ISSN 2187-381X

Honda R&D

Technical Review Vol.38

2026



表紙の言葉

Vol.38の表紙は、“Layered Canyon”というテーマを掲げました。
自然の渓谷は、幾重にも重なる地層が調和し、美しい景観を生み出します。
このイメージにインスパイアを受け、一人ひとりのチャレンジや技術を重なり合うレイヤーとして表現、それらが一体となって大きな流れを生み出し、ドライビングフォースとなって社会をリードしていく姿を描きました。
鮮やかなオレンジは、技術者一人ひとりの思いや情熱を象徴しています。
その情熱が大きなうねりとなり、Hondaの未来への挑戦をさらに加速させる――そんな願いを込めて、この表紙を制作しました。



デザインセンター
河内 雄介

Technical Review
Vol.38

2026

Honda R&D

目　次

寄稿

◇ 小標本データの統計分析へのベイズ定理の適用 . . . . . 酒井信介 1

◇ 戦略的カラーラインナップの実現 . . . . . 吉村雅晴 11

紹介／解説

◇ 電動モトクロッサーCR ELECTRIC の開発 . . . . . 加藤誠司・秋吉洋行・北岡　惇
木下雅之・古山拓也 23

◇ 小型船用電動船外機の実証実験. . . . . 竹重隆正・加藤健太・日向野正麻 31

◇ モーターサイクル用 Honda E-Clutch システムの開発 . . . . . 小野惇也・竜﨑達也・内藤正純 37

◇ リチウムイオン電池の耐久性能下限予測技術への拡散過程モデルの活用 . . . . . 大道　馨・鈴木琴音
長塚豪己・安田道洋 47

◇ 月面での夜間電力供給を目的とした循環型再生エネルギーシステム. . . . . 稲西諒亮・大門鋭刀・福間一教
河野　匠・本多　徹 55

◇ 義足に活用した, 新機構トランスミッション技術. . . . . 小野拓洋・島田　圭・日木　豊
小ノ澤聖二・後藤文人 63

論文

◇ 高速 PIV を用いた時間フィルタ法による乱流成分の分離手法構築とハイブリッド用エンジン開発への適用
大倉康裕・瀬川　誠・鬼丸裕美
佐藤誓祐・浦田泰弘 71

◇ 燃焼 CFD による副室ジェット燃焼を用いた大型二輪車用ガソリンエンジンの出力と熱効率改善の検討
安藤博和・田仲　巧
富沢健吾・井上陽介 84

◇ V6 エンジンにおける始動時エミッション低減用 HCトラップ材料および HCトラップ触媒の検証
竹折浩樹・根本康司・奥　裕希
生友良平・中尾圭太・碓氷豊浩 95

◇ 自動車の外板面ひずみを抑制する設計・製造・材料統合シミュレーション技術の開発
古沢透流・豊岡洋一・横井栄一郎
高見　滋・内山政夫・田中義規 107

◇ 曲率差分を用いた自動車の外板面ひずみの評価手法の構築と車体設計への適用
豊岡洋一・古沢透流・横井栄一郎
高見　滋・内山政夫・田中義規 114

◇ Pix2Pix GAN を用いたサイドミラー周り流れ場短時間予測ツール. . . . . 橋本拓郎・岡部浩司
山戸田武史・城戸誉芳 120

◇ 福祉車両の貢献度合いを測定する尺度. . . . . 遠藤有紗・小山俊博
角南圭一・五味哲也 128

◇ 再学習を必要としないカスタマイズ可能な End-to-end 音声認識の研究
周藤　唯・Shakeel MUHAMMAD・住田直亮 135

◇ LDHs 構造を有するメタネーション触媒による耐水性向上の研究 . . . . . 米田英昭・柳澤和貴
飯嶋洋平・吉田潤平 143

CONTENTS

Contribution

◇ Application of Bayes' Theorem to Statistical Analysis of Small Sample Data. . . . . .Shinsuke SAKAI 1

◇ Realization of Strategic Color Lineup . . . . . Masaharu YOSHIMURA 11

Introduction / Case Study

◇ Development of Electric Motocrosser CR ELECTRIC
. . . . . .Seiji KATO・Hiroyuki AKIYOSHI・Makoto KITAOKA
Masayuki KINOSHITA・Takuya FURUYAMA 23

◇ Demonstration Experiment of Electric Outboard Motor for Small Boat
. . . . . Takamasa TAKESHIGE・Kenta KATO・Shohma HIGANO 31

◇ Development of Honda E-Clutch System for Motorcycles
. . . . . Junya ONO・Tatsuya RYUZAKI・Masazumi NAITO 37

◇ Technology for Lower Limit Prediction of Lithium-ion Batteries Performance after Degradation
Employing Diffusion Process Model. . . . . Kaoru OMICHI・Kotone SUZUKI
Hideki NAGATSUKA・Michihiro YASUDA 47

◇ Lunar Night Power Supply: Circulative Renewable Energy System Capable of Continuous Power Generation
. . . . . Ryosuke INANISHI・Hayato DAIMON・Kazunori FUKUMA
Takumi KAWANO・Toru HONDA 55

◇ New Transmission Mechanism Technology Utilized in Prosthetic Legs
. . . . . Hiromi ONO・Kei SHIMADA・Yutaka HIKI
Seiji ONOZAWA・Fumihito GOTO 63

Technical Paper

◇ Construction of Turbulent Component Decomposition Method Using Time Filtering with High-speed PIV
and Application to Hybrid Engine Development
. . . . . .Yasuhiro OKURA・Makoto SEGAWA・Hiromi ONIMARU
Seisuke SATO・Yasuhiro URATA 71

◇ Numerical Study on Enhancing Power and Thermal Efficiency of Large Motorcycle Gasoline Engine
Using Pre-chamber Jet Combustion Simulated by Combustion CFD
. . . . . .Hirokazu ANDO・Takumi TANAKA
Kengo TOMIZAWA・Yosuke INOUE 84

◇ Verification of HC Trap Materials and Catalysts to Reduce Exhaust Emissions
during Cold-start in V6 Engine . . . . . Hiroki TAKEORI・Koji NEMOTO・Yuki OKU
Ryohei IKUTOMO・Keita NAKAO・Toyohiro USUI 95

◇ Integrated Simulation Technology for Design, Manufacturing, and Materials
to Reduce Surface Distortion of Automotive Outer Panels
. . . . . .Toru FURUSAWA・Yoichi TOYOOKA・Eiichiro YOKOI
Shigeru TAKAMI・Masao UCHIYAMA・Yoshinori TANAKA 107

◇ Development of Evaluation Method for Automotive Outer Panel Surface Distortion
Using Curvature Difference and Application to Body Design
. . . . . .Yoichi TOYOOKA・Toru FURUSAWA・Eiichiro YOKOI
Shigeru TAKAMI・Masao UCHIYAMA・Yoshinori TANAKA 114

◇ Short-time Prediction Tool for Flow Fields around Side Mirrors Using Pix2Pix GAN
. . . . . Takuro HASHIMOTO・Koji OKABE
Takeshi YAMATODA・Takafusa KIDO 120

◇ Quantitative Measurement Scale for Effectiveness of Adapted Vehicle
. . . . . .Arisa ENDO・Toshihiro KOYAMA
Keiichi SUNAMI・Tetsuya GOMI 128

◇ Retraining-free Customizable End-to-end Automatic Speech Recognition
. . . . . Yui SUDO・Shakeel MUHAMMAD・Naoaki SUMIDA 135

◇ Enhancement of Water Resistance by Methanation Catalysts with LDHs Structure
. . . . . Hideaki YONEDA・Kazuki YANAGISAWA
Yohei IIJIMA・Junpei YOSHIDA 143

小標本データの統計分析へのベイズ定理の適用

Application of Bayes' Theorem to Statistical Analysis of Small Sample Data

酒　井　信　介*
Shinsuke SAKAI

1．緒言

近年、機械製品に求められる高機能化に伴い、確率論的取扱いを求められる機会が増えている。このことは、機械製品の高機能化に伴い、万が一の事故時には結果も重大となる傾向があることと無関係ではない。高圧力のもとに貯蔵される車載型の複合材料水素タンクなどはその典型的な例であろう。例えば、G.W.Mair は規格策定の検討において、安全裕度の検討に、確率論的取り扱いを導入することを提案している[(1)]。筆者は、燃料電池車の複合材料水素タンクの安全規格の取り扱いで、GTR 規格などで度たび議論のある確率論的扱いの考え方を紹介している[(2)]。この記事では、自動車分野外の立場から筆者がこれまで体験してきた信頼性設計の観点から、概要をとりまとめている。その中では、歴史的背景、手法の内容、メリットデメリット、他分野での活用事例、燃料電池車での活用の可能性、などについて言及した。これに引き続き、重要となるアクションは、わが国の現状に対して、具体的に確率論的扱いを適用した上で、破裂強度に対する安全裕度の根拠に基づく議論を開始することであろう。そのために、不可欠となるのが統計データの整理である。統計量の基本は、水素タンクの破裂圧力の平均値、分散などの基礎統計量である。しかし、水素タンクの破裂強度の基礎統計量を実験的に取得することは、コスト、労力の観点から容易なことではない。しかも、結果の重大性に鑑みてより高度の安全性が求められるということは、その発生確率が極めて小さいことを意味し、その意味でもサンプルサイズを大きくとることに困難が伴う。もし、膨大なデータ量を取得できるのであれば、いわゆる標本統計学に基づいて、母集団の基礎統計量を精度よく評価することもさほど困難なことではないかもしれない。しかし、複合材料水素タンクの場合は、サンプルサイズを大きくとることは期待できないとしたら、標本統計学の適用は一般に困難である。このような場合に、小標本の統計量の評価に効果的な、ベイズ統計学という考え方がある。例えば、プラントの圧力設備の検査をリスクに基づいて実施するリスクベース検査において、保全データの統計処理においてベイズの定理が活用されている[(3)(4)]。これは、保全データのサンプルサイズを大きくとれないことと関係している。本稿においては、ベイズの定理の基本的考え方から、例題、応用法、適用にあたっての注意点をまとめる。

2．ベイズ統計学の特徴

ベイズの定理について具体的に説明する前に、まずその特徴について述べる。機械製品の破損にかかわる基礎統計量の評価が求められる時に、以下のような状況にあるときには、まずはベイズの定理の適用を考えることが望ましいと考えられる。

1. 対象とする事象が極めて発生頻度の低い事象である
2. 実験によって事象を発生させるためにコスト、労力を要する
3. 対象とする事象が遷移する可能性がある

このような状況にあるとき、サンプルサイズを急激に増やすことは困難が予想され、大きなサンプルサイズを前提とする標本統計学の適用は困難であろう。上記状況の中の３番目の項目について補足する。例えば、プラントの保全を考えるとき、配管や圧力容器の損傷状況は内圧などの運転条件にも依存する。ある時期に、運転条件を変更したとすると、それ以降、損傷確率にかかわる基礎統計量も変化する可能性がある。また、水素タンクなどの開発段階では、設計仕様を変更することが行われるであろう。この場合も、損傷確率にかかわる基礎統計量が変化することが予想されるが、設計仕様の変更のたびごとにサンプルを開始するようでは、いっこうにサンプルサイズが増えることはないであろう。このような困難な状況であっても、ベイズ統計学には次のような特徴があり、ある程度対応できるのである。

1. 破損したという情報のみならず、破損しなかったという情報も統計処理に活用する
2. 統計分布の特定に当たり、母数の確からしさを、少ないサンプルサイズから更新するという手法をとる
3. 母数の確からしさには、出発点では経験値、文献、主観などにより定める

標本統計学では、平均値などの母数を、サンプルデータから統計処理により、一つの値として評価するが、ベイズ統

*横浜国立大学　客員教授，博士（工学）

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_1

計学では、母数を一つの値として評価するのではなく、確からしさというあいまいなものとして取り扱うのである。極端な場合には、出発点として確からしさを主観によって決定することもある。これが主観的確率と呼ばれる所以である。統計処理に主観が入ることはけしからんと考えるかもしれないが、ベイズ統計学では、サンプルデータを取得するたびごとに、更新が行われ、この確からしさが確実に正解に近づいていくということが言える。従って、やがては真値に収束することが期待できる。また、上記の「対象とする事象の遷移」があったとしても、ベイズ統計学では更新により処理するため、その事象の遷移に対しても追随していくことが期待される。しかし、適切な方針のもとに、適用しないとその収束の効率を上げることはできないので、原理をよく理解した上での適用が望まれる。

3．ベイズ統計学の基礎原理

3.1. 考え方

対象として圧力タンクを想定し、その破裂圧力の分布が正規分布であるものとする。正規分布の確率密度関数は次式で表現される。

$$f(x|\mu,\sigma)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

ここで x は破裂圧力の確率変数であり、母数としては平均値 μ と分散 σ^2 の二つが存在する。$f(x|\mu,\sigma)$ は、母数が μ, σ のもとでの確率密度関数であることを示す。平均値 μ と分散 σ^2 である正規分布のことを $N(\mu,\sigma^2)$ と表現することもある。破裂圧力の基礎統計量を明らかにすることは μ と σ^2 を求めることである。サンプルサイズ n を十分に大きくとることができる場合には、標本平均 $\hat{\mu}$ と不偏標本分散 $\hat{\sigma^2}$ は次式から評価できる。

$$\hat{\mu}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \quad (2)$$

$$\hat{\sigma^2}=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\hat{\mu})^2 \quad (3)$$

サンプルサイズを大きくとることができるのであれば、これらの母数を精度良く評価できる。それが期待できないときに、ベイズ統計学の適用を考える。ここでは、簡単化のため分散 σ^2 は既知であるものとし、平均値 μ のみが未知で、これを推定する場合について説明する。両者の母数が未知の場合にも適用可能であるが、その場合の取り扱いは後述することとする。

式（2）による評価により、一つの標本平均値が確定することとなり、手続き上主観が入る余地はない。その意味で客観的手続きと呼ぶことができる。これとは対照的にベイズ統計学では、推定量 μ について、不確定性を与える。つまり、確定的に一つの値を割り当てることをしない。新たな実験データが得られたとすると、圧力容器が特定の条件で破裂したか、しなかったかという結果は客観的事実である。ベイズ統計学では、数少ない客観的事実に基づいて、推定量の不確定性を更新していくことを行う。このことをベイズ更新と呼ぶ。ベイズ更新によって、いきなり母数の正解が得られるわけではないが、正解に近づくということは言える。更新する前の不確定性のことを事前分布、更新した後の不確定性のことを事後分布と呼ぶ。図１に概念的に考え方を示す。縦軸は、確率密度（Probability density）である。

例えば図１の左側が不確定性の事前分布であり、μ_0 が母数の正解であるとするとき、一回の破裂試験の結果に基づいて、ベイズ更新の結果に基づき、不確定性の事後分布が μ_0 の近傍に集まってくる様子を示している。破裂試験のサンプル数が多いほど、よりよい収束の結果が期待され、また繰り返し回数を増やすことにより正解に漸近していくことになる。一番最初に設定する事前分布を初期事前分布と呼ぶ。もし、初期事前分布の設定が的外れなものであれば、収束の性能は期待できないので、慎重に設定することが重要である。初期事前分布は、過去に類似の製品の結果があるときには、それに基づいて設定する、経験者の意見に基づいて設定する、文献情報に基づいて設定する、などの方法がとられる。いずれにせよ、初期事前分布は確定的に与えるものではなく、ある意味主観に基づいて決定されるものなので、主観的確率と呼ばれることもある。あらかじめ、何の情報もない状態からスタートするのであれば、広領域に渡って不確定性を設定することになる。このような分布のことを無情報性事前分布と呼ぶ。図１では、事前分布を連続分布として設定したが、図２のように離散的な値として設定することも可能である。つまり、平均値の不確定性を連続分布として表現するのではなく、μ_a か μ_b のいずれ

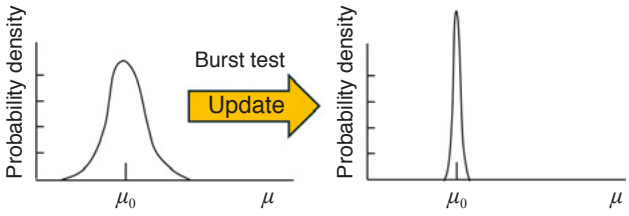


Fig. 1 Principle of Bayesian update for continuous distribution

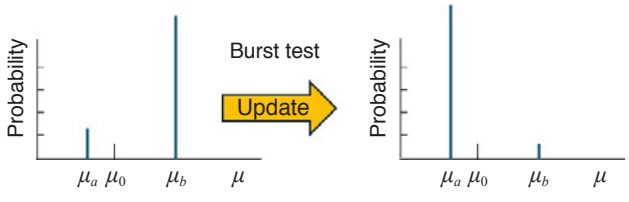


Fig. 2 Principle of Bayesian update for discrete values

か、という形で離散値として推測する方式である。

この図、左側である事前分布では、推測する μ_a と μ_b の値について、各々不確定性に関する確信度の値を離散的に設定している。この例では、μ_a は真値である μ_0 に近い値であるにもかかわらず、μ_b よりも低い確信度を設定してしまっている。サンプル値が得られた後には、ベイズ更新の結果、μ_a の確信度が高くなっており、真値がより μ_a に近いものと判断できる。

3.2. 基礎原理

3.2.1. 離散値の推定

今、ベイズの定理で推定したい、母数などのパラメータが θ であるとする。母数が θ である場合の、破裂などの観察事象 x が生起する確率密度関数を $f(x|\theta)$ と表現する。通常の標本統計学では、サンプルデータから統計処理により標本値 $\hat{\theta}$ を評価するので、主観の入り余地はない。一方、ベイズ統計学では、θ について、主観に基づいて値を設定し、あわせてその値の不確定性に対する確信度も割り当てる。今、ここでは簡単のために θ_1 と θ_2 の二つの離散的な値を設定し、初期の時点での各値に対する確信度を各々 P_1、P_2 とする。ベイズの定理では、観察される事象は、必ず θ_1 か θ_2 の値に基づいて生起するものと仮定する。つまり、$P_1 + P_2 = 1$ を満足しなければならない。例えば、母数が θ_1 であるとする確信の度合いが高ければ、$P_1 = 0.8, P_2 = 0.2$ などと設定する。今、破裂などの観察事象を A と書くこととする。このとき、論理関係は図３のようなベン図で表現できる。ここで、C_1 は、観察された現象が θ_1 に起因して発生した事象であることを示し、C_2 は、観察された現象が θ_2 に起因して発生した事象であることを示す。今後、ある事象が発生する確率を P(事象)と表現することにする。原因となる事象が C_1 でなおかつ、A という事象が観察される確率は、ベン図の基本的性質から次式で表現できる。

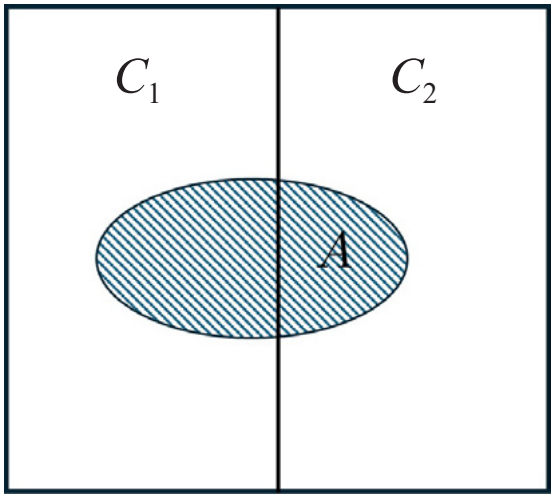


Fig. 3　Venn diagram

$$P(C_1 \wedge A) = P(C_1)P(A|C_1) = P(A)P(C_1|A) \quad (4)$$

ここで∧は、AND の論理関係を示し、$P(A|C_1)$ は、原因 C_1 の条件の下での A が観察される条件付き確率を示す。式(4)を変形することにより

$$P(C_1|A) = \frac{P(C_1)P(A|C_1)}{P(A)} \quad (5)$$

が得られる。一方、$P(A)$ は

$$P(A) = P(C_1)P(A|C_1) + P(C_2)P(A|C_2) \quad (6)$$

と書けるので、式(5)に代入することにより、

$$P(C_1|A) = \frac{P(C_1)P(A|C_1)}{P(C_1)P(A|C_1) + P(C_2)P(A|C_2)} \quad (7)$$

と表現できる。式(7)の右辺内の成分は上記の問題では以下により与えられる。

$$P(C_1), P(C_2) \Leftrightarrow P_1, P_2$$
$$P(A|C_1), P(A|C_2) \Leftrightarrow f(x|\theta_1), f(x|\theta_2) \quad (8)$$

従って、右辺の量は全て与えられた量である。一方、左辺 $P(C_1|A)$ は、A という観察事象があったという制約条件のもとで、C_1 が生起する確率を示すから、観察事象を反映した後の C_1 に対する確信の度合いを示すことになる。従って $P(C_1|A)$ がベイズ更新後の事後確率ということになる。$P(C_2|A)$ についても同様にして

$$P(C_2|A) = \frac{P(C_2)P(A|C_2)}{P(C_1)P(A|C_1) + P(C_2)P(A|C_2)} \quad (9)$$

と求まる。$P(C_1|A)$ や $P(C_2|A)$ は、A という観察事象をもとに、C_1 と C_2 に対する確信の度合いが $P(C_1)$ と $P(C_2)$ から更新されたことを示す。このように、観察事象に基づいて、確信の度合いを更新していくのがベイズ統計学である。引き続き、観察事象が得られたときには、この $P(C_1|A)$ と $P(C_2|A)$ を次回の事前確率として利用することにより、同じ手続きで更新を継続できる。この結果、確信の度合いがより高くなる事象をてがかりに、θ の推定を行う。

簡単な例題を考える。今、測定対象の物理量が正規分布するとし、平均値 $\mu_0 = 0$、標準偏差 $\sigma_0 = 1$ であるとする。この分布を有する物理量を実験による計測値により、推測することを考える。その際、上記のベイズ定理を用いて、一回の測定値ごとに更新していく。ここでは、簡単化するため、標準偏差 $\sigma_0 = 1$ は既知であって、平均値を推定するものとする。まず、表１の二つの離散的事象を推定対象とする。あわせて事前確率(確信度)も示している。この二つの離散値および初期の事前確率は、経験者の知見に基づいて設定することを想定している。事前確率の総和は 1.0 であ

Table 1 Two discrete events

Symbol	Events	Prior probability
C_1	$\mu = -0.1$	0.3
C_2	$\mu = 1.5$	0.7

る必要がある。この場合、母集団の平均値は正しくは 0.0 であるにもかかわらず、この正解に近い -0.1 に対して、0.3 と低い確信度を与え、よりはずれている 1.5 に対して 0.7 の確信度を設定している。それでは、試行実験により、この確信度がどのように更新されているかをシミュレートしてみる。まず、$N(0.0, 1.0^2)$ の正規乱数を 10 個発生し、10 回の実験データによってベイズ更新が行われていく様子を観察する。i 番目の乱数を $rnd(i)$ と表記する。最初の実験値 $rnd(0)$ が得られたときのベイズ更新は式（7）により行われる。この式の右辺は、下記のように全て与えられている量である。

$$\begin{aligned} P(C_1) &= 0.3 \\ P(A|C_1) &= f(rnd(0)|-0.1, \sigma_0) \\ P(C_2) &= 0.7 \\ P(A|C_2) &= f(rnd(0)|0.3, \sigma_0) \end{aligned} \tag{10}$$

ここで、1 回目の観察事象 A は、実験値 $rnd(0)$ が得られたことに対応する。確率密度関数 $f(\ )$ は式（1）で与えられている。この結果、確信度の更新値 $P(C_1|A)$ が得られる。同様にして C_2 の確信度の更新値 $P(C_2|A)$ は、式（9）により得られる。さらに、次の実験値 $rnd(1)$ に対しては、$P(C_1|A) \rightarrow P(C_1)$、$P(C_2|A) \rightarrow P(C_2)$ として、次の更新を行えばよい。以下は同様の手順を繰り返していけばよい。図 4 は、10 個の実験値に対するベイズ更新による事後確率の変化を示す。真値に近い C_1 の確信度がより高く、真値からはずれる C_2 の確信度がより低く変化していく様子を確認できる。この結果、真値はより C_1 の事象であるとする確信が高くなっていく。このように、初期の段階で十分な量のサンプルデータが存在しない場合に、主観に基づいて予測値、確信度を柔軟に設定した上で、その後、数少ない実験データに基づいて、データが得られるたびに、母数の確信度を更新していく方式がベイズ統計学の特徴である。

上記の例では、初期事前分布として、正解に近い -0.1 に対して、0.3 と低い確信度を与えていたが、もしこの確信度をより適切に 0.7 と高く設定した場合の結果が図 5 である。図 4 と比較すると、早く正解の確信度が 1.0 に収束していることが確認できる。このように、初期の事前分布をより適切に設定できれば、早く正解に収束していくが、的外れな設定であれば、収束の程度は劣化する。この場合、かえって効率が低下することにもなるので、初期の事前分布を経験者、過去の事例調査などによっていかに適切に設定するかが鍵となる。

3.2.2. 平均値未知、分散既知の場合の連続分布の推定

上記の例では、推定する破裂確率密度関数の母数を推定するのではなく、破裂確率を離散的な二つの値のいずれかであるものと仮定し、その離散値に対する確信の度合いをベイズ定理で更新する方式を用いた。これを、より一般的な推定方法に拡張するためには、式（1）の破裂確率密度関数の母数そのものを推定することが考えられる。母数には平均値 μ と標準偏差 σ の二つが存在する。これらの母数の推定にベイズ定理を適用することを考える。二つの母数の両者に対して適用可能であるが、ここでは説明を簡単にするために、平均値 μ のみを対象とする。母数推定の汎用性を増すためには、離散値の μ を推定する形式ではなく、連続分布として確信度を表現した上で、連続分布を更新していく形式が望ましい。つまり、特定の平均値 μ のときの、破裂確率密度関数は、

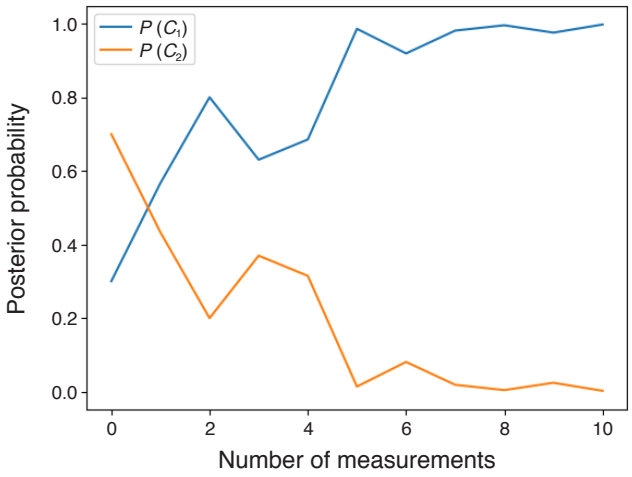


Fig. 4 Variation of posterior probability ($P(C_1)$ = 0.3, $P(C_2)$ = 0.7)

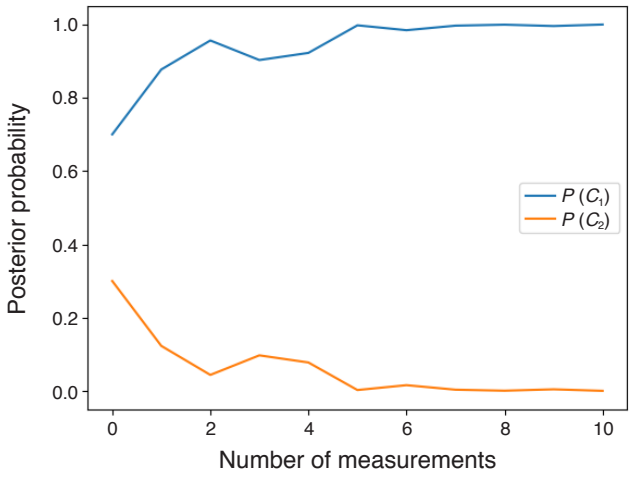


Fig. 5 Variation of posterior probability ($P(C_1)$ = 0.7, $P(C_2)$ = 0.3)

$$f(x|\mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (11)$$

であるが、この関数を尤度関数と呼ぶ。μ の不確定性表現する連続分布として確率密度関数 $g(\mu)$ を設定する。連続分布を設定する考え方は後述するが、まずは事前分布として、離散的方法の場合と同様にして、経験に基づいて設定したものとする。このとき、今観察値 $X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$ が得られた時の事後確率分布はベイズ更新の考え方から以下の様に表現できる。

$$g'(\mu|X)d\mu = \frac{g(\mu)\prod_{i=1}^{n} f(x_i|\mu)d\mu}{\int_{-\infty}^{\infty} g(\mu)\prod_{i=1}^{n} f(x_i|\mu)d\mu} \quad (12)$$

これにてベイズ定理に基づいて事後の確率密度関数 $g'(\mu|X)$ が誘導される。観察値が得られるたびごとに、ベイズ更新の考え方を適用していけば、確信の度合いを表現する連続分布関数は、徐々に真の値に収束していくことが期待できる。しかし、ここに一つやっかいな問題が存在する。事前分布として $g(\mu)$ として全く任意の関数を設定してしまうと、事後分布である $g'(\mu|X)$ は、事前分布とは何の関連性も持たないものが生まれるであろう。この場合、式 (12) の評価は結構やっかいなものとなる。近年は計算機能の向上に伴い、式 (12) で与えられるような複雑な表式であっても、計算機の能力を用いて力づくで、確率密度関数を数値的に導くことも比較的簡単になっている。MCMC 法 (Markov Chain Monte Carlo Simulation) [5] はその代表的な方法である。また、この計算を支援するソフトウェアとして Stan や PyMC3 などの入手も容易になっている。このようなソフトの活用によって、任意の分布に対して適用する考え方もあるが、幸い、この事前確率にある条件を付けることによって、この取り扱いが極めて容易になる。それが、共役事前分布という考え方である。汎用性と取り扱いの容易さの観点からは、共役事前分布の考え方を適用することがよいと考えられるので、ここではこの考え方について説明する。

今課題となっていることは、事前分布 $g(\mu)$ と事後分布 $g'(\mu|X)$ の分布形が全く異なったものになってしまうことであった。ところが、対処とする $f(x|\mu)$ の分布形に対応して、$g(\mu)$ として特定の分布形を採用すると、ベイズ定理を適用して得られる $g'(\mu|X)$ もまた、同一の種類の分布形になることが分かっている。ただし、母数は変更することになる。このような関係が成立することを共役性が成立するといい、このようにして設定した事前分布のことを共役事前分布と呼ぶ。$f(x|\mu)$ が正規分布のとき、μ に関する事前共役分布は正規分布であることが分かっている。つまり、$g'(\mu'|X)$ もまた正規分布になるのである。

今、対象とする確率変数が正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に従うものとし、分散は σ^2 は既知とする。母数の平均値 μ について、確信度に連続分布を設定して、ベイズ更新する。この場合、平均値に対する共役事前分布が正規分布であることを利用する。つまり、平均値の確信度の事前分布として、正規分布を設定すると、事後分布もまた正規分布となる。事前分布として $N(\lambda_1, \tau_1^2)$ を設定したとき、$x = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$ のサンプルが得られた時の事後分布が以下のようになることが誘導されている [6]。

$$N(\lambda_2, \tau_2^2) \quad (13)$$

ここに、

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$$

$$\lambda_2 = \frac{n\tau_1^2\hat{x} + \sigma^2\lambda_1}{n\tau_1^2 + \sigma^2} \quad (14)$$

$$\tau_2^2 = \frac{\sigma^2\tau_1^2}{n\tau_1^2 + \sigma^2} \quad (15)$$

つまり、正規分布となる事後分布の二つの母数は式 (14) と式 (15) とから容易に評価できる。この事後分布を、次回以降の事前分布として活用していけばよい。

例題として、$f(x|\mu, \sigma)$ の正解が $N(0, 1^2)$ の正規分布について、$N(\lambda, \tau^2)$ の初期事前分布を $N(0.5, 1^2)$ からスタートし、ベイズ更新していくことを考える。測定のタイミングで、$N(0, 1^2)$ の乱数 10 個の観測値が得られるものとして、事前分布がベイズ更新によってどのように変化していくかを見ていく。この変遷は式 (14) と式 (15) を使えば容易に追跡できる。図 6 が 2 回分のベイズ更新に事前分布の変遷を示す。ベイズ更新の度ごとに、平均値の予測事前分布は正解の近傍に収束していくことが確認できる。

3.2.3. 平均値も分散も未知の場合の連続分布の推定

次に、平均値 μ も標準偏差 σ もいずれも未知であって、

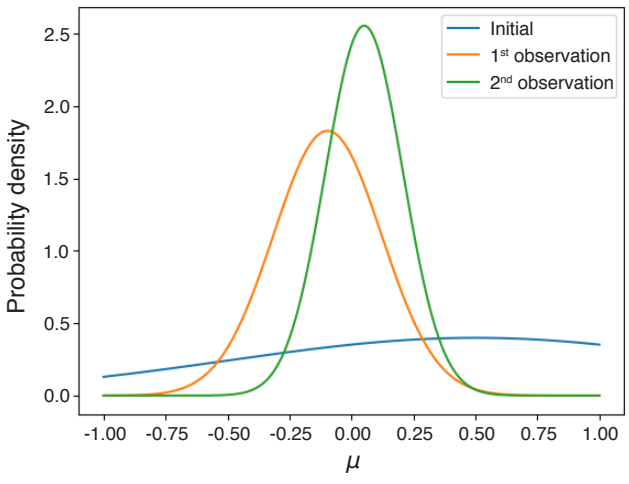


Fig. 6 Variation of prior distribution by Bayesian update

ベイズ更新によって推定していくことを考える。この場合、観察値 $X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$ が得られた時の事後確率分布はベイズ更新により次式で評価される。

$$g'(\mu, \sigma|X)d\mu d\sigma = \frac{g(\mu, \sigma)\prod_{i=1}^{n} f(x_i|\mu, \sigma)d\mu d\sigma}{\int_0^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} g(\mu, \sigma)\prod_{i=1}^{n} f(x_i|\mu, \sigma)d\mu d\sigma} \quad (16)$$

ここに、$g(\mu, \sigma)$ は、共役事前分布となる二次元同時確率密度関数であり、式 (18) (19) のように表現されることが分かっている [7] [8]。

$$g(\mu, \sigma) = \pi(\mu|\sigma^2)\pi(\sigma^2) \quad (17)$$

$$\pi(\mu|\sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2/k_0}} exp\left[-\frac{(\mu - \hat{\mu_0})^2}{2\sigma^2/k_0}\right] \quad (18)$$

$$\pi(\sigma^2) = \frac{(\hat{\sigma_0}^2 v_0/2)^{v_0/2}}{\Gamma(v_0/2)} \frac{exp\left(\frac{-v_0\hat{\sigma_0}^2}{2\sigma^2}\right)}{(\sigma^2)^{1+v_0/2}} \quad (19)$$

なお、$\hat{\mu_0}$, k_0, v_0, $\hat{\sigma_0}$ は事前分布のパラメータであり、式 (19) は、確率密度関数が以下の母数２個で表現される逆ガンマ分布である。

$$f_{Igamma}(x|\alpha, \beta) = \frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)}(1/x)^{\alpha+1} exp(-\beta/x) \quad (20)$$

$$\alpha = v_0/2 \quad (21)$$

$$\beta = \hat{\sigma_0}^2 v_0/2 \quad (22)$$

共役事前分布のパラメータの更新は以下の計算で行われることが導かれている。

$$k' = k + n \quad (23)$$

$$m' = [km + n\hat{\mu}]/k' \quad (24)$$

$$v' = v + n \quad (25)$$

$$v(s')^2 = vs^2 + (n-1)S^2 + kn(\hat{\mu} - m)^2/k' \quad (26)$$

ここで、$\hat{\mu}$ は、サンプル平均値であり S はサンプルデータの不偏標準偏差である。

例題として、母集団の正解が $N(7, 2^2)$ であるケースについて、モンテカルロシミュレーションにより、10 個ずつのサンプルが２回得られた場合について、確信度の連続分布がベイズ定理によってどのように更新されていくかを見ることとする。まず初期の確信度の事前分布としては、正解の母数とはかけ離れた状態からスタートすることとし、$\hat{\mu_0} = 4.0$, $k_0 = 1.0$, $v_0 = 2.0$, $\hat{\sigma_0}^2 = 4.0$ からスタートすることとする。図７に、確信度の初期事前分布の同時確率密度関数を示す。この分布のピークを示す座標値は、正解である $(7, 2^2)$ とはかけ離れていることが確認できる。

10 個の乱数を発生させ、式 (16) によりベイズ更新して得られた同時確率密度関数の結果が図８である。ピークとなる位置の座標値は、$(7, 2^2)$ に近くなっていることが読み取れるものの、密度値はピーク値周辺に大きく分布していることが分かる。さらに、次の乱数 10 個を発生させた上で、ベイズ更新により得られた同時確率密度関数が図９である。ピークの座標値は正解である $(7, 2^2)$ に漸近するとともに、その周辺に密度値が集中していることが確認できる。以後、同様にサンプルが得られるたびごとに、ベイズ更新していけば、正解となる母数の周辺に同時確率密度関数値が集中していくものと考えられる。

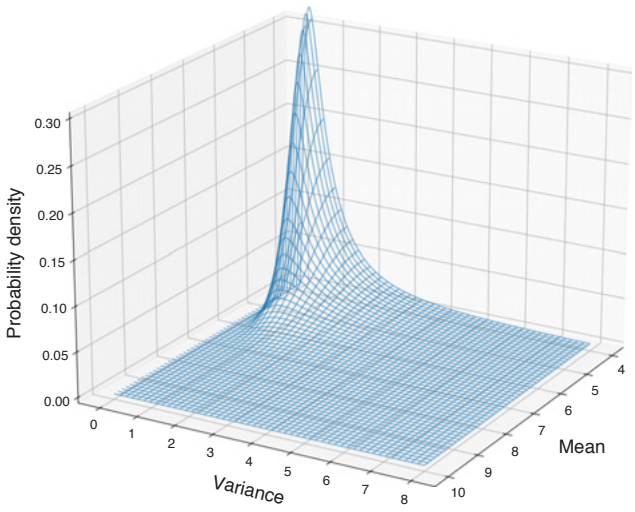


Fig. 7　Initial prior distribution

４．設計変更を伴う製品の統計データ取得への応用

統計データ取得が求められる対象製品が開発段階にあって、しかもその統計的性質が求められる場合がある。対象製品の製造コストが高い場合には、ただでさえ標本数を増やすことが困難であるところ、開発段階にあって製品の強度特性も変化する可能性がある場合には、対象製品の統計的性質の取得には多くの困難が伴うことが予想される。このような場合にこそ、ベイズの定理の適用は有効であると考えられる。つまり、ベイズの定理では、初期の事前分布を図７のように仮定することにより、一度の試験でサンプルサイズの大小にかかわらず、ベイズ更新によって図８のような事後分布が得られる。仮に、この後に対象製品の設計変更があったとする。一般に、開発段階での設計変更は、大幅な変更にならないケースが多いものと考えられる。その場合には、統計的性質の母数の値も極端に変化することは考えにくい。そうであれば、図８の分布を、次の製品の統計的性質推測のための、事前分布として利用可能であり、ベイズ更新によって、その統計的性質の変化に適切に追随していくことが期待できる。ただし、極端に統計的性

質が変化してしまうことがあれば、図８の分布を事前分布として利用することが必ずしも有効ではなく、またリセットしてベイズ更新を進めていくことになる。

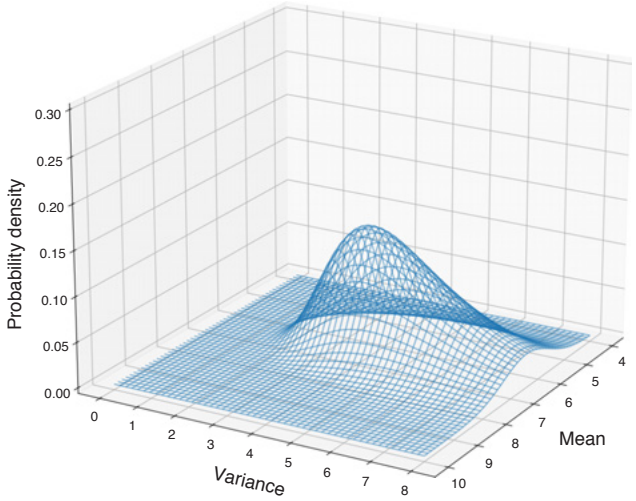


Fig. 8　Second prior distribution

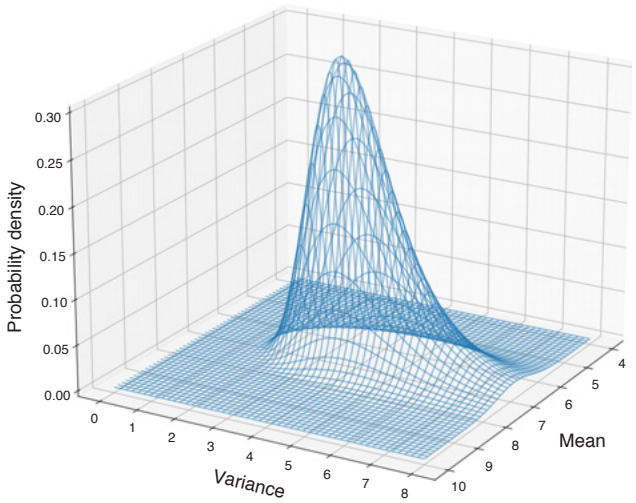


Fig. 9　Third prior distribution

５．圧力機器メンテナンスへの応用事例

産業応用の具体的事例として、圧力機器のリスクベース検査の際に必要となる破損確率評価へのベイズ定理の適用について紹介する。配管や圧力容器などの圧力機器のメンテナンスの考え方の一つとしてリスクベース検査がある。旧来のメンテナンス方式が、決まった時期に、決まった部位について、決まった検査方法で計画的に実施する方法が主流であったところ、その不合理性を排除するために、リスクを指標として検査計画を継続的に見直しをする方法がリスクベース検査である。この分野で先行していたのは、米国石油協会が発行したガイドライン API581[(9)]である。これに対応する、我が国の規格が日本高圧力技術協会から発行されている[(10)]。ここでは、API581 で用いられている破損確率評価へのベイズ定理の適用例を文献[(4)]を参考にして紹介する。

図 10 に、リスクベース検査を行うための一般的手順をフローの形で示す。検査プログラムの策定にあたって、指標としてはリスク値を用いるので、図中には破線で示すリスクアセスメントを行うステップがある。この中で、リスク値の解析を行っているが、リスクの定義は影響度 (Consequence) と太線の枠で示す損傷の起きやすさ (Likelihood) の積で与えられる。この中の損傷の起きやすさの部分の評価にベイズの定理が適用されているので、以下に紹介する。

配管や圧力容器のメンテナンスにおいては、内部流体による金属材料の腐食が主要な損傷モードの一つである。同一の運転条件、環境で操業している限りは、腐食は定常状態で進行するので、腐食速度が大きく変化することはないと期待できる。損傷とは、腐食の進行によって板厚を貫通し、内部流体の漏洩が発生することであるので、損傷の起き易さ、つまり損傷確率は残存肉厚が板厚の何割ぐらいであるかによって評価できる。残存肉厚の測定は、適切な非破壊検査法によって行われ、腐食の進行が定常的であるこ

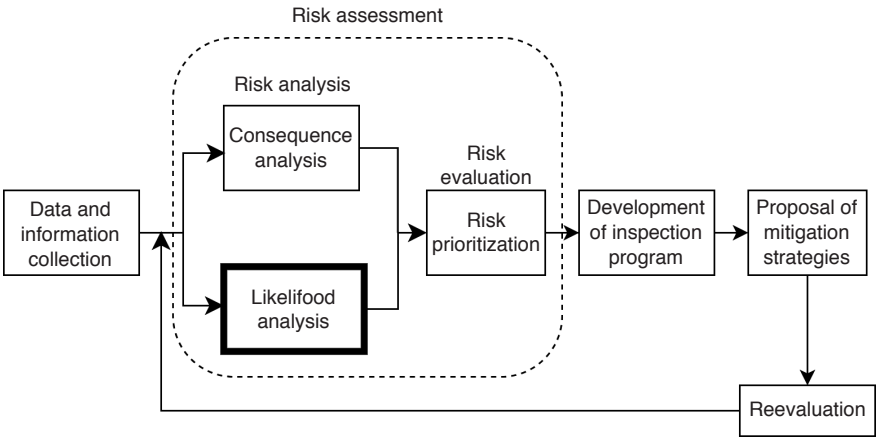


Fig. 10　Procedure of risk based inspection

Table 2 Definitions of damage states

Damage state	Definition
1	Damage does not exceed the predicted value of the damage model
2	Damage is at least equal to the predicted value of the damage rate model and at most twice that value
3	Damage is at least twice and at most four times the predicted value of the damage rate model

Table 4 Relation between inspection effectiveness and confidence

Damage rate state	Poorly effective	Fairly effective	Usually effective	Highly effective
1	0.33	0.5	0.7	0.90
2	0.33	0.3	0.2	0.09
3	0.33	0.2	0.1	0.01

Table 3 Allocation of initial confidence level

Actual damage rate range	Low reliability data	Moderate reliability data	High reliability data
Predicted rate or less	0.5	0.7	0.80
Predicted rate to two times rate	0.3	0.2	0.15
Two to four times predicted rate	0.2	0.1	0.05

とを前提にすれば、将来の減肉も予測することができる。これに基づいて破損確率評価を行い、リスク評価結果を参考に検査計画の見直しが行われる。この場合、腐食速度を適切な非破壊検査法で的確に評価することが重要になる。しかし、精度の低い非破壊検査法で計測する場合、それに伴って、評価される腐食速度の精度も低下する。その意味で、非破壊検査法の有効性の評価が重要となるが、その有効性は対象とする損傷の種類と、非破壊検査法の組み合わせで決まる。この有効性のことを、検査有効度と呼ぶが、評価する腐食速度の精度は、検査有効度の評価も必要である。しかし、この検査有効度は、客観的な量として表現できるものではなく、主観による評価が入ってくることを避けることができない。腐食速度の評価に、ベイズの定理を応用することにより、このような検査有効度というあいまいな量の評価も取り込んだ上で、腐食速度の精度評価に活用されている。以下に、具体的な説明を加える。

手順１

対象とする損傷メカニズムについて、過去の知見から何らかの結論を下す必要がある。代表的なものとして、全面腐食、局部腐食などが存在するが、例えば全面腐食と判断する。初期の段階では一般に腐食速度データを得ることは困難であるが、過去の検査データが存在するのであれば、それをもとに概算で評価する。もし存在しないのであれば、文献データに基づき減肉速度の予測値を与える。ここでは、文献値などから可能な予測値として 0.2 mm/year を設定するものとする。

手順２

手順１で設定した腐食速度の信頼度のレベルを low, moderate, high のいずれに該当するかを決定する。完全なフィールドデータが存在すれば、high に分類できるが、この例題で採用するような既存データが存在せずに推測した場合には low に分類される。API ガイドラインには、詳細な分類の基準が示されている。ベイズの定理の予測対象は、腐食損度そのものではなく、現状で用いている減肉速度の精度を三つの状態に分類し、いずれに該当しているかの確信の度合いをベイズ更新していく。その三つの精度の状況を表２に示す。ベイズ定理適用のための三つの損傷状態に対する初期の確信の度合い、つまり事前確率を表３に示す。

手順３

表２で定義した損傷状態に対する確信の度合いをベイズ更新していく。損傷状態は、検査により評価される結果のあいまいさの程度を示し、大きいほどあいまいさの程度が大きいことを示す。その確信の度合いは、上述の検査有効度に依存する。採用している非破壊検査法や、検査体積率によって、損傷評価の精度は異なる。高精度の非破壊検査法で、100% の体積検査を実施すれば表２の損傷状態１である確信の度合いは高まるであろう。この有効性の尺度が検査有効度である。検査有効度に応じて確信の度合いは変わる。検査有効度ごとに、損傷状態と、正確に測定できる確信の度合いとの関係が表４のように与えられている。この表は、エキスパートなどの意見をもとに作成されたものと思われる。

この値は、のちのベイズ更新において、各損傷状態に対する条件付き確率の意味をもつ。つまり、現状の損傷状態が三つのいずれかの状態にある、という条件付きで、予測値通りの速度が観察される確率を示している。

手順４

検査の実施によって各損傷状態に対する確信の度合いがどのように変化するか、ということをベイズ更新により実施する。つまり、検査時の結果に基づいて、確信の度合いをベイズの定理を用いて更新する。ベイズの定理は以下の

式により適用する。

$$P[A_i|B_k] = \frac{P[B_k|A_i]P[A_i]}{\sum_j P[B_k|A_j]P[A_j]} \quad (27)$$

ここで、各記号の意味は以下の通りである。

$P[A_i]$　事前確率：損傷状態が i である確信の度合い

$P[A_i|B_k]$ 事後確率：検査時の事象が A_k（式では B_k と表示）であったときに、更新された確信の度合い

$P[B_k|A_i]$ 条件付確率：現状の損傷状態が i であるときに、損傷状態 k が観察される条件付き確率。API の中では、これを検査有効度に対応付けている。表４は $i = 1, 2, 3$; $k = 1$ に対する値を示すものであるが、規格の中には $i = 1, 2, 3$; $k = 2$, $i = 1, 2, 3$; $k = 3$ に対する表も別途用意されている。

初回の検査時に、Usually effective の非破壊検査を用いて検査したところ、予測通りの腐食速度が観測されたとすると、ベイズ更新の手続きは次のようになる。

1. 事前確率は文献データに基づいているので、$P[A_i]$ として表３の low reliability data を採用する
2. 検査有効度として Usually effective、予測通りの腐食速度が確認されたことをもとに表４の該当部分の数値を採用する。
3. 検査時の結果が、損傷速度が予測通り、つまり B_1 であったものとして評価する

この結果式 (27) 内の各変数の対応関係は以下のようになる。

$$P[A_1] = 0.5, P[A_2] = 0.3, P[A_3] = 0.2$$
$$P[B_1|A_1] = 0.7, P[B_1|A_2] = 0.2, P[B_1|A_3] = 0.1 \quad (28)$$

これらの数値を式 (27) に代入すると、以下のようになる。

$$P[A_1|B_1] = \frac{0.7 \times 0.5}{0.7 \times 0.5 + 0.2 \times 0.3 + 0.1 \times 0.2} = 0.814$$
$$P[A_2|B_1] = \frac{0.2 \times 0.3}{0.7 \times 0.5 + 0.2 \times 0.3 + 0.1 \times 0.2} = 0.140$$
$$P[A_3|B_1] = \frac{0.1 \times 0.2}{0.7 \times 0.5 + 0.2 \times 0.3 + 0.1 \times 0.2} = 0.046 \quad (29)$$

つまり、表５が得られる。

この結果、損傷状態が１である確信の度合いが高まった。このように、検査有効度という主観的尺度も取り込んだ形で、現状の損傷速度状態の確信の度合いをベイズ定理により更新していくことを実現している。以後、検査のたびごとに、この手続きを実施すれば、現状の損傷速度状態の把握をすることが可能となる。

手順５

損傷状態１の予測速度 0.2 mm/year、状態２の最悪予測速度 0.4 mm/year、状態３の最悪予測速度 0.8 mm/year をもとに、次回検査時の破損確率を損傷状態ごとに評価できる。ここから先は細かい手続きとなるので省略するが、各状態での破損確率と、表５の確信度合いとから、総合的な破損確率を評価する手順となっている。これと、影響度評価との積からリスク評価を行っている。

Table 5　Confidence level after first inspection

Damage rate state	After a usually effective inspection—
1	0.814
2	0.140
3	0.046

６．まとめ

本稿においては、複合材料水素タンクなどに対する破裂強度の統計的性質の取得を目的とするとき、ベイズの定理の活用が有効であることを示した。その最大の理由は、コスト、労力の観点から大量の破裂強度データの取得が困難であり、標本統計学による評価が困難であることによる。ベイズの定理の活用により、小標本のサンプルデータを活用して、ベイズ更新によって母数の確信の度合いを高めていくことが可能である。ただし、初期の確信度である初期事前分布の設定は、任意性が伴うことから、場合によっては主観に基づいて設定するなど、取り扱いにくい側面もある。本稿では、ベイズ統計学の基本から、応用に至るまで例題を交えて説明を加えた。本稿が、小標本統計データ取得のために少しでも貢献できれば幸いである。

参考文献

[1] G. W. Mair, '*Safety Assessment of Composite Cylinders for Gas Storage by Statistical Methods*', Springer International Publishing AG 2017, doi: 10.1007/978-3-319-49710-5

[2] 酒井信介. 信頼性設計の導入に向けて. *Honda R&D Technical Review*, Vol. 37, p. 1-11

[3] 酒井信介. リスクベース検査における機器の破損確率データ収集のためのベイズ定理の応用（第一報ベイズの定理の原理）. 圧力技術, Vol. 42, No. 5, pp. 284–290, 2004. doi: 10.11181/hpi.42.284

[4] 酒井信介. リスクベース検査における機器の破損確率データ収集のためのベイズ定理の応用（第二報ガイドラインの中での利用）. 圧力技術, Vol. 43, No. 1, pp. 22–27, 2005. doi: 10.11181/hpi.43.22

[5] Gilks, W. R., Richardson, S., Spiegelhalter, D.: Markov Chain Monte Carlo in Practice, Chapman and Hall/CRC, 512p., (1995), doi: 10.1201/b14835

[6] ベイズ統計学（分散が既知の場合），2018. https://www.data-arts.jp/bayesian_statistics/normal_distribution/known_variance.html,（参照 2024/12/24）.
[7] 平均と分散がともに未知の正規分布のベイズ更新. https://qiita.com/raidofuwa/items/f665b96b0233674727be,（参照 2024/12/24）.
[8] 報酬が平均･分散が未知の正規分布に従うと仮定した Thompson Sampling, 1998. https://cafeunder.github.io/rosenblock-chainers-blog/2018/03/07/bayes-gaussian-mean-sigma.html,（参照 2024/12/24）.
[9] American Petroleum Institute. *API publication 581, Risk based inspection: Base resource document, 1st edition*, 2000.
[10] 日本高圧力技術協会. HPIS Z107-1TR～4TR リスクベースメンテナンスハンドブック，2010.

■著　者■



酒 井 信 介

戦略的カラーラインナップの実現

Realization of Strategic Color Lineup

吉　村　雅　晴[1]
Masaharu YOSHIMURA

要　旨

二輪車のカラーリングは，モデルのコンセプトや魅力を顧客に伝えるたいせつな要素であり，お客様の購買意欲に大きく影響する．著者はベトナム赴任時に，全モデルのカラーリングを俯瞰的に見直すことで，各モデルの個性を際立たせる「色戦略」を立案した．この「色戦略」に基づき，上位モデルがカラーリングのトレンドを発信し，エントリーモデルがそれを追従するという商品展開をおこなった．これにより，顧客に満足度の高い商品が提供できるようにした．ベトナムでの事例をもとに，日本の 50 cc スクータにも「色戦略」を応用し，モデルごとのカラーリングを見直した．モデルごとに違うお客様それぞれに，満足度の高いカラーの選択肢を提供しつつ，ビジネス的な貢献度の高い商品展開を実現した．市場背景や生産工場の設備の違いなど，地域や市場によって条件は異なるが，「色」を切り口に機種のキャラクタを際立たせて，ラインナップとして最適を目指す「色戦略」は，さまざまなモデルの開発にも応用が可能である．

ABSTRACT

The coloring of motorcycles is an important element that conveys the concept and appeal of the model to customers and greatly influences their purchasing motivation. During the author's assignment in Vietnam, I devised a "coloring strategy" to highlight the individuality of each model by reviewing the coloring of all models from a comprehensive perspective. Based on this strategy, the upper-grade models set the trend in coloring, and the entry models followed. This enabled us to provide customers with high-satisfaction products. Building on the example in Vietnam, we applied the "coloring strategy" to 50 cc scooters in Japan and reviewed the coloring for each model. This provided each different customer for each model with high-satisfaction color options, while also achieving a product lineup with high business contribution. Although conditions vary by region and market, such as differences in market background and production facility capabilities, the "coloring strategy", which aims to optimize the product lineup by highlighting the character of each model from the "color" perspective, can be applied to the development of various models.

1．二輪車におけるカラーリングの重要性

二輪車におけるカラーリングは，各々のモデルのコンセプト，魅力をお客様に伝えるたいせつな要素のひとつである．

販売店に並ぶ二輪車の中に自分の好きな色を見つけ，「色が気に入ったから」と購入されたお客様もいる．二輪車の場合，お客様は自分が乗車している姿をイメージし，そのカラーリングとの調和も考えて選択するという特徴もある．ウエアやバッグなど，自分の好みのカラーを身に着けることが当たり前になっているこの時代，二輪車のカラーリングの重要性はますます高くなっている (Fig. 1)．

二輪車のデザイナがカラーリングを検討する際に真っ先に思うことは，お客様がどんな状況で，どんな風に乗車す



Fig. 1　Motorcycle coloring and user fashion influencing one another

[1] デザインセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_2

るのかということだ．通勤なのかレジャーなのか，それとも日常の足代わりなのか，どんな感じで乗車されるのかを事前の調査，情報よりお客様のライフスタイルに思いをはせる．それにはどんな色が似合うかを検討した上で，厳選したカラーリングを営業部門に提案する．それぞれのモデルのコンセプトに沿った，最適なカラーバリエーションになるように協議しながら，各モデルのカラーラインナップは決まっていく．

二輪車開発部門のデザイナである著者は，2000 年代初頭にベトナムに赴任した．その際，ベトナム国内で販売する全モデルのカラーリングを任される機会を得て，全てのカラーラインナップを俯瞰した．通常カラーラインナップとは，前述したようなモデルごとのカラーバリエーションを指すことが多い．しかしベトナム全モデルのカラーリング責任者となると，必然的に全モデルのカラーラインナップを同時に見ることになる．

当時のベトナムでは３種類のモデルを製造，販売していた．モデルごとに何色かのカラーバリエーションを持っていたが，どれも同じような印象となっており，カラーリングによるモデルのコンセプト表現が充分にされていないと感じた．そこで全体最適を目論み，モデルごとの個性を活かすカラーリングの戦略を立案することとした．この戦略により，モデル個々に検討することで生じていた色やイメージの重複から脱却することができた．また，各々のモデルはより明確な個性を持つカラーラインナップの実現が可能となった．それにより，お客様に色を選ぶ喜びを提供することができた．

以下にそのカラーリング戦略を構築した内容について述べる．

2．色戦略立案のきっかけとなったショーモデル

2.1. 著者のベトナム赴任と危機感

弊社東南アジア諸国連合（ASEAN）地域向けの二輪車の研究開発は，タイに拠点を置く Honda Research & Development Southeast Asia - Thai Office（HRS-T）でおこなわれている．当時，ベトナムモデルのカラーデザインについては，Honda Vietnam 設立当初から担当していたシンガポールの HRS-Singapore Office（HRS-S）がおこなっていた．2000 年代初頭，新興市場として注目されていたベトナムのお客様に寄り添った開発の実現を目的に，新研究所 HRS-Vietnam Office（HRS-V）の開設が望まれていた．2003 年，著者はベトナムでの新研究所立ち上げという使命のもと，設立と同時にハノイに赴任することとなった．

赴任早々，ハノイの街中に出てみた．Honda 車を筆頭に日本メーカー製の二輪車と，日本車を真似たコピー車であふれている印象だった（Fig. 2）．驚いたのは，走っている新旧さまざまな二輪車のカラーの多くが，昔ながらの暗い色であることだった．まれに鮮やかなカラーの二輪車も走ってはいたが，目にする数は限られていた．



Fig. 2　Street corner in suburbs of Hanoi in 2003

２軒訪問した販売店で 10 人程の Honda 車ユーザに話を聞くことができた（Fig. 3）．早速，気になっていた二輪車のカラーリングについて尋ねてみた．年配のユーザからは「Honda のカラーは無難で安心だから」という声が聞かれた．一方，若者ユーザからは「Honda を選んだのは親の世代，もし自分で選ぶなら Honda 以外の日本メーカーのカッコいい二輪車かもしれない」という声が聞かれた．Honda 車は丈夫さで信頼されていることが購入理由であるとは聞いていたが，理由の中にデザインやカラーが入っていないことを目の当たりにした．特に若者ユーザの言葉から，近い将来に起こる購買層の若返りを見据えた，Honda 車のデザインとカラーリングの魅力向上が急務であることを実感した．



Fig. 3　Example of Honda dealerships visited

2.2. 販売店大会とショーモデル

カラーリングの魅力向上を具体的にどう進めるかと考えはじめた矢先，早速その機会が訪れた．ベトナムの Honda 二輪車製造販売会社である Honda Vietnam 社長に会うこととなり，HRS-V 所長とともにホテルのラウンジに向かった．ラウンジでは Honda Vietnam の社長と営業部長が，２ヶ月後に迫った販売店大会に関するプレゼンテーション

を受けていた．販売店大会とは，全ベトナムのHonda販売店を招待し，優秀な経営者の表彰や，次年度の会社施策の説明をおこなうビジネスミーティングである．打合せで使われたホテルのラウンジは，まさに販売店大会が開催される現場であった．

企画運営を担う広告代理店のプレゼンテーションでは，販売店大会以降の「TOI YEU VIET NAM（著者訳：I Love Viet Nam）キャンペーン」に用いる，イラストで描かれたカラフルなキャラクタが紹介されていた（Fig. 4）．



Fig. 4　Characters of “I Love Viet Nam”

現場での自己紹介で著者がデザイナであることを告げると，このキャラクタについて意見を求められた．カラーリング魅力向上の方法を考えていた著者は，このカラフルな二次元のキャラクタイメージそのままの実車を制作し，販売店大会で展示することを提案した．従来の販売店大会は資料の映写，説明が中心と聞いていた．新たにキャラクタイメージの実車を展示することで，華やかさを前面に打ち出し，よりインパクトある訴求ができるのではと考えての提案であった．

この提案に対しHonda Vietnam社長と営業部長は面白そうと賛同した．その一方HRS-V所長は反対の立場を取った．

二輪車の開発責任者としての豊富な経験から，材料の調達，試作から仕上げに至るまでのショーモデル制作の大変さを知っているがゆえであった．販売店大会前に完成させるための制作期間は２ヶ月を切っていた．

本提案を推進するためには，HRS-V所長および工場の車両生産部門のスタッフが納得できる具体的な計画が必要であった．そこで，２ヶ月でショーモデルを仕立てるための段取りおよび日程計画を企画書にまとめることとした．

2.3. 工場への協力要請

打合せ翌日，工場の各部門の責任者が参加する定例会議に出席した．その場で販売店大会向けのショーモデル展示に関する企画とその制作計画を説明した．社長が同意した企画であればと反対はされなかったが，イラストにあるような塗色の調達についての質問が上がった．塗料は我々HRS-Vの方で開発，準備すると説明し，協力の約束を取り付けることができた．

2.4. 塗料開発とショーモデル制作

必要な塗料を調達するため，購買担当駐在員に塗料メーカーとの打合せの設定を依頼した．現地塗料メーカー，HANOI SYNTHETIC PAINT COMPANY社は，日本のHonda二輪車工場に納品している川上塗料株式会社 と技術提携しており，その川上塗料から派遣されている日本人駐在員との打合せが実現した．

早速，販売店大会での実車展示構想を説明し，短期での塗料開発の協力を依頼した．しかし，２ヶ月を切るスケジュールには対応できないと即答された．通常の新色開発は，調色を繰り返し満足する色味ができた後，色落ちを含む耐候性や，密着性を中心とした実機環境適合性などのさまざまな性能確認が必要となる．性能確認の中には，年単位の時間を要する項目もあり，今回のスケジュールでの開発はあり得ないということであった．

それならばと，本企画で必要な項目を再度整理し対処法を考えた．まず，調色にかかる時間の大半は，調色の実務よりも塗料メーカーとデザイナ間での塗色サンプルの行き来に費やされている点に着目した．さらにデザイナが求める調色の方向性を伝えるのは営業担当者のため，調色担当者にニュアンスがダイレクトに伝わりにくい．そこで，メーカーの調色現場にデザイナが直接出向き，その場で色味を判断することを提案した．これにより，塗色そのものの開発時間の短縮が可能となる．

また，通常の新色開発は量産での使用が前提となるため，短期での開発であれば耐候性など性能の確認が取れている顔料だけでおこなうのが一般的である．それは使える顔料が限られ，調色に手間取ることを意味している．しかし今回の新色はショーモデル限定なので，量産を前提とした性能は必要無い．顔料選択の自由度が広がり，調色スピードの加速が期待できる．

今回調色する塗色を量産で使用するときには，規定の時間を取って新色として開発することを確約した．その条件であればと塗料メーカーとの話がまとまり，２ヶ月以内という短期での塗料開発が実現した．

塗料メーカーでの調色後，塗装設備が異なる工場の塗装ラインでは，あらためて色再現の確認が必要となる．その作業時にも川上塗料の駐在員に現場に張り付いていただくなど，初めて塗装ラインに流れる華やかな色の再現に多大なる協力をいただいた（Fig. 5）．

こうして数々のハードルを塗料メーカー，工場，研究所が一丸となり乗り越え，カラフルなショーモデルは無事完成した（Fig. 6）．

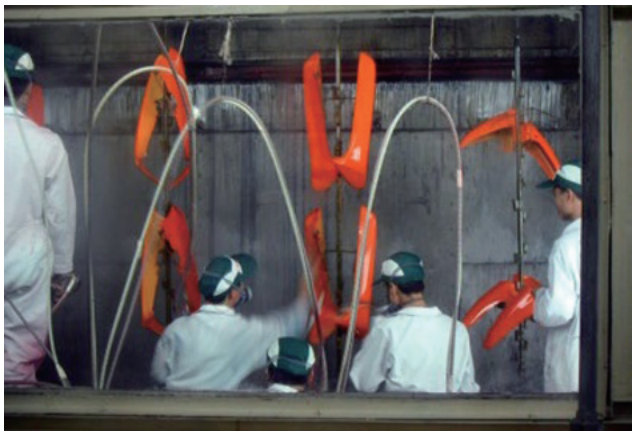


Fig. 5　Paint line at plant



Fig. 6　Completed show models

2.5. 販売店大会

ショーモデルを展示した販売店大会は大盛況であった (Fig. 7). 見たことの無い新しい色に塗られた二輪車の展示は, 来場者をくぎづけにした. その来場者の様子から, カラフルな色に対する関心の高さを強く感じた. 赴任直後の若者ユーザとの会話で感じた危機感と合わせ, 今後の Honda Vietnam 商品への早急なフィードバックの必要性を強く考える契機となった.

3. 戦略的カラーラインナップの考え方と量産化

販売店大会終了後の 2003 年 9 月, ASEAN の拠点技術研究所であるタイの HRS-T より, HRS-V でカラー開発責任者とデザイナを兼務して開発するよう指示が出された. これまで, 開発責任者はタイ, カラーデザイナはシンガポール, と分担していたが, この指示によって, ベトナム人スタッフ及び駐在者の手で, 自分たちの市場向けの商品開発ができるようになった. Honda Vietnam にとって, 自国に開発部隊が常駐するという待ち望んだ姿が実現したのだ.

3.1. 現地のリアルを活かす開発

自分たちで新たに商品開発を進めるため, あらためてベトナム二輪車ユーザのライフスタイルを確認した.

すると二輪車ユーザの多くが, 昼間は通勤や仕事に使い, 夜間は家族のレジャーに使っているという. 昼間の使い勝手はコミュータ用途の二輪車として各国共通であるが, この「夜間は家族のレジャー」とは何を指しているのであろうという疑問を持った. それを確かめるべく夜の街に出てみると何百台もの二輪車が, 2 人乗りは当たり前で, 3 人 4 人と家族で楽しそうに走っている姿があった (Fig. 8). 翌日の出社後, 現地スタッフに聞いてみると, 家にクーラーやテレビの無い家庭も多く, 家族全員で夕涼みを兼ねてレジャーとして街を走るのだという. 特定の目的地は無く, 家族や友人とのシティークルージングである. そこには, 質実剛健で頼もしい相棒としての一面と, 家族みんなに愛されるレジャーバイクとしての一面があった.



Fig. 7　Colorful show models showcased at dealer convention draws large crowd



Fig. 8　Users happily cruising in city at night

あらためてそのような視点でHonda二輪車のカラーラインナップを見てみると，質実剛健ではあるが地味な印象のものばかりであった．しかし，他のメーカーの二輪車にはレジャー性のある明るい色合いのものも含まれていた．赴任早々に街の若者に聞いた，「自分で買うならHonda以外の日本メーカーのカッコいい二輪車」というのは，このようなところからイメージが刷り込まれているのだと感じた．ならば，仕事に多く使われるHondaの二輪車にも，おしゃれやトレンドの香りがするデザインを取り入れることで，家族や若者達にも良いイメージを訴求できるのではないかと考えた．

そこで，ラインナップ全体におけるそれぞれのモデルの立ち位置も再考しながら，カラーラインナップについて検討し，次節にまとめた．

3.2. カラーラインナップ最適化のロジック「色戦略」

Honda Vietnamでは，性格の違う以下の３モデルを販売していた（Fig. 9）．各モデルの特徴を以下に記す．

- Future（110 cc, USD1,556）：スポーティな外観デザインの上位モデル．発売後５年を経て売上げ停滞．
- Wave α（100 cc, USD856）：エントリーモデルとして，廉価さを魅力に販売好調．コピー車が多い．
- Super Dream（100 cc, USD1,431）：歴史と伝統のHonda Vietnamの礎を築いたモデル．変化を求めないユーザの購入が多い．

各モデルそれぞれの市場状況，ラインナップ上のあるべき立ち位置を踏まえ，都市部と地方部のトレンド受容度の違い，流行伝播の時間差，可処分所得の違いを明確化した上で，以下のカラーリング開発方針を定めた．

（1）上位モデルのFutureをトレンド発信モデルと位置づけ，大胆なデザイン表現が可能な２トーンカラーと大型のグラフィックを採用する．

（2）エントリーモデルのWave αをトレンド追従モデルと位置づけ，数ヶ月のインターバルを設けた上でFutureイメージの２トーンカラーと大型のグラフィックを採用する．

（3）伝統のベーシックモデルSuper Dreamを昔からのお客様への安心感提供モデルと位置づけ，コンパクトにまとめたグラフィックにトレンドを取り入れる．

Futureがトレンドを発信し，Wave αが後を追いかける仕組みにして，カラーグラフィックの共通点をお客様がひと目でわかるようにすることで，カラーラインナップの最大効果が発揮できると考えた．

このように全モデルのカラーリングを関連付け，効果的な順番で開発し，生産，発売していく仕組みをまとめて「色戦略」と名付けた．

3.3.「色戦略」で得られること

「色戦略」により以下の項目が実現できると考えた．

（1）Futureのお客様は，いち早く最新トレンドカラーの二輪車を享受できる．

（2）Wave αのお客様は，数ヶ月待てば憧れの上位モデル同様のトレンドカラーの二輪車に手が届く．

（3）営業部門は，トレンドを活用した販売戦略，ブランド戦略の構築が可能となる．

（4）生産部門は，FutureとWave αの新色発売時期が何ヶ月かでもオフセットすることで，年末に集中していたニューモデル立ち上げ工数の分散と，生産の平準化が



Fig. 9　Honda's lineup and color variations circulated at 2003 dealer convention

可能となる.
(5) 塗料メーカーおよび購買部門は, 塗料を計画的に生産, 購入できることになり, 供給コストが安定する.
(6) 開発部門は, デザイン牽引による製品ブランドのイメージ向上と, 開発工数の平準化が可能となる.

3.4. 「色戦略」実現のための事前調整

机上で構築した仕組み「色戦略」を, Honda Vietnam 社長, 営業部長に提示した.「カラー変更だけの戦略的なプレゼンテーションは初めて見た, 先日の販売店大会での I love Viet Nam キャンペーンカラー演出も大成功だったので,「色戦略」に基づいた商品展開をやってみよう」と快諾された.

3.5. 「色戦略」量産化のための課題と手法

早速「色戦略」に沿った開発を始めた. 課題は新色の開発とその開発期間である.

Honda Vietnam の工場にトレンド発信に向いた新色が無いことはわかっていたが, あらためて塗装現場の状況を確認した. 1998 年の工場設立以降 6 年間で, 塗装ラインに投入された塗色は 9 色であった. そのうちの 6 色を活用して現行 3 モデルに用いていた. ASEAN における新興地域として新たに研究所まで設置する市場にしては, 寂しい色数であった.

新色の開発には, 現地塗料メーカーと協力してベトナム専用のオリジナルカラーを開発する手法と, 日本で量産実績のある塗料を Honda Vietnam 用に微調整する手法がある. 前者はデザイナが最新トレンドを反映した現地最適色を開発できるメリットがある. 一方で塗料メーカーと約束した十分な開発期間が必要となる. 後者は日本で実績のある塗料の配合データをベースに工場設備に合わせた微調整レベルとなるため, 開発期間の大幅な短縮が期待できる. 反面, 現地のマインドに最適な色になりにくいことは否めない. 著者は色戦略の遂行のために, 早期の塗料開発が必要と感じていたため, 開発期間を最優先して後者で推進することにした.

早速, 現地塗料メーカーに連絡し, 日本の Honda 二輪工場に納品実績のあるカラーサンプルをすべて取り寄せるよう依頼した. 到着したカラーサンプルから数色を選択し, 現地での調色を開始した. ベトナム市場のトレンドカラーになりうる色を選び, ショーモデルのカラー開発時と同様に調色現場にデザイナが立ち会うことで, 素早いカラー開発を進めた. オリジナルの調合データにより容易に色調の再現ができるため, 調色は微調整レベルで完了した.

3.6. 日本との事前調整

著者はカラーサンプルの取り寄せと並行して, 日本の二輪車開発拠点の材料研究部門の担当者に,「色戦略」における新色開発手法について相談していた. 塗料開発には, 材料研究部門の試験および承認が欠かせないためである. さらに, ベトナム塗料メーカーの技術提携先開発部長に開発状況を説明し, 日本サイドからのいっそうの技術支援を要請した. 材料研究部門と, 塗料メーカーそれぞれの全面協力を得ることができ, 塗料開発は順調に進み, 計画どおりの量産に目途がついた.

3.7. 「色戦略」の実現と結果

「色戦略」第一弾となる Future は, 新発売から 6 年目のカラー変更とは思えないほど大々的な販売促進施策を展開し, ベトナム市場でのデビューを果たした. その前哨戦ともいえるのが, 工場の生産ラインを停止してのラインオフ式典の開催であった. 色変更だけのマイナーモデルチェンジでは前代未聞の式典開催は, 色戦略で Honda Vietnam が変わることを従業員に印象付けるために, 著者が社長と工場長に掛け合い実現した (Fig. 10).

更にはハノイとホーチミンのクラブを貸し切っての発表イベントの開催や, 繁華街の一角に展示するなど, 営業部長も前のめりで矢継ぎ早に企画を実現した (Fig. 11).



Fig. 10 Line-off ceremony



Fig. 11 Night club used for launch event; invited first-customers' "Future" parked at storefront

そうした鳴り物入りで投入した新色をまとったFutureは，ファションリーダー的若者層からは，カッコいい，スポーティと上々の反応を頂いた（Fig. 12）．しかしそれとは裏腹に実販売台数は若干の増加に留まっていた．営業の現場から上がってくる声は，カッコいいけど，新しすぎてFutureには似合わない，周囲の目やリセールバリュが心配で購入には至らないということだった．「カッコよければ買っていただける」と思っていただけに，想定外の結果だった．同時に，高額商品であるFutureを選ぶお客様は，金額に見合う安心感も同時にお求め頂いているということが垣間見え，カッコいいだけの商品魅力では足りないということを痛感した．その現場の報告を聴いたHonda Vietnam社長は「この先も色戦略を続けるのだから，先ずは販売店の店頭に並べてもらえ」と指示を出し，店頭にFutureを展示する店が少しずつ増えていった．それにより，まずは目を慣らしてもらうところからのスタートであった．

それから６ヶ月後，計画どおりに「色戦略」第二弾となるWave ZXが発売された（Fig. 13）．

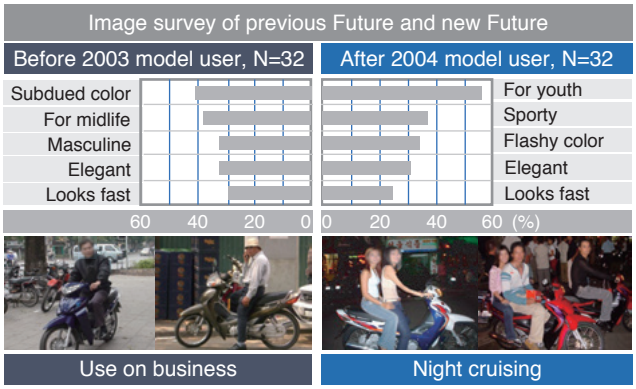


Fig. 12　Image survey of Future at launch



Fig. 13　Wave ZX with coloring inspired by Future

従来のWave αとWave ZXの違いは，Futureイメージのカラーリングに変更した点と，若者ユーザに訴求すべくZXというネーミングを採用したことである．このWave ZXは，カラーリングとネーミングに加え，フロントディスクブレーキを採用したことで，新しいモデルと認識され，Super Dream，Future，Wave αに続く４本目の柱として活躍することとなる．

Wave ZXの販売台数は，FutureとWave αの販売台数にほとんど影響を与えることなく純増となった．これが，上位モデルでトレンドを発信し廉価モデルがフォローすることでトレンドの好循環を起こす，色戦略が実を結んだ結果であると考える．赴任当時は，若者ユーザに「Hondaを選んだのは親の世代．自分ならHonda以外の日本メーカーのカッコいい二輪車」と言われていたが，「色戦略」実施後のHonda二輪車のイメージは大きく若返った．「Hondaのデザインは，カラーリングがカッコいいから」と言って選んでいただけるブランドへの第一歩を踏み出すこととなったのだ（Fig. 14）．

駐在してから１年半が過ぎていた．



Fig. 14　Honda dealership with colorful models in 2006

一方，トレンド発信モデルであるFutureは，外観変更を伴いながら，Future II，Future NeoとモデルチェンジがFuture続いていく（Fig. 15）．

それぞれのモデルには，トレンドのグラフィックと，お客様が一目でFutureとわかるような安心感を併せ持つよう，グラフィックに継続性を持たせた．Wave ZX，および進化版のWave RSがトレンドを捉えたモデルとしてヒッ



Fig. 15　Future, Future II, and Future Neo achieved both evolution and continuity of graphics

トするに従い，トレンド発信モデルとしてのFutureの位置づけは明確化していくこととなる．そして高価格帯モデルにもかかわらず，徐々に，しかし着実に市場に定着し，2006年には2003年と比較して281%の販売台数を記録した．モデルごとの販売台数推移をFig. 16に示す．

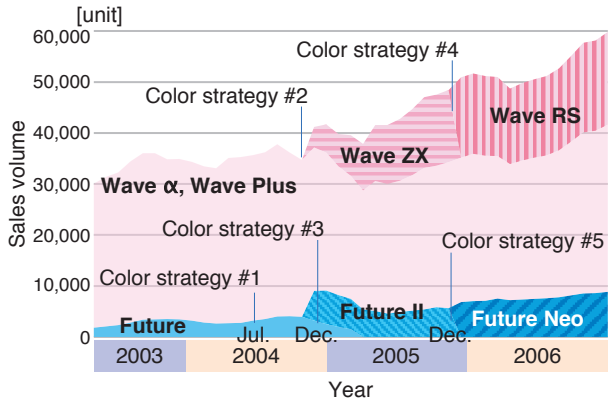


Fig. 16　Sales volume for each model of Honda Vietnam

ちなみにモデルのネーミングは，色戦略に着手した当初，モデルの連鎖が感じられるようにと筆者が仮称として使っていたものをそのまま商標に転用したものである．

4．日本の50 ccスクータにおける「色戦略」の進化適用

2009年，日本の開発拠点へ帰任していた著者は，国内向け50 ccスクータDioのカラー変更開発責任者に任命された．

当時の国内二輪車市場は，駐車禁止取り締まり強化，排出ガス規制による価格変更，リーマンショックなど，さまざまな要因から減少が続いていた[1]．更に50 ccスクータ市場においては，2007年以降の電動アシスト自転車[2]の普及拡大も影響していた(Fig. 17)．このような市場背景

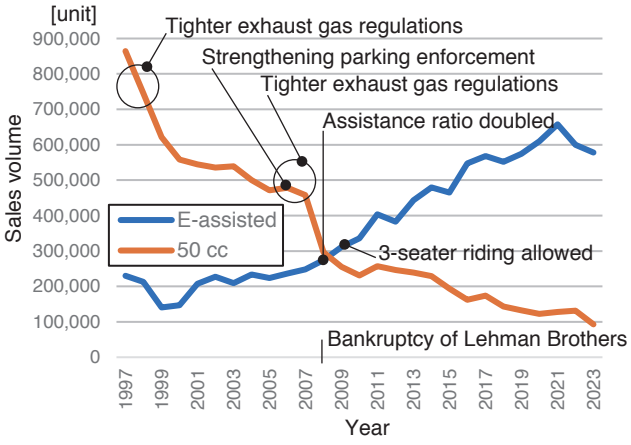


Fig. 17　Sales volume of 50 cc model scooter and domestic production volume of electrically assisted bicycles

の中50 ccスクータメーカー各社は，お客様の購買意欲向上をねらったカラーバリエーションの増大や，新色投入のラッシュが続いていた(Fig. 18)．



Fig. 18　50 cc scooter market in chaos

4.1. 50 ccスクータ，5モデル30色のカオス

2009年のHonda 50 ccスクータラインナップは，男性向けスタンダードのDio，買物かごを備え，主婦層を意識したCesta，ストリート系若者に向けたZoomer，ファッション性の高いScoopy，ベーシックモデルTodayの5モデルで構成されていた．そのカラーバリエーションは30タイプ23色という状態になっていた．

各モデルのカラーは，お客様の声や販売データを参考に，カラー変更主体のモデルチェンジを繰り返していた．また，モデルそれぞれの担当デザイナがカラートレンドを意識することで，似たようなカラー構成となることもあった．その結果，モデルごとの色での差別化は曖昧になっていた．また，販売店ではすべてのモデルのカラーバリエーションを店頭展示できない，お客様は実物で色が確認できない，などの混乱を招いていた．中には「同じ色なら店頭にあるこのモデルでいいや」と言ってお目当て以外のモデルを購入するお客様の姿も見られ，商品魅力やモデルコンセプトを伝えるはずのカラーリングが機能していないことが顕在化していた．

このような状況でDioだけカラー変更しても，お客様に商品魅力を伝えるには不十分であり，お客様や販売の現場に与えている混乱の解決にはならない．この状態から脱するためには，ベトナム駐在時に市場で評価された「色戦略」を進化適用，50 ccスクータラインナップ全体を俯瞰し，各モデルに最適なカラー変更することが必要であると考えた．そして「色戦略」実現のためには，全5モデルの采配が可能な開発責任者としての権限が必要と考え，すべてを任せてもらった．

4.2. 日本向け「色戦略」2009年 - 2011年の展開

まず初めに2009年時点のポジショニングマップの作成

に着手した (Fig. 19(a)). ベトナムの３機種ラインナップは車格の違いがあり，直感的に棲み分けがわかりやすかったのでマップは必要なかった．一方，日本の 50 cc スクータのラインナップは，同じ排気量の中での棲み分けが必要である．それを，ぱっと見て直感的にキャラクタの違いを認識しやすいツールが必要と考え，思いついたのがポジショニングマップであった．マップは，よりシンプルでわかりやすくするため，縦軸を年齢イメージの [老ー若]，横軸を性別イメージの [女ー男] とした．マップの中心には Honda 50 cc スクータの 56% の販売台数を占める Today を置いた．次いで Dio, Cesta, Zoomer, Scoopy をコンセプトに見合う老 - 若 - 男 - 女の位置に配置した．

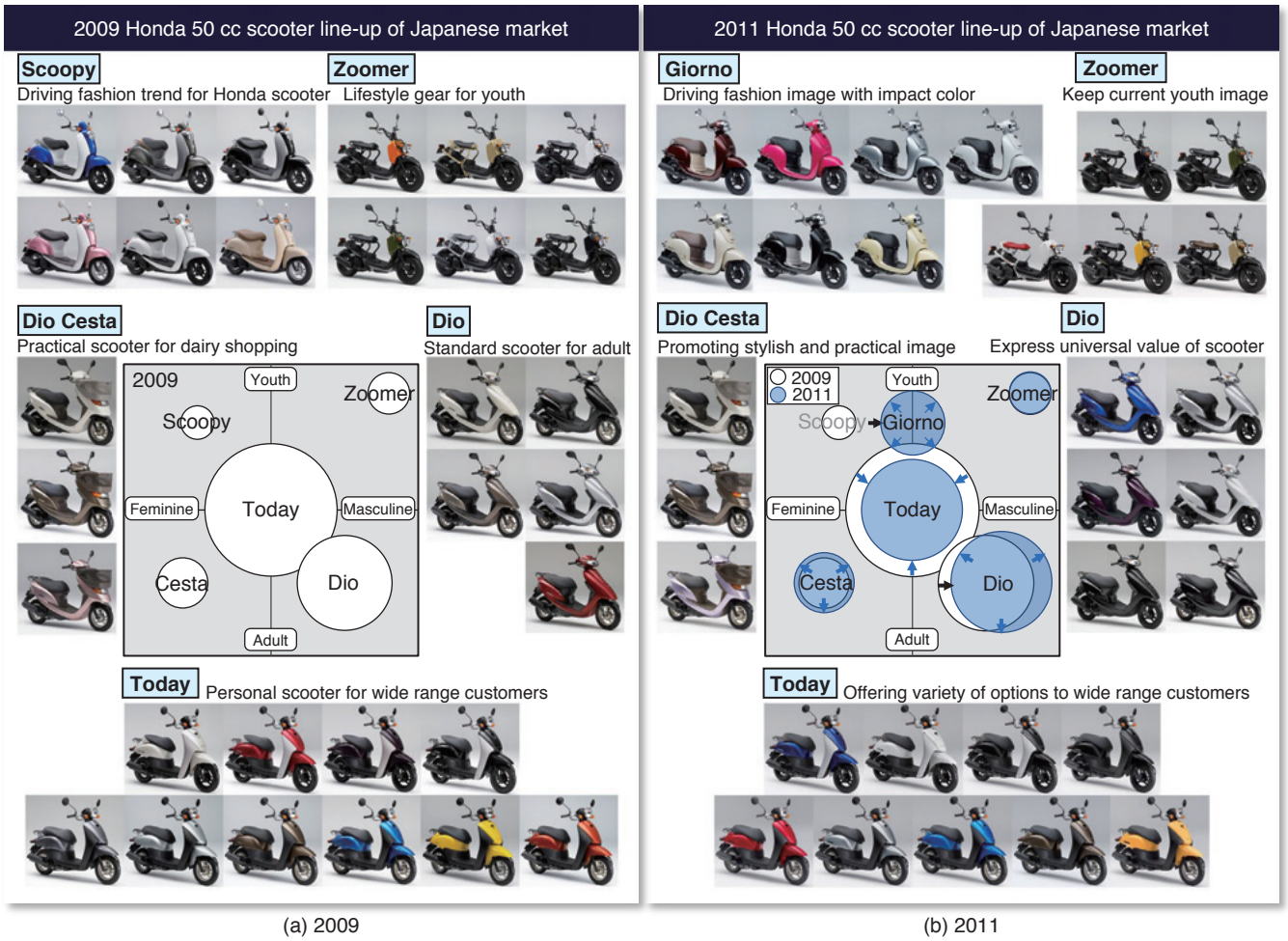
出来上がったマップを見て，モデルごとの棲み分けが出来ているように見えたが，それ以上に Today の数字が 56% を占めていることへ強い危機感を感じた．

Today は仕様とコストのバランスが魅力的で販売好調というのは理解できる．しかし一方で，その他の機種が十分な魅力を発揮していないために Today に集中してしまうのではないか，同じようなカラーリングの機種があれば手頃な価格の方に流れてしまうといった事態なのではないかと考え，ラインナップが機能していないことを強く感じた．そこでマップのサークルのラップ部分を意識して設け，社内のモデル同士が競合している状況を示すようにした．マップにモデルごとの性格分け，すなわちキャラクタを立たせる必要性がある部分を訴える機能も持たせたのだ．

次に，今回開発対象の 2010 年モデルではなく，その翌年の 2011 年モデルのポジショニングマップの作成に着手した (Fig. 19(b)). このプロセスこそ俯瞰でラインナップを考えたベトナム色戦略の進化部分である．一年ごとの対処療法ではなく，翌 2012 年はもとより数年先を見据えたありたき姿の実現に向けて，今必要なことを明確化して実行する戦略的カラー開発の真髄であると言ってよい．

2011 年のラインナップで最も大きな変化は，ファッション路線を牽引し，女性ユーザ開拓の役割を果たしてきた Scoopy が販売終了となり，ファッショナブルな若年層全体をターゲットにしたユニセックスイメージの Giorno を投入することである．

そこで，Today のセンタ配置に変わりはないが，サークルのサイズを若干小さくした．そして，Giorno はもとより，従来から継続して販売する Dio と Dio-Cesta においても，Today とラップする部分をなくしながらサークルサイズを一回り大きくした．



(a) 2009　　(b) 2011

Fig. 19　Honda's Japanese 50 cc scooter lineup and positioning map for 2009 and 2011

マップ内で隣り合うサークルのラップをなくして，各モデルが魅力あふれるカラーで選ばれるラインナップにしたい．そのために，Today のカラーバリエーションはベーシックなものを最小に設定することにして，廉価なものを求めるお客様の要望にお応えすると同時に，それ以外のモデルはそれぞれのコンセプトに合ったカラーを設定し，商品力を上げていこうという意気込みである．

Zoomer はこの年のカラー変更予定はなかったが，2011 年が発売 10 年目であることから，10 周年記念のカラーリング車を限定販売することを提案した．合わせて現行の売れ筋の色に絞ったカラー数の削減を提案した．ポジショニングは若者向けのシティーバイクとして育てていきたいとの思いで孤高の配置とした．

4.3. 日本向け「色戦略」2010 年の展開

2011 年の目標となるポジショニングマップができた後，その過程となる 2010 年のポジショニングマップの作成に着手した (Fig. 20)．真っ先に考えたのが Today の扱いだ．従来の総花的なカラーバリエーションから，定番を外さないカラーバリエーションを考慮した設定としたが，この段階では一気に色数を絞ることはせず，年を追うごとに色数を減らしていくこととした．

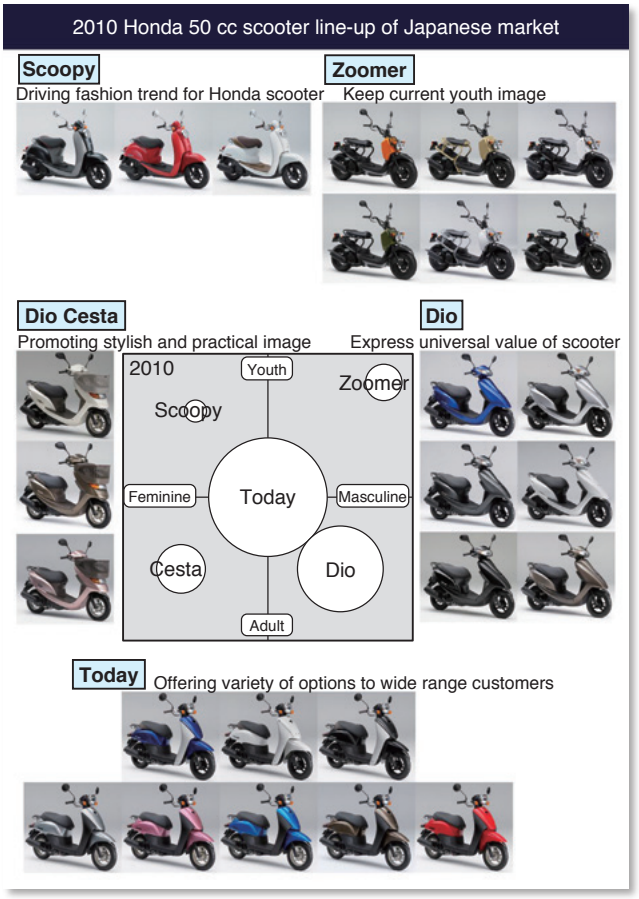


Fig. 20 Honda's Japanese 50 cc scooter lineup and positioning map for 2010

Dio は，A 社の競合モデル 7 色，B 社の競合モデル 9 色というカラー攻勢の中，Today との棲み分けと，高級感と力強さを表現できる 6 色のカラーラインナップとした．そこには，Today からの乗り換えを促したいという意思も込めた．

Scoopy は前述のとおり，翌 2011 年に新規投入するファッション路線後継モデルの Giorno にスムーズにバトンを渡したいと考えた．Giorno は，原点ファッションスクータをコンセプトに掲げて，若手デザイナで構成されたチームでカラー開発を進めていた．Scoopy の 2009 年カラーラインナップは，幅広いファッション指向を網羅すべく Special, Standard, Deluxe の 3 タイプ 8 色が設定されていた．これを Giorno へスムーズに連携する事を念頭に，ユニセックスイメージのファッション路線 3 色に絞って設定した (Fig. 21)．



Fig. 21 Color lineup change in Scoopy from 2009 to 2010

4.4. 日本向け「色戦略」市場の反響

2011 年，新規発売の Giorno は，原点ファッションスクータという新コンセプトが大きな反響を得た (Fig. 22)．

年間約 3000 台売れていた Scoopy の後継モデルとしての Giorno の販売台数は約 16000 台となり，偏重気味であった Today の販売台数は約 9000 台減少している．これらより，同等数のお客様が Giorno に移行し，色戦略で目指した「ありたき姿」の一つである「モデルごとの色での差別化」は実現できたと考える．一方，販売店店頭での展示の混乱を回避するための色数の削減はまだ不十分であったため，色戦略担当を継続し，2012 年の色数削減に取り組むこととした．Fig. 23(a) に 2009 年，Fig. 23(b) に 2012 年のラインナップを示す．

Dio, Cesta, Giorno, Zoomer は，2011 年までの施策で目標としていた色数に落ち着き，残すは Today のみとなった．

2011 年に 1 色減にとどまった Today のカラーバリエーションの絞り込みに本格着手した．



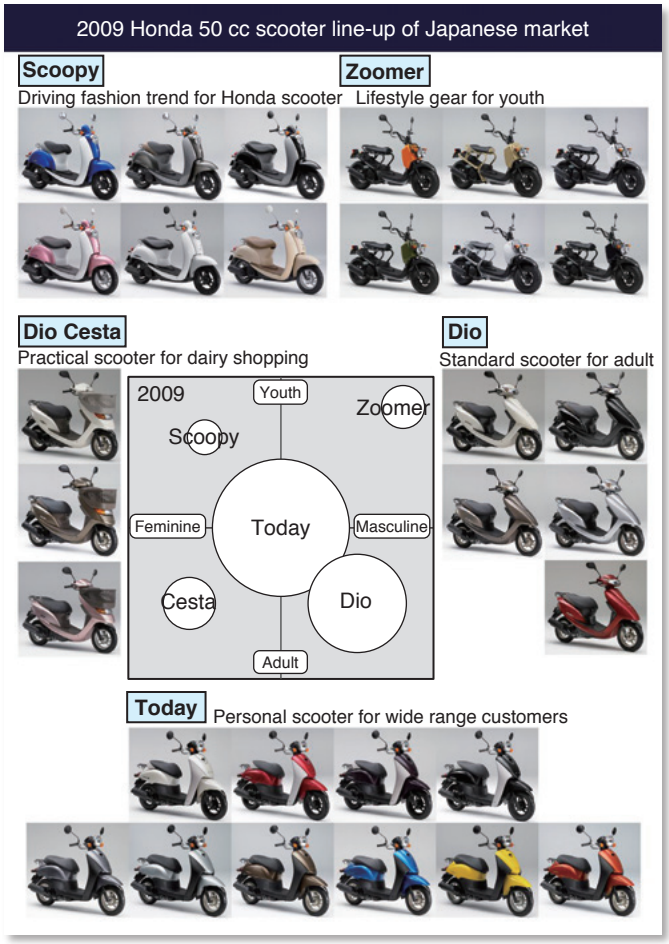
Fig. 22　Color lineup of 2011 Giorno

この時点で，既に他のモデルが個性あるカラーラインナップを取り揃えていたため，色の選定は容易に進んだ．本提案を受けた営業部門は，色戦略に沿った色選定であれば，カラーバリエーションを減らしても問題ないと納得してくれた．それは過去 2 年間の販売実績が色戦略の効果を如実に物語っていたからであった．

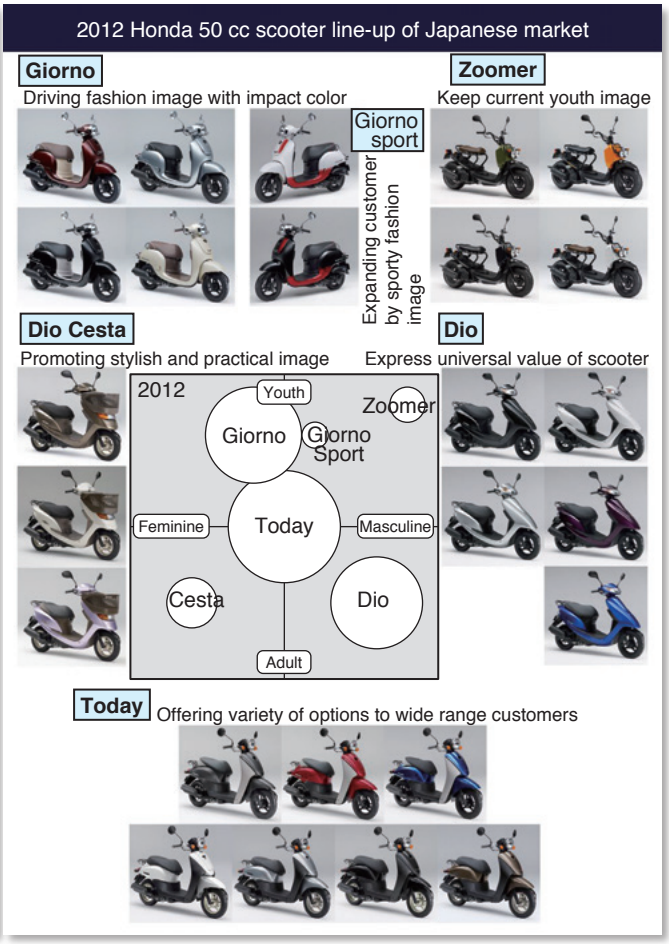
2009 年と 2012 年のモデル数を比較すると，5 モデル 30 タイプ 23 色から 6 モデル 25 タイプ 17 色を実現し，「色戦略は」本章冒頭に上げた，お客様や販売の現場に与えた混乱の収束の一助となった．

また，Today の販売シェアが 55% から 38% に減少したのに対し，販売シェア 4% の Scoopy からモデルチェンジした Giorno は 27% に増大した．著者が本章の冒頭で述べた Today に大きく偏った 50 cc スクータ販売への危機感は解消された (Fig. 24)．

これは，それぞれのモデルの役割，棲み分けを明確化した上で，的確な投入色選定ができた結果であり，お客様は各モデルの個性に沿ったカラーデザインを手に入れることができるようになった．現在も，各モデルコンセプトを活かしたカラーランナップにより，やみくもに色数を増やすことなく効果を上げている．



(a) 2009



(b) 2012

Fig. 23　Honda's Japanese 50 cc scooter lineup and positioning map for 2009 and 2012

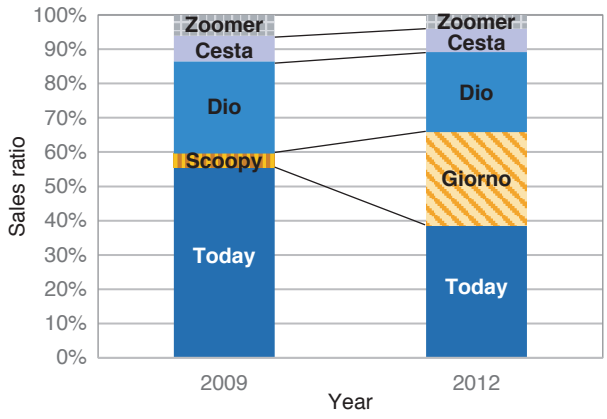


Fig. 24　50 cc scooter sales ratio of Honda

さらに，スクータが 7 割を占める国内 50 cc 市場の 2009 年と 2012 年の販売台数を比較すると，他社が約 10% 減少となる中，Honda は約 3% の増加となった (Fig. 25)．

これをもって，「色戦略」がミニマムカラーでマキシマム効果を発揮する開発手法であることが検証されたと考える．

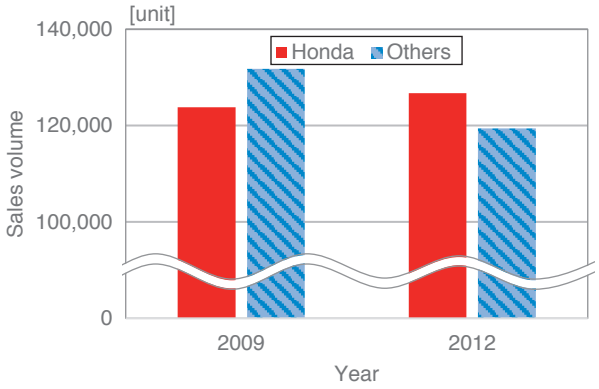


Fig. 25　50 cc model sales of Honda and other manufacturers

5．まとめ

たかが色じゃないかという人もいるし，目先の色変更なんて簡単だろうという人がいるのも事実だ．

しかし，戦略的な色の変更で，最大限の効果を生み出すことが出来ることは，本稿にて述べてきた通りである．

最近，カラーリングの世界も，CMF (Color；色，Material: 素材，Finish: 仕上げ加工) という呼ばれ方で表現されることが増えてきた．Honda においても，数年前から CMF グループが設けられ，魅力ある色の開発に取り組んでいる．

そのような開発を進める中で最も大切なのは，「色で，何を，どうしたいのか」という目的と目標を明確に持つことだと考える．

そして色の使い方によって，それぞれの目標の達成が近づくかもしれない．色ではなく，読者が担当している何かかもしれないが…．

本稿が後進諸氏の思考の一助となることを願っている．

参考文献

(1) https://jamaserv.jama.or.jp/newdb/ (参照 2024/12/26)
(2) https://jbpi.or.jp/business/statistics/production/electric/ (参照 2024/12/26)

■著　者■



吉村雅晴

電動モトクロッサー CR ELECTRIC の開発

Development of Electric Motocrosser CR ELECTRIC

加藤誠司[1] Seiji KATO
秋吉洋行[1] Hiroyuki AKIYOSHI
北岡惇[1] Makoto KITAOKA
木下雅之[1] Masayuki KINOSHITA
古山拓也[1] Takuya FURUYAMA

要　旨

モータースポーツなどのFUN領域で電動車両の新たな価値創出の一助となる，電動モトクロッサーCR ELECTRICを開発した．バッテリセルの選定と制御でのローンチコントロールとエネルギーマネジメントの仕様を構築したことで，モトクロスで求められる動力性能と航続距離を得ることができた．L字型バッテリパックの構築と，フレームボデーの剛性値を最適化し，CRF450R同等の完成車諸元を達成した．さらに400 V帯の高電圧パックの構築と冷却系部品を電動モトクロッサーに合わせて再構築したことで，各部品の小型化と軽量化につながった．これにより，走行時の軽快感，走破性，旋回性といった操縦安定性を得ることができた．

ABSTRACT

In an attempt to offer a new value of EV in the FUN category such as the motorsports, the electric motocrosser CR ELECTRIC has been developed. The employment of launch control and energy management systems upon the selection and control of battery cells enabled realization of the dynamic performance and the range required for the motocross machine. Developing the L-shape battery pack and optimizing the frame body stiffness, the specification of complete vehicle similar to the CRF450R are achieved. Moreover, the development of high-voltage pack as high as 400 volt along with the redesigning of the cooling system to adjust to the electric motocrosser resulted in the downsizing and weight reduction of various component parts. With these measures taken, the maneuverability and stability such as nimbleness, roadability, and turnability have been accomplished.

1．まえがき

社会環境の変化により，四輪車のみならず二輪車においてもカーボンニュートラル化の実現が求められている．Hondaは，2050年までに全製品および企業活動におけるカーボンニュートラルの実現を目標としている．また，2040年代には全ての二輪製品においてカーボンニュートラルを達成する方針であり，これを達成するための環境戦略の中核として，二輪車の電動化を積極的に推進している(1)．

そしてモビリティのカーボンニュートラル実現は，モータースポーツにおいても例外ではない．既にFormula 1やMotoGPにおいてカーボンニュートラル燃料の導入(2),(3)が始まっている．電動化においては，Formula EやMotoEといった電動車専用レースも行われている．しかし，現在主流であるリチウムイオン電池のエネルギー密度はガソリンに対して約2%程度であり，高出力域を多用するレースにおいては航続距離が課題となっている．一方で，電動車は近年のモータ制御技術の進化により出力制御が容易であり，コントロールしやすいドライバビリティを持っている．また，ガソリン車に比べて静粛性が高く排ガスの出ないクリーンな車両であるため，都市部や室内アリーナでもレースが可能であることも魅力の一つである．

Hondaでは商用や日常の移動手段といった近距離型の小型コミューターバイクとしてこれまで電動二輪車を商品化してきた．これに加え，FUN領域の新たな価値創出として，欧州や北米で人気が高くスタジアムなどでも行われるモトクロスに焦点を当て，電動モトクロッサーの開発を行った．

技術検証として，2023年全日本モトクロス選手権 第８戦川越ラウンドに参戦した．そこでヒート１でクラス２位，また３ヒート中２回のホールショット獲得という好成績を残すことができた．このことはHonda初の電動二輪車でのレース参戦としてメディアの注目度も高く，電動車

[1] 本田技研工業株式会社
E-mail: seiji_01_kato@jp.honda

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_3

両の認知につながる結果となった.

本稿ではFig. 1に示す電動モトクロッサー CR ELECTRICの基幹部品であるバッテリをはじめとした電動ユニットで採用した技術と，それらを搭載する車体技術について紹介する.



Fig. 1　External view of CR ELECTRIC

2. 開発のねらい

2.1. モトクロスの特徴

モトクロスとは，未舗装で短距離の周回コースにてスピードを競う二輪車のスプリントレースである. 屋外の平地や丘陵地，またはスタジアムといった様々な場所をフィールドとして利用し，起伏のある地形を人の手で造成しコースを形成する. Fig. 2に示すとおり[4]，巨大ジャンピングスポットも設けられており，跳ねたり飛んだりといった三次元的なアクションが多い. さらには天候やレースの進行とともに路面コンディションが変化するため，様々な要素に対応する車両が求められる.

レース構成として走行時間15から30分程度のヒートレースを，1日の中で2から3ヒート行う. 各ヒートの順位を元に1レースの総合順位を競う. 30台から40台のバイクが横一列に並び，スターティングゲートを使用して一斉に全車が走り出す，迫力あるスタートシーンも魅力の一つである.

このような条件で行われるモトクロスではコンパクトな車体と軽さが重視される. 出力がいかに優れていても大柄で重いモトクロッサーでは走りにくい. また，滑りやすいオフロード路面を走行するので，最大出力も必要であるがリニアなトルク特性と扱いやすいトラクション性能も重要である[5].

また，多人数でスタートするレース構成上，ホールショット（レーススタート直後の第1コーナーにトップで進入すること）を奪取することは，レース展開を有利にするために重要な要素の一つになることも特徴である.

2.2. 電動車の特徴

2.2.1. 搭載エネルギー

ガソリン車はガソリンの燃焼によって発生した熱エネルギーを機械エネルギーに変換し，駆動力を生み出す. これに対し，電動車はバッテリの電気エネルギーをモータで機械エネルギーに変換し，駆動力を得ている. 現在のバッテリ技術では単位重量当たりのエネルギー密度はガソリンに対し2%程度である. モータの高い駆動変換効率を加味しても同車格のガソリン車で得られる利用可能なエネルギーの約40%程度にしかならない. これらは，航続距離の少なさや車両重量の重さに影響を与える.

また，ガソリンは燃焼の際に多くのエネルギーを排熱として失うことに対し，電動車は電力の変換効率が高く，ガソリンエンジンほどの排熱は発生しない. 一方で，バッテリは温度による特性変化も大きく，少ない搭載エネルギーをより効率よく使うためには運転条件や使用環境に合わせた熱マネジメントも重要である.

2.2.2. 出力特性

Fig. 3に電動車とガソリン車の駆動力線図を示す. 電動車はバッテリとモータの特性により低回転時に高トルクを



Fig. 2　Motocross riders jumping on track

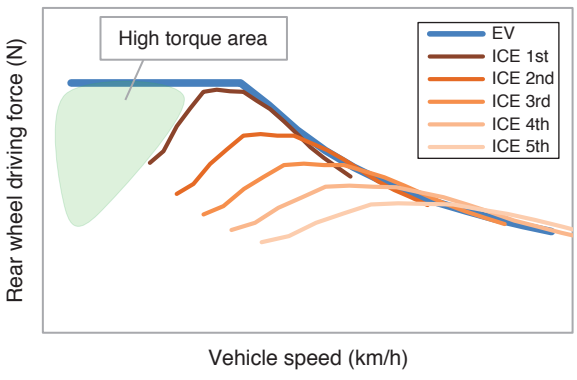


Fig. 3　Comparison of driving force between EV and ICEV

発揮できる．また，電気により発生させるトルクや出力は制御プログラムにより容易に変更が可能である．これはガソリンエンジンがある程度の回転数にならないと十分なトルクが得られないことと異なる．

また，Fig. 4 に電動車とガソリン車の出力特性の違いを示す．高出力を維持するために，ガソリン車は車速に対して適切なギアを使う必要があることに対し，電動車は変速ギアを持たずとも高回転までフラットな出力特性を得ることができる．すなわち，スロットル操作だけで最高速まで容易に到達することが可能となる．よって，速度に合わせたギア選択が不要となり，簡便な操作だけで車両コントロールがしやすいドライバビリティを持っていることが特徴である．

2.3. 開発目標

前章で述べた電動車の出力特性は，絶えずコース環境が変化するモトクロス競技において，有意性があると考えられる．これを利用するためには，現在レースとして確立しているガソリン車両に匹敵する出力と航続距離を満たす必要がある．そこで，CRF450R 同等の動力性能を持ち，実際に行われている 1 ヒート 15 分のレースを走り切る事を目標と定めた．また，旋回性能や悪路の走破性もレースを走る上で重要な要因であり，これには，完成車の重心位置やフレーム剛性といった要素が影響する．搭載物の異なる電動車両においても，Table 1 に示す CRF450R の完成車諸元と同等となる仕様の構築を目標とした．

2.4. モトクロスにおける電動車両の課題

Fig. 5 に示す通り，モトクロッサーに求められる完成車諸元で比較すると搭載できるエネルギーの差が生じるため，単純に搭載エネルギー量を合わせるだけでは車体サイズが大きく，かつ，重くなる．搭載エネルギーが少ないまま高出力を使い続けてしまうと目標としている航続距離には到達しない．よって，電動車両の特性を生かし，高い出力を維持しながらも航続距離を延ばす手法が必要となる．

Table 1　Specifications of 2021 model CRF450R

Overall length [mm]	2182
Overall width [mm]	827
Overall height [mm]	1267
Ground clearance [mm]	336
Seat height [mm]	965
Caster angle [deg]	27.7
Trail [mm]	114
Wheelbase [mm]	1481
Front brake	Single 260 mm disk
Rear brake	Single 240 mm disk
Front suspension	49 mm fork
Rear suspension	Pro Link
Front tire	80/100-21 51 M
Rear tire	120/80-19 63 M

また，使用エネルギーが異なることから搭載物の構成も異なる．単純に従来の部品の共用化を行うことは容易ではないため，フレームなど主要部品の形状を変更しなければならないことも課題となる．

また，電動部品による発熱の課題も存在する．電動車両はモータを駆動させるための電力供給をする際に発生する電力損失が熱エネルギーに変換されていることで発熱する．モータ，バッテリ，インバータは電動車における主要部品であり，電力供給により発熱を伴う．これらの部品は耐熱温度を超えると破損につながることから，設定温度以下に保つための出力制限機能が設けられている．出力制限により加速度やトルクが低下することはモトクロスにおいて不利になることから，電動部品の熱マネジメントが求められる．

これら電動モトクロッサーの課題について，本テーマで採用した要素技術を次章より紹介する．

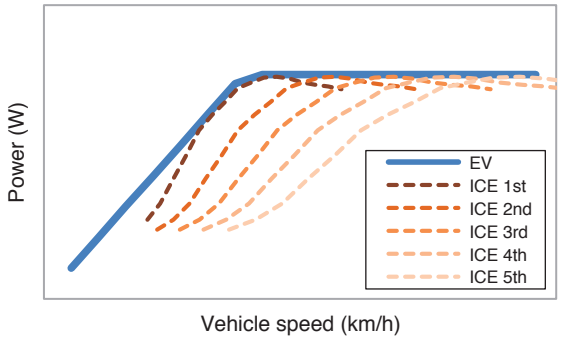


Fig. 4　Comparison of power characteristics between EV and ICEV

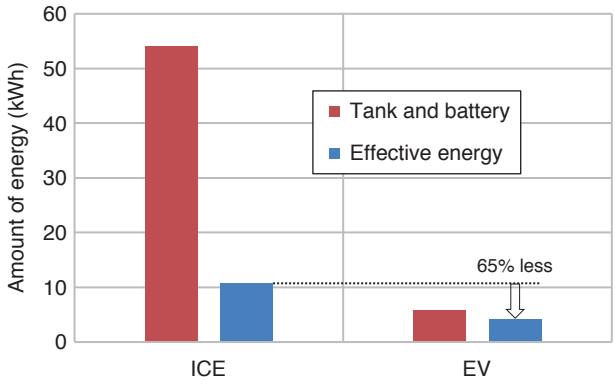


Fig. 5　Comparison of installed energy in motocrossers of EV and ICE

3. 電動車両要素技術

3.1. バッテリ

電動車の完成車性能と諸元を決めるためにバッテリは重要な部品である．完成車が必要とする出力と航続距離を実現する上で最小，最軽量となるようなバッテリパック（以下パック）構造とそのシステムについて述べる．

3.1.1. バッテリパック構造

パックは多数のバッテリセル（以下セル）で構成され，パック性能はセルの性能に依存する．セル性能は重量エネルギー密度と重量出力密度によって評価され，いずれの密度も高い水準であることが実用上重要である．Fig. 6 に，セルメーカー各社の代表的なセルを抽出し，重量エネルギー密度と重量出力密度をプロットしたグラフを示す．

電動モトクロッサーに要求されるセル性能は，CRF450R 同等性能を得ることができる重量出力密度と，レースを走り切ることができる重量エネルギー密度で切り分けることができる．ここで切り分けたエリアの中から，車両コンセプトやパック形状を考慮しセルを選定する．本開発では，1 ヒート走り切ることを主とし，要求エリア内の中でもより高出力のセルを選定した．

次に一般的なセル形状を Fig. 7 に示す．パウチ型や角型セルは，その直方体形状と一辺に集約される電極の配置が特徴である．そのため，効率よい配置とするためには，セル形状に合わせた直方体形状にすることが求められる．一方で円筒型のセルは負極配置の自由度とその外形から，パック外形が複雑になっても余分なスペースが生まれにくい．本テーマでは，前述の性能を満たした選定エリアの中から円筒型セルを選択し，Fig. 8 に示すような L 字配置のパックを構築した．これにより，Fig. 9 に示すようにパック内における重量物であるセルを完成車の後方領域と下方領域まで配置することができた．この L 字配置のパックを構築できたことで，Fig. 9 図中に示すように，電動モトクロッサーの重心位置は，目標としていた CRF450R 同等を達成することができた．

3.1.2. バッテリシステム

一般的な電動スクーターのパックでは航続距離とバッテリ寿命の長さが重要である．そのためセルの直列接続数を最小限にして並列接続数をより多くすることで上述の航続距離と寿命を最大化する手法が主流である．この手法を採用した結果，バッテリパックの出力電圧は 50 から 100 V 帯となることが多い．

電動モトクロッサーには，レースで優位性を持たせるために高い出力で走行することに加えて，レースを走り切れるだけのバッテリ容量を搭載することが求められる．これらを実現するために，前章で選定した高い出力が得られるセルを用い，パックとしての高出力を実現するために直列数を最大化した．そのため，パック出力電圧は Honda 二輪初となる 400 V 帯の高電圧パックを開発した．さらに，レースを走り切れるだけの最小並列接続数を設定した．

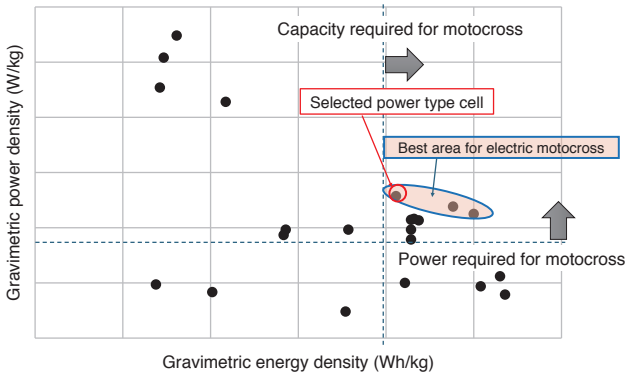


Fig. 6 Comparison of gravimetric energy density and gravimetric power density of various battery cell types

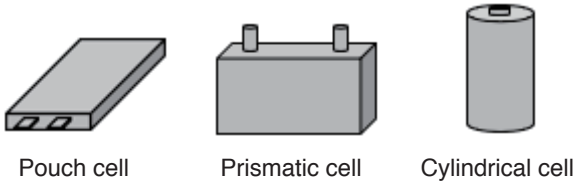


Fig. 7 General cell shapes

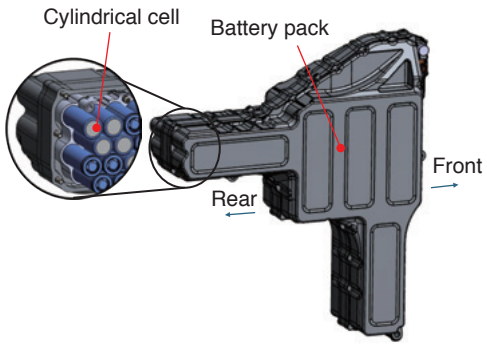


Fig. 8 Battery pack appearance and cells

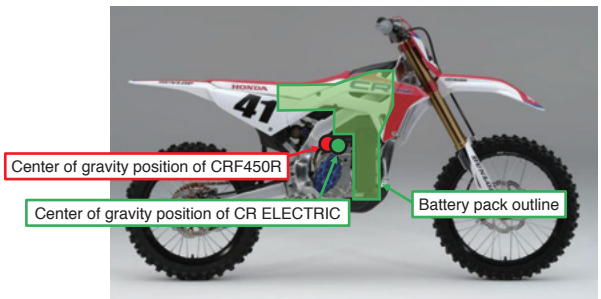


Fig. 9 Battery pack outline and vehicle CG position

パック電圧を 400 V 帯に高電圧化したことで，パック出力電流値が抑えられ，高電圧帯の配線上に存在する主要部品の発熱を抑制することができた．これにより，モータ，インバータの小型化と軽量化ができ，結果として CRF450R の車両重量に対して，電動モトクロッサーの車両重量増加は 10% 以内に抑えることができた．

3.2. 制御

完成車制御システムは，モータ一体型インバータとバッテリパックに内蔵されたバッテリマネジメントユニット，駆動力算出を行う車両マネジメントユニットの三つを組み合わせる制御システムを構築した．

以下に電動車の特性を活かしレースを優位に進めるために作成した制御機能を紹介する．

3.2.1. ローンチコントロール制御

モトクロスの特徴であるホールショットを得るためにはスタートから 1 コーナー進入まで高い駆動力と出力を維持することが求められる．だが，スタートに特化した動力性能のままでレースに臨めば，車両の扱いにくさにつながり，レースを有利に進められない．そこで，レーススタート時の最初の加速時のみ有効になる走行モード切替機能（以下ローンチコントロール）を追加した．

ローンチコントロールは停車中での操作で有効になり，スタート前にライダーによってセットされる．発進後にスロットルを閉じることで自動的に無効となる．無効化されたのちは，有効化前に選択していた任意の走行モードでの走行となる．

レーススタートにおいては，可能な限り高出力でかつホイールスピンさせずに後輪を駆動させることが求められる．また，発進時加速のフロントタイヤの浮き上がり（ウィリー挙動）を抑えつつ安定した加速を与えるため，出力特性を変更した．Fig. 10 に各モードでの出力特性を示す．

スタート時に単に最大駆動力を与えるのではなく，低回転領域の駆動力を約 20% 下げた特性とした．さらに，到達速度はより高い速度とするために最大出力を約 25% 高く設定した．この値はコースやコンディションによって任意の値で設定できる．これにより，ライダーやレース毎で最適な特性を選択することができ，レースでの優位性につながった．

3.2.2. エネルギーマネジメント

限られた搭載エネルギー量を効率的に消費するためには，レースにおける電力消費量の調整が必須である．それを補助するための制御アプリケーションとしてエネルギーマネジメント機能を追加した．

Fig. 11 に示す通り，電費調整手法は以下の設定とした．

（1）レーススタート時に電動モトクロッサーの優位性を得るため，ローンチコントロールモードは電力消費を考慮せずモータ出力を最優先とする．

（2）ローンチコントロール解除後のレースにおいては想定走行時間で電力を使い切れるような出力となるレース用の出力特性にて走行を行う．

（3）レース中の予測が容易ではない電費変動に対し，コース周回ごとの消費電力に対する余裕度と不足度を計算する．

この結果から，出力特性を調整する機能（補助アプリケーション）による補正を行う．

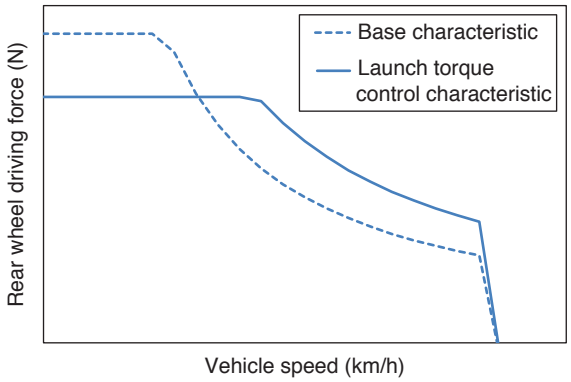


Fig. 10　Launch torque control characteristics under different operating conditions

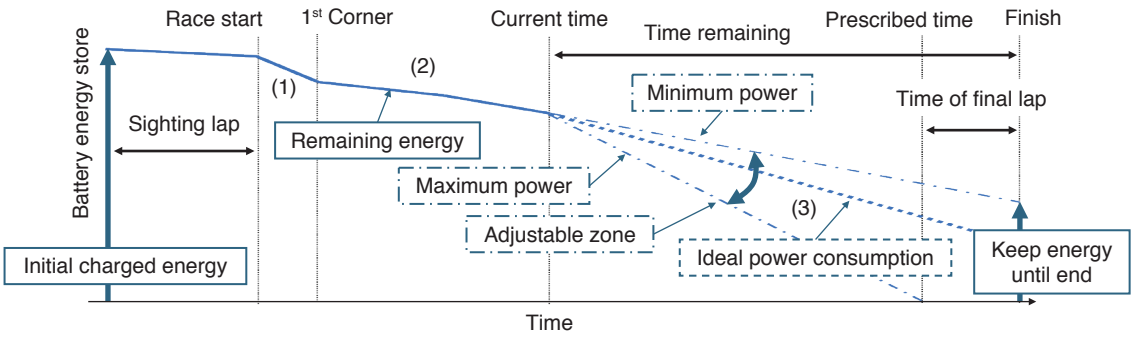


Fig. 11　Concept of battery energy management control during race

これを実現するため，異なる出力制御モードを作成し，設定した各出力において電費計測を実施した．Fig. 12 に出力制御モードと消費電力の関係性をプロットしたデータを示す．このデータをもとに想定走行時間で電力を効率よく使い切れるような出力となるレース用の走行モードを作成した．

また，補助アプリケーションとして，残電力量とローンチコントロール終了からレースの残時間より，ラップごとの消費可能電力を推定した．そして，事前測定した出力と消費電力の線型補完からモータトルクの制御アルゴリズムをリアルタイムで調整する機能を追加した．

3.3. 冷却系部品

モトクロスで他車よりも上位で走り切るためには，温度上昇による出力制限に至ることなく１ヒートさらには１レースを走り切る必要がある．そのため，各部品温度をコントロールする必要がある．本車両ではモータとインバータについて冷却を行った．冷却目標として，以下２つを定めて部品仕様を決定した．一つは１ヒート中に出力制限に入ることなく走行可能であること．もう一つは１ヒート終了後，次ヒートまで部品冷却し１レースを通して走行可能であることとした．本章ではこれらを満たすための冷却系部品について紹介する．

3.3.1. 放熱量設定

電動モトクロッサーにおけるレース走行条件でのモータとインバータの発熱量を設定するため，面積の異なるラジエータコアを用いテスト走行を行った．これより，高電圧部品の温度データを測定し，ラジエータ放熱量とレース中の各部品温度の関係を計測した．

Fig. 13 に仕様の異なる各ラジエータで走行した際のインバータの温度データを示す．Fig. 14 に仕様の異なる各ラジエータで走行した際のモータの温度データを示す．テスト結果から，今回搭載するモータとインバータの電力損失データを比較し，１ヒート走行後の各部温度を決定する発熱量を予測した．また，ラジエータコア面積違いによる水温の差から，モトクロスレースの走行条件によるラジエータコア面積当たりの冷却能力を予測した．

その結果，ラジエータのコア面積はガソリン車と比較し 64% 低減し，重量は 77% の軽量化となった．Fig. 15 に軽量化したラジエータの外観図を示す．これにより，電動モトクロッサーとして１レースで必要な冷却性能の最適化を行うことができた．

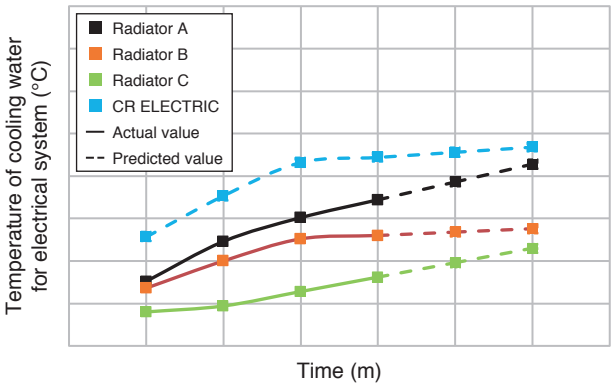


Fig. 13 Heat generation of inverter under varying operating conditions

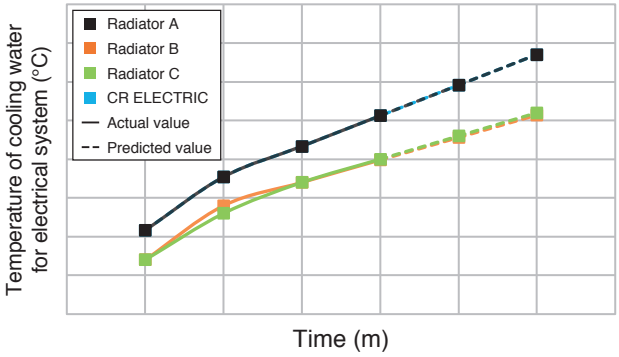


Fig. 14 Heat generation of motor under varying operating conditions

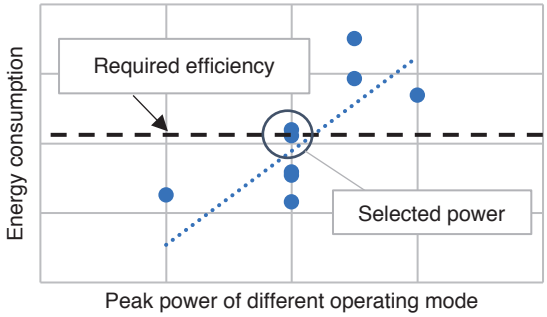
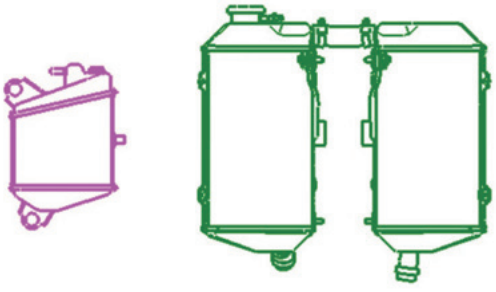


Fig. 12 Relationship between peak power of different control modes and energy consumption



(a) CR ELECTRIC (b) 2024 Model CRF450R

Fig. 15 Radiator size

3.3.2. ウォーターポンプ選定

多くのガソリン車はエンジンの回転運動からウォーターポンプの動力を得るメカニカルポンプが使われている．同様に，電動車でメカニカルポンプを採用した場合，ポンプ作動条件はモータの動作に依存する．これにより，アイドリングが不要な電動車両では，停車中に冷却水の循環ができなくなる．また，メカニカルポンプの場合，回転軸上に部品を配置またはギアを組み合わせて駆動を得る必要がある．そのため，筐体が車体幅方向に広がり，車体サイズ拡大につながる．

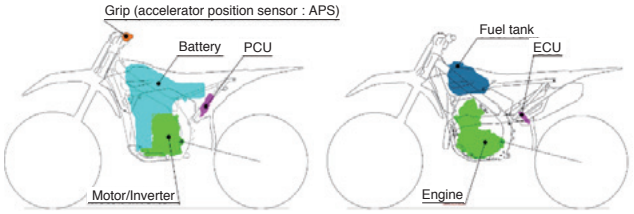
そこで電動ウォーターポンプを選択することで，パワーユニットサイズが小さくなり，停車中の冷却水の循環が可能となった．これにより，電動モトクロッサーの冷却目標を達成するための冷却システムの仕様構築ができた．

3.4. 完成車

3.4.1. 完成車諸元

自由自在な運動性能を確保するために CRF450R の諸元を目標とした．走破性を阻害しない最低地上高，トラクションを生かせる前後重量配分などを条件とし，Fig. 16 に示すように電動駆動ユニット全体の配置を決定した．

これに合わせて，完成車諸元は Fig. 17 に示すように，CRF450R と同じキャスター角，トレール量，シート高，最低地上高とし，ホイールベースは同等とした．これにより，電動モトクロッサーに要求される取り回し性能を実現した．



(a) CR ELECTRIC　　(b) CRF450R

Fig. 16　Vehicle layout

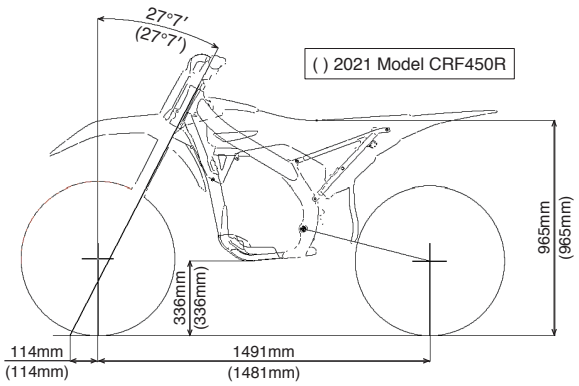


Fig. 17　Vehicle geometry of CR ELECTRIC

3.4.2. フレームボデー

電動モトクロッサーには，求められるバッテリ出力と容量を達成するために，限られたスペースに隙間が少なくなるようバッテリを効率よく搭載することが重要である．従来の CRF450R のエンジンサイズに適したフレームボデーを流用するだけでは 1 レースに必要な搭載量を得ることは容易ではない．一方，フレームボデーの剛性は軽快感や走破性，旋回性といった操縦安定性に影響する．特にモトクロスは不整地で荒れた路面やジャンプ等も伴いながら走行するため，剛性バランスが重要となる．つまり，これまでガソリン車両で培ってきた経験をもとにした剛性バランスが求められる．

そこで，メインパイプは CRF450R で採用しているアルミニウム製セミダブルクレードルツインチューブフレームをベースとした．バッテリの着脱性とフレーム剛性で求められる性能を得るため，メインパイプの断面形状を変更し，ヘッドパイプ部への繋ぎ方を直線的なレイアウトとした．その形状を Fig. 18, 19 に示す．これにより，フレーム剛性値の変化量を CRF450R に対して 10% 以内に抑えることができ，従来ガソリン車と同等の操縦安定性を確保した．

また，Fig. 20 に示すように大容量バッテリの幅が収まるように，ヘッドパイプ後方直後から，メインパイプの幅方向を広げる形状とした．また，Fig. 21 に示すように，メインパイプ上部の曲げを鉛直に沿う方向にした．これにより，Fig. 22 に示すように，バッテリの車体上下方向へのスムーズな脱着が可能となった．

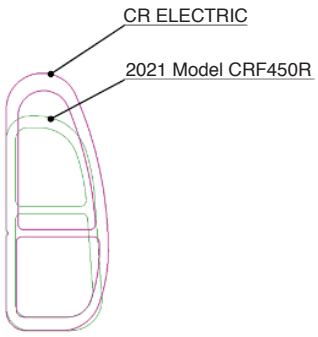
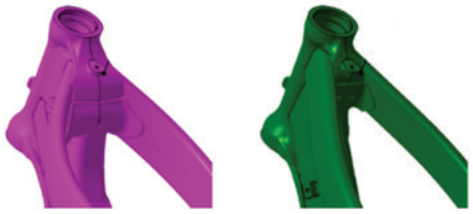


Fig. 18　Cross-sectional shape of main pipe



(a) CR ELECTRIC　　(b) 2021 Model CRF450R

Fig. 19　Shape of connecting part of main pipe to head pipe

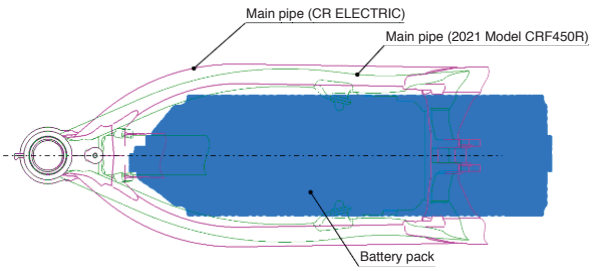


Fig. 20　Route of main pipe



(a) CR ELECTRIC　(b) 2021 Model CRF450R

Fig. 21　Bending shape of main pipe

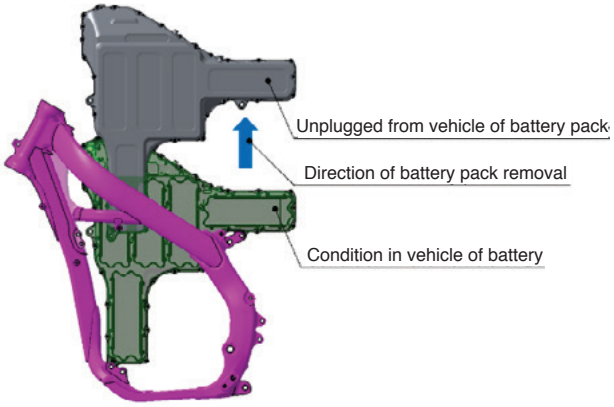


Fig. 22　Direction of battery pack removal

4．まとめ

電動モトクロッサー CR ELECTRIC を開発し，以下の成果を得た．

（1）バッテリに円筒形のセルを採用し，L 字型のバッテリパックを構築したことで，目標とする出力を得ながら，完成車重心位置は CRF450R 同等とすることができた．

（2）バッテリ電圧は Honda 二輪初の 400V 帯としたことで，主要部品の発熱が抑えられ，軽量コンパクトなパック構成を達成することができた．これにより，CRF450R の車体重量に対し，増加量 10% 以内に収めることができた．

（3）走行モード切替制御を開発し，電動モトクロッサーとしてホールショットに求められる動力性能と，レース完走に必要なエネルギーマネジメントを可能とした．

（4）EV コンポーネントにおいて，モトクロス用途での発熱量を予測し最適化することで，CRF450R と比較して 77% 軽量化し 64% コア面積を減らすことで軽量，かつコンパクトな冷却部品構成を達成できた．

（5）従来のモトクロッサーと大きく構成が異なる搭載部品でありながらも，CRF450R 同等の完成車諸元を達成し，モトクロス走行で求められる取回し性能を得ることができた．

より多くのレースに対応するためには，さらなる航続距離の拡大やレース中のバッテリ充電や交換手法の進化が期待される．カーボンニュートラル時代のモータースポーツを目指した CR ELECTRIC を具現化したことで，都市部や室内アリーナでもレース開催可能となり，今までにないユーザーへのアピールも可能となるだろう．

参考文献

（1）https://global.honda/jp/news/2022/c220913a.html（参照 2024/12/24）

（2）https://global.honda/jp/tech/motorsports/Formula-1/Powertrain_e-fuel/（参照 2024/10/17）

（3）https://www.motogp.com/ja/racing-together/fuel-future（参照 2024/10/17）

（4）https://honda.racing/ja/jmx/post/jmx-2023-rd08-ia1-race（参照 2025/4/15）

（5）星紀夫，志村康雄，大熊孝則，野村明史，後郷和彦：4 ストロークモトクロッサ CRF450R の紹介，Honda R&D Technical Review, Vol. 14, No. 1, p. 21-30

■著　者■


加 藤 誠 司


秋 吉 洋 行


北 岡　惇


木 下 雅 之


古 山 拓 也

小型船用電動船外機の実証実験

Demonstration Experiment of Electric Outboard Motor for Small Boat

竹　重　隆　正[1]　Takamasa TAKESHIGE
加　藤　健　太[1]　Kenta KATO
日向野　正　麻[1]　Shohma HIGANO

要　旨

島根県松江市のお堀を小船で巡る観光遊覧「堀川めぐり」をユースケースに，電動二輪車のパワーユニットとスワッパブルバッテリを活用した小型電動船外機システムの実証実験をおこなった．

プロペラ回転方向の切り替えスイッチと，極低速までコントロール可能な速度調整機能により着桟時の制動距離を30% 低減した．操作性については船頭の使い方を検証し，スロットル開度と遊覧船の船速の関係を電動船外機用にチューニングした．また，スワッパブルバッテリの採用により，船上での短時間のバッテリ交換を可能とした．以上の結果から ICE 船外機以上の性能および，フィーリングが得られた．

ABSTRACT

The authors conducted a demonstration experiment of a small electric outboard motor system that utilizes an electric scooter power unit and swappable batteries. As the use case, the experiment took place on the “Horikawa Meguri” sightseeing tour in Matsue City, Shimane Prefecture, in which a small boat is used to tour a moat.

The braking distance when berthing was reduced by 30% by using a switch that changes propeller rotation direction and a speed adjustment function that enables control even at very low speeds. In terms of operability, the authors verified how operators used the equipment and tuned the relationship between the throttle position and tour boat speed for an electric outboard motor. Furthermore, the use of swappable batteries enabled quick battery replacement on board. As a result, the performance and feeling of the outboard motor were better than those of internal combustion engine outboard motors.

1．まえがき

アメリカ，欧州の一部の地域において，19 kW 以下の小型船外機に対するゼロエミッション規制が検討され始めている[(1)]．電動の水上モビリティメーカーとしては，欧州を中心に世界へ展開している Torqeedo 社が挙げられる[(2)]．日本国内においては，2020 年 8 月よりヤマハ発動機株式会社がクルーズ船に電動推進ユニットとステアリングシステムなどを統合した新しい操船システムである HARMO（ハルモ）の実証運航を開始している[(3)]．

Honda は 2050 年のカーボンニュートラル実現に向け，次世代のクリーンな船外機の提案として 2021 年 11 月に Fig. 1 に示す小型電動船外機のコンセプトモデルを発表した[(4)]．

この発表に対し，島根県の松江市観光振興公社から Honda の小型電動船外機を観光遊覧船に搭載したいとの問合せがあった．

松江市は 2050 年のカーボンニュートラル実現に向け，CO_2 排出実質ゼロを長期的な目標に掲げることを表明している．松江市観光振興公社はこの目標達成に向けた取り



Fig. 1　Concept model of electric outboard motor for small boat

[1] ソリューションシステム開発センター
E-mail: takamasa_takeshige@jp.honda

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_4

組みの一つとして，市内で運営している観光遊覧船に搭載されている Honda の内燃機関船外機（ICE 船外機）を電動船外機へ載せ替えることで CO_2 を削減したいと考えていた[5]．

Honda としても電動船外機の量産開発に向けて，バッテリのエネルギ密度や冷却性観点から内燃機関船外機（ICE 船外機）同等の長時間，高負荷運転の実現が難しい中，電動船外機による提供価値，適正な売価や要件，運用方法を実際のお客様の声を聞きながら明確にしたいと考えていた．

こうした状況から，小型電動船外機のパイロット機を既存のリソースを最大限活用し，短期間で仕立て，松江で運用するという事業実証プロジェクトがスタートした．

「堀川めぐり」は松江の城下町にある堀を小船でゆっくりと景色を楽しみながら巡る観光ツアーである．Fig. 2 のようにコースの全長は約 3.7 km で，約 50 分かけて既定のコースを周る．繁忙期にはコース上に 20 艇以上同時に運航することもあり，その時期には 1 日最大 8 周する船も出てくる．船の全長は 23 Ft(≒ 7 m)ほどで，最大乗員数は 13 名である．雨天でも通常運航しており，年中無休で運営されている．

コース近隣には民家が立ち並ぶ箇所も存在する．その区間は“静音区間”に設定され，通過時には ICE 船外機の回転数を抑えて航行する必要がある[6]．

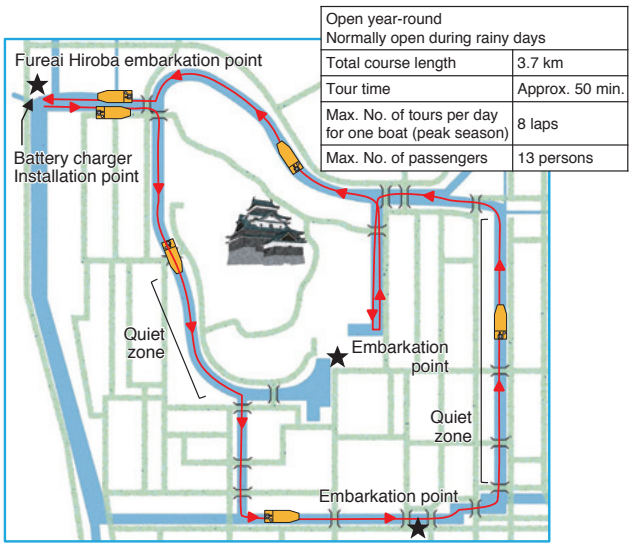


Fig. 2　Tour course overview

2．仕様検討と目標性能

2.1. 動力性能への要求

ツアー中，船はおよそ時速 4 から 6 km で巡航する．遊覧船へ搭載する船外機の所要性能を把握するため，ツアー 1 周における負荷を確認した．

Fig. 3 より，ツアーで使われるパワーユニットには巡航時には約 1.0 kW，乗船場への着桟等の減速，及び停止時には一時的に最大 3.5 kW の出力が要求され，1 周当たりのエネルギ消費量は 1.2 kWh であることが分かった．

2.2. 電動船外機のパワーユニットと動力用電源検討

この動力を出せるパワーユニットを検討するにあたって，当時法人向けに販売していた Fig. 4 に示すビジネス用電動二輪車 BENLY e: に着目した．BENLY e: は排気量 110 cc クラスの BENLY をベースに Fig. 5 のスワッパブルバッテリである Mobile Power Pack e: (MPP) を動力用電源として採用した電動二輪車である．

現在遊覧船に搭載されている ICE 船外機 BF9.9 の最大出力は 7.3 kW である．これは低回転数で静粛に船を動かすためであった．Fig. 6 に示す通り，ツアーで使用されている出力領域は BENLY e: のパワーユニットで出力可能であり，低回転域から高いトルクを出せる電動モータの出力特性を生かせるユースケースと判断した．

2.3. 電動船外機としての目標性能設定

「堀川めぐり」において，ICE 船外機同等以上の使い勝手，電動ならではの新価値を提供するため，ユースケース

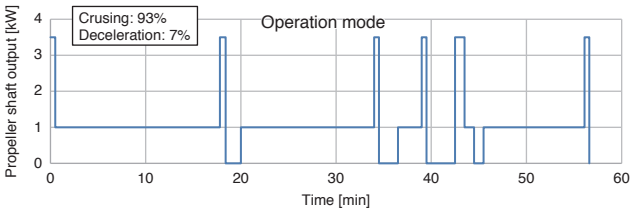


Fig. 3　Mode of used power during one tour lap



Fig. 4　BENLY e:



Fig. 5　Mobile Power Pack e: (MPP)

に基づいて動力性能及び商品性について以下の目標性能を設定した.

（1）船を着桟できる制動性能と操作系レイアウトであること

（2）速度調整機能のスロットルグリップは，握り直しなく極低速から最高速までの調整を自然におこなえること

（3）雨天時に観光遊覧船が運航している中でバッテリ交換がおこなえること

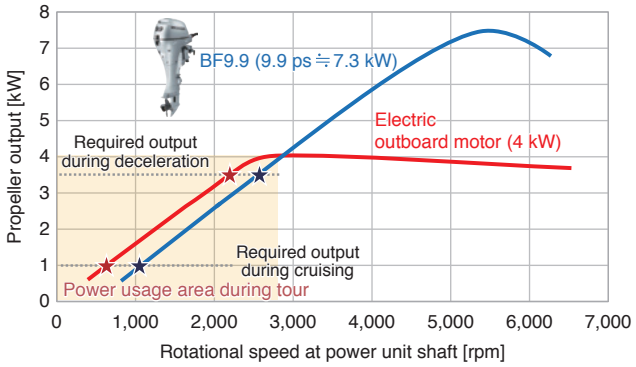


Fig. 6　Comparison of output characteristics between ICE outboard motor and electric motor

3．電動船外機システムの仕様構築

3.1. 概要

今回構築した電動船外機システムは Fig. 7 に示す通り，船外機本体，バッテリ BOX，各種配線のコネクタと MPP2 本を直列で使用するためのデバイス，ヒューズ類を収納した電装デバイス BOX の三つのコンポーネントにより構成される．Fig. 8 のように，バッテリ BOX は使い勝手を考慮し船上へ，電装デバイス BOX は燃料タンクを収納していた空間に搭載することで占有スペースを有効活用した[8),(9)].

3.2. 制動性能と操作系レイアウトの仕様構築

Fig. 9 に示す従来の ICE 船外機では，エンジンと直結するドライブシャフトは常に一定方向にしか回転することができず，プロペラの回転方向を変えるにはクラッチと正転用，逆転用それぞれのギアの噛みあいを切り替える必要がある．切り替えの操作は Fig. 10 に示すように，一方の手はスロットルグリップを操作し，もう一方の手を使い，物理的なレバー操作にてクラッチを動かす．Fig. 11 に示す電動船外機では，モータを使用することによりドライブシャフトの回転方向を制御スイッチ操作で切り替えることが可能となるため，クラッチや逆転用ギア，操作するシフトレバーを廃止することができる．既存 ICE 船外機用ギアケースを基にリバース用ギアやクラッチの廃止をおこなったが，従来は一定方向に回転していたギアが正逆転することになるため，歯当たりの調整等の見直しが必要となった．

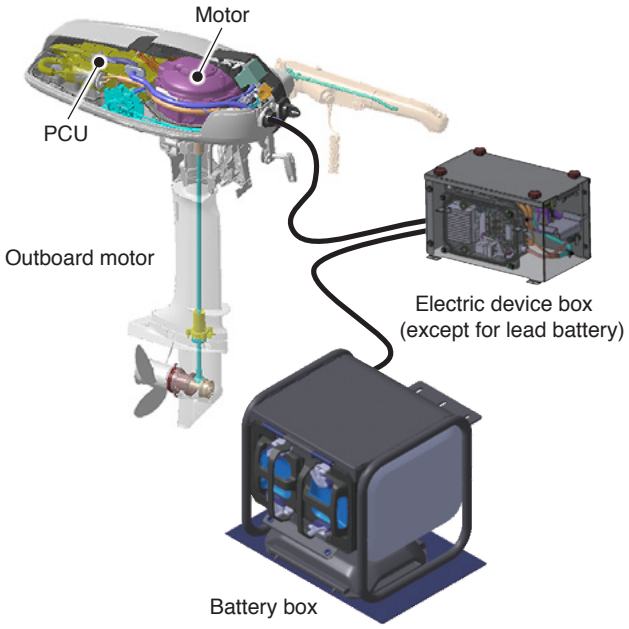


Fig. 7　Configuration of electric outboard motor system

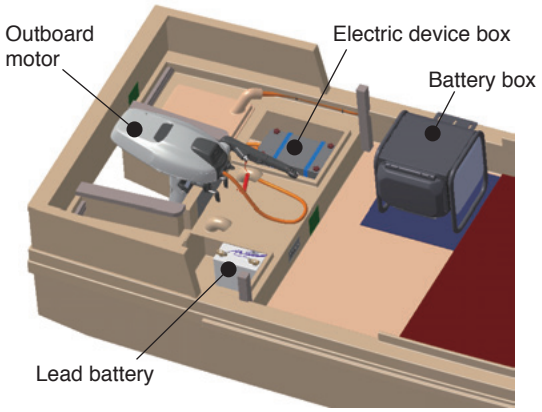


Fig. 8　Image of electric outboard motor system mounted on boat

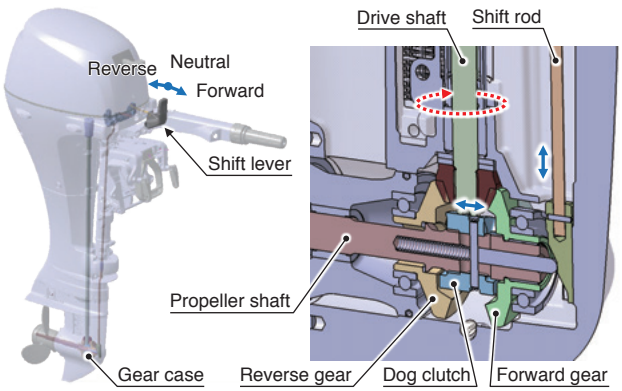


Fig. 9　Internal structure of gear case of ICE outboard motor (BF9.9)

Fig. 12 の電動船外機のギアケース開発はトーハツ株式会社が担当した.

電動化による制御スイッチの設定については, Fig. 11 のようにスロットルグリップの先端部にオルタネイト式スイッチを設けた. このスイッチは, スロットルグリップを握った際に親指付近に来るよう配置される. これにより, ICE 船外機で必要だった両手操作から片手で容易に操作できるようにした. 着桟時にスロットルが開いた状態でスイッチが押されると, パワーコントロールユニット (PCU) は出力トルクの値にマイナスをかけたものを指示値として出力し, モータ回転数を速やかに減速, 停止させ, 逆転へとスムーズに素早く切り替えることが可能である.

この操作系により停船操作がより簡単になり, 時速 5 km 航行時からの制動距離を ICE 船外機に比べ 30% 短縮させることができ, 容易に着桟することが可能となった[10].



Fig. 10 Conventional method of shift switching



Fig. 11 New method of shifting by alternating switch

3.3. 速度調整機能のコントロール性

速度調整はスロットルグリップの開閉でおこなう. Fig. 13 に示すようにスロットル操作にあたっては, BENLY e: と同様にスロットルグリップを回すことでケーブルを介してアクセルポジションセンサ (APS) を回す構造をとっている. なお, スロットルグリップの全開時の角度は ICE 船外機同等の 100 度とした. BENLY e: のパワーユニット流用にあたって, 二輪車と船では受ける抵抗や推進力のメカニズムが異なることからスロットル開度に対する出力のマップは船用にチューニングする必要がある. また ICE 船外機ではアイドル回転数以下でプロペラを回すことができなかったが, 電動モータは極低回転でプロペラを回せ, かつ低回転時にも高いトルクを発生させることが可能となり, 極低速域からの操船が実現できる. チューニングされたスロットル開度に対する遊覧船の船速の関係図を Fig. 14 に示す. 操作性の構築にあたっては実際の船頭の使い方を検証し, 下記項目を考慮した.

(A) グリップ操作時の手首への負担を考慮し, スロットル開度 40 度を超えない範囲で実用上使う船速域をコントロールできる
(B) 巡航時に使う速度域 (時速 4 から 6 km) は手首をあまりひねらずに調整できる
(C) 繊細な操船時に必要となる極低速域は広い角度域で操作できる

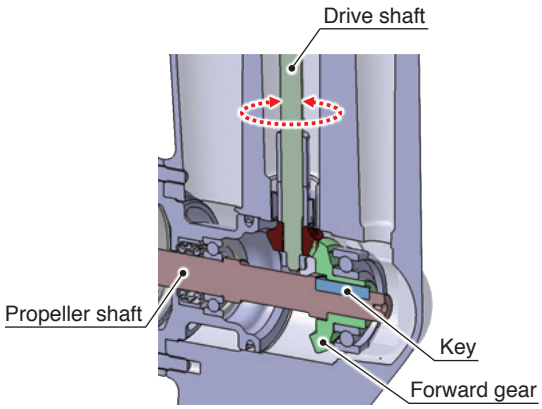


Fig. 12 Internal structure of gear case of electric outboard motor



Fig. 13 APS position in electric outboard motor

3.4. スワッパブルバッテリの観光遊覧船への適合

エネルギ源となるバッテリには容易に着脱，交換，運搬が可能な MPP を採用した．

同出力帯以上の他社電動船外機は大容量バッテリを船内に固定設置している例が多い．１日のユースケースを満足できる大容量のバッテリを搭載し，使用しない夜間等に長時間かけ，桟橋等の陸上設備に専用に設置された陸上電源から充電する運用方式である[7]．今回は既存船からの大幅な改修を必要とせず，かつ設置コストの高い陸上電源を必要としない MPP を採用した．

船の場合，屋外の降水環境下で MPP を交換する必要があり，屋内や軒下の MPP 交換を想定した電動二輪車との大きな違いとなる．前述のように，最多で１日８周航行，MPP 交換作業は４回必要となり，交換時は乗客の乗降の間の数分と限られている．また，遊覧船ならではの要望として，操船席，客席からの視界を妨げない形状と設置レイアウトとすることも挙げられた．

容易な交換と船上の設置レイアウトを配慮した BOX 形状，運転時，交換時の耐水性能等ユースケース上考慮するべき点が多い．

具体的な対応策としては，Fig. 15 に示すように MPP の抜き差し方向を水平として雨水等の被水対応し，また，バッテリ本体高さを 120 mm 以上に設定することによって雨水等が船内に溜まることによる MPP BOX 内への浸水防止と，作業性の確保をおこなった．設置場所は交換作業と操船をおこなう船頭が扱いやすい操船席前方のデッキ上とした．

以上の推進により，既存の観光航行のユースケースや船体に適合したバッテリシステムを構築することができた．

なお，MPP での運用をおこなった場合，ツアー２周ごとに１回のバッテリ交換が必要となる．この運用をおこなうにあたっては，バッテリ充電器を Fig. 2 内の「ふれあい広場乗船場」の整備小屋内に設置させてもらい，乗客の乗降時にバッテリ交換を実施してもらうこととした．

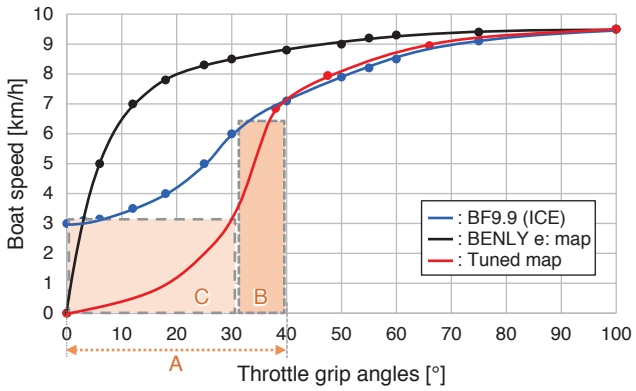


Fig. 14　Boat behavior at each throttle position



Fig. 15　Battery box shape

4．実証実験結果

以上の新操作系と出力マップを実装した電動船外機を遊覧船へ搭載し，船頭に操船していただきフィーリング評価をおこなった．Fig. 16 のように，加速感，応答性については，モータの出力特性によって ICE 船外機以上の性能を得られ，スロットル操作性，制動性については今回の仕様構築によって ICE 船外機以上の評価を得られた．

電動化による新価値として，以下２点が挙げられる．

遊覧船の船頭の目線ではプロペラへの異物絡みつきの検知と除去のしやすさが挙げられる．

「堀川めぐり」の航路には夏季に藻が発生する．定期的に藻刈りを行っているものの全ては刈りつくせないため，Fig. 17 のようにプロペラに絡み動力性能の低下やエネルギ消費の増加に影響を及ぼす．電動船外機は，手腕振動が小さくなったため，藻が絡んだ際のプロペラのアンバランスにより発生するわずかな手腕振動の変化を感じ取れ，それによって藻の絡みを察知し，迅速かつ容易にプロペラ回転方向を逆転することで藻を取り除くことが可能となった．

遊覧船に乗る人全体で目線を広げると，音に関しより高い価値があることが分かった．

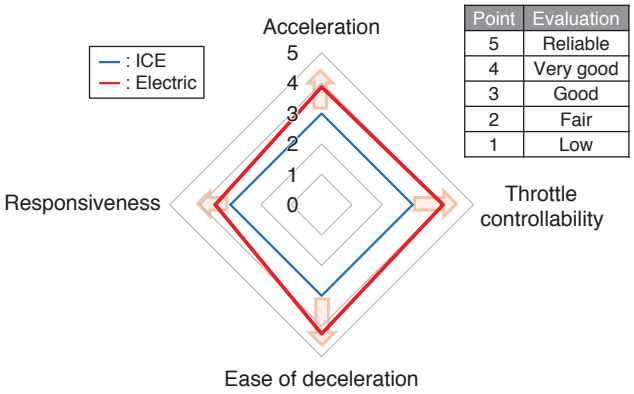


Fig. 16　Comparison of drivability between ICE onboard motor and electric motor

遊覧コースに静音区間が設定されている背景から，エンジンからモータに変わることで音による周囲環境への影響を低減できると考えていた．遊覧中の船内では，船頭からお客様へのガイド，お客様から船頭への質問，といった相互にコミュニケーションを必要とする場面がある．船頭はICE船外機の音によって，お客様からの質問が聞き取れず，エンジン回転数を落として聞き返さなければならないといったやり取りが発生することがあった．

音の低減によって船頭のガイドもよく聞き取れ，船頭とのコミュニケーションも円滑に取れることで，「より一層遊覧船が楽しめた」といった遊覧船ならではの提供価値が得られた．



Fig. 17　Tangled algae around propeller

5．まとめ

以下により，ICE船外機よりも容易に操作でき，既存の観光航行のユースケースや船体に適合した船外機システムを構築した．

（1）プロペラ回転方向を簡単に切り替えられる操作系により停船操作が容易になった結果，時速5 km時の制動距離を従来操作系と比較し30%短縮した．

（2）速度調整機能のチューニングは実際に操船する船頭の使い方を反映することで，極低速･巡航速度で操作しやすい設定とした．

（3）運航頻度が高く耐水性が求められる観光遊覧船に対して，動力用電源にMPPを用いバッテリBOX形状の適正化によって，短時間での交換と雨水等の被水対応を両立し，ユースケースを満足する性能を得られた．

あとがき

既に「堀川めぐり」の船頭による操船で一般のお客様を乗せた試乗会を実施しており，多くの船頭，お客様からは「鳥のさえずり，航行中に水面をかき分ける水の音や，鳥や虫の鳴き声がよく聞こえるようになって，堀川めぐりがいつもより楽しく感じられる」といった静粛性への評価や，すべての操作を片手で完結できるとの評価をいただいている．

このような現場の声を間近で聞き，松江市の皆様と一緒に開発できたことはHondaのエンジニアとしても感慨深いものがある．

引き続き，長期的な電動化の価値の検証を行っていくとともに，今回の遊覧船以外のお客様に対する提供価値の検討も進めていきたいと考えている．

参考文献

（1）https://ww2.arb.ca.gov/news/carb-approves-updated-regulations-requiring-most-new-small-road-engines-be-zero-emission-2024,（参照 2024/07/17）
（2）https://www.torqeedo.com/en/,（参照 2024/08/09）
（3）https://global.yamaha-motor.com/jp/news/2020/0731/harmo.html,（参照 2024/08/09）
（4）https://www.honda.co.jp/marine/prototype-matsue/04/,（参照 2024/09/10）
（5）https://www.honda.co.jp/marine/prototype-matsue/01/,（参照 2024/12/05）
（6）https://www.matsue-horikawameguri.jp/language/en/course.html,（参照 2024/12/05）
（7）https://www.torqeedo.com/en/news-and-press/blog/blog-2021-10-15.html,（参照 2024/12/05）
（8）US20240317377A1
（9）US20240317078A1
(10) 特開 2024-49740

■著　者■


竹 重 隆 正


加 藤 健 太


日向野正麻

モーターサイクル用 Honda E-Clutch システムの開発

Development of Honda E-Clutch System for Motorcycles

小野 惇也[1] Junya ONO
竜崎 達也[1] Tatsuya RYUZAKI
内藤 正純[1] Masazumi NAITO

要　旨

マニュアルクラッチ操作無しで発進，変速，停止ができ，必要な際にはマニュアルクラッチ操作も可能な Honda E-Clutch システムを開発した．既存エンジンに対してクラッチアクチュエータを追加し，クラッチ自動制御を実現した．またエンジン側クラッチレバーを３分割構造とし，ライダーのマニュアルクラッチ操作を適切に検知することで，クラッチ自動制御とマニュアルクラッチ操作のスムーズな切り替えも可能とした．これによりこれまで通りのマニュアルクラッチ操作を楽しむこともでき，一方でクラッチ自動制御でよりスポーティに，より楽に走行することも可能となった．本システムは搭載にあたって車両への制約を少なくし，幅広い車両に適用できる構成とした．

ABSTRACT

We have developed the Honda E-Clutch system, which allows starting, gear shifting, and stopping without manually engaging or disengaging the clutch while permitting manual clutch operations when necessary. The clutch actuator added to the existing engine enables controlling the clutch automatically. With the three-split construction employed in the engine-side clutch lever and by the appropriate detection of rider's manual clutch operation, the system permits smooth change over from automatic to manual and vice versa. Equipped with the automatic clutch, the rider can now enjoy sportier and easier riding than before while maintaining an option of manual clutch operations. The system is configured to minimize restrictive factors in mounting the new system to the vehicle so that it is applicable to various types of motorcycles.

1．まえがき

近年 FUN モーターサイクル（趣味性の高いモーターサイクル）ではデュアルクラッチトランスミッション（DCT）やクイックシフターといったクラッチ操作が不要な駆動系システムが開発され，量産車に適用されている．DCT は二つの油圧自動制御クラッチと専用のトランスミッションの組み合わせによるオートマチックトランスミッション（AT）システムであり，クラッチ操作無しで発進，変速，停止が可能となっており，変速も自動で行われる．クイックシフターは通常のマニュアルトランスミッション（MT）の構成を活用し，発進，停止時にはクラッチ操作が必要なものの，エンジンの協調制御によりペダル操作のみで変速が可能となっている．これらのシステムにより，ライダーのクラッチレバー操作が減ることで，より楽に走行することができ，ライディングに集中し，よりスポーティに走行することもできるようになった．その結果これらのシステムはユーザーに受け入れられ，年々その適用が拡大してきている．

一方で，DCT のように自動制御でクラッチを緻密にコントロールするためには，クラッチの容量を正確に推定する必要があり，油圧を用いたシステム構成が一般的である．しかし油圧を用いたシステム構成では部品点数が増え，システムの搭載性に課題があった．また四輪車とは異なり，バンクやウィリーといった姿勢の自由度が高い二輪車では，クラッチをマニュアルで操作することで駆動力を瞬間的に意のままに調整し，車体姿勢をコントロールしたいという要望も根強く存在している．これに対し DCT の

[1] 本田技研工業株式会社
E-mail: junya_ono@jp.honda

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_5

ようにクラッチレバーそのものを廃してしまうシステムではこの要望に対応することができない．以上のことより，クラッチ自動制御とマニュアルクラッチ操作の両方が可能で，搭載性に優れたシステムが求められている．

これらに対して Honda E-Clutch システムは，搭載性に優れたクラッチアクチュエータの追加により，既存の MT の構成はそのままに，マニュアルクラッチ操作無しでの発進，変速，停止と，これまで通りのマニュアルクラッチ操作の両立を実現させた．本稿ではシステムの狙い，その構成と動作概要，そして動作を実現するためのクラッチ自動制御手法とマニュアルクラッチ操作とクラッチ自動制御の切り替え手法を紹介する．

2．開発の狙い

FUN モーターサイクルは単純な移動手段としてだけではなく，左手左足右手右足の操作，そして身体全体を使い，マシンと一体（人馬一体）となって走る，操る喜びがあると筆者達は考える．その中にはクラッチやシフトチェンジの操作の手間も醍醐味であり，面白さであるという価値観（MT の魅力）がある．その一方でライダーによっては，状況により「やりたくない操作」というものがある．例えば以下の操作が挙げられる．

・発進，停止時のエンジンストールや立ちごけが不安な状況でのクラッチ操作
・渋滞路や長距離移動で疲れた時のクラッチ操作
・減速時のシフトダウンで大きな車体挙動が発生しそうなときのクラッチ操作
・停車信号待ち時のギヤをニュートラルに入れる操作

これらの「やりたくない操作」はクラッチを自動制御化することで省くことができる．

さらにクラッチを自動制御化することで，ワインディングなどでのスポーツ走行時にはエキスパートライダー同等の緻密なクラッチコントロールにより，車体挙動を安定させることもできる．これによりライダーはスロットル，ブレーキ，シフト操作，車体のコントロールに集中することができ，よりスポーティに走行することができる．以上のことから，クラッチやシフトチェンジを自分で操作する MT の魅力は保ったまま，クラッチ自動制御の機能を追加することで，FUN モーターサイクルをより扱いやすくし，楽しい部分をさらに引き出すことが可能となる．

Honda E-Clutch は上記の要求を，既存エンジンに展開可能な形で，シンプルなシステム構成で実現した．本システムは初心者からベテランまで，幅広いライダーにワンランク上の走り（よりスポーティに，より楽に，よりフレキシブルに）を提供することを目指した，MT でできることは全てできる MT の上位互換のシステムである．Fig. 1 に，MT，クイックシフター，Honda E-Clutch，DCT におけるシステムごとの機能の差異を示す．

Honda E-Clutch は発進，停止時にマニュアルクラッチ操作が不要であり，ペダル操作のみで変速することができる．一方でクラッチレバーによるマニュアルクラッチ操作も可能となっている．

Simpler/Flexible
Complex/Inflexible

Clutch type / Operation	Single clutch			Dual clutch
	Conventional manual transmission	Quick shifter	E-Clutch	DCT
Start	Clutch lever and throttle operations 	Clutch lever and throttle operations 	Throttle operation only 	Throttle operation only 
Gear change	Clutch lever and shift pedal operations 	Shift pedal operation only 	Shift pedal operation only (Automatic clutch control) 	No operation needed (Automatic gear change / Voluntary operation possible)
Stop	Clutch lever and braking operations 	Clutch lever and braking operations 	Braking only 	Braking only 
Manual clutch control	Possible	Possible	Possible	No setting

Fig. 1　Drivetrain system types and operations

3．システム構成と動作概要

3.1. システム構成

FUN モーターサイクルにおいては，重量増加や車体全体のレイアウトへの影響を抑えながら，システムを構成する必要がある．そこで Fig. 2 に示すように，本システムは，ベースとなる MT 車両に対してクラッチ自動制御のためにクラッチアクチュエータとモータコントロールユニット（MCU）を追加した．またライダーのペダル操作を検出するためにクイックシフターと同様のシフトセンサをシフトチェンジペダルに組み込んだ．

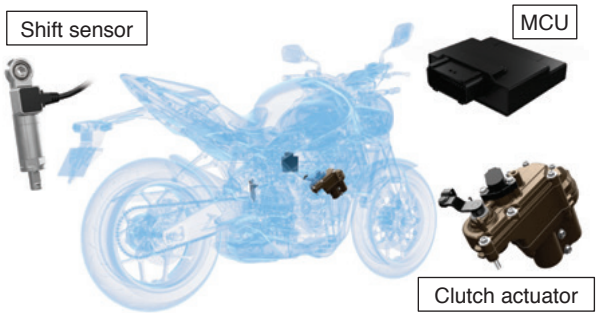
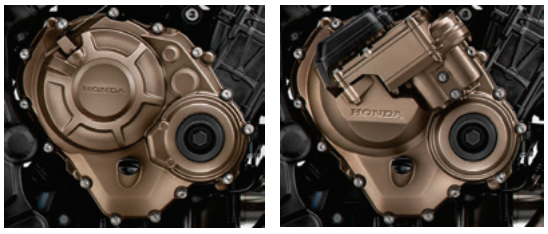


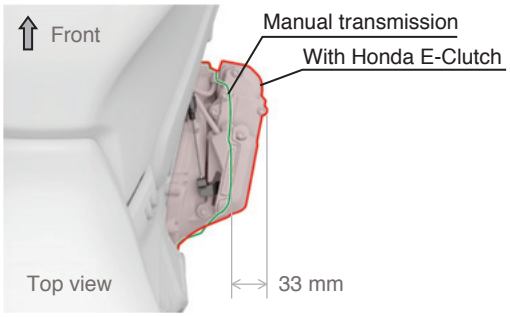
Fig. 2　Components layout

MT 仕様と Honda E-Clutch 仕様の外観と張り出しの違いを Fig. 3 に示す．外観からも分かるように，クラッチアクチュエータは車体右側のエンジンカバーに搭載し，モータでダイレクトにクラッチを制御する構成とした．これによりエンジン部品で大きく変更が必要なのはエンジンカバーのみとすることができた．

クラッチアクチュエータの搭載にあたっては，Fig. 4 のようにクラッチアクチュエータのケースを 3 階層化して減速比を高める構成とした．さらに一つの大きなモータではなく，小さなモータを二つ使用することで，出力を確保しながらクラッチアクチュエータを幅狭化し，Fig. 3(c) に示すように右側への張り出し量を 33 mm に抑えることができた[1]．

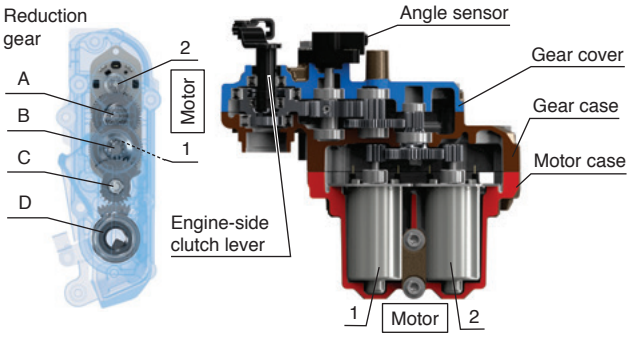


(a) MT　(b) With Honda E-Clutch



(c) Comparative image of engine side cover protruding to the right

Fig. 3　Appearance and size comparison between MT and with Honda E-Clutch



(a) Upper view　(b) Cross-sectional view

Fig. 4　Internal structure of clutch actuator

さらに本システムでは，クラッチアクチュエータの自動制御とライダーのマニュアルクラッチ操作を切り替える必要がある．

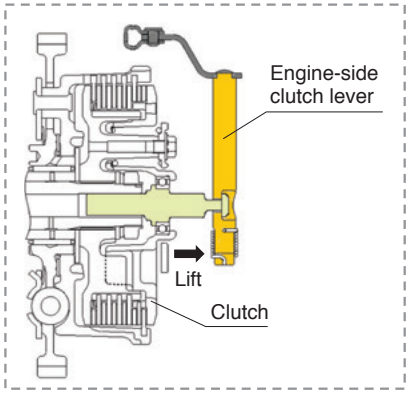
通常のマニュアルクラッチの断面図を Fig. 5(a) に示す．ライダーがクラッチレバーを握ると，クラッチケーブルを通じてエンジン側クラッチレバーが回転し，クラッチをリフトすることで駆動力の伝達が切断される構成となっている．

これに対し，Honda E-Clutch ではクラッチアクチュエータのエンジン側クラッチレバーを Fig. 5(b) に示すような 3 分割構造とし，クラッチ切断方向にオーバーライド可能な構成とすることで前述の要求を実現した[2]．

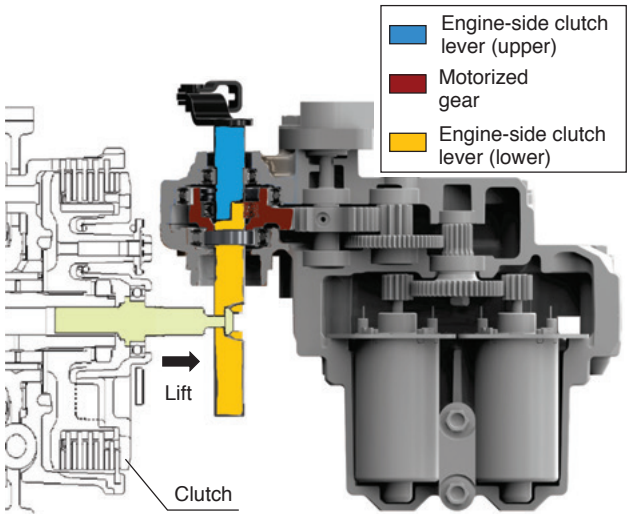
Fig. 5(b) に示すように左手のクラッチレバーはクラッチケーブルにより水色のエンジン側クラッチレバー（上側）に接続される．ライダーがクラッチレバーを操作すると，Fig. 6(a) に示すようにエンジン側クラッチレバーが回転し，黄色のエンジン側クラッチレバー（下側）が駆動され，クラッチが操作される．

クラッチ自動制御の際は，Fig. 6(b) に示すようにモータによって茶色のモータ駆動ギヤが作動し，黄色のエンジン側クラッチレバー（下側）が駆動され，クラッチが制御される．またクラッチ自動制御中にライダーがクラッチレバー

を操作すると，Fig. 6(c) のようにモータ駆動ギヤを追い越す形でエンジン側クラッチレバー（上側）がエンジン側クラッチレバー（下側）を駆動し，マニュアルのクラッチ操作にオーバーライドすることができる．この構成によりシステム失陥時も通常のマニュアル車として走行可能となっている．



(a) Conventional engine-side clutch lever mechanism



(b) Honda E-Clutch lifter

Fig. 5　Engine-side three-split clutch lever mechanism

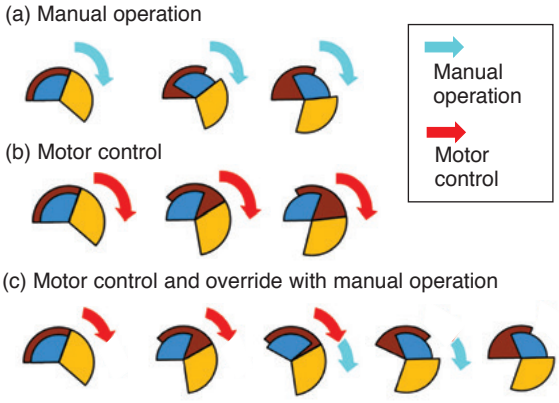


Fig. 6　Cross-sectional view of clutch lever operation diagram for engine-side three-split clutch lever

Fig. 7 に示すようにクラッチアクチュエータは，専用のコントローラ MCU で制御される．MCU は FI ECU から車両の情報を CAN 通信で受け取り，車両の状態とクラッチアクチュエータの状態（アングルセンサーとモータの電流）から状況に応じて適切なクラッチ制御を実施する．

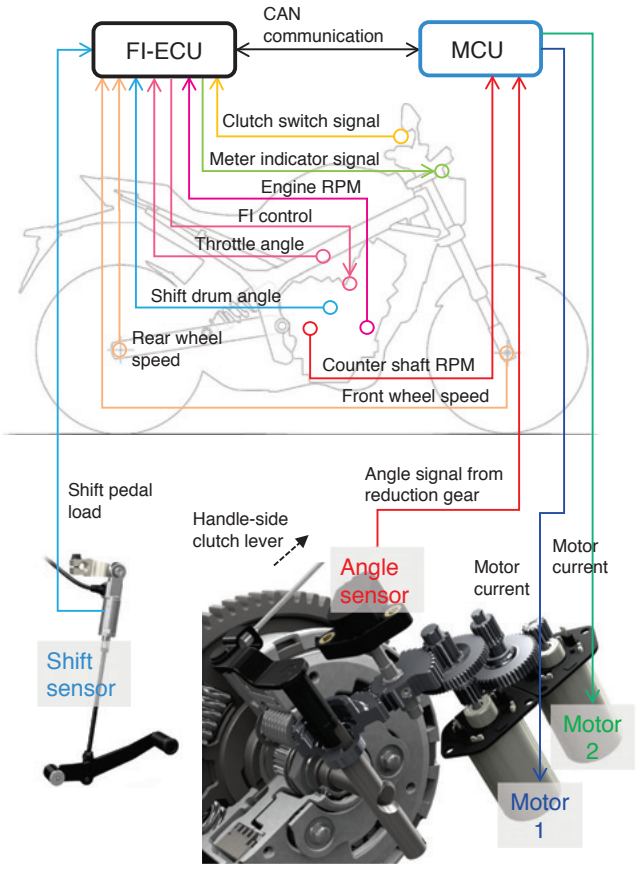


Fig. 7　System configuration overview

上記のシステム構成により，既存エンジンに追加することが可能な搭載性に優れたシステムとした．

また Honda E-Clutch のシステム重量は 2 kg であり，DCT のシステム重量 10 kg と比較し 1/5 である．

3.2. システムで実現している動作概要

Honda E-Clutch システムが有効（システム ON 状態）時のシステムの動作概要を Fig. 8 に示す．ギヤポジションがニュートラルにある状態でキーを ON にして，エンジンを始動させると Fig. 8 の緑枠のクラッチ自動制御状態となる．この状態ではライダーはクラッチレバー操作無しで発進，変速，停止が可能である．クラッチ自動制御が有効かどうかは，Fig. 8 の右下に示すように，メータに搭載されたクラッチ自動制御インジケータの点灯により確認することができる．

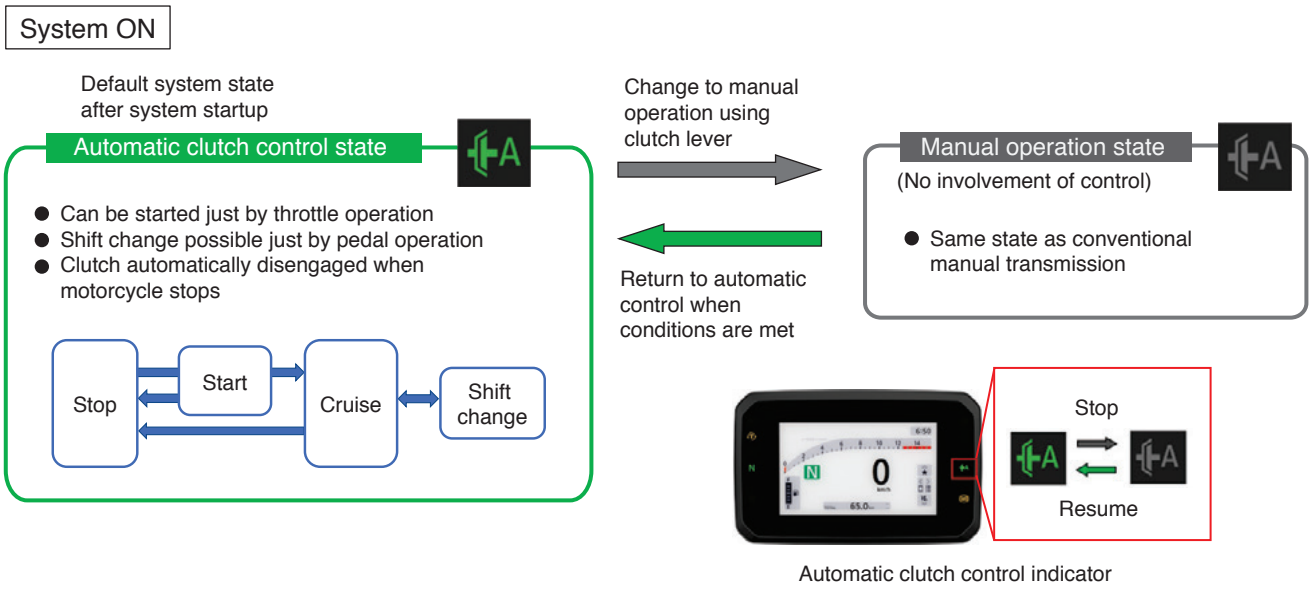


Fig. 8　Operation overview at System ON

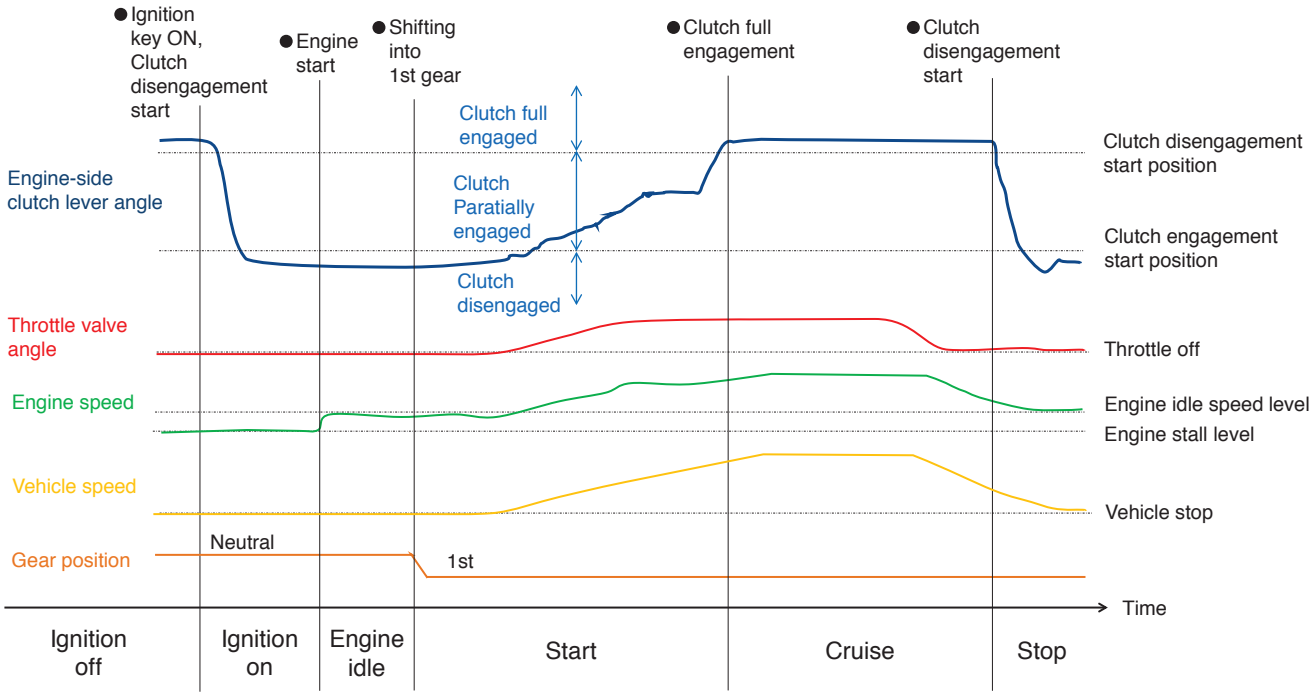
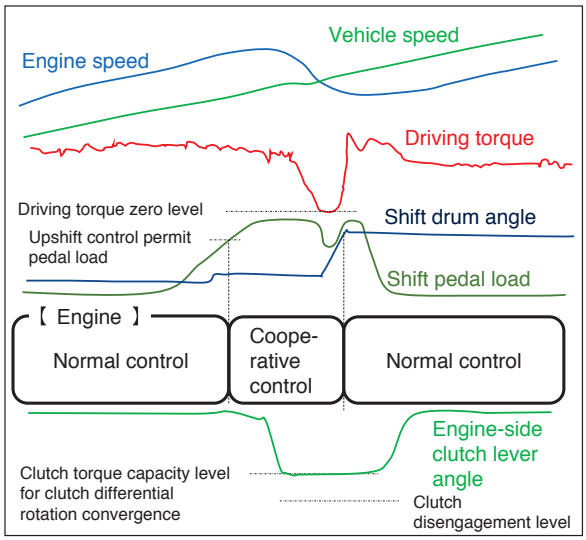


Fig. 9　Transition image of each operation state at ignition on, engine start, starting, cruising, and stopping

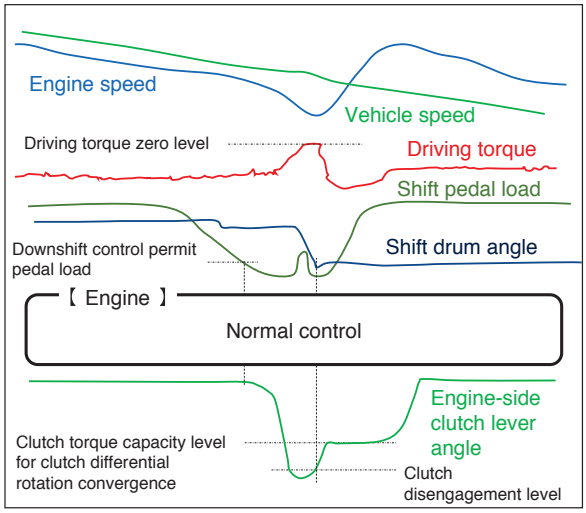
クラッチ自動制御による発進，クルーズ，停止時の車両の各状態の推移を Fig. 9 のグラフに示す．

ニュートラルでエンジン始動状態から，ペダルのみを操作し 1 速にシフトチェンジした後，ライダーはスロットル，ブレーキを操作し，クラッチレバー操作無しでの発進，停止が可能となる．ライダーの操作に対して発進，停止時の車体挙動がリニアになるように，スロットルやエンジン回転数，車速といった車両の状態に応じて，Fig. 9 の青線のエンジン側クラッチレバーの角度変化に示すようにシステムが適切にクラッチ制御を行う．

次に，クラッチレバー操作無しでペダル操作のみでの変速を行った際の車両の各状態推移を，加速中のシフトアップ，減速中のシフトダウンを例に Fig. 10 に示す．



(a) Upshifting during acceleration



(b) Downshifting during deceleration

Fig. 10 Operating image at UP, DOWN shifting

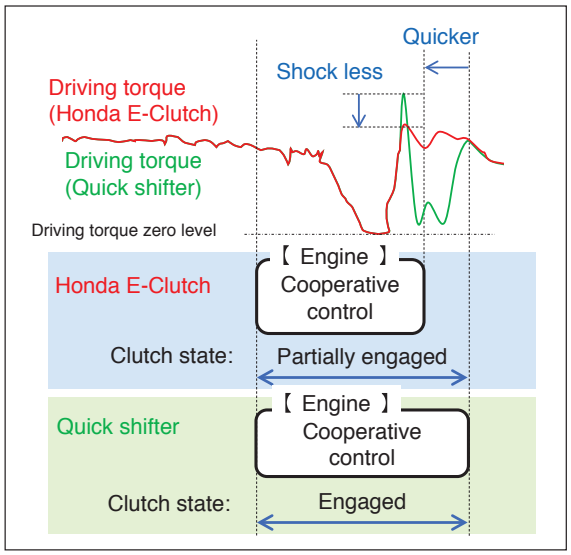


Fig. 11 Comparison of driving force between Honda E-Clutch and quick shifter during upshift

加速中のシフトアップでは，クイックシフターと同様にライダーのペダル操作をシフトセンサにより検出し，システムがエンジンの点火と噴射を適切に制御することで瞬時に駆動力を抜いて次段ギヤに変速させる．通常のクイックシフターでは Fig. 11 に示すように，次段ギヤへ変速する際にトランスミッションの差回転により衝撃トルクが発生する．一方で本システムでは次段ギヤへの変速前には，クラッチをエンジン出力トルクに応じた半クラッチ制御にすることで変速の際に発生するトルクを低減し，クイックシフターよりもスムーズな変速を実現した．減速中のシフトダウンでは，シフトアップと同様にシフトセンサによりライダーのペダル操作を検出し，システムがクラッチを切断し，次段ギヤに変速したことを確認して，適切な半クラッチ制御で差回転を収束させ，変速を完了させる．

続いてライダーがクラッチをマニュアルで操作する場合について説明する．エンジン始動状態でギヤが入っている状態から，クラッチレバーを握ると，システムはライダーのクラッチマニュアル介入操作（クラッチ自動制御が有効な状態でのライダーによるクラッチへのマニュアル介入操作）を検出し，クラッチ自動制御を一時的に停止する．ライダーのクラッチマニュアル介入操作の実施有無は，車両の状態に応じてクラッチスイッチやアクチュエータのモータ負荷から適宜システムが判断する．クラッチ自動制御が停止されるとメータのインジケータが消灯し，車両は従来の MT と同じ状態（マニュアル介入状態）となる．その状態からクラッチレバーの操作を終了し，後述するような所定の条件を満たすか，ギヤポジションをニュートラルとすることでクラッチ自動制御状態に復帰することができる．仮に停車時に誤ってクラッチレバーを握り，マニュアル介入状態になってしまっても，ギヤポジションをニュートラルとすることでクラッチ自動制御状態に復帰することができる．上記によりクラッチレバー操作無しでのスムーズな発進，変速，停止，そして特別な追加操作無しでのクラッチのマニュアル操作及びその後のクラッチ自動制御への復帰を実現している．また Fig. 12 に示すように，メータ上で Honda E-Clutch システムを無効（システム OFF 状態）にすることで，車両を通常の MT 車と同じ状態とすることもできる．

これらの機能によってライダーはよりスポーティに，より楽に，そしてよりフレキシブルにモーターサイクルを楽しむことができる．

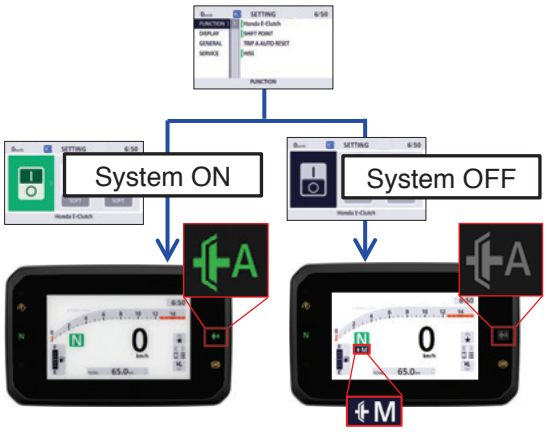


Fig. 12　System ON and System OFF

4．クラッチ自動制御手法

モータダイレクト駆動でのクラッチ自動制御には，クラッチの状態に応じた適切な制御が必要となる．また様々な部品のばらつきを踏まえて，クラッチ自動制御を成立させる必要がある．この二つの要素を踏まえたクラッチ制御により，クラッチレバー操作無しでのスムーズな発進，変速，停止が可能となった．以下に，クラッチ自動制御の手法に関して説明する．

4.1. クラッチの状態に応じた角度制御と電流制御

クラッチアクチュエータでクラッチを制御する際に，クラッチは以下の三つの状態に分けられる．

（1）クラッチ締結状態
（2）半クラッチ状態
（3）クラッチ切断状態

Fig. 13 は，それぞれの状態に対するエンジン側クラッチレバー角度（制御角度）とエンジン側クラッチレバー荷重（制御荷重），クラッチ伝達トルクの関係を示す．

クラッチ締結状態とクラッチ切断状態においては，クラッチ伝達トルクは一定であり，またエンジン側クラッチレバー荷重変化が少ない領域である．このことからクラッチ締結状態，クラッチ切断状態では，クラッチレバー角度による位置制御が適している．一方で半クラッチ状態ではクラッチレバー荷重の変化が大きく，クラッチ伝達トルクはクラッチレバーの荷重に反比例して決まるため，クラッチレバー荷重による荷重制御が適している．本システムではアクチュエータのリダクションギヤ角度をアングルセンサにより計測することで，クラッチレバーの角度を算出できる．そこでリダクションギヤの角度を用いた位置制御（角度フィードバック制御）を適用した．またアクチュエータのモータ電流を計測することで，クラッチレバー荷重を推定できる．このことより荷重制御にはモータ電流を用いた電流フィードバック制御を適用する構成とした．さらにクラッチ切断開始位置，クラッチ接続開始位置といったクラッチの状態の切り替わりポイントで，上記の位置制御と荷重制御を切り替えることで，クラッチコントロール性能を高めた[3]．

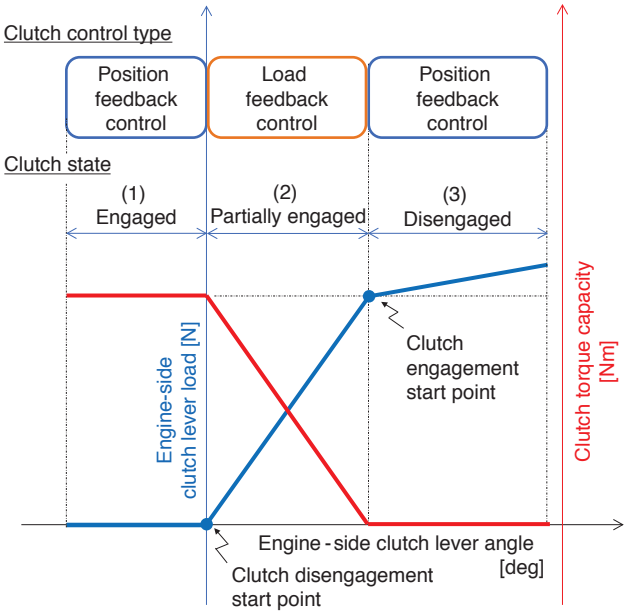


Fig. 13　Relationship between clutch state, engine-side clutch lever angle, and engine-side clutch lever load

4.2. 構成部品のばらつきを考慮したクラッチ制御

システムはクラッチ切断開始位置やクラッチ接続開始位置，その各ポイントでのモータ電流（クラッチレバー荷重）を踏まえてエンジン側クラッチレバーの位置と荷重の制御を行う必要がある．ただしそれらの位置や電流値は，各部品のばらつきや電装部品の特性により車両ごとに異なる．適切なクラッチ制御を実現するためには，車両ごとのばらつきを補正する必要がある．そこで本システムでは，車両毎にクラッチ切断開始位置，クラッチ接続開始位置，モータ無負荷作動フリクション電流，クラッチ接続開始位置電流を MCU が学習することでばらつきを補正した．クラッチ切断開始位置は，クラッチ締結状態のクラッチレバー角度領域から，切断方向にアクチュエータを作動させた際の負荷変化による作動速度変化を検出し，学習する．またクラッチ接続開始位置はクラッチ切断状態のクラッチレバー角度領域から締結方向にアクチュエータを作動させた際の負荷変化による作動速度変化を検出し，学習する．

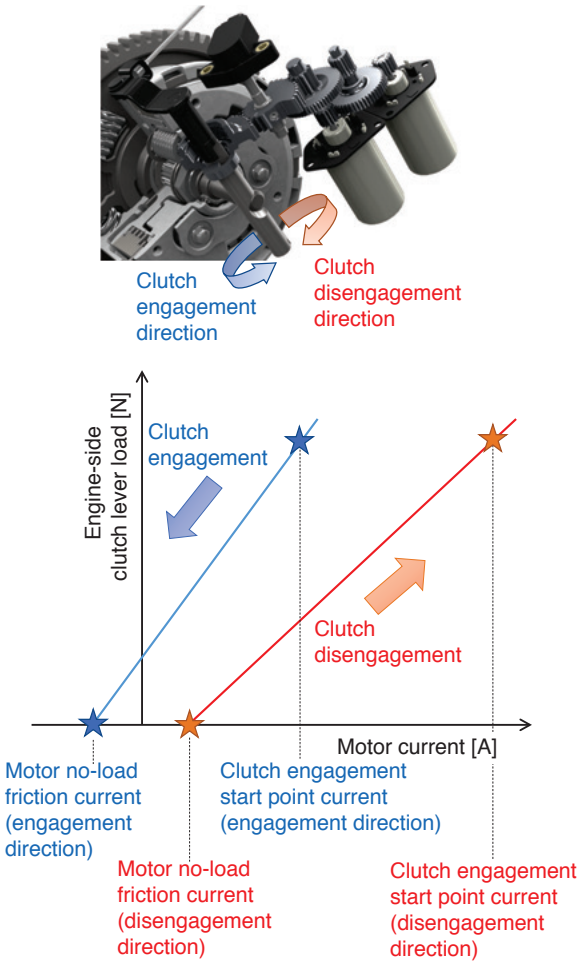


Fig. 14 Relationship between engine-side cultch lever load and motor current

続いて Fig. 14 に，エンジン側クラッチレバー荷重とモータ電流の関係を示す．

エンジン側クラッチレバー荷重とモータ電流の関係は，単純な 1 対 1 ではなく，アクチュエータの作動方向に応じて異なる．これはモータのブラシのフリクションやリダクションギヤ部に生じるフリクションの向きが，作動方向により異なるためである．そこで，アクチュエータを作動させた際の各位置での電流値から，モータ無負荷作動フリクション電流とクラッチ接続開始位置電流を学習させた．学習した電流値は接続，切断の作動方向も踏まえた値である[(4),(5)]．

上記の各位置，各電流値を学習することで，量産車で生じる構成部品の様々なばらつきを補正し，モータダイレクト駆動でのクラッチ自動制御を実現した．

5．クラッチマニュアル介入操作判断とクラッチ自動制御状態への復帰

クラッチマニュアル介入操作によるクラッチ自動制御の一時的な停止には，確実なクラッチ操作の判断が必要となる．またクラッチマニュアル介入状態からクラッチ自動制御状態へ戻る際には，ライダーに違和感を与えないタイミングでの復帰が必要となる．システムが車両の状態やライダーのクラッチレバー操作を適切に判断することで，ライダーはクラッチ自動制御とマニュアルクラッチ操作を自由に選べるようになった．以下にそれぞれの判断方法を説明する．

5.1. クラッチマニュアル介入操作判断

クラッチマニュアル介入操作時にクラッチ自動制御を一時的に停止するが，操作の判断を誤るとクラッチが急に接続する可能性がある．確実なクラッチマニュアル介入操作の判断により，ライダー左手への急なクラッチレバー反力の変化や，車体挙動変化が出ないようにする必要がある．Fig. 15 に各状態の判断の手法を示す．(1) クラッチ締結状態では，クラッチアクチュエータはクラッチを操作している状態ではないため，クラッチ制御を一時停止してもクラッチの状態に変化は無く，車体挙動にも影響は無い．そこで (1) の状態では，左手のクラッチレバーに付いているクラッチスイッチにて操作の有無を判断する．(2) 半クラッチ状態，(3) クラッチ切断状態では，クラッチアクチュエータによりクラッチを制御している状態となるため，より確実なクラッチマニュアル介入操作の判断が必要となる．クラッチ自動制御中のクラッチマニュアル介入操作の判断は，エンジン側のクラッチレバー荷重の負荷が人間の左手に移ったかをクラッチ制御角度（リダクションギヤ角度）とモータ電流の変化から判断する．

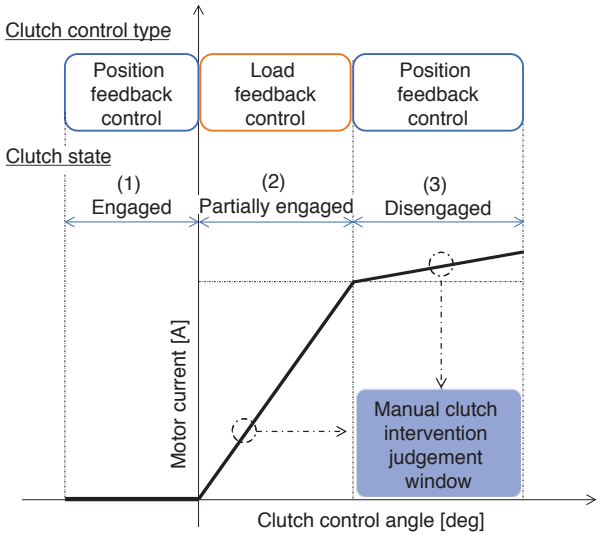


Fig. 15 Manual intervention operation judgment during automatic clutch control

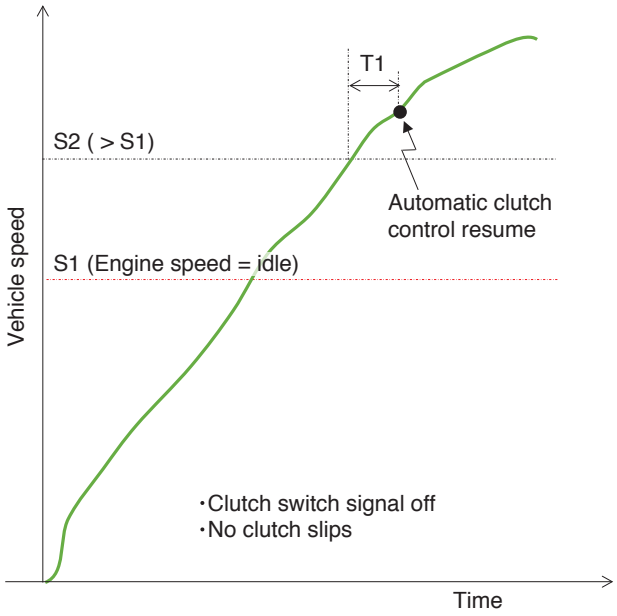
(2) 半クラッチ状態，(3) クラッチ切断状態においてクラッチマニュアル介入操作を行うと，それまでアクチュエータが制御していた荷重が人間の左手に移る．これに

より，アクチュエータのクラッチ制御荷重が小さくなり，Fig. 15 のマニュアル介入判断ウィンドウの中に移行する．確実にマニュアル介入判断ウィンドウに入ったことを確認した上でクラッチマニュアル介入操作が行われていると判断する．各状態に応じた判断手法を取ることで，急なクラッチレバーの反力変化や，車体挙動変化といった違和感をライダーに与えないクラッチマニュアル介入操作判断を実現した[6]．

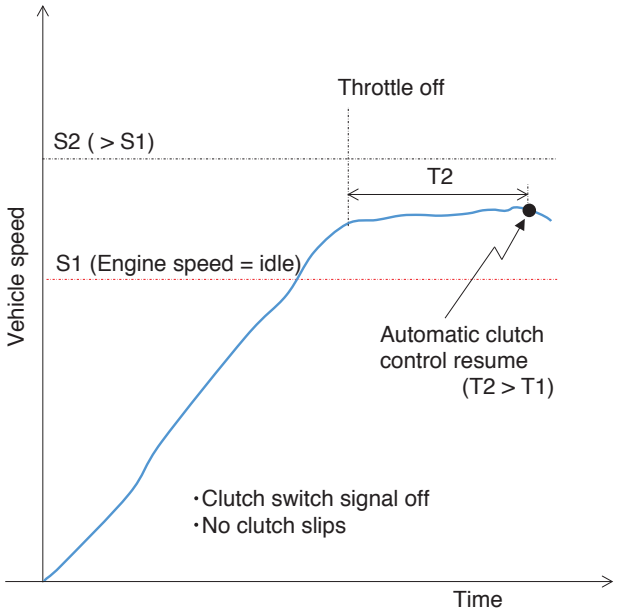
5.2. クラッチマニュアル介入操作状態からのクラッチ自動制御状態への復帰

ライダーがクラッチマニュアル介入操作を終えた際には，適切なタイミングでクラッチ自動制御状態に復帰させる必要がある．クラッチ自動制御状態に復帰した際，車両の状態（車速やエンジン回転数）によってはクラッチ切断動作を行う可能性がある．そこで Fig. 16 のように車両の状態に応じ，三つのパターンでクラッチ自動制御に復帰する構成とした．

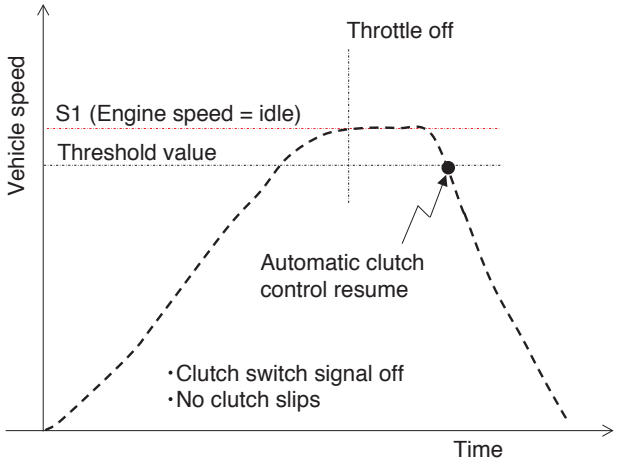
Fig. 16(a) に示すパターン A はマニュアルクラッチ操作終了後，車速がアイドル車速を超え，十分に高い状態である（アイドル車速とは，クラッチ接続状態でエンジン回転数がアイドル回転の時の車速である）．この状態ではクラッチ自動制御状態でもクラッチは締結状態となる．このことより車体挙動に変化は生じないため，短時間でクラッチ自動制御状態に復帰させる．Fig. 16(b) に示すパターン B は，クラッチ自動制御状態ではクラッチを切断するような車速の状態であるが，この状態で即座にクラッチ自動制御状態に復帰すると，クラッチが切れ，急な駆動力変化により車体挙動が乱れ，ライダーの意図に反する可能性がある．そこでパターン A と比べて長い時間経過を待ち，十分車体の状態が落ち着いた後にクラッチ自動制御状態に復帰させる．Fig. 16(c) に示すパターン C はパターン B で自動制御復帰を待っている状態で，マニュアルクラッチ操作無しでブレーキ操作をした際の，エンジンストール回避アシストのためのクラッチ自動制御状態復帰パターンである．なお，ライダーがクラッチレバー操作中で，車両の速度が Fig. 16(d) に示すようにアイドル車速に到達しない場合は，クラッチ自動制御状態には復帰しない．このように，マニュアルクラッチ操作を終えた後に，車両の状態に応じて適切なタイミングでクラッチ自動制御状態に復帰する構成とすることで，違和感の無い使い勝手と車両挙動を実現した[7]．



(a) Pattern A



(b) Pattern B



(c) Pattern C

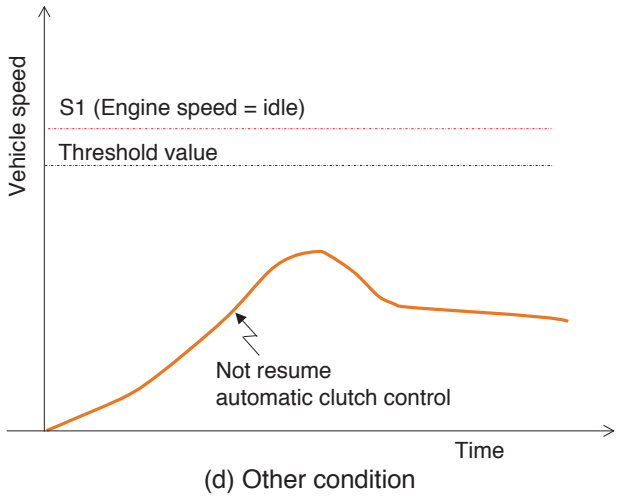


Fig. 16 Resume pattern of clutch automatic control state depending on vehicle state

6．結論

ベースになるMT車両に，クラッチアクチュエータとMCU，シフトセンサを追加することでHonda E-Clutchシステムを構成した．クラッチの状態に応じた制御の切り替えと，様々な部品ばらつきを学習機能により自動的に調整することで，適切なクラッチ制御を実現した．またクラッチの状態に応じたクラッチマニュアル介入操作判断と，操作終了後の車両状態に応じたクラッチ自動制御状態の復帰により，違和感のない使い勝手を実現した．

本システムによりクラッチレバー操作無しに発進，変速，停止が可能となり，ライダーはよりライディングに集中できるようになった．その一方で，ライダーが望む場合には，これまでの通りのマニュアルクラッチ操作も可能となっている．これにより個々のライダーが培ってきた，ライディングの楽しみ方の変更を強いることなく，クラッチ自動制御による，よりスポーティな走行も楽しめるようになった．さらにシチュエーションによっては，「やりたくない操作」を省くことができ，より楽に，というATのメリットを持ち合わせることを実現した．

また本システムは搭載するベース車への制約が少なく既存エンジンにも追加可能な構成となっており，システム追加による重量増加を2 kgとし，完成車への影響も小さいため，幅広い車両に適用することができる．より多くのお客様にFUNモーターサイクルを楽しんで頂けるように，今後この技術をFUNモーターサイクルのスタンダードとなるように展開していきたい．将来的には本技術をさらに進化発展させ，モーターサイクル全般のさらなる普及，発展に寄与していきたい．

参考文献

（1）WO2022/209708,A(2022)
（2）WO2022/209678,A(2022)
（3）WO2023/182104,A(2023)
（4）WO2022/209711,A(2022)
（5）WO2022/209632,A(2022)
（6）WO2022/209634,A(2022)
（7）WO2024/201798,A(2024)

■著　者■


小野惇也


竜﨑達也


内藤正純

リチウムイオン電池の耐久性能下限予測技術への拡散過程モデルの活用

Technology for Lower Limit Prediction of Lithium-ion Batteries Performance after Degradation Employing Diffusion Process Model

大道　馨[1]　Kaoru OMICHI
鈴木琴音[1]　Kotone SUZUKI
長塚豪己[2]　Hideki NAGATSUKA
安田道洋[3]　Michihiro YASUDA

要　旨

リチウムイオン電池を搭載した製品の耐久テスト後の性能を保証するため，ばらつきを含めた下限値を予測するモデルを構築した．劣化の予測には，電池の耐久性劣化トレンドに乗算したランダム効果と時間に比例してばらつきが拡大する拡散過程の２種類の確率変数をモデル式に含めた．パラメータ最適化には，マルコフ連鎖モンテカルロ法を援用した最尤法を用いた．その結果，従来 12 か月分の実測耐久データで推測していた劣化の下限値を４か月分のモデル学習で導出できるようになった．さらに，予測された耐久テスト後の代表性能値と耐久中の性能ばらつきの二つの情報が必要だった下限性能予測を，提案モデルを用いることにより，一つの情報でできることを示した．

ABSTRACT

A model for predicting lower limit performance including variation terms was constructed to help achieve performance after durability testing of products equipped with lithium-ion batteries. To predict degradation, the model formula includes two types of stochastic variables: random effects multiplied by the battery durability degradation trend term, and a diffusion process in which variation expands proportionally with time. Parameter optimization was conducted by the maximum likelihood method aided by the Markov Chain Monte Carlo method. As a result, the lower limit performance after degradation, which had conventionally been predicted based on 12 months of measured durability data, was successfully computed based on only four months of durability data. It was also demonstrated that prediction of lower limit performance, which previously required the two pieces of information of the predicted typical performance values after durability testing and performance variation during durability, could be achieved with just one piece of information by using the proposed model.

1．まえがき

リチウムイオン電池（LiB）は高いエネルギー密度と出力密度を有しており，昨今は小型電子機器から大型モビリティへも用途が拡大している[(1)-(5)]．Hybrid Electric Vehicle や Battery Electric Vehicle などの電動車用 LiB には 10 年以上の長期間にわたり，多様な地域や用途を考慮して耐久性を保証することが求められる[(6)]．様々な使い方での耐久性を検証するには，実機を用いて個別のテストをおこなうよりも，シミュレーションモデルを活用する方が効率的になる[(7), (8)]．著者らは過去に，短期間で効率的に電池性能の劣化を予測できるモデルの構築をおこなった．その検討では，負荷に応じた電池の劣化速度をモデルに学習させ，累積した劣化量を加算して予測することで，

[1] 先進パワーユニット・エネルギー研究所
E-mail: kaoru_omichi@jp.honda
[2] 中央大学，博士（工学）
[3] 株式会社テクノプロ　テクノプロ・デザイン社

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_6

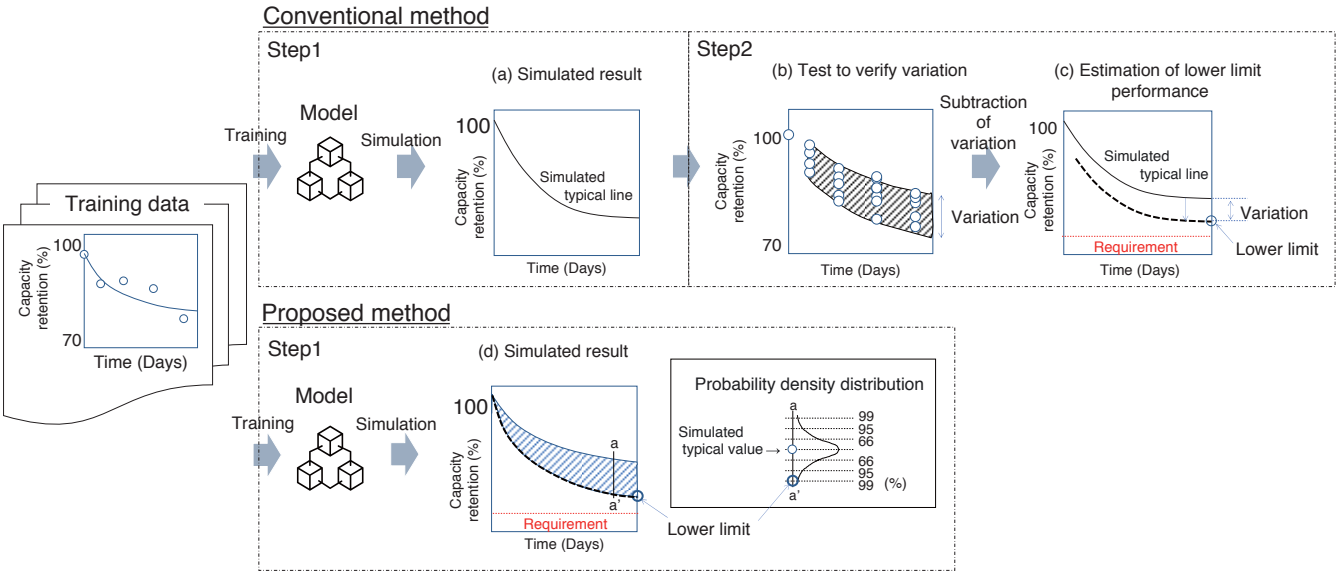


Fig. 1 Estimation of lower limit performance by conventional and proposed methods

非線形な劣化挙動を予測できることがわかっている[9],[10]. ただし, 予測できるのは劣化後の平均的な性能値のみであった. 一方で, 欧州バッテリー規則ではライフタイムにわたる最低性能値要件が定められており[6], LiB の性能の下限値を開発段階で検証する必要がある. Fig. 1(a) のモデルによる予測値から Fig. 1(b) のばらつく量を Fig. 1(c) のように差し引くと下限値を推定することができる. すなわち, 劣化予測モデルによる予測と, 下限値の推定の 2 ステップによりおこなう. 二つのステップでそれぞれ耐久テストが必要であるため, この手法はコストがかかる上に時間を要する. 本検討では, 上記課題を解決するために Fig. 1(d) に示すようなモデルを用いて 1 ステップで効率的におこなうことを目的とした.

この目的達成のためには, 劣化予測モデル式そのものに耐久テスト後の性能ばらつきを適切に表現する項を導入する必要がある. 本検討では, LiB の耐久テスト後の性能がばらつく要因に基づいて複数のランダム項を取り入れた劣化予測モデル式を採用する. この手法にはランダム項の導入に伴ってパラメータ数が増えるため, パラメータが局所最適に陥ることと, モデル学習に必要な耐久テスト期間が不明という課題があり, その解決を図った.

2. 下限値予測モデルの提案

2.1. 性能がばらつく要因考察

ばらつきを表現するランダム項を定めるため, 耐久テスト後の電池残存容量を分析した. 電池の種類と耐久テスト条件は単一とし, 複数個数の電池に対して耐久テストを実施して, 容量の経時変化を測定した. 供試体には 5 Ah クラスの円筒型電池を用いた. 雰囲気温度 55℃, 4.1 V から 3.4 V までを充放電した際の 16 個の電池の劣化挙動を Fig. 2 に示す. 各実線は容量の推移を, 白抜きプロットは各計測時点の容量維持率の分散を示す. 分散が時間と共に増大する傾向があることから, 電池によって劣化速度に個体ばらつきが存在する. また, 単一個体の電池であっても測定タイミングによって容量維持率が上下していることから経過時間によらない測定ばらつきが存在する. LiB の劣化挙動には以上二つのばらつきが存在する.

ばらついた性能を元にモデルを構築するため, モデルが持つパラメータも確率的なばらつきを内包するようになる. 例として, 25, 40, 55℃ において, 観測された劣化速度を Fig. 3 に示す. この劣化挙動を学習した劣化予測モデルの信頼度 95% の信頼区間は, 灰色でハッチングされた範囲になる. すなわち, ばらついたデータを学習したモデルが出力する結果もまた確率的ばらつきを含んでいる. これを以後, モデル誤差と表現する.

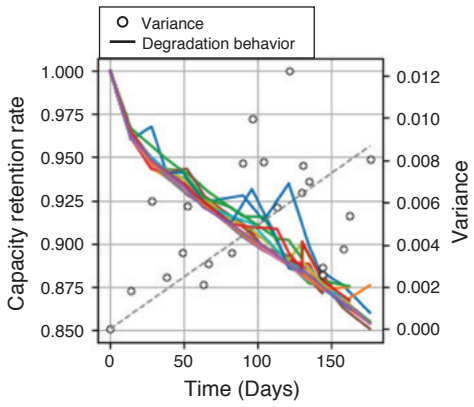


Fig. 2 Degradation behavior of LiB at same loading condition

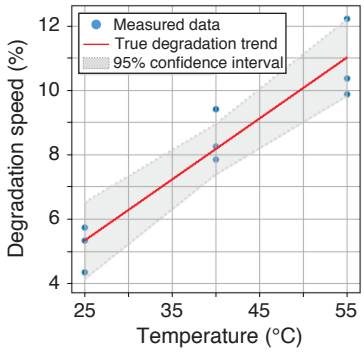


Fig. 3　Observed degradation speed and confidence interval

2.2. 下限値予測モデルの立式

LiB の耐久テスト中の測定データが持つ測定ばらつき，耐久性能のばらつき，モデル化の際のモデル誤差の三つを劣化予測モデル式へ反映させる．下限値予測に用いるモデルは，劣化の傾向を示す確定的なトレンド項と，ばらつく因子を表現するランダム項で構成する．トレンド項，並びにランダム項を，実際の現象に合うようにモデルを立式する．学習データ量が少なくても，外挿条件の場合にモデル誤差が過大とならないようにできるパラメトリックモデルとした．モデルの基本式を式（1）に示す．

$$dX(t) = \mu(\eta(t), \boldsymbol{\theta}_0)d\eta(t) \qquad (1)$$

where

$$\eta(t) = t^b$$

ここで，$X(t)$ は時刻 t における容量劣化率（1 −容量維持率 (%)），$\boldsymbol{\theta}_0$ は劣化速度が持つパラメータ，$\mu(t,\boldsymbol{\theta}_0)$ はトレンド項 $\Lambda(t,\boldsymbol{\theta}_0)$ の t に関する偏導関数 $(\mu(t,\boldsymbol{\theta}_0) = \frac{\partial}{\partial t}\Lambda(t,\boldsymbol{\theta}_0))$，$\eta(t)$ は時間 t の尺度を変換する関数[12]，b は尺度変換係数である．

ばらつきを表すランダム項は，平均 0，分散 σ_ϵ^2（平均，分散共に時間に対して一定）の正規分布に従う確率変数 ϵ とする（Table 1）．

時間と共に徐々に拡大する挙動を表現する耐久ばらつきについては，拡散過程を採用した[11], [12]．Table 1 における $W(t)$ は標準ウィーナー過程，σ は拡散係数である．

トレンド項に積算するばらつき項であるモデル誤差については，平均 μ_λ，分散 σ_λ^2（平均，分散共に時間に対して一定）の正規分布に従う確率変数 λ として，性能を表す式のトレンド項に積算する．なお，モデルにおいて確定変数を確率変数に置き換える目的で導入された変数はランダム効果と一般的に呼ばれる[13]．なお，以上の三つのランダム項はそれぞれ他のランダム項に対し独立であると仮定している．

上記のばらつき項の組み込み方の組合せに基づき，複数の候補モデルを Table 2 に示す．

本検討では，3 種類の誤差の有無の組み合わせより合計 $2^3 - 1 = 7$ 種類のモデル式を立式した．ただし，測定ばらつき，劣化ばらつきを含まずにモデル誤差のみ含むデータは存在しないため候補モデル式から除外し，M1 から M6 まで六つのモデルを検討した．なお，M1 は測定誤差だけが考慮されている従来モデルであり，これは最小二乗法を用いるモデルと同義である．

トレンド項は，劣化速度を表す変数 $a(\theta_0,t)$ を使って式（2）のように表される．

$$\Lambda(\eta(t), \theta_0) = a(\theta_0, t) \times \eta(t) \qquad (2)$$

$a(\theta_0,t)$ は負荷の変数 $SOC(t)$，$Temperature(t)$，$\Delta SOC(t)$，$I\text{-}charge(t)$，$I\text{-}discharge(t)$ とパラメータ $(a_0, a_1, a_2, \cdots b)$ で構成される劣化速度を示す変数である．Table 3 に示すように，各劣化因子に対して一次線形の要因効果を持つ線形モデル (i) (ii)，単純線形には該当しない二次線形モデル (iii) (iv)，要因間の交互作用項を有する交互作用モデル (ii) (iv) を立式した．B は電池の種類により固有の適値を用いる[10]．

Table 1　Three types of degradation formulas with variation terms

Items	Independence of degradation trends	Time dependence of variation	Formula
Measurement variation	Yes	No	$X(t) = \Lambda(\eta(t), \theta_0) + \varepsilon$ $\epsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$
Interindividual variation	Yes	Yes	$dX(t) = \mu(\eta(t), \theta)d\eta(t) + \sigma_B dW(\eta(t))$ $W(\eta(t)) \sim N(0, \eta(t)))$
Model variation	No	Yes	$dX(t) = \lambda \times \mu(\eta(t), \theta)d\eta(t)$ $\lambda \sim N(0, \sigma_\lambda^2)$

Table 2　Six types of model formulas with combinations of variation terms

Model No.	Measure-ment variation	Inter-individual variation	SIM variation	Model formula
M1	○			$X(t) = \Lambda(\eta(t), \boldsymbol{\theta}_0) + \boldsymbol{\varepsilon}$
M2		○		$dX(t) = \mu(\eta(t), \boldsymbol{\theta}_0)d\eta(t) + \boldsymbol{\sigma_B dW(\eta(t))}$
M3		○	○	$dX(t) = \boldsymbol{\lambda} \times \mu(\eta(t), \boldsymbol{\theta}_0)d\eta(t) + \boldsymbol{\sigma_B dW(\eta(t))}$
M4	○	○		$X(t) = Y(t) + \boldsymbol{\epsilon}$, $dY(t) = \mu(\eta(t), \boldsymbol{\theta}_0)d\eta(t) + \boldsymbol{\sigma_B dW(\eta(t))}$
M5	○	○	○	$X(t) = Y(t) + \boldsymbol{\epsilon}$, $dY(t) = \boldsymbol{\lambda} \times \mu(\eta(t), \boldsymbol{\theta}_0)d\eta(t) + \boldsymbol{\sigma_B dW(\eta(t))}$
M6	○		○	$X(t) = Y(t) + \boldsymbol{\epsilon}$, $dY(t) = \boldsymbol{\lambda} \times \mu(\eta(t), \boldsymbol{\theta}_0)d\eta(t)$

$\eta(t) = t^b, t > 0, b > 0, \lambda \sim N(\mu_\lambda, \sigma_\lambda^2), \mu_\lambda > 0, \sigma_\lambda > 0, W(\eta(t)) \sim N(0, \eta(t)), \epsilon \sim N(0, \sigma_\epsilon^2), \sigma_\epsilon > 0$

Table 3　List of trend model formulas

No.	Model	Formula	Number of coefficients
(i)	Linear	$\sum_{i=1}^{5} a_i \times X_i + a_0$	6
(ii)	Linear + interaction	$\sum_{i=1}^{5} a_i \times X_i + \sum\sum_{1 \le i < j \le 5} a_{i,j} \times X_i \times X_j + a_0$	16
(iii)	Quadratic	$\sum_{i=1}^{5} a_{i,i} \times X_i^2 + \sum_{i=1}^{5} a_i \times X_i + a_0$	11
(iv)	Quadratic + interaction	$\sum_{i=2}^{5} a_{i,i} \times X_i^2 + \sum_{i=1}^{5} a_i \times X_i +$ $\sum\sum_{1 \le i < j \le 5} a_{i,j} \times X_i \times X_j + a_0$	21

X_1: SOC; X_2: Temperature; X_3: ΔSOC; X_4: I-charge; X_5: I-discharge

3．パラメータ最適化プロセスの構築

3.1. パラメータ最適化手法

モデル式に含まれるトレンド項のパラメータ（a_0, a_1, a_2, …b），ばらつき項のパラメータ（σ_ϵ, σ_B, σ_λ, μ_λ）を実際のテストデータに基づいて最適化する．非線形パラメータが含まれることから，対数尤度関数（Log-Likelihood: LL）を目的変数とした最尤法によりパラメータの推定をおこなった．ここで，時刻 $t_{i,j}$ におけるセル i の性能値を表す確率過程を $X_i(t_{i,j})$ とすると，提案モデル M2 から M6 の中でパラメータ数が最大となるモデル式の M5 の対数尤度関数は式（3）で与えられる．最適化計算において局所解に陥ることを避けるため，マルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC）を援用して最尤推定値を求めた[14), (15)]．具体的には，分散を大きくとった正規分布を各パラメータの事前分布として設定した．MCMC 法には，パラメータ数が多いときにも有効に働くことで知られるハミルトニアンモンテカルロ法（HMC）を採用し，最大事後確率推定（maximum a posteriori: MAP）をおこなうことで，最尤推定値を求めた．

$$l(\theta) = -\frac{\sum_{i=1}^{n} m_i}{2}\ln(2\pi) - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\ln|\Sigma_i| - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}(\Delta X_i - \mu_\lambda \Delta\Lambda_i(\theta_0))^T \Sigma_i^{-1}(\Delta X_i - \mu_\lambda \Delta\Lambda_i(\theta_0)) \quad (3)$$

However,

$$\{\theta = (\theta_0,\ b,\ \mu_\lambda,\ \sigma_\lambda^2,\ \sigma_B^2,\ \sigma_\epsilon^2),$$

$$\mu_\lambda \in R,$$

$$\sigma_\lambda > 0,$$
$$\sigma_B^2 > 0,$$
$$\sigma_\epsilon^2 > 0,$$

$$\Sigma_i = \sigma_\lambda^2 \Delta\Lambda_i(\theta_0)\Delta\Lambda_i(\theta_0)^T + \Omega_i,$$

$$\Omega_i = \sigma_B^2 \times diag(\Delta\eta_i) + \sigma_\epsilon^2 F,$$

$$F = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 2 \end{pmatrix}$$

$\Delta X = (\Delta X_1, \cdots, \Delta X_n)^T$,
$\Delta X_i = (\Delta X_{i,1}, \cdots, \Delta X_{i,m_i})^T$,
$\Delta X_{i,j} = (X_i(t_{i,j}) - X_i(t_{i,j-1}))$,
$X_i(t_{i,j})$ は，セル i の時刻 $t_{i,j}$ における劣化量

$\Delta\Lambda_i(\theta_0) = (\Delta\Lambda_{i,1}(\theta_0), \cdots, \Delta\Lambda_{i,m_i}(\theta_0))'$,

$\Delta\Lambda_{i,j}(\theta_0) = a(\theta_0, t_{i,j})\{\eta(t_{i,j}) - \eta(t_{i,j-1})\}$,
$a(\theta_0, t_{i,j})$は，セル i の時刻 $t_{i,j}$ における劣化加速係数
$\Delta\eta_i = (\Delta\eta_{i,1}, \cdots, \Delta\eta_{i,m_i})'$,
$\Delta\eta_{i,j} = \eta(t_{i,j}) - \eta(t_{i,j-1}) = t_{i,j}^b - t_{i,j-1}^b$
$t_{i,j}$ ：セル i の j 番目に，劣化量が観測された時刻．$1 \le j \le m_i$，$1 \le i \le j$ }

3.2. モデル式の選び方

トレンド式，ばらつきモデル式を選択する際には，学習データに対する赤池情報量規準（Akaike's Information Criterion: AIC）により決定する．AIC は学習データのみに過適合する事象を防ぎつつ，最適なモデルが選択できる指標として一般的に用いられている．AIC は最適化の際に目的変数として用いた LL の最終値とモデル内のパラメータ数（k）から式（4）を用いて算出する．

$$AIC = -2LL + 2k \quad (4)$$
k:パラメータ数

3.3. 性能下限値の予測

$\Delta X_{i,1:m_i}$ が与えられた下での $\Delta X_{i,1:m_i+1}$ の分布が以下の式（5）で得られる．

$$\Delta X_{i,\ m_i+1} | \Delta X_{i,\ 1:m_i} \sim N(\mu_{m_i+1|m_i},\ \sigma^2_{m_i+1|m_i}), \quad (5)$$

However,

$$\{\mu_{m_i+1|m_i} = \mu_\lambda \Delta\Lambda_{i,\,m_i+1}(\theta_0) + \omega'_{i,1}\Sigma^{-1}_{i,1:m_i}(\Delta X_{i,1:m_i} - \mu_\lambda \Delta\Lambda_{i,1:m_i}(\theta_0))$$
$$\sigma^2_{m_i+1|m_i} = \sigma^2_{i,m_i+1} - \omega'_{i,1}\Sigma^{-1}_{i,1:m_i}\omega_{i,1},$$
$$\omega_i = (0,\ \cdots, 0, -\sigma_\varepsilon^2)',\ \ (m_i \text{ 次元ベクトル}),$$
$$\boldsymbol{\Sigma}_{i,1:m_i} = \sigma_\lambda^2 \Delta\Lambda_{i,1:m_i}(\theta_0)\Delta\Lambda_{i,1:m}(\theta_0)' + \Omega_{i,1:m},$$
$$\boldsymbol{\Omega}_{i,1:m_i} = \sigma_B^2 diag(\Delta\eta_{i,1:m_i}) + \sigma_\epsilon^2 \boldsymbol{F}_{obs},$$

$$F_{obs} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 2 \end{pmatrix},$$

$(m_i \times m_i$ 行列$)$,

$$\Sigma_i^{-1} = \Omega^{-1}_{i,1:m_i} - \frac{\sigma_\lambda^2}{1 + \sigma_\lambda^2 \Delta\Lambda_{i,1:m_i}(\theta_0)'\Omega^{-1}_{i,1:m_i}\Delta\Lambda_{i,1:m_i}(\theta_0)} \times \Omega^{-1}_{i,1:m_i}\Delta\Lambda_{i,1m_i}(\theta_0)\Delta\Lambda_{i,1:m_i}(\theta_0)'\Omega^{-1}_{i,1:m_i},$$
$$\sigma^2_{i,m_i+1} = \sigma_\lambda^2 \Delta\Lambda_{i,m_i+1}(\theta_0)^2 + \sigma_B^2 \Delta\eta_{i,m_i+1} + 2\sigma_\epsilon^2 \}$$

よって，標準正規分布の上側 α% 点を z_α とするとき，個体番号 i のセルの，$\Delta X_{i,1:m_i}$ が与えられた下の，t_{i,m_i+1} 時点の劣化増分 $\Delta X_{i,j}$ の 100 ×（1 − α）% 信頼区間は，式（6）で与えられる．

$$\left[\hat{\mu}_{m_i+1|m_i} - \hat{\sigma}_{m_i+1|m_i} z_{\frac{\alpha}{2}},\ \hat{\mu}_{m_i+1|m_i} + \hat{\sigma}_{m_i+1|m_i} z_{\frac{\alpha}{2}}\right] \quad (6)$$

3.4. 学習 / 検証データの準備

複数の条件で耐久テストをおこなった試験結果をデータセットとした．試験には，4.5 Ah クラスの円筒型 LiB を供試体として用い，放置耐久テストとサイクル耐久テストの２種類のモードでテストをおこなった．学習用データのための放置耐久テストでは，SOC30，55，80，95% の４条

件と温度 25，45，50，65℃の 4 条件を総組み合わせでおこなう 16 条件の放置耐久テストを 4 か月間実施した．テスト期間中，1 週から 2 週のインターバルを設けて中間性能測定を実施し，1 条件当たり 10 点，トータルで 160 点のデータを取得した．サイクル耐久テストでは，サイクルさせるための制御因子である中心 SOC，変動 SOC 幅，温度，充電電流，放電電流の五つの因子を L27 の直行配列表に基づいて計画された 27 条件のテストを実施した．1 条件につき 4 か月で 10 ポイント，合計 270 点のデータポイントを確保した．検証データには，学習条件とは別の 38 条件を 12 か月にわたって耐久テストを実施し，合計 710 点のデータを取得した．

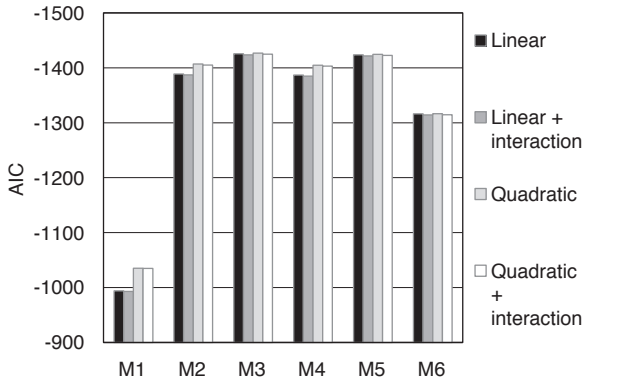
4．結果と考察

4.1. モデル選択結果

モデル選択についてトレンド項のモデル式 4 種類と，ばらつきモデル 6 種類（M1 から M6）から構成される合計 24 種類のモデル式に対し，パラメータ最適化を実施し，AIC を評価した．その結果を Fig. 4 に示す．

本検討で構築した M2 から M6 のいずれの場合においても従来モデルである M1 の AIC を下回る良い結果となった．従って，拡散過程，ランダム効果，またはその両方を用いたモデル式の方が実験データを適切に表現できている．

一般的にパラメータが多いモデル式ほど精度は上昇するが，パラメータの数が多すぎると汎化性能が落ちていく．汎化性能とモデル適合度のバランスが取れている，最も AIC が小さいモデルを選択するのが適切である．劣化予測モデル式では M3 が M5 よりパラメータ数が少ないが AIC は小さい．すなわち M3 の方がより少ないパラメータでテストで得られた電池性能劣化の本質をとらえている．ここでは 2 次（iii）のトレンド式と M3 のモデル式の組み合わせが実験データに最も適合した結果となった．従って，測定ばらつきを含む M4 から M6 は AIC の改善が見られないためモデルに考慮する必要が無いことがわかった．



			Variation models					
		Parameter	1	2	3	2	4	3
	Para-meter		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Model formula of trend term	4	(i) Linear	-993.8	-1388.7	-1425.5	-1386.7	-1423.5	-1316.3
	5	(ii) Linear+ interaction	-992.8	-1387	-1423.5	-1385	-1421.5	-1314.3
	6	(iii) Quadratic	-1035.3	-1406.8	-1426.7	-1404.8	-1424.6	-1316.6
	7	(iv) Quadratic+ interaction	-1034.8	-1405.1	-1424.7	-1403.1	-1422.6	-1314.7

Fig. 4　AIC results of each model

4.2. 選定モデルの信頼区間予測

前項で選択された予測モデル M3 のモデル式とそのパラメータを式（7）に示す．また，SOC100%，温度 45℃で 12 か月耐久テストした実測結果と，最適化された M3 の劣化予測モデルを用いて算出された信頼区間の予測結果の一例をプロットしたものを Fig. 5 に示す．灰色に示された信頼区間は各時間での 95% 信頼区間である．全域で実測プロットが 95% の信頼区間に収まっていることが確認でき，信頼区間の可視化が適切におこなえていることが確認できた．

$$dX(t) = \boldsymbol{\lambda} \times \mu(\eta(t), \boldsymbol{\theta}_0)d\eta(t) + \boldsymbol{\sigma_B dW(\eta(t))}$$
$$\mu(\eta(t), \boldsymbol{\theta}_0)d\eta(t) = (a_1 SOC + a_2 Temp + a_{11} SOC^2 + a_{22} Temp^2 + a_0)d\eta(t) \quad (7)$$
$$\eta(t) = t^b$$

Term	Value	Term	Value
a_0	-5.13	μ_λ	-1.7E-2
a_1	2.6	σ_λ	1.6E-3
a_2	-1.7E-3	σ_B	7.3E-4
a_{11}	-3.2E-1		
a_{22}	1.0E-4		
b	0.55		

4.3. データ分布の確認

本検討で作成したモデルの確からしさを確認するために，学習データよりも過分な量のデータ（放置劣化モードのデータ：24 条件，484 点，サイクル劣化モードのデータ：14 条件，226 点）に対して予測した性能分布が，実測した性能値の包含度合いを解析した．モデルで予測した代

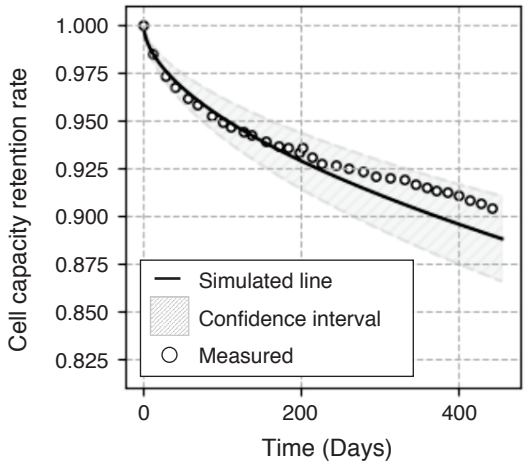


Fig. 5　Confidence interval and measured data points

表的な性能値と実測値の差分を，その時点の標準偏差で除したZ値を求め，ヒストグラム化した結果をFig. 6に示す．Fig. 6(a)は放置劣化モードで取得したデータに対するヒストグラム，Fig. 6(b)はサイクル劣化モードで取得したデータに対するヒストグラムである．Z値4，3，2はそれぞれ理論上99.9%，99.7%，95%を包含する信頼区間に当たる．本検討では放置モードのデータに対して，100%，99.0%，93.6%，サイクルモードのデータに対して，100%，98.7%，94.0%のデータを包含しており，おおむね理論上の値と一致する．よって，信頼度に基づく下限性能値を本モデルで算出可能であると考える．以後，実測データを99.7%信頼区間内に包含している百分率を被覆率と呼ぶ．

4.4. 学習期間の設定

モデル構築に必要な期間を設定するために，学習データの量と信頼区間の幅，および，被覆率について解析をおこなった．各モデルで予測した4か月時点での信頼区間の幅(%)と，99.7%信頼区間への包含率を算出した．その結果をFig. 7に示す．

16条件の放置耐久試験，及び，27条件のサイクル耐久試験の4か月分の学習データのうち，任意の月数までのデータを用いてモデルを構築した．被覆率の算出は，学習データとは異なる38条件，合計380点のデータに対しておこなった．

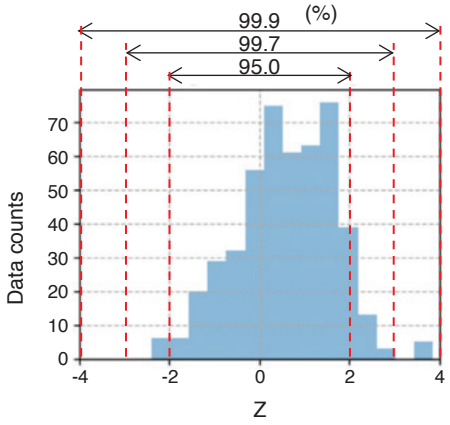
信頼区間幅は学習データの増大とともにわずかに大きくなる傾向がある．一方の被覆率は明確に高くなり，99.7%信頼区間の被覆率は，理論通り99.7%へ漸近して増大していく．このことは，学習データが多くなることによって信頼区間の結果には大きな影響を与えずに，予測された信頼区間の正確性が向上する効果があると推察される．本検討では，4か月の学習期間において99%以上の被覆率を示すことから，4か月以上の劣化挙動を学習することで信頼区間を予測できた．

4.5. 長期予測時の信頼区間

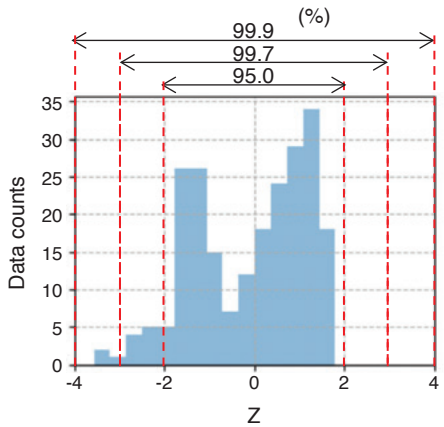
様々な使われ方をする電池性能の劣化予測は，予測期間が長くなるほど不確実性が高いため，信頼区間は広くなることが予想される．

10年分の信頼区間の長期予測をおこなった結果をFig. 8に示す．Fig. 8(a)が従来の測定ばらつきのみ考慮したモデルM1，Fig. 8(b)が今回提案した最適化された予測モデルM3である．

従来のモデルでは10年間にわたって均一の信頼区間が

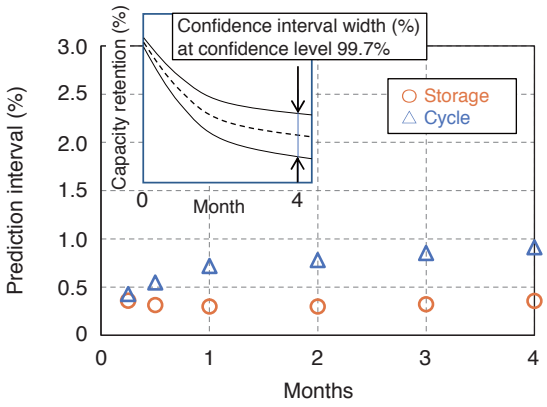


(a) Histogram of data obtained by storage mode degradation

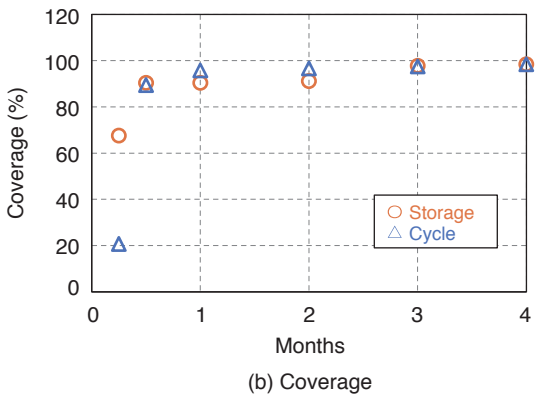


(b) Histogram of data obtained by cycle mode degradation

Fig. 6 Histograms of Z values after standardization



(a) Confidence interval width



(b) Coverage

Fig. 7 Confidence interval width and coverage of models trained with data over different periods

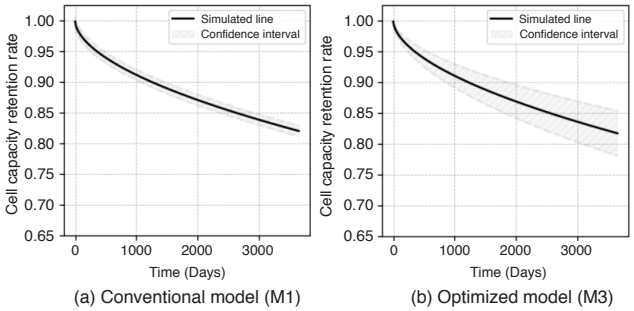


Fig. 8　Simulated confidence interval for 10 years

予測されているのに対し，本検討で最適化されたモデルでは経過時間とともに信頼区間が拡大していっており，当初の想定通りの結果が得られた．従来モデルである M1 に対して，本検討で提案したモデル M3 は，4 か月のテストデータに現れる経年ばらつきの増大を適切にモデル化できていることが確認できた．

5．結言

リチウムイオン電池の耐久テスト後の性能劣化の下限値をモデルによって効率的に予測するために，ランダム項を取り入れた劣化予測モデル式の検討で得た結論を以下にまとめる．

（1）LiB の耐久性劣化トレンドに乗算したランダム効果と，時間に比例してばらつきが拡大する拡散過程の 2 種類の確率変数を含むモデルによりリチウムイオン電池の耐久データのばらつきを表現できることがわかった．

（2）MCMC を援用した最尤推定法を用いることにより，局所解に陥ることなくモデルの最適化が可能である．

（3）最低 4 か月の耐久テスト結果を学習することで 12 か月間の信頼区間を適切に予測するモデルが構築できた．

参考文献

（1）(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構：二次電池技術開発ロードマップ 2013, (2013) https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejias/134/3/134_NL3_5/_pdf,（参照 2024/12/24）

（2）富士経済：エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望 2021- 電動自動車・車載電池分野編, p. 5-12, (2021)

（3）経済産業省：第 1 回蓄電池産業戦略検討官民協議会，資料 3 蓄電池産業の現状と課題について, (2021) https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/chikudenchi_sustainability/pdf/001_s01_00.pdf,（参照 2024/12/24）

（4）Dunn, B., Kamath, H., Tarascon, J.-M.: Electrical Energy storage for the Grid: A Battery of Choices, Science, Vol. 334, Issue 6058, p. 928-935, (2011), doi: 10.1126/science.1212741

（5）Schmuch, R., Wagner, R., Hörpel, G., Placke, T., Winter, M.: Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries, Nature Energy, Vol. 3, p. 267-278, (2018), doi: 10.1038/s41560-018-0107-2

（6）Final Regulation Order, Section 1962.8, Title 13, California Code of Regulations, (2022), https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/barcu/regact/2022/accii/acciifro1962.8.pdf,（参照 2024/12/24）

（7）Waag, W., Fleischer, C., Sauer, D. U.: Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles, Journal of Power Sources, Vol. 258, p. 321–339, (2014), doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.02.064

（8）LcGrasso, J., Ressler, G., Inguva, S.: MEETING CUSTOMER EXPECTATIONS: Life and Safety of Batteries in Hybrid and Electric Vehicles, SAE Technical Paper TP-AAB-AABC_US_2011_20, (2011)

（9）冨永由騎：電気性能発現メカニズムに基づいたリチウムイオン電池性能の劣化推定モデルの構築，電気化学，第 89 巻，2 号, p. 125-132, (2021), doi: 10.5796/denkikagaku.21-FE0014

(10) 大道馨，加我正，西村拓海，合田直弥，冨永由騎：直交表を用いたリチウムイオン電池性能の高効率な劣化予測モデル構築, Honda R&D Technical Review, Vol. 35, p. 31-37

(11) Xu, X., Tang, S., Yu, C., Xie, J., Han, X., Ouyang, M.: Remaining Useful Life Prediction of Lithium-ion Batteries Based on Wiener Process Under Time-Varying Temperature Condition, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 214, (2021), doi: 10.1016/j.ress.2021.107675

(12) Russell, M. B., King, E. M., Parrish, C. A., Wang, P.: Stochastic modeling for tracking and prediction of gradual and transient battery performance degradation, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 59, p. 663-674, (2021), doi: 10.1016/j.jmsy.2021.04.008

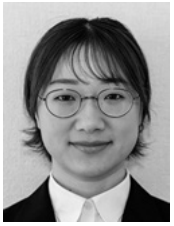
(13) Wu, C. F. J., Hamada, M. S.: Experiments: Planning, Analysis, and Optimization, John Wiley & Sons, Inc., (2021), doi: 10.1002/9781119470007

(14) Castillo, E., Hadi, A. S.: Modeling Lifetime Data with Application to Fatigue Models, Journal of the

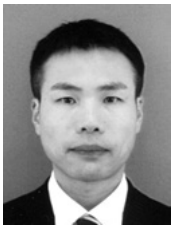
American Statistical Association, Vol. 90, Issue 431, p. 1041-1054, (1995), doi: 10.2307/2291341
(15) Jacquier, E., Johannes, M., Polson, N.: MCMC maximum likelihood for latent state models, Journal of Econometrics, Vol. 137, Issue 2, p. 615-640, (2007), doi: 10.1016/j.jeconom.2005.11.017

■著　者■


大 道　馨


鈴 木 琴 音


長 塚 豪 己


安 田 道 洋

月面での夜間電力供給を目的とした循環型再生エネルギーシステム

Lunar Night Power Supply: Circulative Renewable Energy System Capable of Continuous Power Generation

稲西諒亮[1] Ryosuke INANISHI
大門鋭刀[1] Hayato DAIMON
福間一教[1] Kazunori FUKUMA
河野匠[2] Takumi KAWANO
本多徹[1] Toru HONDA

要　旨

月面での夜間電力供給を目的とした循環型再生エネルギーシステムの開発を進めている．循環型再生エネルギーシステムの原理証明を目的として，打ち上げ想定機の約1/10の出力を持つシステムを構築し，月面３年相当の利用回数である39回のサイクル試験をおこなった．

燃料電池スタックでは純酸素供給による電解質膜の特性変化を考慮したMembrane electrode assembly設計をおこなった．水電解スタックでは高圧酸素下の難燃性や耐酸化性に優れる部品材料を選定した．電気化学式水素昇圧スタックでは流路構造を最適化することで反応面の滞留水の排出性を向上させた．また，安定的な水循環を成立させるための制御やシステムの構築をおこなった．

以上の取り組みによりサイクル試験を達成し，循環型再生エネルギーシステムのコンセプトである水循環による継続的な発電が可能であることが実証され，原理証明を完了した．

ABSTRACT

Development is proceeding on a circulative renewable energy system for lunar night power supply. For proof of principle of the circulative renewable energy system, a system with approximately 1/10 the power of the expected launch unit was constructed, and a cycle test with 39 cycles was conducted, which is equivalent to three years of lunar use.

In the fuel cell stack, the membrane electrode assembly was designed in consideration of changes in the electrolyte membrane properties due to pure oxygen supply. In the electrolysis cell stack, component materials were selected that have reliable flame-retardant properties and oxidation resistance under high-pressure oxygen. In the electrochemical hydrogen compressor stack, discharge of stagnant water on the reaction surface was enhanced by optimizing the flow path structure. In addition, controls and systems were constructed to establish stable water circulation.

Through these initiatives, a cycle test was achieved and demonstrated the feasibility of continuous power generation through water circulation, which is the concept of the circulative renewable energy system and completed the proof of principle.

1．まえがき

近年アルテミス計画をはじめとした月面開発の動きが活発になっている(1)．アルテミス計画では宇宙飛行士が月面に長期滞在し，持続的な探査活動を実施することを目指している．その中で，重量と比例して高額になる月面への輸送コストを抑えつつ，安定的な電力供給を実現する手法が求められている．我々は水素技術の新たな活用先として宇宙を見据えており，燃料電池システム(2)と高圧水電解システム(3)を組み合わせることで，月面での安定的な電力供給を可能にする循環型再生エネルギーシステム（Circulative Renewable Energy System: CREシステム）の開発を進めている．CREシステムは重量エネルギー密度が高く，輸送コスト及び大容量電力確保の観点でメリットを持つことから

[1] 先進パワーユニット・エネルギー研究所
E-mail: ryosuke_inanishi@jp.honda
[2] 先進技術研究所

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_7

今後のさらなる発展が期待されている．本稿では，我々が開発を進めているCREシステムの構成を紹介するとともに，コンセプトである，“水の循環による継続的な発電”の原理証明に向けて実施した取り組みについて紹介する．

2．CREシステム

2.1. CREシステムの意義

月面での長期滞在における重要な課題の一つが，夜間の安定的な電力供給である．月の自転周期は約27日であり，月面地域により異なるが，夜が8から14日間ほど連続する．ある一つのミッションでは無人探査ビークル等の調査機器の稼働のため約2 kWの電力が必要となり，14日夜が連続する場合，最大で672 kWhの電力量が必要であると想定している．この電力量を日中の太陽光発電により生み出し，夜間に利用できるよう保持する必要がある．一般的に考えられている手法として，夜間に使用する分の電力をバッテリーに蓄電する手法が挙げられる．しかし，質量の大きいバッテリーは，1 kgあたり1億円以上[4]とも言われる月面への輸送コストが高額になる．また，月面の低温環境下におけるバッテリー性能低下を防止するため，バッテリー自体を温める電力も蓄電する必要があり，重量の増加につながる．

開発中のCREシステムは，太陽光発電によって得られた電気で水を電気分解し，得られた水素と酸素を夜間に燃料電池スタック（Fuel cell stack: FCスタック）に供給して発電する．さらに発電時に生成される水を再び電気分解することにより，継続的に発電することをコンセプトとしている．Table 1に電力量672 kWhの発電を想定した，将来的なCREシステムの各コンポーネントの想定質量を示す．システム全体のトータル質量は1911 kg，重量エネルギー密度は352 Wh/kgとなる．また，Fig. 1に示すように，Liイオンバッテリーと比較しても重量エネルギー密度が大きく[5], [6]，輸送コスト低減と大容量電力確保の観点で優位性を持つと考えている．

2.2. CREシステムの概要

CREシステムの概要図をFig. 2に示す．まず水電解スタック（Electrolysis cell stack: ECスタック）に水が供給される．ECスタックでは水を電気分解し水素と酸素を生成する．ECスタックは，高圧水素製造を目的として開発したスマート水素ステーションを構成する高圧水電解スタック[7]と類似した構造を有し，高圧酸素を生成する．一方，生成された水素は水とともに移動し，水と分離した後に電気化学式水素昇圧スタック（Electrochemical hydrogen compressor stack: EHCスタック）に供給される．EHCスタック内で，電気化学反応により昇圧することで高圧水素を生成する．生成した高圧水素と高圧酸素はタンクに貯蔵しておき，電力が必要なタイミングでFCスタックに供給し，発電をおこなう．また，FCスタックでは反応時に水が生成されるため，これを再度ECスタックに供給し循環させることで，継続的な発電が可能となる．

Table 1 Expected mass of each component of CRE system

Items	Mass (kg)
CRE system	727
Storage system	814
Fuel water	370
Total mass	1911

2.3. CREシステムの開発課題

CREシステムを月面で使用する際の課題が二つある．

一つ目は宇宙空間での安定的な利用に向けた課題である．宇宙での安定的な利用のためには地上とは異なる様々な外的要因について対応する必要がある．例えば太陽など

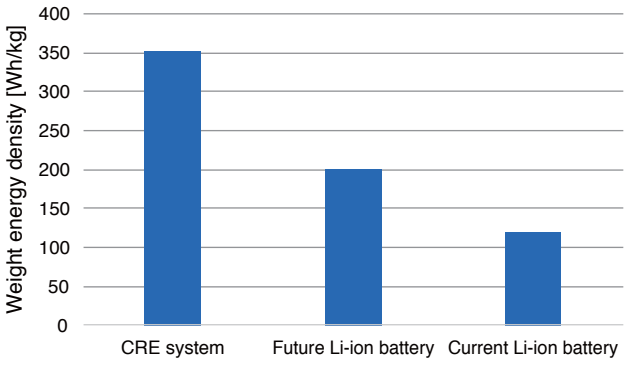


Fig. 1 Comparison of energy density between CRE system and Li-ion battery

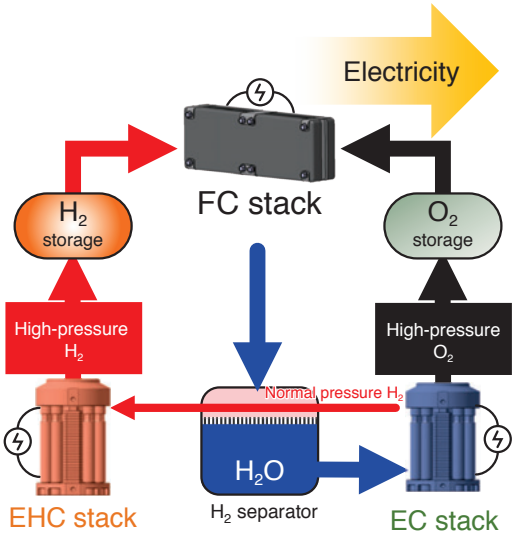


Fig. 2 Schematic diagram of CRE system

からの放射線による部品の経年変化や，低重力による流体挙動の変化，その他に月面輸送時の打ち上げ振動が挙げられる．

二つ目の課題は継続的な発電の実現である．水の循環による継続的な発電を実現するためには様々な工夫が必要となる．例えば，連結されたスタック同士のガス生成量と消費量のバランスをとる必要がある．生成量が大きくなると，内部での圧力上昇によって構成部品の変形が生じ，生成量が小さくなると，電圧上昇が生じる可能性がある．しかし，CRE システムは，資源が容易に得られない月面環境での利用を想定している．そのため流体をシステム外に排出しバランスをとる手法は，継続的な発電を実現できない．システム内での循環を滞りなくおこなうためのシステム構成や制御方法を実現する必要がある．

今回，二つ目に述べた，継続的な発電の実現のための課題について重点的に取り組んだ．取り組み内容と，コンセプトの原理証明のためにおこなった実証試験について紹介する．

3．原理証明に向けた取り組み

CRE システムを実際に月面で使用するまでに，大きく分けて三つの開発段階がある．第一段階では，CRE システムの原理証明をおこなう．第二段階では，打ち上げ想定機とほぼ同仕様のシステムを用いた月面相当環境での評価をおこなう．そして第三段階が，実際に宇宙へ打ち上げる実機での評価，及びミッション利用である．

今回，開発第一段階として，水の循環による継続的な発電の原理証明を目的とした実証試験をおこなった．実証試験では，実際の宇宙での運用を想定したサイクル数分の循環をおこない，継続的な発電が可能であることを確認した．

はじめに，実証試験に向けておこなった CRE システムを構成する各スタック仕様の変更，またシステム制御，及びシステム構成に関する取り組み内容を下記に示す．

3.1. ガス昇圧時の制御

Fig. 3 に示すように EC スタックで生成された水素は H_2 セパレータを経由し EHC スタックに供給される．H_2 セパレータの圧力が低下すると，供給水素量が減少することで反応速度が低下し，EHC スタックの運転電圧が上昇する．逆に H_2 セパレータの圧力が上昇すると部品に余分な負荷を与える．そのため，H_2 セパレータ内の圧力と目標圧力との差分を用いたフィードバック制御によって，EHC スタックの運転電流を決定し，反応水素量を調整している．

H_2 セパレータの圧力が低下する事象としては，供給水素に酸素が混入した場合がある．EHC スタック手前に設置された酸素除去装置内で水素と反応させて水に変換されるため，水素量が減少し，圧力が低下する．また H_2 セパレータの圧力が上昇する事象としては，EHC スタック内で高圧水素が電解質膜を透過して低圧側のガス流路へと移動する場合と，FC スタックで生成された水が，ストレージから H_2 セパレータへと供給される場合とがある．これらの場合においては EHC スタックの運転電流を制御することによって，H_2 セパレータ内の圧力が変動しても，部品強度保証範囲内，また運転電圧の上昇を防止しつつ運転することができる．

3.2. 安定した減圧を目的としたシステム構成

EC スタックと EHC スタックは，セル内部の電解質膜を介して片側は高圧側，もう一方は低圧側となり，差圧が生じる．そのためシステムを停止する際や，タンクが規定圧力まで達した際に，スタック内部品への負担を減らす目的で残存する高圧ガスを減圧する必要がある．しかし，外部

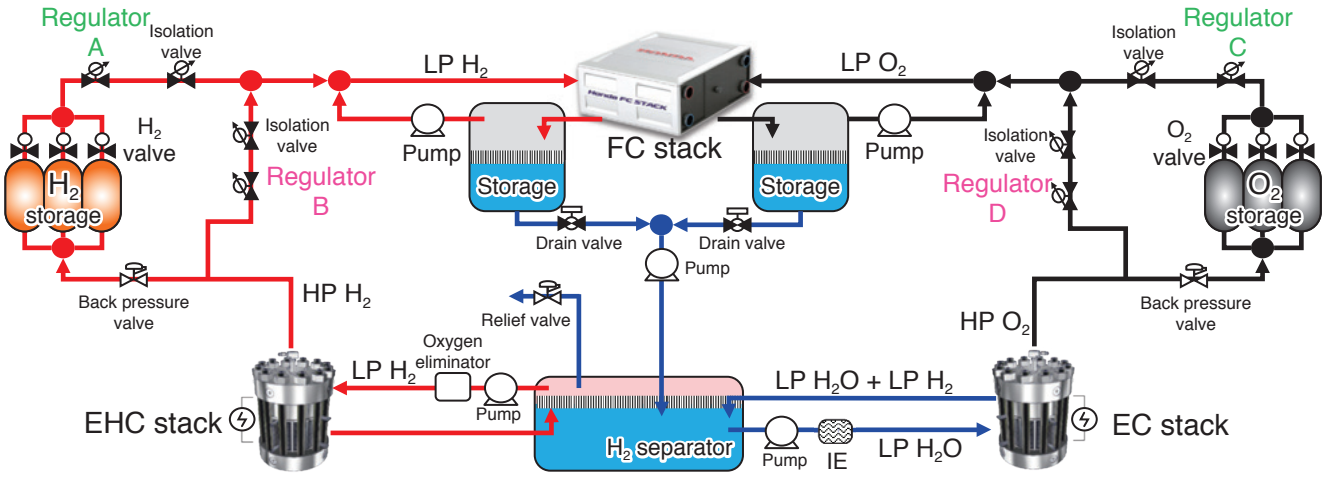


Fig. 3　CRE system configuration

に排出すると，生成した水素，酸素が無駄となる．本 CRE システムでは，余剰ガスを直接 FC スタックへと供給し，反応させることで減圧をおこなう．FC スタックでは，水素と酸素は 2：1 のモル比率で反応するが，各スタック内で残存するガスの量は状況によって異なる．そのため，EC，EHC スタックの両方が減圧完了する前にどちらか片方のスタックの減圧が完了するケースが想定される．

これに対応できるよう，Fig. 3 に示す減圧弁の設定圧力を決定した．EC，EHC スタックと FC スタックの間にある減圧弁 A，C の設定圧力は減圧完了圧力とした．また各タンクと FC スタックの間にある減圧弁 B，D の設定圧力は減圧完了圧力から数十 kPa 程度高い圧力に設定した．これにより EC，EHC スタック側に残存するガスが優先的に消費される．EC あるいは EHC スタックが減圧完了圧力に到達した場合，減圧圧力に到達した方のタンク内のガスの消費が開始される．そのため FC スタック内での反応を継続することができ，発電による EC，EHC 両スタックの減圧が可能となる．

3.3. FC スタック

FC スタックは電解質膜での下記に示す水素と酸素の電気化学反応により化学エネルギーを電気エネルギーに変換する装置であり，反応部を有するセルを複数積層した構造となっている．

陽極：$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

陰極：$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

実証試験で用いた FC スタックを Fig. 4 に示す．地上での使用を目的とした FC スタックでは，空気中に含まれる酸素を使用し発電をおこなうが，CRE システムにおいては，EC スタックにより製造された純酸素が供給される．純酸素による影響として，電解質膜の経時的な特性変化が空気に比べ顕著となる．純酸素による単体耐久試験を実施し，耐久後の膜分子量低下を定量化することで構築した電解質膜の劣化モデル[8]を活用し，実証試験における性能低下を見込んだ Membrane electrode assembly（MEA）設計をおこなった．

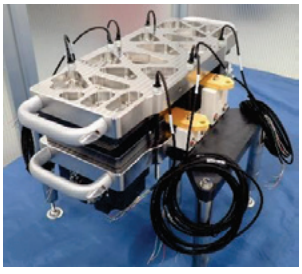


Fig. 4　FC stack

3.4. EC スタック

EC スタックは，水電解をおこない，高圧酸素と低圧水素を生成することを目的とした装置である．実証試験で用いた EC スタックでは 14.7 MPa の高圧酸素生成を目標とした．実証試験で用いた EC スタックを Fig. 5，EC スタックの概要図を Fig. 6 に示す．EC スタックは，FC スタックと同様に複数のセルを積層した構造となっている．セル内部の電解質膜に水を供給し，スタックに電圧を印加することにより酸素と水素イオン（H^+）を発生させる．酸素出口は封止されているため，時間の経過とともに圧力が上昇し，高圧酸素を得ることができる．電解質膜の両端に電圧を加えており，酸素とともに電気分解で発生した水素イオンは電解質膜内を通って陰極側へと移動し，分離される．その後水素となり，EC の水素出口から排出され，EHC スタックへと供給される．

陽極：$H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-$

陰極：$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

高圧酸素下に存在する部品は酸化が促進され，また発火温度の低下や燃焼速度の上昇により，大気中では不燃物である材料であっても可燃物となる場合がある．そのため陽極側の電解質膜周辺部品では酸化と燃焼防止の観点で材料選定をおこない，EC スタック部品に採用した．



Fig. 5　EC stack

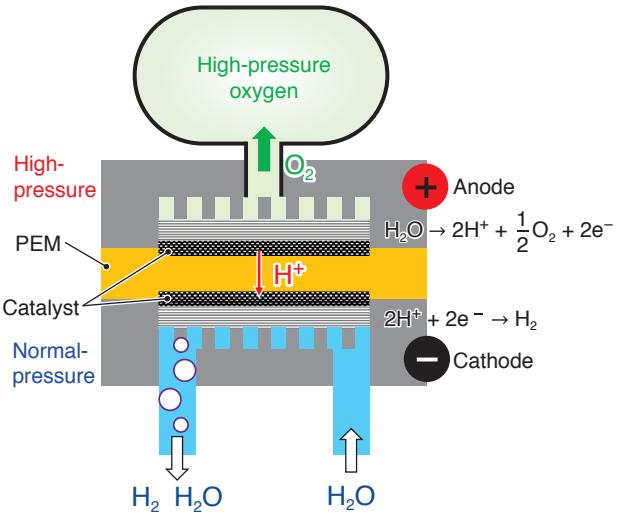


Fig. 6　Schematic diagram of EC

3.5. EHC スタック

EHC スタックは供給された水素を電気化学的に昇圧する装置である．実証試験で用いた EHC スタックでは 70 MPa の高圧水素生成を目標とした．実証試験で用いた EHC スタックを Fig. 7，EHC スタックの概要図を Fig. 8 に示す．EHC スタックも同様にセルを複数積層した構造となっており，各セル内部の電解質膜で下記に示す反応により水素イオンが発生し，電圧の印加により高圧タンクへとつながる陰極側へと移動する．タンクは閉塞空間となっているため，時間の経過とともに圧力が上昇する．

陽極：$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

陰極：$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

電解質膜の乾燥は導電率の低下を招くため，EHC スタックには湿潤水素を供給する．水素中の水分は膜を浸透し高圧側へと移動可能であるが，膜を介した差圧が大きくなるほど低圧側へと水分が押し戻される．Fig. 8 に示すように，押し戻された水分が膜反応部に滞留することで，水素の供給が滞り，電圧が上昇する課題がある．特に月面の低重力環境下では，水が反応膜から離脱しづらくなる．水の滞留を防止するためには，水の排出に寄与する反応面への供給水素の流速が局所的に低下することを防ぐ必要がある．そこで水素流路構造の最適化により反応部の水素流速の均一化を図った．

EHC スタックの水素の流れを Fig. 9 に示す．EHC スタックに供給された水素はインレットフレームから各セルに供給される．供給された水素はインレットフレームの下面に掘られた流路を通り，スペーサーと給電体へと流れる．給電体は電解質膜の下部に位置する部品であり，この部品内の流速分布の均一化をすることで水滞留の防止を図った．インレットフレームの下面に掘られた流路の径や長さなど，13 種類の設計因子を用いて L27 直行表を作成し，各条件における流速ばらつきを流体解析により求めた．解析で求めた結果に基づいて応答曲面を作成し，解析上最も流速ばらつきが低下する形状に流路構造を変更した．Fig. 10 にベース形状での水素流速分布を，Fig. 11 に最適構造での水素流速分布を示す．ガス流れは図において左から右に流れている．中央の半円状のエリアが給電体を示しているが，給電体外側の流路の本数や幅が変更され，構造変更前と比較して給電体内部の流速が均一化されている．水分滞留による運転停止を防止するため，流路構造変更後のセル部品を実証試験で使用した．

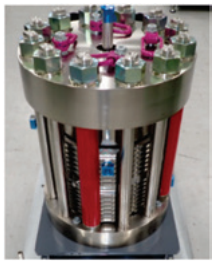


Fig. 7　EHC stack

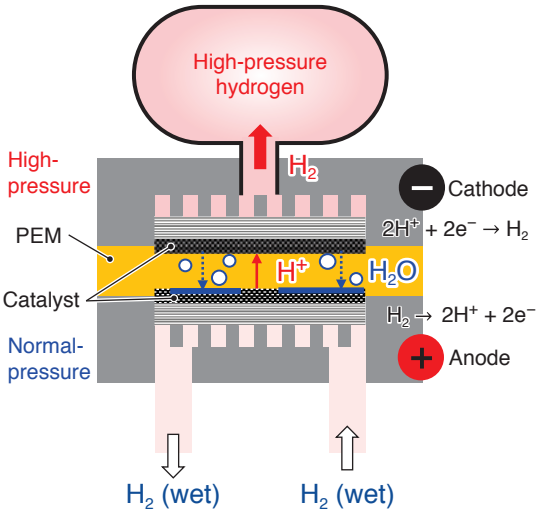


Fig. 8　Schematic diagram of EHC

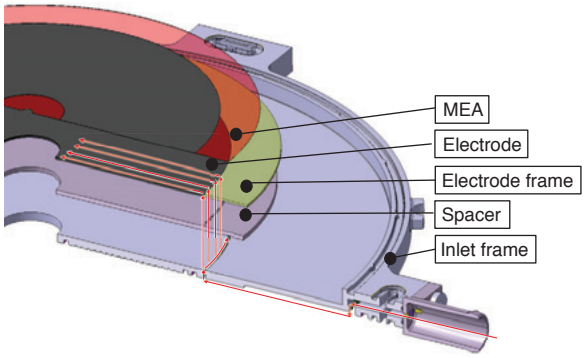


Fig. 9　Flow of hydrogen in EHC

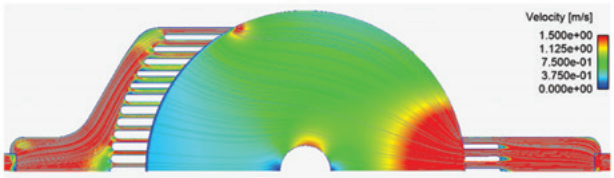


Fig. 10　Velocity distribution in base flow path structure of EHC stack

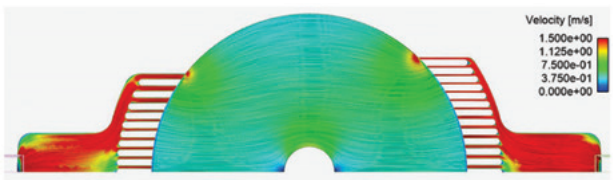


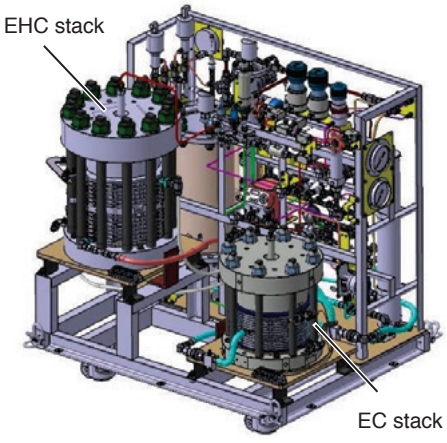
Fig. 11　Velocity distribution in optimized flow path structure of EHC stack

4. CRE システムの原理証明

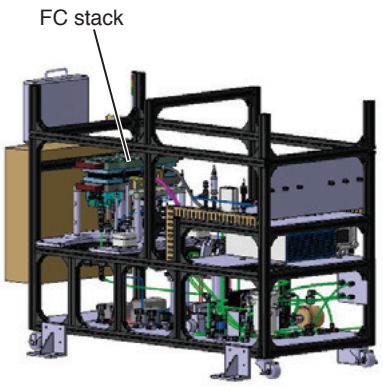
CRE システムの原理証明のため，実証試験をおこなった．

実証試験として，打ち上げ想定機の出力に対して 1/10 程度の出力を有する CRE システムを構築し，サイクル試験を実施した．月面では 1 年あたり 13 回の越夜が生じる．また，CRE システムは月面で数年から十数年の連続した使用が想定されるが，今回は，ある一つの月面ミッションの想定年数である連続 3 年[9]相当の昼夜サイクル数である 39 サイクルを実証試験の規定サイクル数とした．試験開始時にシステム内に存在する総水量は 1900 ml であるのに対し，1 サイクルで水電解に用いられる水量は約 400 ml である．そのため循環が成立していれば，試験停止に至る事象なく規定サイクル分の発電が完了することで原理証明ができる．またこの試験では太陽光発電で得た電力ではなく，一般的な商用電力を用いて実施した．

構築した CRE システムの外観図を Fig. 12 に，諸元を Table 2 に示す．また，CRE システムの 1 サイクル分の動きについて紹介する．Fig. 13 に EC, EHC スタックの運転電流，出口圧力，FC スタックの出力，及び各タンクの圧力の推移を示す．1 サイクルは EC, EHC スタックごとにタイミングが若干異なるが，1：昇圧，2：蓄圧，3：減圧，4：発電の四つのモードに分けられる．



(a) EC and EHC systems



(b) FC system

Fig. 12 CRE system for demonstration test

Table 2 Specifications of CRE system for demonstration test

CRE system	System weight [kg]	2900
FC stack	Average power (generation mode) [W]	221.6
	Stack weight [kg]	50
	Stack dimensions [mm]	570 × 266 × 250
EC stack	Pressure of generated oxygen [MPa]	14.7
	Average oxygen production rate [g/h]	179.5
	Stack weight [kg]	260
	Stack dimensions [mm]	Φ393 × 447
EHC stack	Hydrogen pressure increase [MPa]	70.0
	Average hydrogen pressurization rate [g/h]	22.5
	Stack weight [kg]	470
	Stack dimensions [mm]	Φ460 × 623

昇圧モードでは，電気化学反応の開始によりガスが生成されスタック内での昇圧が始まる．3.1. 節で述べたように EHC スタックの運転電流を制御することで供給水素圧力の変動に対応している．既定の圧力に到達すると蓄圧モードに移行する．

蓄圧モードでは，タンクへのガス供給が開始されタンクの圧力上昇が始まる．タンクが目標圧力まで到達した後に減圧モードに移行する．

減圧モードでは，タンクへのガス供給が止まり，タンク内圧力は保持される．EC, EHC スタック内に残存する余りのガスは直接 FC スタックへと供給され，発電により消費されることで EC, EHC スタック内圧力は低下する．Fig. 13 の最下段のグラフに示すように減圧モードでは FC

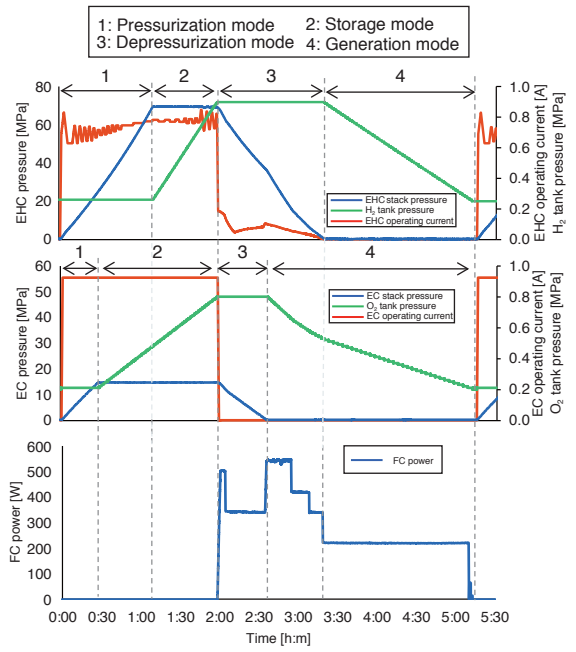


Fig. 13 Operation transition of CRE system

スタックの出力が一定ではない．これはFCスタックの出力を調整することで，EC，EHCスタックの急減圧を防止し，EC，EHCスタック内のゴムシール等でブリスターが生じないようにするためである．

その後発電モードでは，タンクに貯蔵したガスをFCスタックに供給するためタンク圧力が低下する．

サイクル試験の運転方法を設定する上で考慮すべき項目が二点ある．一点目は，昇圧，減圧モードにおける運転電流や減圧弁等を用いた制御時間が，システムの仕様変更に伴い変化する可能性がある点である．しかしこれらは流体の循環のバランスが保たれる制御によって，時間の長短による変化に対応可能である．

二点目は蓄圧モードと発電モードの時間の短縮化である．ガス貯蔵用タンクは容量，貯蔵圧ともに実運用よりも低く設定し，1サイクルは5時間程度で完了する．しかし実運用では必要電力量の増加により運転時間が長時間化する．影響が想定される各スタックの耐久性については，今後，個別耐久で確認する．今回の実証試験ではCREシステム全体の循環について確認することが目的であるため，設定した運転方法でサイクル試験を実施することで検証が可能である．

各サイクルでのFC発電量をFig. 14に示す．一連の取り組みにより，試験が停止することなく39サイクルを通して発電可能なことを確認し，原理証明を完了した．

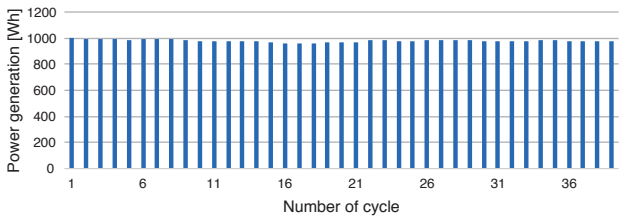


Fig. 14　Power generation in each cycle

5．宇宙での安定的な利用に向けた取り組み

3章で述べたように，今後月面相当環境での評価を実施する．CREシステムを月面で安定的に利用するためには，地上とは異なる様々な環境や外乱について考慮しなければならない．今回は放射線，低重力，輸送振動への対応，また輸送コスト削減に向けた軽量化について，今後取り組むべき内容を紹介する．

5.1. 放射線

月は地球と比較して磁場によるシールドが弱く，月面の環境下では太陽などからの放射線量が地上と比較して高い．放射線による特性変化を把握するためにスタック部品に対して放射線照射試験を実施した．その結果，スタック部品の中で特に電解質膜の特性変化が顕著に見られた．Fig. 15に示すように，放射線吸収量の増加に伴い電解質膜の分子量，及び引張強度が低下する．しかし，スタックは組立にプレス機やクレーンなどの設備が必要であり，月面上で分解し電解質膜を交換することはできない．そのため運用を完遂できる耐久性を有した仕様にしなければならない．放射線吸収量と各部品の機能低下を明確にし，運用期間で機能損失に至らない遮蔽構造を設計する必要がある．

5.2. 低重力

月面の重力は地上の約1/6である．低重力環境下になるほど気泡の浮力が作用しなくなる．そのためECスタックでは，電極表面から生成ガスが離脱せず，物質輸送が阻害され電解性能の低下が予想される．今後，落下塔や航空機のパラボリックフライト等による低重力環境下での試験を実施することで，重力の影響をより明確にし，生成ガスの排出性に優れた水の供給条件や構造の設計に取り組む．

5.3. 輸送振動

宇宙空間に物資を運ぶための輸送ロケットは，打ち上げ時に激しい振動が生じる．そのためCREシステム，及び各スタックはこれに耐え，機能を損なわない構造とする必要がある．一般的に振動対策として共振抑制治具による固定が効果的であるが，宇宙への輸送コストの観点から，振動抑制を目的とした重量増加は可能な限り避けたい．現在，実際の輸送と同レベルの振動を発生させる加振機を使用し，スタックの共振周波数など振動特性評価を実施している．今後，この結果をCAEにフィードバックすることで，設計予測技術の向上を図り，システム設計に活用する．

5.4. 軽量化

月面への輸送コストの削減のためCREシステムを構成する各スタックの軽量化が必要である．特に重量の大きいECスタック及びEHCスタックでは反応部径の最適化が必要である．反応部径を増加させ，1セル当たりの水素生

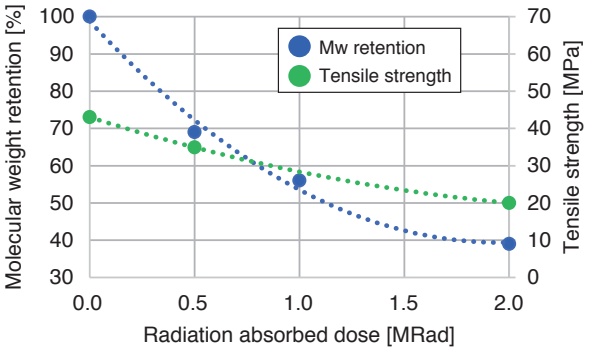


Fig. 15　Relationship between radiation absorption and membrane properties

成量を増加させることでセル積層数を減らすことが可能であり，それに伴いスタックを締結するボルト全長の短縮も可能となる．一方，反応部径を増加させた場合，反応部外周に存在する耐圧部材の径も増加し，重量増加の要因となる．今後，輸送時のスペースなどの制約の下，反応部径の最適化に取り組み，軽量化を実現する．

6．まとめ

（1）FC スタックでは純酸素供給による膜の経年変化を考慮した MEA 設計をおこなった．
（2）EC スタックには，高圧酸素環境下であっても使用可能な耐酸化性，耐燃性に優れた材料を選定した．
（3）EHC スタックの流路構造最適化により，反応部の滞留水の排出性が向上した．
（4）CRE システム内の安定的な水循環を実現するためにバルブやスタック運転制御の設定をおこなった．
（5）構築した CRE システムを用いて 39 サイクルの運転を達成し，原理証明を完了した．

参考文献

（1）https://humans-in-space.jaxa.jp/future/（参照 2024/07/25）
（2）https://global.honda/jp/news/2023/c230202.html（参照 2024/10/11）
（3）https://global.honda/jp/news/2018/c181121.html（参照 2024/07/25）
（4）https://www.astrobotic.com/astrobotic-awarded-79-5-million-contract-to-deliver-14-nasa-payloads-to-themoon/,（参照 2024/10/17）
（5）岡寿久，丸谷健太郎，濱田慎太郎，大迫庸介：宇宙用大容量リチウムイオンバッテリー，三菱電機技報，Vol. 94, No. 2, p. 41-45, (2020), https://www.giho.mitsubishielectric.co.jp/giho/pdf/2020/2002202.pdf,（参照 2024/07/25）
（6）内藤均：宇宙探査用電力供給技術，GS Yuasa Technical Report, Vol. 13, No. 2, p. 1-7, (2016), https://www.gs-yuasa.com/jp/technology/technical_report/pdf/vol13_2/13_02_001.pdf,（参照 2024/07/25）
（7）石川博之，針生栄治，川崎暢之，大門鋭刀：70 MPa 差圧式高圧水電解スタックの開発，Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1, p. 80-87
（8）加藤高士，中原章，大倉拓也，山本昌邦，寺田聡，野田明宏，金岡長之：高耐久・低コスト燃料電池 UEA の開発，Honda R&D Technical Review, Vol. 37, p. 26-31
（9）上原茂高，大濱伸之，互井梨絵，高橋学，村田成亮：有人与圧ローバー再生型燃料電池システムの検討状況，第 68 回宇宙科学技術連合講演会，3A09, (2024)

■著　者■


稲 西 諒 亮


大 門 鋭 刀


福 間 一 教


河 野　匠


本 多　徹

義足に活用した，新機構トランスミッション技術

New Transmission Mechanism Technology Utilized in Prosthetic Legs

小野拓洋[1] Hiromi ONO
島田圭[1] Kei SHIMADA
日木豊[1] Yutaka HIKI
小ノ澤聖二[1] Seiji ONOZAWA
後藤文人[2] Fumihito GOTO

要　旨

両方向の回転が可能なワンウェイクラッチを組み合わせ，そのクラッチの接続状態を切り替えることで変速可能なトランスミッション機構を開発した．

これにより電磁クラッチに対し小型軽量になるとともに，正転･反転両方向回転の駆動力を伝達できるようになった．また回転状態の維持に電力を使わず，切り替えのみに電力を消費し，速比段数の設定に制限がない特徴も備えた．

この技術をモータ駆動式義足に適用した場合，歩行速度がモータ性能に依存しないためモータの小型化が図れ，また省電力でもあることから義足の軽量化が可能となった．また歩行遊脚を省音化することもでき，義足装着者の生活の可能性を広げることができた．

ABSTRACT

The researchers developed a transmission mechanism that combines one-way clutches capable of rotating in both directions and can change speeds by switching the connection state of the clutch.

This makes the clutch smaller and lighter than an electromagnetic clutch and makes it possible to transmit driving force for both forward and reverse rotation. Other features of the mechanism are that it consumes power only for switching, not for maintaining the rotational state, and there is no limit to the number of speed ratio levels that can be set.

When this technology is applied to motor-driven prosthetic legs, the walking speed is independent of motor performance, which means that the motor can be made smaller and the prosthetic leg can be made lighter due to the power savings. In addition, the swinging of the leg while walking can be made quieter, which expands the life possibilities for users of prosthetic legs.

1．開発の背景と狙い

1.1. 膝継手の種類と機能

Fig. 1 に示す通り，義足には身体の欠損箇所によって様々な種類がある(1)．その中で，膝関節を欠損した方が使う義足の膝関節用部品として膝継手がある．

膝継手には，人の膝同様の機能が求められる．体重を支えること，膝を曲げ伸ばしできることなどである．中でも欠損した筋肉の役割に関しては現在も発展をし続け，様々な手段で代替させるものがある．

本稿で紹介する機能は，主にダンパを用いた膝継手のイールディング機能である(2)．イールディング機能とは，適度な屈曲抵抗を与えながら膝を曲げることのできる機能である．義足に体重をかけた際に，意図しない急な膝折れを防止したり，自然な階段の交互下りが可能となったり，膝継手の機能の中でも近年主要な機能となっている (Fig. 2)．また最近は筋肉の役割をモータで代替し，膝の曲げ伸ばしをおこなう膝継手も出てきている．どちらの膝継手も，近年では膝角度センサや荷重センサ，ジャイロセンサ等を活用し膝の状態を検知してダンパやモータなどを動作させている．

その中でもイールディング機能のあるダンパ式膝継手が近年主流となっているが，モータ駆動式膝継手も今後の拡大が期待されている．

1.2. 開発の背景

ダンパ式膝継手とモータ駆動式膝継手は，それぞれ長所と課題がある．

ダンパ式膝継手では，体重がかかっている間 (以降，立脚期) はダンパにより適切なイールディング機能を発揮して急な膝折れを回避できる．体重がかかっていない間 (以

[1] ソリューションシステム開発センター
E-mail: hiromi_ono@jp.honda
[2] 株式会社ラピッドエンジニアリング

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_8

降，遊脚期）には大腿の振り出しに合わせて受動的に膝の曲げ伸ばしがおこなわれるため，ユーザーが自在に操り歩行することができ，扱いやすい．しかし階段の昇りでは膝の伸ばす力を発揮しないので，両足で交互に昇ることは容易ではない．

モータ駆動式膝継手は，立脚期，遊脚期共にモータにより駆動される．遊脚期には膝の曲げ伸ばしをおこなってくれるため歩行が楽になる．立脚期では，階段の昇りや立ち上がりなどのパワーが必要な動作でダンパ式膝継手では難しかった場面も，モータのパワーにより可能になる．そのため，モータ駆動式膝継手の以下の３点の課題を解決することでより扱いやすくなると考えた．

まず１点目に，使用頻度が最も高い歩行中も常に膝関節を駆動するために，電力消費が大きい．そのためモータ駆動用のバッテリーは，日常で使用する頻度を配慮した容量が必要となり，大きさと質量が増すことが懸念される．

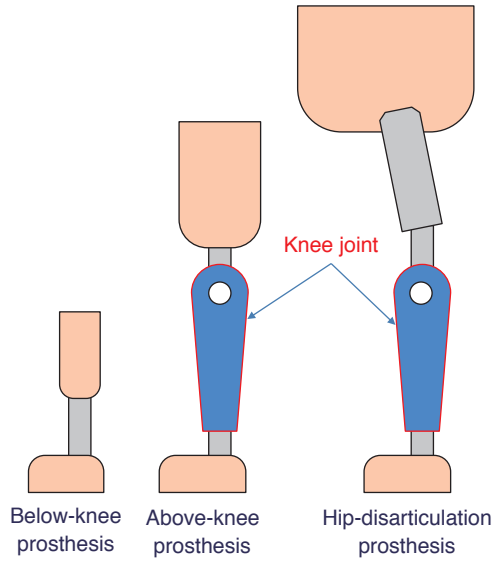


Fig. 1　Types of prosthetic leg

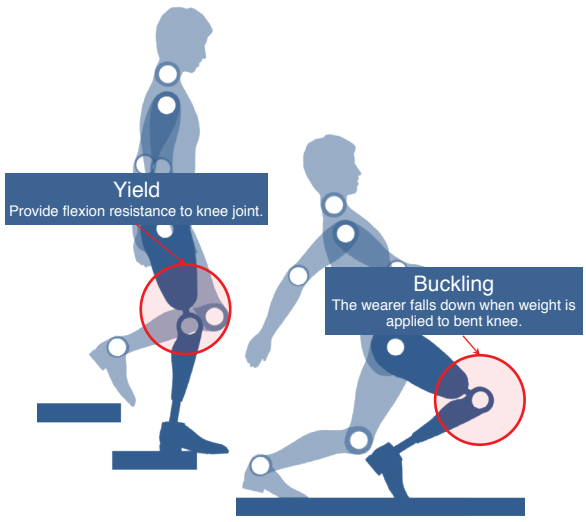


Fig. 2　Yielding and buckling

Table 1　Issues addressed by this research

No.	Issue
1	Power saving while walking on level ground (battery downsizing)
2	Reduction of motor drive noise while walking on level ground
3	Walking cadence independent of motor performance (motor downsizing)

２点目に，歩行中は常にモータ駆動であり，常にモータ駆動音が発生する．３点目に，歩行中の速度はモータの性能に依存する．これは，歩行速度が上がると遊脚の屈曲と伸展の速度が増すためである．歩行ケイデンス（歩数／分）に縛りなく動作させるためには，モータが大型化することも懸念の一つである．

そこで本稿では，モータ駆動式膝継手をベースに，Table 1 と下記に挙げた三つの課題を解決するために，義足システム全体ではなく，技術要素となるトランスミッションを開発した．

・平地歩行時の電力消費を減らすこと．（バッテリー小型化）
・平地歩行時のモータ音を減らすこと．
・平地歩行時の歩行ケイデンスが，モータ性能に依存しないこと（モータ小型化）．

2．狙い

2.1. 膝継手の理想的な挙動

モータ駆動式膝継手は，階段の昇りが可能になるといった，ユーザーの移動，活動の幅を広げる可能性があることが最大のメリットである．このメリットを活かすことは，「すべての人に，『生活の可能性が拡がる喜び』を提供する」という，Honda の掲げる 2030 年 vision に繋がると考えた[3]．

階段の昇りにおいては，膝関節に伸展する力を与える必要がある．一方で平地歩行などの動作については，パワー付与されなくても可能であり，パワー付与せずにダンパ式膝継手同様の挙動を狙うことが Table 1 の課題１から３を解決することに繋がると考えた．

そこでまず，伸展する力を膝関節に与える必要性があるかないかの差により，平地歩行と階段の昇りで分けて考えた．

平地歩行においては，前述のとおりダンパ式膝継手の扱いやすさとイールディングの安心感を参考に，Fig. 3 のような動作を目標とした．具体的には，遊脚期は，装着者が義足を自在に扱える状態にするため，膝軸を自由回転できるよう，モータと膝軸の接続を切断する．また，立脚期にはイールディングによる屈曲抵抗を与えられるよう，モータと接続する．この際の屈曲抵抗として，モータのバックドライブトルクを使用する．これにより平地歩行での必要な電力は切替の動作のみとなり，電力消費を少なくすることができる．また，遊脚期はモータと接続しないため，

モータ音の発生を防ぐことができる．また，遊脚期の屈曲と伸展の動作はモータ駆動によるものではないため，歩行速度も制限されず，Table 1 の 1 から 3 全てを達成可能なコンセプトになる．なお，イールディングの機能はモータが担い，ダンパ式膝継手同等の安心感と扱いやすさを狙うことができる．

次に，階段の昇りにおいては，膝軸の伸展と屈曲にモータの駆動力を使い，Fig. 4 のような動作を狙う．

具体的には，立脚期には体重を支えるために，モータにより膝を力強く伸展させる．遊脚期には，段差を避けるために，モータにより膝を素早く屈曲させる．

この時の立脚と遊脚の速比は約 1:2 に設定した．この理由としては，Fig. 5 に示す通り，人の歩行は遊脚の屈曲動作が約 2 倍速いことに基づいている[4]．

また，立脚期，遊脚期ともに膝関節の動きとして伸展，屈曲どちらの動きも可能であることが求められる．

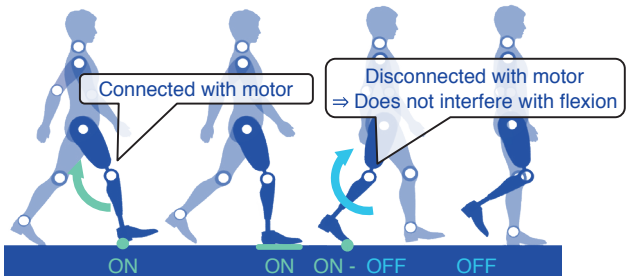


Fig. 3　Aim of walking on level ground and going downstairs

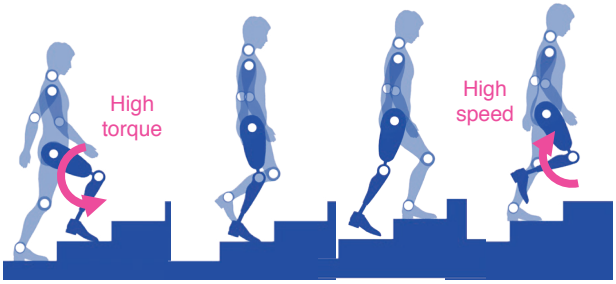


Fig. 4　Aim of going upstairs

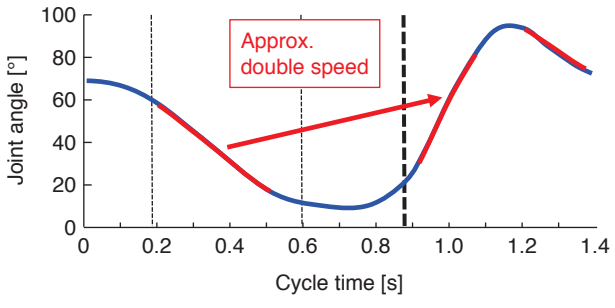


Fig. 5　Speed difference between stance phase and swing phase when going upstairs

2.2. 機能要件と制約条件

2.1. 節で定めた狙いを実現させるため，膝継手には下記の機能要件と制約条件を設けた．

（1）機能要件

平地歩行において，

遊脚期は，ニュートラル状態であり，装着者は膝軸を自在回転できること．

立脚期には，モータとの接続ができ，装着者は膝軸に抵抗を与えられること．さらに

自在回転からイールディングへの切替えが瞬時に行われること．

電力消費が切り替え動作のみであること，とした．

階段昇りにおいて，

モータと 2 速比で接続ができ，立脚期は高トルク，遊脚期は高回転の特性を出しながらアシストパワーを装着者が享受できること．

膝軸の伸展と屈曲の両方向に駆動力を与えることができること，とした．

（2）制約条件

膝シルエットに収まる小型サイズであることとした．

上記機能要件と制約条件を達成するためには，立脚期と遊脚期の状態遷移に合わせモータとの接続状態をニュートラル，速比 2 段階で瞬時に切り替えができる，小型なトランスミッション技術が必要であると考え，開発をおこなった．

3．トランスミッションの基本構造

3.1. トランスミッションの全体構成

トランスミッションの全体構成及び主な機能部品名称を Fig. 6, Fig. 7 に示す．

動力の伝達は，ギア，シャフト，ローラーの 3 部品が担う．ローラーがシャフトとギアの間で噛みあうかどうかでギアとシャフト間の動力を伝えるかどうかを変化させた．リテーナーは，ローラーの位置を保持させた．ギア A とギア B は，速比により歯数等が違うものであり，内側の構成は同じである．

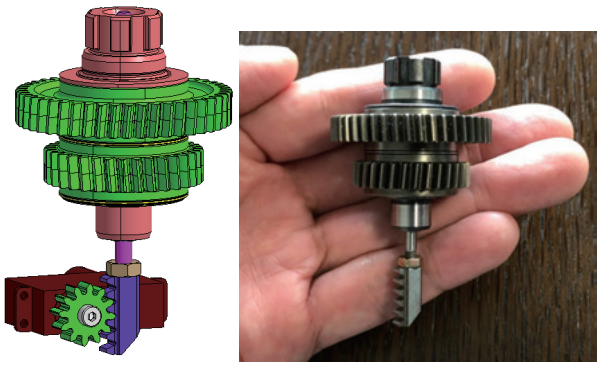


Fig. 6　Overall structure of transmission

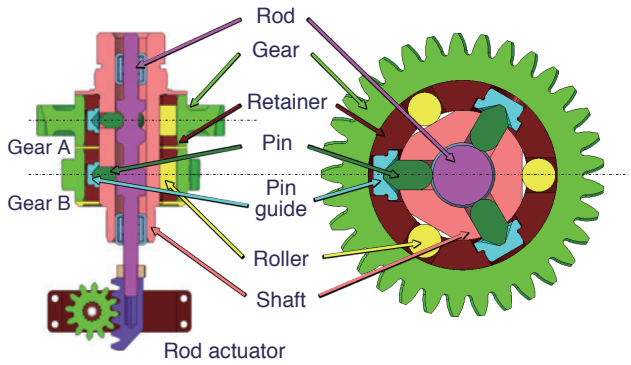
動力伝達状態の切り替えは，ロッドアクチュエータが動作し，ラックアンドピニオン機構を介してロッドを上下に動かすことによりおこなった．ロッドはカム形状になっており，カムによりピンが動作する．ピンがピンガイドを押すことによりリテーナーを動かし，ローラーの状態を変えた．

シャフト内及びクラッチのしゅう動部にはグリスを塗布した．

ロッドの軸方向の断面を Fig. 7(a) に示す．シャフト内のロッドがシャフト軸方向にスライドすることにより，ギア A，B の接続状態が変わる．ロッドは，大径と小径２種類のカム形状を成しており，ギア A，B の中央に大径部が位置するとクラッチ OFF となり，小径部が位置するとクラッチ ON となる．詳細は 3.2. 節と 3.3. 節にて説明する．ロッドは Fig. 7(a) の下部にあるモータとラックピニオン機構によりスライドさせた．またロッド位置はモータのバックドライブトルクにより保持させた．

3.2. クラッチ OFF から ON への切り替え

切り替えの状態遷移について Fig. 8 に示す．ギア B の変化についてフォーカスして見る．Fig. 8 にて，Fig. 9，Fig. 10，Fig. 11 の拡大，断面の個所について示す．



(a) Rod axial cross section (b) Gear cross section

Fig. 7 Structure of transmission

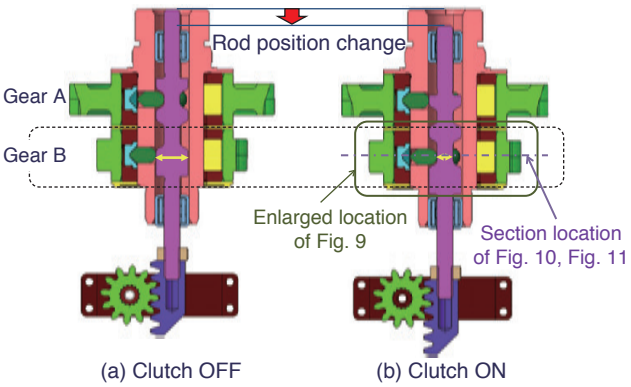


Fig. 8 Switching clutch from OFF to ON

クラッチ OFF の状態からロッドを下にスライドさせると，ピンとロッドの接触状態が変わり，隙間が生じる (Fig. 9)．Fig. 10 に示すように，この時，ギアに回転力を与えるとリテーナーはピンガイドのカムを介してピンを押し戻しながら回転する．その際，ギアとリテーナー間に塗布されたグリスの摩擦により，ギアとリテーナーは共回りする．ローラーはギアとシャフトの間に挟み込まれ，回転力をシャフトに伝達する (Fig. 11)．このような機構により，トルクを伝達した．また，ギアが反転してもギアとリテー

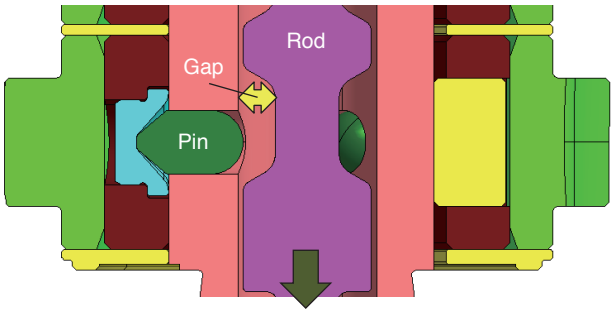


Fig. 9 Rod state when switching clutch from OFF to ON

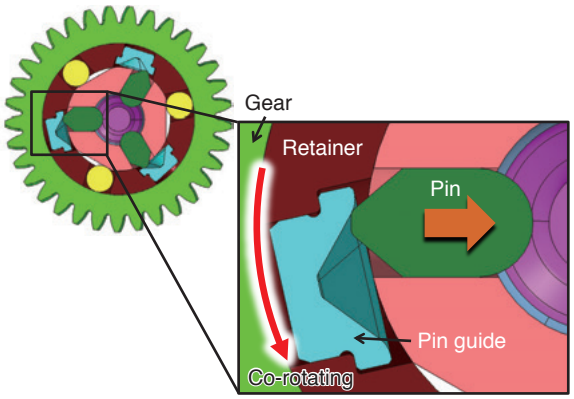


Fig. 10 Pin state when switching clutch from OFF to ON

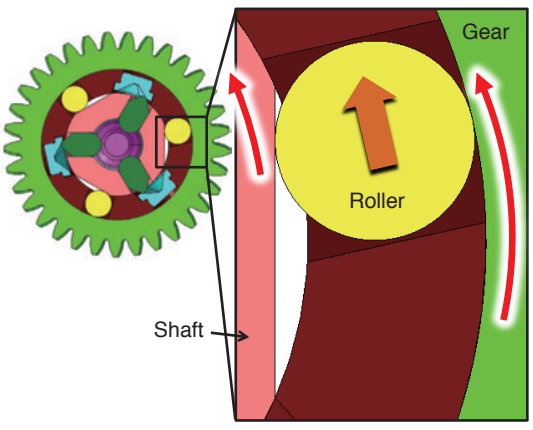


Fig. 11 Roller state when switching clutch from OFF to ON

ナーが共回りするため，再びローラーがシャフトの反対側に挟み込まれ回転力をシャフトに伝達する．

3.3. クラッチ ON から OFF への切り替え

クラッチ ON の状態から再びロッドを上にスライドさせると，ロッドのカムを介してピンが外側に押し出される (Fig. 12)．その際ピンがピンガイドを押し上げ，リテーナーとローラーが固定される (Fig. 13)．その位置ではギアとシャフトがローラーと同時に接触することがないため空転する (Fig. 14)．

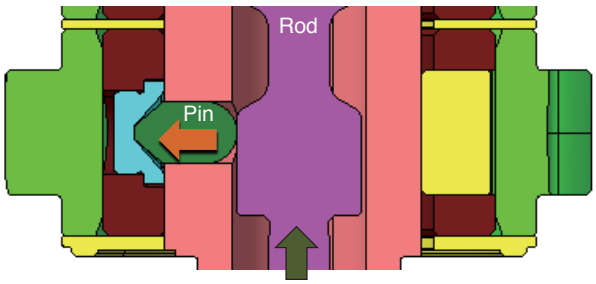


Fig. 12　Rod and pin state when switching clutch from ON to OFF

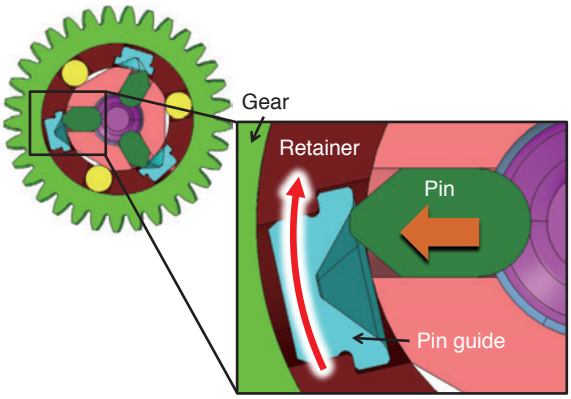


Fig. 13　Pin and retainer state when switching clutch from ON to OFF

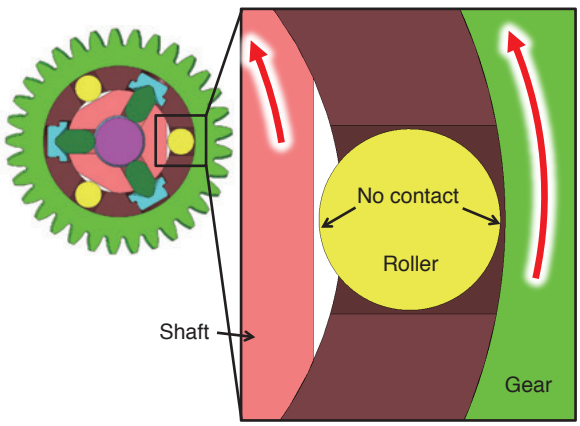


Fig. 14　Roller state when switching clutch from ON to OFF

4．義足での動作

4.1. 義足への組み込み

本トランスミッションを，義足へ組み込んだ際のシステム構成の 1 例を Fig. 15 に，メカニカル部品構成図の 1 例を Fig. 16 に示す．モータのトルクは，トランスミッションを介して膝関節に入る．また，膝関節側から人が発揮するトルクも同様にトランスミッションを介し，モータに入る．膝の状態は，この構成では三つのセンサにより計測した．荷重センサは体重の荷重と抜重を，IMU センサは膝継手の姿勢を，膝角度センサは大腿側部品と下腿側部品のなす角を計測した．

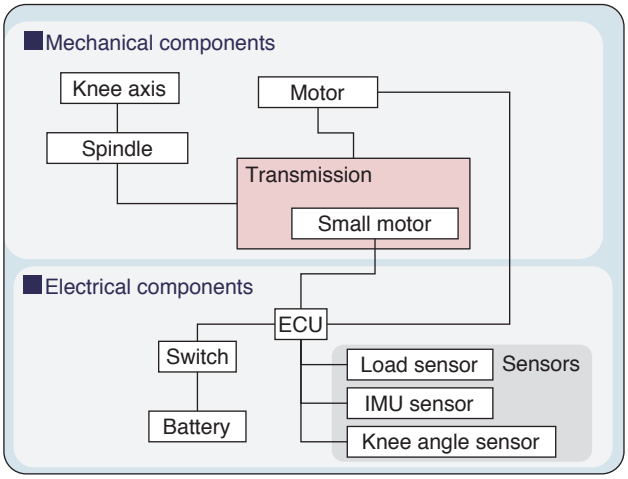


Fig. 15　System structure of knee joint

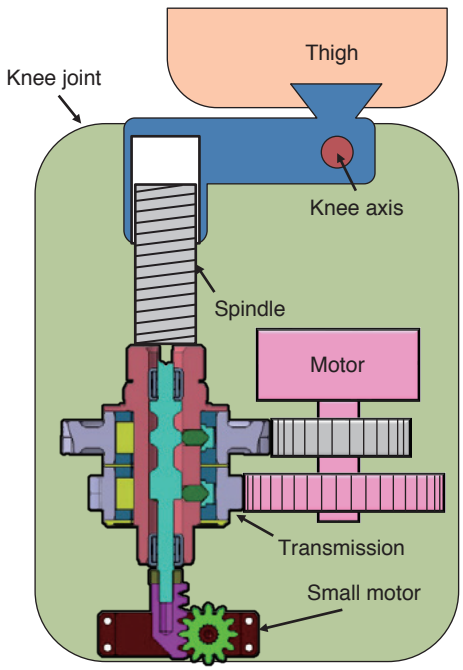


Fig. 16　Mechanical system structure of knee joint without electrical parts

4.2. 義足での動作

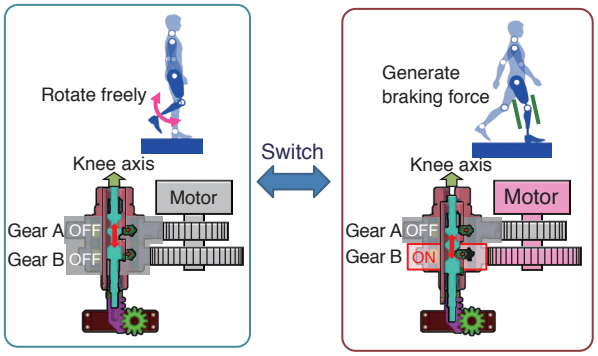
義足での動作は，Fig. 17，Fig. 18 のように機能させた．

平地歩行の遊脚期については，Fig. 17(a) に示すように両方のギアをニュートラルとした．これは，ギア A，ギア B ともにクラッチ OFF の状態であり，装着者の大腿の振り出しにより自由な屈曲，伸展動作が可能である．

立脚期については，Fig. 17(b) に示すようにギア A をクラッチ OFF に，ギア B（高回転ギア）をクラッチ ON とした．膝関節の回転をモータに伝え，モータのバックドライブトルクを利用することで適切なイールディングを機能させた．それにより立脚期の意図しない急な膝折れを防止し，装着者に安心感を与えることが可能となった．

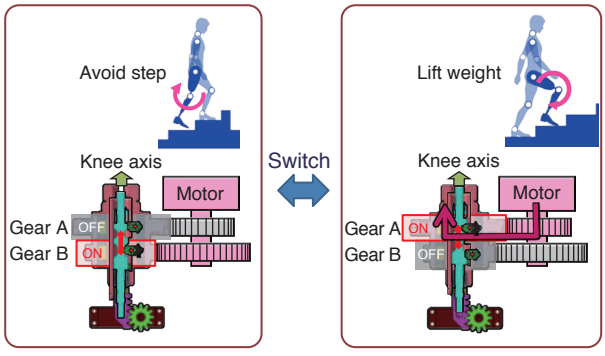
次に，階段の昇りについて説明する．立脚期では，装着者の体重を支えるため高いトルクを必要とするが，回転速度は遅い．しかし遊脚期の屈曲と伸展は膝下の慣性力のみのため，トルクは必要ないが速い回転速度が要求される．この相反する要求に対して 2 段のギア比を持つトランスミッション機構で有効に作用させた．

遊脚期については，Fig. 18(a) に示すようにギア B（高回転ギア）のクラッチを ON にし，ギア A のクラッチを OFF とした．モータによる膝関節の屈曲と伸展を速い速度でおこなうことで，階段に接触することなく次の段に踏み込めることが可能となった．



(a) Swing phase: neutral (b) Stance phase: high speed

Fig.17 Transmission switching when walking on level ground or going downstairs



(a) Swing phase: high speed (b) Stance phase: high torque

Fig. 18 Transmission switching when going upstairs

Table 2 Phases, modes, and their goals

Situation	Phase	Transmission mode	Aim
Walking on level ground/going downstairs	Swing	Neutral	Easy to handle
	Stance	High speed	Yielding
Going upstairs	Swing	High speed	Avoid steps
	Stance	High torque	Lift weight

立脚期については，Fig. 18(b) に示すようにギア A（高トルクギア）のクラッチを ON にし，ギア B のクラッチを OFF とした．モータの出力を高いトルクで膝関節に伝達し，膝の伸展をアシストすることで階段の昇りが可能となった．

以上の，歩行周期におけるトランスミッションのモードと狙いを，Table 2 にまとめる．

4.3. 義足適用時の動作確認

平地歩行におけるログデータを Fig. 19 に示す．立脚 / 遊脚の判定は義足に搭載された力覚センサや IMU センサを使っておこなった．立脚期においては，荷重が掛かる前にロッドの位置が切り替わりモータの抵抗により，膝折れ防止を可能とした．また遊脚期においては，膝角度が増える前にニュートラルに切り替わることで，モータの抵抗が邪魔をせず，膝角度が素早く屈曲できていることが認識できた．

階段の昇りにおけるログデータを Fig. 20 に示す．階段の昇りでは，体重が義足にかかるかどうかを力覚センサで

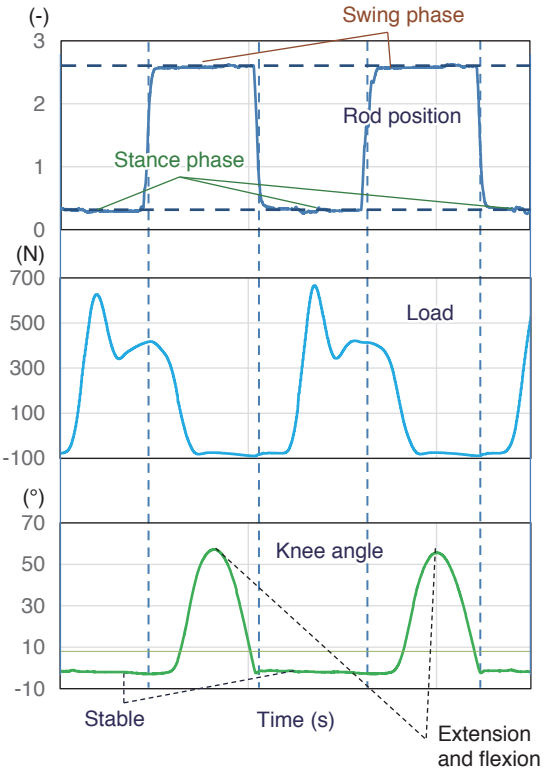


Fig. 19 Log data of walking on level ground

捉えることによって立脚期と遊脚期を切り替えた．水色のロードの数値は，体重による荷重の推移である．体重がかからないとロッドの位置が立脚から遊脚へ切り替わり，体重がかかると遊脚から立脚に切り替わっていることを示している．

4.4. モータ駆動式膝継手に対する課題と対応手段，結果のまとめ

Table 1 に示した三つの課題に対して，Table 3 にまとめた．

まず 1 点目の，義足の使用時間の多くを占める平地歩行での電力消費を抑え，バッテリーを小型化することについて，本トランスミッションは遊脚期のニュートラル状態にすることで消費電力を抑えた．立脚期のモータのバックドライブトルクを利用したイールディングでも電力を消費しない．電力を消費するのは切替え時のみで，その消費電力もロッドの上下動のみの電力で済むため，搭載するバッテリーの容量を少なくすることができる．また，摩擦式のクラッチのように，どちらかの状態における状態維持のための電力を消費することもないというメリットがある．

2 点目に，平地歩行でのモータにより発生する音を小さくすることについて，本トランスミッションを活用した際は遊脚期，モータとの接続がないため，音が生じない．立脚期では，イールディングを活用するシーンではモータと接続されるため音が生じる．ただし，平地歩行中でイールディングを使用するのは，転倒しかけて膝折れが起きるときのみであり，基本的には立脚期も無音である．切り替え時には切り替えのための小型モータの音が微小であり，これは他の電子制御式膝継手と同程度である．以上より，平地歩行では作動音の出ない構造と制御を実現させた．

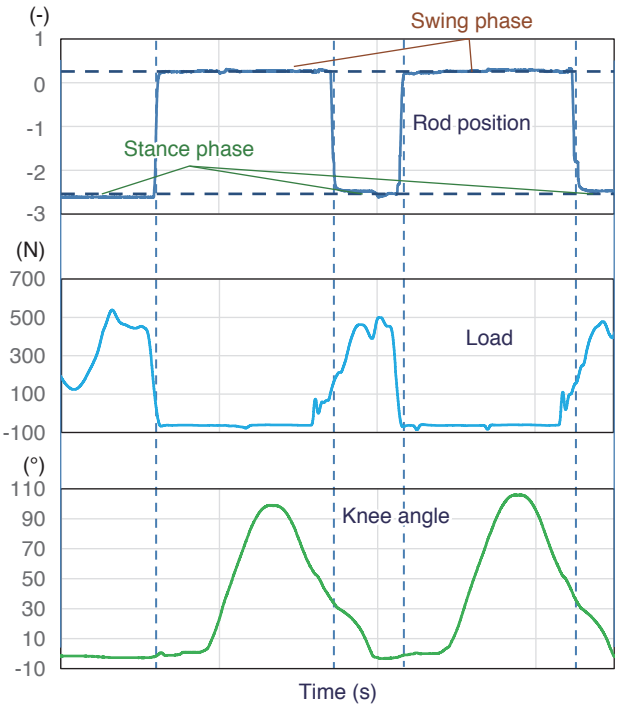


Fig. 20　Log data of going upstairs

Table 3　Issues addressed, countermeasures, and results of this research

No.	Issue	Countermeasure	Result
1	Power saving while walking on level ground (battery downsizing)	During the swing phase while walking on level ground, do not perform extension and flexion by the motor, only switch the state of the knee joint.	Power consumption only for switching, except for activities that require power (e.g. going upstairs)
2	Reduction of motor drive noise while walking on level ground		No motor noise except for activities that require power (e.g. going upstairs)
3	Walking speed independent of motor performance (motor downsizing)		Walking speed independent of motor performance because knees are not moved by motors during walking

Table 4　Performance comparison of roller friction and electromagnetic clutch

Features	Roller friction type	Electromagnetic clutch type		
		Company A	Company B	Company C
Outside shape (mm)	φ25	φ106	φ75	φ90
Mass (kg)	0.2	1.5	1	1
Static friction torque (N·m)	15-20			

3 点目に，歩行速度がモータ性能に依存しない．これは，本トランスミッションではニュートラル機能によって，ダンパ式膝継手のように自身の断端（切断され残った大腿）により動かすことができるためである．

上記 3 点の課題解決に加えてさらに，本技術を義足に適用した場合，下記の機能を追加することができる．

・扱いやすく，自由な平地歩行である．

両方のギアのローラークラッチ接続状態をニュートラルとすることで，装着者の大腿により下腿を振り出すことができる．歩行速度や歩行ケイデンスに対し制約を受けることなく，自由な歩行が可能となる．

・両方向回転駆動できることで安心感に繋がる．

両方向に回転駆動力を伝えることができるため，切替えを行わなくても屈曲と伸展といった反対方向への駆動が可能である．これは装着者にとっては安心感にも繋がる．理由としては不意に逆方向に回転が入った時にもクラッチが抜ける心配がなく，体重を支え続けることができるためである．

・複数の減速比を切替え可能

複数の減速比を持つことが可能で，一つのモータで異なる出力特性を実現できるため，立脚期や遊脚期に最適な特性を出せる．効率のいいポイントや電流量を調整することにより，モータの小型化やバッテリーの小型化に寄与することが見込まれる．

4.5. 電磁クラッチに対する優位性

本技術は，Table 4 に示す通り電磁クラッチに対して小型且つ軽量な特徴を持つことを達成した．このことは，義

足のみならず他の製品に対しても有効に活用可能であると考える.

5. まとめ

本開発は, モータ式膝継手のメリットを活かす要素技術を開発することを狙いスタートし, 新機構のトランスミッションを組み込んだ膝継手を試作確認した.

平地歩行では, 遊脚期はモータと接続をせず, 立脚期はモータと接続する. 切り替えのみに電力を消費するため, 省電力化が達成できた. また, 遊脚期にはモータとの接続がないため省音での歩行が可能となるとともに, モータと切り離し大腿で動かすことができるため, モータの性能に依存しない歩行が可能となった.

立脚期はダンパ式膝継手のようにイールディングが機能するため, 安心感のある歩行が可能である.

また, 階段昇りでは立脚と遊脚の求められる特性に応じて速比を切り替えることができ, モータの小型化に繋がる.

本トランスミッションは電磁クラッチに対して小型且つ軽量にトルク伝達可能な機構であり, 両方向回転駆動が可能, 速比数に制限がない, トルク伝達中に状態維持の電力消費がない, といった多くのメリットを持ち, 膝継手搭載の目標達成のための有効な手段となった.

この技術の特徴は他の機器でも有効に機能すると考えられるため, 独自のメリットを生かすことができる機器に活かしていきたい.

参考文献

(1) https://www.ottobock.com/ja-jp/prosthetic_le/info/structure, (参照 2024/7/10)

(2) https://www.ottobock.com/ja-jp/prosthetic_le/joint/knee/3r80, (参照 2024/7/10)

(3) https://www.honda.co.jp/guide/vision/, (参照 2024/7/10)

(4) Riener, R., Rabuffetti, M., Frigo, C.: Stair ascent and descent at different inclinations, Gait & Posture, Vol. 15, Issue 1, p. 32-44, (2002), doi: 10.1016/S0966-6362(01)00162-X

■著　者■


小野拓洋


島田　圭


日木　豊


小ノ澤聖二


後藤文人

高速 PIV を用いた時間フィルタ法による乱流成分の分離手法構築とハイブリッド用エンジン開発への適用

Construction of Turbulent Component Decomposition Method Using Time Filtering with High-speed PIV and Application to Hybrid Engine Development

大倉康裕[1] Yasuhiro OKURA
瀬川誠[2] Makoto SEGAWA
鬼丸裕美[3] Hiromi ONIMARU
佐藤誓祐[4] Seisuke SATO
浦田泰弘[2] Yasuhiro URATA

要　旨

エンジン燃焼促進に寄与する乱流成分を分離する手法として時間フィルタ法を構築した．時間フィルタ法では流れの周波数特性が変化する周波数をカットオフ周波数としており，この周波数は燃焼室や吸気ポートとともにピストン形状により誘起される比較的大きな流れの時間スケールに相当することを確認した．さらに流れの積分時間スケールの逆数をカットオフ周波数とすることにより，カットオフ周波数を一義的に決定できることを明らかにした．吸気切り替えデバイスであるタンブルコントロールバルブを搭載した流動場へ時間フィルタ法を適用した．得られた乱流は実機の燃焼期間と高い相関性があり，分離手法の確からしさを確認することができた．時間フィルタ法を市販解析ソフトへ実装し，ハイブリッド用エンジンの開発へ適用した．開発初期仕様に対して吸気ポートとピストンの形状を変更した流動強化仕様では乱流が強化されており，急速燃焼を実現するための流動強化コンセプトを検証することができた．

ABSTRACT

A time filtering method was constructed as a means of decomposing the turbulent component that contributes to promoting engine combustion. This time filtering method used the frequency at which the frequency characteristic of the in-cylinder flow changes as the cut-off frequency, and this frequency was confirmed to correspond to the time scale of the relatively large in-cylinder flow induced by the combustion chamber, intake port, and piston shapes. It was also clarified that the cut-off frequency can be uniquely determined by using the inverse of the integral time scale of in-cylinder flow as the cut-off frequency. The time filtering method was applied to a flow field equipped with a tumble control valve, which is an intake switching device. The obtained turbulence was highly correlated with the combustion duration of a metal engine, which confirmed the reliability of the decomposition method. The time filtering method was implemented in commercial analysis software and applied to hybrid engine development. Turbulence was enhanced by the in-cylinder flow enhancement specification that changed the intake port and piston shape from the early development specification and verified the in-cylinder flow enhancement concept for achieving rapid combustion.

1．まえがき

近年，人類の経済活動により排出された二酸化炭素（CO_2）による地球温暖化等の環境問題が社会的に注目されている．2022 年度における日本の運輸部門から排出された CO_2 量は全体の約 18.5％であり，乗用車はそのうちの約 44.9％を占めている[(1)]．乗用車から排出される CO_2 を削減するため，内燃機関の販売禁止や，バッテリまたは燃料電池をパワーユニットとする電動化シフトなどが世界規模で進んでいる．一方，バッテリにはコバルトなどのレアメタルが必要であり，採掘や地金生産の地域が限られていることから安定的な供給に課題があると考えられてい

[1] 本田技研工業株式会社，博士（工学）
E-mail: yasuhiro_okura@jp.honda
[2] 本田技研工業株式会社
[3] 先進パワーユニット・エネルギー研究所
[4] 株式会社ホンダ・レーシング

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_9

る[2]．さらにバッテリ製造や火力発電などで発生するCO_2排出などを考慮したライフサイクルアセスメントでは，バッテリ電気自動車のCO_2排出量がガソリン車に対して多い場合があることを示唆している[3]．そういった背景をもとに，自動車用内燃機関ではカーボンニュートラルを目指してガソリン燃焼に適した燃料組成の開発[4),(5]や既存インフラをそのまま活用できるドロップインを想定した再生可能電力由来の合成燃料（Erneuerbarer strom - fuel: e-fuel）の研究[6]が進められている．

火花点火（Spark Ignition: SI）ガソリンエンジンでは熱効率向上を目的とし，リーンバーン燃焼[7),(8]や大量排ガス再循環（Exhaust Gas Recirculation: EGR）[9]による燃焼コンセプトが研究されている．これらの燃焼コンセプトは，空気と燃料による混合気に，余剰となる空気やEGRガスを加えてポンプ損失や熱損失などを低減させるものである．一方，混合気の希薄化や希釈による燃焼速度の低下を補うため，吸気ポート形状の最適化などにより流動強化がおこなわれている[10]．しかし，このような手法では中高回転領域で吸気抵抗が増加するため，出力の低下を招くおそれがある．この課題を解決するために，エンジン運転条件に応じたタンブル比増加と吸気抵抗低減の両立を狙った吸気切換えデバイスの研究や開発がおこなわれている[11),(12]．

2．乱流成分の分離手法

2.1. 従来手法の課題

SIガソリンエンジンの火炎伝播燃焼を促進するためには乱流強化が有効であり，エンジン筒内の乱流評価にはサイクル平均法が従来用いられてきた．サイクル平均法とは，サイクル平均された速度に対する瞬時速度の差を乱流成分と定義するものである[13)-(15]．しかし，この手法では平均流成分の比較的低周波なサイクルごとの変動も乱流成分に含まれることが指摘されており，乱流を過大に評価してしまう可能性がある．他の分離法として時間フィルタでの分離を試みた研究がある．この手法は圧縮上死点付近の速度から定常的時間平均法を用いて1サイクルごとに平均流成分と乱流成分を分離するものである．圧縮上死点付近において各サイクルの短い期間ではガス流動を定常流とみなせると仮定したものであるが，定常流とみなす平均化時間の明確な物理的定義は与えられていない[16),(17]．また，サイクル平均された速度の積分パワースペクトルが90%以上となる周波数をカットオフ周波数とすることが提案されているが，カットオフ周波数には任意性があるとしている[18),(19]．このように，乱流成分の分離に関しては種々の手法が提案されているが，カットオフ周波数の設定にあいまいさが残る．そのため，例えば計測された乱流強度を判断基準に吸気ポート設計をおこなう場合，乱流を過大に評価してしまうことにより再設計が必要になる場合がある．

2.2. 時間フィルタ法

筆者らは高速で計測可能な高速粒子画像流速測定法（Particle Image Velocimetry: PIV）による時間分解能の高さを利用した時間フィルタ法を新たな乱流成分の分離法として提案した[20]．Fig. 1に吸気行程から圧縮行程の速度uと，流れの周波数特性を示す（速度の方向は後述のFig. 6を参照）．任意サイクルの速度はサイクル平均された速度に対して変動しており，従来手法であるサイクル平均法ではこの変動を乱流成分としていた．時間フィルタ法では1サイクルごとに離散フーリエ変換により周波数特性を求める．それから，サイクル平均した特性の傾きが変化する周波数をカットオフ周波数f_{c_slope}と定義し，f_{c_slope}よりも周波数の高い成分を乱流成分として分離する手法である．ここで，$\hat{u}$, $\hat{v}$はu, v速度成分の離散フーリエ係数である．Fig. 2にサイクル平均法と時間フィルタ法で得られた乱流運動エネルギkの比較を示す．これより，サイクル平均法の乱流運動エネルギk_cは時間フィルタ法の乱流運動エネ

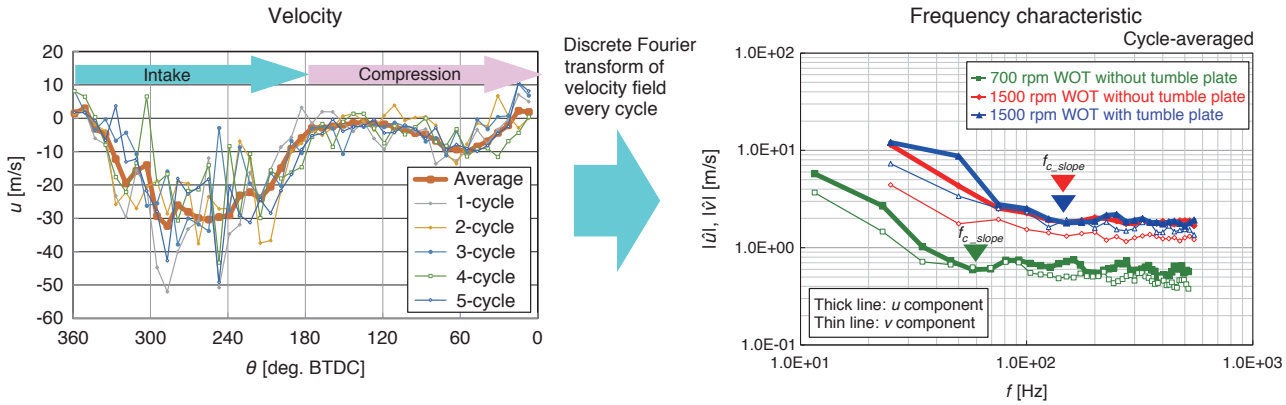


Fig. 1　Velocity and frequency characteristic of in-cylinder flow

ルギ k_f に対して全体的に過大評価されている．特に圧縮行程後半の乱流運動エネルギは燃焼へ直接影響することから燃焼特性を過大に評価してしまう可能性がある．以上のことから，時間フィルタ法では，カットオフ周波数より高い周波数成分を乱流成分とすることにより，燃焼促進に寄与しないと考えられる平均流成分（低周波成分）のサイクル変動分を乱流成分に含めないことが特徴である．

本研究ではエンジン筒内流動へ適用可能な乱流解析法の構築を目的とする．最初に時間フィルタ法に必要な時間分解能の影響を確認し，平均流成分と乱流成分を分離するためのカットオフ周波数の設定について検討をおこなう．次に吸気切換えデバイスであるタンブルコントロールバルブ（Tumble Control Valve: TCV）への適用をおこない，得られた乱流と燃焼特性の相関性から乱流解析法の確からしさを検証する．最後に時間フィルタ法を市販の PIV 自動解析ツールへ実装し，ハイブリッド用エンジンの流動強化コンセプトを検証する．本論文ではこれらの内容を報告する．

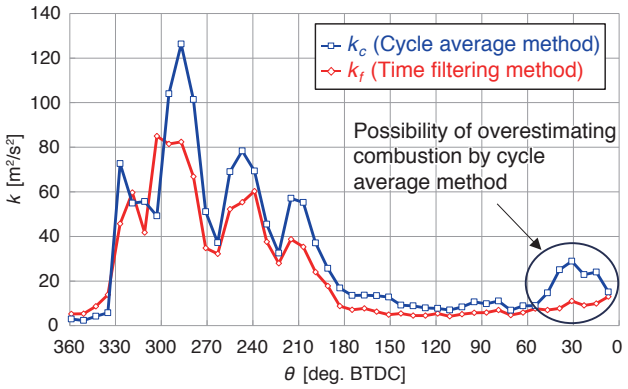


Fig. 2　Comparison of turbulent kinetic energy obtained by time filtering method and cycle average method

3．時間フィルタ法の構築

3.1. 実験方法

3.1.1. エンジン諸元

エンジンの主要諸元を Table 1 に，エンジンの外観を Fig. 3 にそれぞれ示す．エンジンは株式会社小山ガレージ製の全行程単気筒可視化エンジンで，ボア径は 73 mm，ストロークは 89.4 mm である．吸気と排気バルブはそれぞれ二つずつ備えている．ヘッドとブロックの間に石英製スリーブが設置されており，吸気行程から圧縮行程にかけてシリンダ内の様子を側方から可視化することが可能である．延長ピストンのトップ形状は部品交換により形状変更が可能である．ピストン下方から可視化をおこなう場合には，石英製ウィンドウを持つフラット形状へ変更し，延長ピストンの下方に設置された角度 45 度ミラーを介して可視化が可能である．

Table 1　Engine specifications

Engine	Optical single-cylinder engine with quartz sleeve
Bore × Stroke	73 mm × 89.4 mm
Displacement	374 cm³
Valve train	DOHC 4 valves

3.1.2. 計測装置

速度計測に用いた PIV とは，気流中に混入させたトレーサ粒子にレーザなどの照明を当て，カメラにて撮影された画像内の粒子移動量から速度を求めるものである．光源には高繰り返しダブルパルス Nd:YAG レーザ（Lee Laser 社製，LDP-50MQG）を用い，レーザ光の波長は 532 nm である．粒子画像の撮影には高速度 CMOS カメラ（Photron 社製，APX-RS）を用いた．トレーサには，平均粒径 3 μm の SiO_2（鈴木油脂工業株式会社製，ゴッドボール B-6C）を用い，スロットル直後の吸気チャンバからエンジン内に吸入させた．トレーサ粒子の濃度は，後述する PIV 解析の検査領域 16 × 16 pixel に数個程度撮影できるようトレーサ供給装置の空気圧を調整した．

計測をおこなったクランク角度範囲を Fig. 4 に示す．吸気バルブリフト，筒内圧 P_{cyl} と吸気管内圧力 P_{intake} を参考として図に加えた．計測クランク角度は，吸気上死点（Top Dead Center: TDC）であるクランク角度 θ = 360 deg. BTDC から圧縮 TDC である θ = 0 deg. BTDC までとし，これを複数サイクルにわたり計測した．得られた粒子画像は市販の西華デジタルイメージ株式会社製 PIV 解析ソフト Koncerto ver1.0 により解析をおこなった．解析アルゴリズムには再帰的 FFT 相互相関法を用い，検査領域を 64 × 64 pixel から 16 × 16 pixel まで 3 段階に変化させ，オーバーラップを 50 % とした．テスト条件は，

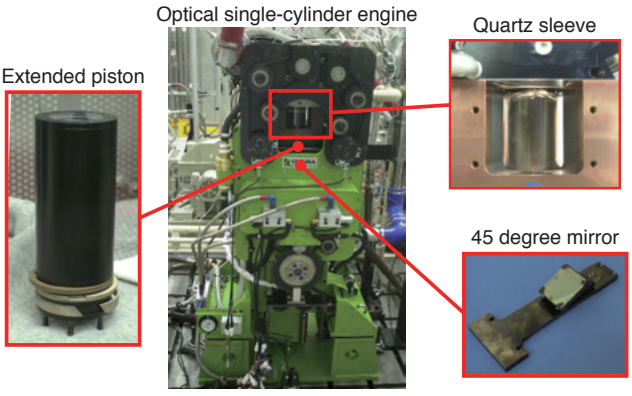


Fig. 3　Appearance of optical single-cylinder engine

Ne = 700 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm の３条件とし，いずれもスロットル全開 (Wide Open Throttle: WOT) とした．

3.2. カットオフ周波数設定法の検討

本節では，時間フィルタ法に必要な時間分解能を明らかにするとともに，カットオフ周波数の設定法や物理的意味についての検討をおこなった．

テストに用いた PIV システムのレイアウトを Fig. 5，計測と解析領域を Fig. 6 へ示す．レーザ光はシリンドリカルレンズにより厚さ 0.5 mm のシート状に引き伸ばされた後，エンジン側面から透明スリーブを通過させてシリンダ内へ照射される．計測位置はボアセンタである．撮影速度を 20 キロフレーム毎秒 (frame per second: fps)，撮影範囲を横 40 mm，縦 18 mm で，空間解像度 0.077 mm/pixel (512 × 256 pixel) にて撮影をおこなった．また，圧縮 TDC 付近まで乱流解析をおこなえるように，シリンダ上部の横 36 mm，縦 6 mm の範囲を解析領域とした．

3.2.1. 時間フィルタ法とサイクル平均法の比較

吸気行程初期 θ = 300.1 deg. BTDC における筒内流動を例に，サイクル平均速度分布と瞬時速度分布の比較を Fig. 7 に示す．これより，Fig. 7(b) に示した任意６サイクルでは瞬時速度分布や渦中心 (赤丸) がサイクルごとに異なっていることが分かる．次に Fig. 7(a) に示したサイクル平均された速度分布は，どのサイクルの速度分布とも異なっている．

時間フィルタ法とサイクル平均法により分離されるエネルギの違いを Fig. 8(a) へ示す．縦軸のエネルギ E は解析点における u 速度成分と v 速度成分の２乗平均値である．時間フィルタ法では１サイクルごとに離散フーリエ変換で周波数特性を求め，サイクル平均値を青色で示した．傾きの変化する周波数 f_{c_slope} は 360 Hz であり，それ以上の高周波

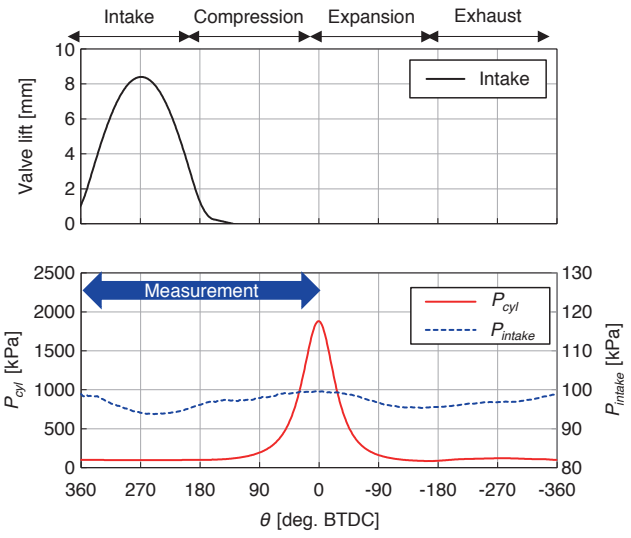


Fig. 4 Measurement range of in-cylinder flow

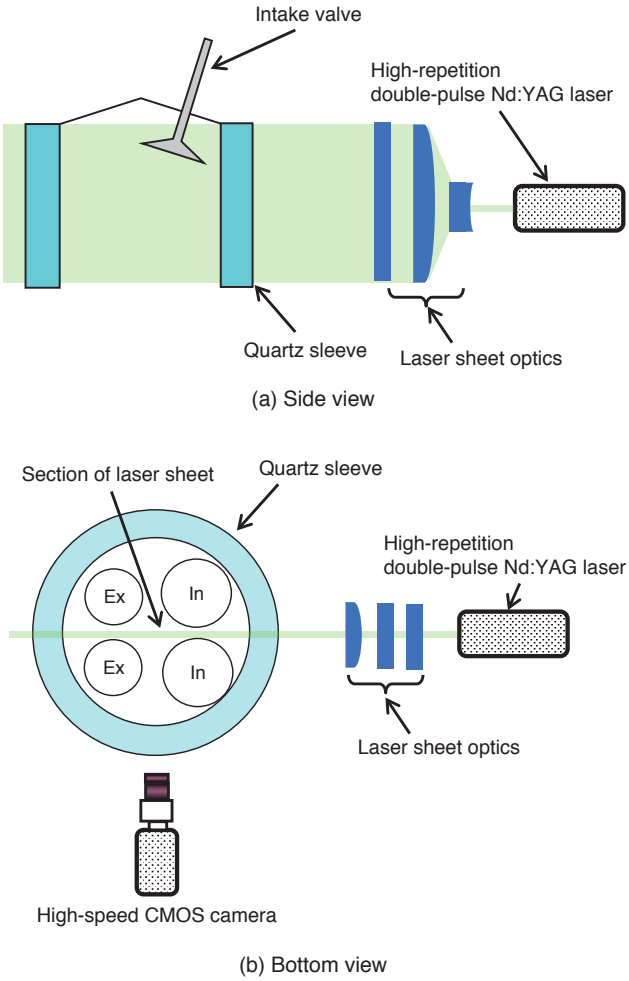


Fig. 5 Layout of PIV system for construction of turbulent analysis method

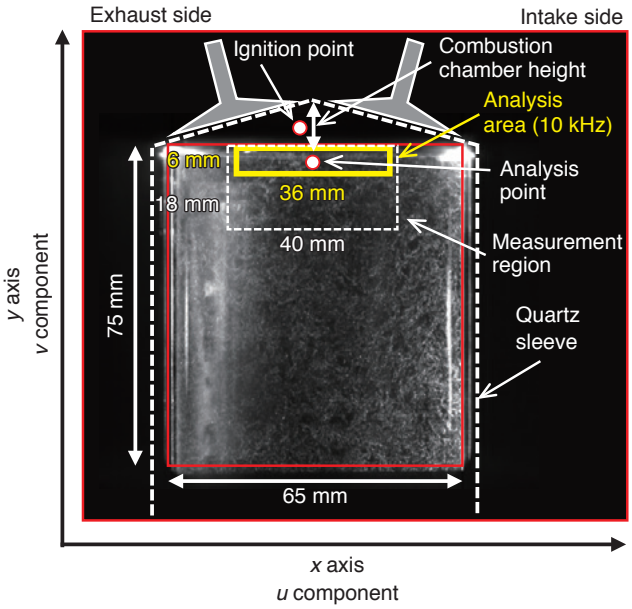
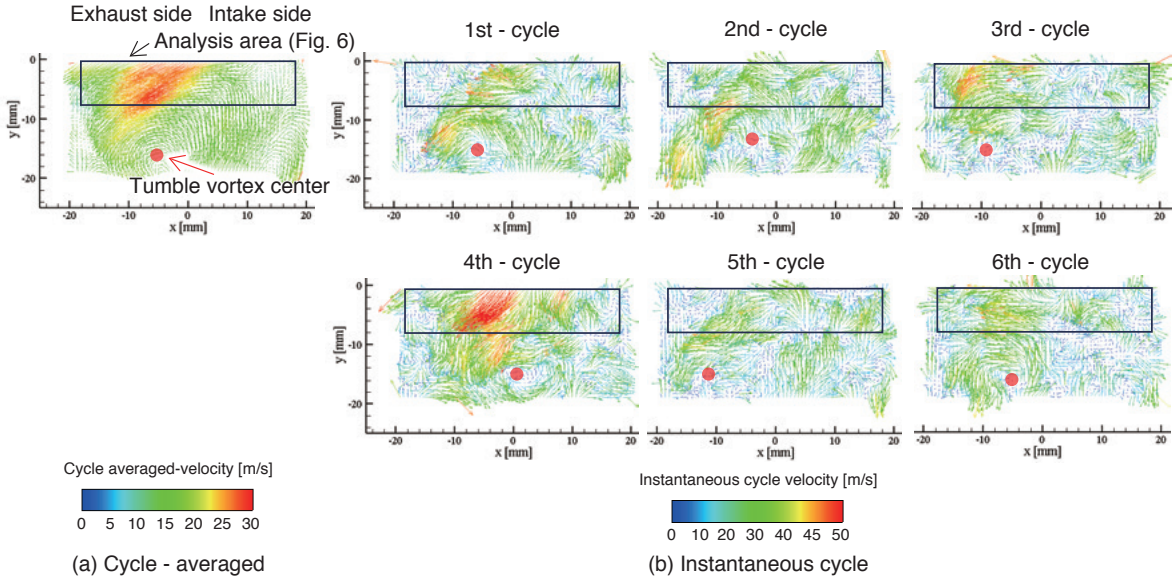


Fig. 6 Measurement region and analysis area for construction of turbulent analysis method

数帯を乱流成分とした（青色で塗られた領域）．この乱流成分は Fig. 8(b) で示す平均流と瞬時の速度差の 2 乗平均値に相当する．サイクル平均法の周波数特性はサイクル平均した速度から離散フーリエ変換により周波数特性を求めて Fig. 8(a) へ赤色の実線で示した．サイクル平均法の乱流成分は時間フィルタ法とサイクル平均法のスペクトルにより囲まれた赤色の領域であり，黒点線で囲まれた領域が時間フィルタ法に対して過大に評価されている．この過大評価された領域は Fig. 8(b) の時間フィルタ法とサイクル平均法の速度差の 2 乗平均値，すなわち平均流成分のサイクル変動分である．

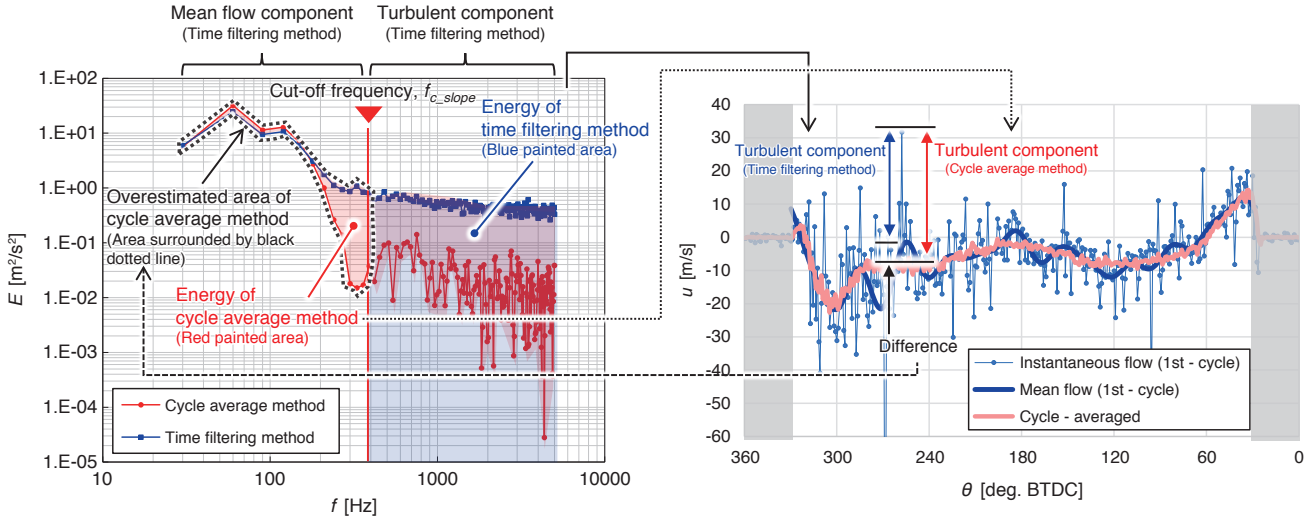
3.2.2. 時間分解能が及ぼす影響

時間フィルタ法で重要になると考えられる時間分解能について解析をおこなった．時間分解能が解析点における u 速度成分のエネルギスペクトル E_u へ及ぼす影響を Fig. 9 へ示す．時間分解能は同一計測データをクランク角度方向に間引くことにより疑似的に減少させた．これより，時間分解能が 10 kHz から 2.5 kHz 程度の間であれば傾きが変化する周波数に大きな影響は見られなかった．ここで，本解析では離散フーリエ変換をおこなっていることから，時間分解能を減少させるとエイリアシングにより真のスペクトルと時間分解能の 1/2 の周波数であるナイキスト周波数



(a) Cycle - averaged　　(b) Instantaneous cycle

Fig. 7　Comparison of cycle-averaged in-cylinder flow and instantaneous in-cylinder flow for 6 cycles in measurement region, *Ne* = 1500 rpm WOT at θ = 300.1 deg. BTDC



(a) Energy spectrum　　(b) In-cylinder velocity

Fig. 8　Comparison of energy obtained by time filtering method and cycle average method at analysis point, *Ne* = 1500 rpm WOT

f_N の整数倍だけ異なった周波数が同一視される．すなわち，真のスペクトルに f_N 間隔ごとのスペクトルが折り重なってしまい，離散化にともなう誤差を生じる[21]．本流動場において，時間分解能が 10 kHz から 5 kHz へ減少した場合でも 360 Hz 以上のエネルギの減少は約 5% であることから，時間分解能が 5 kHz 程度であればエイリアシングが f_{c_slope} へ及ぼす影響は小さいと考える．

3.2.3. カットオフ周波数の設定法

本項では，流れの積分時間スケール τ についての考察をおこない，f_{c_slope} の物理的な意味についての考察とカットオフ周波数の設定について検討をおこなった．

解析領域内の空間平均された流れの積分時間スケールとピストン速度の特性時間 τ_p の比較を Fig. 10 に示す．τ_u は瞬時速度 u から式（1）を用いて自己相関係数 R_{uu} を計算した後，式（2）を用いて自己相関係数 R_{uu} が 0 となるまで積分して求めた[22]．v 速度成分の流れの積分時間スケール τ_v も同様に計算をおこなった．

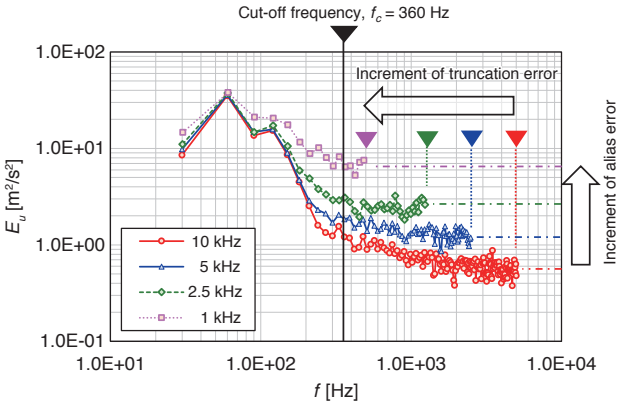


Fig. 9 Effect of time resolution on cycle-averaged in-cylinder energy spectrum at analysis point, *Ne* = 1500 rpm WOT

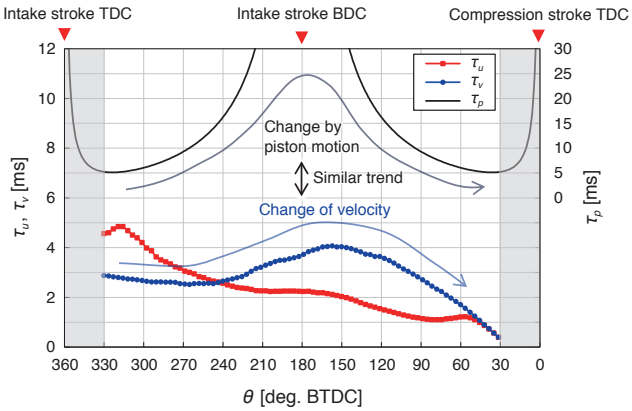


Fig. 10 Comparison of spatial-averaged integral time scale of in-cylinder flow, τ_u, τ_v in analysis area and time scale of piston speed, τ_p. Test condition is *Ne* = 1500 rpm WOT.

$$R_{uu}(\Delta\theta) = \frac{1}{u(\theta)^2}\sum u(\theta)u(\theta+\Delta\theta) \qquad (1)$$

$$\tau_u = \sum R_{uu}(\Delta\theta) \qquad (2)$$

τ_p はボア中心におけるペントルーフ燃焼室頂点からピストントップまでの燃焼室高さ h_p を瞬時ピストン速度 u_p で除した値と定義した．TDC の h_p は 15 mm である．これより，流れの積分時間スケールで，特に τ_v のクランク角度に対する変化は τ_p と近い傾向を示している．この関係性は，流れの積分時間スケールが燃焼室や吸気ポート形状とともにピストン速度によって誘起される比較的大きなスケールの流れに相当するものと考えられる．吸気行程中盤である θ = 270 deg. BTDC の τ_u と τ_v の平均を流れの積分時間スケール τ とし，逆数 $f_{c\_\theta=270}$ と f_{c_slope} の比較を Fig. 11 に示す．図には第 4 章のデータもプロットした．これより，$f_{c\_\theta=270}$ と f_{c_slope} の相関係数は第 3 章で 0.936，第 4 章を加えた全体で 0.918 であり，高い相関が見られた．

以上のことから，流れの周波数特性の傾きが変化する周波数 f_{c_slope} は，流れの積分時間スケール τ と相関があり，燃焼室，吸気ポート形状やピストン速度によって誘起される比較的大きなスケールの流れに相当すると考えられる．また，カットオフ周波数は流れの積分時間スケールの逆数 $f_{c\_\theta270}$ とすることで，一義的に決定することが可能となった．以後，特別に断りがない場合には $f_{c\_\theta270}$ をカットオフ周波数 f_c として用いることとする．

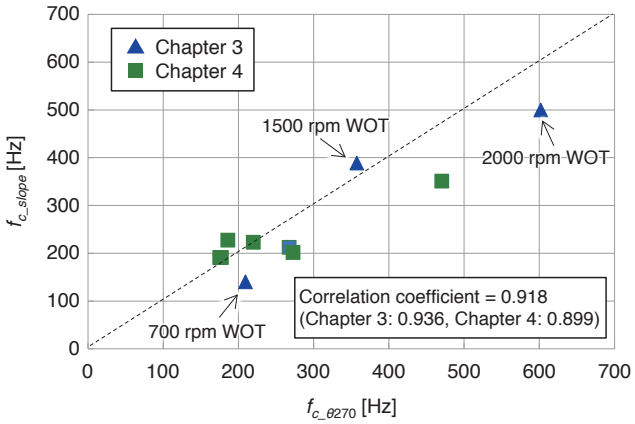


Fig. 11 Relationship between cut-off frequency at changed slope of in-cylinder flow frequency characteristic f_{c_slope} and cut-off frequency obtained from autocorrelation $f_{c\_\theta270}$

4．時間フィルタ法の確からしさ検証

本章では吸気切り替えデバイス TCV へ時間フィルタ法を適用し，得られた乱流と燃焼特性の相関性から乱流成

Table 2　Specifications of tumble control valve

Specifications	Flow part	G_{plate} [mm]	L_{Plate} [mm]
UF 2 mm	Upper	2	93
UF 25 mm	Upper	25	70
UF 50 mm	Upper	50	45
LF 2 mm	Lower	2	93
LF 25 mm	Lower	25	70
LF 50 mm	Lower	50	45

分の分離手法である時間フィルタ法の確からしさを検証した.

TCV の仕様を Table 2, 模式図を Fig. 12 に示す. フラップにより隔壁の下側通路を閉じた場合, 空気は隔壁の上側通路を流れることから, この仕様を上流しとし, Upper Flow (UF) と表記する. 逆にフラップにより隔壁の上側通路を閉じた場合, 空気は隔壁の下側通路を流れることから下流しとし, Lower Flow (LF) と表記する. 隔壁長さ L_{Plate} が長い程, 隔壁の先端位置が吸気バルブステムに近づき, 燃焼室へ流入する流れの指向性が高くなると考えられる. そこで隔壁先端から吸気バルブステムまでの距離 G_{Plate} を隔壁のパラメータとして用い, 2 mm, 25 mm, 50 mmの3仕様とした. 以後, 上流し, G_{Plate} = 2 mm の場合, UF 2 mm とし, フラップと隔壁の仕様をまとめて表記する.

計測範囲と解析領域を Fig. 13 に示す. レーザシート光は 45 度ミラーにより上方へ反射させ, ピストンウィンドウを通過させてエンジン下側から燃焼室内へ照射した. 計測位置はボアセンタで, 計測範囲は燃焼室内の横 46.6 mm, 縦 24 mm である. 点火プラグによる着火から燃焼初期の乱流を解析するため, 正規の点火プラグを取り外し, 外側電極や中心電極をカットしたダミープラグを取り付けた. 点火プラグの着火点 (Ignition point) は吸気行程中に吸気バルブにより隠されるため, 解析には排気側へ 4.6 mm オフセットした位置 (Analysis point) を用いた. また, 空間平均をおこなう場合, 吸気バルブがリフトしても解析結果へ影響を及ぼさない横 8 mm, 縦 4 mm の範囲 (Analysis area) を対象とした. テスト条件は, Ne = 1500 rpm WOT とした.

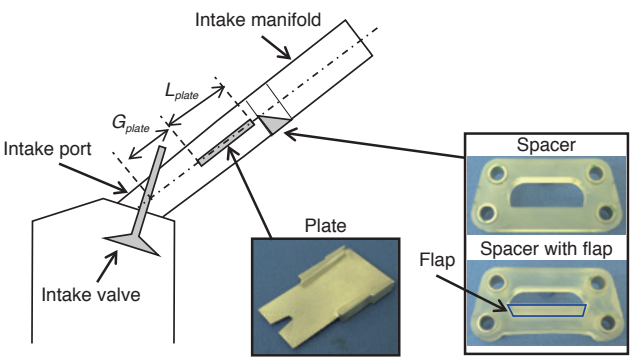


Fig. 12　Schematic diagram of tumble control valve

4.1. TCV の乱流解析

TCV 無し, TCV UF 2 mm (上流し) と TCV LF 2 mm (下流し) の場合の平均流成分と乱流運動エネルギ k_f の空間分布を Fig. 14 に示す. カットオフ周波数 f_c は, それぞれ 267 Hz, 219 Hz, 470 Hz である. 乱流運動エネルギ k_f は式 (3) より求めた.

$$k_f = \frac{1}{2}(u'^2_f + v'^2_f) \qquad (3)$$

ここで, u'_f と v'_f は時間フィルタ法により分離された乱流速度成分である. これより, TCV UF 2 mm の平均流速度は TCV 無しの場合に対して速く, 渦中心は燃焼室中心付近に存在する. TCV LF 2 mm の平均流速度は, TCV 無しの場合と比べておおむね同じ値を示し, 分布にも大きな差は見られない. TCV UF 2 mm の k_f は, TCV 無しの場合に対して高い値を示しており, タンブル流の渦中心がある燃焼室中心付近の k_f が特に高い値を示す. 一方, TCV LF 2 mm の k_f は, TCV 無しの場合とおおむね同じ値を示し, 分布にも差は見られない. この理由として, Fig. 14 の模式図に示したように吸気ポート下側から筒内へ流入した流れは吸気バルブにより排気側へ流され, タンブル流の強化に寄与しないためである.

4.2. 乱流火炎構造の推定

TCV を装着した際の火炎形態を乱流予混合燃焼ダイアグラム[23]により予測した. 圧縮 TDC 付近である θ = 0.4 deg. BTDC の結果を Fig. 15 に示す. 縦軸の乱流強度 u' は可視化エンジンでモータリング時に計測された乱流運動エネルギ k_f の平方根とした. 層流燃焼速度 S_L は, 流体の物性を当量比 ϕ = 1.0, EGR 率 0% の混合気と仮定

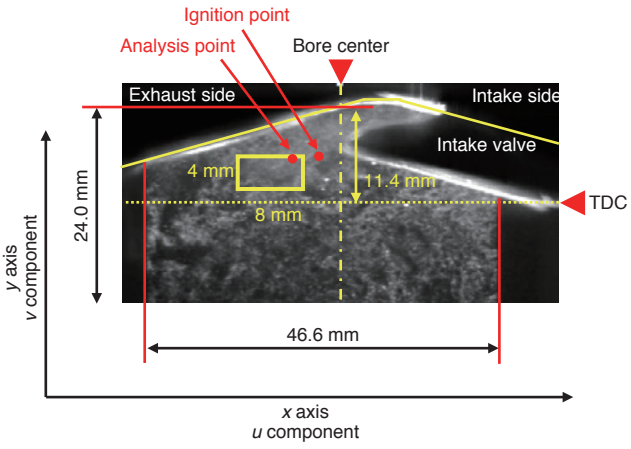


Fig. 13　Measurement region and analysis area for turbulent analysis with tumble control valve

し，素反応計算によりもとめた[24]．燃料組成は疑似ガソリン（Primary Reference Fuel: PRF）で，条件は筒内圧 P_{cyl} = 1270 kPa，筒内ガス温度 T_{cyl} = 532 K である．横軸の乱れの積分長さスケール l と火炎帯厚さ l_F は，それぞれ式（4），式（5）より求めた．

$$l = u' \times \tau_l \quad (4)$$

$$l_F = \nu_F / S_L \quad (5)$$

ここで，τ_l は乱流強度 u' の積分時間スケール，ν_F は混合気の動粘性係数であり，燃料組成は物性推算法[25]より求めた．

これより，TCV 無しと TCV UF 2 mm の場合の火炎形態は，いずれも corrugated flamelets に分類された．TCV UF 2 mm の u' と l は，TCV 無しに対して大きいことからやや右上の位置にプロットされる．corrugated flamelets の領域では火炎面にしわが形成されているが火炎の内部構造にまでは乱流が影響を及ぼさないと考えられており，wrinkled flamelets 領域より火炎面のしわが強調されている[26]．すなわち，乱れが強化され，火炎表面積の増加により燃焼促進を得られることが期待される．さらなる熱効率向上を見据え，リーンバーンや大量 EGR における乱流火炎形態についても計算をおこなった．当量比 ϕ = 1.0 から ϕ = 0.5 へ混合気を希薄にすると S_L が約 42.4 cm/s から 11.5 cm/s へ減少し，thin reaction zones へと火炎形態が変化する．ϕ = 1.0 にて EGR 率を 35% へ増加すると S_L が 0.35 cm/s へ減少し，火炎形態は broken reaction zones へ移動する．これらの火炎形態では乱れにより局所的に火炎

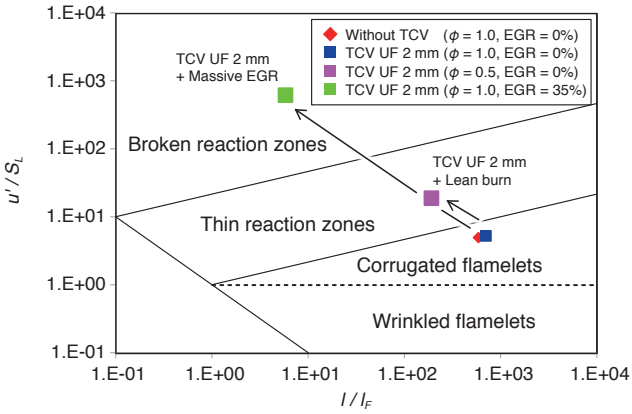


Fig. 15 Effect of enhancement of in-cylinder flow by TCV in analysis area, *Ne* = 1500 rpm WOT at θ = 0.4 deg. BTDC

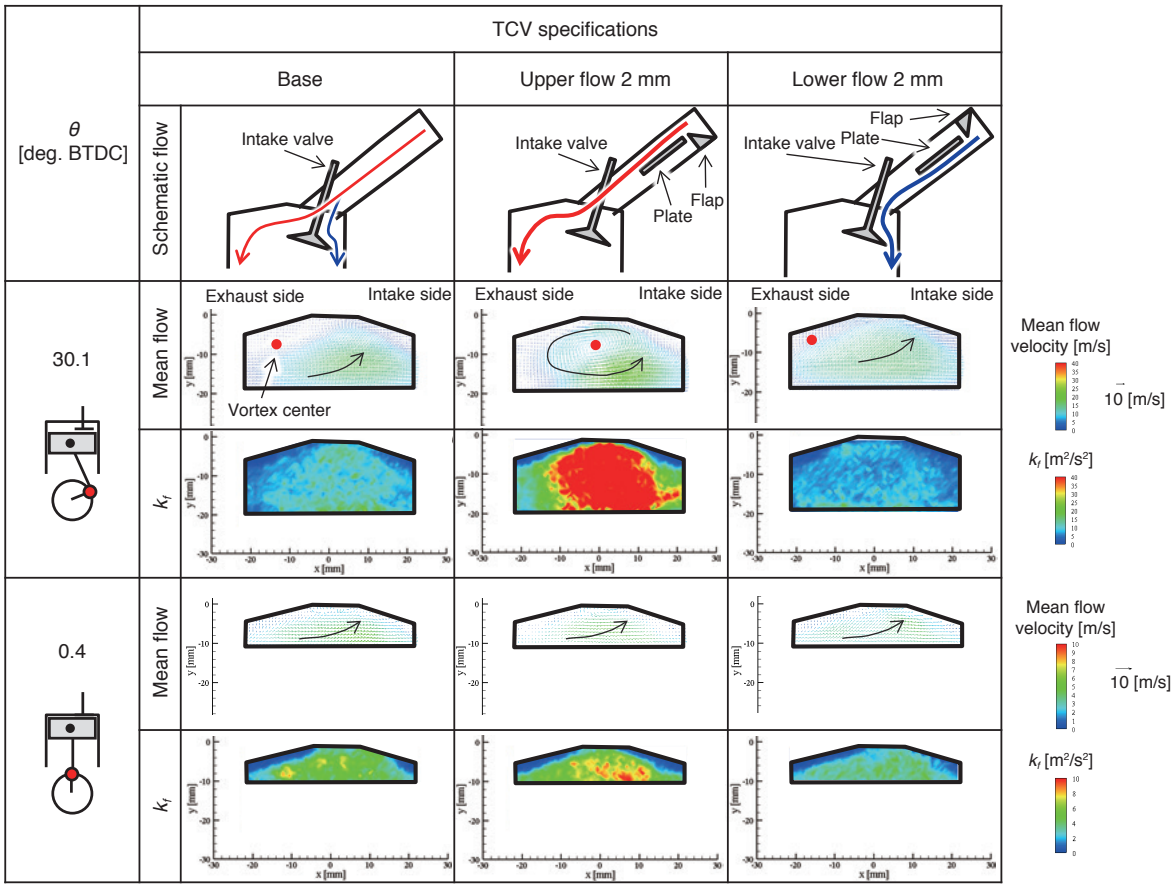


Fig. 14 Distribution of mean flow velocity and turbulent kinetic energy k_f obtained by time filtering method, *Ne* = 1500 rpm WOT in without TCV, upper flow 2 mm and lower flow 2 mm

の消炎が起こると考えられている．すなわち，このような火炎形態となる場合には単に流動強化をおこなうだけでは燃焼を促進できない可能性がある．したがって，例えば点火プラグ周りの平均流のサイクル変動を低減するなどして着火性を向上させるなどの追加対策が必要となる．

4.3. 乱流と燃焼特性の関係

同一諸元を持つ実機単気筒エンジン（以下，実機エンジン）にて TCV が燃焼へ及ぼす影響を確認した．可視化エンジンのモータリング時に得られた乱流運動エネルギ k_f と実機エンジンのファイアリング時に得られた燃焼期間の関係を Fig. 16 に示す．実機エンジンの負荷は圧縮行程から膨張行程の図示平均有効圧力（Indicated Mean Effective Pressure High-loop: IMEP.H）= 1000 kPa である．点火から質量燃焼割合（Mass Fraction Burnt: MFB）が 10% となるまでの期間を初期燃焼期間 θ_{ig}-MFB10 と定義し，k_f は点火時期 θ_{ig} の時の値を用いた．これより，TCV により k_f を増加させると，それにともない θ_{ig}-MFB10 は減少する．TCV 無しに対して，効果の大きい TCV 仕様は UF 2 mm と UF 25 mm である．一方，θ_{ig}-MFB10 が増加した仕様は LF 2 mm であった．乱流運動エネルギ k_f と θ_{ig}-MFB10 の相関係数は 0.875 であり，時間フィルタ法で得られた k_f は燃焼と相関性が見られることから乱流解析法の確からしさを確認することができた．

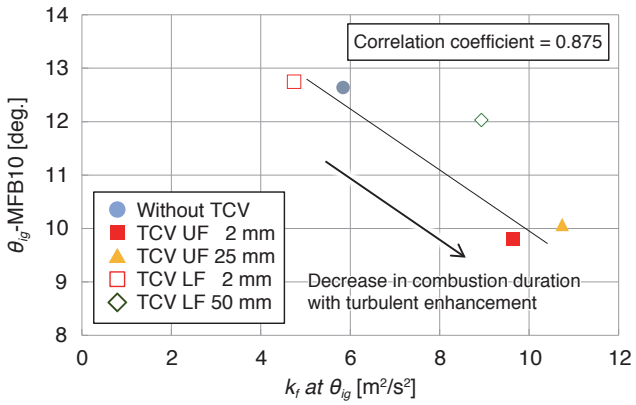


Fig. 16 Relationship between combustion duration on metal single-cylinder engine and turbulent kinetic energy, k_f obtained by time filtering method at ignition timing on optical single-cylinder engine, *Ne* = 1500 rpm IMEP.H = 1000 kPa

5. ハイブリッド用エンジン開発への適用

5.1. 解析ツールの標準化

構築した時間フィルタ法を誰でも簡単に利活用できるように，フローテックリサーチ社製の市販 PIV 自動解析ツール FtrPIV-Cruise へ筒内流動解析機能として実装をおこなった．本ツールの特徴として，PIV の計測設定，PIV 解析，統計処理（乱流解析など）とレポート作成までの処理を同一のツールにて一連でおこなうことが可能である[27]．グラフィカルユーザーインターフェイス（Graphical User Interface: GUI）により時間フィルタ法を選択するだけで，乱流解析と WEB ブラウザ形式のレポート作成を自動でおこなう機能を追加した．GUI による簡便な設定と自動化により，乱流解析とレポート作成に要していた工数を約 30% 低減することが可能となり，エンジン開発プロジェクトへタイムリーに検証結果をフィードバックできるようになった．

5.2. 流動強化コンセプトの検証

エンジン仕様は 2 モータハイブリッド用直列 4 気筒直噴エンジンで，排気量は 2.0 L である．クラストップレベルの燃費を達成するため，本エンジンの圧縮比は 13.9 とし，Cooled EGR システムを搭載する．急速燃焼を実現するため，吸気ポートによりタンブル流が強化され，ピストンによりスムーズに上昇流へ変換するボウルイン型のピストンが採用されている[28]．

流動強化のため吸気ポートやピストン形状を数値流体力学（Computational Fluid Dynamics: CFD）にて検討した．この流動強化コンセプトを検証するため，開発初期仕様と流動強化を目的とした流動強化仕様の筒内流動解析を PIV にておこなった．*Ne* = 2000 rpm WOT にて 60 サイクル計測をおこない，時間分解能は 3 deg. BTDC（撮影速度 8 kfps）である．CFD 解析には市販の Ricardo 社製 3 次元汎用流体解析ソフト VECTIS を用い，乱流モデルには標準 k-ε モデルを適用した．開発初期と流動強化仕様のサイクル平均された筒内流動比較を Fig. 17 に示す．θ = 180 deg. BTDC において PIV により得られた流動強化仕様の速度は開発初期仕様に対して増加しており，吸気ポートから流入した流れがスムーズに上昇流へ変換されている．圧縮行程後半である θ = 30 deg. BTDC のおいても PIV により得られた流動強化仕様の速度が速く，これらは CFD の解析結果と同様の傾向であった．

PIV により得られた開発初期仕様と流動強化仕様の乱流運動エネルギ k_f の比較を Fig. 18 に示す．開発初期仕様に対して流動強化仕様の k_f は θ = 60 deg. BTDC 以降で大きい値を示す．θ = 30 deg. BTDC の k_f 分布では，開発初期仕様に対して流動強化仕様の k_f は燃焼室中心付近で高い傾向である．

時間フィルタ法とサイクル平均法の乱流運動エネルギ k_f の比較を Fig. 19 に示す．時間フィルタ法では開発初期仕様から流動強化仕様へ変更することにより k_f は約 21.9% 増加しているが，サイクル平均法では 24.9% 増加しており，サイクル平均法の k_f は約 3% 大きく見積もられている．

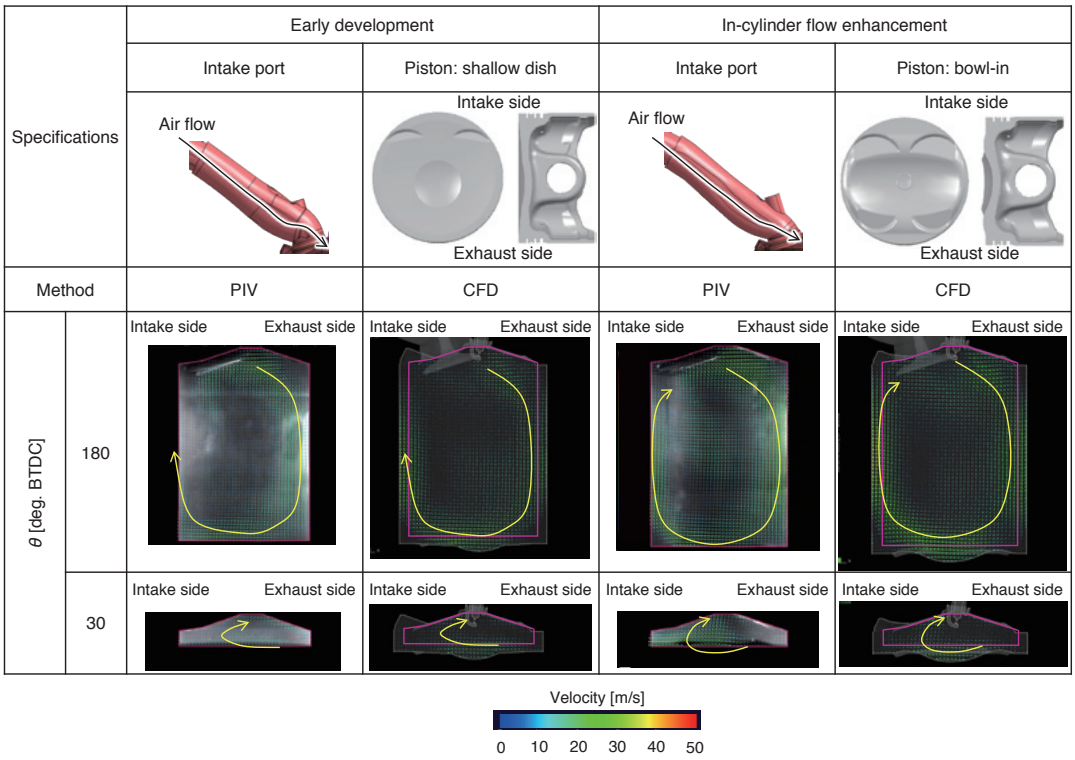


Fig. 17 Comparison of in-cylinder flow with early development and in-cylinder flow enhancement specification obtained by PIV and CFD, *Ne* = 2000 rpm WOT

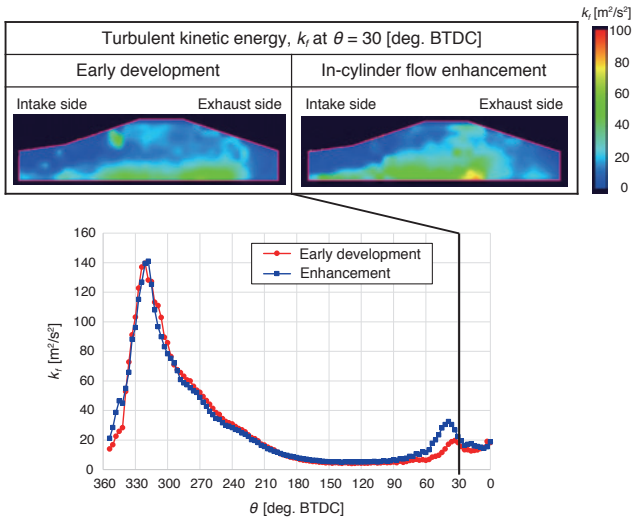


Fig. 18 Comparison of turbulent kinetic energy k_t with early development and in-cylinder flow enhancement specification obtained by PIV, *Ne* = 2000 rpm WOT

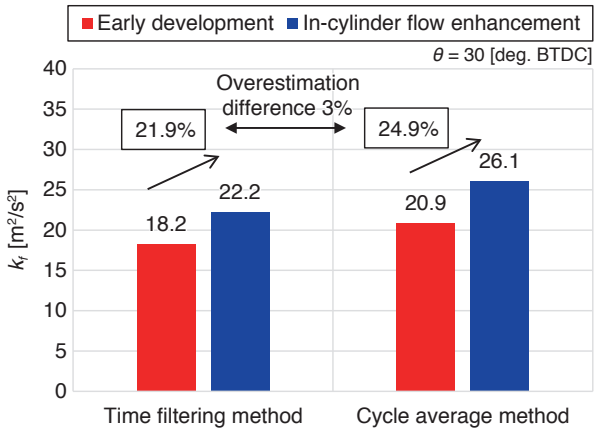


Fig. 19 Effect of time filtering method, *Ne* = 2000 rpm WOT at θ = 30 deg. BTDC

6. まとめ

高速 PIV による時間分解能の高さを利用した時間フィルタ法を新たな乱流分離法として提案し，エンジン筒内流動への適用を検討した．さらに市販の PIV 自動解析ツールへ時間フィルタ法を実装し，ハイブリッド用エンジン開発へ適用することにより以下の結論を得た．

（1）時間分解能を疑似的に変化させ，乱流運動エネルギの特性を検証した．本流動場において平均流成分と乱流成分を分離するためのカットオフ周波数は 5 kHz 以上の時間分解能があれば大きな影響を受けないことがわかった．

（2）流れの周波数特性で傾きの変化する周波数は燃焼室や吸気ポート形状とともにピストン速度によって誘起さ

れる比較的大きなスケールの流れに相当するものであることがわかった．さらに流れの積分時間スケールの逆数をカットオフ周波数とすることで一義的にカットオフ周波数を決定することが可能となった．

（3）吸気切換えデバイスであるタンブルコントロールバルブの乱流特性を時間フィルタ法にて解析したところ，火炎形態は corrugated flamelets に分類され，乱流により燃焼促進効果を得られることが確認された．乱流運動エネルギと実機燃焼期間との間に良い相関が見られたことから，乱流解析法の確からしさを確認することができた．

（4）時間フィルタ法を市販 PIV 自動解析ツールへ実装し，誰でも簡単に利活用できるように解析ツールの標準化をおこなった．これをハイブリッド用エンジン開発へ適用し，急速燃焼を実現するための流動強化コンセプトを検証することができた．

参考文献

（1）国土交通省：運輸部門における二酸化炭素排出量，https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html，（参照 2024/07/17）

（2）経済産業省：自動車新時代戦略会議　中間整理，https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/jidosha_shinjidai/pdf/20180831_01.pdf, (2024/07/23)

（3）木村修二，松浦浩海，菊池隆司，土屋賢次：内燃機関搭載車両におけるカーボンニュートラルに向けた AICE の技術シナリオの検討，自動車技術会 2021 年秋季大会学術講演会講演予稿集，No. 121，20216181，(2021)

（4）松原直義，北野康司，横尾望，中田浩一，小畠健，野村守，藤本尚則，三好明：自動車の早期低炭素化を実現する内燃機関／燃料組成の開発，自動車技術会 2023 年春季大会学術講演会講演予稿集，No. 20，20235090，(2023)

（5）金子和樹，松原直義，北野康司，横尾望，中田浩一，安武優希，内木武虎，小畠健，渡邊学：スーパーリーンバーンエンジンにおける燃料組成が熱効率に及ぼす影響，自動車技術会 2023 年春季大会学術講演会講演予稿集，No. 20，20235091，(2023)

（6）中山智裕：e-fuel に関する技術調査と実証試験，日本機械学会誌，Vol. 27，No. 1266，p. 40-43，(2024)，doi: 10.1299/jsmemag.127.1266_40

（7）木村幸四郎，坂井洋志，大村哲生，高橋大志：カーボンニュートラル実現に向けた熱効率 50％ スーパーリーンバーンエンジンの開発，自動車技術会 2023 年春季大会学術講演会講演予稿集，No. 32，20235145，(2023)

（8）Hanabusa, H., Kondo, T., Hashimoto, K., Sono, H., Furutani, M.: Study on Homogeneous Lean Charge Spark Ignition Combustion, SAE Technical paper 2013-01-2562, (2013), doi: 10.4271/2013-01-2562

（9）田岸龍太郎，池谷健一郎，高沢正信，山田健人：ガソリンエンジンの熱効率追求，自動車技術会 2014 年秋季大会学術講演会講演予稿集，No. 121，20145712，(2014)

(10) 高橋大志，中田浩一，葭原泰司，太田行紀，西浦博之：HV 車用エンジンの熱効率 40% 実現に向けた燃焼開発，自動車技術会 2015 年春季大会学術講演会講演予稿集，No. 1-15S, p. 15-20, 20155004, (2015)

(11) 能川真一郎，中田浩一，神田睦美：過給リーンバーンエンジンによる熱効率向上，第 21 回内燃機関シンポジウム講演論文集，A7-4, p. 533-538, (2010)

(12) Heiduk, T., Kuhn, M., Stichlmeir, M., Unselt, F.: The new 1.8l TFSI Engine from Audi Part 2: Mixture Formation, Combustion Method and Turbocharging, MTZ, Vol. 72, p. 58-64, (2011), doi: 10.1365/s38313-011-0078-1

(13) 城戸裕之，和栗雄太郎，村瀬英一，藤本勝也，王智民，富田攻：圧縮行程中でのシリンダ内乱れの空間尺度の変化，日本機械学会論文集 B 編，Vol. 50，No. 452，p. 1114-1121，(1984)，doi: 10.1299/kikaib.50.1114

(14) 鄭海泳，古井隆，西山淳，池田裕二：PIV と LDV を利用した点火プラグ近傍の乱流特性計測，第 22 回内燃機関シンポジウム講演論文集，20117085, (2011)

(15) Müller, S. H. R., Böhm, B., Gleißner, M., Grzeszik, R., Arndt, S., Dreizler, A.: Flow field measurements in an optically accessible, direct-injection spray-guided internal combustion engine using high-speed PIV, Experiments in Fluids, Vol. 48, p. 281-290, (2010), doi: 10.1007/s00348-009-0742-2

(16) 脇坂知行，浜本嘉輔，木下史郎：内燃機関の燃焼室内における乱流特性，日本機械学会論文集（B 編），Vol. 48，No. 430，p. 1198-1205，(1982)，doi: 10.1299/kikaib.48.1198

(17) 浜本嘉輔，冨田栄二，三葉浩義：四サイクル機関シリンダ内乱流の計測，日本機械学会論文集（B 編），Vol. 53，No. 491，p. 2226-2232，(1987)，doi: 10.1299/kikaib.53.2226

(18) 神本武征，八木田幹，森吉泰生，小林治樹，盛田英夫：透明シリンダエンジンによるシリンダ内空気流動に関する研究，日本機械学会論文集（B 編），Vol. 53，No. 492，p. 2686-2693，(1987)，doi: 10.1299/kikaib.53.2686

(19) 大谷英男，森吉泰生，八木田幹，神本武征：圧縮行程

中のシリンダ内乱れの減衰と生成に及ぼすスワールの影響（空間相関法による乱れスケールのＬＤＶ測定），日本機械学会論文集（B 編），Vol. 56, No. 530, p. 3173-3180, (1990), doi: 10.1299/kikaib.56.3173
(20) 大倉康裕，樋口和哉，浦田康弘，染矢聡，店橋護：高速 PIV によるエンジン燃焼室内の乱流計測，日本機械学会論文集（B 編），Vol. 79, No. 806, p. 2193-2206, (2013), doi: 10.1299/kikaib.79.2193
(21) 日野幹雄：離散化にともなう誤差，スペクトル解析，朝倉書店，p. 175-177,（1997）
(22) 日野幹雄：自己相関関数，スペクトル解析，朝倉書店，p. 25-39,（1997）
(23) Peters, N.: Regimes in Premixed Turbulent Combustion, Turbulent Combustion, Fourth printing with corrections, CAMBIDGE UNIVERSITY PRESS, p. 78-86, (2006)
(24) Ohashi, T., Yang, X., Takabayashi, T., Urata, Y., Kubota, S., Katsuyama, H.: Ignition and Combustion Simulation in HCCI Engines, SAE technical paper 2006-01-1522, (2006), doi: 10.4271/2006-01-1522
(25) 大江修造：気体の粘度の推算法，物性推算法，データブック出版社，p. 228-236, (2002)
(26) 店橋護：乱流予混合燃焼Ｉ－乱流と予混合火炎の代表スケール－，日本燃焼学会誌，第 51 巻，158 号，p. 295-302, (2009), doi: 10.20619/jcombsj.51.158_295
(27) FLOWTECH RESEARCH: https://www.ft-r.jp/soft/cruise.html,（参照 2024/07/18）
(28) 笠島祐也，江川猛，牛尾信博，近藤智文，山口亮，池谷健一郎：2.0L 直列 4 気筒直噴エンジンの開発，自動車技術会 2022 年秋季大会学術講演会講演予稿集，No. 111, 20226128, (2022)

List of Symbols

E	Mean square of u and v velocity components [m^2/s^2]
E_u	Energy of u velocity component [m^2/s^2]
f	Frequency [Hz]
f_c	Cut-off frequency [Hz]
f_{c_slope}	Cut-off frequency at where spectrum slope changes [Hz]
$f_{c\_\theta=270}$	Cut-off frequency which was calculated from inverse of integral time scale of the in-cylinder flow at crank angle 270 deg. BTDC [Hz]
f_N	Nyquist frequency which is half frequency of time resolution [Hz]
G_{Plate}	Gap from tip of tumble plate to intake valve stem [mm]
h_p	Height of combustion chamber from top of pent-roof to piston surface top at bore center [mm]
k	Turbulent kinetic energy [m^2/s^2] (Subscripts f: time filtering method, c: cycle average method)
l	Turbulent integral length scale [mm]
l_F	Flame thickness [mm]
L_{Plate}	Length of tumble plate [mm]
Ne	Engine speed [rpm]
P_{cyl}	In-cylinder pressure [kPa]
P_{intake}	Intake manifold pressure [kPa]
R_{uu}	Auto correlation coefficient of u velocity component
S_L	Laminar burning velocity [m/s]
T_{cyl}	In-cylinder gas temperature [K]
u	Instantaneous velocity component in x direction [m/s]
u'	Turbulent intensity [m/s]
u'_f	Turbulent velocity component in x direction decomposed by time filtering method [m/s]
u_p	Instantaneous piston speed [m/s]
v	Instantaneous velocity component in y direction [m/s]
v'_f	Turbulent velocity component in y direction decomposed by time filtering method [m/s]
x	Coordinate to bore direction [mm]
y	Coordinate to stroke direction [mm]
θ	Crank angle [deg.]
θ_{ig}	Ignition timing [deg. BTDC]
v_F	Dynamic viscosity of mixture [m^2/s]
τ	Integral time scale of in-cylinder flow [ms] (Subscripts u: x direction, v: y direction)
τ_l	Turbulent integral time scale [ms]
τ_p	Characteristic time of piston speed [ms]
φ	Equivalent ratio [-]

List of Abbreviations

BDC	Bottom Dead Center
CFD	Computational Fluid Dynamics
e-fuel	Erneuerbarer strom - fuel
EGR	Exhaust Gas Recirculation
fps	frame per second
GUI	Graphical User Interface
IMEP.H	Indicated Mean Effective Pressure High-loop
MFB	Mass Fraction Burnt
LF	Lower Flow
PIV	Particle Image Velocimetry
PRF	Primary Reference Fuel
SI	Spark Ignition

TCV　Tumble Control Valve
TDC　Top Dead Center (Before TDC: BTDC)
UF　Upper Flow
WOT　Wide Open Throttle

■著　者■


大 倉 康 裕


瀬 川　誠


鬼 丸 裕 美


佐 藤 誓 祐


浦 田 泰 弘

燃焼CFDによる副室ジェット燃焼を用いた大型二輪車用ガソリンエンジンの出力と熱効率改善の検討

Numerical Study on Enhancing Power and Thermal Efficiency of Large Motorcycle Gasoline Engine Using Pre-chamber Jet Combustion Simulated by Combustion CFD

安藤博和[1] Hirokazu ANDO
田仲巧[1] Takumi TANAKA
富沢健吾[1] Kengo TOMIZAWA
井上陽介[1] Yosuke INOUE

要　旨

大型二輪車用のビッグボアガソリン火花点火エンジンに対し全負荷出力向上と部分負荷熱効率改善を目的に，３次元燃焼シミュレーションを用いて燃焼方式の検討をおこなった．全負荷出力点においては，パッシブタイプの副室ジェット燃焼の効果を確認した．副室から噴出するジェットにより主室の乱流運動エネルギーが増加することで燃焼が高速化し，圧縮比を 2.0 高めることで従来 SI 燃焼に対して全負荷図示仕事が 3.6% 向上することを確認した．部分負荷においては，燃焼安定性向上をねらい主室サイドプラグ点火ののちに副室点火をおこなう副室ジェット２プラグ燃焼の効果を確認した．副室から噴出するジェットは，主室サイドプラグ先行点火による火炎面と接触することにより着火が促進した．これにより従来 SI 燃焼に対して部分負荷図示熱効率が 1.7 Pt 向上することを確認した．

ABSTRACT

A study of combustion methods was conducted using 3D combustion simulation with the aim of enhancing power at full load and thermal efficiency at partial load for a big-bore spark ignition gasoline engine for large motorcycles. The effect of passive pre-chamber jet combustion on power was confirmed at full load. It was further confirmed that a jet sprayed from the pre-chamber into the main chamber caused an increase in turbulent kinetic energy that sped up combustion, and that increasing the compression ratio from 10.1 to 12.1 resulted in an enhancement of 3.6% in indicated work at full load compared to conventional SI combustion. At partial load, the effect of pre-chamber jet 2plug combustion, achieved by ignition in the pre-chamber after the ignition of the main-chamber side-plug with the aim of enhancing combustion stability, was confirmed. The jet sprayed from the pre-chamber facilitates ignition by coming into contact with the flame surface generated by the earlier ignition of the main-chamber side-plug. It was confirmed that this resulted in an increase in indicated thermal efficiency of 1.7 points at partial load compared to conventional SI combustion.

1．まえがき

地球温暖化の抑制に際し，気候変動による気温上昇 1.5℃ 未満を達成するシナリオでは温室効果ガス CO_2 を 2030 年までに 2010 年比で 45% 以上削減することが必要[(1)]である．また，国内 CO_2 総排出量における輸送部門の割合は約 20% で，その中で二輪車の割合は 0.4% であるが，CO_2 排出量としては 78 万トン[(2)]であり，二輪車用内燃機関も燃費を改善し，CO_2 を低減することが重要である．

大型二輪車用ガソリン火花点火（Spark Ignition: SI）エンジンは，全負荷最高出力向上による走行性能改善が要求されるのに加え，CO_2 を低減するためには部分負荷熱効率向上による燃費改善が必要となる．ここで，弊社量産二輪機種の最高出力と燃費の関係を整理した．Fig. 1 に，最高出力と二輪車国際統一評価モード（Worldwide-harmonized Motorcycle Test Cycle: WMTC）燃費の関係を示す．図には最高車速 140 km/h 以上の機種が対象となる WMTC モード class3-2 が適用される二輪車をプロットした．図に示す通り最高出力とモード燃費は相反する関係にあることがわかる．最高出力を向上するためには，体積効率増加や高回転化をおこなうことが一般的である．体積効率増加のためには吸気と排気の抵抗を下げる必要があり，吸排気バルブ径を拡大すること，そのためにはボア径を拡大することが重要となる．また，高回転化のためにはピストンスピードを抑える必要があり，ショートストローク化が重要となる．よって，最高出力向上をねらったエンジン諸元はビッグボア，ショートストロークの傾向をとることになる．ビッグボア，ショートストローク諸元は最高出力向上に有

[1] 先進パワーユニット・エネルギー研究所
E-mail: hirokazu_ando@jp.honda

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_10

効である一方で，部分負荷においては吸入空気速度低下および筒内に形成されるタンブル流動低下が顕著となる．これにより混合気の形成が不十分となることや，燃焼タイミングでの乱れが減少することで燃焼速度が低下する．これらにより部分負荷熱効率の低下を招く．ビッグボア，ショートストロークのエンジンにおいて，最高出力と部分負荷熱効率をともに改善するためには，流動以外の手法でも燃焼速度を向上する必要があることがわかる．

ここで弊社現行の量産二輪機種における単一気筒あたりの排気量とボアの関係を Fig. 2 に示す．図に示す通り，本研究では量産二輪機種においてビッグボアエンジンに分類されるボア径 92 mm の機種を対象とした．本機種は一つのシリンダに対しセンターとサイド二つのプラグで点火をおこなうことにより燃焼速度向上を実現している[3]ものの，本研究において更なる燃焼速度向上に取り組んだ．

大型二輪車用 SI エンジンの燃焼速度向上をねらいパッシブ副室を適用した研究事例[4),(5)]がある．パッシブ副室とは，副室内に燃料噴射ノズルを持たず，主室側から混合気を吸入するタイプの副室のことを指す．これらの研究事例[4),(5)]においては，全負荷出力を向上できているものの部分負荷熱効率を向上させた報告はない．また，これらの研究には 3 次元燃焼シミュレーション（以降，燃焼 CFD）が用いられているものの，実機エンジンで問題となるノッキングを考慮した性能評価とはなっていない．

本研究では大型二輪車用 SI エンジンを対象として，詳細素反応によるノッキング判定を可能とする燃焼 CFD を構築した．そのうえで燃焼 CFD を用い，従来 SI 燃焼，副室ジェット燃焼，副室ジェット 2 プラグ燃焼などの様々な方式の火炎伝播燃焼の燃焼メカニズム解析と，最大出力性能評価ならびに部分負荷熱効率評価をおこなった．これらにより大型二輪車用 SI エンジンにおける全負荷出力向上と，CO_2 低減のための部分負荷熱効率向上を同時に可能とする燃焼方式を見出したため，その結果について論じる．

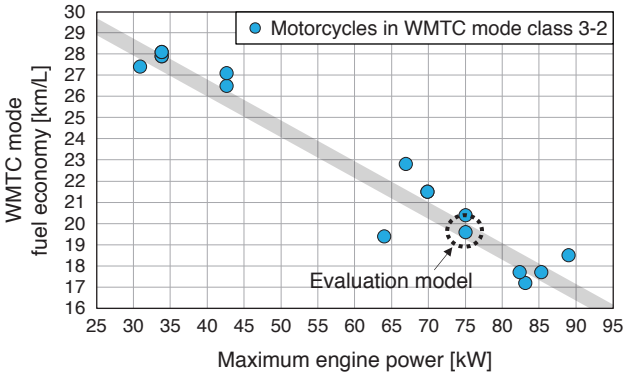


Fig. 1　Maximum engine power and fuel economy of motorcycles in WMTC mode class 3-2

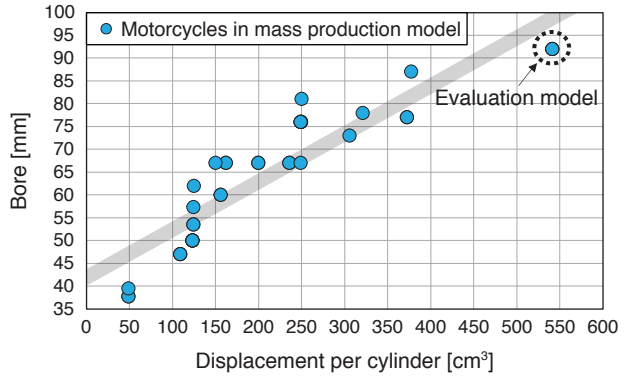
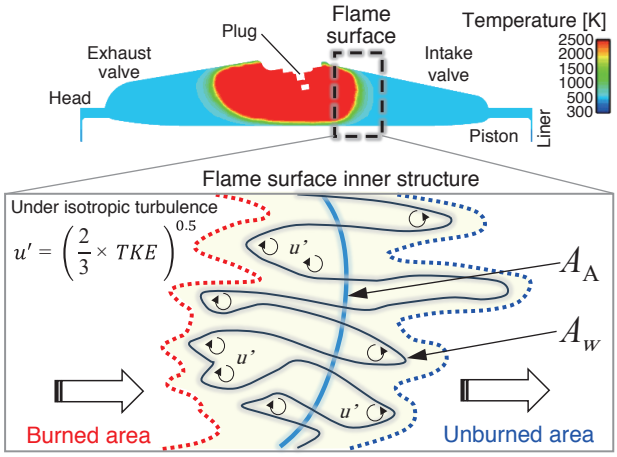


Fig. 2　Displacement per cylinder and bore of motorcycles in mass production model

2．大型二輪車の SI 燃焼課題と燃焼高速化

一般的に SI エンジンにおいて熱効率向上を図る上では，圧縮比を高めることによる理論効率の向上が必要とされる．それに伴いノッキングが発生しやすくなるため，点火時期を Minimum advanced for Best Torque (MBT) よりも遅角せざるを得ず，時間損失が増大する．よって，熱効率向上のためにはノッキングを抑制し，時間損失を低減することが重要となる．

ノッキングはエンドガスの自着火と関連性が高く[6]，特にビッグボアの SI エンジンにおいてはボア端エンドガス部までの距離が長いため，ノッキングが誘発されやすい．ノッキングの抑制には自着火が発生する前に燃焼を完了させる必要があり，燃焼速度を向上することが有効な方策となる[7),(8)]．ここで，火炎伝播燃焼における火炎面挙動と燃焼速度に関するメカニズムについて Fig. 3 に概要を示す．Damköhler らが提唱したしわ状層流火炎の概念[9)-(11)]によると，燃焼速度はしわ状層流火炎面積と関連性があり，それは乱れによって増幅される．したがって，燃焼速度を増加させるためには燃焼室内の乱流運動エネルギー（Turbulent



TKE : Turbulent kinetic energy
u' : Turbulence
A_A : Average flame surface area
A_w : Wrinkled laminar flame surface area

Fig. 3　Schematic diagram of wrinkled laminar flame

Kinetic Energy: TKE) を増加させる必要がある．SI エンジンの燃焼速度向上の方策としては副室ジェット燃焼が注目されており，副室から噴出するジェットにより主室火炎面上の TKE が増幅でき，しわ状層流火炎面積を増加させることで燃焼が高速化される．これにともないノッキングが抑制でき，圧縮比を高めて熱効率改善が可能となる[7),(8)]．

そこで，本研究ではパッシブ副室を用いた副室ジェット燃焼[7),(8)]の効果を確認した．パッシブタイプの副室ジェット燃焼は副室内への混合気吸入により燃料を取り込むため，副室内の燃料が不足しやすい[12),(13)]．さらに副室内で燃焼したガスは噴孔を通過する際に温度が低下するため，特に部分負荷の燃焼安定性に課題が生じる[12)]．このため一つの燃焼諸元にて全負荷から部分負荷までの幅広い運転領域における性能向上を担保することが容易でなく[13)]，これが副室ジェット燃焼の実用化に向けた課題となっている[12),(13)]．

3．燃焼解析手法

3.1. 評価負荷および諸元

Fig. 4 に対象機種における全負荷出力特性と WMTC モード class3-2 を走行した場合に使用するエンジン回転数と出力の頻度をバブルの大きさで記す．

Fig. 4 には併せて本研究での評価負荷点の条件を示している．全負荷最高出力の評価点はエンジン回転数 7500 rpm，スロットル開度 100% に設定し，空気過剰率は 0.85 とした．また，部分負荷熱効率の評価点は WMTC モードにて使用頻度の高いエンジン回転数 4000 rpm，スロットル開度 26% に設定し，空気過剰率は 1.0 とした．

Fig. 5 に燃焼速度向上をねらった解析に使用したエンジン諸元と燃焼室の概略図を示す．Fig. 5(a) は検討のベースである量産大型二輪車用並列二気筒 SI エンジン（以降，従来 SI 燃焼）であり，一つのシリンダにセンターとサイドの二つのプラグを備え同時点火ならびに位相差をつけた点火制御をおこなっている[3)]．Fig. 5(b) は従来 SI 燃焼をベー

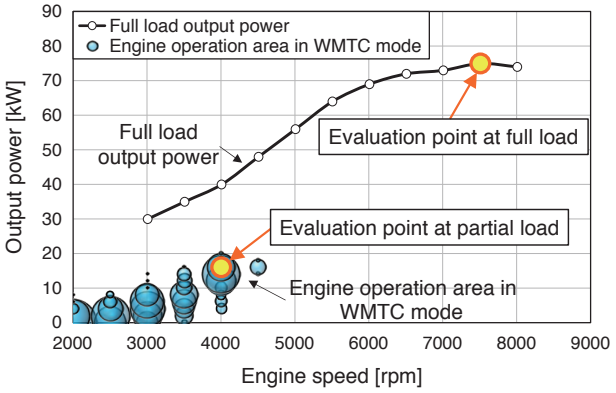
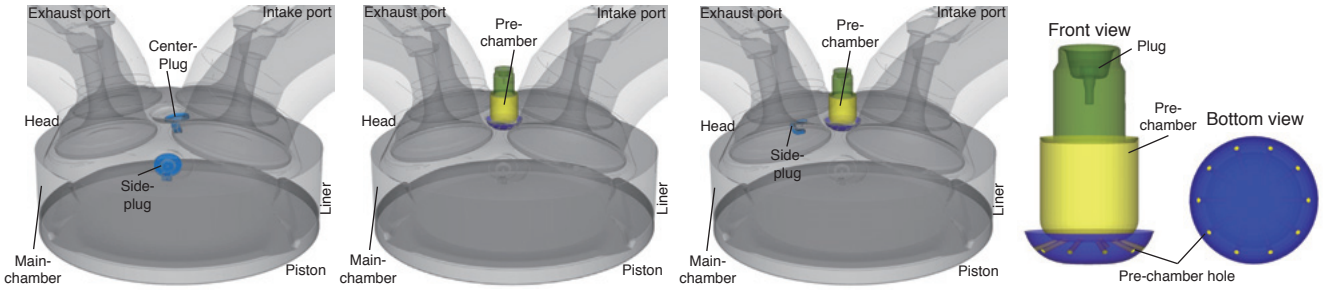


Fig. 4　Schematic diagram of evaluation load conditions



(a) Conventional SI combustion ε10.1　(b) Pre-chamber jet combustion ε12.1　(c) Pre-chamber jet 2plug combustion ε12.1 (for side-plug between exhaust valves)　(d) Schematic diagram of passive pre-chamber

	(a) Conventional SI combustion ε10.1	(b) Pre-chamber jet combustion ε12.1	(c) Pre-chamber jet 2plug combustion ε12.1 (for side-plug between exhaust valves)
Displacement	1082 [cm³]		
Number of cylinders	2		
Bore	92 [mm]		
Stroke	81.4 [mm]		
Compression ratio: ε	10.1	12.1	
Maximum power	75 [kW] / 7500 [rpm] (base)		
Valve system	SOHC 4-valve		
Fuel injection system	Port injection (injection pressure: 343 [kPa])		
Fuel	Japanese regular gasoline (research octane number: 91)		
Ignition system	2plug: Center-plug: conventional Side-plug: conventional	1plug: Center-plug: pre-chamber Side-plug: no-ignition	2plug: Center-plug: pre-chamber Side-plug: conventional (side-plug placement between exhaust valves)
(d) Pre-chamber specifications	-	Hole number: 10	
		Hole diameter: 0.5 [mm]	
		Volume: 0.8 [cm³]	

Fig. 5　Schematic diagrams and specifications of engine

スにセンタープラグをパッシブタイプの副室に置き換え副室のみの点火をおこなう仕様（以降，副室ジェット燃焼）であり，Fig. 5(c) は副室ジェット燃焼仕様の排気バルブ間にサイドプラグを追加して副室とサイドプラグの両方で点火をおこなう仕様（以降，副室ジェット２プラグ燃焼）である．なお，Fig. 5(d) に示す今回使用した副室諸元は，筆者らの先行研究[7),(8)]においてノッキング抑制による熱効率向上効果が得られた諸元を参考とし，噴孔数 10 孔，噴孔径 0.5 mm については同一の設定とした．一方，先行研究に対し今回のエンジン諸元はボア径が 73 mm から 92 mm に拡大したため，ジェット到達距離の延長をねらい容積は 0.5 cm^3 から 0.8 cm^3 に増加させた．

3.2. 計算手法と実機再現性

本研究に用いた燃焼 CFD ソフトは Convergent Science 社製の CONVERGE v3.0.19 であり，モデルの概要を Table 1 に記す．本研究における火炎伝播燃焼モデルについては，Detailed chemical reaction (SAGE)[14] を使用した．本モデルは詳細素反応と乱流拡散との相互作用で燃焼を再現している．計算負荷は高いものの素反応を用い直接燃焼化学反応を解くため，諸元や燃焼形態が変わった場合でもモデル係数への依存度を下げることができると考えられる．さらに素反応計算を用いることから，低温酸化反応からの自着火現象によるノッキングも再現することが可能であり，SI 燃焼ならびに副室燃焼に適用した事例[4),(15),(16)]が報告されている．また，燃料素反応式についてはレギュラーガソリン素反応を精度よく再現することが確認されている SIP-Gr2.0-S5R モデル[17),(18)] を使用した．

本燃焼モデルを用いて，実機と燃焼 CFD の比較をおこなった．Fig. 6 に，供試諸元の従来 SI 燃焼における全負荷最高出力評価点ならびに部分負荷熱効率評価点の燃焼挙動比較を示す．同一のモデル係数を用いた燃焼 CFD にて，全負荷と部分負荷での筒内圧力と熱発生率が実機のサイクル変動の範囲内にあることを確認した．

3.3. ノッキング判定手法と火炎面解析手法

様々な火炎伝播燃焼を解析するにあたり，燃焼 CFD を用いたノッキング判定手法について検討した．先行研究においては，式（1）で示す熱発生率の時間微分最小値の絶対値を用いることで，自着火による熱発生率の急速な立下りを検出できることから，ノッキング判定が可能とされている[19),(20)]．本研究では，式（1）の値を Knocking detection index（以降，KDI 値）と表記し，燃焼 CFD におけるノッキング判定の検証をおこなった．

$$Knocking\ detection\ index\ (KDI) = \left| min \frac{d}{d\theta}\left(\frac{dQ}{d\theta}\right)\right| \quad (1)$$

ここで，θ はクランク角度 [deg.]，Q は発熱量 [J] である．

Table 1　Calculation software and models

CFD software	CONVERGE v3.0.19
Turbulence model	RANS ζ-f
Spray model	Rosin-Rammler and Rayleigh-Taylor
Combustion model	SAGE detailed chemical reaction
Ignition model	Add energy source to ignition point
Fuel chemical reaction mechanism	Regular gasoline SIP-Gr2.0-S5R
Mesh size [mm]	0.125-1.0 (adaptive mesh refinement)
Model parameter	Turbulent schmidt number: 0.5 Reaction multiplier: 1.15

Fig. 7 に従来 SI 燃焼の全負荷最高出力評価点にて，自着火が発生する条件における燃焼 CFD の熱発生率と熱発生率の時間微分値を示す．自着火の発生タイミングでは，熱発生率の立ち上がりの後に立下りが発生し，熱発生率の時間微分値は自着火前と比べて自着火直後に急速に低下する様子が観測された．さらに Fig. 8 に点火時期を変化させた際の KDI 値を示す．燃焼重心時期（Mass Fraction Burned 50%: MFB 50%）が 20 deg. ATDC より徐々に進角すると，KDI 値は一定の傾きを持ち増加し，MFB 50% が 11 deg. ATDC より進角側で傾きが大きくなった．MFB 50% が 11 deg. ATDC から進角側では自着火燃焼によるスパイク状熱発生の立ち上がりが発生し，KDI 値が増加したことを示している．本手法は自着火発生以前と以降では明確に燃焼挙動が変化したことをとらえており，Fig. 8 に示す通りその交点を算出することでノッキング限界 MFB 50% が判定可能となる．以降は本手法を適用しノッキングを考慮した上で，各仕様の性能評価を実施した．

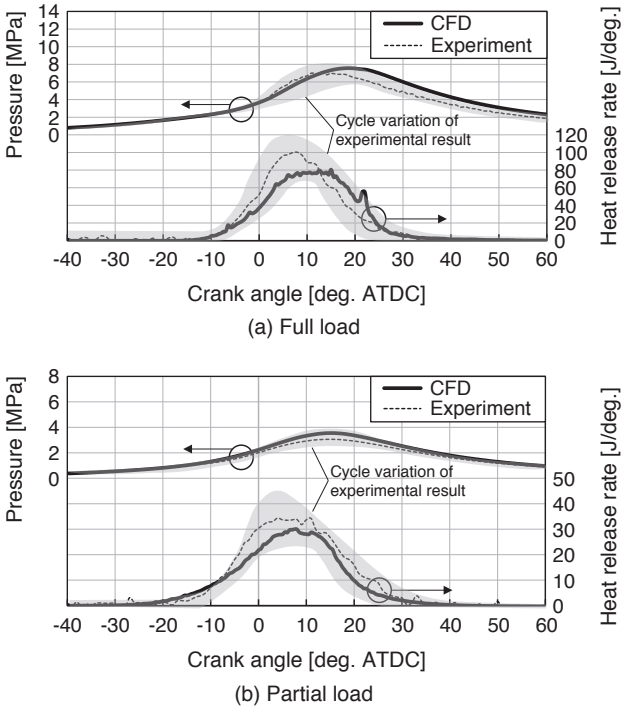


Fig. 6　Comparison of in-cylinder pressure and heat release rate between experiment and CFD

また，火炎面挙動の解析をおこなうにあたり，HO_2 ラジカル等の過酸化物質が火炎帯上でピークを迎える特性を持つため，火炎面位置のマーカーとして用いる手法が提案されている[15),21)]．本研究においても同様の手法にて火炎面位置の観測をおこなった．

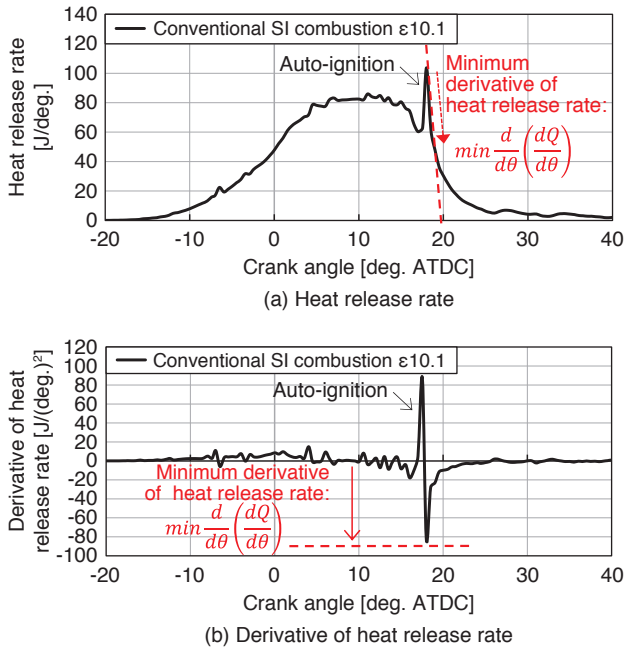


Fig. 7 Heat release rate and its derivative under auto-ignition condition

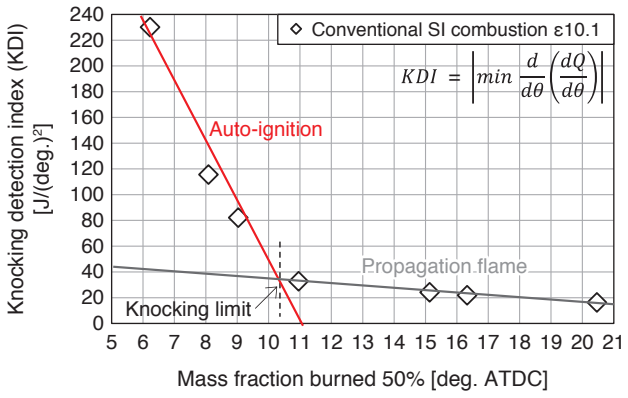


Fig. 8 Knocking judgement using knocking detection index

4．全負荷出力点燃焼 CFD 解析結果

全負荷出力点の解析に用いた仕様は，Fig. 5(a) の従来 SI 燃焼と Fig. 5(b) の副室ジェット燃焼である．筆者らの先行研究において，副室ジェット燃焼は高速燃焼化によるノッキング抑制効果で，1.8 の圧縮比増加が可能となり熱効率向上効果が得られた[7),8)]．本研究はこれを参考とし，従来 SI 燃焼に対して圧縮比を 10.1 から 12.1 に増加させた仕様とした．また，従来 SI 燃焼は，量産機種と同様にセンターからサイドプラグの点火位相を 4 deg. とした．

Fig. 9 は，それぞれの仕様で点火時期を変更した際の，KDI 値によるノッキング判定結果を示している．従来 SI 燃焼と副室ジェット燃焼ともに，MFB 50% 時期が進角することにより自着火が発生し KDI 値が大きく変化したため，これによってノッキング判定をおこなった．副室ジェット燃焼は KDI 値が変化する傾きが大きく，ノッキング限界 MFB 50% 時期が 2.4 deg. 遅角した．

Fig. 10 に，点火時期を変更し，MFB 50% 時期を横軸として整理した燃焼期間と図示仕事の解析結果を示す．また，最大の図示仕事が得られた条件を丸点線で示している．今回，燃焼期間については，燃焼質量割合が 10% から 85% となるまでの燃焼期間 (Mass Fraction Burned 10 - 85%) と定義した．

Fig. 10(a) において，同じ MFB 50% 時期の 14 deg. ATDC にて比較すると，副室ジェット燃焼の方が燃焼期間が 6.2 deg. 短縮した．さらに Fig. 10(b) において，MFB 50% 時期が同一の 14 deg. ATDC では，副室ジェット燃焼の方が図示仕事が 5.9% 増加した．また，従来 SI 燃焼は，ノッキング限界まで点火時期を進角することで最大の図示仕事が得られた．対して副室ジェット燃焼は，ノッキング限界点火時期の前に最大図示仕事となった．最大の図示仕事が得られた条件にて比較すると，副室ジェット燃焼は燃焼期間が 4.1 deg. 短縮し，さらに圧縮比の増加による理論熱効率向上により，3.6% の全負荷図示仕事の向上効果が得られた．

Fig. 11 に最大図示仕事が得られた条件における筒内圧力と熱発生率を示す．図より，従来 SI 燃焼に対し副室ジェット燃焼は TDC 以後の熱発生率が高く急速な燃焼となることが確認された．また，Fig. 12 に示す断熱火炎温度近傍の温度等値面，HO_2 質量分率の断面図より，従来 SI 燃焼は点火プラグを中心に球面上に徐々に火炎面が進行したのに対し，副室ジェット燃焼はジェット噴出により主室内に火炎面が押し広げられる様子が確認できた．

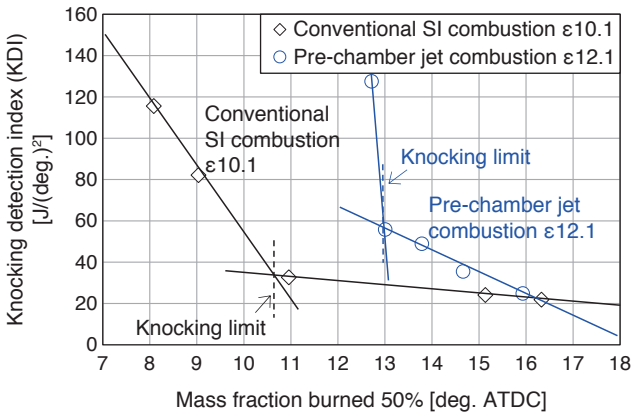


Fig. 9 Knocking limit comparison using knocking detection index

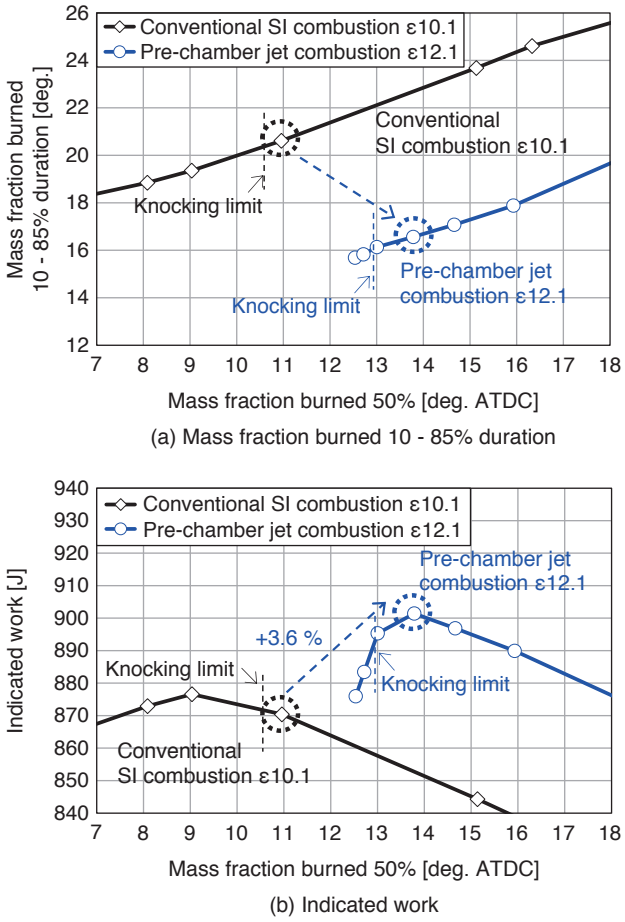


Fig. 10　Combustion duration and indicated work

さらに Fig. 13 に筒内平均 TKE の挙動を示す．副室ジェット燃焼では，噴出するジェットが主室内の乱流運動エネルギーを増加させた．これらにより，迅速な火炎伝播燃焼が得られ，全負荷図示仕事が向上できた．

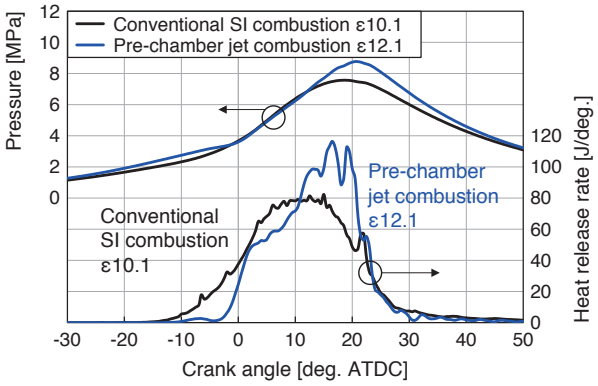


Fig. 11　In-cylinder pressure and heat release rate

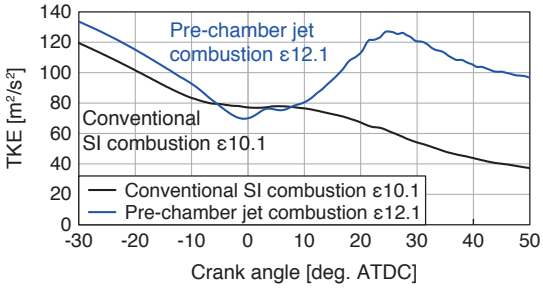


Fig. 13　In-cylinder turbulent kinetic energy

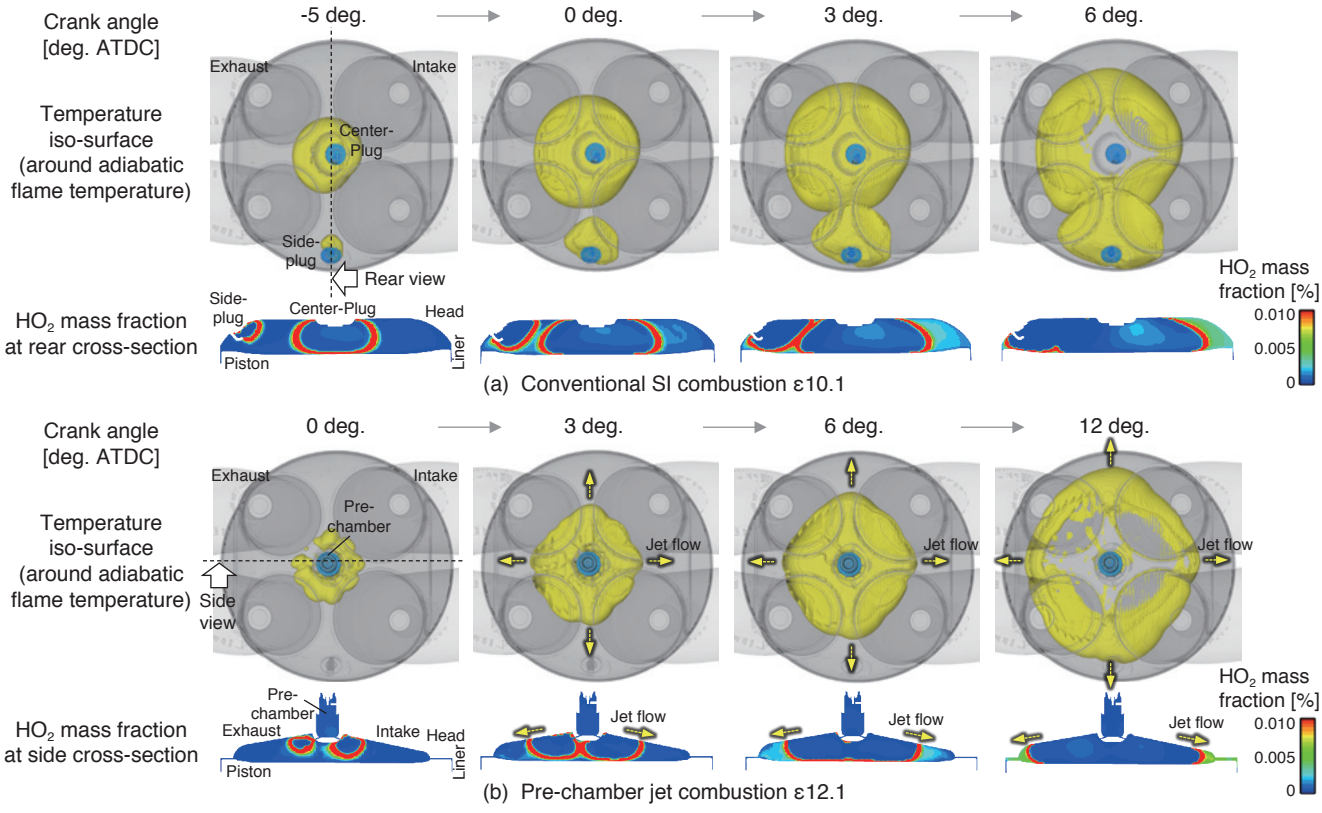


Fig. 12　Flame surface behavior

5. 部分負荷点燃焼 CFD 解析結果

5.1. 副室ジェット燃焼

Fig. 14 に，Fig 5(b) で示した仕様である副室のみで点火をおこなった副室ジェット燃焼にて，点火時期を変更した際の筒内圧力と熱発生率の挙動を示す．図より，部分負荷の副室ジェット燃焼は，いずれの点火時期においても点火直後にわずかな熱発生が確認され，その後失火に陥った．

ここで，副室ジェット燃焼が失火に至った要因を解析した．Fig. 15 に着火可能であった全負荷条件と失火に至った部分負荷条件における点火直前の副室内部の残留ガス率とその分布を示す．Fig. 15(a) に示す通り，部分負荷条件においては，副室内残留ガスが 12.8% から 23.5% に増加した．また Fig. 15(b) の通り，残留 CO_2 が副室内全体にて増加した．この原因は部分負荷条件において吸気流量と流動が低下することから，主室内の残留ガスが増加しやすく，副室内掃気についても不十分となったためと考えられる．

また，Fig. 16 には副室噴孔部の出入口のガス温度を示しているが，部分負荷条件では前述の残留ガスの増加による燃焼温度低下に加えて，孔部を通過する際の熱損失による温度低下が大きくなった．よって，噴出するジェットの最大温度が全負荷条件では 2480 K だったのに対し，部分負荷条件では 2170 K まで低下した．

加えて Fig. 17 に主室雰囲気密度と副室ジェットによる噴孔出口を起点としたジェット先端到達距離（以降，ペネトレーション）の比較を示す．なおペネトレーションは HO_2 の到達距離とした．Fig. 17(a) に示すように，ジェット噴出時 -5 deg. ATDC における主室の密度は，全負荷条件が 14.8 kg/m^3 であるのに対して，体積効率の低い部分負荷条件は 6.9 kg/m^3 に減少した．Fig. 17(b) からわかるように，部分負荷条件は全負荷条件と比較して，初期のペネトレーションが大きいことを確認した．これは主室雰囲気密度が低いことにより，ジェット噴出が促進されたためと考えられる．

さらに Fig. 18 にジェット噴出後の筒内温度分布を示す．全負荷条件では初期のペネトレーションが小さく，噴孔出口近傍にて高温ガスが滞留しやすく着火へと至った．一方，部分負荷条件では初期のペネトレーションが大きいためにジェット噴出直後の主室混合気とジェットの混合が促進し，ジェットが主室に拡散する過程の中でジェット温度が低下して着火に至らなかった．副室ジェット燃焼の着火性低下の要因について解析した先行研究において，強いジェットの場合には噴孔部での熱損失増大によりジェットの温度が低下することが示されている [22]．また噴出されたジェットに主室予混合気の導入が促進されジェット温度が低下し，着火が不安定となる現象が確認されている [22]．本研究においても，先行研究と同様の現象が観測されており，これらの要因にて着火性が低下したと考えられる．

5.2. 副室ジェット２プラグ燃焼

前節より，部分負荷において本諸元の副室単独点火によ

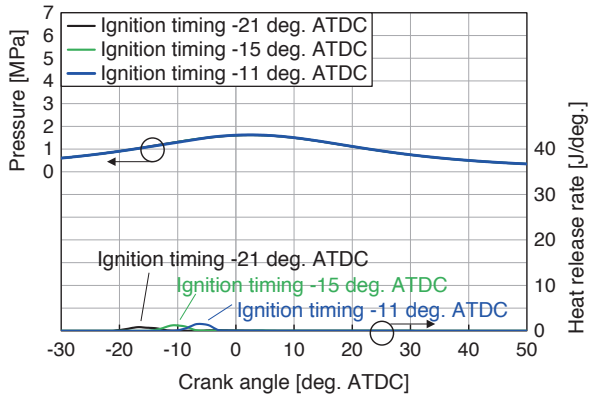


Fig. 14 In-cylinder pressure and heat release rate

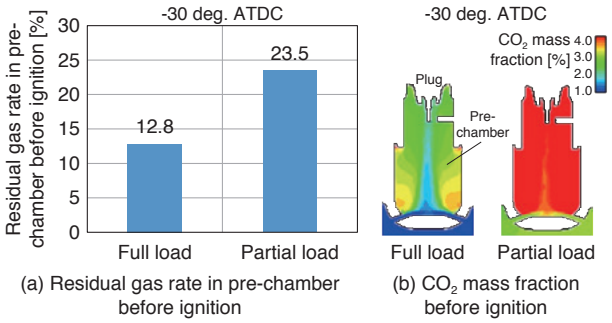


Fig. 15 Residual gas rate and distribution in pre-chamber

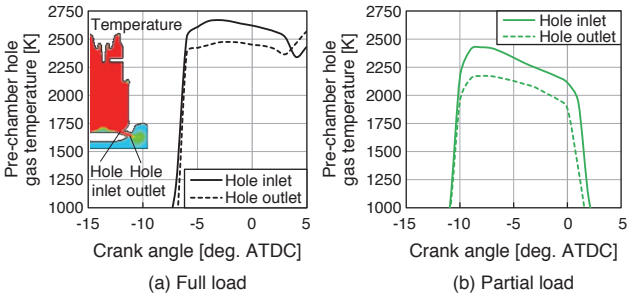


Fig. 16 Pre-chamber hole inlet and outlet gas temperature

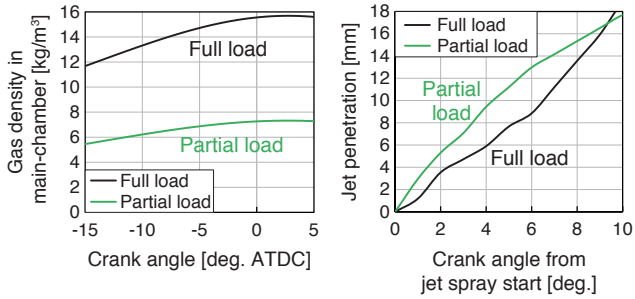


Fig. 17 Gas density and jet penetration in main-chamber

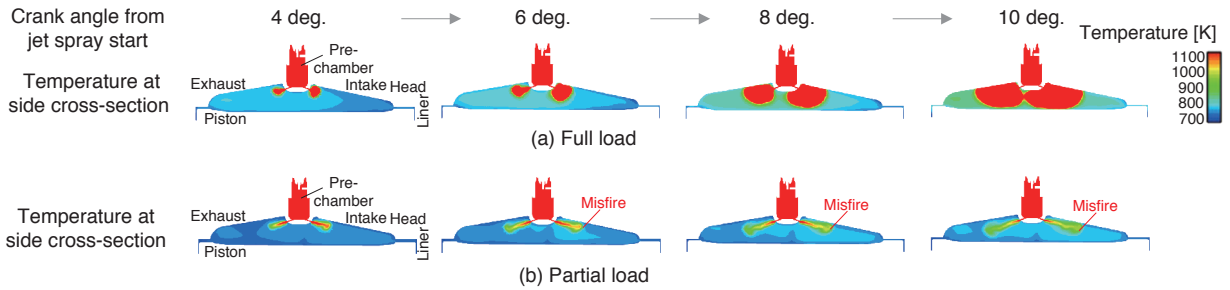


Fig. 18　Jet temperature behavior

る副室ジェット燃焼は，ジェットの温度低下が主因となり失火に至ることが明らかとなった．この対応策として，主室サイドプラグによる先行点火を利用して主室内燃焼により筒内ガスを高温とし，その後に副室を点火しジェットを噴出することにより着火を促進する手法を検討した．

Fig. 5(c) に示す通り，副室ジェット燃焼の主室にサイドプラグを設置する仕様を検討した．主室サイドプラグ位置に関しては，主室先行点火を用いることから，ボア端位置ではその反対側のボア端未燃部過熱時間が増しノッキングを誘発する懸念がある．よって，主室サイドプラグはボア中央寄りの位置となる排気バルブ間配置に変更し，副室ジェット 2 プラグ燃焼の性能評価をおこなった．

点火位相については，従来 SI 燃焼は量産機種と同様にセンターとサイドプラグの同時点火とした．副室ジェット 2 プラグ燃焼については，点火位相をパラメータとした事前検討をおこない，主室サイドプラグによる先行点火の火炎が副室周辺に達した際にジェットを噴出させることで，ジェットの着火を促進することをねらって点火位相を設定した．対象エンジンの評価負荷においては，主室サイドプラグを点火した 10 deg. 後に副室プラグ点火をおこなう設定とした．

従来 SI 燃焼と副室ジェット 2 プラグ燃焼において点火時期を変更した際のノッキング判定結果を Fig. 19 に示す．MFB 50% 時期の進角にともない双方ともに KDI 値に大きな変化が発生したため，これによってノッキング判定をおこなった．副室ジェット 2 プラグ燃焼は KDI 値が変化する傾きが大きく，ノッキング限界 MFB 50% 時期が 3.9 deg. 遅角した．

Fig. 20 に部分負荷点における性能評価の結果を示す．

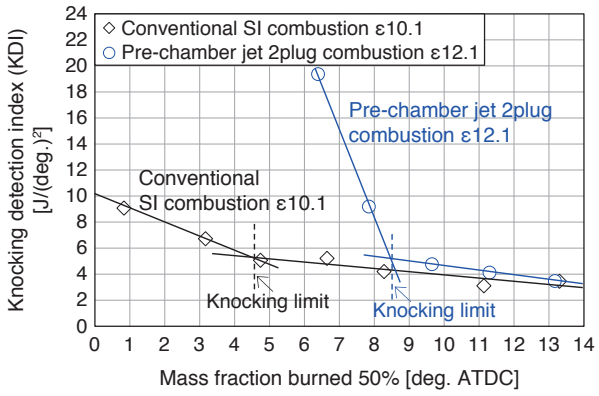


Fig. 19　Knocking limit comparison using knocking detection index

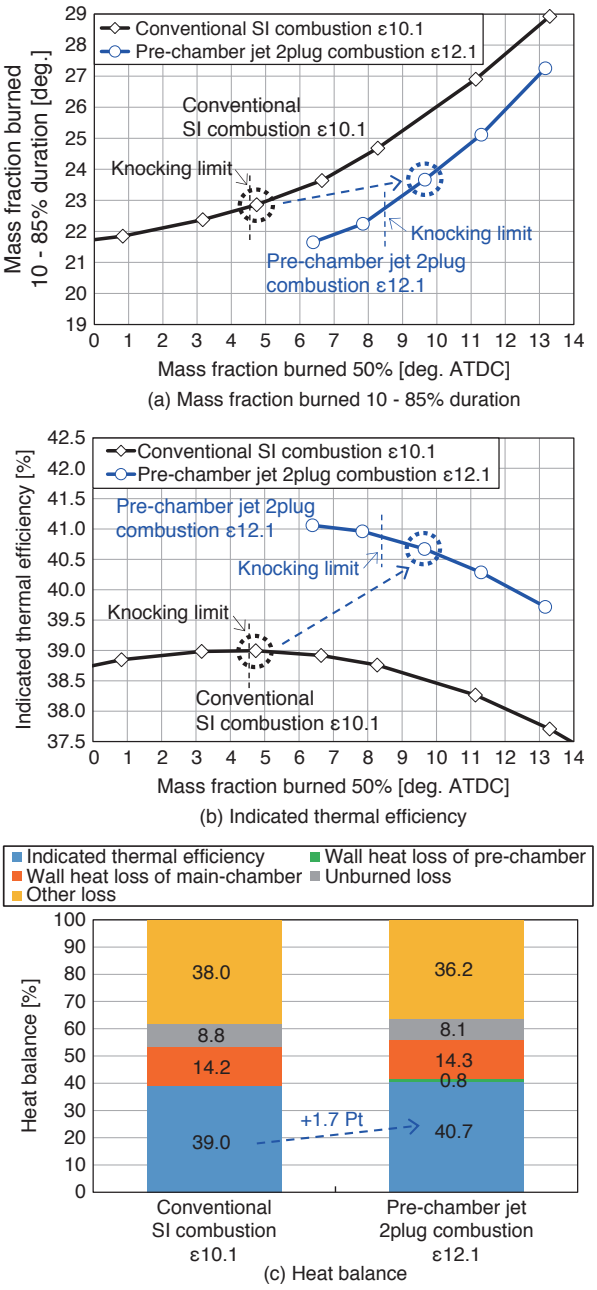


Fig. 20　Combustion duration, indicated thermal efficiency, and heat balance

Fig. 20(a) と (b) は，MFB 50% 時期を横軸として整理した燃焼期間と図示熱効率の解析結果である．また，各仕様の最大図示熱効率が得られた条件を丸点線で示している．従来 SI 燃焼に対し副室ジェット 2 プラグ燃焼は，同じ MFB 50 % 時期の 10 deg. ATDC にて比較すると，燃焼期間が 2 deg. 短縮され，図示熱効率が 2.1 Pt 向上することが確認できた．

さらに Fig. 20(c) に示す最大図示熱効率が得られた条件における熱勘定より，従来 SI 燃焼に対し，副室ジェット 2 プラグ燃焼は熱損失が増すものの，圧縮比を 10.1 から 12.1 に高めた効果を得られることで，図示熱効率が 1.7 Pt 向上できた．

Fig. 21 に最大図示熱効率が得られた条件における筒内圧力と熱発生率の挙動を示す．図に示す通り，副室ジェット 2 プラグ燃焼については失火は発生せず，主室でのジェット着火後に急速な熱発生立ち上がりとなることが確認された．

また，Fig. 22 に示す断熱火炎温度近傍の温度等値面と HO_2 質量分率の断面図より，従来 SI 燃焼は部分負荷においても全負荷と同様に点火プラグを中心に球面上に火炎面が進行した．一方，副室ジェット 2 プラグ燃焼については，主室先行点火による火炎伝播が副室近傍部に達した際に，副室点火によるジェットを噴出することで，ジェット起因の強い火炎伝播が発生する様子が確認された．

さらに，噴出されたジェットが主室で着火に至るまでの挙動に着目し，Fig. 23 に筒内温度分布を示す．図より，副室より噴出されたジェットは，主室サイドプラグ先行点火による高温の火炎面と接触することで着火に至るメカニズムが確認できた．

加えて Fig. 24 に筒内平均 TKE の挙動を示す．従来 SI 燃焼は筒内の TKE が時間とともに減少した．一方副室ジェット 2 プラグ燃焼は，主室点火の後に副室ジェットの噴出をおこなうことで筒内の TKE が高まる様子が確認できた．これにより，ジェット点火後の急速な熱発生立ち上がりが得られ，図示熱効率の向上につながった．

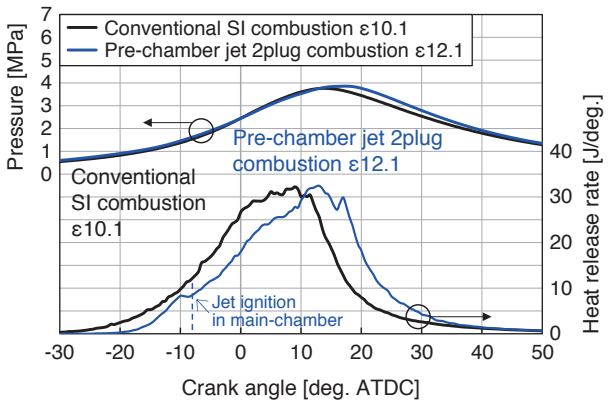


Fig. 21 In-cylinder pressure and heat release rate

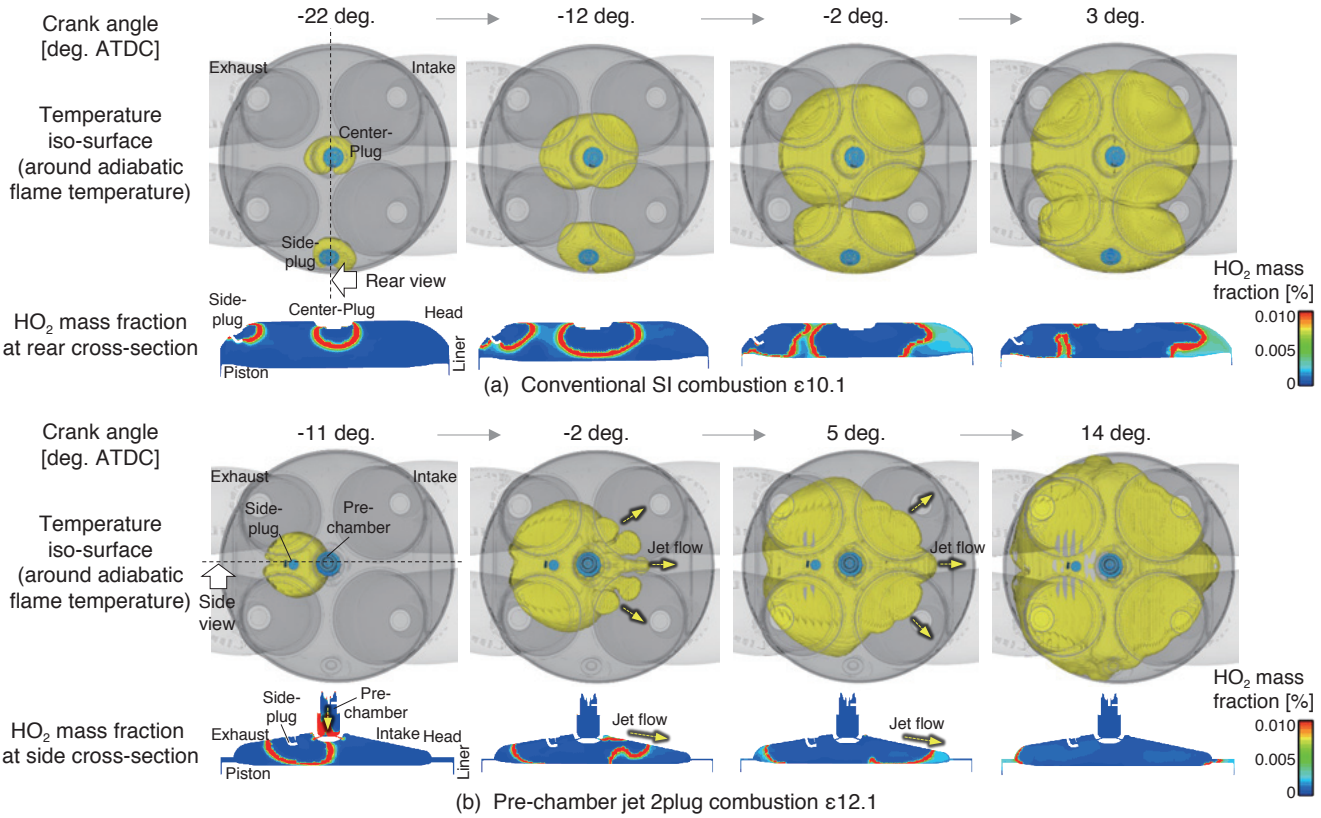


Fig. 22 Flame surface behavior

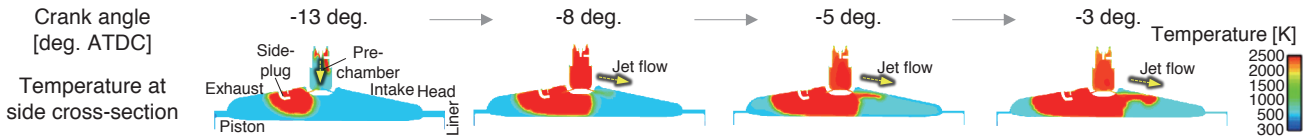


Fig. 23　Temperature behavior in pre-chamber jet 2plug combustion ε12.1

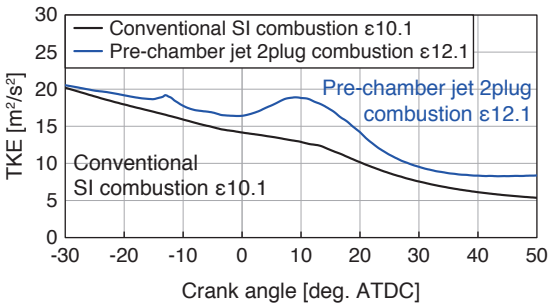


Fig. 24　In-cylinder turbulent kinetic energy

6. まとめ

大型二輪車用 SI エンジンにて，ノッキング判定を導入した燃焼 CFD を用いて，全負荷最高出力と部分負荷熱効率の検討をおこなった．以下に結論を示す．

（1）詳細化学反応モデルを用い，熱発生率の微分最小値の絶対値によるノッキング判定手法を取り入れた燃焼 CFD を構築した．エンジンの燃焼諸元に関し机上での最大出力性能評価と熱効率評価を可能とした．

（2）全負荷最高出力評価点において，副室ジェット燃焼は副室から噴出するジェットにより主室の乱流運動エネルギーが増加することで燃焼が高速化した．

（3）全負荷最高出力評価点において，従来 SI 燃焼に対し副室ジェット燃焼をおこなうことで燃焼期間が短縮し，ノッキングが抑制された．これにより圧縮比を 10.1 から 12.1 に高められ，燃焼期間が 4.1 deg. 短縮し全負荷図示仕事が 3.6% 向上することを確認した．

（4）部分負荷熱効率評価点において，副室点火のみでの副室ジェット燃焼は主室における火炎伝播が維持できず失火に陥ることを確認した．これは副室内の残留ガスによる燃焼温度低下と噴孔部での熱損失によるジェット温度低下に加えて，主室でのジェット拡散にともなう温度低下が要因であることが分かった．

（5）部分負荷熱効率評価点において，圧縮比を 10.1 から 12.1 に高めた諸元にて主室サイドプラグ位置を排気バルブ間ボア中央寄り配置とし，主室サイドプラグ点火の後に副室点火をおこなう副室ジェット 2 プラグ燃焼の効果を確認した．副室から噴出するジェットは，主室先行点火による火炎面と接触することにより着火可能となり，主室燃焼が促進することを確認した．

（6）部分負荷熱効率評価点において，副室ジェット 2 プラグ燃焼は，図示熱効率が従来 SI 燃焼に対して 1.7 Pt 向上することを確認した．

参考文献

（1）Intergovernmental Panel on Climate Change: Global Warming of 1.5°C Presentation to the wrap-up of the Talanoa Dialogue preparatory phase, COP24 Presentation, (2018), https://apps.ipcc.ch/outreach/documents/446/1544108257.pdf, (参照 2025/1/1)

（2）国土交通省：運輸部門における二酸化炭素排出量, (2024), https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html, (参照 2025/1/1)

（3）森田健二，岡田望，岡村広志，鈴木将太：2020 CRF1100L Africa Twin の開発，Honda R&D Technical Review, Vol. 32, No. 2, p. 17-26

（4）Bigalli, S., Catalani, I., Balduzzi, F., Matteazzi, N., Agostinelli, L., De Luca, M., Ferrara, G.: Numerical Investigation on the Performance of a 4-Stroke Engine with Different Passive Pre-Chamber Geometries Using a Detailed Chemistry Solver, Energies, Vol. 15, No. 4968, (2022), doi: 10.3390/en15144968

（5）Nodi, A., Sforza, L., Lucchini, T., Onorati, A., Buttitta, M., Marmorini, L.: CFD Modeling of Conventional and Pre-Chamber Ignition of a High-Performance Naturally Aspirated Engine, SAE Technical Paper 2024-01-2102, (2024), doi: 10.4271/2024-01-2102

（6）寺島洋史：ノッキング現象における末端ガス非一様自着火と圧力波発生機構，日本燃焼学会誌，Vol. 57, No. 181, p. 206-213, (2015), doi: 10.20619/jcombsj.57.181_206

（7）安藤博和，新谷祐輔，小林広樹，椎名亮介，木村範孝：副室ジェット燃焼を用いた未燃部の削減によるガソリンエンジンのノッキング抑制，Honda R&D Technical Review, Vol. 35, p. 45-55

（8）Ando, H., Shintani, Y., Kobayashi, H., Shiina, R.,

Kimura, N.: Study of Knocking Mitigation and Thermal Efficiency Enhancement of Pre-chamber Jet Combustion in Stoichiometric Gasoline Engine, SAE Technical Paper 2023-32-0006, (2023), doi: 10.4271/2023-32-0006
(9) Damköhler, G.: Der Einfluss der Turbulenz auf die Flammengeschwindigkeit in Gasgemischen, Z. f. Elektrochem, Vol. 46, Issue 11, p. 601-626, (1940) (in German), doi: 10.1002/bbpc.19400461102
(10) Glassman, I., Yetter, R. A.: COMBUSTION FOURTH EDITION, Academic Press, p. 231-235, (2008)
(11) 小林秀昭:乱流と火炎の干渉に関する実験と考察, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol. 16, No. 5, p. 398-403, (1997), doi: 10.11426/nagare1982.16.398
(12) Zhou, H., Meng, S., Han, Z.: Combustion characteristics and misfire mechanism of a passive pre-chamber direct-injection gasoline engine, Fuel, Vol. 352, No. 129067, (2023), doi: 10.1016/j.fuel.2023.129067
(13) 大野諒平, 原田雄司, 長津和弘, 鈴木裕和, 内田健司, 飯田晋也, 藤川竜也:ガソリンエンジン燃焼へのプレチャンバー技術適用に関する検討, 第 32 回内燃機関シンポジウム予稿集, No. 81, (2021)
(14) Senecal, P. K., Pomraning, E., Richards, K. J., Briggs, T. E., Choi, C. Y., MacDavid, R. M., Patterson, M. A.: Multi-Dimensional Modeling of Direct-Injection Diesel Spray Liquid Length and Flame Lift-off Length using CFD and Parallel Detailed Chemistry, SAE Technical Paper 2003-01-1043, (2003), doi: 10.4271/2003-01-1043
(15) 保木本聖, 窪山達也, 森吉泰生, 山田敏生:3 次元数値シミュレーションによる副室式ガスエンジンの燃焼解析, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 830, p. 15-00154, (2015), doi: 10.1299/transjsme.15-00154
(16) Maas, R., Bekdemir, C., Somers, B.: Numerical Study on the Design of a Passive Pre-Chamber for a Heavy-Duty Hydrogen Combustion Engine, SAE Technical Paper 2024-01-2112, (2024), doi: 10.4271/2024-01-2112
(17) 酒井康行, 三好明:ガソリンサロゲート燃料簡略反応機構の構築, 第 28 回内燃機関シンポジウム予稿集, No. 28, (2017)
(18) 酒井康行, 長谷川恵三, 三好明:含酸素燃料を含むガソリンサロゲート燃料簡略反応機構の構築, 第 29 回内燃機関シンポジウム予稿集, No. 34, (2018)
(19) Ando, H., Takemura, J., Koujina, E.: A Knock Anticipating Strategy Basing on the Real-Time Combustion Mode Analysis, SAE Technical Paper 890882, (1989), doi: 10.4271/890882
(20) Ando, H., Nishiyama, A., Wachi, Y., Kuwahara, K., Sakai, Y., Ohta, T.: Heat Release Rate and Cylinder Gas Pressure Oscillation in Low and High Speed Knock, SAE Technical Paper 2015-01-1880, (2015), doi: 10.4271/2015-01-1880
(21) Shao, J., Rutland, C.: Modeling Investigation of Auto-ignition and Engine Knock by HO_2, SAE Technical Paper 2014-01-1221, (2014), doi: 10.4271/2014-01-1221
(22) 石井映宇, 古川蒼, 境田悟志, 田中光太郎, 金野満, 米谷直樹, 光藤健太:可視化副室を用いた噴口径が副室ジェット形成に及ぼす影響の解明, 第 32 回内燃機関シンポジウム予稿集, No. 82, (2021)

■著　者■


安藤博和


田仲　巧


富沢健吾


井上陽介

V6 エンジンにおける始動時エミッション低減用 HC トラップ材料および HC トラップ触媒の検証

Verification of HC Trap Materials and Catalysts to Reduce Exhaust Emissions during Cold-start in V6 Engine

竹折浩樹[1] Hiroki TAKEORI
根本康司[2] Koji NEMOTO
奥裕希[1] Yuki OKU
生友良平[1] Ryohei IKUTOMO
中尾圭太[3] Keita NAKAO
碓氷豊浩[3] Toyohiro USUI

要旨

これまでの三元触媒システムでは浄化が難しいエンジン始動直後のエミッション低減を目的に，新しい HC トラップ材料とトラップした HC を効率よく浄化するための HC 浄化触媒を組み合わせた HC トラップ触媒を開発した．HC トラップ材料としては，HC 分子サイズに近い細孔径を有し，化学吸着を促進するイオン交換種の安定性を高めることでより高温まで HC の吸着を可能とするゼオライトとして，Ag-CHA と Cu-FAU を開発した．また脱離した HC を効果的に浄化するためには HC 浄化触媒層を HC トラップ材の上層に配置することが重要であり，HC 浄化触媒に CeO_2 と ZrO_2 を 1：1 で配合した酸素吸放出材料を加えることで，ストイキオメトリ条件下においても脱離した HC を浄化できることを明らかにした．この HC トラップ触媒は，フロア下部に配置した V6 エンジンにおける LA#4 モードのエミッション試験において，エンジン始動時の HC 排出量を約 50% 削減することができた．

ABSTRACT

In order to reduce emissions immediately after engine cold-start, which is a challenge for conventional three-way catalyst systems, an HC trap catalyst was developed that combines new HC trap materials and an HC purification catalyst for efficiently purifying the trapped HC. Ag-CHA and Cu-FAU were developed as zeolite HC trap materials that have pore sizes close to the HC molecular sizes and can adsorb HC up to higher temperatures by increasing the stability of the exchanged ions that promote chemisorption. It was also clarified that arranging the HC purification catalyst layer in the upper layer of the HC trap materials is key to effectively purifying the desorbed HC, and that adding an oxygen absorbing and releasing material consisting of CeO_2 and ZrO_2 in a 1:1 ratio to the HC purification catalyst enables purification of the desorbed HC even under stoichiometric conditions. A V6 engine with this HC trap catalyst in an underfloor arrangement was able to reduce HC emissions during engine cold-start by approximately 50% in the LA#4 mode emission test.

1．まえがき

1960 年代に米国で始まった自動車排ガス規制は現在に至るまで段階的に強化が進んでおり，今後もその傾向は変わらないものとみられる．ガソリンエンジンにおいては三元触媒（TWC）の発明とその進化により対応してきた．しかし TWC は活性開始温度（浄化率が 90% に達した温度）に達するまで浄化機能は発現しないため，エンジン始動直後から TWC が活性開始温度に達するまでは排ガスが浄化されずに排出される．一般的には TWC が活性開始温度に達するには数十秒程度かかるため，更なるエミッション規制強化に対応するためにはこの始動時エミッションの低減技術が重要となる．

TWC の活性開始温度の低温化は長年にわたり研究され

[1] 先進技術研究所
E-mail: hiroki_takeori@jp.honda
[2] 本田技研工業株式会社
[3] 東ソー株式会社

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_11

ている[(1)-(4)]ものの容易ではなく，さらなる規制強化を見据えるとTWCによる対応は限界があり，異なるアプローチによる革新技術が求められてくる．その研究例として，エンジン始動前の電力による触媒加熱により早期活性化をはかる電気加熱式触媒(EHC)[(5)]や，エンジン始動時のような低温で排ガス中の炭化水素(HC)成分をいったんゼオライトなどのHC分子サイズに近い細孔径を持った材料に吸着(トラップ)させ，触媒の活性開始温度到達後にHCを脱離し浄化するHCトラップ触媒[(6)-(11)]等が多数報告されている．このHCトラップ触媒(HC Trap Catalyst: HCTC)はFig. 1に示すようにトラップ材料とHC浄化触媒(Catalyst)から構成され，TWCに対してトラップ層が追加でコーティグされたシンプルなものであることから，既存の排気レイアウト変更や追加システムの設置が必要ない利点がある．

一方でこれまでトラップ材料に関する多数の報告はあるものの性能は十分でなく，今後の規制強化を想定するとさらなる性能向上が求められる．そこで筆者らは排ガス中に含まれる多種類のHCのサイズや高温まで吸着を維持するためのイオン交換種に対するゼオライトの最適化をおこなうことで，直列4気筒1.5 L直噴ターボエンジンの排出HCをLA#4モードで約50%低減可能なHCTCを開発した[(12)]．しかしながら大排気量のV6エンジンにおいてはL4エンジンに比べ排気流量が多いため時間当たりの処理量が上がることで浄化率は低下し，排気ガス温度の上昇も遅いことから活性開始温度に達するまでの時間も長くなる．その結果始動時エミッションは増加し，エミッション全体の90%を占めることもある[(13)-(15)]．したがってHCTCによる始動直後の高い低減効果が期待される一方で，流量増大に伴う吸着量増加や単位時間当たりの吸着率向上等HCTCに対する性能要求も高くなり，このような厳しい環境下におけるHCトラップの低減効果を実証する必要がある．そこで本研究ではV6エンジンの排気レイアウトに対するHCトラップ触媒配置の影響および効果の検証をおこなった．

2．HCトラップのねらい

エミッション低減効果増大に向けたねらいを考える．一つ目は排出量の多い始動直後の低減をはかるべく吸着量を向上させること．二つ目は吸着したHCをなるべく脱離させず浄化し低減効果を目減りさせないこと．三つ目は始動直後以外のTWC浄化性能はTWC単独と同等を維持することである．これらを実現したHCTCのねらいとする浄化特性をFig. 2に示すが，課題としては以下の4点が挙げられる．

(1) 排ガス中に含まれるHCにはパラフィン系，オレフィン系，芳香族系といった化学結合や構造の異なる3種が存在する．またそれぞれ炭素数も1から9まで幅があり，すなわちサイズ大小の分布があることから，これら多様なHCを効率的に吸着する必要がある．

(2) トラップしたHCは併用されるHC浄化触媒の浄化開始温度まで保持させなければ，脱離して浄化されることなく排出されてしまうことから，吸着HCを浄化開始温度以上の高温まで保持可能とする必要がある．

(3) 吸着されたHCはHC浄化触媒により浄化されるが，HCトラップ材料とHC浄化触媒の共存の仕方によりトラップ性能あるいは浄化性能が大きく影響を受ける．したがって両者の配置や量の最適なバランスにより吸着性能と浄化性能が最大限とする必要がある．

(4) 理論空燃比制御(A/F:ストイキオメトリ)においては，酸素は三元反応に必要な量のみが供給されるためTWC後ではゼロとなる．したがってトラップしたHCの脱離時は浄化に必要な酸素が不足した条件(A/F:リッチ)となるため，何らかの手法で酸素を補填することにより脱離HC浄化性能を維持する必要がある．

本研究ではこれらの課題解決のために，課題(1)に対するアプローチとしては，HC分子サイズに近い細孔径を持ったゼオライトを用いることで低温でのトラップ確率が上がり吸着率の向上が見込めると考え，適切なゼオライト材料の選定が重要と考えた．課題(2)に対するアプローチ

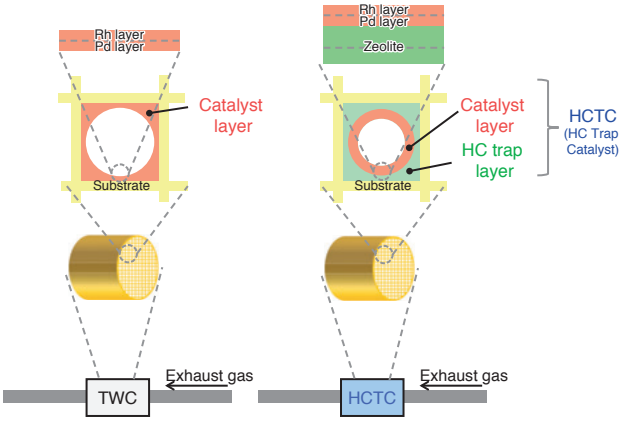


Fig. 1　HC trap catalyst configuration

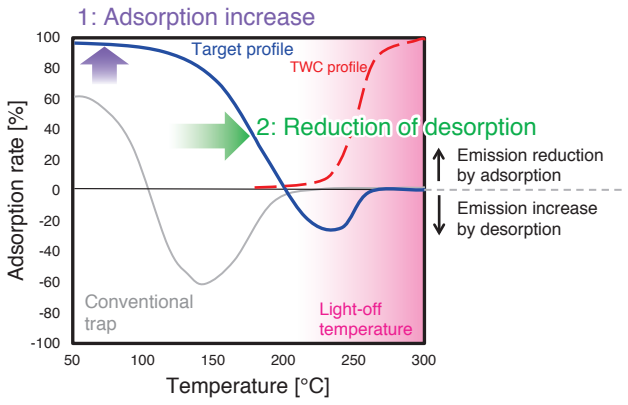


Fig. 2　Direction of enhancement of HC trap material

としては，HC とゼオライトの吸着する力をより強固にすることが有効と考えた．具体的にはゼオライト中にイオン種を導入し，HC の C-C 間結合のうち二重結合や三重結合のような電子密度の高いもの（＝芳香族，オレフィン）との静電的な相互作用を強める化学的吸着が脱離の抑制に有効と考えた．課題（3）（4）に対しては HC 浄化特性の向上を図るために HC トラップ材料と HC 浄化触媒の層配置や触媒コート量を最適化するとともに，酸素吸収放出機能を持つ Oxygen Storage Capacity（OSC）材料の活用が有効と考えた．

3．トラップ材料

3.1. HC 組成解析

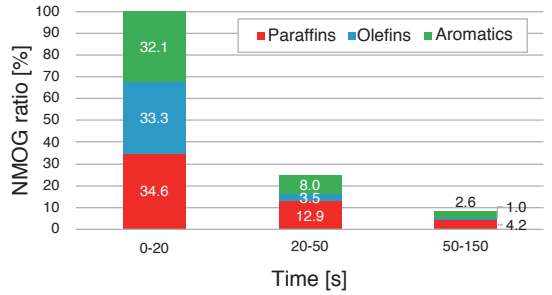
まずトラップ材料のいずれのアプローチにおいても排ガス中にどのような HC が含まれるかを把握することが不可欠であることから，エンジン始動時の排ガスをサンプリングしガスクロマトグラフィーによる HC 組成解析をおこなった．詳細方法を以下に示す．直列 4 気筒 1.5 L 直噴ターボエンジンの TWC 後端面から 30 mm の位置よりサンプリング配管を分岐させ，ポンプで減圧下サンプリングボックス内にテドラーバッグを接続し，0 から 20 秒，20 から 50 秒，50 から 150 秒の各区間において排ガスを採取した．HC の定性定量はガスクロマトグラフィーによりおこなった．

TWC を通過後の排ガス中 HC をパラフィン，オレフィン，芳香族の 3 種で分類，始動時からの時間に対する組成の推移を Fig. 3(a) に示す．ここで HC は米国カルフォルニア州の現行の規制基準である Non Methan Organic Gases（NMOG）とする．各値は 0 から 20 秒のトータル NMOG 濃度（ppmC）を 100% とした時の各区間濃度の相対値である．これより 0 から 20 秒区間排出量が 20 から 150 秒区間合計の 3 倍であり，つまり 20 秒までで全体の 7 割超を占めている．さらに Fig. 3(b) には 0 から 20 秒区間におけるトータル濃度（ppmC）に対する各 C 数，HC 種の排出比率を示す．特徴としてサイズ分布は C 数が 2 から 9 と広いこと，また比率が高いのは C2 から 4 の小分子オレフィン，C7，C8 の芳香族，C8 のパラフィンであることが確認された．

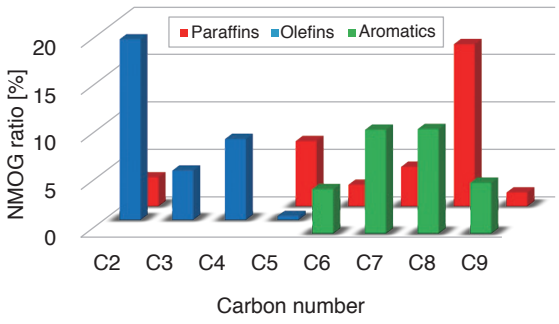
したがってこれらをふまえた吸着量向上の方向性は，分子サイズの観点から C2 から 4 の小分子 HC と C7 から 8 の大分子 HC に分類できる．それぞれの分子径に合わせた細孔径を持つ二つのゼオライトを選定することで効率的に物理的な吸着の向上をはかることとした．次に HC 脱離抑制の方向性に関しては，芳香族やオレフィンといった二重結合を持った HC 種の比率が高いことから，先述のイオン交換種による化学的な吸着が有効[6),(10)]と考えられる．ただしイオン交換種は一般的に熱劣化しやすい特性があるため耐熱性も考慮し選定することが重要である．

3.2. トラップ材料（ゼオライト）の選定

分析した HC を効果的にトラップするゼオライトの検討をおこなった．HC トラップ材料としては東ソー製ゼオライト，H 型 FAU，BEA，MFI，CHA を使用し，さらにこれらの材料に Ag，Cu，Cr，Co，Ni，Mo をイオン交換したものを使用した．用いた各ゼオライトの構造と細孔径を Fig. 4 に示す[16)]．種々のゼオライトはその骨格構造により分類され，それぞれがアルファベット大文字 3 文字で命名されている．吸着性能および浄化性能評価は，各種ボンベガス等を所定比率で混合したモデルガスにより実施した．モデルガス評価は Table 1 に示す組成となるよう各種ボンベおよび気化した液体 HC（Toluene，isooctane）を流量制御して



(a) Relative each group ratio for 0-150 seconds



(b) Relative ratio of carbon number and group for 0-20 seconds

Fig. 3　HC Composition in rear part of TWC

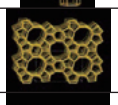
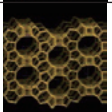
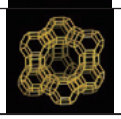
Zeolite	Structure	Pore size [nm]
CHA		0.37
MFI		0.47
BEA		0.60
FAU		0.74

Fig. 4　Structure and pore size of each zeolite (cited from Database of Zeolite Structures)

Table 1 Gas composition of model gas for evaluation

Gas	Concentration
Propylene / ppmC	348
Isopentane / ppmC	108
Toluene / ppmC	408
Isooctane / ppmC	336
NO / ppm	500
H_2 / %	0.17
CO / %	0.5
O_2 / %	0.49
CO_2 / %	14
H_2O / %	10
N_2	Balance

混合し模擬排ガスとしてサンプルへ流入させた．ガス流量は 25 L/min(SV 50,000 h^{-1} 相当)，昇温速度は 40 ℃/min とした．浄化率は式(1)から算出した．流入 HC 濃度は 1200 ppmC とした．

$$吸着率[\%] = \left(1 - \frac{触媒排出HC濃度}{触媒流入HC濃度}\right) \times 100 \quad (1)$$

Fig. 5 に各 C 数のパラフィンに対する種々の細孔径の H 型ゼオライトの吸着率を示す．ここではゼオライト細孔径と HC 分子サイズの吸着率の関係性を確認するため，排ガス中の小さい HC や大きい HC の分子サイズに近い細孔径を持ったゼオライトを比較しており，小さい方から CHA ＜ MFI ＜ BEA ＜ FAU の順番となる．測定に用いるサンプルは各ゼオライト粉末をスラリー化しΦ 25.4 mm × 60 mm(30 cc)のコーディエライト製ハニカムにコートし，その後 500℃ で 2 時間焼成した物を用いた．この評価でのガス組成は Table 1 のモデルガスではなく，パラフィン(C 数 3 から 8 のうち 1 種類)300 ppmC と窒素のみの単純な組成で，C 数を 3 から 8 まで順次実施している．この結果より，細孔径に近い分子サイズの HC がより吸着されやすい特性であることが確認された．これをふまえ小分子 HC 向けゼオライトとしては CHA，MFI，大分子 HC では BEA，FAU を候補として選定した．

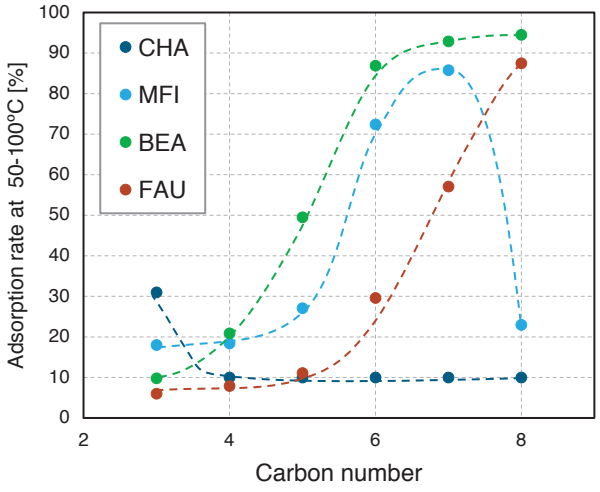


Fig. 5 Influence paraffin carbon number on adsorption rate of various zeolites evaluated with 300 ppmC various paraffin and N_2 gases

Table 2 Propylene adsorption rate on various ion-exchanged FAU

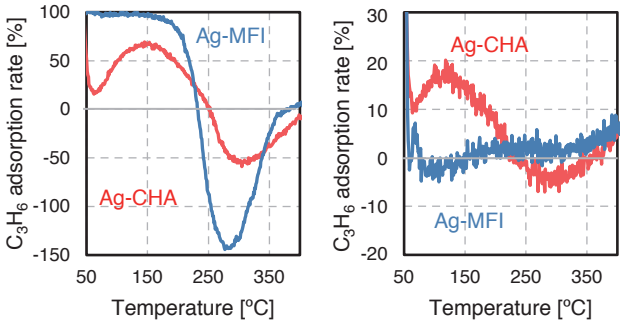
Element	Cu	Ag	Cr	Co	Ni	Mo
Adsorption rate [%]	5.1	13.0	-	-	-	-

次に化学吸着を促進するためのイオン交換種については，小分子 HC 向けと大分子 HC 向けでそれぞれ個別に選定を実施した．

3.3. 小分子 HC 吸着用イオン交換種の選定

まず小分子 HC 向けのイオン交換種の選定のためとして，FAU ゼオライトに種々のイオン交換種を導入し HC 吸着量測定の比較を，小分子 HC の一つであるプロピレンを用いて実施した．これまで小さい HC 分子との吸着は遷移金属イオンでの報告がある[17],[18]が耐熱性含めた HC トラップ材料の検討は少ないことから実際に確認をおこなった．この結果を Table 2 に示す．Cu，Ag のみで吸着性能が確認され，特に Ag で最も高い吸着性能が得られたことから小分子 HC 用のイオン交換種として Ag を選定した．

さらに Ag ゼオライトの性能評価もおこなった．イオン交換種は組み合わせるゼオライトの種類によって耐熱性が変化することが知られており[7]エージング後の性能評価は必須である．条件はフロア下部(以降，床下と言う)配置相当の温度(850℃)とし，雰囲気はプロピレンと酸素の混合ガスを 80 秒，フューエルカットを模擬した空気を 20 秒交互に切り替えて流通させ，同時に常時 10 vol% となるよう水を添加した．実際の小分子向けゼオライト候補の CHA，MFI に Ag を導入した Ag-CHA および Ag-MFI のエージング前(Fresh)とエージング後のプロピレン吸着性能評価結果を Fig. 6 に示す．Fig. 6(a) で示す Fresh 時は Ag-MFI が Ag-CHA よりも高い吸着性能を示したが，Fig. 6(b) のようにエージング後では Ag-MFI は吸着機能が無くなり，Ag-CHA で吸着機能の維持が認められた．この要因解析をおこなうため，Ag イオン，ゼオライトの状態変化を解析し



(a) Fresh (b) After aging at 850°C

Fig. 6 Propylene adsorption and desorption profile of Ag-CHA and Ag-MFI

た．エージング後の物性として Fig. 7 に Ultraviolet-Visible Absorption Spectroscopy (UV-Vis) による Ag のイオン・クラスター比率を示す．Fig. 7(a) の CHA 上の Ag のエージング前後の比率変動はより少なく，逆に Fig. 7(b) の MFI 上の Ag はクラスター化が進行していた．X 線回折法 (XRD) でも CHA の方がよりエージング前後の結晶化度変動が小さかったことを既報[19]で確認しており，CHA 上の Ag がより安定であること，それによってゼオライト構造もより安定となるため吸着機能が維持できることが示唆された．

3.4. 大分子 HC 吸着用イオン交換種の選定

次に C5 以上の大分子 HC 向け材料，特に芳香族をターゲットとして，FAU ゼオライトに 3.3. と同様のイオン交換種を導入し HC 吸着量の比較を実施した．Fig. 8 に吸着率測定結果を示す．この結果 Cu のみが 150 から 300℃ の温度域にユニークな吸着特性を有することがわかった．これまでの HC トラップ材料としての吸着の報告例としては Cu 以外のイオンで見られる 50℃ から 150℃ に温度域で吸着するものしかなく，この Cu の特異性は注目すべきものである．この高温側での吸着特性が HC 脱離遅延に効果があると考え，大分子向けのイオン交換種として Cu を選定した．この吸着は水存在下のみで見られ，無い場合は消失する．すなわち Cu と水による作用があることがわかっている[20]．また，Ag の場合と同様に耐熱性に関してはゼオライトとの相性が存在することから，大分子向けの候補ゼオライトに Cu をイオン交換した材料に関し，エージング前後での HC 吸着性能比較をおこなった．結果を Fig. 9 に示すが，Fresh 時ではどちらも第二吸着ピークが認められるものの，エージング後では Cu-FAU のみが保持されている．そこで各々のゼオライトにおけるイオン状態の変化の差異を明らかにするため，エージング後の Cu 劣化に着目し，Cu-FAU の Cu^{+}，Cu^{2+} イオン総量および CuOx との比率を電子スピン共鳴法 (ESR) により解析した．各イオンの識別は水の存在下と無い時で計測可能イオンが異なる性質を利用しておこない，Fresh 時は全てイオン，エージング後イオン減少量を全て CuOx と仮定した．Fig. 10 (a) に示すようにエージング後でその 1/3 が酸化し 2/3 がイオン

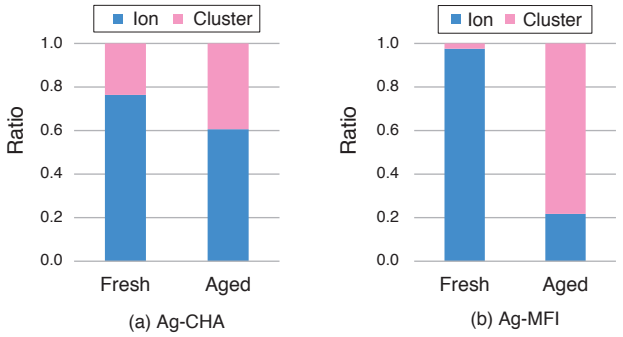


Fig. 7　Variation of Ag ion and cluster ratio calculated from UV-Vis spectra before and after aging

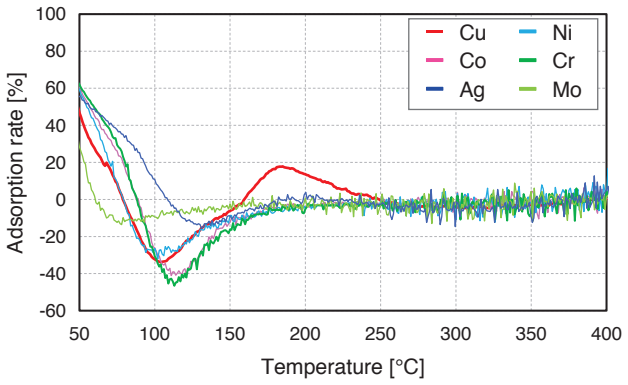


Fig. 8　Profile of HC adsorption on various ion-exchanged FAU after aging

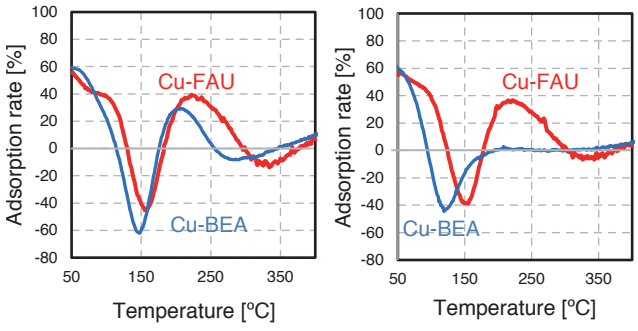
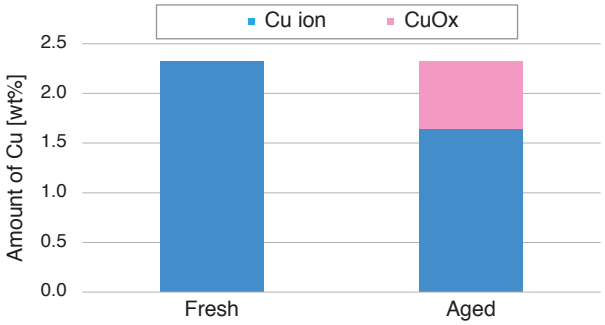
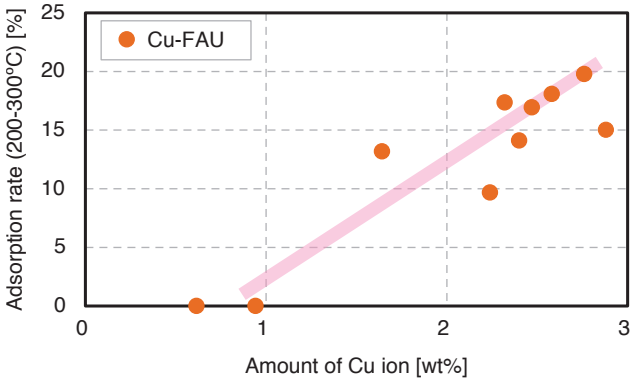


Fig. 9　THC adsorption and desorption profile of Cu-FAU and Cu-BEA



(a) Ratio of Cu ions and CuOx with ESR spectra before and after 850°C aging



(b) Influence of amount of Cu ions on adsorption rate

Fig. 10　Change in Cu ion after aging

状態で保持されているのが確認できた．さらに Fig. 10(b) に示すように，種々のケイバン比（ゼオライトの SiO_2/Al_2O_3）や Cu 含有量の FAU を用いて Cu イオン比率と第二吸着率との関連性を調べたところ，Cu イオンが減少（CuOx が増大）するとともに吸着率が低下する傾向が認められた．このことからもエージング後の吸着性能の維持は Cu イオンの保持状態と関連があるものと考えられる．

3.5. イオン交換種の耐熱性向上要因

先述の Ag-CHA や Cu-FAU がエージング後においても吸着機能を維持可能であることが分かったが，主要因としてイオン交換種の安定性がゼオライトにより高められたことと考えている．CHA における水熱エージング下での Cu^{2+} イオンの特異的な安定性はこれまでに複数報告されており[21),(22)]，シミュレーション解析からゼオライト骨格中の D6R ユニットと Cu^{2+} イオンとの相互作用がより安定なためと結論づけられている．また Ag は Cu と類似した電子配置（最外殻 s 軌道の電子が 1 個かつその内側の d 軌道は電子が 10 個全て満たされる）であることから D6R ユニットとの相互作用は近いものと推定される．Fig. 11 に CHA と FAU の骨格モデル図を示す[16]が，CHA および FAU のいずれもがこの D6R を有していることからイオン交換種を安定化させたため耐熱性を示したものと考察できる．

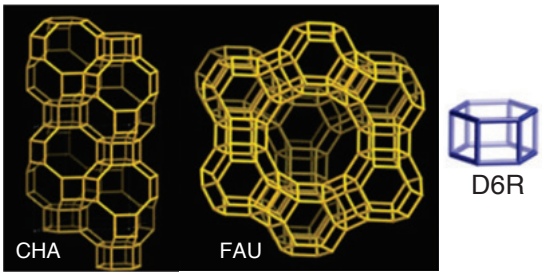


Fig. 11　D6R units in CHA and FAU

4．HC トラップ触媒

選定した HC トラップ材料である Ag-CHA と Cu-FAU，および HC 浄化触媒が組み合わさることで吸着から浄化を完結させる HCTC となる．吸着，浄化それぞれの機能を最大限に活かせるよう HC トラップ触媒化を試みた．

触媒作製方法について述べる．材料として，Pd 用担体には SASOL 製 γ -Al_2O_3，Rh 用担体，OSC 材料には第一稀元素化学工業製 ZrO_2，CeO_2-ZrO_2 をそれぞれ用いた．Pd，Rh は各塩溶液を含浸法で担体へ担持，200℃ で 12 時間乾燥後 500℃ で 2 時間焼成し Pd/Al_2O_3，Rh/ZrO_2 粉末を得た．これらをスラリー化し，HC トラップ層同様コーディエライト製ハニカムに所定量コートした．

2 章（3）（4）で挙げられた HC 浄化触媒における課題への対応について詳細に検討した．まず吸着と浄化のバランスについては，HC トラップ層と HC 浄化触媒の配置や量によって吸着と浄化の性能は大きく変わる．例えばトラップの上層側に HC 浄化触媒をコートするとトラップ性能は低下するし逆も起き得る．また現在用いられている TWC に対してトラップ層の分だけコート量が増加するため，ガスの通路が狭くなることでガス通路単位断面積あたりのガス流量（線速度）の増大，これは処理量の増加となりひいては吸着や浄化性能の低下へとつながることも想定される．これらの性能低下をどれだけ抑制し，トラップ効果をいかに効率的に低減率向上につなげるかがキーとなる．

次に HC 脱離時の浄化である．酸素不足により HC 浄化率の低下が生じてエミッション増大を招くこととなる．この酸素不足を補うために，酸素吸収放出機能を持つ TWC 中の OSC 材料の活用を検討した．

4.1. 吸着と浄化のバランス

4.1.1. HC トラップ材料の層配置

まず HC トラップ材料の特性を活かせる層配置を検討した．材料の特性をふまえた配置としては，水と相互作用を示す Cu-FAU を水との接触確率の高い上層に配置することが望ましく，逆に水に吸着を阻害される Ag-CHA は下層配置の方がより有利と考えられる．また大きな HC 分子のゼオライト内における拡散しやすさを考慮すると，分子サイズよりも細孔径の小さい Ag-CHA が上層に配置されるとゼオライト細孔内に大きな HC 分子が入れず，下層配置となる Cu-FAU との接触確率も下がるため，Ag-CHA は下層にレイアウトする方が好ましいと予想される．Fig. 12 に各材料を組み合わせた HC トラップ層としての HC 吸着特性を示す．Cu-FAU を上層，Ag-CHA を下層に配置した場合 (a) と，逆の層配置にした場合 (b) では，想定通り (a) の場合が優れた吸着率であることが確認できた．

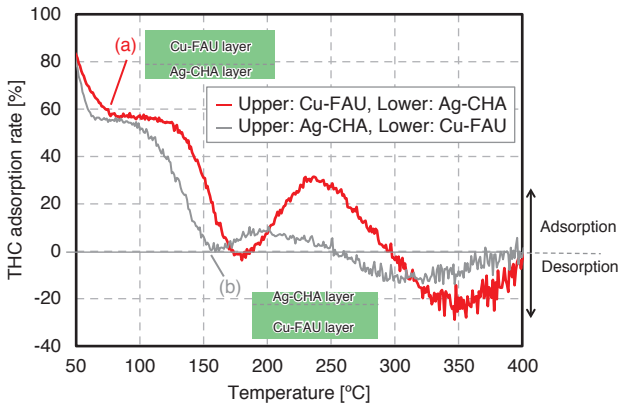


Fig. 12　Relationship between layer composition and adsorption of Cu-FAU and Ag-CHA and TWC

4.1.2. HC トラップ層と HC 浄化触媒層の配置

続いて HC トラップ材料と HC 浄化触媒との配置関係が吸着や浄化に与える影響を比較した．Fig. 13 には同量の HC トラップと HC 浄化触媒それぞれを，ハニカム内に上下に配置した場合での吸着，浄化プロファイルを示す．比較の参照として TWC 単独，HC トラップ層単独も掲載した．

この際，HC 浄化触媒層は 150 g/L としている．HC トラップ層が上層の場合は吸着で若干の優位が確認できるものの浄化における TWC に対する性能低下が著しい．一方 HC 浄化触媒上層の場合は吸着と浄化で若干低下するものの，HC トラップ材料が上層の場合に比べ浄化影響は小さい．この HC 浄化触媒の下層配置時の浄化性能低下は，ガス拡散性が低下することと，ガスからの熱を受け取れず昇温が遅れる影響が大きいためと考えられる．したがってトータルの低減率を考慮すると HC 浄化触媒は上層配置とすることが必須となる．

4.1.3. HC 浄化触媒のコート量

4.1.1. 項での HC トラップ層はその吸着効果が最大となる 200 g/L としており，現在用いられている TWC のコート量と同等である．したがって HC 浄化触媒としてのコート量が TWC 同等とするとトータルで現状の 2 倍となり，ゼオライトの嵩高さもあいまってガス流路がかなり狭くなるため，先述の線速度は増大する方向となり吸着や浄化に不利に働く．したがって，HC 浄化触媒の指針が必要となる．

HC トラップ層のコート量を 200 g/L 一定として，HC 浄化触媒層のコート量と吸着率，浄化率，および低減率との関係を Fig. 14 に示す．ここで吸着率，浄化率，低減率は 150 g/L での値を 100 とした時の相対値として表している．またいずれのサンプルも PGM 総量は 185 g/ft^3 一定とした．この図から読み取れるのは，コート量が減少するほど吸着率は単調増加傾向を示しており，上層の HC 浄化触媒層コート量の影響が大きいことを示す．一方で浄化率はコート量低下とともにいったん上昇傾向を示すものの，100 g/L 以下で低下に転じており極大値を持つような傾向であることが分かった．Fig. 15 にコート量に対する線速度（ガス通路断面積から算出）と Pd 粒子径（CO 吸着法による）を示すが，コート量が減少するほど線速度は減少することが認められ，反応はより進みやすくなる．一方，反応の活性点となる Pd の粒子径はコート量の減少に伴い Pd 密度が高まることで凝集の進行が確認され，これは触媒活性の低下につながる，これら二つの因子のバーター関係により極大値を持つ特性であることが示唆された．以上の結果から上層に HC 浄化触媒，下層に HC トラップ材料を配置すること，さらには HC 浄化触媒コート量については浄化率が極大値を示すような最適値に設定することが有効であることが示された．

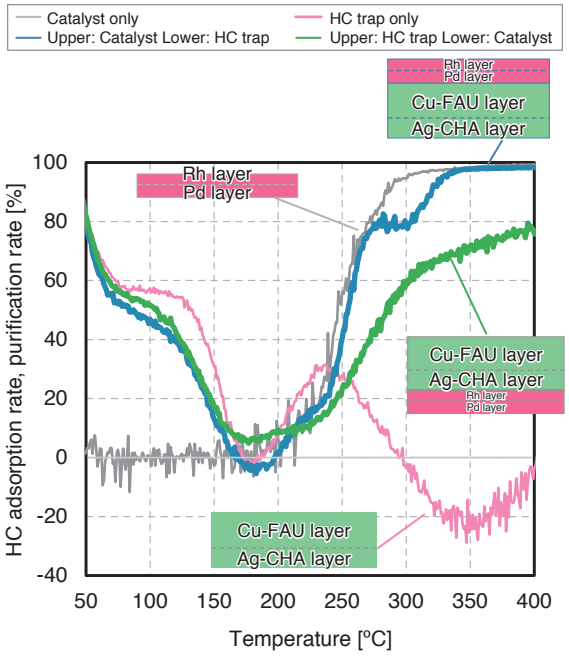


Fig. 13 Effect of zeolite-TWC arrangement on adsorption rate and purification rate

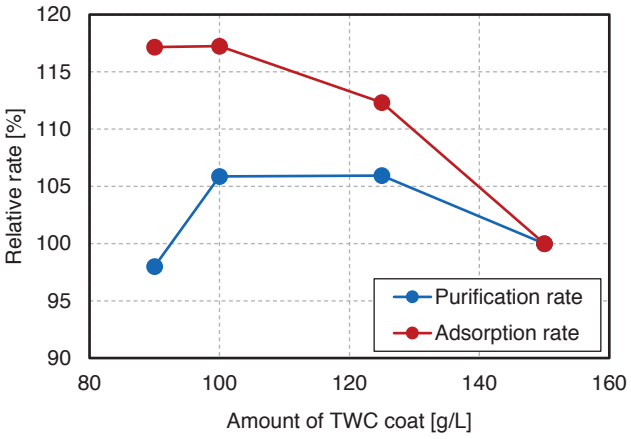


Fig. 14 Relationship between TWC coat and HC absorption rate, purification rate, and reduction rate

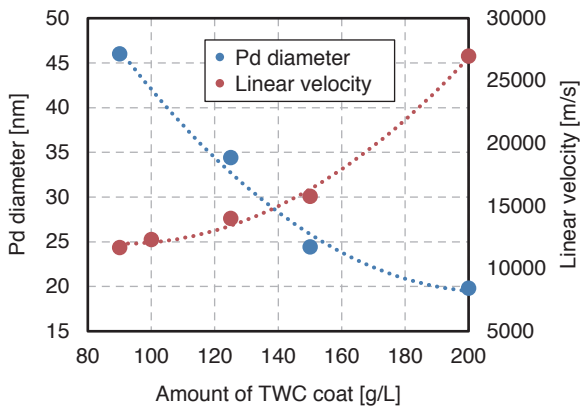


Fig. 15 Influence of coating amount on Pd particle size and linear velocity

4.2. OSC を指標とした材料選定

脱離した HC の浄化については Fig. 16 の結果を用いて説明する．縦軸は TWC のモデルガス性能評価試験における活性開始温度，横軸はモデルガス中の酸素濃度である．通常 A/F がストイキオメトリにおいては TWC の浄化反応に必要な酸素は過不足なく供給され，浄化性能は最大限発揮される条件となる．この図においてはリファレンス TWC のストイキオメトリ条件下での活性開始温度である 285℃ を基準温度とする．それに対して HCTC の活性化開始温度は 30℃ 以上高い 322℃ であることが認められた．要因として，HCTC においては活性開始温度域にて HC が脱離する際には排ガス中に含まれる HC と一緒に酸化しなければならないが，実際には供給される酸素が不足して酸化反応が進みにくいためと考えられる．そこでモデルガス中の酸素を脱離 HC 浄化に必要な分だけ追加することで活性開始温度が元に戻ると考え，酸素濃度を相当分追加して同様に試験したところ，リファレンスの TWC と同等の温度まで回復することが確認できた．これより酸素不足に起因することが明確となり，脱離 HC 分の酸素をいかに補えるかが焦点となる．

ここで着目したのは TWC に用いられる主成分の一つである OSC 材料である．TWC では，浄化率が最大となる A/F ストイキオメトリ付近の状態を A/F 変動時においても維持するため，その際の酸素の過不足を OSC 材料の持つ酸素の吸放出機能により緩和し，浄化率の変動を抑制する[23]．その機能はここでも有効な手段と考えられ，OSC 材料による酸素供給量増加の観点から脱離 HC の浄化性能向上をはかった．アプローチは OSC 材料中の CeO_2 比率である．OSC 材料は主には CeO_2 と ZrO_2 の複合酸化物として構成されており，CeO_2 の価数変化による酸素吸収放出機能と，ZrO_2 の結晶安定化による耐熱性向上機能の二つの側面を持つ．そこで HC 脱離時における酸素供給量増大をはかりつつ耐熱性を維持できるような CeO_2/ZrO_2 比率を検討した．酸素供給量の指標として OSC 保持時間を採用した．OSC 保持時間の評価は，600℃ 定常にて 0.5% 酸素（窒素バランス）流通状態を 5 分維持して OSC 材料内に酸素を満たした後，1%CO（窒素バランス）に切り替えて無酸素状態とし 5 分維持することでおこなった．すなわち OSC 保持時間は OSC 材料内の酸素を何秒間 CO の酸化に供給し続けられるかを意味しており，ここでは CO 浄化率が下降し 50% に達するまでの期間と定義した．CeO_2 比率と OSC 保持時間の確認結果を Fig. 17 の青プロットで示すが，CeO_2 比率 50% にて OSC 保持時間は最大となることがわかった．CeO_2 比率がこれ以上になると ZrO_2 比率が下がることで CeO_2 の熱劣化が促進され，逆にこれ以下では CeO_2 比率減少によって酸素供給可能な量が減少するためと考えられる．さらに CeO_2 比率と HC 浄化率（Fig. 17 第 2 縦軸茶プロット，200 から 400℃ の区間における浄化率）の関係についても同様の傾向であることが確認された．すなわち脱離 HC 浄化に対して OSC 保持時間を伸長するような酸素供給量増大が有効であることが指針として示された．

以上の結果から HC 浄化触媒のコート量と OSC 材料の CeO_2/ZrO_2 比率の最適化前後で性能を比較したものを Fig. 18 に示す．HC 浄化触媒コート量を吸着への影響を最小限

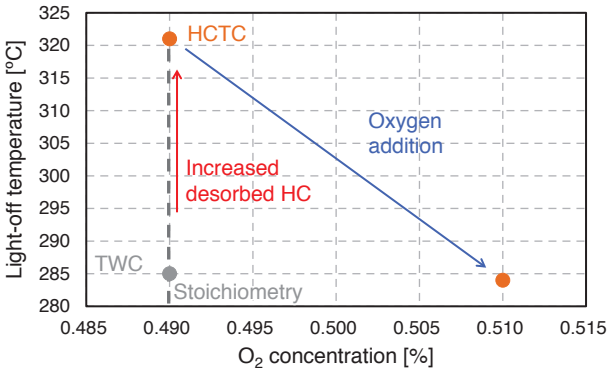


Fig. 16 Effect of oxygen concentration on desorbed HC purification temperature

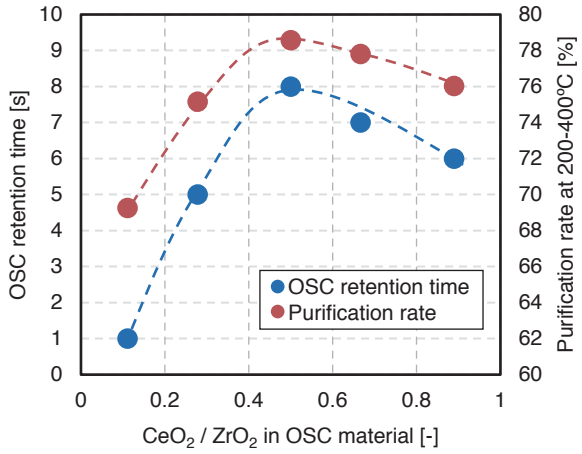


Fig. 17 Relationship between CeO_2 ratio, OSC retention time, and HC reduction rate

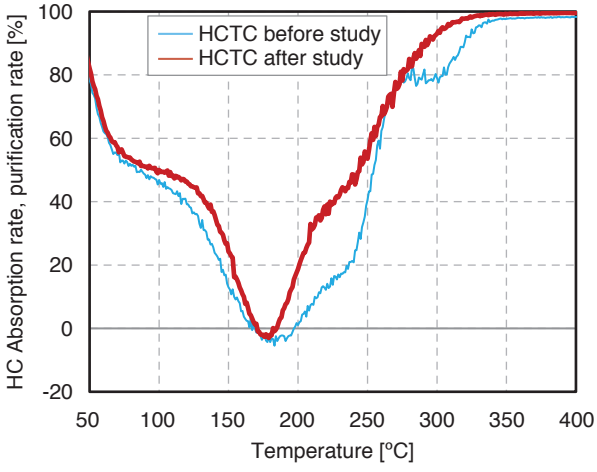


Fig. 18 Effect of HCTC study on temperature characteristics

かつ触媒劣化を最小限とするような範囲とすること，および OSC 材料中の CeO_2 比率を脱離 HC 浄化率が最大限となるように設定することで吸着や浄化の性能低下を抑制可能であることが確認できた．

5．V6 エンジンによるエミッション低減効果

ここまでの HC トラップ材料および HCTC の検討結果を踏まえ，V6 エンジンの HC トラップシステムを Fig. 19 に示す．片側 3 気筒の排気口の直下近傍に TWC を 1 個配置することで直下における変更点は無く，さらにフロアの下部には従来の V6 エンジンに搭載されている TWC を HCTC に置換した．この配置を基に以下のような浄化スキームを考案した．0 から 20 秒においては，排ガスは未活性の直下 TWC を通過するが床下 HCTC で吸着させる．20 から 50 秒の期間で直下 TWC が活性化し始め，一方 HCTC 内の HC トラップ層は初期で吸着した HC を保持し続けるようにする．さらに 50 から 150 秒においては，エンジンから流入するガスはほぼ活性化した TWC で浄化される．一方で HC トラップ層から吸着した HC が脱離し始めるが，HCTC の HC 浄化触媒層も活性化しており，脱離 HC を浄化することが可能となる．

5.1. エミッション試験

実機による配置特性および最終形態での低減効果の検証をおこなった．エンジンは V 型 6 気筒 3.5 L 直噴エンジン，燃料には LEV Ⅲ認証用ガソリンを使用，直下には各バンク同じ TWC（PGM140 g/ft^3，直下相当エージング（先述のエージング条件のうち，温度のみを 950℃ に変更），ハニカムはセル密度 600 cell/inch^2，セル壁厚 3.5 mil，容量 0.85 L）を設け，床下にはリファレンスとして TWC（PGM185 g/ft^3，床下配置相当エージング，ハニカムはセル密度 400 cell/inch^2，セル壁厚 3.5 mil，容量 1.0 L）を配置し，HCTC を置き換えることで評価した．排ガス試験は LA#4（コールドスタート）モードにておこなった．HC は NMOG とする．

5.2. HC トラップ材料と HC 浄化触媒の配置特性

まず HCTC の構成要素である HC 浄化触媒と HC トラップ材料の実機における最適な配置および容量効果の比較をおこなった．比較結果を Fig. 20 に示す（HC 浄化触媒は CAT と記載）．ここで縦軸は，床下が TWC の場合での 0 から 300 秒におけるエミッション値を基準とした時の低減率とする．また HC 浄化触媒層と HC トラップ層のコート量は全ての配置において同量とした．まず 1.0 L の容量にて，下層に HC トラップ層，上層に HC 浄化触媒層を配置すると TWC のみに対して 36% のエミッション低減が認められた．さらに各々のコートによるガス拡散への影響を軽減すべく，前側に HC 浄化触媒，後ろ側に HC トラップ材料を配置した場合（容量は各々1.0 L）とその逆に配置した場合の検討をおこなったところ，それぞれ 39% と 44%

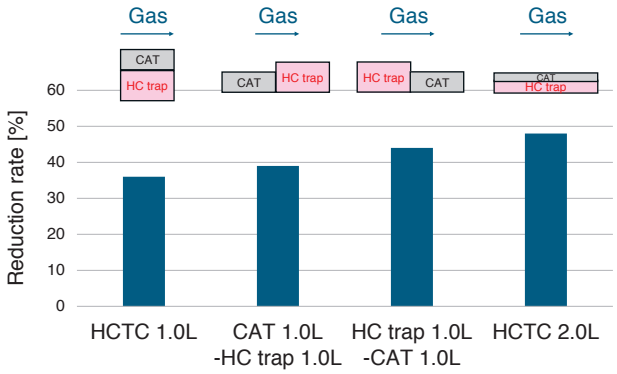


Fig. 20　Relative reduction rate of various arrangement and volume HCTC with V6 engine

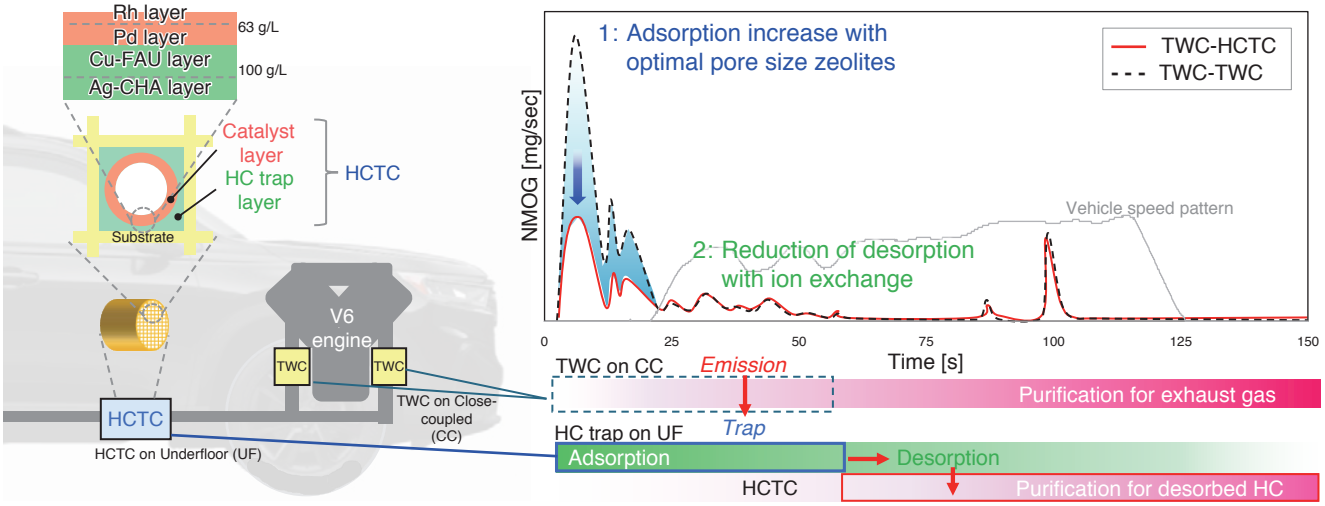


Fig. 19　Emissions reduction strategy using HCTC

の低減を示した．特に後者では上下配置に対して 8% の低減が見られたことから，前後配置による拡散影響の緩和が効果的であることが示唆される．さらに 2.0 L のハニカムに HC 浄化触媒と HC トラップ材料を上下配置としたものは最も高い 48% の低減効果が得られた．容量増大によりコート厚みが減少したことでの線速度緩和効果と，ガス流れ方向の長さ増大とされたことでの吸着や浄化条件の緩和による効果が寄与しているものと考察する．

5.3. HC トラップシステム効果の実証

以上のトラップ材料，トラップ触媒及び配置の検討をもとに，最も浄化性能が優れた 2.0 L の HCTC を床下に配置した排気系システムの，実機における浄化スキームを検証した．その結果，Fig. 21 に示すように NMOG の総排出量は TWC 使用時のみのエミッションに対して 48% まで減り，また Fig. 22 に示すように時間に対するプロファイルを見ると，ねらい通り初期の低減効果が大きいことがわかる．既報[12]の 1.5 L ターボにおいては直下２ベッド TWC 配置に HCTC を床下へ追加配置することで低減効果 51% に達しており，床下に HCTC 配置とすることでの低減効果が複数のエンジンで示された．

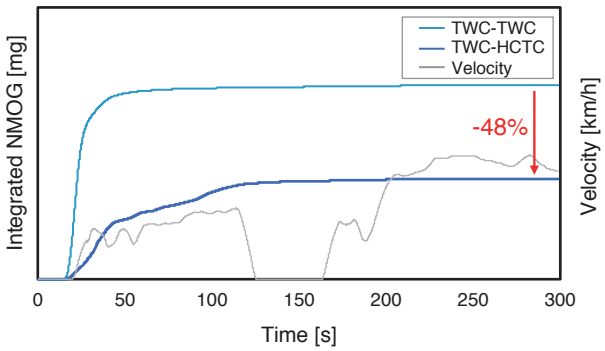


Fig. 21 Comparison of emissions between TWC and final HCTC system with V6 engine

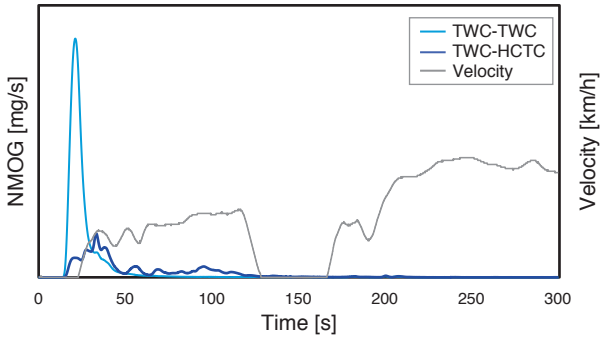


Fig. 22 Changes in HC emission profile over time using final HC trap system in V6 engine

以上の結果からいずれのエンジンにおいても 0 から 300 秒の期間において約 50% 前後のエミッション低減率を実現することができ，材料からシステムに至るまで本研究における HC トラップコンセプトの有効性が実証できた．

6. まとめ

低減効果の高い HC トラップシステムの研究において以下を明らかにした．

（1）HC を高温まで吸着するためには化学吸着を促進するイオン交換種の安定性を高めることが重要であり，小分子 HC トラップ用の Ag イオンを導入した CHA ゼオライト，大分子 HC トラップ用には Cu イオンを導入した FAU ゼオライトを用いることで吸着保持温度を 200℃ 程度まで高めることができる．

（2）CeO_2 と ZrO_2 を 1：1 で配合した OSC 材料を活用することで，TWC のストイキオメトリ条件下においても脱離した HC を浄化できる．

（3）トラップした HC を浄化する触媒としては，最上層に OSC 材料を含んだ TWC 触媒，中間層に Cu-FAU，最下層に Ag-CHA を配置することで，HC 浄化性能を最大化できる．

（4）HCTC は L4 エンジンだけでなく V6 エンジンにおいても床下配置することで効果が高く，LA#4 モード試験において 48% の NMOG を低減できた．

参考文献

（1）Rood, S., Eslava, S., Manigrasso, A., Bannister, C.: Recent advances in gasoline three-way catalyst formulation: A review, Journal of Automobile Engineering, Vol. 234, Issue 4, p. 936-949, (2020), doi: 10.1177/0954407019859822

（2）Hashimoto, M., Nakanishi, Y., Koyama, H., Inose, S., Takeori, H., Watanabe, T. , Narishige, T., Okayama, T., Suehiro, Y.: Development of Low Temperature Active Material for Three Way Catalyst, SAE 2016 World Congress and Exhibition, SAE Technical Paper 2016-01-0932, (2016), doi: 10.4271/2016-01-0932

（3）Bartley, G. J.: Identifying Limiters to Low Temperature Catalyst Activity, SAE 2015 World Congress & Exhibition, SAE Technical Paper 2015-01-1025, (2015), doi: 10.4271/2015-01-1025

（4）Williamson, W., Dou, D., Robota, H.: Dual-Catalyst Underfloor LEV/ULEV Strategies for Effective Precious Metal Management, SAE Technical Paper

1999-01-0776, (1999), doi: 10.4271/1999-01-0776
(5) Hofstetter, J., Boucharel, P., Atzler, F., Wachtmeister, G.: Fuel Consumption and Emission Reduction for Hybrid Electric Vehicles with Electrically Heated Catalyst, SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility, Vol. 3, Issue 1, p. 702-714, (2021), doi: 10.4271/2020-37-0017
(6) Takamitsu, Y., Ariga, K., Yoshida, S., Ogawa, H., Sano, T.: Adsorption of Toluene on Alkali Metal Ion-Exchanged ZSM-5 and β-Zeolites under Humid Conditions, Bulletin of the Chemical Society of Japan, Volume 85, Issue 8, p. 869-876, (2012), doi: 10.1246/bcsj.20120036
(7) Kobatake, Y., Momma, K., Elangovan, S. P., Itabashi, K., Okubo, T., Ogura, M.: "Super Hydrocarbon Reformer Trap" for the Complete Oxidation of Toluene Using Iron-Exchanged β-Zeolite with a Low Silicon/Aluminum Ratio, ChemCatChem, Vol. 8, Issue 15, p. 2516-2524, (2016), doi: 10.1002/cctc.201600550
(8) Endo, Y., Nishikawa, J., Iwakura, H., Inamura, M., Wakabayashi, T., Nakahara, Y., Ogasawara, M., Kato, S.: Development of Highly Durable Zeolite as Hydrocarbon Trap Materials for Automobile Catalyst, SAE Technical Paper 2018-01-0947, (2018), doi: 10.4271/2018-01-0947
(9) Lupescu, J., Xu, L., Jen, H., Harwell, A., Nunan, J., Alltizer, C., Denison, G.: A New Catalyzed HC Trap Technology that Enhances the Conversion of Gasoline Fuel Cold-Start Emissions, SAE Int. J. Fuels Lubr., Vol. 11, Issue 4, p. 411-425, (2018), doi: 10.4271/2018-01-0938
(10) 中尾圭太, 三橋亮, 淺川哲夫：ゼオライト吸着機能を活用した自動車排ガス浄化技術, 東ソー研究・技術報告, 第 63 巻, p. 19-25, (2019), https://www.tosoh.co.jp/technology/assets/19-2-3.pdf,(参照 2024/11/05)
(11) 山本伸司, 高谷正弘, 松下健次郎：冷間始動時の炭化水素排出量低減のための炭化水素吸着型三元触媒システム, 日本化学会誌（化学と工業化学）, 2001 巻, 6 号, p. 333-343, (2001), doi: 10.1246/nikkashi.2001.333
(12) 竹折浩樹, 根本康司, 奥裕希, 生友良平, 森武史, 中尾圭太, 碓氷豊浩, 三橋亮, 中澤直人, 松尾雄一：始動時 HC エミッション低減のための HC トラップシステムの研究, 自動車技術会 2024 年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 17-24, 20245072 (2024)
(13) Takahashi, H., Ishizuka, Y., Tomita, M., Nishizawa, K.: Engine-Out and Tail-Pipe Emission Reduction Technologies of V-6 LEVs, SAE Technical Paper 980674, (1998), doi: 10.4271/980674
(14) Mitsuishi, S., Mori, K., Nishizawa, K., Yamamoto, S.: Emission Reduction Technologies for Turbocharged Engines, SAE Technical Paper 1999-01-3629, (1999), doi: 10.4271/1999-01-3629
(15) 宮本勝彦, 棚田浩, 山下正行, 田辺健：3.0L, V6 エンジン搭載車の北米 SULEV 規制対応技術の開発, 自動車技術会論文集, Vol. 39, No. 4, p. 4_65-4_71 (2008) doi: 10.11351/jsaeronbun.39.4_65
(16) https://www.iza-structure.org/databases/, (参照 2024/11/05)
(17) Liu, X., Lampert, J. K., Arendarskiia, D. A., Farrauto, R.: FT-IR spectroscopic studies of hydrocarbon trapping in Ag^{+}-ZSM-5 for gasoline engines under cold-start conditions, Applied Catalysis B: Environmental, Vol. 35, Issue 2, p. 125-136, (2001), doi: 10.1016/S0926-3373(01)00247-8
(18) Kyriakidou, E. A., Lee, J., Choi, J-S., Lance, M., Toops, T. J.: A comparative study of silver- and palladium- exchanged zeolites in propylene and nitrogen oxide adsorption and desorption for cold-start applications, Catalysis Today, Vol. 360, p. 220-233, (2021), doi: 10.1016/j.cattod.2020.05.019
(19) 竹折浩樹, 奥裕希, 生友良平, 森武史, 根本康司, 松尾雄一, 中尾圭太, 碓氷豊浩, 三橋亮, 中澤直人：Ag-CHA の小サイズオレフィン吸着効果と HC トラップへの展開, 第 133 回触媒討論会予稿集, 1P28, (2024)
(20) 奥裕希, 竹折浩樹, 生友良平, 森武史, 根本康司, 松尾雄一, 中尾圭太, 碓氷豊浩, 三橋亮, 中澤直人：HC トラップ触媒用 Cu-FAU の高温吸着効果, 第 133 回触媒討論会予稿集, 1P29, (2024)
(21) Usui, T., Liu, Z., Igarashi, H., Sasaki, Y., Shiramata, Y., Yamada, H., Ohara, K., Kusamoto, T., Wakihara, T.: Identifying the Factors Governing the Early-Stage Degradation of Cu-Chabazite Zeolite for NH_3-SCR, ACS Omega, Vol. 4, Issue 2, p. 3653-3659, (2019), doi: 10.1021/acsomega.8b03409
(22) Xu, R., Wang, Z., Liu, N., Dai, C., Zhang, J., Chen, B.: Understanding Zn Functions on Hydrothermal Stability in a One-Pot-Synthesized Cu&Zn-SSZ-13 Catalyst for NH_3 Selective Catalytic Reduction, ACS Catalysis, Vol. 10, Issue 11, p. 6197-6212, (2020), doi: 10.1021/acscatal.0c01063

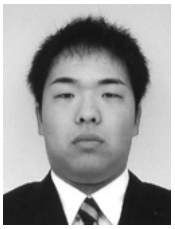
(23) Yamada, T., Ashizawa, H., Nagata, M.: Multiple Regression Analysis of OSC Characteristics under Transient TWC Conditions, SAE Technical Paper 2008-01-0713, (2008), doi: 10.4271/2008-01-0713

■著　者■


竹 折 浩 樹


根 本 康 司


奥　裕 希


生 友 良 平


中 尾 圭 太


碓 氷 豊 浩

自動車の外板面ひずみを抑制する設計・製造・材料統合シミュレーション技術の開発

Integrated Simulation Technology for Design, Manufacturing, and Materials to Reduce Surface Distortion of Automotive Outer Panels

古沢 透流[1] Toru FURUSAWA
豊岡 洋一[1] Yoichi TOYOOKA
横井 栄一郎[1] Eiichiro YOKOI
高見 滋[2] Shigeru TAKAMI
内山 政夫[2] Masao UCHIYAMA
田中 義規[2] Yoshinori TANAKA

要旨

自動車の高意匠な外観デザインを実現するためには，従来製造工程で車体の外板表面のひずみが生じる場合があり，仕様の手戻りを伴う対策の必要があった．そこで開発段階においてひずみが目視確認できない仕様の成立性が予測できる設計，製造，材料の各要因を統合した新たなシミュレーション技術を開発した．

まず車体の設計出図前のモデルから製作所の製造工程（プレス成型，スポット溶接，塗装乾燥）を一気通貫してひずみを予測するデジタル開発のコンセプトを立案し，次に製造工程における蓄積したひずみを解析するシミュレーション技術を構築し，実機を用いて検証した．

そして本技術を新機種の開発運用ルールに導入することにより，長年未解決であった製作所ごとにおけるひずみの対策手戻りを抑制し，効率的な外板意匠面のデザインの実現が可能となった．

ABSTRACT

When producing highly stylized exterior designs for automobiles, conventional manufacturing processes can cause surface distortions on the outer body panels, which require countermeasures in order to meet specifications. To address this issue, we have developed a new development-stage simulation technology. This technology integrates design, manufacturing, and materials factors to predict the potential for a design to be achieved without visible distortions.

We began by proposing a digital development concept that predicts distortions throughout all the plant manufacturing processes (stamp forming, spot welding, and paint curing) based on models made prior to the production of vehicle body design drawings. We then created a simulation technology to analyze the distortions that accumulate throughout all the manufacturing processes, and verified it on actual vehicles.

The technology was then integrated into the development operational rules for new models. This made it possible to reduce reworking due to distortions occurring in plants that had resisted resolution for many years, and thereby enable efficient production of stylized surface designs.

1．まえがき

近年，自動車の開発ではデジタル開発環境を活用して開発期間の短縮を図ると共に，性能や品質の向上を図る取組が盛んになっている(1)．中でも車体の開発においては，図面の設計仕様を数値要件化し，製造プロセスの管理基準を設定している．性能に関しては剛性，衝突，強度耐久，NVH といった各機能の CAE が実施される．また，製造プロセスに関しても，プレス成型，溶接，塗装等の各工程の CAE が実施され，車体開発における MBD やデジタルツインのシミュレーション解析技術が進化している．

しかしながら，車体外板の外観意匠性を最終的に判断する品質検査工程において確認されるひずみは，設計仕様に基づいた各製造工程における変形ひずみ量の蓄積結果であるために，各工程の影響要因の感度や相互作用はわかっていない．車体設計に関しては，モデルの進化により外観

[1] 材料研究センター
E-mail: toru_furusawa@jp.honda
[2] 本田技研工業株式会社

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_12

意匠性や軽量化，安全性や機能性の向上が進み仕様が多様化している．製造に関しては，電動車用の生産技術や工場の環境負荷削減が進み，また製作所ごとに製造条件が異なる．車体用材料に関しては，高強度軽量素材やリサイクル材の適用が進み材料仕様が多様化している．このような要求項目の多様化に伴い，外板のひずみに影響する要因が増え複雑化してきている．そのため，従来の報告例[(2)-(6)]や既存技術だけでは十分に解決が図れていない．

そこで，自動車の高意匠な外観デザインを実現するために，車体開発における設計，製造および材料の外板に関連する要因をデジタル開発環境を用いて連動させ，外板面ひずみを予測するCAE技術を開発した．

2．開発のねらい

設計段階において外板のひずみの発生を予測して防止するため，車体材料から部品，車体製造工程を一気通貫した統合シミュレーション技術を構築する．

まず，設計仕様に基づき製造工程（プレス成型，スポット溶接，塗装乾燥炉）における応力やひずみの蓄積を解析するCAE技術を開発することで，実際の工程のひずみの時刻歴変化を予測できるようにする．

次に，車体材料や設計仕様，各製造工程の各種条件を基準とその振れ幅の範囲においてシミュレーションをおこない，ひずみの発生原因を特定することで，目視でひずみが確認できない仕様や条件を設定する．

3．技術内容

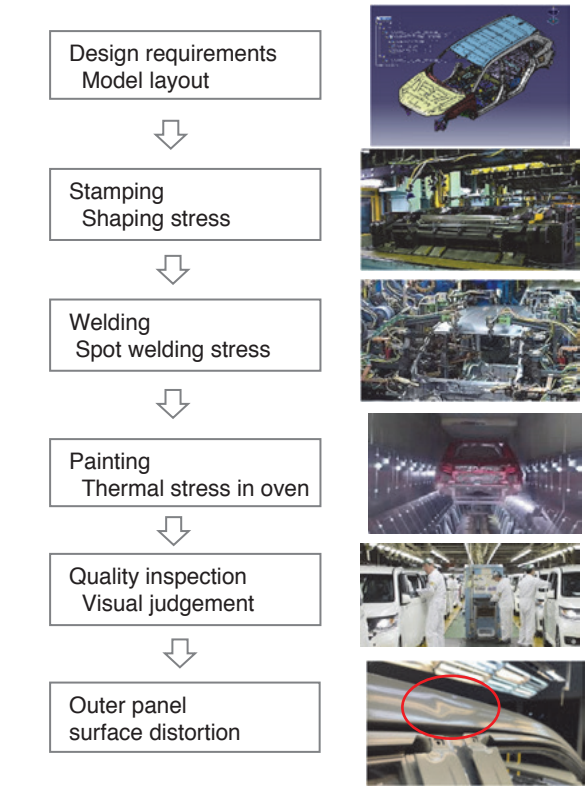
3.1．車体材料から部品および車体製造の工程間を一気通貫した統合シミュレーション技術の開発

3.1.1．外板面ひずみの解決の考え方

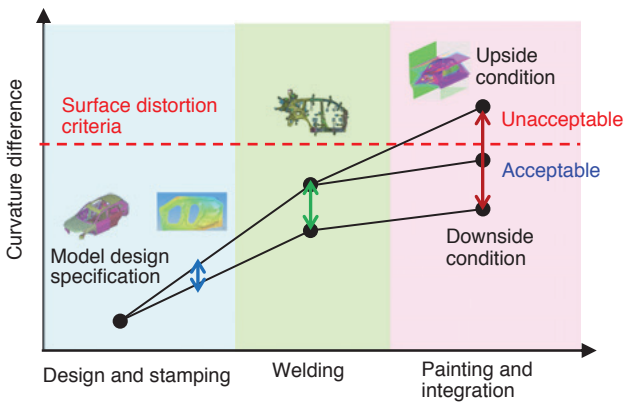
(1) 外板面ひずみの影響要因　車体の外板にひずみが検出されるまでのフローの概念図をFig．1に示す．車体開発では，設計者が要求仕様を満たすモデルのレイアウトをおこない図面を発行する．その後，試作車を製作し製造工程においてプレス成型，スポット溶接，塗装，組み立てをおこない基準となる製造条件を定める．しかし外観検査工程で目視でわかる程のひずみが発生した場合，製造条件の再設定や部品の再設計が必要になる．特に，センターピラー上部のT字交差面，下部サイドシル，ルーフパネルのアーチ近傍などにひずみが生じることが多い．これらの箇所は製造工程において部品加工時の変形，熱応力，捩れなどの外力により応力が集中したり蓄積しやすい面内であることから，負荷が過大となり素材の降伏点を超えた際に部品が塑性変形したことで外板面ひずみが生じたものと考えられる．

これまでも過去の発生事象の対策を反映した仕様の図面化や試作車を用いた検証をおこなってきたものの，事前に発生を予測することができなかった．その原因として，新機種では外観の意匠性向上を狙いとして従来にない形状仕様が適用されたり，製作所ごとの生産技術や設備が異なったりすることが原因と考えられる．実際に車体の外板面ひずみに影響する要因は数百以上に上るものの，溶接打点による板間の隙間や測定ができずCAE解析のみが可能な残留応力など，従来の製造工程の生技性管理項目では考慮できていない項目の影響が大きいと考え，解析項目としてはこれらも新たに追加した．

(2) 工程を一気通貫したひずみの蓄積の評価　Fig．2にひずみ評価の概念図を示す．開発機種により，外板のデ



Fig．1　Surface distortion in automotive body panel manufacturing



Fig．2　Evaluation approach of surface distortion criteria for outer panels during development process

ザイン形状やサイズが異なり，内板やその間に位置するスティフナーの設計諸元も異なる．また製作所ごとに設備仕様や加工条件も異なる．工程内では，納品された素材の板から部品，車体の加工へ流動する間に，外板の形状寸法が変化し残留応力やひずみが蓄積される．

これらを予測するために，各工程におけるひずみに影響する要因の基準と振れ幅の範囲においてシミュレーション評価をおこなった．次に，ひずみがある場合，ない場合，それぞれ外板の曲率分布を求め，両者の差である曲率差分(Curvature difference)を指標に外板のひずみ量を評価した．これまで検査員が目視検査で検知できるひずみ量に関しては曲率差分との相関データとして蓄積されていることから[7]，シミュレーション上で求められたひずみ量の曲率差分と過去のデータを比較することで，ひずみの発生を抑える仕様設定が可能となる．

3.1.2. 一気通貫した統合シミュレーション手法の開発

従来，製造工程(プレス成型，溶接，塗装乾燥)ではそれぞれのプロセスに特化したCAEソルバーが用いられており，工程を連動させた統合的な解析手法は実現されていない．そこで，工程間における解析設定(メッシュ，ノードのデータ形式)の差異に対応してデータを引き渡す方法を設定した．また外板面ひずみに影響する要因をCAE解析手法の入力データに反映した．Fig. 3に製造プロセスのフローおよびシミュレーションを用いた工程間のデジタル連動の概念図を示す．その中で特にひずみへの感度が高い要因について，基準条件から世界の製作所の条件の振れ幅の範囲で評価を実施した．以下に詳細を述べる．

(1) 解析対象　　外板面ひずみを解析する対象部品として，例としてセンターピラー上部，サイドシル，ルーフの三箇所を設定した．

解析には設計要件(基準寸法，基準線における曲率半径，隙間や段差の棚形状寸法，ビード面剛性，座屈耐力等)のデザインデータや過去の設計ノウハウを反映したCAEモデルが必要となる．そこで，車両性能のCAE解析に用いられているモデルのメッシュサイズや結合モデルを転用することで，新たなモデル作成のための工数を増加させず解析をおこなった．

(2) 材料仕様　　外板部品や接合部を構成する材料として，鋼板，アルミ板，接合部の接着剤やシーラーなどが挙げられる．解析に入力する材料特性は，素材の強度や組成ごとに応力歪線図や温度依存性が異なる．また板厚の標準値と公差の上下限によっても，解析結果が大きく影響を受けるため，材料特性の詳細な実測値を元にして社内で蓄積した材料データベース[8]を用いた．

(3) プレス工程　　外板のプレス成型工程におけるひずみは，ドローやフォームなどの絞り成型がトリム，リスト，ベンド，ピアス，カットなどの切断，曲げ成型工程よりも影響が大きい．ここでは陽解法ソルバーである株式会社JSOL製JSTAMPを用い，平板をドロー成形およびフォーム成形した場合の塑性ひずみと板厚減少率を計算した．圧縮方向の応力から発生する外板面ひずみには，塑性ひずみによる鋼板の耐力の変化が重要な要因となるため，加工硬化による塑性ひずみを反映した．また自重による影響を反映して解析した結果を次工程の溶接解析に引き継いだ．

(4) 溶接工程　　外板の溶接工程には，設備仕様，溶接仕様，クランプ仕様などに含まれる非常に多くの条件パラメーターが存在する．その中でひずみの要因としては，生技性の管理上，固定治具の位置，スポット溶接打点の板間隙間，打点位置の順番による残留応力の伝播の影響が挙げられる．そのため，陰解法ソルバーである日本イーエスア

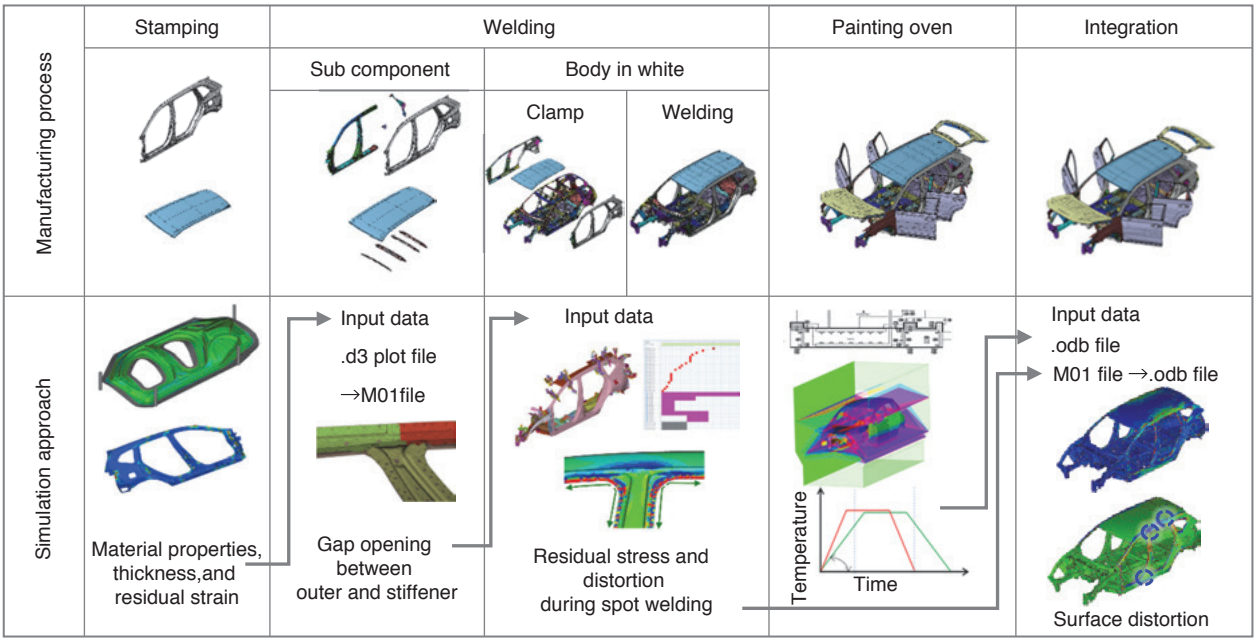


Fig. 3　Integrated simulation approach along manufacturing processes

イ株式会社製 Visual-Assembly を用い，溶接のクランプ位置と打点順，板間のギャップをパラメータとして設定した．また，スポット溶接打点後の残留応力，ひずみ，変形形状のデータを次工程の塗装乾燥炉解析に引き継いだ．

(5) 塗装乾燥炉工程　　外板の塗装工程では，上屋車体が台車に支持されて 100m 以上の長さの乾燥炉（電着炉から中塗り炉，上塗り炉，リペア炉）内を 1 時間以上流動する．その間に常温からおよそ 200℃ まで昇温して塗料を焼付け硬化させた後，常温まで冷却される．乾燥炉の壁面ノズルからの高温噴流が直接当たる外板が先に昇温され，その後に循環した熱風により内側部品が昇温する．その際の内外板の温度差に伴う熱膨張差が，ひずみの要因として挙げられる．しかし CFD による熱流体解析をおこなう場合には計算時間が長く開発の中で実施することが容易ではない．そこで，計算時間短縮のために，熱流体を熱伝達係数や熱放射でモデル化した伝熱解析ソルバーである ARRK Engineering GmbH 製 THESEUS-FE を用いた．まず車体温度の空間分布や時刻歴の変化を把握するため，製作所ごとに異なる乾燥炉の仕様を反映した 3D モデルを作成し，実機の塗装乾燥条件を反映した．解析結果から車体モデルの各メッシュノードに関して温度プロファイルデータを出力し，次工程の最終的な車体の構造解析の入力負荷データとして出力した．

(6) 製造履歴を反映した構造解析　　(1) から (5) で示した各製造工程におけるひずみは蓄積し続けるため，各工程の履歴を引き継いだ CAE 解析が必要となる．そのため，解析ファイル形式としてプレス工程の .d3 plot file から溶接工程の M01 file，塗装乾燥工程および最終的な構造解析の .odb file へデータ形式を連動するスクリプトを作成した．最終的な車体構造の応力解析には陰解法ソルバーであるダッソー・システムズ株式会社製 Abaqus を用いた．

以上のように，車体の設計仕様 DPM，入力材料特性，各製造工程（プレス成型，スポット溶接，塗装乾燥）に起因して蓄積されたひずみを連動し，開発プロセスを一気通貫した統合シミュレーション手法を構築した．

3.1.3. 検証の考え方と測定手法構築

実際の製造ラインまたは検証用ラインの環境下で，試作車を用いてひずみに関連する要因を実測して，シミュレーション結果に対する比較検証をおこなった．

(1) 検証環境　　検証試験は世界の製作所の基準である寄居製作所で実施し，試作車はラインを流動する車種として外板パネルの面積が大きい SUV タイプ 1 機種を用いた．

プレス工程は寄居製作所の量産プレス設備を用いた．溶接工程は寄居製作所の実証用試作ラインにおいて量産同等の溶接をした．塗装工程は量産ラインの乾燥炉を用いて車両を流動させた．

(2) 測定条件　　ひずみの変化量を工程内，工程間において明確にするために，3D 形状，工学的ひずみ（以下 Strain と呼ぶ），板間隙間，温度の時刻歴変化をモニタリングして，塑性ひずみの発生タイミングと発生箇所の相関性を検証した．Fig. 4 に検証手法一覧を示す．非接触の 3D 形状測定は各製造工程の前後で実施し，実車の変形挙動を詳細に測定した．溶接工程ではクランプ，溶接，アンクランプ，において外板と内板の隙間とその変化量をすきまゲージを用いて測定した．さらに溶接工程から塗装乾燥工程では，ひずみの発生量を時系列で連続的に取得するために，光ファイバーを用いた面分布のひずみから三次元的な変形量を測定した．塗装乾燥工程では，外板，内板，そしてその間に位置するスティフナーに熱電対を設置し，内外板の温度差によるひずみの影響を評価した．その際，光ファイバー及び熱電対の測定器やデータロガーは専用に製作した耐熱ボックスの中に格納し，車両乾燥炉内の約 200℃ においてもひずみと温度の経時変化を測定した．

3.1.4. 各製造工程の検証結果

(1) プレス工程　　サイドパネルのプレス成型時の変形は，Fig. 5 に示すスクライブドサークル（変形前後の長軸と単軸の変化率からひずみを計測）や板厚の減少率を測定した．Fig. 6 に板厚の減少率の実測と 3.1.2. 項 (3) シミュレーションの比較結果を示す．減少率の差異は 6.6% 以下でありよく一致することが確認できた．

(2) 溶接工程　　外板面ひずみへの影響が大きいスポット溶接の打点順に伴う Strain の変化について，光ファイ

○: Measured, － : Not measured

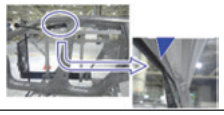
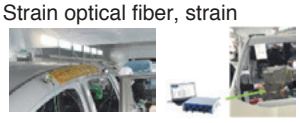
Verification test methods, measurement data	Process		
	Stamping	Welding	Painting
Optical 3D scan, 3D shape 	○	○	○
Feeler gauge and gap width 	－	○	－
Strain optical fiber, strain 	－	○	○
Thermocouple, temperature 	－	－	○

Fig. 4　Verification test methods for vehicles in factory

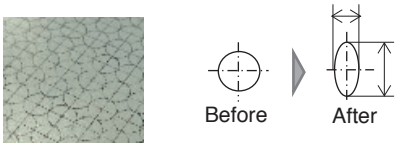


Fig. 5　Measurement method of stamping strain (scribed circle)

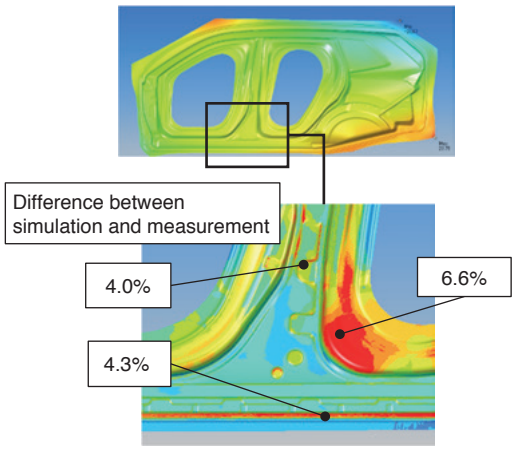


Fig. 6　Simulation of outer panel stamping and comparison of thickness results between simulation and measured reduction in sidesill area

バーを用いた計測と 3.1.2. 項 (4) に述べたシミュレーションの比較結果を Fig. 7 に示す．ルーフ，ルーフサイド，サイドシルの三箇所の評価において溶接打点のタイミングと Strain 変化が良く一致することが確認できた．

(3) 塗装乾燥炉工程　　3.1.2. 項 (5) に述べた塗装工程のシミュレーションにおいて，寄居製作所の電着乾燥工程の入口流量，温度条件下でサイドシル外板温度の計算と測定を比較した結果を Fig. 8 に示す．温度プロファイルが良く一致することが確認できた．また，サイドシル外板とその内側に位置するスティフナーの温度差と，光ファイバーを用いた Strain 測定結果を Fig. 9 に示す．温度差が最大のタイミングで Strain 変化の絶対値が最大になることが示された．このことから製造中の熱膨張差による応力が降伏応力を超える場合に塑性変形に至ることが予想された．

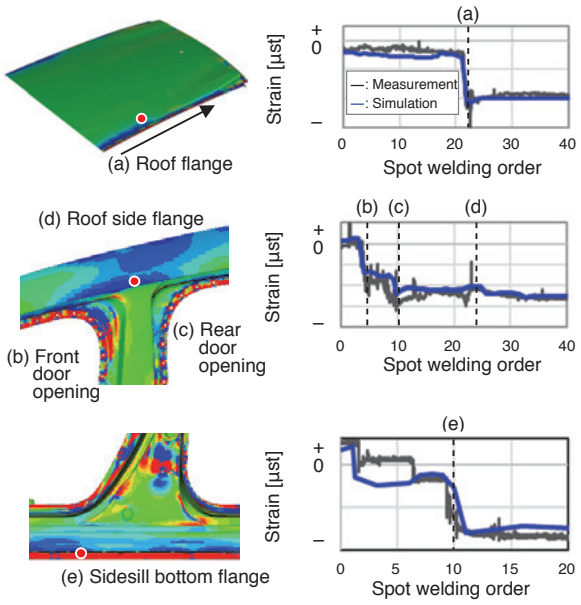


Fig. 7　Comparison of strain results between simulation and measurement along spot welding order

(4) 製造履歴を反映した構造解析の検証　　製造履歴を反映したひずみ解析の有効性を検証するため，サイドシルの初期デザイン面に対する塗装乾燥後の変化量の実測と，シミュレーション結果を Fig. 10 に示す．実測 (a) に対して

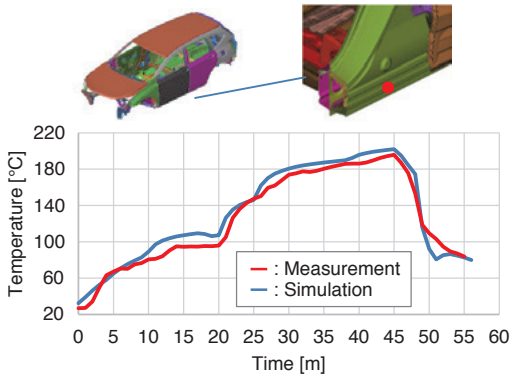


Fig. 8　Comparison of temperature results between simulation and measurement during paint oven process

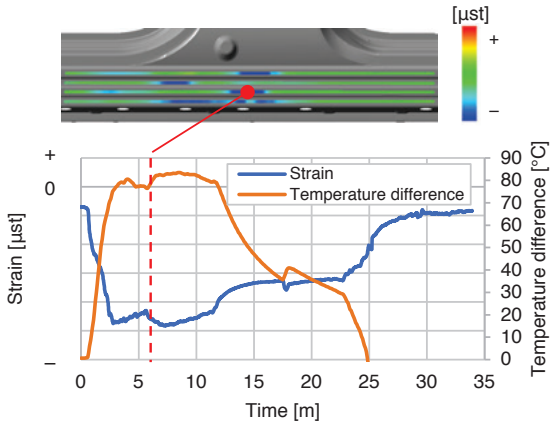


Fig. 9　Measurement results of strain on sidesill outer and temperature difference between sidesill outer and stiffeners

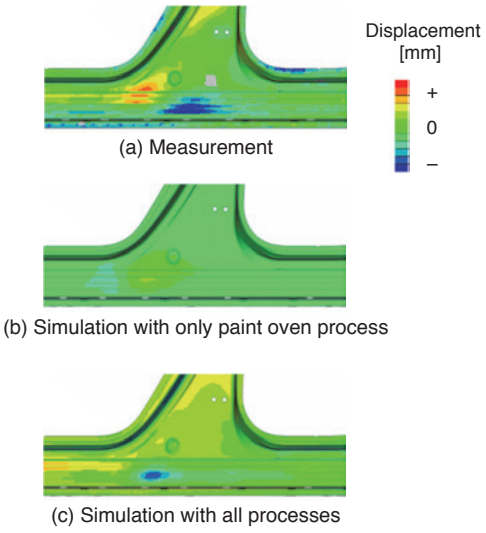


Fig. 10　Comparison of displacement results between measurement and simulation with processes on sidesill

一部製造履歴を考慮しない場合 (b) のシミュレーション結果では変形量が微小となった．一方，全ての製造履歴を考慮した場合のシミュレーション結果 (c) では，実測と同様の位置における同等のマイナス方向 (凹み) の変形が見られ良い一致が確認できた．

次に，塗装乾燥炉工程における光ファイバー測定を用いたサイドシルの時刻歴ひずみ量の実測と計算の比較結果を Fig. 11 に示す．縦軸に，Strain 測定値と外板素材の鋼板の弾性率を乗じた応力値が耐力を超えて塑性変形を生じる領域を示す．昇温開始と共にひずみが増大し，実測では数分経過後に塑性変形が生じた．シミュレーション結果について，塗装乾燥炉工程を考慮しない条件でのシミュレーションでは塑性変形を生じない耐力内の応力であった．一方，製造履歴を考慮した場合では，耐力を超えて塑性変形を生じる結果となり実測と同じ傾向を示した．

以上のように，製造工程を統合した本シミュレーション手法は，実測で塑性変形を起こすタイミングやひずみ量を予測できており，その有用性が確認できた．

3.2. 統合シミュレーションを用いた外板面ひずみの抑制仕様の成立性予測

車両モデルのルーフ，サイドシル，センターピラー上部に対して，外板面ひずみの影響要因の各種条件をふりひずみを抑制する仕様のシミュレーションをおこなった．仕様の成立性の予測の観点として，設計仕様の板厚や外板面曲率，プレス成型工程による板厚減少率の変化，溶接工程でのスポット板間隙間，塗装乾燥工程における昇温速度について，基準条件とその振れ幅の影響を比較した．サイドシルについては，Fig. 12 に示すように，プレス成型時の板減，溶接時の板間隙間は比較的影響が小さいが，塗装乾燥の昇温速度の基準と振れ幅上限側の条件を比較した場合に差異が大きい結果が得られた．そこで実機を用いて実測をおこなった結果，シミュレーションと同一の塗装乾燥昇温速度の基準条件ではひずみが発生しなかった．一方，振れ幅上限を超える条件では発生したひずみがクライテリアを超え，シミュレーション結果と一致した．

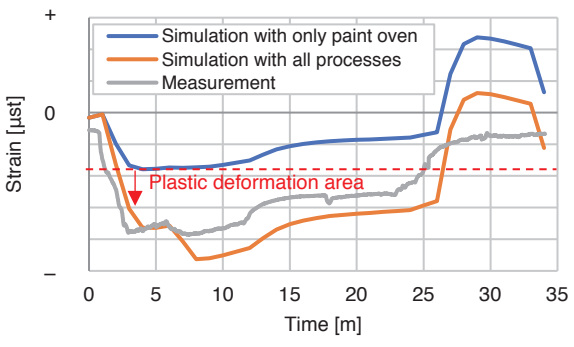


Fig. 11 Comparison of strain results on sidesill between measurement and simulation during paint oven process

またその際に，Fig. 13 に示すように，シミュレーション結果 (a) と実測結果 (b) を比較すると同様なひずみの曲率差分の分布傾向が得られた．この結果から振れ幅の範囲を見直し，最適な昇温速度を製造条件に反映することができた．

次にルーフパネルのシミュレーションをおこなった．Fig. 14 に示すように，基準条件では溶接工程においてひずみは増加するが，塗装乾燥工程の影響は比較的小さいことがわかった．また，溶接条件の振れ幅上限の解析結果，ひずみが増加し，そこに塗装乾燥条件の振れ幅上限の条件

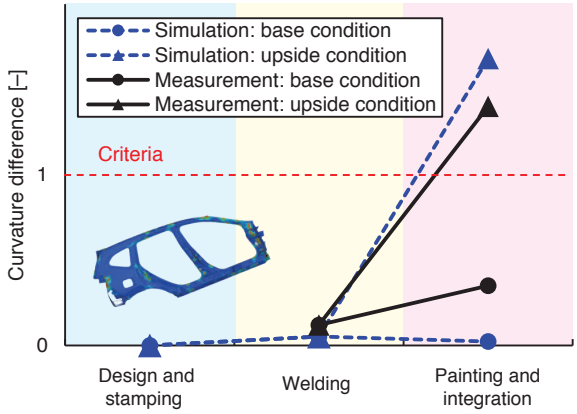


Fig. 12 Comparison of curvature difference results on sidesill

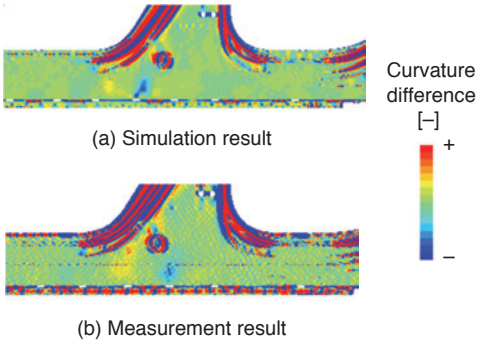


Fig. 13 Simulation and measurement results of curvature difference with all processes on sidesill

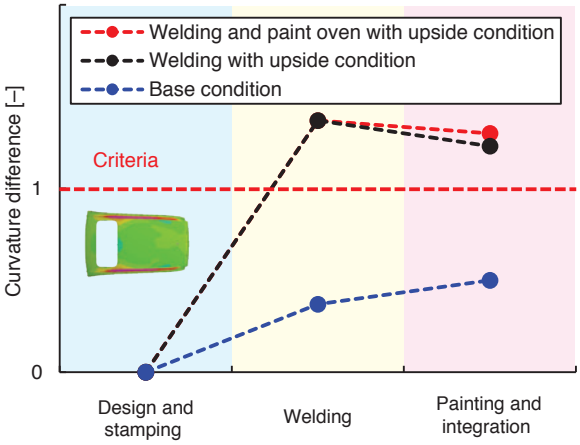


Fig. 14 Simulation comparison results of curvature difference on roof panel

を追加しても影響が小さい結果から，溶接工程がひずみにもっとも影響を与えていることが分かった．

これは，Fig. 15 に示すようにスポット溶接打点時の板間の隙間が大きい程，矩形構造の変形が大きくなることでルーフ面への応力が過大となり，ひずみが発生したものと考えられる．そこで溶接条件を変更し最適な製造条件に反映することで外板面ひずみを抑制することができた．

またこのように，部品によって外板面ひずみへの支配的な要因が異なることもわかった．

以上より，車１台の外板に関して設計仕様から製造各工程におけるひずみの蓄積を考慮した上で仕様の成立性を予測できた．また，部品や部位によって影響要因の感度や相互作用が異なり，車１台分の複雑な事象下のひずみの発生を抑制するためには，一気通貫で統合したシミュレーション手法が有効であることが明らかとなった．

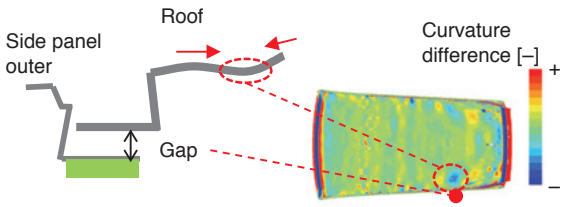


Fig. 15　Simulation result of curvature difference due to gap on roof panel

4．まとめ

自動車の高意匠な外観デザインを実現するために，設計段階において外板面ひずみの発生クライテリアを予測するシミュレーションを構築した．本技術を新機種開発の運用フローへ展開し，世界各地の製作所で生じていた外板面ひずみを対策する手戻りを防ぎ，設計の開発効率を高めることができた．

（1）車体材料，設計仕様から製造工程（プレス成型，スポット溶接，塗装乾燥）を一気通貫で評価するため，ひずみや応力の蓄積データを引き継いだ CAE 技術を構築した．実機を用いて検証した結果，塑性変形の発生タイミングも予測できるようになった．

（2）構築した統合シミュレーション手法を用いて，外板の部位によってひずみへの影響が大きい要因が異なるメカニズムを把握した．そして要因となる設計仕様や製造条件を最適化することで，ひずみの発生を抑制できるようになった．

参考文献

（1）https://www.nvidia.com/ja-jp/omniverse/solutions/digital-twins/,（参照 2025/7/1）

（2）福本幸司，高木康夫，岩瀬哲：自動車パネルの熱変形解析設計技術，R&D 神戸製鋼技報，Vol. 62，No. 2，p. 29-33，(2012)

（3）濵田幸一：外板パネルの塗装熱ひずみ解析技術，日本製鉄技報，第 412 号，p. 92-96，(2019)，https://www.nipponsteel.com/tech/report/pdf/412-14.pdf，（参照 2025/7/1）

（4）Kim，M. S.，Lee，M. S.，Park，S. C.，Jeong，J. Y.，Shin，Y. C.，Shin，S. C.，Joo，G. H.，Ko，S. Y.，Jang，J. H.，Lee，I. H.，et al.: Analysis of Car Body Performance and Thermal Distortion in Paint Drying Oven when applying a Laser Brazed Aluminum Roof，2020 JSAE Congress (Autumn) Proceedings，(2020)

（5）樫山武士，大堀敏郎，塩原学，村野義行，松本拓哉：耐水耐熱変位計による電着槽および乾燥炉内での車体変形の実測と CAE との比較，自動車技術会論文集，53 巻，4 号，p. 821-826，(2022)，doi:10.11351/jsaeronbun.53.821

（6）Cai，W.，Bondy，M.，Carlson，B.，Baylis，M.: Prediction of automotive body-in-white distortion in paint baking process，Manufacturing Letters，Vol. 41，p. 270-280，(2024)，doi: 10.1016/j.mfglet.2024.09.032

（7）豊岡洋一，古沢透流，横井栄一郎，高見滋，内山政夫，田中義規：曲率差分を用いた自動車の外板面ひずみの評価手法の構築と車体設計への適用，Honda R&D Technical Review，Vol. 38，p. 114-119

（8）伊藤剛，石井達子，本田寛，杉本直，豊岡洋一，古沢透流：マテリアルズインフォマティクスを活用した高効率開発のための材料データベース，Honda R&D Technical Review，Vol. 32，No. 2，p. 107-114

■著　者■


古 沢 透 流


豊 岡 洋 一


横井栄一郎


高 見　滋


内 山 政 夫


田 中 義 規

曲率差分を用いた自動車の外板面ひずみの評価手法の構築と車体設計への適用

Development of Evaluation Method for Automotive Outer Panel Surface Distortion Using Curvature Difference and Application to Body Design

豊岡洋一[1] Yoichi TOYOOKA
古沢透流[1] Toru FURUSAWA
横井栄一郎[1] Eiichiro YOKOI
高見滋[2] Shigeru TAKAMI
内山政夫[2] Masao UCHIYAMA
田中義規[2] Yoshinori TANAKA

要　旨

自動車の製造工程において発生する外板面ひずみを開発段階で予測するためには，人の目視検査と相関する定量的な評価手法が不可欠である．本研究では曲率差分を用いた定量的なひずみの評価手法を提案し，開発段階での予測シミュレーションによる仕様判定を可能にすることを目指した．曲率とは曲面の勾配変化率を指し，基準形状とひずみ部との曲率の差を曲率差分と定義することで，ひずみの程度を定量化できる．この手法により，外板面ひずみと目視評価との相関性について良好な一致が得られた．そこで設計段階のシミュレーションにおいて曲率差分を判定基準として取り入れることで，開発から製造現場に至るまで一貫した評価指標として活用が可能となった．本稿では評価手法の詳細と有効性について報告する．

ABSTRACT

A quantitative evaluation method that correlates with human visual inspection is important in helping to predict outer panel surface distortion that may occur in the development phase of the automobile manufacturing process. This study proposes a quantitative evaluation method for distortion using curvature difference, in order to determine specifications through predictive simulations in the development phase. Curvature refers to the rate of change of the slope of a curved surface. The degree of distortion can be quantified by defining the difference in curvature between the standard shape and distorted areas as the curvature difference. The proposed method achieved reliable correlation between outer panel surface distortion and visual evaluation. Therefore, by incorporating curvature difference as one criterion in design phase simulations, it can be utilized as a consistent evaluation index from development to the manufacturing site. This paper reports the details and effectiveness of this evaluation method.

1．まえがき

近年，自動車開発においては，デジタル開発環境の活用により開発期間の短縮と品質や性能の向上を図る取り組みが加速している．中でも車体開発では，設計図面による仕様要件の定義や，製造プロセスにおける管理基準の設定に加え，剛性，衝突安全性，強度，耐久性，NVH（騒音，振動，乗り心地）などの性能に対するシミュレーションが広く実施されている．また，プレス成形，溶接，塗装といった製造工程においてもシミュレーションが導入され，MBD（モデルベース開発）やデジタルツイン技術の進展により，車体開発のシミュレーション技術は高度化している．筆者らはこれまでに，設計，製造および材料の各部門が連携し，外板に関連する要因を統合的に扱うことで，外板面ひずみを予測可能なシミュレーション技術[(1)]を開発した．しかしながら，製造現場におけるひずみ検査では目視評価が重要な判断基準となっており，シミュレーションによる寸法での予測結果と現場での目視との判定が一致しないケースが

[1] 材料研究センター
E-mail: yoichi_toyooka@jp.honda
[2] 本田技研工業株式会社

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_13

課題として残されていた．そのため目視評価にたよらず定量的に判断できるひずみの評価手法を作り，それをシミュレーションにも取り入れる必要があった．

人間の視覚は，表面の滑らかさや連続性の乱れ，曲率の不連続や急激な変化に非常に敏感である．たとえば，光の反射が不自然に変わる，連続していた写像が曲がるといった違和感は，いずれも曲率の急激な変化に起因し，人が感じる滑らかさが損なわれるためである[(2),(3)]．特に自動車の外板のような光沢面では，わずかな凹凸でも光の反射が変化し，目視評価に大きな影響を与える．過去のひずみの定量化や評価について以下に示すが，各々に課題がありHonda での車体開発においては実用化されていない．

（1）非接触 3D 測定による寸法差分による評価[(4)-(6)]

面の微細な起伏を高精度に捉えることができるが，人の目視による光のうねりや折れの評価と非接触 3D 測定による評価との相関が実証されておらず，目視評価と一致するひずみ量を設定することが難しい．

（2）曲率を用いた評価[(7),(8)]

（1）の評価手法同様に外板表面の 3D 形状を測定し，面の曲率や曲率変化を算出することで，面ひずみの分布を定量的に評価する．ただし本稿で扱う製品図面に記載された最終製品の形状であるデザイン面は，元々曲率が大きかったりデザインによる曲率変化がある．そのため，外板面ひずみの微小な曲率の変化では元のデザイン面の曲率に埋もれてしまい，ひずみ部分の曲率だけを極値として抽出することが難しい．

（3）プロファイラによるラインスキャン測定

接触式または非接触式の表面プロファイラを用いて，一定の測定長における表面の高低差を連続的に測定し，面ひずみの定量化に利用するが，面として測定ができないため，実パネルのような広域での評価が難しい．

そこで外板面ひずみシミュレーションの予測結果と現場での目視評価を一致させる新しい定量評価手法を構築することを目指した．

2．開発のねらい

外板面ひずみの評価のためには判断基準となるクライテリアを設定する必要があり，それに伴い外板面ひずみの定量化が必要である．本稿では定量化の手法としてデザイン面と車体の製造工程における変形後の外板面の曲率の差分を取る手法に着目した．人の目視でひずんでいると感じるのは反射が不自然に変わるためであるが，これは滑らかに曲率が変化する途中で急に曲率が変わることに起因する．そのため元の曲率とひずみを含む曲率との差分をとることで，ひずみ部分が効果的に抽出できると考えた．まずは人の目視評価と，実車外板の曲率差分の算出値との相関取りをおこない，次にこの相関により設定した定量指標のクライテリアを用いて，シミュレーション上での設計仕様の検討をおこなった．最後にひずみに対し有効な設計仕様で作製した実車と比較することで有効性を検証した．

3．外板面ひずみの定量化方法

曲率差分を用いた外板面ひずみの定量化原理を以下に示す．xy 座標平面のある曲線を $y = f(x)$ とした場合，x 方向の曲率 κ は式（1）で定義される．デザイン面の曲率を κ_1 とし，ひずみを含む面の曲率を κ_2 とした場合その差分である式（2）を曲率差分 $\Delta\kappa$ と定義した．

$$\kappa = \frac{f''(x)}{(1+f'(x)^2)^{3/2}} \qquad (1)$$

$$\Delta\kappa = \kappa_1 - \kappa_2 \qquad (2)$$

Fig. 1 に単純な曲線を使った一例を示す．Fig. 1(a) が設計で意図した曲線であり，Fig. 1(b) はそれに対して，一部にひずみを与えた線である．両者はほぼグラフ上では見分けがつかない．次に両者の曲率分布を Fig. 1(c), (d) にそれぞれ示すが，曲率分布からもひずみの有無は判別できない．しかし曲率分布の差分を求め Fig. 1(e) のようにプロットすると，ひずみの発生位置に曲率分布の差分の極値が現れる．曲率差分を算出した結果が人の目視との相関があることが実証できれば定量的な評価が可能となる．

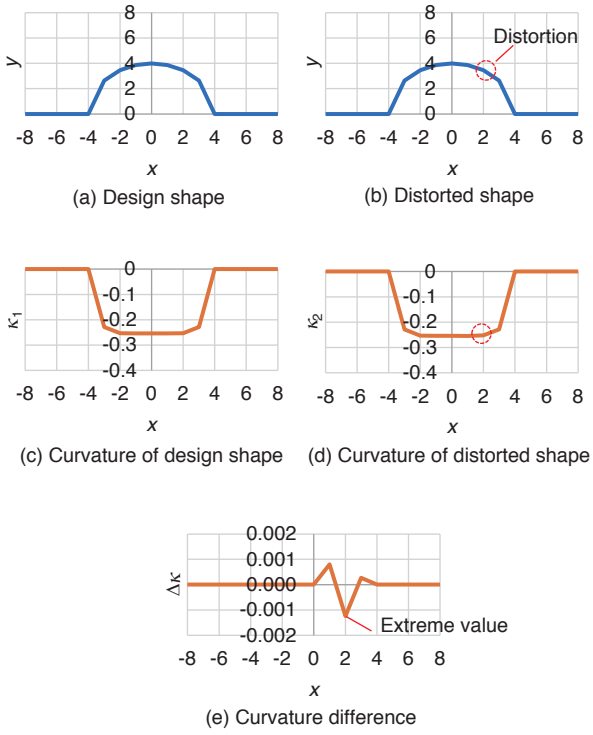


Fig. 1　Example of distortion extraction using curvature difference

4．実車での原理実証

4.1. 実車測定データを用いた曲率差分算出方法

外板面ひずみの曲率差分による定量値と目視評価の相関を調べるため，実車の外板パネルの曲率差分を算出した．本稿では実車の 3D 形状データ測定には GOM 社製の光学スキャン（測定器：ATOS 5X）を用いた．データは平均メッシュサイズを 1 mm としたランダムメッシュデータで出力される．曲率差分の算出フローを Fig. 2 に示す．外板の形状データから曲率差分を算出するために，全体で四つのステップに分けて処理をおこなった．

・Step 1: 3D メッシュデータの取得

xyz 軸の 3D 座標上のデータとし，ひずみを評価する板面を *xy* 面と平行に配置した．デザインデータについては CAD データからメッシュデータに変換をおこなった．

実車の 3D データについては光学スキャンの測定データを用いた．

・Step 2: 等間隔のメッシュデータへの変換

ランダムメッシュデータに対して，*x* および *y* 座標を等間隔にし，その *xy* 座標に対応して *z* 座標の線形補間をおこなった．

・Step 3: 曲率差分の算出

デザインデータと測定データにおける *x* 方向の 1 階および 2 階微分を中心差分法により算出し，*x* 方向のデザインデータの曲率 κ_1 と *x* 方向の測定データの曲率 κ_2 を算出した．最後に曲率 κ_1 と曲率 κ_2 の差分を取り曲率差分 $\Delta\kappa$ とした．

4.2. 節で後述するが，本稿では目視評価と曲率差分との相関性の確認には，ルーフ，ルーフサイド，サイドシルを対象としたため，各部位の長手方向を *x* 軸と同方向に配置し，過去のひずみ発生の状況を鑑みて *x* 方向のみの評価をおこなった．

・Step 4: 曲率差分のマッピング

算出した曲率差分値をステップ 2 のメッシュデータの座標にマッピングすることでデータの可視化をおこなった．曲率差分の正負の符号については，直感的に変形の傾向を把握できるように，プラスを人の目視に対して凸方向，マイナスを凹み方向として定義しカラーマップで表示した．

Fig. 3 に実際のルーフの寸法差分と曲率差分を算出しカラーマップにした結果を示す．(a) でルーフ中央部の *z* 軸 + 方向の変位が確認できるが，寸法差分の大きい部位が目視でひずみとして認識できない場合がある．これは寸法差分

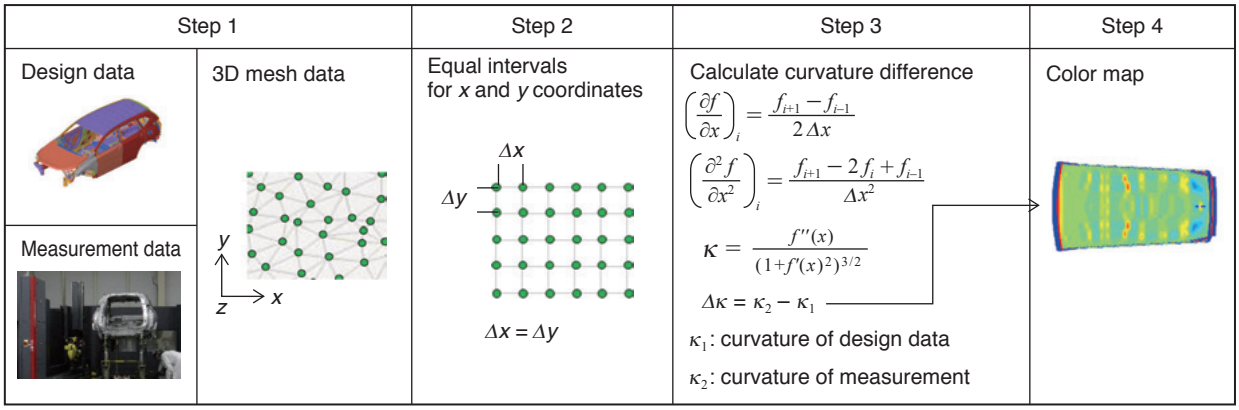
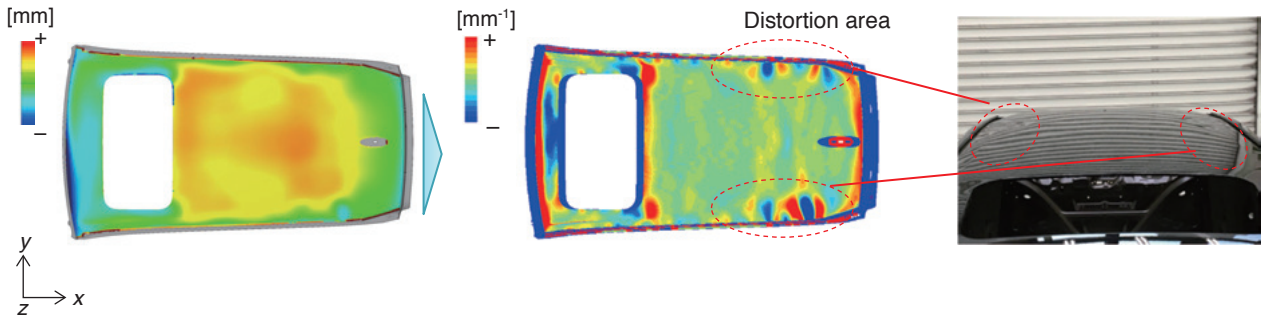


Fig. 2　Curvature difference calculation flow



(a) Dimensional difference (*z*-axis)　(b) Curvature difference (*x*-direction)　(c) Actual roof panel

Fig. 3　Example of dimensional difference and curvature difference in measurement data

がデザインデータと測定データの変位を示す一方で，局所的な変形やうねりといった視覚的な違和感が微小な変位として存在するため，その微小な変位が埋もれてしまい捉えにくいためである．対して (b) の曲率差分においては，ルーフ端部のうねりが明確に抽出されており，(c) の写真のひずみ部位と一致することが確認できた．このことから，曲率差分は目視評価と高い相関性を持ち，目視に近い評価指標として有効であることが示された．

4.2. 目視評価と曲率差分の相関検証

目視と曲率差分との相関性を確認するため，ひずみの程度が小さいものから大きいものまでサンプルとなる車体を５台用意し検証をおこなった．車種は外板パネルの面積が大きくひずみが発生しやすいセダンタイプ２台と SUV タイプ３台を用意した．目視評価についてはルーフ，ルーフサイド，サイドシルの３部位に対し，Fig. 4 の例のように曲率差分の値が極値のポイントをあらかじめ抽出した．それらのポイントに対し Table 1 に示す 10 段階の目視での点数付けをおこなった．評点６以上が量産製品として合格となるボーダーラインとした．評価環境については，蛍光灯を等間隔に配置し光の反射具合の変化でひずみが検出しやすい検査場で実施した．エキスパートの検査員 55 名が，抽出したポイントに対し評点付けをおこない，平均値を評点とした．この評点を各ポイントの曲率差分の値と比較し，相関の確認をおこなった．

ルーフ，ルーフサイド，サイドシルのそれぞれの確認結果を Fig. 5, 6, 7 に示す．グラフの縦軸を目視評点，横軸を曲率差分とし，Fig. 4 に示したポイントに対して目視評点の平均値と曲率差分の関係を車種ごとにプロットした．Fig. 7 のサイドシルについては，セダンタイプは樹脂のガーニッシュ部品が付くため評価せず，SUV タイプのプロットのみを示す．

結果からどの外板部位においても目視による評点が低くなるほど曲率差分の絶対値が大きくなるという傾向が明確

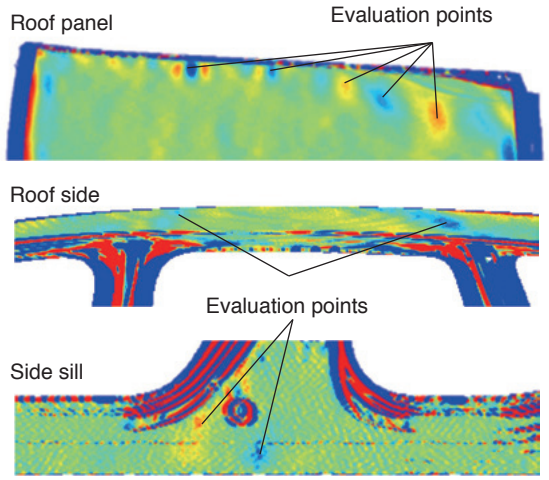


Fig. 4　Example images of visual evaluation points

Table 1　Visual evaluation scores

Score	Judgement	Reactions
10	EXCELLENT	No distortion
9	VERY GOOD	Undetectable even by experts
8	GOOD	Detectable by experts
7	ACCEPTABLE	Recognized but acceptable by experts
6	BORDERLINE	Acceptable but noticeable if customers pay attention
5	UNACCEPTABLE	Detectable by customers
4	UNACCEPTABLE	Complaint
3	POOR	Strong complaint
2	VERY POOR	Repair request
1	N/A	Rejection

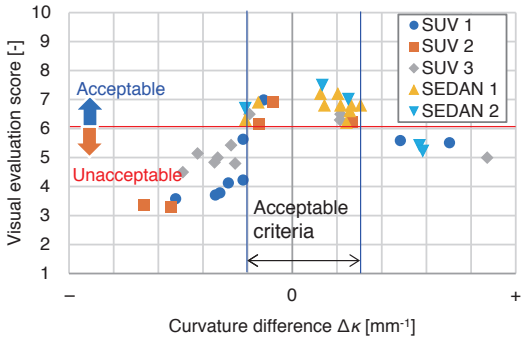


Fig. 5　Correlation between visual evaluation scores and curvature difference of roof panel

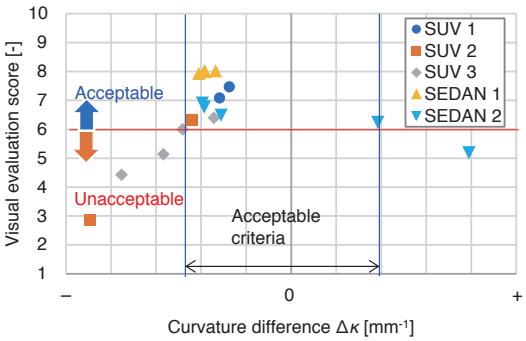


Fig. 6　Correlation between visual evaluation scores and curvature difference of roof side

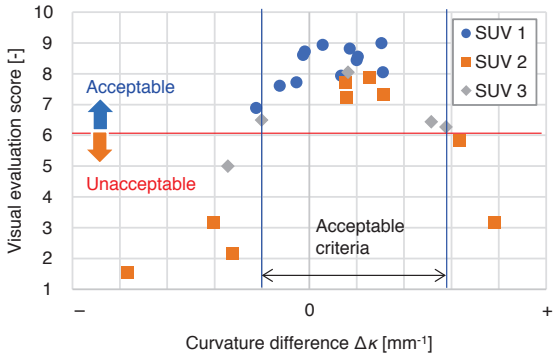


Fig. 7　Correlation between visual evaluation scores and curvature difference of side sill

に表れ，想定していた相関性が確認できた．ルーフ，ルーフサイド，サイドシルではそれぞれ合格となるクライテリアの範囲が違うが，これは部位ごとのデザインの曲率が違うためと考えられる．デザインの曲率が小さい，すなわちより平滑な面だと，曲率差分が小さい場合でも目視ではひずみを感知しやすく，反対にデザイン面の曲率が大きいと，曲率差分が大きくても目視では感知しにくいためと考えられる．この結果から目視評点が 6 点以上になる曲率差分の範囲をひずみのクライテリアとして設定することで，人の目視と実車のひずみの定量指標との相関取りができた．このクライテリアによりシミュレーションと比較できるようになり，不具合時の原因究明や，設計変更時の事前予測が精度よくできるようになった．

今回のクライテリアは既存機種の外板を広くカバーして作られており，新機種の開発にも対応できると考える．ただし，今後車体が進化することで，これまでと大きく異なるデザインの車体が現れることに備えて，より細分化してデータを蓄積することで，精度の向上に努めていく必要がある．

5．シミュレーションへの適用

Fig. 8 は 2022 年モデルの CR-V のルーフにおけるひずみの発生を抑制するための設計過程をルーフを例に示したものである．ルーフ端部には車体フレームとルーフパネルのスポット溶接部があるため，比較的ひずみが発生しやすい箇所である．Fig. 8 の (a)，(b) には初期設計と耐性向上設計の 2 種類の設計案に基づく外板面ひずみの予測シミュレーションによる曲率差分算出結果を比較している．初期設計 (a) では，溶接フランジの溶接起因でルーフ外観部に

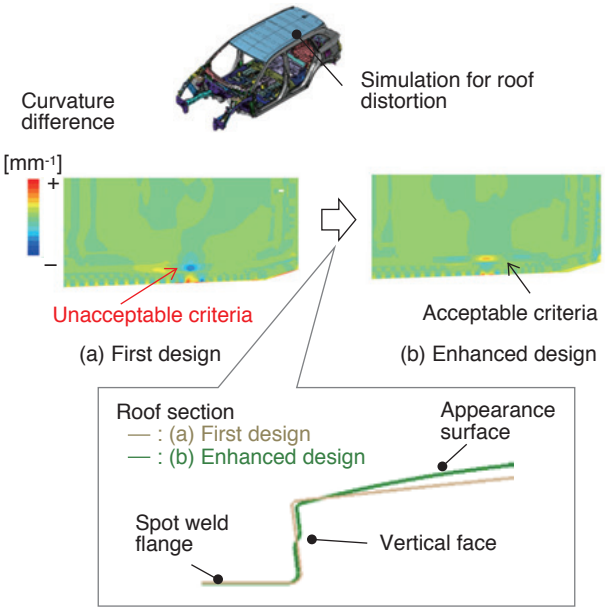


Fig. 8　Design process to reduce distortion in roof

変位が及び，ひずみが発生するため，赤字で示す部分の曲率差分がクライテリア不適合となることがわかった．耐性向上のため設計 (b) として外観面および垂直面の二つの断面形状について，プレスの成形性，機能面，意匠性など他の開発要件に対しネガティブな要素が出ない範囲で寸法検討をおこなった．外観面については外観面の曲率を小さくし剛性を上げ，垂直面については二段形状を設定し，溶接時の変形がデザイン面に及び難いよう寸法を設定した．その結果，曲率差分の値がクライテリア内になることが確認できた．

Fig. 9 に実車のルーフの曲率差分測定結果を示すが，ひずみ耐性を向上させた設計 (b) においてクライテリア範囲内に収まっていることが確認できた．

以上の結果から，曲率差分によるひずみの定量化により設計段階における外板面ひずみの予測シミュレーションと実際の車体の整合性を示すことができた．

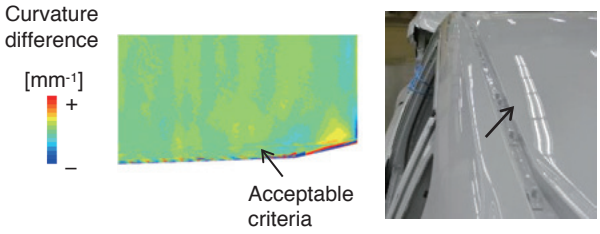


Fig. 9　Measurement of actual roof curvature difference

6．まとめ

車体の外板面ひずみのシミュレーション技術構築に必要であるひずみの定量評価手法について，曲率差分を用い人の目視と相関した定量指標を設定した．実測およびシミュレーションのメッシュデータから曲率差分の算出が可能なフローを設定することで，シミュレーションデータ上での仕様検証が可能となった．外板面ひずみの予測シミュレーションと合わせて実際の開発現場で運用することが可能となり，車体の開発効率を高める技術を構築することができた．

参考文献

（1）古沢透流，豊岡洋一，横井栄一郎，高見滋，内山政夫，田中義規：自動車の外板面ひずみを抑制する設計・製造・材料統合シミュレーション技術の開発，Honda R&D Technical Review, Vol. 38, p. 107-113

（2）高三徳，吉田貞彦，桜井俊明，五十嵐三武郎：自由曲線・曲面の滑らかさの評価方法について，図学研究 38 巻，(2004), doi: 10.5989/jsgs.38.Supplement1_129

（3）大崎純：曲線の滑らかさと力学，traverse：kyoto university architectural journal，4巻，p. 47-54，(2003)，doi: 10.14989/traverse_4_47
（4）福本幸司，高木康夫，岩瀬哲：自動車パネルの熱変形解析設計技術，R&D 神戸製鋼技報，Vol. 62，No. 2，p. 29-33，(2012)
（5）濵田幸一：外板パネルの塗装熱ひずみ解析技術，日本製鉄技報，第 412 号，p. 92-96，(2019)，https://www.nipponsteel.com/tech/report/pdf/412-14.pdf，（参照 2025/7/22）
（6）樫山武士，大堀敏郎，塩原学，村野義行，松本拓哉：耐水耐熱変位計による電着槽および乾燥炉内での車体変形の実測とＣＡＥとの比較，自動車技術会論文集，53 巻，4 号，p. 821-826，(2022)，doi: 10.11351/jsaeronbun.53.821
（7）米村繁，吉田亨，上西朗弘，樋渡俊二，小杉聡史，中川淳一：自動車外板パネル性能向上のための予測評価技術，新日鉄技報，第 393 号，p. 11-17，(2012)，https://www.nipponsteel.com/tech/report/nsc/pdf/393-03.pdf，（参照 2025/7/22）
（8）一条尚樹，岩田徳利，岩田隆道，三田太一，蔦森英夫：プレス成形に伴う面ひずみ評価技術および予測技術の開発，塑性と加工，54 巻，628 号，p．421-425，(2013)，doi: 10.9773/sosei.54.421

■著　者■


豊 岡 洋 一


古 沢 透 流


横井栄一郎


高 見　滋


内 山 政 夫


田 中 義 規

Pix2Pix GAN を用いたサイドミラー周り流れ場短時間予測ツール

Short-time Prediction Tool for Flow Fields around Side Mirrors Using Pix2Pix GAN

橋本拓郎[1] Takuro HASHIMOTO
岡部浩司[1] Koji OKABE
山戸田武史[2] Takeshi YAMATODA
城戸誉芳[2] Takafusa KIDO

要　旨

開発初期におけるサイドミラーのデザイン方向性を検討するため，深層学習モデルの一つである Pix2Pix GAN を採用して，流れ場を短時間かつ十分な精度で予測し，出力までの操作が容易なツールを構築した．深層学習モデルによる予測時間の短縮に加え，計算負荷の高い形状認識のための符号付距離関数を省略して更なる短時間化を達成した．同時に少量の学習データでも予測精度を維持できるツールを構築した．さらに，ツールの操作画面においては，検証に必要な流体物理量の出力を最小限に絞り，入力から出力までをボタン操作のみでおこなえることで，設計者が使いやすいように工夫した．

ABSTRACT

To examine the design direction of side mirrors in the early stages of development, a Pix2Pix GAN deep learning model was used to develop an easy-to-operate tool that enables prediction of flow fields with sufficient accuracy in a short period of time and output of the results. In addition to a shorter prediction time with a deep learning model, further time reduction was achieved by omitting the signed distance function for shape recognition that has a high computational load. The tool was also developed to maintain prediction accuracy even with a small amount of training data. Furthermore, output of fluid physical quantities required for verification on the tool operation screen was minimized, allowing performance of the process from input to output solely by button operations, making it easy to use for designers.

1．まえがき

自動車用サイドミラーは，後方の状況把握のために使用される部品である．車体外部に取り付けられているため，高速走行時には部品形状が周囲の流れを乱すことによって鏡面が振動し，後方視認性を低下させる場合がある．そのため，我々はこの流れの影響を最小限にするために数値流体解析（Computational Fluid Dynamics: CFD）による性能予測を実施し形状検討を進めている．近年 CFD は Graphics Processing Unit (GPU) の進化により計算時間が短縮されつつあるが，サイドミラー周りの流速（速度３成分）と表面流線，及び表面の圧力分布を計算するのに約３日を要している．

サイドミラーの形状は鏡面の振動に影響を与える一方で，スタイリングにも影響する．機能とスタイリングを両立させるためには，本来，設計者とスタイリングデザイナーはその場で議論できることが望ましい．しかし，現状 CFD 計算には時間がかかり，持ち帰って性能予測する必要が生じる．この期間は，設計者が決定した最適形状とスタイリングデザイナーの望むデザインの間ですり合わせをおこなえないことから方向性が合わずに手戻りが発生することが多く，開発期間短縮のボトルネックとなっている．

この課題を解決するために，５分程度の短時間で予測可能なツールがあれば，設計者とスタイリングデザイナーが予測結果を見ながらトライアンドエラーを繰り返し，会議の最中に両立する形状を決定できるようになると考えられる．

近年，予測を短時間でおこなうための手法として深層学習によるサロゲートモデルの研究が盛んにおこなわれてきており，予測時間の短縮に効果があることが数多く報告さ

[1] 本田技研工業株式会社
E-mail: takuro_hashimoto@jp.honda
[2] 株式会社 IDAJ

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_14

れている[1].

深層学習によるサロゲートモデルは，一般的に Fig. 1 に示すように，Convolutional Neural Networks (CNN) を用いた CNN 符号化器と CNN 復号化器を組み合せた CNN 自己符号化器 (CNN Autoencoder: CNN-AE) ベースのアーキテクチャが採用されている[2]．しかし CNN-AE のデメリットとして特徴抽出のための符号化 (圧縮) の過程で細かな情報がノイズとして失われ，形状輪郭がぼやけてしまうことが知られている．このため，形状データを符号付距離関数 (Signed Distance Function: SDF) に換算して CNN 符号化器へ入力し，これを防止している．SDF は形状の幾何学的情報を付与し，ある点からの距離やモデルの内外判定をおこなう符号を含む関数である．精度が向上する一方，訓練時のみならず推論時も毎回全点の距離を算出する必要があるため時間がかかるというデメリットがある．

また，一般的には深層学習モデル構築で十分な精度を確保するためには 10^3 オーダーのデータが必要となることが知られており，赤坂らの研究[1]においても同様の条件でおこなわれている．今回，CFD の結果を用いて，このオーダーの訓練データを準備するには 5 か月程度かかることが課題であった．

もう一つの課題として，設計者が予測ツールを使用する際の表示方法や操作性を考慮する必要がある．議論の時間が限られているので，事象を多角的に確認するよりも検討に必要な情報だけを迅速かつ簡単に表示できることが求められている．

これらの課題を解決するため，本研究においては，下記三点について検討をおこなった．まず，予測時間を短縮するために深層学習を用いるとともに，SDF を省略する可能性について検討した．二つ目に，少量の学習データで予測精度が確保可能な深層学習モデルを検討した．三つ目に，設計者の操作が煩雑にならないように，検証に必要な出力を最小限に絞り，ボタン操作のみでおこなえる操作画面について検討した．

2．深層学習モデル選定と予測ツール構築

上記の課題解決に向けて，最適な深層学習モデルの選定と事前確認，設計者が容易に出力できる表示画面について検討をおこなった．

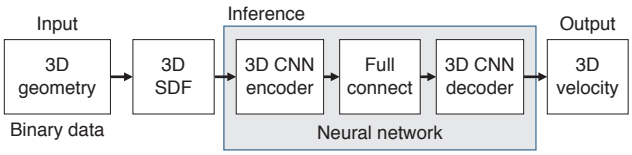


Fig. 1　Basic architecture of previous study

2.1. 予測時間の短縮

予測時間の短縮のため，本研究でも深層学習によるサロゲートモデルを適用した．その深層学習モデルには Pix2Pix Generative Adversarial Networks (Pix2Pix GAN)[3] を採用し，SDF の省略によるさらなる高速化について検討した．Fig. 2 にそのアルゴリズムのベースとなっている GAN を示す．GAN は，Goodfellow ら[4]によって提唱された生成器の訓練手法であり，生成器 (Generator) に加え，識別器 (Discriminator) という二つのニューラルネットワークから構成される．生成器はランダムノイズを入力としてデータを生成する．識別器はそのデータが本物か偽物かを判別する．学習の中で両者は互いに競い合うように学習を進め，生成されるデータの品質が向上していく (敵対的訓練)．これにより形状輪郭がぼやけてしまう CNN-AE に対して，GAN は鮮明な出力を得ることができるまで学習を続ける特徴がある．

GAN を発展させたものに，Fig. 3 に示す Mirza らによって提唱された条件付き敵対的生成ネットワーク (conditional GAN: cGAN)[5]がある．生成器に条件付き入力を指定することが可能となり，任意の入力に対応した出力を持つ生成器を訓練することで，予測精度を高めることができる．

Pix2Pix GAN は，cGAN をさらに発展させたもので，画像生成アルゴリズムのひとつとして広く使用されている．ペアになった二枚の画像の関係性を学習することで，ある一枚の画像をもとに，その関係を反映したもう一枚の画像

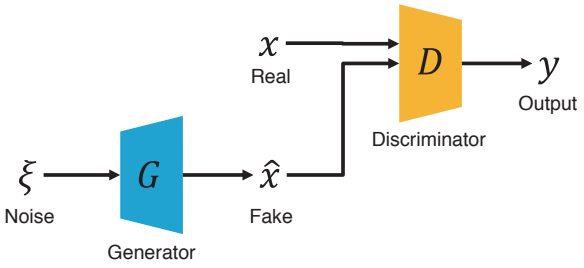


Fig. 2　GAN

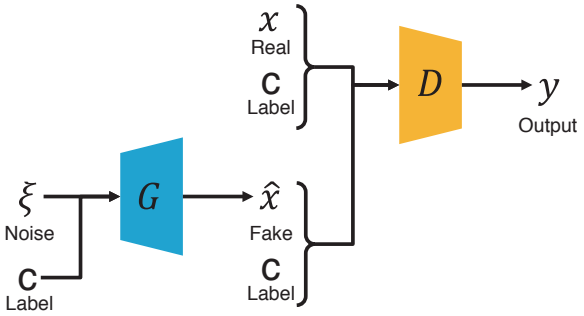


Fig. 3　Conditional GAN

を生成することができる．通常条件付き入力として二次元画像を用いるのが一般的であるが，サイドミラー周りの空間流速（速度３成分）と圧力の予測をおこなうため，アーキテクチャを三次元拡張し，条件付き画像の代わりにSTL形式の三次元データを用いた．三次元への拡張はCirilloら[6]によって腫瘍セグメンテーションに使用した例があるが，流体予測に適用した例はない．そこで，形状のボクセルデータを入力して，流体物理量を出力する生成器として用いた．さらにPix2Pix GANの大きな特徴は生成器にRonnebergerら[7]によって提唱されたU-Netが用いられている点である．Fig. 4にU-NetのCNN層を三次元に拡張させた本研究のアーキテクチャを示す．U-Netはエンコーダとデコーダからなるアーキテクチャで，エンコーダで抽出された特徴をデコーダで元のサイズの画像に戻しつつ，エンコーダとデコーダの間のスキップコネクションにより，詳細な情報が失われることなく，同じ解像度のデコーダ層に伝えることができる．これによりエンコーダで失われがちな空間情報や解像度の詳細をデコーダに直接伝えることが可能であり，CNN-AEでは符号化の過程で失われてしまう細かい特徴も保持することができる．これらGANとU-Netの使用によって，SDFを用いずとも予測精度を維持しつつ，時間短縮が可能かどうかを検討する．

Fig. 5に今回検討したアーキテクチャを示す．推論部分にはPix2Pix GANを使用した．予測精度の検証をおこないながらCNN-AEでは推論前に必要であったSDFを省略することで，ボクセル表現の形状データを直接生成器に入力する方式を検討した．

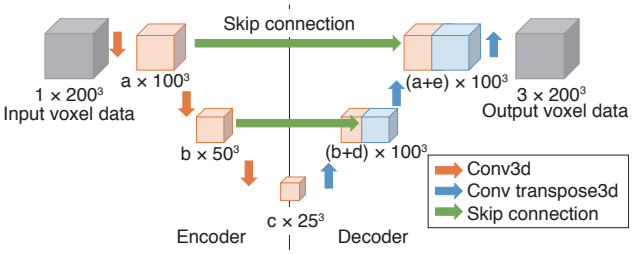


Fig. 4　Extension of U-Net to 3D

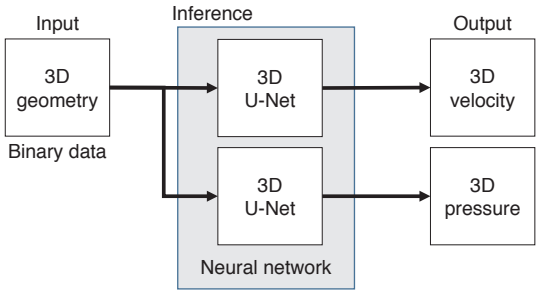


Fig. 5　Proposed architecture

Table 1　Deep learning conditions

	CNN-AE	Pix2Pix GAN
Number of training data	32,500	2,000
Using SDF	Yes	No

2.2. 少量の学習データによる予測精度の確保

一般的に使用されるCNN-AEは，ミニバッチと呼ばれる小さなデータ単位ごとに学習をおこなうが，データ分布全体を考慮できないことから，高い精度を得るには大量の学習データが必要となる．

一方，Pix2Pix GANは，少量の学習データでも高い予測精度を実現できる有効な深層学習モデルである．その理由として，敵対的訓練によって生成モデルがデータ分布全体を捉えられることに加え[4]，生成器に採用されているU-Netが高精度な予測を可能にする点が挙げられる．これらの要素が組み合わさることで，CNN-AEより少ないデータでも予測精度の高い生成器の訓練が可能となっている．

本研究では，少量学習データによる予測精度を検証するため，予測精度と学習データ数の目標値を設定した．Reynolds-averaged Navier-Stokes（RANS）を使用したCFDの精度が±10%程度であることから，予測精度目標は誤差±10%以内と設定した．サイドミラーの圧力係数C_pは±0.3の範囲であることから±0.03以下，速度は主流速38.8 m/sに対して±3.8 m/s（±13.6 km/h）となる．学習データ数は100個以下を目標とした．

精度検証には式（1）に示す平均二乗誤差（Mean Squared Error: MSE）を使用した．

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2 \qquad (1)$$

ここで，Y_iおよび$\hat{Y}_i$はCFD結果と予測ツールの推定結果を示している．nはボクセル点数を示している．

この式から精度目標は，圧力はMSEで750以下，速度はMSEで14.4以下となる．

2.3. 二次元画像による精度検証

本ツールを構築するにあたり，事前にPix2Pix GANの予測精度の妥当性について，Guoらによる CNN-AE と Pix2Pix GAN を比較し検証をおこなった．学習データとして，様々な形状において汎用CFDソフトSynopsys社製ANSYS Fluentによって計算された二次元の速度分布の画像を用いた．Table 1に学習時の条件を示す．CNN-AEは学習データに32,500枚の画像を使用し，さらにSDFへの換算をおこなっている．Pix2Pix GANは学習データに32,500枚の画像からランダムに選択した2,000枚を使用し，SDFを省略している．Fig. 6に予測時の入力例としてバイク形状のバイナリデータと，そこから算出されたSDFを示す．Fig. 7はこの条件をもとに予測した流速

U_x 成分（図水平方向）の結果比較である．CNN-AE および Pix2Pix GAN ともに，バイク形状およびバイク周辺の速度分布は，CFD と同様のボケの少ない画像が得られたとともに，速度の強弱やその領域を定性的に再現することができている．この結果から CNN-AE の代わりに Pix2Pix GAN を採用することで学習データ数が減らせること，SDF が無くても流れ場の車体近傍流速の予測が可能なことが示された．

2.4. 容易に出力可能な操作画面の実現

操作画面は設計者が使用できるように，容易に操作できる必要がある．そこで，すべての操作をボタンのみでおこなえるようにした．入力となる STL データの読み込みから，予測結果の出力までの必要なボタンが順番に並び，一つの画面ですべて操作できる画面とした．出力は Fig. 8 に示す断面速度分布とサイドミラー表面の流体情報（表面圧力分布および流速分布，表面流線）に絞り込み，ボタン操作のみで容易に選択表示できるようにした．

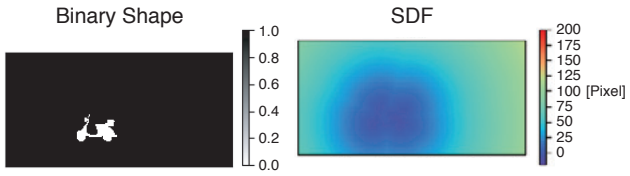


Fig. 6　2D input image

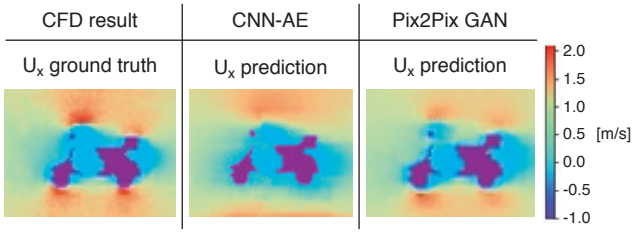


Fig. 7　Comparison between CNN-AE and Pix2Pix GAN

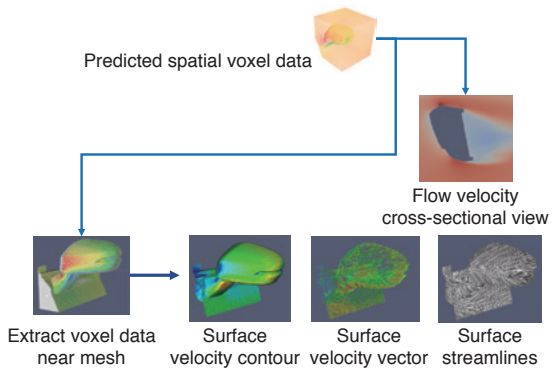


Fig. 8　Mapping from spatial distributions to surfaces

3．サイドミラー予測に向けた学習

2 章で説明したツールを用いて，サイドミラー周辺の圧力分布と流速分布を予測するための学習をおこなった．

3.1. 学習過程

Fig. 9 に本研究で用いた Pix2Pix GAN の提案モデルにおける空間圧力分布の学習過程を示す．まず，ボクセル表現のサイドミラー形状を条件付き入力データとして生成器に加えた．その生成器によって予測された空間圧力分布とサイドミラー形状のペア，同様に CFD 結果（真値）とミラー形状のペアをそれぞれ作成した．続いて識別器はそのふたつのペアを入力として，真偽判定をおこなった．その後この判定をもとに敵対的訓練をおこなった．三次元の空間速度分布（X，Y，Z 方向）に対しても同様に訓練をおこなった．参考までに，このモデルは未知のサイドミラー形状の STL データを与えると生成器のみで空間圧力および空間速度を予測することができる．

3.2. CFD による学習データ生成

学習データは，サイドミラーを取り付けた車両における CFD 結果を用いた．種々のミラーサイズに適用することを想定し，最大のミラーサイズをもつ車体を選定して，すべてのミラーサイズを包括できるようにした．サイドミラーを，Fig. 10 に示すように形状や位置，大きさの特徴を表す 11 個の形状パラメータを設定した．形状パラメータはそれぞれ 3 水準とし，乱数実験計画に基づいた 101 ケースの組み合わせを生成した．パラメトリックなデータ生成には市販のモーフィングツール DEP 社製の DEP MeshWorks を用い，CFD には ANSYS Fluent を用いた．

CFD のメッシュ条件を Table 2 に，メッシュの配置状況を Fig. 11 に示す．全体にヘキサメッシュをベースに用い，表面のみ形状再現のため 1 層の境界層メッシュを配置した．CFD の解析条件を Table 3 に示す．乱流モデルには RANS を使用した．また CFD 結果の一例を Fig. 12 に示す．

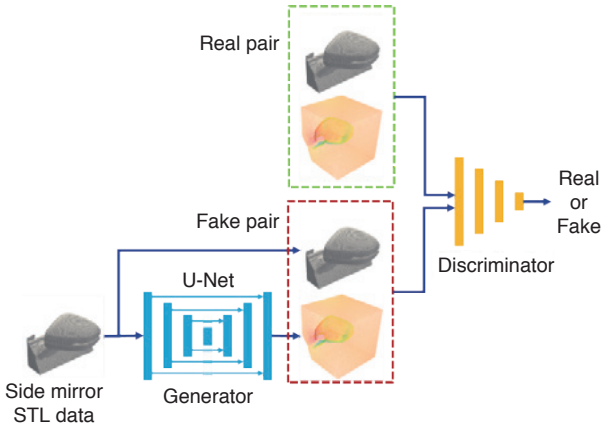


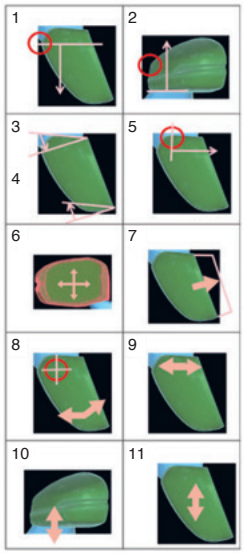
Fig. 9　Deep learning model for pressure distribution

Table 2 Mesh conditions

Number of mesh	50 million
Vehicle surface mesh size	4 mm
Circumference	8-16 mm
Boundary layer mesh	2 mm x 1 layer

Table 3 Analysis conditions

Turbulence model	Realizable k-ε
Speed	140 km/h (38.8 m/s)
Density	1.205 kg/m^3
Viscosity coefficient	1.8075e-5 Pa-s



No.	Parameters
1	Peak position (Horizontal direction)
2	Peak position (Vertical direction)
3	Inner plane angle
4	Outer plane angle
5	Leading edge angle
6	Mirror size
7	Length in mainstream direction
8	Mounting position (Rotation)
9	Mounting position (Mainstream direction)
10	Mounting position (Vertical direction)
11	Mounting position (Horizontal direction)

Fig. 10 CFD model creation for training data

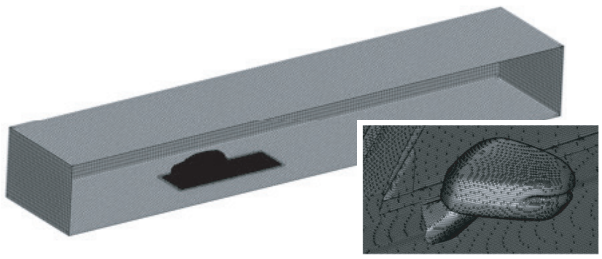


Fig. 11 Mesh placement

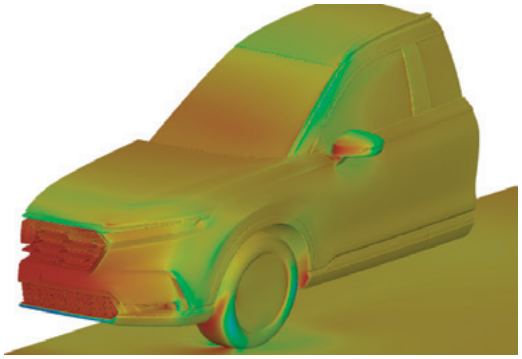


Fig. 12 Example of pressure distribution results using CFD

3.3. 学習データ抽出

車両全体の CFD 結果に対して，深層学習による予測空間をサイドミラー周辺に絞ることで，サイドミラーモデルの形状解像度を引き上げつつ，データ容量を削減して高速度化を図った．具体的な深層学習による予測空間は，Fig. 13 に示すように長さが 400 mm のサイドミラーを包含する立方体とし，その内部に 2 mm 間隔のボクセルを配置した．Fig. 14 に示すミラー形状のボクセルデータへの変換には，オープンソース The Visualization Toolkit (VTK) ライブラリの vtkSelectEnclosedPoints アルゴリズムを使用した．

学習データとして使用する空間圧力場の例を Fig. 15 に示す．CFD メッシュからボクセルへの変換は，各ボクセルの中心に，その近傍上位 10 個の CFD メッシュ点の平均値を代入しておこなった．

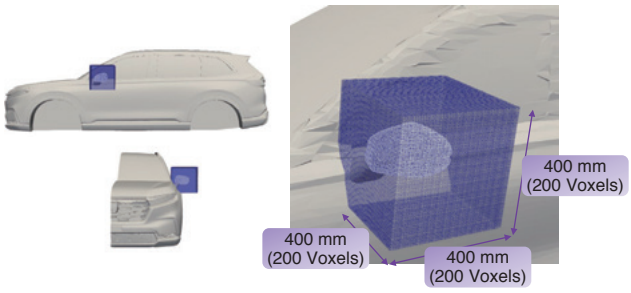


Fig. 13 Training data space for deep learning

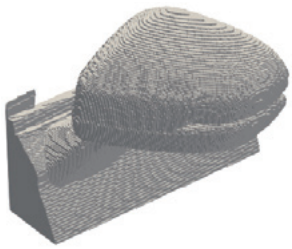


Fig. 14 Side mirror voxel model as noise and condition label

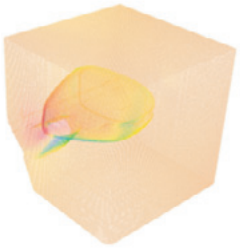


Fig. 15 Example of pressure distribution as training data

Table 4　Machine learning conditions

	Velocity	Pressure
Optimizer	Adams	Adams
Epoch	1000	1000
Batch size	1	1
Learning rate	2×10^{-4}	2×10^{-5}

3.4. 学習条件と学習時間

Table 4 に学習条件を示す．用意した 101 ケースのうち，80 ケースを学習データとして使用した．訓練には NVIDIA 社製 RTX A6000 GPU を 1 台使用した．学習には約 190 時間かかった．

4．予測ツールの精度検証と効果

本ツールによって得られた空間圧力分布と空間速度分布の予測結果それぞれについて検証をおこなうとともに，製作した操作画面において実行した場合の時間短縮効果について確認した．

4.1. 空間圧力分布予測結果

Fig. 16 に空間圧力分布の推論結果を表面投影した表面圧力分布と CFD 結果との比較を示す．ボクセル化による影響で解像度が下がり，圧力分布にムラが生じるものの，圧力の上昇や下降箇所は定性的に CFD 結果と一致した．

Fig. 17 に空間圧力分布を予測した際の MSE を示す．横軸にミラー形状毎に割振った識別番号をとり，縦軸に MSE をプロットしている．白丸は構築した深層学習ツールにおける訓練データ 80 ケースの MSE，黒丸は検証データ 21 ケースの MSE である．訓練データ全体の MSE は 160 程度，検証データ全体の MSE は 330 程度であり，精度目標 10% 以内に収まっていた．ただし，最も悪いケースで MSE は 841 となりわずかに 10% を超えていた．

4.2. 空間流速分布予測結果

Fig. 18 に，空間流速分布の推論結果を表面投影した表面流速分布と流線と CFD 結果との比較を示す．ミラー振

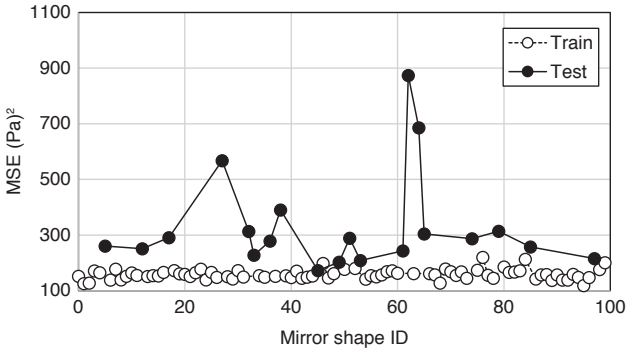
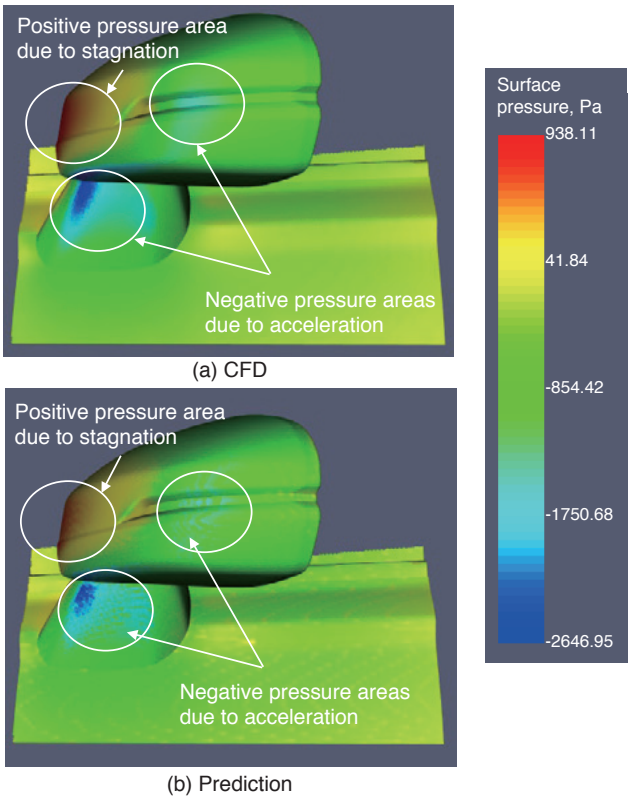


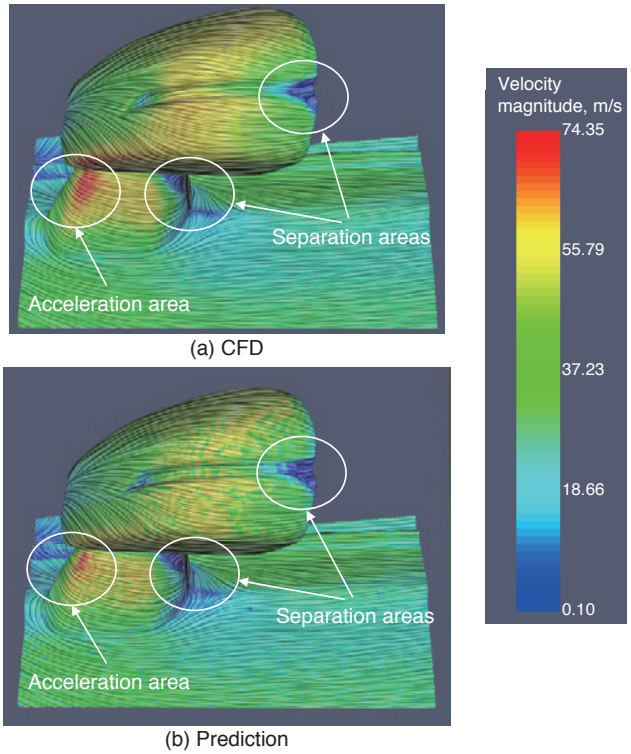
Fig. 17　MSE of inference of pressure distribution



(a) CFD

(b) Prediction

Fig. 16　Comparison of predicted and CFD pressure distribution



(a) CFD

(b) Prediction

Fig. 18　Comparison of predicted and CFD velocity distribution

動に起因するのは，はく離などに影響される表面速度の分布状況や，流線の方向である．この観点において，予測結果は CFD 結果とおおむね一致している．

以上の結果より学習データが 80 個でも十分な精度を確保した予測ツールを構築できた．

各ミラー形状の空間流速分布予測における MSE を Fig. 19 に示す．訓練データ 80 ケース全体の MSE は 0.1 程度，検証データ 21 ケース全体の MSE は 1.0 程度であった．検証データ全体の MSE を速度に換算すると±1 m/s 程度であり，目標値である 10% 以内に収まっていた．最も悪いケースでも MSE は 4.9(速度±1.1 m/s)となり，10% 以内に収まっていた．これらの結果から少量の学習データにおいてでも，本ツールを活用するうえで十分な精度を確保できていることがわかった．

4.3. 操作画面

本研究において製作した操作画面を Fig. 20 に示す．入力となる STL の読み込みから出力結果までの手順のボタンが順番に並び，同一画面上で操作することができる．必要な出力表示は絞り込まれ，すべてボタン操作のみで容易におこなうことができる．

Table 5 Computer specifications

	CFD	Deep learning
CPU	AMS EPYC7702	Intel Xeon w9-3475X 2.21GHz
Number of CPUs	128 core/node	1
GPU	-	NVIDIA RTX6000 Ada
Memory	512 GB/node	1 TB
OS	Red Hat Enterprise Linux release 8.3	Windows Server 2022

4.4. 計算時間

予測ツールの時間評価をおこなうにあたり，各計算に使用した機材のスペックを Table 5 に示す．また Fig. 21 に本予測ツール全体のワークフローを示す．CFD による予測では 52 時間かかっていた作業が，約 100 秒でできるようになった．

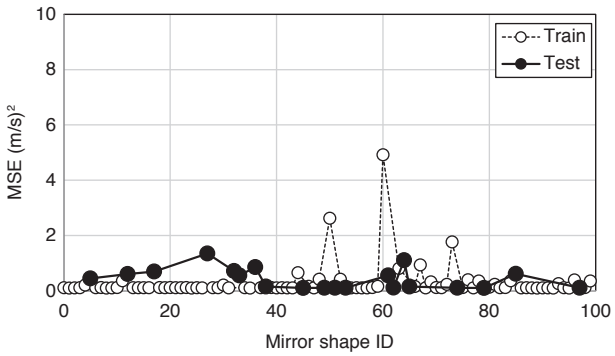


Fig. 19 MSE of inference of velocity distribution

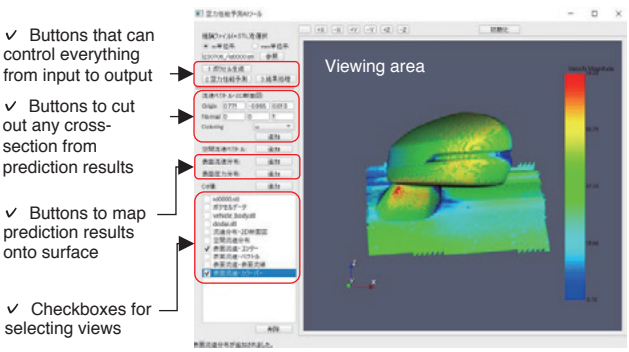


Fig. 20 Graphics of user interface

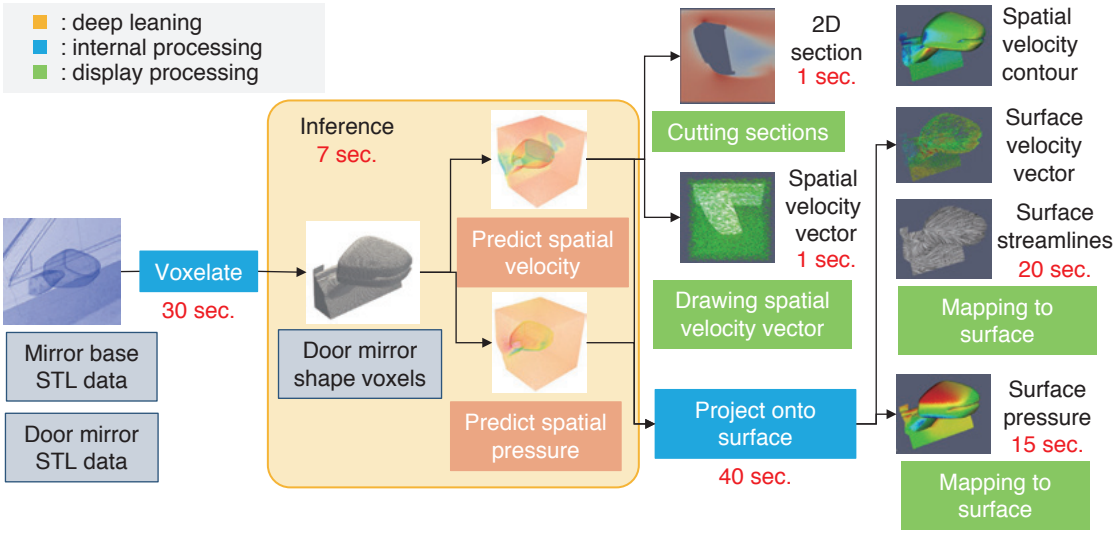


Fig. 21 Workflow of proposed system and total time

4.5. まとめ

以上のことから，構築した予測ツールを活用することで，設計者はスタイリングデザイナーとリアルタイムで意見を交わしながら，デザインの意思決定をおこなうことが可能となる．

加えて，議論を継続することで，アイデアの深掘りや洗練が進んだり，異なる視点を持つ両者が刺激されることで，様々なアイデアが創出されることも期待できる．

5．結言

本研究では，Pix2Pix GAN を使用して，以下の特徴を有する，サイドミラー周りの流れ場予測ツールを開発した．

（1）深層学習モデルによる予測時間の短縮に加え，Pix2Pix GAN の特徴である GAN や U-Net といったアーキテクチャの寄与により，計算負荷の高い SDF を省略することで更なる短時間化を実現した．これにより STL データの投入から結果表示までを約 100 秒でおこなうことができた．

（2）敵対的訓練による生成モデルはデータ分布全体を捉えることできるため，小さな塊ごとに学習させる従来手法より少量データで予測することができる．これにより 80 個の少量学習データでも，圧力及び流速が CFD 結果の±10% 以内で予測できた．

（3）検証に必要な流体物理量の表示を最小限に絞り，ボタン上に機能を表現することで，設計者がすべての操作をマウス操作だけで迷わずに選択できる表示画面を製作した．

本手法は，学習データの収集が容易ではないユーザや，これから導入や開発を始めようとするユーザにとって有用な手法であり，今後は他の予測ツールにも広く活用されることを期待する．

参考文献

（1）赤坂啓，陳放歌，寺口剛仁：機械学習を用いた自動車空力性能を予測するためのサロゲートモデル開発，自動車技術会論文集 Vol. 52, No. 3, p. 621-626, (2021), doi: 10.11351/jsaeronbun.52.621

（2）Guo, X., Li, W., Iorio, F.: Convolutional Neural Networks for Steady Flow Approximation, KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, p. 481-490, (2016), doi: 10.1145/2939672.2939738

（3）Isola, P., Zhu, J-Y., Zhou, T., Efros, A. A.: Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks, 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), p. 5967-5976, (2017), doi: 10.1109/CVPR.2017.632

（4）Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., Bengio, Y.: Generative adversarial networks, Communications of the ACM, Vol. 63, Issue 11, p. 139-144, (2020), doi: 10.1145/3422622

（5）Mirza, M., Osindero, S.: Conditional Generative Adversarial Nets, arXiv, (2014), doi: 10.48550/arXiv.1411.1784

（6）Cirillo, M. D., Abramian, D., Eklund, A.: Vox2Vox: 3D-GAN for Brain Tumour Segmentation, Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham, Vol. 12658, p. 274-284, (2021), doi: 10.1007/978-3-030-72084-1_25

（7）Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T.: U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9351, p. 234-241, (2015), doi: 10.1007/978-3-319-24574-4_28

■著　者■



橋本拓郎



岡部浩司



山戸田武史



城戸誉芳

福祉車両の貢献度合いを測定する尺度

Quantitative Measurement Scale for Effectiveness of Adapted Vehicle

遠藤有紗[1] Arisa ENDO
小山俊博[1] Toshihiro KOYAMA
角南圭一[1] Keiichi SUNAMI
五味哲也[2] Tetsuya GOMI

要　旨

福祉車両を通じてお客様の社会活動の充実に寄与することを目指し，貢献状況の把握や価値の発信ができるよう貢献度合いを定量的に表す手法を検討した．貢献度合いは福祉車両を継続して使用した後のお客様個人の社会活動の活性化度合いとし，17 項目の設問アンケートを 5 段階評価で回答することで活性有無を判別する尺度を構築した．身体が不自由なドライバーと介護に関わるドライバーを対象に，構築した尺度を用いて社会活動の活性化度合いの予測性について統計検証をおこなった．その結果，正解率はそれぞれ 0.825 および 0.846 と高い精度で予測できることを示した．本研究で構築した尺度は福祉車両の貢献度合いを定量的に表せることを確認した．

ABSTRACT

With a goal of contributing to the enrichment of customers' social lives through adapted vehicles, the authors studied a method for quantitatively expressing the effectiveness of the vehicles in order to understand their effect and communicate their value. Effectiveness was defined as the degree of each customer's engagement in their individual social activities after continued use of the adapted vehicle, with engagement determined using a scale based on customer responses to 17 5-point questions. The authors then used this scale to statistically verify a predictive value for the degree of involvement in social activities. The questionnaire was given to physically disabled drivers and drivers involved in caregiving services. The results indicated that highly accurate predictions could be made for both groups, with accuracy rates of 0.825 and 0.846, respectively. This confirmed that the scale developed for this study can quantitatively express the effectiveness of adapted vehicles.

1．まえがき

Honda は「Fun For Everyone. Honda～移動の喜びを一人ひとりに～」というスローガンを掲げ，身体が不自由なドライバーや介護に関わる人の移動の喜びと社会活動の充実に貢献することを目指して福祉車両を提供し続けている(1)．

福祉車両は自操車両と介護車両に大別される．自操車両は下肢が不自由なドライバーが手でアクセルとブレーキを，上肢が不自由なドライバーが足でハンドルを操作できるようにした運転補助装置付き車両である．自操車両の例を Fig. 1 に示す．介護車両は車いす使用者の乗降介助を省力化するために昇降シートや車いす用スロープを装備した車両であり，例として Fig. 2 に示す．

Honda では，上肢が不自由な人の運転操作を補助する装置をセダンに搭載した自操車両を 1976 年に，軽自動車の介護車両を 1995 年に発売したのが始まりである．

福祉車両の国内販売台数推移を Fig. 3 に示す．福祉車両の市場規模は，1994 年度から 2004 年度にかけて 10 倍以



Fig. 1　Adapted vehicle with hand control device



Fig. 2　Adapted vehicle with rear ramp

[1] 本田技研工業株式会社
E-mail: arisa_endo@jp.honda
[2] 本田技研工業株式会社，博士（工学）

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_15

上に成長した．その後は 2014 年度をピークに年々縮小傾向にあり，現在は３万台を下回って推移している．国内で約 400 万台の乗用車が販売されているのに対して福祉車両の市場規模は小さいが，自動車メーカー各社はこれまでに多くの車種を商品化してきた．これは各社が福祉車両を通じた企業の社会性を重んじて，販売台数や売上だけで測ることができない福祉車両の価値を重視しているからだと思われる．

自操車両は上肢や下肢が不自由なお客様が使用することで自律的な行動ができるようになる価値を提供していると考えられる．また，介護車両は介護移送を担うお客様や介護されるお客様にとって精神的，肉体的な負担が軽減されて日常行動に余裕がうまれ，生活の可能性が拡がる価値を提供していると考えられる．

今後もこうした福祉車両の価値をお客様に提供していくためには更なる製品の改善や発展が求められる．しかし，そのために必要な福祉車両の貢献状況に関する情報は少なく，実態の把握が困難である．したがって，適した調査手段の構築が課題となっていた．

福祉車両の貢献状況を把握するためには，貢献状況という定性的な認識をお客様の認識とずれが生じないように具体的な言葉で表現する必要がある．また，お客様ニーズの理解と製品やサービスの向上，および福祉車両の価値を周知することに役立たせる観点からも望ましい．これは，昨今 ESG 経営の関心が高まり，企業活動の社会に対する貢献度合いを定量的に公表する重要度が増してきているためでもある[(2)]．

そこで，筆者らは福祉車両の貢献度合いの定義と定量化をおこない，これまで提唱された生活満足度を測定する尺度とあわせてその有用性の検証を試みた．

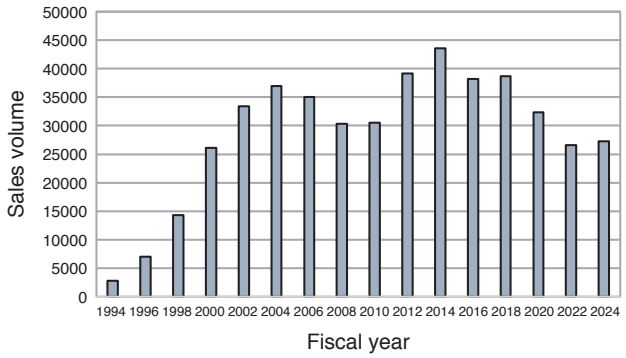


Fig. 3　Domestic sales volume of adapted vehicles

2．測定手法の検討

2.1. 福祉車両の貢献度合いの定義

企業の事業活動がもたらす効果はロジックモデルを用いて経時的に表すことができる[(3)]．また，個人の生活満足度や幸福感は社会活動の参加及び参加意欲や個人レベルのソーシャル･キャピタルと正の相関があることが分かっている[(4)-(9)]．そこで，福祉車両の貢献度合いは事業活動の結果としてもたらす社会やお客様への影響であると考えた．そして，この事業活動を福祉車両の市場投入と置き換えて，福祉車両がもたらす影響を経時的に整理した．その結果を Table 1 にロジックモデルとして示す．

Table 1 の各列は市場投入後の初期成果，中期成果，長期成果の順で経時的に表し，各行は福祉車両の影響を受ける受益者と地域社会を表す．

受益者１は上肢や下肢が不自由な自操車両のドライバーを示す．自操車両から受ける影響は，使うことで一人での外出が可能となり，社会参加と生活自立が実現できることとした．

受益者２は身内などの介護移送を担う介護車両のドライバーを示す．介護車両から受ける影響は，使うことで心身の負担が減り，介護と社会参加を両立できることとした．

受益者３は介護車両の乗員である被介護者を示す．介護車両から受ける影響は，使うことで心身の負担が減り，社会と接する機会が増えることとした．

地域社会は受益者の生活圏を示す．福祉車両の提供による影響は，移動や乗降がしやすくなる人が増え，個人の行動と社会が活性化することで，ソーシャル･キャピタルが醸成されることとした．その結果，人のふるまいの前向きな変化の先に社会の活性化と個人の Well-Being の好循環が生まれると考えた．

Table 1 に整理した内容を検討した結果，福祉車両の貢献度合いを「福祉車両を使う前と後でのお客様の個人の社会活動の活性化度合い」と定義した．これにより個社で調査が可能で，福祉車両を購入したお客様を通して定量化できる見込みがあると考えた．

2.2. 貢献度合いの定量化

上記の個人の社会活動の活性化度合いを定量化するため活力度（Vitality）という尺度を提案した．

活力度は，福祉車両が直接影響を与える個人のふるまいや意識の変化の観点に基づいた設問で構成したアンケートにより測定することができる．その設問項目を Table 2 に示す．

各設問への回答は５段階評価でおこなうこととした．評価段階は１．とてもそう思う，２．ややそう思う，３．どちらとも言えない，４．あまりそう思わない，５．まったくそう思わないとした．そして，１または２と回答した場合は社会活動への参加機会が増加したとみなして１点，３以上は変化なしとみなして０点とカウントすることとした．そして合算した点数（17 満点）で社会活動の活性化度合いを定量的に評価することとした．

Table 1 Outcome stages of logic model

Beneficiary classification	Initial outcomes	Mid-term outcomes	Long-term outcomes
Local community	(1) More people can move by car. (2) More people find getting in and out easier.	More people participate in social activities. People are revitalized.	Social capital is fostered. Society is revitalized.
Beneficiary 1	(1) Able to go out by oneself.	(1) Actions become voluntary	(1) Achieve social participation and independent living.
Beneficiary 2	(2) Reduced mental and physical burden.	(2) Balance personal activities and caregiving.	(2) Continue social participation to utilize individual abilities.
Beneficiary 3		(2) Able to move around for daily needs.	(2) Increased opportunities to interact with society.

Virtuous cycle of well-being and social revitalization

Table 2 Vitality questionnaire

	Questions: Which of the following did you experience?
1	Increased shopping frequency.
2	Increased participation in lessons and clubs.
3	Increased participation in local festivals and events.
4	Increased participation in entertainment such as theater and sports events.
5	Increased opportunities to go out for a change of pace.
6	Increased frequency of meetings with friends and acquaintances.
7	Increased frequency of meetings with relatives and family.
8	Increased contact with neighbors.
9	Increased number of new acquaintances.
10	Income has become more stable.
11	More options to earn income.
12	More ability to be considerate of others.
13	Increased interest in new things.
14	Increased opportunities to feel moved with others (or to want to feel moved).
15	Increased motivation to take action.
16	Increased emotional ease and peace of mind.
17	Increased moments of joy (or wanting to feel joy).

2.3. 検証方法

2.3.1. 比較検証する尺度

活力度と比較する尺度として，Philadelphia Geriatric Center モラール・スケール（PGC）[10)-12)]，Satisfaction With Life Scale（SWLS）[13), 14)]，および Organisation for Economic Cooperation and Development 主観的幸福 _ 生活全般に対する主観的評価（OECD）[5)]の３種類を採択した．

これらは，主観的な生活満足度や幸福感を定量化するために用いられる尺度として知られている．

2.3.2. 相関分析

福祉車両を活用する受益者１と受益者２を対象に PGC，SWLS，OECD，活力度の四つの Web アンケートを実施した．

なお，PGC は 65 歳以上を対象としたアンケートであるため，PGC の回答は 65 歳以上の受益者１と２を対象に実施した．

Table 3 Interpretation of correlation coefficient R

Correlation coefficient R	Level
1.0≧R≧0.7	Very high
0.7≧R≧0.5	High
0.5≧R≧0.4	Moderate
0.4≧R≧0.3	Fair
0.3≧R≧0.2	Low
0.2≧R≧0.00	Very low

合計 118 名から回答を得られた．その内訳は，65 歳以上の受益者１が 23 名，65 歳以上の受益者２が 23 名，64 歳以下の受益者１が 36 名，64 歳以下の受益者２が 36 名であった．

アンケート結果の各尺度のスコアから，活力度に対する PGC，SWLS，OECD の相関関係を求めた．相関性の判断には，Table 3 に示す社会調査のための評価基準[15)]を用いた．

2.3.3. 予測性検証法

PGC，SWLS，OECD，個人のふるまいや意識の変化を問う活力度，社会活動の増加有無の事実を問うアンケートの合計五つの Web アンケートを実施した．増加有無の事実を問うために，直接測る指標として「ボランティア，NPO，市民活動への参加が増えた」[4)]という社会活動に関する代表的な設問を採用した．

アンケート回答の対象者は相関分析と同じである．ただし，PGC，SWLS，OECD，活力度は前項で述べたアンケート結果を用いた．Web アンケート結果から得られた各尺度のスコアから，「ボランティア，NPO，市民活動への参加の増加有り無し」の回答を予測することができるかロジスティック回帰分析を用いて検証した．

尺度のスコア算出と分析にはソフトウェア R version 4.5.0[16)]を用い，「ボランティア，NPO，市民活動への参加機会の有無」を目的変数，活力度などのスコアを説明変数として予測モデルを構築した．予測モデルを表すロジスティック曲線は式（1）に示す標準シグモイド関数となり，代表的な曲線を Fig. 4 に示す．

Table 5　Logistic regression statistics

Items			Estimate (β_0, β_1)	Standard error	*z* value	*p* value
Beneficiary 1	PGC	(Intercept)	-7.924	5.810	-1.36	0.173
		PGC score	0.5718	0.5773	0.990	0.322
	SWLS	(Intercept)	-2.999	1.024	-2.93	0.003
		SWLS score	0.09952	0.05028	1.98	0.048
	OECD	(Intercept)	-3.290	1.020	-3.33	0.001
		Subjective happiness value	0.3208	0.1368	2.35	0.019
	Vitality	(Intercept)	-4.116	1.021	-4.03	$p < 0.001$
		Vitality	0.3430	0.09196	3.73	$p < 0.001$
Beneficiary 2	SWLS	(Intercept)	-1.337	1.114	-1.20	0.230
		SWLS score	-0.01302	0.05514	-0.236	0.813
	OECD	(Intercept)	-1.261	0.9454	-1.33	0.182
		Subjective happiness value	-0.05803	0.1383	-0.368	0.713
	Vitality	(Intercept)	-4.721	1.262	-3.74	$p < 0.001$
		Vitality	0.3591	0.1069	3.36	$p < 0.001$

$$q_i = \frac{1}{1 + e^{-z_i}} \qquad (1)$$

ここで q_i は発生率，e は自然対数である．変数 z_i は n 個の説明変数 x_n と偏回帰係数 β_n 及び定数項 β_0 の総和からなる線形予測子で式（2）である．

$$z_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots \beta_n x_n \qquad (2)$$

各スコア値を式（2）の x_1 に代入する単項式となる予測モデルを検証した．

2.3.4. 提案尺度の精度検証法

活力度モデルの精度検証では，受益者１は 196 人，受益者２は 319 人，合計 515 人に活力度と「ボランティア，NPO，市民活動への参加機会の有無」の二つの Web アンケートを実施した．なお，515 人のうち受益者１の 59 人と受益者２の 59 人の回答は前項で実施した Web アンケート結果を用いた．

まず，この Web アンケート結果から活力度が社会活動の増加有無を判断できるか，参加機会が増加した人と変化しなかった人の群間差を比較した．次に，追加した 397 人を教師データとして予測モデルの精度を検証した．

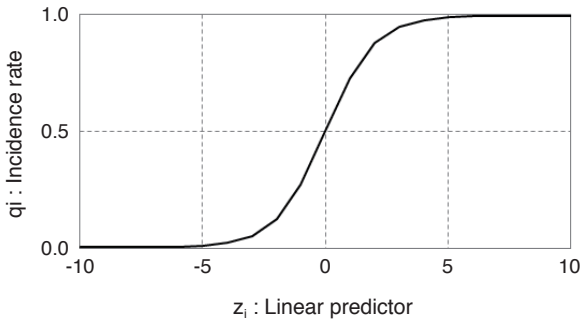


Fig. 4　Diagram of standard sigmoid function

Table 4　Correlation coefficient R between Vitality and existing indicators

Indicators	R for Vitality	
	Beneficiary 1	Beneficiary 2
PGC	0.11	-0.058
SWLS	0.16	-0.12
OECD	0.25	-0.098

3．結果と考察

3.1. 相関分析

PGC，SWLS，OECD の三つの既存尺度と活力度との相関係数を受益者ごとに Table 4 に示す．活力度と OECD とは弱い相関が見られたが，その他の尺度指標とはほとんど相関がないと確認できた．したがって，活力度は既存尺度と独立した尺度で扱えると考えた．

3.2. 予測性検証

ロジスティック回帰分析で得られた統計量を Table 5 に示す．各 p 値が 0.05 未満を統計的に有意とみなす．なお，PGC を回答した 65 歳以上の受益者２で社会活動の参加機会が増えた人はいなかったため，解析から除外した．

受益者１では PGC の p 値が，受益者２では SWLS と OECD の p 値が 0.05 を超えており統計的な有意はみられなかった．つまりこれらの尺度は受益者１と受益者２の全体を通して社会活動の参加機会増加の有り無しに分離する尺度として不十分であることが示唆された．

一方で活力度については，受益者１と受益者２どちらにおいても統計的に有意であることから，「ボランティア，NPO，市民活動への参加機会の増加有無」を分離できる尺度であり，個人の社会活動の活性化度合いを定量化できることを示した．

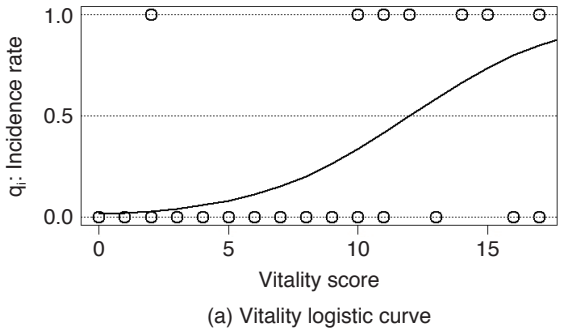
Fig. 5 に各尺度と受益者1のロジスティック曲線を示す. グラフの横軸は各尺度のスコアをとり, 縦軸は「ボランティア, NPO, 市民活動への参加機会の増加有無」のアンケート結果をとり, 増加を1, 変化無しを0として丸印でプロットした. ロジスティック曲線である式(1)は, 式(2)に対し Table 5 に示す定数項を β_0 とし, 偏回帰係数を β_1 として, 各尺度のスコアを x_1 に代入して実線で示した. 活力度を説明変数とした場合の Fig. 5(a) を見ると, ロジスティック曲線が S 字を示し, スコアが 10 から 15 の間で発生率 q_i は 0.5 を超えた. ロジスティック回帰分析では発生率を四捨五入して2値分類するため, 参加機会の増加の有り無しを分離できたことが見て取れる. Fig. 5(c) の SWLS 及び (d) の OECD は分離できているが, (b) の PGC は分離できていないことが分かる.

次に受益者2を Fig. 6 に示す. ロジスティック曲線を見ると Fig. 6(a) の活力度のみが参加機会の増加の有無を分離できており, 個人の社会活動の活性化度合いを定量化できることを示している.

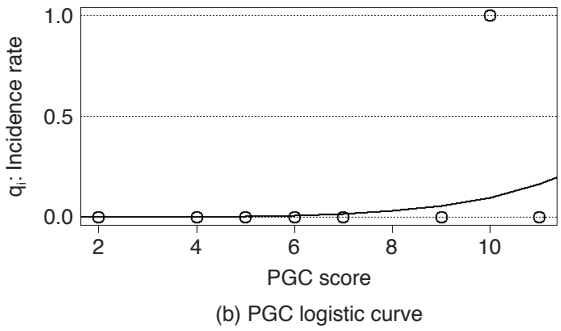
3.3. 提案尺度の精度検証

3.3.1. 受益者1

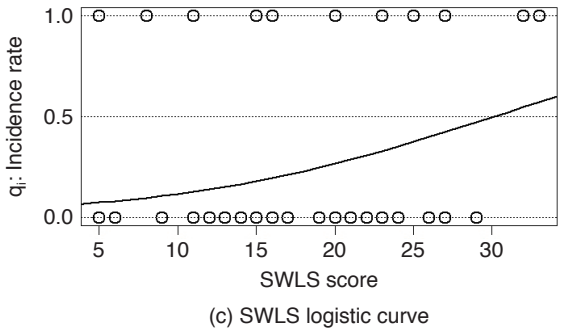
受益者1において福祉車両を得ることでボランティア, NPO, 市民活動への参加機会が増加した人と変わらなかった人との群間差があるか, Cohen の d とノンパラメトリックを取り扱える Cliff のデルタで比較した. Table 6 より, どちらの指標においても群間差が大きいと判定され, 参加機会の増加有無を明確に判断できると言える.



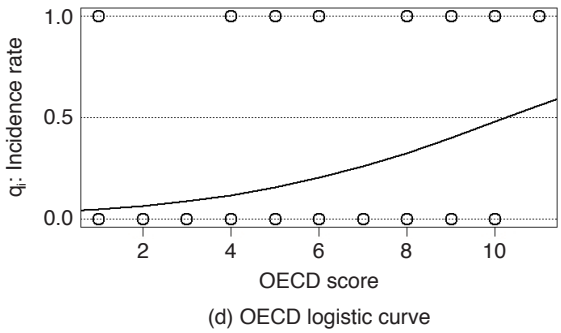
(a) Vitality logistic curve



(b) PGC logistic curve

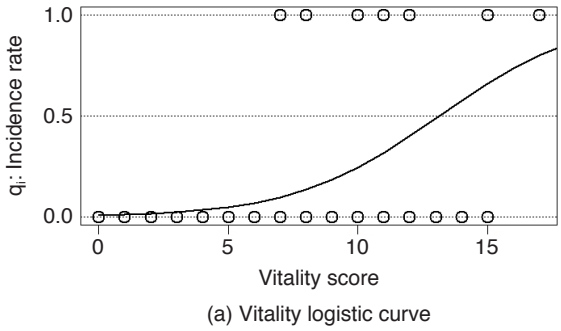


(c) SWLS logistic curve

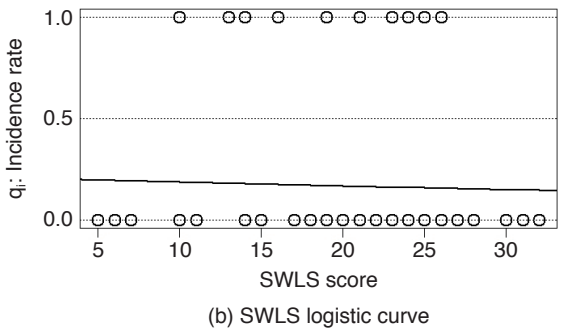


(d) OECD logistic curve

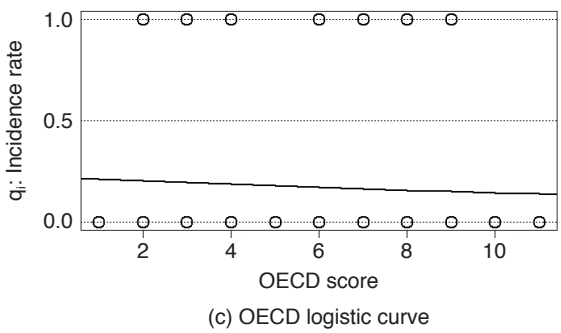
Fig. 5 Logistic curve for Beneficiary 1



(a) Vitality logistic curve



(b) SWLS logistic curve



(c) OECD logistic curve

Fig. 6 Logistic curve for Beneficiary 2

Table 6　Calculation results of Cohen's d and Cliff's delta

		Increase or no increase in participation opportunities in volunteering, NPOs, and civic activities	
Index		Cohen's d	Cliff's delta
Effect size		-1.90	-0.81
Between-group difference		Large	Large
95% confidence interval	Lower limit	-2.60	-0.92
	Upper limit	-1.19	-0.55

Table 7　Confusion matrix of Vitality in Beneficiary 1 with increased participation in volunteering, NPOs, and civic activities

		Prediction	
		Nonparticipation	Participation
Actual	Nonparticipation	92	10
	Participation	14	21

Fig. 7 に受益者 1 の活力度と参加機会の増加有無のヒストグラムを示す. 二つの群を比較すると, 最頻値が左右に分かれていることからも群間差が大きいことが見て取れる.

次に活力度の予測精度を混同行列で検証した結果を Table 7 に示す. 参加機会の増加有りを陽性, 変化無しを陰性として実態と活力度による予測を記載した. 活力度を陽性と判断するしきい値は, Fig. 5(a) に示すロジスティック曲線において発生率 q_i が 0.5 以上のときである. アンケート回答者 137 人中の正解数が 113 であるため本モデルの正解率は 0.825, 再現率は 0.868 であった.

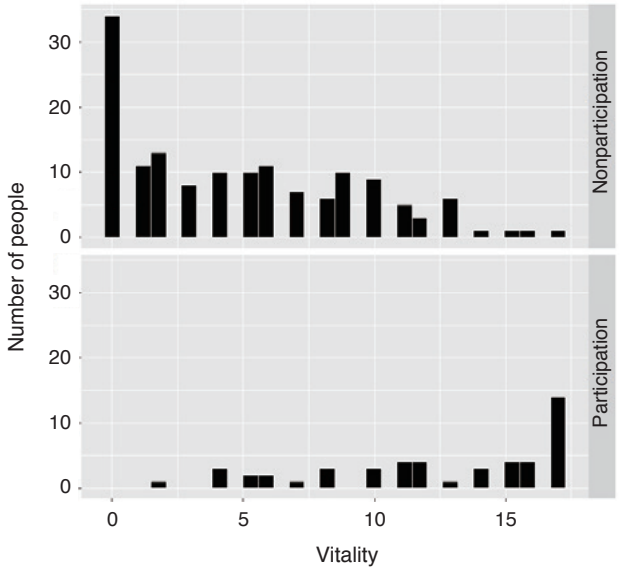


Fig. 7　Histogram of Vitality and increased participation opportunities in volunteer, NPOs, and civic activities in Beneficiary 1

さらに機械学習で作成した分類モデルの性能評価に使用される Area Under the Curve (AUC) 指標でも活力度の予測精度を検証し, 結果を Fig. 8 に示す. AUC は偽陽性率と真陽性率からなる Receiver Operating Characteristic (ROC) 曲線で囲まれる面積で, 最小値 0.5 から最大値 1.0 の間の値を取る. この数値が大きいほど精度が高く, 0.8 以上が良いモデルと言われている. 活力度の AUC は 0.848 であることから, 受益者 1 における福祉車両の貢献度合いを精度よく定量化できたと言える.

3.3.2. 受益者 2

前項の受益者 1 における検証と同様に受益者 2 における活力度モデル精度検証をおこなった. 本モデルの正解率は 0.846 で, 再現率は 0.856, AUC は 0.925 であった.

したがって, 受益者 1 及び受益者 2 における福祉車両の貢献度合いを活力度で精度良く定量化できたと言える.

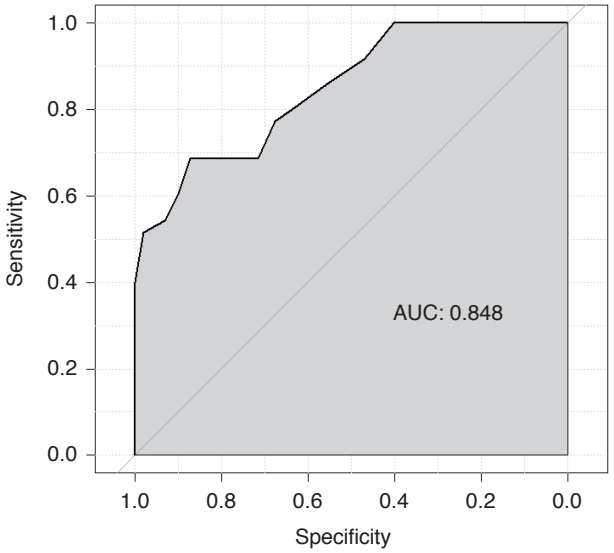


Fig. 8　ROC curve and AUC for Beneficiary 1

4. まとめ

本論文では, 福祉車両を使うお客様へ移動の喜びを提供し続けるため, 福祉車両の貢献度合いの定義と尺度を提案し, 以下の結論を得た.

(1) 福祉車両の貢献度合いを, 「福祉車両を使う前と後のお客様の個人の社会活動の活性化度合い」と定義した.
(2) 社会活動の活性化度合いは 17 項目の設問から構成されるアンケート結果から得られる「活力度」で定量化できる.
(3) 提案する活力度は既存尺度とは独立した尺度である.
(4) 活力度は社会活動の参加機会の増加有無を分離でき

る有効な尺度であり，既存尺度より分離が容易であることを統計的に検証した．

今後，活力度を用いて貢献状況を把握して製品の発展に繋げていく．

参考文献

(1) https://www.honda.co.jp/welfare/thought/，(参照 2025/6/30)

(2) 生田孝史，藤井秀道：企業の非財務情報開示とESG経営に関する研究展望，環境経済・政策研究，13巻，2号，p. 44-56, (2020), doi: 10.14927/reeps.13.2_44

(3) https://www.npo-homepage.go.jp/uploads/h28-social-impact-sokushin-chousa-02.pdf，(参照 2025/6/30)

(4) 宇都宮浄人：地域公共交通とソーシャル・キャピタルの関連性，交通学研究，59号，p. 77-84, (2016), doi: 10.32238/koutsugakkai.59.0_77

(5) 村上由美子，高橋しのぶ：GDPを超えて－幸福度を測るOECDの取り組み，サービソロジー，6巻，4号，p. 8-15, (2020), doi: 10.24464/serviceology.6.4_8

(6) https://rilac.or.jp/wordpress/wp-content/uploads/2017/03/%E5%9C%B0%E5%9F%9F%E5%8A%9B%E5%A0%B1%E5%91%8A%E6%9B%B8.pdf，(参照 2025/2/10)

(7) 桜井政成：複数動機アプローチによるボランティア参加動機構造の分析―京都市域のボランティアを対象とした調査より―，ノンプロフィット・レビュー，2巻，2号，p. 111-122, (2002), doi: 10.11433/janpora.2.111

(8) Clary, G. E., Snyder, M., Ridge, D. R., Copeland, J., Stukas, A. A., Haugen, J., Miene, P.: Understanding and assessing the motivations of volunteers: A functional approach, Journal of Personality and Social Psychology, Vol. 74, Issue 6, p. 1516-1530, (1998), doi: 10.1037/0022-3514.74.6.1516

(9) https://www.esri.cao.go.jp/jp/esri/prj/hou/hou075/hou75.pdf，(参照 2025/2/10)

(10) Lawton, M. P.: The Philadelphia Geriatric Center Morale Scale: A Revision, Journal of Gerontology, Vol. 30, Issue 1, p. 85-89, (1975), doi: 10.1093/geronj/30.1.85

(11) 工藤禎子：高齢者のWell-beingに関する指標とその活用，日本地域看護学会誌，22巻，1号，p. 59-64, (2019)

(12) 馮涛，香川幸次郎：高齢者の対人的社会活動尺度の開発，岡山大学大学院文化科学研究科紀要，20巻，1号，p. 119-130, (2005), doi: 10.18926/1429

(13) Diener, E., Emmons, R. A., Larsen, R. J., Griffin, S.: The Satisfaction With Life Scale, Journal of Personality Assessment, Vol. 49, Issue 1, p. 71–75, (1985), doi: 10.1207/s15327752jpa4901_13

(14) 大石繁宏：幸せを科学する―心理学からわかったこと―，新曜社，p. 47-49, (2009)

(15) 岩永雅也，大塚雄作，高橋一男：改訂版社会調査の基礎，放送大学教育振興会，p. 125, (2003)

(16) The R Core Team: “R: A Language and Environment for Statistical Computing”, Version 4.5.1, (2025), https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/fullrefman.pdf，(参照 2025/7/22)

■著　者■



遠藤有紗



小山俊博



角南圭一



五味哲也

再学習を必要としないカスタマイズ可能な End-to-end 音声認識の研究

Retraining-free Customizable End-to-end Automatic Speech Recognition

周藤 唯[1] Yui SUDO
Shakeel MUHAMMAD[2]
住田直亮[3] Naoaki SUMIDA

要旨

本稿では，ユーザが任意に登録したフレーズに対する認識精度を改善するため，編集可能な用語リストを用いた音声認識モデルのカスタマイズ手法を提案する．提案手法では，従来の Connectionist Temporal Classification/attention 型音声認識モデルにテキストエンコーダと Cross-attention 層を追加し，音声信号に含まれる登録用語を検出する．また，登録用語の認識精度向上のため，検出された登録単語の確率や Connectionist Temporal Classification を統合した推論アルゴリズムを提案する．日本語の社内データセットおよび英語の Librispeech コーパスを用いた評価の結果，提案手法の適用により，登録用語の文字誤り率と単語誤り率が改善した．

ABSTRACT

In this paper, the authors propose a method of customizing automatic speech recognition models using editable term lists to increase recognition accuracy for phrases registered at the discretion of the user. The proposed method adds a text encoder and cross-attention layer to the conventional Connectionist Temporal Classification/Attention-based automatic speech recognition model to detect registered terms in speech signals. To increase registered term recognition accuracy, the authors propose an inference algorithm that integrates the probability of detected registered words and Connectionist Temporal Classification. Results of their evaluation using the in-house Japanese-language dataset and the English-language Librispeech corpus showed that using the proposed method lowered the character error rate and the word error rate for registered terms.

1．まえがき

深層学習の発展に伴い，音声認識技術は発展を遂げている．特に，近年では，End-to-end 音声認識モデルと呼ばれる，音声入力から直接文字列を推定する手法が大きな性能向上を果たしている[(1)]．この飛躍的な性能向上により，スマートスピーカやカーナビゲーションシステム，議事録書き起こしシステム，ホンダコミュニケーションアシスタンスシステム[(2),(3)]など，多くのアプリケーションに音声認識が搭載されるようになってきた．

End-to-end 音声認識は，従来のような音響モデル，発音辞書，言語モデルといった複数のコンポーネントで構成されるシステムとは異なり，単一のニューラルネットワークを用いて入力された音声信号を直接文字列に変換する．ニューラルネットワークは深層学習を用いて最適化され，従来システムにおけるコンポーネント間の誤差蓄積を緩和することができる．一般的な音声認識モデルは，入力音声を符号化するエンコーダと符号化された音声特徴をテキスト列に変換するデコーダから構成されている．これまでに，Connectionist Temporal Classification (CTC)[(4),(5)]や Recurrent Neural Network Transducer[(6),(7)]，注意機構 (Attention)[(8),(9)]など，さまざまなデコーダが提案されている．また，これらの手法を組み合わせた複合型のシステムも提案されており[(10),(11)]，その中でも CTC/Attention 型 End-to-end 音声認識は，その性能の高さから最も広く使用されている手法の一つである[(10)]．

しかし，深層学習を用いた音声認識の性能は，学習データへの依存傾向が高いため，学習データにほとんど出現しなかった単語やフレーズを正しく認識することが難しい．例えば，専門用語や個人名は学習データにはほとんど出現

[1] 株式会社ホンダ・リサーチ・インスティチュート・ジャパン，博士 (工学)
[2] 株式会社ホンダ・リサーチ・インスティチュート・ジャパン，Ph.D.
[3] 株式会社ホンダ・リサーチ・インスティチュート・ジャパン

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_16

しないため，正しく認識されないことが多い．しかし，それらの単語は特定のユーザにとって重要なキーワードとなる場合があり，誤認識してしまうとユーザの満足度を著しく低下させてしまう可能性がある．このような単語を含む学習データを収集し，ニューラルネットワークを再学習することで，認識性能を改善することは可能だが，学習データの収集やアノテーション，ニューラルネットワークの学習には人的リソースや高性能なGPUサーバが必要であるため，頻繁に再学習をおこなうことはできない．したがって，再学習を必要としない音声認識モデルのカスタマイズ手法が求められている．

これらの課題に対し，任意の単語を登録可能なカスタマイズ手法が提案されている[12), 13)]．これらの手法では，デコーダにCross-attention層[14)]を追加することで，再学習することなく任意の品詞を持つ登録用語を検出できる．さらに，登録用語の検出精度を向上するため，補助ブランチを導入する手法や[13), 15)]，Cross-attention層に補助損失関数を導入する方法なども提案されている[16)]．しかし，これらの手法では，推論時に補助ブランチや補助損失を明示的に使用していないため，登録用語に対する性能向上は限定的である．

2．研究のねらい

本稿では，ユーザが編集可能な用語リストを用いて，再学習することなくEnd-to-end音声認識モデルをカスタマイズする手法を提案する．提案手法は，従来のカスタマイズ手法[16)]と同様に，CTC/Attention型音声認識モデル(Fig. 1)[10)]に対し，テキストエンコーダとCross-attention層を追加することで，音声信号に含まれる登録用語を検出する(Fig. 2)．ただし，従来のカスタマイズ手法[16)]とは異なり，登録用語の認識精度をさらに向上させるため，検出された登録用語の確率を増加させ，CTCデコーダによる出力確率を統合する推論アルゴリズムを提案する．本研究のねらいは以下の通りである．

- 推論時に検出された登録用語の確率を増加させることで，登録用語の認識性能を改善する．
- 推論時にCTCデコーダを用いた出力確率を統合することで，全体的な認識性能を改善する．
- 日本語のデータセットにおける性能を詳細に分析する．

本稿は，以前の研究[16)]を拡張したものである．具体的には，先行研究[17)]に対して，CTCデコーダを用いた出力確率の統合および，日本語データセットにおける詳細な性能分析を新たにおこなっている．

3．従来手法(CTC/Attentionモデル)

Fig. 1に従来の音声認識モデルであるCTC/Attentionモデル[10)]を示す．CTC/Attentionモデルは，音響エンコーダ，Attentionデコーダ，およびCTCデコーダを持つ．Attentionデコーダと CTCデコーダは音響エンコーダを共有しており，それぞれ，長さLの音声特徴列$\boldsymbol{X} = [\boldsymbol{x}_1, \ldots, \boldsymbol{x}_L]$が与えられると，長さ$S$の文字列$y = [y_1, \ldots, y_S]$の事後確率$P_{\text{att}}(y \mid \boldsymbol{X})$, $P_{\text{ctc}}(y \mid \boldsymbol{X})$を推定する．これらのデコーダおよび音響エンコーダは共同で学習され，推論時には二つのデコーダの出力確率が統合される．このアプローチにより，学習の安定化と推論時の性能向上が期待される．以下の節で各コンポーネントについて詳述する．

3.1. 音響エンコーダ

音響エンコーダにはConformerを使用する[7)]．Conformerを用いた音響エンコーダは，音声特徴列$\boldsymbol{X}$を次のように，長さTの隠れ状態ベクトル$\boldsymbol{H} = [\boldsymbol{h}_1, \ldots, \boldsymbol{h}_T] \in \mathrm{R}^{T \times d}$に変換する．

$$\boldsymbol{H} = \text{AudioEnc}(\boldsymbol{X}) \quad (1)$$

ここで，dは隠れ状態ベクトルの次元を表す．

3.2. Attentionデコーダ

Attentionデコーダには，Transformerデコーダを使用する[14)]．式(1)に示した音響エンコーダによって抽出された隠れ状態ベクトル$\boldsymbol{H}$および，1フレーム前までの文字列$y_{0:s-1} = [y_0, \ldots, y_{s-1}]$が与えられると，Attentionデコーダは$s$番目の文字$y_s$の事後確率$P(y_s \mid y_{0:s-1}, \boldsymbol{X})$を以下のように推定する．

$$P_{\text{att}}(y_s \mid y_{0:s-1}, \boldsymbol{X}) = \text{AttDecoder}(y_{0:s-1}, \boldsymbol{H}) \quad (2)$$

式(2)を$s = 1, \ldots, S$まで繰り返すことで，文字列yの事後確率が以下のように定式化される．

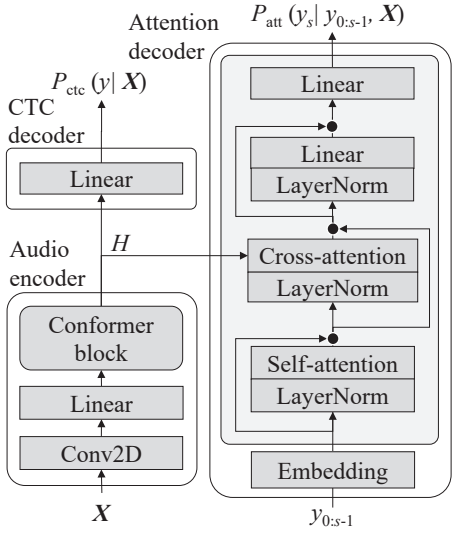


Fig. 1　Overall architecture of CTC/Attention model

$$P_{\mathrm{att}}(y|\boldsymbol{X}) = \prod_{s=1}^{S} P_{\mathrm{att}}\left(y_s|y_{0:s-1}, \boldsymbol{X}\right) \quad (3)$$

上記に対し，クロスエントロピー損失を導入する．

$$L_{\mathrm{att}} = -\log P_{\mathrm{att}}\left(y|\boldsymbol{X}\right) \quad (4)$$

3.3. CTC デコーダ

CTC デコーダは，一層の線形層から構成される[4), (5)]．Fig. 1 に示すように，CTC デコーダは音響エンコーダが出力する隠れ状態ベクトル $\boldsymbol{H}$ を使用して，以下に示すように文字列 y の事後確率 $P_{\mathrm{ctc}}(y|\boldsymbol{X})$ を推定する．

$$P_{\mathrm{ctc}}(y|\boldsymbol{X}) = \mathrm{CTC}(\boldsymbol{H}) \quad (5)$$

上記の出力に対し，以下に示す CTC 損失を導入する．

$$L_{\mathrm{ctc}} = -\log P_{\mathrm{ctc}}(y|\boldsymbol{X}) \quad (6)$$

3.4. 共同学習と共同デコード

CTC/Attention モデルは，式（4），（6）で定義した損失関数に対し，以下に示す重み λ を用いた共同学習により，損失が最小になるよう最適化される．

$$L = (1-\lambda)\, L_{\mathrm{att}} + \lambda\, L_{\mathrm{ctc}} \quad (7)$$

また，推論時の性能向上のため，Attention デコーダと CTC デコーダの出力確率を以下に示す重み μ を用いて統合する．

$$\alpha = (1-\mu)\,\alpha_{\mathrm{att}} + \mu\alpha_{\mathrm{ctc}}, \quad (8)$$

$$\alpha_{\mathrm{att}} = \log P_{\mathrm{att}}(y|\boldsymbol{X}), \quad (9)$$

$$\alpha_{\mathrm{ctc}} = \log P_{\mathrm{ctc}}(y|\boldsymbol{X}), \quad (10)$$

ここで，α，α_{att}，α_{ctc} は，それぞれ，統合確率，Attention デコーダ，CTC デコーダの出力確率を表す．

従来の CTC/Attention モデルは，用語リストなどの外部入力を想定していないため，学習後に音声認識モデルをカスタマイズすることができず，学習データに出現しなかった単語を正確に認識することが難しい．

4．提案モデルのネットワーク構造

Fig. 2 に提案モデルの全体構造を示す．提案手法は，従来の CTC/Attention モデルに加えて，用語リストを入力するためのテキストエンコーダを持ち，Attention デコーダに Cross-attention を追加している（Fig. 2 緑色部分）．テキストエンコーダは，ユーザが任意に編集可能な用語リストを符号化し，Cross-attention 層は入力音声中の登録用語を検出する．

拡張された Attention デコーダは，音声特徴列 $\boldsymbol{X}$ と用語リスト $\boldsymbol{B} = \{b_0, b_1, \ldots, b_N\}$ が与えられると，長さ S の文字列 y の事後確率 $P_{\mathrm{ext}}(y|\boldsymbol{X}, \boldsymbol{B})$ および検出された登録用語のインデックス $n = [n_1, \cdots, n_S]$ の事後確率 $P_{\mathrm{idx}}(n|\boldsymbol{X}, \boldsymbol{B})$ を推定する（Fig. 2）．以下の節で追加された各コンポーネントについて述べる．

4.1. テキストエンコーダ

テキストエンコーダには Transformer エンコーダを使用する[12)]．Transformer エンコーダは，埋め込み層，Transformer ブロック，平均プーリング層，および編集可能な用語リスト $\boldsymbol{B} = \{b_0, b_1, \ldots, b_N\}$ から構成される．b_N は N 番目の登録用語の文字列を表す（例えば，[朝，礼] など）．b_0 は音声信号の中に登録用語が存在しない場合に使用されるダミー単語である．用語リスト $\boldsymbol{B}$ は，埋め込み層および Transformer ブロックに入力され，以下に示すように文字ごとの特徴列 $\boldsymbol{G} \in \mathrm{R}^{(N+1)\times I\max\times d}$ に変換される．

$$\boldsymbol{G} = \mathrm{Transformer}(\mathrm{Embedding}(\boldsymbol{B})) \quad (11)$$

$I_{\max}$ は，用語リストに登録されている単語の最大長を表す（例えば，[朝，礼] が最大長を持つ場合，$I_{\max} = 2$）．その後，平均プーリング層を使用して単語全体の特徴を表す特徴量 $\boldsymbol{V} = [\boldsymbol{v}_0, \cdots, \boldsymbol{v}_N] \in \mathrm{R}^{(N+1)\times d}$ に変換される．

$$\boldsymbol{V} = \mathrm{MeanPool}(\boldsymbol{G}) \quad (12)$$

4.2. 拡張 Attention デコーダ

拡張された Attention デコーダは，式（1），(12) に示す音響エンコーダおよびテキストエンコーダによって抽出された隠れ状態ベクトル $\boldsymbol{H}$，$\boldsymbol{V}$ を使用して，文字列の事後確率 $P_{\mathrm{ext}}(y|\boldsymbol{X}, \boldsymbol{B})$ および検出された登録用語のインデックス確率 $P_{\mathrm{idx}}(n|\boldsymbol{X}, \boldsymbol{B})$ を推定する[12)]．

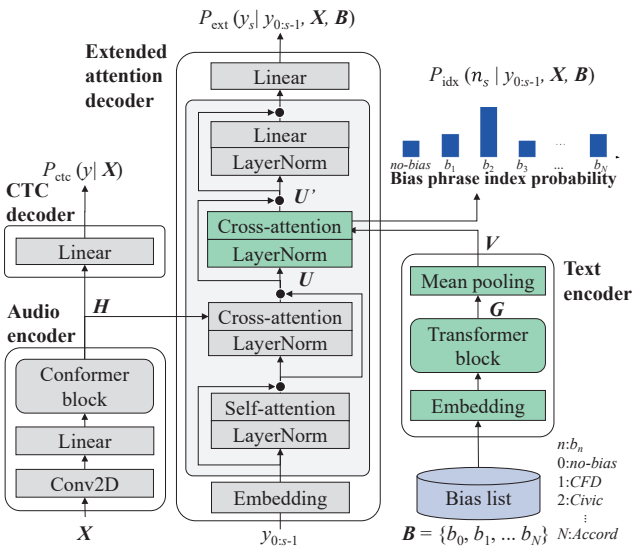


Fig. 2　Overall architecture of proposed method

4.2.1. 文字列確率

式（1），（12）に示した音響エンコーダおよびテキストエンコーダによって抽出された隠れ状態ベクトル $\boldsymbol{H}$, $\boldsymbol{V}$ および，1フレーム前までの文字列 $y_{0:s-1}$ が与えられると，デコーダは s 番目の文字 y_s を以下のように推定する．

$$P_{\text{ext}}(y_s \mid y_{0:s-1}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{B}) = \text{ExtDecoder}(y_{0:s-1}, \boldsymbol{H}, \boldsymbol{V}) \quad (13)$$

式（13）を $s = 1, \ldots, S$ まで繰り返すことで，文字列 y の事後確率は以下のように定式化される．

$$P_{\text{ext}}(y \mid \boldsymbol{X}, \boldsymbol{B}) = \prod_{s=1}^{S} P_{\text{ext}}(y_s \mid y_{0:s-1}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{B}) \quad (14)$$

上記に対し，クロスエントロピー損失を導入する．

$$L_{\text{ext}} = -\log P_{\text{ext}}(y \mid \boldsymbol{X}, \boldsymbol{B}) \quad (15)$$

4.2.2. 登録用語のインデックス確率

Fig. 2 における Cross-attention 層の入力，出力をそれぞれ $\boldsymbol{U}$ および $\boldsymbol{U}'$ とすると，Cross-attention 層は以下のように定義される．

$$\boldsymbol{U}' = \text{Softmax}\left(\frac{\text{LN}(\boldsymbol{U})\boldsymbol{V}^T}{\sqrt{d}}\right)\boldsymbol{V} + \boldsymbol{U} \quad (16)$$

ここで，式（16）の Softmax 項は，入力特徴列 $\boldsymbol{U} = [\boldsymbol{u}_1, \ldots, \boldsymbol{u}_s]$ と用語リストの特徴列 $\boldsymbol{V} = [\boldsymbol{v}_0, \ldots, \boldsymbol{v}_N]$ の内積であるため，それらの類似度を意味する．すなわち，以下に示すように，入力音声中に含まれている登録用語のインデックス列 $n = [n_1, \ldots, n_s]$ の確率と解釈することができる．

$$P_{\text{idx}}(n \mid \boldsymbol{X}, \boldsymbol{B}) = \text{Softmax}\left(\frac{\text{LN}(\boldsymbol{U})\boldsymbol{V}^T}{\sqrt{d}}\right) \quad (17)$$

この確率が最も高いインデックスが音声中に含まれている登録用語であるといえる．例えば，用語リストに二つの単語（1：朝礼，2：PR）が登録されている状態で，y = [朝礼で PR する] という音声が発話された場合，登録用語のインデックス列は n = [1, 1, 0, 2, 2, 0, 0] となる．なお，登録用語ではない文字に関しては，$n = 0$ (no-phrase) が適用される．上記の出力に対し，クロスエントロピーを用いた登録用語インデックス損失を導入する．

$$L_{\text{idx}} = -\log P_{\text{idx}}(n \mid \boldsymbol{X}, \boldsymbol{B}) \quad (18)$$

5．モデル学習および推論方法

5.1. 学習方法

提案手法は，式（6），（15），（17）で定義した損失関数に対し，以下に示す重み λ および γ を用いたマルチタスク学習により損失が最小になるよう最適化される．

$$L = (1-\lambda)\, L_{\text{ext}} + \lambda\, L_{\text{ctc}} + \gamma\, L_{\text{idx}} \quad (19)$$

また，学習中の用語リストに関しては，推論時には任意の単語を用語リストに登録できるのに対し，学習時にはバッチごとに Ground truth からランダムに用語リストが作成される．このランダムな選択は，モデルが幅広い単語やフレーズに対応できるようにするためである．

5.2. 推論アルゴリズム

認識性能をさらに向上させるため，本稿では新たな推論アルゴリズムを提案する．具体的には，拡張された Attention デコーダが推定した文字列 y の事後確率 $P_{\text{ext}}(y \mid \boldsymbol{X}, \boldsymbol{B})$ に対して，（1）登録用語のインデックス確率 $P_{\text{idx}}(n \mid \boldsymbol{X}, \boldsymbol{B})$ の統合 (Fig. 3 赤色部分)，（2）CTC デコーダによる出力確率の統合 (Fig. 3 青色部分) をおこなう．提案したアルゴリズムを Fig. 3 に示す．

（1）まず，拡張された Attention デコーダは式（4）に基づいて，s 番目の各文字の確率 α_{ext} を算出する（5行目）．次に，式（8）および argmax 関数を用いて，s 番目の登録用語インデックス n_s を推定する（6行目）．登録用語が検出された場合 ($n_s \neq 0$)，登録用語に含まれる文字の出力確率を重み α_{bonus} に基づいて増加する（9行目）．例えば，検出された登録用語が b_n = [朝, 礼] の場合，[朝], [礼] という文字の出力確率を増加する．

（2）続いて，CTC Prefix scoring[10] を用いて CTC デコーダの出力確率 α_{ctc} を算出する．ただし，CTC デコーダ

Algorithm 1 Decoding algorithm

1: *hyps* = {<*sos*>:1.0}; *end_hyps* = {};
2: **for** s = 1 to maxlen **do**
3: *ext hyps* = {}
4: **for** $l \in$ *hyps* **do**
5: $\boldsymbol{\alpha}_{\text{ext}} = \log P_{\text{ext}}(y_s \mid y_{1:s-1}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{B})$
6: $n_s \leftarrow \text{Argmax}(P(n_s \mid y_{1:s-1}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{B}))$
7: **if** $n_s \neq 0$ **then**
8: **for** token $\in b_n$ **do**
9: $\boldsymbol{\alpha}_{\text{ext}}$[token] $\leftarrow \boldsymbol{\alpha}_{\text{ext}}$[token] + α_{bonus}
10: **end for**
11: **end if**
12: **for** $y_s \in$ Top-$k_{\text{beam}}(\boldsymbol{\alpha}_{\text{ext}})$ **do**
13: Add $\tilde{l} = l \oplus y_s$ and the score α_{ext} to *ext hyps*
14: $\alpha_{\text{ctc}} = \text{CTCPrefixScore}(\tilde{l}, \boldsymbol{H})$
15: **if** $\hat{n}_s = 0$ **then** (“*no-bias*”)
16: *ext_hyps*[$\tilde{l}$] = $\mu\alpha_{\text{ctc}} + (1-\mu)\,\alpha_{\text{ext}}$
17: **else**
18: *ext_hyps*[$\tilde{l}$] = α_{ext}
19: **end if**
20: **if** y_s = <eos> or len($\tilde{l}$) = maxlen **then**
21: Add $\tilde{l}$ to *end_hyps*
22: **end if**
23: **end for**
24: **end for**
25: *hyps* = Top-k(*ext hyps*)
26: **end for**
27: **return** Top-1(*end_hyps*)

Fig. 3 Joint decoding algorithm

には用語リスト $\boldsymbol{B}$ が入力されないため (Fig. 2), 登録用語に対する確率算出はおこなわない. すなわち, 登録用語が検出されなかった場合のみ ($n_s = 0$), 重み μ を用いて出力確率を統合する (16 行目).

6. 評価実験

6.1. 実験条件

入力される音声特徴量 $\boldsymbol{X}$ は, 512 サンプルの窓長を持つ 80 次元のメルフィルタバンクである. メルフィルタバンクとは, 人の聴覚特性を模したメル尺度を用いた時間 - 周波数特性を表す. 音響エンコーダは, 二つの畳み込み層, 256 次元の線形射影層, 12 個の Conformer ブロックから構成される. テキストエンコーダは, 埋め込み層, 6 個の Transformer ブロックから構成され, 最終層に平均プーリング層を持つ. 拡張された Attention デコーダは, 埋め込み層, 6 個の Transformer ブロック, 線形層から構成される. CTC デコーダは 1 層の線形層で構成される. 式 (19) に示す学習時の重み λ, γ は, それぞれ 0.3, 1.0 に設定した. また, 5.2. 節で述べた推論時のパラメータ α_{bonus}, μ は, それぞれ 1.0, 0.3 に設定した.

評価には, 社内データセット (日本語) と Librispeech-100 コーパス (英語) [18] を用いた. 社内データセットは, 会議・朝礼シナリオを含む 93 時間の社内音声データ, 日本語話し言葉コーパス [19], 株式会社国際電気通信基礎技術研究所が開発したデータベース [20] を含む. 提案手法は, 文字誤り率 (CER), 登録用語の CER(B-CER), およびそれ以外の CER(U-CER) で評価した. 提案手法の目標は, U-CER および全体の CER の増加を最小限に抑えつつ, B-CER を改善することである. Librispeech-100 に関しては, 単語誤り率 (WER), U-WER, B-WER を使用した.

6.2. 日本語データセットでの検証

Table 1 に, $N = 203$ 個の単語やフレーズを用語リストに登録した場合の評価結果を示す. ベースラインはカスタマイズ性を持たない従来の CTC/Attention モデル [10] である (A1). また, 従来のカスタマイズ手法 [15], [21] とも比較した (B1, 2). これらの手法は, 提案手法と異なり, 推論時に検出された登録用語の確率を明示的に使用しない手法である. なお, 提案手法に関しては, 5.2. 節で述べた推論アルゴリズム (登録用語のインデックス確率統合, CTC デコーダによる確率統合) を除いた場合の影響も検証した (C2, 3).

まず, 提案手法とベースライン, 従来のカスタマイズ手法を比較する (A1, B1, B2 対 C1). C1 は, ベースラインと比較して, U-CER (登録用語 "以外" の CER) が 0.06 ポイント増加したものの, B-CER (登録用語の CER) を 11.71 ポイント改善した. その結果, 全体の CER が 1.40 ポイント改善した. また, 提案手法は従来のカスタマイズ手法 [15], [21] よりも全体の CER および B-CER の両方で改善を示した.

Table 1　Experimental results on in-house dataset

ID	Model	CER [%]	U-CER [%]	B-CER [%]
A1	Baseline	9.85	8.17	21.86
B1	NEA-ASR [21]	9.75	8.11	21.90
B2	Intermediate DB [15]	9.28	8.23	16.93
C1	Proposed method	8.45	8.23	10.15
C2	C1 w/o index probability	8.65	8.19	12.11
C3	C2 w/o CTC integration	9.78	9.16	14.54

Table 2　Performance analysis on in-house dataset

Class	Accuracy [%]	Examples
Katakana	86	ジャイロ, リファイン
Alphabet	84	CFD, PR
Kanji	64	接種, 風洞
English	29	SKETCH, CASCADE

次に, 登録用語のインデックス確率統合, CTC デコーダによる確率統合を除いた場合の影響について議論する. C2 および C3 に示すとおり, 登録用語のインデックス確率統合を除くことで B-CER は 1.96 ポイント増加し, CTC デコーダによる確率統合を除くと U-CER が 0.97 ポイント増加した. これにより, それぞれが登録用語およびそれ以外の単語に対する認識性能を改善する効果があることが確認された.

6.2.1. 性能分析

続いて, 登録用語をカタカナ, アルファベット, 漢字, 英語で表記された単語に分類し, 認識精度を分析した. 複数の文字種が使用されている単語に関しては, 最も多く使われている文字の分類とした. 例えば, 「CFD 計算」の場合, アルファベットが最も多く使用されているためアルファベットに分類した. なお, アルファベットとは, 「PR (ピーアール)」のようにアルファベット読みで発音される単語を示し, 英語は, 「SKETCH (スケッチ)」のようにそれ以外で発音される単語を示す.

Table 2 および Fig. 4 に, 登録用語の分類ごとの認識精度, ならびに, 典型的な推論結果例を示す. 推論結果例 1 から 3 は提案手法により登録用語が正しく認識できた例を示し, 推論結果例 4 は正しく認識できなかった例を示す. Table 2 より, カタカナやアルファベットのように, 各文字と発音が一意に決定する単語に関しては 80% 以上の認識精度を達成したのに対し, 英語に対する認識精度は 29% と明らかに低かった. 特に「SKETCH (スケッチ)」や「CASCADE (カスケード)」といった単語のように, 一般にはカタカナで表記されることの多い英語の認識精度が著しく低かった.

これは, 学習中に登録される単語がランダムに選択されたことに起因すると考えられる. 提案手法 (C1) におけるテ

キストエンコーダおよび拡張された Attention デコーダに追加された Cross-attention 層は，入力音声から登録単語の発音を検出するよう学習が進む．そのため，一般的ではない表記と発音の組み合わせを持つ単語に対しては十分に学習が進まなかったことが考えられる．

6.2.2. スケーラビリティ検証

実際のユースケースでは，ユーザが明示的に登録用語を削除しない限り，用語リストに登録される単語数は増加する傾向にある．Fig. 5 に，B-CER（登録単語の CER）に対する用語リストサイズの影響を示す．本実験では，用語リストに単語を登録しない場合（N = 0），そのユースケースに適切な単語を登録した場合（N = 203），不必要な単語を追加した場合（N = 500 から 2000）の B-CER を比較した．

用語リストに単語を登録しない場合（N = 0），B-CER には改善が見られなかったのに対し，適切な単語を登録した場合（N = 203），B-CER は改善した．対象とするユースケースに不要な単語が増加すると，徐々に B-CER は増加した（N = 500 から 2000）．ただし，用語リストに単語を登録しない場合（N = 0）と比較して十分な B-CER の改善効果は維持できていたことから，提案手法は用語リストのサイズ増加に対してロバストであることが確認された．

1. Reference: 一番のネックは風洞だって事だ
   Baseline: 一番のネッカーフードだって事だ
   Proposed (C1) : 一番のネックは風洞だって事だ
2. Reference: それとは別の**職域接種**
   Baseline: それとは別の職域摂取
   Proposed (C1) : それとは別の職域接種
3. Reference: **被引例情報**のときに**第一引例**って
   Baseline: 非陰例情報のときに第一因例って
   Proposed (C1) : 非引例情報のときに第一引例って
4. Reference: **SKETCH** モードを開いて
   Baseline: スケッチモードを開いて
   Proposed (C1) : スケッチモードを開いて

Boldface: Registered phrase
Red: Incorrectly recognized characters
Blue: Correctly recognized characters

Fig. 4　Typical inference results

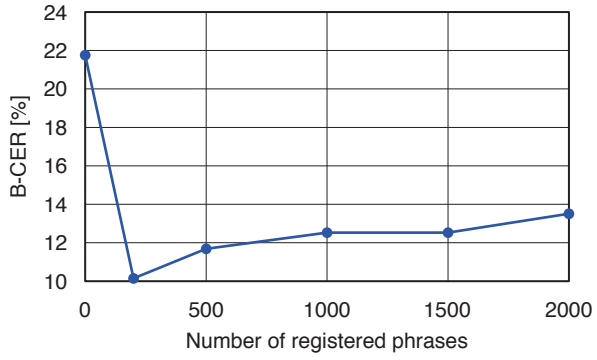


Fig. 5　Robustness to term list size

Table 3　Experimental results on Librispeech-100 h

ID	Model	WER [%]	U-WER [%]	B-WER [%]
A1	Baseline	8.59	5.87	30.71
C1	Proposed method	5.76	4.10	19.30
C2	C1 w/o index probability	6.49	4.83	19.98
C3	C2 w/o CTC integration	7.53	5.27	25.92

6.3. 英語データセットでの検証

次に，日本語とは異なる性質を持つ英語データセット（Librispeech-100）に対し，N = 100 単語を用語リストに登録した場合の評価をおこなった．日本語が表意文字を使用した言語であるのに対し，英語は表音文字を使用した言語であるため，このような性質の異なる言語に対して評価をおこなうことは重要である．Table 3 に，提案手法および登録用語のインデックス確率統合，CTC による確率統合の効果を示す．英語の評価結果についても，日本語の場合と同様の傾向が見られた．提案手法は，ベースラインと比較して，B-CER を改善し，その結果，全体の WER を改善した（A1 対 C1）．また，登録用語のインデックス確率統合および CTC デコーダによる確率統合を除くと，B-WER および U-WER が低下したことから，これらの手法がそれぞれの認識性能を向上させる効果があることが確認された（C1 対 C2, 3）．

また，Fig. 6 に式（8）に基づく Cross-attention 層により推定された登録用語のインデックス確率を示す．横軸に入力された音声発話，縦軸に登録された単語を示している．この音声発話の中には，legality, legislature という登録単語が含まれていた．Fig. 6 より，提案手法は入力された音声から正確に登録単語を検出できることが確認できる．

以上より，提案手法は性質の異なる言語（日本語，英語）に対しても有効であることが確認された．



Fig. 6　Registered phrase detection

7．まとめ

本稿では，ユーザが任意に登録したフレーズに対する認識精度を改善するため，編集可能な用語リストを用いた音声認識モデルのカスタマイズ手法を提案した．提案手法では，音声信号に含まれる登録用語を検出するために，従来

の CTC/Attention 型音声認識モデルにテキストエンコーダと Cross-attention 層を追加した．また，登録用語の認識精度をさらに向上させるため，検出された登録用語の確率を増加させ，CTC デコーダによる確率統合を用いた推論アルゴリズムを提案した．社内データセット（日本語）および Librispeech コーパス（英語）を用いた評価の結果，提案手法は登録用語の文字誤り率と単語誤り率を改善した．

参考文献

（1）Prabhavalkar, R., Hori, T., Sainath, T. N., Schlüter, R., Watanabe, S.: End-to-End Speech Recognition: A Survey, IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, Vol. 32, p. 325-351, (2023), doi: 10.1109/TASLP.2023.3328283

（2）https://global.honda/jp/stories/003.html,（参照 2024/9/23）

（3）https://www.jp.honda-ri.com/activity/honda-ca-system/,（参照 2024/9/23）

（4）Graves, A., Fernández, S., Gomez, F., Schmidhuber, J.: Connectionist temporal classification: labelling unsegmented sequence data with recurrent neural networks, ICML '06: Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning, p. 369-376, (2006), doi: 10.1145/1143844.1143891

（5）Peng, Y., Sudo, Y., Shakeel, M., Watanabe, S.: OWSM-CTC: An Open Encoder-Only Speech Foundation Model for Speech Recognition, Translation, and Language Identification, Proceedings of the 62nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, Vol. 1, p. 10192–10209, (2024), doi: 10.18653/v1/2024.acl-long.549

（6）Graves, A.: Sequence Transduction with Recurrent Neural Networks, International Conference of Machine Learning (ICML) 2012 Workshop on Representation Learning, arXiv preprint, (2012), doi: 10.48550/arXiv.1211.3711

（7）Gulati, A., Qin, J., Chiu, C.-C., Parmar, N., Zhang, Y., Yu, J., Han, W., Wang, S., Zhang, Z., Wu, Y., Pang, R.: Conformer: Convolution-augmented Transformer for Speech Recognition, Proc. Interspeech 2020, p. 5036-5040, (2020), doi: 10.21437/Interspeech.2020-3015

（8）Chorowski, J. K., Bahdanau, D., Serdyuk, D., Cho, K., Bengio, Y.: Attention-Based Models for Speech Recognition, Advances in Neural Information Processing Systems, Vol. 28, (2015)

（9）Radford, A., Kim, J. W., Xu, T., Brockman, G., McLeavey, C., Sutskever, I.: Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision, Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning, p. 28492-28518, (2023)

（10）Watanabe, S., Hori, T., Kim, S., Hershey, J. R., Hayashi, T.: Hybrid CTC/Attention Architecture for End-to-End Speech Recognition, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, Vol. 11, Issue 8, p. 1240-1253, (2017), doi: 10.1109/JSTSP.2017.2763455

（11）Sudo, Y., Shakeel, M., Yan, B., Shi, J., Watanabe, S.: 4D ASR: Joint modeling of CTC, Attention, Transducer, and Mask-Predict decoders, Proc. INTERSPEECH 2023, p. 3312-3316, (2023), doi: 10.21437/Interspeech.2023-1303

（12）Pundak, G., Sainath, T. N., Prabhavalkar, R., Kannan, A., Zhao, D.: Deep Context: End-to-end Contextual Speech Recognition, 2018 IEEE Spoken Language Technology Workshop (SLT), (2018), doi: 10.1109/SLT.2018.8639034

（13）Huang, K., Zhang, A., Yang, Z., Guo, P., Mu, B., Xu, T., Xie, L.: Contextualized End-to-End Speech Recognition with Contextual Phrase Prediction Network, Proc. INTERSPEECH 2023, p. 4933-4937, (2023), doi: 10.21437/Interspeech.2023-767

（14）Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., Polosukhin, I.: Attention is all you need, NIPS'17: Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems, p. 6000-6010, (2017)

（15）Shakeel, M., Sudo, Y., Peng, Y., Watanabe, S.: Contextualized End-to-end Automatic Speech Recognition with Intermediate Biasing Loss, Proc. Interspeech 2024, p. 3909-3913, (2024), doi: 10.21437/Interspeech.2024-1257

（16）Huber, C., Hussain, J., Stüker, S., Waibel, A.: Instant One-Shot Word-Learning for Context-Specific Neural Sequence-to-Sequence Speech Recognition, 2021 IEEE Automatic Speech Recognition and Understanding Workshop (ASRU), (2021), doi: 10.1109/ASRU51503.2021.9687898

（17）Sudo, Y., Shakeel, M., Fukumoto, Y., Peng, Y., Watanabe, S.: Contextualized Automatic Speech Recognition With Attention-Based Bias Phrase Boosted Beam Search, ICASSP 2024 - 2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), p. 10896-10900, (2024), doi: 10.1109/ICASSP48485.2024.10447782

（18）Panayotov, V., Chen, G., Povey, D., Khudanpur, S.:

Librispeech: An ASR corpus based on public domain audio books, 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), p. 5206-5210, (2015), doi: 10.1109/ICASSP.2015.7178964

(19) Maekawa, K.: Corpus of Spontaneous Japanese: Its design and evaluation, Proc. ISCA/IEEE Workshop on Spontaneous Speech Processing and Recognition, (2003), https://www.isca-archive.org/sspr_2003/maekawa03_sspr.pdf, (参照 2024/9/23)

(20) Kurematsu, A., Takeda, K., Sagisaka, Y., Katagiri, S., Kuwabara, H., Shikano, K.: ATR Japanese speech database as a tool of speech recognition and synthesis, Speech Communication, Vol. 9, Issue 4, p. 357-363, (1990), doi: 10.1016/0167-6393(90)90011-W

(21) Sudo, Y., Hata, K., Nakadai, K.: Retraining-free Customized ASR for Enharmonic Words Based on a Named-Entity-Aware Model and Phoneme Similarity Estimation, Proc. INTERSPEECH 2023, p. 491-495, (2023), doi: 10.21437/Interspeech.2023-1320

■著　者■


周 藤　唯


Shakeel MUHAMMAD


住 田 直 亮

LDHs 構造を有するメタネーション触媒による耐水性向上の研究

Enhancement of Water Resistance by Methanation Catalysts with LDHs Structure

米田英昭[1] Hideaki YONEDA
柳澤和貴[1] Kazuki YANAGISAWA
飯嶋洋平[1] Yohei IIJIMA
吉田潤平[1] Junpei YOSHIDA

要　旨

合成メタン製造プロセスの高効率化を目指し，水蒸気と CO_2 の共電解反応から得られた合成ガスをメタン化する触媒を新たに開発し原料ガス中における水蒸気の許容割合，すなわち耐水性の検討をおこなった．流通法による活性評価の結果，層状複水酸化物を利用した NiAl-LDHs は 0.1 MPa，300℃の条件で CO と H_2 からなる合成ガスからメタンを生成する際に高い触媒反応性を示す結果が得られた．また，共電解リアクタと組み合わせた合成メタン製造プロセスで懸念される水蒸気を含む合成ガスのメタン化反応を実験し，水蒸気が 20% 含まれる場合までは，含まない場合と同等の CO 転化率と CH_4 選択率を維持し，従来の金属担持触媒に対して優位性をもつことを確認した．

ABSTRACT

In order to enhance the efficiency of the synthetic methane production process, the authors developed an innovative catalyst that converts synthesis gas (syngas) obtained from the co-electrolysis reaction of water vapor and CO_2 into methane, and studied the allowable proportion of water vapor in the source gas, i.e., water resistance. Evaluation of the activity using the continuous-flow method showed that NiAl-LDHs utilizing layered double hydroxides exhibited higher catalytic reactivity for the generation of methane from syngas consisting of CO and H_2 at 0.1 MPa and 300°C. In addition, the authors experimented with the methane conversion reaction of syngas containing water vapor, which is an issue in the synthetic methane production process, when combined with a co-electrolysis reactor. The results showed that when up to 20% water vapor was present, CO conversion and CH_4 selectivity were equivalent to cases without water vapor, and the catalyst exhibited enhanced performance compared to the conventional metal-supported catalysts.

1．まえがき

近年，二酸化炭素（CO_2）を有用な化学物質に変換することは，二酸化炭素の分離回収と有効利用を支える観点から注目されている[(1)]．その中でも，ガス燃料となる合成メタンの製造については国内外で注目されており，日本国内においては，経済産業省が主導するメタネーション事業やガス会社，自動車関連会社でも取組がすすめられている[(2)]．

合成メタンの生成方法には大きく三種類あり，一つはバイオガス由来の CO_2 からメタンを製造する手法，残り二つは Power to Gas（P2G）によるメタン製造（メタネーション）技術である．P2G の一つ目は，Fig. 1 (a) で示す大気や工場排ガス等から回収した CO_2 と常温の水を電解して得られる水素（H_2）を原料として，触媒を用いた熱化学反応でメタンを製造するサバティエ反応（Sabatier reaction）である．二つ目は，Fig. 1 (b) で示す CO_2 と高温の水蒸気（H_2O）の同時電解反応である共電解（Co-electrolysis）により合成ガス（Syngas）すなわち一酸化炭素（CO）と H_2 の混合物を得て，この合成ガスを原料に触媒を用いた熱化学反応でメタンを製造する革新的メタネーションと呼ばれる手法である[(3)]．

[1] 先進パワーユニット・エネルギー研究所
E-mail: hideaki_yoneda@jp.honda

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2026_38_17

本研究では反応経路以外のエネルギー消費が少なく，高効率なメタン製造が期待できる革新的メタネーションの検討を進めている[4]．

革新的メタネーションの具体例として，Fig. 2 の破線内に示すシステムを検討している[4]．このシステムは，最終目的物であるメタンを生成するために，上流に高い電解効率が期待できる固体酸化物型電解セル（Solid Oxide Electrolysis Cell: SOEC）を積層した共電解リアクタを備え，下流にメタネーションで発生する熱を有効利用できる熱化学式リアクタ（メタネーションリアクタ）を備えており，共電解リアクタで得られた合成ガスをメタンに変換する構成となっている．

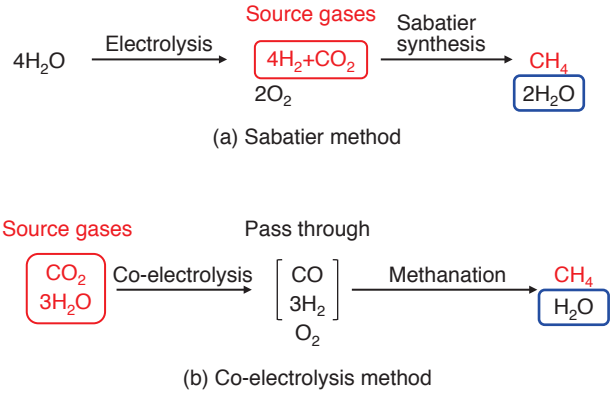


Fig. 1　Comparison of methane synthesis processes

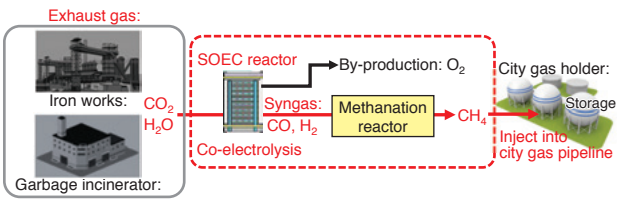


Fig. 2　Co-electrolysis methanation system via syngas

2．メタン製造の高効率化

2.1. 合成メタンの製造プロセス

共電解リアクタでは，燃料極（fuel electrode）において式（1），（2）に示す反応が同時に起こり，原料ガスと電子（e^-）から CO，H_2 および酸素イオン（O^{2-}）が生成される．

$$CO_2 + 2e^- \rightarrow CO + O^{2-} \quad (1)$$

$$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-} \quad (2)$$

さらに副反応として式（3）に示す水性ガスシフト反応（water gas shift reaction）も並行して発生する．

$$CO + H_2O \Leftrightarrow CO_2 + H_2 \quad (3)$$

酸素極（oxygen electrode）では，式（4）に示すように O^{2-} から酸素（O_2）を生成する．

$$O^{2-} \rightarrow 1/2O_2 + 2e^- \quad (4)$$

合成ガスを原料とするメタネーションでは，式（5）に示すように 1 モルの CO に対し 3 モルの H_2 が必要である．CO：H_2 の割合調整は，共電解リアクタでの電解反応およびその入口の CO_2，H_2O の流量コントロールによって実現されることが望ましい．

$$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O \quad (5)$$

2.2. メタネーションの運転課題

共電解リアクタは複数の固体酸化物型電解セルが積層された構造であり，積層したセルの間を原料ガスが通り抜ける際，セルと接触したガスが電解反応によって CO，H_2 に変換される．すなわち，セルと接触しない原料ガスは反応せず未反応ガスとしてリアクタの外に排出される．また，原料ガスの枯渇などで発生する過電圧によるセルの破損を予防するため，合成ガス生成過程では原料ガスである CO_2 と H_2O を 5 から 20% を吹き抜けさせて使用されることが多い．したがって，吹抜けて変換されなかったガスも未反応のまま残留成分として合成ガス中に残る[5]-[7]．上記の残留成分中の H_2O である水蒸気は，触媒活性低下の要因となるため，通常はメタネーションリアクタの手前で分離して取り除かれることが多い．過去に検討された革新的メタネーションプロセスでは，共電解リアクタ後の生成ガス中の水蒸気の割合は 16 から 19% と想定され，メタネーションリアクタの前にドレンを設け水蒸気を冷却，液化，分離することで水蒸気の割合を 5 から 6% まで下げてメタネーションリアクタに供給していた[8]．分離に伴う消費エネルギーは最大 58 kW とされ，システムエネルギー効率の数％を占めていた．本研究では残留成分中の水蒸気を分離するエネルギーを削減するとともに，プロセス全体の小型化やコスト低減のために，革新的メタネーションシステムに適した耐水性に優れた触媒を開発することに取り組んだ．

3．触媒開発のねらい

メタネーション触媒に求められる性能は三つあり，三つのうち二つは式（5）に示す反応に関係するものである．まず一つ目が，原料ガスである CO がメタンを始めとする他の物質に変換された割合を示す転化率．そして，二つ目が，変換後の物質が目標生成物であるメタンに変換されている割合を示す選択率である．生成した合成メタンは再びガス燃料として利用するため，CO 転化率と CH_4 選択率は高いことが望まれる．加えて，メタネーションにおいて H_2O は，先の共電解リアクタでの未反応分だけでなく，式（5）に示すようにメタネーションの副生物として触媒周辺に常に存

在しており，共電解リアクタで得た CO を式（3）の水性ガスシフト反応によって CO_2 に戻してしまう．これによって，プロセスに入った CO_2 は有用な化学物質に変換されないままプロセスから排出されてしまう．そこで，本研究では触媒に求める三つ目の性能として，水蒸気が混入しても水性ガスシフト反応が発生しない，混入を許容する割合（耐水性）が高いこととした．

まとめると，下記三つの性能を有することが望まれる．

（1）CO 転化率が高いこと

（2）CH_4 選択率が高いこと

（3）水蒸気混入に対する許容割合（耐水性）が高いこと

従来メタネーション触媒においては，共沈法または含浸法で調整された Ni ベースの触媒が，比較的低コスト，高活性，メタンの選択性が高いため広く使用されている[9]．含浸法で調製される触媒の活性は，通常，担体の基本的な性質と調製方法に依存している．担体については SiO_2，ZrO_2，γAl_2O_3，CeO_2 などのさまざまな担体が検討されている[10]．しかしながら，これらの担体はその多孔質構造から H_2O を吸着しやすく，吸着すると触媒の活性サイトを覆い活性が低下する課題があるため，メタネーションリアクタの上流で H_2O をドレンなどで分離し取り除く必要がある．そこで，本研究では，一般にハイドロタルサイトとも呼ばれる層状複水酸化物（Layered Double Hydroxide: LDHs）の H_2O を既に含む構造に着目し検討をおこなった．LDHs は Fig. 3 に示すように二次元の層状の構造になっており[11]，調製可能な金属カチオン比，ホストとゲスト間で構成された層のさまざまな相互作用，高比表面積など，構造に高い多様性があることがよく知られている[12]．さらに，LDHs のそれぞれの層の間には H_2O の分子が含まれており，H_2O の吸着サイトは既に埋まっている状態であるため，新たに水蒸気が混入した際も吸着することなく撥水性を有し従来の担持触媒に比べて優位性を持つと考えた．また，LDHs の構造をとることで従来の Ni-γAl_2O_3 触媒（少量のニッケルイオンが Ni^{3+} の形でアルミナとの混合酸化物の形成をサポートする）よりも多くの還元可能な Ni 種（Ni^{2+} から Ni^0）を含む高分散の Ni ナノ粒子をはるかに多く含むことができるため[13]，反応サイトを増やし CO_2 転化率と CH_4 選択率を高めることができると考えた．このため，

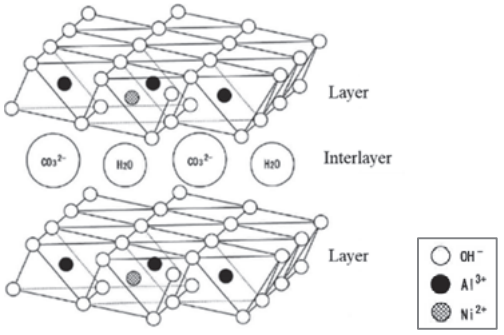


Fig. 3　LDHs structure model

LDHs は水素発生反応，光電気化学水酸化プロセスへの適用や機能性触媒としても期待されている[14]，[15]．

本研究では，従来手法の共沈法と含浸法で調製した触媒と，開発した Ni を活性金属とする LDHs 触媒を比較し，LDHs 触媒の性能と特徴およびシステムに与える効果を述べる．

4．実験方法

4.1. 触媒調製

4.1.1. Ni 共沈触媒の調製

Ni ベースの共沈触媒は，以下の手順によって調製した．$Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ を蒸留水に溶解させ，得られた溶液を Na_2CO_3 溶液（1 mol/L，室温）と一緒に 2 mL/ min のゆっくりとしたはやさでビーカーに滴下した．この際 80℃ で混合物の pH 値を 8.5 に保った．その後，沈殿物を室温で 24 時間放置し，続いて濾過および洗浄をおこない，沈殿物から残留 Na_2CO_3 を完全に除去した．次に，沈殿物を空気中 60℃ で 12 時間乾燥させた．最後に，そこから 2℃/min で昇温し，550℃ にて 4 時間保持して焼成した．

4.1.2. Ni 担持触媒の調製

Ni を含浸法によって担体に担持した触媒は，以下の手順によって調製した．市販の担体（SiO_2，γAl_2O_3，ZrO_2，CeO_2）を 550℃ で 4 時間焼成し表面の不純物成分を除去した後，調製した担体に湿潤含浸法で Ni を導入した．$Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ を脱イオン水に溶解し，担体に均一に含浸させた．それぞれの触媒は Ni の重量が全体に対し 20 wt% となるように調製した．続いて，得られた混合物を室温で 1 時間真空にさらし，その後空気中 60℃ で 12 時間乾燥させた．最後に，そこから 2℃/min で昇温し，550℃ にて 4 時間保持して焼成した．

4.1.3. NiAl-LDHs の調製

Ni ナノ粒子を高分散させ反応サイトを増やすために，NiAl-LDHs は尿素を用いた水熱合成法によって合成した．まず，2.18 g の $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ と 0.94 g の $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ を 60 ml の脱イオン水に一緒に溶解させた．これとは別に，6 g の尿素を 60 ml の脱イオン水に溶解した．それぞれの溶液を室温でかくはん速度 300 rpm で 30 分間かくはんした後に，両溶液を混合しさらに 5 分間かくはんした．その後，この混合物を二つの 100 ml のテフロンでコーティングしたステンレス鋼オートクレーブに密封し，3℃/min で昇温し，120℃ にて 12 時間保持した．この間はかくはんせず静置した．続いて調製した沈殿物を遠心分離法によって溶液の pH が中性になるまで毎回 200 ml の脱イオン水で洗浄した．得られた生成物を空気中 60℃ で 12 時間乾燥させた．最後に，乾燥した触媒は酸素との結合によって構造が崩れることを避けるため，窒素雰囲気中で 2℃/min で昇温し，500℃ にて 4 時間保持して焼成した．

4.2. 触媒のキャラクタリゼーション

4.2.1. 比表面積

調製した触媒の比表面積の測定には，Micromeritics 社製 3Flex 比表面積･多孔質物理吸着アナライザーを用いて N_2 物理吸着により測定した．測定に先立ち，すべてのサンプルは，真空下 250℃ で 10 時間，表面汚染物質を除去する前処理をおこなった．

4.2.2. X 線回折法による構造解析

調製した触媒の結晶構造を確認するため，株式会社リガク製の RINT 2400 システムの X 線回折装置を用いて X-Ray Diffraction（XRD）測定をおこなった．

4.3. 触媒活性評価

触媒活性評価は，Fig. 4 に示す内径 8 mm の固定床反応器で流通法にて実施した．反応管への触媒充填は以下の手順に沿っておこなった．最初に適切な量の石英ウールを充填し，次に 2 g の石英砂と 400 から 850 μm の粒径に調製した 0.25 g の触媒を混合したものを注ぎ，さらに反応中にガスを予熱するために 2 g のガラスビーズを追加し，最後に再び上面に石英ウールを充填した．

還元処理として反応の前に触媒を，H_2 を 40 ml/min で 8 時間，400℃ で還元した．各触媒の活性については 0.1 MPa，20 mL/min，H_2/CO = 3.0 で 8 時間，300℃ に維持した後に計測した．

生成したガスは，株式会社島津製作所製の熱伝導度型検出器（Thermal Conductivity Detector: TCD）GC-2014AT と，水素炎イオン化検出器（Flame Ionization Detector: FID）GC-2014AF を備えた三つのオンラインガスクロマトグラフによって検出した．TCD は上流で CO_2 を，下流では H_2 をそれぞれ計測しており，FID は CO および炭化水素を計測している．

なお，CO 転化率は式（6），CH_4 および CO_2 の選択率は式（7），（8），また CH_4 の収率は式（9）に基づいて算出した．式（6）の Ar は内部標準物質として使用している．ここで式（6）は CO を有用物に変換した割合であり，式（7）は変換された全炭化水素と CO_2 のうち CH_4 の割合を，式（8）は CO_2 の割合を示す．式（9）は反応物のうち目的生成物の CH_4 が得られた割合を示す．

$$CO\ conversion\ [\%] = \frac{Area\left(\frac{CO}{Ar}\right)^{in} - Area\left(\frac{CO}{Ar}\right)^{out}}{Area\left(\frac{CO}{Ar}\right)^{in}} \times 100 \quad (6)$$

$$CH_4\ selectivity\ [\%] = \frac{n\ (CH_4)}{n\ (Total\ hydrocarbon + CO_2)} \times 100 \quad (7)$$

$$CO_2\ selectivity\ [\%] = \frac{n\ (CO_2)}{n\ (Total\ hydrocarbon + CO_2)} \times 100 \quad (8)$$

$$CH_4\ yield\ [\%] = CO\ conversion \times CH_4\ selectivity \times 100 \quad (9)$$

n: [C-mol/h]

5．実験結果と考察

5.1. 比表面積，XRD 測定結果

調製した触媒の比表面積の結果を Fig. 5 に示す．NiAl-LDHs は，20 wt% Ni/SiO_2 より比表面積が低いが，それ以外の担体を用いた場合と比べると同等以上であった．

調製した NiAl-LDHs の XRD 結果を Fig. 6 に示す．37 degrees，43 degrees，62 degrees のピークの位置は LDHs 上の Ni の酸化物 NiO に帰属するものであり，ピークが明確にあることから Ni ベースの LDHS が調製できていることを示している．

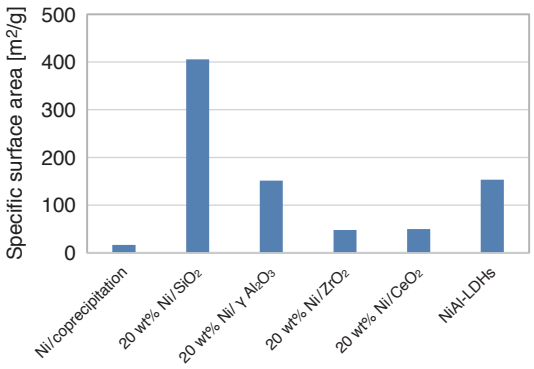


Fig. 5　Comparison of specific surface area

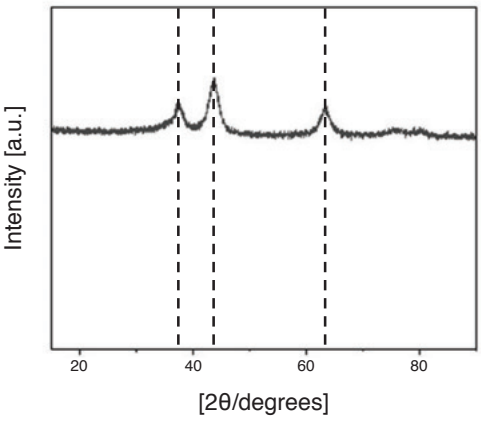


Fig. 6　XRD measurement result of NiAl-LDHs

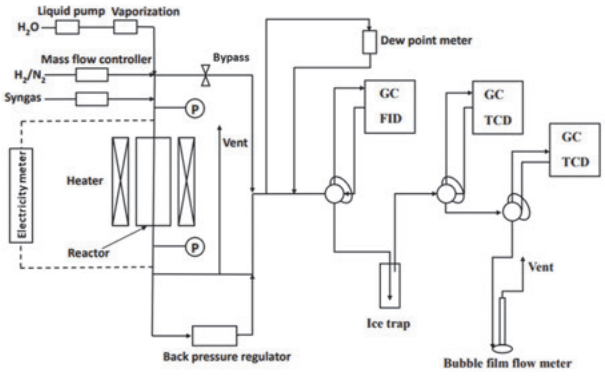


Fig. 4　Reaction devices diagram of fix-bed reactor

Table 1　Results of methane synthesis processes

Catalysts	CO conversion [%]	Selectivity [%]						CH_4 yield [%]
		CO_2	CH_4	C_2	C_3	C_4	C_{5+}	
Ni-coprecipitation	55.9	0	97	2.8	0.3	0	0	54.2
20 wt% Ni/SiO_2	99.5	2.9	93.7	2.9	0.4	0	0	93.2
20 wt% Ni/γAl_2O_3	92	0.4	87.9	7.4	3.3	0.8	0.2	80.9
20 wt% Ni/ZrO_2	82.2	0.1	89.7	7.1	2.5	0.4	0.1	73.7
20 wt% Ni/CeO_2	47	7	50.6	15.1	14.1	5.7	7.5	23.8
NiAl-LDHs	100	0.2	99.8	0	0	0	0	99.8

5.2. 触媒活性

Ni を用いた担体の異なる触媒と NiAl-LDHs の CO 転化率，選択率および収率の比較を Table 1 に示す．まず，NiAl-LDHs 以外では 20 wt% Ni/SiO_2 が他の触媒と比べて優れた活性を示し，CO 転化率 99.5%，CH_4 選択率 93.7%，収率 93.2% であった．ただし，CH_4 以外に CO_2 の生成も見られた．一方，NiAl-LDHs は，CO 転化率 100%，CH_4 選択率 99.8%，収率 99.8% となり最も高い値を示した．NiAl-LDHs は 20 wt% Ni/SiO_2 より比表面積が低いにも関わらず活性が高く，メタネーションに優れた触媒であることを示した．

5.3. 反応特性

NiAl-LDHs について，温度を変えて合成ガスのメタネーション特性を評価した．温度以外の反応条件は，触媒活性実験と同じ条件とした．各温度の結果を Fig. 7 に示す．温度が 250℃ 以下では CO 転化率，CH_4 選択率ともに低く，275℃ で CO 転化率は 100% に達し，CH_4 選択率は 300℃ で 100% に達した．一般にメタネーション反応では，Ni ベース触媒の場合，温度は 250 から 500℃ [10),12)]，圧力は 0.1 から数 MPa で高い反応性を示すことが多いが，発熱反応のため低温高圧が有利とされている．本研究で開発した NiAl-LDHs では，反応温度はそれらと同等の値を示す一方で，反応圧力では，0.1 MPa で上記結果が得られたことから低温低圧で高活性であり，加圧エネルギーを抑えられる有利な特性が確認できた．

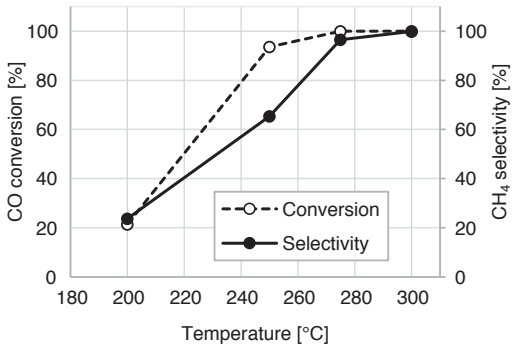


Fig. 7　Reaction characteristics of NiAl-LDHs

5.4. 原料ガスへの水混入時の影響

触媒活性実験と同じ条件に，合成ガス中に供給する水蒸気の割合は，式 (10) に基づいて算出した．

$$Water\ vapor\ proportion\ [\%] = \frac{FH_2O\ (gas)}{(FH_2O\ (gas) + F_{syngas})} \quad (10)$$

Fig. 8 に示すように，水蒸気の割合が増えるにしたがって比較対象である 20 wt% Ni/SiO_2 は CO 転化率が減少，水蒸気の割合が 20% の時には CO 転化率は 50% に低下した．一方，NiAl-LDHs の CO 転化率は，水蒸気の割合が 20% から 65% まで増加した場合でも 100% 近くを維持していた．また，LDHs の CH_4 選択率は，Fig. 9 に示すように

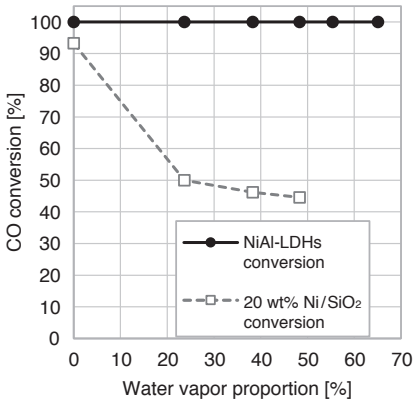


Fig. 8　Conversion of each catalyst with water vapor

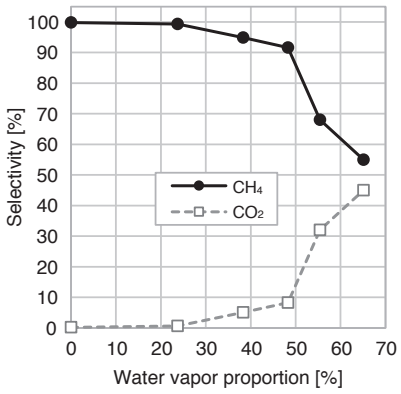


Fig. 9　Selectivity of NiAl-LDHs when mixed with water vapor

水蒸気の割合が 20% までは混入が無い場合と同等の選択率を示し，20% から徐々に低下しはじめ水蒸気の混入量が 65% に達したときには CH_4 選択率は 55% になった．CH_4 の選択率低下に伴い CO_2 の選択率が増加したことから，NiAl-LDHs が許容できる水分の割合を越えると水性ガスシフトが起きていたと考えられる．以上のことから，従来の担持触媒よりも耐水性を有することが示され，原料ガス中の水蒸気の許容割合は 20% であることがわかった．

本研究で開発した NiAl-LDHs の採用により，原料ガスに残留する水蒸気を除去する必要が無くなり，消費エネルギーを最大 58 kW 削減できる可能性がある．

6．まとめ

合成メタン製造プロセスの高効率化を目指し，合成ガスからメタンを生成する熱化学触媒として NiAl-LDHs を開発し以下の結果を得た．

（1）NiAl-LDHs は，0.1 MPa，300℃ の環境下で CO 転化率 100%，CH_4 選択率はほぼ 100% となり，比較触媒の中で同等の CO 転化率を示す 20 wt% Ni/SiO_2 に対しても CH_4 選択率および CH_4 収率で優位性を有していることがわかった．

（2）NiAl-LDHs と Ni ベースの比較触媒である 20 wt% Ni/SiO_2 の原料ガス中の水蒸気の許容割合を比較した結果，20 wt% Ni/SiO_2 は水蒸気が混入するとだたちに CO 転化率と CH_4 選択率が低下したのに対し，NiAl-LDHs は 20% まで低下せず活性を維持し，優れた耐水性を有することがわかった．

以上より，今回開発した NiAl-LDHs を用いることで，今後の高効率なメタン製造プロセスの構築に向けてメタネーションリアクタの上流の脱水工程の省エネルギー化や小型化によるプロセスの高効率化，プロセス費用の低減が期待できる．

参考文献

（1）資源エネルギー庁：令和５年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2024），第８章カーボンニュートラル実現に向けた水素・アンモニアの導入拡大，p. 252-254, (2024), https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2024/pdf/whitepaper2024_all.pdf,（参照 2025/01/13）

（2）資源エネルギー庁：第９回 メタネーション推進官民協議会，資料４－２（メタネーション取組マップ 2023），https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/009_04_02.pdf,（参照 2025/01/13）

（3）資源エネルギー庁：第 27 回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 ガス事業制度検討ワーキンググループ，資料３－１（合成メタン（e-methane）について），https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/gas_jigyo_wg/pdf/027_03_01.pdf,（参照 2025/01/13）

（4）毛里昌弘，柳澤和貴，牧美里，吉田潤平：カーボンリサイクルメタン合成を目的とした二酸化炭素と水蒸気の共電解反応条件の検討，Honda R&D Technical Review, Vol. 34, No. 1, p. 71-79

（5）島田寛之，山口十志明，荒木拓人，水澤竜也，森昌史，藤代芳伸：２．固体酸化物形電解セルを用いた共電解技術の開発，Electrochemistry，84 巻，８号，p. 611-615,（2016), doi: 10.5796/electrochemistry.84.611

（6）荒木拓人，水澤竜也：３．SOEC を用いた水蒸気電解システムの定常サイクル計算，Electrochemistry，84 巻，８号，p. 616-619,（2016），doi: 10.5796/electrochemistry.84.616

（7）松永健太郎，吉野正人，渡邉久夫：固体酸化物形電解セルを用いた水素製造システム及び電力貯蔵システム，東芝レビューVol. 71, No. 5, p. 41-45,（2016), https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2016/05/71_05pdf/b04.pdf,（参照 2025/01/13）

（8）水藤文健，永田陽平，荒木拓人，柳澤和貴，毛里昌弘，牧美里，吉田潤平：社会インフラ CO_2 源に残留する空気成分による SOEC 共電解システムエネルギー効率への影響，自動車技術会論文集，53 巻，５号，p. 973-978, (2022), doi: 10.11351/jsaeronbun.53.973

（9）Meng, F., Li, X., Li, M., Cui, X., Li, Z.: Catalytic performance of CO methanation over La-promoted Ni/Al_2O_3 catalyst in a slurry-bed reactor, Chemical Engineering Journal, Vol. 313, p. 1548-1555, (2017), doi: 10.1016/j.cej.2016.11.038

(10) Yang, X., Wang, X., Gao, G., Wendurima, Liu, E., Shi, Q., Zhang, J., Han, C., Wang, J., Lu, H., et al.: Nickel on a macro-mesoporous Al_2O_3@ZrO_2 core/shell nanocomposite as a novel catalyst for CO methanation, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, Issue 32, p. 13926-13937,（2013），doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.08.083

(11) 特開 2024-063277

(12) He, F., Zhuang, J., Lu, B., Liu, X., Zhang, J., Gu, F., Zhu, M., Xu, J., Zhong, Z., Xu, G., et al.: Ni-based catalysts derived from Ni-Zr-Al ternary hydrotalcites show outstanding catalytic properties for low-temperature CO_2 methanation, Applied Catalysis B:

Environmental, Vol. 293, Article 120218, (2021), doi: 10.1016/j.apcatb.2021.120218

(13) He, L., Lin, Q., Liu, Y., Huang, Y.: Unique catalysis of Ni-Al hydrotalcite derived catalyst in CO_2 methanation: cooperative effect between Ni nanoparticles and a basic support, Journal of Energy Chemistry, Vol. 23, Issued 5, p. 587-592, (2014), doi: 10.1016/S2095-4956(14)60144-3

(14) He, H., Xiao, J., Liu, Z., Yang, B., Wang, D., Peng, X., Zeng, L., Li, Z., Lei, L., Qiu, M., et al.: Boosting the hydrogen evolution of layered double hydroxide by optimizing the electronic structure and accelerating the water dissociation kinetics, Chemical Engineering Journal, Vol. 453, Part 1, Article 139751, (2023), doi: 10.1016/j.cej.2022.139751

(15) 森本和也：層状複水酸化物の合成とその機能性材料への応用, 岩石鉱物科学, 48 巻, 1 号, p. 46-50, (2019), doi: 10.2465/gkk.190130

■著　者■



米 田 英 昭



柳 澤 和 貴



飯 嶋 洋 平



吉 田 潤 平

Honda R&D Technical Review 編集委員会

編集長　須藤　　晶　統括機能センター
副編集長　北村英二郎　先進パワーユニット･エネルギー研究所
副編集長　鈴木　俊次　先進技術研究所

編集協力
本田技術研究所　材料研究センター 論文委員会
先進技術研究所 論文委員会
先進パワーユニット･エネルギー研究所
論文委員会

本田技研工業　二輪･パワープロダクツ 論文委員会
四輪開発本部 論文委員会

編集後記

Honda R&D Technical Review Vol.38 を最後までお読みいただき誠にありがとうございました．本誌の執筆にご協力いただいた著者の皆様，発行までサポートいただいた関係者の皆様，そして何度もの査読会議を経て完成に至ったことに心より感謝申し上げます．本当にお疲れ様でした．

私が本誌の査読に携わるようになって２年目になります．自分の専門分野とは異なる技術領域の論文や技術紹介が多く，しかも技術レベルも非常に高いため，内容の理解には毎回多くの時間を要しています．そのように内容を十分理解することで「よりわかりやすく 楽しく読めるように」と心がけて査読を行ってきました．もちろん論文委員や専門領域の方々も査読に関わっており，Honda R&D Technical Review は専門家にとっても読み応えがあり，異なる分野の方にも分かりやすい内容となっています．多くの方に興味を持って読んでいただけていると感じています．

また，私自身 Honda に入社して 30 年以上研究開発に携わってきましたが，常に「テスト結果の中に何か法則性がないか」を意識してきました．商品開発や研究開発の現場では，規模の大小や適用範囲の広狭はあれど，必ず何らかの法則が見つかるものです．それが性能向上，品質向上，効率向上などに結びついていると考えています．もしそのような法則を見つけ，より広い範囲で成立すると思われた際には，ぜひ Honda R&D Technical Review への投稿をご検討ください．多少時間はかかるかもしれませんが，それ以上の達成感を味わえるはずです．

これからも多くの研究成果が集まり，いつの日か「ノーベル賞を受賞した技術の起点が Honda R&D Technical Review だった」と言われる日が来ることを願っています．

（北村　徹）

Honda R&D Technical Review
©2026 株式会社 本田技術研究所（禁無断転載）

2026 年３月１日　　Vol.38

発行所　株式会社 本田技術研究所

発行人　大　津　啓　司

編集人　Honda R&D Technical Review 編集委員会

事務局　〒321-3393 栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢 4630 番地
株式会社 本田技術研究所 統括機能センター
企画室　技術訴求･渉外ブロック　論文事務局
TEL：028-677-3311（代表）

印刷所　〒351-0024 埼玉県朝霞市泉水 2-8-21
協永堂印刷株式会社

Honda R&D Co., Ltd.