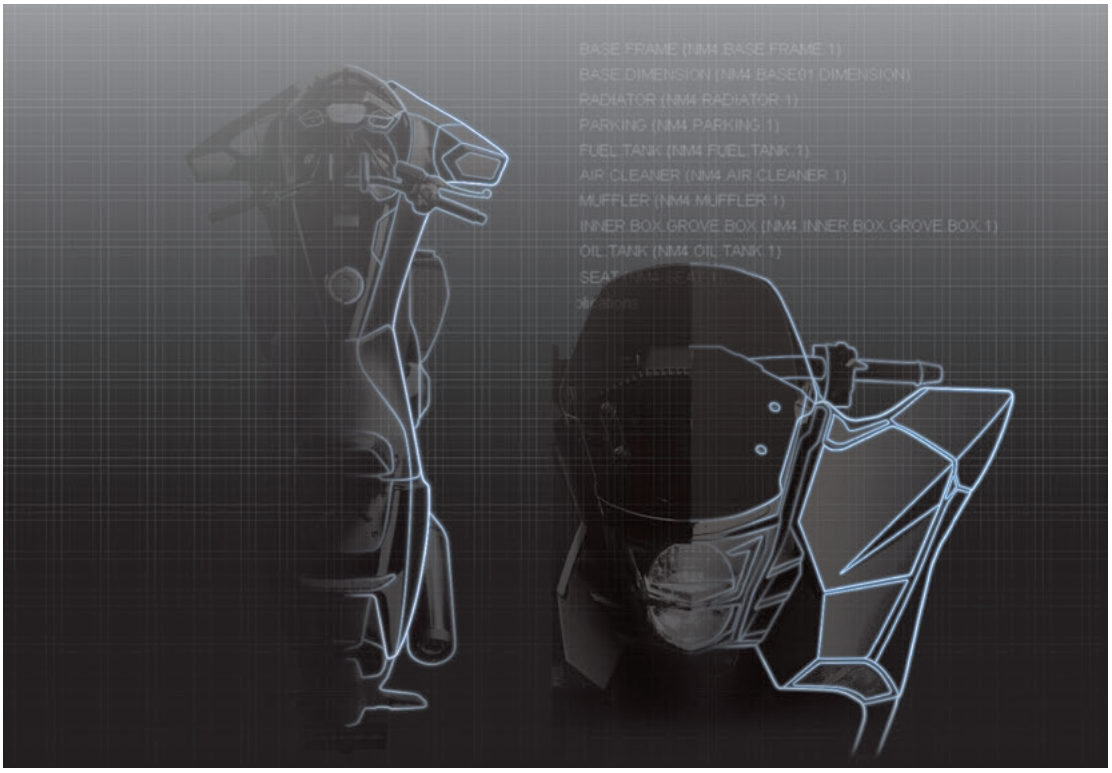
ISSN 0915-3918

Honda R&D

Technical Review
Vol.27 No.1



April 2015



表紙の言葉

Honda は, より良い製品をお客様に提供するために, チャレンジングな開発を続けてまいりました.

表紙をデザインする上で, まず開発者の「思い」を感じていただきたいと考えました. そこで本号で取り上げられている製品をモチーフに, 「開発の過程を想像できる表現」を意識してまとめてみました.



二輪R&Dセンター
中平 翔太



二輪R&Dセンター
伊藤 龍

Technical Review
Vol.27 No.1

April
2015

Honda R&D

目　次

技術紹介

◇ NM4 のコンセプトおよびスタイリングデザイン ..... 西本太郎 1

◇ 二輪車における前部デザインの統一, 継続, 進化によるアイデンティティ構築 ..... 鈴木祥高･三木真洋 8

◇ ニュークロスオーバ VEZEL のデザイン ..... 山本洋幸 13

◇ フューエルインジェクションエンジン搭載インバータ発電機の開発 ..... 齋藤　茂･小野寺泰洋
橋爪　崇･布川剛史 24

◇ CFD を用いた高効率水ポンプの開発 ..... 秋山直寛･紺地隆秀 30

◇ UNI-CUB の開発 ..... 矢田　渉･達富由樹･長谷川　誠 36

◇ SPORT HYBRID SH-AWD 用後輪駆動２モータの振動低減 ..... 矢﨑　学･青木忠信 44

◇ 車載 ECU のドライブレコーダ機能の拡張とレコード情報収集手法 ..... 大渕寛文 53

◇ 廉価 LED 前照灯システムの開発 ..... 土屋洋介･松﨑哲平
竹繁徹朗･小口　敢 59

◇ 位相制御式レギュレート レクチファイアを用いた ACG の開発 ..... 薗田　豊･小野和彦
尾辻美紅･大内勝博 67

◇ 電動カートの利用が高齢者の QOL に与える影響に関する実証実験 ..... 矢口忠博･増渕義則･山村　誠
仲本　剛･川島英敏 72

論文

◇ 集材時の負担を低減する技術の研究 ..... 竹村佳也･山岡洋斗
松下右京･川上智弘 79

◇ Particles Wear-Out Behavior of Reciprocating Engine Crankshaft During the Initial Running-in Operation
松本謙司 89

◇ 燃料電池用結晶面制御 PtNi ナノ粒子触媒の合成とセル発電性能の評価 ..... 坂本良悟 96

◇ 燃料電池運転時におけるカソード面内酸素分圧分布の可視化計測 ..... 豊田将平･岩澤　力 104

◇ 液封マウント振動伝達予測手法 ..... 深澤将弘･村尾剛史･雲丹亀真剛 111

◇ 操縦安定性に関するヒューマンダイナミクス解析へ向けた道具の身体性についての基礎的研究
谷田公二 117

CONTENTS

Introduction of new technologies

◇ Concept and Styling Design of the NM4 . . . . . Taro NISHIMOTO 1

◇ Defining the Identities of Motorcycle Model Lineages by Converging, Inheriting and Enhancing the Vehicle Frontal Styling . . . . . Yoshitaka SUZUKI・Masahiro MIKI 8

◇ Styling Design of New Crossover VEZEL . . . . . Hiroyuki YAMAMOTO 13

◇ Development of Inverter Generator Equipped with Fuel Injection Engine . . . . . Shigeru SAITO・Taiyo ONODERA Takashi HASHIZUME・Takeshi FUKAWA 24

◇ Development of High-Efficiency Water Pump Using CFD Simulation . . . . . Naohiro AKIYAMA・Takahide KONCHI 30

◇ Development of UNI-CUB . . . . . Wataru YADA・Yoshiki TATSUTOMI・Makoto HASEGAWA 36

◇ Vibration Reduction of Two Motors of Rear Wheel Drive for SPORT HYBRID SH-AWD . . . . . Manabu YAZAKI・Tadanobu AOKI 44

◇ Extension of Drive Recorder Function of In-vehicle ECU and Record Information Collection Technique . . . . . Hirofumi OHBUCHI 53

◇ Development of Headlight System with Cost Advantageous Design Using Light Emitting Diodes . . . . . Yosuke TSUCHIYA・Teppei MATSUZAKI Tetsuo TAKESHIGE・Tsuyoshi OGUCHI 59

◇ Development of ACG Using Regulator Rectifier with Phase Control . . . . . Yutaka SONODA・Kazuhiko ONO Miku OTSUJI・Katsuhiro OUCHI 67

◇ Actual Proof Experiment of Electric Wheelchair “Monpal” for Enhancing Elderly QOL . . . . . Tadahiro YAGUCHI・Yoshinori MASUBUCHI・Makoto YAMAMURA Go NAKAMOTO・Hidetoshi KAWASHIMA 72

Technical papers

◇ Research of the Technology for Reducing the Load of Yarding . . . . . Yoshinari TAKEMURA・Hiroto YAMAOKA Ukyo MATSUSHITA・Tomohiro KAWAKAMI 79

◇ Particles Wear-Out Behavior of Reciprocating Engine Crankshaft During the Initial Running-in Operation . . . . . Kenji MATSUMOTO 89

◇ Synthesis of Facet-controlled PtNi Nanoparticles and Evaluation of Performance in PEM Fuel Cell . . . . . Ryogo SAKAMOTO 96

◇ In-plane Visualization of Oxygen Partial Pressure Distribution on Cathode Side during Fuel Cell Operation . . . . . Shohei TOYOTA・Chikara IWASAWA 104

◇ Prediction Method for Vibration Transmission of Hydraulic Engine Mount . . . . . Masahiro FUKAZAWA・Tsuyoshi MURAO・Shingo UNIGAME 111

◇ A Fundamental Study of Tool Embodiment for Human Dynamic Analysis Relating to Handling and Stability of Driving . . . . . Koji TANIDA 117

NM4 のコンセプトおよびスタイリングデザイン

Concept and Styling Design of the NM4

西　本　太　郎*
Taro NISHIMOTO

要　旨

年々若者の二輪車への関心が低下する市場環境の中で，こうした若い世代をターゲットとした新しいモデルの検討が求められていた．これに応えるべく，従来のモータサイクルのどのカテゴリにも当てはまらない，新しい世界観を表現することをねらったモデルの開発に着手した．デザインの基本構成としてロー＆ロングのフォルムと定め，また，スタイリングのキーワードとして，「フロントマッシブスタイリング」，「コックピットポジション」の二つを据えた．これらのデザイン的な要素を実現するために，車両に求められる他の要件を考慮しつつ，その具体的手段を設計領域にも踏み込みながら検討した．これらのステップを経て量産されたモデル NM4 の，新車発表に対する Twitter のツイート件数から，既存のユーザではない人々に対して認知を広めるという，所期のねらいが達成されていることが確認された．

ABSTRACT

One of the issues in motorcycle business is that young people's interest in motorcycles is declining year by year. Accordingly, there has been a need to consider a new model targeting such young generations. To respond this need, Honda has started to create a motorcycle design category that has exceptional features and does not belong to any of the conventional motorcycle categories to explore new motorcycle market. The basic features of the design structure was decided as "Low & Long," and the descriptions of "Massive front styling" and "Cockpit position" were coined as two keywords. Actual methods to materialize these design concepts in a real motorcycle were investigated by having serious involvement in structural design work as well to take practical vehicle requirements into account.

Following this process, the model of the NM4 was brought into mass-production and it was confirmed, through the numbers appeared in the responses on Twitter, that our objective to get a wider recognition among customers not currently using motorcycles was achieved.

1．はじめに

大型二輪車を取り巻く環境を振り返ってみると，90 年代より先進国における大型二輪車市場は拡大を続けてきた．しかし，2008 年のリーマンショックによって，先進国を中心とする市場は縮小傾向を示し，多数のメーカが 100 万台以下の限られた市場で競い合う状況となった (Fig. 1)．

こうした市場においては，絶対的な数値性能よりも個々のライフスタイルに重きを置き，嗜好性を重視するユーザが増加し，大型二輪車に対するニーズの多様化が見られるようになった．同時に，若者の二輪車に対する関心が低下し，年々ユーザの平均年齢が上がり続けていた．従って，

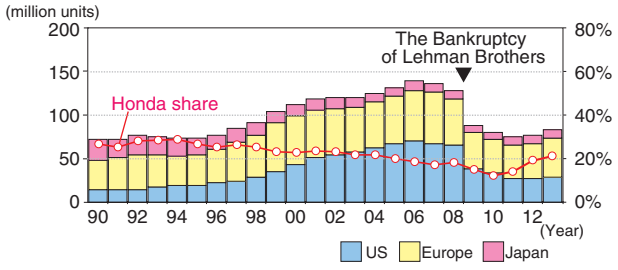


Fig. 1　Sales of large motorcycles in Japan, Europe and US (not including ATVs and off-road motorcycles) (from Honda in-house survey)

＊ THINK 研究室

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_1

将来的には大型二輪車に憧れ楽しんでくれるユーザが，大幅に減少することが避けられない状況になってきていた．

このような背景から，モータサイクルへの関心が薄い若い世代をターゲットとする新しいモデルの検討が必要となり，NM4 の開発がスタートした．

2．開発コンセプト

新しい顧客の開拓を目的とすることから，まず，モータサイクルにまったく興味を持っていない人々にも認知されることが重要と考えた．従来の二輪車ユーザに共感されることよりも，モータサイクルに関心の薄い人々にも一目で認知されるスタイリングデザイン，従来のどのモータサイクルカテゴリにも当てはまらない世界観を表現することを最優先事項とした．同時に Honda 独自の技術を活かすことや，初めてモータサイクルに乗るユーザにも抵抗なく楽しめるハードルの低さも守るべき要件とした．

ハードルの低さを求めた背景には，初心者にとっての乗りやすさを追求しただけでなく，これまでとは異なるモータサイクルの価値を実現するという目的があった．そのために，ライダに高いライディングテクニックを求めず，また，スピード，パワーといった絶対的な数値性能を優先しない車造りを目指した．

新たな世界観の表現と初心者に対するハードルの低さを実現することで，新しいユーザに対するモータサイクルの世界への入り口を増やし，将来的にはモータサイクルのファンになってもらいたいと考えた．

3．スタイリング

3.1. 基本構成の決定

まず，デザインの方向性を決定するにあたり，どのようなモビリティが一般的な人々に魅力的に映るのかを検討した．現在の 20 代から 30 代の世代にとって，過去から現在まで広く認知され，かつ魅力的に感ずるモビリティの例を収集した．現実のモビリティだけではなく，映画やアニメに登場するモビリティからも幅広く例を集めた．また，さらにモビリティ以外のプロダクトやアパレルなど，他業界についても，昨今において魅力的に感じられているものを集めた．

それらより，モビリティにおいて，近未来的なスタイリング，ロー＆ロングのフォルム，太いタイヤサイズ，低シート高といった要素が，新しさを感じさせ，かつ普遍的な魅力要素となっていることがわかった．従ってこれらを，基本プロポーションにおいて押さえるべきポイントと決定した (Fig. 2)．

外観面のスタイリングデザインにおいては，モータサイクルのデザインに多用される「勢い」「スピード感」といった要素を重視するのではなく，スマートフォンや家電といったプロダクトに多く採用されている，すっきりとした無機的な表現を加えようと考えた．

ハードルの低さと Honda の独自技術を活かすという観点で，デュアルクラッチトランスミッション (DCT) 搭載エンジンの採用を決定した．乗りやすさ，扱いやすさとモータサイクルらしいフィーリングを同時に実現するためである．また，バータイプのハンドルや，筒型のマフラ，足まわりの部品など，あくまでモータサイクルとしての基本的な要素や構成も見せることで，モータサイクルらしさを意識させ，カスタマイズによる発展性も残すこととした．さらに，現実的な使い勝手を考慮した際のユーティリティスペースの確保や，追加のユーティリティスペースを備えた派生バージョンの必要性なども検討した．

3.2. スタイリングの方向性とデザイン要素

NM4 のスタイリングデザインは，従来のどのモータサイクルカテゴリにも当てはまらない世界感の演出をねらったものである．さまざまな方向性の中で，映画やアニメ，ゲームといったデジタルカルチャに当たり前のように囲まれて育った若い世代を意識した，近未来感あるデザインを目指した．新規性を表現する上で，ロー＆ロングのプロポーションを基本としながら，達成するべきデザイン要素として，「フロントマッシブスタイリング」「コクピットポジション」の二つをスタイリングキーワードとして設定した．

3.2.1. フロントマッシブスタイリング

これは全体のシルエットに関するキーワードである．大胆な面構成や大きく左右に張り出したフロントフェアリングとそこにビルトインされたサイドミラーなど，塊感のあるフロントに対して，低く小さく絞り込んだリヤフォルムとした．それにより，迫力や押し出し感の演出と共に，オリジナリティあるシルエットを形成する．また，後方にいくほど低く下がるリヤカウルは，絶対性能を重視するスポーツモデルなどの跳ね上がったリヤカウルと対極の形となる．それはスポーツカテゴリと異なる価値観を持つコンセプトの表現を兼ねている．

3.2.2. コクピットポジション

熟練者でなくともリラックスして乗車できるよう，シー

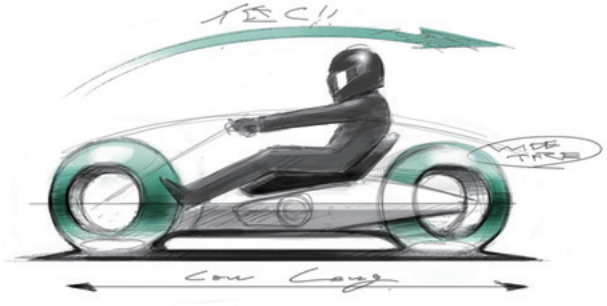


Fig. 2　Conceptual proportions of exterior design

ト高を下げ，足を投げ出しながら上半身を預けることのできるバックレストとフロアステップを装備した．また，通常のモータサイクルでは見下ろす形となることの多いインストルメントパネルをライダの前方に配置した．これらによって，既存のモータサイクルとは大きく異なる，コックピットに潜り込んだようなイメージをユーザに感じさせることをねらった．さらにピリオンシートを兼ねたバックレストを装備することで，パーソナル性を強く主張すると同時に，視覚的にだけではなく，動的な乗り味においても新しさを感じさせることもねらいとした．

また，新規性を表現しながらも，人々の身の回りにあるコンシューマプロダクツのように，ある程度幅広く共感を得られるようなデザインを両立させたいと考えた．そのため，シンプルに処理した外観面とキャラクタラインを用いて，個性的ではあるが複雑になりすぎないデザインとした．若い世代の感覚を取り込みながらも，ヴァーチャルな世界のモノではなく，あくまで現実世界の乗り物らしさや機能性を欠かしたくなかったためである．

上記の要素を守りながら，ラフなアイデアスケッチを描き，具体的なレイアウトや仕様装備に落とし込んでいった．同時に，スケッチに対するエンジニアの技術的見解や意見を集め，それらをスケッチにフィードバックするというプロセスを繰り返すことで現実味のあるデザインとしていった (Fig. 3, Fig. 4)．



Fig. 3　Design sketch of side view



Fig. 4　Design sketch of front view

3.3. スタイリング実現の課題と解決手法

新規性のあるスタイリングデザインと同時に，ハードルの低さを両立させる上での課題とその解決手法を以下に述べる．

3.3.1. ロー＆ロングなフォルムと適度なキャスタ角の両立

ロー＆ロングなフォルムの実現にあたって，スタイリッシュで迫力あるプロポーションを成立させるためには，フロントタイヤは極力前方に出すことが望ましい．そのためにはキャスタ角を大きく寝かせる必要があった．通常キャスタ角が寝ていると，自然で素直なハンドリングは得られにくくなる傾向にある．しかし，モータサイクルの初心者をターゲットとする NM4 では，素直なハンドリングは欠かせない要素である．ロー＆ロングなフォルムとしながら，素直なハンドリングを成立させるデザインのバランスが課題となった．

この課題に対し，設計担当と共にデザインスケッチを作成し，極力キャスタ角を寝かせずにバランスの取れるフロントタイヤとヘッドパイプの位置を決定した．最終的に 33° に寝かしたキャスタ角と，スラント角 4° を合わせて 37° のフォーク角を設定し，トレール量を最適化することで成立を図った．また，フロントフェアリングをフロントフォークにかぶせるようにデザイン処理することで，視覚的にフロントタイヤとボデーの一体感を強調し，より低く，より長く見えるシルエットを演出している．

3.3.2. 低シート高の実現

独特のプロポーションと安心感ある足つき性を両立する，Honda の大型モータサイクルで最も低い 650 mm というシート高を目標としたが，そのためのレイアウトの実現が課題となった．

まず，シート下に集中することの多い電装部品のレイアウトを見直し，可能な限り他所に移動させた．さらに丸型鋼管のシートレールを低位置かつ狭いピッチで配置した．同時に，限界まで下げたシート高でありながら自然な着座位置とするために，シート付近の簡易モデルを製作し確認をおこなった (Fig. 5)．それにより，シート形状やタンク形



Fig. 5　Simplified mock-up model

状などを調整した.

これらにより, シートクッション厚を維持することで十分な乗り心地を確保しつつ, 上記目標のシート高を実現した.

3.3.3. リヤカウルとリヤタイヤのクリアランス

非常に低い位置にあるリヤカウルとリヤタイヤのレイアウトの成立性に課題を抱えていた. ロー&ロングなプロポーションとフロントマッシブスタイリングを両立するには, リヤカウルを低く配置し, かつコンパクトにする必要性がある. しかし, 太いリヤタイヤで十分なリヤサスペンションストローク量を確保するには, リヤタイヤ周辺に大きなクリアランスが必要となる. そのため, リヤカウルを低くコンパクトにすることが難しい.

何度もレイアウトとスケッチを繰り返し, デザインと機能の最適なバランスを目指した.

リヤサスペンションに, プロリンクサスペンションとHonda Multi-Action System(H.M.A.S)ダンパと, 軽量で形状自由度の高いアルミ中空ファインダイカスト製法によるスイングアームを組み合わせ採用した. それにより, 最小限のサスペンションストロークで, 乗り心地の良さと優れた車体安定性を確保し, リヤタイヤの太さを強調するコンパクトなリヤカウルデザインを実現した.

3.3.4. ユーティリティスペースの確保

幅広いユーザの利便性を考え, ユーティリティスペースを確保する必要があった.

フロントマッシブスタイリングから生まれるスペースを活用し, ユーティリティスペースをフロントフェアリング内に備えた. 使い勝手の良さを提供すると同時に, 迫力あるフロントデザインによる新規性の表現とウインドプロテクションの向上を図っている.

3.3.5. ビルトインミラーのレイアウト

新規性の表現に欠かせない重要な要素の一つがビルトインミラーである. しかし, 十分な視認性を確保するミラーのレイアウトは, スケッチやコンピュータ上での検討だけで決定することは難しい.

コンピュータシミュレーションでのレイアウトを繰り返すことによりおおよその位置を求め, 最終的には簡易プロトタイプモデルでの視認性確認をおこない, 最適なレイアウトを決定した. このミラーの配置はハンドルを握る手へのウインドプロテクションも考慮したレイアウトをとっており, ライダの快適性向上にも寄与している (Fig. 5).

4. プロトタイプモデル

前述のプロセスを経て完成したスタイリングスケッチをベースに, 実際に走行も可能なプロトタイプモデルを製作した.

リヤカウルサイドにユーティリティスペースを備えたバージョンも製作した. ユーティリティスペースは, 一般的な取り外しのできるタイプではなく, あえてボデーと一体感のある脱着できないタイプとした. それにより, スタンダードバージョンとはまったく違った個性を発揮するデザインとした.

完成したプロトタイプモデルを Fig. 6 に示す.

プロトタイプモデルの試乗により, 我々の目指した, 見た目だけではない新しさや乗りやすさが表現できているかどうかを確認した. その試乗によって, バックレストにもたれて操縦するというコクピットポジションとDCT搭載エンジンの組合せが, 想像以上に自然かつ新しい乗り味を生み出すことが確認できた. また, 左右のビルトインミラーとインストルメントパネルがライダの前方に横一直線に並ぶ構成が, コーナリングの際にライダに車体のリーンを非常に強く感じさせる視覚的効果を生み出し, 独特の操る楽しさを感じさせることもわかった.



Fig. 6 Prototype model

5. 量産モデル開発への移行

プロトタイプによる基本的な乗り味の検証を経て, 開発ステージを量産モデルの開発に移行した.

更なる新規性の表現と乗りやすさの実現を目指し, 仕様の変更, 熟成をおこない, 量産モデルが完成した (Fig. 7).

新たに加えた仕様について以下に述べる.

5.1. 自動可変色メータ

インストルメントパネルには, 気温計, 燃費計, 時計などを装備した. 通常のメータ機能に加え, 起動時に発光リングが脈動するように点滅をする演出を追加した. これは単に視覚デザイン的なものではなく, ユーザにモータサイクルとの一体感を感じさせる演出となっている. さらに, バックライトと発光リングの色の変化によりDCTの走行モードを表現する, 自動可変色メータを採用した (Fig. 8). バックライトおよび発光リングの色は, ユーザの好みに合わせて 25 色の中から任意の色調に固定設定することもできる (Fig. 9).



Fig. 7　Mass production model of the NM4-01



Fig. 8　Instrument panel

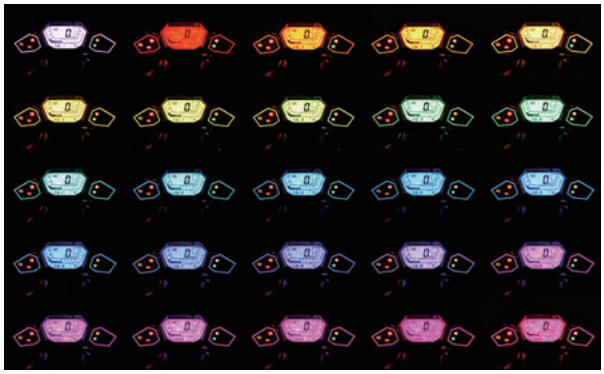


Fig. 9　25 meter color variations

5.2. 起立式ピリオンシート調整機構

バックレストを兼ねる起立式ピリオンシートは，前後に４段階，角度を３段階に切り替えられる構造とした．それにより，幅広いユーザが最適なライディングポジションを選択できるようになり，より快適なライディングが可能となった (Fig. 10)．

5.3. エンボス形状によるモデルネーム表示

スマートフォンや家電といったプロダクトをイメージし，モデルネームをエンボス形状によってシンプルに表現した (Fig. 11)．

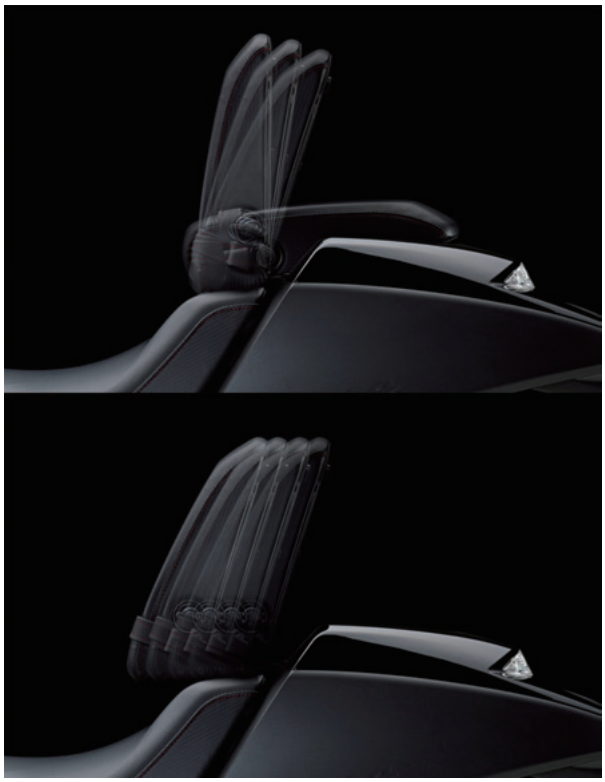


Fig. 10　Upright positionable pillion (4 angular positions including 3 upright positions with longitudinal adjuster)



Fig. 11　Embossed emblem of the model name

5.4. ユーティリティスペース

左右のフロントフェアリング内にユーティリティスペースを備えた．左側にはロック機構や 12 V 電源出力ソケットを追加し，充実を図った (Fig. 12)．

さらに，リヤカウルサイドにユーティリティスペースを備えたバージョンを設定した．ユーティリティスペースは，一般的な取り外しのできるタイプではなく，あえてボデーと一体感のある脱着できないタイプとした．それにより，スタンダードバージョンとはまったく違った個性を発揮するデザインとした (Fig. 13)．



Fig. 12 Front utility space (Left side) (Shown in the photograph is the model for Japanese market)





Fig. 13 The NM4-02

6．発売後の反応

NM4 は 2014 年の大阪モーターサイクルショーで発表された．調査 (自社調べ) の結果，広報発表日の Twitter でのツイート件数 1858 件，広報発表日から 10 日間の累計は 4061 件と，事前の告知をおこなっていないにもかかわらず，非常に高い関心を得ることができた (Fig. 14)．

年代別では，男性は特に 20 代後半，女性は 30 代後半からの関心が高かった (Fig. 15)．

また，リツイートの発信元はバイク業界以外や個人からの波及が目立ち，既存のモータサイクルとは異なる幅広い人々の話題になっていることがわかった．

デザインについても，好き，嫌いは明確に分かれるが，一定数の人々からは非常に好評を得る結果となった．このような評価がすぐに販売に結びつくものではないが，既存のユーザではない人々に対して認知を広めるという，所期のねらいが達成されていることが確認された．

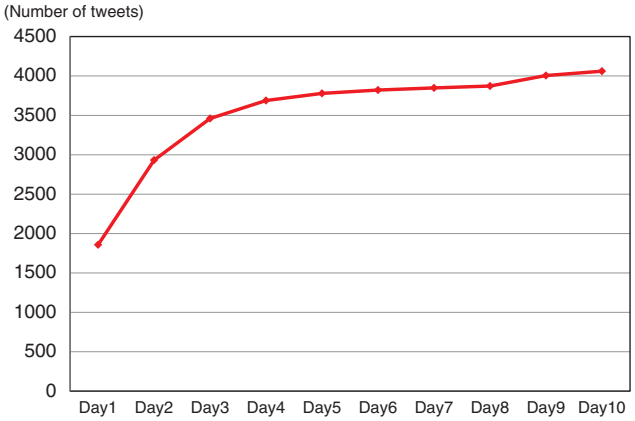


Fig. 14 Cumulative number of tweets after the announcements from public relations (from Honda in-house survey)

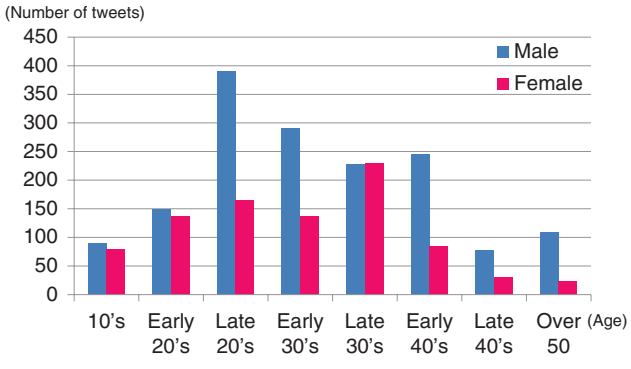


Fig. 15 Tweets number of in another age/gender (from Honda in-house survey)

7．まとめ

NM4 は近未来的なスタイリング，ロー＆ロングのフォルム，太いタイヤサイズ，低シート高といった構成要素とハードルの低さによって，一目で認知されるスタイリングデザインと従来のどのモータサイクルカテゴリにも当てはまらない世界観を創出した．オリジナリティあるシルエットを形成するフロントマッシブスタイリングと，視覚的にだけではなく，動的な乗り味においても新しさを感じさせるコクピットポジションによって新規性を表現することを実現した．

NM4 が新規顧客層開拓と言う開発の目的に向けての第一歩となることを願う．

■著　者■



西 本 太 郎

二輪車における前部デザインの統一，継続，進化によるアイデンティティ構築

Defining the Identities of Motorcycle Model Lineages by Converging, Inheriting and Enhancing the Vehicle Frontal Styling

鈴 木 祥 高* 三 木 真 洋*
Yoshitaka SUZUKI Masahiro MIKI

要　旨

Hondaは二輪車において，各時代の最新技術を投入し，常に新しい価値観を創造するためにデザインも大きく進化させてきた．しかし，変化する市場の要求に応えるために，一部の機種において，これまで継承されてきた車名シリーズが持つイメージとは異なる前部デザインが適用された．これにより継続されてきたアイデンティティが弱まり，お客様の期待にそぐわないという状況が生じた．その解決のために，同一車名シリーズを象徴する前部デザイン形状を定義し，技術進化と共に継続することとした．そして「統一，継続，進化」という三つのキーワードを定めることで，今後の二輪車前部デザインにおけるガイドラインを確立した．

ABSTRACT

In the development of motorcycles, Honda has been implementing the latest technologies. At the same time, the exterior designs have been kept evolving constantly to create new values. Meanwhile, to respond to the changing demands from the markets, a different vehicle front-design was sometimes adopted even though it was not fitting to the symbolic representation inherited through the specific model for generations. Such designing practices eventually diluted the succeeded identity resulting in failing to live up to customer expectations. To solve this, the issue of design identity was repeatedly discussed. The discussion was concluded that it is important to define a key feature of a vehicle front design that symbolizes a series of models having the same product name. Moreover, that design definition should be inherited while incorporating advanced technologies in time. To realize that, we delineated the direction by three key words: “convergence, inheritance and enhancement” as the guidelines for the design of a vehicle front. These guidelines were practically implemented and contributed to establishing a valuable principle of exterior design for our motorcycles.

1．まえがき

Hondaは創立以来，先進，独創の技術をもって世界各地のさまざまなニーズに応える製品を生み出しお客様へ提供してきた．二輪車においても，モデルチェンジごとに各時代の最新技術を投入し，常に新しい価値観を創造するためにデザインを大きく進化させた．そうすることでCB，VFRなどの車名シリーズの歴史を築いてきた．そのような中，個々のシリーズが持つコンセプトを表現するため，「VFRといえばこの顔である」とお客様と共有できるような前部デザインを心がけていた．一方，二輪車ビジネスの世界展開が拡大することで，同一車種でありながら先進国と進展国のユーザを同時にターゲットとしたモデルも増えつつある．しかし，異なる市場においては同一車種であっても異なるデザインが求められる．こうした市場の要求に応えるために，一部の機種において，車名シリーズと異なるイメージを持つ前部デザインが適用された．これによりシリーズごとに継続されてきたアイデンティティが弱まり，販売地域によってはお客様の期待にそぐわないという状況が生じた．この状況の解決のため，CB，VFRなどのデザインの歴史と現状を検証し，アイデンティティとして継続すべき要素について議論を重ねた．その結果として，同

＊二輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_2

一の車名シリーズを象徴する前部デザイン形状を定義した上で統一し，技術進化と共に数世代にわたり継続することが重要であるという結論に至った．この「統一，継続，進化」という三つのキーワードを前部デザイン決定のためのガイドラインにすることによって，お客様の期待に応えられる前部デザインを長期的に提供できると考えた．この考えに基づき，車名シリーズごとのヘッドライト周りの統一感を表現するための基本形状を定義した．一方，長期的にデザインが陳腐化するのを防ぐために，最新技術の導入も考慮に入れた．新技術の例として，デザイン表現に利用可能となってきたLight Emitting Diode(LED)による照光技術がある．これをヘッドライトやラインの表現に用いることにより前部デザインの自由度が増した．ガイドラインの実施例として2010年モデルVFR1200FのX字形状を有する特徴を継承した2014年モデルVFR800Fがある．このモデルにおいてLED照光技術が活用された．以下に，ガイドラインの内容と実施例の詳細について述べる．

2．ガイドラインの策定

車名シリーズと異なるイメージを持つ前部デザインが適用されたため，継続されてきたアイデンティティが弱まった．この状況の解決のため，デザインの歴史と現状を検証した上で，「統一，継続，進化」をキーワードとしたガイドラインを作成した．それぞれのキーワードの考え方について述べる．

2.1. 統一

顧客調査結果(自社調べ)によって，お客様がバイクを購入する際に前部デザインを重視することが分かっていた．丸山らが述べているように[(1)]，人間は顔に似た図形に対して高い感受性を持つことが確認されている．このため，グループごとに統一された前部デザインを適用することで，そのグループに属したバイクは共通した性格や特徴を持っているというイメージをお客様に想起させることが可能になる．これらを参考に，Fig. 1に示すようにシリーズごとのヘッドライト周りの統一感を表現するための基本形状を定義した．それぞれの形状は，新しく提案されたコンセプトモデルや，長期にわたりアイデンティティとして認知された形状に含まれる要素を基本としている．具体的には，VFRシリーズには2008年発表のコンセプトモデルをベースにしたX字形状，Goldwingを頂点とするGLシリーズには大陸的雄大さを表現する水平基調のウイングライン，CBシリーズには伝統を継承するトラディショナルな形状，CBRシリーズには鋭い走りをイメージさせる薄くコンパクトなシャローアイとした．統一の考え方はあくまでも基本形状の提示であり，デザイナの創造性を規制するためのものではない．各シリーズのアイデンティティを理解した上で，シリーズとして統一感を表現できる範囲で柔軟な対応を可能とするものである．

2.2. 継続

ブランドイメージ同様，車名のイメージを定着させるために，統一されたデザインを継続することとした．各シリーズの前部デザインは数世代にわたり継続されることでHondaとお客様との間でアイデンティティとして共有され定着してきた．この認識を確認するために，過去の機種を担当したデザイナに聞き取りをしたところ少なからず前モデルが持つ印象や基本形状を前部デザインに取り入れることを意識していた，とのコメントが得られた．このことからHondaは長い歴史を持つ車名シリーズであるCBやVFRなどにおいてその車名が持つ性格を表現する顔づくりを，継続性を意識しながら実施してきたといえる．一例として，ブランドイメージが定着しているといわれる欧州プレミアム四輪メーカではヘッドライトを含む前部デザインのアイデンティティを長期にわたり大きく変化させていない．このことは，メーカ自身が成熟した社会において何をすべきかを理解し，また顧客もその理念に共感している

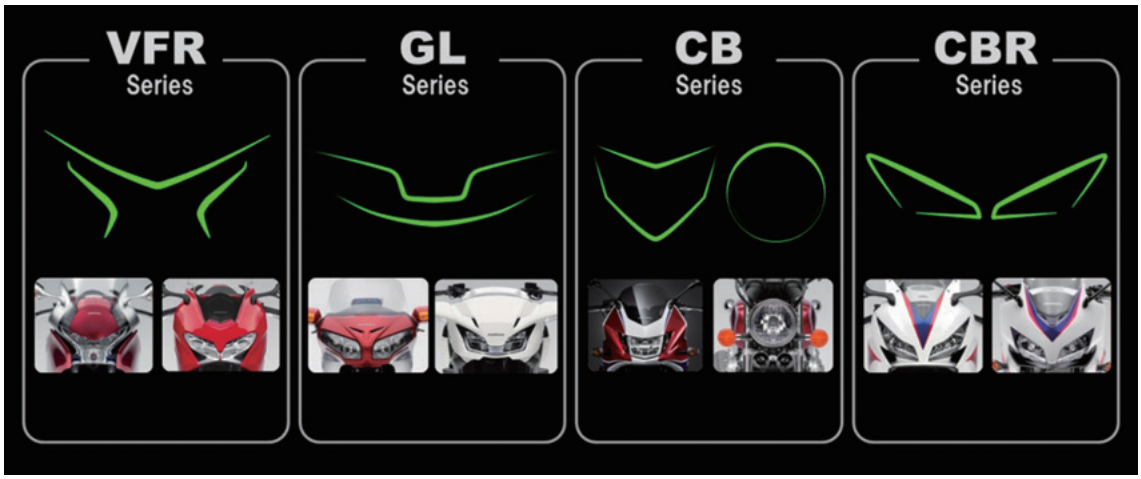


Fig. 1　Styling design motifs

ことを意味している. Hondaは, デザインを大きく変化させることでお客様の嗜好の変化に応えてきた時代を経て, 成熟した社会やお客様のために, 長い歴史を持つ車種の前部デザインを継続していくことへの努力も求められるようになった.

2.3. 進化

前部デザインを継続することは, 長期的には外観が陳腐化するという面も持つ. それを防ぐために, 統一されたシリーズ性を感じさせながら新しさを表現しなければならない. そのために, 最新の技術を取り入れる必要がある. 以下に技術例を示す.

灯火器では常に新しい技術が開発され, 進化を表現するためにさまざまなものが利用可能であった. その中でも近年の車両灯体技術としては, 小型, 低消費電力, 長寿命という特徴などから, 従来のフィラメントバルブに替わりLEDの普及が進んできた. このLEDが2014年モデルの進化に大きく関連しているため, 以下に技術例として述べる. LEDの車両用灯火としての利用は尾灯, 制動灯などで先行しており, 当初は点光源を単体あるいは複数配置する手法が主流だった (Fig. 2). この手法は, 前述の特徴に加え光源そのものを見せることによってLEDの新規性を訴求するものであった. 白色LEDが実用化されると, 前部デザインにもLEDが採用された. 2007年モデルのCBR600RRでは国内メーカ初となる, LEDによるフロントポジションライトを装備し, 前部デザインのコンパクト化に寄与している (Fig. 3). また2008年モデルのCBR1000RRでは左右バックミラーに小型のフロントポジションライトを装備することでヘッドライトとは独立した位置に光源を配置し, 被視認性の向上に寄与している (Fig. 4). この時点では, 機能面を重視したLED利用であった.

その後, 光線解析技術の向上により, 点発光から, 導光によるライン状発光, 面状発光などと方式が多様化し, デザイン表現に利用可能となってきた (Fig. 5). また白色LEDの進化によりヘッドライトの光源として使用されるようになったことで発光部の小型化が進み, 前部デザインの自由度が増した. これらのLED技術進化により, 従来からおこなわれてきた部品形状のみによる表現手法から, 任意の発光形状も使ったデザイン表現が可能となった. 前部デザインで独自のアイデンティティを表現する手段は, これらの技術進化によって選択肢が広がり, 統一, 継続, 進化の試みを大きく前進させる力となった (Fig. 6).

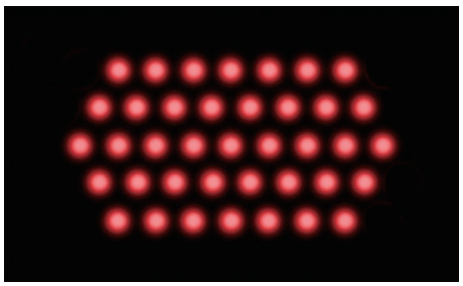


Fig. 2 Dotted arrange of LEDs in tail light



Fig. 3 Front position light (at center) in the CBR600RR, 2007 year model



Fig. 4 Front position lights (at rear view mirror) in the CBR1000RR, 2008 year model

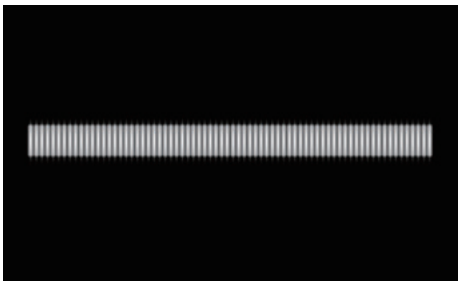


Fig. 5 Light guiding panel



Fig. 6 Application of light guiding panel in the PCX, 2014 year model

3．ガイドラインの実施例：VFR シリーズ（VFR1200F，VFR800F）

VFR は Honda 二輪車における重要な車名シリーズの一つである．1986 年の初代 VFR750F 投入以降，常にユーザの支持を受け続けてきた歴代 VFR は，スポーツツアラーカテゴリにおいて唯一 V 型 4 気筒エンジンを採用してきた．また，その時々の Honda の先端技術を投入することにより，高性能かつ高機能というユニークなハードパッケージと大人のための洗練されたスタイリングの組合せによるコンセプトを具現化し続けてきた[(2)]．2008 年のイタリアミラノにおける EICMA にて発信した新世代の VFR のコンセプトモデル (Fig. 7) は X 字形状を有したフロント周りデザインを特徴の一つとしており，2010 年モデル VFR1200F の量産モデル (Fig. 8) にもそのイメージは再現された．この時点ではヘッドライトはフィラメントバルブを使用しており，X 字のイメージはライトレンズ外形と周辺のダクト形状の複合で表現する手法であった．

2014 モデル VFR800F における前部デザインの検討の際は，それまでの独立二眼のヘッドライトから VFR1200F 同様の X 字形状とすることで VFR シリーズとしての「統一感」を表現した (Fig. 9)．また，歴代の VFR シリーズの中でも多くの支持を得たモデルの印象を引用することで，シリーズとしての「継続性」も表現し，「進化」を表現する観点から LED ヘッドライトを採用した．VFR シリーズとしてのアイデンティティの表現には X 字形状を LED によるライン状発光によって強調する手法を用いている．具体的にはヘッドライトユニットにロービームの一部として組み込まれた導光体の発光形状で表現されている (Fig. 10)．すなわち，光の形状が独自性を表す上で重要な役割を果たすことになった．これによって Honda 二輪車の個性表現が進化したといえる．



Fig. 7　Concept sketch of the VFR, 2008

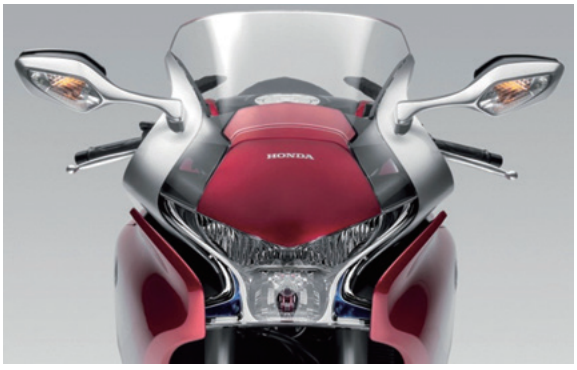


Fig. 8　X image representation in the VFR1200F, 2010 year model



Fig. 9　Image representation using LED light guiding panel in the VFR800F, 2014 year model



Fig. 10　Applied light guiding panel (shown in green color)

4．結論

車名イメージの定着のため，車名シリーズごとの前部基本形状の統一，基本形状の数世代にわたる継続，陳腐化を防ぐための技術進化を，前部デザインを決定する上でのガイドラインとした．

VFR800F において，ガイドラインに沿った前部デザインを採用し，同モデルは 2014 年に発売された．

参考文献

(1) 丸山一幸, 堤陽次郎, 村田裕:二輪車の発見率を向上させる灯火器配置「FACE」デザインの研究, Honda R&D Technical Review, Vol.21, No.2, p.130-135
(2) 岸敏秋:VFR1200F のスタイリングデザイン, Honda R&D Technical Review, Vol.22, No.2, p.14-19

■著　者■



鈴 木 祥 高



三 木 真 洋

ニュークロスオーバ VEZEL のデザイン

Styling Design of New Crossover VEZEL

山 本 洋 幸*
Hiroyuki YAMAMOTO

要　旨

2014 年モデル VEZEL はクーペのパーソナル性とミニバンの合理性を兼ね備えたコンパクト SUV に類される新商品である. VEZEL の開発では単なる小型 SUV ではなく,「スペシャリティカー」をキーワードに, 艶のある車を作りたいという思いから「艶 (つや), Crossover」をグランドコンセプトに掲げた. パッケージデザインでは「Smart Cross PKG」をコンセプトに, SUV, クーペ, ミニバンのそれぞれが持つ魅力を融合させることで, これを具現化した. また, エクステリアデザイン, インテリアデザインはそれぞれ「Dynamic Cross Solid」,「Expansible Cockpit」をコンセプトとし, 力強さと色気をダイナミックに融合させた外観と, 空間の広がりとパーソナル性を両立させた上質な内装を, そしてカラーマテリアルでは「COORDINATION」というコンセプトでバリエーションごとに一つの作品として内外デザインをまとめ上げた. VEZEL の開発チームは合理性と「艶 (つや)」を融合させることで, 性能や装備の差で他社車に対して断片的に優位性を訴求するだけではなく, 感性で選ばれる多面的な価値を持つ商品を誕生させた.

ABSTRACT

The 2014 model VEZEL is a new product, similar to a compact SUV but combining the personal feel of a coupe and the utility of a minivan. The keywords during the development of the VEZEL were “specialty car”, not just a small SUV, because the developers wanted to create a sensual car. The grand concept, therefore, was “Sensual, Crossover.” The concept of the package design was “Smart Cross PKG.” This was embodied by combining the attractive points of SUVs, coupes, and minivans. The concepts of the exterior design and interior design were “Dynamic Cross Solid” and “Expansible Cockpit” respectively. The exterior dynamically combines strength and sultriness, while the high-class interior brings out both spaciousness and a personal feel. Moreover, using the concept of “coordination” for the color material, the designers put together an internal and external design such that each variation was like a new work. By combining utility and “sensuality”, the VEZEL development team did more than just appeal to consumers by being better than competing products in fragmentary ways, such as performance or equipment. Rather, they brought out a product with multifaceted value that consumers would choose based on sensitivity.

1. はじめに

1995 年に発表された CR-V は当時, 異例ともいえる乗用車をベースにしたライトクロスカントリービークルであった. 今では世界約 160ヵ国で年間 50 万台以上を販売するグローバルブランドに成長し, SUV のスタンダードとして認知されている. やがて世界的なダウンサイジングの流れに合わせた新たな SUV の開発がスタートすることとなった. 開発チームは小さな CR-V を作るのではなく, 世界のコンパクトスタンダードを再定義するような, 車らしい魅力を持つ商品を生み出そうと考えた.

開発チームが考える車らしさのキーワードとなったのはスペシャリティカーである. かつて人気を博した PRELUDE (Fig. 1) や ACCORD INSPIRE (Fig. 2) は美しいスタイリングとドライバを主役とした上質な室内を備えていた. それらは当時主流のファミリーセダンとは明らかに異なる魅力を持ち, 単なる移動の道具にとどまらない, より上質で豊かな暮らしのパートナとして支持されていた.

しかし, 時代と共に空間の広さや使い勝手の良さなど, 車に求められる価値が多様化したため, かつてのスペシャリティカーのような商品が多くのお客様の共感を得ることはない. そのためには, Honda の独自技術による合理性と, 感性に直接訴えかける魅力を併せ持つ商品の開発が必要と考えた. 開発チームは世界の都市生活者をターゲットにした新しい時代のスペシャリティカーを追求するために定

＊四輪 R&D センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_3

めたグランドコンセプトが，「艶，Crossover」(Fig. 3)である．そして全ては合理性だけではなく，お客様にとって魅力的かどうかを基準に開発を進めた．



Fig. 1　PRELUDE





Fig. 2　ACCORD INSPIRE



Fig. 3　Grand concept

2．パッケージデザイン

2.1. コンセプト

SUV の安心感や安全感，ステータス，使いやすさという価値をベースに，クーペ価値とミニバン価値を融合するためのコンセプトは「Smart Cross PKG」(Fig. 4)である．また SUV 価値の核である頼もしさと安心感を実現する手法として大径タイヤ，ハイアイポイント，ハイロードクリアランスという三つの要素を重視しながら「艶」のある車としての骨格を追求した．

2.2. SUV らしい視界

SUV 価値の中で注力したのがアイポイント (Fig. 5)である．アイポイントは高くするほど見下ろし感が得られるが，高すぎると目指すスペシャリティカー像と離れる．そこで，全高を抑えながらも SUV らしい視界感や安心感が得られるアイポイントの高さを検証した．

一般的なセダンやハッチバックに対して明確な違いを感じられるアイポイントの高さを，多くの比較車と並べて検証した．その結果，SUV として認知されるためには一般的なセダンやハッチバックに対してプラス 100 ㎜(Fig. 6)の高さが必要と定めた．また，乗車姿勢はアップライトなも

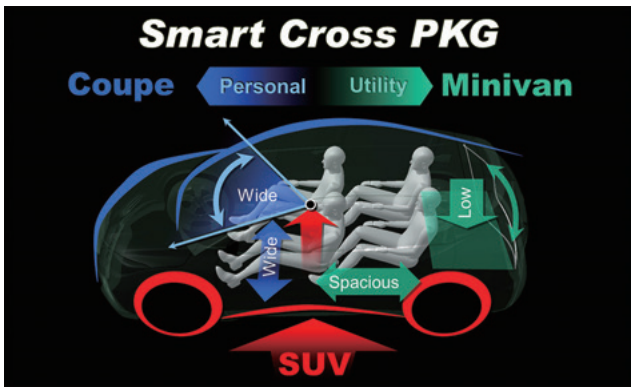


Fig. 4　Package concept

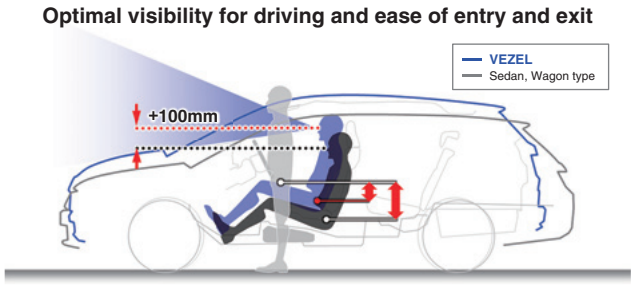


Fig. 5　Eye point of SUV

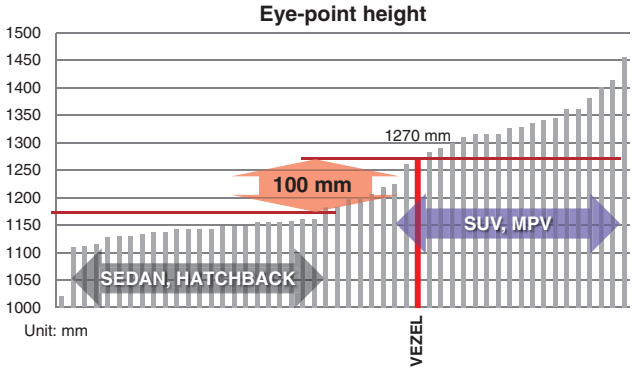


Fig. 6　Eye-point height of SUV and sedan

のほど商用イメージが強くなり，寝そべるような姿勢になるほど前方の不可視長が大きくなる．そこでセダンに近い乗車姿勢を実現することで適度なパーソナル感と良好な視界感を両立させた．

2.3. クーペ価値とミニバン価値

クーペ価値を実現するために，ドライバのためのスポーティなコックピット空間を追求した．まずはハイデッキコンソールの採用を前提とし，さらにその幅方向の寸法を最大限確保することでフロント席乗員にパーソナルかつゆとりのある空間が提供できると考えた．また，車との一体感を得ながら楽しく安全に運転ができるようにワイドな前方視界にもこだわった．そのために，フロントピラーの付け根を極力後方に配置しながらピラー断面を小さく (Fig. 7) することで目標とする前方視界を実現した．

ミニバン価値としては，後席における広々空間と荷室の使い勝手の良さを両立させた．そのために後席空間は 990 mm のレッグルームを確保し，大人が足を組める空間とした．また座面長とシートバック角度は上級セダンを参考に最適化し，広さだけでないくつろぎ感を重視した．

荷室は低い開口地上高とステップワゴン並の開口幅 (Fig. 8) を実現することで大きな荷物の積み下ろしを容易にした．また低床センタタンクレイアウトにより後席を折りたたむことで，前輪を外したマウンテンバイクを立てたまま積み込むことができる荷室高さを実現した．

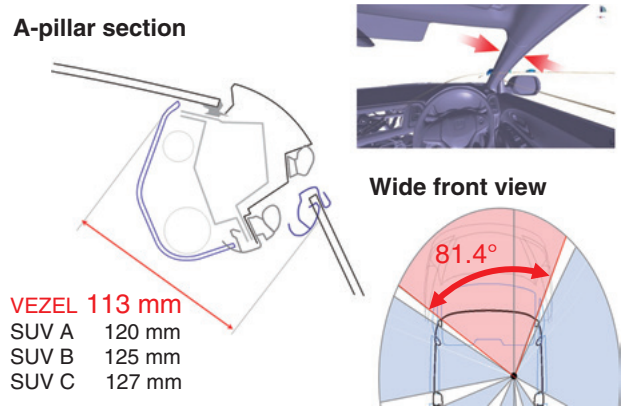


Fig. 7　A-pillar section and wide front view



Fig. 8　Rear space

3．エクステリアデザイン

3.1. コンセプト

SUV に求められる力強さと，クーペの「艶」をダイナミックに融合させることを目的にコンセプトを「Dynamic Cross Solid」(Fig. 9) と定めた．

まず新時代の都会的な SUV らしさとして，従来の SUV が持つイメージのラギッドな (でこぼこした) 要素の排除を前提とした．その上でフロントピラーを後に引き，ノーズには通常のセダンよりも量感を持たせることで力強いフロント部とした．また，車らしい魅力をストレートに表現するため，バンパ周辺の造形は四つのタイヤが踏ん張る感じを重視した (Fig. 10)．



Fig. 9　Exterior design concept



Fig. 10　Final exterior rendering

次にクーペらしさとして，長いストロークを持つキャラクタライン (Fig. 11) にこだわった．コンパクトなボデーの中に大胆に走る長いキャラクタラインは流麗な印象を強め，その伸び伸びとした色気はボデーサイズを超えた存在感を際立たせている．特にCピラーからショルダをまたぎフロントホイールアーチ手前まで一気に切れ込むキャラクタラインは，デザイン上の「艶 (つや)」と力強さがクロスオーバするポイントとして捉え吟味した．さらにパーソナルな2ドア車に見えるよう，リヤドアハンドルをサイドウインドウ後端 (Cピラー部) に一体化させた (Fig. 12)．

3.2. 視界，居住性，乗降性を高次元で満足するエアロキャビン

一般的に車高の大きなSUVはセダンと比べ空気抵抗が大きい．開発チームは新世代SUVとしてセダン並みの燃費目標を掲げていた．また，流体力学的に理想の形と，魅力的なスタイリングとは必ずしも一致するものではない．さらには，視界や居住性のパッケージ性能とバランスさせることも商品開発として重要な要素である．

クレイモデラはクーペらしいスタイリング，視界，居住性，乗降性を満足した上で，流体力学的に理想に近いキャビン形状を追求するため風洞実験室に通ってシミュレーションとモデリング (Fig. 13) を繰り返した．また，商品としての完成度高めるため，エクステリアデザイナだけでなく，パッケージデザイナやインテリアデザイナとも協議を重ねた．

キャビン造形は，強く湾曲したフロントウインドウから始まり後端に向けて絞り込まれた形状を基本とした．一方で後席から荷室にかけてはミニバン並みの後席居住性と良好な後方視界を確保しつつ，外からはあくまでもコンパクトでパーソナルな印象になるようにサイドウインドウグラフィックスを後方でシャープに収束させた．

また，床下の整流 (Fig. 14) も含め空力性能を突き詰めた結果，空力目標は達成されCD×A (空気抵抗値×前面投影面積) はセダンカテゴリの位置づけに到達した．

3.3. フロントフェイスと灯体のデザイン

フロントフェイスはヘッドライトとグリルの一体感を表現し，新しいHondaの顔「SOLID WING FACE」(Fig. 15) の考えに則っている．

ハイブリッド車のグリルにはスモークアクリル樹脂の裏側からメッキ調塗装を施すという新しい手法を採用した．またSUVらしい力強さを上質に表現するために，無垢の金属をイメージさせるシンプルでクリーンな造形にこだわった．一方ガソリン車の考え方も共通で，専用デザイン



Fig. 11 Character line



Fig. 13 Exterior clay model

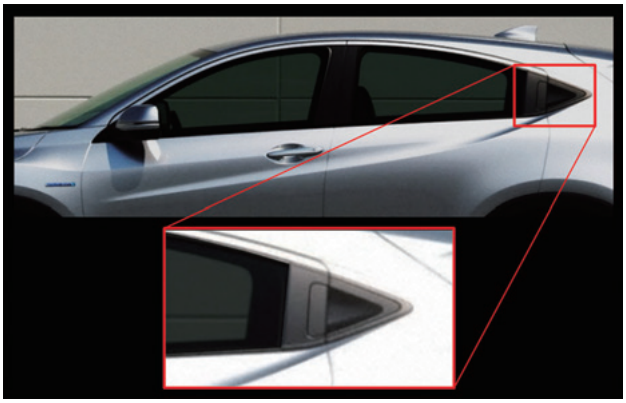


Fig. 12 Rear door handle

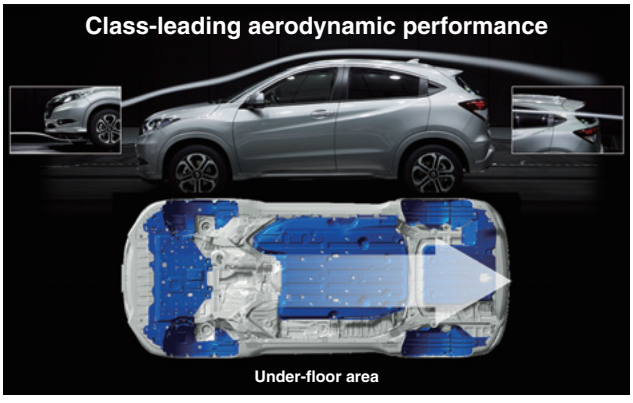


Fig. 14 Aerodynamics

のグリル本体にダークメタリック塗装を施して力強さを表現し，クロームメッキモールを組み合わせて上質さを演出した．

ヘッドライト (Fig. 16) はフロント全体をダーク基調としながら金属的な輝きを持たせ，艶のある力強さを表現した．その上でハイブリッド車には片側２眼の LED プロジェクタタイプを採用した．LED ならではの小型の四角い発光体が暗く奥行きのある空間に浮遊しているような見え方にこだわった．またガソリン車も同じくブラック基調のマルチリフレクタタイプとすることで共通のアイデンティティを持たせた．

リヤコンビネーションランプ (Fig. 16) は LED 導光ストライプをハイブリッド車に，直射型 LED をガソリン車にそれぞれ採用し，被視認性を確保しながら先進性を表現した．

3.4. 世界で輝くデザイン

エクステリアデザインは例えばドイツのアウトバーンの追い越し車線で車体が路面をわしづかみにし，より大型の車が近づいても動じないような強靭な見え方を実現する必要があった．

日本の車は外国では華奢に見えることがある．それは道幅や周囲の車の大きさ，光線の違いなどさまざまな環境要素が日本と異なるからである．開発チームは，VEZEL で世界中の市場で競争力のある強いスタイリング (Fig. 17, Fig. 18) を実現するため，モデルの傍らにより大型で売価の高い比較車を置き，それに負けない存在感と上質さにこだわって開発を進めた．また，世界中のどこを走っても輝くことができる「艶」のある強いデザインを完成させるために，発売予定地域の多くに足を運んで実際に車が使われる環境をリサーチした．そして，その都度必要な要素をモデルに反映しデザインを進化させた．



Fig. 15　Front face design

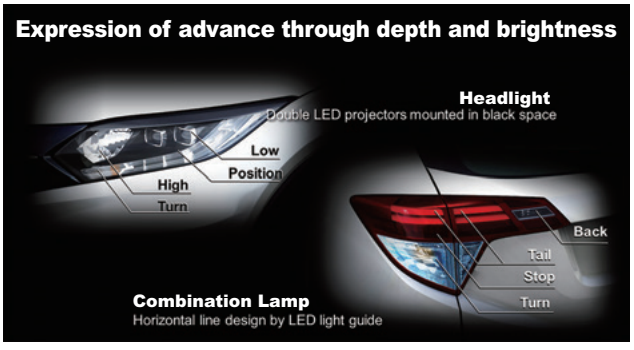


Fig. 16　Lighting design



Fig. 17　Strongly styled front



Fig. 18　Strongly styled rear

4．インテリアデザイン

4.1. コンセプト

次世代のスペシャリティカーを目指す上で定めたコンセプトは「Expansible Cockpit」(Fig. 19) である．広々した空間を意味する「Expanse」，タイトでスポーティなイメージの「Cockpit」，相反する二つの価値を「艶 (あでやか)」というキーワードで融合させることをねらいとした (Fig. 20)．

コンセプトから来るデザインテーマは SUV として期待される安心感と使い勝手を実現した上で，クーペとしての「艶」をいかに融合させるかであった．また，それらの表現手法が表面的な高級感や先進性の演出では上質さが得られないと考えた．奇をてらうのではなく，自動車としての価値の本質に基づいた新しいスタイリングアプローチを模索した．そして，車を良く知るお客様にも共感を得られるような，インテリア骨格と質感の表現に取り組んだ．

4.2. 新しいインテリア骨格への取り組み

4.2.1. インストルメントパネル

開発初期段階におこなったのはインストルメントパネルの骨格形成である．これまではインストルメントパネルを薄く，軽く，見せることで爽快空間を創出する傾向にあった．しかし SUV に安心感を求めるお客様に対して，爽快感と引き換えに外にさらされるような不安感を与えてはいけない．開発チームはこれまで開発した同クラスのコンパクトカーより 70 ㎜程度肉厚な造形 (Fig. 21) が妥当と判断した．これは例えばドイツのアウトバーンを最高速でクルーズする際にも，しっかりと守られている感覚をお客様に提供するために必要な断面設定と考えた．一般的に肉厚な断面は乗員に対し圧迫感を強くする．そこで極力キャラクタラインなどの要素を減らしてシンプルな面構成とすることで視界ノイズを排除し，外の世界と連続するような爽快感を表現した．



Fig. 19 Interior design concept



Fig. 20 Instrument panel

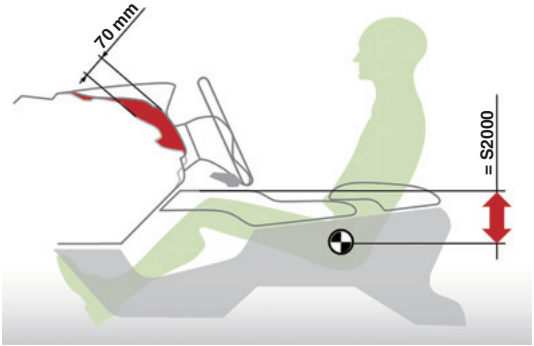


Fig. 21 Sectional view of instrument panel

また広々とした豊かな空間に感じさせるために，水平基調にもこだわった．そのため，空間を縦に仕切る要素となるセンタクラスタパネルを廃止した上で，エアコンの噴出し口は横長形状 (Fig. 22) とするなど，縦の要素を極力排除することで実寸法を超える水平方向の広さを演出した．

シンプル，水平基調を重視した結果，キャラクタラインの少ないインストルメントパネル上面はフロントガラスへの映りこみが少なく，良好な運転視界も実現した．

4.2.2. ハイデッキコンソール

インテリアで VEZEL のキャラクタを象徴するのがハイデッキコンソール (Fig. 23) である．空間を分断することになるハイデッキコンソールの採用には開発初期段階から社内で意見が分かれた．しかし開発チームは，ドライバ，助手席乗員，それぞれのパーソナルエリアが確保されてこそ目指すべきクーペの上質さが実現できると考え，具現化を進めた．

コンソールの高さはビジネスクラスシートのセパレート感をイメージし，乗員基準で Honda を代表するスポーツカーである S2000 同等 (Fig. 21) とした．また前席乗員同士の心地よい距離感のために，車体の枠組みで可能な最大のカップルディスタンス (Fig. 24) とした．

近年，欧州車ではコンパクトカークラスにもインストルメントパネル上面にソフトパッドを適用するものが見られるようになり，上級志向のひとつの記号性として定着化しつつあった．

しかし，お客様の立場に立った時，よりお客様に近いハイデッキコンソールにこそソフトパッドの適用が望ましいと考えた．同クラスではコンソールへの適用例が無いため



Fig. 22 Passenger-side air outlet



Fig. 23 High-deck console

過剰装備との意見もあったが，予定されていたインストルメントパネル上面への適用をやめることを前提に具現化を進めた．結果，大部分がソフトパッドで構成されたコンソールは，お客様に伝わりやすい価値と特徴となり，ねらいのパーソナル性をさらに際立たせた．

またハイデッキコンソールで得られる価値はパーソナルな空間だけではない．パーキングブレーキのバイワイヤ化や，カップホルダの使い勝手から，美しく湾曲した独特のコンソールデザインはシフトレバ下に新しいユーティリティ空間を生み，今までになかったスマートで新しい使い勝手 (Fig. 25) を実現した．

4.2.3. 必然性が生む上質感

このようにして，安心感にこだわったインストルメントパネルとパーソナル性にこだわったハイデッキコンソールにより，コンセプトの「Expansible Cockpit」を具現化するためのインテリア骨格が完成した．

また，今回の取り組みでおこなった必然性から来るシンプルな機能表現は，高い合理性と美しさを融合させている．これこそが VEZEL インテリアで目指す上質さの方向性であると定め，後述する新しい質感表現の考え方にもつながった．

インテリアデザインは機能を端的に表現してこそ美しく，その価値を高めることができる．スタイリングの先走りや，機能を不自然に誇張するデザインは上質とはいえず，本来持つべき価値を損なうことがある．これはエクステリアデザインが同じ工業デザインでありながら彫刻的な純粋美術の要素を持つのに比べ，ニュアンスの異なる点である．



Fig. 24　Wide couple distance

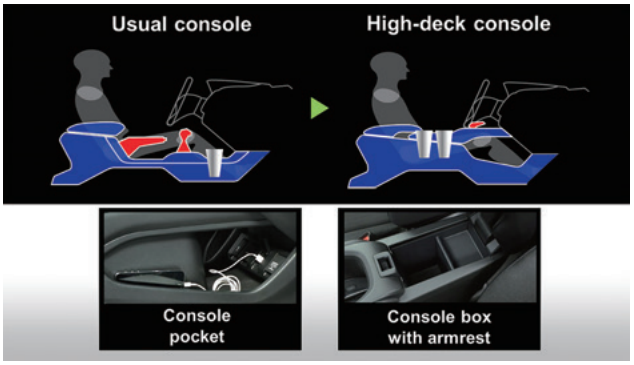


Fig. 25　Console utility

4.3. 新しい質感表現への取り組み

4.3.1. ゴージャスから艶へ

質感表現におけるキーワードはグランドコンセプトに関連して「艶 (あで) やか」とした．樹脂材で代用することが多い木材や金属材の素材表現も，近年の塗料やフィルム素材は高品質化，ローコスト化され，コンパクトカーであっても高級車のようにゴージャスに装飾されるものがある．しかし VEZEL に求める世界観はあくまで「艶 (つや)」でありゴージャスではないと考えた．そこで，質感表現で今までと違う手法を模索する必要があった．

高い合理性から必然性をもって生まれるシンプルなカタチはそれだけで美しく上質であることは，新骨格への取り組みで前述したとおりである．ならば，素材表現においても必然性を追求することで，「艶 (あで) やか」の表現が可能だと考えた．そこで，木材や金属材を模した表現の廃止を前提に，これまでの装飾で表現する質感に対して，カタチで表現する質感という新しい考え方へ移行した．

4.3.2. 質感表現の三つのルール

樹脂成型技術の進化は，あらゆる形状の製品化を可能にした．例えば革材の表現なのに手を切りそうなほど鋭いキャラクタラインや，金属材の表現なのに有機物のような柔らかい表現も可能である．しかし実現可能な形状が必ずしも上質とは限らない．そこで上質な「艶」を具現化するための三つの必然性が必要と考えた．また，これらはインテリア空間においてノイズの元になる矛盾や破綻を排除することになる．これらはお客様に対して目に見えない上質感として必ず伝わると考えた．

一つ目は，機能に対する必然性である．素材選定はその部位に備わるべき機能性を反映する必要があり，運転中に見る，触れる，操作する部分によって的確になされているべきである．

これはスケッチ (Fig. 26) の段階で折り込む内容と考えた．例えば，人の触れる部分は滑らかで柔らかい素材，人



Fig. 26　Concept sketch

から遠い部分はドライで光沢を抑えた素材，また操作する部分や情報表示部は精度の高さを感じる硬質な素材といった例である．そこで，多くの素材サンプルをスケッチ作業の傍らに置いて，実際の素材の触感から受けるイメージと機能性を関連付けながら，極力少ない線で，シンプルかつダイナミックに表現した．

二つ目は，素材に対する必然性である．これは想定する素材にあわせ，例えば革材の表現が前提の部位は，例え樹脂材による成型であっても革の特性に沿った表現であるべきである．これはクレイモデル（Fig. 27）の段階で折り込む内容と考えた．今回のデザインは，大部分が大きな面で構成されていることから，キャラクタラインによるごまかしが効かない分，クレイモデラに新しい造形手法を要求した．そこでシンプルながらも退屈ではない上質な面を作り上げるため，素材の特性を理解し，その繊細かつダイナミックな表情を読み取ってクレイモデルに再現した．また，成型によって縫製を表現する部位では，ステッチの糸に引き込まれる革の微妙なテンションを解析，数値化しクレイモデルに折り込んだ．

三つ目は，作りに対する必然性である．スタイリングモチーフは作り方との整合性が必要であり，作りの都合でモチーフが分断される場合は，作りに合ったモチーフに進化させなければならない．これはデザイン業務の取り組み姿勢そのものであり，開発過程で起こる条件変化への柔軟性を示している．そこで設計部門とのやりとりのなかで発覚する不測の事象に対しては，決めたカタチを頑なに守ろうとするのではなく，むしろさらなるクリエーションの好機と捉えることとした．不測の事象による条件変化に対しては妥当性を議論，理解し，むしろ逆手に取るような発想でデザインを進化させた（Fig. 28）．

このように大きな面から小さなディテール，取り組み姿勢にいたるまで隙の無い必然性の追求で装飾に頼らない，にじみ出る「艶」を表現した．

このようにして新しいインテリア骨格と新しい質感表現により，パーソナルで使い勝手が良く，シンプルながら「艶」のあるインテリアを完成させた．



Fig. 27　Interior clay model





Fig. 28　Final interior rendering

5．カラー，マテリアル

5.1. コンセプト

ファッションを楽しむようにボデーカラーとインテリアカラーを組み合わせるという考え方を示したコンセプトが「COORDINATION」（Fig. 29）である．ボデーカラーとインテリアカラーを個別に開発するのではなく，一台の車として内外一体となった世界観を完成させることで「艶」の表現を完成させた．

ボデーカラーは大人の色気にこだわりながらSUVのタフさ，クーペの妖艶さを表現した．またインテリアカラーはそこに乗り込むお客様の気持ちが高揚するような，上質かつビビッドな空間を表現した．そして，ボデーカラーとインテリアカラーを，Mode，Cool，Elegance の三つのキーワードに当てはめながら，それぞれの世界観として完結させた（Fig. 30）．

Mode は自立した大人の女性に向けた，魅惑と力強さを表現する輝きのある黒の世界の提案である．妖艶なパープリッシュグレーのボデーと質感のコントラストが華やかなブラックインテリアを組み合わせた．

Cool はスポーツとファッションの感性や表現力を持つ人に向けた，アクティブでかつ品格を感じさせる提案である．幻想的なブルーのボデーカラーと華やかなブラックインテリアを組み合わせた．

Elegance は色気を持つ大人に向けた，落ち着きの中に遊び心のある提案である．深みの中に爽快さが感じられるグ



Fig. 29　Color concept

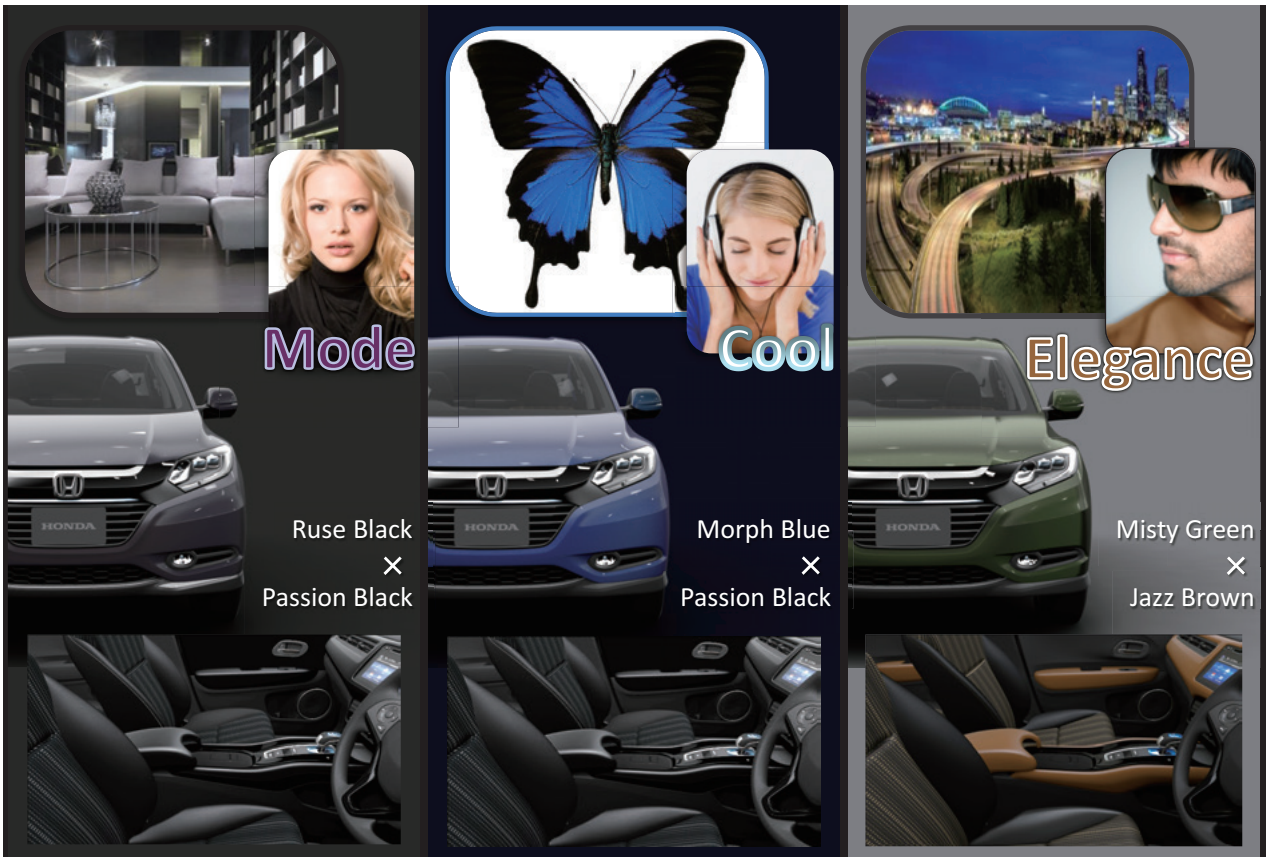


Fig. 30　Three types of coordination

リーンのボデーカラーと，アクティブなイメージのオレンジブラウンを組み合わせた．

5.2. ボデーカラー

ボデーカラーは，エクステリアスタイリングのダイナミックな面の変化が生かせるように角度による表情変化が効果的に見える，ガンメタリック系，ブルー系，グリーン系の三つの新色でSUVのタフさとクーペの妖艶さを表現した．

ルーセブラックは，企みという意味を持つ黒い花の品種に由来している．濃いガンメタリックに紫味を加えることで生まれる妖艶さで，夜の都会に映える妖しい魅力をねらった．

モルフォブルーは，金属的な輝きが美しいモルフォ蝶に由来している．ブルーからパープルに変わる色の変化幅はVEZELの奥深く多面性のある魅力を表現した．

ミスティグリーンは初夏のみずみずしいグリーンではなく，晩秋の落ち着いた雰囲気の赤みのあるグリーンを基調とし，ゴールドを加味することで爽快さと芳醇なイメージを与えた．

5.3. インテリアカラー

インテリアカラーでは機能性と素材感を重視したシンプルなインテリアスタイリングを際立たせたいと考えた．そこであえて装飾的な表現をメッキとピアノブラックのみに絞り，基調で整理された空間の中にビビットな緊張感を演出した．また，シート表皮も織り方や編み方で柄を構成し，素材特性を生かした奥行きのある表現とした．

パッションブラック内装では，無難さから選ばれる黒ではなく，積極的に選ばれるような，若々しく情熱的な新しいブラック内装を完成させた．重視したのは素材による光沢のコントラストである．インストルメントパネルの上面は大粒で低反射のシボによって機能的まとめながら，ミドルパッド部に小粒なスムースレザー調のソフト表皮を配した．一般的な革材の表現では艶をできるだけ抑えて質感を表現することが多いが，VEZELではあえてミドルパッドに艶の高い処理を施し，インストルメントパネル上面とは異なる表現とした．これによりドライなインストルメントパネル上面，なめらかなミドルパッド，濡れたように輝くピアノブラックパネルで三段階の光沢を対比させて華やかな黒の世界を具現化した．

ジャズブラウン内装では，従来の落ち着いたブラウン内装のイメージに対し，アクティブな大人の遊び心を表現した新しいブラウン内装を完成させた．シート表皮はメイン材に落ち着きのある焦げ茶色を採用しながら光沢のあるゴールドのストライプをあしらうことでコーディネート上ミスティグリーンパールと関連性を持たせた．また，インストルメントパネルミドルパッド，センタコンソール，アームレストは，快活な印象のオレンジブラウンを採用することで，エネルギッシュなブラウンの世界を具現化した．

5.4. 組み合わせの妙

グリーン系のボデーカラーが売れないとされる日本市場においてミスティグリーンの開発は周囲の理解を得るのが容易ではないことが予測できた．また，ジャズブラウンのようなブラウン系内装も購入検討段階では候補に入っても，最終的には無難なブラック系内装を選択するお客様が多いことから，やはり販売数が伸びないとされている．

今回のカラー開発ではタフネスとエレガンスの共存を目指した結果，ミスティグリーンとジャズブラウンのあえて売れないとされる物同志を組み合わるというチャレンジングな提案をおこなった．しかし，この試みがそれぞれの魅力を響き合わせるという相乗効果を生んだ．最終的には発売時の訴求色として扱われるなど期待値の高い提案となったのである．事実，ミスティグリーンのボデーとジャズブラウンのインテリアはそれぞれ販売計画構成比率を数倍上回るお客様に支持され，現在VEZELの好調な販売を牽引している．このことは，今後のカラー開発において，コーディネーションによる世界観の提案がいかに重要であるかを証明している．また，お客様へ幅広い選択肢が提供できることは，お客様自身に今までとは違う気付きをもたらし，暮らしに一層の彩りを提供することができると考える．

6．むすび

Hondaらしいという声がかつてほど聞かれなくなった近年，VEZELの開発はHondaらしさとは何かを自問するものでもあった．ただ便利で快適なだけではない，Hondaに乗れば前向きな気持ちになる．そして乗る人の人生に新しい気付きをもたらす．そんな夢の車をつくりたいという思いを共有しながら開発チームはVEZELを産み出した．

クーペのパーソナル性とミニバン並の利便性を両立したパッケージ，屈強でありながら色気を有するエクステリアデザイン，広さとパーソナル感が共存するインテリアデザイン，強さの中に知性を持つカラーデザインは全て「艶」という共通のテーマを持ちながら，真にお客様を思う信念で実現させた．もしお客様が初めてVEZELを見たときピンときた，乗った時しっくりきた，そして良き相棒として日常寄り添ううちに，Hondaらしい車だと思っていただけるとしたならば，VEZEL開発チームの一員としてこれほど幸せなことは無い．

無いものを作って歓ばれてきたのがHondaである．しかし開発者は自らの経験や習慣から失敗しない業務推進を目的に，できないという壁を無意識に作り上げてきた．そして，多くの場合，無いものは壁の向こう側に存在する．そ

の壁を乗り越える力の源泉はお客様に提供すべき正しい価値はこれだという強い信念でしかない．真の Honda アイデンティティはアイデアや新技術に宿るのではなく，必要となればその壁に対峙する開発者一人一人の勇気にあるのだと思う．

■著　者■



山 本 洋 幸

フューエルインジェクションエンジン搭載インバータ発電機の開発

Development of Inverter Generator Equipped with Fuel Injection Engine

齋藤　茂*　Shigeru SAITO
小野寺　泰洋*　Taiyo ONODERA
橋爪　崇*　Takashi HASHIZUME
布川　剛史*　Takeshi FUKAWA

要　旨

5.5 kVA クラス世界トップレベルのコンパクト性と静粛性で定評のある発電機 EU6500is をベースに，バックアップ電源としての価値をさらに高めたEU7000isを開発した．

外的要因によらず最適なエンジンの空燃比を制御可能なフューエルインジェクションシステムを採用し，現行モデルに対し 22% の燃費向上を達成した．

インジェクタとスロットルボデーの一体化により，コンパクト性を維持しつつ，大気圧センサおよび吸気温度センサをジェネレータコントロールユニットの基板上へ実装することや各種センサの削減およびシンプル化を実施することで，コストアップミニマムで発電機用フューエルインジェクションシステムを構築した．

このフューエルインジェクションシステムの採用により，無給油で 12 時間連続運転を可能とした．また，電源回路の変更とジェネレータコントロールユニットの最低動作電圧を下げることでバッテリレスでのリコイルスタータ始動を可能とした．さらに，インバータの高効率化と点火時期の最適化により最大出力を 6500 VA から 7000 VA まで向上させた．これにより，起動時に大きな電力を必要とするエアコン等のモータ負荷に対応可能となり，さらなる発電機用途の拡大につながった．

ABSTRACT

The EU6500is generator, which has an established reputation for realizing the world's top level of compactness and quietness in the 5.5 kVA class, has been employed as the base model in the development of the EU7000is, further increasing the value of the unit as a home back-up generator.

The use of a fuel-injection system able to optimally control engine air-fuel ratio irrespective of external factors has increased fuel efficiency by 22% against the existing model.

The integration of the injector and the throttle body has made it possible to employ the developed generator fuel-injection system while maintaining compactness, and the mounting of the atmospheric pressure and intake air temperature sensors on the circuit board of the generator control unit and the removal or simplification of various other sensors have helped to enable the use of the fuel-injection system with minimal cost increase.

The use of the fuel-injection system has enabled continuous operation of the unit for up to 12 hours without refueling. Modification of the power supply circuit and reduction of the minimum operating voltage of the generator control unit allow starting of the unit using a battery-less recoil starter. The realization of increased inverter efficiency and the optimization of ignition timing have increased maximum output from 6,500 VA to 7,000 VA. This has made it possible to respond to the motor load represented by air conditioners and other pieces of equipment that draw large amounts of power at startup, expanding the range of applications of the unit as a generator.

1．まえがき

世界中でガソリン価格が高騰する中，新興国における電力不足による計画停電の増加や，ハリケーンなどの災害時の停電の長期化により，ポータブル発電機においてはさらなる低燃費化および長時間連続運転化が求められている．

現行モデルである EU6500is は，燃費性能に加え，コンパクトなきょう体と静粛性や高品質な電気性能を評価され，停電時のバックアップ用途のみならず，撮影用電源や

＊汎用 R&D センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_4

精密機器を用いた工事用電源として幅広く信頼を得てきた[1].

しかし，近年世界的に高まる環境問題への対応も踏まえると，気温や標高（気圧）などの外的要因で性能が左右されるキャブレタシステムでは，低燃費化とエミッション低減の両立には限界があった.

このような背景により，今回のモデルチェンジにあたり，低燃費と低エミッションのさらなる高次元な両立をねらいHonda発電機として初のフューエルインジェクション（FI）システムを開発した.

FIシステムはキャブレタシステムに対し，燃料ポンプや多数のセンサが必要でありコストアップにつながる．また，災害停電時における使用を考慮すると，これらのデバイスをバッテリ上がりの状態でも起動させなければならない．また，発電機特有の使われ方として燃料タンク内への塵埃の侵入や長期保管対応も考慮しなければならない.

本稿では，上記に対応した独自のFIシステムを搭載した新型発電機EU7000isについて紹介する.

2．開発目標値

5.5 kVAクラス世界トップレベルのコンパクト性と静粛性を維持したまま，バックアップ電源としての価値（長時間連続運転，長期保管性）をさらに高めた発電機を開発する．EU7000isの外観図をFig. 1に，現行モデルとの諸元比較をTable 1に示す.

市場調査によれば，停電時の要求電力は一般家庭（アメリカ）の場合2000から3000 VA（定格負荷の50%相当）である．その負荷で12時間連続運転可能であれば，夜間給油なしで朝まで連続運転可能となり，バックアップ電源として大きな訴求力を有する.

これを実現するには，現行モデルに対しコンパクト性を維持したまま可能な限りタンク容量を増やし，さらに燃費を20%向上させる必要がある.



Fig. 1　Appearance of EU7000is

Table 1　Comparison of specifications

	EU7000is (New model)	EU6500is (Current model)
Engine displacement (cm^3)	389	389
Fuel system	Fuel Injection	Carburetor
Max. AC output (VA)	7000	6500
Rated AC output (VA)	5500	5500
Fuel tank capacity (L)	19.2	16.0
Rated operating noise level (L_{WA}: dB)	91	91
Dimensions (L × W × H: mm)	848 × 700 × 721	850 × 666 × 699
Dry mass (kg)	118.6	118.2

開発目標値を以下に示す.

1．発電機用FIシステムの開発目標値

（1）燃費20%向上

（2）センサの削減とデバイスの最適化

（3）バッテリレスリコイルスタータ始動

（4）ガス欠停止時の排出ガス触媒保護

2．バックアップ発電機としての開発目標値

（1）無給油で12時間連続運転

（2）最大出力の向上

（3）長期保管性およびメンテナンス性向上

（4）始動操作性の向上

3．達成手法と達成値

3.1. 発電機用FIシステム

3.1.1. 燃費20%向上

エンジンの空燃比（A/F）を薄くする（燃料を少なくする）ことで燃費は向上するが，キャブレタシステムのままで燃料を薄くすると吸気密度の高い低温ではさらに薄くなり，燃焼が不安定になる.

そこで，各種センサにより気温，標高（気圧）などの外的要因によらず最適なA/Fを制御可能なFIシステムを採用し，排出ガス触媒と組み合わせることで，燃費向上とエミッションの低減を高次元で両立させた.

燃料消費量を現行モデルと比較しFig. 2に示す．現行モデルに対し22%の燃費向上（定格負荷の50%時）を達成した.

3.1.2. センサの削減とデバイスの最適化

現行モデルのコンパクト性はそのままでコストアップミニマムとなるよう，FIシステムのセンサの削減およびシンプル化を実施した．システム構成図をFig. 3およびFig. 4[2]に示す.

(1) インジェクタおよびスロットルボデー　　インジェクタおよびスロットルモータをスロットルボデーと一体化する構成により，コンパクトな現行モデルからレイアウト変更することなくインジェクタとスロットルモータを搭載した（Fig. 5）.

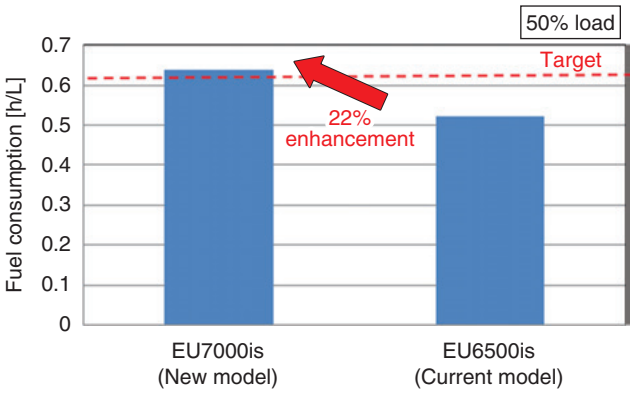


Fig. 2 Fuel consumption

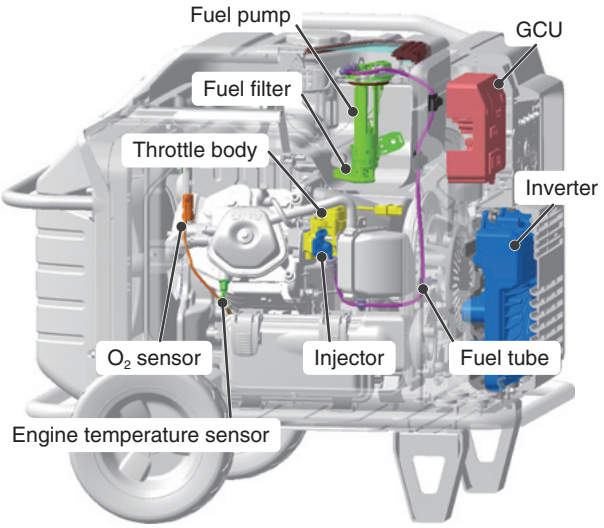


Fig. 3 Fuel injection system

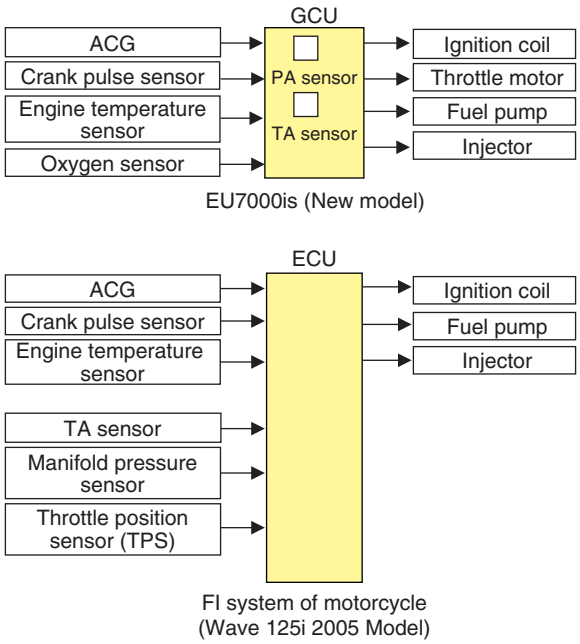


Fig. 4 Schematic diagram of fuel injection system

(2) ジェネレータコントロールユニット(GCU) FIの制御は，ジェネレータを制御するためのユニットであるGCUにFI制御機能を追加し，新たにFI制御ユニットを追加することなくFI制御を可能とした．

FI化に伴う消費電力の増加と部品点数増加に対応するため，基板を2階建て構造とすることで，現行モデルからサイズアップすることなく搭載可能とした．

(3) 大気圧センサ，吸気温度センサ 大気圧センサ(PAセンサ)および吸気温度センサ(TAセンサ)は，GCUの基板上に直接実装することによりセンサのコストダウンおよびハーネスの削減を図った(Fig. 6)．

TAセンサは他部品の発熱等で，エンジンの実吸気温と乖離することがある．そこで，回路部品を高温部と低温部に分けてレイアウトし，センサは低温部に配置することで発熱の影響を受けないようにした(Fig. 7)．

さらに，コントロールパネル上部に通気口を設け，センサ近傍に外気を導き入れることで，実吸気温との相関性が確保できるようにした．

(4) スロットル開度センサ 本システムは，GCUがステッピングモータを用いてスロットル開度を制御してい

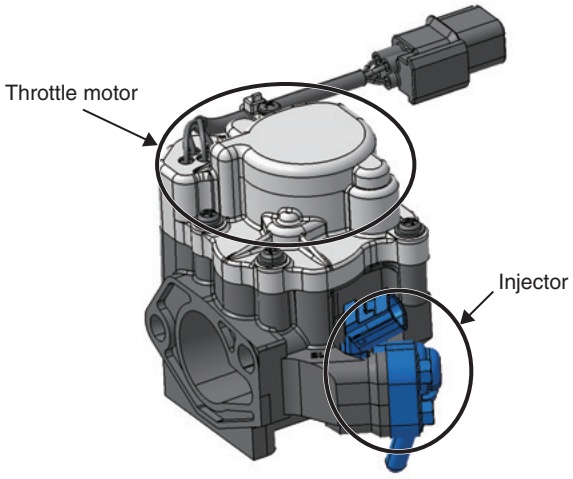


Fig. 5 Throttle body

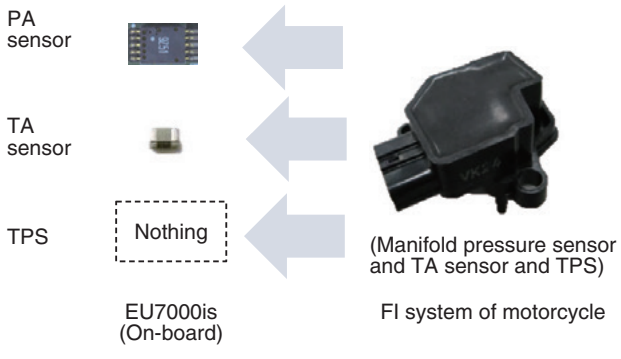


Fig. 6 PA sensor and TA sensor and throttle position sensor

るため，モータへの出力パルスをカウントすることによりGCUが常時開度を認識可能である．この認識値を用いることにより，スロットルスピード方式でありながらスロットル開度センサを削減することができた．

(5) 回転検出用リラクタ　一般的なFIシステムは，回転数やクランク角度を検出するために，1回転で多くの基準位置（例えば13パルス）を検出可能なリラクタをフライホイール（F/W）等に取り付けて制御している．

本開発では現行モデルの点火用の基準信号（1パルス／1回転）とオルタネータの出力信号（10パルス／1回転）を組み合わせることにより，回転数やクランク角度を検出する方法を採用した．

その結果，新たにリラクタを追加することなく現行モデルのF/Wをそのままに，回転数やクランク角度を検出可能とした．本モデルのリラクタと一般的なFIシステム用リラクタを比較したものをFig. 8に示す．

3.1.3. バッテリレスリコイルスタータ始動

本モデルは，通常はセルモータで始動するが，バッテリ上がり時でも始動可能なことが要求される．仮に，バッテリが取り外された状態でも，リコイルスタータを用いて手動で始動可能なシステムの構築をおこなった．

FIシステムはキャブレタシステムに比べ，始動時に燃料ポンプ，インジェクタを駆動するため多くの電力が必要とされる．従来の電源システムのままではバッテリレスリコイルスタータ始動時には電力不足が発生する．そこで電源回路を変更することで現行モデル同等のリコイルスタータ始動性を確保した．

本モデルは点火開始回転数が200 rpmであり，それ以下の回転数でシステムが起動している必要がある．そこで，GCUの最低動作電圧を下げることで対応した．

Fig. 9にバッテリレスリコイルスタータ始動時の電源立ち上がり特性を示す．発電コイル（ACG）からの電力を元に100 rpmから十分な電源を確保できる．

3.1.4. ガス欠停止時の排出ガス触媒保護

発電機の使われ方として，ガス欠まで運転される場合がある．ガス欠間際では間欠的にインジェクタに燃料が供給され，さらに回転数を一定に保つように自動でスロットルを制御するガバナ制御も加わり，A/Fおよび回転数が大きく変動する．その際，未燃ガスが排出ガス触媒に流れ込み異常高温となるため，排出ガス触媒の性能劣化が懸念される．

そこで，既存のエンジン回転数制御機能を利用したガス欠検出制御を構築し，燃料残量センサ等を追加することなく対応した．この制御は，スロットル開度が全開付近にも関わらず，回転数が極低回転のまま上昇しない事象が続いた場合をガス欠と判断し，エンジンを速やかに停止させる．

これによりコストアップすることなく排出ガス触媒の保護を可能とした．

3.2. バックアップ発電機

3.2.1. 無給油で12時間連続運転

タンク容量の20%増量と上記FIシステム技術の採用により，定格負荷の50%でタンク満タンからガス欠までの連続運転時間は現行に対し1.5倍となり無給油で12時

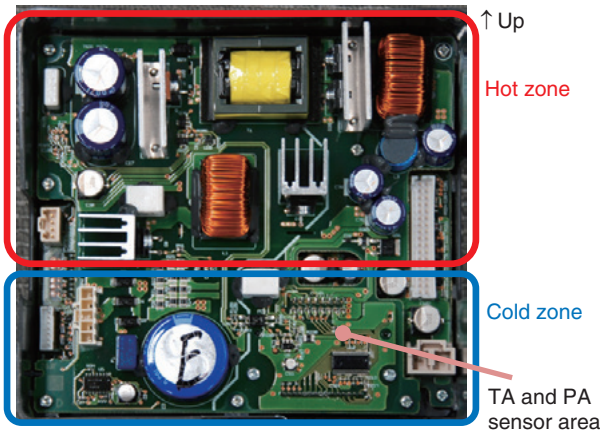


Fig. 7　GCU circuit board

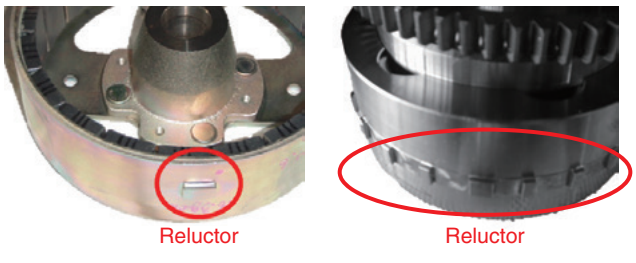


Fig. 8　Reluctor

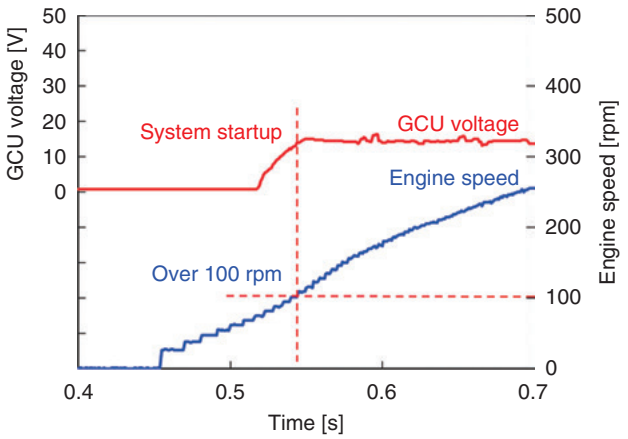


Fig. 9　Power supply at startup

間連続運転を可能とした．現行モデルとの比較を Fig. 10 に示す．

3.2.2. 最大出力の向上

発電機用 FI システム採用でキャブレタシステムでは必要不可欠なベンチュリをなくすことができ，エンジン最大出力が現行モデルに対し 3% 向上した．さらにインバータの高効率化と点火時期の最適化により現行モデルでは 6500 VA であった最大出力を 7000 VA まで向上させた．起動時の電力特性を Fig. 11 に示す．

これにより，起動時に大きな電力を必要とするエアコン等のモータ負荷に対応可能となり，さらなる発電機用途の拡大につながった．

発電コイルは，出力アップのためマグネットの材質変更による磁力強化をおこない，インバータはパワーモジュールの見直しによる効率向上を実施した．

しかし，最大出力増加に伴いインバータの最大発熱量も増加するため，シミュレーションにより冷却フィン形状を最適化し冷却性能を向上させた．

インバータの発熱シミュレーション結果の温度分布を Fig. 12 に示す．フィン形状を放射形状にすることで，風の流れを分散し，冷却性能を向上させた．

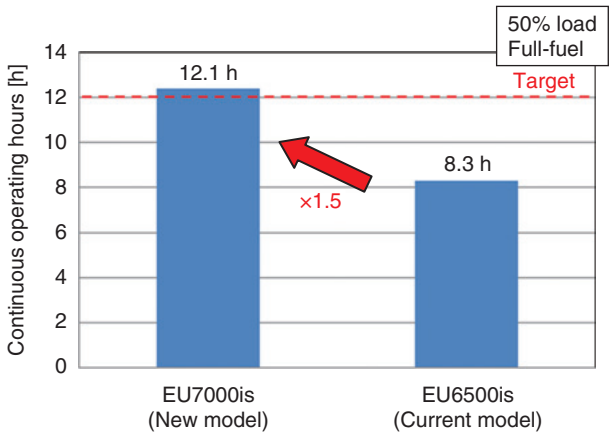


Fig. 10 Continuous operating hours

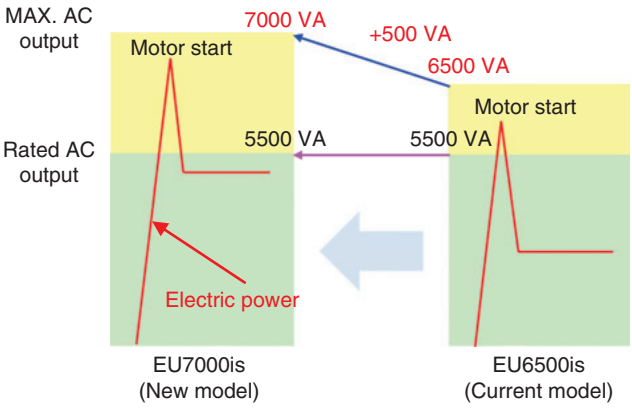


Fig. 11 Maximum power

3.2.3. 長期保管性およびメンテナンス性向上

バックアップ発電機は長期保管されることが頻繁にある．キャブレタシステムの場合，構造上ガソリンが外気と接触するため，長期保管時にはキャブレタチャンバ内のガソリンを抜く必要がある．しかし，FI システムの構造上，ガソリンは外気との接触が少なく劣化しにくいため，FI システム（インジェクタ，燃料ホース等）からガソリンを抜く必要はなく，保管前のメンテナンス性が向上した．

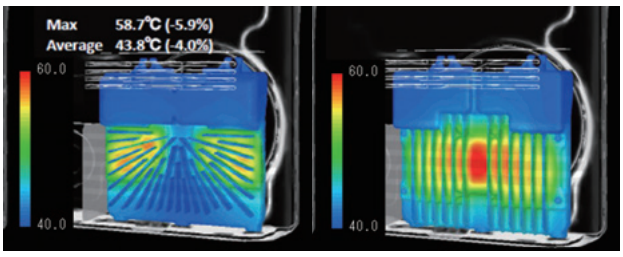
また，発電機は二輪車や四輪車と違いガソリンスタンドから直接給油できないため，携行缶等に汲み置いたガソリンを使用することが多い．これにより燃料タンク内への塵埃の侵入が多くなるため，燃料ポンプはタンク上面へ配置し（Fig. 3），タンク上から燃料ポンプを着脱可能とすることで，燃料フィルタのメンテナンスを容易にした．

3.2.4. 始動操作性の向上

FI システム搭載に伴い，キャブレタシステムでは必要とされた燃料コックとチョーク機構が不要となり，始動操作が簡略化された．

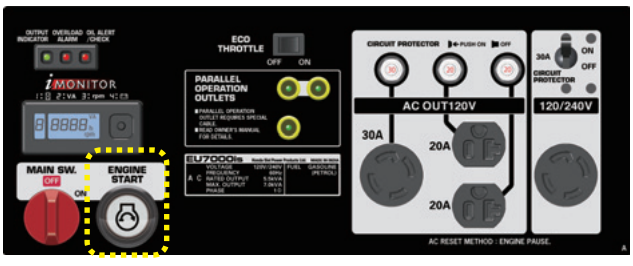
このメリットをさらに訴求するために，プッシュスタート方式を採用した．現行モデルはイグニッションキーをまわしクランキングをおこなっていたが，本モデルではプッシュスタートボタンを押しクランキングする方法を採用し始動操作を一新した（Fig. 13）．

始動操作は，プッシュスタートボタンを短押しすると自動的にセルモータが最大 5 秒作動するシステムとした．エンジンが始動すると速やかにセルモータは停止する．この操作方法により，現行モデルと比較し，より使い勝手が向上し，さらに先進性を高める操作性となった．



EU7000is (New model) EU6500is (Current model)

Fig. 12 Simulation result



Push start button

Fig. 13 Control panel

4．まとめ

コンパクト性を維持したまま，バックアップ電源としての訴求力を高めたFIシステム搭載発電機を開発した．

（1）発電機用FIシステムの開発

・発電機用FIシステムを開発し燃費を22%向上した．

・インジェクタとスロットルボデーを一体化することで，コンパクト性はそのままにFIシステムをレイアウトした．また，PA，TAセンサの基板実装化およびスロットル開度センサの削減により，コストアップミニマムでシステムを構築した．

・電源回路の最適化およびGCUの最低動作電圧を下げることでバッテリレスリコイルスタータ始動を可能とした．

・ガス欠制御を構築し，排出ガス触媒の保護をした．

（2）バックアップ発電機としての開発

・発電機用FIシステム採用により無給油で12時間連続運転可能とした．

・インバータの高効率化およびエンジン諸元の最適化により最大出力を6500 VAから7000 VAまで向上した．

・FIシステム搭載により長期保管性を向上し，また燃料ポンプをタンク上から着脱できる構造とし燃料フィルタのメンテナンス性を向上した．

・プッシュスタート方式採用による始動操作性を向上した．

参考文献

（1）田中良男，小野寺泰洋，岡部格，伊藤隆司：インバータ発電機「EU6500is」の低騒音・軽量化技術，Honda R&D Technical Review，Vol.19，No.2，p.37-43

（2）赤松俊二，上田稔，林徹，大内勝博：小型二輪車用統合型フューエルインジェクションシステムの開発，Honda R&D Technical Review，Vol.17，No.2，p.1-7

■著　者■



齋藤　茂



小野寺泰洋



橋爪　崇



布川剛史

CFD を用いた高効率水ポンプの開発

Development of High-Efficiency Water Pump Using CFD Simulation

秋 山 直 寛* 紺 地 隆 秀*
Naohiro AKIYAMA Takahide KONCHI

要 旨

水ポンプは長時間にわたり連続で使用されることが多いので，汎用製品の CO_2 排出量の大部分を占めており，燃費の改善が要求されている．

そこで本開発では燃費改善をねらいとして，数値流体解析を用いて，水ポンプの作業性能の調整と効率向上を達成する仕様を開発した．

開発した水ポンプは，東南アジア地域の低揚程灌漑作業をおこなう３インチポンプユーザをターゲットとした．ターゲットに合わせたポンプ性能の調整，ポンプ効率の向上，小排気量エンジンの適用，空燃比の調整をおこなうことで，市場の作動領域で従来型に対し 20％以上の燃費向上が達成されることを予測し，試験にて効果を確認した．

ABSTRACT

Water pumps are often used for many continuous hours, and as a result, they account for a large part of the CO_2 emissions of general-purpose products. Therefore, it is desirable that the fuel consumption of such pumps be improved.

In order to make such an improvement, computational fluid dynamics was used to develop water pump specifications that would adjust the working performance and enhance the efficiency of such pumps.

The water pump developed herein was targeted at users of three-inch pumps doing irrigation work with low head (lifting height) in Southeast Asia. The researchers forecast that the new pump could improve fuel consumption by more than 20% compared to a current model within the operating range of the market, thanks to adjustment of the pump performance in line with the needs of the target market, enhancement of pump efficiency, use of a low-displacement engine, and adjustment of air-fuel ratio. The effect was then confirmed by testing.

1．まえがき

1.1. 水ポンプを取り巻く環境

近年，人口増加と温暖化の影響を受けて世界的規模で水資源の確保が課題となっている．食糧増産の傾向は今後も続くと予想され (Fig. 1)[1]，それと共に水需要が増加すると考えられている．一般的に，水資源の活用を補助する機械として世界各国で水ポンプが使用されており，食糧増産と水需要の増加とともに水ポンプの需要も増加すると予測される．

水ポンプの作業内容は，水田や畑の灌漑，池やプールなどの排水，水位調整，水タンクへの給水など様々である．

市場においては 4 - 8 時間にわたり連続で使用されることが多く，他の機械と比べて CO_2 排出量が多くなる傾向にある．Honda が販売する各種汎用製品の CO_2 排出量分析においても，水ポンプが全体の CO_2 排出量の 85% を占めることが予測されている (Fig. 2)．

したがって，今後の需要増大に伴い，よりいっそう CO_2 排出量が多くなることが予想されるため，水ポンプの燃費改善とそれに伴う CO_2 排出量の低減は，水ポンプ製品を扱うメーカの責務と考える．

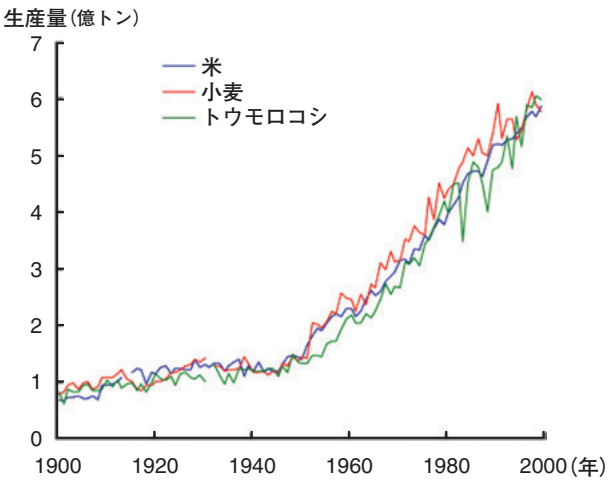


Fig. 1 Quantity of crops production

＊汎用 R&D センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_5

1.2. 自社水ポンプの販売状況分析

Honda における水ポンプの販売状況について述べる．水ポンプの販売は 1967 年より始まっている．製品ラインナップは吸込，吐出口径のインチ別で分類されており，2011 年度の販売結果によると，3 インチ口径のポンプが最も販売台数が多く，全体の 52% であった (Fig. 3)．

販売地域別については，中国，東南アジア，オセアニア地域で約 44% を占める結果であった (Fig. 4)．

1.3. 市場の特徴

世界各地域の市場における水ポンプについて，流量と揚程を指標とした作動点の領域分布を示す (Fig. 5)．用途や設置環境，石油燃料に対する意識などにより，各地域の水ポンプの作動領域には特徴がある．水田の灌漑に水ポンプを多用する東南アジア地域は他とは明らかに異なり，低揚程で流量を抑えた低回転の作動領域であった．

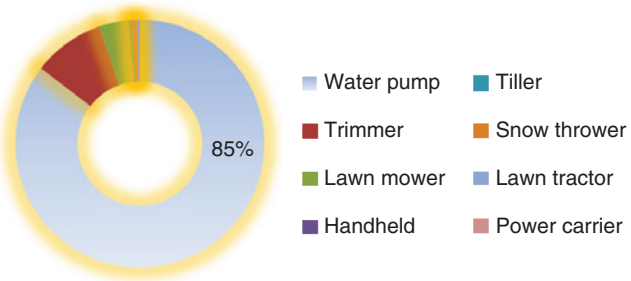


Fig. 2　CO_2 emission ratio of Honda power products

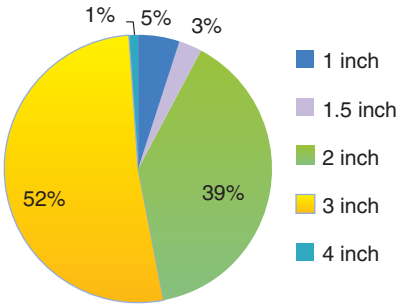


Fig. 3　Inch categorized sales result of Honda pumps

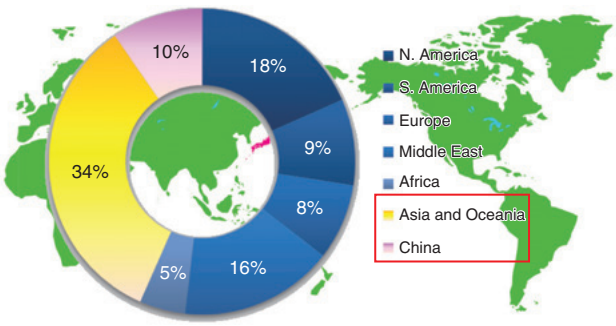


Fig. 4　Area categorized sales result of Honda pumps

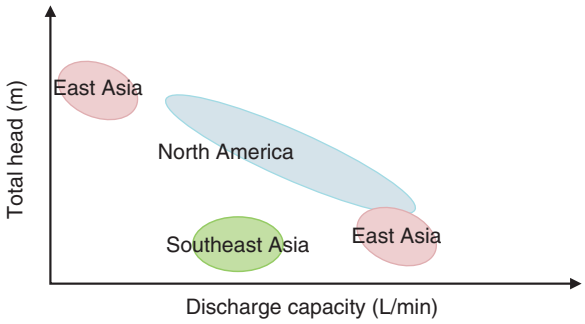


Fig. 5　Work point map of water pump

2．開発ポンプの特徴と目標値

2.1. 開発ポンプの特徴

Honda が販売する水ポンプは主に自吸式水ポンプであり，水の輸送性能であるポンプ性能に加え，始動時に水源から水ポンプ本体まで水を引き上げる自吸性能が要求される．自吸とは，ポンプ内のみに水が満たされた状態から吸込み側の空気を排出する作業のことである (Fig. 6)．自吸時にポンプ内で空気と水が混合されたのち，出口付近で空気のみ分離および排出される様子を Fig. 7 に示す．

高い自吸性能を得るには水と空気の境界面の乱れを大きくして混合を促進する方法や，混合した流体を遠心流に導いて分離を促進させる方法などがあるが，自吸後の通常作業時にはそれらの自吸性能を向上させるための構造がポンプ効率を低下させる傾向にあるため，ポンプ性能と自吸性能は相反する関係にあることが多い．

2.2. 部品構成

水ポンプの主要な構成部品は Fig. 8 のように Impeller, Volute, Casing, Inlet, Outlet である．

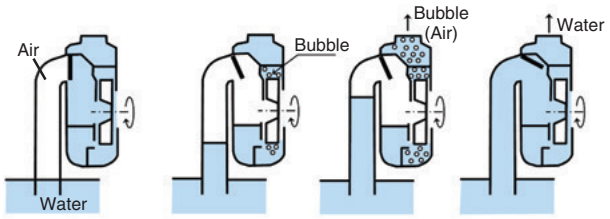


Fig. 6　Self-priming image

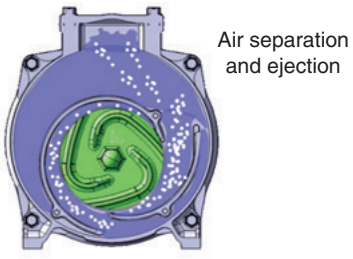


Fig. 7　Water circulation image of self-priming process

これらの形状は，ポンプ性能と自吸性能がバランスするポイントで決定する必要があるが，本開発ではポンプ性能に特化した仕様とした．

2.3. 開発ターゲットと目標

本開発ではユーザ数の多い東南アジア地域で低揚程灌漑作業をおこなう3インチポンプユーザをターゲットとし，実用燃費が改善するポンプを開発する．

目標として，インペラ形状の最適化によるポンプ効率の向上とエンジン搭載変更などの調整を含めて実用燃費20%以上の改善を目指す．

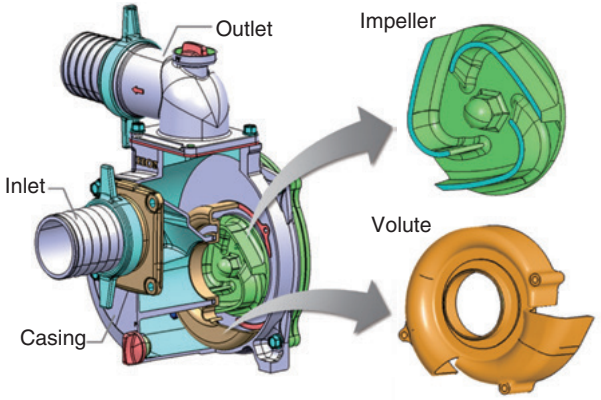


Fig. 8　Main parts of water pump

3．仕様検討

3.1. ポンプ性能の調整コンセプト

低揚程，低回転の運転に適したポンプ性能を検討する．例として，最大流量と効率が等しい二つのポンプA，Bを比較する．BはAに比べて最大揚程が低い仕様である．二つのポンプを低揚程，低回転の作動点で運転する場合，Fig. 9のようになる．このとき，作動点におけるA，Bの効率はFig. 9のように違いが表れ，Bの方がより高い効率で運転することが可能となる．

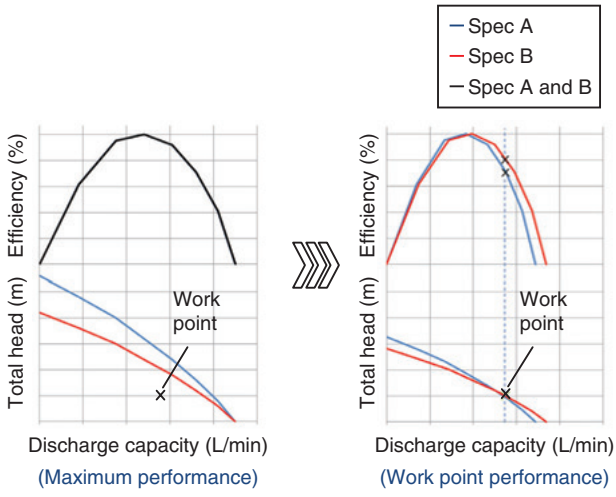


Fig. 9　Concept image of pump performance tuning

Table 1　CFD setting

Solver	Pressure-based
Viscous model	k-ω Standard
Motion	Mesh motion
Scheme	SIMPLE
Fluid materials	Water

したがって，本開発の仕様は作動点での効率を優先し，最大揚程が低くなるようにポンプ性能の調整をおこなう．

3.2. 仕様の検討手法

本開発では商用の数値流体解析（CFD）ソフトウェアを使用してポンプ性能を予測し，水ポンプの形状検討をおこなった．CFDに用いた各種条件をTable 1に，CFDのモデルイメージをFig. 10に従来型を対象とした予測精度の確認結果をFig. 11に示す．ポンプ性能の予測精度は± 5%以

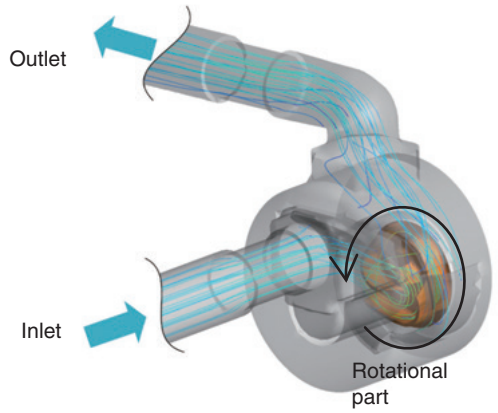


Fig. 10　CFD image

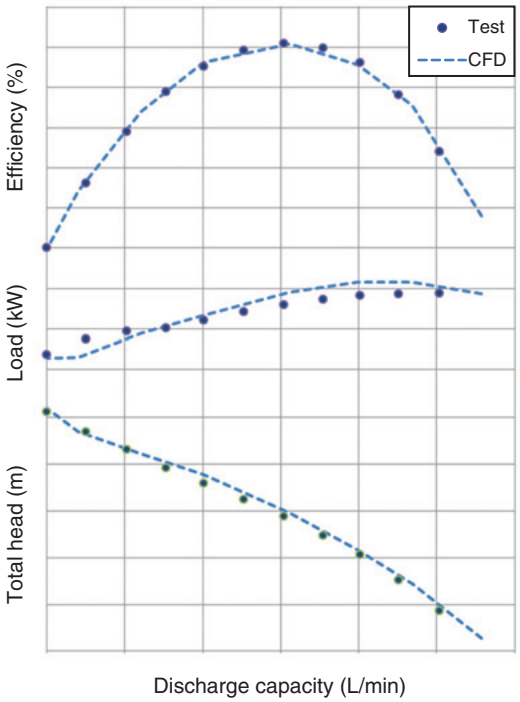


Fig. 11　Correlation result compared with test and CFD

内，所要動力特性の予測精度は± 7% 以内，水ポンプ効率の予測精度は± 3% 以内である．締切揚程近傍ではキャビテーションが起きやすく，この領域の精度向上は今後の課題であるが，ポンプ性能の基礎検討をおこなうにあたり十分に実用レベルにあると考える．自吸性能については水と空気の二相をあつかう解析であり現状では予測精度を欠くと判断したため，形状に対する傾向を試験にて確認した．

3.3. インペラ形状の検討

本開発のインペラ形状は，Fig. 12 に示す各種パラメータを調整して検討した．本開発で調整するパラメータとポンプの性能には Fig. 13 に示す相関がある．

本開発では，始めに翼枚数の選定をおこなった．従来型のインペラを基に翼枚数とポンプ効率の相関を確認した結果 Fig. 14 に示す傾向がある．一般的に，翼枚数が多い場合にインペラ外周部での水と空気の混合が抑制されて自吸性能が低下する傾向にあるが，本開発では効率を優先して翼枚数を選定した．

次に，所要動力と揚程に影響の大きい外径を検討した．ポンプ性能の調整コンセプトを達成するには最大揚程を下げる必要があるが，従来型に対して小外径化した場合にポンプ効率が下がる傾向があったため，外径は従来型と同じ径とした．

最終調整として，その他のインペラパラメータを調整した．流出側の翼角度については，角度を大きくすると自吸性能が向上する傾向にあるが，本開発ではポンプ効率を優先して従来型に対して小さい角度を選定した．なお，ユーザの水源環境によっては小石や植物などの異物を水ポンプ内に吸い込む可能性があり，それらがインペラ内で詰まることを避けるため翼間距離や翼高さは一定以上の幅を確保した．

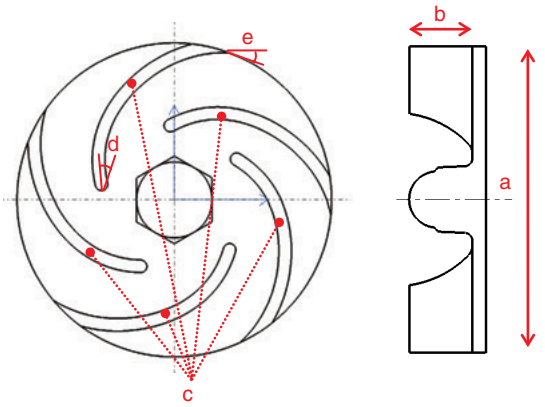


Fig. 12　Impeller parameters

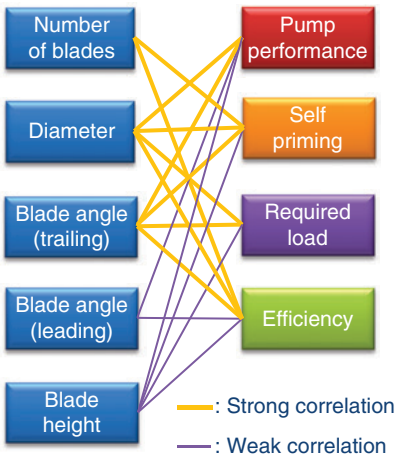


Fig. 13　Correlation map of parameter and pump performance

3.4. ポンプ性能予測

検討の結果，ポンプ性能に大きく影響するインペラ形状は Fig. 15 に示すようになった．CFD により従来型は Fig. 16 に示すように，翼背側で全圧が低下する部分（赤点線部）が見られたが，本開発の灌漑用では Fig. 17 に示すようにそれらの全圧低下を解消するよう翼形状の調整をおこない，効率向上を図った．

ポンプ内流路における各部の損失ヘッドと揚程について，理論揚程[(2)]に対する割合でヘッドバランスを確認した（Fig. 18）．インペラ前後の流れにおける損失ヘッドは従来

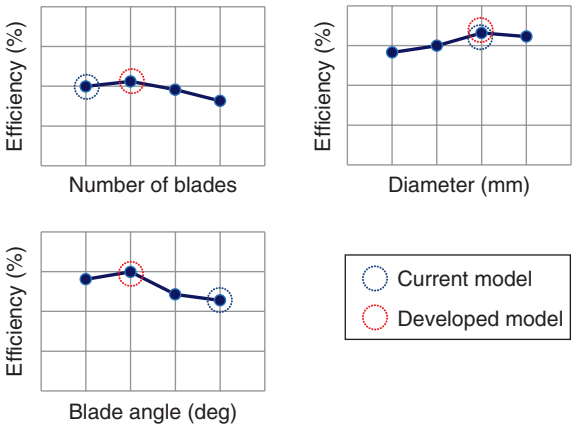


Fig. 14　Correlation of impeller parameters and efficiency

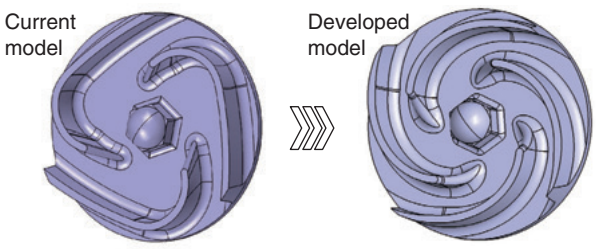


Fig. 15　Comparison of impeller

型と灌漑用でほぼ同等であるが，インペラ部における損失ヘッドは灌漑用の方が小さい．これはインペラ形状を改良したことによる．その結果，損失ヘッドの合計値が少ない灌漑用の方がポンプのアウトプットとして得られる揚程の割合が大きくなる．

ポンプ諸性能の解析結果を Fig. 19 に示す．インペラ形状の調整により，コンセプトどおりのポンプ性能となる見通しを得た．また，最大所要動力が低減し，ポンプ効率として約 8 ポイント向上することが予測された．

3.5. 燃費改善の予測

燃費改善について予測する．(1)ポンプ効率が向上し，所要動力が低減したため燃費が約 7% 改善される．また，(2)GX160 エンジンから GX120 エンジンへ載せ替えた場合，両エンジンの燃費特性の違いにより燃費が約 8% 改善する．さらに，(3)ポンプとのマッチング点で GX120 エンジンの空燃比を最適化した場合，燃費が約 7% 改善する．

これら(1)から(3)の効果により約 22% の燃費改善が可能となる見通しを得た (Fig. 20)．

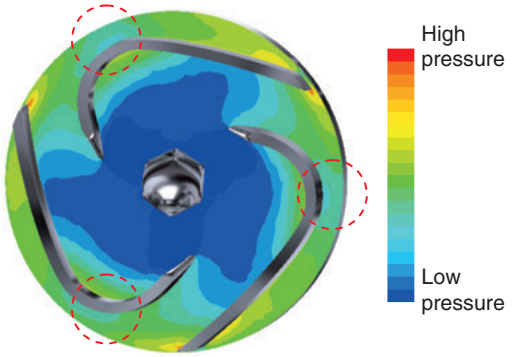


Fig. 16 CFD analysis result (Current model)

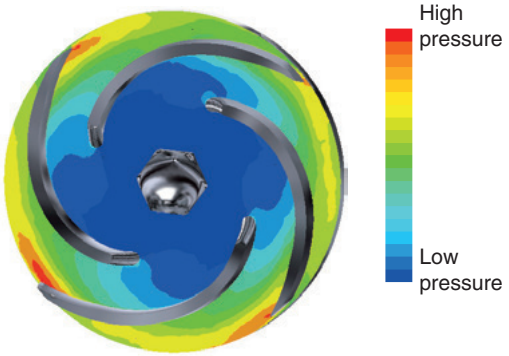


Fig. 17 CFD analysis result (Developed model)

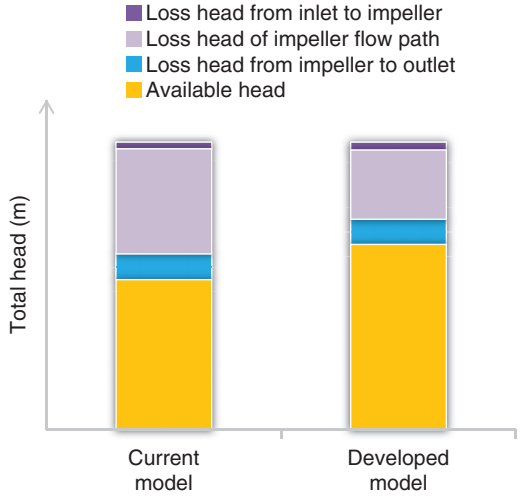


Fig. 18 Head balance

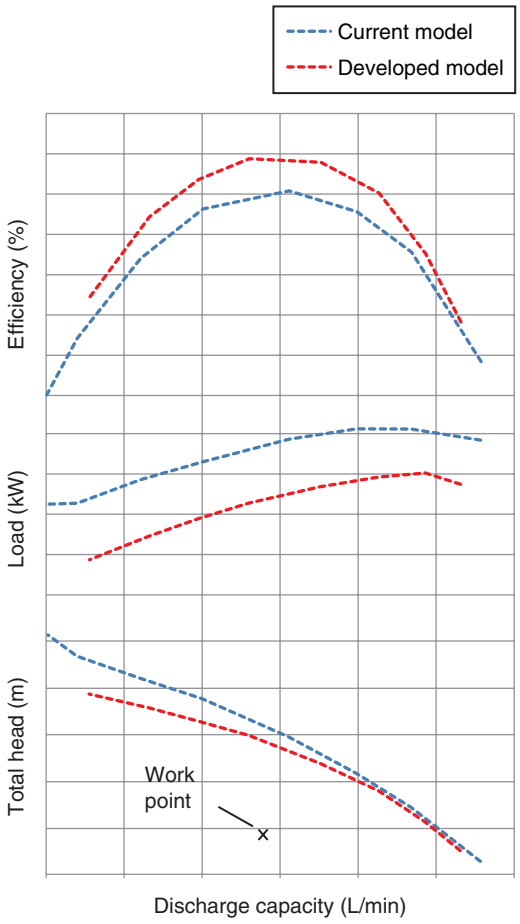


Fig. 19 CFD analysis result of pump performance

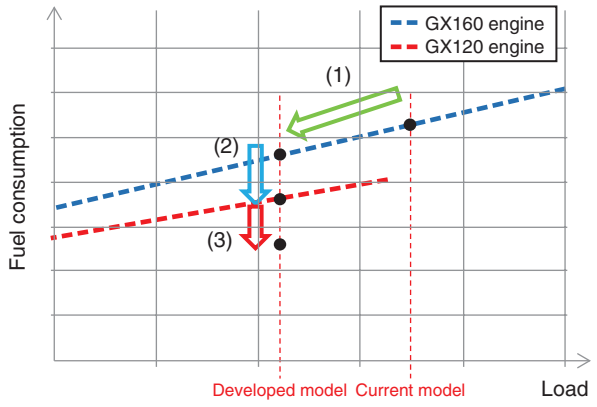


Fig. 20 Calculation of fuel consumption enhancement

4．試験結果

4.1. 諸性能の試験結果

本開発の灌漑用ポンプについて，諸性能の実測結果を Fig. 21 に示す．CFD で予測したとおり最大効率が約 8 ポイント向上することが確認された．また，低揚程，低回転の作動点における効率は約 10 ポイント向上しており，ポンプ性能の調整による効果も確認できた (Fig. 22)．

さらに，GX120 エンジンの適用と空燃比の調整をおこなった仕様にて燃費を確認した (Fig. 23)．その結果，東南アジア地域の作動点における燃費が従来型に対して約 24% 改善することが確認され，予測どおりの燃費改善効果を得ることができた．

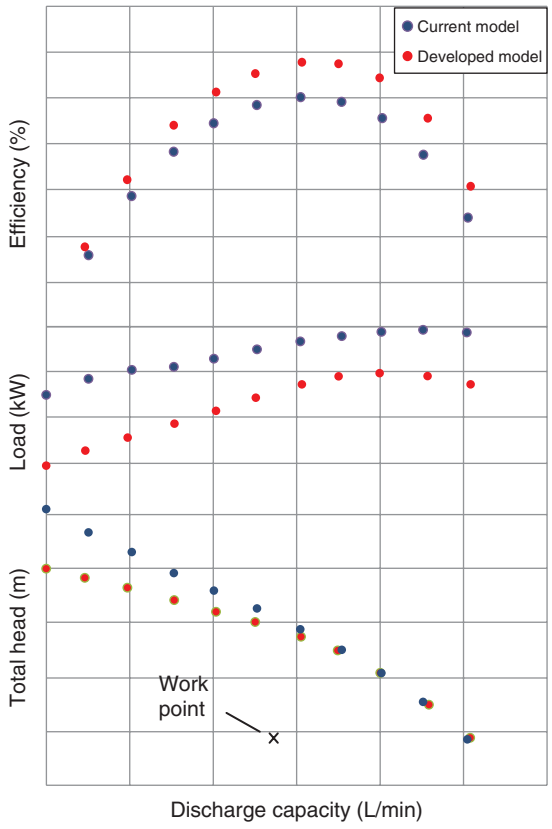


Fig. 21　Test result of pump performance

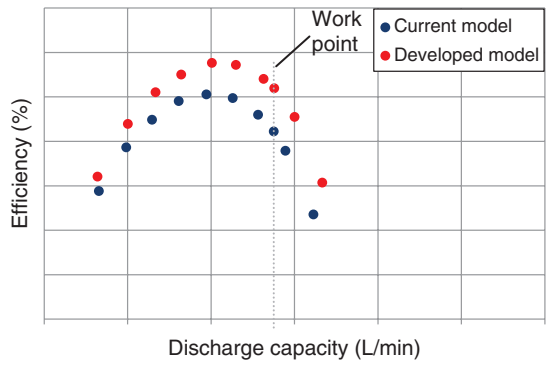


Fig. 22　Test result of pump efficiency at work point

	Engine	Work point CO (%)
Current model	GX160	4.7
Developed model	GX120	5.5

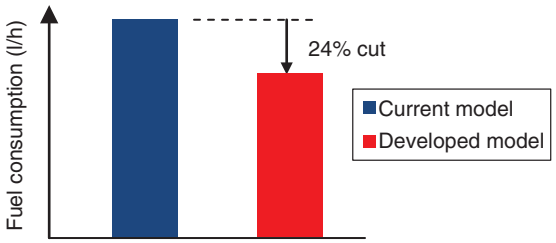


Fig. 23　Test result of fuel consumption at work point

5．まとめ

本開発は CFD 解析による予測技術を用いて低揚程灌漑作業に合わせて各要求性能を調整して燃費改善を達成するポンプの開発に挑戦した．その結果，8 ポイントのポンプ効率向上を達成し，小排気量エンジンの適用と空燃比の調整を合わせて，東南アジア地域の灌漑作業において実用燃費を 20% 以上改善する水ポンプを開発することができた．

自吸性能とキャビテーションの予測が今後の課題でありこれらの技術開発を達成することで，より精度の高い CFD 開発につなげていきたい．

参考文献

（1）小宮山宏：人間活動の膨張の世紀，地球持続の技術，岩波新書，p.11(2007)
（2）ターボ機械協会編：ターボ機械－入門編－〔新改訂版〕，日本工業出版，p.234(2013)

■著　者■



秋山直寛



紺地隆秀

UNI-CUB の開発

Development of UNI-CUB

矢田　渉*　Wataru YADA
達富由樹*　Yoshiki TATSUTOMI
長谷川誠*　Makoto HASEGAWA

要　旨

Honda は，人が行き交う屋内空間や施設などで人と調和して移動することができるパーソナルモビリティをめざして開発に取り組んできた．

2009 年に U3-X，2012 年に UNI-CUB，そして 2013 年には UNI-CUB β を発表した．

いずれも全方向への移動が可能で，かつ搭乗者の両足の間に収まるコンパクトなサイズの着座式倒立振子型パーソナルモビリティである．

本稿では，U3-X から採用された前後左右全ての方向に移動することができる全方位駆動車輪機構 Honda Omni Traction Drive System を用いた UNI-CUB の技術進化について述べる．また 2012 年 6 月から開始した日本科学未来館との共同実証実験における UNI-CUB という新しいモビリティの社会実装に関する検討について紹介する．

ABSTRACT

Honda has been engaging in development efforts aimed at new personal mobility that allows people to move in harmony with others in indoor spaces, facilities, and other such places where there are people coming and going.

In 2009, Honda announced the U3-X, in 2012 the UNI-CUB, and then in 2013 the UNI-CUB β.

All these are personal mobility devices capable of movement in all directions, which are also sit-on style, inverted pendulum-type, compact devices that fit between the rider's legs.

This paper describes the technological evolution of the UNI-CUB, which uses the Honda Omni Traction Drive System adopted since the U3-X that enables movement in all directions. This paper will also introduce the implementation in society of this new form of mobility known as the UNI-CUB. The demonstration tests carried out with the National Museum of Emerging Science and Innovation starting in June 2012.

1．まえがき

倒立振子の制御モデルの研究は，バイオメカニズムという人体の工学的研究分野において，既に 1970 年代に一軸の倒立振子の理論解析と模型を使った実証のレベルでおこなわれている[(1)-(3)]．

四半世紀前の 1989 年，弊社の社内イベントであるアイディアコンテストにおいて，世界に先駆けた倒立振子型の乗り物の二つのタイプ（一軸型：平行二輪駆動，二軸型：単球駆動）が出展され，国内で多方面の方々の興味を引いた[(4)-(6)]（Fig. 1）．一軸型の乗り物はその後 2001 年 12 月に，セグウェイ社（Segway Inc.）が商品化して新しいモビリティとして認知されてきた[(7),(8)]．

一方，二軸型の単球駆動方式は，近年においても実用化に向けた研究や開発がおこなわれてきている[(9)-(11)]．その中で，Honda は駆動機構にオムニホイール機構を応用した独自の駆動輪を考案して訴求力のあるモビリティ開発を開始した．

Honda は人が行き交う屋内空間や施設などで，人と調和して移動できるパーソナルモビリティをめざし，U3-X を 2009 年に世の中に発表した．U3-X には，より多くの場所で男女問わず幅広い年齢層の人を搭乗可能にするため，



(a) Single-axis type　(b) Dual-axis type

Fig. 1　Original mobility devices with inverse pendulum

＊スマートモビリティ開発室

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_6

Honda 独自の Honda Omni Traction Drive System（HOT ドライブ）とバランス制御技術に加え，後部に新たな車輪を配置することによって容易な旋回を可能にし，更なる技術開発を重ね UNI-CUB として進化させてきた[12]．今回，2012 年と 2013 年にそれぞれ世の中に発表してきた UNI-CUB，UNI-CUB β への技術進化および実証試験の例について紹介する．

2．UNI-CUB β への研究開発の変遷

二足歩行ロボット（ASIMO）の研究で培ったバランス制御技術と，前後と左右を自由に移動できる全方位駆動車輪機構の HOT ドライブにより，搭乗者自身が身体を傾けて体重を移動させることで，全方位への移動と速度を調整することを可能とする新たなパーソナルモビリティを研究開発し，価値検証のためのショーモデルとして U3-X を 2009 年に発表した（Fig. 2，Table 1）．

U3-X の開発時のねらいは，搭乗者と調和でき，また周囲の人々とも調和できるパーソナルモビリティとし，

（1）ハンズフリーでの操作･移動が容易なこと
（2）搭乗者の足つき性の良さによる安心感
（3）人幅に納まるコンパクトなサイズ
（4）周囲の歩行者と同じ目線の高さ

を商品要件とした．

次モデルの UNI-CUB の開発は 2012 年からの実証実験への投入を目的としておこなわれた．そこでは，人が自由自在に歩くことと同様な移動を，搭乗者の直観的な操作で実現できることを目指し，両足の間に収まるコンパクトなサイズを保ちながら前後左右斜めへの移動だけでなく旋回できるパーソナルモビリティを開発した（Fig. 3，Table 2）．

UNI-CUB β は実用における使い勝手を更に向上させるため，UNI-CUB の実証実験の結果をフィードバックさせ，

（1）小型･軽量化
（2）人と機体の一体感を更に高めるためのデザイン
（3）搭乗者や周囲の人に対する親和性を高めるための柔軟な外装設計

を課題として開発し，ビジネス実証モデルとして 2013 年に発表した（Fig. 4，Table 3）．



Fig. 2　U3-X

Table 1　Specifications of U3-X

Size (L × W × H) (mm)	315 × 160 × 650
Seat height (mm)	650
Battery type	Lithium-Ion Battery
Maximum speed (km/h)	6
Duration time (hour)	1

Table 2　Specifications of UNI-CUB

Size (L × W × H) (mm)	520 × 345 × 745
Seat height adjustment range (mm)	745 - 825
Battery type	Lithium-Ion Battery
Maximum speed (km/h)	6
Range (km)	6
Application environment	Barrier-free indoor environments

Table 3　Specifications of UNI-CUB β

Size (L × W × H) (mm)	510 × 315 × 620
Seat height (mm)	620
Battery type	Lithium-Ion Battery
Weight (kg)	25
Maximum speed (km/h)	6
Range (km)	6 (approximately 1.5 hours at speed of 4 km/h)
Application environment	Barrier-free indoor environments



Fig. 3　UNI-CUB



Fig. 4　UNI-CUB β

3. UNI-CUB の独自技術

UNI-CUB の外観を Fig. 5 に示す.

本体のシートフレーム下部に回転軸で支持した HOT ドライブを前輪とし, 回転軸から後方にスイングアームを介して配置したオムニホイールの旋回輪を後輪とする機体構造を持つ (Fig. 6). 前輪は前後左右に移動できる駆動力により機体の移動とバランスさせる機能とし, 後輪は専ら車体を旋回させる機能を有する.

3.1. HOT ドライブの原理

HOT ドライブの動作原理は Fig. 7 に示す複数の小径フリーローラを円周上に配置した大径車輪を外見上の特徴に持つ. 内部両側面にはドライブディスクが配置され, その円周上に角度をつけて並べて配置されたフリーローラ (以下, 駆動ローラ) を有し, それらが大径車輪付属のフリーローラに押し当てられた状態で回転力を与える構造となっている.



Fig. 5 External view of UNI-CUB

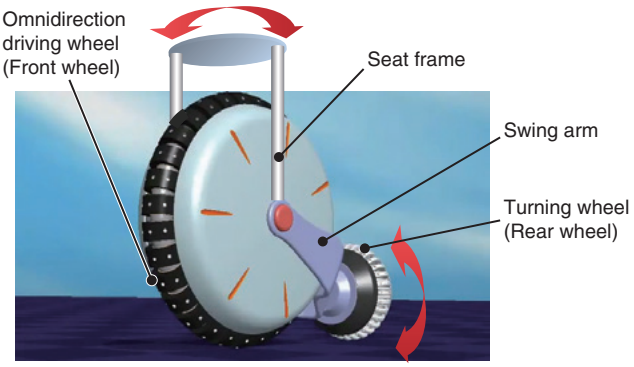


Fig. 6 Drive train with omnidirectional wheels

左右のドライブディスクを同じ角速度 (同一回転方向) で駆動させることにより小径フリーローラの軸回転を止め, 大径車輪の軸回転のみを作動させることで機体が前後方向に移動する. 逆に左右のドライブディスクを逆の角速度 (逆回転方向) で駆動させることにより大径車輪の軸回転を止め, 小径フリーローラの軸回転のみ作動されることで, 機体は左右方向に移動する. また左右のドライブディスクを異なる角速度 (大きさと方向) とすることにより, 大径車輪と小径フリーローラの軸回転が複合して作動され, 斜め方向の移動を可能としている.

この原理を応用した HOT ドライブを UNI-CUB に採用している.

3.2. バランス制御技術

機体と搭乗者を一体と見なした時の重心の挙動に応答する高度な制御系を構築した. その重心は搭乗者の重心移動によって変化するが, 左右のドライブディスクは, それを搭乗者の移動意思に関わる指令値とみなして動作しながら搭乗者の姿勢安定も同時におこなう. 前後左右に移動する速度と方向の指令値は, 本体に対する搭乗者の相対的な重心の位置ずれ量から読み取っている. また, 姿勢安定化のバランス制御は, 機体の加速度センサと角速度センサの信号を入力し, HOT ドライブの車輪を前後左右に駆動させて傾きの復元力を適正に発生させるように機能する (Fig. 8).

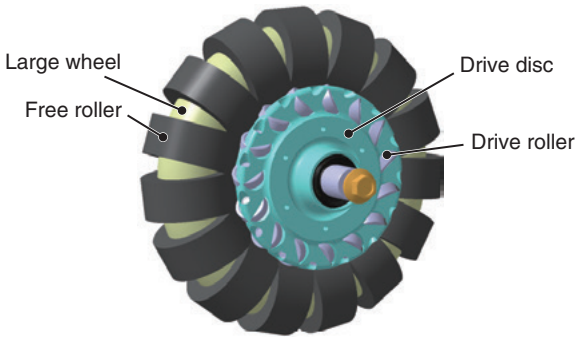


Fig. 7 Principle of HOT drive system

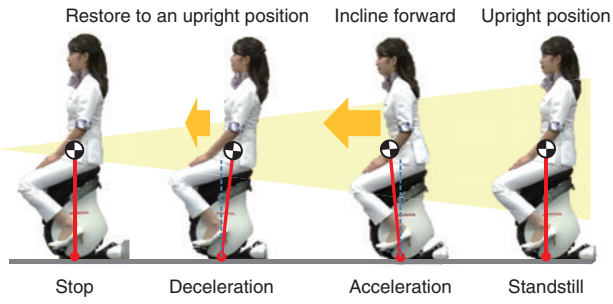


Fig. 8 Balance control

4．UNI-CUB としての進化

4.1. 旋回機能の必要性

駆動源として HOT ドライブのみを有する U3-X は一点で接地しており，構造上ヨーモーメント（接地点の鉛直軸周りのモーメント）を発生させられないため，それ自身で旋回の動作ができない．したがって，旋回させるためには，Fig. 9 に示すように，搭乗者がつま先を地面に軽く接触させ，その接触点をピボットとして旋回するといった操作テクニックを必要とし，一般の方が手軽に操作することが容易ではなかった．

この様な課題に対して，UNI-CUB には旋回輪を付加し旋回機能を持たせている．旋回輪は HOT ドライブの大径輪のように円周に複数のフリーローラを有する構造の駆動輪である．それは，Fig. 10 に示すように前輪と後輪の左右方向の移動速度差を検出して旋回角速度を発生させるように制御される．

旋回輪を付加しての移動制御では，前進から旋回および横移動から旋回への滑らかな遷移を実現するために，移動中に上体を傾けて体重移動をすることにより，旋回を可能とした．



Fig. 9　U3-X turning procedure using toe

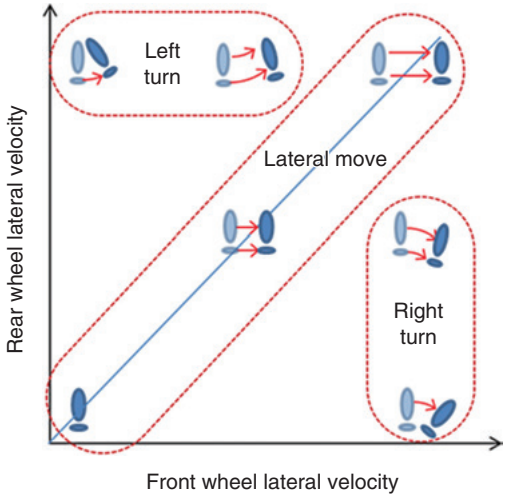


Fig. 10　Schematic diagram of lateral movement and turning

4.2. 前進と旋回の関係

前進から旋回への滑らかな遷移を実現するために，前進中に上体を横に傾けて体重移動することにより旋回するだけでなく横移動を発生させた．しかし初期の制御設定では，旋回中の機体の向きが旋回円の接線方向に対して外側を向くようになり，旋回の先が見えにくいといった違和感が発生した．そこで体重移動に対する機体の応答特性について官能評価テストを繰り返し，前進速度が高くなるにつれて横方向への体重移動に対する旋回の角速度の比が大きくなるような特性を導出した．前進速度と横方向への体重移動および旋回角速度の関係を模式的に表した図を Fig. 11 に示す．

これにより低速域から高速域までの全速度領域で，搭乗者意図に合った操作性を実現できている．

4.3. 横移動と旋回の関係

美術館などで壁に並んだ絵を見る際は，壁の絵を見ながらゆっくり横に移動することができ，さらに別の展示エリアに移動する場合には，より大きく横に体重移動することにより進行方向に車体向きを変えながら移動することが求められる．こうした動作を実現するためには，横移動ゲインと旋回ゲインをバランスさせた制御が必要であった．

Fig. 12 に，本機体に適用されている制御により実現される，左右への体重移動に対する旋回角速度と横移動速度の

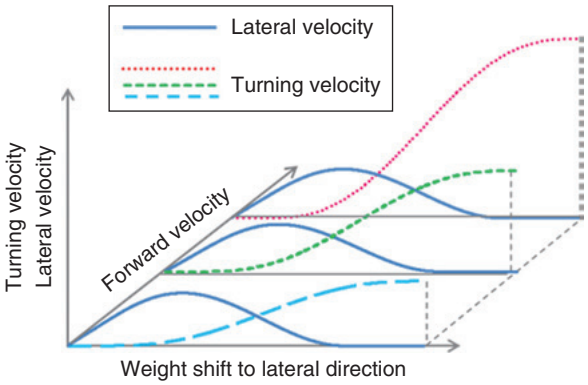


Fig. 11　Schematic diagram of turning motion generation (Velocity-dependent)

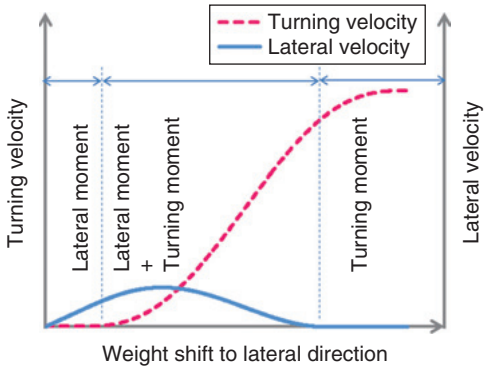


Fig. 12　Schematic diagram of turning motion generation

関係を模式的に示した.

横体重移動量が小さい時には, 旋回をせずに横移動のみとし, 横体重移動量が大きい時には, 横移動と旋回が合わさった移動をするようにした. 横体重移動量がさらに大きくなると, 旋回のみさせるように機体応答特性を設定し美術館などで求められる動作感覚を実現した.

4.4. バリアフリー対応

U3-X (Fig. 2) の使用環境は屋内フラットフロアを想定し, 点字ブロックや誘導ブロック等の段差のある屋内バリアフリー空間を想定していなかった. 実証実験をするにあたり, それら 5 mm の段差を踏破できる性能を必要とした. HOT ドライブ (Fig. 7) を構成する大径車輪, 小径車輪, ギヤの寸法を変更し段差踏破性能を向上させた.

5. 日本科学未来館との共同実証実験

UNI-CUB の発表後, 2012 年 6 月より日本科学未来館との共同実証実験を開始した[13].

Honda の目的は人と調和するパーソナルモビリティのコンセプトを検証することである. 一方, 日本科学未来館は, 社会と研究者の間で新しい知を分かち合うことをミッションとしており, この共同実証実験は双方にとってメリットのある内容として合意された. 例えば, 長時間のガイドツアーは徒歩では疲れてしまい実現ができなかったが, UNI-CUB を用いることで可能なことが実証された.

実験は以下に述べるような順序で段階的に人との調和を検証できるように設計し, 実行された.

5.1. ステージでのデモによる UNI-CUB 活用

まず, 日本科学未来館のサイエンスコミュニケータ (SC) が来場者に UNI-CUB の特徴を伝える 15 分間のデモをおこなった (Fig. 13).

ステージは来場者が間近に見ることができるレイアウトとし, UNI-CUB を使った SC が観覧者に近づいて意見を聞くなどの動作をして, お互いの親和性が確認された.



Fig. 13 Scene of UNI-CUB demonstrationa at an exhibition

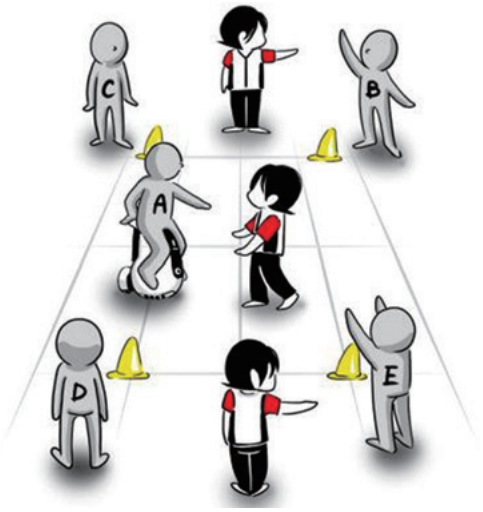
5.2. 館内巡回および案内業務での UNI-CUB 活用

SC が UNI-CUB を使用して館内の巡回および来場者への案内業務をおこなった. このとき初めて観覧者の中に UNI-CUB が入っておこなったが, すれ違う人の約半数がすぐには UNI-CUB に気がつかないほどの対人親和性を確認した.

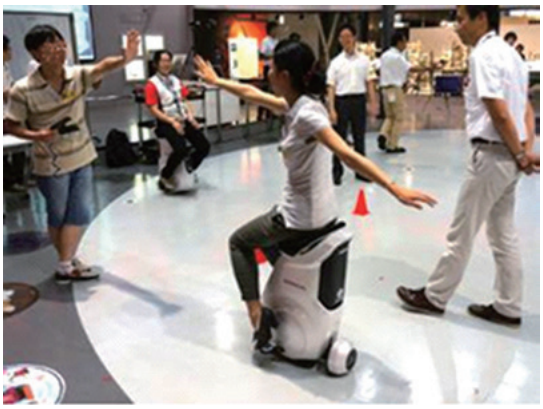
この使い方では周囲から違和感なく受け入れられる親和性が確認されると共に, 来館者たちとの自然な対話が生まれる様子が見られた.

5.3. 5 分間の体験会

来場者に対して短時間の体験会をおこなった. 参加者は延べ 89 名, 年齢は 11 歳から 81 歳と広い年齢層であった. 体験会は参加者を 5 人 1 組とし, 各組 1 台の UNI-CUB を割り当て, 体験時間を 1 人あたり 5 分とした. 搭乗者の視線の方向や指さし動作等の自然な体重移動により UNI-CUB が動くことを感じてもらう様に配慮した. これによりほぼすべての人が時間内に操作を習熟していた. また, 搭乗者以外の 4 人には搭乗者を程良い距離で広く囲んで立ってもらい, 互いに人との調和を自然に感じられるように配慮した〔Fig. 14(a), (b)〕.



(a) Illustration of training method



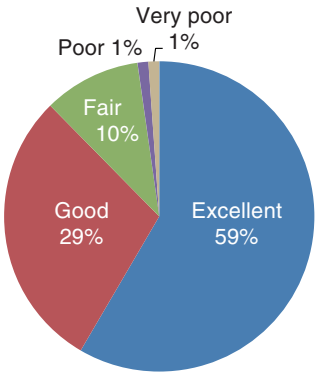
(b) Photo of training scene

Fig. 14 Test area for 5-min. trial ride experience

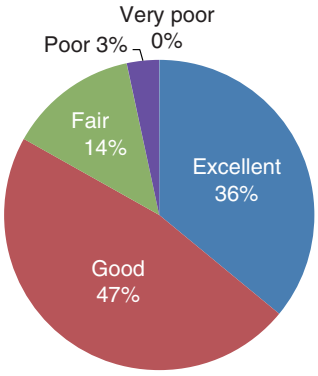
体験会参加者に対しておこなったアンケート結果を Fig. 15 に示す．内容は，周囲との親和性，移動のしやすさ，安心感の３項目についてそれぞれ非常に良い，良い，ふつう，悪い，非常に悪い，の５段階評価をおこなった．５分間という短時間の体験であったにもかかわらず，周囲との親和性や移動のしやすさは高評価であり，UNI-CUB のコンセプトが受け入れられていることを確認した．

5.4. 来場者による館内ツアー体験会

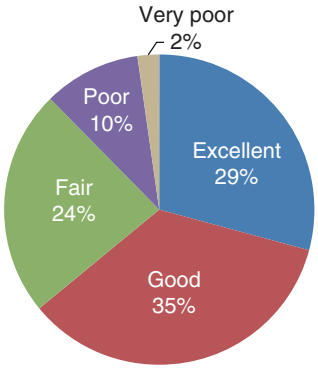
来場者が UNI-CUB を使用し館内展示物を見学するツアーを実施した (Fig. 16)．ツアーの所要時間はアンケート等を含め約１時間，来場者数人を１組にし１名の SC がガイドする設定とした．体験者のコメントから，UNI-CUB を使用すると歩いて回るよりも展示物の見学に集中できることが確認できた．また，実際のツアー時間よりも短く感じるというコメントも得られた．



(a) Sense of affinity with surrounding people



(b) Ease of controlling mobility device



(c) Secure feeling

Fig. 15　Questionnaire results



(a) Scene of riders in motion



(b) Scene of visitors enjoying exhibits

Fig. 16　Guided tour

6．UNI-CUB β での活動

2013 年 11 月開催の第 43 回東京モーターショーでの発表後，全国各地のモーターショーに出展し，多くのお客様に体験頂いた．

その後，課金ビジネス実験として，日本科学未来館，株式会社ホンダカーズ大阪などにリースを開始し活用して頂いている．

このような経験をもとに，各地での展示会における会場内のガイドツアーに展開して実施している (Fig. 17)．

日本科学未来館では 2014 年 4 月より SC の巡回業務用に利用を開始し，10 月には同館内 UNI-CUB ステーション (Fig. 18) を開設して，有料乗車体験ツアーを開始した．同ツアーは日本科学未来館の所定ゾーンを乗車体験する未来館入門ツアーと，常設展示フロアを SC の解説付でまわる常設展ツアーの二つの料金設定で実施されている．

また，2014 年 10 月にはアメリカの人気ロックバンド (OK Go) のミュージックビデオに UNI-CUB β が登場し，世界中で視聴された (Fig. 19)．このような用途での利用は想定外であった．



Fig. 17 Scene of UNI-CUB units on standby at an exhibition



Fig. 18 UNI-CUB station



Fig. 19 Scene from “OK Go” music video

7. まとめ

Hondaは従来より人と調和するモビリティの開発をおこなってきた. Honda独自のHOTドライブ機構を用いた2009年のU3-Xであたかも歩行者のような移動を実現するコンセプトを発表した. その後, より操作性を高めたUNI-CUBを用いて2012年に日本科学未来館において社会実装の実証実験をおこなった. 2013年にはUNI-CUB βを発表, 実証実験結果を反映し, 使用できる人の対象を広げたコンパクトなパッケージとした. また2014年からはリースという形でビジネス実験を開始することができた.

今後広く認知されるにつれて, ミュージックビデオへの採用に見られるように, 様々な形で普及が進むことが期待される.

参考文献

(1) 江村超, 酒井高男:反動力によって立位を維持する倒立振子の研究, バイオメカニズム, バイオメカニズム学会, No. 2, p. 321-328(1973)

(2) 大西昇, 伊藤宏司, 土屋和夫, 伊藤正美:身体運動時の逆応答の制御理論的考察, バイオメカニズム学会誌, Vol. 3, No. 4, p. 21-25(1979)

(3) 江村超, 玄相昊:倒立振子から始めた動的2脚ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 4, p. 418-421(2005)

(4) 手のひらでほうきを倒立させる原理, 日経メカニカル, 1989-12-25, p. 94-95(1989)

(5) 鶴賀孝廣:倒立振子型乗り物(1)ファンタジー(不安立子)バイク, 日本ロボット学会誌, Vol. 8, No. 3, p. 364(1990)

(6) 鶴賀孝廣:倒立振子型乗り物(2)一球車, 日本ロボット学会誌, Vol. 8, No. 3, p. 365(1990)

(7) Ha, Y. S., Yuta, S.: Trajectory tracking control for navigation of self-contained mobile inverse pendulum, Proc. IEEE/RSJ Int'l. Conf. on Intelligent Robots and Systems, p. 1875-1882 (1994)

(8) Nguyen, H. G., Morrell, J., Mullens, K. Burmeister, A. B., Miles, S., Farrington, N., Thomas, K. M., Gage, D. W.: Segway Robotic Mobility Platform, Proc. of SPIE - The International Society of Optics Engineering, 5609, Mobile Robots XVII (2004)

(9) Endo, T., Nakamura, Y.: An omnidirectional vehicle on a basketball, Proc. The 12th Int'l Conf. on Advanced Robotics (ICAR), p. 573-578 (2005)

(10) Lauwers, T. B., Kantor, G. A., Hollis, R. L.: A Dynamically Stable Single-Wheeled Mobile Robot with Inverse Mouse-Ball Drive, Proc. IEEE Int'l. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2006), p. 2884-2889 (2006)

(11) Kumagai, M., Ochiai, T.: Development of a Robot Balancing on a Ball, Proc. International Conference on Control, Automation and Systems 2008, p. 433-438 (2008)

(12) 矢田渉, 小橋慎一郎, 長谷川誠, 城倉信也, 横井元治, 益田綾子：着座式倒立振子型車両の実証実験報告（第１報）, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 16-13, p. 11-14(2013)
(13) 野副晋, 坂巻たみ, 小林直樹, 笹木一義, 小橋慎一郎, 長谷川誠, 末田健一：パーソナルモビリティUNI-CUBの展示空間における実証実験, 日本科学未来館展示活動報告, Vol. 9(2014)

■著　者■


矢 田　 渉


達 富 由 樹


長谷川　誠

SPORT HYBRID SH-AWD 用後輪駆動２モータの振動低減

Vibration Reduction of Two Motors of Rear Wheel Drive for SPORT HYBRID SH-AWD

矢崎　学*　　青木忠信*
Manabu YAZAKI　　Tadanobu AOKI

要　旨

SPORT HYBRID SH-AWD用後輪駆動２モータは小型，高出力，高トルクと静粛性の両立をねらいとして開発した．モータは小型化のため，集中巻きステータを採用しつつ，スロットコンビネーション，磁気回路，制御手法に着目し，振動や車室内騒音の原因となるトルク変動低減を開発目標の一つとした．

磁気回路には徐変エアギャップを用いた．徐変エアギャップはロータ中心とステータ中心をずらし，曲率を変え，ロータ回転に伴いエアギャップ量が連続的に変化する形状とした．徐変エアギャップの採用により，トルクの低下を抑えながらトルク変動を低減することができた．制御手法には高調波重畳を適用した．本制御はモータ駆動制御電流にトルク波形のピークを打ち消すような高調波成分を重畳することでトルク変動の低減をおこなっている．

新開発したモータは従来仕様と比較してコギングトルクおよび，トルクリプルを 50％，モータ単体振動を 10 dB 低減し，車室内騒音を 13 dB 以上低下させた．

ABSTRACT

The two motors employed to drive the rear wheels in the SPORT HYBRID SH-AWD system were developed to balance compactness, high power, high torque, and quietness. Stators employing concentrated windings were used to reduce the size of the motors, and development focused on the combination of slot number and pole number, the magnetic circuits, and control methods in an attempt to satisfy one of the development goals, the reduction of torque fluctuation, which is a cause of vibration and cabin noise.

A Gradually Enlarged Air Gap was adopted for the magnetic circuits. The Gradually Enlarged Air Gapshape offsets the centers and modifies the curvature of the rotor and the stator, producing continuous change in the air gaps with the rotation of the rotor. The application of the Gradually Enlarged Air Gap method made it possible to reduce torque fluctuation while also controlling decline in torque. Superposition of higher harmonics was applied as a control method. This control method reduces torque fluctuation by superposing high-frequency components on the motor traction control current in order to cancel the torque waveform peak.

The newly developed motors realize a 50% reduction in cogging torque and torque ripple in comparison to the previous specifications, and motor vibration has been reduced by 10 dB and cabin noise by more than 13 dB.

1．まえがき

近年，自動車への環境性能要求の高まりから，さまざまな種類の Hybrid Electric Vehicle（HEV）の適用拡大が急速に進んでいる[1]．従来は HEV における環境性能の優位性が重要視されていたが，ここ数年では動力性能，静粛性など付加価値を求める声も高まっている．静粛性を求める車両に対して，エンジンの振動や騒音の影響を受けない，モータのみでの走行が可能な HEV システムも各種，実用化されている[2]-[4]．この静粛性のメリットを最大限に活用するために，HEV に限らず Electric Vehicle（EV）のような電動車において車両感度や振動伝達経路に着目した開発がおこなわれている[5]-[8]．

一般的に，駆動用モータはステータ形式に分布巻きを適用し，トルク変動を低減することで振動と騒音の低減を図る[9]ことが多い．しかし，分布巻きはコイルエンドが大きくなるため，大きな搭載スペースが必要である．そこで，コイルを分割して重ね合わせてコイルエンドを短縮する構造が提案されている[9]が，多点溶接が必要であり，製法が複雑になる．

＊四輪 R&D センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_7

一方，小型化の手法として集中巻きがある[10]．集中巻きは分布巻きに比べてコギングトルク，トルクリプルといった回転時のトルク変動が大きいことが課題である．

集中巻きモータの振動低減手法としてステータの変形形態に着目し，変形を抑える基本骨格の選定[11]，鉄心ティースや磁石極にスキューをおこなった構造[12]，[13]，ロータに多孔を設けたり[14]，ステータの形状[15]-[17]により磁気抵抗を調整する手法が提案されている．さらに，制御を用いた低減手法も報告されている[18]，[19]．

本稿では，埋込磁石型（Interior Permanent Magnet：IPM）方式のロータと集中巻きステータを組み合わせた埋込磁石形交流同期モータ（IPM モータ）において，小型，高出力，高トルクを実現しつつモータ振動，車室内騒音低減をおこなった．新開発の磁気回路設計技術および制御技術を報告する．

2．システム，モータ概要

2.1. SPORT HYBRID SH-AWD

SPORT HYBRID Super Handling All - Wheel Drive（SPORT HYBRID SH-AWD）は三つのモータを搭載した高効率ハイブリッド All - Wheel Drive（AWD）システムである[20]，[21]．Fig. 1 にシステムの全体構成と Table 1 にシステムの仕様を示す．前輪を駆動するＶ型６気筒 3.5 Ｌ直噴エンジンとモータ（DCT モータ）およびトランスミッションは車両前部のエンジンルームに搭載される．後輪は Twin Motor Unit（TMU）の二つのモータ（TMU モータ）で駆動される．

2.2. ハイブリッドシステムオペレーション

Fig. 2 に本システムのオペレーションを示す．モータのみを使用した走行モードとして，TMU 駆動による発進および加速をおこなう EV ドライブモードがある．さらに，エンジンによる前輪駆動をおこなうエンジンドライブモード，TMU によるアシストをおこなうハイブリッドドライブモードがある．ドライバ要求や路面状況によってエンジンと TMU 両方の駆動による AWD 制御がおこなわれる．

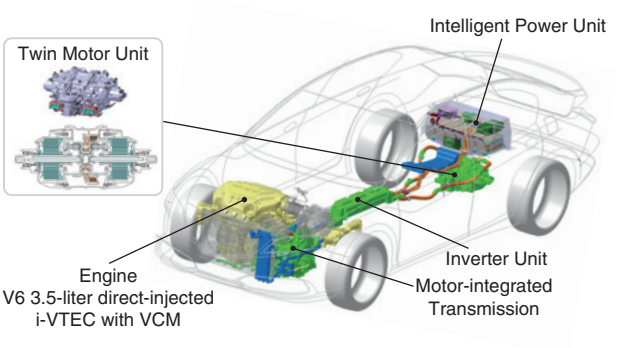


Fig. 1　SPORT HYBRID SH-AWD system

Table 1　System specifications

System power [kW]		281
Engine	Type	V6 3.5L, Direct injection, SOHC, VTEC 24-valve
	Power [kW]	231 at 6,500 rpm
	Torque [Nm]	371 at 4,700 rpm
DCT Motor	Type	Interior Permanent Magnet Synchronous Motor
	Power [kW]	35 at 3,000 rpm
	Torque [Nm]	148 at 500 to 2,000 rpm
TMU Motor	Type	Interior Permanent Magnet Synchronous Motor
	Power [kW]	27 at 4,000 rpm (× 2)
	Torque [Nm]	73 at 0 to 2,000 rpm (× 2)
Battery	Type	Li-ion
	Voltage [V]	260

2.3. 左右駆動力配分

Fig. 3 に AWD 制御における左右駆動力配分動作を示す．ステアリングの舵角や加減速状態に応じて左右後輪の独立な二つのモータを用いて駆動方向および減速方向のトルクに差をつけ，後輪に左右駆動力配分をおこなうことが可能である．さらに，本システムは旋回中の内輪で発生したエネルギーを電気的に回収して外輪に与え，旋回に必要な力を自ら生み出すことが可能な高効率 AWD システムである．

2.4. TMU および TMU モータ

TMU の外観図を Fig. 4 に示す．TMU は左右二つのモータ，減速機構と切離機構から構成される[22]．

Fig. 5 に TMU モータを示す．モータ形式は集中巻きステータ形式の IPM モータ，スロットコンビネーションは８極 12 スロット（8p12s）を採用した．小型化を目的とし，TMU モータに集中巻きを適用した[21]．

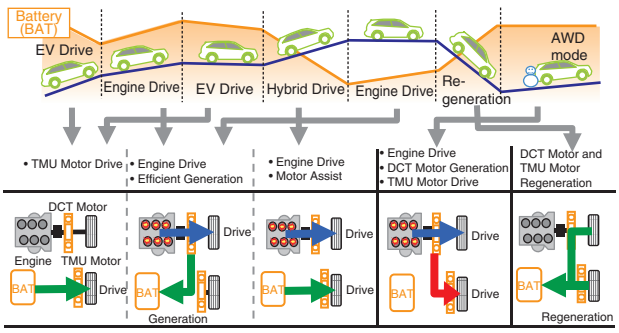


Fig. 2　Operation of SPORT HYBRID SH-AWD hybrid system

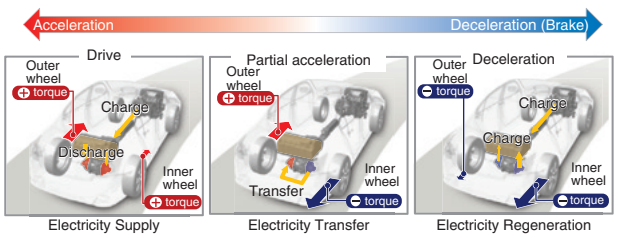


Fig. 3　Concept of torque vectoring

2.5. TMU モータ使用領域

Fig. 6 は 2.2. 節および 2.3. 節で述べたハイブリッドシステムオペレーションにおける TMU モータの代表的な動作点を示す．横軸にモータ回転数，縦軸にトルクを示しており，グラフ中の実線で囲まれた範囲がモータ動作範囲である．EV 発進時は低回転高トルク範囲，EV ドライブモード時は中トルク範囲が使われる．また AWD 制御時はモータ最大出力線に沿った範囲を使用するので回転数とトルクに関わらず TMU モータが使われる．

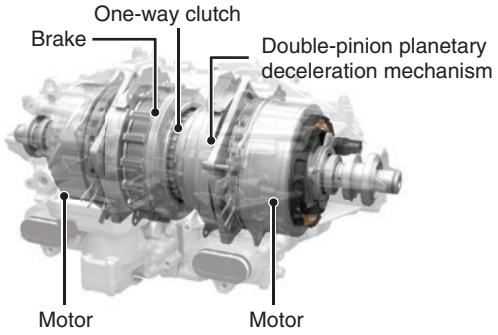


Fig. 4　External view of TMU

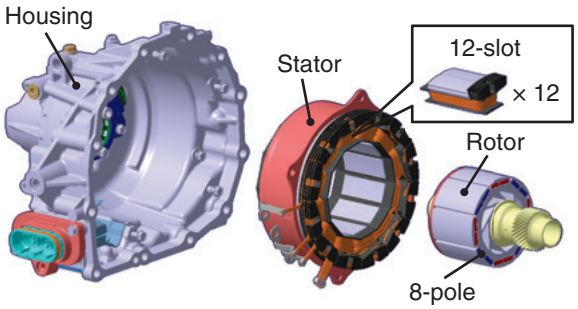


Fig. 5　Configuration of TMU motor

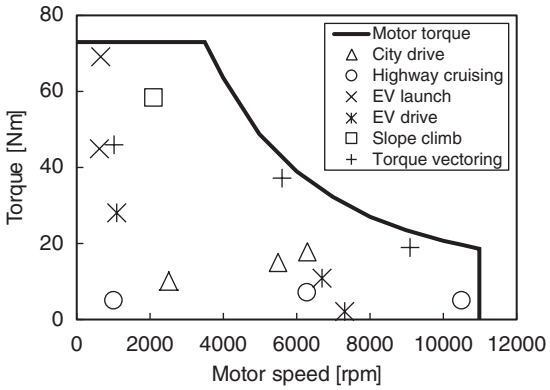


Fig. 6　Operating range of TMU motor

3．モータ振動と車室内騒音

集中巻きモータは，一般的に電気角 2 次成分と電気角 6 次成分の半径方向加振力を主要因とするステータの円環変形が振動と騒音の原因となる[11), (18), (19)]．特に，電気角 2 次成分の半径方向加振力がステータの円環 4 次変形を，電気角 6 次成分の半径方向加振力がステータの円環 0 次変形を引き起こす[11), (18), (19)]．さらに，トルク変動によるモータやユニットのねじれ振動，車体の揺すりも振動と騒音を引き起こす．本章では SPORT HYBRID SH-AWD 用後輪駆動 2 モータに集中巻きモータを適用し，車両走行時車室内音測定をおこない，課題となる振動，騒音を明確にする．

3.1. 電気角 6 次成分のモータ振動と車室内騒音

3.1.1. 車両走行時車室内音の次数

Fig. 7 に本システムの車両走行時車室内音の代表例を示す．横軸に車速を，縦軸に周波数を示す．本システムにおいては電気角 6 次に相当する周波数成分が他の成分に比べて顕著で課題であることがわかる．Fig. 8 にその時の電気角 6 次成分の室内音を示す．室内音は目標値を 13 dB オーバしている．

このようなモータ走行時の車室内音を低減するため，従来，車両感度や振動伝達経路，ギヤノイズとの関係性に着目しモータ振動と車両各部の共振点をずらしたり[5), (8)]，マウント方法を 2 重防振構造とし，高周波域まで防振特性を改善する手法[6)]がとられる．また，各コンポーネントの周波数特性を組み合わせ振動に対して低感度な車体を開発する手法[7)]がとられている．しかし，本システムにおいては，モータ磁気回路の新設計と制御により振動を低減し，SPORT HYBRID SH-AWD の適用を可能にした．

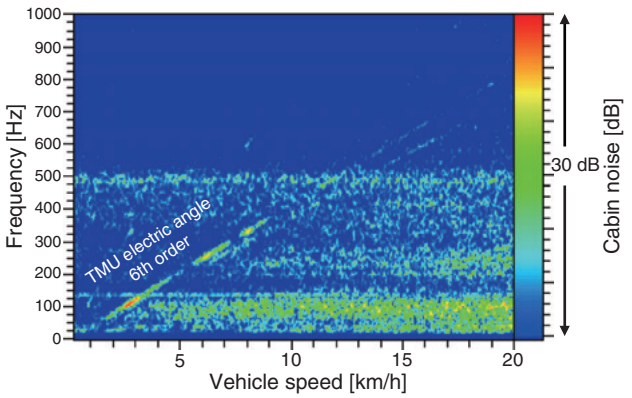


Fig. 7　3D map of TMU motor

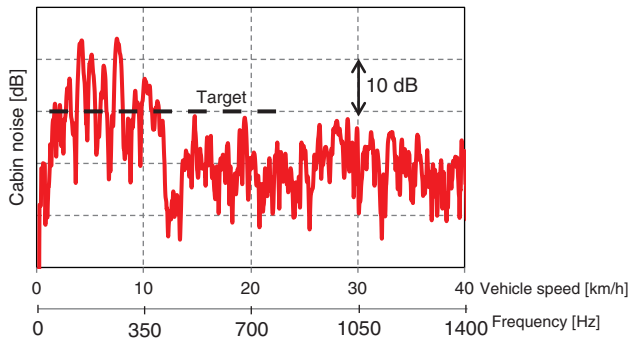


Fig. 8　Cabin noise of TMU motor (Electric angle 6th order)

3.1.2. 車室内音の発生原因

前述した TMU モータによって発生する車両走行時車室内音は電気角６次成分が顕著であり，そのメカニズムを説明する．この次数成分に相当する周波数は車両速度によって，従来のエンジン搭載車に対して広範囲の周波数範囲になる．車両速度によって変化する電気角６次成分の周波数と車両各部の固有振動モードが一致する周波数にてモータ振動が増加する[23]．この電気角６次成分の振動と固有振動モードに着目する．

Fig. 9 に TMU を搭載しているサブフレームとデフマウントを示す．Fig. 10 に振動源であるモータを搭載するハウジングの取り付け点（Point A）に対して，デフマウントのばねレートを変えた場合のサブフレーム取り付け点（Point B）の実走行時での各部振動データを示す．デフマウントばねレートが低い場合は全域において振動遮断できているが，デフマウントばねレートが高い場合は 400 Hz 以下にてデフマウントでの振動遮断がほぼ無いことがわかる．SPORT HYBRID SH-AWD として操縦安定性能を高めるために高バネレートのデフマウントを採用する場合，振動遮断との両立が課題である．

また，Fig. 11 に示すとおり，サブフレーム自体が 400 Hz 以下にて共振を持っており，モータ振動がサブフレームの振動を大きくしている．これらの理由により発進時，停止間際の低車速域のモータ音が大きい．

このようにモータの振動がサブフレームの共振を起振し，車室内音となって聞こえている．SPORT HYBRID SH-AWD として高い走行性能と静粛性を両立させるため，本システムの TMU モータ単体特性において，電気角６次成分の振動，騒音の低減が必要となる．

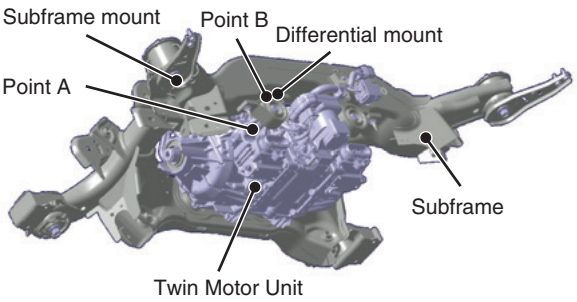


Fig. 9　Bottom view of TMU attached to subframe

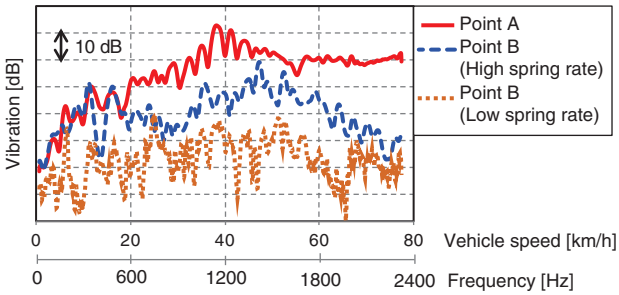


Fig. 10　Vibration of TMU and subframe mounting point

3.2. TMU ねじり振動による車室内音

3.1. 節で述べた電気角６次成分の振動，騒音に加えて，周波数が 1.3 kHz の音が発生する．本原因を調べると TMU の振動モード中に 1.3 kHz で共振が存在することがわかった（Fig. 12）．さらに TMU の変形モードを測定した結果，1.3 kHz に固有値を持つねじれ共振が存在することがわかった．これは TMU モータで走行した場合に，共振ピークと当たる車速にて音として認識される．

このねじり振動による車室内音は，左右２モータ形式の機構特有の現象である．

3.1. 節および 3.2. 節で述べたとおり，本車両と TMU は広範囲の周波数帯で振動，騒音を低減する必要がある．そのため，起振源となるモータの振動を低減する．

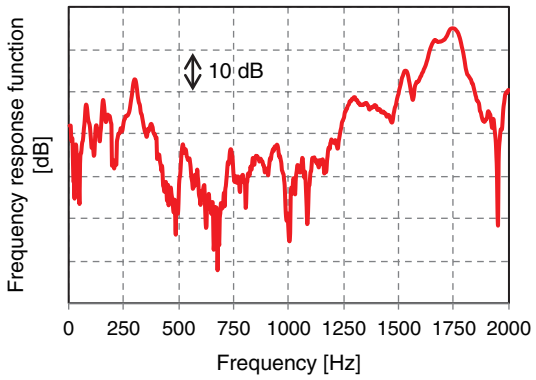


Fig. 11　Vibration of subframe

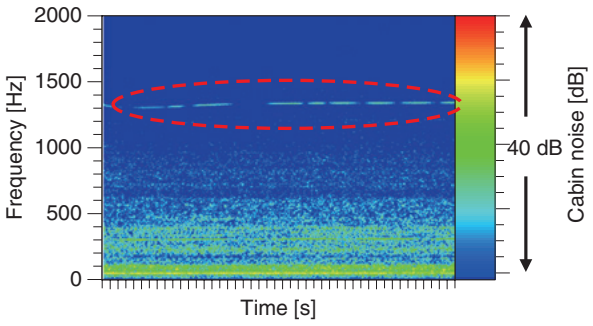


Fig. 12　3D map of TMU torsional vibration

4．磁気回路によるモータ振動と騒音の低減

4.1. スロットコンビネーション

モータのスロットコンビネーションを決める際は，使用する回転数とスロットコンビネーションで決まる電気角２次成分と電気角６次成分の周波数がステータの円環変形の共振点に当たらないように選択する．

TMU モータにおける，モータ回転数に対する周波数およびステータ変形の解析結果を Fig. 13 に示す．8p12s の場

合，電気角２次とステータ円環４次変形および電気角６次とステータ円環０次変形の共振が発生しない．この結果より，TMU モータにスロットコンビネーションとして 8p12s を選択した．

4.2. ステータ形状最適化

4.2.1. 徐変エアギャップ

本システムにおいて，車室内音の主要因である電気角６次の周波数成分を低減するため，U，V，W各相切り替わり時の磁束密度変動を緩和する手法として新たな磁気回路形状の設計をおこなった．

従来の形状を Fig. 14 の Case 1 に示す．モータの振動低減の手法として，ステータ形状またはロータ形状を部分的に変更し，エアギャップを広げ，磁気抵抗を調整することが知られている．例えば Fig. 14 の Case 2 に示す溝形状[16]，Fig. 14 の Case 3 に示す先端部のエアギャップ拡大[17]がある．しかしながら，これらの形状では，電気角６次成分は減らすことができるが，部分的にエアギャップを広げた数だけ高次の次数成分が増える．また，ロータに部分的に孔形状を設ける手法[14]もあるが，強度の観点からロータ形状の変更は実施しない．

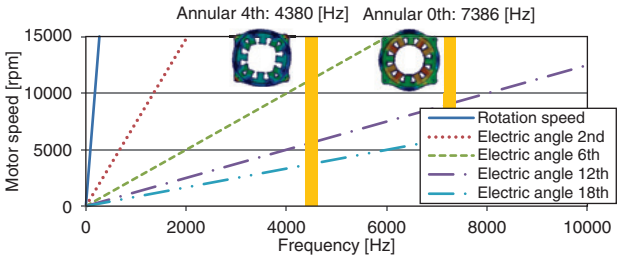


Fig. 13　Natural frequency of 8p12s motor

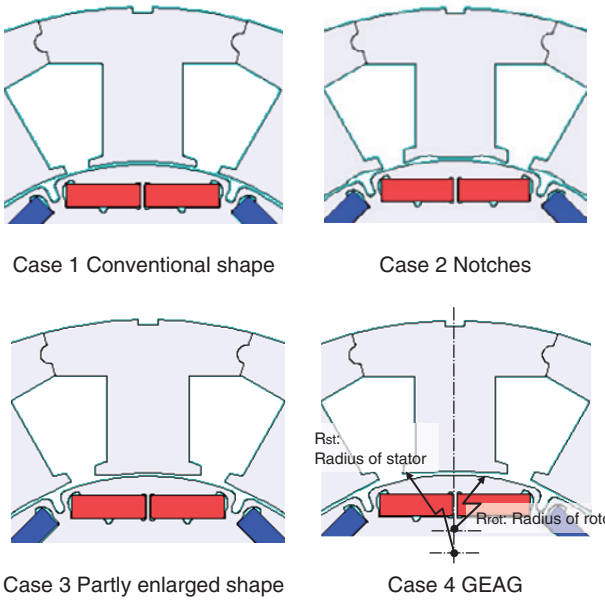


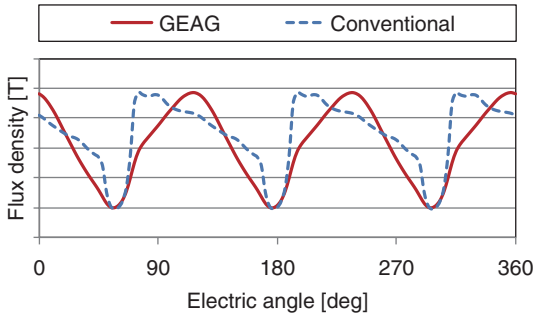
Fig. 14　Difference of magnetic circuits

そこで本モータでは徐変エアギャップ（Gradually Enlarged Air Gap：GEAG）を採用した．磁気回路形状を Fig. 14 Case 4 に示す．GEAG 形状はロータ中心とステータ中心をずらし，ロータとステータの曲率を変えた．

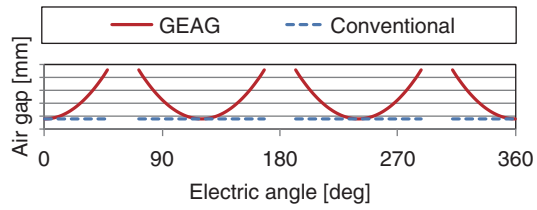
従来形状（Case 1）と GEAG 形状（Case 4）の電気角に対するエアギャップ量を Fig. 15 (b) に示す．Case 4, GEAG は電気角 0，120，240 deg で最もエアギャップが小さく，曲線的に変化する形状とした．Fig. 15 (a) に磁界解析より求めた従来形状（Case 1）と GEAG 形状（Case 4）の磁束密度変化の比較を示す．Case 4, GEAG を採用することで電気角 72，192，312 deg 付近の磁束密度変化を緩和することができた．Fig. 15 (c) に磁束密度変動の FFT 結果を示す．電気角２次以上の高調波成分を低減することができている．これら結果より，起磁力の高調波成分を低減できており，トルク変動および，加振力の高調波成分を低減できる．

4.2.2. エアギャップ変化量とトルク変動低減

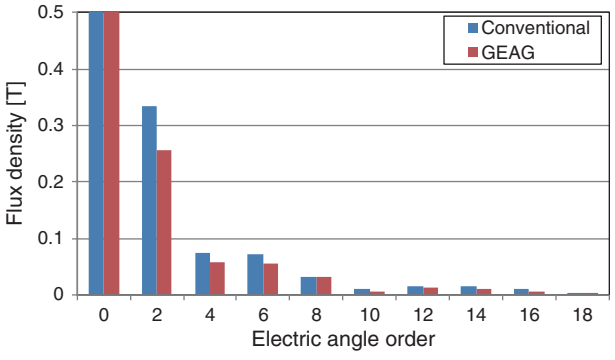
Fig. 16 に磁界解析より求めた GEAG 形状のエアギャップ変化量に対するトルク変動低減効果を示す．Fig. 16 (a) に示す通りステータ内径を変化させることでエアギャップ



(a) Comparison of flux density



(b) Comparison of air gap



(c) FFT of flux density

Fig. 15　Reduction of higher harmonic components of flux density fluctuation

変化量を変えトルク変動を計算した．Fig. 16 (b) に式（1）で定義するステータ中心部と先端のエアギャップ量変化率に対するトルク変動を示す．この結果よりエアギャップ量変化率を 200％（中心部に対して先端部のエアギャップ量を２倍）以上とすることで十分な低減効果が得られるため，TMU モータにもこの変化量を適用した．

$$Rate\ of\ variation\ in\ air\ gap = \frac{d_{gap\_max}}{d_{gap\_min}} \times 100[\%] \quad (1)$$

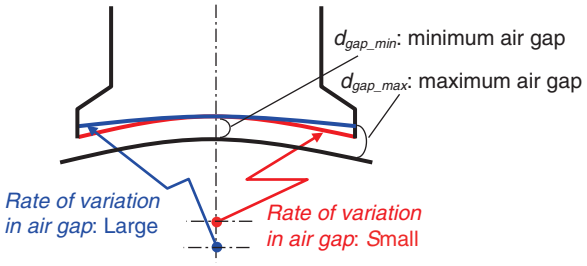
4.3. トルク変動と半径方向加振力の解析結果

Fig. 17 (a) に Case 1 から Case 4 の各磁気回路を採用した場合のコギングトルクの解析結果を示す．Fig. 17 (b) に Case 1 から Case 4 の場合のトルクに対するトルクリプルにおける電気角６次成分の解析結果を示す．これらの結果より GEAG 形状（Case 4）がコギングトルク，およびトルクリプルを最も低減できることが確認できる．

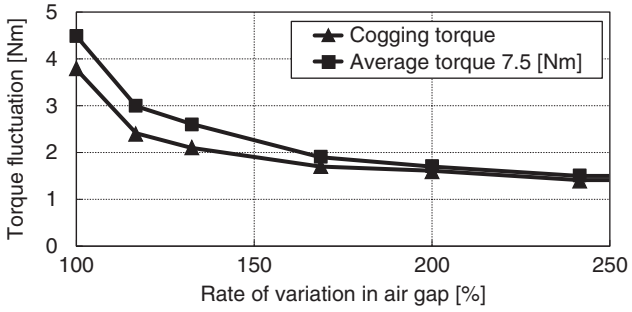
Fig. 17 (c) に Case 1 から Case 4 の場合のトルクに対する半径方向加振力における電気角６次成分の解析結果を示す．これらの結果より GEAG 形状（Case 4）は半径方向加振力も低減できている．Fig. 17 (a) と (b) の結果と合わせて周方向，半径方向同時に低減できている．

4.4. トルク変動実測結果

磁気回路として GEAG を適用した TMU モータのコギングトルク，トルクリプルの低減効果を Fig. 18 に示す．モータ回転数 5 rpm にて，トルク変動のピーク to ピークを計測すると，Fig. 18 (a) に示すコギングトルクおよびトルクリプルの Overall，Fig. 18 (b) に示す電気角６次成分ともに最大 50% 低下している．

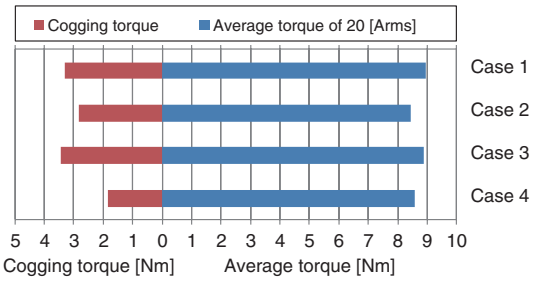


(a) Shape for parameter study

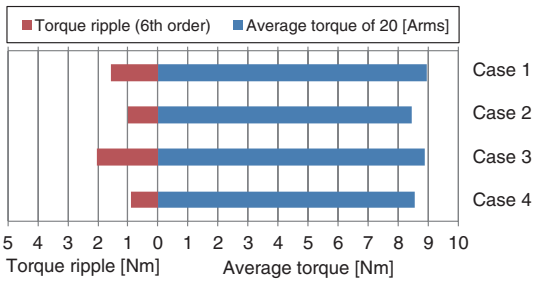


(b) Peak to peak torque ripple

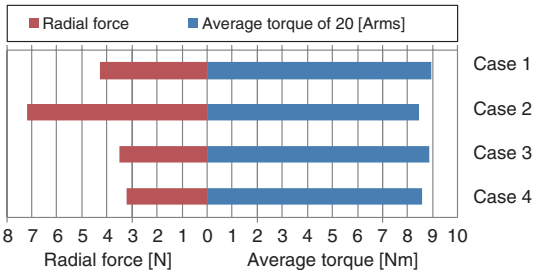
Fig. 16　Results of torque fluctuation parameter study



(a) Cogging torque

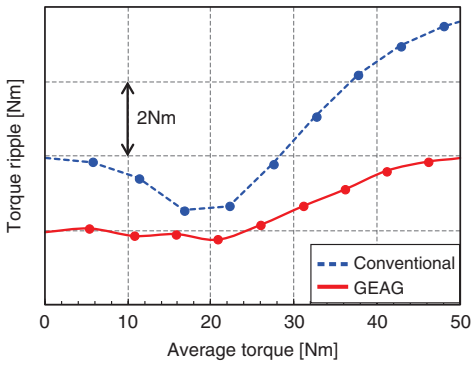


(b) Torque ripple

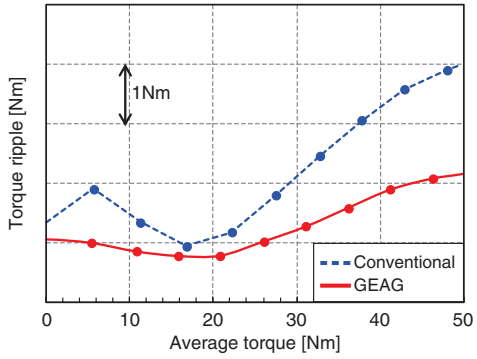


(c) Radial force

Fig. 17　Results of analysis of different stator shapes



(a) Overall



(b) Electric angle 6th order

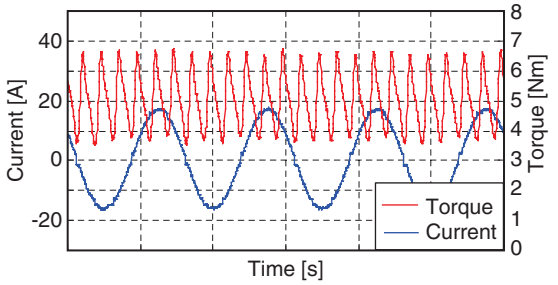
Fig. 18　Results for torque ripple

5. 制御によるモータ振動と騒音の低減

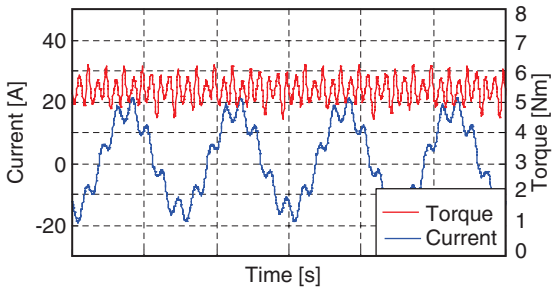
5.1. 高調波重畳制御

高調波重畳のコンセプトを Fig. 19 に示す．3 相交流電流の基本周波数成分を基準として，6n ± 1 次の周波数の高調波電流を 3 相交流電流に重畳する．重畳位相は，減衰対象の逆位相であるため，対象となる波形を打ち消す効果を有する．この重畳電流は，減衰対象である電気角 6 次成分のトルクリプルを最小にする値を設定する．その結果，磁気加振力 (電気角 6 次成分) によるトルクリプルを低減することが可能である．

Fig. 20 に高調波重畳の制御概要を示す．制御時は指示トルク，回転数を軸に持つトルク - 電流マップに対し，同様に指示トルク，回転数を軸に持つ高調波重畳の振幅 - 位相マップの数値を加えることで最終的なモータトルクとして出力する．このようにすることで高回転まで効果的に高調波電流を印加することができる．



(a) Conventional

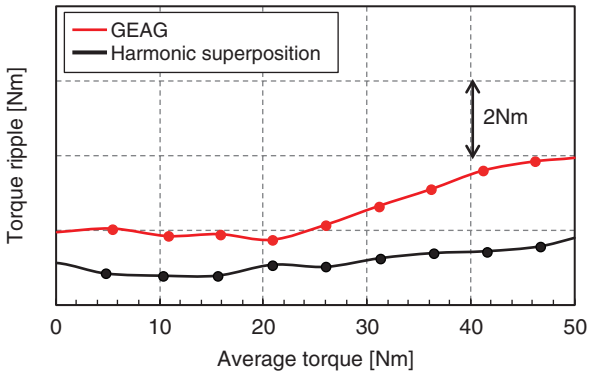


(b) Harmonic superposition

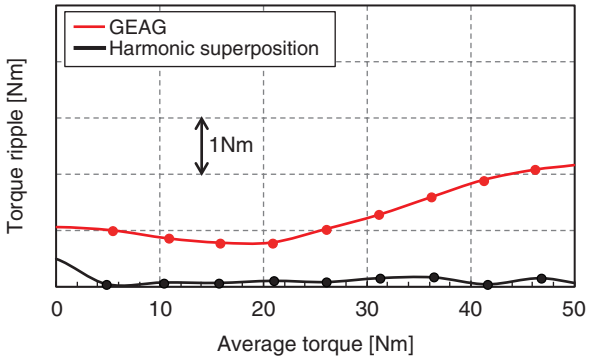
Fig. 19 Concept of superposition of harmonic current

5.2. トルク変動実測結果

GEAG 磁気回路を適用した TMU モータに高調波重畳制御を適用した場合のコギングトルク，トルクリプルの低減効果を Fig. 21 に示す．モータ回転数 5 rpm にて，トルク変動のピーク to ピークを計測すると，Fig. 21 (a) に示すコギングトルクおよびトルクリプルの Overall で最大 50% 低下している．Fig. 21 (b) に示す電気角 6 次成分は 5.1. 節で述べた通り，本制御にて低減対象としている次数であり，トルクリプルを打ち消すことができている．



(a) Overall



(b) Electric angle 6th order

Fig. 21 Results for torque ripple

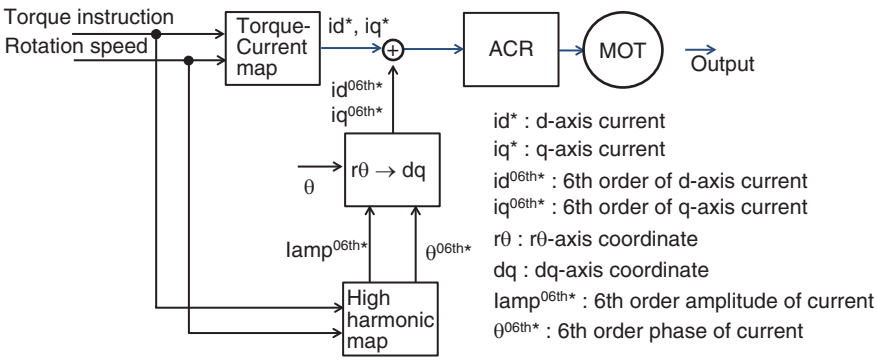


Fig. 20 Control diagram for superposition of harmonic current

6．実測結果

6.1. モータ単体振動実測結果

４章および５章で述べた GEAG 磁気回路と高調波重畳制御を組み合わせた場合の効果検証をモータ単体にておこなった．Fig. 22 に示すように，1000 Hz 程度の回転まで，10 dB 振動を低下させることができた．

6.2. 車室内音実測結果

Fig. 23 に GEAG 磁気回路および高調波重畳を実車に適用し，TMU モータの車室内音を測定した結果を示す．横軸が車速，電気角６次成分の周波数，縦軸が車室内音となっており，緩加速時のデータとなる．TMU モータに GEAG 形状を採用したことで従来形状と比較して全域で室内音を 5 dB 低減でき，効果を確認できた．さらに，高調波重畳を適用することにより，車室内音を 13 dB 以上低減できた．その結果，室内音目標値を達成することができた．

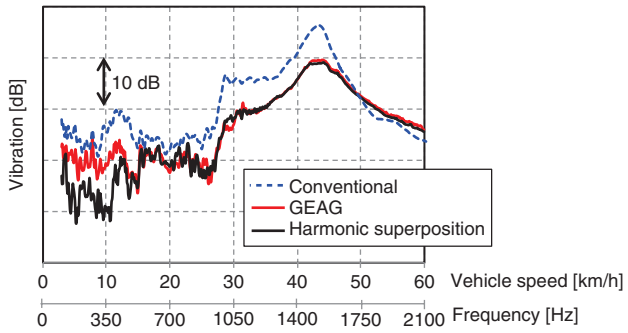


Fig. 22　Results for TMU vibration (Electric angle 6th order)

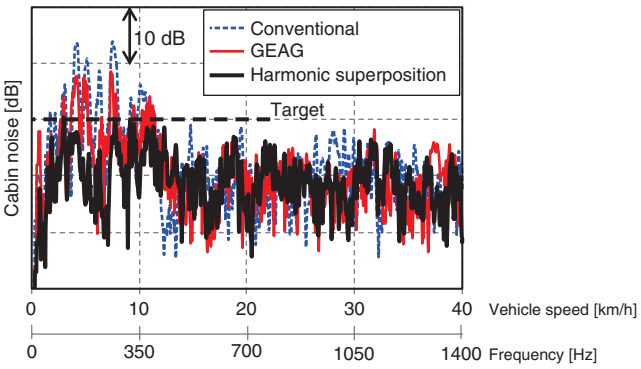


Fig. 23　Results for cabin noise of TMU motor (Electric angle 6th order)

7．まとめ

SPORT HYBRID SH-AWD 用後輪駆動２モータに下記技術を開発した．

（1）磁気回路として新たに GEAG を設計した．モータ回転数 5 rpm にて平均トルク 5 Nm の条件で，トルク変動のピーク to ピークを 50% 低下させた．

（2）制御手法に高調波重畳を適用した．GEAG と組み合わせることで TMU モータ単体振動を 10 dB 低下させた．

以上の技術を適用することで，集中巻きステータを採用し，モータの小型化と振動，騒音低減を両立した．開発したモータを SPORT HYBRID SH-AWD に適用することで，車室内音を 13 dB 以上低下させ，室内音目標を達成した．

参考文献

（1）加藤智，三浦隆未：アウトランダーPHEV 用ツインモーター4WD の開発，自動車技術会シンポジウムテキスト，p.46-50(2013)

（2）松井弘毅，早崎康市，管章二，軍司憲一郎，上野宗利：１モータ２クラッチパラレルフルハイブリッドの正常進化，自動車技術会 学術講演会前刷集，No.57-13，p.17-20(2013)

（3）池上武史，横尾健太郎，斎藤進，四方哲，金森伊織：新型１モーターSPORT HYBRID システム，自動車技術会 学術講演会前刷集，No.64-14，p.17-20(2014)

（4）四方哲，鎌田剛史：新型 HEV 用モータの開発，自動車技術会 学術講演会前刷集，No.3-14，p.9-12(2014)

（5）山本豊樹，栗山幸久，Juliette Florentin，Francois Durieux：EV における軽量静音化の設計提案，自動車技術会 学術講演会前刷集，No.56-11，p.9-14(2011)

（6）鎌塚均，鹿沼剛，森行広，穂垣周三，桑田敏久，波頭伸哉：新開発 EV の車両静粛性向上に関する技術開発，自動車技術会 学術講演会前刷集，No.56-11，p.5-8(2011)

（7）永井久博，中川丈資，酒巻秀彰，波頭伸哉，桑田敏久，越智大輔：FR ハイブリッド専用パワートレイン（１モータ２クラッチハイブリッドシステム）の音振対応技術，自動車技術会 学術講演会前刷集，No.56-11，p.23-25(2011)

（8）濱野崇，平野芳則，河上哲也，山本和志，波頭伸哉，神永整治：新開発 EV のギヤノイズ低減技術，自動車技術会 学術講演会前刷集，No.56-11，p.1-4(2011)

（9）高崎哲，神谷宗宏，水谷竜彦，金岩浩志，加藤充，梅田敦司：小型ハイブリッド車のモータステータの開発，自動車技術会 学術講演会前刷集，No.58-12，p.5-8(2012)

(10) 小川博久，福田健児：CIVIC Hybrid 用モータの開発，Honda R&D Technical Review，Vol.14，No.2，p.25-30

(11) 宮川隆行，榎本俊夫，小宮洋志，初田匡，谷本勉：解析を用いた EV 用モータの振動発生メカニズム解明及び低減検討例，自動車技術会論文集，Vol.45，No.1，p.109-113(2014)

(12) 大西和夫：永久磁石ブラシレスモータのコギングト

ルク低減, 電気学会論文誌D, Vol.122, No.4, p.338-345(2002)
(13) 高畑良一, 湧井真一, 宮田健治, 野間啓二, 妹尾正治: ロータのスキュー効果を用いた集中巻永久磁石同期モータの低振動化に関する一考察, 電気学会論文誌D, Vol.132, No.2, p.278-287(2012)
(14) 小林貴彦, 武田洋次, 真田雅之, 森本茂雄:集中巻IPMSMのホール配置による振動低減, 電気学会論文誌D, Vol.124, No.2, p.202-207(2004)
(15) 浅野能成, 本田幸夫, 武田洋次, 森本茂雄:集中巻永久磁石同期モータのラジアル応力に着目した振動低減, 電気学会論文誌D, Vol.121, No.11, p.1185-1191(2001)
(16) 小林貴彦, 馬雷, 真田雅之, 森本茂雄, 武田洋次:集中巻きIPMSMのラジアル力とトルクリプルの低減法, 電気学会回転機研究会資料RM-02, p.41-51(2002)
(17) 山崎克巳, 狩野祐二, 福島悠, 大木俊治, 根津章, 池見健, 溝上良一:永久磁石渦電流損を低減した集中巻IPMモータの開発, 電気学会論文誌D, Vol.129, No.11, p.1022-1029(2009)
(18) 屋代春樹, 高田一:高次電流重畳による電動機の半径方向加振力低減, 日本機械学会論文集C編, Vol.72, No.715, p.723-728(2006)
(19) 兼松正人, 宮島孝幸, 藤本博志, 堀洋一, 榎本俊夫, 金堂雅彦, 小宮洋志, 吉本貫太郎, 宮川隆行:鎖交磁束に着目した集中巻永久磁石同期モータの６次ラジアル力とトルクリプルの同時制御の提案～無負荷での検証～, 電気学会自動車研究会資料, VT-13-018, p.19-24(2013)
(20) http://world.honda.com/automobile-technology/SH-AWD2/
(21) 矢﨑学, 中村徹, 津吉智明:SPORT HYBRID SH-AWD用モータ, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.3-14, p.13-18(2014)
(22) 平松伸行, 鈴木隆文, 上田雅英:SPORT HYBRID SH-AWD用２モータ駆動ユニットの開発, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.113-14, p.13-16(2014)
(23) 北條秀樹, 山本和志, 平野芳則, 金堂雅彦:高周波モードを考慮したEVモータノイズ低減技術, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.108-12, p.31-34(2012)

■著　者■



矢 﨑　学



青 木 忠 信

車載 ECU のドライブレコーダ機能の拡張とレコード情報収集手法

Extension of Drive Recorder Function of In-vehicle ECU and Record Information Collection Technique

大 渕 寛 文*
Hirofumi OHBUCHI

要　旨

エンジンコントロールユニットのドライブレコーダ機能に対して二つの機能の拡張をおこなった．まず，車両診断機を用いて，スナップショット情報を記録する条件式を自由に生成し，条件式を変更可能とする機能を追加した．あらかじめいくつかの条件式のパターンを用意し，それらを組み合わせることで，ねらった事象を確実に記録可能な条件式の生成を可能とした．次に，スナップショット情報を車両外部のサーバへ転送可能な構成とした．サーバへの転送は Display Audio ユニットのワイヤレス通信機能を利用し，エンジンコントロールユニットから Display Audio ユニットまでの転送は，スナップショット情報を分割送信することで，小容量データを取り扱う車両ユニット間通信において，大容量データを取り扱うことを可能とした．また，単方向の通信とすることで，通信ラインのバス負荷増加を抑制した．この際，電源の遮断等により，転送が途中で遮断された場合においても，スナップショット情報を再送信することで，データ欠損への対策をおこなった．

ABSTRACT

Two of the drive recorder functions of the engine control unit were extended. First, a function was added that can use the vehicle diagnostic tool to freely generate a conditional expression that will record snapshot data as well as to enable modification of the conditional expression. Several patterns of conditional expressions were prepared in advance so that they could be combined to generate the conditional expressions that assure the capability to record the desired phenomena. Next, the system was configured to allow the snapshot data to be transmitted to a server external to the vehicle. The wireless network functionality of the Display Audio unit is used for transmission to the server, and the snapshot data is transmitted from the engine control unit to the Display Audio unit by divided transmission to enable the large volume of data to be handled for transmission between vehicle units, which are intended to handle small volumes of data. This was also done using simplex transmission in order to limit bus load increase on the transmission line. Measures were taken against data loss, as well, by providing for retransmission of the snapshot data even if the transmission is interrupted due to interruption of the power supply or other such reason.

1．まえがき

近年，車両デバイスの電装化が進み，それらを制御するためのソフトウェアは複雑化の一途をたどっている．特にエンジン制御の複雑化は顕著であり，エンジン挙動に対してユーザからディーラへ相談される事象はさまざまである．そのため，エンジン挙動を詳細に解析する必要性が増してきている．

エンジンコントロールユニット（Engine Control Unit：ECU）には，制御ソフトウェアに，エンジンを制御するためのセンサやアクチュエータの故障を自己診断する機能（On Board Diagnostics：OBD）[1]が搭載されている．OBD は，故障時のセンサ入力値の変化を検出することで故障部位を特定することが可能である．また，故障部位の特定に加えて，故障の原因を特定することも重要である．故障原因の特定には，故障発生までのエンジン挙動を解析することが必要である．これには，エンジン挙動を時系列的に記録することが可能なドライブレコーダ機能を用いた解析が有効である．ドライブレコーダ機能は一般的に車両に専用のレコーダツールを装着する構成[2]と ECU 内部にソフトウェアとして実装する構成とがある．専用レコーダによる構成は ECU のメモリ容量によらず長時間のデータを記録

＊四輪 R&D センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_8

することが可能であるが，専用レコーダの数には限りがあるため，解析可能な車両の数は制限される．また，専用レコーダを装着することは，ユーザに対して心理的な圧迫感を与える可能性もある．一方，ECU 内部にソフトウェアとして実装する構成の場合，専用レコーダは不要であり，適用可能な車両の数に制限はなく，ユーザに対する心理的な圧迫感も小さいが，ECU のメモリ容量の制約から長時間の記録はおこなえない．以上のことより，可搬性やユーザの心理面への負担を考慮すると，ドライブレコーダ機能は後者の構成であることが望ましい．

2．開発の考え方

現在，ECU にはオンボードスナップショット（On-Board Snapshot：OBS）と呼ばれるドライブレコーダ機能がソフトウェアとして内蔵されている．OBS は故障等をイベント（トリガ）として，それ以前のある一定時間のエンジン挙動を時系列データ（スナップショット情報）として ECU に保持することが可能である（Fig. 1）．しかしながら，現状の構成には次のような課題がある．一つ目は，スナップショット情報を ECU に保持する起点となるトリガ条件を事前にソフトウェアに組み込んでおく必要があることである．そのため，現状の構成では，ソフトウェア開発時に認知している既知の故障解析以外に使用することはできないので，その用途は限定的である．また二つ目は，本機能を実装するには，エンジン挙動を記録するバッファに比較的大きなメモリ容量が必要なことである．メモリ容量の増加は ECU コストの増加にもつながるため，解析事象が増える度に，新たにトリガ条件を設定し，スナップショット情報を追加していくことは容易ではない．以上のことより，メモリ容量を増加させずに，さまざまな事象の解析に対応可能な OBS であることが望ましい．

また，現状の構成では，スナップショット情報は診断機を用いてのみ読み出し可能である．そのため，スナップショット情報を用いてトラブルシューティングをおこなうには，必ずユーザがディーラに来店する必要がある．交換部品等が必要な場合においては，ユーザは再度来店が必要となり，ユーザにとって時間的な負担となる．スナップショット情報をユーザ来店前に読み出すことで事前診断をおこない，一度の来店で修理を完了することができれば，ユーザにとって大きなメリットとなる．

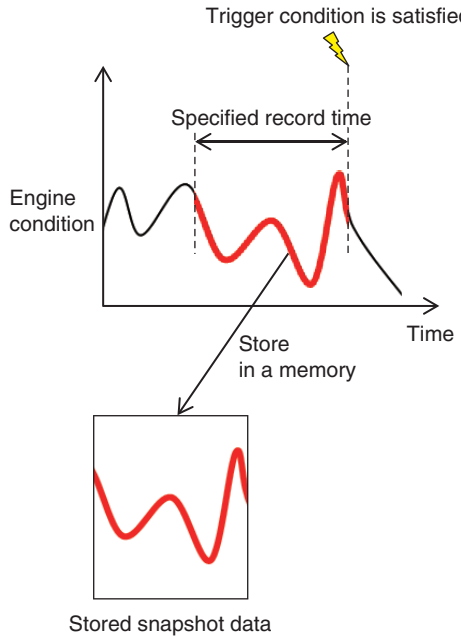


Fig. 1　Conceptual image of drive recorder function

3．開発のねらい

以下に，開発のねらいをまとめる．

（1）診断機によりトリガ条件式を後から変更可能な OBS を構築する．

（2）ECU に保持されているスナップショット情報をワイヤレス通信により車両外部の情報サーバへ読み出し可能な構成とする（Fig. 2）．

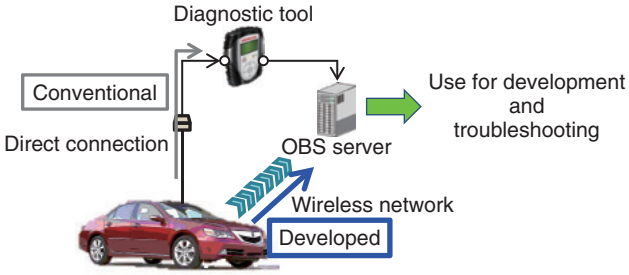


Fig. 2　How snapshot data is collected

4．トリガ条件式を変更可能な OBS 構成

OBS により有用なスナップショット情報を取得するには，詳細なトリガ条件式を設定できることが不可欠である．従来の OBS では，トリガ条件式を事前にソフトウェアに組み込むことで，事象を捉える最適な条件式の設定を可能としていた．診断機からトリガ条件式を設定する場合においても，既存の OBS 相当の詳細なトリガ条件式の設定が可能な構成が必要である．本稿で提案する構成では，トリガ条件式を診断機により変更可能な構成とするため，あらかじめ，いくつかの条件式の構成要素をソフトウェアに内蔵しておく．そして，それらの構成要素の中から一つを選択し，診断機から変数，しきい値，等号，不等号等を設定することで，任意のトリガ条件式を生成する．また，これ

らの構成要素は複数組み合わせることで，さらに複雑な条件式を構成することを可能とする．診断機によるトリガ条件式生成の概要を Fig. 3 に示す．次節では，それらトリガ条件式の構成要素について説明する．

4.1. トリガ条件式構成

Fig. 4 にトリガ条件式の全体構成を示す．トリガ条件式は条件式 1 から 6 より構成されており，各条件式が成立したタイミングでスナップショット情報が ECU に保持される．条件式 1 から 6 はそれぞれ第 1 条件式と第 2 条件式から構成され，第 1 条件式と第 2 条件式には Expression Type 1 から Type 4 よりそれぞれ一つを選択可能である．Expression Type 1 から Expression Type 4 は等号，不等号や論理演算子による演算式であり，選択した Expression Type に応じて，第 1 条件式と第 2 条件式の成立が判定される．条件式の数や設定項目の詳細度については，既知の事象を参考に決定した．

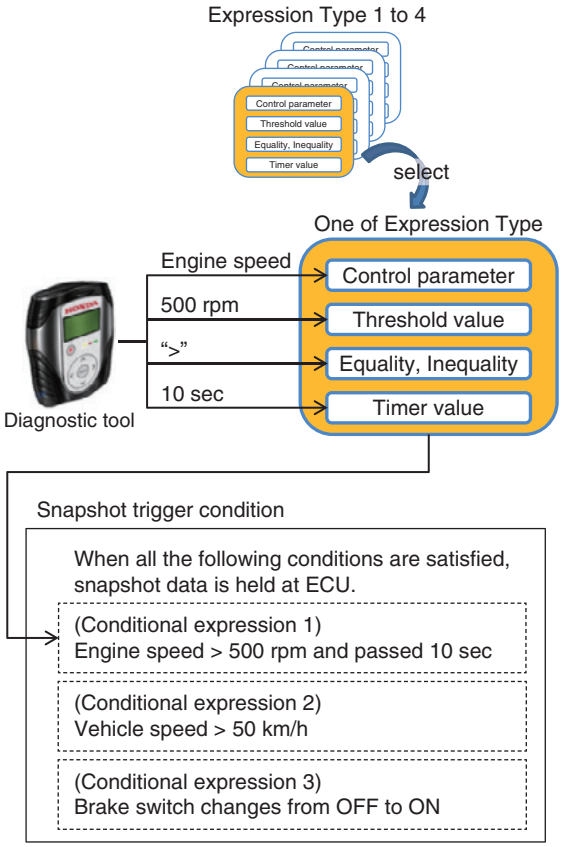


Fig. 3　How to set up trigger condition using diagnostic tool

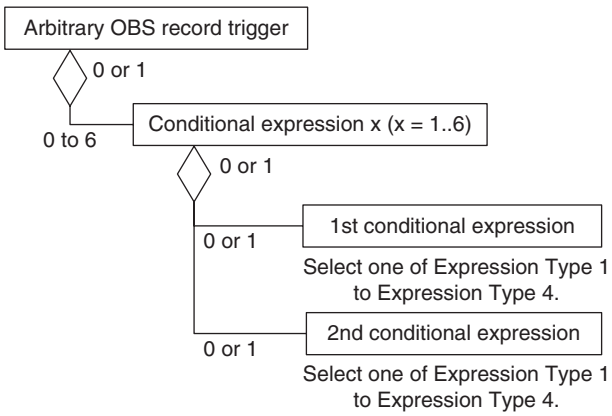


Fig. 4　Entire configuration of arbitrarily selectable OBS record trigger condition

Table 1　Expression type setting

How to judge	Conditional expression	Example of setting
Expression Type 1		
Parameter and threshold	Parameter □ Threshold	Current engine speed > 0 rpm
Expression Type 2		
Each of parameters	Parameter1 □ Parameter2	Current engine torque > Target engine torque
Absolute	| Parameter1 - Parameter2 | □ Threshold	| Current engine speed - Target engine speed | ≥ 100 rpm
Expression Type 3		
Parameter edge	Parameter edge (Up edge or down edge)	Brake switch changes from OFF to ON
Expression Type 4		
Many parameters by logical decision	Many parameters logical judgment (Judged by logical decision)	Satisfy any of the conditions below (logical decision = “or”) Perform transmission control, air conditioning control, or meter control

* □ is equality or inequality

4.1.1. Expression Type に対する設定

Expression Type 1 から Expression Type 4 として設定可能な項目を Table 1 に示す．各 Expression Type ごとの設定内容は以下のとおりである．

(1) Expression Type 1　制御パラメータとしきい値との関係により条件判定をおこなう．制御パラメータとしきい値との関係は等号，不等号により判定する．例えば，エンジン回転数が 0 rpm より大きくなった時にトリガ条件を成立させる場合に設定する．

(2) Expression Type 2　制御パラメータ同士の関係により条件判定をおこなう．条件判定には二つの判定方法がある．一つ目は，制御パラメータ同士の関係は等号，不等号により判定する．例えば，エンジントルクが目標エンジントルクより大きくなった時にトリガ条件を成立させる場合に設定する．二つ目は，制御パラメータ同士の差の絶対値としきい値により条件判定をおこなう．絶対値としきい値との関係は，等号，不等号により判定する．例えば，エンジン回転数が目標エンジン回転数から 100 rpm 以上外れた時にトリガ条件を成立させる場合に設定する．

(3) Expression Type 3　制御パラメータがしきい値をまたいだタイミングで条件判定をおこなう．制御パラメータがしきい値を上方から下方にまたぐ，または下方から上方にまたぐかどちらかを選択可能である．例えば，ブレーキスイッチが OFF から ON に変化した時にトリガ条件を成立させる場合に設定する．

Table 2 Relation setting of expressions

How to judge	Condition	Example of setting
Relation of 1st conditional expression and 2nd conditional expression		
Logical decision	And	Engine speed > 0 rpm or Vehicle speed > 0 km/h (Example of setting that condition is “or”)
	Or	
	Xor	
Decision order	None	Brake switch changes from OFF to ON under the condition of “Accelerator pedal > 0 %” (Example of setting that condition is “1st conditional expression to 2nd”)
	1st conditional expression to 2nd	
	2nd conditional expression to 1st	
Relation of conditional expression x (x = 1 to 6)		
Logical decision	And	Satisfy all conditions of the below (logical decision = “AND”) Conditional expression 1 and Conditional expression 2 and ... and Conditional expression 6
	Or	
Decision timer	Decision delay timer of OBS trigger	When 10 sec pass after “logical decision,” OBS trigger condition is satisfied.

(4) Expression Type 4　複数の制御パラメータの論理和，または論理積により条件判定する．例えば，トランスミッション制御実施中，エアコン制御実施中，またはメータ制御実施中の時にトリガ条件を成立させる場合に設定する．

また，各 Expression Type について，条件誤判定の防止と事象の発生回数や頻度による評価を可能とするため，事象成立時間による条件成立判定のほか，事象成立回数による条件成立判定の設定を可能とした．

4.1.2. 条件式同士の関係に対する設定

各条件式同士の関係として設定可能な項目を Table 2 に示す．条件式 1 から 6 については，条件式同士の論理判定を設定可能とした．第 1 条件式と第 2 条件式との関係としては，条件式同士の論理判定のほか，条件式の成立順序を設定可能とした．これにより，ある条件下において発生する事象のような限定された事象を捉えることも可能とした．また，スナップショット情報を保持するタイミングをトリガ条件成立から設定時間だけ遅延可能な構成とした．これにより，トリガ条件成立後の制御パラメータの挙動をスナップショット情報として保持することを可能とし，条件設定の自由度を高めた．

4.2. 動作確認結果

Fig. 5 に診断機から設定したトリガ条件により，スナップショット情報を取得した際の動作確認結果を示す．設定例として，車速が 30 km/h 以上発生している状況で，アクセルペダルを離した後に，ブレーキペダルを踏み込んだ場合にトリガ条件が成立するように条件式を設定した．その結果，設定したトリガ条件により，スナップショット情報を取得することができた．

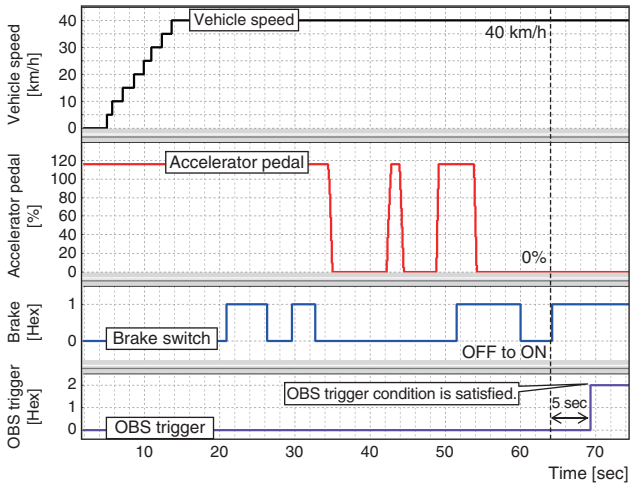


Fig. 5 Results of OBS trigger set up by diagnostic tool

5. ワイヤレス通信によるスナップショット情報の収集手法

スナップショット情報を車両外部の情報サーバへ転送するには，ワイヤレス通信機能が必要である．ワイヤレス通信機能は Display Audio(DA)ユニットの既存機能を利用する．ECU と DA ユニットは Controller Area Network (CAN)により有線で接続されている．ECU と周辺機器との構成について Fig. 6 にまとめる．CAN は ECU，DA ユニット以外にも複数のユニットが接続されるため，スナップショット情報のような数キロバイトに及ぶ大容量のデータを一度に転送することはできない．そのため，スナップショット情報を分割送信し，DA ユニット側で再結合する構成とする．また，スナップショット情報の送信追加による CAN 通信ラインのバス負荷増加を抑制するため，ECU から DA ユニットまでの送信は単方向通信で実現する．次節では，ECU から DA ユニットまでのスナップショット情報の転送手法について説明する．

5.1. 分割送信手法

ECU から DA ユニットまでの通信は CAN にておこなう．

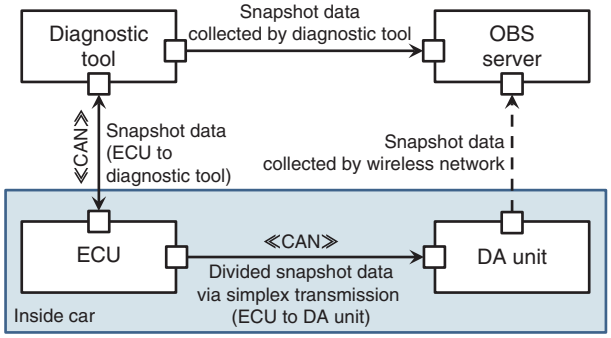


Fig. 6 Entire configuration of system

CAN 通信は 1 フレームあたり 8 バイトのデータを取り扱うことが可能である.

分割送信したスナップショット情報は DA ユニット側で再構築されることになるが, この際, 通信ラインに印加されたノイズ等により, 送信データが欠損する可能性がある. これに対応するため, ヘッダフレームとデータフレームとに分け, 送信データの保証をおこなう.

ヘッダフレームでは, これから送信するスナップショット情報のデータサイズ, チェックサム, および Chunk No. を送信する. データサイズとチェックサムにより, スナップショット情報を再構成した際のデータ保証をおこなう. また, Chunk No. により, DA ユニット側で複数のスナップショット情報を識別することを可能とする. Chunk No. はスナップショット情報が ECU に保持された順番に割り当てられる番号である. DA ユニット側でスナップショット情報と Chunk No. を紐付けて管理することで, ECU が送信しているスナップショット情報の追加や削除を認識することが可能となる. これにより, ECU からの要求に応じて, DA ユニットはユニット内に保持しているスナップショット情報の追加, 保持および削除をおこなう. Fig. 7 にスナップショット情報と Chunk No. とを紐づけた例を示す. 例では, OBS のトリガ条件が 4 回発生した場合に, 新たに ECU に保持されたスナップショット情報に対して新たな Chunk No. が割り当てられている様子を示している. また, 例で示した OBS は, トリガ条件が成立する度に, スナップショット情報が更新され, それまで ECU に保持されていたスナップショット情報は消去される. そのため, OBS のトリガ条件が成立する度に, 古いスナップショット情報に割り当てられていた Chunk No. は消去されている.

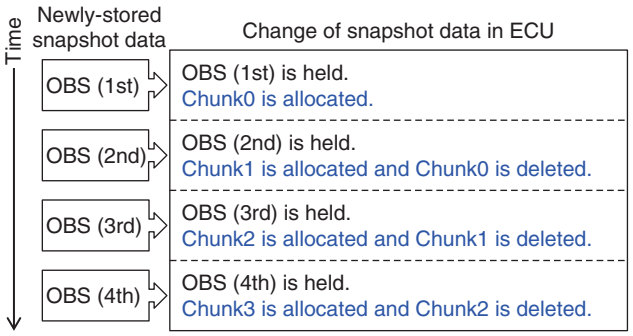


Fig. 7　How to allocate Chunk No. at snapshot

データフレームでは, 分割したスナップショット情報を 6 バイト単位で送信する. その際, フレームカウンタとして連続的な番号を付加することで, スナップショット情報の連続性を保証する. スナップショット情報が Chunk 0 として保持されている状況で, トリガ条件が成立し, 新たなスナップショット情報が追加で保持された場合の送信データの変化を Fig. 8 に示す.

本稿で提案する手法では, ECU から DA ユニットまでのスナップショット情報は単方向通信でおこなうため, ECU は DA ユニットがどこまでスナップショット情報を受信できているかを認識することができない. そのため, スナップショット情報を繰り返し送信する構成とした.

5.2. 巻き戻し送信によるデータ保証

ECU と DA ユニットは起動タイミングおよびシャットダウンのタイミングが異なる. ECU は電源保持機能を有しており, イグニッションスイッチ OFF 後も ECU 要求においてユニットの起動を継続させることが可能である. 一方, DA ユニットはイグニッションスイッチ OFF 直後にシャットダウンしてしまう. また, エンジン始動時のクランキング操作中についても同様であり, DA ユニットのみシャットダウンが発生する. この場合, ECU がスナップショット情報を送信したとしても, DA ユニットは情報を受け取ることができず, データ抜けが発生してしまう. そのため, 上記のようにイグニッションスイッチ操作による電源遮断により DA ユニットがシャットダウンしている可能性のある場合は, DA ユニットの再起動時にフレームカウンタを規定の数だけ前に遡ってスナップショット情報を再送信することでデータ抜けが発生しないように対策した. 巻き戻し送信の動作例を Fig. 9 に示す. 動作例では, 5 番目のフレームを送信中に DA ユニットのリセットを検出し, DA

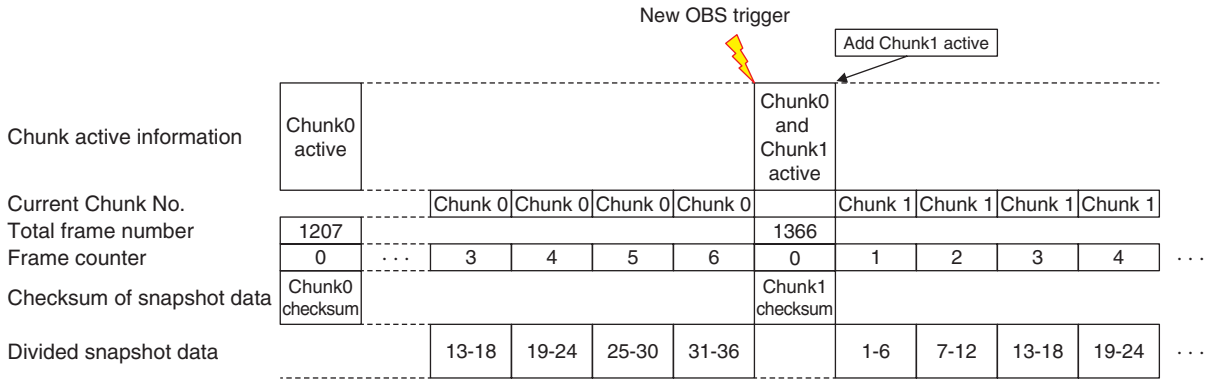


Fig. 8　CAN data management in divided transmission

ユニットの再起動完了後に，巻き戻し送信により再度 4 番目のフレームから再送信した場合の動作を示している．

5.3. 動作確認結果

Fig. 10 に，ECU に保持されたスナップショット情報を DA ユニットへ分割送信した際の動作確認結果を示す．CAN 通信ラインのモニタ結果と，直接診断機により ECU から読み出したスナップショット情報とを比較した結果，同一の値となり，ECU に保持されたスナップショット情報の分割送信がおこなえていることを確認することができた．また，Fig. 11 に，イグニッションスイッチ操作による電源遮断の動作確認結果を示す．ここでは，巻き戻し送信による送信データ保証について確認した．ECU がイグニッション操作を検出した際に，フレームカウンタが 125 から 108 に遡り，スナップショット情報を再送信できていることを確認することができた．また，巻き戻し送信時のフレームカウンタは 108 に制限されているが，これは，連続したイグニッション操作により，必要以上にフレームカウンタが巻き戻ることを防止しているためである．

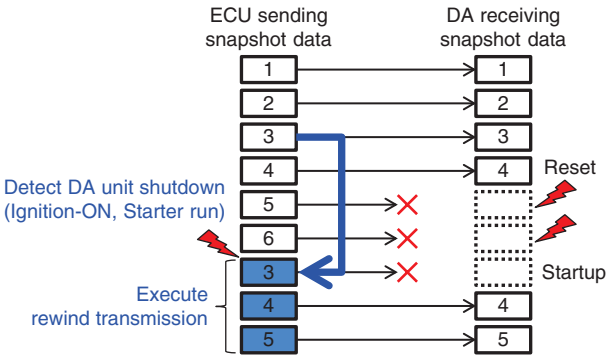


Fig. 9 Rewind transmission

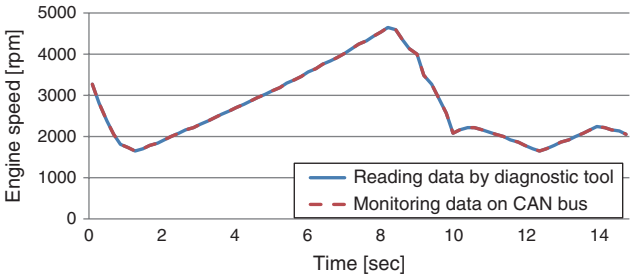


Fig. 10 Result of comparison of data being read by diagnostic tool and being monitored on CAN bus

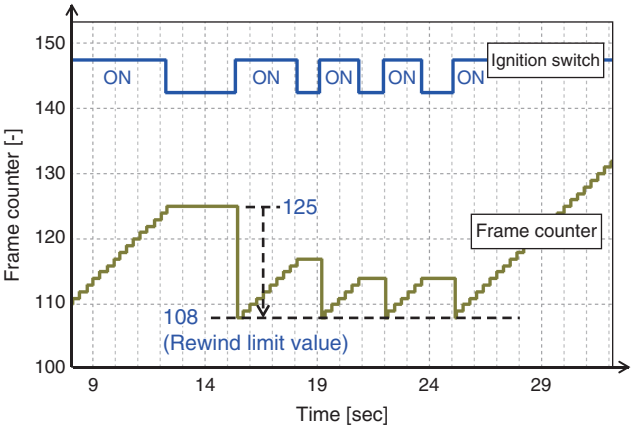


Fig. 11 Result of rewind transmission

6. まとめ

車載 ECU のドライブレコーダ機能の拡張として，以下の機能を構築した．

（1）診断機を用いてトリガ条件式を後から変更可能な OBS 機能を構築した．トリガ条件式として制御パラメータとしきい値との条件判定のほか，絶対値による条件判定，エッジによる条件判定等を用意することで，ねらった事象を記録可能な条件式の生成を可能とした．

（2）スナップショット情報を，DA ユニットのワイヤレス通信機能を利用して外部のサーバへ転送可能な構成を構築した．ECU から DA ユニットまでは単方向の CAN 通信で実現し，スナップショット情報は分割送信することで大容量のデータを取り扱える構成とした．また，イグニッションスイッチ操作等により DA ユニットがシャットダウンする場合においても，巻き戻し送信をおこなうことでスナップショット情報の送信が完了するように対策した．

参考文献

（1）http://www.arb.ca.gov/msprog/obdprog/obdprog.htm

（2）今井龍一郎，飯隈浩文，川村俊勝，齋藤照男：故障診断機“スバルセレクトモニターⅢ”，自動車技術，Vol.61, No.2, p.93-97(2007)

■著 者■



大渕寛文

廉価 LED 前照灯システムの開発

Development of Headlight System with Cost Advantageous Design Using Light Emitting Diodes

土屋洋介* Yosuke TSUCHIYA
松崎哲平* Teppei MATSUZAKI
竹繁徹朗* Tetsuo TAKESHIGE
小口敢* Tsuyoshi OGUCHI

要　旨

近年，低消費電力，長寿命，デザイン上の自由度などの観点から，従来の電球に代わりＬＥＤ光源を採用することが注目されている．自動車業界においても，ＬＥＤ光源の普及が進んでいる．特に，消費電力の大きい前照灯へのＬＥＤ採用により，車両の消費電力低減に大きな効果がもたらされ，燃費向上が期待される．さらに，ＬＥＤ光源が，販売台数の多い低価格二輪車に適用できれば，総 CO_2 排出量の削減に大きな寄与が期待できる．しかし，これまで，ＬＥＤの二輪車前照灯への適用は，高価格帯の一部機種に限られていた．これは，主に，高輝度ＬＥＤ光源部やドライバユニットのコストが高いためであった．これに対し，我々は，中輝度ＬＥＤを複数使用する方式を採用し，また，高コスト化の原因であったヒートシンクを用いずに放熱性を満足する構成を考案した．さらに，ハイビーム用とロービーム用の光源を直列接続することを可能とする回路構成の考案により，定電流回路を一つとすることが可能となり，更なる低コストを実現した．本開発により，ＬＥＤ前照灯の低価格帯二輪車への採用が可能となった．

ABSTRACT

Recently, it is widely noticed that replacing conventional incandescence lights with light emitting diodes as light sources is beneficial in terms of their low power consumption, longer life and larger degree of freedom in designing. That is also the case in automobile industry and light emitting diodes are increasingly used as light sources. Applying light emitting diodes to light sources of the headlights, which consume a large amount of electric power, is highly advantageous for overall reduction of consumed energy in a vehicle resulting in a good fuel economy. Moreover, if light emitting diodes are applied to headlights of motorcycles sold in a large number in affordable price range, a significant contribution is expected to the reduction of the total amount of carbon dioxide emission. However, up to the present, the use of light emitting diodes for headlights of motorcycles has been limited to only certain models in high price range. This is mainly because the headlight systems using high power light emitting diodes and their driver units are expensive. Based on these backgrounds, we adopted a configuration with a multiple use of medium intensity light emitting diodes. In addition, heat dissipation configuration that fulfills the thermal requirements was devised without using a heat sink that was a causal factor of high cost. The cost was further reduced through the employment of a single constant current regulation circuit. It was made possible by the serial connection of high-beam and low-beam light sources. This development made it possible to employ headlights using light emitting diode for motorcycles in low price ranges as well.

1．はじめに

近年 Light Emitting Diode（LED）光源は電球に比べて低消費電力であり長寿命であること，デザイン性や設計自由度が高いこと，リサイクル時に有害な化学物質の放出が少ないことなどさまざまな利点から注目されている．

ＬＥＤ光源は照明器具への普及が進んでおり，東日本大震災以降の節電意識の高まりから，ＬＥＤ照明の出荷数量は増加し，それに伴って価格の低下が進み，急速に普及段階を迎えつつある（Fig. 1）[1]．

自動車業界においても先に述べた利点から灯火器，指示警告表示器，車内灯などへＬＥＤ光源の普及が進んでいる．特に灯火器は近年多くの部位へＬＥＤ光源が適用されている．その中でも消費電力の高い前照灯は，ＬＥＤ光源を採用

＊二輪 R&D センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_9

することにより，低消費電力化が可能となるため車両の総発電量が抑えられ，燃費向上に寄与できる．将来的には販売台数の多い低価格帯の車両へLED光源を普及できればCO_2削減に大きな効果があると考えられている．LED光源を用いた前照灯は，2007年に初めて四輪自動車へ搭載され，二輪自動車には2012年に初めて搭載された．しかし従来のLED灯火器システムは，電球灯火器システムに対しヒートシンクやドライバ回路などの部品が追加され高コストとなるという課題があった．コミュータのような廉価機種に，上記従来型LED前照灯を適用した場合のコスト比較をFig. 2に示す．

このように，LED前照灯は電球に対してコストが約4倍となるのでコミュータへの適用は難しい．この課題を解決するために，特にコストが高い光源部とドライバ部についてコスト低減の検討をおこなった．光源部のコストが高額となる第一の理由は，LED光源を放熱させるためのヒートシンクが追加されることである．従来技術ではLED光源が消費する電力が大きく，ヒートシンクを用いて放熱することが必須であったが，我々はヒートシンクをなくすことによるLED前照灯の低コスト化を試みた．

ドライバのコストが高額となる第二の理由は，ロービーム(Low beam:Lo)とハイビーム(High beam:Hi)の双方に対して制御回路が必要となるためである．本開発では，制御回路の簡素化を実現するためにハイビーム用LEDとロービーム用LEDの接続方式を変更し更なる低コスト化を目指した．

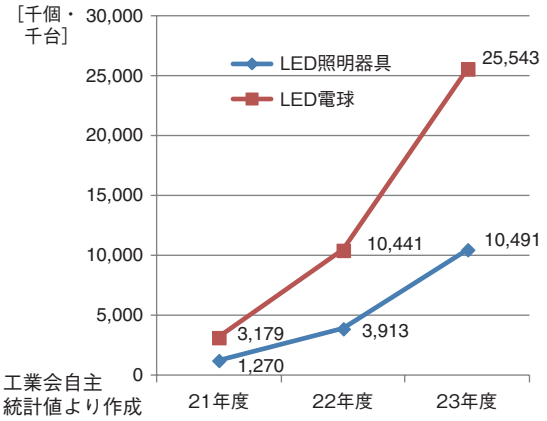


Fig. 1 Numbers of shipments of LED products

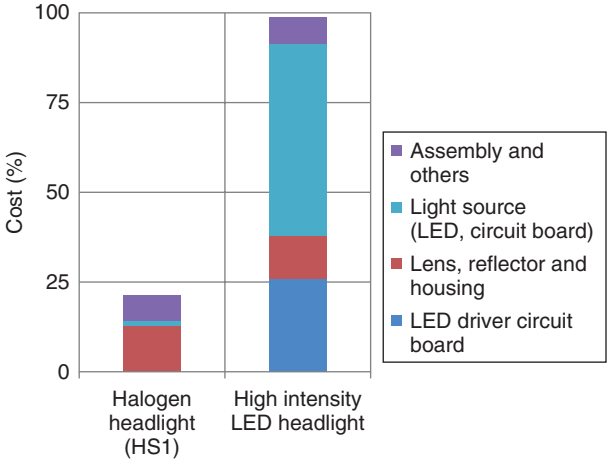


Fig. 2 Cost constituents of a halogen headlight system and a conventional LED headlight

2．ヒートシンクを持たないLED前照灯の成立性検証

2.1. 高輝度LED採用可否の検証

まず，最初に，従来の自動車向けで採用されている高輝度LEDを用いた前照灯のヒートシンクを削減することが可能であるかを検証した．光源光束が従来の進展国向け廉価二輪車(コミュータ)が主に採用しているHS1電球と光源光束が同等の高輝度LEDで検証をおこなった．高輝度LEDとHS1電球の性能比較をTable 1に示す．

ヒートシンクなしによる放熱が可能であるかを検証するため，ガラスエポキシ基板(Flame Retardant Type 4: FR4)上に高輝度LEDをマウントし，LEDの電流とLEDの接合部温度(Tj温度)の関係を測定した(Fig. 3)．基板サイズは電球前照灯のサイズ内に設置できるサイズとしてハイビームとロービームそれぞれ幅を130 mm，奥行きを50 mmに設定した．基板は両面基板とし，銅箔厚は35 μm，銅箔面は両面を同サイズとし両面合計で14,300 mm^2とした．両面銅箔間の熱伝導はスルーホール内に銅箔を通すことで確保した．雰囲気温度は灯火器使用環境温度の上限に設定した．Tj温度の測温は，LEDチップからカソード側半田接合部温度(Ts)を熱電対にて測定し，TsからTjまでの熱量はLED内の熱抵抗にLEDへの印加電力(LED順方向電圧×通電電流)を加算する方法を採用した．

高輝度LEDのTjは700 mA以上で寿命とする使用時間に対する光源輝度の経時変化要件を満たせる温度を超えてしまい，十分な放熱性能が得られない結果となった．し

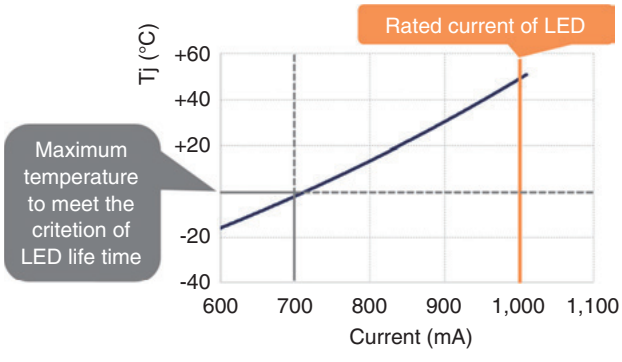


Fig. 3 Characteristic of high intensity LED under the heat dissipation condition without heat sink

Table 1　Rated values of performances for high intensity LED and halogen light bulb

Specification	High intensity LED (PHILIPS/ALTION) *(1)	Halogen (HS1)
Luminous flux	800 lm	825 lm (High)
Rated voltage	13.7 V	13.2 V
Rated current	1.0 A	2.65 A
Rated power	13.7 W	35 W

*(1) The performance as of products in 2010

Table 2　Rated values of performances for high intensity LED and medium level intensity LED

Specification	Medium intensity LED	High intensity LED
Luminous flux	200 lm	800 lm
Rated voltage	3.0 V	13.7 V
Rated current	700 mA	1.0 A
Rated power	2.2 W	13.7 W

たがって，高輝度 LED を用いた場合にはヒートシンクを用いずにはヘッドライト機能を満足できないことが明らかになった．

2.2. 中輝度 LED の採用可能性検証

前章で述べたように，高輝度 LED をヒートシンクなしで使用することはできない．そこで，高輝度 LED の代わりに中輝度 LED を複数使用し，熱源である LED を分散配置することで，放熱性能を成立させる検討をおこなった．中輝度 LED の代表的な定格特性を Table 2 と Fig. 4 に示す．

高輝度 LED は自動車用前照灯のみに適用されてきた光源であるが，中輝度 LED は自動車用 Daylight Running Lamp のほか，広く民生用の光源としても使用されており，高輝度 LED と比較して製造個数が多く，低価格化が進んでいる．このことから，LED 単体のコストとしても，高輝度 LED に対して中輝度 LED を複数用いた方が光源のコストを低減できる．高輝度 LED と中輝度 LED の光束とコストの関係を Fig. 5 に示す．

ハイビーム使用時の光束は約 800 lm であり，この明るさを中輝度 LED を用いて実現した場合のコストは，高輝度 LED を使った場合の約半分となる．800 lm を中輝度 LED で得るためには 4 個必要であり，ロービーム設定時に 2 個点灯，ハイビーム設定時にはロービーム用光源に加えて，さらに 2 個光源を点灯することで，HS1 電球と同等の光束を得ることができる．また，中輝度 LED の定格電力は 2.2 W であり，高輝度 LED の定格電力と比較して 6 分の 1 以下である．したがって，中輝度 LED を 4 個使った場合は，小さな基板サイズで十分な放熱を得ることができる可能性がある．

次に，中輝度 LED を用いて，ヒートシンクなしによる放熱が可能であるかを検証した．FR4 基板上に中輝度 LED をマウントし，基板上の銅箔サイズを変化させ，銅箔面積をどこまで拡大すれば LED の Tj が灯火器寿命を確保可能な温度以下になるかを確認した．基板は FR4 両面基板，銅箔厚は 35 μm，放熱用の銅箔は両面で同サイズとした．また，両面銅箔間の熱伝導はスルーホール内に銅箔を通すことで確保した．Tj 温度の測温は，先に説明した方法と同様の方法を用いておこなった．

中輝度 LED を搭載した基板のイメージ図を Fig. 6, Fig. 7 にて示す．

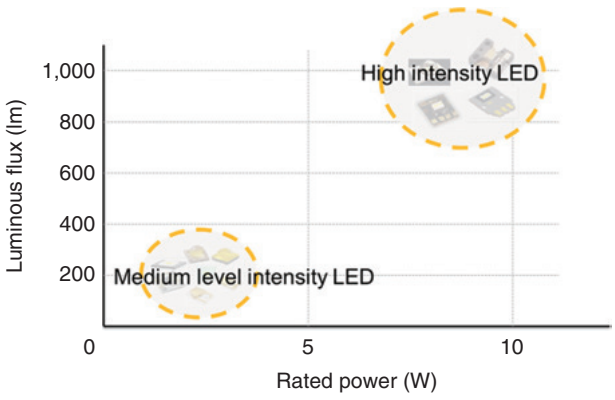


Fig. 4　General ranges in the diagram of rated power and luminous flux for high intensity LEDs and medium level intensity LEDs

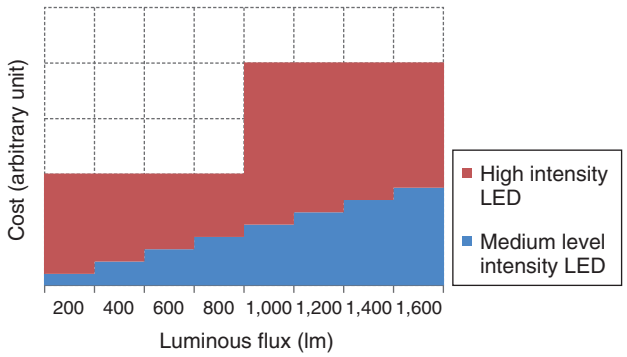


Fig. 5　Relationship between luminous flux amplitude and cost for high intensity LED and medium level intensity LED

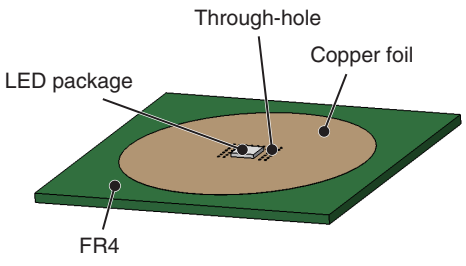


Fig. 6　Schematic view of onboard medium level intensity LED

LEDの通電電流は700 mAとした．雰囲気温度は灯火器使用環境温度の上限に設定した．LEDのTjと基板上銅箔面積の関係をFig. 8に示す．

中輝度LED 1個（電力2.2 W）あたりの放熱銅箔面積は表面，裏面を合計して2,000 mm^2が確保できれば，ヒートシンクなしで灯火器を成立可能であることが分かった．また，この基板サイズはロービームとハイビームそれぞれ横幅130 mm，奥行き50 mm以下で設定でき，コミュータで使用されている前照灯のサイズ内に収めることが可能である．これらの結果より，中輝度LEDを複数個使用することで，ヒートシンクなしで前照灯機能を満足できることが明確となった．

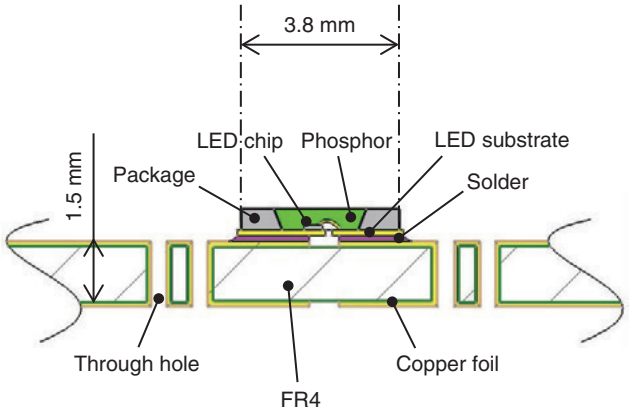


Fig. 7 Circuit board mounted with LED of medium level intensity (cross-sectional view)

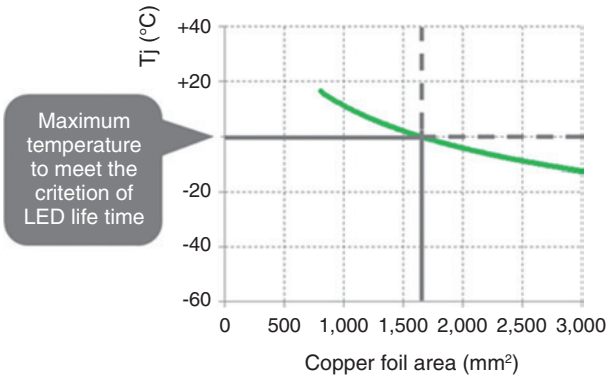


Fig. 8 Heat dissipation characteristic of a medium level intensity LED without heat sink

3．ハイビーム，ロービーム直列接続点灯回路の成立性検証

従来のLED前照灯の点灯回路は，12 Vバッテリを電源とし，LED光源と定電流制御回路を持ったハイビーム用回路とそれらを持ったロービーム用回路を並列に接続する方式となっている．Fig. 9に並列接続方式のLED前照灯点灯回路を示す．

並列接続は直列接続に比べ，各列のLEDの電流値のばらつきが生じ，一列点灯から二列点灯させる場合は消費電流値が変動することから，並列接続は定電流制御を各列に持つ必要がある．直列接続は，各LEDに流れる電流のばらつきはなく，消費電流は一定で，定電流制御も一つで済む利点はある．しかし，Vfが高くなるため，高い電圧の供給が必要であり，ロービーム回路とハイビーム回路の切り替え手法，LED故障時の対応などの課題を解決する必要がある．Table 3に並列接続と直列接続の比較を示す．

3.1. 高電圧駆動を昇圧回路なしで実現する手法

前章で述べた中輝度LEDの場合，Vfは最大3.5 Vのため，ロービームLED 2個ハイビームLED 2個を直列に接続すると，LEDを点灯させるには14 V以上の電圧が必要となる．そのため，バッテリを電源とすると，昇圧回路を設ける必要が生じる．そこで，従来から電球式前照灯のコミュータで多く採用されているACGを電源とし負側半波をレギュレートすることにより12 Vを電球に供給する回路を応用することに着想した．

従来の電球式前照灯点灯回路は，電球に印加する電圧をACGの負側交流半波の実効電圧により制御している．

あらかじめ設定した電圧と実効電圧の演算結果の差分を考慮してサイリスタ（SCR）のタイミング信号（Trig）を出力することで，通電時間を制御して一定の実効値電圧を得ることができる．電球式前照灯の負側半波点灯回路をFig. 10, Fig. 11に示す．

LEDの場合，定電流制御が必要なことから，電球式回路に対し，LEDに流れる電流値を監視してサイリスタの通電時間を制御する仕様に変更し，定電流制御とした．ACGの負側半波を使って定電流制御をすると，LEDの明るさのちらつきが懸案となる．LEDは電球と違って残光現象がないため，脈流電流による明るさのちらつきは電球に比べて際立つ傾向にある．脈流電流を平滑化するために，一般的な

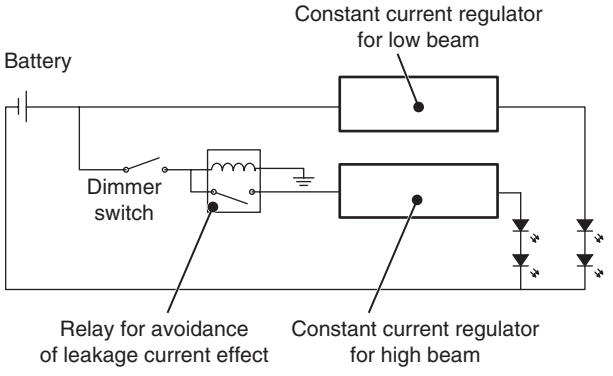
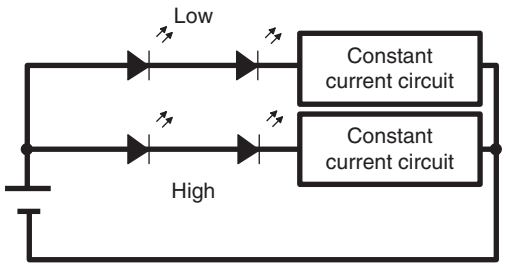
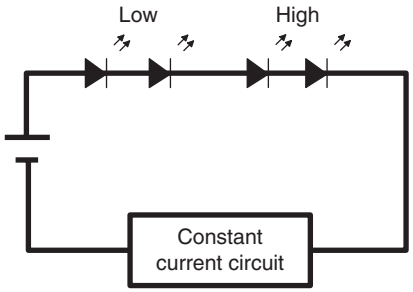


Fig. 9 Schematic circuit diagram for turning on the conventional headlights

Table 3　Comparison between parallel and series circuit connections

Wiring	Parallel connection	Series connection
Equivalent circuit		
Current variation and associated measures	Separate current regulations are necessary because unbalanced current supply occurs from the difference in V_f of those LEDs if one common regulation circuit is applied for providing currents to both of the LEDs for low and high beams.	The same magnitude of current flows through both of low and high beam LEDs.
Constant current circuit	Two (necessary for each line)	One
Total drive current	Large total current is needed for supplying two lines. (1,400 mA)	Current is the same as when driving one LED and unchanged with the number of LEDs. (700 mA)
Drive voltage	Driven by relatively low voltage with a small number of LEDs connected in series on each line. (The voltage is deliverable by using only a down converter.)	V_f becomes high in association with the number of LEDs.
High/Low alternation	By placing on/off switch onto the high beam circuit line, high and low beams alternation is possible.	Placing on/off switch onto the series-connected line works only for turning on or off for both beams at the same time.
When one LED fails in open mode	The other beam with unflawed LED can be turned on.	Both beams cannot be turned on.

手法であるコンデンサを追加することで明るさのちらつきを抑制しようと考えたが，これにはちらつきを抑制するコンデンサ容量の決定とコンデンサの耐圧以下に電圧を制御する手法の二つの課題が存在する．

コンデンサの容量を決めるには，まずちらつきの許容レベル基準を決定する必要がある．我々は，従来の電球式前照灯の ACG 負側半波点灯方式に対して，ちらつきの大きさが同等以下となることを目標とした．

ちらつきが従来の電球式前照灯に対して，同等になるレベルを確認した結果，リプル電流は 300 mA 以下でちらつきが同等以下に抑えられることが分かった．コンデンサ容量違いによるリプル電流を確認した結果，2,250 μF 以上でリプル電流は 300 mA 以下になり，2,250 μF 以下になると，リプル電流は急激に増える．コンデンサのばらつき± 20% と劣化想定 -20% を含めても，2,250 μF 以下にならないようにコンデンサ容量は 4,800 μF と決定した．Fig. 12 にコンデンサ容量とリプル電流特性を示す．

LED ヘッドライトを OFF にすると，LED に電流が流れないため，ACG からの電圧は上がり続け，コンデンサの耐圧をオーバしてコンデンサが故障してしまう．その対策として，コンデンサの定格電圧以下に基準電圧を設定し，その基準電圧より高くなる場合は，サイリスタの

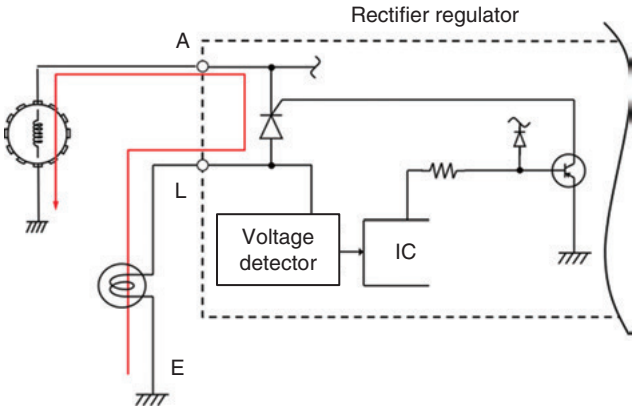


Fig. 10　Circuit diagram of halogen headlamp driver applying negative voltage half wave activation type

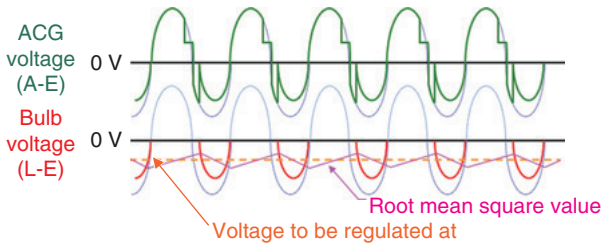


Fig. 11　Waveforms of halogen headlamp driver applying negative voltage half wave activation type

通電幅を縮めるようにタイミング信号を出力し基準電圧以下に調整する制御回路を追加した．コンデンサの定格電圧は 25 V のものを選択したため，基準電圧は温度特性などのばらつきも含めて，基準電圧を 21 V に設定した．Fig. 13，Fig. 14 にコンデンサを追加した定電流制御回路を示す．

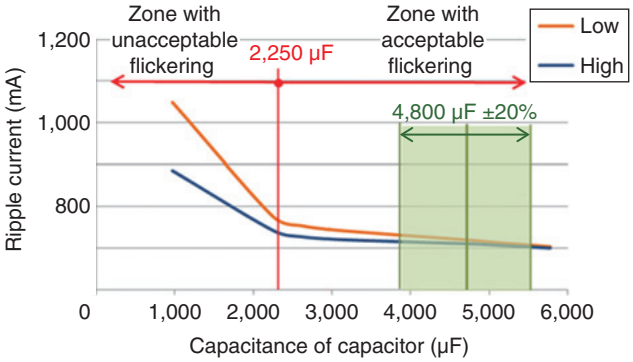


Fig. 12　Ripple currents to capacitance

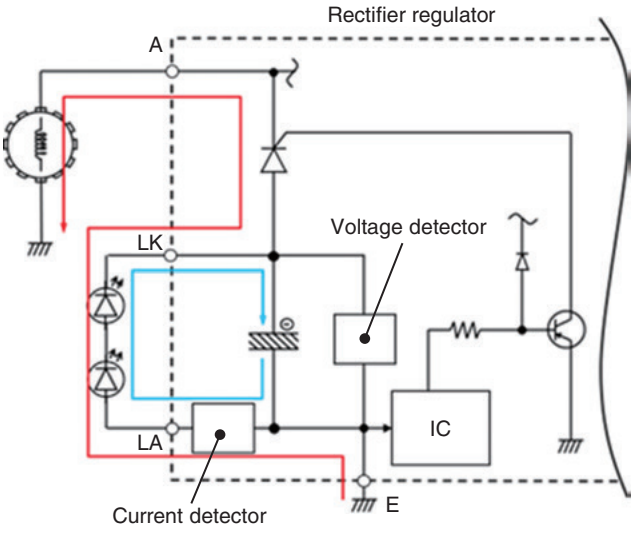


Fig. 13　Circuit diagram adopted with capacitor

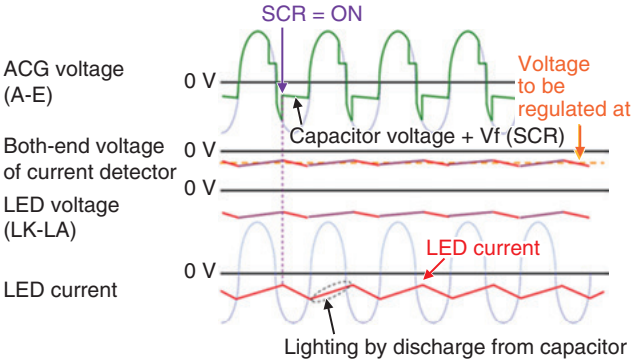


Fig. 14　Waveforms in the circuit adopting capacitor

負側サイクル時にサイリスタを ON して電解コンデンサの電位を溜めると同時に LED へ通電させる．正側サイクル時に電解コンデンサより電流検出回路を通して放電電流を LED へ流す．

LED に流れる電流を電流検出部にて監視し，それと同時に，電解コンデンサの両端電圧を電圧検出部にて監視する．どちらかが基準値より高い場合にサイリスタの通電幅を縮めるように Trig を出力し，低い場合にサイリスタの通電幅を広げるように Trig を出力する．出力制御の方法は，LED に電流が流れている場合は，電流を監視し定電流制御となる．断線等で LED に電流が流れない場合は電解コンデンサの両端電圧を監視し定電圧制御となる．

3.2. 直列回路におけるハイビームとロービームの切り替え手法

点灯形態はロービーム使用時に，ロービーム側 LED 2 個のみ点灯し，ハイビーム切り替え時に，ロービーム側 LED 2 個とハイビーム側 LED 2 個を同時点灯する．つまり，ロービームとハイビームの切り替えは，ロービーム側 LED は常時点灯として，ハイビーム側 LED の点灯，消灯をおこなうことで切り替えられる．そこで，ロービーム側回路とハイビーム側回路の中間部分からハイビーム回路と並列するバイパス回路を設け，バイパス回路への通電と非通電を切り替えるスイッチを設けることにより，ハイビーム非点灯時にはバイパス回路を短絡させる構成とした．Fig. 15 にロービームとハイビームの切り替え回路を示す．

従来の並列接続の LED 前照灯では，ディマスイッチが被水したときに，ハイビーム側 LED が誤点灯することへの対策として，防水スイッチを適用する，または，スイッチは非防水のままで，リレーを追加してリーク電流を排除するか，リーク電流検出回路をドライバに内蔵していた．これらいずれの施策も，コストアップ要因になっていた．一方，本開発で用いられた回路は，ハイビーム非点灯時に

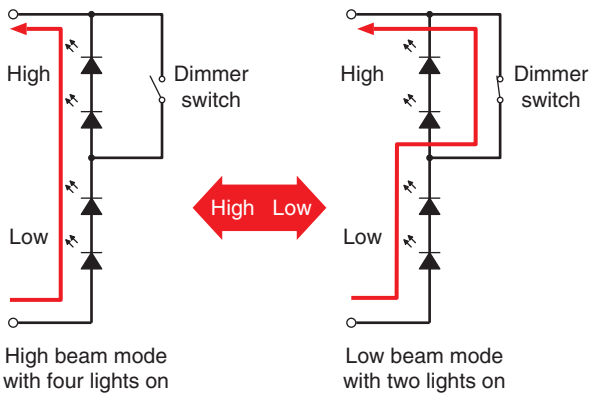


Fig. 15　Alternation circuit between low and high beams

ディマスイッチがリークしても，回路上，ハイビーム側の誤点灯は起きない．また，ハイビーム点灯時にリークした場合には，バイパス回路に電流が流れる分，ハイビーム側の電流値が低下するために明るさは落ちるが，リークで流れる電流値は微少であるため，目視で判別できるほどの影響は生じない．したがって，本回路を採用することにより，従来必要であった，ディマスイッチのリーク対策を省くことが可能となった．しかしながら，この手法を採用した場合，ハイビームからロービームへの切り替えをおこなったときに生ずる，突入電流への対策が新たに必要となる．

ハイビーム（4 灯）からロービーム（2 灯）に切り替えたとき，コンデンサには LED の Vf 4 個分の電圧が維持されている．そのため，2 個に切り替えた際に突入電流が流れる．その対策として，トランジスタと突入電流制限抵抗を設けて，突入電流発生時にのみ，抵抗を通して電流を流す制限回路を追加した．通常の定電流制御の 0.7 A ではトランジスタ Q1 にベース電流が流れ Q1 は ON となっており，Rs2 の抵抗に電流が流れない (Fig. 16)．

スイッチをハイビーム側からロービーム側に切り替えたとき，電流 1.0 A 以上が流れると，Rs3 の端子間電圧が上がり，Q1 と Rs3 よりも，Dr1，Dr2 の電圧が低くなるため，Q1 のベース電流は流れなくなり，Q1 が OFF する．結果，電流は Rs2 の抵抗を通して流れ，突入電流が制限される (Fig. 17)．

電解コンデンサ CREG の電圧が低下していき，電流が 1.0 A 以下となると Q1 が ON して通常制御に戻る．

本回路を追加することにより，通常，2.4 A 程度流れる突入電流を，LED 保証電流以下に抑えることが可能となった (Fig. 18)．

3.3. LED 故障時の対応手法の検討

通常のヘッドライトは，ロービームまたはハイビームのどちらか一方の回路が断線しても走行を継続できるように，ディマスイッチで切り替えれば，断線していないビームを点灯することができる．

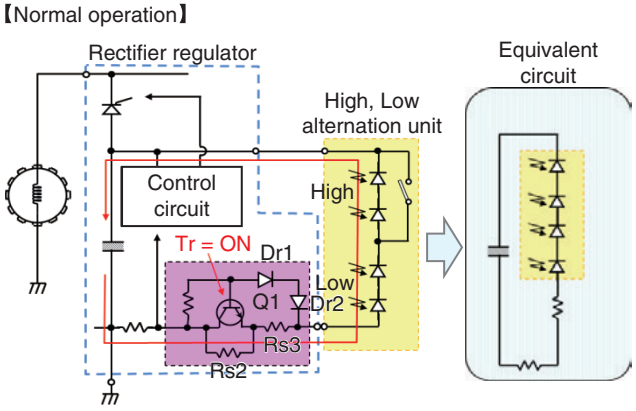


Fig. 16　Current route when normal operation

直列接続の場合，ハイビーム側断線時にはディマスイッチでの切り替えで，ロービーム側を点灯することができる．Fig. 19 にハイビーム側が断線したときの様子を示す．

しかし，ロービーム側断線時は，ディマスイッチを切り替えても，ハイビーム側を点灯できない．本方式においては，このことが新たな課題となる．その対応策として，ロービーム側に並列するバイパス回路を設け，そこにツェナーダイオードとサイリスタを追加し，ロービーム側断線時にレギュレータ出力ライン間の電圧上昇を検知して，サ

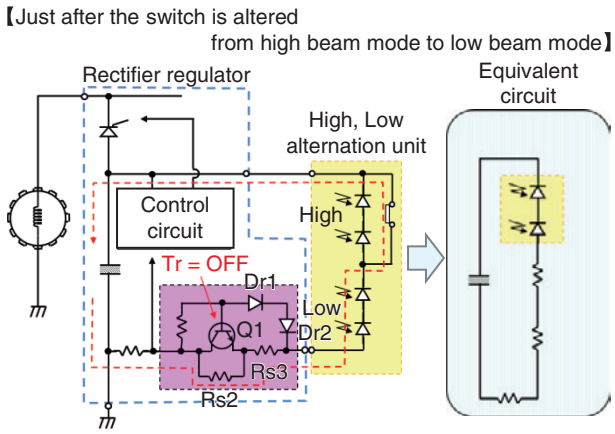


Fig. 17　Current route when rush current occurs

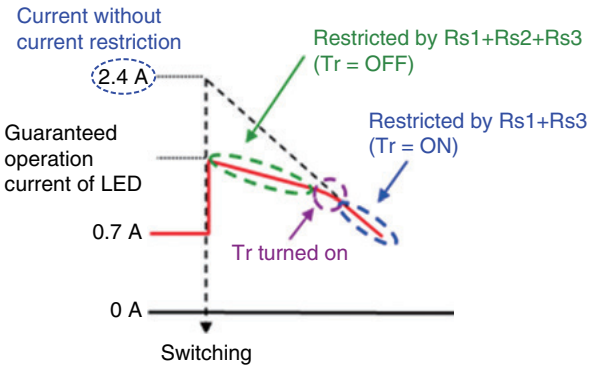


Fig. 18　Current reduction effect by rush current restriction circuit

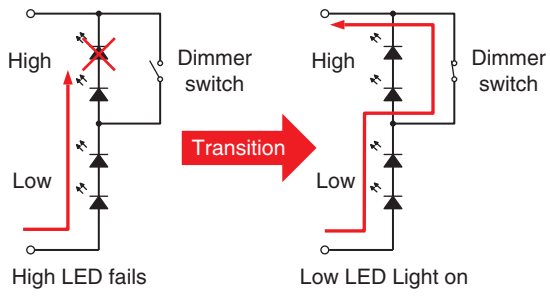


Fig. 19　Change of the current route when a LED for high beam brakes

イリスタを動作させ，バイパス回路を導通させることで，ハイビーム側に電流を流す仕様とした（Fig. 20）．

この対応により，ロービーム側が断線した場合でも，スイッチをハイビーム側に切り替えることでハイビームの点灯が可能となった．

以上に述べた技術手段を講じることにより，ハイビームとロービームを直列に接続する点灯回路を実現することができた．

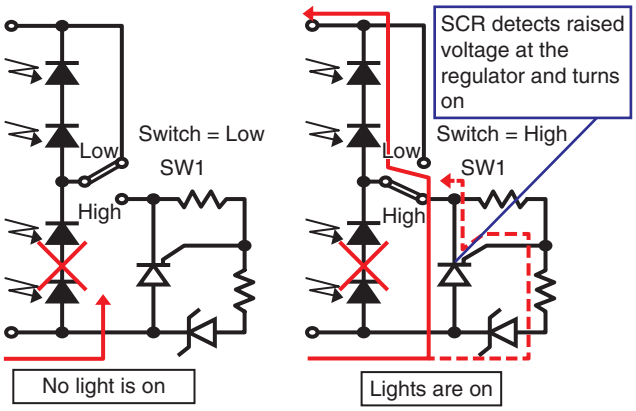


Fig. 20　Change of current route when a low beam LED brakes

4．まとめ

低価格二輪車に適用可能なLED前照灯を開発した．本開発において，下記技術手段を達成した．

（1）中輝度LEDを基板上に分散配置し，ヒートシンクなしの前照灯を実現した．

（2）ACGの半波電圧をLED駆動電圧として使用することで，LED 4個以上の直列接続を昇圧回路なしで実現した．

（3）LED端子間に適正な容量のコンデンサで接続することにより，ACG半波電圧に起因するLEDちらつき量を電球式前照灯同等以下に低減した．

（4）ハイビーム用LEDと並列にバイパス回路を設定し，バイパス回路通電をディマスイッチで制御することにより，ハイビームとロービームの切り替えを実現した．

（5）ハイビームからロービームへ切り替え時に発生する突入電流を，LEDと直列に電流低減回路を設定することにより，LED許容電流範囲まで低減した．

（6）ロービーム側断線に対応するため，ロービーム側回路と並列に断線検知回路を設定し，ロービーム側LED回路断線時には，ハイビーム側LEDへの手動点灯切り替えを可能とした．

これら技術の適用により，LED前照灯のコストを従来電球前照灯に対し1.2倍の範囲に抑えることができた．本開発により，進展国向けコミュータ用二輪車へのLED前照灯の採用が可能となり，今後，二輪車から排出されるCO_2の総量の低減に寄与することが期待される．

参考文献

（1）http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004310/pdf/018_04_00.pdf

■著　者■


土屋洋介


松崎哲平


竹繁徹朗


小口　敢

位相制御式レギュレート レクチファイアを用いたACGの開発

Development of ACG Using Regulator Rectifier with Phase Control

薗田　豊*　Yutaka SONODA
小野和彦*　Kazuhiko ONO
尾辻美紅*　Miku OTSUJI
大内勝博*　Katsuhiro OUCHI

要　旨

近年の希土類金属の価格変動リスクを回避するために，従来材料であるフェライト磁石を用い，希土類磁石を用いたものと同等な発電量を得ることのできる，二輪車用交流発電機を開発した．フェライト磁石を二輪車用発電機に適用する場合，サイズを大きくすることは，質量や慣性モーメントが増加するためできない．そこで我々は，電流の制御方式を短絡制御式レギュレート レクチファイアから位相制御式に変更し，また，位相シフト範囲を適切にコントロールすることによって電流増加を実現した．位相コントロール用センサには，高温度に対応するため新しい構成を適用した．これらにより，フェライト磁石を用い，サイズを変えることなく，希土類磁石を用いた場合と同等の発電量を実現した．

ABSTRACT

To get free from the risks that arise from price variations of rare-earth metals, an alternative current generator for motorcycles was developed using conventional ferrite magnet while keeping the same amount of electricity generation as that of using rare-earth metal. For the application of ferrite magnet to a motorcycle, the way of having a larger size cannot be allowed because of the increases of the mass and moment of inertia associated with that. Accordingly, in our development, the increase of electricity generation was realized by changing the current control from regulated short-circuit rectifier method to phase shifting method with a precise control of the effective range of phase shifting. For that purpose, newly developed configuration was implemented to the sensor for phase control to have it under permissible temperature range against resulting high installation temperature. Through those measures, it was achieved by using ferrite magnet to generate a compatible amount of electricity generation to that of using rare-earth metals without changing the dimensions of the generator.

1．まえがき

希土類金属は，2010年を始めとしてその価格が高騰し，現在も価格変動のリスクにさらされている．こうした背景に起因して，二輪車用の交流発電機（ACG）に用いられる磁石材に対しても，脱希土類が急務とされる状況になっている．その実現手段としてフェライト磁石を用いたACGの採用が挙げられるが，希土類磁石を用いたACGと比較して一般的に発電量が低いため，従来手法の制御では，特に低回転域の発電量が不足してしまう．発電量を増加するためには，ACG全体の寸法を大きくするというのが一般的な手法であるが，質量や慣性モーメントが増加してしまうため，軽量，コンパクト化が強く要求される二輪車への適用は困難であった．そこで，我々は発電制御方式を短絡制御式レギュレート レクチファイア方式から位相制御式に変更することで，低回転域の発電量を確保し，希土類磁石を用いたACGと同等のサイズを実現した．本論文ではこの開発を可能とした技術要素である，二輪車で初めて採用された発電量増加を可能とする位相制御と，発電量増加に伴う発熱量増加に対応するための新しい磁極位置検出手法について報告する．

＊二輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_10

2. 位相制御式レギュレート レクチファイア

従来二輪車で採用されてきた短絡制御式レギュレート レクチファイアでは，全波整流範囲と短絡範囲の割合を変化させることで充電電流を変化させ，充電電圧を制御している (Fig. 1)．一方，位相制御式レギュレート レクチファイアでは，ACG の誘起電圧にバッテリ電圧を印加し，またその際の位相を変化させることで発電電圧を制御し，定電流に近い電流を発生させる．この方式を用いることにより，短絡制御式に比べ発電量を増加させることができる (Fig. 2, Fig. 3)．

Fig. 4 に単相 ACG の等価回路を示す．この回路の左側は誘起電圧 E，インダクタンス L を含む ACG を示し，右側はバッテリおよびインバータで構成された，出力電圧 V の交流電源を示している．制御方式は位相制御であり，誘起電圧 E の位相に対して出力電圧 V の位相を制御することで，目標とする電流 I を得る．

次に，E, V の周波数が等しい条件において，V の電圧位相を変化させたときに電流 I がどのように振る舞うかを説明する．等価回路の電圧方程式から電流を求めると以下の式となる．ただし，角周波数を ω とする．

$$\dot{E} = j\omega L\,\dot{I} + \dot{V} \qquad (1)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{E} - \dot{V}}{j\omega L} \qquad (2)$$

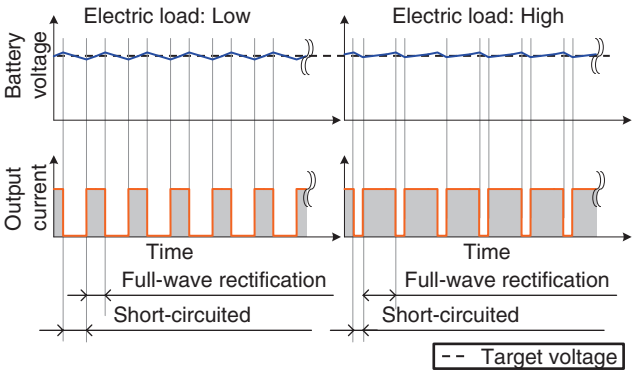


Fig. 1 Schematic illustrations of charging currents under short-circuit type control in different load conditions

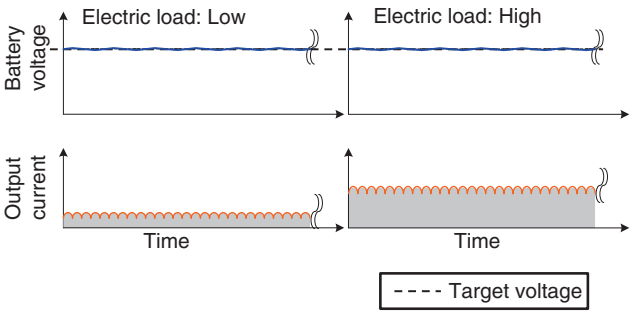


Fig. 2 Schematic illustrations of charging currents under phase control in different load conditions

式 (2) で，ω, L, E を一定値とし，V の位相を変化させると，電流 I の値を変化させることができることがわかる．これをベクトル図で表現すると，Fig. 5 のようになる．E を基準として，V の位相を変化させたとき，電流 I の大きさ，位相が変化することがわかる[(1)-(3)]．

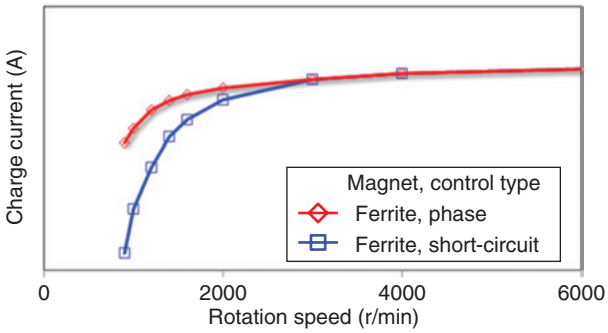


Fig. 3 Characteristics of charge currents under different types of control

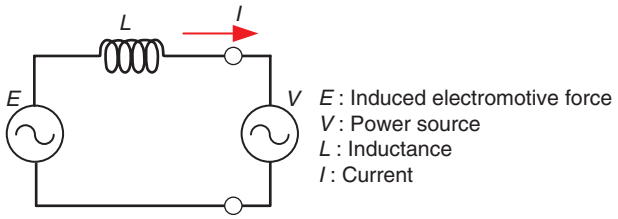


Fig. 4 Circuit composed of two AC power sources and inductance

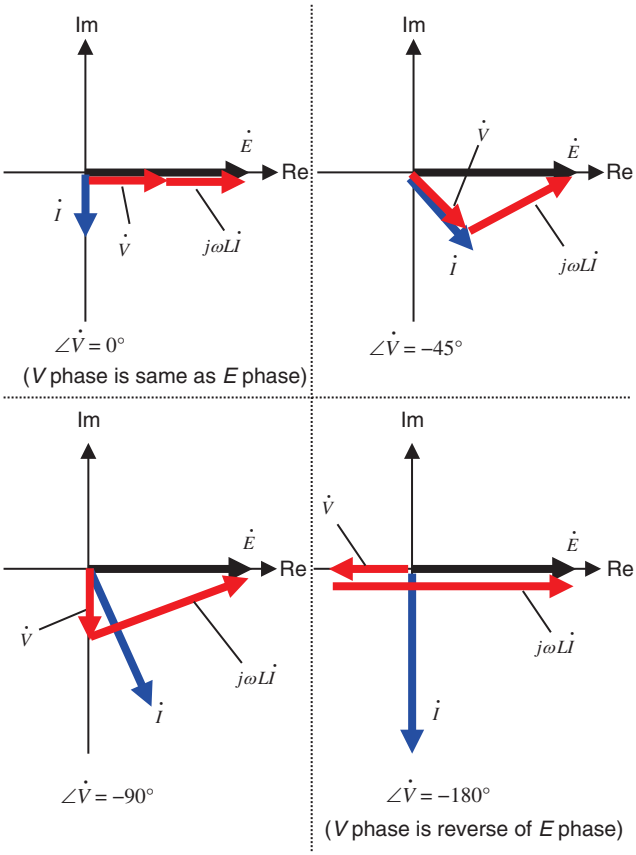


Fig. 5 Vector diagrams with varied phases of supply voltage of V

このように，位相制御方式を用い，電源電圧 V の位相を変えることによって電流制御をおこなうことができる．なお，実際に使用される回路においては，電源電圧 V の位相を決定するために誘起電圧 E の位相，もしくは磁極位置を検出する手段が必要である．また，発電機の巻線抵抗や V と I の力率も考慮する必要があるため，実際の式の記述内容はここに述べた説明よりも複雑となる．

3．発電量増加可能な位相制御

位相制御方式では，制御をおこなう位相範囲の選択が出力特性に大きな影響を与えることがわかっている．我々はこの位相範囲をより遅角方向へ広げることで，短絡制御式に比べより大きな発電量を得ることを可能とした．Fig. 6 に，誘起電圧に対して印加するバッテリ電圧の位相を変化させたときの，出力電流特性を示す．この図からわかるように，位相差 0° の点から，進角方向（右方向）へいくほど出力電流は低下し，遅角方向（左方向）へいくほど出力電流は増加する特性を持っている．この特性を利用してバッテリ電圧が一定となるようフィードバック制御をおこなう．しかし，位相差 -68° で 22.5 A となるのを境に，それよりさらに遅れた位相角においては，ACG に流れる線電流は増加するものの，出力電流が低下傾向となり，制御系が正帰還の状態となってしまうため，ACG 発熱量の増加や制御系の不安定性を招く可能性がある．これらを防ぐためには，制御をおこなう位相範囲を常に適切な範囲内に留める必要がある．また，そうした制御を可能とするためには，制御の基準位置である誘起電圧の位相，もしくは磁極位置を精度良く検出する必要がある．

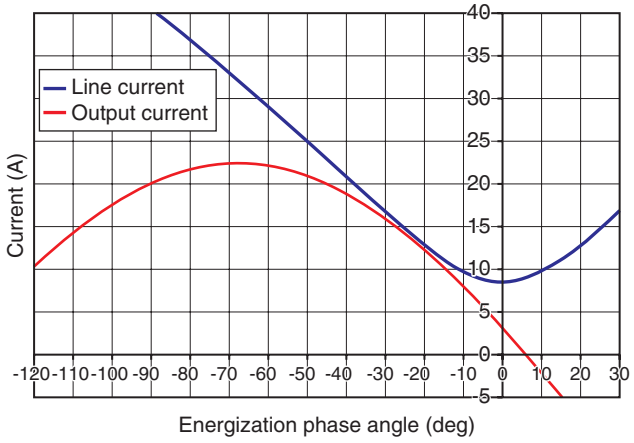


Fig. 6　Characteristics of charging currents to the phase of line current

4．発電量増加による発熱に対応できる新しい磁極位置検出手法

制御の基準位置を精度良く検出する手法としては ACG のステータコイル間にホールセンサを配置し磁極の位置を検出する手法などが採用されている．しかし，低回転時の発電量を増加させた場合，コイル温度は 200°C を超える可能性があり，その場合，センサ素子の温度は耐熱温度である 150°C を超えてしまう（Fig. 7, Fig. 8）．

そこで，我々は新たな磁極位置検出手法の検討をおこなった．検討をおこなう際に，既存のエンジンに対する形状変更が最小限となること，現在量産されているセンサが流用可能なこと，転倒によるセンサ破損のリスクが最小限となるセンサ配置を採ること，位置検出精度は± 10° 以内のことという四つの要件を設けた．

さまざまな手法の検討をおこなった結果，フライホイール外周上の磁石と同じ角度位置に突起を設け，一つのホールセンサのみによって誘起電圧位相を検出する手法を試みた（Fig. 7）．この手法の長所は，温度の低い位置を選び，一つのホールセンサのみを配置すればよい点である（Fig. 8）．しかし短所として，そのままでは磁極位置の検出ばらつきが± 43° 以上と大きく，要求精度を満たすことができない（Table 1）．これは主に ACG やエンジンカバーなどの複数の部品の機械的公差が積み上がることによるものであり，この手法を採用するためには何らかの補正手法が必要となる（Fig. 9）．

そこで我々は，全波整流をおこなうときに，ACG 各相の線電流と誘起電圧の位相の間には，周波数に応じて変化する一定の関係性に着目した．コイルを流れる線電流は，フ

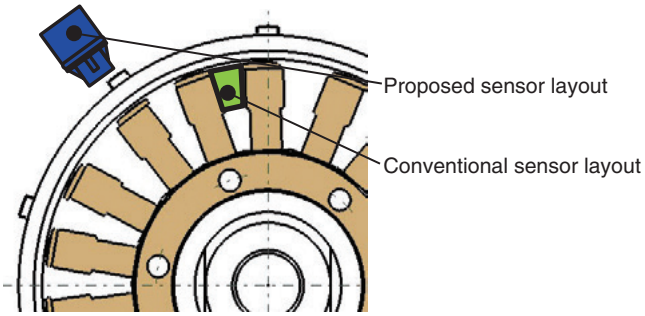


Fig. 7　Comparison of sensor configurations between in-stator location and out-of-flywheel location

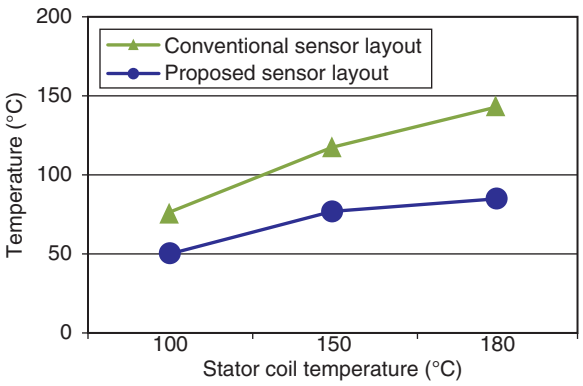


Fig. 8　Comparison of sensor temperatures

Table 1 Comparison of accuracies of detection angles

Sensor layout	Proposed layout		Conventional layout
	Before correction	After correction	
Detection error angle (°)	±43.5°	±4°	±3°

ライホイールが回転した際にステータコイルより生じる誘起電圧に起因して発生するため，誘起電圧周波数や充電電流が流れる経路の抵抗によって，線電流と誘起電圧の間に一定の位相差が生ずる．Fig. 10 の単相等価回路において ACG より発生する誘起電圧 E は

$$\dot{E} = (j\omega L + R)\dot{I}$$

L : ステータコイルのインダクタンス

R : 回路の負荷抵抗

と表すことができ，

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{j\omega L + R}$$

となる．このときの誘起電圧と線電流の位相差 θ は

$$\theta = \tan^{-1}\frac{\omega L}{R}$$

となる．

実際には，Fig. 11 図中 (a) に図示した ACG が発電した際の磁極センサー線電流位相と，Fig. 11 図中 (b) に示した各回転数における誘起電圧－線電流位相差の特性マップの特性値との位相差 θ を求める．これにより，Fig. 11 図中 (c) に示した制御の基準位置となる磁極センサー誘起電圧位相差を求めることができる．

ただし，Fig. 12 に示すような完成車等価回路の負荷抵抗 R_2 については車両側の電気負荷の変動により変化するため，レギュレート レクチファイアの出力端子間電圧を測定することにより抵抗 R_2 変化分の位相変化量の補正をおこなった．これらの補正をおこなった結果を Table 1 に示す．補正後の検出精度は，対象とする遅角方向の位相範囲内において± 4° となり，要件を満たす範囲まで精度向上することができた．

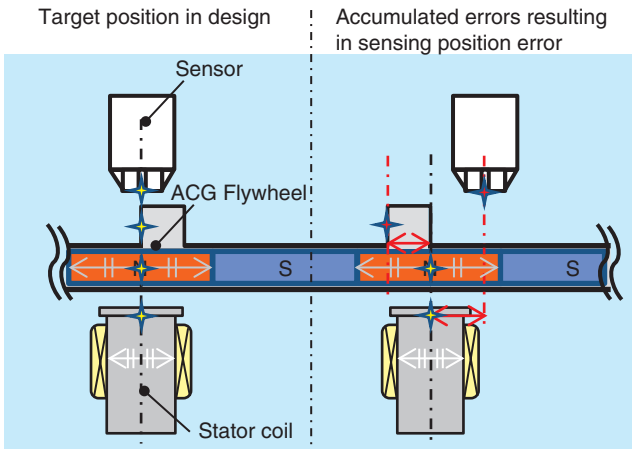


Fig. 9 Source of errors affecting detection angle accuracy of out-of-flywheel type sensor configuration

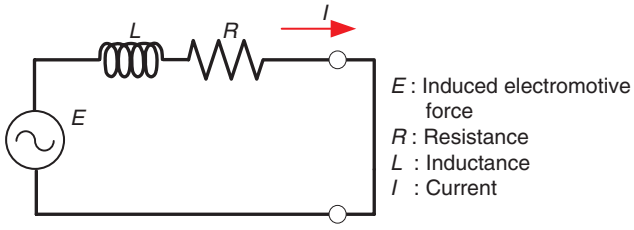


Fig. 10 Equivalent circuit of ACG (single-phase)

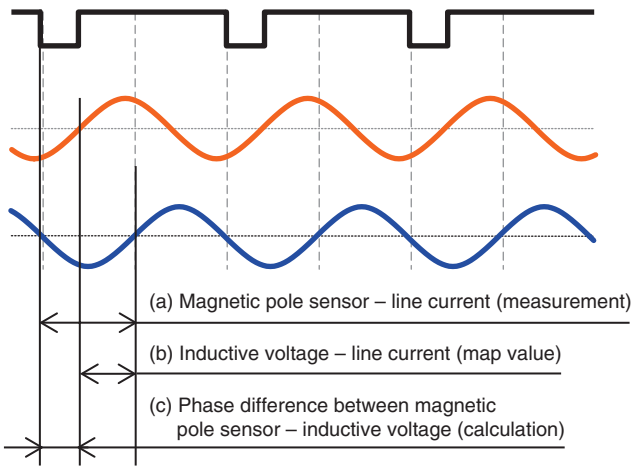


Fig. 11 Timing chart illustrating error compensation

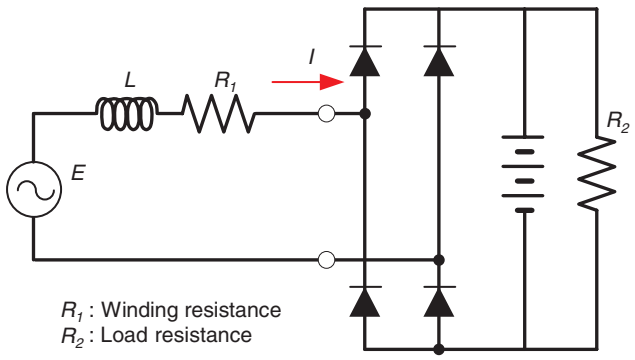


Fig. 12 Equivalent circuit of total charging system applied to the production design (single-phase)

5．位相制御式システムの効果確認

位相制御式レギュレート レクチファイアによる出力電流向上効果を確認するため，希土類磁石 ACG とフェライト磁石 ACG および，短絡式レギュレート レクチファイア

Table 2　Combinations of ACG and regulated rectifier

Combination		Short-circuit (1)	Short-circuit (2)	Phase control
ACG	Outer diameter	ϕ132.5	ϕ132.5	
	Magnet type	Rare-earth magnet	Ferrite magnet	
Regulated rectifier	Control method	Short-circuit control		Phase control

Table 3　Test conditions

ACG temperature	Stator coil temperature 120°C
Ambient atmosphere temperature	Room temperature
Test equipment	Motor bench
Test circuit	Magnetic pole sensor ACG　Regulated rectifier　A　V　R_2

と位相制御式レギュレート レクチファイアを Table 2 で示すように組合せ，出力電流特性測定および比較をおこなった．Table 3 には測定条件を，Fig. 13 には測定結果を示す．

今回の測定条件においては，位相制御式は短絡制御式（1）よりも，全域で出力電流が上回っている．

3000 r/min 以下の低回転域で位相制御式は短絡制御式（2）よりも出力電流が高く，特にアイドリング回転数である 1000 r/min では短絡制御式（2）に対し 2.3 倍の出力電流を得られた．3000 r/min 以上の高回転域では，希土類短絡式とフェライト位相制御式の間に出力電流の差がほとんど見られないことがわかる．これらの結果により，位相制御を用いることにより，ACG 磁石材を希土類からフェライトへと変更することが可能となり，二輪車への適用が可能なシステムを実現できた．

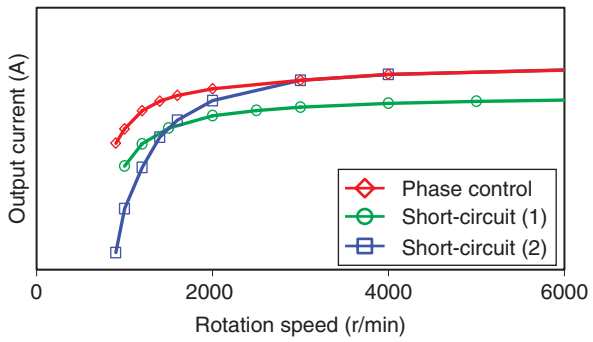


Fig. 13　Characteristics of output current to rotation speed

6．まとめ

我々は，二輪車用 ACG の磁石材にフェライトを採用するために，位相制御方式を採用し，発電量増加可能な位相制御範囲の選択手法と，発電量増加による発熱に対応できる新しい磁極位置検出手法を確立した．本開発により ACG 磁石材に希土類を用いることなく，フェライトによって求められる要件を達成することができるようになった．その結果，希土類磁石の価格変動によって生ずるリスクを回避し，ACG を安定した価格で生産することが可能となった．ここに述べた，位相制御式レギュレート レクチファイアを使ったフェライト ACG は，市販二輪車への適用が既におこなわれており，今後，さらなる適用機種の拡大が期待される．

参考文献

（1）宮入庄太：電機子反作用，大学講義 最新電気機器学 改訂増補，丸善株式会社，p.199-201(1979)
（2）宇野幸一，磯部直吉：波形分析，改訂 交流回路，東京電機大学出版局，p.128-131(1991)
（3）西方正司：同期機，よくわかるパワーエレクトロニクスと電気機器，株式会社オーム社，p.105-110(1995)

■著　者■


蘭 田　豊


小 野 和 彦


尾 辻 美 紅


大 内 勝 博

電動カートの利用が高齢者の QOL に与える影響に関する実証実験

Actual Proof Experiment of Electric Wheelchair “Monpal” for Enhancing Elderly QOL

矢口忠博* Tadahiro YAGUCHI
増渕義則** Yoshinori MASUBUCHI
山村誠** Makoto YAMAMURA
仲本剛*** Go NAKAMOTO
川島英敏**** Hidetoshi KAWASHIMA

要　旨

Honda と熊本県は 2010 年 8 月に締結した，次世代パーソナルモビリティの実証実験に関する包括協定のもと，高齢者に電動カートを貸与し，それによって補完された移動能力が高齢者の生活の質にどのような変化を及ぼすかの評価をおこなった．

生活の質の評価指標として Medical Outcomes Study 36-Item Short-Form を用い被験者の主観的健康状態の変化を検証，生活活動範囲は Life-Space Assessment で評価し，それらを補強する目的で，日常の身体活動を Activities Monitoring and Evaluation System を用いた評価も合わせておこなった．

その結果，電動カートの活用が生活活動範囲を広げ，全体的健康感や活力などの生活の質の向上に資する傾向が示された．

ここでは，これら実証実験結果を報告する．

ABSTRACT

In August 2010, Honda and Kumamoto Prefecture concluded a comprehensive agreement concerning proof experiments of next-generation personal mobility. In accordance with that agreement, electric carts were provided on loan to elderly people and an evaluation was made of how the resulting augmentation of their mobility changed their quality of life.

Using the Medical Outcomes Study 36-Item Short-Form as an index for evaluating quality of life, changes in the subjective state of health of the experimental subjects were verified. Their life-space mobility was evaluated using the Life-Space Assessment. In order to reinforce those evaluations, the Activities Monitoring and Evaluation System was also used to carry out evaluation of everyday bodily activity.

The results indicated a tendency for the use of electric carts to expand life-space mobility and contribute to enhancement of overall sense of health, activity, and other such aspects of quality of life.

The following will report on these proof experiment results.

1．まえがき

Honda は自由な移動の喜びと豊かで持続可能な社会の実現に向けて，熊本県と 2010 年 8 月に締結した次世代パーソナルモビリティの実証実験に関する包括協定のもと，2014 年 3 月まで実証実験をおこなった．

電気エネルギーを利用する個人的移動手段（パーソナルモビリティ）が高齢者にとっての生活の質（Quality Of Life: QOL）向上，ひいてはコミュニティでの暮らしの質の向上に貢献する，そのような将来モビリティの構想検討に役立てることを目的とした[(1)]（Fig. 1）．

＊　四輪 R&D センター
＊＊　汎用 R&D センター
＊＊＊　本田技研工業株式会社
＊＊＊＊日本赤十字社 熊本健康管理センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_11

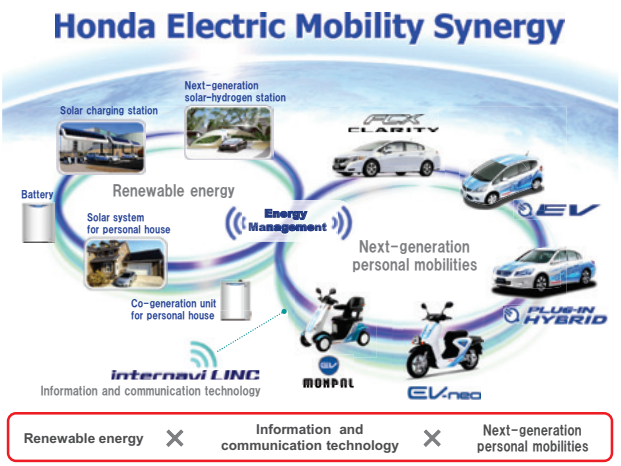


Fig. 1　Honda electric mobility synergy

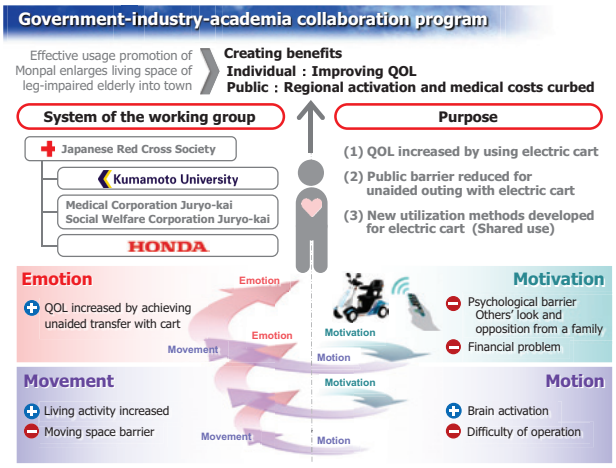


Fig. 3　Objectives of working group with government-industry-academia collaboration program

2. 電動カートによる社会実証実験の目的

Honda は高齢者の外出支援機器として，電動カート（モンパル）を販売しているが，2000 年の介護保険法の施行によってレンタル利用で補助を受けるには要介護認定が必要になったこともあって出荷台数は減少傾向にある (Fig. 2)．また，そのような機器に頼ることによる身体機能の更なる低下や安心して走れる環境の不備など，電動カートに対する認知度や活用度が十分に社会に受け入れられているとは言いがたいのが現状である．

一方，熊本県は長寿を楽しむ社会を目指しており，高齢者の電動カート利用の効果を QOL 指標に基づいて明らかにしたいと考え，次世代パーソナルモビリティの実証実験に関する包括協定の締結を契機に，日本赤十字社熊本健康管理センターを中心とする官学産連携の電動カート部会を設置した．そこでは，高齢者が地域で暮らしていく上で，できるだけ高い QOL を維持するための電動カートの新たな活用法について，多くの議論が重ねられた (Fig. 3)．

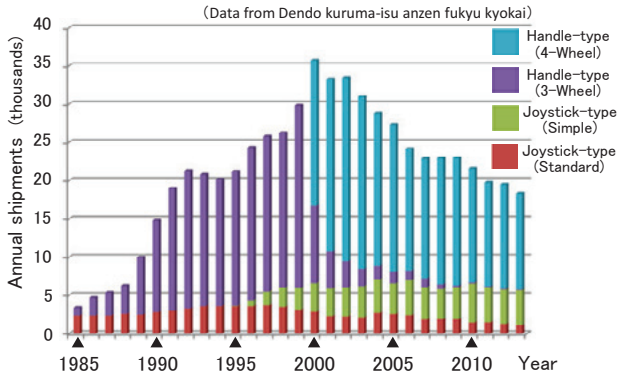


Fig. 2　Annual shipments of electric wheelchair

3. 実証実験の概要

電動カートの利用経験がない高齢者を対象に，日常の移動を支援するモンパルを貸与し，その利用が高齢者の生活にどのような変化を及ぼすかを検証する目的で実証実験をおこなった．実証実験では生活様式が異なる複数の高齢者施設を実証フィールドに選定し，電動カート利用前後の利用者の生活，移動範囲，QOL の変化と電動カートの利用状況について調査と解析をおこなった[(2), (3)]．以下に述べる実験は，弊社生命倫理委員会の承認を受けておこなったものである．

3.1. 実証フィールド

実証フィールドは高齢者施設のうち，身体機能や活動能力において，

（1）日常的に介護が必要な人が居住する介護施設

（2）自立した生活を営むことができる人が居住するサービス付き高齢者向け住宅

の二つのレベルを基準に施設を選定した．

3.1.1. 実証フィールド A（介護施設モデル）

介護施設を利用する高齢者は，介護保険法で介護サービスが必要な要介護状態か，日常生活の支援が必要な要支援状態の要介護認定を受けている方々である．これら認定を受けている方々の多くは身体機能が低下し，日常の移動も介護施設が保有する車いすや歩行補助具等を必要とする場合が多く，健常人と比較して自由に移動できる範囲が狭く，移動機会も少ない．

しかし，これら要介護認定者でも，安全に移動を支援する電動カートがあれば，移動範囲の拡大と移動頻度の向上が可能であると考えられる．そこで，介護施設を利用する高齢者に対して，電動カート利用前後での QOL に関する様々な変化を検証する目的で，熊本市西部に存在する特別

養護老人ホームなどの高齢者の介護施設で電動カートの共同利用による実証実験をおこなった.

3.1.2. 実証フィールドB (サービス付き高齢者向け住宅モデル)

高齢化や核家族化が進み, 高齢者の独居世帯や夫婦のみの世帯が増加している. そのため政府は, 高齢者の居住の安定を確保する政策として, バリアフリー構造を有し, 介護サービスや医療サービスと連携するサービス付き高齢者向け住宅の供給を推進している. このサービス付き高齢者向け住宅を利用する高齢者は, 介護施設を利用する高齢者よりも自立度が高く, 日常生活のほとんどを他者からの支援を受けることなく営むことが可能な方々である.

しかし, 加齢とともに徐々に身体能力が低下し, 長時間, 長距離の歩行が困難になってくると外出介助や通院介助などのサービスが必要となる. サービス付き高齢者向け住宅を利用する高齢者がこれらのサービスが必要になった場合でも, サービスを利用することはできるが, 安全に移動を支援できる電動カートがあれば自立した生活の継続が可能で, その結果, 外出介助や通院介助が必要な期間を短縮させる可能性もある. そこで, サービス付き高齢者向け住宅居住者を利用する高齢者に対して, 電動カート利用前後のQOLに関する様々な変化を検証する目的で, 熊本市東部に存在するサービス付き高齢者向け住宅で実証実験をおこなった (Table 1).

3.2. QOL評価ツール

実証実験をおこなう二つのフィールドにおいて, 電動カート利用者の利用前後での生活 (日常動作), 移動範囲, QOLなどの変化を検証する目的で, 以下の評価ツールを用いた.

3.2.1. 生活活動の評価方法

(1) 身体活動評価　身体活動の評価には, 日常動作をモニタリングするActivities Monitoring and Evaluation System(A-MES)を用いた. このA-MESは, 被験者の体幹部と大腿部に装着した二つの加速度センサのデータを記録, 解析することで以下の動作状態を評価することができる (Table 2, Fig. 4).

(a) 24時間の動作状態 (臥位, 座位, 立位, 車いす駆動, 歩行)
(b) 臥位の状態 (背臥位, 右側臥位, 左側臥位, 腹臥位)
(c) 姿勢変換回数 (立ち上がり, 起き上がり, 寝返り回数)
(d) 各動作の総時間及び最大持続時間
(e) 1時間ごとに各動作状態が占める時間割合

A-MESは医療介護の分野で日常動作を把握する目的で活用されており, データはロガーに長時間蓄積されることから, 被験者の日常 (24時間)の動作状況をモニタリングできる. 実証実験では電動カートを利用する日と利用しない日の2パターンで身体活動を把握し, これらの日常動作の違いを評価した.

Table 1　Forms of use in two different testing fields

	Ownership form	User	Utilization area
Field-A Nursing-care services	Care facility	Group	Living area
Field-B Assisted-living facility for elderly	Care facility	Personal	Living area

Table 2　General specification of A-MES

General specifications of the Data Logger	
Sampling period	0.2 sec constant
Recording time	≥ 24 hours
Power source	size AA battery x 1
Size	85 mm x 75 mm x 25 mm
Data	Sampling time, 6 sensor data items (12 bit/data), Measuring time

(2) Life-Space Assesment　生活を営むために移動した距離と頻度と自立度の積で定義されたLife-Space Assessment(LSA)は生活の空間的な広がりにおける移動を評価する指標である. そこでの移動距離は, 生活空間をLife-Spaceとして評価する移動の原点を個人の寝室とし, 生活空間はこの寝室から町外までを以下の5段階で表し, 評価は0点から120点の得点によっておこなう.

Life-Space 0　Bedroom(寝室)
Life-Space 1　Home(住居内)
Life-Space 2　Outside(居住空間のごく近くの空間)
Life-Space 3　Neighborhood(自宅近隣)
Life-Space 4　Town(町内)
Life-Space 5　Unlimited(町外)

実証実験では電動カート利用前の1ヶ月間と電動カート利用中の一ヶ月間のLSA値を解析した.

(3) 行動範囲の計測　モンパルの作動状態及び運転操作状況を記録するため, 通信機能を搭載したGPSデータロガーを製作し, モンパルに搭載した.

モンパルの作動状態及び運転操作状況とGPS情報はサンプリング間隔1秒で記録されファイル化される. このファイルは号機番号と日付別に携帯電話回線を通して約1分間隔でサーバに転送され蓄積, 保存される.

また, 保存データの確認用に, 移動軌跡やアクセル, ウインカー, ハンドル切れ角等の操作状況, 車速やバッテリ

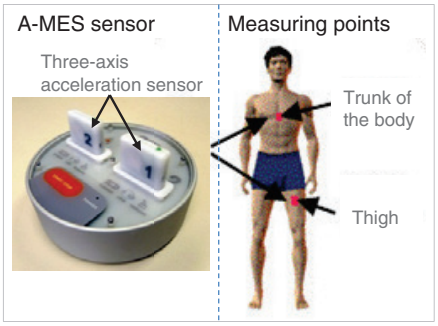


Fig. 4　Sensor and measuring points of A-MES

Table 3　General specification of GPS data logger unit

Size (LxWxH)	Communicator device	101.5 x 139.2 x 47.8
	Antenna	20.0 x 35.0 x 60.0
	GPS	φ 61.0 x 19.5
Total weight	1.8 kg	
Sampling time	1 sec (const.) 5 minutes of FOMA transmitting period	
Loading point	Under seat of MONPAL	
Sampling data	GPS NMEA0183 Velocity, Accelerator position Steering angle, Battery condition	

残量と電圧，モータ電流等の実機情報を蓄積し解析するためのソフトウェアを開発した (Table 3, Fig. 5, Fig. 6).

3.2.2. QOL 評価方法

電動カートの利用による QOL 変化の評価には，健康関連 QOL (Health Related Quality of Life: HRQOL) の評価指標の一つである Medical Outcomes Study 36-Item Short-Form (SF-36™) を用いた．一般に HRQOL は包括的尺度，疾患特異的尺度の二つに分類されるが[4), (5)]，SF-36™ は包括的尺度に分類され，個人の疾病や健康障害の有無に関係なく QOL を評価できる利点を有している．SF-36™ での評価は 8 種類の尺度で構成される．それら尺度の得点の解釈を Table 4 に示す．調査には自己記入回答式による調

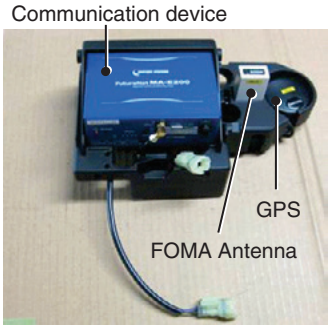
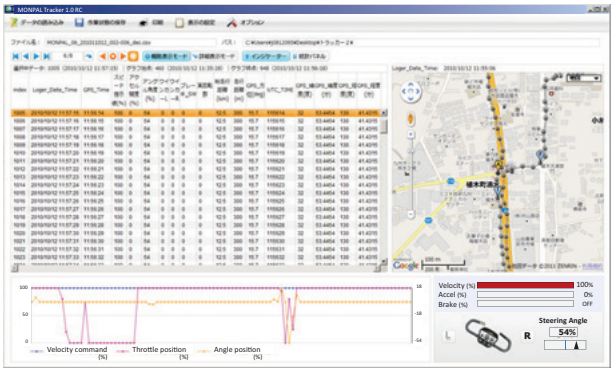


Fig. 5　External view of GPS data logger unit



©2011 Google-Map date ©2011 ZENRIN

Fig. 6　View of Sampling data on PC screen

Table 4　Subscales defined in SF-36™

Subscale items	Abbr.	Scoring reference	
		Worst condition	Best condition
Physical functioning	PF	Impossible to take a bath or change clothes	All physical activity possible
Role physical	RP	Experience trouble with ordinary work	Experience no trouble with ordinary work
Bodily pain	BP	Ordinary work disturbed by severe physical pain	Ordinary work not disturbed at all without physical pain
General health	GH	Health condition getting worse	Good health condition sustained
Vitality	VT	Fully exhausted	Full of vigor
Social functioning	SF	Friendships with families, friends or acquaintance deadly disturbed by some physical or mental impairments	Friendship with families, friends or acquaintance not disturbed by any physical or mental impairments
Role emotional	RE	Problem with work or other activities due to mental reasons	No problem with work or other activities due to mental reasons
Mental health	MH	Always feel depressed with nervous temperament	Always feel calm and happy

(relating to a health condition in the past month)

査用紙が用いられ，それは調査時点から過去 1 ヶ月間の健康状態を調査するための 36 項目の質問により構成されている．

3.3. 実証実験の結果と考察

実証実験フィールドにモンパルの利用環境を整備し，電動カート利用者の利用前後の生活 (日常動作)，移動範囲，QOL の変化や電動カート利用状況について以下の結果を得た．

3.3.1. 生活 (日常動作)

介護施設で電動カートを利用した 2 名に対して A-MES を装着し，電動カートを利用した日と利用してない日のそれぞれで日常動作をモニタリングした結果を Table 5 と Table 6 に示した．また，電動カートを利用した日と利用しない日で生活時間帯による差が生じないよう，両日ともデータが正確に計測できている時間帯を抽出して評価した．

被験者 A は評価時間帯のうち，電動カートを利用した日の方が利用してない日より歩行時間は 1 時間 21 分，立位時間は 26 分，座位時間は 25 分増加していた．反面，臥位時間は 2 時間 12 分減少していた．また，1 日の動作回数は座位から立位，立位から座位への立ち座り動作が 32 回から 61 回へと約 2 倍の増加を示した．

被験者 B は日常の活動時間が午後に集中しており評価時間帯も被験者 A に比べて短いが，歩行時間は 29 分の増加があった．また，動作回数も 1 日当たりの立ち座り動作が 16 回から 31 回へと約 2 倍の増加が認められた．

電動カートは利用者に簡便な移動環境を提供する反面，歩行を代替する手段となることから，歩く機会を減らし，結果的に利用者の脚筋力を低下させる要因となることを危惧する意見が本実証実験のアンケートでも散見されていた．

また同様に運動機能の衰えや障害が要介護の危険性を高めることからロコモティブシンドローム予防が提唱され，

Table 5 Movement status of subject A in Field A

	Without Monpal		With Monpal	
State/Posture	Accumulated Time	Continuous Max. Time	Accumulated Time	Continuous Max. Time
Walking	02:44:57	00:03:03	04:06:04	00:05:50
Standing	00:46:22	00:04:24	01:11:38	00:02:04
Sitting	02:38:16	00:30:53	03:03:30	00:17:13
Recumbent	06:12:40	01:30:01	04:00:43	01:31:59
Total Time	12:22:16	-- : -- : --	12:21:56	-- : -- : --

Table 6 Movement status of subject B in Field A

	Without Monpal		With Monpal	
State/Posture	Accumulated Time	Continuous Max. Time	Accumulated Time	Continuous Max. Time
Walking	00:36:16	00:06:00	01:05:08	00:02:15
Standing	01:03:03	00:06:50	00:45:24	00:04:19
Sitting	03:04:28	00:13:14	02:55:36	00:24:37
Recumbent	02:32:43	00:32:52	02:30:07	00:31:14
Total Time	07:16:32	-- : -- : --	07:16:16	-- : -- : --

高齢者もできるだけ歩く習慣を維持し，歩行能力を喪失しないようにするための啓発がなされている．これは，安易な電動カート利用がこの方向に逆行する可能性があることを危惧しているものと考えられる．

しかしながら，本実証実験では，ここに示した２例以外でも，全被験者で電動カートを利用した日が利用しない日に比べて，歩行時間の増加と臥位時間の減少が確認され，電動カート利用が歩行の代替機器として単純に歩行時間を減少させるのではなく，むしろ移動機会を増加させ，移動に随伴する自立歩行や座位の動作を増加させる傾向にあることが示された．

3.3.2. LSA 評価結果

フィールドＡで電動カートを利用した被験者のうち，利用前後に調査した 13 例の Life-Space スコアと電動カートの利用頻度を Table 7 に示す．電動カートの利用頻度は，週に数回利用したものをＳ，週に１回程度をＡ，週１回未満をＢで示した．

電動カート利用前のＬＳＡスコアが高い人は電動カートの利用頻度が低く，逆にＬＳＡスコアが低い人は電動カートの利用頻度が高い傾向がある．LSA スコアの変化と電動カートの利用頻度を対応させたところ，電動カートの導入前後でＬＳＡスコアが低下した者は４名，向上した者は４名，変化ない者は２名であった．電動カートの利用頻度が高い４名の被験者にはＬＳＡスコアの向上が認められた．

3.3.3. QOL の変化

フィールドＡの被験者の電動カート利用前後の SF-36™ の結果は，尺度のスコアリングごとに国民標準値に基づいたスコアリング（Norm-based Scoring: NBS）で求められ，それら利用前（Before），利用後（After）の八つの尺度の結果を平均値として Fig. 7 に示す．

Table 7 LSA scores and usage frequency of subjects

Subject No.	Life-Space Score <Before>	Life-Space Score <After>	Usage Frequency
1	120.0	102.0	B
2	84.0	24.0	B
3	49.5	63.0	S
4	102.0	120.0	A
5	66.0	84.0	S
6	120.0	–	–
7	84.0	84.0	S
8	120.0	63.0	A
9	120.0	63.0	B
10	22.5	54.0	S
11	120.0	120.0	A
12	18.0	–	–
13	19.5	–	–

フィールドＡでは，身体機能（Physical functioning）と体の痛み（Bodily pain）が国民標準値を大きく下回っていた．また，全体的健康感（General health），活力（Vitality），社会生活機能（Social functioning），心の健康（Mental health）については，ほぼ国民標準値であった．

電動カートの利用前後では，日常役割機能（身体）（Role physical），日常役割機能（精神）（Role emotional），心の健康（Mental health）の尺度の向上が確認された．

3.3.4. サービス付き高齢者向け住宅での検証

介護施設での実証結果から，電動カートを１人で操作できる能力があり，自由に操作し移動できる環境が整っている人ほど，QOL の向上が期待できる．

サービス付き高齢者向け住宅に居住する高齢者にモンパルを貸与し，効果検証と受容性の確認をおこなった．Fig. 8[6] に，フィールドＢの被験者の行動実態を示す．

この被験者は，モンパル利用前，生活圏での移動にはタクシーを利用するしかなく，好きな時にすぐ出かけられないことや，タクシーを待たせるストレスがあった．モンパルを１人で使うようになってからは，真夏日や小雨でも，

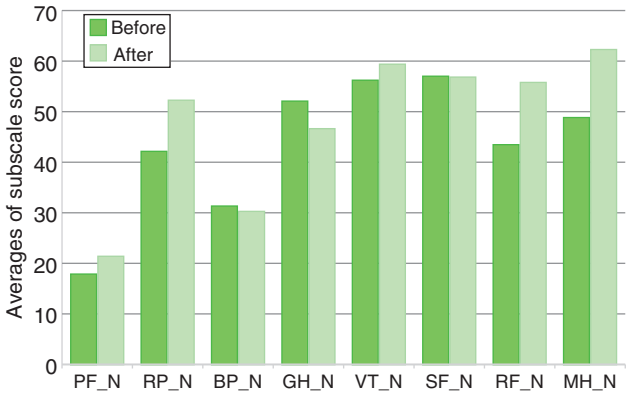


Fig. 7 QOL before-after difference using Monpal in Field A

ほぼ毎日出かけられると満足気であった．施設管理者は，モニターとして協力した被験者の心が動いたことが今回の実証実験で一番嬉しく，１台のモンパルが被験者の意欲を引き出し，生活を一変させたことにとても感謝していると感想を寄せた．

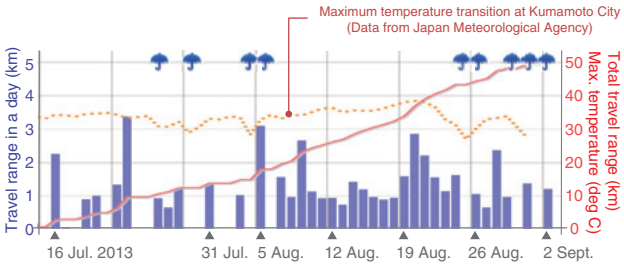
これらにより，電動カートの活用が LSA を高め，それが日常の利便性だけではなく，全体的健康感や活力などの QOL の向上にも資する傾向があることが示された．

2011 年 10 月の高齢者住まい法の改定により創設されたサービス付き高齢者向け住宅は生活する上で自由度が高く，また生活圏エリアでの供給が増加していることから，そこでの電動カートのニーズは高いと思われる．

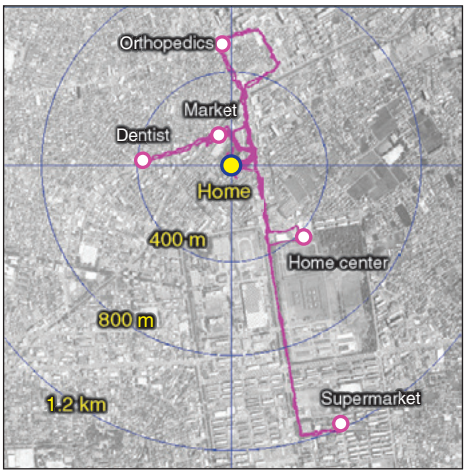


Subject: Mr. K
- Age 86
- Care need level 1: Legs impaired
- Occupancy date : Jun. 2013
- Method of moving around while outside the home: Taxi (almost every day, sometimes twice a day)

(a) Profile



(b) Monpal usage throughout the testing period



The recorded movement locus and circular polar coordinates are aligned with the corresponding section of geospatial photograph from the site (http://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do) provided by the Geospatial Information Authority of Japan.

(C) Representative frequent routes of travel

Fig. 8　Survey of subject's travel in Field B

4．電動カートによる外出支援ソフトの開発

実証フィールドの管理者やモンパル利用者のご家族から，モンパル利用者が今どこにいるのか，位置情報を携帯などで確認したいとの要望を受け，四輪向けカーナビゲーションサービスであるインターナビの活用を考えた．それは，スマートフォン向けの見守りアプリを用いた情報提供により移動活動を広範囲，高頻度化する支援である[(3)]．

システム構成は，実証実験で活用している GPS ロガーをインターナビサーバと連携し，情報の生成を図った．その概略システム構成を Fig. 9 に示す．

今回提供するアプリは Web アプリで，開発言語は HTML5 を使用している．開発工数の削減，アプリの反応速度の向上，また，文字サイズの大きさ等の設定ファイルをサーバ側に置く事で，従来よりもフィードバックが容易なため，採用に至った．提供したアプリの機能は以下の二つである．

一つめは施設もしくは家族（以下，管理者）が設定した場所を基点として管理しているモンパルの位置情報を表示する現在地 MAP である．二つめはモンパルの稼働状況とバッテリ残容量および走行履歴が把握できる運行状況表示である（Fig. 10）．

現在地 MAP の付加機能として，例えば，インターナビ

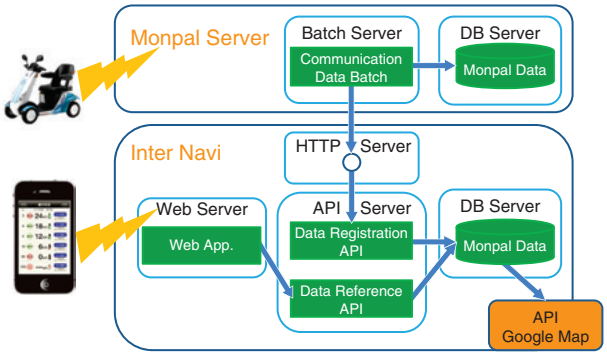


Fig. 9　General diagram of system configuration



©2011 Google-Map date ©2011 ZENRIN

(a) Menu screen　(b) Actual location　(c) Operation status

Fig. 10　Display of tracking monitor on smart phone

の画面で管理者が目的地を設定できる機能がある．それを用いると，管理者がスマートフォンでGPSロガーから取得する現在地を確認し，あらかじめその位置をアプリに登録することで，迎えに行く際にインターナビのサービスが利用できる．

アプリの開発終了後，実証実験で協力していただいている施設や，まちなか共同利用実験の際にアンケートを実施し，使用感としては管理者が使用する見守りアプリについて，アプリを利用することで利用者を見守っている安心感はあるかどうかの問いに対し，22人中19人が肯定している．また，行動履歴が健康管理の指標になり得るかとの問いに対し，12人中9人が肯定する結果が得られている．行動履歴を健康管理の指標とした場合にモンパル利用は外出頻度が増えるきっかけとなり得るかとの問いに対しては，12人中8人が肯定する結果が得られている．総合的にアンケート結果から見ると見守りアプリは外出移動支援のツールとなり得ることがわかった．

一方でアンケートから見えてきた課題は，年齢層によって日常的にスマートフォンを使っていない人でも容易に使えるようになるユーザインターフェースの改善はもとより，スマートフォンやアプリの使い方の講習においても，本来の幅広い用途で習熟いただけるような工夫が必要であるということである．

5．まとめ

今回の実証実験で示されたように，電動カートを1人で操作できる能力があり，自由に操作し移動できる環境が整っている人ほどQOL向上が期待できる．

身体能力が低下し，生活圏が狭くなる高齢者の外出機会を促すために，自由に扱えるパーソナルモビリティとITを活用した社会システムを整備することは個人のQOLだけでなく，QOLの高い社会の形成につながると考える．

謝辞

本報告は，熊本県商工観光労働部新産業振興局産業支援課，(医)寿量会，(医)大浦会，熊本大学大学院生命科学研究部，熊本大学大学院自然科学研究科の協力を得ている．ここに記して謝意を表します．

参考文献

(1) 矢口忠博，原田和典：次世代パーソナルモビリティ実証実験における地域デザイン活動，Honda R&D Technical Review, Vol. 26, No. 2, p.196-201
(2) 溝上章志，川島英俊，永田千鶴，野尻晋一，矢口忠博：高齢社会においてパーソナルモビリティがQOLに与える影響に関する実証調査，土木学会論文集D3(土木計画学)，Vol. 68, No. 5, p.141-153(2012)
(3) 溝上章志，川島英俊，矢口忠博：高齢社会におけるパーソナルモビリティ活用による生活の質の向上，国際交通安全学会誌 Vol.36, No.3, p.44-51(2012)
(4) 松田智大：QOL測定の方法論と尺度の開発，保健医療科学，Vol. 53, No. 3, p.181-185(2004)
(5) de Zwaan, M., Mitchell, J. E., Howell, L. M., Monson, N., Swan-Kremeier, L., Roerig, J. L., Kolotkin, R. L., Crosby, R. D.: Two Measures of Health-Related Quality of Life in Morbid Obesity, OBESITY RESEARCH, Vol. 10, No. 11, p.1143-1151(2002)
(6) http://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do

■著 者■


矢口忠博


増渕義則


山村 誠


仲本 剛


川島英敏

集材時の負担を低減する技術の研究

Research of the Technology for Reducing the Load of Yarding

竹 村 佳 也* 山 岡 洋 斗*
Yoshinari TAKEMURA Hiroto YAMAOKA
松 下 右 京* 川 上 智 弘*
Ukyo MATSUSHITA Tomohiro KAWAKAMI

要 旨

里山には様々な価値があり，人と自然の共生の象徴でもあることから保全が望まれる．Hondaの自然体験施設ハローウッズでは，保全活動を行いその価値を享受している．

本研究では里山保全のために，ハローウッズを事例とし，切った木を運ぶ作業の負担低減技術を構築した．

これはクローラ式小型運搬機をベースとした，里山における無人搬送，傾斜地走行時の横転の抑制，容易な木の積み降ろしの機能のための技術である．

これらの技術については，実験機を製作し要件達成を確認した．これらの機能の実現により集材時の負担を軽減し，里山保全が期待できる．

ABSTRACT

Satoyama provide a variety of services and are symbolic of the coexistence of people with nature, so their conservation is to be desired. HELLO WOODS' is a facility that Honda maintains as a place for people to experience nature. Here, we perform conservation initiatives and receive benefits from the woods in return.

This research uses HELLO WOODS' as a case study in Satoyama conservation. Technology was developed to reduce the environmental burden of yarding; that is, moving trees after they have been logged (cut down).

This technology uses a small crawler-type power carrier and has an unmanned carrier function, overturn suppression function through sloping areas and loading/unloading function.

An experimental carrier was built and used to confirm that each function worked as required. These functions could reduce the burden created by yarding and help to conserve Satoyama.

1．まえがき

古くから人々は，自然から適度に資源を調達し持続可能な生態系を維持することで，自然と共生してきた．このように人々の生活のために維持されてきた山林を里山と呼ぶ．里山には，燃料などの資源の供給以外にも，生物多様性，防災，水源涵養，環境保全，景観や環境教育の場といった様々な価値が存在する．

しかし，高度経済成長期より化石燃料の普及が進み，経済的観点から維持するほどの価値は無いとみなされ，里山は放置され始めた．その結果，里山は藪が増え木は大きく育ち暗い森へと変化しつつある．

Hondaのツインリンクもてぎ内の自然体験施設であるハローウッズでは，里山保全のための活動をワークショップの参加者と共に行っている．木を育てて切って使うサイクルをまわすことで，里山価値を体現している．里山は定期的に伐採を行うことでFig. 1のように明るく若い森として維持される．なお，切った木は薪や炭などに利用される．保全作業には草刈やつる切りなどの育林作業と伐採や集材などの収穫作業がある．一連の作業のうち集材が最も負担となる作業である．

本研究は，集材作業の経験が少ない一般の人が，作業を行う際の負担を低減することを目的としている．ハローウッズを事例として集材時の負担を低減するための技術構築を目指す．負担低減技術が普及すれば，ハローウッズ以外の里山においても多くの人が保全活動に参加でき，多くの里山が保全されると期待できる．

本稿では，集材作業の負担を低減する機能を提案し，設定した要件に対して製作した実験機の概要と達成技術および性能検証について述べる．

＊基礎技術研究センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_12



Fig. 1 Satoyama in HELLO WOODS' (Provided by HELLO WOODS')

2. 作業の分析と達成目標

集材作業とは伐採地において切った木，すなわち材を集積地である土場まで運ぶことであるが，まず，作業内容と作業負担について，ハローウッズにて調査を行い把握した．

ハローウッズの集材作業では Honda 製のクローラ式小型運搬機である力丸を用いる．伐採地において，玉切りと呼ばれる適切な長さへの切断を行った材を人力で力丸に積込み，力丸を操作しながら伐採地内と作業道を走行し，土場において材の荷降ろしを行う．以上を繰り返し，年間 0.4 ha の里山で伐採した木を集材している．

調査において三つの負担となる項目が抽出された．一つ目は運搬のために山道を何度も往復することである．不整地で傾斜のある作業道において，運搬機を操作しながら歩いて往復している．距離が長くなるほど時間がかかり体力を消耗する．二つ目は傾斜地で走行しているときに横転しやすいことである．横転しない様にするため，走行時には最大積載容量の半分以下の材しか載せることができず，その分往復する回数が多くなる．三つ目は，重い材の積み降ろしである．20 kg から 35 kg の材が重量ベースで約半分を占めており，ワークショップでのアンケートでは材の積み降ろしが身体的に最もつらいという回答が多い．以上の三つの負担を低減するために，Fig. 2 で運用を示すように以下の無人搬送，横転抑制，積降補助の三つの機能の構築を目標とする．

（1）無人搬送

無人で搬送することにより，作業者は他の作業が可能となり効率的である．また長い距離を歩かなくてよいので身体的負担が低減される．

手法としては，予め設定したルートを自動で走行し運搬することである．里山では木が障害となって GPS を利用できないことを踏まえて二つの手段により実施した．一つ目は電磁誘導で，土場から土場といった変更されることが無い経路を降雨や降雪環境でも走行できることを想定している．二つ目は視覚誘導で，毎年，場所が変わる伐採地からの搬送の際に，少ない作業量で経路変更ができることを想定している．

（2）横転抑制

多くの材を積載し傾斜した伐採地を走行することで，土場までの往復回数を減らし，また，傾斜地を迂回することも少なくなるので，作業として効率的である．

クローラの接地面の形状より前後より左右の方が不安定であることから，左右に倒れにくくする．また，三尺道と呼ばれる里山に古くからある道は，幅が 90 cm であり狭い．広い道を造成すると環境破壊となるので里山保全の観点から適切ではない．三尺道を走行できる運搬機のサイズを維持して，左右に倒れることを抑制する．そのために，揺動駆動機構を設け制御することで，車体における重心バランスを維持して走行する．

（3）積降補助

材の積み降ろし作業を，小型クレーンにより行う．これにより身体的負担を低減できるが，クレーンの操作においてレバーやボタンといった一般的なコントローラを用いると移動方向が前後，上下，左右の三方向であるため煩雑となり不慣れな人にとって効率を大きく落とすことになりかねない．また，誤操作による事故の可能性もある．

そこで材の移動を直接操作するインタフェースにより容易な操作を実現し，集材作業に慣れていない人が効率を大きく低下させずに楽な積み降ろし作業を可能にする．

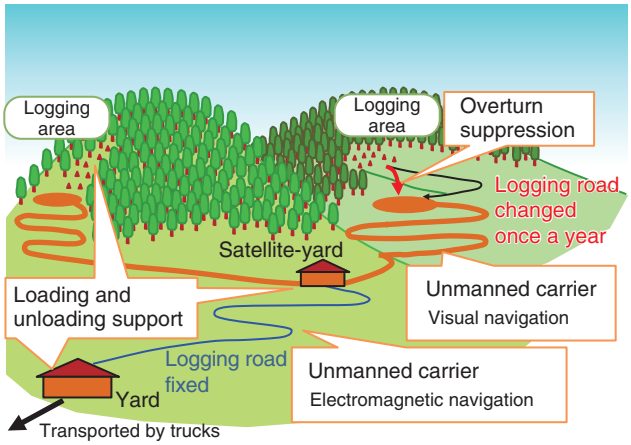


Fig. 2 Three functions for logging in Satoyama

3. 実験機と検証項目

ここでは，機能検証に用いる実験機と検証項目について述べる．

3.1. 実験機

実験機は力丸 HP500 をベースとして駆動系を電気化し，

Table 1　Experimental carrier specifications

	Experimental carrier	Honda Power Carrier HP500
Length	2090 mm	2030 mm
Width (cargo bed)	850 mm	Max. 900 mm
Surface area of the grounding of unilateral crawler belt	180 mm × 694 mm	180 mm × 694 mm
Weight of carrier and max. load	703 kg	542 kg
Max. velocity (forward)	2 km/h	4.3 km/h
Max. angle of rise	20°	15°
Type of drive of crawler	2 Motors	Engine
Power source	Li-battery	Gasoline

３機能の機構やセンサ，駆動系を搭載し，全ての機能を制御するためのシステムコントローラを搭載した．３機能搭載時の実験機の基本諸元を Table 1 に示す．走行時の最高速度は，ハローウッズでの集材時のスピードを参考に決定した．

３機能を含む実験機の電装システムを Fig. 3 に，製作した実験機を Fig. 4 に示す．

積降補助のためのクレーンは荷台の隣に配置し，荷台周辺の材をクランプできるブーム長とした．ブームは，走行時は折りたたみ，実験機の脇に収納する．視覚誘導のためのカメラは材との接触を防ぐためアームに関して荷台と逆側とした．無人搬送時はカメラ側を前にして走行する．

3.2. 検証項目

無人搬送では，テストコースを走行し，後述の誤差要件内で走行できることを検証する．横転抑制では，テストコースを積載状態で走行できることを検証する．積降補助では本機能による積み込みと積み降ろしの時間が後述の要件を満たすことを検証する．

無人搬送と横転抑制のために，ハローウッズの集材に関わる走行路面の特徴を反映して Fig. 5 に示すテストコースを造成した．無人搬送の走路は一周約 50 m であり，横転抑制検証用のトラバース走行用の路面を別途造成した．

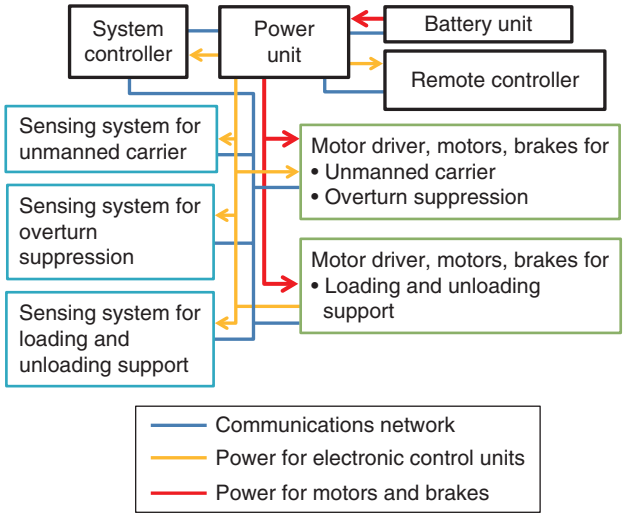


Fig. 3　Electric system of experimental carrier



Fig. 4　Experimental carrier

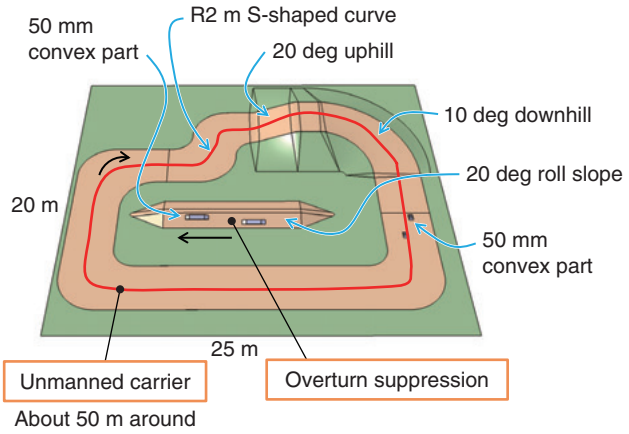


Fig. 5　Test course

4．主要技術と達成内容

4.1. 電磁誘導

走行する作業道は，三尺道とハローウッズの路面状況から幅 900 mm，最大ロール角 7°，最大路面凹凸を 50 mm と設定する．後述の視覚誘導も同様である．

不整地を走行するため，誘導線と車載センサは左右だけでなく上下方向についても位置変動が発生する．左右の位置変動への対応に特化したゴルフカートのような一般的な手法では，上下の位置変動により誘導線との左右方向の

検出距離が大きく影響を受けるため上下位置変動にも対応する.

4.1.1. 機能要件

無人搬送において, Fig. 6 のように直線部 900 mm の道幅に対して, 外幅 600 mm のクローラが走行することから, 走行時に許容できる全体の最大誤差は±150 mm となる. 作業道のコーナにおける最小半径を作業道中央において回転半径(R)2 m とする. R2 m 部では, 従来作業において力丸が走行可能な作業道の幅として 1100 mm と設定した. 誘導線の敷設誤差, 誘導線に対する実験機の位置姿勢すなわち自己位置の推定誤差, 追従走行の誤差について Table 2 のように許容できる最大値として要件を定めた. 速度についての要件は, 直線部において 2 km/h 以上の走行が可能なこととした.

4.1.2. 達成技術

実験機は作業道中央の路面上に敷設された誘導線により発生する磁場を磁気センサで検出し, 自己位置を推定しながら走行する. 停止時は誘導線上に設置した磁界遮蔽板により停止位置を検知して停止する.

磁気検出センサとして, 誘導線との左右方向と上下方向の距離検出が可能となるように, 互いにその軸が直行した縦センサと横センサからなる二つの磁気センサを配置する構成とした. クロスセンサモジュールと呼ぶ.

誘導線には, 発信機により一定周期で繰り返し同じ電流パターンを発生させる. この電流パターン毎に, 磁気センサ内のコイルに誘起される誘導起電圧のピークを検出する. 縦センサで検出した誘導起電圧ピーク V_{VP} と横センサで検出した誘導起電圧ピーク V_{HP} の合ベクトル V_P は, アンペールの法則から明らかなように, 式(1)のように誘導線からの距離 r に反比例し電流の一階微分のピークに比例する. ここで, V_{VP} と V_{HP} は式(2)で表される値となり, 式(3)のように水平距離 y, 高さ z を導出できる. なお, 式(1)から式(3)の定数 C は, 実験により同定した値を使用する. 試作した二つの実験機では車体金属のばらつきによる磁場歪みがあり検出結果が同じではない. そこで, 二つの実験機において検出距離の誤差量が同等となるように C を同定した.

Table 2 Required range of position error

No.	Factor of position error from center of road	Required range of position error from center of road [mm]	
		Straight road	R2 m curved road
1	Gap of laid cable and center of road	±50	±120
2	Position estimation (Included in No.3)	±60	Not setting
3	Trajectory tracking control	±100	±130
Lateral margin (No.1+No.3)		±150	±250

$$V_P = \frac{C}{r},\quad C = \frac{\mu NS}{2\pi}\cdot\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{peak}} \tag{1}$$

$$\begin{cases} V_{VP} = \dfrac{C}{r}\cdot\dfrac{y}{\sqrt{y^2+z^2}} = \dfrac{Cy}{y^2+z^2} \\ V_{HP} = \dfrac{C}{r}\cdot\dfrac{z}{\sqrt{y^2+z^2}} = \dfrac{Cz}{y^2+z^2} \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} y = \dfrac{CV_{VP}}{V_{VP}^2+V_{HP}^2} \\ z = \dfrac{CV_{HP}}{V_{VP}^2+V_{HP}^2} \end{cases} \tag{3}$$

走行制御のために, Fig. 7 に示すように車体前後にクロスセンサモジュールを固定し, 各モジュールより得られた誘導線と車体中心位置の水平距離 y と誘導線と車体のなす角度 φ より, 旋回速度 Ω_c^{ref} をを与え, 直進速度 V_c^{ref} を一定値とし左右のクローラ速度指令値を算出する.

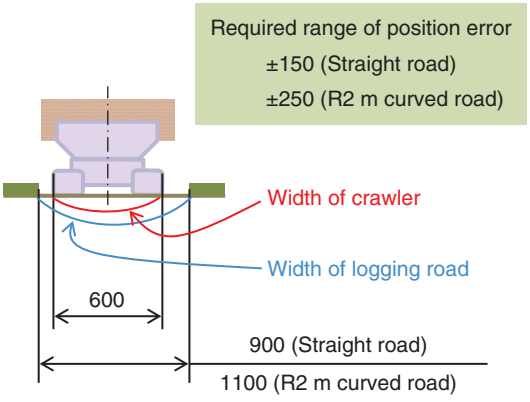


Fig. 6 Width of carrier and logging road

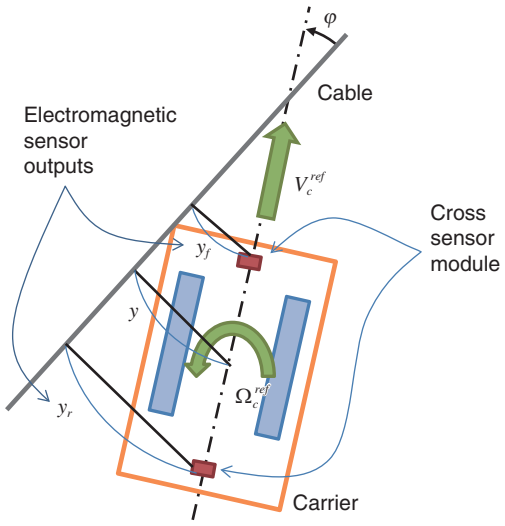


Fig. 7 Position of carrier and sensor output

Table 3　Tolerances measured about each factor

No.	Factor of position estimation error	Error estimate [mm]
1	Slope of cross sensor module (roll 10 deg, pitch10 deg, yaw 20 deg)	±12
2	Electromagnetic strain (max measured value of 2 carrier-bodies and 4 sensors)	±28
3	Measurement error in calibration	±5
4	Electromagnetic noise	±4
5	AD convert and arithmetic error	±2
6	Others	±3

自動停止は，Fig. 8 で示すようにクロスセンサモジュールに到達する磁場が磁場遮蔽板により弱まることで，式（3）の検出高さ z の値が設定した閾値を超えることを検知して車体を停止させる．

4.1.3. 検証結果

車載した状態でのクロスセンサモジュールの誤差要因と，特性試験において計測した誤差の最大値を Table 3 に示す．車載のクロスセンサモジュールとしての最大誤差量は全ての誤差量の和として±54 mm であった．

本手法によりテストコースの走行を実現した．Fig. 9 に電磁誘導により走行している様子を示す．なお，視覚誘導と同じコースを走行することから，次節で述べる視覚誘導用のマークも配置されている．追従走行における誤差量

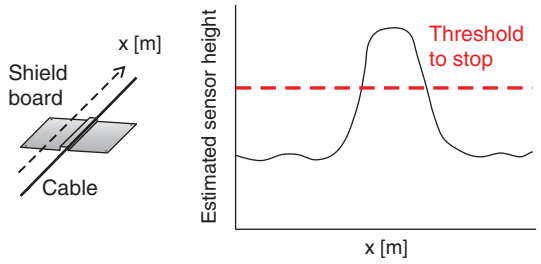


Fig. 8　Automatic stop by shielding magnetic field



Fig. 9　Automatic traveling by electromagnetic navigation

Table 4　Position error of automatic traveling

	Straight road [mm]	R2 m curved road [mm]
Required range of position error	±100	±130
Test result	±35	±43
Consider a production tolerance of carrier and sensor	±63	±71

Table 5　Required range of position error

No.	Factor of position error from center of road	Required range of position error from center of road [mm]	
		Straight road	R2 m curved road
1	Operation by user in teaching phase	±50	±100
2	Position estimation in teaching phase (Included in No.4)	±25	±25
3	Position estimation in playback phase (Included in No.4)	±25	±25
4	Trajectory tracking control	±100	±150
Lateral margin (No.1+No.4)		±150	±250

を，クローラの轍と誘導線の距離を定規により測定し換算することにより得た．Table 4 に示すように走行結果は，Table 2 の No.3 に示す許容誤差要件を満足している．また，車体ばらつきによる磁場歪みを考慮しても要件を達成できている．

4.2. 視覚誘導

里山では日の出から日没，あるいは四季を通して，光学環境や目印となる植物の状態が異なるため，ロバスト性高く自己位置を得ることは難しい．そこで，人工物であるマークを走路周辺に敷設してマークに対する実験機の位置姿勢である自己位置を確実に検出する手法とする．また，走行や停止以外に切り返しなどを含めあらゆる軌道の走行を可能にするために，ティーチングプレイバックによる自動走行を行う．

4.2.1. 機能要件

道幅に対する走行精度要件は電磁誘導と同じである．各要素の許容できる最大誤差について Table 5 に示す．教示走行時の許容誤差については実験機の操作性より決定した．また，教示走行時と追従走行時にそれぞれ自己位置推定を行うことから後述する視覚系位置決め誤差が 2 倍の量として加算される．

4.2.2. 達成技術

本手法では，安定した自己位置推定を実現するために，

視覚センサを用いた自己位置推定結果と，内界センサによる自己位置推定結果を統合する構成とした．

視覚センサによる自己位置推定のためのマーク配置は，まずカメラの画角とコース形状を基に仮決めし，次いで実験機を走行させて検出できる位置を確認しながらその位置を決定した．視覚センサを用いた自己位置推定では常に２本以上のマーク位置検出が必須のため，Fig. 9 で示すように直線ではマークを左右交互に約 0.7 m 間隔で配置し，曲線では外側に約 0.9 m 間隔で配置した．マークには再帰性反射材が，長手方向に一定の比に従って貼付されており，投光器の赤外線光を高い強度でカメラに反射する．

視覚センサは差分カメラ[1]を用いたステレオカメラであり，投光器の光と環境光を分離することができる．これにより，投光器の光のみによるマークの映像を短時間で抽出することが可能となる．反射光強度を高くするには，投光器とカメラの距離を短くする必要があり，Fig. 10 のように投光器を左右のカメラに対して一つずつ配置した．ステレオカメラの基線長は長くすると精度向上が期待できるが搭載可能な範囲で 0.3 m とした．

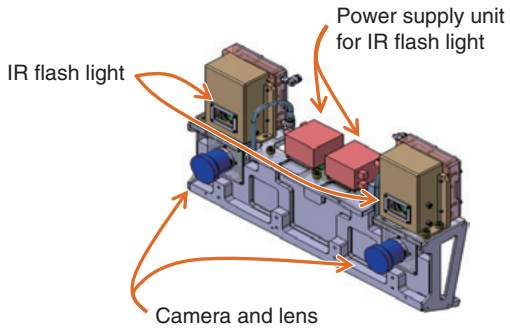


Fig. 10　Stereo difference camera unit

Table 6　Features of position estimation by each sensor

	Processing Time	Noise	Drift
Position estimation by visual recognition	Large	Large	Small
Position estimation by inner sensors	Small	Small	Large

視覚センサを用いた自己位置推定の主な処理内容は，(1)画像読み込み，(2)マーク検出，(3)ステレオ演算，(4)補正前位置姿勢取得，(5)自己位置姿勢補正，(6)補正済位置姿勢出力となっている．

視覚センサによりマーク検出を行い，自己位置を算出する手法と併用して，加速度および角速度センサとクローラ速度検出器すなわち内界センサを利用して，積分により自己位置の推定を行う．Table 6 にそれぞれの自己位置推定結果の特徴を示す．この表より，視覚センサによる自己位置推定は低周波域が，内界センサによる自己位置推定は高周波域が，それぞれ優位となる特徴を有していると言える．この特徴を生かすために，構築した自己位置推定システムでは，Fig. 11 で示すように視覚センサにより得られた車体位置に対しローパスフィルタを内界センサにより得られた車体位置に対しハイパスフィルタを適用し統合を行うことで，安定した自己位置推定を実現している．

追従走行では，教示走行時のクローラ速度をフィードフォワード項として，教示走行時の走行軌道と現在の位置の偏差をフィードバック項として，左右クローラ速度指令値を算出する．

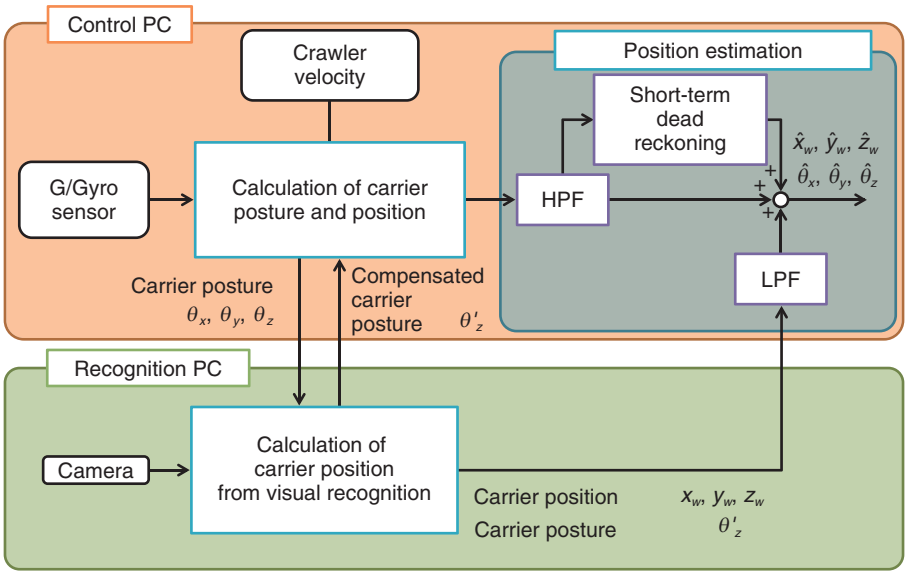


Fig. 11　Process of integration position estimation

4.2.3. 検証結果

まず，視覚システムによる自己位置の検出精度を評価する．本システムは教示，追従走行のシステムであるため，教示軌道に対するトレース精度が求められ，絶対的な位置決め精度は重要でない．そのため，視覚システムとしては同じ軌道を移動したときの検出位置のばらつきすなわち視覚系位置決め誤差により評価する．なお，このばらつきは視覚センサの出力のばらつきに起因する．

視覚システムの出力変数のうち精度検証の対象となるのは，制御に利用されない θ_x，θ_y を除いた X，Y，Z，θ_z の 4 変数である．そこで Fig. 12 のようにカメラシステムを X−Y−Z−θ_Z テーブルに設置し，反射マークを検出しながらテーブルを移動／回転させることで変位量を確認した．検出を想定する最も遠い X 軸方向の位置において，Y 軸方向にカメラが変位した際の，Y 軸方向の視覚系位置決め誤差を Fig. 13 に示す．最も条件が厳しいこの結果より，視覚系位置決め誤差（3 σ）は±7.7 mm であり，要件として設定した±25 mm を十分達成したことが確認できる．

本手法により，テストコースの走行を実現した．追従走行時の教示軌道とのずれについて Table 7 に示す．結果より，Table 5 の No.4 に示す許容誤差要件を満たすことが確認できる．

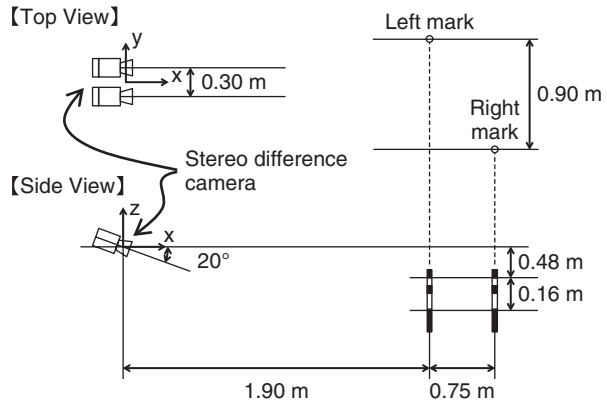


Fig. 12　Bench for measurement of locational error of visual recognition

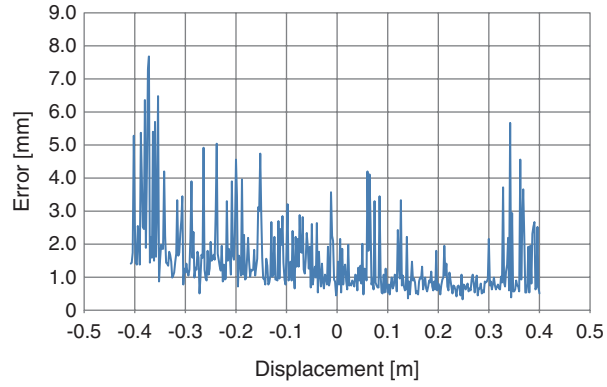


Fig. 13　Locational error of visual recognition

Table 7　Position error of automatic traveling distance from teaching orbit

	Straight road [mm]	R2 m curved road [mm]
Required accuracy	±100	±150
Test result	±15	±40

4.3. 横転抑制

横転抑制は主に伐採地の走行を前提としている．伐採地において走行すべき最大傾斜は 20° とした．20° 以上の傾斜地においては，玉切りした材を転がして 20° の斜面まで移動させることを想定している．

4.3.1. 機能要件

機能の要件としては，最大ロール角 20° の斜面において最大 50 mm の凹凸のある路面を積載状態で走行することである．

4.3.2. 達成技術

姿勢安定化のために，車体を車台と荷台の二つの構造として，重心バランスを維持するように左右に揺動駆動する．荷台のロール角を荷台に固定した傾斜センサにより検出し，ロール角が 0° つまり水平となるようにフィードバック制御を行う．

揺動駆動機構において，左右の重心バランスと走行安定性を維持するために，回転中心を路面に近づける必要がある．Fig. 14 で示すように回転中心位置が高い場合，（1）揺動駆動をしても荷台側の重心位置が大きく変動しないので，Zero Moment Point（ZMP）がトレッド外に出やすく機能として成立しない．ZMP とは，路面上のその点回りの運動によって発生する慣性力と重力の合力モーメントの水平成分が 0 となる点である．（2）ZMP がトレッド内であっても左右のグリップ力に差が生じるので直進性が劣化する．（3）回転軸が左右に揺れることにより，荷崩れが生じやすくなる．という影響が発生しやすくなる．

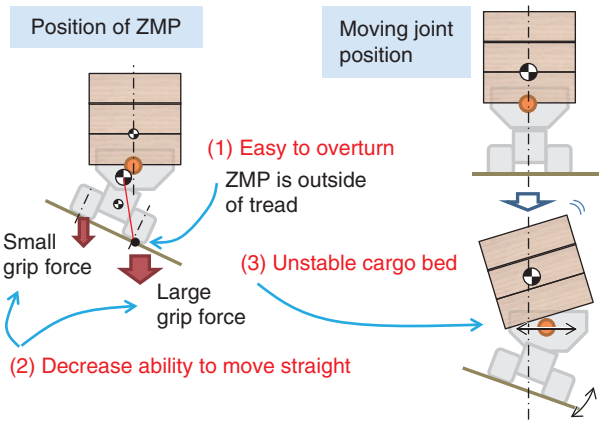


Fig. 14　Harmful effect of high position of joint

そこで，Fig. 15 のように回転中心が低くなるように円弧型のレールと多節リンクを適用して設計した結果，揺動軸の仮想的な回転中心の地面からの高さは 90 mm となった．

4.3.3. 検証結果

本手法により，50 mm の凸部を配置したロール角度 20° の路面において，1.5 km/h での走行が可能となった．Fig. 16 に 20° 斜面において山側のクローラが 50 mm の凸部を乗越えて走行している状態を示す．

姿勢安定性について ZMP を用いて評価を行う．走行時の ZMP のトレッドに対する比率のモデルを Fig. 17 に示す．実験機のトレッド長を左右のクローラの中心間距離 420 mm と定め，ZMP が片側のクローラ中心位置に存在する場合，ZMP の位置比率である y_{ZMP} は 1 となる．横転抑制機能がある実機による走行データと，横転抑制機能が無い場合を仮定して実機パラメータを用いたシミュレーション結果を Fig. 18 に示す．横転抑制機能がある場合は，ZMP は常にトレッド範囲内であり，十分安定していると言える．横転抑制機能が無い場合は，ZMP はトレッド外に変動するので転倒する可能性がある．

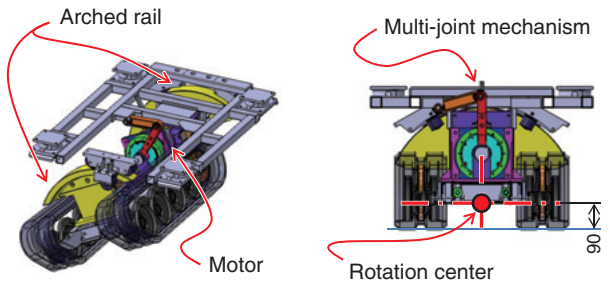


Fig. 15 Swinging mechanism with arched rails



Fig. 16 Traveling on slope using overturn suppression

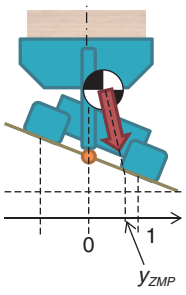


Fig. 17 Ratio of ZMP on tread

4.4. 積降補助

積み降ろし対象の材は調査の結果重量ベースで 80% が 35 kg 以下の材であることから，最大重量を 35 kg とする．材の長さは調査より 70 cm とする．なお，35 kg を越える重量の材については 35 kg 以下になるように短く玉切りするものとする．作業する路面傾斜の要件を最大 20° とする．

4.4.1. 機能要件

本機能は容易に操作できることを目指すことから，積み降ろし時間を要件とする．

ワークショップでの調査の結果，積み込みまたは荷降ろしに要する時間は平均 13 秒／本であった．負担を軽減し，かつ大幅に作業効率を落とさない目標を踏まえ，許容できる積み降ろし時間として 20 秒／本を要件とする．なお後述するように，他の 2 機能により運搬作業において効率化できることから，本機能により多少効率が低下しても全体としては効率化を行うことができる．

4.4.2. 達成技術

小型クレーンによる積み降ろし作業は傾斜地で行うことから，ブームの駆動として旋回および上下の駆動が必要で，それぞれモータにより行う．ワイヤの巻取り巻き出しについてもモータにより駆動を行う．

操作者が持つグリップの上方にワイヤを支持するブームの先端が常に追従することで，安定保持した状態を維持することが出来る．ワイヤの傾斜情報を入力とし，ワイヤが常に鉛直になるようにブームの位置を制御し追従動作を行う．ここで，グリップ部の加速度や力を参照する方法では，ワイヤのねじれによるグリップのヨー周りの姿勢を把握することが困難であるので適切ではない．またブーム先端部

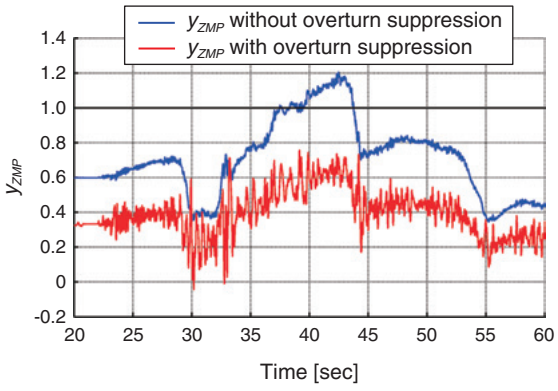


Fig. 18 ZMP on traveling on slope

に及ぼすワイヤの力を参照する方法では，傾斜地での利用時に，重力による力とユーザの操作力を分離できない．そこで，ワイヤと鉛直方向との相対角度２成分を追従制御の入力値とし，ピッチ軸の相対角度よりブームのピッチ軸目標角を算出し，ロール軸の相対角度よりブームのヨー軸目標角を算出し，フィードバック制御した．同時に，グリップの高さが一定となるように，ブームのピッチ駆動と連動してワイヤの巻き出し量を制御した．また，グリップ部に備えるボタンを押しているときのみ追従制御が作動するように構成し，意図しないブームの駆動を防いだ．追従駆動と独立したワイヤの巻取り，巻き出しである上下方向操作については，グリップに備えるコントローラによるものとした．

ワイヤの傾斜の検出機構を Fig. 19 に示す．２自由度のワイヤの傾斜を検出でき，かつワイヤ張力による影響を無くすために常にワイヤがプーリの接線となるように設計した．また，ワイヤガイドや傾斜計の質量による振り子要素による自励振動を低減するために，各軸にウェイトを配置して，重心を回転軸付近に位置させた．

また，70 cm の材を吊上げることから，Fig. 20 および Fig. 21 に示すように，吊上げ可能なエリアを荷台周囲 400 mm とし，ブーム長を 2020 mm とした．

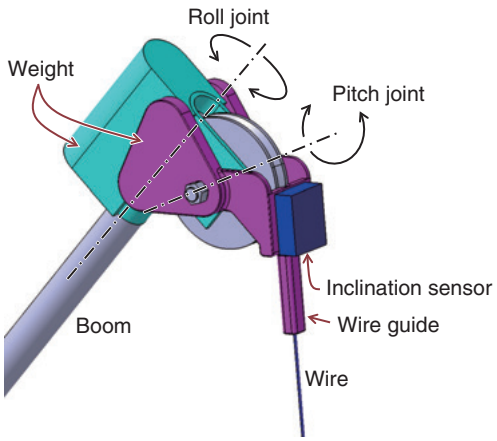


Fig. 19　Guide mechanism for sensing inclination of wire

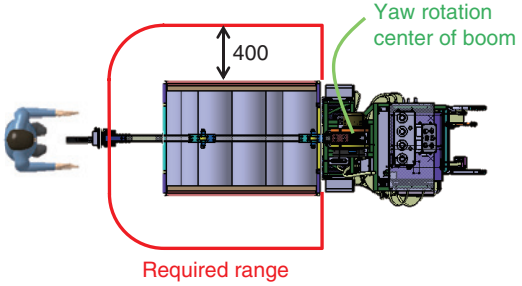


Fig. 20　Required range for picking up logs

4.4.3. 検証結果

本手法により，直接的な操作による材の積み降ろしを実現した．作業の状況を Fig. 22 に示す．

また，本機能の性能を把握するために，実現可能な最も短い積み降ろし時間を把握した．積み降ろしの規定動作を Fig. 23 のように定める．(a) 運搬機の周囲に４本の材を置いた状態からから始め，(b) 材を荷台に積み込み，(c) 運搬機の脇に並べて配置する．この作業において，積込みおよび荷降ろし時のそれぞれの材について，（1）材までグリップを移動する（2）材をクランプする（3）目的の場所まで移動させる（4）材のクランプを開放する，の四つのステップに分けて時間を計測する．本検証では，４名により各２回分の動作について計測を行う．

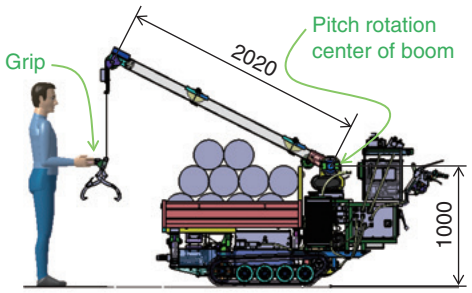


Fig. 21　Crane design of loading and unloading support



Fig. 22　Loading and unloading support

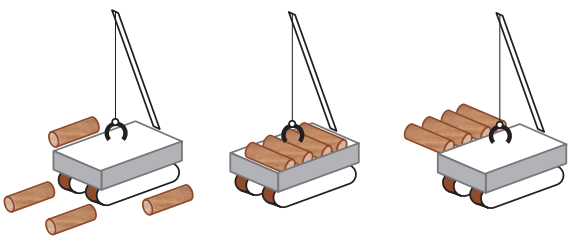


Fig. 23　Steps for measurement time of loading and unloading

各ステップについて最も短い積込み時間の和は 17 秒であり，同様に最も短い荷降ろし時間の和は 17 秒であった．これより，要件としていた 20 秒を達成した．

5．効果の見込み

以上の機能および達成された要件により，集材作業の負担の低減が期待できる．

３機能による，集材時の作業開始から終了までの総作業時間，作業者と作業時間の積である工数について試算を行った．２人の作業者と１台の運搬機により，傾斜のある 0.4 ha の伐採地から片道 300 m の作業道を 2 km/h で走行し土場まで繰り返し運搬する想定で試算を行った．ワークショップの調査より各作業時間や運搬量を設定し，積降補助の効率低下分を加味して試算した．３機能を搭載した運搬機は，従来の運搬機を用いる場合と比べて，総作業時間は 44%，総工数は 51% の削減が見込まれる．

また，運搬機の作業道の総走行距離は従来手法の場合 303 km である．無人搬送により，その分歩行が不要になるので身体負荷低減のメリットは大きい．積降補助においても，作業時間を大きく増加することなく，積み降ろし作業時の身体負荷が軽減できる．

6．まとめ

里山保全のために，ハローウッズを事例として集材時の負担軽減が見込める無人搬送，横転抑制，積降補助の３機能を提案した．製作した実験機により，ハローウッズの事例に基づく要件を満たすことを確認した．以下に，各機能について，手法の概要と達成した主な内容を示す．

（1）無人搬送

電磁誘導においては，不整地に対応できるクロスセンサモジュールを実装した運搬機と路面の誘導線により，自動走行と停止を実現した．

視覚誘導においては，ステレオ差分カメラを実装したシステムと走路周辺のマークにより，ティーチングプレイバックによる走行を実現した．

（2）横転抑制

効果的に姿勢安定化するために円弧型のレールを用い，荷台の傾斜を制御する姿勢安定機構を実現した．

（3）積降補助

容易なクレーン操作のために，ワイヤの傾斜を検知する機構と常に鉛直とする駆動制御システムを構築した．

なお本研究では，造成したテストコースにおいて各機能についての基本的な性能を把握した．実際の集材現場は複雑な環境であり，様々な課題が予想される．各機能の構成や要件が適切かどうかについて実際の現場において検証する必要がある．

謝辞

本研究にあたり，里山やその保全作業についてご助言頂いた東京農業大学地域環境科学部，宮林茂幸教授と，京都学園大学バイオ環境学部，中川重年教授に厚く御礼申し上げます．

参考文献

（1）青山千秋：太陽光下で利用可能な投影式２眼立体視システムの研究，Honda R&D Technical Review, Vol. 25, No. 1, p. 128-135

■著　者■


竹 村 佳 也


山 岡 洋 斗


松 下 右 京


川 上 智 弘

Particles Wear-Out Behavior of Reciprocating Engine Crankshaft During the Initial Running-in Operation

松 本 謙 司*
Kenji MATSUMOTO

ABSTRACT

Reciprocating engines are popular in automobile and small airplane applications, and their reliability relies on the operating life of the crankshaft journal bearings.

Traditionally, reciprocating engines have been designed based on an assumed journal wear rate, which is calculated on the basis of the maximum load, maximum velocity, average project area and maximum oil temperature over the entire sliding surface of a journal bearing. A prediction of journal wear rate suggests that engine parts have some allowances to carry loads. From the perspective of energy conservation, it is desirable to minimize, if not eliminate, such gap. However there have been few attempts to examine the real loads on engine journals. Therefore it may be worthwhile to examine engine parts for excessive margins incorporated in the conventional design of reciprocating engines.

This research is intended to propose a method for measuring the load and the pressure distribution on the journal bearing surface with the intention of modernizing the engine design on the basis of tribological data rather than assumption. From this study, the reliability of engine bearings will increase if the wear particles generated during the initial running-in operation.

1. Introduction

As reciprocating engines have been used for almost a century, automobile engine manufacturers have accumulated a lot of experience and know-how related to engine design. For this reason, reciprocating engines have been designed on the basis of past experience and such established practices have been accepted without question.

The wear of the metal journal bearings in a reciprocating engine is one of the most important and critical issues which determine the reliability and product life of engines. Therefore it is important to study both the pressure distribution of oil films on journals, which carry loads, and their wear. In the past, there was no technology to successfully measure the pressure distribution of oil films on metal journals while engine in a moving vehicle is running[(1)-(3)]. Therefore the author have developed a thin film sensor to measure the load distribution on metal journals[(4)-(8)].

This study consists of three experiments. The first experiment was the measurement of the load on journals in a general aviation reciprocating engine using newly developed thin film sensors. The second was the measurement of the wear of the journal bearing using a simulation test apparatus whose load distribution was controlled by servo valves to simulate the data obtained by the first experiment. The third was the measurement of the wear of a general aviation engine journal bearing for comparison with the data obtained in the second experiment.

It has been known from our experience that both wear patterns and wear rates differ for Start-stop driving conditions and Steady-state driving conditions. But there has been no study, within our knowledge, that identifies the wear patterns and wear rates under Start-stop driving conditions and Steady-state driving conditions independently, because wear particles generated under Start-stop driving conditions are carried over to the Steady-state driving stage and those particles cause excessive wear unless each test is conducted independently. Therefore this research was conducted in two stages. The number of wear particles was measured during Start-stop operation first, and then the tested engine was overhauled and the wear condition was inspected. After all the parts had been cleaned and inspected, the engine was reassembled and the number of wear particles was measured during Steady-state operation. These two-stage tests made it possible to distinguish the wear

＊四輪 R&D センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_13

patterns and wear rates under Start-stop driving conditions from those under Steady-state driving conditions.

The first experiment was reported at the SAE World Congress & Exhibition held in Detroit in April 2009[9], and then further experiments were continued. This paper is a revised version of the report based on the newly obtained data. Since I and my co-author presented the first report about the methods at the SAE World Congress in 2009[9], the measurement techniques for obtaining pressure distribution on journal bearings have been improved. This paper provides an overview of our test and measurement system with additional test data.

2. First Experiment: Measurement of Pressure Distribution of Oil Film

2.1. Construction of Newly-Developed Sensor

The leads of conventional sensors are connected to pressure sensing surfaces. However, the leads of our new sensor are attached directly to metal side. The sensor has five pressure sensing points, each 0.8 mm in diameter. The five points are arranged in the radial direction. This structure makes it possible to measure the load distribution on a journal bearing on the metal part with the same width. An external view of the thin-film sensor attached to a crankshaft journal for the experiment is shown in Fig. 1.

The sensor is made of three layers: an insulation layer, a sensor layer, and an insulation layer on the lining. A cross-section is shown in Fig. 2.

For the calibration of the sensor, the change in its electric resistance was measured under various hydraulic pressures which were uniformly applied to the bearing surface in an autoclave. The temperature dependency was also characterized by varying oil temperature. Functions were curve-fitted to both pressure and temperature characteristics to convert the measured signal to physical quantities, and bearing load was obtained.

2.2. Pressure Measurement in Engine

A water-cooled horizontally-opposed four-cylinder general aviation engine with output of 230-hp was used for the tests. A reduction gear was placed between the engine and the propeller.

The reduction gear had a gear ratio of 1:2.08, which generated 2400 r/m with the propellers in operation. The engine displacement was 3500 cm^3. Premium unleaded gasoline for automobiles was used for fuel. The lubricant for the engine was Ultra Mild 10W-30 Honda genuine engine oil. The connecting rod bearings on which oil film pressure was detected were TAIHO KOGYO SA250.

Two thin-film sensors were used for the tests. One was attached to Journal 1 between the case end and Cylinder 1, and the other to Journal 3 between Cylinders 2 and 3, as shown in Fig. 3. The measured loads on the journals at 3000 r/m were compared with the calculated loads.

2.3. Measurement Results of Load Distribution on Journal Bearings

Comparisons of the measured loads on bearings

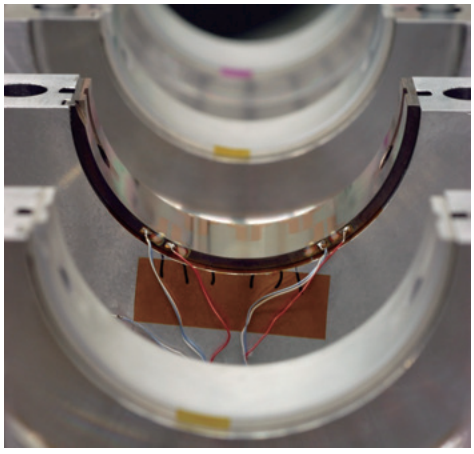


Fig. 1 External view of thin-film sensors

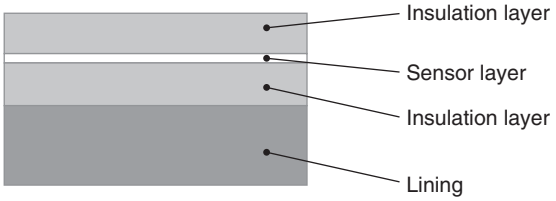


Fig. 2 Thin-film sensor in cross section

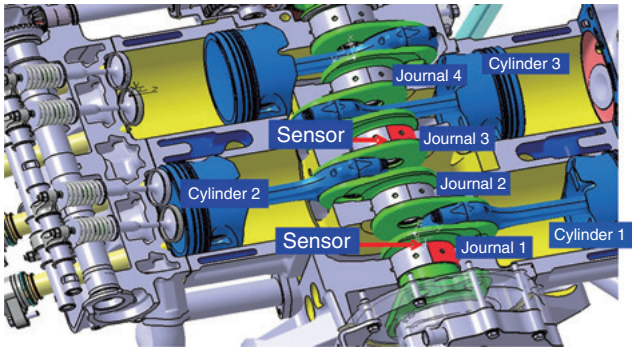


Fig. 3 Locations of thin-film sensors on crankcase

and the calculated loads are shown in Figs. 4 and 5.

The calculation of the loads was made on the assumption that the pressure would be carried uniformly by the total surface of the journal bearings. The measured loads on Journals 1 and 3 were less than half of the calculated ones.

The discrepancy may result from two assumptions made in calculations. One is that the rigidity of the bearing support and the rotary parts such as pistons and piston rods was not taken into account when the resultant force of the inertial load and the explosion load on the journal bearings were calculated, and the other is that the rotary shaft was treated as a beam. The measurements indicate that the loads on the bearings were reduced, because the rotary parts such as pistons and piston rods deformed like springs when the explosion load was received by the bearings. The results of measurement indicate that the size of journal bearings can be reduced by half. This is important to help engine makers reduce not only bearing cost but also the weight of engine.

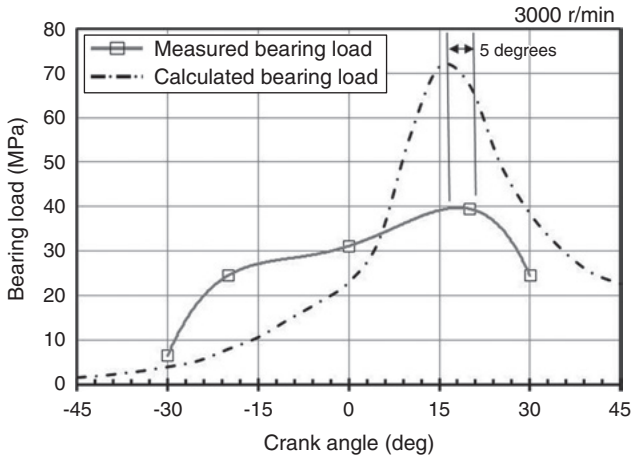


Fig. 4 Relationship between bearing loads and crank angle at peak load of #3 journal bearing

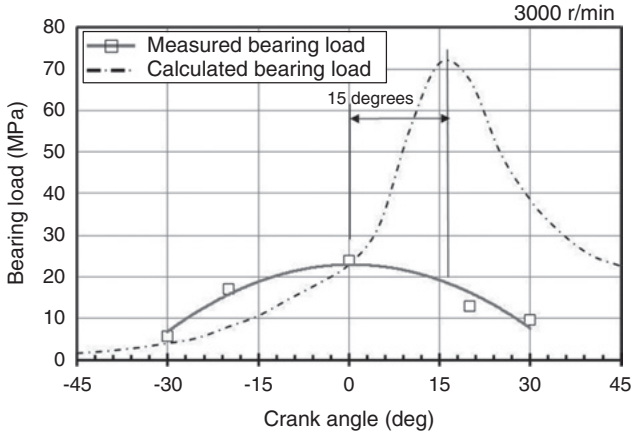


Fig. 5 Relationship between measured bearing load and calculated load and crank angle at peak load of #1 journal bearing

The shapes of the curves of the measured load are not sharp compared with those of the calculated ones. This is because the loads are spread over the journal bearing surface and because the sensor measures the load at five points in the radial direction, although the calculation shows the peak load only.

The difference in crank angle between the measured peak load and the calculated one for Journal Bearing 1 was large, because Journal Bearing 1 was influenced by the motion of Piston 1 only. On the other hand, the difference in crank angle between the measured peak load and the calculated one for Journal Bearing 3 was small, because Journal Bearing 3 was influenced by the motion of both Pistons 2 and 3.

3. Second Experiment: Wear Simulation Tests of Journal Bearing

3.1. Simulation Test Apparatus

In the past, it was common to examine the wear and the reliability of bearings through tests of a completed engine at the final stage. However, in order to design lightweight engines more efficiently, it is desirable to obtain fundamental data on the wear of journal bearing metal by simulating various loads on the journal bearings of an engine. Therefore a bearing test apparatus that can apply various loads to the journal bearings by servo valves was developed. Figure 6 shows the schematic arrangement of the bearing simulation test apparatus, by which bearing wear was examined using the data obtained by the sensors, which were attached to the bearings of the general aviation engine.

Figure 7 shows the construction of the inside of the test chamber with the thin-film sensors, the rotating shaft, the position of the crankcase journal, and the vibrator base, in which a newly developed high-speed hydraulic servo valve is installed.

The data obtained by the first experiment were incorporated into the computer of the simulation test

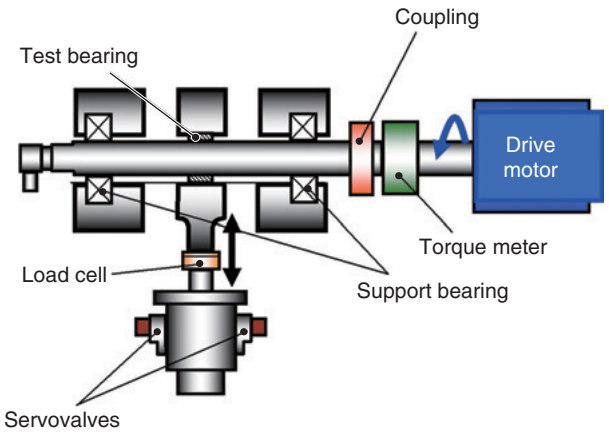


Fig. 6 Schematic arrangement of simulation test apparatus

apparatus, and the wear of the metal journals was monitored during the running of the simulation test apparatus. For the tests, the engine firing force and the simulated load on the journal bearing were adjusted to be identical. Fig. 8 shows an example of the load on the bearing at 70 MPa.

3.2. Initial Wear and Steady-State Wear

In conventional wear tests, the amount of wear was measured throughout the tests, which included both Start-stop tests and Steady-state operation, and was treated as Steady-state wear. However, it is known that the initial wear during the running-in period is greater than the wear during Steady-state operation. Therefore a long running test was conducted in order to keep the initial wear level within the margin of error.

Figure 9 shows the test period with the smallest influence of initial wear. In existing wear tests, the amount of initial wear tends to exceed that of steady wear.

For this reason, longer and more sufficient wear tests were conducted. That is, Steady wear was measured by dismissing the initial wear as erroneous, and comparing the amount of wear before and after the test.

In our new method, the initial wear test and Steady-state wear test were conducted separately. After measuring the wear amount during the initial wear tests, the metal bearings were removed from the test apparatus and cleaned. Then the bearings were re-fitted to the apparatus for the Steady-state wear test. Consequently, our method not only reduced the initial test time, but also made it possible to verify the amount of wear during Steady-state operation.

An originally developed in-line wear particle counting system enabled the separation of these wear phases. As shown in Fig. 10, a portion of the oil from near the bearings containing wear particles flows into the branch line to the counter. The wear particles cover focused laser beams across the oil line and are detected as intensity deviations on a photo detector, whose outputs are processed and yield the number of particles of different sizes.

The oil sampling and particle counting were conducted every 3 minutes during the test.

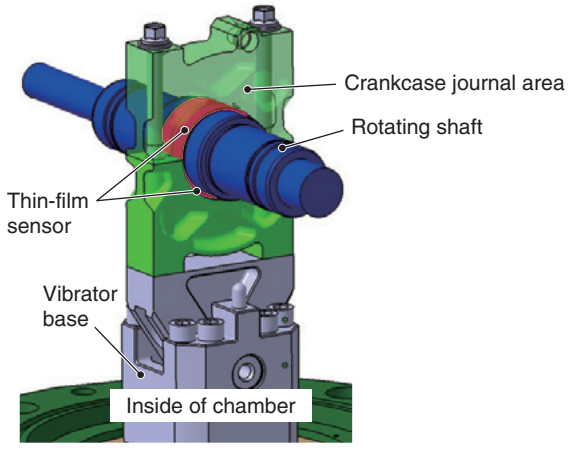


Fig. 7 Inside of chamber of bearing simulation test apparatus

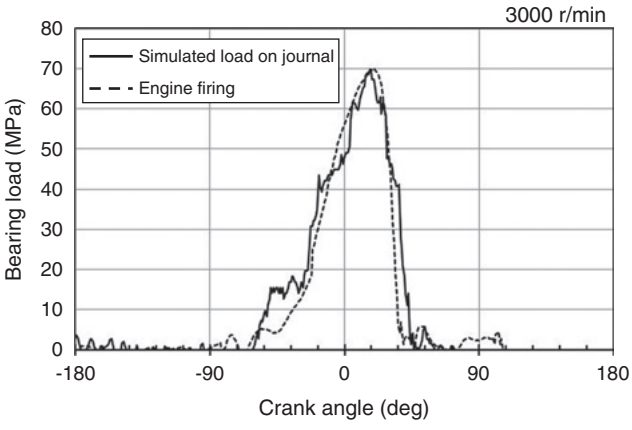


Fig. 8 Conversion data of bearing load value from thin-film sensor measurement data

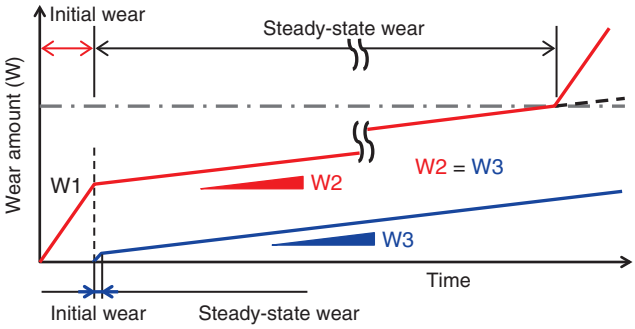


Fig. 9 Test period with small influence of initial wear

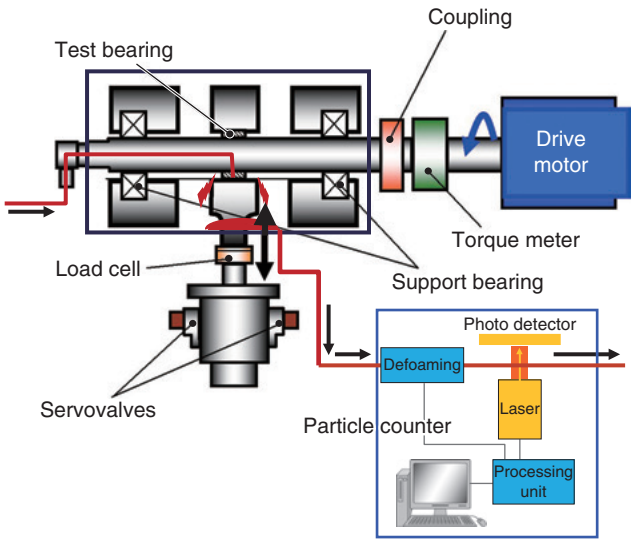


Fig. 10 Oil sampling location

The data were categorized into particle sizes larger than 10 μm and of 10 μm or smaller, and the change in number of particles during the test periods is shown in Figs. 11 and 12.

In the case of the initial wear test, the number of particles 10 μm or smaller increased rapidly as soon as the test started. Then, it decreased as time elapsed until it became constant. But the number of particles larger than 10 μm was almost constant during the initial wear test.

Figure 12 shows that the generation of particles larger than 10 μm or smaller was low and almost constant throughout the steady-state wear test, different from the initial wear test. This suggests that few wear particles are generated in Steady-state wear, after the particles generated by initial wear have been completely removed.

The test results indicate that the wear of bearings is very low during normal operation and the reliability of bearings can be assured as long as the wear metals, which are generated during the initial running, are completely removed before commencement of Steady-state operation.

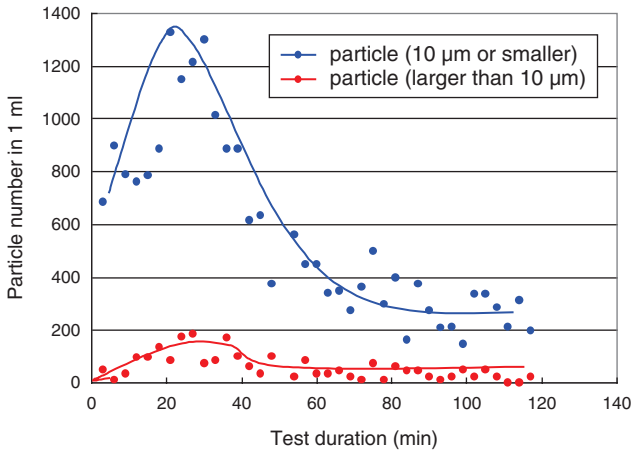


Fig. 11 Generation of initial wear particles

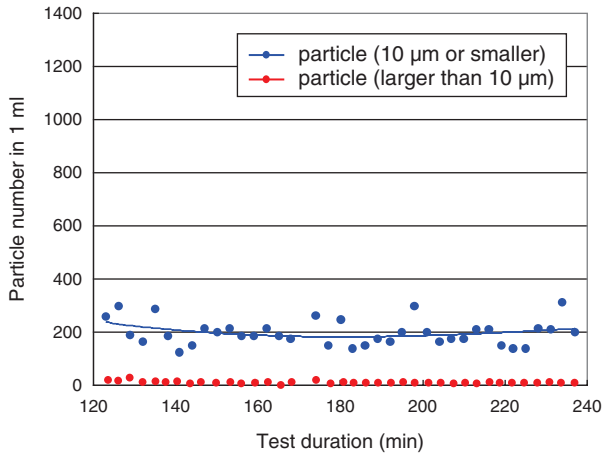


Fig. 12 Generation of Steady-state wear particles

4. Third Experiment: Start-Stop and Steady-State Wear Tests With a General Aviation Engine

4.1. Test Method

Figure 13 shows the flight simulation modes used for the tests. In order to verify the wear data obtained by the simulation test apparatus, confirmation tests were conducted using a general aviation engine, because general aviation engines are operated in simply programmed modes such as “Warm up,” “Take-off,” “Cruise,” “Landing” and “Cool down.” Therefore tests to evaluate the fatigue life of the crankshaft journal bearing were repeatedly conducted in these flight simulation modes.

The tests were carried out based on the flight simulation mode for an aircraft. The main shaft rotational speed and duration for the tests are shown in Fig. 14.

4.2. Results of Start-Stop Wear Test and Steady-State Wear Tests with a General Aviation Engine

After running 2-, 12-, 22- and 32-hour tests (Start-stop tests and Steady-state tests), the condition of the metal was examined under an optical microscope, and the wear of the journal bearing metal was measured with a roughness measurement gauge. The metal was set to the master reference plate of the roughness measurement gauge to measure the same point. The

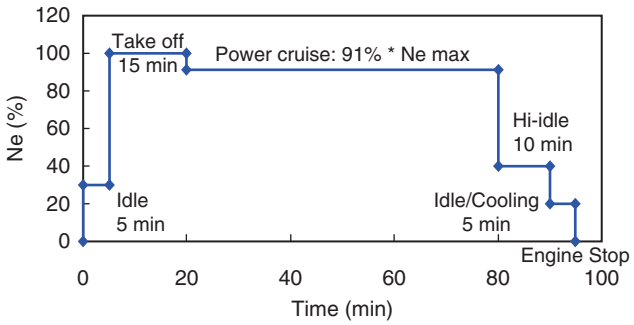


Fig. 13 Flight simulation modes of typical general aviation engine

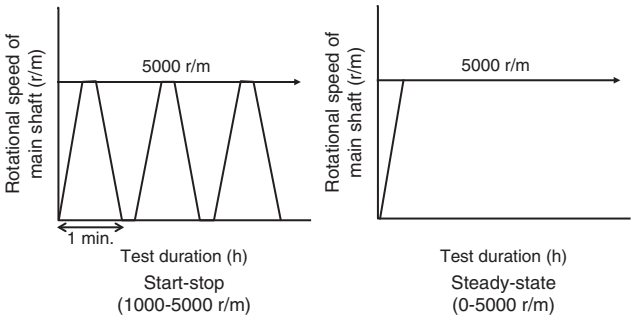


Fig. 14 Running modes

measured cross-sectional curve shows the wear at the center of the metal bearing where the wear was greatest.

In steady-state running mode, there was almost no change in the roughness curves before and after tests, while there was a slight change in the roughness curves in the Start-stop running mode showing some progression of wear, as shown in Fig. 15.

The surfaces of the journal bearings after a 32-hour test are shown in Fig. 16.

The photos in Fig. 16 show that the machining patterns were removed by the initial wear. The bearing surface after Steady-state operation was smooth, although that after Start-stop operation had a relatively deep and new groove, which was found after the 32-hour test. These photos indicate that wear during Start-stop operation is greater than that during Steady-state operation.

Figure 17 shows the number of discharged particles during the test in Start-stop running mode, where r/m varied from 0 to 1,000 and in steady-state running mode, where r/m was constant at 5,000.

Compared with steady-state running mode, the Start-stop running mode produced more wear particles from the beginning of the test, and it took a long time until the production of wear particles becomes stable.

In order to better understand wear during Start-stop operation and during steady-state operation, these wear data, which were obtained using the simulation test apparatus, were compared with those from endurance tests of a general aviation engine in a flying mode.

Figure 18 shows the wear prediction curves in three test modes, which were drawn on the basis of the test data.

The squares show the wear during Steady-state operation, the dotted line shows the wear during Start-stop operation, and the circles show the wear of the metal bearings during the endurance tests in a flying mode. Even though the amount of data was not enough to draw any conclusions, it suggests a general tendency that wear during the steady-state running test, which was conducted after removing the wear particles produced during the Start-stop test, is less than that during the actual engine endurance test and the Start-stop running test in that order respectively.

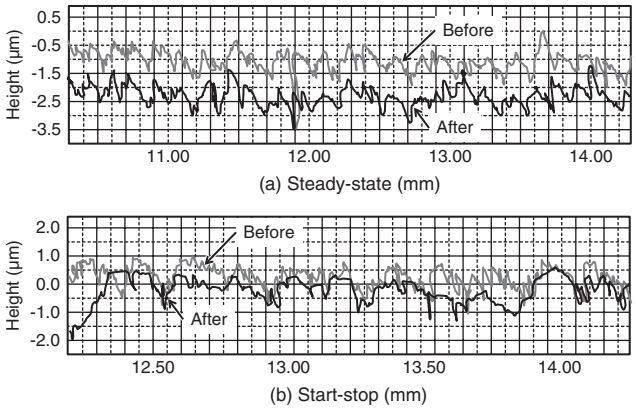


Fig. 15 Roughness curve before and after test

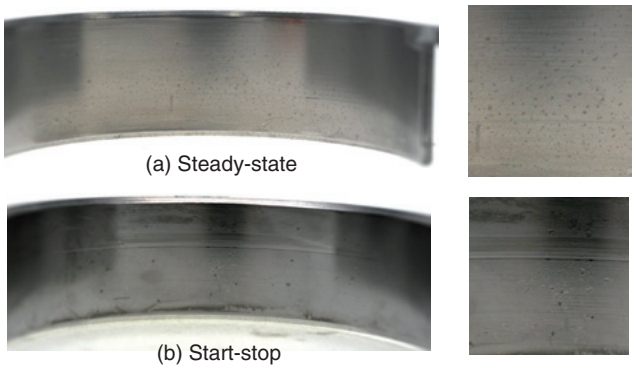


Fig.16 Example of journal metal surfaces at sliding side after 32-hour test

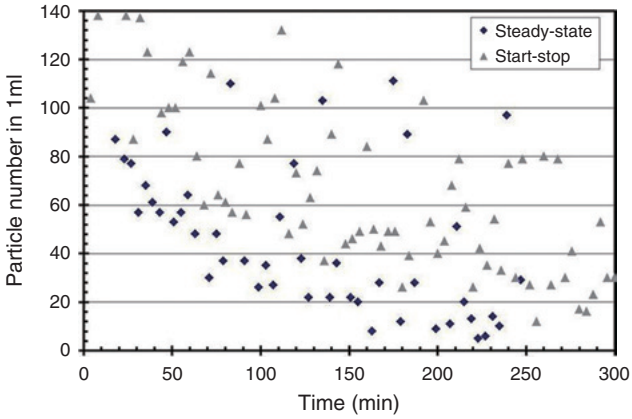


Fig. 17 Generation of particles during start-stop test and steady-state test (Steady-state: 5000 r/m, Start-stop: 0-1000 r/m, 5 min.x100 times)

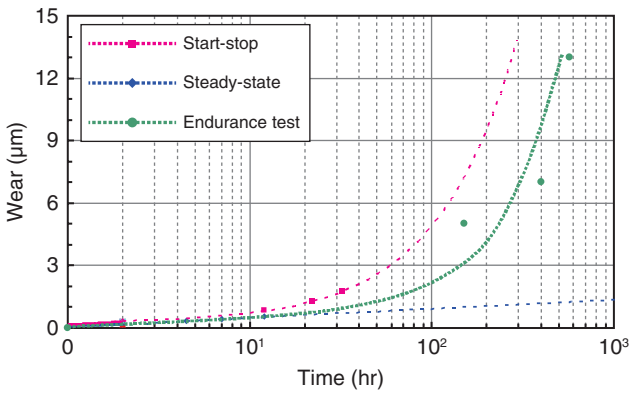


Fig. 18 Comparison of wear amount in three test modes

5. Conclusions

(1) The journal load was measured in an actual running engine with thin-film sensors and the actual load in an actual engine was ascertained.
(2) A bearing simulation apparatus made it possible to reproduce the actual load distribution, and wear tests of the metal bearings were able to be conducted.
(3) The initial wear was differentiated from the Steady-state wear by measuring the generation of wear particles with a particle counter.
(4) The study suggests that the reliability of engine bearings will increase if the wear particles generated during the initial running-in operation are completely removed.
(5) The results of measurement of the loads on the journal bearings indicate some possibility of reducing the width of engine bearings.

In this paper, the new approach by the author, whereby initial and steady wear of the journal bearings in aero-plane engine can be divided, showed the validity for higher the accuracy and efficiency of endurance tests. The basic techniques, such as oil film pressure measurement, load simulation test apparatus and in-situ wear particle counting, are also applicable to other parts such as automobile engine bearings and enhance the development efficiency.

References

(1) Spearot, J. A., Murphy, C. K.: A Comparison of the total capacitance and total resistance techniques for measuring the thickness of journal bearing oil films in an operating engine, SAE Paper, No. 880680 (1988)
(2) Jaloszynski, T. M., Evers, L. W.: Dynamic film measurements in journal bearings using an optical sensor, SAE Paper No. 970846 (1997)
(3) Stephen, R. J., Rajanna, K., Dhar, V., Kalyan, K. G., Nagabushanam K. S.: Comparative performance study of strain gauge sensors for ion thrust measurement, Wear, 259, No. 7−12, p. 1048−1055 (2005)
(4) Kataoka, T., Suzuki, Y., Kato N., Kikuchi, T., Mihara,Y.: Measurement of oil film pressure in the main bearings of an operating engine using thin-film sensors, SAE Paper 2008-01-0438 (2008)
(5) Mihara, Y., Someya, T.: Measurement of oil-film pressure in engine bearing using a thin-film sensor, Society of Tribologists and Lubrication Engineers, STLE Tribology Transactions, 45, 1, p. 11-20 (2002)
(6) Martin, L. C., Wrbanek, J. D., Fralick, G. C.: Thin Film Sensors for Surface Measurements, NAS 1.15:211149, NASA/TM−2001−211149, E−13001, Sep (2001)
(7) Ichikawa S., Mihara, Y., Someya, T.: Study on main bearing load and deformation of multi−cylinder internal combustion engine: Relative inclination between main shaft and bearing, JSAE review, 16, 4, Oct., p. 383−386 (1995)
(8) Mihara, Y., Hayashi, T., Nakamura, M., Someya, T.: Development of measuring method for oil film pressure of engine main bearing by thin film sensor, JSAE review, 16, 2, Apr., p. 125−130 (1995)
(9) Matsumoto, K., Ito, N.: Measurement of oil film pressure on a crank shaft journal in a horizontally-opposed cylinder engine, SAE paper No. 2009-01-0415 (2009)
(10) Boiarski, A. A.: Fiber optic particle concentration sensor, Proceedings of the SPIE, The International Society for Optical Engineering, 566, p. 122−125 (1985)
(11) Miller, J. L., Kitaljevich, D.: In−line oil debris monitor for aircraft engine condition assessment, Proceeding of 2000 IEEE Aerospace Conference, March, p. 18−25 (2000)
(12) Verdegan, B. M., Thibodeau, L., Fallon, S. L.: Lubricating oil condition monitoring through particle size analysis, SAE transactions, 97, p. 1731−1738 (1989)
(13) Michael, P. W., Wanke, T. S., McCambridge, M. A.: Additive and base oil effects in automatic particle counters, ASTM Special Technical Publication, 1501 STP, p. 109−115 (2008)
(14) Iwai, Y., Honda, T., Uno, R., Inagaki, S.: Development of On-line Wear Sensor, Proceeding of JSME annual meeting 2006-09-15, p. 287-288 (2006)

■著　者■



松 本 謙 司

燃料電池用結晶面制御 PtNi ナノ粒子触媒の合成とセル発電性能の評価

Synthesis of Facet-controlled PtNi Nanoparticles and Evaluation of Performance in PEM Fuel Cell

坂　本　良　悟*
Ryogo SAKAMOTO

要　旨

車載用固体高分子形燃料電池の Pt 搭載量の削減を目的として，高い酸素還元反応活性を示す八面体 PtNi ナノ粒子担持カーボン触媒（八面体 PtNi/C）を合成し，実際の燃料電池発電セルにおける Pt 量削減効果を評価した．八面体 PtNi/C をカソードに適用した燃料電池発電試験では，0.9 V において市販 Pt 触媒の 3.4 倍の Pt 質量活性を示した．この結果から，八面体 PtNi/C は実際の燃料電池発電においても高い酸素還元反応活性を発揮することができ，カソード Pt 量を約 70% 削減することが可能な，優れた触媒材料であることが示された．八面体 PtNi/C の耐久性能については，0.6 - 0.9 V 電位サイクルを 10,000 サイクル実施した後の質量活性低下率は 19% であり，低下率が 29% であった市販 Pt 触媒よりも優れた耐久性能を示した．

ABSTRACT

The research discussed in this paper set out to reduce the amount of Pt used in automotive polymer electrolyte fuel cells. Octahedral PtNi nanoparticles supported by carbon black (octahedral PtNi/C), which displays a high level of oxygen reduction reaction activity, was synthesized, and its effect in reducing the amount of Pt employed in an actual fuel cell was evaluated.

Performance tests of a fuel cell using the octahedral PtNi/C as a cathode material showed that Pt mass activity at 0.9 V was 3.4 times that of a market Pt catalyst. These results demonstrate that the octahedral PtNi/C is well suited as a catalyst material, displaying a high level of oxygen reduction reaction activity even in an actual fuel cell, and reducing the amount of Pt used in the cathodes by approximately 70%. The octahedral PtNi/C also displays good durability performance, with a rate of decline in mass activity of 19% after 10,000 0.6-0.9 V potential cycles, against 29% for the market Pt catalyst.

1．まえがき

燃料電池は水素を燃料とし，酸素と反応させることで発電する電気化学デバイスであり，二酸化炭素を排出しないため環境負荷の小さい動力源として期待されている．固体高分子形燃料電池（Polymer Electrolyte Fuel cells: PEFC）は，高エネルギー変換効率，高出力密度，小型軽量，約 80 ℃ の低作動温度，設計自由度が高いなど，自動車用電源として適した特徴を多く持つため，その実用化に向けた研究開発が盛んに行われている．

PEFC を搭載した燃料電池自動車（Fuel Cell Vehicles: FCV）が世の中に普及するための大きな課題のひとつに，低コスト化が挙げられる．現在の PEFC の電極触媒には，高い水素酸化活性を持ち，化学的，電気化学的に比較的安定であるという理由で，高価な白金（Pt）が使用されている．しかし，Pt 触媒は酸素還元反応（Oxygen Reduction Reaction : ORR）に対する活性が充分でなく，それを補うために多量の Pt が FCV には使用されており，高コスト化の原因となっている．この課題に対して，より少ない Pt 量で高い ORR 活性を示すカソード触媒材料の開発が世界中で行われている．Pt と遷移金属の合金化はその代表的なアプローチであるが[(1)-(3)]，純 Pt に対する ORR 活性の向上は２倍程度であり，Pt 量削減の効果は小さい．他のアプローチとして，Pt シェルー遷移金属コアナノ粒子が検討されており，Pt 合金ナノ粒子よりも高い ORR 活性を示すものが報告されている[(4)-(7)]．しかし，この Pt シェルー遷移金属コアナノ粒子は，高酸化環境であるカソードではコアである遷移金属の溶出が起こるため，耐久性に課題があると考えられている．

＊基礎技術研究センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_14

一般的に触媒の活性は，結晶面方位によって変化することが知られており，PEFC 用の Pt 触媒も同様な効果が期待できる．Markovic らは，単結晶 Pt の ORR 活性は，{100} ＜ {111} ＜ {110} の順に向上することを報告した[8]．また，Stamenkovic らは，Pt_3Ni 合金単結晶の ORR 活性は，{100} ＜ {110} ＜ {111} の順に向上することを報告し，Pt とは異なる傾向を示すことを明らかにした[9]．また，Pt_3Ni{111} の単位面積当たりの ORR 活性は，Pt{111} の約 10 倍と最も高く，Pt 触媒の ORR 活性は合金化と結晶面方位の効果を合わせることで向上することが示された．

一般的に触媒の単位重量当たりの活性は，触媒の比表面積と単位面積当たりの活性の積で表される[10]．つまり，触媒活性を実用的に向上させるためには，比表面積を増大させるか，本質的に活性の高い材料を選択することが重要となる．触媒の比表面積はナノ粒子化することで高めることができるため，Pt_3Ni{111} のような本質的に優れた ORR 活性を示す材料をナノ粒子化できれば，Pt 質量当たりの活性は向上し，FCV の Pt 搭載量の削減が期待できる．

我々は，液相化学還元法によるナノ粒子合成において，poly（diallyldimethylammoniumchloride）（PDDA）を添加剤，ポリオールを還元剤として選択し，粒子成長を緩慢にすることで {111} が表面に露出した八面体 PtNi ナノ粒子担持カーボン触媒（八面体 PtNi/C）を得た．これまでの他の研究グループからの報告で，八面体 PtNi/C の ORR 活性を回転ディスク電極法（Rotating Disk Electrode: RDE）で評価したところ，従来の Pt 触媒の 4 倍から 10 倍の高い質量活性を示すことが報告されているが[11]-[13]，実際の PEFC セルによる八面体 PtNi/C の発電性能や耐久性能についての報告は未だにない．

本稿では，八面体 PtNi/C を PEFC セルに適用した場合の Pt 量削減効果および耐久性能を評価することを目的とし，合成した八面体 PtNi/C を用いた PEFC セルの発電試験および電位サイクルによる耐久試験を行った．その結果，八面体 PtNi/C を適用することで，市販 Pt 触媒に比べ約 70% のカソード Pt 量の削減が可能となることが示された．また，電位サイクルによる耐久試験においても，市販 Pt 触媒よりも優れた耐久性能を示したので，その詳細を報告する．

2．実験

2.1. 八面体 PtNi ナノ粒子担持カーボン触媒の合成

本稿では，既報とは異なる簡便な方法で八面体 PtNi/C を合成した[11]-[13]．初めに，エチレングリコール（関東化学株式会社製）50 mL に，カーボンブラック（Ketjen black ECP-600JD：ライオン株式会社製）513 mg，白金アセチルアセトネート（Aldrich 製）588 mg，酢酸ニッケル四水和物（Aldrich 製）372 mg，35 wt.%PDDA 水溶液（Aldrich 製）760 μL を加えた．その混合溶液を，190 ℃，アルゴンガスフロー中で 2 時間還流した．次に，ろ過により混合溶液から生成物を分離し，熱エタノール，アセトン，および熱水で数回洗浄した．生成物を 50 ℃ で充分に乾燥し，八面体 PtNi/C とした．

2.2. 材料特性

合成した八面体 PtNi/C の粒子形状とサイズを把握するために，走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope: SEM）観察および透過型電子顕微鏡（Transmission Electron Microscope: TEM）観察を行った．SEM 観察は株式会社日立ハイテクノロジーズ製 HD-2000 を，TEM 観察は株式会社日立ハイテクノロジーズ製 H-9000UHR を使用した．八面体 PtNi/C の原子組成比と触媒担持率を把握するために，誘導結合プラズマ発光分光分析（Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy: ICP-AES）を行った．また，八面体 PtNi ナノ粒子の局所的な原子組成比を把握するために，粒子を分析対象としたエネルギー分散型 X 線分析（Energy Dispersion X-ray Spectroscopy: EDX）を，SEM 観察と同時に行った．

2.3. RDE 法による ORR 活性の評価

RDE 用触媒フィルムは以下の手順で作成した．35wt.% エタノール水溶液と 5 wt.%Nafion®溶液（Aldrich 製）の混合液に，八面体 PtNi /C を加え，超音波分散させた．その分散液 10 μL を，面積が 0.196 cm^2 の RDE 用グラッシーカーボン（GC）電極上に滴下し，室温でゆっくりと乾燥させ，RDE 用触媒フィルムとした．電極上の Pt 量は 1.4 μg であった．電気化学測定には三電極式セル，PINE 社製 RDE 装置，Solartron 社製ポテンシオスタット SI1287 を使用した．参照極には飽和カロメル電極を，対極には白金黒付き白金電極を用いた．ただし，本稿で記載した電位は，全て可逆水素電極基準とした．RDE 測定の前に，八面体 PtNi/C の電気化学表面積（Electrochemistry Surface Area: ECSA）をサイクリックボルタンメトリ（Cyclic Voltammetry: CV）により求めた．電解液は，溶存酸素を充分に除去した 0.1 M 過塩素酸水溶液を用いた．電位範囲は 0.05 - 1.05 V とした．電極を電気化学的にクリーニングする目的で，電位掃引速度 400 mV/s で 100 サイクルした後に，電位掃引速度 100 mV/s で CV 曲線を得た．得られた CV 曲線において，水素脱離が起こる電位範囲（0.05 - 0.4 V）を積分して電気量 Q_H[C] を求め，式（1）を用いて $ECSA$[m^2/g-Pt] を求めた[14]．

$$ECSA = \frac{Q_H}{2.1\, M_{Pt}} \qquad (1)$$

ここで，M_{Pt}[g] は GC 電極上の Pt 重量である．

RDE法により得られる酸素還元電流は，活性化支配電流と拡散限界電流の影響を受けている．より正確に触媒活性を評価するためには，酸素還元電流から拡散限界電流の影響を除き，活性化支配電流のみを取り出す必要がある．本測定では，Koutecky-Levich plotを得ることで，活性化支配電流のみを抽出した．RDE測定の電解液は，酸素飽和した0.1M過塩素酸水溶液を用いた．電極回転数は，400, 800, 1200, 1600, 2000 rpmとした．電位は1.05 Vから0.05 Vへ掃引し，掃引速度は10 mV/sとした．市販のPtナノ粒子担持カーボン触媒(Pt/C)とORR活性を比較するために，田中貴金属工業株式会社製TEC10E50Eを同様の条件で評価した．市販Pt/C評価時の電極上のPt量は3.9 μgであった．

2.4. セル発電性能評価

セル発電試験に用いた膜 - 電極接合体(Membrane-Electrode-Assembly: MEA)は転写法で作成した．イオン交換水と5 wt.%Nafion®溶液(Aldrich製)の混合液に，八面体PtNi/Cを加え，超音波分散させた．その分散液を，大きさ30 mm角，厚み100 μmのPTFEシートにスプレーで均一に吹き付け，80 ℃で乾燥し，カソード用転写シートとした．同様の方法で市販Pt/Cを用いてアノード用転写シートを作成した．作成したカソードおよびアノード用転写シートでプロトン交換膜(Dupont製NR-212)を挟み，ホットプレスを用いて転写した．各電極のPt搭載量は，転写前後のPTFEシートの重量差から求めた．アノードとカソードのPt搭載量は，それぞれ0.50 mg/cm^2，0.14 mg/cm^{2}であった．比較用として，カソードに市販Pt/Cを用いたMEAも同様の方法で作成した．Pt搭載量はアノード，カソード共に0.50 mg/cm^{2}であった．

作成したMEAをガス拡散層(SGL Carbon製GDL25BCH)と共に発電セル(一般財団法人日本自動車研究所標準セル)に組み込み，発電試験装置(NF回路製燃料電池評価システム)に接続した．試験条件をTable 1に示す．セル抵抗は電流遮断法により測定し，電流ー電圧(I-V)曲線の電圧はセル抵抗を除いた値を採用した．

2.5. 電位サイクルによる耐久性の評価

電位サイクルによる耐久性評価試験の条件をTable 2に示す．セル電位はポテンシオスタット(北斗電工株式会社製HD-3000)により変化させた．電位サイクル前後のカソードのECSAおよびI-V曲線を比較し，電位サイクルによる触媒表面積と発電性能の変化を調べた．ECSAのためのCV測定はアノードに水素，カソードに窒素を流し，アノードを疑似的な参照電極として実施した．ECSAの算出には式(1)を用いた．発電試験はTable 1に示した条件で行った．

Table 1 Conditions for fuel cell test with octahedral PtNi/C as cathode material.

	Anode	Cathode
Cell temperature [°C]	70	
Gas	H_2	Air
Gas stoichiometric ratio	1.4	1.8
Relative humidity [%]	50	73
Back pressure [kPa]	130	100

Table 2 Conditions for durability test of octahedral PtNi/C by potential cycling.

	Anode	Cathode
Cell temperature [°C]	70	
Gas	H_2	Air
Gas stoichiometric ratio	1.4	1.8
Relative humidity [%]	100	100
Back pressure [kPa]	130	100
Potential [V]	0.6 - 0.9	
Shape of potential wave	Square	
Potential retention time [sec.]	20	
Cycle number [times]	10,000	

3．結果と考察

3.1. 材料特性

合成した八面体PtNi/Cの電子顕微鏡像をFig. 1に示す．Fig. 1(a)の低倍SEM像では，形状が八面体，サイズが10 - 15 nmであるナノ粒子がカーボンブラック上によく分散している様子が確認できる．Fig. 1(b)の高倍SEM像では，ナノ粒子の形状は完全な八面体ではなく，頂点がカットされた切頭八面体であることがわかる．八面体PtNiナノ粒子の高分解能TEM像をFig. 1(c)に示す．露出面の方位を調べるため，露出面が紙面に対して垂直となる様に撮影した．Fig. 1(c)の四角で囲われたエリアを高速フーリエ変換して得た擬似電子回折像をFig. 1(d)に示す．AからFの回折スポットは，Fig. 1(c)中のAからFの露出面に対応したものであり，各回折スポットを指数付けした結果，B, Eの頂点がカットされた面は{100}，A，C，D，Fのその他の面は{111}と同定された．以上のことから，合成した八面体PtNiナノ粒子の露出面は，ほぼ{111}であることが確認できた．

我々は，本合成条件において八面体PtNi/Cを得るため

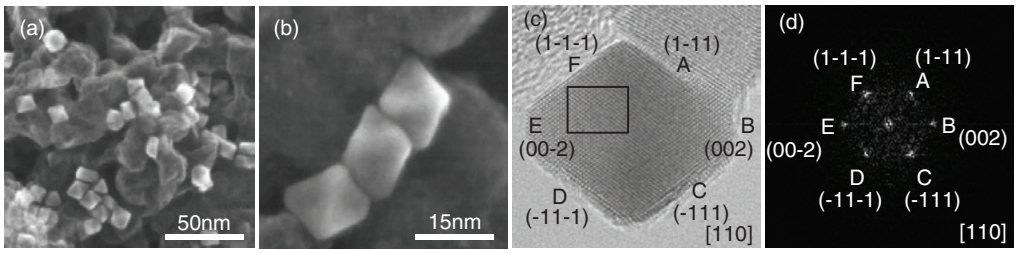


Fig. 1　SEM (a) and (b) and high-resolution TEM (c) images of octahedral PtNi/C. Square shows area image-processed by inverse Fourier transformation to obtain pseudo-electron diffraction pattern. Pseudo-electron diffraction pattern (d) of octahedral PtNi nanoparticles.

に二つの必須条件があると考えている．一つは PDDA の添加である．PDDA はポリマーであり，吸着点と考えられる四級アンモニウムカチオンを高密度に有するため，金属イオンまたは金属粒子表面に対して強い吸着力を示す[15),16)]．この性質が粒子に与える効果は以下の２点である．

（1）粒子サイズの大型化による，{111} 露出割合の増加

（2）粒子成長速度の抑制による，露出結晶面の平坦化

（1）について，反応初期の粒子核生成において，PDDA が Pt^{2+} や Ni^{2+} に配位することで，Pt や Ni への還元が阻害され，生成する核の数は少なくなる．その結果，前駆体は粒子の成長に多く消費され，10 - 15 nm と比較的サイズが大きい粒子へと成長したと推測する．Fig. 2 は，八面体粒子表面の各部位の割合（表面露出総原子数に対する，ある部位を構成する原子数の割合）と粒子サイズの関係を計算により求めたものである．粒子サイズが大きくなるに従い，{111} の割合はコーナやエッジよりも高くなり，11 nm で約 90% となる．つまり，八面体粒子の表面を {111} で占めるためには，粒子の大型化が必要であり，それに PDDA が寄与したと考える．

（2）について，核が粒子へと成長する際，PDDA は粒子表面にも強く吸着し，表面での連続的な金属析出反応がゆっくりと均一に進行すると推測する．その結果，ステップやキンクの少ない，原子レベルで平坦な {111} が露出し，

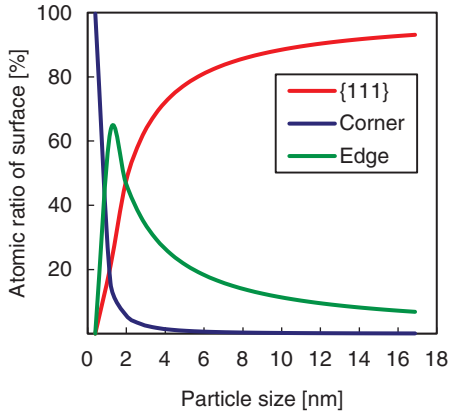


Fig. 2　Calculated relationship of particle size and atomic ratio of {111}, corner, and edge on octahedral nanoparticle surface.

Table 3　Atomic ratio and weight concentration of octahedral PtNi/C as determined by ICP-AES.

	Pt	Ni	C
Atomic ratio [at.%]	62.2	37.8	
Weight concentration [wt.%]	27.5	5.0	67.5

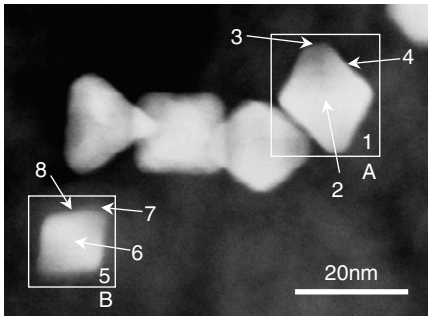
Fig. 1 で見られたような整った形状の八面体粒子が生成したと考える．

二つめの必須条件は，{111}PtNi の表面エネルギーが他の面に比べ小さいことである．各結晶面の露出割合は結晶面の成長速度によって決まり，それは表面エネルギーの大きさに依存する．つまり，表面エネルギーが高い結晶面ほど成長は速く，粒子が成長するに従ってその面の露出面積は小さくなり，やがて消失する．結晶構造が面心立方格子である PtNi 合金において，{111}Pt_3Ni は他の面に比べ表面エネルギーが低く，成長速度が遅いことが報告されている[11),17),18)]．また，PDDA が選択的に {111}PtNi に吸着し，{111}PtNi の表面エネルギーをさらに低下させたとも考えられる．以上の複合的な効果により，平坦な {111} が表面に多く露出した八面体 PtNi ナノ粒子を得ることができたと考える．

ICP-AES で測定した八面体 PtNi/C の組成比を Table 3 に示す．八面体 PtNi/C の Pt と Ni の原子組成比は Pt : Ni = 62.2 : 37.8 であった．合成時の仕込み原子組成比は Pt : Ni = 50 : 50 であったから，得られた八面体 PtNi/C は仕込み組成よりも Pt の割合が高かった．八面体 PtNi/C 中の金属の重量濃度は，Pt が 27.5 wt.%，Ni が 5.0 wt.% であり，計 32.5 wt.% であった．

八面体 PtNi ナノ粒子の局所的な原子組成比を把握するために，粒子を対象とした SEM-EDX 分析を実施した．結果を Fig. 3 に示す．粒子 A において，測定エリア 1 の粒子全体の組成比は Pt : Ni = 63.8 : 36.2 であり，ICP-AES の結果とよく一致した．粒子 A 中央の測定エリア 2 の組成比は Pt : Ni = 57.3 : 42.7 であったのに対し，コーナである測定エリア 3 は Pt : Ni = 80.7 : 19.3，エッジである測定エリア 4 は Pt : Ni = 72.3 : 27.7 と，部位により組成比に差

が見られた．他の粒子Bの組成分布も粒子Aと同様の傾向であった．これらの結果から，八面体PtNiナノ粒子の原子組成比は均一ではなく，粒子内部はNiの割合が多く，コーナやエッジはPtの割合が多い，特異的な組成分布を持つことがわかった．



Analysis points		Atomic ratio [at.%]	
		Pt	Ni
1	Particle	63.8	36.2
2	Center	57.3	42.7
3	Corner	80.7	19.3
4	Edge	72.3	27.7
5	Particle	67.2	32.8
6	Center	58.1	41.9
7	Corner	80.8	19.2
8	Edge	73.6	26.4

Fig. 3 Dark-field SEM image of octahedral PtNi/C including EDX analysis areas (squares) and points (arrows). Table shows atomic ratio at each analysis point.

3.2. RDE法によるORR活性評価

八面体PtNi/Cと市販Pt/CのCV曲線をFig. 4(a)に示す．一般にPtナノ粒子のCV曲線は，0.05 - 0.4 Vで水素の吸着･脱離，0.7 V以降で表面酸化物形成･還元に伴う電流が観測される．市販Pt/CのCVでは，0.13 Vと0.20 Vに明確なピークが見られたが，八面体PtNi/Cでは見られなかった．このような水素の吸着脱離電位域においてピークを示さないCV形状は，報告されている0.1 M過塩素酸中でのPt{111}単結晶のCV形状とよく一致しており[19]，八面体PtNiナノ粒子表面にPt{111}が多く露出していることを示唆している．また，市販Pt/Cでは約0.69 Vから表面酸化物形成の電流が流れるのに対し，八面体PtNi/Cではそれが約0.75 Vと，高電位側にシフトしている．これは，八面体PtNi/Cは表面酸化物形成に対する過電圧が大きく，ナノ粒子表面に酸化物が形成しづらいことを意味しており，従来のPt触媒とは異なる表面特性を有すると考えられる．水素脱離ピークから求めた八面体PtNi/CのECSAは32 m^2/g-Ptであり，68 m^2/g-Ptであった市販Pt/Cの1/2以下であった．市販Pt/Cの平均粒径は2.3 nmと，八面体PtNiナノ粒子に比べ小さく，その差がECSAに反映された．

Fig. 4(b)にRDEによるORR分極曲線を，Fig. 4(c)に0.90 Vにおける Koutecky-Levich plot を示す．Koutecky-

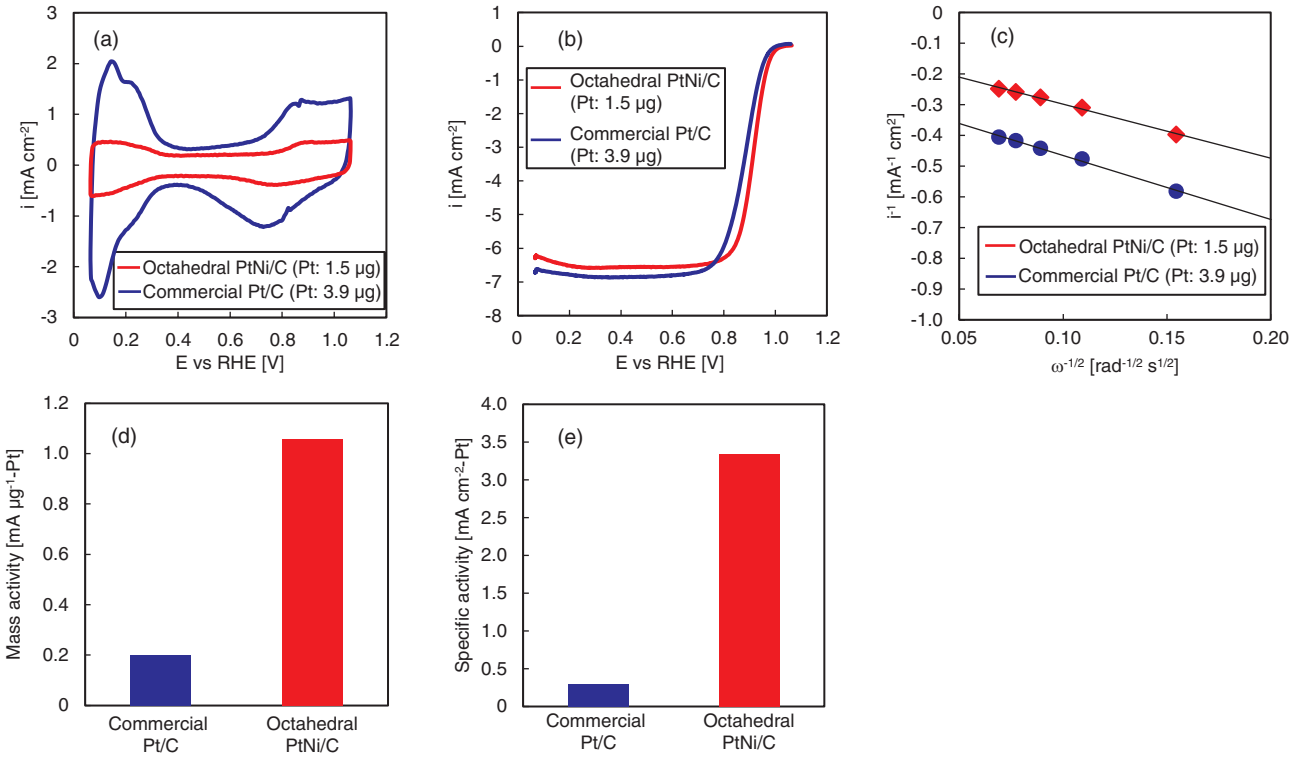


Fig. 4 (a) CV curves, (b) polarization curves and (c) Koutecky-Levich plot for octahedral PtNi/C (Pt: 1.5 μg) and commercial Pt/C (Pt: 3.9 μg) as determined by RDE measurements. Comparison of (d) mass activity and (e) specific activity at 0.90 V between octahedral PtNi/C and commercial Pt/C.

Levich plot の切片の電流値は，拡散限界電流の影響を除いた酸素還元電流値であり，それを電極上の Pt 量で規定した値を質量活性として Fig. 4(d) に示す．八面体 PtNi/C の質量活性は市販 Pt/C の 5.3 倍であった．この結果は，八面体 PtNi/C を用いて一定の電流量を得る場合，従来 Pt 触媒に比べ約 81% 少ない Pt 量で可能であることを意味している．ECSA で規定した酸素還元電流値を面積活性として Fig. 4(e) に示す．八面体 PtNi/C の面積活性は市販 Pt/C の 11.5 倍であり，八面体 PtNi ナノ粒子が ORR に対して本質的に優れた触媒材料であることが示された．

3.3. セル発電性能評価

Pt 量 0.14 mg/cm^2 の八面体 PtNi/C をカソードに適用した MEA の I-V 曲線を，Pt 量 0.50 mg/cm^2 の市販 Pt/C の I-V 曲線と共に Fig. 5(a) に示す．八面体 PtNi/C の Pt 量は市販 Pt/C の 1/3 以下であるにも関わらず，両者の I-V 曲線はほぼ同等であった．質量活性を横軸としたときの Tafel-plot を Fig. 5(b) に，また 0.9 V での質量活性の比較を Fig. 5(c) に示す．八面体 PtNi/C をカソードに用いた MEA の質量活性は，市販 Pt/C の 3.4 倍であった．この結果は，PEFC のカソードを市販 Pt 触媒から八面体 PtNi/C に代替した場合，71% のカソード Pt 量が削減可能であることを意味しており，八面体 PtNi/C はカソード Pt 量の大幅な削減に寄与できることが，実際の燃料電池セルにおいても示された．

RDE による八面体 PtNi/C の質量比活性は 5.3 倍であったのに対し，発電セルでは 3.4 倍と，質量活性向上の効果が小さかった．この原因のひとつに，MEA 中の八面体 PtNi ナノ粒子表面に PDDA が残存しており，それが ORR を阻害したためと考えられる．RDE では，電極を水溶液中に浸漬して電気化学クリーニングを実施することで，水溶性の PDDA は電解液中に溶出または分解し，八面体 PtNi ナノ粒子表面に PDDA が存在しない状態で評価していると推測する．発電試験では MEA の最高性能を引き出すために，測定前に分極サイクルを充分に行っているが，電極層の周辺はほぼ気体であるため，PDDA の除去効果は小さいと考えられ，RDE よりも八面体 PtNi ナノ粒子表面に PDDA が多く吸着した状態で評価していると推測する．

3.4. 電位サイクルによる耐久性の評価

カソードに八面体 PtNi/C を適用した発電セルにおいて，0.6 - 0.9 V 電位サイクルを 10,000 サイクル実施した前後の I-V 曲線の比較を Fig. 6(a) に示す．全ての電流域で，電位サイクルによる I-V 曲線の大きな変化は見られなかった．電位サイクルによる質量活性の変化を Fig. 6(b) に

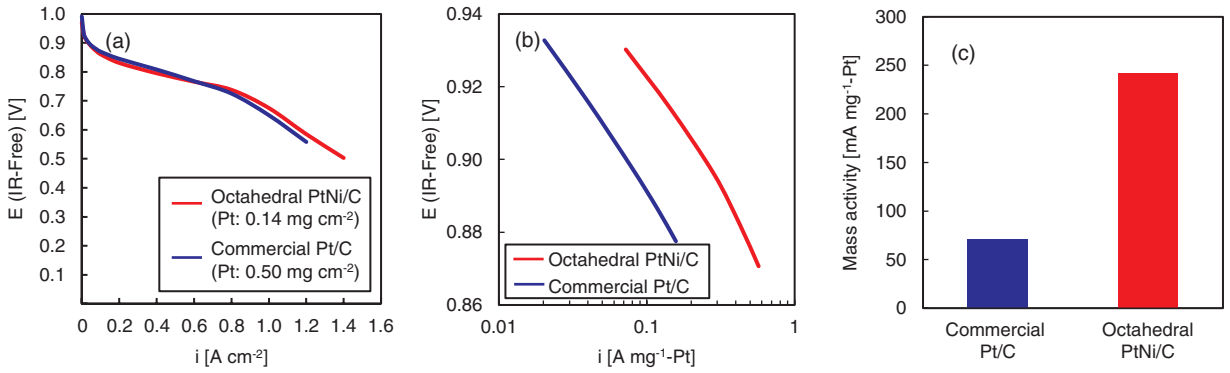


Fig. 5 (a) Polarization curves of PEFC using octahedral PtNi/C and commercial Pt/C for cathodes. (b) Tafel plots for octahedral PtNi/C and commercial Pt/C in fuel cell tests. (c) Comparison of mass activity at 0.9 V for the octahedral PtNi/C and commercial Pt/C.

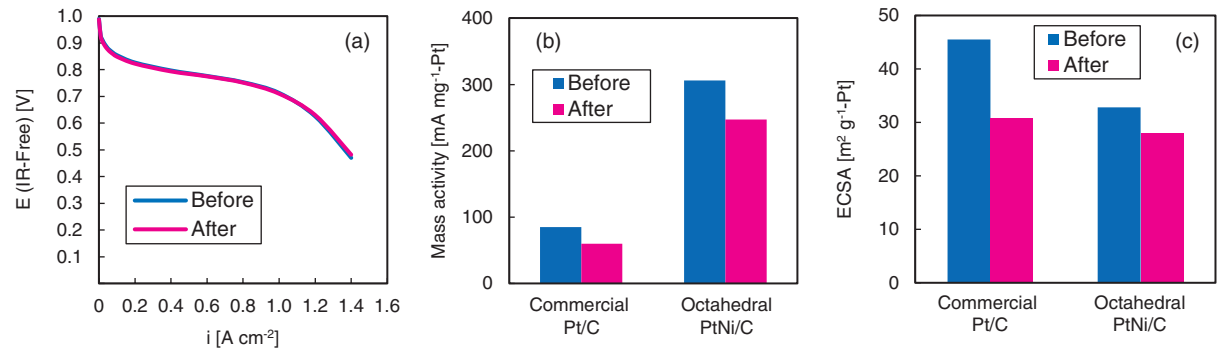


Fig. 6 (a) Polarization curves of PEFC using octahedral PtNi/C before and after 10,000 0.6 - 0.9 V potential cycles. (b) Change in mass activity and (c) ECSA for octahedral PtNi/C and commercial Pt/C as a result of 0.6 - 0.9 V potential cycling.

示す．八面体 PtNi/C の質量活性の低下率は 19% と，市販 Pt/C の 29% よりも小さかった．0.6 - 0.9 V 電位サイクルを 10,000 サイクル実施した後においても，八面体 PtNi/C の質量比活性は市販 Pt/C の 4.1 倍を示し，依然高い優位性を保持していた．以上の結果より，0.6 - 0.9 V 電位サイクルに対して，八面体 PtNi/C は市販 Pt 触媒よりも高い耐久性を有することを確認した．

0.6 - 0.9 V 電位サイクルによる ECSA の変化を Fig. 6(c) に示す．ECSA 減少率は市販 Pt/C で 28% であったのに対し，八面体 PtNi/C では 4% と小さかった．その理由として，以下の二つを考察した．一つは，八面体 PtNi ナノ粒子のサイズが大きいため，粒子がカーボンブラック上を移動して起こる粒子同士の凝集が少なかったことである．もう一つは，表面に露出した {111} が比較的高い耐溶出性を持ち，粒子のオストワルド成長が起こりにくかったことである．{111} は他の結晶面に比べ原子密度が高く，また配位数も高いことが，高い耐溶出性を示す要因と考える．

市販 Pt/C の質量活性の低下率は ECSA 減少率とほぼ一致したことから，市販 Pt/C の活性低下の主な原因は触媒表面積の低下と考えられる．八面体 PtNi/C の場合，質量活性の低下率と ECSA 減少率に相関がないことから，活性低下の主な原因は表面積の低下ではない．八面体 PtNi/C が高い ORR 活性を示すのは，粒子表面に {111}PtNi が多く露出しているためであるから，19% の質量活性低下の要因は電位サイクルによって表面に露出している {111}PtNi の構造が失われたことによるものと推測する．

4．まとめ

車載用固体高分子形燃料電池の Pt 搭載量の削減を目的として，高い酸素還元反応活性を示す八面体 PtNi/C を合成し，実際の燃料電池発電セルにおける Pt 量削減効果を評価した．

得られた粒子はサイズが 10 - 15 nm の切頭八面体であり，TEM 解析により粒子表面はほぼ {111} であることが同定された．また，八面体 PtNi ナノ粒子はコーナとエッジに Pt が多く偏析しており，特異的な組成分布を示した．

RDE 法による八面体 PtNi/C の触媒活性は，Pt 質量活性が市販 Pt 触媒の 5.3 倍，触媒面積活性が 11.5 倍を示した．八面体 PtNi/C をカソードに適用した MEA による発電試験では，0.9 V における Pt 質量活性は市販 Pt 触媒の 3.4 倍を示した．この結果から，八面体 PtNi/C は実際の燃料電池発電においても高い酸素還元反応活性を発揮することができ，カソード Pt 量を約 70% 削減可能である優れた触媒材料であることが示された．また耐久性能については，0.6 - 0.9 V 電位サイクルを 10,000 サイクル実施した後の，八面体 PtNi/C の質量活性低下率は 19% であり，低下率が 29% であった市販 Pt 触媒よりも優れた耐久性能を示した．

参考文献

（1）Stamenkovic, V.R., Mun, B.S., Arenz, M., Mayrhofer, K.J.J., Lucas, C.A., Wang, G., Ross, P.N., Markovic, N.M.: Trends in electrocatalysis on extended and nanoscale Pt-bimetallic alloy surfaces, Nature Materials, Vol.6, No.3, p.241-247(2007)

（2）Anderson, A.B., Roques. J., Mukerjee, S., Murthi. V.S., Markovic, N.M., Stamenkovic, V.: Activation Energies for Oxygen Reduction on Platinum Alloys: Theory and Experiment, The Journal of Physical Chemistry B, Vol.109, No.3, p.1198-1203(2005)

（3）Paulus, U.A., Wokaun, A., Scherer, G.G., Schmidt, T.J., Stamenkovic, V., Radmilovic, V., Markovic, N. M., Ross, P.N.: Oxygen Reduction on Carbon-Supported Pt － Ni and Pt － Co Alloy Catalysts, The Journal of Physical Chemistry B, Vol.106, No.16, p.4181-4191(2002)

（4）Zhang, J., Lima, F.H.B., Shao, M.H., Sasaki, K., Wang, J.X., Hanson, J., Adzic, R.R.: Platinum Monolayer on Nonnoble Metal － Noble Metal Core － Shell Nanoparticle Electrocatalysts for O_2 Reduction, The Journal of Physical Chemistry B, Vol.109, No. 48, p.22701-22704(2005)

（5）Tao, F., Grass, M.E., Zhang, Y., Butcher, D.R., Renzas, J.R., Liu, Z., Chung, J.Y., Mun, B.S., Salmeron, M., Somorjai, G.A.: Reaction-Driven Restructuring of Rh-Pd and Pt-Pd Core-Shell Nanoparticles, Science, Vol.322, No.5903, p.932-934(2008)

（6）Sasaki, K., Naohara, H., Cai, Y., Choi, Y.M., Liu, P., Vukmirovic, M.B., Wang, J.X., Adzic, R.R.: Core-Protected Platinum Monolayer Shell High-Stability Electrocatalysts for Fuel-Cell Cathodes, Angewandte Chemie International Edition, Vol.49, No.46, p.8602-8607(2010)

（7）Sasaki, K., Wang, J.X., Naohara, H., Marinkovic, N., More, K., Inada, H., Adzic, R.R.: Recent advances in platinum monolayer electrocatalysts for oxygen reduction reaction: Scale-up synthesis, structure and activity of Pt shells on Pd cores, Electrochimica Acta, Vol.55, p.2645-2652(2010)

（8）Marković, N.M., Adžić, R.R., Cahan, B.D., Yeager, E.B.: Structural effects in electrocatalysis: oxygen reduction on platinum low index single-crystal

surfaces in perchloric acid solutions, Journal of Electroanalytical Chemistry, Vol.377, No.1-2, p.249-259(1994)
(9) Stamenkovic, V.R., Fowler, B., Mun, B.S., Wang, G., Ross, P.N., Lucas, C.A., Markovic, N.M.: Improved Oxygen Reduction Activity on Pt_3Ni(111) via Increased Surface Site Availability, Science, Vol.315, p.493-497(2007)
(10) Gasteiger, H.A., Marković, N.M.: Just a Dream-or Future Reality?, Science, Vol.324, No.5923, p.48-49(2009)
(11) Zhang, J., Yang, H., Fang, J., Zou, S.: Synthesis and Oxygen Reduction Activity of Shape-Controlled Pt_3 Ni Nanopolyhedra, Nano Letters, Vol.10, No.2, p.638-644(2010)
(12) Carpenter, M.K., Moylan, T.E., Kukreja, R.S., Atwan, M.H., Tessema, M.M.: Solvothermal Synthesis of Platinum Alloy Nanoparticles for Oxygen Reduction Electrocatalysis, Journal of the American Chemical Society, Vol.134, No.20, p.8535-8542(2012)
(13) Cui, C., Gan, L., Heggen, M., Rudi, S., Strasser, P.: Compositional segregation in shaped Pt alloy nanoparticles and their structural behaviour during electrocatalysis, Nat. Mater., Vol.12, No.8, p.765-771(2013)
(14) Clavilier, J., Albalat, R., Gomez, R., Orts, J.M., Feliu, J.M., Aldaz, A.: Study of the charge displacement at constant potential during CO adsorption on Pt(110) and Pt(111) electrodes in contact with a perchloric acid solution, Journal of Electroanalytical Chemistry, Vol.330, No.1–2, p.489-497(1992)
(15) Tian, Z.Q., Jiang, S.P., Liu, Z., Li, L.: Polyelectrolyte-stabilized Pt nanoparticles as new electrocatalysts for low temperature fuel cells, Electrochemistry Communications, Vol.9, No.7, p.1613-1618(2007)
(16) Liu, Z., Koh, S., Yu, C., Strasser, P.: Synthesis, Dealloying, and ORR Electrocatalysis of PDDA-Stabilized Cu-Rich Pt Alloy Nanoparticles, Journal of The Electrochemical Society, Vol.154, No.11(2007)
(17) Kitchin, J.R., Nørskov, J.K., Barteau, M.A., Chen, J.G.: Modification of the surface electronic and chemical properties of Pt(111) by subsurface 3d transition metals, The Journal of Chemical Physics, Vol.120, No.21(2004)
(18) Tian, N., Zhou, Z.Y., Sun, S.G., Ding, Y., Wang, Z.L.: Synthesis of Tetrahexahedral Platinum Nanocrystals with High-Index Facets and High Electro-Oxidation Activity, Science, Vol.316, No.5825, p.732-735(2007)
(19) 荒又明子：単結晶電極，燃料電池の電極触媒，北海道大学図書刊行会，p.56(2005)

■著　者■



坂 本 良 悟

燃料電池運転時における カソード面内酸素分圧分布の可視化計測

In-plane Visualization of Oxygen Partial Pressure Distribution on Cathode Side during Fuel Cell Operation

豊田将平* 岩澤力*
Shohei TOYOTA Chikara IWASAWA

要旨

燃料電池スタックの性能低下を抑制するための制御を構築するために，車載用の燃料電池セル面内における酸素分圧の分布を高解像度で可視化計測するシステムの開発をおこなった．酸素分圧の計測には，発電可視化アクリルプレートのガス流路に塗布した酸素感応試薬の蛍光強度変化を利用した．

本研究により，高電流密度における性能低下の主要因である材料抵抗上昇の分布予測が可能になった．また，その上昇を抑制するためには，カソード配管に残る酸素分圧を低く抑える制御が効果的であることを明らかにし，燃料電池自動車の出力低下を抑制する制御手法を構築した．

ABSTRACT

A system capable of visualizing and measuring the distribution of oxygen partial pressure in fuel cells during vehicle operation at a high level of resolution has been developed in order to help enable the creation of a method of control that would ameliorate the decline in fuel cell performance. Changes in the fluorescent intensity of an oxygen-sensitive reagent coating the gas flow paths of an acrylic plate designed for the visualization of generation were used to measure oxygen partial pressure.

The research discussed in this paper made it possible to predict the distribution of increases in the resistance of the materials employed in the fuel cell, which is the main cause of performance declines at high current densities. In addition, the research verified the effectiveness of applying control to reduce the partial pressure of the residual oxygen in the cathode tubes in reducing this increase in resistance, making it possible to develop a method of control that ameliorated the decline in output displayed by fuel cell vehicles.

1．まえがき

CO_2 や NOx などの自動車排ガス中に含まれる環境汚染物質による地球環境への影響や，将来的な化石燃料の枯渇に対応するために，クリーンかつ低燃費な自動車の開発が急務である．Honda は永続的なエネルギー循環型社会を目指し，化石燃料に頼らず水素を燃料とする燃料電池自動車の開発を進めてきた．

燃料電池とは，水素と酸素の電気化学反応によって電気を取り出す発電装置である．実際の反応は，式（1）に示すアノード極の水素酸化反応と式（2）に示すカソード極の酸素還元反応からなる．カソード極では副生成物として水を生成する．

アノード（An 極）：$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ （1）

カソード（Ca 極）：$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ （2）

Honda は低温時でも始動可能で小型軽量な固体高分子型燃料電池（polymer electrolyte fuel cell：PEFC）を用いた車両の開発を推進している[1]．

Fig. 1 に PEFC の概略図を示す．PEFC は，高分子電解質膜（polymer electrolyte membrane：PEM）の両側に触媒層（catalyst layer：CAT）とガス拡散層（gas diffusion layer：GDL）を配置した膜電極接合体（membrane electrode assembly：MEA），およびガスや冷媒の流路が形成されたセパレータで構成される．

これらの最少構成で形成されたものをセルと呼ぶ．また，セルを複数積層したものをスタックと呼ぶ．PEM は，式（1）の水素の酸化反応によって生じたプロトン（H^+）の伝導を担う．PEM の両側に設置した CAT は，それぞれ式（1）と式（2）の反応を担う．GDL は，CAT への反応ガスの拡散と通電機能を担う．セパレータは，アノードとカソードの各電極への反応ガスの供給と隣接するセル同士の

＊四輪 R&D センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_15

反応ガスの隔離，冷媒の供給による冷却機能，およびCATからの通電機能を担う．

車載用の燃料電池では，燃料電池システム全体の小型軽量化に向けて，より高出力かつ高効率な発電を実現する技術が必要となっている．

燃料電池は発電中に，Fig. 2に示す三つの分極損失によってエネルギーロスを生じる．

三つの分極としては，触媒活性に起因する活性化分極，プロトン伝導と電子伝導に起因する抵抗分極，反応ガスの輸送抵抗に起因する濃度分極がある．特に抵抗分極と濃度分極は高電流密度において大きく増加する．したがって高電流密度での高効率な運転を実現するためには，抵抗分極の低減と濃度分極の低減が要求される．

濃度分極の低減に向けては，カソード電極の材料設計と酸素濃度制御が必要である．これらの検討のためには電極中の酸素を計測するセンサが必要である．そのセンサとしては光ファイバ型酸素センサ内蔵MEA[2]が適しており，すでに計測手法が確立している．本稿では残る課題である抵抗分極の低減手法に着目した．抵抗分極の低減に向けては，その主要因であるPEM抵抗上昇を抑制する必要がある．PEMは水素と酸素が混在する燃料電池の環境にさらされると，プロトン伝導を担うスルホン基が脱離して抵抗上昇することが知られている[3]．燃料電池自動車の開発では車両寿命を考慮し，PEM抵抗上昇を抑制するシステム制御を取り入れている．制御の構築にあたっては燃料電池スタック内のガス混在環境を正しく把握することが重要である．

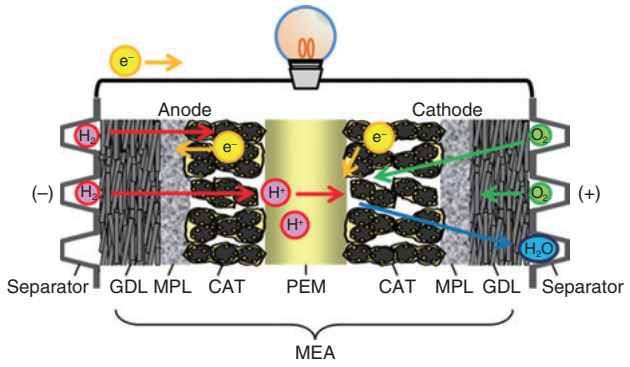


Fig. 1　Schematic image of PEFC

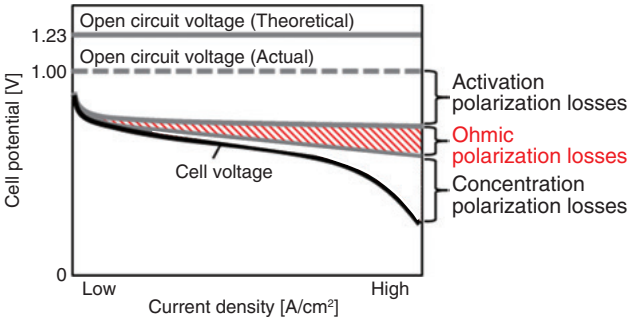


Fig. 2　I–V curve and various polarization losses of operating fuel cell

2．酸素分圧可視化の必要性

2.1. 水素と酸素の燃焼反応によるPEM抵抗上昇

一般的に知られているPEM抵抗上昇のメカニズムをFig. 3に示す．PEMは含水材料であるため，PEM中をわずかにガスが透過する．すると一部の水素と酸素がCAT上で直接燃焼し，さらに一部の副生成物としてOHラジカルを生じる[4]．OHラジカルがPEMの高分子共有結合に接触して置換反応を起こすと，プロトン伝導を担うスルホン基を含む分子構造が脱離し，PEM抵抗が上昇する[5]．

水素と酸素の燃焼反応量を把握し，各種加速因子を考慮することでPEM抵抗上昇を予測することができる．本稿では燃焼反応により消費された水素の物質量を燃焼反応量と定義する．燃焼反応量とPEM抵抗上昇の関係は，PEMに用いる高分子材料の分子構造によって異なるため，実験によってその関係を導いている．水素と酸素を供給してPEMの化学劣化のみを評価する耐久試験から得られる燃焼反応量とPEM抵抗の関係をFig. 4に示す．燃焼反応量の増加に伴いPEM抵抗が上昇する．

燃焼反応量は各時間における燃焼反応速度を積分することで導出する．燃焼反応速度は主に水素分圧，酸素分圧，温度に依存するため，これをマップ化することで燃料電池自動車運用中の燃焼反応量を把握することができる．燃焼反応速度のデータは実機セルを用いて取得している．実際のマップ例をFig. 5に示す．化学反応速度論に従い，反応種の分圧と反応系の温度が高いほど燃焼反応速度が速くな

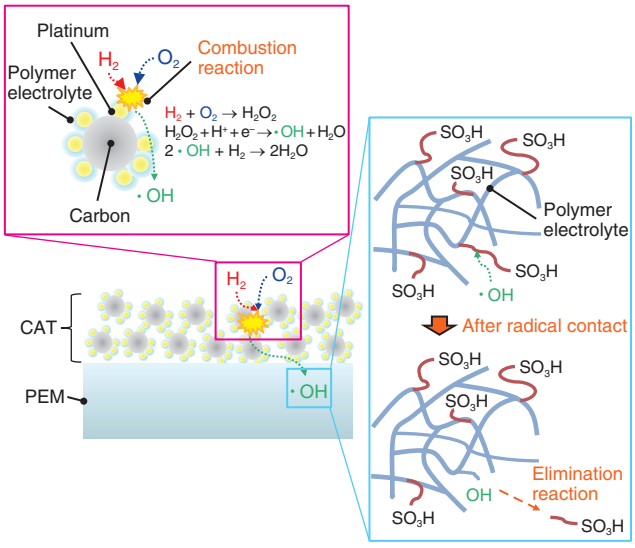


Fig. 3　Mechanism of increase in PEM resistance following combustion reaction of hydrogen and oxygen

る様子がわかる．燃料電池自動車運用中の水素分圧，酸素分圧，温度を把握し，この燃焼反応速度マップから燃焼反応量を導出することにより，PEM 抵抗上昇を予測することができる．

2.2. 燃料電池自動車の頻度耐久試験と燃焼反応量

燃料電池自動車の開発においては，車両寿命を考慮してスタック性能を保証するために，一般使用環境における運転頻度を模擬した頻度耐久試験を実施している．頻度耐久試験において，起動時や発電時などの条件制御中はスタック環境を把握できるためシミュレーション精度が高く，燃焼反応量の導出技術が確立している．一方，一般走行の大部分を占める制御停止状態（ソーク状態）においては，スタック環境を把握するために複雑な反応拡散方程式を含む非線形シミュレーションを解く必要があり，燃焼反応量の導出精度が低い．ソーク状態になると，膜透過係数の高い水素がアノードからカソード発電面へ即座に到達すると同時に，カソード発電面に残存する酸素が消費されるため，カソード面は一様に水素と窒素で満たされる．その後カソード配管に残存する酸素が徐々にカソード発電面へ到達する．この時の酸素分圧分布は，カソード配管に残存する酸素の拡散流入，および CAT 上でのガス消費が絡み複雑な挙動をするため，燃焼反応量の予測が容易ではない．したがって頻度耐久試験中の燃焼反応量を精度良く把握するためには，燃料電池セル面内の酸素分圧を計測する技術が必要である．

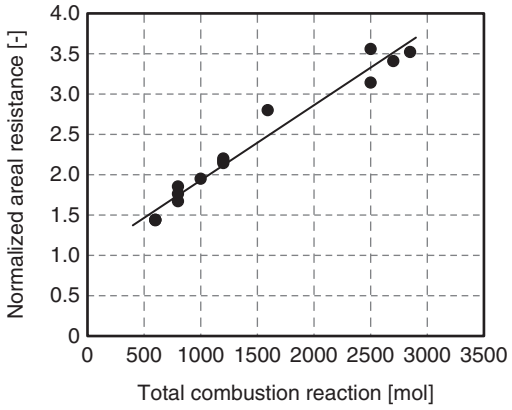


Fig. 4 Relationship between combustion reaction and PEM areal resistance

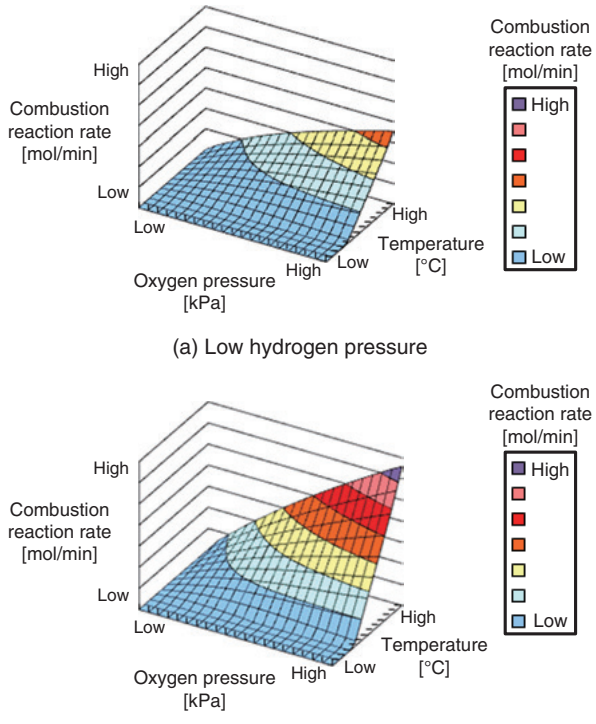


Fig. 5 Examples of combustion reaction rate maps

3．ねらい

本稿では，燃料電池スタックにおける性能低下の低減を目指して以下の二つのねらいを定めた．実機セル面内における酸素分圧の分布を計測するシステムを開発し，実際の酸素分圧の分布に基づいて，ソーク状態の燃焼反応量分布を導出することを目標とした．また，ソーク状態の酸素分圧の分布に着目して，PEM 抵抗の上昇を抑制する制御手法を構築することを目標とした．

4．LED 誘起蛍光式酸素分圧計測の原理

4.1. 酸素分圧計測手法の選定

一般的な酸素濃度計測手法には，濃淡電池の起電力を利用したジルコニアセンサ，酸素の常磁性を利用した磁気式，質量数の違いを利用した質量分析式などがある．本稿では，実機運転条件下の面内酸素分圧の分布を計測するためにシステムの要求性能を定めた．それは，高解像度の画像計測が可能なこと，サンプリングによるガス消費が無いこと，高湿度環境下での計測が可能なこと，電気絶縁性および防爆性が確保できていること，過渡応答性が速いことであり，この五つの要求性能を満たす計測手法として，酸素感応試薬を用いた LED 誘起蛍光（LED Induced Fluorescence：LED-IF）式酸素分圧可視化システムを採用した[6]．レーザ光源ではなく LED 光源を採用することにより，光子密度を小さくした．これにより，面積の大きい実機セル模擬のサンプルに向けてより均一な光を照射することと，安全な環境下で計測することを可能にした．

4.2. 酸素感応試薬

酸素感応試薬として Pt-ポルフィリン錯体を採用した．Pt-ポルフィリン錯体は，バンドギャップに相当する光を吸収すると励起され，蛍光を発する．Pt-ポルフィリン錯

体の周囲に酸素分子が存在すると，蛍光エネルギーの一部が酸素分子の励起エネルギーとして利用される．したがって，酸素分圧が高いほど蛍光強度が減少する[7]．今回選定した酸素感応試薬の吸収波長領域と蛍光波長領域の関係をFig. 6 に示す．吸収波長領域と蛍光波長領域が離れているため，計測波長領域を制限することで反射光や散乱光を除去し，試薬由来の蛍光のみを選択的に捉えることができる[7]．

酸素感応試薬の塗布面に励起光を照射し，各酸素分圧環境下における蛍光強度を計測することで，検量線が得られる．これを用いて蛍光強度を酸素分圧に変換することができる．実際に取得した検量線の例を Fig. 7 に示す．

燃料電池の発電環境下では水が生成されるため，試薬が水で洗い流されないように固定する必要がある．今回採用した酸素感応試薬溶液は有機バインダを含有している．これにアニーリング処理を施すことで塗布面に強固に固定されるため，燃料電池の発電環境に適している．また，高湿度運転条件下では結露によって試薬塗布面に曇りが生じ，乱反射の影響で計測結果が乱れる場合がある．この影響を取り除くために，試薬塗布表面上へさらに親水剤を重ねて塗布する手法を採用した．

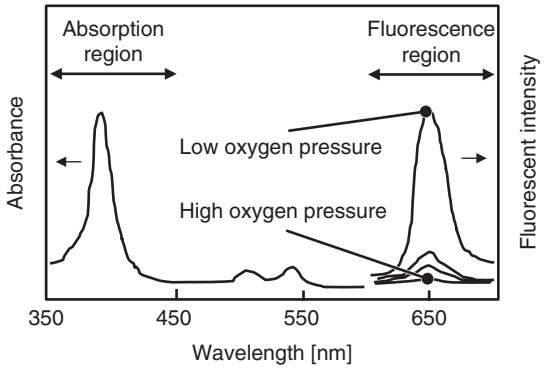
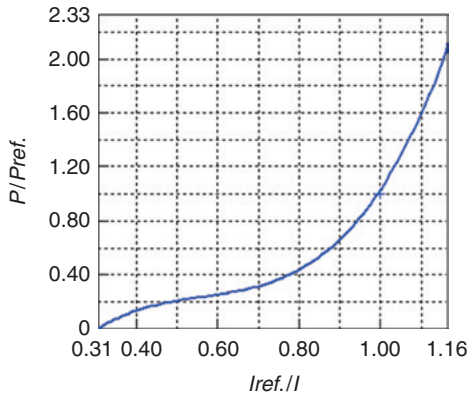


Fig. 6　Luminescence property of oxygen-sensitive reagent



I: Intensity
P: Oxygen pressure

Fig. 7　Example of calibration curve

4.3. 計測装置構成

今回開発した LED-IF 式酸素分圧計測システムは，外乱光の影響を排除するために暗室環境で計測するシステムである．システムの概略図を Fig. 8 に示す．

酸素感応試薬を塗布したサンプルに向けて，波長 405 nm の LED 光を照射する．LED 光の照射範囲はレンズによって調節する．励起状態となった酸素感応色素からは波長 650 nm の蛍光が放出される．同時にサンプル周囲からは LED 光由来の反射光や散乱光が発せられる．酸素分圧は蛍光強度によって計測するため，光学フィルタによって蛍光波長領域のみをカメラに取り込む構成としている．

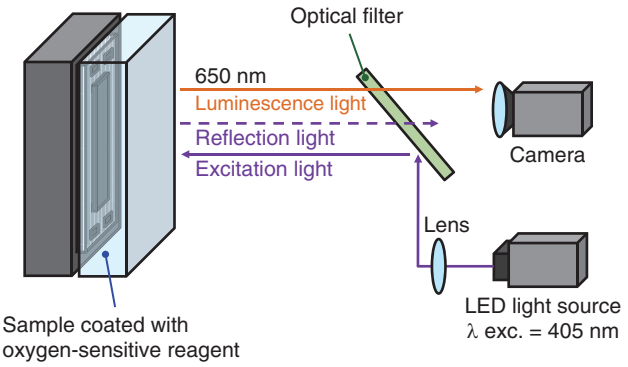


Fig. 8　Oxygen partial pressure distribution measurement system

5．実験と結果

5.1. 発電可視化アクリルプレート

評価セル形状は FCX クラリティに搭載しているものと同じものを用いた．評価セルの概略図を Fig. 9 に示す．

LED-IF 方式によってカソード流路の酸素分圧可視化をおこなうためには，カソード流路に酸素感応試薬を塗布すること，および試薬が発する蛍光をカメラで捉えることが必要である．これを実現するために，実機カソード流路形状を基にした発電可視化アクリルプレートを製作した．高い透明度を有し，計測に影響する蛍光剤を含まないアクリルを材料として選定した．発電可視化アクリルプレートの概略図を Fig. 10 に示す．

高温高圧の実機発電環境を再現するために，アクリルプレートの熱膨張と機械応力を考慮し，アクリルの厚みや締結構造を設計した．

櫛歯形状の集電体を採用することにより，実機同様に面内均一な発電を可能にした．櫛歯電極の可視化面側は酸素分圧の計測対象領域ではなく，ここに LED 光が照射されると乱反射によって周囲の蛍光強度に影響を及ぼす．この乱反射の影響を抑えるため，集電面以外の部分は黒色塗料でコーティングした．

酸素感応試薬はカソード流路中のアクリルプレート壁面にスプレーコーティング法によって塗布した.

5.2. LED-IF 式酸素分圧可視化システムの動作確認

実機同様の発電環境下において, LED-IF 式酸素分圧可視化システムと発電可視化アクリルプレートの酸素分圧の分布を捉える機能を確認するために, 発電時における酸素分圧分布のストイキオメトリ依存性を取得した.

ストイキオメトリとは, 式(3)より計算される値であり, 燃料電池の反応に必要なガス量が過不足無く供給される場合を1として表現する相対値である.

ストイキオメトリ＝供給ガス量／反応必要ガス量 (3)

ストイキオメトリが低い場合はカソード流路下流で酸素残量が少なく, 残存ガスは主に窒素で構成されるため, 酸素分圧は小さくなる. ストイキオメトリが高い場合はカソード流路下流で酸素分圧が高くなる. Fig. 11 にその計測結果を示す.

カソード入口から出口に向けて酸素分圧が低下する様子を確認した. また, ストイキオメトリが高いほどカソード出口の酸素分圧が高くなる様子を確認した.

上記計測結果の確からしさを検証するために, カソード出口酸素分圧に着目して, 発電による酸素消費, 作動圧力, 圧力損失を考慮した計算結果と酸素分圧の計測結果を比較した. その結果を Fig. 12 に示す.

計算結果と計測結果が良く一致し, 本稿のねらいに対して十分な精度を確認した. なお, 検量線の取得方法や画像ノイズ処理手法を改良することで, さらなる計測精度の向上が期待できる.

以上の結果より, LED-IF 式酸素分圧可視化システムによって, 燃料電池発電時における酸素分圧の分布を計測できることを確認した.

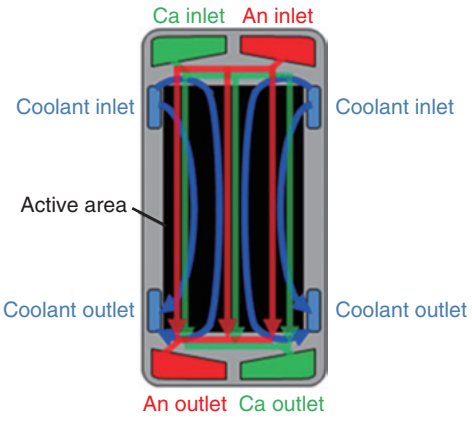


Fig. 9 Schematic image of cell structure

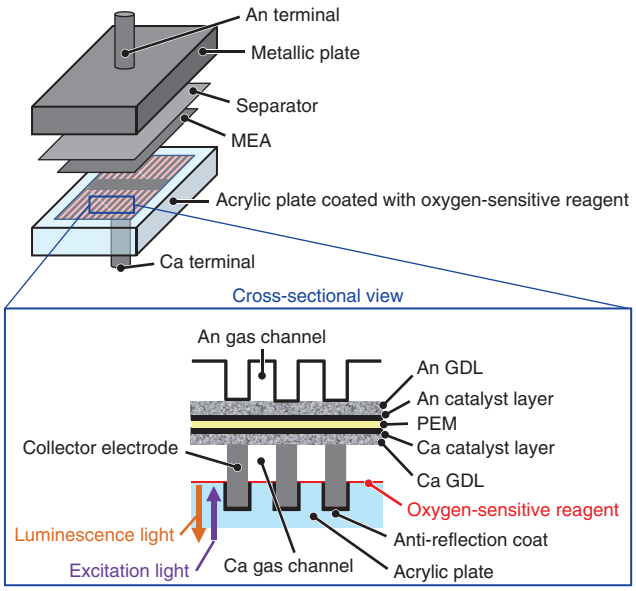


Fig. 10 Transparent acrylic plate for visualization of oxygen pressure

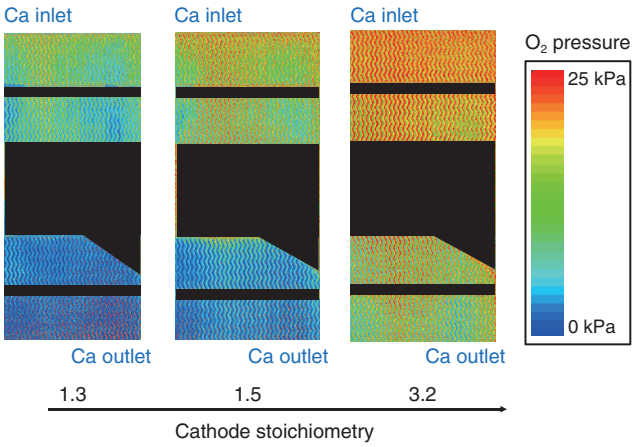


Fig. 11 Change in oxygen pressure distribution with cathode stoichiometry

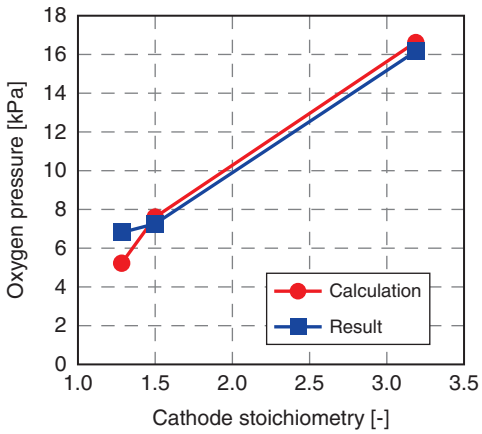


Fig. 12 Comparison of calculation and measurement results for Ca outlet oxygen pressure during generation with cathode stoichiometry

5.3. ソーク状態の酸素分圧分布計測

燃焼反応量導出精度の低いソーク状態の燃焼反応量分布を実測によって明らかにするために，車両運転環境を模擬して酸素分圧分布計測をおこなった．実験手順を Fig. 13 に示す．

発電によって MEA の含水状態を整えた．この時のカソード面内はエアーで満たされる〔Fig. 13 図中 (1)〕．カソード配管の酸素分圧を調整し、運転停止制御を模擬した．この時カソード面内は一様に所定の酸素分圧となる〔Fig. 13 図中 (2)〕．アノードとカソードのガス供給を停止し，ソーク状態を模擬した．水素は膜透過係数が高いため，ソーク開始後にカソード側へ移動し酸素とただちに反応する．したがってソーク開始直後のカソード面内は水素と窒素の混在ガスで満たされる．その後浮力の影響で主にカソード出口連通孔から酸素が流入し，水素と酸素のガス混在が起こる．この混在環境を酸素分圧分布の計測対象とした〔Fig. 13 図中 (3)〕．上記手順に従い，従来の運転停止制御を模擬した際のソーク状態における酸素分圧の分布を確認した．その結果を Fig. 14 に示す．

カソード出口連通孔から流入する酸素の分圧分布の様子を高解像度で確認した．この時，カソード出口連通孔近傍の CAT 上では水素と酸素が共存しており，燃焼反応によってラジカルが生成すると同時に PEM 抵抗が上昇すると予想される．また，酸素分圧の高い部位ほど燃焼反応量が多くなり，PEM 抵抗が大きく上昇すると予想される．

これらの予想を検証するために，酸素分圧と水素分圧と温度の計測結果を用い，燃焼反応速度マップからソーク状態における部位ごとの燃焼反応量を導出した．これと，ソーク状態を模擬した耐久試験から得られた部位ごとの PEM 抵抗上昇との関係を Fig. 15 に示す．

この結果によって，酸素分圧分布のデータを用いて PEM 抵抗上昇の分布を予測できることを実証した．

5.4. 運転停止制御の最適化と頻度耐久試験結果

5.3. 節の結果より，ソーク状態における PEM 抵抗上昇の主要因は，カソード出口連通孔からの酸素拡散であると想定される．これを検証するために，カソード配管に残存する酸素分圧を低減する操作を適用し，ソーク状態における酸素分圧分布の計測をおこなった．その結果を Fig. 16 に示す．

カソード配管における残存酸素分圧を小さくすると，CAT 上に到達する酸素分圧が小さくなる様子が明らかになった．

この結果より，頻度耐久試験中におけるカソード配管の残存酸素分圧を低くする制御を構築することによって，燃焼反応量が低減され，PEM 抵抗上昇が抑制されると予測で

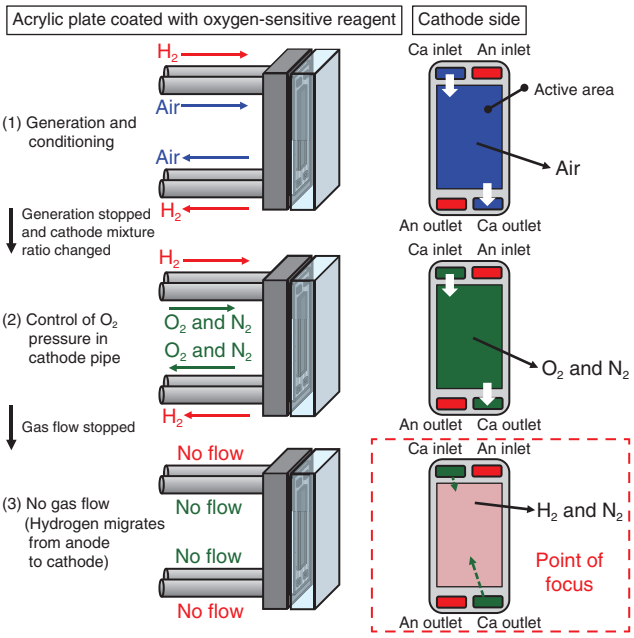


Fig. 13 Experimental procedure for measurement of oxygen pressure distribution after cessation of fuel cell operation

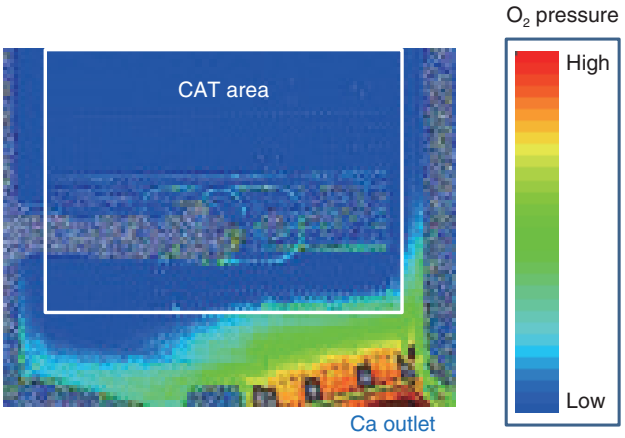


Fig. 14 Oxygen pressure distribution following cessation of fuel cell operation

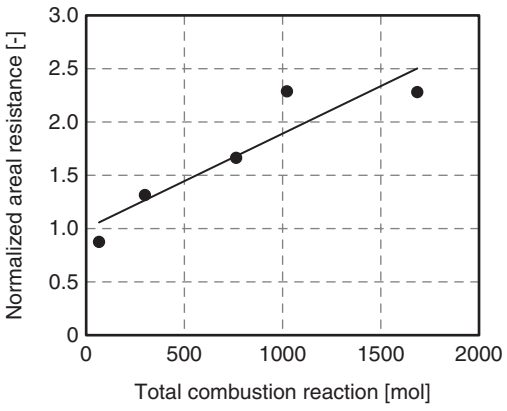


Fig. 15 Relationship between combustion reaction and PEM areal resistance derived from oxygen pressure distribution

きる．これを実証するために，従来制御を適用した場合と，カソード配管における残存酸素分圧を低減する新規制御を適用した場合の頻度耐久試験を実施し，耐久後のPEM抵抗上昇分布の比較をおこなった．その結果をFig. 17に示す．

この結果は，LED-IF式酸素分圧計測システムによって得られたCAT上の酸素到達部位ではPEM抵抗が上昇するという予測と一致した．

以上より，今回開発したシステムを用いてソーク状態におけるPEM抵抗上昇分布を予測できること，およびカソード配管の残存酸素分圧を低減する制御を適用することでPEM抵抗上昇を低減できることを実証した．

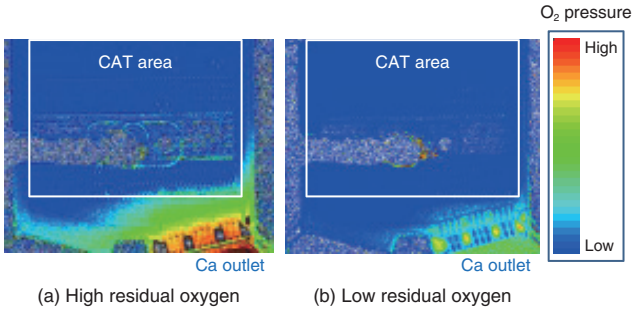


Fig. 16 Comparison of oxygen pressure distribution due to residual oxygen pressure in cathode pipe

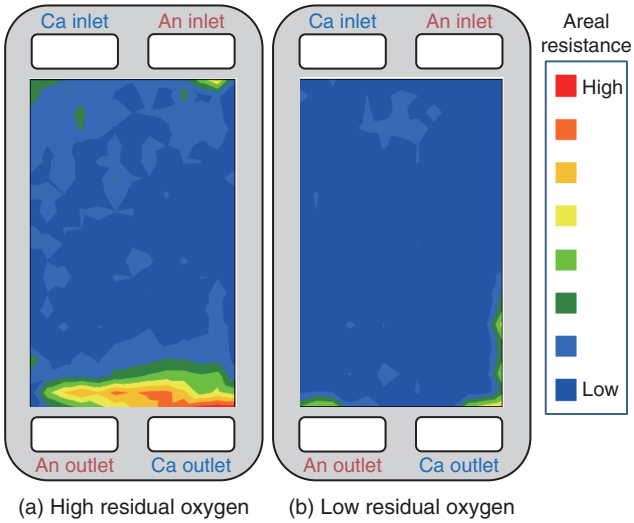


Fig. 17 Comparison of distribution of increase in PEM resistance due to residual oxygen pressure in cathode pipe

6．まとめ

今回開発したLED-IF式酸素分圧計測システムを，燃料電池自動車の運転停止制御の構築に適用し，以下の結果が得られた．

（1）実機サイズセル発電環境における，酸素分圧の分布計測を可能にし，燃焼反応量分布の導出精度を高めた．

（2）燃料電池自動車のソーク開始時に，カソード配管に残存する酸素分圧を低くする制御を適用することで，PEM抵抗上昇を抑制できることを実証した．

参考文献

（1）斉藤信広，菊池英明，中尾靖宏:FCXクラリティ搭載の新燃料電池スタック，Honda R&D Technical Review, Vol. 21, No. 1, p. 15-22

（2）毛里昌弘：燃料電池カソード電極近傍の酸素濃度計測用酸素センサ内蔵MEAの開発，Honda R&D Technical Review, Vol. 26, No. 2, p. 181-189

（3）Qiao, J., Saito, M., Hayamizu, K., Okada, T.: Degradation of Perfluorinated Ionomer Membranes for PEM Fuel Cells during Processing with H_2O_2, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 153, p. A967-A974 (2006)

（4）Coms, F. D.: The Chemistry of Fuel Cell Membrane Chemical Degradation, ECS Transactions, Vol. 16, p. 235-255 (2008)

（5）Collier, A., Wang, H., Yuan, X. Z., Zhang, J., Wilkinson, D. P.: Degradation of polymer electrolyte membranes, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 31, Issue 13, p. 1838–1854 (2006)

（6）Inukai, J., Miyatake, K., Takada, K., Watanabe, M., Hyakutake, T., Nishide, H., Nagumo, Y., Watanabe, M., Aoki, M., Takano, H.: Direct Visualization of Oxygen Distribution in Operating Fuel Cells, Angewandte Chemie International Edition, Vol. 47, Issue 15, p. 2792-2795 (2008)

（7）Asai, K., Amao, Y., Iijima, Y., Okura, i., Nishide, H.: Novel pressure-sensitive paint for cryogenic and unsteady wind-tunnel testing, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 16, p. 109-115 (2002)

■著　者■



豊田将平



岩澤　力

液封マウント振動伝達予測手法

Prediction Method for Vibration Transmission of Hydraulic Engine Mount

深 澤 将 弘* 村 尾 剛 史** 雲丹亀 真 剛*
Masahiro FUKAZAWA Tsuyoshi MURAO Shingo UNIGAME

要 旨

エンジン音，ギヤ音，モータ音等，走行時に発生する中高周波帯騒音の低減のために，液封構造エンジンマウントの振動伝達関数予測技術を構築した．手法としては，まず大変形したゴムの動ばね特性を予測し，次に内封された液体と構造の連成解析をおこなうことで，液封マウントのモデリングをおこなった．さらに完成車状態のモデルを作成し，モード合成法を用いて，エンジンから車体への振動伝達関数を予測した．その結果，共振ピークにおける周波数誤差 4%，応答レベル誤差 3 dB の精度で伝達関数を予測することができた．また，モデリング手法や計算条件の工夫により，従来は約 104 時間要していた解析時間を約 35 時間に削減することができた．本手法により，試作車を用いない開発初期においても，シミュレーションモデルにて液封マウント特性の先行検討が可能となった．

ABSTRACT

A vibration transfer function predictive technique for hydraulic engine mounts was devised in order to reduce medium- and high-frequency band noise (e.g. engine noise, gear noise, motor noise) while the vehicle is in motion. The procedure was to model a hydraulic mount, beginning by predicting the dynamic spring characteristics of highly deformed rubber and then performing coupled analysis of the structure and the fluid sealed therein. Then, the vehicle model was created and a mode synthesis method was used to predict the vibration transfer function from engine to body. As a result, it was possible to predict the transfer function with a precision of less than 4% frequency error and 3 dB response level error at the resonance peak. It also became possible to cut analysis time from the typical 104 hours approximately to only about 35 hours by innovating the modeling technique and calculating conditions. This technique enables advance studies of hydraulic mount characteristics on a simulation model even during the initial stages of engine development, before a prototype vehicle is available.

1．まえがき

近年，開発コスト削減および開発期間短縮のため，試作車を用いない開発初期段階での仕様見極めが必須となっている．振動騒音領域においても，開発の先行段階において試作車を必要とせずに性能を評価し仕様を検討することが求められている．

走行時の振動騒音としては，約 200 Hz から 1000 Hz 程度の中高周波領域におけるエンジン音，ギヤ音，モータ音等の騒音低減が重要な課題[1),(2)]である．騒音伝達の経路としてはパワートレインの振動が，空気伝播にて乗員の耳に伝達する経路と，固体伝播により伝達する経路があり，エンジンマウントが固体伝播の主たる経路となることが多い．そのため中高周波騒音低減には，エンジンマウントの振動伝達特性改善が必要[(2)]となる．

本稿では，パワートレインと車体を液封マウントにて結合させた完成車状態でのシミュレーションモデルを用いて，振動伝達関数を予測する手法を考案した．その手法の概要と予測精度を確認した結果について報告する．

2．課題とねらい

液封構造エンジンマウントは，メインマウントとして採用されることが多い．しかし，現状 100 Hz 程度までの

＊ 四輪 R&D センター
＊＊山下ゴム株式会社

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_16

低周波領域の振動伝達関数予測技術はあるが[3]，中高周波帯域に関する報告はない．その課題として次の三つが考えられる．

（1）エンジンマウントのゴムはパワートレイン荷重を受け変形することが多く，その状態での動ばね特性を予測しなければならない

（2）液封マウントのモデリングにおいて液体と構造の連成手法が構築されていない

（3）液封マウントは構成部品が多く，モデル要素数も多くなり解析時間を要する

特に液体と構造の連成と，解析時間が長いということは本稿で対象とする液封マウント特有の課題である．本稿では，上記三つの課題に対して技術構築することをねらいとする．

3．液封マウント動ばね特性予測手法の構築

Fig. 1 に示すとおり，制振ゴムのみを用いたマウントシステム（以下，コンベンショナルマウント）と同様に，液封マウントは大別してエンジンブラケット，マウント部，ホルダの三つのコンポーネントで構成されている．液封マウントは，コンベンショナルマウントシステムに対し低周波域の乗り心地性能を向上させる目的で用いられることが一般的である．内部の液体がオリフィスを通過する際の粘性減衰により，低周波域の振動減衰を得ている．

液封マウントを用いた完成車の振動伝達関数を予測するためには，液封マウント単体の動ばね特性を予測可能とする必要がある．

3.1. 制振ゴムの動ばね特性予測

Fig. 1 に示すとおり液封マウントはコンベンショナルマウントに対し，部品点数が多い．エンジンブラケットから入力された起振力は，制振ゴムを伝わりホルダに伝搬する．また，完成車搭載時にはパワートレインの荷重を受け，制振ゴムが押しつぶされる．これらをふまえ，パワートレイン荷重による変形を考慮した制振ゴム単体の動ばね特性を予測する手法を開発した．

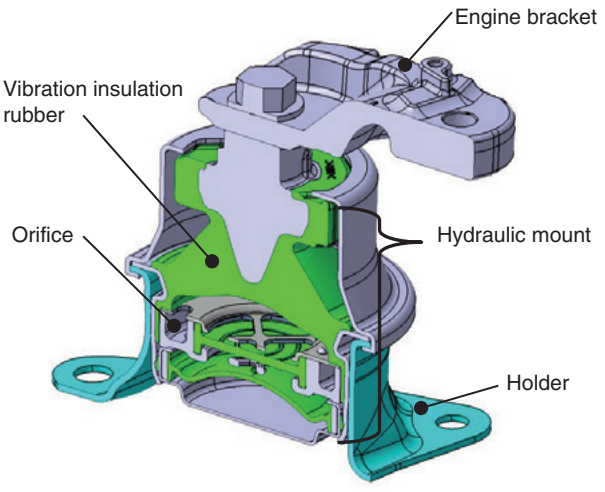


Fig. 1　Hydraulic mount systems

3.1.1. パワートレイン荷重による制振ゴムの変形予測

パワートレインの荷重を受けた制振ゴムは，5 mm 前後の大変形を起こすことが多い．大変形を受けるゴムの応力とひずみの関係は非線形性を持つ．これを有限要素法にて再現するために，式（1）に示すひずみエネルギー密度関数 W の Mooney-Rivlin モデル[4]を用いた．

$$W = C_{10}(I_1-3) + C_{01}(I_2-3) + C_{11}(I_1-3)(I_2-3) + C_{20}(I_1-3)^2 + C_{30}(I_1-3)^3 \quad (1)$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_3^2\lambda_1^2$$

$$I_3 = \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2 = 1$$

C_{ij} : deformation tensor　　(i=0,1,2,3; j=0,1)

λ_i : stretch ratio　　(i=1,2,3)

このモデルに使用する係数 C_{ij} は制振ゴムの材料別，硬度別におこなった二軸伸張試験結果から得ている．

Fig. 2 にシミュレーションによる荷重の有無での制振ゴムの変形状態と，制振ゴムの静ばね特性の解析結果を示す．解析モデルはソリッド要素で作成し，解析結果は計算時間 30 分で得ている．解析精度は，機種によって規定されるパワートレイン荷重において目標± 5％以内に対し -2.6％で達成できている．以上より，係数 C_{ij} のデータベース化と上記モデル手法により，開発初期段階で変形形状や静ばね特性を予測可能とした．

3.1.2. パワートレイン荷重による変形を考慮した動ばね特性の予測

制振ゴムは共振周波数の入力を受けると動ばね定数が上がる．これをサージングとよぶが，エンジンマウントの振

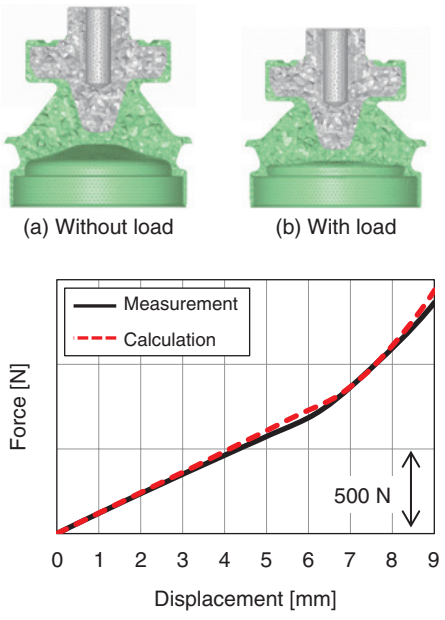


Fig. 2　Static spring analysis accuracy

動伝達において，このサージングの予測は必須である．

制振ゴムのヤング率や構造減衰係数は材料や硬度によって変わる．ゴムは応力とひずみの関係が非線形性の特性を持つために，与えるヤング率を決定づけることが困難となる．実現象に応じたひずみ量でヤング率を決定しなければ，サージング周波数は実現象とかい離することが予測される．そこで以下の二つの方法を考えた．

i　ひずみ分布に応じてヤング率を与える方法

ii　ゴム形状，硬度，材料に応じた一律なヤング率を与える方法

パワートレインの荷重を受け変形した制振ゴムは，Fig. 3 に示すひずみ分布が生じる．

i の方法は 3.1.1. 項で得られたひずみ分布に応じて，ヤング率を与える手法である．ii の方法は，ヤング率と構造減衰係数を制振ゴムモデルに一様に与える手法である．Fig. 3 に示す A 点と B 点は，3.1.1. 項で得られる最小ひずみと最大ひずみの観測点を表す．Fig. 4 は応力とひずみの関係であり，その傾きがヤング率となる．A 点と B 点の傾きの差は，同一ゴム硬度では本稿にて対象とするエンジンマウントにおいて小さく，Fig. 4 に示す応力とひずみの関係は線形と見なせると考えた．

しかしながら，ゴム硬度の 45 度と 55 度による傾きの差は A 点で 54.5%，B 点で 55.7% と無視できないため，ゴム硬度別にデータベースを作成し，全要素に一様なヤング率を与えることで，同等の計算精度が得られると考えた．データベースをゴム硬度のみでなく，ゴムの形状，材料ごとに作成し，また構造減衰係数も対象として作成した．この ii の方法では，新たにデータベースを設ける必要はあるが，i の方法と精度差 2.8% 以内と同等の計算精度を得ながら，計算時間が 10 分程度で済むという利点がある．以上の検討結果から ii の手法を用いることとした．

次に ii の方法のヤング率と構造減衰係数のデータベース作成方法について詳細を述べる．動ばね特性測定方法は，Fig. 5 に示すとおり，制振ゴムを加振器に固定し，完成車で起きるパワートレイン搭載時にかかる初期ひずみを再現する．その後，エンジンブラケットに一定の加速度で強制加振を与え周波数を一定の間隔で上昇させる．シミュレーションモデルにおいても制振ゴムに実測と同様の固定を剛体要素で再現し，エンジンブラケットから実測同様の入力を与えた (Fig. 6)．以上より Fig. 7 に示すとおり，サージングにて目標精度である周波数± 3%，動ばねレベル± 10% 以内を満たすヤング率と構造減衰係数が得られた．

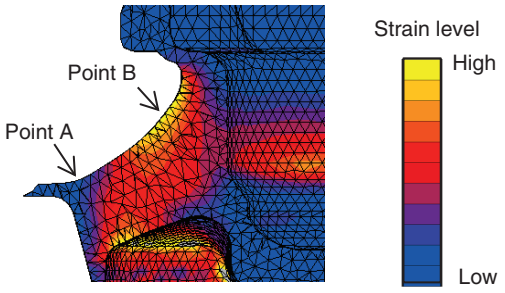


Fig. 3　Distribution of strain

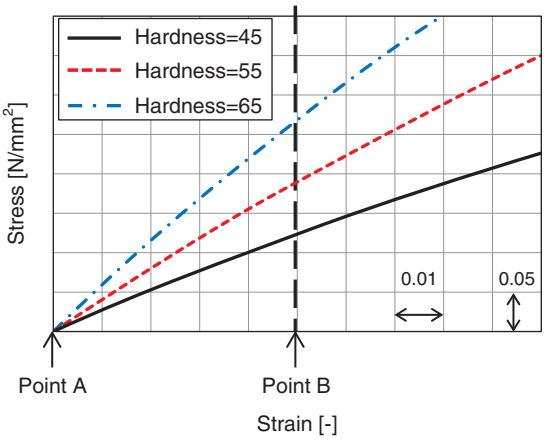


Fig. 4　Stress-strain characteristics

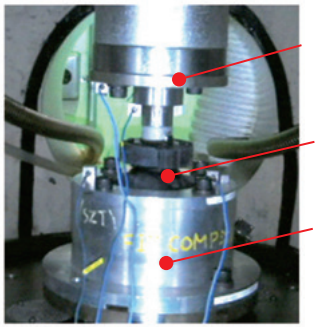


Fig. 5　Test setting

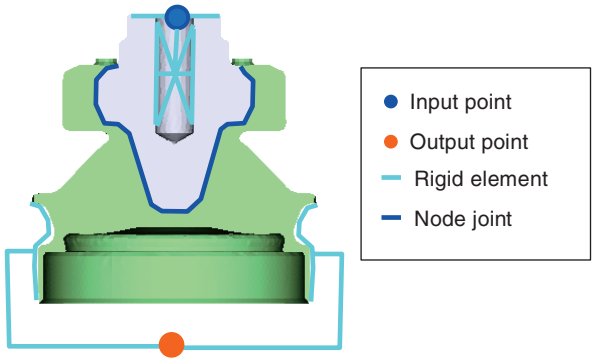


Fig. 6　FE model

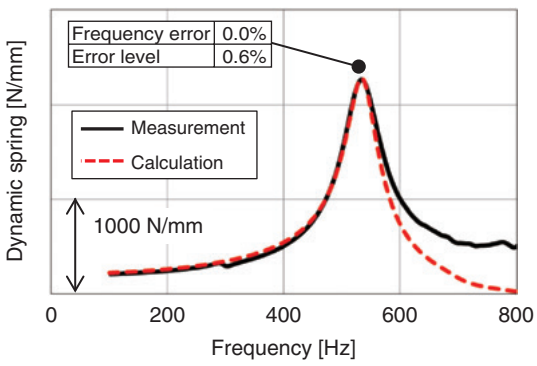


Fig. 7　Accuracy of dynamic spring analysis

Fig. 8, Fig. 9 に本稿で作成した材料データベースの内の一例として，Fig. 6 に示す円錐型マウントの耐熱超低動倍材のデータベースを示す．また，Fig. 10 にデータベースから設定した値を用いた，他の機種での汎用性検証結果を示す．いずれも目標精度である周波数± 3%，動ばねレベル± 10% 以内を満たす結果が得られた．これにより開発初期段階で制振ゴムの形状，硬度，材料が決まれば，ヤング率と構造減衰係数を推定することができるようになった．以上の手法をもって開発初期段階でパワートレイン荷重による変形を考慮した，制振ゴム単体の動ばね特性を予測可能となる．

3.2. 液封マウントコンポーネントの動ばね特性予測

液封マウントは Fig. 1 でも示したとおり，マウント内部に非圧縮性の液体が封入されている．これを精度よく再現するためには液体と構造の連成解析が必要である．中高周波帯域であればマウント入力は微振幅であることから，液体の流れは無いものと考え式（2）を前提条件とし，式（3）に示す液体と構造の圧力による連成解析で表現した．

$$\rho \ddot{u} = -\nabla p \qquad (2)$$

ρ: density
$\ddot{u}$: acceleration
p : pressure

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ -A^T & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_s & 0 \\ 0 & B_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & A \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_s \\ p_f \end{Bmatrix} \qquad (3)$$

M: mass, B: damp, K: stiffness, u: displacement
s: structure, f: fluid, A: boundary matrix, P: load

流体の体積弾性率 K_f は式（4）で定義される．

$$K_f = C^2 \rho \qquad (4)$$

C: speed of sound

まず液体構造連成解析が可能かを判断するため，メンブランを取り除いた供試品と解析モデルを用意した．メンブランとは Fig. 11 に示すとおり，マウント内部の液室を上下に隔てているゴム膜である．

実測方法は 3.1.2. 項の制振ゴム単体動ばね測定と同様に，動ばね試験機に供試品を取り付け，一定加速度で強制加振を与え周波数を一定の間隔で上昇させていく方法を用いた．解析モデルにおいてもメンブランを取り除いた内部構造を再現し，実験と同様の固定と入力を再現した．制振ゴムの材料値は，Fig. 8, Fig. 9 に示す実験と解析で相関の取れた値を用いた．また液体モデルは solid 要素で定義した．より精度の高い連成をさせるために液体モデル要素と構造物モデル要素の境界 node は，同一座標になるように設定した（Fig. 12）．液体要素の材料値は密度 ρ，減衰 B_f,

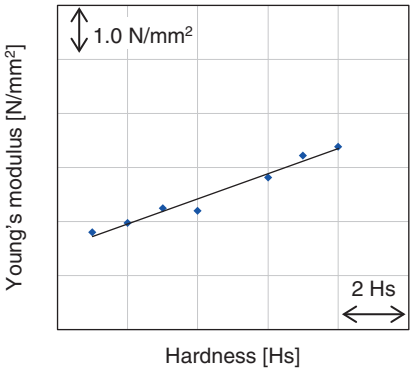


Fig. 8 Material database of Young's modulus

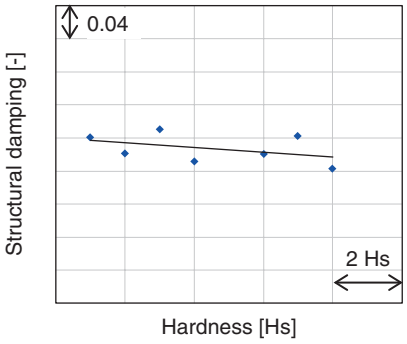


Fig. 9 Material database of structural damping

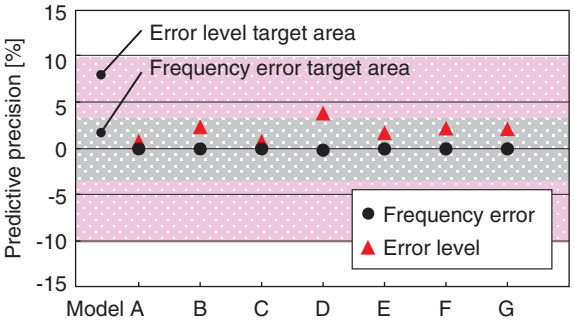


Fig. 10 General-purpose inspection of predictive technique

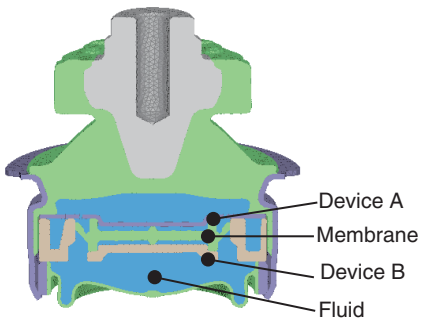


Fig. 11 Hydraulic mount

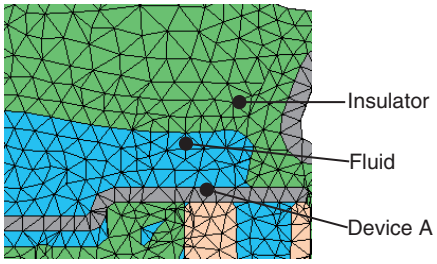


Fig. 12 Boundary condition of liquid model

音速 C を定義している．

Fig. 13 に実測に対する解析結果と 3.1.2. 項で計測した制振ゴム単体の動ばね特性を示す．200 Hz 付近のホール共振を再現でき，500 Hz 付近のサージング消失も再現できていることがわかる．ホール共振は制振ゴムが動的な加振を受け，制振ゴムから圧力を受けた封入液が，Fig. 11 に示すデバイス A に空いた穴によって共振する現象である．このホール共振について目標精度（周波数誤差± 10％，動ばねレベル誤差± 20％以内）を満たす結果が得られており，圧力による液体と構造の連成解析が可能になったといえる．

次に，メンブランを含む完成品の予測精度を検証する．まず，メンブランの液封マウント動ばね特性に与える影響を確認するため，三つのメンブラン硬度別品を用意し，前述の制振ゴム単体やメンブランを取り除いた供試品と同様に動ばね特性を測定した．測定結果を Fig. 14 に示す．前述のメンブランを取り除いた供試品では 200 Hz のホール共振の後，800 Hz 付近まではフラットであったが，このグラフからはメンブランがあることで 300 Hz から 500 Hz に共振が現れ，硬度が上がるにつれこの共振周波数が高くなっていくことがわかった．以上よりメンブランは液封マウント動ばね特性に影響を与えることがわかり，解析モデルにおいてもメンブラン共振を再現する必要がある．

メンブランと周囲の構造物の境界条件に関しては，実際の製品は剛結合ではなく，カシメ構造であるため，ばね要素で結合する手法を考えた．ばね定数は数種類のモデルによる結果から同定した値を用いた．

Fig. 16 と Table 1 がばね要素にてモデリングした結果である．計算時間は 2 時間程度に抑えたまま，ホール共振，メンブラン共振共に実測に対して目標精度（周波数誤差± 10％，動ばねレベル誤差± 20％以内）を満足することができた．以上より，開発初期段階からパワートレイン荷重による変形を考慮した液封マウントコンポーネントの動ばね特性を予測可能とした．

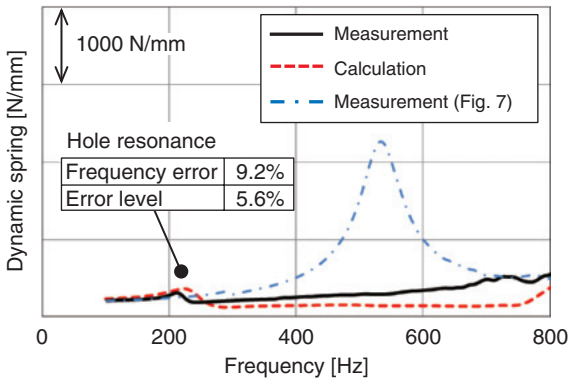


Fig. 13　Hydraulic mount without membrane model

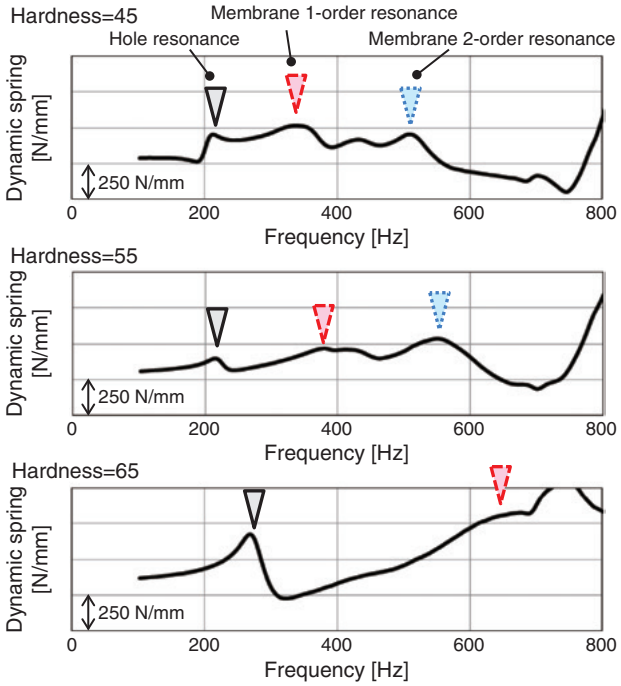


Fig. 14　Dynamic spring of hydraulic mount affected membrane hardness

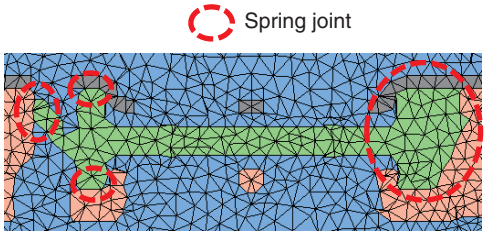


Fig. 15　Membrane mesh model

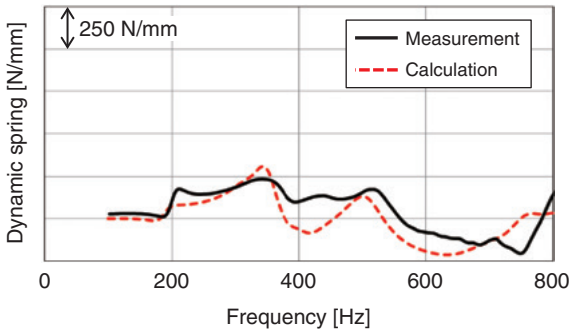


Fig. 16　Dynamic spring analysis result of hydraulic mount systems

Table 1　Accuracy of dynamic spring analysis

	Hole	Membrane 1-order	Membrane 2-order
Frequency error	-5.0%	0.9%	-3.1%
Error level	-19.7%	15.2%	-9.8%

4．完成車状態の振動伝達関数への適用結果

Fig. 17 で示す完成車搭載状態の，マウント振動伝達関数予測をおこなった．手法としては，既存の技術[2]であるブラケットおよびホルダなど金具類の計算モデルと，パワートレインおよび車体モデルを結合させた．なお制振ゴムは

パワートレイン荷重を受け大変形した状態となる．手法としては計算コスト削減の観点より，パワートレインモデルと車体モデルは，エンジンマウント伝達関数に影響する部品のみに簡素化した．さらにマウント締結点にてモード縮約をおこない，部分モード合成法[5]により結合することで，完成車モデルを構築した．

部分モード合成法により得られた，パワートレイン側締結点から車体側締結点までの伝達関数が Fig. 18 である．その結果，目標（実車測定結果に対しピーク周波数精度 ± 5%，ピークレベル精度 ± 3 dB）を満足する精度の結果（ピーク周波数精度 4%，ピークレベル精度 3 dB）が得られた．これにより約 200 Hz から 1000 Hz 程度の中高周波領域のエンジン音，ギヤ音，モータ音等の液封マウント振動伝達関数を，十分な精度で予測することができた．

また従来は初期のモデル作成時間に 56 時間，計算時間に 48 時間，計 104 時間要していた．これは複雑な構造のメッシングにかかる時間や，境界面に用いる結合要素等の増大により計算時間がかかるためであった．今回のモデリングや計算条件等の工夫により，モデル作成時間に 24 時間，計算時間に 11 時間，計 35 時間程度で作成が可能となった．

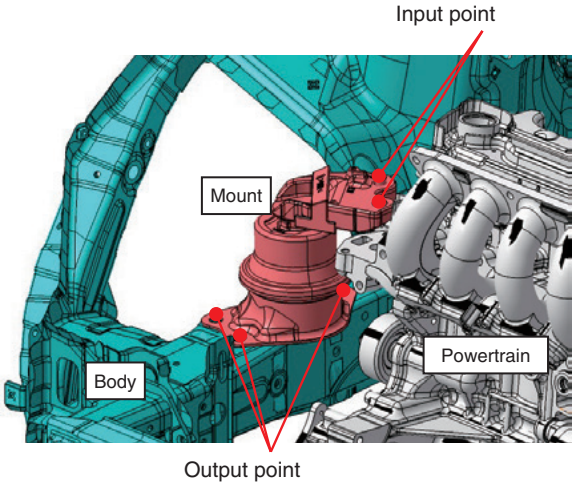


Fig. 17 Layout of mounting systems

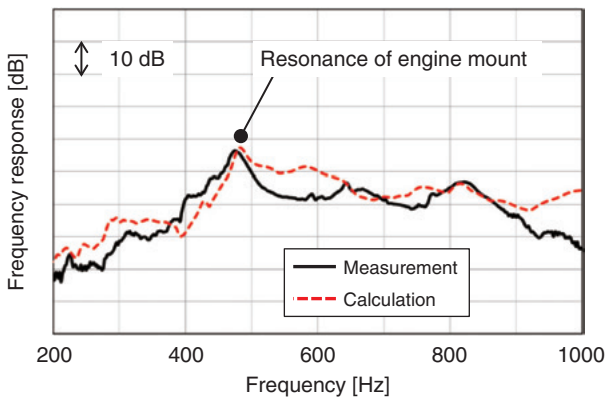


Fig. 18 Comparison between calculation and measurement for frequency response

5．まとめ

中高周波領域における液封マウントの振動伝達特性を予測する技術について，以下の知見を得ることができた．

（1）ゴム硬度に対する，ヤング率と構造減衰係数の関係をデータベース化することにより，大変形を考慮した制振ゴムの特性を予測することを可能とした．

（2）（1）の技術に加えて，封入された液体と構造の連成解析により，液封マウントの動ばね特性を予測可能とした．

（3）計算手法の工夫，大規模モデルのモード縮約，境界条件の簡素化等により，計算コストを約 3 分の 1 に削減できた．

以上により，ギヤ音，モータ音をはじめとする，エンジン音の振動伝達関数に寄与の高い液封マウントに対して，完成車状態における振動伝達関数を十分な精度で予測する技術を構築した．この予測技術により，試作車を用いない開発初期段階でも車両開発に適用可能とした．

参考文献

（1）松本聖司，角賢治，山本憲一，大西有紀子：CAE によるシリンダブロック・オイルパン系の放射音解析，自動車技術会，学術講演会前刷集，No.962，p.229-232(1996)

（2）荒川政司，山岡裕生，後藤優一：エンジンマウントを考慮したギヤノイズ域での振動予測技術の開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.43-13, p.1-6(2013)

（3）山崎浩二，小泉孝之，辻内伸好，柴山俊之，家辺健吾：液封エンジンマウントの動特性解析，日本機械学会，Dynamics & Design Conference 構造論文集，No.01-5, p.1-6(2001)

（4）川端季雄：弾性体の大変形，連載講座 ゴムの力学（V），日本ゴム協会誌，第 53 巻，第 8 号，p.473-485(1980)

（5）長松昭雄，大熊政明：5 モード合成法，部分構造合成法，培風館，p.103-105(1991)

■著 者■


深 澤 将 弘


村 尾 剛 史


雲丹亀真剛

操縦安定性に関するヒューマンダイナミクス解析へ向けた道具の身体性についての基礎的研究

A Fundamental Study of Tool Embodiment for Human Dynamic Analysis Relating to Handling and Stability of Driving

谷 田 公 二*
Koji TANIDA

要　旨

クルマの操縦安定性評価手法の策定にあたって，クルマの大きさや動きを操作者が自身の運動感覚系に取り込む身体性に着目した．身体性と運動感覚の関係を明らかにするために，運動感覚系情報処理の観点においてクルマの操縦と等価であると考えられるバーチャルリアリティ環境でのハサミによる紙切断作業実験を考案した．

バーチャルリアリティ環境において，運動に伴う感覚量である操作者へのフィードバック情報を様々に変化させることによって，操作中に生じる操作実感と脳神経系活動の関係が脳内血流量変化から明らかとなった．また，操作実感には適切な感覚量の呈示が必要であること，感覚量呈示の遅れ時間が操作実感を変容させることが分かった．道具操作時のこれらの実験結果を通して，クルマの操縦安定性評価に向けて身体性の観点から新たな見解，すなわち操縦中に生じる感覚情報評価の必要性を提案するに至った．

ABSTRACT

In the course of formulating methods for evaluating the handling and stability of driving an automobile, attention was focused on embodiments of the size of the automobile and its movements, which the operator absorbs into his or her own sensorimotor system. An experiment was devised to clarify the relationship between embodiment and sensorimotor activity. The experiment involved cutting paper with scissors in a virtual reality environment, where that action would be considered equivalent to steering an automobile from the perspective of processing sensorimotor system information.

In a virtual reality environment, the sensory quantity that accompanies activity is provided to the operator as feedback information. When this information was changed in various ways, the corresponding changes that occurred in the cerebral blood flow clarified the relationship between the feeling of actual operation generated during operation and the activity of the central nervous system. It was also found that the feeling of actual operation requires an appropriate sensory quantity to be presented, and that time delay in presenting the sensory quantity alters the feeling of actual operation. This experimentation during the manipulation of tools produced results that led to new ideas regarding evaluation of the handling and stability of driving of automobiles from the perspective of embodiment. In other words, it led to the proposal that it is necessary to evaluate the sensory information generated during driving.

1．まえがき

クルマやバイクには，走る，曲がる，止まるの基本性能が備わっており，ドライバは，駆動，操舵，制動の基本操作で運転をする．もしくはライダにとっては，駆動，荷重移動，制動が基本操作となる．操縦者の思い通りにクルマやバイクが動いているかどうかの性能は操縦安定性と呼ばれる．

現在，クルマにおけるその定量的な性能評価には，クルマのみを対象とするオープンループ試験法と擬似的なドライバを含めたクローズドループ試験法がある．オープンループ試験法においては，クルマには駆動輪やステアリングなどを通じて運動が与えられ，例えばタイヤのグリップ

＊基礎技術研究センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2015_27_1_17

特性や車両運動をシミュレートする研究が多数報告されている[1]．一方，クローズドループ試験法においては，ステアリングなどへのフィードバックループを含んだ入出力系を備える関数モデルで簡略表現されたドライバモデルのシミュレーション技術が研究開発されている[2]．クローズドループ試験法では車両挙動と操縦操作量の因果関係からロバスト性など操縦安定性の良し悪しなどが評価される．

いずれの試験法においてもドライバは定められた操作方法で車両に運動を与え，生じた車両挙動を数値化することで評価がなされている．他方ドライバの観点から車両評価するために，ドライバを計測する実験系が設計され，そこで操縦安定性は官能評価や操舵成績などで検証されている[3]．しかしながら，なぜドライバが車両挙動の良し悪しを判断できるのかは未解明のままである．その解明のために筆者はドライバの脳に着目した．脳は情報処理器官であるので，ドライバが操作に伴って得られる何らかの車両情報を脳内で処理し何かしらの評価に至っていると考えられるが，その情報処理の特性は着目されてこなかった．今回，これまで発表してきた研究を通して，脳機能計測と心理学実験から明らかとなってきた運動感覚情報と官能評価の関係を総括した．操縦安定性の評価にはドライバへの感覚情報の観点が重要であるとの見解に至ったので，ここに論述する．

2．感覚情報量の脳機能計測

ドライバの脳は運転中にどのような情報処理を行っているのであろうか．クルマの運転は，クルマをあたかも自分の身体の一部のように，すなわちクルマに対して身体性が成立したドライバ自身が手や足を動かすことで交通環境の中でどのように振舞うかの体現であるので，概念的かつ身体的な複雑な情報処理である．概念的な面とは，何時にどこへどのルートで行くか，交差点信号ではどうするか，どのような車間距離で走行するかという言語化可能な運転行動である．身体的な面は，車両の横加速度を感じながらステアリング操作を行う，路面の摩擦力を感じながらアクセルペダル操作を行うという運転行動である．運転の中でも車両挙動の制御はこの身体的な情報処理である[4]．

しかしながら，このような複雑な情報処理の中から，運転中にドライバの特定の脳活動を計測して運動感覚系にまつわる情報処理のみを把握することは容易ではない．さらには誰も脳の情報処理に注目してこなかったのであるから，例えば車両にかかる横加速度の大きさと操作や官能評価の関係も不明なままである．車両旋回中に生じる横加速度よって運転姿勢の乱れを制御するのも運動感覚系にまつわる脳内の情報処理である．このようにステアリングホイールの操作に着目してもそれ以外の脳機能の成分が含まれてしまうおそれがある．同じ信号の中に同時に生じる複数の脳機能課題を分離することは容易ではないのである．

したがって，脳機能の計測で留意しなければならないのは課題設定である．このようなことから，本研究ではまず礎を築くために，自動車運転と等質な道具を操作する運動中の運動感覚情報処理に注目し，以下に述べる実験系を構築し脳機能の計測を行ってきた．その研究概要[5]を紹介する．

2.1. 自動車運転と等質な実験の設定

運動感覚系での脳機能計測では，実験協力者に感覚情報を複種類呈示して比較実験をすることが必要である．一方，実験立案においては先に触れたように複雑な情報処理環境から運動感覚系のみを抜き出し，実験を単純化する必要がある．そこでバーチャルリアリティ技術（VR）を用いることで感覚情報量を可変とし，また単純化した実験においても運動感覚系情報処理の観点において自動車運転との等質性を再現するためにハサミを用いた紙の切断実験を立案した．

なぜ自動車運転とハサミ操作が等質なのか．自動車運転では，ドライバは目的地へ向かう道中で走行ラインを予測的に設定し，車両から生じる力を運動に変えるために例えばステアリングホイールを転舵し車両挙動である物理量変化を受容器から感じ取り，操舵量を修正しながら移動している．一方，ハサミ操作においても，使用者は切り出したい形状の想定の中でハサミの進路を予測的に設定し，所々変化する紙の厚さや繊維方向の変化による抵抗を感じ取り，ハサミの開閉速度や作用点を修正しながら切断点を線でつないでゆく作業である．このような観点から以下６項目に示す自動車運転とハサミ操作の等質性に着目し，今回実験的に運動感覚情報処理を評価した．すなわち，

（1）身近な道具である．
（2）フィードバックがハンマ打撃のように瞬間的でなく，操作中に継続する．
（3）予測と結果を比較しながらの操作である．
（4）途中の結果は最終目的の過程である．
（5）ミスは怪我につながるので慎重な作業となる．
（6）人 - 操作対象 - 外界のダブルインタラクションである．

作業課題は，切断作業に関する感覚情報のみを変化させ４水準設定した．すなわち，Table 1 に示すように現実のハサミで現実の紙を切断する課題（以下，現実ハサミ課題），センサグローブをはめた右手を開閉させることでコンピュータグラフィックス（CG）で描画された VR ハサミで CG の VR 紙を切断する課題（以下，VR ハサミ課題），この課題にさらに切断音と振動触覚信号を加えた課題（以下，聴触覚付加 VR ハサミ課題），他者の現実環境での切断作業を録画した VTR の再生画像を監視するだけの課題（以下，VTR 監視課題）の４課題である．

実験協力者は右手が利き手であるモンゴロイド成人男性

Table 1　Experimental tasks for measurement of brain

	Real task	VR tasks		VTR observation task
Experimental scenarios	 Real paper with real scissors	 VR paper with VR scissors generated using sensor glove on right hand	 Auditory and tactile sensory information added to task at left	 Observing video recording of real task performed by someone else

5名であり，左手で現実の紙ならびにVR紙を手繰り寄せるように引き出した．振動触覚信号はFig. 1に示すように，偏心した重りを回転させることで振動を生み出すモータをグローブに複数配置することで呈示された．実験協力者はこのグローブを装着しハサミを扱うような動きをする．その手の動きはFig. 2に示すようにCGによって画面の中で生成された．

2.2. NIRSによる脳内血流量の計測とプロトコル

脳機能計測として脳内血流の変化に着目した．脳の神経細胞群が活動するとき，酸素と糖を供給するために活動部位に動脈血が増加する．頭皮上から近赤外光を照射し，それぞれ吸光度が異なる酸化ヘモグロビンと還元ヘモグロビンの脳からの散乱光を検出することで脳内のそれぞれの血行動態を観測できるのが，NIRS(Near Infrared Spectroscopy)である．ヘモグロビンは血中に含まれるのでヘモグロビンの濃度変化は血流変化を示す．ヘモグロビンが増加すると吸光度が増し検出される散乱光は減少する．ここでは詳細な連立方程式などの記述を略すが，ヘモグロビン濃度変化は，酸化ヘモグロビンと還元ヘモグロビンごとに，複数照射される波長によって異なる量で検出される散乱光量の値に基づいた相対的な変化量として算出される[6]．センサは前頭から頭頂にかけて3 cm間隔の格子状に分布し左右対称で計24箇所配置される．実験プロトコルは，20 s間の閉眼安静の後，続けて課題を20 s間行ない，その直後に閉眼安静を20 s間行なう実験ブロックを10試行繰り返した．試行と試行の間は2 - 3 min設けた．別の課題呈示を日を変えて同時刻に行なうことで，概日リズムによる影響に配慮した．課題呈示順は実験協力者ごとに異なりランダムとした．



Fig. 1　Vibrators on right-hand glove. Five small motors are placed at circled locations on the tops of the fingers and one on the palm.

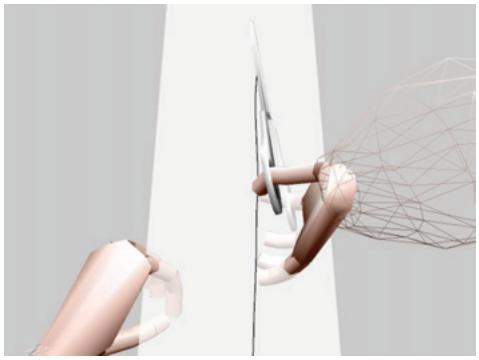


Fig. 2　VR environment with right and left hands, a pair of scissors, and a sheet of paper displayed by CG

酸化ヘモグロビン変化量(Δ Coxy)の数値化については，0 - 20 s間のヘモグロビン変化量の平均値を安静区間の変化量とし，20 - 40 s間のヘモグロビン変化量の平均値を作業区間の変化量と定義した．一課題あたり10試行であるので，この安静値と作業値は一実験水準あたり10組算出される．これらの値を用いて，課題作業中のヘモグロビン変化が安静中に対して有意に変化したかどうかを対応ある両側t検定で判定した．なお，40 - 60 sまでのヘモグロビン変化量データは数値化の際，計測器によるドリフト成分の除去のために用いた．

2.3. 脳機能計測の解析結果

現実ハサミ課題において，全実験協力者において有意に顕著に賦活した部位は左半球の前頭前野周辺であった．実験協力者は右手でハサミを操作していたので，左半球が賦活したという結果は，感覚入力や運動出力は反対側の脳半球が関与するという，これまでの知見と一致する．また前頭前野の賦活が観測された結果は，作業中はハサミ開閉の運動出力とフィードバック情報の受容器からの感覚入力が生じているので，運動と感覚情報の統合化を司る前頭前野が賦活するという神経科学的な知見と相違ない．一方，VTR監視課題では，全実験協力者には左半球の前頭前野周辺の賦活は観測されず，さらには全ての計測部位で実験協力者間で共通した賦活部位も観測されなかった．また両VRハサミ課題においても，全実験協力者に関して共通した賦活部位は観測されてはいなかった．したがって，全ての課題を比較するために，この現実ハサミ課題において賦活が観測された左前頭前野周辺の血行動態に着目した．この左前頭前野周辺での作業中の酸化ヘモグロビン変化量を全被験者に渡って算術平均を行なった．それらの大きさの差は，ANOVAによると$F(3,12)=6.712$となり$p<0.01$で課

題違いによることが示唆された．その結果を Fig. 3 に示す．現実ハサミで賦活した左前頭前野周辺で，VR ハサミ課題では VTR 監視課題と比較して大きな血流変化を示したことから，VR ハサミ課題の方が脳内活動が盛んであることが示されていた．さらに聴触覚付加 VR ハサミ課題の方が，視覚のみにたよる VR ハサミ課題よりも血流変化が大きく，脳内活動がより盛んであることが示された．

なお，この計測に先立って，実験協力者には課題に慣れるために各課題を試行する機会が与えられており，その際実感の順序を評価してもらったところ，全ての実験協力者が示した実感の順は VTR 監視課題＜ VR ハサミ課題＜聴触覚付加 VR ハサミ課題＜現実ハサミ課題であった．

さて，この血流変化は小さいものから，VTR 監視課題＜ VR ハサミ課題＜聴触覚付加 VR ハサミ課題＜現実ハサミ課題であり，この順序は先述した実感の順である．血流量の大きさは脳の賦活を示し脳内の情報処理活動度合いを表わしている．本実験では感覚情報量を可変にし，その感覚情報量に関して VTR 監視課題＜ VR ハサミ課題＜聴触覚付加 VR ハサミ課題＜現実ハサミ課題の順で操作作業時の運動感覚系におけるフィードバック情報が増していることも明白である．したがって，本実験結果から，道具を操っている実感，すなわち手応えを得るには豊富な作業フィードバック情報と運動を統合する脳内情報処理が必要であるという示唆が得られた．以上，運動に伴う感覚情報量の大小と有無に関する実験結果である．

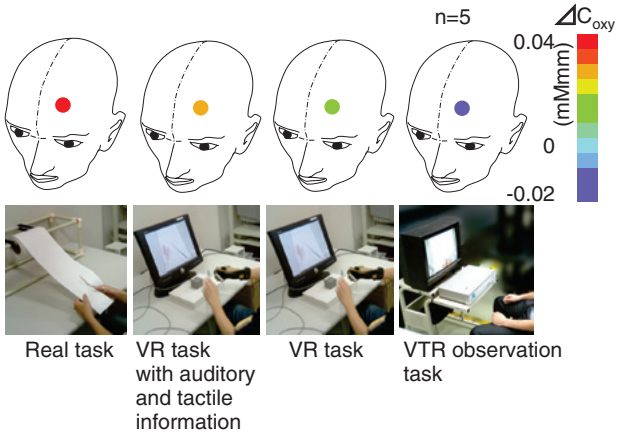


Fig. 3 Experimental result for measurement of brain activation

3．感覚情報発現の遅れ時間評価

次に，感覚情報の時間特性について操作者がどのような操作印象を持つか評価実験を行った研究結果[7]を概説する．実験協力者は 8 名で右利きであった．ここでは第 2 章の聴触覚付加 VR ハサミ課題を元に，実験協力者への感覚情報フィードバック呈示タイミングを意図的に遅らせた実験環境を準備した．呈示遅れを特に設定しない場合でも，本 VR 実験システムは 1 秒間に約 20 回のセンサ入力，各種計算処理，描画更新が伴うので 50 ms の遅れが含まれる．呈示した実験条件は，50 ms を含む遅延なし，200 ms，500 ms，1000 ms の 4 種類であった．なお，先述した脳機能計測に用いた VR システムはこの遅延なし条件である．

Table 2 Results of Scheffe's method of paired comparison with Nakaya's modification

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Unbiased variance	F
Total	100	48		
Main effects	85.187	3	28.395	241.54
Main effects × personal	9.3125	21	0.4434	3.7721
Combination effects	0.5625	3	0.1875	1.5949
Error	4.9375	42	0.1175	

Here, F(3,7,0.01)=8.451252 < 241.54, F(21,7,0.01)=6.132382 > 3.7721, F(3,42,0.01)=4.285255 > 1.5949

実験プロトコルは，実験協力者はまず 4 種類の遅延のうちある 2 種類の実験条件で 50 cm 相当の VR 紙を VR ハサミで切断し，この切断作業後にそれらの比較を官能評価で回答する．総当りとした一対比較の実験条件の組み合わせは 6 組あり，それぞれの順序は各実験協力者で異なるようにランダムな順とした．官能評価は，各組の切断作業に対して次の 5 段階で回答する．(1)前者の遅延環境が操作感が良い，(2)前者がやや良い，(3)違いを感じない，(4)後者がやや良い，(5)後者が良い，である．

各遅延を前述のようにランダムとしたので順序効果はないものとみなし，順序の入れ替えを行わない中屋の変法により解析を行った．その解析結果を Table 2 に挙げる．

Table 2 に示したように，実験協力者による評価，遅延条件の組み合わせによる評価に有意差は認められず，一方，遅延条件の評価には危険率 1 % で有意差が認められた．その遅延条件の大小関係は，統計スコアに基づくと次のようになる．操作感は遅延なし条件が一番良く，次に 200 ms 遅延条件が続きこの二つの条件は良い印象がもたれた．一方，操作感の悪さでは 500 ms 遅延条件と 1000 ms 遅延条件が挙げられ，1000 ms 遅延条件の方がさらに悪い印象をもたれていた．

実験後の聞き取り調査において，全実験協力者が 200 ms の遅延条件では，「重たい」，「分厚いものを切っているようだ」，「ハサミが硬い，ハサミの動きが渋い」など同じ傾向の操作印象を挙げた．これらを理由に半数の実験協力者は遅延なし条件の方が「やや良い」と回答した．また 500 ms，1000 ms の遅延条件では，「普通と同じように切断する操作が行えずストレスが大きい」，「まっすぐ切ることが難しい」，「老人になったようだ」などの感想を挙げた．このことから，感覚情報は操作とほぼ同時に感覚器を通じてフィードバックされることが良き操作感を導き，一方で操

作してから感覚情報が得られるまでの時間が長いと操作そのものが困難になったり，操作している道具や操作対象が，さらには操作者自身が変質してしまった印象を持たせてしまうことが分かった．

4．感覚情報そのものの評価

第２章で紹介した研究では実験協力者は触覚と聴覚の両感覚情報を同時に経験している．それぞれの感覚情報はどのように操作印象に影響を及ぼしているのであろうか．次に運動感覚の情報と操作印象との関係についての研究[8]の概要を記す．

4.1. 触覚刺激と操作印象の関係

ここで紹介する実験は先述のVRシステムで50 msの遅延を含む遅延なし条件で，かつ切断音のない，すなわち聴覚信号のない条件で行った．VRハサミ操作時の振動触覚信号を強弱３段階とし，振動感覚を与える指もしくは掌部に応じて振動触覚信号の強弱の組み合わせを５組準備した．本実験の先行検討結果から，３段階の振動触覚強度は，（1）操作者は注意しないと分からない程度，（2）感じることができる程度，（3）振動なしとし，指への刺激呈示は親指，人差し指，中指の計３箇所，掌部へは１箇所とした．以下が準備した五つの組み合わせパターンである．

a. 指:振動（2） ＋ 掌部:振動（2）
b. 指:振動（2） ＋ 掌部:振動（1）
c. 指:振動（2） ＋ 掌部:振動（3）
d. 指:振動（1） ＋ 掌部:振動（2）
e. 指:振動（3） ＋ 掌部:振動（2）

実験協力者６名は一つのパターンを３回づつ試行し合計15回ランダム順で実験に協力した．それぞれのVRハサミの環境に対して実際の操作感に近いかどうかの操作印象を，臨場感の有無の度合い７段階で回答するように求められた．

この結果，操作印象の平均値の順は，b＞c＞a＞d＞eとなった．これより，掌部への振動触覚強度は弱い方が好まれ，また指への振動触覚強度は強くもなく存在する方が臨場感のある操作印象に対して効果的であることが分かった．

4.2. 聴覚刺激と操作印象の関係

次に紹介する事例は，聴覚刺激である切断音がハサミの操作印象にどのように及ぼすかの実験である．この実験は先述のVRシステムで50 msの遅延を含む遅延なし条件で，かつ振動触覚信号のない条件で行った．切断音は電子合成音ではなく，一般的な紙であるプリンタ印刷用紙の現実の切断音を録音したものを用い，VRハサミでVR紙を切断する操作に合わせて切断音を再生した．再生音は日常の道具として考えられる７種類用意した．

（A）刃渡り 45 mm，ステンレス製，事務用．
（B）刃渡り 60 mm，ステンレス製，事務用．
（C）刃渡り 75 mm，ステンレス製，事務用．
（D）刃渡り 105 mm，ステンレス製，事務用．
（E）刃渡り 140 mm，ステンレス製，事務用．
（F）刃渡り 40 mm，ステンレス製，ジグザグ切断線，事務用．
（G）刃渡り 100 mm，鉄製，裁ちバサミ布用．

なお，（C）は先述した脳機能計測ならびに感覚情報遅延課題に用いた切断音である．

実験協力者６名へは，実験条件を３回繰り返しで計21回ランダム順に呈示した．また，音の印象評価について，実際の操作音に近いか否かの度合いを７段階で回答するように求めた．

その印象評価点の平均値を比べた結果，（A）＞（D）＞（E）＞（C）＞（G）＞（B）＞（F）の順となった．例えば数名の実験協力者のコメントによると，（G）は切断音が高温であるため操作において軽量感があり実感に乏しいということであった．実験に用いたハサミの切断音はそれぞれ固有の音質を有す．このように操作印象に対して順列が生じたことから，切断音として有効な音域が存在し，単に聴覚刺激の有無だけでなく，その音質もまた操作印象を変容させることが示された．また，疲労度に関する官能評価では切断音のある環境の方が疲れないという結果が得られた[9]．

4.3. 聴触覚刺激と操作印象の関係

前述の一連の研究として最後に紹介する実験結果[8]は，これら聴覚刺激と触覚刺激とが操作印象に対してどのように影響を及ぼすかである．実験協力者６名で行われた実験は以下の通りである．VR実験系は4.1.節で設定したbの条件で，切断音は4.2.節で挙げた(D)の条件であった．比較実験に用いられたのは次の４条件である．

（1）CGのみ
（2）CGと触覚刺激あり
（3）CGと聴覚刺激あり
（4）CGと触覚刺激と聴覚刺激あり

実験協力者は現実の操作に近いかの印象評価について，臨場感はないを１点，臨場感があるを７点として７段階で回答するように求められた．その印象評価点の平均値を比べた結果，（1）2.3 点，（2）3.8 点，（3）5.3 点，（4）6.0 点であった．これより，VRハサミによるVR紙の切断課題において，触覚刺激は評価を高める一方，その効果は聴覚刺激ほどではないことが分かった．

5．人から見た操縦安定性

ここまで運動における感覚情報と操作印象の関係を紹介してきた．これらの知見を総括し，道具と人の関係に関し

て考察を述べる.

道具を操っている実感を得るには操作に伴った豊富な運動感覚系情報が必要であることを第２章で述べた. 神経活動は階層構造をなしており筋肉に直接信号を出す下位層では, 筋肉が発動する前に運動プログラムの結果をシミュレート, すなわち予測していると考えられている[10]. またその運動シミュレーションは運動によって生じるであろう感覚信号もシミュレートしている. これら運動感覚系のシミュレーションでは予測が実際の行動結果すなわち物理世界と相違ないかどうかを比較するので, 感覚器系はどのような運動感覚が生じるのか予測的に物理世界からの入力も期待しているのである. すなわち脳はその差分を見出すために制御目標に対して情報処理ループを構築する. 一方, 運動プログラムや認知過程のような一まとまりの意識活動は上限およそ３秒で保持され, ３秒以内に起こる事象を一つの心理的ユニットとして神経系は捉えている[11]ことが知られている. また, パブロフの古典的条件付けとして, 同時条件付け, あるいは遅延条件付けでは刺激に対する学習が強化される[12]ことが知られている. すなわち, 脳神経系は情報入力と運動出力の関係を自動的に学習強化する性質があるので, 操作者の脳神経活動は作業と作業時に生じた情報との関連付けを自動的に模索, 形成し運動感覚系情報処理ループを学習する. 学習といっても特別な認知活動ではなく, 脳神経系ではどの行動においても, 作業目標を達成する遂行のみならず, その課題を遂行するための知識やスキルを獲得する学習は同時に行われている[13]. 4.1. 節ならびに 4.2. 節で述べたように, 模擬的な振動と切断音がフィードバック感覚として呈示される VR ハサミ操作時の聴触覚 VR 情報が, 作業課題とほぼ同時に実際のハサミ操作時とは異なる指の甲や掌部, スピーカ音源から呈示されているにも関わらず, これらの情報も運動感覚系情報処理ループに取り込まれ実感化してしまうほど学習は強力である. 脳内血流評価によって, この実感度合いは運動出力と統合化される感覚情報入力の豊富さと相関が認められた. したがって, 操作している道具が身体の延長となり, その身体性を向上させるためには, あるいは身体性を維持するためには, 作業に適切な量と質の感覚情報が必要であるということである.

しかし, その作業に適切な感覚情報は単なる感覚量だけではなく, 時間情報も考慮せねばならないことが第３章から導かれた. 感覚情報の呈示に遅れ時間が生じると操作荷重の大きさに影響を及ぼしたのであった. このような事象は, パーソナルコンピュータ操作中にアイコンのドラッグを行った時など反応が遅い場合に, 重いという表現を使うことと同じであり, pseudo haptic と呼ばれる[14]. このことは, ドライバがハンドルが重たいと評価しても, 実際にはステアリング操舵トルクを評価していない可能性, 言わば力覚の錯覚があることを示唆する. ドライバはクルマを操作するときに時間成分も運動感覚系に取り入れているので, 人からの操縦安定性評価には時定数評価を考慮せねばならないと考えられる.

また, 作業に適切な感覚情報は, 先述したように制御目標なる物理世界からの情報である. 情報処理量が減る作業では賦活部位の脳内血流量の低下が見られた. 他方, 切断音がない, すなわち感覚情報が入力されない方が疲労感を招いた. これらの結果は脳内の情報処理負荷と疲労感あるいは負担感が一対一対応でないことを意味する. 情報処理を司る機能をもつ脳にとっては, 運動と感覚情報をつじつま合わせのように統合する運動感覚ループを構築しやすい方が疲労軽減につながっていると考えられる.

ハサミ操作における最終制御目標は操作者が切り出したいように切断できたかどうかである. ハサミ操作ではそれは視覚によって確認される. 今回の VR 環境における実験では, 視覚情報に加え 4.3. 節で述べたように触覚と聴覚情報が, 操作しているという実感に影響を及ぼしていることが分かった. 脳の情報処理は上層に概念的階層, 下位層に運動感覚的な階層をもつ階層構造をなしており, それぞれの階層で最上位の最終制御目標を遂行するための個別の制御目標が設定される[4]. すなわち, 各階層での情報処理ループ遂行が最終制御目標への最上位の情報処理ループ遂行を支える構造となっている. ハサミの場合は, 最終制御目標である切断軌跡を確認する視覚情報に加えて, 聴触覚情報も重要であり最終制御目標への遂行に対するフィーリング評価に影響した. 下位層での制御目標の遂行から得られる操作実感は, 総合的な最終制御目標の遂行の操作フィーリング評価向上へ導くのである. 一方, 例えば, 楽器では, 楽器を操る運動感覚系情報処理ループも構築される[15]ことも報告されているが, 制御目標は聴覚情報である音である. このように, 道具によって操作者が運動感覚系情報処理ループを作るに必要な感覚情報は異なる. したがって, クルマの場合の操縦安定性評価では, どの感覚情報が物理情報と関連付けられているのかを明確にし, ドライバの制御目標への操作とその制御目標からの感覚情報との情報処理ループの構築度合いを評価することが必要である.

フィードバックされる受容器の感覚情報は基本的に運動出力と同じ部位で生じたものが統合化される. しかし, クルマの操作は手と脚であるが, クルマの挙動は身体に加速度や回転としても感覚入力される. 例えば, アクセルペダル操作の感覚は踏み込む脚の筋肉の運動と運動感覚系の情報処理ループを作る. 操作と同時に動きを与えられるクルマの５自由度の運動は, ドライバ身体の加速度センサである三半規管, オプティカルフローを検出する視覚, シートバックに押し付けられる背中の触覚や圧痛覚, 身体姿勢の変形を捉える体性感覚などへの刺激も誘発する. これらの感覚情報は運動と同時に生じるので, 神経系はその性質

上，自動的に運動感覚系情報処理ループを構築する．その運動感覚系情報処理ループでは，例えば車両のヨー変化を臀部や腰で感じる，目で感じるなど構築される感覚入力は個々人に依存するようであるが，またこれらも感覚における錯覚も含まれているかもしれないが，結果的に最終制御目標に対してループを生成するのは同じである．重要なのは運動と同時に生じる最終制御目標に至る感覚情報に対して情報処理ループを構築するということである．この様々な感覚情報から運動と関連付けられる情報のみを選択し情報処理ループを構築する神経系の柔軟さによって，人々はステアリング操舵力，取り付け角度やペダル踏力などが全て異なるセダンからスポーツカーやトラックなどへ乗り換えても操縦できるのである．

以上，操縦安定性評価に向けた運動感覚情報からの観点の重要性を導いてきたが，さらにこれらを鑑みてクルマのあり方を考えてみると，振動対策や遮音性能向上の行き過ぎには注意せねばならない．ドライバの脳は運動に必要な感覚情報を常に求め，すなわち様々な環境情報から運動とつじつまの合うものをシグナルＳとして扱い，情報処理ループを構築できないものをノイズＮとして扱う．一概に周波数何 kHz 帯がＮである，Ｓであるとは定義できない．例えば，ドライバにとって乗り心地評価に対して 10 kHz 帯がＮであるとする．技術者は 10 kHz 帯を数 dB 遮音しようと対策を試みる．ある施策を打っては 10 kHz 帯の増減を確かめる．この繰り返し作業の中では，その技術者にとっては 10 kHz 帯が制御したい目標であり，もはやこの技術者にとって 10 kHz 帯はＮではなく他の周波数帯に埋もれてもなお 10 kHz 帯は遮音成績を表わすＳなのである．このように人それぞれの情報処理ループによって情報はＳかＮに分けられるので，振動評価にはドライバが運転の際にどのような情報処理ループを構築するのかの観点が必要である．S/N 比の向上，ならびにＳそのものの大きさ，時間情報も操作感覚には必要なのであるが，Ｎと一緒にＳも過度に防振遮音してしまうと操縦感覚が希薄となってゆき，結果的に物理的な車両挙動とドライバの関係は分断されてしまう．このような振動や音もドライバが運転しているという実感を生じさせるためには感覚情報として必要なのである．また，これら感覚情報は物理環境に応じて走行中に変化する．このようなことから操縦安定性は，例えば単に車両が 0.2 G 旋回できることではなく操作に伴う物理情報を得てどのように 0.2 G 旋回に至ったかの時間情報処理の評価でもあると考えられる．

6．まとめ

VR 技術を用いた実験環境にて運動感覚系における感覚情報を変化させることによって，それが道具を操作する印象へどのように影響を及ぼすのかを先行研究結果を紹介しながら解説した．それら様々な実験結果から，クルマを操るとはどういうことかを脳科学と心理学の見地から考察し，操縦安定性評価手法の確立へ向けて一見解を見出した．

今後，ドライバが操縦を通じた車両運動において，最終制御目標としている物理事象は何なのか，それに伴う最終制御目標からの物理情報は何なのかを明らかにし，より多くのドライバが車両挙動を自ずと感じ物理的に安定させるように操縦できる車両の開発へ結び付けていきたい．さらには運転に伴う fun も情報処理の結果の感情と考えられるのでその解明にも努めていきたい．本稿によりハード的な操縦安定性評価からソフト的な評価へ拍車が掛かれば，またこの研究は始まったばかりであるのでご意見ご教授いただければ幸いである．

注）本稿では sensorimotor の和訳として知覚運動や感覚運動性でなく運動感覚と記した．

参考文献

（1）酒井英樹：ヨー運動と後輪横滑り運動との関係，近畿大学工学部研究報告，No.46, p.85-88(2012)

（2）山本敬一，西村秀和：操縦安定性改善のためのアクティブスタビライザと電動パワーステアリングの分散制御系設計，日本機械学会論文集，C 編 76 巻，765 号，p.1271-1279(2010)

（3）金圭勇，池田透，矢野修：ＶＳＡによる氷雪路走行時の操縦安定性向上，Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.2, p.83-90

（4）Tanida, K., Pöppel, E.: A Hierarchical Model of Operational Anticipation Windows in Driving An Automobile, Cognitive Processing, 6, p.275-287(2006)

（5）谷田公二，舟橋健司，近江政雄，楠見昌司：バーチャルリアリティ技術を用いた道具に関する身体性評価－脳内血流変化からの評価－，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.12, No.1, p.3-10(2007)

（6）山下優一，渡辺英寿，川口文男，牧敦，小泉英明：無侵襲脳機能画像計測システムとしての光トポグラフィ開発，MEDIX Vol.29(1998)

（7）舟橋健司，久保谷太亮，谷田公二，岩堀祐之：仮想はさみシステムにおける呈示遅れによる擬似的な力覚表現の検討，日本バーチャルリアリティ学会第 12 回大会，p.393-394(2007)

（8）Funahashi, K., Kubotani, D., Iwahori, Y., Tanida, K.: A Study for Virtual Scissors System with Thin Haptic and Force Feedback Environment, 2008 Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium

on advanced Intelligent Systems, p.1448-1453(2008)
(9) 久保谷太亮:希薄な触力覚フィードバック環境下における仮想はさみシステムの検討, 平成 17 年度修士論文, 名古屋工業大学大学院工学研究科 (2006)
(10) Erich, V. H., Mittelstaedt H.: Das Reafferenzprinzip. (Wechselwirkungen zwischen Zentralnervensystem und Peripherie), Naturwissenschaften, 37, p.464-476(1950) (in German)
(11) Pöppel, E.: A Hierarchical Model of Temporal Perception, TRENDS in Cognitive Sciences 1, p.56-61(1997)
(12) 板野登:心理学研究法 3 実験Ⅱ, 苧坂良二 (編), 東京大学出版, p.181-208(1973)
(13) Sweller, J.: Cognitive load during problem solving: effects on learning, Cognitive Science, Vol.12, p.257-285(1988)
(14) Lecuyer, A., Burkhardt, J. M., Etienne L.: Feeling Bumps and Holes without a Haptic Interface: the Perception of Pseudo-Haptic Textures, Proc. ACM SIGCHI, p.239-246(2004)
(15) Bangert, M., Altenmüller, E. O.: Mapping perception to action in piano practice: a longitudinal DC-EEG study, BMC Neuroscience, Vol. 4, No. 26, BioMed Central(2003)

■著 者■



谷田公二

本田技術研究所　論文委員会

編集長　漆山　雄太　四輪 R&Dセンター
須藤　　晶　四輪 R&Dセンター
塩崎　智夫　二輪 R&Dセンター
金古　　章　基礎技術研究センター
笠井　聡人　汎用 R&Dセンター
石橋　正明　二輪 R&Dセンター
郷土　健二　四輪 R&Dセンター
齋藤　俊博　四輪 R&Dセンター
徳根　敏生　基礎技術研究センター
中村　孝広　基礎技術研究センター
馬場　雅之　二輪 R&Dセンター
木村　芳彦　二輪 R&Dセンター
千葉　省作　汎用 R&Dセンター
友永　久人　四輪 R&Dセンター
白木　晶子　四輪 R&Dセンター
田中　公俊　基礎技術研究センター

編集協力　二輪 R&Dセンター論文委員会
汎用 R&Dセンター論文委員会
四輪 R&Dセンター論文委員会
基礎技術研究センター論文委員会
航空機エンジン R&Dセンター論文委員会

編集後記

研究所の技術者の生き様の記録として Honda R&D Technical Review は，多くの人々の努力の元に発行されてきました．この間，世の中はものづくりの価値を根底から覆すような大きな変化をしているように思えます．

こうした時代に研究者として存続していくためには，言われたことをやるだけではなく，自らを鼓舞して高みを目指す気概が必要です．自らの成長は主体的に行動することによって得られるものです．多くの人は世の中の変化を感じているにも関わらず，どうして良いかを見出せないでいます．しかし変化し続ける中で普遍性を持った解はあるはずがなく，常にその時々に見合った解を探し続ける姿勢が必要です．

日頃自分に与えられた仕事を事務的にこなすだけで良しとしていないでしょうか．一見事務的に見える仕事でも創意工夫を凝らすことで，創造的な結果を得ることができます．技術者が受身の仕事だけでなく，さらに高みを目指すためには主体的行動が必要不可欠であり，その一つの方法として論文執筆があります．

論文は著者が主張したい内容を自らの責任で主体的に発信するものです．変化し続ける世の中で技術者としての足跡を残し，成長を続けるためにも論文執筆へのチャレンジをお勧めします．

(田中，金古)

Honda R&D Technical Review

©2015 株式会社 本田技術研究所 (禁無断転載)

2015 年 3 月 1 日　　Vol.27　No.1

発行所　株式会社　本田技術研究所

発行人　山　　本　　芳　　春

編集人　本田技術研究所　論文委員会

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　四輪 R&Dセンター
技術広報室　第 2 ブロック　論文事務局
TEL 028-677-3311 (代表)　FAX 028-677-7854
Tr_randd@n.t.rd.honda.co.jp

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.

