

Honda R&D

Technical Review Vol.28 No.2



October 2016



==== 表紙の言葉 =====

クルマは、モビリティとしての価値以外にも、たくさんの可能性を秘めています。

その価値を引き出す新しいデバイスの一つ、それが「POWER EXPORTER 9000」です。

クルマに蓄えられたエネルギーから、家電はもとより、非常時の医療用機器まで、高品質な電力を安定的に供給できる性能を備えています。

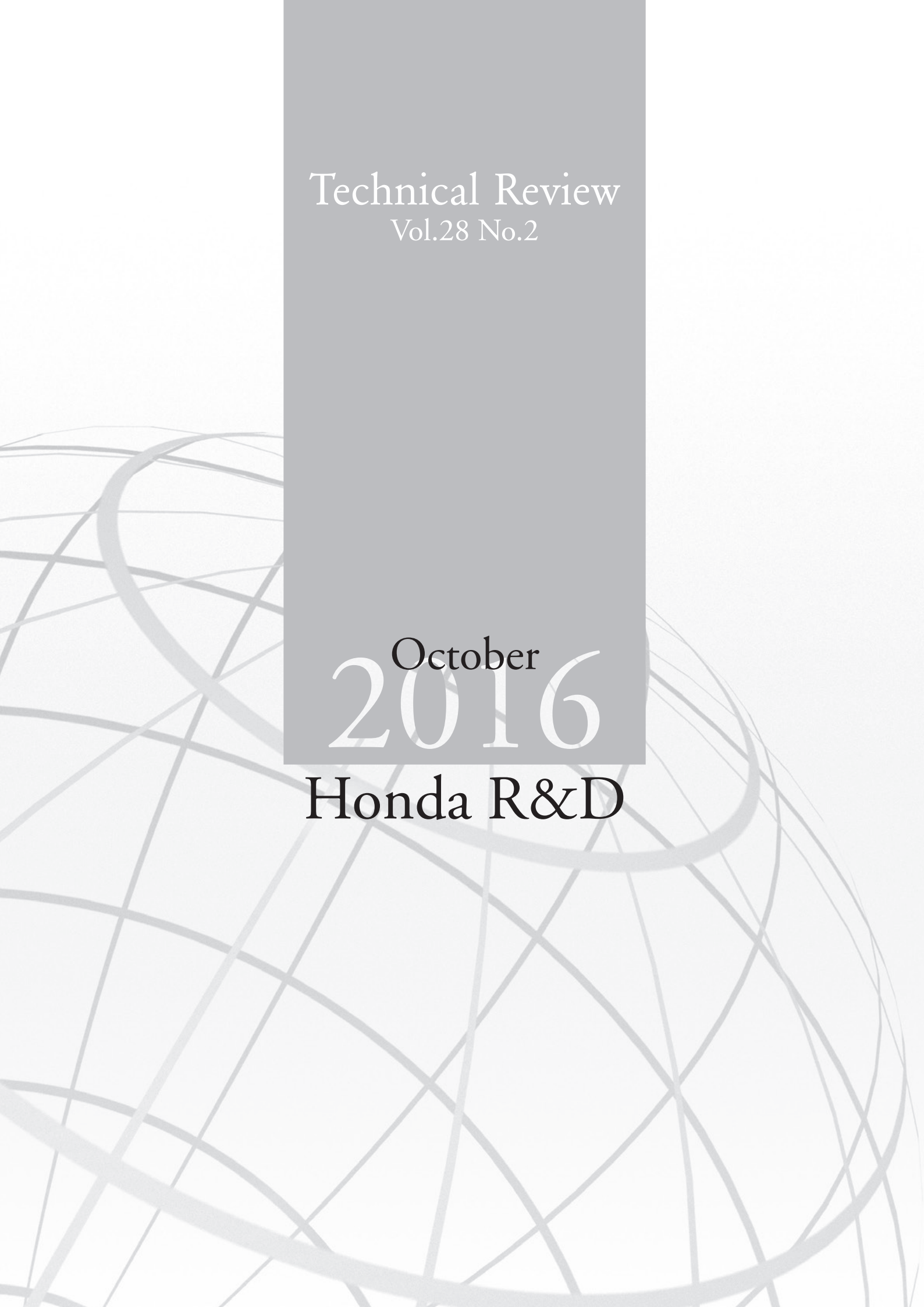
「つながる」というクルマの新しい価値から、いったいどのような未来が生まれてくるのでしょうか。その期待と未来を内包した「POWER EXPORTER 9000」をモチーフに、本号の表紙をまとめてみました。



二輪R&Dセンター
伊藤 龍



二輪R&Dセンター
中平 翔太

The background features a light gray wireframe sphere. A solid gray vertical bar is positioned in the upper center, containing the text 'Technical Review' and 'Vol.28 No.2'. Below this bar, the word 'October' is in black, and '2016' is in large white letters. At the bottom, 'Honda R&D' is written in black.

Technical Review
Vol.28 No.2

October
2016

Honda R&D

目 次

技術紹介

- ◇ CRF1000L Africa Twin のスタイリングデザイン 小松昭浩・桂川 碧 1

- ◇ CRF1000L Africa Twin の開発.....飯塚 直・山倉 裕・今井良幸
飯田晃祥・菅野 剛・中村公紀
小山信也・中村健一郎・小野和彦 9

- ◇ PIONEER 1000 完成車技術 半田秋男・神山 剛・黒田耕介
横田 洋・坂本直樹・西山真也
菊安丈幸・佐藤浩二・山崎雅貴 21

- ◇ 次世代自動車向け高出力可搬型外部給電システムの開発 津野康一・小松貴如・船木美帆
進 正則・金澤絨行・大串健次 36

- ◇ CLARITY FUEL CELL 搭載の新型燃料電池スタックの開発 菊池英明・加地勇人・西山隆之
小此木泰介・原田 仁 44

- ◇ CLARITY FUEL CELL 用エア供給システムの開発.....菅原竜也・金沢卓磨
立花 優・今井直樹 52

- ◇ モデルベース開発のためのエンジンモデルの ECU 組込み技術 赤崎修介・久保知也・千田耕平
清水治喜・山崎文誉 59

- ◇ パワートランスファユニットギヤ音の N V 設計技術構築 西小路拓也・斉藤和弘・平野至海 66

- ◇ 新型 NSX の高出力に貢献するハイブリッドシステムの熱マネージメント 高橋広一・漆原圭輔 73

- ◇ グローバルテレマティクス用アンテナの開発 片山 睦・昆野靖弘・曾根孝之 79

- ◇ 駆動モータ用重希土類フリー熱間加工磁石 清水治彦・加藤龍太郎・中澤義行
服部 篤・日置敬子・及川貴司 85

- ◇ パンパフェイシア軽量化のための高剛性ポリプロピレン素材とクリヤ塗膜の開発 能見恵美・中根 健 90

論文

- ◇ 金属表面の常圧気相表面改質を用いた熱可塑性樹脂の異種材接合技術 秋田浩司・黒田真一・河井貴彦 96

- ◇ セルロース系バイオエタノール研究 ー育種とセルフクロニングによる高性能発酵菌の構築と全体プロセス検討ー
土田芳樹・塚越範彦 103

- ◇ セルロース系バイオエタノール研究 ー自前糖化酵素の構築ー 光澤茂信・福浦麻衣子・新川 智 111

CONTENTS

◇ Styling Design of the CRF1000L Africa Twin	Akihiro KOMATSU・Midori KATSURAGAWA	1
◇ Development of CRF1000L Africa Twin	Naoshi IIZUKA・Yutaka YAMAKURA・Yoshiyuki IMAI Akihiro IIDA・Takeshi SUGANO・Masanori NAKAMURA Shinya KOYAMA・Kenichiro NAKAMURA・Kazuhiko ONO	9
◇ Development of the PIONEER 1000	Akio HANDA・Takeshi KAMIYAMA・Kosuke KURODA Hiroshi YOKOTA・Naoki SAKAMOTO・Shinya NISHIYAMA Takeyuki KARIYASU・Koji SATO・Masaki YAMAZAKI	21
◇ Development of High-output, Portable External Power Output System for Use with Next-generation Environment Vehicles.	Koichi TSUNO・Takayuki KOMATSU・Miho FUNAKI Masanori SHIN・Hiroyuki KANAZAWA・Kenji OGUSHI	36
◇ Development of New FC Stack for CLARITY FUEL CELL	Hideaki KIKUCHI・Hayato KAJI・Takayuki NISHIYAMA Daisuke OKONOGI・Hitoshi HARATA	44
◇ Development of Air Supply System for CLARITY FUEL CELL	Tatsuya SUGAWARA・Takuma KANAZAWA Yu TACHIBANA・Naoki IMAI	52
◇ Technology for Embedding Engine Models in ECU for Model-based Development	Shusuke AKAZAKI・Tomoya KUBO・Kohei CHIDA Haruki SHIMIZU・Fumitake YAMAZAKI	59
◇ Establishment of NV Design Technology for Power Transfer Unit Gear Noise	Takuya NISHIKOJI・Kazuhiro SAITOU・Yoshimi HIRANO	66
◇ Hybrid System Heat Management that Contributes to High Performance for New NSX	Koichi TAKAHASHI・Keisuke URUSHIHARA	73
◇ Development of Antenna for Global Telematics	Mutsumi KATAYAMA・Yasuhiro KONNO・Takayuki SONE	79
◇ Heavy Rare Earth-free Hot-deformed Magnet for Traction Motor	Haruhiko SHIMIZU・Ryutaro KATO・Yoshiyuki NAKAZAWA Atsushi HATTORI・Keiko HIOKI・Takashi OIKAWA	85
◇ Development of High-Rigidity Polypropylene Material and Clear Coat for Lightweight Bumper Fascia	Emi NOMI・Ken NAKANE	90

Technical papers

◇ Technology for Joining of Dissimilar Material with Thermoplastic Polymeric Resin Using Atmospheric Gas Phase Modification of Metal Surfaces	Hiroshi AKITA・Shinichi KURODA・Takahiko KAWAI	96
◇ Research on Production of Cellulosic Ethanol – Development of High-Efficiency Yeast Strain using Mutagenesis and Selection and Self-Cloning, and Study of Entire Process –	Yoshiki TSUCHIDA・Norihiko TSUKAGOSHI	103
◇ Research on Production of Cellulosic Ethanol – Creation of Novel Saccharifying Enzyme –	Shigenobu MITSUZAWA・Maiko FUKUURA・Satoru SHINKAWA	111

CRF1000L Africa Twin のスタイリングデザイン

Styling Design of the CRF1000L Africa Twin

小松 昭 浩*

Akihiro KOMATSU

桂 川 碧*

Midori KATSURAGAWA

要 旨

CRF1000L Africa Twin は、大型オン／オフロードモデルとして新たに開発された。このモデルは、1988年にデビューし名声を博した、XR650 Africa Twin に始まるシリーズに対する、12年の時を経たのちの後継機種として開発された。このモデルをデザインするにあたり、一目で Africa Twin だとわかるということや、最新のレーシングマシンが持つ技術の流れを感じさせることをコンセプトとした。このコンセプトのもと、スタイリングデザインにおいては、車両全体のデザインとともに、フェアリング、フューエルタンク、ヘッドライト、メータなどのディテールにわたって、全身機能美の表現を実現し、Africa Twin としての個性を際立たせた。また、カラーリングにおいては、「Africa Twin ブランドの再興」をコンセプトの根幹に据え、トリコロール、CRF450Rally カラー、スタンダードカラー、それぞれに個性を持ったカラーリングをそなえることで、伝統、先進、そして顧客ニーズにバランスよく応えることを可能とした。これらスタイリングデザインとカラーリングにより、伝統的な Africa Twin スタイリングと、最新の技術に裏付けられたラリー向けレーシングマシンのスタイリングの融合、という所期のデザイン目標を成立させた。

ABSTRACT

The CRF1000L Africa Twin was developed as a new large dual sport motorcycle. After a 12-year absence, this model was developed as a successor to the Africa Twin series originating from the XR650 Africa Twin, which made its debut in 1988 and became famous. The concept in designing this model was to make it immediately identifiable as an Africa Twin and to convey the trends in latest racing machine technologies. Based on this concept, the styling design embodies functional beauty throughout the vehicle, not only in the overall appearance, but also the details including the fairing, fuel tank, headlights and meters, to highlight the distinct personality of the Africa Twin. Additionally, the revival of the Africa Twin brand is placed at the core of the concept for colors, and each of the color variations provided—Tricolor, CRF450 Rally color and Standard colors—have distinct personalities to strike a balance in carrying on its heritage, demonstrating advancement and responding to customer needs. Through this styling design and color scheme, we have achieved the desired design goal of fusing the classic Africa Twin styling with the styling of racing machines backed by the latest technologies.

1. はじめに

CRF1000L Africa Twin (Fig. 1) は、Honda が大型オン／オフロードモデルとして新たに開発したモデルである。

Africa Twin という名称は、Honda のオン／オフロードスポーツモータサイクルの中で、1978年よりアフリカで開催されていたパリ、ダカールラリーに端を発するモデルに付けられたものである。

1988年にデビューした初代 XR650 Africa Twin

*二輪 R&D センター

(Fig. 2) は、1980年代に Honda が投入したワークスレーサ、NXR750 (Fig. 3) のイメージで作られた。実際にラリーに出場できるオフロード性能と、フルフェアリングを付けたユニークなスタイリングで、多くのファンを魅了した。実用面においては、スポーツモータサイクルの本場である欧州での、長距離を高速で快適に移動するというニーズに合致した。さらに、各メーカを巻き込み、フルフェアリング付き大型オン／オフロードスポーツモータサイクルというカテゴリを生み出すにいたった。

その後、さらなる大排気量化、高速化が進み、各社さまざまなラインナップを展開する中、Hondaは、実用面、オンロード性能を重視した、XL1000V Varadero(Fig. 4)やVFR1200X(Fig. 5)をリリースした。一方、この大排気量化が進む中、2003年にAfrica Twinは生産を終了した。



Fig. 1 The CRF1000L Africa Twin



Fig. 2 The XRV650, the first generation Africa Twin launched in 1988



Fig. 3 The NXR750, 1987 Paris Dakar Rally model

近年では、大排気量ツアamodelの市場も成熟し、さらに再びオフロードも楽しめるモデルへの注目度が高まり、Africa Twin復活を望む市場の声がこれまでも増して高まってきた。

10年以上の歳月を経たのち、現在の市場に向けてAfrica Twinの復活を検討するに当たり、まずは何が必要なのか、何を求められているのか、について考察した。その基礎とすべく、主要市場であるドイツ、フランス、イタリア、イギリスで市場調査をおこない、開発するモデルの基本となる考え方について検討を重ねた。その結果、New Africa Twinは、「どこにでも行ける」本格オフロードモータサイクルでなければならないという結論にいたった。

そこで、我々開発チームは、New Africa Twinの開発コンセプトを「Go anywhere 日常のコミューティングから広大な夢の大地を走破できる、本格アドベンチャーモデル」とした。そのコンセプトにふさわしい、冒険心を刺激するスタイリングデザインの実現が不可欠な要素となった。本稿では、そのスタイリングデザインのコンセプトとその実現手段について述べる。

なお、本稿ではCRF1000L Africa Twinを本モデルもしくはNew Africa Twinと呼び、XRV650 Africa Twinは初代、XRV750 Africa Twinには先代を付けて呼ぶこととする。



Fig. 4 The XLV1000 Varadero, launched in 2000



Fig. 5 The VFR1200X, launched in 2010

2. スタイリングコンセプト

歴代モデルのユーザや、歴代モデルにあこがれを抱いて育ってきたお客さまには、かつての Africa Twin への強い思いがある。前述の調査結果でも、お客さまは、一目で Africa Twin とわかるスタイリングデザインを望んでいることがわかった。

その一方、スポーツモータサイクルのトレンドとして、最新のレーシングマシンが持つ技術、特色との関連性を求められるという一面もある。それは最新技術を所有することにあこがれるユーザ心理からである。Honda は 2013 年より、ダカールラリーに復帰、参戦している。その参戦車両である、CRF450Rally (Fig. 6) のスタイリングは、まさにそのカテゴリにおける最新トレンドである。

初代 Africa Twin (Fig. 2) のスタイリングは、80 年代に活躍したワークスレーサ、NXR750 (Fig. 3) をイメージしたものである。NXR750 は、当時のラリー競技における走行ステージの条件から、車体は大柄で頑丈に、また、ライダーや機能部品をプロテクトすることを優先して設計されていた。例えば、フューエルタンクは、長距離走行を可能とする大型のものが用意され、また、フェアリングは、ライダーを走行風から守る大きなものが用意され、これらは Africa Twin のアイコンとも言える存在感を示していた。さらに、ヘッドライトは、過酷な夜間走行でも視界を確保する、大型の 2 眼タイプのものを採用していた。これらのデザイン要素により、広大な大地を走り抜け、高速で長距離を安心して走ることができるというイメージが実現されていた。

一方、ダカールラリーは、2009 年以降は南米開催となり、かつてのパリ、ダカールラリーとは、走行ステージの様子が大幅に変わった。そのため、参加車両である CRF450Rally は、スリムで軽量、コンパクトなものとなった。また、技術の進化に伴い、ヘッドライトをはじめとする各種機能部品の小型軽量化も進んだ。大容量のフューエルタンクも、4 分割されて車体に収まり、目立たなくなった。また、メンテナンス時間短縮を目的に、機能部品のカ

バー類は省略される傾向となった。そのため、デザインの上でも、山岳地帯の険しい道でもものともしない、本格的オフロード性能を持った、フットワークの良さを感じさせるイメージの実現が求められた。

新しい Africa Twin をデザインする上で、これら二つのイメージは、いずれもの重要な要素と考えた。すなわち、伝統的な Africa Twin のスタイリングと、最新のラリー向けレーシングマシンの持つ機能、技術に裏付けられたスタイリングの融合が重要であると考えた。そして、これを新時代の Africa Twin のスタイリングコンセプトの根幹として定めた。

スタイリングコンセプトに沿って描かれたデザインスケッチを Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 に示す。



Fig. 7 Concept evolution sketches



Fig. 8 Sketches to realistic proportions



Fig. 6 The CRF450Rally

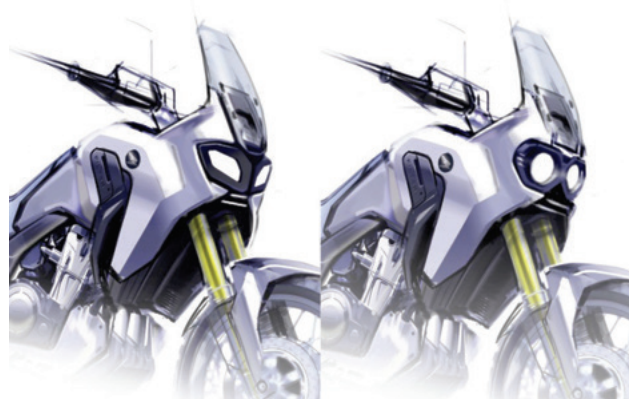


Fig. 9 Design sketches of face part of the vehicle



Fig. 10 Rendered image of the final design of the new Africa Twin

3. 具体的なデザイン手法

二輪車のスタイリングデザインには、大きく分けて二つの要素がある。一つは車体全体のイメージを決めるバランスやプロポーション、ボリュームの構成である。もう一つは個々のパーツデザインにおけるディティールや質感の表現である。その二つの要素が互いにハーモナイズすることで、全体のデザインが成立する。

3.1. 全体イメージ

まず全体イメージについて述べる。本格的なオフロードバイクは、荒れた路面であっても、優れた運動性能によって走破するイメージを持っている。そこで、マスの集中と逆三角形のフォルムという、前出の CRF450Rally をはじめ、Honda のモトクロスレーサに用いられる手法を取り入れた。また、オフロードモデルとして不可欠な、ロングストロークサスペンションを、運動性能を強調した足長のプロポーションとして活かした。先代 Africa Twin とのプロポーションの違いを、Fig. 11, Fig. 12 に示す。

全体のボリュームに関しては、ライダーに安心感を与える一方で、重そうで扱いづらいと感じさせない大きさを、開発チームメンバーのさまざまな視点を通して設定した。例えばシート形状は、アクティブなライダーの動きを妨げない形状でありながら、十分なサイズとすることで、快適性と見た目の躍動感を演出した (Fig. 13)。

さらに、フェアリングは、さまざまな体格のライダーが自由に操れると感じさせるコンパクトさを実現しながらも、走行風や砂埃など、走行を妨げる要素を防いでくれるという、安心感を与える大きさとした。

3.2. ディティール

次に、ディティールについて述べる。ディティールの処理では、どこの部分のデザインについても機能美が感じられる、すわなち、全身機能美をテーマとした。具体例を以下に示す。

(1) フェアリング フェアリングは、フロントオーバーハングをできるだけ切り詰めた。これによって、マスの集中による運動性能の確保だけでなく、(車両全体を俯瞰したときの印象) 見た目の印象においても、躍動感ある軽快さが表現されている。短いオーバーハングを実現するためには、フロントスクリーンの角度が、切り立ったものにな



Fig. 11 Proportional scheme of the previous model of the Africa Twin



Fig. 12 V-shape proportional scheme applied to the new Africa Twin



Fig. 13 Streamlined seat shape that helps smooth actions of a rider

る (Fig. 14). さらに、その影響でフェアリング内の負圧が大きくなり、ライダーの姿勢保持に影響をおよぼす。この作用を抑制するために、スクリーン下方にエアダクトを設けた。これにより、軽快なスタイリングを実現しつつ、快適な乗車空間を提供することができた (Fig. 15)。

(2) フューエルタンク 歴代モデルでは、車体サイズに対して、通常よりも大きな比率のタンクが、タフさと長距離走行可能というデザイン上のイメージも演出してきた。すなわち、存在感のある印象を与えるフューエルタンクは、Africa Twin の重要なアイデンティティの一つである。New Africa Twin の開発においては、長距離走行性能に加えて、優れた運動性能の実現も求められた。すなわち、タンク形状には、ライダーの動きを阻害しないスリムさが求められていた。本モデルでは、エンジンレイアウトが、V-Twin から並列 Twin となったため、タンク下方への容積拡大が可能となった。そこで、サイドビューでは大きく見せながらも、スリムなタンク形状を実現できた。これによって、フューエルタンクのデザインにおいても、従来からの Africa Twin のアイデンティティを守りつつ、優れた運動性能の実現をはかることができた。

(3) ヘッドライト ヘッドライトは、二輪車のフロント周りをデザインする上で重要な要素の一つである。



Fig. 14 Fairing with wind screen with a steep angle



Fig. 15 Air streams around the fairing and the rider

Africa Twin の場合、左右対称の丸型2灯式ヘッドライトが、目としての存在感を印象づけていた。しかし、本モデルで採用した薄型LEDヘッドライトの構造上、照光部分はほぼ半円となり、その面積も小さくなった。そのため、目としての存在感が薄れてしまった。そこで、不足した目としての存在感を強めるために、シグネチャーライトを下方に配置し、円周の輪郭を強調した。これによって、新技術であるLEDを採用しつつも、New Africa Twinとしての個性であるヘッドライトによる目の存在感をアピールすることを実現できた (Fig. 16)。

(4) メータ Africa Twin は、ラリー車としての血筋を持ち、乗る人にラリーが与えるさまざまな状況変化に素早く対応する緊張感をかもし出すデザインが求められる。そのため、最新のラリーレーサに採用されるメータのデザインを適用した。すなわち、情報を上下方向に配置、表示し、縦長のものとした (Fig. 17)。これにより、左右に生まれる空間から前方の視界が確保され、刻々と変化する路面状況が把握でき、オフロード走行における状況確認が補助さ



Fig. 16 Headlights and signature accent lights that emphasize the impression of round edge lines



Fig. 17 Vertically long-sized display unit with information display stack

れる。また、本モデルでは、通常の二輪車で必要とされるもの以外に、多くの情報を表示する必要がある。それらには、Dual Clutch Transmission(DCT)、Selectable Torque Control, Antilock Brake System などの状況を示す情報がある。したがって、多くの情報を、状況や優先順位に合わせて、走行中にわかりやすく表示する必要がある。そのため、頻繁に確認が必要な情報を上から順に配置した。さらに、表示の切換えスイッチを手元に配置し、グリップから手を離すこと無く、さまざまな情報の確認を可能としている。このメータデザインにより、ラリー競技に出場するような臨場感や高揚感をライダーに与えるという、Africa Twin が持っていたデザイン的特色を継承した。

以上に述べたディテール部分のデザインにより、ねらいとしていた全身機能美の表現を実現でき、Africa Twin としての個性を際立たせることができた。

4. カラーリングデザイン

4.1. カラーリングコンセプト

モータサイクルのカラーリングとは、そのモデルのコンセプトを瞬時に伝えることができる、重要な要素である。

Africa Twin と冠される本モデルにおいて、カラーリングコンセプトを設定する際に、何を一番に表現するべきかを考察した。

まず、新しいモデルであるということを前面に出し、これまでにないまったく新しい世界観のカラーリングによる訴求を行うことも考えた。しかしながら、今回のターゲットユーザについては、旧モデルをずっと大切に乗り続けて来られたお客さま達の存在も大きい。また、スタイリング全体のコンセプトに沿った、Africa Twin ブランドの継承という視点も重要である。したがって、カラーリングにおいても本モデルが Africa Twin としてのアイデンティティを維持し、また、これまでに Africa Twin というモデルが築き上げてきたブランド性を受け継いだ、次の世代のモデルであることを表現すべきだと考えた。このような背景から、「Africa Twin ブランドの再興」ということをカラーリングコンセプトの根幹に据えることとした。

4.2. ログタイプとグラフィックライン

全バリエーションに共通するログタイプのデザインは、初代 Africa Twin が持つ、ブラッシュストロークのような勢いのある表現や、エネルギー感を継承した。加えて、シャープでエッジの効いたデザインとすることで、現代的なテイストを感じさせるログタイプへと進化させた。車体側面に大きくログタイプを入れることによって、ダイナミックで力強い Africa Twin らしさを表現した (Fig. 18)。

また、車体に入れるカラーグラフィックのラインは、マスの集中化によって新しくなったスタイリングを強調し、

視覚的相乗効果をねらった。

以下、カラーリングのバリエーションごとに、その手法について述べる。

4.3. カラーリングの三つのテーマと手法

(1) トリコロール Africa Twinであることを一番に感じさせるカラーリングとは何か、という問いに対し、我々デザイナーの答えは、赤、青、白の、トリコロールであった。

トリコロールは、1986 年からパリ、ダカールラリーで 4 連勝したワークスレーサ、NXR750 のレプリカモデルである初代 Africa Twin, XRV650 がもっていたカラーリングである (Fig. 2)。欧州では、Africa Twin = トリコロールというイメージが、広くお客さまの間に浸透している。そのような背景のもと、本モデルのコンセプトを強く市場に印象づけることをねらい、このトリコロールを Africa Twin ブランドの再興の象徴として設定した (Fig. 19)。



Fig. 18 Logotype designs of the first generation Africa Twin and the new Africa Twin



Fig. 19 The new Africa Twin in Tricolor color scheme

初代の XRV650 トリコロールは、すべてソリッドカラーによって構成されていた。本モデルのトリコロールでは、1000 cc クラスならではの高級感、上質感を表現するために、色合いに深みがでるパールやメタリックカラーを採用した (Fig. 20)。また、トリコロール仕様専用のパーツ色を設定することで、初代 Africa Twin のコンセプトを強調し、かつ特別な仕様であることを印象づける演出をした。

- ・ゴールドのリム
- ・ゴールドのハンドルバー
- ・白いナックルガード
- ・赤いリヤサススプリング
- ・青いハンドルウエイト

これらは、どこから見たときにも、New Africa Twin のトリコロールであると認識させるための要素として、デザインイメージの訴求に大きく寄与している。

(2) CRF450Rally カラー Honda は 1989 年の参戦を最後に、当時のパリ、ダカールラリーにおけるファクトリー活動を終了したが、2013 年より 24 年ぶりにダカールラリーへ復帰した。最新のアドベンチャーモデルの象徴であるという存在感を示すために、現在のダカールラリーへ参戦しているワークスレーサ、CRF450Rally (Fig. 6) のカラーリングを取り入れた。

本カラーリングは、ラリーレーサの持つ勢いを全面に表現することを念頭に置いてデザインされた。現役のレーサモデルがかもし出すスポーティな印象を持たせるため、すべてをソリッドカラーでコーディネートした (Fig. 21)。また車体全体に亘るカラーリングで勢いを表現するために、フロントカウルから始まる白いラインを、シートサイドまで延長させた (Fig. 22)。しかし、柔らかいシート素材にシャープなラインを施すため、シート表皮の合わせ部分や、車体外装部品とシートの合わせ部分などで、ラインがずれることなく配置されるように工夫するなど、技術的な

ハードルが高かった。しかし、勢いや流れを表現するために、この白いラインは欠かすことができなかったため、この技術的課題を乗り越えた。その結果、このラインの効果を活かすことに成功し、ラリーレーサとしての勢いを、車体全体で表現できた。

(3) スタンダードカラー 現在、欧州を中心に、大型のオン／オフロードモデル市場が順調に推移しているため、こうした市場に向けたカラーリングも設定した。先に述べた二つのカラーリングのように、特定のイメージにとらわれず、幅広いライフスタイルの指向を持つお客様に対して訴求可能な、スタンダードカラーである。通勤で大型オン／オフロードモデルを軽々と乗りこなすビジネスマンや、揃いのウエアでツーリングを楽しむ大人のユーザを意識してデザインをおこなった。大人の持ち物にふさわしい金属感の表現や、都市の風景の中での力強い存在感、また、旅先の古い街並みにも自然に溶けこむデザインであることを考慮して、シックな色調やボールドな印象の色調で構成した (Fig. 23, Fig. 24)。これによって、本格的なオフロード走行も可能な、大人のツアラーとしての新しい価値を提案した。



Fig. 21 The new Africa Twin in CRF Rally color scheme



Fig. 20 Contrast in brightness by metallic colors applied to the painted areas and the stripes



Fig. 22 The white stripe stretches on to the seat side



Fig. 23 Standard color option: Digital silver metallic



Fig. 24 Standard color option: Matte ballistic black metallic

5. まとめ

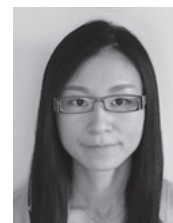
本モデルで一貫して目指した、伝統的な Africa Twin スタイルと、最新の技術に裏付けられたラリー向けレーシングマシンのスタイリングの融合、というテーマを成立させるために、全体バランス、ディティール、カラーリングという観点で多角的にアプローチした。

その結果、本モデルは多くのお客様に「これは明らかに Africa Twin であり最新のモデルである」と認めていただくことができた。2015 年 12 月の発売開始より、日本、欧州、米国で多くのお客さまより好評を得ており、Africa Twin の復活という、当初の目的を達成できたと感じている。本モデルも、先代モデル同様、末永くお客さまに愛されるモデルとして育ってほしいと願っている。

■ 著 者 ■



小松 昭 浩



桂 川 碧

CRF1000L Africa Twin の開発

Development of CRF1000L Africa Twin

飯 塚 直*

Naoshi IIZUKA

飯 田 晃 祥**

Akihiro IIDA

小 山 信 也*

Shinya KOYAMA

山 倉 裕**

Yutaka YAMAKURA

菅 野 剛*

Takeshi SUGANO

中 村 健一郎*

Kenichiro NAKAMURA

今 井 良 幸*

Yoshiyuki IMAI

中 村 公 紀*

Masanori NAKAMURA

小 野 和 彦*

Kazuhiko ONO

要 旨

オン/オフロードタイプの二輪車の中で、アドベンチャースポーツというカテゴリのさきがけとなったXR750 Africa Twinの伝統を継承しながら、新しい時代にふさわしい技術を取り込んだCRF1000L Africa Twinを開発した。細部までこだわった軽量化やマスの集中化により、前モデルとほぼ同等の車体サイズや車両重量を達成した。エンジンは998 cm³直列2気筒とし、オイルタンク内蔵式のドライサンプ構造などの採用により、高出力でコンパクトなユニットを実現した。これらにより、オフロード走行性能とオンロードのツーリング性能を高い次元で両立させることができた。また、オフロードモデルとして初のDual Clutch Transmissionはオフロード走行においてもその有効性を発揮した。

ABSTRACT

The CRF1000L Africa Twin was developed with technologies for a new era while inheriting the tradition of the XR750 Africa Twin, which pioneered the adventure sports category. Extensive weight reduction and mass centralization allows the size and weight of the CRF1000L Africa Twin to closely match its predecessor. An engine with parallel twin cylinders and displacement of 998 cm³ was employed. In addition, a dry sump system was applied in which the oil tank is integrated within the crankcase. These features contributed to enabling a powerful and compact power unit. The dynamic performances in off-road riding and the performances sought as an on-road touring motorcycle are fulfilled at the highest levels. Furthermore, a dual clutch transmission was applied for the first time to an off-road motorcycle, and has proven its effectiveness in off-road riding as well.

1. まえがき

近年、欧州など先進国では縮小傾向にあるモータサイクル市場において、大型のオン/オフロードモデル市場は安定的に推移している。1985年までは、大型のオン/オフロードモデルはモデル数も少なく小さな市場であったが、Hondaは、1986年にこの市場に初のフルフェアリング付大型オン/オフロードモデルとしてXL600V TRANSALPを発売した。1988年にはパリダカウルラリーで1986年から3年連続優勝(二輪車部門)を成しとげたワークスレーサNXR750の技術をフィードバックしたXR750 Africa

Twinを投入した。その後、1990年に排気量を拡大し、XR750 Africa Twinとしてアドベンチャースポーツという新たなコンセプトの礎を築いた。2000年には高速長距離ツーリングへの対応を目的として開発したXL1000V Varaderoを市場へ投入した。一方、欧州のメーカーも顧客のツアー志向の高まりをうけ、排気量を拡大させ高速移動への対応をするとともに、オフ志向のモデルの追加などでモデル数も拡大し、年々、販売台数とシェアを拡大していた。

このような背景から、Hondaは、XR750 Africa Twinのコンセプトを踏襲しながら、現代が求める環境性能や次世代モデルとしてふさわしい技術を搭載した大型オン/オ

* 二輪 R&D センター

** Honda R&D Southeast Asia Co., Ltd.

フルードモデル CRF1000L Africa Twin (Fig. 1) を新たに開発し、グローバル市場へ投入することとした。

本稿では、CRF1000L Africa Twin の完成車のパッケージング、新開発の 998 cm³ 直列 2 気筒エンジン、オフロード走行を考慮した Dual Clutch Transmission (DCT) の制御システムなどの技術を解説する。

なお、本稿では CRF1000L Africa Twin を本モデル、XRV750 Africa Twin を前モデルと呼ぶこととする。



Fig. 1 The CRF1000L Africa Twin

2. 開発のねらい

開発チームは、1980 年代に Honda が参戦を続けていたパリダカールラリーにおける挑戦の歴史と、その当時新たな市場の創出に挑戦した Africa Twin の伝統を継承しながらも、新時代の Africa Twin を開発することを目指した。Africa Twin と称するのであれば、オフロードの走破性が高いことは必須条件であり、加えてオフロードにいくまでの高速走行を含むオンロードでの移動は荷物を積載しても快適に走行することが必要と考えた。したがって、この二律背反の走行性能を高次元でバランスさせることを本モデルの開発のねらいとした。

コンセプトは「Go anywhere - 日常のコミューティングから広大な夢の大地を走破できる、本格アドベンチャーモデル」とした。

3. 車体仕様

3.1. パッケージングとディメンション

本モデルでは、新開発のコンパクトな直列 2 気筒エンジンを採用した。これにより、V 型エンジンでは後部側のシリンダが配置される車体重心の周辺に、重いバッテリーや Engine Control Unit (ECU) などの電装部品を配置し、マスの集中化を図った (Fig. 2)。また、前モデルに対して同等

の車体サイズとしながらも、サスペンションのストロークをフロント 220 mm から 230 mm へ、リヤは 214 mm から 220 mm に伸長した。また、タイヤサイズは、前輪は前モデルと同じ 21 インチ、後輪は 17 インチから 18 インチとすることで、最低地上高も 220 mm から 250 mm に増加させている (Fig. 3)。

ステアリング系に関しては、前モデルに対してステム側の径が大きい倒立タイプのサスペンションを採用しながらも、ヘッドパイプ周りのフレーム形状とエアクリナ形状のスリム化によって、ハンドル転舵角を 40° から 43° に増加させることができた。これにより、大型オン/オフロードモデルのカテゴリにおいてトップレベルとなる最小回転半径 2.6 m を確保した。その結果、狭い林道での折り返しを想定したオフロード走行シーンだけでなく、自宅ガレージなどの日常での取り回しに至るまで、さまざまなシーンで扱いやすい車体となった。

3.2. エンジン搭載レイアウト

本モデルで新開発した直列 2 気筒エンジンは、前モデルに対して、エンジンの前後長の短縮化が実現でき、フロントタイヤとリヤスイングアームピボットの間隔を 8 mm 短

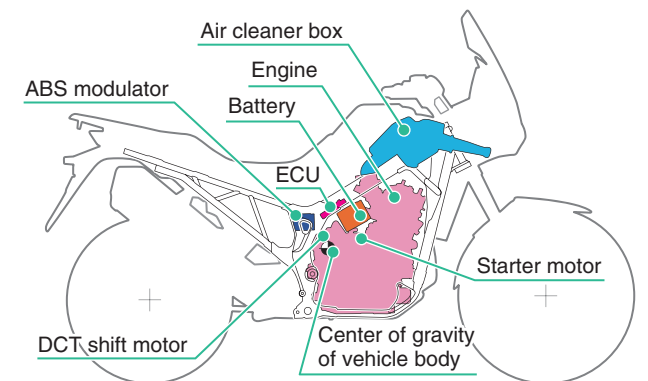


Fig. 2 Layout of key components

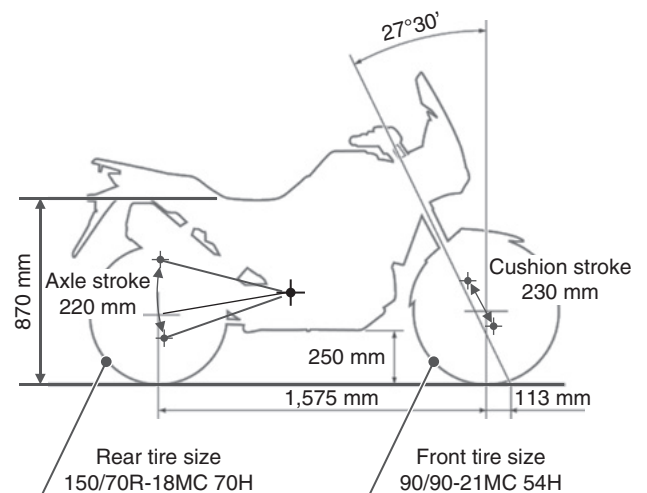


Fig. 3 Dimension and key parameters

縮させた (Fig. 4)。これにより、フロントタイヤの分担荷重比が増加し、安定性が向上すると同時に、タイヤの挙動もライダーがより適確に捉えることができる。その結果、不安定な路面を走行することが多いオフロードモデルに必要な車体特性の一つであるフロントタイヤの接地感を向上させている。

また、直列2気筒エンジンは、V型エンジンと比較すると後部側のシリンダがないため、ライダーの膝周辺の車体幅のスリム化が可能となる。これによりオフロード走行に適したアクティブなライディングポジションを可能とする車体形状を確保した (Fig. 5)。

さらに、シート高を標準状態 (870 mm) から 20 mm 下げることが可能なアジャスト機能を装備することで、タンデム走行時や足つき性を重視するような路面を走行する際の利便性を向上させた (Fig. 6)。

3.3. フレームボデー

フレーム構造は、Honda のオフロードモデルで伝統的に

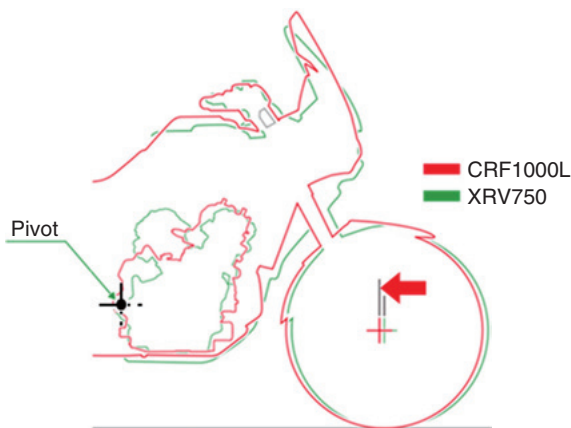


Fig. 4 Comparison of front axle positions

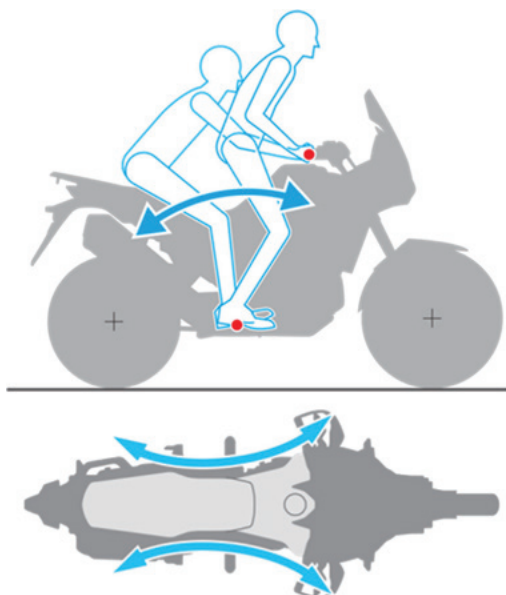


Fig. 5 Rider movements

使用され、ダカールラリー参戦モデルである CRF450 Rally や前モデルでも採用したセミダブルクレードル構造とした (Fig. 7)。そこに、タフなオフロード走行やハイウェイでの高速積載タンデム走行、荷物を積載したままでの荒れた路面の走行などのさまざまな走行状況下で必要な強度と剛性を確保した。同時に、荒れたオフロード路面でもタイヤを追従させ、エンジンで発生した駆動力を路面に伝達させるしなやかさも確保している。そのため、Fig. 8 に示すような異型楕円形状のメインパイプ部材を採用した。また、エンジンを6箇所エンジンハンガで取り囲むように支持している (Fig. 9)。これらにより、最適なフレームボデーの剛性バランスを実現した。また、幅広い使用環境に対応可能な強度と、車体の運動性能を高めるために必要な軽量化を両立させるため、フレーム素材には、高張力鋼を採用した。

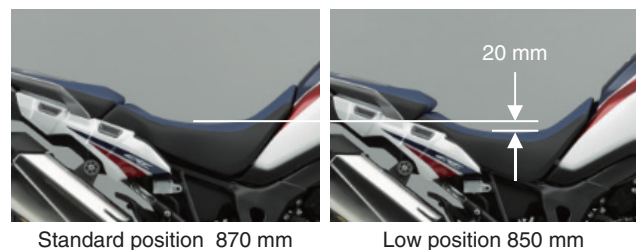


Fig. 6 Seat height adjuster



Fig. 7 Frame body (MT model)

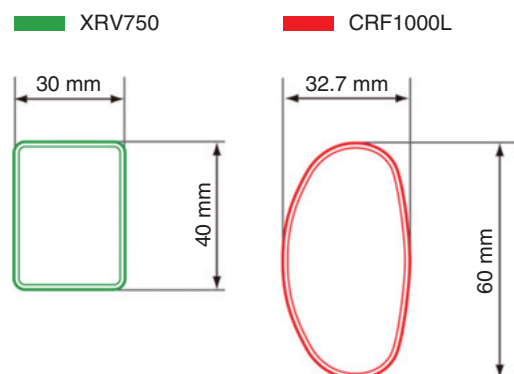


Fig. 8 Comparisons of frame pipe cross section

3.4. 積載装置

本モデルは、荷物の積載性を向上させる便利なアクセサリとして、トップボックスとパニアケースを設定した (Fig. 10). 通常、パニアケースを装着するためには別体のパニアケース取付け用ステーを事前に車体に装着しておく必要がある。しかし、本モデルでは VFR1200X と同様の取付け用ステー不要のパニアキャッチシステムを採用した。さらに、強度と剛性が求められるリヤキャリアとリヤグリップ、パニアキャッチシステムを一体構造としたことで部品点数を削減することができた。また、材質をガラス補強材入りのナイロン樹脂としたことで軽量化も実現することができた (Fig. 11)。

3.5. シャシの仕様

3.5.1. フロントサスペンション

フロントサスペンションにはばね下重量の軽減と作動性の向上、高剛性化をねらった $\phi 45$ 倒立フォークを採用した。アクスルホルダはリーディングアクスル式とすることで操舵系重心を回転中心に近づけ操舵慣性モーメント低減に寄与するとともに、対向 4 ポットのラジアルフィットブ



Fig. 9 Six engine hanger locations



Fig. 10 Accessories integrated in motorcycle styling

レーキキャリアを装備する形状とした。

また、日常の街乗りからタンデム走行+積載でのツーリングやオフロード走行などさまざまな使い勝手が想定されるため、幅広いセッティングに対応する必要がある。そのためスプリングプリロード調整機構に加え、伸びと縮み双方の減衰力調整機構も備えた、フルアジャスタブル式を採用した [Fig. 12(a)]。

3.5.2. リヤクッション

オフロード走行においては、ライダーは前後への体重移動やシッティングやスタンディングによるアクティブなライディングをおこなう。そのため足つき性を確保したうえでスリムな車体形状とすることが要求される。同時に、ツーリングなどにおいて十分な航続距離を得るために 18 L の燃料タンク容量を確保する必要がある。それらを両立するため、リヤクッションの上部取付け位置を前モデルに対して 33 mm 下方に移動し、それによってできたスペースに燃料タンクの後端を配置することでライディングの自由度を阻害せずに燃料タンク容量を確保した。取付け位置を下



Fig. 11 Pannier system

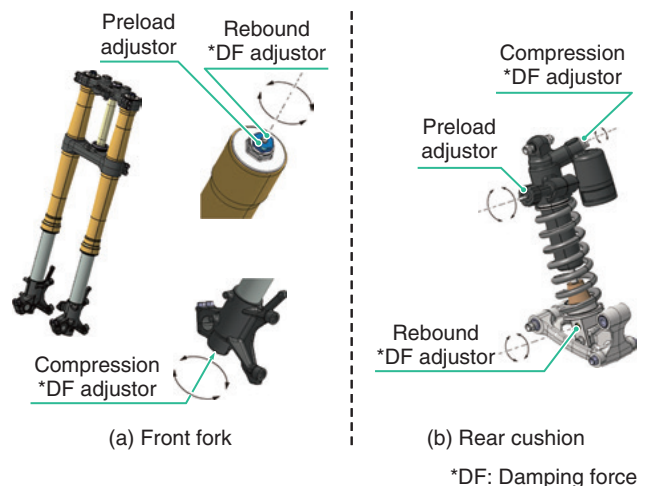


Fig. 12 Front fork and rear cushion

げた状態においても最低地上高とリアアクスルストロークを、リヤクッションの全長を見直すとともにプロリンクを専用設計とし実現した。

また、フロントサスペンションと同様、さまざまな使い勝手に対応するためスプリングプリロード調整機構に加え、伸び/縮みの減衰力調整機構も備えた、フルアジャスタブル式を採用した。特に使用頻度の高いスプリングプリロード調整機構は工具不要で調整が可能な油圧ダイヤル式とし、積載荷重の変化に対して柔軟かつ迅速に対応できる仕様とした〔Fig. 12(b)〕。

3.5.3. スイングアーム

スイングアームは、アクティブなライディングポジションを妨げないようにするため、マフラと近接する範囲のスイングアーム面を車体内側に追い込む必要があった。また、同時に適切な剛性や強度を満足させることも必要である。そのため、各部の形状と板厚の最適化を効率良く実施できるアルミニウム中空重力鋳造製法により製造することとした (Fig. 13)。

3.5.4. ブレーキ

ブレーキシステムは積載+タンデム走行でも安心して制動できることを目標に、前モデルに対し絶対効力を大きく高めた。同時にオフロード走行での繊細なブレーキコントロールにも対応するため細部のセッティングをおこない、これを両立した。Fig. 14 に前後輪ブレーキシステムの外観を示す。前輪ブレーキは、 $\phi 310$ のフローティングディスク

を本モデル用として専用設計しダブルで装着した。ディスクハブはアルミ製とし、軽量化を図った。フロントブレーキキャリパは、安定したブレーキタッチと高いコントロール性、軽量化を目指し、対向4ポットラジアルフィットキャリパを専用設計した。後輪ブレーキは $\phi 256$ ソリッドディスクを採用した。

3.5.5. 後輪 ABS OFF 機能および後輪ブレーキにかかわる DCT 制御

オフロード走行時に前後輪ブレーキの使い分けが必要な場面を想定し、Honda 初の切り替え機構つき Antilock Brake System (ABS) を採用した。これはライダーのスイッチ操作により後輪の ABS の機能をオフにすることを可能としたものである。後輪の ABS をオフにすることにより、後輪ブレーキはライダーのペダル操作だけでコントロールすることが可能となる。この場合、インジケータにより後輪の ABS がオフ状態であることを表示しライダーへインフォメーションを伝えるものとした。

DCT 車においては、エンジン回転数の変化や車速の変化から、走行中にライダーが後輪ブレーキを踏み、後輪がロック状態になることを前もって予測し、締結側のクラッチに印加されるクラッチ油圧を瞬時に小さくすることでクラッチを切断し、エンジンストール (エンスト) を回避している。これにより、ライダーはマニュアルトランスミッション車両にあるようなエンストさせないためのクラッチレバー操作に気を遣うことなく後輪をロックさせることができる。

4. エンジン概要と適用技術

4.1. 新エンジンの出力特性と動力性能

Fig. 15 に新エンジンの外観を、Table 1 に前モデルのエンジンと比較した主要諸元を示す。

また、本モデルと前モデルの出力特性比較を Fig. 16 に示す。前モデル同様、フラットなトルク特性による扱いやすい出力特性を求め、ポート形状、バルブタイミング、吸排気系および2プラグ位相点火制御の最適化を図った。そ

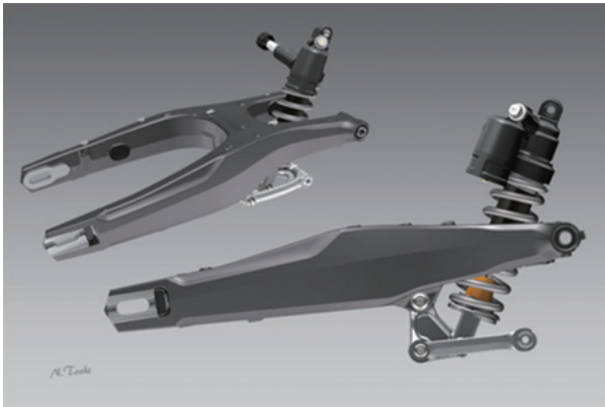
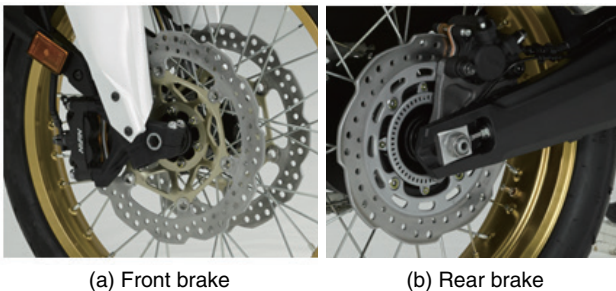


Fig. 13 Swing-arm



(a) Front brake

(b) Rear brake

Fig. 14 Front and rear brake

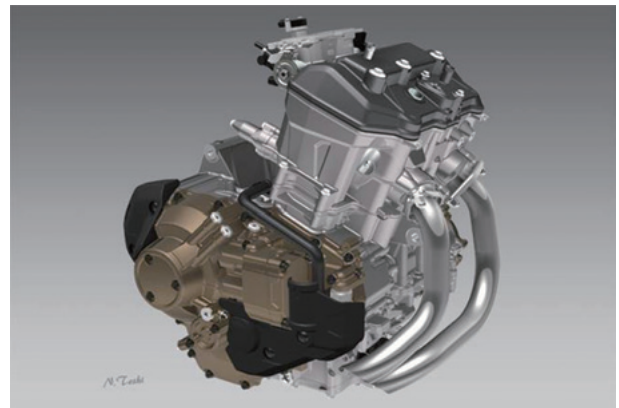


Fig. 15 External view of engine (DCT type)

Table 1 Comparison of specifications of engine

Model name	CRF1000L Africa Twin	XR750 Africa Twin
Displacement (cm ³)	998	742
Bore × stroke (mm)	92.0 × 75.1	81.0 × 72.0
Compression ratio	10.0	9.1
Maximum power (kW/rpm)	70/7,500	45/7,500
Maximum torque (Nm/rpm)	98/6,000	64/6,500

の結果、排気量拡大に伴う全域での出力向上と扱いやすさの両立を実現し、低速から高速域まで、高いトラクション性能と心地よいパルス感を発揮するエンジンとなった。

4.2. 軽量コンパクト化のための適用技術

4.2.1. クランクケース内蔵オイルタンク式ドライサンプ構造

オフロード走行においては車体の姿勢変化が大きくなり、エンジン内に溜めているエンジンオイルの油面位置が大きく変化する。このため、ウェットサンプ方式のモデルでは、オイルパンを深くし、より低い位置からエンジンオイルをポンプによって吸い上げるように配慮されている。これにより、油面位置の変化に影響されずに、安定してオイルを圧送することが可能となる。しかしながら、オイルパンを深くすることは、二輪車の最低地上高が低くなることを意味し、オフロード走行時の走破性を阻害することとなる。一方、ドライサンプ方式の場合、オイルを溜めておくタンクを設定することにより、安定してオイルポンプでオイルを圧送することが可能となる。ただし、オイルタンクをエンジンと別に設定すると、軽量、コンパクト化を阻害する要因となる。

このため、本エンジンは、クランクケース内にオイルタ

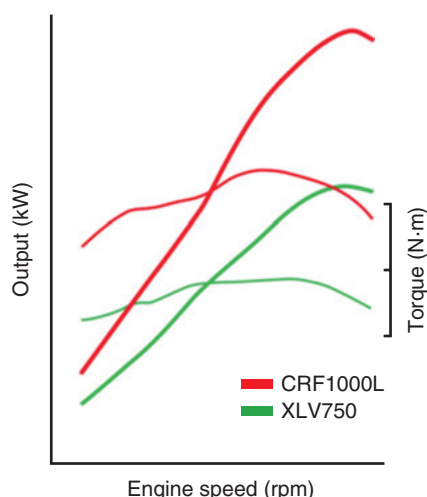


Fig. 16 Engine performance

ンクを内蔵したドライサンプ方式 (Fig. 17) を採用した。本構造の第一の特徴は、クランクケースおよびオイルパンと一体で構成されるオイルタンクをエンジン内部に備えたところにある。また、第二の特徴として、そのオイルタンクへオイルを供給するためのポンプをタンク内部に配置した点が挙げられる。

第一の特徴により、本モデルは効率的にオイルタンクを設置でき、かつオイルパンの高さを 35.7 mm という低さに設定することが可能となった。この結果、本モデルはクラストップレベルの最低地上高 250 mm を達成した。

さらに第二の特徴により、オイル通路は、オイルパンおよびタンクと一体かつ最短で設置することが可能となり、エンジン全体の軽量、コンパクト化に寄与している。

4.2.2. クラッチ室内配置構造ウォータポンプ

従来、ウォータポンプの設置手法として、クランクケースやエンジンカバーの外面に取付け座面を構成し、外側からボルトで締結する手法が広く採用されてきた。この手法では、その座面やボルトがエンジン外面に存在することにより、エンジンカバーのスタイリング自由度が制限される要因となっていた。また、ウォータポンプをクラッチカ

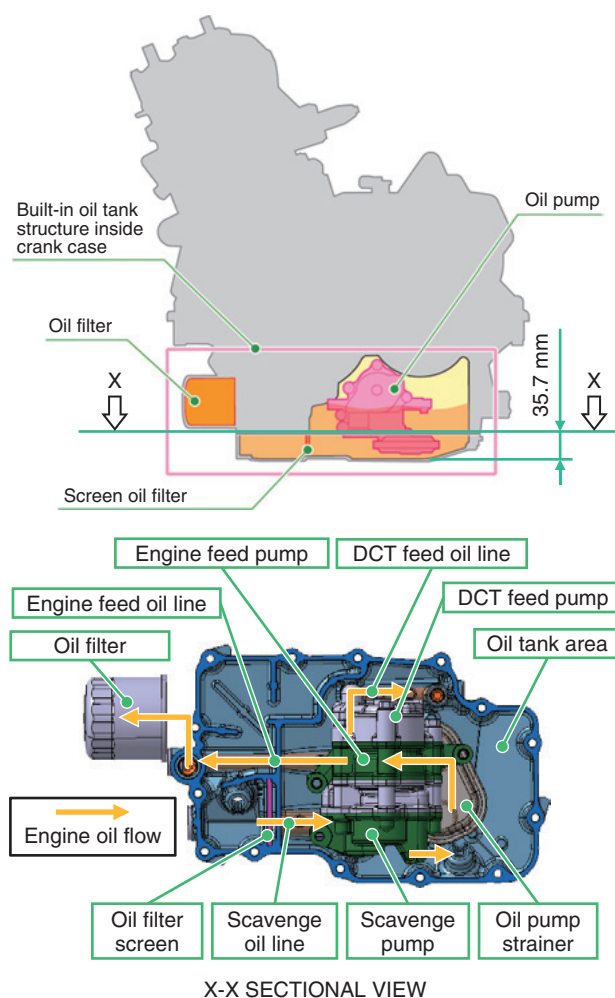


Fig. 17 Construction of dry sump system having oil tank integrated in crankcase

バーに設置する場合、DCTの油圧制御に必要なデバイス類を避けながら配置する必要が生じる。

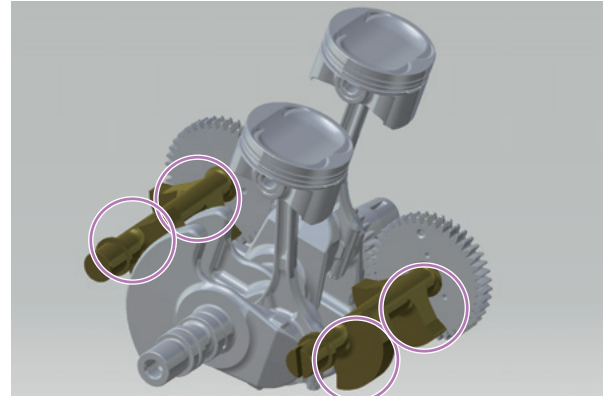
そこで、本エンジンのウォーターポンプは、クラッチ室内配置構造 (Fig. 18) を採用した。この構造の特徴は、ウォーターポンプの取付け座面をクラッチ室内に構成し、ウォーターポンプをエンジンの内側からボルトで締結するところにある。これにより、ウォーターポンプをエンジンに設置するための座面およびボルトを、エンジン外面から排除することができた。また、ウォーターポンプからシリンダのウォータージャケットに冷却水を送るためのホースも、エンジン外面から排除することが可能となった。さらに、エンジン右側側面視において、DCTの油圧制御デバイス類を、ウォーターポンプと重ねながら配置することができ、DCTモデルの軽量、コンパクト化に貢献した。

4.2.3. 270° 位相クランクシャフトと2軸1次バランス

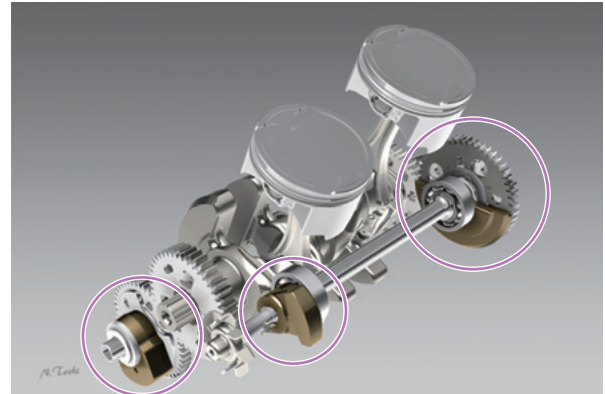
前モデルは、そのV型2気筒エンジンが持つ、低速域での扱いやすさやトラクション性能、パルス感について高い評価を得ていた。本エンジンは、その長所を継承しながら、さらなる軽量化やコンパクト化、マスの集中を実現するため、直列2気筒270°位相クランクシャフトを採用した。

直列2気筒エンジンにおいて、270°位相クランクシャフトは不等間隔爆発となり、V型エンジンに近いパルス感を発生することが知られている⁽¹⁾。一方、270°位相クランクシャフトは、2気筒相互のピストン往復運動によって

2次振動を打ち消すことは可能であるが、1次振動を打ち消すことはできない。従来、この1次振動を打ち消す手段として、2本のバランスシャフトに各2個のバランスウェイトを付加する手法がとられてきた。しかし、この手法は、バランスウェイトとコネクティングロッドの干渉を避けるために、エンジンの前後長が長くなるという課題があった。そこで、本エンジンは、三つのバランスウェイトで1次振動を打ち消すことが可能な、独自の2軸1次バランス構造⁽²⁾を採用した (Fig. 19)。これらにより、軽量、コンパクト化と低振動化の両立を可能とした。



(a) Biaxial primary balancer (Conventional type)



(b) Biaxial primary balancer (CRF1000L Africa Twin)

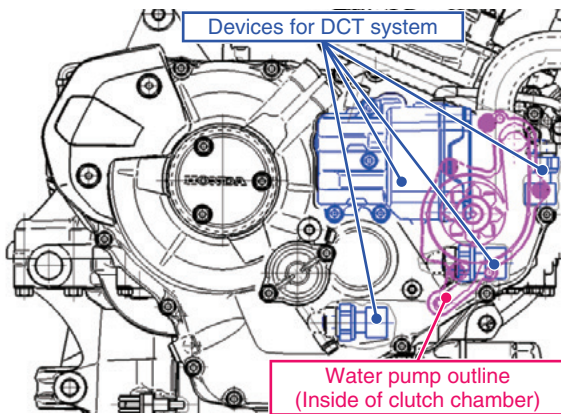
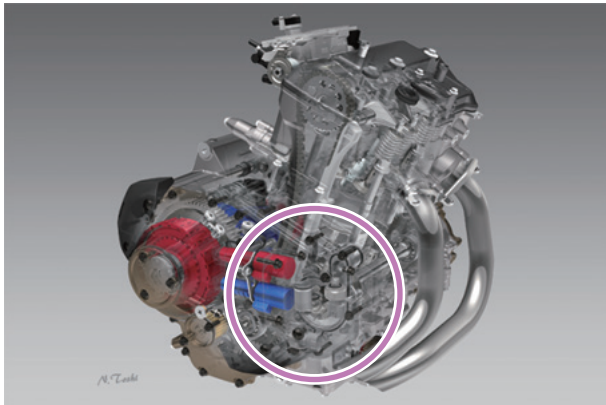


Fig. 18 Construction of water pump stored in clutch housing

Fig. 19 Parallel twin cylinder using 270 deg phased crank shaft and biaxial primary balancer

5. オン/オフロードモデル用 DCT の概要と制御技術

5.1. DCT クラッチ

Fig. 20 に DCT クラッチの構造図を示す。本モデルではオフロード走行時、ライダーがステップに足を載せたまま上体を前後移動、またはコーナでは足を出しバランス取りをする使い勝手が想定される。そのため、ライダーの動きを阻害しない足元付近のクランクケース右側カバー、および左側チェンジ機構まわりのコンパクトさが要求される。

本モデルの DCT では、NC700/750 シリーズに対し、油路構成を見直し 10 mm 以上右側カバーの突き出し量を低減した。

DCT のシフト機構は、Manual Transmission (MT) の構造をベースに、シフトスピンドルへの入力方法を、足で操作するシフトペダルから、リダクションギヤ列を装備したコントロールモータに変更したものである。

本モデルでは、マスの集中化および最低地上高 250 mm を達成するため、スタータモータ、バッテリーボックス、シフトチェンジスピンドルに囲まれた位置に DCT シフトチェンジモータを配置した (Fig. 21)。

5.2. DCT 制御システム

DCT は MT の駆動力伝達方式と同様に、ダイレクトなエンジントルク伝達が可能である。さらに、ライダーによるクラッチ操作およびシフトペダル操作が不要な自動変速機能は、駆動力を断続させることなくショックの少ない変速が可能である。これらの特徴は、ダイレクト感のある駆動力を維持しながらライダーがスロットル操作とブレーキ操作に集中できる点で、オフロードを走行するオン/オフロードモデルにとって大きなアドバンテージとなる。本モデル

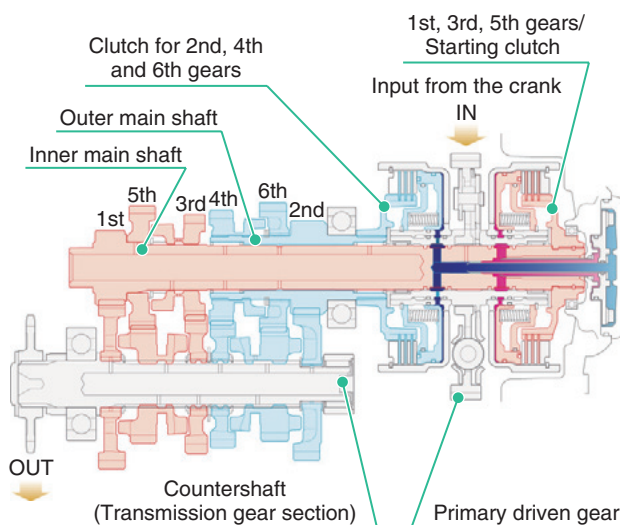


Fig. 20 DCT system

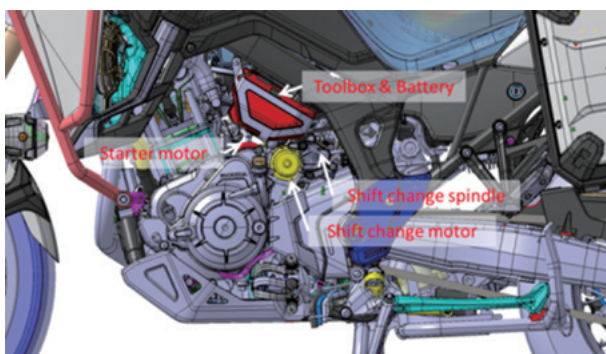


Fig. 21 Location of DCT shift motor

ではこのメリットを最大限にいかすために、以下に述べるような新しい制御機能を開発した。

5.2.1. G スイッチ機能

G スイッチによるモード切替え機能は DCT 車のオフロード走破性を向上させるために開発された。G は英語で砂利を意味する Gravel の頭文字をとった。G スイッチを押すとメータの液晶画面に G マークが表示されることで G スイッチの機能がオンになる。G スイッチ機能がオンのときの動作を以下に示す。

スロットルを完全に閉じた状態から開いた際の接続側クラッチ油圧を通常より速く上昇させる。これにより、半クラッチ状態からクラッチ完全締結状態への移行が早くなり、駆動力の立ち上がり特性がレスポンス向上方向に変更される (Fig. 22)。その結果、ライダーのスロットル操作によるピッチング方向の姿勢コントロールやテールスライドといったオフロード走行の使い勝手によりマッチした駆動力性能が提供される。

Automatic Transmission (AT) モード中の変速スケジュールは、低速域を中心にシフトアップ車速を引き上げ、かつシフトダウン車速を引き下げたセッティングに変更されることで、オフロード走行によりマッチしたものとする (Fig. 23)。

なお、ライダーがさまざまな DCT モードを選択しながら走行することを想定して G スイッチ機能は MT モードでも使用可能とし、AT モード中と同様にクラッチ接続制御が変更される。

5.2.2. S モードの 3 レベル化

DCT の AT モードでは、市街地走行を中心とした燃費重視の D モードと高速走行での追越しやスポーティな走行をするための S モードがある。本モデルではさらに、S モードのレベルを三つに増やすことでライダーの好みにさらに近い変速スケジュールが選択できる構成とした。従来の

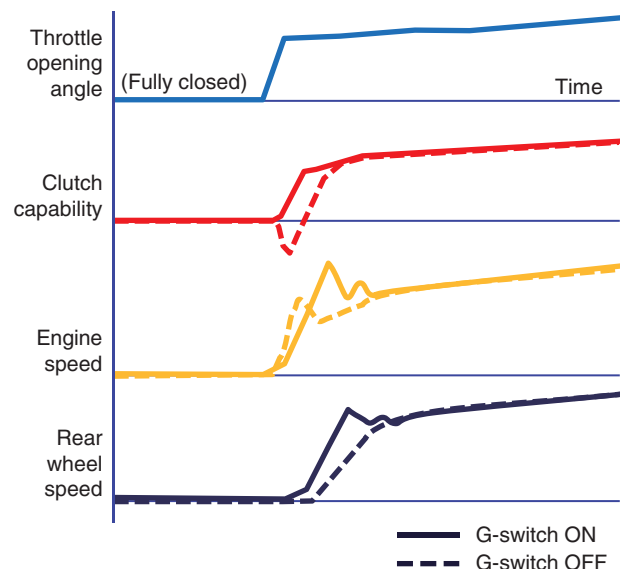


Fig. 22 Clutch capability control with G-switch

S モードの位置づけとなるレベル 2 に加え、やや控えめのスポーツ設定で燃費性能との両立を図ったレベル 1、および最もスポーティな設定としたレベル 3 が自由に選択できる (Fig. 24)。選択された S モードのレベル設定はイグニッションスイッチをオフしたあとも ECU に記憶されている。

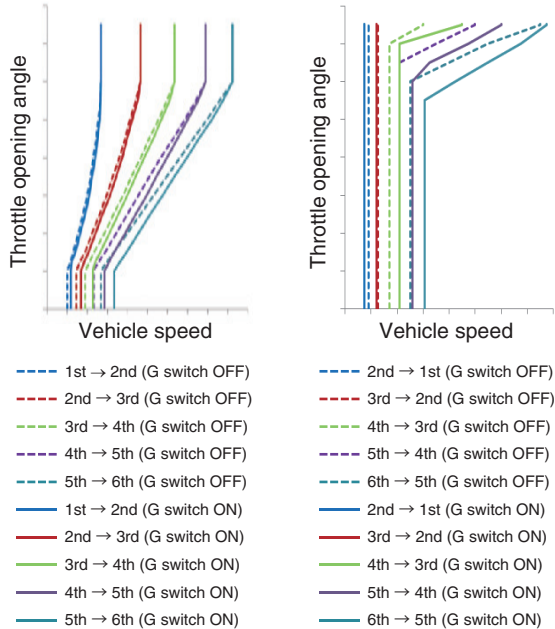


Fig. 23 Shift schedule in AT mode with G-switch on or off

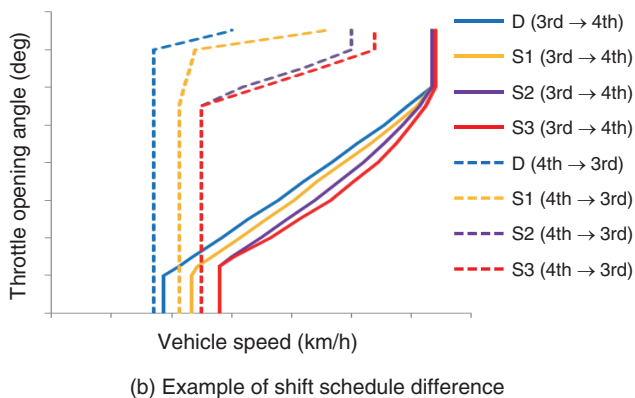
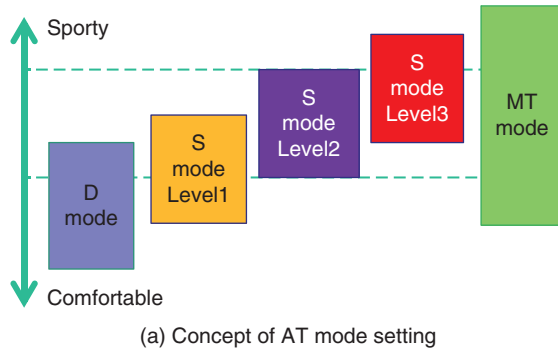


Fig. 24 AT modes with three levels in S mode

5.2.3. 登降坂推定

車両の各種センサからの入力情報として、エンジン回転速度、スロットル開度、車速、ギヤポジション、ブレーキスイッチ等から路面の登降坂角を推定している。これに基づき、AT モードでは登降坂角に応じて変速スケジュールを適正化している。下り坂と判断されブレーキ操作を多用する減速走行中であれば、早めのシフトダウンをおこなうことでエンジンプレーキが効果的に使われるようになる。また、登り坂と判断された場合は、ライダーのスロットルワークに応じて早めに登坂用の変速スケジュールに変更することで低めのギヤポジションが選択され、登り坂走行に必要な駆動力が確保される (Fig. 25)。

5.2.4. Honda セレクタブルトルクコントロール

VFR1200X や VFR800X などで用いられている Honda セレクタブルトルクコントロール (以下トルクコントロール) を本モデルにおいても採用した (Fig. 26)。ライダーはトルクコントロールスイッチを操作し、好みに合わせて 3 段階のエンジントルクコントロールの介入度合いを選択することができる。本モデルでは各シリンダにおける燃料噴射を必要に応じて一時的に停止する燃料噴射制御を主とした VFR800X タイプのトルクコントロールを踏襲している。気筒数が少なく不等間隔爆発のエンジンにて燃料噴射制御

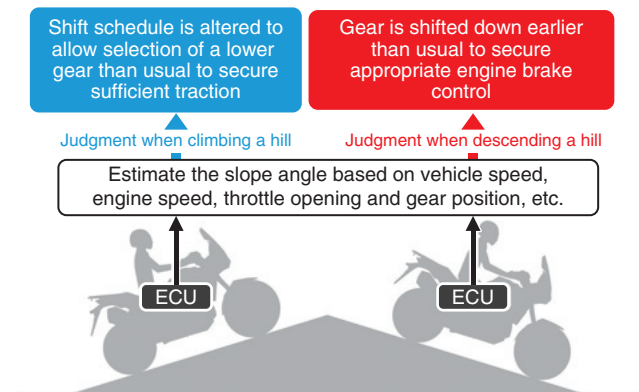


Fig. 25 Image diagram of gear-shifting control at uphill and downhill

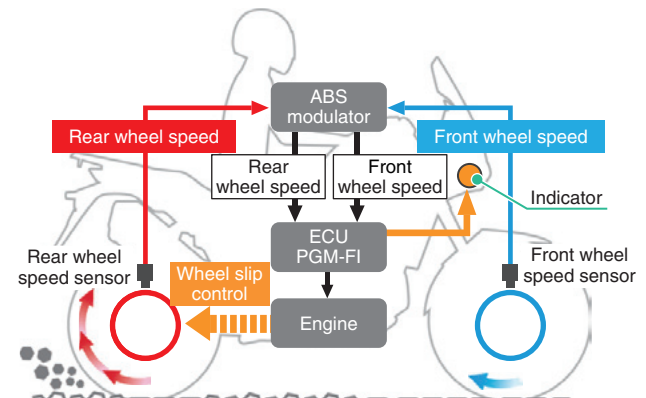


Fig. 26 Honda selectable torque control

の停止順序が適切でない場合、エンジントルクの変動幅が増加し、安定したトルク低減作用が得られないだけでなくパルス感が低下してしまう。そこで、トルクコントロール作動中における燃料噴射は実行と停止をできるだけ交互に配置することで、トルク低減性能と良好なパルス感を確保している。また、ライダーによるクラッチ操作の介入がないDCT車ならではのスロットル急開で発進した際のリヤホイールスピンに対応するため、車両停止状態からも作動可能としている (Fig. 27)。

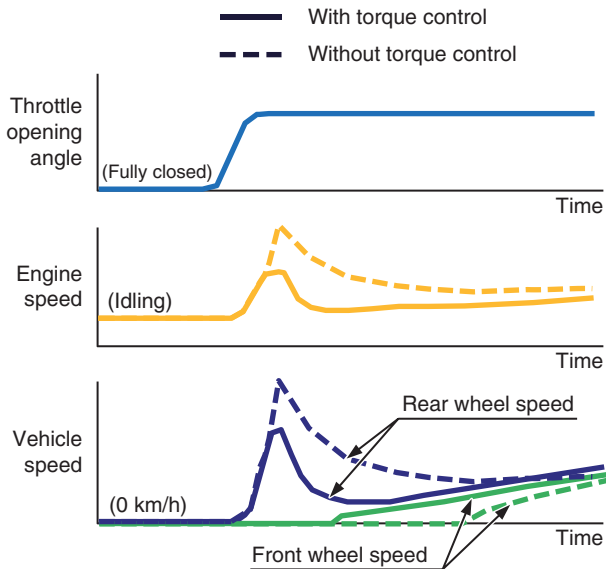


Fig. 27 Honda selectable torque control operation at start

6. 吸排気系

6.1. 吸気系

Fig. 28 に吸気系の構造を示す。エアクリーナは、完成車パッケージを優先しながら最大限の給気効率を実現するため、左右ダクト+2枚エレメント構成とし、ヘッドパイプ後部でメインフレームをまたぐ3室ケース構造を採用した。エアクリーナからスロットルボデーまでの接続チューブは270°位相クランクの吸気間隔への最適化のため、2気筒を不等長(#1: 110 mm, #2: 160 mm)とした。またオフロード走行に必要な高い埃タフネス、長寿命を実現するため、ヘッドライト横カウル内に吸気口を配し、濾過面積1,200 cm²のビスカスエレメントを左右に配置する構造とした。

吸気ダクト内フラップなどのデバイスを採用することによる重量増を避けるため、吸気ダクトを片側φ25.2の小排気量車並みの開口径とすることで静粛性を確保した。さらに目標出力とドライバビリティを成立させるために、吸気下流に向けてφ25.2からφ50.6に拡大するテーパーダクトを採用することで吸気抵抗を低減した。また、ダクト全長

を286 mmとすることで吸気共鳴による過給効果を利用して出力を向上する構造とした。

6.2. 排気系

本モデルのコンセプトを表現する排気音色として、1,000 ccクラスの迫力と軽快なツインエンジンモデルらしい歯切れの良さの両立を目指し開発をおこなった。目指す音色の評価には、独自の重厚感とパルス感という評点指標を用いた。これら指標は複数の評価者が主観的につけた点数を平均化したものである。重厚感により低周波数域の音圧に相関が強く、パルス感はエンジンの爆発間隔および高周波数域の音圧に相関が強い指標であることがわかっている⁽³⁾。

採用したマフラ構造は、従来型の3室リターン構造のものに対し、2番目の膨張室から外気へ通じる排出管を追加したものである。すなわち、2番目の膨張室と外気をつなぐ管である2室テールパイプと、3番目の膨張室と外気をつなぐ管である3室テールパイプの二つのテールパイプを有する構造となっている (Fig. 29)。

一定以下の音量に減衰させる必要がある中で、従来型

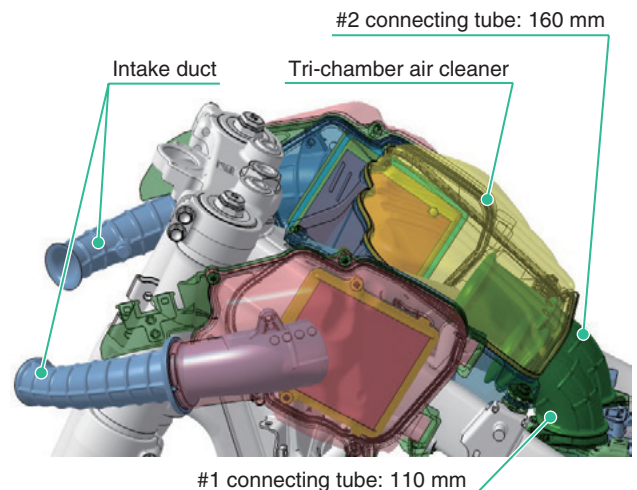


Fig. 28 Configuration of air intake system

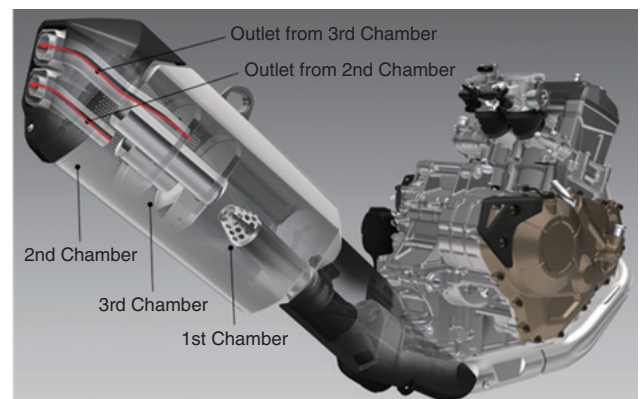


Fig. 29 Structure of muffler

の3室リターン構造の場合、高周波数域がより減衰しやすく、パルス感評点は下がる傾向となる。しかし、本モデルでは上記構造の採用により高周波数域の音圧を保つことができ、パルス感評点に対し、エンジン爆発間隔による効果に加え、周波数特性による効果を上乘せすることができた。

Fig. 30 に2室と3室のテールパイプにおける音圧測定結果を示す。

これを見ると、2室テールパイプが2.5 kHz以上の高周波数域で3室テールパイプの音圧を上回っていることがわかる。

3室テールパイプの排出周波数特性は、従来型3室リターン構造のものと考えられ、2室テールパイプのパルス感評点向上への効果が見て取れる。

一方、3室テールパイプは100 Hz前後の低周波数域の音圧が高く、重厚感評点向上に寄与している。それぞれの管径の選定により、全体音量および出力特性を考慮しつつ、周波数特性とのバランスをとることで目指す排気音色を達成した。

従来機種に対する各評点の位置づけは Fig. 31 のとおりである。

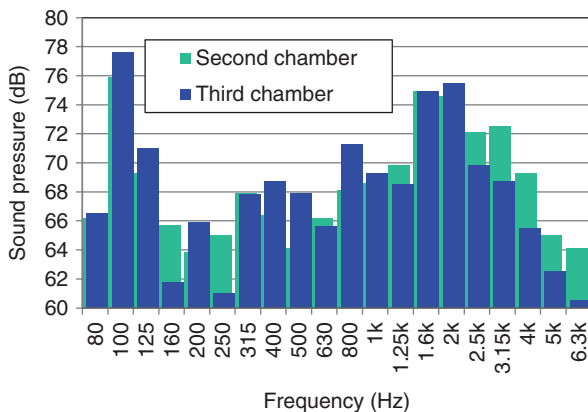


Fig. 30 Measurement results of exhaust sound pressure

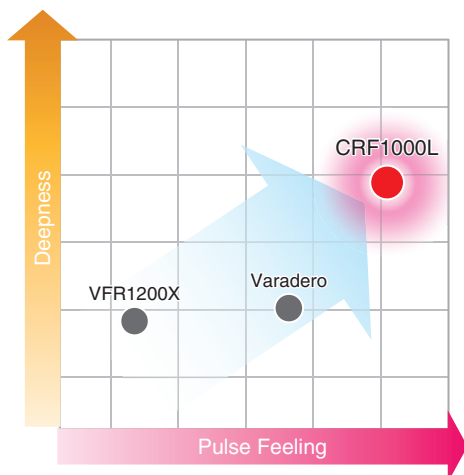


Fig. 31 Evaluation results of exhaust sound

7. メータおよびスイッチ

7.1. メータ

メータは左右へ視線の移動が少なく視認性の高いラリー車のメータイメージを踏襲し、二つのネガ表示液晶を上下に配置し、アッパカバーの仕切りで表示機能を明確に分ける形状とした (Fig. 32)。従来メータに配置していたメータセレクト、セットスイッチは前述のとおり、ハンドル周りへの配置として、洗練されたデザインを実現した。インジケータ周りも液晶画面との仕切りを設け、左右対称の機能的な配置とし、コックピットをイメージする演出を施した。

走行中に最も視認性が求められるスピードメータ表示やエンジン回転数は視線移動の少ない中央上段に配置した。下段部にマルチインフォメーションディスプレイを配置し、限られた空間の中で豊富な情報を見やすく表示できるようにした (Fig. 33)。DCT のモード表示、ギヤポジション、G スイッチのセレクト状態、トルクコントロールレベルの表示も、集約した配置とすることで、見やすく情報が伝わる表示とした。

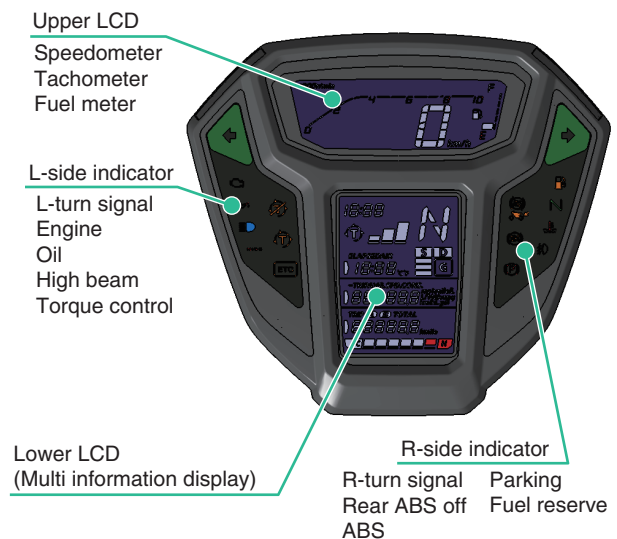


Fig. 32 Gage panel

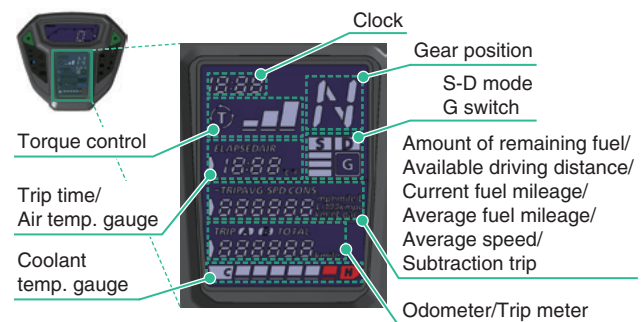


Fig. 33 Multi information display

7.2. ハンドルスイッチ

左側ハンドルスイッチは、トルクコントロールスイッチやメータセレクト・セットスイッチを新たに配置し、走行中も指の移動量を最小限にしてグリップから手を離すことなく操作できるよう配慮をした〔Fig. 34(a)〕。

スイッチの形や配置に関しては、指の動きやフィット感、クリック感を最大限に得られるようにするため、操作性テスト、実走テストなどを通じて検討をおこなった。また、操作頻度の高いウイंकアススイッチは、操作性の良さを配慮して、ハンドルパイプより下側に配置した。さらにDCT用のシフトスイッチは、シフトアップ側を人差し指でおこなえるように背面に配置し〔Fig. 34(b)〕、シフトダウン側は親指でおこなえるように前面に配置した。これらにより快適な操作フィーリングを実現している。

右側には、エンジンストップ/スタータ統合スイッチやDCT用のAT/MT切替えスイッチ、ハザードスイッチを配置した〔Fig. 34(c)〕。右側ハンドルスイッチ類は、親指のみですべてのスイッチが操作できる配置とした。

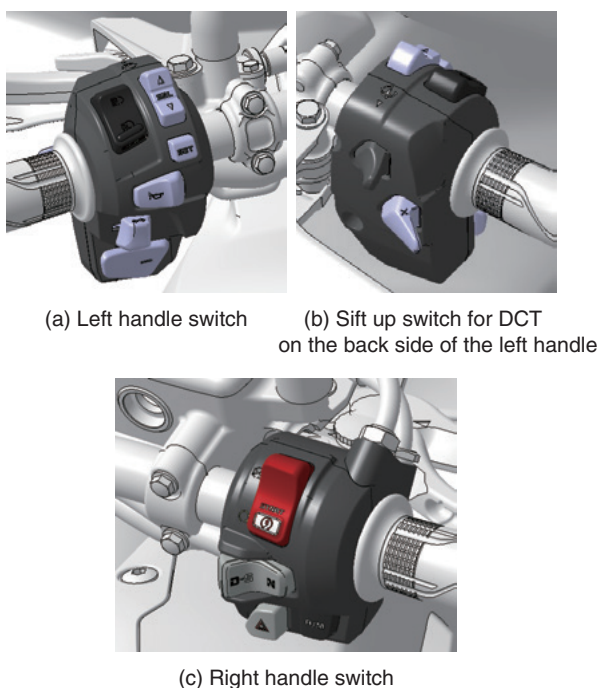


Fig. 34 Handle switch

8. あとがき

CRF1000Lの開発は、前モデルであるXR750 Africa Twinの伝統を踏襲しながらも、次世代のモデルにふさわしい技術を取り込むことで、以下を達成した。

- (1) オフロードの走破性と積載しての高速走行を含むオンロードでの快適な走行性能の両立
- (2) Honda 初のオフロードモデル用DCTを搭載し、オフ

走行でもその有効性を発揮

以上により、多くのお客様に「これはAfrica Twinである」との賞賛を得た。

長い旅のパートナーとして、また、さまざまな日常のシーンで末永く愛用いただきたい。

参考文献

- (1) 小林弘毅, 根来正明, 大須賀貴則, 三堀敏正, 大島正: NC700 シリーズの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 24, No. 2, p. 23-31
- (2) 特許番号, 第 5847688 号 (2015)
- (3) Tanaka, K., Sugita, H., Saito, H., Sekita, M.: Design Method of Motorcycle Exhaust Sound Fitting to Vehicle Concept Regardless of Engine Configurations, SAE Technical Paper 2014-32-0121, doi: 10.4271/2014-32-0121, (2014)

■ 著 者 ■



飯塚 直



山倉 裕



今井良幸



飯田晃祥



菅野 剛



中村公紀



小山 信也



中村健一郎



小野和彦

PIONEER 1000 完成車技術

Development of the PIONEER 1000

半 田 秋 男*

Akio HANDA

横 田 洋*

Hiroshi YOKOTA

荻 安 丈 幸*

Takeyuki KARIYASU

神 山 剛*

Takeshi KAMIYAMA

坂 本 直 樹*

Naoki SAKAMOTO

佐 藤 浩 二*

Koji SATO

黒 田 耕 介*

Kosuke KURODA

西 山 真 也*

Shinya NISHIYAMA

山 崎 雅 貴*

Masaki YAMAZAKI

要 旨

北米の Recreational off-highway Side by Side vehicle (SXS) 市場向けに、PIONEER シリーズのフラッグシップとなる PIONEER 1000 が開発された。SXS 市場で最大排気量となる 999 cm³ Parallel twin 新エンジンに、SXS 市場で初のデュアルクラッチトランスミッションを搭載し、プラットフォームを共用した 3 人乗りと 5 人乗りの 2 タイプを市場に投入した。これらのモデルは、数多くの新技術の採用により、高い汎用性と優れた性能と機能、耐久性をあわせ持っている。レクリエーションや実用作業で多用途に活躍している Honda マルチカテゴリー PIONEER シリーズ中で、より高い魅力を提供するモデルである。

ABSTRACT

The PIONEER 1000 was developed to serve as a flagship model for the PIONEER series in the North American market for Side by Side vehicles, also known as recreational off-highway vehicles. Three-passenger and five-passenger types are made available, both applying a new 999 cm³ parallel-twin engine, the largest in the Side by Side market, and for the first time in the Side by Side market a dual clutch transmission. These are built with a common platform and have excellent versatility, function and durability deriving from the numerous technologies applied. It is a model that presents an enhanced appeal within Honda's multi-category PIONEER series that is popularly used for various purposes such as recreational activities and practical work.

1. ま え が き

Honda のオフロードバギー車の歴史は、1970 年の世界初の鞍乗りタイプの三輪 All-Terrain Cycle(ATC)US90 から始まり、四輪鞍乗りの All-Terrain Vehicle(ATV)に進化した。ATV は現在も北米市場に育てられている。一方シートに座るタイプの四輪バギー(FL)は、1977 年 FL250 (ODYSSEY 250)から始まり FL350R(ODYSSEY 350R)、FL400R(PILOT 400R)と進化し、1990 年まで販売された。ATC、ATV、FL はいずれも 1 人乗りである。一方、Recreational off highway Side by Side vehicle(SXS)は、ATV の機動力と走破性を継承し、多くの乗車定員でハンティングやトレール走行を楽しめる車両である。また、積載と牽引の能力を上げたことで農場や牧場などの実用作業でも活用できる (Fig. 1)。そのため SXS 市場は 2003 年頃

から急成長し、2016 年の現在も成長を続けている。SXS は 2 人乗りから 6 人乗りの車両があり、エンジン排気量は 150 cm³ から 1000 cm³ までの幅広い機種が各社から投入されている。Honda の SXS は BIG RED 700 から始まり、PIONEER シリーズとして PIONEER 700、PIONEER 500 に続き、今回紹介する PIONEER 1000 へと繋がっている。

一般的に多人数乗車 SXS の車両は大型化し、機動力や取回し性が損なわれやすい。PIONEER 1000 ではリヤシートを畳んで収納できる Honda 独自の技術により、コンパクトな車体を実現させた。また高出力エンジンに Dual Clutch Transmission(DCT)を組み込み、ロングストロークサスペンションと大径タイヤの採用により、クラスをリードする商品魅力が得られた。ここに PIONEER 1000 を紹介する (Fig. 2, Fig. 3, Table 1)。

*二輪 R&D センター



Fig. 1 Usage example of a Side by Side



Fig. 2 The PIONEER 1000-3



Fig. 3 The PIONEER 1000-5 DLX

Table 1 Model variation and features

Features	3P STD	3P EPS	5P EPS	5P DLX
27 inch bias tire	○	○	○	
27 inch radial tire				○
Aluminum wheel				○
Electric power steering		○	○	○
Tilt steering		○	○	○
Color panel		○		○
Camouflage color		○		○
Manual shift mode		○	○	○
Self-leveling suspension			○	○
LED head light				○

2. 開発のねらい

PIONEER 1000 は、よく働き、よく遊ぶ SXS として「King of Works Hard, Plays Hard」をコンセプトに商品化を目指した。SXS 市場には、4 人から 6 人乗りの前後複列シート車両があり、トレールライディング等のレクリエーションを多人数で楽しめる。しかしながら、後列シートに加えて荷台のスペースを確保すると、ホイールベースが延びて回転半径が大きくなる。このため、農場や牧場などで見回りや運搬などの作業時の取回し性が損なわれることがある。そこで、Honda 独自のパッケージング技術を駆使し、多人数乗車にもかかわらず、2 人乗りと同等の取回し性能をねらった。また、マルチカテゴリーのフラッグシップモデルとして余裕のある駆動力、走破性、乗り心地、静粛性、低振動、積載牽引等の作業性を備えた性能もねらった。さらに、3 人乗り用のリヤベッド構成部品と 5 人乗り用リヤロールバーを除いた、フレームボデーの基本骨格部品をすべて共通にすることで生産性の向上を図り、お客さまが購入しやすい価格の SXS を提供することもねらった。

3. エンジン、駆動系

フラッグシップモデルとしてのコンセプトにより、目標を以下に定めた。

- ・乗員スペースの確保と、最低地上高を両立させる、低重心、軽量かつコンパクトなエンジン。
- ・マルチカテゴリー SXS の使い勝手を考慮し想定される最大傾斜角の登坂路を、本モデルの最大積載時や、最大牽引時にも、H レンジで登坂可能な余裕駆動力 (Fig. 4)。
- ・クラストップレベルの加速性能と最高速度。
- ・AT の利便性とダイレクトな走行フィーリングを両立する変速機の搭載。

これら実現するために、エンジンの排気量を SXS 最大となる 999 cm³ とし、形式は水冷、OHC、4 バルブ、直列 2 気筒とした。トランスミッションはサブトランスミッション付 DCT とした。主要スペックを Table 2 に示す。

Table 2 Engine specifications

Engine type	Liquid-cooled 4-stroke
Cylinder arrangement	Parallel
Number of cylinder	2
Crank angle	270 degree
Bore/Stroke	92 mm/75.2 mm
Displacement	999 cm ³
Compression ratio	10.0:1
Maximum power (Counter shaft)	50 kW/6000 r/min
Valve train	Unicam/4 valve
Lubrication	Dry-sump
Balancer	Single-shaft Primary-balancer
Transmission	6-speed DCT transmission + subtransmission

3.1. エンジンパッケージング

3.1.1. エンジン搭載方向、位置、軸配置

マスの集中、軽量化の観点より、エンジンとトランスミッションは一体構造とした。エンジン搭載位置は、車両の前後重量配分の観点から車両中央とし、エンジンの搭載方向は、エンジン内にベベルギヤが不要な縦置きを選択した (Fig. 5)。

エンジンの一部を前列シート下に潜りこませ、シリンダヘッドおよび吸気系を前列シートの後方に配置することにより、目標とする前後重量配分を達成している (Fig. 6)。

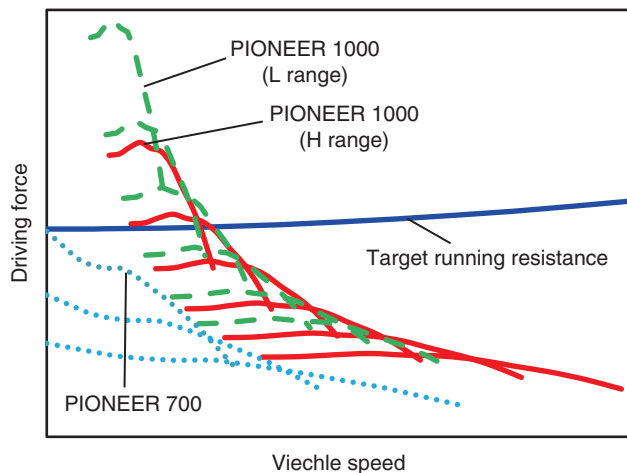


Fig. 4 Driving force diagram

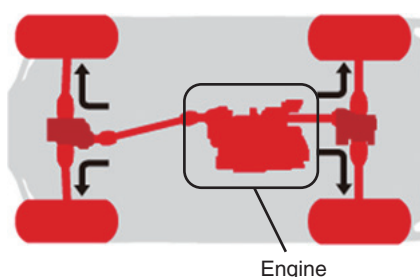


Fig. 5 Engine placement (plain view)

3.1.2. エンジン内設置型オイルタンク式ドライサンプ構造

SXS 特有の急な登降坂、トラバース走行等におけるエンジン油圧の安定性の確保と、エンジン全高を抑えることを両立させるために、多くの SXS にはドライサンプ構造が採用されている。本エンジンでは、さらに部品点数を抑えるために、エンジン内設置型オイルタンク式ドライサンプ構造を採用した (Fig. 7)。

エンジン下部のオイルパンを扁平形状にすることで、エンジン全高を 525 mm, 出力軸からエンジン底部までの距離を 116 mm に抑えることができた。これにより、目標の最低地上高と乗員スペース確保の両立と、低重心に寄与することができた (Fig. 8)。また、エンジン後方のカバー内にオイルタンクを形成しエンジンに内蔵させた。これにより、別体のオイルタンクとオイル配管が不要になり、部品点数の削減とマスの集中に貢献した。

3.1.3. ユニカムバルブトレイン

エンジンの軽量、かつコンパクト化と、動力性能を両立させるために、動弁機構にはユニカムバルブトレイン機構を選択した (Fig. 9)。これにより、一般的な DOHC 機構に対し、約 800 g の軽量化およびシリンダヘッドの小型化が可能となり、乗員スペースの確保と低重心に寄与することができた。

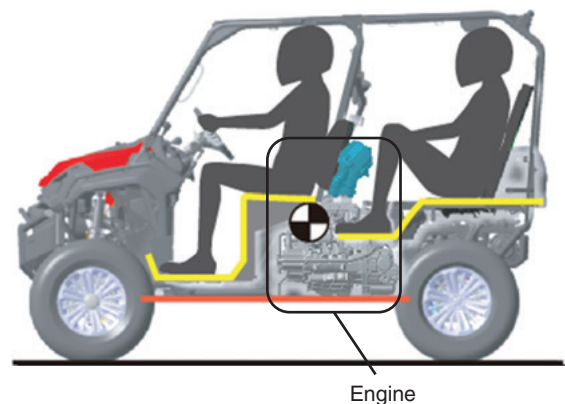


Fig. 6 Engine placement (cross-section)

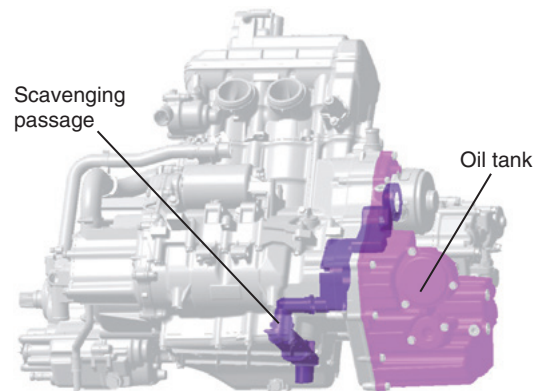


Fig. 7 Dry sump system

3.1.4. トランスミッション

ATの利便性と効率の良さ、低速での使い勝手を達成するため、DCTシステムを採用した。Fig. 10に示すように、DCTシステムは、二輪車のNC700シリーズ⁽¹⁾の基本構造をベースとした。各クラッチのディスクとプレートの枚数を3から4枚に増やすことで、レクリエーション走行や実用作業で必要されるクラッチ容量を確保している。サブトランスミッションは動力伝達経路上のDCTの下流に配置されている。

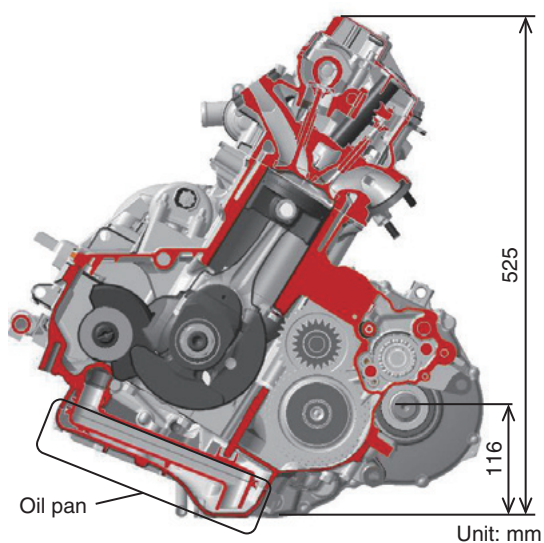


Fig. 8 Cross-section of the engine

このサブトランスミッションは、通常走行用のギヤ (Hレンジ) と実用作業用のギヤ (Lレンジ) および後退用ギヤ (Reverseレンジ) を内蔵している。また、サブトランスミッション内にはパーキングドグを内蔵している。これはHondaの乗用車に用いられている構造を流用している。Fig. 11に示すように、パーキングドグをLレンジ用のミッションドグの外周に配置することで、部品点数を削減した。

3.2. DCTの制御

SXS用として新たに開発した制御について説明する。

3.2.1. クラッチの発進制御

ECUには、クラッチ回転、クラッチ油圧、車速、スロッ

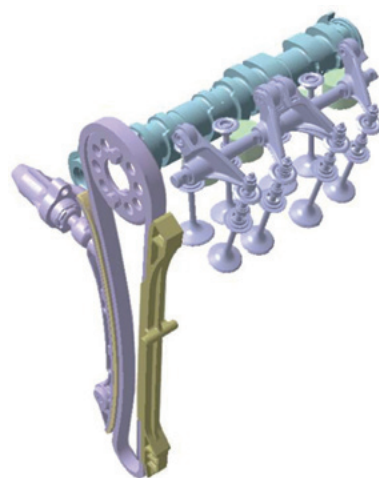


Fig. 9 Unicam valve train system

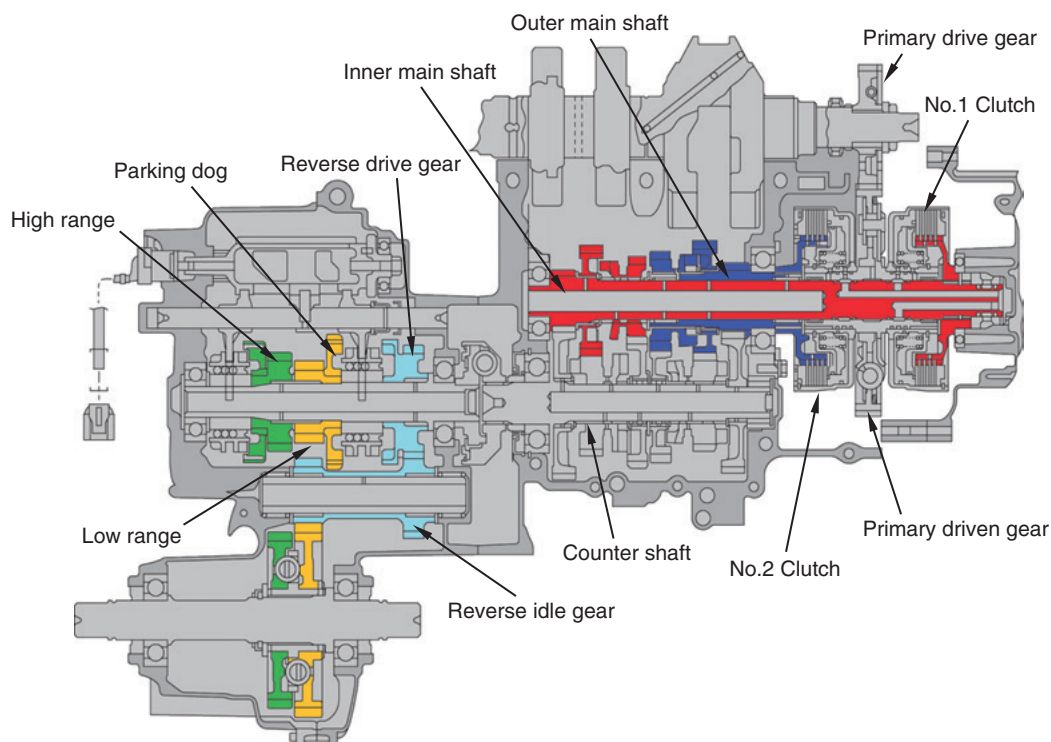


Fig. 10 Transmission layout

トル開度などさまざまな情報が送られる。路面状況や負荷に応じた、発進に必要な駆動力を、ECUは得られた情報からリアルタイムに算出する。それによりクラッチ油圧をコントロールすることでスムーズな発進を実現している。特に本モデルでは、登降坂や重牽引の使い勝手から、極低速域 (3 km/h 以下) においてクラッチの断続のきめ細かい制御が求められる。

そこで、DCT 専用の速度センサをエンジンに追加した。これにより、センシング分解能をおよそ 3 倍に向上させ、極低速域でのクラッチのきめ細かい制御性能の向上を図った (Fig. 12)。

3.2.2. 走行中のクラッチ制御

スロットルを開けた直後と閉じた直後の一定時間は、一般的にトランスミッションは、駆動力の変化により駆動が一瞬もたつくことで車体挙動に違和感が生じる。これを緩和するためクラッチ油圧を瞬時的 (300 ms 程度) に下げる制御を追加した。

また、SXS では急降坂走行時のエンジンプレーキが重

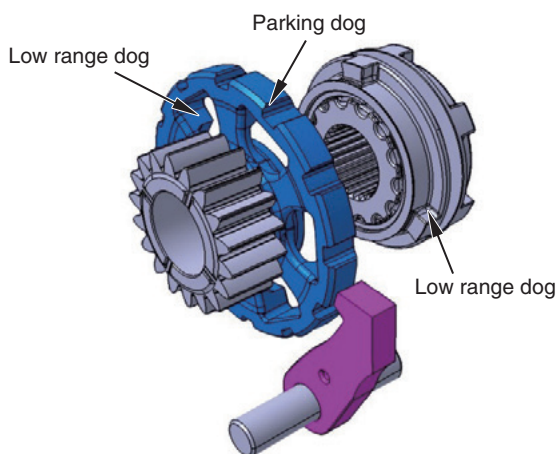


Fig. 11 Parking dog

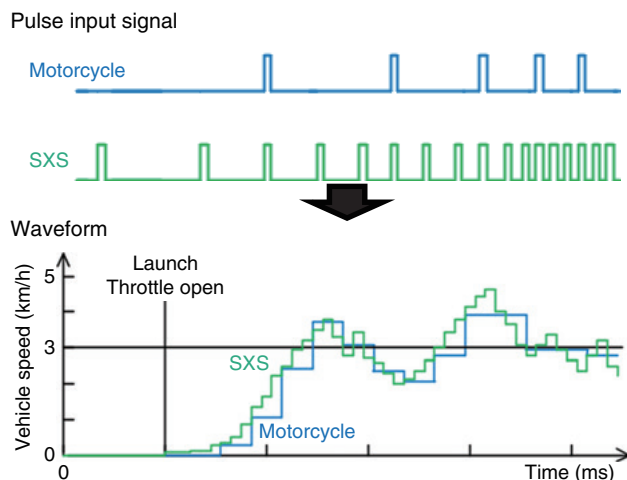


Fig. 12 DCT speed sensor

要である。そのため減速中も停車の直前までクラッチを接続させる必要がある。しかしながらそのような設定をすると、停車直前のブレーキキングによるタイヤのロックが発生したときには、クラッチ切断遅れによるエンジンストールが発生することがある。また、雪上などのすべりやすい路面を走行中にハードブレーキングをおこなうと、タイヤのロックによるエンジンストールを誘発しやすい。

これらのエンジンストール事象を防止するために、車速とエンジン回転数を用いたクラッチ制御に加えて、各々の変化率を監視してタイヤのロックを予測するアルゴリズムを追加した。これにより急減速をいち早く捉えることができ、タイヤがロックする状況でも速やかにクラッチを切断することが可能となった。

また、SXS が使われる極低温下によるクラッチ油圧の応答性低下も、クラッチの切断遅れの要因となる。そのため、油温別の補正項を新たに追加し、クラッチ切断遅れに対応している。

3.2.3. 変速タイミング制御

AT モードでは、レクリエーションや実用作業での扱いやすさを考慮した変速タイミングを設定した。さらにスポーツ走行を楽しみたいお客さま向けに SPORT 変速モードも用意されている。

また、サブトランスミッションが L レンジに切り替えられたときは、低速ギヤを積極的に使用する変速タイミングを設定し、重牽引等の低速作業においても扱いやすい特性とした。

変速タイミングの制御ロジックは、以下に代表されるような二輪車 DCT の最新ノウハウを、SXS 用として適用した。

- ・コーナリング推定制御: コーナリング中の不意なシフトアップを防ぐ。
- ・減速度追従シフトダウン制御: 減速度が大きいほどシフトダウン車速を高車速側に変移させ、エンジンプレーキ効果を増大させる。
- ・自動マップ切替え制御: 走行負荷の頻度を学習してシフトタイミングを最適にする。

また、オフロード車両特有の積載牽引走行、登降坂走行、テールスライド走行においては、ATV の TRX420 から培ってきたオフロード用 DCT 制御技術も採用し、ドライバーの走り方や走行環境に応じた最適な変速タイミングを提供している。

3.3. 駆動系操作系

3.3.1. DCT 操作系

ステアリングから手を離さずにギヤシフトできるパドルシフタを採用することで、さまざまな走行環境でもすばやい操作性を提供している (Fig. 13) (3P-STD を除く)。

本モデルのパドルシフタは、フラッグシップモデルらし

さにこだわり、先に発売された PIONEER 500 のパドルシフト構造にクリック機構を追加することで、上質な操作感を提供した。また、埃や水がかかる環境下での使用も想定されるので、パドルシフトは埃や水に十分に配慮した構造とした。これにより、長期間安定した操作性を実現している。

AT モードと MT モードの切替は Fig. 14 に示すスイッチを採用した。その同じスイッチで、AT モードでの SPORT モード切替えもできる。また、AT モード使用時でも、パドルシフト操作による MT 介入モードの選択が可能である。MT 介入モードからは、スロットル開度や走行速度などの情報をもとにした自動復帰機能により、適切なタイミングで AT モードへスムーズに復帰する。これにより MT 介入モードにおいても快適なドライビングが可能になった。

3.3.2. サブトランスミッション操作系

本モデルは、先に説明したサブトランスミッションのシフト操作を、1 本のレバーで操作できる構造としている (Fig. 15)。レバー操作をおこなうことで、サブトランスミッションに連結されたスピンドルシャフトを駆動させ、パーキング、リバース、ニュートラル、H レンジ、L レンジを切り替えることができる。

本モデルでは、さらに Fig. 16 に示すように、シフトフォーク側面にスプリングを用いたロストモーション構造を付加することにより、シフトレバー操作の操作性を向上している。

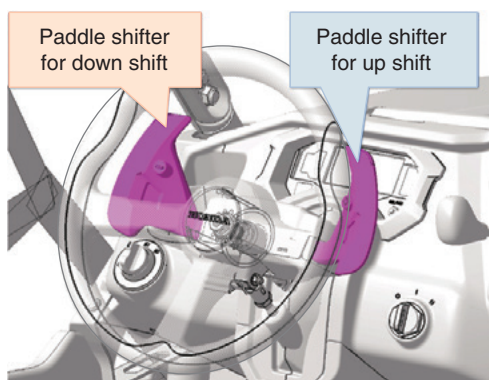


Fig. 13 Shift paddles

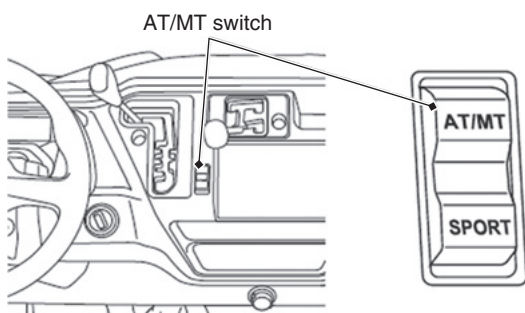


Fig. 14 AT/MT switch

3.3.3. 駆動モード切り替え機構

路面状況と使い勝手にあわせた 4 通りの駆動モードを、メカニカル式のモードセレクトレバーを操作することで選択できる (Fig. 17)。4 通りのモードは、2WD, 4WD, 4WD DIFF LOCK, さらに Turf がある。Turf とは前後のデファレンシャルを作動させ、旋回時に内外輪の回転差が生ずることで、芝生や牧草を痛めないように意図したモードである。また、各々のモードでの前後デファレンシャル



Fig. 15 Shift lever

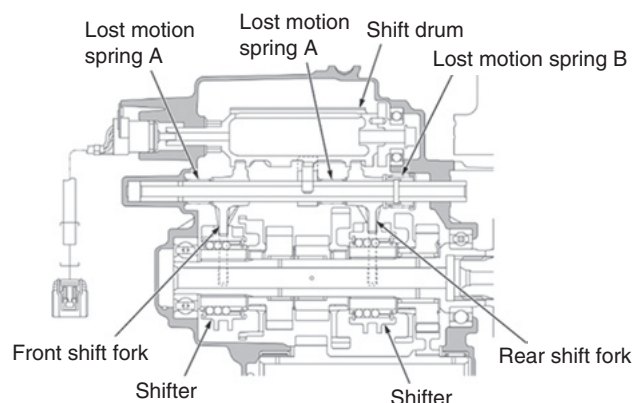


Fig. 16 Lost motion structure



Fig. 17 Drive mode select lever

4. 車体

の作動状態を Fig. 18 に示す。Fig. 19, Fig. 20 に示すように 2WD, 4WD, 4WD DIFF LOCK の切り替えは、シンプルで軽量、かつコンパクトな構造のメカニカル式とした。

	Front	Rear	Drive mode indicator
Turf	○	○	
2WD	○	●	
4WD	○	●	
4WD DIFF LOCK	●	●	

○ : Differential ● : Differential lock

Fig. 18 Drive mode

4.1. 車体パッケージング

開発のねらいで述べたように、前後複列シートと同時に、実用作業に必要な荷台のスペースを確保すると、ホイールベースが長くなり回転半径が大きくなる。そのため、ATV のような機動力や取回し性が発揮し難い。そこで本モデルは、3 人乗りモデルと 5 人乗りモデルのプラットフォームの共通化を前提に、必要十分な快適居住空間を確保し、同時にホイールベースの短縮、および車体全幅を抑えたコンパクトな車体とするパッケージングの検討をおこなった。

全長の拡大を最小限に留め、さらに車体全幅をも抑えたコンパクトな車体を実現するために、下記三つの手法を採用した。

- ・ エンジンの上部に吸気系部品を配置
- ・ 後列のクイックフリップシート構造の採用
- ・ 新構造の前列 3 人乗り用シートの採用

これらにより本モデルは、2036 mm と短いホイールベースながら高い居住性を確保し、かつクラストップレベルの最小回転半径 (4.2 m) で取回し性の良い完成車として具現

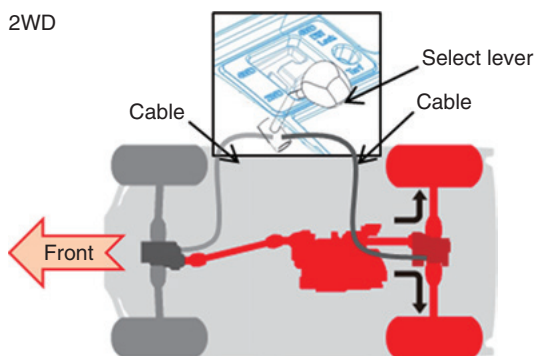


Fig. 19 2WD mode

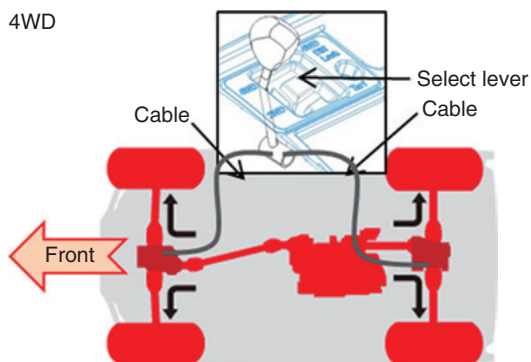


Fig. 20 4WD mode



化できた (Fig. 21, Fig. 22).

4.1.1. エンジンおよびエアクリーナ搭載位置

エンジンは、出力軸位置と底面距離を最小化し、かつ全高を下げることで、車両中央の前列シート下に潜り込ませて搭載した。シリンダヘッドは前列シート後ろに配置し、

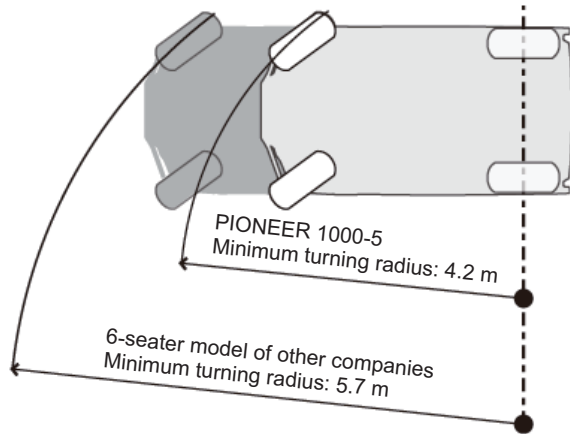


Fig. 21 Turning radius

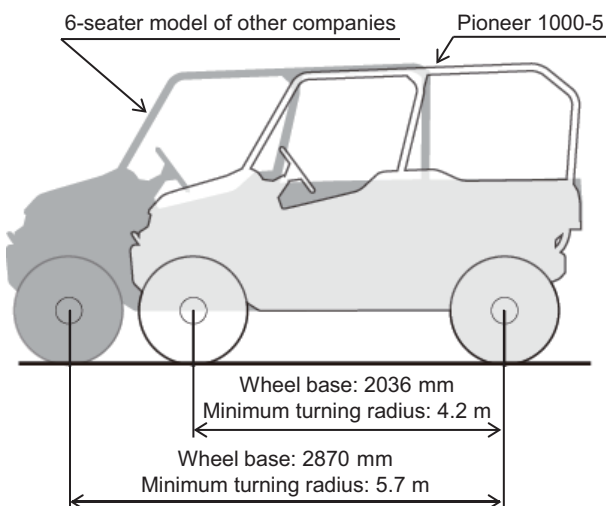


Fig. 22 Comparison of wheel base

その上部にエアクリーナを配置した。これにより、車両の全長を抑えることができた。また、同時に高い地上高 (3人乗りタイプ:327 mm, 5人乗りタイプ:314 mm) と低重心を実現し、車両の安定性を向上させた。さらには低いシート高および低い荷台も実現することができた (Fig. 23)。

4.1.2. クイックフリップシート

多人数乗車車両において、車両全体が長くなるという課題を解決するため、左右のシートバックを独立して折り畳める、クイックフリップシートを後列シートに採用した (Fig. 24)。このクイックフリップシートは、PIONEER 700 で開発され、AM95 パーセントایلの人が着座可能なサイズに設定されている。前席3人と合わせて、最大5人の乗車を可能とした。シートバック収納時には、縦 1200 mm × 横 915 mm (積載スペース中央での縦横寸法) の荷台スペースとなる。また荷台がチルトし積載物をダンプできる機能も付加されている (Fig. 25)。なおシートの収納と展開は工具を使わずに簡単におこなえる。

クイックフリップシートの採用により、荷台スペースは、実用作業において 1000 lb (454 kg) までの積載に対応できる。また、クイックフリップシートが主に使われるレクリエーションにおける5人乗車時にも、ランチ等の携行に必

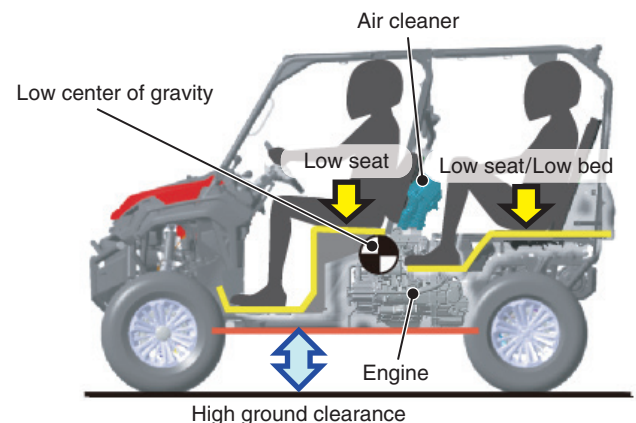
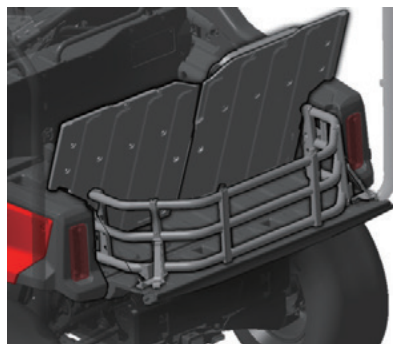


Fig. 23 Location of engine and air cleaner



5P mode



3P mode

Fig. 24 QuickFlip® seats

要な積載スペースがシート後方の荷台に確保されている。

これにより、十分な荷台スペースを確保しつつ、取回し性の良い完成車を具現化することができた。

4.1.3. 前列3人乗り用シート

AM95 パーセントイルまで想定した3人乗りの前列シートで、快適な居住空間を確保したい場合は、車体全幅を広げる手法を取ることが多い。しかし、本モデルでは、短いホイールベースだけでなく、車体全幅をも抑えたコンパクトな車体も達成する必要があった。さらに、実用作業では乗降の頻度が高いために、左右への移動がスムーズにおこなえるベンチシートの採用も必要であった。そのため、中央席がオフセットした3人乗りベンチシートを開発した。

中央席は、座面高さを両隣の席より 18 mm 上げた。また、ヒップポイントを 45 mm 前方に設定し、さらに、シートバックを 4 度寝かせた。中央席を両隣の席からオフセットすることで、最大幅の肩が乗員間で前後にオフセットし、それにより、実質的な居住空間を確保している (Fig. 26)。

また、中央席の乗員用に、ウォークスルーを阻害しないベルトタイプのハンドホールドを、シート座面の左右に配置した。さらにベンチシートながらホールド性の高いシート形状を設定し、悪路走行など不安定な状況でも乗員を保持できるようにした。



Fig. 25 Dump function

4.2. 静粛性技術

風切音に遮られる車速 (30 mph) に達するまでは会話ができる静粛性を目指した。具体的には、30 mph 以下のクルーズ車速において、運転席の耳元騒音を、クラストップの 83.5 dB 以下とすることを目標とした。

エンジンの吸気口は、従来の機種に対して乗員の耳元から遠ざけたフロントフード内に設置し、吸気原音を低減した。吸気ダクトには、レゾネータを2個設置することで、管共鳴音を低減した (Fig. 27)。また、乗員近くに配置されるエンジン、およびエアクリーナボックスの放射音を低減するため、Fig. 28 に黄色図形で示す位置に吸音材を設置した。さらに、クルーズ走行時は、DCT の変速タイミング制御によりエンジン回転数を低く保ち、エンジン放射音自体も抑制した。これらの技術により、フラッグシップとしての静粛性を達成し、会話の楽しめる居住空間を実現できた。PIONEER 700 との比較を Fig. 29 に示す。

4.3. 低振動技術

振動を低減するためには、エンジン回転数全域で防振効果を発揮する、エンジンマウントラバーが必要となる。特にアイドリング時の振動を低減するには、従来の Honda ATV, SXS で使用されてきたマウントラバーよりも、大幅にばね定数を下げる必要がある (Fig. 30)。そこで、エンジ

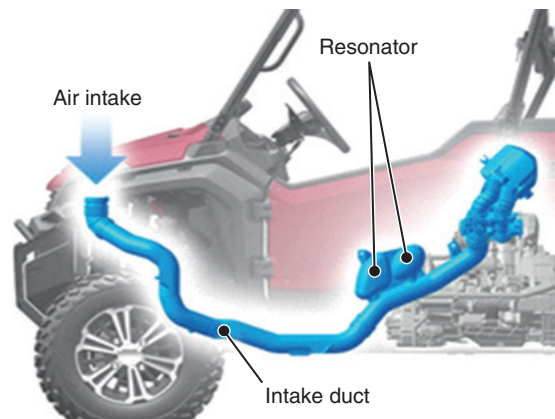


Fig. 27 Intake duct layout

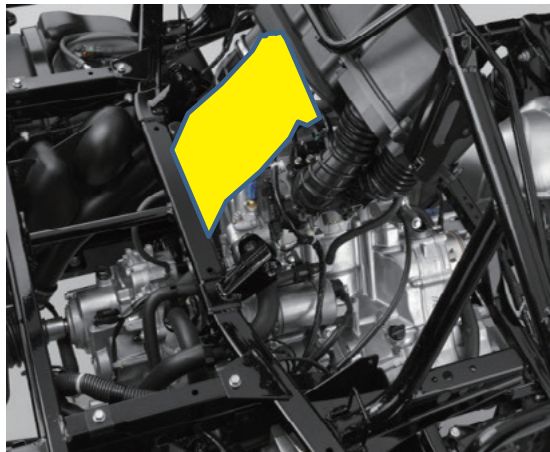


Fig. 26 Bench type front seat

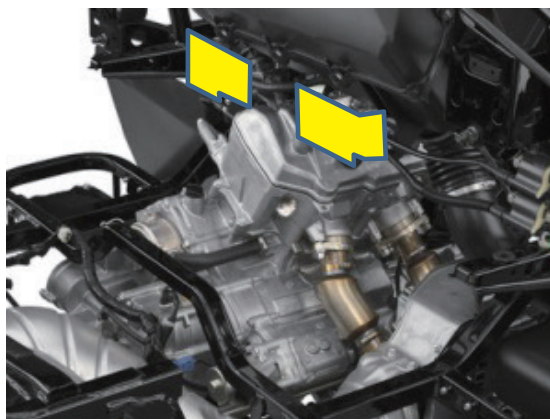
ン重量が同等である Honda の小型乗用車用マウントラバーをベースに、ばね定数の最適化をおこなった。その結果、Fig. 31 に示すように、アイドリングを含めた全域で車体へのエンジン振動を低減でき、快適な乗車振動を実現した。

4.4. 吸気系

SXS は、埃が舞いやすいオフロードで使用されることが多い。本モデルのエンジンのクランク軸受けは、プレー



(a) Front side



(b) Rear side

Fig. 28 Noise absorbent location

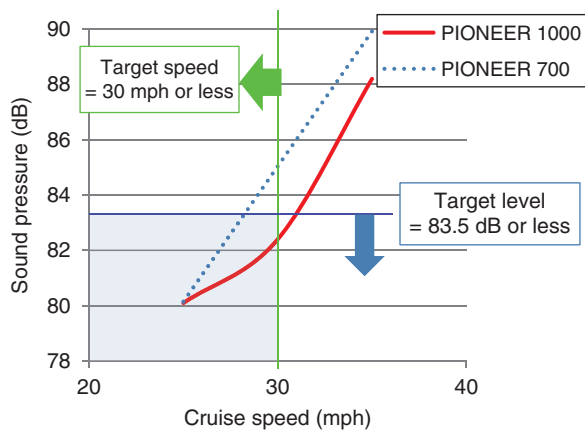


Fig. 29 Cabin noise target and measurement result

ンベアリングのため、従来の Honda SXS で使われているボールベアリングに対して、より埃をエンジン内に吸入し難くする必要があった。そのためエアクリナエレメントは、従来の湿式ウレタンタイプに対し、ダストの吸着性能がより高い湿式ろ紙タイプを、Honda SXS および ATV として初めて採用した。しかし、湿式ろ紙タイプにすると交換が必要となる。そこでエアクリナエレメントのろ過面積を、PIONEER 700 で採用している、洗浄できる湿式ウレタンタイプに対して約 8 倍と大型化し、交換のインターバルを延ばした。また吸入口を Fig. 27 で示した通り、より埃が溜まりにくいフロントフード内側に配置した。これにより、エアクリナ内に吸入されるダスト量そのものの低減も図っている。

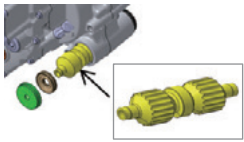
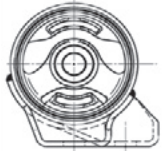
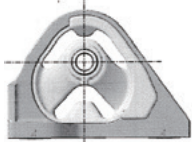
	Mounting rubber shape	Z-direction stiffness comparison with TRX 680
TRX 680		100%
PIONEER 1000		19%
Honda small automobile		19%
PIONEER 700		60%

Fig. 30 Dynamic spring characteristics and shape

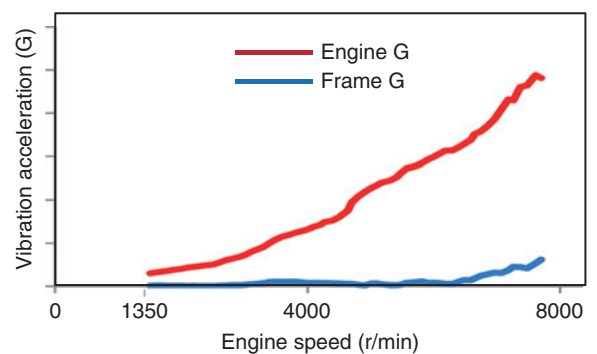


Fig. 31 Vibration mitigation effect

4.5. 排気系

エキゾーストパイプは、エンジン低回転からの高トルクを実現するための必要な長さを、確保する必要がある。また、後部座席の乗員スペースを確保するために、パイプの取回しを Fig. 32 に示す配置とした。マフラは排気量 1000 cm³ クラスに最適な容量を設定したことで重いため、左右のバランスを考慮し、車体後方の中央に配置した。これにより、エキゾーストパイプとマフラは垂直に接合する構造とした。

排気系の支持は、オフロード走行時に、路面からの突き上げなどの車両振動と、エンジン振動を抑制する構造としている。すべての方向からの振動を吸収できるように、Fig. 32 に示す自動車の吊り下げ式マウントラバーと、Fig. 33 に示す球面ジョイント構造を採用した。これにより排気系が車体へ与える振動も低減でき、また、重いマフラをシンプルで軽量な方法で支持させることができた。

4.6. 電装系

4.6.1. ヘッドライト

Honda SXS では初となる LED ヘッドライトを、5P-DLX モデルに採用した。これにより、マルチ SXS ではトップクラスの明るさを実現しながら、消費電力は、当社の従来のバルブ仕様に対して約 70% (LOW ビーム時) に抑えることができた。ドライバが明るいと感じるため

に、LED の色温度は太陽光と同等の 5000 K とした。また、7 個のダイレクトイルミネーションタイプの LED 発光部から、一つの灯体が構成される意匠とした。それにより、バルブ仕様よりもよりいっそうスタイリングコンセプトの“勢い UNSTOPPABLE”の表現に寄与している (Fig. 34, Fig. 35)。

4.6.2. マルチファンクションディスプレイ

本モデルは、マルチファンクションディスプレイを装備している (Fig. 36)。



Fig. 34 LED head lights

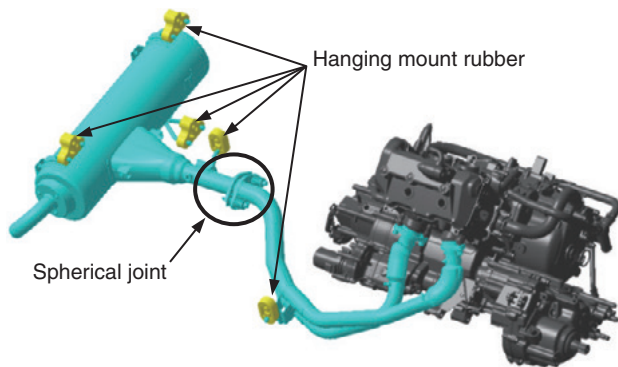


Fig. 32 Exhaust system layout



Fig. 35 Bulb head lights

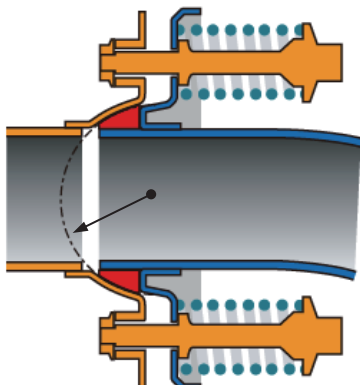


Fig. 33 Spherical joint system

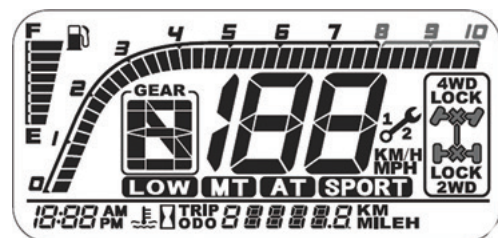


Fig. 36 Multi-function display

- ・ タコメータ: ドライバがパドルシフト操作時に、ドライバが見やすいレイアウトとした。
- ・ 駆動力切替え: 駆動状態をビジュアルに表示することで、ドライバがより感覚的に認識できる表示とした。
- ・ DCT の変速モード: 二つの AT モード (AT および SPORT) と MT モードを、それぞれを独立したアイコン表示とした。

これらの表示をより見やすくするために、従来モデルに対して面積比で約 230% 大型化した液晶ディスプレイを採用した。また、ディスプレイをコックピットセンタに配置することで、オフロード性能が向上した本モデルにおいても、視認性が確保されている。これによって、ドライバがよりドライビングに集中できるコックピットを実現した (Fig. 37)。

4.7. サスペンション

クラストップレベルのホイールストローク量となる、Front wheel travel: 268 mm (10.5 inch), Rear wheel travel: 254 mm (10 inch) を確保し、荒れた路面でも優れた走破性と乗り心地性能を実現するサスペンションを開発した。本モデルの 5 人乗り DLX モデルには、ZF SACHS 製のセル

フレベリングリヤクッションを採用した。SXS は荷台に積載する重量の差により、車高が大きく変化し、乗り心地が損なわれることがある。従来は、リヤクッションスプリングのプリロードアジャスタを手動で操作し、プリロードを変化させることで車高を調整する必要があった。

積載によりセルフレベリングリヤクッションが沈み込んだ後の走行では、クッションのロッドが上下に往復することで、低压ガス室から高压ガス室に作動油が汲み上げられる。これにより、高压ガス室の圧力が高くなり、ピストンロッドを押し上げ、自動的に無積載状態と同じ車高に戻る (Fig. 38)。



Fig. 37 Cockpit

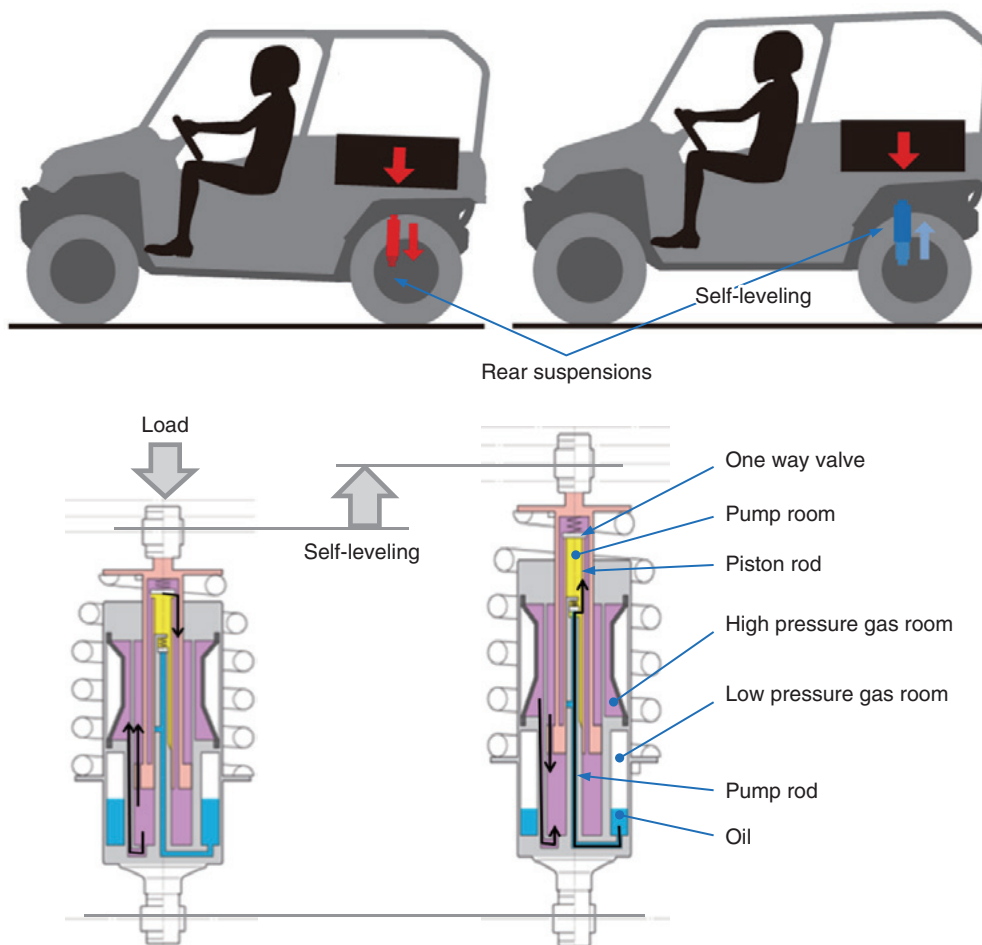


Fig. 38 Self-leveling suspension

荷物の積載量、重量、後席乗車に関わらず自動で車高が調整されることで、安定した乗り心地を提供することができるようになった。

4.8. ステアリング機構

近年、悪路走行時に、より快適な操舵力を求める声が増えてきた。また、フラッグシップモデルには、より快適な操舵を行えるように、ドライビング姿勢の自由度も求められている。本モデルでは、電動式パワーステアリング (Electric Power Steering: EPS) とチルトステアリング機構を採用し、それらの要求にこたえることとした (但し 3P STD を除く)。

普通の乗用車より厳しい使用環境で使われる SXS には、その使用環境に近い ATV 用の電動式パワーステアリングをベースとして、アシスト性能や取付け方法などを最適化した。また、配置場所は被水し難いステアリング中間軸とした (Fig. 39)。

チルトステアリング機構は、運転手の体型や好みに合わせて、ガスダンパのレバーを操作することで、ステアリングホイールを任意の角度に簡単に調整できる。さらに、左右からの運転席への乗降性も考慮し、ステアリングホイールのチルト作動角度は、乗用車より大きい 31 度に設定した。

4.9. ブレーキ

本モデルのブレーキシステムは、乗用車用のシステムをベースに、さまざまな環境下での使用を想定し適合させた。特に本モデルは、1 人から 5 人の乗車人数の変化や、また空荷から積載重量の変化があっても、扱いやすく安定したブレーキングをおこなうために、SXS として Honda 初の 2 ポットキャリパを、フロントブレーキに採用した (Fig. 40)。このフロントキャリパを 12 インチホイール内

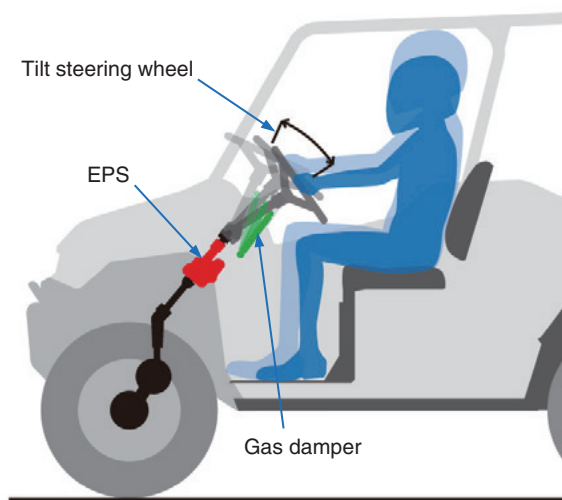


Fig. 39 EPS

に収めるために、二輪車用の小径ダストシール構造を採用し、シール溝周りのボデーを小型化している。それにより、従来 SXS で採用していた乗用車用のキャリパに対して、約 40% 軽量化を実現している。さらに 2 ポットキャリパ化することで、ディスク有効径を 10% 拡大し、制動力を向上させている (Fig. 41)。シングルピストンのリヤキャリパも、同様に小型軽量化しつつ、前後の制動力バランスを考慮してピストンサイズの変更をおこなった。これらより、本モデルでは、無積載から最大積載迄の中広い積載状態に対しての十分な制動力、バランスの取れた前後制動力配分、扱いやすいコントロール性を実現している。また、耐久性を確保するために、新規に開発したキャリパブラケットは、泥やチッピングによるピストン表面への損傷を防ぐ形状となっている。



Fig. 40 Front brake

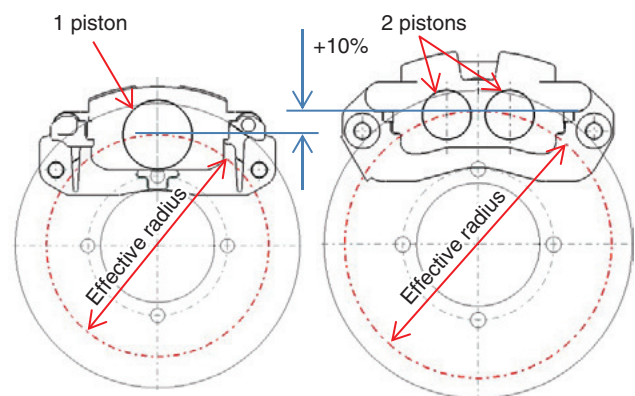


Fig. 41 Front disc effective radius

5. スタイリングデザイン

5.1. PIONEER 1000 スタイリングコンセプト

本モデルのコンセプトは、「King of Works Hard, Plays Hard」, すなわち「よく働き、よく遊ぶ」である。これを表現するため、以下の三つの Keyword をスタイリングコンセプトとした。

「RUGGED」ハードな扱いにも耐える“頑丈さ”

「VERSATILE」さまざまな仕事にも、遊びにも対応する“多用途性”

「UNSTOPPABLE」止められない“勢い”

さらに PIONEER ファミリーであることを直感するフロントマスクにより、シリーズ性のある外観を目標とした。

5.2. PIONEER 1000 スタイリングデザイン手法

まずは三つの Keyword をわかりやすく伝えることを重視した。

頑丈さを感じる、ゴツゴツした造形と、力強さと機能性を表す、4×4の踏ん張り感あるプロポーション、そして勢いを伝える、アグレッシブな形状のバンパとフロントグリル (Fig. 42) で、コンセプトである「よく働き、よく遊ぶ」を表現した。さらに、遠くからでも一目でわかるモデルにするために、ボデーサイドに連続した、ダイナミックな形状のカラーパネルを採用した (Fig. 43)。

それらにより、フラッグシップモデルを望むお客さまのプライドを満たす、機能性と心躍るレクリエーション性を絶妙にバランスさせたスタイリングを実現した。

5.3. デジタルモデリング

本開発では、クレイモデルを用いることなく、3D-CAD



Fig. 42 Aggressive front grill



Fig. 43 Colored panels applied to body sides

によるデジタルモデリングで、スタイリングデザインをおこなった (Fig. 44)。デジタルモデルだけでは確認できないサイズ感やエルゴノミクスについては、簡易的な実物大のモデルで確認した。全体のスタイリング、およびカラーリングの見え方については、大画面のバーチャルリアリティ画像で検証をおこなった。

3D-CAD を用いることで、タイヤクリアランス等の可動部分のディメンションや、空力、強度などの CAE 解析から得られたデータを、高い精度でデジタルモデルに反映することが可能となった。それにより、スタイリングと機能を高い水準で両立することができ、短時間で高精度なモデルを創り上げることができた。

これらの手法により、コンセプトである「King of Works Hard, Plays Hard」を、スタイリングに表現することができた。



Fig. 44 Styling design using a digital model

6. まとめ

PIONEER 1000 は「レクリエーションと実用作業を両立すること。フラッグシップにふさわしい動力性能、悪路走破性、快適な乗り心地性を有すること。また、家族や友人と楽しめる多人数乗車で、かつ取回しやすい車体サイズであること。」これらを目標に開発された。2気筒 999 cm³ 新エンジンと、伝達効率および耐久性に優れた業界初の 6 速 DCT + H レンジ / L レンジ切り替え式のサブトランスミッションを搭載し、5 人乗り用で採用のクイックフリップシートなどにより、コンパクトな車両を実現した。さらに快適性を高めるための低振動技術、セルフレベリングサスペンションを初め、多くの新技術を採用した。Honda のマルチカテゴリー SXS PIONEER シリーズの 500, 700 に続くフラッグシップモデルとして、クラストップレベルの 3 人乗り、5 人乗りの 2 タイプの商品化を実現した。この PIONEER 1000 は、オフロード走行の初心者から上級者までが楽しめるモデルである。家族、友人と多人数で、レクリエーションでの楽しみを共有でき、クラストップレベル

の実用作業性も有することで、良く働き良く遊ぶモデルとして、市場での活躍が期待される。

参考文献

- (1) 小林弘毅, 根来正明, 大須賀貴則, 三堀敏正, 大島正, NC700 シリーズの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 24, No. 2, p. 23-31

■ 著 者 ■



半田 秋男



神山 剛



黒田 耕介



横田 洋



坂本 直樹



西山 真也



荻安 丈幸



佐藤 浩二



山崎 雅貴

次世代自動車向け高出力可搬型外部給電システムの開発

Development of High-output, Portable External Power Output System for Use with Next-generation Environment Vehicles

津 野 康 一*
Koichi TSUNO
進 正 則*
Masanori SHIN

小 松 貴 如*
Takayuki KOMATSU
金 澤 紘 行**
Hiroyuki KANAZAWA

船 木 美 帆*
Miho FUNAKI
大 串 健 次**
Kenji OGUSHI

要 旨

次世代自動車から電気を取るという新価値を提供する、外部給電器 EE90i (Power Exporter 9000)を開発した。次世代自動車は、Power Exporter 9000 により必要な場所で電気を使用できるため、走る電源として活用できる。

Power Exporter 9000 は、エンジン発電機の小型軽量化技術の応用により CLARITY FUEL CELL のトランクに搭載可能とした。次に、エンジン発電機のインバータ技術ならびに放熱構造を活用することで、商用電源同等の高品質で安定した電気の出力かつ 9 kVA の高出力を達成した。また、電動自動車用充放電システムガイドライン V2L DC 版に適合することにより、自社に限らず他社の外部給電機能を持つ次世代自動車との接続互換性を実現した。CLARITY FUEL CELL も上記ガイドラインに準拠した設計とすることで、外部給電器接続の汎用性を高めた。これらの技術により、自然災害に対する国土強靱化社会構築、および Honda の目指す水素社会の実現の一手法となる見通しを得た。

ABSTRACT

The external power output device EE90i (the Power Exporter 9000) that provides new value with the capability for obtaining electric power from next-generation vehicles was developed. Through use of the Power Exporter 9000, next-generation vehicles will be able to utilize electrical output at the location where it is needed, allowing the use of those vehicles as mobile power sources that can provide electrical output.

The Power Exporter 9000 has realized a form factor that allows loading the unit into the trunk of a CLARITY FUEL CELL by means of applying downsizing and weight-saving technologies for engine generators. The engine generator's inverter technology and heat-dissipating construction were then used to achieve stable electric output with quality equivalent to grid power as well as high output of 9 kVA. Furthermore, compliance with the Guidelines of Charge/Discharge System for Electric Vehicle V2L DC version has enabled connectivity and compatibility with next-generation vehicles that have external power output function and that are not only from Honda but also from other manufacturers. The general usability of the CLARITY FUEL CELL for connection with external power output devices was also heightened by following the above guidelines in the design. These technologies were found to offer prospects for a method of developing a society that builds national resilience against natural disasters and realizing the hydrogen society that is Honda's aim.

1. まえがき

2011 年の東日本大震災以降、自然災害対策に対する関心が高まり、国土強靱化 (ナショナル レジリエンス) 基本計画が閣議決定された⁽¹⁾。レジリエンス社会構築の一手法として、大電力を発電や蓄電する機能がある次世代自動車 [燃料電池自動車 (以降 FCV) や電気自動車 (以降 EV) など] を、走る電源として活用することが期待されている。走る

電源を実現するには、移動先で電気を取り出すことが必要となるため、可搬型の外部給電器 EE90i (Power Exporter 9000: 以降 PE9000) を開発した。災害時等の有事利用と野外活動等の平時活用といった幅広いシーンでの使用を想定しており、PE9000 の出力は高出力とすることが求められている。よって、電気設備の技術基準の解釈⁽²⁾ 第 199 条の 2 で規定されている上限である車両端出力最大値 (10 kW) 未満を満足する 9 kVA に設定した。可搬型で高出力とする

* 汎用 R&D センター

** 四輪 R&D センター

ことで、PE9000 は次世代自動車に走る電源という新価値を提供した。

一方で Honda では、水素エネルギーを中心とした、“つくる”、“つかう”、“つながる”をコンセプトに CO₂ 排出ゼロの水素社会の実現を目指している。FCV で“つかう”際に使用される水素は再生可能エネルギーから生成可能であり、利用時にも CO₂ 排出がない。また、高エネルギー密度で貯蔵かつ輸送が可能なため、エネルギーセキュリティに優れた次世代エネルギーとして着目されている。さらに水素・燃料電池戦略ロードマップ⁽³⁾にて、“FCV を 2030 年に 80 万台程度の普及を目指す”という政府の目標値が設定されたことから、今後の水素エネルギー利用拡大が見込まれている⁽⁴⁾。本開発では PE9000 で FCV と電気機器とが“つながる”ことで、水素社会の実現を目指した。

本稿では、PE9000 の特徴である小型軽量可搬型、高出力高品質電源、車両互換性の三つを実現した技術と、CLARITY FUEL CELL の給電技術を紹介する。

2. 開発のねらい

2.1. 開発コンセプトと要求性能

Fig. 1 に Honda が目指す水素社会を示す。スマート水素ステーション⁽⁵⁾で再生可能エネルギーから水素を“つくる”、FCV で走ることで“つかう”、PE9000 で車両と電気機器とが“つながる”[Vehicle to Load (以降 V2L)]、または Power Manager HEH55⁽⁶⁾で車両と住宅等とが“つながる”[Vehicle to Home (以降 V2H)]ことで水素社会の実

The hydrogen society that is Honda's goal.

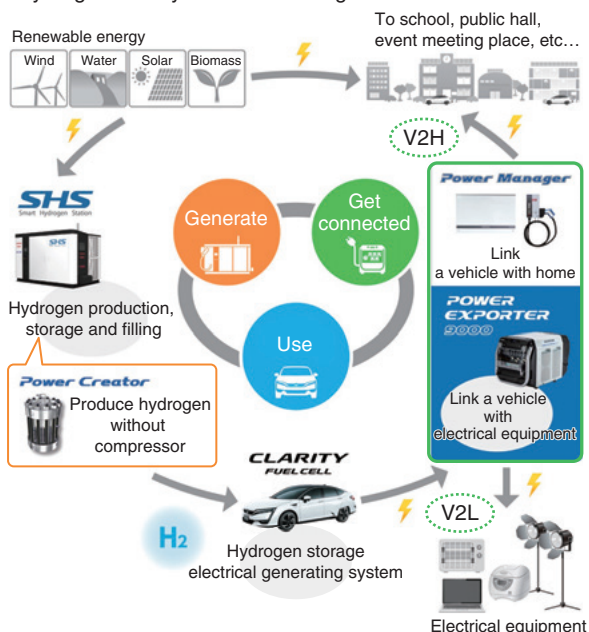


Fig. 1 Conceptual diagram of realization of hydrogen society

現を目指している。PE9000 の開発にあたっては、“クルマとつながる。暮らしへひろがる”をコンセプトに、“つながる”新価値を提供することを目的とした。

Fig. 2 に PE9000 の外観を示す。Inter-Blended をキーワードに環境と調和するクリーンなデザインとした。CLARITY FUEL CELL のデザインと調和させ、システムでの一体感を作った。

PE9000 を水素社会の実現と、自然災害に対するレジリエンス強化の一手法として活用するために、以下の性能を実現することを開発のねらいとした。

- (1) 持ち運び可能な可搬性を有すること
- (2) 商用電源同等の高品質出力かつ高出力のこと
- (3) 多くの次世代自動車と接続できる高い汎用性を有すること

2.2. システム構成と特徴

Fig. 3 に外部給電システムの構成図を示す。次世代自動車から供給された DC 電力を PE9000 により AC 電力に変換し、電気機器に電気を供給している。次世代自動車が Honda の CLARITY FUEL CELL の場合、給電の状態を車両の Multi-information display (MID) 表示だけではなく、離れた場所でもインターナビシステムを介することでスマートフォン等で確認できるシステムとした。



Fig. 2 External view of Power Exporter 9000

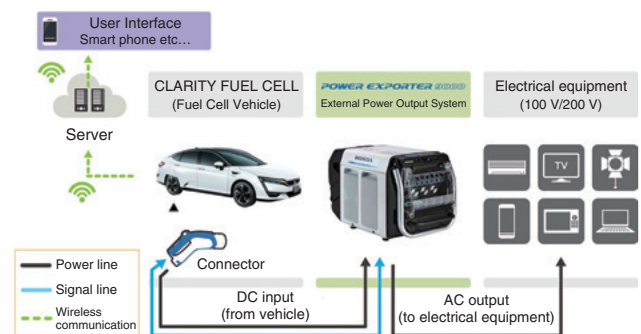


Fig. 3 System configuration of external power output system

Table 1 Specifications of Power Exporter 9000

Item	Specification
Rated output power	9 kVA
Output voltage	100 V/200 V
Dimension (L/W/H)	755 mm × 387 mm × 438 mm
Mass	50.8 kg
Sound power level	L_{WA} 57 dB
Applicable standard	V2L Guidelines for DC system

Table 1 に PE9000 の主要諸元を示す。PE9000 は以下の特徴を持つ。

(1) 小型軽量可搬型

エンジン発電機の小型軽量化技術の活用により 9 kVA の高出力でありながら CLARITY FUEL CELL のトランクに搭載が可能な大きさと質量に収めた。また、ハンドルと車輪構造により車両から降ろした後に容易に 1 人で持ち運べるような設計とした。

(2) 高出力高品質電源

搭載されている電子ユニットの発熱部品を効率的に冷却できるよう、電子ユニットの配置と冷却ファンの最適化を実施した。これにより、高出力時にも安定的な供給ができる設計とした。また、エンジン発電機のインバータ設計技術⁽⁷⁾により、高品質で安定した電気の出力を可能とする設計とした。

(3) 車両互換性

電動自動車用充放電システムガイドライン V2L DC 版⁽⁸⁾ (以降 V2L ガイドライン)に適合することで、他社の外部給電機能を持つ次世代自動車を含めた互換性を確保した。CO₂ 排出ゼロという観点で車両は EV または FCV を選択できるが、2016 年 6 月時点では EV より航続距離が長い FCV との接続時に高出力のメリットが最大化する。Honda の CLARITY FUEL CELL と接続した場合は一般家庭の約 7 日分の電力を供給することができる⁽⁹⁾。さらに V2L システムに適したユーザインターフェースとすることで、高いユーザビリティを持つ設計とした。

本稿では、上記三つの特徴を達成した開発技術を紹介する。

3. 開発技術の紹介

3.1. 小型軽量可搬型技術

9 kVA の高出力ながら、CLARITY FUEL CELL のトランクに搭載可能とする外形寸法、および成人男性 2 人で積み下ろし可能な質量 (60 kg 以下)⁽¹⁰⁾とするきょう体構成を目指し、出力重量比において他社に対して大きな優位性を持たせる設計をねらいとした (Table 2)。また、本機単独での移動時および、車両への積み降ろし時のユーザ負荷低減をおこなった。以下に小型、軽量化技術と取扱い性能および車載時の衝突エネルギー吸収構造について紹介する。

Table 2 Compare power/mass ratio with competitors

Name	Power (kVA)	Mass (kg)	Power/Mass ratio (VA/kg)	Portable or not
Honda PE9000	9	60 (Target)	150 (Target)	Portable
Nichicon Vehicle to Socket	3*1	73	41	Not portable
Mitsubishi MiEV power BOX	1.5	11.5	130	Portable
AESC LEAF to 100V	1.5	12	125	Portable

*1: At the time of external power output.

3.1.1. インバータ、コンバータの細分化とパッケージング

PE9000 においてインバータとコンバータは主要機能部品であり、質量および容積において大きな割合を占める。PE9000 はインバータとコンバータ合せて五つの電子ユニットで構成している。9 kVA 出力で 1 ユニットとせず、6 kVA 出力のインバータ、3 kVA 出力のインバータをそれぞれ 1 ユニット、3 kVA 出力のコンバータを 3 ユニット組み合わせることで、9 kVA 出力とした。このようなユニットの細分化によって自由度の高い配置構成が可能となった。

Fig. 4 に PE9000 の内部構成を示す。インバータ、コンバータの配置を基本構成として、他の機能部品を下記のように配置した。

- (1) 上部に制御用電装部品を配置
- (2) 前部に出力用電装部品を配置
- (3) 後部に給電コネクタを収納
- (4) 側面に冷却ファンを配置

これらの構成により、CLARITY FUEL CELL のトランクに搭載可能な外形寸法となった。

3.1.2. 軽量高強度骨格

軽量化する一方で、通常の実用性に耐えうる強度を確保するため、フレーム材には軽量かつ強度に優位なアルミパイプを採用した。Fig. 5 にフレーム構造と、それにかかる外部から入力される荷重の分布を示す。外部から入力される荷重をメインフレームに集約する構造とすることで、ブラケット等の部品を不要とした。さらにパイプフレームに機能部品を直接取り付け等の機能集約を図ることで構成部品を省略し、軽量化をおこなった。総質量におけるフレーム部品質の割合は、同等質量の Honda 発電機 (EU28is) が 54.8% であるのに対し、PE9000 は 32.7% となった。

3.1.3. コンバータ構造

PE9000 の入力電圧範囲が 150 V から 450 V と広いため、本システムでは内部直流電圧を一定に変換するコンバータが必要となる。Fig. 6 にコンバータの断面図を示す。

本システムにおいて大きな質量と容積を占めるコンバータであるが、基板を2段構成とすることにより、表面積が減少し、コンバータの小型化、並びにケースの軽量化が可能となった。また、樹脂モールド処理をおこない、耐水性・耐振動性を確保しているが、本システムはエンジンのような主要振動発生源を搭載していないため、従来のエンジン発電機に比べ、振動環境下に置かれることが少ない。それを踏まえ、樹脂モールドの最適化をおこなった結果、上下基板間の空間をモールド材で埋めない中空構造が可能となり、さらなる軽量化につながった。中空構造であるため、基板の部品面側のみをモールド処理しており、はんだ面にモールド材が接しない。これにより、はんだ母材とモールド材の熱膨張率の差による、はんだクラックの防止に寄与している。また、中空空間部のケースに呼吸穴を設けることで、基板の吸湿を抑制可能な構造とした。これらの技術によりコンバータの小型化および軽量化を達成した。

以上のパッケージング、軽量高強度骨格、コンバータ技術により、最大出力9 kVAの高出力でありながら、きょう体サイズ755 mm×387 mm×438 mm(全長×全幅×全高)、総質量50.8 kg(出力重量比177 VA/kg)を達成し、CLARITY FUEL CELLのトランクに搭載することを可能とした。

3.1.4. 取扱い性能

小型軽量化に加え、高い取扱い性能をねらった機能を追加した。定置時の安定性と、移動操作性を両立させるため、ハンドルを持ち上げたときのみ接地する車輪構造を新たに採用した。Fig. 7に定置時とハンドル持ち上げ時の接地状態を示す。これにより、定置時の安定性を確保しながらも、車輪の固定を不要とし、本体の車輪を使って一人で容易に移動することを可能とした。

車両への積み降ろし時の操作性についても考慮し、前後

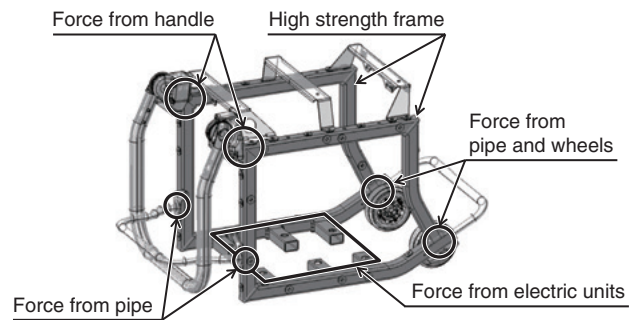


Fig. 5 Force receiving points on high strength frame

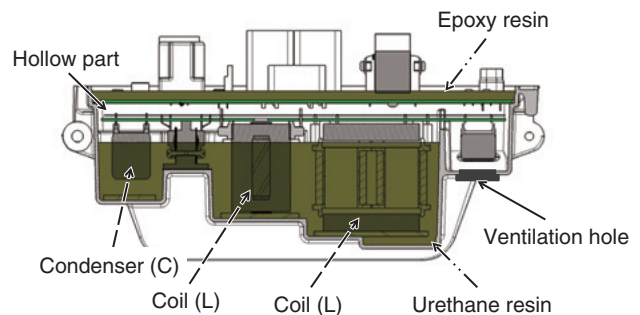


Fig. 6 Section of converter

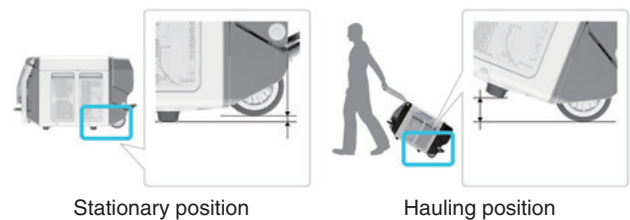


Fig. 7 Configuration of wheels and contact with ground

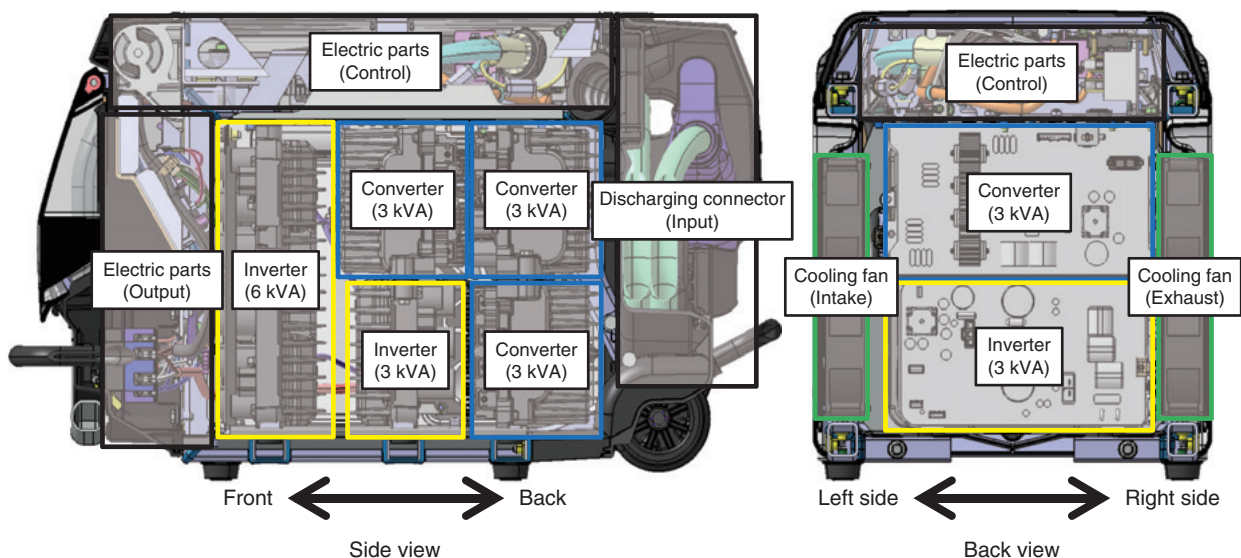


Fig. 4 Inner configuration of Power Exporter 9000

のグリップに加え、側面にもグリップを配置した。Fig. 8にPE9000の持ち上げ姿勢を示す。前後のグリップと側面のグリップを合わせて保持することで、本体を安定して傾けることが可能となり、前後のグリップのみを保持するよりも、容易にトランクへ搭載することを可能とした。

以上のような配慮により、移動の容易さおよびトランクへの積み降ろし時のユーザ負荷低減を達成した。

3.1.5. 車載時の衝突エネルギー吸収構造

CLARITY FUEL CELLのフレーム構造は、衝突時の衝撃吸収に寄与するエネルギー吸収部と、乗員や燃料系統部品の保護に寄与する、高強度キャビン領域で構成されている。

PE9000をCLARITY FUEL CELLに車載する場合、エネルギー吸収部であるトランク内に搭載される。そこで、PE9000はトランクと同様に衝突エネルギーを吸収する構造とし、CLARITY FUEL CELLの後部衝突時の安全性に配慮した。高強度のメインフレーム部品を左右に分割し、それらをブラケットおよびパイプで結合する構成とした。通常の使用における外力はFig. 5で示す高強度フレームで受け止め、Fig. 9に示すように、衝突時の横からの強い衝撃をブラケットおよびパイプにて構成された荷重軽減部分にて軽減する構造となっている。これにより、通常の取扱いに耐えうる強度を確保しながらも、高強度キャビン領域以下の荷重でPE9000を变形させることを可能とした。

3.2. 高出力高品質電源を達成する冷却技術

PE9000に搭載されているインバータおよびコンバータ



Fig. 8 Raised up position

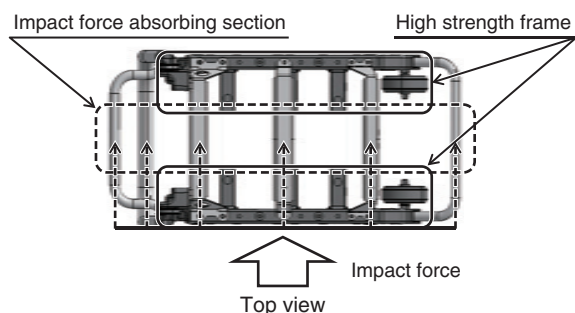


Fig. 9 Frame composition of Power Exporter 9000

は動作中に内部損失による熱が発生するため、冷却が必要となる。PE9000では高出力の給電システムを擁しながらも、小型軽量とするため、効率的な冷却構造とすることで最小限の冷却ファン容量で成立するように検討した。

放熱性の観点では、Fig. 6に示したコンバータの2段構成および中空構造が放熱性能にも寄与する。主な熱源となる受動素子を下段基板に集約させることで、冷却フィンにより近づけることが可能となり、効率的な放熱となる。中空構造により、コンバータ内に空気層を構成することもダイカストケースへ優先的に放熱を促している。また、下段基板の素子のモールド材として熱伝導率の優れているウレタンを採用することで、さらに放熱量を高めている。結果、小型高出力ながらも十分な放熱をおこなうことが可能となった。

また、冷却方法には電動軸流ファンによる空冷を採用している。軸流ファンの使用方法として、きょう体内に空気を吸い込むように取り付ける方式(吸込み取付け)ときょう体内から空気を吐き出すように取り付ける方式(吐き出し取付け)がある。吸込み取付けはきょう体内の発熱部が集中する場合に効果的であり、吐き出し取付けは発熱部が分散する場合に効果的である⁽¹¹⁾。Fig. 10にインバータ、コンバータ、ファンの配置を示す。インバータ、コンバータの発熱量および発熱箇所にあった最適なファンの配置とするため、本開発では、吸込み取付けと吐き出し取付けを組み合わせる構造を採用した。

Fig. 11に発熱箇所および風の流れ場解析結果を示す。これは、発熱量が高く、発熱箇所が集中しているインバータを吸込み取付けのファンで冷却し、発熱量が少ないが、発熱箇所が分散しているコンバータを吐き出し取付けのファンで冷却していることを示す。この配置構造によって、どちらか一方にファンを配置するよりも、小電力の小型軽量ファンで冷却することが可能となった。

以上の技術により、9 kVAの高出力ながら音響パワーレベル L_{WA} 57 dBを達成した。

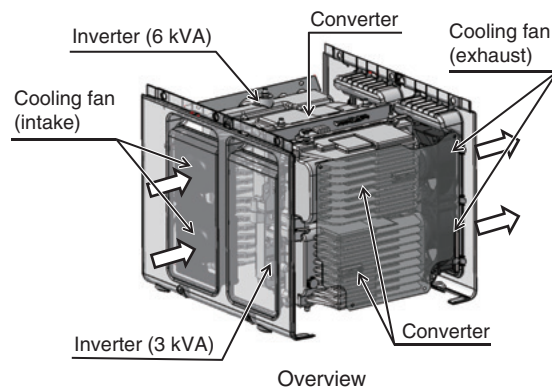


Fig. 10 Composition of inverter, converter and cooling fans

3.3. 車両互換性技術

3.3.1. V2L ガイドラインの適合

PE9000 は V2L ガイドラインの適合性証明である V2L 検定基準⁽¹²⁾に世界で初めて適合した。そのため、CLARITY FUEL CELL のみならず他社の外部給電機能を持つ次世代自動車とも接続可能となり、高い汎用性を達成した。

一方で、車両が限定されないため広い電圧入力範囲に対応する必要がある。そこで、コンバータに LLC 電流共振方式を採用した。LLC 共振駆動方式は、Fig. 6 に示す L と C の共振によりソフトスイッチング (Zero Voltage Switching) をおこなう。スイッチング周波数を変化させることにより、広範囲の電圧ゲインを得ることができる。本方式により、150 V から 450 V の広い入力電圧範囲を高効率かつ低い電気ノイズで、一定の出力電圧に変換することを達成した。結果、CLARITY FUEL CELL との接続時において、PE9000 の変換効率は 90% 以上 (定格出力時) を達成した。

また、CLARITY FUEL CELL も PE9000 以外の外部給電器との互換性を確保するため V2L ガイドラインに準拠した設計とし、高い汎用性を達成した。以下に CLARITY FUEL CELL での給電技術を述べる。

3.3.2. CLARITY FUEL CELL の給電コンポーネント

CLARITY FUEL CELL は燃料電池で発電し、直流電力を PE9000 に供給している。Fig. 12 に CLARITY FUEL CELL の主要部品配置を示す。燃料電池が発電するために必要な水素燃料は、高圧水素タンクに 70 MPa の充てん圧力で約 5.0 kg 貯蔵され、一般家庭のおよそ 7 日分の電力供給を可能としている。Fig. 13 に給電部の構成要素を示す。燃料電池スタックが発電した電力は、FC 昇圧コンバータ (FCVCU) とパワーコントロールユニット (PCU) で出力電圧を制御⁽¹³⁾し、リチウムイオンバッテリーと並列接続して、Japan Electric Vehicle Standard (JEVS) G105 イン

レットから給電している。過渡的な給電電力変動に対してはリチウムイオンバッテリーが充放電をおこなうことで安定した電力供給を可能としている。

3.3.3. CLARITY FUEL CELL の給電時エネルギーマネジメント

車両からの給電電力は、給電器に接続される電気機器の負荷量に応じて燃料電池スタックによる発電で供給している。高圧バッテリーへ充電してから電力を供給すると充放電損失が発生するため、前述の手法とすることで高い効率を確保した。給電中は次回の走行を考慮し、高圧バッテリーの State Of Charge (SOC) を低下させないように制御している。

給電中はユーザが車室内にいないことを想定し、水素残量が低下した場合には自動で給電を停止し、テレマティクスを用いてスマートフォン等に通知する機能を実装した。

走行と比べ給電を実施する機会が少ないと想定し、ユーザに分かりやすい給電開始操作とする必要がある。そのため、給電コネクタを嵌合した後は通常の走行時の操作 (ブレーキペダルを踏みながら POWER スイッチ ON) のみで給電可能とした。

3.3.4. 給電可能目安時間の協調表示

V2L 機器は無負荷から定格出力まで広い範囲で使用されることを想定している。有事の際には、ライフラインとなる電気機器を使用するケースも想定し、現在使用している電力を供給できる目安の時間を認識可能とすることで、高いユーザビリティを目指した。本システムでは、PE9000、CLARITY FUEL CELL およびスマートフォン

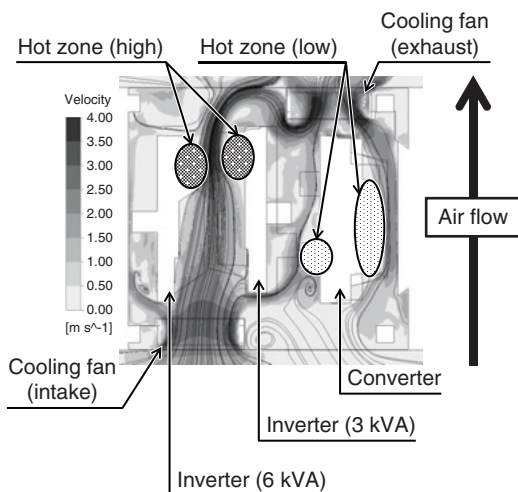


Fig. 11 Air flow analysis results

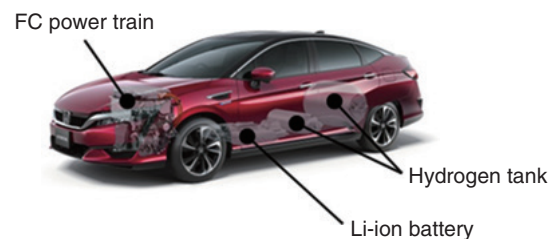


Fig. 12 Main components of CLARITY FUEL CELL

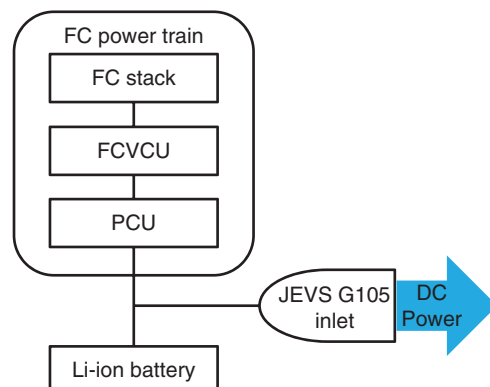


Fig. 13 Components for power export

にて表示をおこなった。Fig. 14 に PE9000 の表示灯および CLARITY FUEL CELL の MID 表示を示す。接続されている負荷量から現在の給電電力を PE9000 が算出し、通信にて CLARITY FUEL CELL に送信している。CLARITY FUEL CELL は、受信した給電電力および自己消費分から水素残量より給電できる残り時間を算出し、双方の表示機にて協調表示をしている。また、Fig. 3 に示すように、本情報をサーバを介してスマートフォンに送信している。Fig. 15 にスマートフォン表示を示す。車両から離れた場所でも給電状況を確認可能な仕様とした。

これら三つの表示により、使用する電気機器に近い PE9000 のシンプルな表示で感覚的に状況判断でき、車両の MID で詳細な時間を確認し、スマートフォンにて離れた場所でも確認可能となり、高いユーザビリティを達成した。

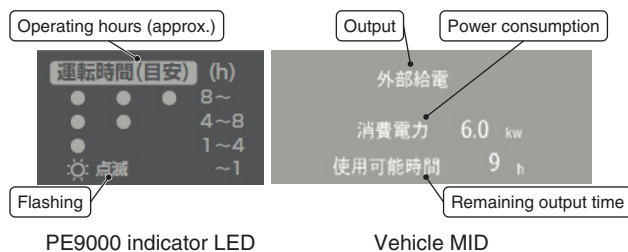


Fig. 14 Design example of indicator LED and vehicle MID on external power output system



Fig. 15 Design example of internavi application on smartphone

4. まとめ

次世代自動車に走る電源という新価値を提供する外部給電システム PE9000 を開発した。主要技術の達成により以下の結論を得た。

- (1) 小型軽量化を達成したことで CLARITY FUEL CELL のトランクに搭載可能となった。また、トランクから降ろした後も容易に本機を移動可能な構造を実現した。
- (2) 効率的な冷却構造にすることで、9 kVA の高出力時の冷却性を成立させた。また、エンジン発電機のインバータ技術を応用することで、高品質出力を達成した。
- (3) PE9000 は V2L 検定基準に適合し、CLARITY FUEL CELL は V2L ガイドラインに準拠した設計とすることで、接続の汎用性を高めた。

5. おわりに

PE9000 の適用先検証のため、以下のような実証実験やデモンストレーションを実施した。

- (1) 鳥取大学医学部と共同研究となる医療機器へのマッチング確認や、Disaster Medical Assistance Team (災害急性期に活動できる機動性を持ったトレーニングを受けた医療チーム) への参加 (有事利用)
- (2) 帰宅困難者防災訓練として、災害時に必要な電気機器の駆動と外部給電機能付き次世代自動車の有用性確認 (有事利用)
- (3) 東京ミチテラスでのイルミネーションやイベント車に給電することで、公的空間で外部給電の活用検証 (平時活用)

上記の結果から、PE9000 が自然災害に対する国土強靱化社会構築、および Honda の目指す水素社会の実現の一手法となる見通しを得た。

PE9000 は、次世代自動車を走る電源として活用する際に可能な限り多くの電気機器を動かせるように高出力仕様で開発した。今後は普及拡大に向けて、さらに気軽に持ち運べるパーソナルユースのニーズに応えられるようにパリエーションを拡大し、国内市場だけではなく全世界商品に育てていきたい。

参考文献

- (1) 内閣官房, 国土強靱化基本計画, (2014)
- (2) 経済産業省, 電気設備の技術基準の解釈, (2016)
- (3) 経済産業省, 水素・燃料電池戦略ロードマップ, (2016)
- (4) 経済産業省, エネルギー基本計画, (2014)
- (5) 吉田喜祐, 三宅葵: 国内仕様ソーラー水素ステーションの実証試験結果, Honda R&D Technical Review, Vol. 26, No. 2, p. 190-195
- (6) 津野康一, 小谷尚史, 土橋学, 小出文隆, 福重貴浩, 有吉斗紀知: Honda Smart Home System の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 26, No. 1, p. 11-16
- (7) 齋藤茂, 小野寺泰洋, 橋爪崇, 布川剛史: 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, Honda R&D Technical Review, Vol. 27, No. 1,
p. 24-29

- (8) 一般社団法人電動車両用電力供給システム協議会, 電動自動車用充放電システムガイドライン V2L DC 版, (2014)
- (9) 電気事業連合会, 原子力・エネルギー図面集 (一世帯あたりの電力消費量の推移), (2015)
- (10) 厚生労働省, 労働省令第 13 号 年少者労働基準規則, 第七条, (2016)
- (11) オムロン株式会社テクニカルガイド, 軸流ファン技術解説, (2016)
- (12) 一般社団法人CHAdeMO 協議会, V2L 検定基準DC 版, (2015)
- (13) 木村顕一郎, 河崎輝明, 大村孝之, 渥美淑弘, 清水潔: 新型燃料電池自動車CLARITY FUEL CELLの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1, p. 1-7

■ 著 者 ■



津野 康一



小松 貴如



船木 美帆



進 正 則



金澤 紘 行



大串 健 次

CLARITY FUEL CELL 搭載の 新型燃料電池スタックの開発

Development of New FC Stack for CLARITY FUEL CELL

菊 池 英 明*
Hideaki KIKUCHI
小此木 泰 介*
Daisuke OKONOGI

加 地 勇 人*
Hayato KAJI
原 田 仁**
Hitoshi HARATA

西 山 隆 之*
Takayuki NISHIYAMA

要 旨

燃料電池スタックの軽量かつコンパクト化のために、セルの厚み低減とセルの積層数削減をおこない、世界トップクラスの容積出力密度 3.1 kW/L を達成した。セルの厚み低減は、膜電極接合体の湿度分布の均一化、ガス流路深さの低減と膜電極接合体の厚み低減にて達成し、セルの積層数削減は、ガス流路ピッチを縮小化して 1 セルあたりの出力性能を向上させたことにより達成した。また、燃料電池スタックのガス流路を横方向に流す構造にすることで燃料電池スタックの高さを低くしたことと、締結バーによるセル保持構造にすることで耐衝撃性の向上をおこない、燃料電池スタックのフロントフード内への搭載を可能とした。さらには、軽量かつコンパクト化により熱容量が低減したことで、低温時における定格出力の 50% に到達する時間を従来と比べ 1/2 に短縮させることができた。また、セルを構成する膜電極接合体の外周を樹脂化し、膜電極接合体を矩形化したことにより、電解質膜や拡散層の材料使用量を低減するとともに連続生産性を向上させることができた。

ABSTRACT

In order to make the fuel cell stack lighter weight and more compact, the cell thickness and the number of cell stacks were reduced. This achieved the world's highest level of volume power density at 3.1 kW/L. The reduction in cell thickness was achieved by the uniform distribution of water in the membrane electrode assembly, a reduction in the gas flow channel depth, and reduction in the membrane electrode assembly thickness. The reduction in the number of cell stacks was achieved by narrowing the gas flow channel pitch so as to enhance the power output performance per cell. Structuring the FC stack so that the gas flow channels are oriented laterally allowed the height of the fuel cell stack to be reduced while the connection bar was used as a cell retention structure, increasing the impact resistance. This enabled mounting of the fuel cell stack under the front hood. Making the fuel cell lighter weight and more compact reduced its heat mass so that the time taken to reach 50% of rated capacity when the fuel cell is at a low temperature could be shortened to one-half of the time required by a previous fuel cell. The membrane electrode assemblies that make up the cell were given a resin frame around their periphery, and squaring off their shape reduced the amount of material needed in the electrolyte membranes and diffusion layers while also increasing their continuous manufacturing productivity.

1. まえがき

燃料電池は CO₂ や有害物質をいっさい排出しない循環型クリーンパワートレインとして期待されている。

1999 年に自社開発の燃料電池スタックを燃料電池実験車に搭載し、2003 年には高出力密度化と寒冷地での始動

を可能とした Honda FC スタックを発表した⁽¹⁾。2006 年には容積出力密度で 50%、重量出力密度で 67% 向上させた V Flow FC スタックを発表した⁽²⁾。CLARITY FUEL CELL では、さらなる軽量かつコンパクト化およびフロントフード内への搭載⁽³⁾を目指し、燃料電池スタックの開発に取り組み、セルの厚み低減およびセルの積層数削

* 四輪 R&D センター

** ホンダエンジニアリング株式会社

減, 耐衝撃性の向上をおこなった. これにより, V Flow FC スタックと比べ, 容積出力密度で 60%, 重量出力密度で 35% 向上し, 低温始動性と, 膜電極接合体 (membrane electrode assembly: MEA)⁽⁴⁾ の生産性を向上させた新型燃料電池スタックを 2016 年に発表した. Fig. 1(a) に V Flow FC スタック, Fig. 1(b) に新型燃料電池スタックの外観を示す. 本稿では, 軽量かつコンパクト化しフロントフード内に燃料電池パワートレインの搭載を可能とした新型燃料電池スタックについて紹介する.

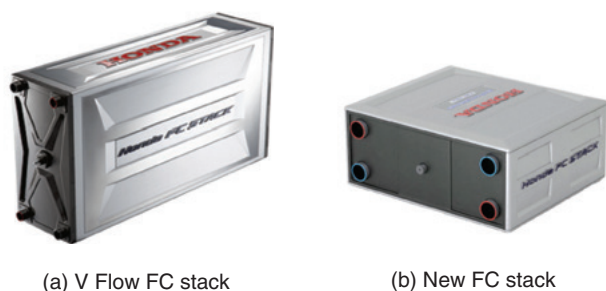


Fig. 1 Appearance of fuel cell stack

2. 燃料電池とは

固体高分子型の燃料電池は Fig. 2 に示すように⁽⁵⁾, 電解質膜を用い水素と空気中の酸素との電気化学反応によって化学エネルギーを電気エネルギーに直接変換するものである.

水素極 (-): $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$

酸素極 (+): $1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

水素イオンを伝導する電解質膜を水素極と酸素極 (空気極) の二つの電極層と拡散層で挟み, MEA を形成し, この

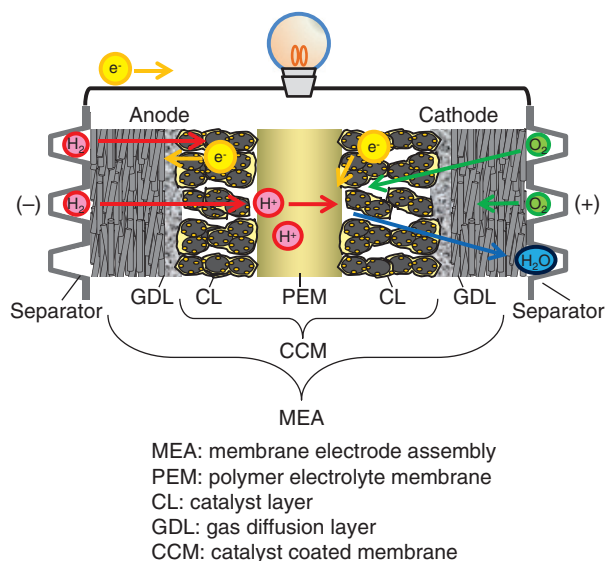


Fig. 2 Mechanism of electricity generation in FC stack

MEA を 2 枚のセパレータで両側から挟んで 1 個のセルを形成する. 1 セルでは開回路時でも理論電圧 1.23 V を超える電圧は得られないので, Fig. 3 に示すようにセルを積層することで高い電圧を発生するようにしている. また, MEA の性能を発揮させるためには, 電解質膜や電極層に加湿し含水させて水素イオンの伝導抵抗を低くする⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾ ことも重要である.

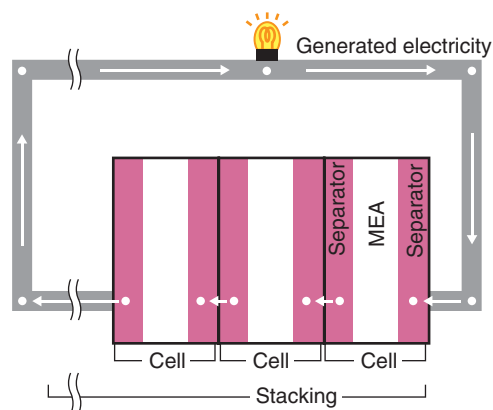


Fig. 3 FC stack configuration

3. 開発のねらい

CLARITY FUEL CELL の開発では, 燃料電池パワートレインを小型化してフロントフード内に搭載することにより FCV の市販車として世界初となる 5 人乗りセダンパッケージの実現をねらいとした⁽³⁾.

新型燃料電池スタックの開発に際しては, CLARITY FUEL CELL の開発のねらいと将来への大量普及を見据え, 以下を開発のねらいとした.

- (1) 軽量かつコンパクト化
- (2) 耐衝撃性の向上
- (3) 低温始動性の向上
- (4) MEA の生産性を向上

4. 軽量かつコンパクト化

燃料電池スタックの軽量かつコンパクト化のためには, セルの厚み低減とセルの積層数を削減することが必要である.

4.1. セルの厚み低減

セルの厚みを低減するためには, 水素および空気の高ス流路深さを浅くすることと, MEA の厚みを低減することが必要である. しかしながら,

ガス流路深さ = 生成水の付着力 / 生成水の排出力
 の関係があるため, 水素および空気の高ス流路を浅くす

ると生成水がガス流路に付着する力の割合が増し、生成水が排出できずに滞留しやすくなり (Fig. 4)、水素や空気の供給が阻害され安定した発電ができなくなる。従来の燃料電池スタックにおいては、水素および空気のガスを平行流として上から下に流す構造とし、発電で生成した水は、重力の利用によって排出力を高めて排出し、燃料電池スタックの発電安定性を維持しつつガス流路深さを低減して、セルの厚み低減をおこなっていた。本開発においては、さらにセルの厚み低減をさせるために、MEA 内の湿度の均一化をおこない加湿する量を低減した。これにより、生成水を凝縮させずに排出することができたので、生成水の排出力が低い低負荷領域においても、ガス流路への付着を無くすことによって、発電安定性を維持しつつ、さらなるセル厚みの低減をおこなうことができた。まず、水素と空気のガスを平行に流すセル構造から対向に流すセル構造 (対向流) にした。Fig. 5 に示すように加湿された空気が入り口側で MEA へ水分を供給し、出口側に向かって生成された水が MEA へ供給される。そして、水素極側へも MEA を透過した水が逆拡散し、水素入り口側へ水が供給されることで、発電面内で水の循環性を高め、MEA 内の湿度分布の均一化を可能とした。また Fig. 6 に示すようにガス連通口からガス流路へのガス分配を均一化することも重要である。Fig. 7 に示したように、従来スタックから採用している 2 枚の MEA を 3 枚のセパレータで保持し両側に冷媒を流すセル構造においては、2 枚の MEA に挟まれたセパレータは、片面に水素を反対面に空気を流す構造となる。金属プレスセパレータではプレス成形加工により形状が表裏となるため、それぞれに最適な分配流路が成形できない。そのため Fig. 8 のよう

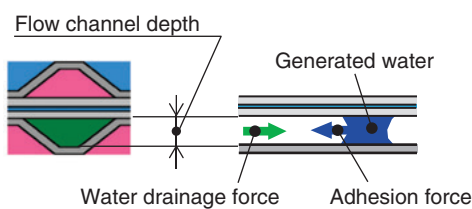


Fig. 4 Relationship between flow channel depth and adhesion force

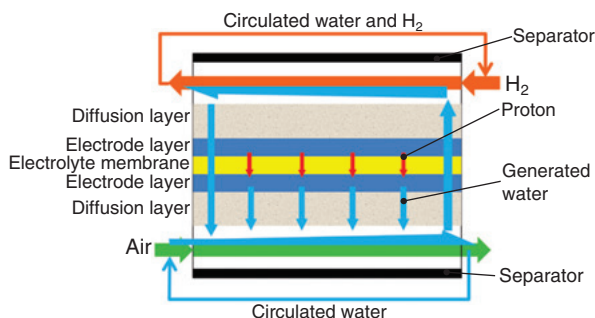


Fig. 5 Diffusion in MEA

に水素極側、空気極側のバランスを見てエンボス形状等で設計する必要がある。そこで、MEA の外周を樹脂化して (Fig. 9)、セパレータプレス面を平面とし、樹脂化し

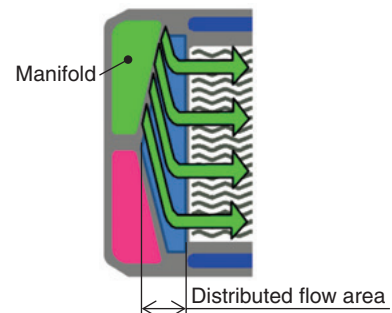


Fig. 6 Distributed flow area

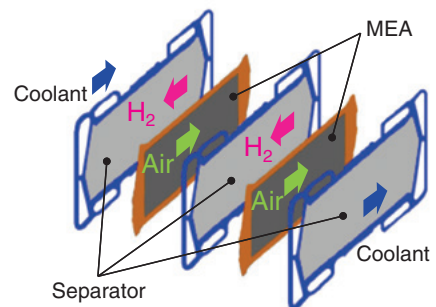


Fig. 7 One cooling layer per two cells

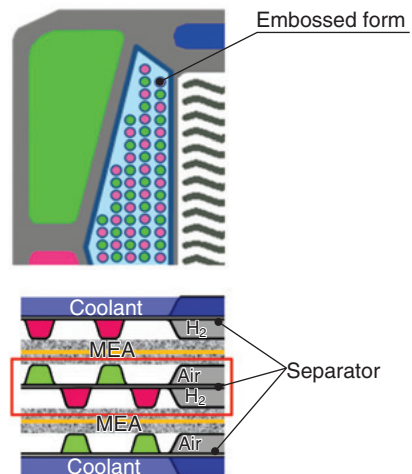


Fig. 8 Previous gas distribution structure

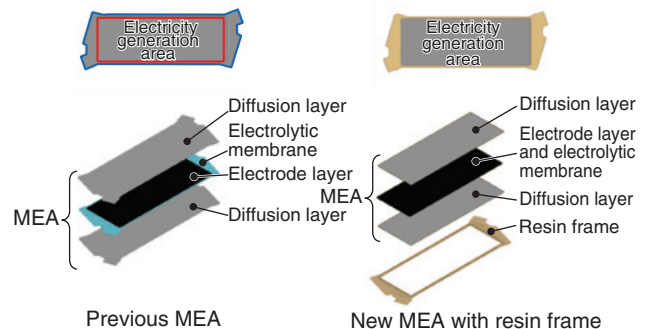


Fig. 9 Comparison of MEA structures

た部分にそれぞれのガスを最適に分配する溝を形成する (Fig. 10) ことで両ガスの分配を向上して、さらに MEA 内の湿度分布を均一化した。また、MEA の改良もおこなっ

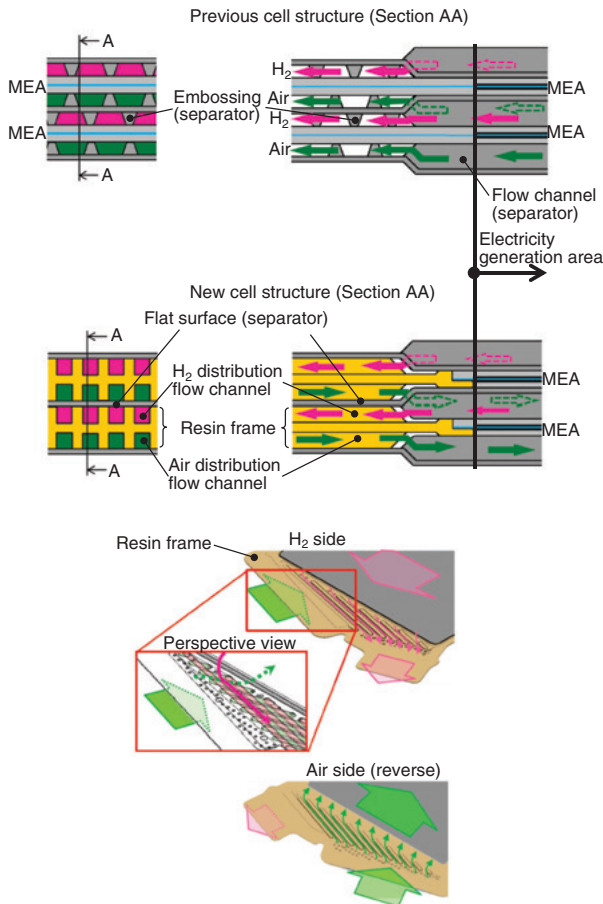


Fig. 10 Resin-framed MEA

た。電解質膜の空気極から水素極への濃度差による水の拡散性を向上させ循環性を高めるためと MEA 厚みを低減するために、電解質膜を薄くした。さらには、カーボン繊維で構成される拡散層においてもカーボン繊維の密度を粗くし空孔率を高めることでガスの拡散性や水の排出性を向上させた。水素極側においては、水素の高拡散性により、拡散層の厚みを低減しても十分なガス拡散性を得られる。これらにより、加湿量を従来と比べて 40% の低減をすることができたので、生成水の排出力が低い低負荷領域において、発電面内での湿度を 100% 以下にできた。その結果、生成水を凝縮させないで排出することが可能となったので、流路への生成水の付着が無くなり発電安定性を維持しつつ流路深さを 26% 低減できた。電解質膜および拡散層の厚み低減による MEA 全体厚み低減と合わせ、1 セルあたりの厚みが 1 mm となり、従来と比べて 20% の厚み低減ができた (Fig. 11)。また、生成水の排出のために重力を利用する必要がなくなり、燃料電池スタックのガス流路を横方向に流す構造としても Fig. 12 に示すように、発電安定性を維持することが可能となった。

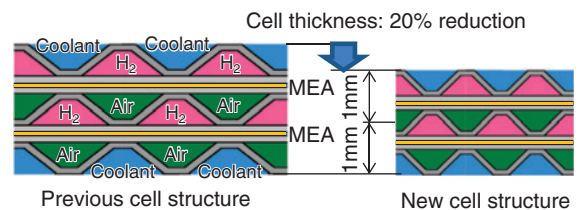


Fig. 11 Cross-section of cell structure

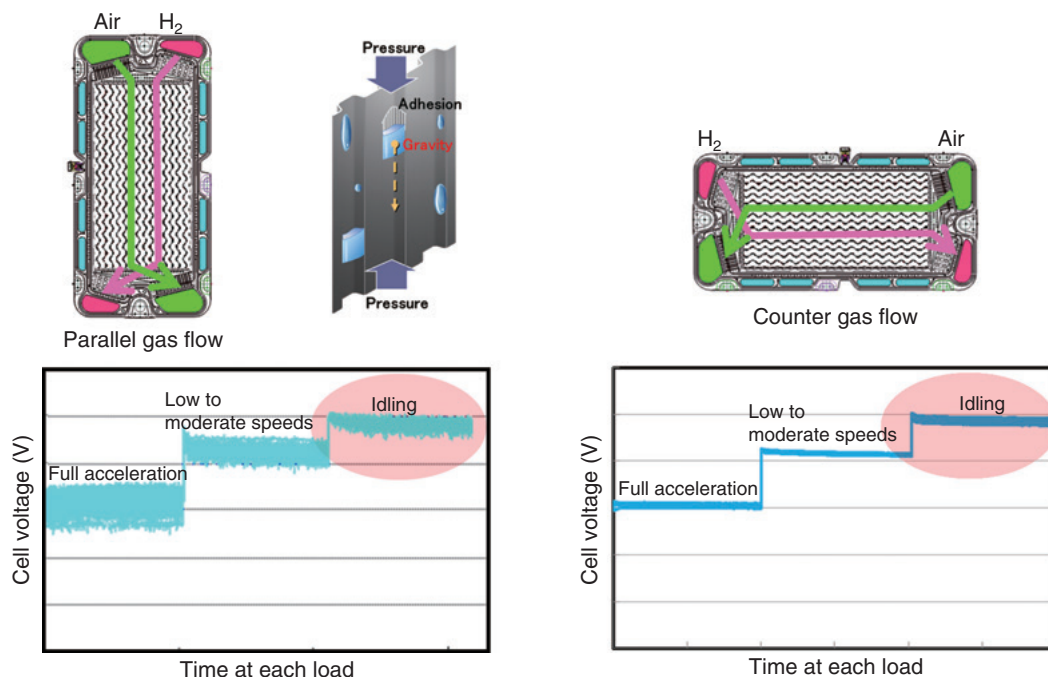


Fig. 12 Natural stabilized electricity generation

4.2. セル積層数の削減

セルあたりの発電面積を変えずにセルの積層数を削減するには、単位発電面積あたりの出力をさらに向上させる必要がある。そのためには、単位面積あたりの電流密度をより高めれば良い。しかしながら空気極側では、発電により生成水が増加しMEA内での空気の拡散性を阻害することによって出力性能の低下を招くという課題がある。よって、MEA内での生成水の滞留をなくすことが必要である (Fig. 13)。

セパレータは水素および空気をMEAに供給させるためのガス流路を形成しており、そのガス流路とMEAが接しているところでは、発電で生成した水が拡散層内にて凝縮し滞留してしまい、水素や空気をMEAに均一に供給できなくなる。よって、Fig. 14 の中性子可視化テストにて示すように、ガス流路とMEAが接する流路山部を狭くすれば生成水の滞留をなくすことが可能となることに着目し、ガス流路ピッチの低減をおこなった。

しかし、金属プレスセパレータにおいては、ガス流路ピッチを狭くするとプレス成形時に板の伸び率が多くなり、ガス流路成形部に割れが生じたり、局所的に板厚みが薄くなってしまう。それを回避するためには、プレス成形を数回に分ければよいが、生産性の低下を招いてしまう。本開発では、ガス流路深さを低減したことでガス流路ピッチを35%狭くしても従来と同等な板の伸び率を確保することができた (Fig. 15)。

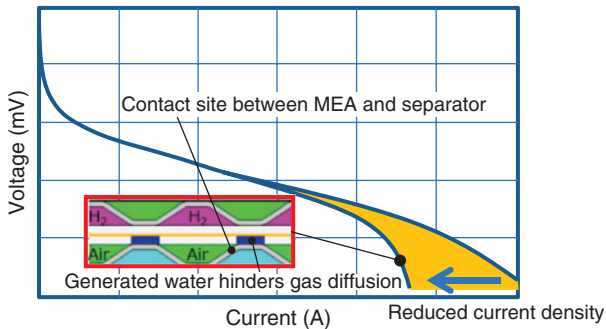


Fig. 13 I-V characteristic

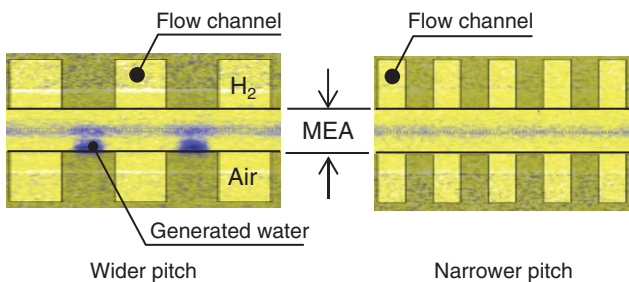


Fig. 14 Comparison of flow channel pitches

その結果、電流密度を高めても流路山部での生成水の滞留をなくすことができ、空気の拡散性が確保されることで、従来の燃料電池スタックに比べ電流密度を1.5倍に高めることが可能となり、単位面積あたりの出力性能を1.5倍にすることが可能となった (Fig. 16)。それにより、従来の燃料電池スタックと同等の出力でありながら、セルの積層数を30%削減することができた (Fig. 17)。

このような軽量かつコンパクト化技術で、セルの厚み

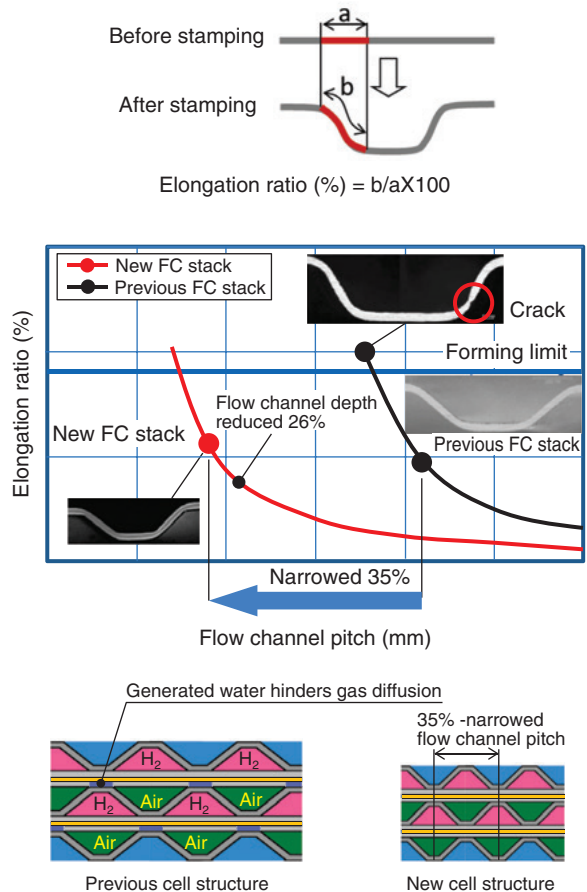


Fig. 15 Narrowed flow channel pitch

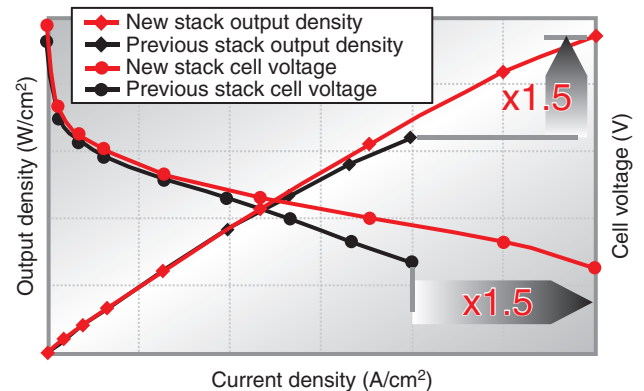


Fig. 16 Comparison of cell output density

低減とセルの積層数削減により、従来比で燃料電池スタックの容積出力密度が 60%，重量出力密度が 35% 向上し、世界トップクラスの容積出力密度 3.1 kW/L を達成した (Fig. 18)。

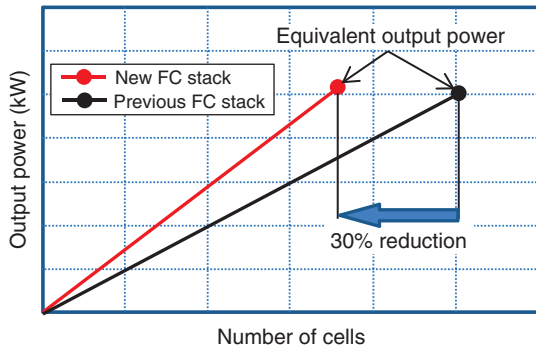


Fig. 17 Reduced number of cells

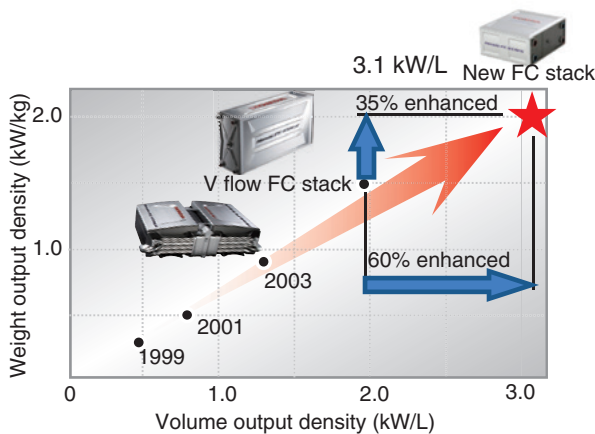


Fig. 18 Comparison of stack output density

5. 耐衝撃性の向上

フロントフード内への搭載は、従来のセンタトンネル搭載よりもフロント衝突時の燃料電池スタックに入る衝撃力が増加するため、耐衝撃性を向上させる必要がある。そこで、Fig. 19 に示すようにセルの上下方向に凸部を設け、スタック両端のエンドプレートにパー締結とし、セルに設けた凸部を保持することにより大きな衝撃力でも破損することなくセルのずれを抑制することができるパー締結 1 ボックススタック構造を開発した。その結果、従来のパネル締結構造のスタックと比べ耐衝撃性を 4 倍向上させることができた。

コンパクト化と耐衝撃性の向上により燃料電池スタックを駆動モータ上部に搭載することを実現し、燃料電池パワートレインを従来の V6 エンジン同等サイズに小型化することができた。これにより FCV の市販車で初めて 5 人乗りセダンパッケージを実現した。

6. 低温始動性の向上

従来の燃料電池スタックにおいては、V Flow セル構造によって生成水の排出性を高めたことと、熱容量を 40% 低減させたことで、始動時の出力性能を向上させた。本開発では、熱容量および MEA 部材の固有抵抗を低減し、低温始動性の向上をおこなった。

まず、電解質膜の薄膜化とイオン交換容量の最適化および、拡散層の薄型化により、MEA の固有抵抗を低減できた。また、ガスの対向流化による MEA 面内湿度の均一化で低加湿環境下での電解質膜の抵抗も低減できた。これらにより、 -20°C 環境下でのスタックの電気抵抗を 1/3 に低減することができ、始動直後の出力性能が向上された。さらには、セパレータ流路深さ低減とセルの積層数削減による、スタックの軽量およびコンパクト化と冷媒保有量の低減により、熱容量が 12% 低減されたことで出力上昇速度が向上でき、 -20°C 始動時における 50% 出力に到達する時間を従来と比べて 1/2 短縮することができた (Fig. 20)。

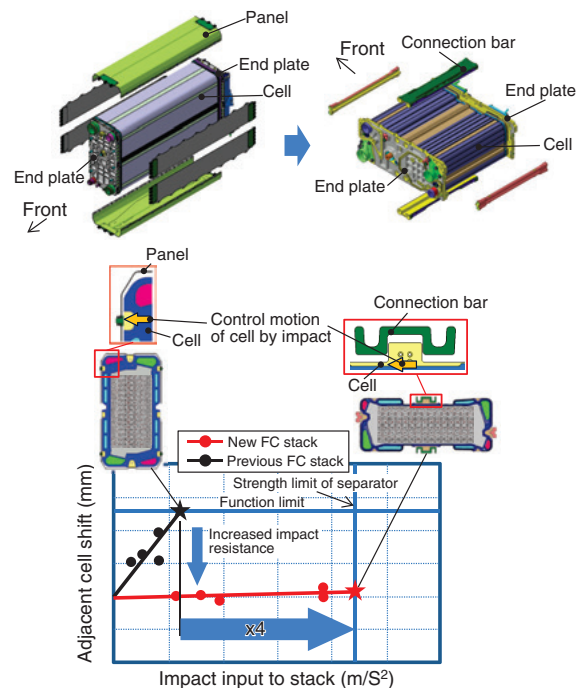


Fig. 19 High impact resistance stack

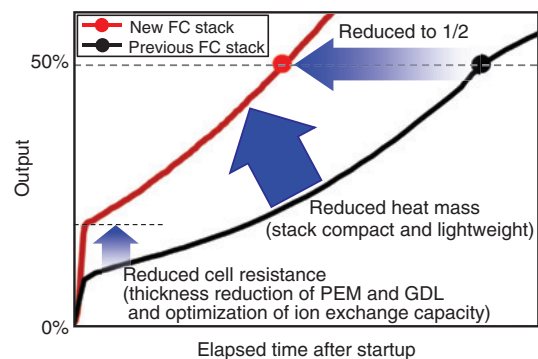


Fig. 20 Comparison of low-temperature performance (operated at -20°C)

7. 生産性の向上

Fig. 21(a) に示すように従来技術では、拡散層に下地層を、電解質膜上に電極層をそれぞれにパターン塗工で形成し積層することで、MEA を製造していた。この生産方法では、連通口から流路へガスを流すための発電には寄与しない部分も含め、MEA として一体で形成されるため複雑な形状になり、拡散層や電解質膜の無駄となる部分が多く存在していた。本開発では、Fig. 9 で示したように外周部を樹脂枠とし、発電部の MEA を矩形化したことで、ロール状の拡散層に下地層や電極層をシート状で形成できるようになった。その後、多数個取りの打抜きプレスで MEA を矩形化するため、Fig. 21(b) に示すとおり大量流動ができるプロセスとなった。拡散層に下地層や電極層をシート状に塗工するためには、多孔質な拡散層表層へうねりの少ない平坦な膜を塗工する必要がある。よって撥水性のあるインクを開発し、拡散層への染み込みを低減できた結果、平滑な電極層を高速でシート化する技術が構築できた。MEA が矩形化されたことで、シート状で電極膜上の膜欠陥を検査し、良品エリアのみを選択的に切り取り、MEA に使用する生産技術も適用できるようになった。

これらの結果、生産時の無駄となる部分を削減し拡散層や電解質膜の使用量を 40% 低減でき、大量流動と低コスト化のための生産技術が構築できた (Fig. 22)。

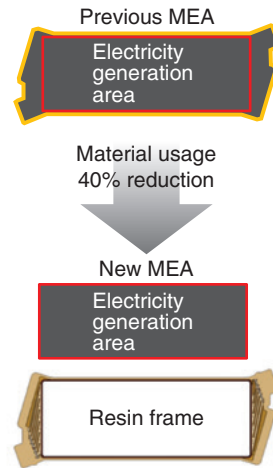


Fig. 22 Reduction of material usage

8. まとめ

本開発では、燃料電池スタックを軽量かつ小型化し、耐衝撃性の向上と、低温始動性および MEA 生産性の向上をおこなった。

- (1) 燃料電池スタックのセルの厚み低減とセルの積層数削減にて、従来と比べて容積出力密度で 60%、重量出力密度で 35% の向上し、世界トップクラスの容積出力密度 3.1 kW/L を達成した。

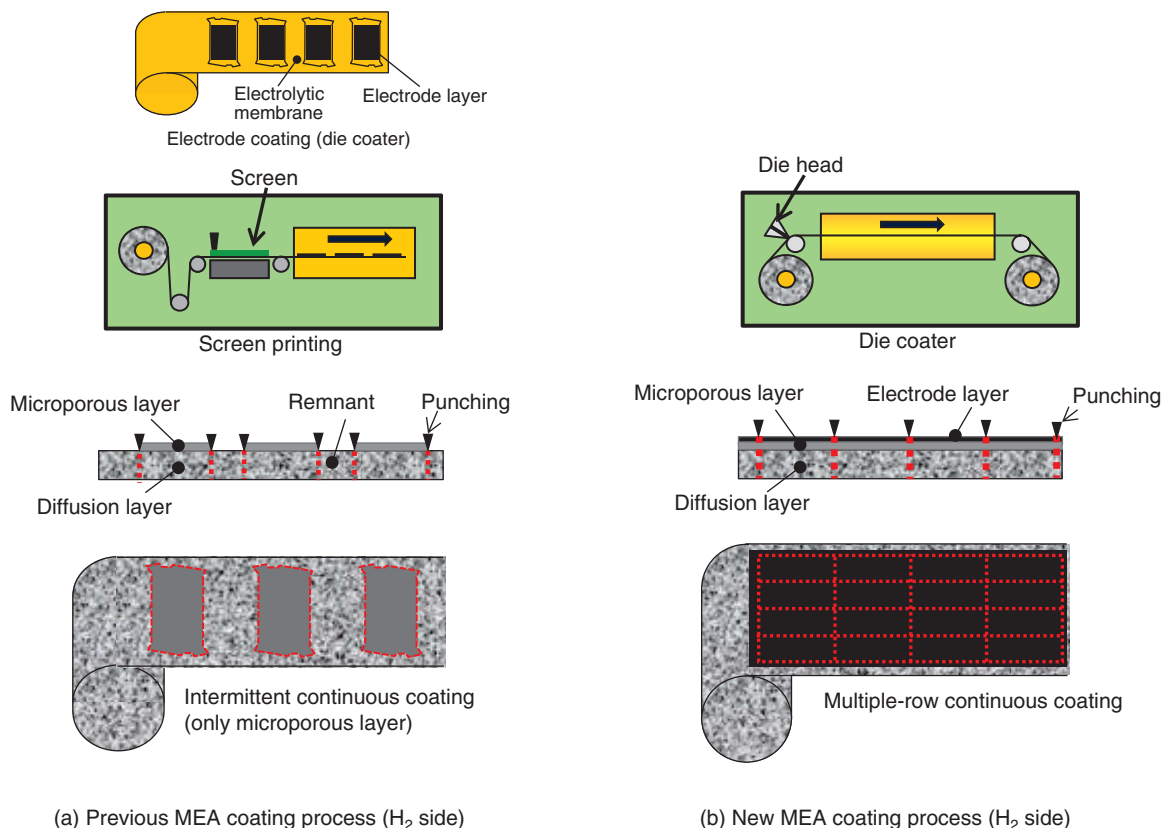


Fig. 21 MEA coating process (H₂ side)

- (2) コンパクト化と合わせ、ガスの流し方を横方向とすることにより、スタック高さを低くし、さらに、耐衝撃性を向上したことで、フロントフード内への搭載を達成できた。
- (3) MEA の抵抗低減および、熱容量の低減により、低温時の 50% 出力到達時間を従来と比べ 1/2 に短縮させることができた。
- (4) MEA を矩形化して MEA の発電部以外を樹脂枠化したことで、生産性を向上させるとともに、高価材料の使用量を 40% 削減した。

参考文献

- (1) 井ノ上雅次郎, 斉藤信広, 内堀憲治: Honda FCX 搭載の次世代燃料電池スタック, Honda R&D Technical Review, Vol.17, No.2, p.8-13
- (2) 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
- (3) 木村顕一郎, 河崎輝明, 大村孝之, 渥美淑弘, 清水潔: 新型燃料電池自動車 CLARITY FUEL CELL の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.28, No.1, p.1-7
- (4) 竹中啓恭: 原理と電極反応: 燃料電池技術とその応用, テクノシステム, p.91, (2000)
- (5) 佐藤雅彦, 千葉裕人, 井ノ上雅次郎: 燃料電池スタックにおけるセル面内 CCM 含水量分布計測システムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.28, No.1, p.15-23
- (6) 南雲健司, 井ノ上雅次郎: シミュレーションによる燃料電池スタックセル面内 CCM 含水量分布予測, Honda R&D Technical Review, Vol.28, No.1, p.24-30
- (7) 岩成亨, 宮島一嘉, 古澤宏一郎, 井ノ上雅次郎: 実車搭載発電システムにおける燃料電池スタックセル面内 CCM 含水量のリアルタイム計測, Honda R&D Technical Review, Vol.28, No.1, p.31-36

■ 著 者 ■



菊池 英明



加地 勇人



西山 隆之



小此木 泰介



原 田 仁

CLARITY FUEL CELL 用エア供給システムの開発

Development of Air Supply System for CLARITY FUEL CELL

菅 原 竜 也*

Tatsuya SUGAWARA

立 花 優*

Yu TACHIBANA

金 沢 卓 磨*

Takuma KANAZAWA

今 井 直 樹*

Naoki IMAI

要 旨

CLARITY FUEL CELL の燃料電池システムをフロントフード内に搭載するために、小型のエア供給システムを開発した。従来のリショルム型に対して静粛性に優れる電動ターボ型のコンプレッサを採用することにより、消音補機類の体積で 50% の小型化を実現した。

空気の清浄性を求められる燃料電池のために、軸受けにオイルが不要なエアベアリングを採用した。

ターボ化の課題である運転領域の制約に関しては、斜流式コンプレッサの採用とコンプレッサを 2 段にすることで、運転領域のワイド化と従来比 1.7 倍の供給圧力向上を達成した。

また新規でレゾルバレス制御用インバータを開発することで、モータを回転角センサレスとすることが可能となり、モータの高回転化と小型化に寄与した。さらにパワーモジュールのフルモールド化とプレスフィット接続によりインバータ本体の小型化を達成した。

ABSTRACT

A compact air supply system has been developed for the CLARITY FUEL CELL fuel cell system in order to make it possible to fit the system under the front hood of the vehicle. The use of a motorized turbo compressor realizing greater quietness than a conventional Lysholm compressor made it possible to reduce the volume of the noise-reducing auxiliary devices by 50%.

Air bearings that do not require oil were used as the compressor bearings based on the necessity of supplying pure air to the fuel cell system.

To address the issue of restriction of the operating range of the compressor as a result of turbocharging, a mixed-flow compressor was used, and two-stage compression was applied. This realized a wide operating range and made it possible to increase air supply pressure 1.7-fold compared to a conventional compressor.

The development of a new inverter using resolver-less control made it possible to do away with the rotation angle sensor in the motor, contributing to increased motor speed and increased compactness. The use of a full-mold power module and a press-fit connection method reduced the size of the inverter unit.

1. ま え が き

燃料電池を発電させるためには、燃料電池内の発電面に水素および空気を連続して供給することが必要である。そのために燃料電池システムは大きく分けて Fig. 1 の四つのシステムで構成されている。

水素は車両に搭載されている水素タンクから水素供給システム中の減圧工程を経て燃料電池に供給され、空気はエア供給システム内のエアコンプレッサで吸入圧縮して燃料電池に送られる。

Honda では 2002 年に開発した FCX⁽¹⁾よりエアコンプレッサとして電動リショルム型コンプレッサを用いてきた

が、CLARITY FUEL CELL において燃料電池システムをフロントフード内に搭載するために⁽²⁾、システムの小型化を目指して電動ターボ型コンプレッサを用いた次世代のエア供給システムを開発した (Fig. 2)。

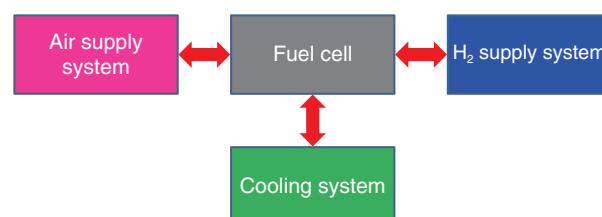


Fig. 1 Overview of fuel cell system

*四輪 R&D センター

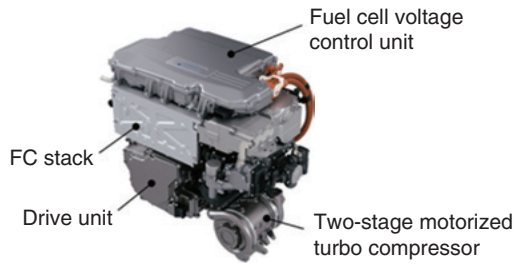


Fig. 2 Downsized fuel cell powertrain

2. 開発のねらい

従来のリショルム型コンプレッサは、コンプレッサのロータ内部で一度空気を圧縮してから放出する構造のために、動作圧力を高くするほど吐出音が大きくなる。そのため、吐出音を減衰させる消音デバイスは動作圧力を高くするほど容量および容積を大きく取らなければならない課題があった。一方ターボ型ではリショルム型のような内部圧縮工程は無く吐出音が低いため、動作圧力を高めても消音デバイスの削減や、システムの小型化が可能と考えた。

さらに、燃料電池に投入する空気の圧力を上げることで酸素分圧が上昇し、高出力時における燃料電池の電圧降下が改善される。そのため圧力上昇に必要なエアコンプレッサ消費電力増加分を差し引いても、Fig. 3 に示すように燃料電池システム全体の出力を上昇させることが可能となる。この効果によりスタック必要セル数を削減し、小型化とコスト低減に寄与できると考えた。

また、運転圧を高圧化することで Fig. 4 に示すようにスタック内部の相対湿度を上げることができる。このことにより必要となる加湿量が低減し、加湿器の小型化が実現できる。その上で運転圧の高圧化により運転温度が上がる条件でも適度な湿度を維持することが達成できる。このことにより急坂登坂時のような走行風が少なくラジエータ冷却能力が低いために運転温度が上がるシチュエーションでも、燃料電池の発電性能を保持し、車両動力性能を高い状態で維持することが可能となる。

以上より CLARITY FUEL CELL のエア供給システムを開発するにあたり、ねらいを以下のように定めた。

- (1) エア供給圧力の上昇により燃料電池出力の向上で燃料電池に必要なセル数を削減し、小型化とコスト低減をおこなう。
- (2) エア供給圧力上昇により必要となる加湿量の低減で、加湿器の小型化と燃料電池の高温運転領域を拡大する。
- (3) 電動ターボ型コンプレッサ採用による静粛性向上で消音デバイス類を削減し、エア供給システムを小型化する。

- (4) フロントフード内搭載を実現するために、モータの小型化が可能なレゾルバレスモータとし、センサレス制御可能なインバータを開発する。

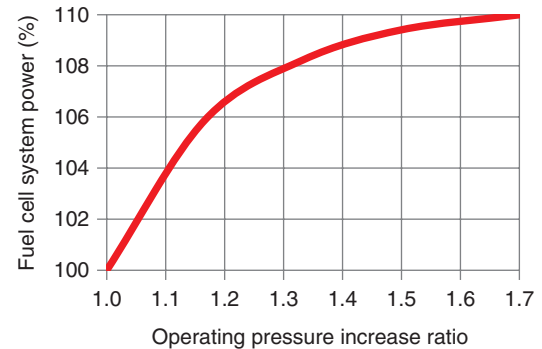


Fig. 3 Correlation between cathode operating pressure and fuel cell system power

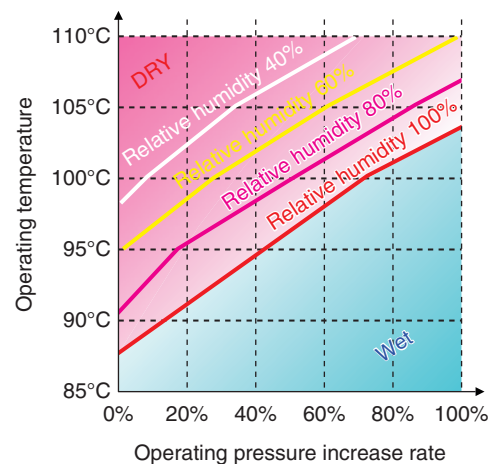


Fig. 4 Correlation between stack humidity and pressure and temperature

3. 2 段過給電動ターボ型コンプレッサの特徴

Fig. 5, Fig. 6 に今回 Honeywell 社と共同開発した 2 段過給電動ターボ型コンプレッサの外観と断面図を示す。

本構造の特徴を下記に挙げる。

- (1) エアベアリングを用いた軸受け構造
- (2) 低圧側コンプレッサと高圧側コンプレッサをロータの両端に備えた、2 段過給構造
- (3) コンプレッサのターボ化による静粛化

3.1. 軸受け構造

通常、内燃機関用のターボ軸受けはオイル潤滑式を採用している。しかし燃料電池システムにターボ型コンプレッサを採用するにあたっては、軸受けより流出するオイルが燃料電池を被毒させ発電能力を劣化させる懸念が

あった。そこで、航空機の空調システム用ターボで実用されているエアベアリングを自動車用として世界で初めて採用した。構造例としてラジアル側のエアベアリングを Fig. 7 に示す。

ロータが浮上する原理を Fig. 8 に示す。ロータの回転と共に、空気の粘性作用でくさび状の隙間に空気が押し込まれ、圧力(動圧)が生じることでロータを浮上させる。

浮上後、Fig. 9 に示すように発生した圧力はトップフォイルを介してバンプフォイルに伝達される。バンプフォイルが変形することにより圧力変動を吸収し、フォイル間の



Fig. 5 Two-stage motorized turbo compressor

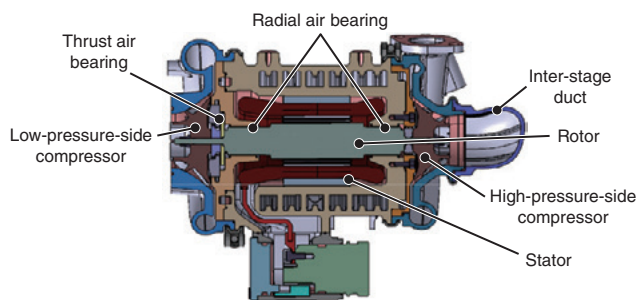


Fig. 6 Sectional view of motorized turbo compressor

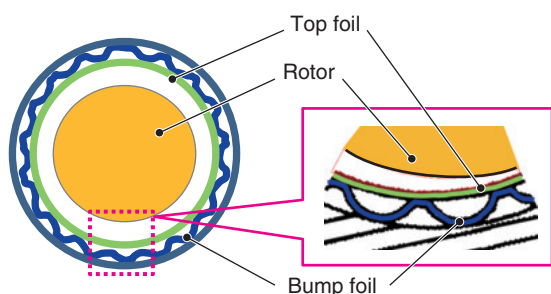


Fig. 7 Structure of radial air bearing

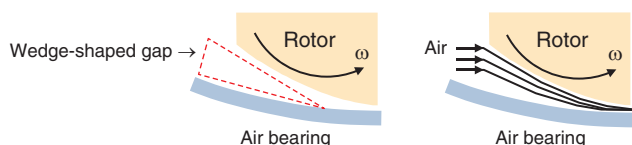


Fig. 8 Rotor lift-off mechanism

摩擦力で変動を減衰することで、ロータ回転数変動に伴う圧力変動に対しても最適な空気薄膜厚さ (Thin air layer thickness) を維持し、ロータを浮上し続けることができる。

3.2. コンプレッサ構造

燃料電池システムの小型化のために、燃料電池へのエア供給圧力の高圧力化が求められた。また、燃料電池システム用エアコンプレッサとして、負荷や温度、気圧などの環境変化に応じた圧力、流量の制御と加減速に代表される過渡領域の制御が必要なため、コンプレッサとしてワイドな運転領域の確保が求められた。

一般的なターボコンプレッサを Fig. 10 に示す。エンジン用のターボコンプレッサとしては遠心式 (Centrifugal) が良く用いられている。遠心式では流体のすべてが羽根車の外周から流出するので大きな圧力上昇が可能である⁽³⁾。しかし、流量を減少させていくと、系の圧力や流量が変動し始める⁽⁴⁾サージにより運転領域が狭くなる傾向にある。

他方、航空機のジェットエンジンで使われている軸流式 (Axial) は流量を大きく取れるが、羽根車単段では大きな圧力上昇が確保できず、高い圧力上昇が必要な場合には羽根車を多段化する必要が生じる。

そこでワイドな運転領域を確保するために、遠心式と軸流式の間の特徴を持つ、斜流式 (Mixed-flow) を2段化することで高い吸入圧力と吐出圧力の比 (圧力比) と流量の両

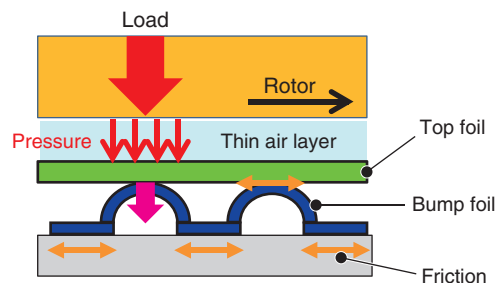


Fig. 9 Operation of air bearing

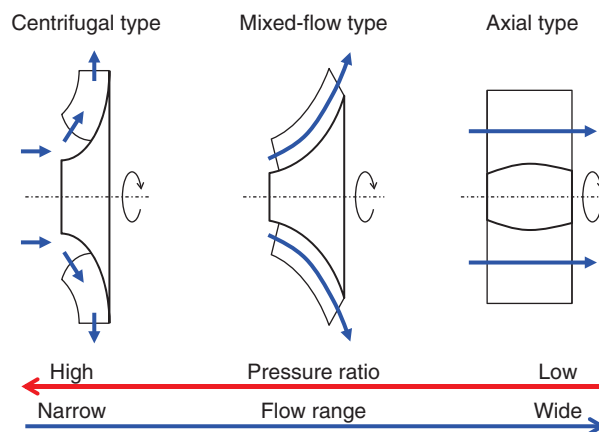


Fig. 10 Compressor wheel type

方を確保する構造とした (Fig. 11).

この構造により Fig. 12 および Table 1 に示すように遠心1段階式と比較して、従来比 1.7 倍の高い圧力比とワイドな運転領域を両立することができた。

3.3. コンプレッサのターボ化による静粛化

燃料電池自動車は内燃機関を持たないため、走行中も静粛である。そのためエアコンプレッサの作動音を低減することが重要である。

Fig. 13 に従来使用していたリショルム型コンプレッサの構造を示す⁽⁵⁾。リショルム型は二つのロータで内部の空気を圧縮して断続的に吸入し、吐出をする構造のため、吸気と吐出側に脈動音が発生する。さらにロータがギヤを介して駆動する機構のためギヤ音もコンプレッサの作動音としてキャビン内に侵入する。そのため燃料電池自動車の特長である、走行時の静粛性を確保するために消音用の補機類が多数必要となっていた。

今回ターボ型のコンプレッサを採用することで脈動を低減し、Fig. 14, Fig. 15 で示すように吸気側と吐出側で発生する騒音の低減を達成した。

またリショルム型では二つのロータはギヤ駆動であったが、コンプレッサとロータを同軸化することによりギヤは不要となり Fig. 16 で示すように本体からの放射音も低減した。

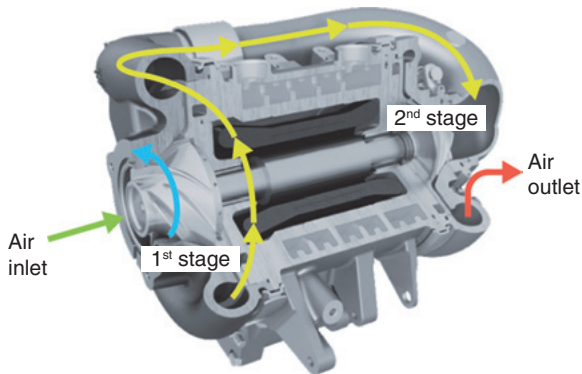


Fig. 11 Internal air flow of two-stage motorized turbo compressor

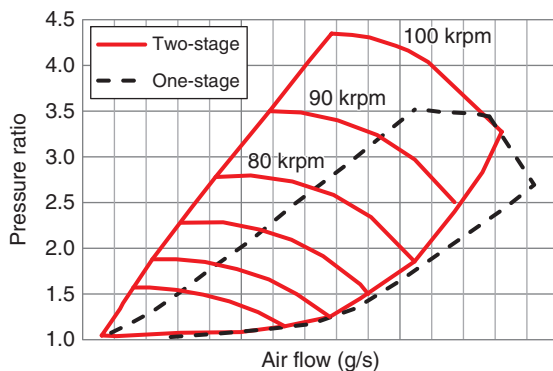


Fig. 12 Performance map

Table 1 Specifications

	One-stage	Two-stage
Wheel type	Centrifugal	Mixed-flow
Maximum rotation speed	100 krpm	100 krpm
Maximum pressure ratio	3.5	4.2

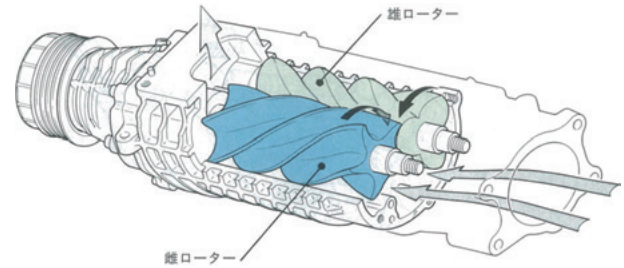


Fig. 13 Cross-section of Lysholm compressor

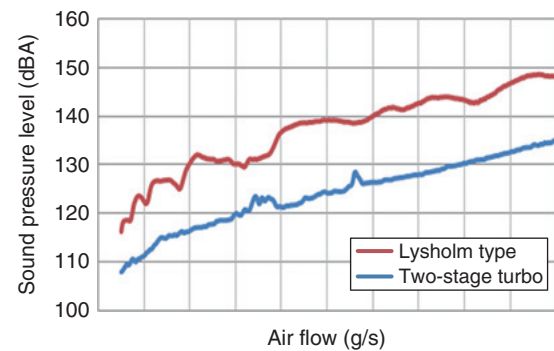


Fig. 14 Inlet noise comparison

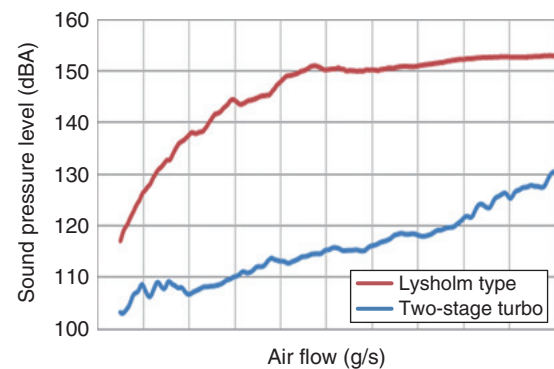


Fig. 15 Outlet noise comparison

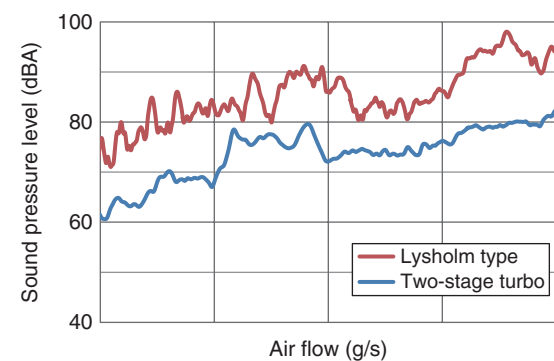


Fig. 16 Comparison of radiation noise near compressor

コンプレッサの静粛性が向上することで、これまでフロントフード内で多くのスペースを必要としていた吸気脈動対策のレゾネータの小型化、吐出脈動対策のサイレンサおよび放射音低減カバーの廃止をすることができた。その結果、Fig. 17 に示すように消音補機はエアクリーナと一体化することによって、前モデルの FCX クラリティ⁽⁶⁾ 比で体積 -50% の小型化を達成することができた。

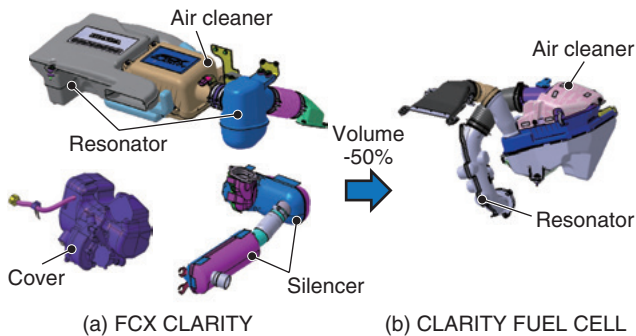


Fig. 17 Downsized noise reduction devices

4. 2 段過給電動ターボ駆動用インバータ

Fig. 18 に示す BRUSA 社と共同開発したインバータユニットは下記の特徴を有する。

限られた空間内に搭載可能とするために Intelligent power unit (IPU) ボックスとの一体化構造にし、またコンプレッサ軸回転数 10 万 rpm でのセンサレス制御を達成するための高速スイッチングに対応したデバイスおよび冷却構造である。

4.1. インバータと IPU ボックスとの一体化

インバータユニットを車両へ搭載するに際しパッケージとして二つの項目を満足する必要があった。

一つはキャビン外配置でインバータユニットの一次側に繋がる直流高圧配線 (DC 配線) を IPU ボックスと一体接続することである。もう一つは各衝突要件試験にてユニットのケースに損傷を受けないレイアウトとすることである。

これらを満たすパッケージサイズは、IPU ボックスの前面側で各衝突試験にて剛体が侵入してこないエリアに収まる必要がある。要求性能を満足した上でそのエリア内に搭載できるように、専用インバータを開発し、IPU ボックス一体のパッケージとした (Fig. 19)。

メンテナンスの際に作業者の電気安全を確保するために、車載状態では DC 配線接続部へのアクセスができない構造とした。この構造を実現するために DC 配線を IPU ボックスからインバータユニットへ直接引き込むレイアウトが必要となった。その際の課題となる IPU ボックスの防水性能を確保するために IPU ボックスとユニット間の接

続をフレキシブルなゴムダクトにて対応した (Fig. 20)。また浸水が想定される床下に搭載されることから (Fig. 21)、防水や防食への設計上の配慮として、防錆性の高いアルミ材料をケースへ適用した。またケースとリッドの隙間の腐食対策として防水構造に Formed-in-placed gasket (FIPG) を採用した。

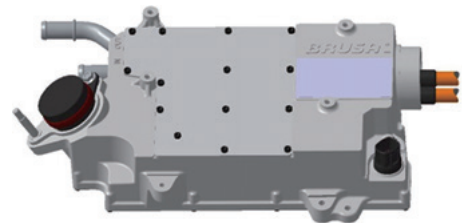


Fig. 18 Air pump inverter unit

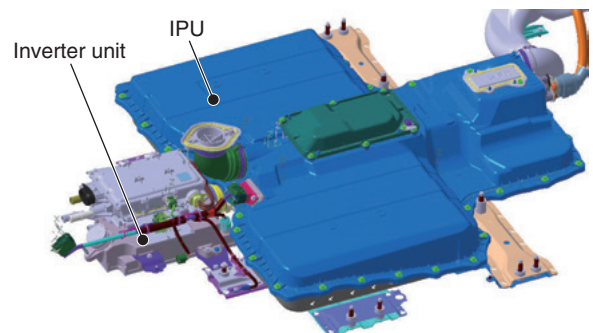


Fig. 19 Potential area for fitting of controller unit

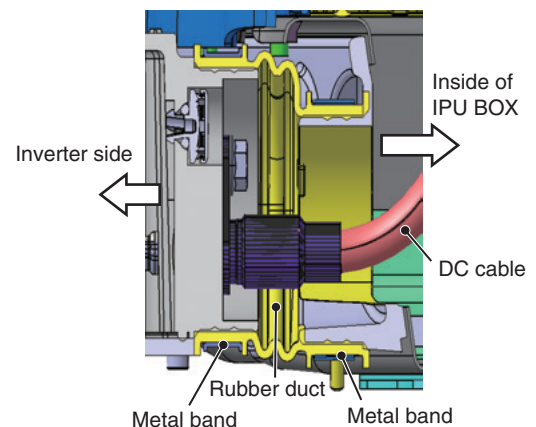


Fig. 20 Sectional view of duct



Fig. 21 Inverter mounting position

4.2. 高速スイッチング対応技術と小型化技術

小型化と高効率化を達成するために下記三つの要素技術を適用した。

フルモールドモジュールによる高放熱化とプレスフィット接続による小型化を適用した。さらに、センサレス制御によるモータの小型化である。

まずフルモールドモジュールは、Direct Copper Bonding (DCB) 基板をトランスファモールドにて封止したパワーモジュール (Fig. 22, Fig. 23) を採用することで、半導体チップからベースプレートまでの熱抵抗を小さくすることによる高効率な放熱が可能となり、従来の Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) のスイッチング周波数を超える 24 kHz でのスイッチングが可能となった。

次にパワーモジュールピンへ適用したプレスフィット接続は、パワー基板間との電氣的接続としてプレスフィットピンを基板スルーホールに強圧入とすることで、熱衝撃に起因する半田クラック発生による信頼性の低下を排除できた。さらに配線の簡素化と部品間の距離を短縮したことによりユニットを小型化できた。また開発期間短縮のため IEC 規格に基づく設計製造ライセンスの取れたプレスフィット端子を採用することとした。仕様上重要となる大電流通電接触部 (Fig. 24) の温度上昇値と接触抵抗値の関係性を明確にして管理することで、電氣的接続部の耐久信頼性が確保できた。

最後にセンサレス制御では、スイッチング周波数を可聴域外の 24 kHz とし、モータを 1 極対にすることにより、スイッチングノイズの低減と共に最高回転数 10 万 rpm でのモータ制御安定性を確保した。センサレス制御での制御値と実回転数の挙動を Fig. 25 に示す。本制御では回転停止時間の短縮を目的とした減速時に PWM 制御を用いた電力回生をすることで、加速時のみならず減速時にも高い応答性を達成した。

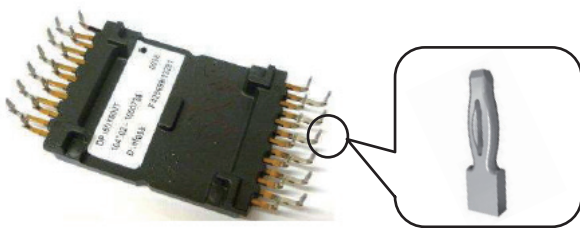


Fig. 22 Full-mold module and press-fit pin

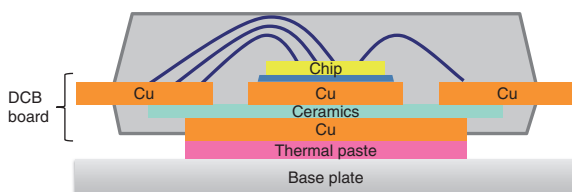


Fig. 23 Sectional image of full-mold module

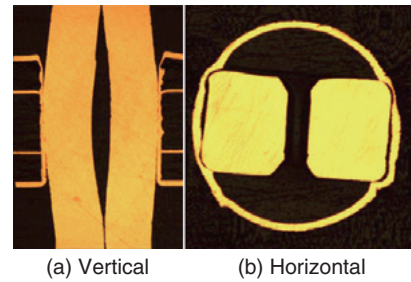


Fig. 24 Cross-section of press-fit connection

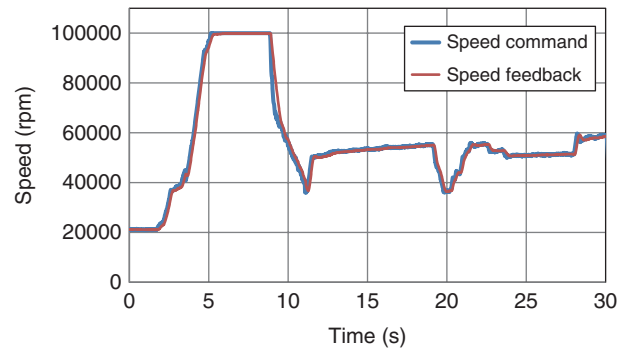


Fig. 25 Rotor speed behavior with sensor-less control

5. まとめ

燃料電池へのエア供給圧力向上および静粛性向上をねらい、2 段過給電動ターボ型コンプレッサの開発をおこない、以下の成果を得た。

- (1) 斜流式コンプレッサを 2 段化することで、従来比 1.7 倍のエア供給圧力向上を達成した。
- (2) 清浄な空気を必要とする燃料電池システムヘターボコンプレッサを適用するために、エアベアリングを採用し、オイルが不要な高速軸受けを実現した。
- (3) 電動ターボ型のコンプレッサを採用することにより、消音補機類の体積で 50% の小型化を実現した。
- (4) 衝突安全、電気安全を確保するため IPU ボックスと一体化をしたインバータにフルモールドモジュール、プレスフィット接続技術を導入することで小型な高回転センサレス制御インバータを実用化し、モータの小型化に寄与した。

参考文献

- (1) 川崎聡志, 小野徹, 小椋正己, 加美陽三: 世界初の燃料電池乗車用 Honda FCX の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 15, No. 1, p. 1-6
- (2) 木村顕一郎, 河崎輝明, 大村孝之, 渥美淑弘, 清水潔: 新型燃料電池自動車 CLARITY FUEL CELL の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1, p. 1-7

- (3) 日本機械学会:機械工学便覧応用編 B5 流体機械, 日本機械学会出版, p. 11, 68, (1986)
- (4) ターボ機械協会:ターボ機械入門編, 日本工業出版, p. 99, (1989)
- (5) 星嶋浩:世界初の自動車用ミラーサイクルエンジンとヨーレート感応型4WSに注目!, モーターファン別冊, ユーノス 800 のすべて, p. 14-21, (1993)
- (6) 松永稔, 福島達也, 尾島邦明, 木村顕一郎, 小川隆行: FCX クラリティ用燃料電池パワートレイン, Honda R&D Technical Review, Vol. 21, No. 1, p. 7-14

■ 著 者 ■



菅原 竜也



金沢 卓磨



立花 優



今井 直樹

モデルベース開発のためのエンジンモデルの ECU 組込み技術

Technology for Embedding Engine Models in ECU for Model-based Development

赤 崎 修 介*
Shusuke AKAZAKI
清 水 治 喜**
Haruki SHIMIZU

久 保 知 也*
Tomoya KUBO
山 崎 文 誉***
Fumitake YAMAZAKI

千 田 耕 平*
Kohei CHIDA

要 旨

内燃機関の制御では、モデルベース開発のV字プロセスにおいて上位レベルから下位レベルまでの制御対象モデルに統一性を持つことが重要である。そこで上位レベルの一次元エンジンモデルと中位レベルの平均値エンジンモデルにパラメータ適合を用いて一定の誤差内になるよう関連性を持たせた。そしてHardware-in-the-Loop Simulationにて使用する平均値エンジンモデルをそのままECUに組込むための環境を構築した。モデルは数式シミュレーションツールによって記述され、Cコードに変換される。このコードをもとにECU搭載用のCコードに自動で変換するツールを開発した。変換されたCコードをCPU評価ボードで実際に動作させ、エンジンのデバイス制御の演算周期である10 ms以内に動作可能であることを確認した。これにより、モデルベース開発の上位レベルのモデルと中位レベルでのモデルを関連づけ、下位レベルでのECUへのモデル実装も可能となり、V字プロセスのエンジンモデルの再利用性を向上することができた。

ABSTRACT

Consistency in the control subject model from the top level to the lower level of the V-process used in model-based development is an important factor when designing internal combustion engine control. For this reason, parameter calibration was used to provide relevance between the 1D engine model in the top level and the mean value engine model in the middle level so that the deviation is within a certain level. In addition, an environment was constructed for embedding the mean value engine model used by Hardware-in-the-Loop Simulation as is in an ECU. The model is described using a formula simulator and converted to C code. A tool was developed that automatically converts this code into C code for mounting in an ECU. The converted C code was actually operated using a CPU evaluation board, and was confirmed to operate in 10 ms or less, which is the calculation cycle for engine device control. This made it possible to link the models in the top and middle levels of model-based development and also enabled model mounting to an ECU in the lower level, which increased the reusability of V-process engine models.

1. ま え が き

近年、ダウンサイジング過給エンジンの技術やLow Pressure Loop (LPL)-EGR⁽¹⁾、希薄燃焼の研究など、熱効率の向上を中心とした燃費向上技術が注目されている。

高効率エンジンには専用のセンサやデバイスおよびソ

フトウェアが必要であるが、一方で排気処理のための触媒改良などシステム全体が複雑になってきている。これまで単体ベンチテストでのマッピングなど比較的単純な作業によって適合が計られてきたが、量産へ向けてはパラメータ設定に多大な時間を要するのが現状である。最適化ツールやシミュレーションの進化により効率の良いデータサン

* 四輪 R&D センター

** 株式会社両毛システムズ

*** サイバネットシステム株式会社

リング法や応答曲面などを用いた誤差最小化のための最適化による対応が試みられている⁽²⁾。また、各国の排ガス規制も厳しくなることが予想され、燃費と排ガス規制対応のために空燃比制御やEGR制御の精度向上など、エンジン制御に対する要求が増加することが懸念されている。

一方、モデルベース開発の推進から、検証用のツールとしてHardware-in-the-Loop Simulation(HILS)⁽³⁾が普及してきている。制御システムの設計では、HILSと実際のECUを用いた制御ロジックの構築が試みられている。モデルベース開発の効果を向上するには、モデルの再利用性を高めることで、モデルの改良進化を促すことが望ましい。そこで、HILS用に構築した制御系設計および検証用に適合され、精度を保証された平均値エンジンモデル⁽⁴⁾をそのまま制御用ECUへ実装することで、実際のエンジンの状態予測器としてECU内にて再利用することを検討した。これまでは、CPUの演算性能が不足するため、エンジンの一部をモデル化して組込む例⁽⁵⁾はあったが、吸気系から燃焼および排気系まで含めて実行した例は少ない。今回用いた平均値エンジンモデルは、直噴過給エンジンを数式シミュレーションツールで作成され、あらかじめ数式モデルでの最適化を実施した。その後、ECUへの搭載を検証するため、市販のCPU評価ボードを使って実行し、演算時間や演算結果を比較した。

2. HILS と ECU 組込みモデルの共通化と課題

2.1. モデルベース開発用エンジン制御 HILS

Fig. 1 に示すようにモデルベース開発の中間レベルにおける機能設計時に Model-in-the-Loop Simulation(MILS)またはHILSを用いて機能要求を満たす制御ロジックを設計する。制御対象モデルとしてエンジンモデルを用いているが、モデルは実際のエンジンと定常状態の挙動が一致するようにパラメータを適合される。そして過渡状態の動きについては、定常と同様に再現されていることが望ましい。機能設計時のMILSと検証時のHILSで共通のモデルを用いれば、設計時と検証時に違いは生じない。ただし、

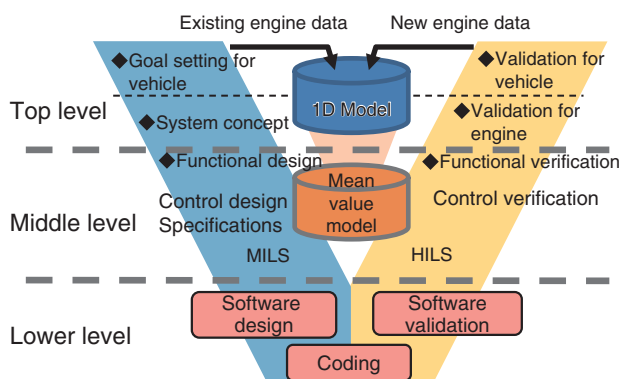


Fig. 1 Standard V-process

MILSでのモデルは実時間実行の必要はないが、HILSにおいては実際のECUを用いるため、実時間実行の必要がある。

2.2. ECU 組込みのための目標設定

HILS上で実時間実行可能なモデルは、比較的簡易な演算で構成されているので、ECUでの演算も可能であると考えた。そこで、モデルを再利用して観測の難しいポイントの温度や圧力などを予測するために使用できるか検討した。実エンジンとは異なり、ECU内のモデルは測定に必要なセンサを自由に搭載可能である。今回は燃焼モデルによるトルクの演算に注目して開発した。駆動力制御からの要求ではトルク演算誤差が全開トルクの5%である10 Nm以内であったので、これを満足できるようにモデルによるトルク演算誤差も、10 Nm以内とした。制御周期は、スロットルなどのデバイス制御の周期が10 msであることから10 ms以内とした。以下に開発目標を示す。

- (1) 制御系設計時や制御性の検証時に使用するHILS用平均値エンジンモデルを吸気から排気まで含めたフルモデルでECUに実装可能とする。
- (2) 数式モデルから自動生成するCコードをECUに搭載可能なコードへ自動修正するツールを開発する。
- (3) エンジンモデルのECU演算周期を10 ms以内であること。トルク演算誤差は10 Nm以内とする。

3. 平均値エンジンモデルと実機適合

3.1. 組込み用のエンジンモデル

これまでの段階的システム同定⁽⁴⁾のエンジンモデルのパラメータ適合の流れをFig. 2に示す。V字フローの上位レベルから中位レベル、下位レベルといった各レベルごとに使用するツールが違うため、各モデルの設定パラメータをシミュレーション結果が一致するように適合する構成とした。開発初期には現行のエンジンを用いて一次元モデルを適合し、次に平均値エンジンモデルへとステップを踏んで適合していく。そして最終段階では、モデルを制御ECUへ実装するという開発ステップである。開発エンジンの改良とともに、このステップを繰り返すことでシステム開発レベルも向上していく。

Fig. 3に今回開発したエンジンモデルを示す。ダウンサイジング過給直噴ガソリンエンジン1.5 L 4気筒を数式処理機能をもつモデリング・シミュレーションツールのMapleSimを用いて平均値モデルで作成した。モデルの部品構成としては、実際のエンジン部品の組み合わせとなっている。これは部品の構成や諸元変更の際にモデルの変更が最小限となるようにモジュール化を考慮し配置した。これにより部品の仕様変更に対応する時は、部品の特性の合わせ込み結果を部品単位の単体計測データやパラメータ変

更にておこなうことができる。MapleSim の部品コンポーネントは、標準で用意されているものがあるが、燃焼モデルなど標準で準備されていないものは、数式化してカスタムコンポーネントにて作成した。カスタムコンポーネントで作成した LPL-EGR と燃焼モデルを説明する。

3.2. LPL-EGR モデル

LPL-EGR は排気ガスの導入遅れが反映されていない場合 HILS での制御系設計と実エンジンの過渡状態での挙動が不一致となり課題となる。そこで、EGR ガスの遅れをパラメータ設定で実際の挙動が再現可能かどうかシミュレーションにて確認した。Fig. 4 に MapleSim による PC 上でのシミュレーション結果を示す。この結果は

LPL-EGR バルブの開度制御でステップ応答をおこなったものである。EGR_rate は、吸気管に入る EGR ガスの割合を示している。LPL-EGR バルブが閉じる際に吸気管の入り口にあるスロットルが開いているときの rate 1 と閉じているときの rate 2 を比較する。スロットルを開いている rate 1 では、即座に EGR ガスは応答しているが、スロットルが閉じているときの rate 2 は、吸気管前のインタークーラなどのチャンバ内でのガス交換時間が大きくなり LPL-EGR ガスが完全になくなるまでに 2 s という長い時間が必要であることがわかる。この応答のむだ時間と応答遅れが実測の場合とシミュレーションと同じ 2 s であることから LPL-EGR モデルとしてガスの遅れを表現できていると判断した。

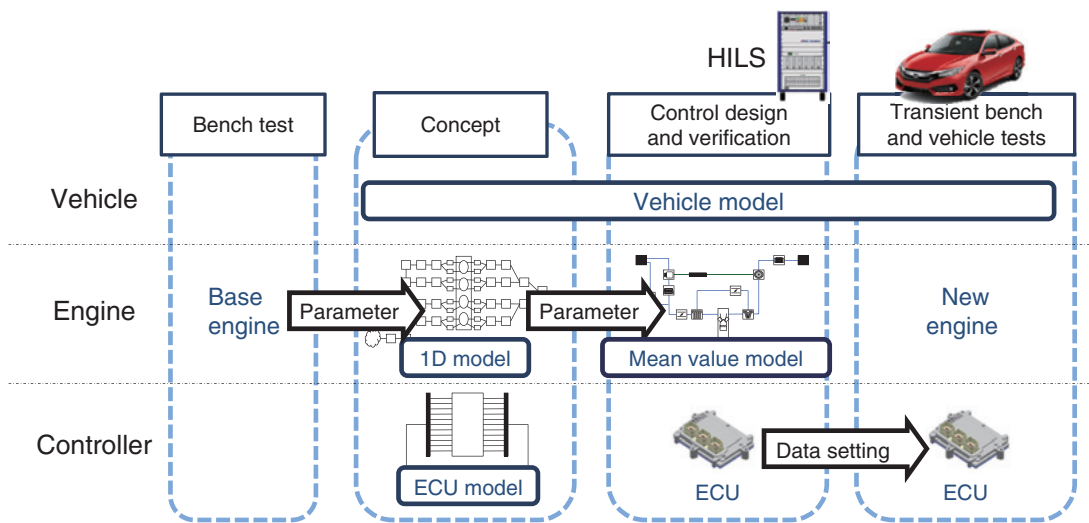


Fig. 2 Model parameter identification flow for engine plant model

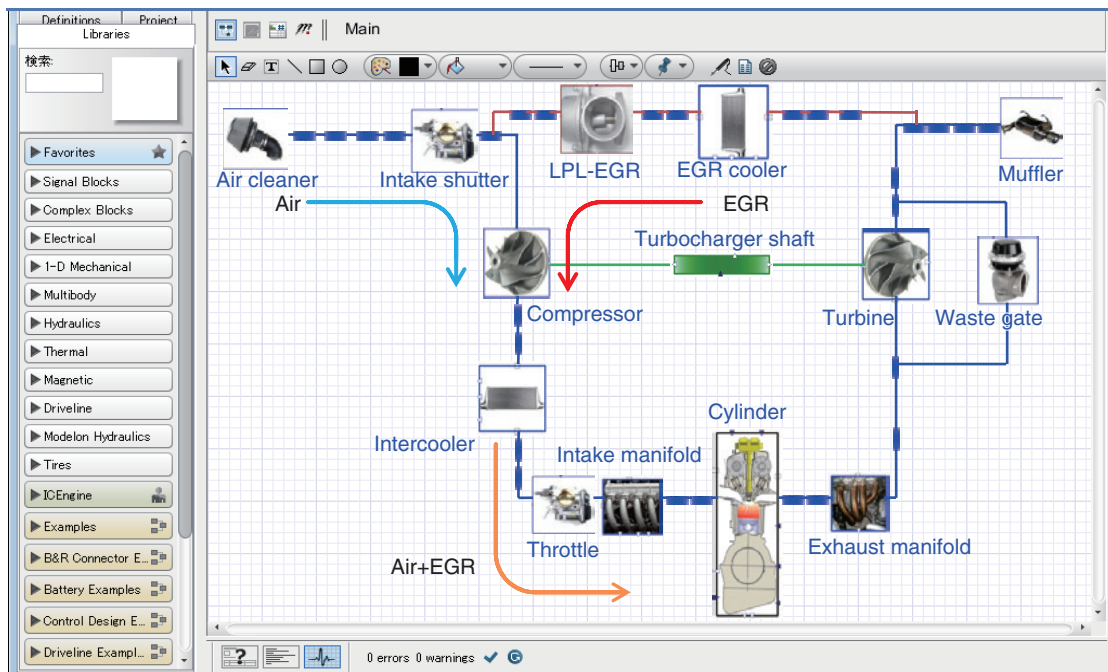


Fig. 3 Mean value engine model with turbocharger and LPL-EGR

3.3. エンジン燃焼モデル

通常の燃焼解析装置などの燃焼演算では Wiebe 関数が用いられることが多いが、クランク角 0.5 deg から 1.0 deg 程度のステップによる演算回数が必要なため、HILS に採用するためのリアルタイム実行が容易ではない。そこで、熱発生のパターンをあらかじめ実測したデータの代表点で設定できるようにして計算式の簡単化をおこなった。HILS で使用するモデルでは、この設定値を実エンジンと一致するように回転数と吸入空気量、点火時期等のエンジン制御パラメータの関数とした。エンジンでの測定は、基準のキスラー社製センサ (305B) と AVL 社製燃焼解析装置 Indicom を用いた。

Fig. 5 に示すように熱発生量を基に赤いポイントが設定した代表点を表す。演算開始の点、熱発生開始位置とピーク値の 3 点に、二階微分値のピーク位置 2 点を加え、さらに質量燃焼割合 5 % 位置と燃焼終了位置付近の三角で示す 2 点、トータルで 7 点とした。

この各ポイントを直線近似式で補完計算をおこないクランク角度に対する熱発生パターンを求めた。これと行程容積から燃焼期間中の筒内圧を演算する。

式 (1) に示すのは、筒内圧と行程容積、比熱比から熱発生を算出する式である。この式 (1) を変形し筒内圧の式 (2) を求めた。

$$\frac{d}{d\theta} Q(\theta) = \frac{1}{\kappa - 1} \cdot V(\theta) \frac{d}{d\theta} \cdot P(\theta) + \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot P(\theta) \cdot \frac{d}{d\theta} V(\theta) \quad (1)$$

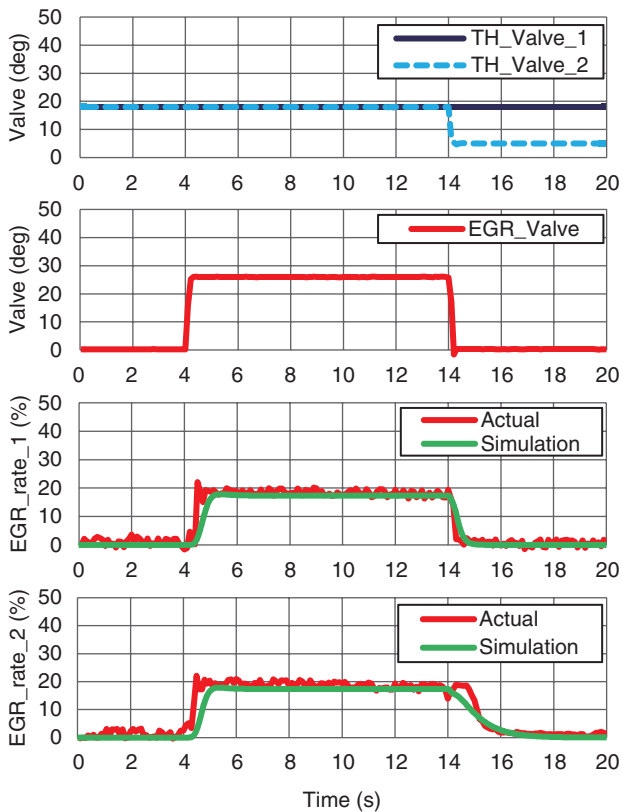


Fig. 4 LPL-EGR simulation results

上記、筒内圧と熱発生量の関係式のパラメータ

$V(\theta)$: 容積 (cm^3)

$P(\theta)$: 圧力 (kPa)

$Q(\theta)$: 熱量 (J)

κ : 比熱比

$$P(\theta) = \left\{ \int_0^\theta \left[\frac{d}{d\theta'} Q(\theta') \right] \cdot (\kappa - 1) \cdot V(\theta') \cdot d\theta' + \frac{P_{ini}}{V(0)^{-\kappa}} \right\} \cdot V(\theta)^{-\kappa} \quad (2)$$

ただし

θ' : クランク角度 0 から θ までの積分値

P_{ini} : 初期圧力

IMEP を式 (3) に NMEP を式 (4) に PMEP を式 (5) にて記す。

$$IMEP = \frac{1}{V_d} \int_{V_{-360}}^{V_{360}} P \cdot dV \quad (3)$$

$$NMEP = \frac{1}{V_d} \int_{V_{-180}}^{V_{180}} P \cdot dV \quad (4)$$

$$PMEP = IMEP - NMEP \quad (5)$$

V : Volume (m^3)

dV : Derivative of Volume

V_d : $V_{max} - V_{min}$ (m^3)

P : Pressure (kPa)

IMEP: Indicated Mean Effective Pressure

NMEP: Net Indicated Mean Effective Pressure

PMEP: Pumping Indicated Mean Effective Pressure

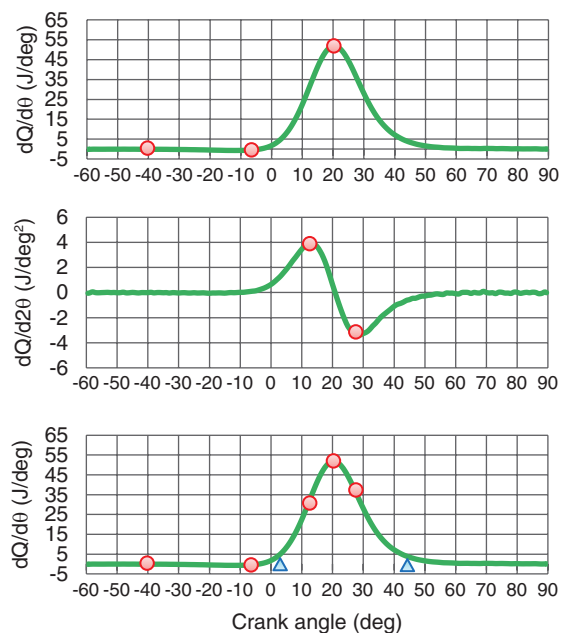


Fig. 5 Heat release rate of combustion and setting points for model calibration

燃焼期間中の NMEP は式 (4) の通り、筒内圧力を行程容積において積分することで算出している。次にポンピングロス (PMEP) は、トルクの演算に対する影響が比較的小さいことから吸気マニホールド内の圧力と回転数によるマップから実測の数値を検索して簡易的に求めた。以上により IMEP の演算時間を短縮化することができた。

3.4. 一次元モデルとの比較

一次元モデルは実際のエンジンと適合する事例⁽⁶⁾からみられるように、定常から過渡において一般に利用されている。実エンジンの計測結果と一次元モデルおよび平均値エンジンモデルのパラメータを一致するように適合させた。

平均値エンジンモデルへの適合は、前記燃焼モデル 7 点の設定値をトルク誤差が最小になるようにした。

Fig. 6 に計測したエンジンのトルクに対して二つのシミュレーションについての適合結果を比較する。この結果から二つのシミュレーションは、低出力時から高出力時にかけて線形であり一次元モデルと平均値エンジンモデルのトルク演算値の誤差は、10 Nm 以内であった。この結果から ECU に組み込むモデルとして問題ないと判断した。

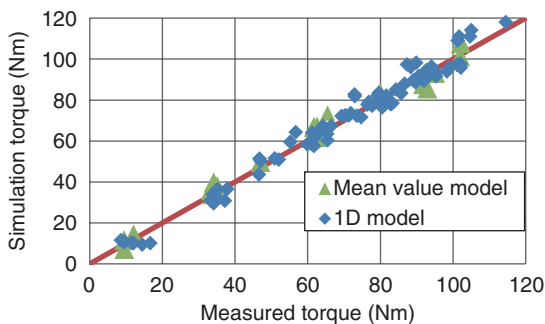


Fig. 6 Comparison of simulation results

4. ECU 組込みツールの開発

4.1. エンジンモデルのコード変換

これまで紹介したモデルは MapleSim にて記述されている。MapleSim の自動 C コード生成機能によりモデルから C コードを生成する。この C コードは、MATLAB の Simulink 用と一般コードの二通りが選択可能であるが、今後のツールのバージョンアップなどによる影響を可能な限り小さくするため、一般コードを採用した。次にこれを ECU 組込みのためにプログラム作成ルールに則った組込み用のプログラム形式へと変換する必要がある。それをターゲット CPU のコンパイラを使って HEX ファイルを作成してダウンロードすることで組込みは完了する。

今後の開発時に随時更新されるさまざまなエンジンのモ

デルにタイムリーに対応するため、組込み用の C コードに自動変換するツールを開発し作業効率を向上した。

Fig. 7 に開発したコード変換ツールの実行画面を示す。このように簡単な画面上で対象ファイルを選択するだけで実行することができる。開発ツール本体の開発は継続的なバージョンアップを考慮し MATLAB にて作成した。コード変換ツールの機能は以下である。

(1) 変数の定義などプログラム作成ルールの適用

変数名変更、型名変更、コメント文の追加、リミット処理、ゼロ割防止処理、キャスト演算子の型宣言、関数のプロトタイプ宣言、変数の追加

(2) 処理負荷軽減

倍精度を単精度へ変更、浮動小数点での割り算を専用関数へ変更

(3) 既存ライブラリの適用

ヘッダファイルの読み込み処理

このツールによる C コードの変換に要する時間は約 11 分で、コードサイズは 500 k バイトであった。

4.2. CPU ボードでの動作確認

Fig. 8 に動作確認をおこなった評価ボードの外観を示

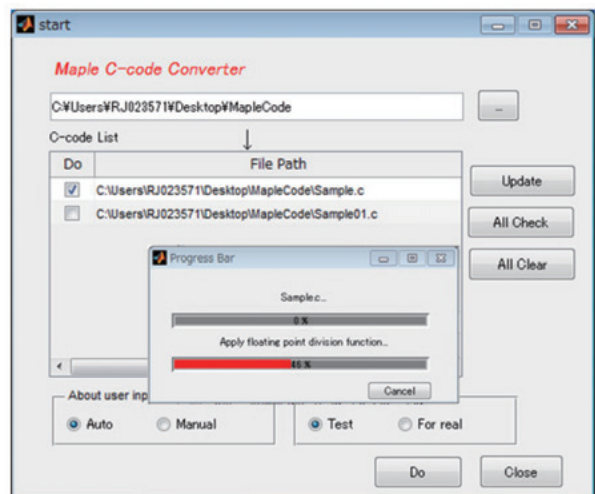


Fig. 7 File setting screen of conversion tool

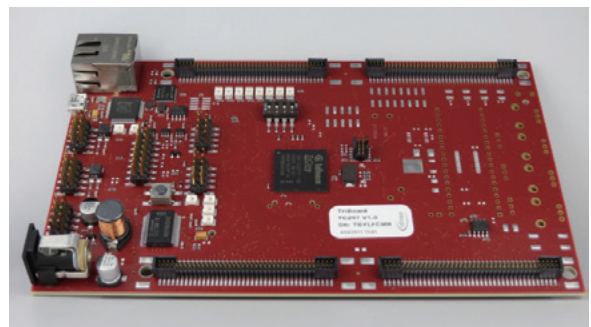


Fig. 8 Appearance of CPU evaluation board

す。評価ボードは、マルチコア CPU でクロック周波数を任意に設定できるため、インフィニオン社製の TC297 評価ボードを選択した。この評価ボードにプログラムを実装して演算時間を計測した。このボードの性能は、ROM と RAM の容量および処理能力で比較して現在の量産型 ECU のほぼ 2 倍である。

これは、今後の組込みモデルの拡大に対応できるようあらかじめ余裕をもって設定した。今回の時間測定では、通常のエンジン制御やその他の演算部は搭載していないので、割り込み等の影響は考慮していない。

Fig. 9 にオイラー法とルンゲクッタ法による演算時間の測定結果を示す。プラントモデルは ECU で演算される際に、離散化⁽⁷⁾された信号を用いるが、その離散化の手法として代表的なオイラー法とルンゲクッタ法を比較した。CPU のクロック周期は、標準の 200 MHz を想定した。ECU 上でのエンジンモデルの動作は可能な限り周期は短いことが望まれるが、吸入空気量によるトルクの制御周期は 10 ms であることから、それに十分に間に合えばよい。比較結果では演算量の多いルンゲクッタ法にて実行時間が 2.5 ms であった。計測時のエンジン運転条件は、LA4 モードでの車両運転条件である。

一方で離散化には、信号入力や演算値が前回演算時と今回演算時にステップ状に変化する特徴がある。このため差分が大きくなるとオーバーフローなど演算処理が不安定になりやすい。特にオイラー法による簡易的な離散化処理では、演算周期が延びると内部演算結果の差分が大きくなり、演算に段差が生じるため短周期が要求される。しかし全体の演算回数が増えるため、エンジン回転数が高くなると点火時期や燃料噴射などイベント割り込みの増加で、10 ms 周期の演算終了に時間が掛かってしまう。今回の結果では、ルンゲクッタ法でも、演算時間は 2 倍程度延びたものの目標時間内であり、安定した動作を得ることができたので、ルンゲクッタ法を選択した。

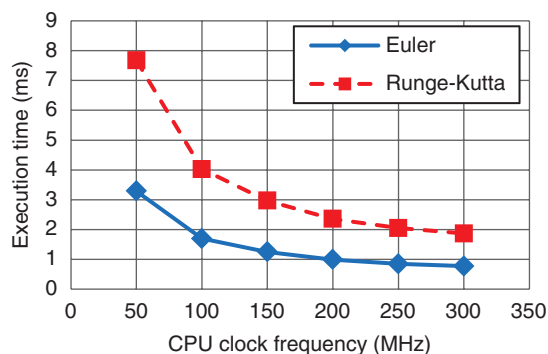


Fig. 9 Comparison of execution time with Euler's and Runge-Kutta methods

Table 1 Performance comparison between CPU and HILS

Execution condition	Evaluation board	HILS
Data length	16 bit	32 bit
Control cycle [ms]	10	0.1

5. HILS とモデル組込み ECU の演算結果の比較

エンジンモデルを HILS に搭載した演算結果と ECU を模擬した評価ボードに実装した場合の演算結果の差異を検証した。検証にて走行した運転パターンは、これまでと同じ LA4 モードである。演算結果の比較には、HILS と評価ボードを CAN にて同時にモニタリングして 100 ms で計測した。

使用した HILS と ECU の演算性能の差を Table 1 に示す。

データ長が 16 ビットと 32 ビットで違うのと演算周期が 10 ms と 0.1 ms と異なる。このためモニタリングした演算結果に有効桁数の違いによる桁落ちやモニタの更新周期の違いがあり、単純に差を求めると細かなノイズのような誤差波形が観測される。

Fig. 10 にトルク演算値を LA4 モードの 2 山目について比較した結果を示す。細かなノイズのような誤差が発生しているが、これは先に述べた CPU 性能の違いのためである。

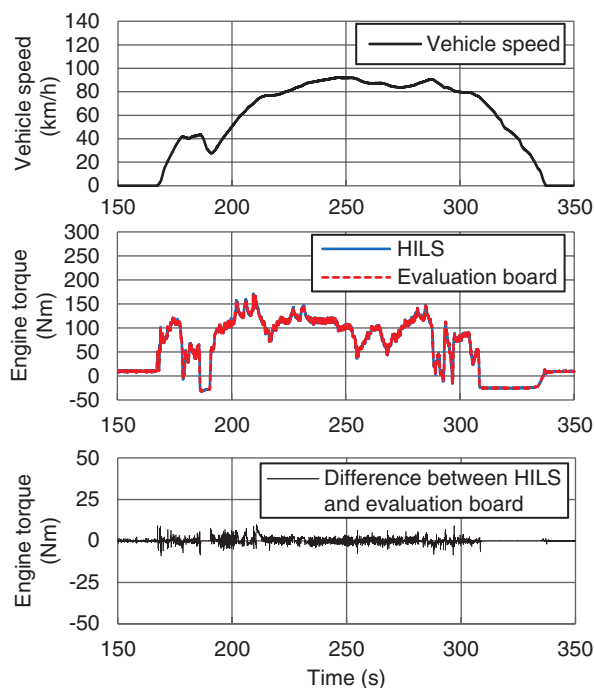


Fig. 10 Comparison of calculation results in LA4 mode

これまで述べたように HILS に搭載した平均値エンジンモデルを ECU に組込むことで、HILS による制御系設計時と動作検証時そして実際のエンジンの制御時のエンジンモデルを統一化することができた。直噴インジェクター体式の筒内圧センサ⁽⁸⁾など、燃焼解析装置と同等の高精度な燃焼演算ができるようになってきている。今後、こうしたセンサと組み合わせることで、エンジン燃焼モデルを改良しながら、詳細な筒内情報を用いたリーンバーン制御や、エンジン振動の抑制などにも応用が期待できる。

6. まとめ

制御設計や検証時のエンジンモデルと同じものを ECU に組込む環境を構築した。これにより、V 字プロセスの上流から、下流のエンジンモデルの誤差や不具合が、修正された場合に他プロセスでの不具合も反映される。手戻りが減りプロセス全体の効率化が期待できる。

下記にその内容をまとめる。

- (1) 制御系設計時や制御性の検証時に使用する HILS 用平均値エンジンモデルを吸気から排気まで含めたフルモデルで ECU に実装可能とした。
- (2) MapleSim から自動生成される C コードを ECU に搭載可能なコードへ自動で変換するツールを開発した。
- (3) CPU 評価ボードを用いてエンジンモデルの演算実行時間が目標の 10 ms 以下の 2.5 ms であった。HILS とのトルク演算誤差は最大出力値の 5 % 以内の 10 Nm 以下であった。

参考文献

- (1) Siokos, K., Koli, R., Prucka, R., Schwanke, J., Miersch, J.: Assessment of Cooled Low Pressure EGR in a Turbocharged Direct Injection Gasoline Engine, SAE Int. J. Engines 8(4), p. 1535-1543, (2015)
- (2) 梶洋隆, 喜多一: エンジン制御パラメータの実験ベース進化的多目的最適化: YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW, No.43, (2007)
- (3) 小堂智史, 藤本茂希, 小野高志, 鈴木哲也: パワープラント系制御開発用ドライビングシミュレータ, Honda R&D Technical Review, Vol.26, No.2, p.111-118
- (4) Guzzella, L., Onder, C.: Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems, Springer, (2010)
- (5) 藤本茂希, 大高義行, 小堂智史: MBD 実現に向けたエンジンプラントモデルと段階的システム同定環境の構築, Honda R&D Technical Review, Vol.24, No.2, p.120-127
- (6) 窪山達也, 山田敏生, 森吉泰生, 大瀧康宏, 畑村耕一,

森川弘二: 過給ガソリン機関の 1D シミュレーションモデルの構築, 自動車技術会 2015 年春季大会予稿集, No.3-15S, p.63-67, (2015)

- (7) 山本裕: サンプル値制御理論の回顧と展望, 計測と制御, Vol.40, No.1, p.76-82, (2001)
- (8) 赤崎修介, 井上泰輔, 鈴木哲也, 林貴之, 高奥淳司: 直噴インジェクター一体型筒内圧センサの改良とフィードバック型エンジントルク制御手法の開発, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.1 p.17-22, (2016)

■著 者■



赤崎 修 介



久保 知 也



千田 耕 平



清水 治 喜



山崎 文 誉

パワートランスファユニットギヤ音の NV 設計技術構築

Establishment of NV Design Technology for Power Transfer Unit Gear Noise

西小路 拓也*
Takuya NISHIKOJI

斉 藤 和 弘*
Kazuhiro SAITOU

平 野 至 海*
Yoshimi HIRANO

要 旨

四輪駆動車に搭載されるパワートランスファユニットの NV 性能を、図面段階で予測する技術を構築した。

パワートランスファユニットに内蔵されるハイポイドギヤの噛合いから発生するギヤ音を対象に、有限要素解析モデルを構築した。起振源となるハイポイドギヤのモデルは、ギヤ歯の質量と回転軸のイナーシャを補正するため、6 面体要素とシェル要素を組み合わせでモデル化した。また、ハイポイドギヤの噛合いモデルは歯剛性を考慮した 5 重節点モデルとすることで、400 Hz から 1600 Hz の周波数範囲において実稼動振動のピーク周波数誤差 $\pm 5\%$ 以内とピークレベル誤差 ± 2 dB 以内を達成した。

この予測精度と計算に必要な時間は、開発初期段階での仕様検討を可能とするのに十分である。

ABSTRACT

Prediction technology for NV performance of power transfer units installed in four-wheel-drive vehicles was established at the drawing stage.

A finite element analysis model was created for predicting gear noise generated by the mesh of hypoid gears built into power transfer units. A model of hypoid gears that are a source vibration was created by combining hexahedral elements and shell elements in order to compensate for the mass of the gear teeth and the inertia around the rotating axis. The model of the hypoid gear mesh employed a quintuple-node model that takes tooth rigidity into consideration. This approach achieved a peak frequency gap between prediction and measurement within $\pm 5\%$ and peak level gap within ± 2 dB in the 400–1600 Hz frequency range.

The predictive accuracy and time required for calculation are sufficient to make it possible to examine specifications in the early development stages.

1. まえがき

近年、SUV や RV などの四輪駆動 (4WD) 車に対しても、高い走破性と併せて低燃費や静粛性が求められており、軽量化や車室内騒音の低減に対し多岐にわたる取り組みが進められている。これらの高い要求性能を満足するため、試作ユニットの設計段階に CAE による数値解析 (CAE 解析) を用いて目標性能を具現化する仕様を検討し、他の機能への影響も考慮して仕様を決定することが重要である。このため 4WD 車の NV 商品性開発においては、トランスミッションから後輪軸に駆動力を伝達するパワートランスファユニット (PTU) のハイポイドギヤの噛合いを起振源とす

る PTUハウジング振動について、目標達成のための CAE 解析が必要である。トランスミッションと PTU、およびハイポイドギヤを Fig. 1 に示す。

設計段階において PTUハウジング振動を予測する手法として、ギヤの噛合い起振力 (Mesh Force: MF) と、ギヤからハウジング上の振動評価点までの周波数応答関数 (Gear to Housing Frequency Response Function: $GtHFRF$) を用いるものがある。これまでも構造解析モデルを用いて求めた MF と実測 $GtHFRF$ の組み合わせによりオートマチックトランスミッション (AT) のギヤ音低減を効率的におこなった事例⁽¹⁾や、CAE 解析により 400 Hz から 600 Hz 範囲のリヤデファレンシャル (リヤデフ) ギヤ音の低減に向け

*四輪 R&D センター

設計指標を決定した事例⁽²⁾などが報告されている。

本稿では、FFをベースとした4WD車(FF-4WD車)用PTUのハイポイドギヤ音解析に対してMFと $GtHFRF$ とともにCAE解析により求め、それらを用いてPTUハウジング振動レベルと振動特性を予測する。対象周波数は、車体伝達部品の共振周波数とPTU振動ピークを分離する必要性を反映し、従来より広範囲の400 Hzから1600 Hzとする。そのうえで、ハウジング振動がピークを持つ要因となる設計変数と、振動特性に影響する固有振動モードとハウジング振動との関係について明らかにすることにより、構造解析のみで仕様を決定することが可能な精度を有する解析手法について紹介する。

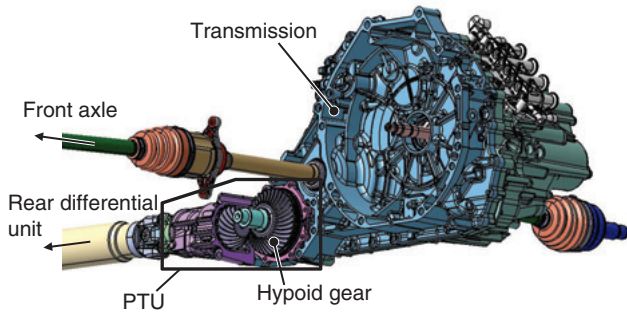


Fig. 1 View of PTU and drive train

2. PTU ギヤ音商品性の開発課題

FF-4WD車用のPTUハイポイドギヤ音商品性は、車体に入力する加振力となるPTUハウジング振動の振動レベルとピーク周波数の調整により、目標とする完成車室内音レベルを達成している。ハウジング振動レベルは設定した目標値以下に抑制し、ハウジング振動ピーク周波数はプロペラシャフトをはじめとする車体伝達系部品の共振周波数と同じ周波数域に存在しないように分散を図っている。ハイポイドギヤの噛合いに起因するPTUのハウジング実稼動振動レベル(Operational Vibration Level: OVL)は、ハイポイドギヤの噛合いで発生する噛合い伝達誤差(Transmission Error: TE)と $GtHFRF$ により式(1)で表される⁽¹⁾。なお、式(1)において、TEと k は周波数に依存しない実数、それ以外は複素関数である。

$$\begin{aligned} OVL &= TE \times \frac{1}{2/k + \phi_1 + \phi_2} \times GtHFRF \\ &= TE \times MF \times GtHFRF \end{aligned} \quad (1)$$

k : 歯のばね定数

ϕ_1 : 駆動側のギヤ噛合い点コンプライアンス

ϕ_2 : 被駆動側のギヤ噛合い点コンプライアンス

TEとはギヤの噛合い進行に伴い歯面上に発生する微小な遅れ進みの相対変位量として定義される。ギヤの噛合い軌跡とTEの関係をFig. 2に示す。

また、PTUハイポイドギヤを起振源とする完成車室内におけるギヤ音の音圧レベル(Sound Pressure Level: SPL)は、固体伝播音と空気伝播音の和として式(2)で表わされる。このうち、固体伝播音は式(2)の第一項に表わされるようにOVLと、PTUから車室内の音圧レベル評価点との間の振動入力音響感度(Acoustic Sensitivity between PTU housing Vibration and cabin Noise: ASbVN)の積となる。また空気伝播音は、式(2)の第二項に表されるようにPTUハウジング近傍の体積速度(Near Field Volume Velocity Level around PTU housing: NFVVL)とPTU周辺と車室内の音圧レベル評価点との間の音響伝達関数(Acoustic Transfer Function between PTU housing and Cabin: ATFbPC)の積となる。

$$SPL = \sum_{i=1}^m (OVL \times ASbVN_i) + \sum_{j=1}^n (NFVVL_j \times ATFbPC_j) \quad (2)$$

m : 振動伝達経路の総数

n : PTU ギヤ音放射面の分割数

式(1)から明らかなようにOVLの低減に対してはTEを低減する手法と、MFと $GtHFRF$ を低減する手法があるが、従来は構造を持つ周波数特性対策よりもTEのレベル低減とばらつき低減に対して重点的に開発をおこなってきた。また、式(2)に表すSPLの低減に対しては、前述の通り固体伝播音の低減に向け、主として車体伝達系の周波数応答特性を変更することによりASbVNを調整し、システム全体として目標値を満足する開発をおこなってきた。しかしながら、前述したような4WD車に求められる市場要求の変化に対応するためには、従来のような車体伝達系対策だけでは必ずしも目標達成に対して十分でなく、成立見通しのある仕様を決定することが容易でない。従って、OVLに対してもMFや $GtHFRF$ のような周波数特性について開

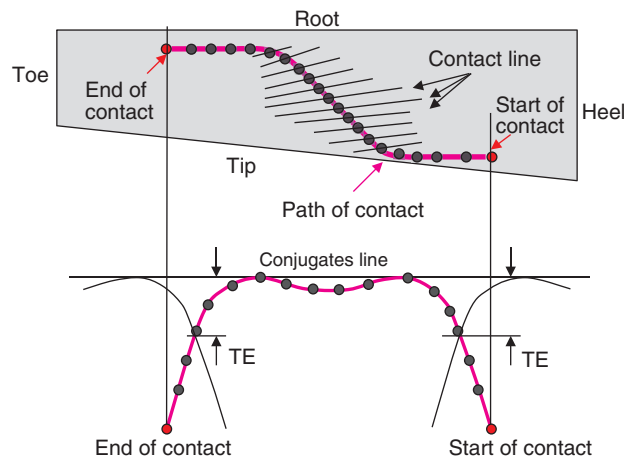


Fig. 2 Transmission error of hypoid gear

発初期の基本レイアウト段階で検討し、目標達成に必要な仕様を定量的な判断に基づいて決定するためのCAE解析を用いた予測技術が必要である。

3. NV 設計技術構築のねらい

CAE解析を用いた予測技術構築にあたり、ツールとして求められる性能を基に以下の予測精度を目標として設定した。

- (1) ピーク周波数予測精度は、車体伝達系との周波数分離を可能とするため、実機周波数の $\pm 5\%$ 以内とした。
- (2) 振動レベル予測精度は、完成車ギヤ音の官能評価ポイントを判別するのに必要なハウジング振動レベルの $\pm 2\text{ dB}$ 以内とした。
- (3) 上記予測精度を確保する周波数範囲は、弊社の標準的なプロペラシャフトの固有振動特性を考慮し、400 Hz から 1600 Hz とした。

4. PTU ギヤ音解析モデル

PTUのハウジング振動レベルおよび振動ピーク周波数を仕様判断可能な精度で予測するために、周波数応答解析用有限要素解析モデル（以下、FEMモデル）を作成した。式(1)に示したようにPTUのハウジング振動を計算するためにはMFと $GtHFRF$ を計算する必要がある。このため、FEMモデルにはMFを精度良く計算するためにPTUハイポイドギヤの噛合い点を含む駆動側と被駆動側のドライブ

トレインモデルが必要となる。同時に $GtHFRF$ を精度良く計算するためにトランスミッションを含むハウジングのモデル化も必要となる。

前述した周波数範囲で仕様判断可能な予測精度を確保するためには解析メッシュ分割サイズは小さくなり、モデル全体でのメッシュ数は多くなる。また、FEMモデルの解析結果からPTU仕様を決定するためには、対策仕様の具現化検討に要する時間も考慮すると数時間で計算が終了することが求められる。これらを考慮した結果、PTUギヤ音解析には、周波数領域での線形固有値解析に基づく周波数応答計算を用いることとした。

4.1. ハイポイドギヤ噛合い解析モデル

PTUのMFと $GtHFRF$ を求めるため、ハイポイドギヤの噛合い解析モデルを作成した。解析モデル範囲は、PTU内蔵ハイポイドギヤ噛合い点から、駆動側はトランスミッションのファイナルギヤまで、被駆動側はプロペラシャフトおよびリヤデフハイポイド駆動ギヤまでとした。ハイポイドギヤ噛合い解析モデルの主要部分をFig. 3に示す。

ハイポイドギヤのFEMモデル作成にあたっては、曲げ振動モードと捩り振動モードの予測精度確保と、計算時間の短縮を両立させるため、ハイポイドギヤの歯底径を外周縁とするソリッドを6面体要素でモデル化した。また、ギヤ歯に相当する質量と回転軸周りのイナーシャを補正するため、前述した6面体要素にシェル要素を貼付したモデル構成とした。作成したFEMモデルをFig. 4(a)に示す。

一方、ハイポイドギヤ噛合い点のモデルには、ハイポイ

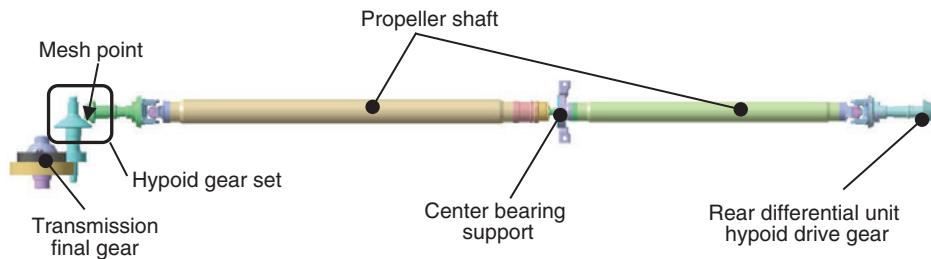


Fig. 3 FEM model for MF analysis

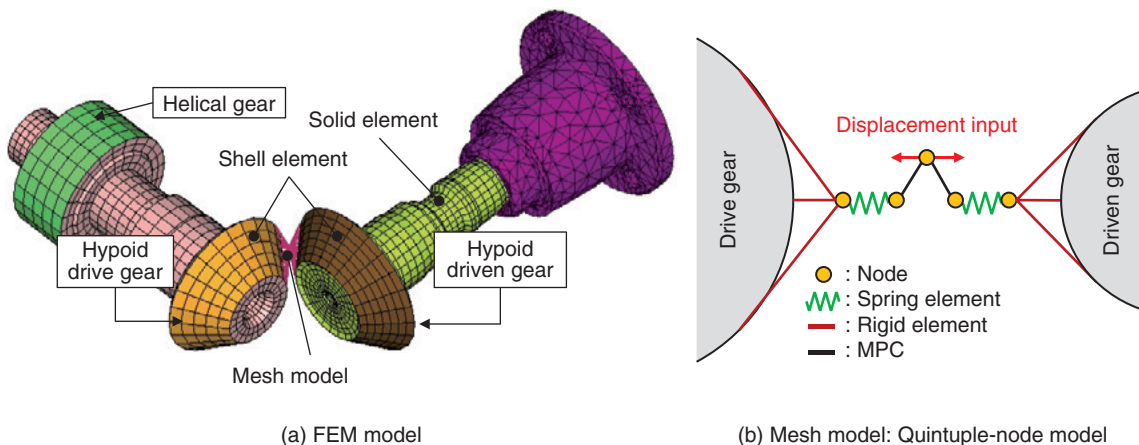


Fig. 4 Hypoid gear mesh model

ドギヤの歯剛性を考慮した5重節点モデルを設定し、ギヤ諸元から決定される噛合い作用線方向に強制変位入力と歯剛性を定義するための局所座標系を設定した。作成したギヤ噛合い点モデルの概念図を Fig. 4 (b) に示す。後述するハウジング振動解析モデルにおいて、このギヤ噛合い点に単位強制変位入力を与えた際に同噛合い点に発生する多点拘束反力 (MPC フォース) が MF となる。

作成した FEM モデルで用いる歯剛性は、後述するハウジング振動解析モデルより求めた PTU ハウジング振動計算値と計測結果のコリレーションより同定し設定した。歯剛性を変化させるとハウジング振動計算値のピーク周波数が変化するため、歯剛性を変化させた際に得られるピーク周波数とハウジング振動計測結果のピーク周波数を比較した結果を Fig. 5 に示す。V6 エンジン搭載機種のハイボイドギヤ諸元が異なる 2 種類の PTU を用いてピーク周波数の相対的な位置づけを確認した。ハウジング振動計測結果のピーク周波数がそれぞれ 1100 Hz と 800 Hz に存在する PTU に対して、歯剛性を変化させた際のピーク周波数計算値を比較すると、ある歯剛性において計測結果と計算値のピーク周波数がほぼ一致することが確認できた。このため、V6 エンジン搭載機種の歯剛性はこの値を適用することとした。

4.2. ハウジング振動解析モデル

ハイボイドギヤの噛合い点に単位強制変位入力を与えて PTU ハウジングに発生する振動を計算するために、トランスミッションを含むドライブトレインの FEM モデルを作成した。解析モデル範囲は、エンジンからリヤデフおよびドライブシャフトを含んだ範囲とし、Fig. 6 に示す。

MF を計算する際に重要となる振り剛性の予測精度を確保するため、プロペラシャフトジョイントとベアリングは実走負荷条件下での振動特性を再現可能なモデリングをおこなった。プロペラシャフトジョイントは Fig. 7 (a) に

示すように、ヨーク側とスパイダー側をバネ要素で結合した。ここで用いたバネ要素の剛性値は、ジョイント前後の FRF テスト結果とのコリレーションより同定し設定した。PTU に内蔵しているベアリングは Fig. 7 (b) に示すように、インナベアリングとアウトバベアリングを 6 面体要素でモデ

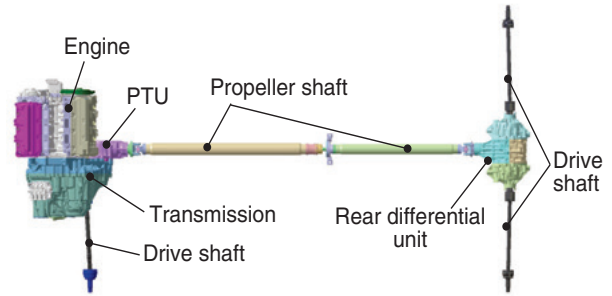
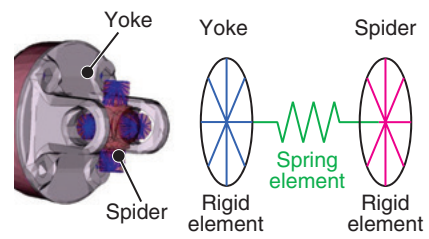
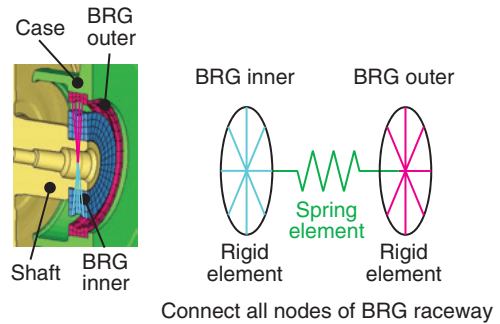


Fig. 6 FEM model for OVL analysis



(a) Connection of propeller shaft joint



(b) Connection of bearing (BRG)

Fig. 7 Parts modeling

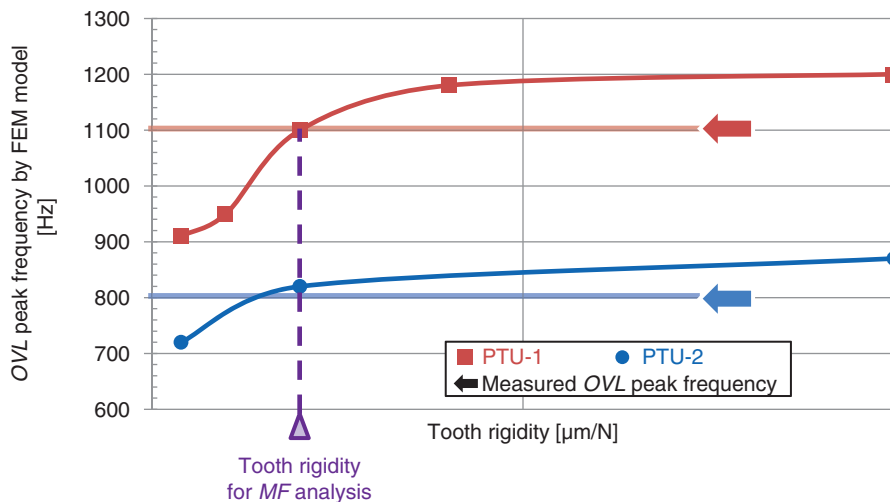


Fig. 5 Correlation between tooth rigidity and OVL peak frequency in calculation

ル化し、バネ要素で結合した。ここで用いたバネ要素の剛性値は、各荷重方向の実走負荷入力に対する変位量を静剛性解析より求め、その剛性値を反映した。また、 $GtHFRF$ を計算する際に重要となるトランスミッションおよびPTUのハウジングモデルは、トランスミッションギヤ音商品性の開発で運用している予測精度検証済みのFEMモデルを用いた⁽³⁾。

構築したFEMモデル化手法を用いて、V6エンジン搭載機種に適用しているPTUのハウジング振動を計算した結果をFig. 8に示す。PTUのハウジング振動とMF、 $GtHFRF$ の計算結果をFig. 8 (a)に示す。またMFピークの発生要因分析のために駆動側と被駆動側の噛合い点を分離したモデルを作成し、コンプライアンス ϕ_1 と ϕ_2 を計算した結果をFig. 8 (b)に示す。解析対象機種の車体伝達部品の共振周波数である1200 Hz付近に存在するMFピークに着目して解析をおこなった。MFは式(1)に示すように ϕ_1 と ϕ_2 の積の逆数であることから、1150 HzのMFピークは駆動側の715 Hzモードと被駆動側の836 Hzモードの影響を受けていることがわかった。各モードの計算結果をFig. 8 (c)に示す。どちらも振りモードであり、1150 HzのMFピークは駆動側のギヤ振りモードと被駆動側の

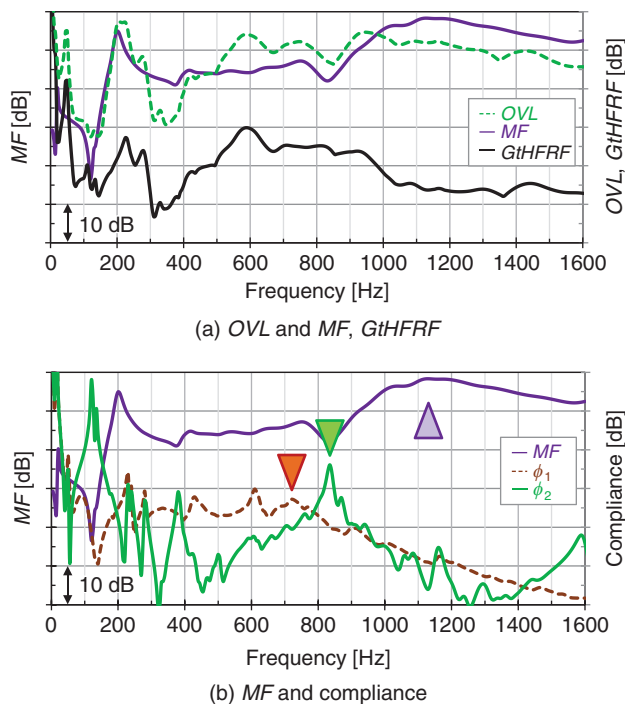


Fig. 8 Calculated results

プロペラシャフトジョイント振りモードから生成されていることがわかった。

4.3. 解析モデルの精度検証

FEMモデルの計算方法がプロトタイプを製作する前のレイアウト段階で仕様を決定することが可能な予測精度を有するか検証するために、FEMモデル計算値と振動計測結果を比較した。実機におけるMF計測は容易ではないため、 $GtHFRF$ とPTUハウジング振動を対象としてFEMモデル計算値と振動計測結果を比較検証した。V6エンジン搭載機種にて適用しているPTUを用いて比較した結果をFig. 9に示す。Fig. 9 (a)に示す $GtHFRF$ およびFig. 9 (b)に示すPTUハウジング振動ともに、設定した周波数評価範囲において、ピーク周波数付近の波形を再現していることが確認できた。

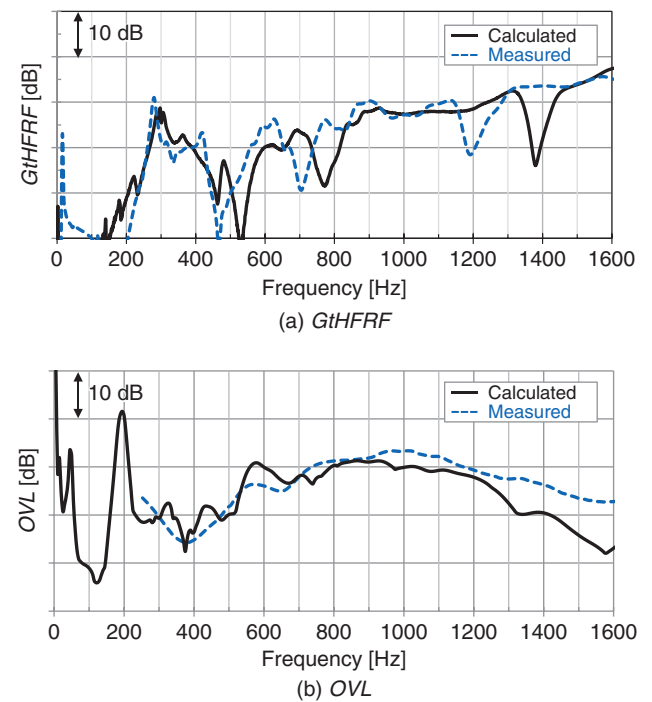


Fig. 9 Comparison of calculated results and measured data

5. PTU ギヤ音解析モデルの検証

PTU骨格開発におけるPTUギヤ音解析モデルの有用性を検証するために、構造の異なるPTUを用いてハウジング振動計算値とハウジング振動計測結果の比較により、目標とした予測精度を達成しているか検証をおこなった。また、既存骨格PTUの形状変更によりMFを変更させた仕様を検討し試作品を作成した。形状変更前後のハウジング振動計算値と振動計測結果の比較により、PTUギヤ音解析モデルを用いた仕様検討が有効であるかの検証をおこなった。

5.1. 予測精度の検証

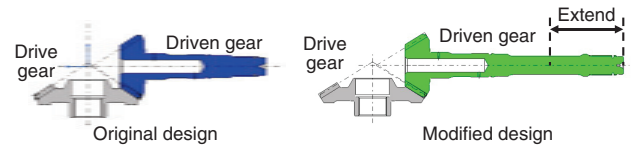
構造の異なる PTU を用いて、ハウジング振動計算値と振動計測結果の比較をおこなった。比較には弊社既存の AT 骨格として PTU の 4 仕様を用い、PTU ギヤ音が課題となるピーク周波数とピーク振動レベルのコリレーションを確認した。ピーク周波数の比較結果を Fig. 10 (a) に、ピーク振動レベルの比較結果を Fig. 10 (b) に示す。Fig. 10 の結果より、PTU 振動解析モデルの予測精度目標として設定した、周波数予測精度が $\pm 5\%$ 以内および振動レベル予測精度が ± 2 dB 以内を対象周波数 400 Hz から 1600 Hz の範囲内で満足することが確認できた。

5.2. 実機適用結果

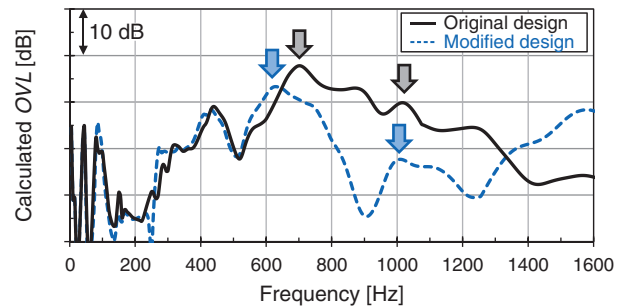
従来構造の PTU を用いて、被駆動ギヤの形状変更により MF を変化した仕様を試作し、ハウジング振動計算値と振動計測結果の比較をおこなった。比較したギヤの形状を Fig. 11 (a) に示す。また、ベース仕様と形状変更仕様の 2 仕様について、PTU ギヤ音解析モデルより求めたハウ

ジング振動計算値の比較を Fig. 11 (b) に、ハウジング振動計測結果の比較を Fig. 11 (c) に示す。Fig. 11 において、2 仕様のハウジング振動計算値とハウジング振動計測結果を比較すると、700 Hz 付近と 1000 Hz 付近の振動ピーク周波数と、振動レベルの変化量は両者で同等の結果となっていることがわかる。

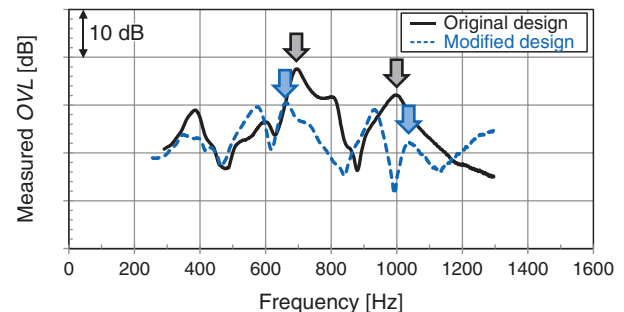
以上の検証結果より、PTU ギヤ音解析モデルを用いた PTU ハウジング振動計算値は設計初期段階における仕様検討や仕様決定に用いることが可能であることが確認できた。



(a) Designs for validation



(b) Comparison of calculated OVL

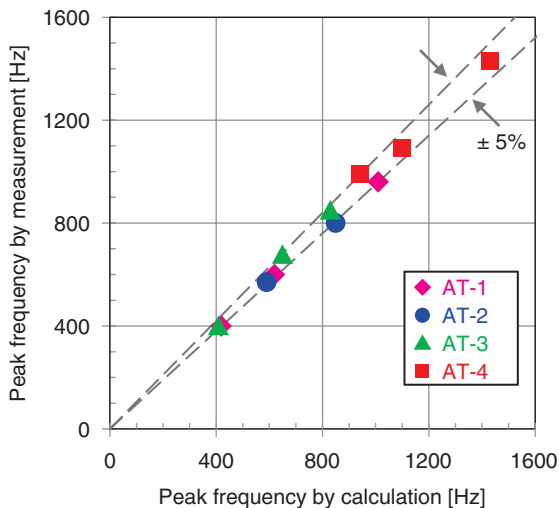


(c) Comparison of measured OVL

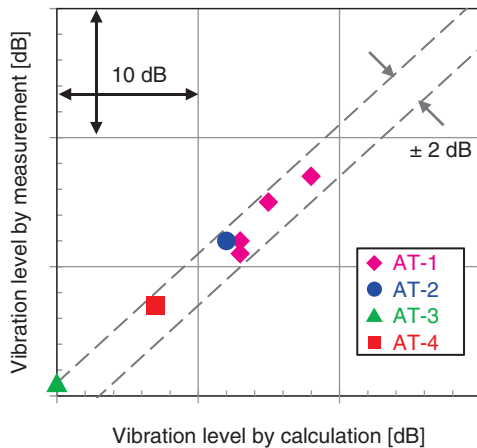
Fig. 11 Validation result of application

6. 結論

エンジンからリヤデフおよびドライブシャフトを含んだドライブトレイン全体の FEM モデルを作成し、ハイポイドギヤの噛合いを起振力とする PTU ハウジング振動を計算した。ハイポイドギヤのモデルは 6 面体要素とシェル要素から成るモデルとし、ギヤ噛合い点モデルは歯剛性を考慮した 5 重節点モデルを作成し局所座標系を設定した。FEM モデルを用いたハウジング振動計算値とハウジング振動計測結果を比較した結果、以下を達成した。



(a) Peak frequency



(b) Peak level

Fig. 10 Verification of prediction accuracy

- (1) 400 Hz から 1600 Hz の周波数範囲において、振動ピーク周波数誤差が $\pm 5\%$ 以内、振動ピークレベル誤差が ± 2 dB 以内の予測精度を達成し、開発初期に PTU レイアウトに対する仕様判断が可能な定量的予測技術を構築した。
- (2) 形状変更した仕様においても、FEM モデルを用いたハウジング振動計算値は実機振動と同様の波形を示しており、解析モデルの有用性を確認した。

参考文献

- (1) 神田靖典, 藤井浩司, 畑村耕一, 熊野昌平, 栗栖徹: トランスミッションギアノイズの解析技術, 自動車技術会シンポジウムテキスト, No.09-00, p.10-16, (2000)
- (2) 松岡貴範, 平野芳則, 河上哲也: ファイナルドライブギアノイズ振動伝達特性の制御技術, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.120-05, p.11-14, (2005)
- (3) 坂口和貴, 斉藤和弘: トランスミッションケース放射音特性予測評価法の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.17, No.1, p.42-45

■ 著 者 ■



西小路 拓也



斉藤 和弘



平野 至海

新型 NSX の高出力に貢献する ハイブリッドシステムの熱マネジメント

Hybrid System Heat Management that Contributes to High Performance for New NSX

高橋 広一*

Koichi TAKAHASHI

漆原 圭輔*

Keisuke URUSHIHARA

要 旨

新型 NSX の車両コンセプトである高いパワートレインシステム出力と動力性能を実現するために、三つのモータを有するハイブリッドシステムを開発した。ハイブリッドシステムの各コンポーネントは小型、高出力をねらい、冷却性能向上でそれらの両立を図った。従来のハイブリッドシステムに対し高い冷却性能を達成するために、direct drive motor はエンジン冷却水による直接冷却化、Twin Motor Unit はオイルクーラの追加、Power Drive Unit は専用ラジエータの大型化、Intelligent Power Unit はエアコン協調バッテリー冷却システムを採用した。

その結果、高負荷走行時におけるハイブリッドシステムの熱成立性を達成した。エンジンと三つのモータシステムの組み合わせからなるパワートレインシステムは 427 kW の高出力を達成し、ハイブリッドシステムのモータアシストにより、過給エンジンの課題であるターボラグを補完し、高応答な加速を可能とした。また、ハイブリッドシステムによる前後および左右駆動配分制御により、旋回性能と高速安定性を高次元で両立した。

ABSTRACT

A hybrid system with three motors was developed to realize the high power train system power and vehicle dynamic performance that are the vehicle concepts of the new NSX. Efforts were made to enhance the cooling performance in order to simultaneously reduce the size and increase the power of each hybrid system component. To achieve high cooling performance compared to that of the conventional hybrid system, the direct drive motor is directly cooled by the engine cooling water, an oil cooler has been added to the Twin Motor Unit, the size of the dedicated radiator for the Power Drive Unit has been increased, and the Intelligent Power Unit uses an air conditioner cooperative battery cooling system.

As a result, thermal feasibility of the hybrid system during high-load driving was achieved. The power train system, which consists of the engine and three motor systems, achieved the high power of 427 kW. In addition, the motor assist of the hybrid system compensated the turbo lag, which is an issue for supercharged engines, enabling rapid response acceleration. Furthermore, the longitudinal and lateral driving force allocation control performed by the hybrid system realized a good balance between cornering performance and high-speed stability.

1. まえがき

現在は地球的視点で環境、エネルギー、食糧問題等々を捉えるべきと叫ばれて久しい。その中で、環境諸問題に対して CO₂ 排出量の削減、石油依存度の低減が急務であり、自動車会社としては、自動車の燃費性能向上が世界的におこなわれている。

新型 NSX では、それらを前提としつつ、新規パワートレインの開発をおこなった。それは高出力エンジン、

トランスミッションと三つのモータ、Power Drive Unit (PDU)、Intelligent Power Unit (IPU) からなるハイブリッドシステムで構成される。この新開発のパワートレインの高いシステム出力とトルクによって高応答の加速性能を発揮する。また、三つのモータから構成される四輪駆動システムである SPORT HYBRID SH-AWD による前後および左右駆動配分制御により、高い運動性能を発揮することが可能となっている。一方、ハイブリッドシステムにより高い燃費性能も実現している。

*四輪 R&D センター

Table 1 Specifications of power train system

Power train system	SPORT HYBRID SH-AWD Maximum power 427 kW Maximum torque 646 Nm
Engine	Twin-turbocharged DOHC V6 3493 cm ³ 373 kW at 6500-7500 rpm 550 Nm at 2000-6000 rpm
direct drive motor	Water-cooled motor and generator directly connected to crankshaft 35 kW at 3000 rpm 148 Nm at 500-2000 rpm
Transmission	9DCT
TMU	Twin traction motor and generator unit 27 kW at 4000 rpm x 2 73 Nm at 0-2000 rpm x 2

新型 NSX に搭載しているパワートレインシステムについて、Fig. 1 と Fig. 2 に搭載レイアウト、Table 1 に諸元を示す。V6 3.5 L ツインターボエンジンは縦置きミッドシップとし、クランクシャフト直結の direct drive motor および 9 速デュアル・クラッチ・トランスミッション (9DCT) により後輪を駆動する。車両前軸には、左右前輪を個別のモータで駆動する Twin Motor Unit (TMU) を搭載している。高圧バッテリーおよび高圧配電部品を有する IPU はシート背面に搭載し、シート間のセンタコンソール下には三つのモータへの電力供給および制御をおこなう PDU を配置し、車両センタ近くに主要コンポーネントをレイアウトしている。

新型 NSX のハイブリッドシステム各コンポーネントは小型、軽量化と平均出力の向上を図りつつ低重心を目指した配置をおこなった。平均出力の向上により、相応の冷却性能達成が課題となった。本稿では新型 NSX に搭載されているハイブリッドシステムの冷却および出力向上と、車両システムについて紹介する。



Fig. 1 Overview of layout

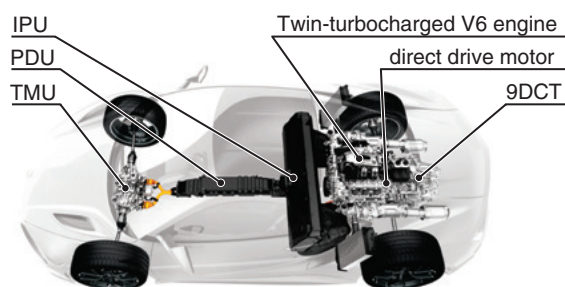


Fig. 2 Power train system components

2. ハイブリッドシステム

ハイブリッドシステムは、Fig. 3 に示すように direct drive motor, TMU, PDU, IPU の主要コンポーネントで構成されている。direct drive motor は、エンジンに直結され発電、回生、駆動をおこなう。TMU は左右前輪を個別のモータで駆動、回生する。IPU は主に高電圧バッテリーで構成され、電力を充電、放電する。PDU は三つのモータと IPU の間に接続され AC-DC 電力変換、制御をおこなう。

2.1. direct drive motor

direct drive motor は、エンジンとトランスミッションの間に配置され、クランクシャフトにロータが直結された構造を採用した (Fig. 4)。これはエンジンと協調しモータのリニアなトルク特性を生かすためであり、ターボラグを補い高応答な加速を得ている。Fig. 5 に示すように、冷

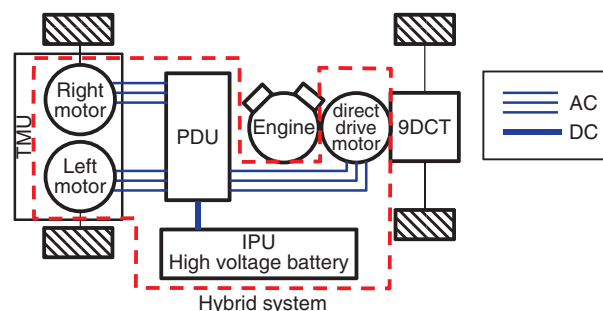


Fig. 3 Hybrid system components

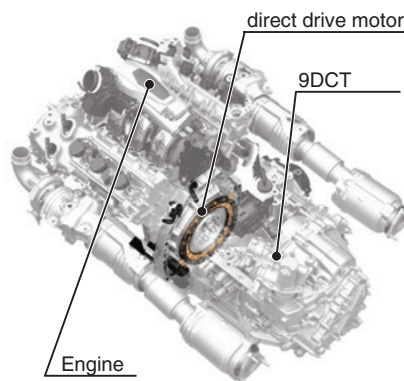


Fig. 4 Location of direct drive motor

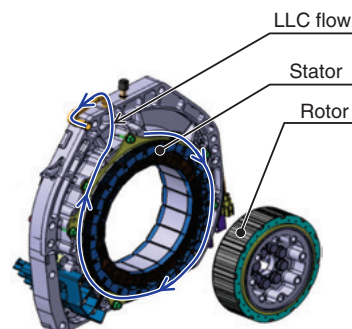


Fig. 5 Structure of direct drive motor

却性能確保のためエンジン冷却水 (LLC) を用いたステータウォータジャケット構造による冷却を採用した。また、Fig. 6 に示すように、発熱部位であるコイルと伝熱経路であるステータコアへの熱抵抗を低減するため、インシュレータは、従来の組立式からモールド式へ変更をした。Fig. 7 に、平均出力と平均車速の関係を示す。燃費モードに代表される市街地走行モードおよび高速道路を含む走行モードを City mode、サーキットでの高負荷走行モードを Heavy load mode とする。各点は本システムでの動作点を示し、従来ハイブリッドでは City mode が包含できる冷却性能を有するように設定している。本システムでは、Heavy load mode において従来ハイブリッドシステムと比較し 40% の平均出力向上を実現し、冷却性能を満足していることを確認した。高負荷走行においても十分な性能を発揮することを可能とした。

2.2. IPU

高いシステム出力と低燃費を実現するためには高圧バッテリーは高出力で高容量であることが求められる。しかし、バッテリーの搭載量が増えると車両重量の増加を招く。したがって、車両の動力性能を向上させるための出力向上と同

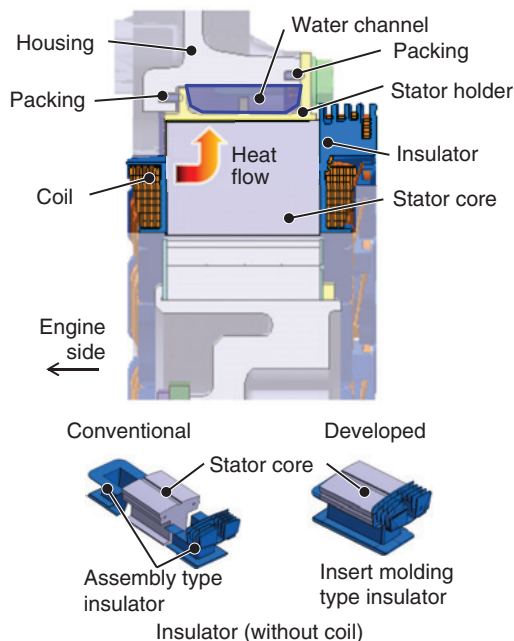


Fig. 6 Section view of direct drive motor

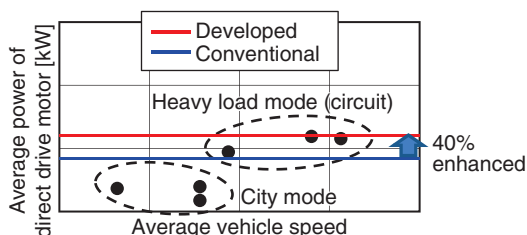


Fig. 7 direct drive motor performance

時に軽量化も必要である。従来方式のキャビン内の空気によるバッテリーセル冷却に加え、高負荷走行時にはバッテリーセルの温度を適温に保ち出力性能を向上させるために、エアコン冷気を導入し、バッテリーセルを冷却するシステムを採用した (Fig. 8)。一方、従来ハイブリッドシステムに比べ小型軽量化したリチウムイオンバッテリーセルおよびモジュールを開発した (Fig. 9)。それらにより、従来ハイブリッドシステムに対し最大 15% の出力向上を実現した。本システムでは、Heavy load mode での高負荷走行において、従来ハイブリッドシステムに対し 80% の平均出力向上を実現し、冷却性能を満足していることを確認した。

2.3. TMU

車両フロントに配置した TMU は二つのモータとギヤボックスを内蔵し、左右前輪を駆動だけでなく制動方向にも個別にトルク制御をすることが可能である。左右輪のトルクコントロールにより、効果的にヨーモーメントを発生させることができる。その結果、機械式 SH-AWD の左右輪の駆動トルク差によるヨーモーメントを活用するよりも高い旋回性能を引き出すことが可能となった (Fig. 10)。

冷却性能確保のために TMU クーラの設置 (Fig. 11) と走行風を TMU 本体に当てることで高熱負荷に対応している。Fig. 12 に TMU 左側のモータ構造を示す。Fig. 13 に平均出力向上結果を示す。平均出力特性曲線は走行風による

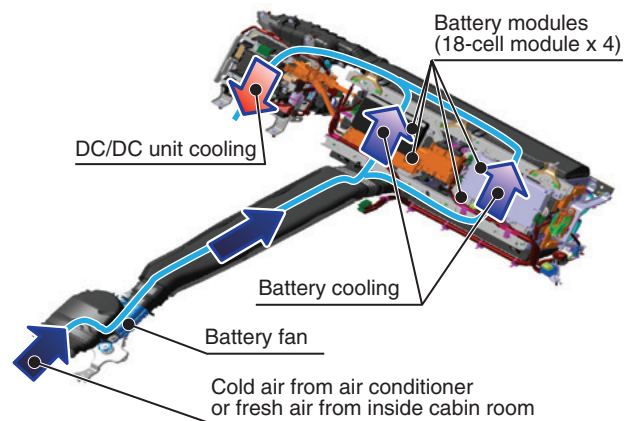


Fig. 8 Overview of IPU cooling system

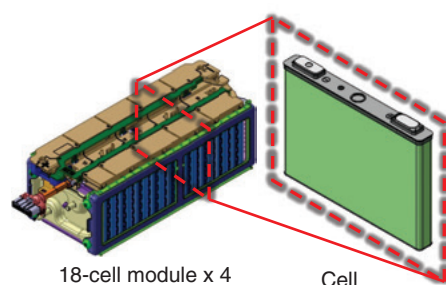


Fig. 9 Structure of battery module and cell

冷却のため、車速依存性を有する。本システムでは、Heavy load modeでの走行において、従来ハイブリッドシステムに対し、95%の平均出力向上を実現し、冷却性能を満足していることを確認した。

2.4. PDU

direct drive motor および TMU の合計三つのモータを制御する PDU (Fig. 14) について、インバータ発熱増加を専用ラジエータの大型化によって冷却能力の向上をおこ

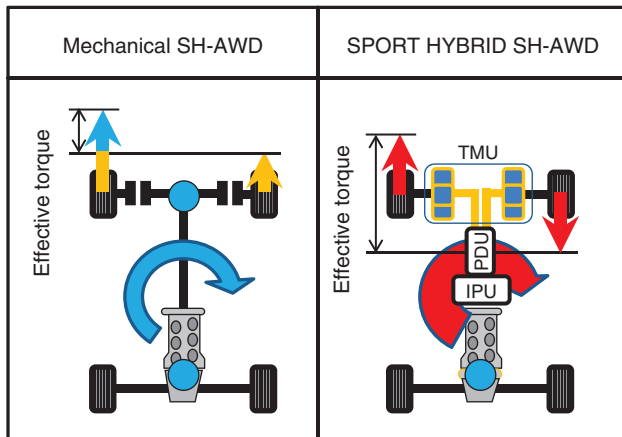


Fig. 10 Difference between SH-AWD systems

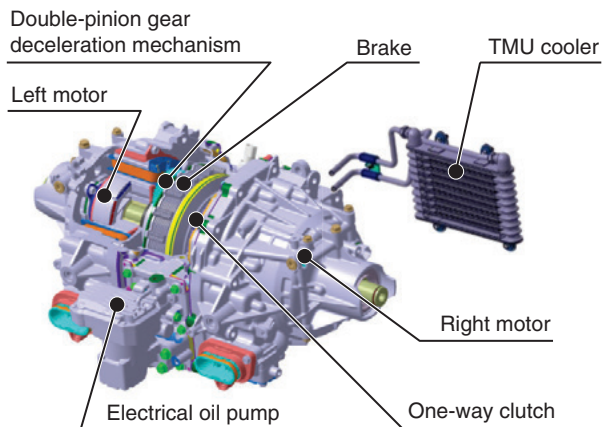


Fig. 11 Overview of TMU

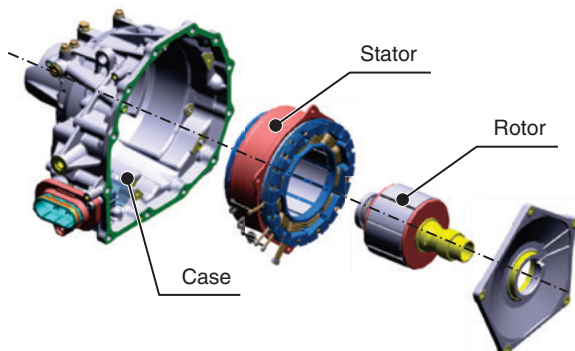


Fig. 12 Structure of TMU left motor

なった (Fig. 15). PDU 専用ラジエータの配置は、フロントバンパから導入した空気の利用効率を向上させるために、エンジンラジエータおよびエアコンコンデンサへの導入空気量の最適化をおこなった。シミュレーション結果を Fig. 16 に示す。本システムは、Heavy load mode 走行において、従来ハイブリッドシステムに対し、80%の平均出力向上を実現し、冷却能力を満足していることを確認した。

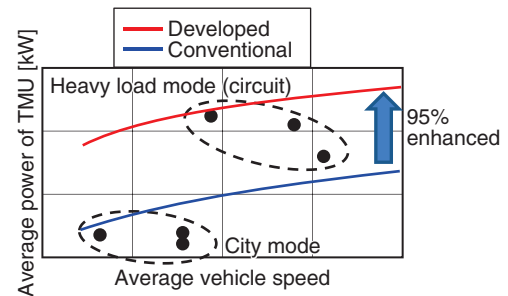


Fig. 13 TMU performance

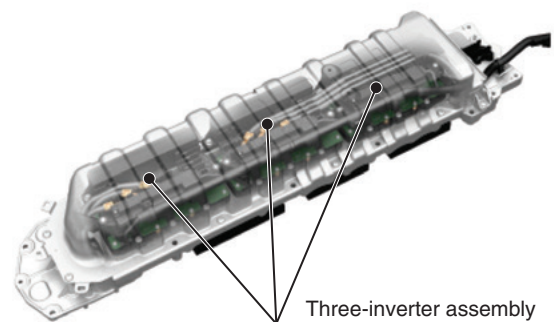


Fig. 14 Overview of PDU

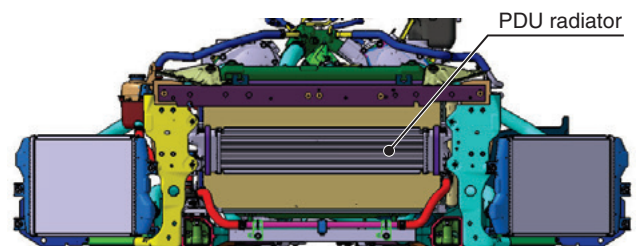


Fig. 15 Section view of PDU radiator

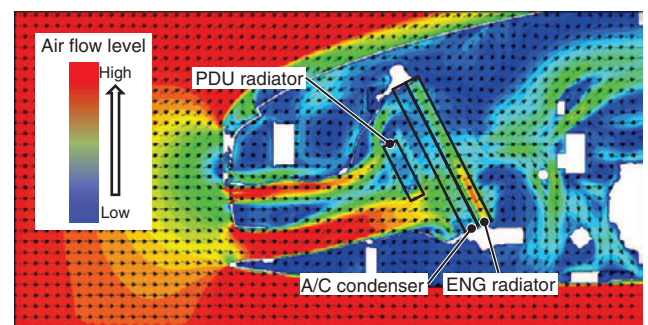


Fig. 16 Air flow for PDU radiator (simulation)

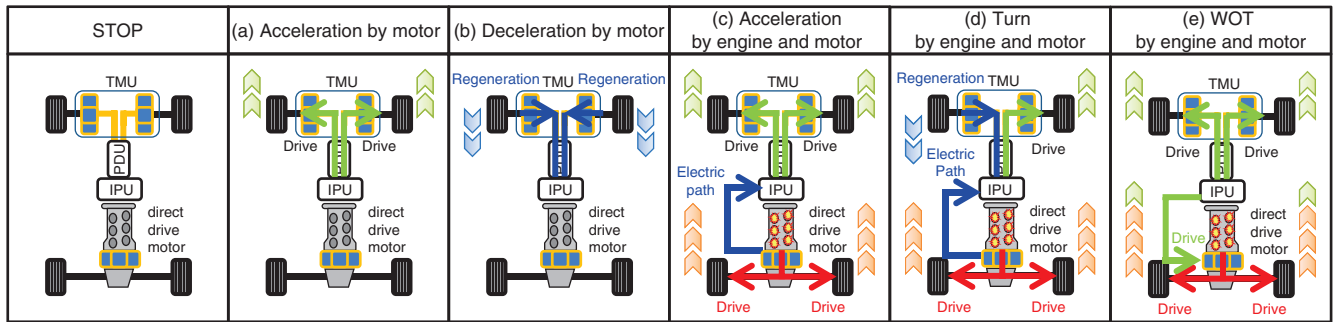


Fig. 17 System operation

3. システムオペレーション

3.1. 通常オペレーション

Fig. 17 に SPORT HYBRID SH-AWD システムの代表的な走行モードを示す。EV 走行において後輪はエンジンから切り離され、TMU による前輪駆動のみとなる [Fig. 17(a)]。

減速時は、TMU の回生ブレーキにより発電し、バッテリーへ充電する [Fig. 17(b)]。ハイブリッド走行モードではエンジンで直接後輪を駆動し、バッテリーの充電状態に応じて適宜 direct drive motor で発電および充電する [Fig. 17(c)]。旋回時は TMU の旋回内輪側モータで回生したエネルギーにより外輪側モータを駆動し、先述の駆動トルク差によりヨーモーメントを発生させる [Fig. 17(d)]。

3.2. WOT(wide open throttle) オペレーション

高い駆動力が必要な時はバッテリーにチャージされた電力で TMU と direct drive motor を駆動させ、エンジンと三つのモータによる高応答な加速を生み出す [Fig. 17(e)]。200 km/h 以上の車速では、過回転からモータを保護するため、TMU はクラッチにより切り離す。Fig. 18 にシステム出力について示す。WOT 時の車速とトランスミッション段とパワートレイン各コンポーネント出力を示し、システムとして 427 kW の最高出力を達成した。

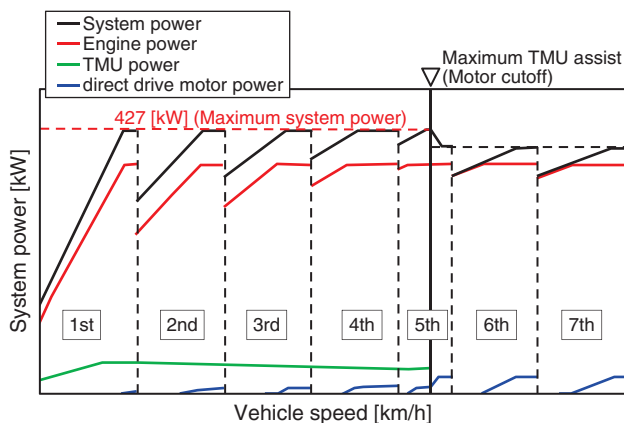


Fig. 18 System performance at WOT

4. 高負荷走行と熱成立性

4.1. 高応答加速性能の実現

Fig. 19 に WOT 発進時のハイブリッドシステムの動作状態を示す。TMU と direct drive motor によるターボラグ補完アシストおよび定常アシストにより、WOT 加速時の出力立ち上がり率が 57% 向上した (Fig. 20)。それらは 0 km/h -100 km/h 加速および、中間加速性能向上に寄与している。

4.2. 高旋回性能の実現

ハイブリッドシステムによる左右駆動力配分制御により、高い旋回性能を実現している。30R (R0) 旋回での横方向加速度に対する US/OS 特性のシミュレーション結果を Fig. 21 に示す。前後および左右駆動力配分制御により、アンダステアが抑制され横方向加速度限界が向上し、その結果として旋回性能も向上している。

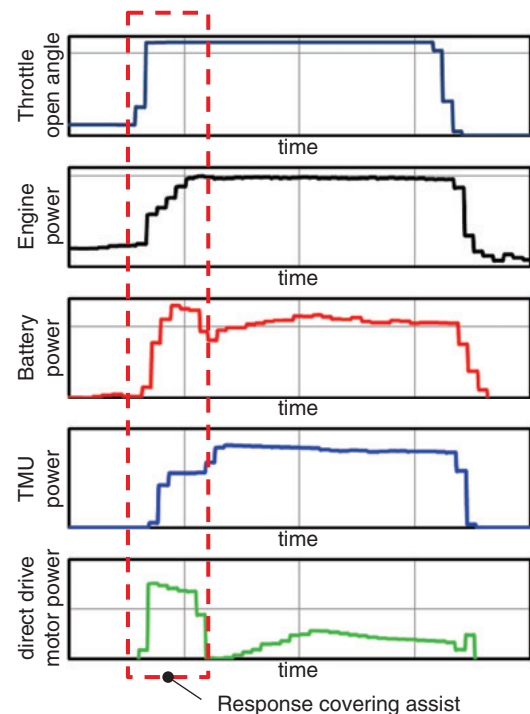


Fig. 19 Power of power train system

4.3. 高負荷走行における熱成立性の実現

ハイブリッドシステム各コンポーネントの冷却性能向上により、高負荷走行においても、ハイブリッド出力を抑制することなく走行可能となった。結果の一例として、Heavy load mode 走行におけるハイブリッドシステムの効果を Fig. 22 に示す。前述した高応答加速性能向上と旋回性能向上により、1.8% のラップタイム向上をシミュレーションにて確認した。

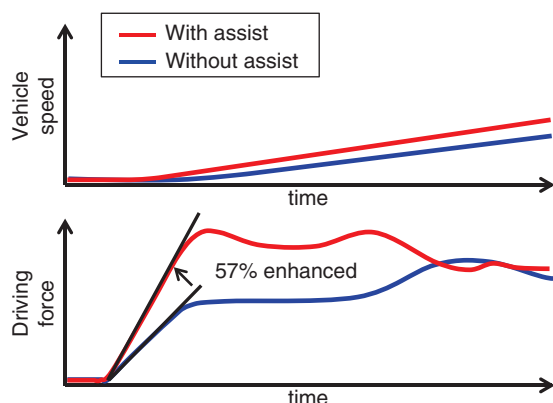


Fig. 20 Effect of motor assist on driving force at WOT

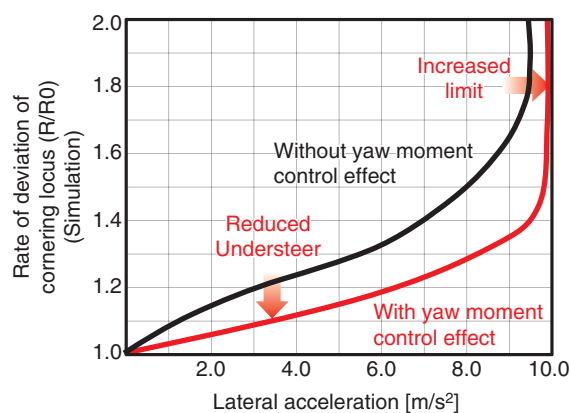


Fig. 21 Effect of hybrid system on US/OS Characteristics

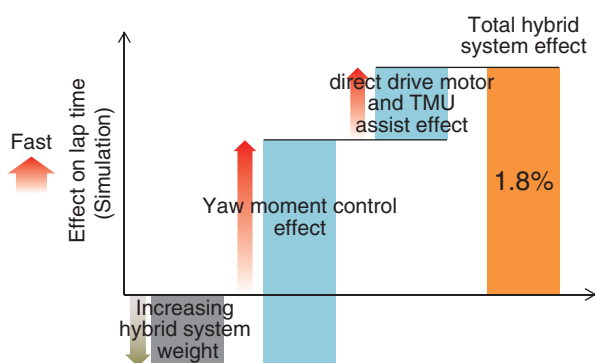


Fig. 22 Effect on lap time

5. まとめ

新型 NSX 用ハイブリッドシステムにおいて、以下の項目を達成し、高出力で高レスポンスなパワートレインを開発した。

- (1) Heavy load mode 走行時におけるハイブリッドシステムの熱成立を達成した。
- (2) 3 モーターとエンジンの組み合わせにより、システム最高出力 427 kW を達成した。
- (3) 過給エンジンのターボラグを direct drive motor のアシストにより補完し、WOT 加速時の立ち上がりを 57% 向上した。
- (4) ハイブリッドシステムによる左右駆動配分により、旋回性能と高速安定性を高次元で両立した。

参考文献

- (1) Toyoshima, H.: 3-motor HEV Powertrain for super sport, Internationaler Motorenkongress 2016, p.23-30, (2016)
- (2) Fukuda, K., Mitani, M., Matsuzawa, Y., Kawata, M., Uetake, J.: Development of Battery System for the New NSX, EVTeC & APE Japan, 20169074, (2016)
- (3) Tamura, S., Yoshinari, T.: Development of Electric Drive system for New Model Super Sports Hybrid Vehicle, SAE Technical Paper, 2016-01-1685, (2016)

■ 著 者 ■



高橋 広一



漆原 圭輔

グローバルテレマティクス用アンテナの開発

Development of Antenna for Global Telematics

片山 睦*

Mutsumi KATAYAMA

昆野 靖弘*

Yasuhiro KONNO

曾根 孝之**

Takayuki SONE

要 旨

「全世界対応」コンセプトのもと、テレマティクスサービスのグローバルな適用拡大に対応する、携帯電話通信用と衛星測位用を統合したテレマティクス用アンテナを開発した。

携帯電話通信用アンテナは、各国の携帯電話通信事業者ごとに異なる使用周波数と規格上の周波数範囲を考慮し、ボウタイアンテナを採用した。これにより下限 698 MHz から上限 3800 MHz までの超広帯域特性を実現した。衛星測位用アンテナは、米国 GPS とロシア GLONASS に対応するとともに、信号分配器と供給電源切換え回路を内蔵することによりテレマティクスシステムと他システムとの信号分配を可能とした。アンテナケースは従来体積比 50% 小型化を達成することで、インストルメントパネル内への搭載自由度も高めた。

ABSTRACT

Based on a concept of global compatibility, a telematics antenna unit has been developed that integrates antenna elements for mobile communications and for satellite positioning in order to respond to the increasing global application of telematics services.

Taking into consideration the differences in the frequencies used by each mobile network provider in any specific country and the frequency range stipulated by regulations, a bowtie antenna was employed as the antenna for mobile communications. This made it possible to realize an ultra-wide-band characteristic from 698 to 3800 MHz. The antenna for satellite positioning is compatible with both the US GPS and Russian GLONASS systems, and the use of a built-in signal divider and power supply selector switch has made it possible to split satellite signals between the telematics system and other systems. The volume of the antenna unit has been reduced by 50% against conventional antenna units, increasing the degree of freedom available for fitting in the instrument panel.

1. ま え が き

テレマティクス (Telematics) とは、テレコミュニケーション (Telecommunication) とインフォマティクス (Informatics) からの造語とされ、自動車業界や輸送業界がおこなう情報サービスとして知られている。

近年では、個々の車両の走行記録を大規模に集計しビッグデータとして公益利用される事例も注目を集めてきている。なかでも Honda のインターナビ・フローティングカーシステム⁽¹⁾を活用したサービスは、2011 年の東日本大震災の際に通行実績情報マップとして利用され、通行可能な道路をいち早くユーザに伝えることで社会貢献につながることができた⁽²⁾。現在のテレマティクスサービスは、以下のように大別することができる。

- (1) 道路混雑状況や気象情報など、走行中の四輪車ユーザに役立つ情報を伝達する

- (2) 緊急通報システムなど、その国や地域で救急救命体制への通報手段となる

- (3) 電気自動車のバッテリー情報、充電スタンド情報など、車両性能を維持管理する

なかでも救急救命体制への通報手段の一種として機能する緊急通報システムは、公的標準規格化や法規による装備義務化が進みつつある。

欧州においては官民組織 European Road Transport Telematics Implementation Coordination Organization (ERTICO) が中心となり、社会実証実験 (HeERO1 と HeERO2 や eCall 等) による検証を複数段階で実施のうえ、欧州技術規格⁽³⁾を策定した。この規格に基づき 2018 年 3 月 31 日以降の新しい型式の車両に装備が義務付けられている。

欧州規格とは別にロシアも 2015 年 1 月 1 日以降の新しい型式の車両、2017 年 1 月 1 日以降の全ての新車販

* 四輪 R&D センター

** 株式会社ヨコオ

売車両への装備義務化が決定済みであり、通報に用いる自動車位置の測位システムにはロシア衛星測位システム GLONASS の採用を必須としている。

このようなテレマティクスの世界的普及に対し、従来型のテレマティクス用アンテナは、各国や地域それぞれで利用する携帯電話通信会社の周波数に特性を合わせた仕様となっていた。そのためテレマティクスが世界的に普及すればするほど各国や地域向けにアンテナのバリエーションは増加し、同時にユーザのコスト負担増加にもつながることとなっていた。

2. 開発のねらい

これらの課題に対応するため、「全世界対応」コンセプト、すなわち国や地域を問わず世界中の全仕向地で共通に適用可能で、テレマティクスの世界的な普及にともなうアンテナのバリエーション増加を抑制することが可能な、新型テレマティクス用アンテナを開発することとした。

テレマティクス用アンテナは、移動体ワイヤレス通信ネットワーク接続用としての携帯電話通信用アンテナ (TEL ANT) と、自車の位置情報を得るための衛星測位用アンテナ (GNSS ANT) とで構成される。開発目標を下に記す。

- (1) TEL ANT は、現在世界的に普及が進みつつある Long Term Evolution (LTE) 方式の規格が定める周波数帯をほぼ全てカバーすること
- (2) GNSS ANT は、従来利用されてきた米国の衛星測位システムだけでなく、ロシアの衛星測位システムにも対応し、衛星測位システムを利用する他システムとの、衛星信号の分配共用を可能とすること
- (3) インストルメントパネル内への搭載自由度を高めるため、小型サイズであること

3. TEL ANT

3.1. 従来型 TEL ANT の課題

自動車電話の登場以来、車載用の TEL ANT は、トランクリッド、ルーフ上、インストルメントパネル内などに配置されてきた。アンテナ素子には 1/4 波長モノポール型、1/2 波長モノポール型、1/2 波長ダイポール型、およびそれらの派生型が主に採用されており、線状の素子を定在波に共振させるタイプである⁽⁴⁾。

共振型のアンテナにはその動作原理によって共振周波数があり、所定の性能を発揮可能な周波数幅への制約が生じる。上限周波数を下限周波数で除した周波数比で 1.05 から最大 1.1 程度の範囲で用いられることが一般的である。

携帯電話で用いられる周波数帯は、Third Generation Partnership Project (3GPP) が定める世界標準規格に基づき、各国と地域の政府当局が携帯電話通信会社に対し免許

を与える。周波数帯は 1 GHz 以下の帯域 (ローバンド) と 1 GHz 以上の帯域 (ハイバンド) に大きく二分されており、通信環境や通信内容によって使い分けられている。

2000 年以降の主流である第 3 世代携帯電話の場合、北米地域では主に 824 MHz から 894 MHz のローバンドおよび 1850 MHz から 1990 MHz のハイバンドを利用している。欧州地域とアジア地域では主に 880 MHz から 960 MHz のローバンドおよび 1710 MHz から 1880 MHz または 1920 MHz から 2170 MHz のハイバンドを使用している。これらの周波数の帯域幅はそれぞれ周波数比 1.1 程度かそれ以下に定められているので、TEL ANT は各帯域に共振周波数を調整した共振型アンテナを採用することで対応してきた⁽⁵⁾。ローバンド用とハイバンド用の 2 素子を採用する手法 (Fig. 1) と、ローバンド用素子にローバンドの第 3 高調波としてハイバンドも共振させて、全体として 1 素子だけにする手法とがある。

電波の波長は光速 (30 万 km/秒) を周波数で除した値として算出され、たとえばローバンドの最低周波数 824 MHz での波長は 364 mm である。これに共振する TEL ANT 素子の基本長さは、1/2 波長ダイポール型であれば 182 mm、1/4 波長モノポール型であれば 91 mm となる。

第 4 世代携帯電話にて主流として用いられる周波数帯は、ローバンド下限は 698 MHz へ、ハイバンドは 1427 MHz から 1510.9 MHz と、1744.9 MHz から 2200 MHz と、2500 MHz から 3800 MHz へと、広がることとなった。698 MHz の波長は 430 mm であり、共振する TEL ANT 素子の基本長さは、1/2 波長ダイポール型であれば 215 mm に、1/4 波長モノポール型であれば 107 mm に、それぞれ長大化する。

前述の通り各携帯電話通信会社は、これら各帯域の中から所定幅の周波数割当て免許を政府当局から取得する。Honda がテレマティクスサービスを世界の各地で実施する際には、現地にて契約する携帯電話通信会社が免許取得している周波数帯に応じて、アンテナ素子の共振周波数を調整することとなる。

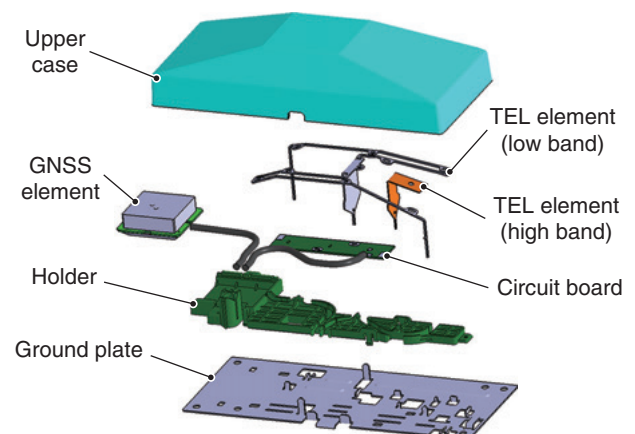


Fig. 1 Conventional antenna

従来の TEL ANT はこのようにして、契約する携帯電話通信会社の数だけそのバリエーションも増加する。また契約先携帯電話会社を変更しなくても、その会社が新規の周波数を追加獲得すると、その度にアンテナ素子にも追加や再調整の必要が生じて、TEL ANT のバリエーションがさらに増加する。

3.2. 自己相似型 TEL ANT 素子

どの国のどの携帯電話通信事業者との契約であっても共通に使用し得る性能が必要となるが、周波数比 1.1 前後で動作させる従来の共振型では、周波数帯のすべてに幅広く使用可能な特性を得ることは容易ではない。そこで TEL ANT 素子の動作形式には、共振型に代えて自己相似型を採用することとした。インストルメントパネル内での配置自由度を考慮すると、自己相似型アンテナのなかでもボウタイアンテナが、三次元立体構造ではなく一対の平板構造をその基本形状とする点で、有利である。

ボウタイアンテナは地中探査パルスレーダなどミリ波パルスを利用した広帯域レーダへの応用例が知られている⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。

二つの円錐で構成された広帯域アンテナとして知られているバイコニカルアンテナを平面投影した構造であると言われ、蝶ネクタイのように頂点を互いに向き合わせた一対の三角形が基本構成となり、その実体寸法が使用可能な周波数を左右することが知られている (Fig. 2)。また三角形の斜辺を二次曲線や半円状に変形することで、周波数に対する利得特性を調整可能である⁽⁸⁾。

放射される電界の偏波は三角形の配列軸方向 (円錐の回転軸方向) と同一方向となるため、携帯電話の第 2 世代と第 3 世代とで主に利用されている垂直偏波を重視して、三角形の配列軸は上下方向を基本姿勢とした。

TEL ANT を GNSS ANT と同一ケースに組み合わせ収容する必要がない場合は素子の平板形状にあわせてケース外形も単純な平板形状となるが、GNSS ANT と組み合わせ収容する場合は配慮が必要となる。

新型 TEL ANT 素子の基本構造にボウタイアンテナを採用したことにより、第 4 世代携帯電話で予定されている

周波数帯 698 MHz から 3800 MHz、周波数比 5.4 に対応することができた。従来型 TEL ANT は共振周波数から外れると利得が急激に低下するのに対し、新型 TEL ANT は周波数利得特性の変化が 698 MHz から 2700 MHz の範囲で 2 dB 幅に収まる超広帯域特性を実現している (Fig. 3)。なお、この図は周波数利得特性を比較しやすくするために、698 MHz から 2700 MHz の範囲での最大利得を基準 0 dB として表示している。

定在波比 (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) は、アンテナと伝送線路とのインピーダンス整合を示す指標であり、最良値 1 から増加すると、アンテナの放射効率の低下などが発生しやすくなる。従来型 TEL ANT は共振周波数から外れると急激に値が上昇劣化するのに対し、新型 TEL ANT は 698 MHz から 3800 MHz まで全域で VSWR 3 を下回る超広帯域な特性を実現している。

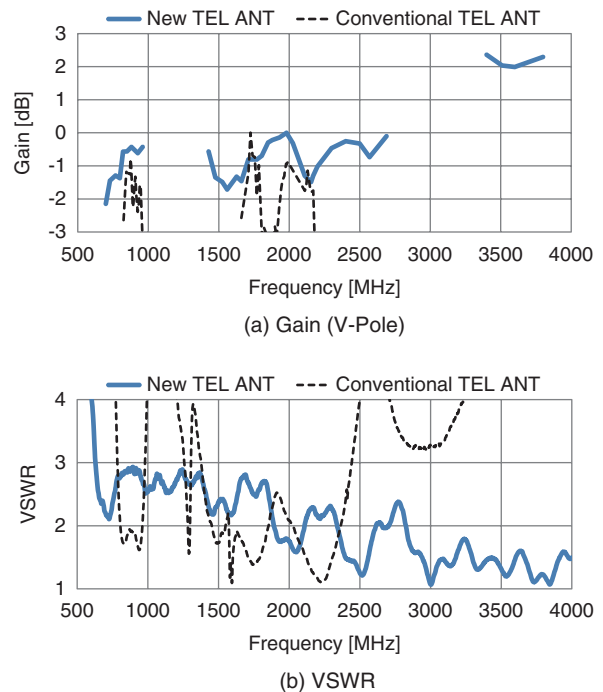


Fig. 3 Frequency characteristics

4. GNSS ANT

四輪車では以前からナビゲーション装置 (以下 NAVI 装置) に GNSS を利用してきた。米国により運用される全地球測位システム (Global Positioning System: GPS) の民生利用である。テレマティクスでも自転車位置情報を利用するため、NAVI 装置とテレマティクスユニット (Telematics Control Unit: TCU) とを同時採用する場合は、GNSS ANT が同一車両内に複数搭載されることがある。

また、前述したロシアでの GLONASS のように、自国の衛星システム採用を義務付ける例もある。米国

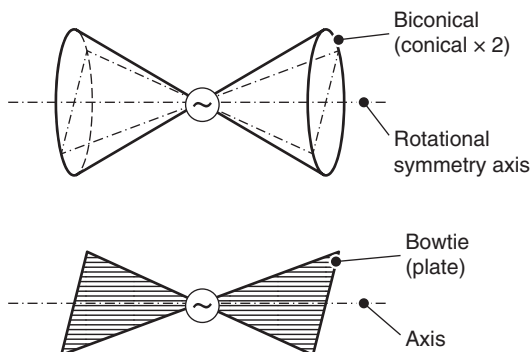


Fig. 2 Bowtie antenna

GPS とロシア GLONASS の民生利用周波数はそれぞれ 1575.42 ± 1 MHz と 1601.72 ± 4 MHz であり、ともに L1 帯に含まれる点では共通するが約 30 MHz の差が存在する。このため、GNSS 素子直下に一体的に保持される低雑音アンプ (Low Noise Amplifier: LNA) 内に構成される妨害波除去フィルタの特性を、双方の周波数を受信可能に調節する必要がある。

現在運用中の衛星測位システムには、例えば日本の準天頂衛星システム (Quasi-zenith satellite system: QZSS) など含まれるが、QZSS の周波数は GPS と基本同一であるため、アンテナ素子も GPS と同一としてよい。

NAVI 装置との同時適用有無の仕様差に対応して、GNSS 受信信号分配器を内蔵するタイプを設定した。分配器にはウィルキンソン型を採用し、GNSS 素子直下に配置する LNA の回路基板上に分配回路パターンを追加形成することで適用した。これにより、NAVI 装置と TCU とが同時採用となる場合には GNSS ANT を共有可能となり、GNSS ANT を同一車両に複数搭載する必要を無くすことができた (Fig. 4)。

GNSS 素子直下の LNA は、TCU や NAVI 装置からの電源供給により動作する。

NAVI 装置が供給する電源電圧は 4.5 V から 5.0 V 系が主流である。一方、TCU からの電圧は NAVI 装置とは異なる場合がある。緊急通報を代表例として、車両からの電源供給が絶たれても TCU は内蔵電池を用いて最低限の動作継続時間を確保する必要がある、この際に電源電圧を下げることで低消費電力とする手法が一般的なためである。

一方で NAVI 装置や TCU には、LNA への供給電流を監視することでアンテナ接続忘れ、断線、短絡などを検知する機能がある。GNSS 分配器有りタイプのアンテナに接続されたユニット相互間で供給電圧に違いが生じる場合、電源回り込み対策として単純な逆流防止措置を採用したのでは、供給電流監視を正しく機能させることが容易ではない。そこで LNA 基板上に電源選択切換え回路を設け、二つのシステムが同時接続されている場合は一方の側を LNA 電源として用い、他方の側を擬似負荷へ接続する構成とした (Fig. 5)。

図の Unit #1, Unit #2 のどちらか一方だけに接続した際には、接続した側から LNA に電源供給する。Unit #1 と Unit #2 に同時に接続した際には、Unit #2 だけが LNA の電源として接続され、Unit #2 からの電源は擬似負荷の抵

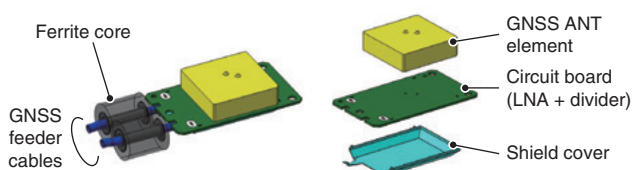


Fig. 4 GNSS ANT element and circuit board

抗 R に接続される。

以上により、アンテナに接続されたユニット相互間で供給電圧に違いが生じていても、電源回り込み防止機能と供給電流監視機能を両立させた。

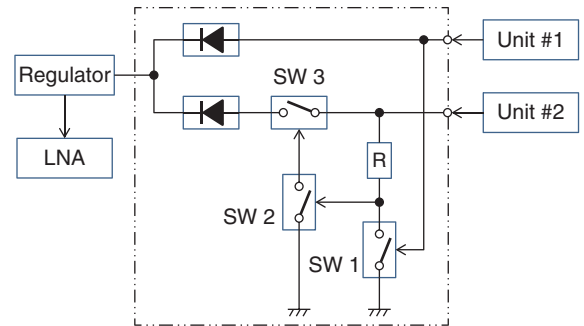


Fig. 5 Power supply switching circuit

5. 小型化

前述した通り、TEL ANT 素子のボウタイアンテナを構成する三角形の配列軸は上下方向となる。一方、GNSS ANT 素子は LNA 付きパッチアンテナであり、開けた天頂方向に素子面を向けた水平配置である。これらを一体的に配置する場合は TEL ANT 素子の上辺沿いに GNSS 素子を並べた逆 L 字型または T 字型となり、横幅と高さ寸法は TEL ANT 素子により、奥行き寸法は GNSS ANT 素子により、それぞれ定まる。両者全体を収容するケースを単純に設けると、GNSS ANT 素子の下方と TEL ANT 素子とで挟まれる空間がデッドスペースとなるため空間利用効率が低く、インストルメントパネル内の配置自由度を低下させてしまう。このため内部配置構造を検討した [Fig. 6(a)]。

ボウタイアンテナは、素子形状の変形やスロットの設置などにより、小型化や広帯域特性の調整が可能なが知られている⁽⁶⁾。そこで、ボウタイアンテナの上側素子を途中で下向きに折返す構造とし、GNSS ANT 素子の高さ寸法だけ折返した位置から GNSS ANT 素子の奥行き寸法に合わせた水平部を設け、最後に GNSS ANT 素子の高さ寸法分の上向き折返し部を設けた。これにより GNSS ANT 素子の側面を、TEL ANT 素子の折返し部の二箇所が所定間隔を保って囲むこととなる [Fig. 6(b)]。一方、ボウタイアンテナの下側素子は GNSS ANT 素子と重ね合わせる必要が無い。このためケース本体には収容せず外部に延出させることとした。ケース底部から下方に保持部を伸ばして下側素子をはめ込み固定する構造である。

下側素子にもスロットを複数設けており、その一部はガイド部へのはめ込み固定穴を兼ねている。

以上の構成により、ケース高さ寸法の小型化と同時に、GNSS ANT 素子の保持構造を形成し、ケース空間内の利

用効率を上げることができた。

高周波電力の給電線には、外来電磁波による妨害、漏れ電力による損失、配線作業における取扱い性、製造コストなどの観点から、同軸ケーブルの採用が一般的である。

同軸ケーブルは外部導体と中心導体の同軸構造で構成される不平衡型の給電線であるが、ボウタイアンテナは一對の対称素子構造を基本形とする平衡型アンテナである。このように平衡型と不平衡型を接続する際には、バランを用いて平衡不平衡変換を施す手法がある⁽⁷⁾。しかし周波数比5.4の広帯域に対応するバランは構成が複雑化しがちなために採用が容易ではない。また、TEL ANT 素子の一部に GNSS ANT 素子を搭載する小型化構造としたために、GNSS ANT 側の同軸ケーブル外部導体にも漏洩電流が誘導される懸念が生じた。そこで、TEL ANT 用と GNSS ANT 用それぞれの同軸ケーブルにフェライトコアを装着し、漏洩電流を抑制することとした。

フェライトコアの形状は、同軸ケーブル仕上がり外形によってコア内径が定まり、磁性特性によってコア外径とコア軸長が定まる。前述のように小型化したケース本体内部

に TEL ANT 用1個と GNSS ANT 用2個、計3個のフェライトコアを収容するスペースが新たに必要となる。そこで、コア外径3個分のスペースは、フェライトコアを上下2段に配列することでケースの拡大を抑制した。コア軸長分のスペースは、ボウタイアンテナの軸線をケース左右幅方向中心に対してオフセットすることで確保した。この軸線オフセットによるボウタイアンテナの性能特性への影響は、素子の斜辺形状の調整などで対応可能な範囲である [Fig. 6(c)]。

以上により、従来のインストールパネル内蔵用アンテナとの体積比で約50%の小型化を達成して、インストールパネル内への配置自由度を向上した。

NAVI 装置等との同時採用がない場合には分配器を内蔵しないタイプを選択可能とすればよいので、新型アンテナのバリエーションは (a)GNSS ANT 分配器有り、(b)GNSS ANT 分配器無し、(c)TEL ANT 単独、の全3タイプとなる。

外観上は、GNSS ANT の有無と、同軸ケーブルの本数およびコネクタ極数で、見分け可能である (Fig. 7, Fig. 8)。

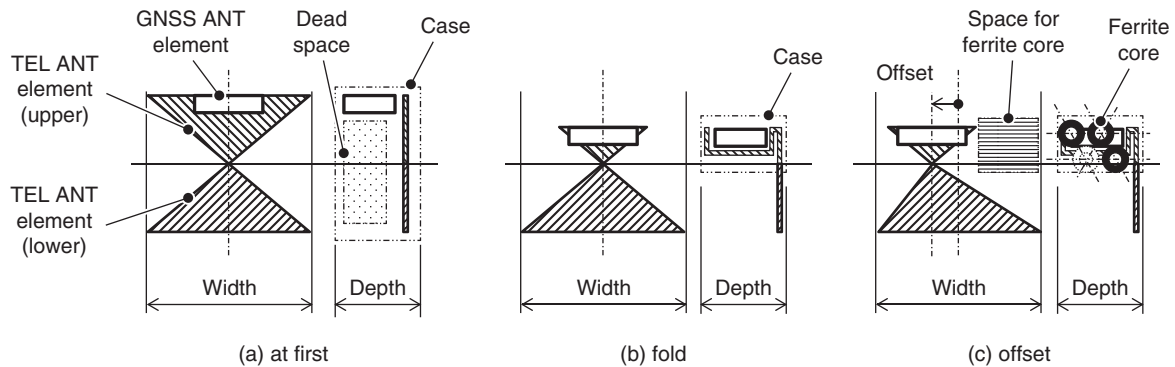


Fig. 6 Configuration concept for TEL ANT and GNSS ANT elements

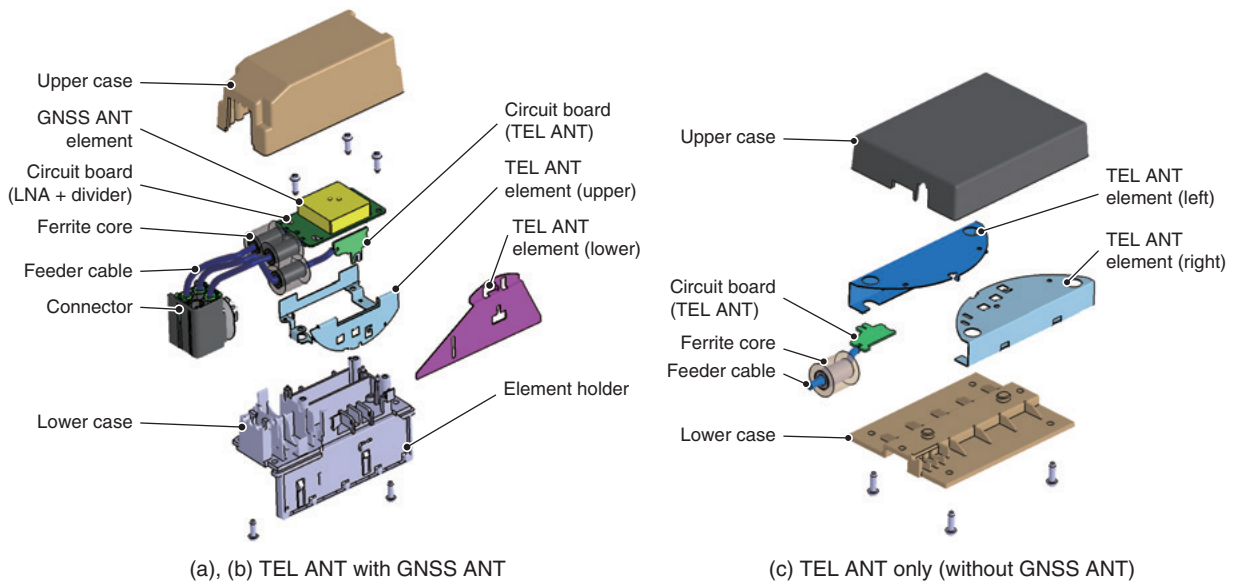


Fig. 7 Configuration of new antennas

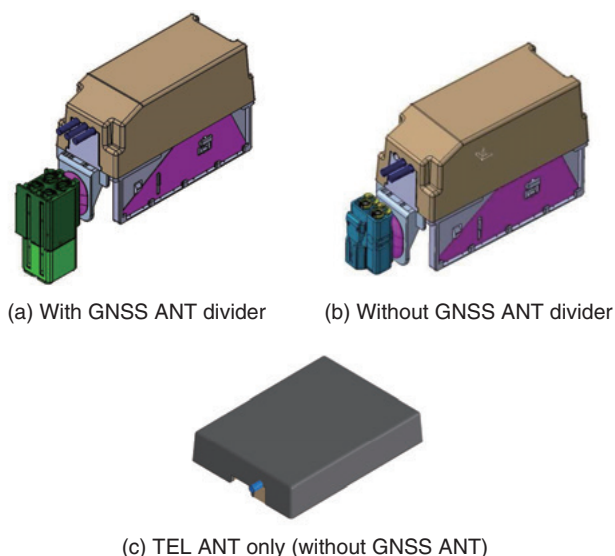


Fig. 8 Appearance of new antennas

6. まとめ

今回新たに開発したテレマティクス用アンテナは、契約携帯電話通信事業者の使用免許周波数を問わず、グローバルに適用可能である。「全世界対応」コンセプトのもと、開発目標を以下の通り達成した。

- (1) TEL ANT 素子にボウタイアンテナを採用し、698 MHz から 3800 MHz までの周波数比 5 を超える広帯域を実現することで、LTE 方式で利用する周波数帯全てをカバーした。
- (2) GNSS ANT は、従来利用されてきた米国 GPS だけでなく、ロシア GLONASS にも対応するとともに、内蔵 LNA の回路基板上に信号分配器と供給電源切換え回路を内蔵し、衛星測位システムを利用する他システムとの信号分配共用を可能とした。
- (3) 従来体積比 50% の小型化を達成して、インストールメントパネル内への配置自由度を高めた。

参考文献

- (1) 今井武, 柘植正邦, 菅原愛子: インターナビ・フローティングカーシステムと渋滞予測について, IATSS Review, Vol. 31, No. 1, p. 39-45, (2006)
- (2) <http://world.honda.com/news/2011/c111109Good-Design-Awards/>, 2012/10/18
- (3) ETSI: Mobile Standards Group (MSG); eCall HLAP Conformance Testing; Abstract Test Suite (ATS) and Protocol Implementation eXtra Information for Testing (PIXIT), ETSI TS 103 321 v1.1.1, (2015-04)
- (4) Rabinovich, V., Alexandrov, N., Alkhateeb, B.:

Automotive Antenna Design and Applications, CRC Press, p. 107-149, (2010)

- (5) 小岩正明, 井上文義, 岡田隆: マルチバンド移動端末の開発, NTT DoCoMo テクニカルジャーナル Vol. 14, No. 2, p. 31-37, (2006)
- (6) 電子情報通信学会 (編): アンテナ工学ハンドブック (第2版), オーム社, p. 187, p. 547, (2008)
- (7) Fujimoto, K. (editor): Mobile Antenna System Handbook (Third Edition), ARTECH HOUSE, p. 543-587, (2008)
- (8) 村田一平, 宮崎保光, 後藤信夫: スロット付半円形型ボウタイアンテナの広帯域特性解析, 電気学会論文誌C Vol. 124, No. 12, p. 2421-2426, (2004)

■ 著 者 ■



片山 睦



昆野 靖弘



曾根 孝之

駆動モータ用重希土類フリー熱間加工磁石

Heavy Rare Earth-free Hot-deformed Magnet for Traction Motor

清水 治彦*
Haruhiko SHIMIZU
服部 篤**
Atsushi HATTORI

加藤 龍太郎*
Ryutaro KATO
日置 敬子**
Keiko HIOKI

中澤 義行*
Yoshiyuki NAKAZAWA
及川 貴司**
Takashi OIKAWA

要 旨

電動車両の駆動モータ用磁石において、耐熱性向上を目的に添加されている重希土類のジスプロシウムとテルビウムの使用量をゼロにする技術を構築した。磁石の製造法において主流である焼結法に対して耐熱性のポテンシャルが高い熱間加工法に着目した。この熱間加工法において加工温度の低減および加工速度と成分設定の最適化をおこなうことで磁気特性を向上させた。これらにより量産車への適用が可能な重希土類完全フリー磁石を実現した。

ABSTRACT

A technology has been developed making it possible to do away with the use of the heavy rare earths dysprosium and terbium, which are added to the magnets employed in traction motors for application in electric vehicles and hybrid electric vehicles in order to increase heat resistance. The research focused on the hot-deformation method of magnet manufacture, which offers greater potential for the realization of heat resistance than the sintering method, the main method of manufacturing the magnets currently in use. The magnetic properties of the developed magnet were boosted by reduction of the temperature for hot-deformation and the optimization of the rate of hot-deformation and the composition design of the magnet material. These approaches made it possible to develop a completely heavy rare earth-free magnet able to be employed in mass-production vehicles.

1. まえがき

1982年に日本人が発明した希土類-鉄-ボロン系磁石（ネオジム磁石）は、最大エネルギー積 $[(BH)_{\max}]$ が現存する永久磁石で最も大きく、焼結法で大量に生産が可能のため広く普及している⁽¹⁾。EVやHEVの駆動用モータに用いられているネオジム磁石も焼結法によるものであるが、家電製品と異なり高温、高磁場の環境となるため、磁石には高い耐熱性の指標となる保磁力 (H_{cj}) が求められる。そのため、磁石主相の異方性磁界を高める効果を有する重希土類を添加することで H_{cj} を向上させている。たとえば重希土類のジスプロシウム(Dy)であれば5 wt%-10 wt%、同じく重希土類のテルビウム(Tb)であれば1 wt%-5 wt%を添加する⁽²⁾。しかし、重希土類は軽希土類に対し鉱石中に含まれる割合が十分の一以下であり、産地も限定される。今後の電動車両の増加を考慮した場合、環境負荷、希少資源

リスクおよびコストの観点から使用量を低減することが必須となってくる。よって、重希土類の添加以外の手法で H_{cj} を向上させることが求められる。

Fig. 1に磁石組織の模式図を示す。主相とそれを取り巻く粒界相からなっており、矢印は主相結晶の磁化容易軸を

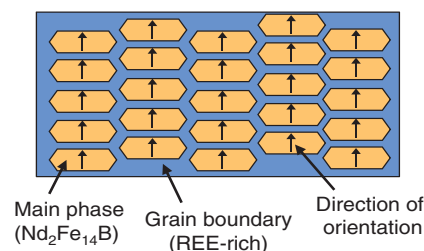


Fig. 1 Schematic image of crystalline microstructure of magnet

* 四輪 R&D センター

** 大同特殊鋼株式会社

表している。この主相結晶を微細にすることや、粒界相を厚くし主相結晶を磁氣的に孤立させることにより H_{cj} を向上できることがわかっている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

しかし、焼結法での原料磁粉の微細化は、酸化が生じたり、1000℃以上の高温加熱時に結晶が5 μm程度に成長してしまうため実現が容易でない。そこで本開発では熱間加工法に着目した。熱間加工法は磁石原料の溶湯を超急冷することでナノメートル (nm) オーダの結晶からなる薄帯を作製⁽⁶⁾、これを700℃程度の低温で熱間加工する⁽⁷⁾ため、焼結法より十分の一以上微細な数百 nm という組織が実現可能である。しかし、熱間加工磁石は製法の特長から高磁気特性の磁石を大量に製造することが容易でなく、これまでのところ比較的限られた分野で採用されるに留まっていた。

2. 開発のねらい

焼結磁石および従来の熱間加工磁石と本開発における熱間加工磁石の特性を Fig. 2 に示す。

横軸が駆動モータの運転時最高温度における H_{cj} 、縦軸が残留磁化 (B_r) である。駆動モータに求められる特性領域 (Fig. 2 図中の赤点線内) に対し、焼結磁石は重希土類 (主に Dy) を添加することで異方性磁界を向上させて対応しており、重希土類フリーでの対応はできていない。また、従来の重希土類フリー熱間加工磁石は希土類フリーの焼結磁石と比較すると H_{cj} は高いものの十分ではなく、駆動モータに適用できるものはなかった。そこで加工条件の最適化と成分設定をおこなうことで特性を向上させ、駆動モータとして使用可能な領域を目指した。

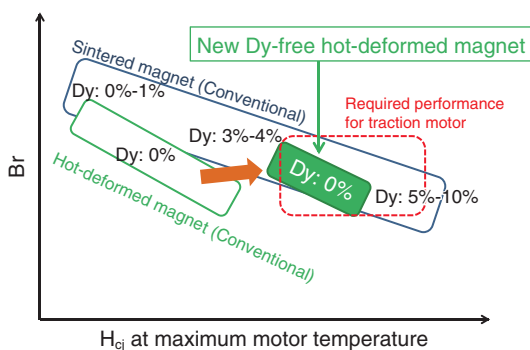


Fig. 2 Relationship between magnetic properties

3. 磁石の製造方法と課題

磁石の製造方法にはさまざまなものがあるが⁽⁸⁾、ネオジム磁石の製法として代表的な焼結法および本開発で取り上げた熱間加工法についてそれぞれの特徴を Fig. 3 に示す。

3.1. 焼結磁石

焼結法の出発原料となる磁粉は、原料合金の溶湯を薄板状に冷却したあと機械的に粉碎したもので、2 μm から 5 μm の粉末状となる。これを冷間プレスで圧粉体に成形するが、このとき金型のキャビティ内に磁場を発生させ磁粉の磁化容易軸をそろえて配向させる。磁粉は個々の粉末が一つの結晶からなっているため配向が容易であり、圧粉体の形状の自由度が高い。このため、大きなブロックを成形することが可能で生産性が高い。続いて加熱炉で焼結、時効をおこない磁石が完成する。

3.2. 熱間加工磁石

熱間加工法は原料合金の溶湯を 10⁵℃/s から 10⁶℃/s の速度で急速に冷却して薄帯を作製する。この急冷効果により、40 nm 程度の微細な結晶を生成させることができる。この薄帯を碎き 150 μm 程度の多結晶状の粉末にして原料磁粉とする。個々の粉末内部の微細結晶の向きは等方的であるので配向させて磁化容易軸をそろえる必要がある。ただし、焼結法のように個々の粉末が一つの結晶からなっているわけではないので、磁場で配向させることはできず、まず圧粉体に成形したあとに熱間で塑性加工をおこなって配向させる。その配向のメカニズム⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾を Fig. 4 に示す。

結晶に熱が加わると磁化容易軸である c 軸に対し垂直方向に優先成長して扁平な形状になっていく。その後、一軸方向の荷重を加えると扁平な結晶にトルクが働いて回転し、加圧した方向に配向する⁽¹⁰⁾。以上のメカニズムに基づ

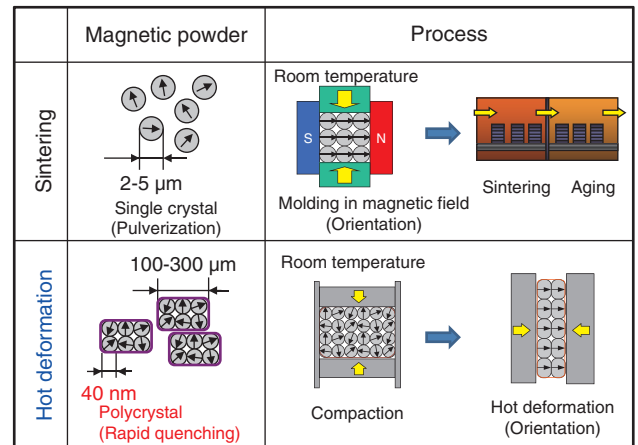


Fig. 3 Magnet manufacturing method comparison

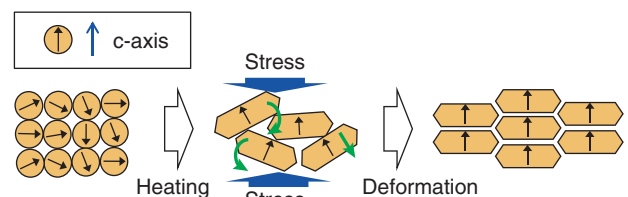


Fig. 4 Model of anisotropic crystal growth

き、圧粉体に対して熱間での押出し加工による一軸加圧をおこない、配向した板状の磁石を成形する。ただし、圧粉体の全ての部位に均等に圧力を伝えなければならないため、均質な磁石を作るためにはある程度圧粉体の形状に制約があり、塑性加工条件の設定ではばつきを抑えることが課題である。本工程において、配向によって B_r は向上するが、被熱による結晶成長を伴うので H_{cj} は逆に低下する。そのため、このトレードオフを考慮し特性を向上させる必要がある。また、本開発磁石のような微細組織を有する高 H_{cj} 磁石は一般に着磁性の低下が懸念されるため、この影響も確認する必要がある。

4. 熱間加工磁石の特性向上

4.1. 熱間加工条件

Fig. 5 に本開発で特性を向上させた Dy フリー磁石の熱間加工温度ごとの走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真を示す。熱間加工温度が上がるほど結晶が成長し、形状が扁平化していくため、配向が進んでいることがわかった。一方で、前述の通り、微細組織を維持するためには、熱間加工温度をより低温化する必要がある。そのため本開発では、熱間加工時の温度を低温化することで、結晶粒の微細化を図ると共に、その低温条件でも、従来工法対比で相対的に高い配向度が得られるよう塑性加工速度の設定をおこなった。

4.2. 成分設定

ネオジム磁石の主相の化学量論比組成は $RE_2T_{14}B$ (RE: 希土類, T: 遷移元素) で表される金属間化合物となっているが、実際には粒界相の成分も存在するため、原料合金中の総希土類量 (Total Rare Earth: TRE) は化学量論比組成よりも多くなっている。Fig. 6 に TRE が少なく H_{cj} が低い従来の磁石と、TRE が多く H_{cj} が高い改善された磁石の SEM 写真を示す。粒界相 (白い部分) を厚くすることで、主相の磁氣的孤立が確保されて H_{cj} が向上する。主相割合を大きく減少させない範囲で TRE を増やして特性向上を図った。

4.3. 磁気特性の改善

Fig. 7 に従来熱間加工磁石と本開発磁石の磁気特性を示す。本開発磁石は、熱間加工温度の低温化、塑性加工条件の最適化および最適粒界相とするための成分設定をおこなった。結晶粒の微細化と主相の磁氣的孤立性の改善によって H_{cj} を向上させると共に、微細組織を維持しつつ配向度を改善することで、 B_r も向上した。

4.4. 温度依存性

一般的に H_{cj} は高温で低下するが、その低下率は粒径に

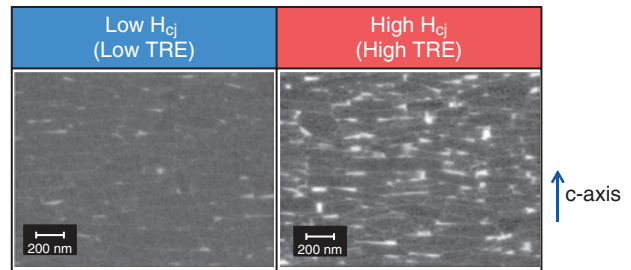


Fig. 6 Crystalline microstructure of hot-deformed magnet

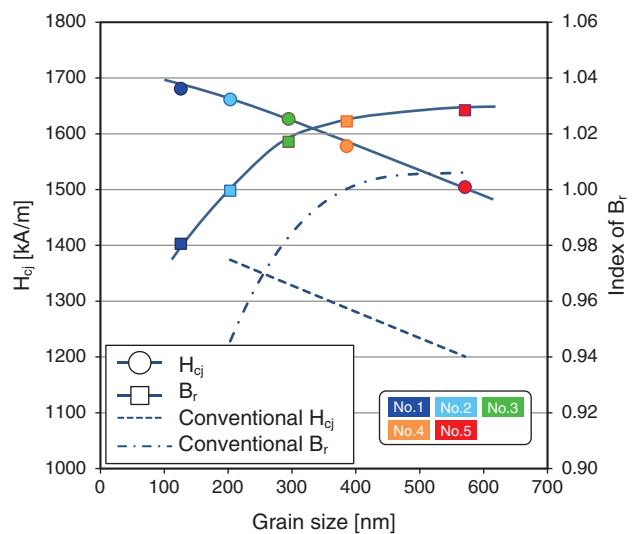


Fig. 7 Relationship between grain size and H_{cj} /grain size and B_r

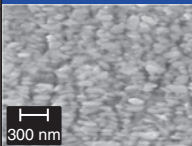
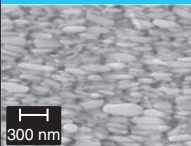
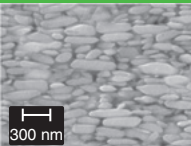
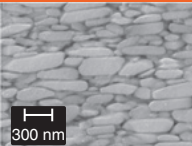
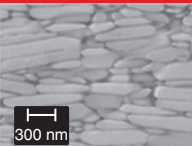
No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
SEM image					
Grain size	126 nm	203 nm	295 nm	386 nm	571 nm
Deformation temp.	700°C	725°C	750°C	775°C	800°C

Fig. 5 Grain size of hot-deformed magnet for differing deformation temperatures

依存する⁽⁴⁾。微細化の副次効果として H_{cj} の温度係数 (β %/°C) と粒径との相関が認められた (Fig. 8)。

温度係数の改善による具体的な効果の例を Fig. 9 に示す。常温付近での熱間加工磁石の H_{cj} は、実線で示す焼結磁石の H_{cj} より低い。高温側になっていくと焼結磁石と同等以上の H_{cj} になる。これは熱間加工磁石の温度依存性が小さく、 H_{cj} の低下割合が少ないためである。駆動モータにおいて減磁が課題となる高温側では、熱間加工磁石の温度依存性が利点となる。

4.5. 着磁性

Fig. 10 に焼結磁石および熱間加工磁石の初磁化曲線 (ヒステリシス曲線の第 1 象限) を示す。原点から印加磁界を

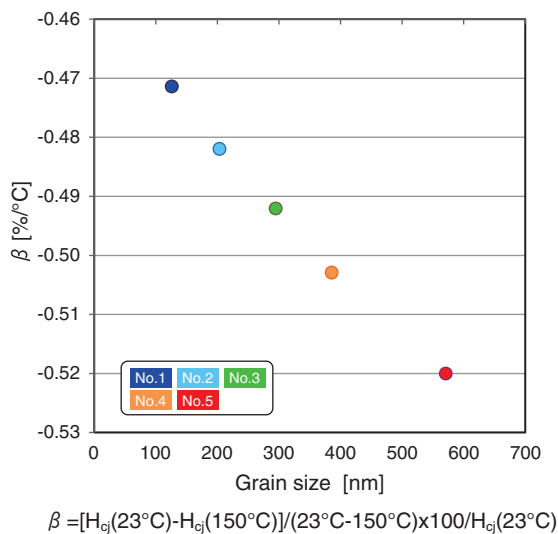


Fig. 8 Relationship between grain size and temperature coefficient of H_{cj} (β)

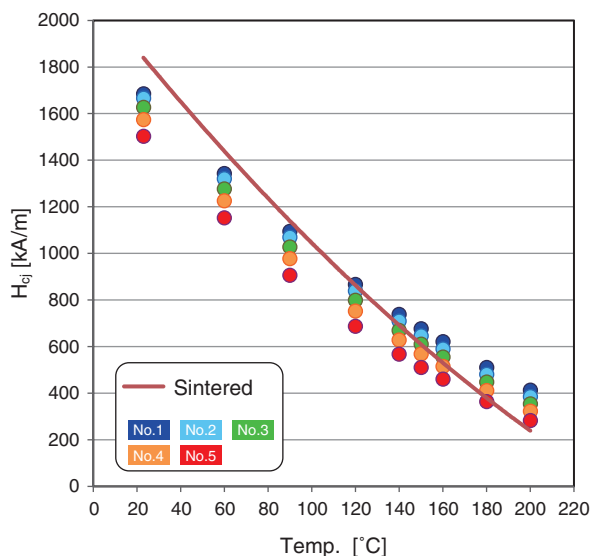


Fig. 9 Temperature-dependence of H_{cj} in hot-deformed magnet and sintered magnet

増やしていくと焼結磁石は 500 kA/m 程度で一気に飽和してほぼ完全に着磁されるが、熱間加工磁石は初磁化曲線が 2 段階になり完全着磁に保磁力相当以上の有効磁界が必要となる。

焼結磁石は結晶粒が大きいいため一つの粒が多磁区構造になっており、磁界が印加されると磁壁移動により容易に磁化される。これに対し、熱間加工磁石は結晶粒が小さいため単磁区構造と多磁区構造の結晶粒が複合している状態になっている。この場合、まず多磁区結晶粒が磁化されてから単磁区結晶粒が磁化されるため、2 段階の初磁化曲線を描く。

両磁石の磁区構造を磁気力顕微鏡で観察した結果を Fig. 11 に示す。焼結磁石は一つの結晶中に磁壁で区切られた磁区が複数存在する多磁区構造になっているが、熱間加工磁石は磁壁が存在しない単磁区構造の結晶が多くみられる。これより、初磁化曲線の相違が裏付けられる。

以上から、熱間加工磁石の着磁にはより大きな印加磁界が必要となるため、生産技術上考慮が必要であり、着磁電源の電圧設定で対応した。

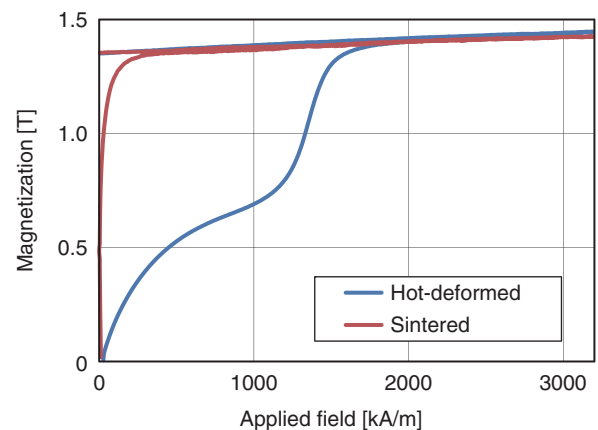


Fig. 10 Magnetization profile

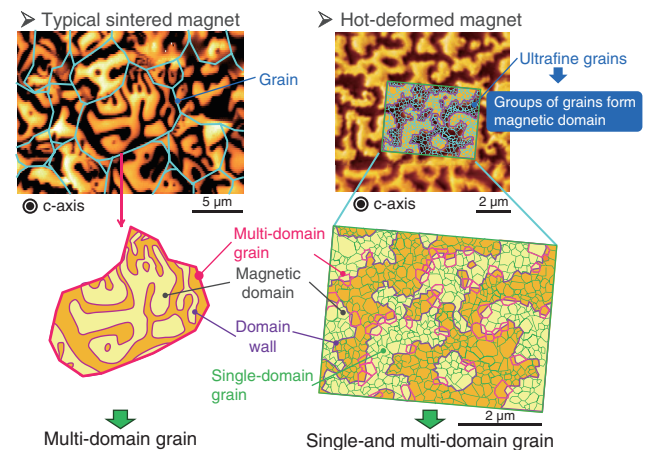


Fig. 11 Magnetic domain structures (Magnetic force microscope image)

4.6. 特性の均一性

製法変更に伴う成形品の安定性を確認した。成形品から切り出した個々の磁石の B_r に起因する磁束を測定した(Fig. 12)。熱間塑性加工時の金型最適設計と成形条件の最適化により、磁束のばらつきはHEVに求められる範囲に対して工程能力指数 $C_p=5.90$ を確保できた。

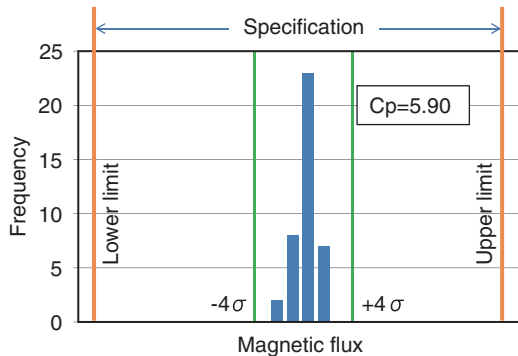


Fig. 12 Dispersion on magnetic flux

5. まとめ

本開発では重希土類フリー熱間加工磁石の駆動モータへの適合をおこなった。低温での熱間加工による微細組織化、塑性加工速度の最適化による高配向化、粒界相の設定による主相の磁氣的孤立の確保により H_{cj} および B_r を向上させた。また、量産における品質の安定性も確認した。これらにより産出偏在性の大きい高コストな重希土類を用いることなく従来同等以上の性能を有する電動車両用駆動モータの量産が可能となった。

参考文献

- (1) Sagawa, M., Fujimura, S., Togawa, N., Yamamoto, H., Matsuura, Y.: New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe, J. Appl. Phys., Vol.55, No.6, p.2083-2087, (1984)
- (2) 佐川真人, 広沢哲, 山本日登志, 松浦裕, 藤村節夫: Nd-Fe-B系永久磁石材料, 固体物理, Vol.21, No.1, p.37-45, (1986)
- (3) 宇根康裕, 佐川真人: 結晶粒微細化によるNd-Fe-B焼結磁石の高保磁力化, 日本金属学会誌, 第76巻, 第1号, p.12-16, (2012)
- (4) Hioki, K., Hattori, A., Iriyama, T.: Development of Dy-Free Hot-Deformed Nd-Fe-B Magnets by Optimizing Chemical Composition and Microstructure, J. Magn. Soc. Jpn, 38, p.79-82, (2014)

- (5) Liu, J., Sepehri-Amin, H., Ohkubo, T., Hioki, K., Hattori, A., Schrefl, T., Hono, K.: Effect of Nd content on the microstructure and coercivity of hot-deformed Nd-Fe-B permanent magnets, Acta Mater., 61, p.5387-5399, (2013)
- (6) Croat, J. J., Herbst, J. F., Lee, R. W., Pinkerton, F. E.: Pr-Fe and Nd-Fe-based materials: A new class of high-performance permanent magnets, J. Appl. Phys., 55, p.2078-2082, (1984)
- (7) Lee, R. W.: Hot-pressed neodymium-iron-boron magnets, Appl. Phys. Lett., Vol.46, p.790-791, (1985)
- (8) 佐川真人, 浜野正昭, 平林真: 永久磁石, アグネ技術センター, p.240, (2007)
- (9) Mishra, R. K.: Microstructure of hot-pressed and die-upset NdFeB magnets, J. Appl. Phys., 62, p.967-971, (1987)
- (10) Kato, R., Nakazawa, Y., Shimizu, H., Kumano, M., Nagase, T., Yasuda, H. Y.: Orientation and Deformation Mechanisms of Hot-Deformed Nd-Fe-B Magnets, Proceeding of the 22nd International Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and Their Applications, p.85-88, (2012)
- (11) 塩井亮介, 宮脇寛, 森田敏之: RE-Fe-B系熱間加工異方性磁石の配向メカニズム, 電気製鋼, 第82巻, 1号, p.31-37, (2011)

■著 者■



清水 治彦



加藤 龍太郎



中澤 義行



服部 篤



日置 敬子



及川 貴司

バンパフェイシア軽量化のための 高剛性ポリプロピレン素材とクリア塗膜の開発

Development of High-Rigidity Polypropylene Material and Clear Coat
for Lightweight Bumper Fascia

能 見 恵 美*
Emi NOMI

中 根 健*
Ken NAKANE

要 旨

バンパフェイシアの軽量化を目的としたポリプロピレン素材とクリア塗膜を開発した。

軽量化のためバンパフェイシアの平均肉厚を 3.0 mm から 2.0 mm へ薄肉化できるポリプロピレン素材を開発した。開発素材は 2.0 mm で成形可能な高流動性を有し、かつ剛性を補完するため高剛性化を図った。一方、高剛性化により低下した衝撃性が、塗装後はさらに低下することに着眼し、素材だけでなく塗膜も開発することで衝撃性の低下を抑制した。バンパフェイシアの塗膜を構成するプライマ、ベース、クリア層のうち、割れの起点となっているのはクリア層であった。クリア層について、主成分であるアクリル樹脂を高ガラス転移温度化するとともに、粒径 0.1 μm 以下の粒子状の樹脂を配合することで塗膜を硬くもろい仕様とし、割れの数を増やすことで応力の分散を図った。

この結果、2016 年モデル CIVIC のバンパフェイシアは、従来材比で 23% 以上の軽量化を達成した。

ABSTRACT

A polypropylene material and clear coat were developed for the purpose of reducing bumper fascia weight.

In order to reduce bumper fascia weight, a polypropylene material was developed that would make it possible to thin the average wall thickness of 3.0 mm down to 2.0 mm. The developed material has high flowability to enable injection at 2.0 mm, and steps were taken to augment its rigidity by making it a high-rigidity material. At the same time, attention was also paid to the reduction in impact resistance caused by the higher rigidity, and to the fact that it would be further reduced after coating. That reduction in impact resistance was therefore limited by developing not only a material but also a coating for the purpose. Of the primer, base, and clear layers that make up the bumper fascia coating, the origin of cracking is in the clear layer. The main component of the clear layer is acrylic resin, and the glass transition temperature of this resin was raised while also adding an admixture of resin particles with a diameter of 0.1 μm or less. This was done to make the coating hard and brittle, increasing the number of cracks in order to distribute the stress.

As a result, a weight reduction of 23% or more relative to preceding materials was achieved in the bumper fascia of the 2016 model CIVIC.

1. まえがき

地球環境保護のため、二酸化炭素排出低減への関心は高い。自動車のライフサイクルにおいて走行時の二酸化炭素の排出割合は高く、燃費向上による二酸化炭素の排出低減が求められている。燃費向上のため車体軽量化は重要視され、多くの部品で検討されている。

バンパフェイシアはフロントとリヤを合わせた 1 台当た

*四輪 R&D センター

りの重量が 8 kg 前後あり、軽量化効果が期待できる大型ぎ装部品である (Fig. 1)。その軽量化の手法としては、素材の低比重化と部品の薄肉化が挙げられるが、既に低比重素材であるポリプロピレン (PP) 素材を使用しているため、主に薄肉化技術への取り組みが報告されている⁽¹⁾。

薄肉化は成形性、剛性、衝撃性を低下させるため、部品設計、材料、製法等において、その性能向上が検討されている。特に材料については、PP 素材を構成する PP 樹脂、

配合充填剤としてのタルク、ゴムの3成分の特性と配合バランスが検討されている。

バンパフェイシアの成形加工には射出成形が用いられるが、薄肉化により金型内の流動性が低下し成形性が低下する。そのため、成形性の向上にはPP素材の流動性向上が必要となる。

バンパフェイシアは薄肉となると剛性が低下し、ワックスがけをする時に押力による部品のべこつきが発生するため、素材の高剛性化が必要となる。さらにPP素材は、温度により特性が変化し、低温環境下の衝撃性が常温に対し低下する⁽²⁾。冬期の北米やロシアのような低温環境下では、衝撃性が低下し外力により部品が破損することが懸念されるため、衝撃性向上が必要となる。

一方で、Fig. 2に示すように、PP素材の剛性と衝撃性は相反する関係にある。さらに塗装後の低温衝撃性は、塗装前に比べて低下する。このためPP素材の開発だけで剛性と塗装後の低温衝撃性を両立させ、大きな軽量化効果を得るのは容易ではない。そこで低温衝撃性低下を抑制する塗膜を開発できれば剛性と衝撃性の両立が可能であると考えた。本稿では、薄肉化のためのPP素材と低温衝撃性低下を抑制する塗膜を新たに開発したので紹介する。



Fig. 1 Front and rear bumper fascia

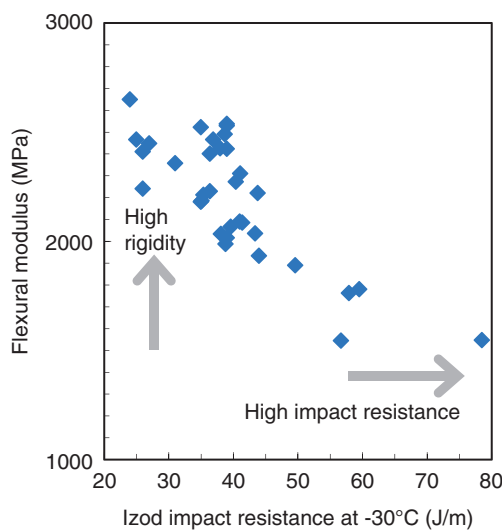


Fig. 2 Relationship between impact resistance and rigidity

2. 衝撃性低下抑制塗膜の考え方

一般的なバンパフェイシアの塗膜はPP素材との密着性を確保するプライマ、カラーを発現させるベース、紫外線から膜を保護するクリヤの3層で構成される (Fig. 3)。

塗装後の低温衝撃性の評価については、JIS K5600-5-3の6項⁽³⁾による変形デュポン式衝撃試験機を用いた (Fig. 4)。

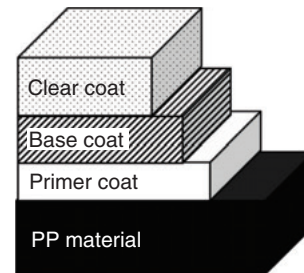


Fig. 3 Construction of bumper fascia coatings



Fig. 4 Modified Dupont impact tester

−30℃に冷却した試験片に1kgの重りを試験機の一定の高さから落下させ、試験片が割れなければ合格とした。落下高さを10cmずつ上昇させ、試験片が割れた高さを不合格とし、割れない最高値を衝撃値とした。また、バンパフェイシアの使われ方を調査し、実使用環境下で部品が破損しない衝撃値の目標を定めた。

塗装後の低温衝撃試験で割れた試験片の破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した結果を Fig. 5 に示す。割れは塗膜を起点に PP 素材表面へ進展し、下面へ伝播していることがわかる。

Fig. 6 に3層の塗膜と衝撃性の関係を示す。塗装していない素材に対して、プライマのみを塗装した場合とプライマとベースを塗装した場合はいずれも衝撃性は変化しない。一方、プライマとベースとクリヤを塗装すると衝撃性が低下する。

破面観察結果と塗膜各層の衝撃性の関係から、割れは以下のように起こると考えた。外力により試験片が変形する。この変形に追従できずクリヤ表面に割れが発生し、ベース、プライマ、PP 素材の順に伝播していき、PP 素材の割れに至る。割れの起点はクリヤであることから、クリヤ中の樹脂特性を変更し衝撃性低下を抑制することを検討した。

割れの伝播を抑制するためにクリヤの樹脂特性としては二つのタイプを考えた。一つめは外力による変形に追従する軟質タイプで、二つめは特定の割れの優先的な進展を避けるため、逆にクリヤを割れやすくし割れの数を増やすことで応力を分散し、割れの進展を抑制する硬質タイプである。軟質タイプは、夏季の高温下でクリヤ表面が軟質化しべとつくため、汚れが落ちにくくなり、変色による外観商品性の低下が懸念される。高温下のクリヤ汚染性と低温環境下の衝撃性を両立する樹脂特性の設定は容易ではない。

硬質タイプはクリヤを割れやすくすることで塗膜のフレキシブル性が損なわれ、バンパフェイシア脱着時の塗膜割

れによる外観商品性の低下が懸念されるが、脱着作業を模した屈曲試験で塗膜が割れない設計とすることで樹脂特性の設定が可能と考えた。

以上から、従来同等の機能と衝撃性低下の抑制を両立させるためにクリヤは硬質タイプの応力分散型とした。

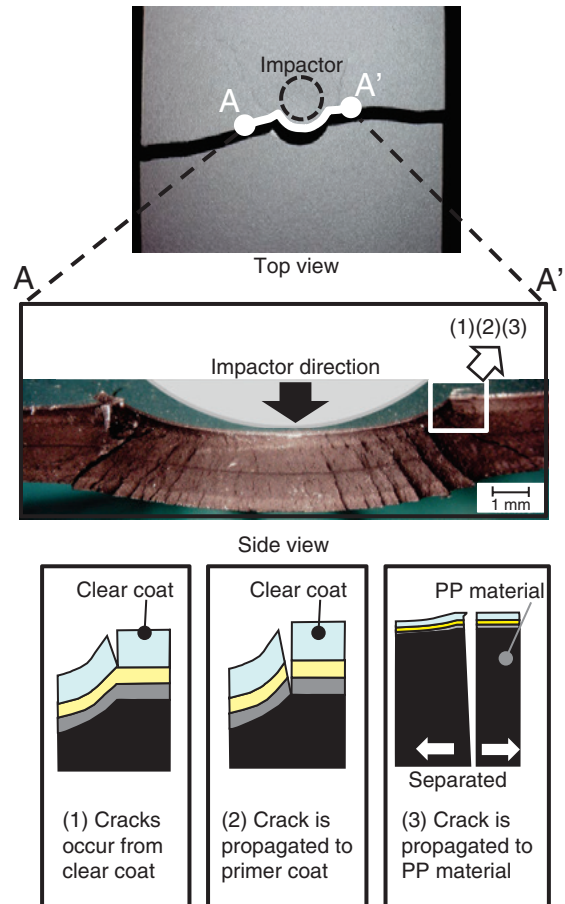


Fig. 5 SEM photograph of broken panel

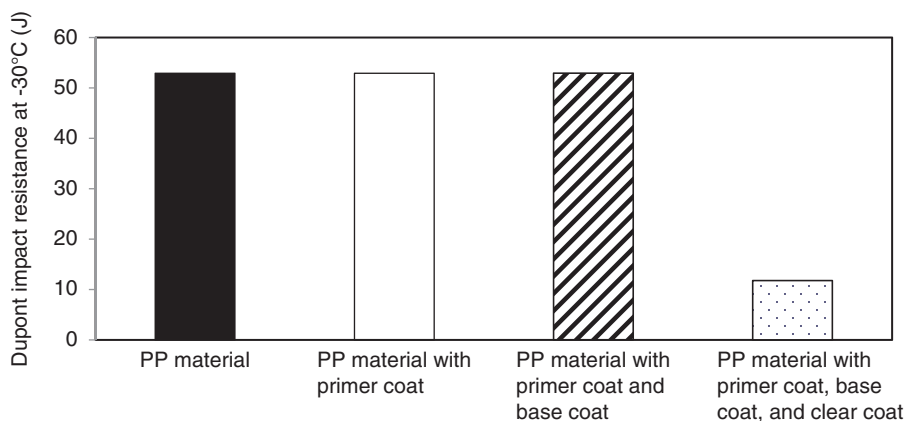


Fig. 6 Impact resistance of 3.0 mm PP material with coatings

3. 開発のねらい

薄肉化の目標は、既量産車のバンパフェイスの重量と平均肉厚を調査し、対他競争力のある軽量化 20% 以上、平均肉厚 2.0 mm とした。

(1) 流動性

平均肉厚を従来材 3.0 mm から 2.0 mm に薄肉化するため、2.0 mm でも PP 素材が流動するように約 50% 高流動化することを目標とした。流動性の指標にはメルトフローレート (MFR) を用いた。

(2) 剛性

一般に剛性は板厚の 3 乗に比例する。平均肉厚 2.0 mm で 3.0 mm 並みの剛性を確保し、20% 軽量化するために、比重を 1.04 g/cm^3 以下、曲げ弾性率を 2200 MPa 以上とした。なお、曲げ弾性率の測定は ASTM D790⁽⁴⁾ に準拠おこなった。

(3) 衝撃性

塗装の有無で PP 素材の衝撃値を比較した。Fig. 7 に示すように、従来材について (a) 塗装した PP 素材は無塗装の PP 素材の衝撃値に対して約 80% 低下する。(b) 肉厚を 3.0 mm から 2.0 mm へ薄肉化することで PP 素材の衝撃性が低下する。さらに、(c) PP 素材を高剛性化すると、衝撃性は従来材より低下する。(d) 薄肉、高剛性化した PP 素材に従来塗装をおこなう

と、目標とする衝撃値を下回る。(e) 薄肉、高剛性化による PP 素材の衝撃性低下分を推測し、塗装後の低温衝撃性を確保するための低下分は 50% 以内に抑制することを目標とした。

4. 開発仕様

4.1. 高剛性かつ高流動な PP 素材

PP 素材には PP 樹脂、タルク、ゴムの 3 成分が主に配合されている。目標の比重と剛性を両立させるため、剛性向上成分であるタルクを増量し、剛性を低下させるゴム成分を減量した。

従来 PP 素材中のタルクは増量による比重増加分に対して剛性向上効果が小さく目標を達成できないため、開発材は異なるタルク種を検討した。一般的に配合が同量のタルクでは縦横比 (アスペクト比) が高いほど剛性向上効果が高いため、高アスペクト比のタルクを選定し、従来材に対し約 2 倍量を配合した。

ゴム成分は射出成形時に表層部で延伸され塗膜の密着性を向上させる効果があるため、減量による密着力低下が懸念される。安定した塗膜の密着強度を確保するため、ゴム成分の減量は従来材に対し約 30% とした。PP 素材中の 3 成分の配合比率を Fig. 8 に示す。

高流動化については、PP 素材中で最も配合量が多い

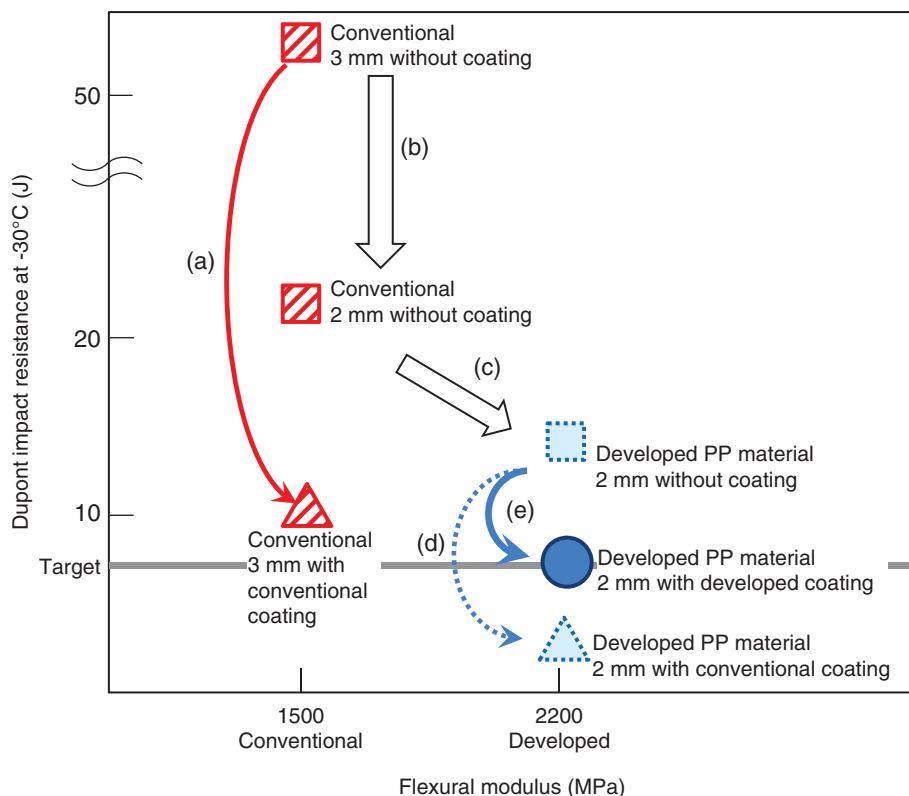


Fig. 7 Relationship between flexural modulus and Dupont impact resistance

Table 1 Properties of conventional and developed PP material

Properties		Conventional	Target value	Developed
Moldability	Melt flow rate (g/10 min)	28	≥ 42	44
Rigidity and weight reduction	Flexural modulus (MPa)	1500	≥ 2200	2280
	Specific gravity (g/cm ³)	0.95	≤ 1.04	1.04

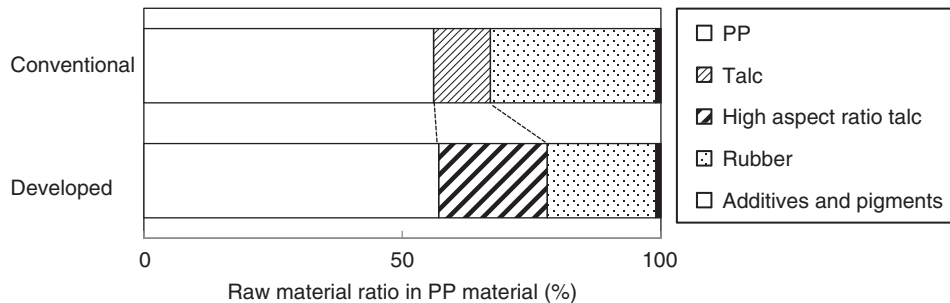


Fig. 8 Comparison of raw material ratio

PP樹脂の平均分子量を下げ低粘度化することで達成した。開発材と従来材を比較した結果を Table 1 に示す。

4.2. 応力分散型クリヤ仕様

バンパフェイスには熱硬化型ウレタンクリヤが使用される。このクリヤ中の主成分であるアクリル樹脂を外力入力時に多数の割れが入るよう硬くもろい設計とした。具体的には、アクリル樹脂を従来材に対し高ガラス転移温度(Tg)とした。

さらに塗膜変形時に割れの起点となる硬質な粒子状の樹脂を配合した。粒子状の樹脂については、粒径が大きいと光が拡散されてしまいクリヤの光沢低下が懸念されるた

め、光沢を維持できる 0.1 μm 以下のものを配合した。

Fig. 9 に示すように、アクリル樹脂を高 Tg 化し、粒子状の樹脂を配合することで衝撃性が向上した。本クリヤを使用することで、塗装後の衝撃低下率は従来クリヤの約 80% に対し約 50% に抑制できた (Fig. 10)。

従来クリヤと応力分散型クリヤの衝撃試験後の塗膜断面を SEM で観察した。Fig. 11 から従来クリヤは応力が一ヶ所の割れに集中し、鋭利な割れとなって基材中に深く伝播していることがわかる。これに対し応力分散型クリヤは、塗膜に多数の割れが入っており、PP 素材の割れも浅くなっていることから、応力が分散され素材割れが抑制されていることがわかる。

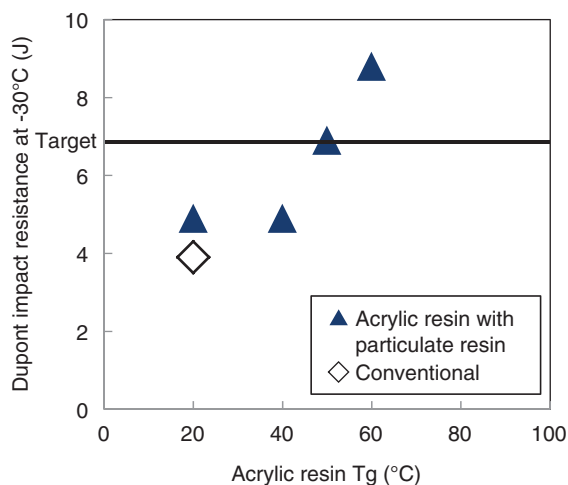


Fig. 9 Relationship between acrylic resin Tg and Dupont impact resistance

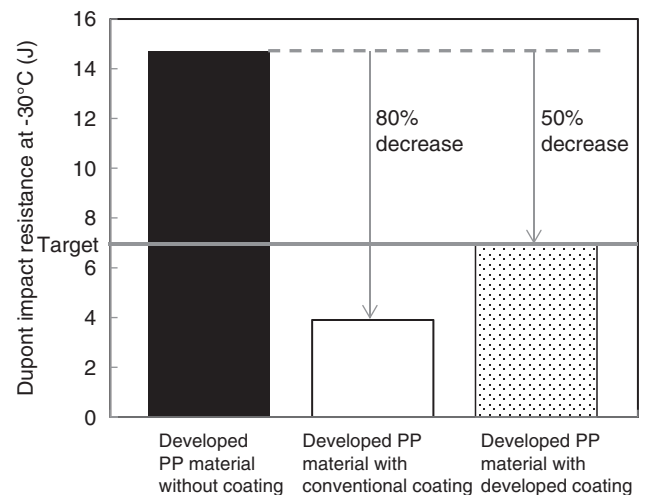


Fig. 10 Dupont impact resistance of developed 2.0 mm PP material with developed coating

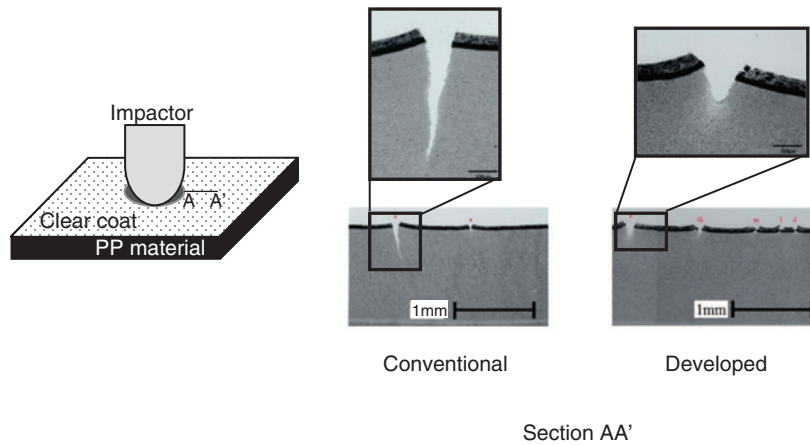


Fig. 11 Section AA' of coated PP after impact test, taken using SEM

5. 製品性能評価

参考文献

高剛性、高流動の PP 素材に応力分散型クリヤを塗装したバンパフェイスアの部品性能を振り子衝撃試験、押力に対する変形量測定、部品の脱着試験で確認した。

低温環境における車の使い方を想定し、 -30°C 環境で十分に冷却したバンパフェイスア下部への振り子衝撃試験で破損がないことを確認した。

押力による部品のべこつきについては、一定荷重を入力した時の変形量を測定し、基準値以下であることを確認した。

塗膜割れについては、バンパフェイスアの脱着作業による検証をおこない、割れによる外観商品性の低下がないことを確認した。

部品の衝撃性と剛性を損なうことのない薄肉軽量なバンパフェイスアを開発し、2016 年モデルの CIVIC から適用を開始した。フロントとリヤを合わせて 23% 軽量化できた。

6. まとめ

以下に示す PP 素材とクリヤ塗膜の組合せにより、剛性と低温衝撃性を両立しつつバンパフェイスアを薄肉化することができた。

- (1) PP 素材については、PP 樹脂を低粘度化することで射出成形時の流動性を向上させた。また、高アスペクト比のタルクを選定し、目標とする比重と剛性値を両立した。
- (2) クリヤ塗膜については、アクリル樹脂を高 T_g 化し、 $0.1\ \mu\text{m}$ 以下の粒子状樹脂を配合することで、外力による変形時の割れ起点を増やした応力分散型の仕様とした。

- (1) 朝野千明, 藤和久, 原正雄, 大西正明: バンパ用高剛性ポリプロピレン材料の開発, マツダ技報 No.30, p.191-194, (2012)
- (2) エドワード・P・ムーア・Jr. 編著, 保田哲男, 佐久間暢: 衝撃改良 PP, ポリプロピレンハンドブック 基礎から用途開発まで, 株式会社工業調査会, p.258, (1998)
- (3) JIS K5600-5-3:1999 塗料一般試験方法 - 第 5 部: 塗膜の機械的性質 - 第 3 部: 耐おもり落下性
- (4) ASTM D790-10: 2010, Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

■ 著 者 ■



能見 恵美



中 根 健

金属表面の常圧気相表面改質を用いた熱可塑性樹脂の異種材接合技術

Technology for Joining of Dissimilar Material with Thermoplastic Polymeric Resin
Using Atmospheric Gas Phase Modification of Metal Surfaces

秋田浩司*
Hiroschi AKITA

黒田真一**
Shinichi KURODA

河井貴彦**
Takahiko KAWAI

要 旨

金属部品に熱可塑性樹脂からなる部品を溶着接合するための金属表面改質処理を、自動車ボデー生産ライン上でおこなう技術を構築した。大気圧プラズマ化学気相成長処理の条件設定によって 1.4×10^{-9} mol/cm² という高い水酸基密度を有するガラス膜をアルミニウム合金表面上に形成できた。得られた表面は溶融した6ナイロンに対する濡れ性を有していることを確認した。加えてこれに熱溶着させた熱可塑性樹脂の界面部近傍にアモルファス層が形成されていることが観察された。これらの効果により、熱溶着による異種材接合品において既存のアンカ効果をねらった金属表面粗化品と同等の高い接合強度を得ることができた。

ABSTRACT

A technology was developed for metal surface modification treatment to be used on a car body production line for weld-joining parts made of thermoplastic resin with metal parts. A glass membrane with a high hydroxyl group density of 1.4×10^{-9} mol/cm² was successfully formed on an aluminum alloy surface by configuring the conditions for the atmospheric pressure plasma chemical vapor deposition process. The obtained surface was confirmed to have wettability to melted 6-nylon. In addition, an amorphous layer was observed to have formed near the interface portion of the thermoplastic resin thermally welded to it. The effect of these results was that a high level of join strength equal to that in existing items with roughened metal surface aiming for an anchor effect was achieved with items of dissimilar material joined by thermal welding.

1. ま え が き

近年、自動車に対する世界的な燃費向上要求の高まりを背景に、車体の軽量化を目的とした複合材料の応用検討が盛んになってきている。その中で6ナイロンに代表される熱可塑性樹脂をマトリックス材料に用いたカーボンファイバ複合材料である Carbon fiber reinforced thermo plastics (CFRTP) がその高い比強度、比剛性および Life cycle assessment の観点から注目を集めている⁽¹⁾。車体への応用に際しては使用環境による機械特性低下の懸念や高い材料コストから、金属材料との組み合わせ構造が多用される。その際の異種材接合には CFRTP のマトリックス材料である熱可塑性樹脂の熱溶着性を利用し、部品の構造や製造工程を簡素化することが軽量化およびコストの観点から望ましい。

熱可塑性樹脂の異種材溶着接合技術として、金属表面に数 nm から数十 μ m サイズの微細な孔や溝を掘り込んで粗化する処理を施し、凹部に溶融した熱可塑性樹脂を射出成型で充填し冷却固化する、いわゆるアンカ効果によって機械的に接合する手法が近年多数実用化されている。たとえば小型携帯電子機器用の部品製造工程において熱可塑性樹脂と軽合金板材の、アンカ効果を利用した一体成形技術が広く用いられている。しかしこれらの表面粗化処理は、金属表面に孔や溝を形成するための薬品に部品を浸しておこなう溶液プロセスによる化学処理を必要とする。工程時間の長さや廃液処理等による設備の複雑化から、これら溶液プロセスを自動車ボデー生産ラインへ導入することは容易でない。また溶液プロセスは本来比較的小さな部品を多数同時にバッチ処理するための技術であって、サイズの大きな自動車部品表面の必要箇所のみを局所的に処理すること

* 四輪 R&D センター

** 群馬大学

には適していない。接合に不要な部分を含めた広い表面を粗化処理することは、薬品の使用量が多くなり処理設備も大型化するためプロセスコストの上昇を招き好ましくない。溶液プロセスによらない金属表面粗化手法としてレーザ加工機を用いた技術も用いられているが、微細な三次元加工を高速でおこなうには高出力な装置と複雑な制御が必要となる。

自動車部品の異種材溶着接合を実現するための、機械的接合以外のメカニズムとして化学結合力の応用が考えられる。一般的な接着接合においては接着剤成分と固体表面の間に水素結合もしくは共有結合が形成される。化学反応を伴わない熱可塑性樹脂の熱溶着接合においては水素結合による化学結合力が利用できる。

水素結合力を発現させるためには、固体表面と熱可塑性樹脂の双方に水酸基やアミド基のような異方性官能基が必要である。6ナイロンのようなポリアミド系樹脂は分子鎖の基本構造中にアミド基を含むが、アルミニウム合金のような無機材料の固体表面において異方性官能基は本来存在しないものであるため、化学的な表面改質によってこれを新たに付与することが必要となる。

そのためには二つの課題が存在する。第一の課題は熱溶融した熱可塑性樹脂の固体表面への濡れ性の向上である。化学結合力を効果的に発現させるためには固体金属表面への濡れ性が必要となるが、熱可塑性樹脂はその鎖状に延びた分子構造から溶融時に高粘性液体となるため、硬化前の低分子量の熱硬化性接着剤に比べて濡れ性が低下する。

第二の課題は接合状態の安定性を得ることである。6ナイロンのような結晶性を有する熱可塑性樹脂においては、溶着工程における冷却固化およびその後の使用環境温度の変化によって剥離や接合強度の低下を生じやすく、接合状態の安定を得にくい。これは溶融ナイロンの結晶化進行が溶着界面部まで達すると柔軟性が失われ、異種材間の熱膨脹差からくる溶着界面熱応力を吸収できなくなり界面剥離が生じるためである。界面剥離を防止する手法として、金属表面上に柔軟な非結晶性樹脂を厚さ約 100 μm で塗装し、その表面上に重ねて熱可塑性樹脂を射出成型することで一体成形部品形状を形成し、最後に熱処理して非結晶性樹脂を架橋し接合強度を確保する技術が実用化されている。この非結晶性樹脂層のための特殊なグレードの樹脂材料が必要になり、プロセスも複雑で工程時間を要するものとなる。

2. ねらい

自動車ボデー生産ライン上で CFRTP 部品との異種材熱溶着を局所的に可能とするために金属部品の表面改質を大気中でおこなえる手法で検討した。

熱可塑性樹脂の溶着に水素結合からなる化学結合力を利

用し、アンカ効果による機械的な結合と同等の接合強度を安定的に得ることを目標とし、下記に留意した。

- (1) 接合界面の水酸基密度を高める
- (2) 接合界面における熱可塑性樹脂の濡れ性を高める
- (3) 接合の安定性を高めるため界面に非晶質層を生成

3. 達成手法

熱可塑性樹脂の熱溶着を可能とするために、金属表面に高密度の水酸基を導入することを表面処理技術検討の方針とした。金属表面水酸基と熱可塑性樹脂との相互作用によって、前述した第一の課題である溶融樹脂の濡れ性を改善し高い水素結合力を発現させることで高い接合強度を得る。さらにこの相互作用が高分子鎖の自由運動を制約する効果を利用して、溶着界面部の熱可塑性樹脂の結晶化進行を抑制することで、柔軟なアモルファス性の熱応力緩和層を形成して第二の課題である接合の安定化をも実現できると考えた。

金属表面に水酸基を導入する手法としては、常圧大気中で高速処理が可能な大気圧プラズマ法に着目した。

放電や熱により雰囲気ガスの一部をプラズマ化した、プラズマガス流を対象物に吹き付けることで酸化還元等の化学処理を常圧雰囲気中でおこなうのが一般的な大気圧プラズマ処理である⁽²⁾。

そのプラズマガス流中にシロキサン等の前駆体化合物を投入し、プラズマの作用で分解し生成させた化学活性の高い物質を対象物に吹き付けてポリマ化させることにより、対象物表面上にガラス等の薄膜を形成する表面改質技術が大気圧プラズマ化学気相成長 (chemical vapor deposition: CVD) 処理である⁽³⁾。励起種すなわち放電により励起した原子および分子のエネルギー準位は、雰囲気ガスの種類によって異なるものとなる。さらにプラズマガス流の下流側ではこれら励起種の緩和が進行したり、あるいは大気中の酸素、窒素、水等の分子と衝突して相手を励起したりすることで励起種のエネルギー準位は低下していく^{(4),(5)}。この性質を利用すれば前駆体物質が分解反応を生じる雰囲気コントロールし、同一の前駆体から異なる分解生成物を得ることが可能となる。結果として性質の異なるガラス薄膜を作り分けることができる。

既存の研究例として、Ihde らは前駆体物質にヘキサメチルジシロキサン (Hexamethyldisiloxane: HMDSO) を用いてアルミニウム合金 (Al 2024-T3) 表面上に大気圧プラズマ CVD 処理で形成した二種類のガラス膜の性状について報告している⁽³⁾。第一は雰囲気ガスに乾燥空気 (Air) を用いる処理条件で得られる、前駆体からの残留有機成分が少ない均質性の高いガラス薄膜である。これはアルミニウム合金の防食コーティングに適した物理的性質を有する。第二は同じ装置で雰囲気ガスに乾燥窒素 (N_2) を用い、前駆体を

プラズマガス流に混合する場所をプラズマ発生源から下流側に数 mm 移動させる処理条件で得られる、第一の膜に対し約 2.5 倍の有機成分を含む組成のガラス膜である⁽³⁾。これらガラス膜については塗料や接着剤の密着性についても研究がなされており、特に第一の膜については自動車ウィンドシールドにおけるウレタン系熱硬化接着剤の接着プライマとしての応用が提案されている⁽⁶⁾。

熱可塑性樹脂の熱溶着性についてはまだこのような検討がなされていない。当研究においては第二の膜表面の有機成分すなわち HMDSO 前駆体由来のメチル基に着目した。

ガラス表面部に存在するメチル基が大気圧プラズマ処理による酸化改質により水酸基(シラノール基)に変性されることが知られている⁽⁷⁾。

まず金属表面上に大気圧プラズマ CVD 処理でメチル基の豊富なガラス膜を形成し、次いでこれを大気圧プラズマ処理で酸化変性することで高密度の表面水酸基を有するガラス膜が得られると考えた。

4. 実験

4.1. アルミニウム合金の表面改質処理

大気圧プラズマ CVD 処理には Plasmatreat GmbH 製 Openair プラズマシステム (FG5001 plasma generator, PFW10-PAD/RD1004 plasma jet nozzle, PAD1 polymer coating controller) を用いた。

装置の概念図を Fig. 1 に示す。本装置は大気圧プラズマジェット装置をベースとしている。導電性金属の円筒に大気圧の雰囲気ガスを通しつつ、内部の絶縁電極に高電圧パルスを加えてアーク放電させることでプラズマを生成させる。このプラズマを含んだガス流を円筒先端部のプラズマノズルから対象物表面に吹き付けるのが大気圧プラズマジェット装置である。このプラズマノズルに Fig. 2 のような液体流路付きのカバーノズルを被せるように取り付け、これを介してプラズマガス流に前駆体物質を噴射混合することにより大気圧プラズマ CVD 処理をおこなうことができる。

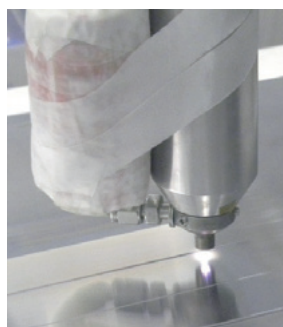


Fig. 1 Diagram of atmospheric pressure plasma CVD process principle

Table 1 Atmospheric pressure plasma CVD process conditions

Membrane type	Atmospheric pressure plasma CVD		Post processing
	Gas	Nozzle extension	
A	Nitrogen	4.5 mm	-
B	Air	-	-
C	Nitrogen	4.5 mm	Plasma oxidation
D	Air	-	Plasma oxidation

大気圧プラズマ CVD 処理を施す金属基材にはアルミニウム合金 (A1 5052) 圧延材を用いた。本合金表面には溶剤等による洗浄はおこなわず、Air を雰囲気ガスに用いて生成したプラズマガス流を吹き付けて表面に付着した油分や汚染物質を酸化除去して用いた。

次に HMDSO を前駆体物質とした大気圧プラズマ CVD 処理をおこない、基材表面にガラス薄膜を形成した。大気圧プラズマ CVD 処理は雰囲気ガス種およびノズル延長の有無が異なる二種類の条件でおこない、さらにそれぞれに対して大気圧プラズマで酸化する後処理を加えたものも作成した。こうして Table 1 に示す計 4 種類のガラス薄膜を作成した。

具体的には、第一の条件の大気圧プラズマ CVD 処理では雰囲気ガスに N_2 を用いた。加えて Fig. 3 のようにカバーノズルにシムおよびパイプ状の延長部品を追加することでプラズマガス流に前駆体が混入される位置を 4.5 mm 下流側に移動させた。こうしてアルミニウム合金表面上にガラス薄膜 (A) を形成した試料を得た。

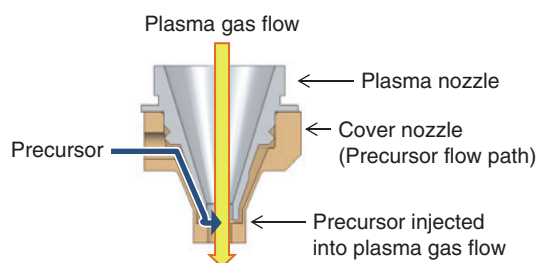


Fig. 2 Plasma CVD nozzle (original form)

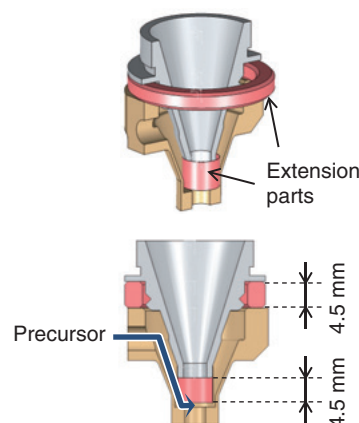


Fig. 3 Plasma CVD nozzle extension

第二の条件としては比較のために雰囲気ガスに Air を用い、延長部品を用いないオリジナル仕様のノズルを使用して大気圧プラズマ CVD 処理をおこない、ガラス薄膜 (B) を作成した。以上二つの処理はプラズマ生成条件を Plasma voltage: 283 V, Plasma current: 13 A とし、ノズル先端から基材表面までの距離 4 mm, 水平方向のノズル移動速度 20 mm/min で実施した。

さらにこれら薄膜試料 (A), (B) の表面に Air を雰囲気ガスとして生成させたプラズマガス流を前駆体の導入なしに吹き付けて残留有機成分を酸化処理した薄膜 (C), (D) をそれぞれ作成した。酸化処理はプラズマ生成条件を Plasma voltage: 301 V, Plasma current: 20 A とし、ノズル先端から基材表面までの距離 7 mm, ノズル移動速度 20 mm/min で実施した。

4.2. ガラス膜の性状分析

走査電子顕微鏡 (SEM) および原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて、ガラス膜の形状の観察および表面粗さの測定をおこなった。

陽電子ビーム法を用いた陽電子消滅寿命測定により酸化ケイ素 (SiO_2) 骨格の平均細孔半径分布測定をおこなった。陽電子線源として ^{22}Na ベースの陽電子ビームを用い、ガンマ線検出器として BaF_2 製シンチレータと光電子増倍管を用いた。

X 線光電子分光 (XPS) を用いてガラス膜表面の元素存在比を測定した。X 線元として単色化アルミニウムを用い、pass energy 160 eV でおこなった。

イオンクロマトグラフィー法を用いてガラス膜表面の水酸基密度を測定した。具体的には臭素化ケイ素化合物の溶液で表面の水酸基を誘導体化処理した試料を熱分解させ、発生したガスをアルカリ水溶液に吸収させてイオンクロマトグラフィーにて液中の臭素量を測定した。水酸基密度は基材寸法から計算した表面積当たりの数値として計算した。

4.3. 熱可塑性樹脂溶着による異種材接合

大気圧プラズマ CVD 処理したアルミニウム合金に CF RTP を熱溶着接合したラップシヤ強度試験片を作成し、接合強さの測定をおこなった。アルミニウム合金試験片としては、大気圧プラズマ処理をおこなわなかったものの、薄膜 (C), (D) を表面に形成したもの、既存のアンカ効果利用のための金属表面粗化処理を施したものをを用いた。金属表面粗化処理手法としては、6 ナイロンの射出成型用グレードで凹凸サイズが異なる四種類の処理をアルミニウム合金に施したものを選定した。一つはレーザ加工で幅および深さが約 50 μm の溝を 200 μm ピッチのグリッド状に掘り込んだもの、他の三つは陽極酸化法や酸アルカリ溶液による化学処理でより微細なサイズの粗化や細孔形成をお

こなったものである。

熱溶着接合は、金型インサート射出成形法を用いておこなった。成形は $100 \times 25 \times 2.0$ mm の短冊状アルミニウム合金試験片をキャビティ内にセットできる Fig. 4 のような専用金型を用いておこなった。キャビティ内の残空間を試験片と長手方向に 12.5 mm 重ねた短冊形とし、そこにカーボンファイバ (CF) を 15 wt% 含有した CF RTP グレードの 6 ナイロンペレットをシリンダ温度 260°C, 金型温度 160°C から 180°C, 保圧力 30 MPa で射出成型することによりアルミニウム合金板と 6 ナイロン板が熱溶着接合されたラップシヤ強度試験片を得た。

全ての試験片は一水準について $n=5$ で作成してラップシヤ強度試験に供した。

SEM およびエネルギー分散型 X 線分光法 (EDX) を用いて破断面の観察および成分元素の定性分析による破壊箇所の同定をおこなった。

4.4. 熱溶着界面部の 6 ナイロン分析

微小角入射 X 線回折 (Grazing Incidence X-ray Diffraction: GIXD) 法による 6 ナイロンの結晶化状態の観察は大型放射光施設 Spring-8 の BL46XU 第 1 ハッチ内に設置された HUBER 社製多軸回折計でおこなった。試料は基材表面に 6 ナイロン薄膜層を溶液スピンコート法で形成した後に熱溶融し再凝固させて作成した。アルミニウム合金基材の圧延製法に起因する表面の凹凸が測定精度を損なうため、基材には平滑な Si ウエハを用いた。回折角に対する強度プロファイルを結晶成分と非晶成分に分離することで、結晶化度を算出した。

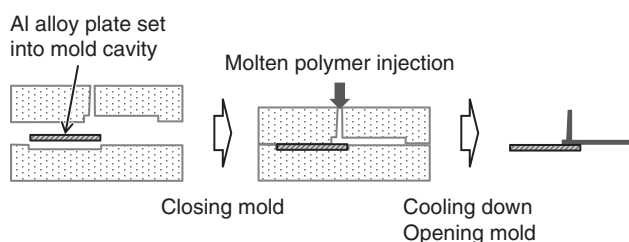


Fig. 4 Process of joining by metal insert polymer injection molding method

5. 結果と考察

5.1. 改質表面の性状分析

まず、ガラス薄膜 (A) および (B) を分析し、それぞれのガラス骨格の物理的性状を比較した。薄膜 (A) および (B) 表面の SEM 写真を Fig. 5 に、薄膜 (A) 表面の AFM 観察の結果を Fig. 6 に示す。二種類の薄膜に対する陽電子ビーム法を用いた陽電子消滅寿命測定によって得たガラスの

Table 2 Property of atmospheric pressure plasma CVD glass membrane surface

Membrane type	Process conditions			Membrane properties		
	Atmospheric pressure plasma		Post processing	C/Si content (atomic %/atomic %)	Water contact angle (°)	Hydroxyl group density (mol/cm ²)
	Gas	Nozzle				
A	Nitrogen	Extended	-	1.3	160	Unmeasured
B	Air	Normal	-	0.8	80	Unmeasured
C	Nitrogen	Extended	Oxidation	0.3	2.5	1.4×10^{-9}
D	Air	Normal	Oxidation	0.6	43	2.6×10^{-10}

SiO_x 分子骨格の平均細孔分布の比較を Fig. 7 に示す.

薄膜 (B) は平滑な表面を有する均一な膜構造を有し SiO_x 骨格の孔径分布にもシャープなピークが存在した. 薄膜 (A) は AFM で計測した表面粗さの平均二乗根値が約 20 nm の微粒子からなる構造だった. 薄膜 (A) のガラス骨格は規則性に乏しいブロードな SiO_x 孔径分布を示し, 薄膜 (B) に比べて規則性に乏しい骨格構造からなることを示唆した. この膜構造はマクロ的には表面積が大きく, ミクロ的には分子構造の規則性に欠け不安定であるため酸化改質による化学的な組成の変化を生じやすい構造であると推測される.

次いで, 薄膜 (A), (B), (C), (D) 表面の化学組成および性状の比較をおこなった. それぞれの薄膜の作製条件, XPS による化学組成分析, 水接触角および表面水酸基密度を Table 2 に示す.

C/Si 比のデータからわかるように, 薄膜 (A) は薄膜 (B) に対して HMDSO のメチル基由来の炭素成分を約 2 倍量多く含んでいた. 大気圧プラズマ処理で酸化することによる薄膜 (A) から (C) への化学組成の変化すなわち炭素原子の減少の割合は, 薄膜 (B) から (D) のそれに比較して大

きなものであった. これは薄膜 (A) の表面積が大きく酸化を受けやすいガラス骨格であったためと考えられる. 結果として薄膜 (C) の表面水酸基の密度は薄膜 (D) のそれより 5 倍以上高かった.

水接触角のデータからわかるように, 薄膜 (A) は微細な凹凸からなる物理的表面形状との相乗効果によって超撥水性を示した. 一方これを酸化して得られた薄膜 (C) は超親水性を示した. 熱溶解した 6 ナイロンに対しても Fig. 8 の写真のように同様の濡れ性の変化を示した.

5.2. 熱可塑性樹脂溶着強度の評価

インサート射出成形用の金型を使用して, 未処理のアルミニウム合金基材表面および薄膜 (D) に接触する形で 6 ナイロンを射出成型しても接合は得られず, 金型を開放すると両者が分離した状態で取り出された. 一方で薄膜 (C) の処理を施したアルミニウム合金基材からは Fig. 9 のように良好に溶着接合した試験片が得られた. また, アンカ効果利用のための金属表面粗化処理手法でアルミニウム合金

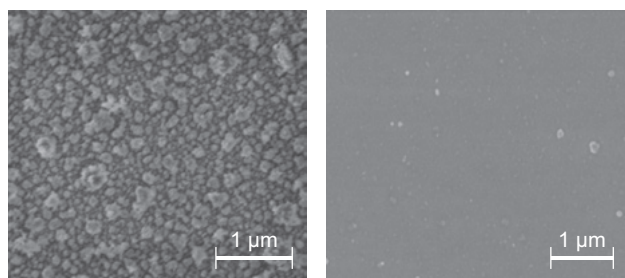


Fig. 5 SEM image of membrane A (left) and membrane B (right) surfaces

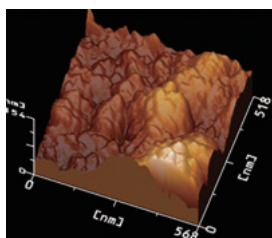


Fig. 6 AFM image of membrane A

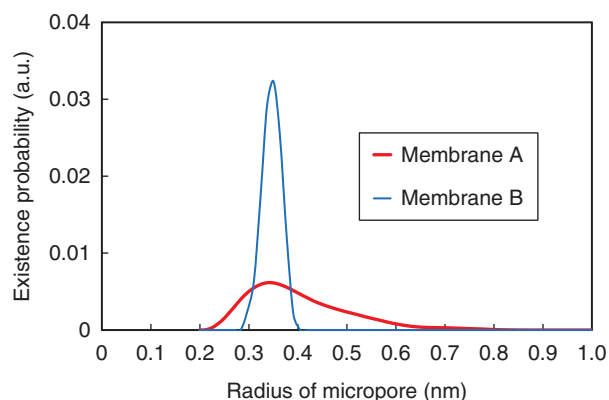


Fig. 7 Positron annihilation lifetime spectroscopy of atmospheric pressure plasma CVD glass membrane

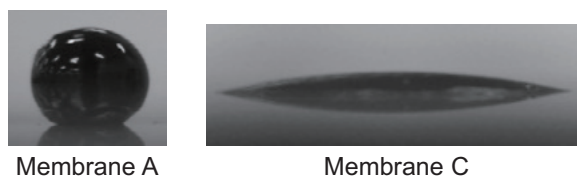


Fig. 8 Molten polyamide 6 behavior on CVD glass membrane surface

基板に処理したものについても接合した試験片が得られた。これらのラップシヤ強度試験結果の比較を Fig. 10 に示す。薄膜 (C) 処理が物理的アンカ効果と同等の溶着接合強度を実現していることが確認された。

ラップシヤ強度試験で破断させた溶着接合試験片の SEM 写真を Fig. 11 に示す。アルミニウム合金表面に CF RTP の破片が付着していることが観察された。また CF RTP 由来の炭素および CVD ガラス膜由来のケイ素の存在が EDX 分析でアルミニウム合金側の破断面上に確認された。これらのことは溶着接合部の破壊が溶着界面部の剥離やガラス層の破壊ではなく CF RTP 内部の材料破壊で生じていること、すなわち CF RTP の層間強度以上の熱溶着強度が得られたことを示している。

5.3. 熱溶着界面部の 6 ナイロン結晶化状態分析

薄膜 (C) 処理表面における熱可塑性樹脂熱溶着のメカニズムについてより詳細な解析をおこなった。

溶着界面領域とバルク領域それぞれにおける、熱可塑性樹脂の結晶化の度合いを測定評価できる GIXD 法を用いて、6 ナイロンの結晶化状態評価をおこなった。得られた結果を Fig. 12 に示す。グラフの横軸は基材表面から測定位置までの 6 ナイロン膜厚を示している。また縦軸は観察された X 線結晶回折強度の全散乱強度に対する比を示しており、大きい数値はその部分の 6 ナイロンの結晶化度が高いことを意味する。無処理の Si ウエハ表面に熱溶着された 6 ナイロンはウエハとの接触界面付近まで結晶化が進行していた。一方で薄膜 (C) 処理された表面の場合は界面



Fig. 9 Specimen of joined CF RTP and Al alloy

から厚さが数百 nm に達するアモルファス性の 6 ナイロンの層の存在が確認された。

5.4. 熱可塑性樹脂溶着安定性の確認

気温 -30°C および 80°C の雰囲気それぞれ 30 分の暴露を繰り返す冷熱サイクル環境に、溶着接合品を 200 サイ

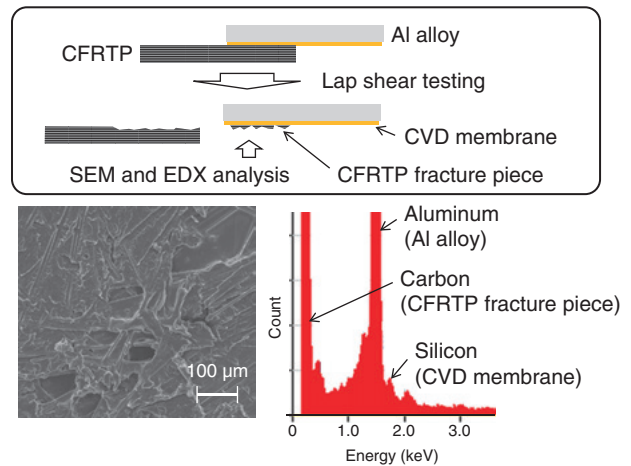


Fig. 11 SEM image (left) and EDX spectrum (right) of CF RTP fracture piece on Al alloy substrate

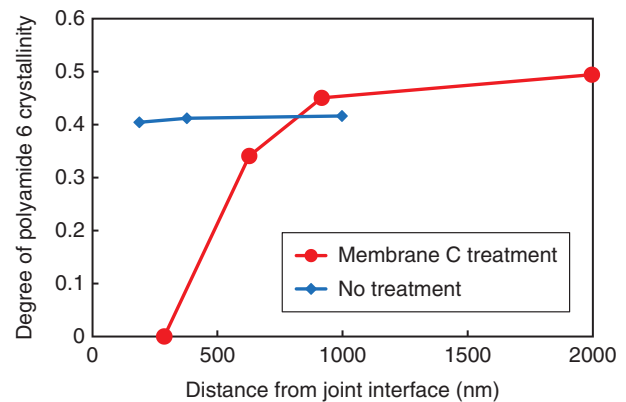


Fig. 12 Suppression of polyamide 6 crystallization by CVD membrane surface effect

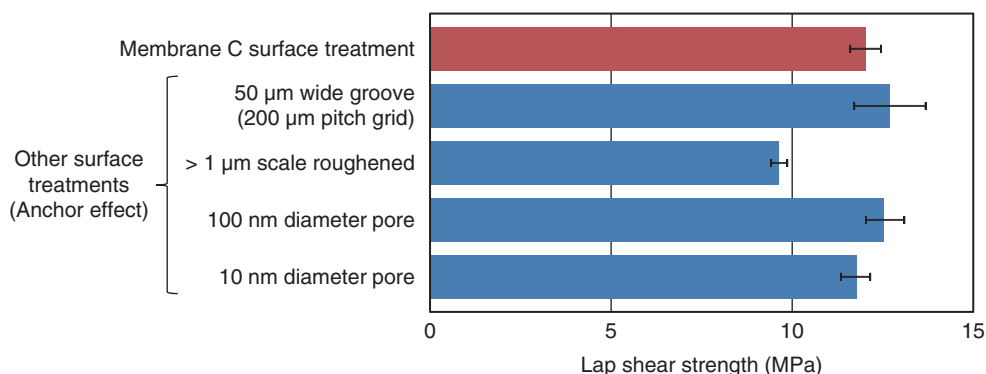


Fig. 10 Joining strength of Al alloy and CF RTP joined by insert injection molding

クル暴露した。Fig. 13 に示すように接合強度の変化は見られなかった。さらに6ナイロン板を熱溶着した試料に対し、35℃の5%中性塩水噴霧、気温60℃で湿度25% RHの乾燥雰囲気暴露および50℃で98% RHの湿潤雰囲気暴露を1サイクルとした複合サイクル試験を60サイクル実施したが溶着部の剥離は観察されなかった。

以上より、溶着界面に形成された柔軟なアモルファス層による熱応力緩和の効果によって、安定した溶着接合が得られたことが確認された。

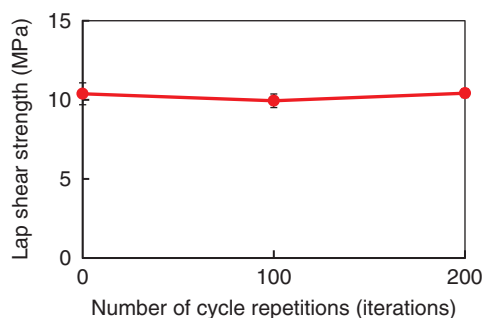


Fig. 13 Joining strength after cooling and heating cycle

6. まとめ

大気中での気相プロセスでアルミニウム合金表面にガラス薄膜層を形成する表面改質をおこない、得られた表面の性状および熱可塑性樹脂の溶着性を評価した。

- (1) 大気圧プラズマ CVD 処理において、プラズマが前駆体物質を分解する雰囲気を調整することによって有機成分を含むガラス膜を形成した。これを大気圧プラズマ処理で酸化変性することにより表面水酸基密度の高い薄膜層が得られた。
- (2) この表面は熔融状態の6ナイロンの濡れ性が高く水素結合を効果的に利用でき、熱溶着接合で機械的なアンカ効果並みの高い接合強度が得られた。
- (3) 溶着界面部近傍に6ナイロンのアモルファス層が形成された。これは熱熔融した熱可塑性樹脂の高分子鎖の運動性が固体表面水酸基との相互作用によって阻害され結晶化が抑制される効果による。結晶化したバルク部分に比べて柔軟性を有するアモルファス層が異種材料間の熱応力を吸収緩和することで、金属表面との剥離を防止し熱溶着接合を安定化した。

参考文献

- (1) 高橋淳:環境負荷低減を目指した複合材料技術の進展 3. CFRP の LCA と省エネルギー効果, 材料, Vol. 57, No. 8, p. 852-855, (2008)

- (2) Lommatzsch, U., Pasedag, D., Baalman, A., Ellinghorst, G., Wagner, H.-E.: Atmospheric Pressure Plasma Jet Treatment of Polyethylene Surfaces for Adhesion Improvement, Plasma Processes and Polymers, Vol. 4, Issue Supplement 1, p. S1041-S1045, (2007)
- (3) Lommatzsch, U., Ihde, J.: Plasma Polymerization of HMDSO with an Atmospheric Pressure Plasma Jet for Corrosion Protection of Aluminum and Low-Adhesion Surfaces, Plasma Process and Polymers, Vol. 6, Issue 10, p. 642-648, (2009)
- (4) Dowling, D. P., O'Neill, F. T., Langlais, S. J., Law V. J.: Influence of dc pulsed Atmospheric Pressure Plasma Jet Processing Conditions on Polymer Activation, Plasma Process and Polymers, Vol. 8, Issue 8, p. 718-727, (2011)
- (5) 田嶋聡美:パワーデバイス実装に用いられる異種材料のプラズマ接着前処理, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 19, No. 2, p. 111-119, (2016)
- (6) USP, US 7517561 B2 (2009)
- (7) Murakami, T., Kuroda, T., Osawa, Z.: Dynamics of polymeric solid surfaces treated with oxygen plasma: Effect of aging media after plasma treatment, Journal of Colloid and Interface Science, 202, p. 37-44, (1998)

■ 著 者 ■



秋田 浩司



黒田 真一



河井 貴彦

セルロース系バイオエタノール研究 ー育種とセルフクローニングによる高性能発酵菌の 構築と全体プロセス検討ー

Research on Production of Cellulosic Ethanol

– Development of High-Efficiency Yeast Strain using Mutagenesis and Selection and Self-Cloning,
and Study of Entire Process –

土 田 芳 樹*

Yoshiki TSUCHIDA

塚 越 範 彦*

Norihiko TSUKAGOSHI

要 旨

ABSTRACT

バイオマスの非可食部を原料とする第二世代バイオエタノール生産プロセスの高効率化に必要な、阻害物質存在下で高い発酵収率を示す発酵菌を構築した。構築には育種とセルフクローニングの組合せを用い、両者の組合せが発酵菌構築に有用であることを示した。セルフクローニングは、非組換え菌としての取扱いが可能な範囲での遺伝子組換えである。

バイオマス糖液を利用した育種により、糖液中の阻害物質への耐性とエタノール発酵収率の両者を高めた。その育種株をベースにトランスアルドラーゼおよびアルコールデヒドロゲナーゼ遺伝子をセルフクローニングで強化した株は、より高濃度のエタノール発酵が可能となった。

全体プロセス検討では、阻害物質であるフェノール類の生成を抑制するバイオマス前処理条件を見出し、同前処理条件および構築した発酵菌を用いたプロセスで、1 dry-tonのコーンストーバから 213 L のエタノールを生産可能であることを示した。

A fermentation organism capable of producing a high fermentation yield in the presence of inhibitors, necessary for the realization of increased efficiency in the process of production of second-generation bioethanol from inedible plant biomass, has been developed. The construction of the organism involved a combination of mutagenesis and selection and self-cloning, and results indicated the effectiveness of this combination in the creation of fermentation organisms. Self-cloning is a form of genetic modification implemented within a scope that makes it possible to treat the organism as non-genetically-modified.

Mutagenesis and selection using biomass hydrolysates increased both the organism's tolerance to inhibitors in hydrolysates and its ethanol fermentation yield. Using the selected strain as a base, genes for the expression of transaldolase and alcohol dehydrogenase were enhanced by self-cloning. The developed strain was able to produce a higher concentration of ethanol.

An examination of the entire process led to the discovery of a biomass pre-treatment condition that would control the production of phenols, which act as inhibitors. A process using this pre-treatment condition and the developed fermentation organism would be able to produce 213 L of ethanol from 1 dry-ton of corn stover.

1. ま え が き

化石資源枯渇の懸念や CO₂ 排出量削減の必要性への対応として、オイルリファイナリに替わるバイオリファイナリが提唱されている。バイオリファイナリは再生可能資源であるバイオマスを出発原料とし有用物質を生産するプロセスであるが、最も開発が進んでいるプロセスの一つに、バイオエタノール生産プロセスがある。サトウキビやトウ

モロコシの可食部を利用するバイオエタノール（第一世代）に続き、非可食部を利用するセルロース系バイオエタノール（第二世代）も実用化研究が進んでいる。バイオマスを分解して得た糖を菌体で発酵する糖化発酵法による、年産数千万ガロンの工場が世界では 2014 年から 2015 年にかけて複数開所している。我々は糖化発酵法によるセルロース系バイオエタノールの研究を行い、全体プロセス効率向上のために、阻害物質耐性が向上した発酵菌を構築した。

*基礎技術研究センター

2. エタノール生産プロセス概要

2.1. バイオマスの構成

植物バイオマスは主にセルロース、リグニン、ヘミセルロースから構成される (Fig. 1)。セルロースは六炭糖であるグルコースが β -1,4結合で強く結合してできた高分子であり、いわゆる繊維質として植物の構造を支える。セルロースは、その分解酵素であるセルラーゼを持つ生物が少なく、分解されにくい。

リグニンは六員環を多く含む高分子であり、セルロースを包むように強固に一体化して植物体を構成している。ヘミセルロースはリグニンとセルロースを結合する役割を持つとされる。ヘミセルロースの構造は一部に五炭糖を含む。

2.2. プロセス構成: 前処理, 糖化, 発酵, 濃縮

バイオエタノール生産プロセスの概要を Fig. 2 に示す。

サトウキビの絞り汁に含まれるショ糖やグルコースは、多くの発酵菌が直接利用できる。トウモロコシの可食部に含まれるデンプンはグルコースが α -1,4結合で弱く結合してできており、安価な酵素であるアミラーゼでの処理により発酵菌が利用できる。このため第一世代バイオエタノール生産プロセスは比較的容易である。

第二世代バイオエタノール生産プロセス (以下、第二世代プロセス) では、セルロースとリグニンやヘミセルロースが一体化した構造を破壊し、さらにセルロースを分解してグルコースとして利用する。第二世代プロセスの難しさはこのバイオマスの強固な構造に起因する。

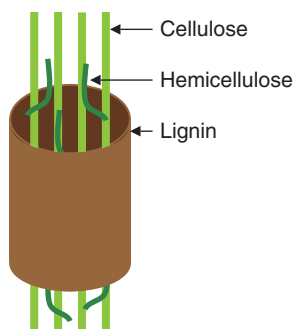


Fig. 1 Illustration of biomass structure

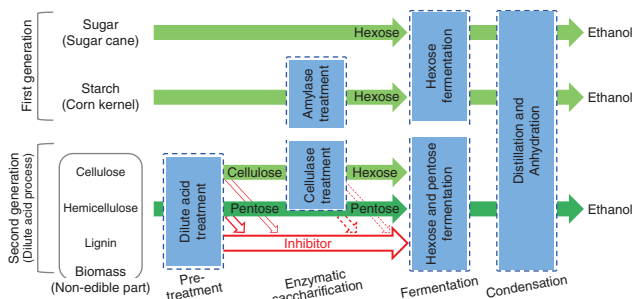


Fig. 2 Schematic diagram of bio-ethanol production process

Table 1 Characteristics of fermentation inhibitors

Category	Description	Inhibition mechanism	Countermeasure		
			Pre-treatment	Fermentation condition	Genetic modification
Phenols	Hydrophobic	Damage to membrane	Suppress production	—	—
Aldehydes	Oxidative	Oxidation of enzymes, etc.	—	—	Overexpression of ADH to reduce aldehydes
Organic Acids	Dissociation depends on pH	Damage due to change in intracellular pH	—	Fermentation pH control	Overexpression of TAL subject to damage by acetic acid

第二世代プロセスはガス化法と糖化発酵法に大別される。糖化発酵法はいくつかの工程に分けられる。

前処理工程ではリグニン分解を伴う。熱化学的手法が有効であり、水熱処理やアルカリ処理、酸処理が用いられる。

糖化工程ではセルラーゼを水溶液として添加し、セルロースをグルコースに分解する。セルラーゼが高価であることが糖化工程の課題の一つである。

前処理および糖化工程では、ヘミセルロースに主に由来する五炭糖も生成する。バイオマスを最大限利用してプロセス効率を向上するために、第二世代プロセスでは五炭糖を発酵に利用することも必須とされる。多くの生物は五炭糖を効率的に利用できないため、遺伝子組換えや育種などの遺伝子改変が必要となる。発酵工程では六炭糖および五炭糖をエタノールに変換する。

濃縮工程では、蒸留および脱水が行われる。蒸留には多くの熱エネルギーが必要なため、発酵液のエタノール濃度は高いほうが良い。

2.3. 発酵阻害物質

前処理工程でリグニンやヘミセルロースが様々な化学物質に変性する。生じた五炭糖や六炭糖の一部が過分解される。これら化学物質には発酵工程で菌の働きを大きく阻害する阻害物質が含まれる。阻害物質生成の経路を模式的に Fig. 3 に示した。阻害物質は発酵工程の収率を大きく低減するため、エタノール生産プロセス全体への影響が大きい。Table 1 に阻害物質の種類と特性を簡単にまとめた。

発酵阻害物質のうち酢酸は、トランスアルドラーゼ

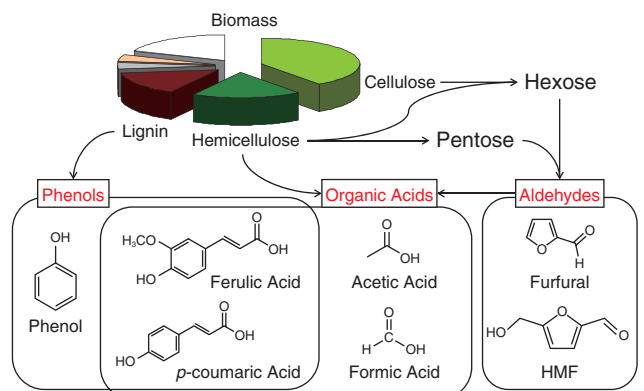


Fig. 3 Schematic diagram of production of fermentation inhibitors

(TAL)と呼ばれる五炭糖資化に重要な酵素の活性を低下させることが知られている。一方でアルコールデヒドロゲナーゼ (ADH) という酵素が、アルデヒド類を還元し弱毒化させることが分かっている⁽¹⁾。

2.4. バイオマス種類

第二世代プロセスでは原料となるバイオマスとして、稲わらや小麦わら、トウモロコシの茎や葉であるコーンストーバ、サトウキビの搾りかすであるバガスなどの農業残渣が主に研究されている。

第二世代プロセス研究を最も強力に推進してきた米国では、トウモロコシの茎や葉といった農業残渣であるコーンストーバの利用が見込まれている。国連食糧農業機関の公表データ⁽²⁾から推計すると、コーンストーバは稲わら、小麦わらについて世界の農業残渣で三番目に多いことが分かり、第二世代プロセスの主流となる可能性が高いと考えられる。

2.5. 前処理手法

前処理手法は水熱処理、アルカリ処理、希硫酸処理などが知られており、米国では希硫酸処理法の研究が進んでいる。希硫酸処理の特徴として、ヘミセルロースの分解が容易に進み、ヘミセルロース分解酵素が不要である一方、阻害物質の酢酸が多く発生することが知られている。またアルデヒド類も多く確認され、これは五炭糖および六炭糖の過分解によることが、熱分解シミュレーションで確認されている。

前処理およびその後の糖化工程では、バイオマスからの糖の収量を向上させると、同時に阻害物質濃度も向上する傾向にある。この発酵収率に関するトレードオフ関係には、前処理および糖化工程と発酵菌の阻害物質耐性が相互に関連しながら寄与するため、一体的な改良が必要である。

3. 本研究の対象と手法

3.1. 本研究の目的

第二世代プロセスでの大きな課題として、糖化酵素が高価であることが挙げられる。本研究では市販酵素の現状性能を前提とし、その使用量を減らすことを狙った。それには強力な前処理による糖化の促進が必要だが、同時に阻害物質濃度が増えることとなる。第二世代プロセスの効率向上のために、発酵菌の阻害物質耐性強化、すなわち阻害物質存在下での発酵収率向上を本研究の目的とした。

3.2. バイオマス種と前処理手法の選択

バイオマスの種類や前処理手法の選定により、阻害物質や糖など発酵に供される糖液の組成が決まり、さらに発酵工程で求められる発酵菌の特性が定まる。発酵菌の阻害耐

性強化には、ターゲットとするバイオマス種と前処理を決定する必要がある。

本研究ではコーンストーバをターゲットとし、その前処理手法は希硫酸処理を選択した。

3.3. ベース菌選択

発酵菌構築にあたってのベース菌選択に際して、プロセス効率向上に必要な五炭糖資化能を天然に持つことを重視した。通常の菌は五炭糖資化能を持たないため遺伝子組換えで外来遺伝子を導入する必要があるのに対し、*Meyerozyma guilliermondii* (以下、本菌) は天然に五炭糖資化能を持つため非組換え菌としての構築が可能である。生物工学的な遺伝子組換えを行う場合でも、菌体が天然に持つ遺伝子のみを対象とする限りはセルフクローニングと呼ばれ、遺伝子組換え生物を規制するカルタヘナ法の対象から除外されるため非組換え菌扱いとなる。非組換え菌扱いであれば、社会的に受容されやすく行政手続きが簡便であるなど世界的にも利点があるため、本菌を発酵菌構築のベース菌として選択した。

3.4. 代謝経路強化手法

発酵菌体内の代謝経路を改変することで、糖や阻害物質に対する発酵菌の反応を改善することができる。本菌のエタノール発酵経路を簡略化して Fig. 4 に示す。

本研究では、発酵菌の阻害物質耐性強化の手法を、次の通りとした。まず阻害物質を含むバイオマス糖液で育種を行い、更なる強化が必要な個所のプロモータを遺伝子組換えし、組換えによる代謝バランスの乱れを調整するため再度育種を行う。プロモータは特定の酵素の生体内での発現量をコントロールするため、遺伝子組換えにより所望の酵素の発現量を増やせる一方で、代謝経路ネットワークのバ

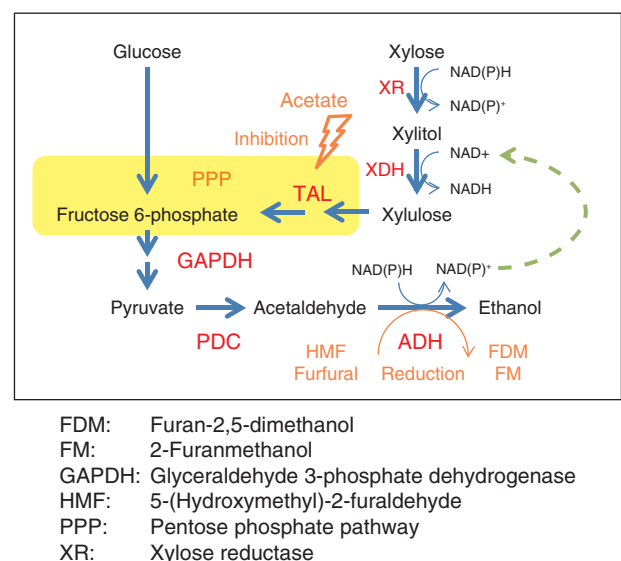


Fig. 4 Metabolic pathway of *Meyerozyma guilliermondii*

ランスが崩れることが予想される。崩れたバランスを育種によって整え、高性能な発酵菌が獲得できると考えた。

3.5. 育種

植物や動物の品種改良では、突然変異や交配を利用し望ましい特性を持つ生体を選択しているが、菌体でも同様の改良、すなわち育種が可能である。DNA に変異が導入された多数の菌体を例えば六炭糖を含まず五炭糖のみを含む培地で育てると、多くの変異体のうち五炭糖を資化できる株のみが生き延びることになる。さらには資化速度の速いものが他を圧倒して育つため、変異体の中でもより望ましい性質の株を取得できる。

育種の速度を上げるには、突然変異を人為的に高頻度起こす必要があるが、不均衡変異導入法によりそれが可能である。生体内では DNA 複製時に複製エラーが恒常的に起きている。この校正機能の人為的な抑制により、不均衡変異法では高頻度に、かつ DNA のランダムな位置に突然変異を起こすことができる。不均衡変異導入法では複製エラーをより高頻度起こす改良型の DNA 修復酵素、または同等の効果を持つ変異剤カクテルを用いる。

本研究ではバイオマス由来糖液を作成し、育種に用いた。これにより実際のバイオマス糖液に耐性を持つ菌体を選択できるため、プロセス適合性の高い菌体の構築が可能になる。代謝ネットワーク調整のための再育種も不均衡変異導入法で行った。なお不均衡変異導入法による育種は、開発元である共同研究先の株式会社ネオ・モルガン研究所が実施した。

3.6. セルフクローニング

実バイオマス糖液を用いて育種した発酵菌の阻害物質耐性をさらに向上するために、セルフクローニングの範疇で遺伝子組換えを行った。

TAL は五炭糖をエタノール発酵する経路に存在するが (Fig. 4)、酢酸存在下での活性低下がパン酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) で報告されている⁽³⁾。酢酸存在下での TAL の振舞いが、本菌でもパン酵母と同様であることをメタボローム解析から推定した。データベース⁽⁴⁾上のパン酵母の TAL 配列と最も相同性が高い本菌の遺伝子配列を本菌の TAL として発現を強化することとした。TAL 強化により、酢酸耐性向上、増殖促進 (五炭糖資化促進)、発酵収率の向上を狙った。なおメタボローム解析用サンプルは、CS 糖液での発酵開始後 24 時間時点と 72 時間時点の培養液をそれぞれ採取し、メタノール添加による生体反応停止を行った。定量には内部標準法を採用した。

パン酵母の ADH は大別して 8 種類あることが知られている⁽⁴⁾。本菌で強化する ADH の選定にあたっては、反応が正方向であること、アルデヒド類還元能を持つこと、補酵素の NADH 依存性が推定されることを考慮し、パン酵

母の ADH1 に相同性の高い本菌の遺伝子配列を選定した。ADH の強化により、アルデヒド耐性向上と発酵収率の向上を狙った。

TAL および ADH 強化は、次の手順で行った。フルオロオロチン酸含有プレートで、自然変異により本菌のウリジン要求性株を得た。ウリジン要求性株はオロチジン 5'-リン酸デカルボキシラーゼをコードする遺伝子 *ura3* に変異が入っていると考えられ⁽⁵⁾、*ura3* の修復によるウリジン要求性の解除および TAL、ADH の強化を同時に相同組換えで行うべく、Fig. 5 に示す DNA 断片を導入した。TAL には定常的かつ強力な発現のためにグリセルアルデヒド-3-リン酸デヒドロゲナーゼのプロモータを採用し、ADH にはキシロース存在時の発現強化を狙ってキシロースレダクターゼのプロモータを用いることとした。プロモータは開始コドン上流の 1000 bp とし、ターミネータは終止コドン下流の 400 bp とした。形質転換には Zymo Research 社の Frozen-EZ Yeast Transformation II を用いた。

3.7. 育種およびセルフクローニングの効果

本研究では当初、稲わらをアンモニア水溶液で熱処理したバイオマス糖液 (RS 糖液) を用い、育種を行った。育種により、キシロースやアラビノースなどの五炭糖資化能の向上、発酵副生成物の低減、TCA 回路への炭素源流入制限による菌体増殖抑制およびエタノール生産量増大、抗酸化物質の発現量増大などの効果があったことが、育種前後の株のメタボローム解析から分かった。

上記育種株に、セルフクローニングによる TAL および ADH 強化を行った。TAL および ADH の発現量がそれぞれ 2 倍、1000 倍程度に増加したことを、同様のセルフクローニングを行った株の Real Time PCR 試験で確認した。Real Time PCR のサンプル調整は、RNA 抽出および DNase 処理に RNAqueous-4PCR Kit、cDNA 作成に High Capacity RNA-to cDNA Kit を用い、RNA 定量に Fast SYBR Green Master Mix Kit を用いた。

セルフクローニング株のメタボローム解析からは、ペントースリン酸経路 (PPP) が促進されていることが分かり、TAL 強化の効果が確認された。同解析からは更に、XDH が PPP のボトルネックとなっていることが示唆された。今回の ADH 強化では NAD⁺ 供給量を増やし XDH の活性

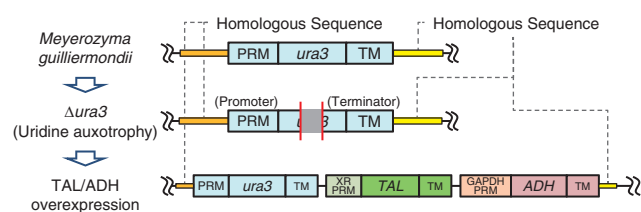


Fig. 5 Schematic diagram of DNA segment used for self-cloning

向上を狙った (Fig. 4) もの、必ずしも目論見通りとならなかったことが示唆された。ADH の発現量が 1000 倍程度に増大しているにも関わらず XDH のボトルネック解消が見られなかったことから、今回強化した ADH が実際には NADH 依存性でなかったと推定される。

強化した ADH の発現量からは、発酵菌の代謝に何らかのアンバランスが生じることが予想されたが、実際にセルフクローニング株数株のエタノール耐性が全て低下していることが分かった。エタノール耐性低下のメカニズムは現時点で不明だが、別の複数の TAL および ADH 強化株でも同様の傾向を示していることから、今回のセルフクローニング工程が株の代謝バランスを崩したことが強く示唆された。このような代謝のアンバランス解消を狙い、次に再育種を行った。

4. 発酵菌の性能

4.1. 構築した発酵菌の性能

セルフクローニング株のエタノール耐性低下を受け、エタノール耐性付与を主な狙いとした再育種を行った。育種前、育種後、セルフクローニング後、再育種後の各株の発酵収率を Fig. 6 に示す。発酵試験には 20 w/w% のコンストーバを希硫酸処理した糖液を用いた。糖液は試薬添加分も含めてグルコースを 63.2 g/L、キシロースを 34.5 g/L 含むため、この糖液からのエタノールの理論収量は 49.96 g/L となる。発酵は固液分離後の清澄液を pH6.0 に調整した糖液で 96 時間行った。

TAL および ADH のセルフクローニングのみでは、PPP 促進、エタノール耐性低下など、正負両者の効果により限定的だった発酵収率の向上が、再育種により促進されたものとする。遺伝子組換えと育種の組合せによる発酵菌性能の向上を目指した本研究コンセプトの正しさが示されたと言える。

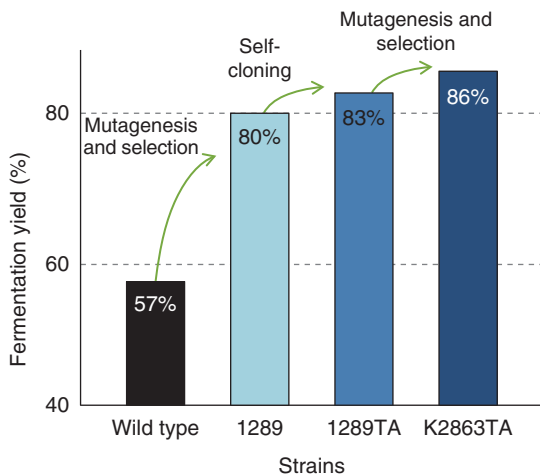


Fig. 6 Increase in fermentation yield by development of strain

4.2. スケールアップ時の性能

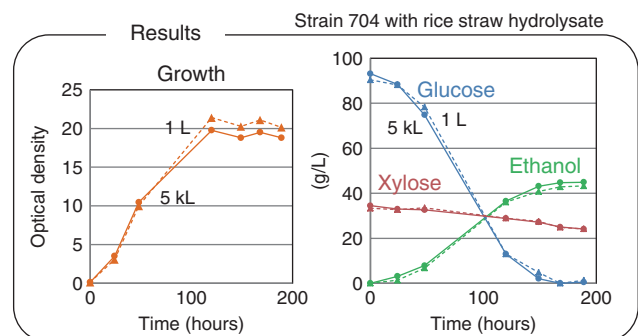
本研究では 5 kL 容量の発酵槽を含むエタノール生産プロセスを構築した。発酵工程のスケールアップでは、槽内温度の不均一性、攪拌やタンク下部の高圧による菌体へのダメージなどが問題となりうる。5 kL プロセスでは 1289 株と同様に RS 糖液で育種した株を用い、RS 糖液で発酵を行ったところ、対照区の 1 L スケール試験とほぼ同等の結果を示した (Fig. 7)。本菌を用いて少なくとも 5 kL までのスケールアップが可能であることが確認された。

4.3. 育種および遺伝子強化の方向性と発酵菌性能向上

育種により構築した発酵菌の一株を用いて、希硫酸処理コンストーバのスラリーでの発酵試験を行った。さまざまな糖液濃度での試験のため、10% 以上の糖濃度のものは、試薬糖を添加して調整した。Fig. 8 に示す通り、糖濃度が高くなるにつれて発酵収率は低下する。これは糖液中の阻害物質が増加することと、生成物阻害、すなわち自らが生産するエタノールによる阻害を受けること、両者の影響による。なお図中のエタノール濃度のラインは、発酵後の糖液に含まれるエタノール濃度を示す。

発酵収率と糖濃度を変化させた場合に、全体プロセスコストが一定値となるラインを Fig. 8 に示した。このラインに近いほど低コストでのエタノール製造が可能になるため、発酵収率のラインと最も近い糖濃度 (8%) の糖液を用いて、セルフクローニング株の再育種を行った。その結果、同糖濃度での発酵収率の向上に成功した。

生成物阻害への対応として、セルフクローニング株に高エタノール濃度耐性を選択圧とする再育種を、糖濃度 11% の糖液を用いて行った。その結果生産するエタノール濃度の向上が見られた。これらの事例からは、発酵菌の構築に



Experiment condition

Fermentation scale	1 L	5 kL
Jar size	2 L vol.	5.5 kL vol.
Biomass	Rice straw	
Sugar conc.	12.2 w/w%	
Agitation	Rotor blade	Pump circulation

Fig. 7 Comparison of 1 L- and 5 kL-scale tests

において、糖液組成や濃度、生産させたいエタノール濃度などをあらかじめ設定する必要性が示されたとともに、設定した条件に沿う形での発酵菌性能向上が図れることが示された。

4.4. ストレス応答と発酵菌性能向上

トランスクリプトームとDNA変異解析、メタボローム解析結果を統合し、代謝系のボトルネックを解明する代謝流れ解析を試みた。その結果、構築した発酵菌が五炭糖資化の際にストレス応答状態であることが示唆された。ストレス応答反応は阻害物質などのストレスに対して菌体の生存を図るものであるが、生成物による阻害もこのストレスの一因となる。

生成物阻害ストレスに対して応答せず、最終的に自らが生産したエタノールにより死滅して発酵が終了する現象が、高濃度のエタノール発酵を行う日本酒用パン酵母で確認されている。このような生成物阻害によるエタノール生産自主規制を解除する、すなわち強制的にエタノール生産を継続させることにより、高濃度エタノールを生産する発酵菌が構築できると考えられる。その試みの一つとして、TAL および ADH に加えて Fig. 4 に示すピルビン酸デカルボキシラーゼ (PDC) を強化し、エタノール生産量の向上を狙った。PDC が TAL および ADH 強化後のボトルネックとなっていることがメタボローム解析により示唆されたためである。その結果、PDC の強化前に対して生産エタノール量が向上しており (Fig. 8)、エタノール生産自主規制の一部が解除できた可能性がある。

上記エタノール生産の自主規制と併せて他の阻害物質によるストレス応答を解除することで阻害物質やエタノール存在下でもエタノール発酵を継続する菌体が構築でき、エタノール収率の更なる向上が可能と考えられる。

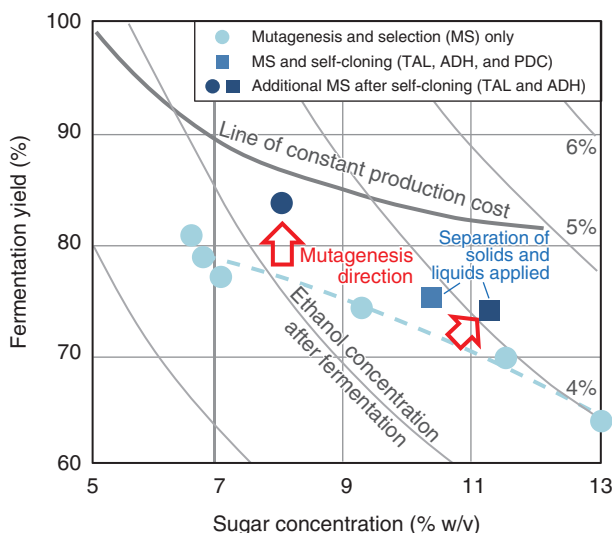


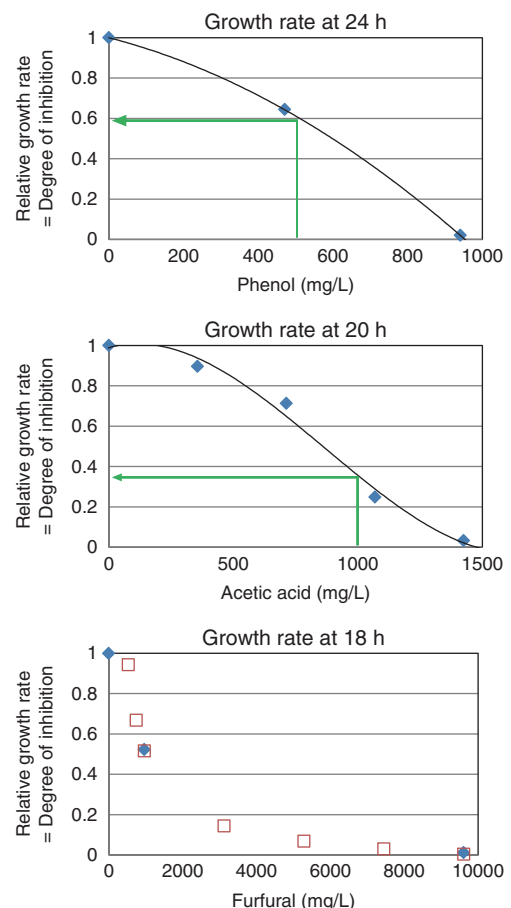
Fig. 8 Dependence of fermentation yield on sugar concentration

5. 発酵プロセスと全体収支

5.1. 阻害物質許容濃度の推定と前処理条件決定

Table 1 に示した阻害物質について、本菌の増殖を遅らせる効果を定量化した。

まず各阻害物質単独での増殖阻害効果を、次の様に数値化した。増殖阻害効果がないと考えられる合成培地に、各阻害物質をいくつかの濃度で添加し、その阻害度を調べた (Fig. 9)。Table 1 の通りフェノール類、アルデヒド類、有機酸類では阻害メカニズムが異なることが、添加濃度と一定時間後の菌体数の関係を表す曲線の違いに反映されている。これら曲線から、各阻害物質による増殖への影響を読み取ることができる。例えば培地に含まれる 500 mg/L のフェノールの影響により、増殖速度が合成培地での 0.6 倍程度になる。同様に 1000 mg/L の酢酸の影響により増殖速度が 0.35 倍となるが、培地に両者が含有される場合は複合的な影響がその積、すなわち $0.6 \times 0.35 = 0.21$ 倍で近似できることが分かった。この様にして、糖液が含有する阻害物質濃度を測定することにより、本菌の増殖を遅ら



Vertical axes indicate standardized growth rate.
(Culture OD with X mg/L inhibitor ÷ Culture OD without inhibitor)
Typical examples of phenols, aldehydes, organic acids are shown.
Optical density (610 nm) at ca. 20 hours was measured.
Organic acid concentration was multiplied by the dissociation constant for estimation of the concentration upper limit, in order to reflect the actual inhibition effect.

Fig. 9 Estimation of upper limit for inhibitor concentration

Table 2 Process conditions

Pre-treatment	Corn stover	Dry biomass ground to 3 mm pieces Mix at ratio of biomass : 2.5 % w/v Dilute acid = 1:2 Maintained at 170°C for 10 minutes
	Rice straw	Dry biomass ground to 3 mm pieces Mix at ratio of biomass : 25 % w/v aq. ammonia = 1:0.7 Maintained at 80°C for 3 hours
Saccharification	Substrate: 16.4 % w/w Enzyme: 0.4 mg/g-BM Maintained at 50°C for 72 hours at pH 5	
Fermentation	Substrate: 14.0 % w/w Sugar concentration: 6.2 % w/w Maintained at 30°C, at 28 mg/L/h aeration for 67 hours at pH 6	
Quasi- SSF	Saccharification and fermentation changed as follows Saccharification: 72 → 20 hours + 4 hours cooling Fermentation: 67 → 76 hours Process hours: 139 + cooling time → 100 hours	

せる効果を定量化した。

この推定法は、簡単のために各阻害物質濃度の影響の積を用いており、また全ての阻害物質を網羅できないことから、その精度に限界がある。そのため以下をパラメータとして扱い、パラメータフィッティングによる精度向上を図った。まず、種類が多岐にわたり定量が困難なフェノール類は定量したフェノールの一定量倍とした。一般に阻害効果が指摘されるメイラード反応産物の影響も一定値とした。

この推定法によってバイオマス糖液中の阻害物質のバランス検討が可能になったため、糖液中に許される *p*-クマル酸などフェノール類の上限値を定めた。フェノール類は発酵条件や遺伝子改変による対応が難しく、発生量を抑える必要があるためである (Table 1)。

別途、熱分解シミュレーションにより希硫酸処理条件 (濃度, 温度, 保持時間) による阻害物質と糖の発生量の関係を求め、阻害物質発生量が上限値以下でかつ糖収量が多くなるよう前処理条件を定めた (Table 2)。

このように前処理糖化工程を含めた全体プロセスの条件と、発酵菌の阻害物質耐性強化を並行して検討することにより、第二世代プロセスへの適用が可能な発酵菌が構築できた。

5.2. 糖液濃度と発酵収率

第二世代バイオエタノール生産プロセスの実用化には、各工程のコストダウンが必要とされる。そのためには効率向上が求められるが、ある工程の効率は別工程の効率とのトレードオフとなる場合が多い。これまでに述べた阻害物質濃度と糖濃度の関係の他、糖収率を上げるために糖化酵素量を増やすとトータルコストが抑制できない、糖濃度が低いと得られる生成エタノール濃度も低く蒸留エネルギーが過大になるなどの関係である。

このため各プロセス条件を変えたときに全体コストがどう変化するかのパラメータスタディを行い、コストミニマム条件を探ることとした。Fig. 8 に示した発酵収率と糖濃度

を変化させた時にコストが一定値になるラインを見ると、水色で示す発酵菌を使用した場合、糖濃度 11% 程度で発酵を行うよりも、糖濃度 7 から 8% 付近で発酵を行った方がコストラインに近く、トータルコストが抑えられることを示す。コストラインの形状から、低糖濃度でのコスト削減には限界があることが示されており、トータルコストの一層の削減には蒸留エネルギーや装置コストの削減のために、より高糖濃度条件での発酵収率の向上が必要と分かる。

5.3. 準 SSF プロセス化

バイオエタノール生産プロセスの一つとして Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF) がある。これは、同一容器内で酵素糖化とエタノール発酵を同時に行うことにより、プロセス時間の削減が可能とされているものである。また、糖化プロセス後に固液分離をせずスラリのまま発酵させる為、糖化槽と発酵槽を統合でき固液分離工程を削減できるので、イニシャルコストの低減につながる。

SSF では糖化と発酵の条件を同一にして行うが、本研究で用いた糖化酵素の至適条件 (50°C, pH 4) と、発酵菌の至適条件 (30°C, pH 6) では差が大きいため、全く同じ条件での糖化発酵は現実的ではない。そこで、同一容器内で糖化および発酵を逐次的に行う準 SSF を検討した。3 L スケールの専用装置を作成し、20 時間の酵素糖化の後、降温および pH 調整を行い、発酵菌を添加してエタノール発酵を行った。準 SSF により、39 時間の短縮と装置の効率化が図れることが明らかとなった (Table 2)。

5.4. 物質収支

バイオエタノールの物質収支およびエネルギー収支は酵素糖化やエタノール発酵以外のプロセスにも大きく依存している。我々はバイオエタノールの物質収支を計算するにあたり、NREL レポート⁽⁶⁾を参考にした。発酵残渣からメタン発酵や残渣燃焼および発電を行うことで製造プロセスの全エネルギーを供給できると仮定して、物質収支を算出した。使用したコーンストーバ中にセルロースとヘミセルロースが合計で 57 w/w% 含まれている場合、Table 2 の条件で酵素糖化を行い糖収率が 63%、準 SSF で発酵を行い発酵収率が 86% となり、その後の蒸留および濃縮工程を経るとバイオマス 1 dry-ton から 213 L の無水エタノールが得られる計算となった。

6. まとめ

本研究を通して、次の結果を得た。

- (1) 五炭糖質化酵母をベースとすることにより、非組換え菌扱いとなる第二世代プロセス用エタノール発酵菌を構築した。
- (2) セルロースおよびヘミセルロース含有量が合計で

57 w/w% のコーンストーバを 1 dry-ton 用いた場合、構築した発酵菌の利用を含む本研究の条件では、213 L のエタノールが得られる。

また、次の知見を得た。

- (1) 発酵菌の構築に、遺伝子組換えと育種の組合せが有効であることを示した。既知の酵素のみを組換えるだけでなく、未知の酵素を含めた代謝経路ネットワーク全体の改変が必要であるためと理解される。
- (2) どのような糖液にも対応できる万能な発酵菌構築は現実的でなく、バイオマス種や各工程を限定したプロセス専用の発酵菌が必要であり、プロセス条件を限定したうえで発酵菌を構築する必要がある。

参考文献

- (1) Liu, Z. L.: Molecular mechanisms of yeast tolerance and in situ detoxification of lignocellulose hydrolysates, *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 90, p. 809-825, (2011)
- (2) <http://faostat.fao.org/site/728/DesktopDefault.aspx?PageID=728#ancor>
- (3) Hasunuma, T., Sanda, T., Yamada, R., Yoshimura, K., Ishii, J., Kondo, A.: Metabolic pathway engineering based on metabolomics confers acetic and formic acid tolerance to a recombinant xylose-fermenting strain of *Saccharomyces cerevisiae*, *Microbial Cell Factories*, Vol. 10, p. 2-13, (2011)
- (4) www.yeastgenome.org
- (5) Foreau, E., Courdavault, V., Simkin, A. J., Pichon, O., Crèche, J., Giglioli-Guivarc'h, N., Clastre, M., Papon, N.: Optimization of the URA-blaster disruption system in *Candida guilliermondii*: efficient gene targeting using the URA3 marker, *Journal of Microbiological Methods*, Vol. 91, p. 117-120, (2012)
- (6) Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol, <http://www.nrel.gov/docs/fy11osti/47764.pdf>, NREL, May 2011

■ 著 者 ■



土田 芳樹



塚越 範彦

セルロース系バイオエタノール研究 — 自前糖化酵素の構築 —

Research on Production of Cellulosic Ethanol
— Creation of Novel Saccharifying Enzyme —

光澤 茂 信*
Shigenobu MITSUZAWA

福浦 麻衣子**
Maiko FUKUURA

新川 智**
Satoru SHINKAWA

要 旨

ABSTRACT

セルロース系バイオエタノール実用化にとってボトルネックの一つである糖化酵素のコスト課題の解決に向けて、使用量と生産コストの低減に向けた取組みを平行して行い、自前糖化酵素を構築した。

使用量低減取組みでは、無駄な酵素を含まないオリジナル糖化酵素ミックスを構築し、さらにその主構成成分である酵素を遺伝子工学的にアミノ酸置換することで活性向上を実現した。

生産コスト低減取組みでは、エタノール生産プロセスで使うバイオマスを炭素源として利用し、高効率な生産方法である固体培養を特徴としたオンサイト生産プロセスを利用し、それを実現できるオリジナル酵素生産麹菌株の構築に成功した。

以上二つの成果は、バイオエタノール生産における糖化酵素コストを低減する可能性を持つ新しい知見である。

The cost of saccharifying enzymes is one of the factors hindering the practical use of cellulosic bioethanol. In an attempt to address this issue, research has been conducted to create a novel saccharifying enzyme, in parallel with efforts to reduce the quantity of the enzyme used and the cost of production of the enzyme.

Reduction of the quantity of the enzyme used involved the creation of an original saccharifying enzyme mixture that did not include any unnecessary enzymes. In addition, genetic engineering techniques were applied in order to substitute an amino acid sequence in the enzyme that formed the main constituent, increasing enzyme activity.

Reduction of the cost of production of the enzyme involved utilizing the biomass employed in the ethanol production process as a carbon source, and employing an onsite enzyme production process exploiting solid-state fermentation, a high-efficiency production method. An original enzyme-producing strain of *Aspergillus oryzae* was created in order to realize this process.

The two outcomes discussed above represent new findings with the potential to reduce the cost of saccharifying enzymes for bioethanol production.

1. ま え が き

化石資源枯渇の懸念やCO₂排出量削減の必要性への対応の一つとして、バイオエタノールがある。可食部を利用するデンプン系バイオエタノール（第一世代）に対して、非可食部を利用するセルロース系バイオエタノール（第二世代）も実用化研究が進んでいる。糖化酵素は、セルロース系バイオマスを分解し、発酵菌がエタノール生産の原料として利用できるグルコースを生成する反応を触媒する酵素（タンパク質触媒）である。セルロースは強固な構造を持っており、分解には多量の酵素が必要である。専門メーカー

が長年研究開発を進めてきたが、従来のデンプン系バイオエタノールで使用される糖化酵素に比べて、10倍以上のコストがかかる^{(1), (2)}。結果として、糖化酵素のコスト高が、セルロース系バイオエタノール実用化のボトルネックの一つとなっている。

そこで我々は、独自の革新的な低コストを実現しうる糖化酵素の研究開発を推進してきた。

本論文では、研究のねらい、特徴について述べると共に、構築した独自糖化酵素および糖化酵素生産菌の性能、コスト効果について説明し、研究の過程で得られた知見を述べる。

* 基礎技術研究センター

** 四輪 R&D センター

Table 1 Composition of enzyme mixture

Enzyme group	EG: Endoglucanase	CBH1: Cellobiohydrolase 1	BGL: Beta-glucosidase	EX: Endoxylanase	BX: Beta-xylosidase
Function	Cuts the surface of crystalline cellulose to create nicks	Cleaves out cellobiose at reducing end of cellulose chain	Cuts cellobiose into glucose	Cuts hemicellulose into xylooligosaccharide	Cuts xylooligosaccharide into xylose
Original organism	<i>Acremonium</i>			<i>Thermoascus</i>	<i>Thermotoga</i>
Weight percentage (%)	24	47	24	4	1

2. 研究のねらい

糖化酵素コストは、1 Lのエタノールを製造するために使用するコスト C (単位: ¥/L-エタノール) で表現するのが分かりやすい。すると酵素コストは次式のように、展開できる (Fig. 1)。

ここで、A: 酵素使用量 (g/kg-バイオマス)、B: 酵素生産単価 (¥/g-タンパク質)、D: バイオマスの糖含有率 (kg-単糖換算/kg-バイオマス)、E: 糖化率 (kg-回収/kg-元)、F: 発酵効率 (kg-エタノール/kg-糖)、G: エタノールの比重 (kg/L) である。式中、朱色背景開部分とは 1 kg バイオマスから生産されるエタノール量であり、バイオマスからグルコースへの変換率 (糖化率) を含めたプロセスの必要要件と物性定数から一定値に定まる。したがって、酵素コストを下げるために可変な部分は、青色背景部分である使用量と生産単価の積であり、酵素コスト低減には、使用量と生産単価を下げる 2 方向があることが分かる。

本研究ではこの両方向に向かって、生化学的研究開発を推進した。具体的には、使用量低減を目的として、糖化酵素の触媒活性を向上させる取組みを、また、生産単価低減を目的として、酵素生産菌の生産性を向上させる取組みを行った。次章以降、それぞれの研究内容と結果を順に説明する。

$$C = \frac{\text{Enzyme cost for 1 kg biomass (¥)}}{\text{Ethanol produced from 1 kg biomass (L)}} = \frac{A \times B \times G}{D \times E \times F}$$

Fig. 1 Breakdown of enzyme cost

3. 使用量低減取組み

3.1. 自前酵素ミックスの作製

糖化酵素は、微生物 (バクテリア、カビ) が、栄養源であるバイオマスを消化するために分泌する。工業的には、こ

れらの微生物を大量培養し、糖化酵素を分離、濃縮して使用する。天然の微生物は約 30 種以上の酵素を同時に分泌しており、これらの酵素は Fig. 2 と Table 1 に示すような異なる五つの機能を持つグループに大きく分けられる。

同一グループには多種類の酵素が属するが、これは、自然界に存在する多様なバイオマス源に対応するためには、少しずつ機能が異なる酵素群が必要となるからである。しかし、工業的にバイオエタノールを生産する場合、その原料となるバイオマス種は一種類に限定することが一般的である。その場合、必要な酵素の種類数は約 30 よりも大幅に少ない可能性がある。つまり、ターゲットとするバイオマス種にとっては必要がない無駄な酵素を省くことで、使用量を低減することを狙った。本研究では、アンモニア水に浸漬することで糖化しやすいように前処理を施した稲わらをバイオマスとして実験に使用した。

無駄な酵素を省くことで、使用量を低減することができるという作業仮説を検証するために、我々はアクレモニウム、サーモアスカス、サーモトガと呼ばれる微生物 3 種が分泌する酵素群から、稲わらに特化して無駄な酵素を排除した酵素ミックスの構築に取組んだ。酵素の選別には、Fig. 3 に示すように、各酵素種分子の表面電荷の差で分離し、その後、稲わら糖化試験で有効な画分を選択する手順を繰り返すこととした。

取組みの結果、Fig. 2 と Table 1 に示す五つのグループからそれぞれ 1 種類ずつ合計 5 種類だけで構成されるミックスを作製し、さらに、構成成分の配合比を変えて稲わら

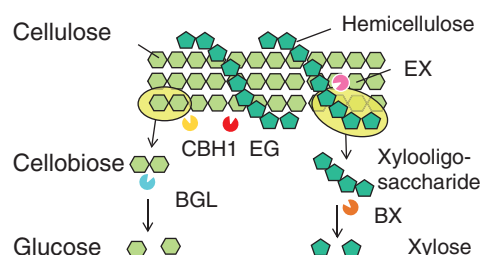


Fig. 2 Functions of components in enzyme mixture

糖化試験を行い、最適比を決定した。Fig. 4 に、実際の糖化活性を示す。バイオマス糖化活性を無駄な酵素が含まれている天然のアクレモニウムの培養液と比較した結果、約 2.5 倍に上昇したことを確認した。

以上の結果から、無駄な酵素を省くことで、使用量を低減することができるという当初の作業仮説が正しいことが証明された。

3.2. 酵素のアミノ酸置換

次に我々は、酵素ミックスを構成する酵素自体の活性を向上させることにした。その手法としてアミノ酸置換法を採用した。酵素分子は Fig. 5 に示すような一定の 3 次元構造をとるポリマからできている。このポリマはタンパク質であり、その構成モノマがアミノ酸である。酵素を構成するアミノ酸には 20 種類が存在し、その並び方で酵素の 3 次元構造や触媒活性が決定される。天然の酵素が持つアミノ酸配列の一部が他の配列に置換されることで、性能低下を及ぼす場合や活性向上に寄与する場合があることが知られている。前節で構築したオリジナル糖化酵素ミックス

スのうち重量構成比 47% と主成分である CBH1 に注目し (Table 1)、実験を行った。Fig. 5 は CBH1 の分子構造である。CBH1 はアミノ酸が 550 個つながったポリマであり、中央にトンネルのような空洞部分を持つ。この空洞部分の表面には極性や大きな疎水性を持つアミノ酸が複数存在し、それらと非共有結合を形成することでセルロース鎖がこの空洞に取り囲まれ、切断される。アミノ酸置換の可能な場合の数は 19 の 550 乗であり、全てをテストすることは実質不可能である。そこで、セルロース鎖と接触する空洞表面部分のアミノ酸 30 箇所をコンピュータモデリングで特定し、各アミノ酸をそれぞれアラニンという別のアミノ酸に置換し、活性の変化を調べた。アラニンは置換前のアミノ酸に対して、極性や大きな疎水性を持たないので、置換前のアミノ酸が活性にとって悪影響だった場合、アラニン置換することで活性が向上すると考えられる。結果として、Fig. 6 に示すように、30 個の置換体のうち置換前の天然型 (Wild Type: WT) と比較して高活性な置換体を 3 種取得できた。Fig. 6 には、活性値の上位六つを示した。置換体の表記は例えば、N062A は端から 62 番目のアスパラギン (N) をアラニン (A) に置換したものを示す。特にもっとも高活性なものは、WT の約 7.8 の活性をもつことが明らかになった。

さらに、セルロース鎖が CBH1 の空洞部分に取り込まれる過程を分子動力学シミュレーションで再現した結果、WT においてセルロース鎖と水素結合していたアミノ酸をアラニンに置換しその水素結合をなくすことで、酵素分子がセルロース鎖を内部に取り込む過程が促進されることが、この活性向上の要因であることを確認した。

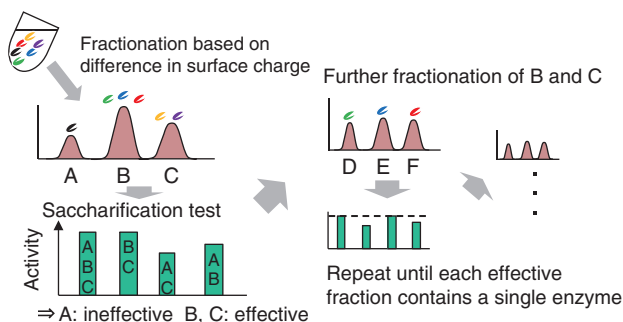


Fig. 3 Scheme of enzyme selection

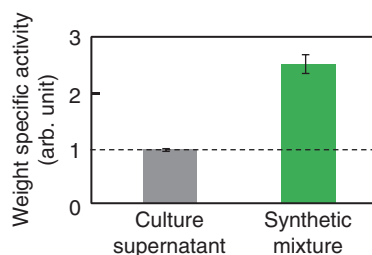


Fig. 4 Specific activity of novel enzyme mixture

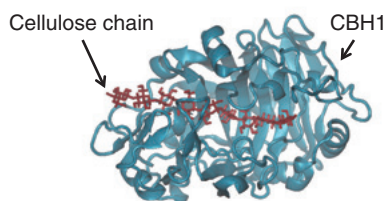


Fig. 5 Molecular structure of CBH1 and cellulose chain

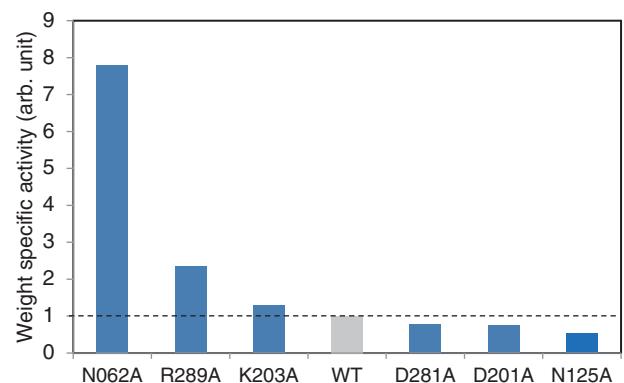


Fig. 6 Specific activity of CBH1 mutants

4. 生産単価低減取組み

4.1. オンサイト生産プロセスの考案

前章で構築したオリジナル酵素を低コストで生産するために、我々は Fig. 7 に示す生産プロセスを選択した。通常のプロセスでは、培養時に生産菌に与える栄養源として均

質糖源を用い、液体状態で培養する。これらは、均一な品質の酵素を大量生産するための技術である。我々の目的はバイオマスからエタノールを生産する途中過程で使用する酵素を生産することであり、酵素生産ラインを主プロセスと併設する（オンサイト生産）ことで、高価な均質糖源の代わりにエタノール原料のバイオマスを糖源として使用することが可能となると考えた。また、バイオマスは固体であることから、オンサイト生産には液体培養よりも、固体バイオマス上に微生物を繁殖させる固体培養が向いている。固体培養は液体培養と比較して液体培地分の培養体積が小さく済むため、装置コストが低減できる。

4.2. オリジナル酵素生産菌の構築

上記のオンサイト生産プロセスを可能にするためには、これに適した微生物が必要である。本研究では麹菌を選定した。日本では酒や味噌などの醸造食品製造において麹菌を用いた固体培養技術が成熟している。また近年、遺伝子組換えによる麹菌のゲノム改変、形質転換技術がほぼ確立され、本来麹菌が分泌しない外来酵素を生産できる⁽³⁾。

麹菌には多くの種類があり、我々はまずそのスクリーニングに着手した。麹菌 15 種類を入手し、稲わら固体培養で酵素分泌量を比較し、最も分泌量が多いものを選抜した。

次に我々は、相同組換えと呼ばれる手法で、前述の CBH1 をこの株のゲノム DNA に導入し、生産させることに成功した (Table 2)。一方、比較のために使用した他の微生物 3 種はいずれも CBH1 を生産しなかった。このことから、オリジナル生産菌として麹菌を選定したことの有効性が示された。

さらには、この麹菌株の全ゲノム配列を解読し、その情報から、酵素分泌を阻害すると考えられる遺伝子 3 種類を人為的に破壊することで、分泌量の向上を図った。結果と

Table 2 Comparison of candidates for enzyme production host

Organism	<i>E. coli</i>	<i>B. subtilis</i>	<i>P. pastoris</i>	<i>A. oryzae</i>
Capable of phenotypic transformation?	Yes	Yes	Yes	Yes
Capable of solid-state fermentation?	No	Yes	No	Yes
Capable of CBH1 production?	No	No	No	Yes

して Fig. 8 に示すように、日本酒づくりで使われる麹菌標準株 RIB40⁽⁴⁾ に比べて 1.5 倍の CBH1 生産能を持つ株を構築することに成功した。

さらにこの株の特性を調べたところ、バイオマス成分であるリグニンから遊離するフルフラールと呼ばれる低分子が持つ微生物の生育阻害効果に対して耐性を持つことが分かった。我々が構築したオリジナル酵素生産菌のフルフラール耐性を CBH1 生産量を指標に、RIB40 と比較した結果が、Fig. 9 である。RIB40 ではフルフラール存在下で生産量が約 40% まで低下した一方、オリジナル生産菌ではほ

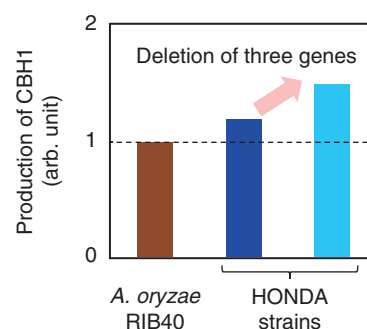


Fig. 8 Production of CBH1 by HONDA strains

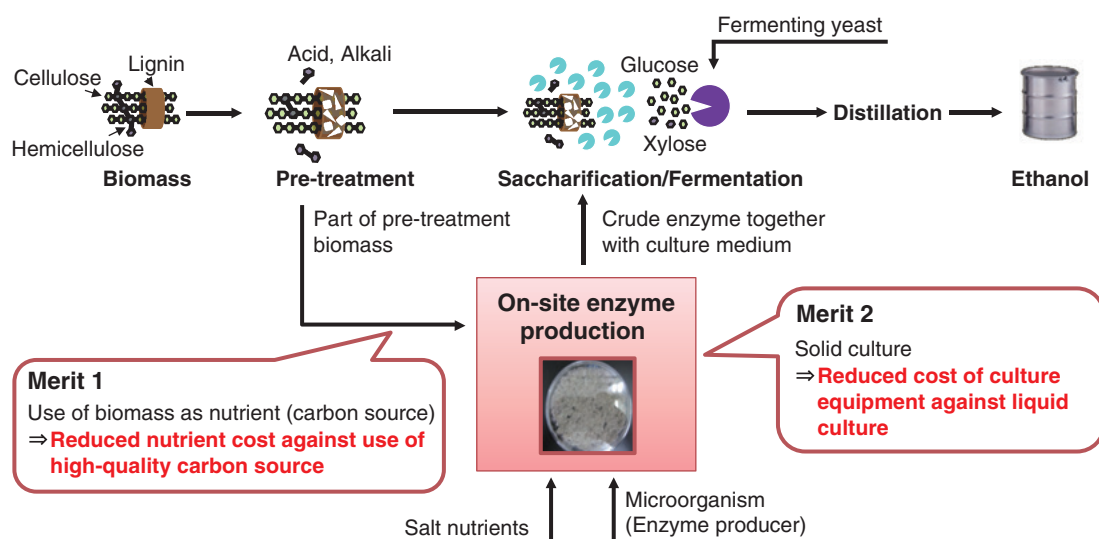


Fig. 7 Scheme of enzyme production

とんどフルフラールの影響がなかった。我々のオリジナル酵素生産菌が持つこの特徴は、バイオマス固体培養をする際にとても大きな利点であると考えられる。

フルフラール耐性の要因をゲノムおよび細胞内物質の網羅的分析 (RNA 解析, メタボローム) に基づき検討した結果, 細胞内の酸化ストレス適応能とタンパク質合成反応速度が変化した可能性があることが明らかになった。これらの結果は, 麹菌の分子生物学の観点からも貴重な知見といえる。

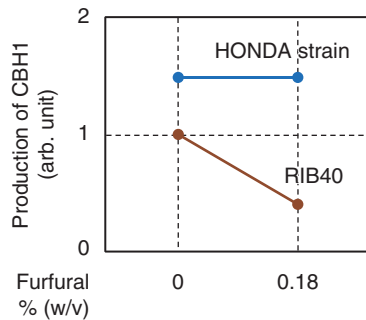


Fig. 9 Tolerance against furfural of original strain

5. コスト効果

以上, 酵素使用量および生産コスト低減の取組み内容を説明した。その中では, 取組みの評価をそれぞれ, 糖化活性と生産量を用いて行った。これらの値は高くなる程, 使用量と生産コストは下がるので, 最終的に酵素コストも下がることになる (Fig. 1)。

我々がセルロース系バイオエタノール用の一般的な市販酵素のタンパク質重量当りの性能を評価したところ, 最も高性能なものは天然のアクレモニウムの培養液とほぼ同等であった。本研究で構築した自前酵素ミックスは天然のアクレモニウムの培養液と比較して 2.5 倍の活性をもっている (Fig. 4), 単純に計算すると, 同じ糖化性能を出すのに必要な使用量は最も高性能な市販品の 1/2.5 で済む。市販品の生産菌であるトリコデルマ菌は自前生産菌と同じ糸状菌 (カビ) であることから, 仮に単価が同じとすると Fig. 1 から, 酵素コストも 1/2.5 となる。

作製した中でもっとも高活性な CBH1 のアミノ酸置換体は, WT の約 7.8 倍の活性をもつことが分かった (Fig. 6)。CBH1 WT は酵素ミックス全重量の 47% を占めるので (Table 1), 計算上は CBH1 に最も高活性なアミノ酸置換体を使うことで, 酵素ミックスの性能を保ちつつ, 必要量を 41% (= $47 - 47/7.8$) 削減でき, 上記と同様に考えるとコストも 41% 削減できるはずである。実際には最も高活性なアミノ酸置換体は麹菌での生産量が低く, 酵素ミックスの必要量低減を確認することはできていない。

オリジナル生産菌のコストに対する効果は, 生産プロセスに依存するので直接的には議論できない。しかし, 同じ生産プロセスを仮定すれば, 我々の構築した生産菌は, 食品産業界で広く使われている標準麹菌株 RIB40 に比べて 1.5 倍の CBH1 生産量を示しており, 単純に計算すると, 生産単価は 1/1.5 倍になるといえる。

以上の考察から, 本研究で構築したオリジナル酵素ミックスおよびオリジナル酵素生産菌は, バイオエタノール生産の糖化酵素のコスト低減に寄与することが期待できる。

6. まとめ

セルロース系バイオエタノールの実用化を可能にし得る革新的な低コスト酵素の実現を目指し研究を行った。結果として以下の成果を得た。

- (1) 天然の生物が生産する酵素ミックスから無駄な酵素を排除して自前ミックスを構築し, 天然のアクレモニウム培養液と比較した結果, 糖化活性が約 2.5 倍に上昇したことを確認した。さらにその主成分である CBH1 のアミノ酸配列を置換することで, 約 7.8 倍の触媒活性向上に成功した。
- (2) オンサイト生産プロセスを実現し得るバイオマス固体培養能を持つオリジナル酵素生産麹菌株を構築した。この株は, 麹菌標準株 RIB40 に比べて 1.5 倍の酵素生産能を持つ。

以上二つの結果から, バイオエタノール生産における糖化酵素コストを低減できる技術が構築できた。

本研究で活用した技術手法は, 1980 年代以降進展が目覚ましい遺伝子工学に依るところが大きい。今後は, 環境やエネルギー以外の分野においても, これらの技術の利用価値の高まりが期待される。

参考文献

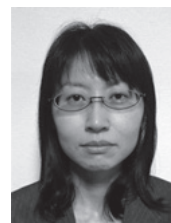
- (1) Humbird, D., Davis, R., Tao, L., Kinchin, C.: Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol, Technical Report NREL/TP-5100-47764, (2011)
- (2) McAloon, A., Taylor, F., Yee, Y.: Determining the Cost of Producing Ethanol from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks, Technical Report NREL/TP-580-28893, (2000)
- (3) Toda, T., Sano, M., Honda, M., Rimoldi, O.J., Yang, Y., Yamamoto, M., Takase, K., Hirozumi, K., Kitamoto, K., Minetoki, T., Gomi, K., Machida, M.: Deletion analysis of the enolase gene (*enoA*) promoter from the filamentous fungus *Aspergillus oryzae*, Current Genetics, Vol. 40, p. 260-267, (2001)

- (4) Machida, M., Asai, K., et al.: Genome sequencing and analysis of *Aspergillus oryzae*, Nature, Vol. 438, p. 1157-1161, (2005)

■ 著 者 ■



光澤 茂信



福浦麻衣子



新川 智

編集長	漆山 雄太	四輪 R&Dセンター
	石橋 正明	二輪 R&Dセンター
	岩舘 徹	二輪 R&Dセンター
	笠井 聡人	汎用 R&Dセンター
	金古 章	四輪 R&Dセンター
	齋藤 俊博	四輪 R&Dセンター
	塩崎 智夫	二輪 R&Dセンター
	白木 晶子	四輪 R&Dセンター
	須藤 晶	四輪 R&Dセンター
	田中 公俊	基礎技術研究センター
	田中 久人	航空機エンジンR&Dセンター
	徳根 敏生	四輪 R&Dセンター
	友永 久人	四輪 R&Dセンター
	直江 学	汎用 R&Dセンター
	中原 淳	四輪 R&Dセンター
	中村 孝広	基礎技術研究センター
	野口 実	四輪 R&Dセンター
	橋本公太郎	四輪 R&Dセンター
	馬場 雅之	二輪 R&Dセンター
	吉田 聡	四輪 R&Dセンター

地球上の人口は増加を続けており、先進国を中心とした高齢化も進んでいます。また情報通信技術の発達スピードは、モビリティの移動速度をはるかに超えて、絶え間なく進化を続けています。

モビリティの分野では、地球環境への負荷低減を実現する様々な手法の開発や、情報通信と高知能化を活用した新たな価値の創造が盛んにおこなわれ、これらに必要な技術やサービスへの取り組みもおこなわれています。

我々が利用している現在の技術は先人達の努力の結集であり、これらを超えていくことは簡単ではありません。しかし我々は先人達や過去の自分達を越えるべく、努力を続け、新たな技術や製品の研究開発をおこなう者たちであると信じています。そして開発した製品やサービスは、世の中の人々から温かくも厳しい目で評価されます。一方、開発で得られた技術を世の中に発信する場として、Honda R&D Technical Review を大いに活用して欲しいと考えています。我々が何を志し、どんな課題と向き合い、どんな手法で克服したのか。社内外の多くの人々に広く知って頂きたいと思います。

——(田中久人)——

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

発行所 株式会社 本田技術研究所

発行人 松 本 宜 之

編集人 Honda R&D Technical Review 編集委員会

事務局 〒321-3393 栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢 4630 番地
株式会社 本田技術研究所 四輪 R&Dセンター
技術広報室 論文事務局
TEL 028-677-3311(代表) FAX 028-677-7775
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.

