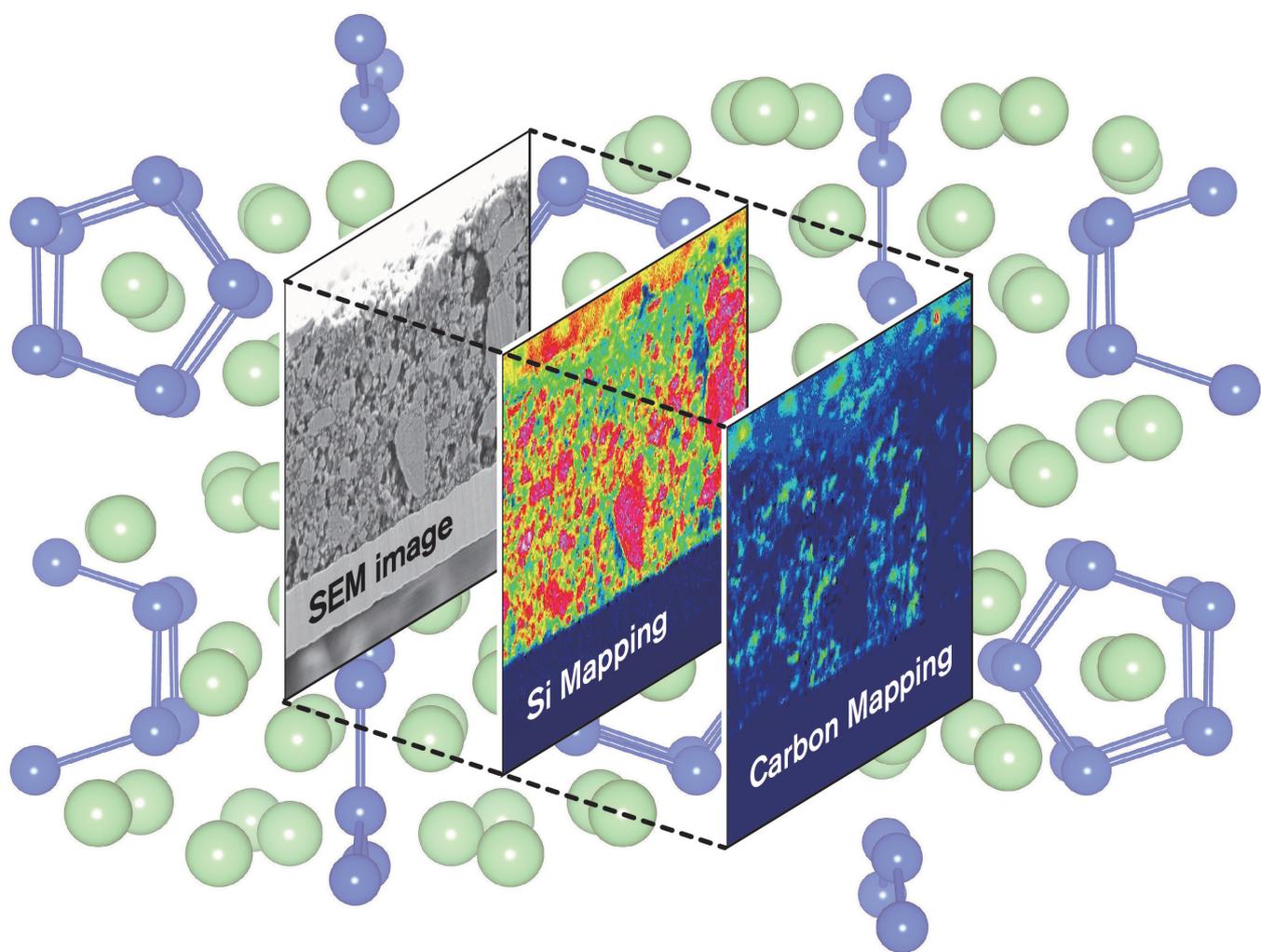


# NISSAN TECHNICAL REVIEW

日産  
技報

2015 No.76



環境技術を支える材料

NISSAN MOTOR CORPORATION





2015



NISSAN TECHNICAL REVIEW

No.76

# 日産技報第76号

## 目次

2015年3月 発行

### ◆ 巻頭言

材料技術への期待、サステナビリティと競争力の源泉として……………土井 三浩 …… 1

### ◆ 特集：環境技術を支える材料

1. 材料屋の心意気……………原田 宏昭 …… 3

2. 世界初 1.2GPa 級高成形性超ハイテン材の適用開発 ……福原 恵美・石内健太郎・岩崎 剛  
吉田 健・徳光 偉央 …… 5

3. 水性 3WET 1プレヒート塗装工程対応材料の開発 ……筒井 宏典・橋下 健一・前田 廉 …… 10

4. 自動車用排気浄化触媒の貴金属低減技術……………花木 保成・伊藤 淳二・藤本 美咲 …… 14

5. 電動パワートレインの進化を支える材料技術……………村上 亮・川下 宜郎・杉 千花  
小川 和宏・肥塚 洋輔 …… 20

6. 燃料電池自動車向け低コスト触媒層および電極触媒材料技術

大間 敦史・真塩 徹也・在原 一樹・菅原 生豊  
光本 久司・関場 徹・篠原 和彦・飯山 明裕 …… 26

7. リチウムイオン電池の進化を支える材料分析技術… 今井 英人・久保 啓・茂木 昌都・上口 憲陽  
松本 匡史・真田 貴志・谷村 誠・秦野 正治 …… 31

8. 日産自動車におけるクローズド・ループリサイクルの取り組み

山田 雄一・村上憲太郎・田中 安栄・端野 直輝・服部 直樹・佐川 琢円 …… 37

◆ 技術紹介

9. 新型高効率4気筒1.6L直噴ガソリンターボエンジンの開発 …………… 松井 義典・岸 一昭  
藤原 和弘・仲津 周一 …… 42
10. ダウンサイジング過給ガソリンエンジンへのLow-pressure Cooled EGRシステムの適用  
吉田慎一郎・野原 常靖・春井 淳・伊藤 行伸・平井 直樹・土田 博文 …… 48
11. 新型NP300 Navara搭載 新型4気筒ディーゼルエンジンYS23DDTTの開発  
三枝 社・山口 稔・宅間 正和・岡部 恭慶・田中 一弘  
北原 靖久・中島 正寿・ジル マリア・ルイス ソフィー …… 53
12. スマート・ルームミラーの開発 …………… 田崎 祐一・進木 博之・阿部 修・岡 弘和 …… 59
13. 新型日産ムラーノの空気流性能開発 ……新井 正明・刀根慶太郎・谷口 圭一・村上美香子・大島 宗彦 …… 65

◆ 新車紹介

14. 新型e-NV200 商品概要 ……………田村 利徳・香川 信哉・公手 晃一  
小松 英之・小坂 智・渡辺 絵理 …… 71

◆ 社外技術賞受賞一覧表 …………… 75

◆ 受賞技術概要

15. 円筒歯車のかみ合い効率予測とその向上 ……………森川 邦彦・西原 隆太・松本 将 …… 79

◆ **Preface**

- ~ Expectation to Material Technology as Source of Sustainability and Competitiveness ~ ..... 1  
By Kazuhiro DOI
- 

◆ **Special Feature : Materials Supporting Environmental Technology of Automobile**

1. Pride of Materials Engineer ..... 3  
By Hiroaki HARATA
2. The World's First Development of 1.2GPa Ultra-High Strength Steel with High Formability ..... 5  
By Emi FUKUHARA, Kentarou ISHIUCHI, Tsuyoshi IWASAKI, Tsuyoshi YOSHIDA, Hideo TOKUMITSU
3. Material Development for Waterborne 3-Wet 1 Preheat Paint System ..... 10  
By Hironori TSUTSUI, Kenichi HASHISHITA, Ren MAEDA
4. Platinum Group Metals Reduction Technology for Automobile Exhaust Purification Catalyst ..... 14  
By Yasunari HANAKI, Junji ITOU, Misaki FUJIMOTO
5. Material Technology for Evolution of Electric Powertrain ..... 20  
By Ryo MURAKAMI, Yoshio KAWASHITA, Chika SUGI, Kazuhiro OGAWA, Yousuke KOIDUKA
6. Low-Cost Electrode and Electrocatalyst Materials Technology for Fuel Cell Electric Vehicles ..... 26  
By Atsushi OHMA, Tetsuya MASHIO, Kazuki ARIHARA, Seiho SUGAWARA,  
Hisashi MITSUMOTO, Toru SEKIBA, Kazuhiko SHINOHARA, Akihiro IYAMA
7. Advanced Analysis for Innovation of Lithium-ion Batteries ..... 31  
By Hideto IMAI, Kei KUBOBUCHI, Masato MOGI, Kazuhiro KAMIGUCHI,  
Masashi MATSUMOTO, Takashi SANADA, Makoto TANIMURA, Masaharu HATANO
8. Closed-Loop Recycling Efforts in Nissan ..... 37  
By Yuuichi YAMADA, Kentarou MURAKAMI, Yasue TANAKA,  
Naoki HATANO, Naoki HATTORI, Takumaru SAGAWA

◆ **New Technologies**

9. Development of New Highly Efficient 4-cylinder 1.6L Direct Injection Gasoline  
Turbocharged Engine ..... 42  
By Yoshinori MATSUI, Kazuaki KISHI, Kazuhiro FUJIWARA, Shuichi NAKATSU
10. Application of Low-pressure Cooled EGR System to Downsize Boosted Gasoline Engines ..... 48  
By Shinichiro YOSHIDA, Tsuneyasu NOHARA, Jun HARUI,  
Yukinobu ITO, Naoki HIRAI, Hirofumi TSUCHIDA
11. New 2.3L I4 Diesel Engine (YS23DDTT) for New NP300 Navara ..... 53  
By Yashiro SAEGUSA, Minoru YAMAGUCHI, Masakazu TAKUMA, Yasuyoshi OKABE, Kazuhiro TANAKA,  
Yasuhisa KITAHARA, Masatoshi NAKAJIMA, Maria GIL GOMEZ, Sophie LOUIS-MOSSBERG
12. Development of Smart Rearview Mirror..... 59  
By Yuichi TAZAKI, Hiroyuki SHINKI, Osamu ABE, Hirokazu OKA
13. Development of Aerodynamics for New Nissan Murano ..... 65  
By Masaaki ARAI, Keitaro TONE, Keiichi TANIGUCHI, Mikako MURAKAMI, Munehiko OSHIMA

◆ **New Model**

14. Product Outline of All-new e-NV200 ..... 71  
By Toshinori TAMURA, Nobuya KAGAWA, Kouichi KUDE,  
Hideyuki KOMATSU, Tomo KOSAKA, Eri WATANABE

◆ **List of Technical Award Recipients** ..... 75

◆ **Technical Award News**

15. Estimation and Improvement Method of Mesh Efficiency of Cylindrical Gears ..... 79  
By Kunihiko MORIKAWA, Ryuta NISHIHARA, Susumu MATSUMOTO



## 材料技術への期待、サステナビリティと競争力の源泉として

～Expectation to Material Technology as Source of Sustainability and Competitiveness～

アライアンス グローバル ディレクター 総合研究所所長 土井 三浩

日産自動車は、2010年に世界初の量産電気自動車、日産リーフを世に送り出すまでに、リチウムイオン電池の研究開発に約15年を費やしました。それまで自動車用電池はニッケル水素電池が主流であり、リチウムイオン電池は、耐久性とコストの面から実現は難しいと考えられていました。成功の鍵は、研究段階における安定なマンガン系結晶格子構造の発見であり、実用化におけるシンプルなラミネート型電極構造の開発でした。全ての研究開発過程でこの実現を支えたのは、①分子軌道・結晶格子レベルまで遡った深い電気化学の理解と、②グローバルな市場におけるさまざまな電気自動車の利用シーンでの電池負荷を想定した膨大な材料試験、そして③安定した電池性能を量産可能とする材料のばらつきを抑えた生産技術です。材料技術は電気自動車のようなゲームチェンジに繋がるイノベーションの源泉であり、独創的な材料レベルからの発想は、容易にはキャッチアップができない競争優位を生み出します。

今回の特集は「環境技術を支える材料」です。全ての産業分野において、これまでも環境負荷低減に向けたさまざまな技術開発が行われてきましたが、それでもなお地球環境には課題が山積しているといわざるを得ない現状です。持続可能（サステナブル）な社会の実現に向けて、今なお一層の環境技術への取り組みは必須であり、自動車産業はこれをリードすべき立場にあると思います。前述のリチウムイオン電池のさらなる高容量化をはじめ、軽量化のコアとなる炭素繊維強化プラスチック、資源問題の解決に向けた貴金属・レアアースフリー材料、そしてそれらのリサイクル技術など、一日も早い実現と普及が待たれており、材料技術はこれらを支える基盤です。

また、材料技術を自動車への応用・実用化という側面から見た場合、材料そのものの進化と要求性能の高度化に伴って、異分野領域との組み合わせが複雑化しています。例えば、スチール車体材料は、軽量化と安全性、デザインへの要求に応えるために、従来のスチール材に加えて超高張力鋼、高張力鋼と軽金属、強化プラスチックを上手に使い分けるマルチマテリアル車体へと進化しています。ここでは異種材接合のような新たなプロセス技術や、複合材料の破壊強度解析のような設計基盤技術を新たに作り上げていく必要があります。リチウムイオン電池やモータ用磁性材料のようなユニット系材料は、高度な制御技術と組み合わせたシステム開発なくしては実用化が不可能です。このように今日の材料は、単独での深化に加えて、使いこなしのための領域間連携やシステム設計の視点がますます重要になってきており、自動車の開発プロセスにも少なからぬ変化を与えています。

この日産技報第76号のページを繰っていただくと、私たちが取り組んでいる幅広い材料の世界が広がります。将来社会のサステナビリティと自動車の競争力を根底で支える材料技術の力を感じて頂きたいと思います。

## 材料屋の心意気

Pride of Materials Engineer



先端材料研究所 原田 宏昭  
Hiroaki Harata

### 1. テレビ番組に唸(うな)る

昨今テレビ番組が、技術屋としてもなかなか興味深いものになっています。警察特捜ドラマの分析科学的蘊蓄(うんちく)はそれなりに唸らせるものがありますし、大学教授の物理化学実験的謎解きは、実に面白い。企業の先端技術を異種格闘技戦のように対決させる企画も大変見応えがあります。

### 2. 機械屋 vs 材料屋

先日NHKで、超絶 凄(すご)ワザ!「名勝負再び“振動ゼロ”を目指せ! 究極の台車対決」という番組をやっていました。内容は、宅配便などで活躍する台車のお話です。台車はタイルの継ぎ目や段差により強い衝撃・振動がおきするため、壊れやすい荷物運搬の課題となっています。そこで“振動ゼロ”の夢の台車をめざし挑むのは、独自開発のウレタンゲルで衝撃・振動吸収の業界をリードする岐阜県の会社、対するのは、世界初の全方位型サスペンション(金属製板ばね)でその名を知られる東京の会社です。凹凸試験路を疾走する台車に積んだパック詰めイチゴが無傷で守れるか、という勝負です。

この勝負は言わば高分子材料屋と機械屋との勝負です。私は高分子材料屋ですから「ばかばかしい、板ばねにエネルギー吸収ができるか、粘弾性体のゲルの勝ちに決まっているのではないか」と高を括っていました。しかしゲルチームはゲルの弾性不足に苦しみ、一方のばねチームも激しい衝撃の暴れを押さえられず、勝負の行方は予断を許さない。最終的に双方とも物性を多段階に調整したゲルとばねを車輪締結部に挿入し、テーブル部も2重フロート構造としての勝負となりました。判定は凹凸試験路搬送後のイチゴの表面傷面積比率を画像処理にて行い、結果はわずか1%ほどの差で金属板ばねの勝ち(1%が勝敗を言うほどの差とも思えませんが)でした。

番組で勝敗の技術的解説は行われませんでした。私が映像を見る限り、板ばねチームの勝利のカギは浮かせた



出典：(株)松田技術研究所 ホームページ

図-1 金属球状全方位サスペンション  
Fig. 1 Spherical metal suspension



出典：(株)エクシールコーポレーション ホームページ

図-2 ウレタンゲル防振クッションパッド  
Fig. 2 Urethane gel insulation pad



出典：エポックトランスポート(株) ホームページ

図-3 防振サスペンション付防振台を設置した台車  
Fig. 3 Anti-vibration truck with spherical metal suspension

テーブルの重量にあったように思います。明らかに彼らのテーブルはずっしり重そうに見えました。一方高分子ゲルチームは、ゲルの弾性限界からマス（重量）を使いきれなかったが故の敗北、即ち高分子の粘弾性が機械的制振特性に敗北した瞬間でありました。

### 3. 編集委員として、読みどころ

さて、今回は材料特集です。「環境技術を支える材料」と題して、近年益々競争が激化する環境技術を根底で支える材料を紹介していきます。切り口としては、

- (1) 燃費競争を支える弛（たゆ）まぬ軽量化、1.2GPa級超ハイテン材が限界を広げる
- (2) 工場エネルギーの大口消費者、塗装焼き付け工程を減らす3WET塗装
- (3) 貴金属資源問題に終止符、排気触媒の白金が鉄に置き換わる
- (4) EV電動パワートレインの電費改善は基礎体力、効率のカギとなる磁性材料、熱機能材料
- (5) 燃料電池車普及に向けた大幅原価低減、低白金電極触媒をものにする
- (6) EV航続距離改善は焦眉の急、高容量リチウムイオン電池の材料設計を支える最新分析・高度解析技術
- (7) 地球規模のごみ・資源問題に解決、クローズド・ループリサイクルへの取り組み

という8つの視点から捉え、日産の材料技術がいずれの分野においても世界最高水準の技術力で、日産車の環境性能を支えていることをご理解いただこうとする試みです。

実はちょうど10年前の2005年第57号でも「環境に貢献

する自動車材料技術」という特集が組まれました。内容は車体軽量化、パワートレインの小型軽量化、低フリクション、（日産リーフ用電池の原型となる）ラミネート型リチウムイオン電池と、今回と似た構成ではあります。しかし、中身を読み比べてみると、軽量化ではアルミニウムやマグネシウムなど軽金属の適用が一巡して再びハイテンが脚光を浴びていたり、燃費では内燃機関の悩みが電動パワートレインで同様の悩みとなっていたり、電池の関心事が出力（パワー）から容量（航続距離）になっていたりと、10年の時の流れがしみじみと感じられます。当時からの読者で第57号を保存している方は、是非読み比べてください。面白いと思います。

今回の執筆陣は、材料技術部、車体設計部、生産技術部、EVシステム研究所、先端材料研究所と、社内の様々な部署で活躍する材料エキスパートです。機械技術が主流を占める自動車メーカーにあって多いとは言えない材料技術者が、様々な分野でがんばっている姿も見ていただきたいと思っています。

### 4. 材料屋の心意気

長々と書きましたが、要すればこの特集は、材料の幅広い貢献を購読者に伝えつつ、材料屋自身にとって自動車メーカーの中で（幾分肩身の狭い思いをしている所もあるかと思いますが）「環境技術は材料屋が支えているのだ」という気概と誇りを感じ取れるものになればと思っています。もし仮に前述の台車勝負に環境を支える材料技術という視点を入れ、軽量化への配点をいくらかでも加えたなら、勝者はゲル材料チームであったと信じつつ。

# 世界初 1.2GPa級高成形性超ハイテン材の適用開発

The World's First Development of 1.2GPa Ultra-High Strength Steel with High Formability

福原 恵美\*  
Emi Fukuhara

石内 健太郎\*  
Kentarou Ishiuchi

岩崎 剛\*\*  
Tsuyoshi Iwasaki

吉田 健\*\*\*  
Tsuyoshi Yoshida

徳光 偉央\*\*\*\*  
Hideo Tokumitsu

**抄 録** 自動車を取り巻く環境は年々複雑化し、その中でCO<sub>2</sub>削減は重要な課題である。車両の軽量化はCO<sub>2</sub>削減の有効な手段であり、超ハイテン材の適用拡大による軽量化は重要なテーマの一つである。しかしながら、鋼板の高強度化は延性の低下を招き、スポット溶接強度を確保しにくくなるという特性があるため、これまで複雑な車体骨格部品に対しては、超ハイテン材の適用に限界があった。そこで最適な成分設計と製造プロセスの確立により、組織を微細化した複合組織とすることと最適なスポット溶接パターンを見出すことによってこれらの課題を解決し、高強度でありながら高い成形性を有する1.2GPa級高成形性超ハイテン材を世界に先駆けて開発し、新型スカイラインに適用した。更なる軽量化のため、適用車種、部位拡大を目指している本材料の車両適用のキー技術を報告する。

**Summary** The circumstances surrounding automobiles are becoming increasingly complex, and CO<sub>2</sub> reduction has become an important issue. Reducing vehicle mass is considered effective for CO<sub>2</sub> reduction and the application of Ultra-High Strength Steel (UHSS) for body-in-white (BIW) is one of the most significant measures for achieving this. However, higher tensile strength of steel may lead to lower ductility and spot-weldability, and therefore UHSS application had been limited to BIW structural parts with complicated shapes. Nissan has overcome these issues with the world's first 1.2GPa UHSS with high formability, which has been realized with a nano-level complex structure having the optimum chemical composition and the most appropriate production process. This new 1.2GPa UHSS has been applied to new Skyline. This article describes the key technologies for 1.2GPa UHSS, which will be applied to more parts and vehicles for even greater reductions in vehicle mass.

**Key words :** Material, light weight, ultra-high strength steel, high formability, spot weldability, nano-level complex structure, Skyline

## 1. はじめに

昨今の自動車を取り巻く環境は年々複雑化している。中でもCO<sub>2</sub>削減は重要な課題となっており、日産自動車ではCO<sub>2</sub>削減の取り組みとして、中期環境行動計画「ニッサン・グリーンプログラム 2016」を策定している。この中で、企業平均燃費35%改善（2005年比）達成を目標としており、軽量化を重要な方策として推進している。また、セーフティ・シールド「クルマが人を守る」という安全の考え方にに基づき、衝突時の乗員保護を目的とした車体の衝突安全性能の更なる向上に努めている。軽量化を促進しつつ、衝突安全性能を向上させていくため、車体への780MPa以上の超ハイテン材（超高張力鋼板：UHSS）の適用拡大が重要な技術開発テーマとなっている。

## 2. 開発の狙い

一般的に鋼板は引張強度を高めると、延性は低下する傾向がある（図1）。この延性の低下はプレス時の割れにつながることから、複雑な構造を持った車体骨格部品に対

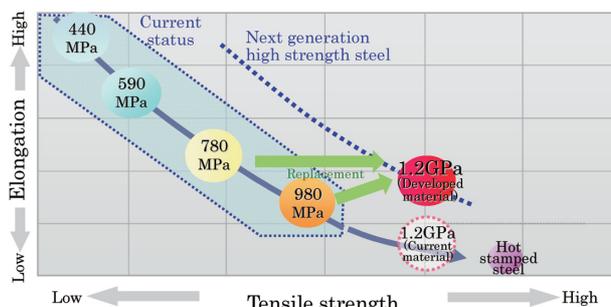


図-1 鋼板 材料強度と延性

Fig. 1 Relationship between tensile strength and formability

\*材料技術部 \*\*Infiniti 製品開発部 \*\*\*車体技術部 \*\*\*\*生産技術研究開発センター

して、980MPaを超える高強度な超ハイテン材の適用拡大は困難とされてきた。そこで、常温にてプレス成形が可能な冷間次世代超ハイテン材として、980MPaおよび780MPa級ハイテン材適用部品への置き換えを狙い、1.2GPa級高成形性超ハイテン材（以下、1.2GPa材と称す）の開発に着手した。

### 3. 採用技術

新型スカイラインに適用した1.2GPa材の採用技術を紹介する。

#### 3.1 材料コンセプト

表1に今回開発した1.2GPa材と従来の980MPa級ハイテン材（以下、980MPa材と称す）の機械的特性値と化学成分を示す。超ハイテン材は主に、衝突時に客室周りの変形を抑制する複雑な形状を持った強度部品に適用される。1.2GPa材はこれらの部品適用を念頭に必要強度（YP, TS）、および成形に必要なとされる延性（EL）、穴広げ性（ $\lambda$ 値）を要求特性とした。従来の980MPa材以上の強度と延性を有する1.2GPa材を実現するべく、金属組織は従来の二相（Dual-Phase: DP）タイプではなく、変態誘起塑性性（Transformation Induced Plasticity: TRIP）効果を発現する残留オーステナイト、軟質なフェライト、硬質なベイナイト、マルテンサイトを最適なバランスで、かつ微細化させた複合組織を採用した。残留オーステナイトを得るためには、製造時の熱処理（過時効処理）においてオーステナイトへの炭素の濃縮を必要とすることから、従来の980MPa材に対し炭素量を増やす成分設計を行った。金属組織および組織構成の概念図を図2に示す。

表-1 1.2GPa材の機械的特性値  
Table 1 Mechanical property of 1.2GPa UHSS

	YP (MPa)	YS (MPa)	EL (%)	$\lambda$ (%)	C量 (%)
1.2GPa材	Min. 850	Min. 1180	Min. 14	Min. 30	Max. 0.19
980MPa材	Min. 600	Min. 950	Min. 10	—	Max. 0.1

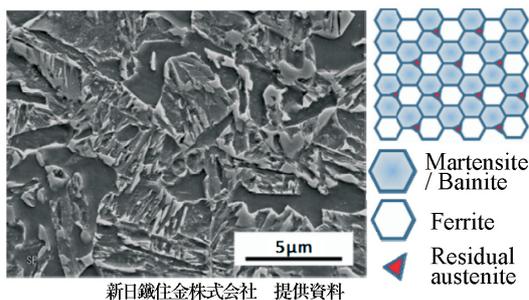


図-2 1.2GPa材の金属組織  
Fig. 2 Microstructure of 1.2GPa UHSS

#### 3.2 成形性

本1.2GPa材は高度な組織制御と化学成分の最適化によって、高い強度と延性を有する機械的特性値を得ることができた。図3に1.2GPa材および980MPa材の応力-歪線図、図4に成形限界曲線（FLD）を示す。1.2GPa材は引張強度、降伏強度が980MPa級より高いにもかかわらず、高延性であり、980MPa同等以上の成形限界を有することが確認できた。

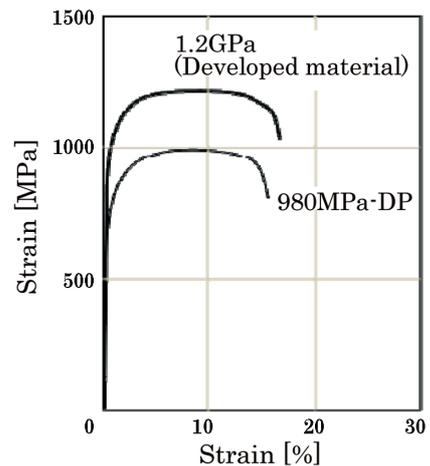


図-3 1.2GPa材のS-Sカーブ  
Fig. 3 Stress-Strain curve of 1.2GPa UHSS

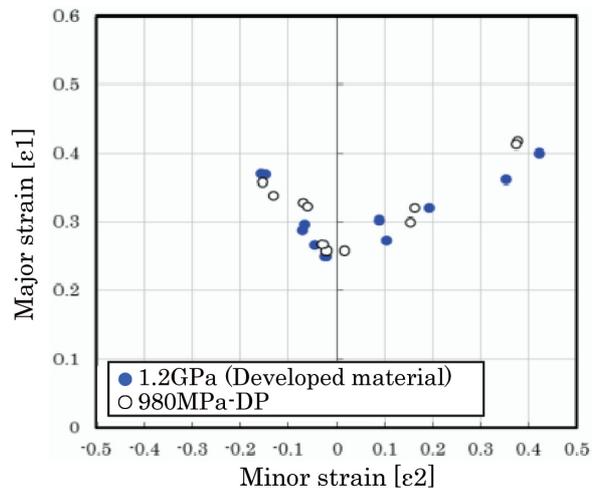


図-4 1.2GPa材の成形限界曲線  
Fig. 4 Forming limit diagram (FLD) of 1.2GPa UHSS

一方、1.2GPa材の適用に当たり、高い降伏強度に比例して発生するスプリングバックやキャンバなどによる部品形状精度への影響が課題として挙げられた（図5、図6）。そこで、CAE解析の精度向上に取り組むことにより、部品形状精度の向上を図った。その一例としてCAE成形解析に適用する材料モデルの高精度化と、金型設計へのCAE技術の活用を実施した。前者はバウシング効果とヤング率予ひずみ依存性を織り込んだ材料モデルを作成し、後者は成形量の増大に伴う金型やプレス機自体の変形量を予測して（図7）成形解析に織り込んだ。これらのCAE

成形解析の高精度化により、現物に近い成形状態を再現することができ、部品形状の精度向上が可能となった。

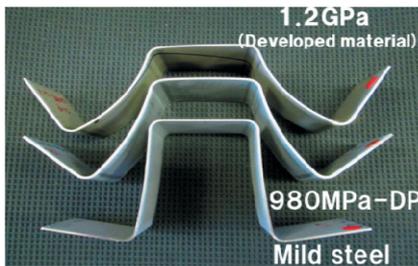


図-5 ハット成形後の外観写真  
Fig. 5 Appearance after hat forming



図-6 センタピラーレイフォースのスプリングバック解析例  
Fig. 6 Springback analysis in center pillar reinforcement

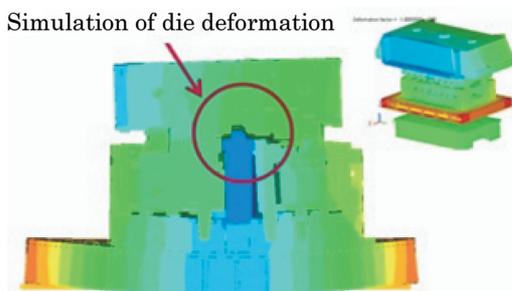


図-7 CAE 解析によるプレス金型変形量  
Fig. 7 CAE structure analysis for die deformation

### 3.3 スポット溶接性

鋼板のスポット溶接性は高強度化するに従い、剥離方向の入力に対する溶接強度（十字引張強度：以下、CTS と称す）が低下する傾向にあることが知られている<sup>1)</sup>。これは高強度化に伴う炭素量の増加により溶接部（ナゲット部）の靱性が低下すること、また高強度化によって母材部の変形が拘束されナゲット部への応力集中が高くなることが要因として考えられる。

本1.2GPa材は、表1に示したように炭素量が従来の980MPa材よりも高い、中炭素鋼であることから、CTSを向上する独自の溶接プロセスを開発した。

まず溶接部破断メカニズムを熱解析シミュレーションや、実験による亀裂の進展方向を分析し、そこからCTS

の向上に向けた次の2点の方策を確立した。

- ①ナゲット端部の結晶粒微細化による靱性向上（図8）
- ②熱影響部の軟化幅の拡大によるナゲット部への応力集中の緩和（図9）

これらの方策を実際の溶接プロセスで発現するべく、従来のスポット溶接通電パターンに、溶接部微細化のための急冷サイクルプロセスと、熱影響部拡大のための通電後のホールド時間を最適化したプロセスを導入した（図10）。このように、加圧力と電流、通電時間を高度に制御する独自の溶接プロセスを確立したことにより、従来ハイテン材と同等以上のCTSを確保することが可能となった（図11）。

Current welding condition Optimized welding condition

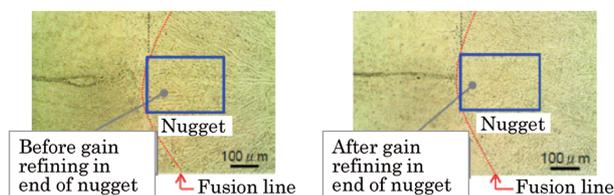


図-8 ナゲット端部の結晶粒サイズ  
Fig. 8 Grain size near nugget boundary

Current welding condition Optimized welding condition



図-9 熱影響部の硬さ分布  
Fig. 9 Hardness distribution in heat-affected zone

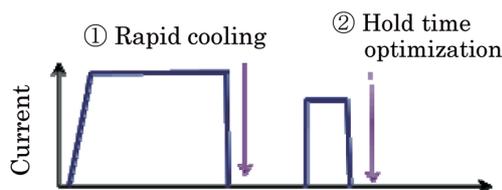


図-10 最適スポット溶接条件  
Fig. 10 Developed spot welding process

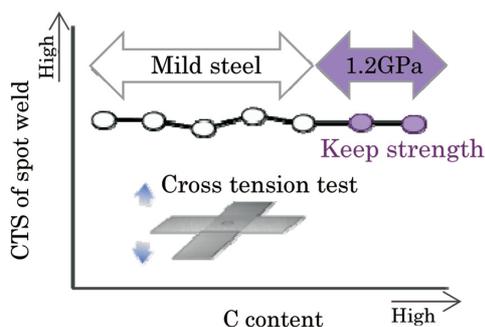


図-11 最適溶接条件での1.2GPa材CTS (t1.6mm)  
Fig. 11 CTS (t1.6mm) of 1.2GPa UHSS with the most appropriate spot-weld process

### 3.4 衝突性能

衝突安全性能の観点として、ピーク反力と吸収エネルギーが重要である。ハット材の落すい衝突試験実験により、従来の980MPa材に対して1.2GPa材のピーク反力は20%向上（図12）し、吸収エネルギーにおいても20%向上（図13）することが確認できた。

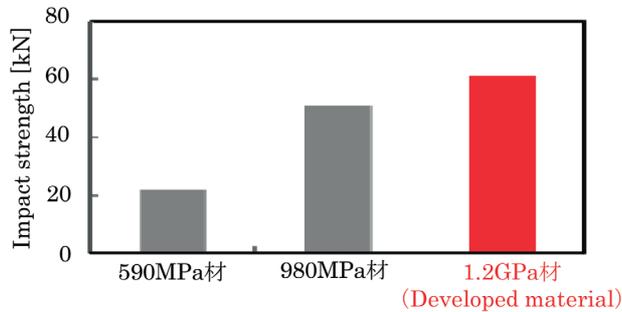


図-12 落すい衝突試験によるピーク反力  
Fig. 12 Impact strength in drop weight test

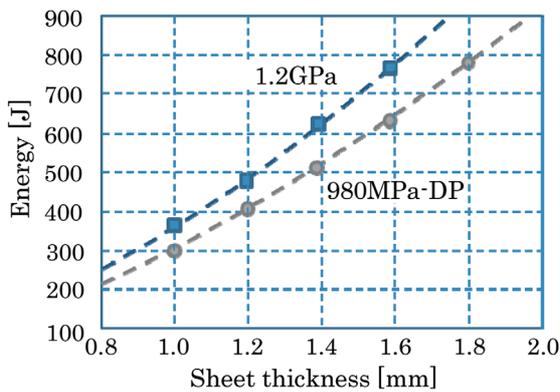


図-13 落すい衝突試験による吸収エネルギー  
Fig. 13 Energy absorption in drop weight test

### 3.5 耐遅れ破壊

一般的に、引張強度が1.2GPa以上の高強度鋼は適用に際し、遅れ破壊に留意する必要があることが知られている<sup>2)</sup>。遅れ破壊とは使用環境から鋼材に侵入する水素によって、ある引張強さ以下の負荷応力のもとで、ある時間経過後に突然脆性的に破壊する現象である。残留応力と環境（水素浸入）が影響することから、本1.2GPa材についても実使用環境下にて、耐遅れ破壊性を見極める必要があった。そこで、侵入水素量の観点から、市場環境や生産時よりも過酷な条件である塩酸浸漬法による評価試験を実施した（図14）。

図15に塩酸浸漬試験後のU曲げ試験（実部品以上の塑性変形を付与した場合）と、センタピラー実部品の外観写真を示す。どちらも亀裂は認められず、良好な耐遅れ破壊性を有することが検証できた。

この要因としては、本1.2GPa材では主に2点①残留オーステナイトを導入したことにより、遅れ破壊性を劣化させ

るセメントタイトの粒界析出の抑制、②残留オーステナイトの水素トラップサイト機能<sup>3)</sup>、が効果的であったと考えられる。

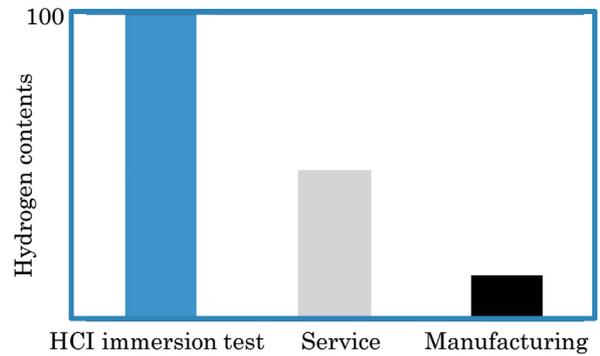


図-14 鋼中への侵入水素量  
(塩酸浸漬試験、市場環境、生産時)  
Fig. 14 Hydrogen contents at HCl immersion test, service, and manufacturing



株式会社 神戸製鋼所 提供資料  
(a)U曲げ (b)センタピラーレイフオース

図-15 塩酸浸漬試験後の外観写真  
Fig. 15 Appearance after HCl immersion test

### 3.6 化成処理性

一般的に、鋼板に残留オーステナイトを導入する際、高いシリコン（Si）量を必要とする。しかしながら、高いSi量は表面にSi系酸化皮膜を生成することから、化成処理性を悪化させると言われている。

本1.2GPa材は鋼板製造時の酸洗プロセスを適正化することにより、鋼板表面の酸化皮膜を低減した。その結果、図16に示した緻密なリン酸亜鉛皮膜（結晶サイズ3 $\mu$ m）が得られ、化成処理性は良好であることが確認できた。

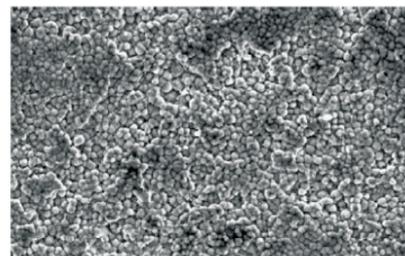
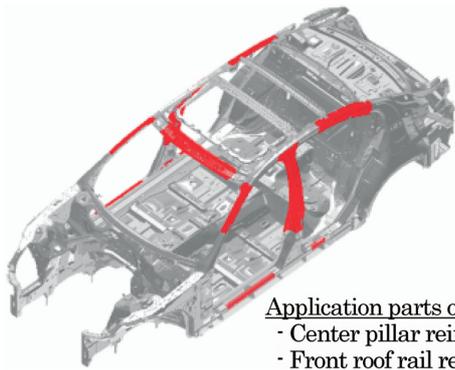


図-16 1.2GPa材化成皮膜のSEM画像  
Fig. 16 SEM image of phosphate coating on 1.2GPa UHSS

### 3.7 車体適用

本1.2GPa材は図17に示す新型スカイラインの衝突性能が要求される上屋骨格の7部位に初めて適用され、6kgの

軽量化へ貢献した。



**Application parts of 1.2GPa UHSS**

- Center pillar reinforcement
- Front roof rail reinforcement
- Side roof rail reinforcement
- Applied in other 4 parts

図-17 新型スカイライン 1.2GPa 材適用部位

Fig. 17 1.2GPa UHSS application on Skyline body-in-white

#### 4. 今後の展望

本1.2GPa材の適用開発により、困難とされた複雑な車体骨格部品への超ハイテン材の採用が可能となり、更なる

軽量化を実現した。今後も世界トップレベルの軽量化をリードし続けるために、日産のキー技術として1.2GPa材を積極的に採用し、更なる軽量化を図っていく。

#### 5. 謝 辞

本1.2GPa材は新日鐵住金株式会社、株式会社神戸製鋼所との共同開発により、世界に先駆けて実用化することが可能となった。本開発に際し、技術の革新に挑戦して頂いた両社、およびその他社内外の関係者各位に深く感謝致します。

#### 6. 参 考 文 献

- 1) 塩崎克美ほか：980MPa級ハイテン材の車体骨格部品への適用開発、自動車技術会、学術講演会前刷集、No. 81-04、pp. 25-28 (2004)
- 2) 松山晋作：遅れ破壊、日刊工業新聞社 (1989)
- 3) 粕谷康二：TRIP型ベイニティックフェライト鋼板の機械的性質に及ぼす合金元素及び焼鈍条件の影響、神戸製鋼技報、Vol. 57、No. 2、pp. 27-30 (2007)

#### ■ 著 者 ■



福原 恵美



石内 健太郎



岩崎 剛



吉田 健



徳光 偉央

# 水性3WET 1プレヒート塗装工程対応材料の開発

Material Development for Waterborne 3-Wet 1 Preheat Paint System

筒井 宏典\*  
Hironori Tsutsui

橋下 健一\*\*  
Kenichi Hashishita

前田 廉\*\*  
Ren Maeda

**抄 録** 塗装工程から排出されるCO<sub>2</sub>は、自動車製造工程全体の約30%を占めるため、塗装工程の短縮がCO<sub>2</sub>削減に効果的である。今回新たに開発した水性塗料を用いた3WET 1プレヒート塗装工程は、従来に比べ30%以上のCO<sub>2</sub>削減を実現し、2013年2月から日産自動車九州に国内初で採用した。新規工法に適合する塗料として、特に、鮮映性（塗装の肌）、耐チップング性、耐候性向上を行ったが、今回は、鮮映性の改良手法について報告する。

**Summary** The shortening of processes is an effective means of reducing CO<sub>2</sub> emission from paint shops, which generate approx. 30 percent of the CO<sub>2</sub> emissions of a vehicle production plant. The newly developed Waterborne 3-Wet 1 Preheat paint system could help reduce CO<sub>2</sub> by 30% or more. The new system has been applied for the first time in Japan since February 2013 at Nissan Motor Kyushu. Development of paint material adapted to the new process centered on paint appearance (paint smoothness), anti-chipping, and weatherability. This article focuses on improvement of paint appearance.

**Key words :** Material, Production Engineering, painting, compact process, CO<sub>2</sub>, appearance

## 1. はじめに

世界の人口増加や急激な経済発展は、気候変動、エネルギーや資源の需給逼迫、自然環境の劣化など、複雑かつ多岐にわたって地球環境に影響を与えていると言われている。自動車産業はCO<sub>2</sub>排出量の削減に取り組むだけでなく、化石燃料の依存から脱却し、ビジネス構造を変革する時代を迎えている。

当社では、中期環境行動計画であるニッサン・グリーンプログラム2016（NGP2016）を策定し、積極的に環境活動を推進している<sup>1)</sup>。NGP2016の活動の一つとして、2016年時点までに、企業活動におけるCO<sub>2</sub>排出量をグロー

### 企業活動におけるカーボンフットプリントの最小化

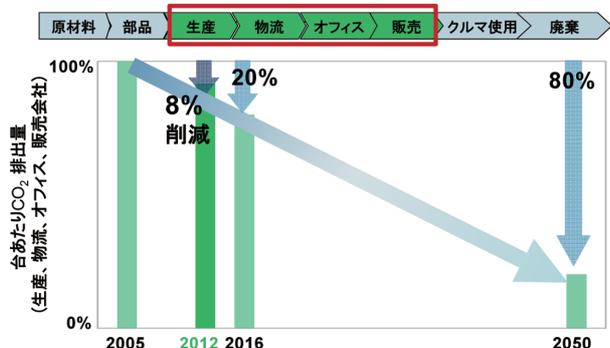


図-1 NGP2016 CO<sub>2</sub>削減のロードマップ  
Fig. 1 Road map of NGP2016 CO<sub>2</sub> reduction

バル販売台数当たり20%削減（2005年度比）に向け取り組んでいる（図1）。

自動車製造工程から排出されるCO<sub>2</sub>の1/3は塗装工程からであり、メインブース・空調機からの排出が40%、次いでオープンが19%であることから、CO<sub>2</sub>削減にはブースとオープンの削減、または短縮が効果的である<sup>2)</sup>。

## 2. 開発の方向性

図2に一般的な水性塗装ラインの変遷を示す。従来は「中塗り塗装・焼付後、ベース塗装、プレヒート（仮焼き）、クリア塗装・焼付」の3コート2ベーク1プレヒート方式が主流であったが、近年は工程短縮が進められている。そ

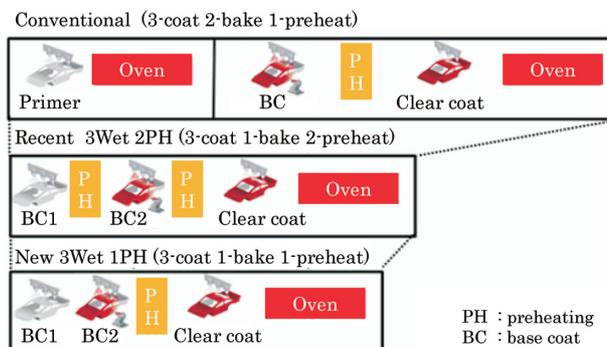


図-2 水性塗装工程の短縮化  
Fig. 2 New waterborne painting process

\*車体技術開発部 \*\*生産技術開発センター

の多くは水性3WET 2プレヒート方式（中塗り工程廃止、プレヒート2回）であるが、今回新たに開発した「水性3WET 1プレヒート方式（中塗り工程廃止、プレヒート1回）」は最も短い工程となる<sup>1)</sup>。

一般的に3WET塗装は、下地隠蔽性の機能を有する中塗り工程がないため、高鮮映性を実現することが難しく、適用できる生産ラインが限られていた。今回最もCO<sub>2</sub>削減が可能な水性3WET 1プレヒート方式で、高鮮映性を達成できる塗料・塗装工法を開発したので報告する。

### 3. 技術課題と達成方策

水性3WET 1プレヒート方式は、無彩色ベース塗装（以下、BC1と称す）がウェットな状態で、カラーベース塗装（以下、BC2と称す）を塗り重ねるため、BC1とBC2の塗料が混ざりあうこと（混層）が、鮮映性低下の主要因である。さらにウェット重ね塗りによるタレ（厚くなって流れる）やワキ（乾燥時に小穴ができる）を抑制するため各層が薄膜になる傾向があり、それが下地隠蔽性の悪化を招き、結果として鮮映性低下に拍車を掛けている。今回、以下の課題解決により鮮映性向上を実現した。

#### ① セパレート樹脂の適用

混層を抑制するセパレート樹脂をBC1、BC2へ添加した。

#### ② 硬化速度の制御

BC1、BC2、クリア塗膜の順番で下層から硬化させる塗装設計とした。

#### ③ 体積収縮の少ないクリア塗料の適用

体積収縮の少ない付加反応を有する酸-エポキシ硬化型塗料、及び2液アクリルウレタン塗料を適用した。

#### ④ 塗装条件の最適化

塗着N.V.（Coating non-volatile：被塗物に塗装された一定時間後の固形分比率）、膜厚条件を検討し、塗料の微粒化、及びレベリング（フロー性）の最適化を進めた。

#### ⑤ BC2の塗料配合チューニング

レベリング効果を最大限に活用する塗料設計とした。

## 4. 実験

上記①～⑤の方策を実証するにあたり、下記の装置を使って実験・評価を行った。

### 4.1 鮮映性測定方法

塗装仕上がり外観は、BYK-Gardner社製Wave Scan DOIを使用して、塗装表面のうねりを6波長（Dullness: <0.1mm, Wa: 0.1-0.3mm, Wb: 0.3-1mm, Wc: 1-3mm, Wd: 3-10mm, We: 10-30mm）に分解し、各波長の鮮映性への寄与率をアルゴリズムとして計算した当社独自の視覚に近い鮮映度（Paint Smoothness Value）により評価した。

### 4.2 剛体振り子による硬化挙動の評価

エー・アンド・デイ社製RPT-3000Wを用い、振り子：FRB300、ナイフエッジ：RBE160、慣性能率：3600にて、対数減衰率、及び周期を求めた。

## 5. 結果と考察

### ① セパレート樹脂の適用

セパレート樹脂をBC1、BC2に配合することにより、ウェットな状態での混層を防止し、鮮映性を向上できた。図3にセパレート樹脂の有無によるBC1、BC2界面の断面写真を示す。下地の肌がより平滑となり、セパレート樹脂による混層抑制効果が確認された。

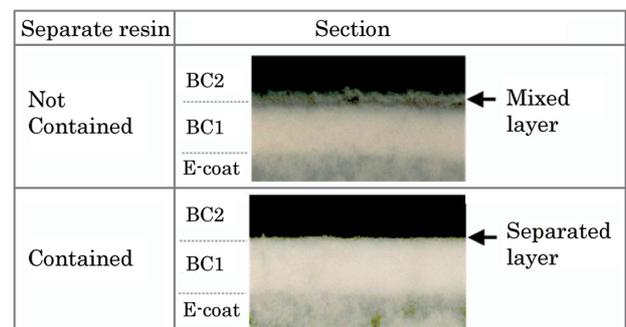


図-3 セパレート樹脂の効果  
Fig. 3 Effect of separate resin

しかし、セパレート樹脂は鮮映性を向上させるものの、密着阻害の要因にもなる。図4にBC2の固形分中の顔料濃度（以下、PWCと称す）とセパレート樹脂添加量が鮮映性、密着性に与える影響を示す。

PWCの高い塗色において、BC2層とクリア層の密着性の低下が確認された。原因として、PWCが高いBC2は顔料リッチのため、元々の凝集力が低いことが挙げられる。さらにセパレート樹脂は極性が低いため、極性の高いクリア塗料の場合は、相溶性が悪くBC2層とクリア層の塗膜層間の密着力が低下する。よって、鮮映性と密着性を両立させるセパレート樹脂の最適な添加量を明確にした。

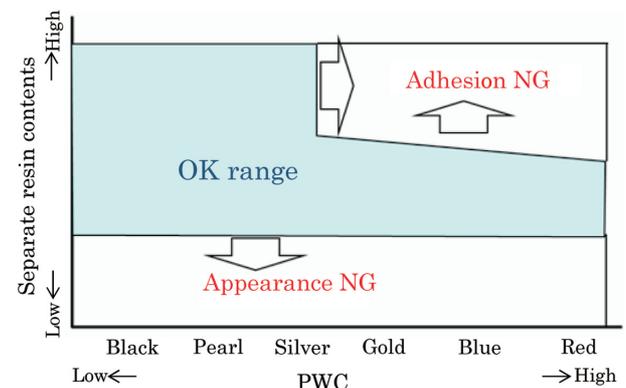


図-4 PWCとセパレート樹脂量の関係  
Fig. 4 Relation between PWC and separate resin contents

② 硬化速度の制御

各層の塗膜硬化速度の制御による鮮映性向上のため、各層の硬化速度を剛体振り子試験機により決定した。図5に測定結果を示す。BC1、BC2、クリア塗膜の下層から順番に硬化させることにより、鮮映性向上に繋げた。

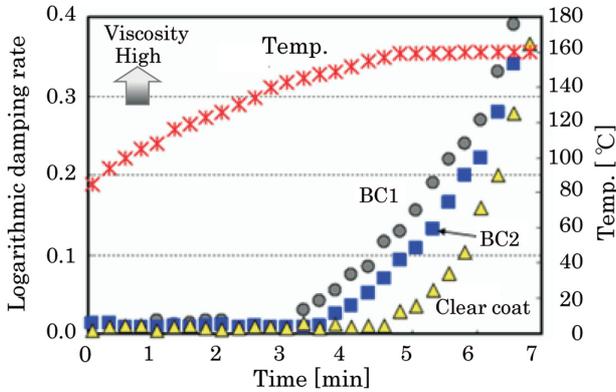
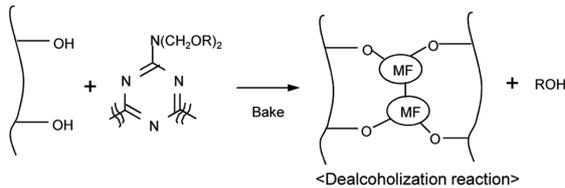


図-5 硬化時間と粘度の関係  
Fig. 5 Relation between curing time and viscosity

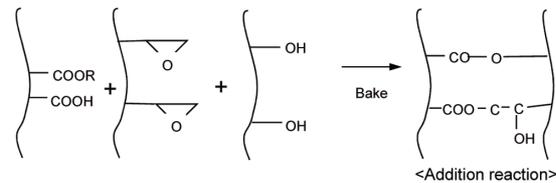
③ 体積収縮の少ないクリア塗料

図6に、主なクリア塗料の反応系を示す。(1) アクリルメラミンは、硬化時に脱アルコール反応をし、体積が収縮する。(2) 酸-エポキシ系及び (3) アクリルウレタンは、付加反応で脱離物が無いため体積収縮は少ない。

(1) Acrylic melamine



(2) Acrylic acid-epoxy



(3) Acrylic urethane

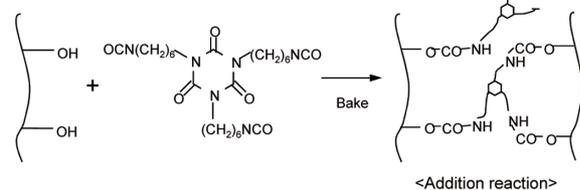


図-6 クリア塗料の硬化プロセス  
Fig. 6 Curing process of clear coat

図7に上記クリア塗料の種別による鮮映性の影響を示す。電着の下地肌を拾いやすい水平面において、体積収縮の少ない酸-エポキシ系及びアクリルウレタンは、アクリルメラミンより20%以上鮮映性が向上し、体積収縮の少ないクリア塗料の適用有効性が確認できた。

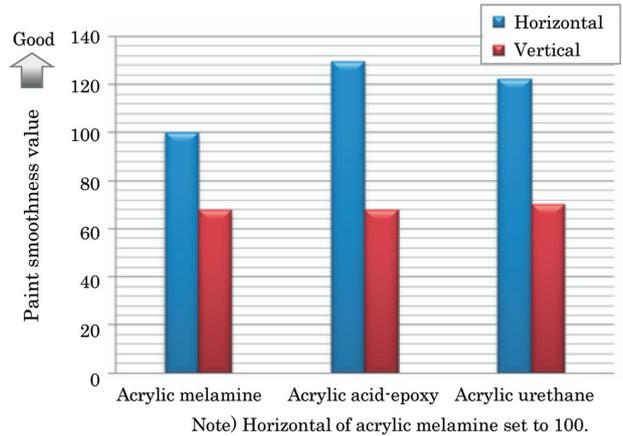


図-7 クリア塗料の種別による鮮映性  
Fig. 7 Appearance by clear type difference

④ 塗装条件の最適化

塗装条件の最適化による鮮映性向上の方策としては、「BC1またはBC2のレベリング性を高めるため厚膜化し、塗着N.V.を下げる。つまり成膜時の塗料中の含有水分量を多くすることでフロー性を高めること」、及び「BC1またはBC2の平滑性を高めるため、低吐出量で塗装する。つまり低吐出量塗装された薄膜塗膜は、ラウンドの浅い短波長となり、平滑性が得られること」の二通りが考えられる。図8に概念図を示す。

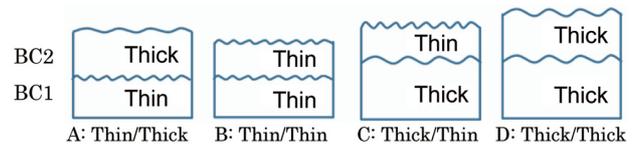


図-8 塗装表面粗さのイメージ図  
Fig. 8 Schematic image of surface roughness

図9にBC1とBC2の膜厚を変化させた場合の鮮映性の結果を示す。薄膜BC1 (A, B) は、塗料微粒化により平滑性が得られるため、厚膜BC1 (C, D) に比べBC2の膜厚変動によるロバスト性が高い。

薄膜BC2 (B) に比べ厚膜BC2 (A) の鮮映性が高い理由は、塗料中の水分量が多く、フロー性が向上したためである。

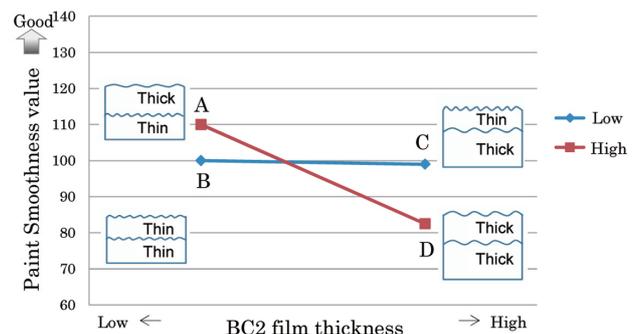


図-9 BC1/BC2の膜厚効果による鮮映性  
Fig. 9 Effect of BC1/BC2 film thickness on paint appearance

一方、厚膜BC1 (C, D) は、BC2の膜厚変動による鮮映性のばらつきが大きく、厚膜BC2(D)は大幅に低下した。これは、厚膜BC1により生じた大きなラウンド (長波長) を、厚膜BC2の塗料含有水分によるフロー性で消すことができなかつたためである。なお、薄膜BC2 (C) は塗料の微粒化により長波長のラウンドを消す方向に働いたと思われる。

上記結果を裏付けるため、鮮映性測定装置Wave Scan DOIによる測定データを図10に示す。Bに比べAが優れる理由は、緻密なBC1に加え、厚膜BC2の含有水分がフローさせたためであり、特に低波長～中波長 (Dullness～Wb)が向上している。また、Cに比べDが悪化した理由は、厚膜BC1の長波長 (Wc～Wd)を厚膜BC2で消せなかつたためである。

以上より、塗装条件はBC1、BC2ともに薄膜のBが鮮映性に対し最もロバスト性があると言える。次項で、Bであっても、Aと同等以上の効果が得られる塗料配合チューニングについて説明する。

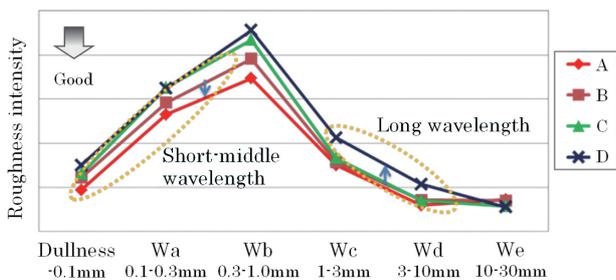


図-10 Wave Scan DOIによる塗装表面うねり測定データ  
Fig. 10 Measured data by Wave Scan DOI

#### ⑤ BC2の塗料配合チューニング

上記AとBの結果から、BC2のレベリング性により鮮映性向上の効果があることが分かつたため、さらなる鮮映性向上の検討として、(1) BC2の低粘度化、(2) BC2の高沸点溶剤添加、(3) BC2の表面調整剤増量によるレベリング性向上を試みた。結果を図11に示す。いずれもBC2の塗着N.V.が下がり、レベリング効果により鮮映性向上が見

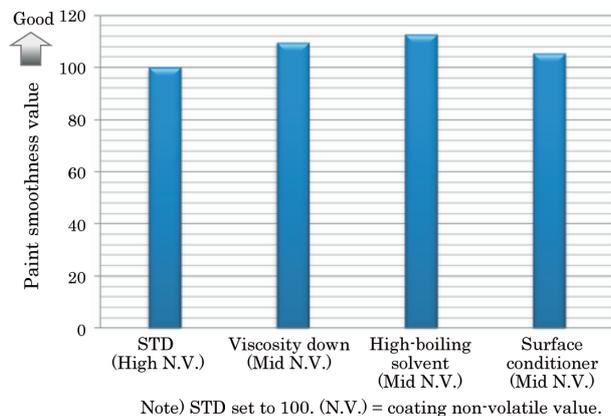


図-11 BC2チューニングによる鮮映性  
Fig. 11 Appearance by BC2 tuning

られた。特に高沸点溶剤の添加の効果が大きく、約15%も鮮映性が向上した。

以上、①～⑤の組み合わせをバランスよく設計することにより、高級車にも対応可能な高鮮映性を実現できる塗料・塗装工法を確立した。

## 6. まとめ

中塗り工程を廃止した水性3WET 1プレヒート塗装にて、高級車にも適用可能な鮮映性を達成した技術内容を以下に述べる。

- (1) BC1、BC2へのセパレート樹脂の適用は鮮映性向上に効果がある。但し、BC2層とクリア層との密着性を低下させるトレードオフ性があるため、BC2のPWCを考慮した最適添加量とした。
- (2) 定量的な硬化挙動の把握により、BC1、BC2、クリア塗膜の順番に下層から硬化させる設計とした。
- (3) クリア塗料としては、硬化時に体積収縮の少ない酸-エポキシ系や2液ウレタン系が有効であることが分かつた。
- (4) BC1、BC2を薄膜とすることにより、ロバスト性のある高鮮映性を実現できる塗装条件とした。
- (5) 高沸点溶剤をBC2に添加し、レベリング性 (フロー性) を高める設計とした。

本開発技術は2013年2月、国内で初めて日産自動車九州に導入した。これにより、中塗りブースとオープンが不要となり、30%以上のCO<sub>2</sub>削減に貢献できた。

本技術は、メキシコ新工場、ブラジル新工場、大連新工場にも応用され、今後さらなるグローバル展開を進める。

## 7. 参考文献

- 1) 日産 環境への取り組み説明会資料、p. 9, 21 (2013)
- 2) 環境報告書2011、大気社、p. 10 (2011)

### ■ 著 者 ■



筒井 宏典



橋下 健一



前田 廉

# 自動車用排気浄化触媒の貴金属低減技術

Platinum Group Metals Reduction Technology for Automobile Exhaust Purification Catalyst

花 木 保 成\*  
Yasunari Hanaki

伊 藤 淳 二\*  
Junji Itou

藤 本 美 咲\*\*  
Misaki Fujimoto

**抄 録** 貴金属代替材料として鉄触媒の排ガス浄化性能と熱劣化特性を調べた。鉄とセリウムの酸化状態が、ナノ構造界面でシンクロしながら鉄が低酸化状態になることで、浄化活性が発現することを見出した。鉄の担持技術を改良し、鉄とセリアが高分散で接触する触媒は、熱耐久後でも貴金属触媒よりも高い排ガス浄化性能を示すことを確認した。

**Summary** Iron is one candidate material that may serve as an alternative to the platinum group metals. We found that the oxidation state of iron and cerium in an iron nanostructures interface expresses purification activity in a low oxidation state. We confirmed that a catalyst with improved iron support technology and in which iron and ceria come into contact in a highly dispersed manner exhibits higher exhaust gas purifying performance than platinum group metal catalysts, even after heat endurance.

**Key words :** Material, Research & Development, catalyst, three-way catalyst, iron, platinum, exhaust gas

## 1. はじめに

近年、新興国を中心としたモータリゼーションの高まりを背景に、自動車保有台数の大幅な増加が見込まれている。しかし、その一方で環境問題が世界的な問題となってきたり、自動車がこれらの問題の根源の一つとしてその利用形態が問われている。長期的にみれば、電気自動車や燃料電池自動車などへ移行していくと思われるが、まだまだハイブリッド車を含む内燃機関が動力の中心であり、限られた資源を有効活用しながら環境保全を図っていくために、排気浄化触媒研究が果たすべき役割は非常に大きい。

図1に貴金属使用量の経年変化を示す<sup>1)</sup>。Pt (白金)、Pd (パラジウム)、Rh (ロジウム) いずれの貴金属も年々増加していることがわかる。これら貴金属は希少資源であり、また南アフリカやロシアなど産出国に限られることから、使用量増大化を抑制することは自動車メーカーにとってコスト負担の低減だけではなく、希少資源の有効活用やリスク低減といった観点からも重要であり、貴金属低減技術への期待は高い。

今日の自動車からの排ガスレベルは、排気規制導入当時の1970年代と比較して1/100以下と非常に高い浄化性能を実現している。しかし、今後見込まれている自動車保有台数の増加や、ディーゼル車およびハイブリッドなどの新システムに対応していく上では、より一層の進化が望ま

れる。これら増大し続ける排気触媒用の貴金属需要の解決策として、貴金属シンタリング抑制技術は重要な技術であり、さらには、貴金属代替技術開発が重要である。

本稿では、これら排気触媒用の貴金属低減技術および貴金属代替技術開発について説明する。

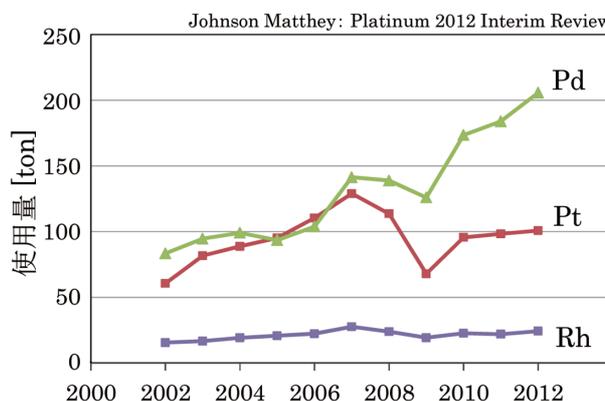


図-1 貴金属使用量の推移  
Fig. 1 Trends in use of platinum group metals

## 2. 排気ガス浄化触媒の劣化と劣化抑制策

### 2.1 貴金属シンタリングメカニズム

排気浄化触媒中の貴金属シンタリングのメカニズムとして、以下の二つが知られている<sup>2)</sup>。

① 貴金属の担持基材上で貴金属粒子が移動し、互いに接

\*先端材料研究所 \*\*材料技術部

触した時点でシンタリングする。

- ② 貴金属の担持基材同士が凝集し、それによって基材に担持されている貴金属がシンタリングする。

これらのうち、どちらがより支配的原因であるのかを確認するため、日産自動車では貴金属にPt、基材に比表面積200m<sup>2</sup>/gのAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を使い、基材であるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を予め700℃で焼成して比表面積を170m<sup>2</sup>/gまで凝集させたものと、焼成しないものにPtを担持し、この二つのPt担持Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を700℃で焼成して、Ptのシンタリング状態を確認している(図2)<sup>3)</sup>。基材であるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の凝集によるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の比表面積低下速度は、予め焼成したものとししないもので大きく違うにもかかわらず、Ptシンタリング速度はどちらも変わらないことがわかる。このことから①のPt粒子が基材上を動き回るといことが、シンタリングの支配的原因であることがわかる。

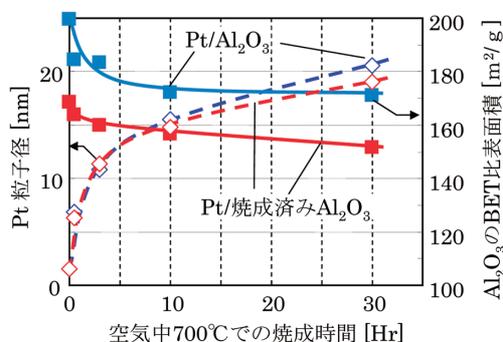


図-2 基材凝集と貴金属シンタリングの関係  
Fig. 2 Relationship of substrate aggregation and platinum group metals sintering

## 2.2 貴金属シンタリング抑制策

貴金属のシンタリングはPtの場合、酸化雰囲気で起こりやすく、Pdの場合は還元雰囲気で行進しやすい。またRhはアルミナへの固溶による活性低下の問題が指摘されている。これらの課題に対しては、種々の添加物による貴金属粒子の移動抑制やアルミナの修飾による固溶抑制が検討されてきた<sup>2)-5)</sup>。しかし、実車の高温で水蒸気を含んだような厳しい使用環境下でのシンタリング抑制は困難であった。これに対し最近、このような条件下でも有効な方策が見出されてきた。A社は、インテリジェント触媒にみられるように、有機化合物を使って貴金属をペロブスカイト型酸化物中に組み込み原子レベルで制御している<sup>6)</sup>。Pt、Pd、Rhといった貴金属を、金属イオンとして酸素イオンと結合させて、ペロブスカイト型結晶を持つセラミックスにする。形成された結晶は排出ガス内の酸素過剰・不足に呼応し、酸素不足時には金属イオンが結晶から出て金属ナノ粒子を形成して、酸素過剰時は結晶内へ戻るといった出入りを繰り返す。この変化の連続が「排気ガスの熱で金属粒子同士が融合して、金属の表面積が減少し、触媒としての浄化性能が低下する」という現象を防ぎ、高い浄化性能を少量の貴金属で発揮・持続することが可能となる。

またB社やC社は、貴金属と基材との間に強い結合力を持たせ、かつ基材の耐熱性を向上することによって貴金属のシンタリングを抑制している<sup>7)8)</sup>。B社のシングルナノ触媒は、セラミックスのサポート材上に貴金属粒子を高分散かつ強固に担持させることで、貴金属の熱によるシンタリングを抑制しようとするものである<sup>7)</sup>。一方、C社は、貴金属と触媒担体表面との間に強い相互作用(アンカー効果)を持たせることでシンタリングが抑制できることを見出すとともに、貴金属ごとに担持基材を適正化し、貴金属使用量の低減と高い浄化性能を両立する技術を開発した<sup>8)</sup>。

日産自動車は、酸化物の種類により貴金属との化学結合力が異なる点を活用したナノ構造設計を行い実用化した。具体的には貴金属との結合力が強いセリア系材料を貴金属の担持基材とし、それを結合力の弱いアルミナ系材料で仕切る構造で、基材凝集を抑えるとともに吸着エネルギーの井戸を形成することで、貴金属の凝集を抑制している<sup>3)</sup>。

Pt触媒粉末を作成し、排ガスによる耐久後(触媒の入口温度900℃、耐久時間30時間)の透過型電子顕微鏡(TEM)による観察結果を見ると、Ptの粒子径は従来触媒では約100nmであったのに対し、新触媒では1/10以下の10nm以下のサイズにまで抑えられている(図3)。

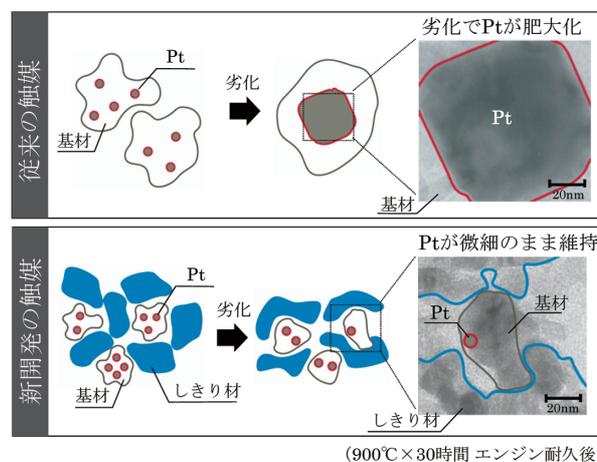


図-3 新触媒コンセプトの貴金属シンタリング抑制効果(TEM像)  
Fig. 3 Platinum sintering inhibiting effect of new catalyst concept (TEM image)

## 3. 貴金属代替材料の開発

自動車用排ガス浄化触媒で使用している貴金属代替材料として、Fe(鉄)、Mn(マンガン)、Cu(銅)など様々な遷移金属が着目されている<sup>9)10)</sup>。著者らは、活性成分としてはもちろんのこと、資源量や安全性、価格などの面からFeに着目し、研究開発を行った。

### 3.1 貴金属代替材料の選定と指針

金属酸化物の触媒作用は、一般的には山形の酸化活性

序列として知られている (図4)<sup>11)</sup>。

縦軸は触媒性能の指標としてエチレンと酸素の共存下において、エチレンが1.8%減少した時の温度である。また、横軸は金属の状態から1モルの酸化物が形成されるに要するエンタルピにおいて、酸素原子あたりで算出した値を示す。この値は言い換えれば、酸素原子1個が金属と結合しているエネルギーとみなすこともできる。酸化鉄がPt、Pdのような触媒作用を有するためにはFeと酸素の結合しているエネルギーを小さくすることが重要であると考えた。そこで著者らは、Feより酸素との結合力が強いCe (セリウム) とFeを組み合わせることにより、酸化鉄の酸素の吸脱着促進の検討を行った。

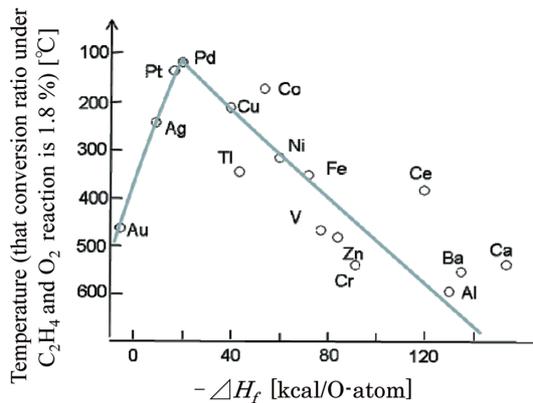


図-4 酸化反応と各金属酸化物の酸素エンタルピの関係  
Fig. 4 Relationship between enthalpy and temperature of starting oxidation reaction

### 3.2 Fe触媒の基本特性

まず、 $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>およびFeOx/CeO<sub>2</sub>のCO酸化反応特性を調べた。FeOx/CeO<sub>2</sub>は共沈法で調製し、 $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は市販品を用いた。また実験には、触媒0.2gを用いガス流通系の触媒反応装置を用いた。500°C、30分間O<sub>2</sub>=10%で前処理を行い、冷却後反応ガス組成をCO=0.4%、O<sub>2</sub>=0.2%、He=balanceとした。昇温速度は10°C/min、ガス流量は50ml/minとし、ガス検出は質量分析計で測定した。

続いて、触媒の酸素の吸脱着特性を把握するため、触媒が還元および酸化雰囲気下にさらされた場合のFeOx/CeO<sub>2</sub>の構造変化について、in situ XANES解析した。図5

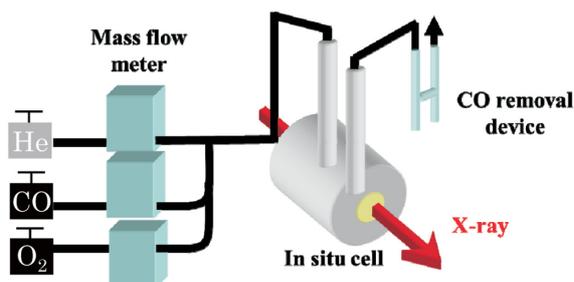


図-5 触媒反応中のXAFS測定 (SPring-8 BL14B2ライン)  
Fig. 5 Set-up for catalytic reaction (XAFS was measured with BL14B2 of SPring-8)

に装置の概略を示す。CO=0.4%、O<sub>2</sub>=0.2%、He=balanceのガスを10°C/min、ガス流量は50ml/minとし昇温速度5°C/minで450°Cまで昇温した後、CO=6%、He=balance、ガス流量50ml/minとO<sub>2</sub>=3%、He=balance、ガス流量50ml/minを5分ごとに交互に繰り返しながら解析を行った。なおこのin situ XANES解析はSPring-8のBL14B2で実施した。

図6に $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>およびFeOx/CeO<sub>2</sub>のCO酸化反応特性を示す。 $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に比べFeOx/CeO<sub>2</sub>が低温からCO酸化活性を示し、さらに高温化においても高いCO酸化活性を持つことが確認できた。

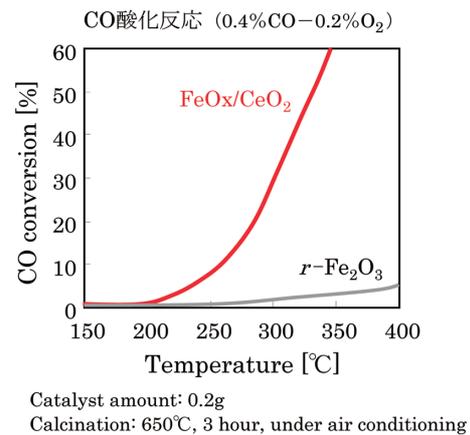


図-6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeOx/CeO<sub>2</sub>触媒によるCO酸化反応  
Fig. 6 CO and oxidation reaction behavior in Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeOx/CeO<sub>2</sub>

図7には、COガスとO<sub>2</sub>ガスを交互にフローしている時のFeの変化とCeの変化を示す。Ceに関する変化の縦軸は、すべてのCeOx状態の合計を100とした場合のCeO<sub>2</sub>の割合を示す。数字が大きいくほどCeが酸化状態であることを意味する。また、Feに関する変化の縦軸はFeのXAFSスペクトルのpre-peakのエネルギーを示し、数字が高いほど酸化状態であることを意味する。 $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>はCOガスとO<sub>2</sub>ガスを交互に切り替えてもFeのXAFSスペクトルのpre-peakのエネルギーの値はほとんど変化しないのに対して、FeOx/CeO<sub>2</sub>のFeのpre-peakのエネルギーの値は、COガスとO<sub>2</sub>ガスの変動に合わせて大きく変化することがわかった。CO雰囲気下ではFeのpre-peakのエネルギーの値が小さくなることから、CO雰囲気下においては酸化鉄の酸素が脱離し、Feが低酸化状態になることが示唆された。したがってFeは、例えばFeOx/CeO<sub>2</sub>のようにCeO<sub>2</sub>に担持して使用することにより酸化鉄の酸素が脱離しやすくなることが確認できた。またCeO<sub>2</sub>に関しても、酸化鉄と接触させることによりCeO<sub>2</sub>の酸素が脱離しやすくなったことがわかった。FeとCeの酸化還元が同時に起こっていることから、酸化鉄とCeO<sub>2</sub>の界面付近の酸素が脱離しやすくなったと考える。

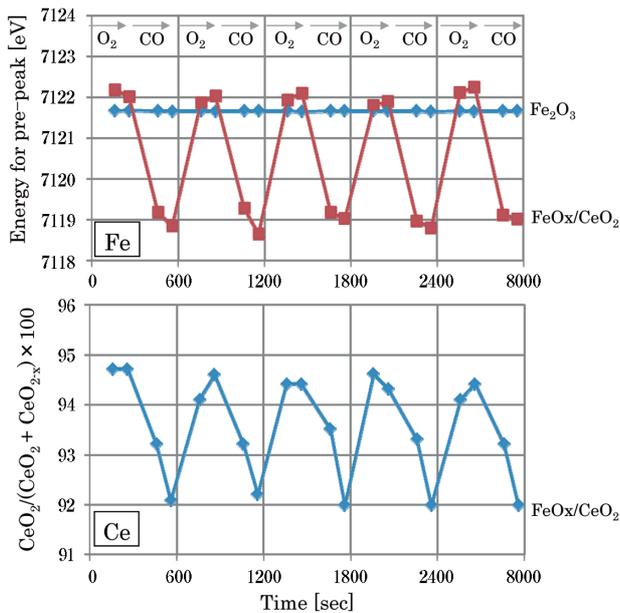


図-7 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeOx/CeO<sub>2</sub> 触媒中の Fe および Ce の酸化還元挙動  
Fig. 7 Oxidation and reduction behavior of Fe and Ce in Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeOx/CeO<sub>2</sub>

### 3.3 Fe 触媒の耐久性

Fe 触媒の実用上の効果把握するため、Fe 触媒 (Fe として 5wt%) と Pt 1.0g/L 触媒の排ガス浄化性能を比較した。フレッシュ状態の Fe 触媒の排ガス浄化性能は高温状態下では比較的高いものの、実機耐久後の性能は大きく低下することがわかった (図8)。

実機耐久後に Fe 触媒が大きく性能低下した劣化メカニズムを解析するために、電界放射型透過電子顕微鏡、およびエネルギー分散型 X 線分光法 (TEM-EDX)、電子線回折により初期と耐久後の Fe の結晶構造、大きさ、存在箇所を観察した。触媒は CeO<sub>2</sub> と ZrO<sub>2</sub> の複合酸化物に Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 換算で 5wt% 担持した材料と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を混合したものを、コーディエライト (2MgO · 2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 5SiO<sub>2</sub>) 製ハニカムにコーティングして用いた。触媒の耐久はエンジン排気により 800℃、50 時間行った。

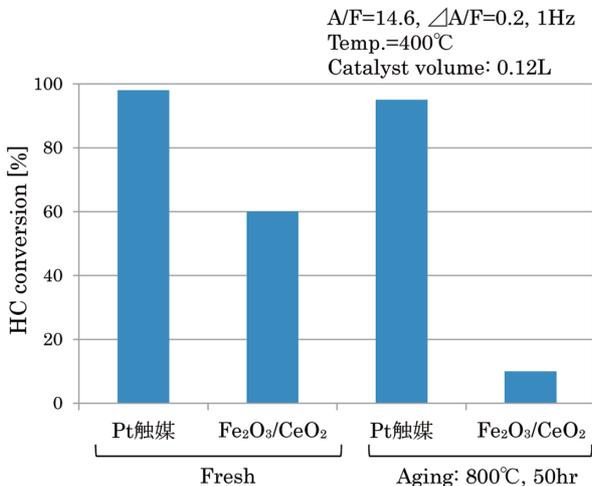


図-8 Fe 触媒の排ガス浄化性能  
Fig. 8 Exhaust gas purification performance in Fe catalyst

TEM により耐久前後の触媒の状態を観察した。図9 に初期、図10に耐久後の TEM 画像を示す。初期では CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 複合酸化物、Fe、Al が独立した粒子として観測された。電子線回折により、Fe はコランダム構造の Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> であると推定される。一方、耐久後の触媒はロッド形状をした粒子から Fe と Al が検出され、電子線回折の結果、スピネル構造の FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> であると推定された。このメカニズムは、高温で排気雰囲気還元雰囲気の際 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の酸素欠陥が生成し、反応性が高い不安定な状態において近傍の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と反応し、不活性なアルミネート化して安定化したと考えられる。

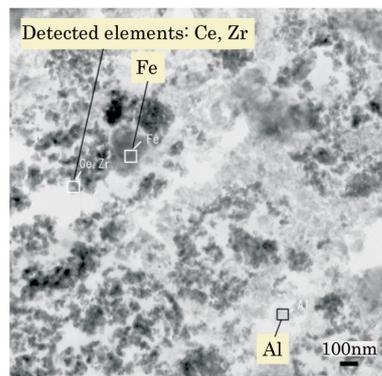


図-9 FeOx/CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の TEM 像 (初期)  
Fig. 9 TEM image of fresh FeOx/CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

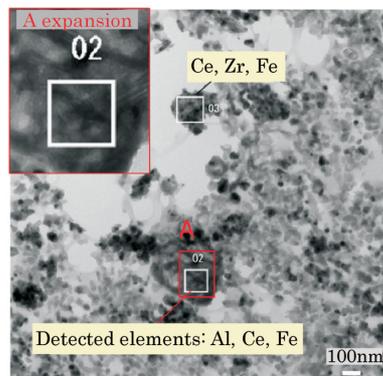


図-10 FeOx/CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の TEM 像 (耐久後)  
Fig. 10 TEM image of aged FeOx/CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

### 3.4 Fe 触媒の耐久性向上策

これまでに、FeOx/CeO<sub>2</sub> 系において Fe が CeO<sub>2</sub> の酸素の吸放出を促進することを明らかにした。また、Fe 触媒の劣化が FeOx のアルミネート化によることを明らかにした。これらを踏まえ、厳しい排気条件にさらされる Fe 触媒が高い触媒性能と耐久性を持つには、Fe と Ce の接触性を上げることがポイントであると考えた。すなわち、Fe と Ce の接触性を上げることで Fe の酸素吸放出をさらに促進し、また FeOx から酸素が抜けた時に近傍にある CeO<sub>2</sub> から潤沢に酸素が補給されることにより FeOx の構造変化を防ぐことができることを期待した。さらに Fe 化合物を、Fe の結晶構造像変化を抑えつつ酸素放出が可能なペロブ

スカイト構造のLaFeO<sub>3</sub>とした。FeとCeの接触性を向上する材料コンセプトとして、基材であるCeO<sub>2</sub>系材料の粒子間にLaFeO<sub>3</sub>の微粒子を担持することが有効であると考えた。CeO<sub>2</sub>系材料は、高耐熱性化およびLaFeO<sub>3</sub>の微粒子の高分散担持を狙い、細孔特性を制御したCeZrNdOxの複合酸化物を用いた。

### 3.5 新コンセプトFe触媒の効果

新規Fe触媒の初期および耐久後について、超高分解能を持つ走査透過型電子顕微鏡 (STEM-EDX) を用いて観察した。

初期の状態を図11に示す。図11(a)は基材であるCeZrNdOxの複合酸化物のSTEM-EDX画像である。青く表示してある箇所がEDXマッピングによりCe元素の存在を示し、黒い部分が空隙である。これにLaFeO<sub>3</sub>を担持した鉄化合物が図11(b)であり、青色部分のCeに加えて、黄色部分のLaおよびFeの存在箇所を重ね書きしたものである。これより基材のCeZrNdOxの複合酸化物の細孔に20~30nm程度のLaFeO<sub>3</sub>と思われるペロプスカイト構造の粒子が観察され、期待通りの構造になっていることがわかった。ペロプスカイト構造の確認は、電子線回折により行った。

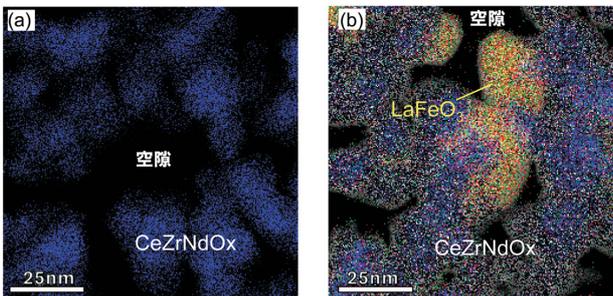


図-11 CeO<sub>2</sub> (a) と Fe 複合材料 (b) の STEM/EDX 像 (初期)  
Fig. 11 STEM/EDX images of fresh CeO<sub>2</sub> (a) and fresh Fe composite (b)

耐久後の状態を図12に示す。STEM-EDXマッピングにて水色部分がCe、黄色部分がLaおよびFeの存在を示す。耐久後もLaFeO<sub>3</sub>粒子が変質や凝集することなく存在することが確認され、新コンセプトにより高い耐久性を持つ鉄

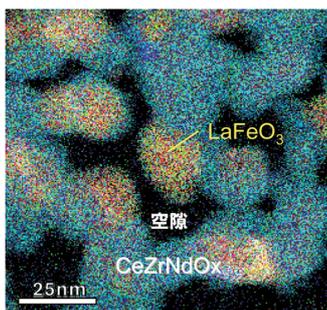


図-12 Fe 複合材料の STEM/EDX 像 (耐久後)  
Fig. 12 STEM/EDX image of Fe composite aged at 800°C

化合物が得られた。装置は原子分解能分析電子顕微鏡 JEM-ARM200F (日本電子社製)、EDX 検出器 Centurio (日本電子社製) で加速電圧 200kV にて測定した。

新コンセプト Fe 触媒の実用上の効果把握するため、新 Fe 触媒 (Fe として 5wt%) と Pt 1.0g/L 触媒の排ガス浄化性能を比較した。結果を図13に示す。耐久後の排ガス浄化性能が大きく向上し、Pt 触媒とほぼ同等性能を発現することを確認できた。

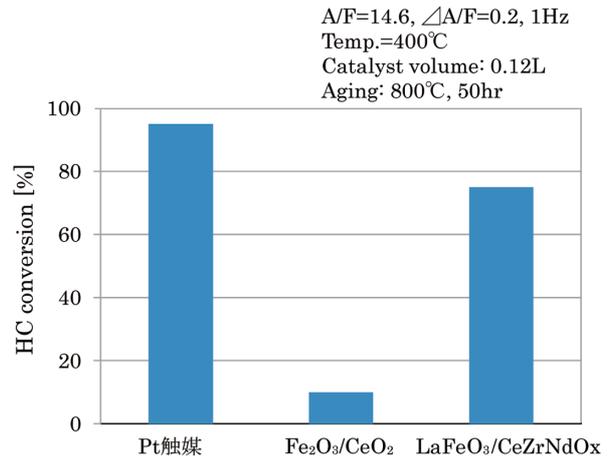


図-13 新 Fe 触媒の排ガス浄化性能  
Fig. 13 Exhaust gas purification performance in new concept Fe catalyst

### 3.6 Rh 添加 Fe 触媒の効果

新規に開発した Fe 触媒に貴金属凝集抑制技術を適用した Rh を微量添加 (貴金属のみの触媒で使用している貴金属使用量の約 10%) した触媒粉末を用いて、実際に車載されているサイズの触媒を試作し排ガス浄化性能を把握した。ガソリン車には一般的に、エンジンのマニホール直下とアンダーフロア (床下) の 2 箇所に触媒が配置されている。今回は、床下触媒に新 Fe 触媒を試作し、その後エンジンで耐久試験を行い、排ガス浄化性能を確認した。

新規に開発した Rh 添加 Fe 触媒は、貴金属使用量が Pt+Rh 触媒の 10% 以下にもかかわらず、Pt+Rh 触媒と同等の性能を示すことを確認した (図14)。

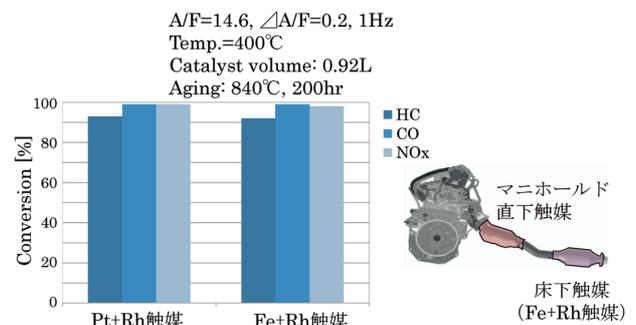


図-14 新 Fe+Rh 触媒の排ガス浄化性能  
Fig. 14 Exhaust gas purification performance in new concept Fe+Rh catalyst

#### 4. ま と め

貴金属代替材料としてFe触媒の排ガス浄化性能と熱劣化特性を調べた結果、以下の知見を得た。

- (1) FeとCeの酸化状態が、ナノ構造界面でシンクロしながらFeが低酸化状態になることで、浄化活性が発現することを見出した。
- (2) Fe触媒の劣化がFeOxのアルミネート化によることを明らかにした。
- (3) Feの担持技術を改良し、Feとセリアを高分散状態で接触させることにより、熱耐久後も高い排ガス浄化性能を示すことを確認した。
- (4) 新たに開発したFe触媒に微量のRhを添加した触媒により、貴金属使用量を大幅に削減できる可能性があることがわかった。

近年、地球規模での環境保全の意識が高まり、様々な制約を受けつつ解決すべき課題が山積している。今回ご紹介した研究事例以外にも、数多くの多角的なアプローチにより課題解決に向けた努力がなされている。希少元素である貴金属使用量を低減していく研究は、サステナブルな社会を築いていく上で終わりは無い。

#### 5. 謝 辞

本研究における貴金属代替材料の開発は、NEDO「希少金属代替材料開発プロジェクト」から委託を受けて実施いたしました。関係各位に深く感謝いたします。

#### 6. 参 考 文 献

- 1) Platinum 2012 Interim Review, Johnson Matthey, pp. 54-59 (2012)
- 2) 村上雄一ほか：触媒劣化メカニズムと防止対策、東京、技術情報協会、pp. 23-26, 109-125 (1995)
- 3) 中村雅紀ほか：触媒中の貴金属使用量半減を可能とする超微細貴金属触媒の開発、自動車技術会 論文集、Vol. 40、No. 4、pp. 985-990 (2009)
- 4) A. F. Diwell et al. : The Role of Ceria in Three-Way Catalysts, Studies in Surface Science Catalysis, Vol. 71, pp. 139-152 (1991)
- 5) L. L. Murrell et al. : Laser Raman Characterization of Surface Phase Precious Metal Oxides Formed on CeO<sub>2</sub>, Studies in Surface Science Catalysis, Vol. 71, pp. 275-289 (1991)
- 6) M. Taniguchi et al. : Thermal Properties of the Intelligent Catalyst, SAE Technical Paper No. 2004-01-1272 (2004)
- 7) 高見明秀ほか：シングルナノテクノロジーを活用した貴金属微量担持高性能三元触媒、自動車技術会 シンポジウムテキスト、No. 07-08、pp. 33-38 (2008)
- 8) N. Takagi et al. : Sintering Mechanism of Platinum Supported on Ceria-Based Oxide for Automotive Catalysts, SAE Technical Paper No. 2006-01-0413 (2006)
- 9) 浅田照朗ほか：アルミナ細孔内外へのLaMnO<sub>3</sub>の選択担持手法の開発とその触媒特性、触媒、Vol. 56、No. 6、pp. 487-489 (2008)
- 10) 高橋晶士ほか：ガソリンエンジンの排ガス浄化性能を向上する鉄触媒技術の開発、自動車技術会 論文集、Vol. 45、No. 2、pp. 197-202 (2014)
- 11) 清山哲郎：金属酸化物とその触媒作用、東京、講談社、p. 15 (1978)

#### ■ 著 者 ■



花 木 保 成



伊 藤 淳 二



藤 本 美 咲

# 電動パワートレインの進化を支える材料技術

Material Technology for Evolution of Electric Powertrain

村上 亮\*  
Ryo Murakami

川下 宜郎\*  
Yoshio Kawashita

杉 千花\*  
Chika Sugi

小川 和宏\*\*  
Kazuhiro Ogawa

肥塚 洋輔\*\*  
Yousuke Koiduka

**抄 録** 近年、日産では「ニッサン・グリーンプログラム 2016」に基づき、電気自動車やハイブリッド車の販売、普及に注力している。これらの環境対応車ではモータ、インバータを含む電動パワートレインが動力性能や電費、燃費を左右する重要な役割を担っている。本稿ではモータ、インバータの性能向上やコスト低減を支える材料技術を紹介する。

**Summary** Recently, Nissan has been looking to expand the sales of its electric and hybrid vehicles based on the Nissan Green Program 2016. In these environment-friendly vehicles, the electric powertrain (including the motor and inverter) takes the important role of controlling driving performance and energy efficiency. This article presents material technology to support improved performance and cost reduction for the motor and inverter.

**Key words :** Material, Electric Equipment, electric vehicle (EV), hybrid vehicle, electric motor, inverter, magnetic property, thermal property, electric property, bonding

## 1. はじめに

日産自動車は、2016年度までの中期環境行動計画「ニッサン・グリーンプログラム 2016」<sup>1)</sup>の中で「ゼロ・エミッション車の普及」「低燃費車の拡大」を大きな柱としている。目標を達成する上で電気自動車およびハイブリッド車においては、それらの動力性能およびエネルギー効率を左右するモータ、インバータを含む電動パワートレインの開発が重要である。モータ、インバータには特に磁性、電気、熱的な機能を持った材料が多く使用されており、これらの材料技術が電動パワートレインユニットの小型化、信頼性を確保し、車載を可能にするとともに、さらなる進化を支えている。

本稿ではモータ、インバータ向けに開発を行っている材料技術について、具体的な採用例を交えながら紹介する。

## 2. モータ向け材料

### 2.1 モータ向け材料概要

電気自動車およびハイブリッド車の電動パワートレインには埋込磁石型同期モータと呼ばれる高効率高出力モータが使用されている。例として図1に電気自動車、日産リーフに搭載されているモータの外観を、図2には埋込磁石型同期モータの主要部品と使用材料を示す<sup>2)</sup>。



図-1 日産リーフ用モータ外観  
Fig. 1 Motor for Nissan LEAF

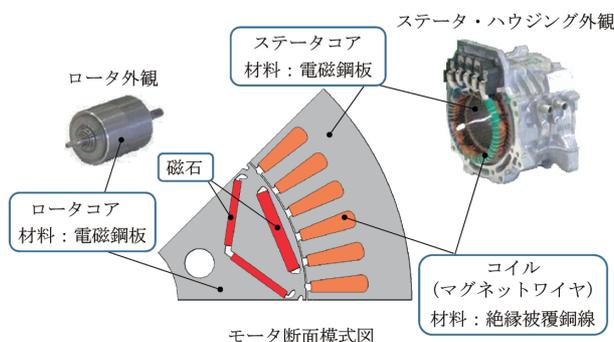


図-2 埋込磁石型同期モータの主要部品と使用材料  
Fig. 2 Main parts and materials for electric motor

\*先端材料研究所 \*\*材料技術部

埋込磁石型同期モータには、高性能磁石であるNd-Fe-B磁石（以下、ネオジウム磁石と称す）がロータコアに挿入されている。また、ロータコア、ステータコアは積層された電磁鋼板からなり、モータ内部の磁気回路を構成している（図2）。

モータを構成する材料の中でも特に磁石、電磁鋼板の特性は、モータの出力と効率に大きな影響を及ぼすため、継続的な特性改善が要求されている。以下、モータ用磁石材料に対する日産での取り組みについて紹介する。

## 2.2 磁石材料の特性改善と資源リスク低減

一般に高出力モータ用の磁石には高い残留磁束密度が求められるが、一方で、コイルおよびコア部品の発熱に起因して磁石が高温に曝されるため、高温でも磁力が減少しない耐熱性も求められる。よって、ネオジウム磁石の耐熱性を高めるために、レアアースの一つであるジスプロシウム（Dy）を添加するのが一般的である。使用温度域によっては10wt%近くDyが添加されている場合もあり、他の用途に比べて搭載磁石量の多い電動パワートレイン用モータでは特にDyの使用量が多くなる傾向にある。電気自動車およびハイブリッド車の普及などにより、世界的にDyの需要は伸びると予測されている反面、主要産出国である中国からの供給増加は期待できず、中国外からの供給動向も不透明であることから、価格高騰や供給のリスクが高くなる懸念されている。また、現在は落ち着きを取り戻したものの過去には2010年の諸島問題をきっかけにDy価格が高騰した経緯もあり、電動パワートレインの価格低減、安定供給のためのDy削減は必須の課題となっている。

最近では、磁石の性能をより向上しつつ、Dy使用量を削減できる技術として、粒界拡散技術による省Dy磁石の開発が盛んに行われている。日産では図3に示す粒界拡散技術を用いた磁石を2012年11月に日産リーフに採用し、Dy使用量の40%削減を達成している<sup>3)</sup>。

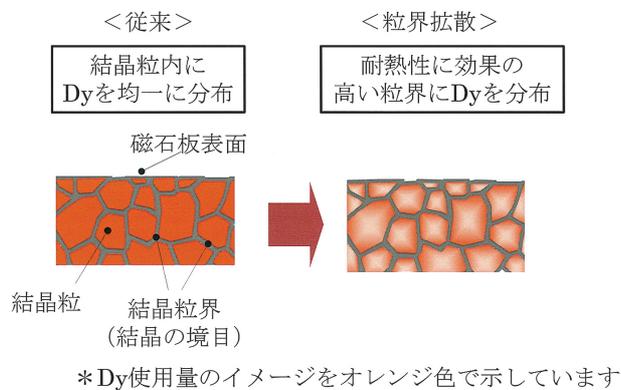


図-3 磁石の粒界拡散技術  
Fig. 3 Grain boundary diffusion technology for magnet

図4に磁石の製造工程を示す。従来技術では、Dyは原料合金溶製の段階で添加されるため、焼結後の製品磁石

においてDyは結晶粒内に均一に分布する。しかしながら、Dyは結晶粒界近傍に存在した方が耐熱性向上の効果が大きいことが分かっているため、理想的には結晶粒界近傍にDyが濃縮した状態を作り出すことが求められる。

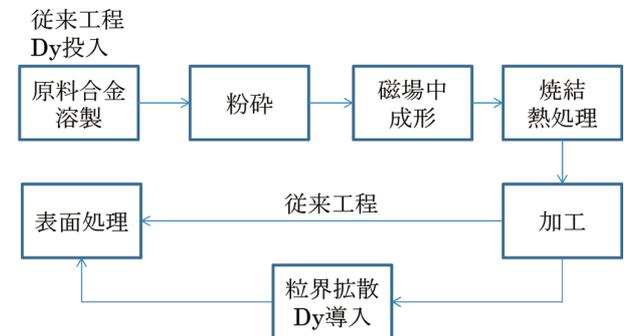


図-4 磁石製造工程  
Fig. 4 Production process for magnet

粒界拡散技術は、磁石を板状の製品形状に加工した後、磁石表面からDyを粒界に沿って磁石内部に拡散させる技術であり、効果的に粒界近傍にDyを濃縮することができる。これにより従来同等の耐熱性を得るために必要な結晶粒内部のDyを削減することが可能となる。結晶粒内部のDyが削減できることで、磁束密度の向上という効果も得られ、モータ出力の向上にも寄与する。磁石表面からの拡散となるため、採用にあたっては有効に耐熱性を向上できる拡散深さが課題となるが、日産では部位ごとの耐熱性向上効果について詳細検討を実施することで、最適な磁石形状を見出し、いち早く電動パワートレイン用モータへの採用を実現している。

## 2.3 電磁鋼板の低鉄損化

特に電気自動車ではモータによってのみ駆動力を得るため、モータの消費電力を低減することが直接、航続距離延長につながる。モータの効率を下げる要因となる損失には、大きく分けて銅コイルのジュール発熱による損失（銅損）と、ロータおよびステータコアに用いられる電磁鋼板の発熱による損失（鉄損）が挙げられる。モータが軽負荷で動作している場合には、特に鉄損の割合が高くなるため、電磁鋼板の低鉄損化が求められている。

一般的にモータ向け無方向性電磁鋼板として各鉄鋼メーカーからは0.5mm、0.35mm厚さの製品がラインナップされているが、電気自動車用モータではさらなる効率向上のために、鉄損の中でも特に渦電流損失を低減できる薄手電磁鋼板の採用が効果的である。ただし、電磁鋼板を薄くする場合には、圧延工程のコストアップ、コア部品構成のための積層時に用いるかしめ締結が困難となるなどの課題がある。日産ではコスト低減、積層工程の成立性および低鉄損化を両立する薄手鋼板として0.3mm厚さを選定し、日産リーフに採用している。

また一般的に、モータ用電磁鋼板に対して面内方向に圧縮応力を付与すると鉄損が増加し、反対に、引張応力を付与すると鉄損が軽減する現象が生じることが知られている<sup>4)</sup>。よって、モータ組立時のステータコアをハウジングに固定する際に焼ばめなどの圧縮応力が入ることで鉄損が増加してしまう懸念がある。そこで、日産では応力印加時の鉄損増加を抑制する技術についても、研究を行っている。

圧縮応力による鉄損増大を緩和するため、あえて応力分布やひずみ量に影響するような表面加工を導入して、圧縮応力下での鉄損を評価した。図5は、一般的な0.35mm厚さの電磁鋼板の短冊形状試験片に、500 $\mu$ mピッチで溝形状加工を表面に施したものと加工無しの状態のものを、単板磁気測定器（SST）を用いて磁気測定を行い比較した結果である。30MPaの圧縮応力下では、表面加工した方が、鉄損が低減する結果が得られている。

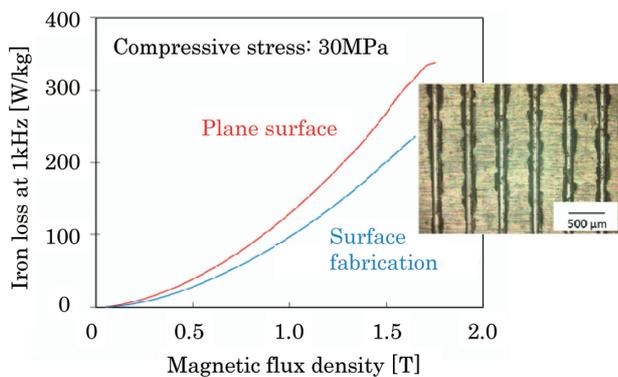


図-5 SSTによる鉄損評価結果  
Fig. 5 Iron loss evaluation result measured by SST

さらに15kW-30N・mクラスの埋込磁石型同期モータで、ステータコアの圧縮応力がかかる部位に表面加工を施した場合の鉄損低減効果を織り込んで、モータ効率への寄与を解析した。結果を図6に示す。電流負荷が小さく回転数が高い領域で、モータ効率の改善効果が大きくなる結果が得られている。

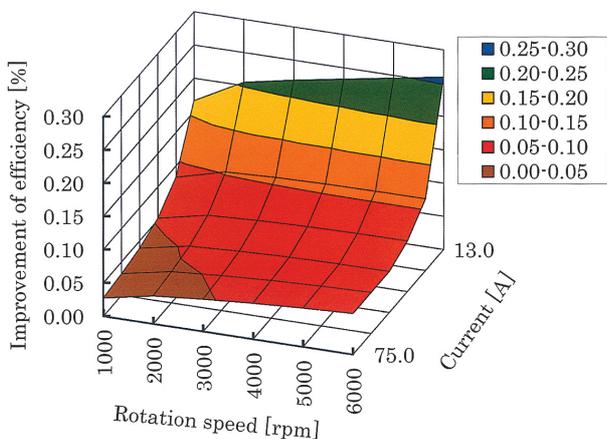


図-6 モータ効率改善効果の解析結果  
Fig. 6 Analysis result of improvement for motor efficiency

これらの結果から、モータ内で圧縮応力がかかる部位に使われる電磁鋼板に表面加工を施すことで鉄損が低減でき、モータの効率を改善できる可能性があると考えている。

### 3. インバータ向け材料

#### 3.1 インバータ向け材料概要

電気自動車およびハイブリッド車の電動パワートレインに使用されるインバータの例として、日産リーフに搭載されているインバータの内部構造を図7に、パワーモジュールの主要部品と使用材料を図8に示す。インバータはパワーモジュール（IGBT）、キャパシタ、モータコントローラ、ウォータージャケットなどにより構成されている。パワーモジュールは銅とモリブデンの合金（CuMo）からなる緩衝板を介して、シリコン（Si）半導体を銅バスバーに直接マウントする構造をとっている。また、パワーモジュールとアルミニウム（Al）合金製ウォータージャケットの間は、両者を電気絶縁する絶縁シートで構成されている。

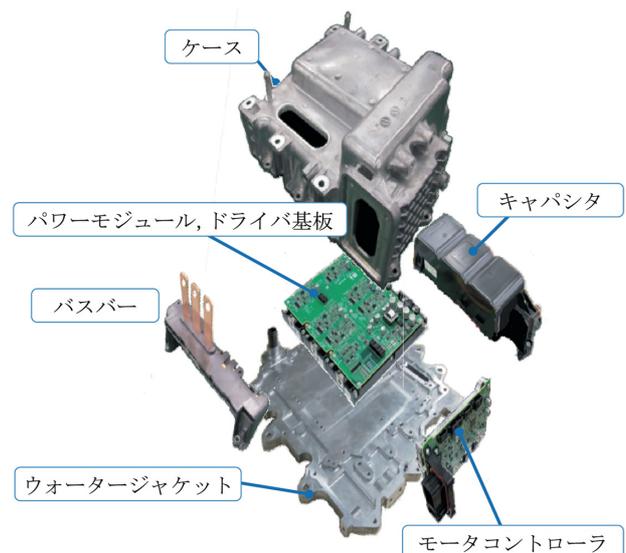


図-7 日産リーフ用インバータ内部構造  
Fig. 7 Inverter for Nissan LEAF

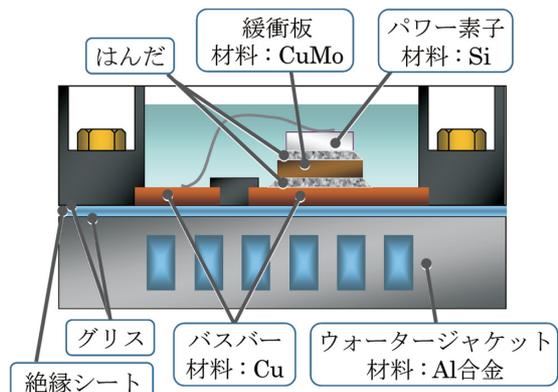


図-8 パワーモジュール主要部品と使用材料  
Fig. 8 Main parts and materials of power module

電動パワートレイン用インバータには、小型高出力化、耐久信頼性、コストの適正化が求められるが、これらの課題に対しインバータの中では、パワーモジュールの影響が最も大きい。これらの解決に向けては、放熱設計の最適化により熱抵抗を低減するアプローチと、半導体から発生する損失を低減するアプローチがある。

以下、絶縁材およびウォータージャケットの熱対策、並びに低損失の炭化ケイ素 (SiC) 半導体の実用化に向けた高温実装技術に関する日産での取り組みについて紹介する。

### 3.2 インバータ用材料の高熱伝導化

日産リーフで採用したパワーモジュール構造 (図8) は非絶縁型モジュールに分類されるが、絶縁機能を持つ絶縁シート周辺の熱抵抗が高くなりやすいという課題があった<sup>5)</sup>。そこで、半導体から冷却水までの間の熱抵抗 $R_{th(j-w)}$ を低減するため、日産では絶縁シートの熱伝導率向上と、その上下界面の接触熱抵抗の低減に取り組んだ。

絶縁シート自体の熱伝導率を向上させるには、ゴムシート以外のセラミックスシートなどを選択する方法も考えられるが、コストの適正化、表面凹凸への追従性や動作温度などを総合的に検討した結果、基材にはSiゴムを選択した。さらにシートに添加する熱伝導性セラミックスフィラーの材質・サイズなどの調整やフィラー中の導電性不純物をコントロールする技術により、熱伝導率の向上を図った。その結果、従来レベルの耐電圧性と可とう性を維持したまま、熱伝導率を2倍程度に改善することができた。

一方、表面の微小な凹凸による界面の熱抵抗を低減するため、熱伝導グリスを使用することとし、フッ素 (F) 系グリスを開発した。ここで、一般的に用いられているSi系のグリスを用いると、グリス中のオイル成分がシート中に吸収され、グリスが固着した状態となる。この状態で温度サイクル負荷を受けると、絶縁シートに亀裂が入り、絶縁不良を起こしやすいという問題がある。そこで、前述のF系グリスを用いることにより、熱抵抗を低減しつつ、耐久信頼性・熱疲労試験による絶縁不良の発生を防止した。

図9には熱抵抗低減に関して、同一条件で試験した熱抵抗と熱疲労試験評価結果を示している。絶縁シートの熱伝導率が向上した効果とF系グリスを用いた効果により、半導体～冷却水間の熱抵抗 $R_{th(j-w)}$ が約30%低減し、Siゴム～Si系グリスの組合せでの絶縁信頼性の問題も解消された。図9の横軸は熱疲労寿命を示すが、F系グリスを使った仕様では、熱伝導率を向上させたシートとの組合せでありながら、目標に到達した。相対的にはF系グリスを用いることで、熱疲労寿命をSi系グリス比で約6倍に延ばすことができた。この熱伝導率を向上させた絶縁シートおよびF系グリスは日産リーフに採用済みである。

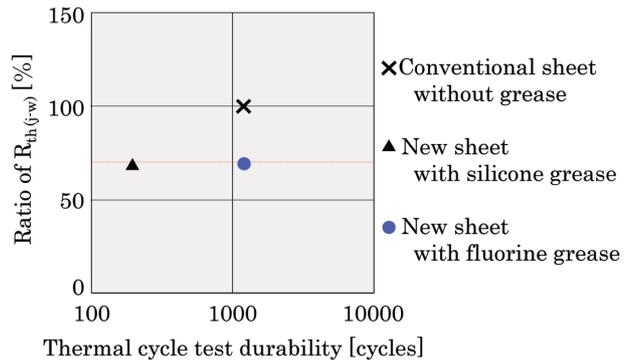


図-9 熱抵抗と耐久信頼性  
Fig. 9 Thermal resistance and durability of insulated sheet and grease

また、絶縁シートの下部にはウォータージャケットが配置されるが、このウォータージャケットの性能も半導体の冷却にとって重要な因子となる。ウォータージャケットの熱対策としては、フーガ ハイブリッド向けでは高熱伝導のAl合金を使用し、ウォータージャケット自体の固体伝熱量を向上させた例がある<sup>6)</sup>。

### 3.3 ウォータージャケットー冷媒間の熱伝達向上

ウォータージャケット自体の小型化に重要な固体から流体への伝熱においては、高熱伝達、低圧力損失となる伝熱面実現に向け、ディンプル構造などによる伝熱促進技術が報告されている。しかしながら、実際にこれら微細構造伝熱面が放熱器や熱交換器に適用された事例は少なく、工業利用を推進するには、さらなる形状、流動条件の検討が必要である。そこで日産では、高熱伝達、低圧力損失となる小型ウォータージャケット実現に向け、伝熱面近傍の渦流れを利用した表面構造 (Back step groove、以下B.S.G.と称す) を提案し、開発を行っている。

図10に平滑面、B.S.G.、櫛歯状フィンの圧力損失と熱通過係数の関係を示す。B.S.G.の伝熱特性 (熱通過係数) がフラット面に対して同一圧力損失で4倍程度高く、さらに櫛歯状フィンに対しても、同一圧力損失で同等以上となる領域が存在している。図11に、この時のB.S.G.の伝熱面近傍の流れのLDV (Laser Doppler Velocimetry) 計測結果を示す。溝内部にバックステップ流れに類似した渦流れが生じており、これにより伝熱面近傍のみが攪拌 (かくはん) され、圧力損失の増加を抑えつつ、熱通過係数が大きくなったと考えられる。この渦流れが流動条件に応じて変化するため、特定の条件でより伝熱が促進すると考えられる<sup>7)</sup>。本技術により、ウォータージャケットの大型化・複雑構造化の要因となるフィン構造を代替することで、小型、低廉なウォータージャケットが実現できると考える。

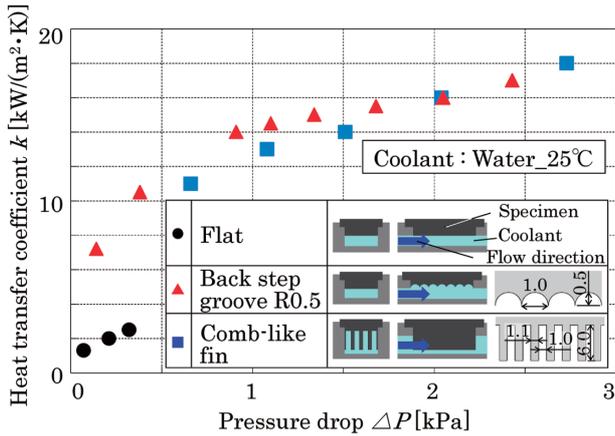


図-10 圧力損失と熱通過係数の関係

Fig. 10 Relationship between pressure drop and heat transfer coefficient

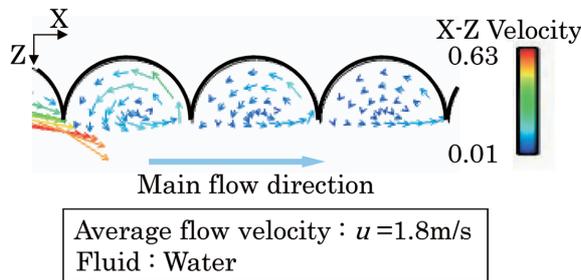


図-11 表面近傍の流速分布

Fig. 11 Measurement of velocity field at groove surface

### 3.4 SiCパワーデバイスに対応する高温実装技術

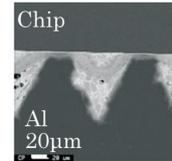
SiCパワーデバイスの実用化に向けて、ダイアタッチの接合材料として金 (Au) 系共晶はんだ<sup>8)</sup>、金属ナノ粒子などを用いた実装技術の研究開発が行われている<sup>9)-10)</sup>。しかしながら、これらの金属は高価であることから、よりコスト競争力の高い接合技術が望まれている。

そこで日産では、Alと亜鉛 (Zn) の共晶反応を利用したAl/Alダイレクト接合による実装技術を開発している<sup>11)</sup>。図12に実装試作の一例としてSi半導体チップ (Si IGBT、5.5×6.4×t0.25mm、裏面にNi/Ag/Alをスパッタ4~6 μm成膜) と純Al (A1070) バスバーの実装構造断面を示す。本接合方法では、バスバー表面に施したマイクロテクスチャ凸部での応力集中によってAl酸化被膜を破壊し、その酸化被膜の欠片は、被接合面間に配置した低温で溶融するZn系インサート材 (Zn-Al-Mg合金、m.p. 334.8℃) とともに界面から排出されることが特徴となっている。テクスチャ凸部の先端部では、半導体チップ裏面のAlとAlバスバーとがダイレクト接合されており、接合界面から酸化被膜は検出されなかった。

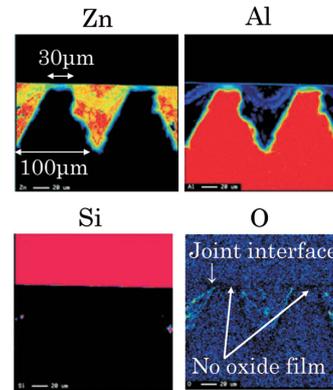
本技術を適用してSiC半導体チップ (SiC Diode、1.658×1.52×t0.355mm、裏面にNi/Ag/Alをスパッタ4~6 μm成膜) を純Al (A1070) へ実装した実装構造接合部のダイシヤ強度 (速度100 μm/sec、ツール先端高さ10 μm)

は、58.8MPaであった。また、ダイオードのリーク電流値はチップ基準値の±15 μA以内であり、接合プロセスの加熱ないしマイクロテクスチャ凸部で発生する局所応力により、半導体チップへ破損が生じないことを確認できている。

本接合方法は、半導体チップを純Al製バスバーへ5MPaという低荷重かつ低温、短時間、大気中にて接合することを可能とするため、SiC採用時の実装技術として有望であると考えている。



(a) SEM Image



(b) EPMA Mapping

図-12 実装構造の断面

Fig. 12 Cross section of joint interface

## 4. ま と め

以上、電動パワートレインの主要ユニットであるモータ、インバータに関連する日産の材料技術に対する取り組みについて紹介した。電気自動車およびハイブリッド車の普及には、コストと性能を両立させた電動パワートレインの継続的な開発が不可欠であり、今後も機能性材料の性能向上は電動パワートレインの進化を支える重要な要素であると考えられる。

最後に本稿で紹介した材料開発、研究には各材料のサプライヤの皆様をはじめとした社内外の関係者の皆様から多大なご協力をいただいております。日頃からご協力をいただいている皆様に深く感謝申し上げます。

## 5. 参 考 文 献

- 1) 日産自動車グローバルホームページ：環境への取り組み、<http://www.nissan-global.com/JP/ENVIRONMENT/APPROACH/GREENPROGRAM/> (参照日2014年12)

月2日)

- 2) H. Shimizu et al. : Development of an Integrated Electrified Powertrain for a Newly Developed Electric Vehicle, SAE Technical Paper No. 2013-01-1759 (2013)
- 3) 日産自動車プレスリリース：日産自動車、ジスプロシウムを従来比40%削減した電気自動車用モーターを開発、[http://www.nissan-global.com/JP/NEWS/2012/\\_STORY/121120-02-j.html](http://www.nissan-global.com/JP/NEWS/2012/_STORY/121120-02-j.html) (参照日2014年12月2日)
- 4) 谷良浩ほか：応力下における無方向性電磁鋼板の鉄損特性、日本磁気学会、日本応用磁気学会誌、Vol. 30、No. 2、pp. 196-200 (2006)
- 5) 渋谷彰弘ほか：FCV駆動システムにおけるインバータ実装技術開発、自動車技術会、学術講演会前刷集、No. 76-04、pp. 5-8 (2004)
- 6) 新井健嗣ほか：フーガ ハイブリッド向けモータ&インバータの開発、日産技報、No. 69・70、pp. 36-40 (2012)
- 7) 肥塚洋輔ほか：バックステップ流れを利用した伝熱促進技術 (第1報)、第50回日本伝熱シンポジウム講演論文集、Vol. II + III、pp. 474-475 (2013)
- 8) 谷本智ほか：高温領域まで拡張した高信頼性SiCダイアタッチメント、スマートプロセス学会誌、Vol. 2、No. 4、pp. 144-151 (2013)
- 9) 井出英一ほか：銀ナノ粒子を用いた高温対応鉛フリー接合プロセス、日本材料学会、材料、Vol. 54、No. 10、pp. 999-1004 (2005)
- 10) T. Ishizaki et al : Thermal Characterizations of Cu Nanoparticle Joints for Power Semiconductor Devices, Microelectronics Reliability, Vol. 53, No. 9-11, pp. 1543-1547 (2013)
- 11) 宮本健二ほか：共晶反応と表面微細形状を利用したアルミニウムダイレクト接合の半導体チップ実装への適用とその特性評価、Mate 2014 予稿集 (2014)

■ 著 者 ■



村上 亮



川下 宜 郎



杉 千 花



小川 和 宏



肥塚 洋 輔

## 燃料電池自動車向け低コスト触媒層および電極触媒材料技術

Low-Cost Electrode and Electrocatalyst Materials Technology for Fuel Cell Electric Vehicles

大間 敦史\*  
Atsushi Ohma真塩 徹也\*  
Tetsuya Mashio在原 一樹\*  
Kazuki Arihara菅原 生豊\*  
Seiho Sugawara光本 久司\*\*  
Hisashi Mitsumoto関場 徹\*\*\*  
Toru Sekiba篠原 和彦\*  
Kazuhiko Shinohara飯山 明裕\*  
Akihiro Iiyama

**抄 録** 水素と酸素から電気を生み出すクリーンなエネルギーを動力源とする燃料電池自動車 (FCEV) は、長い航続距離をカバーできる次世代ゼロ・エミッション車 (ZEV) の一つとして期待が寄せられている。FCEVの性能は既に内燃機関車レベルに到達してきており、最大の課題はコスト低減と水素インフラ整備である。前者のうち、とりわけ固体高分子形燃料電池 (PEFC) スタックに使用される貴金属量を低減することは、FCEVの本格普及期を睨む上で非常に重要な課題である。本報では、FCEV普及拡大期に向けた貴金属低減技術として開発している燃料電池触媒層、およびその構成要素である電極触媒材料に関する課題と開発状況、並びに今後の展望について述べる。

**Summary** Fuel cell electric vehicles (FCEVs), which have a long cruising range using hydrogen as a clean energy source, are being looked to as a promising type of zero emission vehicle (ZEV) for the future. The performance of FCEVs has nearly reached the same level as ICE vehicles. Cost reduction and hydrogen infrastructure are the primary concerns associated with the commercialization of FCEVs. With regard to the first concern, reducing the amount of precious metals used in the polymer electrolyte fuel cell (PEFC) stack is a hurdle that must be cleared if full-scale popularization of FCEVs is to be achieved. This article describes the challenges, current status, and outlook of fuel cell electrode and electrocatalyst materials technology.

**Key words :** *Research and Development, fuel cell electric vehicle (FCEV), polymer electrolyte fuel cell (PEFC), membrane electrode assembly (MEA), electrode, electrocatalyst*

## 1. はじめに

日産自動車は、地球環境に優しいゼロ・エミッション車 (= 運転中の二酸化炭素排出ゼロの車; ZEV) の領域でリーダーになることを目指しており、2010年に世界で初めて発売した量産型電気自動車 (EV) 「日産リーフ」に続く次世代電動駆動車の研究開発を継続している。水素と酸素から電気を生み出すクリーンなエネルギーを動力源とする燃料電池自動車 (以下、FCEVと称す) は、長い航続距離をカバーできる次世代ZEV/ EVの一つとして期待が寄せられている。FCEVの性能は既に内燃機関車レベルに到達してきているが、普及のための最大の課題はコスト低減と水素インフラ整備である。前者については、とりわけ固体高分子形燃料電池 (以下、PEFCと称す) スタックの電極 (触媒層) に含まれる白金 (Pt) などの貴金属の使用量を低減することが、FCEVの本格普及期を睨む上で非常に重要な課題である。

本報では、FCEV普及拡大期に向けた貴金属低減技術として開発しているPEFC触媒層、およびその構成要素・

材料に関する課題と開発状況、並びに今後の展望について述べる。

## 2. 燃料電池触媒層の構成要素と求められる機能

図1に、PEFC触媒層と電極触媒材料の電子顕微鏡像および概念図をそれぞれ示す。触媒層は、FCEVの動力源であるPEFCスタックに積層された膜電極接合体 (以下、MEAと称す) を構成する主要部材であり、厚さ10 $\mu$ m程度の多孔質構造を有する。構成要素は、触媒金属と触媒担体からなる電極触媒材料と電解質であり、それらの隙間から形成される空孔径は50nm程度である。白金などの触媒金属は一般に4nm程度のナノ粒子であり、カーボン粉末 (直径30nm程度の一次粒子の凝集体) に代表される触媒担体の表面に分散して担持され、電極触媒材料を構成する。その周囲の一部を、厚さ10nm以下の電解質が覆うように存在すると考えられている。触媒層内部では、触媒表面における電気化学反応と反応物質および生成物質の輸送がナノ～マイクロスケールで同時に起こる。

\*EVシステム研究所 \*\*株式会社日産アーク \*\*\*実験試作部

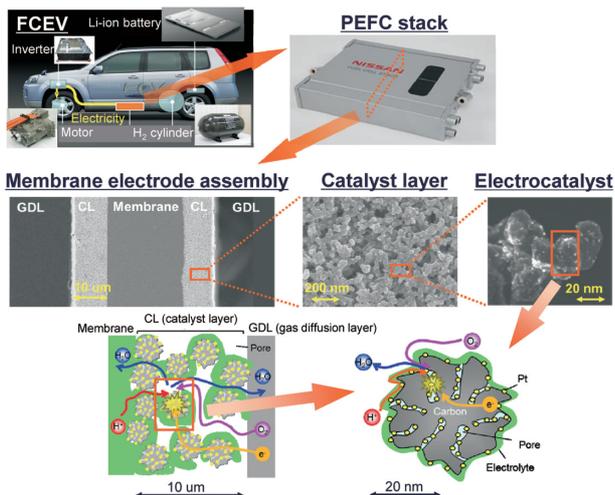


図-1 PEFC 触媒層および電極触媒材料の構造  
Fig. 1 Structure of PEFC catalyst layer and electrocatalyst

触媒層の構成要素と求められる主要機能を表1に示す。電極触媒材料に含まれる触媒金属は、電気化学反応を起こす心臓部である。触媒担体は主として炭素微粒子が用いられ、電子を輸送し、内部に空孔が存在する場合はガスや水を輸送する機能を必要とする。電極触媒の周囲に存在する電解質は、プロトンや水を輸送し、同時にガスを通すことが求められる。また、触媒担体同士の隙間で構成される空孔も、ガスや水を輸送する機能を必要とする。

表-1 PEFC 触媒層の構成要素と求められる主要機能  
Table 1 PEFC catalyst layer components and main functions

構成要素	主要機能		
触媒層	電極触媒	触媒金属(白金)	電気化学反応を起こす
		触媒担体(カーボン)	電子を輸送する
		空孔	ガス・水を輸送する
電解質		プロトン・水を輸送する、ガスを通す	
空孔		ガス・水を輸送する	

### 3. 日産における触媒層および構成要素の設計スキーム

これらの機能を高め、少ない貴金属量や安価な材料で優れた触媒層の性能を得るために、図2に示すような設計スキームを構築した。従来スキームでは、電極触媒や電解質などの材料を混合し塗布乾燥させることで触媒層を試作し、その性能の良し悪しを評価して直接的に材料仕様や試作プロセス条件を決めていた。しかしながら、性能は触媒層以外の部材にも影響を受けることから、必ずしも適切なフィードバックとなっていなかった。

そこで、性能のみならず、作製した触媒層そのものの構造や物性情報を抽出して評価・分析し、性能との相関を解析することで、短時間で精度よく材料や試作工程の要求仕様に反映することができるようになった。このような取り組みを通じて、少ない貴金属量で優れた性能のMEAやスタックをスピーディに開発できると考える。

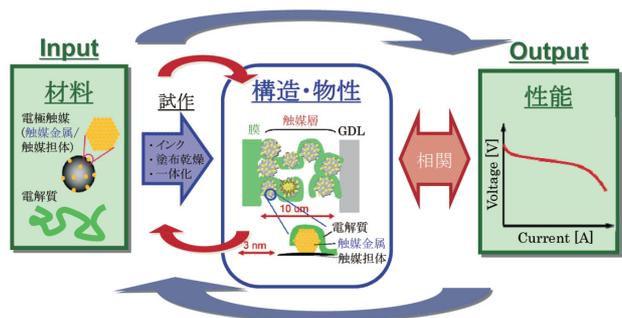


図-2 PEFC 触媒層の設計スキーム  
(青矢印: 従来スキーム、赤矢印: 新規スキーム)  
Fig. 2 PEFC catalyst layer design scheme

## 4. 触媒層を構成する要素材料の課題と開発状況

### 4.1 触媒金属

電極触媒材料は、白金系と非白金系に大別される。前者は、白金などの貴金属を含むため一般的に高い活性を示し、実用化に近い材料である。後者は、酸化物系触媒やカーボンアロイ触媒など研究初期段階の材料が多い<sup>1)2)</sup>。白金系の触媒金属は白金や白金合金のナノ粒子(直径2~10nm程度)が代表的であり、何れもカーボン(C)などの触媒担体上に分散して担持され、電極触媒材料として用いられる。近年、ナノ粒子が金属原子1~3層程度のシェル(スキン層)とその内部のコア材から形成されるコアシェル構造を有する電極触媒材料が精力的に開発されており<sup>3)-5)</sup>、高い酸素還元反応(以下、ORRと称す)活性の実現による白金使用量の低減が期待される。

触媒金属の改良によるORR活性の向上は、最重要課題の一つである。ORR活性の定義は、「触媒貴金属の単位質量あたりに流れる活性支配電流(=ORR質量比活性)」であり、触媒金属の有効表面積あたりの活性(ORR面積比活性)と有効表面積の積で表される。従って、ORR質量比活性を向上させるためには、少なくともORR面積比活性と有効表面積の何れかを増大させることが必要である。昨今、SPring-8などの放射光設備を活用したX線吸収微細構造解析(XAFS)による原子レベルの構造・電子状態解析により、ORR面積比活性に対して表面付近の白金原子間距離が支配因子の一つであることが解明されてきた<sup>6)</sup>。一方で、耐久性の向上も求められる。PEFCは酸形の燃料電池であるために、一般に触媒金属としては白金などの貴金属が用いられる。しかしながら、FCEVの負荷応答に併せて電極触媒材料(金属)の電位が変動することで白金の溶解が進み、有効表面積が減少するといった劣化現象が観測されている<sup>7)</sup>。実用化の観点では耐久性の向上が必須であり、活性と耐久性の両立が急務である。

電極触媒材料はコンセプト検証段階で多くを調製することが困難であるため、少量のサンプルで測定する手法が必要である。そこで日産では、回転ディスク電極法(以下、

RDE法と称す)を用いて精度よくORR活性を測定するための条件や手順を確立し、次いで自動車用途を模擬した負荷耐久試験プロトコルを策定して耐久試験前後における電極触媒のORR質量比活性を測定し、触媒金属の仕様や調製プロセスにフィードバックするといった取り組みを行ってきた。その中で、特に重点的に開発している材料の一つは、規則化した白金コバルト合金(PtCo)をコア材とし、表層を白金シェル構造とした触媒金属を有する電極触媒材料である。規則化とは、白金原子とコバルト原子が規則的に配列した構造を指す。このような規則構造をとることで、白金ナノ粒子と比べて、表面付近の白金原子間距離が適度に短くなりORR活性が向上する、および熱力学的に安定構造となるために耐久性にも優れる、といった仮説に基づくコンセプトである。

図3に、日産試作の新規触媒(白金コバルト合金触媒)と市販の白金触媒および白金コバルト合金触媒のORR質量比活性の評価結果をそれぞれ示す。白金とコバルトの原子比は試作品および市販ともに3:1を狙って調製し、サンプルはRDE法を用いて評価した。結果、市販の白金触媒に比べて、およそ8倍の初期活性を示す試作品がピーカーレベルで得られた。この要因を調査するために、ORR面積比活性と有効表面積をそれぞれ測定したところ、有効表面積は白金触媒とほぼ同等であったものの、ORR面積比活性が8倍であることがわかった。そこで、コア部分(バルク)が規則化されているかどうかを検証するために、X線回折(XRD)を用いて、(110)の超格子ピークの有無、および(220)のピーク位置をそれぞれ観測した。図4にX線回折パターンを示す。市販の白金触媒や白金コバルト合金では、 $2\theta = 33^\circ$ 付近の(110)の超格子ピークは観測されなかったが、試作品の白金コバルト合金触媒は僅かなピークを観測した。また、(220)のピーク位置は市販の白金コバルト合金触媒よりも試作品の方が高角側にシフトしており、規則化したPt<sub>3</sub>Co構造に近いことがわかる。従って、日産試作品の白金コバルト合金触媒は、市販品と比べてコア材が規則化した構造となっていると考えられる。

一方、自動車での運転条件を加速模擬した耐久試験プロトコルを策定し、耐久試験の前後におけるORR質量比活性評価および試作触媒材料の形態観察をそれぞれ行った結果を図5に示す。初期では市販の白金触媒に対して8倍のORR質量比活性を示していたが、1万サイクル後では2倍程度まで低下した。また、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた形態観察から、触媒金属の粒径増大が確認された。

このように、ラボレベルではあるが高いORR活性を示す電極触媒材料が試作可能となってきた。耐久性についてはまだまだ改善を要するものの、白金よりも耐久試験後の活性が高いものが得られてきている。今後の課題としては、耐久性の更なる向上に加え、活性や耐久性の支配因

子の把握と定量化、およびその制御方法の確立、スケールアップなどが挙げられる。

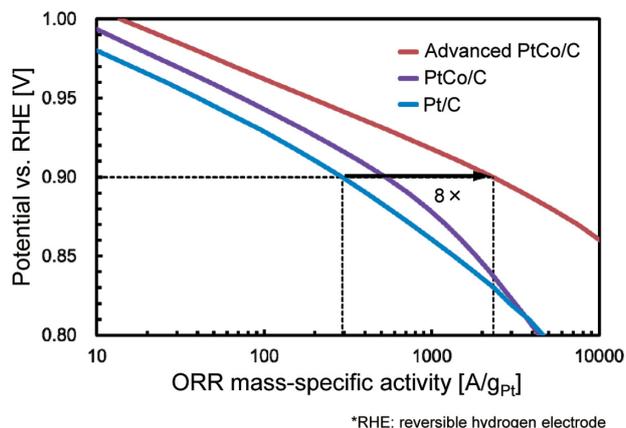


図-3 日産試作新規触媒のORR質量比活性  
Fig. 3 ORR mass-specific activity of new prototype electrocatalyst

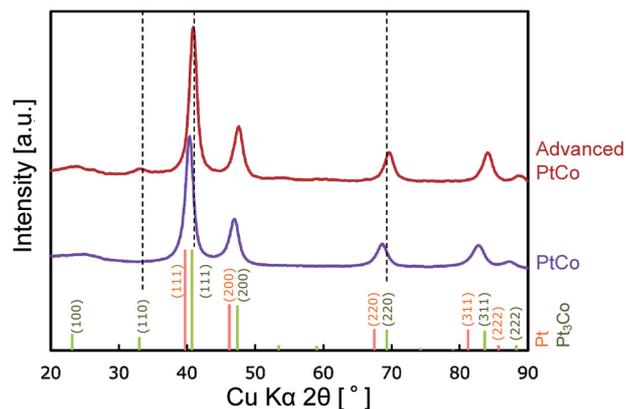


図-4 日産試作新規触媒のX線回折パターン  
Fig. 4 XRD pattern of new prototype electrocatalyst

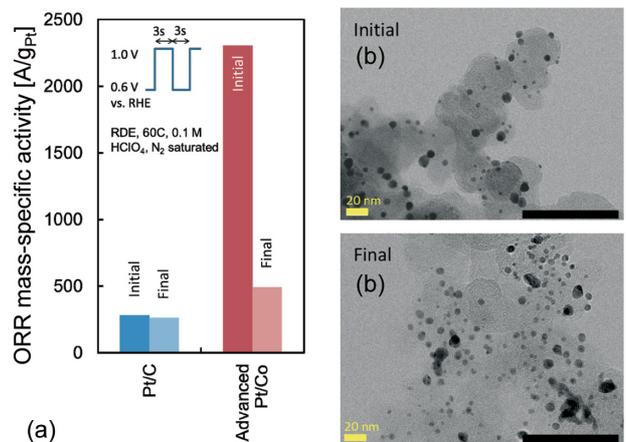


図-5 日産試作新規触媒の耐久評価結果  
(a) ORR質量比活性  
(b) 透過型電子顕微鏡(TEM)による形態変化  
Fig. 5 Durability test results of new prototype electrocatalyst,  
(a) ORR mass-specific activity,  
(b) change in morphology by TEM

## 4.2 触媒担体

触媒担体は、リン酸形燃料電池の時代からカーボンブラックを中心に開発され、触媒の分散性や担持性の観点から Vulcan® から Ketjen Black へという歴史的な流れがあった。その後、PEFCの起動停止操作の際に生じる腐食現象の対策として、黒鉛化カーボンブラックや非カーボン担体の開発が盛んになった。現在も、NEDOやDOEプロジェクトにおいて、新規担体材料や触媒担持法の開発が進められている<sup>5)8)</sup>。

触媒担体の主要課題は、ORR 質量比活性向上、物質輸送性向上、腐食耐久性向上が挙げられる。物質輸送は、図1に示す触媒担体内部の微細空孔（直径10nm以下）や担体同士の間隙（直径50nm程度）におけるガス輸送性向上が課題であり、空孔構造や表面の親疎水性の制御が重要となる。触媒担体の腐食はシステムの起動停止時に生じる劣化現象であり、結晶性向上などが有効である。また、ORR 質量比活性を決める前記二つの因子のうち、有効表面積の増大については、担体による触媒分散性の向上や安定化が求められる。ここでは、ORR 面積比活性向上に関する機能について述べる。

一般に、MEAにおいて触媒担体の異なる触媒層を用いると、触媒分散性（＝触媒表面積）の影響を規格化したORR 面積比活性に有意な差が確認されている（図6）。この詳細なメカニズムは不明であったが、最近の日産における取り組みにおいて、この変化の一因は、触媒層内電解質の白金への被覆率の違いであることがわかってきた。このメカニズムは、後述する電解質の機能と大きく関係する。即ち、触媒担体は、ORR 面積比活性の支配因子の一つである触媒金属への電解質の被覆率を決める重要な機能を担う材料である。このような見解は、触媒担体の空孔分布測定など従来の分析に加えて、新たに触媒表面の電解質被覆率を測定する手法を構築した結果や、古典的分子動力学法（MD法）により、電解質が前述の触媒担体内部の微細空孔に入らないという結果などを総合して得られたものである。

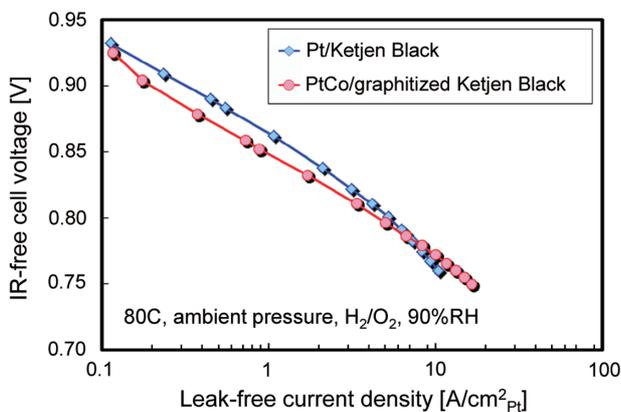


図-6 異なる触媒担体を用いた触媒層の ORR 面積比活性  
Fig. 6 ORR area-specific activity with different catalyst support materials

図7に、異なる触媒担体と触媒金属（白金、白金コバルト合金）を用いた触媒層の、触媒金属への電解質被覆率とORR 面積比活性との相関を示す。被覆率は、白金表面への一酸化炭素の化学吸着現象を利用し、電気二重層容量の湿度依存性から求めた。電解質被覆率は、本検討では触媒担体種（比表面積）を変えて制御しており、一般に担体の比表面積が大きいほど被覆率は減少する。この結果、白金および白金合金触媒の何れについても、電解質被覆率が低いとORR 面積比活性が向上することがわかった。従って、触媒担体はORR 質量比活性を向上させる機能を有しており、白金量低減効果をもたらす重要な材料であると言える。

今後は、触媒担体内部の微細空孔確保と耐久性との両立に加え、調製コストの低減などが課題である。

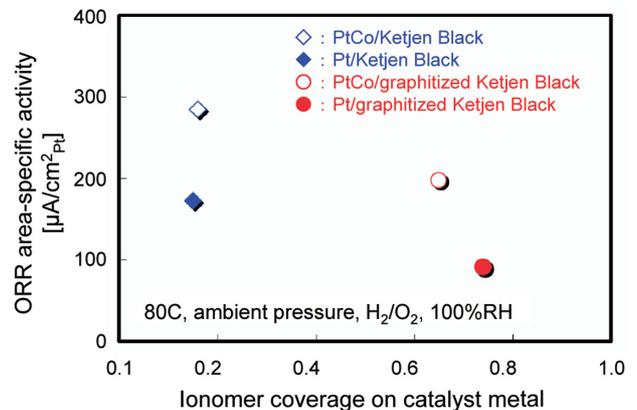


図-7 触媒金属への電解質被覆率と ORR 面積比活性の相関  
（色付き：白金、白抜き：白金コバルト合金）  
Fig. 7 ORR area-specific activity as a function of ionomer coverage on catalyst

## 4.3 電解質

触媒層に含まれる電解質材料は、電解質膜と同様にフッ素系と炭化水素系の2種類の高分子材料が存在する。図1で示した通り、電解質膜とは異なり厚さが10 nm以下と薄く、要求される機能も異なるが、最大の違いはガスの輸送性向上が求められることである。つまり、プロトン・水とガスという相反する物質輸送性を両立させる必要がある。また上述の電解質被覆率の影響からも推測されるように、触媒への吸着によりガスの反応サイトへの吸着を阻害する可能性があるため、その対策も重要である。ここでは、ガス輸送機能の解析例について触れる。

図8に、触媒層電解質への酸素の溶解（吸着）を模擬したモデルにおけるMD法での解析結果例を示す。グラファイトシート上に薄膜状に形成された電解質の表面に、側鎖を囲むように水クラスターが存在しているが、酸素は水クラスターを避け電解質の主鎖近傍に吸着する様子が観察される。水は反応物質であるプロトンの輸送に必要な媒体であることから、上述のように、酸素とプロトン・水の輸送を両立させるには、電解質に求められる機能であるガスやプ

ロトン・水の輸送について、その経路をマイクロなレベルで分離制御することが求められる。

このように、白金量を減らす上で、電解質材料に求められる機能は重要性を増す。今後は、電解質材料の分子設計による物質輸送機能や触媒との相互作用の制御、触媒材料への被覆構造制御やネットワーク構造最適化、電解質材料の合成プロセス簡素化などが課題である。

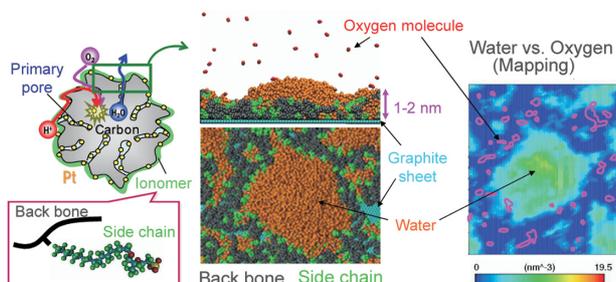


図-8 触媒層を模擬した電解質構造（グラファイトシート上の電解質と水）における酸素吸着挙動  
Fig. 8 Oxygen adsorption behavior on ionomer and water on graphite sheet

## 5. おわりに

本稿では、自動車メーカーの視点で燃料電池触媒層および電極触媒材料の課題と技術開発状況について述べた。低コスト化に対する影響が大きいことから、何れも将来のFCEV普及拡大期に向けて不可欠な足の長い要素基盤技術である。このような技術開発を着実に遂行することで、将来訪れるであろう車両電動化の時代に対するお客様のニーズや選択肢に応えるとともに、エネルギーセキュリティや環境問題などの社会的課題の解決にも貢献していきたい。

## 6. 引用文献

- 1) 太田健一郎ほか：酸化物系非金属触媒、平成26年度NEDO新エネルギー成果報告会、燃料電池・水素分野予稿集、pp. 38-45 (2014)
- 2) 難波江裕太ほか：カーボンアロイ触媒、平成26年度NEDO新エネルギー成果報告会、燃料電池・水素分野予稿集、pp. 30-37 (2014)
- 3) R. R. Adzic : Platinum Monolayer Electrocatalysts, Electrocatalysis, Vol. 3, pp. 163-169 (2012)
- 4) 稲葉稔ほか：低白金化技術、平成26年度NEDO新エネルギー成果報告会、燃料電池・水素分野予稿集、pp. 22-29 (2014)
- 5) 渡辺政廣ほか：劣化機構解析とナノテクノロジーを融合した高性能セルのための基礎的材料研究、平成26年度NEDO新エネルギー成果報告会、燃料電池・水素分野予稿集、pp. 8-2 (2014)
- 6) X. Wang et al. : Quantitating the Lattice Strain Dependence of Monolayer Pt Shell Activity toward Oxygen Reduction, J. Am. Chem. Soc., Vol. 135, pp. 5938-5941 (2013)
- 7) P. J. Ferreira et al. : Instability of Pt/C Electrocatalysts in Proton Exchange Membrane Fuel Cells, J. Electrochem. Soc., Vol. 152, pp. A2256-A2271 (2005)
- 8) V. K. Ramani et al. : Synthesis and Characterization of Mixed-Conducting Corrosion Resistant Oxide Supports, DOE Annual Merit Review for Hydrogen and Fuel Cells Program, FC085 (2014)

## ■ 著 者 ■



大間 敦 史



真 塩 徹 也



在 原 一 樹



菅 原 生 豊



光 本 久 司



関 場 徹



篠 原 和 彦



飯 山 明 裕

## リチウムイオン電池の進化を支える材料分析技術

Advanced Analysis for Innovation of Lithium-ion Batteries

今井 英 人\*  
Hidetō Imai久保測 啓\*\*  
Kei Kubobuchi茂木 昌 都\*\*  
Masato Mogi上 口 憲 陽\*\*  
Kazuhiro Kamiguchi松本 匡 史\*\*  
Masashi Matsumoto真田 貴 志\*\*  
Takashi Sanada谷 村 誠\*  
Makoto Tanimura秦 野 正 治\*  
Masaharu Hatano

**抄 録** ゼロ・エミッション車の一つである電気自動車用のリチウムイオン電池は、材料技術の革新によって今後発展していく。その材料革新を支えるのが、解析技術である。近年の解析技術の進歩は、材料を原子レベルで、高精度に分析することが可能であり、リチウムイオン材料研究においても、これまでわからなかった数々の現象を解明できるようになってきた。本稿では、日産における研究例を紹介する。

**Summary** The development of lithium-ion battery technology for electric vehicles, which represent one type of zero emission vehicle, can be expedited through material innovation. Advanced analysis is a key factor toward this end. Atomic-level observation of materials has been made practical by recent progress in analytical technologies. As a result, many new findings have been made by using advanced analysis in lithium-ion battery research. This article introduces Nissan's research achievements related to advanced analysis for lithium-ion batteries.

**Key words :** *Material, Research & Development, Computer Application, electric vehicle(EV), battery, advanced analysis, lithium ion, active material, XAFS, NMR, first principles simulation*

## 1. はじめに

日産が市場投入している100%電気自動車「日産リーフ」や100%電気商用車「e-NV200」は、いずれも蓄電池として大容量のリチウムイオン電池を搭載している。その電池は航続距離やキャビンスペースなどの車両性能に直接的に影響を与えるため、高性能化が望まれている。電池技術の中でも特に重要なのが蓄電性能を左右する活物質材料であり、その研究開発が精力的に行われている<sup>1)</sup>。

新規な高性能活物質材料を開発するためには、電池反応メカニズムを理解することが重要であり、そのためには材料の原子レベルでの精密な分析手法が必要となる<sup>2)</sup>。本稿では、日産における最新の活物質材料研究に向けた高度な分析技術の適用例を紹介する。

## 2. 正極材料

リチウムイオン電池がエネルギーを貯蔵・放出を繰り返す際、正極材料はリチウムイオン (Li-ion) および電子を出し入れしながら材料の状態が変化する<sup>1)</sup>。これらの状態変化を様々なデータから間接的に推定することは可能であるが、より詳細な解析を行うためには、電池内部での現象を

直接観察する必要がある。近年、測定機器やソフトウェアの発達により、in situ測定法（電池を解体しないで、内部状態を観察する測定手法）が可能となっており、これまでにない高性能な材料開発の一助となっている。本章では、その一例を紹介する。

## 2.1 X線吸収分光法

正極材料の解析においては、遷移金属の価数変化や酸素の価数変化をモニタすることで、電池反応メカニズムを解明できるため、様々な手法が利用されている。中でも、X線吸収分光法はin situ測定が容易であることに加えて、同じ測定スペクトルのX線吸収端近傍構造 (XANES) 領域からは価数変化を、広域X線吸収微細構造 (EXAFS) 領域からは局所構造が同時に解析できることから、遷移金属の高度解析に適している<sup>3)</sup>。

図1a~cには三元系層状正極材料<sup>2)</sup>を用いた充放電実験におけるNi (ニッケル)、Co (コバルト)、Mn (マンガン) それぞれのK-edge XANESスペクトルを示す。これらのスペクトルは図2に示す充電曲線における、3点で測定した。図中のLi (リチウム) の横に示される数字は組成式Li<sub>n</sub>(Ni<sub>x</sub>Mn<sub>y</sub>Co<sub>z</sub>)O<sub>2</sub>におけるLiの含有量nを示しており、図の左から右に行くに従い充電が進み、セル電圧が上昇しな

\*先端材料研究所 \*\*株式会社日産アーク

から正極中のLi量が減少していることを示している。

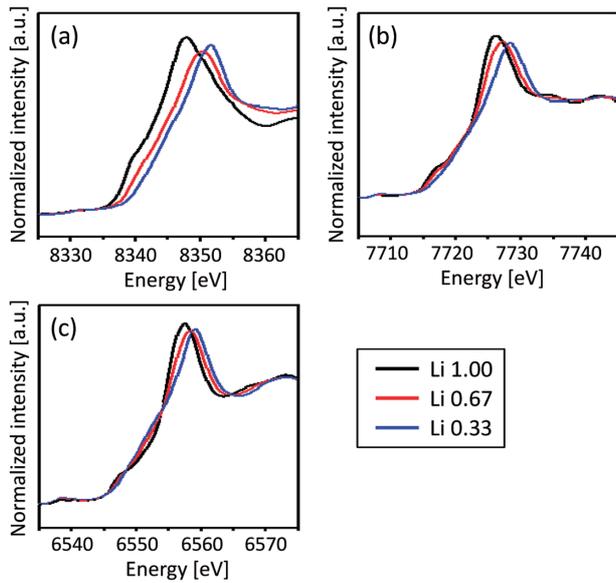


図-1 K-edge XANES スペクトル、(a) Ni、(b) Co、(c) Mn  
Fig. 1 K-edge XANES spectra, (a) Ni, (b) Co, (c) Mn

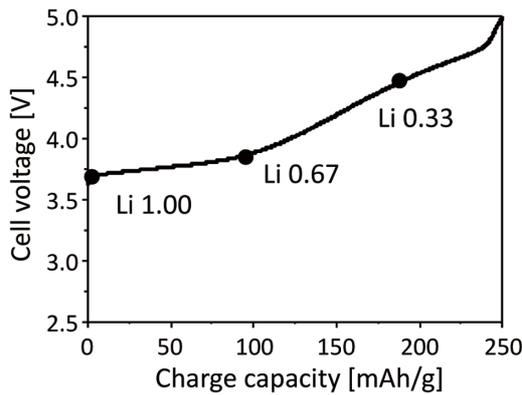


図-2 充電曲線  
Fig. 2 Charging profile

図1a~cの横軸の数値を見るとわかるように、Ni、Co、Mnの吸収スペクトルはそれぞれ異なるエネルギー領域で観測されるため、一度の測定で複数の元素を同時に観測することができる。図1a、bから、NiとCoのスペクトルは充電の進行に従って一方向に変化しており、このことは充電に従いNi、Coの価数が上昇していることを示している。以上のように正極材料中のNi、Coの観測には本手法が有効である。

一方Mnに目を向けると、図1cに示すようにスペクトルの変化が小さくかつ複雑であり、NiやCoの場合と同様の解析は困難である。我々はこの問題を解決するために、微小変化から状態を推定する手法を提案するとともに<sup>4)</sup>、計算機シミュレーションによるより正確な解析を行っている。

## 2.2 計算機シミュレーション

2.1節に述べたMnのX線吸収スペクトルの解析を理論

的にサポートし、複雑な挙動を示すXANES形状の変化から価数変化をより正確に読み取るために、第一原理計算(実験的に得られるパラメータを使わずに、理論的に机上で計算する手法)によるシミュレーションを行った。ここでは、高容量正極材料として注目されるLi過剰系固溶体正極材料<sup>5)</sup>の母物質であるLi<sub>2</sub>MnO<sub>3</sub>を対象とした。図3aに示すようにLi<sub>2</sub>MnO<sub>3</sub>のMn K-edgeスペクトルは、三元系層状正極材料の場合(図1c)と同様に充電が進み、材料中のLi量が減少するに従い、ピークトップと裾野では高エネルギー側にシフトするものの、中腹部では逆に低エネルギー側にシフトする。即ち、単に測定データを眺めるだけでは、Mn価数変化がどのように起きているのか確定できない。そこで第一原理計算によって、各スペクトル変化を理論的に計算した<sup>6)</sup>。図3bに示すように、スペクトルのシフト挙動がよく一致している。さらに、この計算結果からパラメータとして見積もることができるMnとOの価数を表1に示す。その結果、充電が進んでもMn価数はわずかに増加していないことがわかる。その一方で、Oの価数は減少しており、正極から+1価のLiが減少する際の電荷補償に寄与するのはOであると推定された。以上のように、本計算は充電時における正極材料の状態を再現でき、単純なスペクトル解析では困難であったMnの価数の定量的な解析に有効であることがわかる<sup>7)</sup>。

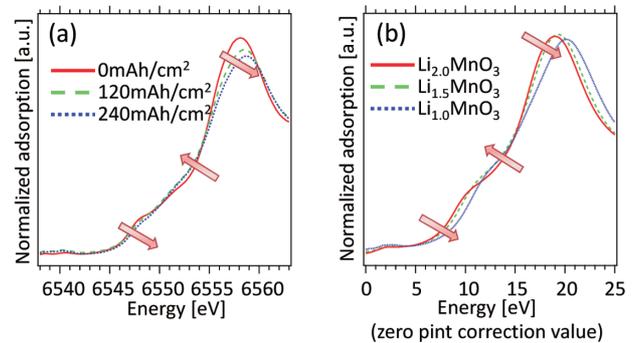


図-3 MnのXANES スペクトル、(a) 実測、(b) シミュレーション  
Fig. 3 Mn XANES spectra, (a) experimental data, (b) simulated data

表-1 MnおよびO原子の有効価数  
Table 1 Effective valence of Mn and O atoms

充電状態	Mn	O
Li <sub>2.0</sub> MnO <sub>3</sub>	1.91	-1.19
Li <sub>1.5</sub> MnO <sub>3</sub>	1.93	-1.08
Li <sub>1.0</sub> MnO <sub>3</sub>	1.95	-0.93

## 2.3 固体核磁気共鳴法

ここまで正極材料中の遷移金属元素や酸素イオンに関する解析について述べてきたが、Liを観測する手法も重要である。その一つとして固体核磁気共鳴法(NMR)がある<sup>8)</sup>。固体Li NMRは複数種のLi元素を個別に観測でき、

定量性を有するため、複雑な構造を持つ正極材料においても、Liを定量的に分析することが可能である有用な分析手法である。

我々は2.2節と同じ $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ を対象に、固体 $^6\text{Li}$  NMRを用いた解析を行った。この材料は層状構造を有しており、大別すると遷移金属層とLi層があり、結晶構造中に複数のLi種が存在する<sup>8)9)</sup>。さらに従来の手法に比べ最新の技術では、高磁場化（600 MHz）、マジック角回転の高速化（ $\sim 67$  kHz）をすることで測定精度が向上してきており、高分解能なスペクトルを得ることが可能となっている。

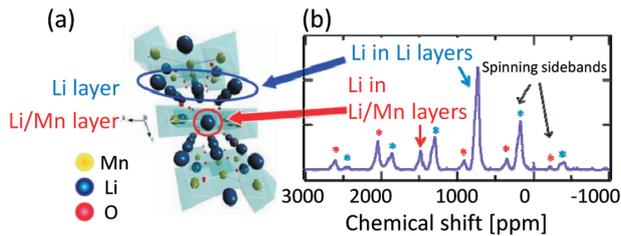


図-4 (a)  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ の結晶構造、(b)  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ の固体 $^6\text{Li}$  NMRスペクトル

Fig. 4 (a) Crystal structure of  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ , (b)  $^6\text{Li}$  NMR spectra for  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$

図4に $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ の結晶構造とその固体 $^6\text{Li}$  NMRスペクトルの測定結果を示す。750ppm付近の信号および1500ppm付近の信号は、それぞれLi層中のLi、遷移金属層（Li/Mn層）中のLiに対応する。それらの信号面積を解析すると、Li層とLi/Mn層中のLiの比率がおおよそ3:1となり、結晶構造に対応することが確認できる。

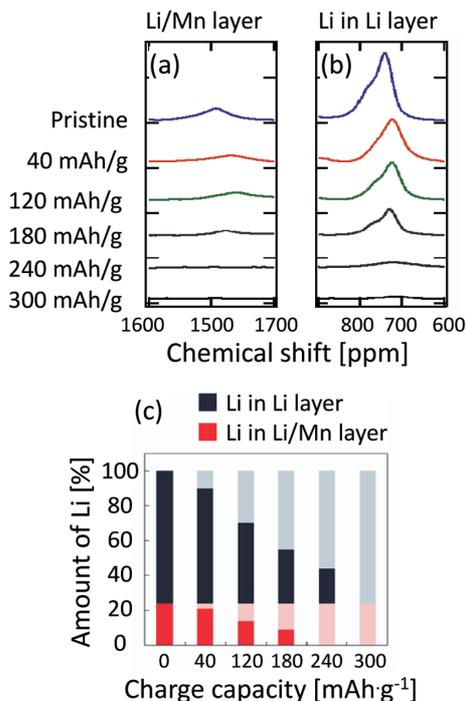


図-5 (a)(b)  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ の固体 $^6\text{Li}$  NMR スペクトルのSOC依存性、(c) NMRの解析から得られたLi量のSOC依存性  
Fig. 5 (a)(b)  $^6\text{Li}$  spectra for  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  change with increasing SOC, (c) Li content change with increasing SOC

図5には最大300mAh/gまで充電した過程における材料中の $^6\text{Li}$  NMRスペクトルを示す。Li/Mn層中のLi（図5a）、Li層のLi（図5b）ともに充電初期から引き抜かれ、Li/Mn層のLiは240mAh/g付近ではほぼ完全に抜け切っている。初期のLi量を100%、300mAh/g充電でLi量が0%と仮定すると、図5a、bの結果を図5cのように換算できる。以上のように、本手法によって材料中の複数種のLi-ionを個別に定量的な解析が可能となる。

### 3. 負極材料

負極材料は、正極材料の場合と同様な問題意識に加えて、二つの側面から高度解析技術の重要性が認識されている。一つは材料表面の分析であり、もう一つは非晶質（アモルファス）状態の解析である。元来高度な分析技術が必要なこれらの分野において、近年電池材料の解析に適した手法が開発されてきており、負極材料の開発に貢献している。本章では、表面解析とアモルファス解析の最新技術について紹介する。

#### 3.1 硬X線光電子分光法

負極と溶液の界面に形成されるSEI（Solid Electrolyte Interface）は、電極と溶液間のLi-ionを安定に移動させるLi-ion電池の不可欠な要素である<sup>2)</sup>。一方で電池性能の劣化要因にもなり、電池を安定に動作させるためにSEIの構造を把握し、制御する必要がある。現在でもSEIの構造と電池性能の関係については議論が行われている。しかし、汎用的な手法（たとえば実験室レベルの低エネルギーX線を用いた分光法）では、数十nm厚さのSEIを非破壊で分析を行うのは困難である。対して高エネルギーのX線を使用した硬X線光電子分光（HAXPES）は高エネルギーの励起光源を用いるため、検出深さが深くSEI全体の構造を非破壊で解析することが可能である。HAXPESにより、サイクルに伴うSEI全体の構造変化を解析することができる。

充放電サイクル後のカーボン系負極のC1sおよびF1sスペクトルを図6に示す。X線源に8keVの硬X線を用いることで、30nm程度の深さまで検出できる。SEI下部の活物質のカーボン（282.5eVのピーク）が明瞭に観測されており、スペクトルに含まれるSEIの情報は電解液との界面から電極活物質との界面に渡るSEI全体を反映している。スペクトルより求めた充放電サイクルに伴う活物質とSEI成分（有機SEI、 $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 、LiF）の組成の変化を図7に示す。サイクルの増加に伴いSEIの組成が増加しており、SEIが徐々に堆積していると考えられる。また $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 、LiFの割合が増加していた。本電極のSEIはサイクル増加に伴いイオンや電気抵抗が増加しており、これらの構造変化が大きく関係すると考えられる。以上のように本手法を用いることで、負極SEIの全体像が把握できるようになる。

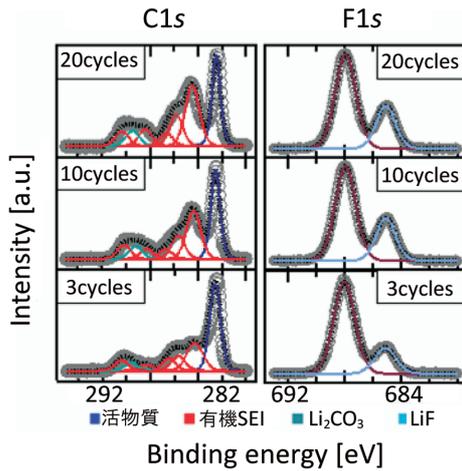


図-6 カーボン電極のHAXPES C1sおよびF1sスペクトル  
Fig. 6 C1s spectrum and F1s obtained by HAXPES for carbon electrode

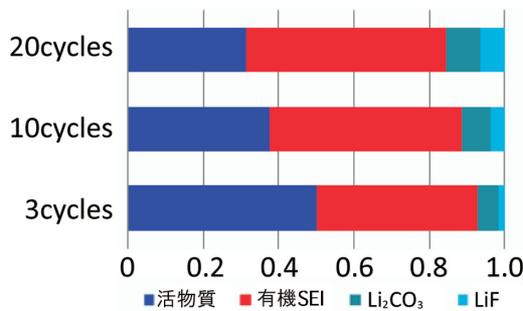


図-7 カーボン電極のSEIの組成  
Fig. 7 SEI composition for carbon electrode

### 3.2 軟X線吸収分光法

一般的にLi-ion電池に使用されているカーボン負極の約10倍の理論容量を持つSi（シリコン）は、次世代負極材料として期待が大きい<sup>10)</sup>。しかしながら、充放電時でのLiの吸蔵・放出に伴うSi自らの体積変化などにより、耐久性が著しく低いことが報告されている<sup>11)</sup>。活物質の構造に着目すると、結晶性Si（c-Si）を用いた場合、Li吸蔵に伴い生成するアモルファスLi<sub>x</sub>Si相と未反応Si結晶相との二相共存反応で進行し、二相の境界面で大きな応力が生じ、微粉化を促進させるとされる。それに対し、アモルファスSi（a-Si）を用いた場合、Li吸蔵とともに均一な反応を示し、微粉化による劣化を抑制できる可能性がある。

これらc-Siとa-Siの充電過程について、低エネルギーの軟X線を用いた吸収分光で解析を行った。図8に示したのは広域X線吸収微細構造（EXAFS）から得られる動径構造関数と呼ばれるデータで、材料中のSi原子周りの局所構造に関する情報を含むものである。バルク情報が得られる蛍光収量（FY）法で得られた結果（図8a、c）からは、c-Siの初期状態でSi-Si相関を示すピークが複数確認されるが（図8a）、a-Siでは0.2 nm付近に一つのピークのみが観察される（図8c）。またa-Si、c-Siいずれも、Liの吸蔵割合に対してピーク強度が段階的に減少することが確認され

る。一方、活物質表面の情報が得られる全電子収量（TEY）法による結果（図8b、d）からは、a-Siは蛍光収量法によるバルク情報と同様の結果であり、均一な反応であることが示唆される。c-Siの場合はSOC 25%でSi-Si相関を示すピークが大幅に減少しており、表面から優先的に合金化反応が進行し、不均一な反応を示したと考えられる（図7c）。以上のように本手法を用い得ることにより、結晶性、アモルファスの観点から電極反応の均一性、不均一性を解析することが可能となる。

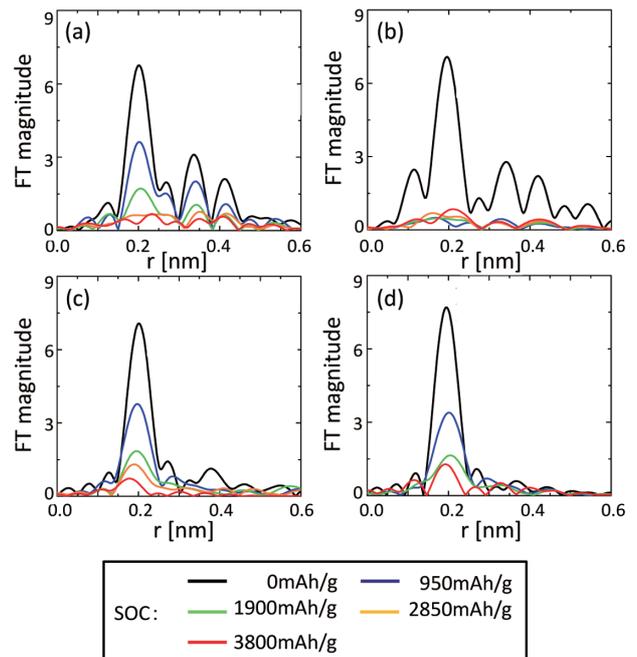


図-8 Si周りの動径分布関数、  
(a)(b) 結晶性Si、(c)(d) アモルファスSi、  
(a)(c) 蛍光収量法、(b)(d) 全電子収量法  
Fig. 8 Radial structure function of the c-silicon, (a)(b) and the a-silicon, (c)(d) obtained by FY, (a)(c) and TEY, (b)(d) at Si K-edge

### 3.3 Si負極のTEM-MRO解析

3.2節で述べたように、Si負極をアモルファス状態に保つことにより、電極反応が均一に進行し、耐久性向上に効果があることが示唆された。従って、その材料設計のためにアモルファス状態を検知し、定量化することが重要である。そこで我々は、先に述べた軟X線によるXAFS解析のデータを補完する手法として、TEM-MRO解析<sup>12)</sup>を行っている。

図9はボールミルを用いたメカニカルアロイング（MA）法で調製したSi-Sn-Ti（Si:Sn:Ti=6:2:2）合金負極の、調製時のミリング時間を変えた（12～48時間）場合の耐久性の違いを容量維持率で示している。図から明らかなように、ミリング時間が長いほど耐久性が向上している。この耐久性の違いと、Siのアモルファス状態の関連性を調べるためにMRO解析を行った。本手法では、高分解能の透過電子顕微鏡（TEM）を用いた電子線回折パターンからSi

結晶の(220)面に関する情報を抽出し、逆フーリエ変換することにより図10に示す像を得た。図10のドットの並びから、中範囲規則構造 (MRO) のサイズと、Siの持つ正四面体構造の中心間距離を見積もることができる。その結果、MA処理時間の延長とともにMROサイズは小粒子化: 4.7→2.2→1.4nm (MA処理時間12→24→48時間) されており、アモルファス化が進行していることが確認された。また、MA処理時間の延長とともにSi正四面体中心間距離は0.42→0.48→0.53nmと大きくなり、純粋なSi結晶より距離が拡大している。Siサイトへより原子半径の大きいSn(すず)にて置換しているためと推定される。以上のように本手法を用いることにより、耐久性の優れたSi系負極材料の微細構造を特定することができる。

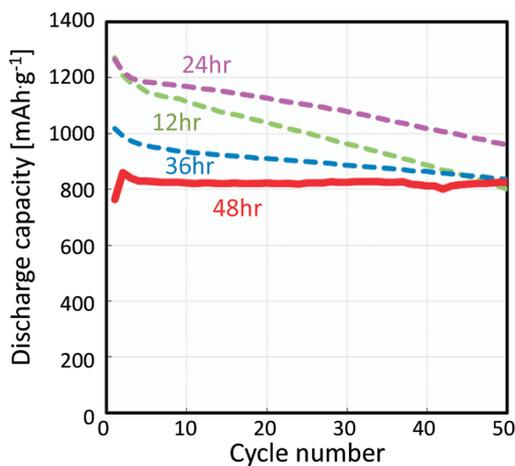


図-9 Si-Sn-Ti (Si:Sn:Ti=6:2:2) 合金負極のサイクル耐久性  
Fig. 9 Cycle durability for Si-Sn-Ti (Si:Sn:Ti=6:2:2) alloy anode

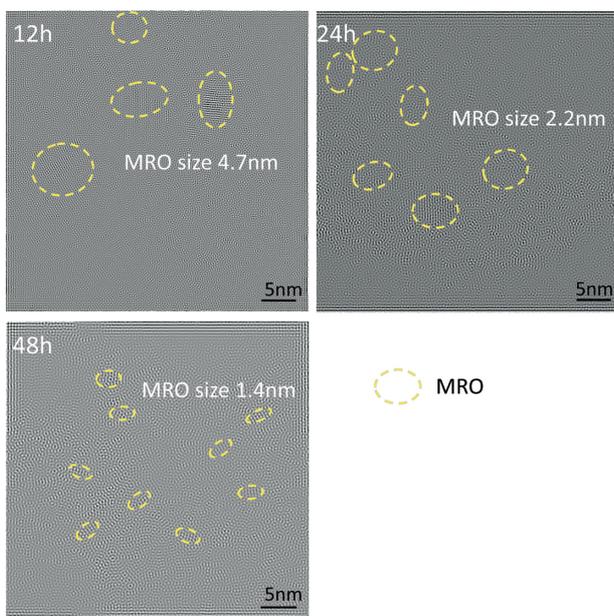


図-10 Si-Sn-Ti 合金負極のMRO解析  
Fig. 10 MRO analysis for Si-Sn-Ti alloy anode

#### 4. おわりに

Li-ion電池にはまだ多くの可能性があり、材料の革新は性能向上に向けた一つのキー技術である。そのためには多くのブレークスルーが必要なのは事実であるが、近年の分析技術の進歩が後押しとなることは間違いない。本稿で述べたような多種多様な分析技術が、ゼロ・エミッション技術の普及に貢献すると考える。

#### 5. 謝辞

本研究の一部はNEDOより交付される「リチウムイオン電池応用・実用化先端技術開発事業／高性能リチウムイオン電池技術開発／高容量Si合金負極の研究開発」の助成により実施したものである。関係各位に深く感謝の意を表す。

#### 6. 参考文献

- 1) 伊藤淳史ほか：高エネルギー密度バッテリーを実現する材料技術、日産技報、No.69・70、pp. 162-167 (2012)
- 2) 菅野了次：構造からみたリチウム電池電極材料、GS Yuasa Technical Review、Vol. 3、No. 1、pp. 1-11 (2006)
- 3) W-S. Yoon et al. : Combined NMR and XAS Study on Local Environments and Electronic Structures of Electrochemically Li-Ion Deintercalated  $\text{Li}_{1-x}\text{Co}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$  Electrode System, *Electrochem. Solid-State Lett.*, Vol.7, No. 3, A53 -A55 (2004)
- 4) A. Ito et al. : In situ X-ray absorption spectroscopic study of Li-rich layered cathode material  $\text{Li}[\text{Ni}_{0.17}\text{Li}_{0.2}\text{Co}_{0.07}\text{Mn}_{0.56}]\text{O}_2$ , *Journal of Power Sources*, Vol. 196, pp. 6828 -6834 (2011)
- 5) A. Ito et al. : Cyclic deterioration and its improvement for Li-rich layered cathode material  $\text{Li}[\text{Ni}_{0.17}\text{Li}_{0.2}\text{Co}_{0.07}\text{Mn}_{0.56}]\text{O}_2$ , *Journal of Power Sources*, Vol. 195, No. 2, pp. 567-573, (2010)
- 6) K. Kubobuchi et al. : In situ x-ray absorption spectroscopy and first-principles calculations on structural changes of  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  during charge and discharge processes, abstract #970, 224th ECS Meeting (2013)
- 7) K. Kubobuchi et al. : Mn  $L_{2,3}$ -edge X-ray absorption spectroscopic studies on charge-discharge mechanism analysis of  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ , *Applied Physics. Letters*, Vol. 104, No. 5, pp. 053906-053906-4 (2014)
- 8) J. Bréger et al. : High-resolution X-ray diffraction, DIFFaX, NMR and first principles study of disorder

- in the  $\text{Li}_2\text{MnO}_3\text{-Li}[\text{Ni}_{1/2}\text{Mn}_{1/2}]\text{O}_2$  solid solution, *Journal Solid State Chemistry*, Vol. 178, No. 9, pp. 2575-2585 (2005)
- 9) A. Boulineau et al. : Evolutions of  $\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.61}\text{Ni}_{0.18}\text{Mg}_{0.01}\text{O}_2$  during the Initial Charge/Discharge Cycle Studied by Advanced Electron Microscopy, *Chemistry of Materials*, Vo.24, No. 18, pp. 558-3566 (2012)
- 10) J.-M. Tarascon et al. : Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries, *Nature*, Vol.414, pp. 359-367 (2001)
- 11) U. Kasavajjula et al. : Nano- and bulk-silicon-based insertion anodes for lithium-ion secondary cells, *Journal of Power Sources*, Vol.163, pp. 1003-1039 (2007)
- 12) Y. Hirotsu et al.: Application of nano-diffraction to local atomic distribution function analysis of amorphous materials, *Journal of Electron Microscopy*, Vol. 50, No. 6, pp. 435-442 (2001)

■ 著 者 ■



今井英人



久保 潤 啓



茂木昌都



上口 憲 陽



松本 匡 史



真田 貴 志



谷村 誠



秦野 正 治

# 日産自動車におけるクローズド・ループリサイクルの取り組み

## Closed-Loop Recycling Efforts in Nissan

山田 雄一\*  
Yuuichi Yamada

村上 憲太郎\*  
Kentarou Murakami

田中 安栄\*  
Yasue Tanaka

端野 直輝\*  
Naoki Hatano

服部 直樹\*  
Naoki Hattori

佐川 琢円\*  
Takumaru Sagawa

**抄 録** 2050年には現時点で確認済みの地下鉱物資源がすべて採掘されてしまうという予測も出てくることから、日産では自動車の材料として占める割合が高く、かつ天然資源採掘時の環境への影響が大きく、材料製造時や廃棄時に多くのエネルギーを要するアルミニウム、鉄、樹脂という三つの材料のクローズド・ループリサイクルに注力している。本稿ではクローズド・ループリサイクルの日産での取り組み事例を主に紹介する。

**Summary** It has been predicted that all underground mineral resources that are known at the present time will be mined by 2050. Nissan is focusing on closed-loop recycling of three materials—namely, aluminum, iron and resin—that are used in high volumes in vehicles, have a large environmental impact at the time of mining, and consume great amounts of energy during production and disposal. This article mainly presents examples of closed-loop recycling in Nissan.

**Key words :** Material, steel & iron, aluminum, plastic, resin, recycling, closed loop

### 1. はじめに

新興国の経済発展に伴い鉱物資源の需要が急速に拡大し、この状況が継続すれば2050年には現時点で確認済みの地下鉱物資源がすべて採掘されてしまうという予測も出ている。また現在稼働中の採掘現場や新たな探査現場の一部は、生態系の保全価値が高い地域に位置しており、採掘時の表土掘削や森林伐採、廃水などが与える環境への影響が懸念されている。こうした課題に対応しながらお客さまにこれからもクルマを提供していくために、日産自動車は中期環境行動計画「ニッサン・グリーンプログラム2016」の中で、新たに採掘する天然資源量の最小化を取り組みの柱の一つに置き、2016年度までに生産を開始する新車1台当たり占有する再生材の使用率を25%に引き上げることを目標に定めて、取り組みを進めている。

この再生材の使用率を引き上げる取り組みの一つとして「クローズド・ループリサイクル」がある。クローズド・ループリサイクルとは、従来取り組んできた自動車の生産過程で投入する資源の削減といった資源の利用効率の向上だけでなく、生産時に発生した廃棄物や端材(スクラップ)、回収した自社の使用済み製品の部品を、同等のクオリティを維持した材料として再生し、再び自社製品の部品に採用する手法である(図1)。この手法を適用することで、新たに採掘する天然資源を最小化でき、また同じ材料を繰り返

返し使用できるようになり、製品ライフサイクルにおけるCO<sub>2</sub>排出と環境負荷を大幅に低減させることができる。特に日産では、自動車の材料として占める割合が高く、かつ天然資源採掘時の環境への影響が大きく、材料製造時や廃棄時に多くのエネルギーを要するアルミニウム、鉄、樹脂という三つの材料のクローズド・ループリサイクルに注力している。特にアルミニウムと鉄は、生産時に発生する端材を減らす工夫に加え、発生した端材をビジネスパートナーと協力しながら回収し、自動車用の材料に再生することに努めている。さらに使用済み自動車のアルミホイールの回収・再生利用、樹脂については工場が発生する塗装済み



図-1 クローズド・ループリサイクル概念図  
Fig. 1 Closed-loop recycling structure

\*材料技術部

バンパのスクラップを、塗膜を除去して再生するなどの取り組みを推進している。

本稿では、アルミニウム、鉄、樹脂という三つの材料のクローズド・ループリサイクルの取り組みを進める中での事例と課題を主として、他産業からのリサイクル材適用や、バイオマス由来材料の適用事例も交えながら紹介する。

## 2. アルミホイールの再生利用

### 2.1 サスペンション部品への適用

使用済み自動車から回収したアルミホイールを、日産の工場内で材料として再生し、高品質のサスペンション部品などへ採用することを可能にした(図2)。これによりバージン材料の使用を削減している。従来から廃アルミニウム材はエンジンをはじめ、幅広くアルミニウム部品としてカスケードリサイクルされているが、全国のリサイクル事業者で日産のアルミホイールのみの分別・回収を徹底して行うことにより、サスペンション部品を代表とするアルミニウム部品に、バージン材と同等品質で水平リサイクルしている。回収に際しては、メッキや塗装の無いホイールを選別し、更には異物(バランスウェイト、バルブなど)の除去を実施している。



図-2 サスペンション部品へのリサイクルフロー  
Fig. 2 Recycling process for suspension parts

### 2.2 アルミホイールへの適用

上記と同様のルートで回収したアルミホイールを、部品メーカーと共同で新車用ホイールとしても再生利用している(図3)。



図-3 アルミホイールへのリサイクルフロー  
Fig. 3 Recycling process for aluminum wheels

サスペンション部品への適用に際しては、適切な分別・回収が大きな課題となるが、それに加えてアルミホイールへの適用では鉄系の化合物や酸化物といった介在物量の増加に伴う機械的特性の低下、表面性状の悪化(ピンホール発生など)が課題となる。

今回、バージン材と同等品質を確保するために、溶解・

鋳造工程において、炉内の堆積物を取り除く除滓方法の改善、フラックスの適正化、鋳造フィルタの変更、金型冷却方法の改善などを実施した(図4)。

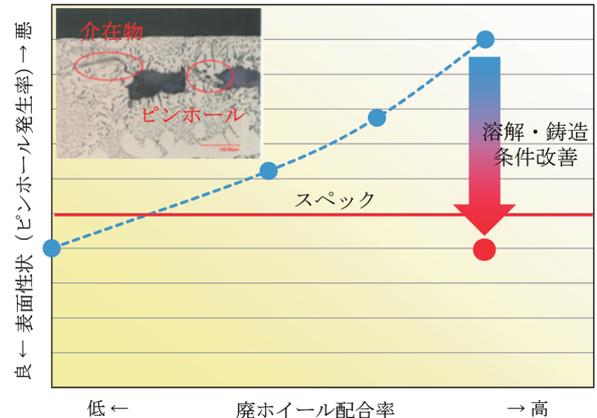


図-4 表面品質改善の取り組み  
Fig. 4 Improvement of surface properties

## 3. アルミニウム板、鋼板の再生利用

自動車ボディのプレス工程で発生する端材(スクラップ)を回収し、提携先のアルミニウムメーカーおよび鉄鋼メーカーで自動車向け材料に再生するクローズド・ループリサイクルを行っている。生産ラインでは様々な種類の素材を扱うため、回収工程などで異物(異材種)の混入を防ぐ必要があり、メーカーと共同で検査・物流体制を確立し、再生材の品質を安定させた。

アルミニウム板については、追浜工場のプレスラインを OUTER パネル向け 6000 系材料と、INNER パネル向け 5000 系材料に分別・回収可能な構造として、異材種の混入を防いでいる。この取り組みは、2013 年から北米スマーナ工場にも水平展開を開始している。

鋼板については、国内では九州工場、追浜工場において実施されており、北米ではスマーナ工場、キャントン工場にて同様の取組みを実施している(図5)。なお、プレス端材の40%をクローズド・ループリサイクルすることにより、鉄鉱石などの新規天然資源の消費量を2%削減する効果があると見込んでいる<sup>1)</sup>。



図-5 板材のリサイクルフロー  
Fig. 5 Recycling process in plate materials

## 4. 塗装済みバンパのスクラップの再生利用

従来、使用済みバンパなどの塗装済みバンパ由来のPP

(ポリプロピレン) スクラップのリサイクルは、塗膜による外観・材料物性への影響により、要求品質の低い部位への採用に限定されていた。

これら品質課題をクリアし、塗装済みバンパ由来PPスクラップのクローズド・ループリサイクルを実現するために、塗膜の剥離および樹脂スクラップとの選別工程を追浜工場に導入<sup>2)</sup>した(図6)。

リサイクルPPの安定した品質を実現するため、設備仕様・運転条件による残留塗膜の性状(サイズ・量)および品質影響への関係を明らかにし、リサイクル工程管理値を設定した。その結果、バージン材と同等の樹脂品質を実現でき、日産リーフをはじめとする量産車のバンパ用樹脂として、再生利用を開始した。

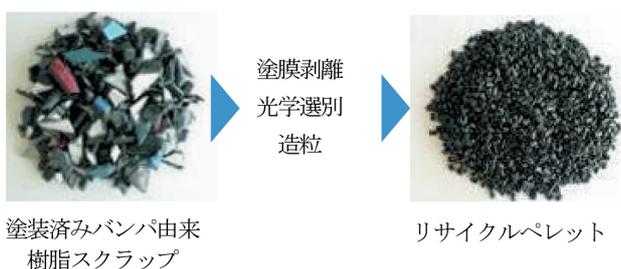


図-6 バンパ由来樹脂スクラップ  
Fig. 6 Scrap materials from bumper

## 5. リサイクルPPの新車内装材料への適用

内装部品向けの樹脂は、機械物性、部品成型性、外観、VOC(揮発性有機化合物)性能など多岐にわたる要求品質を満たし、かつそれを安定したばらつきの範囲内で量産

し、安定的に供給する必要がある。

このような要求を満足するため、内装部品へ適用するリサイクルPPへは、①最適なりサイクル原料の選定、②効率的な再生技術、③ばらつきを抑制する量産工程が重要である(図7)。

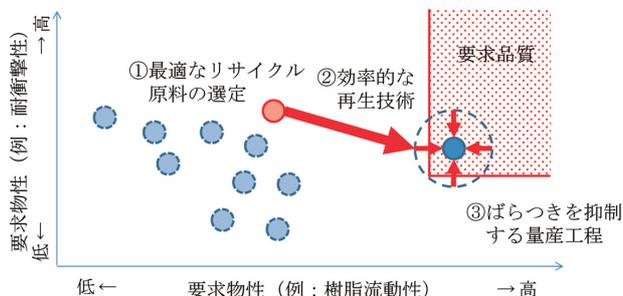


図-7 リサイクルPP開発のアプローチ  
Fig. 7 Approach in recycling PP development

### 5.1 最適なりサイクル原料の選定

日産リーフでは多くの内外装部品において、PP、繊維のリサイクル樹脂を採用している。それぞれの採用部品において要求される材料特性が異なるため、図8に示すように、使用するスクラップを使い分けている。

### 5.2 効率的な再生技術

多様なリサイクル原料を用いたリサイクルPPを、内装用PPの要求スペックに安定して適合させるには、スクラップの配合量の見極め、添加剤の最適選定などの再生技術の確立が必要である。

たとえば、使用済み廃家電由来のPPスクラップを内装用PPにリサイクルするには、主に物性および色の改質が

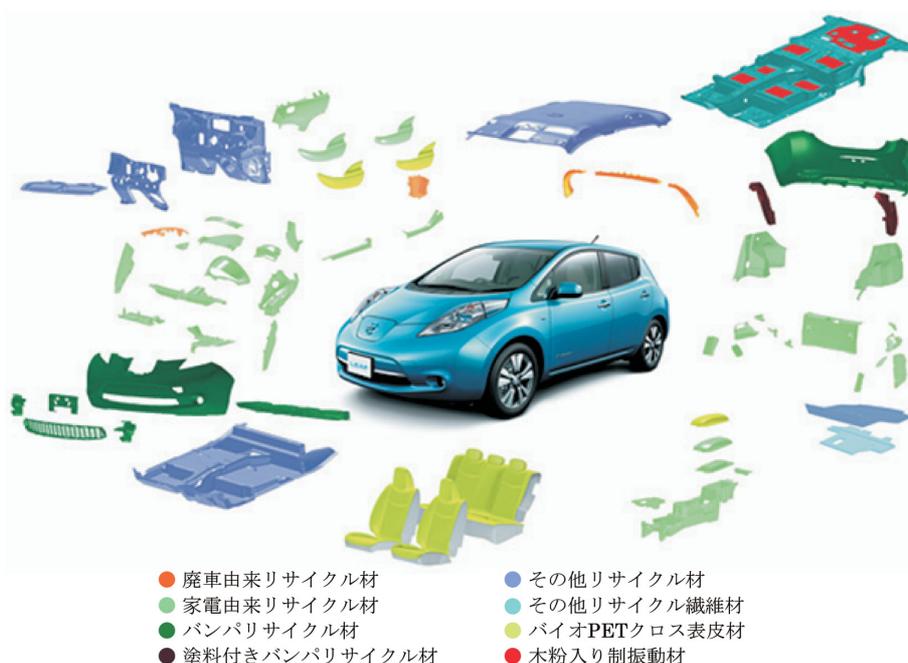


図-8 日産リーフに採用されているリサイクル樹脂材料  
Fig. 8 Recycled resin materials in Nissan LEAF

必要となるが、その際樹脂流動性を向上させると、一方で耐衝撃性が低下するなど、要求物性間のバランスが重要なポイントである（図9）。

そのために、最適な添加剤の選定およびその配合の見極めを実施し、多岐にわたる要求品質をバージン材同等水準で満足するリサイクル技術を開発し、適用した。

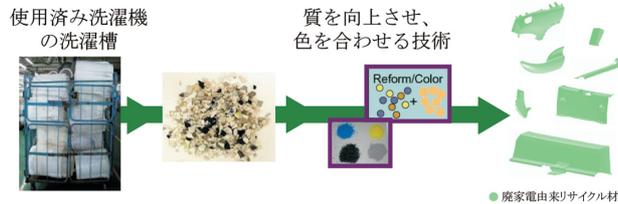


図-9 廃家電由来 PP のリサイクル工程  
Fig. 9 Recycled PP process from waste household electrical appliances

### 5.3 ばらつきを抑制する量産工程

リサイクル原料のばらつきを考慮し、安定した品質を実現するため、図10に示すように、スクラップ樹脂受入時の品質検査における機械物性などの項目を追加し、またロットごとの配合を検討している。さらに工程内およびアフターブレンド後の製品検査による二度の品質確認を行っている。これらにより、バージン樹脂同等の品質基準を確立している。

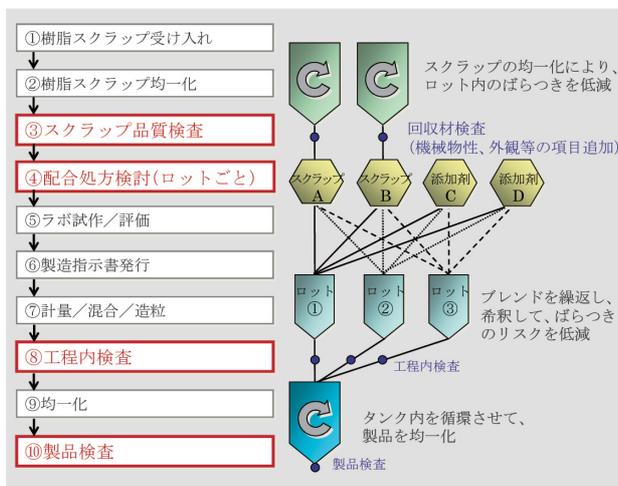


図-10 新車内装向けリサイクル PP 量産における品質管理手順  
Fig. 10 Quality control procedure in recycled PP mass production for interior parts

## 6. バイオマス由来樹脂の活用

リサイクル材以外の、枯渇性資源の使用量低減方策として、バイオマス由来樹脂の活用があげられる。日産リーフでは、サトウキビ生成過程から得られる廃糖蜜を原料の一部に用いたバイオPET（ポリエチレンテレフタート）樹脂をシート表皮に適用した（図11）。

また日産リーフやe-NV200のフロアカーペットにおいて

は、バイオマス由来成分を含むPTT（ポリトリメチレンテレフタレート）繊維を適用し、枯渇性資源の使用量低減に寄与している（図12、図13）。

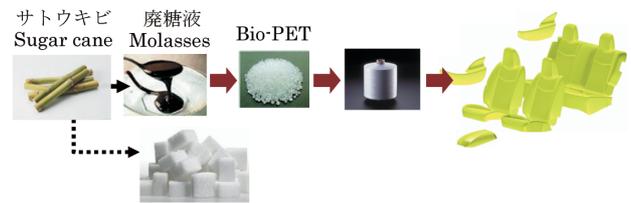


図-11 バイオ PET 樹脂の製造工程  
Fig. 11 Manufacturing process in Bio-PET



図-12 e-NV200 とバイオ PTT 繊維適用フロアカーペット  
Fig. 12 e-NV200 and Bio-resin floor carpet

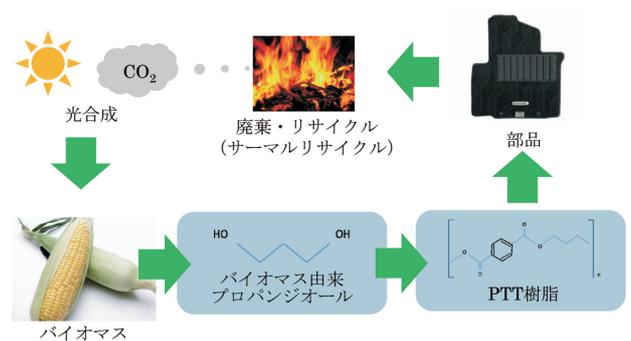


図-13 バイオ PTT 樹脂の資源循環  
Fig. 13 Resource recycling of Bio-PTT

## 7. おわりに

ここでは、新たに採掘する天然資源量の最小化のための取り組みの一であるクローズド・ループリサイクルの実際の適用事例や、他産業からのリサイクル材の適用、バイオマス由来材料の適用事例を紹介した。

リサイクル材の適用拡大やバイオマス由来材料の採用に加えて、クローズド・ループリサイクルの取り組みを拡大するためには、材料、部品製造時の廃棄物の分別・回収のみならず、使用済み自動車の処理、リサイクル材の再生技術、リサイクル材使用時の生産技術など、開発・生産・廃車処理・材料サプライチェーンなど多くの関係者のリサイクル拡大に向けた取り組みが必要となってくる。自動車というグローバルに必要不可欠なモビリティを継続的に提供していくため、今後もクローズド・ループリサイクルの

取り組みを関係者と協力しながら推進していく。

## 8. 参考文献

- 1) 青木昇二ほか：クローズドループリサイクルによる持続可能な資源利用、自動車技術会、学術講演会前刷集、No. 99-13、pp. 1-2 (2013)
- 2) 寺田暁彦：電気自動車のリサイクル技術、自動車技術会、自動車技術、Vol. 66、No. 11、pp. 43-46 (2012)

### ■著者■



山田 雄一



村上 憲太郎



田中 安栄



端野 直輝



服部 直樹



佐川 琢円

# 新型高効率4気筒1.6L直噴ガソリンターボエンジンの開発

Development of New Highly Efficient 4-cylinder 1.6L Direct Injection Gasoline Turbocharged Engine

松井 義典\*  
Yoshinori Matsui

岸 一 昭\*  
Kazuaki Kishi

藤原 和 弘\*  
Kazuhiro Fujiwara

仲津 周 一\*  
Shuichi Nakatsu

**抄 録** 近年、環境性能への要求がますます高まっており、エンジンはいっそうの効率向上が求められている。今回開発したエンジンは、2010年に発表したJUKE 16GT/16GT FOURに搭載されているMR16DDTエンジンをベースとし、燃焼素質の改善、Low-pressure Cooled EGR、鏡面ボア溶射シリンダブロック、小型高効率ターボチャージャを始めとする様々な技術を投入することで、Euro 6b規制への適用、及び動力、燃費性能を一段と向上させた。

**Summary** In recent years, demand for higher environmental performance has made it necessary to improve engine efficiency even more. Nissan has developed a new engine that utilizes the basic design and main structure of the MR16DDT that was fitted on the Juke in 2010 to comply with the Euro 6b exhaust emission standards but improves dynamic performance and fuel efficiency by applying various new technologies, such as a low-pressure cooled EGR, spray-coated and mirror-finished cylinder bores, and a compact turbocharger.

**Key words :** Power Unit, gasoline engine, turbocharger, direct injection, downsizing

## 1. はじめに

近年、地球環境への負荷を低減するために、燃料電池自動車（FCEV）や電気自動車（EV）など、内燃機関以外の環境技術が実用化されつつあるが、本格的な普及に向けては航続距離、コスト、インフラなど、乗り越えなければならない壁がある。よって、ゼロ・エミッション車の普及と低燃費車拡大の双方が、地球環境への負荷低減のために重要である。

日産自動車では、世界初の量産型EV、日産リーフを始め、ハイブリッドシステム、クリーンディーゼルエンジン、ダウンサイジング過給エンジンなど、様々な環境技術を投入することで、持続可能な社会への貢献を図っている。今回新たに開発したエンジンもその一翼を担っており、2010年に発表したMR16DDTエンジンをベースとし、燃費、排気性能の更なる向上を図った。本稿では、新型エンジンの開発概要と主な採用技術について紹介する。

## 2. 開発の狙い

新型MR16DDTエンジンは先代に対し、動力と燃費性能の向上、及びEuro 6b規制への対応を目的として開発を行った。

## 3. エンジンの概要と主要諸元

図1に新型MR16DDTエンジンの外観図を、表1に新旧エンジンの主要諸元を示す。

新旧の主な差異点は以下の通りである。

- ・熱効率を高めるため、圧縮比を10.5へ変更した。
- ・排気温度低減効果によるストイキ（理論空燃比）領域の拡大、及び過給領域の燃費向上のため、Low-pressure Cooled EGR（LP-EGR）システムをガソリンターボエンジンとして世界で初採用した。
- ・軽量化、ノッキング抑制、フリクション低減のため、鏡面ボア溶射シリンダブロックを採用した。

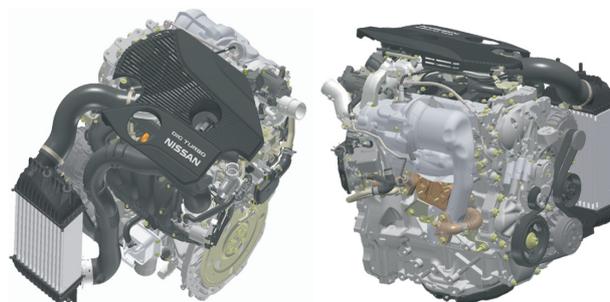


図-1 新型MR16DDTエンジン  
Fig. 1 Outline drawing of new MR16DDT engine

\*パワートレイン第一製品開発部

表-1 エンジン主要諸元  
Table 1 Engine specifications

	New MR16DDT	Conventional MR16DDT
Engine type	Inline 4	←
Displacement (cc)	1618	←
Bore × Stroke (mm)	φ79.7 × 81.1	←
Compression ratio	10.5:1	9.5:1
Max. power (kW / rpm)	140 / 5600	←
Max. torque (Nm / rpm)	240 / 1600 - 5200	240 / 2000 - 5200
Max. revolution (rpm)	6400	←
Emission level	JPN : H17 U-LEV USA : LEV2-ULEV EU : Euro 6b	JPN : H17 U-LEV USA : LEV2-ULEV EU : Euro5
EGR	Internal & external (low-pressure system)	Internal
Cylinder block	Spray coated and mirror finished bore	Iron liner
Valve train	DOHC 16 valves with intake & exhaust CVTC *equipped with intermediate lock function	DOHC 16 valves with intake & exhaust CVTC
Aspiration	Turbocharger	←
Fuel supply system	Direct injection	←
Fuel type	Premium	←

CVTC : Continuously variable valve timing control

#### 4. 性能向上をもたらす要素技術

本エンジンにて先述以外に、燃費、排気、動力性能を高次元でバランスさせるため採用した技術を表2に示す。

本章では、これらの技術の詳細について述べる。

表-2 主な採用技術  
Table 2 New adoption technologies

Adopted technologies	Objectives		
	Fuel economy	Emission	High output
DIG system	X	X	X
Low-pressure cooled EGR system	X		
Alumite coated piston crown surface	X		X
Piston ring made of high conduction material (top)	X		X
Aluminum cylinder block with spray coated and mirror finished bore	X		X
Intake(*) & exhaust CVTC system *equipped with intermediate lock function	X	X	X
Swirl control valve	X		
Compact turbocharger integrated with exhaust manifold		X	X
Electronic waste gate valve	X	X	
Coolant thermal management controlled by electronic rotary valve	X		
Variable displacement oil pump (VDOP)	X		
DLC coated piston ring (top, oil)	X		
Hybrid coated piston skirt	X		
Teflon coated rear oil seal	X		
Decoupled alternator pulley	X		
0W-20 lubrication engine oil	X		

DLC : Diamond like carbon

#### 4.1 直噴システム

##### 4.1.1 燃焼コンセプト

先代では広角噴霧とピストンキャビティを用いた冷機時ウォールガイド成層燃焼を行い、吸気工程と圧縮工程それぞれで燃料を噴射することで、触媒昇温と燃焼安定性の両立を図った。また、ポートタンブル流の強化により燃料のミキシングを促進させ、均質燃焼時の速度、安定性向上も狙いとしていた (図2)。

新型では2章で述べた開発の狙いを達成するため、以下の変更を行った。

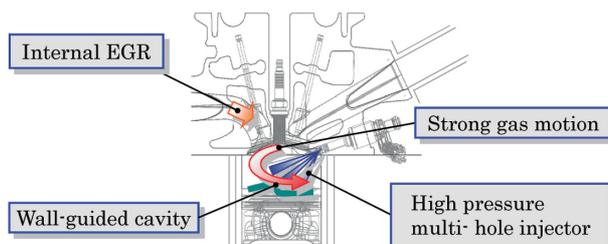


図-2 燃焼コンセプト  
Fig. 2 Concept of combustion

##### 4.1.2 吸気ポート

タンブル流の更なる強化を目的として、吸気ポート形状の見直しを行った。図3に新旧の吸気ポート形状を示す。タンブル流の強化により、後述するLP-EGR、及び遅閉じミラーサイクル時の燃焼安定性の向上を図った。図4に吸気ポートの通気抵抗 (流量係数) とタンブル比の関係を示す。一方、通気抵抗の増加は出力性能に影響するが、圧縮比の変更、過給圧、及びカムプロフィールの見直しを行うことで、先代の出力性能を維持した。

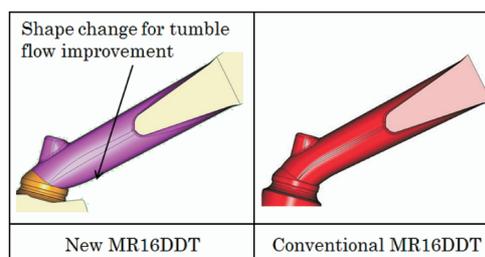


図-3 吸気ポート形状比較  
Fig. 3 Comparison of intake port

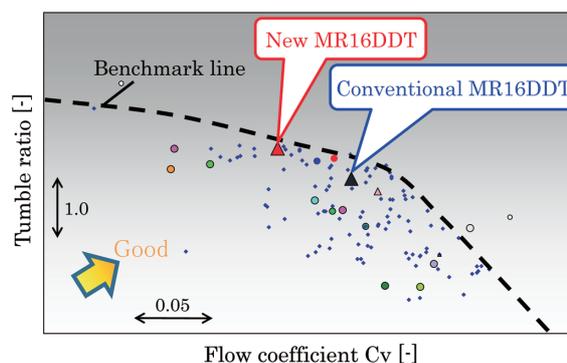


図-4 吸気ポートの通気抵抗とタンブル比の関係 (10mm リフト時)  
Fig. 4 Relationship between flow coefficient and tumble ratio (10mm valve lift)

##### 4.1.3 インジェクタ噴霧

ピストン冠面への燃料付着量の低減を目的として、噴霧の見直しを行った。図5に新旧の噴霧形状を示す。混合気の均一度を向上させるためには広角噴霧が望ましい。広角にするとボア壁面やピストン冠面への燃料付着量の増加に繋がり、オイル希釈、Euro 6bで新たに規制されるPN (粒子の排出数による規制) に影響を及ぼすため、新型では噴霧形状の狭角化に加え、異孔径及び噴孔にレーザ加

工を用いることでピストン側への流量を低減しつつ、ベネトレーションの低減、微粒化の促進を図った。また、オイル希釈が懸案となる低回転・高負荷時には多段噴射を用いることで、ボア側の燃料付着量を低減した。図6に上記で述べたアイテムを用いた際のボア、ピストンへの燃料付着率の推移を示す。

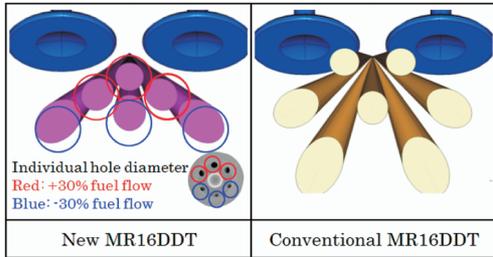


図-5 インジェクタ噴霧比較  
Fig. 5 Comparison of injector spray pattern

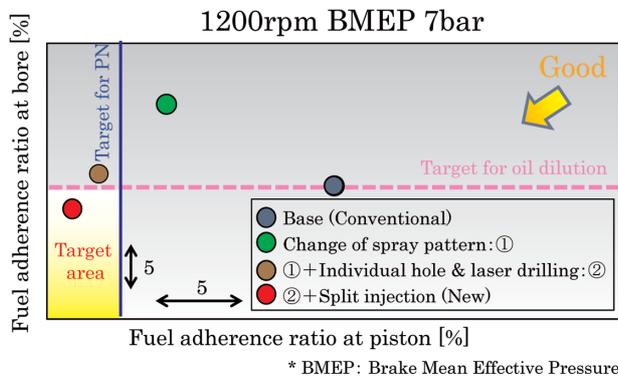


図-6 燃料付着率比較  
Fig. 6 Comparison of fuel adherence ratio

#### 4.1.4 ピストン冠面

前述の噴霧パターンに合わせ、キャビティ形状の見直しを行った。図7に新旧の冠面形状を示す。新型では先述したピストン冠面への燃料付着量低減のために、冷機運転中におけるウォールガイド成層燃焼時の2度目の噴射タイミングを早めている。燃料噴射タイミングを早めてもプラグ周りにリッチな混合気を安定して形成できるようにキャビティ形状を大きくし、燃焼安定度の向上を図った。図8に成層燃焼時における新旧の燃焼安定性を示す。また、ノッキング抑制のため、先代と同様にオイルジェット、クーリングチャンネルの採用に加え、冠面にアルマイト処理を行い、ピストントップリングの材質を高熱伝導率の高いSUP9へ変更した。

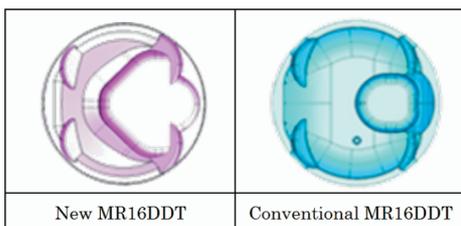


図-7 ピストン冠面形状比較  
Fig. 7 Comparison of piston crown shape

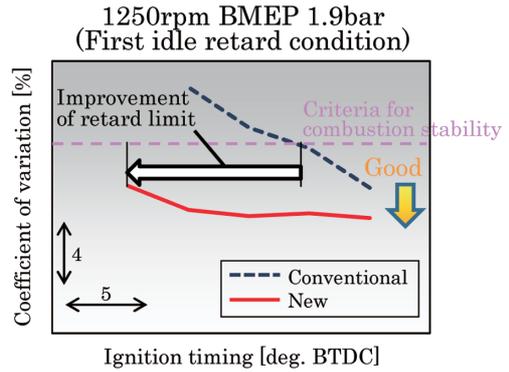


図-8 燃焼安定度比較  
Fig. 8 Stabilization level of combustion

#### 4.2 LP-EGRシステム

新型では排気温度低減効果によるストイキ領域の拡大、及び過給領域の燃費向上を目的とし、LP-EGRシステムを採用した。Cooled EGRシステムにもEGR取出し位置とEGR導入位置によっていくつかの種類がある(図9)が、過給領域における燃費改善にとって重要なEGR導入の容易性、ノッキングの抑制、排気温度の低減の三つに関して、いずれの点でも優れるLP-EGRシステムを選定した<sup>1)</sup>。

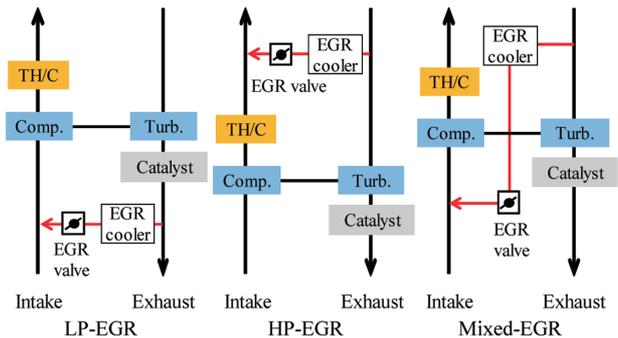


図-9 Cooled EGRシステムの種類  
Fig. 9 Variation of cooled EGR systems

#### 4.2.1 ノッキング抑制、排気温度低減効果

EGRは排気ガスを再循環させるため、排気中に含まれる様々な成分が燃焼室に供給される。中でもNitrogen oxide (NOx) 濃度が高まると自己着火を促進させることが報告されており<sup>2) 3)</sup>、触媒下流からEGRガスを取り出すLP-EGRはノッキングの抑制に有利である。図10に

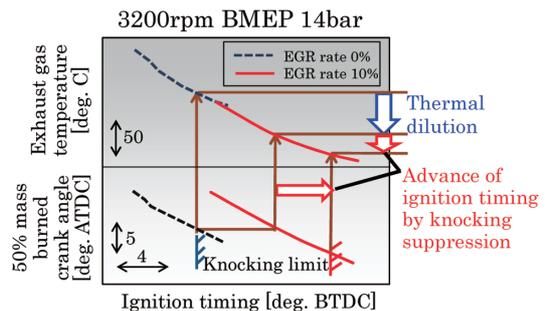


図-10 LP-EGRの排ガス温度低減効果  
Fig. 10 Effect of EGR on reducing exhaust gas temperature

LP-EGRによる排気温度低減代を示す。EGRの熱希釈効果に加え、LP-EGRのノッキング抑制効果により点火時期の進角が可能となり、排気温度が大幅に低減している。

#### 4.2.2 EGR領域

図11にEGR領域、及びBセグメント車両でのRoad-Load線を示す。LP-EGRを用いることで、低回転・高負荷から広い範囲でEGRガスを導入できていることがわかる。一方、差圧が小さく、LP-EGRを使用できない低中回転・低負荷領域は、内部EGRを用いることで広範囲に渡って燃料消費率の低減を図った。

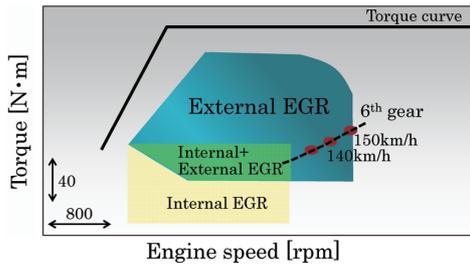


図-11 EGR領域

Fig. 11 Internal and external EGR regions

#### 4.3 鏡面ボア溶射シリンダブロック

新型では、R35 GT-Rでも採用しているボア溶射シリンダブロックを採用した。ボア内面に金属皮膜を形成することで、従来の鋳鉄ライナに対し鉄部分の肉厚を大幅に薄くした(図12)。鋳鉄ライナが無くなることで軽量化だけでなく、ボア壁-シリンダ壁-ウォータージャケット間の熱伝達率が上がることによりノッキング抑制にも効果がある。また、量産エンジンで採用するにあたり、ランニングコストを下げるため溶射方式をプラズマ溶射からアーク溶射に変更した。更に、シリンダ表面の潤滑性を確保するためのクロスハッチ加工を廃止し、溶射時に形成されるしゅう動面の気孔を利用することで、皮膜部の鏡面化を行いフリク

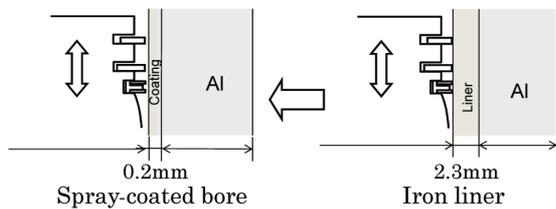
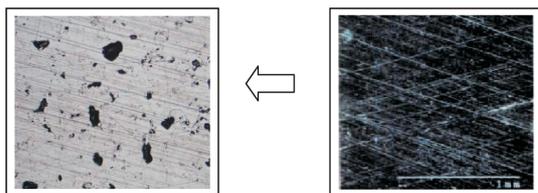


図-12 ボア溶射シリンダブロック  
Fig. 12 Spray-coated cylinder bore



Spray-coated and mirror-finished cylinder bore Iron liner and crosshatch machining

図-13 ボア表面比較  
Fig. 13 Comparison of bore surface

ションの低減を図った(図13)。

#### 4.4 中間ロック機構付吸気CVTC

新型は吸気バルブの遅閉じ(Late Intake Valve Closing; LIVC)ミラーサイクルによるポンピングロス低減と始動性の両立を目的として、中間ロック機構付CVTC(Continuously Variable Valve Timing Control)を採用した。進角側に変換する油圧駆動のCVTC(進角VTC)を用いるとエンジン停止時はバルブタイミングが最遅角すなわちLIVC状態になる。この状態では、コンプレッションが低く、始動性が厳しい極低温環境下では始動できなくなる懸念がある。LIVCと極低温環境下の始動性を両立するには、遅角側に変換するCVTC(遅角VTC)が望ましい。一方、遅角VTCでは最進角位置を始動性に重きを置いたバルブタイミングにせざるを得ないため、バルブオーバーラップを付けることが難しく、低中速領域の出力性能に影響する。これら相反する要求を両立するために、遅角側規制を新たなストップを追加することでエンジン停止時は最遅角状態では無く、始動に最適なバルブタイミングになるよう中間変換角で保持できるようにした(図14)。これにより、出力性能、始動性を両立しつつ、遅閉じミラーサイクルによる燃費性能の向上を図った。

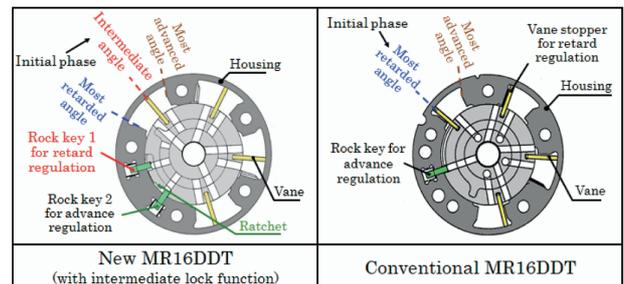


図-14 CVTC構造比較

Fig. 14 Comparison of CVTC structure

#### 4.5 エキゾーストマニホルダー一体型ターボチャージャー

新型はレスポンス向上を目的として、先代に対し慣性モーメントを45%低減したターボチャージャーを選定した。図15に新旧の形状を、図16に新旧Bセグメント車両でのセカンドギア、車速20km/hから全開加速した際の加速度を示す。本運転条件ではバルブタイミングをLIVCから出

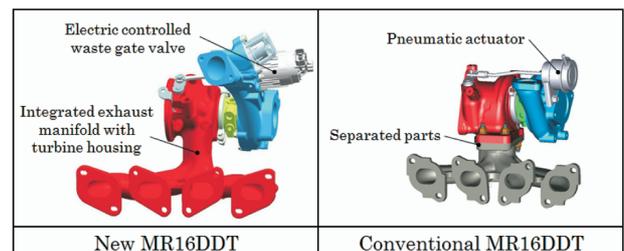


図-15 ターボチャージャー比較

Fig. 15 Comparison of turbochargers

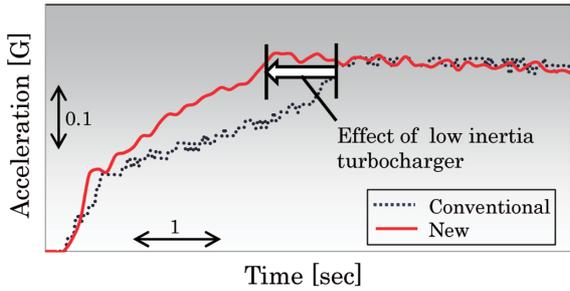


図-16 再加速性能比較  
Fig. 16 Comparison of re-acceleration performance (Gear : 2nd, V0=20km/h → wide open throttle)

カバルブタイミングへ進角させる条件であるにもかかわらず、先代に対して加速性能が向上している。一方、ターボチャージャの小型化は出力性能に影響するが、先述した圧縮比の変更、及び過給圧とカムプロフィールの見直しを行うことで、先代の出力性能を維持した。また、エキゾーストマニホールド一体とすることで、ヒートマス低減による触媒の早期活性化を図った。

#### 4.6 ウェストゲートバルブの電制化

ポンピングロス低減を目的として、ウェストゲートバルブの電制化を行った。自然吸気 (Natural Aspiration; NA) 領域はウェストゲートバルブを開くことでタービンへの仕事を減らし、過給領域はスロットル全開でウェストゲートバルブ開度によりトルクコントロールすることでポンピングロス低減を図った。更に、NA領域でタービン仕事を減らすことは、冷機始動時の触媒早期活性化にも有効である。

#### 4.7 フリクション低減アイテム

図17に新型で新たに採用したフリクション低減アイテムの一覧を示す。以下、主なフリクション低減アイテムについての詳細を説明する。

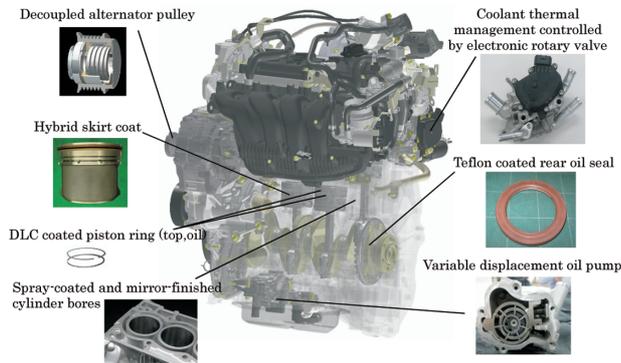


図-17 フリクション低減アイテム  
Fig. 17 New technologies for reducing mechanical friction

##### 4.7.1 サーマルマネージメント

電制ロータリバルブを用いてラジエータ、オイルクーラ、ヒータに流す水量をコントロールできるようにした。冷機時はエンジン暖気を促進するために、上記3系統へ水を流さず (Zero-flow)、暖気後は高水温制御により機械摩擦低

減を図った。図18にNEDCモード走行時の水温推移を示す。

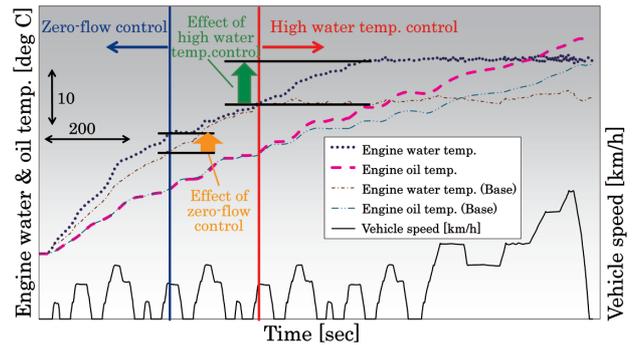


図-18 NEDCモード走行時の温度推移  
Fig. 18 Engine warm-up curves in NEDC mode

##### 4.7.2 可変容量オイルポンプ (Variable displacement oil pump)

先代では固定容量タイプのオイルポンプを用いていたため、回転数と共に吐出量が上がり、領域によっては必要以上の流体仕事をしていた。新型では可変容量オイルポンプに変更し吐出流量を制御することで、固定容量タイプに対して不要な領域の流体仕事を低減した。また、電制2段切り替えによる油圧制御によって、低負荷領域の吐出圧を下げることで、更なる流体仕事の低減を図った。

図19に新旧の油圧特性を示す。

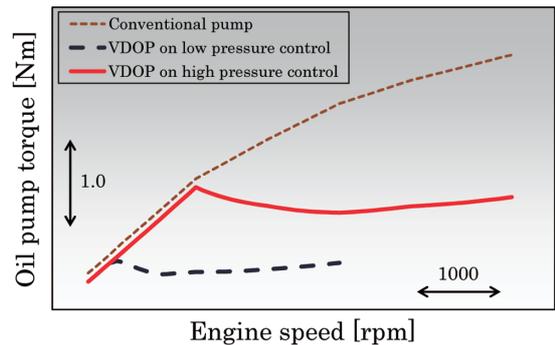


図-19 オイルポンプフリクション比較  
Fig. 19 Oil pump friction comparison of conventional and low-high pressure control

図20に新旧のフリクションを示す。上記を始めとする様々なフリクション低減アイテムを織込むことにより、先代に対し12%のフリクション低減を実現した。

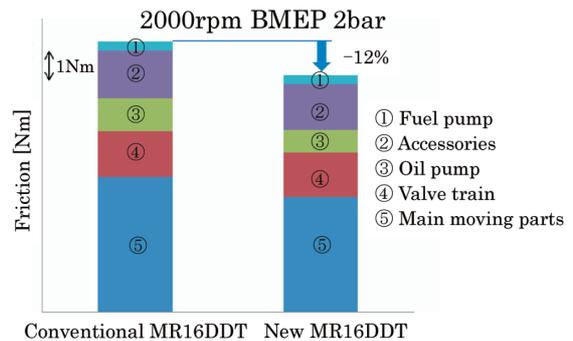


図-20 フリクション比較  
Fig. 20 Comparison of engine friction

## 5. 性能達成度

4章で説明した要素技術を織込んだことによる、性能達成度を以下に示す。

図21に新旧のトルクカーブを示す。先述したターボチャージャーのイナーシャ低減とスカベンジングを用いることで、インターセプト回転を先代より400rpm下げた。これにより、ダウンサイジングエンジンとしてより扱いやすい特性とした。

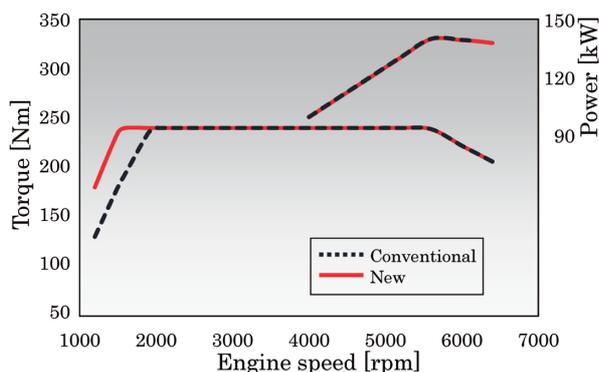


図-21 トルクカーブ  
Fig. 21 Engine torque curves

燃費性能は先代に対し10%以上低減（※）した。また、LP-EGRは過給領域などのモード外においても効果を発揮するため、リアルワールドでの燃費向上も実現した。

PNは先代に対し50%以上低減（※）し、Euro 6b規制を満足することができた。

（※Bセグメント車両でNEDCモード走行した際の比較）

## 6. ま と め

以上のように、新型MR16DDTエンジンは先代に対し、圧縮比の向上、及びLP-EGRや鏡面ボア溶射シリンダブロックを始めとする様々な要素技術を織込んだことで、動力、燃費、排気性能を更なる高次元でバランスさせることができた。本エンジンは2014年7月のJUKEマイナーチェンジを頭出しとし、将来的にはダウンサイジングエンジンとして他モデルへの搭載も予定している。本エンジンが、地球環境への負荷を低減する一翼を担い、持続可能な社会に貢献できると確信している。

最後に、本エンジンの開発、製品化に多大なるご協力を頂いた関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

## 7. 参 考 文 献

- 1) D. Takaki et al. : Study of an EGR System for Downsizing Turbocharged Gasoline Engine to Improve Fuel Economy, SAE Technical Paper No. 2014-01-1199 (2014)
- 2) Y. Kawabata et al. : The Effect of NOx on Knock in Spark-ignition Engines, SAE Technical Paper No. 1999-01-0572 (1999)
- 3) B. Grandin et al. : Heat Release in the End-Gas Prior to Knock in Lean, Rich and Stoichiometric Mixtures With and Without EGR, SAE Technical Paper No. 2002-01-0239 (2002)

### ■ 著 者 ■



松井 義典



岸 一 昭



藤原 和 弘



仲津 周 一

# ダウンサイジング過給ガソリンエンジンへのLow-pressure Cooled EGRシステムの適用

Application of Low-pressure Cooled EGR System to Downsize Boosted Gasoline Engines

吉田 慎一郎\*  
Shinichiro Yoshida

野原 常靖\*  
Tsuneyasu Nohara

春井 淳\*  
Jun Harui

伊藤 行伸\*  
Yukinobu Ito

平井 直樹\*  
Naoki Hirai

土田 博文\*\*  
Hirofumi Tsuchida

**抄 録** 燃費改善のためにエンジンを過給し排気量を低減するダウンサイジング化が進んでいる。ダウンサイジング化を進めていくと、高負荷域での使用頻度が多くなるため、過給領域の燃費改善が重要となってくる。従って、ダウンサイジング過給エンジンの燃費改善のポイントはノッキングの抑制、排気ガス温度の低下、比熱比の向上などとなる。これらを実現可能なLow-pressure Cooled EGRシステムを開発し、ガソリンターボエンジンとしては世界初で第二世代MR16DDTへ採用した。本稿では、開発したLow-pressure Cooled EGRシステムの内容について紹介する。

**Summary** Engine downsizing has been promoted in recent years as a way of improving the fuel efficiency of turbocharged gasoline engines. To downsize an engine, it is particularly important to improve fuel efficiency in the turbocharged area. The key points in improving fuel efficiency in this area are suppressing knocking, lowering exhaust gas temperature, and increasing the specific heat ratio. Therefore, we have developed a low-pressure cooled EGR system (LP-EGR system) and applied it to a turbocharged gasoline engine (second-generation MR16DDT) in order to improve fuel efficiency. This article describes the LP-EGR system's features, hardware components, and EGR rate control.

**Key words :** Engine Component, exhaust system, heat exchanger, exhaust gas recirculation (EGR)

## 1. はじめに

近年ガソリンエンジンの燃費向上のために、ダウンサイジング化が進んでいる。図1は、CVTを使用したときの1.6Lダウンサイジング過給ガソリンエンジンの北米の代表走行モードにおける燃料消費分担図であり、過給域の使用頻度が高く、過給域の燃費改善が重要であることが分かる。過給域の燃費改善のためには、下記三つがポイント

として挙げられ、これらすべてに効果があるCooled EGRシステムが各社で開発されている<sup>1)~7)</sup>。

- (1) ノッキングの抑制による点火時期進角
- (2) 排気ガス温度の低減による燃料増量領域の縮小
- (3) 比熱比の向上

今回我々は、Low-pressure Cooled EGR (LP-EGR) システムを開発し、第二世代MR16DDTガソリンエンジンへ適用したので、その内容について紹介する。

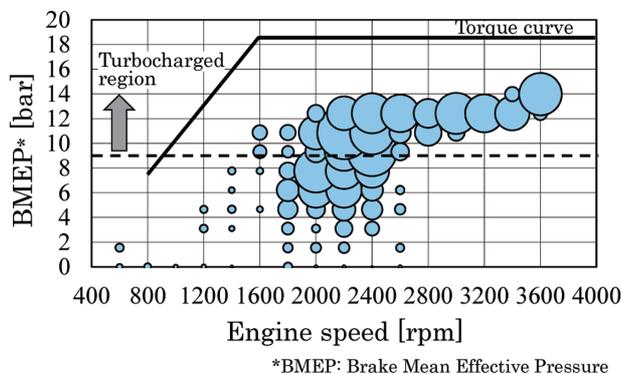


図-1 US06 走行時のダウンサイジングエンジンの作動点例  
Fig. 1 Example of downsized engine operation in US06 driving cycle

## 2. EGRシステムの選定

過給ガソリンエンジンに適用可能なEGRシステムはEGR取出し位置、EGR導入位置の違いでいくつかの種類があり、今回は下記三つのシステムを候補として検討した。

- (a) Low-pressure EGR (LP-EGR) : EGRガスをタービンの下流から取出し、コンプレッサの上流に導入する。
- (b) High-pressure EGR (HP-EGR) : EGRガスをタービン上流から取出し、スロットルの下流に導入する。
- (c) Mixed-pressure EGR (MP-EGR) : EGRガスをタービン上流から取出し、コンプレッサの上流に導入する。

\*パワートレイン第二技術開発部 \*\*パワートレイン第一技術開発部

それぞれのシステムの概念図を図2に、また各システムの得失比較を表1に示す。過給領域におけるEGRガスの導入のしやすさ（EGR導入可能領域）、ノッキングの抑制、排気ガス温度の低減の三つのポイントに関して得失比較をした結果、いずれの点でも優れるLP-EGRを選定した。以下にそれぞれについて説明する。

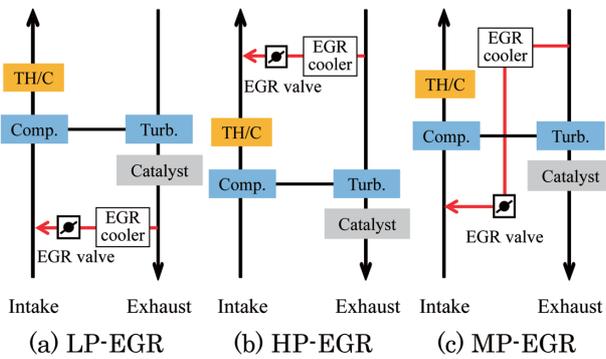


図-2 EGR システム図  
Fig. 2 Schematic diagrams of EGR systems

表-1 EGR システムの比較  
Table 1 Comparison of EGR systems

	LP-EGR	HP-EGR	MP-EGR
Width of EGR area in turbocharged region	++	-	+
Knocking suppression	++	+	+
Exhaust gas temperature reduction	++	+	+

## 2.1 EGR 導入領域

図3に各EGRシステムの差圧（EGRガス取出し部とEGRガス導入部の差）を示す。LP-EGRは、HP-EGRに比べ低回転・高負荷域での差圧を確保できる領域が拡大している。それにより、燃費改善を狙っている低回転・高負荷域において多くのEGRを導入することができる。さらにHP-EGRでは、図3中の囲い部において排気圧より吸気圧の方が高く、EGRバルブを開けると新気が排気管に流れ込む現象が起きてしまうため、EGRを導入することができない。一方、MP-EGRは同じ領域においてLP-EGRより大きいシステム差圧を示している。しかしながら、これはEGRバルブ閉状態における差圧であり、実際にEGRバルブを開けた場合には、次に示すような課題がある。図4に、低速領域でのEGR導入時のシリンダ空気導入量のシミュレーション結果を示す。MP-EGRはEGR取出し部がタービンの上流に設置されていることから、EGRを導入するとタービンを回転させる排気ガス容積が低減するため過給仕事は低下するのに対し、LP-EGRはタービン下流にEGR取出し部を設置されているため、その低下は無い。すなわち、MP-EGRはLP-EGRに対し、低回転・高負荷領域において、トルクを維持したままEGRを導入すること

ができない。

以上より、LP-EGRでは低回転・高負荷域において、EGR導入領域とEGR導入量を他の候補システムに比べ拡大することができる。

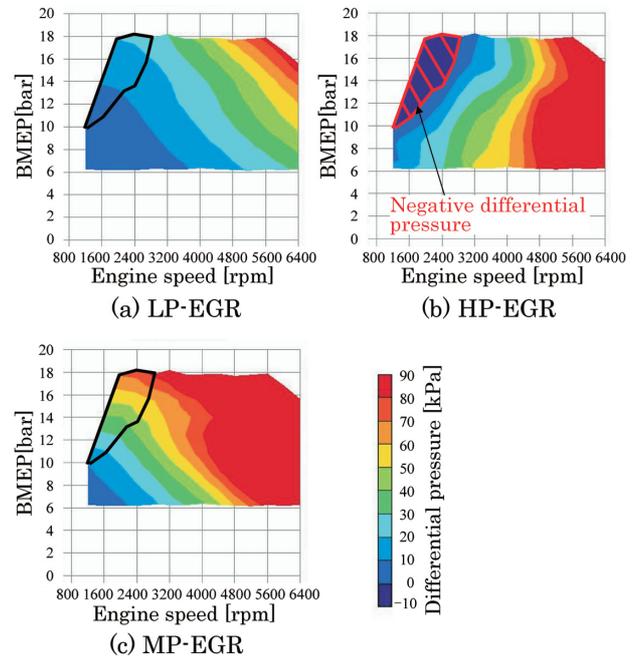


図-3 EGR 取出し部とEGR ガス導入部の圧力差比較  
(EGR バルブ全閉時)  
Fig. 3 Comparison of differential pressures between EGR gas extraction and introduction portions (EGR valve closed)

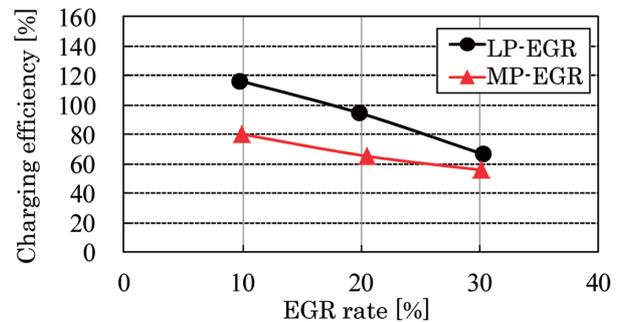


図-4 各システムのEGR導入時のシリンダ吸入空気充填効率（エンジン回転数1600rpm、スロットルバルブ開度全開、ウェストゲートバルブ全閉時のシミュレーション結果）  
Fig. 4 Charging efficiency of each system as a function of EGR rate (simulation, engine speed 1600 rpm, throttle valve full-open and westgate valve full-close)

## 2.2 ノッキング抑制効果

窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）に関して、燃料の自己着火を促進させることが報告されている<sup>8)9)</sup>ことから、今回ノッキングへの影響について検討した。ガソリン単気筒エンジンにおいてEGRを導入させた状態で、吸気管中のNO<sub>x</sub>濃度を変化させ、ノック余裕度への影響確認実験を行った結果を図5に示す。吸気管のNO<sub>x</sub>濃度を下げることにより、ノック余裕度は改善することが確認できた。また、吸気管の

NO<sub>x</sub>濃度が0ときのEGR率10%当りのノック余裕度の改善が3degあることを確認できた。このことからノッキング抑制効果をより拡大するためには、EGRガス中のNO<sub>x</sub>濃度を下げることが有効であり、三元触媒の下流からEGRガスを取り出すLP-EGRは、他の候補システムに対してEGRによるノッキング抑制効果を拡大できることが分かった。

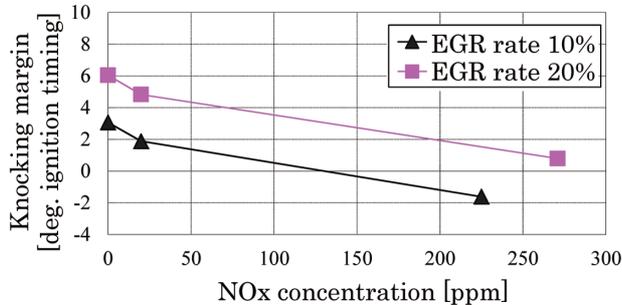


図-5 吸入空気中NO<sub>x</sub>濃度とEGR率0%からのノック余裕度改善代の関係(エンジン回転数1600rpm、IMEP\*15bar)  
 Fig. 5 Influence of NO<sub>x</sub> concentration in the intake air on knocking margin improvement from EGR rate 0% (engine speed 1600rpm, IMEP 15bar)  
 \*IMEP: Indicated Mean Effective Pressure

### 2.3 排気ガス温度低減効果

ガソリンエンジンは、高回転・高負荷の排気ガス温度が高くなる条件において、排気系部品の保護のために燃料増量をしている。このため、排気ガス温度を低減すれば燃料増量をしている領域を縮小することができ、燃費改善となる。

図6は高回転・高負荷において、EGR量を変化させた場合の点火時期と排気ガス温度の関係を示したものである。この結果、EGR量を増大させることにより、高負荷領域において排気温度が下がることを実証できた。図3に示す通り高回転・高負荷領域では、どのシステムにおいても十分なEGRシステム差圧が得られる領域であるが、LP-EGRは前述2.2節のノッキング抑制効果で点火時期が進角できる分だけ、他の候補システムに比べ排気ガス温度の低減効果をより大きく得ることができる。

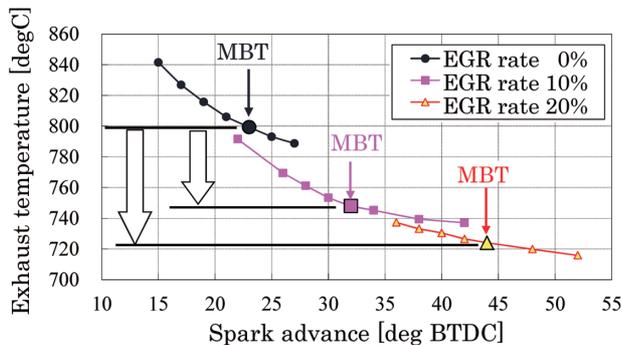


図-6 EGRの排気ガス温度低減への効果(エンジン回転数4000rpm、BMEP 9bar)  
 Fig. 6 Effect of EGR on reducing the exhaust gas temperature (engine speed 4000rpm, BMEP 9bar)

### 3. システム構成

図7に、第二世代MR16DDTエンジンに搭載したLP-EGRシステム部品を示す。LP-EGRはEGRシステムの差圧が小さいため、低圧力損失となるように触媒下流からコンプレッサ上流までのガス経路を構成した。さらに、EGRシステムの差圧が低いと、少しの圧力変化がEGR率変化(燃焼状態変化)へ与える影響は大きくなる。このため、EGRバルブ上下流の差圧を測定できる差圧センサを設定し、燃焼状態が適切な状態できるようにEGRを動作させるシステムとした。

また、EGRバルブ下流の経路にゴムホースを設定し、排気系部品の熱ひずみによるコンプレッサの熱移動を吸収させる構造にしている。以下に主要部品の詳細を説明する。

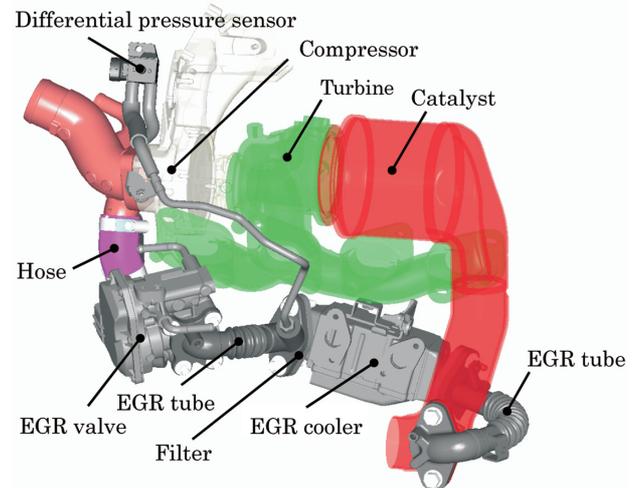


図-7 第二世代MR16DDTエンジンのLP-EGRシステム部品  
 Fig. 7 Structure of LP-EGR system for 2nd generation MR16DDT engine

#### 3.1 EGRバルブ

LP-EGRはシステムの差圧が小さいため、構成部品の圧力損失を低く抑える必要がある。図8に、各構成部品に割付けた圧力損失を示す。EGRバルブ以外の部品で約半分の圧力損失となるようにEGR部品の経路、断面積を決定し、残りの約半分の差圧で、要求EGR流量を流せるようにEGRバルブ仕様を決定した。このときのバルブ開度は全開開度ではなく、後述4.2節の過渡応答要求を考慮した中間開度を前提とする必要があるため、バルブ構造は大径化に有利なバタフライタイプを採用した。

一方、燃焼安定性へ影響のあるバルブ全閉時漏れ流量もバルブ構造を決める重要な特性である。一般的にバタフライタイプは、バルブ全閉時漏れ流量規格がポペットタイプのバルブよりも大きいのが、LP-EGRはバルブ前後の差圧が小さいため、実漏れ流量は小さくなり、燃焼安定性への影響は小さい。

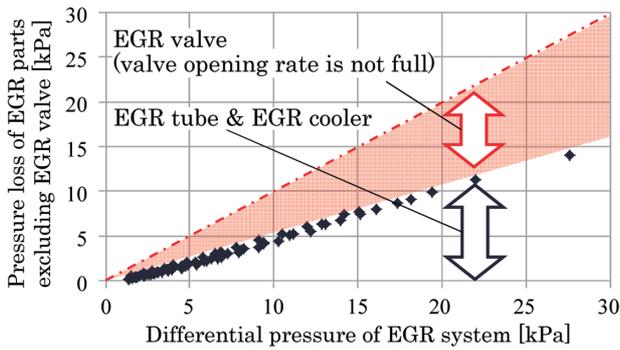


図-8 LP-EGRシステムの圧力損失 (EGR率 10%)  
Fig. 8 Pressure loss of LP-EGR system (EGR ratio 10%)

### 3.2 EGRクーラ

本エンジンでは高回転・高負荷までEGRを導入しており、EGRクーラ入口のガス温度は高く、ガス流量も多くなる。そのため、水冷式のインナーフィンタイプの高冷却効率EGRクーラを採用することにより、EGRクーラのサイズ拡大を抑制した。EGRクーラ出口のガス温度は、部品耐熱要求から130℃以下となる設計とした。

### 3.3 異物捕捉フィルタ

排気系部品で発生した溶接スパッタなどの異物が、EGRガス経路を通過してコンプレッサ翼へ衝突するのを防止するために、EGRガス通路内に異物を捕捉するフィルタを設置した。フィルタ追加による圧力損失増加の抑制とフィルタの熱応力低減のため、図7に示すようにガス温度の低いEGRクーラの下流側に搭載した。

また、LP-EGRのEGR取出し部が触媒下流でEGRガス中に含まれるデポジット要因物質が微小のため、フィルタへのデポジットによる目詰まりの影響は小さい。なお、デポジット耐久試験によりフィルタの圧力損失増加に問題ないことを確認している。

## 4. EGR率コントロール

### 4.1 定常時のEGRコントロール原理

LP-EGRの基本原理を説明する構成図を図9に示す。吸気系のEGR導入部より上流を第1の抵抗 $\alpha_1$ 、排気系のEGR取出し部より下流側を第2の抵抗 $\alpha_2$ と考える。エンジンの吸入空気量 $Q_1$ が変化すると、第1の抵抗 $\alpha_1$ の下流側圧力 $P_1$ と第2の抵抗 $\alpha_2$ の上流側圧力 $P_2$ が変化し、その両者の差圧 ( $P_2-P_1$ ) は吸入空気量に応じてほぼ一義的に決まる。これはEGRシステム上下流の差圧であり、EGRガス流量 $Q_2$ はこの差圧で決まる。一方、EGRバルブの抵抗 (バルブ開口面積)  $\alpha_3$ が固定の場合、 $Q_2$ は差圧に応じて一義的にしか決まらず、 $Q_1$ と $Q_2$ の比率は同一となる。すなわちEGRバルブ開度が同じならば、吸入空気量の大小によらずEGR流量の割合は一定 (EGR率が一定)

となる。

図10は定常条件におけるEGRバルブ開度に対するEGR率の実験結果であり、スロットルバルブ開度すなわち吸入空気量によらず、EGR率が一定であることが分かる。

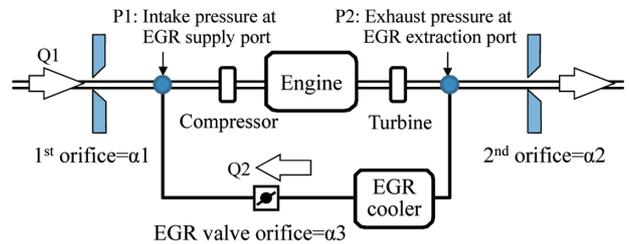


図-9 LP-EGRシステムの構成図  
Fig. 9 Schematic diagram of LP-EGR system

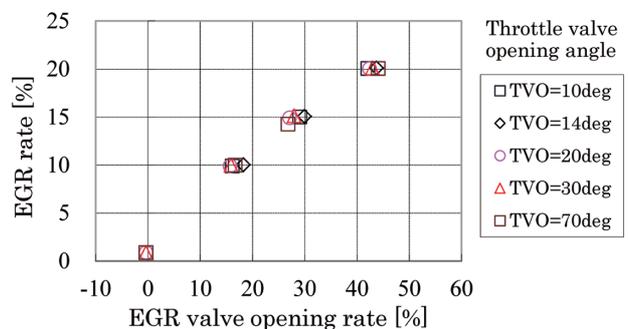


図-10 スロットル開度ごとのEGRバルブ開度とEGR率の関係 (エンジン回転数 2000rpm)  
Fig. 10 EGR rate vs. EGR valve opening area in several throttle valve opening angle (engine speed 2000rpm)

### 4.2 過渡時

図11にスロットルバルブを急激に閉じた場合のEGR率挙動を示す。EGR率が一時的に増加している図中 (a) は、EGRバルブ開度が一定の場合である。これは、吸入空気量はスロットルバルブ急閉後即時に低下するが、排気圧力は少し遅れて低下する、つまりEGRガス流量の低下が遅れることが要因である。この問題を解決するために、応答遅れの間はEGRバルブ開度を補正する制御を開発した。EGRバルブ開度の補正量は、その時点の吸入空気量で算出される排気圧力と遅れ分の時間を、遡った時点の吸入空気量で算出される排気圧力の比により求めた。EGRバルブ開口面積を図中 (b) のように補正することで、EGR率の変動幅が低減できていることが分かる。

以上より、EGR制御の基本構成は、定常状態において目標EGR率になるようにEGRバルブ開度を設定し、さらに過渡の応答遅れ補正を行うことで、安定的なEGRの導入を可能とした。

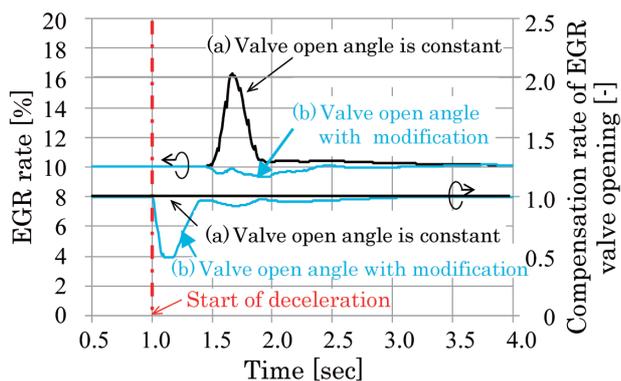


図-11 過渡状態時のEGR率挙動  
(減速：エンジン回転数 2000rpm、BMEP 11bar → 7bar)  
Fig. 11 EGR rate motion during transient condition  
(deceleration: engine speed 2000rpm,  
BMEP 11bar → 7bar)

### 5. ま と め

- (1) 過給域の燃費改善は、EGRガスを触媒下流から取出しコンプレッサ上流へ導入するLP-EGRが有効な手段と考える。
- (2) 低システム差圧のLP-EGR適用のため低圧力損失となるハード部品構成とし、差圧センサによるEGRバルブ前後の差圧をモニタするシステムとした。
- (3) LP-EGRは、定常運転時EGRバルブ開度を一定に保つと、吸入空気量によらずEGR率が一定となる。
- (4) 定常状態において目標EGR率になるようにEGRバルブ開度を設定し、過渡時は排気圧力の変化遅れを考慮したバルブ開度へ補正することで、EGR率を安定して導入することができる。

### 6. 謝 辞

最後に、本LP-EGRの開発、製品化に多大なるご協力を頂いた関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

### 7. 参 考 文 献

- 1) J. Miller et al. : Future Gasoline Engine Technology and the Effect on Thermal Management and Real World Fuel Consumption, SAE Technical Paper No. 2013-01-0271 (2013)
- 2) A. Cairns et al. : Pre Versus Post Compressor Supply of Cooled EGR for Full Load Fuel Economy in Turbocharged Gasoline Engines, SAE Technical Paper No. 2008-01-0425 (2008)
- 3) A. Cairns et al. : Exhaust Gas Recirculation for Improved Part and Full Load Fuel Economy in a Turbocharged Gasoline Engine, SAE Technical Paper No. 2006-01-0047 (2006)
- 4) L. Zhong et al. : EGR Systems Evaluation in Turbocharged Engines, SAE Technical Paper No. 2013-01-0936 (2013)
- 5) G. Vent et al. : The New 2.0l Turbo Engine from the Mercedes-Benz 4-Cylinder Engine Family, Proceedings of the 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology (2012)
- 6) M. Kaneko et al. : Development of New Generation Horizontally Opposed Direct Injection Gasoline Turbo Engine, JSAE Symposium Text, No. 10-12, pp. 20-23 (2013)
- 7) D. Nagano et al. : Development of Horizontally Opposed Direct-Injection Turbo Gasoline Engine (1st Report), SUBARU Technical Review, No. 39, pp. 140-146 (2012)
- 8) Y. Kawabata et al. : The Effect of NOx on Knock in Spark-ignition Engines, SAE Technical Paper No. 1999-01-0572 (1999)
- 9) B. Grandin et al. : Heat Release in the End-Gas Prior to Knock in Lean, Rich and Stoichiometric Mixtures With and Without EGR, SAE Technical Paper No. 2002-01-0239 (2002)

### ■ 著 者 ■



吉田 慎一郎



野原 常靖



春井 淳



伊藤 行伸



平井 直樹



土田 博文

# 新型NP300 Navara搭載 新型4気筒ディーゼルエンジンYS23DDTTの開発

New 2.3L I4 Diesel Engine (YS23DDTT) for New NP300 Navara

三枝 社\*  
Yashiro Saegusa

山口 稔\*  
Minoru Yamaguchi

宅間 正和\*  
Masakazu Takuma

岡部 恭慶\*  
Yasuyoshi Okabe

田中 一弘\*  
Kazuhiro Tanaka

北原 靖久\*\*  
Yasuhisa Kitahara

中島 正寿\*\*  
Masatoshi Nakajima

ジル マリア\*\*\*  
Maria Gil Gomez

ルイス ソフィー\*\*\*  
Sophie Louis-Mossberg

**抄 録** LCV (Light Commercial Vehicle) 車搭載用FRディーゼルエンジンYS23DDTTエンジンを開発した。本エンジンを搭載する新型NP300 Navaraの車両コンセプトである“TOUGH”“SMART”を実現するために、2ステージターボ、電制可変容量オイルポンプを始め、乗用車用ディーゼルエンジンに採用され始めた新しい技術アイテムをLCV向けに適用し、前型YD25DDTiで高い評価を頂いたトップレベルの動力性能を維持しつつ、クラストップの燃費性能を持たせた。

**Summary** The YS23DDTT engine was developed as a brand-new FR diesel engine for LCV (light commercial vehicle) application. New technologies that have recently been applied to passenger car diesels, such as 2-stage turbocharger and an electrical variable displacement oil pump, were applied to achieve both high output performance that is unchanged from that of its highly evaluated predecessor (YD25DDTi) and class-leading fuel economy.

**Key words :** Power Unit, engine, diesel engine, new model, turbocharger, fuel injection, engine component

## 1. はじめに

環境性能の強化に対する期待や要求は世界的にますます加速しつつあり、また、燃費経済性の競争も同様に熾烈さを増している。拡大し続けるLCV（小型商用車）事業の中核を担うべく開発された新型NP300 Navaraに搭載する新型YS23DDTTエンジンは、燃焼改善やフリクション低減などのベーシックな技術の磨き上げに加え、従来乗用車を中心に適用が拡大しつつあった2ステージターボや電制可変容量オイルポンプなどの新技術を採用し、前型YD25DDTiで高く評価して頂いたすぐれた動力性能はそのままに、クラスをリードする低燃費とEuro 6b規制に適應できる低エミッション化を実現した。

本稿では、本YS23DDTTエンジンの開発の狙いと主な採用技術の概要を紹介する。

## 2. 開発の狙い

新型YS23DDTTエンジンは、環境性能の向上はもちろんのこと、今後のLCV車両への適用性を考慮し、以下のコンセプトの下で開発された。



図-1 新型NP300 Navaraのコンセプト  
Fig. 1 Vehicle concept of NP300 Navara

Vehicle architecture			
Powertrain layout			
Common			
Customer usage			

図-2 新型YS23DDTTエンジン開発コンセプト  
Fig. 2 YS23DDTT engine development concept

\*パワートレイン第一製品開発部 \*\*パワートレイン実験部 \*\*\*Nissan Technical Centre Europe (Spain) S.A.

- ・新型NP300 Navaraのコンセプト“TOUGH”“SMART”を実現するため、力強い走りを支える出力性能と、クラストップの燃費性能の両立（図1）
- ・ビジネスのグローバル展開を考慮した十分な耐久性の確保
- ・Renaultとの協業を生かした高い開発効率と主要部品の共用による合理化（図2）

### 3. エンジンの概要と主要緒元

新型YS23DDTT エンジンの主要緒元を表1に、採用した主要技術を図3に示す。

前型のYD25DDTiに対して、排気量を約200ccダウンサイジングしつつも、前型と同等の最高出力140kW、最大トルク450N・mを達成し、また最大トルクを従来比で500rpm低い1500rpmから発生させて、よりパワフルな走りを可能とする。

燃費性能については、高効率な燃焼、低フリクション化、ダウンサイジング効果などにより、2000rpm台上燃費比で約10%の向上を図った。

さらに今後のLCV車両への搭載拡大を考慮し、エンジンパッケージのコンパクト化を図ると共に、20kgの軽量化を実現した。

表-1 エンジン主要緒元  
Table 1 Engine specifications

	YS23DDTT	Predecessor (YD25DDTi)
Engine type	Inline 4-cylinder DOHC 16valve	←
Displacement [cc]	2298	2488
Bore x Stroke [mm]	85 x 101.3	89 x 100
Compression ratio	15.4:1	15.0:1
Max. power [kW / rpm]	140 / 3750	140 / 4000
Max. torque [Nm / rpm]	450 / 1500 - 2500	450 / 2000
Specific power [kw / L]	60.9	56.2
Specific torque [Nm / L]	195.8	180.8
BSPC (engine speed=2000rpm)	-10 %	Base
Fuel injection system	Common-rail 2000bar piezo injector	Common-rail 2000 bar solenoid injeter
Turbocharger system	2-stage turbo	Variable nozzle turbo
Length x Width x Height [mm]	632.9 x 665.6 x 815.5	703.3 x 748.0 x 839.5
Engine weight [kg]	-20	Base

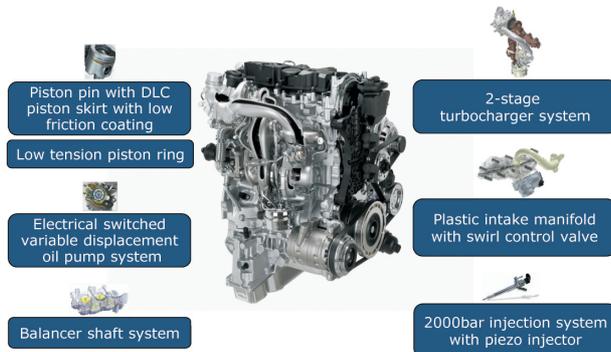


図-3 主要採用技術

Fig. 3 Key technologies of YS23DDTT engine

### 3.1 ステージターボ

力強い走りを実現するため、ダウンサイジングしつつも最高出力、最大トルクは前型のYD25DDTi並みを維持し、さらに低回転域のトルクを向上するために、新たに2ステージターボを採用した。図4にエンジン低回転域、図5にエンジン高回転域の作動状態をそれぞれ示す。

エンジン低回転域では、上流側に設定された小型低慣性タービンを持つ小型ターボ（HP (High-pressure) ターボ）を主に作動させることにより、高レスポンスと、低回転域でのトルクの向上を図った。エンジン回転の上昇とともに、HPターボと大型のターボ（LP (Low-pressure) ターボ）間にあるバイパス弁を開くことで、LPターボへの排気ガス流を主流とし、高回転域でのトルク向上を図った。

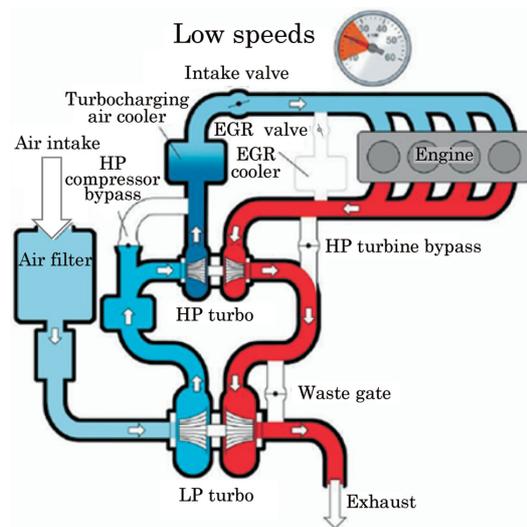


図-4 2ステージターボ（エンジン低回転域）  
Fig. 4 2-stage turbocharger system (low engine speed area)

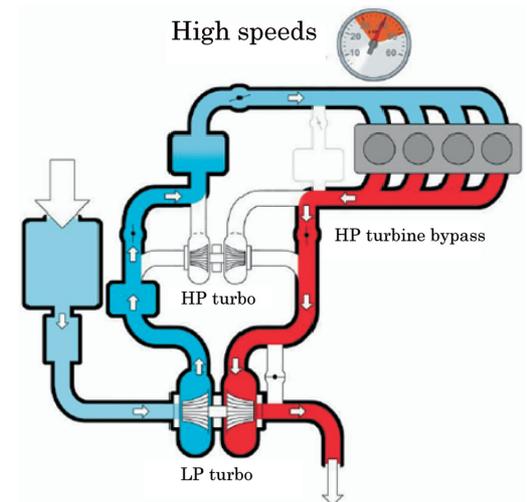


図-5 2ステージターボ（エンジン高回転域）  
Fig. 5 2-stage turbocharger system (high engine speed area)

### 3.2 燃焼システム

#### 3.2.1 高圧燃料噴射システム

ディーゼルエンジンの性能を向上する上で重要な噴霧

の微粒化、及び噴射タイミングの精度向上のため、噴射圧力は2000barとし、7穴のピエゾ式インジェクタを採用した(図6)。

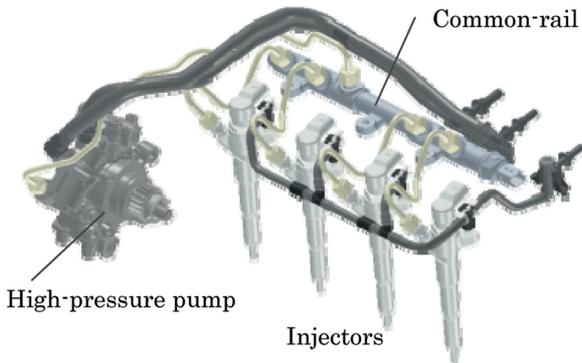


図-6 高圧燃料噴射システム  
Fig. 6 High-pressure fuel injection system

### 3.2.2 ガス流動改善と燃焼場の生成

燃焼改善を図るために、以下のアイテムを採用した(図7-図9)。

- 1) スワールコントロールバルブ付樹脂インテークマニホールドのマニホールドポート部とバルブ形状の工夫により、通気抵抗、新気・EGR (Exhaust Gas Recirculation) の分配、及びシリンダ内流動の最適化を図った。
- 2) ピストン冠面形状、インジェクタ 噴霧を注意深く検討し、燃焼場の最適化を図った。

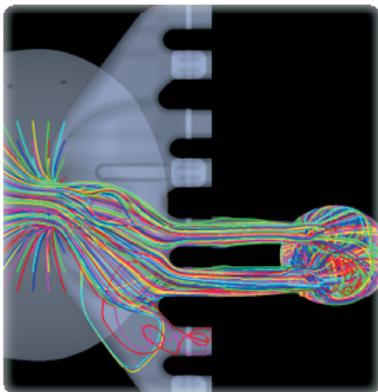


図-7 ガス流動解析  
Fig. 7 Intake air flow analysis by simulation

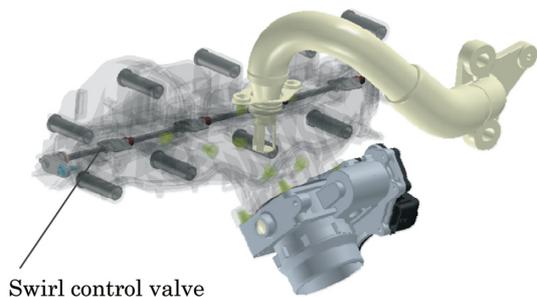


図-8 スワールコントロールバルブ付樹脂インテークマニホールド  
Fig. 8 Plastic intake manifold with swirl control valve



図-9 ピストン冠面形状とインジェクタ噴霧図  
Fig. 9 Piston bowl and injection design

### 3.3 電制可変容量オイルポンプ

オイルポンプ駆動によるフリクションロスを低減するために、電制可変容量オイルポンプ (EVOP: Electrical Variable displacement Oil Pump) を採用した。

図10にエンジン回転領域ごとのシステムの作動原理を示す。EVOPは、オイルポンプ内のスプリング張力と油圧のバランスでコントロールリンクを左右に移動させることで容量を可変させ、かつ電制ソレノイドバルブの切り替えによりリリーフ圧をコントロールすることで、エンジン回転領域に応じた最適な油圧を確保することができる。

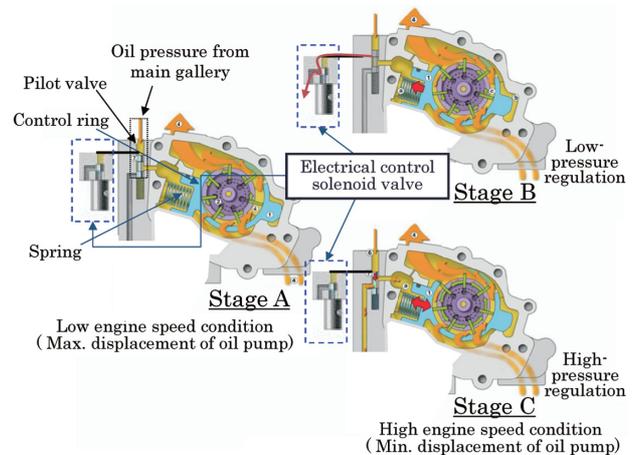


図-10 電制可変容量オイルポンプ作動原理  
Fig. 10 Operating principle of electrical variable displacement oil pump (EVOP) system

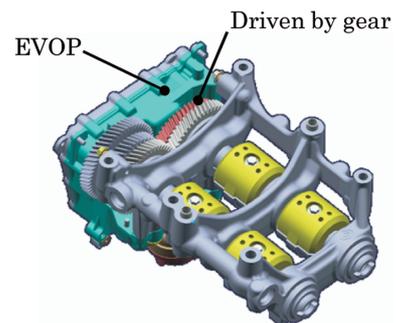


図-11 電制可変容量オイルポンプ パッケージ  
Fig. 11 EVOP packaging

また、オイルポンプ駆動をギア駆動とし、かつオイルポンプと balanサーシャフトの一体化により、コンパクトなパッケージを実現した（図11）。

図12にEVOPと従来型のオイルポンプの油圧マップの比較を示す。EVOP採用により、低油圧での使用領域を大幅に拡大することで0.5%の燃費向上を実現した。

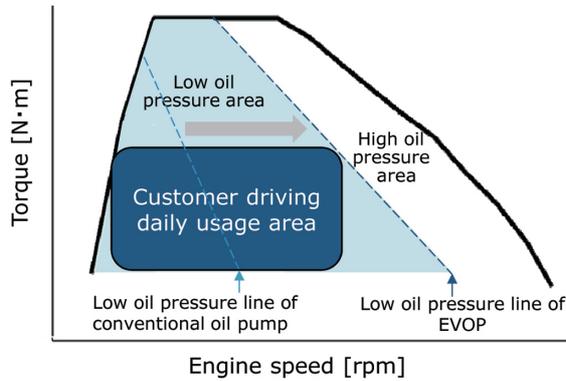


図-12 EVOP と従来型オイルポンプの油圧マップ比較  
Fig. 12 Oil pressure map comparison between EVOP and conventional oil pump

### 3.4 フリクション低減

以下のフリクション低減アイテム及びエンジンダウンサイジングの効果により、新型YS23DDTT エンジンでは前型に対して、全域にわたり10-20N·mのフリクション低減を実現した（図13）。

- (1) DLC (Diamond Like Carbon) コートのピストンピン
- (2) モリブデン (Mo) コートのピストンスカート
- (3) ピストンリングの張力低減
- (4) PTFE (ポリテトラフルオロエチレン) コートのクランクシャフトリヤオイルシール

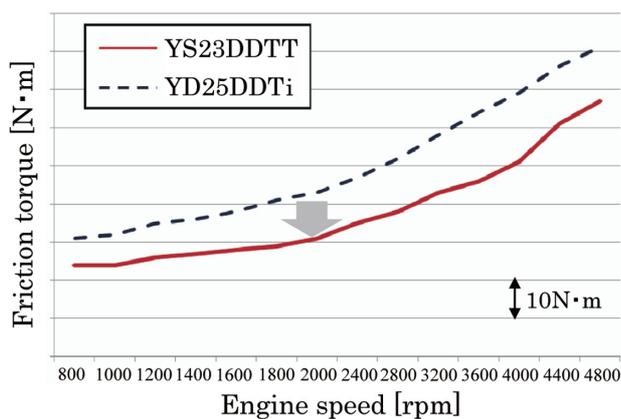


図-13 フリクション比較（エンジン回転数 2000rpm）  
Fig. 13 Motoring friction comparison at engine speed 2000rpm

### 3.5 二次バランサシステム

LCV車両の音振性能の向上要求を受け、こもり音を低減するため、二次バランサシステムを搭載し、エンジン回転数3000rpm以上の領域において15dB以上の向上を果た

した。また、ギア駆動により、パッケージのコンパクト化を図った（図14）。



図-14 二次バランサシステム図  
Fig. 14 Balancer system

## 4. エンジン及び車両性能達成

以上紹介した主要技術の採用により達成したエンジン単体、及び車両での各性能について説明する。

### 4.1 車両燃費、動力性能

図15に車両での燃費性能、動力性能について、競合他社との比較を示す。横軸に欧州NEDCのモード燃費、縦軸に0-100km/hの加速タイムを示している。

新型YS23DDTT搭載のNP300 Navaraは前型のYD25DDTi搭載車でもトップレベルであった動力性能をさらに向上し、燃費性能においても同クラスで卓越した性能を達成することができた。

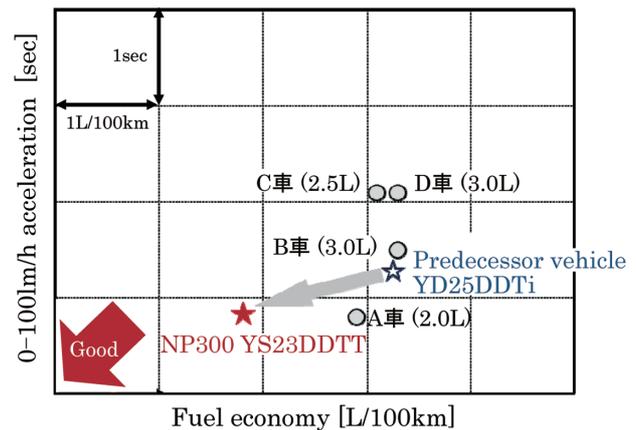


図-15 燃費、動力性能ポジション比較（欧州NEDCモード）

Fig. 15 Fuel economy and acceleration performance comparison (NEDC mode)

### 4.2 エンジン出力性能

図16に新型YS23DDTTの前型との出力、及びトルクカーブの比較を示す。最高出力、最大トルクは前型と同様の140kW、450N·mであるが、2ステージターボの採用によ

り、低回転域におけるトルクの向上と、高回転域でのエンジンの伸びを向上することができた。

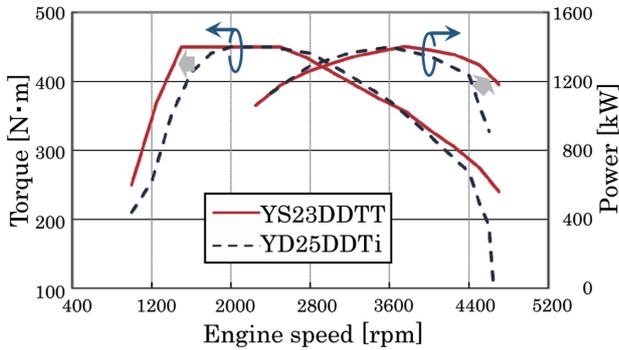


図-16 エンジン出力、トルク比較  
Fig. 16 Engine power and torque comparison

### 4.3 エンジン燃費性能

図17に新型YS23DDTTの前型とのエンジン回転数2000rpmでの正味燃料消費率（BSFC）の比較を、図18にBSFCマップの比較を示す。

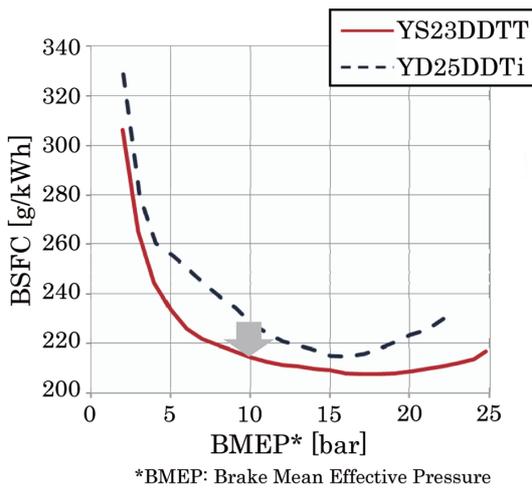


図-17 正味燃料消費率（BSFC）比較  
（エンジン回転数2000rpm）

Fig. 17 BSFC comparison at engine speed 2000rpm

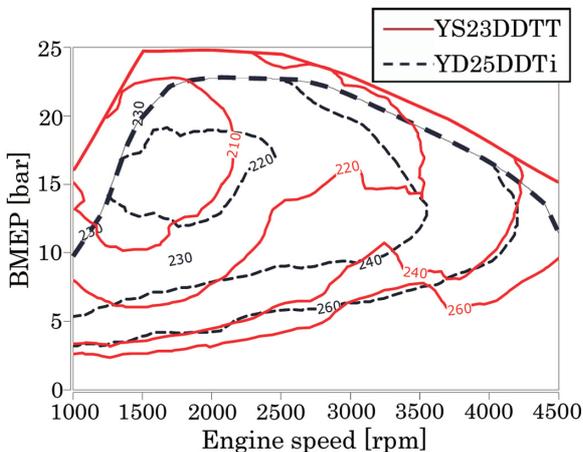


図-18 正味燃料消費率（BSFC）マップ比較  
Fig. 18 BSFC map comparison

図17は横軸にエンジン負荷（bar）、縦軸に正味燃料消費率（BSFC）を示している。新型YS23DDTTは低フリクションアイテム、電制可変容量オイルポンプ、及びダウンサイジング効果により、前型に対して10%の台上燃費の向上を図ることができた。

図18は横軸にエンジン回転数、縦軸にエンジン負荷を示している。BSFC同様、低燃料消費率の領域が、前型に比べて大幅に拡大されていることがわかる。

### 4.4 車両燃費、排気性能

図19に新型YS23DDTT搭載のNP300 Navaraと前型のYD25DDTi搭載車との車両燃費の比較を示す。

YS23DDTT化による燃費向上に加え、下記車両の燃費向上アイテムとの相乗効果により、前型車に対して20%の燃費向上を図ることができた。

- (1) ハイギアレシオ化（High gear ratio）
- (2) オルタネータ回生制御の採用（Electric power regeneration）
- (3) 空力の改善（Running resistance）

また、燃焼改善によりCO<sub>2</sub>のみでなく、NO<sub>x</sub>も大幅に低減し、今後欧州で排気規制強化されるEuro 6b規制対応を視野に入れた排気ポテンシャルを持つことができた。

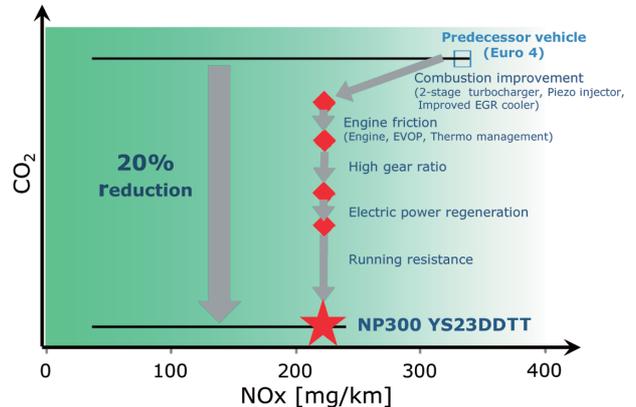


図-19 車両燃費、排気性能比較（欧州NEDCモード）  
Fig. 19 Vehicle fuel economy and emission performance comparison (NEDC mode)

## 5. まとめ

新型YS23DDTTエンジンは、ダウンサイジング化と同時に、2ステージターボ、電制可変容量オイルポンプといった新しい技術をLCVの新型NP300 Navaraに採用することにより、クラストップレベルの動力性能と卓越した燃費性能を両立することができた。

また、本エンジンはRenault-日産のアライアンスエンジンとして開発されており、今後LCV事業の拡大に貢献する中核エンジンとして、グローバルな展開が期待される。

最後に末筆ながら、本エンジンの開発、製品化に当たり多大なご協力を頂いた社内外の皆様へ厚く感謝の意を表

します。

### 6. 参考文献

- 1) Y. Saegusa et al. : High Performance 2.3L I4 Diesel Engine with 2-Stage Turbocharger for LCV, Proceedings of the 23<sup>rd</sup> Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology (2014)
- 2) G. Ambrosi et al. : The new RENAULT Energy dCi 140kW 2,3l Diesel engine, Proceedings of the ROUEN 2014 - SIA Powertrain International Conference (2014)
- 3) M. Ikeda et al. : Outline and Clean Diesel Technologies of a New 2.5L Diesel Engine Complying with Euro5 Regulations, Proceedings of the JSAE annual congress, No. 152-10, pp. 1-4 (2010)

### ■著者■



三枝 社



山口 稔



宅間 正和



岡部 恭慶



田中 一弘



北原 靖久



中島 正寿



ジル マリア



ルイス ソフィー

# スマート・ルームミラーの開発

## Development of Smart Rearview Mirror

田崎 祐一\*  
Yuichi Tazaki

進木 博之\*\*  
Hiroyuki Shinki

阿部 修\*\*\*  
Osamu Abe

岡 弘和\*\*\*\*  
Hirokazu Oka

**抄 録** さまざまな走行環境において、ドライバーにクリアな後方視界を提供するモニタと、従来のルームミラーを任意に切り替えることを世界で初めて可能にした、スマート・ルームミラーの開発を紹介する。本システムは、後方の交通状況を確認する新開発の高性能狭角カメラと、ルームミラーに内蔵した新開発の特殊形状液晶モニタで構成されている。リヤウインドウに設置された高解像度カメラにより、鮮明な画像を液晶モニタに映し出すことによって、従来よりも広くクリアな後方視野をドライバーに提供し、快適な運転操作を可能とする。

**Summary** This article describes the development of a smart rearview mirror; specifically, the world's first LCD monitor that not only provides clear rearward visibility under various conditions, but also gives the driver the ability to switch between the LCD monitor and a traditional rearview mirror, depending on his or her preference. This system, which is housed within the structure of the rearview mirror, has a built-in LCD monitor that can be activated in place of the conventional mirror. A high-resolution camera mounted on the rear of the vehicle provides the driver with a clear unobstructed view of the rear flanks, allowing the ability to check blind spots and other traffic conditions. The camera projects a clear image onto the monitor to provide the driver with a better view for a more comfortable driving experience.

**Key words :** Electronics, Safety, visibility, rearview mirror

### 1. はじめに

近年、視界性能向上技術として、カメラとモニタにより後退時に近距離の後方が確認できるバックビューモニタ(図1)や、クルマを上空から見下ろしているかのように直感的に周囲の状況を把握できるアラウンドビューモニタ

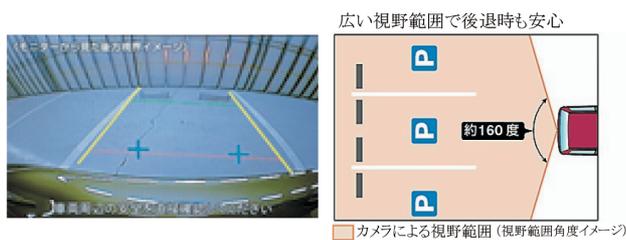


図-1 バックビューモニタ  
Fig. 1 Rear View Monitor

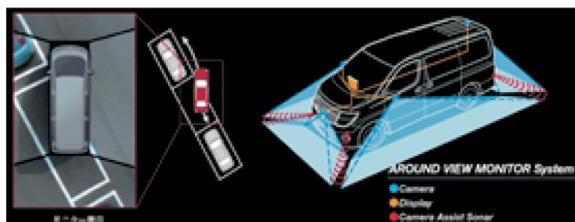


図-2 アラウンドビューモニタ  
Fig. 2 Around View Monitor

(図2)などの技術が普及している。

本稿では、カメラとモニタを用い、シーンに応じてカメラの画像を映し出す液晶モニタと通常のみラーとを任意に切り替えることを可能にした世界初の視界性能向上技術であるスマート・ルームミラーの開発について説明する。

### 2. 開発背景と狙い

近年、安全対応としての後席ヘッドレストの大型化や、環境対応(燃費向上)での空力を考慮したエクステリアデザインにより、ルームミラーの視界が悪化傾向にある。また、夜間、悪天候時の視界不良や、後席乗員、荷物積載により視界が遮られることもある。ルームミラーの役割は、車両後方の交通状況や環境を把握することであり、後方視界の情報が得にくくなると、ドライバーはストレスや疲労、不安を感じることもある。ユーザインタビューの結果からも、後方視界への改善要望が多く、潜在的な不満になっていることが分かった。

今回開発したスマート・ルームミラーは、上述の不満を改善する手段として、様々な環境で妨げの無い、広くクリアな後方視界をドライバーに提供し、安心して快適なドライブを可能とすることを開発の狙いとした。また、モニタはミ

\*内外装技術開発部 \*\*車両実験部 \*\*\*コンバージョン&アクセサリ企画開発部 \*\*\*\*日産車体株式会社

ラーに映る物とほぼ同等のものを映すため、直感的に理解できることと、自車両の動きに対して違和感がないことが重要である。様々な場所にモニタを設置し走行実験を重ねた結果、ルームミラー以外の場所に置いた場合、ドライバーに戸惑いが見られ、現状のルームミラーの場所が最適であることが分かった。ルームミラーは、後方視界の確認以外にも後席の子供を見たり、荷物を見たり、自分の顔を見たりすることにも使われている。ゆえに、既存のミラーと全く同じ位置にモニタを置き、ミラーとモニタの双方を簡単に使い分けられることをコンセプトに開発を行った。

### 3. 主な技術課題と方策

これまでモーターショーなどでルームミラーの代わりにモニタを使ったコンセプトカーは多く存在したが、モニタON時にミラー反射像も見えてしまい、モニタ像を認識しにくくなる課題があり、ミラーとモニタを両立させたものはなかった。今回の開発では、人の目のピントを合わせる仕組みに着目し、車内で直射光を受けないルーフトリムを映すようにミラーを傾けてモニタONすることで、モニタより暗いミラーの反射像を認識しにくくさせ、モニタを認識しやすくする構造にすることで解決した。また、例えば夜間のハレーション（特に強い光の当たった部分の周りが白くぼやける現象）により後方を正確に映し出すことができなくなるなどの画質自体の課題については、高感度カメラの開発、および周辺照度と強い光源を認識して自動で絞りを調整し画像処理を施すソフトを開発することで解決した。更に、ユーザの使いやすさを向上させるアイテムとして、モニタ映像の位置感覚向上技術や画面位置の調整機能を開発した。詳細は5章から8章にて解説する。

### 4. システム概要

スマート・ルームミラーは、後方の交通状況や環境を撮像する新開発の専用狭角カメラと、ルームミラーに内蔵した新開発の特殊形状液晶モニタで構成されている。図3にシステム概要を、図6にミラー部構造を示す。リヤウインドウの内側に設置されたカメラによる鮮明な画像をモニタに映し出すことによって、後方や斜め後ろを走行する車両などがピラーなどで遮られることなく、従来のルームミラーよりも広くクリアな後方視界をドライバーに提供する。周辺の交通状況の把握がしやすく、安心して快適なドライブをサポートとする（図4）。

また、従来のルームミラー機能も併せ持ち、任意に切り替えられることが可能となっている（図5）。

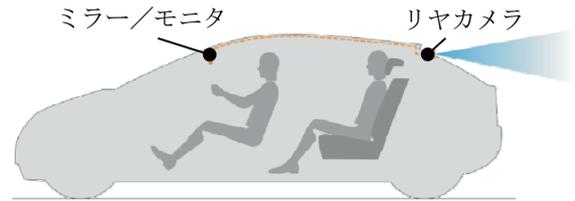


図-3 システム概要  
Fig. 3 System summary

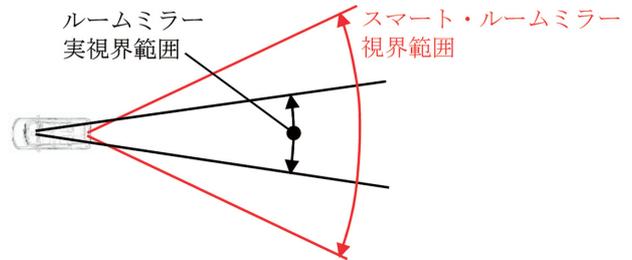


図-4 ルームミラーとスマート・ルームミラーの視界  
(参考：エルグランド)  
Fig. 4 View of rearview mirror and smart rearview mirror  
(reference: ELGRAND)



図-5 モニタ使用時とミラー使用時の画像イメージ  
Fig. 5 Images of monitor and mirror

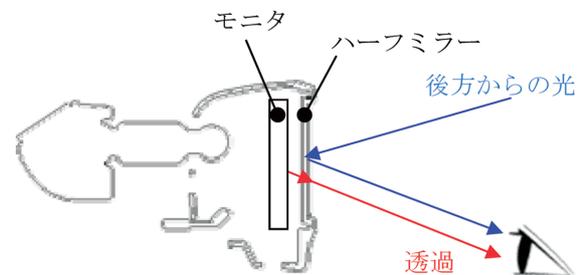


図-6 モニタとミラーの両方の像 (断面)  
Fig. 6 Both images of monitor and mirror (cross-section)

### 5. モニタON時のミラー反射

前述したように、モニタの最適な位置と既存のルームミ

ラーの使われ方を考慮して、モニタとルームミラーを全く同じ位置に置き、双方の機能を使い分けられることが重要と判断したが、単純にモニタとミラーを両立させることは困難であった。例えば、ミラーをハーフミラーにすることで、ハーフミラーの裏面側にレイアウトされているモニタ映像を透過させてドライバーに見せることができるが、ハーフミラーは反射もする。ここが今回の大きな課題である。図6、図7に示すように、モニタとハーフミラーの反射像の明るさが同じであると、モニタが透過する像とハーフミラーに反射する像の両方が見えてしまい、これではモニタの像が認識できない。一方、ミラーの反射像よりもかなり明るいモニタにすれば、モニタを認識しやすくなるが、目の近くにあるため、明るすぎると運転に集中できなくなる、あるいは目が疲れてしまうことがある。また、常に使うことを想定すると、消費電力の増加は燃費の悪化に繋がりが、環境にやさしくない。そこで本課題解決に対して、目の調節機能（ピントを合わせる仕組み）に着目して開発を行った。

図8に示すように、モニタとミラーでは焦点距離が違うため、人は同時に両方に焦点を合わせて認識することができない。モニタを見るときは、距離の近いモニタの表面に焦点を合わせて、ミラーを見るときは、距離の遠いミラーに反射しているものに焦点を合わせている。そして図9に示すように、焦点の合っていないものは認識しづらくなる。

また、図10のように、人は無意識に明るいものに焦点を合わせる特性があるため、暗い方は焦点がずれてほとんど認識できなくなる。

ミラーとしての使用時にモニタON



図-7 モニタとミラーの両方の像 (実際の写真)  
Fig. 7 Both images of monitor and mirror (actual photo)

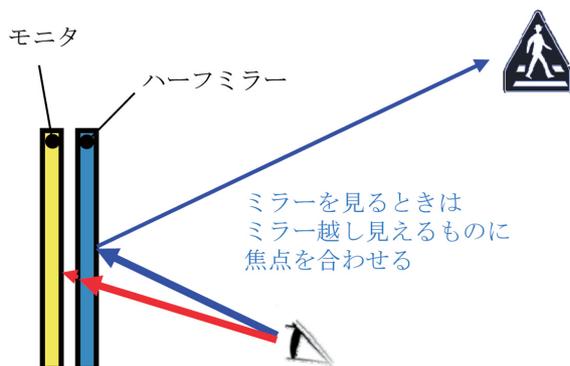


図-8 モニタとミラーの焦点距離の違い  
Fig. 8 Difference of focus distance of monitor and mirror



図-9 近くを見ているときの焦点  
(遠くの車は認識しづらい)  
Fig. 9 Near focus (distant car is difficult to recognize)

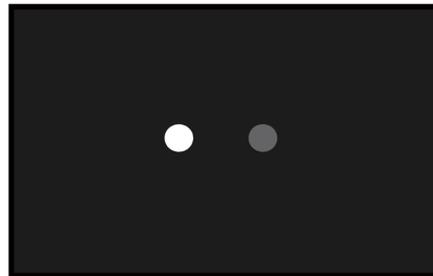


図-10 明暗による人の認識の違い  
Fig. 10 Difference in recognition by light and shade

上述の説明を本システムに当てはめると、モニタをONした際にミラーに映るものが暗ければ、明るいモニタの方に焦点が合いやすくなり、モニタを認識しやすくなる。

具体的な方策は図11、図12に示すように、車内で直射光を受けず、モニタよりも暗いルーフトリムが映るようにミラーを傾けた状態でモニタONする構造とした。これにより、ミラーの反射像は認識しづらくなり、モニタ像を認識しやすくなる。またミラーとしての使用時は図13、図14に示すように、モニタがOFF状態なので透過する光がほとんどなく、従来のルームミラー機能となる。ON/OFFの切り替えは、下部のレバーを引くとミラーが上に傾きモニタONとなり、レバーを押すとミラー角度が戻りモニタOFFでミラー機能になるというシンプルな操作とした。

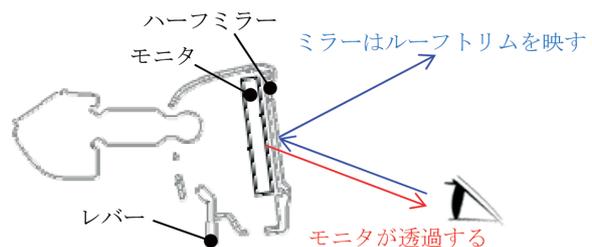


図-11 モニタとしての使用時 (断面)  
Fig. 11 At the time of monitor (cross-section)



図-12 モニタとしての使用時 (実際の写真)  
Fig. 12 At the time of monitor (Actual photo)

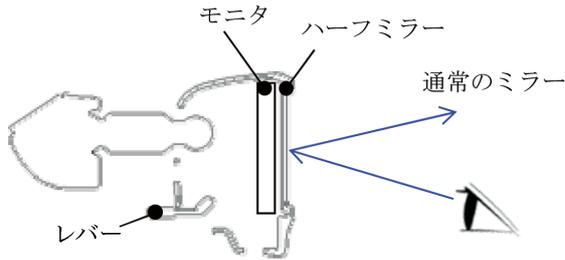


図-13 ミラーとしての使用時(断面)  
Fig. 13 At the time of mirror (cross-section)



図-14 ミラーとしての使用時(実際の写真)  
Fig. 14 At the time of mirror (actual photo)

## 6. モニタの画像品質

日常で使い慣れたミラーからモニタになると、画像品質が大きな課題となる。スマート・ルームミラーでは、夜間の画像と鮮明さに特に重点を置いて開発を行った。人の視覚特性を理解したうえで、最適な技術を開発したことが特徴となっている。

### 6.1 夜間の画質

一般的な車載カメラで撮像すると、図15に示すように明るい光源に対してハレーションを起こしてしまう。ハレーションを低減させることと、周辺を明るく映すことは背反するものであるが、ワイドダイナミックレンジの専用カメラを新規に開発し、さらに様々なシーンでの実験を重ね、周辺照度と明るい光源を認識して自動でカメラの絞りを最適に調整し、画像処理を施すソフトの開発によって、図16に示すように、ハレーションを抑えても周辺を明るく映し出すことを実現した。



図-15 一般的なカメラでの夜間のシーン  
Fig. 15 Night scene in general camera



図-16 スマート・ルームミラーでの夜間のシーン  
Fig. 16 Night scene in this system

### 6.2 画像の鮮明さ

もちろん画像は鮮明なほど良い。ただし、車載用のカメラやモニタによって現実的な上限がある。今回の開発では、人の視力を判断基準として、モニタに映る画像の鮮明さの許容値を導き出した。

目標の視力相当に映せるシステムを開発するうえで、ユーザがモニタを見たときに、モニタが映せる視力相当とppi (pixel per inch) の関係を検討し、カメラとモニタの仕様を決定した。

様々な要素を関連付けし、映せる視力相当とppiの関係式を作成すると、カメラの切り取る前の画角が大きく影響することが分かった。カメラが撮像するエリアに対して、使う画角を切り出せばその分だけ画素数は少なくなり、モニタで映せるppiは小さくなる。例えば、図17に示すように、一般的なバックビューモニタのカメラを使用すると、切り取り時に大幅に画素数を損失してしまい、使える画素数はカメラ画素数の1/30~1/40になってしまう。そのためスマート・ルームミラーでは、画素数の損失が最小限になる狭角の専用カメラを新規開発し、目標の視力相当を達成した。

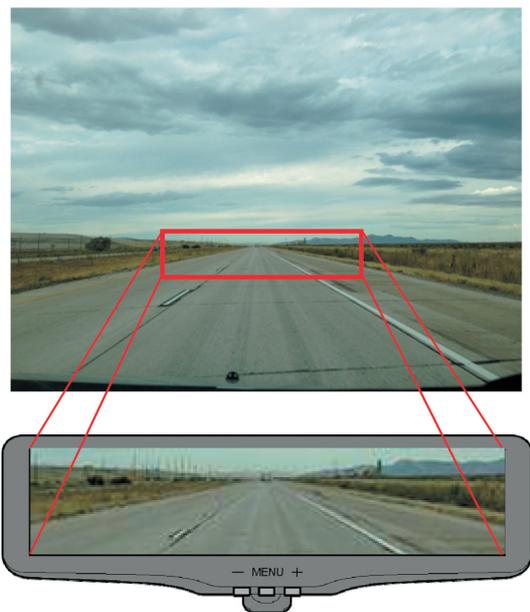


図-17 切り取りによる画素数の損失  
Fig. 17 Loss of pixels by cropping

## 7. 使いやすさ向上技術

### 7.1 モニタ映像の位置感覚向上技術

スマート・ルームミラーでは、モニタ映像の位置感覚をつかみやすくする方策として、ミラー時に見えるシートやリヤガラス形状などをシースルー表示する機能を開発した。本機能はモニタの視認性評価を行った際に、「モニタではミラーに映っていた室内が映らないため、どこを映しているのかが直感的に分かりにくい」という結果への対策である。検討する中で、図18のリヤガラスの枠を模擬し

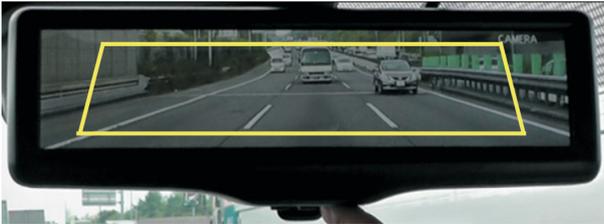


図-18 リヤガラス枠表示  
Fig. 18 Rear glass line indication



図-19 写真との重ねあわせ  
Fig. 19 Put photography on image



図-20 シースルー表示する絵  
Fig. 20 See-through indication figure



図-21 通常表示  
Fig. 21 Normal image



図-22 シースルー表示  
Fig. 22 See-through indication image

た絵を加えて表示したところ、位置感覚のつかみやすさが向上した。この効果を最大に引き出すために、重ね合わせる絵の検討を繰り返し行い、一番効果があり後方視界を認識しやすいものを導き出した。例えば、図19のようにリアリティのある写真や絵を重ねると、重ねた写真や絵のほうを注視してしまい、後方視界の視認性が悪くなることから、図20のような輪郭線無くした単色のシンプルな絵とした。図21の通常表示に対して、絵をカメラ映像に半透明で重ねたものが図22である。結果、鏡の時に見えていたものが透けて見え、位置感覚がつかみやすくなり、奥行き感が得やすくなるという効果が得られた。

また、この機能はドライバーの違いや慣れによって有無の好みが分かれたため、表示のON/OFF機能を設定した。

### 7.2 画面位置の調整機能

本システムでモニタを使用する際は、既存のルームミラーのように本体角度を調整しても、モニタに映るものは変わらない。ユーザの好みによって見たい角度は異なるため、その際にカメラ本体の取り付け角度を変更せずに、好みの位置に調整できる機能を付与した。具体的には、ルームミラー本体下部のスイッチ操作によって、図23のようにカメラで撮像した映像の切り取り範囲を変えて、モニタに映せるようにした。標準位置の図24に対して、図25は下方向に切り取り範囲を変えた参考図である。同様に上方向、左右方向、回転方向も調整可能とした。さらに凸面鏡が好みのユーザ対応として、縮尺も調整可能とした。

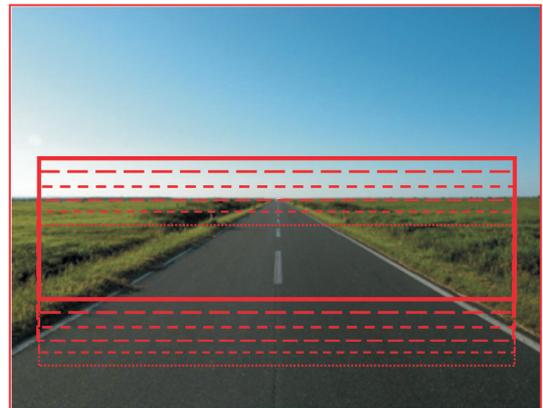


図-23 映像の切り取り位置の変更  
(参考：下方向のイメージ)  
Fig. 23 Change of cropping position of image  
(reference: below image)



図-24 標準位置の高さ  
Fig. 24 Standard position



図-25 下方向のイメージ  
Fig. 25 Below position image

## 8. おわりに

以上、潜在的なニーズとしてある後方視界の改善を目的に、スマート・ルームミラーを開発した。

今回の開発では目の調節機能(ピントを合わせる仕組み)に着目し、直射光を受けないルーフトリムを映すようにミラーを傾けた状態でモニタをONすることで、モニタ映像とミラーの反射像が両方見えてしまうことを防ぐ構造と

し、ミラーとモニタの両立を実現させた。また、画質に関する課題については、高感度カメラの開発、および周辺照度と明るい光源を認識して自動で絞りを調整し画像処理を施すソフトを開発することで解決した。開発当初の狙い通り、様々な環境で妨げの無い、広くクリアな後方視界をドライバーに提供し、安心して快適なドライブに貢献するシステムとすることができた。

スマート・ルームミラーは、エルグランドやエクストレイルに搭載しており、お客様からは、「今までありそうでなかった画期的な装備で、とても気に入っている」「位置や角度、明るさ調整も付いており、とても重宝している」、「ルームミラーでは見えない後方視界が映像で確認できて安心」、「後席に乗員が多い時やキャンプに行く時、更には夜でも雨でも関係なく、ルームミラーよりもクリアな後方視界が確認できて嬉しい」などの評価を得ている。

最後に、この開発に御協力頂いた社内外の全ての皆様に深く感謝の意を表します。

### ■ 著 者 ■



田崎 祐一



進木 博之



阿部 修



岡 弘和

# 新型日産ムラーノの空気流性能開発

Development of Aerodynamics for New Nissan Murano

新井 正 明\*  
Masaaki Arai

刀 根 慶太郎\*  
Keitaro Tone

谷 口 圭 一\*  
Keiichi Taniguchi

村 上 美香子\*  
Mikako Murakami

大 島 宗 彦\*\*  
Munehiko Oshima

**抄 録** 新型日産ムラーノでは、競合他社車より優位な燃費性能を達成するため、特に空力性能の向上に重点を置き、他車を圧倒的に凌駕（りょうが）する空気抵抗係数（ $C_D$ ）を実現するべく開発を進めてきた。本開発では、SUVの $C_D$ で顕著に大きくなる背面抵抗を最小化させるため、特にリヤエンド形状の最適化に力を入れた。開発初期段階からロアグリルシャッターを設定し、開時はエンジン冷却性能を満足させつつ、閉時は遮断された流れを積極的に上屋へ流してリヤエンド形状のチューニングを行い、空力効果を最大限になるよう形状を決めた。加えて大型フロントスポイラを設定し、フロアへの流れを可能な限り抑制し、上屋への流れを多くすることで、ルーフ上での圧力回復を大きくし、後流による背面抵抗を低減させた。その結果、上質なスタイリングを保った上で、 $C_D = 0.31$ という同セグメントではトップの空力性能を誇るSUVが実現できた。

**Summary** The new Nissan Murano achieves a  $C_D$  of 0.31 as measured in Nissan's wind tunnel. That figure is an improvement of 17% over the previous Murano and is significantly lower compared with competing vehicles. It therefore represents the achievement of class-leading aerodynamic performance among D-segment SUVs. Three key aerodynamic features—namely, front spoiler, active grille shutter, and rear upper body—were developed with the particular aim of reducing aerodynamic drag. In order to maximize the lower grille shutter efficiency, the shapes of all styling points were optimized to promote strong flow to the upper body by blocking the grille shutter closing. That increases pressure restoration on the roof and reduces rear-end drag.

**Key words :** Aerodynamics, drag coefficient( $C_D$ ), ideal flow, separation, rear end drag, front spoiler, grille shutter, roof approach

## 1. はじめに

自動車に対する「低燃費」、「低排ガス」の要求は、年々高くなってきている。同時に、DセグメントSUVの需要も、年々増加してきている。2014年12月北米で発売した新型日産ムラーノ（図1）では、お客様が期待している高い要求を満足するべく、DセグメントSUVの中でトップレベルの燃費性能を実現させるため、エンジン&トランスミッションの改良、軽量化、低転がり抵抗タイヤの採用など、様々な燃費向上アイテムを採用した。そのうち、特に空力性能の向上は、車両としての向上アイテムの中では貢献度が高い。新型ムラーノの $C_D$ 値は0.31と、前型車から約17%の向上となり、DセグメントSUVの中では圧倒的に小さい（図2）。この数値は、燃費性能でトップクラスを狙うためには必要不可欠であったが、私たち空力先行開発技術から見ても、かなりチャレンジングであった。しかし、新型ムラーノが狙うべき空力性能（ $C_D$ 値）を開発当初から0.31と定め開発を行い、今回目標を達成することができた。この結果、 $C_D$ の向上のみで、前型車から大幅な

燃費向上を図ることが可能となった。本稿では $C_D$ 低減として織り込んだ内容について解説する。



図-1 新型日産ムラーノ  
Fig. 1 All-new Nissan Murano

\*Nissan 第二製品開発部 \*\*車両性能開発部

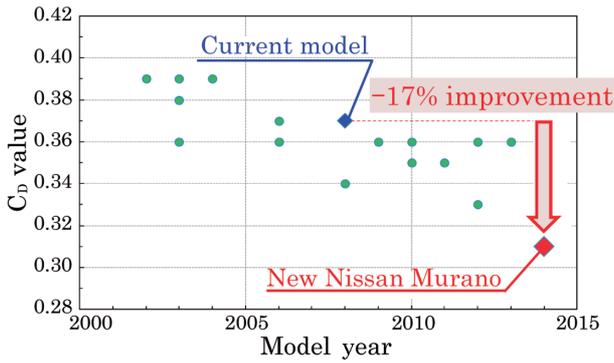


図-2 DセグメントSUVのCd分布図  
Fig. 2 Cd distribution map for D-segment SUV

## 2. Cd = 0.31を実現するための理想的な流れ

DセグメントSUVのカテゴリで0.31というCd値を達成するのは極めて難しい。SUVという車の特徴でもあるが、走破性を重視するために、フロア地上高はセダンよりもかなり高いことから、空力的には不利なためである。事実、日産の風洞にて測定している同クラスの競合車を並べても、ここまでの低Cd値の車は存在しなかった。そこで私たちは、このセグメントの車でCd = 0.31を達成させるにはどうしたらよいかを検討した。その方策として、まずは前型車の数値流体力学CFDの解析結果を使い、流体（流れ）の可視化、部位ごとの抵抗分解による分析を行った。そこから、空力的に更に向上できるポイントを探し、Cd = 0.31を達成するための流れについて検討し、作りたい「理想的な流れ」を定義した。その後、20%スケール風洞を用いて、定義した流れについて検証を行い、全ての部位においてパラメータスタディを実施して、空力性能向上に寄与する要素に落とし込んだ。

更に実際の造形フェーズにおいては、一つひとつの流れを実現させるため、空力的に向上する要素を含んだある部位が、どのような造形意図や設計要件があるのかを知り、それが弊害となった場合にどういう両立解があるかや、お客様のためには何が大事なのかを念頭に置き、形状を決めていった。結果、車両全体において理想的な流れを実現することで、トップレベルの空力性能を達成することができた。ここでは部位ごとに、その「理想的な流れ」の説明を行う。

### 2.1 フロントエンド (図3)

エンジンルーム内抵抗を極力減らすため、流入風量を可能な限り抑え、エンジン内冷却に必要な風を最小限しか導入しない。

また、フロアで受ける抵抗を極力減らすため、フロントバンパ下端からフロアへ流入する流れを可能な限り抑えるようにする。

フロントバンパサイド面からボディサイドへスムーズに流して背面抵抗を減らし、且つフロントタイヤ前面で受ける抵抗を極力減らすため、フロントホイールアーチで剥離する流れは、フロントタイヤ側面に沿うように流すようにする。



図-3 フロントエンドの理想的な流れ  
Fig. 3 Ideal flow of front end

### 2.2 キャビン (図4)

フロントウインドシールド下方で動圧から受ける抵抗を極力減らすため、フード後端で剥離する流れは、可能な限り剥離角を大きくする。

背面抵抗を極力減らすため、フロントピラーからボディサイド（ドアガラス）にかけては、剥離によってできてしまう縦渦を極力抑える。

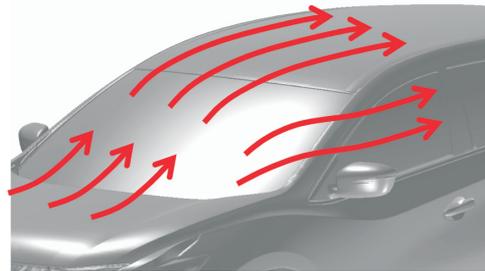


図-4 キャビンの理想的な流れ  
Fig. 4 Ideal flow of cabin

### 2.3 リヤエンド (図5)

背面抵抗を極力減らすため、車両後方へ行くに従い徐々に流速を小さくし、末端で奇麗に剥離させる。この時の剥離速度は、ルーフ（上）からの流れとボディサイド（横）からの流れを可能な限り同じ流速とし、速度差による渦が極力小さくなるように合流させる。

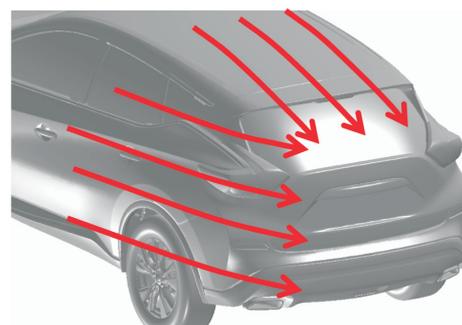


図-5 リヤエンドの理想的な流れ  
Fig. 5 Ideal flow of rear end

## 2.4 フロア (図6)

フロントバンパ下端を下げることでフロアへの流入風は抑制できるが、それでもフロアへ流入する風は存在する。そういった風によるフロア抵抗を極力減らすため、流れのベクトルを変えることなく、後流へスムーズに流す。

ホイールハウス内抵抗を極力減らすため、ホイールハウス内への流入風量を可能な限り抑えるようにする。

ホイールアーチ後ろで受ける抵抗を極力減らすため、ホイールハウス内に溜まった空気を後流へ流す。

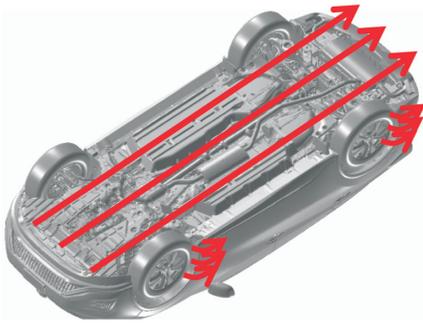


図-6 フロアの理想的な流れ  
Fig. 6 Ideal flow of floor

## 3. 開発プロセス

### 3.1 20% スケール風洞

0.31という $C_d$ 値は、DセグメントSUVとしては非常に高い目標値であったため、開発の初期段階から、本当に到達可能なかを車両形状として立証する必要がある。また、私たちが掲げた「理想的な流れ」を実現することで目標が達成できるかを検証する必要もあった。これらの理由から、通常より早めにスタイリングデータを入手し、空力専用20%スケールモデルを作成してスケール風洞にて検証実験を行った。また本実験では、空力性能向上に効果の

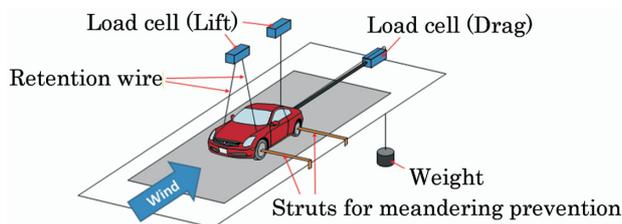


図-7 20%スケール風洞  
Fig. 7 Detail of 20% scale wind tunnel

あった箇所についてパラメータスタディを行い、各部位における最適形状検討を行った。

今回使用した20%スケール風洞は、日産総合研究所内に設置してある小型風洞である(図7)。ゲッチング型風洞で、最高速度は30m/sとなっている。抗力測定はプッシュプルロードセルにて行う。スケールモデル後方とプッシュプルロードセルを連結し、風による入力を測定する。

### 3.2 フルスケール実車風洞

開発フェーズが進み、スタイリングが玉成し、各部品に対する詳細な設計要件が検討されてきたため、20%スケールモデルからフルサイズスケールモデルに移行した。これにより、エンジンルーム内やフロアの検討、フロントスポイラ下端とリヤスポイラ後端の関係性、フロントピラーとミラー位置の関係性など、細部にわたってより高い実験精度での検討が可能となった。

今回使用したフルスケール実車風洞は、日産テクニカルセンタ内に設置している風洞である(図8)。ゲッチング型風洞で、最高速度は270km/hとなっている。

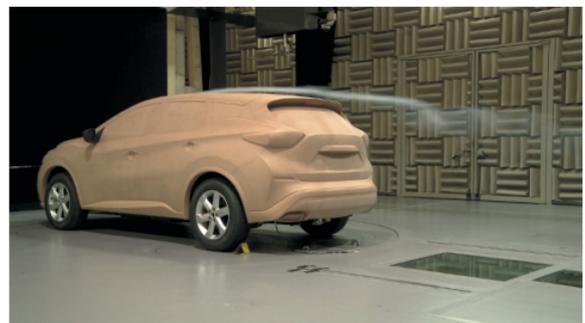


図-8 フルスケール実車風洞  
Fig. 8 Detail of full scale wind tunnel

### 3.3 CFD (Computational Fluid Dynamics)

風洞で検証した実験モデルを解析モデルでも再現し、

CFD解析を行った。これにより、理想的な流れの可視化、及び風洞実験では測定が難しい部位ごとに受ける $C_D$ 値の測定による空力向上ポイントの特定、エンジンルーム内に流入する風量の測定が可能となった。

なお、今回使用したCFDソフトウェアはPowerFLOWである(図9)。

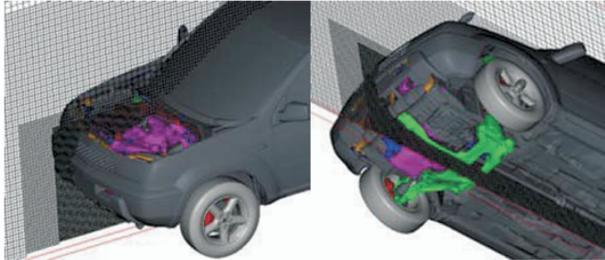


図-9 CFD解析例 (PowerFLOW)  
Fig. 9 CFD analyzed example

#### 4. 理想的な流れの実現

本章では、先述の理想的な流れを実際の車で再現させるために織り込んだ空力アイテムについて具体的に説明する。

##### 4.1 フロントエンド

エンジンルーム内への流入風量を可能な限り抑えるため、新型ムラーノでは、フロントバンパのロア開口部にグリルシャッタ(図10)を設定し、エンジン冷却風不要時のエンジンルーム内抵抗を大幅に低減した。

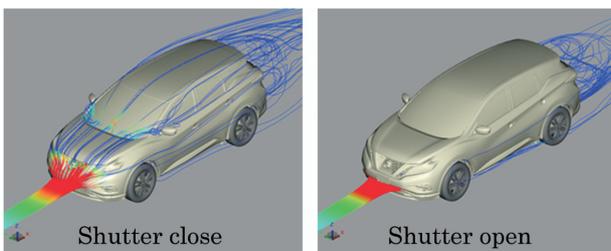


図-10 ロアグリルシャッタによる効果  
Fig. 10 Effect of lower grille shutter

CFD解析によるパラメータスタディにより、ロアグリルがアッパーグリルよりも冷却風導入口として有効なことが分かったため、アッパーグリル開口面積は、必要最小限の風量を確保できる最小限の開口に制限し、代わりにロアグリル開口を可能なまで拡大した。その結果、グリル開口からは15%、バンパ開口からは85%の流量配分とした。空調性能要求により、コンデンサは常時空気を必要とするため、その分だけをアッパーグリルだけで確保して、ラジエータが必要とする分は全てロアグリルから採るようにし、それが不要なときはグリルを閉じて $C_D$ を低減する。

グリル開口からの空気は、熱交換器以外に漏れることがないように、周辺をダクト形状にし、流入風量がラジエータ

を通過する効率を最大化させた。

また、ロアグリルシャッタを閉じることでエンジンルーム内に入るはずであった流れを入口で遮断し、その分車体周りの風量を増大させている。この流れを前提として、フード、フロント/リヤバンパ、スポイラ形状を最適化した。これによる効果は、4.3節でさらに詳しく触れる。

フロントバンパ下端からフロアへ流入する流れを抑制するため、大型のフロントスポイラを設定した(図11)。これにより、部品間段差の大きいSUVフロアで発生する抗力を低減した。

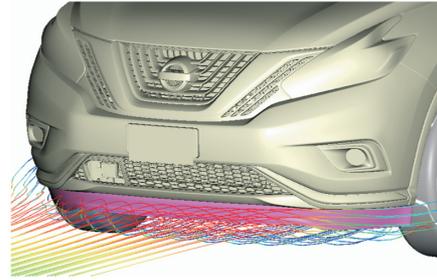


図-11 フロントスポイラ  
Fig. 11 Front spoiler

また、大型フロントスポイラを設定したSUV並みのアプローチアングルを確保するため、新型ムラーノではスポイラ下端形状を工夫している。下端にリップ(突出形状)を設けることにより流れの剥離角を拡大させ、フロアへの流れの侵入を積極的に抑制した(図12)。これにより、スポイラ下端を下げることで得られる流れと同等にしておき、アプローチアングルを犠牲にすることなく、理想的な流れを実現している。フロントスポイラの材質も、様々な検討を行っている。燃費向上において空力性能が一番発揮される高速域では、風圧で撓むことなく、万が一路面乗り上げなどでフロントスポイラを干渉させてしまっても、曲がって応力を分散させ破損しないという、相反する条件を満足する材質、板厚、形状を実現した。

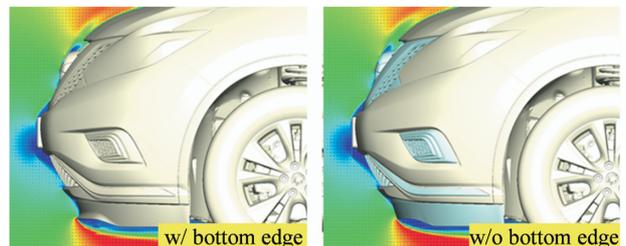


図-12 フロントスポイラ下端のリップ  
Fig. 12 Front spoiler bottom edge

フロントタイヤ側面を沿うように流すため、ホイールアーチ周りに樹脂フィレットモールを設定した(図13)。これにより、フロントバンパサイドの意匠を損なうことなく、フィレットモールの幅の区間で、タイヤ側面を狙う流れの剥離角のチューニングを可能とした。

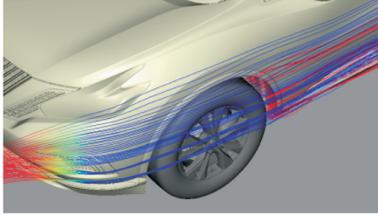


図-13 フィレットモールの流れ  
Fig. 13 Flow of fillet moldings

## 4.2 キャビン

可能な限り剥離角を大きくしてフード後端の流れを剥離させるため、フード後端の形状を最大限高くした。インテリアモックを使い、ドライバーから見た前方下方視認が満足する限界点を検討した。これにより、空力性能向上だけでなく、主流をワイパのセット位置から遠ざけることで、ワイパで受ける風切り音の低減や、雨天走行時にフロントガラス下方に溜まった水滴が滞る実用空力性能の向上にも貢献した。

フロントピラーからボディサイドにかけて発生する縦渦を極力小さくするため、フロントガラスモール内側のR拡大、及びフロントピラー外側面の最適化を行った。フロントガラスモール内側のRは、大きければ大きいほどスムーズに流れるため空力性能にとっては良い形状となるが、雨天走行時にワイパによってかき取られた水滴がドアガラスへ垂れやすくなってしまい、お客様の満足度を悪くしてしまう恐れがある。新型ムラーノでは、ドアガラスへの水垂れが、お客様が走行時に気にならないレベルの内側Rを導き出し、空力向上と両立させている（図14）。フロントピラー外表面は、フロントガラスからの流れを可能な限り滑らかに流すため、キャラクタ位置を工夫している。車体組付け精度を上げ、外板とその内側にある骨格部品のクリアランスを極力詰めることで、車体強度を損なうことなく、外板のキャラクタ位置を空力性能最適値である車両内側に置くことができた。

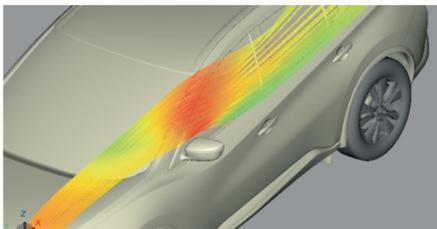


図-14 フロントピラーの流れ  
Fig. 14 Flow of front pillars

ドアミラー前面で受ける抵抗を極力小さくするため、ドアミラーレイアウトの最適化を行った。フード後端、フロントピラー下端から乗り越えてくる流れを直接的に受けないう、空力性能としては極力下方へ配置させることが有利となる。そこでインテリアモックを使い、ドライバーから見た後方視認が満足する限界点を検討した。空力要件と

後方視認エリア、ドアサッシュのスタイリングが全て両立する場所を導き出し、そこへ配置した。

## 4.3 リヤエンド

車両後方へ行くに従い徐々に流速を小さくし、端末で奇麗に剥離させるため、リヤまわりのスタイリングを最適化した。前述の通り、新型ムラーノでは、ロアグリルシャッタを閉じることで遮断された流れを上屋へ積極的に流し、リヤスポイラ、リヤコンビネーションランプ、リヤバンパの形状を最適化している（図15）。その上で、グリル閉時の車体周りの流れを前提に、各部形状のチューニングを行った。これにより、ルーフアプローチ量（図16）を大きく確保することが可能となるため、ルーフ上での圧力回復が大きくなり、後流による背面抵抗を低減できる。ルーフ流れとボディサイド流れのバランスを取るために、ルーフアプローチ量をパラメータとした形状のチューニングを行い、最適化した。空力性能より導き出したルーフアプローチ量は、ルーフトリムなどの内装を工夫することで、インサイドミラーからの後方視界を十分確保できている。

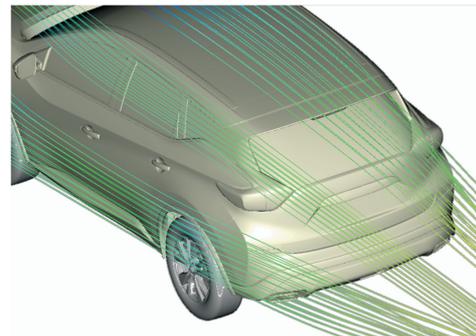


図-15 リヤエンド周りの流れ  
Fig. 15 Flow of rear end

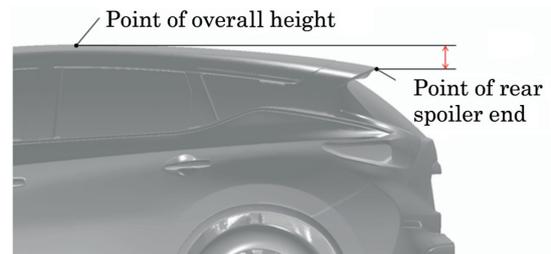


図-16 ルーフアプローチの定義  
Fig. 16 Definition of roof approach

今回搭載している大型リヤスポイラに関しても、このルーフアプローチ量を満足させるために不可欠なアイテムとなる。サイド側のフィン形状も含めて、車両後方へ行くに従い、形状を絞らせている。ルーフからスポイラにかけては車体色で長く見せ、且つサイドのフィンは別部品で車両内側へ絞り込み、黒色で車体色と差別化することで、新型ムラーノの特徴である「フローティングルーフ」の実現にも、空力として貢献している（図17）。



図-17 フローティングルーフ  
Fig. 17 Floating roof

また、デザインと両立したリヤコンビネーションランプ形状やリヤバンパキャラクタを通すことで、積極的に流れを剥離させた。

#### 4.4 フロア

フロントバンパ下端から流入した流れが、フロア下の凹凸になるべく侵入せずスムーズに後流へ流れるように、新型ムラーノでは大型エンジンアンダーカバーとフロアカバーを設定している（図18）。前型車では、フロントサスペンションリンクと燃料タンクが特に下方へ突出しており、その間をマフラ配管がむき出しにレイアウトされていた。今回は、この間に厚みを持たせたフロアカバーを設定した。加えて燃料タンク下面を上げることで、前方から後方まで通して平滑化している。燃料タンク容量は前型車より10L縮小したが、空力性能を始めとする燃費性能向上により、航続距離は伸ばすことができている。

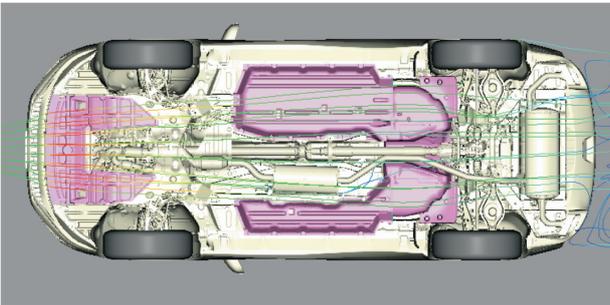


図-18 フロアの流れ  
Fig. 18 Flow of floor

ホイールハウス内へ侵入する流れを極力抑えるため、フロントはホイールハウス前まで回り込んだ大型フロントスポイラを、リヤはタイヤ前にディフレクタを設定している（図19）。フロントスポイラは路面干渉要件を鑑み、両サイドの下端を可能な限り下げて、流れの侵入を抑制してい

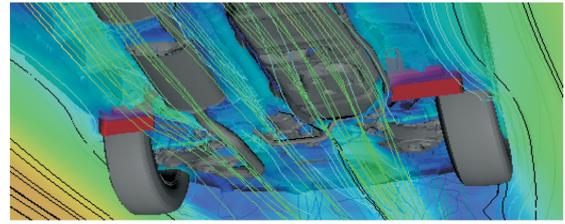


図-19 リヤタイヤ前ディフレクタ  
Fig. 19 Rear tire deflector

る。リヤタイヤ前ディフレクタは、流れ方向、幅方向、下端地上高のパラメータスタディを行うことで最適解を導き出し、部品形状を決定した。

ホイールハウス内に溜まった空気を後流へスムーズに流すため、ホイールアーチに設定されたフィレットモールの形状を工夫している。前述の通り、前半分は剥離した流れをタイヤ側面へ沿わすため、剥離角のチューニングと微小Rで奇麗な剥離をさせている。後ろ半分は溜まった空気を後流へ流すため、可能な限り大きなRをとっている。本部品を樹脂で作製することで、空力要件やホイールガード要件を満足させるための形状自由度が増し、大変有効な手段となっている。

#### 5. ま と め

新型ムラーノの空力開発として、 $C_d = 0.31$ を達成するための理想的な流れを部位ごとに決め、その流れを実現すべく、上屋スタイリングの最適化や空力パーツの開発を行った。20%スケール風洞、フルスケール実車風洞、CFD解析といった様々なツールを使用し、理想的な流れを検証した。特にリヤエンド形状を空力的に最適化させるため、大型フロントスポイラ、ロアグリルシャッタを設定して積極的に上屋の流れを多くし、リヤスポイラ、リヤコンビネーションランプ、リヤバンパなどの形状のチューニングを行った。その結果、デザイナーと部品設計者の多大なる御協力のもと、DセグメントSUVではトップの空力性能である $C_d = 0.31$ を実現することができた。

最後に、新型ムラーノの $C_d = 0.31$ を実現できたのは、空力性能開発に関わって頂いた全ての皆様に御協力頂いたおかげです。心から感謝の気持ちと御礼を申し上げます。

#### ■ 著 者 ■



新井 正 明



刀 根 慶 太 郎



谷 口 圭 一



村 上 美 香 子



大 島 宗 彦

# 新型 e-NV200 商品概要

## Product Outline of All-new e-NV200

田村 利徳\*  
Toshinori Tamura

香川 信哉\*  
Nobuya Kagawa

公手 晃一\*\*  
Kouichi Kude

小松 英之\*\*\*  
Hideyuki Komatsu

小坂 智\*\*\*\*  
Tomo Kosaka

渡辺 絵理\*\*\*\*  
Eri Watanabe

**抄 録** 新型 e-NV200 はグローバル市場をターゲットに開発された商用 EV である。日産リーフで好評の EV としての特徴と、NV200 のコンパクトな車体で広い室内寸法を有する機能性を併せ持つ。本稿ではこの新型 e-NV200（日本向け）の商品概要を説明する。

**Summary** Nissan has developed all new e-NV200 as a 100% electric commercial vehicle for global market. The e-NV200 inherits EV characteristics from Nissan LEAF and functionality from NV200, which has a compact body with a large interior space. This article provides a product outline of new e-NV200 for Japan market.

**Key words :** Automotive General, new car, commercial vehicle, electric vehicle(EV), e-NV200

### 1. はじめに

近年、大都市への人口集中や大気汚染の防止を目的として、都市中心部への乗り入れ規制や課税が話題となっている。

新型 e-NV200（図1）はグローバル市場に向け、生活が24時間化する都市部を中心としたエリアで、人や荷物を運ぶ多用途なニーズを満たす機能性の高い電気自動車（以下、EV と称す）として誕生した。



図-1 新型 e-NV200（ワゴン G モデル）  
Fig. 1 All-new e-NV200（Wagon G）

### 2. 商品コンセプト

新型 e-NV200 は主にビジネスユーズを目的としたターゲットカスタマーのニーズに基づいて“Compact Business Energizer”をコンセプトとして開発された。また、投入の目的として、大きく下記三つが挙げられる。

- ・EV の特徴を生かし夜間の配達や屋内での使用など、ビ

- ジネスの広がりをお客様に提供すること
- ・長時間車内で過ごすドライバの疲労低減とともに、ビジネスの効率を上げられる快適な室内や運転性
- ・ビジネスのみでなく、環境への配慮の見える EVらしいスタイリング

### 3. アピールポイント

#### 3.1 デザイン

新型 e-NV200 は NV200 バネットが持つスタイリッシュで機能的なデザインに、日産 EV のアイデンティティを融合したエクステリアデザインとした。

フロント中央に配した特徴的な充電ポートリッド形状、およびその両端からフードに伸びるシャープなキャラクターライン、大きくラウンドしたフロントバンパとハの字型の開口形状、特徴的なフォグランプ周辺形状により、日産 EV の共通イメージを持たせている。

また、フロントは L 字型のシグネチャーポジションラン



バルブ式（バン VX・GX モデル） LED 式（ワゴン G モデル）

図-2 シグネチャーポジションランプ  
Fig. 2 Signature position lamps

\*LCV 事業本部 \*\*日本商品企画部 \*\*\*マーケティングダイレクターオフィス \*\*\*\*グローバルセールス&マーケティング本部

プ(図2)を採用したハロゲンヘッドランプによって、モダンなEVイメージを際立たせており、リヤはクリアブルーのインナパネルと透明なアウトレンズを採用した高輝度LEDリヤコンビネーションランプにより、EVならではのクリーンで先進的な印象を高めている。

インテリアデザインはNV200バネットの使い勝手の良さ大きな荷室からなる高機能性に、日産リーフと同様の特徴的なセンタクラスタやEVらしさの表現を融合させている。

インストルメントパネルはNV200バネットをベースに横方向への広がり感を表現し、機能的な大型センタクラスタをインストルメントパネルから浮いてみえるよう組み合わせたモダンなデザインとした(図3)。



図-3 インテリア(バンVXモデル)  
Fig.3 Interior (Van VX)

日産リーフと共通のブルー照明を持つデジタルメータは、必要な情報表示をシンプルに集約したクリーンで洗練されたメータデザインである(図4)。また、新開発のシフトノブ、スタータスイッチも採用している。



- A) パワーメータ  
モータの出力と回生をわかりやすく表示。出力中は右側の目盛が、回生中は左側の緑の目盛が点灯する
- B) パワープラグ用バッテリー残量制限レベル  
バッテリー残量が満充電から2目盛になるまでの範囲で使用可能
- C) Li-ion バッテリー残量計  
バッテリー残量を全容量に対する比率(12目盛および%値)で表示する
- D) 車両情報ディスプレイ  
充電や電費情報、各種警報、回生ブレーキ発電量/回生率などを表示する  
パワープラグ用バッテリー残量制限レベルを2~11目盛に任意に設定できる

図-4 ブルー照明のデジタルメータ  
Fig.4 Blue illumination digital meter

### 3.2 積載性・利便性

新型e-NV200はプロユースの商用バンの基本として、荷室の広さを追求した。バッテリーを小型化し、床下に配置したことでNV200バネットと同等の3,600Lの荷室容量と1,830mmの荷室フロア長(バン5人乗(2名乗車時))を確保している。

新型e-NV200はシートアレンジにより様々な規格サイズの資材が床置き可能で、ライバルを圧倒する積載能力を有する。2列目シートを折りたたむことで、1間サイズの合板、メータモジュールの床置きができる(図5)。

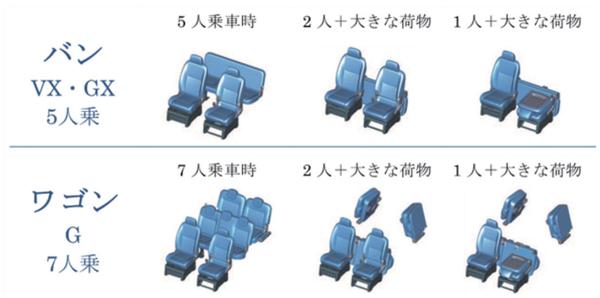


図-5 シートアレンジ例  
Fig.5 Seat arrangements

ラゲジスペースは張り出しが抑えられたホイールハウスとし、荷物の固定に重宝するロープフック(4個)や、バン(VX・GXモデル)はパーティションパイプ、バックドアアシストベルトなどを設定しており、積載性に優れる。また、助手席シートバックテーブル、車検証などをすっきり収納することができるグローブボックス(リッド付)、パーキングチケットなどが入るサンバイザ(チケットホルダー付)を運転席側と助手席側に設定するなど、新型e-NV200は商用車としての積載性や使い勝手のよさにもこだわっている(図6)。



ホイールハウス



ロープフック(4個)



グローブボックス(リッド付) サンバイザ(チケットホルダー付)



図-6 積載性・使い勝手の良さを向上するアイテム例  
Fig.6 Usability items

家庭用のコンセントのように、走行用バッテリーから最大負荷1500Wの電力を取り出すことができるパワープラグを日産EVで初めて採用し、2列目助手席シート背面とインストルメントパネル下部の2箇所に配している(2箇所で1500W、バンGXモデルとワゴンGモデルに標準装備)(図7)。満充電時から1000Wで給電した場合、連続で約8時間使用可能である(表1)。ビジネスに貢献するさまざまな電気製品にはもちろんのこと、万一の災害時の電源としても活用することができる。



助手席シート背面



インストルメントパネル下部

図-7 パワープラグ位置

Fig. 7 Location of power outlets

表-1 パワープラグ接続使用可能時間  
Table 1 Available time of power outlet battery

	バッテリー残量制限レベル設定値	
出力電力	6目盛 (初期状態)	2目盛
1000W	約8時間	約13時間
1500W	約5時間	約9時間

また、スイッチひとつで起動でき、クルマの電源が入ってなくても使用可能である上、帰りの走行距離や用途に応じてバッテリー残量（目盛）を制限しパワープラグが自動停止するよう設定できるため、バッテリーを使いすぎる心配がない（図4D参照）。あらゆる面から安心感を追求した信頼のシステムである。

### 3.3 e-パワートレイン

新型e-NV200は日産リーフのe-パワートレインをベースに、減速比の最適化など商用車専用のチューニングを施したe-パワートレイン（図8、表2）、および回生協調時でも従来のブレーキと同じペダルフィールを実現する新回生協調ブレーキシステムを採用している。

また、バッテリー残量警告灯が点灯した後、最高速度を100km/hに制限し、不要な電力消費を防ぐエネルギーセーブモードや、アクセルを踏み込んでいく途中にクリック感を持たせることで過度な踏込みを抑制し電力消費を低減するアクセルペダルを搭載し、商用車に最適なパフォーマンスを実現している。

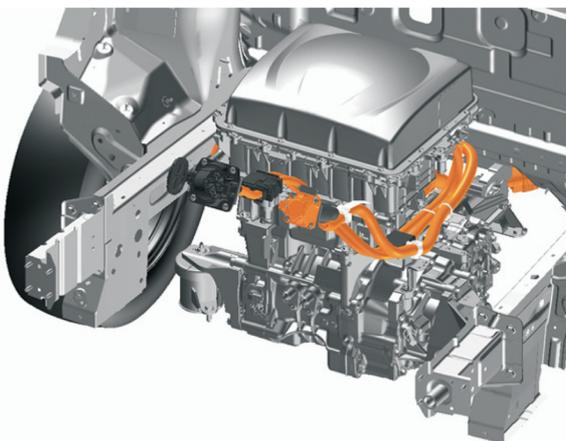


図-8 e-パワートレイン  
Fig. 8 e-powertrain

表-2 e-パワートレイン諸元  
Table 2 Specifications of e-powertrain

	e-NV200用 e-パワートレイン
最高出力 (kW)	80
最大トルク (N・m)	254
最終減速比	9.301
最高速度 (km/h)	120 以上
航続距離 (km)	185~190 (JC08 モード)

新型e-NV200は、基本的なスペックは日産リーフと同じ大容量かつ軽量・コンパクトなLi-ionバッテリーを搭載する（表3）。また、商用ユースで想定される、繰り返しの急速充電を伴う連続運用によるバッテリーの温度上昇を緩和するため、バッテリー冷却システムを採用している。バッテリーケースの内部に設けられたバッテリークーラによってモジュールに冷気を均等に循環させ冷却し、電力制限による充電時間の長時間化、加速の悪化、最高速度の低下を抑制する（図9）。システム自体は普通／急速充電中に作動するため、走行時に冷却システムのために電力消費をすることがない。

表-3 Li-ion バッテリー諸元  
Table 3 Specifications of Li-ion battery

	e-NV200用 Li-ion バッテリー
電圧 (V)	360
バッテリー容量 (kWh)	24
バッテリーモジュール数 (個)	48
バッテリーバックサイズ (mm)	1578×1102×266
重量 (kg)	267

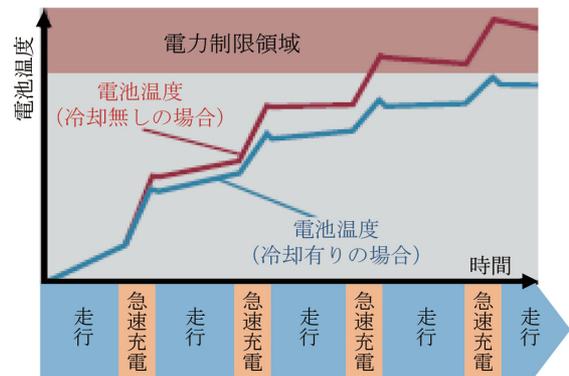


図-9 バッテリー冷却システム  
Fig. 9 Cooling system for battery pack

### 3.4 走行性能・操縦安定性

新型e-NV200はEVならではのスムーズで力強い加速性能と、あらゆる車速でガソリン車を凌ぐ静粛性を実現する。

Li-ionバッテリーを車体中央の床下に搭載していることによる低重心化によって、背高車とは思えないほどコーナでのぐらつきやステアリング操作からの応答遅れを低減させ、走りの安定感も向上している。

サスペンションの高剛性化やセッティングにより、クラストップのショック吸収性を実現したことで、長時間乗っ

でも疲れにくく、荷物をたくさん積んでも快適な乗り心地で走行することが可能である。また車体剛性の向上によりボディの振動を抑制し、乗り心地も滑らかで、人だけでなく荷物もやさしく運ぶことができる。

加えて、ドライバの安心感を高めるヒルスタートアシストを採用しており、ブレーキペダルを離れた後の2秒間、車両を停止させることにより坂道でのずり下がり防止する。積載時であっても安心して発進ができる。

新型e-NV200はドライバの意図や交通状況に合わせて、四つの走行モードを選択できる（図10）。Dモードは商用車に求められる走りの要件を満たしながら、「フル積載で30%以上の登坂能力」「ガソリン車より優れた0-100km/h加速」といったEVならではの特性を実現し、Bモードはガソリン車のLレンジのように強い減速度を発生させ、下り坂やカーブでフットブレーキを踏む回数を抑え、重積載時でも安心して運転が行える。航続距離を延長したいときは、ECOモードが便利である。

	ノーマルDモード	Bモード
ECO OFFモード	基本となる走行モード	
	ガソリン車のLレンジの様な強い減速度	
ECOモード	ECO OFFモードよりもマイルドで、航続距離も伸長	
	ガソリン車のLレンジの様な強い減速度	

図-10 走行モード  
Fig. 10 Driving modes

### 3.5 環境性能・充電機能

新型e-NV200はEVのため、走行中は排出ガスを一切出さないことから、免税措置が適用される。また、リサイクルしやすい構造や材料の検討などを行い、e-NV200のリサイクル可能率は95%以上を達成している（ISO規格（22628:2002:AnnexA）に基づき算出）。

新型e-NV200はステアリングヒータとクイックコンフォートヒータ付シート（運転席・助手席）を標準装備することにより、快適さを保ちながらエアコン使用を抑制し、電費向上を図ることが可能である。

また日産リーフと同様に、新型e-NV200は乗車する前にエアコンのタイマを設定し、室内温度を快適にすることができる。携帯電話やパソコンからの操作に加えて、インテ

リジェントキーを使って車外からの行うことも可能となり、お客さまの利便性を向上させた。充電ケーブルが接続されていればコンセントから電力消費されるため、バッテリー残量が運転前に消費されることがない。

充電の種類は、即時充電、タイマ充電、リモート充電の3モードである。おおよその充電時間を図11に示す。

電源電圧	普通充電		急速充電
	電流 電源から車両へのAC入力電流値	充電時間 バッテリー残量警告灯点灯から満充電までの目安	充電時間 バッテリー残量警告灯点灯から80%充電までの目安
AC200V	15A	約8時間	約30分
AC100V	11.2A	約28時間	

図-11 充電時間  
Fig. 11 Charging time

EV専用開発されたカーウイングスナビゲーションシステムをワゴンGモデルに標準装備している。近くの充電スポットが簡単に検索でき、目的地設定もスムーズに行うことができる。

また、新たに設置された充電スポット情報は、カーウイングスデータセンタを通じて自動的に更新されるため、データ更新の手間も不要であり、EVの移動をしっかりサポートする。

## 4. おわりに

新型e-NV200は世界で最も多く販売されているEV「日産リーフ」に続き、日産がグローバルに販売する2車種目の量販EVである。e-NV200は日産初の商用車EVとして、また人・モノ・電気を運ぶ実用性に優れたクルマとして、2014年5月に欧州市場、同年10月に日本市場に投入しており、今後グローバルに展開する予定である。

ビジネスに使える機能性を損なうことなくEVとしての特徴を組み合わせるのみでなく、新機能としてのパワーラグの追加などにより、当該市場において競争力の高い商品に仕上げている。

最後に新型e-NV200プロジェクトにかかわったすべての部門の方々に深く感謝を申し上げたい。

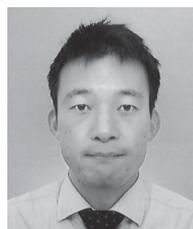
### ■ 著 者 ■



田村 利徳



香川 信哉



公手 晃一



小松 英之



小坂 智



渡辺 絵理

# 社外技術賞受賞一覧表

## 1. 技術賞

〈2013年11月～2014年10月〉

※主要な技術賞、論文賞、貢献・功労賞を対象に掲載しております。  
 ※所属は受賞時の所属、( )は研究開発当時の部署。  
 ※敬称略。

受賞年月	賞名	受賞技術	受賞者
2013.11	平成25年度厚生労働大臣表彰 卓越した技能者（現代の名工）の表彰 〔厚生労働省〕	フライス盤工（鋳造用金型製作に永年従事し、形状加工の工程設計では、三次元的に形状をイメージした上で加工中のワークの温度変化や加工負担による歪みを予測できる。加工中は状態を音から正確にイメージすることができ、高精度な部品を短時間で作り上げることができる。技能五輪国際大会で優勝した実績をもつ。）	成形技術部 櫻岡 勤
2013.11	平成25年度神奈川県技能者等表彰 〔神奈川県〕	卓越技能者 優秀技能者  青年優秀技能者	成形技術部 加賀 満 車体技術部 伊野瀬 哲夫 新車生産準備技術センター 市村 英一 追浜工場 佐藤 朝美 横浜工場 児島 直之 実験試作部 峰岸 栄治 車体技術部 高橋 一貴 追浜工場 阿久津 智之 新車生産準備技術センター 北川 皓平 車両品質技術部 森 裕司 実験試作部 北浦 慧 追浜工場 下村 朋之 横浜工場 白石 京 横浜工場 鈴木 宏彰
2013.11	平成25年度栃木県知事表彰 〔栃木県〕	卓越した技能者	栃木工場 矢嶋 渡
2013.11	平成25年度栃木県職業能力開発協会会長表彰 〔栃木県〕	卓越した技能者 職業訓練功労者	栃木工場 出頭 光好 栃木工場 増川 信二
2013.11	平成25年度福岡県勤労者知事表彰 〔福岡県〕	効率的な生産を行うために豊富な知識と技能を発揮して、ものづくりの改善を実践している。また、後進の育成にも貢献してきた。	日産自動車九州 浦埜 義明
2013.11	平成25年度福岡県優秀技能者表彰 〔福岡県〕	福岡県優秀技能者 (福岡県版「現代の名工」)	日産自動車九州 倉方 満志
2013.11	2013年度品質管理推進功労賞 〔一般社団法人日本品質管理学会〕	長年の品質管理推進への貢献とともに、部門間連携を強化する活動としてV-upプログラムを開発し、課題解決の支援に尽力されたこと	元日産 玉浦 賢二 (V-up推進・プロセス改革チーム)
2014.1	2013年秋季大会学術講演会 優秀講演発表賞 〔公益社団法人自動車技術会〕	1モータ2クラッチパラレルハイブリッド車両におけるエンジン始動時のクラッチトルク配分制御の開発	EVパワートレイン開発部 芦沢 裕之

〈2013年11月～2014年10月〉

受賞年月	賞 名	受 賞 技 術	受 賞 者
2014.2	2013年度日本機械学会賞 日本機械学会賞（論文） 〔一般社団法人日本機械学会〕	円筒歯車のかみ合い効率予測とその向上	EVシステム研究所 森川 邦彦 EVシステム開発部 西原 隆太 (研究実験試作部) 早稲田大学 松本 将
2014.4	平成26年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 創意工夫功労者賞 〔文部科学省〕	カム型クランプ台車の圧力測定による不良率の改善 大型建付治具取扱助力装置の考案 温度センサー固定法の改善とバネ巻き機の考案 マイコン活用による安価な診断装置の考案 制御技術応用によるIT&ITSシステムの改善 自動車プレス金型の高速底面加工方法の考案 プレス金型の輪郭自動加工における最適工法考案 産業用ロボット減速機潤滑グリス更油装置の考案	成 形 技 術 部 嵯峨 仁 栃 木 工 場 小林 光男 成 形 技 術 部 後藤 康隆 栃 木 工 場 鈴木 秀雄 実 験 試 作 部 瀬口 秀則 プ レ ス 技 術 部 佐藤 武 プ レ ス 技 術 部 棚橋 希望 日 産 自 動 車 九 州 筒井 淳夫
2014.4	2013年度機素潤滑設計部門功績賞 〔一般社団法人日本機械学会〕	日産・ジヤトコにおいて、一貫して歯車の技術革新に取り組み、多くの新技術を他社に先駆けて量産適用したこと	パワートレイン技術開発試作部 鈴木 義友 (ジヤトコ株式会社)
2014.5	第64回自動車技術会賞 技術開発賞	転舵角と操舵力を独立制御可能な操舵システムの開発	シャシー技術開発部 久保川 範規 シャシー技術開発部 榎崎 拓也 シャシー技術開発部 蔡 佑文 シャシー技術開発部 菅原 直人 (車両実験部) 車 両 実 験 部 中山 大
	技術開発賞	超薄肉射出成形インストルメントパネル表皮技術の開発	カルソニックカンセイ(株) 中村 哲男 カルソニックカンセイ(株) 小野田 剛 Infiniti製品開発部 寿原 雅也 (内外装技術開発部) 塗装樹脂技術部 徳毛 一晃 (材料技術部) 追 浜 工 場 石井 郁 (車両技術開発試作部)
	技術開発賞 〔公益社団法人自動車技術会〕	世界初1.2GPa級高成形性ハイテン材の開発	材 料 技 術 部 福原 恵美 材 料 技 術 部 石内 健太郎 Infiniti製品開発部 岩崎 剛 車 体 技 術 部 吉田 健 生産技術研究開発センター 徳光 偉央
2014.5	平成26年春の褒章 黄綬褒章 〔内閣府 厚生労働省関係〕	多年木型木工としてよく職務に精励したこと	成 形 技 術 部 齊藤 丈二

〈2013年11月～2014年10月〉

受賞年月	賞 名	受 賞 技 術	受 賞 者
2014.6	第24回青木固技術賞 〔プラスチック成形加工学会〕	射出成形による超薄肉インストルメントパ ネル表皮の開発	生産技術研究開発センター 長尾 毅 (車両技術開発試作部) 追 浜 工 場 石井 郁 (車両技術開発試作部) 塗装樹脂技術部 徳毛 一晃 (材料技術部) Infiniti製品開発部 寿原 雅也 (内外装技術開発部) カルソニックカンセイ(株) 小船 義人
2014.8	2014年春季大会学術講演会 優秀講演発表賞 〔公益社団法人自動車技術会〕	新たな接合評価試験による各種接合の評価	車 両 実 験 部 江口 達也
2014.8	International Gear Conference 2014 The Best Paper Award 〔Science Conferences International〕	The new estimation formula of coefficient of friction in rolling-sliding contact surface under mixed lubrication condition for the power loss reduction of power transmission gears	早 稲 田 大 学 松本 将 EVシステム研究所 森川 邦彦
2014.9	IEEE IAS Industrial Power Conversion Systems Electric Machines Prize Paper Awards 2014 Third Prize	Efficiency Contours and Loss Minimization over a Driving Cycle of a Variable-Flux Flux-Intensifying Interior Permanent Magnet Machine	EVシステム研究所 福重 孝志 University of Wisconsin- Madison Natee Limsuwan EVシステム研究所 加藤 崇 芝浦工業大学 赤津 観 University of Wisconsin- Madison Robert D. Lorenz
	Industrial Drives Prize Paper Awards 2014 Third Prize  〔IEEE IAS〕	Variable Flux Machine Torque Estimation and Pulsating Torque Mitigation during Magnetization State Manipulation	University of Wisconsin- Madison Chen-Yen Yu EVシステム研究所 福重 孝志 University of Wisconsin- Madison Natee Limsuwan EVシステム研究所 加藤 崇 University of Oviedo David Reigosa University of Wisconsin- Madison Robert D. Lorenz
2014.10	平成25年度熱工学部門技術功績賞 〔一般社団法人日本機械学会〕	熱工学の分野で顕著な功績を挙げた卓越せる研 究者、もしくは技術の発展に貢献した卓越せる 技術者に授与する	元日産 飯山 明裕 (EVシステム研究所)

## 2. 製品ほか受賞

〈2013年11月～2014年10月〉

※主要な製品賞を対象に掲載しております。

受賞年月	受賞車（製品）、その他	受賞名	主催
2013.11	Direct Adaptive Steering	2013 Best of What's New ・ Grand Award in auto category	(米)「Popular Science」誌
2013.12	キューブ 15X ロルブルーセレクション (スオミブルー（外装）／ロルブルー (内装))	オートカラーアウォード2014 ・ 準グランプリ	一般社団法人日本流行色協会 (JAFCA)
2013.12	Infiniti Q50 Hybrid	Canadian Car of the Year 2014 ・ Best New Luxury Car (over \$50,000)	Automobile Journalists Association of Canada (AJAC)
2014.1	Direct Adaptive Steering	2014 Best New Technology Awards ・ Best New Innovation Technology	Automobile Journalists Association of Canada (AJAC)
2014.1	Predictive Forward Collision Warning	2014 Best New Technology Awards ・ Best New Safety Technology	Automobile Journalists Association of Canada (AJAC)
2014.1	Nissan Qashqai	What Car? Car of the Year 2014 ・ Car of the year ・ Best small SUV	(英)「What Car ?」誌
2014.1	Nissan X-Trail	What Car? Car of the Year 2014 ・ Reader Award	(英)「What Car ?」誌
2014.1	Nissan Motor Co Ltd	Sustainability Yearbook 2014 ・ Bronze Class in automobiles category	(スイス) RobecoSAM AG
2014.3	副会長 志賀俊之	2014 J-Win ダイバーシティ・アワード ・ 経営者アワード	NPO 法人 J-Win
2014.3	サンキャット245CS (日産マリーン㈱)	日本ボート・オブ・ザ・イヤー2013 ・ 日本ボート・オブ・ザ・イヤー ・ 国産中型艇部門	一般社団法人日本マリン事業 協会
2014.5	Nissan Motor Company	World Trademark Review Industry Awards 2014 ・ Vehicles & Transport	(英)「World Trademark Review」 誌
2014.8	「日産リーフ」取扱説明書	日本マニュアルコンテスト2014 ・ 紙マニュアル 一般部門 部門最優秀賞 ・ 安全賞	一般財団法人テクニカルコミュニ ケーター協会
2014.10	X-Trail	Favorite Car	22nd Indonesia International Motor Show
2014.10	ティアナ	2014年度グッドデザイン賞	公益財団法人日本デザイン振興会
2014.10	スカイライン	2014年度グッドデザイン賞	公益財団法人日本デザイン振興会
2014.10	チョイモビ ヨコハマ (ワンウェイ 型カーシェアリングサービス)	2014年度グッドデザイン賞	公益財団法人日本デザイン振興会
2014.10	おもいやりライト運動	2014年度グッドデザイン賞	公益財団法人日本デザイン振興会

# 円筒歯車のかみ合い効率予測とその向上

Estimation and Improvement Method of Mesh Efficiency of Cylindrical Gears

森川 邦彦\*  
Kunihiko Morikawa

西原 隆太\*\*  
Ryuta Nishihara

松本 将\*\*\*  
Susumu Matsumoto

## 1. はじめに

自動車用変速機では複数の歯車が同時にかみ合った状態で運転されるので、変速機的全損失に占める歯車の損失の割合も少なくない。したがって、変速機や減速機のより一層の動力伝達効率向上のためには、歯車のかみ合い損失のさらなる低減が重要となる。歯車のかみ合い損失に関しては、実用的な歯面摩擦係数の予測式がなく、その見積もりは実験に頼るところが大きかった。今回、有用な歯面摩擦係数の予測式を提案し、それを盛り込んだ精度のよいかみ合い効率予測法を開発したことが評価された。

## 2. 概要

かみ合い効率の予測においては、歯面の荷重分布と摩擦係数を知る必要がある。歯面の荷重分布は、歯面修整形状も考慮したかみ合い解析から求める。一方、歯車のように接触面が潤滑油膜で完全に分離されない混合潤滑状態での摩擦係数推定式は、過去に提案されたものはいずれも実用的なものではなく、新たに混合潤滑状態における潤滑苛酷さを考慮した有用な摩擦係数推定式を提案した。歯面の摩擦係数  $f$  を流体潤滑負担部  $f_L$  と境界潤滑負担部  $f_S$  に分け、その分担比率  $\alpha$  を表面粗さ  $Rz$  と油膜厚さ  $h_0$  の大きさの比で表したもので、次式で与えられる。

$$f = f_L(1 - \alpha) + f_S\alpha \quad (1)$$

$$\alpha = 0.5 \log D \quad (2)$$

$$D = (Rz_1 \cdot Rz_2) / h_0 \quad (3)$$

歯車諸元や歯面修整形状の異なる数種類の歯車対にこの式を適用して、その有用性を確認した（図1）。また、かみ合い解析にこの歯面摩擦係数予測式を導入した歯車のかみ合い効率予測法を提案し、実際の歯車での実験検証から簡便に精度よくかみ合い効率を予測できることを確認した（図2）。

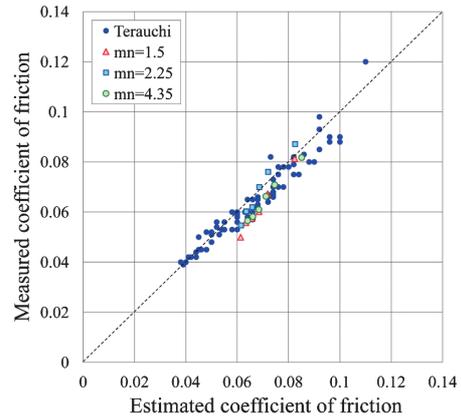


図-1 歯面摩擦係数予測式の検証  
Fig. 1 Validation of estimation method of friction coefficient of gear pair

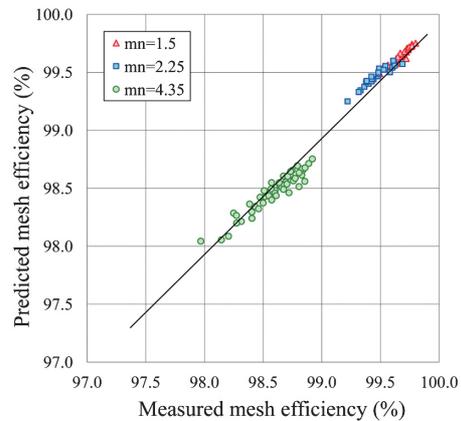


図-2 かみ合い効率予測法の検証  
Fig. 2 Validation of proposed prediction method of gear mesh efficiency

## 3. おわりに

本方法により潤滑油性状、運転状態、歯車諸元および歯面修整形状のかみ合い効率に対する寄与を簡便に精度よく定量的に評価できるようになり、かみ合い効率の効果的な向上が可能になった。

なおInternational Gear Conference 2014 (Lyon, France)にて発表した関連論文は Best paper award を受賞している。

\*EV システム研究所 \*\*EV システム開発部

\*\*\* 早稲田大学大学院

※日本機械学会賞（論文）とは、日本の機械工学・工業の発展を奨励することを目的として設けられ、優秀な論文を発表した個人会員及びその共著者に贈られる。



## 編 集 後 記

日産技報の編集に携わって、改めて日産技報とはなにかと考える機会になっています。本誌は50年の歴史を持つ日産唯一の技術誌で、発行部数約5,000部のうち70%を社内読者とし、大学や関連企業や同業他社にもご購読いただいている技術広報誌でもあります。内容は、論文集ほど専門的ではなく広報誌ほど万人向けでもなく、異分野技術者であっても理解できるようにかみ砕かれた総説が領域ごとに特集としてまとめられています。

このような日産技報の門構えを見るに、本誌は読者にとっては自動車技術者として身に着けておきたい基礎的教養を提供するものであり、一方執筆者にとっては自領域技術を俯瞰的に眺めるなかで、その産業的な意義や将来展望などを改めて考える機会を提供するものと思います。また執筆技術者と異分野読者との論議のきっかけとなることで、新しい融合技術を生み出す絶好の機会を提供することになろうと思います。

編集委員会では、情報の国際化や電子化の流れの中で日産技報の新しい方向性を論議しています。将来に向けて本誌が目指す本質的な価値を見失うことなく、新しい時代に合った価値を加えていきたいと考えています。今回の第76号が読者諸氏の手元に届いたとき、部署内や部署間で、社外との共同開発で、大学との共同研究で、また新しい論議が始まり新しい自動車技術が生まれていくことを願っています。

— 日産技報編集委員・原田宏昭 —

### 2014年度日産技報編集委員会 (Editorial Committee)

委員長 (Chairman)

原田 宏 昭  
(Hiroaki HARATA)

副委員長

村田 茂 雄

委 員

植 月 剛

佐藤 正 晴

斎藤 康 裕

森 達 朗

石川 信 也

荒木 敏 弘

菊池 朗

山口 敏 之

先端材料研究所

第一パワートレイン開発本部

商品戦略部

Infiniti製品開発部

Infiniti製品開発部

Infiniti製品開発部

IT&ITS開発部

統合CAE部

実験・計測技術開発部

パワートレイン第三製品開発部

岸本 洋 一

高城 龍 吾

巖 桂 二郎

中野 正 樹

三田村 健

長谷川 哲 男

瀬川 浩

高橋 啓

事務局

柳井 達 美

丸山 高 澄

細谷 裕 美

パワートレイン第一技術開発部

技術企画部

研究企画部

EVシステム研究所

モビリティ・サービス研究所

環境・安全技術渉外部

車両生産技術統括部

パワートレイン技術企画部

研究企画部

研究企画部

研究企画部

### 日産技報第76号

© 禁無断転載

発 行 2015年3月

発行・編集人 日産技報編集委員会

発行所 日産自動車株式会社

総合研究所 研究企画部

神奈川県厚木市森の里青山1番1号

〒243-0123

印刷所 相互印刷株式会社

東京都江東区森下3-13-5

### Nissan Technical Review 76

March, 2015

Publisher Nissan Technical Review  
(Editor) Editorial Committee

Distributor Society and Frontier Laboratory

Nissan Research Center

NISSAN MOTOR CO., LTD.

1-1, Morinosatoaoyama, Atsugi-shi

Kanagawa, 243-0123, Japan

Copyrights of all articles described in this Review have been preserved by NISSAN MOTOR CO., LTD. For permission to reproduce articles in quantity or for use in other print material, contact the chairman of the editorial committee.

---

---

## 表紙コンセプト

---

---

総合研究所先端材料研究所で自動車用リチウムイオン電池を担当する秦野です。次世代のリチウムイオン電池用材料として有望なシリコン系負極は、人の目には黒い物体としか見えませんが、今回の表紙ではその本質をイメージできる原子像のCGおよび高分解能顕微鏡写真を用いてデザインしてみました。我々の研究では、材料中の $\text{\AA}$ ~ $\mu\text{m}$ レベルでの分散状態が電池性能のキーポイントであることがわかってきていて、日々理想を追い求めています。このような原子レベルでの材料設計が、環境技術を支えていく、との思いを込めてまとめました。



先端材料研究所  
秦野 正治

---

