NISSAN TECHNICAL REVIEW

日産技報
2022
No.
88

ARIYA から始まる Nissan Intelligent Factory ／次世代のフラッグシップ ARIYA

NISSAN
MOTOR CORPORATION

日産技報

NISSAN TECHNICAL REVIEW

2022 No.88

NISSAN TECHINICAL REVIEW　2022 No.88

目　次

2022 年 6 月　発行

◆巻頭言

日産の DNA が生みだした超進化『青い地球と共生可能な生産システム』 …… 坂本 秀行 …… 1

◆特集 1：ARIYA から始まる Nissan Intelligent Factory

1. ARIYA から始まる Nissan Intelligent Factory …… 岡口 秀寿 …… 7

2. 多様なパワートレインに対応した次世代のアンダーフロア工程の採用 …… 土金 大真・宇賀治 篤史・内藤 祥久 …… 13

3. 新モーターラインにおけるデジタル、IoT を活用したモノづくりの革新…… 飯塚　悟 …… 19

4. ボディ／バンパー一体塗装工法開発による革新工程の実現 …… 後藤 丈志・岡本 倫幸・道浦 千惠 …… 23

5. 外観・仕様検査への自動化技術適用によるクォリティゲートの実現 …… 石渡 輝行・平山　満・田中 大輔 …… 27
守屋 隆之・山田 恭央・山田　誠
本田 武志

6. 予知予防保全・リモートメンテナンス技術の拡大採用による設備稼働率・工程能力の向上
小川 堅博・櫻井　諭・牧野 幸一 …… 33
津本 卓也・阿部　奨・早川 正芳
瀬尾 和也・河野　稔

7. 革新的薄肉軽量シリンダーヘッドを実現する鋳造技術の開発…… 杉山 雄大・土屋 真一・久米 洋道 …… 39
西　高宏・田渕 満智

◆特集 2：次世代のフラッグシップ ARIYA

1. 次世代のフラッグシップ ARIYA …… 赤石 永一・中嶋　光 …… 45

2. 高いパッケージング効率を実現した EV 専用プラットフォーム CMF-EV の開発 …… 大西 将浩 …… 51

3. 統合型インターフェースディスプレイ …… 小畑　哲・江口　隆・笹沼 慶与 …… 57

4. 新しい NissanConnect の開発 …… 村松 寿郎・船井 一宏・田﨑　克 …… 61
村上 晋太郎・上島 宏幸

5. ARIYA 向け高容量リチウムイオンバッテリ …… 片村 淳二・八田 健太郎・若林 計介 …… 65
高木 雅紀・轟木 直人

6. ARIYA の性能を実現する新開発モータ …… 大久保 孝仁・和田 裕紀 …… 69

7. 日産が考える電動 AWD の進化「e-4ORCE」～もっと爽快で自信をもてるドライビングをめざして～
富樫 寛之・宮腰 祐篤・片倉 丈嗣 …… 73

◆論文

視線と音声を用いたマルチモーダルインタフェースによるワークロードの低減…… 森田 祐介・田村　総 …… 77

可変圧縮比エンジン用マルチリンク式クランク機構の軸受要素の開発…… 中村 勝敏・茂木 克也・大熊　悟 …… 83

機械学習を用いた自動車空力性能を予測するためのサロゲートモデル開発…… 赤坂　啓・陳　放歌・寺口 剛仁 …… 91

微小操舵角域のライントレースのバラツキを低減するピッチ特性に関する研究…… 田尾 光規・町田 直也・林　豊・長棹　謙 …… 99

◆受賞論文

乗員の快適性を向上させる車両運動の探求…… 牧田 光弘・松下 晃洋・草柳 佳紀・三浦 雅博 ……107

高速道路複数車線の運転支援システムの開発…… 谷口 洋平・出川 勝彦・徳永 誠士・長江 新平・佐々木 光次 ……115

メゾスケールズーミング解析による CFRP 製圧力容器の強度評価 …… 竹本 真一郎 ……117

日産のDNAが生みだした超進化『青い地球と共生可能な生産システム』

執行役副社長　坂本　秀行

1. はじめに

日産自動車はクルマづくりの会社であり、我々、自動車エンジニアはそのクルマづくりの中核を担っています。

日産の歴史は、1933年、創業者『鮎川 義介』の『他がやらぬことをやる』の精神によって、国産自動車の開発と大量生産に始まり、今日につながる日本の自動車産業の歴史の幕開けを担ってきた自動車会社でもあります。

この自動車の国産化を機に自動車技術の進化が始まり、その後も日産の先人達は創業者のDNAを強く受け継ぎ、自動車輸出や海外生産といった事業展開を行い、環境・大気汚染、交通事故、オイルショック・燃費規制、貿易摩擦といった世界の社会問題も含めて、本当にたくさんの山あり谷ありの課題に直面して来ました。同時に、クルマづくりの観点で他社にはできない新しい課題を、日産の先人達の熱意と努力の結晶による新しい技術で乗り越えてきた歴史でもあります。歴代のクルマや世界初として創出された技術に触れると、日産の先人達がいかに努力して届けてきたかが、良く分かると思います。

今、世界の自動車業界が直面している『100年に1度の大変革期』として、『CASE』や『カーボンニュートラル』がメディアで大きく取り上げられています。これからのクルマの発展は未来生活像の実現に向かい、複雑な社会システムとの関わりを前提として、大規模かつ高難度な技術開発に依存していくと思います。しかしながら、自動車エンジニアに求められる役割と価値は今後も変わることはありません。技術開発の焦点は、お客様や社会にもたらす価値にあります。自動車エンジニアに求められる日常は、常にそれを意識し、市場環境の動向と技術の発展を十分理解し活用することで、お客様や社会に共感される機能と性能を実現する最善のテクニカル・ソリューションを提供することです。これらは、日産としては100年に1度ではなく、日産創業時からのDNAで受け継がれており、今後も何も変わらないと思っています。

今回の日産技報の特集も、まさにお客様や社会に共感される機能と性能を実現する最善のテクニカル・ソリューションに関する技術報告が満載となっており、創業者のDNAを強く受け継いだ技術の進化となっております。

2. 自動車産業を取り巻く環境変化

日産自動車は、クルマづくりや次世代の自動車産業のあり方において、4つのミッションを考えています。

1つ目は、労働集約型からの脱却です。100年前にフォードが取り入れた、T型フォードの量産に多くの人が集まって効率的にクルマを生産する方式は、当時は画期的なクルマの生産方式でした。近代化とともに各種自働化が織り込まれて来ましたが、基本的には、現在もこの生産方式は踏襲されています。ところが、昨今、日本のみならず世界中で自動車工場での労働者不足や、コロナのようなパンデミックを考えると人がたくさん集まってクルマを造っていくということが、段々難しくなってきています。よって、ここから脱却して合理的な生産方式を確立することが必要となります。

2つ目は、少子高齢化の波が来ており、昔のように若い人に高度な訓練を行って難しいクルマづくりに従事してもらう方式が段々難しくなってきたことからも、工場の労働環境の改革が必要となります。

3つ目は、予期せぬ事態への柔軟な対応です。これは、コロナのようなパンデミックや半導体供給不足、物流網の大混乱等、色々な要素が、クルマの生産活動を行う上で変動要素として非常に難しい問題となっており、これにどう対応していくか?が重要となります。また、これからの時代は、バッテリーやe-コンポーネント、それらの原材料も不安定な供給問題に直面し、今後も大きな変動要素として拡大の一途となることは間違いなく、これにも柔軟に対応していくことが必要となります。

4つ目は、世界中で進んでいるカーボンニュートラルに向けた気候変動への具体的な対策に、貢献することが必要となります。

4つのミッション

これら4つの条件を満たした上で、新しい未来のクルマにどのように生産活動を展開していくか？電動化・知能化・コネクテッドなど、クルマやクルマづくりが非常に複雑かつ高度になっていきます。クルマづくりにおいて、ソフトウェアの大量かつ同時書込みや、多くのセンサーのキャリブレーション、高度な自己診断系やフェールセーフ等様々なシステムの機能保証を行うことが必要となり、クルマづくりがますます難しくなってきました。EVでは、バッテリーも航続距離の長い大型バッテリーや標準タイプがあり、自動運転知能化技術に関しても、ハンズオフを可能にするような高度な自動運転技術を使ったモノや標準的な運転支援のようなシステム、色々な高バリエーションがクルマづくりの中に要求されてきています。このような複雑かつ高度なクルマを造るための変動に強い生産現場と生産技術は、明日の日産の飛躍の要になります。

高度化する商品への対応

3. 気候変動 / Life cycle Carbon Neutralへの取組み

3.1　ニッサングリーンプログラムの貢献

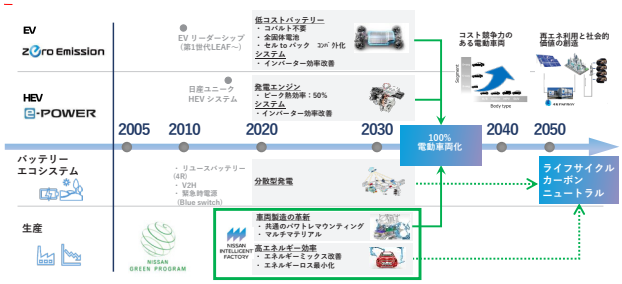
今、世界中でこの気候変動についての対策を取るべく、2050年カーボンニュートラルを実現することに関して、各国の合意や宣言がなされ、色々な政策が始まっています。

日産も2050年に確実にカーボンニュートラルを実現するというコミットの元、2030年代早期に主要市場の車両を電動化し、生産技術のイノベーションを推進して、クルマを造る上でもカーボンニュートラルを実現していきます。また、日産は2005年よりニッサングリーンプログラムによりいち早くCO2排出の削減に取り組んできました。

このプログラムの中で、2010年には初代EVである『リーフ』の量産を始め、日常使いのEVとしてメインマーケットへ提供を始めました。

その後も、電動車両の走る楽しさをお客様に感じて頂いて、EVの普及の一助とすることを目的に、e-POWERを世の中へ投入しました。

更にこのようなクルマを造る上で、なるべく少ないエネルギーでCO2排出を低減するという取り組みを継続して行ってきました。今後も更にイノベーションを加えて、実現していきたいと思います。

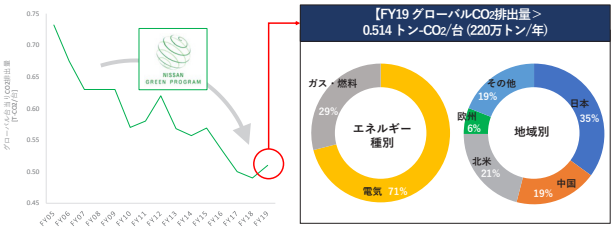


ライフサイクル･カーボンニュートラルへの取組み

ニッサングリーンプログラムで、クルマを生産する面でのCO2排出削減については、2005年から2019年にかけて1台のクルマを造るのに30％のCO2排出削減を実績として成功しています。

現在の使用エネルギーの内訳としては、71％は電気を占めており、ガス・燃料は29％という構成になっています。これをゼロに向けてどうするのか？が我々にとっての重要なミッションになります。

■カーボンニュートラル(生産)に向けてガス・燃料依存の脱却と日本・中国・北米の対応を強化する



生産CO2排出削減の実績

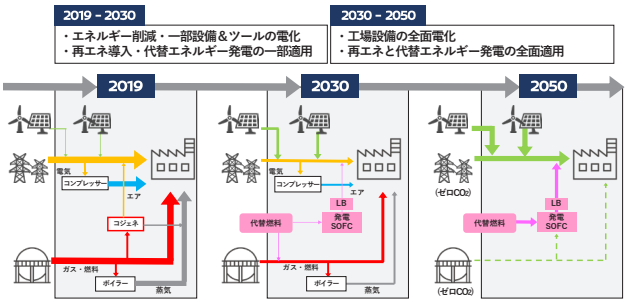
3.2　生産領域のカーボンニュートラルへの取組み

日産の生産工場のカーボンニュートラルに関して、どのように2050年に向けて対応していくか？というロードマップを既に決定して技術開発も進めています。

現在の生産工場で利用している動力としては　電気やコンプレッサーからの高圧エア、ガス・燃料からは蒸気・熱・電気に変換し工場を運営しています。

2030年に向けては、エネルギーを画期的に削減していきます。更に、クリーンな代替え燃料を使った燃料電池（SOFC）によるカーボンニュートラル発電を行い、太陽光や風力のような再生可能エネルギーとセットでクリーン化のトライアルを拡大していきます。

2050年に向けては、生産工場の中で動く生産設備は全て電化し、そのエネルギー源を再生可能エネルギーとクリーンエネルギー発電によって全て置き換えていきます。

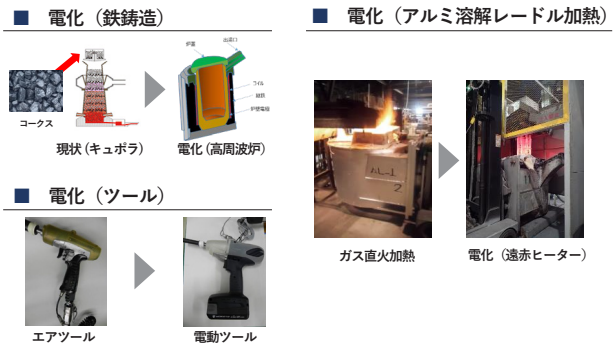


生産CO2排出削減ロードマップ

難易度の高い生産工程としては鋳造工程があり、特にドライブトレインに多く用いられる炭素鋼の鋳造工程ではコークスを使って溶解しながら加炭を行いますが、ここを高周波炉の適用により電化していくことになり、まだまだ技術開発が必要な領域となっています。

工場内で使用するツールもエアツールから電動ツールへ電動化します。また、パワートレインに多く用いられるアルミ合金の溶解も完全電化していくような技術開発を進めていきます。

ただし、従来の燃料（軽油やガス等）の代替として直接熱エネルギーを伝えられる新しい代替クリーン燃料が将来的に開発された場合は、我々の技術開発の方向性の見直しも必要になるため、エネルギー業界の先行技術開発の動向については、注目しておく必要があります。

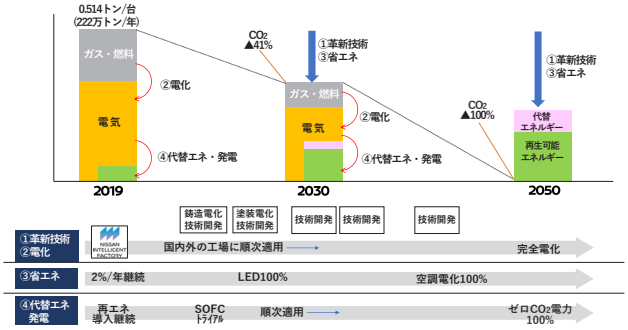


生産CO2排出削減の主な取組み

全てのクリーンエネルギーを外部からの供給に頼ると、供給の不安定さや価格けん制力の低下等により事業継続性への課題を抱えることになります。そこで、日産の生産工場の中でもクリーンエネルギー発電をトライアルし、実用化しようと計画しています。バイオエタノールを使った燃料電池（SOFC）によるカーボンニュートラル発電を栃木工場で実証実験を行い、世界中へ展開していく計画です。また、英国日産サンダーランド工場では、太陽光・風力の利用も既に始まっていて、今後もマイクログリッドによる大規模なクリーンエネルギー供給や太陽光発電を取り入れていきます。

生産CO2排出削減の主な取組み

具体的な数字目標としては、2030年までに日産の生産工場でクルマを造る上で必要なエネルギーの大幅削減やカーボンニュートラル発電のトライアルも適用し、41%のCO2排出削減を狙います。2050年にはカーボンニュートラル発電と再生可能エネルギー調達で100%カーボンニュートラル化を実現します。これに必要な技術開発を既にR&Dや生産技術の協働で進めています。



生産CO2排出削減の数値目標

3.3　生産工場と地域環境との共生への取組み

生産活動を行う中で、地域との共生も非常に大切にしています。Nissan Intelligent Factoryを導入した栃木工場の周辺には、たくさんの緑の中に色々な生態系があります。その自然環境を守るために、生産時に生じる環境依存と負荷を自然が吸収可能なレベルに安定させ、生態系保護や水質管理、景観維持、再生エネルギーの活用により地域環境にもやさしい生産工場として共生しています。Nissan Intelligent Factoryの新塗装ブースでは塗装ミスト回収のための水を使用

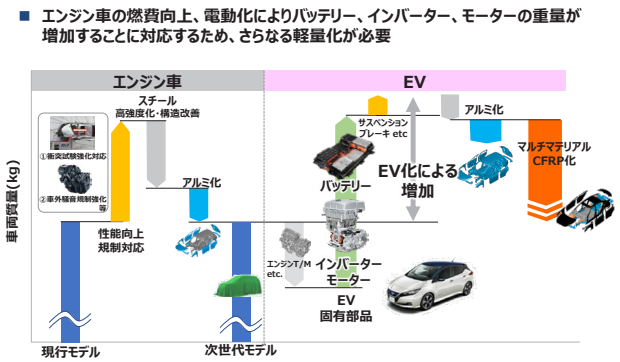
しません。この塗装ブースからの排水を一切無くすことができた結果、排水処理にかけるエネルギーをゼロにすることが可能となりました。また、その他の工程から出る排水も徹底的な浄化・水質管理を行っています。その水を使った工場内の小川では、蛍が生息し、夏には綺麗な光を放ってくれています。

地域との共生

3.4　電動化に必要となる量産可能な軽量化技術

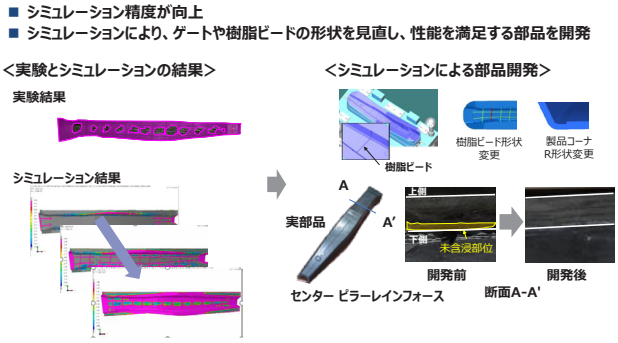
世界中でEV普及が進んでいますが、EV普及に必要な技術は、EVパワートレイン（モーター、インバーター、バッテリー材料・構造等）の技術開発だけではなく、量産可能な車体の軽量化技術も非常に重要となります。航続距離を確保するために、EVの大型バッテリー搭載で増々重量が増加していくため、抜本的な車体構造の見直しや革新的な車体の軽量化が求められます。

軽量化に関しては、構造強度部位であれば超ハイテン材の使用や、カバー部品であればアルミ合金の使用が一般的ですが、強度面で鉄の代用範囲が限られます。また、アルミ合金の接合に関しては、従来はリベット（SPR）で行っていますが、接合に使用されるリベットの分だけ重量が増加してしまうため、この接合を溶接化していくことや、異種材（アルミ合金～鉄～樹脂）の接合にも革新技術が求められてきます。



電動化と車両重量

従来から車体の軽量化で注目されている材質としては、CFRPがあります。我々は、2020年にCFRPの量産化技術を発表しました。CFRPが世に出始めてから数十年経ちますが、量産技術（コスト、サイクルタイム）の確立が積年の課題でした。このCFRPの量産を実現するためにはモノを造る技術、つまり生産技術のブレークスルーが必要だったのです。我々は、樹脂の流動性解析の応用により日産独自のCFRP生産技術開発を完了し、C-RTM工法の量産化適用で2分のサイクルタイム実現の目処が見えてきました。1台当たり2分ということは、1時間に30台分の生産スピード（30JPH）に追従できるという、画期的な量産可能な工法となります。



樹脂含浸シミュレーションの成果

4. ARIYA から始まる Nissan Intelligent Factory

アリアは、新しい日産とNissan Intelligent Mobilityを体現したデザインとなり、幅広いニーズに対応する4つのパワートレインラインナップ、快適で意のままに走るドライビングパフォーマンスと新世代のEVパワートレイン、最先端の運転支援技術と先進のコネクテッド技術を搭載しています。

日産のEVの革新は、2010年量産初のEVリーフから始まりました。

日産EVの革新

リーフもモデルライフの中で何度も改良が繰り返されて、今では458kmの航続距離を実現しています。また、アリアは最大610kmの航続距離を実現し、電動化・知能化において搭載されるECUの数はリーフに比べて2倍、通信に使われる信

号の数も2.5倍、２種類のバッテリー容量や重量当たりの容量も1.5倍と大きく進化しています。

この複雑かつ高度に進化したアリアを効率的に生産するために、Nissan Intelligent Factoryの4つの柱のコンセプトを作り、長い年月をかけて要素技術開発と適用技術開発を行い、今回、実現することができました。

Nissan Intelligent Factory 4つの柱

この間も本当にたくさんの山あり谷ありがありましたが、多くの日産の自動車エンジニア達の努力で革新的な自動化ラインを完成させることができました。そのラインが全自動で動いた際は、私も現場の皆と一緒に拍手で喜びと感動を分かち合い、まさに自動車エンジニアとしての醍醐味を感じることができた瞬間でした。

このNissan Intelligent Factoryは、今回の栃木工場をパイロットとして、グローバルに展開していく計画です。

5. お わ り に

5.1　今後、乗り越えるべきクルマづくりの課題

今後も先行きが見通せない中、山あり谷ありで我々が乗り越えていくべき、クルマづくりにおける課題としては以下の通りと考えており、自動車エンジニアだけでなく日産全体として皆で検討し、更なるブレークスルーが必要となります。

- 新たなパンデミックや米中摩擦による世界供給網の大混乱
- 電動化による更なる重量の増加と車体の革新的な軽量化（マルチマテリアル、異種材接合、革新構造等）との闘い
- 原材料の調達リスクによる市況コスト影響と危険度のアップ
- 若手人財の理系離れの中、新たな競合の出現によるAIやシステムに強い人材の獲得競争の激化
- 自動車生産現場における世界的な採用環境の悪化、　等

5.2　日産の自動車エンジニア達へのメッセージ

日産の自動車エンジニア達の熱意と努力で取り組んできた技術開発の歴史や成果を『その苦労やアプローチ方法がいかに時代を切り拓いてきたのか？』という視点で改めて見つめ直し、そして、これからの時代を乗り越えていく皆さん自身が、先人達の歴史に触れて本質を理解し、受け継いでいって欲しいと思います。

技術の成熟には時間がかかりますが、本質を理解する力をつけることで、『この技術は何に役立つか？』と将来に向けて常に考える行動に移り、質を高め、着実に進化していきます。そして、それらが『技術革新による未来のクルマの具現化』や、パンデミックや半導体問題のように各国の政策や不安定な情勢に対して強く影響を受けない『変動に強く、信頼される生産システムの実現』や『人にやさしく、プライドを持てる職場作り』に欠かせない活動であり、これからの日産を背負う自動車エンジニアの皆さんの熱意と努力からの創出に期待したいと思います。

我々、日産の自動車エンジニアは日本の自動車産業発展のために、過去より常にこの精神で行動してきました。日産の自動車エンジニアが開発する商品や新技術は、今までできなかったこと・諦めていたことを出来るようにすることで、人々の生活を豊かにしてきました。このことを本技報にて皆さんと共有し、今後もプライドを持ち続け、自分の力を信じて進化し、活躍して欲しいと思います。

特集1：ARIYAから始まるNissan Intelligent Factory

1. ARIYAから始まるNissan Intelligent Factory

岡口　秀寿*

1. 自動車の生産事業における動向

自動車産業は100年に1度の大変革時代に入り、クルマの知能化と電動化などCASE（Connected, Autonomous, Share & Service, Electric）領域の変化が加速し、クルマの高度化が進んでいる。このような高度技術に富んだクルマを従来のクルマと同じように高品質かつ最適なコストで生産することが必要とされている。

また、少子高齢化による労働人口減少を背景に、これまで自動車メーカーが行ってきた多くの働き手を1か所に同時に集めて行う生産方式では成り立たない未来が予想される。労働人口が減ることに加えて、働き手の意識や求める職業も変化していることから、誰でも働くことができる職場の実現と、労働集約型での自動車生産方式から抜け出すことが求められている。

さらには、パンデミックや天災、半導体の供給問題などが頻発し、予期せぬ事態への柔軟な対応が自動車産業のみならず、多くの業界で必要とされている。気候変動に対する危機感、活動も世界中で急速に進み、カーボンニュートラルにむけた具体的対策の実行も急務となっている。（図1）

図1　自動車の生産事業を取り巻く環境

2. 日産自動車の生産工場が向かう先

日産自動車の生産工場はグローバル化が加速する状況下で、日産生産方式（Nissan Production Way）/アライアンス生産方式（Alliance Production Way）として生産ラインの改善や刷新を進めてきた。その歴史の中で、環境負荷への対応や、電気自動車をいち早く量産させるといった新たな挑戦を“技術”を駆使して乗り越えてきた。今回は、この日産自動車の生産工場をNissan Intelligent Mobilityの代表であるアリアの導入に合わせて、今までの取り組みをさらに加速・進化させることに取り組んだ。

進化させる上で最も重要な点は、1節で述べたような世の中で起こる“変動に対する柔軟性”と“変動に対する強度”を持つことである。知能化・電動化の加速に伴い、車両構造のハードとソフト両面の変化や多様化も多く起きており（図2）、内燃機関のクルマから電動車が主流となる生産工程に変えていかなければならない。機能面においてもConnectedやAutonomousに関連するこれまでにない多くの部品搭載や機能確認の工程が必要である。

図2　Nissan Intelligent Mobilityを代表するARIYAの特徴

また、労働人口減少により人の力に頼った生産工場では働き手が集まらなくなる。体力が求められる作業や単純作業の繰り返しなど敬遠されがちな仕事は排除し、働きたいと思ってもらえる職場を実現する必要がある。一方で労働集約型から脱

* 車両生産技術統括部

却していくと、人に求められる仕事のスキル領域が高度技術に移行していき、働き手が求める仕事の領域ややりがいを感じる仕事も変化していく。

パンデミックや天災、部品供給不足問題など、予期せぬ事態が発生した際は、生産量の短期的な増減に生産現場を対応させる必要があり、職場に行くことができない作業員を補うために人員編成を組み替える必要が出てくる。そのために複数の作業員に対して作業習熟を行い、控えさせておくなど通常生産以外の負担が増大している。

地球環境保護の観点から、世界中において多くの取り組みが加速し、これまで取り組んできた環境にやさしい取り組みをより高いレベルで挑戦していくことが必要となってきており、積極的な環境対策やクリーンなイメージを会社と製品に対して求めるような消費者心理の変化も起きている。

このような数多くの“変動”に対して、いち早く変化を捉え、その変化に合わせることができる“柔軟性”を持つこと、そして変化させたとしても想定を超える収益減少にはならないような通常生産では必要なかったコストをミニマムにする、あるいは変化に伴う品質悪化を未然に防止するなど、変化に対する“強度”を高めることが重要である。

“変動”に対する“柔軟性”を持つことと“強度”を高めることを進化の要として、要素技術開発と適用技術開発で培ってきた設備や機械を導入する。そして、それらがデジタル技術によって一つの生産システムとして繋がり、高度技術を持った人によって運営される工場をNissan Intelligent Factoryと呼ぶこととした。

Nissan Intelligent Factoryは工場としての競争力を確保することにも繋がり、Nissan Intelligent Mobilityを創造し続けることができる、数十年先も事業継続可能な生産工場になると考えている。

3. Nissan Intelligent Factoryの４つの柱

Nissan Intelligent Factoryは、１節と２節で述べた背景をもとに以下の４つの柱を掲げて、取り組むべき課題と狙いを定義した（図3）。それを軸とした各工程の最新技術アイテムとそれらを横断的に繋げる保全や品質管理に必要なシステムによってNissan Intelligent Factoryは構成されている。

図3　Nissan Intelligent Factoryの4つの柱

3.1　「未来のクルマを造る技術」

近年、加速しているCASE領域の変化に伴うクルマの高度化・電動化に追従した生産工場の対応が必要とされている。未来のクルマとはNissan Intelligent Mobilityそのものであり、複雑かつ高度技術が適用され、ユーザーの高まる多様性へのニーズに応える多種多様な仕様を持ったクルマのことと捉えている。

多種多様なお客様のニーズに応えるためには、パワートレインなど、多くのバリエーションが必要で、アリアは４仕様パワートレイン（２バッテリー×２駆動方式）の構成となっている。製品構造の共通部分と固有部分を見定め、固有部分だけを最小範囲で変動させるような製品設計・工程設計・設備設計を工夫しながら、現状だけでなく、将来の変更にも柔軟に対応できるような開発を進めた。

またアリアは知能化のためにクルマの制御をつかさどるECU（Electrical Control Unit）が従来の電気自動車リーフよりも２倍以上の78個搭載している。これに伴い、生産工場で行うデータ通信高速化のシステム開発とデータ書き込み工程の拡張を行った。

クルマの多様化に伴い、生産過程および出荷保証で起こりうる現象も多様化する。その複雑化した現象を的確にとらえるために品質データや設備の異常データをデジタル技術によって可視化し、働き手と設備全体がデータで繋がるシステムを構築することによってスムーズな生産運営を実現した。

〈新技術アイテムの事例〉

- パワートレイン一括搭載システム（図４）
- デジタル技術による早期作業習熟の実現（IOSS）
- 新接合工法 ディンプル溶接
- クルマの知能化に対応する電装システムの構築
- 磁石レス界磁モーターの巻線自動化（図５）
- 塗装外観自動検査
- 統合自動検査（仕様＆傷検査）
- クオリティゲートによる確実な品質保証
- 予知予防保全・リモートメンテナンス

図4　パワートレイン一括搭載システム

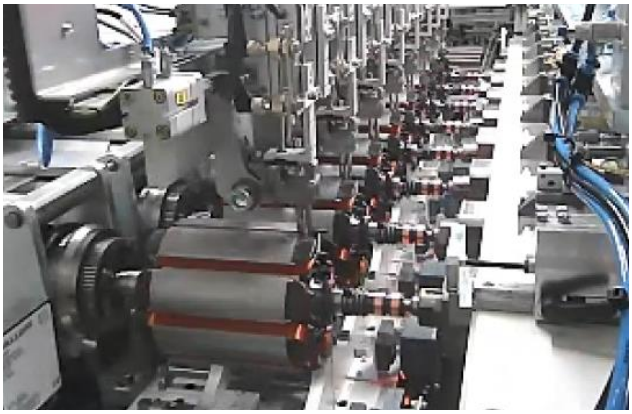


図5　磁石レス界磁モーターの巻線自動化

3.2　「匠の技で育つロボット」

匠の技とは、熟練者が経験や訓練を積み重ね、視覚、触覚、聴覚等の感覚を駆使して実行する仕事のことである。これは高品質のクルマを生産するために必要不可欠な要素である。その匠の技をロボットの作業や機械の制御回路に伝承することによって、匠は更なる付加価値の高い現場改善や、自動化が難しいとされる感性品質の検査や機械でも難しいとされる特殊作業だけに集中することができる。その結果が、最高品質のクルマづくりへ導くと考えている。

熟練者（匠）の仕事を繰り返し分析し、センシング～情報処理～アクチュエーションの領域を数値化した。さらに数値化だけでなく、匠が膨大な過去の経験を用いて自然と行っている判断の過程と結果をロジック化し、最新鋭の高性能センサーやカメラ、画像処理技術を組み合わせた要素技術と適用技術開発により、組立作業や品質検査作業における匠の技をロボットが実現できるようになった。

ロボットは正確な繰り返し動作や常に同じレベルで作業を行うことができ、特定の領域では匠を越えた品質をも実現できると考えている。もしも、予期せぬ事態が発生し、短期的な生産台数変動が発生したとしても、ロボットは素早く稼働と停止を繰り返すことができるため、余計なコストもかかることなく、変動に対する強度が高まったと言える。

〈新技術アイテムの事例〉

- サスペンションリンクの自動締付け＆自動アライメント調整（図6）
- ヘッドライニング自動組付け
- コックピットモジュール自動組付け
- 塗装外観自動検査
- 統合自動検査（仕様＆傷検査）（図7）

図6　サスペンションリンクの自動締付け&自動アライメント調整

図7　統合自動検査（仕様&傷検査）

3.3　「人とロボットの共生」

ロボットが得意とする重筋・上向き・腰曲げ・繰り返し作業、簡単なミスが重大な問題を引き起こすような人にとってはプレッシャーのかかる作業、または、多くのことを記憶する必要がある作業など、人にとっては苦手な作業を部分的に自動化させ、人への身体的/精神的負担を軽減させた。また、情報の収集や伝達などデジタル化による自動処理の利点を活用し、人の手間や負担を軽減した環境を作りこんだ。ただし、毎回異なる微調整が必要な作業などは人が得意なため、人が継続して行う。

このように、ロボットが得意とする仕事と人が得意とする、あるいは人がやりがいを感じる仕事を選定し、それらを最適に融合することを工夫し、人とロボットが共生する職場環境を実現した。

これによって両者の得意とする領域をそれぞれ高次元で引き出すことができ、誰でも働きやすく、女性や高齢者も活躍できる環境となり、働きがいを感じながら、活き活きと仕事ができる工場が実現できると考える。

〈新技術アイテムの事例〉

・パワートレイン一括搭載システム
・サスペンションリンクの自動締付け&自動アライメント調整
・ヘッドライニング自動組付け（図8）

図8　ヘッドライニング自動組付け

3.4 「ゼロエミッション化生産システム」

日産自動車は、会社全体として今まで風力や太陽光電力、コージェネレーションなどの積極的な採用をニッサングリーンプログラムとして取り組んできた。

2050年までに事業活動を含むクルマのライフサイクル全体におけるカーボンニュートラルを実現するために、今後は2030年にむけて風力、太陽光発電をさらに増やし、工場設備における動力源の電化を進める。代替燃料（バイオエタノール、水素、人口メタン、SOFCを使って発電）の採用にも取り組み、栃木工場において2022年からSOFCを生産工場で使用する実証実験を開始する予定である。

Nissan Intelligent Factoryは、革新技術の適用に合わせて工場設備の電化を進め、電力およびエネルギー使用量の効率化やリサイクルによるマテリアルフットプリントの低減に取り組むことによってカーボンニュートラル実現に貢献する。

例えば、塗装工程において、低温で硬化する水系塗料を新たに独自開発し、焼き付け温度を140℃から85℃にすることが可能となった。結果として使用エネルギーを25%削減することができ、これは大きなカーボンニュートラルへの貢献と言える。

〈新技術アイテムの事例〉

・ボディ／バンパー 一体塗装（図9）
・塗装ドライブース
・代替燃料による自社発電計画

図9　ボディ／バンパー 一体塗装

4. Nissan Intelligent Factoryがもたらす価値

クルマの電動化、知能化、多様化に対応した生産ラインを実現し、匠の技が伝承されたロボットによって自動化され、そして人とロボットが共生できる職場環境を実現することによって、様々な“変動”に対して“柔軟性”と“強度”が高まったと言える。例えば、パンデミックや半導体供給不足のような不測の事態においても、自動化が進んだ工程は需要に合わせてすぐに止めたり、動かしたり自由に稼働させることができるため、通常生産で発生しないような余計なコストも最小限とすることができ、それは変動に対する強度が高まった点である。

さらに、自動化やデジタル化の適用による省人効果やボディ／バンパー一体塗装のような工法の変更によりエネルギー費そのものも削減され、製造原価が安くなることによって事業収益にも貢献する。

このようなNissan Intelligent Factoryの導入効果は、自動車産業において、カーボンニュートラルの実現にむけて大きく貢献する上に、今後のクルマの進化や、環境の変化に合わせて生産工場も進化を続けることを可能にし、自動車メーカーとして数十年先まで事業継続を可能にする。

5. おわりに

Nissan Intelligent FactoryはNissan Intelligent Mobilityの代表であるアリアの導入に合わせて、アリアを生産する栃木工場へ最初の適用を行った。

2019年に発表したNissan Intelligent Factoryのコンセプトをこの栃木工場において2021年10月に社内外の皆様にも現物を見て頂きながら発表を行い、Nissan Intelligent Factoryの価値を発信することができた。このような社内外への発信も日産自動車のブランド向上やお客様の信頼度向上に貢献すると信じている。

今後は、更なるクルマの技術進化に合わせて、惜しみなく

技術開発を継続し、工場の設備更新と新型車展開に合せて最適な時期に日本の工場、そしてグローバルにも導入を進める。

図10　2019年 コンセプト発表時の様子

図11　2021年 栃木工場での発表時の様子

著者

岡口　秀寿

特集１：ARIYAから始まるNissan Intelligent Factory

2. 多様なパワートレインに対応した次世代のアンダーフロア工程の採用

土金　大真*　　宇賀治　篤史**　　内藤　祥久***

1. はじめに

昨今、世界的にカーボンニュートラルの取り組みが加速する中、日産自動車としても、ライフサイクル全体でのカーボンニュートラルの実現を目指している。その中の１つとして、車両の電動化（EV、e-Power）が今まで以上に加速される。

また一方で、生産現場に目を向けると、日本国内のみならず、欧米・アジア諸国においても、少子高齢化が進み、高技能者、働き手の減少が予想され、労働集約型産業である車両組立工場において、その対応が急務である。（図１）

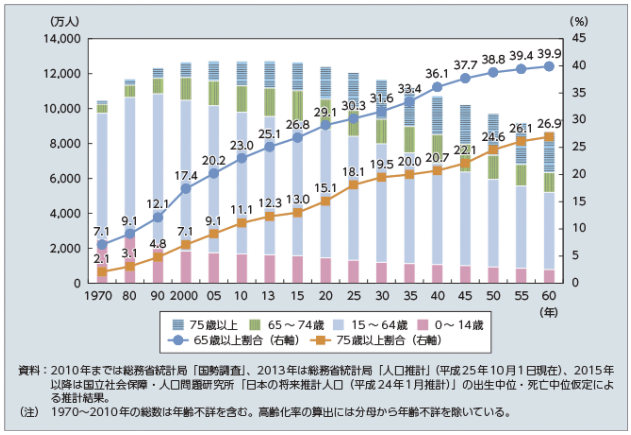


図1　年齢区分別人口及び高齢化率の推移

このように社会環境の変化の激しい時代となり、電動化に伴い車両も急激に変化をする。その変化にフレキシブルに対応するために、今回、生産技術として、栃木工場のNissan Intelligent Factory（以下、NIF）で採用した次世代のアンダーフロア工程について述べていく。

2. 次世代の生産現場に求められる工程像

上記の通り、車両の電動化・少子高齢化を踏まえると自動車の生産現場には大きく２つの対応が求められている。

2.1　フレキシブルな生産工程

脱炭素社会の実現に向け、今後、EV, e-Powerといったバッテリー・モーターを持つ電動車両が急増してくる（図２）。また、従来までの内燃機関の車両ICEについても、今後しばらくは生産が続けられる。

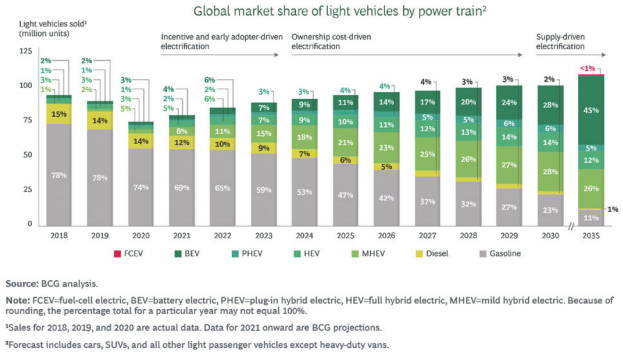
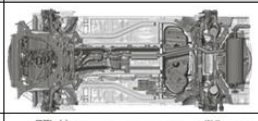
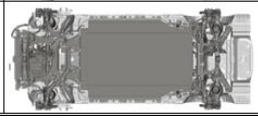


図2　電動車両の新車販売台数予測

このように生産現場においては、EV, e-Power, ICEといった新旧の多様なパワートレインを既存の生産ラインで効率良く生産することが求められる。しかし、電動車両と従来の車両では部品構成・構造が大きく異なる。（表１）　それにより、車種ごとに、工程・作業も異なることから、既存の生産ラインで混流生産すると、作業者は同一工程・同一作業ができず、サイクリックな作業ができないことで、品質・作業時間ともに大きなロスを生じてしまう。

表1　ICEとEVの構造差比較

車種	床下部品構造	部品点数	部品重量差	ボルト本数
ICE		16	―	32
EV		8	ICE+500kg	52

* 車両組立技術部　　** 生産技術研究開発センター　　*** 成型技術部

特に電動車両においては、今後、さらなる技術の発展と進化が予想され、電動車両構造のトレンドも流動的であり、生産現場としてその電動車両の車両構造にもフレキシブルに対応することが求められる。そこで、今回、既存の生産ラインを活用し、新しい工法を採用することで、多様なパワートレインを効率良く、フレキシブルに生産することを目指した。

2.2　誰でも働ける生産工程

現在、車両組立工場において、特に車両のアンダーフロア部品を組付ける工程においては、重筋作業、挙上作業（図3）といった高技能者による作業も数多く存在している。

図3　つらい挙上作業

さらに今後、世界的な少子高齢化により働き手が減少する。その働き手を確保するために、重筋作業、挙上作業といった作業者への負担のかかる作業を減らし、誰でも働ける工程づくりをすることが求められる。

また、車両の電動化においても、バッテリーの大型化、高重量化、それに伴う締付点数の増加（表1）が想定される。そこで、挙上作業が集中するアンダーフロア作業では、今まで以上に作業者への負担が増え、さらなる作業環境改善への対応も求められる。そこで、今回は作業者への負担の大きい作業を削減し、誰でも働きやすい生産工程の実現を目指した。

上記２つの次世代工程の実現に向け、今回栃木NIFで採用した２つのシステムについて、以下「3. アンダーフロア部品一括搭載システム」、「4. サスペンションリンク自動締結システム」で紹介する。

3. アンダーフロア部品一括搭載システム

前章で述べたフレキシブルかつ誰でも働ける生産工程の実現に向けて、アンダーフロア部品一括搭載システムを導入した。本章ではその取組について紹介する。

3.1　多様なパワートレインへの対応

車両のアンダーフロアに組付けるエンジンやトランスミッション等のパワートレイン部品や、EV車の大型バッテリーは、複数工程で専用リフターを用い組付けが行なわれていた。（図4 Before）

また、リフター上に設けられた“部品を支える受け”は部品仕様ごとに人手で交換する必要があった。構成部品が異なるICEやEVをこのような工程で混流生産すると、各工程の作業内容（段取り作業や搭載作業）の違いから作業時間の差が大きくなるが、最も作業時間が必要なケースで人員配置が行われるため、車種により手待ちロスが生じていた。

今回は工程設計を見直し、パワートレインの仕様差の影響を受ける作業をサブラインへ移動、作業の組み合わせで時間差を吸収すると共に、新開発のパレットシステムの採用により、サブ工程で組立てられた部品の車両搭載を１工程に集約、一括搭載する工程とした。（図4 After）

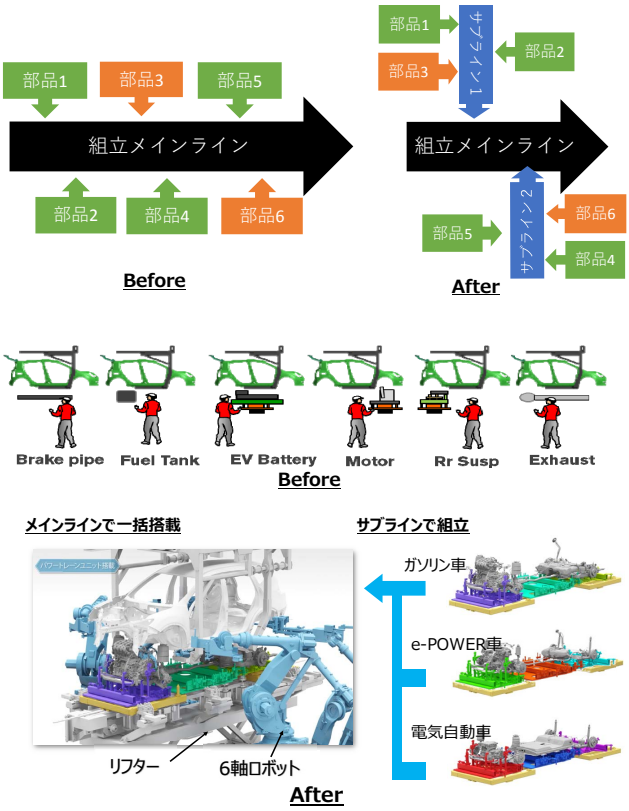


図4　アンダーフロア工程のBefore After

さらに、車体とアンダーフロア部品の寸法誤差を一台ごとに測定し、自動で位置合わせを行うロジックを開発することで、部品一括搭載の全自動化を実現した。

3.1.1　パレットシステム

従来の搭載工程では、“部品を支える受け”はリフターと一体とする方式であったが、今回、新たに上下２層のパレットシステムを開発した。（図5）

下層は搬送機能として形状固定し、上層は車体や部品との

接触部として、車種や将来のパワートレインに応じて交換可能な構造とした。

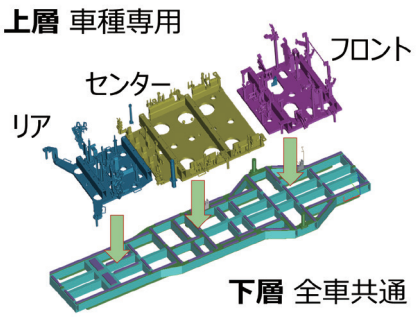


図5　2層式パレット

一般的なパレットシステムは、部品の受け及び搭載部品の精度ばらつきの影響を吸収する複雑なメカ調整機能を持っており、これを高精度に維持管理する必要があった。今回は、リフターに２軸のロボット式位置調整機能を持たせ、上層の各パレットをコンベア搬送される車体の位置に合わせることで部品精度のばらつきを吸収する方式を採用、パレットの精度管理を簡素化した。

また、パレットを介さずにダイレクトに締結ロボットへボルトを自動供給するシステムを開発し、従来、締結装置にボルトを供給するために必要であったパレット上のボルト治具を廃止、パレットコストを削減した。

3.1.2　位置合わせロジック

車体に組付けられたリアショックアブソーバーとリアパレットに搭載されたリアサスペンションリンクアームの組付けは、両者が組付けられる前の状態では下方よりリフトアップしても、そのままでは両者の位置が合わない為（図6）、車体の位置情報とサブラインで計測したリアサスペンションリンクアームの位置情報を用いて両者の位置補正を行うと共に、６軸ロボットでショックアブソーバの位置決めを行い、位置合わせを実現した。

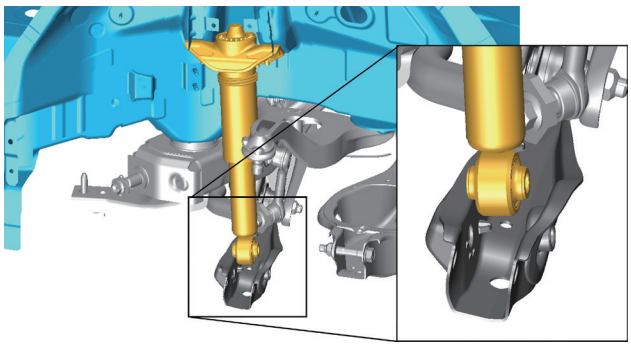


図6　リアショックアブソーバーの位置合わせ

具体的には、まず、リアショックアブソーバーを前工程で車体に取り付ける。（図７①）　次に、サブラインにて、パレット上のリアサスペンションの組立精度をビジョンシステムにて計測する。（図７②）

車体の位置についても同様にビジョンで計測し（図７③）、複数点撮影することで計測誤差影響を最小化、リフター上の２軸のロボットでリフター上の２軸のロボットでリアパレットの位置を調整してリアサスペンションを組付け位置へ移動させる。（図７④）

６軸アームロボットがリアショックアブソーバーを把持して、リアサスペンションの組立精度の計測結果を基に、リアサスペンションリンクアームの位置へと補正する。（図７⑤）リフターが上昇し、ドッキングを完了させる。（図７⑥）

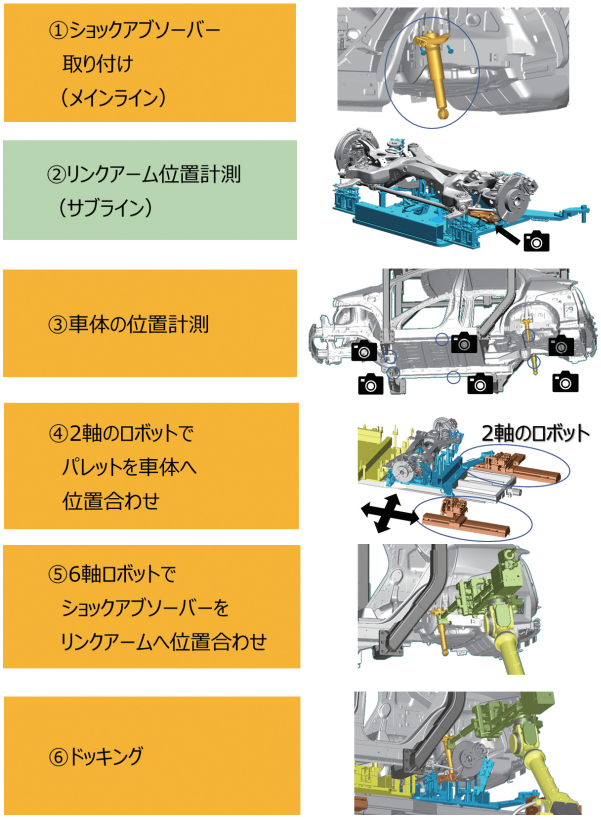


図7　リアショックアブソーバーの位置合わせフロー

3.2　締結工程の自動化

従来のアンダーフロア工程では、作業者は挙上作業による組付を行っていた。アンダーフロア工程の部品は重要部品であり、高トルクで信頼性の高い締結が必要なため、締結ツールも大型で高重量となっていた。また、締結部位ごとにボルトサイズや締結トルクが異なることから、ツールの持ち替えが頻発し、負担の高い作業となっていた。本章の２節で述べた誰でも働ける生産工程を実現するにはこれらの課題を解決する必要があった。以下に紹介する。

3.2.1　インライン自動締結の実現

アンダーフロア工程における高負荷の締結作業を廃止するために、締結の自動化を推進した。位置ずれにロバストで自動締結に適した先巻きボルトを採用すると共に、車両部品に対しては自動締結に有利となる位置決め構造を織込んだ。また、ボルト供給装置の構造上ボルトは下向きに搬送されロボットに供給されるが、締結は上向きで行うため、ボルトの反転が必要となる。そこで、自動で一本ずつボルトを反転させ、車体の締結方向へ整列させて供給するする独自のボルト反転装置を開発した。M8からM14までのボルトサイズを締結するために、ソケットサイズをワンタッチで切り替えできるフレキシブルなソケットシステムを採用した。

アンダーフロアの締結点にボルトをセットするには、パレットやパレットを搬送するコンベアなどの障害物の狭い隙間を通してアプローチする必要があるため、1.4mを越えるロングツールを採用し、締結点の位置を測定し補正を行うビジョンシステムはロングレンジでも精度を確保できるものとした。これらの採用により、パレット上の部品精度、搭載精度、搬送設備の製作精度、停止精度のばらつきの影響を排除し、ボルト位置補正精度±0.5mmを確保、締結の完全自動化が実現できた。(図8)

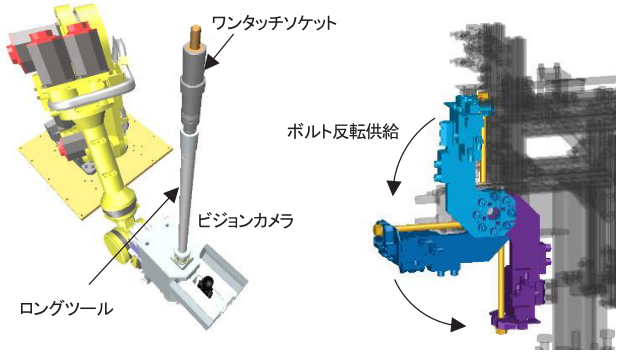


図8　ボルト供給システムと自動締結ロボット

4. サスペンションリンク自動締結システム

前述の通り、メインラインのアンダーフロア作業に生じる課題はサブラインにおいても発生するため、同様に取り組んだ。本章ではその一例として、マルチリンク形式のサスペンションユニットのリンクボルトを自動で締結するシステムを紹介する。

4.1　リンクボルト締結構造

サスペンションユニットは、モーターユニットを積載したサスペンションメンバーと、タイヤの回転軸となるハブやブレーキローター、ブレーキキャリパーによって構成されるアクスルモジュール、及びサスペンションメンバーとアクスルモジュールを接続するリンクによって構成されている。リンクとアクスルモジュール、リンクとサスペンションメンバーは、それぞれの部品を貫通するボルト―ナット構造で締結されている。(図9)

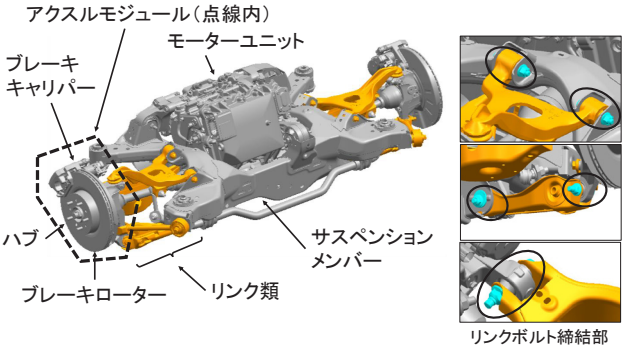


図9　サスペンションユニット　リンクボルト締結構造

このリンクボルト締結工程では、従来、アンダーフロア工程同様に作業者が手に持った高トルクで高重量のツールを、一つの工程の中で多様な車種と締結部位に応じて使い分けながら作業する必要があった。(図10)

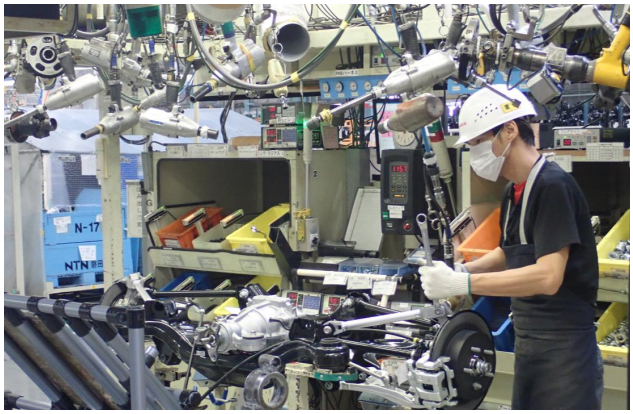


図10　使い分けが必要な締結ツール

さらに、ボルト―ナット構造の締結では一方に締結ツール、もう一方に回り止め用のスパナをセットする必要があるため、作業者は利き腕ではない手で締結部位に高重量のツールを合わせる両手作業を行っていた。

本設備では、このような身体的負担の大きい両手作業となるリンクボルト締結作業を自動化するために、ロボットと締結ツールの組み合わせ方を工夫して解決した。

4.2　2台のロボットによる挟み込み締結

ロボットと締結ツールで構築する自動締結システムには大きく3つの課題がある。

一つ目は、搬送台車・治具・ワークの寸法精度の積み上げによって生じるボルトの位置のばらつきである。これにより、ロボットに教示した位置をプレイバックするだけでは、ボルトの位置と締結ツールの位置が合わず、ボルト―ナットを回転させることができない。

二つ目として、図9で示したように、リンクボルト締結部は周辺の部品も含めて部位ごとに異なった形状となっており、これらの形状・配置に合わせて締結ツールをアプローチさせる必要がある。三つ目として、締結時の反力受けと回り止めを形状に合わせて設計した専用ツールを使用すると、締結部位数に比例して締結ツールとロボットの数が増えることになる。その場合、作業者工程のように1か所で複数部位を締結することができず、大きな設備設置エリアが必要となる。

これらの課題を解決するために、本システムでは、作業者が両手で汎用ツールを用いて複数部位を締結する作業をロボットで再現させるべく、ビジョンシステムとツールチェンジャ機構を有した2台1組のロボットをワークの左右に配置した。（図11）

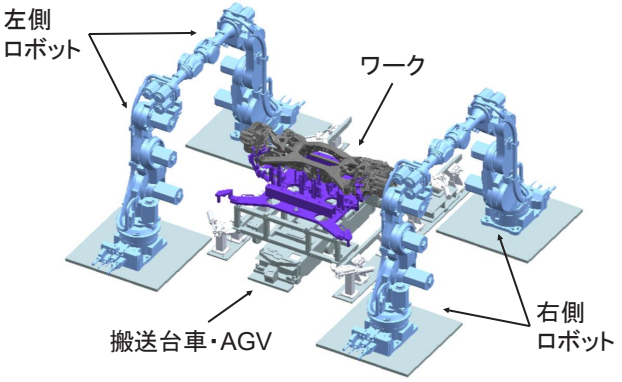


図11　2台1組のロボットによるリンクボルト締結

まず、ボルト位置のばらつきに対しては、アンダーフロア工程と同様にNIFとして開発したビジョンシステムを適用し、汎用の安価な機材での3D位置補正機能を導入した。一組のロボットのうち、片方にカメラを設置しており、これによって対象ワークの位置を検出する。検出した位置情報をもう一方のロボットと共有し、2台が同じ情報に基づき動作を補正することで、ボルトの位置ずれに対応させている。

次に、締結部位ごとに異なる形状に対応し、かつ最小限のエリアで実現するために、汎用形状のツールを2台のロボットで独立して動作させて締結するシステムを開発した。

2台のロボットには、それぞれ締結側のナットを回転させ締結トルクを制御する締結ツール（ナットランナ）と、回り止めのためのスパナを取り付けている。2台のロボットが独立して動作し、締結側と回り止め側を挟み込むようにして締結する。締結ツールは車種や締結部位ごとの専用ツールではなくシンプルな汎用形状のため、同じツールで複数の部位にアプローチし締結することが可能である。（図12）

さらに、ロボットと締結ツールとをツールチェンジャ機構を介して接続したことで、締結部位に応じて使用するツールを持ち替えながら、合計10か所を4台のロボットと4本のツールで締結可能である。このようにして、締結部位数に対してロボットとツールの台数を半分以下に抑えたコンパクトな設備を実現した。

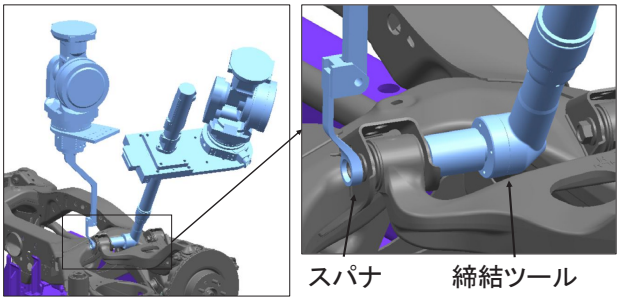


図12　ロボットによるボルト―ナット挟み込み締結

また、これらの課題解決に加えて、作業者同等の作業スピードと確実にツールをセットするロバスト性を実現するために、ロボットの制御に高技能者の作業方法を取り込んだ。

ボルト―ナット挟み込み締結において、締結側のツールはソケットを回転させながらナットに押し付けることで、ナットの6角とソケットの6角の向きが揃い、ナットがソケットに入る。一方、回り止め側は固定されたスパナを押し当てるだけではボルトに入らない。

上記解決方法として、作業者がボルト軸を中心にスパナを回転させながら6角の向きを合わせてスパナをセットする動作に注目し、ロボットにこれを再現させることを考えた。ただし、この動きをロボットで再現しようとすると、ハンドに保持したスパナを動かすために多関節ロボットは全体の姿勢を変えながら動くことになる。狭小部位にアプローチするリンクボルト締結ではロボットの可動範囲が制限されるため、姿勢を変えながらスパナを動かすことが困難であった。

そこで、本システムではスパナを保持するハンドの回転軸（J6軸）をスパナ中心と一致させた構造のハンドを設計した。（図13）これにより、ロボットの姿勢を変えることなくスパナのみの回転が可能となり、狭小部位でも周囲と干渉することなくボルトにスパナを素早く確実にセットすることが可能となった。

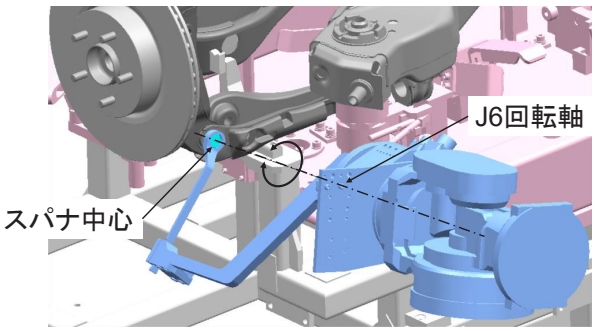


図13　スパナハンド

以上のように、本システムは汎用のロボット・安価なビジョンシステム・シンプルな締結ツールを組み合わせたコンセプト

に、作業者の技能を再現した動作を組み合わせることで実現したものである。

5. おわりに

上記のように、今回、栃木NIFに2つの生産システムを採用し、多様なパワートレイン、サスペンションユニットにフレキシブルに対応した次世代のアンダーフロア工程を実現することができた。そして、今後の新型車導入においても、設備の変動部と固定部を切り分け、ソフトウェア制御のロボットを採用することで、ハードウェアの改造を最小限にし、新型車の生産準備における設備投資低減と生産準備期間の短縮にも貢献することができた。

また、作業者の負担のかかる重筋作業、挙上作業も約15%削減することができた。さらには、締結品質を設備が保証することで、重要保安工程の作業者の身体的負担だけでなく、心理的負担も合わせて削減し、誰でも働きやすい生産工程の実現をすることができた。

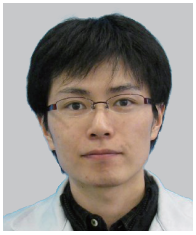
今後も、日々進化し続ける技術革新と世界規模で変化し続ける社会環境に迅速に、フレキシブルに対応しながら、今回、NIFに採用した技術にさらなる進化を加え続けていく。そして、それらをグローバル拠点へと展開し、生産技術部門として、挑戦し続けていきたい。

6. 参考文献

1) 厚生労働省ホームページ 26年版厚生労働白書
2) ボストン コンサルティング グループ「Why Electric Cars Can’t Come Fast Enough」(2021年4月)

著者


土金　大真


宇賀治　篤史


内藤　祥久

特集1：ARIYAから始まるNissan Intelligent Factory

3. 新モーターラインにおけるデジタル、IoTを活用したモノづくりの革新

飯塚　悟*

1. はじめに

DX（Digital Transformation）という言葉は世間でも認知されるようになっているが、生産工場も例外ではない。昨今のコロナ禍において工場の製造部は出勤が必要である一方で、技術スタッフは在宅勤務が定常的になっている。このため在宅勤務の環境においても工場の生産状況をリアルタイムに把握し、生産をサポートすることが求められる。それを実現するためにはIoTを始めとするデジタル技術の活用が不可欠である。筆者の所属するパワートレイン生産技術開発部門では、品質不具合ゼロ及び品質の安定化（製品の品質や生産条件を管理レンジ内に収めるだけでなく、規格レンジの中央＝ノミナル値狙い）や、生産効率の指標である設備総合効率（OEE）95%を目指した活動を進めている。栃木の新モーターラインではデジタル技術を活用することで、これらの目標達成をすべく、数多くのデジタルシステムを導入している。（図1）

本章では、これらのシステムで解決しようとしている課題と、システムの概要について紹介する。

2. デジタル技術の適用を進める上での現状と課題

目標の達成に向けて、様々な課題を抽出しているが、デジタル技術での解決が期待されるものも多い。本章では主要な2つの課題をピックアップしてご紹介する。

2.1　高いレベルでの製品品質の安定化

製造業各社においては製品品質の管理に注力されているかと思うが、日産自動車においても製品の品質管理は最重要課

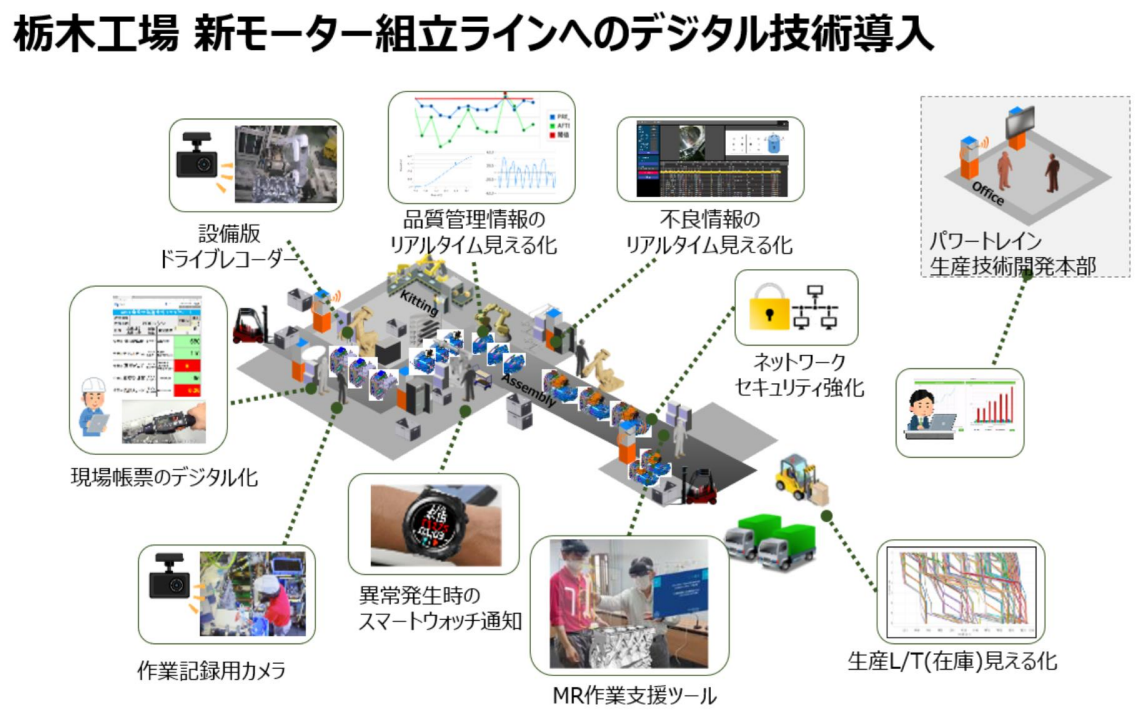


図1　新モーター組立ラインのデジタルシステム

* パワートレイン技術企画部

題になっている。品質保証部を旗振り役として、生産技術部、製造部が連携して、高いレベルでの品質の確保に取り組んでいる。日産自動車で取り扱う製品ラインナップは、エンジン車からe-Power（HEV）及びEVへのシフトを進めているが、新車プロジェクトで管理する品質管理項目は年々増大している。製造現場では品質の傾向管理を日々のQRQCなどで行っているが、チェックする項目数は数百にのぼるため、人手による確認では傾向の変化に気づくのが遅れ、対策が後手に回ってしまうことも少なくない。品質を維持、向上させていくためには、品質傾向が悪化する前に予兆に気づき、設備の生産条件へいち早くフィードバックすることが重要である。現在のデイリーのチェックから、更に時間単位、分単位と、いかにリアルタイムでの管理に近づけていけるかが課題である。

2.2　高効率な生産

製造現場におけるもう一つの課題は生産の効率を向上させることである。生産設備でチョコ停が発生した際の復旧作業は製造現場に任されているが、復旧時間は製造現場のメンバーや班によってバラツキがある。より高効率の生産を行うためには復旧時間のバラツキを最小限に抑える必要があるが、各班の実力把握を定量的かつタイムリーに行えていないのが現実である。複雑化する製造現場の業務において、監督者・作業者の負荷を低減し、より効率的に生産を行える環境を整えることが課題である。

更に製造現場の人による作業員の教育の効率化も課題の一つである。特に新車プロジェクトにおいては、作業品質を向上させるため、教育にも多くの時間をかけている。しかし従来通りビデオや紙を使った教育コンテンツや、OJTだけでは、これ以上の効率化は難しいため、作業者が自己学習をより簡単に行える仕組みが課題である。

3. 新モーターラインへ導入したシステムの紹介

本章では栃木の新モーターラインに導入したシステムより、前述の課題に対する方策として導入したものをご紹介する。

3.1　データのリアルタイム見える化と内製アジャイル開発

本章の2.1で述べたように、製品品質を安定させるには品質傾向が悪化する前に予兆に気づき、設備の生産条件へいち早くフィードバックすること必要である。しかし従来は品質不具合が発生した際、生産技術の担当者が生産設備から必要なデータをUSBメモリで抜き出し、Excelを使って変化点の分析や、見える化を行っていた。このため不具合の事後にしかアクションを取ることができていなかった。品質不具合と、それに付随する仕損を削減するには、不具合が発生する前に検知を行いたい。

そこで新ラインではリアルタイムに生産設備の情報を収集し、見える化するシステムを導入した。結果系である品質測定結果だけでなく、要因系である生産設備の生産条件も含めてリアルタイムに見える化を行う。これに加えて、設定した閾値を超えた際は担当者へ通知することで、品質不具合が発生するよりも前に気づくことができ、品質改善活動へのフィードバックサイクルを加速することができる。技術スタッフは在宅勤務でもその情報をもとに現場をリモートでサポートする。

こうしたシステムは従来からいくつか採用されているが、その多くはパッケージソフトをベースとしている。またパッケージの標準機能で不足する場合はカスタマイズ開発を行うことが常である。このカスタマイズは日産自動車では受託開発という形で社外の協力会社へ依頼することが多い。ここでの課題がソフト開発完了までのリードタイムである。外部委託の場合、成果物保証の観点から開発方式はウォーターフォール方式であることが多く、要件定義、仕様策定、システム開発、テストから納品まで最低でも数か月を要してしまう。

しかし製造現場で求められるスピード感はもっと速い。ラインで新規不具合が発生した際には、システムで実装していないグラフであっても、必要なセンサーをすぐに取り付け、翌日には見えるようにすることが求められる。このため従来のシステム開発方式では対応しきれず、結局昔ながらにUSBメモリでデータを吸い上げて、Excelでグラフを作成するという業務が発生する。システムが出来上がる頃には品質影響要因は特定され、設備対策が完了しており、結局意味のないものとなってしまう。

外部委託の場合、成果物保証がされてないアジャイル方式の採用が難しいこともあり、新ラインでは外部委託ではなく、社内に開発部隊を置き、内製で見える化開発を行うためのシステムを導入した。ベースとなるシステムはデータ収集、蓄積、見える化（グラフ等）を行える機能を有しているソフトを選定している。画面の作成や、データフローの変更といったカスタマイズを社内の人間が行えることが特徴である。開発はアジャイル方式を採用し、細かい単位でPDCAを回した開発を行う。製品の新規不具合発生時のようにすぐにでもグラフ化したいケースでは、まず初版で必要最低限の機能を短期間でリリースし、後付けで通知機能などを付加することで、製造現場のニーズに迅速、かつフレキシブルに対応することが可能になった。図２は内製で開発した画面の一例である。この画面の主要機能は比較したい2種類のデータの検索とグラフ表示である。この程度の機能のボリュームであっても、外部委託では開発期間が３か月程度かかってしまうが、内製開発により１週間まで短縮することができた。

図2　データの見える化　システム画面

3.2　設備異常スマートウォッチ通知

2.2の記述通り高効率な生産を行うためには、チョコ停発生後の復旧時間は最低限に抑える必要がある。従来、生産設備でチョコ停が発生した際は、アンドンやパトライトを見て異常に気づいた現場作業者が対応を行っていたが、新ラインでは設備異常発生時に現場作業者が装着するスマートウォッチ(図3)へ通知するシステムを開発、導入した。スマートウォッチでは設備異常が発生した設備名、異常内容を確認できるため、復旧作業の着手開始を迅速に行うことができる。また対応を行う作業者がスマートウォッチで対応開始ボタンを押すことで、他の作業者は、誰が対応しているかを認識することができるので、自分の作業に集中することができる。本システム導入効果は、過去の導入実績よりOEE 2%程度の向上を見込んでいる。生産ラインでは日々の改善活動においてコンマ数%の改善方策を積み上げており、本システムによる2%の向上効果は目を見張るものがあった。

一方、本システムでは設備異常の内容や、異常発生から着手、復旧までの時刻を蓄積している。日産自動車ではこれら情報から、勤務番や班構成メンバーによる対応時間の差異を分析し、作業班編成、人員配置、作業動作などの改善ポイントの発見に活かしている(表1)。

なお本システムにおいて将来的には生産設備のチョコ停を事前に予測する機能を織り込み、復旧時間のさらなる短縮を目指していく。

図3　設備異常を通知するスマートウォッチ

表1　異常停止の発生回数と作業班ごとの対応時間

作業班	異常発生回数	着手までの平均時間	備考
A 班	333	3:29	平均レベルの指導員、作業者(正社員)
B 班	227	2:20	技能の高い指導員、作業者(正社員)
C 班	335	3:56	技能の高い指導員、期間工

3.3　MR (Mixed Reality) による作業習熟

2.2で述べた高効率な生産のためには、監督者が新人の教育に要する時間の短縮も課題である。新車プロジェクトでは数回の試作ロットを経てから量産開始となるが、途中で設計変更や、工順・作業内容の変更が発生した場合は、また一から教育を行わなくてはならない。デジタル技術により教育工数を削減し、作業者の習熟期間を短縮することが課題となる。

新ラインではxR技術の一つであるMRを活用した作業習熟システムを開発した。本システムではMRゴーグルを使用する。ゴーグルを装着した作業者は、作業順や作業時のポイントについてホログラムを通して習熟することができる(図4)。従来の紙やビデオといった2Dの情報では理解しづらい組付位置といった情報も、モーターの実物に対してホログラムで指示できるため、誰でも容易に理解することができるので、習熟時間を短縮できる。

このシステムがあれば作業者は監督者が付き添わなくとも自習することができるため、監督者の教育工数も削減できる。新モーターラインでは監督者の教育工数を90%、作業者の習熟時間を50%削減することができた。

また作業者がトレーニングした後は、作業者目線の映像が記録として残るので、監督者は正しく作業を理解できているか、習熟度合いはどの程度かをチェックし、作業者へフィードバックすることができる。

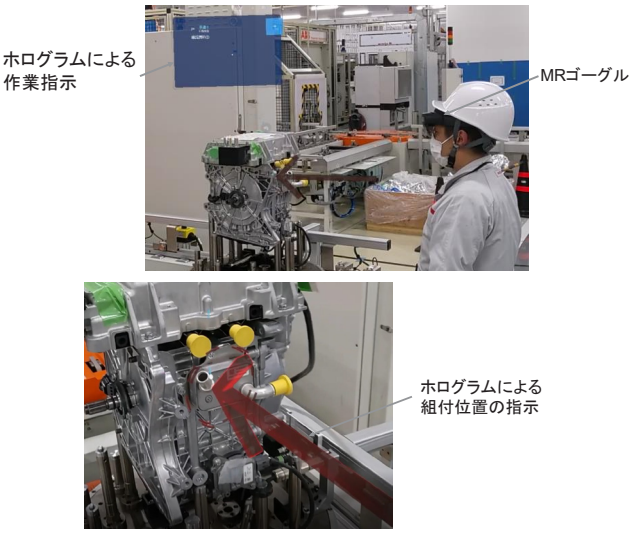


図4　ホログラムを活用した習熟作業の様子

4. まとめ

デジタル技術を活用した3件のシステムを紹介したが、これらはラインに特化せず、汎用的なシステムとして開発したものであるため、日産自動車内でグローバルに展開できるものとなっている。今後、順次適用範囲を広げていくことで、グローバル拠点においてOEE 95%、品質不具合ゼロ、そしてノミナル値狙いへと結びつけていきたい。

一方、デジタル技術を活用していくためのステップは、データの取得 ⇒ 見える化 ⇒ 自動分析・予知 ⇒ 自動制御 の順に難易度が高くなっていく。日産自動車では見える化や自動分析の一部の領域に着手した段階であるが、これらの技術をより広範囲に広げていくにはいくつかの課題が挙げられる。その一つが人財の確保である。日本は欧米や中国、韓国、シンガポールといったアジア諸国と比べてもデジタル化が遅れていると言われているが、この主要因の一つが人財の不足である。データサイエンティストのような高技能者の確保も必要である一方で、デジタルシステムを活用する側、つまり製造現場の人たちのデジタルリテラシの向上についても必要性が高まっている。

従来、紙で行っていた始業点検をタブレットで行うというだけでも製造現場では大きなストレスとなる。製造現場がシステムへの苦手意識から、その使用を敬遠してしまうという過去の事例もあったため、これに対する方策として日産自動車ではデジタルシステムの教育実施に加えて、製造現場の者が困った時に相談できる窓口を設置している。さらにシステムを活用した現場作業について標準作業（手順）書への織り込みを進めている。

しかし、システムを活用し最大限の効果を得るためには、これらの方策だけではまだ不足している。例えば、保全部署の人財の不足は今後解決すべき課題の一つである。システム導入後にトラブルなどでシステムが正常に動作しない時は保全部署で対応しなくてはならない。保全部署にもデジタルに関する知識、スキルを持った人財はいるものの、まだまだ不足しているのが現状である。

デジタル技術はツールの一つであり、人がうまく使いこなせなくてはその効果を得られない。デジタル技術を適用する際は、製造現場における作業と融合させて活用し、製造現場が効果を実感できることが最大のポイントである。またその状態を維持、管理していくためにも、こういった人財確保、育成はシステムの開発、導入とセットで考えるべきであり、日産自動車においても直近の課題として取り組んでいきたい。

著者

飯塚　悟

特集1：ARIYAから始まるNissan Intelligent Factory

4. ボディ／バンパー一体塗装工法開発による革新工程の実現

後藤　丈志*　　岡本　倫幸**　　道浦　千惠***

1. はじめに

2015年当時、国内の主要な塗装工場は建築後35年以上を経過し老朽化に伴う設備更新の必要性に迫られていた。

ここで、一言で塗装工場と言っても実際は「前処理・電着工程」「シーリング工程」「中塗り工程」「上塗り工程」「仕上げ工程」と複数の加工工程が組み合わされている一大プラントである。これら設備の更新費用は建屋更新まで含めると100億円を超えることからそのサイクルは25年～30年毎で考えることが一般的である。

この様な背景の中、日産自動車の栃木塗装工場においても更新の企画が持ち上がった、この検討が今日のNissan Intelligent Factory（以下、NIF）の起源となるものであった。

そのキーコンセプトとして

✓ 20年後でもQCT競争力がある生産設備であること

✓ カーボンニュートラル実現へ向けた省エネ設備の構築

✓ 環境汚染物質であるVOC（揮発性有機溶剤）の排出規制を掲げ検討が進められることとなった。

本稿におけるボディ／バンパーの一体塗装は上記を解決するための方策として開発された新技術であり以下その詳細を述べる。

2.「ボディ／バンパー一体塗装技術」とは

ボディ／バンパー一体塗装技術とは、従来別々の場所（＝工場）で生産されていた金属製の車体と樹脂製のバンパーを同一工場で生産することを可能とする技術である。

主にそのメリットは二つのプラントの統合による合理化効果より得られ

① イニシャルコスト削減（15％減）

② ランニングコスト削減（25％減）

③ CO2排出量削減（25％削減）

と非常に大きな効果を生む。

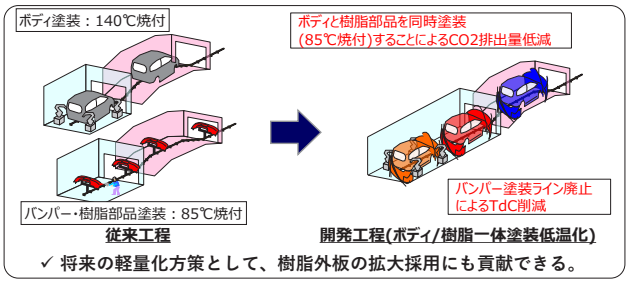


図1　一体塗装概念図

加えて、ボディとバンパーを同一エリアで生産することで、塗装現場で発生する色合わせ（カラーマッチング）問題を完全に撲滅することが可能となる品質面でも非常に大きな効果を発揮する新技術である。

3. 一体塗装を実現させるための開発内容

ここからは、ボディ／バンパー一体塗装を実現させるための具体的開発内容について詳細を述べていく。

従来方式としてのいわゆる別体塗装では、塗装対象としての素材が「金属」と「樹脂」と異なることから、それぞれの専用材を用いて塗膜を形成し性能を満足させていた。そのため、金属製の車体用塗料と樹脂製のバンパー用塗料は要求性能及び焼き付け温度が異なるものとなっていった。主な性能差として「車体用塗料は剛直（＝高強度）な塗膜性能が必要であり、その性能を保証するために140℃で20分の高温で焼き付けるタイプの材料のみが存在した。一方で樹脂用の材料は柔軟であることを求められ、且つ熱溶融による変形を避けるため85℃という比較的低温で焼き付け完了する様に設計されていた。つまり完全に別物であった。（表1参照）

* 車両生産技術開発本部　** プラットフォーム・車両要素技術開発本部　*** 車両生産技術開発本部

表1　ボディ用塗料とバンパー用塗料の要求性能差

	共通性能	特有性能	塗膜物性
ボディ塗装（140℃）	・耐候性 - XWON、自然暴露 等 ・耐擦り傷性 - 洗車機、乾拭き 等 ・密着性 - 温水、耐湿、熱サイクル 等 ・大気降下物 - 酸性雨、鳥糞、花粉 等 ・薬品性 - ｶﾞｿﾘﾝ、ｱﾙｶﾘ、ﾜｯｸｽ 等 ・副資材の相性 - 両面ﾃｰﾌﾟ、PGF 等	・耐チッピング性（衝撃吸収能が低い鋼板上） ・ウィンドガラス接着性（高い剥離力に対する耐力）	剛直で高強度な塗膜（入力に対する耐力）
バンパー塗装（85℃）		・軽衝突性（樹脂基材の変形への追従性） ・裏面チッピング割れ性（自車の石はねによる変形への追従性）	柔軟で高伸び率な塗膜（基材に追従できる伸び）

そこで、今回はボディとバンパーを同時塗装するために、焼き付け温度が85℃でよく、それぞれの特有性能を満足する共通材料の開発に取り組んだ。

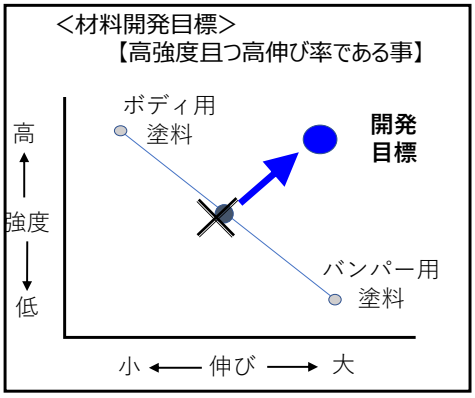


図2　共通材料　開発目標概念

4. 材料開発詳細

ボディ用塗料を低温焼き付け化（140→85℃）することで従来熱硬化により得られていた塗膜強度が確保出来なくなる。そこで今回は低温でも硬化が期待出来るNCO（イソシアネート）を使用した2液硬化型塗料を活用した材料開発に着手した。当時水系の低温3ウエット材料の採用事例はなく業界初の試みであった。

材料を設計する上で、2液型塗料は高価であり且つ塗装機毎に混合装置を投資しなければならないという点を考慮する必要があった。この事は、生産ラインにおいて色数の少ない中塗り及びクリア塗料への2液材の採用は可能であるものの、色数が多く2液化するとコスト高になるベース塗料については現実的な選択肢ではなかった。

そこでベース塗料については従来型1液材料を維持することとし、その場合でも低温にて硬化させるために下層の中塗り及び上層のクリアからのNCOを含侵させる方式（＝サンドイッチ方式）を採用することでこの問題の解決を図った。つまり、ベース塗料を塗装し成膜させた後に他層中のNCOを使い混ぜる方式を発案した。

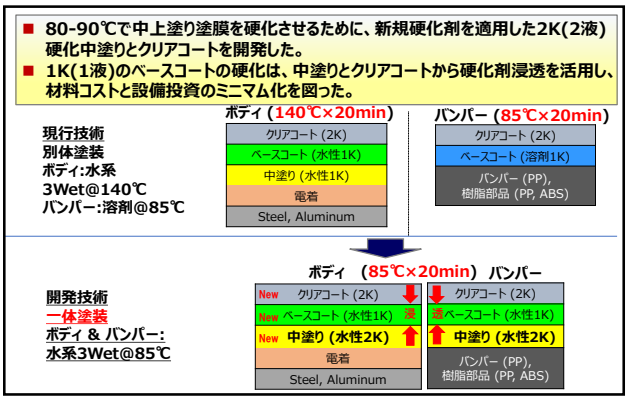


図3　共通材料構成図（サンドイッチ法）

このサンドイッチ方式を採用し、高強度であり且つ柔軟で伸びのある塗膜を得るために、以下の如く材料の基本組成を決定していった。

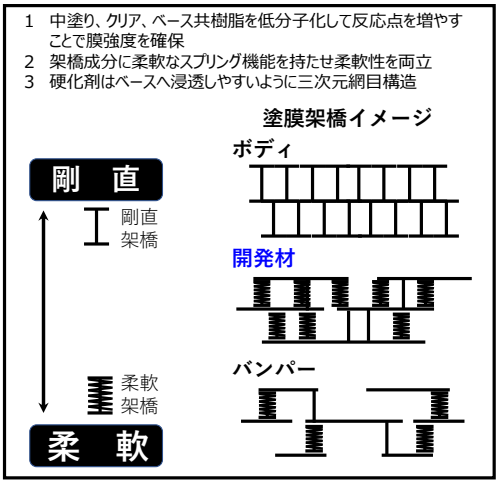


図4　共通材　塗膜設計概念図

上記思想に基づき作成した塗料について、「塗膜としての基本性能確認」及び実際にラインで生産成立性を確認するための「作業性評価」を並行して実施した。

従来それらは順番に行う方式が取られていたが、今回は全くの新材料であり過去の経験が適用出来ない可能性が大いにあったことから、これらを同時並行に行い手戻りによるロスを最小とすべく取り組んだ。

加えて「焼き付け温度」「膜厚」「硬化剤の混合量」等生産ラインでのバラツキ要因及びその変動範囲を洗い出し、限界性能（＝品質上の崖）への距離を正確に把握しながら進めたことでロバスト性の高い材料開発とするべく留意した。

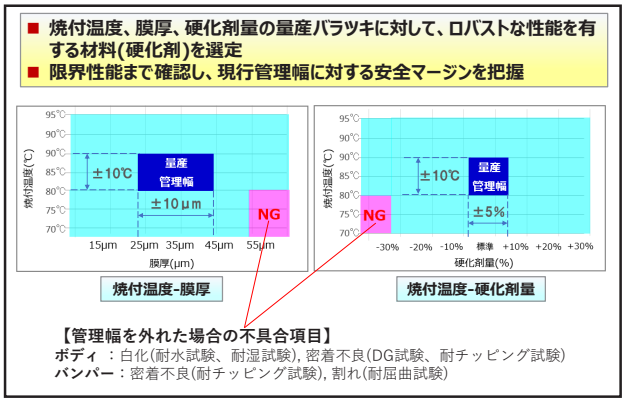


図5　焼き付け温度と膜厚･硬化剤変動の関係

5. その他一体塗装を支える技術

5.1　一体塗装向け低温オーブン開発

樹脂パーツと鋼板製の車体を同時に焼き付けするため、乾燥炉の吹き出し温度を樹脂の熱変形限界温度（95℃）以下で管理する必要がある。この様な形で吹き出し温度に制限を掛けた場合車体ドアのインナー部等で規定温度までの昇温に従来の倍以上の時間が掛かり、焼き付け乾燥炉の炉長が長くなってしまうという問題が生じた。

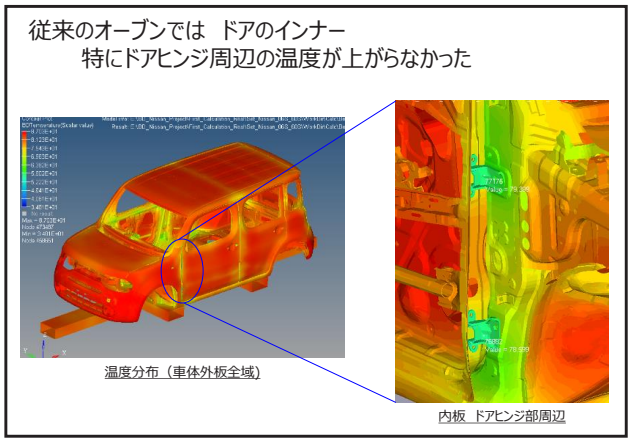


図6　焼き甘部例(車両　ドアヒンジ周辺)

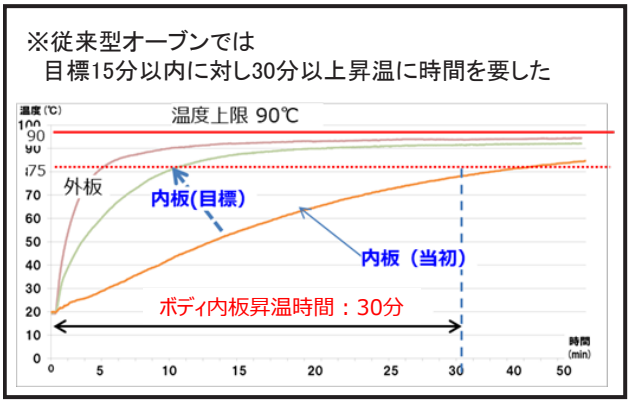


図7　内板昇温カーブ目標及び当初発生した昇温不良

そこでこの問題を解決するため、高次精度TVDを取り入れた流動解析を用い適正な風速・風量を算出し新たに焼き付けオーブン内ノズル形状を設計することとした。以下が車体内部への熱風の流入量を変化させたシミュレーション検討結果であるが、従来型オーブンでは車体内部に熱風がアプローチ出来ておらず対流による熱交換が外板でのみ起きていたことに対して、風量・風速を増加させたものでは十分に内部へも熱風が投入され内板壁面での対流が起きていることが確認出来る。これにより実ラインでは内板部においても目標の昇温カーブを確保することが可能となった。

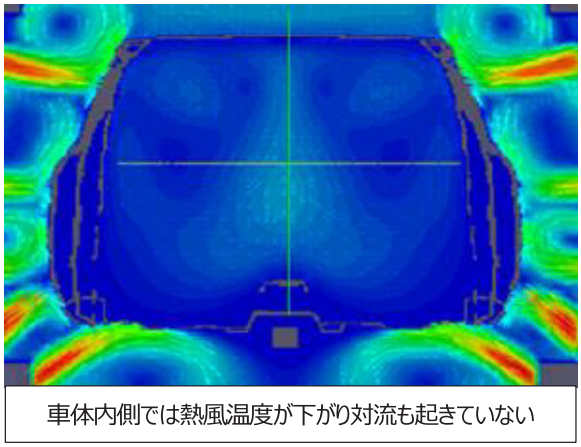


図8　従来型乾燥炉　シミュレーション結果

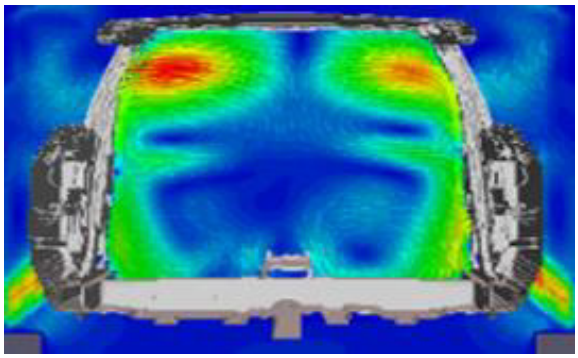


図9　一体塗装用乾燥炉　シミュレーション結果

5.2　一体塗装条件下での色合わせ

自動車塗装ラインにおいては材料の歩留まり向上の為静電塗装が行われている。このため、導電性の異なる鋼板製の車体と樹脂パーツをやみくもに同時塗装しても同じ発色を得ることは出来ない。

この問題を解決するためには下記全ての条件を同一とする必要がある。

① 塗装環境（温度・湿度・ダウンフロー風速）
② 塗装材料
③ 塗装条件（吐出量・回転数・SA流量・電圧）
④ 塗装軌跡（被塗物間距離・塗装ピッチ・速度）
⑤ 膜厚

特に⑤項について、静電塗装による効果を等価とするため、各ワークの導通性を全く同じレベルとすることが重要なポイントとなる、言い換えると素材間で導通性に差を作らないことが重要ということになる。

そこで今回は、その導通確保を水系塗料そのものを用い、各パーツのアースポイントから塗装することで素材を選ばず同一な通電性を確保する方式を採用した。これにより、全ての素材について同一の色調が確保可能となり良質のカラーマッチが得られる。

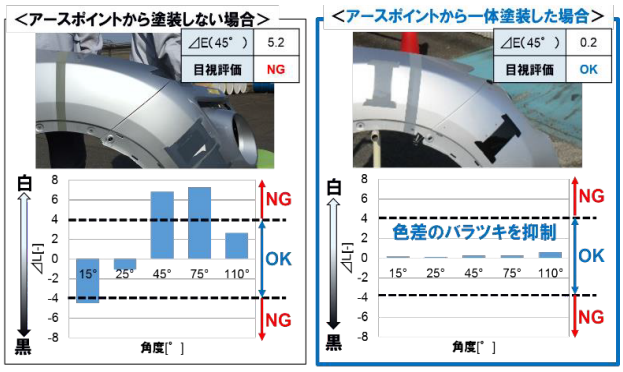


図10　角度別色差
塗装起点をアースポイントとした場合としない場合の比較

加えて、全ての角度にて分光反射率の完全一致を確保した場合でも、パーツ間の突合せ角度が異なると、結果として色が違って見える。

一体塗装工法において現場でこれが起こると素材別に材料を調色することが出来ない為調整余地がない。そこで各色合わせ部品については許容可能な角度ズレ量の事前確認及び実際の色合わせ評価時に面角度評価も行うことが重要となる。今回はこの問題を防ぐためデジタルカラーマッチ評価システムを開発し3Dスキャナーと組み合わせることでその問題解決及び歯止めとした。

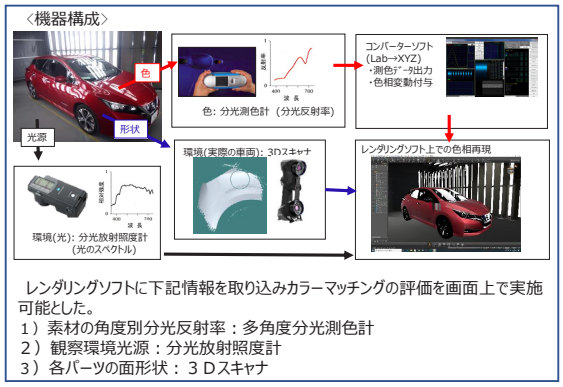


図11　デジタルカラーマッチングシステム

図12　色味評価:実写vsシミュレーション

6. 一体塗装工法の価値及び今後

一体塗装技術を確立したことで従来比25％減の省エネ及びCO_2削減効果を達成することが出来た。今後本工法を新標準とし新設ラインへ拡大採用していくことでカーボンニュートラル達成に貢献していく。

又、本技術採用により塗装現場で調整に長時間を要していた車体とバンパーの色合わせ業務が不要となることが確認出来た。

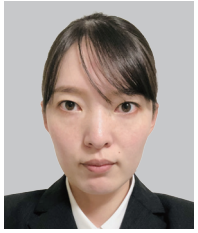
この事は新車準備リードタイムの短縮・立上品質の安定化に寄与することは勿論、従来採用することが出来なかった高意匠塗料（Ex. 高陰影塗料）も採用可能になることから、より魅力的な色を作り手側から提案することが出来る様になると言える。

より高品質な塗装をお客様に届けるための新技術としてもこの新工法を作りこんでいきたい。

著者


後藤　丈志


岡本　倫幸


道浦　千恵

特集1：ARIYAから始まるNissan Intelligent Factory

5. 外観・仕様検査への自動化技術適用による クオリティゲートの実現

石渡　輝行*　平山　満*　田中　大輔*　守屋　隆之**
山田　恭央**　山田　誠*　本田　武志***

1. はじめに

より良いクルマを高い品質で生産するために、これまで培ってきたモノづくりの理念やノウハウをアライアンス生産方式(APW)としてまとめている。その中の一つの取り組みとして、「品質の同期;お客さまの期待を満足する品質の商品を、工程でつくり込むこと」と定義して、悪いものを受取らない/つくらない/流さない、工程設計を行っている。

これを実現するために、「各製造工程(圧造～組立)に設定された品質保証ステージにおいて、必要な品質基準を定め、保証することで、工程内で保証を完結する」仕組みを、クオリティゲートと定義した。本章ではNissan Intelligent Factory(以下、NIF)における、クオリティゲートを実現するための自動検査技術の開発事例を紹介する。

2. クオリティゲートによる工程保証

2.1　クオリティゲートにおける自動検査の必要性

少子高齢化による労働力人口の減少が進む中で、スキルを持った検査員の育成や維持が課題となってくる。一方で、お客様のニーズが多様化することで、内外装や塗装色などの多彩なバリエーションに対しての、工程内での保証を確実に全数行っていく必要がある。こういった環境の変化に対しても、高品質なクルマを生産するため、検査の自動化の推進が有効な手段である。また、自動化に伴って取得が可能となる検査データを利用することで、更なる不具合の未然防止に繋がる。

これらを推進するために、クオリティゲートにおける自動検査技術の活用が必要である。

2.2　自動検査に期待する効果

クオリティゲートにおける検査自動化の推進により、以下を実現し、工程内保証を行っていく。

・自動検査による品質保証レベルの向上：全数自動判定をすることで、判定の困難な検査や多様な仕様に対して、検査員のスキルに頼らずに安定した検出力や判定力を維持することができる。

・自動検査データの活用による更なる品質改善：自動化により得られる全車両の検査結果をIoTサーバーへ送信、管理することで品質基準を合格しないと次工程へ移行しない仕組みとし、また記録されたトレーサビリティデータを活用することで、不具合の早期原因究明に繋げることができる。

2.3　実現に向けた自動検査技術の適用

NIFとしては、クオリティゲートにおける自動検査を実現するにあたり、クルマの意匠性に影響の大きい塗装表面の欠陥、また、お客様の信頼を大きく損なう仕様間違いについて、新たな適用を行った。

今回、全数保証検査装置として2つの適用事例を紹介する。

・塗装工程における、ゴミ、色、鮮映性、膜厚の総合的な保証の実現。(本章の3節)

これまで熟練された人でしか検出できなかった微小な塗装欠陥を検出可能とし、色、鮮映性、膜厚についても全数計測を可能とした。

・組立工程における、車両での塗装面二次傷、ガラス傷、及び仕様保証の実現。(本章の4節)

視認性の悪いガラス面上の傷などの外観検査、多彩なバリエーションに対しての仕様検査について、人のスキルに頼らない安定した保証を実現した。

3. 塗装外観自動検査

3.1　システム構成と工程概要

塗装の最終外観検査工程に検査・測定ユニットを持つロボット(図1)を複数配置し、ボデーとバンパーの全数自動検査エリアを設けた。

図2はそのレイアウトを示し

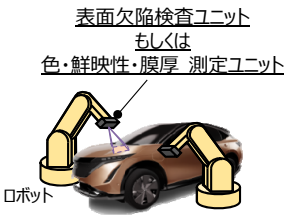


図1　検査ロボットの構成

* 生産技術研究開発センター　** 車両品質技術部　*** 塗装樹脂技術部

たもので、上流側がゴミブツ等の塗装欠陥を検出する工程、下流側が色・鮮映性・膜厚を測定する工程としている。

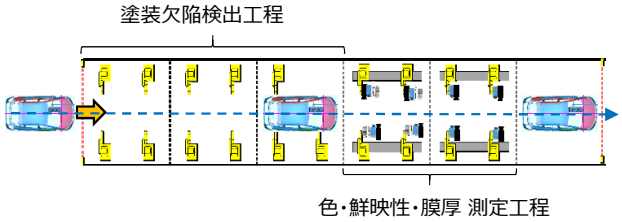


図2　塗装外観全数自動検査エリア レイアウト

3.2　塗装欠陥の検出

〈従来技術と課題〉

現在広く使用されている塗装欠陥検査ユニットとして縞投影型の画像認識技術がある。

縞投影を移動させながら複数枚画像をカメラ撮影した後、最大－最小明度画像の差分による強調化処理を実施することで、微小サイズ及び凸及び凹形状の欠陥を検出するものである。(図3[※1)])

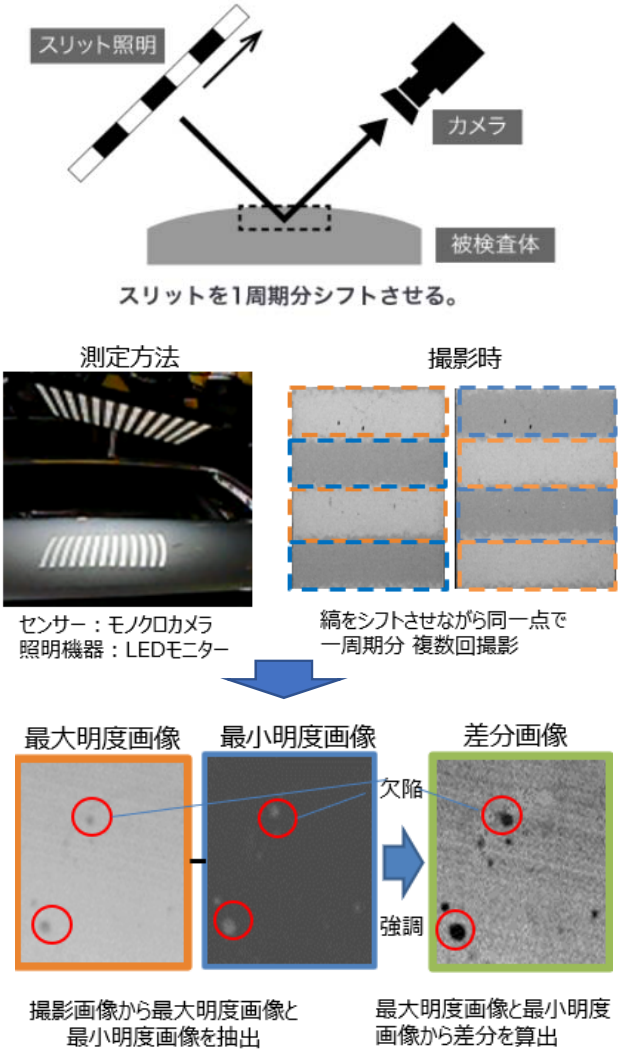


図3　縞投影型の画像認識技術

この縞投影型の画像認識技術においては、塗色により、塗色の持つ明度（L値）の差による検出率の差異が発生するという問題がある。

〈課題解決手法詳細〉

塗色差（塗色の明度（L値）の差）による検出率差異をなくすために、従来技術では行われていなかったカメラ側のゲイン調整を塗色毎に実施することで（表1）、強調化処理の安定化を図った。

その結果、従来 人でしか検出できなかった0.3 mmレベルの塗装欠陥や薄く凹んだハジキ不具合についても自動検出可能となった（図4、図5）。

表1　塗色とゲイン設定における検出率

塗色	明度 (L値)	ゲイン設定値								
		1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	5	6
K23(シルバー)	126	85	100	100	100	60	10	15	10	10
QAB(白)	107	70	100	100	100	80	15	0	5	0
EAU(オレンジ)	83	70	75	100	100	100	75	60	20	0
RBK(ブルー)	56	70	80	100	100	100	100	100	65	40
NAH(赤)	40	65	60	100	100	100	100	100	100	70
KH3(黒)	5	70	75	100	100	100	100	100	100	70

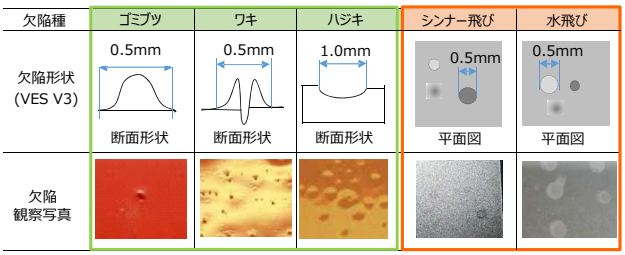


図4　検出可能 塗装欠陥一覧

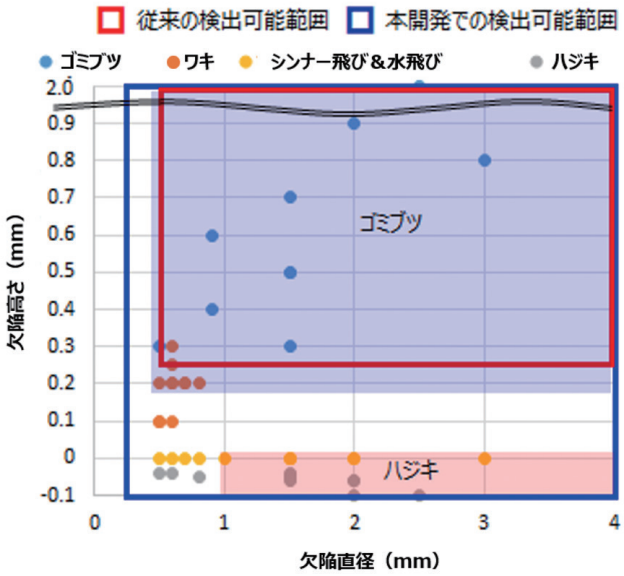


図5　従来-新規方式における検出可能欠陥形状の差異

さらに、以下２つのケースのような欠陥形状が特殊なゴミブツの場合、人が欠陥と認識する範囲が広くなり、検査装置（機

械）の判定サイズが人の測定サイズを下回ってしまってしまう。

ケース１：クリア層が盛り上がっているために裾が広がっている。

ケース２：欠陥の周囲に溝がある。

この欠陥判定サイズの下振れを回避するために、合成画像と人の目に近い生画像の両方を使い判定するロジックを追加することで、人の目との乖離を減少させた（図6）。

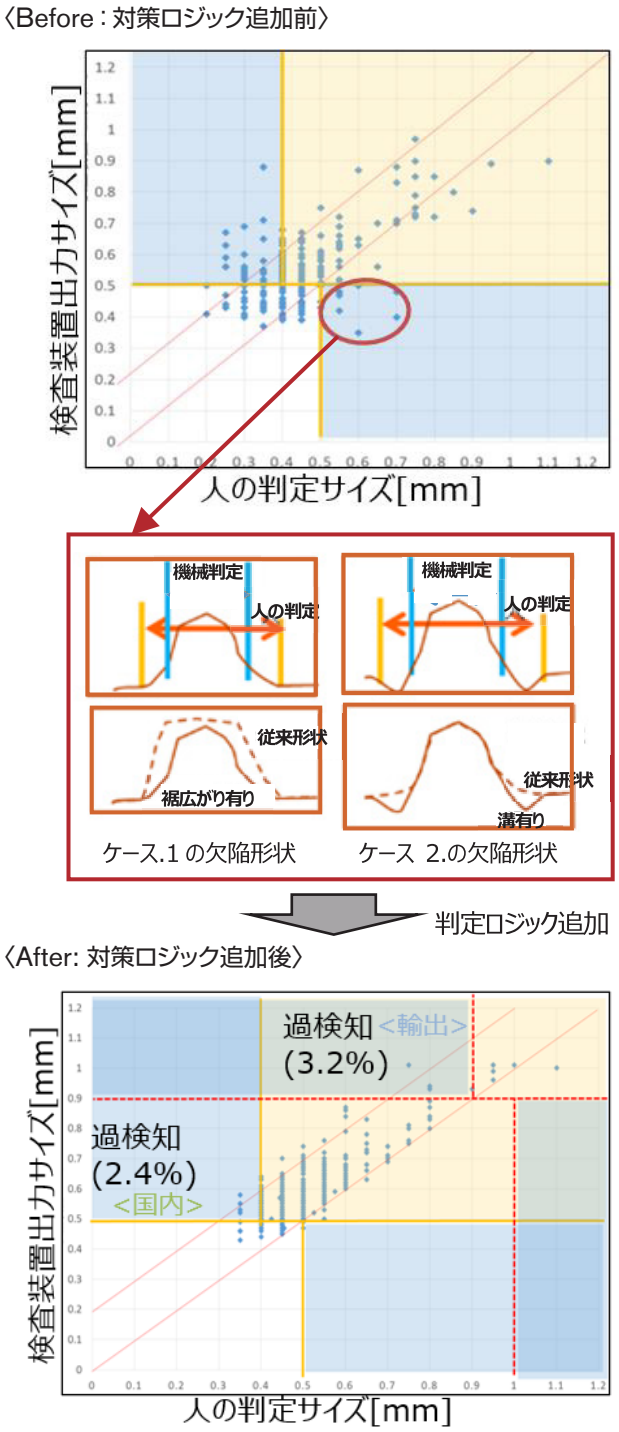


図6　特殊な欠陥形状における検査装置と人の判定サイズの差異と対策結果

又、撮像ユニットをロボットに持たせ且つモニター中の縞を車体表面上のキャラクターラインでつぶれないように方向可変させること（図7）で複雑な車体形状についても外表面の98％を検出可能とした。車両1台当たり562エリアを検査し、各エリアに対し11回の撮像結果から欠陥検出を行うことから、台当たりの撮像回数は、6,182回/台となる。

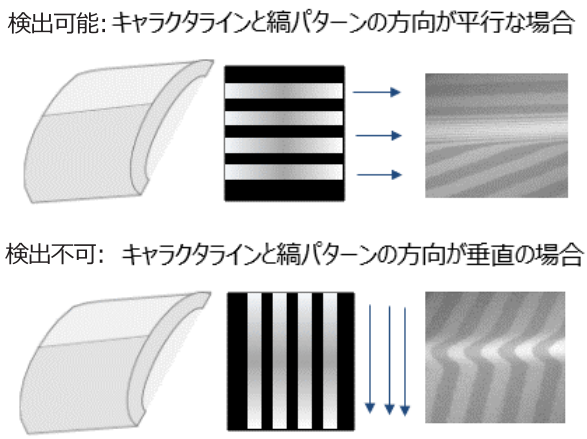


図7　キャラクターラインと縞パターン方向による縞画像の違い

以上により、従来の検出率95％から、100％を達成することができた。

3.3　色・鮮映性・膜厚の測定

〈従来技術と課題〉

従来、色・鮮映性・膜厚の測定は、測定機器の測定ヘッド部を車両測定面へ接触させることが必要であったため、測定ヘッドの位置合せを人で行っていた。接触状態での位置合わせを自動化するためには、測定ヘッドの測定面に対しての相対位置精度を±1mm以内に収める必要があり、測定ヘッドを持つロボットの停止位置精度を向上させる必要があった。

この課題により、これまで自動車生産ラインでの全数自動測定の実現は難しかった。

〈課題解決手法詳細〉

今回Vision systemを活用することでロボットによる高精度位置合わせを実現し、全数自動計測を可能とした。

3.4　本システムの特徴

今回のシステムにおいて、

① 塗装欠陥検査装置で検出した欠陥に対しての修正完了登録が未完了の場合

② 色・鮮映性・膜厚の計測結果が品質基準を満足していない場合

上記のいずれかに合致する場合、次工程へ車両が搬出されない制御システムを構築し、工程内保証を実現した。

3.5　価値

ゴミの自動検査化による効果として検査実施工数４名が不要になるとともに、安定した検査実施により出荷品質保証度が向上する。本システムにより塗装最終工程で計測した全車両の品質データと塗装設備側に設けた生産中の各種状態監視データベースから、不具合発生時の原因究明に要する時間の最小化、及び 今後のより安定した品質を維持する設備側条件の確立（源流対策）に繋げることが可能となる。

4. 統合自動検査（仕様＆傷検査）

4.1　システム構成と概要

本装置では仕様検査と傷検査の2種類の検査を行っている。仕様検査は生産指示システムの情報に基づき、対象とする部品が指示通りに取り付けられているか否かの検査を行う。また、傷検査では、塗装面のみならず、ガラス面についても検査を行う。これらの検査を同じステージで行うため、ロボットには仕様検査用、傷検査用として別々の照明とVisionセンサが搭載されている（図8、図9）。

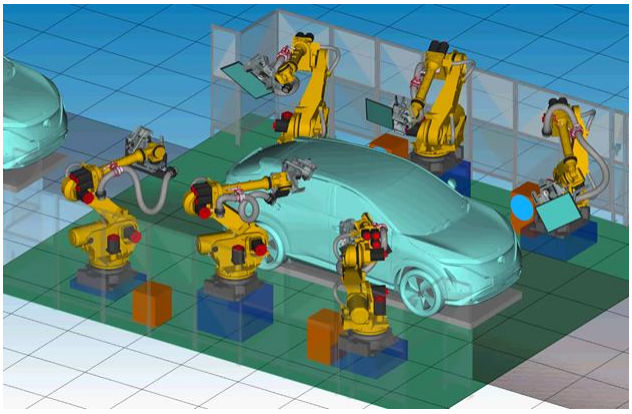


図8　検査ステージ　ロボット配置

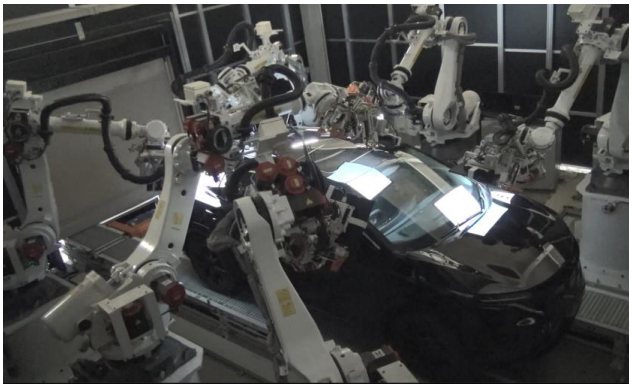


図9　実際の検査風景

4.2　仕様検査

〈従来技術と課題〉

(1) 塗装色判定

色仕様検査の画像処理においてL*a*b*色空間上のユークリッド距離（色差）で判定する方法がある。しかし、車両の塗装色では白ソリッドや白パールなど、両方の色を並べて比較しないと違いがわからないような類似色が存在し、それらは上記距離が接近している。加えて、照明と検査面の関係から反射率がばらつくことにより分布が重なってしまい判定を間違えるといった課題がある（図10）。

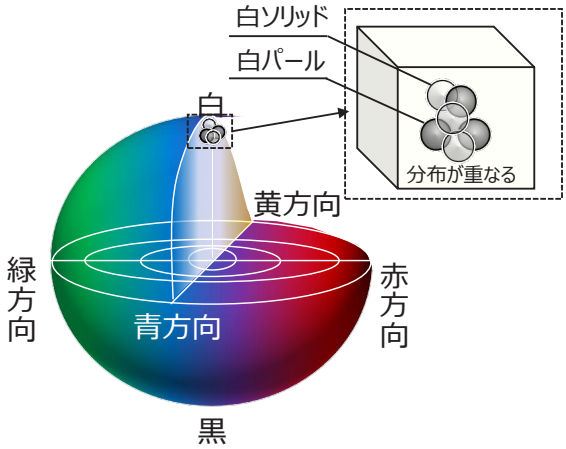


図10　L*a*b*色空間

(2) 多様な検査対象と表面状態における判定精度確保

本装置が対象とする検査は部品の有無、形状、位置、姿勢、色などでOK/NG判定を行っている。色以外の判定については画像処理にて部品の輪郭をベースにして行われるが、部品の表面状態が塗装面や鏡面、無塗装面、ガラス面と光の反射率が異なるため、照明の当て方によって検出したい部品の輪郭が消失してしまう場合がある。また、検査対象部品とその背景が同色の場合にもコントラスト差がないため、輪郭が消失してしまう。対応策として、複数の組み合わせの照明とVisionセンサを用いる方法があるが、ロボットに取り付けるハンド部が大きくなるため、他のロボットとの干渉回避や姿勢変更に時間を要し目標とするサイクルタイムを満足できないといった課題がある。

〈課題解決手法詳細〉

(1) 塗装色判定

反射率のばらつきを抑制できるよう、照明を間接的に照射できる位置に配置し、生産指示システムの情報に基づき色のグループ毎に照明やVisionセンサのパラメータを自動で切替えられるようにした。また、検出エリアは反射率の影響を受けにくい箇所かつ、検査対象部品とそれに隣接する別部品の２箇所を視野内に収まるよう選定し、上記２箇所の色空間の距

離を相対的に比較する判定ロジックとした。その結果、100%の判定精度を実現できた。また、塗装色毎にそれぞれ判定ロジックや閾値を持たせることなく検査が実現できるため、メンテナンス性も大幅に向上している。

(2) 多様な検査対象と表面状態における判定精度確保

本装置の対象となる検査種類と部品特性を見極め、塗装面や鏡面部品は反射強度を抑制するため間接照明による散乱光を利用し、無塗装部品やガラス面上の印字文字は反射強度が高くなるよう、リング照明による正反射光を利用するようにした。部品毎の細かい反射率の違いに対しては照明装置にスライド機構を持たせ照射位置をコントロールすることで最適な反射強度を確保している。また、このスライド機構について撮影時以外は照明を格納できる機構を有しておりハンド部のコンパクト化も実現した。これによりサイクルタイムへの影響を最小化している（図11）。

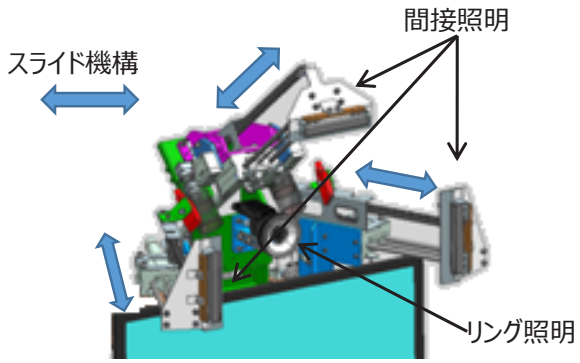


図11　ハンド部機器構成（照明、Visionセンサ）

加えて、塗装色や部品別に照明やVisionセンサのパラメータを自動で切替えるだけでなく、撮像姿勢も切り替えることで背景の写りこみを最小限に抑えつつ、コントラスト差を確保している。その結果、不良品の流出0%、良品に対する誤検出0.001%以下を実現している（図12）。

図12　表面状態別　検出画像例

4.3　傷検査

〈従来技術と課題〉

(1) 傷検出

本装置では前述の塗装検査のものと同じ縞投影方式の欠陥検出センサを用いている。しかし、検査項目である傷の大部分は幅0.1mm以下の細長い形状をしており、塗装欠陥の特徴とは全く異なる。加えて、塗装面とガラス面という光の反射率が異なる条件においても、傷を検出できることが求められる。

(2) 誤検出の抑制

傷検出では、画像上の画素の明るさが急激に変化している部分を抽出し欠陥判定を行っている。組立最終工程で検査を行うため、塗装ボディのみの検査とは異なり、取付け済の部品の端部や、ガラス上の識別ペイント、模様、熱線、汚れや作業時の拭き跡などが存在する（図13）。これらは、欠陥と同様に明るさが急激に変化しており欠陥として誤って検出されることがあるため、これを抑制する必要がある。

図13　誤検出要因の例

〈課題解決手法詳細〉

(1) 傷検出

車両に発生する可能性のある傷の特性を見極め、塗装面、ガラス面それぞれ、照明の縞幅/周期、撮影枚数、撮像パラメータなどをチューニングすることで、より鮮明な傷画像の取得が可能となった（図14）。

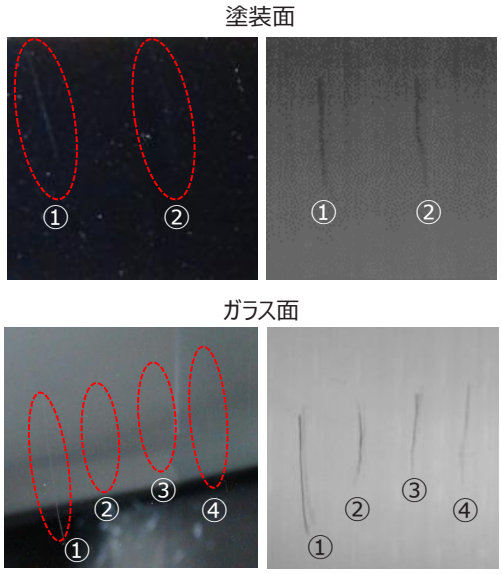


図14　塗装面とガラス面の疑似傷検出画像
（左:デジカメ画像、右:画像処理画像）

(2) 誤検出の抑制

部品の端部やガラス上の模様、熱線などによる誤検出を抑制するために、これらの持つ特徴（パターン）をもとに画像処理にて領域を抽出しマスクを自動で構成することで、誤って欠陥と検出されることを防ぐロジックを実装した（図15）。

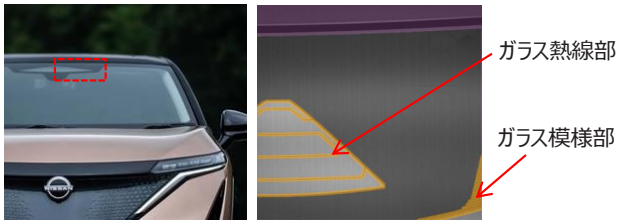


図15　自動マスク処理領域（黄色塗潰し部）

但し、汚れや拭き跡による誤検出の抑制（汚れと傷の判別）については、ランダムな位置で発生し、形状などの特徴が一意でないことから、現状の欠陥判定手法では対応が困難である。この課題に対しては新たな手法を検討し対応する予定である。

なお、仕様検査を含め、検査結果（図16）については一括でサーバーに保存、蓄積される。

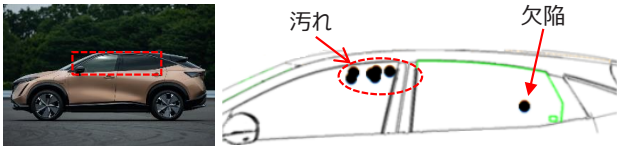


図16　傷検査　結果出力例

4.4　価値

本装置により、多様な車種・仕様を混流生産する組立工程での複雑な仕様検査と塗装面、ガラス面の微細かつ様々な特性を持つ傷検査において、検査員のスキルに頼らない一定の判断基準に基づく検査の自動化を可能にした。これにより、これまでの目視検査に対して品質保証レベルの安定と向上を図り、お客様に不具合を流さない、工程内保証の実現に寄与している。加えて、蓄積される検査情報を活用し、発生原因の特定と、より不具合を発生させない工程設計を行うことで、更なる品質不具合が起こらない、起こせない、作業者にとっても働きやすい環境を提供していく。

5. ま と め

本稿ではクオリティゲートの考え方と、クオリティゲートにおける品質保証レベルの向上を図るための、自動検査における技術開発事例を紹介してきた。

現在は製造工程内における検査の自動化を中心に進めているが、今後は完成車の検査工程に範囲を広げ、保証工程全体へ検査自動化の適用を進める。

これにより、品質保証レベルの向上と検査結果に基づく品質改善の推進によって、車両品質向上を図り、お客様の期待にそえる高品質の商品をお届けし、日産ブランドの価値の向上へ貢献していきたい。

参考文献

※1）バイスリープロジェクツ株式会社：
実用新案登録第3197766号　表面検査装置（2015）

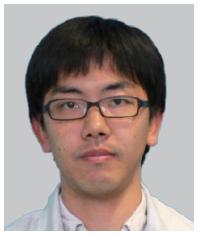
著者


石渡　輝行


平山　満


田中　大輔


守屋　隆之


山田　恭央


山田　誠


本田　武志

特集1：ARIYAから始まるNissan Intelligent Factory

6. 予知予防保全・リモートメンテナンス技術の拡大採用による設備稼働率・工程能力の向上

小川　堅博*　櫻井　諭**　牧野　幸一**　津本　卓也***
阿部　奨***　早川　正芳*　瀬尾　和也*　河野　稔*

1. はじめに

日産自動車では、アリアをはじめとした高機能かつ高品質な車を安定して製造し、納期通りにお客様へお届けすることが課題となっている。この課題解決のために、Nissan Intelligent Factory（以降、NIF）では多機能且つ高性能な新鋭設備が導入された。一方で、全生産拠点に目を向けると、老朽化が進んでいる設備も残っており、以上から、円滑な生産の実現に要求される保全レベルが従来よりも高くなっている。

保全部門ではかねてより、QCTの向上を目的に、「設備を故障させない」「故障を再発させない」「発生した故障はすぐ直す」の3原則を掲げてきた。この3原則の下、保全部門はこれまで、多数のベテラン保全員を中心とした現場体制で運営してきた。ところが昨今、保全部門の人員構成も変わってきた。一つはベテラン保全員が少なくなり、これまでベテラン保全員のスキルやカンコツに頼るところが大きかった運営体制を維持できなくなってきた。もう一つは、保全員全体の人数自体も減少傾向にあり、突発的な設備異常への対応と、定常業務である膨大な定期点検作業の両立が難しくなってきている。

これらの課題を解決していくために、日産自動車の保全部門では、最新のIoTなどのデジタル技術を用いた様々な業務革新を進めている。本章では、その中の一部として、NIFに導入した予知予防保全とリモートメンテナンスについて紹介する。

2. 予知予防保全

前節で紹介した、日産自動車における保全3原則の中で、「設備を故障させない」「故障を再発させない」に関わる中長期戦略として、日産自動車では「FY30に設備起因のドカ停ゼロ」という目標値を掲げている。

過去の設備故障履歴を調査したところ、過去5年間に国内車両3工場（栃木、九州、追浜）で納車遅れの可能性のあった設備停止発生371件のうち、実に132件（34%，1位）が定期点検では発見が困難な設備異常が原因であった。これはつまり、設備停止の撲滅のためには従来の定期保全だけでは不十分で、設備状態の常時監視の必要性を示している。

そこで日産自動車では、IoT技術を活用して、設備異常兆候を示すデータを常時監視する予知予防保全システムを導入することとした。本節では、この予知予防保全システムを構成する重要な要素技術を紹介していく。

2.1　計測技術

生産設備の異常状態を常時監視するためには、設備異常の兆候を表すデータを常時計測して収集する必要がある。この、「設備異常の兆候を表すデータ」には、大きく分けて2種類存在する。一つは、生産設備自体が、設備の制御や品質管理を目的に元々モニタしているデータである。もう一つは、元々生産設備はモニタしていないため、生産設備に後付けで取り付けたセンサ類から取得するデータである。前者のデータの取得には、それほど費用は掛からないが、後者のデータ取得には、①特定の物理量を計測するためのセンサ、②センサからの微小信号を増幅するアンプ、③アンプからのアナログデータをデジタルデータに変換するデバイス、④デジタルに変換されたデータを有線もしくは無線のネットワークに送信するデバイス、そして⑤有線送信のためのネットワーク配線、といった各種デバイス費用や設置費用が必要となる。これら①～⑤を工場内数百か所に設置しようとすると、費用は高額になり、工期も長いため、常時監視の対象を増やすことが難しくなる。また、設備の可動部に計測用のセンサを設置したい場合でも、データ送信用の配線が必要であると、センサの設置を断念せざるを得ない場合が生じる。

そこで日産自動車では、後付けセンサの設置費用を大幅に削減し、且つ可動部の計測を容易に実現することを目的に、富士電機（株）と「診断センサHUB」を共同開発した（図1）。このデバイスは、①3軸の振動センサ、②アンプ、③A/D変換、④無線によるデータ送信機能を内蔵する。また、4チャンネルの外部入力端子を有し、各種計測センサと接続することで、様々

* プラント・メンテナンスエンジニアリング部　** パワートレイン生産技術部　*** 生産技術開発センター

な計測データの無線通信を安価に実現することができる。また、この「診断センサHUB」の寸法は10cm×10cm×3cmと小さく、ロボットなどの複雑で激しく動く生産設備にも容易に取り付けが可能である（図1）。

NIFでは、生産用ロボットの常時監視を目的に、189個の「診断センサHUB」が設置され、毎サイクル800Hz×3軸分の振動データが、2-2で紹介する「Field Storage」を介してIoTネットワークへ送信され、2-3で紹介する予知予防保全プラットフォームにて設備異常診断が自動で常時行われている。

（出典:富士電機（株）WEBサイト）

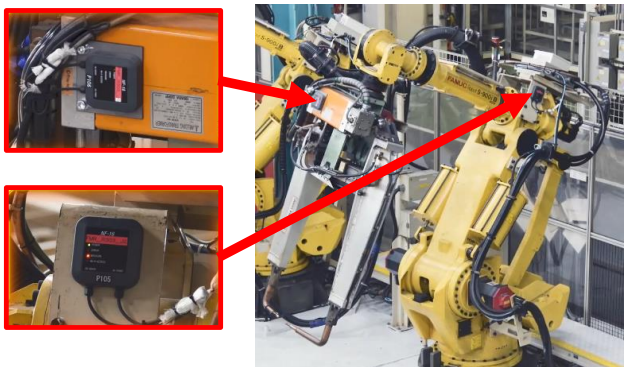


図1　車体ロボットに設置された診断センサHUB

2.2　データ収集・活用技術

日産自動車では、生産ラインから取得した大量のデータを、予知予防保全だけでなく品質監視やトレーサビリティなどの様々な用途に容易に使用できるように、“Collect once, Use many”をコンセプトに掲げ、データ通信規格とデータ構造の社内統一を進めている。

この統一したデータ通信規格として、日産自動車はIndustry 4.0で先行するヨーロッパにて普及しているOPC-UAを選択した。但し、現在はまだ生産設備や計測センサ自体はOPC-UAに対応していないものが多いため、生産設備から取得されたデータ及び後付けセンサにより計測されたデータは、OPC-UA規格に適合したデータに変換されてから、IoTネットワークへと送信される必要があった。そこで日産自動車は、生産設備側からの種々雑多な構造のデータを、OPC-UA規格に適合したデータに変換するツールとして、「Field Storage」を開発した。この「Field Storage」は、生産設備側から受け取ったデータを自動でOPC-UA規格に変換し、変換されたデータは2-3で説明する予知予防保全プラットフォームや品質管理システムのデータベースへ送信される（図2）。

また、日産自動車では、同じ種類の生産設備が多くの工場で使われている。予知予防保全プラットフォームにて、複数の工場で同じ種類の設備に対し同じ診断ロジックプログラムを適用するためには、同じ種類の設備から取得されるデータは、工場に関わらず共通のデータ構造でデータベースに格納されている必要がある。そこで日産自動車は、設備の種類毎に「データモデル」と呼ばれる標準化されたデータ構造を作成した。「Field Storage」は、このデータモデルに適合するようにデータ変換を行う。これにより、工場に関わらず、同じ種類の設備から取得されたデータは、共通のデータ構造及び共通の通信規格にて予知予防保全プラットフォームに送信及び蓄積されることが可能となった。

現在NIFでは、1,229台の設備の予知予防保全を目的に、32,464種類のデータが予知予防保全プラットフォーム用のデータベースに常時格納されており、今後も予知予防保全の対象設備の増加に伴い、データの種類の数は増える予定である。

図2　Field Storage

2.3　システム化技術

本章の2節の冒頭で述べた通り、日産自動車では今後、「FY30に設備起因のドカ停ゼロ」という目標のために、予知予防保全を全拠点に迅速に展開し、且つその運用状況を監視する必要がある。そのための予知予防保全プラットフォームとして、日産自動車は「MASTER CBM」を開発した。

「MASTER CBM」の最大の特徴は、一つのプラットフォーム上に、①診断ロジック作成機能、②オンライン自動診断機能、③診断結果ダッシュボード機能、の3大機能を1パッケージで搭載したことである。

①の診断ロジック作成機能では、ノンプログラミング開発環境にて診断ロジックを作成することができる（図3）。NIFでは、29種の診断ロジックを作成した。また、作成した診断ロジックは、今回開発した「Diagnosis model management system」

を通して日産自動車の全生産拠点で共有し、且つその運用状況を遠隔でモニタすることが可能である。

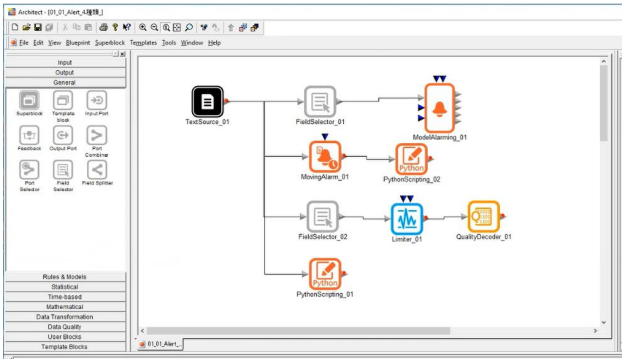
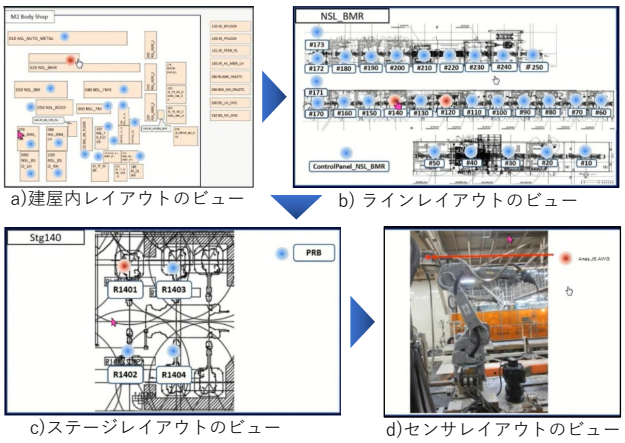


図3　ノンプログラミング診断ロジック開発環境

②のオンライン自動診断機能は、常時送信されてくる計測データに対し、①で作成した診断ロジックを自動で実行する機能である。市場を見ると、診断ロジックを開発する機能と、オンラインで自動診断する機能の双方を有しているシステムは少ない。日産自動車では、双方を別々のシステムで準備するのではなく、同一のプラットフォームで双方の機能を運用することを狙った。今回の「MASTER CBM」には、その双方の機能を実装した。自動で計測データをサイクル毎に診断した結果は、工場のレイアウト図上でリアルタイムにインジケータ表示する。

③の診断結果ダッシュボード機能では、診断ロジックが異常と判定した設備を、工場のレイアウト図上にて明滅する赤いインジケータで表示する（図4）。赤いインジケータをクリックしていくと、a）建屋内レイアウト⇒b）ラインレイアウト⇒c）ステージレイアウト⇒d）センサレイアウト、と4階層をドリルダウンすることができ、最終的にはアラームを発生している設備部位に到達する（図4）。また、センサなどの計測機能自体に問題が生じた場合も、レイアウト図上で同様に異常箇所が明示される機能を有する。また、計測された生データの表示は勿論のこと、診断ロジックに使用される特徴量（統計値等）や異常判定閾値が、任意のタイムスケールで表示可能である（図5）。



a)建屋内レイアウトのビュー　b) ラインレイアウトのビュー

c)ステージレイアウトのビュー　d)センサレイアウトのビュー

図4　ドリルダウン化されたダッシュボード

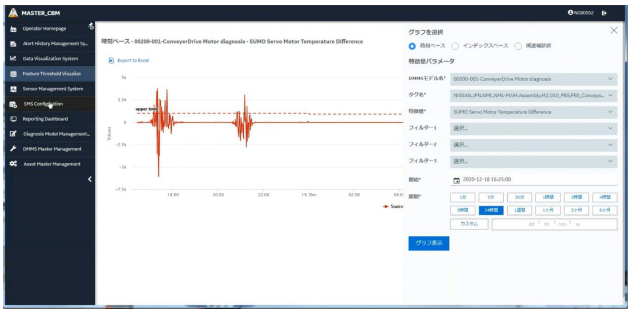


図5　データ表示

更に、保全3原則の一つである「故障を再発させない」ために、③の機能の一部として、「MASTER CBM」では、診断ロジックがアラームを発報した各計測データに対し、対象設備の調査結果を紐づける機能を有する。この情報を用いて、将来的には計測データから故障箇所や設備停止時期を更に精度良く予測できるようになることが期待される。

2.4　診断ロジック開発

2-1～2-3にかけて、デバイスやシステムなどハード面の説明をしてきたが、もう一つ重要な要素はソフト面の診断ロジックであり、日産自動車はこの開発にも力を注いできた。

診断ロジック開発は、対象設備を選定後にFMEAを実施し、設備の構成部品と動作メカニズム、過去に発生した異常の履歴情報から、劣化する部品とその故障モードを洗い出す。そして、影響度、発生頻度、検知性より最適な保全方式を選定し、常時監視が必要と判断した故障モードに対し、計測データ及び判定方法等を検討する。

計測するデータは、主に電流、トルク、振動、圧力、流量、寸法、温度、等から異常の兆候が現れそうな物理量を選定する。実際に正常時のデータのばらつきを調べ、異常を検出するために必要なデータの前処理と特徴量の設定と判定方法を仮決めする。計測したデータの生値や波形がそのまま判定に使えるものもあるが、ほとんどは加工が必要である。バンドパスフィルタによるノイズ除去などの前処理を行い、1サイクルまたは単位時間あたりの平均値、中央値、最大/最小値、偏差などの特徴量に加工し、上下限診断、ガードバンド診断、周波数解析、トレンド分析などの手法で正常/注意（異常の前兆）/異常の判定を行えるか検証を繰り返す。

これらの様々な物理量、前処理、特徴量、判定方法の中から最適な組合せを選ぶ必要があるが、最も重要なキーポイントは正常/注意/異常のレベルを識別する閾値の設定である。この閾値は診断の精度を決める重要な要素であり、この閾値が適正でないと、正常を異常と誤判定してしまう「誤報」や、逆に異常な状態にも関わらず異常の判定ができずにアラーム発報を逃がしてしまう「失報」となり、異常の未然防止が図れない事態となってしまう。

この閾値設定の難易度は大きく3種類ある。1つ目は、規格や設備仕様等から予め異常判定閾値の絶対値が定められている場合であり、容易に閾値を設定できる。

2つ目は、閾値が規格等で定められてはいないものの、計測データの変化と設備劣化状態の相関関係が明確な場合である。設備異常時のデータのサンプルが多数ある場合は、異常時と正常時のデータを比較して閾値を仮設定する（図6）。一方で、異常時のデータがない場合も多く、その場合は正常時のデータを統計処理して閾値を仮設定する。いずれの場合も、設備の個体や部位毎に閾値の検証が必要であり、非常に多くの時間と手間を要する。また、異常データのサンプルは基本的に少ないため、閾値を仮設定した後も、誤報と失報の発生状況をモニタしながら閾値の微調整を継続する必要がある。

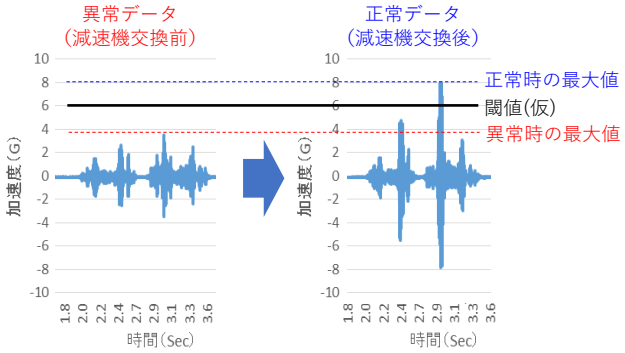


図6　ロボットの異常減速機交換前後の振動データ

3つ目は、計測データの変化と設備異常状態の相関関係が解明できていない場合であり、計測データが不規則に変化するため、変化の定量化が難しい。このような場合に対し、日産自動車では統計手法を駆使した診断ロジック開発を行い、一例として計測データの波形から多数の特徴量を抽出し、波形の変化を数値化することによる診断ロジックを構築した（図7）。但し、この場合も判定精度の高い診断ロジックの構築には大量の異常データによる特徴量や閾値等の見直しが必要であり、且つ、定期的に設備の実物の劣化度合いを調査し、計測データの変化との相関情報を蓄積する必要がある。日産自動車では今後、本章の2-3で説明した予知予防保全プラットフォームに蓄積されるビッグデータを使い、診断精度の向上に継続的に取り組む。

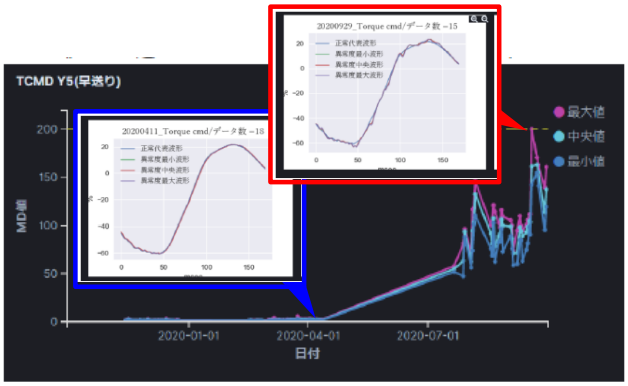


図7　マシニングセンタのリニア軸トルク波形形状の数値化

2.5　工具交換時期の見える化技術

次に、パワートレイン加工ラインでの工具交換時期の見える化技術について紹介する。

停止の未然防止をするためには、停止要因の予測が必要であり、生産設備から製品品質情報（測定値、傾向）、加工条件情報（加工時間、切削工具使用回数）、設備状態情報（主軸振動値、切削水流量・圧力等）の情報を収集し、状態監視を行った。今回はそのシステムの一つである、工具交換時期の見える化技術について説明する。

日産自動車では、従来、加工ラインで使用している切削工具の工具交換について、シグナルタワーや、ライン内の大型ディスプレイに工具交換予告を表示することで、ライン内のオペレータに情報を伝えていた（図8）。そのため、工具交換が発生したその都度対応しており、複数の設備で同時に工具交換となった場合、対応遅れによる設備停止ロスが発生していた。

今回開発したシステムでは、設備からリアルタイムにツールカウンターの情報を収集することで、その日の工具交換時刻の予測が可能となった（図9）。工具交換時期の見える化をすることで、複数工具のまとめ交換や、オペレータのリリーフ対応により、工具交換による設備停止ロスのミニマム化をすることができた。

今回説明したシステムは、IoTシステムのごく一部であり、設備管理による予知予防保全や、ラインの稼働状況の見える化を行い、生産ロスのミニマム化に向けてシステムのアップデートを進めていく。

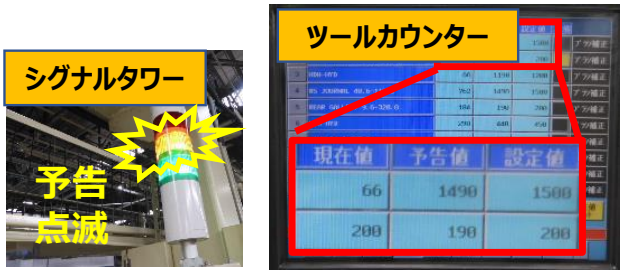


図8　既存工具交換予告

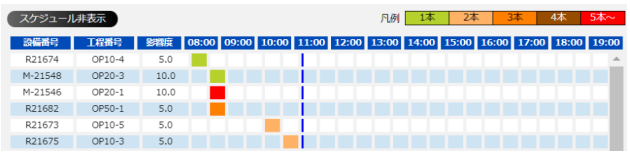


図9　IoT工具交換スケジュール画面

3. リモートメンテナンス

日産自動車の保全3原則の残り一つである「発生した故障はすぐ直す」を、ベテラン保全員が減少している環境下で実現するために、日産自動車ではNIFにて、ベテラン保全員を配置した集中監視室を立ち上げ、且つ、集中監視室と保全現場をデジタルツールで繋ぐリモートメンテナンス体制を取り入れた。

背景として、過去に発生したドカ停を分析した結果、復旧時間が長時間になる要因として、主に「現状把握や要因解析の不十分」、「復旧作業ミス」、が挙げられ、これらは「調査時間が不十分」「保全員の知識・技能不足」が要因である。リモートメンテナンスを取り入れることで狙う効果は、まさにこの2つの要因の解消である。

集中監視室では、ベテラン保全員が工場の稼働状況を把握するために、設備稼働モニタや予知予防保全プラットフォーム、生産現場のカメラ(243台)の映像等を表示できる大型モニタを27台配備した(図10)。これにより、ベテラン保全員がリアルタイムに生産設備の異常を把握することが可能となった。また、集中監視室には、保全マニュアルや、設備の設計図、過去トラブル集などの、あらゆる情報を一元的に集約した。この体制を構築したことで、設備異常が発生してから現場保全員が問題の現場に到着するまでの間に、ベテラン保全員が現状把握や要因分析を行う体制を確立した。

図10　集中監視室

また、集中監視室のベテラン保全員と現場の全保全員をリアルタイムに繋ぐデジタルツールとして、ウェアラブルカメラ、ヘッドセット、タブレットを64セット配備した。これにより、現場映像の共有、音声によるコミュニケーション、保全マニュアル等の共有がリアルタイムにベテラン保全員と現場保全員の間で可能となり、現場保全員の知識不足を補う体制を構築した(図11)。

この集中監視室を中心としたリモートメンテナンス体制により、故障復旧時間を平均30％削減することを見込んでいる。

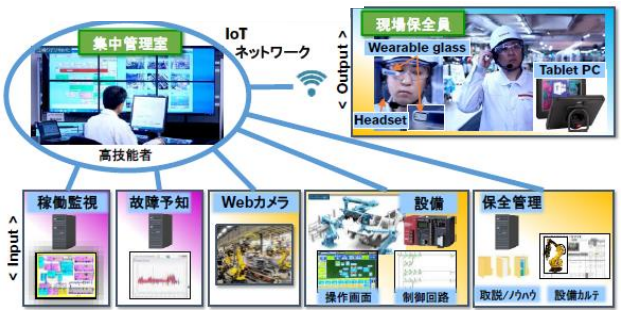


図11　リモートメンテナンス

4. ま と め

本章では、高度な新鋭設備の登場や設備の老朽化により、高度な保全技術が必要となっている一方で、ベテラン保全員が減少する厳しい環境の中、NIFではデジタル技術による予知予防保全及びリモートメンテナンス体制を構築することで、設備停止頻度と設備停止時間を抑え、お客様へ約束した納期通りに高品質な車をお届けする取り組みを紹介した。

今後、日産自動車では今回紹介したシステムを全世界の生産拠点に展開する。また、将来的には蓄積されるデータの学習を行うことで、生産設備の残存寿命予測やトラブルシューティング自動支援も実現する。更に、蓄積される知見を生産設備設計へフィードバックし、故障し難い産まれの良い設備を設計する。この結果より、NIFでは設備停止回数及び復旧時間を極限まで削減し、全世界のお客様へ新鋭の高品質な車を遅滞なくお届けすることを目指している。そして、デジタル化を進め、人のスキルへの依存度が低い保全業務に革新することで、少子高齢社会における業務形態の多様化、及び働く人の間口開放(働き方改革)に貢献していく。

著者

小川　堅博

櫻井　諭

牧野　幸一

津本　卓也

阿部　奨

早川　正芳

瀬尾　和也

河野　稔

特集1：ARIYAから始まるNissan Intelligent Factory

7. 革新的薄肉軽量シリンダーヘッドを実現する鋳造技術の開発

杉山　雄大*　　土屋　真一**　　久米　洋道*　　西　高宏**　　田渕　満智**

1. はじめに

地球規模でのCO2排出量の削減に向けた取り組みが加速している。日本でも、2020年10月の第203回臨時国会にて2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すとの宣言が示された。自動車業界では、電動化車両の拡大はもちろんのこと、既存の内燃機関の更なる高効率化と車両軽量化によるCO2排出量の更なる低減が求められるのと同時に、車の生産過程である生産工場のCO2排出量削減も果たさなければならない大きな責任がある。

内燃機関の更なる燃焼効率向上を達成するためには、過給機によるエンジンシリンダー内の更なる圧縮比増大が求められている。その実現には、排気ポート部の高い冷却性能が必要となり、エンジンシリンダーヘッド内に張り巡らされている内部冷却回路をより細く緻密にする必要がある。そのため、シリンダーヘッド内のウォータージャケットの構造が複雑な形状となっている。同時に燃費向上のニーズから車両軽量化のためのシリンダーヘッド薄肉化が求められており、この2つを高い次元でバランスできる、鋳造工法の開発が急務である（図1）。

生産プロセスについても、シリンダーヘッド粗材は低圧鋳造法というアルミ鋳造法で造られており、アルミを溶かす工程と、強度を調整する熱処理工程で、多くのエネルギーを使用しており、2019年時点で、日産自動車の生産工程の中で、塗装工程、鋳鉄鋳造工程に続いて、3番目に多くCO2を排出している。そのため、工程全体でのCO2排出量削減が急務であり、今回新世代の可変圧縮比ガソリンエンジンの開発、及びGlobal展開に合わせて、新しいシリンダーヘッド生産ラインを開発した。

本章では、その開発内容の中で、複雑・緻密な内部冷却構造と製品薄肉化を両立するために開発した、V-LPDC Process（Vacuum Low Pressure Die Cast Process：吸引低圧鋳造法）と、関連する技術の詳細を以下に説明する。

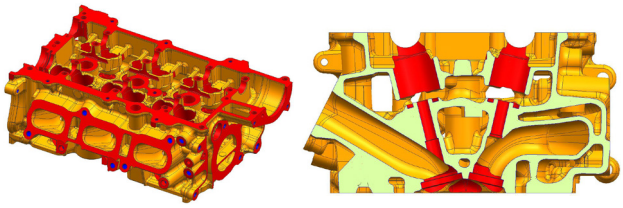


図1　シリンダーヘッド

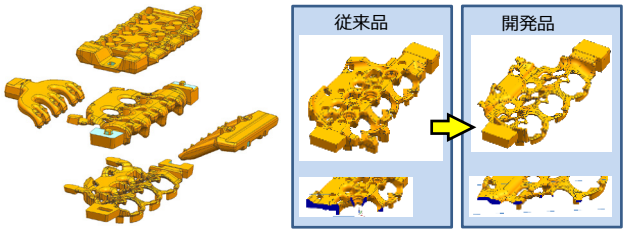


図2　中子

2. アライアンス スタンダード ラインの概要

薄肉軽量シリンダーヘッドを実現のため、必要な技術を集結し、“アライアンススタンダードライン”として標準化した。

エンジンの競争力向上のため、シリンダーヘッドは吸気、燃焼、排気を司ることから重要な機能部品である。シリンダーヘッドを製造するアルミ鋳造工程はそれらの機能を実現するため金型と内部の中空部分を作る中子（図2）を使い、溶かしたアルミを金型に注湯して部品を形成する。

複雑化した冷却通路、部品統合及び薄肉形状を高品質で製造するため、アライアンス スタンダード ラインに新工法、及びバラツキを極小化する各種自動化を盛り込んだ。

図3に工程のフローを示す。

中でも薄肉化のため中心となる新技術は、吸引低圧鋳造法、無機中子、ロータリー熱処理炉、CTによる自動検査である。それらの工程は、すべて一個送りで行っており、製造から搬送まで自動化レベルを向上し、ミスや不具合発生を排除している。

CO2削減の観点でも、無機中子、個別溶解炉、ロータリー

* 第二製造部　　** 成形技術部

熱処理炉を採用することでカーボンニュートラルに貢献している。

また、働く人の環境改善も考慮した。従来の鋳造工場は、煙・ヤニ・粉塵で工場内が暗い・臭い・汚い、また手作業が多いと環境面ではとても良いは言えない工場であった。この新ラインにおいては無機中子を始めとする技術によりこれらを大幅に改善させることができた。

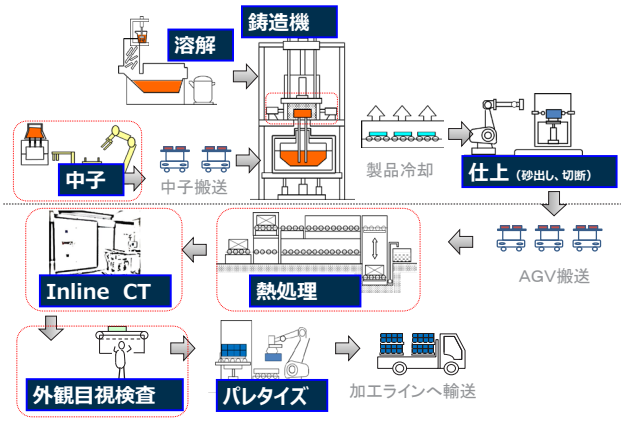


図3　工程フロー（概要）

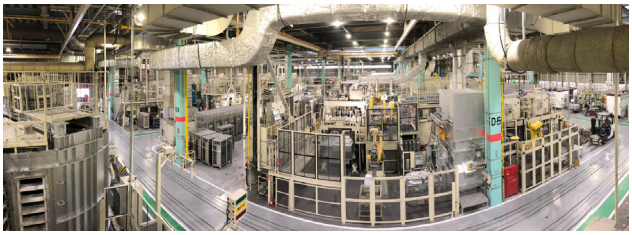


図4　レイアウト（鳥観図）

3. 開 発 内 容

3.1　V-LPDC（吸引低圧鋳造法）

革新的な薄肉軽量シリンダーヘッドの実現のための中心となる技術が、V-LPDCである。

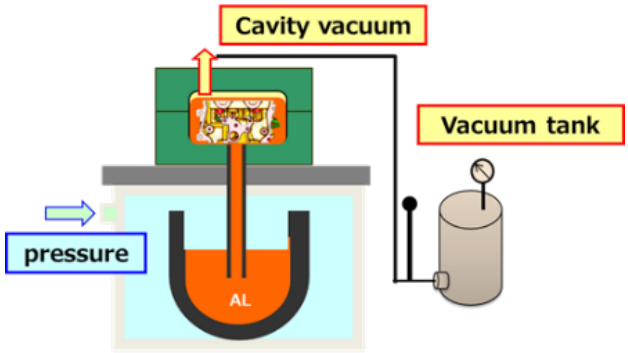


図5　V-LPDC（吸引低圧鋳造法）

図５のようにシリンダーヘッドの鋳造は溶融アルミニウムを金型内の空間に流し込み空気とアルミニウムを置換することで形状を成型している。この時空気は金型の合わせ面の隙間等から抜ける構造となっているが、溶融アルミニウムの流動を阻害しないように空気抜き部の背圧を低くする必要がある。薄肉化を突き詰めるとこの背圧が原因で空気がアルミニウムに置換される前にアルミニウムが固まり製品形状不良が発生する。そこでその背圧を低減するため、鋳造中に金型合わせ面からの吸引を行う技術を開発した。（図６）

この際、アルミニウムを充填する圧力と金型内の圧力のバランスを取ることが重要である。そこで金型内の圧力をセンサにより常時モニタリング（図７）するとともに、熱電対により金型内のアルミニウムの流れをデータ取得した。鋳造CAE（図８）とこれらのデータを活用することで、最適な吸引条件を設定し、最少肉厚２㎜のシリンダーヘッド鋳造を実現できる技術を開発した。量産では、エンジンの強度要件を考慮しながら、従来モデルと比較し約４％の重量低減を実現した。

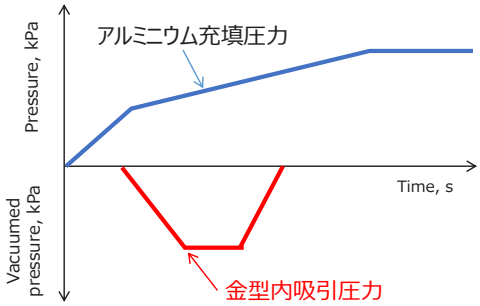


図6　金型内吸引条件

図7　金型内の圧力

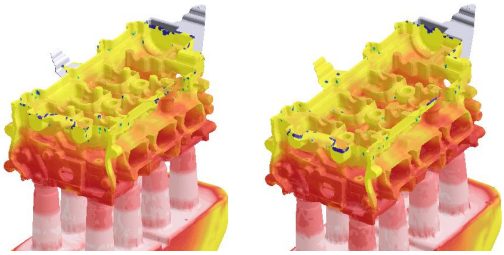


図8　鋳造CAE

また、この吸引低圧鋳造法は従来の有機粘結材を使用した中子方案であるシェルモールド法では鋳造時に発生する煙、金型に堆積するヤニにより吸引通路が閉塞してしまうという課題があった。そこで、V-LPDCでは、煙、ヤニが発生しない無機中子工法を採用した。(図9) 本工法は、中子を形成するため、砂の粘結に水ガラスをベースとした無機バインダーを使用している。今回これらの技術をアライアンス スタンダードラインで採用し、吸引低圧鋳造法と無機中子の組み合わせにより薄肉軽量シリンダーヘッドの量産を実現した。

図9　無機中子造型機

3.2　中子・鋳造工程の全自動化

前述のように本ラインでは、品質バラツキ低減、作業環境改善等を目的として溶解、中子造型、鋳造、仕上げ工程及び搬送について最大限に自動化を織り込んだ。

中子造型では、無機中子造型工法を、全自動化するにあたり、シューティングヘッド内の砂の自然硬化や造型直後の柔らかい状態でのハンドリング及びロボットでのバリ仕上げが課題であった。

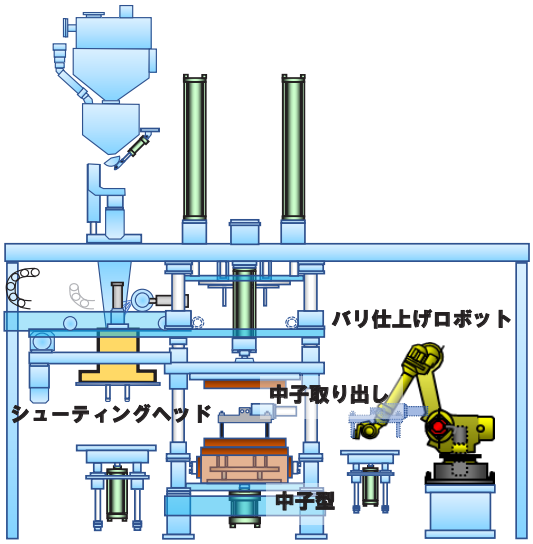


図10　無機中子造型機

無機中子造型 (図10) は、混錬した砂から水分を除去することで硬化させる方法である。そのため、中子造型機周りの雰囲気温度や湿度の変化により、シューティングヘッド内の砂の硬化速度に影響を与える。シューティングヘッド内での砂の乾燥を防ぐため、シューティングヘッド内を水冷却しているが、気温や湿度により露点が変化すると、シューティングヘッド内外で結露が起こり砂に過剰な水分を与え、中子品質を悪化させてしまう。そのため、シューティングヘッド周囲の気温、湿度を常時測定し、露点を算出、常時モニタリングし、冷却水の温度を制御することで結露防止対策を実施した。

造型直後の無機中子は柔らかいため、把持することが困難である。中子を下面からすくい上げる仕様でハンドリングを実施することで、型からの取り出し及び、搬送ラックへの積み込みを実施した。(図11) これにより柔らかい造形直後の中子を壊すことなく自動ハンドリングすることが可能となった。

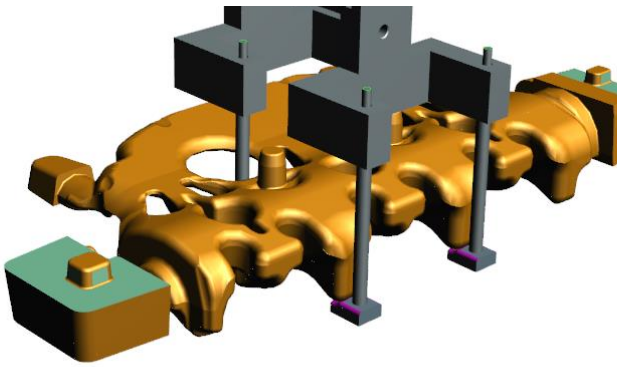


図11　中子把持具

造型後の中子はロボットにてバリ仕上げを実施しているが、無機中子の脆い特性、薄い中子形状からバリ仕上げ中に中子が折れ易かった。そのため、バリ仕上げ時の受け台の中子との位置決めブロック形状やクリアランス設定を見直し、バリ仕上げ時の中子の動きを最小限に抑えることで中子折れを対策した。

仕上げられた中子は搬送ラックに積載され、無人搬送車 (図12) により牽引され中子外観場まで搬送される。フロアの状態により搬送中の中子に少しでも衝撃が加わると中子が容易

図12　中子無人搬送車

に折れてしまうため、搬送ラックにバネを挟み込み、衝撃を吸収させることで、凹凸のあるフロア上でも薄く、脆い中子の自動搬送が可能となった。

鋳造工程では、中子を金型に収める作業及び、製品を金型から取り出す作業をロボットにより自動化している。

中子が脆く、薄いため、ハンドリング時や金型に収める時の少しの衝撃により、金型内に砂粒が落ちることで発生する砂噛み不良や金型に収めた中子が折れた状態で鋳造することによる中子折れ不良が懸念された。中子の巾木をハンドリングに最適な形状にデザインし、その部位を把持することにより、それらの衝撃を最小限に抑えた。（図13）さらに、中子収め後のエアブローによる砂除去作業もロボットにより自動化することで、中子を破損させず、金型に設置し、かつ、中子設置後の金型表面の余剰残砂を確実に除去することで、鋳造工程を自動化することができた。（図14）

中子による中空部の検査は、CTによる自動検査を採用し、複雑かつ緻密な内部形状を全数保証している。

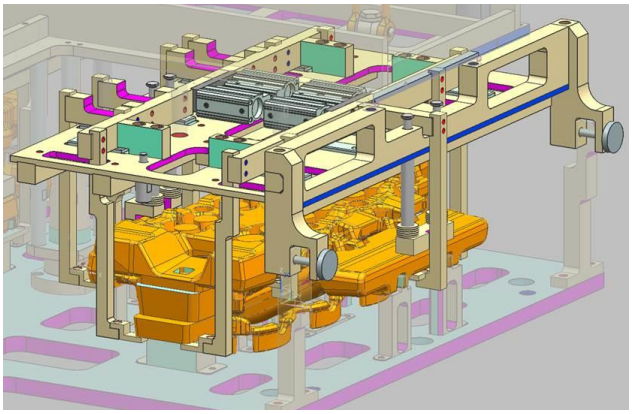


図13　中子セット治具

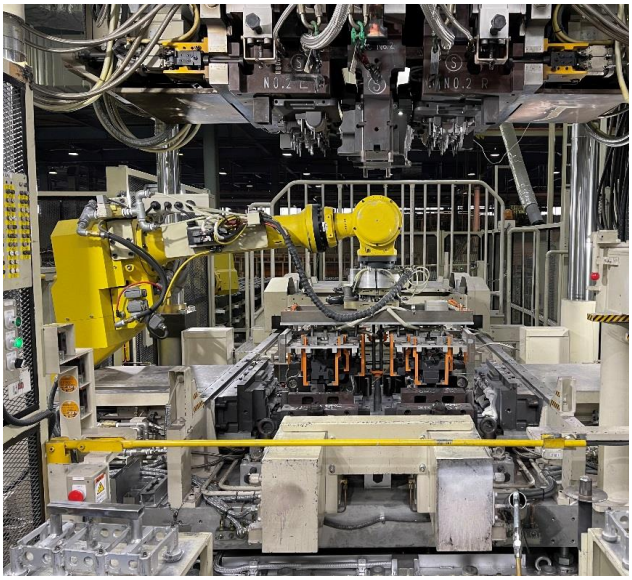


図14　鋳造機･中子セットの中の写真

3.3　溶解・熱処理工程のエネルギーロス低減

アルミ鋳造工程業界では、溶解工程及び熱処理工程でアルミ鋳造工程の35%のCO2を排出している。カーボンニュートラルに向けた取り組みが加速する中で、CO2削減に繋がる省エネルギーを考慮した生産設備設計が求められており、本ラインにおいても、小モジュール化及び熱効率に優れた設備を採用することで、省エネルギーを実現したのでその内容を紹介する。

〈溶解工程〉

従来の溶解工程は、時間あたり3～4トン/hrの溶解能力を有した大型溶解炉を各工場毎に配置し、溶融したアルミニウムを取鍋付きフォークリフトで多数の低圧鋳造機に順次運搬・配湯する方式であった。大型溶解炉ゆえに、操業度に関係なく常にバーナーで溶湯を保持する必要があり、エネルギーロスの課題と溶湯を運搬・配湯する安全上のリスクの課題があった。本ラインでは、低圧鋳造機1台に必要な最低限の能力を有した小型溶解炉（図15）を各低圧鋳造機横に配置し、ロボットを用いて溶湯を低圧鋳造機保持炉に配湯する方式とした。作業者は、アルミ材料を所定の場所にセットするのみであり、従来の大型溶解炉では困難であった材料投入から溶解～配湯までの工程の自動化が実現できた。これにより、作業者が溶湯を運搬する危険性を排除し、安全面と環境面で向上が図れた。また、低圧鋳造機毎の操業度に応じて溶解炉を停止することが可能となり、エネルギーロスの削減が可能となった。

図15　手許溶解炉外観

〈熱処理工程〉

シリンダーヘッド鋳造工程では製品の機械的性質向上を目的に熱処理工程があり、前述の溶解工程同様に従来は大型熱処理炉を各工場毎に数台配置し、熱処理バスケットと呼ばれるステンレス製のバスケットにワークを充填し溶体化工程（約500℃）、水冷却工程（約80℃）、時効工程（約200℃）をバスケット搬送する連続熱処理炉を採用していた。この連続熱処理炉の搬送に使用するバスケットは、ワークに対し約2倍の重量があり、ワークのみならず搬送に使用するバスケットも同程

度の温度まで加熱されるため、熱損失が膨大であった。低操業度時は、バスケットへのワークの充填率が下がり、更なる熱効率の低下が余儀なくされていた。また、高温・急冷の繰り返しによるバスケットの変形もあり、定期的なメンテナンスが必須であった。これらの課題を解決するために、バスケットを使用しないロータリー式の回転熱処理炉（図16）を採用した。各工程間（溶体化～水冷却～時効化～空冷）をロボットを用いてワークをハンドリングし、ワーク投入から搬出までを全自動化した。ワークの処理を１個送りとすることで、熱処理工程で発生する製品内部の残留応力バラツキを低減する事ができ、製品の薄肉化に寄与している。また生産能力は、低圧鋳造機２台分の小さなモジュールとした。

熱処理バスケットレスにより熱損失が皆無となり、約44％の熱効率向上が図れた。また小モジュール化により、操業度に応じて運転・停止が可能となり、エネルギーロス削減に大きく寄与できた。

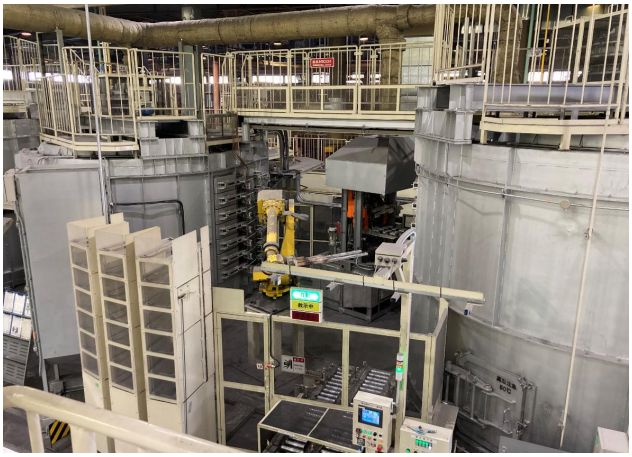


図16　熱処理炉外観

4. おわりに

V-LPDC（吸引低圧鋳造法）という新たな鋳造工法の開発と新規プロジェクトへの適用により、シリンダーヘッドの▲４％の製品軽量化に貢献することができた。さらに生産工場ラインとしても、より魅力ある製品を実現する新たなアライアンススタンダードラインを構築することができ、実生産に適用したことでCO_2排出量を▲24％削減することができた。

更なる進化を続けるとともに、グローバルに本技術を広げ効果を最大化し、今後もお客様に魅力ある製品をお届けするため鋳造技術としてより高機能、高品質な部品を生み出していく。

著者


杉山　雄大


土屋　真一


久米　洋道


西　高宏


田渕　満智

特集２：次世代のフラッグシップ ARIYA

1. 次世代のフラッグシップ ARIYA

赤石　永一*　　中嶋　光**

1. 初 め に

2010年に世界に先駆けてEVの量産を始めた日産自動車は、10余年の市場経験を基に革新的な次世代EVとしてアリア（図1）を開発した。アリアは、新しい日産とNissan　Intelligent Mobilityを体現した車であり、目指したのは、「車の未来を感じる次世代のフラッグシップEV」である。お客様に「EVだからこそ実現できる比類なき至福のご経験を提供したい」という思いを込めた。

図1　ARIYA

2. 次世代フラッグシップを目指して

アリア開発にあたり、EVの特性を十分に活かしつつ、最新の技術を取り込み、すべての面でお客様にご満足いただけることを目指した。そこで我々は、多くの価値を同時に実現するために、新たな要素技術開発とそれらを高度に融合させる革新的システム技術の開発に挑戦した。

まず初めに、新たなEV専用PFによるパッケージの革新で、広く静かな室内、十分な航続距離、美しいスタイリングを実現した。次に、インフォテイメント技術の革新により、豊富なサービスと驚くほどの使いやすさを両立、そして、車両統合制御の革新により、高い動力性能と安定した走行性能を具現化した。また、あわせてProPILOT 2.0の性能を向上し、新たにリモートオートパーク機能を追加した。

以下それぞれの技術革新について、次章からの詳細な説明に先立ち、概説していきたい。

3. EV専用PFによるパッケージの革新

これまでのEVの多くは、ICE搭載車用のプラットフォーム設計の考え方を踏襲していたため、EVの持つ小さなパワートレインの特性を十分活かしきれていなかった。そこで、今回、EV用パワートレインと車両搭載技術を高度に融合させたEV専用パッケージを新たに開発することで、室内空間の拡大、フロントオーバーハングの低減とホイールベースの拡大、最小回転半径の低減、操縦安定性や乗り心地性能の向上、EV航続距離の拡大、静かな室内等の実現を目指した。

それぞれの目標を満足する個々の達成手段には相反するものが数多くあるため、以下に述べる高度な技術開発を統合的に行う複雑なシステム技術開発に取り組んだ。

3.1　基本構造と室内空間、スタイリング

まず室内高の拡大に関しては、電池搭載のための床下構造を総合的に見直した。後述する必要な電池容量を確保しながら、同時に温調機構を備え、車両強度や剛性を確保するためにクロスメンバーを取り込む構造とした（図2）。それにより、超薄型かつ大容量電池搭載可能で高剛性を有する、車体一体型の電池パッケージを開発することができた。さらに、その

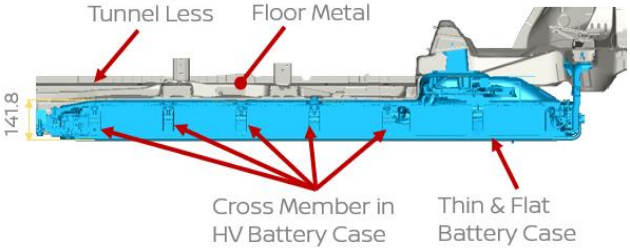


図2　床下構造

* 常務執行役員　　**Nissan 第一製品開発部

高剛性パッケージを前後の車体と連結することで、車両全体のねじり剛性を高め、バッテリー床下配置による低重心化、おおよそ50：50の前後重量配分の効果と併せて、操縦安定性の向上と乗り心地性能の向上を高次元で両立させることができた。

また、パワートレインを小型化した空間を活かし、これまで室内に配置されてきた空調装置（HVAC）をモータールーム内に配置した。同時に、構造的に空間の多いHVAC自体を衝突時のつぶれ代としても機能させることで、衝突性能を維持しながら車室内空間の大幅な拡大を図った（図3）。また、同様にその空間を活用し、タイヤの切れ角を増大させ、Dセグメント並みの室内空間ながら、Bセグメント並みの最小回転半径を実現している。

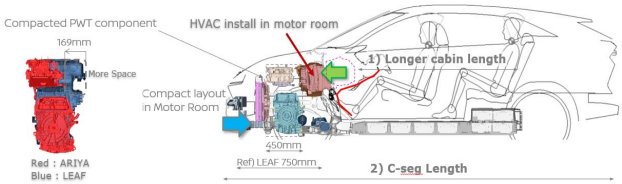


図3　パワートレインとHVACレイアウト

加えて、電動センターコンソールの採用とインストパネルの小型化により室内長を最大化し、フラット化した床面により前後席の足元スペースを拡大した。

このプラットフォームにより、Cセグメントの全長ながら、室内有効長はDセグメント並みの広さを実現することができた。同時に、ショートオーバーハング、ロングホイールベースレイアウトを可能にし、画期的で目を引くスタイリングを実現可能なベースを築くことができた。

これら画期的な室内や外観はアリアの大きな魅力であり、EV専用の新プラットフォームにより実現することができた。

3.2　長い航続距離

アリアを多くのお客様に買っていただきEV普及に貢献するために 航続距離、充電性能、冷暖房時の電費等のEVの基本性能を向上させ、お客様の実際の使用シーンで利便性を大幅に高めることを目指した。

その開発要素として、地道な走行抵抗の低減に加えて、主たる走行抵抗である空気抵抗の低減、夏場の高速道路走行で重要になる急速充電性能の向上、冬場の暖房性能の向上と電池耐低温特性の向上を図った。

3.2.1　電池容量

航続距離については、お客様の使用用途に応じて選択可能な様に、B6グレード車とB9グレード車を設定した。B6グレード仕様は主に毎日の通勤や買い物に使用するお客様を想定し、B9グレード仕様は週末のレジャー（ゴルフやキャンプ等）を中心に使用するお客様を想定した。その想定レンジを満足する電池容量を、以下に示す技術開発で実現した高い電費から導き出し、B6グレード：66kWh、B9グレード：91kWhとした。

3.2.2　空気抵抗の低減

空力抵抗係数（Cd値）を低減するため、流れるようなルーフ形状とし、フロントマスクにはエアカーテンと呼ぶ風流れを整流する通気口を設けた。また、空気流れのコントロールのために床下にフラットなフルアンダーカバーを採用した（図4）。これによりCd値：0.3以下を達成し、SUVとしてはトップクラスの空力性能を実現することができた。

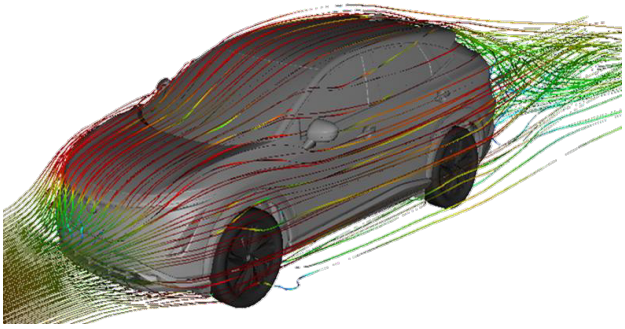


図4　空気流れ

3.2.3　急速充電性能

急速充電性能は、高速道路のパーキング等で急速充電するするシーンを想定し、30分間の急速充電でバッテリー電力残量が10％から80％に回復できることを目標とした。充電速度はバッテリーの内部温度に強く依存するため、気温や走行パターンによらず安定した充電性能を確保し、また、薄型にできる様、液体による温度調整システム（図5）を開発した。

なお、将来を見据えて、この車載充電装置の受け入れ可能なパワーを130kWに設定し開発を行った。

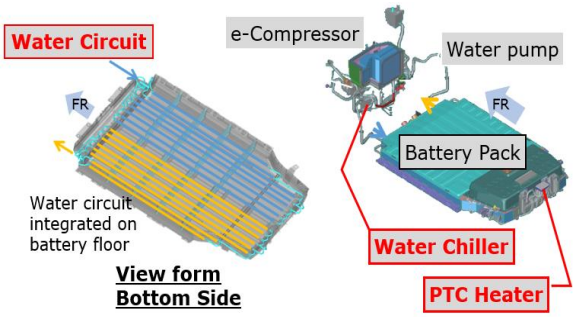


図5　温度調整システム

3.2.4　暖房性能

EVにとって、走行以外で最も大きなエネルギーを必要とするのが、夏期に比べて外気温との差が大きい冬期の暖房である。高効率なヒートポンプ式を採用し、暖房時の電費を大きく改善することで冬期の航続距離拡大を目指した。

3.3　静音性

エンジンの無いEVの騒音は、路面とタイヤの間で発生するロードノイズ、高速走行時に発生する風切り音、モーターが発する音が主なものである。

ロードノイズに対しては、ノイズ吸収材内蔵タイヤや二重防振サブフレームを採用し、車体骨格の徹底的な剛性強化によるノイズ伝達系の感度低下を実施した。風切り音については、風流れ渦が発生しないように外板の段差、隙間を無くし、また遮音ガラス等の採用により車室外から入りこむ音を徹底的に遮断した。

さらに、ロードノイズが低い低車速等で、わずかなモーターの回転変動や半径方向振動が気になることがあるため、低速での音振特性に優れた新たなモーターを開発し、フラッグシップにふさわしい静音性を実現することができた。

4. インフォテイメント技術の革新

これまでの車載型操作表示装置とコネクテッドシステムは、新たなサービスや機能の増加に伴い、選択すべき階層が広く深くなると同時に操作や表示が煩雑になる。また、システムが複雑であるがゆえに、機能追加に時間がかかり、タイムリーなサービス提供が難しいという課題があった。そこで、アリアでは、IVIパネルとメータパネルの2つの大きな画面を統合的に使えるようにし、操作階層を大幅に減らすとともに操作のしやすい入力システムを構築した。また、表示装置としても、スワイプ操作で2画面を一体的に使えるようにすることで、わかりやすく使いやすいインターフェイスを開発することができた（図6）。

また、この入力装置の機能であるNAVIやエアコンの設定等

図6　画面スワイプ

には、ドライバーの音声により操作可能なボイスリコグニションを採用しており、お客様の自然な発話を理解する、利便性の高いHMIを実現した。

それを支えるコネクテッドサービスシステムは、柔軟性と開発スピードを担保するために、サービス用サーバーとシステムサーバーを分離独立させ、加えて、重要な機能統合ソフトウエアを内製で開発した。同時に、車載用のファームウエア更新を無線で行うFOTA（Firmware Over-The-Air）を導入し、永続的に、豊富なサービスを使いやすく、タイムリーに提供可能なシステムを実現できた。

5. 車両統合制御の革新 e-4ORCE

お客様要望の強い4WDを搭載するにあたり、単なる生活4WDではなく、車両制御とパワートレイン制御を融合させた、新たな4WDの価値を提供したいと考えた。

GTRやアテッサで採用されている、車両の走行状態に応じて前後アクスルのトルク配分を制御する4WD制御技術に、リーフで培ったモータートルクをmsec単位で高速高精度制御する技術を高度に融合させることにより、どんな路面の状況（雪道、凍結、雨、ドライ）であっても常に安定した車両挙動を実現し、安心、安全なドライビングを提供することを目指した。

前後に配置された2つのモーターは、従来の駆動力制御に加え、車両の加速度、ヨーレート、タイヤのスリップ判定など、これまで車両制御に用いられてきた情報を統合し、シームレスで自由自在な前後トルク配分を作り出す。加えて、4輪のブレーキ制動制御を統合することで、各輪荷重に応じた最適な駆動力を制御可能にし、車両挙動を高度に制御することを可能にした。

例えばワインディングロードの走行では、カーブ入り口では回頭性を良くするためにFR車のような後ろよりトルク配分、カーブの中間では挙動の維持をするために前後50:50、カーブの出口でFF車のような前よりトルク配分とし、滑らかに加速しながらカーブを抜けてゆく、この様な制御を前後独立して実施する（図7）。また、モーターによる前後配分を最適化した回生ブレーキの制御により、ドライバーだけではなく助手席や後席に乗る人にもスムーズで、快適な乗り心地を提供する。

e-4ORCEは、優れた動力性能に加え、運転するお客様に安心・安全そして運転する楽しさを提供する卓越した性能を有するシステムである。

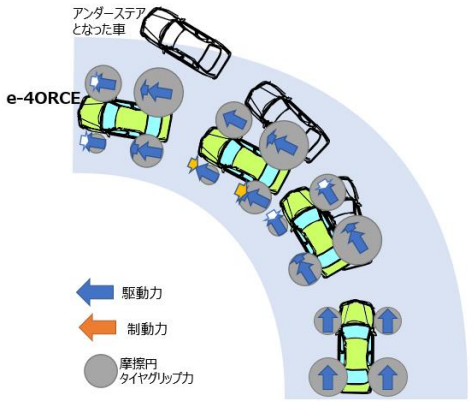


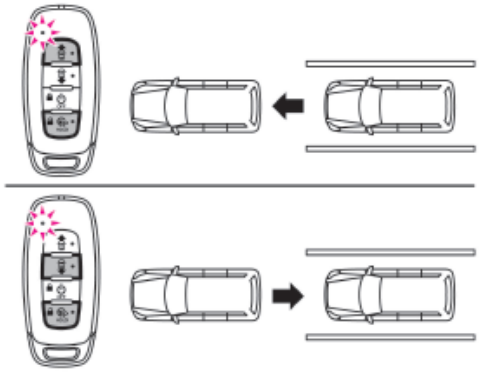
図7　e-4ORCE作動

6. ProPILOT 2.0、Remote Auto Park

スカイラインに搭載したProPILOT 2.0 は、多くのジャーナリストから単に便利で安全快適なだけでなく、「相棒」「パートナー」と言った表現でこれまでにない人とクルマの関係を表現していただいた。さらにその性能を向上させるため、準天頂衛星の信号を用いて自車位置精度を向上した。

複数車線の高速道路で、従来は自車がどの車線にいるか判別することが困難であったが、準天頂衛星信号を使う事により50cmレベル精度で自車位置の把握が可能となり走行する車線の位置を正確に確認することが出来る。これにより進路案内の精度が大幅に向上し、高速道路の分岐点に対する車線選択案内や車線変更案内が正確にかつスムーズに出来るようになった。

また、お客様への支援という意味では今回Remote Auto Park（RAP）という新しい技術を搭載した。専用のリモコンKeyを使う事で車外からアリアを前後に動かすことができる機能である（図8）。狭い駐車場で乗り込む際に先ずRAP機能で少し前進させ、ドアが十分に開けられるスペースを確保したうえでアリアに乗り込むということが可能となる。



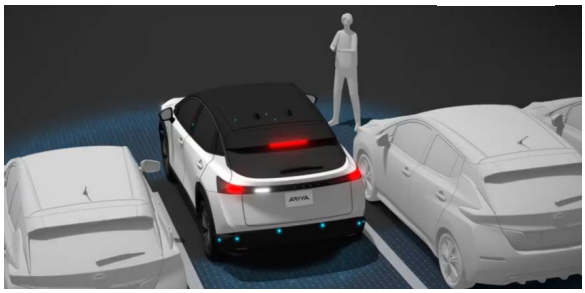


図8　Remote Auto Park

7. まとめ

開発した革新的システム技術によりアリアは、CセグメントSUVながら、Dセグメント並みの車室内広さとEセグメント並みの静音性を実現し、圧倒的に広く静かな、フラッグシップにふさわしい空間を実現した。同時に、WLTCモードでの航続距離は、最大610kmを達成した。情報を自在に操れる統合型インターフェイスディスプレイとコネクテッドサービスシステムにより、豊富なサービスと使いやすいインフォテイメントを実現した。また、日常から雪道まであらゆる走行をレベルアップさせるe-4ORCEにより、卓越した走行性能を実現した。

なお、この章では触れることができなかった多くの技術的チャレンジについては、以下の章にて取り上げているのでご参照いただきたい。

アリアは日産が有する全ての最新技術を盛り込んだ、まさにNissan Intelligent Mobility の象徴であり、車の未来を感じる次世代フラッグシップEVに作り上げることができた。実際にアリアに乗って、触れていただき我々開発者の想いを感じて頂ければ幸いである。

著者

赤石　永一

中嶋　光

特集２：次世代のフラッグシップ ARIYA

2. 高いパッケージング効率を実現した EV専用プラットフォームCMF-EVの開発

大西　将浩*

1. はじめに

2010年に発売を開始したリーフは、本格的な量産EVとして、高い信頼性や安全性、EVらしい走りの気持ちよさがお客様に受け入れられ、EV普及時代を切り開くパイオニアとして貢献してきた。

今回、アリアで採用したEV専用プラットフォーム（CMF-EV）を新規開発するにあたり、リーフで培った高度な信頼性・安全性を継承・進化させつつ、車両パッケージ・航続距離・走行性能について「さらにお客様の期待を越えること」を、取り組むべき課題に据えた。

本稿では特に広い室内と大容量バッテリーの搭載、高い走行性能を達成させたキーポイントについて解説する。

2. EV車両パッケージの現状

お客様がEVに期待する車両パッケージとして、大きく以下２つが挙げられる。

① コンパクトなパワートレインによる、前後方向で広々とした室内空間

② 排気系、プロペラシャフトレスによる、完全にフラットな室内フロア

しかしながら、実際に双方を両立させるEVの開発はお客様の想像以上に困難である。

図1に、市販SUV群における車両全長と有効室内長（アクセルペダルから後席乗員ヒップポイントの距離であり、居住空間の前後長の代表指標）の比較を示す。SUV EV車のベンチマークラインはSUV ICE車に対して前後方向のパッケージ効率で劣っていることが解る。航続距離確保を目的に大容量高電圧バッテリーを搭載したEVでは、車両質量が大幅に増加する。そのため、ICE車に対して、低速衝突時の損傷性ならびに高速衝突時の乗員・高電圧安全確保に必要な衝突ストロークが増え、コンパクトな駆動系によるスペースメリットを相殺していた。

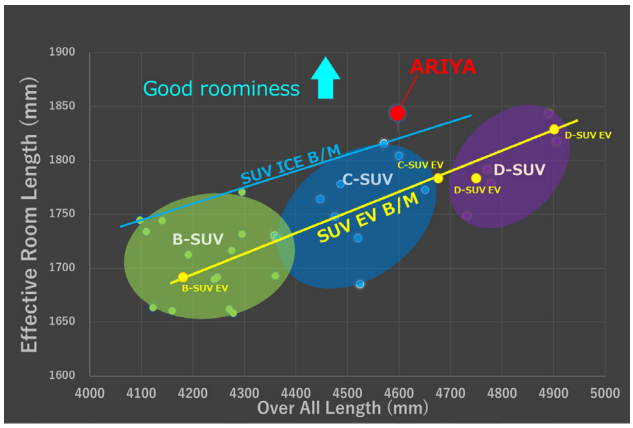


図1　SUV群における車両全長･有効室内長比較

また、完全フラットフロアについても、リーフではセンタートンネル内にブレーキ配管、冷却水配管、高電圧ハーネスなどを配策しており、お客様の期待に必ずしも応えられていなかった。

3. 新規EV専用プラットフォームCMF-EVでの進化

アリアに採用したCMF-EVでは、空調ユニットをエンジンコンパートメントに搭載するブレークスルーと、機能統合によるパッケージの高密度化を図り、SUV ICE車のトップベンチマークを上回る前後方向空間効率と完全フラットフロアを実現した。（図1・図2）

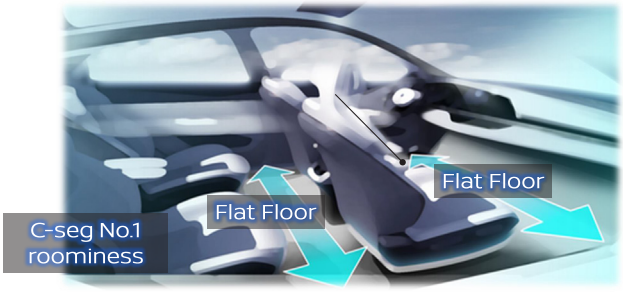


図2　高い空間効率と完全フラットフロアを実現

*Nissan 第一製品開発部

更に、上記の機能統合部品を計画当初から車体骨格剛性の前提に織り込むことで、お客様がEVに期待する意のままの操縦性・乗り心地と軽量化を両立させた。

4. 空調ユニットのエンジンコンパートメント内配置

本章以降は、より具体的な達成方策について解説する。従来は室内のインストゥルメントパネル内に配置されていた空調ユニットを、エンジンコンパートメント内配置に変更し、薄型インストゥルメントパネルを実現したことは、アリアのワールドプレミア等で紹介され、広く知られている。

しかしながら、単なるユニット搭載位置変更のみでは車両全長に対する有効室内長、すなわち前後方向のパッケージ効率向上に殆ど寄与しない。なぜならば、室内空間が延長される一方で、空調ユニットを搭載するエンジンコンパートメントは延長せざるを得ないからである。

アリアにおけるブレークスルーは、空調ユニットの移動に加えて衝突時に積極的に圧壊させる構造としたことである。図3に示す通り、従来の空調ユニットはダッシュパネル後方、すなわち非クラッシャブルゾーンに搭載されていた。単純に空調ユニットをエンジンコンパートメントに移動、かつクラッシュストロークを維持すると、空調ユニットの前後寸法分エンジンコンパートメントの延長が必要になる。（図4）

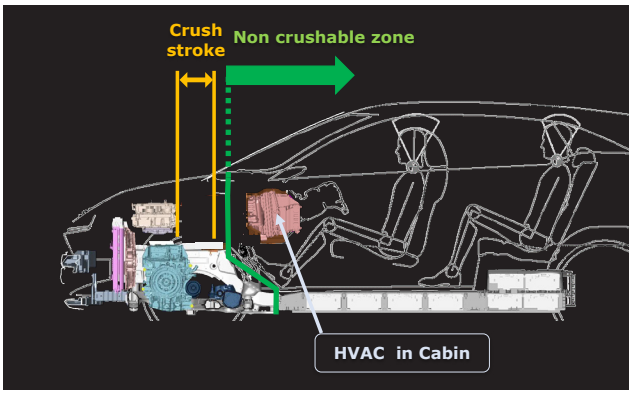


図3　従来の空調ユニットとクラッシュスペースの関係

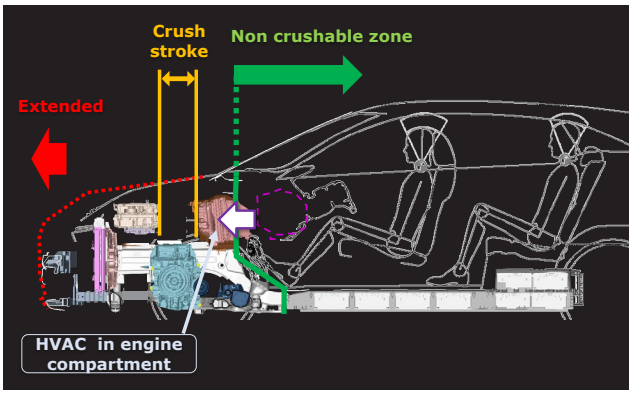


図4　空調ユニット移動とエンジンコンパートメント延長

アリアに採用したCMF-EVでは、空調ユニットを圧壊させることにより、必要なクラッシュストロークを確保しつつ、エンジンコンパートメント前後長を短縮した。（図5）

空調ユニットは主に熱交換器、冷媒配管、ブロアファン、ダクト等で構成されているが、熱交換機とブロアファンモータ以外の構成部品は樹脂あるいは中空形状であるため、圧壊代が存在する。そこで、アリアのフルラップ前面衝突時では200㎜程度空調ユニット本体を圧壊させる前提で衝突時のFS特性を空調ユニット割り付けて開発を進めた。

なお、空調ユニット構成部品のうち、高電圧部品である空気PTCヒータは、非クラッシャブルゾーンである居室内に搭載し、衝突時の高電圧安全にも配慮した。

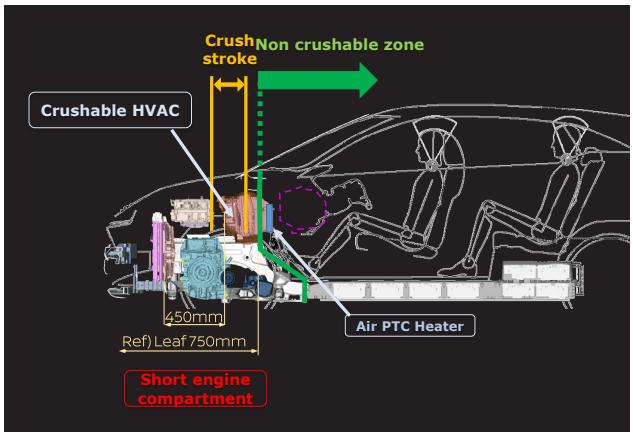


図5　空調ユニット圧壊前提のクラッシュスペース

ここでは、空調ユニットを安定して圧壊させる方策について解説する。図6にCMF-EVのエンジンコンパートメント内レイアウト図を示す。空調ユニットはエンジンコンパートメント内の最後方に搭載され、その前方には充電器、ジャンクションボックス、DCDCコンバータをアッセンブリしたアッパーパワートレインユニットが搭載されている。

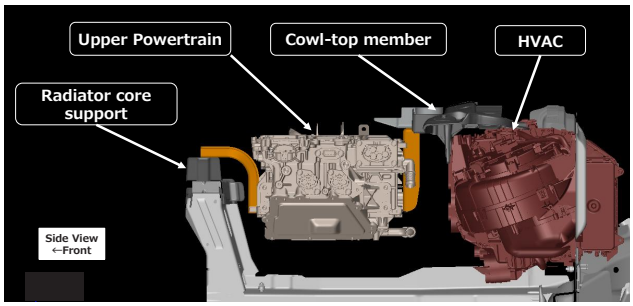


図6　エンジンコンパートメントユニット配置図

前面衝突時には、アッパーパワートレインユニットは衝突事象の中期から後退を開始し、空調ユニットの完全圧壊とほぼ同時に最大後退量に到る。様々な衝突形態において、安定的に空調ユニットを圧壊させるには、アッパーパワートレインユ

ニット側面視の初期搭載角度を維持したまま後退させることが望ましく、以下の考え方で挙動コントロールを達成した。

① アッパーパワートレインユニット前方を車体骨格と接続し、衝突時の後退挙動を安定させる

② アッパーパワートレインユニット後退時に後方固定点ブラケットを切り離し、アッパーパワートレインユニット後退を阻害しない

上記①の具現化構造として、フロントサイドメンバーと接続されたラジエターコアサポートメンバーにアッパーパワートレインユニット前方を固定するとともに、ブラケット許容変形量及び変形モードを規定した。

②に対しては、後方固定点のボルト締結部にスリットを設け、衝突時の後退入力を受けた時のみブラケットがスライドして抜ける構造を設けた。（図7）

通常走行時の確実な固定と衝突時のスライドを両立させるため、ブラケット剛性や表面処理、寸法精度、締結トルク管理等を徹底している。

上記取り組みによって、新たに空調ユニットスペースをクラッシャブルゾーンとして活用し、十分なクラッシュストロークとお客様の期待である「コンパクトなパワートレインによる、前後方向で広々とした室内空間」の両立が可能となった。

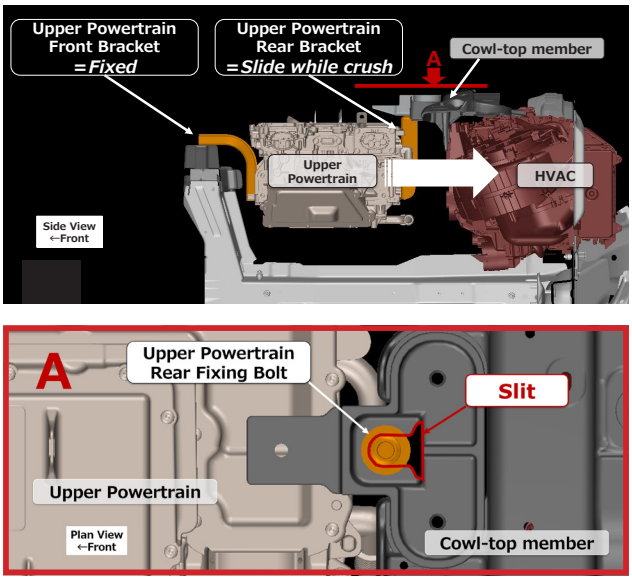


図7　前突時ユニット挙動ねらいと締結点のスリット構造

5. 機能統合による省スペース化と車体剛性の両立

大容量バッテリーの搭載、居室空間の拡大とフラットフロア、高い走行性能の実現を目的に、機能統合によるパッケージの高密度化にも取り組んだ。ここでは主要な2事例を紹介する。

第1は、アッパーパワートレインユニット固定構造、空調ユニット固定構造、ストラットタワーバーを統合したカウルトップメンバーである。図8に示す通り、従来構造において、アッパーパワートレインユニットはサイドメンバー間を接続するメンバー上に、空調ユニットは車室内のステアリングメンバーにそれぞれ搭載されていた。さらに高い操縦性能が求められる車両については個別にストラットタワーバーが追加されていた。

CMF-EVでは、新たに設定したアルミ製のカウルトップメンバーにアッパーパワートレインユニッと空調ユニットの固定、ストラットタワーバーの機能を集約することで、固定構造スペース低減と軽量化をすすめながら、ストラットタワー周りの骨格剛性向上を両立させた。（図8）

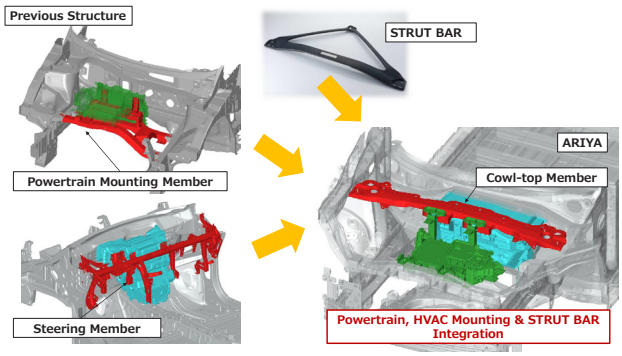


図8　カウルトップメンバーによる機能統合

第2は、高電圧バッテリーフレームの多機能化である。従来構造における高電圧バッテリーフレームの主たる機能は、バッテリー本体保持と衝突や路面干渉をはじめとする様々な入力からの保護機能である。

詳細は高電圧バッテリー開発の稿に譲るが、CMF-EVでは、バッテリーフレームにアルミ押し出し材を採用した利点を活かして、上記機能に加えて、バッテリー温調用ウォータジャケットと4WD用のリアモータ・インバータ行き冷却水配管を、新たにフレーム断面内に統合した。（図9）

さらに、リアモータ・インバータ行き高電圧ハーネスをバスバー化して高電圧バッテリーパック内に配策、ブレーキ配管を高電圧バッテリーパックとサイドシルの間隙に通すことによってトンネルを廃止し、お客様がEVに期待する「排気系、プロペラシャフトレスによる、完全にフラットな室内フロア」を実現した。

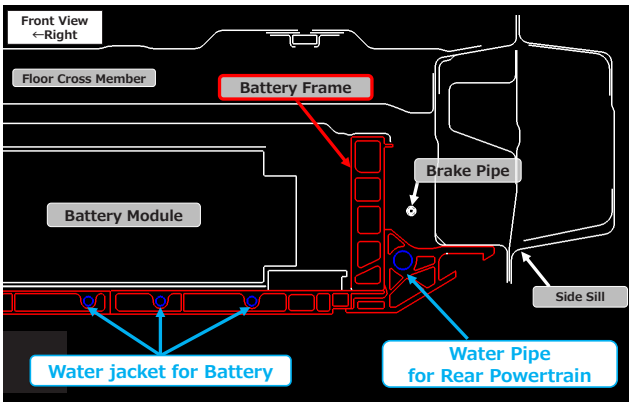


図9　高電圧バッテリーフレームへ水配管を統合

加えて、高電圧バッテリーフレームを主要な骨格部品として位置付け、車体骨格ならびにサスペンションメンバーとの結合強化を図った。

図10に示す通り、車体フロアに設定したホットスタンプ材の床上クロスメンバーと高電圧バッテリー内クロスメンバーは前後位置が互い違いとなる様に設定されている。高電圧バッテリー内クロスメンバーはサイドフレーム及びサイドレールを介して車体のサイドシルと結合されており、側面衝突時の高電圧バッテリーの保護のみならず、車体骨格剛性向上にも寄与している。

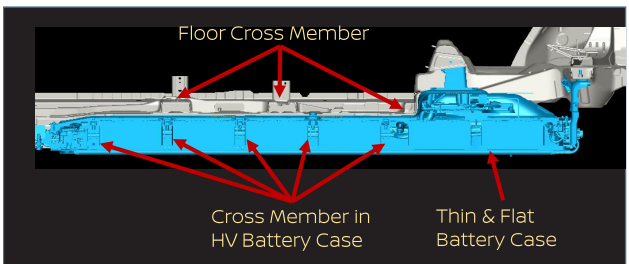


図10　車体フロアと高電圧バッテリー骨格位置関係

また、フロントサスペンションメンバーのリア側締結点、リアサスペンションメンバーのフロント側締結点と、高電圧バッテリーフレームとを、サスペンションピンステイを介して結ぶことにより、サスペンションメンバー締結点横剛性を向上させ、操舵応答性を高めた。（図11）

この様に、高電圧バッテリーフレームを主要な骨格部品として活用したこと等により、車体側クロスメンバー断面を縮小してフラットフロアを実現させつつ、従来Cセグメント SUV に対して約1.9倍の車体剛性を確保し、低床フラットフロアと乗心地性能をはじめとする動性能との両立を図った。

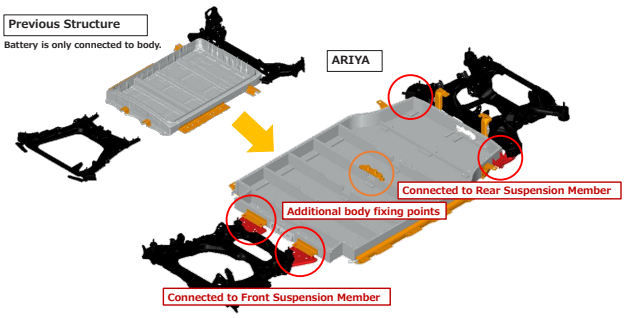


図11　サスペンションと高電圧バッテリーとの結合強化

6. おわりに

アリアに採用したCMF-EVは、当初からルノー車での活用も見据えて開発された。ルノーの主要開発メンバーも神奈川県厚木市の日産テクニカルセンター内のオフィスに常駐し、様々な技術課題に対して、お互いにアイデアを出し合い、日夜論議を尽くして技術解を練り上げ、ベストなものを選びながら開発を進めた。

また、開発中にEVを取巻く環境は日々激動したが、リーフで培った高度な信頼性・安全性を継承・進化させつつ、車両パッケージ・航続距離・走行性能について「さらにお客様の期待を越える」という当初目標はぶれることがなかった。

本稿では触れられなかったが、空調使用時や様々な温度条件を含む実用シーンでの航続距離や充電性能、高電圧バッテリーの耐容量低下特性などもリーフから進歩させることができた。さらに、e-4ORCEに代表されるEVならではの走りの良さやコネクティビリティーによる使い勝手の更なる向上にも取り組んだ。

結果として、アリアは、EVというカテゴリーを越えて、純粋なクルマとしても積極的に選んで頂ける製品になったと自負している。

これまでEV購入をためらっていたお客様にも広くご購入頂くことで、持続可能なモビリティに貢献できることを期待している。

著者

大西　将浩

特集２：次世代のフラッグシップ ARIYA

3. 統合型インターフェースディスプレイ

小畑　哲*　　江口　隆*　　笹沼　慶与*

近年、スマートフォンが日常の情報ツールとなり、ユースケースやUXの変化と共に車内のインフォテイメント情報は増加傾向にある。加えて、運転支援技術の進化により、周囲のセンシング情報やシステム状態等、情報の質も変化してきている。

このような環境変化において、運転や操作の負荷を減らすため、情報に容易にアクセスできるヒューマンマシンインターフェース（以下、HMI）を開発した。

本稿では、アリアで採用した「容易な情報へのアクセス」を支える技術である“視認性と操作性を両立する統合型ディスプレイのパッケージング”と、“多様なコンテンツを直感的で使いやすくするグラフィカルユーザーインターフェース（以下、GUI）”について述べる。

1. 視認性と操作性を両立するインターフェース

インフォテイメントディスプレイとメーターディスプレイを一体の情報表示エリアとする様々な方策を検討し、今回はステアリングホイールによる死角を考慮したディスプレイおよびコンテンツ配置を採用した（図1）。

図1　統合型インターフェースディスプレイ

運転に必要なメーター情報は、ドライバーから見やすい前方に適切な距離を確保して表示し、インフォテイメント情報は、ドライバーの手が届く操作しやすい距離に配置した（図2）。また、人間の視野は、縦に比べ横に約1.5倍広く、横方向への視線移動がしやすいことから水平に2つの情報を配置した（図3）。

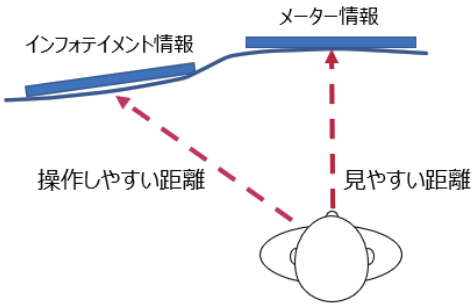


図2　情報レイアウト

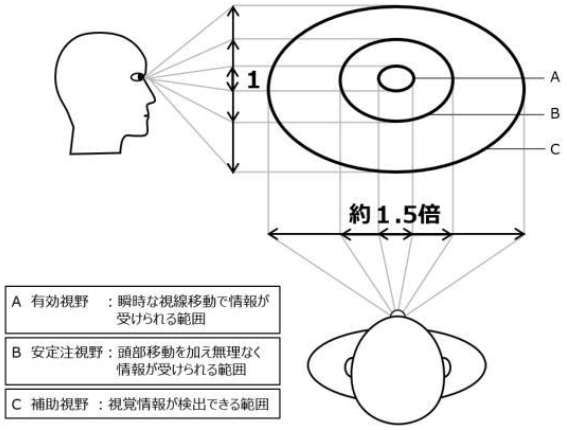


図3　人間の視野特性

これらディスプレイをS字曲面でつなぐことで、先進的なコックピットインテリアに調和した（図4）。これは複数曲率を持つカバーガラスを3Dホットフォーミング技術で生成し（図5）、カバーガラスの曲面に平面液晶ガラスを歪無く貼り合わせるオプティカルボンディング技術により実現した（図6）。

* コネクティドカー＆サービス開発部

図4　インテリアに調和したS字形状

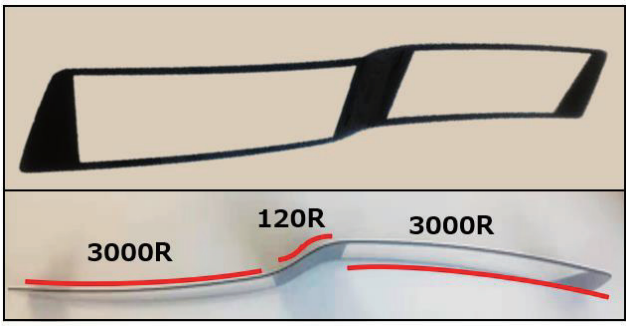


図5　S字形状のカバーガラス

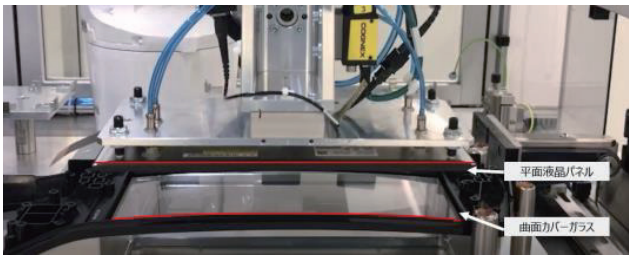


図6　曲面カバーガラスボンディング

2. シンプルで直感的なGUI

2.1　インフォテイメント情報

情報量の増加に対し人間の処理能力には限界があるため、分かりやすいメニューの数や配置を設計した。ウィジェット（図7）やタイルメニュー（図8）を大きくかつ数を最適化することで、機能の認知性と操作性を高めた。

最適なメニュー配列は、年代別被験者のメニュー選択しやすさ評価に基づき決定した。メニュー数の増加とともに短期記憶のしやすさは低下するが、年代によらず9割以上の正答率となる計8個の4列×2行メニューを採用した（図9）。

基本的な使いやすさに加え、様々なコンテンツをお客様の好みや使い方に合わせてカスタマイズできる。また、タイルメニューは、ドラッグ&ドロップで直感的なレイアウト変更ができる（図10）。

図7　ホームウィジェット

図8　8タイルメニュー

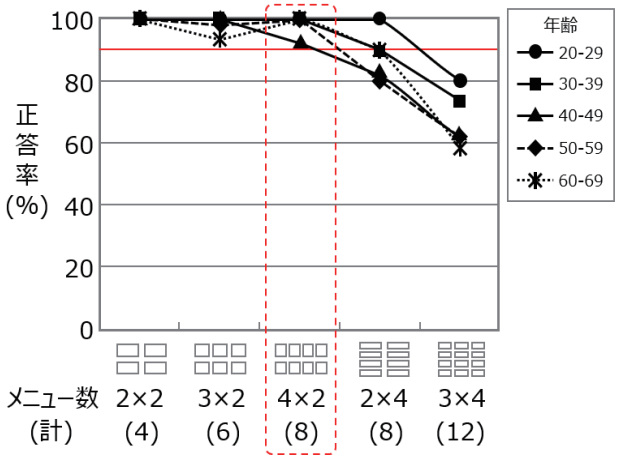


図9　選択しやすいメニューの数

図10　ホームウィジェットのカスタマイズ画面

2.2　メーター情報

メーター情報は、3つのゾーニングを表示の基本としている（図11）。さらに1ゾーン当たりの情報量を制限する事で情報を見つけ易くするシンプルモードを採用した。例えば、パワーゲージ、デジタル車速、走行可能距離を各ゾーンに配置する

事で、一目で車の状態を確認できる（図12）。

図11　従来から採用のメーター表示

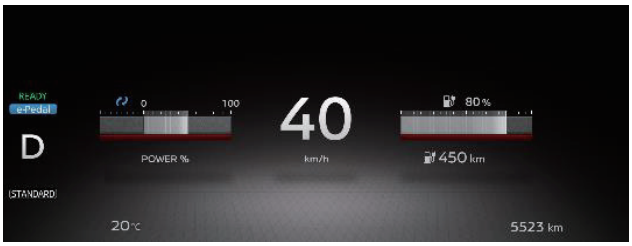


図12　ARIYAから採用のシンプルモード表示

2.3　2画面の情報連携

ドライバーがより見やすい位置で地図・オーディオ情報を確認可能にするため、直感的なスワイプ操作でインフォテイメントディスプレイからメーターディスプレイへ瞬時に情報を移動できる連携機能をEthernet通信により実現した（図13）。メーターでは地図を表示し、パッセンジャーは他のコンテンツを楽しむなど多様なユースケースをサポートした。

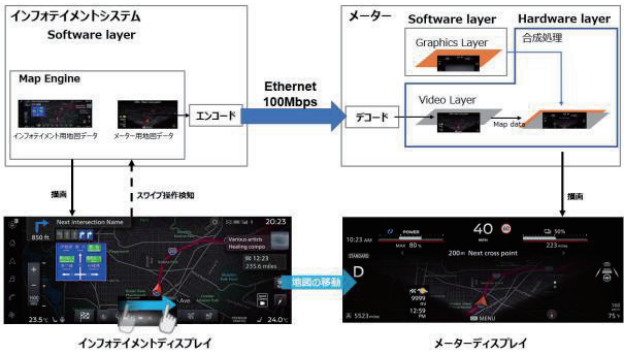


図13　Ethernetを使った2画面の情報連携

2.4　エモーショナルなUX

使いやすさの基本性能に加え、エモーショナルなバリューをお客様に提供する目的から、インタラクティブ性、空間性を持った機能・インタラクションを開発した。

音声認識機能では、認知性を高めるインタラクティブ性のある音声アニメーション表現を用いた（図14）。

ホームウィジェットは、パララックス（視差）効果によりタイルメニューとアイコンに空間性を持たせ、操作の気持ち良さ、楽しさをといった新しいUXを実現した（図15）。

図14　音声インタラクション画面

図15　パララックス効果を持つホーム画面

まとめ

アリアにおいて、「容易な情報へのアクセス」を支える技術として、“視認性と操作性を両立させる統合型ディスプレイのパッケージング”と、“増加する情報を分かりやすく・使いやすく構造化したGUI”を実現した。加えて、多様なアプリやアニメーションなど、新たなエモーショナルバリューをお客さまに提供することにもチャレンジした。

今後はさらに、コックピットHMIをドライビングコンシェルジュの役割へと進化させて行く。

著者


小畑　哲


江口　隆


笹沼　慶与

特集２：次世代のフラッグシップ ARIYA

4. 新しいNissanConnectの開発

村松　寿郎*　　船井　一宏**　　田﨑　克**　　村上　晋太郎*　　上島　宏幸**

1. はじめに

携帯電話網とナビゲーションシステムを接続し様々なサービスを提供するコネクテッドサービスは1990年代後半に始まり、日産自動車は“NissanConnect（旧コンパスリンク、カーウイングス）”を開始してから既に四半世紀が過ぎようとしている。

近年はインターネットの普及に伴う技術進化により自動車や家電のような「モノ」自体をインターネットにつなげてより便利に活用するIoT（Internet of Things）も身近になるなか、日産は2019年にコネクテッドカーシステムを刷新し、車両とお客様端末をシームレスにつなげお客様に新しい体験を提供するNissanConnectサービスの利用者が急激に増えている（図1）。

アリアでは、NissanConnect開発チームが全力で開発した技術を惜しみなく採用し、お客様に新しい感動体験を提供している。

本稿では、強化したNissanConnectプラットフォームと、それを土台に新たに開発した音声認識技術を紹介する。

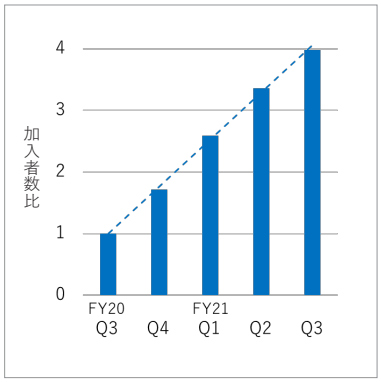


図1　NissanConnect加入者数推移

2. NissanConnectシステム

図２にNissanConnectのシステム概要を示す。車両にはIn-Vehicle Infotainment（IVI）とそのディスプレイ&GUI、クラウドとの通信を行うTelematics Control Unit（TCU）を装備し、車内の他のECUやセンサとLANで接続される。TCUは携帯電話回線を用いてクラウドシステムと通信する。クラウドシステムはユーザへのサービスや情報を提供するためのコールセンタや3rdパーティによる情報提供システムが接続される。またユーザのスマートフォン上の専用APPはこのクラウドシステムと連携しており、これらIVI、ディスプレイ、IVC、クラウドシステム、およびAPPによってNissanConnectのプラットフォームとなっている。

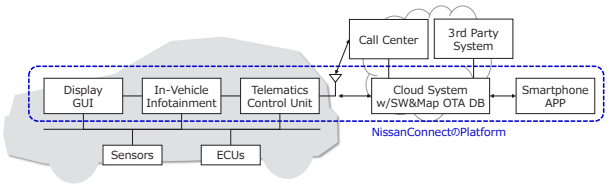


図2　NissanConnectシステム概要

ここでクラウドシステムは大きく３つの構成要素からなり、車両接続・車両情報管理部、サービスロジック・提供管理部とソフトウェア・Map OTA（Over-the-Air）配信管理部である。これらは迅速にグローバル展開することを目的に、コア部分をグローバル共通化した上で、各地域固有のニーズに合わせた地域ユニーク部分を追加する構成としている。またこのシステムには安定してサービスを提供するためのロバスト性と、変化するお客様の要望や周辺IoTに対応するためのフレキシビリティの両面が求められる。これを実現するため、よりロバスト性が求められる車両接続・車両情報管理部とソフトウェア・Map OTA（Over-the-Air）配信管理部をマイクロソフト社と共同開発し、よりフレキシビリティが求められるサービスロジック・提供管理部を内製することで効率の良い開発を実現している。

図３にこのプラットフォームを用いて提供する各種サービスのシーケンス概要を示す。例えばAPPから車両を操作するリモート機能では、APPへのユーザ入力をトリガにしてクラウド

* コネクティドカー＆サービス開発部　　** コネクティド技術開発＆サービスオペレーション部

サーバとTCU間で通信路を確立し、コマンドをTCUに送信する。TCUはそのコマンドによって車両システムを動作させるとともに結果をクラウドシステムを介してAPPに通知する。また、車両運行中に3rd Party情報と連携するサービスでは、IVIへのユーザ入力をトリガにしてクラウドシステムがプロキシとなり3rd Partyのシステムと接続し、そのサービスを提供する。これらのようにNissanConnectのプラットフォーム上に機能を構成することによって各種サービスを提供する。

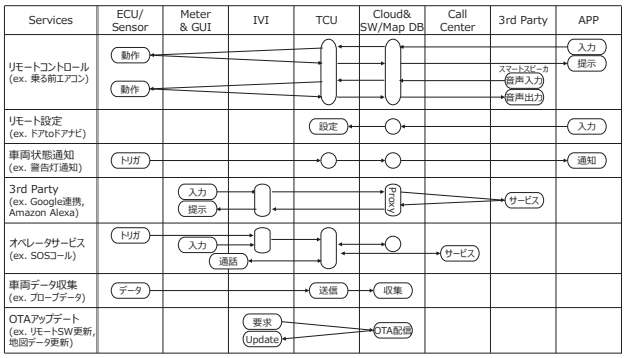


図3　NissanConnectサービスシーケンス概要

3. CCSを支える音声認識技術

運転中の車載機操作の負荷軽減に寄与する手段に音声認識技術がある。これまでは車載機本体に音声認識エンジンを装備したスタンドアロン方式が主流であったが、アリアではこれに加え、先に紹介したプラットフォームを土台として構成されるネットワーク上に配置した日産専用の辞書データベースを開発し、運転中に使われる日常的な発話表現とその意図を正確に理解できるオフボード方式を採用した。

自然言語の音声は、マイクを経由し車載機の音声信号処理を経て、1.音素認識、2.単語・文章認識、3.意図推定の順に処理される（図4）。

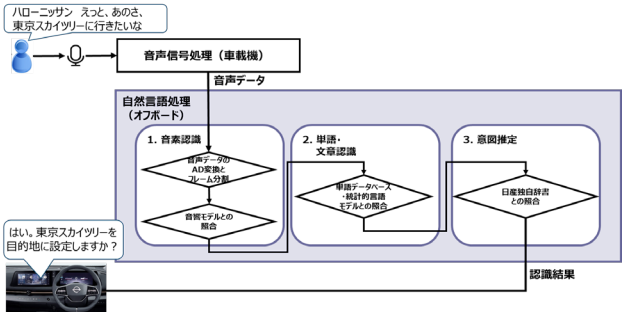
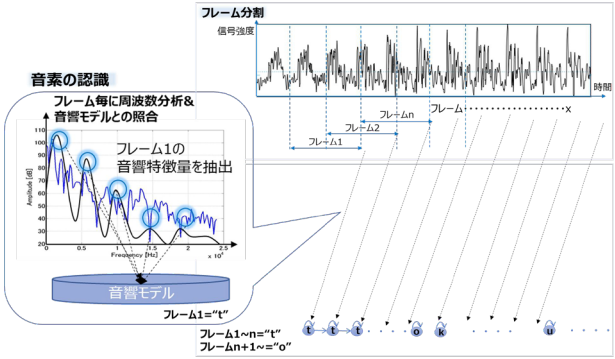


図4　自然言語認識処理の流れ

3.1　音素の認識

マイクに入力された音声信号はAD変換され等長のフレームに逐次分割される。そして周波数スペクトル分析をフレーム毎に行い音響特徴量を求め、それを音響モデルという人間の声を統計的に処理したモデルと照合することで音素を認識する。



（例：「to :kʲoː¯」＝「とーきょー」、「to」＝「とー」、「:kʲoː」＝「きょー」）

図5　音素の認識

3.2　単語・文章の認識

単語は、音素の時系列の繋がりを単語データベースに照合する事で得られる。また、単語から単語に遷移する確率をパラメータとして学習する事で得られる統計的言語モデルに照らして「最も確からしい単語の組み合わせ結果」を文章の最終候補として選定する。

例えば　“とう…きょうすかいつりーにいきたい“という入力に対し、「東京スカイツリーに行きたい」のように正確度が高い文章を認識する事ができる。

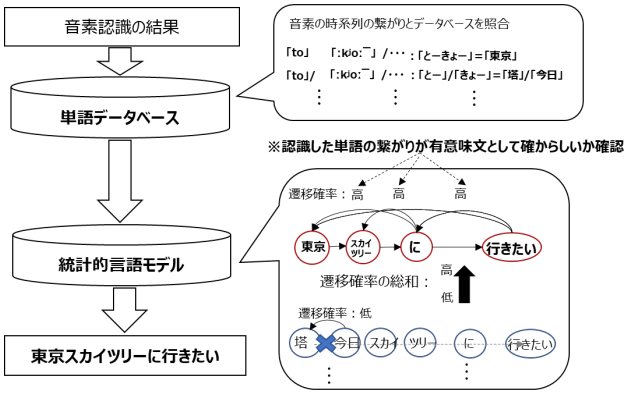


図6　単語、文章認識

3.3　意図推定

運転中に使われる発話の意図を推定するには、不要な単語（例：“えーと”、“あのさ”）を除去し、意図推定に必要な単語（例：東京スカイツリー＋行きたい）のみを抽出する処理が必要となる。

また、“に行きたい”の多くの同意語（“へ行く”、“を目的地にして”等）の認識や文法的には正確性を欠く語順となる場合もある。

これらを選別し、運転環境下でも十分な意図推定性能を確保す為、実運転環境で収集した約3000パターンの発話データを学習した日産独自の辞書データベースを開発した。

この辞書データベースを用いて、必要単語のみに絞り込むことで、他社水準70％程度に対しARIYAでは約85％もの音声認識率を達成した。

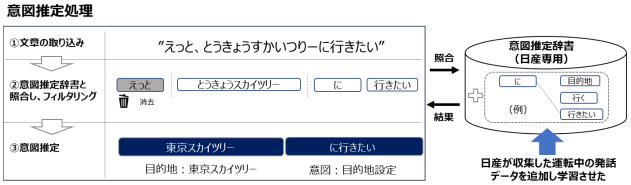


図7　意図推定

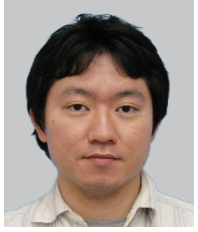
4. おわりに

NissanConnectプラットフォームを土台に、インターネットの一部として車が新たな価値を生み出す時代が到来した。今回紹介した音声認識は将来の新たな体験、例えばVPA（VirtualPersonalAssistant）等の対話型サービスに繋がっていく。「大切なのはお客さまにとっての価値」、「そこに競争力はあるのか?」「正解を知っているのはお客様だけ」、これらの言葉の意味と意義を改めて噛みしめ、新しい時代をリードするサービス開発に勇往邁進していく。

著者


村松　寿郎


船井　一宏


田﨑　克


村上　晋太郎


上島　宏幸

特集２：次世代のフラッグシップ ARIYA

5. ARIYA向け高容量リチウムイオンバッテリ

片村　淳二*　　八田　健太郎*　　若林　計介*　　高木　雅紀*　　轟木　直人*

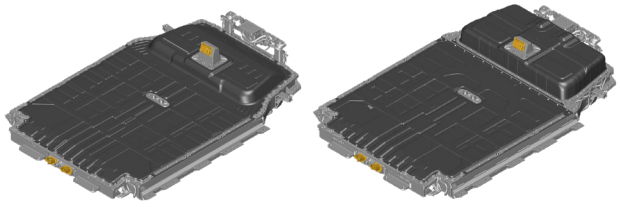
1. はじめに

近年、電気自動車（EV）のグローバル展開に伴い、さらなる航続距離の伸長が求められている。航続距離はバッテリ性能に大きく依存しており、所定のバッテリサイズにおけるエネルギー量の増加、すなわち体積当たりのエネルギー密度の向上が重要である。アリアは新開発のEV専用プラットフォームを採用することで、フラットで広々とした室内空間を実現しており、限定された空間でのバッテリレイアウト設計が求められていた。

一方で、利便性向上の観点から急速充電性能に対する要望も高く、短時間でより多くの充電量を確保することが求められている。そのためにはバッテリ温度を適切にコントールする温調システムが必要不可欠である。しかしながら、バッテリ温調システムはバッテリパックの体積効率を著しく低下させる要因であり、特に厚み（高さ）方向に大きな影響を与える。

今回、新開発したバッテリパックでは温調システムを搭載しているにも関わらず、リーフ e+に対してバッテリパックの厚さ当たりのエネルギー密度を約2.3倍も向上させた。この結果、車室内の居住性の向上に貢献しつつ、EVトップレベルの体積エネルギー密度・急速充電性能を実現した。

本稿では、アリアに搭載した高容量リチウムイオンバッテリ開発について紹介する。



B6グレード(66kWh)　　B9グレード(91kWh)

2. 室内空間の低床・フラット化を実現した技術

前述の通り、アリアは新開発のEV専用プラットフォームを採用しており、フラットで広々とした室内空間を実現している。その為、バッテリには薄型でフラットな構造設計が必要となり、その実現のため新開発した主要技術について紹介する。

薄型冷却機構

バッテリEV（BEV）には、一般的にLLCを用いた温調システムが採用されている。このシステムにはプレートがバッテリパック底面部に敷設されており、LLCをチラーで冷却/ヒーターで加温し、プレートに流す事でバッテリを温調する。

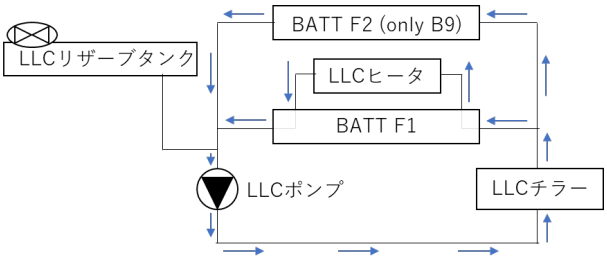


図1　バッテリ温調システム図

バッテリ内に配置された電池モジュールを均一に冷却/加温するためには、底板全面に均一にLLCを流す必要があるが、バッテリ内部空間はLLC流路と隔てられた水密空間である必要がある。その為、図2のように、底板、LLC流路機構、その保護板の３つの構造が必要になってしまう。しかし、アリアでは、それらを一体化する事でバッテリパックの薄型化を達成している。（図3）

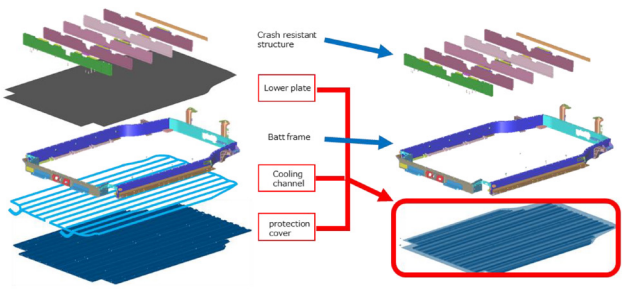


図2　他社バッテリ冷却構造　　図3　アリア冷却構造

* パワートレイン・EVエネルギー技術開発部

アルミ押し出しによるバッテリフロア

バッテリ筐体の底板、LLC流路機構、保護板を一体化するために、バッテリ筐体にはアルミ押し出し工法を採用し、押し出した底板の中をLLCが流せる断面構造とした。これによって、底板と冷却プレートの一体化を実現し、厚さを抑えた冷却機構を実現した。（図4）

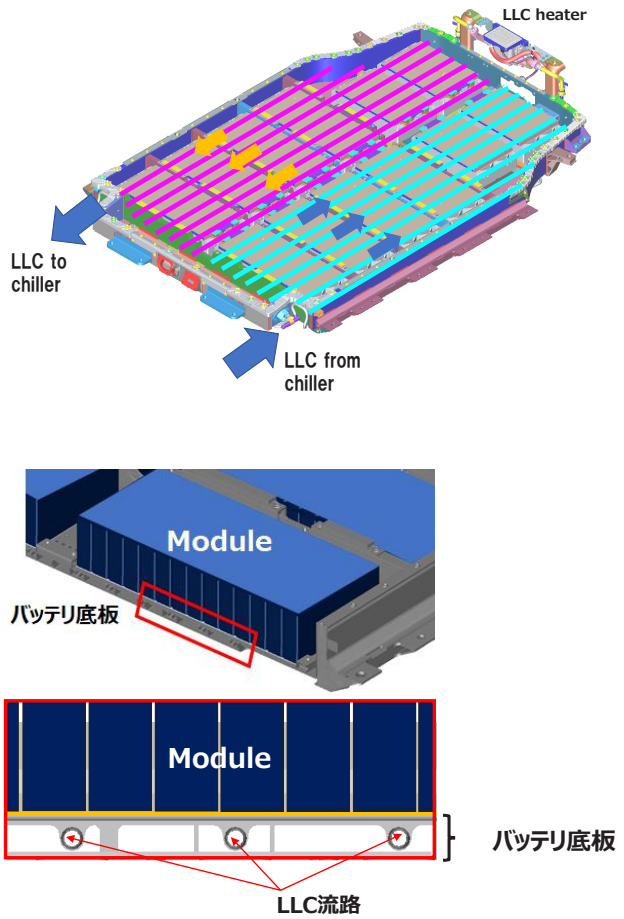


図4　LLC流路付きバッテリ底板断面

LLCを流す断面は電池モジュールを搭載するアッパープレートに接するように構成し、ロアープレート側には中空部を設ける事で断熱性を高め、冷却効率を高めている（図5）

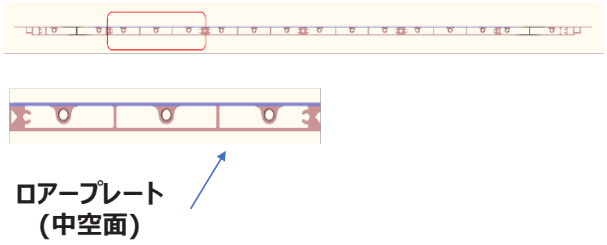


図5　LLC流路断面

また、薄型でフラットなバッテリレイアウト設計の実現のために、電池モジュールを薄く広く配置している（図6）ため、パック外周骨格と電池モジュールの空間が狭く、衝撃時のつぶれ代が少ないという課題が出てくるが、これを解決するために、複数のクロスメンバーをバッテリパック内に配置することで高い耐衝撃性を実現している。

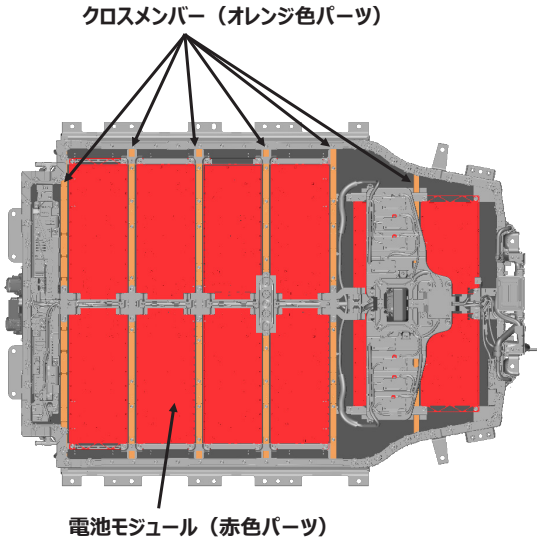


図6　ARIYAバッテリレイアウト

3. トレードオフ性能に対するバランスのとれた進化

これまでは高い次元で性能をバランスさせるバッテリ開発を行ってきたが、アリアではさらにそれを進化させた。

表1は、アリアバッテリとリーフ及び　既存技術において、お客様の価値に繋がる主要なバッテリ性能を比較したものである。アリアバッテリはトレードオフの関係にあるバッテリ性能をバランスよく進化させており、その代表的な項目について紹介する。

表1　既存技術との比較

お客様価値	バッテリ性能	自然放熱（LEAF）	液体温調（既存技術）	薄型温調機構（ARIYA）
車室内空間	パック厚さ	BASE	△	○
航続距離	エネルギー	BASE	×	○
	質量	BASE	×	△
価格	部品点数	BASE	×	△
	構造の拡張性	BASE	←	○
利便性	連続充電	BASE	◎	◎
	低温充電	BASE	◎	○

利便性能向上

前項で紹介した薄型冷却機構によって、EV専用プラットフォームならではのフラットで広々とした室内空間を実現しながら、様々な環境下における高い急速充電性能の実現も可能となった。

図7に外気温40℃、-5℃環境下で急速充電を実施した際の30分間の充電電力量を示す。アリアではバッテリ温度を適

切にコントロール（冬場は加温、夏場は冷却）することで、様々な環境下においても優れた急速充電性能を発揮することが可能になった。

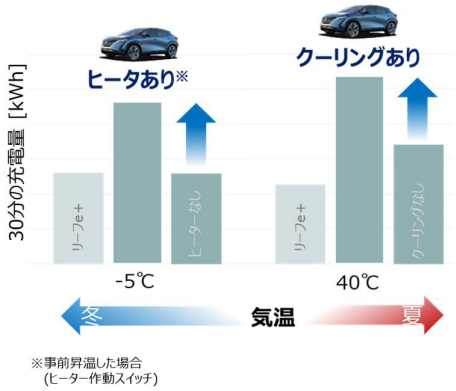


図7　急速充電性能

また、主に高速道路において、高速走行と急速充電の繰り返しを行うようなロングドライブを想定した際の急速充電性能を図8に示す。リーフ e+では急速充電の回数を重ねるごとにバッテリ温度が上昇し、2回目以降の充電速度が低下する傾向がある。しかしながら、アリアではバッテリ温度を適切にコントロールしているため、高速走行と急速充電を繰り返しても充電速度が低下せず、快適なロングドライブが可能となった。

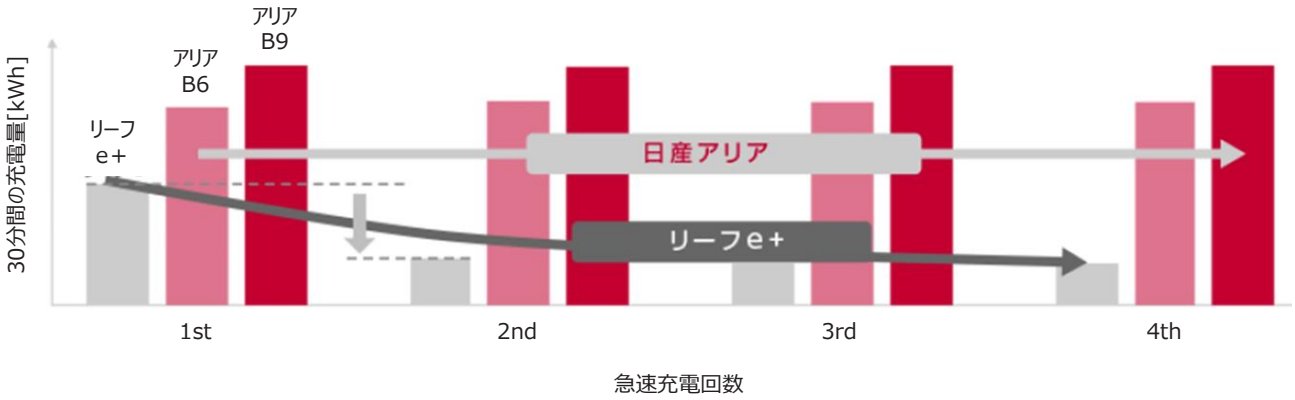


図8　高速走行と急速充電を繰り返した際の充電量推移

高い拡張性と部品点数削減を実現したバッテリ構造

前項で紹介したアルミ押し出しバッテリフロア構造は、

バッテリ薄型化だけでなく、さまざまな車両仕様に対応できる高い拡張性も実現している。バッテリ筐体は、車両ボディ前後方向に押し出した構造をとっているため、押し出し長さを変えることで、例えばホイールベース違いの車両へ適用が容易な構造となっている。これにより仕様数削減を実現している。さらに、B6グレード（66kWh）に対し、B9グレード（91kWhバッテリ仕様）では、高いエネルギー容量を得るために後部座席下のスペースにも電池モジュールを配置した2階建て構造となっているが、1階部分の基本構造は流用可能な構造をとっている。（図9）

前述したようにバッテリ筐体の底板とLLCプレートの一体化によって約60％近くの部品点数削減も実現し、こうした技術によって高い競争力に繋げている。

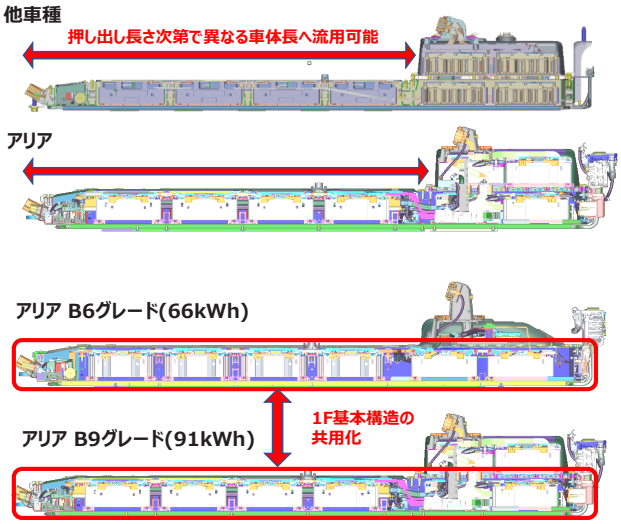


図9　他車種への高い拡張性

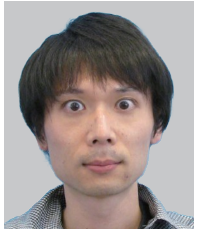
4. まとめ

今回、アリアに搭載したバッテリは、新開発の薄型のバッテリ構造/温調システムにより、EV専用プラットフォームならではのフラットで広々とした室内空間を実現しながら、体積当たりのエネルギー密度の向上、様々な環境下における高い急速充電性能の実現を可能とした。

今後も、EVの本格普及に貢献するため、高い性能、信頼性を維持しつつ、リチウムイオン電池のケミストリーを継続的に改良していき、エネルギー密度向上と、より競争力のあるバッテリ開発を継続してゆく。

著者


片村　淳二


八田　健太郎


若林　計介


高木　雅紀


轟木　直人

特集２：次世代のフラッグシップ ARIYA

6. ARIYAの性能を実現する新開発モータ

大久保　孝仁*　　和田　裕紀**

1. はじめに

アリアで実現したコンセプトの一つにラウンジ感を提供するというものがある。ラウンジコンセプトを実現するには、シートをはじめとするインテリアのデザイン・品質に加えて、ショックのないスムースな加減速や静粛性が高い次元で確保されていることがキーとなる。本稿ではアリアに採用された完全新設計のモータを中心に、上記要件を達成した結果を紹介する。

2. 新設計モータの概要

アリアでは、これまでリーフやノート・セレナe-POWERで採用してきたIPM (SM) [※1]に代わり、EESM[※2]を採用した。EESMはステータに３相交流電流をPWM制御によって流す点ではIPMと同様であるが、ロータに永久磁石を使わず、代わりに直流電流を流して電磁石とする点が特徴である。

これにより、運転負荷に応じて最適なロータ・ステータ電流を選ぶことができ、効率の向上や振動・音の低減が図れる。一方でロータに電流を流すことによる発熱の増加や、トルク応答性の確保が課題である（詳細を次項以降に示す）。

図１にアリアのEESMの展開図と、参考にリーフのIPMの展開図を比較として示す。アリアのEESMは、８極のロータを採用し、ここにPEB[※3]で生成した直流電流をブラシシステムを経由して供給する構造となっている。ロータ用の直流電流とステータ用の３相交流電流は、ドライバーからの駆動力要求に応じたトルク指令値をもとにPEBで演算され、それぞれの電流が最適な組み合わせとなるように制御される。またモータの冷却には直接油冷を採用した。

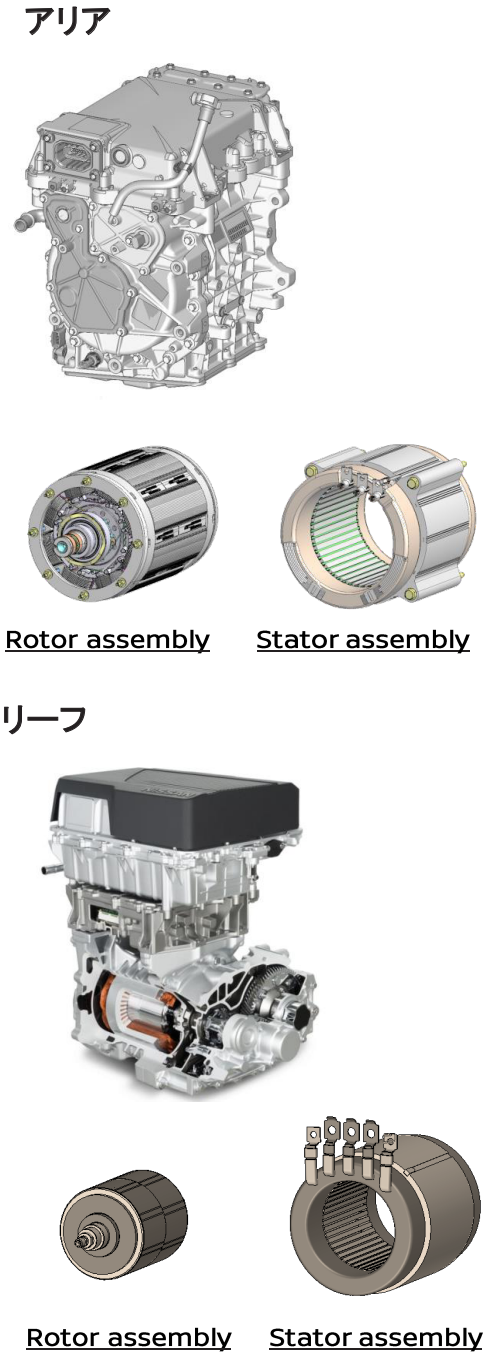


図1　アリアとリーフのモータ

* パワートレイン・EV 技術開発本部　　** パワートレイン・EV 電動技術開発部

3. ARIYAのモータで実現した価値

3.1 静粛性の実現

BEV※4では、エンジン車やハイブリッド車に比べてエンジンが発生する音がないため、ロードノイズや風切り音が目立つようになると言われている。さらにエンジンにはなかったモータやインバータが発する高周波音が課題になることもある。アリアでは車体側で乗員に聞こえるロードノイズ・風切り音を小さくする工夫を多く入れており、それに伴ってモータから発生する高周波音も小さくすることで、全体の静粛性を確保した。

モータが発する高周波音は回転数・トルクに応じて変化し、その主な成分は電磁加振力である。IPMではロータの磁力が一定であるため、トルクはステータ電流のみで制御され、電磁加振力はそれに比例する。アリアのモータではステータだけでなくロータの電流をも制御することで、特に低トルク領域において電磁加振力を低減した。これにより緩加速や巡行など、ドライバーからの駆動力要求が大きくないシーンにおいて、一段上の静粛性を実現した（図2）。

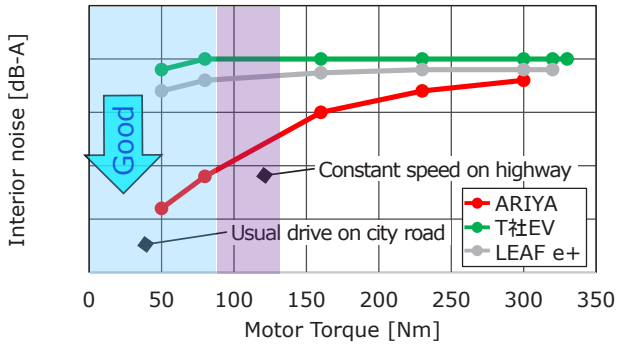


図2　室内音の比較

3.2 電費の向上

IPMでは高回転になるほど、ロータとステータの間に発生する誘起電圧が増大し、一般に弱め界磁制御などで高回転領域での出力を確保しているが、同時に効率が悪化してしまう。高周波音と同様に磁力一定のIPMでは誘起電圧の大きさ、弱め界磁電流の大きさは回転数・トルクに応じて一意に決まる。アリアのモータではロータの磁力を電流で可変できる点を活かし、誘起電圧を抑えつつ要求されるトルクを出せるようロータ・ステータ電流を制御した。これにより高回転運転においても効率低下を低減した（図3）。

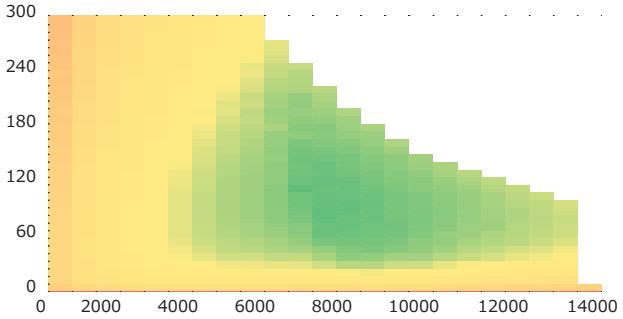


図3　効率

4. ARIYAのモータの特徴

4.1 巻線ロータの構造

EESMはその名の通り、ロータに直流電流を流し電磁石とするため、ロータも巻き線構造であることが特徴である。アリアでは８極の巻き線を持つロータを開発した。アライアンスグループであるルノーでは、Zoe向けに４極の巻き線を持つEESMを採用しているが、高出力化に伴い、ロータ体積を増大させると共に８極化することで、必要な電磁力とトルク応答性を確保することとした。

アリアではさらに高回転化も図っており、上記高出力化とも合わせて構造上の工夫をいくつか取り入れている。

図４にロータの断面および一部の拡大図を示す。８極のロータそれぞれに巻き線を巻いた後、極間にくさび型のスロットウェッジを挿入し、遠心力による巻線の変形を抑える構造としている。そのため巻線の巻き上がり形状の安定性が非常に重要である。アリアでは、Nissan Intelligent Factoryとしてモータ生産工程を立ち上げる際、全自動巻き線機を導入し、一度に８本のロータを巻き上げられる生産能力を確保しながら、生産技術部門と連携し各ロータ間で巻き上がり形状の均一化、安定化を実現した。

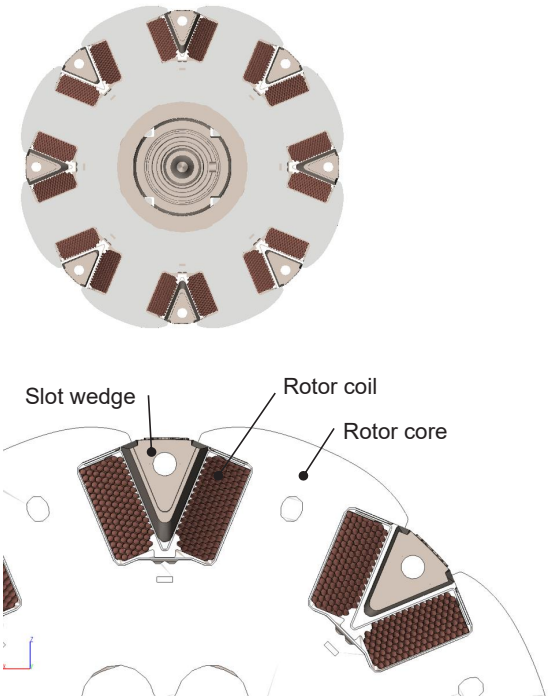


図4　巻線ロータの構造

4.2　油冷による冷却性能の向上

EESMはロータに電流を流して電磁石化する構造上、ロータの発熱が大きくなる。そこでアリアでは直接油冷という冷却方式を採用した。

図5に油冷回路の構成を示す。モータ下部のオイルパンに溜められたオイルを電動ポンプによって汲み上げ、モータケース内部の通路を経由して、ステータ･ロータ各部に噴き付ける。ステータには外周部から供給してステータコアを主に冷却し、ロータは前後コイルエンド部を冷却している。同時にベアリング、オイルシール周辺にも供給して潤滑の機能も確保した。

オイルはモータの内部でのみ循環し、発生した熱はモータ側面に取り付けられた熱交換器を通じて、車両側の水冷却回路に排出される。

オイルポンプはステータ・ロータの温度に応じて吐出量を可変としており、これによりポンプの消費電力を抑えた。

オイルは高電圧部品の冷却に使用することから絶縁性を確保しつつ、極低温から高温まで安定した性能を実現できるものを選定した。さらに無交換、無補充で済むメンテナンスフリーも実現している。

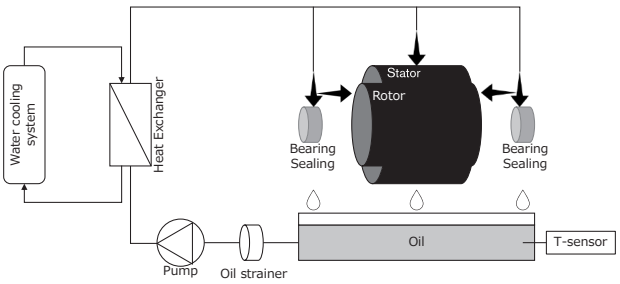


図5　モータの油冷回路

5. ま と め

電動化が加速している中で、電動駆動技術も進化している。今回アリアでは、従来多く使われてきたIPMに加えて、EESMも十分な性能・量産品質を確保できる有効な選択肢として増やした。

お客様が求める車両性能に対して、最適な技術を提供できるようになるとともに、レアアースコスト・供給リスクを低減する効果も得られた。

今後はEESMの特徴をさらに活かし、例えば前後に駆動モータを持つような車両において、巡行時のような負荷が低い時には、片方のモータのステータ・ロータ電流をオフにして、電費改善していくような使い方も有効であると考えている。

用語解説

※1 IPM（SM）：Interior Permanent Magnet Synchronous Motorの略。埋め込み磁石型同期電動機

※2 EESM：Electrically Excited Synchronous Motorの略。外部界磁型同期電動機

※3 PEB：Power Electric Boxの略。インバータ機能を主に周辺回路や電源分岐を集約した部品

※4 BEV：Battery Electric Vehicle。外部から充電された電池の電力のみを用いて走行する電動車

著者

大久保　孝仁

和田　裕紀

特集２：次世代のフラッグシップ ARIYA

7. 日産が考える電動AWDの進化「e-4ORCE」～もっと爽快で自信をもてるドライビングをめざして～

富樫　寛之*　　宮腰　祐篤**　　片倉　丈嗣***

1. はじめに「e-4ORCE」とは

日産は、新たな電動 AWD（All Wheel Drive）制御技術「e-4ORCE」をアリアから採用する。

「e-4ORCE」の「e」は、電気自動車の電動駆動に由来しており、「4ORCE（フォース）」は、物理的なパワーとエネルギーに四輪駆動の「４」を掛け合わせ、４輪のタイヤのパワーであるフォースを制御するという意味を表す。

近年、環境性能に加えて高い運動性能への要求に応えるべく、高出力なモーターを前後に２機装備した電動AWDが各社で採用されてきている。電動AWDは従来の機械的AWDに対して、非常に高い技術的ポテンシャルを有しているが、それは単に“加速が良い”、“限界性能が高い”と言うだけではなく、日常の使用環境下でも、クルマの動きの“質”を一段高めることができると日産は考えている。

「e-4ORCE」は、電動AWDのポテンシャルを引き出し、クルマの動きの“質”を高めることにチャレンジした技術である。

本章では、この「e-4ORCE」の技術について解説する。

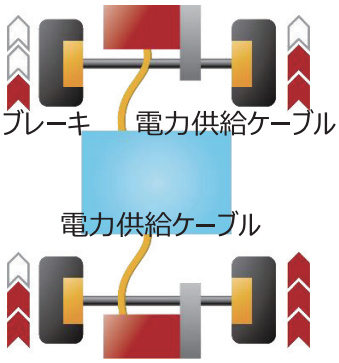


図1　e-4ORCE AWDシステム図

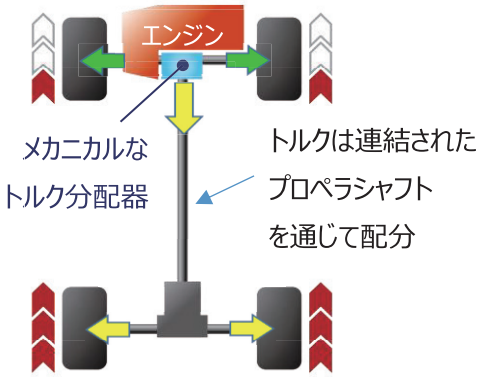


図2　従来 AWDシステム図

2.「e-4ORCE」の技術概要

従来の内燃機関搭載のAWDシステムは、内燃機関が発生する動力を連結されたプロペラシャフトを通して機械的に前後輪へ配分することによって実現されている（図２）。そのため、動力伝達の機械的遅れや、配分の分解能に機械的な限界がある。また、内燃機関は電動モーターのように高応答で出力を制御することが困難であるため、0.1秒オーダーで総駆動力を制御することは難しかった。

「e-4ORCE」の基本構成は電動AWDであるが、電動AWDは、前後に独立した電動モーターを搭載するため（図１）、高い応答性で正確な前後駆動略配分が可能となる。

「e-4ORCE」の技術的な狙いは、電動AWDのポテンシャルを100％引き出し、どのような環境下においてもドライバーが安心して運転できるだけでなく、車両姿勢を制御することにより同乗者にも快適な乗り心地を提供することにある。

クルマは４つの車輪で車体を支えているが、各車輪に掛かる荷重は、路面や車両状態により、刻一刻と常に変化している。輪荷重に伴って各タイヤ摩擦力（図３）の限界も変化するが、いかにバランスよく全てのタイヤを限界内で余裕を持たせてコントロールするかが、ポテンシャルを引き出すポイントとなる。

* 車両性能開発部 & パワートレイン・EV 性能開発部　　**AD/ADAS &シャシー制御開発部　　*** パワートレイン・EV 性能開発部

図3　タイヤ摩擦円と合力

前輪駆動車では、曲げる機能と加減速の機能が前輪に統合されており、余裕を持たせるのは難しい。4輪駆動では、曲げる機能と加減速の機能を前後に最適に役割分担させて（図4）、各タイヤが限界を超えることが無いように安定させることを狙う。最終的な限界挙動では、摩擦円の淵である最大値を4輪で使いきれる様に配分する。

一方限界挙動の手前では、各タイヤの限界が超えない範囲で自由な配分を細かく制御することによって、これまで機械式AWDでは不可能であった滑らかで扱い易い動きを実現することを可能にした。さらに状況に合わせブレーキを左右コントロールし、減速時以外にもブレーキ力を活用し、旋回性能を高めた。

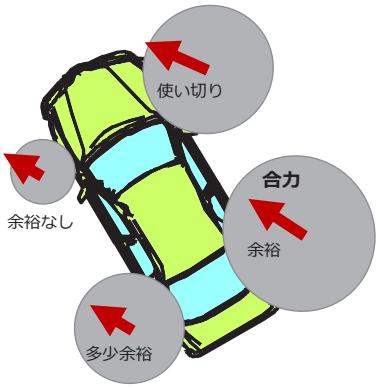


図4　4輪の摩擦円と合力関係を示すイメージ

これらの技術は、ATTESA E-TS電子制御トルクスプリット四輪駆動システムやインテリジェント4x4システムなどで長年日産が培ってきたAWD技術と、リーフ、e-Powerで培った電動駆動力制御のノウハウを遺伝子として交配、組み合わせながら、それぞれの技術を進化させることにより生み出し開発された（図5）。

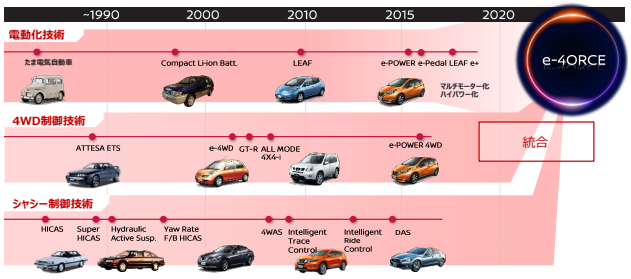


図5　e-4ORCEの歴史

3.「e-4ORCE」がもたらす カスタマーエクスペリエンス

―爽快で自信をもてるドライビングを体験―

「e-4ORCE」が狙ったのは、電動AWDを前提として、電動モーターの高いポテンシャルを最大限に引き出すことで、クルマの 1. 卓越したハンドリングの扱い易さ、2. 路面を問わない安心感、3. 乗るすべての人に快適な乗り心地を従来の内燃機関車や他社の電動駆動AWDでは到達していないレベルにまで引き上げることだ。

3.1　卓越したハンドリング性能

一般的に、コーナリング時に加速するとクルマの走行ラインは外側にずれていく為、ドライバーはステアリングを操作切り足しするか、速度を落として対処しなければならない（アンダーステア）。これは輪荷重で決まる摩擦円の限界値の一部を加速する力に使うため、曲げる力が弱くなるために起こる。「e-4ORCE」は路面状況や走行状況に応じて、変化する輪荷重に応じたタイヤのグリップを最適に使用できるよう駆動力を前後輪に配分する。通常時の前後のトルク配分は50:50付近であるが、路面状況や走行シーンに応じて0:100～100:0の範囲で、ドライバーが気づかない間に、自動で最適な配分に変更する。また、減速時には前後モーターによる回生ブレーキと4輪の油圧ブレーキを組合せて制御することで、コーナリング性能を向上させている（図6）。

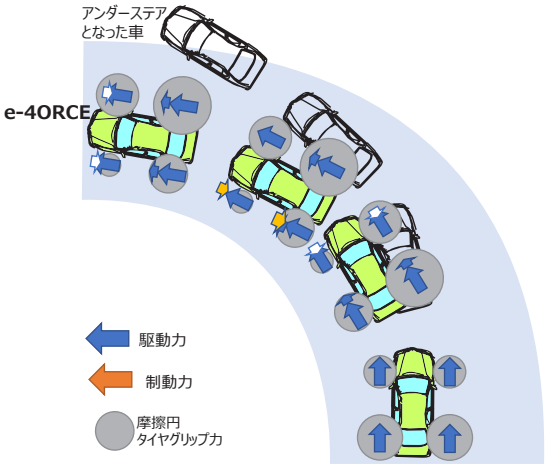


図6　e-4ORCEとアンダーステア比較

こうした高度な制御は、特にコーナリング時に効果を発揮し、クルマの動きはドライバーのステアリング操作に忠実で、修正操舵は最小限に抑えられると期待できる。「e-4ORCE」でこの滑らかで安定感の高いドライビングを感じてもらいたい。

3.2 路面を問わない安心感

雪、圧雪、氷、轍、ウエットなど状況変化する滑りやすい路面でも、日産が培ってきた前後独立モーター制御技術とブレーキ制御により、優れた走行性能を発揮する。

旋回加速安定性のデータを安心感の達成事例として図7に示す。このデータは、一定の40R、車速25kphの旋回状態を安定させた上で、そこから、アクセルを4秒間かけて全開まで踏み込んだ際のステア特性の変化を比較したグラフである。ステア特性とは、狙った走行ラインより外側にずれていく状況下で、走行ラインに合わせるために切り増しが必要となる操舵の大きさを表わす指標である。積雪路面では、摩擦力が低い上、凹凸の変化があり摩擦円の大きさは常に変化しているため、走行ラインが外側へも内側へも振れることがあり、状態を安定させることが簡単ではない。そのような雪道においてもアリア「e-4ORCE」は、ステア特性変動が小さく、安定した走行が可能であることがわかる。ハイパワーなモーターを搭載する他社SUVのAWD車（緑線、青線）に対し、ステア変化は約1/9となっている。従来の内燃機関搭載車のAWD車としてトップベンチのSUV（オレンジ線）と比較しても、約1/3の小さい変動を達成している。

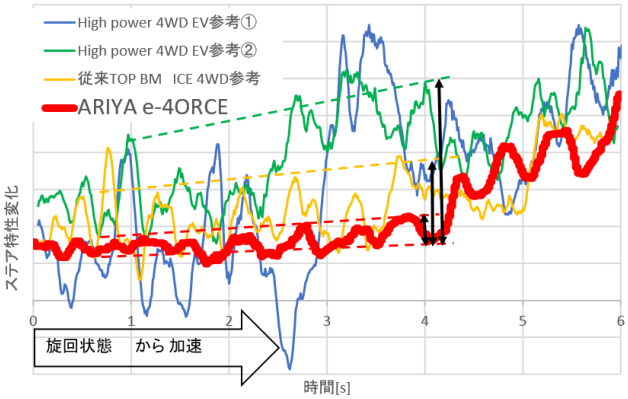


図7 雪路からの旋回加速性能

この高い安定性は、様々な状況においても、路面、ドライバーを問わず、高い安心感を提供できると考える。さらにスキルのあるドライバーには、雪道や凍った路面でも、この頼もしさが、ウインターシーズンのドライブに、楽しさをもたらしてくれるかもしれない。

3.3 乗るすべての人に快適な乗り心地

モーターによる回生ブレーキの制御は、快適な乗り心地の提供にも貢献する。電動駆動車であっても前輪駆動車の場合、フロントに搭載されたモーターのみで回生ブレーキをかけるため、減速時にクルマの後方が持ち上がり、ピッチという車両の傾きを、大きく感じる（図8左）。

「e-4ORCE」では、フロントモーターに加え、リアモーターの回生ブレーキも併せて活用することで、渋滞時でも揺れが少なく、快適に過ごせる。加速、減速時には、モーターを最適にコントロールすることで車体姿勢の変化を抑える（図8右）。その快適な乗り心地は、車体の振動を最小限に抑え、ドライバーだけではなく助手席や後席に乗る人にもスムーズで、快適な乗り心地を提供することができる。

（ノート e-Power 4WDにて初採用）

図8 車両の傾き

4. おわりに

「e-4ORCE」は、システムが作動していることにドライバーが気付かないほど自然に制御を行うことを信条としている。初めて「e-4ORCE」に乗った人でも、極めて自然に何の違和感もなく快適で思い通りにクルマを操ることができると感じて頂けると期待する。

今まで日産車を乗り継いで頂いてきた方には、運転中のふとした瞬間に、根幹の部分で、“日産だ”、でも“新しい領域の日産だ”と感じてもらえると嬉しい。そして、一度「e-4ORCE」を知ってしまい、その安心感に慣れてしまうと、「e-4ORCE」なしのクルマには乗ることができなくなるような技術となることを狙って開発した。

アリアでは、ステアリング操作時のステア特性の変化の少なさから得られる安定性により、スポーツ・カーに匹敵するパワーを持ちながら、構えることなく自然に扱えるクルマに仕立てた。この技術の発展性では、スポーツ・カーでも更なる性能を引き出せる可能性を秘めた技術となる。

参考文献

仲田 直樹，特集2：成長するe-POWER「2. システムの特徴と今後の発展」，日産技報，2020，No.88

平工 良三　坂上 永悟　片倉 丈嗣，特集2：成長するe-POWER「6. 価値を高める電動AWD 技術（All wheel drive）」，日産技報，2020，No.88

日産自動車株式会社，「インテリジェント トレースコントロール」，日産グローバルサイト
https://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/OVERVIEW/cornering_stability_assist.html

著者


富樫　寛之


宮腰　祐篤


片倉　丈嗣

視線と音声を用いたマルチモーダルインタフェースによるワークロードの低減

森田　祐介*　　田村　総*

抄録　近年の車載機能増加に伴う操作負荷増大に対し、低減方策の一つとして人間の認識に関連するさまざまなリソース（視覚/聴覚/言語/空間など）を分散することを検討している。本研究では、現在の音声操作をシングルモーダルとして使用する操作と、視線位置と音声コマンドをマルチモーダルとして使用する操作の２種類の操作を比較することで、ドライバーの作業負荷への影響を明らかにする。視線と音声による操作に関しては、現在の音声操作よりも効果的な２つのユースケースがあり、ドライビングシミュレータ試験での主観評価（NASA-TLX）と客観評価（予測誤差）で確認した。

1. はじめに

近年、車両に求められる安全/快適への要望は高まり、自動運転や駐車支援、コネクテッドサービスを用いた情報提供等、搭載される新機能は増え続けており、これに伴い機能の設定/調整/確認に関わる操作負担が増加している。一方で、現状の車内操作はタッチ選択（視覚による位置探索）や音声入力（コマンド発話）等、単一のモダリティによるインタフェースが一般に用いられている。

例えば、タッチ選択の場合は、一般的に限られたディスプレイ面積を使用するため階層構造が用いられており、どこにどの機能が存在するか、操作ロジック/順序を事前に認知/把握する必要がある。また音声入力の場合は、やりたい操作をダイレクトに指定することができるが、選択を伴う指示には音声だけでは困難な事象も多く、操作したいデバイス名や、“右前側の”、“一番下の”等の具体的な選択肢の指示が必要なため負荷が高くなる。

このような単一モダリティ操作で生じる負荷を低減するアプローチとして、Multiple Resource Theory[1]に基づいたマルチモーダル操作に着目した。Wickensらによると、認知/反応を含む精神負荷は情報種類に応じ複数のリソースを使用し実行されており、このリソースは、人間の情報処理の機構を3つの次元で示し、2分されたリソースを持つと考えられている。1つは情報の入出力で“知覚”と“反応”、2つ目はモダリティで“視覚”と“聴覚”、3つ目は情報の表現形式で“空間”と“言語”に分かれる。さらに、視覚の中に“中心視”と“周辺視”が2分される。これら4つの次元において、1つリソースに集中せずに分散させることでワークロードが低減できると考えられている。また、この理論に基づき、複数リソースに分散させることにより、負荷が軽くなることが報告されている[2]。自動車においては、操作負荷低減のため、音声認識技術による音声操作が用いられているが、情報の表現形式（次元3）で“言語”リソースに集中してしまう。昨今、進化している視線検知技術を用いてドライバが見ている空間情報を上手く用いて“空間”と“言語”リソースに分散されることで負荷を下げられるのではないかと考えた。

そこで本研究では、運転中に常に行われる視認行動に注目し、音声認識と合わせ、視線と音声によるマルチモーダルでの操作指示により負荷のリソースを分散することで、操作全体のワークロード低減につなげることを検討した。視認行動をトリガーに操作する場合（視線と音声によるナビの地図を見て目的縮尺に合っていないから操作する、見ている方向が見えない為補助モニターを使用する等）、ドライバの視線情報をモニターすることで、操作する対象物が推定できる。これにより、ドライバは具体的に対象物を指示しなくても直接的に操作を指示することができ、負荷低減が可能と考えた（図1）。

マルチモーダルの中でも特に視線と音声を用いたインタフェースはこれまでも検討されているが[3),4)]、これらは一般情報機器に用途が限られており、常に周囲を注意しながらの使用が前提となる自動車内デバイスの操作とは異なる。また自動車内デバイスに関する研究[5)]でも、その低減効果は具体的に

* 内外装技術開発部

示されていない。

本論文では、視認行動をトリガーとした操作に注目し、音声のみの操作と視線と音声を用いた操作での比較を行い、マルチモーダルインタフェースの効果を確認した。

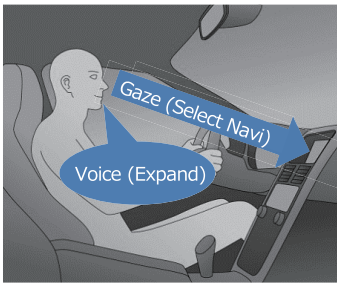


Fig.1 Navi operation by gaze and voice

2. 視線と音声を用いたマルチモーダルインタフェース

2.1 概要

視線を検知し、音声とともに操作に用いることの効果を確認するため、現状操作として音声認識（単一モダリティ操作）との比較を図2に示す。左側にドライバの行動と思考、右側にインタフェース違いでのインプットのタイミングと内容を比較記載した。

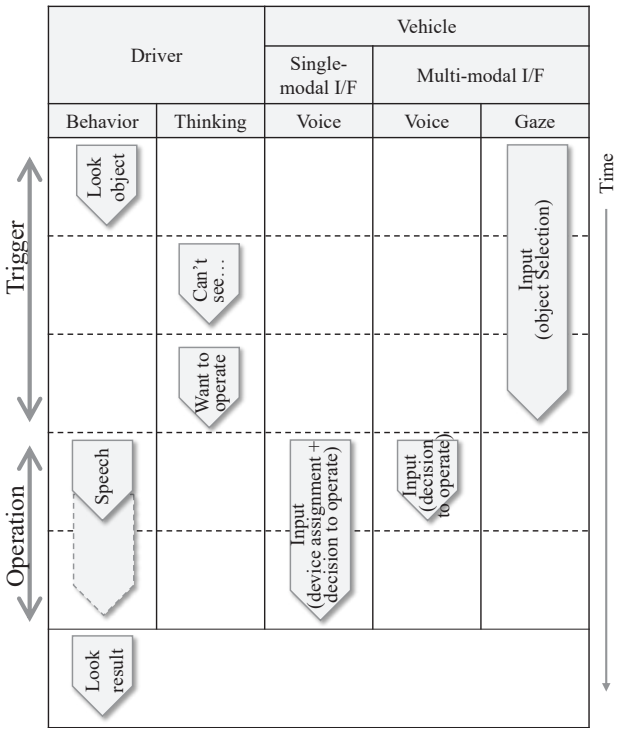


Fig.2 Comparison with single and multi modal operation

図2より、ドライバが対象物を確認しようと視線を動かしたうえで“見えない”ことがわかると、その不満解消の為の欲求が起きる。

音声認識の場合であれば、デバイス名や方向＋操作コマンドを発声して指示する。一方、視線と音声による操作の場合、トリガーとなる視認行動の際、操作対象となるデバイスや方向を、車両システム側の視線検知で推定できる状態となる。これによりドライバは対象を選択する必要が無くなり、「カメラ」や「拡大」等の簡単な指示言葉をインプットにして操作できる。その結果、音声のみによる操作と比較し、方向や位置等の補足が不要なシンプルな言葉の発声のみとなる。

2.2 対象操作

前述の通り、視線を用いることで操作負荷低減が見込めるタスクは、視覚から得られた情報をトリガーに操作行動に移るパターンを持つ。このパターンを持ち、かつ同じ名称のデバイス（例：右のカメラ/左のカメラ/後ろのカメラ）が車内にあるケース、同じ指示語で複数のデバイスが反応し得るケース（例：電子ミラー画像の“拡大”/地図の“拡大”）を加味し、以下3つを事例とした。

i）地図の拡大：

近年、車両採用の広がるメータクラスタからセンタークラスタにまたがる大画面や複数画面において、2つもしくはそれ以上の地図が表示されている時に、ある特定の地図を操作するためには、音声認識では“どの地図を＋どうする”というコマンド指示が必要となる。一方で視線と音声による指示では、見ている/もしくは見ていた地図を言葉で選択せずに直接操作することができる。今回は地図拡大操作を対象とした。

ii）電子ルームミラーの画像拡大：

近年問題となっている後方からのあおり運転に遭遇した場合やグループ旅行等で、複数車両での走行時に後方の車両/車種を判定したい場合等を想定し、車両後方カメラ画像の拡大操作を対象とした。音声操作の場合は“拡大”だけではどのデバイスを対象とするのか車両側は認識できない。一方で、視線と音声による操作では、ミラーを見た後“拡大”と言うだけで拡大のインプットとなる。今回は、拡大した場合のバックミラーの視野角を考慮し、拡大画像が一部オーバーレイする状態とした（図3）。

Fig.3 Sample picture of expand view

iii）サイドカメラの画像確認：

死角を補助するカメラを起動させる場合、単に“カメラ”と

発声するだけでは、複数のカメラが搭載されている車両の場合、どのカメラを起動させるべきか車両側は認識できない。特に狭路でのすれ違い時（図4）には、壁もしくは対向車との接触を避けるために、短時間で多様な情報を取得し、判断に基づく操作が求められ、焦りを感じるシーンとなる。視線と音声による操作の場合、視線方向により操作対象のデバイスを推定し、“カメラ”だけで起動インプットとなる。

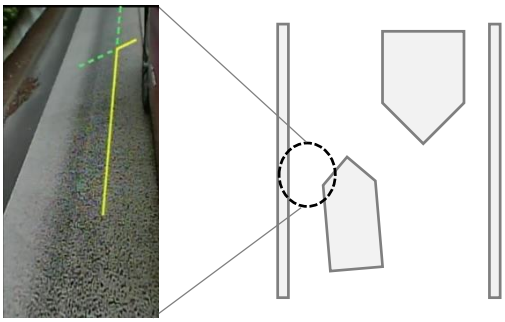


Fig.4 Passing scene

上記3シーンでの音声のみによる操作と、視線と音声での操作の比較を表1に示す。

Table1 Comparison with control of “voice” and “gaze & voice”

Task	Voice	Gaze & Voice
i) Map expansion	(After checking the map once) ・Expand the center map ・Expand the navigation map on center ・Expand the IVI map	(After checking the map once) ・Expand
ii) eMirror expansion	(After checking the mirror once) ・Expand the eMirror ・Expand the room mirror ・Expand the back mirror	(After checking the mirror once) ・Expand
iii) Side camera pop-up	(After checking front left) ・Left side camera ・Left camera ・Left hand side camera	(After checking front left) ・Camera

i）～iii）のいずれの操作においても、ドライバは操作の前に必ず状況確認の為にデバイス（i、ii）や注意方向（iii）を視認しており、その意図を視線方向から推定することで、デバイス/方向に関わる音声指示に伴う負荷を低減できると見込める。

3. 評 価 実 験

3.1 評価システム

2.2で設定した操作での負荷低減を確認するためのシステムの概要を図5に示す。IRカメラとマイク、それらのデータを処理するPCと、出力装置としてのディスプレイで構成される。

IRカメラで得られた顔画像をPCで解析し、ドライバの視線情報とカメラーモックアップレイアウト情報から、どのデバイス/エリアを見ているかをデータ化する（図6）。カメラを含む視線検知システムはSmart Eye AB社製Smart Eye CDK v.0.9.0を使用した。また、マイクから得られた音情報を音声認識しテキストデータ化する。音声認識システムはGoogle Cloud Speech-to-Text APIを使用した。

操作コマンド処理は、視線情報と音声情報を統合し、出力すべき画像を決定する。

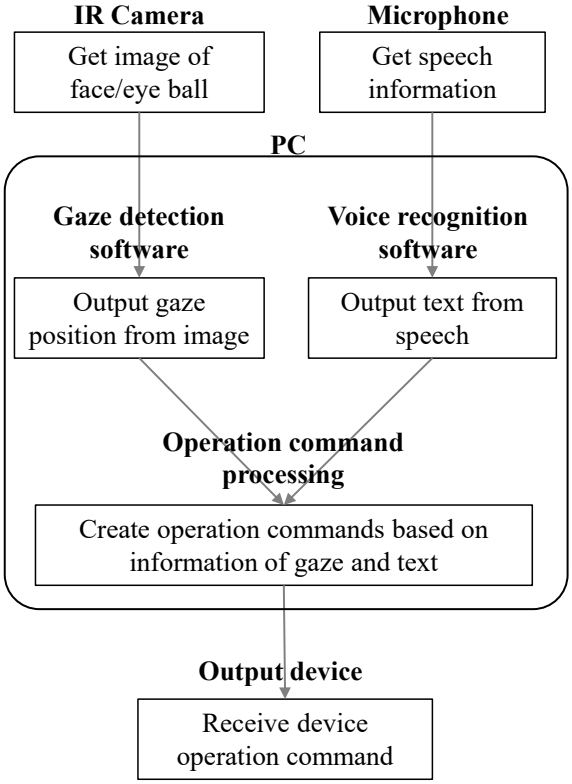


Fig.5 System outline and function flow

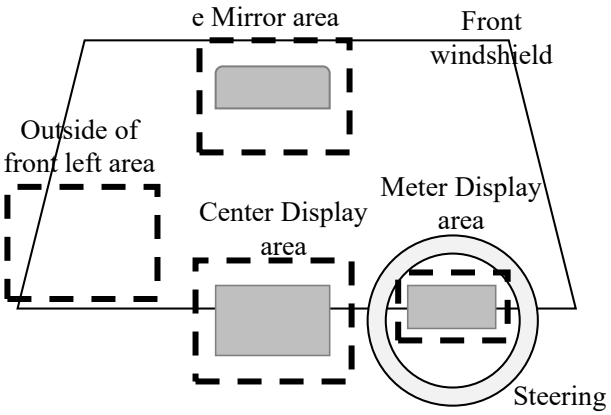


Fig.6 Image of recognizable area

Fig7. Test condition of Driving Simulator

結果表示系の車内デバイスとして11inch 液晶ディスプレイ（センターレイアウト）＋8inch液晶ディスプレイ（メータレイアウト）＋7inch液晶ディスプレイ（ルームミラーレイアウト）を使用した。

運転タスクを含む実験は、三菱プレシジョン製ドライビングシミュレータを用い実施した。評価風景を図7に示す。

3.2 評価方法

主観評価として、従来の研究でも採用されているNASA-TLX[6]を用いた。また、定量値での比較を目的に、運転者のSTRG操作の滑らかさを表すステアリングエントロピー[7]算出の基となる操舵角予測誤差を用いた。

操舵角予測誤差は、時間的過去のデータとの差分の値から時系列的に算出する。急な操作が発生した時ほど予測誤差＝差分は大きくなり、わき見や考え事など、運転以外のことに気を取られていた場合ほど値の分布が広くピークが下がる形状となる。

実験参加者は、運転免許を持つ20～60歳代の男女7名で実施した。各操作に対して十分な習熟を行った後に3回試行し、それぞれの走行回ごとに結果を評価した。走行及び操作条件を表2に示す。

Table2 Test condition

Task	Scene	Speed
i) Map expansion	Highway	100km/h
ii) eMirror expansion	Highway	100km/h
iii) Side camera pop-up	City road	30km/h

高速道路は、最小半径1000m程度のなだらかなカーブの続く区間の中央車線（他車無し/車線変更無し）を単独走行する条件で、右カーブ・左カーブを半数ずつ設定している。よって、カーブ条件の偏りによる効果は無いと考える。また、住宅街は、センターラインの無い幅約5mの道路において助手席側の駐車車両を避けて走行する条件とした。

実験は、高速走行、住宅街走行それぞれで無負荷（＝何もタスクをせず運転操作のみ）、音声操作、視線と音声による操作、の3パターンを、順序効果を考慮し参加者ごとにランダムに組み合わせて実施した。

なお、本稿で扱う実験は、日産自動車（株）実験倫理委員会の審査を受け、承認を得た内容であり、実験参加者からのインフォームドコンセントを得た上で実施したものである。

3.3 主観評価結果

主観評価としてNASA-TLXでの評価結果を図8に示す。音声操作に対し、視線と音声による操作の評価が有意に低減しているかを確認するため、対象操作i）～iii）において、それぞれの操作評価を一対のデータとして両側分布に従う確率をスチューデントのt検定でp値を算出した。

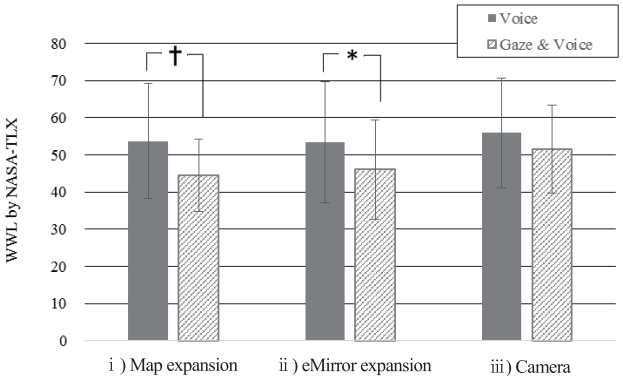


Fig.8 Result of NASA-TLX（* p<0.05、† p<0.1）

音声操作と比較し、視線と音声による操作のWWL得点はi）地図拡大については有意傾向として、ii）ミラー拡大については有意な差として低いことが示された。視線を用いたことで、現状の音声入力に比べ負荷が減少していることが示唆される。

一方で、iii）カメラ起動に操作方法による有意な差は見られず、今回の条件では負荷低減の傾向を示唆するにとどまった。

このカメラ起動は、狭路でのすれ違い運転のため、前述のMultiple Resource Theory[1]の4つの次元に基づくと、周辺障害物と車両のクリアランスの確認により、中心視－周辺視（次元4）での“中心視”へのリソースに偏り、周辺障害物との接触回避運転操作により、知覚－反応（次元1）の“反応”のリソースに偏ったと考えられる。さらに、音声操作、視線と音声による操作のどちらとも“中心視”（デバイスを確認する）、“反応”（デバイスを操作する）のリソースを使うため干渉する。従って、中心視を多用し、運転操作負荷が高い場合は、音声操作と視線と音声による操作の差を感じ難くなると考えられる。さらに運転スキルの低い人は、狭路でのすれ違い運転操作の影響を

受けやすいため、それも要因として考えられる。

それに対し、高速道路での走行時は、レーンキープするだけで比較的ドライバの負荷も低く、リソースにも余裕があり、地図を見る、ミラーを見る、という行為が自然に行われ、簡便なコマンド指示が負担低減につながったと考えられる。

3.4 定量評価結果

定量評価値として算出した操舵角予測誤差について、ある参加者（20代女性）の度数分布例を図9、10、11に示す。タスク指示から完了までの時間が約10秒間であったため、タスク開始から10秒間のデータを用いた。なお、図中のαは個人の運転特性の違いを表す値[8]として、無負荷時の分布における90%タイル値を使用した。

前述の通り、度数分布で表現した場合、滑らかな運転ができているときほど中心へのシャープさが増した形となる。今回の例では”無負荷”→”視線と音声による操作”→”音声による操作”、と徐々にピークが下がり、周辺に広がる＝ステアリングの振れが大きく急操作が多い、ということがわかる。

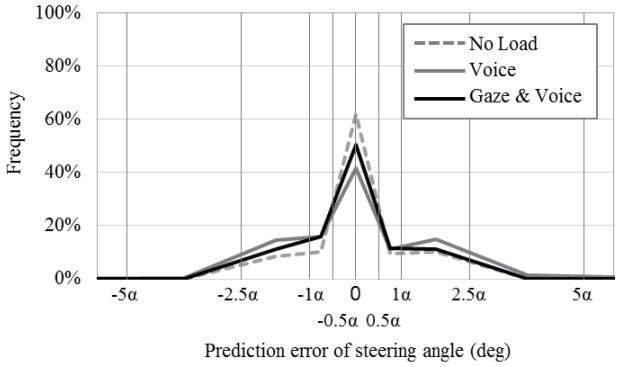


Fig.9 Frequency distribution（Example “Map expansion”）

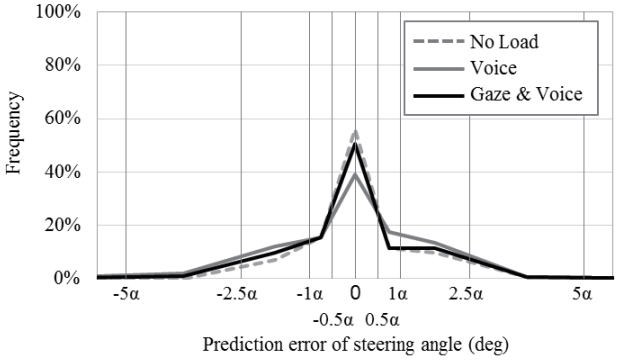


Fig.10 Frequency distribution（Example “eMirror expansion”）

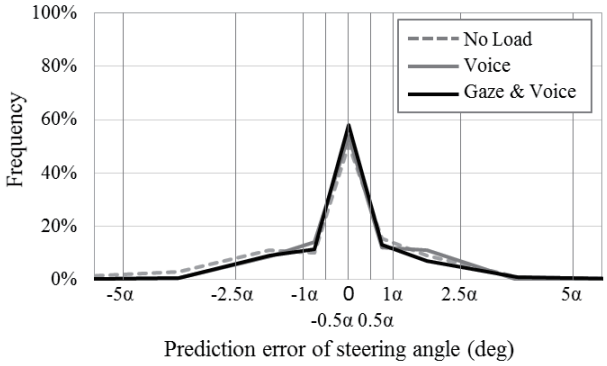


Fig.11 Frequency distribution（Example “Camera”）

参加者全体の傾向を把握するため、操舵角予測誤差の度数分布の90%タイル値αを比較したグラフを図12に示す。3.3章の主観評価と同様に、各々の条件間でt検定を実施している。

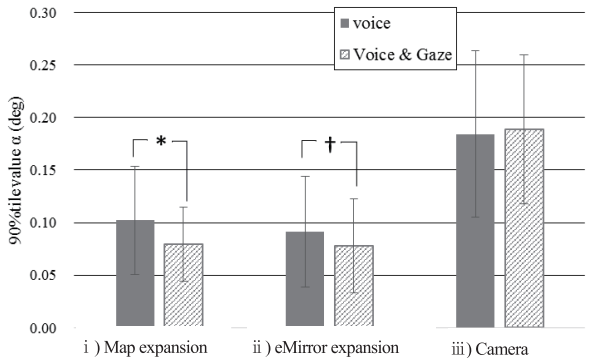


Fig.12 Comparison of αvalue（* p<0.05、† p<0.1）

主観評価と同様に、i）地図拡大/ii）ミラー拡大についてはそれぞれ有意差/有意傾向があり、定量値でも負荷低減が示されたと考える。

また、iii）カメラ起動も主観評価時の結果と同様、操舵予測誤差が大きいことを示すαの値がi）ii）よりも大きい傾向を持つことから、ドライバへの負荷が高いことを示唆する結果となった。視認負荷の増大により、2つの操作方法に差異が見られなくなる傾向は、主観評価結果と一致しており妥当と考える。

4. まとめ

本研究では、視線と音声を用いたマルチモーダルインタフェースについて、視認行動をトリガーとした操作に注目し、従来の音声認識と比較することにより、その効果を確認した。その結果、音声のみによる操作（単一モダリティ）と比較し、負荷を低減できることを確認した。

一方で、走行環境やタスク次第で視線による操作が困難な場合もあると考えられるため、視線による操作は音声操作やス

テアリングスイッチ等他の操作方法と完全に置き換わるのではなく、併用してユーザが都合の良い方を使用する設定の仕方が妥当であると考える。

また、前述の通り、あるリソース（今回の場合“中心視”と“反応”）に情報が集中したときには負担が重くなり、低負荷時と同様の応答がしにくくなる。今回の実験条件のような、狭路運転で負荷の高い状況に対しては、必要なカメラ画像を自動で表示するなどの工夫が必要であると考える。

今後は、今回事例とした3タスク以外にも候補を広げ、より効果の高いタスクの抽出とその具現化を進めていく。また、実走行環境での評価を実施し、同様の傾向である旨を確認することも課題である。

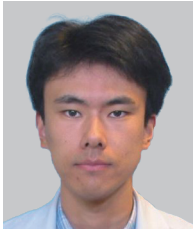
参　考　文　献

1) C. D. Wickens: Multiple Resources and Mental Workload, Human Factors, Vol. 50, No. 3, p.449–455, (2008)
2) 岩田貴裕、山邉哲生、中島達夫：マルチタスク環境下における認知負荷の測定と評価、情報処理学会研究報告、Vol.2009-UBI-22, No.8, (2009)
3) 岡田友哉、坂本大介、小野哲雄：英文閲覧時における視線と音声情報を組み合わせた対訳提示手法、情報処理学会インタラクション2019論文集、p.747-751, (2019)
4) 中川千拡、松原俊一、Martin J. Durst: 視線情報と音声情報を組み合わせたWebブラウジング用インタフェースの提案と実装、情報処理学会第78回全国大会講演論文集、p.369-370, (2016)
5) Abdul Rafey Aftab: Multimodal Driver Interaction with Gesture, Gaze and Speech、ICMI ’19 p.487-492, (2019)
6) 芳賀繁、水上直樹：日本語版NASA-TLXによるメンタルワークロード測定、人間工学、Vol.32, No.2, p.71-79 (1996)
7) 中山沖彦、二見徹、中村友一、アーウィン・ボアー：運転負荷定量化手法「ステアリングエントロピー法」の開発、自動車技術会学術講演会前刷集、No.45-99, p.5-8, (1999)
8) 伊藤敏行、中山沖彦、アーウィン・ボアー：車載情報機器に関する自工会安全性ガイドラインの策定とステアリングエントロピー法による運転者負荷評価、国際交通安全学会誌、Vol.26, No.4, p.243-250, (2001)

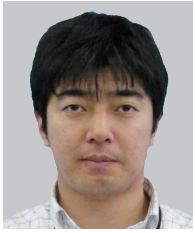
出　　典

公益社団法人自動車技術会
自動車技術会論文集
Vol.51, No.5.　文献番号：20204473

著者



森田　祐介



田村　総

可変圧縮比エンジン用マルチリンク式クランク機構の軸受要素の開発

中村　勝敏*　　茂木　克也**　　大熊　悟*

抄録　世界で初めての量産型可変圧縮比エンジンであるVCターボエンジンに用いられるマルチリンク式クランク機構は、運転シーンに応じ圧縮比を使い分けることで低燃費、高動力性能の二律背反する要素の両立を高次元で実現できる機構である。本稿では、本機構を成立させる上で重要な機能部品である軸受要素の負荷容量の確保のため、軸受毎の独特の荷重特性、摺動条件を踏まえた軸受構造を設定したこと、また軸受機能を保持する上で、油路を設け軸受部にオイルを確実に配給することが、特に油路を設けづらいリンク間を連結する揺動軸受において重要であることについて述べている。

1. まえがき

2018年、世界で初めて量産型可変圧縮比エンジンの生産が開始された。本可変圧縮比エンジンに用いられる可変圧縮比機構は、運転シーンに応じ圧縮比を使い分けることで、低燃費、高出力の相反する要素の両立を高次元で実現できる機構である。また、研究レベルにおいて様々な方式の提案がなされている可変圧縮比機構の中でも、当エンジンに採用されたマルチリンク方式は、主機能である圧縮比の変更機能に加え、静粛性、フリクション抑制といったユニークな付加価値を有することが特徴である[(1)]。本稿では、上記方式を実現する機構、マルチリンク機構を成立させる上で重要な機能部品である軸受要素について、それぞれの独特の荷重特性、摺動条件に応じた負荷容量の向上手法、及び摺動部へのエンジンオイル配給による異物排出、および冷却効果に着目することで、本機構の付加価値を損ねることなく軸受の機能信頼性を確保したこと、また、小軸径に設定した軸受要素数の増加にも関わらず、従来機構エンジンと比較しても同等のフリクションを実現することができたことについて述べる。

2. 開発コンセプト

本軸受要素群は、機構の有するてこの構成などの影響により、従来機構用軸受と比較して入力荷重が増大する傾向にある。この傾向に対応するためには高負荷容量の確保、及び摺動部への積極的な潤滑油の配給が必要となるが、軸径増大といった一般的な対応では、エンジンの車載性確保の為の必要条件であるリンク部品小型化を妨げる方向となってしまう。今回、この二律背反する項目の両立が課題となった。

3. マルチリンク機構、軸受要素の構成

3.1. マルチリンク機構の部品構成

マルチリンク方式を前提とした可変圧縮比機構（Variable Compression Ratio（VCR）system）の部品構成を図1に示す。ピストン、コンロッド、クランクシャフトの連接により構成される従来機構（図2）に対し、コンロッドに代替する部品群としてアッパーリンク、ロアリンク、コントロールリンク（本稿ではそれぞれ、U-Link、L-Link、C-Linkと呼称する）が連接するマルチリンク式クランク機構により構成されている。C-Link大端部はクランクシャフトの下方にベアリングキャップにて固定されるコントロールシャフトの偏心軸部に連接し、更にこのコントロールシャフトより連結部を介しアクチュエーターリンク（本稿ではA-Linkと呼称する）に繋がり、エンジン側面に配置されるアクチュエーター（本稿ではACTRと呼称する）へと連接される構造となっている。

* パワートレイン・EV 機構システム技術開発部　　** パワートレイン・EV 先進技術開発部

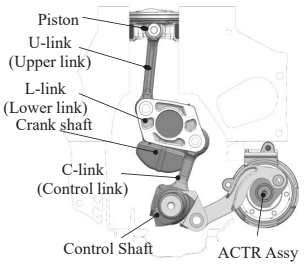


Fig. 1 Components of VCR system

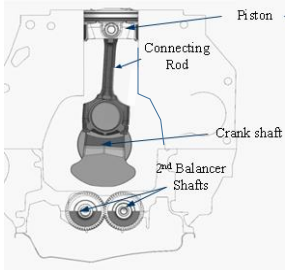


Fig. 2 Components of conventional

3.2. マルチリンク機構における軸受要素の構成

マルチリンク機構における軸受要素は、前述したピストン、リンク、及びシャフト間を連接するために設定されている。軸受の構成について図3に示す。本機構特有の、U-LinkとL-Linkに圧入されるアッパーピンとを繋ぐUピンブッシュ、L-Linkとクランクピンとを繋ぐL-Linkベアリング、L-Linkに圧入されるコントロールピンとC-Linkとを繋ぐCピンブッシュ、C-Linkとコントロールシャフト偏心軸とを繋ぐC-Link大端部ベアリング、及びコントロールシャフト主軸とベアリングキャップとを繋ぐコントロールシャフトベアリングの5箇所に加え、従来機構同様のクランクシャフト主軸とベアリングキャップとを繋ぐメインベアリングと、ピストンピンブッシュの2箇所の、計7箇所が本機構の軸受要素である。

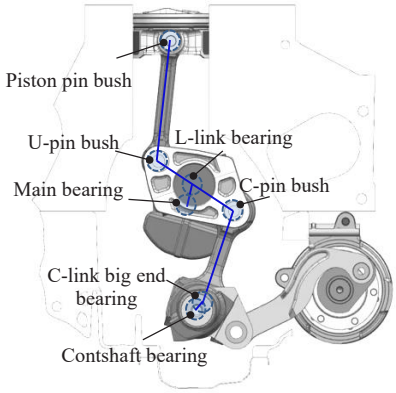


Fig. 3 Bearing components of Multi-link system

4. 軸受要素の設計

前述した各軸受要素群について、それぞれの荷重特性、及び使用環境を踏まえて設計を行った。各軸受の外観、寸法、荷重特性、摺動特性について表1、表2に示す。L-linkベアリング、メインベアリングは従来機構用軸受同様の回転軸受部として機能するが、マルチリンク機構用に新たに設定されたUピンブッシュ、Cピンブッシュ、C-Link大端部ベアリング、及び従来機構同様のピストンピンブッシュは揺動軸受部となっていることが特徴である。直径クリアランスについては、いずれの箇所も、一般的なメイン、コンロッドベアリングと比較して概略同等に設定されている。

Table1. Specification of bearings No.1

	L-Link bearing	Main bearing
	Upper / Lower	
Diameter(mm)	42	52
Width(mm)	25	17
Width of groove(mm)	-	3.15
The rate of increase of load	1.9	1.9
Sliding property	Rotating	Rotating
	U-pin bush	C-pin bush
Diameter(mm)	23	21
Width(mm)	16.6	18.5
Width of groove(mm)	2.29	2.29
The rate of increase of load	1	0.9
Sliding property	Oscillating	Oscillating

Table2. Specification of bearings No.2

	C-Link big end bearing	Controlshaft bearing
Diameter(mm)	35	40
Width(mm)	17	17
Width of groove(mm)	2.58	3.15
The rate of increase of load	0.9	0.9
Sliding property	Oscillating	Non-sliding

4.1. L-Linkベアリングの設計

L-Linkベアリングを設計するにあたり、三つの問題が生じた。一つ目は、L-Linkの構造の特徴により生じる問題で、田辺が述べているように[(2)]、従来構造用コンロッドと比較して、エンジン軸方向に幅広の構造であることと、中央部に全幅の1/2を占めるスリット構造を持っていることにより、受圧部は従来機構用コンロッドと比較して低剛性の構造となっていること（図4参照）、及びL-Linkベアリング中心に対しUピン側、Cピン側とで非対称の構造となっていることである（図5参照）。以上の特徴により、実働中にハウジング側（リンク側）とベアリング側とで相対的なすべりを引き起こし易い傾向となっている。二つ目は、リンク機構のてこの構成により、入力荷重が図6に示すとおり、（L2＋L4）/L2＝1.9倍にまで増幅されることである。そして最後の三つ目は、図7に示すエンジン高回転時に増大する傾向にある慣性荷重が、プレーンベアリング合わせ面方向に入力されることである。本ベアリングは、筒内圧荷重方向がL-Linkボルトの軸方向とほぼ同方向、つまり、プレーンベアリングの合わせ面より90°方向となるよう設定されているが、実動中の慣性荷重についてはL-Linkの揺動動作により、筒内

圧荷重に対し約90°傾いて発生するため、結果的に負荷容量が小さい、合わせ面方向への入力荷重として生じる。今回、軸受機能確保の為、上記三つの問題に対し以下の対策を講じた。一つ目のベアリング背面部の相対すべりについては、軸径を従来機構コンロッド用ベアリングに対し小径化し、かつL-Link幅が従来機構用コンロッドベアリング幅に対し増加していることを利用し、軸受幅を拡大することで、ベアリング背面部の総密着力を1.5倍程度までに向上させることで対応した。総密着力算出式と軸受部各諸元について表3に示す。L-Link内径部への密着力を上げ、追従性を高めることで相対すべりに対応することができた。加えて合わせ面部の爪構造について形状と配置の工夫を行った。以上対応の結果、二つ目の課題である増幅された入力荷重に対して従来機構用コンロッドベアリング並の平均面圧とすることができた。また三つ目のベアリング合わせ面方向の慣性荷重に対しては、一般的なコンロッド用ベアリングに対してクラッシュリリーフ形状の逃げ部の高さを縮小し、受圧面積の確保を図ることで対応した（図8参照）。

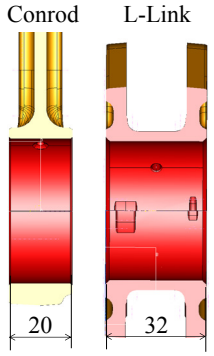


Fig. 4 Width of L-Link

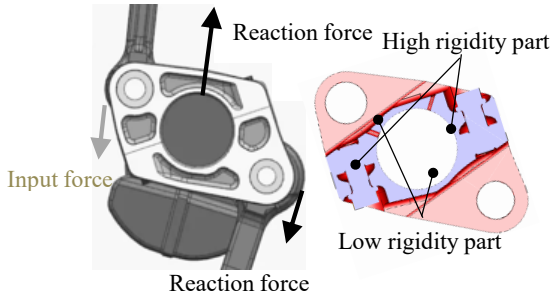


Fig. 5 Mechanical asymmetry of L-Link

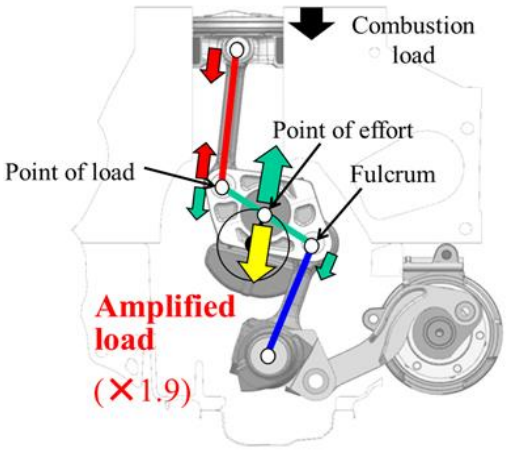


Fig. 6 Principle of lever by multi-link

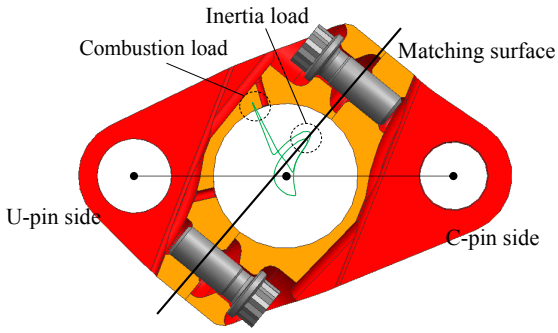
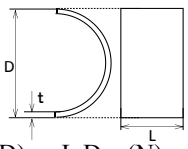


Fig. 7 Load of L-Link bearing

Table3. Specification of L-link(conrod) bearing

	Multi link	Conventional
D(mm)	45	47
t(mm)	1.5	1.5
L(mm)	25	16
Fr ratio※	1.56	1



Total adhesion：$Fr = 2(1-t/D)(t/D)\ \sigma_B\ L\ D\ \pi\ (N)$

σ_B: Stress in bearing circumferentional direction

※ Fr ratio = Fr value of each model / Fr value of conventional

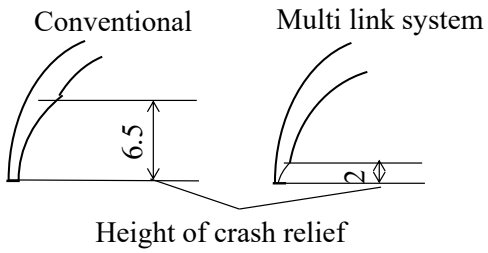


Fig. 8 The height of crush relief

4.2. メインベアリングの設計

既報[3]のとおり、前述のL-Linkベアリング同様、マルチリンク機構のてこの構成により、クランクシャフトメインベアリングへの入力荷重は（L2＋L4）/L2＝1.9倍に増幅される（図6参照）。一方、このてこの構成は、ピストンストロークについて

も増幅させる効果を持っており、従来機構に対しクランクスローを約0.5倍とすることが出来るため、クランクシャフトの口開き変形量を低減することができる（図9参照）。この両者の得失の結果を図10に示す。マルチリンク機構により軸受部での片当たり傾向が大幅に緩和し、結果として軸受の負荷容量が向上し、従来機構と比較して最大荷重値が倍程度となりつつも、軸受の潤滑性能を向上させることが出来た。局所面圧の低減効果についてマルチボディダイナミクス解析ソフトであるEXCITE ™を用いたEHLの結果を図11に示す。より出力の小さいエンジンと比較しても、局所面圧が低減していることが確認できた。

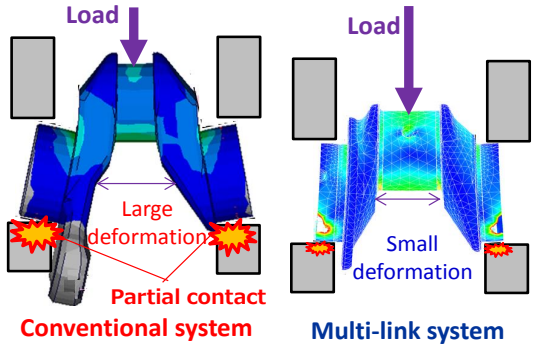


Fig. 9 Comparison of bending deformation

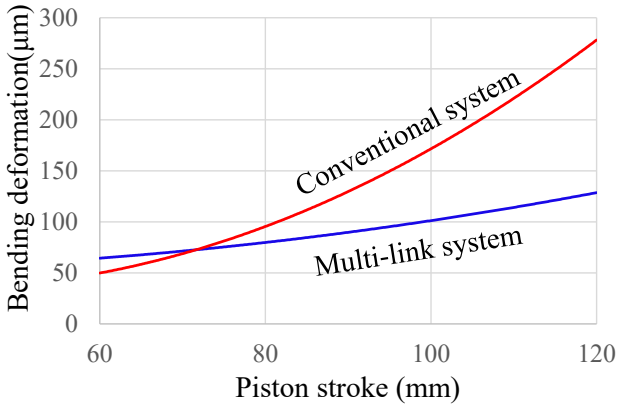


Fig. 10 Bending deformation of crankshaft

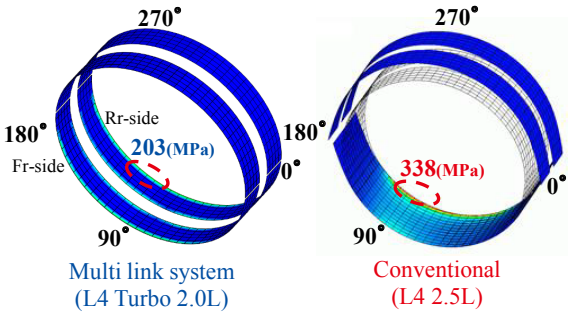


Fig. 11 Local pressure of main bearing

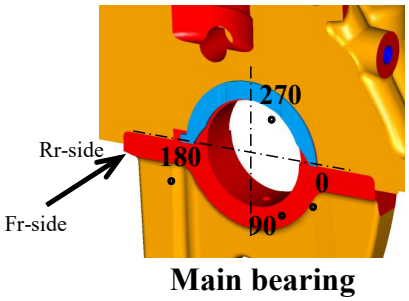


Fig. 12 Positional relation of main bearing

4.3. C-Link大端部ベアリング,U,Cピンブッシュの設計

マルチリンク機構用軸受要素として新たに設定されたC-Link大端部ベアリング、U、Cピンブッシュの三要素はピストンピンブッシュ同様、いずれも揺動条件で用いられる軸受要素である。図13に各軸受要素について揺動軸受において問題となる、摺動部摩耗の指標となるPV値を示す。各部位とも従来機構用ピストンピンブッシュ部の値を上回るため、ピストンピンブッシュ同様に、耐摩耗性に優れた材質である高面圧用銅合金ブッシュ材を採用した。また、本軸受群は、摺動形態が揺動であるが故、連続した一方向摺動により特に促される軸受円周方向の油流が、回転条件で用いられる軸受と比較して弱く、コンタミの停滞や摺動面の潤滑油による冷却機能の低下を引き起こし易い傾向にあり、結果、焼き付きの危険性が高まる要因となる。これを補うため軸受面に全周溝構造を設けた。これにより、軸受円周方向の油流の不足を軸受幅方向の油流で補った（表1参照）。加えて、構成部品群に対し、摺動面への油通路の設定を行うことで（図14参照）、給油、及び油排出を促す油経路を設けることができた。一方で、全周溝を設けることで懸念される受圧面積減少に伴う面圧増大の影響について、EHL計算、及び摺動部の温度測定による、解析、実測での確認を行った。まず図15、16に、C-Link大端部軸受について全周溝の有無、それぞれの場合について燃焼圧荷重時のハウジング部の変形を考慮したEHL計算の結果を示す。軸受幅中央部は、ハウジングの変形により、端部に対し相対的に油膜厚さの大きい荷重非主保持部となり、受圧部としての機能が小さいことが確認された。この結果は、軸受幅中央部に油溝を設けても、軸受の受圧機能が損なわれ難いことを示している。図17に実機における摺動部温度測定による油経路設置の効果確認結果を示す。相対的に温度は低下しており、実測でも油通路、及び全周油溝を配置することでの温度低減効果が確認できた。以上より、解析、実測の双方において軸受機能の向上効果が確認できた。同様に、U、Cピンブッシュ部についても確認を行った。図18、19、21、22にUピン、Cピンブッシュそれぞれの EHL計算の事例を示す。C-Link大端部ベアリング同様、全周油溝を設けることで受圧

機能が損なわれないことが確認できた。また、摺動部温度についても低減していることが確認できた。C-Link大端部軸受同様に、油通路、及びブッシュ部の全周油溝による摺動部への常時給油の効果が得られたと考えられる（図20、23参照）。一方、軸部側となるU、Cピン部については、高PV値に対応するため表面コーティング被膜として水素フリーDLC材を採用した。これにより摺動部における低μ化、高硬度化を図り、耐焼付き性、耐摩耗性の向上を図った。

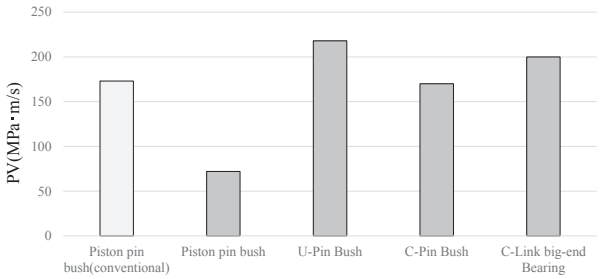


Fig. 13 PV value of bearings for multi-link

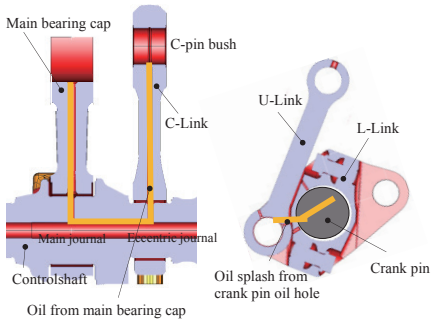


Fig. 14 Oil passage to bearings

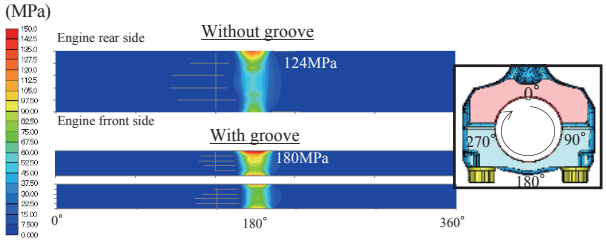


Fig. 15 Local pressure of C-link big end bearing

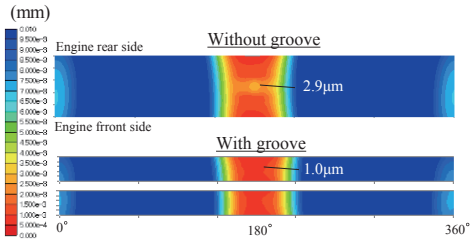


Fig. 16 Oil film thickness of C-link big end bearing

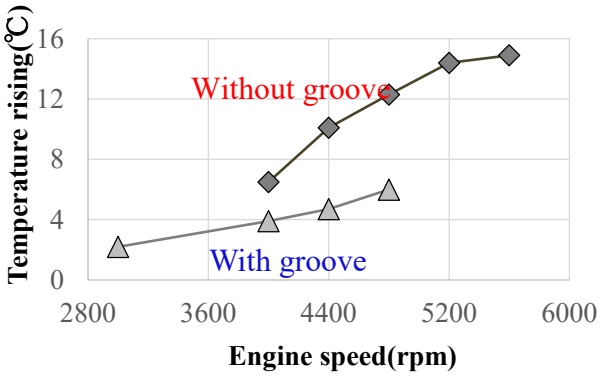


Fig. 17 Thermal measurements of C-link big end bearing

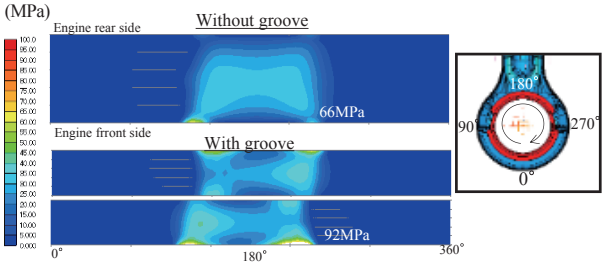


Fig. 18 Local pressure of U-pin bush

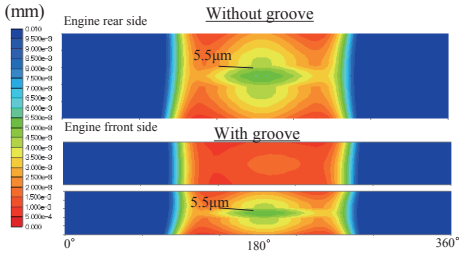


Fig. 19 Oil film thickness of U-pin bush

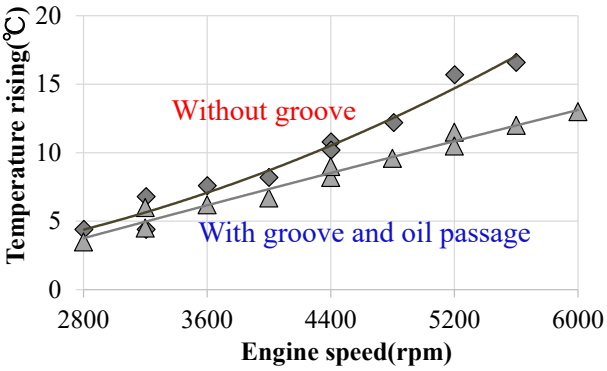


Fig. 20 Thermal measurements of U-pin bush

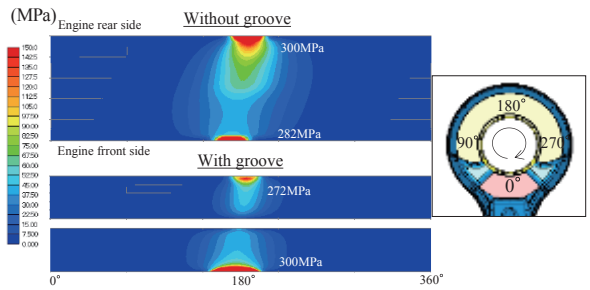


Fig. 21 Local pressure of C-pin bush

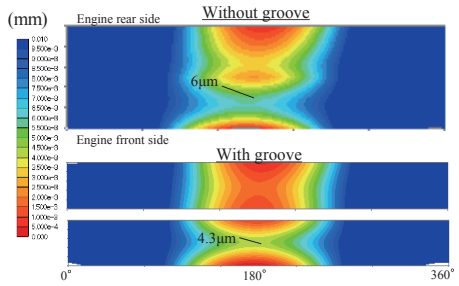


Fig. 22 Oil film thickness of C-pin bush

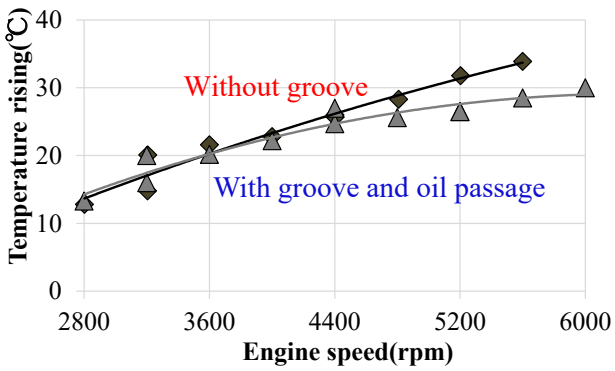


Fig. 23 Thermal measurements of C-pin bush

4.4. コントロールシャフトベアリングの設計

前述した揺動軸受部と比較して、コントロールシャフトベアリングは圧縮比変更時を除いて回転、揺動運動ともに起こらない、非摺動状態で使用されることが特徴である。このことから、本軸受では摺動による潤滑油の流れを期待することができないため、直接接触による摩耗増大が懸念される。上記問題に対応する為、前述の揺動軸受同様、全周油溝を設け、軸受幅方向の油流により対応する構成とした。また、コントロールシャフトの曲げ剛性がクランクシャフトと比較して大幅に向上しているため、軸受部での片当たりの傾向はクランクシャフト主軸受部と比較して大幅に軽減できる構成となっている。ベアリング材質としては、揺動軸受部同様、本箇所にも高面圧用銅合金ブッシュ材を適用することで耐摩耗性を確保した。

4.5. ピストンピンブッシュの設計

従来機構と比較してマルチリンク機構では、ピストンピンブッシュ部のPV値が低減される傾向にある（図24参照）。これは、燃焼荷重を受ける膨張行程、すなわちATDC時のピストン降下タイミングにおいて、ピストン直下のU-Link（従来エンジンのコンロッドに相当）が直立姿勢を維持しピストンピンブッシュ部の摺動速度が小さくなるためである（図25参照）。この傾向はマルチリンク機構用ピストン設計においてピストンピンの小ピン径化の容易さを示しており、また、本機構の有するサイドスラスト力低減効果と相まって、ピストン小型軽量化のポテンシャルを有していることも示している。

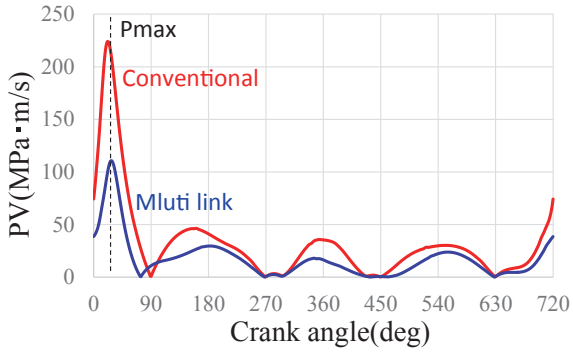


Fig. 24 PV of piston pin bush

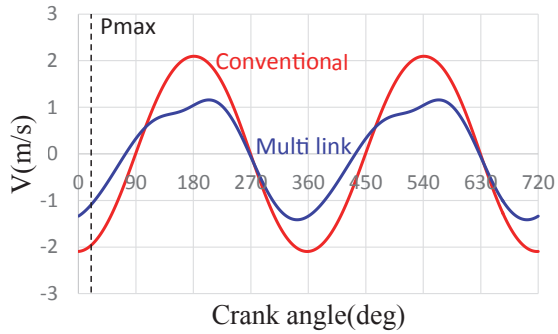


Fig. 25 Sliding velocity of piston pin bush

5. マルチリンク機構用軸受要素の特徴の整理

マルチリンク機構用軸受群は、各々の軸受の環境、特徴から、三つのグループに分けることが出来る。図26に示す、第一グループのL-Linkベアリング、メインベアリングは、従来機構用コンロッドベアリング、メインベアリング同様に回転軸受としての機能が求められる。一方で、入力荷重についてはマルチリンク機構によるてこの構成により1.9倍までに増幅される。今回、この増幅した荷重に対してL-Linkベアリングは軸受幅を増大させることで、機構上、構造上発生しやすい背面部の相対すべりに対応し、結果、面圧の低減にも繋がった。メインベアリングについては、クランクシャフトの高剛性化により片当たり傾向を防ぐことで機能信頼性を確保した。第二グループのC-Link大端部、及びU、Cピンブッシュは、マルチリンク機構

用に新たに設定された軸受要素である。これらの軸受要素は従来機構用ピストンピンブッシュ部同様、揺動軸受として機能する箇所であるが、摩耗の指標であるPV値に着目すると（図13参照）、ピストンピンブッシュと比べ数値が増大する傾向にある。これにより損なわれる耐焼付き性を向上させるため、エンジンオイルを摺動部引き込むための油通路を設けた。また軸受部自体に全周溝構造を設けることで冷却、異物排出効果を増強し、耐焼付き性を確保した。この際、全周油溝を非荷重主保持部である軸幅中央部に配置することで、負荷容量を損ねることなく、冷却機能、及び異物排出機能を獲得することが出来た。第三グループに分類したコントロールシャフトベアリングは非摺動部として機能する機会が多い。この部位については第二グループ同様に全周油溝を設けることで異物排出機能を獲得しつつ、高曲げ剛性を有するコントロールシャフトにより片当たり傾向を大幅に抑制した。軸受材には第二グループ同様にブッシュ材を採用することで耐摩耗性を確保した。いずれのグループにおいても、それぞれの具体的な対応方法は異なるが、増大する荷重や、油量が確保できないことで低下傾向にある油流量に対し、構成部品のサイズの肥大化を防ぎ、剛性の特質に着目し軸受部の負荷容量を確保しつつ、油経路を設けて軸受幅方向の油流を確保することで機能信頼性を確保した。

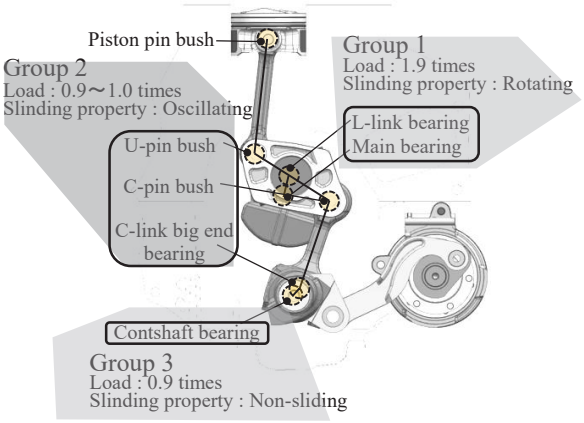


Fig. 26 The grouping of bearings

6. フリクションの確認

マルチリンク機構では新たに軸受要素が追加されたことにより、フリクションが増大する要因が増えるが、追加された各軸受要素は揺動動作の箇所であること、また小径であることからその増大代は限定的である。一方で、マルチリンク機構においてATDC時にU-Linkが直立姿勢であることで得られるピストンスラスト力低減効果、及び、前述の対応でクランクシャフト軸径を小径に設定できたことにより、比較対象である自然吸気 同一排気量エンジンと比較して図27に示すとおり、フリクションを低減することができた。

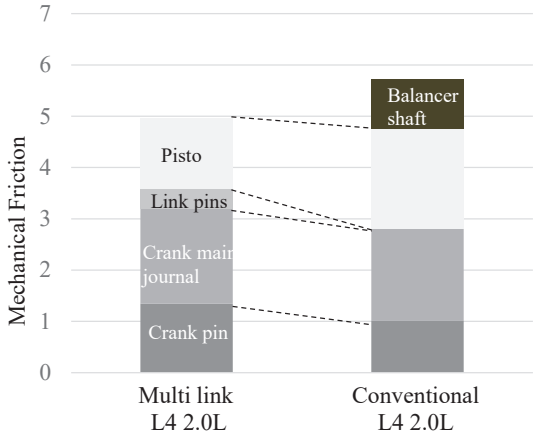


Fig. 27 Comparison of mechanical friction

7. 結 論

結論は以下のとおりである。

マルチリンク機構の各軸受部位について、部位毎の特性に応じた以下の対処により、機能信頼性を確保することができた。

・従来機構においても存在するクランク軸周りの軸受については、てこにより荷重が増大するが、軸受自身，若しくはクランクシャフトといった構成部品の剛性を向上させることで、内転しやすい傾向、および局所面圧増大に対処した。

・マルチリンク化により新設された揺動、非摺動軸受については耐摩耗性向上の為、高面圧用銅合金ブッシュ材を採用した。

・上記材質の高硬度が異物による耐焼付き性を損ねる傾向と、軸回転による油流が限定的となることで生じる異物排出性悪化への対応の為、油通路、全周溝を設けることで当該溝部への給油経路を確保し、軸受幅方向の油流れを強化した。

謝　辞

今回の検討，開発に当たりましては、NEDOの委託事業である「エネルギ使用合理化技術戦略的開発」において多大な支援をいただきました。関係者皆様に感謝を申し上げます。

参 考 文 献

(1) Katsuya Moteki：A study of a Variable Compression Ratio System with a Multi-Link Mechanism, SAE Paper 2003-01-0921, (2003).

(2) 田辺孝司：軸受面圧平準化効果を狙った可変圧縮比エンジンVC-T用マルチリンク部品の構造、自動車技術会2018年度春季大会学術講演会講演予稿集、20185421, (2018).

(3) 中村勝敏：動的挙動解析を活用した可変圧縮比エンジンVC-T用マルチリンク式クランク機構の開発、自動車技術会2018年度春季大会学術講演会講演予稿集、20185420, (2018)。

出　典

公益社団法人自動車技術会
自動車技術会論文集
Vol.51, No.4　文献番号：20204316

著者

中村　勝敏

茂木　克也

大熊　悟

機械学習を用いた自動車空力性能を予測するためのサロゲートモデル開発

赤坂　啓*　　陳　放歌**　　寺口　剛仁**

抄録　燃費性能の競争力向上や新たな環境規制に対応するため、より一層の空気抵抗の低減が求められている。そこで、より高い空力性能の実現に向けて、造形デザイナーや空力エンジニアが限られた期間内に多数のデザイン案の空力予測を行えるツールの開発を行った。本研究では、短時間に空力性能を予測できるように、CFD (Computational Fluid Dynamics)の代わりに機械学習を用いた予測モデルを開発した。本論文では、開発した機械学習モデルおよび学習に使用したデータセットの概要、予測精度や計算時間について報告する。

1. まえがき

近年、自動車市場における燃費性能の競争力向上や新たな環境規制に対応するため、より一層の空気抵抗の低減が求められている。自動車の空力性能開発において空気抵抗を評価する場合、風洞実験と並んでComputational Fluid Dynamics（CFD）も多用される[1,2]。しかし、CFDを行うためには多額の費用と時間が必要となる。特にCFDについては、実験評価前の事前計算や評価仕様数の増加、更に計算精度向上といった要求も加わりCFDの計算量、計算時間は年々増加している。そこで本研究では機械学習を用いて、自動車形状とCFDの計算結果の関係を学習することにより、CFD結果（流速、圧力および空気抵抗係数）を推定するサロゲートモデルの開発を試みた。これにより、空力解析をCFDから機械学習モデルに置換えることが可能となり、CFDの計算時間の短縮と計算量、コストの削減が期待できる。本論文では、提案手法とデータセットの概要および検証結果について報告する。

2. 機械学習モデル

2.1 既存研究

これまでも本研究と同種の研究は存在する。Umetaniら[3]は自動車の空気抵抗係数（C_D値）および流れ場の推定を目的に、自動車形状を数値化した特徴量とCFDの計算結果（流速、圧力、C_D値）をGaussian processを用いて学習、推定する機械学習モデルを構築した。Umetaniらは約800の自動車形状とCFD結果について学習を行い、C_D値および流れ場の推定結果はCFDの計算結果と比較して良く一致すると報告しており本研究の参考となる。しかし、より現実に近い自動車形状を学習する場合には課題がある。この手法ではPolyCubeと呼ばれる多面体を使用しており、PolyCubeの構成点をトポロジーが変わらない範囲で自動車形状にプロジェクションする。このプロジェクションされた各構成点の座標や高さを特徴量として使用しており、学習対象の自動車形状に近いトポロジーのPolyCubeを用意する必要がある。しかし、実際の自動車形状はセダン（3BOX）やハッチバック（2BOX）、ミニバン（1BOX）など、トポロジーが異なっており同一のPolyCubeを用いることは難しい。これについては、各車型に適したPolyCubeを用意し、個別に学習することも考えられるが手間を要する。また、実際の自動車にはエンジンルーム部品、タイヤ、フロアー部品、ドアミラーといった複雑な形状が存在するが、このような複雑な形状要素を表現できるトポロジーを持ったPolyCubeを用意することは簡単ではない。このため、Umetaniらの事例は比較的シンプルな自動車形状への適用にとどまっている。

一方で、Guoら[4]は、物体からの距離を表わす距離関数を入力データとし、2次元および3次元の流れ場（流速ベクトル、圧力）を推定する機械学習モデルをConvolutional Neural Network（CNN）[5]を用いて構築した。距離関数は複雑な形状に対しても適用が可能であり、かつ3次元への拡張も比較的容易なため、流れ場（流速、圧力）の推定についてはGuoらが提案するネットワーク構造を採用する。

* 統合 CAE・PLM 部　　** 総合研究所モビリティ＆AI 研究所

しかし、GuoらのモデルはC_D値の推定はできないため、C_D値の推定を行う学習モデルが別に必要になる。著者らはこれまでにボクセルデータを入力し、C_D値を推定する学習モデルを提案している[6]。C_D値の推定精度も良好であるため本研究でもこのモデルのネットワーク構造を採用する。

既存研究において、複雑な3次元形状を有する自動車形状まわりの流れ場とC_D値の両方を学習できる学習モデルは提案されていない。そこで本研究では、既存研究で提案されている異なる二つの学習モデルを用いて流れ場とC_D値の推定を行う。

2.2 流れ場を推定する学習モデルの概要

流れ場推定モデルの基本構成は、図1に示すGuoらによって提案されたネットワーク構造を採用する。このネットワークは、EncoderとDecoderを全結合層により接続した構成となっている。このネットワークを本研究のような実用問題に適用する場合、形状の複雑度合い等に応じて入力する距離関数のサイズを大きくする必要がある。これ伴い、EncoderおよびDecoderの中間層についても多層化する等の対応を行いネットワークの性能を向上させるが、中間層の多層化は学習時の勾配消失もしくは勾配爆発を招きやすく学習が進み難くなる課題がある。そこで本研究では、Guoらが提案するネットワーク構造に対し、全結合層の代わりにResidual blocks[7]を採用し勾配消失・爆発の抑制を図る。本研究の提案モデルを図2および図3に示す。距離関数を入力し、(a) 流速ベクトルの3成分、(b) 圧力を出力するモデルとなっている。また、EncoderおよびDecoderについても勾配消失の抑制のため、Batch normalization[8]およびInstance normalization[9]を用いた。

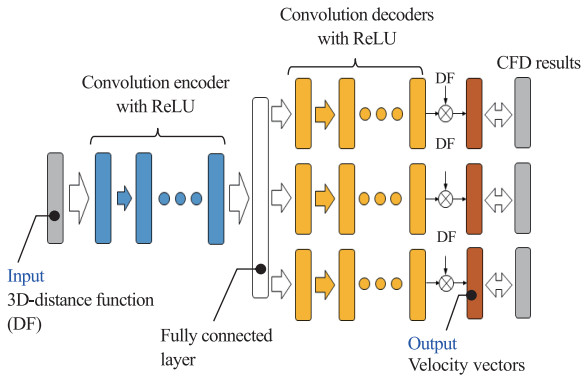


Fig.1 CNN structure of prediction model for flow filed proposed by Guo [4]

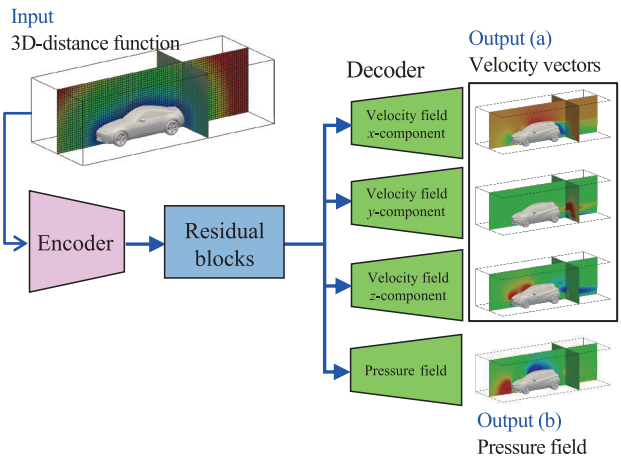


Fig.2 Structure of proposed model for flow field estimation

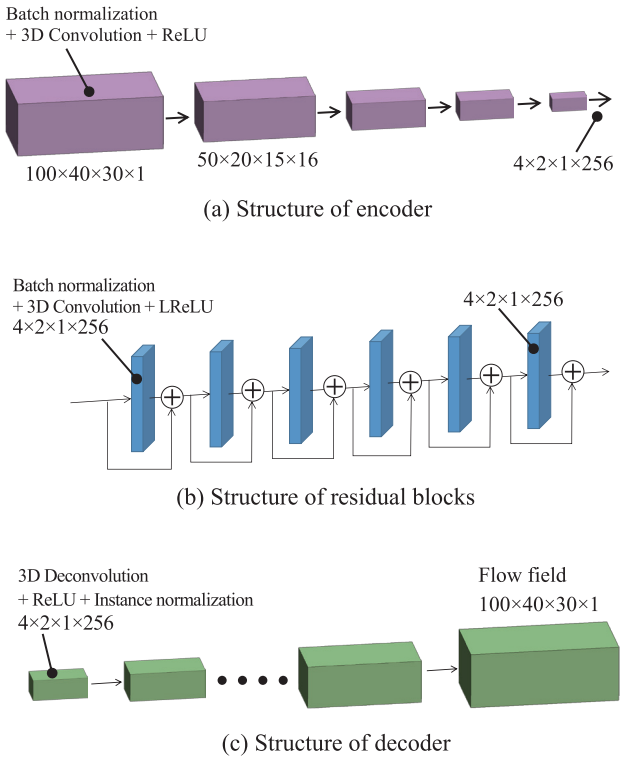


Fig.3 Details of encoder, residual blocks and decoder of proposed model for flow field estimation

2.3 C_D値を推定する学習モデルの概要

次にC_D値を推定する学習モデルについて述べる。著者らはこれまでに、ボクセルデータを入力とし、C_D値を推定する学習モデルを提案している[6]。このモデルはMaturana[10]によって提案されたVoxnetをベースしているが計算量を減らすため、中間層を一次元に変換する際に、Linらの研究[11]を参考に全結合層を使用せず代わりにGlobal Average Poolingを採用している。C_D値の推定精度も良好であるため本研究でもこのネットワーク構造を採用する。

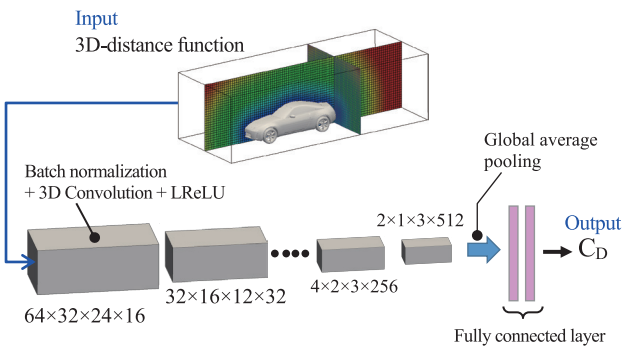


Fig.4 Structure of proposed model for coefficient of aerodynamic drag (C_D) estimation

ただし、流れ場とC_D値の推定で入力データが異なることは利便性の観点で避けたい。そこで、C_D値の推定モデルの入力データをボクセルから距離関数に変更し、流れ場とC_D値の推定モデルの入力データを距離関数に統一する。入力データを距離関数に変更したネットワーク構造を図4に示す。

2.4 距離関数およびハイパーパラメータ

まず、CNNに入力する距離関数について述べる。図5に本研究で用いた3次元の距離関数の距離場を示す。色は各格子点の自動車形状からの距離を示している。次に距離関数の生成方法について述べる。自動車形状周りにBounding boxを設定し、Bounding box内に直交等間隔の格子点を配置する。これら各格子点に対して自動車形状からの最短距離を計算し距離場を生成した。表1にBounding boxの大きさ、格子間隔および格子点数を示す。C_D値の推定に用いる距離関数については、詳細な形状変化を捕らえられるように、より小さい格子間隔を用いた。

また、本研究で使用したOptimizer、損失関数およびハイパーパラメータは表2のとおりである。

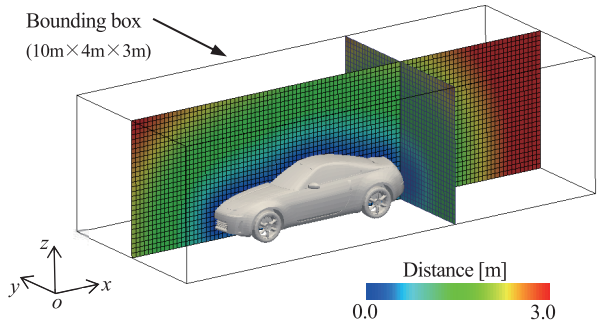


Fig.5 3-dimensional distance function around car shape

Table 1 Parameter of distance function

	Flow field prediction	C_D prediction
Bounding box	10.0m×4.0m×3.0m	6.4m×3.2m×2.4m
Grid pitch	0.10m	0.05m
Num. of grids	100×40×30	128×64×48
	120,000	393,216

Table 2 Optimizer, loss function and hyper-parameters

	Flow field prediction	C_D prediction
Optimizer	Adam	Adam
Loss function	Mean absolute error	Mean absolute error
Learning rate	10^{-3}	10^{-4}
Epoch	5,000	2,000
Batch size	16	16

3. データセットと検証結果

3.1 データセット

データセットを図6に示す。1つのケースは、距離関数、流速ベクトル3成分、圧力およびC_D値の6種類の情報を有している。CNNに入力するのは距離関数のみであり、流速、圧力およびC_D値はネットワークの出力結果である。これらの出力結果が学習ケースの流速、圧力およびC_D値と一致するように学習を行う。本研究では1,123ケース用意し10:1の割合で分割し、学習とテストに使用した。データセットにはセダンやクーペ、SUV、ハッチバック、ピックアップトラック、軽自動車の6種類の車型が含まれており、学習ケースとテストケースに含まれる車型の割合は同程度となっている。学習およびテストに使用する流速ベクトル、圧力およびC_D値は商用のCFDソフトウェアを用いて計算した。計算条件は、直進走行状態、車速33.3m/s、Reynold数1.0×10^7における計算結果である。また、CFDの計算は距離関数とは異なる格子で計算をしているため、CFDの計算結果を距離関数用の格子にマッピングしている。

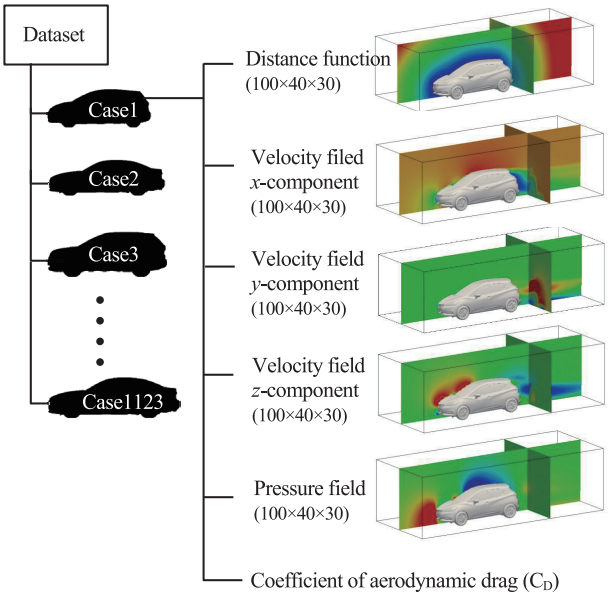


Fig.6 Distance function, flow fields and aerodynamic drag (C_D) in dataset

また、距離関数およびCFD結果は有次元の情報となるため、本研究では学習、テストに使用する前に正規化を行った。

学習に使用した計算リソースはNVIDIA社のDGX-1（1GPU）であり、機械学習関係のライブラリはTensorflow2.0を用いた。流れ場の学習に要した時間は約4日、C_D値の学習に要した時間は0.5日程度であった。また、表2に示すEpoch数まで計算することで、流速ベクトル3成分，圧力およびC_D値の最終的な損失関数の値が表3に示す程度まで下がることを確認している。

Table 3 Errors of loss functions in velocity vectors, pressure and C_D at last epoch of proposed model

Velocity vectors	Pressure	C_D
0.003～0.005	0.002	0.001

3.2 流れ場の検証結果

次に、本手法で推定した流れ場について考察する。各テストケースは12万点（100×40×30）の流速ベクトルを有する。この12万点の平均誤差を式(1)に示すMean absolute error（MAE）を用いて評価した。

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|a_i - y_i| \qquad (1)$$

ここで、a_iおよびy_iは、それぞれCFD結果と提案モデルの推定結果を表している。また、nは格子点数を表しており、今回は12万点となる。

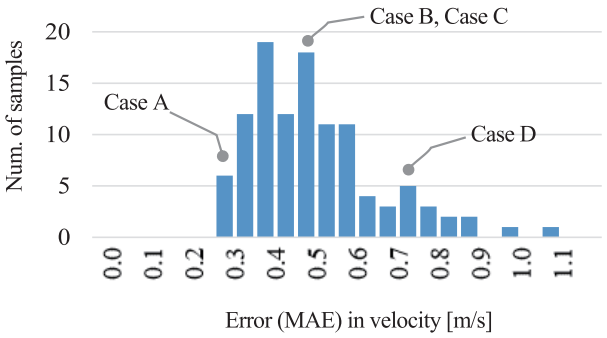


Fig.7 Histogram of mean absolute error in x-component of velocity vector on test cases

流速ベクトルのx方向成分の平均誤差（MAE）を図7に示す。x方向成分の平均誤差は0.2～1.1m/sであり、車速風の0.6%～3.3%程度の誤差に収まっている。また、yおよびz方向成分の平均誤差はx方向成分の誤差に比べて小さいことを確認している。

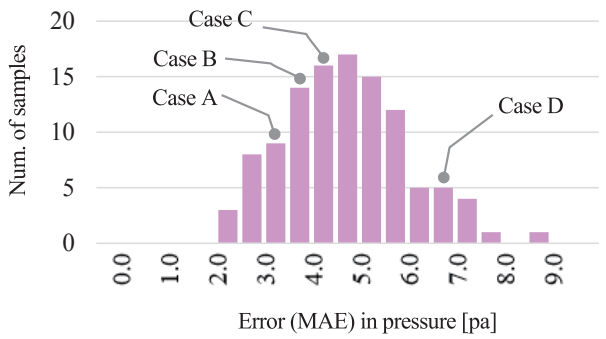


Fig.8 Histogram of mean absolute error in pressure on test cases

図8は、提案モデルで推定した圧力について、流速ベクトルと同様に12万点の平均誤差をMAEで評価し、その結果をヒストグラムで表した図である。圧力の平均誤差は2.0～9.0paであり、車速風に基づいた動圧の0.3～1.3%程度の誤差に収まっている。流速、圧力ともに車型による誤差の傾向に顕著な違いは見られなかった。

図9および図10は提案モデルを用いて推定した圧力分布および流速分布をCFD計算結果と比較した図である。ケースAからDはテストケースの代表例であり、各ケースの圧力と流速の誤差は図7、図8に示すとおりである。図9および図10は、いずれのケースも上段は比較対象となるCFDの計算結果であり、下段が提案モデルによる推定結果である。

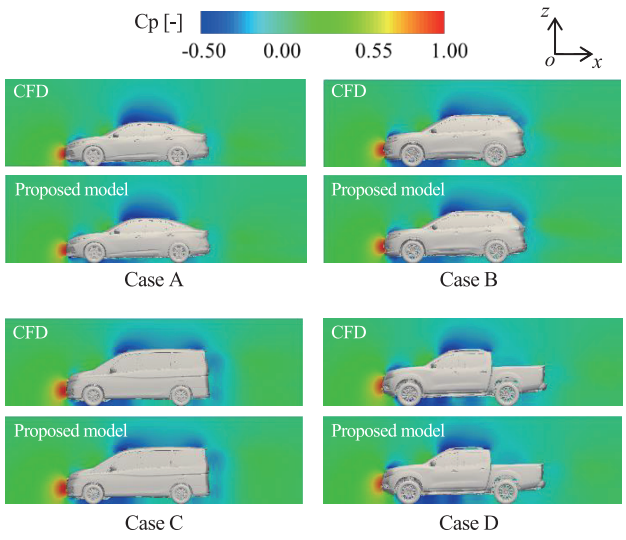


Fig.9 Comparison of pressure between CFD and proposed model in central cross-section

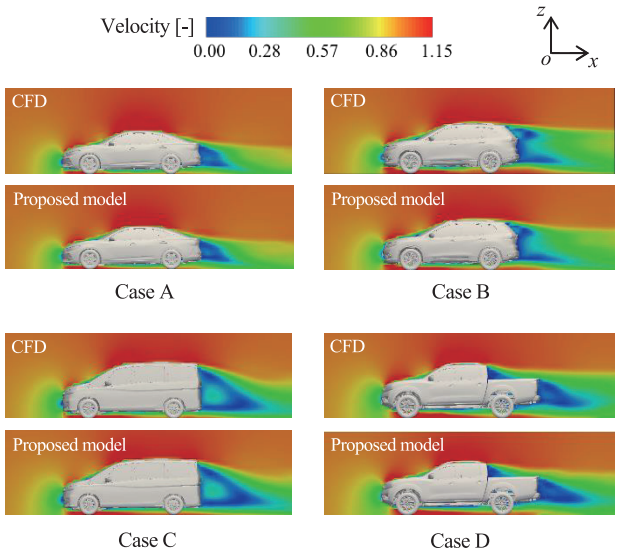


Fig.10 Comparison of velocity magnitude between CFD and proposed model in central cross-section

図9は車両中心断面における圧力分布を示しており、圧力値については動圧で無次元化している。いずれのケースにおいても提案モデルを用いて推定した圧力分布はCFD結果の傾向を再現できていることがわかる。

図10に車両中心断面における流速分布を示す。流速値は車速で無次元化している。特に空力評価において重要となる車両後方の後流領域の大きさや流速分布の傾向において、提案モデルはCFD結果を定性的に再現できていることがわかる。

図9および図10の比較結果から、圧力と速度の誤差が比較的大きいケースDであっても流れ場の定性的な傾向を再現できていること、加えて提案モデルは、異なる車型が持つ流れ場の特徴を再現できることを確認できた。

3.3 Residual blocksの効果について

EncoderとDecoderの接続に全結合層を採用したGuoらが提案するネットワーク構造と、全結合層の代わりにResidual blocksを採用した本研究で提案するネットワーク構造を適用した場合の比較を示す。図11は車両中央断面における流速分布を示している。図11(a)はCFDの計算結果であり、図11(b)はResidual blocksを用いて学習した結果である。この図からCFDの計算結果に近い結果が得られることがわかる。一方、図11(c)は全結合層を用いて学習した結果であり、CFD結果とは異なる流速分布となった。勾配爆発により学習時の重みの最適化が進まず、流速ベクトルの損失関数の値は0.1程度であった。表3に示す提案手法の損失関数の値と比べて大きく、また、Epoch数を増やしてもこれより下がることはなかった。これらの結果からResidual blocksは有用であると考える。

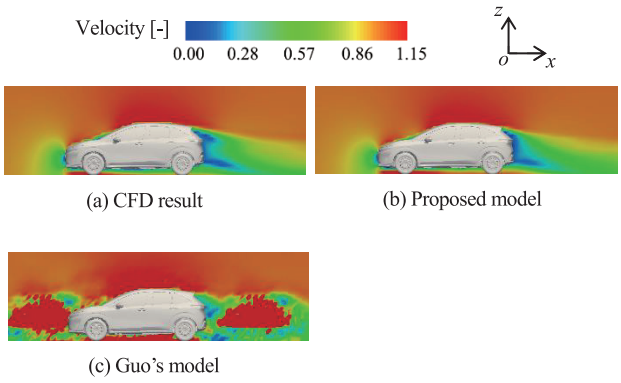


Fig.11 Comparison of velocity magnitude between Guo's model and proposed model in central cross-section

3.4 C_D値の検証結果

図12に提案モデルを用いて推定したC_D値の誤差を示す。図中の(a)は学習ケースを用いた場合の誤差であり、(b)はテストケースを用いた場合の誤差である。また、誤差を式(2)に示すMean Absolute Percentage Error (MAPE)および標準偏差で評価した結果を表4に示す。

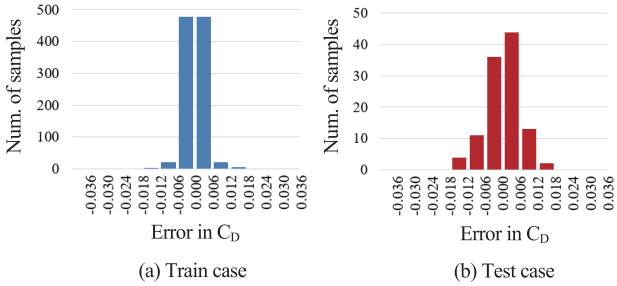


Fig.12 Histograms of error in C_D

Table 4 Error in C_D of train and test

	(a) Train case	(b) Test case
Std. deviation	0.002	0.006
MAPE	0.5%	1.4%

$$MAPE = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|a_i - y_i|}{a_i} \qquad (2)$$

式(2)におけるa_iおよびy_iは、それぞれCFD結果と提案モデルで推定した結果を表しており、nは学習ケースの数またはテストケースの数を表す。

図12および表4に示す学習ケースの誤差(a)は標準偏差、MAPEともに十分に小さいことから、データセットを適切に学習できていることがわかる。一方、テストケース(b)については、(a)に比べて誤差が大きく汎化性能に課題がある。

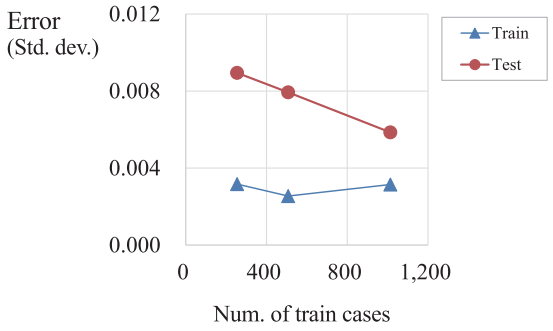


Fig.13 Error history in C_D with increase of train cases

図13に学習ケース数を変えた場合の誤差の変化を示す。横軸は学習ケースの数であり縦軸は誤差（標準偏差）となっている。学習ケースの数が増えるに伴い、テストケースの誤差が小さくなることがわかる。汎化性能の向上に向けては学習ケースの増加が有効と考える。

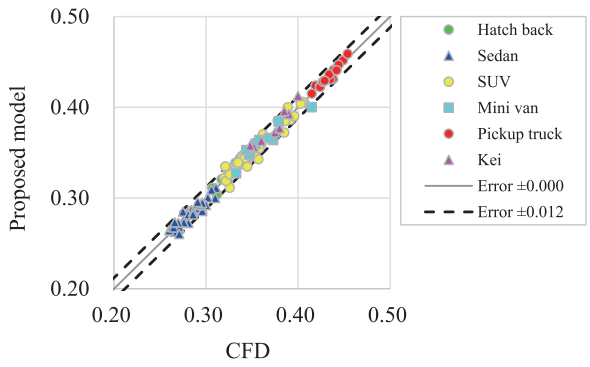


Fig.14 Comparison of coefficient of aerodynamic drag (C_D) between CFD and proposed model

図14に提案モデルを用いて推定したテストケースのC_D値とCFD結果の比較を散布図で示す。縦軸は提案モデルで推定したC_D値であり、横軸はCFDで計算した値である。テストケースには6種類の車型が含まれているが、いずれの車型についても提案モデルで推定したC_D値は、CFD結果に対して概ね±0.012以内に収まっていることがわかる。

自動車開発の初期フェーズでは複数のデザイン案の空力評価を行うが、この段階では各デザイン案の形状差は大きく、C_Dの値も提案モデルの誤差以上に異なる。従って、初期フェーズであれば、各デザイン案に対するC_D値の優劣関係の評価に提案モデルを利用することが可能であり、CFDの利用頻度、計算量の削減が期待できる。

3.5 機械学習モデルの推定時間

提案モデルを用いて、前述のケースAの流速分布、圧力分布およびC_D値を推定するのに要した時間を表5に示す。比較として商用のCFDソフトウェアを用いた場合に要する時間も記載した。

Table 5 Comparison of computational time between CFD and proposed model

Proposed model		CFD	
Distance function	11.4 min.	Mesh generation	4.0 H
Prediction of velocity, pressure and C_D	0.1 min.	Flow calculation	20.0 H
Sum.	11.5 min.	Sum.	24.0 H

CFDの場合、格子作成および流体計算で合わせて24時間程度の時間を要した[(1)]。これは、メッシュ数は約8,000万点、256cpuコア（Intel Xeon）を用いた場合の計算時間であり、一方で提案モデルの場合は、ノートPC（cpuスペック Intel Core-i5）を用いて距離関数の計算に約11分を要するものの、流速分布、圧力分布およびC_D値の推定は3秒程度であった。提案モデルは、複数の形状案の定性的な流れ場やC_D値を短時間に確認したい場合に有用なツールと言える。

4. まとめ

本研究では、複雑な3次元形状を有する自動車形状まわりの流れ場および空気抵抗係数（C_D値）を学習できる実用的な機械学習モデルの開発に取り組んだ。

1. 流れ場の学習モデルについては、Guoらの提案するネットワーク構造に対して、全結合層の代わりにResidual blocksを採用することで勾配爆発を抑制し、自動車形状まわりの流れ場を学習できるモデルを構築できた。
2. 提案モデルを用いて推定した流れ場はCFDの結果を定性的に再現できることを確認できた。
3. 提案モデルを用いて推定したC_D値の誤差（MAPE）は1.4％であった。
4. 提案モデルは複数の形状案の流れ場やC_D値を短時間に確認できることから、CFDを代替する有用なサロゲートモデルと言える。本提案モデルを用いることで、空力解析の計算時間短縮および計算コストの削減が期待できる。

参考文献

(1) 赤坂啓ほか：CFDを活用した空力性能と熱性能の同時検討の取り組み、自動車技術会 学術講演会前刷集、No.96-05, pp.11-14（2005）.
(2) M. Arai, et al.: Development of the Aerodynamics of the New Nissan Murano, SAE Technical Paper, 2015-01-1542（2015）.
(3) N. Umetani, et al.: Learning Three-Dimensional

Flow for Interactive Aerodynamic Design、ACM Trans. Graph., Vol. 37, No. 4, Article 89 (2018).

(4) A. Guo, et al: Convolutional Neural Networks for Steady Flow Approximation, Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, pp.481–490 (2016).

(5) Y. LeCun, et al.: Gradient-based learning applied to document recognition, Proceedings of the IEEE, 86 (11), pp.2278–2324 (1998).

(6) 赤坂啓ほか: 機械学習を用いた自動車空気抵抗係数のインタラクティブ予測ツール開発、人工知能学会 第34回全国大会、2O6-GS-13-02 (2020).

(7) K. He, et al: Deep residual learning for image recognition, Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 770-778 (2016).

(8) Ioffe, et al.: Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift, arXiv preprint arXiv:1502.03167 (2015).

(9) Ulyanov, et al. :Instance normalization: The missing ingredient for fast stylization, arXiv preprint arXiv:1607.08022 (2016).

(10) D. Maturana, et al.: VoxNet: A 3D Convolutional Neural Network for real-time object recognition, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Hamburg, pp. 922-928 (2015).

(11) M. Lin, et al.: Network in network, arXiv:1312.4400 (2013).

出　典

公益社団法人自動車技術会
自動車技術会論文集
Vol.52, No.3　文献番号：20214248

著者


赤坂　啓


陳　放歌


寺口　剛仁

微小操舵角域のライントレースのバラツキを低減するピッチ特性に関する研究

田尾　光規*　　町田　直也**　　林　豊***　　長棹　謙****

抄録　直進走行でドライバが走行レーン中央を維持するために行うような、微小な操舵シーンにおいて、操舵角に比例した微小な車両下向きピッチ角を付加することによって、ドライバが行う操舵のバラツキが減少すること、その定量的な関係を解明した。既報の「微小操舵角領域のライントレース性を向上する操舵力とヨー特性に関する研究」で解明した、同シーンで正確な操舵を可能とする操舵反力と車両ヨー特性の関係と組み合わせることで、ドライバが目標とする走行ラインに対して、正確な操舵をバラツキ少なく実行できるようになることを確認した。

1. まえがき

一般的なドライバの日常での走行シーンを考えると、微小な操舵で車両の走行軌跡を微調整するようなシーンを含めて、概ね直進走行といえるシーンがその大半を占めていることが想像できる。筆者らが欧州および日本で実施したある調査では、微小な操舵といえる操舵角5deg以下の頻度は、全車速帯で51.1%と半分以上、80kph以上の車速帯では79.6%と約8割を占め、それらを裏付ける結果が確認されている。このような微小操舵角で目標とした走行ラインに沿って車両をトレースするライントレース性は、多くのドライバにとって遭遇頻度の高い重要な性能であるが、そのメカニズムは十分に解明されておらず、実際の開発現場ではその性能開発を実車によるチューニングに頼っているケースが多い。

本課題に対し、既報の研究「微小操舵角域のライントレース性に対する操舵力とヨー特性の関係解明」[1)] では、微小操舵角域のドライバの不感帯、車両のヨー特性の不感帯を定量的に把握し、研究で定義したライントレース性の評価量と2つの不感帯の関係を分析することによって、ライントレース性に対する操舵力とヨー特性の定量的な関係を明らかにした。しかし同時に、ドライバの試行回ごとの走行軌跡が大きくばらつくことが、新たな課題の一つとして確認された。

本研究では、走行軌跡のバラツキ要因の一つが、微小域のドライバの操舵のメカニズムの中に潜んでいることに着目し、操舵に対してある量の車両ピッチ挙動を付加することでそのバラツキを低減出来るという仮説の立案とドライビングシミュレータを使った検証、そしてその定量的なバラツキ低減効果を抽出した。既報の研究で取り組んだ、ドライバが目標とした走行ラインを平均して正確に走行できる車両特性の解明に加えて、試行回ごとのバラツキが少ない、毎回正確に走行するための車両特性の解明に取り組んだ。

研究の流れとして、最初に既報の研究の概要と今回の課題である走行軌跡のバラツキについて述べる。次に、同じく既報の研究で仮説として定義した微小操舵角域のドライバの操舵のメカニズムの中からバラツキの要因になっていると考えられる現象を考察し、そのバラツキを低減するために追加する車両挙動としてピッチを選定した理由について説明する。そして、実験で得られたドライバのピッチ挙動に対する感度特性から走行軌跡のバラツキを低減できる定量的なピッチ特性の仮説を立て、最後にその実験検証結果を示す。

なお、本研究で実施した二つの実験は、日常から通勤等で車を運転している20～50代の一般男性25名を対象に、日産自動車（株）実験倫理委員会の審査を受けて承認を得た内容により、実験参加者からインフォームドコンセントを得た上で実施したものである。

2. 既報の研究の概要と課題

既報の研究では、図1のような、80kphの一定速直進走行から、概ね5deg前後の操舵入力となる、1200Rのカーブとその緩和区間で構成される評価コースを設定、それを目標ライン

* 総合研究所モビリティ＆AI研究所　** パワートレイン・EV性能開発部　*** カスタマーパフォーマンス＆実験技術革新部　**** 先行車両性能開発部

として走行した時の実際の走行軌跡のずれを“ライントレース乖離量”と定義してそのメカニズム解明を行った。

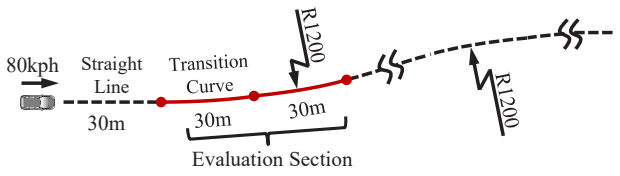


Fig.1 Evaluation Course

このライントレース乖離量は、図2で示したように、ドライバが「車両に操舵入力をした」と認識する最小の操舵角に感度の高い操舵反力特性と、図3及び図4で示したように、ドライバが「車両が動いた」と感知する最小のヨーレイト0.21deg/sを発生する操舵角に感度の高い“ヨーレイト不感帯(Dead Band)”の二つの特性を使って概ね精度よく設計できることを、ドライバー車両モデルによる仮説と実験評価者によるシミュレータを用いた検証により解明した。図5にその検証結果を示しており、操舵力が重くヨーレイト不感帯が大きいグラフ手前の仕様ではライントレース乖離量がマイナスと、目標ラインに対して外側に膨らむこと、逆に操舵力が軽く不感帯が小さい仕様では内側に切れ込むこと、そして操舵力と不感帯を太い破線で示したライン上に設定することで、目標ラインを正確にトレースできることを明らかにした。

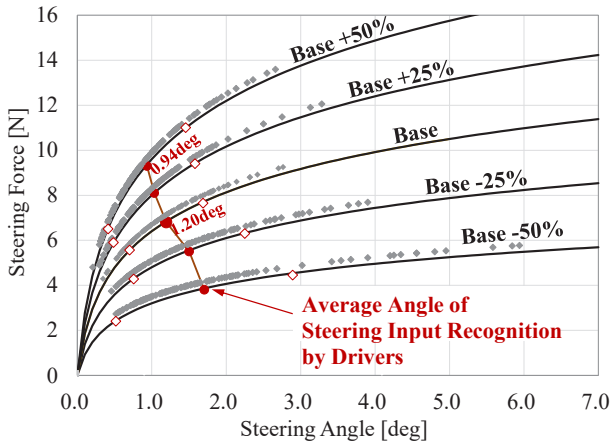


Fig.2 Steering Force & Driver's Input Recognition Angle

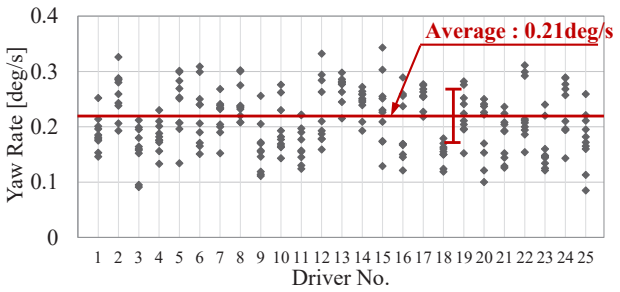


Fig.3 Driver's Yaw-Rate Sensitivity Experimental Result

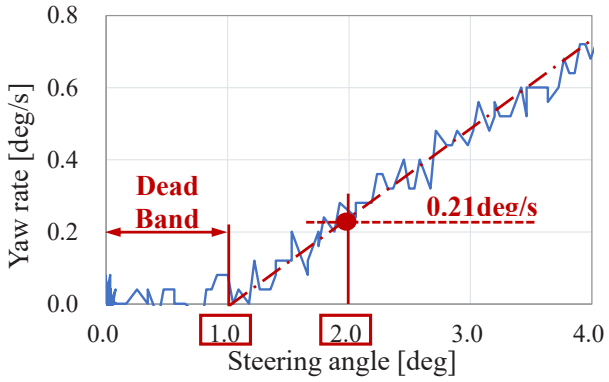


Fig.4 Yaw-Rate Characteristic in Small Steering Angle

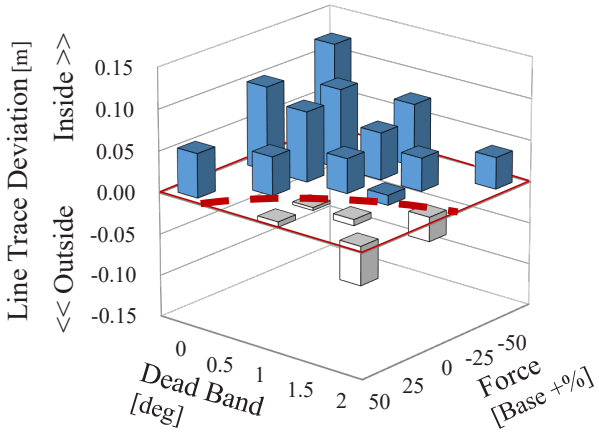


Fig.5 Experimental Result of Line Trace Deviation

一方、新たな課題として、ドライバの試行回ごとの走行軌跡のバラツキが大きいことが確認された。図6は、25名のライントレース乖離量の平均がほぼ“ゼロ”となる、操舵反力が基準＋25％、ヨーレイト不感帯が1degの仕様での、あるドライバの6試行回の走行軌跡の示したものである。平均すると概ね太い破線の目標ラインを走行できているものの、同時にそれらにはいくらかのバラツキがあることが確認できる。

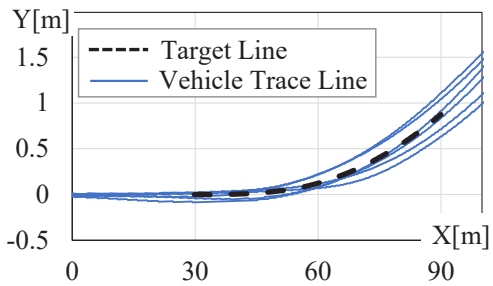


Fig.6 Line Trace Deviation by a Driver

図7は、同じ仕様の25名のドライバの走行軌跡のバラツキを、それぞれのライントレース乖離量の標準偏差を算出して示したものであるが、それらの平均値は0.047mとなり、図5で示した全ドライバ全試行回の平均値で定義した仕様違いのライント

レース乖離量の変動と比較しても、その値は十分に小さいとは言えないことが分かる。

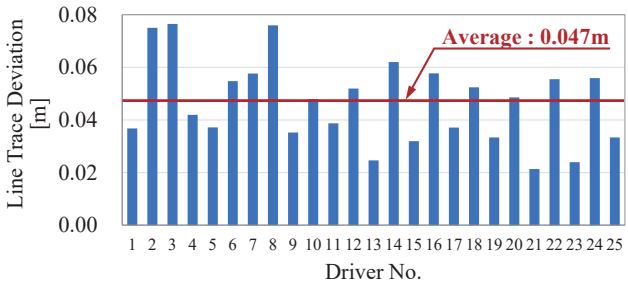


Fig.7 Average of Line Trace Deviation by 25 Drivers

本研究では、既報の研究で取り組んだ、ドライバが目標とした走行ラインを平均して正確に走行できる車両特性の解明に加えて、試行回ごとのバラツキが少ない、毎回正確に走行するための車両特性の解明に取り組む。

3. 走行軌跡のバラツキ要因と低減方策の検討

3.1 微小域の操舵メカニズムと走行軌跡バラツキの考察

ドライバの試行回ごとの走行軌跡のバラツキには、ドライバの視線の配り方やハンドルの握り方、運転に対する集中度合いのバラツキ等、様々な要因が考えられるが、本研究では既報の研究の中で仮説として定義した、微小操舵角域でのドライバの操舵のメカニズムの中に、その要因の一つがあることに着目し、詳細分析を行った。

図8に示したように、ドライバは直進走行から目標走行ラインに向けた操舵において、まず操舵反力の情報により概ね1deg前後の操舵角で車両に操舵入力を開始したことを認識する。よってこれと同じタイミングで車両がヨー運動を開始するようにヨーレイトに不感帯を設定しておくことで、ドライバの感覚に合う車両の動きが実現でき、最終的には平均的にライントレース乖離量も低減したと考えられる。しかしながら、ドライバが実際にこのヨーレイトの動きを視覚情報として感知できるのは、その値が0.21deg/sを超える、操舵角が約2degに達した時である。つまり、操舵角1～2degの区間では、ドライバは車両の動きの視覚からのフィードバック情報を得ること無く、操舵反力からの情報だけを頼りに、いわゆる“ブラインド的に”操舵を増している状態であると考えられる。

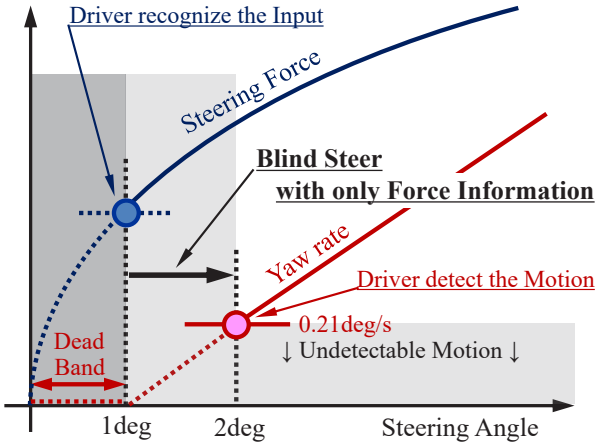


Fig.8 Driver's Steering Process in Small Steering Angle

視覚からのフィードバック情報は、安定して正確な運転をする上で最も重要な情報の一つであることは明らかであり、1～2degという微小な舵角帯といえども、その影響は小さくないと考えられる。とりわけ今回のように操舵角5deg以下の微小操舵角域でのライントレース性に着目した場合にはその影響は大きく、今回の課題である走行軌跡のバラツキの大きな要因の一つになっているものと考えた。

ドライバが操舵入力をしたと認識する操舵角1deg付近で車両がヨー方向の運動を開始し、操舵の増加とともにその動きも増加していることを、視覚からの情報としてドライバにフィードバックすることによって、ドライバはより安定した正確な操舵が出来るようになり、走行軌跡のバラツキが低減するものと考えられる。

3.2 ドライバに視覚情報を与えるための車両挙動の選定

前述の通り、今回の課題は操舵に対して車両が応答しヨー方向に運動を開始したことを、ヨー運動そのものではドライバに感知させられないことにある。ドライバがヨー方向の動きを感知するには0.21deg/sのヨーレイトが必要なためである。仮に車両が動き始めた瞬間からドライバが感知できる過大なヨーレイトを発生するような設定にすれば、車両のヨー方向の動きが機敏になりすぎて、本来目標とした走行ラインを正確に走行することすら出来なくなることは容易に想像できる。

本研究では並進・回転の6方向の車両運動の中から、ヨー運動の開始直後から車両が応答していることを、ヨーの動きに代わって視覚情報としてドライバに伝えるための動きについて検討した。まず、ヨー方向の運動と同様に平面運動で車両の走行軌跡に直接影響を与える前後・左右方向の運動を除外した、ロール、ピッチ、バウンスの3つの運動を候補として選定した。そして、人間の感度を調査した先行研究[2)] 事例を参考に、視覚からの感度がヨー方向と同等に高い感度であることが報告されているピッチ方向の運動を最終的に選定することとした。

また、いくつかの先行研究[3), 4)]において、操舵に対して車両前下がりのピッチ挙動とした方が、ピッチ挙動を与えない場合や前上がりとした場合と比較して、旋回時のフィーリングあるいはフィーリングと相関の高い特性が向上することが報告されており、本研究でも、操舵に対して車両前下がりのピッチ挙動を付加することとした。

4. 車両ピッチ挙動を用いた走行軌跡バラツキ低減仮説の立案

4.1 ピッチ挙動に対するドライバの感度調査

ドライバが感知できる最小のピッチ挙動を把握するために、ドライビングシミュレータを用いた感度実験を行った。図9に実験風景を示す。ドライバには前方のスクリーンの景色を注視した状態で、車両に下向きで一定のピッチレイトを与え、ピッチの動きを感知した瞬間に手元のスイッチを押すように指示をした。ピッチレイトの値は0.0125deg/sの極めてゆっくりした速さのものから、0.3deg/sという比較的速いものまで、計8つのピッチレイト違いの実験をそれぞれ5回ずつ実施し、試行回ごとにドライバが感知したピッチ角を記録した。

Fig.9 Pitch Sensitivity Experimental Scene

図10に計測結果を示す。実験した8仕様のピッチレイトを横軸に、それぞれのピッチレイトでドライバが感知したピッチ角を縦軸として、実験評価者25名の計測データをドットで、それぞれの平均値を実線で結んだラインで示した。なお、ピッチレイトが最も速い0.3deg/sの仕様では、すべてのドライバがピッチの動きが始まった瞬間にその動きを感じ取れることが、ボタン操作の様子と評価コメントから確認されたため、図10のデータは0.3deg/sのピッチレイトを発生させた瞬間からボタンが押されるまでの時間差をドライバの操作時間と考え、すべてのドライバの操作時間の平均値0.51sを全実験生データから差し引き、補正した上で示したものである。

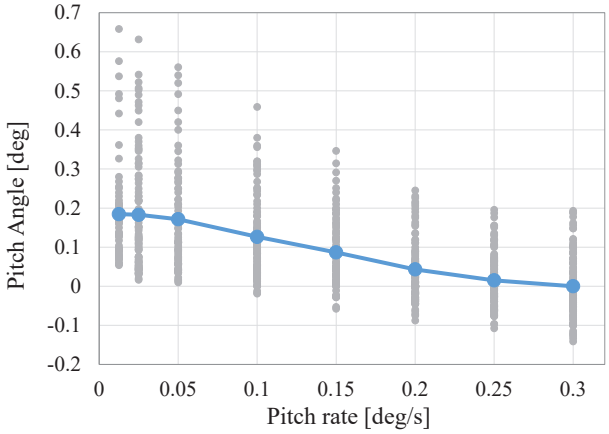


Fig.10 Driver's Sensitivity for Pitch Motion

ピッチレイトが0.05deg/s以下の遅い角速度では、ドライバはいずれも0.15～0.2degのピッチ角でその動きを感知していることが分かる（グラフ左側の領域）。これは、ドライバが0.05deg/s以下のピッチレイトを感知することが出来ず、積算されたピッチ角の大きさによって、初めてその動きを感知しているためと考えられる。一方、0.3deg/sあるいはそれに近い速いピッチレイトでは、ピッチ角がほとんど発生していない状態で、ドライバがその動きを感知していることが確認できる（グラフ右側の領域）。これは、前述の通りこの速さのピッチレイトでは、ドライバが速さそのものを感知できるためと考えられる。そしてこれら二つの領域に挟まれる中央の領域は、ドライバがピッチレイトの速さとピッチ角の大きさを総合して感じ取っている領域と考えられ、その感度は二つの領域をつなぐ右下がりのラインになったものと考えられる。以降、この感度ラインを使って、ヨーの動き始めたことをドライバに感知させるためのピッチ挙動の仮説を立てる。

4.2 走行軌跡のバラツキを低減するピッチ特性の仮説

ドライバが操舵入力をしたと認識するとともに、車両がヨー運動を開始する操舵角1deg付近で、車両が応答していること、更にそのヨーの動きが増加していることを、ピッチ挙動を使ってドライバに感知させるためのピッチ特性の仮説を立てる。ピッチ挙動の与え方として、操舵角比例、操舵角速度比例、またそれぞれに非線形性を加えたもの等、様々なパターンのものが考えられるが、本研究では、可能な限り単純化した状態でそのメカニズムを検証することを目的として、その中でも最もシンプルな、図11の示す操舵角に比例したピッチ角（下向き）を選定し、必要な比例定数の仮説を立てることとした。また、既報の研究の実験結果から、対象とするシーンでは、ドライバは概ね3deg/sの角速度で操舵を行うことが確認されているため、この操舵角速度を前提条件に加えた。

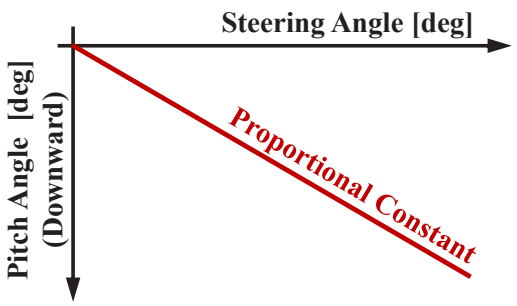


Fig.11 Pitch Characteristics for Driver's Information

$$\theta_{pitch} = K \times \theta_{steer} \qquad (1)$$

$$\dot{\theta}_{pitch} = K \times \dot{\theta}_{steer} = 3K \qquad (2)$$

θ_{pitch} : Pitch Angle (Downward) [deg]
θ_{steer} : Steering Wheel Angle [deg]
K : Proportional Constant
$\dot{\theta}_{pitch}$: Pitch Angle Rate (Downward) [deg/s]
$\dot{\theta}_{steer}$: Steering Wheel Angle Rate [deg/s]

実験で得られたドライバのピッチ挙動に対する感度ライン（図10）と、式（1）（2）で定義した操舵に対するピッチ挙動の式から、ドライバが操舵角1degでちょうどピッチ挙動を感知できる比例定数Kの値を求める。図12は、ドライバのピッチ挙動に対する感度ラインに対して、比例定数Kを0～0.08まで0.02刻みで変更した時の、操舵角1degで発生するピッチレイトとピッチ角の値をプロットしたグラフである。

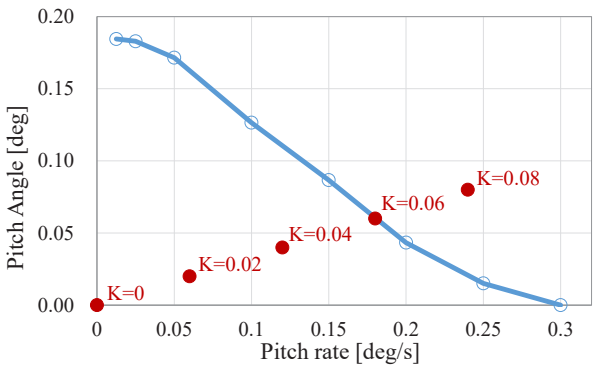


Fig.12 Pitch Motion by each "K" at Steering Angle 1deg

Kの値が0.04以下の場合、操舵角1degで発生するピッチ挙動は、ドライバの感度ラインに到達しておらず、この設定ではドライバは操舵角1degでそのピッチの動きを感知できないことが分かる。一方、K=0.08とした場合、操舵角1degで既にドライバの感度ラインを大きく越えており、ドライバは操舵角が1degに到達する前に、その動きを感知してしまうものと思われる。そしてK=0.06とした時に、そのピッチ挙動が概ねドライバの 感度ライン上にあることから、これが、ドライバが操舵角1degでちょうどピッチ挙動を感知できるKの値になると考えられる。

$$\theta_{pitch} = 0.06 \times \theta_{steer} \qquad (3)$$

以上より、式（3）により、操舵角に対してピッチ角を付加することによって、ドライバが操舵入力をしたと認識するとともに、車両がヨー運動を開始する操舵角1deg付近で、車両が応答していること、更にそのヨーの動きが増加していることを、ピッチ挙動という視覚情報を使ってドライバに感知させられるものと考える。そして、これまでドライバがブラインド的に操舵をしていたと考えられる微小操舵角域において、視覚からのインフォメーションのフィードバックを付加することによって、操舵角及び走行軌跡のバラツキが低減すると考えられる。これらを仮説として、その検証を実施した。

5. 仮説の検証

仮説の検証は、既報の研究と同じく、あるCセグメント車両のモデルを用い、図1で示した評価コースを再現したドライビングシミュレータを用いて実施した。以降その概要と実験方法及び結果の詳細について述べる。

5.1 実験に用いた車両モデルとシミュレータの概要

実験に用いた車両モデルの主要なパラメータを表1に示す。

Table 1 Vehicle Model Parameter

Parameter	unit	Value
Vehicle Mass	kg	1670
Vehicle Yaw Inertia	kgm^2	2600
Vehicle Pitch Inertia	kgm^2	2300
Height of C.G.	m	535
Front axle～C.G.	m	1.08
Rear axle～C.G.	m	1.62
Front Cornering Power	kN/rad	62.5
Rear Cornering Power	kN/rad	95.5
Steering Gear Ratio	-	15.0

また、実験に用いたシミュレータの外観図を図13に示す。このシミュレータは、可動域が22×6mのスライドレールにヘキサポッドを介してマウントされたキャビン、それらを高精度に駆動する64個のリニアモータなどを備え、多くのシーンで高い実車再現性を実現しているものである[5)]。

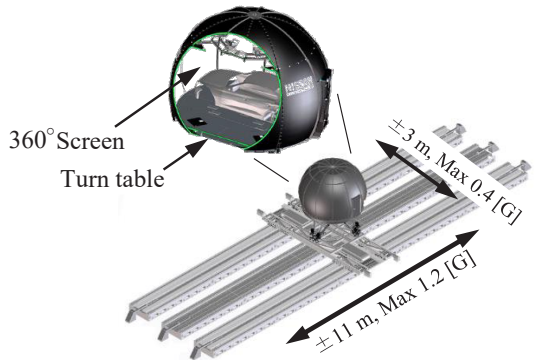


Fig.13 Driving Simulator

次に本シミュレータの精度検証結果を示す。図14は、今回対象とする現象に寄与の大きい操舵力とヨーレイトの操舵角依存性について、Cセグメント車両の実車計測データとシミュレータでの計測データを比較したものであり、いずれも高い再現精度が確認されている。

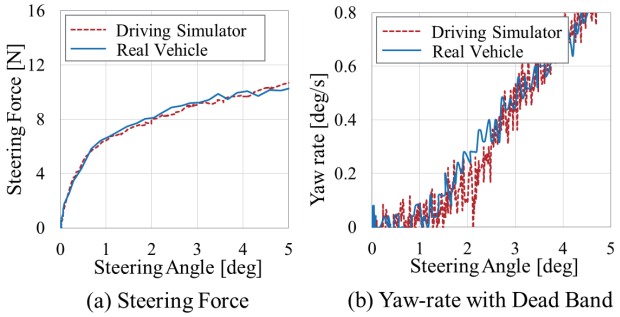


Fig.14 Driving Simulator Accuracy Confirmation

5.2 実験方法

実験はピッチレイトの感度実験と同じ25名のドライバで実施した。車速を80kph一定に固定し、ドライバにはハンドル操作のみを行い車線の中央を目標に走行するように指示をした。実験仕様は、既報の研究でライントレース乖離量の全試行回の平均値がほぼ“ゼロ”と、最も小さい値となったヨーレイト不感帯、操舵反力をそれぞれ 1deg、基準＋25％に固定し、操舵角に対するピッチ角の比例定数Kを0～0.08まで、0.02刻みで変更した5つの仕様とした。それぞれの仕様に対し、右操舵3回、左操舵3回の全30試行回をランダムに並べた順番で実験を行い、その操舵角及び走行軌跡を計測した。

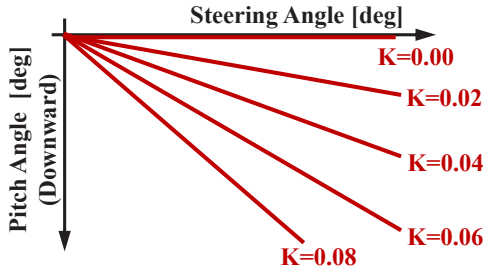


Fig.15 Pitch Characteristics

5.3 実験結果

図16に、ピッチの比例定数K違いでの、あるドライバの走行軌跡の計測結果を示す。なお右旋回のデータは左旋回方向にミラー処理して表示した。ピッチの比例定数Kの増加にともなって、目標ラインに対する走行軌跡のバラツキが低減していく様子が確認できる。またそれぞれのグラフ内に表示した数値はライントレース乖離量のバラツキを算出したものであるが、定量的にもその傾向が確認できる。

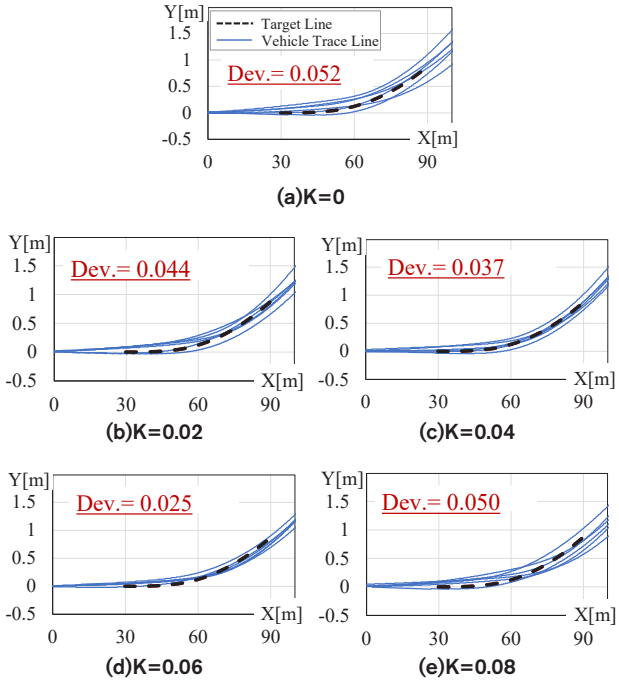


Fig.16 Line Trace Experimental Result

図17は、25名のドライバの走行軌跡の計測結果から、ピッチ仕様違いのライントレース乖離量のバラツキを算出し、横軸をピッチの比例定数Kとしてプロットしたものであり、Kの増加に伴ってライントレース乖離量のバラツキが低減する傾向が確認できる。太い実線は各仕様の平均値を結んだものであるが、その値はK=0.06で最も小さくなり、K=0.08ではまた増加することが定量的にも確認でき、本研究で立てた仮説が検証さ

れた。そして、K=0.06のピッチ角を付加した場合、ピッチ挙動を付加しない場合に対して、ライントレース乖離量のバラツキを約33％低減できることが確認できた。

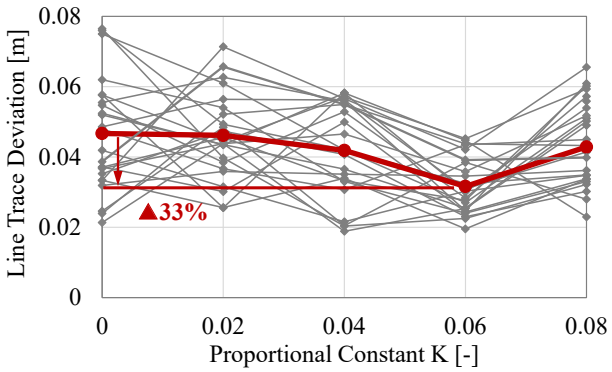


Fig.17 Line Trace Deviation Experimental Result

ここで、Kの増加に伴うライントレース乖離量の変化を考察する。K=0とK=0.02では乖離量の値に大きな差は見られない。これは、ピッチ挙動をまったく与えないK=0に対して、K=0.02とした場合でもドライバがその動きを感知できるのは操舵角で約3degと、2deg付近でヨーの動きを感知した後であり、1～2degのブラインド操舵区間の視覚情報を補うことが出来なかったためと考えられる。同様に考えると、K=0.04の場合は操舵角約1.5deg付近でピッチの動きをドライバに感知させられることが出来るため、K=0.06の場合のように、ブラインド区間を完全にカバーすることはできないまでも、それと比べて約半分の区間、ドライバに視覚情報を与えることが出来るため、相応のバラツキ低減効果があったものと考える。一方、K=0.08とした場合は、ドライバが操舵入力を認識したり、車両が実際にヨー運動を開始する、操舵角が約1degに達する前に、ピッチの動きをドライバに感知させてしまったと考えられ、むしろドライバの正確な操作を阻害する余計な視覚情報を与えてしまったことで、K=0.06の場合に対してバラツキが増加したものと考えられる。

最後に、ピッチ挙動を追加することによる、ライントレース乖離量の平均値への影響について考察しておく。本研究においてピッチ挙動を追加する目的は、これまでドライバが操舵反力の情報だけを頼りに感じ取っていた車両の動き出しを、ピッチという視覚情報を加えることで、よりばらつき少なくそれを感じ取れるようにすることであった。よって、その目的を達成するために必要な量のピッチ挙動であれば、ライントレース乖離量の平均値には影響がないと考える。図18は、今回計測された25名のドライバのライントレース乖離量の平均値を示したものであるが、ピッチ挙動を加えることによってその値に大きな変化がないことが確認されている。

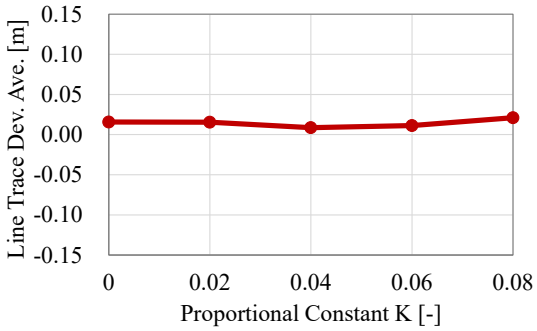


Fig.18 Line Trace Deviation Average Experimental Result

6. まとめ

微小操舵角域の走行軌跡の試行回ごとのバラツキの一要因がドライバのブラインド操舵区間の存在にあることに着目し、その区間にピッチ挙動を付加してドライバに視覚情報を与えることによってそのバラツキを低減できることを確認した。ドライバのピッチ挙動に対する感度調査から付加するピッチ挙動の適正量の仮説を立て、実験によりその検証を行うとともに、定量的な走行軌跡のバラツキ低減効果を抽出した。既報の研究で解明した微小操舵角域でドライバが平均して正確に走行できる車両特性に加えて、いつも正確に走行するために必要な車両特性の一つを解明した。

参考文献

(1) 田尾光規、他：微小操舵角域のライントレース性に対する操舵力とヨー特性の関係解明、自動車技術会論文集 Vol.51 No.3 pp.428-433 (2020)
(2) 福井 勝彦、ほか：視覚特性に基づくロール感向上技術、自動車技術会論文集 Vol.40 No.5 pp.1185-1190 (2009)
(3) 酒井 英樹、ほか：過渡的な旋回感覚を強調する減衰力制御、自動車技術会論文集 Vol.43 No.3 pp.709-716 (2012)
(4) 山門 誠：EVの精密な制駆動力制御による3次元理想車体挙動の探求、精密工学会誌 Vol.84 No.9 pp.765-768 (2018)
(5) 今村昌幸、ほか：高性能ドライビングシミュレータの開発、日産技報 ダイナミック・パフォーマンス技術No.83 pp.60-65 (2018)

出典

公益社団法人自動車技術会
自動車技術会論文集
Vol.52, No.2 文献番号：20214137

著者


田尾　光規


町田　直也


林　　豊


長棹　謙

受賞：2021年 自動車技術会賞 論文賞

乗員の快適性を向上させる車両運動の探求

－逆車両運動解析による乗員受動運動設計の試み－

牧田　光弘*　　松下　晃洋**　　草柳　佳紀***　　三浦　雅博***

抄録　車両運動による乗員身体の受動運動は乗車の快適性に影響する。そこで、運転タスク実行下でより良い身体挙動はどうあるべきかを探索する手法を検討した。車両に乗員身体を組込んだモデルで、身体挙動を評価関数設定した最適制御計算により乗員運動を設計する。レーンチェンジを題材にして、快適性に影響すると考えられる要因を最適化した車両運動波形を導き、実車およびモーションシミュレータにて評価を行なうという方法を提示した。本方法構築により、車両運動の乗員運動知覚影響を探ることが可能となった。

1. 緒　言

本論文の目的は、車両運動が非運転乗員に与える影響を、快適性の観点から解析するための手法構築である。乗車時の快適性としては、路面垂直方向の車両運動影響である乗り心地が想起される。これに加えて、自動運転普及を見据えると、操作が人から離れることから、路面平面方向の車両運動も移動する快適空間創出には重要な研究課題となる。

乗員身体は、車両運動に伴う加速度に対応する慣性力によって動かされるので、乗員は何らかの身体運動不快感を受ける。ドライバは自らの操作に対する応答として、自身の身体慣性力付加に積極的な意義を感じる場合もあるが、非運転乗員にとって通常は乗車の快適性を損なうものである。もちろん緊急回避などで高加速度運動が必要なときには、シートや拘束装置で身体の動きをホールドしなければいけない。しかしながら、通常の運転領域では、車両運動を工夫することで乗員への慣性影響を低減して、快適性向上へ振り向けたい。

では、乗員の快適性を向上させるためには、車両運動をどのようにとらえればよいのだろうか。車両加速度の主たる発生要因は<経路>と<速度>によるので、まずは適切な経路を走行させることで、乗員への慣性負荷を穏やかにできるはずである。走行経路の設定は、自動運転技術の発展に伴って車両運動制御で重要となっている。ドライバの運動知覚を考慮した経路生成の研究[(1)]や、乗員では、快適性を損なう車酔いを低減できる経路設定[(2)]についての研究などが行われている。

乗員挙動にフォーカスした研究アプローチとしては、乗員の身体挙動のモデルを用いることが考えられる。車両運動を既知とした場合において、乗員の挙動を解析する手法[(3)]や、走行経路による影響評価の研究[(4)]などの提案がある。

価値創出研究として、身体への慣性力負荷の時間タイミングによる乗員の自律的姿勢制御の影響の探索[(5)]や、乗員の運動知覚を刺激して車両運動への気づきを与えることで、身構え姿勢を取りやすい車両運動加速度創出の提案[(6)]がある。車酔い低減も含めて、感覚や身体運動メカニズムを用いたアプローチは、人間理解の進展に伴い、有用性を増している。

以上のような先行研究を踏まえると、想定した走行シーンにおいて、乗員の身体挙動やそれに伴う運動知覚量を抑える車両挙動を探索する手法の構築は、期待される研究方策であろう。そこで本論文では、筆者らが研究を進めてきた――最適制御を適用して設定した評価量を最適化する車両運動を求める――を逆車両運動解析[(7)]の一つとして位置付け、乗員まで含めて拡張することでこれに応えようと考えた。

最適制御を用いると、『所望の車両運動とその実現のための操作量を、評価関数を最小化させることに置き換えて求める』ことができる。言い換えれば、『快適性に影響すると思われる諸量を評価関数に用いることで、快適性を向上できる車両運動の特徴を抽出できる』ということになる。

本論文では、次章で最適制御を用いた場合の逆車両運動解析について述べ、乗員挙動の解析に適用させる場合には解法上の制約があることを示す。続いて、その制約を超えるための技術的解決策を示す。最後に、過渡運動を題材に、計算

* 総合研究所モビリティ＆ AI 研究所　　** カスタマーパフォーマンス＆実験技術革新部　　***AD/ADAS ＆シャシー制御開発部

と実車実験およびその評価を含めて述べることで、乗員の快適性を探索するための方法論を提示する。

2. 快適性解析手段としての逆車両運動解析

『操作入力を設定して、それに対する車両運動を求める』場合を順車両運動解析とすれば、『因果関係を反転させて、なんらかの車両運動を規定する設定から、それを満たす操作入力と車両運動を求める』場合は逆車両運動解析[7]となる。逆方向では、何を規定するかによって計算の手法が異なるが、本論文では走行シーンを規定して、その前提の下で乗員にとって快適な運動探索を目指すため、最適制御を用いた逆車両運動解析を展開する（図1にイメージ、表1に変数名）。

最適制御では、運動対象の状態変数 $\mathbf{x}(t)$ や入力変数 $\mathbf{u}(t)$ などの変数で記述する関数であるStage Cost 関数 $L(\mathbf{x}(t),\mathbf{u}(t))$ を用いて、それが最小となる車両運動を求める。視点を変えれば、Stage Cost 関数によって車両運動を設計するといえる。実際に記述できる関数形式は、変数の2次形式など、計算可能な形は限定されるが、これで車両運動設計が行える。

走行シーンの規定は、車両運動タスクとして、状態量と操作量の初期値と終端値を設定することで行う。つまり、両端での車両運動状態が固定（境界値問題化）されるので、Stage Cost関数値を最小化する操作量 $\mathbf{u}(t)$ を求めることができる。

Table.1 Variables and functions for optimal control

Notation	Description
$\mathbf{u}(t)$	Input Variables (1,..., p)
$\mathbf{x}(t)$	State Variables (1,..., m)
t_0 / t_f	Initial / Terminal Time
$\mathbf{u}_0$ / $\mathbf{u}_f$	Initial / Terminal value of Input Variables (1,..., p)
$\mathbf{x}_0$ / $\mathbf{x}_f$	Initial / Terminal value of State Variables (1,..., m)
$\mathbf{f}(\mathbf{x},\mathbf{u})$	State Equation of motion (1,..., m)
$\boldsymbol{\lambda}(t)$	Adjoint Variables (Lagrangian) (1,..., m)
$L(\mathbf{x},\mathbf{u})$	Stage Cost
$J(\mathbf{u})$	Cost Function

p: Number of Inputs
m: Number of State Variables

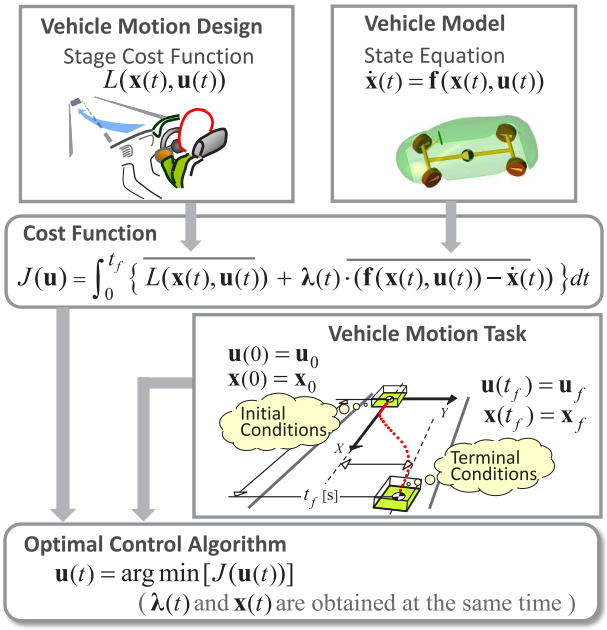


Fig.1 Schematic flow of the inverse vehicle dynamics methodology by optimal control: Ride quality is reflected to stage cost to describe motion design.

乗員の快適性評価には、車両モデルは乗員の乗る車体の3次元運動を再現する必要がある。それに加えて、一般的な変分原理を用いた最適制御の定式化では、車両モデル（状態方程式形式）を、随伴変数（Adjoint Variables）を使ってStage Cost関数と加算する。ただし、加算量を時間積分させた評価関数には、モデル記述の制限がある。それは、状態方程式の記述で、式（1）形式ではなく式（2）のように、状態変数 $\mathbf{x}(t)$ の微分量 $\dot{\mathbf{x}}(t)$ が、状態変数で＜陽（Explicit）＞に記述可能なことである。

$$\dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{f}(\dot{\mathbf{x}}(t),\ \mathbf{x}(t),\mathbf{u}(t))\ . \tag{1}$$
$$\dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{f}(\mathbf{x}(t),\mathbf{u}(t))\ . \tag{2}$$

式記述の制約に従いつつ、輪荷重移動を含む車体運動を正確に表現するために、筆者らは先行研究[7]にて車両モデルを開発した。表2と図2に、ばね下座標系基準で車体運動を含む車両モデルとその状態変数を示す。タイヤ特性は、簡略化したMagic Formulaに、緩和長を用いた応答特性も加えている。式（2）形式の車両モデル詳細は先行研究[7]を参照されたい。

Table.2 Variables and input functions of vehicle model

Notation		Description
State Variables $\mathbf{X}(t)$	$X_G(t), Y_G(t), Z_G(t)$	C.G. Position (Ground Coordinate)
	$V_\xi(t), V_\eta(t), V_Z(t)$	C.G. Velocity (Vehicle Coordinate)
	$\Omega(t), \omega(t)$	Yaw Angle, Yaw Rate
	$\Phi(t), \phi(t)$	Roll Angle, Roll Rate
	$\Theta(t), \theta(t)$	Pitch Angle, Pitch Rate
	$\alpha_i(t)$	Tire Slip Angle
Inputs $\mathbf{u}(t)$	$\delta(t)$	Front Tire Toe Angle
	$Acc(t)$	Longitudinal(ξ) Acceleration

Subscript i: Wheel Position [Front → FR, FL ; Rear → RR, RL]

Table.3 Variables and parameters of passenger model

Notation		Unit	Description
State Variables	$\Phi_B(t), (\dot{\Phi}_B(t))$	[rad], [rad/s]	Upper Body Roll Angle (Angular Velocity) (Vehicle Body-Fixed Coordinate)
Temporal Variables	$X_S(t), Y_S(t), Z_S(t)$	[m]	Seating Pivot Point (Ground Coordinate)
	$Fy_B(t), Fz_B(t)$	[N]	Applied Force at Upper Body C.G.
Model Parameters	ξ_S, η_S, ζ_S	[m]	Seating Pivot Point (Vehicle Body-Fixed Coordinate)
	h_{BCG}	[m]	Height of Upper Body C.G. from Pivot
	I_B / m_B	[kg-m^2] / [m]	Upper Body Mass / Inertia
	K_B / C_B	[Nm/rad] / [Nm/(rad/s)]	Upper Body Roll Stiffness / Damping

$\Phi(t), \phi(t), \theta(t), \dot{\omega}(t), V_\xi(t), V_\eta(t), V_\zeta(t)$ are the state valiables of vehicle model[7]

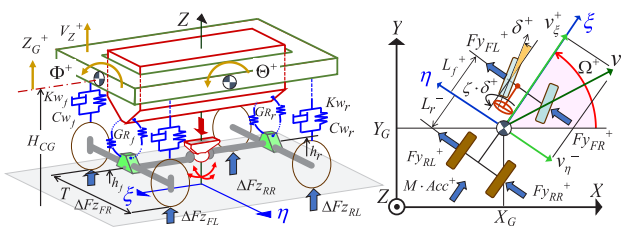


Fig.2 Two track and body motion vehicle model conforms to equation (2): Refer to author's previous research[7]

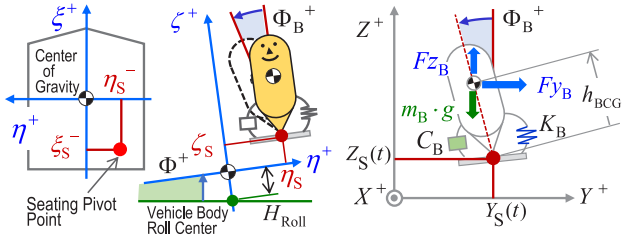


Fig.3 Passenger seating point configuration: Passenger upper body (including head) is simplified to a single inverted pendulum, then affected with vehicle motion.

ここまでに述べた逆車両運動解析を用いて、乗員の快適性向上探索を行う。そのためには、まずは乗員の身体モデルを車両モデルの車体へ乗せなければならない。その際、乗員のモデル化でも車両モデルと同様に式 (2) の形式が要請される。

次に、快適性を運動設計で扱うには、乗員の車両運動知覚に関係する量を状態変数 $\mathbf{x}(t)$ として用意しなければならない。例えば、運動知覚を行う前庭器は、並進加速度や角速度を認識するが、式 (1) に示すように、加速度は状態変数ではなく、その微分量 $\dot{\mathbf{x}}(t)$ なので、運動設計方針としてStage Cost関数へ組み込むことができず、状態変数に変える方策が要請される。

以上から、逆車両運動解析を乗員の快適性へ適用するための２つの要請課題が示された。次章でその解決を図る。

3. 乗員の快適性評価を行うための拡張

3.1 乗員身体挙動のモデル化

乗員身体運動モデルを、式 (2) のように状態変数で＜陽＞表現させるという制約の下で構築する。乗員の運動慣性力を車両に作用させると、車両と乗員の状態変数での＜陽＞記述ができなくなるため、車両運動慣性力による受動運動のみとし、頭部分離しない身体上体横方向（ロール）運動をモデル化する。

最初に、乗員に加わる車両運動の慣性力を表現する。図３左と中央に、車体固定座標系での着座位置と、そこにピボットをもつ上体剛体モデルを示す（以下展開する乗員モデルに関わる変数や定数は表３）。このピボットには車両運動から、式 (3) に示す３軸並進加速度が加わる（影響の小さい項は省略）。

$$\begin{cases} \ddot{X}_S(t) = -V_\eta(t)\cdot\omega(t) + \dot{V}_\xi(t) - \eta_S\cdot\dot{\omega}(t), \\ \ddot{Y}_S(t) = V_\xi(t)\cdot\omega(t) + \dot{V}_\eta(t) + \xi_S\cdot\dot{\omega}(t) - \left(\zeta_S + H_{Roll}\right)\cdot\dot{\phi}(t), \\ \ddot{Z}_S(t) = \dot{V}\ \ (t) + \eta\ \ \cdot\dot{\phi}(t) - \xi\ \ \cdot\dot{\theta}(t). \end{cases} \tag{3}$$

次に、身体上体重心への作用力を求める。そのためには上体重心の加速度を導く必要があるが、これは地上座標系で記述した上体重心位置（ピボット位置＋上体のロール姿勢角影響）の２階微分として加速度記述できる。図３右に示す横と上下方向への作用力は、上体質量を掛けた式 (4) として近似する。

$$\begin{cases} Fy_B(t) = m_B\cdot\dfrac{d^2}{dt^2}\left(Y_S(t) - h_{BCG}\cdot\mathrm{Sin}\left(\Phi_B(t)+\Phi(t)\right)\right), \\ Fz_B(t) = m_B\cdot\dfrac{d^2}{dt^2}\left(Z_S(t) + h_{BCG}\cdot\mathrm{Cos}\left(\Phi_B(t)+\Phi(t)\right)\right) \\ \qquad\qquad + m_B\cdot g\ . \end{cases} \tag{4}$$

ここで、上体重心への作用力 Fy_B 、Fz_B によってピボットに対してロール方向上体運動の運動方程式を表すと、式 (5) となる。なお、ロール剛性および減衰には、乗員とシート面の間に作用する支持力や摩擦などの影響を近似的に含めている。

最後に、上体の運動方程式 (5) へ式 (3)、(4) を代入することで、上体ロール角加速度 $\ddot{\Phi}_B$ が式 (6) のように<陽>に解ける。

$$
\begin{aligned}
\ddot{\Phi}_B(t) = \frac{1}{I_B + h_{BCG}^2 \cdot m_B} \cdot \\
&\Big(g \cdot \mathrm{Sin}\big(\Phi_B(t) + \Phi(t)\big) \cdot h_{BCG} \cdot m_B \\
&- K_B \cdot \Phi_B(t) - C_B \cdot \dot{\Phi}_B(t) \\
&+ \mathrm{Sin}\big(\Phi_B(t) + \Phi(t)\big) \cdot h_{BCG} \cdot m_B \cdot \\
&\big(\dot{V}_\zeta(t) + \eta_S \cdot \dot{\phi}(t) - \xi_S \cdot \dot{\theta}(t)\big) \\
&+ \mathrm{Cos}\big(\Phi_B(t) + \Phi(t)\big) \cdot h_{BCG} \cdot m_B \cdot \\
&\big(V_\xi(t) \cdot \omega(t) + \dot{V}_\eta(t) + \xi_S \cdot \dot{\omega}(t) - (\zeta_S + H_{Roll}) \cdot \dot{\phi}(t)\big) \\
&- h_{BCG}^2 \cdot m_B \cdot \dot{\phi}(t) \Big) . \qquad (6)
\end{aligned}
$$

求まった乗員モデル式 (6) には、車両モデル側の状態変数の微分量である $\dot{V}_\eta, \dot{V}_\zeta, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\omega}$ が含まれている。しかし、式 (6) を運動方程式から状態方程式に変換して車両モデルと連立させれば、状態変数で置換されて式 (2) の形に収まる。これで、逆車両運動解析で用いる最適制御の定式化要求に対応できた。

3.2 乗員運動知覚量の状態変数化

快適性で想定される物理量には、身体に加わる並進加速度や角加速度などが考えられる。ところが、前章で述べたように、状態変数と入力変数以外は評価関数に組み込めない。

加速度を状態変数化する手段としては、二階の微分方程式で表される運動方程式を、さらに微分した三階の微分方程式 (jerkまで状態変数化するには四階) とすることで実現できる。ただし、解くべき式が増えて計算負荷が大きくなり、逆車両運動計算には不向きである。そこで、状態量オブザーバを用いて、評価関数に組み込める近似状態量を求めることにする。

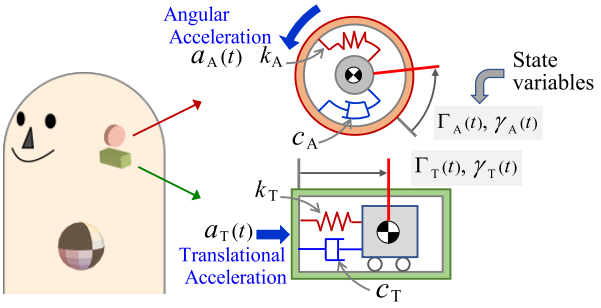


Fig.4 Acceleration and jerk detection with soft sensor (physical image of state observer) : Acceleration and jerk at the attached body are approximated to state variables.

車両及び乗員モデルと合わせて最適制御の定式化のために、図4に示すソフトセンサとしての状態量オブザーバを設定した。具体的には、式 (7) に記した状態方程式を用いて、乗員身体もしくは車体の観測したい部位の加速度を、入力 $a(t)$ として与える。これから、その取付け部位の並進や回転の加速度とJerkを、状態変数 $\Gamma(t), \gamma(t)$ で近似量として観測できる。

$$
\begin{cases}
\dot{\gamma}(t) = c \cdot \gamma(t) + k \cdot \Gamma(t) - a(t) , \\
\dot{\Gamma}(t) = \gamma(t) .
\end{cases} \qquad (7)
$$

状態量近似精度は、式 (7) では c、k 設定値で決まる。図5にはこれらの設定値を変えた場合における、固有周波数違いでの特性を示す。近似度合いを表すゲインは1に近いフラットな特性になるように設定値を選んでいる。

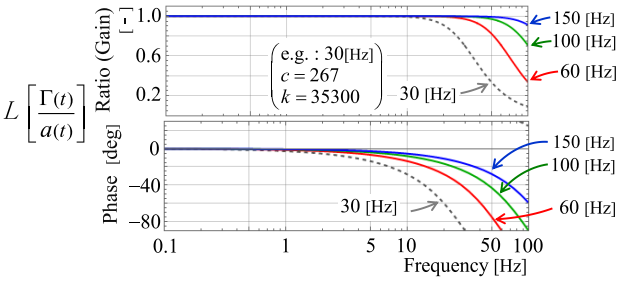


Fig.5 Frequency response characteristic of state observer: Four cases of translational and angular accelerations.

ここで、状態量オブザーバの近似精度が逆車両運動解析に与える影響を確認しておく。次章で用いているレーンチェンジ挙動において、状態量オブザーバを車両重心点位置の車体に設置して、車両重心点横加速度を最小化させた計算結果を図6に示す。Stage Cost関数値を見ると、応答周波数を上げることによる、近似精度の向上には適値領域があることがわかる。つまり、応答周波数が高すぎると、状態オブザーバの微分方程式が、解くべき系全体を硬く (stiff) してしまう。数値計算では、精度と計算誤差累積のトレードオフ考慮は必要である。

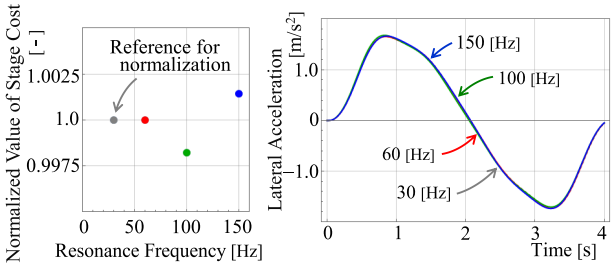


Fig.6 The degree of approximation of state observer (stage cost is quadratic value of lateral acceleration): There is an appropriate value for the resonance frequency of state observer.

以上から、状態オブザーバを用いることで、乗員の運動知覚に関係する加速度やJerk の近似量を、状態変数として組込み、それを用いて評価関数を設計することが可能になった。

4. 乗員の受動運動設計による快適性要因探索

4.1 快適性評価としての運動設計

快適性を向上できる車両運動探索の方法論を具体化させる。そのために、乗員の身体運動による運動知覚量を組込んだ評価関数の最小化を逆車両運動で導くことを考えていく。

既に先行研究[7]において論理展開している事であるが、車両評価においては、『何を同じ条件として比較を行うか』という同一性の担保が重要となる。逆車両運動解析では、図1の車両運動タスク部（Vehicle Motion Task）で、運動初期と終端での状態・入力変数の値を設定して解くことで、同一性が担保される。これから、評価関数に基づく運動設計が成立する。

そこで、設計の流れとしては、以下の三段階となる；

（ｉ）評価する走行シーンを設定（車両運動タスク）

（ii）快適性要因を評価関数で設定して最適解を算出

（iii）最適解を車両運動として再現させて実験評価。

最適解として得られるのは、想定車両の操作量および運動である。そこで、最後の段階における車両運動再現は、図7に示すように、操作量を実車に与えるか、または加速度空間を再現できる装置を用いて、乗員に運動を付加することで行う。

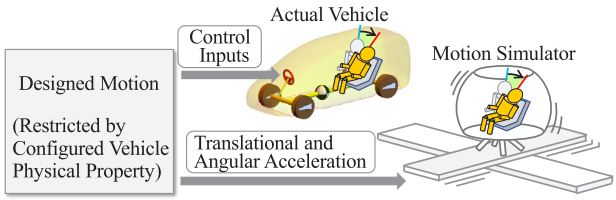


Fig.7 Methodology to construct acceleration space

まず、快適性評価の走行シーンとしては、操作入力の種類（操舵単独か、ブレーキ・アクセルによる積極的な加減速を加えるかなど）にもよるが、定常運動では運動知覚に関係する評価関数差が顕著になり難い。そこで本論文では、運動知覚差を得やすい走行シーン例として、過渡運動を題材とした（図8）。

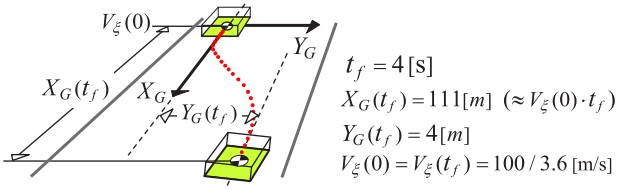


Fig.8 Example of vehicle motion task: Lane change as a typical transient vehicle motion scene.

次に、表4に例として用いる車両運動設計仕様を示す。車両運動タスクとして、終端における操作と、路面平面運動の状態量である方位角やヨー角速度を直進（＝0）に戻すレーンチェンジを設定した。評価関数は、ドライバの快適性を仮定した操舵操作量最小化仕様（V0）と、乗員の快適性向上の仮定として、身体ロール角加速度最小仕様（R1）を設定した。比較のため、身体ロール角加速度最小仕様に、終端でのロール角加速度と角速度を0に戻す条件を追加した仕様（R2）も設定している。

Table.4 Vehicle and passenger motion design specification: Three condition to exemplify design methodology.

Stage Cost *		Terminal Condition (Motion Task)			Symbol
		Vehicle		Passenger	
Subject	Roll Angular Acceleration	Control Input	Plane Motion	Body Roll Motion	
Driver (Vehicle)	Vehicle Body	Steering Angle & Angular Velocity return to 0	Track Angle & Yaw Rate return to 0	Arbitrary State	V0
Passenger	Passenger's Body	Same Speed as initial condition	Lateral Velocity of C.G. return to 0		R1
			Set C.G. Position	Angular Acceleration &Velocity back to 0	R2

* Applied quadratic form of state and/or input variables

4.2 設計に基づく乗員加速度空間の算出

運動の設計仕様に従って計算を行う。ここで、乗員身体モデルの特性を決める必要がある（車両特性の設定は、著者らの先行研究[7]にて用いた車両と同一）。単純な乗員モデルなので、モデル特性の厳密性追求による精度向上効果は小さい。そこで、形状や質量特性値としては、後工程4.3 節での実車実験評価者に近い値を仮定する。横加速度2[m/s^2] 付近の身体剛性K_Bを、被験者計測結果（15例）の分布を参考に設定した。図9に計測例を箱ひげ図で示す。計算は、乗員が下向き姿勢でテキストリーディング時の値を用い、後席左位置に着座させた。

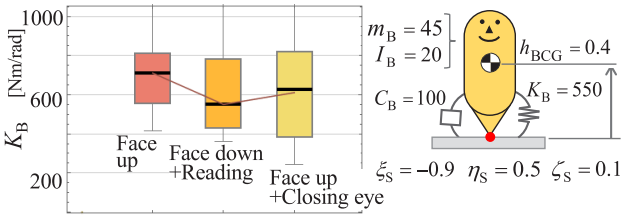


Fig.9 Passenger body roll stiffness (box-and-whisker plot) and other characteristics: Passenger model parameters were fixed from subject measurement (n=15) and estimation.

これで計算に必要な設定が完了したので、逆車両運動解析を行い、終端条件を満たしつつ評価関数を最小化する操作入力と、車両運動（図は車両重心軌跡）を算出した（図10）。

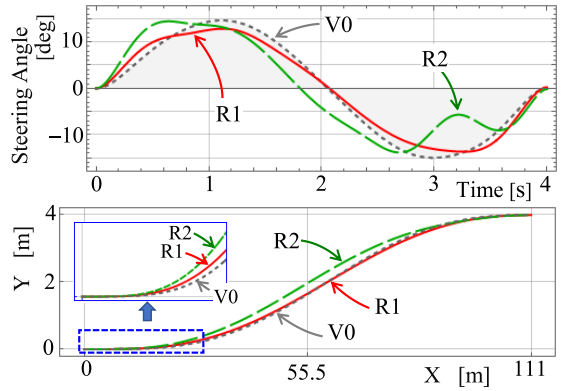


Fig.10 Steering pattern and vehicle C.G. path (with enlarged view) to satisfy design specification of vehicle and passenger motion: Inverse vehicle dynamics analysis fixes both input and state variables simultaneously.

最適化算出された車両運動として車両重心横加速度と、乗員身体のロール姿勢角 Φ_B を図11に示す。計算結果は、V0のSin関数状の変化に対して、乗員挙動を最適化した仕様R1では乗員挙動のピーク値が抑えられている。また、終端拘束を加えた仕様R2では姿勢角が計算終端で一定値収束している。

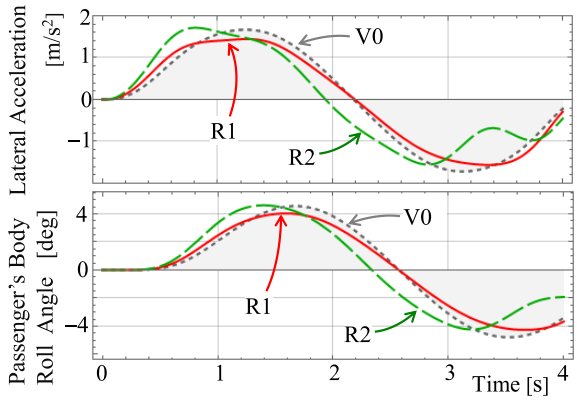


Fig.11 Vehicle and passenger motion to satisfy the design specification: Calculated results.

4.3 加速度（車両）空間を用いての評価

実験方法は、車両に操舵ロボットを取付けて算出操舵波形を再現することで、後席乗員への加速度付加を行った。実環境対応のため、車両モデルには勾配の影響項を追加して計算を行った。計算値終端の4 秒に合わせて実験値を比較する。

乗員は、乗員特性計測時の平均に近い体格を持つ運動性能評価エキスパートである。乗員は、操舵ロボットでは不可避な駆動音で車両の運動開始を認識してしまう。けれども、外界視界は周辺視で捉えているだけなので、運動予測はできにくく、受動運動という設定に近いはずである。乗員姿勢変化は、後頸部に装着させた変位センサによる移動量から推定した。

実験結果は計算例（図11）に対応させて図12に示す。加速度空間の再現性は確保できている。乗員姿勢変化量の計算値との乖離（図では係数2.0を掛けている）は、計算が図9の乗員モデル特性値（四分位範囲で約2倍の差が存在）であるため、評価者との個体差などの影響と考えている。仕様相互の相対的関係は計算による予測と対応していると判断している。

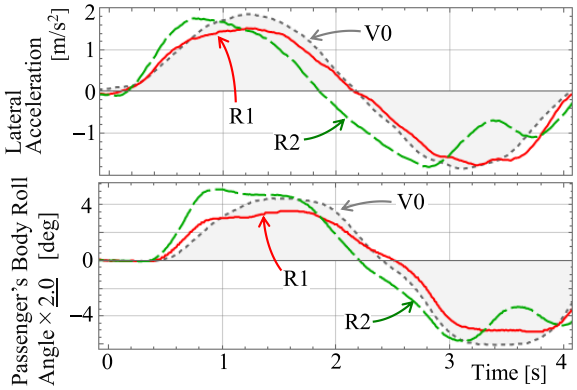


Fig.12 Vehicle and passenger motion of actual vehicle test: Every data curve was averaged (n=5).

主観評価では、仕様V0 は『動きは滑らかだが、身体姿勢変化は大きい印象』なのに対して、身体ロール角加速度を抑えた仕様R1 は『身体ロール姿勢変化が小さい』と感じることができている。別表現では『身体の並行移動感が高まった』という評価も得た。ただし、終端でのロール姿勢拘束を追加した仕様R2は、『運動初期の動きがV0 比較で大きい』という評価であった。また、身体姿勢保持を狙った終端身体ロール抑制は、『高周波の動きは気になるが、身体抑制による負荷低減は認識できる』との評価であった。以上、乗員受動運動設計を用い、計測と主観評価双方で快適性をパラメトライズできている。

5. 快適性探求に向けての考察

乗員身体モデルとしては、頭部を別体化するなどの自由度増は可能であるが、受動運動範囲とはいえ、頸椎部の剛性などの適切なモデル特性値の確定も難しくなる。乗員の乗車中の行動や状態は多様と考えられるので、乗員モデルの複雑化とは別に、モデル特性値の設定の工夫は研究課題であろう。

一方、乗員の運動知覚に関しては、身体モデルから機械的に算出できる量ではなく、人間の内面の感覚特性のモデルも加えて、真の知覚量で評価関数を構成することが重要であるかもしれない。図13は、身体ロール角加速度を評価関数とした仕様での終端拘束の有（R2）無（R1）での身体挙動（計算値）を示している。R2仕様では中間時間での横移動量がR1仕様より大きく、終端での身体挙動を制御するためには、身体ロール運動を早期に励起させる必要があることがわかる。ロール運

動を抑える代わりに並進加速度が増加しており、並進と回転の運動知覚認識のメカニズムも検討に加えていく必要がある。

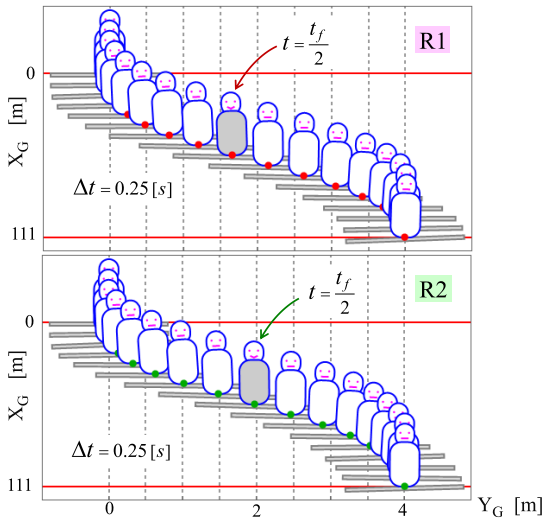


Fig.13 Passenger upper body posture transition: Earlier motion generation is required for terminal posture control, then needs quick initial motion, too.

運動設計自由度は、評価関数形の制限と関係してくる。組込める変数は一般的には2次形式の組み合わせに限定される。

また、複数操作入力へ拡張した走行シーンでは、個々の操作入力に応じた量の項を評価関数に設定しないと、同時最適化ができない（項の直交性確保）。快適性の探索を進めるには、評価関数の表現の自在性向上も図る必要がある。

6. 結 言

本論文では、車両運動による乗員への影響を、快適性の観点で捉え、それを向上させるための＜実験・評価の方法論＞を提示した。快適性は、車両運動による加速度空間内での身体受動運動の負荷や知覚に依存すると想定すれば、車両運動を工夫することで、乗員の快適性向上を図ることができる。

そこで、望ましい動きを評価関数として設定して、最適制御から車両運動を求める逆車両運動解析を用いた運動設計を試みた。負荷量推定として乗員の身体モデル、知覚量推定として加速度量などを評価関数へ取り込むためのオブザーバ構築で、乗員と車両を組み合わせた逆運動解析を可能とした。

もちろん、評価関数の形がどのようであれば、設計された車両運動が快適性を向上させているといえるのかは、乗員の車両運動知覚特性の解明と共に、主観評価で判断していく必要がある。そのために、走行シーンを仮定して、候補となる評価関数設定で車両運動設計を行い、乗員をその加速度空間（本論文では実車）に置いて評価する流れを具体例として示した。

制御ロジックやAI などによる自動運転技術開発に、乗員に優しい車両運動という価値を加えるべく、研究を進めていく。

（追記）：本論文で実施した実験は、日産自動車（株）実験倫理委員会の審査を受け、承認を得た内容であり、実験参加者からインフォームドコンセントを得た上で実施したものである。

参 考 文 献

(1) 吉本達也、深尾隆則、横小路泰義、伊能寛：ドライバの操作特性を考慮した動的環境下におけるレーンチェンジ経路生成法、自動車技術会論文集、Vol.47, No.2, p.633-638 (2016)
(2) 和田隆広：自動運転車両における動揺病低減について、自動車技術会学術講演会予稿集（2016）、20165263
(3) 山田勝徳、本島治敏、北川裕一、安木剛：レーンチェンジ時の乗員挙動とシートによる乗員支持の関係調査、自動車技術会学術講演会予稿集（2016）、20165176
(4) 山本真、山本忠、西山修二：多連クロソイド曲線を用いた曲率変化の滑らかな走行路緩和曲線の提案、日本機械学会論文集、Vol.83, No.852 (2017)
(5) 吉岡透、安部正人、山門誠、狩野芳郎、武田雄策、竹村和紘、塚野孝俊、加藤史律、梅津大輔：G-Vectoring 制御による人が感じる車両運動性能向上効果に関する分析、自動車技術会学術講演会予稿集（2016）、20165250
(6) Alexander Lange, Martin Albert, Karl-Heinz, Siedersberger, Klaus Bengler：Ergonomic design of the vehicle motion in an automated driving car, 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE) (2015)
(7) 牧田光弘：輪荷重移動を含む車両モデルを最適制御問題へ定式化するための一手法、日本機械学会論文集、Vol.81, No.826 (2015)

出 典

公益社団法人自動車技術会
自動車技術会論文集
Vol.50, No.5 文献番号：20194687

受賞者

牧田　光弘

松下　晃洋

草柳　佳紀

三浦　雅博

受賞：2021年 自動車技術会賞 技術開発賞

高速道路複数車線の運転支援システムの開発

谷口　洋平*　　出川　勝彦*　　徳永　誠士*　　長江　新平**　　佐々木　光次**

1. はじめに

本開発では、高速道路の複数車線をナビゲーションシステムと連動して設定したルートを走行し、かつドライバが常に前方に注意して道路・交通・自車両の状況に応じて直ちにハンドルを確実に操作できる状態にある限りにおいて同一車線内でハンズオフが可能となる新しい運転支援システムを実現した。本稿では、そのシステムついて説明する。

2. そのシステムについて

本システムではナビゲーションシステムで目的地を設定し、高速道路の本線に合流するとナビ連動ルート走行を開始することができる。ナビ連動ルート走行を開始すると追い越しや分岐なども含めてシステムがルート上にある高速道路の出口までの走行を支援し、ドライバが常に前方に注意して道路・交通・自車両の状況に応じ直ちにハンドルを確実に操作できる状態にある限りにおいて同一車線内でハンズオフが可能となり、ドライバの運転操作を幅広く支援する。また、ナビゲーションシステムと周囲360度のセンシング情報に基づいて、ナビ連動ルート走行中の分岐や追い越しのための車線変更の適切な開始タイミングをシステムが判断し、ドライバに提案する。ドライバがハンドルに手を添え、スイッチ操作で提案を承認することで、車線変更支援を開始する。図1に作動イメージを示す。

3. センサ構成

本システムでは車両に搭載した7個のカメラ、5個のレーダ、12個のソナーと、GNSS(全球測位衛星システム)、3D高精度地図データを組み合わせて使用することで車両の前方だけでなく、左右や後方など周囲360度の情報と、道路上の正確な位置を把握する。3D高精度地図データには、道路構造が把握できる情報と車線の数、合流・分岐・交差の位置の情報が含まれ、これらの情報を使うことでこれから走る道路を予見した制御を行い、滑らかな走行を実現した。センサ搭載図、360度センシングのイメージ図をそれぞれ、図2および図3に示す。

4. 高速道路複数車線運転支援

複数車線運転支援で重要な車線変更支援を実現するための課題の一つに、前方の車線に関する情報を取得することが挙げられる。車線変更を開始する時点では車線変更終了地点の車線情報をカメラでは計測しきれていない場合がある。このため、カメラのみの情報では車線変更中に車線変更禁止を表す区画線が現れるなど車線変更ができなくなる可能性がある。

一方で、3D高精度地図データは車線レベルで曲率や区画線などの情報を有しているため、カメラの検知範囲外の道路形状を取得することで、任意の車線の開始地点から終了地点までを考慮した車線変更可否判断が可能となる。

本システムでは、3D高精度地図データのもつ車線レベルのデータを用いて走行計画を作成することで、追い越し支援やナビゲーションシステムの推奨する経路に沿って進む目的で、システムによる適切なタイミングでの車線変更提案を実現した。

5. おわりに

本開発ではナビゲーションシステム、360度センシング、3D高精度地図を組み合わせることにより高速道路複数車線の運転支援システムを実現した。本技術開発により、運転支援技術の進化に貢献し、さらなる発展の可能性を示すことができたと考える。

*AD/ADAS 先行技術開発部　　** カスタマーパフォーマンス＆実験技術革新部

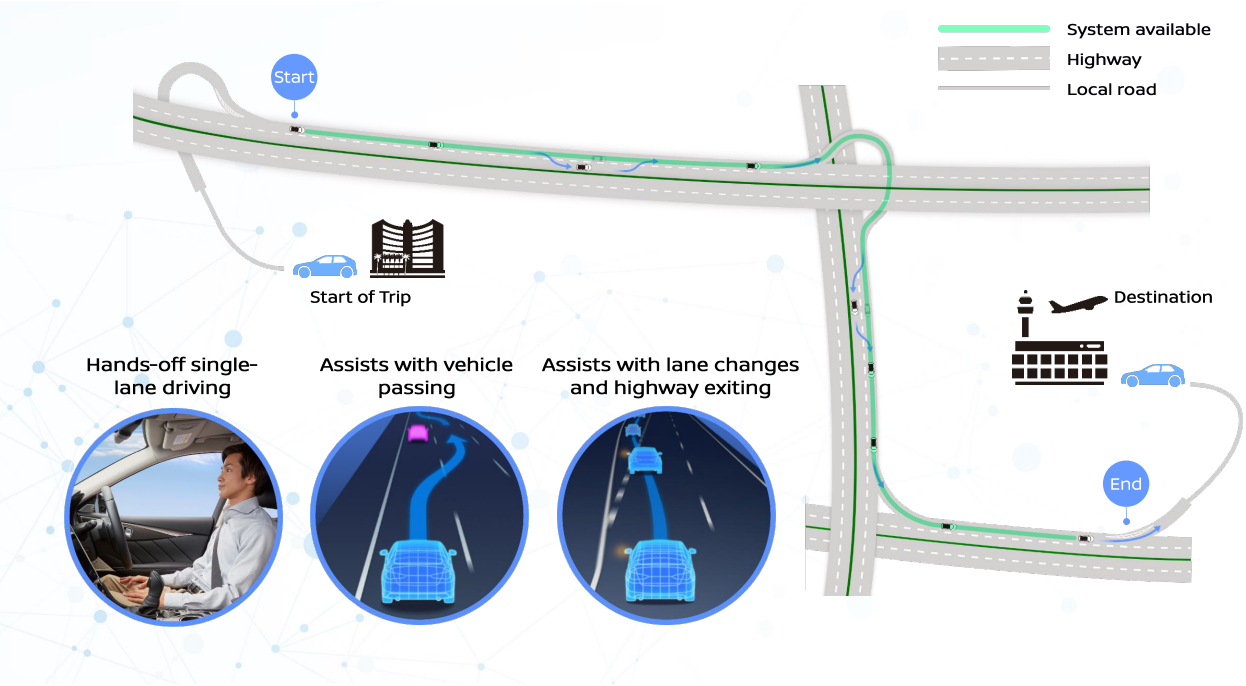


Fig.1 System Overview

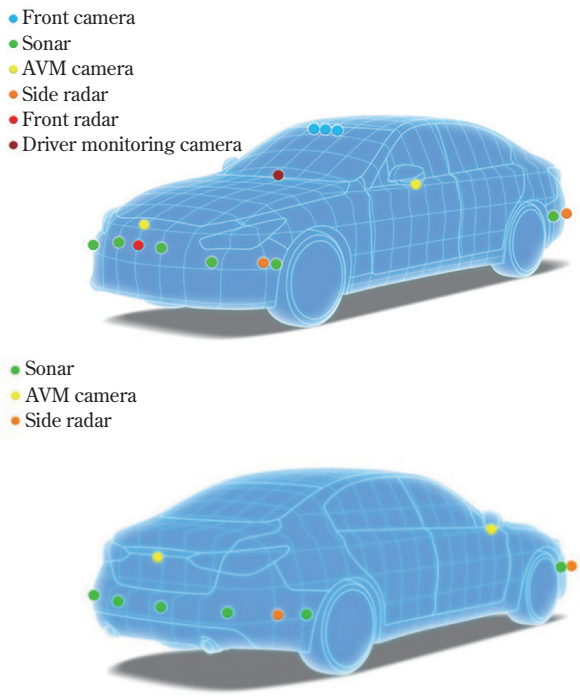


Fig.2 Onboard technology

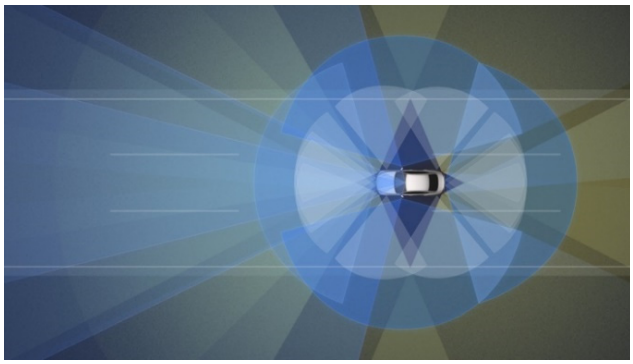


Fig.3 360 degree sensing

出　典

公益社団法人自動車技術会
自動車技術
Vol.75 No.06

受賞者

谷口　洋平

出川　勝彦

徳永　誠士

長江　新平

佐々木　光次

受賞：2020年 日本機械学会賞 論文賞

メゾスケールズーミング解析による CFRP 製圧力容器の強度評価

竹本　真一郎*

抄録　燃料電池自動車に搭載される炭素繊維強化プラスチック（CFRP）製高圧水素容器は、低コスト化と安全性の両立のため高精度な強度評価手法が求められている。しかし、フィラメントワインディング（FW）工法による炭素繊維束とマトリクス樹脂とのメゾ構造を伴った積層により、容器の破壊圧力を予測することがこれまで困難であった。本研究では、容器直胴部のメゾ構造を代表させるモデルに対して、CFRP層の強度発現機構を支配する強度構成因子を設定し、軸対称連続体モデルによる容器全体のマクロ解析から求まる変位場を境界条件としてズーミング解析を行い、破裂圧力を予測する手法を提案する。容器破裂試験結果と比較検証した結果、容器の破壊圧力を高精度に予測できることを示した。

1. 緒 言

さらなる燃料電池自動車の普及促進（大仲、2009）のため、高圧水素燃料容器の軽量化および低価格化が厳しく求められている（水素・燃料電池協議会、2019）。この燃料容器は常用圧70 MPaになる高圧に耐えるため、ライナーと呼ばれる水素を密閉するアルミやプラスチック製の内側容器に、フィラメント・ワインディング（FW）工法（牧他、1970）を用いて炭素繊維強化プラスチック（CFRP：Carbon fiber reinforced plastic）を積層することで製造される。容器の軽量化および低価格化に効果的な方策のひとつは、積層構成の最適化などによる繊維使用量の最小化であり、そのためには容器破裂圧の高精度な予測手法が必要である。

FW工法で積層された容器の破壊強度は、炭素繊維束とマトリクス樹脂により構成されるメゾ構造において発生する局所的な破壊現象に支配される。そのため鋼製容器のようなマクロな応力規準に基づく保守的強度評価手法（高圧ガス保安協会、2016）に相当するものは未だ確立されておらず、膨大な時間と費用を要する実容器に実働負荷類似の負荷を与えるシリーズ試験（竹花、太田、1997）（国際連合、2013）により、安全性と信頼性を担保している。実容器を用いた試験をコンピュータシミュレーションにより代替したいとの要望は強いが、容器の損傷と破壊を適切に予測できる方法論はいまだ提示されていない。

これまでに、CFRP容器の強度評価について様々な研究が積み重ねられてきた。CFRP積層のマクロスケール構造における積層理論に基づく評価（飯田、1978）、積層理論と軸対称シェルモデルのFEM解析との比較（平瀬他、1991）、鏡部を等張力曲面とする容器の評価（劉他、1997）など、連続体力学の枠組みで容器の剛性や強度予測精度向上が行われてきた。また実験による破壊メカニズムの解明（荒居他、2007）なども行われている。これら方法論は、容器のマクロ変形評価には有効な手法であるが、炭素繊維束と樹脂からなるメゾ構造において発生する局所的な応力およびひずみの上昇に起因する破壊現象を正確に評価することは困難である。一方、炭素繊維一本単位でユニットセルを構成し、ユニットセルに対するミクロ解析と部材全体のマクロ解析を連成する均質化法を用いたCFRP積層板の粘弾性構成式による評価（荒井他、2008）なども試みられているが、容器などの実部品サイズでの破壊評価にまでは至っていない。

著者らは、前報（竹本、吉川、2019）において、CFRP容器における円周方向や軸方向の引張による破壊を想定し、繊維束を交差させた試験片による二軸引張試験と有限要素解析との照合を通じて、CFRPヘリカル層の引張強度発現機構を支配する構成因子を明らかにした。本研究では、強度発現機構を支配する構成因子を高度化し、メゾスケールモデルによるズーミング解析を用いた、燃料電池自動車用高圧水素容器の破裂圧力の予測手法を提示する。破裂評価が容易なタイプ3小型圧力容器の水圧破裂試験を通じて、本手法が試験結果を高精度に予測できることを実証する。

* 先端材料・プロセス研究所

2. タイプ３小型圧力容器の水圧破裂試験

2.1 圧力容器の作製

本研究で提案する強度評価手法の検証のため、FW工法を用いてCFRPを積層したタイプ３小型圧力容器を作製し水圧破裂試験を行った。容器内の水素を封入する役目を担うライナーは、圧延およびスピニング加工により製作したA6061-T6アルミ合金製（図1）とした。容器胴部（シリンダー部）の肉厚 d = 2 mmに対し、成形時の塑性加工により鏡部（ドーム部）肉厚が増大し鏡部の強度が向上しているため、破壊起点は胴部に発生し易くなりCFRP強度の評価が行い易いと考えられる。このライナーに、FW工法によってヘリカル積層（図2(a)）およびフープ積層（図2(b)）を施した後、熱硬化させた。

部材の材料定数を表１に示す。これらは材料メーカーが提示している代表値である。炭素繊維束は幅10 mm、厚さ0.5 mmの東レT700SC-24000-50C、マトリクス樹脂は主剤のエポキシ樹脂（三菱化学jER828）に硬化剤（日立化成HN2200）と促進剤（花王カオーライザーNo. 20）を質量比100:10:1で配合したものとし、炭素繊維の体積含有率を Vf = 55 %とした。積層後、硬化炉にて容器を横方向に配置し回転させながら、80 ℃で２時間保持ののちさらに110 ℃で３時間保持することにより熱硬化を行った。

本研究で用いた４種類の容器のCFRP積層構成を表２に示す。CFRPの積層は、ライナー側の最内層から第１層、第２層、第３層、第４層とする。１層の厚さは0.5 mmである。ヘリカル層は容器の中心軸に対して繊維配向角+30度と-30度とした。ヘリカル層のみのNo.1容器、繊維配向角が90度であるフープ層がヘリカル層の内側にあるNo.2容器、外側にあるNo.3容器、さらにフープ層を外側に重ねたNo.4容器を作製した。また、いずれの容器においても、水圧上昇によるネジ部からの水漏れを防ぐため、両端のボス部にフープ巻き補強を施した。これら容器の写真を図３に示す。

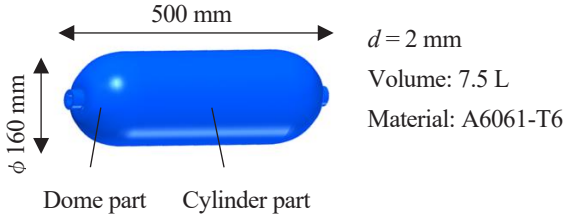


Fig. 1 Aluminum liner.

(a) Helical layer (±30 degree). (b) Hoop layer.

Fig. 2 CFRP layer manufactured by filament winding.

Table 1 Material properties.

	Carbon fiber	Matrix resin	Aluminum liner	Steel plug
Young's modulus [GPa]	230	3.75	70.0	210
Poisson ratio	0.26	0.41	0.33	0.30
Elongation [%]	2.1	2.6	12	-

Table 2 Variation of CFRP layers of tanks for evaluation.

Tank No.	CFRP 1st layer	CFRP 2nd layer	CFRP 3rd layer	CFRP 4th layer
1	Helical ±30 degree			
2	Hoop	Helical ±30 degree		
3	Helical ±30 degree		Hoop	
4	Helical ±30 degree		Hoop	Hoop

(a) Tank No.1. (b) Tank No.2. (c) Tank No.3. (d) Tank No.4.

Fig. 3 Type 3 tanks for burst test.

2.2 水圧破裂試験

作製した容器の破裂試験を行った。静的負荷となるように設定圧力を0.75 MPa刻みでステップ状に1ステップあたり4秒以上をかけ、設定圧力±0.05 MPaとなるように水圧を上昇させた。容器表面の炭素繊維束の繊維方向ひずみも合わせて計測した。ひずみゲージの貼付位置を図4に示す。一方の面にヘリカル層の配向角である中心軸に対して30度の傾きの測地線上に等間隔で7か所、他方の面には子午線上に等間隔で7か所貼付した。ひずみゲージは一方向計測用（共和電業 KFG-5-120-C1-11 L5M3R）を用い、最外層の繊維束方向に貼付した。すなわち、No.1容器およびNo.2容器は最外層のヘリカル層の繊維束に沿って中心軸に対して傾き30度で貼り付け、No.3容器およびNo.4容器は最外層のフープ層の繊維束に沿って円周方向の向きに貼り付けた。一例として、ひずみゲージを貼りつけた状態のNo.4容器の写真を図5に示す。

破裂圧力は、No.1容器：12.0MPa、No.2容器：26.3MPa、No.3容器：24.8MPa、No.4容器：35.3MPaであった。水圧破裂試験実施後の容器破壊状態を図6に示す。No.1容器は、図6(a)に示すように、ライナー、ヘリカル層ともに容器中央部で破断した。No.2容器は、図6(b)に示すように、容器中央部でライナーが破断したものの最外層のヘリカル層の損傷はわずかであった。そこでCFRP層を分解したところ、図6(c)に示すように、容器中央部最内層のフープ層が軸方向に沿って破断していた。No.3およびNo.4容器は、容器中央部でライナーとともに最外層のフープ層が破断した。No.4容器は破裂圧の上昇に伴いアルミライナーが大きく塑性変形した。

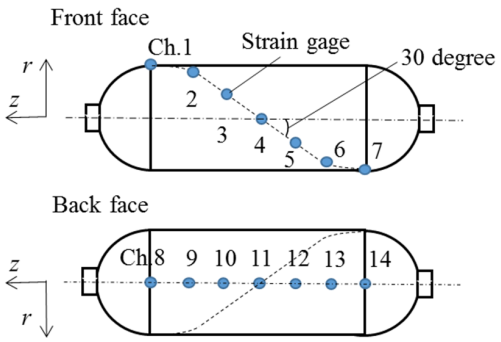


Fig. 4 Locations of strain gages.

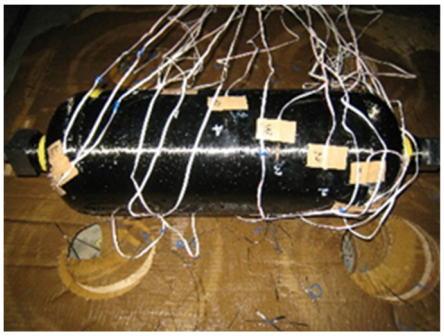


Fig. 5 Strain gages on tank No. 4 set up.

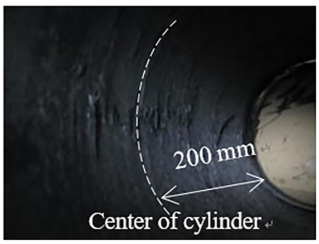
3. 軸対称連続体モデルによる破裂圧予測

3.1 軸対称連続体モデル

破裂試験を行った圧力容器の破裂圧力を、容器の軸対称連続体モデル化（キム他、2017）によるマクロスケールシミュレーションにより予測した。CFRP層は直交異方性線形弾性体とし、その材料定数は表1に示した炭素繊維と樹脂の材料定数から複

(a) Tank No.1.

(b) Tank No.2.



(c) Tank No.2 (Hoop layer from inner side).

(d) Tank No.3.

(e) Tank No.4.

Fig. 6 The tanks listed Table 2 after burst tests are shown. Both CFRP layers and aluminum liner are broken at center of cylindrical part at all the tanks. The CFRP helical layer is broken at tank No.1. The CFRP hoop layer of inner side is broken at tank No.2. The CFRP hoop layer of the most outside is broken at tank No.3 and No.4.

合則（牧他、1970）により算出した。ヘリカル層は繊維配向角+30.0度と-30.0度の層が同じ厚さで積層されているとして積層理論（Vasiliev and Morozov, 2001）に基づきモデル化した。FW工法により繊維束の交差が発生するが、それによるひずみの局所的上昇は評価できない。アルミライナーの応力-ひずみ構成則は図7に示す等方性弾塑性体のものとした。また、鋼製プラグは破裂試験によっても破壊が生じず十分に強度と剛性を有していたことから、表1に示す材料特性の等方弾性体とした。

解析に用いる軸対称有限要素モデルとその境界条件を図8に示す。No.1～4容器に関するものをそれぞれ(a)～(d)に示す。容器の1/2をz軸周りの対称性を考慮して、r-z平面でモデル化した。ライナー端のボス部では、プラグとボス部を補強したCFRPフープ層を完全結合し、プラグ中心軸で容器半径方向（r方向）変位Urを拘束した。また、容器は中央面に関して上下対称とし、中央面でz方向変位Uzを拘束した。容器内圧は0.750 MPa刻みで上昇させた。図8(a)～(d)のそれぞれ右図は容器中央部の拡大図であり、内側からアルミライナー、CFRP第1層、(a)はCFRP第2層まで、(b)、(c)はCFRP第3層まで、(d)はCFRP第4層までを示している。アルミライナー、フープ層、ヘリカル層とも三角形一次要素でモデル化した。CFRPヘリカル層は鏡部で赤道からボス部に向かい層厚が増す。その変化は理論式（キム他、2017）に従い設定した。また繊維配向角が連続的に変化するため、要素ごとに異なる直交異方性体の材料定数を設定した。要素数はNo.1容器で17,842要素、9,551節点、No.2および3容器で19,171要素、10,216節点、No.4容器で20,444要素、10,853節点となった。

3.2 解析結果

No.1～4容器の解析結果を、2章で行った実験結果と合わせて図9(a)～(d)にそれぞれ示す。縦軸は容器内圧、横軸はひずみである。緑色の□は容器破裂試験時に測定したひずみの値を示す。図4に示す計測位置のうち、図6に示した破裂開始点に一番近い位置の値を破裂圧までプロットした。実線は軸対称連続体モデルを用いた解析結果である。黒線はアルミライナーの円周方向ひずみ、青線はCFRPヘリカル層の繊維方向ひずみ、赤線はCFRPフープ層の繊維方向ひずみである。容器の破裂位置である容器中央部付近の各層の最内面でひずみは最大となり、図中の実線はその値を示している。また表1からCFRPの繊維方向ひずみが繊維の破断ひずみ2.10

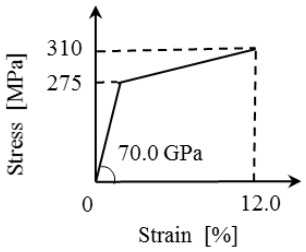


Fig. 7 Constitutive law of aluminum liner.

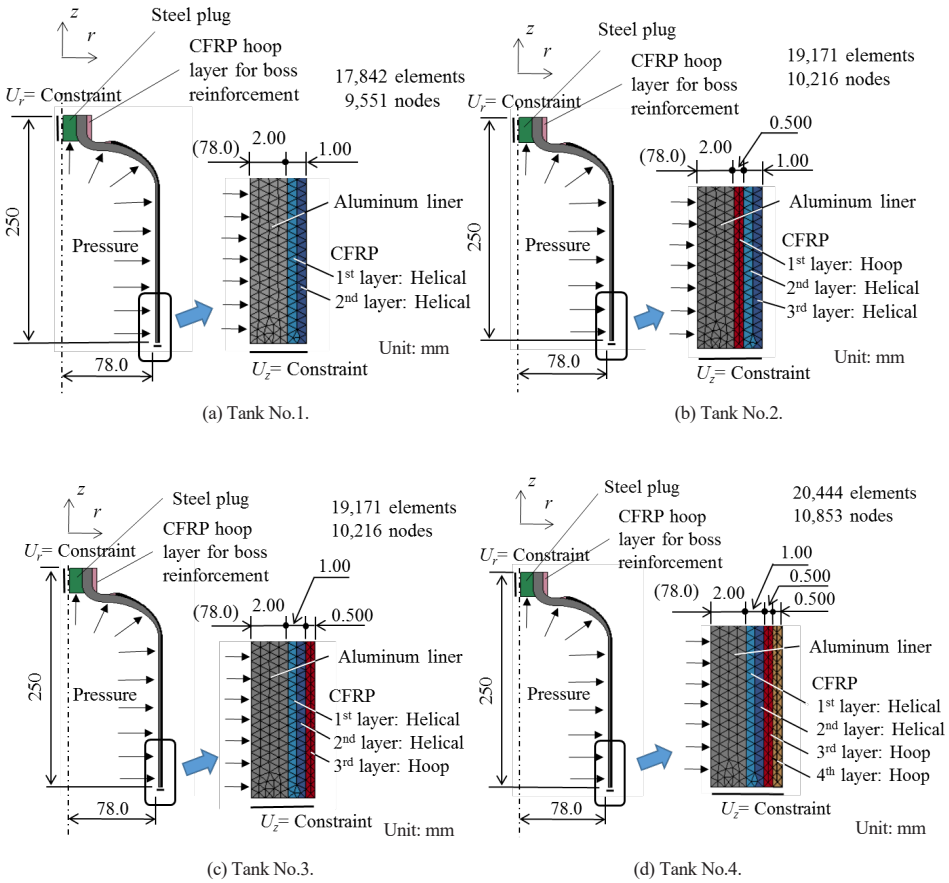


Fig. 8 Axisymmetric analysis models of tank.

%に達すると当該のCFRP層が破壊し容器破裂に至ると仮定して求めた破裂圧まで実線を描いた。いずれの容器においても、アルミライナーのひずみ最大値は表1に示す破断ひずみ(12 %)を超えておらずアルミが破壊起点とはなっていないと考えられる。この解析結果から、いずれの容器においても鏡部から十分離れた胴部中央部で、No.1容器はCFRP第1層(ヘリカル層)を起点に内圧17.2MPaで、No.2容器はCFRP第1層(フープ層)を起点に29.6MPaで、No.3容器はCFRP第3層(フープ層)を起点に圧力29.8MPaで、No.4容器はCFRP第3層(フープ層)を起点に47.4MPaで破裂するとの予測となった。

3.3 解析結果と実験結果との比較

図9に緑□で示す最外CFRP層の繊維方向ひずみ計測値は、すべての容器に関してひずみが0.5%以下の微小変形領域では解析結果とよく一致した。ひずみゲージにより計測されたひずみは、繊維束に貼付したものであっても、後述のメゾスケールモデルを用いた解析で議論の対象とする繊維束と樹脂に発生する局所的なひずみの上昇までを正確に表すものではなく、貼付された領域の平均的ひずみを表すものである。そのため、平均としてのひずみが微小であれは軸対称連続体モデルを用いた本解析結果とひずみ計測結果は比較的よく一致する。ひずみが高くなり、局所的ではあるが樹脂の非線形挙動が顕著になると、その影響を取り込んでいない本解析結果はひずみ計測結果と乖離する。

No.1容器では、アルミライナーの塑性変形が始まるまでは解析結果と計測結果は一致したが、内圧8 MPaを超えて塑性変形が進むとCFRP層の樹脂の非線形挙動が顕著となり、解析結果は計測結果から外れていったと思われる。No.2容器では最外層のヘリカル層の繊維方向ひずみが比較的低かったため、全圧力範囲において解析結果は計測結果とよく一致した。No.3、4容器においてもひずみの低い領域では解析結果と計測結果はよく一致したが、樹脂の非弾性変形が進行するにしたがって徐々に解析結果と測定結果が乖離する結果となった。

解析により予測された破壊位置については、CFRP層の厚さ方向の位置も含めて、実験結果とよく一致したが、解析により予測された容器の破壊圧力は、No.1, 2, 3, 4容器それぞれについて、17.2MPa, 29.6MPa, 29.8MPa, 47.4MPaであり、実験結果である12.0MPa, 26.3MPa, 24.8MPa, 35.3MPaよりいずれも30%程度大きな値となった。すなわち軸対称連続体モデルを用いた予測は危険側となり、その結果を設計に活かそうとすれば、その誤差を見込んだ安全裕度を設定することとなる。設計－製造－破裂試験を繰り返し経験則により安全裕度を設定するとの方法論が採られることが多いが、保守的に大きめの安全裕度を設定する場合が多く、結果として合理性を欠く容器の重量増加につながっている。その状況を改善し、合理的な最小重量設計を行うためにはメゾスケールモデルに基づく解析が必要である。

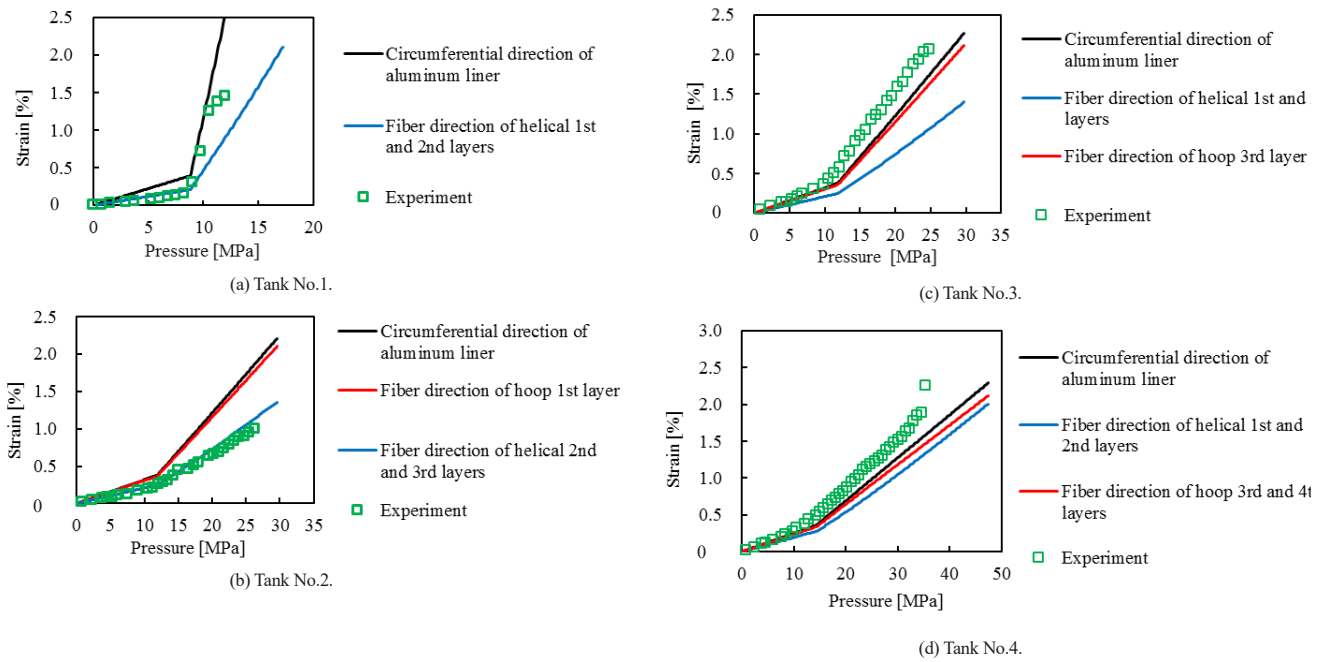


Fig. 9 Pressure-strain curves of axisymmetric analyses and experiments at the tanks are shown. The slopes are identical for experiment and analyses in small strain region before nonlinear behavior of resin becomes prominent. They deviate in large strain region where nonlinear behavior of resin affects much, since the nonlinear behavior of resin is not taken into account in axisymmetric analyses. Predicted bust pressure by the analyses exceed the experimental results by 30 % because of inadequate handling of nonlinear behavior of resin.

4. メゾスケールモデルを用いたズーミング解析による破裂圧予測

4.1 メゾスケールモデル

炭素繊維束とマトリクス樹脂を区分するメゾスケールモデル(竹本、吉川、2019) を用いたズーミング解析により圧力容器の破裂圧力を高精度で予測することを試みた。2章で示した試験結果および3章で行った解析結果から、破裂起点となる容器中央近傍の直胴部のみを破裂評価の対象とした。円筒側面の一部を平面状に近似してx-y-z直交座標系上でメゾスケールモデルを設定した。x方向は円筒の円周方向(θ方向)、y方向は半径方向(r方向)、z方向は中心軸方向とする。

図10(a)に青色で示す楕円断面の柱状体を一炭素繊維束とし、黄色で示すマトリクス樹脂部と合わせた幅10.0mm、厚さ0.500mmの帯状領域を基本単位としてメゾスケールモデルを構成した。楕円の長径を3.84mm、短径を0.230mmとし、長径端部での応力集中の影響を極力小さくしつつ、メゾスケールモデル全体の炭素繊維体積含有率がVf=55.0%となるように、炭素繊維束は炭素繊維体積含有率Vf=95.0%の直交異方性体とした。図10(b)に示すヘリカル層メゾスケールモデルは、z方向長さ80.0mm、x方向幅46.2mm、y方向厚さ1.00mmとなる領域に、上層でz軸に対し+30.0度、下層で-30.0度となるよう炭素繊維束を4繊維束ずつ配し、z方向長さの中央部で交差し屈曲が階段状に現れる構造体とした。図10(b)には炭素繊維束のみを表示してある。フープ層メゾスケールモデルはヘリカル層メゾスケールモデル同様の、z方向長さ80.0mm、x方向幅46.2 mm、y方向厚さ0.500 mmとなる領域に、z方向に等間隔で8繊維束を配して構成した。図10(c)にその繊維束のみを表示する。

解析に用いるメゾスケールモデルは、当該部分のメゾ構造を適切に表すよう、ヘリカル層メゾスケールモデルとフープ層メゾスケールモデルを組み合わせて構成した。積層間、繊維束と樹脂間はそれぞれ節点を共有し結合させた。図6に示す容器の破壊位置である円筒胴部中央を解析対象とするので、鏡部で発生する曲げ変形の影響を考慮する必要はない。曲げ変形を考慮する必要がなければ、内圧容器のマクロな変形場は膜理論により評価できる。膜理論によれば円筒部の曲率は内圧と面内応力の平衡方程式にのみ影響を与えるので、軸対称モデルを用いた解析により平衡方程式を満足する変位場を評価し、その結果からメゾスケールモデルの境界条件を設定する本手法では、曲率の影響を考慮しなくてよい。

図11(a)に示すNo.1容器のメゾスケールモデルは、ヘリカル層のみであり、図10(b)のヘリカル層メゾスケールモデルそのものとなる。10節点四面体二次要素で離散化し、1,033,956要素、1,480,278節点となった。図11(b)にNo.2容器のメゾスケールモデルを示す。y方向下層からフープ層、ヘリカル層を配した2層構造となり、1,530,251要素、2,149,325節点となった。図11(c)はNo.3容器のメゾスケールモデルであり、No.2容器と積層順番を入れ替えて下層からヘリカル層、フープ層を配した。要素数および節点数はNo.2容器と同一である。図11(d)はNo.4容器のメゾスケールモデルであり、下層よりヘリカル層と2層のフープ層を配した3層構造であり、2,034,346要素、2,827,060節点となった。

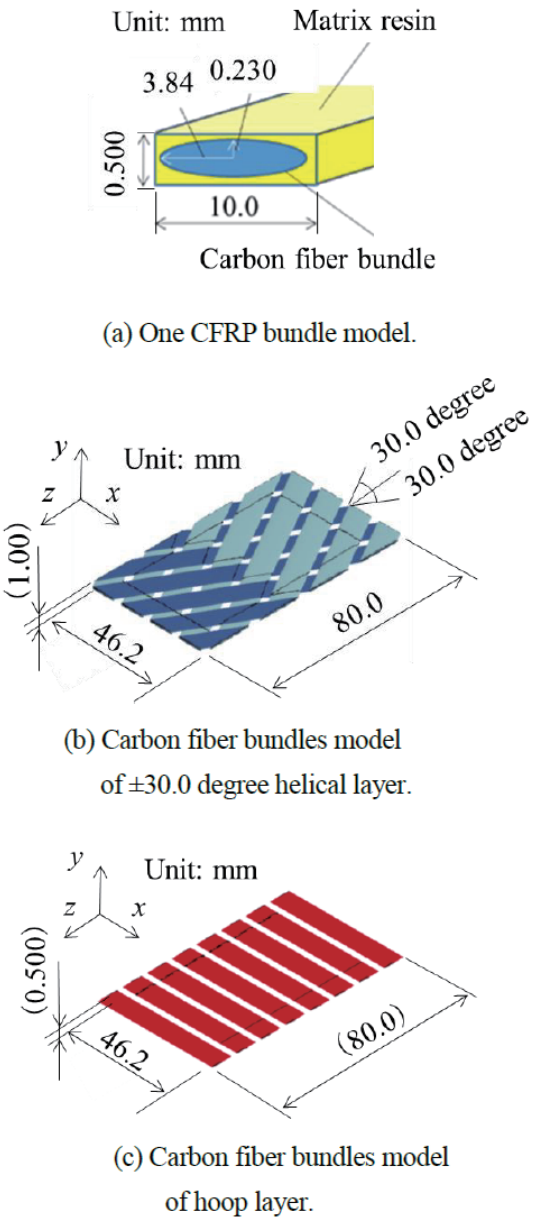


Fig. 10 Meso-scale model for zooming analysis.

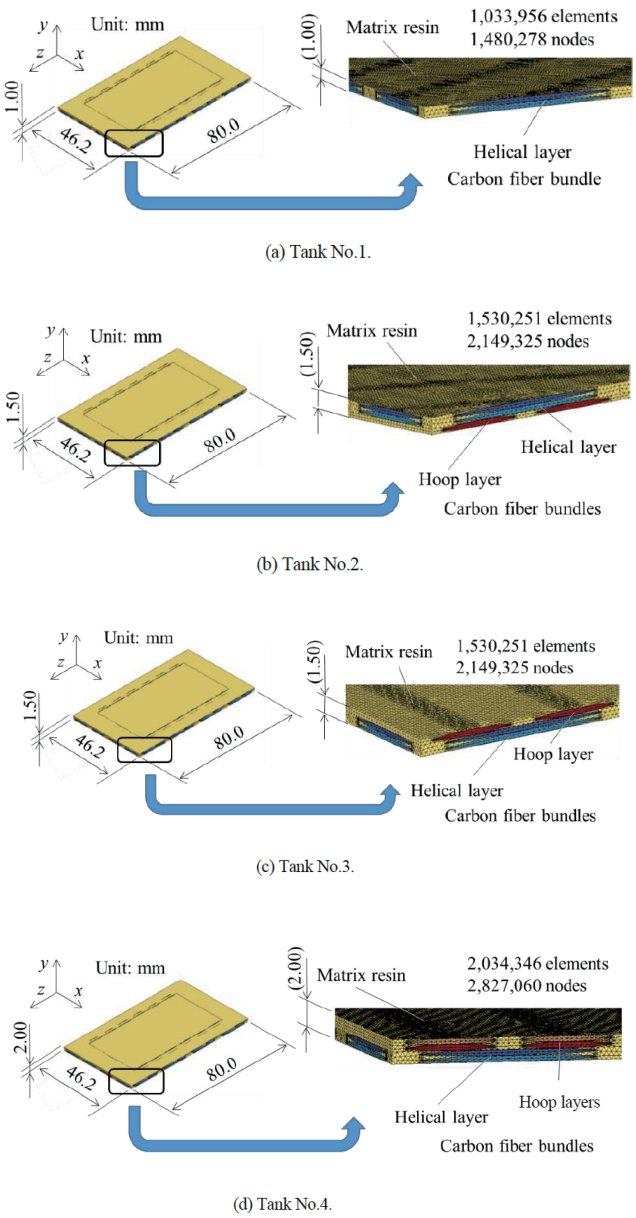


Fig. 11 Meso-scale model of tank.

4.2 強度モデルの設定

CFRPのマトリクス樹脂として用いているエポキシ樹脂は、一般的にひずみ速度依存性特性を呈する (Littell et al., 2008) 。その依存性を反映させ、CFRPヘリカル層の引張強度発現機構を構成するためには、以下の3つの因子が妥当であることを前報 (竹本、吉川、2019) で明らかにした。

1) 樹脂引張強度のひずみ速度依存性：樹脂および繊維が破壊する際、破壊部近傍の樹脂において弾性エネルギーが解放され、局所的にひずみ速度が上昇する。樹脂のひずみ速度依存性により樹脂強度が上昇し破壊が抑制される。
2) 樹脂強度の引張／圧縮非対称性：樹脂破壊時によりき裂などが発生したとしても樹脂は消滅せず、破断面に垂直な圧縮力は保持される。すなわち、破壊後に引張応力は保持されないが、圧縮応力は保持される (LSTC, 2015) 。
3) 炭素繊維束の異方性破壊則：繊維直交方向破壊は、繊維の破断ひずみではなく樹脂の破断ひずみに支配される。

炭素繊維束のメゾ構造を忠実に再現したモデルであっても、面内引張荷重により薄板試験片中で発生する応力場は平面応力場に近く、試験片厚さ方向に関する局所性が高くない。一方、容器のヘリカル層とフープ層境界付近で発生する応力場は厚さ方向に沿って激変し、また厚さ方向の垂直応力の影響も考慮する必要がある。以上を鑑み、強度モデルの一般性を高めるため前記3つの構成因子に、以下の2つの構成因子を加えて、強度モデルを構成する因子とした。

4) 樹脂剛性のひずみ速度依存性：圧縮および引張応力下で、ひずみ速度上昇に伴いヤング率も上昇する。
5) 樹脂圧縮強度のひずみ速度依存性：引張応力下のみならず圧縮応力下においても、ひずみ速度上昇に伴い圧縮強度が上昇する。

以上の強度モデルを具体化したマトリクス樹脂の応力－ひずみ線図を図12に示す。横軸は相当ひずみ、縦軸は相当応力である。樹脂を等方性弾塑性体とし、引張応力下では樹脂の相当ひずみが表1から破断ひずみ2.60%を超えたときに樹脂が破壊したと判断し応力を解放した。樹脂が破壊しても、破壊により発生する応力再配分で生じる圧縮応力を担うことはできるため、要素の削除は行わず、圧縮応力下では、降伏応力に達したのちは圧縮ひずみが増加しても応力は降伏応力のままであるとした。引張と圧縮は体積ひずみの正負によって判定した。降伏点のひずみおよび破断ひずみは不変とし、降伏応力のひずみ速度依存性を表すクーパー・シモンズ式 (Dietenberger et al., 2005)に準じて、引張から圧縮までの応力全域において、以下のひずみ速度依存性特性を有するとした。

$$\left(\frac{\mathrm{d}\sigma_m}{\mathrm{d}\varepsilon_m}\right)' = \left\{1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}_m}{C}\right)^{\frac{1}{P}}\right\}\frac{\mathrm{d}\sigma_m}{\mathrm{d}\varepsilon_m} \tag{1}$$

ここで、σ_mは樹脂の相当応力、ε_mは樹脂の相当ひずみ、$\dot{\varepsilon}_m$は樹脂のひずみ速度、( )'は樹脂のひずみ速度依存特性による変化、CおよびPはクーパー・シモンズ式の定数である。前報 (竹本、吉川、2019) で行った樹脂試験片の動的引張試験より得られた結果から、硬化温度80/110℃の樹脂に対してC=24.1、P=1.00と同定した。図12に赤線で示す、ひずみ速度43.4 /secの測定結果までしか得られていないので、それを超えるひずみ速度に対してもその応力－ひずみ関係を適用するものとした。

一方、炭素繊維束の強度モデルは、いわゆるトランスバースき裂による破壊モードを実現するため、図13に示す異方性線形弾性体破壊モデル (竹本、吉川、2019) を設定した。縦軸は応力、横軸はひずみであり、黒線は繊維方向、青線は繊維直交方向に関するものである。破壊規準は、表1から、繊維方向に関しては炭素繊維の破断ひずみ2.10 %、繊維直交方向に関しては樹脂の破壊が支配的と考え破断ひずみ2.60 %と設定した。圧縮応力下では繊維束は破断しないとした。

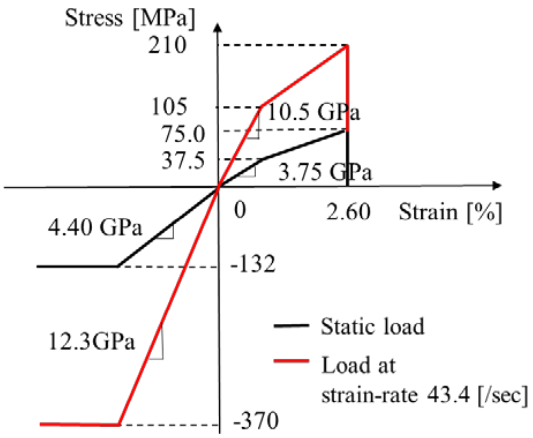


Fig. 12 Asymmetric fracture model of matrix resin for meso-scale analysis.

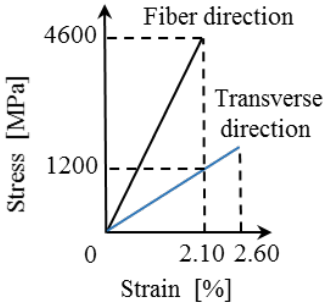


Fig. 13 Anisotropic fracture model of carbon fiber bundle for meso-scale analysis.

4.3 ズーミング解析

3章で行った軸対称連続体モデルによる容器の解析結果から得られる破壊起点である円筒胴部中央近傍の変位場を、メゾスケールモデルの境界条件として設定しズーミング解析を行った。設計問題への適用を想定し、計算負荷を軽減するため以下の近似解析手法を採った。

1) 容器の軸対称連続体モデル解析ではCFRPは線形弾性体とし、メゾスケールモデルでは樹脂の非線形挙動と破壊モデルおよび炭素繊維束の直交異方性線形弾性体破壊モデルを解析に組み入れる。
2) 均質化法 (荒井他、2008) に則れば、メゾスケールモデルの非線形解析結果を軸対称連続体モデル解析にフィードバックして逐次解析を進めるべきであるが、それは行わず、軸対称連続体モデル解析結果からメゾスケールモデルズーミング解析への一方向解析とする。

3章で示した解析結果から、内圧毎に、容器胴部中央面から中心軸方向に40.0 mmの位置に対する各要素の中心軸方向垂直ひずみの平均値および周方向ひずみの平均値から相当する変位場を求め、図14に示すメゾスケールモデル縁に対する強制変位 Uz, $-Uz$, Ux, $-Ux$ を算出した。メゾスケールモデルの構造非対称性から生じる面外変形を抑止するため、強制変位を与える縁に y 方向の拘束を与えた。縁付近では局所的な応力／ひずみ上昇が発生してしまうため、縁から一繊維束分の領域（図14に青線で囲んだ z 方向に60.0 mm、x 方向に34.7 mmの領域の外側）では破壊判定を行わないとした。解析における加圧速度は、解析結果に差異が生じない範囲で演算時間を極力短縮するため $1.50\text{x}10^{-4}$ sec/MPaとした。

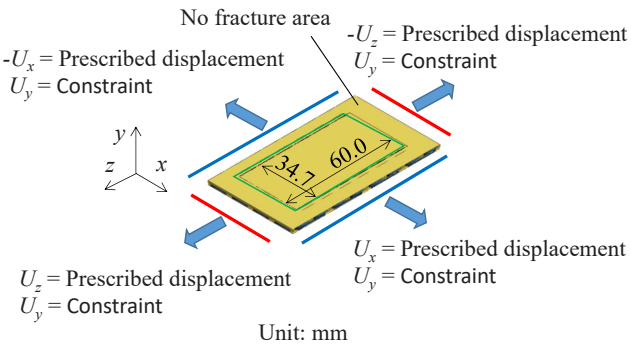


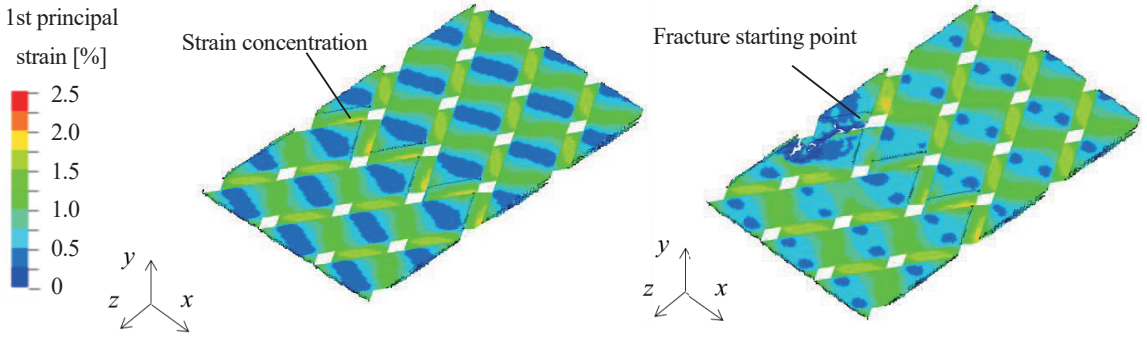
Fig. 14 Boundary condition of meso-scale model for zooming analysis.

4.4 解析結果

No.1～4容器のメゾスケールモデルに関して、解析結果より得られた炭素繊維束表面の第一主ひずみ分布図を図15～18に示す。表示領域は図14に示した青線で囲んだ領域である。図15～17では破壊直前の分布を(a)に、直後の分布を(b)に示す。

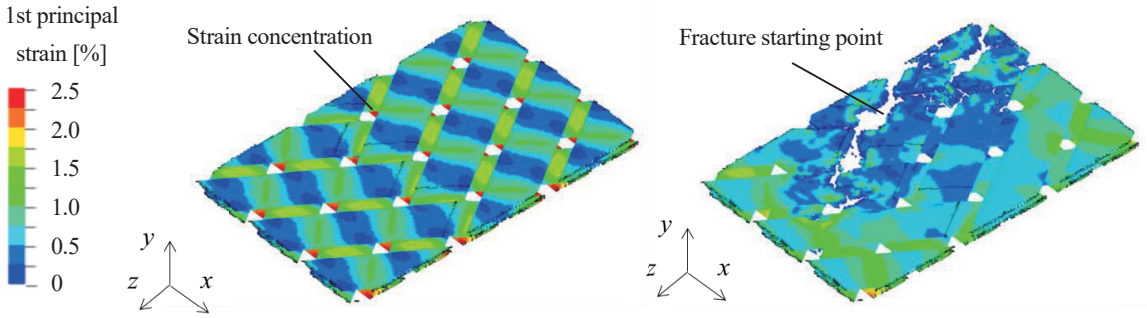
図15に示すNo.1容器に関する結果では、ヘリカル層交差部のクリンプ（屈曲）部に繊維の破断ひずみ2.1%に近い局所的なひずみ上昇が発生し、そこが起点となって破壊が開始した。メゾスケールズーミング解析により軸対称連続体モデルでは捉えられなかったメゾスケールでの破壊機序を予測できる。図16に示すNo.2容器に関する結果では上層のヘリカル層内の繊維束交差によるひずみの局所的上昇が下層のフープ層繊維束に破断ひずみに近い繊維方向ひずみを誘発し、そこが起点となって破壊が開始していた。下層のフープ層から破壊するとの予測は2章で示した実験結果と一致する。図17に示すNo.3容器に関する結果では、No.2容器に関するものと積層順序が入れ替わっているが同様のメカニズムでひずみ上昇が起きており、ヘリカル層繊維束の交差部に近接するフープ層繊維束部分が起点となり破壊が開始した。この破壊開始位置に関する予測結果も実験結果と一致する。

No.4容器に関する結果を示す図18では、破壊直前の結果を(a)、(b)、(c)に、破壊直後の結果を(d)に示す。図18(a)、(d)は最外層側からの視野での全繊維束の分布図、(b)は内層側からの視野でのフープ層繊維束の分布図、(c)は最内層側からの視野での全繊維束の分布図を示している。図18(b)からはフープ層内側で局所的ひずみが大きくなっており、図18(c)からはNo.2および3容器に関するものと同様にヘリカル層内の交差繊維束によるひずみの局所的上昇がフープ層繊維束に破断ひずみに近いひずみ上昇を引き起こし、そこが起点となって図18(d)に示す破壊が開始した。これらの結果も破裂試験結果と一致する。No.4容器に関するマトリクス樹脂の主ひずみ分布を図19に示す。フープ層に関して内層側からの視野で(a)は第一主ひずみ、(b)は第三主ひずみである。第一主ひずみの最大値は、表1に示す樹脂の静的破断ひずみ2.6%を超えており、また第三主ひずみの最小値も-5%程度となっている。本研究で設定したひずみ速度に依存する強度モデルによらなければ破壊の進行が早まり、破裂試験結果より低い破裂圧を予測することになったと予想される。低い破裂圧の予測は安全側であり、容器の信頼性を確保する上では望ましいが、保守的すぎる設計は経済的ではなく、本研究で示した手法により的確に破裂圧力を予測することで容器の信頼性と経済性を両立できる。



(a) Pressure of 10.7 MPa just before fracture.　(b) Pressure of 10.8 MPa just after fracture.

Fig. 15 1st principal strain distributions of carbon fiber bundles obtained by zooming analysis of tank No.1 are shown for just before (a) and after (b) fracture. Local strain concentration occurs to raise the maximum first principal strain in the vicinity of crimp part of the helical layer. The fracture initiates at the point of the strain concentration, when it reaches to 2.1 %, that is, fracture elongation of carbon fiber.



(a) Pressure of 26.6 MPa just before fracture.　(b) Pressure of 26.8 MPa just after fracture.

Fig. 16 1st principal strain distributions of carbon fiber bundles obtained by zooming analysis of tank No.2 are shown for just before (a) and after (b) fracture. The local strain concentration of the crimp part in the upper helical layer causes increases of the local strain of the lower hoop layer. The strain reaches to 2.1 % at the moment of fracture.

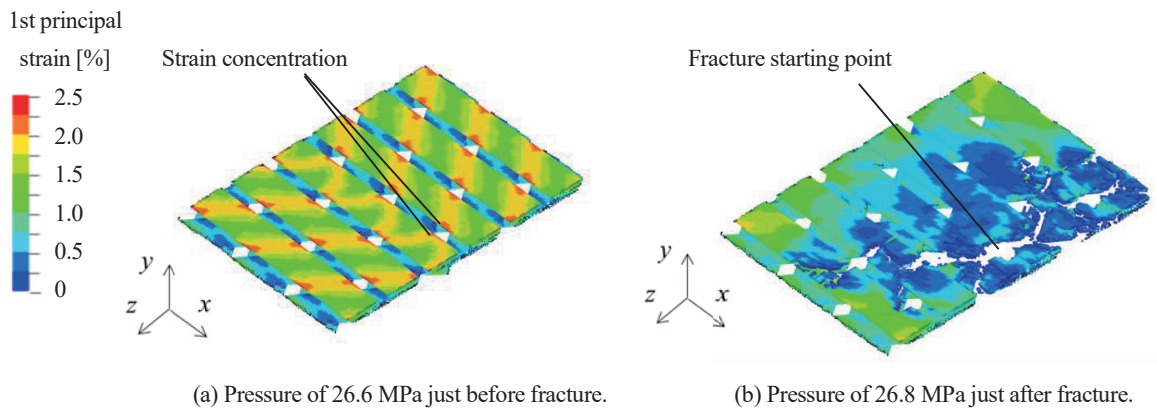


Fig. 17 1st principal strain distributions of carbon fiber bundles obtained by zooming analysis of tank No.3 are shown for just before (a) and after (b) fracture. By the similar mechanism of tank No.2, the local strain enhancement at the crimp part of the lower helical layer causes increase of the local strain of the upper hoop layer.

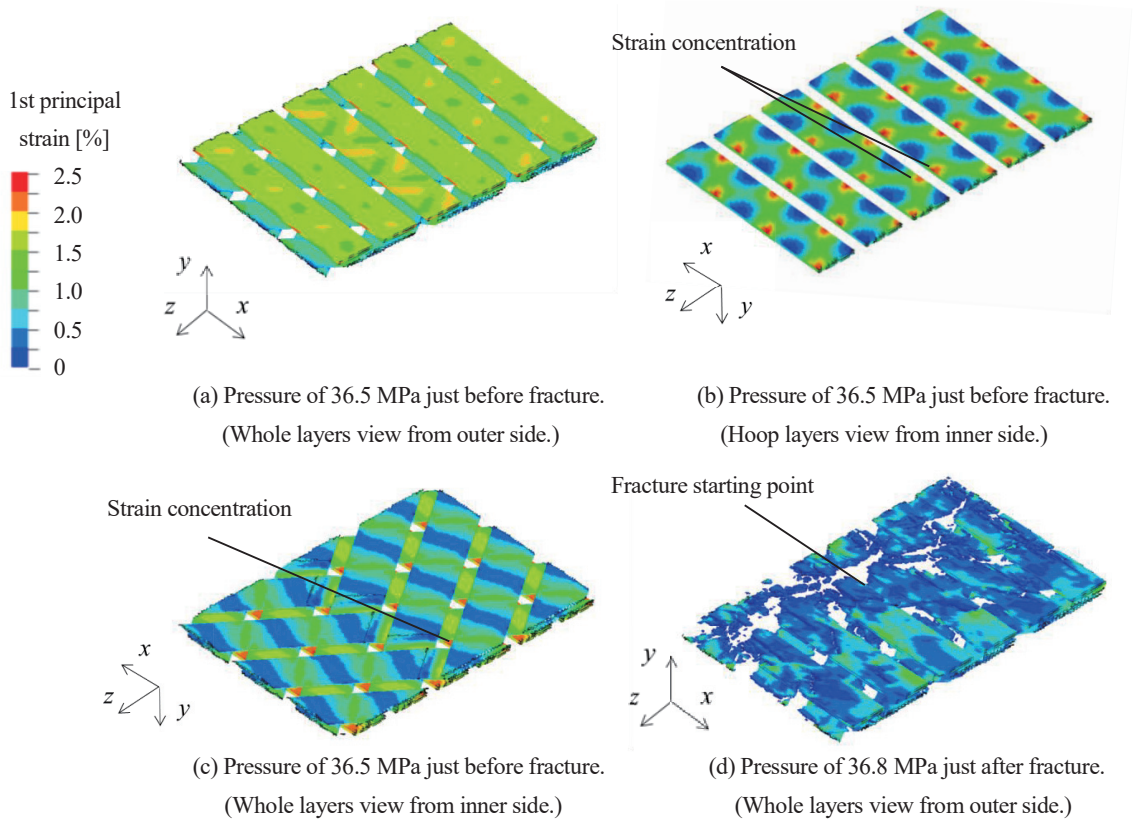


Fig. 18 1st principal strain distributions of carbon fiber bundles obtained by zooming analysis of tank No.4 are shown for just before (a), (b), (c) and after (d) fracture. Both (a) and (d) illustrate by the view from outer side for whole layers. (b) is inner side view for hoop layer. (c) is inner side view for whole layers. The local strain concentration occurs in the hoop layer caused by the crimp in helical layer. The fracture of hoop layer fiber bundle starts when its local strain reaches to 2.1 %.

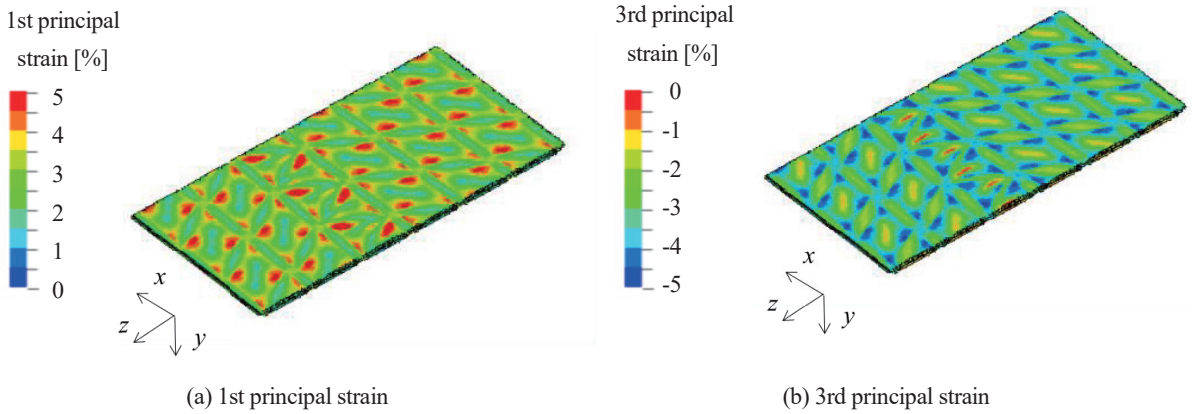


Fig. 19 Distributions of 1st principal strain (a) and 3rd principal strain (b) of matrix resin obtained by zooming analysis of tank No.4 are shown by the view from inner side at internal pressure of 36.5 MPa, that is, just before the fracture. The maximum value of the 1st principal strain exceeds 2.6 %, that is, fracture elongation of matrix resin. The minimum value of the 3rd principal strain is about -5 %.

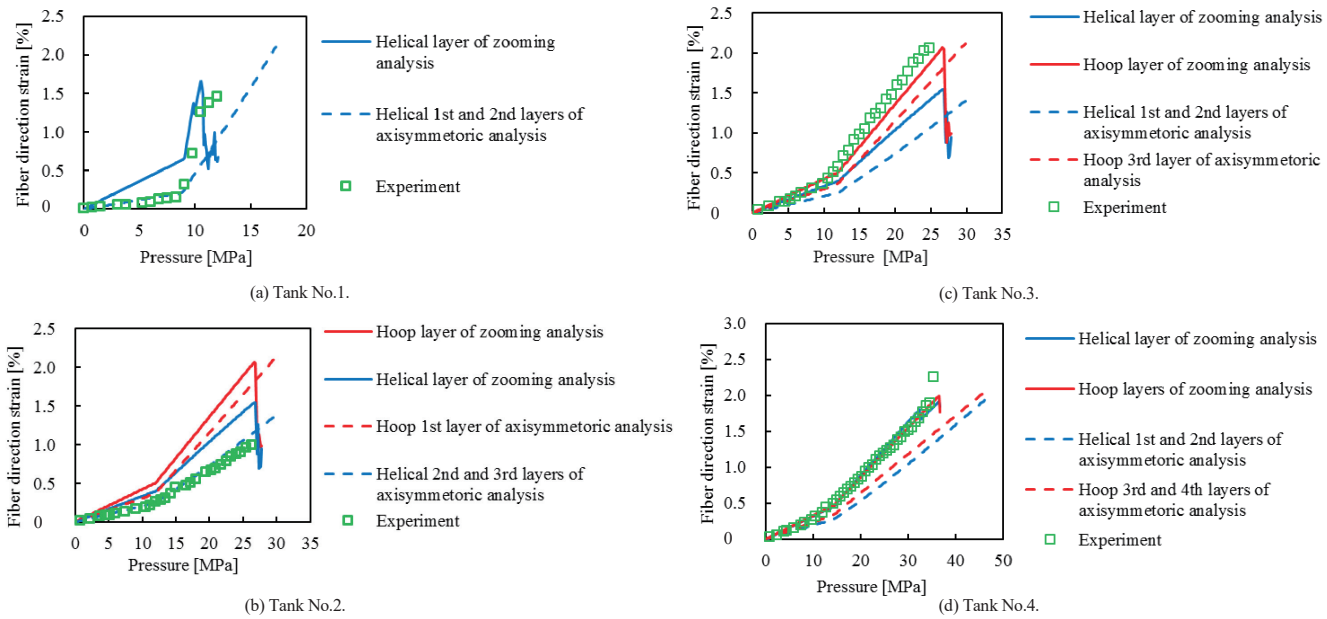


Fig. 20 Pressure-strain curves of analyses and experiments for the tanks are shown. The zooming analyses predict the burst pressure precisely. The analyses yield higher strain than axisymmetric analyses for all the tanks because of precise evaluation of local strain enhancement caused by the mesoscopic structure of fiber bundles and resin. The strains of zooming analyses exceed the experimental one at tank No.1 and 2, since effect of fiber bundle crimp in helical layer cannot be measured by strain gage. The strains of zooming analyses become closer to those of experimental measurements at tank No.3 and 4 since the strain enhancement caused by nonlinear behavior of resin is taken into account in zooming analyses.

4.5 ズーミング解析結果と破裂試験結果との比較

メゾスケールモデルによるズーミング解析の結果得られた炭素繊維束のひずみと内圧の関係を、図20(a)～(d)にNo.1～4容器についてそれぞれ示す。縦軸は炭素繊維束の繊維方向ひずみであり、横軸は容器内圧を示す。各層で評価された最大値を、ヘリカル層については青実線で、フープ層については赤実線で示している。緑□は破裂試験で計測した最外CFRP層の繊維方向ひずみ、青破線は軸対称連続体モデルで評価したヘリカル層内での炭素繊維方向ひずみの最大値、赤破線は同様のフープ層内での最大値である。

3.3節で述べた通り、ひずみゲージによる計測値は貼付した領域の平均値とみなせるものであり、低ひずみ領域では軸対称連続体モデルの解析結果とよく一致する。ズーミング解析より得られたひずみの最大値は軸対称解析結果より大きく、繊維束の交差と樹脂の非線形変形挙動の影響を正確に表現していると思われる。最外層がヘリカル層であるNo.1およびNo.2容器に関しては、繊維束交差により発生する局所的ひずみ上昇が顕著で、ひずみゲージによる計測ではそのような局所ひずみまでを正確に計測することができないため、ズーミング解析結果より得られたヘリカル層のひずみの最大値の方が計測結果よりも大きい。最外層がフープ層であるNo.3および4容器では、フープ層の繊維方向ひずみの計測値はズーミング解析によるひずみの最大値とほぼ一致していた。フープ層では繊維束の交差がなく、またズーミング解析では繊維束破断に先行して発生する樹脂の非線形挙動を正確に表現しているため、軸対称連続体モデルの解析結果よりもズーミング解析結果のほうが計測結果に近い結果となったと考えられる。

ズーミング解析による破裂圧予測結果は、No.1～4容器についてはそれぞれ、10.8MPa, 26.8MPa, 26.8MPa, 36.8MPaであり、破裂試験の結果得られた破裂圧12.0 MPa, 26.3MPa, 24.8MPa, 35.3MPaとの差異は10%以内である。3章で示した軸対称連続体モデルを用いた予測に対して大幅な改善が見られ、ズーミング解析で特定された破裂の機序となる層についても破裂試験結果と合致していることから、本研究で提示した手法の妥当性が示されたと考える。

5. 結 言

FW工法で製造される高圧水素容器の破裂圧評価手法として、CFRP層を構成する炭素繊維束とマトリクス樹脂を区分するメゾスケールモデルに基づく手法が有効であることを示した。メゾスケールモデルを構成するにあたり、強度モデル構成因子を下記の5因子とした。

1) 樹脂引張強度のひずみ速度依存性
2) 樹脂強度の引張／圧縮非対称
3) 炭素繊維束の異方性破壊則
4) 樹脂剛性のひずみ速度依存性
5) 樹脂圧縮強度のひずみ速度依存性

実証のためCFRP積層構成の異なる4種類のタイプ3小型圧力容器を試作し破裂試験を行った。既往の軸対称連続体モデルに基づく破裂圧力の予測では、積層構成を忠実にモデル化しても予測値が30 %程度高くなり、危険側の結果となった。

容器中央直胴部の一部を板状のメゾスケールモデルで表し、軸対称連続体モデルによる解析から得られた変位場を境界条件として設定してズーミング解析を行うことで、精度よく破裂圧力を予測できることを示した。破裂圧を正確に予測することで、過剰に保守的にならず、経済性と信頼性を両立させた設計が可能になる。

本研究で示したズーミング解析では直胴部のみを対象としたが、提示した強度モデルは引張と圧縮の非対称性までを含めた現実に即した強度モデルであるため、複雑な曲げ変形が発生する容器鏡部のCFRP層に対する適用可能性を今後検証していく。

文　献

荒井政大、角孝平、伏見祐介、松田哲也、均質化法を用いたCFRP積層板の粘弾性構成式の評価、計算数理工学論文集、Vol.8、No.10-081128 (2008)。

荒居善雄、大塚朋之、鈴木弘、柴田哲、大淵智之、飯島孝文、アルミニウム合金ライナ／FW-CFRP強化複合圧力容器の疲労破壊メカニズムの評価、日本機械学会論文集A編、Vol.73、No.736 (2007)、pp.1388-1394.

Dietenberger, M., Buyuk, M. and Kan, C. D., Development of a high strain-rate development vehicle model, LS-DYNA Anwenderforum Bamberg 2005 (2005).

高圧ガス保安協会、KHKS0220 超高圧ガス設備に関する基準 (2016).

平瀬欣弘、森孝男、石原利郎、加藤昭彦、川原正言、FRP容器についての網目理論、積層理論およびFEMによる応力解析の比較検討、日本機械学会論文集A編、Vol.57、No.535 (1991)、pp.550-555.

飯田一、FW圧力容器の力学的特性　非線形挙動の解析、日本複合材料学会誌、Vol.4、No.4 (1978)、pp.163-167.

キムサンウォン、吉川暢宏、東條千太、鈴木純三、TYPE3蓄圧器のドーム部形状最適化、圧力技術、Vol.55、No.1 (2017)、pp.3-11.

Littell, J. D., Ruggeri, C. R., Goldberg, R. K., Roberts, G. D., Arnold, W. A. and Binienda, W. K., Measurement of epoxy resin tension, compression and shear stress-strain curves over a wide range using small test specimens, Journal of Aerospace Engineering, Vol.21, No.3 (2008), pp.162-173.

劉継紅、山田一馬、細見充、池田敏夫、平野徹、ライナ付FRP圧力容器の構造設計および解析、日本機械学会論文集A編、Vol.63、No.612 (1997)、pp.1758-1765.

LSTC, LS-DYNA R8.0 keyword user's manual, Vol.2 (2015), pp.127-129.

牧廣、島村昭治、田部井清、大石新、フィラメントワインディング、日刊工業新聞社 (1970)。

大仲英巳、燃料電池自動車の開発現状、高温学会誌、Vol.35、No.5 (2009)、pp.231-238.

竹花立美、太田浩、FRP複合容器の安全性評価と規格、圧力技術、Vol.35、No.1 (1997)、pp.15-20.

竹本真一郎、吉川暢宏、高圧水素容器CFRP積層構造のメゾスケール引張強度評価のための樹脂非線形材料モデルの高度化、日本機械学会論文集、Vol.85、No.869 (2019) 、DOI:10.1299/transjsme.18-00304.

水素・燃料電池戦略協議会、水素・燃料電池戦略ロードマップ　水素社会実現に向けた産学官のアクションプラン、経済産業省水素・燃料電池戦略協議会第16回会議 (2019)。

国際連合、水素及び燃料電池自動車に関する世界統一規則、世界統一技術規則第13号 (2013)。

Vasiliev, V. and Morozov, V., Mechanics and analysis of composite materials, Elsevier (2001), pp.236-237.

出　典

一般社団法人日本機械学会
日本機械学会論文集
Vol.86,No.8832

受賞者

竹本　真一郎

編集後記

日産技報をご愛読頂きましてありがとうございます。本第88号では、2050年のカーボンニュートラルに向けた大きなうねりがある中、日産として大きな変革の象徴である2つのトピックスを特集しました。日産の新世代のEVであるアリアと、そのアリアの生産を変化点として大きく進化を遂げた、未来のクルマを造る「Nissan Intelligent Factory」です。

まず、「Nissan Intelligent Factory」は、カーボンニュートラル生産を目指すとともに、様々な環境の変化にも対応する柔軟性と強度を兼ね備えたもので、電動車そのものの普及と対をなす重要な領域です。次に、アリアは、2010年12月に初代日産リーフを発売した日産が新世代のEVと位置付けているモデルです。EV専用新型プラットフォーム、新開発の4輪シャシー制御技術とパワートレイン、クルマとのインターフェイスとコネクテッドといったあらゆる領域を刷新した自信作を解説しました。

これら執筆には日産の技術開発から生産の領域で先頭に立つ者が携わっています。ここに、日産の技術を広く発信したいという思いで関わったすべての執筆者および編集関係者に敬意を表します。

最後に、我々日産が2021年11月に発表した長期ビジョン「Nissan Ambition 2030」に基づき開発している高い技術が、読者の皆さまに伝わることを切に願っております。

総合研究所　研究企画部 山村 智弘

NISSAN TECHINICAL REVIEW　2022 No.88

発　行　　2022年6月

発行所　　日産自動車株式会社
総合研究所 研究企画部
〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山1番1号

発行人　　総合研究所 研究企画部　部長　山村　智弘

編集所　　株式会社日産クリエイティブサービス
企画・開発部
〒243-0126 神奈川県厚木市岡津古久560-2　日産テクニカルセンター内

日産自動車株式会社