

# 三菱電機技報

5

2019

Vol.93 No.5

モビリティの未来を拓く 自動車機器の先進技術



## 目次

### 特集「モビリティの未来を拓く自動車機器の先進技術」

“モビリティの未来を拓く自動車機器の先進技術”の特集号に寄せて……………**巻頭言** 1  
井口 功

車社会の将来展望と技術動向……………**巻頭論文** 2  
山川智也

予防安全・自動運転の開発と実証実験の取組み…………… 8  
角谷文章・一杉和夫・明石陽平

自動運転に向けた経路生成・車両統合制御技術…………… 12  
鶴生知輝・篠本 淳・吉桑義雄

自動走行を高度化するインフラ技術…………… 16  
名倉健一・末廣 雄・細井響子・渡辺昌志・小崎成治

スマートモビリティ時代に向けた  
体験型コンセプトカー“EMIRAI4” (2019年版) …………… 20  
古本友紀

車室内モニタリングシステム…………… 24  
熊谷太郎

超小型・高機能なLEDヘッドライト用光学モジュール…………… 28  
桑田宗晴・諏訪勝重・大嶋律也・小島邦子

リソース管理ソフトウェア“リソースマネージャー”  
による車載マルチメディアシステムの性能改善…………… 32  
三橋 植

自動車機器での製品セキュリティへの取組み…………… 36  
松井俊憲・山口見由・跡部悠太・高塚雄也・井上知之

4GL-IPU: 2 モーターシステム用パワーユニット …………… 40  
石橋誠司・福 優・和田典之

エンジン出力軸直結型48V-ISGシステム用モータ  
の電磁気設計…………… 44  
北尾純士・深山義浩・中野正嗣

EPS用次世代モーターコントロールユニット…………… 48  
有働豊秋・國光威宏・米澤亮一

次世代電制ウエストゲートアクチュエータ…………… 51  
山岡邦宏・内田 毅

エンジン点火・燃焼系シミュレーション技術…………… 54  
橋場敏彦

関連拠点紹介…………… 57

### 特許と新案

「充電表示装置」……………

「ナビゲーション装置、およびナビゲーション方法」…………… 59

「車両判定装置、車両判定方法及び車両判定プログラム」…………… 60

### Advanced Technologies of Automotive Equipments to Create Future of Mobility

Foreword to Special Issue on Advanced Technologies of Automotive Equipments to Create Future of Mobility

Isao Iguchi

### Prospective Stories and Engineering Trend in Automotive Society

Tomoya Yamakawa

### Development and Experiment of ADAS and Autonomous Driving System

Fumiaki Kadoya, Kazuo Hitosugi, Yohei Akashi

### Path Planning and Vehicle Integrated Control Technologies for Autonomous Driving System

Tomoki Uno, Rin Shinomoto, Yoshio Yoshikuwa

### Infrastructure Technologies to Improve Autonomous Driving

Kenichi Nakura, Takeshi Suehiro, Kyoko Hosoi, Masashi Watanabe, Seiji Kozaki

### Experience-based Concept Car “EMIRAI4” (2019 Version) for Smart Mobility Era

Yuki Furumoto

### In-vehicle Monitoring System

Taro Kumagai

### Compact and High Function Optical Module for LED Headlights

Muneharu Kuwata, Masashige Suwa, Ritsuya Oshima, Kuniko Kojima

### Improvement of Performance for Car Multimedia System by Resource Management Software “Resource Manager”

Tadashi Mihashi

### Approach to Product Security in Automotive Equipments

Toshinori Matsui, Teruyoshi Yamaguchi, Yuta Atobe, Yuya Takatsuka, Noriyuki Inoue

### 4GL-IPU: Power Unit for 2 Motor System

Satoshi Ishibashi, Masaru Fuku, Noriyuki Wada

### Electromagnetic Design of Electric Motor for Crankshaft-mounted Integrated Starter-Generator System for 48V Hybrid Vehicles

Junji Kitao, Yoshihiro Miyama, Masatsugu Nakano

### Next Generation Motor Control Unit for Electric Power Steering

Toyoaki Udo, Takahiro Kunimitsu, Ryoichi Yonezawa

### Next Generation Electric Waste Gate Actuator

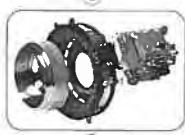
Kunihiro Yamaoka, Tsuyoshi Uchida

### Simulation Technology for Ignition and Combustion System of Automotive Engine

Toshihiko Hashiba



①



②



③

表紙：モビリティの未来を拓く自動車機器の先進技術

三菱電機は広い裾野と基盤力を保有する総合力を生かし、自動車の未来に向けて必要となる技術開発を進めている。

①はコンセプトカーEMIRAI4である。電動化・自動運転・コネクテッドの3分野の開発成果を集約し、ドライバーセンシング技術、HMI (Human Machine Interface) 技術、ライティング技術等の次世代運転支援技術を搭載した。

②はエンジン出力軸直結型48V-ISG (Integrated Starter-Generator) システムである。エンジンと変速機の間に搭載され、アイドリングストップからのエンジン再始動、減速時のエネルギー回生や加速時のトルクアシストを行うことで、燃費改善に貢献する。

③は自動運転実証実験車xAUTOによる試験風景である。インフラ協調型と自律型の自動運転システムが搭載されており、視認性の悪い条件下での自動運転実証試験を実施した。

巻/頭/言

“モビリティの未来を拓く自動車機器の先進技術”の特集号に寄せて

Foreword to Special Issue on Advanced Technologies of Automotive Equipments to Create Future of Mobility

井口 功  
Isao Iguch



自動車は暮らしを豊かにするとともに、人々の安心・安全や快適性の実現、更なる環境性向上の要求に対し、常に進化を続けてきました。今、その自動車を取り巻く状況はかつてない大きな変革期を迎えています。この動向は“CASE”と呼ばれています。これはConnected(コネクテッド)、Autonomous(自動運転)、Shared & Services(シェアリングとサービス)、Electric(電動化)の頭文字をつなげた言葉です。

コネクテッドは、自動車が無線通信で車外とつながることです。車内外の情報を活用することでインフォテインメントシステムやコックピットで様々な情報サービスが得られ、安全性と快適性が向上します。三菱電機は車室内センシングによって乗員の状態にも合わせたHMI(Human Machine Interface)を開発しており、さらに心地よく安心できる車内空間としています。コネクテッドは今後の5G等の次世代移動体通信技術の進歩とともに、自動運転やMaaS(Mobility as a Service)などを支え、将来のスマートモビリティにも必須となります。様々な機器がインターネットにつながるモノのインターネットIoT(Internet of Things)と併せて、サービス適用分野は多様化し、新たな分野での市場創出が期待されています。

自動運転は、利便性の向上だけでなく、交通事故による死傷者数削減を目指して開発を進めています。カメラ、レーダ、ソナー等の車載センサによって車両周辺を認識し、運転を支援するシステムADAS(Advanced Driver Assistance System)として衝突被害軽減ブレーキや車線維持支援装置などの普及が進んでいます。このような自律型の自動運転技術に加え、準天頂衛星の信号と高精度地図を活用したインフラ連携型走行技術を組み合わせることで、高度な運転支援を実現します。当社はセンチメートル級測位補強サービスを活用した自動運転の実証試験を、世界で初めて<sup>(注1)</sup>実施しました。来年2020年に開催される東京オリンピック・パラリンピックでは、日本の自動運転技術を披露

することが内閣府から発表されています。

シェアリングとサービスは、自動車を個人で所有せずに借りて使用するカーシェアや移動サービスとして自動車を活用するライドシェアといった利用方法であり、急速に広がっています。さらに公共交通と連携させ、検索・予約・課金を一括してMaaSとして提供する事業も開始されています。将来は人・モノが家庭、ビル、自動車、鉄道等をシームレスに移動する様々なサービスに発展することが見込まれます。このようなサービスではコネクテッドによって自動車の情報を収集し、IoTで収集したビッグデータと結びつけることで、個人の利便性だけでなく、渋滞の緩和や環境負荷低減への貢献も可能になります。

電動化は、地球温暖化への影響が大きい二酸化炭素の排出量低減に貢献しています。気候変動抑制は地球規模の課題であり、2015年にはパリ協定が合意され、排出量の9割をカバーするまで批准が進んでいます。自動車からの排出量は全体の2割を占めており、欧州を筆頭に各国で罰則を伴う排出量規制が厳しくなっています。このためエンジンと電動走行を組み合わせたハイブリッド車、外部からの充電可能なプラグインハイブリッド車や電気自動車の普及が加速しています。当社はエンジンの低燃費化と並行して、車載向けパワー半導体デバイスとそのパワーエレクトロニクス機器への応用、モータと組み合わせた電動化システムの小型・高効率化で貢献しています。

当社は目指すべき姿として“持続可能性”と“安心・安全・快適性”が両立する豊かな社会の実現に貢献する“グローバル環境先進企業”を掲げており、国連が定めた2030年に向けた17の持続可能な開発目標(SDGs)の達成に貢献することを経営理念としています。広い裾野と基盤力を持っている当社の総合力を生かし、この大変革の時代に対応していきます。今回の特集では、この取組みを支える技術と新製品を紹介します。

(注1) 2017年9月19日現在、当社調べ





山川智也\*

# 車社会の将来展望と技術動向

Prospective Stories and Engineering Trend in Automotive Society

Tomoya Yamakawa

## 要 旨

現在、自動車業界は100年に一度の変革期にあると言われる、この変化の領域はCASE: Connected(コネクテッド), Autonomous(自動運転), Shared & Services(シェアリングとサービス), Electric(電動化)と呼ばれている。

電動化は、地球温暖化への影響が大きい温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>の排出を低減する有力な手段である。既にエンジンと電動モータを組み合わせたHEV(Hybrid Electric Vehicle)やPHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle)は普及が進んでいる。また、走行中のCO<sub>2</sub>排出をゼロにするEV(Electric Vehicle)の普及も進みつつある。

自動運転は、車社会が抱える深刻な課題である自動車事故による死傷者をなくす解決策として期待される。車載センサから周辺状況を認識し、運転を支援するシステム

ADAS(Advanced Driver Assistance System)は、機能が拡大して普及が進んでいる。さらに高精度測位やインフラ側からの情報を活用した自動運転技術の開発が加速している。

コネクテッドは、無線通信で車外とつながる共通機能である。従来のインフォテインメントシステムだけでなく、自動運転やMaaS(Mobility as a Service)などモビリティにかかわるサービス全般に必須となる。高速、大容量、高信頼性を実現する次世代移動体通信技術の進歩とともに、車の環境負荷低減や安全面の向上など社会課題解決のほか、モビリティサービスも多様化し、様々な分野でコネクテッド技術の活用が期待されている。



## 持続可能な開発目標SDGsと自動車業界の変化の領域

三菱電機は、経営戦略のなかで、“持続可能な社会”と“安心・安全・快適性”が両立する豊かな社会の実現に貢献する“グローバル環境先進企業”を目指すべき企業の姿として位置付けている。これは、2030年に向けて世界が合意した17の持続可能な開発目標SDGs(Sustainable Development Goals)が目指すものと合致していると考えている。このビジョンの下、CASEと呼ばれる自動車業界の変化の各領域で自動車の未来に向けて必要となる技術開発を進めている。

## 1. ま え が き

自動車普及し始めて100年を越えた現在、Connected(コネクテッド)、Autonomous(自動運転)、Shared & Services(シェアリングとサービス)、Electric(電動化)のCASEと呼ばれる変化の各領域の進展によって大きな変革期を迎えていると言われている。

自動車によって排出されるCO<sub>2</sub>は人類が世界で排出するCO<sub>2</sub>全体の2割を占めており、大気中のCO<sub>2</sub>濃度の上昇は地球規模での気候変動をもたらしつつある。自動車の電動化は化石燃料の使用量を減らし、排気ガスが環境に及ぼす影響を低減する有力な手段である。自動車事故も車社会が抱える深刻な課題である。死者数は世界で年間135万人にもなっている。自動運転は事故の原因となる運転時のヒューマンエラーをなくすることができる抜本的な解決策として期待されている。無線通信技術の普及によって、自動車がインターネットと常時接続されるコネクテッドカーになりつつある。これによっていつでも必要な情報をやり取りすることが可能になり、カーシェアやライドシェアなどのシェアリングサービスへの活用や様々なサービスへのデータ活用が可能になってきている。

将来、自動車以外の多様なモビリティと組み合わせたモビリティサービス(MaaS)の提供へと発展し、交通全体の最適化を図るスマートモビリティ社会が実現されようとしている。

本稿では、これらの自動車を取り巻く状況と、その問題解決に向けた自動車機器の技術動向について、電動化、自動運転、コネクテッドの三つの視点から述べる。

## 2. 電 動 化

地球の重大な環境問題の一つは、温室効果ガスによる温暖化現象である。この対策として世界各国で自動車のCO<sub>2</sub>排出量規制を行っている(図1)。最も積極的な欧州では、2015年に乗用車1台が排出するCO<sub>2</sub>のEU全体の平均値を130g/kmに制限する罰則を伴う規制を導入しており、2021年に95g、2030年には2021年から更に37.5%削減する方針を固めている。欧州以外でも規制が強化されている(図1)。また、世界最大の車市場である中国では、新エネルギー車(NEV)と称しPHEV、EV、FCV(Fuel Cell Vehicle)を戦略産業として育成し、2025年に20%まで普及させる方針である。

このような国際状況に対応し、各国の自動車メーカーは、後述する様々な対策に取り組んでいる。

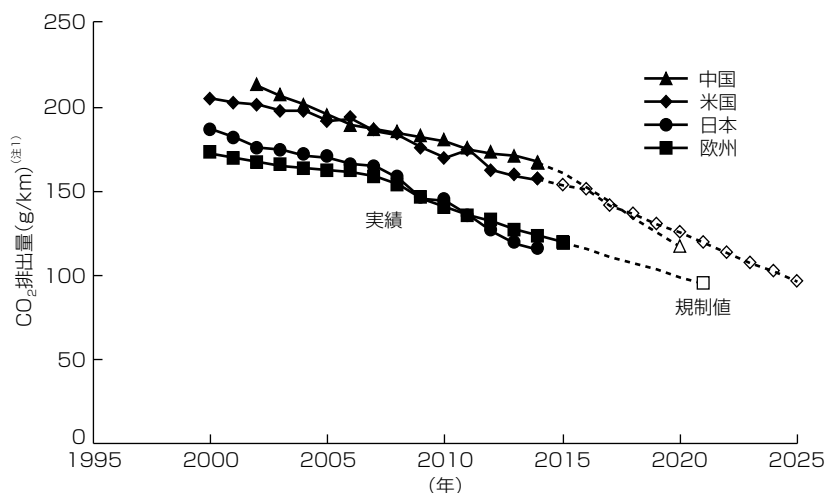
### 2.1 低 燃 費 化

自動車のパワートレインは電動化の方向にあるものの、依然としてガソリンやディーゼル車の低燃費化技術の進化も求められている。代表的なガソリンエンジンのモード燃費の分析ではエンジンの正味仕事量は30%に過ぎず、冷却や排気による熱損失が60%、エンジンやポンプの摩擦損失が10%あるとされている。このため、車両の軽量化やタイヤの転がり抵抗の低減の負荷低減に加えて、エンジンの希薄燃焼化、高圧縮化や可変圧縮比化による燃焼の改善、過給機との組合せによるエンジンの低排気量化(ダウンサイジング)が進められている。また、電動パワーステアリングの適用による補機損失の削減、変速機が多段化や無段化技術でエンジンの燃料消費率の向上が実現されている。最近ではアイドリングストップ機能の普及が顕著であり、2020年には半数以上の車に適用される見込みである。

### 2.2 電 動 化

自動車の電動化はモータだけで駆動するEVと、エンジンとモータを併用するHEVに大別される。EVは、バッテリーのコストやサイズに起因する航続距離の短さや充電時間の長さ、充電施設の普及の問題などがあり、急速な普及には至っていない。現在の主流であるリチウムイオンバッテリーは高エネルギー密度化が進展し、航続距離やコストの問題が緩和されていく傾向にある。さらに安全性が高く、高エネルギー密度化も期待される全固体電池の開発も進んでいる。EVとPHEVを併せた規模は2030年に2千万台/年まで増加すると予測されている(図2)<sup>(2)</sup>。

エンジンを主動力に使用し、発進時のトルクアシストと減速時の発電をモータで行う方式がMild-HEVである。この方式は、追加するモータ、制御装置、バッテリーが比較的小型であるため、大規模な機器レイアウトの変更がなく実現可能である。特に欧州の主要カーメーカーを中心に、



(注1) NEDC(New European Driving Cycle)モードへの換算値

図1. CO<sub>2</sub>排出量実績と規制の動向<sup>(1)</sup>

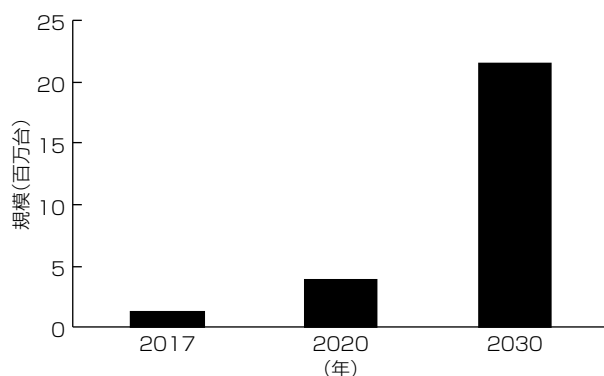


図2. 電動車両(EV・PHEV)の規模予測<sup>(2)</sup>

低電圧で安全対策コストが安い48Vのバッテリーを使用したMild-HEV方式の採用が拡大している。エンジンとモータをベルトで連結する形式やエンジンと変速機の間に薄型モータを挟み込んで直結する形式の採用が拡大している。

これに対して、エンジンが停止した状態で電動走行を可能にした方式がFull-HEVである。また、車外からバッテリー充電を可能にしたものがPHEVである。PHEVは電動走行が可能な近距離使用だけに限定すれば燃料を使わないため環境性能が高く、航続距離は燃料によるエンジン走行によって長いため、EVより先行して普及が進んでいる。Full-HEVやPHEVでは電動走行と発電を別々のモータで行うと、更なる低燃費が実現できる。この2モータによる電動化システムをコンパクトに実現するため、インバータや降圧コンバータ等のパワーエレクトロニクス機器を統合したパワーユニットも普及している。

また、エンジンの代わりに燃料電池を搭載したFCVは走行中に水しか排出しないため環境に優しいと言われている。燃料電池は、燃料の水素と外部から導入した酸素(空気)の化学反応で発電してモータを駆動し、生成される水だけが排出物となる。水素生成工程効率化と生成時のCO<sub>2</sub>排出量低減などの課題があるが、2015年には初の量産車が販売された。

住宅や工場が電力供給側からも制御でき、電力需要の平準化や再生可能エネルギーの導入促進を目指すスマートグリッドでは、EVやPHEVは充電タイミングを電力需要の小さい時間帯にずらし、逆に電力需要の大きい時間帯には車載バッテリーから電力を供給することで電力需要の平準化に貢献することが可能であり、実用化に向けた検討が進んでいる<sup>(3)</sup>。

### 3. 自動運転

#### 3.1 交通事故の状況と対策

環境問題に加えて、交通事故による死傷者の増加は車社会の発展に伴って生まれたもう一つの課題である。

世界保健機構(WHO)が2018年12月に発表した道路の安

全に関する報告書によると、2016年に交通事故で死亡した人は世界で135万人に達した。交通事故による死者の半数以上は、交通弱者の歩行者と自転車やバイクを運転する人が占めていた。

日本では、警察庁によると、2017年の交通死亡事故による死者数は3,694人であった。このうち、65歳以上の高齢者の占める割合は54.7%で、10年間の統計では高い水準で推移している。日本政府は、第10次交通安全基本計画(2016年3月)で、2020年までに24時間死者数を2,500人以下とし、世界一安全な道路交通を実現することを目標に掲げている。その実現に向けて、高齢者や若年者を含むドライバーへの交通教育などの人的対策、道路交通環境の整備などのインフラ対策、車自体の安全性向上などの車両対策に加えて、人・インフラ・車の連携による安全性向上策が必要である。

関係省庁は交通事故の死傷者低減に取り組んでいる。国土交通省は、1991年から先進安全自動車(ASV)に関する技術の開発・実用化・普及を促進している。また、国土交通省所管の独立行政法人自動車事故対策機構で1995年から自動車アセスメント(自動車の安全装置の性能評価とランク付け)が行われている。これは安全な車の指標として衝突安全性の評価結果を一般ユーザーに公表することで、自動車メーカーの開発を促進させることを意図したものである。

#### 3.2 車両の安全性向上

ADASは、車載の各種センサから周辺状況を認識し、ドライバーの運転を高度に支援するシステムで、様々な機能に対応するものが開発されている。

##### 3.2.1 運転支援システム

AEB(Autonomous Emergency Braking)は、衝突を防止したり被害を軽減する自動ブレーキで、多くの量産車で採用されている。車両以外に、歩行者や自転車などを対象とするものも実用化されている。対歩行者では、夜間でも歩行者を検知する機能や、AI(Artificial Intelligence)の利用によって歩行者の行動を予測する機能に対応するシステムも実用化が進められている。

政府は、高齢ドライバーの事故防止対策の一環として、指定したADASを搭載した車を安全運転サポート車として認定しており、AEBをADAS要件に組み込んでいる。その他のADAS要件には、ペダル踏み間違い時加速抑制装置、車線逸脱警報、先進ライトが指定されている。

操舵(そうだ)に係るADAS機能も高度化してきている。従来の車線逸脱警報機能は、システムが操舵を制御して車線逸脱を防止する機能に発展している。また、緊急時にAEBと自動操舵を組み合わせる衝突回避の確率を高めるシステムも実用化されている。自動操舵機能は、このような緊急的に用いるシステム以外に、車線維持支援や車線変更支援などの実用化も進められている。

日本や欧州の自動車アセスメント(NCAP)では、AEB関連がADAS分野に共通して組み込まれた評価項目となっている。評価対象のAEBは、技術の進展に合わせて高度な機能に置き換わっていく。NCAPの評価項目は地域による違いがあり、AEB以外のADAS評価項目では車線逸脱警報、車線維持支援などが含まれる。

### 3.2.2 駐車支援システム

利便性を主目的とする駐車支援システムは、ドライバーによる駐車操作を支援するシステムから自動で駐車するシステムに進化しつつある。自動化された駐車支援技術では、車外からの遠隔操作による自動駐車や学習型の自動駐車が実用化段階である。

遠隔操作による自動駐車は、ドライバーが駐車スペースに入る直前位置で降車してから、スマートフォンのアプリケーションなどを操作することによって駐車させる機能である。システムは、ソナー等の周辺監視用センサで障害物や歩行者を検知しながら駐車させる。

学習型の自動駐車は、所定位置の駐車スペースへの駐車を自動化する方式である。その用途は、利用頻度の高い自宅ガレージや職場などの駐車場で駐車である。ドライバーの実演による運転手順をシステムに記憶させた後に、ドライバーがスマートフォンなどから自動駐車アプリケーションを起動する。遠隔操作による自動駐車よりも長距離の駐車操作に対応でき、駐車経路等を記憶させるための容量次第で自動駐車距離を長くしたり、登録する駐車地点数を増やしたりできる。

### 3.3 人・インフラ・車の連携

前述したような車両単独での安全システムでは限界があることから、人(歩行者)・インフラ・車の連携による安全システムの開発・適用が進んでいる。

V2X(Vehicle-to-everything)は、車と、人・インフラ・車が通信する技術である。V2Xは、様々な用途が検討されており、車載センサで検知されない道路上の注意情報等を周囲の車やインフラ等から通知することによって、走行時の安全性を高めることができる。V2Xの通信方式は、ITS(Intelligent Transport Systems)用帯域を利用するDSRC(Dedicated Short Range Communication)とセルラ系のC-V2Xがある。C-V2Xは、セルラ網を経由する通信と直接通信モードが規定されている。後者は、5.9GHz帯のITS用帯域を用いて機器間で直接通信するので低遅延であり、DSRCと同様に車車間通信などで緊急性のある情報の送信にも利用できる。今後、DSRCとC-V2XのどちらがV2Xで展開されるかは、世界の地域ごとに状況が異なっている。

自動バレーパーキングは、車と駐車場インフラの連携による自動駐車システムである。駐車場入口でドライバーが降車してから車が駐車スペースまで自動走行する。自動バ

レーパーキングに必要な機能は、車やインフラに持たせる必要がある。日本では、経済産業省が一般社団法人日本自動車研究所に委託した自動バレーパーキングシステムの実証事業で、車とインフラに機能を分担させる協調型システムとして2018年に実証実験が行われた。これに対し、ドイツでは、インフラ側への機能配分を大きくしたシステムの実験が行われている。ISOでは、自動バレーパーキングシステムの国際標準化に向けた検討が進められている<sup>(4)</sup>。

### 3.4 自動運転に向けて

現在、自動車事故の大半が人の過失に起因するものであるため、車の自動運転が将来的な安全対策として期待されている。日本政府は、自動運転の実用化推進に取り組んでいる。国土交通省による2016～2020年度の第6期ASV(Advanced Safety Vehicle)推進計画では、“自動運転の実現に向けたASVの推進”がテーマとなっている<sup>(5)</sup>。また、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)自動走行システムは、2014年からの活動で自動運転の実用化に向けた技術開発と実証実験を行った。これに続く第2期の活動では、物流や移動に係る新たなサービスやビジネスの創出などに取り組んでいる<sup>(6)</sup>。

自動運転を含むITSについて、関連省庁や民間企業等は、“官民ITS構想・ロードマップ”によって今後の方向性等を共有している<sup>(7)</sup>。2018年版のロードマップでは、高速道路でのレベル3と限定地域でのレベル4の無人運転移動サービス実現が2020年頃となっている(表1)。

レベル3では、システムが運転タスクを継続できない場合、ドライバーに引き継ぐため、ドライバーが運転を引き継げる状況にあるかを常に確認するためのドライバーモニタリング機能が必須となる。また、引き継ぎのプロセスでは、ドライバー側に必要な行動(操作)が適切なタイミングで分かりやすく提示されることが必要である。

表1. 自動運転レベルの定義の概要<sup>(7)</sup>

レベル	概要	安全運転に係る監視、対応主体
運転者が一部又は全ての動的運転タスクを実行		
レベル0 運転自動化なし	・運転者が全ての動的運転タスクを実行	運転者
レベル1 運転支援	・システムが縦方向又は横方向のいずれかの車両運動制御のサブタスクを限定領域において実行	運転者
レベル2 部分運転自動化	・システムが縦方向及び横方向両方の車両運動制御のサブタスクを限定領域において実行	運転者
自動運転システムが(作動時は)全ての動的運転タスクを実行		
レベル3 条件付運転自動化	・システムが全ての動的運転タスクを限定領域において実行 ・作動継続が困難な場合は、システムの介入要求等に適切に応答	システム (作動継続が困難な場合は運転者)
レベル4 高度運転自動化	・システムが全ての動的運転タスク及び作動継続が困難な場合への応答を限定領域において実行	システム
レベル5 完全運転自動化	・システムが全ての動的運転タスク及び作動継続が困難な場合への応答を無制限に(すなわち、限定領域内ではない)実行	システム

レベル4については、ロボットタクシーや自動運転バス等の事業によって実用化が始まる。国内外で、事業者が限定地域でのサービスを開始する見込みである。ドライバーが搭乗しない遠隔監視・操作に対応する自動運転システムも含まれる。

自動運転では、車線上の場所までの精度で自車位置を把握する必要があるが、車載カメラやセンサ類で対応できない場合もある。このため、衛星測位の活用が期待されている。従来のGNSS(全地球航法衛星システム)では車線を判定できる精度が得られないが、測位補強情報を用いることで高精度化が可能になる。日本では高精度測位端末(ロケータ)を搭載して準天頂衛星システム(QZSS)のセンチメートル級測位補強サービスを利用することができる。海外でも高精度測位補強サービスが提供される見込みである<sup>(8)</sup>。

自動運転では、高精細な道路地図も必要である。将来は、静的な情報とともに准静的、准動的、動的な情報も組み込んだダイナミックマップが整備されていく見通しである<sup>(9)</sup>。

#### 4. コネクテッド

無線通信で車外通信ネットワークとつながるコネクテッド技術は、従来のインフォテイメントシステムへの情報提供に加えて、車両から収集したビッグデータを活用するこ

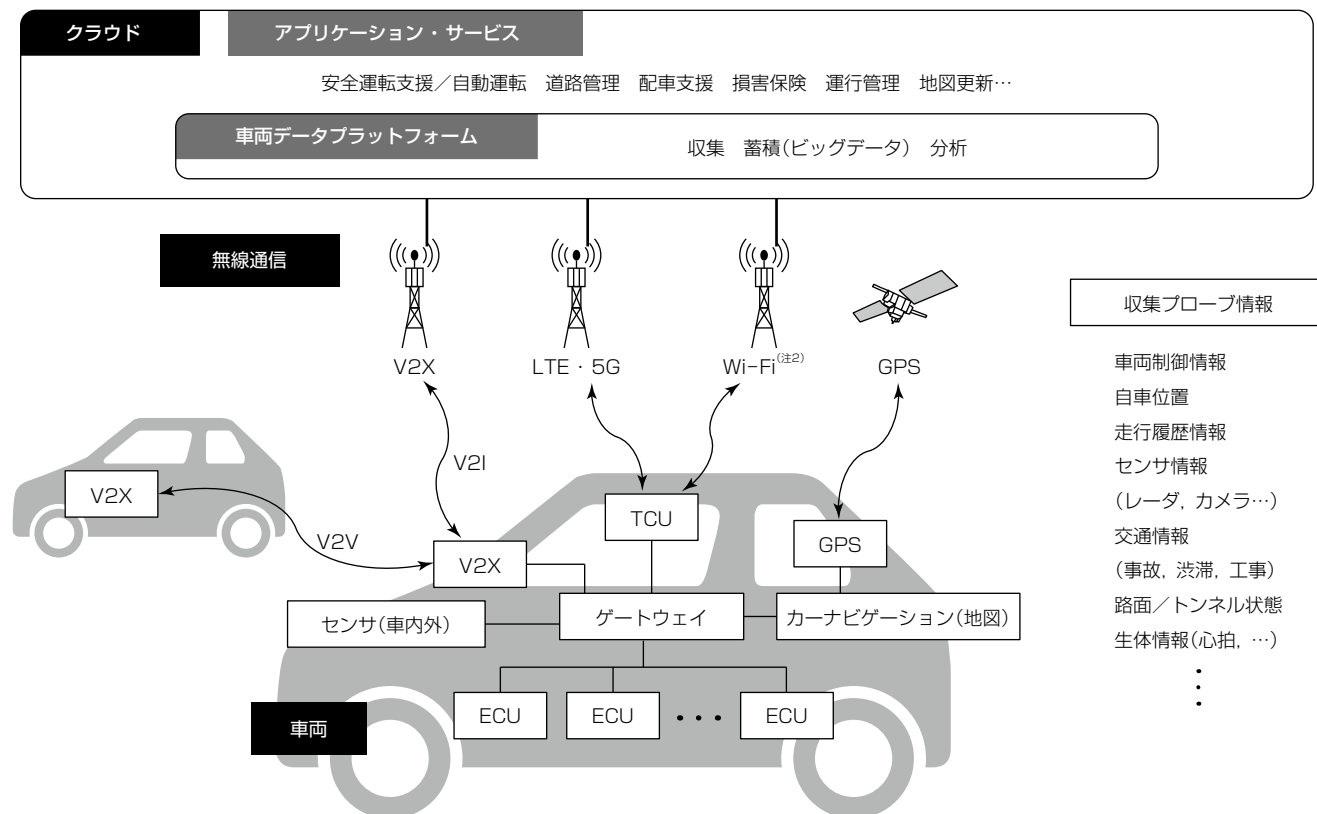
とでユーザーへの新たな価値提供を可能にする。情報通信技術利用の拡大によって、サービスは多様化し、新たな分野での市場創出が期待されている。

##### 4.1 情報通信技術利用の拡大

従来のVICS(Vehicle Information and Communication System)では、渋滞や規制などの交通情報をインフラ側から車両側へ一方向に提供し、運転の快適性の向上を実現してきた。DSRCやETC2.0, LTE, 5G(第5世代移動体通信)などの無線通信でつながるコネクテッドカーでは、インフラと車両との間で双方向かつリアルタイムにつながることによって、車両が保有する車両制御情報や車載センサのセンシング情報などの車両プローブ情報を収集可能になる。収集した情報はクラウドサーバへ集約し、他車両からの収集情報と合わせてビッグデータとして解析することで、様々なサービスへ利用可能になる(図3)。

ビッグデータを用いたサービスは、地図情報生成・更新サービス、路面センシングによる道路保守サービス、タクシーや商用車の配車サービス、業務車両管理サービス、損害保険サービスなど様々な分野への適用が検討されている。

また、公共交通機関などを利用したモビリティサービスを統合化し、エンドユーザーがシームレスに移動可能になるMaaSなどの新たな市場創出をもたらすと予想される。



TCU : Telematics Communication Unit, LTE : Long Term Evolution, GPS : Global Positioning System, V2V : Vehicle to Vehicle, V2I : Vehicle to Infrastructure, ECU : Electronic Control Unit

(注2) Wi-Fiは、Wi-Fi Allianceの登録商標である。

図3. コネクテッドカー



## 4.2 コネクテッドカーのHMI

コネクテッド技術の適用によって、車載情報サービスは高機能化・高度化し、ドライバーや乗員に提供する情報は複雑化していく。よって、より直感的で運転の邪魔にならない、ドライバーの意図を理解したHMI(Human Machine Interface)が求められる。

近年搭載が始まったドライバーモニタリングシステムは、ドライバーの覚醒状態や顔向き、視線といった情報から、運転時のドライバーの状態を検出し、脇見・居眠り運転防止支援を行っている。さらに、モニタリングを脈波などの生体情報や乗員の発話情報に拡張し、感情を分析することによって、ドライバーや乗員の感情に適応した最適なHMIへの発展が期待される。

## 4.3 サイバーセキュリティ

コネクテッドカーはサイバー攻撃の対象になり得るため、攻撃を防御するセキュリティ対策技術を準備する必要がある。同時に、開発・製造だけでなく、出荷後に発生する脆弱(ぜいじゃく)性への対応を含めた運用・廃棄に至る自動車機器のライフサイクル全体にわたるプロセスと体制の整備が必須になっており、国際標準化が進められている。

## 5. む す び

電動化、自動運転、コネクテッドの三つの視点から自動車機器の技術動向を述べ、大きく変化する自動車を取り巻く状況を確認した。当社は、総合電機メーカーとしてモビリティの先進技術を結集し、“グローバル環境先進企業”として“持続可能性”と“安心・安全・快適性”が両立する豊かな社会の実現に貢献していく。

## 参 考 文 献

- (1) Yang, Z., et al.: 2017 Global Update : Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas and Fuel Economy Standards, International Council on Clean Transportation (2017)
- (2) Global EV Outlook 2018, International Energy Agency (2018)
- (3) 鈴木浪平：スマートコミュニティの取組み，三菱電機技報，**88**，No.9，606～611 (2014)
- (4) 谷川 浩，ほか：特別講演“自動運転・自動パーキングの開発動向について”，日本自動式駐車場工業会会報誌，No.71，9～12 (2018)
- (5) 国土交通省：クルマの高度化による更なる交通事故の削減を目指して～自動運転の実現に向けたASVの推進～ (2017)
- (6) 内閣府：戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) 自動運転(システムとサービスの拡張)研究開発計画 (2018)
- (7) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議：官民ITS構想・ロードマップ2018 (2018)
- (8) 廣川 類，ほか：準天頂衛星システムのセンチメートル級測位補強サービスが拓く高精度測位社会，三菱電機技報，**92**，No.2，105～108 (2018)
- (9) 小山 浩，ほか：自動走行におけるダイナミックマップ整備，システム／制御／情報，**60**，No.11，463～468 (2016)

# 予防安全・自動運転の開発と 実証実験の取組み

角谷文章\*  
一杉和夫\*  
明石陽平\*

Development and Experiment of ADAS and Autonomous Driving System

Fumiaki Kadoya, Kazuo Hitosugi, Yohei Akashi

## 要 旨

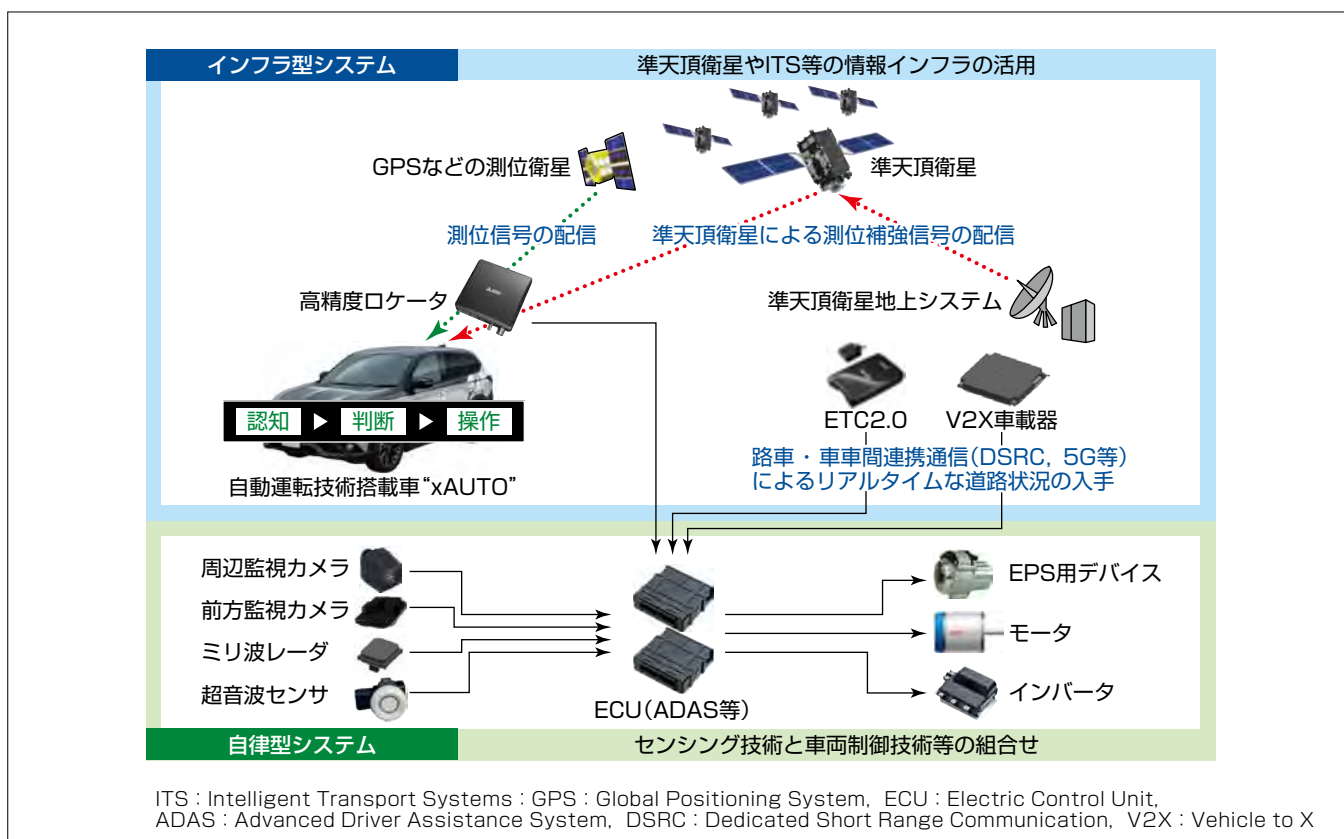
グローバルで官民一体となって実用化を目指している自動運転に関して、日本では2025年に自動化レベル4の実現を目指す指針が政府から示された。この背景の下三菱電機では、予防安全事業を発展させたレーダやカメラを用いた自律型の自動運転技術に加えて、準天頂衛星システム及びITS(高度道路交通システム)を用いたインフラ型の自動運転技術の両面から自動運転の取組みを推進している。

インフラ型自動運転では、準天頂衛星からセンチメートル級の位置情報を受信し、高精度地図と組み合わせることで高精度に自車位置を把握することで自動運転を実現する。トンネルなどの衛星の電波が受信困難な状況では自律型デバイスからの情報や、車両運動系センサから得られる車両状態量から自車位置を推定する複合航法技術を用いることで自車

位置を把握し自動運転の継続を図る。また、路車・車車間通信を用いてダイナミックマップと呼ばれる位置と紐(ひも)付けされたリアルタイムな交通情報を受信し、先読み情報を使った高度な自動運転を実現している。

この自動運転システムを実証実験車“xAUTO(エックスオート)”に搭載して、公道で実証走行をすることで、様々な道路環境でも自動運転が実用可能なことを確認してきた。さらに、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の大規模実証実験に参加し、ダイナミックマップを活用した自動運転高度化の取組みを進めている。

今後は高度な自動運転システムの実現と実車を用いた実証実験によってシステムのロバスト性と完成度を高め、安全で快適な交通社会の実現のために貢献していく。



## インフラ型及び自律型自動運転システム構成

インフラ型システムは準天頂衛星やITS等の情報インフラと高精度ロケータを組み合わせた自動運転システムであり、自律型システムはレーダやカメラ、超音波センサによるセンシング技術と車両制御技術等を組み合わせた自動運転システムである。

インフラ型と自律型両面の自動運転技術を搭載した“xAUTO”による実証実験を通じて自動運転システムのロバスト性や完成度を高めている。

## 1. ま え が き

近年の自動車産業では“CASE”と呼ばれるキーワードが使われている。“CASE”は、今後の自動車産業の成長に欠かせない技術領域の頭文字がつけられている。その中の“A”はAutonomous：自動運転を指している(残りは、Connected：コネクテッド, Shared & Services：シェアリングとサービス, Electric：電動化を指している)。自動運転技術は、高度化や実用化が進んでいくことが見込まれている。

当社では、独自技術として強みのある高精度衛星測位システムや高精度三次元地図等を活用した“インフラ型”自動運転システム、車載センサ(カメラ、レーダ、ソナー等)を活用した“自律型”自動運転システムを協調させた自動運転システムの開発に取り組んでおり、あらゆる環境で高い安全性と快適性を両立させる自動運転システムの実現を目指している。さらに、自動運転実証実験車xAUTOを開発し、公道での自動運転実証実験を行っている。

本稿では、“インフラ型”と“自律型”を協調させた高度自動運転システムの開発について述べる。

## 2. 自動運転レベル

自動車の自動運転には、ドライバーの関与度合いや自動運転システムが行う機能によって様々な概念が存在する。内閣府主導の戦略的イノベーション創造プログラム(cross-ministerial Strategic Innovation promotion Program：SIP)の自動走行システム研究開発計画<sup>(1)</sup>では、自動運転レベルの定義として、米国SAE(Society of Automotive Engineers)のJ3016(2016年9月)が採用されている。自動運転レベル定義の概要を表1に示す。また、SIPの自動運転研究開発計画では、2020年を目途にSAEレベル3、2025年を目途にSAEレベル4の市場化を目指すとなっている。

## 3. 準天頂衛星システムの活用

インフラ型自動運転システムは、準天頂衛星システムのセンチメートル級測位補強サービス(Centimeter Level Augmentation Service：CLAS)<sup>(2)</sup>を活用する。準天頂衛星システムは、2018年度から正式運用が開始された衛星システムであり、米国のGPSと互換性を持つ測位信号を送信する補完機能と測位精度を向上させる補強信号を日本国内に配信する補強機能を併せ持っている。従来の衛星測位は、GPSなどの全地球航法衛星システム(GNSS)からの

表1. 自動運転レベルの定義概要<sup>(1)</sup>

レベル	概要	安全運転に係る監視、対応主体
運転者が全て又は一部の運転タスクを実施		
SAEレベル0 運転自動化なし	・運転者が全ての運転タスクを実施	運転者
SAEレベル1 運転支援	・システムが前後・左右のいずれかの車両制御に係る運転タスクのサブタスクを実施	運転者
SAEレベル2 部分運転自動化	・システムが前後・左右の両方の車両制御に係る運転タスクのサブタスクを実施	運転者
自動運転システムが全ての運転タスクを実施		
SAEレベル3 条件付運転自動化	・システムが全ての運転タスクを実施(限定領域内 <sup>(注2)</sup> ) ・作動継続が困難な場合の運転者は、システムの介入要求等に対して、適切に応答することが期待される	システム (作動継続が困難な場合は運転者)
SAEレベル4 高度運転自動化	・システムが全ての運転タスクを実施(限定領域内 <sup>(注2)</sup> ) ・作動継続が困難な場合、利用者が応答することは期待されない	システム
SAEレベル5 完全運転自動化	・システムが全ての運転タスクを実施(限定領域内 <sup>(注2)</sup> ではない) ・作動継続が困難な場合、利用者が応答することは期待されない	システム

(注2) ここでの“領域”は、必ずしも地理的な領域に限らず環境、交通状況、速度、時間的な条件などを含む。

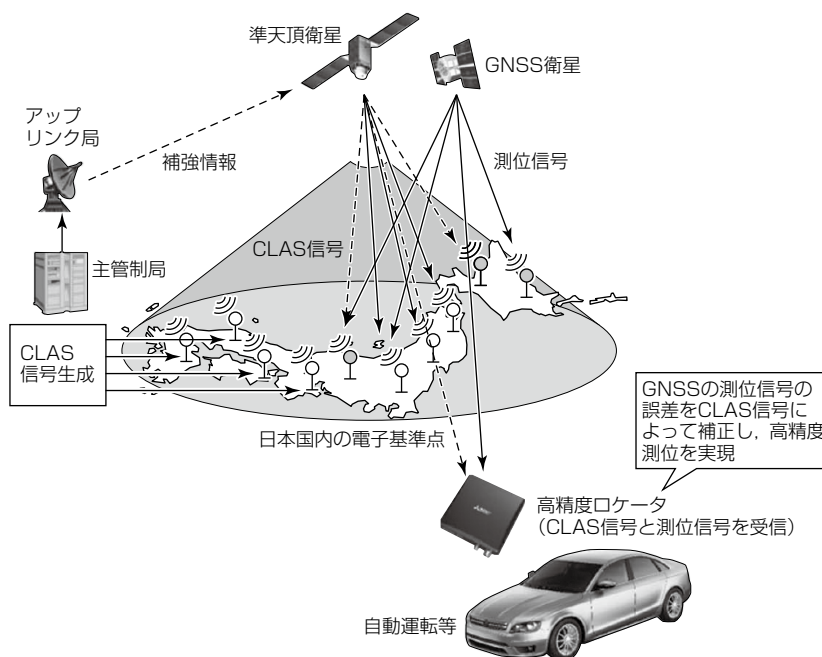


図1. センチメートル級測位補強サービス

測位信号を利用したものであり、衛星が持つ誤差(衛星軌道・衛星クロック・衛星信号バイアス誤差)と測位する地域による誤差(電離層・対流圏遅延誤差)を含んでおり測位精度は数m程度である。CLASは、国土地理院が設置している電子基準点網を活用して衛星や地域ごとの誤差を補正する測位補強信号を生成し、準天頂衛星経由で配信することでセンチメートル級の測位精度を提供する(図1)。

## 4. インフラ型自動運転システム

自動車の位置推定にGNSSを活用する場合、高い絶対位置精度が期待できる一方で、道路上の遮蔽物の影響等によ

る信号の途切れや衛星信号の出力遅延などの影響を考慮する必要がある。当社では、慣性センサから得られる車両状態量を用いることで衛星測位信号を補うGNSS/INS(自律航法システム)複合航法の開発に取り組んでいる(図2)。慣性センサは、センサ出力のアベイラビリティ(必ず出力が得られる)や連続性、小さい出力遅延という点で優れている一方、位置誤差が時間とともに拡大することに注意する必要がある。

さらに、ダイナミックマップと呼ばれる高精度三次元地図と高精度衛星測位システムを組み合わせることで、高速道路で車線内での自車の位置まで特定できる。高精度な自車位置の特定と、周辺道路や周辺車両から提供される情報とを合わせることで、高速道路で目的地(目的の高速出口)への車線レベルでのルート設定や車線内の高精度な位置制御車線変更、合流・分流シーンでの自動運転走行への活用が期待できる。

## 5. 自律型自動運転システム

自動車の運転は、一般的に“認知”“判断”“操作”の機能に分類される。人による運転であれば、前方の道路環境や信号、歩行者等を知覚情報として得て、脳で判断し、手や足で自動車の装置を操作するという行動になる。先に述べた衛星測位システムの活用は、“認知”の機能として自動運転

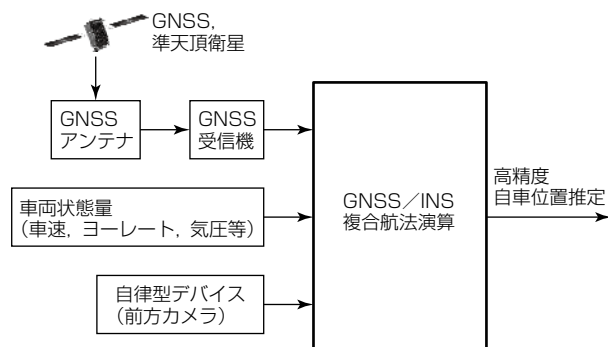


図2. GNSS/INS複合航法

に用いられる。当社では、自律型デバイスとして、ミリ波レーダ(物体識別機能)、前方監視カメラ・周辺監視カメラ、超音波センサ、ドライバーモニタなどの技術開発にも取り組んでいる。これら自律型デバイスの情報とEPS制御技術や先進運転支援システム制御ユニット(ADAS-ECU)を組み合わせることで自動運転技術につながる高度な運転支援システムを実現している。例えば、前方の歩行者との衝突を避けるための緊急自動ブレーキ、車線維持制御装置、車間距離維持装置、さらには自動駐車システムなどがある。

自動運転実証実験車xAUTOにはこれらの自動運転技術に加えて、乗員へ情報を通知するHMI(Human Machine Interface)装置も備えており、各種自動運転技術の状態を確認できる。

## 6. 車両制御システム

自動運転実証実験車xAUTOの車両制御システムは、“センサ部”“ロケータ部”“ADAS-ECU部”の三つに分かれる。センサ部は、準天頂衛星受信アンテナや慣性センサ、前方監視カメラやミリ波レーダ等の自律型デバイスを指す。ロケータ部は、衛星による高精度測位結果や車両状態量、道路白線等の道路情報と内部に備える高精度三次元地図を組み合わせることで、地図上の自車位置を高精度に演算し、自車位置情報や目標走行ルート及び道路の速度制限などの周辺道路情報を出力する。ADAS-ECU部は、ロケータ部から受け取った情報と車両状態量及び自律型デバイスの情報から各種運転支援システムのための制御操作量(ステアリング制御量、アクセル制御量、ブレーキ制御量等)を演算し、車両の各種アクチュエータに指令を出す(図3)。

先に述べた自動運転レベルのSAEレベル3以上の自動運転技術では、安全運転のための監視や対応の主体はシステム側におくと定義されており、ADAS-ECU部が安全運転の監視を担う。xAUTOは、インフラ協調型自動運転システムと自律型自動運転システムを搭載し、走行する環境に応じて最適なシステムを選択して自動運転走行を行う。

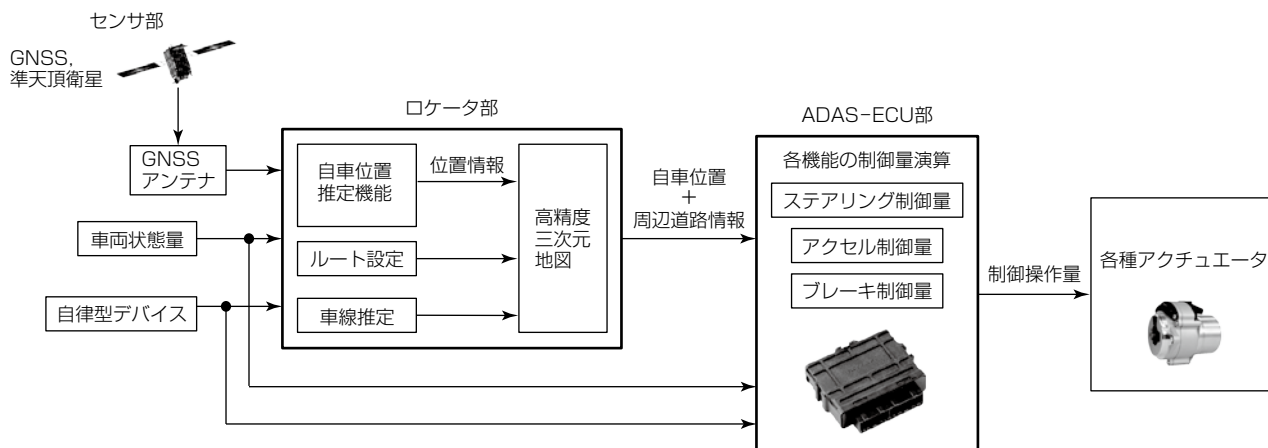


図3. xAUTOの車両制御システム



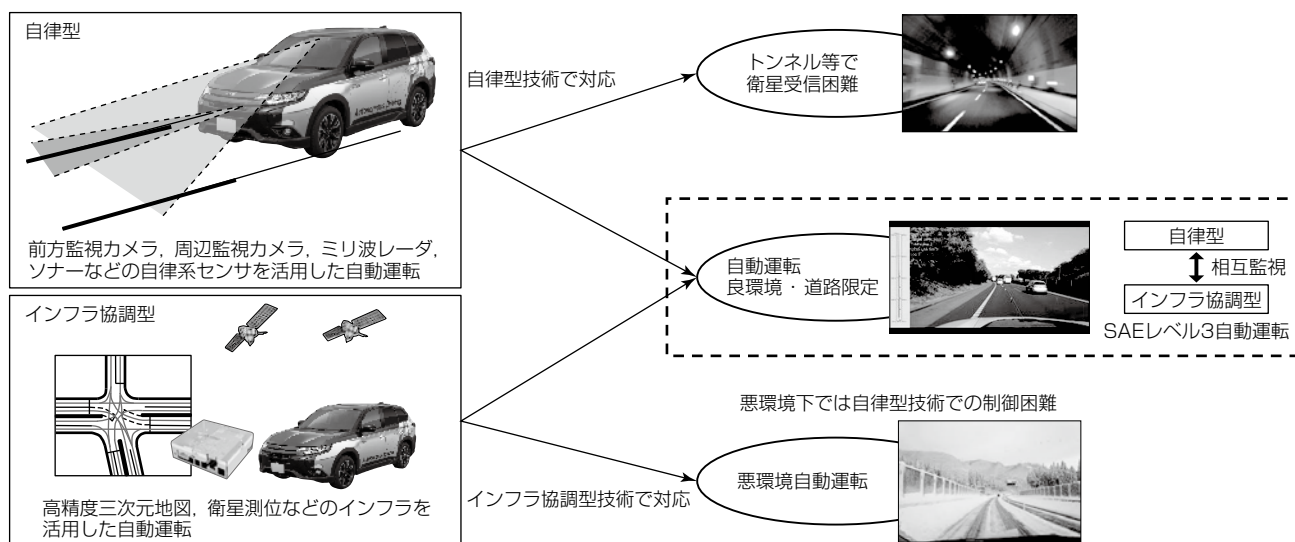


図4. xAUTOの自動運転システム

例えば、良環境では自律型とインフラ型の相互監視による自動運転走行を行う。道路白線が老朽のため薄くなっている場合や積雪のために白線を認識できないような悪環境では、衛星を活用したインフラ型をメインとした自動運転システムによる自動運転走行を行う。また、トンネル走行時は、衛星からの信号を受信できなくなるため、前方監視カメラ等の自律型デバイスによる自律型自動運転システムをメインとした自動運転走行を行う(図4)。

## 7. 公道実証実験の状況

xAUTOは2017年9月に、試験運用中の準天頂衛星からのCLAS信号を用いた公道実証実験を世界で初めて実施した。また、SIPの大規模実証実験への参画によるダイナミックマップを利用した自動運転や、積雪や吹雪のある視認性の悪い条件下での自動運転を実施し、公道試験を通じてxAUTOの自動運転システムの成立性やロバスト性を確認している。公道実証実験の様子を図5、図6に示す。

## 8. む す び

“インフラ型”と“自律型”の自動運転技術を組み合わせた自動運転システムの開発について述べた。インフラ型の自動運転システムには当社が強みを持つ準天頂衛星によるCLAS信号を利用している。自律型の自動運転システムには当社が取り組む高度な認知センサ技術を用いている。自動運転実証実験車xAUTOを開発し、公道実証実験で安全性と快適性の両立を確認している。今後は、さらに信頼性を高めて市街地までの高度なSAEレベル2、高速道でのSAEレベル3やエリア限定のSAEレベル4の自動運転システムの実用化に向けて開発を進め、安全で快適な交通社会の実現に貢献していく。



図5. CLAS信号及びダイナミックマップを利用した自動運転の様子



図6. 視認性の悪い条件下での自動運転の様子

## 参 考 文 献

- (1) 内閣府：戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)自動走行システム研究開発計画(2018)  
[https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/6\\_jidousoukou.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/6_jidousoukou.pdf)
- (2) 廣川 類, ほか：準天頂衛星システムセンチメートル級測位補強サービス, 三菱電機技報, 91, No.2, 101~104 (2017)

# 自動運転に向けた 経路生成・車両統合制御技術

鵜生知輝\*  
篠本 凜\*  
吉桑義雄\*\*

Path Planning and Vehicle Integrated Control Technologies for Autonomous Driving System

Tomoki Uno, Rin Shinomoto, Yoshio Yoshikuwa

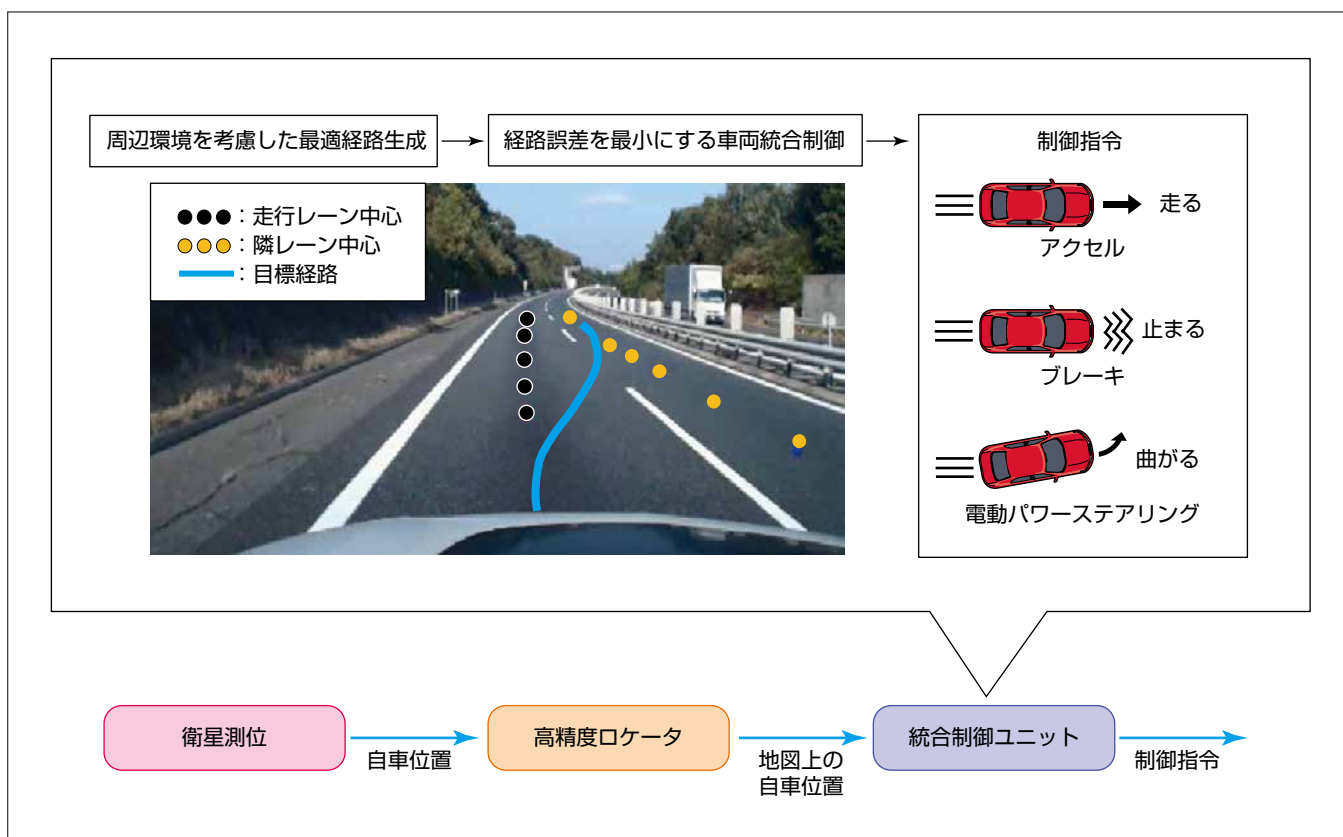
## 要 旨

自動運転の技術は多くのメーカーや研究機関で開発が進められており、公道での実証試験も実施されている。また、高速道路の本線走行時などでは、前方車両を監視しながら車線内を走行することで、自動走行がほぼできるレベルにある。しかしながら、自動運転を世の中に浸透させていくためには、周辺車両や歩行者の存在を考慮して、適切に行動する自動運転の技術開発が必要である。そのためには、高度な認知技術とともに、周辺環境に応じた行動判断技術、及び安全で快適な車両操作技術が必要と考えられる。

そこで三菱電機では、複雑な環境に適応でき滑らかな車両挙動を実現する経路生成技術、車両の運動能力を最大限に発揮できる安全で安心感のある車両統合制御技術の開発

を進めている。具体的には、ロボットのための経路生成技術として開発が進められてきたサンプリングベース計画法に、車両のシステムモデルを組み合わせた独自の経路生成手法を開発している。また、非線形な車両運動特性を考慮して、車両の縦方向と横方向の運動を統合的に制御し、様々な制約条件の下で快適な車両運動を実現するモデル予測制御の開発に取り組んでいる。

衛星測位を活用した自動運転システムに、これらの経路生成技術、車両統合制御技術を適用した実車走行試験を行い、自車両周辺に障害物がある場合でも適切な経路が生成でき、安全な車両制御が実現できる結果を得た。



## 自動運転を実現する技術

自動運転システムでは、衛星測位を用いて高精度に自車位置を把握し、高精度ロケータによって地図上での自車及び周辺物体の位置を把握して、統合制御ユニットで経路生成及び車両制御を行う。周辺環境と車両運動特性を考慮した最適経路生成が求められ、車両の運動性能を最大限に発揮する統合制御によって、安全で安心感のある車両制御を行う。

# 1. ま え が き

自動車の自動運転技術は、交通事故の削減、環境改善への貢献、及び高齢者の社会参画につながるという期待等から注目を集め、開発が進められている<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>。自動運転システムによる運転可能領域を拡大するには、様々な周辺環境を正しく認識するとともに、その環境下で安全性と快適性を実現する判断・操作技術が重要と考えられる。例えば、複数車線の道路を走行中に他車両や障害物などの周辺環境を認知し、自車の行動計画をたて、搭乗者にとって安心感のある車両制御を実現することが望まれる。

本稿では、現在自動運転システムに向けて開発を行っているなかから、複雑な環境にも対応できる経路生成技術と、車両統合制御技術について述べ、これらを用いた実車試験結果を示す。

# 2. 経路生成技術

## 2.1 自動運転のための経路生成技術

従来の経路生成技術として、Dijkstra<sup>(5)</sup>やHart等<sup>(6)</sup>のグラフサーチ計画法や、RRT(Rapidly-Exploring Random Tree)<sup>(7)</sup>を代表とするサンプリングベース計画法等がある。これらは複雑な環境での高速な経路探索が可能であるが、移動ロボットのための経路生成技術として開発されたものであり、車両の動作特性が考慮されていない。したがってこれらの手法によって生成された経路に追従する際、車両挙動が滑らかでなくなり、快適性という観点で課題が生じる。このため、曲線の利用や運動モデルとの組合せによる経路生成技術が多く提案されてきた。

当社では、複雑な環境への適応と、滑らかな車両挙動の実現を両立させる経路生成技術の開発を目的として、パーティクルフィルタ(Particle Filter: PF)を用いたサンプリングベースの経路生成手法であるPF-RRTを開発している<sup>(8)(9)</sup>。サンプリングベースの計画法であるため、複雑な環境での経路生成が可能であり、またパーティクルフィルタで車両のシステムモデルを用いることによって、車両運動の特性を考慮した経路生成を可能にしている。

## 2.2 パーティクルフィルタによる経路生成手法

パーティクルフィルタとは、条件付確率分布をパーティクル(粒子)と呼ばれるデータ群によって近似的に表現する状態推定器である。通常、状態推定器は推定対象に取り付けたセンサから得られる観測値に基づき、観測できない状態量を推定するために用いられる。この開発では推定対象として理想的な状態にある車両を仮定し、そこから得られる観測値である理想観測値を用いる。理想的な状態とは経路生成での目標に当たり、例えば目標車線の中央に位置することや、目標車速を保持すること、周辺の障害物から安全な距離を確保すること等が挙げられる。理想観測値を用

いて状態推定を行うことで、現在の状態から理想状態へ近づくための状態変化を算出することが可能になる。

パーティクルフィルタによる経路生成の流れを図1に模式的に示す。まず全パーティクルに対し、システムモデルを用いて状態予測を行う。このときシステムモデルへの入力に乱数を用いることで、パーティクルの状態にばらつきが生じる。各パーティクルの状態から得られる観測値と理想観測値との差から、それぞれのパーティクルの重みを計算し、重みに応じてリサンプリング(パーティクルの増減)を行う。状態予測、重み計算、リサンプリングを繰り返すことによって、各時刻での状態の確率分布がパーティクルによって近似的に得られ、パーティクルの状態量の平均値を取ることで、現在の状態から理想状態へ近づくための経路が得られる。

## 2.3 パーティクルフィルタ-サンプリングベース経路生成

パーティクルフィルタによる経路生成に加えて、複雑な環境での経路生成にも対応できるように、サンプリングベース計画法のInput-based RRTと組み合わせた経路生成方法を考案した。RRTは、ツリー構造を取るデータ群を乱数を用いて拡大し、その中から経路を探索する手法である。またInput-based RRTは、ツリーを拡大する際、ランダムにノード(節点)を選び、そこからシステムモデルに基づいて枝を伸ばすものである。ツリーのノードは、システムモデルによって表される動作特性に基づいてつながっているため、Input-based RRTでは車両の動作特性を考慮しながら経路を探索することが可能になる。

開発した経路生成の流れを図2に沿って述べる。①位置や車速を含むデータ群をツリー構造で保持する。②ランダムに選択したノードを初期位置とし、先に述べたようにパーティクルフィルタを用いて経路を生成して、生成した経路を新たな枝としてツリーへ追加する。③手順②を繰り返すことでツリーを拡大する。④ツリーの中から到達コストが最小となる経路を選択し、制御器へ出力する。

このようにランダム性を持ってツリーを拡大することで、複雑な環境でも経路の探索が可能になる。

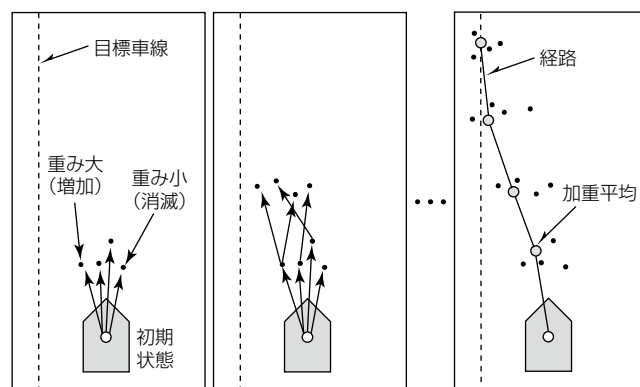


図1. パーティクルフィルタによる経路生成の流れ



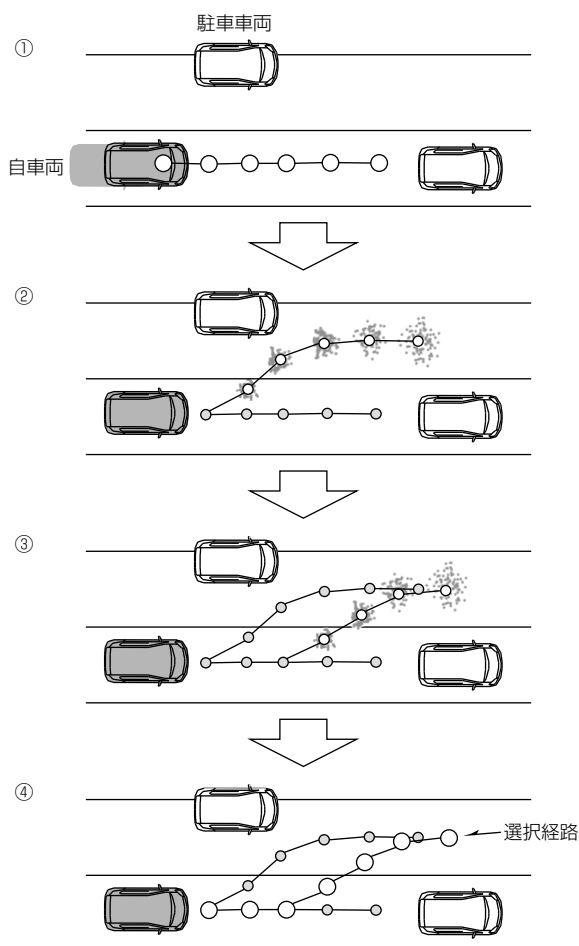


図2. パーティクルフィルタ・サンプリングベース経路生成の流れ

### 3. 車両統合制御技術

#### 3.1 自動運転のための車両制御技術

近年、計算機的能力向上もあり、非線形モデル予測制御 (Nonlinear Model Predictive Control : NMPC) を用いた制御手法が注目されている。図3に非線形モデル予測制御を示す。NMPCはサンプリング周期ごとに将来の一定期間の最適化問題を解き、得られた解の初期値を制御入力として適用する制御手法であり、計算負荷が高いという課題があるものの、多変数制御問題を扱えることや制約を陽に考慮できること、非線形モデルを扱えるという利点がある。そこで当社では、生成した経路に高精度に追従し、かつ乗り心地よい車両挙動を実現することを目的とし、NMPCを用いて車両の縦方向と横方向の運動を統合して制御するコントローラの開発を行っている<sup>(10)</sup>。NMPCを用いることで、経路追従性だけでなく、加速度やジャークといった乗り心地やその上限値を考慮して制御できる。

#### 3.2 非線形モデル予測制御の定式化

NMPCでは、車両の現在の状態 $\hat{x}_0$ から将来の一定期間までの車両の状態を予測する運動モデル、生成された経路に乗り心地よく追従するように設計された評価関数、状態量や制御入力の上下限を設定する制約を設定する必要がある。

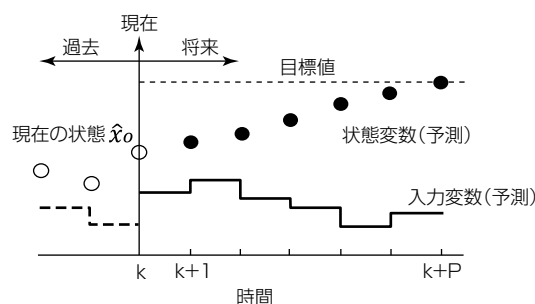


図3. 非線形モデル予測制御

本稿では、車両運動モデルは一般的に用いられる二輪モデル<sup>(11)</sup>と非線形タイヤモデルであるPacejka formula<sup>(12)</sup>を組み合わせ用いた。モデルの状態変数は自車の縦・横位置、方位角、縦・横速度、ヨーレート、舵(だ)角、前・後輪横滑り角、前・後車輪速であり、入力変数は、舵角速度と前・後輪制駆動トルクにした。評価関数は、目標経路と自車位置の偏差及び目標速度と自車速度の偏差で追従性を考慮し、縦加速度、縦ジャーク、ヨーレート、舵角速度で乗り心地を考慮する設計にした。制約は、レーン幅に相当する位置偏差と舵角、舵角速度、前・後制駆動トルクに設定した。

これらによって設計したNMPCコントローラを逐次二次計画法によって求解し、その最適解を車両のハンドル角度と速度に適用して車両制御を行う。

## 4. 実車検証

### 4.1 システム構成

今回開発した技術を適用する自動運転システムの構成を図4に示す。この自動運転システムは衛星測位システムを搭載し、高精度地図を持っている。高精度地図はレーン中央の緯度、経度の点群情報を持っている。また、障害物の位置と速度を計測するセンサを搭載している。これらセンサと地図情報を用いて、2章で述べた方法によって目標経路及び速度を生成し、それに追従するために3章で述べたNMPCコントローラによって、車両の目標ハンドル角、目標制駆動トルクを演算する。演算された目標値に追従するように車両制御コントローラでPID(Proportional Integral Differential)等の制御を行い、最終的に地図に沿って走行するように車両のハンドル角と速度を制御する。

### 4.2 実車試験結果

直線路で障害物を回避して走行する実車試験を行い、この自動運転システムの有効性を検証した。道路は2車線で、目標車速80km/hで走行中に静止した障害物の回避走行を行う。実車試験によって得られた車両の移動軌跡を図5に、その際の車両の横位置偏差、ハンドル角と車速を図6に示す。図6から、滑らかにハンドルを操舵し、経路に追従していることが分かる。また、車速も目標車速80km/hに追従するように動作している。この自動運転システムによ



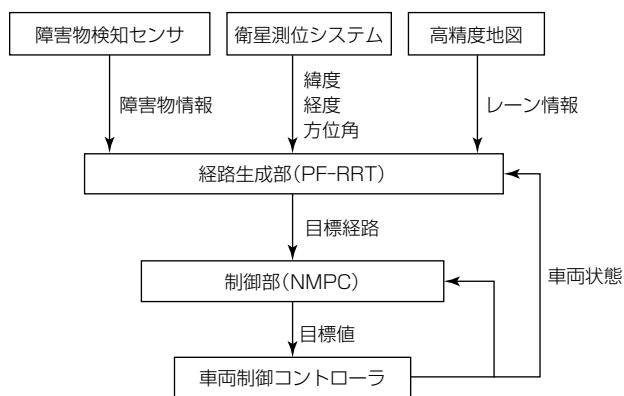


図4. 自動運転システムの構成

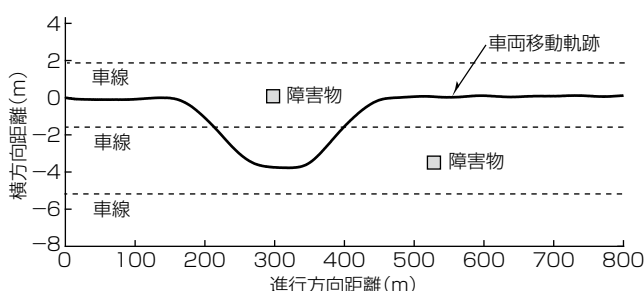


図5. 障害物回避時の車両移動軌跡

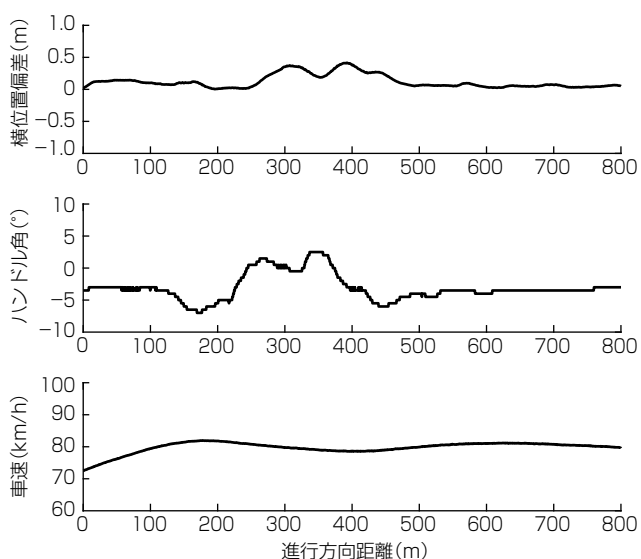


図6. 障害物回避時の車両状態

て、ハンドルと車速を制御し、障害物に応じて車線変更を実施しながら走行できることを確認した。

## 5. む す び

自動運転に必要な技術として、経路生成技術及び車両統合制御技術について述べた。経路生成に関しては、自車両周辺の複雑な環境を考慮し、かつ滑らかな車両挙動を実現するための経路生成技術を開発した。車両制御に関しては、車両の運動能力を最大限に発揮させるために車両の縦方向と横方向の運動を統合的に制御し、また様々な制約条件の

下で快適な車両運動を実現するモデル予測制御を開発した。これらの技術を実車試験で検証したところ、周辺環境に応じた適切な経路が生成でき、安全な車両制御が実現できる結果を得た。

これらの技術を普及させるためには、より複雑なシーンへの対応に加えて、ロバスト性の向上、演算コスト低減などが重要になると考えている。当社はこれらの課題解決にも取り組んでおり、実用的な自動運転技術の確立を目指している。

## 参 考 文 献

- (1) Maurer, M., et al.: Autonomous driving, Springer Berlin Heidelberg (2016)
- (2) 須田義大, ほか: 自動運転技術の開発動向と技術課題, 情報管理, **57**, No.11, 809~817 (2015)
- (3) 菅沼直樹: 市街地における自動運転のための外界環境認識, 計測と制御, **54**, No.11, 816~819 (2015)
- (4) Takeuchi, Y., et al.: Development of Autonomous Driving System Using GNSS and High Definition Map, SAE World Congress Experience, 2018-01-0036 (2018)
- (5) Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs, Numerische mathematik, **1**, No.1, 269~271 (1959)
- (6) Hart, P. E., et al.: A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths, IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics, **4**, No.2, 100~107 (1968)
- (7) LaValle, S. M.: Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning (1998)
- (8) Berntorp, K., et al.: Particle filtering for online motion planning with task specifications, American Control Conference, 2123~2128 (2016)
- (9) 篠本 凜, ほか: 自動運転のためのパーティクルフィルタを用いた経路生成, 自動車技術会 2018年秋季大会 学術講演会 講演予稿集, No.163-18 (2018)
- (10) 鶴生知輝, ほか: RTK-GPSを用いた自動運転システムにおける非線形モデル予測制御による車両統合制御, 自動車技術会 2018年秋季大会 学術講演会 講演予稿集, No.163-275 (2018)
- (11) Berntorp, K., et al.: Models and methodology for optimal trajectory generation in safety-critical road-vehicle manoeuvres, Vehicle System Dynamics, **52**, 1304~1332 (2014)
- (12) Pacejka, H.: Tire and Vehicle Dynamics, Third Edition, Butterworth-Heinemann (2012)

# 自動走行を高度化するインフラ技術

名倉健一\* 渡辺昌志\*\*  
末廣 雄\* 小崎成治\*  
細井響子\*

Infrastructure Technologies to Improve Autonomous Driving

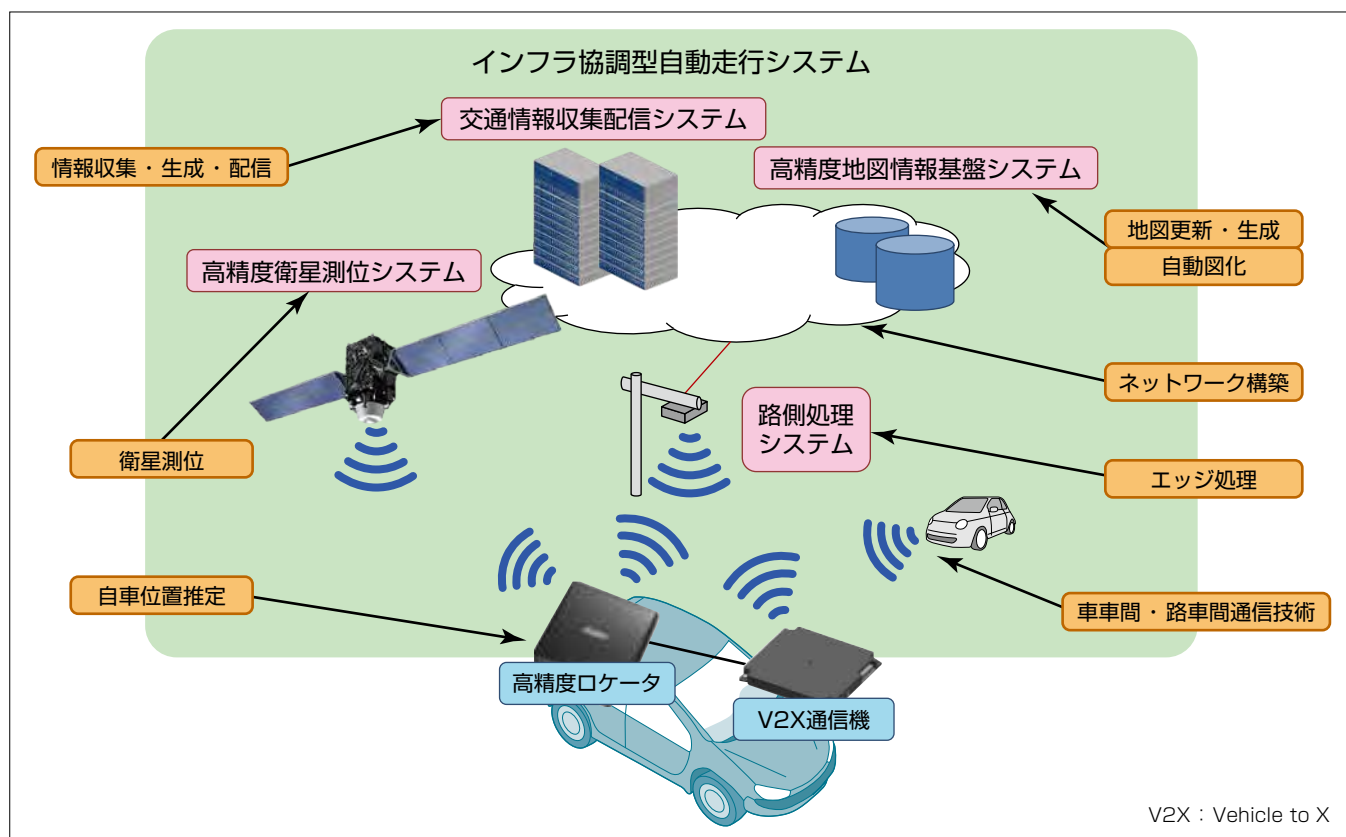
Kenichi Nakura, Takeshi Suehiro, Kyoko Hosoi, Masashi Watanabe, Seiji Kozaki

## 要 旨

自動走行をより高度化し、安全性の向上、モビリティの高速化や道路交通の効率化、さらには環境への貢献を向上させるためには、車載機器による自律走行に加え、周辺情報や先読み情報等を車両に伝えるインフラ協調による走行に関する技術も重要となる。インフラ協調型自動走行システムの主要構成要素として、交通情報収集配信システム、路側処理システム、高精度衛星測位システム、高精度地図情報基盤システム等が挙げられる。また、自動走行を高度化するインフラ技術として、ネットワーク構築技術、エッジ処理技術、高精度三次元地図生成技術が挙げられる。

三菱電機では、それらのインフラ関連技術を開発・適用

したインフラ協調型自動走行システムを試作し、自動走行車両を用いた合流支援に関わる実証試験を行って所期の機能・性能を確認した。試作した実証システムは路側センシングによるリアルタイムな周辺情報をダイナミックマップの形式に従って配信したもので、エッジ処理技術による運転支援情報の適用性を確認した。また、同システムは路側処理システムだけでなく、交通情報収集配信、高精度衛星測位、高精度地図基盤の全てのシステム要素を組み合わせで実現したものであり、今後の自動走行に関する社会基盤としての有用性を示した。



## インフラ協調型自動走行システムの構成

インフラ協調型自動走行システムは、車両位置を高精度に把握するための高精度衛星測位システム、周辺情報の収集・配信を行う交通情報収集配信システム、路側センサ情報の処理及び車両への配信を行う路側処理システム、高精度地図の生成技術などのシナジーによって、より高度な自動走行を実現する。

## 1. ま え が き

自動走行をより高度化し、安全性の向上、モビリティの高速化や道路交通の効率化、さらには環境への貢献を向上させるためには、車載機器による自律走行に加え、周辺情報や先読み情報等を車両に伝えるインフラ協調による走行に関する技術も重要となる。

本稿では、自動走行を高度化するインフラ協調型自動走行システムの構成要素と、ネットワーク構築技術、リアルタイム配信を実現する上で重要なエッジ処理技術、高精度地図生成技術等の要素技術について述べる。

## 2. インフラ協調型自動走行システムの構成

### 2.1 交通情報収集配信システム

車車間・路車間通信を利用したインフラ協調型自動走行システムでは、道路地図情報、工事規制情報や物体情報などの車両への配信、及び車両からのプローブ情報や路側に設置したセンサ情報を収集する交通情報収集配信システムが必要である。情報の収集・配信周期は月単位から秒単位まで様々であり、応答性条件に応じて効率的に情報の収集・分析・配信を行えるシステム構成の実現が課題である。インフラ協調型のシステムで車両やインフラシステムで情報を効率的に利用するには位置情報のフォーマットの共通化が重要であり、ダイナミックマップと呼ばれる静的な地図情報を基盤として動的な情報を関連付ける方式で統一的に扱うことが想定される。

### 2.2 高精度衛星測位システム

自動走行の実現には自車位置を車線レベルで正確に特定する高精度な測位技術が必要である。2018年11月から運用を開始した準天頂衛星システム“みちびき”からのセンチメートル級測位補強サービス信号を高精度衛星測位端末等で受信することによって自車位置をセンチメートル級で把握することが可能になる。

### 2.3 高精度地図情報基盤システム

自動走行システムでは、自動車に搭載されたレーザレーダやカメラなどによるセンサ情報が必要となるが、区画線、路肩縁、標識などの高精度な静的地図情報も不可欠とされている。高精度地図を利用することで、車載センサでは判別できない遠くの道路状況を先読みすることが可能になり、より安全・快適な自動走行が可能になる。高精度地図情報は、GNSS(Global Navigation Satellite Systems)の受信機やレーザレーダといった様々なセンサを具備したMMS(Mobile Mapping System)と呼ばれる車両によって走行した際に取得された情報を図化処理することで生成される。

### 2.4 路側処理システム

車載センサでは認識できない見通し外の状況を、路側に設置したレーダやカメラの情報から他車両や障害物を検知

して自動走行車両へ配信することで、よりスムーズな自動走行が可能になると考えられる。特に高速で移動する物体や近傍の物体は100ms程度の周期で車両へ配信することが求められ、センサ情報のリアルタイム処理技術が必要である。また路車間の無線通信システムではDSRC(Dedicated Short Range Communication)<sup>(1)</sup>が広く普及しているが、スループットの向上を目指してIEEE 802.11p<sup>(2)</sup>やセルラ技術を用いたC-V2X(Cellular-V2X)などが開発されており、さらに第5世代無線通信技術(5G)についても車車間・路車間通信への適用が検討されている。

## 3. 自動走行を高度化するインフラ技術

### 3.1 ネットワーク構築技術

情報通信ネットワークの観点からすると、交通情報収集配信システムでは、2章で述べたように高信頼・低遅延のほか、多数のセンサや車両からの膨大なデータ収容が求められる。一方で、自動走行車両にとっては物理的に自車に近い情報ほど重要性や緊急性が高いという性質があることから、ネットワーク上の情報に対する上述の要件は局所的であるという特徴を持つため、リアルタイム性が求められる処理はより車両に近いエリアで行うエッジ処理との親和性が高いと考えられる。図1に当社が検討しているエッジサーバを適用した情報収集配信ネットワーク<sup>(3)</sup>の構成を示す。例えば高速道路を想定すると、高速道路のIC(Inter-Change)、SA(Service Area)/PA(Parking Area)、JCT(JunCTion)の合流路付近に路側無線装置や路側センサを設置し、エッジサーバが複数のエリアの機器を管理する。

路側センサの情報はエッジサーバで処理し、路側無線装置を介して車両へ配信する。緊急性の低いセンサ情報やプローブ情報はセンターサーバへ転送して処理する。エッジサーバを適用することで、低遅延なデータ転送・処理のほか、センサデータをネットワークの途中で終端するため幹線ネットワークの負荷を低減することが可能になる。

### 3.2 エッジ処理技術

合流支援システムに関するエッジサーバの主要な機能としては次の3点が挙げられる。

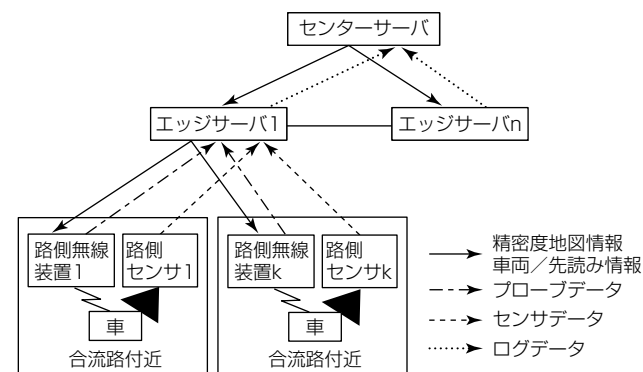


図1. エッジサーバを適用した情報収集配信ネットワークの構成

- (1) 物体同定と物体情報生成(センサ処理)
- (2) 物体情報を共通フォーマットへ変換
- (3) 物体情報を路側へ配信及びセンターサーバへログ送信

これらを実現するエッジサーバの機能構成を図2に示す。センサインタフェース部は受信したセンサデータへの時刻情報の付与とフィルタリングをパケットレベルで実施する。フィルタリングとしては、道路外の物体を示すデータや静止物を示すデータなどのノイズの削除や、時間方向での間引きがある。この構成例ではセンサデバイスとして画像カメラとミリ波レーダを用いている。センサ処理部は、まずカメラデータとミリ波レーダデータのそれぞれを解析する。カメラデータに対しては、各受信画像で検出した車両の位置とサイズ(全長、全幅)を算出する。ミリ波レーダは自身が放射した電波の反射波を観測して反射点の位置(方位、距離)と速度を取得する。そこで、センサ処理部は各時刻で反射点をクラスタリングした後に、過去のデータと突き合わせて反射物体を追跡することで、時系列の位置及び速度を算出する。続いて、ミリ波レーダデータからの反射物体の時系列位置情報にカメラデータからの時刻情報付きの車両の位置・サイズ情報を統合することで車両を同定し、その位置、速度、サイズのデータを生成する(センサ間同定)。データ管理部は、エッジサーバ内で生成したデータや外部から受信したデータの管理と、路側無線インタフェース部と上位ネットワークインタフェース部を経由した、路側無線装置及びセンターサーバへの配信制御を行う。センターサーバへは車両情報に加えて車両ごとにカメラデータをログとして送信する。フォーマット変換部は、エッジサーバが生成したデータをダイナミックマップ形式に変換する。また、センサデータやエッジサーバで生成するデータに時刻情報を付与するために時刻管理部を持つ。

### 3.3 高精度三次元地図生成技術

高精度三次元地図生成時の大まかな処理の流れは、①MMSによる点群データ等の情報取得、②ソフトウェアによる自動図化処理、③手作業による修正・承認処理となる。②については様々な手法が既に検討されているが、計測情報には様々な要因によってノイズが含まれることなどによって、完全な自動化は困難であるため、地図情報を低コストに整備するには、③の作業量削減が重要である。当社では、自動図化結果に確からしさを表す信頼度を付与する機能を提供している。これによって、作業者がチェックの必要性の高い箇所を容易に判別可能になる。

信頼度は地物ごとに設定した複数の評価項目値を入力とする評価関数によって導出される。地物として路肩縁を例にとると、評価項目は、①高さ方向の形状変化量(大きいほど評価値高)、②抽出された線の形状の関数近似に対する誤差(小さいほど評価値高)、③計測時のMMSとの距離(近いほど評価値高)、とする<sup>(4)</sup>。

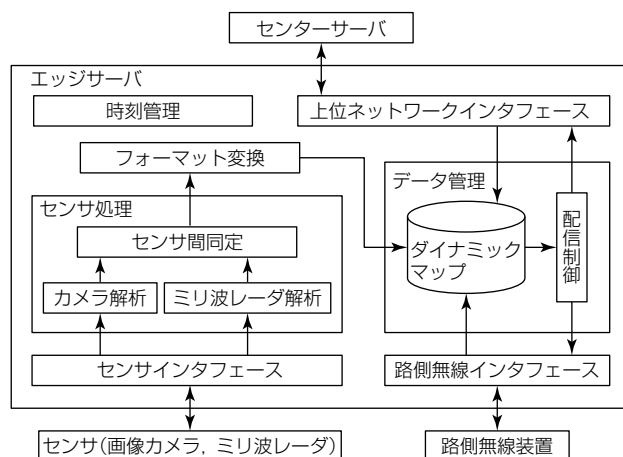


図2. エッジサーバの機能構成



図3. 自動図化処理結果(路肩縁)

図3に路肩縁に対する信頼度付き自動図化処理結果のイメージを示す。図の実線部分は信頼度が高く、点線部分は信頼度が低いことを示している。実際の図化結果と、目視確認結果による修正の有無の情報を蓄積し、機械学習によって傾向を分析することで、信頼度評価関数の精度向上が可能と考えられる。

### 4. インフラ協調による自動走行支援の実証

3章で述べたエッジサーバを適用した合流支援システムを試作し、テストコースで自動走行支援の実証実験を行った。合流部では本線路・合流路間の見通しが悪い場合があり、距離的(時間的)に限りがある合流レーンの走行中に本線路への車線変更を終えなければならないため、自動走行の実現に当たり難易度が高い箇所の一つとされている。また、他車両とのタイミング次第で急加減速が避けられないケースがあり、渋滞が発生しやすい地点でもある。そこで、互いに見通しがなく、車車間通信による情報共有も難しい状態でも情報収集配信システムによって車両位置を把握することで、急加減速なしに前もって進入タイミングを調整して安全かつスムーズな合流を支援できることを確認した<sup>(5)</sup>。図4にその検証系を示す。車両は本線路と合流路のそれぞれ1台ずつとし、本線車両を観測する路側センサにはいずれも市販のミリ波レーダ3台と監視カメラ1台を、合流車両・路側インフラ間の通信にはIEEE802.11p標準準拠のV2X無線機器を用いた。ミリ波レーダは77GHz帯を使用するもので、50ms周期で反射点情報を送信する。カメ



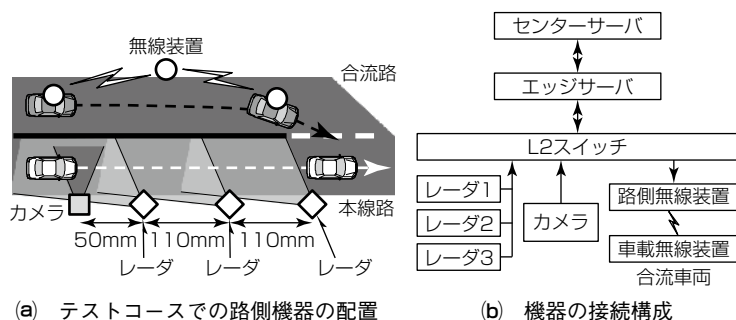


図4. 試作システムの検証系

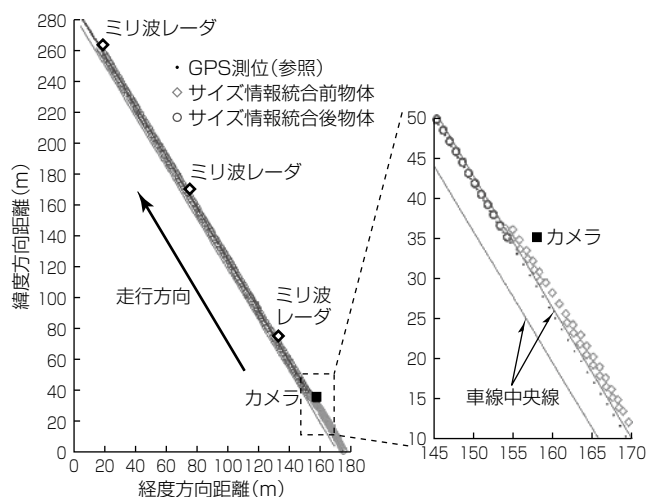


図5. エッジサーバでの追跡物体の軌跡

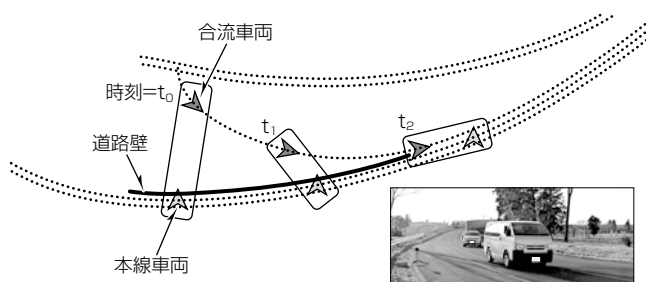


図6. 路側インフラで検知した車両位置の軌跡

ラは画像サイズ640×360、フレームレート30fpsに設定し、エンコードはH.264とした。エッジサーバからの車両情報(位置、速度、サイズ)の配信は、路車協調型の高度交通システムでの一般的な通信処理周期である100msの周期配信とした。

実際に自動走行システムで合流の判断を行うためには、1 m程度の位置精度で周辺車両を認識する必要があると考えられ、合流支援システムから配信する本線車両情報にも同等の精度が求められる。図5にエッジサーバ内で追跡された物体の軌跡を示す。

センサ間同定前、すなわちサイズ情報統合前では、1台の車両としてクラスタリングしきれない複数の物体が追跡されているのに対し、サイズ情報統合後は1台の車両として認識できていることが分かる。また、ミリ波レーダの観測点は車両ボディの反射点であるため、サイズ情報統

合前の認識物体位置は高精度衛星測位(車両中央位置に高精度GNSS受信機を設置)からミリ波レーダ寄り(進行方向右側)にずれているが、サイズ情報統合後ではサイズ情報を用いた車両中央位置への変換を行っており、位置精度が向上していることを確認した。合流車両が受信したサイズ情報統合後の車両情報の位置精度は、高精度衛星測位との比較で平均誤差が0.96mであった。

図6に別のテストコースで行った試験での車両位置の軌跡を示す。道路壁によって見通しが悪いカーブ路での合流になっている。両車は時刻 $t_0$ に同時スタート、本線車両が等速走行を継続するのに対して合流車両は死角の本線車両情報を受信して減速することで適当な車間距離を生成し(時刻 $t_1$ )、その後再加速してスムーズに合流した(時刻 $t_2$ )。右下の写真は合流時の様子を捉えたものである。

## 5. む す び

自動走行を高度化するインフラ協調型自動走行システムの構成要素と主要要素技術について述べ、開発した技術を用いて試作した合流支援システムを用いて行った自動走行実証試験の一例について述べた。実証システムは路側センシングによるリアルタイムな周辺情報をダイナミックマップの形式に従って配信するもので、エッジ処理技術による運転支援情報の適用性を確認できた。また、実証システムには路側処理システムその他、交通情報収集配信、高精度衛星測位、高精度地図情報基盤の全てのシステム要素を組み合わせ実現しており、今後の自動走行に関する社会基盤としての有用性を示したものと考える。

## 参 考 文 献

- (1) 電波産業会：狭域通信(DSRC)システム, ARIB STD-T75 (2001)
- (2) IEEE 802.11p-2010: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments (2010)
- (2) Suehiro, T., et al.: Development of I2V information collection/distribution system using edge server to support autonomous driving system, ITS Asia-Pacific Forum Fukuoka 2018, TS13 (2018)
- (4) 渡辺昌志, ほか: 高精度地図自動生成システムにおける信頼度導出方法, 電気学会 電子・情報・システム部門大会, OS5-7 (2018)
- (5) 末廣 雄, ほか: 自動走行支援のための情報収集配信システム, 電子情報通信学会研究報告, 118, No.128, 111~115 (2018)

# スマートモビリティ時代に向けた体験型 コンセプトカー“EMIRAI4” (2019年版)

古本友紀\*

Experience - based Concept Car "EMIRAI4" (2019 Version) for Smart Mobility Era

Yuki Furumoto

## 要 旨

三菱電機は、安心・安全・快適なスマートモビリティ時代のクルマ社会を実現する、次世代の運転支援技術を搭載したコンセプトカー“EMIRAI4(イーミライフォー)”を開発した。“第45回東京モーターショー2017”に出展し、また、新たな機能を追加して“CES2019”に出展した。

EMIRAI4では、“Feelings with you ～一人ひとりに、やさしく、安心して心地よく～”のテーマの下、電動化・自動運転・コネクテッドの3分野の開発成果を集約し、ドライバーセンシング技術、最新のHMI(ヒューマンマシンインタフェース)技術、ライティング技術が体験できるコックピットを提案している。

ドライバーセンシング技術では、運転席・助手席乗員を同時にモニタリングし、個人認証でのパーソナライズやド

ライバーの状態確認で自動運転から手動運転への安全な切替えをサポートする。HMI技術では、リアルテクスチャクロッシングディスプレイでリアルな奥行き感や質感を再現した高級感のある表示を実現し、高精度ロケータとAR(拡張現実)対応HUD(ヘッドアップディスプレイ)で安全運転をサポートし、Knob-on-display(ノブオンディスプレイ)によって、タッチ操作の多機能性とノブ操作の安心感を両立させた。

ライティング技術では、平坦(へいたん)ではない路面でも判別しやすいアニメーションライティングを搭載し、人とクルマの分かりやすいコミュニケーションを実現した。

EMIRAI4は、これらの次世代運転支援機能によって、人に寄り添う未来のクルマを提案したものである。



## EMIRAI4の全体像とコックピット

当社の次世代運転支援技術を搭載したコンセプトカーEMIRAI4の全体像とコックピットの外観を示す。

## 1. ま え が き

EMIRAI4は、“Feelings with you ～一人ひとりに、やさしく、安心して心地よく～”のテーマの下、次世代の運転支援技術を搭載したコックピットが体験できるコンセプトカーである。スマートモビリティ時代のクルマ社会で、クルマとクルマ、人とクルマのコミュニケーションがどう変化するのか、どのように安心・安全になるのかの未来を提案している。

本稿では、想定する社会と必要技術、EMIRAI4のコックピットとそのHMI、また、それらの実現に必要な技術について述べ、安心・安全・快適なスマートモビリティ時代のクルマ社会の実現に向けた当社のコンセプトを示す。

## 2. 想定する社会と必要技術

EMIRAI4の想定年代である2023～2025年は、自動車業界の大きな変化を表すCASEという言葉が示すとおり、多くの車が様々なものとなつたり(Connected)、自動運転は高度化し(Autonomous)、シェアリングとサービスが普及し(Shared & Services)、電動化(Electric)していくと考えられる。中でも、自動運転の高度化は目覚ましい。

しかし、それらの進化の過渡期には、自動運転車両だけでなく、自動運転対応車両が手動運転で走行していることもあれば、依然として既存の手動運転車両も残っている。これら多種多様な車両が混在する状況では、人々は今までにない新たな状況に直面することになる。例えば、運転席に誰もいない自動運転車両を見て戸惑うかもしれないし、シェアリングなどで初めて乗る車両の自動運転・運転支援機能がよく分からず誤操作したり、性能に不安を感じたりするかもしれない。このような状況を作り出す要因としては、人々が慣れるより進化が速く、様々な“よく分からない”という状況に直面するためと考える。その解決には、“状況に合った分かりやすいHMI”が必要である。

また、先に述べた進化とは別に、パーソナライズ化が更に進むと考えられる。そのためには、車両が更に人を知り、“乗員の嗜好(しこう)や意図を汲(く)んで動作するHMI”が必要となる。

## 3. EMIRAI4のコックピットとそのHMI

EMIRAI4は、2章で述べた想定年代でのクルマ社会の車両のコックピットを具現化した(図1)。EMIRAI4は、クラウドなど様々なものとなつがったEV(Electric Vehicle)車両で、専用道路では自動運転、一般道は高度な運転支援機能を用いた手動運転が可能な車両である。このような車両で、乗車から自動運転(専用道路)で走行、手動運転(一般道)に切り替えて降車するまでの一連の操作を支援するHMIをEMIRAI4のコックピットに搭載した。

4章からは、これらの流れの代表的な五つのシーン(乗車、自動運転中、手動運転中、運転モード切替え、降車)での課題と、それらを解決するHMIについて述べる。

## 4. 乗車時の個人認証によるパーソナライズ

2章で述べた時代の進化によって、車内空間(コックピット)でのパーソナライズ化も進むと考えられる。それは、ドライバーだけでなく、車両の全乗員が対象になっていくであろう。各乗員に最適で快適なコックピットを実現するには、乗員の様々な情報を知る必要がある。

それには、まず個人認証をしてその乗員が誰なのかを特定し、体調をチェックしたり、クラウドからその乗員の好みや、スケジュールなどのパーソナルデータを取得する。EMIRAI4では、そのデータを活用し、ドライバー・助手席乗員それぞれの体調や好みに合わせる快適なコックピットを提案した(図2)。例えば、ドライバーは暑がりなのでエアコンの温度設定を低くし、助手席乗員は寒がり体調も良くなさそうなので温度設定を高くするなどである。さらに、乗員2人のスケジュールを突き合わせ、それぞれの立ち寄り先から最適なルートを提案することなども可能になる。その実現のため、乗員の個人認証ができるドライバーモニタリングシステムを活用した。

ドライバーモニタリングシステムは、IR(赤外線)カメラを用いて、個人認証だけでなく、乗員の顔向きや視線情報などもセンシングできる。EMIRAI4では、車両中央に設置した1台の広角カメラで、ドライバーと助手席乗員の同時センシングを実現した。



図1. EMIRAI4のコックピット



図2. 個人認証画面

## 5. 自動運転中の分かりやすいHMI

走行中の車両で、落下物の回避などでブレーキングや車線変更などが必要になることがある。進化の過渡期にある自動運転車両では、乗員はそのような不意に起こる車両の挙動の変化に対し、何が起こったのか理解できず、不安を感じると考えられる。その不安解消のため、車両の挙動を事前に提示することで、乗員にその挙動の意味を伝え、無用な不安を感じさせないHMIが必要である。

EMIRAI4では、自動運転中の次の二つのシーンを例に、適切で分かりやすいHMIを実現した。

- (1) 周囲の車の状況から、右車線後方から接近する車両の割り込みを検知し、車間距離をあける。
- (2) ダイナミックマップ<sup>(注1)</sup>から、前方車両で見えない落下物を検知して車線変更する。

また、これらのHMIでは、重要な警告表示などの視認しやすさ、表現力の高さが重要となる。

速度表示など、旧来の針式に変わり、状況に応じて様々な内容を表示できる液晶メータが既に採用され始めている。リアルテクスチャクロッシングディスプレイは、液晶メータが持つ表現力はそのままだに、単なる平面の液晶にはない浮遊感や奥行き感による分かりやすさ、リアルな質感表現による高級感のある快適さを実現する表示デバイスである。

具体的には、2枚の液晶パネルとハーフミラーを用いることで、実像(斜め面)と虚像(縦面)がクロスしているように表示できる。そこで、斜め面に車両周囲状況を、縦面に注意喚起を表示することで、同じ面上に表示するよりも重要情報の視認性を高めることができる。

また、4章で述べたドライバーモニタリングシステムと組み合わせ、ドライバーの顔位置を検出し、見る位置によって表示物の光沢や陰影を制御することも可能である。それによって、リアルな質感を再現し、より表現力の高い高級感のある表示も演出できる。EMIRAI4では、それらの表示特性を生かした“針(図3)”“ガラスと液体”“空間の広がり”をイメージした3タイプのメータ表示を提案している。

(注1) 信号情報や周辺の車両情報など刻一刻と変化する動的情報を持つ地図



図3. リアルテクスチャクロッシングディスプレイのスピードメータ

## 6. 手動運転中の安心で快適なHMI

新しいHMI技術の搭載によって、従来対処できなかった手動運転中の課題を解決できるようにした。

### 6.1 視界の悪い状況下での運転サポート

濃霧や雪道といった視界の悪い状況では、センターラインなどが見えにくく、どこを走ればよいのか分かりにくい。それは、自車の走行すべき車線をAR表示し、見えない道路を可視化することで解決できる。さらに、濃霧の中から急に現れる対向車や後方から接近するバイクなどを検知して警告表示することも有効である。それには、現実世界に違和感なくAR表示できるAR対応HUDと、自車前方の道路や自車位置を正確に把握する高精度ロケータを利用する。

EMIRAI4に搭載したAR対応HUDは、任意の距離に奥行き感のある映像を表示できる。これによって前方の道路などに違和感のないAR表示が可能になる。また、高精度ロケータは、高精度三次元地図と測位技術で自車が進む前方の道路形状の把握を可能にする。これらの技術を組み合わせ、自車前方に車線などをAR表示することで、見えない道路を可視化できる(図4)。

### 6.2 手動運転中のタッチディスプレイ操作

車載器にも多く採用されているタッチディスプレイでは、画面上のどこにボタンなどが表示されているかを、見ながら操作しなければならない。そのため、前方から視線を逸(そ)らせない手動運転中は操作できない。それを解決するため、タッチディスプレイ上に物理的なノブを設けたKnob-on-display(ノブオンディスプレイ)を開発した(図5)。前方から視線を逸らさなくても、手探りでノブを

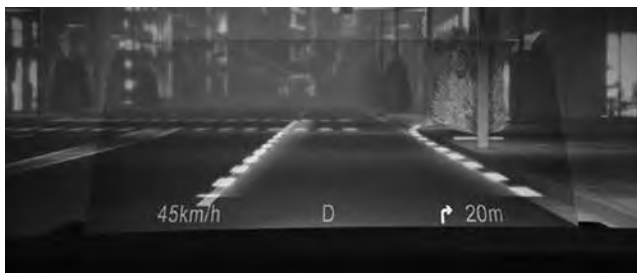


図4. AR対応HUDでの走行レーン表示



図5. Knob-on-display



握(つか)むことができ、その操作結果を前方のHUDに表示することで、手動運転中でも操作が可能になる。

Knob-on-displayは、画面上にノブを取り付けたタッチディスプレイである。ノブでは、回転や左右のスライド操作ができ、指でのタッチ操作も可能である。仕組みとしては、一般的な静電容量方式のタッチセンサを利用して、ノブに内蔵している導電体の位置や移動を検知している。ノブがどこにあってどう動いたかだけでなく、乗員がノブに触れているか否かも判別できる。また、タッチの仕組みを使うことで、ノブからの信号取得用の配線がないシンプルな構造が実現できる。さらに、ノブ中央に穴をあけることができ、その穴をディスプレイ表示やタッチができるボタンとしても使用できる。

## 7. 安心でスムーズな運転モード切替えHMI

専用道路は自動運転、一般道は手動運転といったような、運転モードが切り替わる車両では、安全にモードを切り替える必要がある。例えば、自動運転から手動運転への運転モード切替えでは、ドライバーがすぐ運転開始できる状態であるかを確認する必要がある。問題なければ運転モードを切り替えるが、脇見状態であれば音で気付かせたり、居眠り状態であれば路肩へ停車するなどの対策が必要となる。また、その逆の手動運転から自動運転への運転モード切替えでは、切替え完了前に自動運転に切り替わったと誤解したりなど、車両が無制御状態とならないようにしなければならない。そのためには、運転モードがどちらであるか、一目で分かるようにする必要がある。

### 7.1 運転モード切替え時のドライバーチェック

EMIRAI4では、ドライバーモニタリングシステムでドライバーがすぐに運転開始できる状態であるかを確認して、手動運転モードに切り替える。具体的には、覚醒しているか(目を開けているか)・顔は前を向いているか・ハンドルを持っているかの三つのチェック項目が全てOKになってから切り替える(図6)。これによって、ドライバーは慌てることなく、安全でスムーズに運転を開始できる。

### 7.2 運転モード切替え時の分かりやすいHMI

EMIRAI4では、乗員がその車両の運転モードがどちらであるか、切替えが完了したかを一目で判別できるよう、モードごとにライティングの色を変えるHMIを提案した。また、電子サイドミラーの表示サイズを、自動運転中はあまり見なくてもよいため小さくし、手動運転中は見やすいよう大きく変えるなど、各モードで最適な表示に変更することでも変化を持たせている。

## 8. 降車時の人とクルマのコミュニケーション

2章に述べたように、様々な車両が混在して走行している状況では、その車両がどういう状態なのか、どう動こう



図6. カメラ映像とドライバーチェック画面



図7. ドア開けライティング

としているのかなどは、他車や歩行者などからは分かりにくく、不安感につながると考えられる。そこで、車両状態などを外から見ても分かるようなHMIを導入することで、安心を提供できると考える。

EMIRAI4では、歩行者などへの情報伝達手段として、光で車の状態や動きを伝える路面ライティングを搭載した。車両がどう動こうとしているかなどのメッセージ(図7ではドア開け)が分かる表示デザインを路面にライティングすることで、車外へ注意喚起できる。さらに、降車時にドアを開けようとする動作などの乗員の自然な動きを検知し、それをトリガーにしてライティングすることで、乗員の意図を汲んだ、他車や歩行者などへの分かりやすい注意喚起を実現できる。ただし、積雪などで凸凹のある路面では表示デザインが崩れてしまう。そこで、ライティングにアニメーションを加えることで、デザインが崩れても、単なる明かりではなく、何らかの注意喚起であることが伝わりやすくなる。

また、運転モードなどの車両状態は、車両後部にボディライティングすることで、車外に伝えられる。7.2節に述べた、運転モードの切替えも、車外から把握できる。

## 9. む す び

コンセプトカーEMIRAI4を題材とし、安心・安全・快適なスマートモビリティ時代のクルマ社会に必要なHMIとその技術について述べ、当社が考える“人に寄り添うことで、一人ひとりに最適で、快適な未来のクルマ”を提案した。

# 車室内モニタリングシステム

熊谷太郎\*

In-vehicle Monitoring System

Taro Kumagai

## 要 旨

車室内の乗員の状態を把握し、乗員の安全性・快適性の向上に寄与する目的で、車室内モニタリングシステム(IMS)の開発を行っている。三菱電機のIMSは広角カメラを利用しており、ダッシュボードセンター位置に搭載することによって、運転席と助手席に対するセンシングを同時に行うことができる。加えて、水平方向だけではなく、垂直方向の映像も幅広く撮像するため、顔だけではなく、肩や手などの情報や、姿勢まで検知できる。このように当社IMSは、運転者の顔だけを高精度に撮像してセンシングを行う通常のドライバーモニタリングシステムと比較して、

機能の拡張性が高い。

IMSの車載量産向け開発を行うに当たり、多種多様な環境・ユーザーで利用されることを考慮し、IMSの機能のロバスト性を担保、又は性能限界の見極めを実施する必要がある。当社IMSでは特に“環境ロバスト性”“個人差ロバスト性”“アクセサリロバスト性”“行動ロバスト性”の四つの観点をロバスト性検証で重視し、データの収集と評価、性能限界の検証を実施している。また、開発の効率化やセンシング性能の可視化を目的としてIMSの開発用ツールを開発した。



## IMSの撮像映像と処理結果例

IMSの撮像映像と、撮像映像を当社IMSの開発用ツールを用いて、一部センシング結果を見える化したイメージである。IMSでは、顔向き角度や開眼度を検出することで、運転者の脇見や眠気・居眠りを検知する。また、助手席も撮像範囲に含まれていることから、助手席乗員向けの機能の追加も可能である。

## 1. ま え が き

車室内の乗員の状態を把握し、乗員の安全性・快適性の向上に寄与する目的で、当社は、広角カメラを利用したIMSの開発を行っている。当社IMSは、運転者だけでなく、その他乗員も撮像できるため、運転者の脇見や眠気・居眠りの検知等はもちろん、乗員を含めた個人認識やシートベルト装着状態検知を実現できる。IMSに対する要望・期待は、事故防止や自動運転時の運転者監視の観点、Euro NCAP(The European New Car Assessment Programme)等の自動車アセスメントの観点から年々高まっており、今後、市場規模の拡大が予想されている<sup>(1)</sup>。さらにIMSで撮像した画像は、交通事故の原因解析にも有効であり、事故前後の映像記録装置としての役割も担うことができる。

本稿では、当社IMSのシステム構成と特長、搭載機能、車載向け製品として満たすべきセンシングのロバスト性について述べる。また、IMSの評価・開発効率化用に用いているツールについても述べる。

## 2. IMSのシステム構成と特長

### 2.1 システム構成

当社IMSは、近赤外線カメラ、近赤外線LED(Light Emitting Diode)、SoC(System on a Chip)の三つで構成される。近赤外線カメラモジュールに内蔵されたイメージセンサは、近赤外線LEDから発光された光が物体に当た

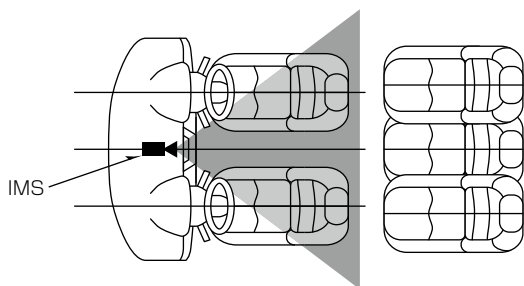


図1. IMSの搭載位置と撮像範囲



図2. IMSの撮像映像例

り、反射した光を受光することで、近赤外線映像を取得する。その近赤外線映像をSoCで画像解析することによって、車室内の乗員の状態を推定できる。

### 2.2 当社IMSの特長

当社IMSは広角カメラを利用しており、図1のようにダッシュボードセンター位置に搭載することによって、運転席と助手席に対するセンシングを同時に行うことができる。加えて、水平方向だけでなく、垂直方向の映像も幅広く撮像するため、顔だけではなく、肩や手などの情報や、姿勢まで検知できる。そのためIMSは、運転者の顔だけを高精度に撮像してセンシングを行うドライバーモニタリングシステムと異なり、機能の拡張性が高い(図2)。

## 3. IMSの機能

IMSの機能は、顔の検出や顔向き角度、開眼度、視線角度、手の形といった基本的な情報を出力するセンシング機能と、センシング機能で検知された情報を利用し、乗員有無の検知や脇見検知、眠気検知、ジェスチャ判定等を行うアプリケーション機能に大別される。

次に二つの検知機能について述べる。

### 3.1 脇見検知機能

図3に脇見検知機能の処理フローを示す。IMSはまず、センシング機能である顔・パーツ検出を実施し、それらの情報を用いた顔向き角度の推定を行う。脇見の判定は、顔向き角度がしきい値を超えたか否かで判定するが、車両情報によってそのしきい値を変化させる。これは、停車中や旋回時に不適切な脇見検知が行われることを防止する目的や、高速走行で有効視野が狭くなった場合に、より適切なタイミング・状況で警報等の支援を行う目的でしきい値を変化させている。

IMSの脇見判定としては、図3に示すように顔向き角度と車両情報を利用する以外にも、視線角度や車外センシングの結果を利用することも可能である。しかしながら、指標を増やすことによる誤判定リスクの増加や、評価の煩雑化、他システムとの依存度増加等の観点も鑑み、判定方法を判断していく必要がある。

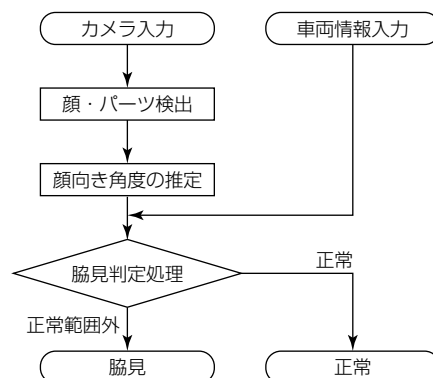


図3. 脇見検知機能の処理フロー

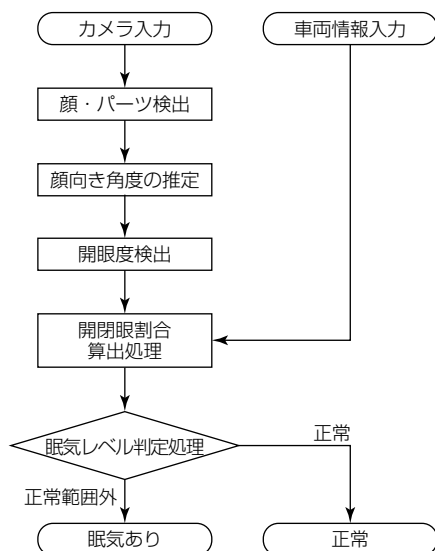


図4. 眠気検知機能の処理フロー

### 3.2 眠気検知機能

IMSでは、眠気をPERCLOS(Percent of Eyelid Closure)を用いて推定している。PERCLOSは単位時間当たりの閉眼の割合を示しており、眠気レベルと相関が高く、個人差が少ないとされている<sup>(2)</sup>。

図4に眠気検知機能の処理フローを示す。センシング機能として、顔向き角度の推定までの処理は脇見検知機能と同様である。追加となる開眼度検出では、目の開き具合を算出し、開眼と閉眼を判定する。なお、顔向き角度の推定の後に開眼度検出を行うのは、顔向き角度ごとに画像として映る目の形が異なることによって、開眼度検出の補正処理を行う必要があるためである。次に、開閉眼割合算出処理では、単位時間当たりの開眼と閉眼の割合を算出し、その後の眠気レベル判定処理によって眠気の有無を判定する。なお、開閉眼割合算出処理で車両情報を利用しているのは、停車中の故意の閉眼を眠気の指標から除くためである。

眠気レベルの判定には、PERCLOSのほかにも、表情や姿勢の変化、仕草等の情報を用いることが考えられる。特に姿勢の変化や仕草を利用した眠気検知については、広角カメラを利用し、肩から下の体の情報や、左右方向に広い範囲のセンシングが可能な当社IMSであるからこそ、実現可能な機能ということが出来る。

## 4. ロバスト性

IMSの車載量産向け開発を行うに当たり、多種多様な環境で、多種多様なユーザーが利用することを前提に、センシング機能又はアプリケーション機能としてのロバスト性を担保、又は、性能限界の見極めを行う必要がある。当社IMSでは特に、“環境ロバスト性”“個人差ロバスト性”“アクセサリロバスト性”“行動ロバスト性”の四つの観点をロバスト性として担保又は性能限界を見極めるべき主な観点と捉え、データ収集と評価、性能限界の検証を実施している。



図5. 顔に生じる光のコントラスト例

次に、それぞれの内容について述べる。

### 4.1 環境ロバスト性

環境ロバスト性は、車載環境での多種多様な環境へのロバスト性項目であり、その多くは、人工的な光や太陽光等、光関連のロバスト性である。図5に、顔に生じる光のコントラスト例を示す。図に示すとおり、同一個人にも関わらず、時間帯や走行環境によって顔に様々な形、強さのコントラストが生じることによって、画像としての情報は大きく異なってしまう。このような状況でも、安定的にセンシング機能やアプリケーション機能が動作することが求められる。

### 4.2 個人差ロバスト性

個人差ロバスト性は、人ごと及び同一人物内の変化に対してIMSが担保すべきロバスト性である。利用者によってIMSの利用可否が異なる、また、個人内での化粧の有無や髭(ひげ)の有無、髪型の変化等によって、大きく結果が異なるようであれば、商品性を欠くことになる。当社IMSは、国内外でのデータ収集及び様々な個人内変動を再現したデータ収集を行い、性能評価・改善を行うことで、個人差ロバスト性を高めている。

### 4.3 アクセサリロバスト性

アクセサリロバスト性は、顔の場合であれば、図6に示したような、メガネやサングラス、マスク等、装着品へのロバスト性のことを示す。また、センシング範囲を肩より下に広げた場合は、衣服や手袋等に対するロバスト性まで含まれる。当社IMSでは、様々な形状のメガネやサングラスでの性能評価、改善を実施していることはもちろん、サングラスの近赤外光の透過率を計測し、センシング性能の限界の見極めを実施している。

### 4.4 行動ロバスト性

行動ロバスト性とは、顔の一部を手で隠す動作や表情の変化、姿勢の変化等、走行中に乗員が行う行動に対するセンシング機能、又はアプリケーション機能のロバスト性を





図6. 装着アクセサリの個人内変動例

示す。例えば手の動きをIMSで認識させ、車載機器を操作するジェスチャ操作機能では、運転者が他車に対して何らかの意思表示を行う動作を誤ってジェスチャ操作と判定してはならない。そのために、ジェスチャとそれ以外の切り分け処理を搭載し、ロバスト性を高める必要がある。なお、ソフトウェア処理でロバスト性を高める以前に、検知範囲や検知対象とするジェスチャをあらかじめ他の行動と判別が容易になるよう設計を行ってれば、それ自体がロバスト性向上の取組みとなる。

## 5. IMSの開発用ツール

ここでは、IMSの開発を効率的に進めるために用いている開発用ツールについて述べる。このツールは、IMSへの組み込み前に、アルゴリズム検証や、図7に示すようなセンシング結果の見える化を行う目的で開発したソフトウェアであり、パソコン上で動作させることができる。このツールを開発する上で特に工夫した点は次の3点である。

- (1) 評価用の映像を入力することで、車載用に搭載するIMSと同じセンシングやアプリケーションの結果を出力する点である。IMSとこの開発用ツールの出力結果が同じになることで、パソコンを用いた性能評価結果を、IMSでの性能評価結果と等価として取り扱うことができる。パソコン評価用ソフトウェアでは、この仕組みに加え、データの読み込み機能や自動評価実施機能を付加することで、オフラインでの繰り返しの評価を、人手を用いることなく実施することが可能になり、開発の効率化に大きく寄与している。
- (2) 開発用ツールからIMS実機へのソフトウェア移植性である。開発用ツールとIMS実機のソフトウェアについて、出力結果が同様であっても、ソフトウェアの構成等が異なり、実機に移植する際、再度作り直しが必要にな



図7. センシング結果の見える化

ると、開発の効率が下がってしまう。当社IMSは、開発用ツールと実機のソフトウェア構成を極力同一にすることで、非常に高い移植性を実現している。

- (3) 性能の可視化である。実機のソフトウェアの場合は、センシング機能やアプリケーション機能の出力結果を数値として確認できても、その結果を実際の入力映像と重畳させ、確認することは困難である。そこでこの開発用ツールでは、センシング結果を画像と重畳させて表示できるようにしたことで、不具合の早期発見はもちろん、当社IMSのデモンストレーション用ソフトウェアとしても利用することが可能である。

## 6. む す び

当社IMSと開発用ツールについて述べた。IMSは、運転者だけでなく、他の乗員もセンシングすることで、例えば、エアバッグの展開に利用が可能な前席乗員の体格を判定する機能等、様々な機能拡張が考えられる。また、車室内を広範囲に撮像できることから、運転者がスマートフォンを手元で見ているような状況や、体調急変によって大きく姿勢が崩れたような状態等、自動運転時代の到来によって必要性が増す機能に対する親和性も高い。今後は、前席だけでなく、その他の席も対象にしたIMSの開発や他のセンサとの連携機能の開発を進めることで、車室内から車の安全性や快適性の向上に寄与していく。

## 参 考 文 献

- (1) STRATEGY ANALYTICS : Semi-Autonomous Applications Accelerate Development in Automotive Driver Monitoring Systems (2016)
- (2) Knippling, R. : PERCLOS : A valid psychophysiological measure of alertness as assessed by psychomotor vigilance, Tech Brief FHWA-MCRT-98-006 U.S.Department of Transportation (1998)

# 超小型・高機能な LEDヘッドライト用光学モジュール

桑田宗晴\* 小島邦子\*\*  
諏訪勝重\*\*  
大嶋律也\*

Compact and High Function Optical Module for LED Headlights

Muneharu Kuwata, Masashige Suwa, Ritsuya Oshima, Kuniko Kojima

## 要 旨

ヘッドライトの光学系は、LED光源から広範囲に放射される光を集光し、ロービームが上方に飛ばないための境界線(カットオフライン)を持つ配光分布を形成して車両前方に投射する。一般的なプロジェクタ方式の光学系には、ミラーコーティングを施したりフレクタなどの反射面が用いられるが、反射面を用いると反射光路の確保や反射損失によって、光学系が大型化するとともに光の利用効率が低下するという課題があった。また、夜間の安全運転に向けて、運転者の視界確保や視認性向上、前方車両や歩行者への幻惑防止などが求められている。

これらの課題に応えるため、三菱電機は今回、屈折作用と全反射作用だけで所望の配光分布を実現する、独自方

式の“RIR(Refraction surface, total Internal reflection surface, Refraction surface) 光学系”を開発した。投射レンズの高さを20mmに小型化するとともに光利用効率を約1.8倍とし、一般的な高さ40～60mmの投射レンズと同等以上の明るさを確保した。また、ロービームでは光が届かない領域の歩行者などを車載センサで検知してスポットビームで照射する機能を開発した。これによって、歩行者などの対象物の早期発見が可能になる。

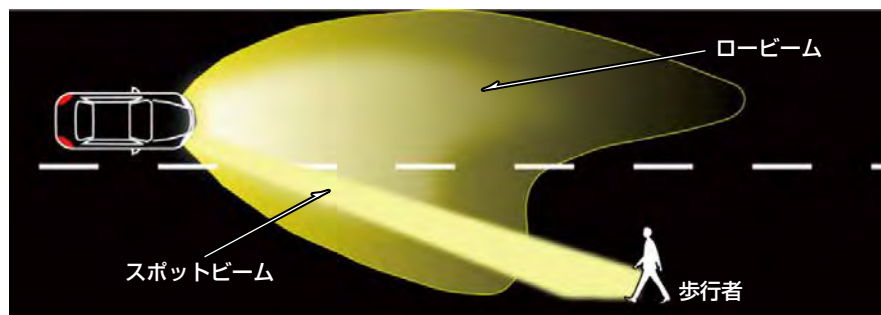
今回開発した超小型・高機能な光学モジュールによって、ヘッドライトのデザイン自由度を向上させるとともに、高度な配光制御によるライティングで安心・安全な夜間走行を支援する。



開発した光学モジュールで実現できる  
先進的なデザインのイメージ



LEDヘッドライト用光学モジュール



歩行者などを車載センサで検知してスポットビームで照射する機能

## LEDヘッドライト用光学モジュールとスポットビーム照射機能

超小型・高機能なLEDヘッドライト用光学モジュールを開発した。独自のRIR光学系によって、従来の課題であった小型化と高効率化の両立を実現するとともに、ヘッドライトのデザイン自由度を向上させた。また、ロービームの届かない遠方の歩行者などを車載センサで検知してスポットビームで照射する高度な配光制御機能を開発した。歩行者などの対象物の早期発見によって、安心・安全な夜間走行を支援する。

# 1. ま え が き

CO<sub>2</sub>の排出削減や燃料消費の抑制といった環境負荷軽減の観点から、自動車の省エネルギー化が求められている<sup>(1)</sup>。ヘッドライトでも軽量化と省電力化が求められるなか、ヘッドライトの光源としてLEDの採用が進み<sup>(2)</sup>、現在20%強のLED化率は2025年には50%を超えると見込まれている<sup>(3)</sup>。しかし、LED光源の発光面の光強度分布は均一であるため、ヘッドライトに求められる複雑な配光分布を得ることは難しい。そこで、ハロゲンランプなどの従来ランプ光源用とは異なる、LED光源に適した光学系が必要となる。

また、モーターショーで出展されるコンセプトカー等のヘッドライトのデザインは薄型のものが多く見られることから<sup>(4)(5)</sup>、薄型ヘッドライトの将来需要が高いことがうかがえる。しかしながら、現行のヘッドライト光学系では、配光性能等を満足しつつそのような薄型のデザインを達成することは困難と思われる。これは、ヘッドライトの光学系サイズ(ヘッドライトの開口サイズ)の小型化と光利用効率がトレードオフの関係にあることが主要因である。

そこで当社は、超薄型のデザインと高い光利用効率の両方を達成することができる新しいヘッドライト用光学系として“RIR光学系”を考案した<sup>(6)</sup>。RIR光学系は、入射屈折面R(Refraction surface)と全反射面I(Total Internal Reflection surface)、出射屈折面R(Refraction surface)を持つRIRレンズを含む。RIR光学系を適用したヘッドライトは、超薄型デザインと高い光利用効率の両立を可能にし、ヘッドライトのデザイン自由度を向上させるとともに省エネルギーにも貢献できる。

# 2. ヘッドライト光学系と課題

ヘッドライトの光学系は、LED光源から広範囲に放射される光を集光し、ロービームが上方に飛ばないための境界線(カットオフライン)を持つ配光分布を形成して車両前方に投射する(図1)。一般的なプロジェクタ方式の光学系には、金属蒸着を施したリフレクタなどの反射面が用いられるが<sup>(7)</sup>、反射面を用いると、反射光路と光学系との干渉回避や反射損失によって光学系が大型化するとともに、光利用効率が低下してしまう。そこで、光学系の小型化と光利用効率の向上が課題となる。



図1. ヘッドライトの配光(ロービーム)

# 3. RIR光学系

## 3.1 RIR光学系の概要

先に述べた課題に応えるため、当社は独自の“RIR光学系”を考案した。RIR光学系では、屈折作用と全反射作用だけを利用し、金属蒸着面による反射を用いない。これによって、投射レンズの高さを20mmに小型化するとともに一般的なプロジェクタ方式に対して光利用効率を約1.8倍とし、一般的な高さ40~60mmの投射レンズと同等以上の明るさを確保した。小型化によってヘッドライトの形や配置などのデザイン自由度を向上させ、細目或多灯、1灯タイプなど、二輪・四輪を問わず様々な車種やグレードのヘッドライトに適用が可能である。

## 3.2 RIR光学系の構成と配光形成の原理

図2にRIR光学系の構成と配光形成原理を示す。RIR光学系は、集光レンズとRIRレンズから構成される。この光学系に特有のRIRレンズは、金属蒸着面による反射面がない中実の屈折材からなり、光の制御には屈折作用と全反射作用だけを利用している。

図2を用いてRIR光学系の配光形成原理について述べる。図はRIR光学系の側面図である。LED光源から出射された光は集光レンズによって集光される。集光レンズには全反射面を含むTIR(Total Internal Reflection)レンズを採用することで高効率な集光が可能になる。集光レンズから出射される光は、RIRレンズのカットオフライン形成部付近に集光される。RIRレンズに入射する光は、最適化された自由曲面形状の入射屈折面によって屈折され、所望の配光分布が形成される。入射屈折面に入射した光は、光路Ray1を通り出射屈折面から投射される。一方、入射屈折面に入射した光の一部は、光路Ray2に示すようにRIRレンズの全反射面で全反射される。このように、光路Ray1の光と光路Ray2の光をカットオフライン形成部近傍で重畳させることで、カットオフライン近傍を明るく照明することを可能にしている。なお、カットオフライン形成部は、RIRレンズの全反射面の終端に形成されたカットオフライン形状の稜線(りょうせん)部のことである。このカットオフライン形成部をRIRレンズの出射屈折面の焦点位置と一致させることで、カットオフライン形成部を含む焦点面上に形成された配光パターンを車両遠方に投影する。

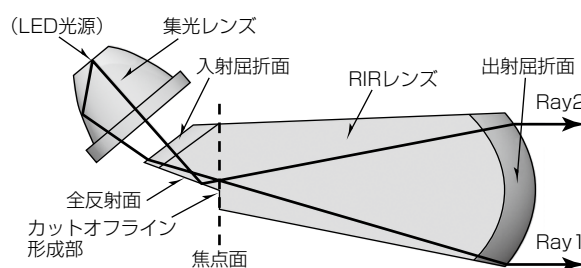


図2. RIR光学系の構成と配光形成原理

### 3.3 RIR光学系の特長

ここでは、一般的なヘッドライト光学系としてのプロジェクタ方式光学系と比較しながらRIR光学系の特長を述べる。図3に、プロジェクタ方式光学系の構成を示す。プロジェクタ方式光学系は、一般に楕円(だえん)リフレクタ、シェード、投射レンズの三つの光学部品で構成される。LED光源からの光を楕円リフレクタでシェード付近に集光する。シェードは光を遮ることでカットオフライン形状を持つ配光パターンを形成する。最後に、投射レンズによって焦点面上に形成した配光パターンを投射する。プロジェクタ方式光学系では、図の光路Ray3と光路Ray4に示されるような原理的に光を取り込めない領域が存在することに加え、楕円リフレクタの金属蒸着面による反射損失があることから、光利用効率の低下を招いている。

一方、RIR光学系は、集光レンズとRIRレンズの二つの光学部品で構成され、プロジェクタ方式光学系に比べて部品点数が少ないため、光学界面でのフレネル損失による光利用効率の低下を抑えることができる。また、光の反射に全反射を利用しており、金属蒸着面による反射を利用していない。全反射による光の反射率は原理的にはほぼ100%であり、高い光利用効率を維持できる。

図4に、プロジェクタ方式光学系とRIR光学系について、投射レンズの高さと光利用効率の関係をシミュレーションした結果を示す。LED光源は同一とし、配光分布が同等のパターンとなるように設計した。図から、RIR光学系はプロジェクタ方式光学系に比べて高い光利用効率を得られていることが分かる。特に、投射レンズの高さが20mmの場合は約1.8倍である。つまり、小型化と高い光利用効率を両立させることが可能である。

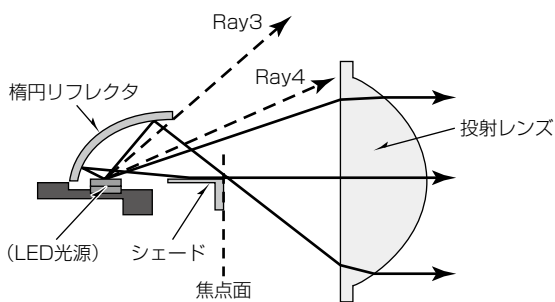


図3. 一般的なプロジェクタ方式光学系

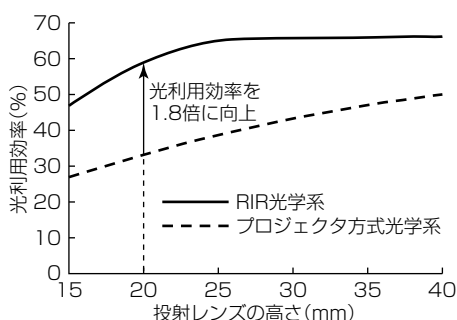


図4. 投射レンズの高さと光利用効率

### 4. 試作機

RIR光学系を用いた投射レンズの高さ20mmの超薄型ヘッドライト光学モジュール試作機を開発した。図5に試作機の外観写真を示す。左側の3モジュールがロービーム、中央の3モジュールがハイビーム、右側の3モジュールが合計6セグメントのADB(Adaptive Driving Beam)モジュールである。ここでは特にロービームモジュールについて述べる。

ロービームモジュールは、狭配光モジュールと広配光モジュールの2種類で構成される。狭配光モジュールは、配光の中央付近を特に明るく照明するとともに、配光パターンのカットオフライン形状を形成する。広配光モジュールは、水平方向に広がりを持った配光パターンを形成し、路肩を明るく照明する。

表1に試作機のロービームモジュールの仕様を示す。各モジュールの光源には光束600lmの矩形(くけい)LEDを採用した。ロービームは、最大光度が30,400cdで十分な明るさを持つとともに、欧州の配光規格UNECE R123に適合している。図6に試作機のロービームの路面配光分布を示す。3 luxの到達距離が126mであり、遠方視認性の高いロービームを実現している。水平方向の配光の広がりも±40度であり、道路側方でも高い視認性を確保してい

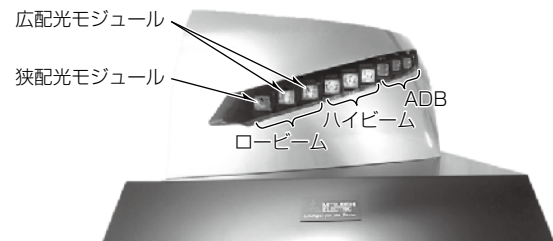


図5. 超薄型ヘッドライト光学モジュール試作機

表1. 試作機のロービームモジュールの仕様

モジュール数	3
光源光束(lm)	1,800
最大光度(cd)	30,400
消費電力(W)	19
3 luxの到達距離(m)	126
適合法規	UNECE R123

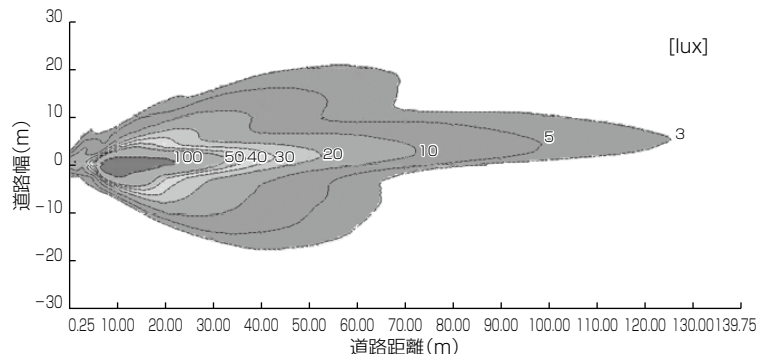


図6. ロービームの路面配光分布



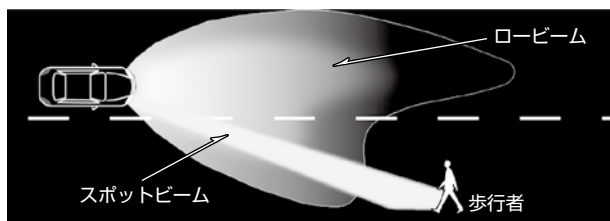


図7. 歩行者などをスポットビーム照射する機能

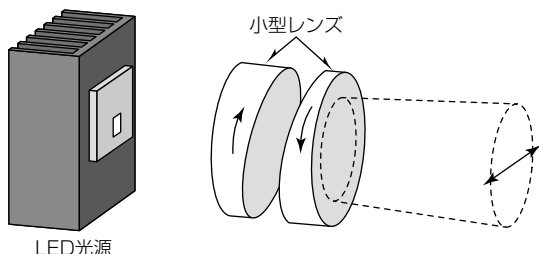


図8. スポットビームモジュールの光学構成

る。投射レンズの高さ20mmで消費電力19Wと、薄型かつ低消費電力でありながら十分な配光スペックを達成した。

### 5. 配光制御機能

夜間の安全運転に向けて、運転者の視界確保や視認性向上などが求められている。ロービーム走行では、ヘッドライトの光が届かない領域に存在する歩行者などの発見が遅れがちになることから<sup>(8)</sup>、車載センサで検知した対象物をスポットビームで照射する機能を開発した(図7)。図8にスポットビームモジュールの光学構成を示す。2枚のウェッジプリズム形状の小型レンズを互いに反対方向に同速度で回転駆動することによって、スポットビームを水平方向に走査できる。モジュール全体を駆動させる一般的な方式と比較し、可動範囲を含めたモジュール占有スペースの削減が可能である。

図9に、スポットビーム照射機能を搭載した高機能ヘッドライト用光学モジュールの試作機を示す。投射レンズの高さ20mmのロービーム、ハイビーム、ADBモジュールに加え、スポットビームモジュールを持っている。図10に、高機能ヘッドライト用光学モジュールを搭載したヘッドライト及び車両のデザインイメージを示す。スポットビーム照射機能によって、歩行者などの対象物を早期に発見して夜間の安全運転を支援するとともに、超小型の光学モジュールによってデザイン自由度を向上させることが可能である。

### 6. む す び

今回開発したヘッドライト用の光学系である“RIR光学系”及びこの光学系を適用した超薄型ヘッドライト用光学モジュールについて述べた。光学部品点数の削減や全反射作用の効果的な活用によって、投射レンズの高さ20mmで

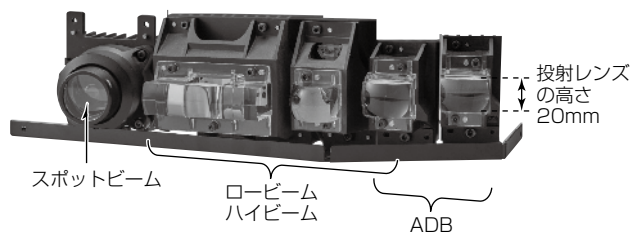


図9. 高機能ヘッドライト用光学モジュールの試作機

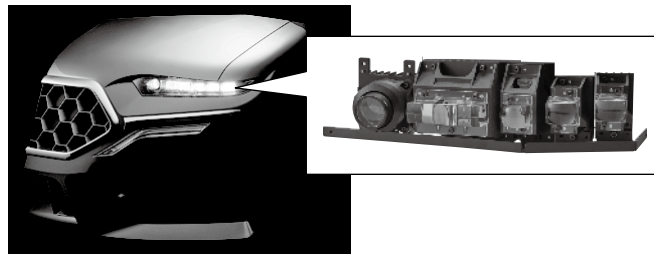


図10. 光学モジュール搭載時のデザインイメージ

消費電力19Wと超小型かつ低消費電力でありながら高い照射性能を持つロービームを実現した。RIR光学系はロービームだけでなくハイビームやフォグランプ、ADBなどの車載用ライティングにも適用が可能であり、様々なデザイン要求にも柔軟に対応できる。また、ロービームの届かない領域に存在する歩行者などをスポットビーム照射する機能について述べた。このような高度な配光制御機能によるライティングで安全な夜間走行を支援する。

### 参 考 文 献

- (1) 国土交通省：国土交通白書2018, 316～319 (2018)
- (2) ロバート・ボッシュGmbH：ボッシュ自動車ハンドブック, 日本語第3版, 日経BP社, 896 (2011)
- (3) 株式会社富士キメラ総研：車載電装デバイス&コンポーネンツ総調査2018「上巻：システム/デバイス編」, 120～121 (2018)
- (4) Bedu, F.: RENAULT Full LED Headlamp Strategy, 11th International Symposium on Automotive Lighting, 3～8 (2015)
- (5) Albou, P., et al.: Very thin headlamp with laser sources, 10th International Symposium on Automotive Lighting, 128～139 (2013)
- (6) Suwa, M., et al.: Development of the RIR Optical System for Ultra-thin Headlights, 6th International Forum on Automotive Lighting, 2～7 (2018)
- (7) ロバート・ボッシュGmbH：ボッシュ自動車ハンドブック, 日本語第3版, 日経BP社, 890 (2011)
- (8) 財交通事故総合分析センター, ITARDA INFORMATION, No.83, 9 (2010)  
<https://www.itarda.or.jp/itardainfomation/info83.pdf>

# リソース管理ソフトウェア“リソースマネージャー” による車載マルチメディアシステムの性能改善

三橋 禎\*

Improvement of Performance for Car Multimedia System by Resource Management Software "Resource Manager"  
Tadashi Mihashi

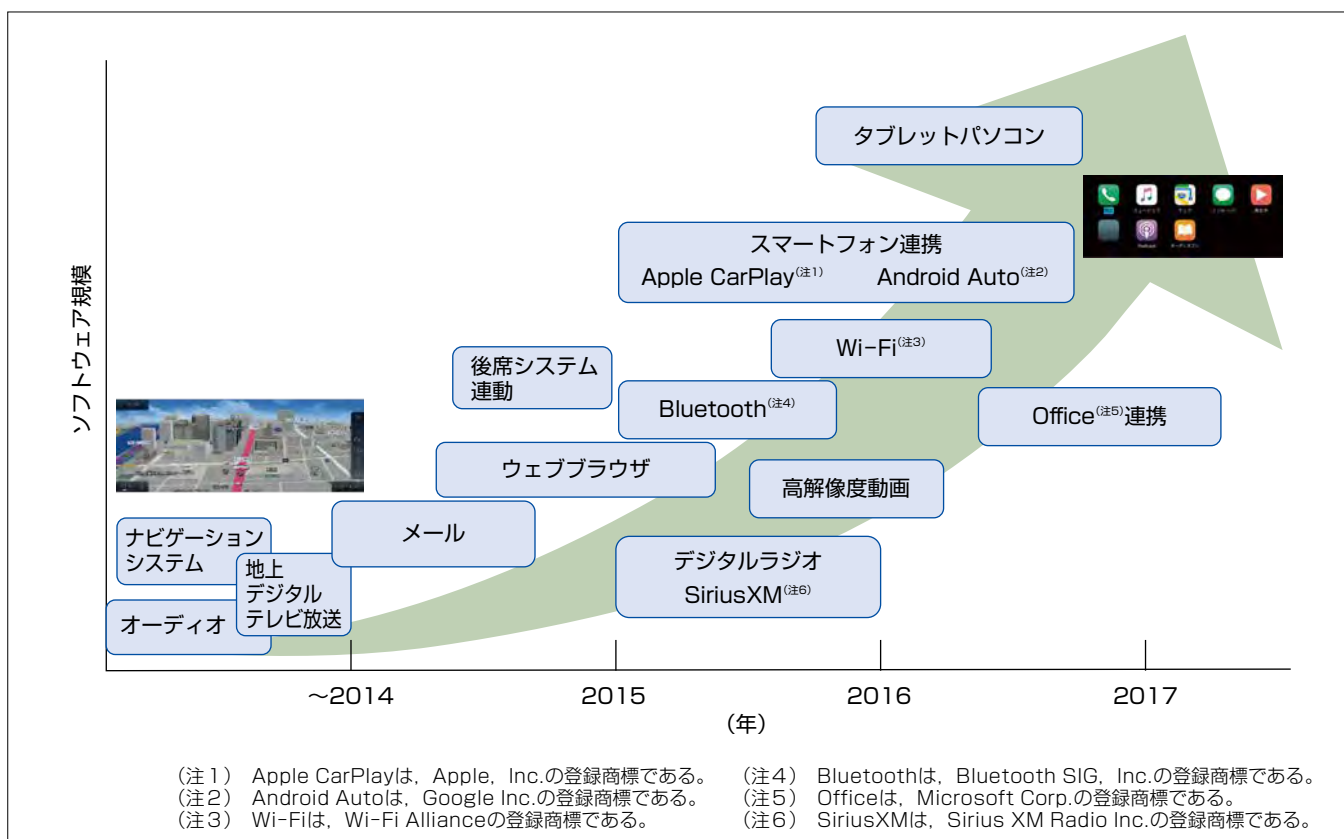
## 要 旨

車両に搭載されるマルチメディアシステム向けに、システムのリソースを最適化するリソース管理ソフトウェア“リソースマネージャー”を開発した。近年の車載マルチメディアシステムは、従来のナビゲーションよりも多機能・大規模化が進み、システム全体のリソースを最適化するために煩雑な調整が発生する。さらに、開発中や量産開始後に仕様変更要求が生じた場合、そのたびに同様のリソースの最適化を行う必要があった。

特に、車載マルチメディアシステムでは、開発開始前に決定されたハードウェアを変更することなく機能追加の仕

様変更に対応することが求められる。したがって、最初に決定した、限られたCPU処理能力と、メモリ容量の中で、即時応答性能を保ったまま、機能追加を行うことが必要になり、全てのユースケースでこれらのリソースが許容量を超えないように注意して開発を行う必要がある。

これらを鑑み、車載マルチメディアシステムで動的にCPUやメモリの有限リソースを管理できるリソースマネージャーを組み込むことで、性能を維持しつつ新機能の継続的な追加を実現できた。



## 車載マルチメディアシステムの高機能化とソフトウェア規模の増大

車載マルチメディアシステムの対応機能は増加の一方であり、それに伴ってソフトウェア規模も増大していく。販売後の車両でも、ソフトウェア更新だけで新しい機能に対応できるよう、市場の要求も高まっている。

## 1. ま え が き

近年の車載マルチメディアシステムのソフトウェアは大規模化が進み、システム全体のリソースを最適化するために煩雑な調整が発生する。さらに、既に販売された車両向けにも新機能追加ソフトウェアの開発要求が生じるため、ハードウェア変更による対応ができない。したがって、CPUやメモリのリソース不足と性能劣化への対応が不可欠となる。

これらを鑑み、システムで動的にCPUやメモリの有限リソースを管理できるソフトウェア“リソースマネージャー”を開発した。これによって、システムの基本性能を維持しつつ新機能の継続的な追加を実現できた。

本稿では、リソース管理の対象となる車載マルチメディアシステムの構成と仕様変更への対応について述べ、今回開発したリソースマネージャーによるヒープメモリやCPUのリソース管理の方法とその効果について述べる。

## 2. システムの仕様変更への対応

### 2.1 車載マルチメディアシステムの構成

#### 2.1.1 車載マルチメディアシステムのソフトウェア構成

近年の車載マルチメディアシステムでは、従来のカーナビゲーションや光学メディアなどによるコンテンツ再生だけでなく、衛星ラジオ再生やBluetoothを利用したスマートフォンからのコンテンツ再生、ウェブ閲覧、ハンズフリー電話、車両エアコン制御や照明制御など多種多様な機能に対応している。

実使用では、カーナビゲーションによる経路案内を実施しながら、Bluetooth接続されたスマートフォンから音楽を再生し、バックグラウンドでのFM放送の受信、インターネット経由でのリアルタイム交通情報の受信等、複数機能が同時実行される。

さらに、車載マルチメディアシステムは、例えばユーザーの操作によるメディアソース変更、エアコン操作やハンズフリー通話の呼発信といったエンドユーザーの要求に即時に応答できるようにする必要がある。したがって、それぞれのアプリケーションは全て即時にその機能を動かせるように、システム上で各機能が起動した状態で待機する常駐型のシステム構成が必要とされる。

また、スマートフォン等の車内に持ち込まれる機器の接続に対しても、ユーザー操作に対して素早く応答できるように、接続機器の音楽情報データや電話帳データなどをメモリに保持するようにしている。

#### 2.1.2 車載マルチメディアシステムのハードウェア構成

ハードウェア設計に際しては、自動車メーカーからの価格低減要求に応えつつ、多種多様な機能要求と性能要求に対応することはもちろん、車両販売後のソフトウェア更新

による機能追加を考慮して構成を決定する必要がある。また、車載機器では振動や埃(ほこり)に対する要求も厳しく、車両販売後にメモリ追加やCPUアップグレードをすることを考慮した構成が困難である。機能追加に備えたCPU性能やメモリの選定については、自動車メーカーと議論・合意の上で開発を始めることになり、開発開始後の変更要求は初期に選定したCPU性能やメモリ容量で対応することが前提となる。

リソースマネージャーを組み込んだ車載マルチメディアシステムは、2016年量産開始になる高級車向けシステムとして、2013年に表1に示すハードウェア構成で開発を開始し、最新(2018年秋)のソフトウェアに対しても全く同じハードウェア構成を取っている。

### 2.2 仕様変更への対応

2013年の開発着手以降、スマートフォンの本格普及による連携機能の強化、車外との通信を使ったサービスの充実など、車載システムとしての技術トレンド追従、さらには開発システムの搭載予定車種の増加によって、膨大な仕様変更が発生した。開発中及び量産後の半年ごとの更新プログラムの仕様変更累計数、及びソフトウェア総ステップ数の推移を図1に示す。最も仕様変更要求が多く発生した2017年春実施の量産ソフトウェア切替えでは、448か所の仕様変更要求が発生し、その規模増加量はプログラムで80万行以上にも及んだ。変更の大部分は新たな機能追加に伴うものであるが、これは開発初期の想定を大幅に超えるものである。

先に述べたとおり、このシステムでは、全てのアプリケーションが常駐し、複数のアプリケーションが同時に実行されるユースケースが通常の使用で発生する。したがっ

表1. 車載マルチメディアシステムのハードウェア構成

CPU	Cortex <sup>(注7)</sup> -A15 4コア(1.5GHz)
RAM	DDR3 4GB
HDD	300GB
eSD	2GB
NOR FLASH	4MB

(注7) Cortexは、Arm Ltd.の登録商標である。  
RAM : Random Access Memory  
eSD : embedded SD

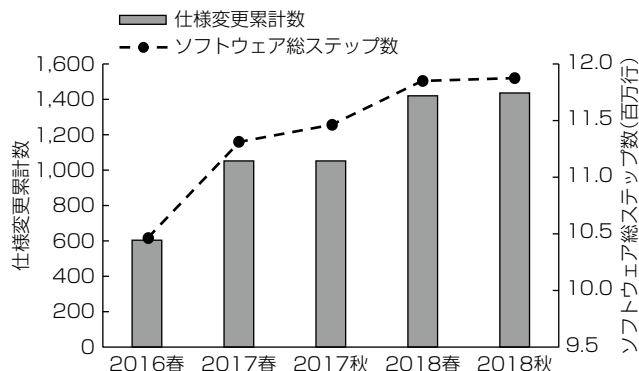


図1. 仕様変更累計数とソフトウェア総ステップ数の推移

て、このような大規模な機能追加は複数の機能が同時に実行された場合のCPUリソースの枯渇を招く。また、アプリケーション常駐による消費メモリ容量が増加するため、メモリリソースの枯渇を引き起こすおそれもある。これらのリソース枯渇によって、性能劣化やシステム安定性低下といった問題を引き起こす。

こうした課題を解決するためには、有限であるリソースの枯渇が発生する前に、本来そのタイミングでリソースを必要とするモジュールに対してリソースを割り当てる必要がある。その手段として、有限のリソースを動的に管理できるリソースマネージャーを開発することにした。

### 3. リソースマネージャー

#### 3.1 ヒープメモリリソースマネージャー

対象機器では2,200MBのヒープメモリ容量があり、アプリケーションごとに静的にメモリ設計している。2016年量産開始版ソフトウェアに対し、2017年春の機能追加ソフトウェアでは、大規模な機能追加要求によってヒープメモリ使用量が当初想定値より最大450MB増える見込みとなり、ヒープメモリの容量を超える可能性があった。しかし、各アプリケーションのヒープメモリ使用量削減による最適化には限界があるため、2017年春以降の更なる機能追加にも対応できるように、ヒープメモリリソースを次のように動的に管理するヒープメモリリソースマネージャーを開発・実装した。

- (1) ヒープメモリの使用量モニタリングとしきい値判定
- (2) しきい値を超えた場合、ユーザーへの影響が少ない低優先機能から順にヒープメモリ開放実施
- (3) ヒープメモリ空き容量が十分になればヒープメモリ開放した機能へメモリ再割り当て

ヒープメモリ開放動作の優先順位は自動車メーカーとも協議し、次のように設定した。

- (1) WEBブラウザキャッシュ削除
- (2) ログ用バッファ破棄、ログ出力一時停止
- (3) リモートソフトウェアダウンロード一時中断
- (4) バックグラウンドでの描画用メモリ最適化処理中断
- (5) Bluetooth接続電話の電話帳キャッシュ量低減

低優先機能のヒープメモリ開放を行う場合のヒープメモリリソースマネージャーの動作例を図2に示す。ヒープメモリリソースマネージャーはメモリ確保要求を受け、メモリ残量と機能優先順位を加味し、必要に応じて低優先機能から順にメモリを解放していくことで、動的に高優先機能に対してメモリを確保できる。

このヒープメモリリソースマネージャー導入による効果を図3に示す。グラフはメモリ使用量が最大となるワーストケースでの各機能のヒープメモリの使用量を表す。大規模な機能追加要求によって、機能同時動作のワーストケー

スではヒープメモリ必要量が実際に存在するメモリ容量最大値を超える見込みとなっていたが、リソースマネージャー導入によって、2018年秋の切替えソフトウェアでのワーストケースでもヒープメモリ枯渇に陥ることなく、性能も維持することが可能になった。

#### 3.2 CPUリソースマネージャー

対象システムのCPUでは、16,900MIPSの性能を持ち、CPUリソースの割り付けは優先度スケジューリング方式である。したがって、図4に示すようにCPU負荷が低い場合は優先度が低いスレッドも適宜実行されるが、優先度が高いスレッドが高負荷となった場合、低優先スレッドにはCPU処理リソースがなかなか割り当てられないという

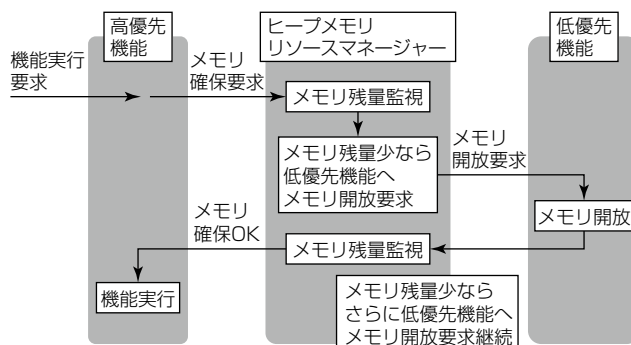


図2. ヒープメモリリソースマネージャーの動作例

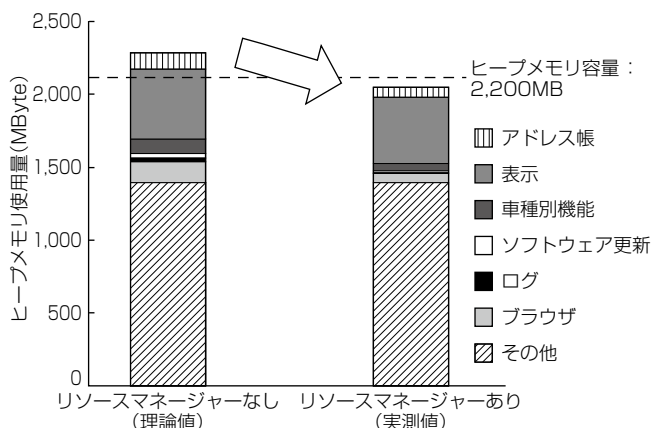


図3. ワーストケースでのヒープメモリ使用量

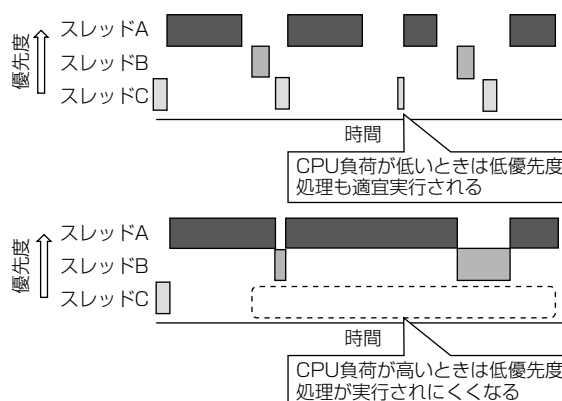


図4. スレッド優先度とスレッド実行の例



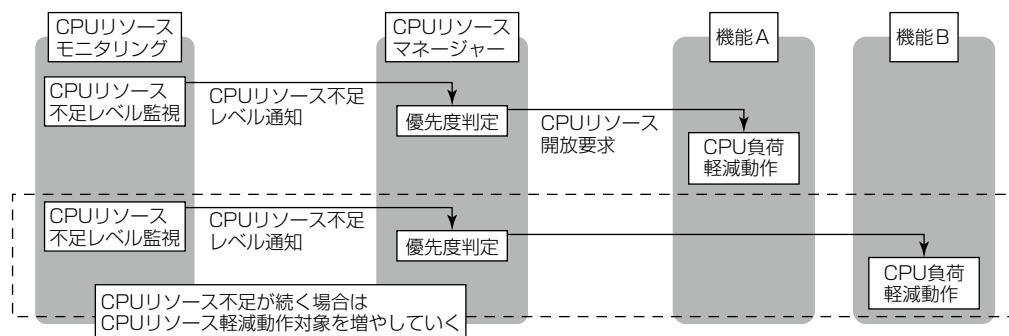


図6. CPUリソースマネージャーの動作例

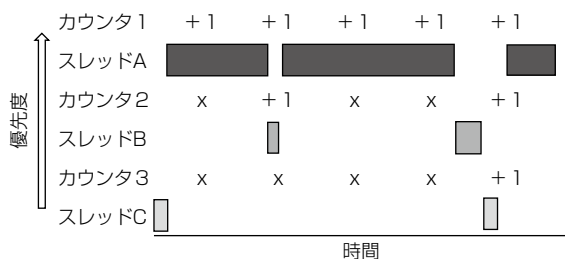


図5. カウンタの動作例

ことが起こる。このようにスレッド実行がなかなか行われない場合、一部機能の極端な性能劣化や動作停止という問題を引き起こす場合がある。

先に述べたとおり、対象機器では16,900MIPSの性能を持つCPUを採用していたが、2017年春の機能追加ソフトウェアでは大規模な機能追加要求によって、CPUリソースが最大44,100MIPS必要になることが見込まれた。しかしながら、各アプリケーションの処理負荷低減やスレッド優先度調整による最適化手法では限界があり、2017年春以降の更なる機能追加にも対応できるように、CPUリソースを次のように動的に管理するCPUリソースマネージャーを開発・実装した。

- (1) CPU使用状況モニタリングとリソース不足検出
- (2) ユーザーへの影響が少ない機能から順にCPU負荷軽減動作実施

各部の内容を次に述べる。

### 3.2.1 CPU使用状況モニタリングとリソース不足検出

モニタリング機構そのもののリソース消費を最小とすることを優先し、定時間ごとにカウンタ値を1ずつ増やす低優先度スレッドを複数追加した。CPU負荷が高い状況では、低優先度スレッドのカウンタ値が増えにくくなることから、このカウンタ値を読み出すことでCPU使用状況を推測することが可能である。図5の例の場合、優先度の高いカウンタ1はカウンタ数が5増えるが、優先度の低いカウンタ2, 3はそれぞれ2, 1しかカウンタ数が増えていない。このようなカウンタ値の差異から、カウンタ2より優先度の高いスレッドAがCPUを占有している時間が長く、カウンタが一回しかされていないカウンタ3以下の優先度ス

レッドがほとんど実行されていないことが把握できる。

このようなカウンタによるCPU使用状況モニタリングを実施し、カウンタ値によってCPUリソース不足レベルを5段階に評価して通知するメカニズムを持たせた。

### 3.2.2 ユーザーへの影響が少ない機能から順にCPU負荷軽減動作実施

上記CPUリソース不足レベルに応じて、段階的にCPU負荷を下げるに当たり、CPU負荷軽減動作の優先順位は自動車メーカーとも協議し、次のように設定した。

- (1) ログ出力機能の停止
- (2) 音声認識用の動的辞書作成速度低減
- (3) Wi-Fiの通信速度低減
- (4) 音楽プレイヤー楽曲情報取得速度低減
- (5) 画面描画更新頻度低減(24回/秒→5回/秒)
- (6) ソフトウェア更新データダウンロード中断

CPU負荷軽減を行う際のCPUリソースマネージャーの動作例を図6に示す。CPUリソースマネージャーはCPUリソースモニタリング機能からのCPUリソース不足レベル通知を受け、負荷軽減優先度順にCPU負荷を軽減することによって、低優先スレッドにもCPUリソースを割り当てることができる。

このCPUリソースマネージャー導入によって、大規模な機能追加を実施したにも関わらず、ワーストケースでも性能劣化を最小限に抑えることが可能になった。

## 4. む す び

高級車向け車載マルチメディアシステムとして、最先端機能の継続追加と性能への高い要求に応えるために開発したリソースマネージャーについて述べた。今後の自動運転やカーシェアリングで要求される新しい車載マルチメディアシステムは従来のカーナビゲーションやメディアコンテンツの視聴にとどまらず、更なる機能向上や新しいサービスへの対応など進化が継続することが想定される。これらの新しい機能やサービスのタイムリーな提供ができるよう、容易にアップデート可能な進化し続ける車載マルチメディアシステムを提供していく。

# 自動車機器での製品セキュリティへの取り組み

松井俊憲\* 高塚雄也\*\*\*  
 山口晃由\*\* 井上知之†  
 跡部悠太\*\*\*

## Approach to Product Security in Automotive Equipments

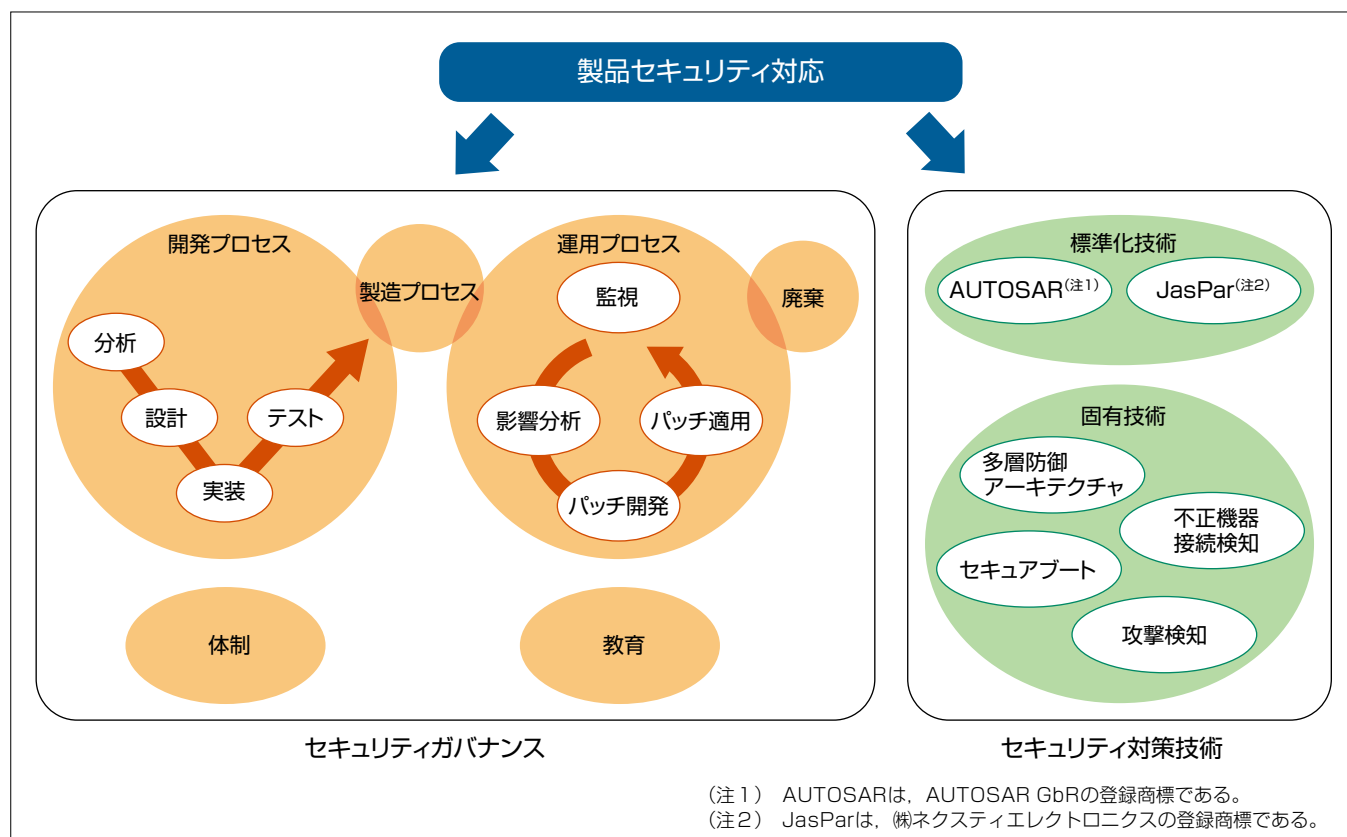
Toshinori Matsui, Teruyoshi Yamaguchi, Yuta Atobe, Yuya Takatsuka, Noriyuki Inoue

### 要 旨

車外から情報を入手するコネクテッドカーでは、新たな機能を提供できる反面、サイバー攻撃の対象にもなり得る。そのため自動車機器でもセキュリティ対応が必要となる。セキュリティ対応では、セキュリティポリシーに基づくライフサイクル全体のプロセス定義と体制整備、教育といったセキュリティガバナンス、及びサイバー攻撃から自動車機器を守るセキュリティ対策技術を準備する必要がある。

三菱電機では、自動車機器の製品ライフサイクル全体のプロセスとして開発・製造・運用・廃棄でのプロセス定義を進めている。開発プロセスでは、構築済みの品質と機能安全の要件に対応した開発プロセスにセキュリティの要件を融合させ、“Safety & Security開発プロセス”として定義した。運用プロセスでは、出荷後の脆弱(ぜいじゃく)

性情報を監視し、脆弱性情報の検出をトリガーに関係者が連携して対応するプロセスを定義した。さらにこれらプロセスを円滑に回すための体制として、PSIRT(Product Security Incident Response Team)を各拠点に設け、研究所等の社内連携も明確にした。またセキュリティ対策技術では、AUTOSAR, JasPar等が規定する標準化技術を準備するだけでなく、固有技術も準備している。固有技術では、多層防御アーキテクチャ、起動時に正当なプログラムであることをチェックするセキュアブート、発生順序の特徴を見つけ出すことで巧妙化する攻撃を検知できる攻撃検知技術、車載ネットワークへの不正機器接続検知技術等を開発している。



### 製品セキュリティ対応に必要な要素

自動車機器での製品セキュリティ対応は、セキュリティガバナンスとセキュリティ対策技術の側面がある。セキュリティガバナンスは、セキュリティポリシーをベースとした製品ライフサイクルの各プロセスの実施内容の規程、プロセスを円滑に回すための体制、教育が含まれる。セキュリティ対策技術は、標準化技術と固有技術に分類される。標準化技術はAUTOSARやJasPar等が規定する非競争領域となる対策技術であり、固有技術は競争領域として当社が力を入れている対策技術となる。

## 1. ま え が き

自動車産業を取り巻く環境の大きな変化の一つとして、乗員にとってより便利な機能を提供するために、自動車に搭載される機器は、自身が持つセンサや車内の別の機器から情報を入手するだけでなく、コネクテッドカーとして車外とつながって様々な情報を入手するようになってきている。車外とつながることで、より多くの情報を入手することができるが、一方で、パソコン、IoT(Internet of Things)機器等と同様にセキュリティ上の脅威にさらされ、サイバー攻撃の対象となり得る。車載システムやシステムを構成する個々の機器をサイバー攻撃から防御するための製品セキュリティ対応は、出荷の段階で全てが完了するわけではなく、出荷後に出現する新たな脅威への対応も求められる。これらの対応が不十分であると、カーナビゲーションシステム等に保存されている電話帳などの個人情報盗まれたり、自動車を車外から操作されて安全が脅かされたりすることになり得る<sup>(1)</sup>。今後、通信インフラの整備に伴ってコネクテッドカーが増加することが予想されることから、製品セキュリティ対応が急務になっている。

製品セキュリティ対応には、自動車業界としても取組みを進めている。この一つの動きとして、ライフサイクル全体でのセキュリティ要件をまとめた国際標準(ISO21434)が2020年に発行される予定である。当社は、公益社団法人自動車技術会を介して、国際標準の策定活動にも力を入れている。

## 2. セキュリティガバナンス

製品セキュリティ対応では、図1に示す製品ライフサイクル全体をカバーする開発・製造・運用・廃棄プロセスとそれを円滑に回すために関連部門と連携する体制が必要となる。これらのプロセスと体制は、企業が定めるセキュリティポリシーに基づくセキュリティガバナンスとなる。プロセスと体制は規則化し、定期的に見直していくことが重要となる。

当社での自動車機器の開発でも、自動車機器サプライヤーとして、安全性の高い製品と顧客・ユーザーへ安心安全を提供するため、セキュリティに関する取組みの継続的な推進・改善を進めることを目的としたセキュリティポリシー

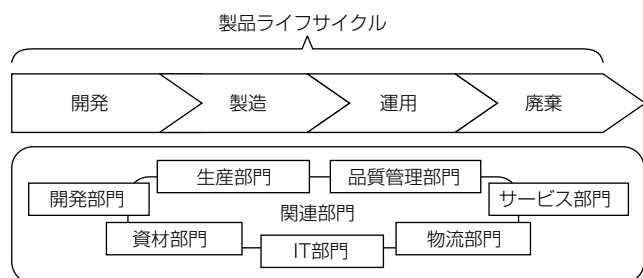


図1. 製品ライフサイクル全体

を策定し、それに基づく体制とプロセスの整備を進めている。

### 2.1 製品ライフサイクルでのプロセス

自動車機器での製品ライフサイクルは、開発プロセス、製造プロセス、運用プロセス、廃棄プロセスの流れになる。それぞれのプロセスで、製品セキュリティ対応として実施すべきことを明確にしている。

#### 2.1.1 開発プロセス

開発プロセスでは、まず、機能安全とセキュリティの開発プロセスを共通化して効率的に開発できるように、機能安全に対応した開発プロセスに、セキュリティ対応として求められる要件を融合させたSafety & Security開発プロセス(S&S開発プロセス)を策定した。さらに、図2に示すようにS&S開発プロセスでの分析・設計・実装・テストの各フェーズの実施を支援するガイドを作成している。各ガイドの特徴を次に示す。

- (1) 分析ガイド：機能安全の分析結果に対して、当社が持つセキュリティ分析技術に自動車業界で検討されているセキュリティ分析技術の要素を加えた自動車機器向けのセキュリティ分析技術を用いて、網羅的に分析するための手順を明確化している。
- (2) 設計ガイド：分析結果から導出されたセキュリティ対策のコンセプトを、システム・ハードウェア・ソフトウェア設計で作り上げる具体的な対策とするための手順を明確化している。さらに、当社の情報システム、重要インフラ向けのセキュリティ対策実績を元に、分析結果と対策が紐(ひも)付いたリストを作成することによって、自動車分野でも対策を導き出すことを効率化している。
- (3) 実装ガイド：セキュリティ対策を盛り込んだコードを作成するために守るべきセキュアコーディングルールを明確にするとともに、AUTOSARやJasParをベースとしたセキュリティ対策での標準化技術(メッセージ認証、Hardware Security Module等)の実装と適用方法を明確にしている。作成したコードに脆弱性が含まれていないか、コーディングルールが守られているかを解析するツールの導入も併せて実施している。
- (4) 評価ガイド：セキュリティに特化したテストとして、テスト対象の動作状態と連動させたファズテストを実施する評価環境と評価手順を明確にしている。さらに、侵入テストを軸にしたより実践的なセキュリティテストを実施する体制を整えている。

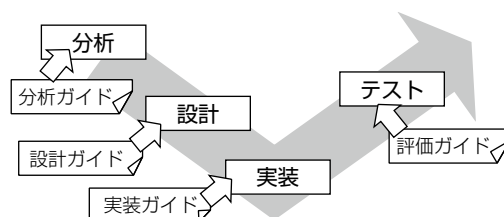


図2. 開発プロセスを支援するガイド

## 2.1.2 製造プロセス

製造プロセスでは、セキュリティ対策を行う上でベースとなる暗号化に必要な鍵情報や、機器に実装するプログラムやデータといった秘密情報を製造ラインでどのように管理し、取り扱うかについて明確にしている。

## 2.1.3 運用プロセス

運用プロセスで、PSIRTは、開発・販売する製品について脆弱性情報の収集と分析を行い、対策の実施を支援する役割を担う。

脆弱性情報については、まず自動車関係のサイバーセキュリティに関する情報を共有し、連携して対策に当たる組織である米国Auto-ISAC(Automotive Information Sharing and Analysis Center)に加入して自動車業界固有の情報収集を行っている。またIT(Information Technology)分野を源流として、今後車載適用が増えてくるOS(Operating System)や通信等の技術についての脆弱性情報も監視するためにJPCERT/CC(Japan Computer Emergency Response Team Coordination Center)等からの情報収集も行っている。さらにOSS(Open Source Software)などの脆弱性情報を検出するツールも導入している。なお、製品に関する脆弱性情報は収集するだけでなく、外部から直接報告される場合に備えて、情報収集の窓口を設けて対応している。

脆弱性を悪用され被害が発生した場合や被害が発生する可能性が高い場合はインシデント対応を実施する。対応では、PSIRTが影響度、緊急度を基にインシデントのレベルを算出し、レベルに応じてPSIRTと製作所が連携するだけでなく、自動車メーカーや関係するサプライヤーチェーンと連携して対応する。

## 2.1.4 廃棄プロセス

廃棄プロセスでは、個人情報や鍵情報、プログラムそのものが流出しない仕組みを組み込んでいくことが必要になる。そのために、ソフトウェアでの対策だけではなく、ハードウェアを連携させた対策を進めている。

## 2.2 体制

体制として、実際に自動車機器を開発する当社製作所には、脆弱性の影響分析と教育を行う組織を立ち上げるとともに、製作所を統括する事業本部に脆弱性情報の監視と製作所のプロセスの改善を支援する組織をそれぞれ2018年度に立ち上げた。これらの組織は、2.1.3項で述べた製品セキュリティインシデント対応チーム(PSIRT)となる。

## 3. セキュリティ対策技術

この章では、車載システムや機器に搭載するセキュリティ対策技術について述べる。

### 3.1 車載システム向け多層防御アーキテクチャ

従来の車載システムでは、各機器は単独でセキュリティ

を担保している。しかし、搭載されたセキュリティ対策は各々守るべきところが異なるため、車載システム全体のセキュリティとしては不十分になるおそれがあった。この課題を解決するため、各機器に搭載する複数のセキュリティ対策で補完させることで、従来よりも強固なセキュリティを実現する多層防御アーキテクチャを開発した。この多層防御では、一つのセキュリティ対策では守れない攻撃に対し、別の一つ又は複数の対策を組み合わせで補完することでセキュリティを強化する。例えば、ソフトウェア改ざんを目的とした攻撃に対し、起動時には、3.2節で述べるセキュアブートで対応し、起動後の攻撃については攻撃検知で対応する、といった補完関係を持たせた。また、車載システムにはカーナビゲーションシステムを代表としたインフォテインメント系から、ハンドルを操作したり、運転支援をしたりする走行安全系の機器があり、それぞれリアルタイム性や接続性などの特性が異なる。そのため、各機器の特性に適したセキュリティ対策を選定することによって、車載システム全体のセキュリティを確保することを可能にした。

### 3.2 自動車機器向けセキュアブート

近年、組み込み制御機器で、不正プログラムを実行させないために、実行するプログラムの電子署名を検証することで、正当なプログラムであることをチェックするセキュアブートの採用が増えている。自動車機器でも同様にセキュアブートの採用が増えることが予想される。しかし、従来のセキュアブート方式の場合、ソフトウェア本体とその電子署名を丸ごと古いバージョンに戻すダウングレードを機器単体で検証できない<sup>(2)</sup>。そこで、この課題を解決するセキュアブート方式を開発した<sup>(3)</sup>。

この方式では、機器単体でダウングレードの検証を行うため、初回起動時の署名検証の過程で生成されたハッシュ値をセキュアな領域に格納し、2回目以降のセキュアブートに活用することで、ダウングレードが発生しても、セキュアな領域内のハッシュ値との比較によって検証可能になる。

セキュアブートには、秘密情報の秘匿や改ざん防止のため、ハードウェアで保護されたセキュアな領域が必要になる。よって、SoC(System on a Chip)内に通常の非セキュアな演算を行う主演算部と、鍵などの秘密情報の安全な格納とそれを用いた演算を内部で行えるセキュリティ演算部を搭載するプラットフォームを前提とする。

今回開発したセキュアブート方式を図3に示す。ブートローダに含まれるTEE(Trusted Execution Environment)などの既存のセキュアブート機能との併用を可能にするため、ブート時に各ソフトウェアの完全性検証を署名検証ベースで行い、各ソフトウェアのハッシュ値を収集し、あらかじめ計算しておいたMAC(Message Authentication



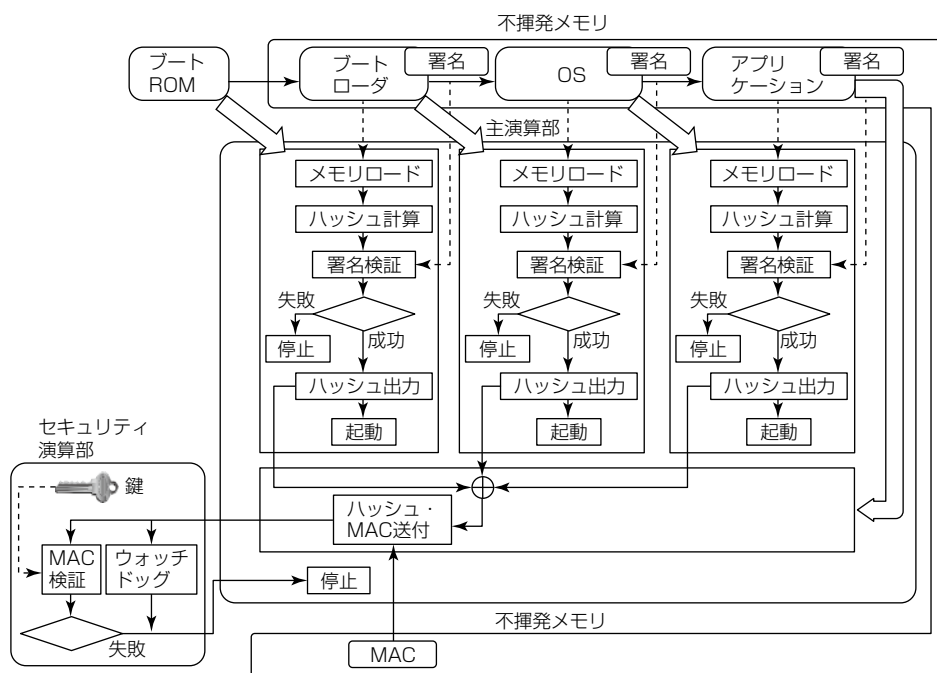


図3. 開発したセキュアブート方式の動作

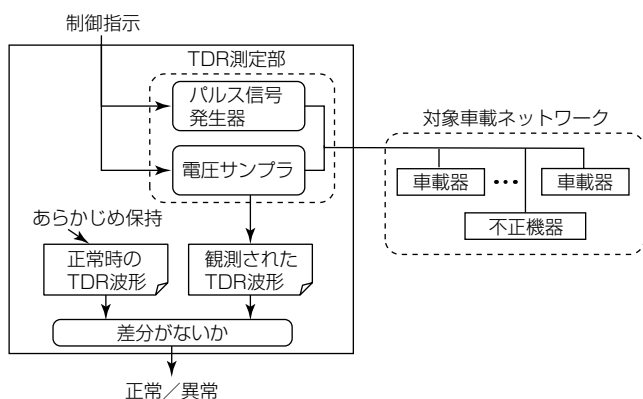


図4. 不正機器接続検知方式

Code)とともにセキュリティ演算部に送り、セキュリティ演算部内にある鍵でMACの検証を行う。これによって、ダウングレードを検知する。

### 3.3 車載システム向けサイバー攻撃検知

従来、外部からのサイバー攻撃に対しては、通信パケットを監視し、攻撃指示が仕込まれているかをチェックしていたが、攻撃指示の複雑化・巧妙化につれ、対応が困難となっている。しかし、攻撃対象システムに焦点を置き、過去のサイバー攻撃の事例を調査すると、攻撃者が目的を達成するために必ず実施せざるを得ない攻撃の手口があること、複数の攻撃手口は発生順序に特徴があることが分かった。これらに基づき、車載システム向けサイバー攻撃検知では、攻撃者が必ず実施せざるを得ない攻撃手口による痕跡を捉え、攻撃目的に基づく発生順序の特徴を見つけ出すことで、攻撃指示が複雑化・巧妙化したサイバー攻撃を高精度に検知することを可能にした。

### 3.4 不正機器接続検知

カーシェアでは、遠隔からのサイバー攻撃だけでなく、

車両へ物理的に機器を取り付ける攻撃についても考慮する必要がある。攻撃者は、不正機器を車載ネットワークへ物理的に後付けすることで、自動車の走行制御を乗っ取ることができる。この課題に対し、不正機器が車載ネットワークへ後付けされていることを検知する不正機器接続検知技術を開発している。

この技術では、ネットワークの電気的特性を観測するTDR(Time Domain Reflectometry)技術<sup>(4)</sup>を応用する。TDR技術は、高周波ステップ信号を印加し、それに対する反射応答を時間波形として観測する。図4に開発した不正機器接

続検知方式を示す。この方式では、不正機器が接続されていない状態の正常時のTDR波形をあらかじめ保持しておき、不正機器の後付けを検査する際にTDR波形を観測し、正常時のTDR波形と比較する。ネットワークの電気的特性は機器の接続構成によって一意に定まるため、観測されたTDR波形と正常時の波形に差分があれば、不正機器の後付けがあったと検知できる<sup>(5)</sup>。

## 4. む す び

自動車機器の開発から市場での運用、廃棄までの製品ライフサイクルを通じたセキュリティ対応プロセスと体制構築、及びセキュリティ対策技術を述べた。

今後も自動車機器のセキュリティを向上させるため、継続的な推進・改善や技術開発を行っていく。

## 参 考 文 献

- (1) Charlie Miller, et al.: Remote Exploitation of an Unaltered Passenger Vehicle (2015)  
<http://illmatics.com/Remote%20Car%20Hacking.pdf>
- (2) Matteo Carlini: Secure Boot on Arm system, Linaro connect San Francisco 2017 (2017)
- (3) 山口晃由, ほか: 組み込み制御機器におけるセキュアブート方式の検討, SCIS 2019 3D2-3 (2019)
- (4) Dascher, D. J.: Measuring Parasitic Capacitance and Inductance Using TDR, Hewlett-Packard Journal, **47**, No.2, 83~96 (1996)
- (5) 跡部悠太, ほか: TDRを用いた不正機器の車載ネットワーク接続検知に関する一検討, SCIS 2019 1E2-2 (2019)

# 4GL-IPU： 2モータシステム用パワーユニット

石橋誠司\*  
福 優\*  
和田典之\*

4GL-IPU : Power Unit for 2 Motor System

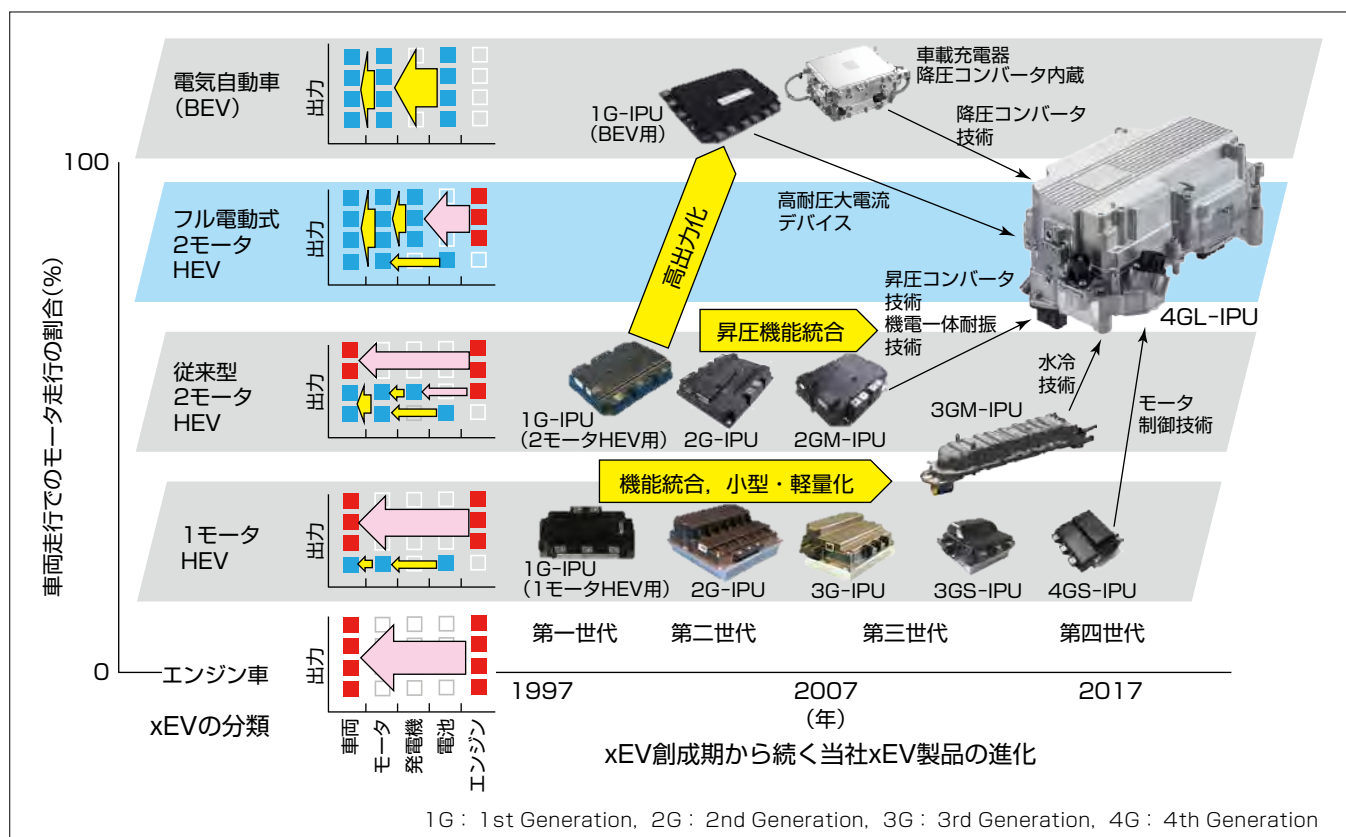
Satoshi Ishibashi, Masaru Fuku, Noriyuki Wada

## 要 旨

地球温暖化対策や排出ガス規制対応のため、HEV(Hybrid Electric Vehicle)やBEV(Battery Electric Vehicle)などのxEV(HEVやBEV等の電動化車両の総称)の市場投入が続いている。三菱電機は世界に先駆け、xEV創成期の1997年にHEV用IPM(Intelligent Power Module)を製品化して以来、小型・軽量・低コスト・高性能をコンセプトに周辺機能の統合を進めたIPU(Integrated intelligent Power drive Unit)の製品化を進め、トランスミッションに直接搭載可能な高耐振性を特長とする2モータHEV用IPU、並びに平滑コンデンサ及びヒートシンク内蔵を特長とする1モータHEV用IPUを量産化するなど、地球温暖化対策や排出ガス規制対応に不可欠なxEVの普及に貢献してきた。

近年、高い環境性能と走る楽しみの両立が可能な、高出力モータによる電動走行のニーズが高まっており、低速での巡航走行だけでなくフル加速や高速走行も全てモータで走行可能なフル電動式の新しい2モータHEVや、外部からの電池充電も併用可能なPHEV(Plug-in HEV)等の高出力2モータシステムが増加傾向にある。

この背景の下、フル電動式の2モータシステムに対応した第四世代IPUとして、電動走行用・発電用の二つの高出力モータを駆動するインバータと、システム電圧をモータ小型化に適した高電圧にする昇圧コンバータと、従来は車室内に搭載されていた12V電池充電用の絶縁型降圧コンバータをコンパクトに統合した4GL-IPUを開発した。



## フル電動式の新しい2モータHEVに対応する4GL-IPU

xEVにはエンジンが主役の1モータHEVからモータだけで走行するBEVまで様々な種類がある。従来の2モータHEVはエンジン出力を併用するためモータ出力は車両出力より小さかった。しかし、モータだけで走行するフル電動式の新しい2モータHEVが近年増加傾向にある。フル電動式では高出力化と小型化の両立が必要であり、これに対応する高放熱パワーモジュールと当社独自の昇圧回路を採用した4GL-IPUを開発した。

## 1. ま え が き

当社はxEV創成期である1997年にHEV用IPMを製品化して以来、小型・軽量・低コスト・高機能をコンセプトに周辺機能の統合を進めたIPUの製品化を進め、トランスミッションに直接搭載可能なIPUや、平滑コンデンサ及びヒートシンクを内蔵したIPUを量産化するなど、地球温暖化対策や排出ガス規制対策に不可欠なxEV普及に貢献してきた。

近年、高い環境性能と走る楽しみの両立が可能な、高出力モータによる電動走行のニーズが高まっており、低速での巡航走行だけでなくフル加速や高速走行も全てモータによって走行可能なフル電動式の新しい2モータHEVや、外部からの電池充電も併用可能なPHEV等の高出力2モータシステムが増加傾向にある。

この背景の下、フル電動式の2モータシステムに対応した第四世代IPUとして、電動走行用・発電用の二つの高出力モータを駆動するインバータと、昇圧コンバータと、従来は車室内に搭載されていた絶縁型降圧コンバータをコンパクトに統合した4GL-IPUを開発した。

本稿では、4GL-IPUの特長と適用技術について述べる。

## 2. 4GL-IPUの特長

4GL-IPUは中型車のフル電動走行に必要な高出力と、従来は車室内に搭載されていた降圧コンバータの機能統合に加え、複数の車載要件に対応する小型化とトランスミッションに直接搭載可能な高耐振性を高次元で実現した。次に、4GL-IPUのシステム構成と部品配置について述べる。

### 2.1 4GL-IPUのシステム構成

4GL-IPUのシステム構成を図1に示す。4GL-IPUは電動走行用・発電用の二つのインバータ、主電池電圧を650Vに昇圧する昇圧コンバータ、補機用12V電池を充電する絶縁型の降圧コンバータ、衝突時等にIPU内部の高電圧を急速に放電する急速放電機能で構成している。

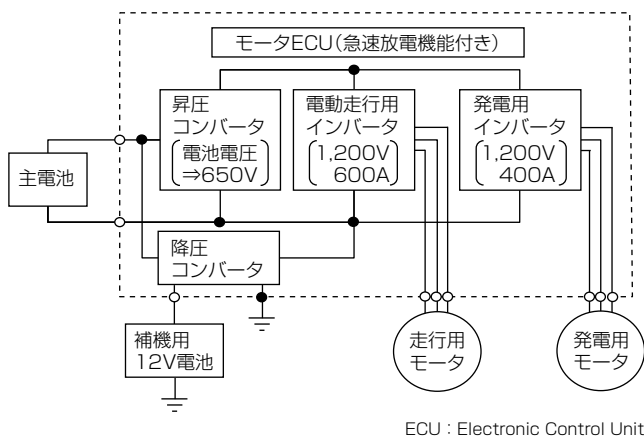


図1. 4GL-IPUのシステム構成

### 2.2 4GL-IPUの部品配置

4GL-IPUの部品配置を図2に示す。4GL-IPUは2.1節で述べたシステム構成要素の大半を構成するパワーサブアセンブリ (ASSY) と、パワーコネクタ、信号コネクタ等の車両とのインタフェース部品を集中配置したケースLサブASSYと、平滑コンデンサを持つケースUサブASSYの三つの筐体(きょうたい)から構成される。

パワーサブASSYは水冷流路となるウォータージャケット (W/J) の上下に、放熱が必要なパワーモジュール・昇圧用リアクトル・降圧コンバータ部品群を配置している。

高放熱が求められるパワーモジュール側のヒートシンク (H/S) とW/Jは摩擦攪拌(かくはん)接合 (Friction Stir Welding: FSW) によって接合される。従来製品ではOリングを介してねじ締結し、水冷流路の密閉とH/Sの固定を行っていたが、FSWの採用によって流路の密閉信頼性向上とねじ締結不要による小型化(放熱有効面積率向上)、筐体部品点数削減を実現した。

Oリングでは万が一水漏れが発生した際に製品内部の水没を避ける排水構造が実現困難なため、H/SとW/Jの締結を流路中央に設けることが困難であったが、密閉信頼性の高いFSWを採用することで流路中央を強固に締結し、トランスミッション直接搭載に必要な耐振性を確保できた。

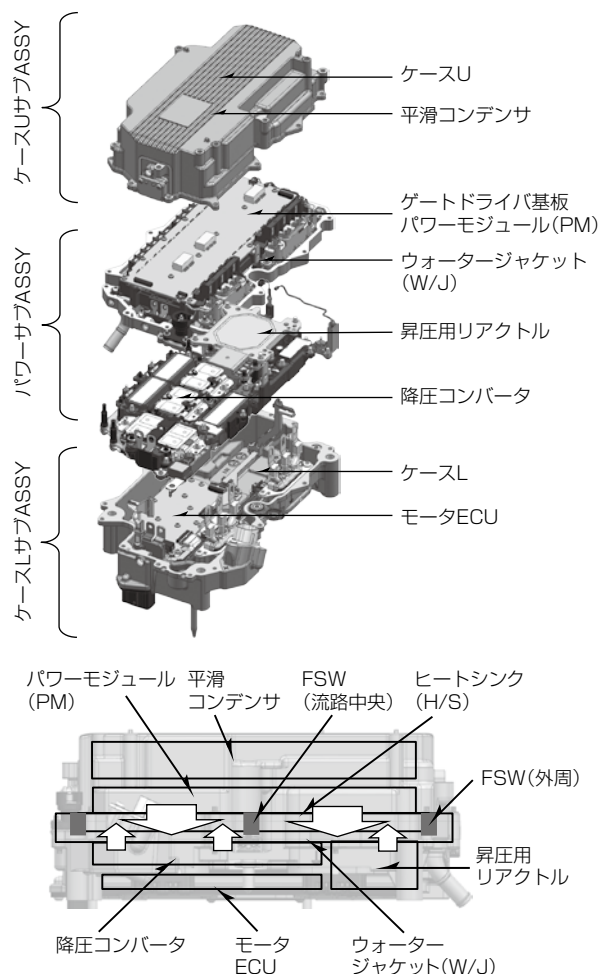


図2. 4GL-IPUの部品配置

### 3. 4GL-IPUの適用技術

先に述べた高出力化と小型化と機能統合を高次元で実現するため、4GL-IPUでは新型パワーモジュール、独自回路方式による昇圧コンバータ、新しい制御技術等を適用した。

#### 3.1 新型パワーモジュール<sup>(1)(2)</sup>

多くの機能を小さな筐体に収容するため、フル電動走行に適したパワーモジュールNdbPM(Nano sinter die-bonded Power Module)を新たに開発した。図3に4GL-IPUに採用した新開発のNdbPMと、3GM-IPU等の従来製品に採用しているT-PM(Transfer molded-Power Module)の放熱構造を示す。

T-PMはモータを短時間のトルクアシストに用いる1モータHEVや、エンジン出力を併用可能でモータ出力がフル電動式に対して比較的小さな従来型の2モータHEVや3モータHEVに採用されていた。そのため短時間出力向上を狙い、パワーデバイス直下にヒートスプレッド(熱拡散用の比較的厚い銅板)を配置して過渡熱抵抗を低減する放熱構造であった(図3(a))。

一方、今回開発したNdbPMはフル電動走行に必要な大電流の連続出力に対応するため、定常熱抵抗低減を片面放熱のシンプルな構造で実現することを目指した。すなわち、パワーモジュールと冷却器間の固定をばね押さえからはんだ接合に変更して締結部品と熱伝導性グリースを廃止した。また絶縁部材を絶縁シートからDBC(Direct Bonded Copper)基板に変更することで熱伝導率が比較的小さな部材を廃止するとともに大幅な小型化を実現した。さらにダイボンド(パワーデバイスと放熱部材間の接合)に高熱伝導かつ薄厚化が可能なAg(銀)ナノ粒子によるシンター接合(ナノ粒子によってAgの融点以下で焼結する接合方法)を採用してダイボンドのボイドレス化を実現した(図3(b))。これら放熱構造の見直しによって、パワーデバイス-冷却水間の定常熱抵抗低減とパッケージサイズの小型化、軽量化を実現した(図3(c))。

#### 3.2 独自回路方式による昇圧コンバータ

昇圧コンバータを搭載しシステム電圧を高電圧化・低電流化することによって、モータ・インバータの小型化と高効率でモータ駆動可能な出力領域を拡大させることが可能になる。一方で昇圧コンバータにはパワーモジュール、低電圧側(C1)・高電圧側(C2)コンデンサ、リアクトル(L)が必要であり、限られた搭載スペースで昇圧機能を実現するにはこれら部品の小型・軽量化が重要である。

4GL-IPUでは一般的な昇圧チョッパ方式に対して中間コンデンサC0を設け、図4に示す四つのモードを繰り返すことによって昇圧動作を行う当社独自の昇圧回路方式を採用した。

モード1：リアクトルLに磁気エネルギーを蓄える

モード2：蓄えた磁気エネルギーをコンデンサC0へ放出

モード3：再度リアクトルLに磁気エネルギーを蓄える

モード4：蓄えた磁気エネルギーとモード2で蓄えたC0のエネルギーを高電圧側コンデンサC2へ放出

図5に一般的な昇圧チョッパ方式と当社独自回路方式の比較結果を示す。当社独自回路方式ではパワーデバイスの駆動周波数を増やすことなくリアクトルの駆動周波数を2倍にすることが可能であり、パワーデバイスのスイッチング

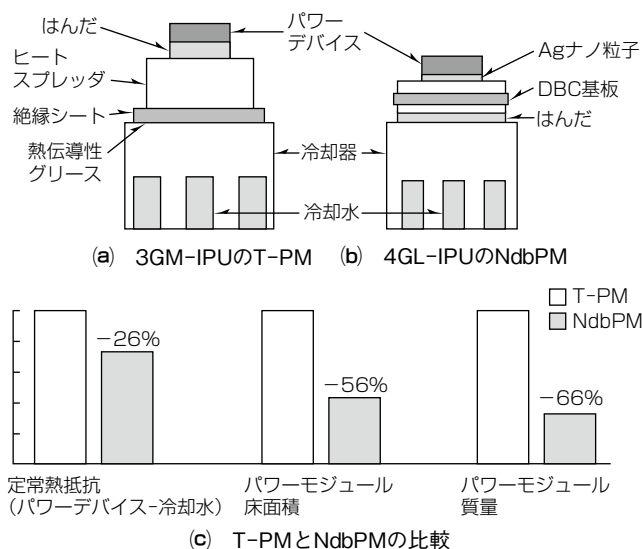


図3. パワーモジュール放熱構造

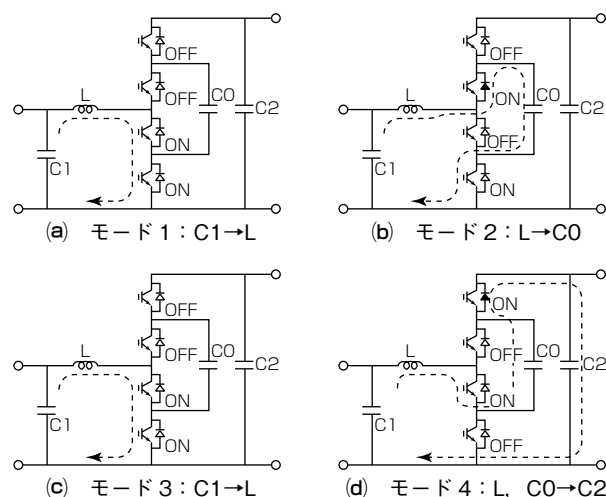


図4. 昇圧コンバータの動作モード

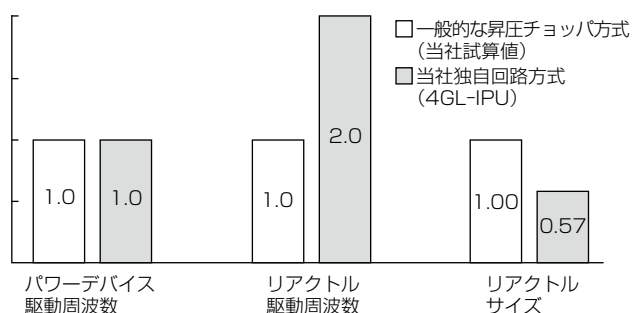


図5. 一般的な昇圧チョッパ方式と当社独自回路方式の比較



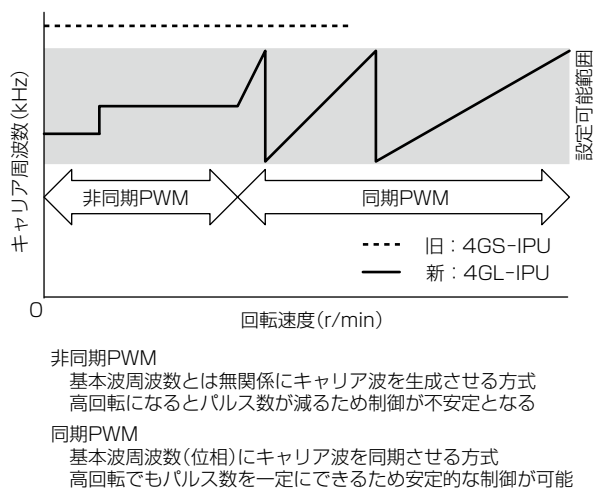


図6. PWM方式とキャリア周波数の切替え

損失を増やすことなくリアクトルサイズを約40%小型化した。この小型化によって従来車室内に搭載されていた降圧コンバータをエンジンルーム内に搭載されるIPUに統合し、その結果車室内空間の拡大を可能にした。

### 3.3 新しい制御技術<sup>(3)</sup>

1モータHEV用の従来製品(4GS-IPU)に比べ、走行用モータ出力が約5倍、発電機出力も含めると約10倍に高出力化が必要な4GL-IPUで、パワーデバイス損失低減は小型・高出力化に大きく寄与する。特に高出力領域では昇圧によって印加電圧が従来システムよりも高くなっており、印加電圧に比例するスイッチング損失低減(キャリア周波数低減)が必要不可欠であった。

一方でモータ回転速度(基本波周波数)も約2倍に上昇しており、これまでの非同期PWM(Pulse Width Modulation)方式ではキャリア周波数を高く設定しなければ電流制御性が悪化するという背反する課題があった。

一般的にキャリア周波数に依存する騒音及び電流制御性の観点ではキャリア周波数は高く設定し、逆にスイッチング損失に影響する効率・熱成立の観点及びキャリアごとに演算が必要なマイコン処理負荷の観点ではキャリア周波数を低く設定したいというトレードオフの関係上、キャリア周波数の設定可能範囲は非常に狭くなった。

そこで、これら制約を解決する手段としてキャリア周波数の可変化及び同期PWM方式を採用した。なお、当社で同期PWM方式はFA(Factory Automation)用モータ制御や鉄道車両駆動用モータ制御などで使用しているが、車載用として市販の汎用マイコン機能を利用した同期PWM方式は初の取り組みである。

4GL-IPUでは、図6のように従来の非同期PWM方式と新方式の同期PWM方式を共存させて回転速度に応じてキャリア周波数を緻密に切り替えることで、キャリア周波数の狭い設定可能範囲で各種性能向上を実現した。

表1. 従来IPUと4GL-IPU比較

適用技術	従来IPU	4GL-IPU	効果
パワーモジュール	T-PM	NdbPM	高出力、小型
パワーデバイス	第6世代(600V耐圧)	第7世代(1,200V耐圧)	低損失(高出力、小型)
チップ下構造	はんだ	Agナノ粒子(シンター接合)	高放熱(高出力、小型)
絶縁構造	絶縁シート	DBC基板	
絶縁下構造	熱伝導グリース	はんだ	
冷却器固定	ばね+ねじ		
流路密閉構造	Oリング+ねじ	FSW(摩擦攪拌接合)	小型、高耐振
モータ制御	1モータ対応 非同期PWM (キャリア周波数一定)	2モータ対応 非同期+同期PWM (キャリア周波数可変)	低損失(高出力、小型)
昇圧コンバータ	なし	あり(当社独自回路)	小型、高機能
降圧コンバータ	なし	あり(低背、耐振設計)	高機能

最終的に、この方式の採用によって従来方式では達成できなかった高回転領域の車両特有の急峻(きゅうしゅん)なトルク応答を実現可能な制御性を成立させ、同時にパワーデバイスの小型化に寄与し、スイッチング損失低減が可能になった。

## 4. む す び

当社はxEV創成期から小型・軽量・低コスト・高機能コンセプトとし周辺機能の統合を進めたIPUを製品化してきた。4GL-IPUは豊富な実績のある従来IPUのコンセプト・要素技術・生産技術、他分野で実績のある制御方式と、表1に示すような新しい接合技術、当社独自の昇圧回路方式などの新技術を融合して開発した。これによって近年増加傾向にあるフル電動走行が可能な2モータシステムに対応し、高い環境性能と走る楽しみの両立、車内空間拡大を可能にした。

4GL-IPUはフル電動式の2モータHEV向けの製品であるが、今回開発したフル電動走行に対応可能な高出力化技術、パワーモジュール、制御技術、高耐振構造、生産技術等を活用し、IPUを更に小型・軽量・低コスト・高機能化することによって、更に高い環境性能と走る楽しみの両立によるxEVの普及を通じ、地球温暖化対策、排出ガス規制対応に貢献していく。

## 参 考 文 献

- (1) 3GM-IPU：3モータシステム用パワーユニット，三菱電機技報，89，No.1，27(2015)
- (2) 日野泰成，ほか：高耐熱パワー半導体モジュールパッケージング要素技術，三菱電機技報，88，No.5，313～316(2014)
- (3) マイルドハイブリッド車用インバータ，三菱電機技報，91，No.1，21(2017)

# エンジン出力軸直結型48V-ISGシステム用モータの電磁気設計

北尾純士\*  
深山義浩\*  
中野正嗣\*\*

Electromagnetic Design of Electric Motor for Crankshaft-mounted Integrated Starter-Generator System for 48V Hybrid Vehicles  
Junji Kitao, Yoshihiro Miyama, Masatsugu Nakano

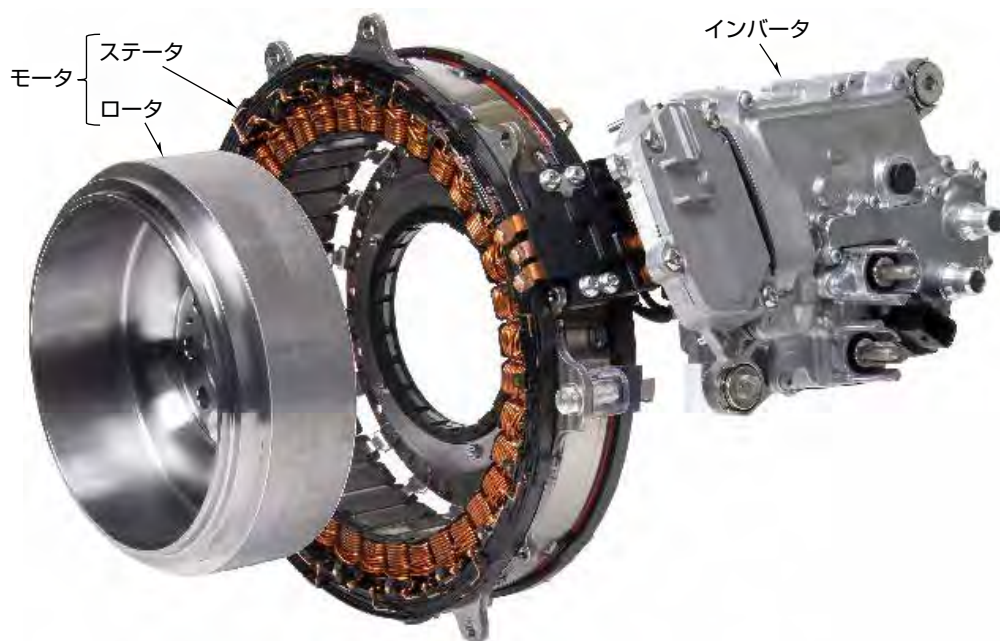
## 要 旨

近年、地球環境保護(CO<sub>2</sub>排出量削減)の観点から、自動車市場では電気自動車(EV)やハイブリッド電気自動車(HEV)など様々な電動車両の普及が急加速している。100Vを超える高電圧電源システムを搭載したHEVは燃費改善効果が大きい反面システムコストが高く、エンジンルーム内のレイアウト変更が必要になる。これらの背景から、エンジンルーム内のレイアウト変更を抑えつつ、比較的 low コストで燃費向上が実現できる48V規格に対応したマイルドHEVの普及が見込まれている。

三菱電機は、この要求に対応するため、小型・軽量と高効率を両立させたエンジン出力軸直結型48V-ISG(Integrated Starter-Generator)システムを開発し、製品化

した。エンジン出力軸直結型48V-ISGシステムは、アイドリングストップからのエンジン再始動、減速時のエネルギー回生や加速時のトルクアシストを行うことで、自動車の燃費改善に貢献できる。

このシステムのモータは、エンジンと変速機の上に搭載する構造であり、軽量化も必要であることから、薄型・扁平(へんぺい)な円筒状の限られたスペースで磁気回路を構成する必要がある。このような形状制約の中で、高トルク・高出力発電、低～中回転域の低トルク域での高効率、高回転域の連続動作等の様々な要求性能を満足させるための電磁気設計を実施した。



## エンジン出力軸直結型48V-ISGシステム

地球環境保護の観点から、比較的 low コストで燃費向上が実現できる48V規格に対応したISGシステムが求められており、当社はエンジン出力軸直結型48V-ISGシステムを開発した。このシステムはエンジンと変速機の上に搭載され、アイドリングストップからのエンジン再始動、減速時のエネルギー回生や加速時のトルクアシストを行うことで、自動車の燃費改善に貢献する。

# 1. ま え が き

近年、地球環境保護(CO<sub>2</sub>排出量削減)の観点から、自動車市場ではEVやHEVなど様々な電動車両の普及が急加速している。これらの背景から、比較的低コストで燃費向上が実現できる48VのマイルドHEVの普及が見込まれている。当社は48V規格に対応した小型・軽量と高効率を両立させたエンジン出力軸直結型48V-ISGシステムを開発し、製品化した。

本稿ではエンジン出力軸直結型48V-ISGシステムの特長とモータの電磁気設計について述べる。

## 2. エンジン出力軸直結型48V-ISGシステムの特長

### 2.1 エンジン出力軸直結型48V-ISGシステム

図1に、エンジン出力軸直結型48V-ISGシステムの構成を示す。このシステムは、エンジンと変速機の間にモータを搭載する構造であり、エンジン出力軸にモータのロータが直結されている。出力軸直結のため、モータの駆動力を直接伝達でき、高トルク伝達が可能でトルク応答速度向上が図れる。ただし、エンジンルームのレイアウト制約と軽量化の観点から、薄型・扁平な円筒状の限られたスペースで磁気回路を構成する必要がある。

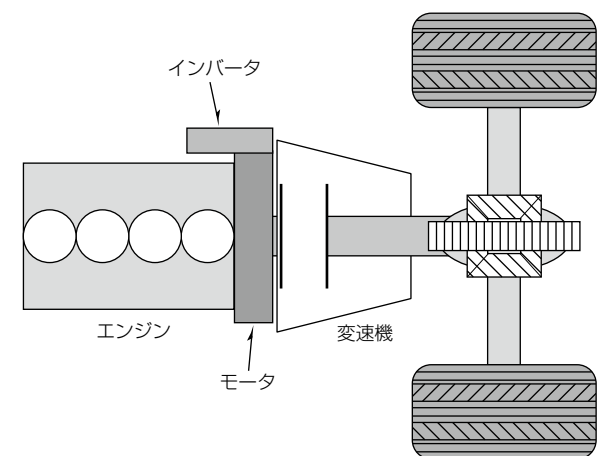


図1. システムの構成

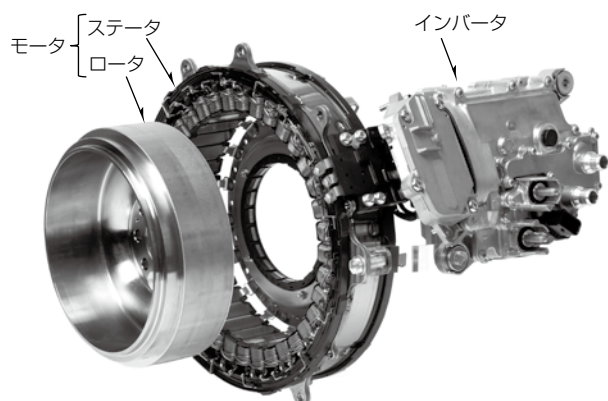


図2. エンジン出力軸直結型48V-ISGシステム

### 2.2 48V-ISGシステム用モータ

エンジンとモータを動力源とするHEVは、機能の違いによってフルHEVとマイルドHEVの2種類に大別される。フルHEVは、エンジンを止めた状態でモータだけでの走行が可能であるため、大幅な燃費向上が期待できる。一方、マイルドHEVは、モータだけでの走行はせずトルクアシストや減速回生等の機能を持っており、簡素なシステムで実現できるという点が特長である。特に、48VのマイルドHEVは、高電圧システムで要求される安全機能を実装する必要がないためシステム全体のコストを抑えることができ、普及加速が見込まれている。

マイルドHEV向けの48V-ISGシステムは、アイドリングストップからのエンジン再始動、減速時のエネルギー回生や加速時のトルクアシストを行うことで、自動車の燃費改善に貢献できる。図2に、今回開発したエンジン出力軸直結型48V-ISGシステムの外観を示す。モータは薄型・扁平構造で、インバータはモータハウジングにマウントされている。このシステムと同様の機能を持つベルト駆動式モータジェネレータ<sup>(1)</sup>と比較すると、ベルト駆動よりも伝達可能なトルクが高く、高出力発電が可能であるため、回生による減速エネルギーの利用率も高めることができる<sup>(2)</sup>。

## 3. 48V-ISGシステム用モータの電磁気設計

### 3.1 要求性能

図3に、48V-ISGシステム用モータの回転数-トルク特性での各車両動作で求められる領域を示す。アイドリングストップからのエンジン再始動では低回転域で高トルクが求められ、車両加速時のトルクアシスト動作では低～中回転域の低トルク域で燃費に直結する高効率化が求められ、車両減速時のエネルギー回生動作では低～中回転域での高出力発電が求められる。さらに、このシステムではエンジンの駆動力がロータを介して伝達されるため、エンジンの

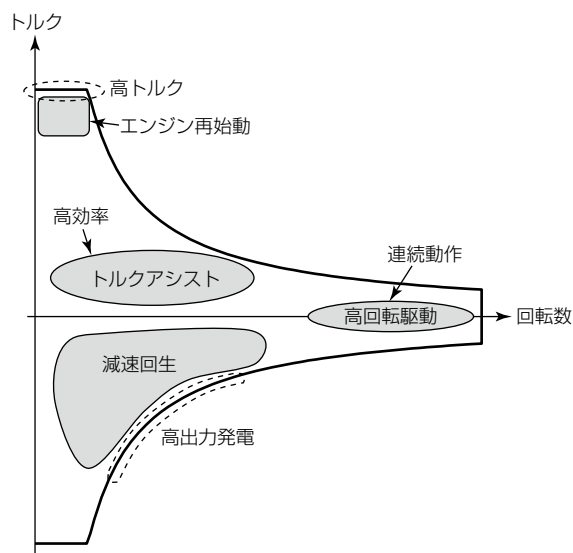


図3. 48V-ISGシステム用モータの動作領域と要求性能



駆動範囲全域で動作する必要がある、高回転域でも連続動作が求められる。このように、高トルク・高出力発電、低～中回転域の低トルク域での高効率化が求められるため、このシステムのモータ方式として高トルク・高出力発電が特長である永久磁石式同期モータを採用している。しかし、永久磁石式同期モータでは、48Vの低電圧でエンジンの最高回転数まで連続動作するために、誘起電圧を弱めるための電流を通電(弱め磁束制御)する必要がある。このシステムでは、弱め磁束制御に必要な電流の低減が電磁気設計でのキーポイントの一つであるため、次節以降では、弱め磁束制御に必要な電流の低減に寄与した巻線構造と多極化に関する検討について述べる。

### 3.2 巻線構造に関する検討

ここでは、48V-ISGシステム用モータに適した巻線構造の検討について述べる。モータの巻線構造は、一つのティースにコイルが巻回される集中巻構造と複数のティースをまたがってコイルが巻回される分布巻構造に大別される。集中巻構造と分布巻構造の性能を比較するために、鉄心長・コイルの直列導体数・極数・ロータ外径・ギャップ長を同一とし、最大電流密度及び無負荷誘起電圧が一致するようにステータとロータを設計した。

図4に、それぞれの巻線構造の電磁界解析による結果を示す。図4(a)の“短時間定格”は最大電流時でのモータ回転数-トルク特性を示し、“連続定格”は連続動作を想定した同一の電流密度下でのモータ回転数-トルク特性を示す。短時間定格に関しては、どの回転数でも分布巻構造は集中

巻構造より高いことが分かる。分布巻構造は集中巻構造よりもリラクタンストルクが高く、結果として高トルク・高出力を実現できている。しかし、連続定格を比較すると、中～高回転数域では集中巻構造の方が高トルクを実現できている。これは、弱め磁束制御に必要な電流が低減できているためである。一例として、巻線構造の違いによる、ステータに鎖交する磁束を100%弱めるために必要な電流を図4(b)に示す。集中巻構造は分布巻構造よりインダクタンスが高いため、弱め磁束制御に必要な電流を低減でき、図4(b)の結果からも集中巻構造の方が低電流であることが確認できる。この効果は図4(c)及び図4(d)の効率特性にも表れており、一例として同一の効率ラインを点線で示しているが、弱め磁束制御に必要な電流を低減することで集中巻構造の方が高回転域まで高効率範囲を広げることができている。

このように、48V-ISGシステム用モータで高回転域まで高効率かつ連続動作を実現するためには、集中巻構造の方が有利であるため、このシステムではこれらの特長を生かした集中巻構造を採用している。

### 3.3 多極化に関する検討

48V-ISGシステム用モータは、先に述べたとおり薄型・扁平な円筒状の限られたスペースで磁気回路を構成する必要がある。集中巻構造を採用することでコイルエンドを縮小しつつ、さらに多極化によってコイルエンドの更なる縮小と磁気回路を構成するために必要な面積の低減が可能になるため、このシステムのような限られたスペースで要

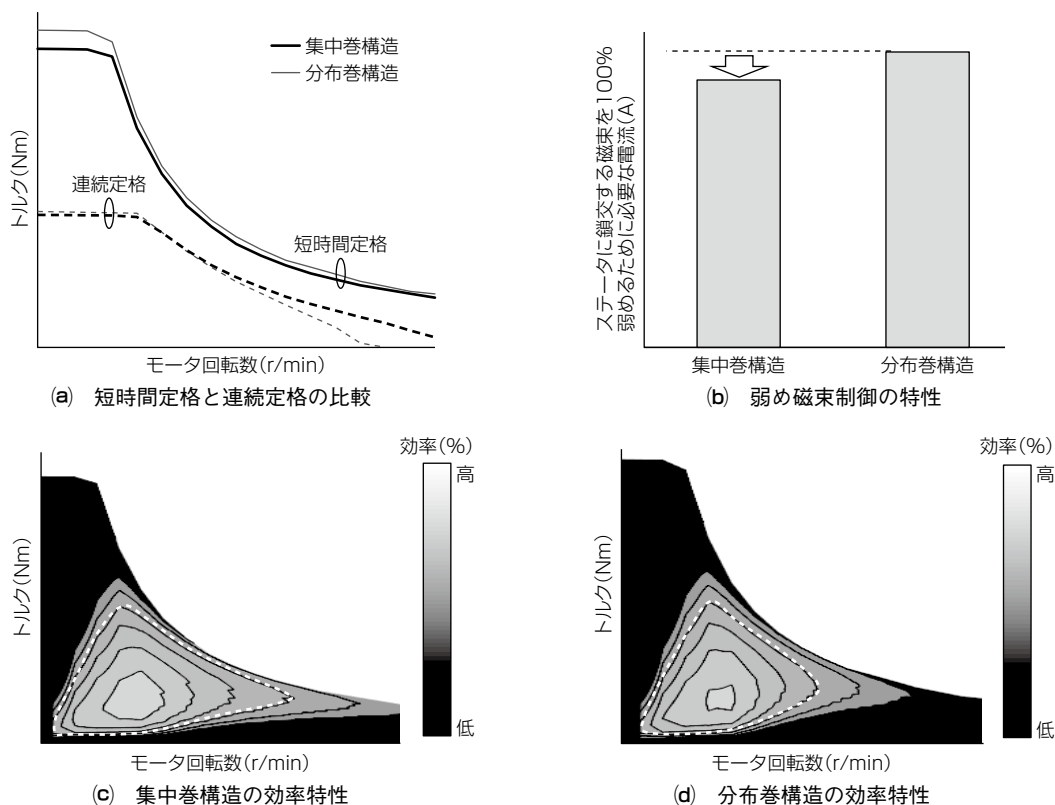


図4. 集中巻構造と分布巻構造の性能比較



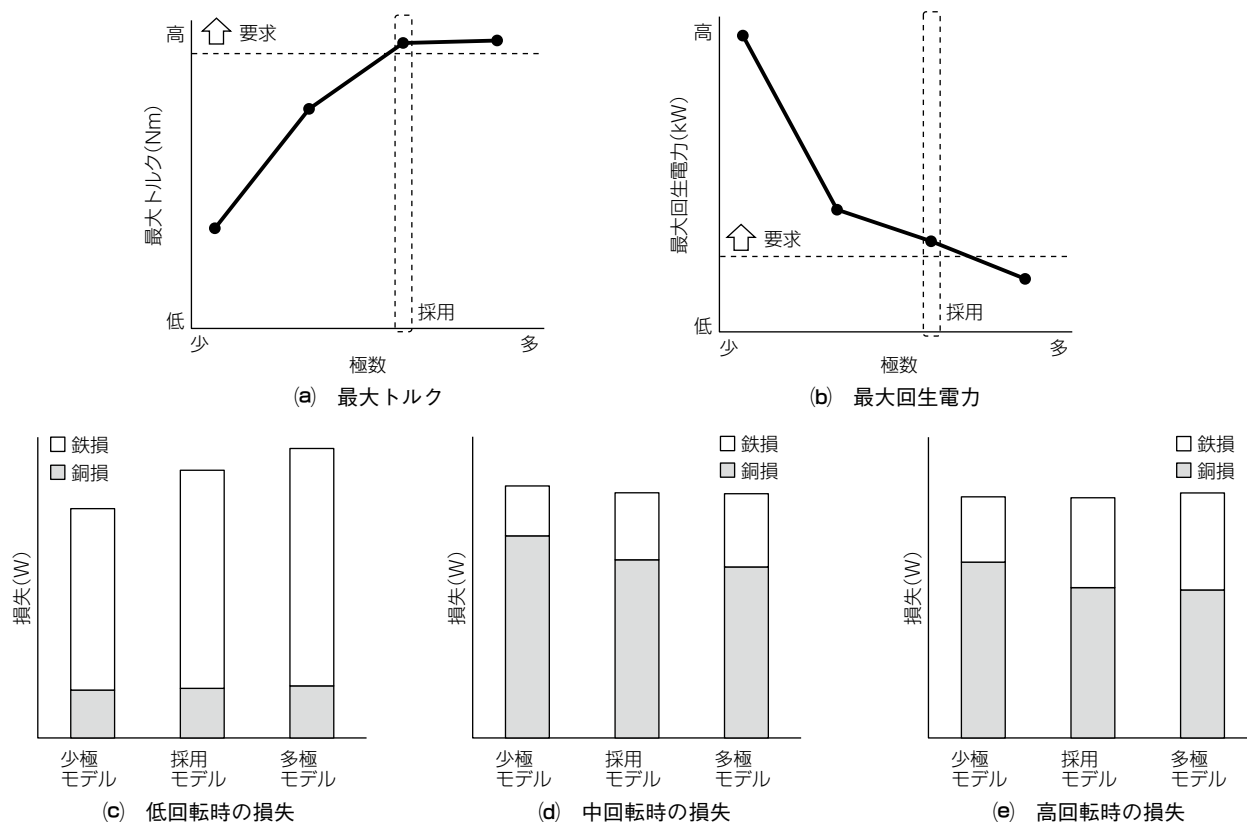


図5. 極数に対する電磁気性能

求性能を満足させるためには集中巻構造及び多極化が効果的であると考えられる。ただし、多極化することでモータの電気角周波数が高くなるため、鉄損の増加が懸念される。このように、極数は電磁気設計で非常に重要なパラメータであるため、ここでは要求性能と極数の関係について述べる。

図5に、最大電流密度・磁石量を同一として設計した各極数での最大トルク・最大回生電力・各回転数の損失の電磁界解析による結果を示す。なお、図5(c)～図5(e)では、全て同一の低トルク時(HEVで使用頻度が高い低負荷の条件であり、図3のトルクアシスト領域に相当する)である。図5(a)に示す最大トルクに関しては、多極化によって増加しているが、ある極数から多極化しても頭打ちになっていることが分かる。多極化によってモータに必要な磁気回路を構成する面積を低減できるため、各部の磁気飽和緩和とロータ径の拡大によってトルクの向上が図れる一方で、多極化によってスロット数が増加してステータのスロット間漏れ磁束が増加するため、これらのトレードオフによって図5(a)のような傾向となる。図5(b)に示す最大回生電力に関しては、多極の方が低いことが分かる。先に述べたとおり、多極化によってスロット間の漏れ磁束が増加するため、インダクタンスが増加して結果的に最大回生電力は低下する傾向にある。したがって、最大トルクと最大回生電力は極数に対してトレードオフの関係にあるため、このシステムではどちらの要求性能も満足する最適な極数を採用している。図5(c)～図5(e)に、低～高回転時の銅損と鉄損の電

磁界解析による結果を示す。低回転では鉄損が支配的であるため少極の方が低損失であるが、中回転では弱め磁束制御の影響によって銅損が支配的となるため、多極の方が総損失では最も低い。高回転になると、少極による低鉄損化と多極による低銅損化がバランスして図5(e)ではどのモデルでもほぼ同等の損失となっている。

このシステムでは、最大トルク及び最大回生電力の短時間定格と、高回転まで連続定格を維持するための弱め磁束制御に必要な電流の低減に着目して極数を選定している。

#### 4. む す び

エンジン出力軸直結型48V-ISGシステムの特長とモータの電磁気設計について述べた。48V-ISGシステム用モータでは、弱め磁束制御に必要な電流が連続定格や効率特性に対する影響度が高いため、多極化した集中巻構造を採用した。これによって、幅広い動作領域で全ての要求仕様を満足する48V-ISGシステムを開発できた。今後は、更なる小型・軽量・高出力化に向けて、技術開発を推進していく。

#### 参 考 文 献

- (1) 藤田暢彦：ベルト駆動式モータジェネレータ，三菱電機技報，90，No.3，199～202 (2016)
- (2) 吉澤敏行，ほか：車載用発電電動機の進化，電気学会自動車研究会，VT-18-002，7～11 (2018)

# EPS用次世代モータコントロールユニット

有働豊秋\*  
國光威宏\*  
米澤亮一\*

Next Generation Motor Control Unit for Electric Power Steering

Toyoaki Udo, Takahiro Kunimitsu, Ryoichi Yonezawa

## 要 旨

EPS(電動パワーステアリング)はドライバーの操舵(そうだ)負荷トルクをモータでアシストするシステムで、数多くの乗用車に搭載されている。三菱電機はこれまで、中・小型乗用車のEPS向けを中心に、ブラシレス方式のモータとECU(Electronic Control Unit)を一体型にしたMCU(モータコントロールユニット)である2G-FI(ECU前方搭載型第2世代MCU)を量産してきた。今回、大型乗用車のEPS向けに高出力な次世代MCUである2G-RI(ECU後方搭載型第2世代MCU)を開発し、量産化した。

開発に当たっては、高出力化のために、従来機種に比べてモータ径を拡大し、定格電流を増やした。さらに、アルミ製円筒フレームにモータ部品とECU部品を収納し、最

適設計することで、スリムで、かつ広い周波数帯で高いEMC(ElectroMagnetic Compatibility)性能を持つ製品を実現した。

安全面では、従来の信頼性が高い安全設計を踏襲しつつ、新たな安全機構の構築によって機能安全規格ISO26262で最も要求レベルの高いASIL-D(Automotive Safety Integrity Level-D)に適合する安全設計を実現した。

また、車載ソフトウェア標準化プラットフォームAUTOSAR<sup>(注1)</sup>(AUTomotive Open System ARchitecture)や次世代通信プロトコルFlexRay<sup>(注2)</sup>の採用など、ソフトウェア面でも付加価値の高い製品を開発した。

(注1) AUTOSARは、AUTOSAR GbRの登録商標である。

(注2) FlexRayは、Daimler AGの登録商標である。



## ECU後方搭載型第2世代MCU(2G-RI)

大型乗用車のラック搭載型EPS向けの次世代MCUを開発した。全体構造の最適化によって、従来機種よりも高出力だが、スリムで優れたEMC性能を持つ高機能なMCUを実現した。

# 1. ま え が き

EPSはドライバーの操舵負荷トルクをモータでアシストするシステムで、中・小型乗用車を中心にコラム搭載型EPSが採用されてきた。近年では、大型乗用車向けのラック搭載型EPSの需要も拡大している。

当社はこれまで、コラム搭載型EPS向けを中心に、ブラシレス方式のモータとECUを一体型にしたMCUである2G-FIを2013年から量産してきた<sup>(1)</sup>。今回、ラック搭載型EPS向けに高出力かつスリムなパッケージの次世代MCUとして2G-RIを開発し、量産を開始した。

本稿では、2G-RIの特長について述べる。

## 2. 次世代MCU 2G-RIの特長

### 2.1 高出力とスリムなパッケージの両立

従来機種の2G-FIと今回開発した2G-RIの仕様比較を表1に示す。大型乗用車向けの高出力対応として、基本的な電磁気設計は2G-FIと同じ10極12スロット、デルタ結線を踏襲しつつ、ロータとステータの外径を拡大して電磁気設計を最適化した。また、ECU部のFET(Field Effect Transistor)等の通電部品の容量アップと放熱性能を向上させることで定格電流を80Armsから100Armsに拡大し、高トルク化と高回転数化を図った。

一方で、ステアリングラックへの搭載性に影響するMCU外径寸法を小さくするために、図1に示すように、一様円筒形状のアルミ製フレームに開口面からステータと

ヒートシンクASSY(Assembly)を挿入・圧入し、最後に車両コネクタ部を持つケースASSYで蓋をする構成とした。これによって図2に示すように、2G-FIでは外径方向に突出していたステータを持つフレームとハウジングの締結部及びハウジングとヒートシンクの締結部を廃止することができ、また、ケースASSYの軸方向端面に車両コネクタ部を設けることで、スリムなMCUになった。ECUについては図3に示すとおり、従来、モータ軸方向寸法短縮のために、同一平面に配置していたパワーモジュールとコンデンサを、2G-RIではヒートシンクの両面に同軸上に配置することで、ヒートシンクASSYを径方向に小型化した。

### 2.2 EMC性能向上

車両を安全に走行させるために、車両内の電子機器にはその動作によって、他のシステムの動作を妨害しないこと(EMI(ElectroMagnetic Interference)性能)、他のシステムから妨害されずに動作すること(EMS(Electro-Magnetic Susceptibility)性能)の両立(EMC性能)が求められる。2G-RIが搭載される欧州の自動車メーカーでは、EMI性能に対する要求が高く、中波放送帯・FM放送帯でCISPR(Comité International Spécial des Perturbations Radio électriques) 25で最も厳しいクラス5を満足することが求められる。

この対策として、図4に示すようにECU部をアルミ製のフレームと、プレートASSYに収納する構成とし、パワーモジュールなどのインバータ主回路及び制御回路基板から放射されるノイズが外部に漏れるのを抑制した。ま

表1. 2G-FIと2G-RIの仕様比較

		仕様(同等トルクで比較)	
		2G-FI	2G-RI
性能	定格電流(Arms)	80	100
	定格トルク(N・m)	4.79	4.71
	定格回転数(r/min)	1,380	1,830
	出力(W)	692	903
寸法	円筒部半径(mm)	65.0	46.2
	全長(mm)	135	201
質量(kg)		3.1	2.9

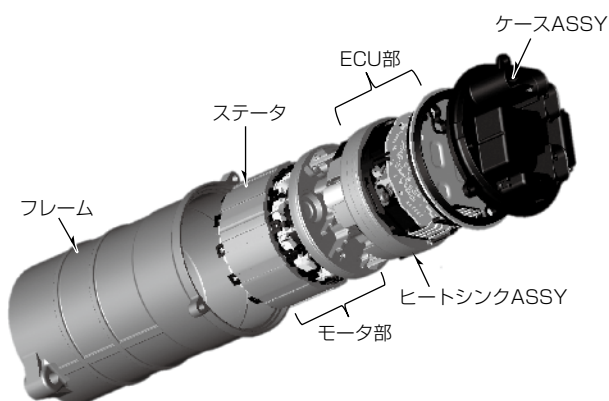


図1. 2G-RIの内部構造

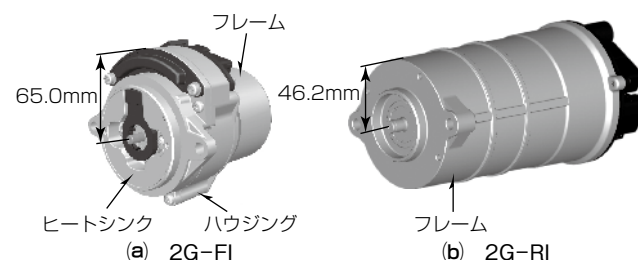


図2. 2G-FIと2G-RIの外観比較

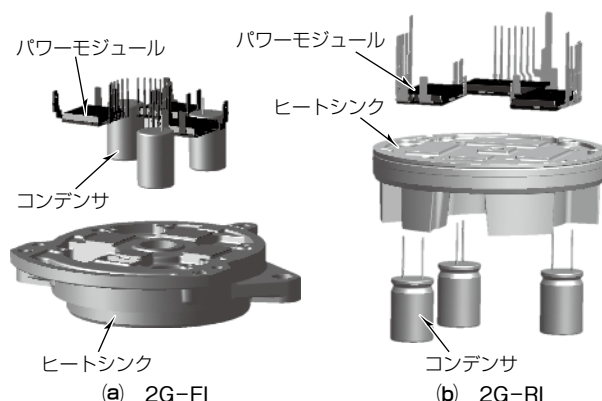


図3. ヒートシンクASSYの概略構成

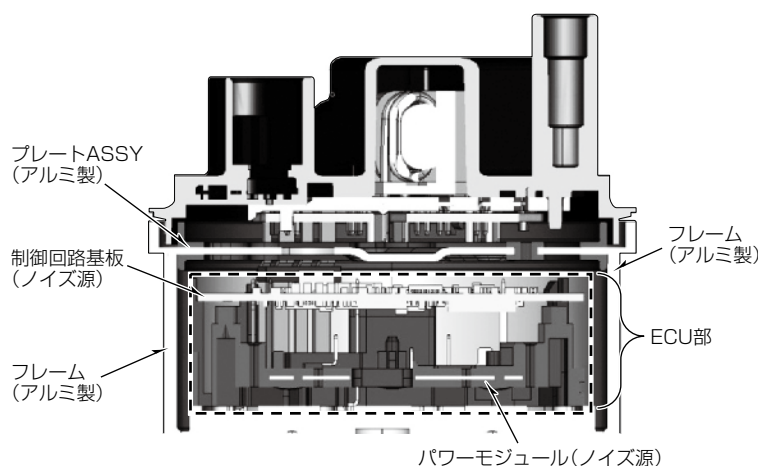


図4. 2G-RI ECU周辺部の断面図

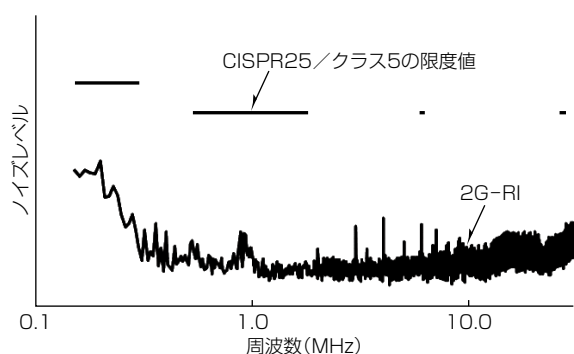


図5. 放射EMI性能

た、伝導雑音抑制のためのフィルタ設計の最適化も行った。これらによって、伝導及び放射EMI性能共に中波放送帯・FM放送帯でCISPR25/クラス5を満足する性能を達成した(図5)。同時に、周波数1 MHz～3 GHzの広い周波数にわたって400V/m以上の高いEMS耐性も確保し、製品に求められるEMC性能を実現できた。

### 2.3 安全設計

中・大型乗用車でのEPS機能失陥は車両の操舵機能の喪失につながり、重大事故へと至る可能性がある。このため、EPSは機能安全規格ISO26262で最も要求レベルの高いASIL-Dが求められ、信頼性の高い設計が必要となる。当社は当初から安全性を考慮したEPSを設計し、これまで数多く量産化してきた。2G-RIでは、これまでの量産で実績がある安全設計は踏襲しつつ、ASIL-D適合のマイコンを採用するなど新たな設計を盛り込み、ASIL-Dの要求を満足する安全設計を実現した。

ハードウェア設計では、パワーモジュールの適用など2G-FIで実績のある信頼性の高い要素技術を継承した。さらに、部品・回路レベルでの冗長化設計を実施し、故障部位検出性とアシスト継続性の向上を実現した。またISO26262に基づき、電子部品の故障率を用いて、定量的に安全性を検証した。

ソフトウェア設計では、従来実装している実績のある安全機構を踏襲しつつ、不正アクセスからメモリを保護する機能や、プログラム実行状態を監視する機能を強化し、また、一部の機能が故障しても他の機能への影響を最小限に抑えるアーキテクチャを新たに構築した。開発プロセス面では、安全目標達成に必要な活動が全ての開発工程で確実に実行されたことを確認するため、構成管理ツール導入によって開発に関連する膨大な文書を一元管理し、文書間のつながりや抜け漏れチェックを容易にした。これらによって、安全性の証明と品質の確保を実現した。

### 2.4 高付加価値化

この製品には、欧州自動車メーカーを中心に採用が進む車載ソフトウェア標準化のプラットフォームであるAUTOSARを適用した。自動運転や電動化の普及にしたがって自動車に搭載される機能は年々増加かつ高度化している。それに伴い、ソフトウェアの開発規模や複雑性も増大している。AUTOSARは、こうした車載ソフトウェア開発の課題解決を目的にした標準化プラットフォームであり、この製品に適用することによって開発規模抑制、移植性の面で優位性を得た。

また、顧客ソフトウェアを当社ソフトウェア内に組み込む仕組みを提供することで、操舵フィーリング制御に関わるソフトウェアの自社開発を望む顧客要求にきめ細かく応えることができた。同時に、この仕組みによってソフトウェア開発を顧客と並行して実施できるためソフトウェア開発効率化にも寄与した。

車両との通信機能については、次世代車載ネットワークの一つであるFlexRayを新採用した。近年、自動車に搭載されるECU自体の増加や、複数のECUがネットワークを介して協調動作する運転支援機能追加に伴い、通信の高速化と信頼性向上が車載ネットワークに対する主な課題となっていた。FlexRayは、従来の車載ネットワークであるCAN(Controller Area Network)が抱えるこれらの課題を解決する次世代の通信プロトコルであり、この採用によって高速・高信頼性の車両内通信を可能とした。

## 3. む す び

高出力でスリムな高機能次世代MCU 2G-RIを開発し、量産化した。今後も、自動運転や各機能の二重化による止めないEPSの実現など、更なる高機能で小型なMCUを開発し、よりよい車社会に貢献していく。

### 参考文献

- (1) 浅尾淑人, ほか: EPS用次世代モータコントロールユニット, 三菱電機技報, 87, No8, 452~455 (2013)



# 次世代電制ウエストゲートアクチュエータ

山岡邦宏\*  
 内田 毅\*

Next Generation Electric Waste Gate Actuator

Kunihiro Yamaoka, Tsuyoshi Uchida

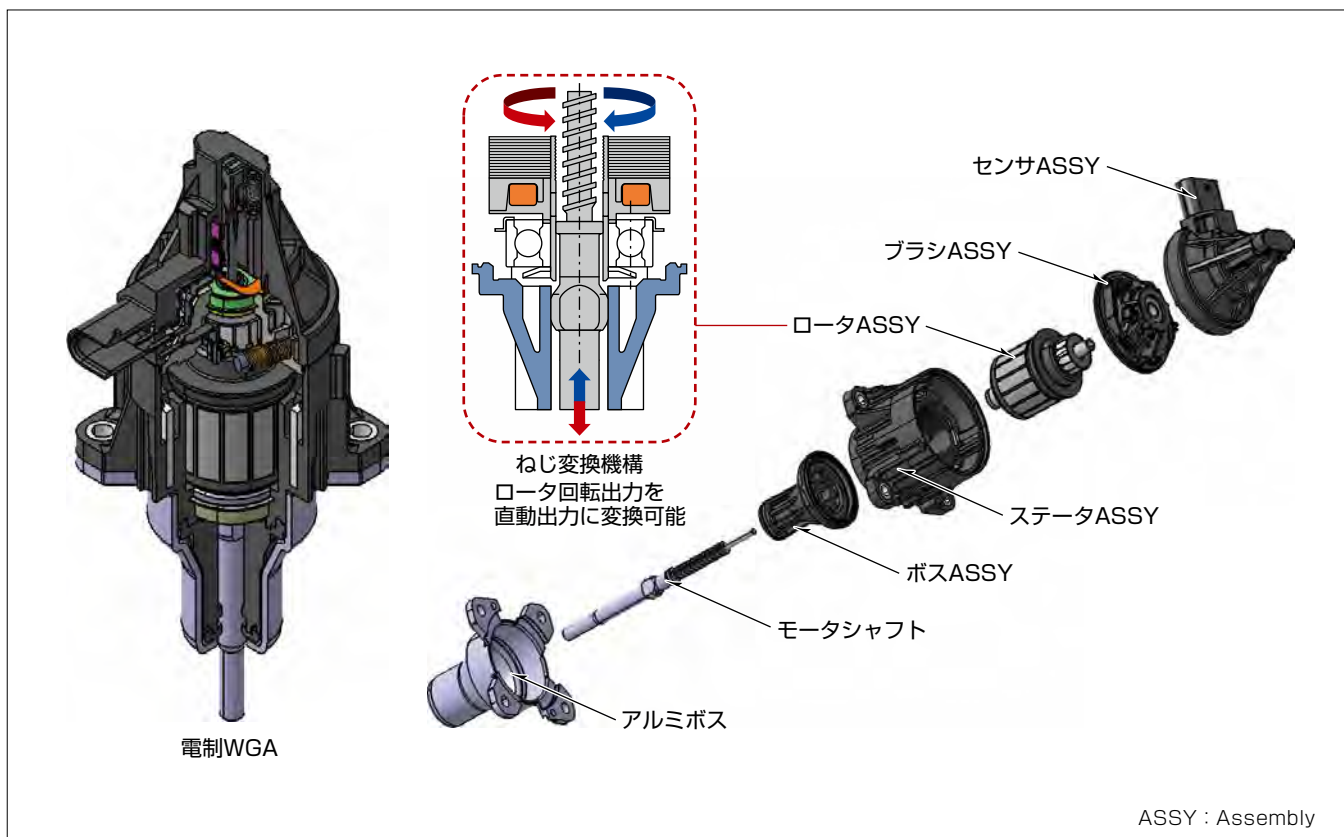
## 要 旨

近年、自動車の燃費向上や排出ガス規制が世界的に強化されるのに伴い、ガソリン車ではエンジンの小型化と過給システムの採用が拡大傾向にある。エンジンの小型化は、排気量や気筒数を減らして燃費を抑えることができる一方、エンジン出力が低下するデメリットがある。このエンジン出力の低下は、ターボチャージャー等による過給システムを採用することで補うことができる<sup>(1)</sup>。

ターボチャージャー等の過給システムには、排気ガスの一部をタービンに取り付けられたウエストゲートバルブで調整する機構が設けられており、バルブ開度を調整する機

能をウエストゲートアクチュエータ(WGA)が担っている。タービンの回転数を調整して安定した過給圧を得るためにバルブ開度の高精度な制御がWGAに要求される。WGAを空圧式から電制化することで、過給圧制御の自由度と過給レスポンスを高めることができる。

三菱電機では、回転出力を直動出力に変換できる内包ねじ機構を備え、モータシャフトの位置を検出するセンサ部からステータコア(鉄心)を除去した小型DC(Direct Current)モータで構成した高精度な制御、高い応答性能、かつ高耐熱性を備えた次世代の3.6G電制WGAを開発した。



## 3.6G電制WGA

3.6G電制WGAのモータ構成を示す。ロータASSYに内包ねじ機構を設けており、通电によって得られる回転出力を直動出力に変換できる。巻線方式を分布巻で構成することでノイズ発生を抑え、従来機種に構成していたノイズ除去回路を取り除き、耐熱性を向上。また、直動するモータシャフトの位置を検出するセンサ部からステータコア(鉄心)を除去したセンサ構造によって小型化を実現した。

\*三田製作所

## 1. ま え が き

近年、自動車の燃費向上、排出ガス規制が世界的に強化されるのに伴い、ガソリン車ではエンジンの小型化と過給システムの採用が拡大傾向にある。エンジンの小型化は、排気量や気筒数を減らして燃費を抑えることができる一方、エンジン出力が低下してしまうデメリットがあるが、ターボチャージャー等による過給システムを採用することで、エンジン出力の低下を補うことができる。ターボチャージャーは、エンジンからの排気ガスでタービンを回して同軸上に構成されたコンプレッサを回転させ、エンジンへの吸入空気を過給することで出力を増加させることが可能である。

エンジンへの吸入量はタービンに取り付けられたウエストゲートバルブで調整され、このバルブ開度を調整する機能をWGAが担っている。安定した過給圧を得るためにバルブを高精度で制御することや、エンジンルーム狭小化に伴う小型化とともにエンジン、タービンといった発熱源からの耐熱性の向上が課題となっている。当社ではバルブ動作の高精度制御や高い信頼性を確保するため、センサ性能や耐熱性を向上させることができるWGAの開発を進めてきた。

本稿では、当社が開発した次世代の3.6G電制WGAについて述べる。

## 2. 3.6G電制WGAの開発

### 2.1 小型・高精度化

従来の3.5G電制WGAではモータシャフト位置検出方法としてセンサ部に1軸リニアセンサを使用していた。1軸リニアセンサは1軸(Z)方向に収束させた磁束密度をセンサが検知する仕組みであり、磁路形成のためにステータコアを配置し、かつモータシャフトのストローク分を網羅できる長さが必要であったことからセンサ部の全長が長くなってしまった問題があった(図1(a))。

3.6G電制WGAでは3軸角度センサを採用し、2軸(X, Z)の磁束密度を合成ベクトルとして角度換算してモータシャフトの位置を検出できることから、磁路形成用のステータコアなしでセンサ構成を実現した(図1(b))。ステータコアを除去できたことで、WGAの全長を3.5G電制WGAに対し約10mm短縮できた(図2)。またこのセンサはマグネットの熱減磁による磁力変化の影響を受けない検出構造となっている。これによってモータシャフトのストロークに対するセンサ出力位置精度(センサリニアリティ)を高温域で確保できた。3.5G電制WGAとのセンサ部の構造比較を図3に示す。

### 2.2 高耐熱化

WGAは高温のタービンに近接しているため耐熱性が

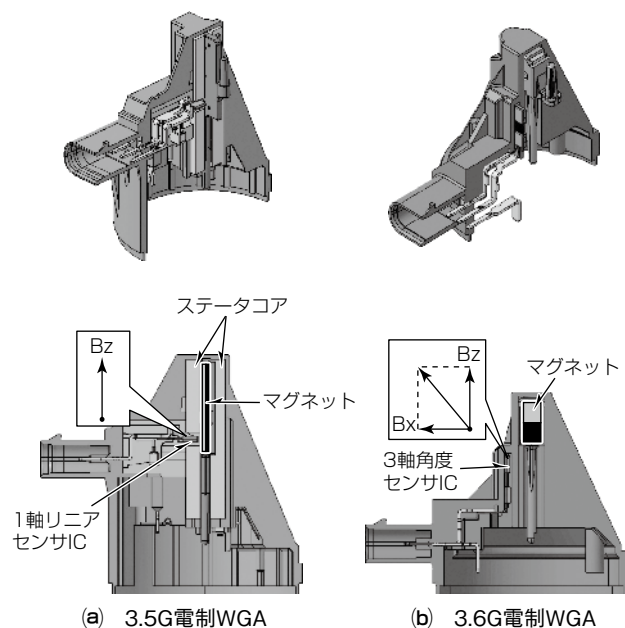


図1. 電制WGAのセンサ比較

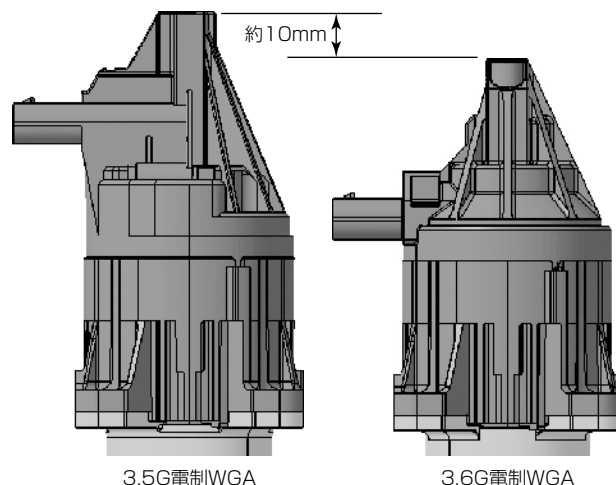


図2. 全長の比較

要求される。3.5G電制WGAはロータASSYにコンデンサと抵抗が実装されたノイズ除去回路を搭載しているため、WGA動作時のコイル部の自己発熱を考慮すると、使用雰囲気温度は140℃が限界であった。ノイズ除去回路はロータASSY部のブラシとコンミテータの通電切替え時に発生する火花を抑制するためのものであるが、実装されている素子の使用可能温度範囲によって使用環境温度が制限されてしまうという問題がある。また、エンジンの小型化によってエンジンルームが狭小化し、高温になることからWGAの耐熱性を更に向上させる必要があった。

そこで、3.6G電制WGAでは3.5G電制WGAで採用している巻線方式である集中巻に対し、ノイズ低減効果のある分布巻を採用した(図4)。その結果、ロータASSYに搭載していたノイズ除去回路が不要になり、使用雰囲気温度を160℃まで引き上げることができた(図5)。

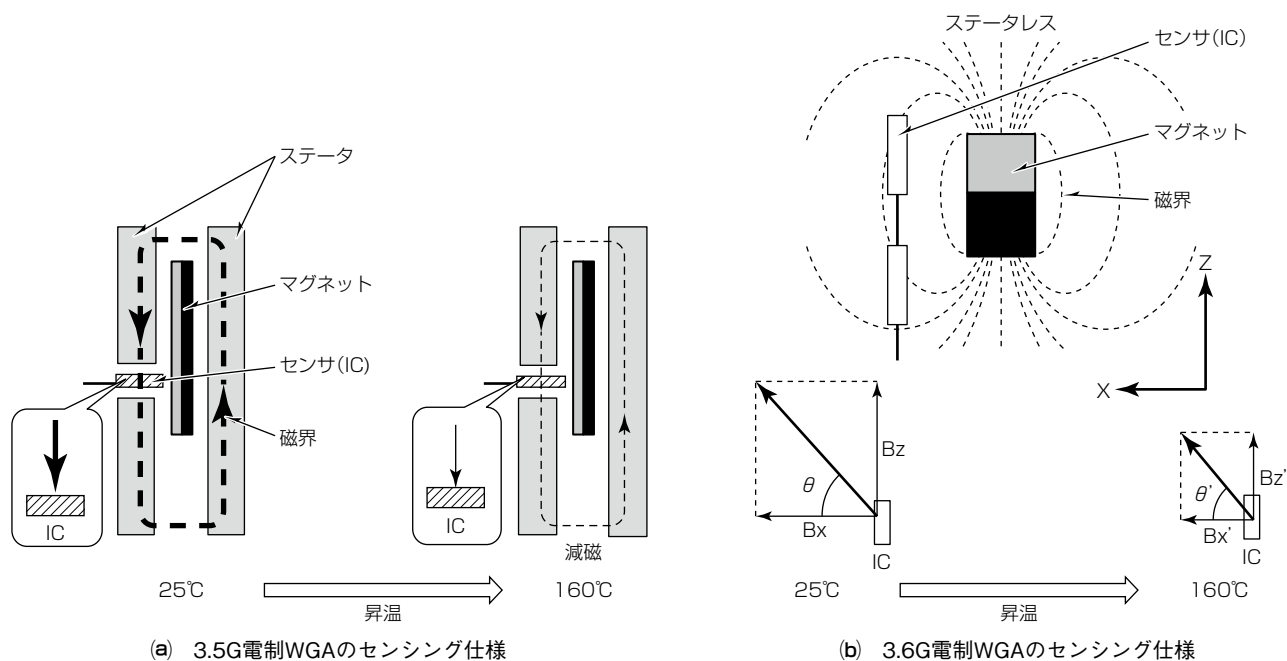


図3. センサ部の構造比較

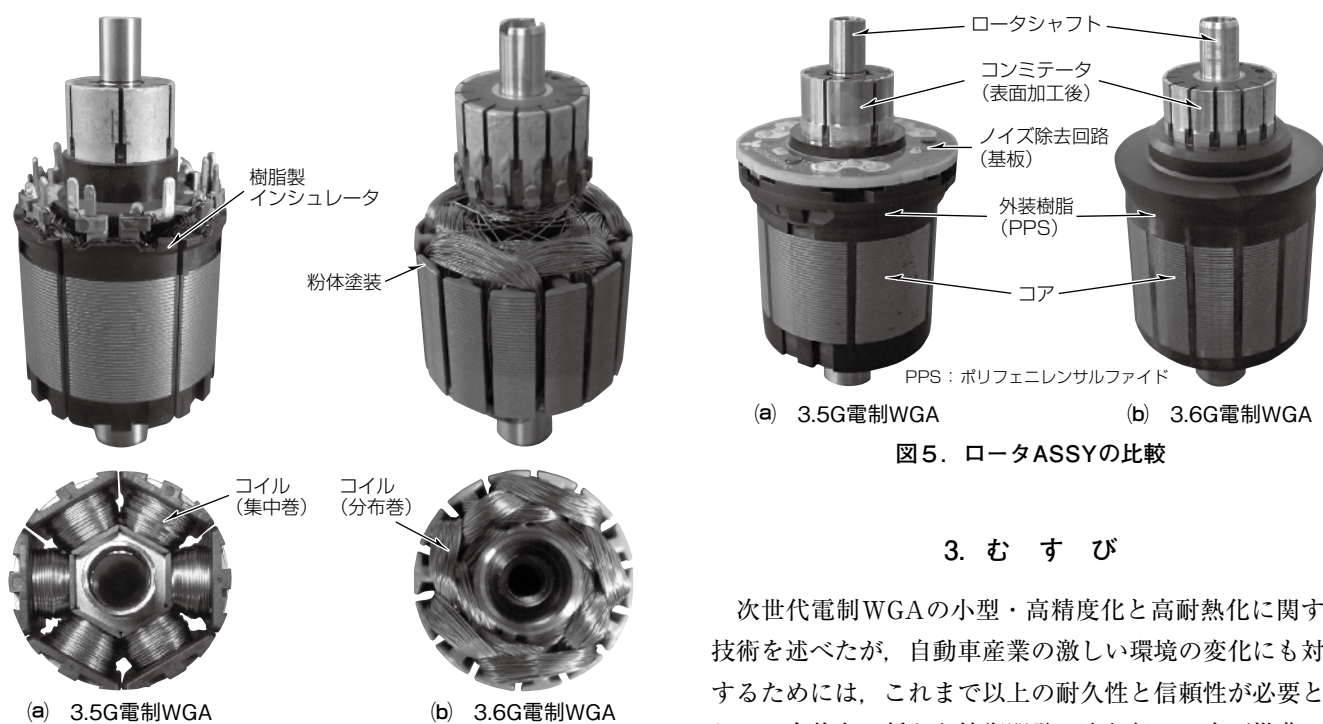


図4. 巻線方式の比較

また3.5G電制WGAと同様にWGA先端のボス部分は高温のタービンに近接しているため、この部分をアルミ部材で構成し、アルミボスを介してコンプレッサハウジング側に放熱する機能を備えている。

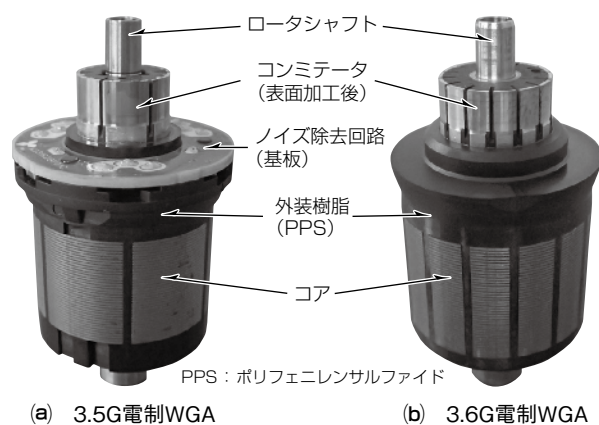


図5. ロータASSYの比較

### 3. む す び

次世代電制WGAの小型・高精度化と高耐熱化に関する技術を述べたが、自動車産業の激しい環境の変化にも対応するためには、これまで以上の耐久性と信頼性が必要とされる。今後も、新たな技術開発に取り組み、車両燃費の更なる向上を実現し、省エネルギー化への貢献を目指していく。

### 参 考 文 献

- (1) 土井弘文, ほか: 駆動回路一体型電制ターボアクチュエータ, 三菱電機技報, **84**, No.9, 519~522 (2010)

# エンジン点火・燃焼系シミュレーション技術

橋場敏彦\*

Simulation Technology for Ignition and Combustion System of Automotive Engine

Toshihiko Hashiba

## 要 旨

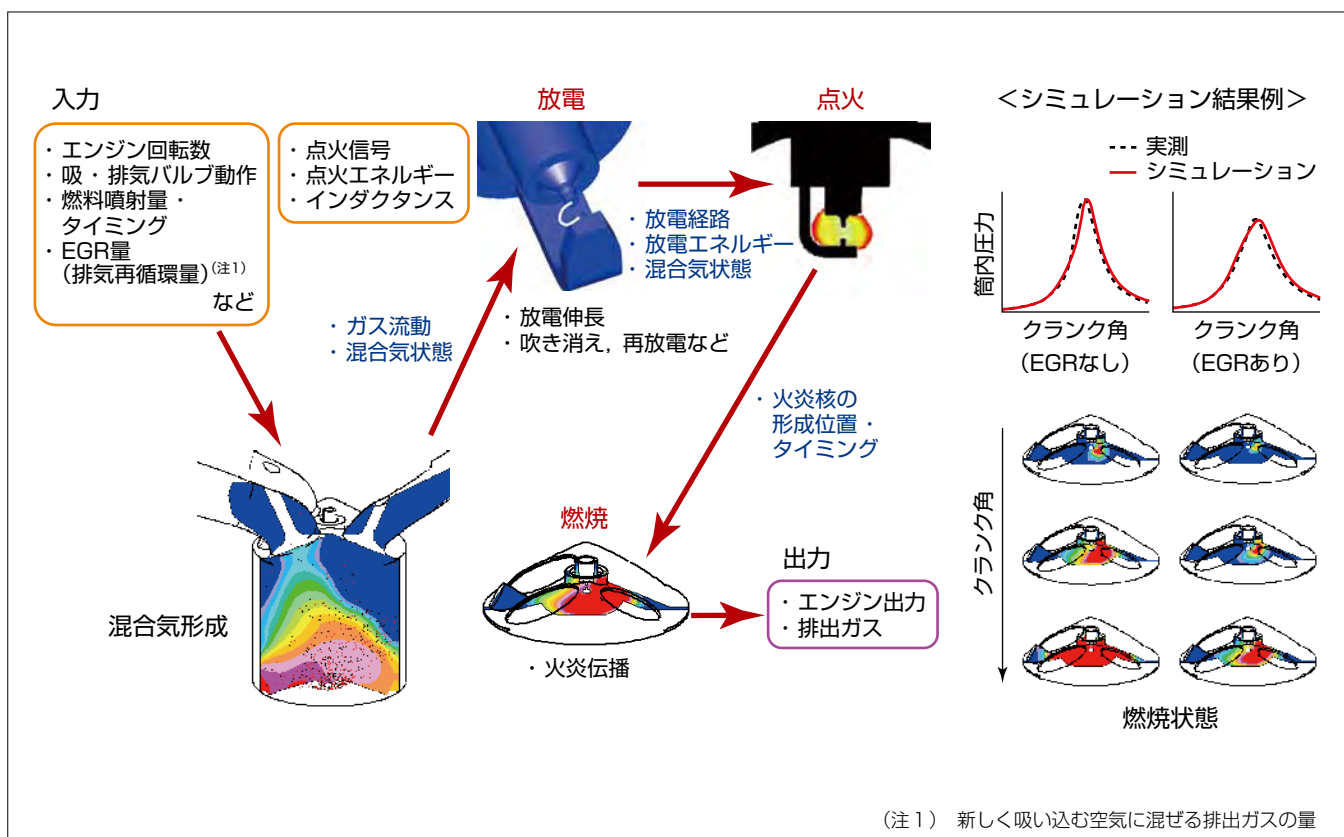
近年、省エネルギー意識の高まりや地球環境保護の観点から、自動車の燃費向上や排出有害ガスの低減が強く求められている。自動車のパワートレインシステムは、このような要望に応えるため年々高度化が進んでおり、今後もシステムは一層大規模かつ複雑なものへ推移していくと考えられる。

今後複雑化していくシステムを、限られたリソースでタイムリーに開発していくためには、従来の試作と評価の繰り返しによる実物ベースの開発では限界があるとされており、システムの効率的な開発手法として、近年シミュレーションを活用したモデルベース開発が注目されている。

このような背景の下、三菱電機ではパワートレインシス

テムの開発効率化を狙い、パワートレインシステムの構成要素の一つであるエンジン点火・燃焼系を対象とするシミュレーション技術を構築した。このシミュレーション技術は、市販ソフトウェアに当社オリジナルモデルを組み込んでおり、点火プラグでの放電挙動を含めたエンジン筒内の一連の挙動を高精度で予測できる。この技術によってバーチャル環境での点火・燃焼系の最適化が可能になり、開発期間の短縮や試作コストの削減に利用している。

今後は、点火・燃焼系以外へのモデルベース開発の適用を目指して取組みを継続していくとともに、燃費向上に有効と言われるスーパーリーンバーン(超希薄燃焼)に適した放電仕様の検討などにこの技術を活用していく予定である。



## 点火・燃焼系シミュレーション技術

このシミュレーション技術では運転条件を入力すると、エンジン筒内のガス流動、混合気状態、放電・点火・燃焼の一連の現象及び筒内圧力などのエンジン出力を求めることができる。市販ソフトウェアSTAR-CD(CD-adapco社)をベースに放電・点火・燃焼の各計算部に当社オリジナルモデルを組み込むことでシミュレーション精度を向上させており、この技術によってバーチャル環境での点火・燃焼系の最適化を可能にした。



## 1. ま え が き

近年、省エネルギー意識の高まりや地球環境保護の観点から、自動車の燃費向上や排出有害ガスの低減が強く求められている。自動車のパワートレインシステムは、このような要望に応えるため年々高度化が進んでおり、今後もシステムは一層大規模かつ複雑なものへ推移していくと考えられる。

今後複雑化していくシステムを、限られたリソースでタイムリーに開発していくためには、従来の試作と評価の繰り返しによる実物ベースの開発では限界があるとされており、システムの効率的な開発手法として、近年シミュレーションを活用したモデルベース開発が注目されている。

このような背景の下、当社ではパワートレインシステムの開発効率化を狙い、パワートレインシステムの構成要素の一つであるエンジン点火・燃焼系を対象とするシミュレーション技術を構築した。このシミュレーション技術は、市販ソフトウェアに当社オリジナルモデルを組み込んでおり、点火プラグでの放電挙動を含めたエンジン筒内の一連の挙動を高精度で予測できる。この技術によってバーチャル環境での点火・燃焼系の最適化が可能になり、開発期間の短縮や試作コストの削減に利用している。

本稿では、構築した点火・燃焼系シミュレーション技術の概要と、その適用事例について述べる。

## 2. 点火・燃焼系シミュレーション技術

図1に点火・燃焼系シミュレーション技術を示す。このシミュレーション技術では、エンジン回転数などの運転条件を入力すると、エンジン筒内のガス流動、混合気状態、放電・点火・燃焼の一連の現象がシミュレーションされて筒内圧力などのエンジン出力を得ることができる。

放電計算部では、点火信号や点火エネルギーに応じて点

火プラグの電極間に放電が形成されるとともに、放電がガス流動などによって湾曲状に伸長する挙動や、伸長した放電が吹き消えたり、電極間に再放電する挙動を模擬できる。点火計算部では、この放電挙動に応じて初期火炎核の形成位置・タイミングが変化し、燃焼計算部での火炎の拡がり方に影響を及ぼす。このように放電挙動が、エンジン出力に与える影響を考慮できることが特長である。

このシミュレーションは市販ソフトウェアSTAR-CD (CD-adapco社)をベースに、放電・点火・燃焼の各計算部に当社オリジナルモデルを組み込むことでシミュレーション精度を向上させている。この精度向上に際しては、各現象を当社試験設備で可視化計測し、その実測結果を参考に物理モデルを改良した。本稿では改良内容の詳細な説明は割愛するが、その一例を表1に示す。また図2に、モデル改良後の点火計算部のシミュレーション結果の一例を示す。図に示すように、シミュレーション結果は、混合気条件違いでの初期火炎の大きさや形状を良好に模擬できている。

表1. モデル改良内容の一例

改良点	狙い
電磁力効果の組み込み	放電伸長の予測精度向上
任意放電波形モデルの組み込み	多重放電などの多様な放電パターンに対応
燃焼素反応モデルの組み込み	高EGR率や、希薄燃焼(リーンバーン)条件の予測精度向上

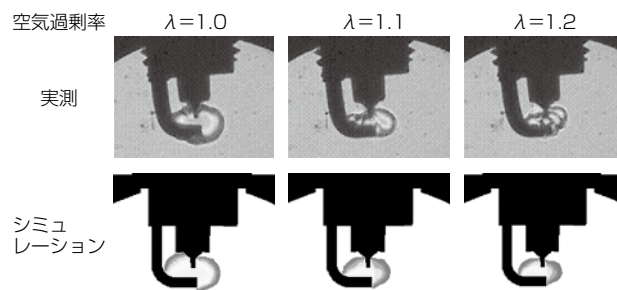


図2. 点火計算部のシミュレーション結果の一例

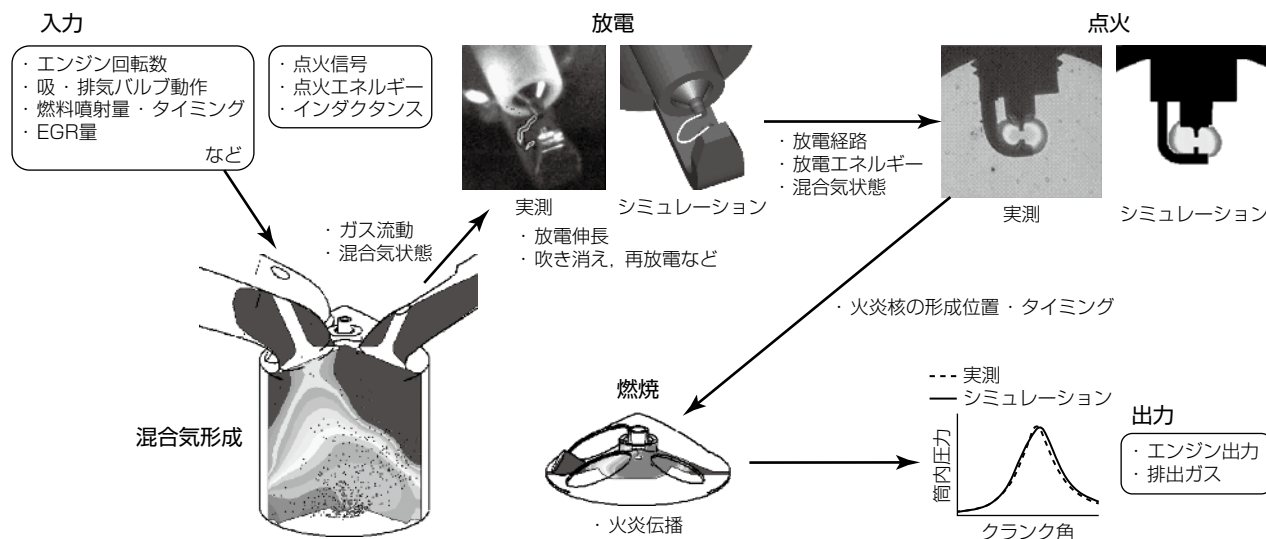


図1. 点火・燃焼系シミュレーション技術

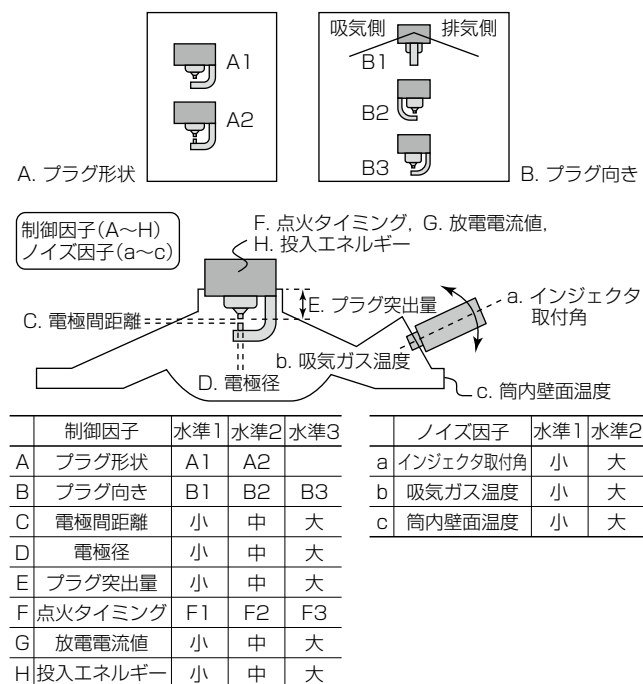


図3. バーチャル品質工学で考慮したパラメータ

### 3. 点火・燃焼系シミュレーション技術の適用事例

構築したシミュレーション技術の適用事例として、点火系の仕様最適化に活用した例について述べる。

#### 3.1 仕様最適化の狙い

今回の事例では、エンジン筒内の混合気状態がばらついても、エンジン出力が変動しにくい点火系の仕様を求めることを狙いとした。この検討では、シミュレーション技術を用いた品質工学(バーチャル品質工学)によって、点火系の仕様最適化を図った。

#### 3.2 バーチャル品質工学

バーチャル品質工学で考慮したパラメータを図3に示す。制御因子(最適化する設計パラメータ)は、点火プラグの形状、プラグの向き、電極間距離、電極径、プラグ突出量、点火タイミング、放電電流値、投入エネルギーとした。

またノイズ因子は、インジェクタ取付角、吸気ガス温度、筒内壁面温度とし、これらのパラメータで混合気状態のばらつきを与えた。

各因子をL18直交表に割り付けてバーチャル品質工学を実施し、その結果(図4)から、制御因子の最適な組合せを抽出した。

#### 3.3 確認実験

バーチャル品質工学で求めた点火系仕様の効果を、実機試験で確認した結果の一例を図5に示す。図に示す筒内圧力はエンジンの動作300サイクルのアンサンブル(サイクル周期)平均であり、点火系最適化前(従来仕様)と最適化後とで、混合気状態のばらつきに伴う変動を比較した。なお比較評価に際しては、筒内圧力をエンジン出力に換算して行った。

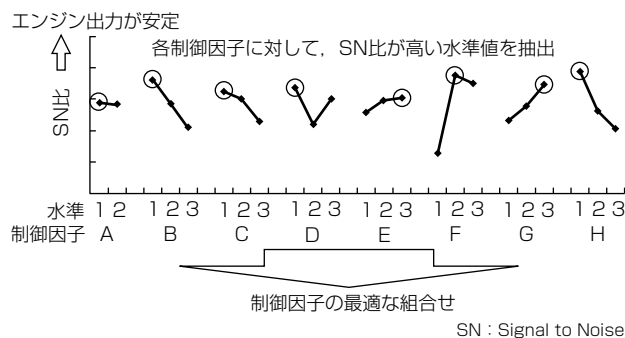


図4. バーチャル品質工学の結果(要因効果図)

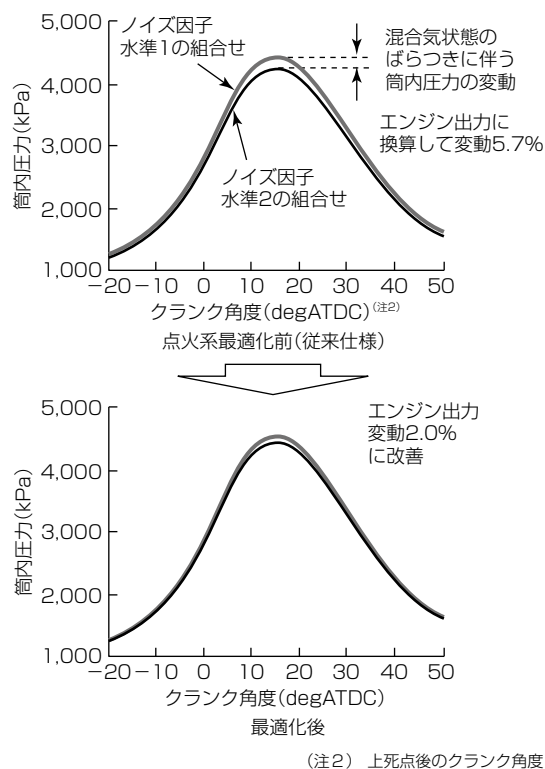


図5. 確認実験の結果

図から、従来仕様は混合気状態のばらつきに伴ってエンジン出力に5.7%の変動が見られたが、点火系最適化後は2.0%となり、エンジン出力の変動を改善できている。

混合気状態のばらつきに強い点火系を狙ってバーチャル品質工学で仕様の最適化を図った結果、実機でその効果を確認できた。この例は、シミュレーション技術を用いたバーチャル品質工学の有効性を示せた例と考えている。

## 4. む す び

今回、大規模かつ複雑化していく自動車のパワートレインシステムの開発効率化を狙い、パワートレインシステムの構成要素の一つであるエンジン点火・燃焼系を対象とするシミュレーション技術を構築した。

今後は、点火・燃焼系以外へのモデルベース開発の適用を目指して取組みを継続していくとともに、燃費向上に有効と言われるスーパーリーンバーン(超希薄燃焼)に適した放電仕様の検討などにこの技術を活用していく。