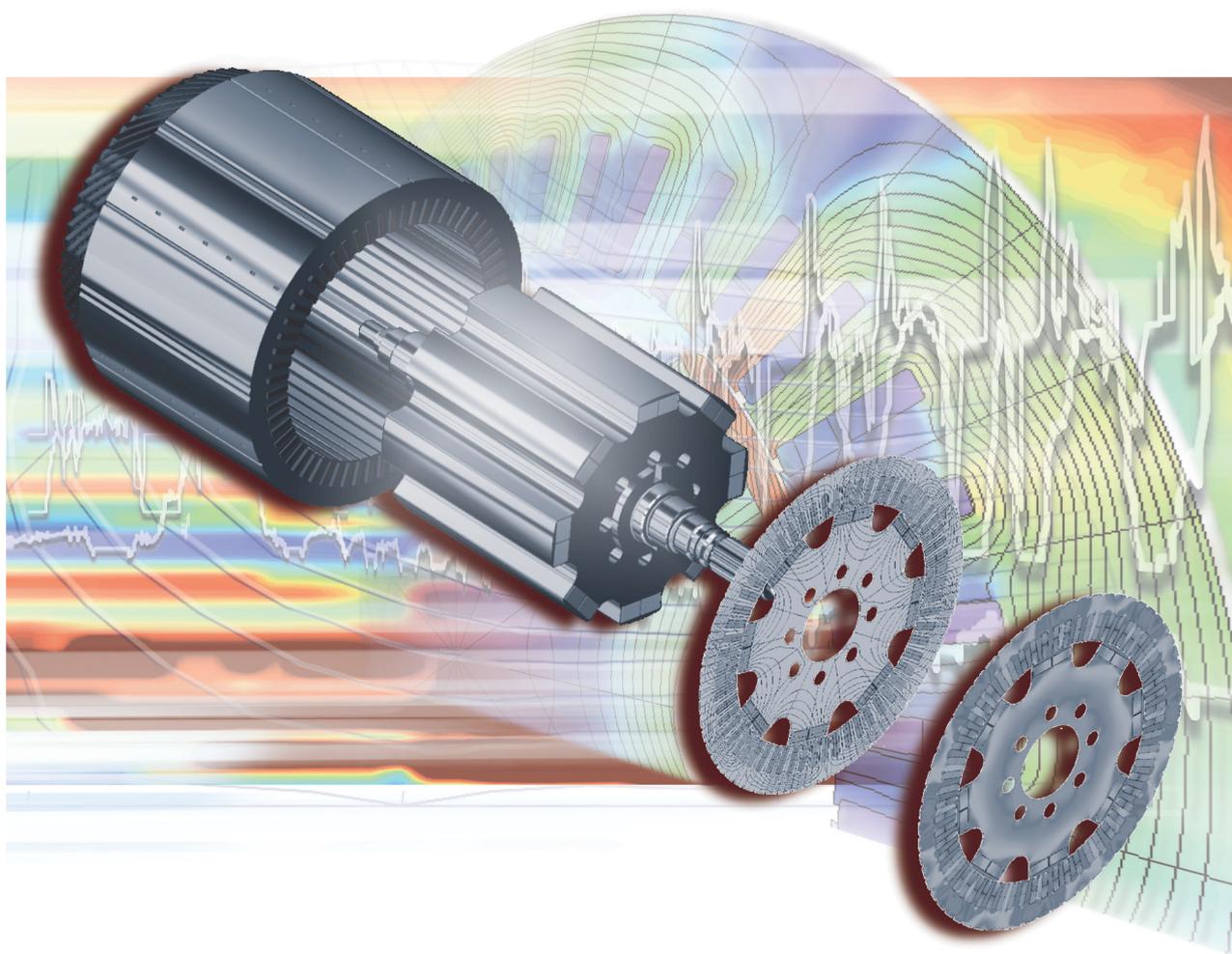


NISSAN TECHNICAL REVIEW

日産
技報

2016 No.78



日産のオープンイノベーションを支える海外リサーチアクティビティ
Global Research Activity for Nissan Open Innovation

NISSAN MOTOR CORPORATION



2016



NISSAN TECHNICAL REVIEW

No.78

日産技報第78号

目次

2016年3月 発行

◆ 巻頭言

世界の智と共に研究を加速する……………土井 三浩 …… 1

◆ 特集：日産のオープンイノベーションを支える海外リサーチアクティビティ

1. 世界の智が集う日産総合研究所……………伊藤 智啓 …… 3

2. シリコンバレーでの研究活動紹介：NRC-SV …… 高田 裕史・ペダーセン リアム・ディブ グレゴリー
セフキン メリッサ・シーアハウス マーティン …… 6

3. 北米日産テクニカルセンターにおける電池材料及びセル研究……………押原 建三 …… 14

4. ロシアでの研究活動紹介：NRC-Russia …… 奥山 陽三・リーマン リュードミラ …… 21

5. インドでの研究アクティビティ紹介：NRC-India …… 羽賀 史浩・サブラマニ アルーア …… 27

6. 環境変化にロバストな自己位置推定および環境情報取得に関する研究……………佐野 泰仁 …… 33

7. 一般道自動運転に向けたディープラーニングによる車線認識……………吉畑 友太・古性 裕之 …… 40

8. マルチポートコンバータの電力損失低減技術……………山上 滋春 …… 47

9. 可変磁力モータの研究	福重 孝志・加藤 崇・佐々木健介	52
10. シリコン合金負極での固相-電解液界面 (SEI) の解析		
	伊藤 淳史・渡邊 学・津島 健次・秦野 正治	61
11. 量子ドット増感型固体太陽電池の研究		
	福本 貴文・丹羽 勇介・太田 最実・菅 克雄	71
12. 触媒実有効表面積の解析に関する研究		
	井殿 大	77
◆ 技術紹介		
13. 新型VR30DDTTエンジンの開発		
	石井 仁・安藤 章作・志方 章浩 田中 勉・林 昭宏・高嶋 和朗	85
◆ 社外技術賞受賞一覧表		
		93
◆ 受賞技術概要		
14. 一時停止交差点におけるドライバのヒヤリハット・リスク定量化手法の研究		
	平松真知子・寸田 剛司・小竹 元基・鎌田 実	98

———— CONTENTS ————

◆ **Preface**

- Accelerating Research Activities together with the World's Intellectuals 1
By Kazuhiro DOI
-

◆ **Special Feature : Global Research Activity for Nissan Open Innovation**

1. Nissan Research Center : where World Intellectuals Converge 3
By Tomohiro ITOU
2. Introduction to Research Activities in Silicon Valley : NRC-SV 6
By Yuji TAKADA, Liam PEDERSEN, Gregory DIBB,
Melissa CEFKIN, Maarten SIERHUIS
3. Research on Battery Materials and Cells at NTCNA-Farmington Hills 14
By Kenzo OSHIHARA
4. Introduction to Research Activities in Russia : NRC-Russia 21
By Yozo OKUYAMA, Liudmila LIMAN
5. Introduction to Research Activities in India : NRC-India 27
By Fumihiro HAGA, Ailoor. K. SUBRAMANI
6. Report on Robust Localization and Map Making for Handling Driving Environment Changes 33
By Yasuhito SANO
7. Lane Recognition by Deep Learning for Autonomous Driving on City Roads 40
By Yuta YOSHIHATA, Hiroyuki FURUSHOU
8. Loss Reduction Technology for a Multi-port Converter 47
By Shigeharu YAMAGAMI

9. A Study on Variable Magnetic Flux Machines	52
By Takashi FUKUSHIGE, Takashi KATOU, Kensuke SASAKI	
10. Characterization of Solid-Electrolyte Interphase on Silicon Alloy Anode	61
By Atsushi ITO, Manabu WATANABE, Kenji TSUSHIMA, Masaharu HATANO	
11. A Study on a Solid-state Quantum-dot-sensitized Solar Cell	71
By Takafumi FUKUMOTO, Yuusuke NIWA, Yoshimi OHTA, Katsuo SUGA	
12. Analysis of Effective Surface Area for Electrochemical Reaction	77
By Hiroshi IDEN	
◆ New Technology	
13. Development of the New VR30DDTT Engine	85
By Hitoshi ISHI, Shosaku ANDO, Akihiro SHIKATA, Tsutomu TANAKA, Akihiro HAYASHI, Kazuaki TAKASHIMA	
◆ List of Technical Award Recipients	
93	
◆ Technical Award News	
14. A Study of a Method for Quantifying Drivers' Near-miss Risk at Stop Sign Intersection	98
By Machiko HIRAMATSU, Takashi SUNDA, Motoki SHINO, Minoru KAMATA	



世界の智と共に研究を加速する

アライアンス グローバル ディレクター 総合研究所所長
土井 三浩

日産自動車は、クルマの電動化、知能化を柱にした技術開発を進めている。エネルギー、地球温暖化、渋滞、交通事故などの自動車を取り巻く課題を解決し、更に魅力あるクルマづくりを進める上で、これら技術の役割は大きい。日産リーフの発売から4年半経った2015年6月、ルノー・日産アライアンスによる電気自動車（EV）の累計販売は25万台を突破し、他社のEV市場への参入が相次ぐ中、グローバルでのシェアは50%を超える。また、既に20年を超える予防安全技術開発の流れの中で実現した自動ブレーキは、お客様より高評価を頂き、自動運転につながる技術として期待されている。電動化、知能化に関わる研究開発は、その一歩を着実に踏み出し、更に大きな実りを、クルマおよび取り巻く社会で享受する段階に入る。

自動車産業は、独自の知見や技術を社内で育て、組織として蓄積することで競争優位を担保してきた。しかしながら、社内資源のみに頼る従来型の研究スタイルで、高度かつ多様化する技術、お客様の満足、新たな社会価値を創出していくことには限界がある。EVを活用したVehicle to Home（V2H）や、ネットワークに常時接続されるコネクテッドカーに代表される様に、クルマが社会とのつながりを強固にしていく中、クルマ自身がよりオープンに変化していく潮流は必然と言える。

日産自動車総合研究所は、企業内部と外部のアイデアを組み合わせることで新しい価値を早く生み出す「オープンイノベーション」の可能性に早くから着目し、“世界の智が集うオープンイノベーションの拠点になること”を行動指針のひとつに掲げてきた。知的探究心に満ちた世界の智と協力し、新しい価値を生み出すためには、世界中の有識者と広くネットワークを構築することに加え、世界の智を刺激する高い技術力や専門知識、枠にとらわれずに共創を楽しむオープンなマインドを持つことが重要である。本指針の下、現在の研究活動は、国内のみにとどまらず、新たな研究シーズや人材を求めて海外に活動の場を広げ、その地域に根差し、特徴を生かした内容としている。2013年設立のNissan Research Center Silicon Valleyでは、自動運転技術の研究・開発を加速するため、米国航空宇宙局（NASA）やスタンフォード大学などの世界トップレベルの研究機関・大学と共同研究を行っている。また、欧州、アジアでも、クルマと社会システムへの新たな貢献を研究・実証する取り組みが進行中である。これら施策は、研究者の育成にも大きく貢献し、ユニークな研究成果を産む土壌となっている。本号特集では、私たち総合研究所の海外拠点における研究活動、海外大学・研究機関との共同研究事例を紹介する。オープンイノベーションへの論議を促すと共に、グローバルに展開される研究活動の躍動感を感じて頂ければと思う。

Accelerating Research Activities together with the World's Intellectuals

Kazuhiro Doi
Alliance Global Director, Research Division

Nissan Motor Company is moving ahead with research and development activities focused on vehicle electrification and intelligence. These technologies will play a major role in advancing more attractive automotive design and engineering contributes to resolve various issues related to vehicle use such as energy consumption, global warming, congestion and traffic accidents, among others. In June 2015, four and a half years after the release of the Nissan LEAF, cumulative sales of electric vehicles (EVs) by the Renault-Nissan Alliance surpassed 250,000 units. Our share of the global EV market exceeds 50%, amid the continued entry into this segment by one company after another. In the course of developing active safety technologies for more than twenty years now, we have commercialized an emergency brake system that is highly acclaimed by customers and is one technology that is expected to lead to autonomous driving. Research and development work on vehicle electrification and intelligence is steadily moving forward and will soon enter the stage where it will yield significant results that will benefit not only vehicles but also society in general.

Companies in the automotive industry have traditionally cultivated their own knowledge and technologies independently and accumulated them within their organization to secure a competitive advantage. However, the traditional research style of relying only on in-house resources is limited with regard to creating advanced and diversified technologies, greater customer satisfaction and new social value. As typified by the Vehicle-to-Home (V2H) system and the connected car that is always connected to the Internet, the links between vehicles and society are continually becoming stronger. In this context, a trend toward making vehicles themselves more open will be inevitable in the coming years.

At the Nissan Research Center, we began early on to focus on possibilities for open innovation in creating new value quickly by combining ideas from both within and outside the company. As one of our action guidelines, we set the goal of becoming an open innovation center where the world's intellectuals would gather. In order to create new value through collaboration with global intellectuals filled a spirit of intellectual inquiry, it is necessary to build a broad network of contacts with learned persons throughout the world. In addition, it is also important to possess high levels of technical skills and specialized knowledge for mutually stimulating global intellectuals, along with an open mind that enjoys co-creation without being confined within a particular framework.

Under this guideline, we have not kept our research endeavors solely in Japan, but have extended them abroad in pursuit of new research seeds and human resources. Our research activities have taken root in different areas of the world and are characterized by making effective use of distinctive local features. At the Nissan Research Center Silicon Valley established in 2013, collaborative research is being conducted with the world's leading research institutes and universities, including the U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA) and Stanford University, to accelerate the research and development of autonomous driving technologies. Moreover, programs are also under way in Europe and Asia to research and demonstrate technologies for making new contributions to vehicles and social systems. These various efforts are contributing substantially to the development of researchers and provide the foundation for producing unique research results.

This special feature of the Nissan Technical Review describes the research activities under way at the overseas facilities of the Nissan Research Center and presents examples of joint research studies conducted with universities and research institutes abroad. It is hoped that it will serve to stimulate further discussion on open innovation and also enable the reader to feel the dynamic quality of our research activities that under way globally.

世界の智が集う日産総合研究所

Nissan Research Center : where World Intellects Converge



研究企画部 伊藤 智啓
Research Planning Department Tomohiro Itou

1. はじめに — Nissan Research Way —

私たち総合研究所のミッションは「将来のモビリティ社会に貢献する新たな価値の創造」であり、日産の将来ビジネスを実現するためのコアとなる新技術を創出する“源泉”であり続けることが最大の役割である。

日産技報73号（2013年12月）のOrchardコンセプトに基づく日産の技術開発戦略特集では、日産自動車独自の価値を創出するために“Orchardコンセプト”という枠組みを通じて技術を培ってきたことを紹介したが、その中で登場したOrchard（＝果樹園）の横に立ち将来の果実（技術）に思いを巡らす農夫に“新たな開墾地”を探して提供し、“新たな種や苗”を手渡し続けることが、総合研究所のミッションである。

ミッション遂行のため、総合研究所は三つの柱からなる「Nissan Research Way」を活動の基本としている（図1）。

一つ目の柱は「将来の技術動向と社会の価値観変化を見定めること」で、技術のトレンドと自動車の進化から、私たちが貢献すべき“将来の社会像（マーケット）”を明確にすることである。二つ目は「世界の智が集うオープンイノベーションの拠点になること」で、世界各国の研究機



図-1 Nissan Research Way
Fig. 1 Nissan Research Way

1. Introduction: the Nissan Research Way

The mission of the Nissan Research Center is to create new value contributing to sustainable mobility for the future. Our principal role is to be a fountainhead that continuously creates new core technologies indispensable to Nissan's future business.

Nissan's technology strategy is based on the Orchard Concept detailed in Nissan Technical Review No. 73 (December 2013). It describes how Nissan nurtures new technologies through the framework of the Orchard Concept to create unique value. In this analogy, the Nissan Research Center's mission is to seek and provide new land for cultivation, along with new seeds and seedlings, to a farmer standing by an orchard and contemplating ways to grow new fruits (technologies).

To carry out this mission, at the Nissan Research Center we conduct our activities based on the Nissan Research Way consisting of three pillars (Fig. 1).

With the first pillar, to "forecast technology trends and social changes," the aim is to clarify the image of the society (market) to which we wish to contribute. With the second, to "create open innovation with the world's intellects," the aim is to build a global network comprising research institutes from around the world as a basis for "finding new land to clear" and "growing new seeds and seedlings." With the third, to "develop competitive technologies in strategic domains," the aim is to stock the "new seeds and seedlings" and hand them over to the farmer.

2. Creating Open Innovation with the World's Intellects

This special feature focuses on the second pillar, particularly on how Nissan Research Center is moving forward with open innovation to support overseas efforts to develop electric and intelligent vehicles.

Our open innovation activities overseas can be broadly divided into two categories. One is the activities our overseas research centers are carrying out, and the other is dispatching human resources from Japan to famous universities and research institutions abroad.

Our overseas research sites are located in Farmington

関とグローバルネットワークを構築し“新たな開墾地の発見”と“新種の種や苗を創出する”ための基礎をつくることである。そして三つ目の「戦略的領域で内部に高い技術力を持つこと」が、まさに農夫に手渡す“新種の種や苗”をストックすることである。

2. 世界の智が集うオープンイノベーションの拠点

今回の特集では、この二つ目の柱について、特に海外における電動化・知能化に向けた取り組みの一部を交えて、私たち総合研究所がどのようにオープンイノベーションを推進しているかご紹介したい。

私たちの海外でのオープンイノベーションのための活動は、大きく二つに分けられる。一つは総合研究所の海外拠点を中心とした活動、もう一方は日本から海外の著名大学や研究機関に人材を派遣しての活動である。

総合研究所は、ファーミントンヒルズ（米ミシガン州）、シリコンバレー（米カリフォルニア州）、チェンナイ（インド）、モスクワ（ロシア）に拠点を置いている（図2）。

米国は世界トップレベルの研究人材と設備、旺盛な投資環境によって、基礎から応用まで非常にすそ野が広く、かつ極めてユニークな発想の材料技術が生み出されており、ファーミントンヒルズではこれらを最大限に活用し、電池の材料研究などを行っている。

シリコンバレーはベンチャー企業など先進的な企業の活動が盛んであり、最先端のICT（Information and Communication Technology）研究や独創的なビジネス開発が行われている、まさに世界の智が集まる場所である。私たちはこの場所に身を置き、この環境を生かして、自動運転やコネクテッドカーに代表される知能化技術の研究を行っている。

チェンナイでは燃料電池やリチウムイオン電池の材料選定・評価から、自動運転のソフトウェア開発・評価に至るまで、幅広い研究領域を担っている。以前、インドは人件費の安さを理由に、試作や単純評価での活用が主であったが、私たちは優秀な人材の宝庫として早くから注目し、現地体制を整えてきた。その結果、既に現地発の新しい研究アイデアが生まれるレベルにまで成長してきている。

モスクワでは、旧ソ連時代の宇宙技術、原子力技術に端を発する先端材料技術、特にナノマテリアルやナノプロセスなどの領域に着目し、研究活動を進めている。米国やEU地域とは異なる発想の、電動化技術に応用可能な独創的な技術が数多く存在しており、これらを積極的に取り込んでいる。

私たちは日本（厚木・横須賀）の総合研究所とこれら4拠点を中心に、各国・地域の長所と利点を生かして切磋

Hills (Michigan, USA), Silicon Valley (California, USA), Chennai (India), and Moscow (Russia) (Fig. 2).

Top-level human resources and equipment, combined with a robust investment environment, enable the Farmington Hills site to implement its activities on a broad scale ranging from basic to applied research. Making the most of these advantages, the men and women at the site have produced exceptionally unique ideas about materials for use in electric vehicle batteries.

Silicon Valley is known as a thriving area for venture firms, a center for state-of-the-art ICT (Information and Communication Technology) research and creative business development where world intellects congregate. By establishing a facility in this area and taking advantage of its environment, we have been able to carry out top-level intelligent technology research for application to autonomous vehicles and connected cars.

The Chennai site handles a wide range of research areas, ranging from selecting and assessing materials for fuel cells and lithium-ion batteries to developing and assessing software for autonomous vehicles. Previously, the work there focused on prototypes and simple evaluations, taking advantage of the low labor costs in India. However, the site quickly drew attention as a treasure trove of excellent human resources and accordingly we established a local system there. As a result, it has already grown to a level where new research ideas are being created there.

In Moscow, which in the former Soviet Union was a center for studies in space exploration and research on advanced materials in nuclear power systems, we are promoting research activities with particular emphasis on areas such as nanomaterials and nanoprocesses. In this way Nissan is actively adopting new and different ideas from the United States and the EU, as well as innovative technologies that can be applied in the shift to electric vehicles.

Our research site in Japan (Atsugi, Yokosuka) lies at the middle of the four overseas sites. In establishing these sites we have built a global research system where the



図-2 日産の研究拠点
Fig. 2 Nissan's global research sites

琢磨し合えるグローバル研究体制を構築してきた。総合研究所はこれらの拠点や研究機関を通じて、世界の智をくまなく集結している。

次に、日本から大学や研究機関に人材を派遣しての活動であるが、たとえば2015年までの5年間で30人以上の研究員を派遣しており、現地の研究チームに加わって研究を行っている。

それぞれの研究課題は一方的に日産から依頼するものではなく、先方の研究機関の要望も織り込みながら論議して決めている。私たちは一方的ではないところから、オープンイノベーションが育まれると考えている。また、この機会を通じ若手研究員が現地の文化や風土にどっぷりと浸かり、グローバルネットワークの土壌をつくり、帰国後も日本からオープンイノベーションをけん引する“グローバル人材”に育っている。つまり、研究成果のみに留まらない価値を研究所にもたらしてくれている。本特集では、この海外派遣活動によって行われた研究、特に電動化・知能化での事例を中心にご紹介する。

3. お わ り に

自動車産業はグローバルな競争を展開しており、またコンペティタも従来の自動車業界の枠を超え、ICT産業にまで広がりつつある。このような環境で新技術を創出し続け生き残るためには、オープンイノベーションは“研究の理想の姿”ではなく、“生き残りの必須条件”である。逞（たくま）しく積極的にオープンイノベーションを推進する総合研究所の勇姿をご覧いただきたい。

strengths and advantages of each country and region can be combined, enabling each site to learn from the others. Through links to overseas sites and other research institutions, Nissan Research Center truly becomes a place where the world's intellectuals gather.

The center also dispatches human resources from Japan to universities and other research institutions. In the last five years up to and including 2015, for example, more than 30 researchers have been sent to other areas to join research teams there.

In such cases Nissan does not unilaterally specify the research tasks to be performed; rather, the tasks are determined through discussions. We believe that open innovation can be nurtured by not taking a one-sided approach. We also believe that sending researchers to other areas will give them opportunities to interact with young local researchers and from them learn things about the local culture and climate. This will help them establish a foundation for a global network, which they can use to nurture “global human resources” through open innovation from Japan after returning home. In other words, they will bring back values not limited to research laboratory results.

This special feature has shown how these desired objectives can be achieved, with a focus on applying research work to the development of electric and intelligent vehicles.

3. Concluding remarks

The global competition in the automotive industry has expanded to the point where it has spread beyond the automobile business and moved into the ICT industry. In creating new technologies to survive in such an environment, open innovation must be carried out as the “essential conditions for survival” rather than “ideal research.” We sincerely hope that all who read this special feature will understand and appreciate the deep and concerted efforts the Nissan Research Center is making to push forward with open innovation.

シリコンバレーでの研究活動紹介：NRC-SV

Introduction to Research Activities in Silicon Valley : NRC-SV

高田 裕 史*
Yuji Takada

ペダーセン リアム*
Liam Pedersen

ディブ グレゴリー*
Gregory Dibb

セフキン メリッサ*
Melissa Cefkin

シーアハウス マーティン*
Maarten Sierhuis

抄 録 Nissan Research Center Silicon Valley (NRC-SV) は、北米西海岸に2013年2月に設立された研究所である。シリコンバレーは世界的に見てもソフトウェア開発やネットワーク技術の開発が盛んな地域であり、NRC-SVにおいても主な研究の対象はこれらの分野に特化される。具体的には、自動運転車に賢い動きをさせるための人工知能 (AI) に関する研究や、ネットワークにつながる自動車 (Connected Car) サービスに関する研究を実施している。本稿では、本研究所が所在するシリコンバレーという環境の特徴と、本研究所において実施している各研究の概要について紹介する。

Summary Nissan Research Center Silicon Valley (NRC-SV) has been operating since February 2013 in Silicon Valley, on the west coast of the USA. Silicon Valley is internationally recognized as the center of advanced software technology and telecommunication network technology. Affected by the Silicon Valley nature, NRC-SV is also focusing its research on software engineering and development. In particular, NRC-SV focuses on AI (artificial intelligence) research enabling autonomous vehicles to perform socially acceptable and human-like maneuvers and research on vehicles connected to networks (connected cars). In this article we overview NRC-SV's research activities.

Key words : *Research & Development, Computer Application, Electronics, research, intelligent vehicle, artificial intelligence, simulation*

1. はじめに

Nissan Research Center Silicon Valley (NRC-SV) は2013年2月に設立された日産自動車の新しい研究開発拠点である。シリコンバレー地域の中心、米国カリフォルニア州サンバレー市に位置し、地域の多様な研究機関や企業と協働しながら、新しい自動車及び新しい自動車社会の実現を目指して研究開発を推進している。

現在の研究対象は、自動運転車の実現に向けた技術開発やネットワークにつながる自動車 (コネクテッドカー)、大規模データ利用に関する研究が主である。いずれも、自動車開発にとっては新しい技術分野への挑戦であるが、シリコンバレーの地域的な特色と自動車開発独自の方法論を上手に融合させることによって達成可能な研究分野である。

本稿では、NRC-SVを取り巻く環境と、その環境において取り組んでいる我々の研究活動の一部を紹介する。

2. Nissan Research Center Silicon Valley

シリコンバレーにおけるNRC-SVの設立は、戦略的な市

1. Introduction

Nissan Research Center Silicon Valley (NRC-SV), founded in February 2013, is a new research and development center for Nissan. Located in the middle of the Silicon Valley area (Sunnyvale, California), NRC-SV aims to develop new vehicles and a new automobile society while working together with the various research institutes and companies in the region.

The center's current interests mainly focus on research leading to the development of autonomous vehicles and using available large-scale data to develop vehicles connected to networks (connected cars). Either case involves new technical challenges in which the research features emanating from Silicon Valley are combined with Nissan's own methodologies. This article will present the research activities NRC-SV is carrying out in the context of the Silicon Valley environment.

2. Nissan Research Center Silicon Valley

The NRC-SV (Fig. 1) was established in Silicon Valley in accordance with Nissan's global strategy of extending R&D activities to and localizing them in strategic markets. The key for companies competing in the autonomous vehicle and connected car fields is developing software

*Nissan Research Center Silicon Valley

場におけるR&D機能の拡張と現地化という日産のグローバルな戦略に基づくものである。自動運転やコネクテッドカーといった分野での自動車関連各社の技術競争が活性化していく中で、それら技術の実現にはソフトウェア開発、特にデータ解析技術や人工知能（AI: Artificial Intelligence）技術の開発が鍵となっている。これら技術開発及び自動車への適用を迅速に行うことを目的として、ソフトウェア開発で先端を行く当地区に、本研究所は設立された。近隣にはYahoo社、Apple社、Google社に代表される多くのIT関連企業が本社を構え、また、NASA、スタンフォード大学などの政府や大学所属の研究機関も数多く所在する環境である。本研究所は、真にシリコンバレーの中心地に位置している（図1）。

2.1 研究分野

現在、NRC-SVで行っている研究は主に①自動運転、②コネクテッドカー及びサービス、③Human Machine Interface及びInteractionの3領域であるが、特に都市部の街中でも走行できる自動運転車の実現に向けたAI技術の開発に注力している。前記のように、この分野の競争は近年激しくなっており、技術開発、車両実装、走行テスト、改良のサイクルを効率良く回していく必要がある。このような開発を実現するためには、全体のソフトウェアプログラムの中から、改良されたプログラムを一部だけ「プラグ&プレイ」できるようなプラットフォームを実現する必要がある。言い換えると、ソフトウェアプラットフォーム開発や開発の方法論自体も、本研究所の研究対象になっている。

2.2 研究開発のアプローチ

研究開発の方法論として、Lean Startup¹⁾と呼ばれる開発手法をベースとしたLean Research Cycleを採用している。以下に、Lean Research Cycleの各ステップでの活動を説明する（図2）。

enabling them to put their technologies to real and practical use, particularly data analysis software and artificial intelligence (AI) software. Accordingly, Nissan established NRC-SV with the aim of developing such software in an area representing the forefront in software development, and then rapidly employing it in automobiles. Many organizations of worldwide repute have facilities located nearby NRC-SV, including Yahoo Inc., Apple Inc., NASA, and Stanford University. Thus, it can truly be said that the center is located in the heart of Silicon Valley.

2.1 Research fields

Currently, research at NRC-SV is mainly being performed in three fields: (1) autonomous vehicles, (2) connected cars and services, and (3) human-machine interface and interaction. Particular emphasis is focused on developing AI techniques that will enable autonomous vehicles to be operated even in urban areas. Competition in these fields has become quite fierce in recent years, making it essential to efficiently carry out the cycle of developing techniques, implementing them in vehicles, performing and running tests, and making improvements. It will be especially important to develop a software platform that makes “plug and play” possible for at least some improved software programs. Thus, NRC-SV’s major research objectives include developing software platforms and methodologies for doing so.

2.2 Research and development approach

The research and development methodology NRC-SV has adopted is a “Lean Research Cycle” (Fig. 2), which is based on a development approach called “Lean Startup”¹⁾. In this cycle specific use cases are used to construct realistic technology development scenarios. The steps in the cycle are as follows.

- (1) Scenario development: Discuss specific use cases of developing technology and drawing up its realistic scenario of development.
- (2) Sensing: Identify customer needs, particularly on the basis of market surveys and actual field observations.



図-1 Nissan Research Center Silicon Valley
Fig. 1 Nissan Research Center Silicon Valley

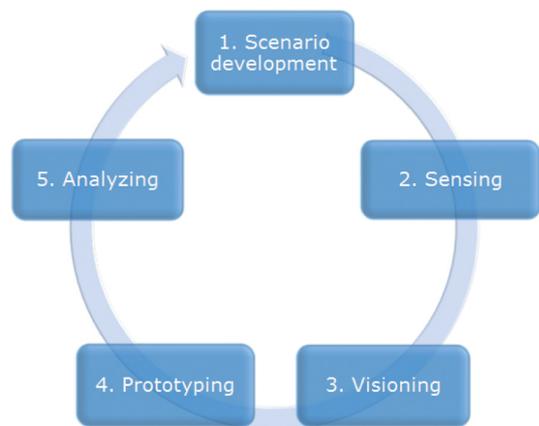


図-2 Lean Research Cycle
Fig. 2 Lean Research Cycle

1. Scenario development：開発する技術の具体的なユースケースを構築し、現実的な技術開発シナリオを立てる。
2. Sensing：顧客のニーズを特定する。市場調査や実際の現場での観察に基づくニーズの把握が大事である。
3. Visioning：ニーズを実現する解を提案する。いくつかの候補を検討しながら、専門的な知見に基づき候補を絞る。
4. Prototyping：絞られた解候補について、顧客テストが実行可能な必要最小限のプロトタイプを構築する。
5. Analyzing：顧客テストを実施し、フィードバックを獲得する。この反響を開発シナリオの修正や、新しいシナリオの作成に反映させる。

非常に早いスピードで状況が変化するシリコンバレーにおいて競争力を保つには、Lean Research Cycleの回転を早めて、常に研究成果を出し続ける必要がある。そのためには、各サイクルで達成された顧客価値を、実際の・体感的に理解する必要がある。価値の適切な理解によって、次のサイクルにおける研究課題が適切に方向付けられる。

2.3 シリコンバレー・エコシステム

一年を通して過ごしやすい環境は、シリコンバレーに世界中から人を呼びこむ要因となっている。次々と集まってくる人々により組織は持続的に構成・拡張し続け、また各組織が互いを補うように作用することで、新たな価値が次々と生み出されている。生み出された新たな価値は、地域の更なる成長の原動力となる。

このように、あたかも一つの生態系のように地域全体が機能している様子を表現して、近年この地域の活動は“シリコンバレー・エコシステム”と呼ばれている。シリコンバレー・エコシステムは様々な業種の企業によって構成されており、これにベンチャーキャピタルや一流の大学が加わることで、スタートアップや破壊的なビジネスモデル、多種多様なハイテク分野でのリーダーを生み出す環境として、大きな成功を収めている。²⁾

NRC-SVはこのエコシステムの一要素として加わることで、グローバルな日産の一員としての役割のみならず、この地域における技術交流や教育、雇用などにおいても、相互補完的な役割を担っている。

3. 自動運転研究

自動運転車は他の自動車、歩行者、自転車など、多くの他の道路利用者と道路環境を共有することになる。そのためには、与えられた時間の中で、互いに満足できる形で折り合いを付けたり、移動に際しては、他の道路利用者の動きを予想しながら、自身も周囲にわかりやすい動きで、確実に移動する必要がある。つまり、自動運転車が社会に受け入れられるためには、人間が普段、無意識に行っている判断や振る舞いを、自動運転車上でも再現する必要がある。

- (3) Visioning: Propose solutions to meet the needs, using specialized knowledge to narrow down the range of possible candidates.
- (4) Prototyping: From the narrowed-down range, construct prototypes with the minimum scope required for customer tests.
- (5) Analyzing: Perform the tests to obtain feedback for use in modifying development scenarios and creating new ones.

To remain competitive in Silicon Valley, where things change very rapidly, it is essential to perform the Lean Research Cycle quickly and produce research results continuously. Therefore, it is necessary to thoroughly and truly understand the customer value achieved in each cycle. Such understanding of the value will point out the right direction to take to address research challenges in the next cycle.

2.3 Silicon Valley ecosystem

The comfortable environment Silicon Valley offers year-round attracts people from all over the world to it. Many of them continue to form and expand organizations that complement each other in producing new value time and again. This new value creation is a driving force for further growth in the region. Thus, the whole region seems to function as one ecosystem, which is why the recent activities in the area are referred to as the “Silicon Valley ecosystem.” The ecosystem comprises multiple firms in multiple industries, to which venture capital and first-class universities are added. This has enabled the region to enjoy great success as an environment that produces startup firms, disruptive business models, and leaders in a wide variety of high-tech fields²⁾.

NRC-SV has been added as an element of this ecosystem, playing a complementary and active role not only as one of Nissan’s global research sites, but as a contributor to employment, education, and technical exchanges in the region.

3. Autonomous vehicle research

The future will see autonomous vehicles sharing the roads and driving environments with other vehicles, pedestrians, bicycles, etc. in many areas. Accordingly, they will need to be able to move around freely while at the same time anticipating the movements of other road users, making compromises in a manner satisfactory to all concerned. That is, for society to accept autonomous vehicles it will be necessary for them to interpret and potentially reproduce judgments and actions that human beings make instinctively and automatically.

In order to develop such vehicles, every day NRC-SV personnel observe and improve their understanding of driving behavior in the city and use their understanding as a basis for developing software that will enable autonomous vehicles to behave “intelligently.”

そのような自動運転車を実現するため、本研究所では、人間が日頃、街中で行っている運転行動を観察・理解することから始め、その上で、それらの理解に基づいた自動運転車の賢い振る舞いを実現するソフトウェアの開発を行っている。

3.1 知的な動作の実現

他車両や歩行者の動きを読む、あるいはその読みに基づいて自身の動きを決定する計算は、問題として自由度が高く、計算結果にも曖昧さが残る。この点で、火星で探査車両を動かしたり、自動で旅客機を飛ばしたり、といった技術と比較しても、とても難しい課題である。つまり、自動運転車の実現に向けた課題は、AIやロボティクスなど、ソフトウェア工学の分野で議論されている共通課題を解き明かすことに他ならない。

具体的には、以下の機能を実現する必要がある。

- 意図推定：他の道路利用者の意図を理解し、これから何をするのかを予測する技術。例えば、歩行者が道を渡ろうとしているのか、前の車が車線変更しようとしているのかなど。
- 経路計画、軌道計画：目的地までの適切な経路を計画する技術と、その上で他車両や障害物を回避する技術。
- ネゴシエーション：例えば、信号の無い交差点を通過する際に他車両や歩行者の状態、あるいは意図を獲得して、通過できる／できないの判断を行う機能。

以上の機能を自動運転車が備え、逐次的に計算を行い、振る舞いを決めていくことで、他の道路利用者と共存可能な自動運転車の実現が可能となる。

3.2 ソフトウェア工学

自動運転のソフトウェア開発では、前記の機能を実現するために、何千行ものソースコードを記述する。これらコードで記述された複数のモジュールが互いに同期して機能し、結果、意図したように機能するプログラムを実現することが、ソフトウェア工学の役割である。

NRC-SVでは、シリコンバレーにおけるソフトウェア工学のベストプラクティスを導入している。具体的には、シミュレーションによる動作確認、ドライビングシミュレータ(図3)による動作検証などを経た上で、実験車を用いた走行実験を実施するといった、効率と効果の最大化を目的とした方法論を適用した開発を行っている。

3.3 自動運転車の社会受容性

「自動運転車はどのように振る舞えば、人間が運転する自動車や歩行者、自転車などの他の道路利用者に受け入れられ、社会の一員として共存できるか」。

自動車を「運転」する時、ドライバは他のドライバや歩行者、自転車などの他の道路利用者と、その場その場で意

3.1 Achieving “intelligent” behavior

Problems remain in using calculation to read the movements of other vehicles and pedestrians and using the readings as a basis for determining autonomous vehicle movements. These include high degrees of freedom and ambiguity in the calculation results. The advanced automation technology of today enables us to fly airplanes or move an exploration vehicle on Mars, but the challenges facing us in developing autonomous vehicles are even more difficult. Nothing less will be required than to unlock the secrets of AI, robotics, and all the other branches of science discussed in the software engineering field.

Specifically, it is necessary to develop the following functions.

- Intention estimation : This function makes it possible for the vehicle to understand the intentions of other road users and predict what they will do next. Predict, for example, whether that pedestrian is going to try to cross the road or whether that vehicle in front is going to try to change lanes.
- Trajectory and path planning : This function makes it possible for the vehicle to plan the best route to take to the destination and to avoid the other vehicles and obstacles on it.
- Negotiation : This function makes it possible, for example, for the vehicle to judge whether or not it can pass through an intersection without a signal, by assessing the situation regarding other vehicles and pedestrians and determining their intentions.

Implementing these functions will enable the development of autonomous vehicles that can coexist with other road users by performing sequential calculations to determine their intentions and actions.

3.2 Software engineering

To enable these functions to be developed, autonomous vehicle software is written with several thousand source code lines. Multiple modules written in these codes are synchronized so as to function with each other, enabling software engineering to perform its role of developing programs that function as intended.



図-3 視界 360°ドライビングシミュレータ
Fig. 3 360 FOV driving simulator

シリコンバレー・エコシステムを活用し、大規模データの解析、モバイルアプリケーションの開発、及びクラウドサービス、ネットワーク、IoT (Internet of Things)、テレマティクスなどにおける内外の様々な技術を統合することで、モビリティに新たな価値を見出すことを試みている。

以下、これら技術を応用した研究事例を紹介する。

4.1 応用事例

4.1.1 アプリケーション開発 (Click N Plug / CollaBox)

Click N Plug は電気自動車の充電支援アプリケーションであり、職場などにおける充電器の混雑を緩和することを目的として、充電器の予約と順番待ちの情報を提供する。このアプリケーションを実現するために、CollaBoxと呼ぶミドルウェアを構築した。

4.1.2 クラウドサービス (LEAF@Home)

LEAF@Homeはクラウド及びモバイルのアプリケーションであり、オフピークで低料金の時間帯に充電を自動的に行ったり、出発前にいつでも出発できるように自動車を待機状態にしたり、到着前に自宅を帰宅可能な状態にしたりする機能を提供する (図5)。この機能は現在30名の北米日産従業員によってユーザテスト中であり、Lean Research Cycleの考え方に基づいて、テスト結果はアプリケーションの機能向上と新たな機能の提供に役立てられている。

5. Human Machine Interaction 研究

5.1 研究の背景

自動運転実現に向けた課題の一つに、ドライバと自動運転の間の円滑なコミュニケーションの実現が挙げられる。

4.1 Application cases

4.1.1 Application development: Click N Plug / CollaBox

Click N Plug is an application for electric vehicle charging support. It provides information about charging station reservations and queues, with the aim of relieving congestion at charging stations at or outside the workplace. We constructed a middleware framework called CollaBox to realize the application.

4.1.2 Cloud service: LEAF @ Home

LEAF @ Home (Fig. 5) is a cloud and mobile application with features that automatically enable electric vehicle users to charge their vehicles during off-peak hours when charging rates are lower, put it in standby state before they leave so that it will be ready to go at any time, and ensure it is sufficiently charged to get them home. The application is currently undergoing user tests with 30 Nissan North America employees serving as users. The test results, acquired by applying the Lean Research Cycle concept, become a useful means for enhancing the application's features and providing new ones.

5. Human-machine interaction research

5.1 Research background

One of the major challenges in developing autonomous vehicles is achieving smooth communication between the driver and the vehicle during autonomous driving.

In introducing autonomous driving into the market, Nissan has proposed the idea of introducing it in phases, from highways to city streets. Such an approach will mean a mixing of areas where autonomous driving is possible and areas where human driving has always been the norm. In other words, the driving entities will switch back and forth in the areas, autonomous driving taking over from human driving and vice versa.

Even for areas where autonomous driving is not

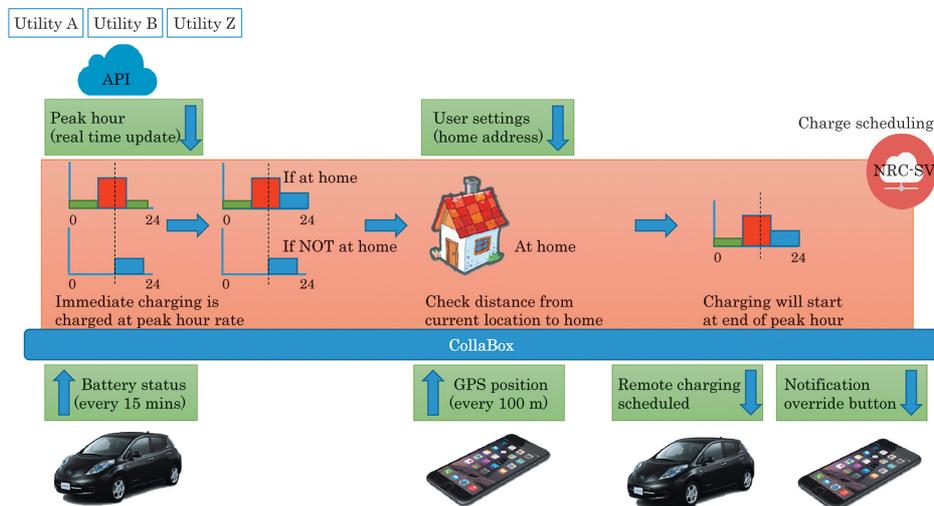


図-5 LEAF@Home の概念図
Fig. 5 LEAF@Home concept

日産は自動運転技術の市場導入の考え方として、高速道路から市街路まで、自動運転の段階的な導入を提案している。このような導入を目指した場合、自動運転で走行可能なエリアと、これまで通り人間の手で運転するエリアが混在することになる。つまり、それぞれのエリアの切り替わりにおいて、人間から自動運転、自動運転から人間へと、運転を実際に行う主体が切り替わる場面が発生する。

また、自動運転での走行が想定されていないエリアにおいても、自動運転用として備わったセンサや制御が使える場面では、今まで以上の機能を備えた高度な運転支援技術（ADAS）をお客様に提供できる可能性がある。

自動運転技術の開発レベル、または走行する環境に応じて、人間と自動運転、あるいは人と賢い運転支援の役割分担をデザインする研究と技術の開発は、自動運転の時代を迎えるにあたって重要な課題である。

5.2 実験環境としてのシリコンバレー

当地に研究所を構える利点の一つに、実験環境が挙げられる。カリフォルニア州では、事前の審査によって自動運転車の公道走行実験が許可される。実際の交通環境をシミュレーション、またはシミュレータで模擬しきことは難しい。開発した機能の最終的な検証は、実環境で行う必要がある（図6）。このような実験環境が身近にあること自体が、実際的な研究課題の抽出と実際的な技術開発を促進し、研究活動の加速要因となっている。

6. ま と め

本稿では、NRC-SVの環境と本研究所で行っている各研究の一部を紹介した。本研究所は土地柄、国籍、性別、文化や日々の生活習慣などが多種多様であり、文字通り、ダイバーシティに富んだ環境でもある。結果、型に縛られない自由な発想が日々生まれている。研究成果も、次第に形のあるものが増えてきている。日産の車づくりにおいて、今後更なる貢献に期待していきたい。

参 考 文 献

- 1) E. Ries: The Lean Startup: How Today's Entrepreneurs Use Continuous Innovation to Create Radically Successful Businesses (2011).
- 2) K. E. Kushida: A Strategic Overview of the Silicon Valley Ecosystem: Towards Effectively "Harnessing" the Ecosystem, Stanford Silicon Valley – New Japan Project (2015).

contemplated, using sensors and controls provided for it may enable us to offer customers advanced driver assistance systems (ADAS) with better functionality than ever.

Important factors will be involved in bringing on the era of autonomous driving. One is the development level of autonomous driving technology. Another is the study and development of methods for determining how the support roles will be divided between human and autonomous driving, between people and intelligent vehicles, in accordance with the driving environment.

5.2 Silicon Valley as an experimental environment

One of the advantages to setting up a research center in Silicon Valley is the experimental environment the region provides. In California, prior testing is permitted for road tests of autonomous vehicles. However, it is difficult to reproduce actual driving environments through simulation and to get accurate results using simulators; developed functions must ultimately be validated in actual driving environments (Fig. 6). Complete familiarization with these environments is nothing less than the key factor in defining research issues and promoting research development.

6. Concluding remarks

In this article we have provided an overview of NRC-SV and its research activities. The men and women at the center represent many different countries, nationalities, cultures and lifestyles, making it a research center that is truly rich in diversity. The consequence of this is a free-thinking atmosphere where new ideas are born every day and tangible research results are progressively increasing. As exemplified by its NRC-SV facility, Nissan looks forward to making further contributions to the automaking world in the future.

References

- 1) E. Ries, The Lean Startup: How Today's Entrepreneurs Use Continuous Innovation to Create Radically Successful Businesses (2011).



図-6 ハイウェイでの実験風景
Fig. 6 On-highway vehicle testing

- 2) K. E. Kushida, A Strategic Overview of the Silicon Valley Ecosystem: Towards Effectively “Harnessing” the Ecosystem, Stanford Silicon Valley – New Japan Project (2015).

■ 著者 / Author(s) ■



高田 裕史
Yuji Takada



ペダーセン リアム
Liam Pedersen



ディブ グレゴリー
Gregory Dibb



セフキン メリッサ
Melissa Cefkin



シーアハウス マーティン
Maarten Sierhuis

北米日産テクニカルセンターにおける電池材料及びセル研究

Research on Battery Materials and Cells at NTCNA-Farmington Hills

押原 建三*
Kenzo Oshihara

抄 録 電気自動車（EV）用電池容量向上のためグラファイト系負極の厚膜化やシリコン系負極材料の適用が検討されているが、いずれもまだ課題が多い。NTCNA（日産テクニカルセンター・ノースアメリカ）は米国での電池の高容量化アイテムについてベンチマークを行い、高容量化に伴う課題の明確化を行った。その結果、集電箔近傍での導電構造の機械的破壊ならびに電極活物質層中の低導電性粒子周辺で発生する容量損失が課題として抽出された。そこで電極活物質層中の導電構造について導電率の向上と機械的破壊の防止に注目し、各種電池材料の特徴と実際の効果を比較した。その結果、両方の要素を持つ新規材料において興味深いレート特性を得たので報告する。

Summary Thickening the electrode layers and applying silicon- or tin-based active materials are methods that have been studied for increasing the battery capacity of electric vehicles (EVs). However, many issues concerning these approaches remain to be solved. To clarify potential issues concerning high-capacity batteries, at the Nissan Technical Center North America (NTCNA) we benchmarked US-originated technical measures for improving battery capacity. The results of this benchmarking indicate two key phenomena: mechanical damage to the conductive pathway at the interface with the current collector and capacity loss around low-conductivity particles in the active material layers. In light of these results, NTCNA is focusing on suppressing the mechanical damage to the conductive pathway and enhancing conductivity in the active material layers. This article shows that using a new material that is effective in both ways improves the discharge rate capability.

Key words : *Research & Development, material, lithium-ion battery, rate characteristics, conductive path*

1. はじめに

地球規模の気候変動ということが言われるようになってからもうすぐ半世紀が経とうとしている。この間、二酸化炭素の排出削減への技術的努力は継続され、一定の成果を上げてきた。

日産自動車はこれら環境課題に対し中期環境行動計画「ニッサン・グリーンプログラム」を策定し、二酸化炭素の排出削減へ向け、電気自動車（EV）や燃料電池車（FCEV）などゼロ・エミッション車の開発を進めてきた。さらにこの流れを推し進めるため、グローバルに研究開発活動が今も進行中である。

NTCNA（日産テクニカルセンター・ノースアメリカ）におけるゼロ・エミッションリサーチは2009年にスタートし、特に燃料電池と電池技術についての材料研究を行っている。米国で培われた新しい材料技術を自動車用途へと進化させていくことが目的である。本報では、NTCNAのゼロ・エミッションリサーチの活動について紹介していく。

1. Introduction

It will soon be fifty years since it was first said that climate change is happening on a global scale. In the intervening period, technical efforts to reduce emissions of carbon dioxide have continuously been pursued, and definitive accomplishments have been made.

To address environmental issues, Nissan formulated a medium-term environmental action plan called the Nissan Green Program. With the aim of reducing emissions of carbon dioxide under this plan, we are continuing to develop zero-emission vehicles such as electric vehicles (EVs) and fuel-cell vehicles (FCEVs). Moreover, to keep this momentum moving forward, we are conducting global R&D activities.

Zero-emission research started at the Nissan Technical Center North America (NTCNA) in 2009 and has focused on materials research concerning fuel-cell and battery technologies in particular. The aim of this research is to evolve new material technologies cultivated in the USA towards automotive applications. This article describes the zero-emission research activities under way at NTCNA.

*Nissan Technical Center North America

2. 米国電池材料研究の強さと難しさ

米国で行われている研究には二つの強みが存在する。

まず一つめの強みは、研究のすそ野の広さである。例えば高容量電池をつくるために、高容量活物質シリコンを使いこなすという典型的な研究から、放電容量を持った集電箔というような大変ユニークな材料研究まで存在する。集電箔に放電容量を持たせるという発想自体が大変ユニークであり、新しい電池をつくるうえで、新しい可能性を開いてくれるヒントとなっている。

二つめの強みは、そのようなユニークな材料についても、十分な量のサンプルを利用した評価が実施できる点である。研究の初期段階でも DOE（米国エネルギー省）などからしっかりと投資がなされているため、研究を進めていくための証拠づくりがスムーズに進む。先の集電箔については既にロール to ロールの装置が導入されており、研究としては十分な量のサンプルが利用できた。

一方で、実際の応用を考えたとき、これらの強みが二つの難しさを生む。一つは既存システムへの適用の難しさである。当然であるが、アイデアが奇抜であればあるほど、既存のシステムへの適用が難しくなる。

もう一つは研究初期段階において技術の改善が進みにくいことである。アイデアで勝負しているような、特にベンチャー企業のような立場にとって、ある程度サンプルを供給できるようになれば、次の段階はアイデアの売却である。つまり、そういう段階でそのアイデアをさらに磨くことは通常行われない。

従って彼らが持っている技術は本質的にどのようなものなのか、性能の良し悪しのみならず、なぜそうなるのか、彼らの主張する性能がどういう場合に出て、どういう場合に出ないのか、それらをすべて、一回のサンプル評価の間に理解し、その後の改善方策を立案しなければならない。

3. NTCNAのゼロ・エミッションリサーチでの電池研究

上述のように本質的な技術理解が求められるため、基礎的な課題把握とそれに基づく現象理解が私たちにとって大変重要となる。例えば、表1に示すようなりチウムイオン



表-1 米国発の高容量負極材料
Table 1 US-originated high-capacity anode materials

	Evaluation results	
	Rate capability	Durability
Crystal Si	×	×
Amonrphous Si	×	×
Nano Si	×	×
Sample A	○	○
Sample B	×	×
Sample C	×	×
Sample D	○	○

2. Strengths and difficulties concerning research on battery materials in the USA

Research conducted in the USA has two key strengths. The first is that the range of research fields is extensive. For example, with the aim of manufacturing high-capacity batteries, research ranges from classic research, such as for applying high-capacity silicon active materials, to very unique research on current-collector foils with discharge capacity. The idea of giving discharge capacity to current-collector foils itself is very unique, and such ideas provide hints about opening up new possibilities for new batteries.

The second strength is that adequate amounts of unique material samples are available for testing. Since steady investments have been made by organizations such as the United States Department of Energy (DOE), evidence for judging the feasibility of applying new materials has been continually collected. In the case of current-collector foils, a roll-to-roll manufacturing process has already been implemented, making an adequate amount of samples available for research.

On the other hand, these two strengths have also generated two difficulties when considering practical applications. The first is the difficulty of applying a new idea to existing systems. The more novel the idea is, the more difficult it is applying to existing systems. The second is the difficulty of improving a technology in the later stage of research. From the standpoint of engaging in a business with a unique idea in the manner of venture companies in particular, if a certain amount of samples can be provided, the next target is to sell the idea to other companies. Generally, an idea is not further refined in that stage. For that reason, we need to understand the technologies in many aspects during a one-off sample evaluation period—including the essence of the technologies offered, the mechanisms of the technologies that influence product performance, and the instances when the purported performance does or does not materialize—and improving measures must then be proposed.

3. Research on batteries at NTCNA from the standpoint of zero-emissions

To gain the innate technical understanding described above, it is essential for us to understand fundamental problems as well as the phenomena underlying those problems. As for the various anode materials used for increasing the capacity of lithium-ion batteries (such as the examples listed in Table 1), it is desirable to not only evaluate materials individually but also have a universal and essential understanding of background phenomena. This is because without this essential understanding of the phenomena involved, when present technologies are combined, challenges that were previously concealed invariably emerge afterwards.

The samples listed in Table 1 are high-capacity anode materials that were sourced in the USA.

電池の高容量化に用いるさまざまな負極材料について、材料を個々に評価をするのではなく、背後にある統一かつ本質的な現象理解をしておくことが求められる。なぜならこの本質的な現象理解なしに、既存技術と組み合わせると、後で必ず隠れていた課題が浮上するからである。

表1はいずれも米国起源の高容量負極材料である。これらの含むシリコンは4200mAh/g、スズは1000mAh/gの容量を持ち、従来よく用いられているグラファイトの370mAh/gに比べて高容量化を期待できる材料である。反面充放電に伴う体積の膨張収縮が著しい。そのためこれらの材料は、アモルファス化や合金化あるいはナノ化により体積変化を抑えたり、グラフェンや中空炭素で体積膨張を吸収したりする狙いがある。

結果的に言うと、試料A及びDが良い性能と耐久性を示した。ここでレート特性が良いものは、耐久性もよい傾向にあることが分かる。なぜそのような相関が出るのか。これが統一かつ本質的な現象理解の一つのヒントになる。次にそれぞれの特性がどのような現象と関係するかを考えてみる。

レート特性はその電池がどの程度素早く放電できるかを示す指標であり、リチウムイオンと活物質の「反応速度」や、リチウムイオンの「拡散速度」、「電子伝導の抵抗」などが関係する。一方、耐久性は電池の初期容量に対してどの程度の容量を維持できるかを示す指標であり、電解液分解など好ましくない「副反応」、「活物質の可逆性」、「電極の構造安定性」などが関係する。これら両者に影響しうる要素が何かを抽出したところ、電極中の導電経路、すなわちリチウムイオンの拡散経路、電子伝導経路が影響しているのではないかという仮説に至った。

導電性がレート特性に有効であることは容易に想像できるが、なぜ耐久性にも影響するのであろうか。耐久試験中にリチウムイオンの拡散経路や電子伝導経路のどこに何が起きているのであろうか。この理由を明らかにする仮説を立案し、実験による検証を行った。

3.1 シリコン添加で導電経路に何が起きるか

まずシリコンを加えたセルに何が起きるかの確認を行った。図1にそのセル性能を示す。矢印で示した充電時のプラトー（平坦な）部分は本来同じ電圧で起こるはずであるが、ここでは電圧は0.14Vから0.17Vまで変化しており、著しく分極（内部抵抗による電圧のずれ）が増加していることが分かる。この原因として先のリチウムイオンの拡散経路や電子伝導経路に注目し、二つの劣化原因仮説を置いた。これらを図2に示す。

一つめは電極コート層と集電箔の境目で起こる「剥離」である。シリコンの膨張に伴い、電極層は膨張しようとするが、集電箔と電極層の機械的強度の違いから集電箔近傍だけは強いせん断力が集中してかかる。これがバインダ

Silicon and tin are anode materials expected to increase capacity, having specific energy capacities of 4200 mAh/g and 1000 mAh/g, respectively, in comparison to that of commonly used graphite (370 mAh/g). In the case of silicon and tin, however, the volume expands and contracts significantly accompanying charging and discharging. Accordingly, research on these materials is aimed at suppressing the volume change by utilizing amorphization and nanonization processes and to absorb the volume expansion by using other materials such as graphene or a hollow carbon shell.

As one example of the results of such research, it was shown that samples A and D achieve high performance and good durability. This result indicates that a high discharge rate characteristic tends to result in good durability. As for why such a relationship exists, this trend provides one hint towards a universal and essential understanding of the underlying phenomena. We then considered how each of these characteristic features is related to the phenomena involved.

The discharge rate is an index showing how quickly a battery can discharge, which are related to the reaction rates between lithium ions and active materials, the diffusion rate and the resistance to electron conduction. On the other hand, durability is an index showing how much capacity can be maintained in relation to the initial capacity of a battery and how it is affected by undesirable factors pertaining to side reactions of electrolyte, irreversibility of active materials, and structural instability of the electrodes. Upon identifying some factors that may influence both indices, we reached a hypothesis suggesting that the conductive path in an electrode (namely, the diffusion path of lithium ions and the electron-conduction path) influences both indices.

Although it is easy to imagine that conductive properties influence the discharge rate, the reason why they also influence durability is not clear. What happens and where it happens to the diffusion path of lithium ions and the electron-conduction path during durability testing.

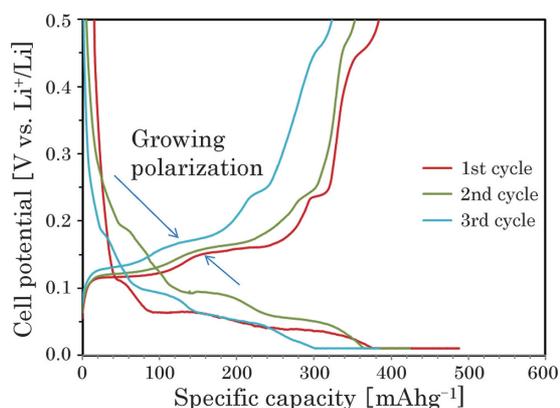


図-1 4%シリコン系負極活物質追加の影響
Fig. 1 Influence of 4% silicon addition to anode

の強度を超えるると電極層が箔から浮いた状態となり、やはり分極抵抗としてあらわれると考えた。

二つめはシリコンの膨張に伴い、電極層中の細孔体積が減少することによるリチウムイオンの拡散経路の「閉塞」である。リチウムイオンが存在しないまま電極反応が進行することで「副反応」による分解物が発生し、これが抵抗としてあらわれるのではないかと考えた。

上記「剥離」の影響を確認するため、集電箔と電極層の間に一層グラファイト層の挿入を試みた。図3にその構造を示す。集電箔近傍に膨張収縮の少ない層を挿入することで、シリコンの膨張収縮によるせん断力を緩和し「剥離」を抑制しようと考えた。その結果を図4に示す。先ほどと同じ3サイクルでは平坦な電圧レベルはほとんど変化

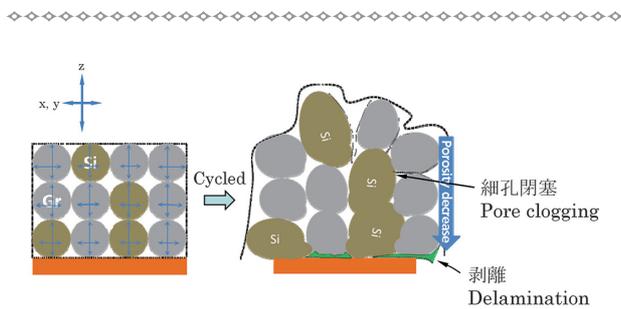


図-2 シリコン系負極活物質追加による電極劣化原因仮説
Fig. 2 Hypothesis for electrode degradation caused by adding silicon to anode active material

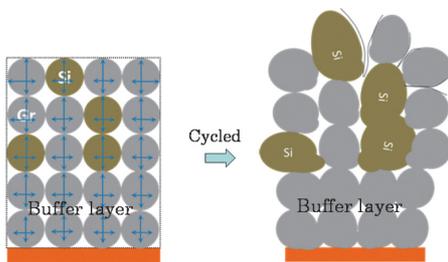


図-3 集電箔近傍での剥離対策
Fig. 3 Suppressing delamination near current collector

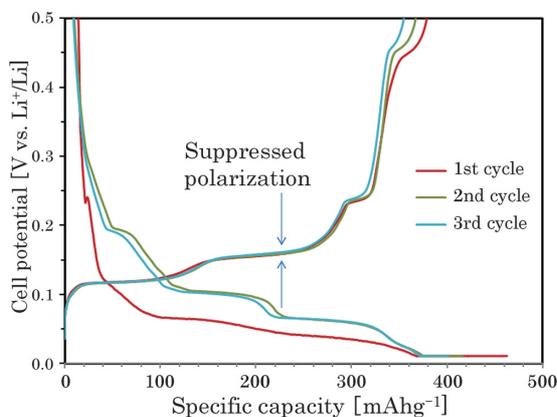


図-4 剥離抑制による分極抑制効果
Fig. 4 Effect of reducing delamination on suppressing polarization

Accordingly, we formulated and experimentally verified a hypothesis to reveal that reason.

3.1 What happens on the conduction path due to addition of silicon?

It was first confirmed what happened in a battery cell when silicon was added. Cell performance is shown in Fig. 1. Although the plateau during charging (indicated by arrows) ought to occur at essentially the same voltage, according to this graph, the voltage varies from 0.14 to 0.17 V. This result indicates that polarization (i.e., deviation of voltage due to internal resistance) increases significantly. As the reason for this polarization increase, we focused on the lithium-ion diffusion path and electron-conduction path, and came up with two hypotheses for the cause of electrode degradation. The schematized hypotheses are shown in Fig. 2.

The first hypothesis concerns delamination of the electrode coating layer and current-collector foil that occurs at their boundary. Although the electrode layer tries to expand as the silicon expands, the mechanical strengths of the current-collector foil and electrode layer differ, so a strong shear force concentrates near the collector foil. When that shear force exceeds the strength of the binder, the electrode layer “floats” away from the collector foil. As expected, this state is manifested as polarization resistance.

The second hypothesis is that pore clogging occurs, i.e., blockage of the diffusion path of lithium ions due to a decreasing volume of pores in the electrode layer. We suspect that as a result of electrode reactions proceeding in the absence of lithium ions, decomposition products are generated by a side reaction, and these products are manifested as the cause of resistance.

To ascertain the influence of the above-mentioned delamination, we tried inserting a single graphite layer between the collector foil and the electrode layer. The resulting structure is shown schematically in Fig. 3. By inserting a layer with little expansion and contraction close to the current collector foil, we reasoned that the shear force due to expansion and contraction of silicon would be mitigated and thereby suppress the delamination. The results of this structural addition are shown in Fig. 4. After three charging cycles, the level of the above-mentioned voltage plateau little changed, so we concluded that the delamination was well suppressed. This implies that such delamination is one cause of the decline in durability.

Moreover, to ascertain the influence of the blockage, a sample thick-film electrode layer (with about double thickness)—which was assumed to have more influence—was similarly evaluated in the state in which the single graphite layer was inserted between the collector foil and the electrode layer. The results of the evaluation are shown in Fig. 5. In the state in which the lower delamination was suppressed, significant polarization (peak-voltage deviation) was not observed even when the electrode film thickness was increased.

せず、うまく「剥離」を抑制できたと考えられる。このことから、「剥離」は耐久性が落ちる原因の一つと考えた。

さらに「閉塞」の影響を確認するため、集電箔と電極層の間に一層グラファイト層を入れた状態で、より影響の出やすいと考えられる厚膜の電極層（厚みおよそ2倍）のサンプルで同様の評価を実施した。その結果を図5に示す。下段の「剥離」を抑制した状態では厚膜化しても、著しい分極（ピーク電圧のずれ）は観測されなかった。

以上のことから、シリコン系負極材料を適用する際の原因としては、電極層と集電箔の間で発生する「剥離」が最も大きな影響を与えていると考えた。

では電極層自体の導電性には問題がないのであろうか。その点を明らかにするため図6(a)のように、意図的に絶縁性の粒子を電極層に混合し、その影響を検討した。絶縁性の粒子は硫酸バリウムを用い、構造に影響がないように他の活物質粒径と同じ粒径のものを用いた。また充放電に伴う剥離の影響を除外するため、電極活物質としてはグラファイトのみを用いた。その結果、グラファイトの重量当たりの放電容量の低下が観測された（表2）。つまり、電極層に存在しているすべてのグラファイト活物質を使え

In light of these results, we concluded that when silicon is utilized as an anode material, the delamination occurring between the electrode layer and current collector foil is the biggest factor causing polarization. Given that conclusion, we wondered if there was a problem in the conductivity of the electrode layer itself. To clarify that possibility, we deliberately mixed insulator particles into the electrode layer as shown in Fig. 6(a) and investigated the resultant effect. Particles of barium sulfate were used as insulation, and a material with the same grain size as that of other active material particles and without affecting the structure was used. To exclude the influence

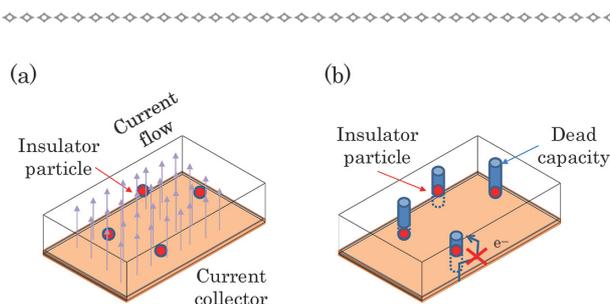


図-6 電極層中の絶縁粒子の影響
Fig. 6 Influence of insulator particles in electrode layer

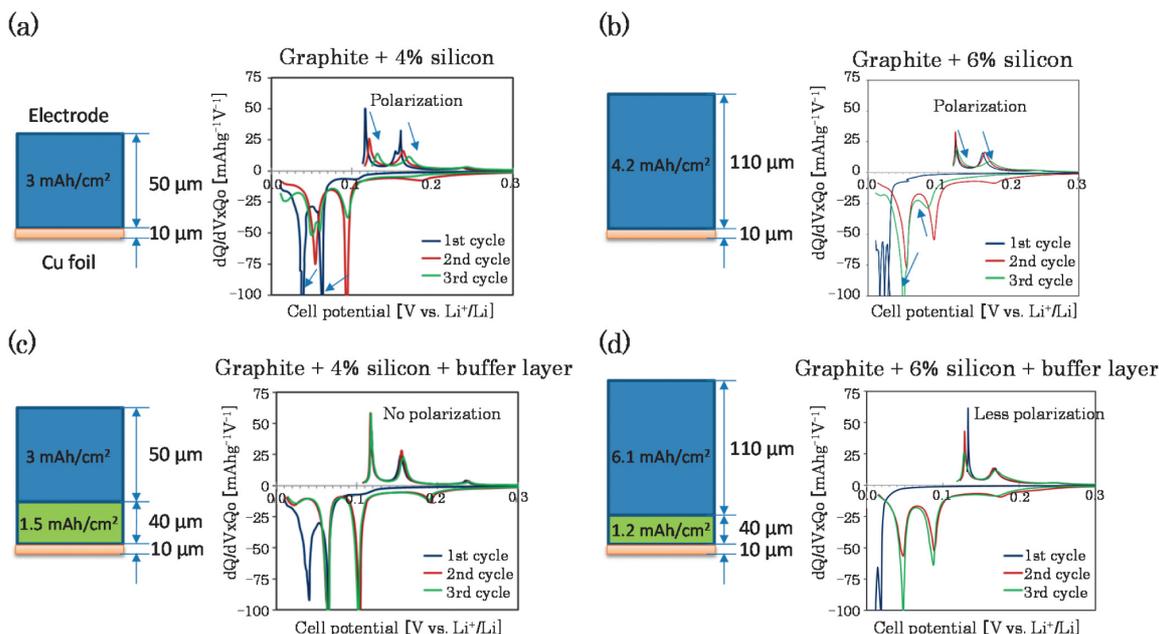


図-5 細孔内電解液減少の影響検証－厚膜電極化
Fig. 5 Influence of decreasing electrolyte volume by increasing silicon volume in thick electrode

表-2 絶縁粒子が電池性能に及ぼす影響
Table 2 Effect of insulator particles on cell performance

	Cycle number	Charge capacity (mAh/g)	Discharge capacity (mAh/g)	Discharge CC capacity (mAh/g)	Discharge CV capacity (mAh/g)	Columbic efficiency (%)
With "dead" particle	1	352.2	395.9	323.1	72.8	89.0
	2	353.4	358.3	328.1	30.2	98.6
	3	353.2	356.9	332.2	24.6	99.0
Without "dead" particle	1	362.9	420.4	342.7	77.7	86.3
	2	366.0	369.4	344.2	25.2	99.1
	3	365.7	366.9	347.7	19.2	99.7

高くするにつれ、放電可能な容量が低下していく一般的な傾向が見られた。しかし電子伝導経路が大幅に改善しているはずなので、この傾向は電解液分解などの「副反応」による劣化であって性能ではないと推定し、「副反応」が起きやすい初期の長時間充放電を回避し、高レート側からレート特性評価を行ったところ、図8(b)のような極めて平坦なレート特性を得た。

現時点でこのメカニズムは解明できていないが、初期の容量の90%は超えないことから、高レートでの放電によって微細な電子伝導経路を溶融などにより失いながら、より太い安定な電子伝導経路を形成しているのではないか、あるいは細孔内に導入するグラファイト活物質との接触抵抗が初期に高い状態であり、この段階で長時間に高い電位での放電を行うと「副反応」が起きてしまうものの、先に高レート放電をすることで接触抵抗が低減し「副反応」を回避できるようになるのではないかと考えている。

いずれにしても、高容量電池のより速い充放電を可能にする技術候補の一つになりうると考えている。

4. お わ り に

ごく最近の天気予報でよく耳にするのが「過去に例を見ない」とか「これまでにない」という言葉である。雨量600mmであったり風速70m/sであったり、確かに私たちが子供に頃に聞いていた400mmの大雨や40m/sの突風という過去の言葉から考えると、最近の数値の大きさは異常の範囲になっていると思える。しかしこれらの異常を引き起こしているものが、海水温の変化など地球規模での大きな変化であることを考えると、今後はむしろ600mmの雨量や風速70m/sが通常になっていくことは避けられないと感じる。そのとき私たちはどうするのか。やはり「過去に例を見ない」方法や「これまでにない」技術で乗り越えていくことが、私たちの進むべき方向だと信じてやまない。そのために世界中の智を結集し、世界を変えていく力に進化させていくことが私たち企業研究の使命と信じ、研究を続けていきたいと思う。

discharge rate performance. However, since 90% of the initial capacity is not exceeded, while the microscopic electron-conduction path is lost due to melting or other reasons during discharge at a high rate, either a wider and more stable electron-conduction path is being formed or the contact resistance with the graphite active material inserted into the pores is initially high. While the side reaction occurs during discharge at a high potential for a prolonged time at this stage, we believe that lowering the contact resistance by initially discharging at a high rate will avoid the side reaction. In any case, we believe that this technique represents one candidate technology for enabling fast charging and discharging of a high-capacity battery.

4. Concluding remarks

In very recent weather forecasts, we have often heard expressions like “unparalleled in history” and “never before.” Rainfall of 600 mm and wind speeds of 70 m/s are a couple of examples. When we think about phrases like “heavy rain totaling 400 mm” and “gusts of wind at speeds up to 40 m/s,” we think the magnitude of recent numbers is in an abnormal range. However, since these abnormalities are being caused by global great changes (such as variation in ocean temperatures), we sense that rainfalls of 600 mm and wind speeds of 70 m/s may inevitably become the normal in the future. At that time, what should we do? We believe we should take “unprecedented” methods and “unparalleled” technologies to overcome these problems. Toward that, we intend to continue our research by gathering the wisdom of the world and converting it into the power to change the world with belief that those are our mission for corporate researchers.

■著者 / Author(s) ■



押原建三
Kenzo Oshihara

ロシアでの研究活動紹介：NRC-Russia

Introduction to Research Activities in Russia: NRC-Russia

奥山 陽三*
Yozo Okuyama

リーマン リュードミラ*
Liudmila Liman

抄 録 NRC-Russiaは2008年にモスクワに開設された。当初は、旧ソ連時代からの宇宙技術、原子力技術を中心としたロシアにおける最先端研究全般の調査を任務としてスタートした。現在は、先端材料分野、特にナノマテリアル、ナノプロセスの分野を中心に、新しい研究テーマのためのシーズ技術の調査を行っている。また、調査の範囲を欧州に広げ、さらにはロシアの若い頭脳を活用したアイデア創出のための活動も行っている。本稿では、NRC-Russiaの役割、活動例について紹介する。

Summary Nissan Research Center-Russia (NRC-R) opened in Moscow in 2008. Initially, NRC-R was in charge of surveying cutting-edge research in Russia in general, especially space technologies and nuclear technologies developed since the Soviet Union era. Now, as for new research themes, we are searching for “seeds technology” concerning advanced materials, especially nano-materials and nano-processing. We are now expanding these surveys to Europe while continuing “idea creation” activities applying the brains of young researchers in Russia. This article introduces the role of NRC-R and presents some examples of NRC-R’s activities.

Key words : Research & Development, space technology, nuclear technology, seeds technology, advanced materials, nano-materials, nano-processing, idea creation activity

1. はじめに

日産自動車は世界12か国に数多くの研究開発拠点を有しており(図1)、その中の研究拠点の一つがNissan Research Center-Russia(以下、NRC-R)である(図2)。

NRC-Rは2008年にモスクワに開設された。当初は、旧ソ連時代からの宇宙技術、原子力技術を中心としたロシアにおける最先端研究全般の調査を任務としてスタートした。現在は、先端材料分野、特にナノマテリアル、ナノプロセスの分野を中心に、新しい研究テーマのためのシーズ



図-1 主な日産の研究開発拠点
Fig. 1 Example of Nissan global R&D sites

1. Introduction

Nissan has established many research and development (R&D) sites in twelve countries around the world (Fig. 1), and one research site among them is the Nissan Research Center-Russia (NRC-R) (Fig. 2).

NRC-R opened in Moscow in 2008. Initially, NRC-R was in charge of surveying cutting-edge research in Russia in general, especially space technologies and nuclear technologies developed since the Soviet Union era. Now, as for new research themes, we are searching for “seeds technology” concerning advanced materials, especially nano-materials and nano-processing. We are now expanding these surveys to Europe while continuing “idea



図-2 日産の研究拠点
Fig. 2 Nissan global research sites

*Nissan Research Center - Russia

技術の調査を行っている。また、調査の範囲を欧州にも広げ、さらにはロシアの若い頭脳を活用したアイデア創出のための活動も行っている。本稿では、NRC-Rの役割、活動例について紹介する。

2. NRC-Rの役割

日産は社会研究の結果から、「エネルギー」、「地球温暖化」、「交通渋滞」、「事故」が将来の自動車社会の大きな問題であると捉え、その解決策として、電気自動車を代表とする電動化技術と、自動運転を代表とする知能化技術を研究開発の柱としている（図3）。

また、日産は2016年までの中期環境行動計画「ニッサン・グリーンプログラム2016」の中で、「ゼロ・エミッション車の普及」を重点活動領域のひとつとしており、2010年に量産型電気自動車「日産リーフ」（図4）を発売した¹⁾。

NRC-Rは先端材料分野、特にナノマテリアル、ナノプロセスの観点から将来の革新的な電気自動車に貢献しようとしている。例えば、リチウムイオン電池やその先の新型電池、燃料電池、新エネルギー、超軽量車体、機能材料、希少材料代替、新製造プロセスなどである。

図5に日産の研究プロセスを示す。アイデア創出フェーズからスタートし、原理確認フェーズ、実行可能性判断フェーズを経て、目標を達成した研究が次の先行開発に移行される。

NRC-Rの役割は、将来の柱となる様な質の高いアイデア創出フェーズの研究テーマを立ち上げることにある。そのための活動の柱として、ロシアと欧州におけるシーズ技術の調査、研究をフルーガルに進めるためのロシアと欧州のファンド調査、さらには見つけたシーズ技術をいかに使うか、ニーズに対していかに技術的に解決するかアイデア創出活動を行っている。

以下、上記3つの活動の柱について説明する。

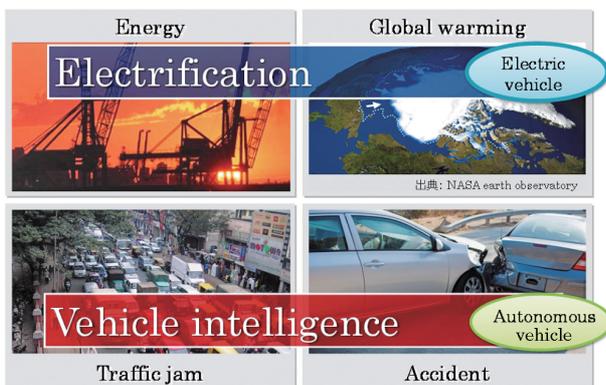


図-3 社会研究から導き出された日産の研究開発の柱
Fig. 3 Nissan research and development pillars introduced from social studies

creation” activities applying the brains of young researchers in Russia. This article introduces the role of NRC-R and presents some examples of NRC-R’s activities.

2. Role of NRC-R

From the results of social studies, Nissan has identified four big problems facing a future car-oriented society—namely, energy consumption, global warming, traffic congestion, and accidents. Accordingly, aiming to solve these four problems, we have set two “pillars” of research and development—namely, “electrification” technologies (such as electric vehicle) and “vehicle intelligence” technologies (such as autonomous vehicle) (Fig. 3). Moreover, as part of the “Nissan Green Program 2016” (a medium-term environmental action plan lasting up to 2016), Nissan set “zero-emission vehicle penetration” as another main R&D pillar. In 2010, the Nissan LEAF, mass-produced electric vehicle, was launched (Fig. 4).¹⁾

NRC-R aims to contribute to creating electric vehicles of the future that are groundbreaking from the standpoints of advanced materials, nano-materials, and nano-processing. Examples of our contributions are lithium-ion batteries and new types of batteries surpassing them, fuel cells, new energy technologies, ultralight car bodies, functional materials, rare-material substitutions, and new manufacturing processes.

Nissan’s research, process is shown schematically in Fig. 5. The research process consists of three phases: an “idea creation phase,” a “principle confirmation phase,” and a “feasibility judgment phase.” After the research goal of these three phases is achieved, the overall process moves onto the “advanced engineering.”

The role of NRC-R is to launch high quality research themes of idea creation phase that will be pillars of the future. As the three pillars supporting that role, (i) surveys



図-4 電気自動車「日産リーフ」
Fig. 4 Electric vehicle “Nissan LEAF”

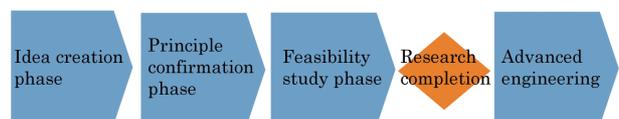


図-5 日産自動車の研究プロセス
Fig. 5 Research process of Nissan

3. NRC-Rの活動内容紹介

3.1 シーズ技術調査

論文検索、ロシアと欧州の主要学会参加、有望な研究者訪問を行い、また、後述のファンド調査やアイデア創出活動も加えたサイクルを回しながら、質の高い新たな研究テーマ創出に向けて活動を行っている。(図6)。

また、どの国でどの分野が強いのかということを示す欧州先端材料研究マップ(図7)を作成し、戦略策定の指針としている。これを用いて、欧州研究開発拠点と連携し、効率的かつ効果的なシーズ技術調査を行っている。

ロシア国内においては特に、コネクションが重要である。現在のロシアは旧ソ連時代に比べてはるかに開かれた環境になったとは言え、情報公開のレベルが欧州に比べてまだ低いため、NRC-Rがこれまで築き上げてきたネットワーク、研究者からの紹介など、あらゆるネットワークを活用している。

3.2 ファンド調査

研究をフルーガルに実施するため、ロシアと欧州のファンドを最大限活用している。欧州研究開発拠点と協力しながら、よりよい条件のファンドを見つけることに努めている。

ファンド調査は金銭的なメリットのみならず、その研究領域の勢力図が見えてくるため、その意味でも重要な活動と言える。

3.3 アイデアクリエーション活動

将来の柱となる様な質の高い研究テーマを創出するためには、シーズ技術をいかに使うか、ニーズに対していかに技術的に解決するかの新しいアイデアを創出することが非常に重要である。日産ではこの活動のことを、アイデアクリエーション活動と呼んでいる。

アイデアクリエーション活動は、日産では日常的に行わ

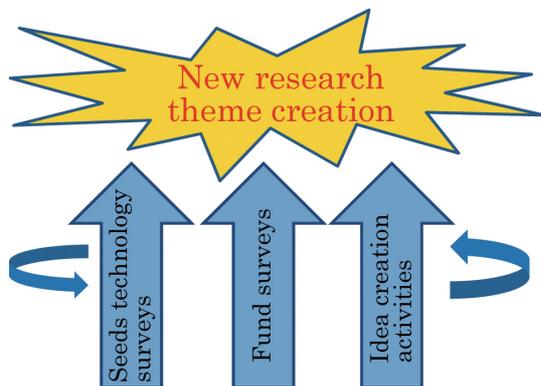


図-6 NRC-Rの活動の3つの柱
Fig. 6 Three pillars of NRC-R activities

of seeds technology in Russia and Europe, (ii) surveys of funds in Russia and Europe for promoting research frugally, and (iii) idea creation activities (namely, how to use discovered seeds technology and how to satisfy needs technically) are ongoing. These three pillars are described in detail in the following section.

3. Introduction to Detailed Activities of NRC-R

3.1 Surveys of seeds technology

While a cycle including searches for research papers, participation of major societies in Russia and Europe, and visiting up-and-coming researchers in addition to the fund surveys (described in the following) and idea creation activities are repeated, activities aimed at creation of new, high quality research themes are continuing (Fig. 6). Moreover, a "European advanced materials research map" (Fig. 7)—which shows which research fields are strong in which European country—is plotted and used as a guideline for formulating strategies. This map is used to plan effective and efficient surveys of seeds technology in cooperation with R&D centers in Europe.

Within Russia, connections are particularly important. Although present-day Russia is said to be a more open environment in comparison to the Soviet Union era, the level of public information disclosure is still lower than that of European countries. Given that situation, networks previously built by NRC-R and every other kind (such as ones introduced by researchers) are being utilized.

3.2 Surveys of funds

To put "frugal" research in practice, funds in Russia and Europe are utilized to the utmost. While cooperating with R&D centers in Europe, we are working tirelessly to find better circumstances concerning funds. It is said that fund surveys are significant activities because they have not only financial merits but also reveal power structure of these research areas.

3.3 Idea creation activities

To generate high quality research themes that will become future pillars in the manner described above, it is essential to create original ideas for using seeds

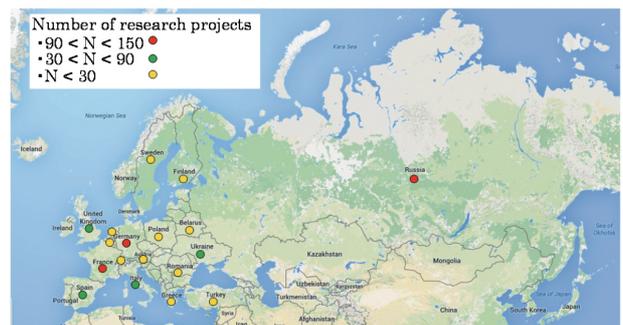


図-7 欧州先端材料研究マップの例
Fig. 7 Example of European advanced materials research map

れている。しかしながら、日本の、且つ自動車業界の研究者のみの活動ではどうしても限界があるため、異なる業界、且つ若い柔軟な頭脳を交えての活動が必要との判断から、ロシアの大学生、特に、PhDコースの学生を交えた活動がスタートした。

ロシアの大学は基礎教育がしっかりしているため、学生のレベルは非常に高い。NRC-Rでは、この様な若い優秀な頭脳を活用して、日産が求めるシーズ技術やニーズに関する斬新なアイデアを創出しようとする、アイデアクリエーションセッションを頻繁に行っている。

大まかなプロセスは以下の通りである。日産のスペシャリストとアイデアクリエーションセッションのテーマを決め、事前に参加者に課題を与えておく。当日は、ブレインストーミングの方法論の説明、技術内容・課題の説明が行われる。参加者は、事前の検討内容に、当日自分で考えたアイデア、さらには他者のアイデアを聞いた上で思いついたアイデアも加えた後、全員でグルーピングを実施する。その後、面白そうなアイデアのグループについて、さらにブレインストーミングを実施する。

一度のアイデアクリエーションセッションで決定的なアイデアが出ることは稀（まれ）であるが、この活動を通じて出てきたアイデアを基に、さらなるシーズ技術調査や研究者訪問を実施し、必要であれば再度、アイデアクリエーションセッションを実施するというサイクルを回すことにより、質の高いアイデア創出に結びついている（図8）。

アイデアクリエーションセッションは優秀な学生に斬新なアイデアを出してもらうことが主目的であるが、一方で、優秀な学生を見つけ出すという狙いもある。優秀な学生に対しては、NRC-Rや日産へのインターン生としての派遣や、ロシアおよび日本での採用も念頭に入れている。

technology or technically solving problems in accordance with needs. At Nissan, we call these activities “idea creation.” Idea creation activities are going on at Nissan at all times. However, activities of researchers only in the car industry in Japan are surely limited; accordingly, activities that mix flexible intellectual powers of young people and mix people from different industries were judged necessary. To meet that need, activities mixing students at Russian universities (particularly those taking Ph.D. courses) were started.

Russian universities provide a solid basic education, so the level of their students is extremely high. At NRC-R, we hold frequent idea creation sessions—in which we try to create original ideas concerning seeds technology and needs identified by Nissan—that utilize the young, highly capable intellectual powers of such Russian students.

The rough process involved in these sessions is outlines as follows. The theme of the idea creation session is set by the participants with specialists from Nissan, and the subject matter concerning the theme is given to participants before the session. On the appointed day of the session, the methodology of brainstorming as well as challenges and technical matters are explained. The participants add their own ideas on the day and ideas they came up with after listening to others to the pre-study session contents. Then, all participants group the ideas. After that, groups of interesting ideas are subjected to further brainstorming.

It is rare that definitive ideas come out of a single idea creation session. Even so, by following a cycle in which further seeds technology surveys and researcher visits are implemented on the basis of the ideas generated through this process and, if required, the idea creation session is repeated, it is possible to create high quality ideas (Fig. 8).

Although the main purpose of idea creation sessions is to get original ideas from outstanding students, another purpose is to identify outstanding students with potential

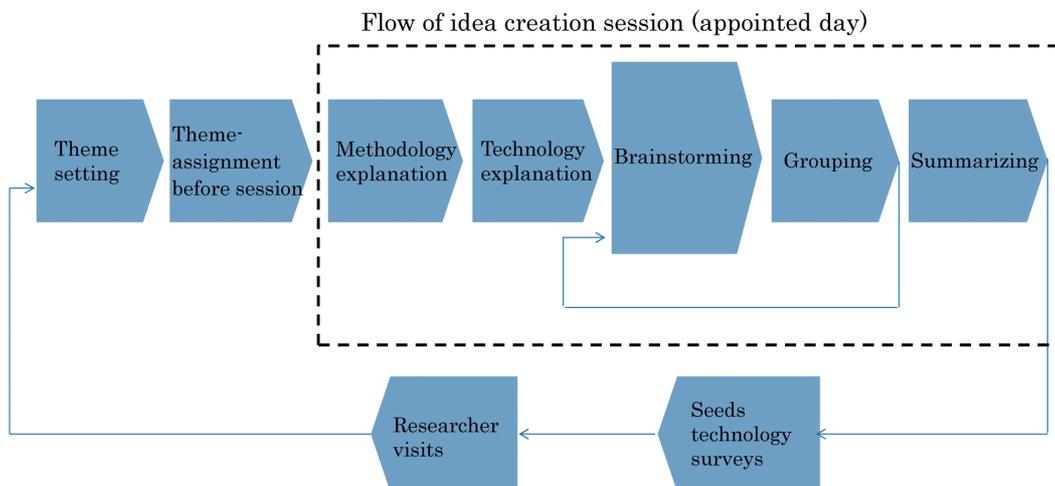


図-8 アイデアクリエーションセッションの流れ
Fig. 8 Flow of an idea creation session

4. ロシアの研究機関との連携内容紹介

4.1 モスクワ大学

モスクワ大学は名実ともにロシアトップの大学であり、学生、研究者のレベルは非常に高い。NRC-Rはモスクワ大学材料科学部と包括契約を結び、幅広い先端材料分野での共同研究テーマの探索、学生の日産へのインターン生としての派遣、アイデアクリエーションセッション（図9）などを行っている。特に、アイデアクリエーションセッションに関しては、モスクワ大学のPhDコースの学生を集め、頻繁に実施している。

4.2 トムスク工科大学

トムスク工科大学（TPU）はシベリア地区にある、ロシア国内でトップクラスの技術系大学である。日産はTPUと共同研究契約を結んでいる。この契約は両者で共同研究を行う以外にも、学生の日産へのインターン生としての派遣、学生とのアイデアクリエーションセッションの開催（図10）など、広範囲に及んでおり、お互いにとってメリットのある活動を実施している。

TPUはナノ粒子合成技術、及び粒子の固形化技術に強みを持っており、この領域での共同研究を行っている。性能や耐久性に関わる特性向上を目的に、材料のナノ粒子化を検討している。

4.3 RTC

サンクトペテルブルクにあるRTC（Russian State Scientific Centre for Robotics and Technical Cybernetics）は宇宙技術に関する、ロシア国内で有数の研究機関である。日産はRTCと、自動運転関連技術について共同研究を行っている。

as future Nissan employees. In regard to outstanding students, it is kept in mind that interns are sent to NRC-R and Nissan, and some of them are employed in Russia and Japan.

4. Introduction to the Details of Cooperation with Research Institutes in Russia

4.1 Moscow State University

In reality and in name, Moscow State University is the top university in Russia, and the level of students and researchers there is extremely high. NRC-R has signed a comprehensive agreement with the Materials Science Department of Moscow State University, in collaboration with which we are searching for collaborative research themes in a broad range of advanced materials research fields, dispatching interns to Nissan, and holding idea creation sessions (Fig. 9). In particular, idea creation sessions are frequently held with students taking Ph.D. courses at Moscow State University.

4.2 Tomsk Polytechnic University

Located in Siberia, Tomsk Polytechnic University (TPU) is a top-class technical university in Russia. Nissan has signed a collaborative research agreement with TPU. As well as collaborative research between both parties, this agreement covers a broad sphere of activities, such as dispatching interns to Nissan and holding idea creation sessions with students (Fig. 10), and promotes activities that are beneficial to both parties.

TPU has particular strengths in the technology fields of nano-particle synthesis and particle solidification, and the collaborative research between NRC-R and TPU is targeting those fields. Aiming to improve properties related to performance and durability, this collaborative research is investigating creating nano-particles of various materials.

4.3 RTC

The Russian State Scientific Centre for Robotics and



図-9 モスクワ大学とのアイデアクリエーションセッション風景

Fig. 9 A scene from an idea creation session with students of Moscow State University



図-10 トムスク工科大学とのアイデアクリエーションセッション風景

Fig. 10 A scene from an idea creation session with TPU

4.4 ロシア科学アカデミー

ロシア科学アカデミー（Russian Academy of Sciences：RAS）はロシアの最高学術機関である。ロシア連邦全土の学術研究機関を包括するものであり、数多くの研究機関を有している。日産はRASにある複数の研究機関と、これまでリチウムイオン電池、燃料電池、空気電池、磁石、耐摩耗材料などの分野で共同研究を行ってきた。

5. おわりに

ロシアは宇宙技術、原子力技術を中心とした基盤技術に強みを持つ。また、大学における基礎教育がしっかりしているため、学生のレベルが非常に高い。一方で、その技術をどの様に使うかというニーズ創出、製品開発に弱みがある。後者の理由から一見、ロシアには有望な技術はないと簡単に判断してしまいがちであるが、ここにこそ、ロシアの研究機関と日産が共同研究を行うことの意義があると考えられる。なぜなら、お互いを補完し合い、大きな成果につなげることができるポテンシャルがあるからである。

ロシア国内のシーズ技術調査はもちろんのこと、ロシアの優秀な人材を用いた、欧州のシーズ技術調査やアイデアクリエーション活動は、大きな可能性を秘めていると感じている。将来の日産の革新的な電気自動車に搭載される技術の種を創出することに、これからも貢献していきたい。

参考文献

- 1) 日産自動車グローバルホームページ：環境への取り組み
<http://www.nissan-global.com/JP/ENVIRONMENT/APPROACH/GREENPROGRAM/>（参照日：2015年12月4日）

Technical Cybernetics (RTC) is a prominent Russian research institute with expertise in space technologies. Nissan is involved in collaborative research with RTC on autonomous driving-technologies.

4.4 Russian Academy of Sciences

The Russian Academy of Sciences (RAS) is the preeminent academic institution in Russia. RAS includes the academic organizations of the entire Russian Federation, and there are many research institutes under RAS. Nissan has been involved in collaborative research in many fields—such as lithium-ion batteries, fuel cells, air cells, abrasion-resistant materials—with a number of these research institutes.

5. Concluding Remarks

Russia has strengths in fundamental technologies, centered on space technologies and nuclear technologies. And the level of students in Russia is extremely high because Russian universities provide such a solid basic education. Russia, however, has weaknesses in terms of “needs creation” (namely, how to use these technologies) and product development. A glance at the reason for the latter weakness tends to simply conclude that there are no up-and-coming technologies in Russia. That is why collaborative research between Russian institutes and Nissan is significant, since it realizes the potential for complementing each party and linking great accomplishments.

While it goes without saying that great potential is hidden in surveys of seeds technology in Russia itself, we feel that great potential is also hidden in surveys of seeds technologies in Europe and idea creation activities that utilize the outstanding human resources of Russia. From now onwards, we aim to keep contributing to creating the seeds technology that can be installed in Nissan’s innovative electric vehicles of the future.

References

- 1) Nissan Motors Global Home Page: “Approaches for the Environment,” <http://www.nissan-global.com/JP/ENVIRONMENT/APPROACH/GREENPROGRAM/> (reference date: December 4, 2015).

■著者／Author(s)■



奥山 陽三
Yozo Okuyama



リーマン リュードミラ
Liudmila Liman

インドでの研究アクティビティ紹介 : NRC-India

Introduction to Research Activities in India : NRC-India

羽 賀 史 浩*
Fumihiko Haga

サブラマニ アルーア**
Ailoor. K. Subramani

抄 録 人口ボーナス、市場の拡大、豊富な理系人材、グローバル経営者の登場など、いまインドは世界経済にとってホットな話題である。このホットなインドで成功を取るために、先行してインドへ進出したグローバル企業のベンチマークから三つの成功要因の抽出を行った。2009年チェンナイに開設した、日産のインド研究拠点であるNRC-Indiaでは、これらインドでの成功要因を実践する活動として、①日本で教育を受けたLocal Leaderによるマネジメントの実施、②Vision 2020を設定しStrategic Roleを明確化、③Empowering local teamsを推進するためのインドの強みを生かした大学および外部研究機関との連携を行っている。本報では、NRC-Indiaの概要と研究活動の内容について報告する。

Summary With advantages such as a population bonus, market expansion, huge science-related human resources, and the emergence of global executives, India is presently a hot topic in regard to the global economy. To succeed in this “hot” India, three success factors were identified from the benchmarks set by global companies that have already moved into India. In 2009, NRC-India was established as Nissan’s research center in India. As activities based on these success factors, first, NRC-India has implemented management by local leaders who were trained in management at Nissan Japan, second, established Vision 2020 to make clear the strategic role of NRC-India, and, third, empowered local teams in the collaboration with universities and other research institutes in India. In this article, the research activities of NRC-India are overviewed.

Key words : *Research & Development, India, R&D Center, local leadership, strategic role, empowering, fuel cell, battery*

1. はじめに

世界第2位の12億人を超える人口を持ち、多様な言語(憲法で公認されているだけで21言語)、民族、宗教によって構成されている南アジアの大国、インド。いまそのインド経済が世界の関心を集めている。国内規制のボトルネックがあるものの、引き続き高い経済成長率が継続されると予測されており、その成長力の源泉は生産年齢人口の増加で、2045年ごろまで上昇し続ける、いわゆる「人口ボーナス」の恩恵を受けることが見込まれている。この結果、豊富な労働力人口により外資の設備投資と現地生産が促進され、それによる雇用拡大と所得増が更なる消費を生み出し、経済成長が加速されることが期待されている。

その注目のインドの地に、2009年日産は研究拠点(以下、NRC-India)を、南インドの経済、文化の中心であり、「南アジアのデトロイト」と異名を持つ都市チェンナイに開設した。ベンガル湾に面するこの港湾都市は、古くはマドラスと呼ばれ、英国東インド会社の本部が置かれ発展したが、現在は綿織物工業、自動車、鉄道車両などの組み立て機械工業が盛んである。

日産とルノーは、ここチェンナイに世界初のアライアン

1. Introduction

With the second-highest population in the world (currently surpassing 1.2-billion people), speaking a diversity of languages (21 of which are endorsed by the constitution), practicing diverse religions, and comprising various ethnicities, India is the largest country in South Asia, and its economy is drawing the attention of the whole world. While it is known that India’s domestic regulations create many bottlenecks, India’s ongoing rapid economic growth is forecast to continue. The font of that growth, namely, India’s increasing working-age population, is expected to continue increasing until the year 2045; in other words, India will benefit from a so-called “population bonus.” Consequently, it is anticipated that local production and business investment through foreign capital will grow in response to this abundant labor force, consumption will be boosted by expanding job opportunities and increasing incomes, and economic growth will be accelerated.

In 2009, Nissan established a research center (NRC-India) in an Indian region gaining attention, namely, the city of Chennai—which is known as the “South Asia Detroit”—located in the economic and cultural center of southern India. As a port city facing the Bay of Bengal, and

*研究企画部 / Research Planning Department **Renault Nissan Technology & Business Center India Private Limited

ス工場を2007年に設立し、2010年より操業を開始しており、ルノー車と日産車の両方を製造して、インド国内はもとより世界に輸出を行っている。インドにはこのアライアンス製造会社であるルノー・日産 オートモーティブ インディア社（以下、RNAIPL）に加えて、販売を行うインド日産社、ルノーインディア社、そしてアライアンスで技術開発およびビジネスサポートを行うルノー・日産 テクノロジー & ビジネスセンター インディア社（以下、RNTBCI）がある（図1）。

NRC-IndiaはこのRNTBCIの中に、研究組織として設置されている。本報では、インドの研究拠点NRC-Indiaの概要と研究活動の内容について報告する。

2. インドにおける研究開発拠点

近年インドに研究開発拠点を設置するグローバル企業が増えてきている。代表的な企業としてはIBM社、Robert Bosch社、General Electric（GE）社、Samsung社、Google社、Microsoft社などがあるが、これらの企業の多くがインドに研究開発拠点を設置する理由として、安い人件費と潜在的な市場を魅力として挙げている一方で、技術力を有する高い質のタレント獲得を目的としている企業もあり、単なるコスト競争力を武器にした時代から、優秀な技術人材を活用したテクノロジー集約型の時代に変化してきていることを示している（図2）。

インド進出で成功を取めているグローバル企業の変遷を分析してみると、初期はグローバル製品開発の単なる下請けとしての機能からスタートするものの、質の低下、質上げ、離職といった危機に直面し、その後企業変革を実行することで成功へと導かれていた。変革のパターンは大きく二つあり、一つはGlobal Strategic Centerへの変革で、もう一方はLocal Development Centerへの変革である。これら企業の成功要因を分析すると、①Local Leadership、②Strategic Role、③Empowering Local

known as Madras in the old days, Chennai was developed by the British East India Company, which established their headquarters there. These days, it is home to a prospering assembly-equipment industry, including cotton textiles, automobiles, and railway vehicles.

Nissan and Renault established the world's first "alliance factory" in Chennai in 2007, and started operations there in 2010. Renault and Nissan vehicles are both manufactured at this factory, and these vehicles were sold in the domestic market as well as exported to world markets. In addition to Renault Nissan Automotive India Private Limited (RNAIPL) which is an alliance manufacturing company, the alliance is composed of Nissan Motor India Private Limited (in charge of sales and distribution), Renault India Private Limited, and Renault Nissan Technology Business Centre Private Limited (RNTBCI, in charge of developing technologies and business support) (Fig. 1).

NRC-India is set up within RNTBCI as a research organization. In this article, R&D centers in India are introduced, and the research activities of NRC-India are overviewed.

2. R&D centers in India

In recent years, the number of global companies setting up R&D centers in India has been increasing. Some representative companies are IBM, Robert Bosch, General Electric (GE), Samsung, Google, and Microsoft. As for the reason that such companies have set up R&D centers in India, some businesses are enticed by low labor costs and potential markets; others aim to acquire high-quality talent with technical skills, and the times are changing from an era in which simple cost competitiveness is a weapon to a technology-intensive era in which outstanding technical talent is utilized (Fig. 2).

According to an analysis of trends concerning global corporations that have successfully moved into India, while most corporations started from facilities operating as mere subcontractors performing global product development, the road to success involved confronting crises (such as

RNTBCI is one of the two alliance joint ventures supporting the expansion plans of Renault and Nissan Brands in India



図-1 インドにおけるルノー・日産アライアンス
Fig. 1 Renault-Nissan Alliance in India

- Lowering cost and potential local market were initial drivers.
- Some companies established R&D centers to use high-quality local talent.



Source: Frost & Sullivan Analysis.

図-2 インドにおける研究開発の設立初期動機
Fig. 2 Initial motivation to establish an R&D center in India

Teams の三つの要素が抽出された。

①Local Leadershipを強化するため、例えばA社のケースでは、現地の将来リーダー候補に対してグローバルな研修機会を提供し、マネージメント方法を理解したグローバルリーダー人材を育成している。また本国からはマネージャではなく技術エキスパートを派遣することで、現地での技術の底上げを実施している。②Strategic Roleを明確にすることで成功しているB社などは、製品に関するソフトウェア開発をインドでオペレーションするという思い切った戦略をとることで、景気が良い時も悪い時も、良質の人材を活用した仕事の効率化とコスト競争力を武器に仕事がインドに集まる仕組みを確立している。③Empowering Local Teamsを成功させているC社のケースでは、現地の組織に対して権限を移譲し自立性を持たせることで、現地の強みを生かした運営、効率的な意思決定、現地の市場ニーズにマッチした研究開発が加速されることとなる。

私たちNRC-Indiaでは、これらグローバル企業の研究開発拠点のベンチマーク結果を活用しながら、人材と組織の運用、マネージメントを実施している。

3. NRC-India (RNTBCI Research) の概要

NRC-Indiaは前述の通り、RNTBCIの中に研究組織として存在する。RNTBCIは研究開発、製品開発、製造プロセス開発などを行うエンジニアリング機能と、購買、ITサポートなどを行うビジネス機能からなり、従業員5,000人以上のルノー・日産の海外拠点としては最大規模である。RNTBCI本社があるマヒンドラ ワールド シティは、南インドの都市チェンナイ市内から南西に下った工業地帯近くに位置し、アライアンス製造工場および部品サプライヤに近く連携を図りやすい立地になっている (図3)。

また、NRC-Indiaは、このRNTBCIオフィス以外に、大学や外部研究機関との研究連携を促進するため、チェンナイ市内にあるインド工科大学マドラス校 (以下、IIT-M) のキャンパスにあるIITリサーチパーク (以下、IIT-RP) の建物の中に実験室およびオフィスを構えている (図3)。

4. NRC-Indiaの研究活動

NRC-Indiaは2009年開設当初、IIT-RP建物内にRNTBCI Fuel Cell Labをオープンさせ、2013年には同Battery Labを新設した。開設初期は、日本よりマネージャを派遣し、組織の運用およびマネージメントを実施していたが、現在は日本で実践的な業務経験を積みNissan Wayを習得したLocal Leaderがマネージメントを実施している。2013年にRNTBCI Research and Advanced Engineering Vision 2020を設定し、Strategic Roleを明確にして、インドの強みを生かした先進材料開発を行って

quality degradation, wage increases, and high staff turnover) head on and transforming their corporations thereafter. This pattern of transformation takes two forms: first, transformation to “global strategic centers” and, second, transformation to “local development centers.” Analyzing the factors that led these corporations to success reveals three key components: local leadership, strategic roles, and empowering local teams.

To strengthen local leadership, company A, as an example, offers global opportunities for training to nurture candidates for future leaders on site, and cultivates human resources supplying global leaders who understand management methods. And it implements “bottom-up technologies” by dispatching not managers but technical experts from those countries. Achieving success by defining “strategic roles,” namely, implementing a drastic strategy under which software development is performed in India, company B and others are establishing a structure in which work in India brings together improved work efficiency (by utilizing high-quality human resources) and cost competitiveness as weapons when economic conditions are good or bad. Achieving success by empowering local teams, namely, by granting independence in terms of power and authority to local organizations, company C is speeding up operations utilizing local strengths, efficient decision-making, and R&D matching local market needs.

At NRC-India, while utilizing the benchmark achievements of R&D centers of the above-mentioned global corporations, we are putting human resources and organizations to practical use and implementing management by local leaders.

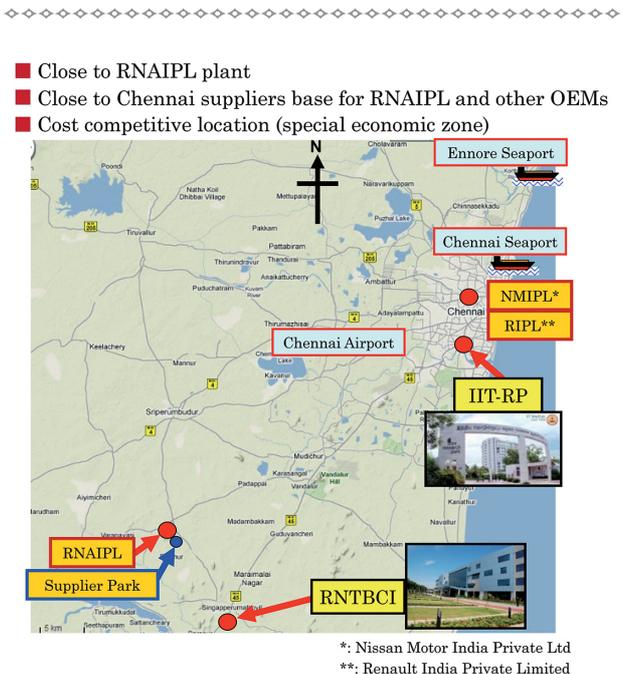


図-3 RNTBCI および IIT-RP の設置場所
 Fig. 3 Locations of RNTBCI and IIT-RP

る。高度な材料研究能力を有する研究者が大学および外部研究機関と連携しながら、材料の耐久評価、スクリーニング、分析を専用実験室で実践している（図4）。

また、Empowering Local Teamsを推進するために、インドの理工系大学最高峰であるIIT-Mと2009年より戦略的に連携しており、現在五つのプログラムを実施している（図5）。

- ① 日産サポートプログラムは、若い大学研究者への研究費サポートを目的としたプログラムで、毎年選考委員会を設置し、提案者本人によるプレゼンテーションにより将来有望で先進的な研究を選定、助成、成果報告会を行っている。
- ② モビリティワークショップでは、毎年モビリティに関するテーマを決め、インド国内外より大学、政府、研究機関、企業の幅広い関係者を集めて討論会を実施している。
- ③ IIT-RP内に燃料電池とバッテリーの専用ラボを開設し、大学や外部研究機関と連携した研究を行っている。
- ④ スカラシッププログラムは、日産グローバル財団と共同で、毎年IIT-Mの学生2名を、論文および面接により選定し、奨学金の付与、RNTBCIでのインターシップ、日産の工場および研究所訪問を行っている。
- ⑤ これら連携プログラムを通じて見出された有望な研究テーマに関しては、共同研究テーマへ発展させ、実用化に向けた研究を実施している。

IIT-MとNRC-Indiaとの共同研究からは、数多くの成果が生み出されており、例としては固体高分子形（PEM）燃料電池用電極触媒の研究がある。最先端のカーボンナノチューブおよびグラフェンに特殊な処理を行うことで、高価な触媒材料であるPt（白金）を高分散で担持することができ（図6）、性能においても耐久性が大幅に向上することを見出した。本成果はIIT-Mとの共著で論文発表している。¹⁾

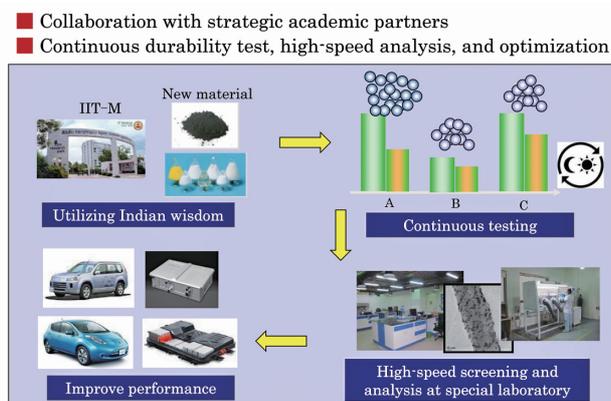


図-4 NRC-India での先端材料研究
Fig. 4 Research on advanced materials at NRC-India

3. Overview of NRC-India (RNTBCI Research)

As mentioned above, NRC-India is a research organization within RNTBCI, which is composed of an “engineering function” (performing, for example, R&D, product development, and fabrication-process development) and a “business function” (performing, for example, purchasing and IT support). With over 5000 employees, it is the largest-scale overseas base of Renault-Nissan. Mahindra World City, home of the head office of RNTBCI, is located south-west of the southern Indian city of Chennai in close proximity to industrial areas in order to promote easily cooperation with nearby alliance factories and parts suppliers (Fig. 3). Moreover, as for premises other than the RNTBCI head office, aiming to facilitate cooperative research with universities and external research institutes, NRC-India has set up laboratories and offices within the premises of the IIT Research Park (IIT-RP)—located on the campus of the Indian Institute of Technology Madras (IIT-M) in Chennai (Fig. 3).

4. Research activities of NRC-India

NRC-India first opened the RNTBCI Fuel Cell Lab on the premises of IIT-RP in 2009, and then constructed the Battery Lab on the same premises in 2013. When the laboratories were first established, managers were dispatched from Japan to facilitate and manage the laboratory systems. Presently, however, the laboratories are managed by “Local Leasers”—who have been trained in the “Nissan Way” while they were gaining practical work experience in Japan. In 2013, RNTBCI Research and Advanced Engineering Vision 2020 was established, and strategic roles were defined. Under that vision, advanced materials are being developed by utilizing India’s strengths. While researchers with skills in advanced materials cooperate with universities and other research institutes, they perform durability testing of materials followed by screening and analysis of those materials in specialized laboratories (Fig. 4).

Furthermore, with the aim of empowering local teams, cooperation with IIT-M (which represents the top science and technology university in India) was started in 2009, and five programs (summarized below as (1) to (5))



- ◆ Nissan Support Program
- ◆ Mobility workshop
- ◆ Fuel cell and battery laboratory
- ◆ Scholarship program
- ◆ Contracted research




Laboratory in IIT-RP



Scholarship program by Nissan Global Foundation



Nissan Support Program (selection committee)



Mobility workshop

図-5 IIT-Madras とのパートナーシップ
Fig. 5 Partnership with IIT-RP

5. おわりに

いまインドは世界から注目されている。人口ボーナスが生み出す経済成長、中間層の拡大による巨大な市場創出、IITを軸とした優秀で豊富な理系人材、Google社やMicrosoft社といったグローバル企業で活躍するインド人経営者など、話題に事欠かない。このホットなインドで成功を収めるために、先行して進出したグローバル企業のベンチマークから抽出された成功要因を着実に実践していく、世界が驚くようなイノベーションがインドから発信していくことをNRC-Indiaは目指している。

参考文献

- 1) N. Karthikeyan et al.: Highly Durable Platinum based Cathode Electrocatalysts for PEMFC Application using Oxygen and Nitrogen Functional Groups Attached Nanocarbon Supports, Fuel Cells, Vol.15, No. 2, pp. 278-287 (2015).

are presently being undertaken (Fig. 5).

- (1) Nissan Support Program: Yearly selection committees are set up under the aim of supporting research spending on young university researchers, and promising advanced research is selected, and promoted, on the basis of presentations by young researchers. The results of that research are then presented at special meetings.
- (2) Mobility Workshops: Themes concerning mobility are set every year, and relevant people from a wide variety of organizations (namely, universities, government agencies, research institutes, and businesses) are invited to discuss those themes at special sessions.
- (3) Fuel Cell and Battery Lab.: A laboratory specializing in fuel cells (FCs) and batteries was set up, and research on those technologies is carried out in cooperation with universities and external research institutes.
- (4) Scholarship Program: Through cooperation with Nissan Global Foundation, two students are chosen every year on the basis of a dissertation and interview, and granted an internship at RNTBCI, including visits to Nissan factories and research centers.
- (5) Contracted Research: Promising research themes identified through the above related programs are expanded as collaborative research themes, and research aimed at practical applications of these themes is implemented.

Many accomplishments have stemmed from the collaborative research between IIT-M and NRC-India, and one example is research on electrode catalysts for polymer-electrolyte-membrane (PEM) fuel cells. By special processing of cutting-edge carbon nanotubes and graphene, platinum (Pt) (which is a costly catalytic material) can be supported in a highly dispersed form, thereby significantly improving durability while maintaining performance (Fig. 6). This accomplishment is presented in a paper co-authored with IIT-M. ¹⁾

5. Concluding remarks

India is drawing the attention of the whole world while it generates plenty hot topics, such as economic growth created by a population bonus, creation of a huge market through a growing middle class, abundant scientific-based human resources focused at the IIT, and Indian businesspersons flourishing at global corporations like Google and Microsoft. To be a success in this hot Indian market, NRC-India is aiming to put into practice the success factors extracted from benchmarks set by the global companies first to penetrate India and convey innovation from India that will surprise the whole world.

References

- 1) N. Karthikeyan et al., Highly Durable Platinum based Cathode Electrocatalysts for PEMFC Application using Oxygen and Nitrogen Functional Groups Attached Nanocarbon Supports, Fuel Cells, Vol. 15, No. 2, pp. 278-287 (2015).

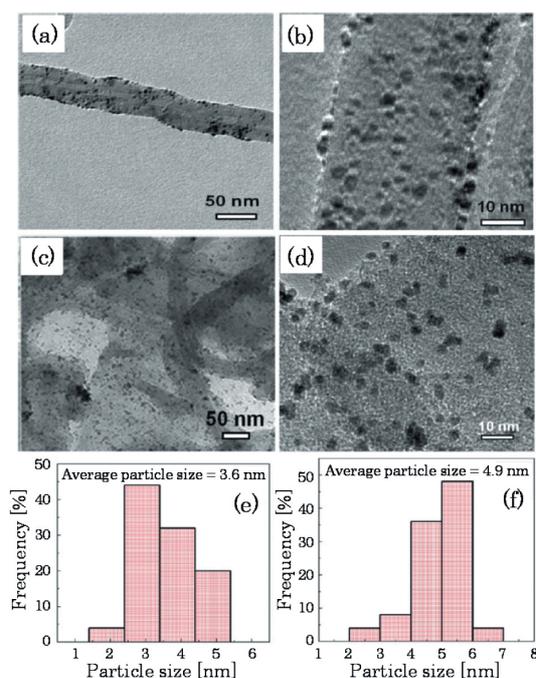


図-6 Pt/N-f-(MWCNT) と Pt/N-f-(MWCNT+FLG) の透過型電子顕微鏡 (TEM) 像と粒子径分布
 Fig. 6 TEM image and particle-size distribution of Pt/N-f-(MWCNT) and Pt/N-f-(MWCNT+FLG)

■著者／ Author(s) ■



羽 賀 史 浩
Fumihiro Haga



サブラマニ アルーア
Ailoor. K. Subramani

環境変化にロバストな自己位置推定および環境情報取得に関する研究

Report on Robust Localization and Map Making for Handling Driving Environment Changes

佐野 泰 仁*
Yasuhito Sano

抄 録 自動運転技術は渋滞および交通事故の軽減に対して大きな効果が期待される。自動運転システムを早期に、かつセンサ群で実現するため、日産自動車とオックスフォード大学 Mobile Robotics Group は2010年より共同研究を開始した。この共同研究では、高価で特殊なセンサや特別に測量した地図データを利用せずに、汎用的な車載センサによる地図の構築とそれに対する自己位置推定に基づく自動運転システムを提案し、実証実験を行ってきた。本稿では、カメラ記録データから環境変化にロバストな走路環境モデルを構築する手法と、その確認実験内容について報告する。

Summary An autonomous driving system offers great promise for improving traffic safety and reducing traffic congestion. We started a collaborative project with the Mobile Robotics Group at Oxford University to study the possibility of achieving autonomous driving with affordable sensors. Map making and localization were considered without using expensive 3D laser sensors and special map data that include detailed road structures and semantic information. This article proposes a robust road model for localization and presents experimental results that confirm its performance.

Key words : *Research & Development, research, artificial intelligence (AI), autonomous driving, perception, localization, map building*

1. はじめに

自動運転は、近年多くの研究グループがそのデモンストラーションを行っており、近未来に実現可能なシステムとして捉えられはじめた。日産自動車も2020年までに、自動運転システムを搭載した車両を販売開始することを発表している。

自動運転技術は統合技術であり、これを実現するためには、a)車両周囲の交通環境の把握、b)車両周囲の認識、c)走行計画の立案、d)実際の車両制御など多くの技術が必要である。これまでに報告されたいくつかの先行事例では、a)とb)に関しては高価な3D LRF (Laser Range Finder) による周囲計測や、特別に測量して地物データなどを記載した地図 (High-definition Map) の利用を前提としており、商品化に向けては多くの課題がある¹⁾。

また既存の地図情報を用いて自動運転を実施するためには、実際の環境と地図との違いについても考慮しなくてはならない。地図は間違いを含んでいる可能性もあり、地図の不完全性を考慮に入れたシステムを構築する必要がある。

これに対して、日産自動車は3D LRFやHigh-definition Mapを頼ることなく、a)やb)を行うアプローチを開発することを目的として、オックスフォード大学と2010年より共同研究を行ってきた。このアプローチは、カメラによる車

1. Introduction

Many research groups have conducted autonomous driving demonstrations in recent years, and it is beginning to look like a feasible system may be achieved in the near future. Nissan has announced that it will begin selling a vehicle equipped with an autonomous driving system by the year 2020.

An autonomous driving system comprises comprehensive technologies. In order to make autonomous driving a reality, many technologies will be needed for (a) capturing the traffic environment around the vehicle, (b) recognizing the vehicle's surroundings, (c) planning a driving strategy, and (d) actually controlling the vehicle, among other tasks. Several previously reported studies have proposed for tasks (a) and (b) the use of an expensive 3D laser range finder (LRF) to measure the surrounding environment or high-definition maps that indicate data on specially surveyed geographical features. However, there are many hurdles that must be overcome in order to commercialize an autonomous driving system based on these assumptions.¹⁾

In using existing map data to accomplish autonomous driving, it is necessary to take account of discrepancies between the actual environment and maps. The system must be constructed so as to take into account the incompleteness of maps and the fact that they may also contain errors.

To deal with these possibilities, Nissan has been

*モビリティ・サービス研究所 / Mobility Services Laboratory

両走行位置の計測（自己位置推定）と、地図情報のみに頼らず、車載したセンサによる情報から走行した道路環境を走路環境モデルとして合成する技術を主軸とする。ここで走路環境モデルとしては、白線や走路境界情報などを含む。これにより、次回以降の実際の走行時には、センサ情報から直接認識した結果だけでなく地図情報を参照することで、直接計測が困難なエリアの情報も取得しながら周囲環境を把握し、これをベースに走行計画を立案するという方策をとる。

ここで、カメラによる自己位置推定とマップ構築に関して最もよく知られている手法は、Visual SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) と呼ばれる技術である。George Kleinによる特徴点の登録と自己位置推定を非同期に行うことで高速化、高精度化を実現したPTAM (Parallel Tracking and Mapping)²⁾ が有名であるが、それ以降もDTAM (Dense Tracking and Mapping in Real-Time)³⁾、LSD-SLAM (Large-Scale Direct Monocular SLAM)⁴⁾、SVO (Semi-Direct Visual Odometry)⁵⁾ などが提案されてきている。これらはいずれもカメラ画像情報からカメラ移動量を推定し、その推定量に基づきカメラ周囲の環境モデルを構築するというSLAMの枠組みに沿ったものである。これらはカメラの移動に伴い画像が変化する程度の環境モデルしか持たないため、様々な環境で動作することができるという利点がある。

ただし、これを自動車環境に応用して、過去に走行した道路環境を走行モデルとして記録し、次回以降これを参照しようとした場合、季節や天候変化に伴い、部分的に見た目の環境が変化する。この時、実際の環境と走路環境モデルとの差異が大きくなり、自己位置推定が実施できないという問題点が発生する。この問題に対し、比較的变化の少ない道路表面を道路環境として記録し、この上で自己位置推定を実施する手法、ロバストな走路環境モデルを提案する。

以降に、Visual SLAMによる自車両移動量の推定方法、ロバストな走路環境モデルの構築、結論と今後の課題について説明する。

2. 共同研究内容紹介

2.1 Visual SLAMによる自車両移動量の推定方法

本手法ではステレオカメラを用いてVisual SLAMを実施し、カメラ移動量の推定を行い、これをベースとした周囲環境のモデル化を行うという方策を採用した。

ステレオカメラによるVisual SLAMは、

1. 画像の正規化
2. 特徴点の抽出
3. 左右のカメラでのステレオマッチング
4. 前画像とのマッチングによる移動量の計算

conducting research with Oxford University since 2010 with the aim of developing an approach for accomplishing tasks (a) and (b) without relying on a 3D LRF or high-definition maps. This approach is principally based on techniques for synthesizing a road environment model using cameras to measure the vehicle's position (self-localization) and vehicle-mounted sensors to provide information on the traveled road environment without relying solely on map data. The road environment model contains white lane markings, road boundary markings and other information. As a result, from the next time the vehicle is driven map data are also referred to, in addition to the results of direct recognition of the environment based on sensor information. This approach enables recognition of the surrounding environment by also acquiring information on areas where direct measurements are difficult to obtain, and that serves as the basis for planning a driving strategy.

The best known technique for camera-based self-localization and map making is called Visual SLAM (Simultaneous Localization And Mapping). The well-known PTAM (Parallel Tracking and Mapping)²⁾ method proposed by Klein and Murray achieves faster speed and higher accuracy by recording features and performing self-localization asynchronously. Other methods proposed since then include DTAM (Dense Tracking and Mapping in Real-Time),³⁾ LSD-SLAM (Large-Scale Direct Monocular SLAM)⁴⁾ and SVO (Semi-Direct Visual Odometry).⁵⁾ All of these methods are in the SLAM framework in that they estimate camera movement based on camera image data and use the estimations to build a model of the camera's surrounding environment. Because these methods only provide an environment model in which images change as the camera moves, they have the advantage of being able to operate in a wide variety of environments.

When this type of method is applied to the vehicle environment, road environments traveled in the past are recorded as road environment models. However, when an attempt is made to refer to a model from the time of the next trip onward, the present environment may differ from that seen previously owing to changes in the seasons or the weather. Large discrepancies between the real-world environment and the road environment model can give rise to the problem that self-localization cannot be accomplished. To resolve this problem, we propose a robust road environment model that records the relatively unchanging road surface as the road environment and then performs self-localization on that basis.

The following sections describe the method adopted for estimating the vehicle's movement using Visual SLAM, the construction of a robust road environment model, the conclusions of this study, and issues for future work.

2. Details of Collaborative Study

2.1 Method of estimating the vehicle's movement using Visual SLAM

The proposed method uses a stereo camera to

の流れを取る（図1を参照）。以下にそれぞれ詳しく説明を行う。

まず時刻 t_k において、ステレオカメラから左右の画像を一枚ずつ取得し、ゆがみを補正して正規化画像を得る。ステレオカメラで撮影された左右の画像の点は、同じ高さに映ることとなる。

上記の正規化画像内で、特異的な部分画像の抽出を行う。一般的には、もし線の端点や角など画像が動いた場合に、どれだけ動いたかを計測可能な点を抽出する。この特徴点抽出手法としてはSIFT (Scale-Invariant Feature Transform)⁶⁾、SURF (Speed up Robust feature)⁷⁾、FAST (Features from Accelerated Segment Test)⁸⁾ など様々な手法が提案されているが、本手法では、計算負荷が軽いFAST特徴量を採用した。

左右のカメラで検出された特徴点同士を比較し、同じ特徴点同士を関連付ける。この手順をマッチングと呼ぶ。正規化手続きにより一つの画像で検出された特徴点は、もう一方の画像の同じ高さに存在するはずである。マッチング手法としては、ここではEMS (Efficient Second-order Minimisation)⁹⁾ を用いて行った。ここで関連付けられた M 個の特徴点を $y^j_k (j = 1 \dots M)$ とする。

時刻 t_k において得られた特徴点 y^j_k とその次のステレオ画像によって得られた特徴点 y^j_{k+1} に関して、再びマッチング処理を行う。RANSAC手法により t_k から t_{k+1} におけるカメラの移動量と回転量を 4×4 SE(3)* 遷移行列 $T_{k,k+1}$ として求め、これをLevenberg-Marquardt¹⁰⁾ 手法により高精度化するという流れをとることとした。

(* Special Euclidean group Dimension 3)

2.2 ロバストな走路環境モデルの必要性

上記手法は、検出された特徴点を環境モデルとしている。仮に光学環境や構造物の配置が全く同一であれば、次回以降も全く同一の特徴点群がステレオカメラ画像から検出されるので、これらをマッチングさせることで、環境モデル内におけるカメラ位置を推定することが可能となる

implement Visual SLAM, estimates the camera movement, and models the surrounding environment on that basis. Visual SLAM based on a stereo camera is accomplished according to the following process as outlined in Fig. 1.

1. Image normalization (de-warping and rectification)
2. Feature extraction (feature detection/description)
3. Left-to-right stereo matching
4. Calculation of movement by matching with the previous images

Each of these steps is explained in detail below.

First, at time t_k one right and one left image each are obtained from the stereo camera and normalized images are acquired by rectifying image distortions. Points in the right and left images captured by the stereo camera are now displayed at the same height.

Specific partial images are extracted from the normalized images. Generally, if the end points of lines, angles or other features of the images have moved, keypoints that allow the amount of movement to be measured are extracted. Methods that have been proposed for extracting such keypoints include SIFT (Scale-Invariant Feature Transform),⁶⁾ SURF (Speeded Up Robust Features)⁷⁾ and FAST (Features from Accelerated Feature Test),⁸⁾ among others. Our proposed method adopts FAST for keypoint extraction because of its light computational load.

The keypoints detected by the right and left cameras are compared and associations are established between the same keypoints in the right and left images. This method is referred to as matching. The keypoints detected in one image as a result of the normalization operation should be present at the same height in the other image. Matching is done by a method called Efficient Second-order Minimisation (ESM).⁹⁾ Here, M number of associated keypoints are expressed as $y^j_k (j = 1 \dots M)$.

Matching is again performed on the keypoints y^j_k obtained at time t_k and on the keypoints y^j_{k+1} obtained in the next set of stereo images. Camera movement and rotation in the interval from t_k to t_{k+1} are found in the 4×4 transition matrix $T_{k,k+1}$ in the Special Euclidean Group in three dimensions, SE(3), using the random sample

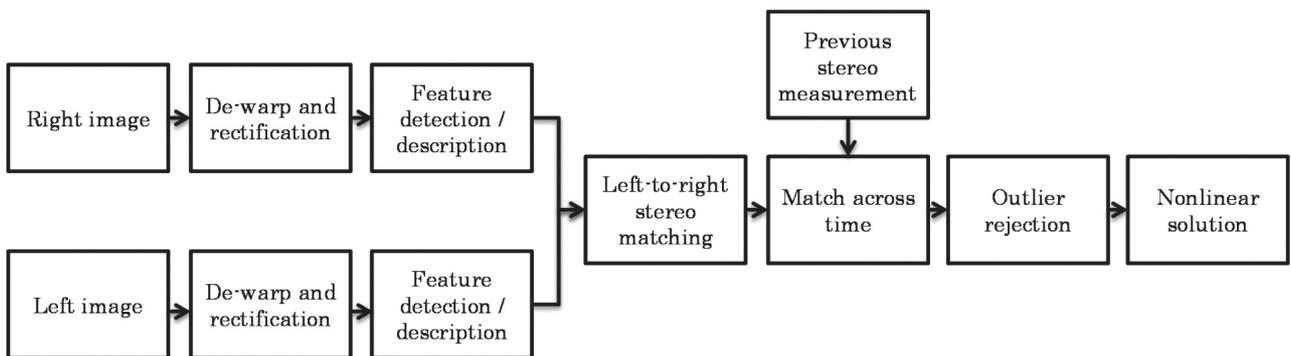


図-1 ステレオカメラを用いた Visual SLAM による自車両移動量推定の流れ
Fig. 1 Process of Visual SLAM using a stereo camera

路環境を明示的に記述された地図を参照する、あるいはセンサによる情報などをリアルタイムで認識する必要がある。今後は、交通ルールを含む既存の地図情報と、ここで構築した走路環境モデルの位置を合わせてハイブリッドマップとして活用すること、既存の地図情報の間違いや環境の恒久的な変化を地図に記載していくこと、地図情報を参照する際に手がかりとしやすい情報をインデックスとして、やはり地図に記載していくことなどが考えられる。

4. 謝 辞

本研究はオックスフォード大学 Paul Newman 教授の Mobile Robotics Group と共同で実施した。この場を借りて深く感謝申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Google Self-Driving Car Project Monthly Report, May 2015.
- 2) G. Klein et al.: Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces, Proc. of 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), pp. 1-10 (2007).
- 3) R. A. Newcombe et al.: DTAM: Dense Tracking and Mapping in Real-Time, Proc. of 2011 International Conference on Computer Vision (ICCV), pp. 2320-2327, (2011).
- 4) J. Engel et al.: LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM, European Conference on Computer Vision (ECCV) 2014, pp. 834-849 (2014).
- 5) C. Forster et al.: SVO: Fast Semi-Direct Monocular Visual Odometry, Robotics and Automation (ICRA) 2014, pp. 15-22 (2014).
- 6) D. G. Lowe: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, International Journal of Computer Vision, Vol. 60, No. 2, pp. 91-110 (2014).
- 7) H. Bay et al.: SURF: Speeded Up Robust Features, Computer Vision—ECCV 2006, pp. 404-417 (2006).
- 8) E. Rosten et al.: Machine learning for high-speed corner detection, Proc. of 9th European Conference on Computer Vision—ECCV 2006, pp. 430-443 (2006).
- 9) S. Benhimane et al.: Real-time image-based tracking of planes using Efficient Second-order Minimization, Proc. of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) 2004, Vol. 1, pp. 943-948 (2004).
- 10) R. Hartley et al.: Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge: University Press

potential to support vehicle control for tracing the same trajectory on a course previously driven. However, the road environment model constructed with this method consists of keypoints and does not possess semantic information in the form of traffic rules. In order for a car to stably drive itself on the basis of an understanding of the road environment, it will be necessary to refer to maps in which the road environment is explicitly described or to recognize the environment in real time using sensor information.

In the future, it is planned to use hybrid maps consisting of existing map data containing traffic rules combined with the method developed in this study for constructing a road environment model. Errors in existing map data and permanent changes in the road environment will need to be described in the maps. Information providing easy cues when referencing map information will have to be indexed and also described in the maps. These are some examples of the approaches that presumably will be necessary.

4. Acknowledgments

This study was conducted jointly with the Mobile Robotics Group headed by Professor Paul Newman at Oxford University. The author would like to express his appreciation to everyone who cooperated with this research.

References

- 1) Google Self-Driving Car Project Monthly Report, May 2015.
- 2) G. Klein et al., Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces, Proc. of 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), pp. 1-10 (2007).
- 3) R. A. Newcombe et al., DTAM: Dense Tracking and Mapping in Real-Time, Proc. of 2011 International Conference on Computer Vision (ICCV), pp. 2320-2327, (2011).
- 4) J. Engel et al., LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM, European Conference on Computer Vision (ECCV) 2014, pp. 834-849 (2014).
- 5) C. Forster et al., SVO: Fast Semi-Direct Monocular Visual Odometry, Robotics and Automation (ICRA) 2014, pp. 15-22 (2014).
- 6) D. G. Lowe, Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, International Journal of Computer Vision, Vol. 60, No. 2, pp. 91-110 (2014).
- 7) H. Bay et al., SURF: Speeded Up Robust Features, Computer Vision—ECCV 2006, pp. 404-417 (2006).
- 8) E. Rosten et al., Machine learning for high-speed corner detection, Proc. of 9th European Conference on Computer Vision—ECCV 2006, pp. 430-443 (2006).
- 9) S. Benhimane et al., Real-time image-based tracking of planes using Efficient Second-order Minimization, Proc. of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) 2004, Vol. 1, pp.

- (2003).
- 11) A. S. Huang et al.: Finding multiple lanes in urban road networks with vision and lidar, *Autonomous Robots*, pp. 103-122 (2009).
- 12) P. F. M. Nacken: A Metric for Line Segments, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 15, No. 12, pp. 1312-1318 (1993).
- 10) R. Hartley et al., *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge: Cambridge University Press, (2003).
- 11) A. S. Huang et al., Finding multiple lanes in urban road networks with vision and lidar, *Autonomous Robots*, pp. 103-122 (2009).
- 12) P. F. M. Nacken, A Metric for Line Segments, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 15, No. 12, pp. 1312-1318 (1993).

■ 著者 / Author(s) ■



佐野 泰仁
Yasuhito Sano

一般道自動運転に向けたディープラーニングによる車線認識

Lane Recognition by Deep Learning for Autonomous Driving on City Roads

吉 畑 友 太*
Yuta Yoshihata

古 性 裕 之*
Hiroyuki Furushou

抄 録 一般道での自動運転の実現に向けて、ディープラーニングを用いた周囲環境認識の研究開発を進めている。本稿では、スタンフォード大学との共同研究を通じて開発した、カメラ画像による車線認識について紹介する。白線が他車両により隠されている場面や、交差点などで白線が存在しない場面においても、周囲の状況から車線境界線を推測できることを確認した。

Summary To achieve autonomous driving on city roads, Nissan aims to develop a surrounding environment recognition system for complex road environments using deep learning. This article describes deep learning-based lane recognition using camera images. The system is being developed in collaboration with Stanford University. The lane recognition model is trained by using labeled data that contain the positions of lane boundaries without any hand engineering. The labeling system using a 3D lane boundary model is effective in producing large volumes of datasets with a small amount of human effort. Our results show that lane recognition by deep learning can deal with complex lane structures and predict lane boundaries even when lane markings are partially invisible or inexistent at intersections. This indicates that deep learning could achieve a high level of perception beyond conventional object detection.

Key words : *Research & Development, research, artificial intelligence (AI), autonomous driving, perception, lane recognition, deep learning, neural networks*

1. はじめに

近年、ディープラーニング／深層学習と呼ばれる人工知能の技術が注目を集めている。画像認識や音声認識、自然言語処理など様々な分野に応用され、目覚ましい成果を上げている。画像認識での開花のきっかけは、2012年の画像認識コンテストImageNet Large Scale Visual Recognition Challengeにおいて、Hintonらのグループによるディープラーニングの手法¹⁾が他を圧倒して優勝したことである。コンテストは、画像中に写る物体の種類を1,000個のカテゴリの中から答えるタスクでの正答率を競うものである。これを契機に多くの研究者がディープラーニングの研究に着手し、激しい開発競争の末、現在では同タスクにおいて人よりも優れた性能を収めるまでに達している。1,000個もの物体の種類を同時に識別するという大規模な認識、物体の位置・姿勢や状態によらず物体の普遍的な特徴を捉えるという高次元な認識を実現可能にしたと言える。

日産自動車では、一般道での自動運転の実現を目指し研究を進めている。一般道では高速道路に比べて圧倒的に複雑で多様なシーンが存在し、認識すべき対象物も多く、複雑な周囲環境認識が必要とされる。多くの対象物を

1. Introduction

An artificial intelligence technique known as deep learning has attracted increasing attention in recent years. Impressive results have been obtained by applying this technique in various fields, including image recognition, voice recognition and natural language processing, among others. The impetus for the popularity of deep learning for image recognition stems from the victory by Professor Geoff Hinton's team using deep learning to overwhelm other competitors in the ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge 2012.¹⁾ Entrants in this contest compete to see how well their system can identify objects in images and classify them into 1,000 different categories. That victory prompted many researchers to initiate studies on deep learning. As a result of fierce competition, deep learning has now progressed to the level where its performance in this same task surpasses that of humans. It is possible to say that two capabilities have been proved; large-scale recognition that can simultaneously distinguish 1,000 categories of objects and high-level recognition for identifying the universal features of objects regardless of their position, pose or state in images.

Nissan is carrying out research aimed at achieving autonomous driving on city roads. The situations on city roads are overwhelmingly more complex and variegated

*モビリティ・サービス研究所 / Mobility Services Laboratory

同時に認識すると共に、周囲の状況を総合的に認知する高次な知能が必要であると考えている。そこで、前述の通り大規模で高次な認識を可能にし得るディープラーニングの技術に着目し、第一人者の一人であるスタンフォード大学 Andrew Ng 准教授と組み、自動運転のための周囲環境認識への応用研究に着手した。本稿では、ディープラーニングの車線認識（図1）への応用について紹介する。

2. 共同研究内容紹介

2.1 ディープラーニングの特徴と利点

ディープラーニングとは、機械学習の手法の一種で、多層ニューラルネットワークを用いた手法の総称である。従来の機械学習を用いた画像認識では、各物体認識に有効な画像の特徴量を、研究者が経験や知識をベースに設計した上で、その特徴量をもとに学習を実行する。特徴量の設計・開発に研究の重点が置かれており、例えば歩行者認識では、頭・腕・脚などの各パーツの位置関係を示す特徴量などが開発され、性能向上が図られてきた。対してディープラーニングでは、こうしたハンドデザインを全く必要とせず、特徴量自体も学習によって獲得することが特出している点である。その結果、従来よりも優れた性能を持つことが、数々のタスクにおいて実証されてきている。

ニューラルネットワークの多層構造が、こうした特徴量の自動抽出を可能とするのみでなく、より抽象的な特徴を捉えることを可能にする。層を積み重ねるごとに非線形性を増し、抽象的な特徴量を抽出していく。その結果、より複雑で高次な認識が実現される。

ひとえにディープラーニングといっても様々な手法が存在する。画像認識においては、畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Networks : CNNs）による教師あり学習が一般的に用いられる。



図-1 ディープラーニングによる一般道車線認識
Fig. 1 Lane recognition on city roads by deep learning

than on highways, and there are many more objects to be recognized. Consequently, the ability to recognize more complex surrounding environments is required. It is assumed that high-level intelligence is needed to simultaneously recognize a large variety of objects and also to holistically comprehend the surrounding circumstances. For that reason, we decided to focus on the technique of deep learning that is capable of facilitating large-scale, high-level recognition as noted above. We have initiated research on the application of deep learning to surrounding environment recognition for autonomous driving in collaboration with Dr. Andrew Ng, an associate professor at Stanford University, who is one of the leading authorities in this field. This article describes the application of deep learning to lane recognition (Fig. 1).

2. Details of Joint Research

2.1 Features and advantages of deep learning

Deep learning refers to one type of machine learning; it is a generic term for methods that make use of multilayer neural networks. In conventional image recognition systems using machine learning, researchers have designed the features effective for recognition of each target object based on their experience or knowledge and have then trained the systems using those features. Research has focused on the design and development of such features. For example, for pedestrian recognition, efforts have been made to improve recognition performance by developing features showing the positional relationships among body parts such as the head, arms and legs. In contrast, one of the biggest characteristics of deep learning is that features themselves can be learned from data without any such hand engineering. Consequently, it has been demonstrated in many tasks that deep learning can deliver much better performance than conventional methods.

The multilayer structure of neural networks not only facilitates this automatic extraction of features, it also enables acquisition of more abstract features. More layers lead to an increase in nonlinearity and enable extraction of abstract features. As a result, more complex, high-level recognition is achieved

What is simply referred to as deep learning subsumes various methodologies. In image recognition, convolutional neural networks with supervised learning are generally used.

2.2 Lane recognition by deep learning

Lane configurations on city roads are more complex than on highways and an infinite variety of patterns exist. There are also various patterns of lane markings, including white lines and Botts' dots. It is safe to say that it would be next to impossible for a person to define all the lane configuration patterns and all the features of lane markings. Therefore, our aim is to make the system learn all of the features without any hand engineering by using deep learning and to achieve more flexible and robust lane recognition.

2.2 ディープラーニングによる車線認識

一般道では高速道路に比べて車線の形状が複雑で、無数のパターンが存在する。また、白線やボツドツツなどの道路区画線のパターンも様々である。人が車線形状のパターンや道路区画線の特徴を全て定義するのは困難であると言える。そこで、ディープラーニングを用いて、ハンドデザイン無しに機械に全て学習させることで、より柔軟でロバストな車線認識の実現を目指す。

さらに、一般道では車間距離が短く他車両により白線が隠されてしまうケースが頻発する。また、交差点内ではそもそも白線が存在しない。こうした状況下で、人は単に白線を見つけるだけでなく、周囲の情報を手掛かりに仮想的な車線境界線をイメージして走行をしていると言える。同様のことを、複雑で高次な推論を可能とするディープラーニングにより実現することを狙う。つまり、画像上の白線が写らない領域においても、途切れなく車線境界線を推定することが可能な車線認識の実現を目指す。

ディープラーニングによる車線認識の学習過程のイメージを図2に示す。まず、画像と、画像中の車線境界線の位置の正解データを多数用意する。画像を入力とし、車線境界線の位置を出力とする構成の多層ニューラルネットワークを準備し、正解データを用いて学習させる。学習の結果、図1に示すように車線境界線を推定するネットワークが構築される。Huvalらの手法²⁾に概ね沿って開発を行う。以下に詳細を説明する。

2.2.1 ネットワーク構造

640×480のピクセルサイズのRGBの画素値を入力とし、8×8ピクセルのセグメント領域ごとの車線境界線の存在確率を出力する(図3(b))。さらに詳細な境界線の位置情報を得るため、各セグメント内での車線境界線の開始/終了位置の座標を別途出力する。図3(a)に示すように、355×355ピクセルの広域な領域の情報をもとに、その中心に位置するセグメントの推定結果を算出する。この領域のことをコンテキストウィンドウと呼び、周囲の白線や車両、

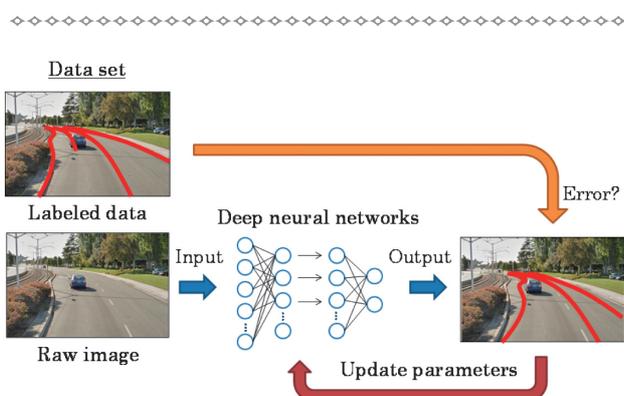


図-2 車線認識用多層ニューラルネットワークの学習プロセスのイメージ

Fig. 2 Concept of learning process of deep neural network for lane recognition

Moreover, lane markings on city roads are often obscured by other vehicles owing to close headway distances, and they do not exist from the beginning inside intersections. In these circumstances, human drivers do not simply try to find the lane markings, they also imagine virtual lane boundaries using information on the surroundings as clues and drive their vehicles accordingly. Our aim is to accomplish the same thing by using deep learning that facilitates complex and high-level inference. In other words, the aim is to accomplish lane recognition even in places where lane markings do not appear in the captured road images by estimating continuous lane boundaries without any interruption.

Figure 2 illustrates the learning process for lane recognition by deep learning. First, large quantities of raw images are prepared along with correct data of the positions of lane boundaries in the images. A deep neural network is prepared that takes an image as the input and outputs the positions of lane boundaries. The network is then trained using the correct data. As a result of this training, a network is formed for estimating lane boundaries as shown in Fig. 1. We generally follow the method by Huval et al.²⁾ The details are explained below.

2.2.1 Network structure

The input is 640 x 480 RGB pixels and the output is probabilities of lane boundaries being present in each 8 x 8 pixel segment (Fig. 3(b)). In order to obtain more precise positions of lane boundaries, the coordinates of the beginning and ending points of the lane boundaries in each segment are also output separately. The estimated results for each segment are calculated on the basis of information on a 355 x 355 pixel region (Fig. 3(a)). We call this region a context window. The purpose of the context window is to recognize lane markings and vehicles in the surroundings, the road surface conditions and the positional relationships of these objects. The aim is to estimate the presence and positions of lane markings using information on the surroundings in the context window as clues, rather than just in local areas.

Figure 3(c) is an example of a visualization of the network output results. The small pink squares represent segments, and the color gradations indicate the probability of lane boundaries being present. In the segments showing a probability above a certain specified level, lane boundaries are shown as straight lines using the separately output coordinates of the beginning/ending points.

The basic network structure inherits that proposed by Krizhevsky et al.¹⁾ which achieved notable results in the challenge of recognizing 1,000 categories of objects mentioned earlier. Features are extracted using this network up to the 5th layer among the seven layers in total. The fully connected 6th and 7th layers are reconfigured to obtain the desired output.

2.2.2 Data sets

It is well known that deep learning requires much larger quantities of data than other machine learning methods. Therefore, one key point is how efficiently data

の方法で3次元の車線境界線のラベル付けを行った後に、動画から5Hzで画像と正解データを取り出し、最終的に27,000枚程度の学習用データセットを用意した。4台のGPU：NVIDIA社製 GeForce GTX TITAN Blackを用いて、およそ3日をかけて学習を行った。

学習用データとは別に用意した動画に対してネットワークを実行し得られた結果の例を図6に示す。図6(a)では左側の分岐車線の複雑な形状の境界線を認識していることがわかる。図6(b)は車両により完全に白線が隠されている状況でも、車線境界を推定していることを示す。図6(c)は交差点内の白線が無い状況下でも、車線境界を推定していることを示す。これらの結果から、単に白線を検出するのではなく、周囲の情報を手掛かりに車線境界を推定していることが示された。

学習したネットワークはGPU：NVIDIA社製 GeForce GTX 780 Tiを搭載したデスクトップパソコンで、44Hzで実行可能である。リアルタイム処理に十分な速度であり、車載アプリケーションとしての応用可能性を確認した。

3. ま と め

ディープラーニングによる一般道での車線認識の手法を提案し、原理検証を行った。複雑な車線形状にも対応可能であり、白線が隠れているあるいは存在しない場面でも、周囲の状況から車線境界を推定可能なことを示した。車線認識への応用例を通じて、ディープラーニングによる画像認識が、単なる物体検出を超えて、高次の推論を伴う認識が可能なことを示した。

さらなる効率的な正解データの作成方法の検討を進めるとともに、データ量を増やし、認識性能の向上を目指す。また、車線以外の対象物も含めた統合した形での周囲環境認識の開発を進めて行き、一般道での自動運転で必要とされる認知知能の実現を目指す。

that were obtained when the network was applied to the video that was prepared separately from the training data sets. It is seen in Fig. 6(a) that the network recognized the lane boundaries of the complex configuration of the lane branching off on the left side of the image. Figure 6(b) shows that the right-side boundary of the adjacent lane was estimated even though it was obscured by another vehicle. Figure 6(c) shows that the lane boundaries were estimated even inside an intersection where there were no lane markings. These results indicate that the network did not simply detect the lane markings, but that it estimated lane boundaries using information on the surroundings as clues.

The trained network can run at 44 Hz on a desktop computer installed with a NVIDIA GeForce GTX 780 Ti GPU. It has sufficient speed for real-time processing and its capability for in-vehicle application has been confirmed.

3. Conclusion

This article has proposed a method of lane recognition on city roads using deep learning, and demonstrated proof of concept. It was shown that this method is capable of handling complex lane configurations and can estimate lane boundaries from the surrounding circumstances even in situations where lane markings are obscured or nonexistent. Through the examples of application to lane recognition, it was indicated that image recognition by deep learning can go beyond simple object detection and achieve recognition accompanied by high-level inference.

In future work, we plan to investigate methods for creating correct datasets more efficiently and also increase the volume of the data with the aim of further improving recognition performance. In addition, we plan to develop an integrated recognition system for the surrounding environment that includes the recognition of various objects besides lane boundaries, and aim to achieve recognition capabilities needed for autonomous driving on city roads.

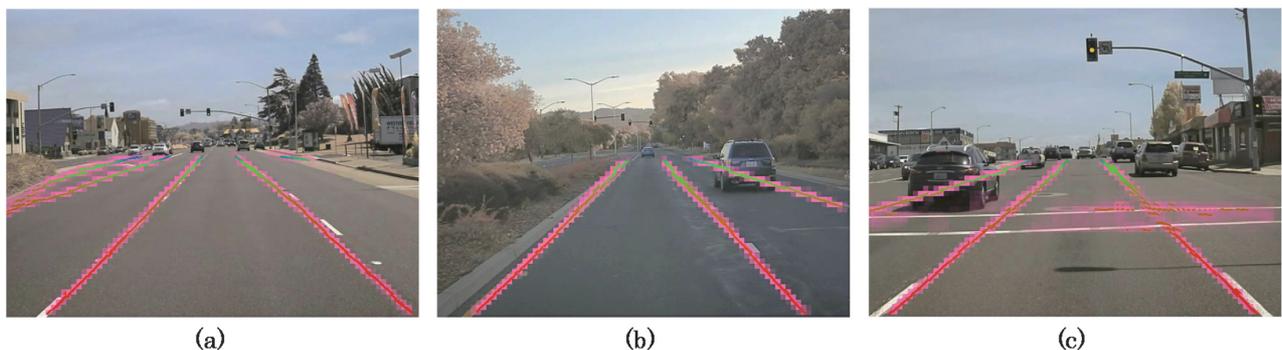


図-6 ディープラーニングによる車線認識の結果例
Fig. 6 Sample results of lane recognition by deep learning

4. 謝 辞

本研究はスタンフォード大学 Andrew Ng 准教授の研究室と共同で実施した。また、研究の実施にあたり Nissan Research Center Silicon Valley (NRC-SV) の協力を得た。この場を借りて深く感謝申し上げる。

参 考 文 献

- 1) A. Krizhevsky et al.: ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, Advances in Neural Information Processing Systems, pp. 1097-1105 (2012).
- 2) B. Huval et al.: An Empirical Evaluation of Deep Learning on Highway Driving, arXiv:1504.01716 (2015).
- 3) P. Rajpurkar et al.: Driverseat: Crowdstrapping Learning Tasks for Autonomous Driving, ICML '15 Workshop on Crowdsourcing and Machine Learning (2015).

4. Acknowledgments

This research was carried out jointly with researchers in the laboratory of Professor Andrew Ng at Stanford University. Cooperation for conducting this research was also provided by the Nissan Research Center Silicon Valley (NRC-SV). The author would like to take this opportunity to thank everyone involved for their cooperation.

References

- 1) A. Krizhevsky et al., ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, Advances in Neural Information Processing Systems, pp. 1097-1105 (2012).
- 2) B. Huval et al., An Empirical Evaluation of Deep Learning on Highway Driving, arXiv:1504.01716 (2015).
- 3) P. Rajpurkar et al., Driverseat: Crowdstrapping Learning Tasks for Autonomous Driving, ICML '15 Workshop on Crowdsourcing and Machine Learning (2015).

■ 著者 / Author(s) ■



吉畑 友太
Yuta Yoshihata



古性 裕之
Hiroyuki Furushou

マルチポートコンバータの電力損失低減技術

Loss Reduction Technology for a Multi-port Converter

山上 滋 春*
Shigeharu Yamagami

抄 録 電動車のための低損失な電力変換用マルチポートコンバータを提案し、検証した。このマルチポートコンバータは、容易にポート休止ができ、休止ポートでのスイッチング損失がゼロという特徴を持つ。各ポート間で自由に電力変換をするための電力分配制御手法を確立し、試作回路を用いた実測で動作を確認した。本研究は米国バージニア工科大学と共同で行った。

Summary This article describes a low-loss multi-port converter for electric vehicles. The multi-port converter achieves port idling without any complex control procedure and zero switching loss at the idling port. A power flow distribution scheme is proposed. The effectiveness of the proposed scheme was verified by experimental results. This study was conducted jointly with Virginia Polytech Institute and State University in the United States.

Key words : Research & Development, Parts, Electric Equipment, Electronics, electric circuit, power electronics, multi-port converter

1. はじめに

将来の電動車では、さまざまなエネルギー源や負荷が車載されるため、それらの中で自由に電力を変換する技術が重要となる(図1)。通常は1方向の電力変換に対して1つのコンバータが必要なため、コンバータの数が増え、コストやサイズが増大してしまう。これに対し、1つのコンバータで複数のポートを持つマルチポートコンバータが提案されている¹⁾³⁾。図2に示すように、マルチポートコンバータによって複数のコンバータを一体化することができる。車載用マルチポートコンバータの場合、特定のポートへの電力変換を停止する必要がある。例えばメインバッテリーへの充電中に14Vバッテリーへ電力変換を停止する場合などである。従来のマルチポートコンバータでは、電力変換を行

1. Introduction

Future electric vehicles will be fitted with various types of power sources and loads, making it important to have the technology for converting power between them flexibly (Fig. 1). Ordinarily, because one converter is needed for power conversion in one direction, the number of converters required increases, resulting in higher costs and a larger system. To address this situation, a multi-port converter has been proposed that consists of one converter having multiple ports.¹⁾³⁾ As illustrated in Fig. 2, a multi-port converter serves to integrate multiple converters into one unit. In applying a multi-port converter to vehicles, it will be necessary at times to suspend power conversion to a specific port. For example, while charging the main battery, power conversion to the 14 V auxiliary battery will be suspended. One issue of conventional multi-

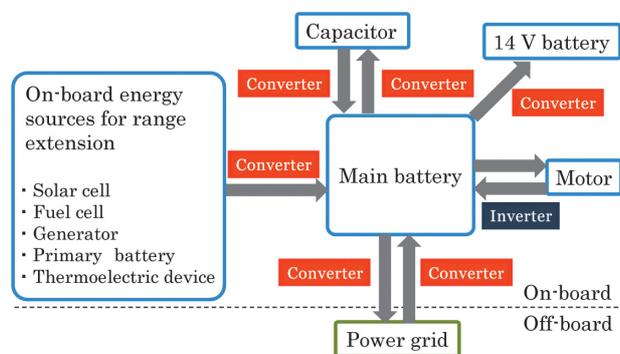


図-1 将来電動車における電力変換
Fig. 1 Power conversion in future electric vehicles

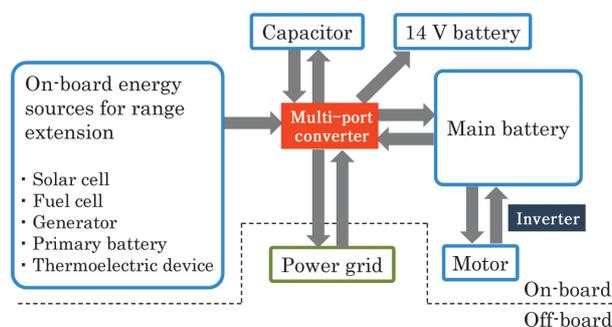


図-2 マルチポートコンバータによるコンバータの一体化
Fig. 2 Converter integration with a multi-port converter

*EVシステム研究所 / EV System Laboratory

わない休止ポートにおいて、トランジスタのスイッチング損失により電力損失が発生するという課題がある。休止ポート数が増えると、その分損失が増加し、全体効率が低下する。本稿では、休止ポートにおける電力損失を低減する新規マルチポートコンバータについて紹介する。

2. 共同研究内容紹介

2.1 従来型マルチポートコンバータ

図3に従来型マルチポートコンバータの回路図を示す。従来型のマルチポートコンバータは、各ポートが高周波トランスを介して電氣的に並列に接続されている。したがって図4(a)に示すように、休止したいポートのトランジスタを全てオフにしてもトランジスタに並列接続されたダイオードを介して休止ポートに電流が流れ込み、休止ポートの電力をゼロにできない。また図4(b)に示すように、上下どちらかのアームを定常オンにし $V_{SQ3}=0$ とした場合、ポート3のトランス巻線の電圧もゼロとなる。各ポートは高周波トランスを介して並列に接続されているため、他の巻線の電圧もゼロになってしまい、電力変換ができなくなる。従来型マルチポートコンバータでは、休止ポートのトランジスタを数十kHzの高周波でスイッチングし、電力収支をゼロにする Virtual isolation という手法が提案されており、1ポート休止時の最高効率は89%と報告されている³⁾。

2.2 新規マルチポートコンバータ

図5に新規マルチポートコンバータの回路図を示す。このマルチポートコンバータは、各ポートが高周波トランスを介して直列に接続されている点の特徴である。特定のポートを休止する場合、休止したいポートのフルブリッジ回路の上下どちらかのアームのトランジスタを定常オンにすることで、休止ポートの負荷もしくは電源への電流を遮断することができる。これにより、休止ポートは他のポートと電氣的に分離される。したがって休止ポートにおける複雑な制御が必要なく、スイッチング損失も原理的にゼロにすることができる。

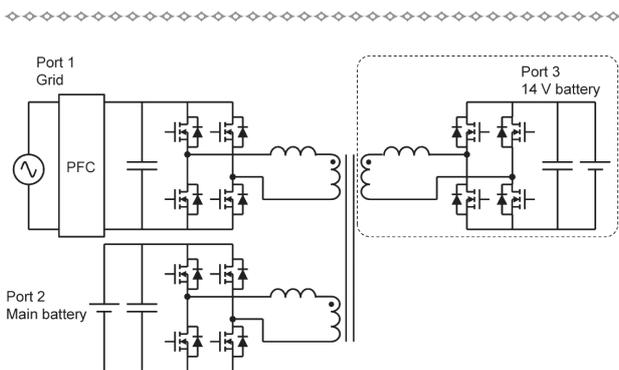


図-3 従来型マルチポートコンバータ回路
Fig. 3 Circuit diagram of a conventional multi-port converter

port converters is that transistor switching losses occur in an idling port where power conversion is suspended, resulting in power losses. As the number of idling ports increases, power losses increase to a corresponding extent, with the result that overall power efficiency declines. This article describes a new multi-port converter that reduces power losses in idling ports.

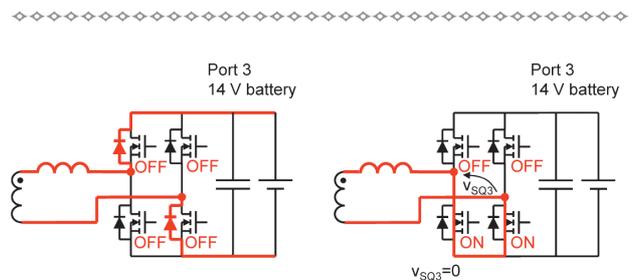
2. Details of Joint Research

2.1 Conventional multi-port converter

Figure 3 shows the circuit diagram of a conventional multi-port converter. Each port of this multi-port converter is electrically connected in parallel via a high-frequency transformer. Consequently, as shown in Fig. 4 (a), even if all the transistors of the port to be idled are turned off, current still flows into the port via the diodes connected in parallel to the transistors, making it impossible to reduce the power of the idling port to zero. In another case as shown in Fig. 4 (b), if the transistors of either the upper or lower arm are always turned On to produce $V_{SQ3} = 0$, the voltage of the transformer windings of port 3 also becomes zero. Because each port is electrically connected in parallel via a high-frequency transformer, the voltages of the other transformer windings also become zero, making power conversion impossible. For conventional multi-port converters, a virtual isolation method has been proposed to achieve a zero power balance by switching the transistors of an idling port at a high frequency of several tens of kHz. Maximum efficiency of 89% has been reported for operation with one idling port using this method.³⁾

2.2 New multi-port converter

Figure 5 shows the circuit diagram of the new multi-port converter. A distinctive feature of this multi-port converter is that each port is electrically connected in series via a high-frequency transformer. When a specific port is to be idled, the transistors of either the upper or lower arm of the full bridge circuit of that port are always turned On, making it possible to block the flow of current to the port load or to the power source. As a result, the idling port is electrically decoupled from the other ports. Consequently, no complex control procedure is needed for the idling port and it is also possible in principle to reduce



(a) 全トランジスタを定常オフ (b) 下アームトランジスタを定常オン
(a) All transistors are off (b) Low side transistors are on

図-4 従来型マルチポートコンバータのポート3の動作
Fig. 4 Operation of port 3 of a conventional multi-port converter

新規マルチポートコンバータの各ポート間で自由に電力を変換するために、新しい電力分配手法を構築した。図5のポート1に電源V₁、ポート2および3に負荷R₂、R₃を接続した場合について説明する。高周波トランスの巻数は図5に示す通りn_{2P}、n_{2S}、n_{3P}、n_{3S}である。各ポートのトランス巻線に印加される電圧V_{SQ1}(t)～V_{SQ3}(t)は図6に示す方形波となる。これらの方形波の導通角（デューティ比に相当）をα、β、γとする。方形波は一般的にさまざまな周波数成分を持つサイン波の重ね合わせと考えることができる。これらのサイン波のうち、基本波（V_{FC1}(t)）の周波数と図5のLC直列共振回路の共振周波数を一致させることで、基本波に対するLC直列共振回路のインピーダンスがほぼゼロになる。基本波以外の高調波はLC直列共振回路でフィルタリングされる。LC直列共振回路を含む閉ループにおいては、各ポートの基本波の重ね合わせがゼロになるという原理を用いて、各ポートの出力電圧が定式化可能となる。導出した導通角と出力電圧の関係式を以下に示す。

$$\sin \beta = \frac{R_3 V_2 V_1}{V_3^2 R_2 \cdot V_2^2 R_3} \frac{n_{2S}}{n_{2P}} \sin \alpha$$

$$\sin \gamma = \frac{R_2 V_3 V_1}{V_3^2 R_2 \cdot V_2^2 R_3} \frac{n_{3S}}{n_{3P}} \sin \alpha$$

2.3 実験結果

原理確認用の数百Wクラスの新規マルチポートコンバータを試作した（図7）。試作回路においては、ポート1

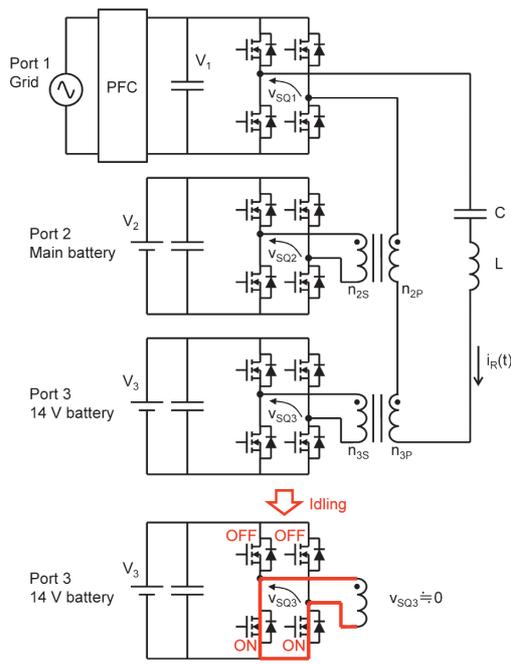


図-5 新規マルチポートコンバータ回路
Fig. 5 Circuit diagram of proposed multi-port converter

the switching losses there to zero.

A new power distribution method was developed to facilitate flexible power conversion between the ports of the new multi-port converter. Figure 5 explains this method for an example where the power supply V₁ is connected to port 1 and loads R₂ and R₃ are connected to ports 2 and 3. As indicated in the figure, the number of turns of the high-frequency transformer is denoted as n_{2P}, n_{2S}, n_{3P} and n_{3S}. The square waves of the voltages V_{SQ1}(t) to V_{SQ3}(t) applied to the transformer windings of each port are shown in Fig. 6. The conduction angles (corresponding to the duty ratio) of these square waves are denoted as α, β and γ. Square waves can generally be considered as the superposition of sine waves having various frequency components. The frequency of the fundamental wave (V_{FC1}(t)) of these sine waves is made to coincide with the resonant frequency of the LC series resonant circuit in Fig. 5. That reduces the impedance of the LC series resonant circuit to nearly zero relative to the fundamental wave. Other than the fundamental wave, the high harmonics are filtered out by the LC series resonant circuit. The output voltage of each port can be formulated using the principle that the superposition of the fundamental wave of each port becomes zero in the closed loop containing the LC series resonant circuit. The equations derived for the relationship between the conduction angle and output voltage are shown below.

$$\sin \beta = \frac{R_3 V_2 V_1}{V_3^2 R_2 \cdot V_2^2 R_3} \frac{n_{2S}}{n_{2P}} \sin \alpha$$

$$\sin \gamma = \frac{R_2 V_3 V_1}{V_3^2 R_2 \cdot V_2^2 R_3} \frac{n_{3S}}{n_{3P}} \sin \alpha$$

2.3 Experimental results

A several-hundred-watt-class prototype of the proposed multi-port converter was fabricated to verify its operating principle (Fig. 7). In the prototype circuit, ports 1 to 3 were mutually isolated using high-frequency transformers. The resonant frequency of the resonant circuit and the switching frequency of the full bridge

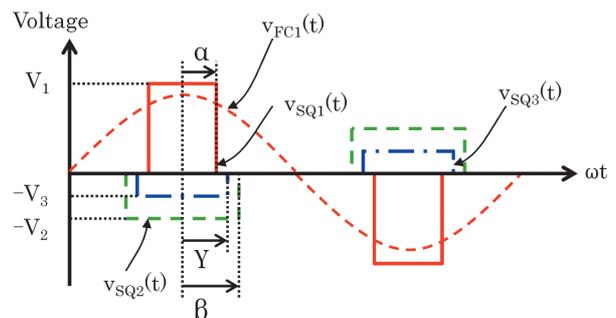


図-6 各ポートのトランス巻線部の電圧波形
(V_{SQ1}(t)～V_{SQ3}(t) および V_{SQ1}(t) の基本波成分 V_{FC1}(t))
Fig. 6 Voltage waveforms of transformer windings at each port

～3は高周波トランスを用いて互いに絶縁されている。共振回路の共振周波数およびフルブリッジ回路のスイッチング周波数は共に85kHzである。ポート1が電源、ポート2および3が負荷に接続されている。図8に入力電圧 $V_1 = 50V$ 、各ポートのデューティ比がDuty 1 = Duty 2 = Duty 3 = 1の場合の実測波形を示す。方形の電圧波形が確認でき、さらに $V_{SQ1}(t)$ の基本波成分によるサイン波の電流波形も確認できる。次に、例としてDuty 3を変化させた場合の出力電圧値の計算値と実測値の比較を図9に示す。実測した出力波形が、解析式によって求められた計算値とよく一致していることが分かる。本実験ではフィードバック制御を行っていないが、実際の出力電圧をフィードバックしてデューティ比を制御することで、所望の出力電圧を得ることができる。3ポート動作時の実測最高効率率は95%であった。

次にポート3を休止し、ポート1を電源、ポート2を負荷に接続した場合の動作の実測結果を図10に示す。この動作モードでは、ポート3の下アームの2つのトランジスタを定常オン、上アームの2つのトランジスタを定常オフにして測定した。この動作モードにより任意のポートを複雑な制御無しに休止することができ、休止ポートのスイッチング損失ゼロを実現できることを確認した。その結果、

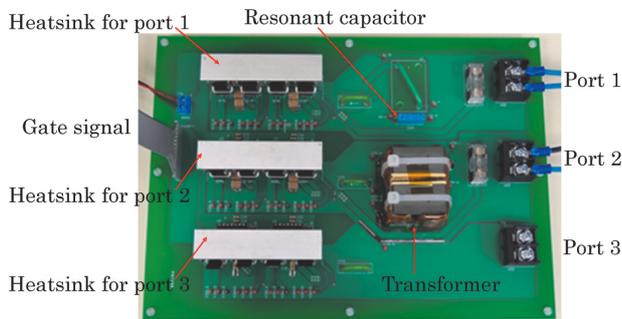


図-7 試作した原理確認用新規マルチポートコンバータ
Fig. 7 Prototype of proposed multi-port converter

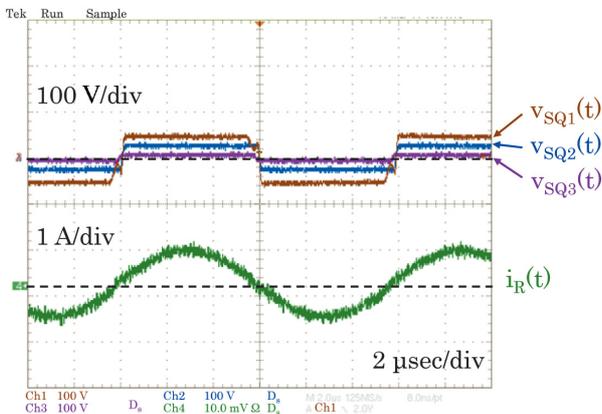


図-8 試作回路による3ポート動作時の実測波形
Fig. 8 Measured waveforms under 3-port operation

circuit were both set at 85 kHz. Port 1 was connected to the power supply and ports 2 and 3 to loads. Figure 8 shows the waveforms that were measured for an input voltage V_1 of 50 V and a duty ratio for each port of Duty 1 = Duty 2 = Duty 3 = 1. Square waveforms were confirmed for the voltages applied to the transformer windings of each port, and the current waveform of the sine wave due to the fundamental wave component of $V_{SQ1}(t)$ was also confirmed. As one example, Fig. 9 shows a comparison of the calculated and measured output voltages when Duty 3 was varied. The results indicate that the measured output waveforms coincided well with the calculated values obtained with an analytical equation. Feedback control was not applied in this experiment. If the duty ratio was controlled by feeding back the actual output voltage, the desired output voltage could be obtained. The maximum measured efficiency under 3-port operation was 95%.

In the next experiment, port 3 was idled and port 1 was connected to the power supply and port 2 to the load. The measured results obtained for 2-port operation under this condition are presented in Fig. 10. In this 2-port operating mode, the two transistors of the lower arm of port 3 were always turned On and the two transistors of

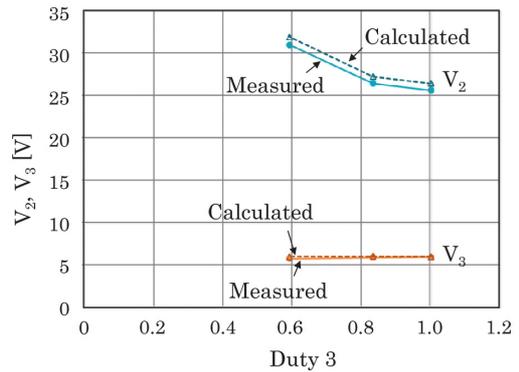


図-9 3ポート動作時の出力電圧のデューティ比依存性比較
Fig. 9 Measured and calculated output voltage dependence on duty ratio under 3-port operation

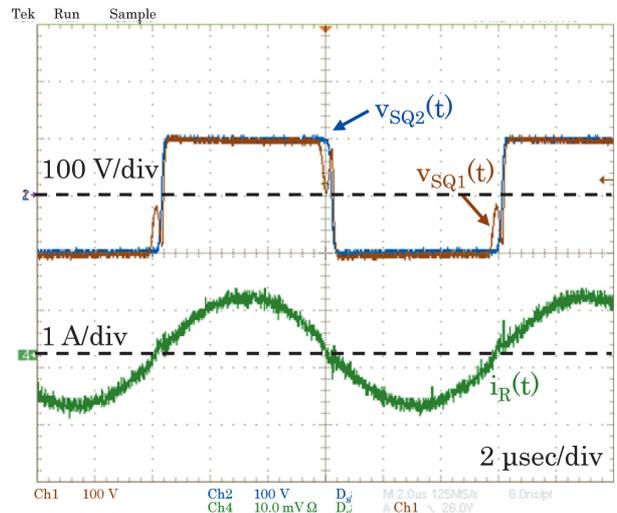


図-10 2ポート動作時の実測波形
Fig. 10 Measured waveforms under 2-port operation

ポート3休止時の実測最高効率 94% と、高い効率を得られた。

3. ま と め

車載用マルチポートコンバータにおいて重要となる、ポートの休止に着目した新規マルチポートコンバータ回路を提案した。各ポート間で自由に電力を変換するために、新しい電力分配制御手法を確立し、試作機により手法の妥当性を確認した。また休止ポートのスイッチング損失ゼロ化を実現した。

4. 謝 辞

共同研究において多数の助言をいただいたバージニア工科大学のProfessor Khai D. T. Ngoに深く感謝申し上げます。また留学期間中、有益な議論をさせていただいたCPES*の皆様に感謝申し上げます。

(*CPES: Center for Power Electronics and Systemsは1998年に設立された世界有数のパワーエレクトロニクス研究コンソーシアムで、これまでに3,000以上の論文を発表し、280名以上の修士、博士を輩出している。5大学、70以上の企業から成り、産業界との結びつきが強い。)

参 考 文 献

- 1) C. Zhao et al.: An isolated three-port bidirectional DC-DC converter with decoupled power flow management, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 5, pp. 2443-2453 (2008).
- 2) S. Y. Kim et al.: Three-port full bridge converter application as a combined charger for PHEVs, Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf., pp. 461-465 (2009).
- 3) S. Y. Kim et al.: Idling Port Isolation Control of Three-Port Bidirectional Converter for EVs, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 5, pp. 2495-2506 (2012).

the upper arm were always turned Off. This operating mode allowed either of the ports to be idled as desired without using any complex control procedure. It was confirmed that zero switching losses were attained for the idling port. As a result, the maximum efficiency measured when port 3 was idled was a high 94% .

3. Conclusion

This article has proposed a new multi-port converter circuit that focuses on rendering a specific port idle, which is an important factor for vehicle application of a multi-port converter. A new power distribution method was established for flexible power conversion between each of the ports. A prototype of the proposed multi-port converter was built and the validity of this method was verified. A condition of zero switching losses at the idling port was also attained.

4. Acknowledgments

The author would like to express his deep appreciation to Professor Khai D. T. Ngo for his valuable advice regarding this joint research. Thanks are also due other faculty members, researchers and students at the Center for Power Electronics Systems (CPES) at Virginia Polytechnic and State University for their many useful discussions during the author's stay there. Established in 1998, CPES is one of the world's leading power electronics research consortiums. To date, it has graduated over 280 researchers with master's or doctoral degrees and has published over 3,000 papers. CPES comprises five partner universities and over 70 industrial firms and has strong ties with industry.

References

- 1) C. Zhao et al., An isolated three-port bidirectional DC-DC converter with decoupled power flow management, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 5, pp. 2443-2453 (2008).
- 2) S. Y. Kim et al., Three-port full bridge converter application as a combined charger for PHEVs, Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf., pp. 461-465 (2009).
- 3) S. Y. Kim et al., Idling Port Isolation Control of Three-Port Bidirectional Converter for EVs, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 5, pp. 2495-2506 (2012).

■ 著者 / Author(s) ■



山 上 滋 春
Shigeharu Yamagami

可変磁力モータの研究

A Study on Variable Magnetic Flux Machines

福重孝志*
Takashi Fukushige

加藤 崇**
Takashi Katou

佐々木 健介**
Kensuke Sasaki

抄 録 強め界磁可変磁力モータの原理確認機を用い、着磁/脱磁性能、トルク特性、トルク発生時の磁石減磁を実験評価し、各着磁量における効率マップを測定した。また、改良された鉄芯形状を適用したフルスケール機を設計し、FEAを用いて効率マップを作成した。電気自動車搭載時のモード走行損失を計算し提案モータの損失低減効果を確認した。本研究は米国ウイスコンシン大学と共同で行った。

Summary A proof-of-principle prototype of a VFI-IPM (variable-flux flux-intensifying interior permanent magnet) machine is fabricated. A series of experiments is conducted to evaluate the magnetization and demagnetization characteristics, torque characteristics and demagnetization caused by load current. Efficiency contours are also acquired. A full-scale machine is then designed with an improved magnetic circuit for application to an electric vehicle and evaluated using finite element analysis. The losses during a driving cycle are evaluated. The study was conducted jointly with University of Wisconsin-Madison in the United States.

Key words : Research & Development, permanent magnet synchronous machine, variable speed, variable flux machine, efficiency, VFI-IPM, flux intensifying machine, variable magnetization machine, memory motor

1. はじめに

近年、走行中にCO₂などの排出ガスを一切出さない電気自動車や環境への負荷が少ないハイブリッド車が注目され、自動車メーカー各社から販売されている。これらの電動化した自動車の原動機には、小型化および高効率化の観点から永久磁石モータが用いられることが多い。電費/燃費向上のため、モータのさらなる効率向上が望まれる。

永久磁石モータでは、高回転運転領域において、永久磁石磁束の変動により発生する鉄損や、磁石磁束による逆起電力を抑制するための弱め界磁電流に伴う銅損が大きくなる。このことは言い換えると、高回転時には永久磁石の磁力が強すぎることで、損失が増大しているということである。永久磁石の磁力を、低回転では大トルクが発生可能なように大きくし、高回転になった時は小さく変化させることができれば、モータの損失を低減し、さらなる高効率化が可能となる。

磁石の磁力に可変特性を持たせたモータが、複数例報告されている¹⁾²⁾。例えば、図1に示す通り、メモリーモータと呼ばれるモータが提案されている¹⁾。通常の永久磁石モータでは、ロータに高保磁力のネオジウム磁石が用いられるが、メモリーモータでは低保磁力のアルニコ (AlNiCo) 磁石が用いられている。低保磁力磁石は、ステータ巻線に印加するパルス電流によって着磁/脱磁、すなわち磁力

1. Introduction

Vehicle manufacturers began selling electric vehicles (EVs) and hybrid vehicles in recent years because these vehicles have attracted considerable interest on account of zero-emission and their low environmental impact, respectively. The prime mover used on these electrified vehicles is often a permanent magnet (PM) machine from the standpoints of compactness and high efficiency. For the purpose of improving electrical energy/fuel efficiency, it is desired to improve machine efficiency further.

In the high speed operating region, PM machines suffer larger iron and copper losses, the former due to fluctuation of PM flux and the latter to the field weakening current applied to inhibit the back electromotive force produced by magnetic flux. Put differently, losses increase in high speed operation because the magnetomotive force of the permanent magnets is too strong. If the magnetomotive force of the magnets could be varied such that it is increased at low speeds to facilitate the generation of large torque and reduced after reaching high speeds, machine losses would decrease, leading to even higher efficiency.

A number of examples have been reported of machines having variable magnetomotive force characteristics.¹⁾⁻²⁾ For example, the memory motor shown in Fig. 1 is one example of such a machine.¹⁾ Ordinarily, neodymium magnets having high coercive force are used for the rotor of PM machines, but the memory motor uses low-coercive-

*モビリティ・サービス研究所 / Mobility Services Laboratory **EVシステム研究所 / EV System Laboratory

を変化させることが可能である。高回転の運転領域において磁石磁力を低下させることで、先に述べた課題の解決が期待できる。

また、メモリーモータでは追加要素が必要なく、磁石の着磁／脱磁には通常のもータにも存在するステータ巻線に電流パルスを印加するだけで実現可能であり、サイズやコストの面でのデメリットが少ない。

しかしながら、メモリーモータの磁石配置では、磁石端部がステータ電流による電機子反作用の影響を受けやすいため、大トルク発生時に磁石端部において減磁（磁力を保持できず、弱まってしまうこと）が発生し、結果として所望のトルクを発生させることが困難となっている。

以上の課題を解決すべく、著者らは可変磁力強め界磁（VFI-IPM: variable-flux flux-intensifying interior permanent magnet）モータを提案している³⁾⁻⁵⁾。このコンセプトにおけるモータは、低保磁力磁石を用い、かつロータ鉄芯に特殊な形状を採用している。この特殊な形状により、大トルク発生時においても磁石端部における磁力を保持し、所望のトルクを発生させることを可能としている。また、メモリーモータと同様、追加要素が必要ないため、サイズやコストの面でのデメリットが少ない。

本稿では、VFI-IPMモータの原理確認機を試作・実験評価し、続いて電気自動車適用を想定した出力特性を有するVFI-IPMモータのフルスケール機を設計し有限要素解析（FEA: finite element analysis）により特性を評価した結果を報告する。

2. 共同研究内容紹介

2.1 可変磁力強め界磁（VFI-IPM）モータの原理と仕様

VFI-IPMモータではロータ鉄芯に特殊な形状を採用することで、突極性というモータ特性を表すパラメータが正の値になっている⁶⁾。正の突極性を持つと、磁石の磁力を強めるステータ電流を流した場合に、トルクが大きくなるという性質がある。一方で、磁石を強めるステータ電流を

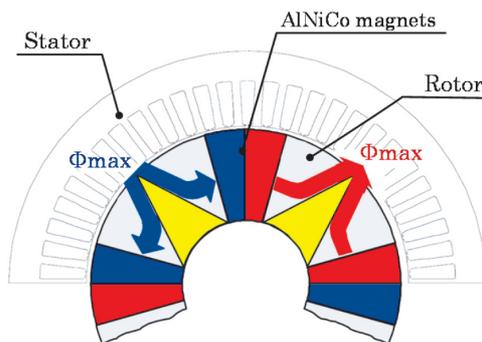


図-1 メモリーモータの形状
Fig. 1 Geometry of memory motor

force aluminum-nickel-cobalt (AlNiCo) magnets for the rotor. Low-coercive-force magnets can be magnetized/demagnetized by the pulse current applied to the stator windings, which means their magnetomotive force is variable. It is expected that the machine loss issue can be resolved by reducing the magnetomotive force of the magnets in the high speed operating region.

Moreover, the memory motor does not require any additional elements; the magnets can be magnetized/demagnetized by simply applying a pulse current to the stator windings that are present in all ordinary machines. Consequently, it has few disadvantages with respect to size and cost.

However, with the magnet layout of the memory motor, the edges of the magnets tend to be influenced by the armature reaction due to the stator current. Consequently, when large torque needs to be generated, the edges of the magnets can be demagnetized, i.e., cannot retain their magnetomotive force and become weaker, making it difficult to produce the desired torque.

To resolve this issue, the authors have proposed a variable-flux, flux intensifying interior permanent magnet (VFI-IPM) machine.³⁾⁻⁵⁾ The concept of this machine uses low-coercive-force magnets and also the rotor iron core is designed with a special geometry. This special geometry enables the edges of the magnets to retain their magnetomotive force when large torque is generated, thus making it possible to produce the desired level of torque. Moreover, like the memory motor, it does not require any additional elements, so there are few disadvantages with regard to size or cost.

This article describes the fabrication and evaluation tests of a proof-of-principle (PoP) prototype of the VFI-IPM machine. It then describes the design of a full-scale VFI-IPM machine possessing output characteristics envisioned for EV application and presents the results of an evaluation of the machine characteristics by finite element analysis (FEA).

2. Details of Joint Research

2.1 Principle and specifications of VFI-IPM machine

Because a special geometry is adopted for the rotor iron core of the VFI-IPM machine, the saliency, one of parameters expressing the machine characteristics, takes a positive value.⁶⁾ Possessing positive saliency gives the machine the characteristic that torque increases when stator current is applied to intensify the magnetomotive force of the magnets. At the same time, the magnetomotive force at the edges of the magnets tends not to weaken. In other words, positive saliency enables to keep having large torque still maintaining the magnets their magnetomotive force.

Saliency is usually negative with the geometry of the rotor iron core of machines in general. With a rotor having negative saliency, iron cores can be positioned in the space that exists between the magnets having opposite polarity.

流していれば、磁石端部の磁力は弱まりづらい。すなわち、大トルクを発生させることと、磁石の磁力を保つことが両立可能となる。

一般的なモータのロータ鉄芯形状では、突極性は負となっている。負の突極性を持つロータ鉄芯形状では、極性の異なる磁石間に存在するスペースに電磁コアを配置することで、省スペースながら大きなリラクタンストルクを得られることから、モータの小型化には適している。しかしながら負の突極性を持つ場合では、大トルクを発生させることと、磁石の磁力を保つことはトレードオフであるため、1章で述べたような課題が存在していた。

VFI-IPMモータの原理確認機の磁気回路構成部の形状を図2に示す。VFI-IPMモータでは低保磁力のサマリウムコバルト (SmCo) 磁石を用いている。低保磁力磁石は、ステータ巻線に印加するパルス電流によって着磁/脱磁、すなわち磁石の着磁量 (MS : magnetization state) を変化させることが可能である。高回転の運転領域において着磁量を低下させることで、高回転領域での損失を低減させる。最大トルクは21.6Nm、最高出力は4.8kWである。磁石にはサマリウムコバルト系の低保磁力磁石の新規開発品を用いた。正の突極比を有し、最大トルク時に電流が磁石を強める状態となるようなロータ鉄芯形状となっている。このため、最大トルクを発生させても、磁石は減磁しない設計である。

2.2 試作機の着磁特性

試作した原理確認機での着磁特性を、実験により確認した。巻線部の9箇所および磁石部の4箇所に貼りつけた熱電対により温度をモニタリングし、各部分が20~40℃の範囲に収まるよう、以下すべての実験を行っている。ダイナモを用いて300 min⁻¹ (電気周波数15 Hz相当) で、モ-

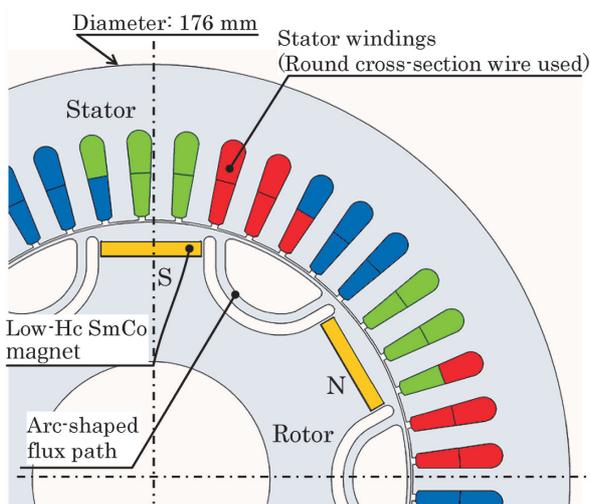


図-2 設計した VFI-IPM モータ原理確認機の形状
Fig. 2 Geometry of designed proof-of-principle VFI-IPM machine

Thus, large reluctance torque can be obtained while at the same time saving space, making negative saliency suitable for machine downsizing. However, when a machine has negative saliency, there is a trade-off between the generation of large torque and the retention of the magnetomotive force of the magnets. Consequently, such a machine has the issue described in the preceding section.

Figure 2 shows the geometry of the magnetic circuit of the PoP prototype of the VFI-IPM machine. The VFI-IPM machine uses low-coercive-force samarium-cobalt (SmCo) magnets. Magnets with low-coercive-force are magnetized/demagnetized by the pulse current applied to the stator windings, which means the magnetization state (MS) of the magnets can be varied. Reducing the MS in the high operating speed range works to reduce machine losses at high speed. The prototype machine produces maximum torque of 21.6 Nm and maximum power of 4.8 kW. The machine has the geometry of the rotor iron core with positive saliency, which enables the current applied at the time of maximum torque generation to intensify the MS of the magnets. Consequently, the machine is designed such that the magnets do not demagnetize even when the maximum torque is generated.

2.2 Magnetization characteristics of prototype VFI-IPM machine

The magnetization characteristics of the PoP prototype machine were confirmed experimentally. In the experiments, the machine temperature was monitored with thirteen thermocouples attached on the windings and the magnets. All the experiments described below were conducted such that the temperature of the windings and magnets stayed in a range of 20-40°C. The machine was operated at a speed of 300 min⁻¹ (equivalent to an electrical frequency of 15 Hz) using a dynamometer.

First, a negative current pulse was applied to the stator windings to demagnetize the magnets and create a nonmagnetized state. Then, after magnetization was increased again by applying a positive current pulse, the no-load back electromotive force was measured in order to calculate the no-load flux linkage. Because of the relationship between the no-load flux linkage and the MS of the magnets, i.e., because the MS has nearly a proportional relationship, it was possible to confirm the MS. The magnetizing current pulse had a trapezoidal waveform and the overall pulse period was 500 milliseconds.

The graph in Fig. 3(a) shows the no-load flux linkage that was obtained as a function of the current pulse amplitude. It is seen that MS saturated when the current pulse amplitude was 2.7 times greater than the current rating of the machine. Accordingly, that magnetization state was defined as 100% MS. Similarly, Fig. 3(b) shows the demagnetization characteristics obtained as a function of the negative current pulse amplitude. Complete demagnetization was possible when the pulse amplitude was more than 0.6 times greater than the current rating of

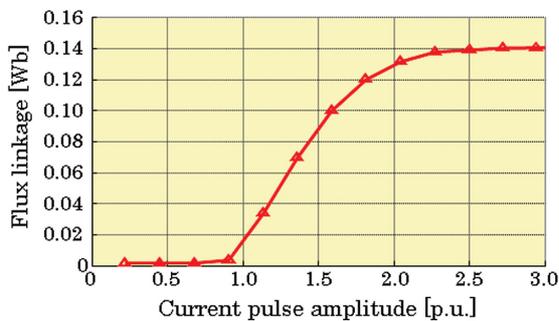
タを回転させる。

まず、ステータ巻線に負の電流パルスを印加することで磁石を脱磁し、無着磁状態とする。その後、正の電流パルスを印加して増磁した後、無負荷誘起電圧を計測することで無負荷鎖交磁束を算出する。無負荷鎖交磁束と磁石の着磁量、すなわち磁力はほぼ比例関係にあるため、磁石がどの程度着磁できたかを確認することができる。着磁電流パルスには台形状の波形を用いており、全体の幅を500ミリ秒とした。

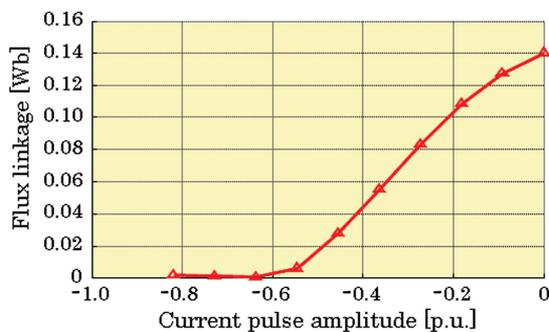
図3(a)は電流パルスの振幅を変えた場合に得られる無負荷鎖交磁束のグラフである。電流パルスの振幅がモータ定格電流値の2.7倍以上で着磁量は飽和するため、この着磁量を100% MSと定義する。同様に、図3(b)は負の電流パルスの振幅を変えた場合に得られる脱磁の特性である。定格電流値の0.6倍以上で、完全な脱磁が可能であった。

2.3 試作機のトルク特性

トルクと電気進角の関係を実験により確認した。まず、2.2節に記載の方法にて、100% MSまで着磁する。続いて、ある電気進角で最大電流を印加しトルクを発生させ、その後、無負荷時における誘起電圧から再度着磁量を測定する。図4に示すトルク（赤線）と着磁量（青線）である。



(a) 着磁特性
(a) Magnetization characteristics



(b) 脱磁特性
(b) Demagnetization characteristics

図-3 着磁/脱磁特性の測定実験結果
Fig. 3 Experimentally obtained magnetization and demagnetization characteristics

the machine.

2.3 Torque characteristics of prototype VFI-IPM machine

The relationship between machine torque and the electric lead angle was confirmed experimentally. First, using the method described in the preceding section, the magnets were magnetized to 100% MS. Then, the maximum current was applied at a certain electric lead angle to produce torque, after which magnetization was again measured from the back electromotive force at the no-load condition. Figure 4 shows the machine torque (red curve) and MS (blue curve) as a function of the electric lead angle. The results indicate that 100% MS was maintained during field intensifying control (when the electric lead angle was negative). It is also seen that 97% MS was maintained even under the condition of maximum torque. These results thus confirmed that the issue described in section 2.1 of maintaining the MS of the magnets under load was resolved.

2.4 Efficiency maps of prototype VFI-IPM machine

Figure 5 presents efficiency maps of the prototype machine that were obtained experimentally for three different MSs (100%, 75% and 50%). The machine was able to display its maximum torque at 100% MS. As the MS was reduced, the torque characteristic at high operating speeds tended to improve.

Figure 6(a) presents an efficiency map that was created by selecting the MS yielding the highest efficiency at each operating speed in the three efficiency maps in Fig. 5. The results indicate that the region of high efficiency was expanded, though the maximum efficiency value did not change from that seen for 100% MS in Fig. 5(a). The map in Fig. 6(b) shows which MS in Fig. 6(a) was selected. It is seen that a lower MS was selected at higher operating speeds.

2.5 Improvements made to full-scale VFI-IPM machine

A full-scale VFI-IPM machine was then designed with

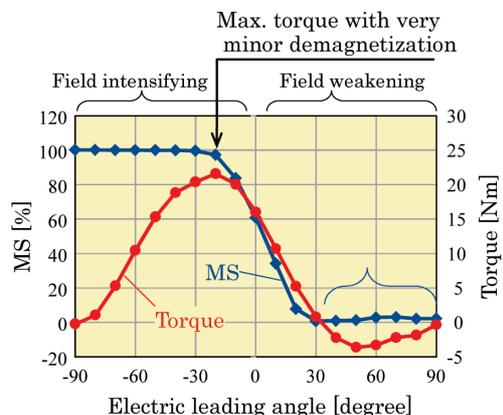
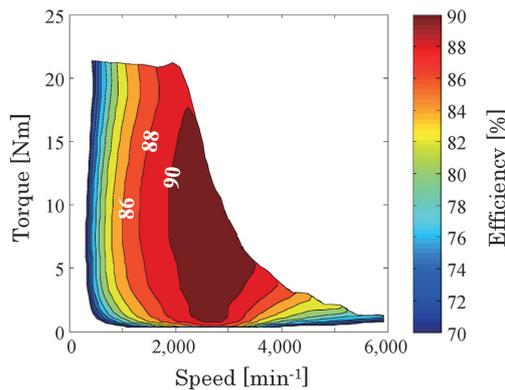


図-4 電気進角量に対するトルクおよび着磁量の変化
Fig. 4 Torque and MS change versus electric lead angle

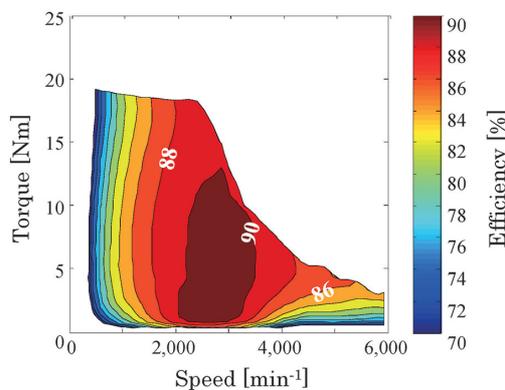
この図より、100% MSは強め界磁時（負の電気進角時）にて維持可能であり、最大トルク条件においても97% MSを保持可能であることがわかる。このことは2.1節で述べた、負荷時の磁石着磁量を保つという課題を解決できていることを示している。

2.4 試作機の効率マップ

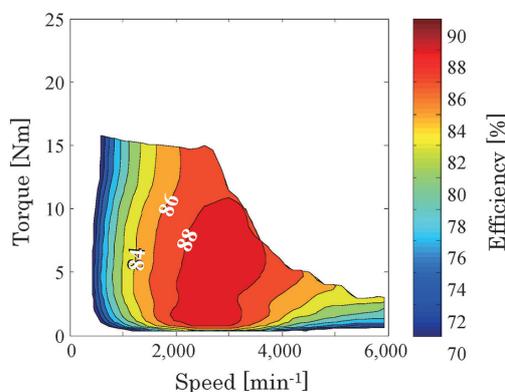
実験により取得した、各着磁量における効率マップを図5に示す。100% MSにおいて、最大のトルクが発揮可能で



(a) at 100% MS



(b) at 75% MS



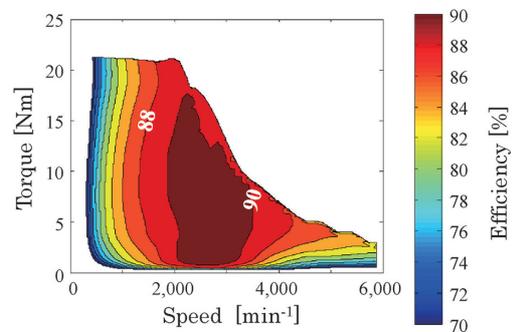
(c) at 50% MS

図-5 試作した原理確認機の効率測定実験結果
Fig. 5 Experimentally obtained efficiency maps of fabricated VFI-IPM machine

output characteristics envisioned for EV application and the machine characteristics were evaluated by FEA. The full-scale machine generates maximum torque of 280 Nm and maximum power of 90 kW. Based on the test results for the PoP prototype, improvements were made to the magnetic circuit of the full-scale machine. With the prototype machine, the amount of current needed for magnetization was 2.7 times greater than the machine's current rating. That could give rise to an issue that the electrical load of the machine drive system increased at the time of magnetization. To prevent this, the magnetic circuit and winding method were changed as shown in Fig. 7. The specific details of the changes are explained below.

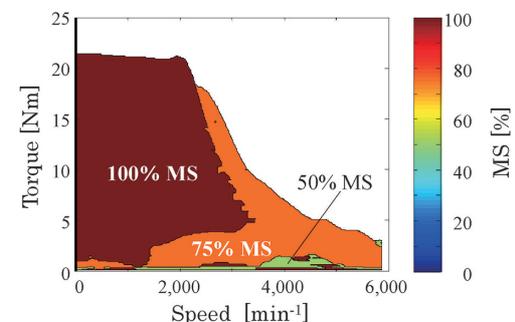
(a) Omitting arc-shaped flux paths

As shown in Fig. 2, arc-shaped flux paths were provided at the rotor of the PoP prototype to give the machine positive saliency. However, these flux paths had the effect of increasing the flux produced by the stator pulse current during magnetization, which caused significant magnetic saturation of the stator iron core. The flux paths were omitted for the full-scale machine, thereby mitigating the magnetic saturation during magnetization and reducing the current needed for magnetization by around 40%. While this change reduced saliency, a positive value was still maintained, thus making it possible both to produce large torque and to maintain the magnetomotive force of the magnets.



(a) 効率マップ

(a) Efficiency contours with optimum MS



(b) 選択された着磁量のマップ

(b) Selected MS

図-6 最適着磁量選択時の効率マップおよび着磁量マップ
Fig. 6 Efficiency and corresponding magnetization state maps of VFI-IPM machine under optimal operating efficiency

あり、着磁量を低減するに従い、高回転でのトルク特性が向上していく傾向が見られた。

図6(a)は、図5に示す3つの効率マップの、各動作点において最も効率が高くなる着磁量を選定した場合の効率マップである。最高効率こそ100% MS (図5(a))と変わりはないものの、高効率である領域が広がっていることがわかる。図6(b)は、図6(a)において、どの着磁量が選定されたかを示しているマップである。より高回転になるに従い、低い着磁量が選定されていることがわかる。

2.5 フルスケール機の改善点

続いて、電気自動車適用を想定した出力特性を有するVFI-IPMモータのフルスケール機を設計し、FEAにより特性を評価した。最大トルクは280Nm、最高出力は90kWである。原理確認機の実験結果を受け、フルスケール機では磁気回路に改善を加える。原理確認機では、着磁に必要な電流量は、モータの定格電流の2.7倍が必要であったため、着磁時にはモータドライブシステムの電氣的負荷が高まってしまうという課題があった。フルスケール機では図7に示す通り、磁気回路と巻線手法を変更している。具体的には、下記の通りである。

(a) 弧状磁束通路の廃止

原理確認機では、正の突極性を持たせるため、図2に示す通りロータに弧状の磁束通路を配置していた。しかし、この磁束通路の影響で、着磁時のステータパルス電流により発生する磁束が増大し、固定子鉄芯の磁気飽和が顕著となっていた。フルスケール機では、この磁束通路を廃止することで、着磁時の磁気飽和が軽減でき、着磁に必要な電流を40%程度低下させている。この変更により、突極性は減少するものの、正の値を保っており、大トルクを発生させることと、磁石の磁力を保つことが両立可能となっている。

(b) 巻線手法の変更

巻線手法を、従来のインサータを用いた丸線・乱巻から、角線・整列巻へと変更する。これにより巻線占積率を向上することができ、ステータが発生可能な最大の起磁力が60%程度増大し、定格電流以内での着磁を可能とする。

2.6 フルスケール機のFEA結果

図8は、設計したフルスケール機のFEAにより得られた、20℃における効率マップである。鉄損の計算には各要素での周波数分析を行い、スタインメッツの実験式を適用することで算出している。機械損については考慮していない。

着磁量は100%、75%、50%の中から損失が最小となるものを選んでいる。原理確認機での実験結果の傾向と同様、高回転側で低い着磁量が選定されている。

(b) Change of winding method

The winding method was changed from the previous random windings with round cross-section wires to bar windings. This change improved the slot fill factor of the windings and increased the maximum magnetomotive force producible by the stator by around 60%, thereby enabling magnetization within the machine's current rating.

2.6 FEA results for full-scale VFI-IPM machine

Figure 8 presents an efficiency map that was obtained by FEA for the designed full-scale VFI-IPM machine at 20°C. A frequency analysis was conducted for each element and Steinmetz's equation was applied to calculate the iron loss. Mechanical losses were not considered in the calculation.

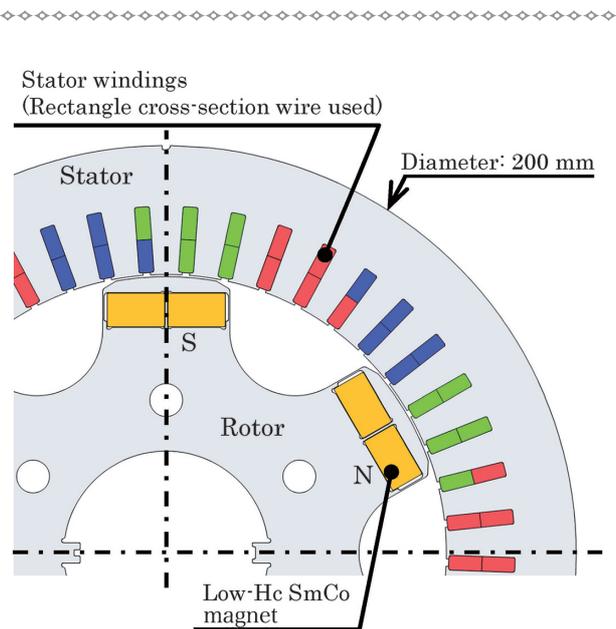


図-7 フルスケール VFI-IPM モータの形状
Fig. 7 Geometry of designed full-scale VFI-IPM machine

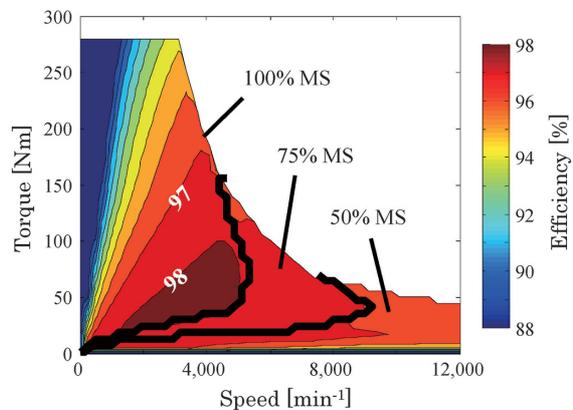


図-8 フルスケール VFI-IPM モータの FEA により得られた効率マップ
Fig. 8 Efficiency contours of designed full-scale VFI-IPM machine obtained with FEA

2.7 モード電費の計算と比較

次に、フルスケール機のFEAにより得られた効率マップを用いて、モード走行時の電力消費および効率を評価する。走行モードはFederal Test Procedureの Los Angeles Route Four (LA-4) モードとした。このモードを走行時のモータの動作点は、典型的な電気自動車のパラメータを仮定し計算した。機械ブレーキは使用せず、すべて回生ブレーキを行うものと仮定している。また、バッテリーについては、電流値によらず、一定電圧を出力可能なものと仮定した。着磁電流パルスの幅は、原理確認機で動作可能であった最小幅の50ミリ秒とした。

図9に、トルク、回転数、着磁量の時間波形を示す。着磁量については、モータ損失が小さくなるよう、好適な値をモータ運転状態に応じて変化させている。

図10に、モード走行におけるモータ損失の比較を示す。左に示す棒グラフは、同様のトルク・出力特性を持つ一般的な永久磁石モータのモード損失である。右の棒グラフは、VFI-IPMモータでのモード損失であり、トータルの損失が39%低減できることがわかった。

Of the three MSs of 100%, 75% and 50%, the MS value achieving the lowest machine losses was selected. Similar to the test results for the PoP prototype, it is observed that a lower MS was selected on the high speed side.

2.7 Calculation and comparison of electrical energy consumption under driving cycle operation

Using the efficiency maps obtained by FEA for the full-scale VFI-IPM machine, an evaluation was then made of the electrical energy consumption and efficiency under driving cycle operation. The Los Angeles Route Four (LA-4) driving cycle of the Federal Test Procedure was selected. The operating points of the machine during this driving cycle were calculated assuming typical EV operating parameters. It was assumed that regenerative braking was always applied without using a mechanical braking system. It was also assumed that the battery was capable of providing a certain constant voltage output that did not depend on the current value. The amplitude of the magnetizing current pulse was set at an amplitude of 50 milliseconds, which had been able to facilitate operation of the PoP prototype.

Figure 9 shows profiles of the torque, speed and magnetization. The MS is consistently changed to a suitable level that can reduce machine losses.

Figure 10 compares the total energy losses of the full-scale VFI-IPM machine and a conventional PM machine during operation under the LA-4 driving cycle. The left-hand bar graph indicates the energy loss of a conventional PM machine having the same torque and power output characteristics. The right-hand bar graph shows the energy loss of the VFI-IPM machine. The results show that the latter reduces the total energy loss by 39% compared with the former.

3. Conclusion

This article has described the fabrication and evaluation tests of a proof-of-principle prototype of a variable-flux, flux intensifying interior permanent magnet

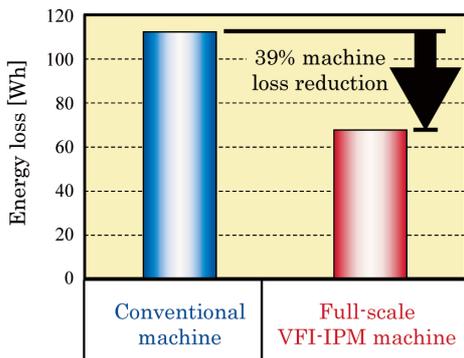


図-10 LA-4 モード走行時にモータで発生する損失
Fig. 10 Total energy loss in a machine comparison under LA-4 driving cycle operation

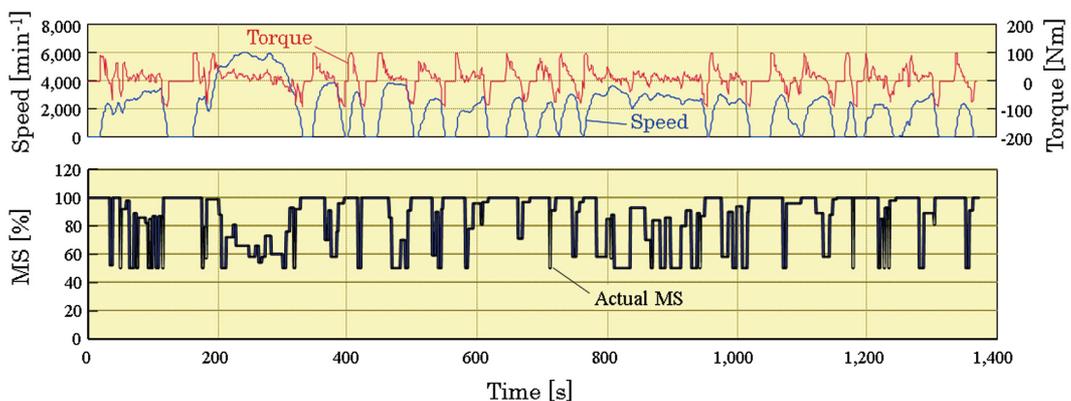


図-9 LA-4 モード走行パターン時のトルク、回転数、着磁量の時間波形
Fig. 9 Waveforms for torque, speed and magnetization state under the LA-4 driving cycle

3. ま と め

本稿では、可変磁力強め界磁（VFI-IPM）モータの原理確認機を試作・実験評価し、着減磁が可能で、最大トルク発生時にも磁石が減磁しないことを確認した。各着磁量における効率マップを取得し、高回転領域では着磁量を下げることによって効率を向上できることを確認した。

また、着磁特性を改善した、フルスケール機を設計し、FEAを用いて効率マップを評価した。電気自動車に搭載時のモード走行損失を計算し、提案したモータがモータ損失を低減させるのに有効であることが確かめられた。

今後、着減時に伴うトルク脈動や、誘起電圧について検討を行う。

4. 謝 辞

本研究は、米国 Wisconsin 大学マディソン校と共同で行った。Prof. Lorenz を中心に、学生数名、著者とでプロジェクトチームを編成し、理論構築から原理確認、設計試作、実験確認まで実施した。同校では WEMPEC と呼ばれるモータ/パワーエレクトロニクスのコンソーシアムを構成しており、世界中から多くの優秀な技術者が集まってきた。このコンソーシアムに参加することで常に最先端の研究を近くで見たり、情報交換したり、人脈を広げられることも大きなメリットとなっている。本共同研究を遂行するにあたり、Wisconsin 大学教授陣、WEMPEC スタッフに多大なご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) V. Ostovic: Memory motors: a new class of controllable flux PM machines for a true wide speed operation, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2001 IEEE, Vol. 4, pp. 2577-2584 (2001).
- 2) K. Sakai et al.: New generation motor for energy saving, Conference Record of the International Power Electronics Conference (IPEC) 2010, pp. 1345-1358 (2010).
- 3) N. Limsuwan et al.: Design and evaluation of a variable-flux flux-intensifying interior permanent magnet machine, Proc. of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2013, pp. 3670-3677 (2013).
- 4) T. Fukushige et al.: Efficiency Contours and Loss Minimization over a Driving Cycle of a Variable-Flux Flux-Intensifying Interior Permanent Magnet

(VFI-IPM) machine. The test results confirmed that the magnets can be magnetized/demagnetized and that they do not demagnetize even when maximum torque is produced. Machine efficiency maps that were experimentally obtained for three different magnetization states confirmed that reducing the magnetization state in the high speed range works to improve efficiency.

A full-scale machine was also designed with improved magnetization characteristics. Machine efficiency maps were then evaluated by finite element analysis. The total energy loss of the machine when fitted to an EV was calculated for operation under the LA-4 driving cycle. The results confirmed that the proposed VFI-IPM machine is effective in reducing machine losses.

The torque ripple and back electromotive force during magnetization process will be investigated.

4. Acknowledgments

This study was conducted jointly with researchers at the University of Wisconsin-Madison. A project team was formed around Professor Robert D. Lorenz and consisted of other professors, several students and the author. The team began by formulating the theory of the VFI-IPM machine and then proceeded to confirm the principle involved, design the prototype machine and carry out the evaluation tests. The Wisconsin Electric Machines and Power Electronics Consortium (WEMPEC) was formed at the University of Wisconsin-Madison and attracts many outstanding research engineers from around the world. Participating in this Consortium also brought many significant benefits for the author, including a chance to observe cutting-edge research first-hand, exchanges of valuable information and the broadening the network of personal contacts. The author would like to take this opportunity to thank the faculty members concerned at the University of Wisconsin-Madison and the WEMPEC staff for their invaluable cooperation with the conduct of this joint study.

References

- 1) V. Ostovic, Memory motors: a new class of controllable flux PM machines for a true wide speed operation, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2001 IEEE, Vol. 4, pp. 2577-2584 (2001).
- 2) K. Sakai et al., New generation motor for energy saving, Conference Record of the International Power Electronics Conference (IPEC) 2010, pp. 1345-1358 (2010).
- 3) N. Limsuwan et al., Design and evaluation of a variable-flux flux-intensifying interior permanent magnet machine, Proc. of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2013, pp. 3670-3677 (2013).
- 4) T. Fukushige et al., Efficiency Contours and Loss Minimization over a Driving Cycle of a Variable-Flux Flux-Intensifying Interior Permanent Magnet Machine, Proc. of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2013, pp. 591-597 (2013) .

- Machine, Proc. of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2013, pp. 591-597 (2013).
- 5) T. Kato et al.: Variable Characteristic Permanent Magnet Motor for Automobile Application, SAE Technical Paper No. 2014-01-1869 (2014).
- 6) K. Akatsu et al.: Design and Control of a Field Intensify Interior Permanent Magnet Synchronous Machine, IEEJ Trans. on IAS, Vol. 126, No. 7, pp. 827-834 (2006).
- 5) T. Kato et al., Variable Characteristic Permanent Magnet Motor for Automobile Application, SAE Technical Paper No. 2014-01-1869 (2014).
- 6) K. Akatsu et al., Design and Control of a Field Intensify Interior Permanent Magnet Synchronous Machine, IEEJ Trans. on IAS, Vol. 126, No. 7, pp. 827-834 (2006).

■ 著者 / Author(s) ■



福重 孝志
Takashi Fukushige



加藤 崇
Takashi Katou



佐々木 健介
Kensuke Sasaki

シリコン合金負極での固相-電解液界面 (SEI) の解析

Characterization of Solid-Electrolyte Interphase on Silicon Alloy Anode

伊藤 淳史*
Atsushi Ito

渡邊 学*
Manabu Watanabe

津島 健次*
Kenji Tsushima

秦野 正治*
Masaharu Hatano

抄 録 アルゴン国立研究所との共同研究の中で、Si電極上のSEIに関する形態・化学構造について計算科学と組み合わせた解析を行った。ホスファイト系の添加剤が一例として検討され、化学構造シミュレーション及び各種分析の結果から、CF₃を含む添加剤が良質なSEIとして機能し、ポリマ化及びCH₂CF₃ラジカルがサイクル耐久性向上と関係することが示唆された。

Summary The chemical structure and morphology of the solid-electrolyte interphase (SEI) film generated from phosphite-type chemicals on a Si alloy anode were characterized by utilizing a combination of DFT calculations and various analytical techniques in joint research with the Argonne National Laboratory. The results of the DFT calculations revealed some chemicals with the CF₃ functional group as good additive candidates. The results of simulations and electrochemical measurements suggested that polymerization and the CH₂CF₃ radical are key factors for improving the cyclic durability of the Si anode.

Key words : Research & Development, solid electrolyte interphase, SEI, DFT calculation, CH₂CF₃ radical, Si alloy anode

1. はじめに — 研究背景 —

地球規模において、これからも持続可能な社会を実現していくためには、“エネルギー管理”は非常に重要な課題の一つである。これは、クルマ社会においても同様であり、運輸部門の占めるエネルギー消費量の割合は全体の約2/5であり、そのうちの製造業は約9割を占める¹⁾。昨今ではバッテリーによるエネルギーの効率化が重要な技術戦略として取り上げられている。内燃機関のエネルギー変換効率が20~30%程であるのに対し、電気自動車 (EV) の効率は約90%と極めて高く、究極のエネルギー効率を有するモビリティとして、ここ数年でその注目度を高めている。

こうした発展に拍車をかけたのがリチウムイオンバッテリー (LiB) であり、EV 開発競争が過熱する中で、LiB の性能向上に向けた開発競争もまた更に激化している。これは、EV に求められる性能として航続距離と加速性能があり、バッテリーがこれらを決定的に左右するファクタであることに起因する。クルマとして要求される2大性能を満足するために、バッテリーに求められるものはエネルギー密度とバッテリー寿命、そして出力特性である。図1(a)は各バッテリーのエネルギー密度と耐用サイクル回数の関係、図1(b)はそれぞれの出力値を示す。ここから分かるように種々あるバッテリーの中でLiBは各性能面において非常に優れており、これがLiBの注目されている所以である。

1. Introduction

Energy management is an extremely critical issue for the ongoing formation of sustainable societies on a global basis. This is also true for today's motorized societies where energy consumption by the transport sector represents approximately 40% of the total energy consumed, and manufacturing industries account for approximately 90% of that amount.¹⁾ The use of batteries to increase energy efficiency has been taken up as a key technology strategy in recent years. The energy conversion efficiency of internal combustion engines (ICEs) is around 20-30%, but that of electric vehicles (EVs) is markedly high at approximately 90%. Batteries have attracted increasing attention in recent years as a mobile power source

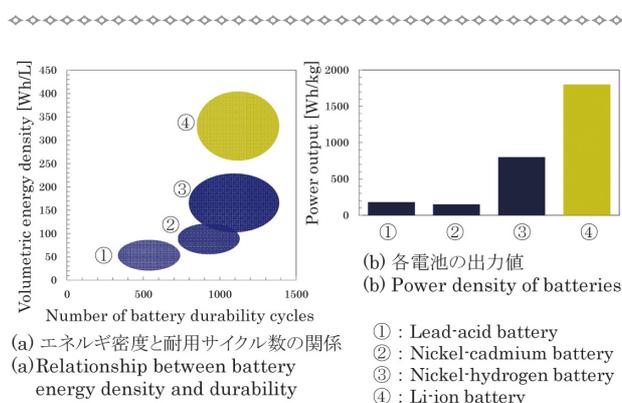


図-1 各電池の特性
Fig. 1 Battery characteristics

*先端材料研究所 / Advanced Materials Laboratory

2. 共同研究内容紹介

2.1 LiBの反応機構

LiBは化学電池であり、どのようにエネルギーが取り出されるかを図2と共に示す。全ての化学電池は正極と負極、そしてそれらを隔てる電解液から構成され、電池の外部の電荷移動を電子が担い、正極負極間の電荷移動をLiイオンが担うことにより、電気が流れる。LiBはLiイオンが正極-負極間を行き来し電荷が移動することから、LiBと呼ばれている。そして、この電荷が移動する際の正極と負極の持つエネルギーの差が、電池のエネルギーとして取り出される。これを式に表すと式(1)のようになる。

$$\Delta G = nF\Delta E \quad (1)$$

G: ギブスエネルギー n: 関与電子数
 F: ファラデー定数 ΔE: 電位差

ΔGがエネルギー差であり、nが関与する電荷の数、Fはエネルギー変換の際に適用されるファラデー定数、ΔEは正極電位 (Ec) と負極電位 (Ea) の電位差であり、EcとEaはその材料固有の値を持つ。したがって、n及びΔEが大きいほど、電池からより大きなエネルギーを得ることができ、Liは-3.054V vs. SHEと地球上において最も低い電位を有しており、これがLiBの高いエネルギー密度を持つことができる大きな理由の一つである。また、バッテリー寿命に関して観てみると、LiBが化学電池として特異である部分が見えてくる。通常の化学電池は鉛蓄電池のように充放電の際、正負の極板が化学的な相変態を起こし、破壊を生じる。一方で、LiBは正極、負極の“ホスト構造”にLiイオンが挿入される形をとり、基本的に大きな形態変化を生じないため、電極構造の破壊が生じにくく、高寿命化が可能である。そして、このホスト構造へLiイオンを挿入するシステムは高い出入力もまた可能にする。これは前述したよ

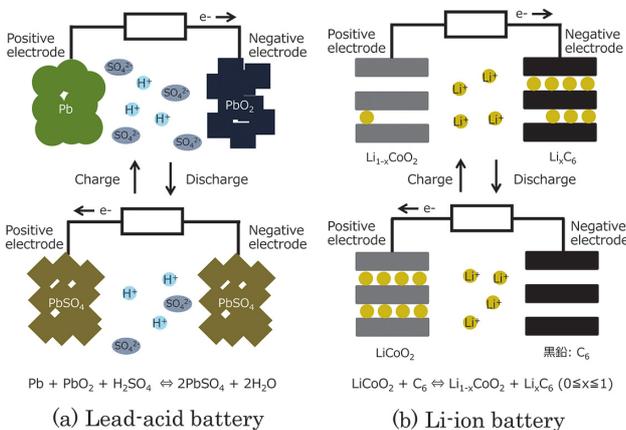


図-2 電池の反応模式図 ((a) 鉛蓄電池、(b) LiB)
 Fig. 2 Rough model of (a) lead-acid battery and (b) Li-ion battery

possessing the ultimate level of energy efficiency.

This trend has been accelerated by lithium-ion batteries (LiBs). Amid the fierce competition to develop EVs, the competition to improve LiB performance has also further intensified. This is because the battery system is a decisive factor determining the driving range and acceleration performance of EVs. In order to satisfy these two major performance requirements of vehicles, batteries must possess high energy density, a long lifetime and high power output. Figure 1(a) shows the relationship between battery energy density and the number of durability cycles, and Fig. 1(b) shows the power output characteristics of different types of batteries. Among the various battery types compared here, it is seen that the LiB is notably superior in each of these performance attributes. This is the reason why LiBs have attracted so much interest.

2. Details of Joint Research

2.1 LiB reaction mechanism

The LiB is an electrochemical battery. Figure 2 illustrates how energy is obtained from a lead-acid storage battery and an LiB. All types of electrochemical batteries have a positive electrode and negative electrode which are separated by an electrolyte. In an LiB, electrons transfer the external charge of the battery and Li ions transport the charge between the positive and negative electrodes, resulting in the flow of electricity. A lithium-ion battery is so named because Li ions transfer the charge by migrating between the positive and negative electrodes.

The difference in energy between the positive and negative electrodes at the time the charge is transferred represents the energy of the battery that can be output. This can be expressed by the formula in Eq. (1).

$$\Delta G = nF\Delta E \quad (1)$$

G: Gibbs free energy n: number of electrons involved
 F: Faraday constant ΔE: potential difference

The notation ΔG is the energy difference, n is the number of electrons involved in the charge, F is the Faraday constant applied to the energy conversion, and ΔE is the potential difference between the cathode potential (Ec) and the anode potential (Ea). The values of Ec and Ea are intrinsic to the materials used. Therefore, larger energy can be obtained from a battery with increasing n and ΔE. Lithium has the lowest potential of any material on earth at -3.054 V vs. SHE. This is one of the major reasons why LiBs have such high energy density.

Looking at the battery life, it becomes clear that LiBs have a unique property as electrochemical batteries. In ordinary electrochemical batteries like a lead-acid storage battery, chemical phase transformations occur at the positive and negative electrode plates during charging and discharging cycles, causing destruction. In contrast, in LiBs, Li ions are inserted in the host structure of the positive and negative electrodes. Fundamentally, because large phase transformations do not occur, the electrode

うに、従来の化学電池が化学的な相変態を生じ、系全体が変化するのに対し、Liイオンのみが移動することから、抵抗が小さく、出力を高めることができるためである。他の電池系と比較して、これらの優れた反応機構を有することから、LiBは車載用途への応用が可能となったのである。

2.2 Si負極活物質とその課題

LiBの負極活物質としては、現在黒鉛が主流である。その理論容量は372mAh/gであり、この理論容量は式(2)から与えられる。

$$Q = 1000nF / 3600M \quad (2)$$

Q: 理論容量 (mAh/g) n: 関与電子数
F: ファラデー定数 (A・s/mol) M: 分子量 (g/mol)

活物質の分子量、Liとの反応量に依存し、エネルギー密度を高めるためには、分子量を小さく、そしてLiとの反応量を増加させる必要がある。上記の計算を基に得られる最も高い理論容量を有する活物質がSi(シリコン)である。Siは1原子当り最大3.75原子のLiと反応することが可能であり、その際の理論容量は3589mAh/gである。これは黒鉛の約10倍であり、エネルギー密度の観点からは非常に有望な新規負極材料である。しかしながら、高い容量密度を有する一方で、寿命特性に関して二つの大きな課題がある²⁾。それが、“体積膨張”と“還元分解”である。一つ目の体積膨張は、SiがLiと多量に反応することにより最大400%膨張し、図3の原因1にあたる粒子破壊及び電極剥離を生じ、電池性能を低下させる。この問題に対しては、他元素との合金化による原子レベルでの設計、小粒子化による応力緩和、さらに電極構造の改善が検討されている。そして、もう一方の還元分解は、図3の原因2及び3にあたるLi_xSi合金の高い活性に由来し、電解液とLi_xSiの接触界面において、電解液中に含まれる物質を還元分解してしまう現象である。これは、還元された物質が抵抗物質となりSi上に堆積することにより、活物質の性能を劣化させ、電池性能を低下させる現象を引き起こす。この還元分解反応の進行を抑制する皮膜がSEI(固相-電解質界面)である。

2.3 SEI解析の重要性と課題

SEIは主にLiBの負極の活物質表面に形成する皮膜で、電解液中に含まれる主溶媒や支持塩とは異なる添加剤が、電気化学的に還元されることによって形成される。SEIは活物質表面に形成されることから、主に下記の四つの機能が必要であると考えられる。

- ① イオン伝導性: Liイオンを輸送する機能
- ② 結着性: 活物質に接着する機能
- ③ 電子伝導性: 電気化学反応に必要な電子を輸送する機能

structure tends not to be destroyed, making a long service life possible. In addition, this system that inserts Li ions into the host structure also enables the output and input of high levels of energy. As noted above, conventional electrochemical batteries undergo chemical phase transformations that induce changes in the entire system, whereas the energy output of LiBs can be increased because of their low internal resistance owing to the fact that only Li ions migrate. Compared with other battery systems, this outstanding reaction mechanism of LiBs has made their application to vehicles possible.

2.2 Si anode active material and its issues

Graphite is currently the mainstream active material for the anode of LiBs. Its theoretical capacity is 372 mAh/g which is given by Eq. (2).

$$Q = 1000 nF/36000 M \quad (2)$$

Q: theoretical capacity (mAh/g)
n: number of electrons involved
F: Faraday constant (A・s/mol)
M: molecular weight (g/mol)

Energy density is dependent on the molecular weight of the active material and the amount that reacts with Li. To increase the energy density, it is necessary to reduce the molecular weight and increase the amount that reacts with Li. Based on the equation above, the active material possessing the highest theoretical capacity is silicon (Si). One atom of Si can react with as many as 3.75 atoms of Li, giving Si a theoretical capacity of 3589 mAh/g, which is approximately ten times greater than that of graphite. Therefore, Si is a very promising new anode material in terms of energy density. Although possessing high capacity density, Si has two major issues with respect to service life,²⁾ which are volumetric expansion and reductive decomposition.

Volumetric expansion refers to the 400% increase in volume due to the large quantity of Si that reacts with Li, which causes particle fracture and electrode peeling that degrade battery performance. This corresponds to cause 1 of the degradation mechanism illustrated in Fig. 3. Measures now being examined for addressing this problem include an atomic level design for alloying Si with other elements, stress relief by reducing the particle size, and improvement of the electrode structure.

The other issue of reductive decomposition

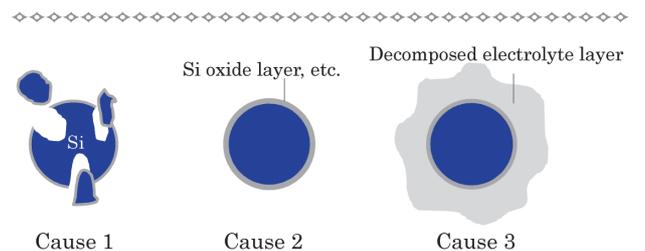


図-3 Si負極のサイクルに伴う劣化原因
Fig. 3 Degradation mechanism of Si anode for Li-ion battery

④ 伸縮性：活物質の膨張収縮に追従する機能

①と②は基本的に必要とされるSEIの機能であり、③と④は膨張収縮し、粒子破壊を生じるSiのような負極材料に特に必要とされる機能と考えられる。図4は良質なSEIが形成された場合と形成されない場合の負極材料の寿命特性の変化を示す。

炭酸フルオロエチレン (FEC) を添加した場合を例に示すが、サイクルごとの容量の低下が大幅に抑えられることから、SEIが機能することにより劇的に特性は変化することが分かる³⁾。したがって、皮膜を形成し得ると考えられる様々な添加剤が電解液に添加され検討が進められている。しかし、SEIは電解液中に含まれる様々な物質が反応することによって形成されるため、形成されるSEIの化学構造やその形態は特に複雑なものとなる。そのため、SEIの特性改善は劇的な効果を持つにもかかわらず、更なる特性改善につなげるための知見を得る分析・解析が非常に困難であった。そこで、我々は高度な分析技術と計算化学の専門家を有するアルゴンヌ国立研究所 (Argonne National Laboratory: ANL) と共同研究を組むことにより、SEIの形成メカニズムとその特性改善を目指した。

2.4 ANLについて

ANLは、原子力の父と言われる Enrico Fermi を中心とした研究チームが1942年に世界に先駆けて制御核分裂連鎖反応を成功させたシカゴ大学と、マンハッタン計画研究者の一部を母体とする原子力の平和利用を研究する目的で1946年に設立された米国の国立研究所であり、現在は米国エネルギー省 (DOE) のバッテリー研究の拠点となっている研究機関である。我々は、ANLにおけるバッテリー研究の中心人物の一人である Khal Amine のグループと計算科学・分析の専門家集団である Larry Curtiss のグループと共に、SEIの特性改善に向けた研究に取り組んだ。

研究スキームは図5に示す通りであり、日産側の保有する成膜技術による分析サンプルの作製と電気化学診断、

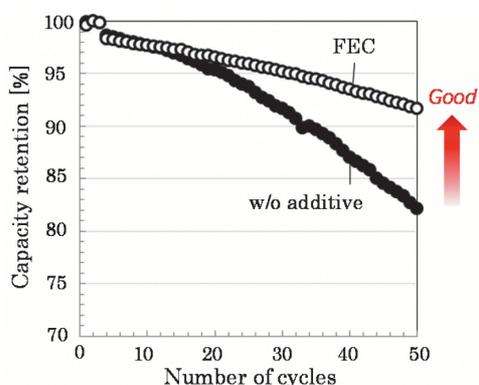


図-4 FEC 添加時と未添加時のサイクル試験結果
Fig. 4 Cyclic performance of Li/Si half-cell using 1M LiPF₆ EC/DEC with and without FEC

corresponds to causes 2 and 3 in Fig. 3 and stems from the high activity of the Li_xSi alloy. It refers to a phenomenon whereby the materials included in the electrolyte reductively decomposes at the contact interface between the electrolyte and Li_xSi owing to that high activity. The decomposed material becomes resistive material that builds up on the surface of Si, causing the performance of the active material to deteriorate and thereby degrading battery performance. Formation of a solid-electrolyte interphase (SEI) film acts to inhibit the progress of the reductive decomposition reaction.

2.3 Importance of SEI film characterization and associated issues

The SEI film principally forms on the surface of the anode active material in LiBs. The principal solvent, supporting electrolyte salt and other additives included in the electrolyte undergo electrochemical reduction to form the SEI film. Because the SEI film forms on the active material surface, it is assumed that the following four functions are necessary.

- (1) Ionic conduction: the function for transporting Li ions
- (2) Cohesiveness: the function of binding to the active material
- (3) Electron conductivity: the function of transporting the electrons needed for the electrochemical reactions
- (4) Elasticity: the function of being able to follow active material expansion/contraction

The first two functions are essential to the SEI film, and the third and fourth functions are presumed to be especially essential to the anode material such as Si, which undergoes expansion and contraction that cause particle fracture. Figure 4 shows the change in the service life characteristic (i.e., capacity retention) of the anode material depending on whether a good SEI film was formed or not.

The figure shows an example for the addition of fluoroethylene carbonate (FEC) to the electrolyte. Because a decline in capacity with an increasing number of cycles was markedly inhibited, presumably the SEI film functioned to produce this dramatic difference in capacity retention.³⁾ Accordingly, studies are proceeding on the addition of various additives to the electrolyte that are thought to be conducive to the formation of the SEI film. However, because the SEI film is formed by the reactions of various substances contained in the electrolyte, its chemical composition and morphology are especially complex. For that reason, even though improvement of the SEI film properties would have a dramatic effect on preventing performance degradation, it has been extremely difficult to conduct analyses and simulations for obtaining knowledge leading to further improvement of the SEI film. Therefore, the aim of this study was to elucidate the mechanism of SEI film formation and improve the film properties through joint research with Argonne National Laboratory (ANL), which possesses advanced analytical techniques and has specialists in

ANL側の皮膜解析技術と計算科学による材料候補シミュレーションを組み合わせることによりSEI解析を進めることとした。

2.5 結果及び考察

我々は、まず初めにDFT (Density Functional Theory) 計算を用いた反応シミュレーションによる、SEIを形成するであろう添加剤候補の選定を行った。ANLではすでにシミュレーションによる黒鉛負極用の添加剤のスクリーニングの先駆的研究を行っており⁴⁾⁵⁾、今回同手法を用い、上記に記したSi負極に必要とされる機能に着目した添加剤候補のシミュレーションを行った。シミュレーション結果の選定基準は二つとした。一つ目は電解液の溶媒として使用される炭酸エチレン (EC) 及び炭酸ジエチル (DEC) よりも高い電位で分解するか、すなわち溶媒よりも先に分解し保護膜を形成するかであり、もう一方は、分解物がポリマを形成するか、つまり皮膜を形成するかである。下記にその一例としてホスファイト系添加剤の5種 (TTFP、BTTFEP、THFP、TMP、TEP) の検討結果を図6に示す。DFT計算を行った結果、分解するとされる電位はそれぞれTTFP(Tris(2,2,2-Trifluoroethyl)phosphite)が1.6V、BTTFEP(Bis(2,2,2-trifluoroethyl)phosphite)が1.87V、そしてTHFP(Tris(1,1,1,3,3,3-Hexafluoro-2-propyl)phosphite)

computational chemistry.

2.4 Overview of ANL

ANL is a U.S. national research laboratory that was founded in 1946 for the purpose of conducting research on peaceful uses of nuclear energy. The founding members were researchers at the University of Chicago where the world's first controlled nuclear fission chain reaction was successfully conducted in 1942 by a research team led by Enrico Fermi, called the father of atomic energy, and some researchers from the Manhattan Project. Today, this research facility is the center of the battery research sponsored by the U.S. Department of Energy (DOE). We conducted research on improving the SEI film properties jointly with the group headed by Dr. Khal Amine, who is a principal figure in battery research at ANL, and with Dr. Larry Curtiss's group of specialists in computational chemistry and analysis.

The scheme of the joint research with ANL is outlined in Fig. 5. Nissan was responsible for preparing the samples for analysis using its film fabrication technology and for conducting electrochemical evaluations and diagnostics. ANL was responsible for SEI film characterization by combining its film simulation techniques with candidate material simulations based on computational chemistry.

2.5 Results and discussion

As the first step, we selected additive candidates believed to form the SEI film based on reaction simulations using density functional theory (DFT) calculations. ANL had previously conducted research based on simulations to screen additives for use with graphite anodes.⁴⁾⁵⁾ Using the same method, we conducted simulations on the additive candidates, focusing on the above-mentioned functions required for the Si anode. Two selection criteria were applied to evaluate the simulation results. The first criterion was whether the additive decomposed at a higher potential than ethylene carbonate (EC) and diethyl carbonate (DEC) used as the solvent of the electrolyte solution. In other words, did the additive decompose before the solvent and form a protective film? The second criterion was whether the decomposed product formed a polymer? In other words, did it form a protective film?

As an example, Fig. 6 shows the results found for five types of phosphite-based additives: tris(2,2,2-trifluoroethyl) phosphite (TTFP), bis(2,2,2-trifluoroethyl) phosphite (BTTFEP), tris(1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-propyl) phosphite (THFP), trimethyl phosphite (TMP), and triethyl phosphite (TEP). The results of DFT calculations revealed the following potentials at which these additives decompose: TTFP at 1.6 V, BTTFEP at 1.87 V and THFP at 1.92 V. The decomposition potentials calculated in the same way for EC and DEC were 1.41 V and 1.45 V, respectively. These results revealed that three types of additives, TTFP, BTTFEP and THFP, decompose at a higher potential than either EC or DEC. In contrast, TMP and TEP decompose at 1.14 V and 0.94 V, respectively,

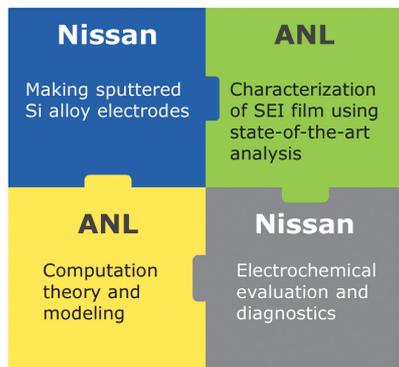


図-5 日産とANLの共同研究スキーム
Fig. 5 Scheme of joint research with Argonne National Laboratory

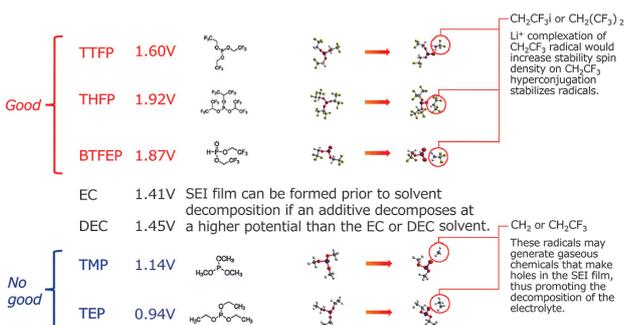


図-6 各材料のDFT計算による分解反応とその電位
Fig. 6 Decomposition model and decomposition potentials of examined additives obtained by DFT calculations

は1.92Vであった。同様の計算方法から算出されたEC及びDECの分解電位は1.41Vで、DECが1.45Vであり、この結果、TTFP、BTFEP、THFPの3種がEC及びDECよりも高い電位で分解することが示された。一方、TMP (Trimethyl Phosphite) 及びTEP (Triethyl Phosphite) はそれぞれ1.14Vと0.94Vであり、上記の計算結果から、溶媒種よりも低い電位で分解するため、溶媒種の分解前に良質なSEIを形成しにくいことが示唆された。そこで本計算結果が妥当であるかを確認するために、各添加剤の添加時及び未添加時の分解電圧についてコインセルを作製し、評価を行った。未添加時においてECとDECの還元分解に起因する電気容量が0.51V vs. Li/Li⁺及び0.57V vs. Li/Li⁺に観察されるのに対し、TTFP、BTFEP、THFPはそれぞれ1.12V vs. Li/Li⁺、1.24V vs. Li/Li⁺、1.45V vs. Li/Li⁺の高い電位での還元分解反応を示し、TMPとTEPを使用した場合の還元電流ピークは0.557V vs. Li/Li⁺、0.525V vs. Li/Li⁺において生じた。計算結果と比較した結果を図7に示すが、TMPとTEPはEC及びDECより分解電位が低いため、溶媒の分解反応が観察されることから一致しないが、溶媒種よりも高い分解電圧を示す各添加剤の分解電位の傾向はよく一致した。以上より、本添加剤のDFT計算による結果の妥当性が示された。添加剤の代表としてTTFPを使用した場合のSEIについて分析を行い、未添加時のSi表面のSEIとの比較を行った。図8はTTFP使用時と未使用時の電解液中においてSi電極を充放電しSEIを形成させ、その表面の形態の変化を走査型電子顕微鏡 (SEM) 及び原子間力顕微鏡 (AFM) によって観察することとした。ナノオーダーでの形態を正確に観察するため、基板には表面の凹凸を1nm以下とする特殊加工を施したステンレス (SUS) 基板を使用した。まずSEMの結果から、未添加時は粒状の物質が点在しているのに対し、TTFPを使用した場合は膜状の物質の存在が示唆された。さらにAFMによるナノ領域での違いを観察した結果、未添加時

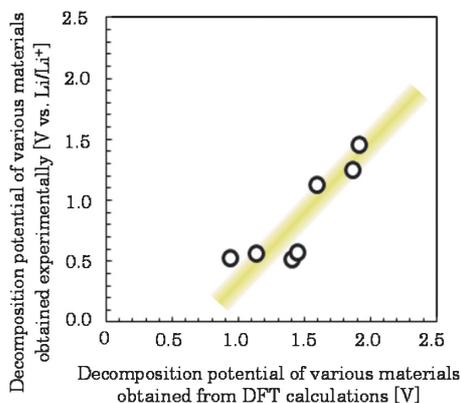


図-7 実験及びDFT計算から得られた各材料の分解電位の関係

Fig. 7 Comparison of decomposition potentials of examined additives obtained experimentally and by DFT calculations

indicating that they break down at lower potentials than the two solvents. This implies that a good SEI film would probably not be formed before the decomposition of either type of solvent.

A coin cell was then fabricated and evaluations were made of the decomposition voltage with and without each additive in order to confirm the validity of the calculated results. Without the additives, it was observed that the electric capacity attributable to the reductive decomposition of EC and DEC was 0.51 vs. Li/Li⁺ and 0.57 V vs. Li/Li⁺, respectively. In contrast, TTFP, BTFEP and THFP showed reductive decomposition reactions at higher potentials of 1.12 V vs. Li/Li⁺, 1.24 V vs. Li/Li⁺ and 1.45 V vs. Li/Li⁺, respectively. When TMP and TEP were used as the additives, the reduction current peaks occurred at 0.557 V vs. Li/Li⁺ and 0.525 V vs. Li/Li⁺. Figure 7 shows a comparison of the experimental and calculated results. Because TMP and TEP displayed lower decomposition potentials than EC and DEC, the two sets of results did not agree owing to the decomposition reactions observed for the solvents. However, for the three additives that displayed higher decomposition voltages than the solvents, the trend of their decomposition potentials agreed well between the experimental and calculated results, which validated the results of the DFT calculations for the additives.

The SEI film that formed when TTFP was used as a representative additive was then analyzed and a comparison was made with the SEI film obtained on the Si surface when no additive was used. The Si anode was cycled in the electrolytes with and without the TTFP additive to form the SEI film, and the difference in the surface morphology was studied with use of scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM). The results obtained are presented in Fig. 8. In order to observe the nanometer-scale morphology accurately, stainless steel (SUS) substrates were used that were specially machined to keep the surface unevenness

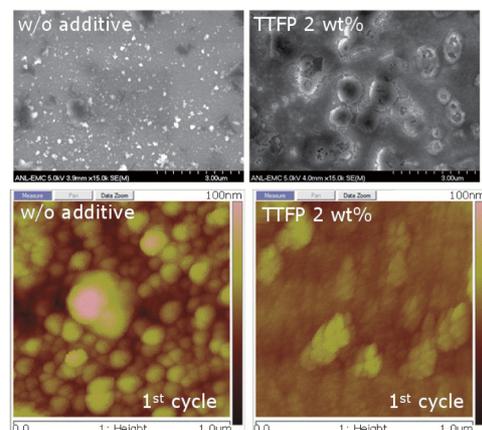


図-8 TTFP添加時及び未添加時にSi負極上に形成させたSEIのSEM及びAFM像

Fig. 8 SEM and AFM images of SEI film on Si anode after cycling in electrolytes with and without TTFP

の場合、直径30nm以上の球状粒子が堆積し、起伏が目立ったが、TTFPを用いた場合、その表面は未添加時と比較して平滑であり、堆積する粒子の平均径は10 nm程度であった。DFT計算の結果から、TTFPはポリマ化することが示されたが、SEMの結果でも計算科学と一致する傾向が観られた。また、AFM像からTTFP添加による起伏の抑制がなされていることが分かった。SEIの形成による電気化学特性の変化を確認するため、交流インピーダンス測定を行った。図9はコールコールプロットと呼ばれ、半円が小さいほど抵抗は小さいことを意味する。溶媒種よりも高い分解電圧を有する3種の添加剤を使用した場合、劇的に半円の径が小さくなっており、電極の抵抗値を算出すると、未添加時に152Ωであったのに対し、3種の添加剤はそれぞれTTFPが30.1Ω、41.8Ω、83.3Ωであり、抵抗の減少が確認された。SEM、AFM及びインピーダンス結果を総合して考えると、TTFPの分解により形成されるこの膜は、電極上の電荷移動抵抗を軽減することが示されており、イオン伝導あるいは電子伝導を向上させる効果を持つことが示された。また、電気化学反応は電極面が平滑に保たれるほど突起部への電流集中を抑制し、電極上での反応が均一に進行するが、AFM像からTTFP添加による起伏の抑制がなされていることから、突起部の電流集中や、高抵抗部における副反応の進行を抑制するといった結果をもたらしていると考えられる。それでは、何故TTFPから成るSEIが反応抵抗を軽減するのか、この点を明らかにするため、フーリエ変換赤外分光分析 (FTIR) 及びもう一度DFT計算を行った。FTIRは物質の化学構造を解析する有効な手法の一つであり、図10はTTFP添加時及び未添加時において充放電されたSi電極のFTIR測定結果である。両者の比較において、最も顕著な違いは炭素合成素子CF₃に起因する振動スペクトルであり、未添加時には見られないCF₃の振動スペクトルがTTFP添加時に観察された。DFT計算の結果から、TTFPの分解時にCH₂CF₃ラジカルはLi⁺と反応し、超共役することが示

below 1 nm.

First, the SEM results suggested that particle-like material was scattered without the additive, whereas the addition of TTFP resulted in the presence of film-like material. A further observation of the difference in the nanometer region was made by AFM. Without the additive, globular particles of over 30 nm in diameter were deposited with conspicuous undulations, but when TTFP was added, the surface became smoother and the deposited particles were around 10 nm in diameter on average. The DFT calculations suggested that TTFP polymerized, and the SEM observations showed that this tendency coincided with the computational chemistry results. The AFM images also revealed that the TTFP additive served to inhibit the formation of undulations.

Alternating current impedance measurements were then made to confirm the difference in electrochemical characteristics due to the formation of the SEI film. Figure 9 presents Cole-Cole plots obtained with each additive and without any additive. The smaller the semicircles, the lower the resistance is. The size of the semicircles became dramatically smaller when the three types of additives having decomposition potentials higher than the solvents were used. A calculation of the electrode resistance showed a value of 152 Ω without any additives, whereas the values for the three types of additives were much lower at 30.1 Ω for TTFP, 41.8 Ω for BTfEP and 83.3 Ω for THFP. A comprehensive consideration of the SEM, AFM and impedance measurement results revealed that the film formed by the decomposition of TTFP reduced the resistance to charge transfer at the anode, indicating that it had the effect of improving ionic conductivity or electron mobility. Presumably, electrochemical reactions proceed uniformly at the anode, as the higher current density in protrusions is inhibited due to the smooth electrode surface. It was inferred from the AFM images that the TTFP additive inhibited the formation of undulations, which was the result of high current density in the protrusions and the progress of side reactions in the areas of high resistance.

The next question was why the SEI film formed from TTFP reduced reaction resistance. To clarify the reason for that, a Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis was conducted along with performing DFT calculations again. FTIR is an effective method for characterizing the chemical structure of materials. Figure 10 shows the FTIR spectra measured for the Si anode cycled in an electrolyte with and without the TTFP additive. A comparison of the two sets of results revealed that the most pronounced difference was the vibration spectrum attributed to “functional group” CF₃ (trifluoromethyl). While no CF₃ vibration spectrum was observed without the additive, it was seen when TTFP was added to the electrolyte. The results of the DFT calculations indicated that when TTFP decomposed, the CH₂CF₃ radical reacted with Li⁺, resulting in hyperconjugation. This implies that Li and CH₂CF₃ ions

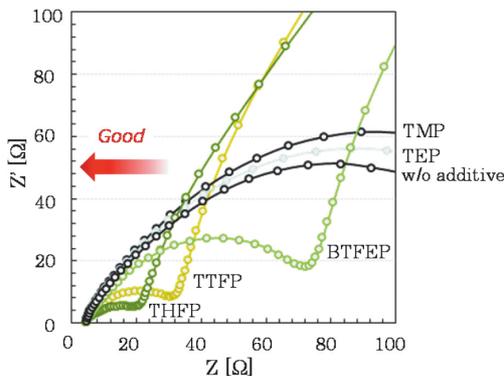


図-9 各添加剤を使用したセルのコールコールプロット
Fig. 9 Comparison of Cole-Cole plots of Li/Si half-cell cycled in electrolytes with and without additives

唆されており、Liと CH_2CF_3 は反応抵抗を軽減させると考えられ、これがSi電極の反応抵抗の軽減に寄与したものと考えた。上記において抵抗を低減したTTFP、BTFFP、THFPの3種の添加は全て CF_3 を含む CH_2CF_3 あるいは $\text{CH}_2(\text{CF}_3)_2$ ラジカルを生成するという計算結果が出ており、実験結果とよく一致する結果を示した。最後にTTFP、BTFFP、THFP、TMP、TEPの5種を添加した電解液と、比較のため未添加の電解液を使用したLi/Siハーフセルの充放電サイクル試験の結果を図11に示す。図から明らかなように、 CF_3 を有する50サイクル後の容量維持率は未添加時と比較して約30%向上し、顕著な特性改善を示した。この特性の改善は上記のSEI解析結果から明らかなように、TTFPから成るSEIが電極上における反応抵抗を低減し、さらに電極反応を均一化した結果と考えられる。

3. ま と め

ANLとの共同研究の中で、Si電極上に形成するSEIの形態・化学構造の解析を行い、計算科学と組み合わせることで、Siに適したSEIの形成を試みた。本研究の一例としてホスファイト系の添加剤から形成されるSEIの解析を行った。DFT計算の結果から、 CF_3 を含む添加剤であるTTFP、BTFFP、THFPの3種がポリマ化し、且つ Li^+ と超共役を有する CH_2CF_3 ラジカルの形成が示唆され、SEM、AFM、FTIR、ACインピーダンス及び電気化学測定から、これらの存在及び本SEIが電極反応の抵抗を軽減することが示され、最終的にサイクル特性を向上させる結果を得た。しかしながら、より一層の特性向上が求められており、種々のSEI形成機構の理解と化学構造の制御を行うため、さらに詳細な研究を進めている。

最後に、こうしたANLとの共同研究を行う中で、技術

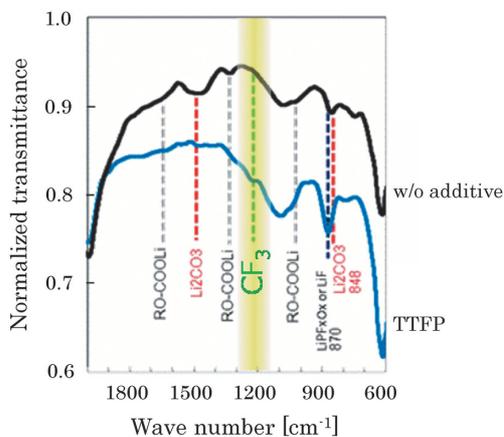


図-10 TTFP 添加及び未添加時に Si 負極上に形成させた SEI の FTIR スペクトル

Fig. 10 FTIR spectra of SEI film on Si anode cycled in an electrolyte with and without TTFP

reduced the reaction resistance, which contributed to reducing the reaction resistance at the Si anode. The calculation results indicated that the three types of additives—TTFP, BTFFP and THFP—that reduced the reaction resistance all formed the CH_2CF_3 or $\text{CH}_2(\text{CF}_3)_2$ radical containing CF_3 . Accordingly, the calculated and experimental results coincided well.

As the last step, cycling was performed with a Li/Si half-cell using electrolytes containing the five types of additives—TTFP, BTFFP, THFP, TMP and TEP—individually and an electrolyte without any additive for comparison. The results are shown in Fig. 11. The results clearly show that the three electrolytes containing CF_3 displayed approximately 30% better capacity retention after 50 cycles than the electrolyte without any additive. The three additives clearly exhibited a marked improvement in the capacity retention characteristic. As the SEI film simulation results made clear, the reason for this improvement is presumably that the SEI film formed from TTFP, for example, reduces the reaction resistance at the anode and also makes the electrode reactions uniform.

3. Conclusion

In this joint research conducted with ANL, the morphology and chemical structure of the SEI film formed on the Si anode were characterized and the results were combined with computational chemistry in an effort to obtain an optimum SEI film for Si. As one example of this research, this article has described the characterization of the SEI film formed from phosphite-based additives. The results of DFT calculations suggested that three types of additives—TTFP, BTFFP and THFP—containing CF_3 polymerize and produce the CH_2CF_3 radical that forms a hyperconjugation with Li^+ . Results obtained by SEM, AFM, FTIR and AC impedance measurements as well as electrochemical measurements revealed the occurrence of these phenomena and that the resultant SEI film reduced the reaction resistance at the anode. The end result was an improvement of charge/discharge cycling characteristics.

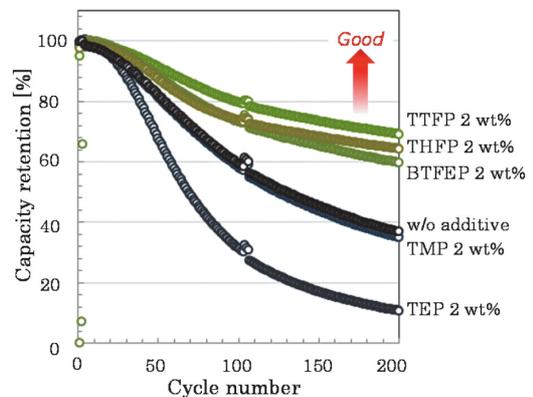


図-11 各添加剤使用時及び未添加時における Si 負極のサイクル試験結果

Fig. 11 Relationship between the number of cycles and capacity retention of Li/Si half-cell cycled with and without various additives

面以外において心がけたことを一つ上げるとすると、“私自身に興味を持ってもらう”ということに尽きる。自分の持つ技術や考えを伝え、自分に何が出来るかを示すこと。言葉のハンディキャップを持つ上で、彼らとできる限り円滑にコミュニケーションを取り、研究を進めるためにまずは私自身に興味を持ってもらえるよう努めた。ここを起点として、技術や私生活の会話も含め、彼らの技術的な得意分野はどのようなことで、さらに彼らの得たい技術や知識が何かを知ることができた。結果として、ANLに在籍する様々な国籍の方々と交流を持つことができ、研究面だけでなく、形でない多くの財産を得ることができたと感じている。今後もそこで得た経験を種々多様な場面で生かしていきたいと考えている。

4. 謝 辞

本研究はアルゴンヌ国立研究所との共同研究において行われ、多大なるご協力を頂いた Khalil Amine, Larry A. Curtiss, Hsien-Hau Wang をはじめとする関係者各位に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁、第2節部門別エネルギー消費の動向、
<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-2.html> (参照日 2015年12月1日)。
- 2) L. F. Cui et al.: Carbon – Silicon Core – Shell Nanowires as High Capacity Electrode for Lithium Ion Batteries, *Nano Lett.*, Vol. 9, No. 9, pp. 3370-3374 (2009).
- 3) Y. M. Lin et al.: High performance silicon nanoparticle anode in fluoroethylene carbonate-based electrolyte for Li-ion batteries, *Chem. Commun.*, Vol. 48, No. 58, pp. 7268-7270 (2012).
- 4) L. Zhang et al.: Molecular Engineering toward Stabilized Interface: An Electrolyte Additive for High-Performance Li-Ion Battery, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 161, No. 14, pp. A2262-A2267 (2014).
- 5) J. Huang et al.: An Organophosphine Oxide Redox Shuttle Additive That Delivers Long-term Overcharge Protection in 4 V Lithium-ion Batteries, *J. Mater. Chem. A*, Vol. 3, pp. 10710-10714 (2015).

However, further detailed studies are needed to better understand better the formation mechanism of various types of SEI films and to control the chemical structure in order to enhance these performance characteristics.

Finally, I would like to cite an example of something that I always kept in mind during this joint research project at ANL, in addition to the technical aspects. In short, that was to develop personal friendship with my ANL co-researchers. I conveyed my ideas and showed my technical abilities, demonstrating to them what I was capable of doing. Owing to a language difference, I endeavored to communicate clearly with others as much as possible and to have them first of all take interest in me as a person in order to proceed with our research. With that as a starting point, in the course of conversations that included talking about my technical skills and personal life, I was also able to learn about their fields of technical expertise and the techniques and knowledge they wanted to acquire. As a result, I was able to have fruitful exchanges with researchers of many different nationalities during my stay at ANL. I feel that I gained much not only regarding research, but also many invaluable intangible culture assets as well. I want to make the most of the valuable experience I acquired at ANL in a wide variety of situations in the future.

4. Acknowledgments

This study was carried out as a joint research project with the Argonne National Laboratory. I would like to express my profound gratitude to everyone involved and especially to Dr. Khalil Amine, Dr. Larry A. Curtiss and Dr. Hsien-Hau Wang for their invaluable cooperation with this research.

References

- 1) Part 2 Trends in Energy Consumption by Sector, Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Energy of Japan,
<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-2.html> (reference date: December 1, 2015).
- 2) L. F. Cui et al., Carbon-Silicon Core-Shell Nanowires as High Capacity Electrodes for Lithium Ion Batteries, *Nano Lett.*, Vol. 9, No. 9, pp. 3370- 3374 (2009).
- 3) Y. M. Lin et al., High performance silicon nanoparticle anode in fluoroethylene carbonate-based electrolyte for Li-ion batteries, *Chem. Commun.*, Vol. 48, No. 58, pp. 7268-7270 (2012).
- 4) L. Zhang et al., Molecular Engineering toward Stabilized Interface: An Electrolyte Additive for High-Performance Li-Ion Battery, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 161, No. 14, pp. A2262-A2267 (2014).
- 5) J. Huang et al., An Organophosphine Oxide Redox Shuttle Additive That Delivers Long-term Overcharge Protection in 4 V Lithium-ion Batteries, *J. Mater. Chem. A*, Vol. 3, pp. 10710-10714 (2015).

■著者 / Author(s) ■



伊藤 淳史
Atsushi Ito



渡邊 学
Manabu Watanabe



津島 健次
Kenji Tsushima



秦野 正治
Masaharu Hatano

量子ドット増感型固体太陽電池の研究

A Study on a Solid-state Quantum-dot-sensitized Solar Cell

福本 貴文*
Takafumi Fukumoto

丹羽 勇介*
Yuusuke Niwa

太田 最実*
Yoshimi Ohta

菅 克雄*
Katsuo Suga

抄 録 電気自動車 (EV) の航続距離延長の方策として太陽電池の車載が有望であるが、現在市販されている太陽電池は高コストと低効率が課題であった。本研究では、低コストと高効率の両立を目指し、次世代型高効率太陽電池として期待されている“量子ドット増感型固体太陽電池”の可能性についてEPFLとの共同研究を通じて検討した。量子ドットの粒径制御やその近傍の内部抵抗を減らし、発電効率を当時のトップレベルである3.9%まで向上した。

Summary While a solar charging system is one promising way of extending the driving range of electric vehicles, there are problems with the current solar cells on the market in terms of cost and low efficiency. With the aim of achieving low cost and high efficiency, this joint study conducted with EPFL focused on a solid-state quantum-dot-sensitized solar cell (ss-QDSSC), which is expected to be a next-generation high-efficiency solar cell. An ss-QDSSC was prepared with a low-cost wet process and its power generation capacity was confirmed. Furthermore, by controlling the particle diameter of quantum dots and reducing the internal resistance with surrounding parts, the photoelectric conversion efficiency was improved to 3.9%, which was one of the best figures at the time.

Key words : Research & Development, electric vehicle (EV), solar cells, ss-QDSSC

1. はじめに

日産リーフは世界累計販売台数20万台以上(2016年1月現在)の最量販の電気自動車 (EV) である。今後、更なるEVの普及には1回の充電で走行可能な航続距離の延長が必要であり、動力源であるリチウムイオン電池(以下、LiB)のエネルギー密度を高める研究開発が盛んである。一方、航続距離延長の他の手段として、車載した太陽電池の発電エネルギーをLiBに充電する方法もある。例えば、図1に示す様に、既存の太陽電池(効率 $\eta = 16\%$)と次世代の高効率太陽電池($\eta = 40\%$)をルーフ、フード、ボディ

1. Introduction

The Nissan LEAF is the world's best-selling electric vehicle (EV) with a cumulative global sales volume of over 200,000 units as of January 2016. In order to popularize the EV more in the future, the driving range obtainable on a single battery charge must be extended. Toward that end, vigorous R&D efforts are under way to increase the energy density of the lithium-ion battery (LiB) that is the EV's power source. Another method of extending the driving range would be to generate electrical energy with vehicle-mounted solar cells and use it to charge the LiB. For example, Fig. 1 shows a comparison of the driving range extension that might be obtained with existing solar cells (photoelectric conversion efficiency $\eta = 16\%$) and next-generation high-efficiency solar cells ($\eta = 40\%$) mounted on the roof, hood and body sides of the vehicle. For the average amount of solar radiation during one day in Tokyo, it is estimated that the former solar cells could extend the driving range by up to 30 km and the latter solar cells by up to 80 km. This estimation suggests the possibility of charging-free EVs if high-efficiency solar cells can be developed.

In this study, a high-efficiency solar cell for vehicle application was investigated with the aim of extending the EV driving range.

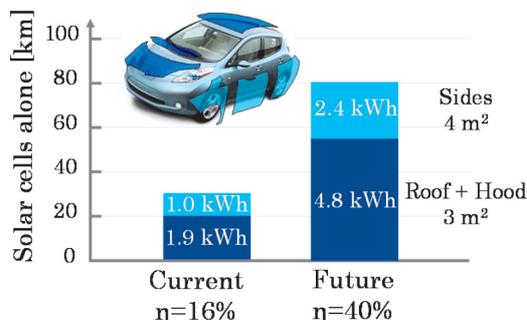


図-1 太陽電池による延長可能な航続距離
Fig. 1 Driving range extended by solar cells

*先端材料研究所 / Advanced Materials Laboratory

者が集まるハブ機関となり、色素増感の世界最高効率を常に更新し続けている。この世界最高の基盤技術に、高効率化が期待される量子ドットを融合した量子固体増感が本研究のポイントである。そこで、著者は客員研究員としてEPFLのGrätzel研究室に赴き、本研究を実施した(図3)。

2.3 動作原理と高効率化への課題

動作原理は基本的に色素増感と同じであり図4に示す。

透明電極ガラス(以下、FTO)を透過した太陽光が半導体であるSb₂S₃に吸収されると、電子と正孔が生成される。

電子はN型半導体であるTiO₂に注入され、FTO、外部回路を通じて対極の金(Au)に到達し、P型半導体のPoly-3-hexylthiophene(以下、P3HT)に電子を受け渡す。一方、正孔はP3HTに移動してAuに到達した電子をもらうサイクルが繰り返されることで、光のエネルギーが電気エネルギーに変わる。

この様に動作原理は色素増感と同じであるが、光吸収体が量子ドット、電解質が固体であるため量子固体増感には特有の課題が存在する(図5)。

- ① 光吸収体のSb₂S₃層が厚いため、内部で分離した電子がTiO₂に注入される前に正孔と再結合し、熱エネルギーとして失われる。
- ② 固体電解質のP3HTが露出したTiO₂と直接接触するため、TiO₂からの電子がP3HTに流れ込み(逆電子移動)正孔と再結合し、熱エネルギーとして失われる。

①②の課題を解決するには、Sb₂S₃の薄い層でTiO₂表面を均一にコートできればよいと考えた。そのためには、色素増感のプロセスを量子固体増感に応用すると共に、改良する必要があった。

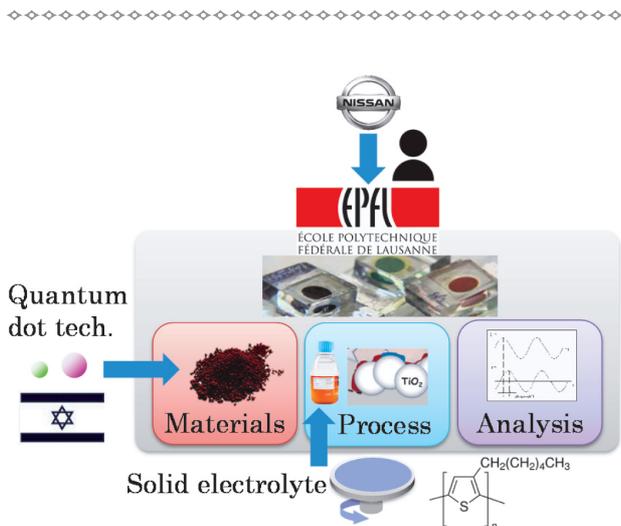


図-3 量子ドット増感型固体太陽電池開発と研究体制
Fig. 3 Development concept for ss-QDSSC and research organization

absorption coefficient ($1.8 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ at $\lambda = 450 \text{ nm}$).

2.2 Joint research with EPFL

A ss-QDSSC substitutes quantum dots for the dye that is the light-absorbing element of a dye-sensitized solar cell (DSSC) and also has a solid electrolyte instead of a liquid one. Because a ss-QDSSC employs the fundamental technology of a DSSC, it was necessary to acquire much know-how from the DSSC field, including the basic operating principle and fabrication process. The DSSC was invented by Professor Michael Grätzel at the École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) in 1991. Since then, DSSCs have been very widely researched as inexpensive solar cells.

Today Professor Gratzel's Laboratory of Photonics and Interfaces is a cutting-edge research facility that attracts leading researchers from around the world. It has continued to constantly update the world's highest level of efficiency obtained with DSSCs. The key point of the present study was to combine this world-leading fundamental technology with an ss-QDSSC for which higher efficiency is expected. The author went to Professor Grätzel's laboratory as a visiting researcher and conducted this joint study as outlined in Fig. 3.

2.3 Fundamental operating principle and issues for higher efficiency

The fundamental operating principle of an ss-QDSSC is illustrated in Fig. 4 and is the same as that of a DSSC. Sunlight passes through a transparent fluorine-doped tin oxide (FTO) electrode and is absorbed by the Sb₂S₃ semiconductor to produce electrons and holes. Electrons are injected into the N-type TiO₂ semiconductor, pass through the FTO and an external circuit to reach the Au counter electrode and electrons are transferred to the P-type poly-3-hexylthiophene (P3HT) semiconductor.

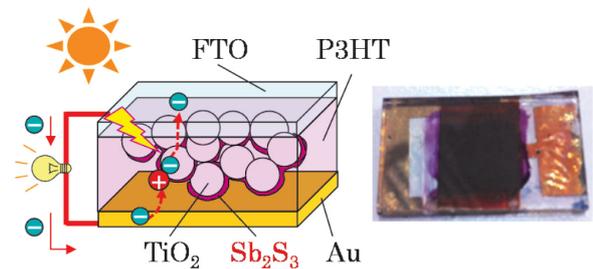


図-4 Sb₂S₃量子ドット増感型固体太陽電池構成
Fig. 4 Constituent materials of Sb₂S₃ ss-QDSSC

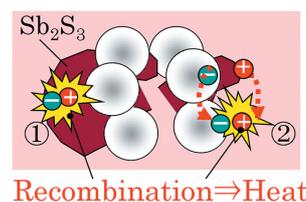


図-5 Sb₂S₃量子ドット増感型固体太陽電池の課題
Fig. 5 Issues of Sb₂S₃ ss-QDSSC

2.4 高効率化のためのプロセスの改善

プロセスは図6の3つのステップに分けられる。

- “TiO₂ 基板形成” では、TiO₂とFTO透明電極との密着性を向上すると共により多くの光を取り込ませるために、ポーラス体で高表面積を確保する。
- “Sb₂S₃吸着” では、Sb₂S₃で生成した電子をTiO₂に注入させるため、TiO₂表面を覆う。
- “P3HT成膜” では、Sb₂S₃で生成した正孔を速やかにP3HTに移動させるため、Sb₂S₃との内部抵抗を減らす。

2.4.1 Sb₂S₃内での電子・正孔の再結合抑制

“Sb₂S₃吸着” では、十分な吸光度を持ち、かつ再結合をさせない均質な薄い層を形成するプロセスの見極めが必要である。今回、既にドットとなったものを吸着するのではなく、低温の液相の中で丁寧に核成長させながらTiO₂に吸着させる化学浴槽堆積（CBD：Chemical Bath Deposition）法を適用し、吸着時間を調整した。量子ドット研究が盛んなイスラエルの研究者がGrätzel研究室に在籍しており、同氏のノウハウを大いに活用することができた。

ここで、光電変換効率η（以下、効率）は入射した光のエネルギーに対する太陽電池が発生する最大の電気エネルギーの割合であり、下記の関係式および図7で表される。

$$\eta = \frac{J_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P} \times 100 \quad [\%]$$

- η：光電変換効率 V_{oc}：開放電圧
- J_{sc}：短絡電流密度 FF：Fill Factor
- P：照射光強度密度

高効率化を狙うには、図7の青色の面積を増やすこと、すなわち電流、電圧、FFを上げることになる。

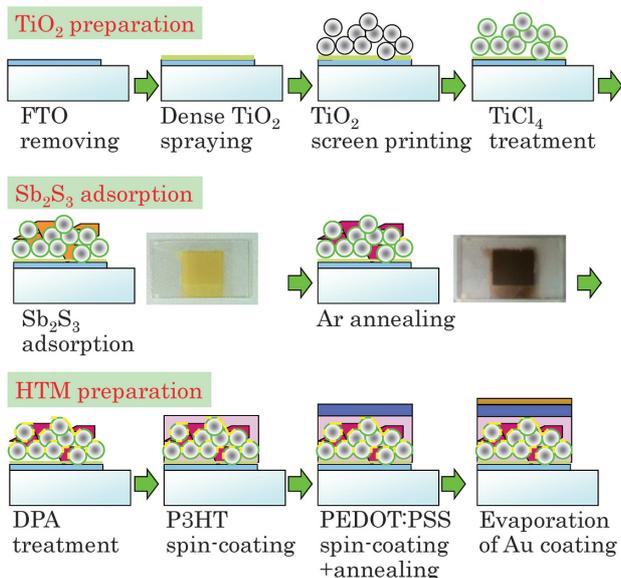


図-6 Sb₂S₃量子ドット増感型固体太陽電池のプロセス
Fig. 6 Fabrication process of Sb₂S₃ ss-QDSSC

Meanwhile, holes migrate to the P3HT and a cycle of collecting the electrons arriving at the Au counter electrode is repeated, which converts optical energy into electrical energy.

As described here, the fundamental operating principle is the same as that of DSSCs, but because the light-absorbing elements are quantum dots and a solid electrolyte is used, an ss-QDSSC has the following intrinsic issues (Fig. 5).

- (1) Because of the thick Sb₂S₃ light-absorbing layer, electrons separated in the cell interior recombine with holes before being injected into TiO₂ and are lost as thermal energy.
- (2) Because the solid P3HT electrolyte is in direct contact with the exposed TiO₂, electrons from TiO₂ flow into P3HT (reverse electron transfer), recombine with holes and are lost as thermal energy.

It was hypothesized that these two issues could be resolved by coating a thin layer of Sb₂S₃ uniformly on the TiO₂ surface. For that purpose, it was necessary to adapt the DSSC process to ss-QDSSCs and also to make improvements.

2.4 Process improvements for obtaining higher efficiency

The cell fabrication process is divided into the following three steps as shown in Fig. 6.

- Preparation of TiO₂ substrate: In this step, a large porous surface area is prepared in order to improve adhesion between TiO₂ and the transparent FTO electrode and also to capture a larger amount of light.
- Sb₂S₃ adsorption: In this step, the TiO₂ surface is masked in order to inject electrons produced by Sb₂S₃ into TiO₂.
- P3HT deposition: In this step, the internal resistance with Sb₂S₃ is reduced so that holes produced by Sb₂S₃ can quickly transfer to P3HT.

2.4.1 Prevention of electron-hole recombination in Sb₂S₃

In the Sb₂S₃ adsorption step, it was necessary to define a process for forming a homogeneous thin film that has ample absorbance and also prevents electron-hole recombination. In this study, a chemical bath deposition

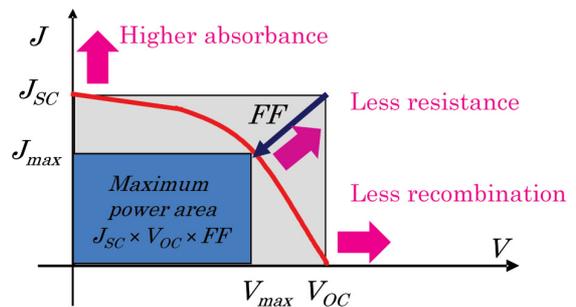


図-7 太陽電池の性能評価項目と向上方策
Fig. 7 Test items of SC performance and improvement measures

表1に示す様に、Sb₂S₃吸着量は吸着時間に比例して増加し、それに伴い光の吸収量が増えるため、電流が増大する。しかし、吸着時間が2時間以降経過後は電流が減少したことから、光吸収量は増加するものの、Sb₂S₃の粒子内での再結合が促進されて熱エネルギーとして失われたためと考えられる。

2.4.2 TiO₂/P3HT間の再結合抑制

再結合抑制には、デシルホスホン酸 (DPA) でTiO₂表面の前処理を行った。DPA処理は色素増感での色素/TiO₂の界面においても同様な再結合抑制効果が得られていることが最近Grätzel研究室で見出されていた。表2にDPAを用いた時の電流電圧測定結果を示す。

今回のDPAを用いることで、特に電圧とFFの向上が見られ、この材料系で最高レベルの効率 $\eta = 3.9\%$ が得られた。この向上した原因をインピーダンス解析と呼ばれる手法にて、TiO₂/P3HT間における再結合抵抗を調べた結果、DPAで表面修飾することで再結合が起こりにくくなっていることが明らかになった。つまり、再結合を抑制したと言える。このことから、図8で示した様に、Sb₂S₃から電荷分離してTiO₂層に注入された電子がTiO₂露出面を通じてP3HTの正孔と再結合 (逆電子移動) し、熱エネルギーとして損失していたが、DPAを修飾することでブロッキングレイヤとして機能し、再結合を防いでいるというメ

(CBD) method was applied and the adsorption time was adjusted. Sb₂S₃ was adsorbed on TiO₂ in a low-temperature liquid phase while carefully growing the nucleus of the dots rather than adsorbing existing dots. A researcher from Israel where vigorous research is being done on quantum dots was working in Professor Grätzel's laboratory and extensive use was made of his know-how.

Photoelectric conversion efficiency η refers to the maximum proportion of electrical energy generated by a solar cell relative to the energy of the incident light. It is expressed by the following relational equation and is shown in Fig. 7.

$$\eta = \frac{J_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P} \times 100 \quad [\%]$$

- η : photoelectric conversion efficiency
- J_{sc} : short-circuit current density
- P : irradiation light intensity density
- V_{oc} : open-circuit voltage
- FF : fill factor

For the purpose of improving efficiency, it is necessary to increase the blue area in Fig. 7, that is, to increase the current, voltage and fill factor.

As indicated in Table 1, the amount of Sb₂S₃ adsorbed increases in proportion to the adsorption time. Because the amount of light absorbed increases accordingly, the current increases. However, because the current decreased after the adsorption time exceeded 2 hr, it is presumed that electron-hole recombination was promoted inside the Sb₂S₃ particles, causing the loss of electrons as thermal energy even though the amount of light absorbed increased.

2.4.2 Prevention of recombination between TiO₂/P3HT

To prevent recombination, the TiO₂ surface was pretreated with decylphosphonic acid (DPA). It was recently discovered in Professor Grätzel's laboratory that the application of this DPA treatment to the dye/TiO₂ interface in DSSCs has the same effect of inhibiting recombination. Table 2 compares the measured current and voltage with and without the DPA treatment.

The results show that the DPA treatment especially improved both the voltage and fill factor, resulting in the highest level of efficiency $\eta = 3.9\%$ for this material system. The reason for this improvement was examined by applying a technique called impedance analysis to investigate the recombination resistance between TiO₂/P3HT. The analysis revealed that recombination tended not to occur as a result of modifying the surface with DPA, which implies that recombination was inhibited.

The following mechanism was inferred from these results. As shown in Fig. 8, without the DPA treatment the electrons produced by charge separation from Sb₂S₃ and injected into the TiO₂ layer passed through the exposed TiO₂ surface, recombined with holes in P3HT (reverse

表-1 吸着時間が太陽電池性能に及ぼす影響
Table 1 Effect of adsorption time on SC performance

Adsorption time	1 hr	2 hr	3 hr
After adsorption (Before annealing)			
J_{sc} [mA/cm ²]	8.9	13.3	11.4
Efficiency η [%]	2.7	3.8	3.3

表-2 DPAを用いた時の太陽電池特性
Table 2 Comparison of ss-QDSSC performance with/without DPA

	η [%]	V_{oc} [mV]	J_{sc} [mA/cm ²]	FF
Without DPA	3.1	472	13.8	0.48
With DPA	3.9	510	14.2	0.54

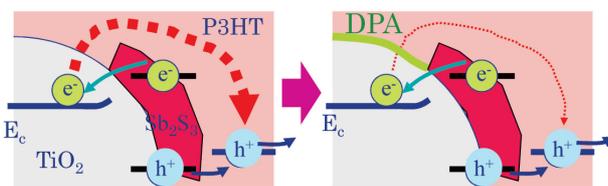


図-8 DPAによる表面修飾の効果
Fig. 8 Effect of surface modification by DPA

カニズムが推定できた。すなわち、逆電子移動を抑制できた結果として V_{oc} 向上につながり、効率向上したと考えている。

3. ま と め

- EVの航続距離延長には低コストかつ高効率の太陽電池が必須であり、次世代型の量子ドット増感型固体太陽電池が有望と考え、 Sb_2S_3 量子ドットで検討した。
- 高効率化への課題は、光吸収体内及び $TiO_2/P3HT$ 間での再結合を抑制することであり、それぞれ量子ドットの粒径制御及びDPAによる TiO_2 表面修飾で改善し、効率 $\eta = 3.9\%$ を達成した。
- インピーダンス解析からDPAがブロッキングレイヤとして機能した結果、電圧向上につながったことが推定できた。

4. 謝 辞

本研究の成果はGrätzel教授を中心に、量子ドットの造詣が深いDr. Lioz、解析のスペシャリストであるDr. Thomasでチームを編成し、改良に改良を重ねた結果によるものである。また、研究以外においては、日産インターナショナル社から現地生活面など多大なサポートを頂いた。これら関係者各位に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) T. Fukumoto et al.: Effect of Interfacial Engineering in Solid-State Nanostructured Sb_2S_3 Heterojunction Solar Cells, *Advanced Energy Materials*, Vol. 3, No. 1, pp. 29-33 (2013).

electron transfer) and were lost as thermal energy. In contrast, the surface modification with DPA formed a blocking layer that acted to prevent recombination. In other words, inhibiting reverse electron transfer presumably resulted in a V_{oc} improvement that led to greater efficiency.

3. Conclusions

Low-cost and high-efficiency solar cells are needed to extend the EV driving range. It was hypothesized that applying next-generation solid-state quantum-dot-sensitized solar cells (ss-QDSSCs) would be a promising approach, so a study was made of a Sb_2S_3 ss-QDSSC.

One issue in achieving higher efficiency is to prevent electron-hole recombination in the light-absorbing element and between $TiO_2/P3HT$. The respective measures taken to prevent recombination were to control the quantum dot diameter and to modify the TiO_2 surface with a DPA treatment, which were effective in achieving efficiency $\eta = 3.9\%$.

The results of an impedance analysis suggested that DPA acted as a blocking layer that presumably resulted in improved voltage.

4. Acknowledgments

The results of this study are attributable to the repeated improvements achieved by the research team centered around Professor Michael Grätzel and including Dr. Lioz Etgar, who is deeply knowledgeable of quantum dots, and Dr. Thomas Moehl, a simulation specialist. Thanks are also due Nissan International S.A. for its generous support in Switzerland. The author would like to express his deep appreciation to everyone concerned.

References

- 1) T. Fukumoto et al., Effect of Interfacial Engineering in Solid-State Nanostructured Sb_2S_3 Heterojunction Solar Cells, *Advanced Energy Materials*, Vol. 3, No. 1, pp. 29-33 (2013).

■ 著者 / Author(s) ■



福本 貴文
Takafumi Fukumoto



丹羽 勇介
Yuusuke Niwa



太田 最実
Yoshimi Ohta



菅 克雄
Katsuo Suga

触媒実有効表面積の解析に関する研究

Analysis of Effective Surface Area for Electrochemical Reaction

井 殿 大*
Hiroshi Iden

抄 録 日産が掲げている「ゼロ・エミッションリーダーシップ」を実現する主役は言うまでもなく電動車である。電気自動車の動力源は、Liイオンバッテリー、水素を燃料とする燃料電池（PEFC）など、様々な技術が現時点では考えられているものの、これらに共通して言えることは、いずれも電気化学反応を利用する電気化学デバイスということである。電気化学デバイスの最適化において最も重要なことは、その電気化学反応場である触媒の有効表面積を広く確保することである。しかし、実際に反応が進行している際の触媒表面積についての理解は決して十分とは言えない。そこで、Imperial College Londonとの共同研究を通じ、PEFCのPt触媒上における電気化学有効表面積計測を目的として、新規手法の開発を試みた。その結果、有効表面積のみならず、有効表面積低下を引き起こす吸着質の大きさも評価可能な手法を開発することができた。

Summary Nissan is aiming to be a leader in the field of zero-emission vehicles, putting primary emphasis on electric vehicles (EVs). There are several possible candidates as power sources such as lithium-ion batteries and polymer electrolyte fuel cells (PEFCs) that run on hydrogen, among others. Their common denominator is that they are all electrochemical devices operating on electrochemical reactions. The most important thing for optimizing such electrochemical devices is to maximize the surface area of the electrocatalysts where the electrochemical reactions occur. However, the effective surface area under real operation is still not sufficiently understood. Accordingly, Nissan collaborated with Imperial College London in an attempt to develop a new method for measuring the effective surface area of platinum (Pt), which is the electrocatalyst for PEFCs, for electrochemical reactions under actual operation. Through this collaboration, we have successfully developed a new method that enables us to measure not only the effective surface area but also the size of blocked area that causes loss of the effective surface area.

Key words : Research & Development, fuel cell, effective surface area, RDE, HOR

1. はじめに

日産はゼロ・エミッションの領域でリーダーになるという目標を掲げており、その主役は、ゼロ・エミッション車、すなわち電動車である。その動力源として、リチウムイオンバッテリー、水素を燃料とする燃料電池（PEFC）など、様々な可能性が現時点では考えられ、これらの研究開発が並行して進められている。各デバイスに共通して言えることは、いずれも電気化学反応を利用する電気化学デバイスということである。電気化学デバイスの最適化において最も重要なことは、その電気化学反応場である触媒の有効表面積を最大限利用できるように設計することである。しかし、実際に反応が進行している際の触媒表面積についての理解は、決して十分とは言えない。この理解無くしてデバイスを最適化し、コスト競争力を確保することは非常に困難である。これは、全ての電気化学デバイスにおける共通の課題である。そこで本研究では、電気化学反応

1. Introduction

Nissan has set the goal of being a leader in the field of zero-emission mobility and one of the principal means of accomplishing that is through zero-emission vehicles, namely, electric vehicles (EVs). At present, various possibilities can be considered as the power source of EVs, including lithium-ion batteries and polymer electrolyte fuel cells (PEFCs) using hydrogen as the fuel. Research and development work is currently proceeding in parallel on these different technologies. One of their common features is that they all represent electrochemical devices, which make use of electrochemical reactions. In optimizing electrochemical devices, the most critical factor is to execute a device design that allows maximum use of the effective surface area of the catalyst where the electrochemical reactions take place. However, a sufficient understanding is still lacking of the catalyst surface area while the reactions are actually proceeding. Without such an understanding, it would be next to impossible to

*EVシステム研究所 / EV System Laboratory

難しい。白金 (Pt) 酸化物量を定量し、そこから逆算する方法もあるが、いくつかの仮定が必要なうえ、それで求めた表面積では解釈できない結果も多く、定量性には疑問が残る方法である。

2.2 新規手法開発の気づき

そこで、低電位でも十分速く進行することから、通常は低電位で測定を実施する燃料極のHORにおける、低電位から高電位まで掃引したときの電流挙動を、回転電極を用いて調査した。その結果、0.1 Vまでに回転数で定められる物質輸送限界の電流値に達し、PEFC酸素極の実運転領域である0.6 V以上の高電位において、電流値の低下が確認された (図2)。そしてこの結果を物質輸送性、つまり回転数に対して整理 (Koutecky-Levichプロットを作成) したグラフを図3に示す。図3において、高電位におけるKoutecky-Levichプロットの傾きは回転数に応じて変化し、低回転側 (図の右側) では低電位と同様の傾きを示し、回転数の増大に伴い傾きが増加する傾向が確認できた。

同様の現象はこれまでも報告されているが、その解釈は高電位においてPtの水素酸化能が低下したという曖昧なものであった。しかし、この現象を詳細に理解することで実有効表面積評価のヒントが得られるのではないかと考えた。Koutecky-Levichプロットの傾きは、電極の幾何面積: A 、バルクの反応物濃度: C_0 、電解液中における反応物の拡散性: D 、電解液の動粘度: ν で決まるため、本来一定であるべきである。しかし、前述の通り、高電位においては、回転数の増大に伴って傾きが大きくなる傾向が確認された。この変化が、実はディスク電極上の実有効表面積の変化によるものであり、本来変わるはずのないパラメータを変えてしまっているのではないかと考えた。

2.3 モデルを用いた現象の理論的解釈

この仮説が正しいとすれば、傾きの変化が認められない低電位であっても、電極表面を部分的に被覆した場合

to find the reaction area. However, in addition to requiring several hypotheses, this method leaves some doubt about quantitativity because there are many results that cannot be interpreted on the basis of the surface area calculated in this way.

2.2 Reasoning behind development of new measurement method

Measurement of HOR at the fuel electrode is usually done at a low potential because the reaction proceeds sufficiently fast even at low potentials. A rotating electrode was used to investigate the current behavior when sweeping from a low to a high potential in the HOR measurement. The results showed that the current reached the material transport limit determined by the electrode rotation rate by a potential of 0.1 V and that the current declined at higher potentials above 0.6 V, which is the actual operating region of the PEFC oxygen electrode (Fig. 2). These results were then arranged in Koutecky-Levich plots showing the material transport property in relation to the rotation rate. The resultant graph is shown in Fig. 3. It is seen that the slope of the Koutecky-Levich plots at high potentials changed corresponding to the rotation rate. At lower rotation rates on the right side of the figure, the slope was same as that at low potentials and tended to increase as the rotation rate increased.

The same type of phenomenon has been reported previously, but ambiguously interpreted as a decline in the hydrogen oxidation capability of Pt at high potentials. However, we reasoned that a detailed understanding of this phenomenon might provide a hint for evaluating the effective surface area of the catalyst. The slope of Koutecky-Levich plots is determined by the geometrical area of the electrodes (A), the bulk reactant concentration (C_0), diffusivity of the reactants in the electrolyte (D), and the kinematic viscosity (ν) of the electrolyte, which means it should be constant by nature. However, as noted above, the results showed that the slope tended to increase with an increasing rotation rate at high potentials. It was reasoned that this change was due to a change in the effective surface area of the disk electrode, and thus it

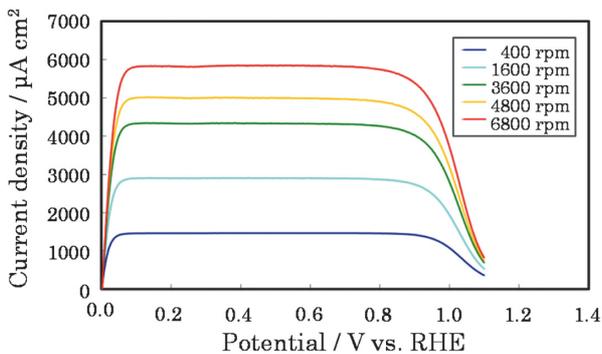


図-2 種々の回転数における水素酸化電流の電位依存性
Fig. 2 Potential dependence of HOR currents at different rotation rates

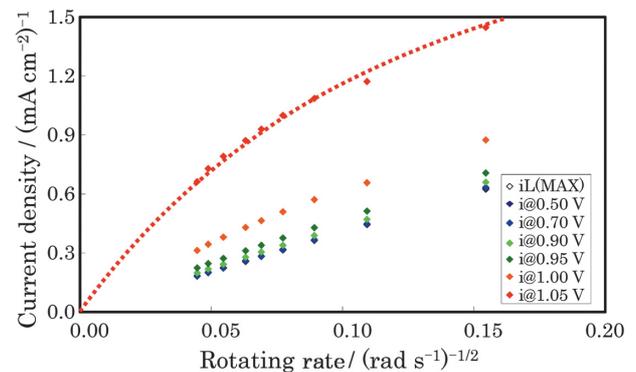


図-3 HOR に対する Koutecky-Levich プロット
Fig. 3 Koutecky-Levich plots for HOR

は傾きが増大することになる。そこで、この仮説を検証するための実験を考案した。被覆物としては、Ptに特異吸着することで良く知られている一酸化炭素 (CO) を用いることとした。また、特異吸着したCOはPtの電位を上げることで二酸化炭素 (CO₂) に酸化除去される。この際に、上昇させる電位、保持時間などを制御すると、部分的にCOが吸着した状態とどまる。このような電極を作製し、同様に水素酸化反応電流を観測したところ、高電位で見られた場合と同じくKoutecky-Levichプロットの傾きが増大することを確認した (図4)。

Koutecky-Levichプロットの傾きの変化が示す物理的意味については、上述の検証実験で確認でき実有効表面積と相関があることが分かった。しかし、それを定量化するためには理論的な解釈が必要となる。それを実験的に得ようとすると、電極形状、部分被覆形態、超高回転領域における回転数などを制御する必要がある。これらの制御は容易ではないので、モデルを用いたシミュレーションが適当と判断した。電極表面への物質輸送現象は、Koutecky-Levich式においては拡散で表されている。そこで、電極表面が被覆物によって部分的に有効でないモデルを構築して、輸送現象としては拡散のみを考慮し、電極表面における反応物濃度分布を計算した。ここで、電極最表面における濃度変化が電流に相当し、拡散層厚さが回転数に相当する。そのためこのシミュレーションから、電流値(さらには電流密度)と回転数の関係が得られる。つまり、シミュレーションでKoutecky-Levichプロットを描くことが可能である。

拡散モデルを用い、パラメータとして被覆率 (θ) と被覆物サイズ (l) を変えた計算を行った。その結果を図5に示す。図5においてはパラメータをどう変化させてもプロットが上に平行移動するだけ、言い換えると切片が増大するだけで、傾きに変化は見られなかった。つまり、実験結果は、拡散現象だけでは説明できないと言える。

次に、輸送現象として対流のみを考慮した対流モデルを用いて同様の計算を行った。回転電極の場合、有効サ

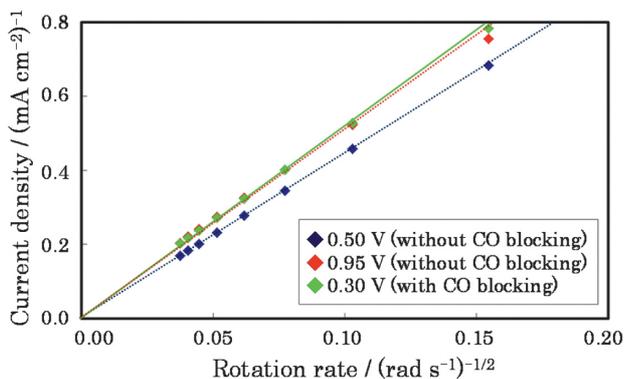


図-4 Koutecky-Levich プロット (CO による部分被覆後)
Fig. 4 Koutecky-Levich plots with partial CO blocking

presumably changed a parameter that originally should not change.

2.3 Theoretical interpretation of the slope change using a model

Assuming that this hypothesis was correct, partial blocking of the electrode surface would cause the slope to change even at low potentials where no change in the slope was observed. Therefore, an experiment was designed for the purpose of validating this hypothesis. Carbon monoxide (CO), which is known for specific adsorption on Pt, was selected as the blocking material. In addition, it was assumed that this specific adsorption of CO on Pt would raise the potential of Pt, resulting in CO oxidation and removal as carbon dioxide (CO₂). At that time, some CO could remain adsorbed on the catalyst by controlling the rise in the potential, holding time or some other conditions. Such an electrode was then fabricated and the HOR current was observed in the same way. The results confirmed that the slope of the Koutecky-Levich plots increased at low potentials in the same way as was observed at high potentials (Fig. 4).

The physical meaning of the change in the slope of the Koutecky-Levich plots was thus confirmed by the verification experiment and shown to correlate with the effective surface area of the catalyst. However, a theoretical explanation was needed to quantify the relationship. Trying to obtain that explanation experimentally would require controlling many parameters such as the electrode geometry, morphology of the partially blocked area, and the electrode rotation rate, among others. Because it would not be easy to control all these parameters, it was concluded that conducting simulations with a model would be more suitable.

The transport of materials to the electrode surface is represented by diffusion in the Koutecky-Levich equation. Accordingly, a model was constructed that assumed the electrode surface was rendered partially ineffective by CO blocking and diffusion was the only transport phenomenon considered. The model was used to calculate the concentration distribution of the reactants at the electrode surface. It was assumed that the change in concentration

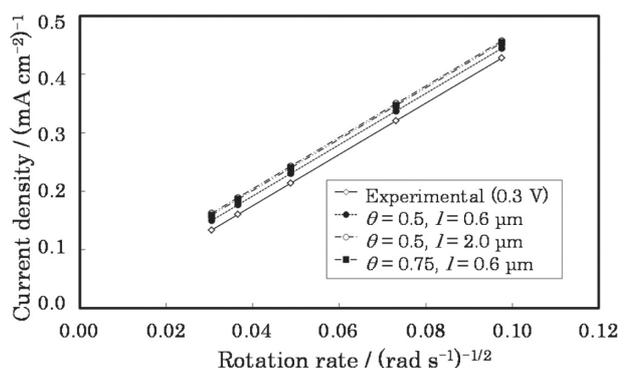


図-5 拡散モデルで計算した Koutecky-Levich プロット
Fig. 5 Koutecky-Levich plots based on a diffusion model

する) 傾向を確認できた。前の対流モデルのところでも述べたように、被覆物サイズが拡散層厚さよりも十分に大きい場合、例えば拡散層が非常に薄くなる高回転領域では、拡散の影響を無視できるため、対流が支配的となる。言い換えれば、被覆物があろうとも、拡散層が十分に厚い(回転数が低い)場合は拡散が支配的になり、対流の影響は小さくなる。これらのことから、Koutecky-Levichプロットの傾きの変化は、電極表面に対する反応物の輸送現象の推移、具体的には、低回転においては拡散が、高回転においては対流が支配的となる輸送現象の推移を表していると考えられた。図7において、被覆物サイズが大きいものほど、低い回転数から傾きが変化している傾向も確認できる。これは、被覆物サイズが大きいものほど、比較的低い回転数から対流の影響がみられているということを示しており、前述の理論的解釈と一致する。つまり、実験結果は流拡散モデルで再現できるということが言える。

2.4 実有効表面積の定量

理論的な解釈が得られたので、実有効表面積変化の定量について検討した。対流モデルでは傾きの変化が χ^{eff} に相当するため、対流支配となる超高回転における傾きを外挿することで χ^{eff} を求めることができる。しかし、求めたいものは χ^{eff} のみならず、実有効表面積 $(1-\theta)$ である。ここで、 χ^{eff} は θ と l の二つのパラメータに依存している。例えば同じ θ であっても、 l が小さく、被覆物が高分散していれば、有効な部分へのさらなる反応物の輸送が促進されるため、 χ^{eff} は $1-\theta$ までは低下しない。そのため、これらの関係を理解し、なお且つ分離することができれば、 $1-\theta$ が得られることになる。この分離方法について検討した。実有効表面積と被覆物サイズは、電極の電位のみ依存し、 χ^{eff} は電極の形状にも依存すると考えられる。本検討ではディスク電極を用いているが、被覆物が存在する場合、回転中心部近傍と電極エッジ部周辺では対流の影響が異なり、後者の方が対流による物質輸送速度向上の恩恵を受け、結果的に有効性が大きく現れるはずである。このことから、例えばディスク電極のサイズが小さくなれば、同じ電位であっても(同じ θ 、 l であっても)、より低回転から傾きの変化がみられるということになる。このように、異なるディスク径の結果が複数あれば χ^{eff} 、 θ 、 l の関係式が複数得られるということになる。それらを連立させることで、それぞれを分離することが可能となる。

実際に、通常5 mmのディスク径を2 mmに小さくしたPtディスク電極を作製し、これまでと同様の実験を繰り返し行った。その結果、想定通り、同じ電位であっても、低い回転数からKoutecky-Levichプロットの傾きが変化する傾向を確認できた。また、この傾向はシミュレーションでも確認できた。得られた異なるディスク径の実験結果から θ 、 l を分離し、電位に対し整理した(図8)。図8から、

the diffusion layer is sufficiently thick (i.e., the rotation rate is low), diffusion becomes dominant and the influence of convection decreases even if the electrode surface is blocked.

Based on these results, it was inferred that the change in the slope of the Koutecky-Levich plots was attributable to the transition in the transport of the reactants to the electrode surface; specifically, the dominance of diffusion at low rotation rates and convection at high rotation rates represented this transition in the transport phenomenon. It is observed in Fig. 7 that the slope tended to change from a low rotation rate with increasing size of the CO blocked area. This indicates that the influence of convection was seen at a relatively low rotation rate as the size of the blocked area became bigger, which is consistent with the theoretical explanation mentioned above. In other words, the experimental results were reproduced by the convective-diffusion model.

2.4 Quantification of actual effective surface area

Having obtained a theoretical explanation, a study was then undertaken to quantify the actual effective surface area of the catalyst. Because the change in the slope of the Koutecky-Levich plots corresponded to χ^{eff} with the convection model, χ^{eff} can be found by extrapolating the slope at ultra-high rotation rates where convection is dominant. However, what we wanted to find was not just χ^{eff} , but the actual effective surface area $(1-\theta)$. It was assumed that χ^{eff} is dependent on two parameters, θ and l . For example, even at the same value of θ , if l is small and the blocked area is highly diffused, it will promote the transport of more reactants to the effective portion, so χ^{eff} will not decrease as far as $1-\theta$. Consequently, if these relationships are correctly understood and can be separated, it should be possible to obtain $1-\theta$.

A method of separating the relationships was then investigated. It was assumed that the effective surface area and the size of the blocked area were dependent only on the electrode potential and that χ^{eff} was also dependent on the electrode geometry. This investigation presumed the use of a disk electrode. When blocking occurs, the influence of convection differs between the vicinity near the center of rotation and the area around the edges of the electrode. The latter area benefits from the improved rate of material transport due to convection, with the result that catalyst effectiveness should be markedly manifested. This means that with a smaller disk electrode the change in the slope will appear at a lower rotation rate even at the same potential (i.e., at the same values of θ and l). In this way, if results are available for different disk electrode diameters, multiple relational equations can be formulated for χ^{eff} , θ and l . By solving them simultaneously, the relationships can be separated.

A Pt disk electrode of 2 mm in diameter, smaller than the ordinary 5-mm-diameter disk, was actually fabricated and the same types of tests as those explained above were repeated. As expected, the results confirmed that the slope

4. 謝 辞

本研究を進めるにあたり、実験、計算の師事を下さった Anothony Kucernak 教授、英国での生活を円滑に進める手助けをして下さった Nissan Technical Centre Europe の Spong Richard 氏、佐千恵・ウッドランド氏に心から感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) H. Iden et al.: Analysis of effective surface area for electrochemical reaction derived from mass transport property, J. Electroanal Chem., Vol. 734, pp. 61-69 (2014).

4. Acknowledgments

The author would like to thank Professor Anthony Kucernak for his guidance concerning the experiments and calculations performed in this study. Thanks are also due Richard Sprong and Sachie Woodland at Nissan Technical Centre Europe for their assistance in enabling me to enjoy a comfortable life in the U.K.

References

- 1) H. Iden et al., Analysis of effective surface area for electrochemical reaction derived from mass transport property, J. Electroanal Chem., Vol. 734, pp. 61-69 (2014).

■著者 / Author(s)■



井 殿 大
Hiroshi Iden

新型VR30DDTTエンジンの開発

Development of the New VR30DDTT Engine

石井 仁*
Hitoshi Ishi

安藤 章作*
Shosaku Ando

志方 章浩**
Akihiro Shikata

田中 勉*
Tsutomu Tanaka

林 昭宏***
Akihiro Hayashi

高嶋 和朗*
Kazuaki Takashima

抄 録 VQ37VHRエンジンの後継として開発したVR30DDTTエンジンは新世代に相応しく、優れた燃費性能と世界中の厳しい排気規制にも対応できる環境性能を併せ持つ。またInfinitiブランドのフラッグシップエンジンに相応しく、ライバルを圧倒する動力性能も数々の最新のテクノロジーを採用することで実現した。本稿ではVR30DDTTが実現した圧倒的な性能とそれを支える最新のテクノロジーについて紹介する。

Summary The VR30DDTT engine was developed as the successor to the VQ37VHR engine. This new engine provides good environmental performance, including high fuel efficiency and the latent capacity for compliance with future exhaust emissions regulations all over the world. It also delivers outstanding driving performance as the Infiniti brand's flagship V6 engine, owing to the adoption of many advanced technologies. This article describes the overwhelming performance achieved by the VR30DDTT engine and the advanced technologies it incorporates.

Key words : Power Unit, gasoline engine, direct injection, turbocharger, inter cooler, downsizing, engine performance, thermal efficiency

1. はじめに

米国のCAFE、GHG排出規制など地球温暖化対策やエネルギーセキュリティの観点から、燃費規制は年々厳しくなっている。また大気汚染物質の削減も、自動車が持続可能な社会の一員として今後も存在し続けていく上で必要不可欠な取り組みである。究極のゼロ・エミッション車は電気自動車や燃料電池自動車ということであろうが、ゼロ・エミッション車への完全な移行には技術的な課題だけでなく、インフラの整備などまだ克服すべき課題が多々あり、もうしばらく時間を要する。当面内燃機関が自動車の動力源の主流であり続けることは間違いなく、各社ダウンサイジングなどのアプローチにより、一層の効率向上に取り組んでいる。一方で力強さや軽快感といった運転する喜びや楽しみにつながるダイナミック・パフォーマンスは、特にラグジュアークラスにおいて極めて重要である。本エンジンの開発にあたっては将来にわたる排気・燃費規制の動向を見据え、グローバルに展開可能な基本素質を備えつつも、走りには一切の妥協を排除し、ライバルに対して圧倒的な優位性を獲得することを目標とした。

1. Introduction

Fuel economy regulations are becoming increasingly tighter every year from the standpoints of energy security and measures to curb global warming, as typified by the Corporate Average Fuel Economy (CAFE) and greenhouse gas emissions standards adopted in the United States. Efforts to reduce air pollutants from vehicles are also indispensable and necessary if the automobile is to continue to be a member of sustainable societies in the years ahead. While the ultimate form of zero-emission vehicles may be electric vehicles and fuel cell vehicles, it will take some time yet before they become prevalent. Numerous issues must be overcome to facilitate a complete transition to zero-emission vehicles, not only technological problems, but also the implementation of the necessary infrastructure to support their use. There is no doubt that internal combustion engines (ICEs) will continue to be the mainstream power sources of vehicles for the foreseeable future. Vehicle manufacturers everywhere are taking various approaches to further improve ICE efficiency such as through the downsizing of engines.

At the same time, dynamic performance that leads to the joys and pleasures of a powerful and nimble driving experience is also a vitally important vehicle attribute, especially in the luxury car category.

*パワートレインプロジェクト部 / Powertrain Project Management Department **パワートレイン制御開発部 / Powertrain Control Engineering Department ***エンジン&トランスミッション技術開発部 / Engine and Transmission Engineering Department

2. 開発の狙い

新型VR30DDTTはVQ37VHRの後継として次世代のInfinitiブランドを支えるフラッグシップエンジンとして企画された。VQエンジンは1994年の市場投入以来、その軽やかな吹け上がりやレスポンスの良さが市場で高く評価されており、2002年にVQ35DEをInfiniti G35に搭載し、このセグメントで圧倒的なダイナミック・パフォーマンスを誇った。しかし2005年にドイツ製プレミアムセダンに3.0L 6気筒直噴ターボエンジンが搭載され、当社ではそれに対抗してVQ35HR、VQ37VHRを開発し進化を遂げてきたが、拡大するマーケットのニーズの変化や今後の排気・燃費規制への対応を考慮すると、排気・燃費性能のポテンシャルが高く、かつ圧倒的な動力性能を実現するためには新型3.0L V6直噴ターボエンジンへの更新が得策であると判断した。今回VR30DDTTを開発するにあたり、このVQエンジンのDNAとも言うべき軽やかでシャープなレスポンスをターボエンジンで実現することが、最大の課題であった。

3. エンジンの概要と主要諸元

表1にエンジンの主要諸元、図1に外観図を示す。

VR30DDTTは前型VQ37VHRに対して、動力・燃費性能の大幅向上を実現するために、排気量の3.0L化、過給

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

	Infiniti Q50 VQ37VHR	Infiniti Q50 VR30DDTT Standard output	Infiniti Q50 VR30DDTT High output
Engine type	DOHC 24-valve V6	DOHC 24-valve V6	
Displacement (cm ³)	3696	2997	
Bore × stroke (mm)	95.5 × 86.0	86.0 × 86.0	
Compression ratio	11.0:1	10.3:1	
Variable valve timing control	INT.: Hydraulic EXH.: Without	INT.: Electric EXH.: Hydraulic	
Turbocharger	Without	Twin turbochargers	
Intercooler	Without	Water cooled	
Fuel supply system	EGI	DIG	
Max. power (HP / rpm)	328 / 7000	300 / 6400	400 / 6400
Max. torque (N·m / rpm)	363 / 5200	400 / 1600~5200	475 / 1600~5200



図-1 エンジン外観図
Fig. 1 External view of engine

The aim set for the development of the new VR30DDTT engine was to achieve overwhelming superiority over rival models by not allowing any compromises with regard to driving performance, while endowing the engine with fundamental qualities supporting its global deployment by envisioning future trends in emissions and fuel economy regulations.

2. Development Aim

The VR30DDTT engine was developed to succeed the VQ37VHR engine as the flagship engine for supporting next-generation Infiniti brand models. Since the VQ engine was put on the market in 1994, it has been highly acclaimed for its perky acceleration and excellent throttle response. The VQ35DE engine that was mounted on the Infiniti G35 in 2002 enabled the car to boast overwhelming dynamic performance in its segment. Subsequently, to compete with a 3.0L 6-cylinder direct-injection turbocharged engine that was fitted to a German premium sedan in 2005, Nissan further evolved the VQ series by developing the VQ35HR and VQ37VHR engines. However, considering the changes in expanding market needs and compliance with future emissions and fuel economy standards, it was concluded that it was advisable to update the flagship engine to a new 3.0L direct-injection turbocharged V6 in order to secure higher potential for emissions and fuel economy performance combined with overwhelming dynamic performance.

The biggest challenge to be addressed in developing the new VR30DDTT engine was to achieve in a turbocharged engine the perky and sharp throttle response that characterizes the DNA of the VQ engine series.

3. Engine Overview and Specifications

The specifications of the VR30DDTT engine are listed in Table 1 in comparison with those of the previous engine, and Fig. 1 shows an external view of the engine.

The VR30DDTT engine embodies a host of cutting-edge technologies to achieve substantial improvements in power and fuel economy compared with the previous VQ37VHR engine. These include the adoption of 3.0L displacement, application of turbocharging, and the use of a direct-injection gasoline (DIG) combustion system, among others (Table 2).

Nearly all of the major component parts were newly designed, but except for the bore diameter, the principal dimensions were continued from the previous engine. That held down new capital investment in equipment by enabling effective use of the existing production facilities at the Iwaki Plant where the engine is built.

4. Overwhelming Power Performance and Response

4.1 Development aim

The development aim was to achieve preeminent performance in a mass-marketed 3.0L turbocharged engine. Transient response usually requires a trade-off in

化、燃料の直噴化などの最新技術を投入している（表2参照）。

主要構成部品については、ほぼすべてを新設計する一方、ボア径以外の主要寸法を前型から踏襲することで、いわき工場設備の有効活用による投資抑制も実現している。

4. 圧倒的な出力性能とレスポンス

4.1 開発目標

量販3.0Lターボエンジンとして、突出した性能を目標に置いた。高出力型ターボエンジンではトレードオフとなる、過渡応答性についても妥協をせずに、インターセプト回転数1600rpmを実現した（図2）。

Infiniti Q50 2015年モデルに搭載するVQ37VHRは大排気量の自然吸気エンジンにVVEL（Variable Valve Event and Lift）を組み合わせ、アクセル踏み込み時の吸気管内圧力応答遅れを大幅に低減することで、応答の速いダイレクト感ある加速を実現している。しかしその後の加速Gの伸びが課題であったため、新型VR30DDTTでは応答の速いダイレクト感をそのままに、その後の伸び感（Swell感）を大幅に向上させることで、より気持ちのよい加速感を実現することを目標とした。VR30DDTTでは高い加速Gが、シフトアップまで息切れすることなく続き、2速へのシフトアップ後も高い加速Gが継続している。その結果、0-60mphの加速タイムは、前型に対して0.7秒の短縮を実現できた（図3）。

the case of a high-power turbocharged engine, but the VR30DDTT achieves an intercept speed of 1600 rpm, thus allowing no compromises with regard to responsiveness (Fig. 2).

The 2015 model year Infiniti Q50 is fitted with the VQ37VHR engine, a large-displacement naturally aspirated engine that incorporates Nissan’s Variable Valve Event and Lift (VVEL) system. This engine substantially reduces the pressure response lag in the intake manifold when the driver depresses the accelerator pedal to provide acceleration with a feeling of an immediate, direct response. However, the subsequent sensation of a sustained increase in acceleration (G) was still an issue. Therefore, the aim set for the new VR30DDTT engine was to achieve a much more pleasing acceleration feel by continuing the immediate, direct throttle response and markedly improving the sensation of a sustained increase in acceleration. The VR30DDTT engine continues to deliver high acceleration (G) without any hesitation until the transmission upshifts to second gear, after which it still sustains high acceleration (G). As a result, the VR30DDTT engine shortens the 0-60 mph acceleration time by 0.7 s compared with the previous VQ37VHR engine (Fig 3).

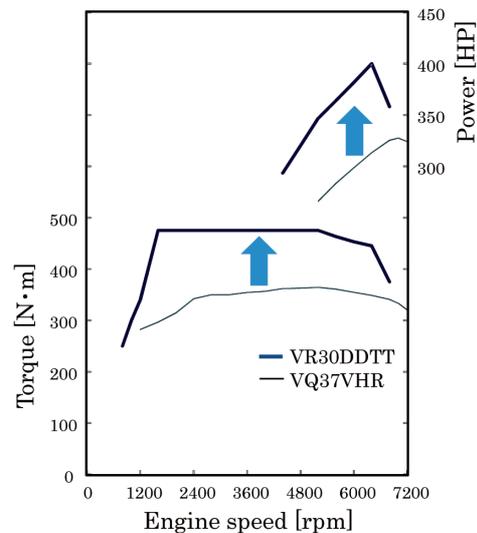


図-2 トルクカーブ
Fig. 2 Comparison of engine torque curves

表-2 投入アイテムリスト
Table 2 List of improvement measures

		Power & torque	Response	Fuel economy	Exhaust emissions	Weight savings
Engine proper & major moving parts	Thermally sprayed, mirror-finished cylinder bores	○		○		○
	Piston top rings with high thermal conductivity			○		
	Hydrogen-free DLC-coated piston rings			○		
	Alumite-coated piston crown underside			○		
	Optimized piston cooling channels and increased oil jet flow rate			○		
	Hybrid piston skirt coating			○		
	Electroprecipitated alumite coating treatment on piston ring grooves	○				
Cylinder head	High strength materials (pistons, crankshaft)	○				○
	Cylinder head with integrated exhaust manifold				○	○
	End gas cooling			○		
Valve train	Thinner cylinder head			○		
	Electrically operated VTC system		○	○	○	
	Sodium-filled exhaust valves			○		
	Optimized valve springs of beehive type			○		
	Increased radius of cam chain backside			○		
Turbocharging system	Discontinuation of rear chain case					○
	Compact twin turbos and turbine speed sensor	○	○		○	
	Electronically controlled wastegate			○	○	
Lubrication system	Water-cooled intercooler	○	○			
	Electronically controlled variable displacement oil pump			○		
	Plastic oil pan					○
Cooling	0W-20 low viscosity engine oil			○		
	DIG (20 MPa)	○	○	○	○	
Intake system	Multi-way control valve (MCV)			○		
	Plastic intake manifold					○

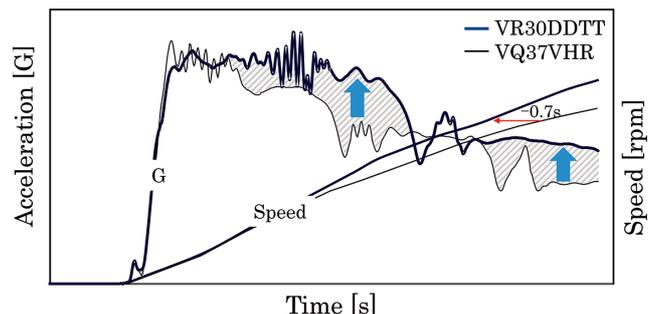


図-3 G-t カーブ
Fig. 3 Comparison of acceleration vs. time curves

4.2 採用技術

4.2.1 DIG (Direct Injection Gasoline) 燃焼システム

DIG燃料噴射においては、燃料噴霧と空気の混合気の形成が特に重要である。高いトルクと出力を発生させるためには燃料を均質に空気に混合させる必要があり、排ガス低減のためには始動直後に混合気中の燃料濃度を成層化し、点火プラグ周りに安定した濃い混合気を形成させる必要がある。そのためCFD (Computational Fluid Dynamics) をフル活用し、吸気ガス流動 (吸気ポート形状、バルブタイミング、ピストン冠面形状)、インジェクタの噴霧パターン、燃料圧力、噴射タイミング、分割比などを設計段階から最適化した。新型VR30DDTTでは最大3回噴射を採用している (図4、図5)。

4.2.2 可変動弁システム

通常走行において、使用頻度の高い低負荷領域では吸気バルブが閉じるタイミングを遅くするミラーサイクルを採用することで、ポンプロス低減し、燃費改善が可能となる。一方、加速シーンでは吸気バルブが開くタイミングを早くし、大きなオーバーラップを取ることで大きなトルクを発生させる必要がある。このようにバルブタイミングは、燃費領域とは要求が異なることから、燃費とシャープな加速の両立のために、速いVTC (Valve Timing Control) 変換速度が必要となる。

新型VR30DDTTでは、吸気側に、従来の油圧式に代わり電動VTCを採用することで、最適なバルブタイミングを遅れなくトレースできるシステムを構築し、燃費とレスポンスの両立の実現している (図6)。

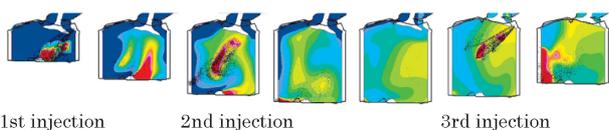


図-4 混合気形成
Fig. 4 Air-fuel mixture

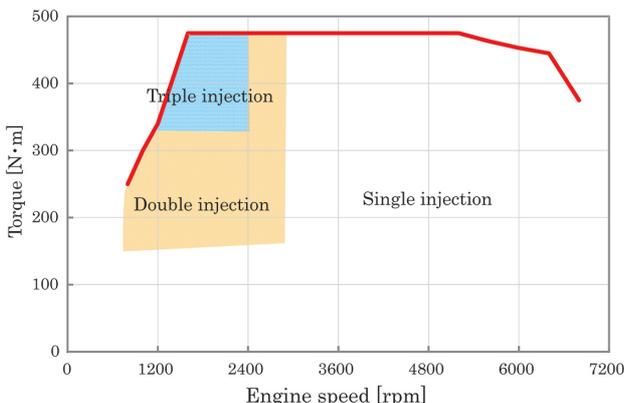


図-5 噴射回数
Fig. 5 Number of fuel injections

4.2 Technologies adopted

4.2.1 DIG combustion system

The formation of the air-fuel mixture is an especially important factor in a DIG combustion system. It is necessary to mix the fuel spray homogeneously into the air in order to produce high levels of torque and power. Moreover, to reduce engine-out emissions, the fuel concentration in the air-fuel mixture right after engine start must be stratified and a stable, rich air-fuel mixture must be formed around the spark plug. To accomplish that, full use was made of computational fluid dynamics (CFD) from the design stage onward to optimize the intake air flow (intake port geometry, valve timing and piston crown configuration), injector spray pattern, fuel pressure, injection timing, split injection ratio and other parameters. A fuel injection pattern with a maximum of three injections was adopted for the VR30DDTT engine (Figs. 4 and 5).

4.2.2 Valve timing control system

Adopting the Miller cycle with a late intake valve closing timing for the low-load region in which the engine frequently operates during ordinary driving makes it possible to improve fuel economy by reducing pumping losses. On the other hand, in acceleration situations when it is necessary to produce high torque, large valve overlap must be provided by applying an early intake valve opening timing. The required valve timing thus differs depending on the fuel economy region. For that reason, a valve timing control (VTC) system capable of changing the valve timing quickly is needed to obtain both good fuel economy and sharp acceleration response.

On the intake side of the VR30DDTT engine, an electrically operated VTC system was adopted in place of the previous hydraulically activated VTC. The VTC system is constructed so that it can trace the optimum valve timing without any delay, thereby providing both the desired fuel economy and response (Fig. 6).

4.2.3 Turbocharging system

High power output and response usually involve a trade-off in a turbocharged engine. A large-diameter turbine and compressor are advantageous for high power

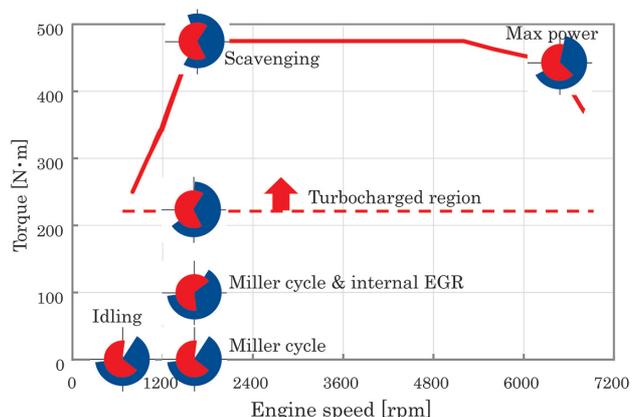


図-6 バルブタイミング
Fig. 6 Valve timing

VQ37VHR比+50%の筒内圧力に耐えうる本体・主運動系を、前述の主要寸法制約の中で実現している。

- ピストン、クランクシャフトの高強度材料適用（高強度）
- ピストンリング溝の電解析出金属強化アルマイト採用、コンロッドメタルの耐面圧向上（耐摩耗性）
- ヘッドボルトの軸力アップ、ヘッドガスケットのレイヤ最適化（シール性）

5. 高効率でクリーンな環境性能

5.1 開発目標

新型VR30DDTTは今後強化される排ガス規制や燃費規制に最小限の変更で対応できるポテンシャルを織り込むことを、開発初期から目標とした。具体的な排気規制は米国のSULEV、欧州のEURO6cであり、それに対応するエンジン本体の主要諸元やキーとなる技術は最初から織り込み、規制の変動に対しては基本的に触媒貴金属量などの後付けのアイテムで対応できるコンセプトとした。燃費に対しても2016年時点のクラス最高燃費を想定し、それを上回る目標とした。

5.2 採用技術

5.2.1 高熱効率化

高圧縮比化と、低フリクション化アイテムの採用に加えて、バルブタイミングの最適化により、広い低燃費率領域を確保した（図9）。

5.2.2 ミラーボアコーティングシリンダブロック

本エンジンもMR16DDTエンジンから採用しているミラーボアコーティングシリンダブロックを採用し、低フリクション化、耐ノッキング性能を向上させると共に、軽量化にも貢献している。

5.2.3 エキゾーストマニホルダー一体シリンダヘッド

将来の排気規制を見据えて、高い触媒昇温効果を持つエキゾーストマニホルダー一体シリンダヘッドを採用した（図10）。エキゾーストマニホルダー一体シリンダヘッドに

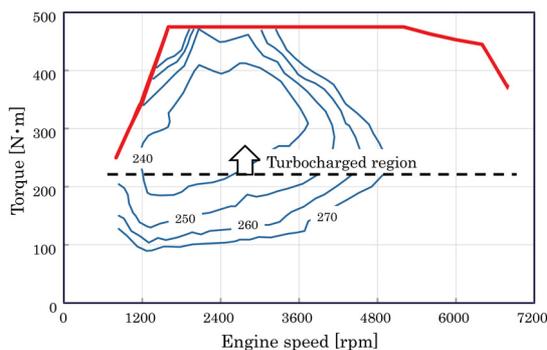


図-9 正味燃費率
Fig. 9 Brake specific fuel consumption (BSFC)

of the engine proper and major moving parts were improved to cope with the higher maximum in-cylinder pressure (Pmax) needed to obtain increased power output. Thanks to the adoption of the measures noted below, the engine proper and major moving parts can withstand 50% higher cylinder pressure than the previous VQ37VHR engine, despite the limitations on the major dimensions as noted earlier.

- Application of high-strength materials to the pistons and crankshaft to increase their strength
- Application of an electroprecipitated metal reinforced anodizing to the piston ring grooves and improvement of contact pressure resistance of the connecting rod bearings for improved wear resistance
- Increased axial force of the cylinder head bolts and optimization of the cylinder head gasket layout for improved sealing properties

5. High Efficiency and Clean Environmental Performance

5.1 Development aims

From the outset of the development work, the aim was to incorporate in the VR30DDTT engine the potential for meeting even tighter exhaust emissions and fuel economy regulations in the future through minimal changes. The specific exhaust emissions regulations targeted were the Super Ultra-low Emission Vehicle (SULEV) standard in the U.S. and the EURO6c standard in Europe. The concept was to incorporate the principal engine specifications and main key technologies for complying with these standards from the beginning and to meet subsequent changes in the regulations basically through retrofitting measures such as by varying the precious metal loading of the emission control catalysts. With regard to fuel economy regulations, the highest fuel economy in the 3.0L high-powered engine sedan class was envisioned for 2016 and the aim was to exceed that level.

5.2 Technologies adopted

5.2.1 Higher combustion efficiency

In addition to increasing the compression ratio and adopting various friction reduction measures, valve timing was also optimized to secure a wider region of low brake specific fuel consumption as shown in Fig. 9.

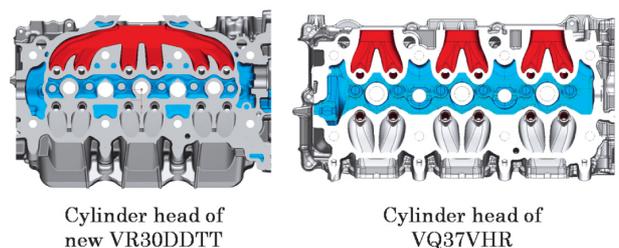


図-10 エキゾーストマニホルダー一体シリンダヘッド
Fig. 10 Cylinder head with integrated exhaust manifold

加えて、DIGの燃焼最適化、即変換が可能な電動VTCの活用により、ヒートマスによる排温低下が大きいターボを搭載しているにも関わらず、前型に対して、厳しい排気規制にも対応できる、高い排気性能ポテンシャルを実現した(図11)。

6. ま と め

新型VR30DDTTは強豪の多いラグジュアリーセグメントにおいてInfinitiブランドのフラッグシップエンジンとして圧倒的な性能で存在感を示し、長くグローバルに展開可能なエンジンとなることが至上命題であった。そのため、出力、トルク、レスポンスはもちろん、回転の滑らかさといった細部にまでこだわり一切の妥協を排除し、クリーンな排気、高い燃費性能といった環境性能も同時に実現した。市場で高い評価を得てきたVQエンジンの後継としてInfiniti Q50、Q60から搭載される。多くの先進技術で進化したこのエンジンが、多くのお客様から長く愛されるエンジンになることを願っている。

最後に、このエンジンの開発、製品化などに多大な貢献をいただき、ご協力いただいた社内外の関係者の皆様に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 松井義典ほか: 新型高効率4気筒1.6L直噴ガソリンターボエンジンの開発、日産技報、No. 76, pp. 42-47 (2015).
- 2) 池田伸ほか: VQ37VHRエンジンの開発、日産技報、No. 62, pp. 4-7 (2008).

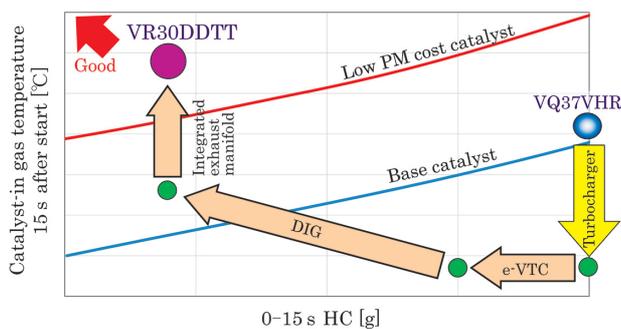


図-11 排気マップ
Fig. 11 Emissions map

5.2.2 Mirror bore coating technology for cylinder block

The VR30DDTT engine also adopts mirror bore coating for cylinder block, which Nissan engines have featured since the MR16DDT engine released in 2014. This technology reduces friction, improves knocking resistance and also contributes to weight savings.

5.2.3 Cylinder head with integrated exhaust manifold

Looking ahead to future exhaust emissions regulations, a cylinder head with an integrated exhaust manifold was adopted that is highly effective in raising the catalyst temperature (Fig. 10). In addition to integrating the exhaust manifold into the cylinder head, the DIG combustion system was optimized and the electrically operated VTC system that was adopted can change the valve timings instantaneously. The effective use of these measures gives the VR30DDTT engine the potential for higher environmental performance than the previous engine, enabling the new engine to comply with tighter exhaust emissions regulations, despite being fitted with twin turbochargers the thermal mass of which greatly lowers the exhaust temperature (Fig. 11).

6. Conclusion

The overriding priority set for the new VR30DDTT engine was to create a flagship engine for the Infiniti brand in the luxury car segment where there are many formidable rivals. As such, the engine had to be capable of displaying overwhelming performance and presence and allow global deployment over many years to come. Toward that end, power, torque and response were naturally improved, while simultaneously securing excellent environmental performance typified by cleaner exhaust emissions and higher fuel economy. Meticulous attention was paid to the smallest details such as engine smoothness and no compromises were allowed. As the successor of the VQ engine that enjoys an excellent reputation in global markets, the VR30DDTT engine has been adopted first on the Infiniti Q50 and Q60 models. The engine has been further evolved through the adoption of a host of advanced technologies, and it is hoped that many customers will favor it for a long time to come.

7. Acknowledgments

The authors would like to thank everyone inside and outside the company for their many helpful contributions and invaluable cooperation with the development and commercialization of this new engine.

References

- 1) Y. Matsui et al., Development of a New Highly Efficient 4-cylinder 1.6L Direct Injection Gasoline Turbocharged Engine, Nissan Technical Review, No. 76, pp. 42-47 (2015).
- 2) S. Ikeda et al., Development of the New VQ37VHR Engine, Nissan Technical Review, No. 62, pp. 4-7 (2008).

■著者 / Author(s) ■



石井 仁
Hitoshi Ishi



安藤 章作
Shosaku Ando



志方 章浩
Akihiro Shikata



田中 勉
Tsutomu Tanaka



林 昭宏
Akihiro Hayashi



高嶋 和朗
Kazuaki Takashima

社外技術賞受賞一覧表

1. 技術賞

〈2014年11月～2015年10月〉

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

受賞年月	賞 名	受 賞 技 術	受 賞 者
2014.11	平成26年度神奈川県技能者等表彰 〔神奈川県〕	卓越技能者 優秀技能者 青年優秀技能者 第51回技能五輪全国大会特別優秀技能者	車体技術部 藤谷 眞治 実験試作部 野地 昭吉 追浜工場 小平 良一 車体技術部 土井 英紀 横浜工場 鈴木 剛 (追浜工場) 新車生産準備技術センター 河上 隆 実験試作部 永田 直勝 実験試作部 山根 雅夫 車体技術部 三品 英則 追浜工場 大岡 俊之 追浜工場 中嶋 亮 新車生産準備技術センター 松田 祐次郎 実験試作部 赤石 慎一 新車生産準備技術センター 工藤 寿則 実験試作部 堀越 広志 新車生産準備技術センター 柁屋 貴紀 T C S X 松本 紳太郎 成形技術部 高橋 真哉 生産技術研究開発センター 中村 雄太郎 (新車生産準備技術センター) 実験試作部 五島 聖太 (T C S X) パワートレイン技術開発試作部 天童 悠輝 (成形技術部) EV・HEVコンポーネント開発部 薬師寺 紘 車体技術部 立野 瑞樹 車体技術部 和田 大樹 成形技術部 小山 倫弘 車体技術部 安部 翔伍 (実験試作部) 成形技術部 本田 彼方 新車生産準備技術センター 陣内 雄大 EV・HEVコンポーネント開発部 西澤 誠 EV・HEVコンポーネント開発部 高橋 翔哉 車体技術部 和田 拓郎 (T C S X)
2014.11	平成26年度栃木県知事表彰 〔栃木県〕	卓越した技能者	栃 木 工 場 出頭 光好
2014.11	平成26年度栃木県職業能力開発協会 会長表彰 〔栃木県〕	卓越した技能者 職業訓練功労者	グローバル人材開発部 加藤 勇一 (栃 木 工 場) 栃 木 工 場 福田 里志

〈2014年11月～2015年10月〉

受賞年月	賞 名	受 賞 技 術	受 賞 者
2014.11	平成26年度福岡県知事表彰 〔福岡県〕	優秀技能者	日産自動車九州 児玉 進
2014.11	平成26年度福岡県勤労者知事表彰 〔福岡県〕	設備保全部門で幅広い業務経験を有し、性能・良品率・稼働率を最小コストで実現するため、技能の向上や現場環境改善活動に取り組んでいる。全社的な保全部門の技能向上に貢献をしている。	日産自動車九州 阿部 広樹
2015.3	平成26年電気学会産業応用部門 研究会部門優秀論文発表賞 〔一般社団法人 電気学会産業応用部門〕	実験計画法を用いた可変洩れ磁束モータの形状パラメータ感度解析	EVシステム研究所 松浦 透
2015.3	平成26年電気学会産業応用部門 ・優秀論文発表賞A賞（部門大会） ・部門奨励賞（副賞 高橋勲賞） 〔一般社団法人 電気学会〕	電動車両における可変磁力モータの検討	モビリティ・サービス研究所 福重 孝志 (EVシステム研究所)
2015.3	2014年秋季大会学術講演会 優秀講演発表賞 〔公益社団法人自動車技術会〕	感性工学と強化学習モデルに基づく Driving Pleasureに関する研究	カスタマーパフォーマンス & 実験技術部 田中 克則
2015.4	平成27年春の褒章 藍綬褒章 〔内閣府 経済産業省推薦分〕	産業振興功績	元 副 社 長 今津 英敏
2015.4	平成27年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 創意工夫功労者賞 〔文部科学省〕	コンタミ撲滅吸引装置の考案 無人搬送車の制御基板の修理方法の改善 無人搬送車の制御基板の修理方法の改善 アルミ鋳造用金型ガス抜き用ベントの考案 カム研削盤用超高速ホイールの考案 LBセル電圧測定器の改良による測定時間の改善 マイコンによるローコスト設備診断装置の考案 構内物流作業の改善	いわき工場 笛木 聖 栃木工場 岩瀬 富美男 栃木工場 森 康裕 成形技術部 田中 保久 実験試作部 渡辺 秀徳 新車生産準備技術センター 齋藤 謙 日産自動車九州 白石 賢治 日産自動車九州 西 盛隆
2015.4	平成27年春の褒章 黄綬褒章 〔内閣府 厚生労働省推薦分〕	多年フライス盤工としてよく職務に精励したこと	成形技術部 櫻岡 勤
2015.5	平成26年度小野田賞 〔一般社団法人 日本ダイカスト協会〕	シリンダブロックにおける鋳造技術開発	成形技術部 水江 保晴 成形技術部 滝沢 佐知雄 成形技術部 高橋正也 成形技術部 甲斐 信貴

〈2014年11月～2015年10月〉

受賞年月	賞 名	受 賞 技 術	受 賞 者
2015.5	第65回自動車技術会賞 論文賞	一時停止交差点におけるドライバのヒヤリハット・リスク定量化手法の研究	モビリティ・サービス研究所 平松 真知子 モビリティ・サービス研究所 寸田 剛司 東 京 大 学 小竹 元基 東 京 大 学 鎌田 実
	論文賞	自動車車室内における逆問題的接近法に基づく多領域音場制御	中 央 大 学 有光 哲彦 中 央 大 学 戸井 武司 Korea Research Institute of Standards and Science 曹 浣豪 カスタマーパフォーマンス & 実験技術部 穂垣 周三 カスタマーパフォーマンス & 実験技術部 中島 洋幸
	技術開発賞 〔公益社団法人 自動車技術会〕	後方視界を確認できるモニタとルームミラーを両立させた世界初のルームミラーモニタの開発	内外装技術開発部 田崎 祐一 元 日 産 進木 博之 コンバージョン&アクセサリ企画開発部 阿部 修 日 産 車 体 (株) 岡 弘和
2015.9	IEEE IAS Industrial Power Conversion Systems Electric Machines Prize Paper Awards 2015 Second Prize 〔IEEE〕	Permanent magnet temperature estimation in PMSMs using pulsating high frequency current injection	University of Oviedo David Reigosa University of Oviedo Daniel Fernandez EVシステム研究所 加藤 崇 EVシステム研究所 吉田 秀穂 University of Oviedo Fernando Briz
2015.9	SAE/JSAE International Powertrains, Fuels & Lubricants 2015 Best Paper Award 〔SAE/JSAE〕	Mechanism Analysis on LSPI Occurrence in Boosted S. I. Engines	パワートレイン先行技術開発部 葛西 理晴

2. 製品ほか受賞

〈2014年11月～2015年10月〉

※主要な製品賞を対象に掲載しております。

受賞年月	受賞車（製品）、その他	受賞名	主催
2014.11	ダイレクトアダプティブステアリング	2015年次RJCテクノロジーオブザイヤー	NPO法人日本自動車研究者・ジャーナリスト会議
2014.11	生産技術本部 座間事業所	平成26年度 厚生労働大臣表彰 (職業能力開発関係優良事業所) 技能振興関係「事業所」	厚生労働省職業能力開発局
2014.11	X-Trail	Indonesia Car of the Year (ICOTY) 2014 ・ Best Medium SUV	(インドネシア)「Mobil Motor」誌
2014.11	Juke	Indonesia Car of the Year (ICOTY) 2014 ・ Best Small SUV	(インドネシア)「Mobil Motor」誌
2014.11	Teana	Indonesia Car of the Year (ICOTY) 2014 ・ Best Sedan ・ Best Acoustics	(インドネシア)「Mobil Motor」誌
2014.11	日産自動車	Thomson Reuters 2014 Top 100 Global Innovator Award	(米) Thomson Reuters
2014.12	X-Trail	Auto Bild Award 2014 ・ Car of the Year ・ Best Medium SUV	(インドネシア)「Auto Bild Indonesia」誌
2014.12	Juke	Auto Bild Award 2014 ・ Best Compact SUV	(インドネシア)「Auto Bild Indonesia」誌
2014.12	March	Auto Bild Award 2014 ・ Best Small Hatchback	(インドネシア)「Auto Bild Indonesia」誌
2014.12	Teana	Auto Bild Award 2014 ・ Best Big Seda	(インドネシア)「Auto Bild Indonesia」誌
2014.12	Evalia	Auto Bild Award 2014 ・ Best Low MVP	(インドネシア)「Auto Bild Indonesia」誌
2014.12	Elgrand	Auto Bild Award 2014 ・ Best Luxury MVP	(インドネシア)「Auto Bild Indonesia」誌
2014.12	奇駿 (東風日産 エクストレイル)	中国2014年度風雲汽車 (中国カー・オブ・ザ・イヤー)	中国主流媒体連盟
2015.1	日産自動車	平成26年度女性が輝く先進企業表彰 内閣府特命担当大臣 (男女共同参画) 賞	内閣府男女共同参画局
2015.1	日産自動車	第15回テレワーク推進賞 ・ 優秀賞	一般社団法人日本テレワーク協会
2015.1	中村史郎 (専務執行役員、CCO (Chief Creative Officer))	30th Edition of the International Automobile Festival LE GRAND PRIX DU DESIGN	International Automobile Festival in Paris

〈2014年11月～2015年10月〉

受賞年月	受賞車（製品）、その他	受賞名	主催
2015.2	Nissan	Sustainability Yearbook 2015 ・ Silver Class ・ Industry Mover	(スイス) RobecoSAM AG
2015.3	Pulsar	2015 Car of the Year for the Canary Islands	Canary Islands
2015.3	Datsun Go	Zee Zgnition Auto Awards 2015 ・ Entry Level Hatchback of the Year	(インド) Zee Business
2015.4	藍鳥 (LANNIA)	Best New Model To Come Award	第16回上海国際モーターショー
2015.5	ティアナ	JNCAP ファイブスター賞	独立行政法人自動車事故対策機構 (NASVA)
2015.6	志賀俊之 (副会長)	平成27年度男女共同参画社会づくり功労者内閣総理大臣表彰	内閣府男女共同参画局
2015.7	日産セレナ「両側スライドドア」	第9回キッズデザイン賞 ・ 子ども視点の安全安心デザイン 一般部門	キッズデザイン協議会
2015.7	SNN TOOLS & DIES CO., LTD. (Thailand)	2015年度GOOD FACTORY賞 ・ ファクトリーマネジメント賞	一般社団法人日本能率協会

第65回 自動車技術会賞 論文賞*

The 65th JSAE Awards : Outstanding Technical Paper Award

一時停止交差点におけるドライバのヒヤリハット・リスク定量化手法の研究

A Study of a Method for Quantifying Drivers' Near-miss Risk at Stop Sign Intersection

平松 真知子*
Machiko Hiramatsu

寸田 剛 司*
Takashi Sunda

小竹 元 基**
Motoki Shino

鎌田 実**
Minoru Kamata

1. は じ め に

車載器とデータセンタが通信で接続されたコネクテッドカーの普及により、各車両から収集される交通ビッグデータを利用した新サービスの開発が期待されている。なかでも交通安全に寄与するサービスの開発は、自動車会社として取り組むべき課題の一つである。本研究は、交通ビッグデータを活用してドライバ個人の運転を診断し情報提供することにより安全運転を促進する技術の創出を目指す。この技術において核となるのが、安全運転の診断手法である。

従来からドライバの運転を車速や加速度により診断する技術はあったが、診断基準と事故リスクの関係を明らかにしたものではなかった。

本論文は、ヒヤリハットを事故の代用特性とし、日常運転行動とヒヤリハット・リスクとの関係を明らかにし、定量的でかつ妥当性のある安全運転診断手法を提案した。

2. 概 要

日本において死亡重傷事故の最も多い出会い頭事故に着目し、3段階のステップで安全運転診断手法を構築した。

まず、出会い頭事故の多い一時停止交差点の通過過程に着目し、事故事例から「停止」と「進入」の運転行動指標の候補を考案した (図1、図2)。

次に、最大規模の日常運転行動データベースで、一般ドライバのヒヤリハット発生率 (トリップあたりの交差点

1. Introduction

With the spread of “connected car” technologies, which connect on-board devices with data centers via wireless communication, it is anticipated that new services utilizing “traffic big data”—collected from each vehicle on the road—will be developed. Among those developments, development of services that contribute to road safety is one challenge that we should overcome as car manufacturers. In the present study, we aimed to create a technology for enhancing safe driving by examining the driving of individual drivers (by utilizing traffic big data) and providing that information as a service. At the core of this technology is a method for diagnosing safe driving.

Although technology for diagnosing a driver’s driving on the basis of speed and acceleration has been available for a while, the relationship between a diagnostic criterion and accident risk has not been clarified.

In this study, taking a “near-miss” as an alternative characteristic concerning an accident, we clarified the relationship between everyday driving and near-miss risk, and we devised a method for diagnosing safe driving (hereafter, “safe driving diagnostic method”) in a quantitative and reasonable manner.

2. Summary

Focusing on collisions at crossing (which are the most-common accidents involving death or serious injury in Japan), we formulated the safe driving diagnostic method in the following three steps. First, focusing on the

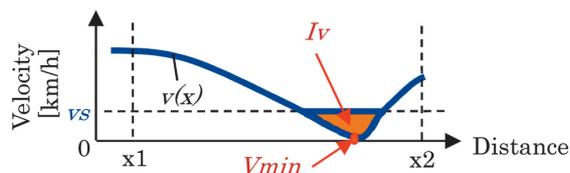


図-1 停止の運転行動指標
Fig. 1 Driver behavior index for stopping

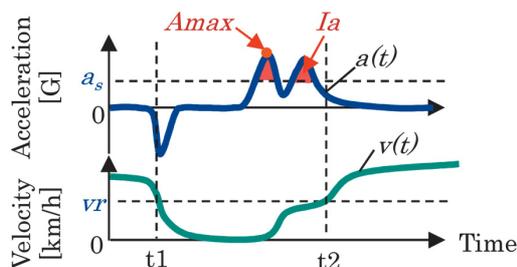


図-2 進入の運転行動指標
Fig. 2 Driver behavior index for entering intersection

*モビリティ・サービス研究所 / Mobility Services Laboratory **東京大学 / The University of Tokyo

編 集 後 記

日産技報は、本号より日英併記となりました。「技術の日産」をグローバルに訴求する媒体の一つとして、ご愛顧頂ける契機となればと期待しています。グローバル化の時代にあっては、いささか遅いタイミングでの英語化となりましたこと否めませんが、様々な制約条件を一つ一つクリアして下さった事務局、およびご協力頂きました方々に感謝したいと思います。

本号は、特集としてもグローバル化を意識し、「海外リサーチアクティビティ」を取り上げました。従来、製品化した技術主体の内容として参りましたが、我々が抱える技術的な課題や問題意識を問う内容とすることとし、小さいながらもチャレンジをしています。日産自動車が進める「電動化」、「知能化」を支える研究・開発は多岐に渡り、年々高度化且つ多様化しています。本号が、特集の主旨であります処のオープンイノベーションを促すきっかけとなり、また、学生から社会人まで、様々な読者層の自動車技術に関する興味を喚起する一助となれば幸いです。研究領域の技術を論ずるにあたり、執筆に際しては、過度にテクニカルにならない様に心がけましたが、読みにくい点などありましたら、ご容赦頂ければと思います。

編集方針や個別の記事に関するご意見、ご質問を頂けると幸いです。編集委員、執筆陣の励みとなります。

— 日産技報編集委員・高木 潔 —

2015年度日産技報編集委員会

委員長		畠 山 徹 也	エンジン&トランスミッション技術開発部
高 木 潔	先端材料研究所	露 木 正 彦	パワートレイン先行技術開発部
		佐 藤 学	技術企画部
副委員長		原 田 宏 昭	研究企画部
村 田 茂 雄	パワートレイン開発本部	中 野 正 樹	E V システム研究所
		三 田 村 健	モビリティ・サービス研究所
委 員		長 谷 川 哲 男	グローバル技術渉外部
豊 嶋 浩	ブランド推進部	瀬 川 浩	車両生産技術統括部
佐 藤 正 晴	Infiniti 製品開発部	稲 葉 義 宣	パワートレイン技術企画部
斎 藤 康 裕	Infiniti 製品開発部		
森 達 朗	Infiniti 製品開発部	事 務 局	
石 川 信 也	コネクテッドカー&サービス開発部	柳 井 達 美	研究企画部
荒 木 敏 弘	統合 C A E ・ P L M 部	細 谷 裕 美	研究企画部
桑 原 雅 子	カスタマーパフォーマンス&実験技術部		

日 産 技 報 第 78 号

© 禁無断転載

発 行	2016年3月
発行・編集人	日産技報編集委員会
発行所	日産自動車株式会社 総合研究所 研究企画部 神奈川県厚木市森の里青山1番1号 〒243-0123
印刷所	相互印刷株式会社 東京都江東区森下3-13-5

Editorial Postscript

From this issue onward, the Nissan Technical Review will be published in both Japanese and English. As a medium for promoting "Technology Nissan" globally, we hope it will be a chance to reach even more people. While there is no denying that the timing of English articles addition is slightly late in this age of globalization, I am thankful to our organizer for overcoming many constraints as well as those who worked hard and cooperated to make this possible.

With globalization in mind, in this special feature, we focus on "overseas research activity." Nissan Technical Review has focused the technology in products, but it takes many of more advanced issues surrounding ourselves needs to be addressed in technological solutions. Nissan has been promoting "electrification" and "vehicle intelligence" in research and development, which, in a multitude of ways, have been advancing as well as diversifying year after year. The aim of this special feature is to promote opportunity of open innovation, and we hope it will help stimulate an interest in automobile technology in a wide range of readers, from students to professionals. As this feature deals with technology in the research field, we made a point to not get too technical at the time of writing, but please forgive us should there be parts that are difficult to understand.

We would be happy to hear your opinions or questions on our editorial direction or individual articles. The editorial committee members and authors would be greatly encouraged.

Kiyoshi Takagi

Member of the Nissan Technical Review editorial committee

FY2015 Nissan Technicai Review Editorial Committee

Chairman

Kiyoshi TAKAGI
Advanced Materials Laboratory

Vice-chairman

Shigeo MURATA
Powertrain Engineering Division

Members

Hiroshi TOYOSHIMA
BRAND Promotion Department
Masaharu SATOU
Infiniti Product Development Department
Yasuhiro SAITOU
Infiniti Product Development Department
Tatsuro MORI
Infiniti Product Development Department
Shinya ISHIKAWA
Connected Car and Services Engineering Department
Toshihiro ARAKI
Integrated CAE and PLM Department
Masako KUWAHARA
Customer Performance and Test Technology Department
Tetsuya HATAKEYAMA
Engine and Transmission Engineering Department

Masahiko TSUYUKI
Powertrain Advanced Engineering Department
Manabu SATOU
Technology Planning Department
Hiroaki HARATA
Research Planning Department
Masaki NAKANO
EV System Laboratory
Takeshi MITAMURA
Mobility Services Laboratory
Tetsuo HASEGAWA
Global Technical Affairs Department
Hiroshi SEGAWA
Vehicle Production Engineering Control Department
Yoshinori INABA
Powertrain Planning Department

Organizer

Tatsumi YANAI
Research Planning Department
Hiromi HOSOYA
Research Planning Department

Nissan Technical Review 78

March, 2016

Publisher Nissan Technical Review
(Editor) Editorial Committee
Distributor Society and Frontier Laboratory
Nissan Reseach Center
NISSAN MOTOR CO., LTD.
1-1, Morinosatoaoyama, Atsugi-shi
Kanagawa, 243-0123, Japan

Copyrights of all atricles described in this Review have been preserved by NISSAN MOTOR CO., LTD.

For permission to reproduce articles in quantity or for use in other print material, contact the chairman of the editorial committee.

表紙コンセプト / Cover Design Concept

総合研究所実験試作部でモータ設計業務を担当している齋藤です。今回の表紙デザインは、可変磁力モータ研究における取り組みを表したいと思い、中心にはシミュレーションとモノ作りをイメージした絵を置き、背景にはモータ性能を評価する実験データをレイアウトしました。この表紙には、全ての車の電動化・自動化（知能化）を目指し、国内のみならずグローバルの拠点や大学などで、解析・設計・モノ作り・実験を行っている、全ての人に感謝の気持ちを込めたメッセージとして表現しています。

The cover design of this issue represents various activities involved in research on variable magnetic flux machines. Positioned in the center is an image symbolizing simulations and manufacturing, while experimental data for evaluating motor performance are presented in the background. The cover expresses a message of heartfelt appreciation to everyone, both in Japan and at Nissan's global R&D centers as well as at universities and other locations worldwide, who is engaged in simulation, design, manufacturing and testing activities, aimed at promoting the electrification and automation (intelligent functionality) of all vehicles.



齋藤 英二
Eiji Saitou
実験試作部
Prototype and Test Department
