

# TECHNICAL REVIEW

Vol. 57 2015

特集：LEDの変遷とGaNデバイスの進展

## 目 次

巻頭言	「赤崎，天野先生ノーベル賞受賞と企業責任」	市川 昌好 1	
特 集	[LEDの変遷と GaN デバイスの進展]		
特別寄稿	青色 LED 開発の軌跡とこれからの豊田合成の皆さんへの期待	名古屋大学 天野 浩 2	
総 説	豊田合成 LED 開発の歩み	下野 信治 奥野 浩司 6	
論 文	LED チップ開発の最新動向	中田 尚幸 荒添 直棋 篠田 大輔 14	
	LED 製品開発の現状と最新動向	成田 巧 伊藤 優輝 下西 正太 20	
	LED チップ開発の最新動向（生産技術開発）	牧 弘昭 稲澤 良平 澤崎 勝久 27	
	縦型 GaN パワーデバイス実現に向けた技術開発	岡 徹 伊奈 務 上野 幸久 西井 潤弥 田中 成明 長谷川一也 安西 孝太 村上 倫章 34	
一 般	論 文	車室内空間における LED 照明のあり方と可能性	渡邊 千穂 40
	論 文	電子部品の寿命推定に関する要素技術の確立	婦木慎一郎 佐分 主税 山田 寛之 佐藤 真 伊藤 修 46

一 般	論文	エアバッグ展開シミュレーションの ガス流れの挙動に関する研究	井田 等 青木 雅司 浅岡 道久 東北大学 流体科学研究所 大谷 清信	51
	新技術紹介	電源カットデバイス	中村 祥宜 福山 岳樹 堀 啓介	57
		ブレーキホース用口金のシート面検査技術	宮地 修平 鯛 直樹 豊田中央研究所 長嶋 千恵	59
		漆黒めっき技術	仲谷 幸司 堀田 祐志 丸岡 洋介	62
		水系離型剤の適用技術	筒井 良治 福田 秀喜	64
	新製品紹介	昇降式カップホルダー	菱田 裕	66
		振動機能付ステアリングホイール	上坂維志篤	68
		車両デザインの変化に対応したインナー W/S の開発	高瀬 智宏 河合 辰弥	70
		給油利便性向上キャップレスデバイス	大植 剛	72
		創風機 Q (スマートサーキュレーター) 開発	本藤 学	74
	特許紹介	特許紹介		76

# CONTENTS

<b>Preface</b>		Prof. Akasaki and Prof. Amano, Nobel Prize Winners and Corporate Responsibility	Masayoshi Ichikawa	1
<b>Feature</b>	<b>History of LED and Progress of GaN Device</b>			
	<b>Contribution</b>	In memory of the development of blue LEDs with TG members and expectations for their continuing contribution for establishing sustainable society	Nagoya University Hiroshi Amano	2
	<b>Review</b>	History of Toyoda Gosei LED Development	Shinji Shimono Koji Okuno	6
	<b>Technical Paper</b>	Latest Trend of LED Chip Development	Naoyuki Nakada Naoki Arazoe Daisuke Shinoda	14
		History and Latest Trend of LED Products	Takumi Narita Yuhki Ito Shota Shimonishi	20
		Latest Trend of LED Chip Development (Production Engineering Development)	Hiroaki Maki Ryohei Inazawa Katsuhisa Sawazaki	27
		Technological Developments of Vertical GaN Power Devices	Tohru Oka Tsutomu Ina Yukihisa Ueno Junya Nishii Nariaki Tanaka Kazuya Hasegawa Kota Yasunishi Noriaki Murakami	34
<b>General Article</b>	<b>Technical Paper</b>	Concept and Possibility of LED Light in Vehicle Compartment Space	Chiho Watanabe	40
		Elemental Technology Establishment for Life Expectancy of Electronic Component	Shinichiro Fuki Chikara Saburi Hiroyuki Yamada Makoto Sato Osamu Ito	46

General Article	Technical Paper	A Study of Gas Flow Behavior in Airbag Deployment Simulation Tohoku University institute of Fluid Science	Hitoshi Ida Masashi Aoki Michihisa Asaoka Kiyonobu Ohtani	51
	New Technology	Pyrotechnical Circuit Breaker for Electric Vehicle	Yoshiki Nakamura Takaki Fukuyama Keisuke Hori	57
		Inspection Technology for Sheet Surface of Brake Hose Fitting TOYOTA Central R&D LABS., INC.	Shuhei Miyachi Naoki Tai Chie Nagashima	59
		Jet Black Plating Technology	Koji Nakatani Yuji Hotta Yosuke Maruoka	62
		Mass Production Technology for Water-based Mold Release Agent	Yoshiharu Tsutsui Hideki Fukuda	64
	New Products	Adjustable Cup Holder	Yu Hishida	66
		Vibration Function for Steering Wheel	Yoshitoku Uesaka	68
		Sharp Angle Bended Inner W/S	Tomohiro Takase Tatsuya Kawai	70
		Capless Device for Conveniently Refueling	Go Oue	72
		Souhuki Q (Smart Circulator) Development	Manabu Motofuji	74
Patents	Patents		76	

## 「赤崎，天野先生ノーベル賞受賞と企業責任」



取締役副社長  
市川 昌好

赤崎先生，天野先生がノーベル物理学賞を受賞されるらしいという吉報が，飛び込んできたのは，昨年の10月7日シカゴのオヘア空港を降り，携帯電話のメールを開いたときでした。早速，本社に電話すると夜10時過ぎに弊社の美和技术センターで単独緊急記者会見が行われるとのことであった。お祝いをお伝えすることはできませんでしたが，両先生はもちろんのこと，1986年当時からの研究を協力させていただいた弊社の技術者や，豊田中央研究所の所員の皆さんへ「おめでとう，ありがとう」という感謝の念が私の心に沸々と湧いてきました。ノーベル物理学賞の受賞に関わる研究開発に民間企業が携われたことは，企業の技術者にとって，この上ない喜びだったと思います。

2004年から8年間にわたりオプトE事業部を担当し，パソコンのバックライトや照明用電球へのLEDの普及には，両先生が研究された 1) サファイア基板上にきれいなGa<sub>N</sub>結晶を成長させる技術，2) p型，n型Ga<sub>N</sub>半導体を製造する技術，が確立できたからこそ，LED技術の進歩があったわけがあります。世界初の研究を世に出すには，なにより先生方の理論や成功するまで実験を繰り返す情熱がなければ達成しないことを直接指導していただいておりますので，企業で研究や技術開発に携わっている皆さんに，是非お伝えしなければならない事だと思っております。

さて，世界初の青色LEDの研究を，世界で普及するために企業はどんな技術開発をしてビジネスにつながったのかを，LEDの発光効率lm/Wを指標に技術の進歩をご紹介しますと思います。

1991年に科学技術振興機構（当時 新技術事業団）より青色LEDの開発が成功認定されたときのLEDの明るさは，発光効率が0.4lm/Wであったそうです。その後の商品化においては，'96年大型ディスプレイ用砲弾ランプで10lm/Wを達成し，ローソク1本分の明るさでした。7年後，携帯電話のバックライトに汎用的に使われたときには35lm/Wとなり，'07年世界に先駆けノートパソコン用バックライトに使われたときには，77lm/Wまで開発が進んでおりました。さらに，'09年国内家電メーカーのLED電球に採用されたときには，発光効率は95lm/Wまで改良され，白熱電球60形の消費電力54Wが約7Wへと大幅な省エネが実現できました。'10年世界初タブレット端末の採用時には，世界でトップクラスの110lm/Wを達成しておりました。いまでは更なる技術開発が進み1.5倍以上の発光効率の開発が進んでおります。

ノーベル物理学賞受賞となった研究成果を応用し，世界の皆さんに環境，省エネルギーに貢献できるLED製品を世に送り出すことで，弊社本社に展示してある赤崎・天野両先生から寄贈いただいた2個のノーベル賞メダルのレプリカに応えることになると思っております。また寄贈にあたって赤崎先生が述べられた「メダルが会社創立100周年に向けて，向上のマイルストーンとなれば望外の幸せ」というお言葉に報いていくことが，私たちの企業責任と捉え，LEDに関わる技術者と開発に一層邁進していきたいと考えております。

今回は，LEDの変遷とGa<sub>N</sub>デバイスの進展の特集号として掲載させていただいており，名古屋大学教授・赤崎記念研究センター長の天野先生にもご執筆いただいております。今後のLED動向やGa<sub>N</sub>パワーデバイス等につき興味を持ってご一読いただければ幸いです。

## 青色 LED 開発の軌跡とこれからの豊田合成の皆さんへの期待

天野 浩<sup>\*1</sup>In memory of the development of blue LEDs with TG members and  
expectations for their continuing contribution for establishing sustainable societyHiroshi Amano<sup>\*1</sup>

## 1. はじめに

私が豊田合成技報に報告を書かせていただくのは、2回目になります。1回目は4年前の2011年でしたが、前回とは自分を取り巻く環境が、まるで変わってしまいました。下の写真は、赤崎先生とともに御社に寄贈させていただいたノーベル賞のレプリカメダルです。レプリカといっても、職人の方が本物と同様に作ったもので、素材以外、光沢等も含めて見分けがつかません。レプリカは合計三つで、他の二つは名古屋大学と名城大学に寄贈させていただきました。お世話になった豊田合成の皆様に日々ご覧いただけるのは、私にとってこの上ない光栄です（図-1）。



図-1 御社ロビーに展示されている赤崎先生と私のノーベル賞レプリカメダル

思い起こせば、1985年2月の低温バッファ層以来、1986年から本格的に御社と名古屋大学赤崎研究室との共同研究がスタートしました。当時、私は博士課程の学生でしたが、p型の実現ばかりに気を取られており、低温バッファ層の詳細を開発担当の方にあまり熱心に伝えなかったため、大変ご苦労されたと伺っております。当時はまだ誰もやったことが無い仕事で、開発が困難を極めたことから、量産化の決定までには社内でも多くの議論

があったことと思います。その後1987年からのJSTからの援助もあり、量産化を決定されました。

今回の内容は、1番目のテーマとして、御社と私とのかかわりの中で、特に1986年から1993年まで、御社と赤崎先生および私がGaNのLEDの共同研究を始めたころのエピソードを交え、独断と偏見に満ちた話として、2番目のテーマは、少し視点を変えて、世界でどのようなことが問題になっているか、その問題に対して、皆様のような研究者・技術者は、解決に向けてどれくらい貢献ができそうか、という話を紹介させていただきます。

## 2. 1986年から1993年まで

まず私が青色LEDに強く惹かれたのは、大学3年生の冬に、4年生で行う卒業研究の研究室を決めるときでした。1年生から3年生まで大学での講義は全て楽しかったですし、あこがれていた量子力学についてもDirac先生の書かれた原著などを読んで楽しんでおりましたが、一方で物足りなさも感じておりました。当時は、ビルゲイツさんやスティーブジョブスさんに憧れ、マイコン（現在のPC）に強く惹かれて、夜勤のアルバイトをして富士通のFM-8を買い、ゲームなどを作って楽しんでおりましたが、やはり人の作ったコンピュータやプログラムを勉強するだけでは、物足りなさを感じておりました。そのようなときに、青色LEDという研究テーマを見て、装置も含めて何でも自分でできる、ということに大きな魅力を感じて、赤崎研究室に入れて頂きました。私は浜松の出身で、小学生の頃は、イロハのイの字の高柳健次郎先生の話をおそらく何回も聞きます。マイコンでもそうですが、高柳健次郎先生の使われていたのもブラウン管で、自分としてはディスプレイをもっとスマートにしたい、郷土の偉大な研究者である高柳先生のご業績を超えるようなことをしたい、という、今から考えれば若気の至りのよ

\*1 名古屋大学 教授・赤崎記念研究センター長

うな気持ちもありました。始めたころは、青色 LED が大変難しいということは、全く理解していませんでした。多分豊田合成の方が青色 LED を始めたのも、当時の私と似たようなお考えだったかもしれません。

豊田合成の方々と特に記憶に残っているのは、フォトルミネッセンス (PL) の測定と、電子線照射です。1985 年、修士 2 年生の時に低温バッファ層を使って、当時世界で最もきれいな GaN 結晶を作ることができるようになり、博士課程進学後は、いよいよこれまで誰も達成できなかった p 型結晶にチャレンジすることを決めました。当時は、自分たちだけがきれいな結晶を作っているのだから、自分たちができなければ世界のだれもできない、自分は挑戦する責務がある、などと、かなり気負った気持ちで日々研究に没頭しました。不純物としては、GaP や GaAs など他の材料ではよく用いられ、Pankove 先生が最初 1971 年に作られ、赤崎先生が 1970 年代に研究リーダーを務められた松下電器(株)のグループでも作られていた MIS 型 LED でも用いられた亜鉛 (Zn) にこだわって、実験を行っていました。しかし、1985 年の博士 1 年生から 1988 年の 3 年生が終わるまで、ずっとやっていましたが p 型結晶は一度もできませんでした。しかし、興味深い現象も 2 つ見つけておりました。

一つは、極低温、液体ヘリウム温度での PL です。Zn 濃度を適正化した試料では、液体ヘリウム温度で非常に発光線幅の狭い中性アクセプタに束縛された励起子発光が観測されました。これを是非論文にしたいと思いましたが、問題は液体ヘリウムです。当時、研究室には液体ヘリウムを使う予算がほとんどなかったもので、測定はできませんでした。1986 年に御社との共同研究がスタートし、測定装置も揃えられたので、御社では液体ヘリウムでの PL 測定もできました。今から考えれば、青色 LED とはあまり関係ないテーマでしたが、PL 装置の使用をご許可いただき、更に夜遅くまで測定につきあっていただき、本当にありがたかったです。途中、ホップの香りのする会社の前を小さなスクーターで何度も通い、漸く変形ポテンシャルに関するきれいなデータをまとめることができました。応用物理学会で発表したとき、会場にいたのは残念ながら 4 人、座長、赤崎先生、その他どなたかと私、即ち話を聞いていただいたのはたった一人だけでしたが、JJAP に投稿した論文は受理されました。

もう一つは博士課程の 2 年生の時、NTT にてインターンシップを行っているときに見つけた、電子線照射すると Zn 添加した GaN の青色発光が非可逆的に増大する LEEBI 現象です。残念ながら p 型にはならなかったのですが、これは必

ず論文になる、と思い名大に帰ったのち、急いで図書館で調べたら、自分よりも 4 年も前に当時ソ連のモスクワ大学のサパリンという方が、全く同じ現象を見つけていて、がっかりしたことを今でも鮮明に覚えております。ただこの結果は、中国北京で行われたルミネッセンス国際会議で口頭発表しました。初めての国際会議での英語発表で非常に緊張しました。最初、席の最後列に座られていた 1973 年ノーベル物理学賞を受賞された江崎玲於奈先生が、私の講演の途中で最前列まで来られて聞いてくださるのを見て、大変感激しました。その時に座長をしていただいたのはスウェーデン、リンチョピン大学のモネマー先生です。

ということで Zn では p 型を作るのはできなかったのですが、1987 年に JST からの御社への事業化支援が決まり、名大にも ULVAC 製の新しい横型 MOVPE 装置が導入され、そこで以前御社にも在籍された方が低温バッファ層で苦労され、その後現在名大に居られる鬼頭雅弘氏が主に p 型の実験を行うことになりました。最初 Zn を考えていたのですが、J.C.Phillips 先生の手記“Bonds and Bands in Semiconductors”という教科書の中で、GaP 中では Zn よりも Mg の方が p 型に向いているというグラフを見て今までの間違いに気が付き、高価な Mg 原料を買っていただいて、鬼頭氏が結晶をたくさん作ってくれました。そのままではやはり高抵抗で p 型ではなかったので、Zn の時に行った LEEBI をやろう、と思いつきました。問題は電子線照射装置です。名大になかったので、探していると豊田合成の島津製 EDX 装置なら可能、ということがわかり、お借りすることにしました。PL 装置の時と同じように、片道 1 時間かけて通わせていただきました。試料一つ処理するのに 7 時間から 8 時間かかり、大変時間のかかる処理でしたが、夜中まで付き合ってください、本当にありがたく思っております。おかげで世界初の p 型および pn 接合型青色 LED を世に送り出すことができ、それがノーベル賞の受賞につながったと思っております。

### 3. 世界規模の問題にどう取り組むか

2015 年 6 月、外務省からの招請でロシアサンクトペテルブルグとモスクワに行かせていただき、都心での交通渋滞のひどさにびっくりしました。日本では東京と大阪ですが、一極集中は日本だけの問題ではなくて、世界中至る所で同じことが起きていることを実感しました。交通渋滞でのイライラを解消する方法として、今後自動運転技術は益々重要になるでしょう。その際、認識用の画像は、より高精細になり、センサーの種類も数

も大幅に増えることから、車内での通信ネットワークは、より広帯域化が必要になります。現在銅線のワイヤーハーネスで行っていることが、いずれすぐに安価なプラスチック光ファイバを用いた光通信システムに代わると思われます。

一方、都市部への一極集中は、社会全体で考えると効率低下の原因です。また生活環境も悪化します。地方への分散化は、社会全体の効率向上及び優れた環境で生活するために重要なテーマと思われれます。将来は、自然の豊かな地方に住んで在宅勤務することが、ライフスタイルの一つとして定着するかもしれません。その際に重要になるのが、特に地方への情報ネットワークの拡充です。ここでも、日本のバックボーンとなる石英光ファイバ網から、各家庭につながるラストワンマイルでの低コスト光ファイバ通信が重要になります。現在赤色 LED や LD で通信が行われていますが、そこに、青色、緑色、黄色などの LED、LD を混載すれば、将来の 4K や 8K にも対応した超広帯域通信システムも普及するでしょう。

電力問題は、日本では正解が見えにくい問題です。2011 年前までは、原発の発電量が全体の約 30% 程度、約 300TWh でした。日本には 48 基の原子炉がありますが、2014 年にはすべて動作が止まり、2015 年の 8 月 11 日によろやく川内原発一号機が運転を再開しました。その発電能力は年間 4～8TWh 程度です。この原稿が皆さんの目に触れるころには、あと数台運転を再開している炉があるかもしれません。残りの必要電力は現在、天然ガスと石炭の輸入を増やし、古くて効率が悪いために止めていた火力発電施設を再稼働しております。従来より日本の火力発電は環境対策が進んでいるために、人間の健康を害するような環境負荷物質はほとんど排出しません。ただ CO<sub>2</sub> だけは排出を免れることができません。ご存知の通り CO<sub>2</sub> は地球温暖化を加速させます。日本ではこれから人口が徐々に減少することから、それに伴って GDP も減少して、必要発電量も減少すると予想されます。一方、世界に目を向けると、近くで若干一休みしている国もありますが、世界全体では GDP の伸びは非常に大きく、そのため 2025 年ころには、世界的に電力供給が不足すると指摘されております。

新しいエネルギー源として再生可能エネルギーが期待されていますが、その多くはコストが高いことが欠点です。特に御社の皆様に声を揃えてアピールしていただきたいのが、日本及び世界での電力問題を解決する手段の一つとしての省エネです。皆さんが開発した青色 LED を用いた LED 電球は、日本では 2020 年までに全照明のうちの 3/4 を占め、その省エネ効果は全発電量のうちの

約 7%、電力料金にすると年間 1 兆円と試算されています。2011 年前までに原発が賄っていた約 30% のうち、原発再稼働で約半分程度は賄われるとすると、残り 8% 程度を他の手段で埋め合わせる必要があります。御社も開発を行っておられるパワーデバイスによる省エネにより、その実現が可能です。例えば電気自動車やハイブリッド車は直流のバッテリーを積んでおりますが、モーターは交流モーターです。したがって直流から交流へ変換するインバータが必要になります。インバータには、現在 Si による IGBT が主に用いられています。その効率は大凡 95% で、決して低くはありません。ただ 5% は損失で熱になっております。これを皆様が開発された GaN を用いたトランジスタに置き換えると、損失を 0.5% 程度にまで低減できることがわかっております。この応用は自動車だけではなく、冷蔵庫や空調機などモーターを用いるものはほとんどすべて、更に最近では直流で動作する家電の割合が急速に増加しており、直流の電圧を直接変換可能なコンバータにも GaN を用いた低損失トランジスタは欠かせません。さらに GaN トランジスタは高速でスイッチングができるので、回路全体を周波数に合わせて小さくできる特徴があります。将来はインバータやコンバータも集積化されてワンチップ化され、どこにあるかわからなくなるような時代が来るかもしれません。その実現のためにも、GaN パワートランジスタをいち早く事業化することが重要です。

#### 4. ノーベルウィーク及びその後色々とお世話になった話

ところで、昨年 2014 年の 12 月のノーベルウィークでは、荒島社長（当時）、太田顧問にご同行頂き、大変お世話になりました。12 月 10 日の授賞式直前でお二人との写真が次頁の通りです（**図-2**）。その日の昼には昼食会を開いていただき、名城大学および名古屋大学の方々と共に食事と飲み物を堪能させていただきました。授賞式後の晩さん会とダンスの後、太田顧問には、学生連盟が主催するスチューデントナイトキャップにもご同行いただきました。特に朝の 2 時くらいになって、家内の体力が限界に近かったので、わがままを言ってホテルに連れて行っていただきました。

また、お二人には BBC のノーベルマインズという番組収録でもご同行いただきました。



図-2 左が荒島社長(当時), 右が太田顧問。お二人ともタキシード着用。真ん中の私が首からぶら下げているのは文化勲章。

下の写真は、総務の山田部長と広報の半田さんです。お二人には、赤崎先生ご家族のケアと私の家族のケアをしていただきました。特に家内や娘のわがままをいろいろ聞いてくださり、大変ありがたく思っております(図-3)。



図-3 ノーベルウィークでご同行された左：半田さんと右：山田さん。お二人にも、赤崎先生ご家族および私の家族、特に家内と娘が大変お世話になりました。

右上の写真は、授賞式の昼食会で紹介された、青色 LED と白色 LED の紹介キットです。人工光源の歴史と実際の LED チップ、および白色 LED の原理が大変わかりやすく説明されています(図-4)。



図-4 ご準備頂いた LED キット。

このキットを広報の稲葉さんにご準備いただき、下記の学校や政府機関などに寄贈させていただきました。

静岡県立浜松西高等学校  
浜松科学館  
浜松市立広沢小学校  
浜松市立蛸塚中学校  
ロシア科学アカデミー  
ユネスコ日本政府代表部

そのほか、現在研究室で保管させて頂いております。貴重な資料をご提供くださり、この場を借りてお礼申し上げます。

以上とりとめもなく、思いつくままに原稿を書かせていただきました。御社での青色 LED 開発もインジケータやディスプレイへの応用が最初であったと思います。それが今や照明にも使われ、省エネの代名詞といえるほど大きく発展し、まさに世界を変えています。新しい技術が世界を変える好例で、御社の方々の頑張りが、それを強力に推し進めたといえるでしょう。是非この体験に味を占めて頂きたく思っております。皆様方のこれからもたゆまぬご尽力で、青色 LED に続く第2、第3の大変革が次々と生まれ、持続可能で、より住みやすい新しい世界が実現して、人々がみな幸せな未来になることを祈念しております。

著 者



天野 浩

## 豊田合成 LED 開発の歩み

下野信治<sup>\*1</sup>, 奥野浩司<sup>\*1</sup>

### History of Toyota Gosei LED Development

Shinji Shimono<sup>\*1</sup>, Koji Okuno<sup>\*1</sup>

#### 1. はじめに

現在、我々の生活に深く浸透し、今後も省エネ対策の柱として必要不可欠となっている青色発光ダイオード（青色LED）は20世紀中には実現しないと言われていた。赤崎先生（現 名城大学終身教授 / 名古屋大学特別教授・名誉教授）天野先生（現 名古屋大学大学院教授）による窒化ガリウム（GaN）系化合物半導体を用いた青色LEDの発明は、科学者だけでなく市場経済に至るまで大きな衝撃と影響を及ぼしている。両先生の偉業を称え、ノーベル物理学賞受賞に至ったことは、両先生のご指導の元、世界に先駆けて青色LEDを開発・量産化したパイオニア企業としての豊田合成の誇りである。

本総説では、豊田合成が青色LEDの量産化を成功するまでの開発の歩みを赤崎先生、天野先生との出会いと共に紹介する。後半では、量産化以降のLEDの技術開発の取り組み事例について製品を交えながら概論を説明する。

本技報では、本総説の後に論文として、「LED製品開発の現状と最新動向」、「LEDチップ開発の最新動向」、および「生産技術開発動向」につい

てさらに詳しい技術内容を特集として報告する。

#### 2. 豊田合成の青色LED開発の歴史

豊田合成は、ゴム・樹脂を中心とする自動車部品メーカーとして1949年に設立した。1980年代、豊田合成は自動車部品に次ぐ脱ゴム、脱樹脂での事業を模索していた。自動車部品の付加価値向上に繋がる発光応用製品としてLEDに着眼し、1984年より開発に取り組んでいた。開発当初は、当時から存在していた赤色や緑色LEDを用い、面発光LEDイルミネーションや車載用として、トップマークやフォークリフト向けに電圧残存計の開発を手掛けた。赤崎先生との出会いは1985年、当時の技術企画室の室員が聴講した先生の講演会であった。その場で赤崎先生は高性能な青色LEDやレーザーダイオードの材料である窒化ガリウム系化合物半導体に関するご自身の研究について話された。聴講した豊田合成の担当者は、青色LEDは重要であると考え、当時の社長の根本正夫氏を通じて赤崎先生にアプローチし、先生との共同研究が実現した。

一方、ほぼ同時期に新技術開発事業団（現 科学技術振興機構（JST））が赤崎先生の技術に注

表-1 豊田合成と赤崎先生・天野先生とそのグループの青色LED開発の歩み

年	豊田合成	赤崎先生, 天野先生とそのグループ
1980		フリップチップGaN MIS型青色LEDの開発 MOVPEによるGaNの成長開始
1984	LED応用製品の開発	
1985	赤崎先生との出会い, 共同開発の申し入れ	低温AlN/バッファ層による高品質GaN単結晶の実現
1986	赤崎研究室との青色LEDの共同研究開発スタート	
1987	新技術開発事業団との産学官連携スタート「GaN青色発光ダイオードの製造技術」 SiH <sub>4</sub> を用いたGaNのn型伝導度の制御	
1989		Mg添加高品質GaNへの電子線照射によるp型伝導の発見 pn接合型青色LEDの実現
1991	MIS型高輝度青色LEDの開発 (新技術開発事業団の成功認定 効率1.2%)	量子サイズ効果を示すGaN/AlGaIn多層ヘテロ構造
1992		高効率青色LEDの実現(効率1.5%)
1995	高輝度青色LEDの量産化(2cd)	高出力AlGaIn/GaNダブルヘテロ構造紫外LEDの実現
1996	発光層にMQW構造を用いた 高輝度青色LED, 緑色LEDの開発	最短波長レーザーダイオードの実現

\*1 オプトE事業部 オプトE要素技術開発部

目し、「委託開発（独創的シーズ展開事業）」による事業化の話が進んでいた。折しも豊田合成が赤崎先生と共同研究を行っており、事業化を熱望しているとの話から、開発実施企業として豊田合成および既に先生と関係があった豊田中央研究所が選定され、1986年より産学官連携によるプロジェクト名「GaN 青色発光ダイオードの製造技術」（期間 1987～1990年、代表発明者 赤崎先生、開発費用 5.5 億円、開発目標 30mcd@10mA）がスタートした。赤崎先生は最終的に豊田合成を選んだ理由は「熱意」であったと自書の中で紹介している<sup>1)</sup>。

豊田合成は、試作棟（春日工場）の3階に設置したクリーンルームを開発場所とし、結晶成長から電極形成、素子化による LED チップ作製設備、さらに砲弾型のランプ作製可能な設備を設置した。しかしながら、当時の豊田合成には、GaN どころか、半導体の研究者・技術者は在籍せず、設備設置の間、結晶成長技術は名古屋大学の赤崎先生の研究室で、結晶成長後のプロセス技術は豊田中央研究所の化合物半導体研究室で初歩から学んだ。その後、大学院博士課程であった天野先生が p 型化の研究で豊田合成の技術センターにオートバイで連日通われたのが天野先生と豊田合成の関係の始まりとなった。

豊田合成は、のちの章で紹介する赤崎先生が成し遂げたブレークスルー技術について、赤崎先生、天野先生、豊田中央研究所の定期的なご指導のもと開発を進め、プロジェクトスタートから3年半後の1991年、当時としては世界最高輝度（50mcd@10mA）の青色 LED の開発に成功し、新技術事業団の成功認定を受けた。その後は、他のブレークスルー技術に改良を重ね、1995年には、実用レベルの明るさを持つ青色 LED（2cd）の量産を実現し、自動車部品とは異なる新事業の大きな一歩を踏み出した。なお、赤崎先生、天野先生には現在も豊田合成のアドバイザーとしてご指導を頂いている。そして、これまでに15名の両先生の研究室の卒業・修了生が豊田合成に入社

し、豊田合成からも社会人ドクターとしてエンジニアを派遣するなど人的交流が続いている。

### 3. ブレークスルー技術

青色 LED の実現により、従来から存在した赤色、緑色 LED と合わせて光の三原色を実現した。高輝度青色 LED と赤色、緑色 LED、もしくは緑から赤色領域を発光する蛍光体を組み合わせることにより白色光源が実現し、液晶バックライトの光源から照明まで用途が広がった。青色 LED が実現して以来、その応用製品は爆発的な普及が進んでいる。その理由は長寿命、低消費電力、速い応答速度、高い色純度といった LED の長が挙げられる。本章では (1) LED の発光メカニズム、(2) 青色 LED の材料である GaN について説明し、**図-1**に示す赤崎先生、天野先生と豊田合成らによって実現した GaN 系青色 LED 実現のための数あるブレークスルー技術のうち今日の青色 LED の礎となった技術 (3) 低温堆積 AlN バッファ層、(4) p 型 GaN 層の実現、について述べる。

#### 3-1. LED の発光メカニズム

初めに、LED の発光メカニズムについて説明する。Light Emitting Diodes (LED) は、電流を流すことにより発光する半導体素子である (**図-1**)。1907年にRoundによって発見されたSiCに電圧を加えた時の発光現象が起源とされる<sup>2)</sup>。発光原理はエレクトロルミネッセンス効果を利用している。これは半導体のpn接合部に注入された電子と正孔が再結合する時、半導体のバンドギャップ  $E_g$  (禁制帯幅) に相当するエネルギーを光として放出することで発光するものである。LED が発する波長  $\lambda$  の制御は次式で表されるようにバンドギャップ  $E_g$  によって決まる。

$$\text{発光波長 } \lambda \text{ [nm]} = 1240 / E_g \text{ [eV]}$$

このバンドギャップ  $E_g$  は半導体材料固有の値であることから、発光波長は半導体材料によって

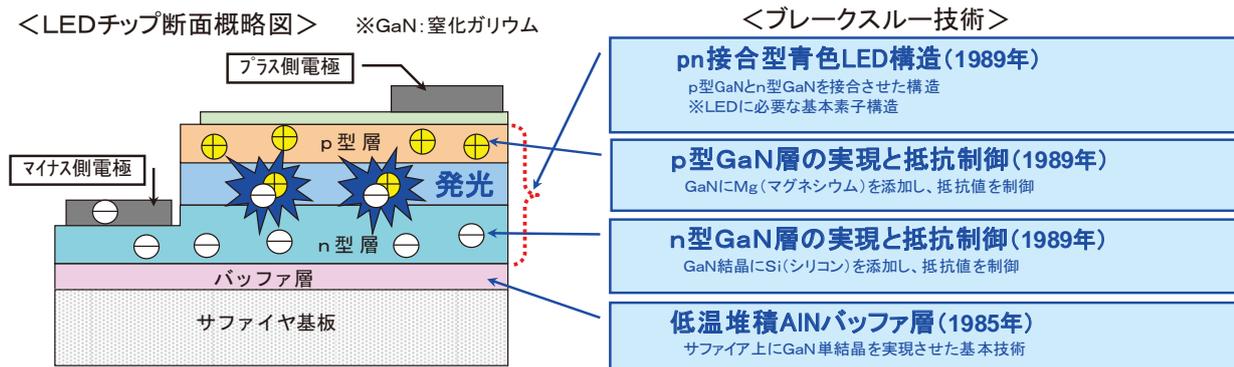


図-1 LED 構造とブレークスルー技術

決まる。従って LED の開発は半導体材料の選択とその開発を意味する。

### 3-2. 窒化ガリウム (GaN)

青色 (波長～450nm) の光を発光させる高輝度 LED の実現のために、2.3～2.8eV のバンドギャップを持つ直接遷移型の半導体の開発が必要となる。

上記条件を満たす材料として、当時、GaN (Ⅲ族窒化物)<sup>3)</sup>、ZnSe (Ⅱ族カルコゲナイト)<sup>4)</sup> が挙げられた。ZnSe は、GaN に比べて低温での成長が可能で、やわらかいため加工し易く、n 型・p 型の電気伝導の制御も容易である。そのため、多くの研究者は ZnSe を選択した。しかし、取扱がし易い反面、素子寿命が短いなど実用化への課題が山積していた。一方、GaN は多くの結晶の中でも最も作製 (結晶成長) が困難とされた。GaN は窒素の蒸気圧が高いことからバルク結晶の作製が非常に難しく (※現在では可能となっている<sup>5)</sup>)、また結合力が強く格子定数が小さいことから格子整合する適当なヘテロ基板が存在しない。すなわち GaN は、他の材料に比べ非常に硬くて、作りにくい材料である。しかし逆説的に最も安定な材料であり、良質な結晶が得られれば高い信頼性のデバイスが実現できる。赤崎先生はこのことに着眼し、先見性から GaN の材料としての有望性を見抜かれた。今日の青色 LED の発展の礎は、まさに材料の選択とその開発にあると実感させられる。

### 3-3. 低温堆積 AlN バッファ層

材料としての GaN のポテンシャルは、3-2 項で説明したとおり非常に高いものである。従って、如何にして高品質の GaN 結晶層を実現させるかが研究開発の鍵であった。本章では、高品質 GaN 単結晶を実現させたブレイクスルー技術、低温堆積 AlN バッファ層について説明する。今日において、本技術は大きな格子定数差を持つ半導体どうしのヘテロ接合をエピタキシャル成長により得る手法のスタンダードとなっている。

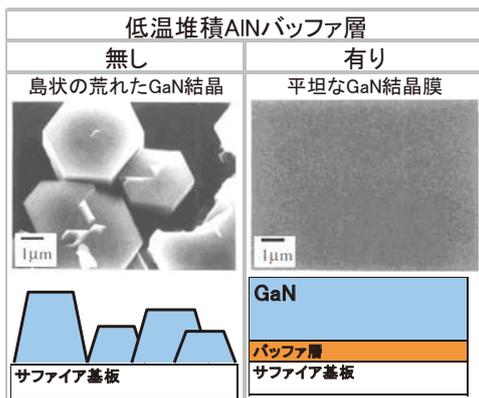


図-2 高品質 GaN 成長技術 (低温堆積 AlN バッファ層)

一般的に高品質な結晶を得るためには、格子整合する基板を用いることが原則である。それは、基板と結晶層の格子定数が異なると成長層には圧縮又は引張歪が生じ、蓄積された弾性歪エネルギーを開放するため、転位などの結晶欠陥を発生させ、結晶層の品質を低下させるからである。従って、AlGaAs や ZnSe などの結晶はそれらのバルク基板、又は格子定数差の小さいヘテロ (異種) 基板を用いて結晶成長が行われる。

3-2 項で説明したように GaN には格子定数の近い適当なヘテロ基板が存在しない。現在 GaN 成長用基板として一般的に使用されているサファイア基板との格子定数のズレは約 16% にもなる。その結果、歪の緩和は数原子層で発生し、図-2 に示すようにサファイア基板上に“直接” GaN 層を成長させた場合は良質な結晶層を得られない<sup>6)</sup>。従って、サファイア基板上に良質な GaN 層を得るためには、基板との歪を緩和し、基板との界面に発生する欠陥を閉じ込める工夫が必要となる。これを実現させた技術が低温堆積 AlN バッファ層である<sup>7)</sup>。その具体的な成長メカニズムを図-3 に模式的に示す。サファイア基板上に低温で AlN 結晶層を堆積させることによって、高密度の核形成とその核を起点とした結晶粒成長が起きる<sup>8)</sup>。この高密度の AlN 結晶粒層は多結晶構造であることから結晶品質が非常に低いが、基板と結晶層との格子定数差に起因する結晶欠陥を基板界面に閉じ込めると共に、効果的に歪を緩和させる<sup>9)</sup>。この AlN 結晶粒は GaN 層成長温度までの昇温中に再結晶化 (固相成長) が進む。高温で成長する GaN 層は、歪が緩和した高密度の AlN 結晶粒を成長核として成長することができる。こうして得られた GaN 薄膜は、結晶学的、光学的、電気特性的にも高輝度 LED を実現させるための要素をすべて満たしている。このようにして実現した高品質 GaN 単結晶が、次に説明する結晶層の p 型化<sup>10)</sup>、電気特性の制御<sup>11)</sup> といった LED 基本構造に必要な不可欠な技術を成功へと導いた。

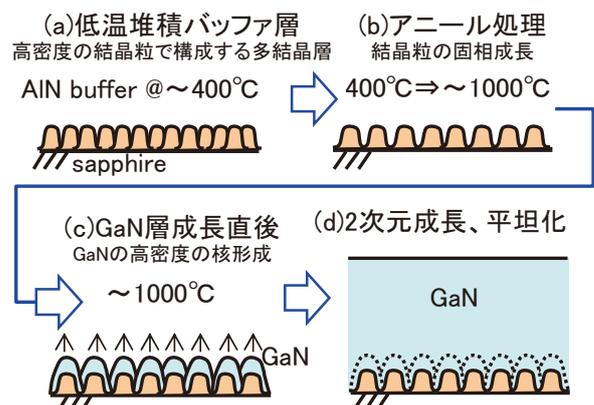


図-3 低温堆積 AlN バッファ層の成長メカニズム

### 3-4. p型 GaN 層の実現

高輝度 LED を実現させるためには、pn 接合が必要である。3-1 項で説明したように、LED は電子と正孔が pn 接合の領域で結合することによって発光するため、n 型、p 型の伝導性の制御が非常に重要である。n 型については、1989 年に n 型不純物として Si をドーピングすることにより実現した<sup>11)</sup>。これはドーピングした Si 濃度に比例して電気伝導を制御することができる。一方、p 型については n 型のようにはいかなかった。大きなバンドギャップを有する半導体になるほど、電気伝導の制御が困難になり、GaN 層の p 型化においては特に顕著であった。これを打破した技術は 2 つある。

1 つ目は p 型不純物材料としてマグネシウム (Mg) を選択したことである。従来、p 型 GaN の不純物として亜鉛 (Zn) が用いられていた。p 型結晶を得るためには、ドーピングされた不純物原子が活性化する必要があり、活性化するためのエネルギーが高い場合、p 型結晶は得られない。Zn は GaN 結晶において活性化エネルギーが高く、p 型化が困難な材料であった。天野先生が p 型化の研究の中で、Mg の方が Zn よりも活性化エネルギーが小さいことに気づいたことが GaN 結晶層の p 型化の実現に近づく契機となった。ここでも材料の選択が如何に重要であるのかを再認識させられる。

2 つ目に重要な技術は、電子線照射による Mg ドープ GaN 層の p 型化である<sup>10)</sup>。Mg は GaN 層の p 型不純物の材料として高いポテンシャルを秘めていたが、Mg ドープ GaN 層は依然として高抵抗であった。天野先生は研究の中で電子線照射をすると Mg に関与する青色発光の強度が増加し、照射後の Mg ドープ GaN 層が p 型化することを発見した。この発見がブレークスルーとなり、p 型 GaN 層の実現に至った。これは、GaN 層中の Mg 原子に結合した水素が p 型化を阻害していた要因で、熱的に水素を脱離することにより低抵抗 p 型伝導が実現することが後に解明された (図-4)。

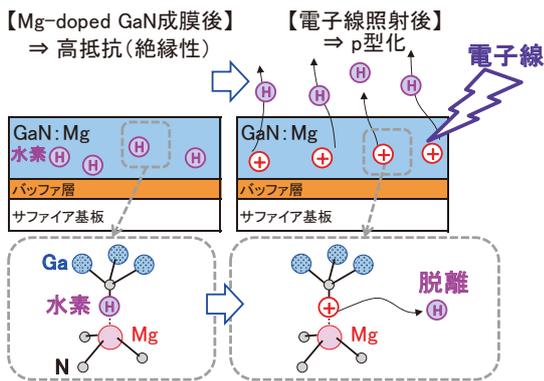


図-4 GaN 層の p 型化のメカニズム

低温 AlN パルファ層による高品質 GaN の実現、n 型、p 型伝導性の制御の実現により、高輝度 LED の基本構造として必要不可欠な pn 接合が実現した<sup>10)</sup>。これらの成功および発明がのちの LED 高出力化のトリガーとなり、高輝度 LED に必要不可欠な技術が次々と発明され、今日の LED の発展と繋がっている。次章では、青色 LED 量産化以降の青色 LED 製品の発展について述べる。

## 4. 青色 LED 実用化（表示装置）

青色 LED の量産化以降、優れた省エネ性能、寿命が長いといった理由から環境にやさしい光源として LED の応用分野が広がった。まずは、インジケータやサイン等の表示器として、赤色 LED や黄色 LED での実績がある砲弾型 LED への応用である (図-5 (a))。青色 LED が実用化されるといち早くこれに搭載された。砲弾型 LED ランプは、図-5(b)に示すように、LED チップ、リードフレーム、ワイヤ、レンズで構成される。使用される材料は、これまでの赤色、緑色よりも短波長での耐久性が求められるようになったため、改良された材料を採用し信頼性を確保している。また、砲弾型 LED ランプはレンズ設計による配光制御が容易であり、用途に応じた形状のものがラインナップされている。本章では、砲弾型 LED の代表使用例を紹介する。

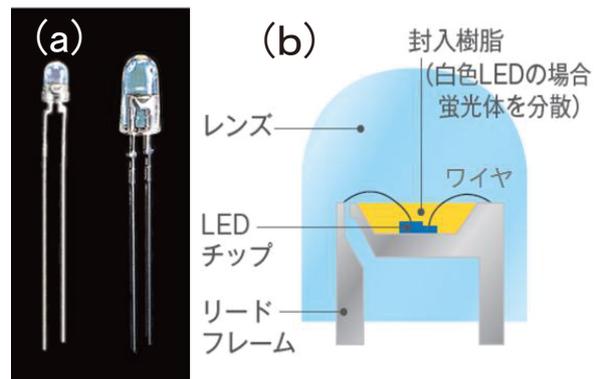


図-5 (a) 砲弾型 LED ランプの写真 (b) 砲弾型 LED ランプの構造

### 4-1. ディスプレイ用途

青色 LED が実現した最も大きい効果は、従来から存在する赤、緑色 LED を加えて「光の三原色」が揃い、あらゆる色を表現することが可能になったことである (図-6)。これを応用し砲弾型 LED を用いて実現した象徴的な製品は、スタジアムや商業施設などの公共施設に設置されている図-7のような大型フルカラーディスプレイであろう。赤 (R)、緑 (G)、青 (B) -LED を 1

光の三原色

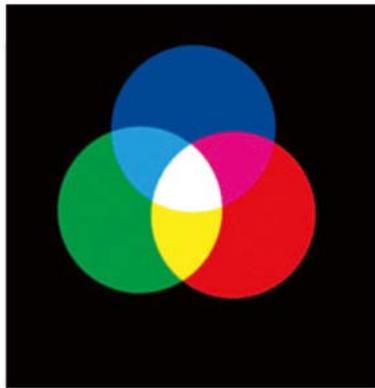


図-6 光の三原色



図-7 大型フルカラーディスプレイ

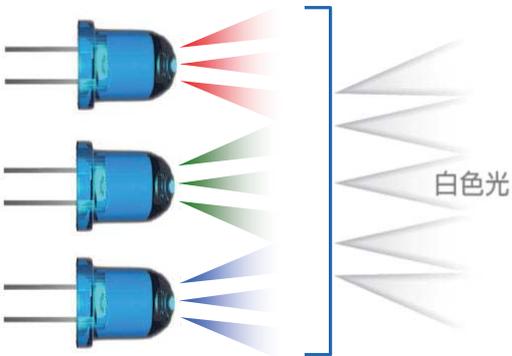


図-8 R, G, B-LED による混色白色光

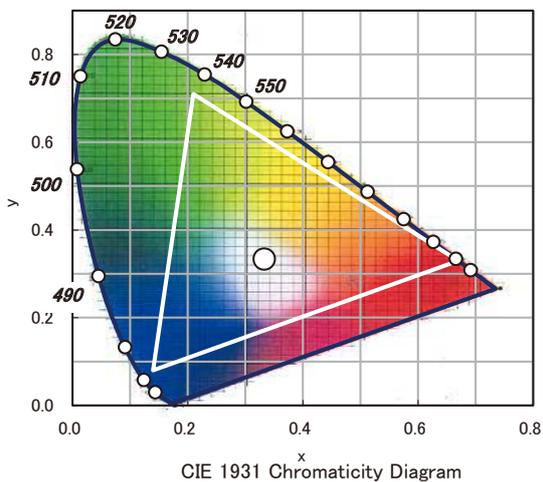


図-9 色度図

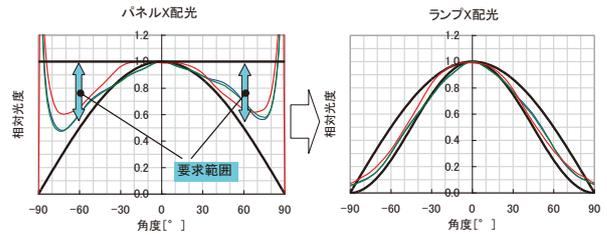


図-10 パネル要求配光特性

組の画素として構成する (図-8)。図-9の色度図から示されるように、RGB 各々の LED 出力を調整しカラーバランスを変化させることで、フルカラーで映像を表示することができる。図-7のような大型ディスプレイには砲弾型 LED ランプがおおよそ 2~3 百万個使用されている。

屋外用ディスプレイで重要なことは、明るい空の下でも多くの人々が画像を認識できることである。そのためには、白色面輝度  $5000\text{cd}/\text{m}^2$  のパネルが必要とされる。これに対して LED の輝度を向上させ対応してきた。青色 LED の輝度は量産化以降急速に向上しており、大型ディスプレイの普及を牽引している。また、パネルには視認性が必要な範囲にのみ輝度が求められる。左右  $60^\circ$  範囲での観覧を想定しているため、LED ランプの配光は、図-10 右グラフを狙い調整されている (図-10)。一方、上下方向の視認性は広くなくてよい。そのため、レンズがオーバル形状の砲弾型 LED ランプが採用されている。このように、搭載される砲弾型 LED ランプはパネル要求に対応した設計となっている。ディスプレイ用途においては、LED は人が直接見るもののため、配光のばらつきがパネルを見る角度によって斑やムラ、色味が異なるといったクレームを防止するため、量産における LED ランプの配光に安定化が重要である。

#### 4-2. 信号用途

青色 LED 実現の恩恵を我々の日常生活の中で実感できるデバイスが図-11 に示す信号機である。信号機の青色の発光色はドミナント波長が



図-11 LED 信号機

500～520nm であり、緑色に近い青色に設定されている。これは、色弱者（赤緑色覚異常や青黄色覚異常）への配慮とされており、GaN系LEDで対応可能な発光色である。信号機にLEDを応用することで、低消費電力であり省エネに貢献できること、長寿命であり電球の交換頻度を減らせること、灯具にリフレクタを持たないため、朝日や夕日の入射によって生じる疑似点灯（ファントム現象）が無いこと、といったメリットがある。また誤認防止のため、横方向からの視認性を制限するため、LEDランプの配光を半値角23°まで絞り最適化している。こうしたメリットが認められ、全国の信号機はLEDに置き換わりつつあり、普及率は37.9%に達している（平成25年、警察庁調べ）。また、CIE（国際照明委員会）の定める交通信号の緑色の発光色範囲へも対応が可能となり、欧州向けに採用も拡大している。

LEDの量産化が実現した当時は世界で最高性能を誇る青色LEDであったが、LEDの普及に必要な性能には到達しておらず性能改善が急務であった。その後の絶え間ない開発・製品化により、現在の青色LED性能は開発当初に比べて、明るさ13倍、駆動電圧20%下げる改善、電力効率に至っては商品化当初の15倍である約76%にも達している。青色LEDは、表示系用途の普及により人々に広く認知されるようになり、現在では省エネ対策の有力なツールとして照明分野へ急速な拡大が続いている。次項では、我々の生活を明るく照らすための必要不可欠なツールである照明用途に関する白色LEDについて紹介する。

### 5. 名実ともに第4世代の明かりへ

光の三原色の実現により、LEDの応用製品として最も期待されるアプリケーションが照明である。人類を照らしてきた光は、「ろうそく」にはじまり、「電球」、「蛍光灯」と世代が変わってきた（図-12）。現在においては、LEDは第4世代の光として確実な地位を築いている。他の世代と異なり、LEDは電気を直接光に変換できることが最大の特徴である。その効率の高さからLED照明の普及は発電時のCO<sub>2</sub>の排出量削減に直結する。そのため、LED照明は環境問題・エネルギー問題を解決する答えの1つとして近年ますます注目を集めている。

GaN系青色LEDを用いて白色光を実現させる方法は、図-13に示すように主に3つある。1つ目は第3項で説明したR、G、B-LEDによる混合白色光である。2つ目は、GaN系紫外LEDを用いてLEDの放射する紫外光によりR、G、Bの蛍光体を励起・発光させる方式である。どちら

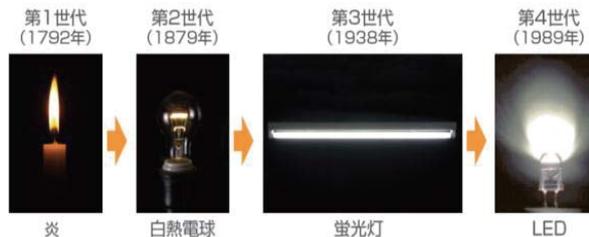


図-12 明かりの進化

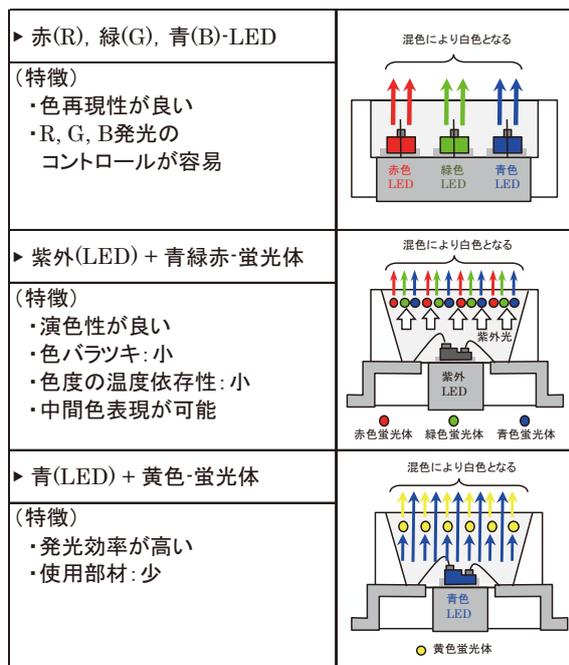


図-13 白色LEDの方式

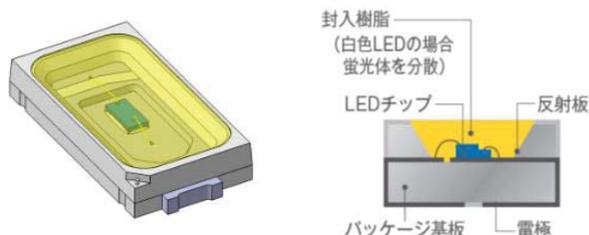


図-14 表面実装型LEDパッケージ

の方式も光の三原色を実現することから、演色性・色再現性が良いといったメリットがある反面、コストや効率に課題がある。3つ目の方式はGaN系青色LEDと黄色蛍光体材料との組合せによる擬似白色光である<sup>12, 13)</sup>。先の2つの方式と比較すると演色性は劣るが、現在この方式が照明用LEDとして最も実用・量産化されている。その理由として、高効率であること、青色LEDと蛍光体の組合せのみで簡単に白色光を実現できることから低コストであることが挙げられる。LED照明の普及にはコスト低減が必須であるため、現在においては最も主流な方式となっている。また、照明タイプの白色LEDパッケージは砲弾型ではなく、図-14に示すような表面実装型LEDパッケージが広く用いられている。これはLEDチップ

プを直接基板に接着できるので薄型化しやすく設置スペースなどの制約が少なくなるためである。

黄色蛍光体と組合せた GaN 系白色 LED (以後、単に白色 LED と述べる) は、先ず液晶のバックライトとして普及が進んだ。ベースとなる青色 LED の高光度化が進むにつれて白熱電球、蛍光灯の置き換えが可能となり、現在では 200lm/W に迫る発光効率を持つ白色 LED の製品化も現実味を帯びてきている<sup>14)</sup>。

白色 LED の普及に伴い、市場では顧客製品にあわせた白色 LED パッケージのラインナップの充実が進んだ。本章では、照明用途での事例を 2 つ挙げる。

### 5-1. 蛍光灯型 LED 照明

図-15 は、従来の蛍光灯と同様の筒型形状の中に、5mm 程度の大きさの白色 LED が 100 ~ 200 個並んでいる蛍光灯型 LED 照明になる。LED の特徴である省エネ効果により、オフィスや工場の電気代削減に貢献することができる。豊田合成およびトヨタグループ各社において、それぞれ 7 万本以上の蛍光灯型 LED 照明の設置・活用が進んでいる (図-16)。最新のモデルでは、

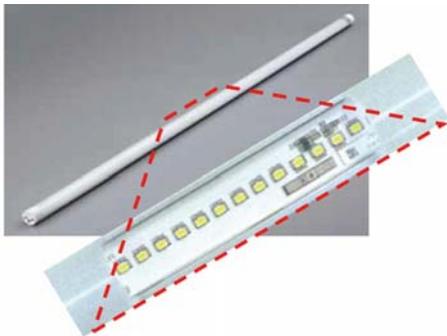


図-15 蛍光灯型 LED 照明

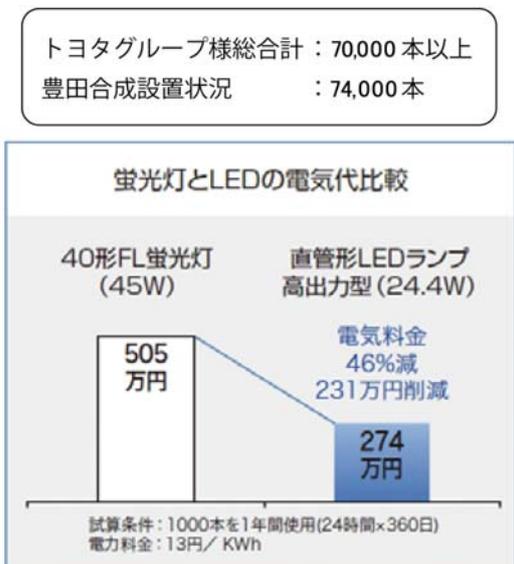


図-16 蛍光灯と LED 照明の電気代比較

表-2 蛍光灯と LED 照明の性能比較

		蛍光灯	LEDランプ*	最新モデル
器具光束		3,000 lm	2,300 lm	2,300 lm
器具効率		67 lm/W	94 lm/W	147 lm/W
インシャル回収年数		—	3年	2年
点灯制御	調光制御	不可	非搭載	対応可能
	調色制御	不可	非搭載	対応可能

※蛍光体同等以上の照度を達成

従来の LED ランプと比較して 1.5 倍の効率改善を達成し、更なる省エネに貢献できる製品となっている (表-2)。また LED ならではの特長として、色や明るさを任意に調光できる機能を搭載することも可能となっている。

### 5-2. 高天井 LED 照明

図-17 は、工場や体育館の天井に設置する高天井 LED 照明で、豊田合成北九州工場での実証事例である。1つの基板の上に、50個~100個のチップを搭載した COB (Chip On Board) 光源を使っている。

TG北九州工場の実証例	高天井LED照明	LED COB パッケージ
	<p>器具光束：15,100lm 消費電力：140W</p>	<p>光束：2,750lm 消費電力：20W 効率：138lm/W</p>

図-17 高天井 LED 照明の方式と性能

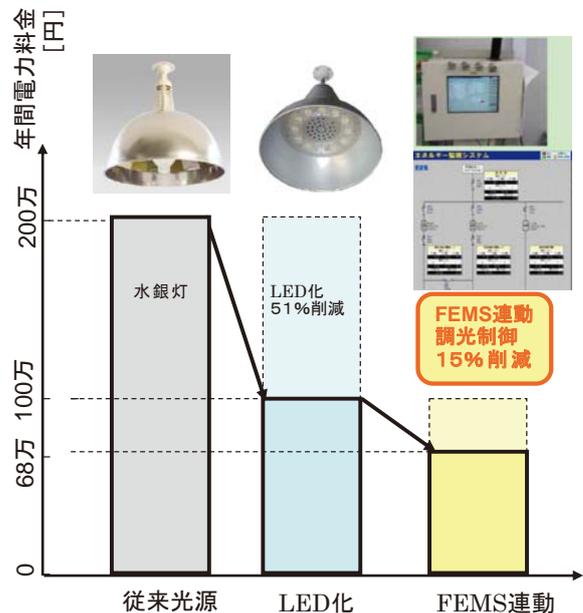


図-18 水銀灯と高天井 LED 照明の比較

器具に COB を複数個搭載することにより、水銀ランプ同等の大光量を確保できるレベルまで LED の性能が向上している。

この事例では、LED 化により従来の水銀灯比較で約半分の省エネを実現した (図-18)。また LED ならではの長所である「電源に連動し瞬時に ON/OFF を制御できる」ことを活用して、外光の強さなどにより点灯制御をする FEMS (Factory Energy Management System) と連動させ、さらに 15% の省エネ化が可能となり、トータルで 1/3 まで電気代を削減できる。また長寿命であるという長所から、高所でのメンテナンス回数を削減できるメリットもあり、豊田合成各工場でも導入を進めトヨタグループ各社での導入についても積極的に検討を進めている。さらに近年の LED 効率の改善により、ギラツキ低減のための拡散板を用いても従来光源より高効率を維持できる。そのため図-19 のように、V リーグの公式試合にも使用可能な体育館用 LED 照明への活用について豊田合成の体育館に設置し実証をしながら、各種体育館へ設置活動を推進している。



図-19 高天井 LED 照明の設置例

## 6. おわりに

本総説では、青色 LED の開発から量産化までにおける開発の経緯と事業化までの歩み、そして量産化以降の青色 LED 製品の発展について述べた。

青色 LED の開発から量産化までの道のりには多くの困難があったが、必ず成し遂げるという熱意と信念を持って進めてきた。青色 LED の事業化を通して、赤崎先生、天野先生、豊田中央研究所ならびにご指導ご協力して頂いた関係者の皆様には改めて感謝の意を表します。

LED は、優れた省エネ性能、寿命が長いといっ

た理由から環境にやさしい光源として今後ますます普及が進んでいきます。我々が青色 LED の事業化を通して学んできたことを、今後の LED チップ、パッケージのさらなる技術改善と事業拡大に継続して活かすと共に、世界に先駆けて青色 LED の開発・量産化に成功したパイオニア企業としての誇りを持って LED による社会貢献を進めていきたい。

## 参考文献

- 1) 産学官連携ジャーナル vol.7 No.4 2011
- 2) H. J. Round : Electrical World 49 (1907) 309
- 3) W. C. Johnson, J. B. Parsons, and M. C. Crew : J. Phys. Chem. 36 (1932) 2651
- 4) S. Myhajlenko, J. L. Batstone, H. J. Hutchinson and J. W. Steeds : J. Phys. (c) 17 (1984) 6477
- 5) H. Amano : Jpn. J. Appl. Phys. 52 (2013) 050001
- 6) I. Akasaki, H. Amano, Y. Koide, K. Hiramatsu and N. Sawaki : J. Cryst. Growth 98 (1989) 209
- 7) H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda : Appl. Phys. Lett. 48 (1986) 353
- 8) K. Hiramatsu, S. Itoh, H. Amano, I. Akasaki : J. Cryst. Growth 115 (1991) 628
- 9) T. Kehagias, P. Komninou, G. Nouet, P. Ruterana and T. Karakostas : Phys. Rev. B 64 (2001) 195329
- 10) H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu and I. Akasaki : Jpn. J. Appl. Phys. 28 (1989) L2112
- 11) K. Koide, H. Kato, M. Sassa, S. Yamasaki, K. Manabe, M. Hashimoto, H. Amano, K. Hiramatsu and I. Akasaki : J. Cryst. Growth 115 (1991) 639
- 12) K. Bando, K. Sakano, Y. Noguchi and Y. Shimizu : J. Light & Vis. Env. 22 (1998) 2
- 13) M. Koike, N. Shibata, H. Kato and Y. Takahashi : IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 8 (2002) 271
- 14) R. Haitz and J. Y. Tsao : Phys. Stat. Sol. (a) 208 (2011) 17

## 著 者



下野信治



奥野浩司

## LED チップ開発の最新動向

中田尚幸<sup>\*1</sup>, 荒添直棋<sup>\*2</sup>, 篠田大輔<sup>\*3</sup>

### Latest Trend of LED Chip Development

Naoyuki Nakada<sup>\*1</sup>, Naoki Arazoe<sup>\*2</sup>, Daisuke Shinoda<sup>\*3</sup>

#### 要旨

本稿では、特殊照明用途に使用する LED チップ開発の最新動向を報告する。高効率化と光源サイズの小型化という市場要求を満たすために、高電流密度での LED 性能を向上させることは重要な課題である。一般的に、高電流領域の性能低下は、デバイスの自己発熱効果に起因する。この問題を解決するための開発事例として、温度特性の改善事例と放熱特性に優れたフリップチップ (FC) 構造の開発事例を紹介する。

#### Abstract

In this article, we described recent developments in LED lighting using for large areas. To satisfy the strong market demand such as high efficiency and small size, improving LED performance in high current density is crucial issue. Generally, performance degradation in high current region is caused by self-heating effect of the device. To resolve this significant issue, we achieved excellent temperature characteristics and high heat radiation with FC structure.

## 1. はじめに

1996年に青色LEDと黄色の蛍光体を組み合わせた現在の主流である白色LEDが実用化され、以降めざましい技術開発によって発光効率 (lm/W) は飛躍的な向上を続けている。発光効率の向上に伴い、LED市場は信号や交通案内等の表示機器、液晶用バックライト、照明分野と急拡大を続け、直近では発光効率200lm/Wを視野にいった製品も実用化段階に入っている。これは蛍光灯の発光効率の約2倍、低圧ナトリウムランプ (180lm/W) を超えて既存光源技術で最大の発光効率を実現することであり、蛍光灯のLED化代替スピードの加速やヘッドライト、投光器等の特殊照明用途への更なる市場拡大が見込まれている。

特殊照明用途の開発ニーズとして単位面積当たりの明るさ向上があげられる。これを実現するには光源面積の小型化・高出力化のための高電流投入が必要である。しかしながらLEDチップは高電流化やそれに伴うチップ自身の発熱により発光効率が低下する性質があり、この改善が必須課題

となっている。本報告では上記課題に対する開発事例として、2項で温度特性改善事例を、3項で大電流領域での放熱性に優れたフリップチップ (FC) 開発事例を紹介する。

## 2. 温度特性改善

### 2-1. LEDの効率

白熱電球の代替としてLEDを用いた電球型照明が広く普及している。外観や発光の色目は良く似ているが、その特性は大きく異なる。この違いは発光原理に依るものであり、白熱電球はタングステン等でできたフィラメントに電流を流して加熱することによって光を発する黒体放射に良く似たものであるのに対し、LED電球は半導体で構成された発光ダイオード内部でプラスの電荷を持った電子とマイナスの電荷を持ったホールが結合する際に発するエネルギーが光として放出されるものであるという違いである。このため、白熱電球は太陽光に似た発光スペクトルを示すのに対し、LED電球は半導体材料に起因した特定の波長で強度が強い発光スペクトルを示す。発光原理の違いから温度に対する特性も大きく異なる。白熱電球はフィラメントを加熱することで発光するため、周囲の温度が低い場合は加熱するために多くのエネルギー (入力電力) が必要となり効率 (電

\*1 オプトE事業部 オプトE要素技術開発部

\*2 オプトE事業部 照明・H/Lユニット

\*3 オプトE事業部 バックライトユニット

力効率)は悪くなる。逆に周囲温度が高い場合は加熱するためのエネルギーが少なくて済むため効率は良くなる。一方、LED 電球ではこの特性は逆転する。一般に半導体は周囲温度が低い場合は欠陥等に起因した準位が活性化しにくいいため効率は良くなる。逆に周囲温度が高い場合はこれらが活性化しやすくなるため効率は低下する。これらの概念図を図-1に示す。

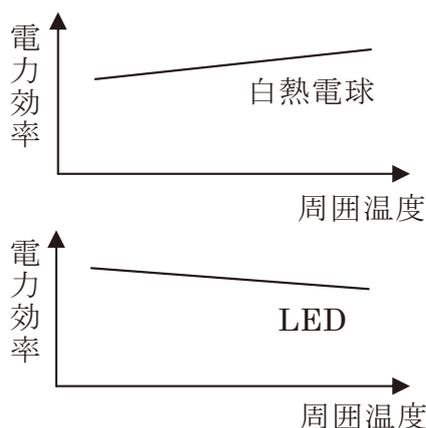


図-1 周囲温度と電力効率の概念図

LED 電球に用いられている窒化ガリウム (GaN) 系 LED でもこれと同様な特性を示す。入力電力の 10% 程度しか照明光として利用できない白熱電球に対し、入力電力の半分以上を光に変える GaN 系 LED でもその残りは最終的には熱エネルギーとして消費している。白熱電球では照明光以外に変換された熱や赤外線発光を利用して効率を高めることができるが、LED では変換された熱は効率を低下させる。このため、LED 電球では効率を低下させないように放熱するための様々な工夫が凝らされている。しかしその光源としての LED チップに対しては、より小さくより明るくという要求が強く、そのため小さなチップに多くの電流を流すことになる<sup>1)</sup>。電流を多く流すと効率が低下する現象は効率 droop と呼ばれ、これもまた効率の低下分は最終的には熱に変換されている。このようなことから、豊田合成では LED チップそのものの温度に対する効率低下を改善する技術開発を進めており、本項ではその改善事例を紹介する。

## 2-2 効率低下の要因

電流を増加させたときに効率が低下する効率 droop は、発光層内でキャリア密度が増加したことによる電子とホールとの再結合全体に占める発光再結合の割合の低下と、キャリアの発光層からの漏れによるものが要因であると考えられる<sup>2,3)</sup>。一方、温度上昇による効率低下は、欠陥等に起因し

た非発光再結合中心を介してキャリアが再結合するショックレー-リード-ホール (SRH) 再結合によるものと、発光層からのキャリアの漏れが要因として考えられる<sup>4)</sup>。LED 内のキャリアの再結合は経験則として ABC モデルでよく表される。これはキャリア密度を  $n$  とした時、再結合速度  $R$  は、

$$R = An + Bn^2 + Cn^3$$

で示されるというものである。ここで、 $A$ 、 $B$ 、 $C$  はそれぞれ SRH 再結合、発光再結合、オージェ再結合の各係数である。この式が表すように、SRH 再結合はキャリア密度が低い時に支配的であり、キャリア密度が増加すると再結合全体に占めるその割合は低下していく。通常の LED において、周囲温度を変化させた時の発光強度の変化を図-2に示す。図には室温での発光強度を 1 とした時の相対強度を縦軸とし、電流密度を 1.5、15、90 A/cm<sup>2</sup> とした時のそれぞれの温度に対する変化を示した。

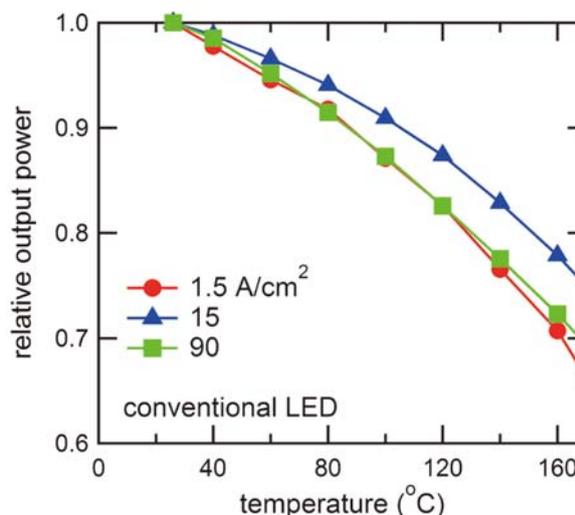


図-2 周囲温度と相対発光強度

図-2より、電流密度が 1.5 A/cm<sup>2</sup> と低い時、周囲温度を 120℃まで上昇させると発光強度は室温の 82% と 18% 低下することが分かる。しかし、ここから電流密度を上げるとこの低下率は小さくなっていく。同図に示すように、電流密度を 15 A/cm<sup>2</sup> まで上昇させるとその低下幅は 13% に留まる。ここでさらに電流密度を上げていくと、その低下率は大きくなっていく。電流密度を 90 A/cm<sup>2</sup> とした場合は、その低下幅は 18% となる。電流密度を変化させた時のそれぞれの電流密度での室温に対する 120℃時の相対発光強度の変化を図-3に示す。

図-3より、電流密度が 30 A/cm<sup>2</sup> より低い場合、電流密度が増加すると室温に対する 120℃時の相対発光強度が増加していく様子が分かる。これはこの電流密度領域では電流密度が高くなるほど再結合全体に占める SRH 再結合の割合が低下

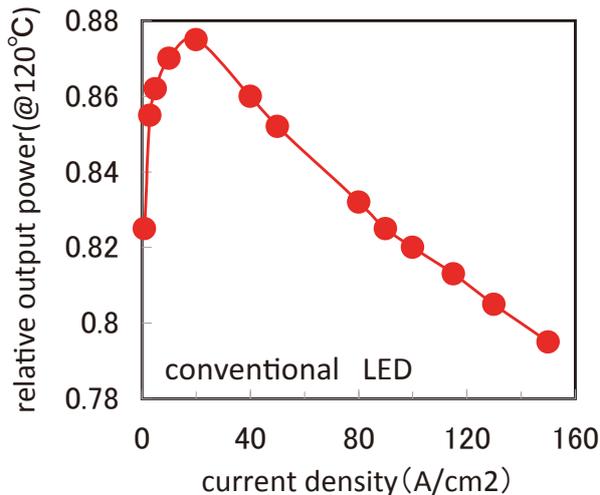


図-3 電流密度と相対発光強度

するためであると考えられる。このことから、このような低い電流密度で駆動する場合、転位密度を低減させるなどの対策が有効であると考えられる。一方、電流密度が  $30\text{A}/\text{cm}^2$  より高い場合、電流密度が増加すると室温に対する  $120^\circ\text{C}$  時の相対発光強度は低下していく様子が分かる。このことから、この電流密度領域では発光層からのキャリアの漏れが支配的であると考えられる。温度が上昇することにより再結合全体に占める発光再結合の割合が低下すると共に、熱エネルギーを得たキャリアが発光層（井戸層）を発光再結合しないで通過しやすくなっているためである。以上のことから、発光層に多重量子井戸構造を採る現在の LED 構造においては、井戸層にキャリアを留め発光再結合させることが、高電流密度領域での温度上昇による効率低下を抑制するのに有効であると考えられる。

本項では LED 構造に用いている超格子層の結晶成長条件を最適化することにより結晶表面の平坦性を向上させ、温度上昇による効率低下を抑制させた事例を紹介する。

### 2-3. 表面平坦性向上による温度特性改善

表面平坦性向上を狙い、結晶成長の条件を変更して超格子層で成長を止めたウエハを 3 種類作製した (sample A, B, C)。図-4 に原子間力顕微鏡 (AFM) にて測定した二乗平均面荒さ (RMS) を示す。サンプル A, B, C の順に表面 RMS の値が小さくなっており、結晶成長条件の最適化により超格子層における表面平坦性を向上できることが分かる。

次にこれら 3 種類の異なる結晶成長条件にて LED 構造を作製し、周囲温度に対する相対発光強度の変化を評価した。その結果を図-5 に示す。

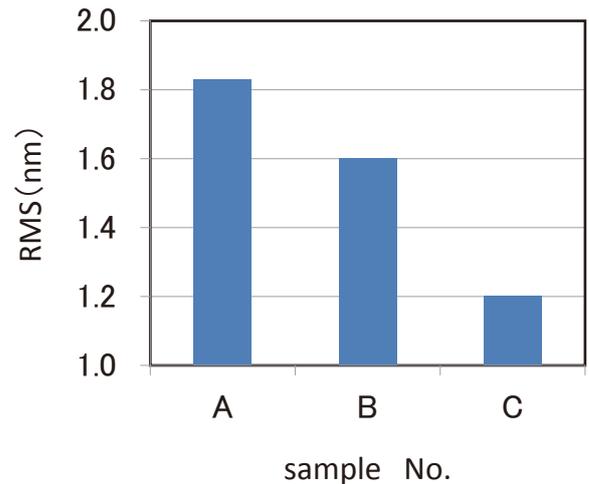


図-4 結晶成長条件を変更して作製した超格子層における表面 RMS 値

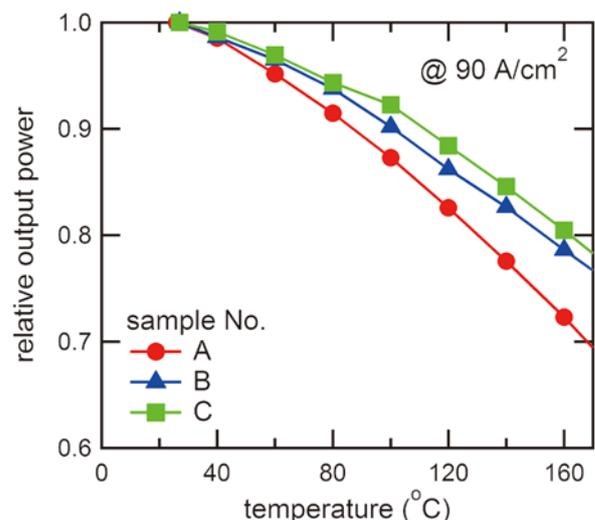


図-5 結晶成長条件を変えて作製した LED の相対発光強度の周囲温度依存性

図-5 より、サンプル A, B, C の順に温度上昇時の室温に対する発光強度の低下が小さくなっていることが分かる。サンプル A では  $120^\circ\text{C}$  時の室温に対する相対発光強度が 82% であるのに対し、サンプル C ではその値が 89% へと改善している。

図-6 に各サンプルの RMS 値と  $120^\circ\text{C}$  時の室温に対する相対発光強度の関係を示す。

図-6 から表面平坦性が小さくなるにつれて、温度上昇時の発光強度の低下が小さくなっていることが分かる。このことから、表面平坦性の向上が温度上昇時の発光強度の低下を抑制する要因であると考えられる。本サンプルにおいて、井戸層は GaInN で構成されているが、GaInN は In の局所的な偏析が生じやすい。表面平坦性が向上したことによりこの偏析がより小さくなり、偏析によって生じていた局所的な電場勾配が小さくなったと考えられる。局所的な電場勾配はキャリアの

集中の要因となり、温度の上昇により欠陥等を通じてトンネルしていく<sup>5)</sup>。本実験において周囲温度上昇時の発光強度の低下が抑制されたのはこのような現象が抑制されたためであると考えられる。

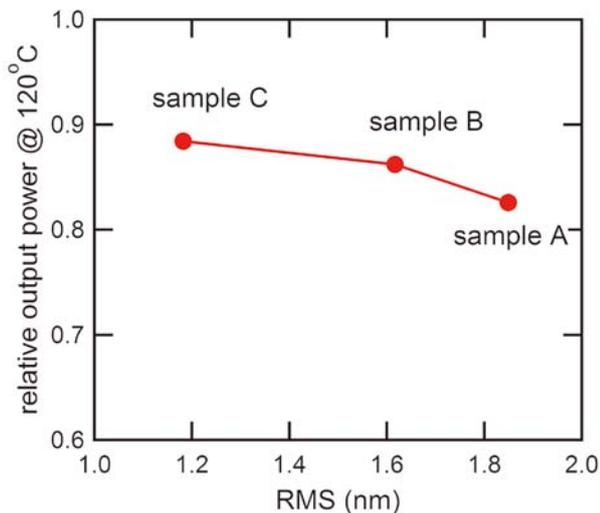


図-6 超格子層の表面 RMS と 120°C時の相対発光強度

### 3. フリップチップ開発

#### 3-1. LED チップの構造

LED チップは特性向上や用途に合わせて、様々な形状や構造が考案されているが、実装方法に着目すると大きく2種類に分類することができる。一つは、フェイスアップチップ (FU) と呼ばれるもので、もう一つはフリップチップ (FC) と呼ばれるものである。この二つの構造を図-7に示す。

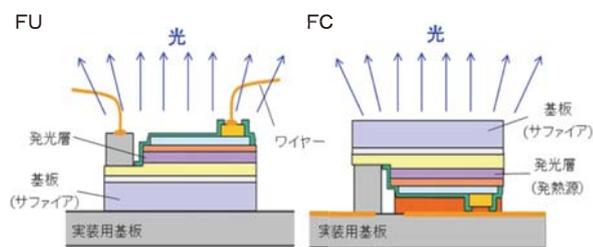


図-7 FU と FC の構造

FUはサファイア基板を実装用基板と接合するタイプで、電極に透明電極を用いることで、電極側から光を取り出すLEDチップである。この実装方法に対して、チップを上下逆にして電極を実装用基板と接合する実装方法をとるチップがFCである。これはサファイア基板が透明であることを利用して、サファイア基板側から光を取り出すLEDチップである。

#### 3-2. フリップチップの特長

FUとFCは上記のような構造上の違いから、主に表-1のような特長を持つ。

表-1 FUとFCの特長

	項目	FU	FC
①	実装しやすさ	有利	不利
②	実装 小スペース化	不利	有利
③	放熱性	不利	有利

##### ①実装しやすさ

FCでは実装用基板に接合するチップ面にp電極とn電極があり、このpとnが電気的につながらないように実装する必要があり実装難易度が高い。これに対して、FUでは実装用基板に接合するチップ面は絶縁物であるサファイア基板であり、チップ全面と実装用基板を接着すればよいのでFCより実装が容易であり、現在主流の構造になっている。

##### ②実装 小スペース化

FUでは電気的接続のためにワイヤーボンディングが必要であり、そのスペースが実装用基板に必要である。それに対して、FCでは実装用基板とチップを直接電気的に接続するために、ワイヤーが不要であり実装スペースを小さくできる。

##### ③放熱性

LEDチップは、電気的なエネルギーを光のエネルギーに変換するものだが、その際のロスにより発熱する。また、LEDチップは発光層の温度が上昇すると明るさが低下してしまう。そのため、放熱性が良いことが望まれる。LEDチップでは、発光層が発熱源となっている。FUにおいては、数百um厚のサファイア基板を通して熱を実装用基板に逃がす必要があるため熱がこもりやすい。一方、FCでは、数um厚の電極を通して熱を実装用基板に逃がせば良いため、放熱性はFUに比べて良い。同一電流密度でのチップ温度を比較したデータを図-8に、電流密度による明るさを比較したデータを図-9に示す。図-8からFC

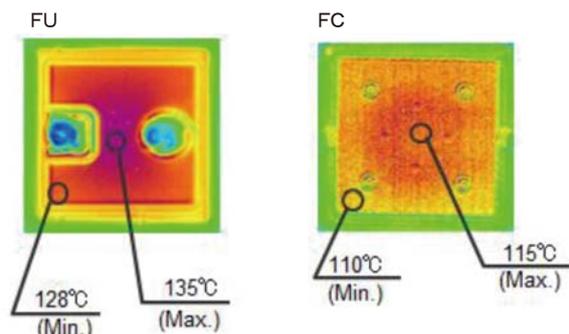


図-8 FU と FC のチップ温度比較

の方がFUよりもチップ温度が低いことが分かる。電流密度を上げるほどチップの発熱は大きくなるが、図-9から、放熱性の良いFCはFUほど効率 droop が起こらないことが分かる。

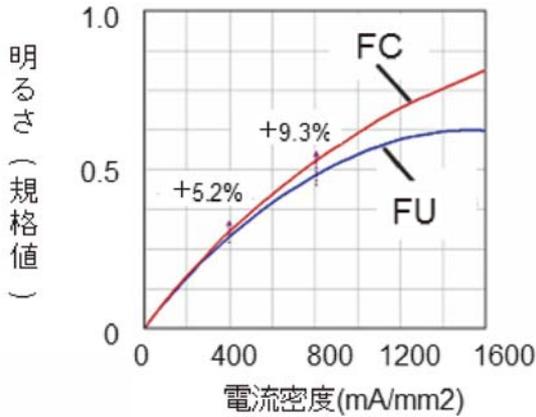


図-9 明るさの電流密度依存性

### 3-3. FCがターゲットとする市場

照明市場における配光制御の必要性と光束について、器具ごとの位置づけ概要を、図-10に示す。

LED化がまだ進んでいない領域として、ヘッドライトや投光器等の特殊照明があげられる。これらは、配光制御が必要で、高光束が求められる。器具において配光制御をするためには、チップを高密度実装し、発光面積を小さくすることによりレンズでの配光制御を容易にする必要がある。また、高光束であることも必要とされている。すなわち、下記2項目を実現する必要がある。

- 1) 小さいスペースにチップを高密度実装して発光面積を小さくする。
- 2) 放熱性をあげて、大電流を投入して大光束が得られるようにする。

3-2で述べたとおり、1) 2) の点でFUと比較してFCは優位であり、これは、実装上の欠点を補うに余りあると考えられる。

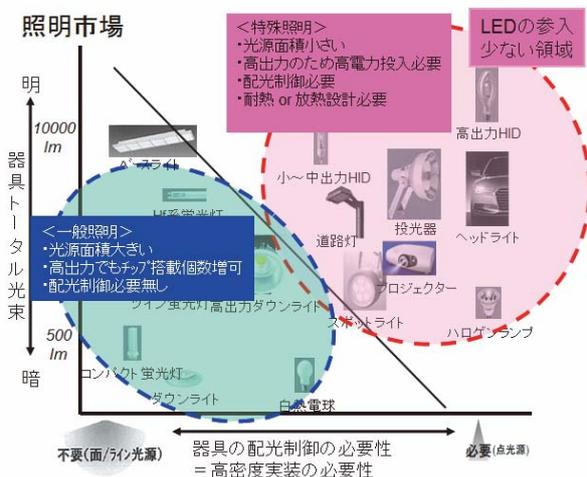


図-10 照明市場における器具の必要特性

従来は、特殊照明に必要な光束を与えられた実装スペース内で実現することは、FCであっても困難であった。しかしながら、LED技術の進歩によって発光効率向上が進み、近年キャッチアップすることが可能になってきている。

### 3-4. 明るさ向上のための技術

FCの特徴を活かし、特殊照明に必要な性能要求に応えるためには、明るさ向上が必要である。そのために開発した技術について説明する。LEDでは光は発光層で生まれるが、その際、四方八方に向かって光が進む。FCでは、この光をできるだけロスすることなく、サファイア基板面から取り出す必要があるが図-11に示すように、反射膜で光の吸収(ロス)が発生する。

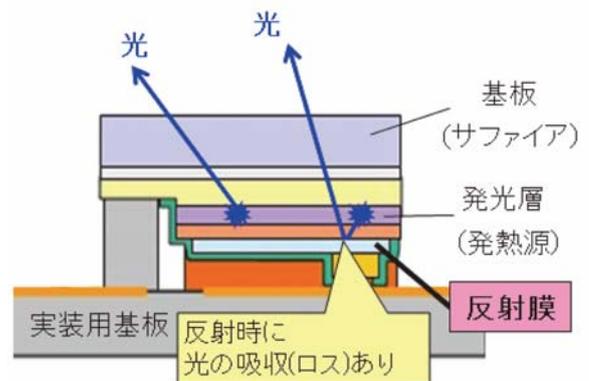


図-11 FC光取り出し

明るさを向上させるためには、反射膜に反射率のより高い材料を用いる必要がある。代表的な金属の反射率を図-12に示す。

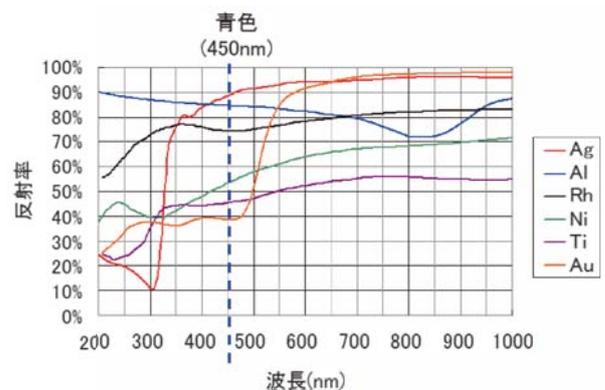


図-12 代表的な金属の反射率

反射膜としては、青色(450nm)での反射率が高いことが望ましく、最も反射率が高い金属がAgであり、次にAl, Rhと続く。従来、Alを反射膜として使用したFCは量産化してきており、今回Agを反射膜に使用することにより、更なる明るさの向上を図った。AlからAgへの変更に

よる効果を示したデータを図-13に示す。結果として、8%明るさを向上することができた。

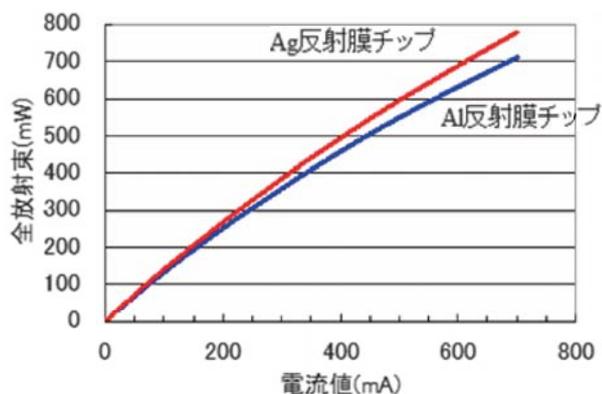


図-13 Ag 反射膜チップの全放射束

しかしながら、Agはよく知られているとおりイオンマイグレーションしやすい金属である。そのため、明るさ向上を狙ったAg反射膜導入時の背反事項として高温・高湿での耐久性能に課題があった。その対策方法としてAgを他の金属で覆い、水分から遮断することで耐久性能を確保することに成功した。高温・高湿試験の結果を図-14に示す。

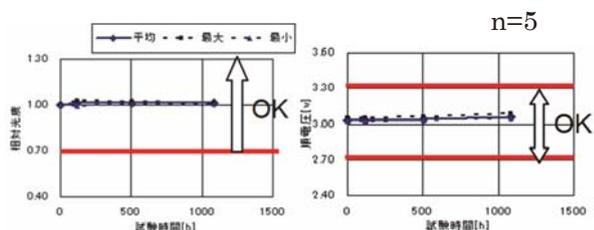


図-14 高温高湿試験結果

#### 4. 終わりに

本報告では特殊照明用途の開発ニーズを実現するための課題としてLEDチップの効率 droop をとりあげ、その開発事例を紹介してきた。温度・電流の使用環境による発光効率低下に対する改善余地はまだまだ大きい。本事例のような技術を1つ1つ積み上げていくことにより、実使用領域の発光効率を向上し、新たなLED市場を切り開いていきたい。

#### 参考文献

- 1) 神谷真央, 豊田合成技報, 53, 15 (2011)
- 2) M.-H. Kim et al., Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 183507
- 3) 天野 浩, 豊田合成技報, 53, 2 (2011)
- 4) D. S. Meyaard et al., Appl. Phys. Lett. 99 (2011) 041112
- 5) B. Monemar et al., Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 181103

#### 著 者



中田尚幸



荒添直棋



篠田大輔

## LED 製品開発の現状と最新動向

成田 巧<sup>\*1</sup>, 伊藤優輝<sup>\*2</sup>, 下西正太<sup>\*3</sup>

### History and Latest Trend of LED Products

Takumi Narita<sup>\*1</sup>, Yuhki Ito<sup>\*2</sup>, Shota Shimonishi<sup>\*3</sup>

#### 要旨

青色 LED の開発と、その後の蛍光体を用いた白色 LED の登場により、様々な用途に LED が用いられるようになってきた。ここでは LED 製品の活用事例を基に、顧客ニーズに応えるスペクトル制御を行う白色化技術、および HID ランプに迫る大光束化を達成した照明用パッケージ技術に焦点を当てて技術の変遷と最新動向について解説する。

#### Abstract

The development of blue LEDs and subsequent combination with phosphor brought white LEDs to the world for various applications. This report describes the history and latest trends in LED package technologies, with reference to examples of LED applications. The focus is on spectral control of white emissions to meet various customers' requirements, and high flux lighting packages that bring us closer to HID lamps.

### 1. はじめに

豊田合成では青色 LED チップの開発、量産とともに、そのアプリケーションとなるパッケージ開発、量産を手掛けてきた。チップ（素子）単体では顧客の実装工程では取扱いが困難であるため、パッケージ化が必要となる。

ここでは LED の用途拡大に伴うパッケージの技術変遷と、その最新動向について解説する。

### 2. LED パッケージの用途展開

総説でも述べているように、青色 LED の開発後の蛍光体を利用した白色 LED の登場により、**図-1**に示すように様々な用途に LED が展開されてきた。特に携帯電話の普及時期と白色 LED の登場が重なったため、液晶画面のフルカラー化が急拡大し、その後の LED の効率向上により、照明分野へ展開が拡大して行った経緯がある。次項から、その代表例について説明する。

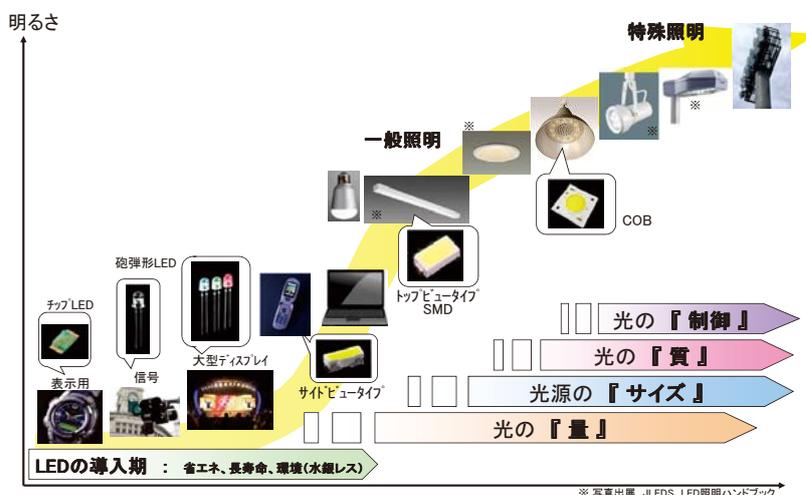


図-1 LED の用途展開の変遷

\*1 オプト E 事業部 オプト E 生産準備部

\*2 オプト E 事業部 オプト E 要素技術開発部

\*3 オプト E 事業部 照明・H/L ユニット

### 3. 液晶バックライト

#### 3-1. バックライト用途での LED 製品

青色 LED を光源とし蛍光体を励起させる方式の白色 LED の開発により、小型・省電力の白色光源が実用化され、更なる用途拡大が進んだ。

代表例としては液晶ディスプレイ (liquid crystal display, LCD) が挙げられる (図-2)。白色 LED の登場以前の LCD ではバックライト



図-2 液晶ディスプレイ

用光源はφ2～4mmの冷陰極蛍光管 (Cold Cathode Fluorescent Lamp-CCFL) が主流であったが、白色 LED の高効率化により急速に置き換えが進んだ。LED化によるメリットとしては主に次の2点である。

- 1) 発光効率が高い
- 2) 薄型化ができる

LED は光源自体のエネルギー効率が高いことに加え、配光指向性によりバックライトへの入射効率が高くなるため、機器としての省エネが図りやすいことも大きなメリットとなっている。効率が低いことにより特にバッテリー駆動の携帯機器においてフル充電時の使用時間を延ばすことが可能となりユーザーの嬉しさに繋がっている。LED が当たり前になった現在においてもパネル画質向上 (高精細化・広色域化) に伴うパネル透過率低下 (= 画面が暗くなる) を補うため LED への効率向上への期待・ニーズは依然として高い。

広色域化に関しては、白色のスペクトルに依存することになるが、次項3-2項にて詳述する。

薄型化に関してはサイドビュータイプの白色 LED の薄型化が進み、バックライト構成部品の薄型化技術進展と合わせて、機器としての薄型化に寄与している。豊田合成では白色サイドビュー LED の開発に注力し、現在では効率 140lm/W (10年前当社比 200%)、厚さは最薄 0.4mm (同比 40%) まで量産対応している。

#### 3-2. バックライト用途での白色化技術

青色 LED に黄色蛍光体を加えた擬似白色光の LED が、スマートフォンやタブレット、パソコンなどの様々な液晶のバックライト用光源として使用されてきた。

最近、従来の青色 LED と黄色蛍光体の組み合わせから、光の3原色である青色 LED と緑色蛍光体・赤色蛍光体の組み合わせによる色品質の向上が図られている。

ここで擬似白色光について、簡単に説明する。青色 LED から発せられる青色光と、黄色蛍光体によって、青色光が変換された黄色光との混色により、白色光となる。その原理について図-3に示す。光の混色は加法混色であるため、図-4に示すように、青色と黄色を混色させると白色が得られる。

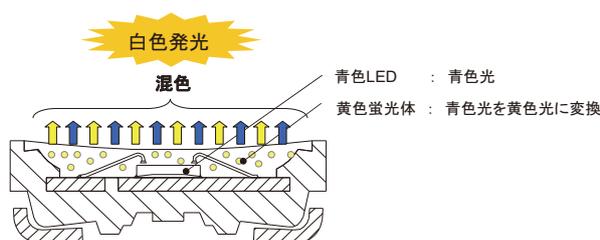


図-3 擬似白色光の発光原理

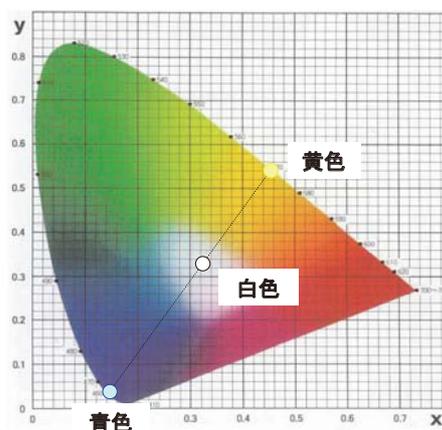


図-4 色度図における青色と黄色、白色

バックライト用光源は液晶パネルの光源として使用されている。液晶パネルはRGBのカラーフィルタ (CF) と液晶部から成り、液晶のOn/Offによる光の透過とカラーフィルタによる透過スペクトルを制御することにより光の3原色の強弱をつけてフルカラー画面を生み出している (図-5)。バックライト用途向け LED には RGB それぞれが狭いスペクトルを持つことが望まれる。

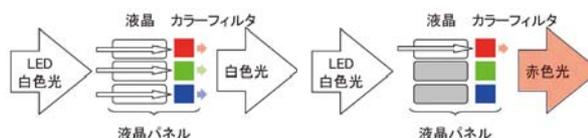


図-5 液晶パネルでの発色のしくみ

### a. 擬似白色光（青色 LED + 黄色蛍光体）

従来の擬似白色光の光源 LED スペクトルは図-6（左）に示すスペクトルを持ち、液晶を通して我々の目に入る白色光は図-6（右）に示すスペクトルとなる。このように擬似白色光は液晶に用いられる場合、色の純度が低く、液晶パネル上の色域が狭いのが一般的である。色域を広げるためには、液晶パネルのカラーフィルタの濃度を上げる方法があるが、光の損失が大きくなるため望ましくない。

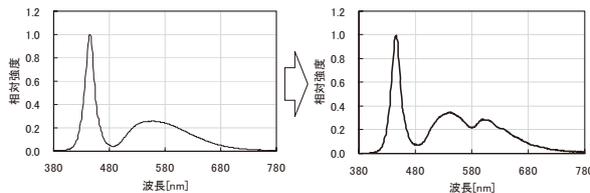


図-6 擬似白色光源、CF 通過後のスペクトル

### b. 新規白色光（青色 LED + 緑色 / 赤色蛍光体）

そこで色域を向上させるため、青色 LED に緑色蛍光体と赤色蛍光体を組み合わせた、新規白色光が開発されている。ここに用いられる蛍光体はスペクトルの広がり小さく、色純度が高いのが特徴である。この新規白色光のスペクトルを図-7（左）に示す。図-7（右）は液晶パネル透過後の白色光のスペクトルである。

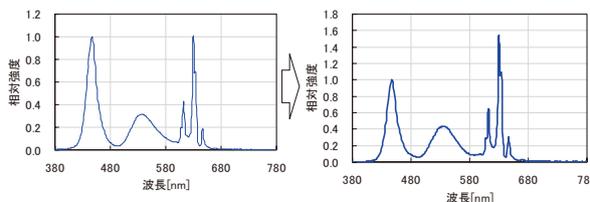


図-7 新規白色光源、CF 通過後のスペクトル

### c. 白色化技術の進歩と液晶パネルの色域改善

擬似白色光と新規白色光を用いた場合の、液晶パネルでの色域を図-8に示す。色域は色度図において RGB の頂点座標を直線で結んだ三角形となる。新規白色光のスペクトルでは色純度が向上しているため、色域が広がっていることが分かる。

世の中の色域の規格はいろいろあるが、一例として挙げる NTSC (National Television System Committee, 全米テレビジョン放送方式標準化委員会, 放送規格) と比較すると、新規白色光の色域は緑色成分が不足しており、更なる改善が求められる。

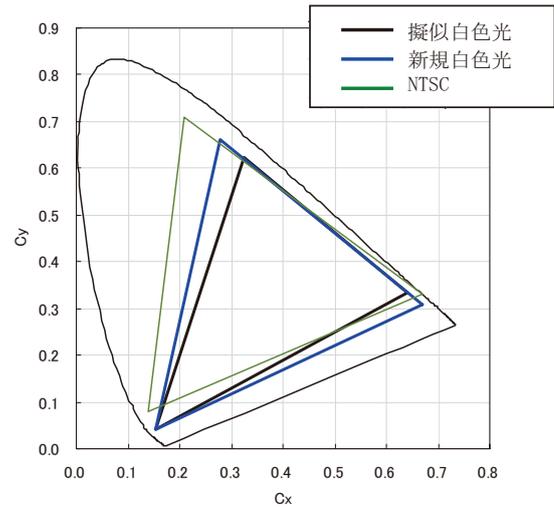


図-8 擬似白色光と新規白色光の色域比較

## 4. 照明

### 4-1. 照明用途での LED 製品

白色 LED の性能向上に伴い照明用光源への適用が拡大されてきた。<sup>1)</sup>

LED 化のメリットは特に「省エネ」「長寿命」である。LED は高効率・長寿命であることからランニングコストを抑えることができる。一方でひとつ当たりの光束が小さく必要な光束を得るための光源コストが高いという短所があった。

低コスト化開発の進行とともに既存光源の中で特に省エネ効果の大きな「白熱電球」「ハロゲン電球」（効率 10～20lm/W, 寿命 1000～2000 時間）から LED 化が始まった。地球温暖化防止のため欧米の一部の国で白熱電球の生産販売が規制されているほか、日本でも大手メーカーの自主規制が行われ、現在では電球型蛍光ランプと競うように LED 電球が広く普及している。

次に「蛍光ランプ」の LED 化が進んだ。白熱電球に比べ効率、寿命に勝る蛍光ランプ（効率 70～110lm/W, 寿命 6000～12000 時間）は世界的にも広く普及していたが、LED の効率は蛍光ランプを超え、長寿命メリットと合わせて普及してきている。

更に「HID ランプ (High Intensity Discharge lamp, 高輝度放電ランプ)」領域での LED 化も始まっている。既存 HID ランプ光源の代表例として、体育館等で広く用いられている水銀ランプが挙げられる（表-1）。

表-1 各種照明用光源の比較

	白熱電球	蛍光ランプ	水銀ランプ
光束	350～800lm	1,000～4,000lm	2,000～20,000lm
効率	10～20lm/W	70～110lm/W	35～55lm/W
寿命	1,000～2,000h	6,000～12,000h	5,000～12,000h

LED では1つの光源から得られる光束が小さいことが弱点であったが、総説でも述べているように、豊田合成では複数のチップを密実装したCOB (Chip On Board) タイプの光源を開発し、高効率・長寿命と大光束化を両立させることにより、水銀ランプに代わる高天井照明などで実用化を進めている。

#### 4-2. 照明用途での白色化技術

照明用光源は物を見るための光源である。光源から発せられた光が物体で反射され、反射された光が人間の目に入り物体の色を認識する(図-9)。

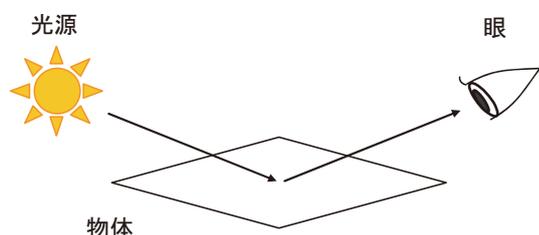


図-9 物体の色の見え方

物体の色を表す光源の指標として演色評価数が用いられる。演色評価数には、平均演色評価数(Ra)と、特殊演色評価数(R9~R15)がある。バックライト用途向けとは異なり、照明用途向けLEDには幅広いスペクトルを持つことが望まれており、極論を言うと、太陽光と同じスペクトルが理想である。

##### a. 擬似白色光 (青色LED + 黄色蛍光体)

現在では照明用光源においても、バックライト用光源同様に擬似白色光が広く普及している。白色LEDの方式として最も効率が高いためであるが、青+黄のスペクトルの組み合わせであるため特に赤色の演色性(R9)が低く改善が求められてきた。

##### b. 新規白色光 (青色LED + 緑色 / 赤色蛍光体)

LEDチップの効率向上、新規赤色蛍光体の開発により、青色LEDと緑色蛍光体・赤色蛍光体の組み合わせによる白色LEDが普及してきている。

擬似白色光のRaは約70程度であるが、新規白色光では蛍光体の発光波長の組み合わせによりRa80~Ra90のLEDが開発されている。表-2は各白色光における演色評価数である。図-10は擬似白色光と新規白色光のスペクトル比較である。

表-2 演色評価数

	擬似白色光	新規白色光(Ra80)	新規白色光(Ra90)
Ra	70	83	92
R9	-35	8	76

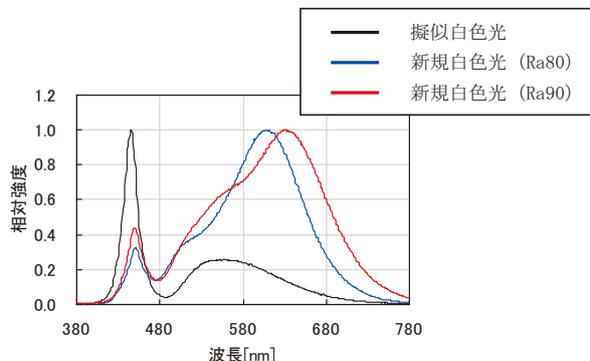


図-10 新規白色スペクトル

#### 4-3. 照明用パッケージ技術の進展

##### a. LED 発光効率の変遷

低炭素社会、省エネ化を掲げ、照明分野はここ5年間で急速にLED化が進んできた。最初にLED化が進んだ領域は、既存光源の中で、発光効率が最も低い白熱電球であり、それを皮切りに、蛍光ランプ器具、ベースライト等の省エネ効果の高い領域で、LED化が進んだ。

このLED化を加速させた主な要因は、当然のことながら、LED照明器具が白熱電球や蛍光ランプの既存光源以上の発光効率を有することであるが、既存光源の効率を上回った以降も、継続的に効率が改善されていることも大きな要因である。これまでのLEDパッケージの発光効率の変遷を図-11に示す。

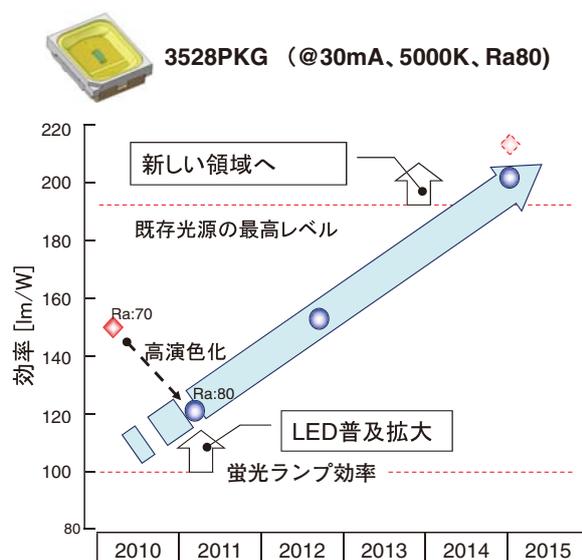


図-11 LED 発光効率の変遷<sup>2)</sup>

図に示すように、2011年に蛍光ランプ効率を上回り、LED照明が普及拡大した。それ以降もLED素子、蛍光体、パッケージ構成部材の改良により、年率10%以上効率が改善され、2015年には発光効率は200lm/W達成見込みである。

発光効率の今後の見通しについては、図-12に示す通り、200lm/W時のエネルギー収支の内訳に、光に寄与しないロスがあるため、このロス分の改善により更なる効率改善が進むと考えられる。

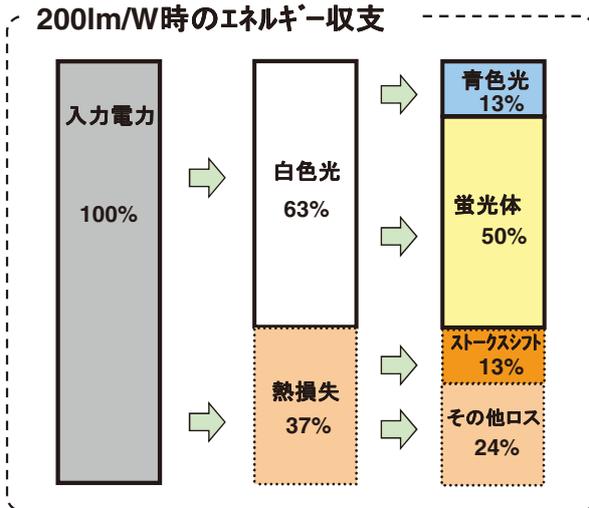


図-12 200lm/W時のエネルギー収支<sup>2)</sup>

## b. 大光量化

近年、白熱電球、蛍光ランプに次いで、大光量が必要となる水銀ランプが用いられている産業用途照明のLED化が注目されている。

本項では前号（豊田合成技報 Vol.53<sup>3)</sup>）で紹介した照明用LEDパッケージに続く開発事例として、水銀ランプ代替を目指したマルチチップCOB（Chip on Board）の紹介とその採用事例、および最新の開発動向について報告する。

産業用途照明のLED化が最初に注目されたのが、工場、体育館等向けの高天井照明である。同照明用光源には水銀ランプ、セラミックメタルハライドランプ等のHIDランプが使われているが、白熱電球や蛍光ランプと比較して、小型かつ大光束の光源が求められている（図-13）。

マルチチップCOBは図-14に示す通り、Al（アルミニウム）基板上に複数のチップを搭載し、チップ間をAu（金）ワイヤで繋げた構成である。

これにより1つのパッケージから大光束を得ることが可能となり、光束は1000～8000lmの高出力を達成している。

一方でこれだけの大光束ともなれば投入電力も高くなり（20W～50W）、大量の熱が発生するため、COBの基板には熱伝導率の高いAlを基材に用いる器具ヒートシンクへの放熱を成立させた。

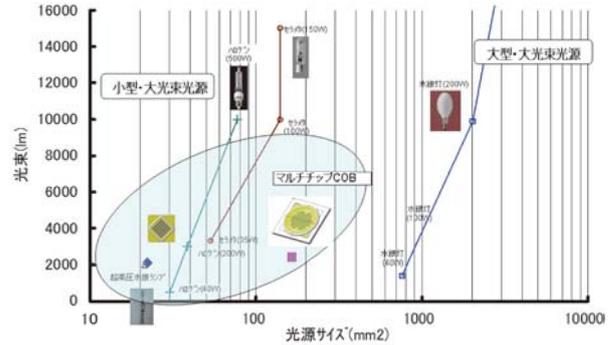


図-13 光源サイズと光束

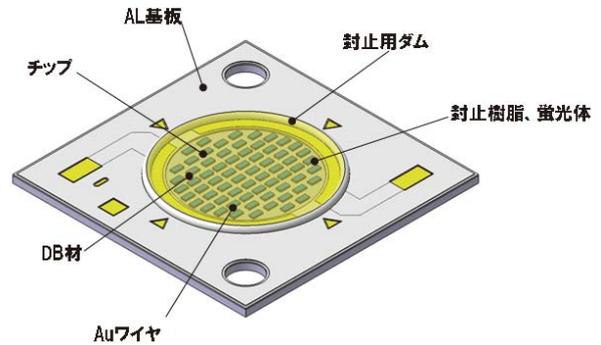


図-14 マルチチップCOBの構成

また近年では、蛍光体による高演色・高効率化が進んでおり（前述4-2項参照）、例えばRa, R9といった規格条件がEnergy Star等で定められている北米市場向けにこのマルチチップCOBを展開している。

## c. マルチチップCOBの採用事例

マルチチップCOBの特長を活かし、前述の総説「豊田合成LED開発の歩み」で述べた通り、豊田合成のマルチチップCOBは、工場や体育館の天井に設置される高天井LED照明に採用されている。

このLED化により、従来の水銀ランプでは不可能であった始動時の瞬時点灯、調光システムの利用が可能になった。また長寿命化（水銀ランプ比較：約5倍）により、ランプ交換工事の頻度が低減できることも大きなメリットと言える。

以上より、マルチチップCOBによって、本事例に示すようなLEDならではの用途、可能性が広がった。

## d. 小型化への取り組み

前項の通りこれまでLED照明への切り替えが困難であった大光束の照明器具についても、COBを用いることにより近年LED化率が飛躍的に伸びている。白熱電球や蛍光ランプと同様な切り替え比率まではまだ時間が掛かると想定される

が、継続して LED 化が進むと考えられる。しかし COB には次に示す課題があるため、当初期待された LED 化率と比較して鈍化傾向にある。

その課題とは COB の光源サイズが大きいことである。COB は大光束を実現するために、多数の LED 素子をセラミック基板および Al 基板上に搭載し Au ワイヤで繋いでいるため、LED 素子間の距離を確保する必要があるため、結果的に光源サイズが大きくなる。そのため狭角の配光制御が不要な、倉庫・工場の高天井照明や街路灯には適しているが、中角・狭角の配光制御が必要な投光器やスポットライトには不向きであり、COB 搭載器具よりも 1W クラスの SMD を複数個搭載した器具が主流となっている（図-15）。

豊田合成は、従来のマルチチップ COB の小光源化を図り、大光束と小光源を両立させた「FC (Flip Chip) マルチチップ COB」を開発した（図-16）。



図-15 ダウンライトと光源の 1W パッケージ

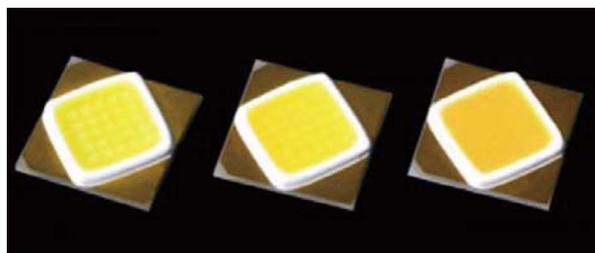


図-16 FC マルチチップ COB  
(左から 色温度 5000k, 4000k, 3000k)

この製品は光源サイズが従来の FU (Face Up) タイプの COB と比較して約 50% 小さく (FU タイプ:  $\phi 14.5\text{mm}$ , FC タイプ:  $\square 6\text{mm}$  図-17), 単位面積当たりの光束は約 5 倍になる。光源の小型化により照明器具のレンズおよびリフレクタとのマッチング性が改善し、光ロスが無く、COB

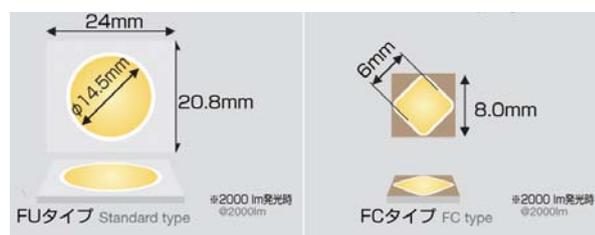


図-17 FU タイプと FC タイプの比較①

から発光される光をレンズやリフレクタに取り込めるようになる。そのため投光器やスポットライトのような狭角配光が要求される照明器具に適用可能となった。

#### e. FC 化の特徴

これらの課題を解決する FC マルチチップ COB は、大光束と小光源を両立させるため図-18 に示すように、LED 素子は従来の FU タイプではなく、電極面が下側に配置され Au ワイヤが不要な FC タイプを採用した。この FC タイプは、基板とダイレクト接合により導通を確保するため、Au ワイヤが不要である。そのため LED 素子を密に並べることができ、光源サイズを小さくすることが可能となる。LED 素子間の距離は、FU タイプ 300 ~ 500  $\mu\text{m}$  に対し、FC タイプでは約 100  $\mu\text{m}$  まで狭めることができる。



図-18 FU タイプと FC タイプの比較②

LED を実装する基板は LED からの発熱を効率的に放熱するため、セラミック基板を使用し、LED とセラミック基板の接合には、Au バンプや AuSn はんだ等の金属材料を用いている。また基板サイズ  $\square 8\text{mm}$  の小エリアに大電力を投入し光が射出されるため、発光部の最適構造設計、材料開発により、高信頼性を実現している。

繰り返しになるが、本 FC マルチチップ COB の特長を下記に示す。

- 1) 大光束 (2000lm クラス以上)
- 2) 発光面積の極小化  
(発光部:  $\square 6\text{mm}$ , 基板:  $\square 8\text{mm}$ )
- 3) 無機材料採用による高信頼性  
(40,000 時間の長寿命)
- 4) FC 採用による放熱性アップ
- 5) FC 実装による更なる高信頼性の実現  
(ワイヤ接合レス, 金属接合)

図-19 に示すように COB 搭載の照明器具は、器具性能は当然のこと、パッケージの実装コスト等を加味した器具トータルのコストを想定した場合は、1W クラスの複数個搭載器具と比較してメリットは多い。

昨今このようなメリットにより、小型+大光束光源の市場要求が高まり、LED メーカー各社が様々な設計アプローチで光束密度を高めた製品をり



図-19 FC マルチチップ COB のうれしさ

リースしている。今後、1W クラスから COB 搭載の器具が主流になり、かつ従来のパッケージや COB では実現が困難であった照明器具も LED 化が進むことが期待される。

また従来、COB を使用する際には COB を押圧により固定するホルダ、接点を確保するためのコネクタ、グリス、導線等の周辺部材が必須であったが、これら部材の最適化も進み、低コスト、高性能でかつ意匠に優れた LED ならではの照明器具の登場が期待される。豊田合成としても、次世代の LED 照明拡大に貢献するべく、付加価値の高い LED パッケージ、COB の開発を推進していく。

#### f. グローバル展開に向けて

LED 照明の普及に伴い、米国を基点に LED 照明要求規格が制定され、要求事項が整備され始めている。その中でも、LED の光束維持率試験を規格化した「IEC LM-80」への対応は、グローバル展開する上では、必要不可欠なものになってきている。

豊田合成としては、このような市場要求に応えるべく、2013年2月「IES LM-80」の認定試験所として米国環境保護庁（EPA）の承認を取得した。社内に認定試験所を持つことにより、より早く市場ニーズに対応した LED 製品、ドキュメントを供給することが可能になるとともに、製品の品質や環境性能のより一層の向上に貢献できると考えている。

## 5. 照明用途拡大と LED 開発の方向性

広く普及し始めた LED 照明は、既存光源の白熱電球・ハロゲン電球（10～20lm/W）、蛍光灯（70～110lm/W）よりはるかに発光効率が上回るため、中国を筆頭にアジア勢のコモディティ化による急拡大が予想される一方で、急激な価格下落が進むのは容易に想定される。また新興国をはじめ全世界に LED 照明を普及するためには、更なる低価格での供給が必須である。

一方、HID ランプの領域では、比較的効率の低い水銀ランプの省エネ化のための置き換えや、

高所でのメンテナンス作業削減等、LED 照明のメリットがあるため、一部 HID ランプ領域の LED 化は進んでいるものの、現在の LED の効率では白熱電球ほどのスピードで HID 搭載の照明器具の LED 化は考えにくい。

HID ランプ領域の LED 化の加速には、HID ランプの効率を大きく上回った時に進むと考えられるため、一般照明向けの低コスト化開発だけではなく、HID ランプを凌駕する性能を目指した、大電流域での効率限界に近づく効率向上の開発は必要不可欠である。

またセラミックメタルハライドランプ（効率 110lm/W、Ra90）は、高効率に加え高演色性という特長も持ち合わせており、屋内照明（商業施設、スポーツ施設等）および屋外照明（野球場、競技場等）に幅広く使用されている。これらの領域への LED 照明の参入を加速させるためには、効率とともに色品質向上に取り組む開発も重要であり、蛍光体の開発を含め発光スペクトルの最適設計を進めていく必要がある。

## 6. おわりに

以上、LED 製品開発の変遷と最新動向について述べてきた。

省エネルギーに大きく貢献できる LED 照明の普及は全世界で取り組む重要な事案である。また、小型薄型、高効率の LED は特に携帯機器の魅力を高めるための必須アイテムとなっている。豊田合成では今後も引き続き環境にやさしい社会の実現に貢献するべく、市場ニーズに応えられる LED 素子、LED パッケージの開発を行っていく。

### 参考文献

- 1) JLEDS（LED 照明推進協議会）、LED 照明ハンドブック改訂版、(2011)
- 2) JLEDS、LED 照明シンポジウム 2014 発表資料、2014/10/10
- 3) 豊田合成技報、53、P7-14（2011）

### 著 者



成田 巧



伊藤優輝



下西正太

## LED チップ開発の最新動向（生産技術開発）

牧 弘昭<sup>\*1</sup>， 稲澤良平<sup>\*1</sup>， 澤崎勝久<sup>\*1</sup>

### Latest Trend of LED Chip Development (Production Engineering Development)

Hiroaki Maki<sup>\*1</sup>， Ryohei Inazawa<sup>\*1</sup>， Katsuhisa Sawazaki<sup>\*1</sup>

#### 要旨

LED はスマートフォンやタブレット PC の液晶用バックライト， また大型ディスプレイや屋内外照明の光源など多くの製品に普及し， 生活に必要不可欠なものにまで成長している。これらの製品を実現するために用途に応じ様々な特性が求められている。その中には電池を長持ちさせるための消費電力削減や， 写真や動画をきれいに自然な色合いで表現するための光の品質（高精細化）への要求がある。我々はそのニーズに応えるため， より安定したモノ造りを実現するための生産技術開発を進めてきた。

今回 LED チップの生産技術開発として， 波長のばらつきを抑えるための狭波長化生産技術， ならびに安定した明るさを得るための DBR 成膜生産技術の事例を報告する。

#### Abstract

LEDs are used in many products that are necessary for our daily life. For example, LEDs are used in liquid crystal display backlights of smart phones and tablet PCs, as well as light sources for large displays and general lighting. These products require LEDs with various characteristics depending on the application. These requirements include lower power consumption for longer battery life, and quality of light (high resolution) for the expression of natural colors in photographs and animations. We have made progress in the production engineering development that will help to achieve more stable high volume production to satisfy these requirements.

Here, two examples of production engineering development are reported. First is production engineering to reduce variations of wavelength, and second is DBR film deposition technology to obtain stable brightness.

## 1. はじめに

近年， LED はスマートフォンやタブレット PC の液晶用バックライト， また大型ディスプレイや屋内外照明の光源など多くの製品に普及し， 生活に必要不可欠なものにまで成長している。

現在， 市場のニーズとして特に高発光効率ならびに低価格化が強まっている。2020 年までに発光効率は 22% 向上， 価格は 65% 削減と市場予想されており， 今後も LED の効率向上・低コスト化が市場から求め続けられるのは必至である。<sup>1)</sup>

これらの製品を実現するために用途に応じ様々な特性が求められている。その中には， 電池を長持ちさせるための消費電力削減や， 画像や動画を自然な色合いで表現できるための光の品質（高精

細化）への要求がある。我々はそのニーズを受け， 新規工法を開発し， 安定したモノ造りと併せて生産性向上， 低コスト化を実現した LED チップ生産技術開発を進めてきた。

## 2. LED チップ工程について

市場ニーズに対し， 我々は品質とコストが両立できる生産技術開発を進めてきた。

2011 年には基板の大口径化を導入し， 研磨・切断方法および， 基板面内の結晶膜均一化を行った。その結果人員・物量生産性を大幅に向上させ， 生産性向上など低コスト化を実現することができた。

またニーズである高効率チップを安定して造るために， 設備の改造・見直しおよび新規工法開発を継続的に実施してきた。

\*1 オプト E 生産準備部 パッケージ生技室

ここでLEDチップ工程について簡単に説明する。工程の流れを以下図-1に示す。

- a) PSS 工程：  
（PSS：Patterned Sapphire Substrate）  
サファイア基板に表面凹凸加工を設けることで、LED 内部で発光した光を効率良く外部に出す構造を形成させる。
- b) 結晶成長工程：  
サファイア基板にアンモニアガス（V 族材料）と有機金属（Ⅲ族材料）を化学反応させ、LED 結晶を成膜する。
- c) 電極形成工程：  
結晶成長層の上に電極を形成し、LED 素子として電気を通して発光させる機能を付加する。
- d) 研磨・DBR 成膜・切断工程：  
（DBR：Distributed Bragg Reflector）  
電極を形成した基板を薄く研磨し裏面に反射膜を成膜し、1つ1つのチップに分割する。
- e) 検査・配列工程：  
分割したチップの電気・光学特性を行い、特性別にシートに配列する。

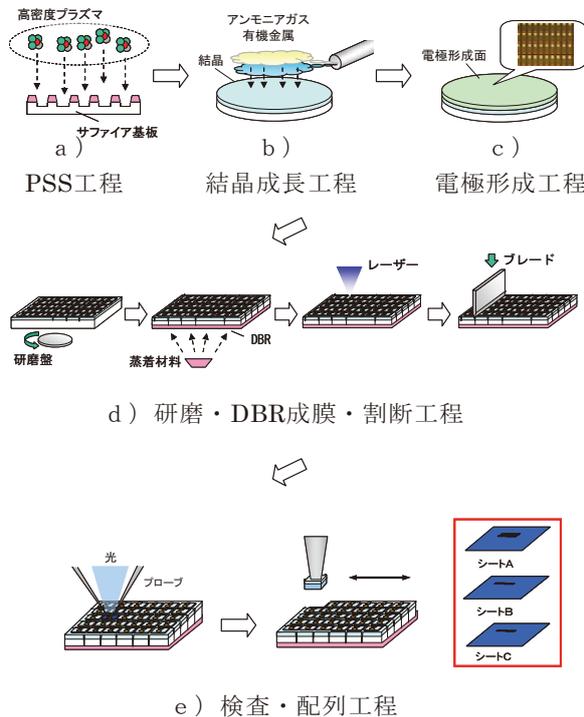


図-1 LEDチップ工程の流れ

モノ造りの上で、a)～d)工程を中心に生産技術開発を進めてきた。

今回はその中で、波長のばらつきを抑えるための狭波長化生産技術（b：結晶成長工程）、ならびに安定した明るさを得るためのチップ裏面DBR成膜生産技術（d：DBR成膜工程）の2事例を報告する。

### 3. 狭波長化生産技術

#### 3-1. 光の品質への要求

スマートフォンやタブレットPCの液晶バックライトでは、自然な色合いで表現できるよう光の色合いへの要求がある。

液晶バックライトの光源として使用される白色LEDは、青色のLEDに黄色の蛍光体を用いており、蛍光体の開発と青色LEDの高い生産技術力で、太陽光に近い色合いとなる高い演色性を達成してきた。

演色性は、蛍光体の特性と青色LEDの波長によって決まり、蛍光体に合わせた適切な波長の青色LEDを組み合わせることで、高い演色性が得られる。そのため、青色LEDへは、適切な波長を精度高く造り込む生産技術が求められる。

しかし青色LEDは、わずかな製造条件・環境の差で波長が変化してしまうため、基板面内で均一な波長を造り込むには、高い生産技術力の開発が必要であった。

本報告では、均一な波長を造り込むための青色LEDチップの生産技術開発の事例を報告する。

#### 3-2. 発光原理と波長

LEDは、図-2で示すようにエネルギー単位の高い伝導帯の電子と、エネルギー単位の低い価電子帯の正孔が再結合することで発光する。

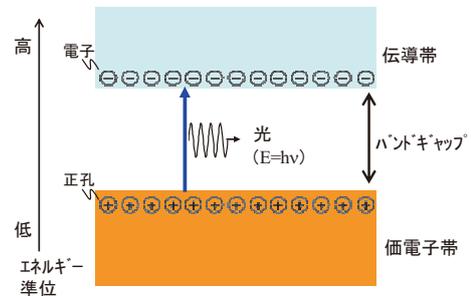


図-2 発光原理

伝導帯と価電子帯の間のエネルギー帯をバンドギャップといい、このバンドギャップで再結合エネルギーが決まり、式①により波長が決まる<sup>2)</sup>。青色LEDではInNとGaNの混晶であるInGaNを用いており、In/Gaの比率によって、バンドギャップが決まる。つまり、LEDにおいて波長を均一に造り込むためには、バンドギャップを決めるIn/Gaの比率を精度よく造り込むことが必要となる。

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad \dots \text{式①}$$

$E$ ：エネルギー  
 $h$ ：プランク定数  
 $\nu$ ：振動数  
 $c$ ：光の速さ  
 $\lambda$ ：波長

### 3-3. 結晶成長

青色 LED の製造工程は、2 項で示した図-1 のとおりで、波長は結晶成長工程で造り込まれる。結晶成長工程では、MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 法を用いてサファイア基板の上にエピタキシャル成長させることにより、InGaN などの結晶を成長させる。

MOCVD 法によるエピタキシャル成長は、図-3 に示すように熱源となるサセプタからサファイア基板に熱を与えて、そこに Ga や In を含む有機金属とアンモニアガスを供給することで、基板の上に結晶が成膜される。

ここで、発光層である InGaN の成膜において生産技術上の難しさがある。InGaN の In/Ga の比は、図-4 に示すように温度が高くなると In

の比率が低くなり、温度が低くなると In の比率が高くなる。つまり、InGaN の成膜温度によって、In/Ga の比率、バンドギャップ、波長が変わってしまう。

GaN 系のエピタキシャル成長は、800 ~ 1000℃ と高温で成膜される。その中で数℃ の温度差が波長に影響するため、非常に高い精度が必要になる。

LED チップの製造工程では、1 枚の基板に数万個の LED チップを製造するため、基板面内で適切な温度から外れると In/Ga の比が変わり、最適な波長から外れてしまうチップが製造される。そのため、基板面内で均一な波長を造り込むためには、基板面内を最適な温度に制御する必要がある。

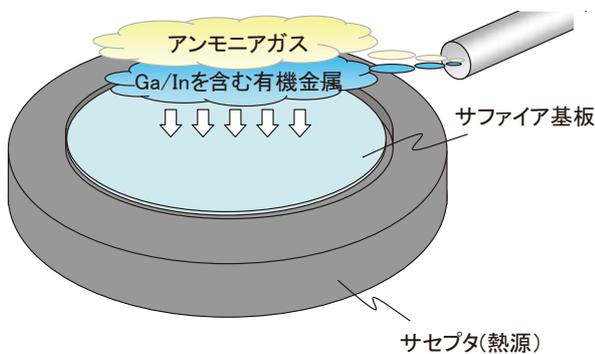


図-3 結晶成長概略図

### 3-4. 基板温度制御技術

サファイア基板に熱を伝えるサセプタは、カーボンを主な材料としており、基板を保持する部分の形状設計においては、熱膨張係数差を考慮する必要がある。このことから、図-5 で示すように、基板とサセプタの壁面に高温時でも接触しないよう十分なクリアランス (図-5 の d 部) を設けている。しかし、このクリアランスが伝熱に影響し、サセプタの壁面から基板までの距離により熱が十分に与えられない問題があった。

温度	低 ← → 高
Ga/In 比	
バンドギャップ	
波長	長い ← → 短い

図-4 成長温度と波長の関係

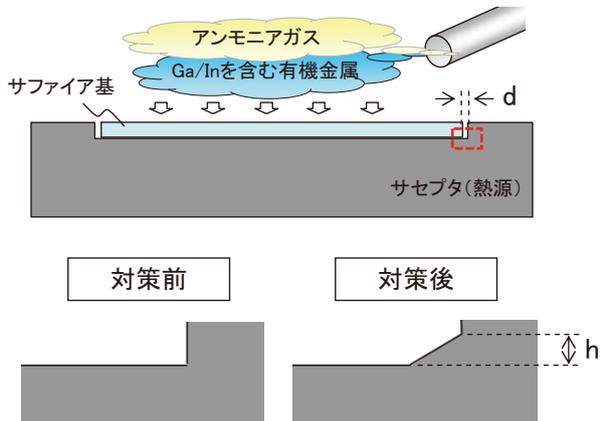


図-5 基板温度制御技術の概略図

そこで、側面からの熱の供給不足を補うために図-5 に示すように壁面近傍の底を上げることで必要な熱量を与えられないか伝熱シミュレーションにて検討した。その結果、図-6 と図-7 に示すようにサセプタ壁面から離れることで不足する熱量と壁面近傍の底を上げることで得られる熱量を導き、サセプタの形状を設計することができた。

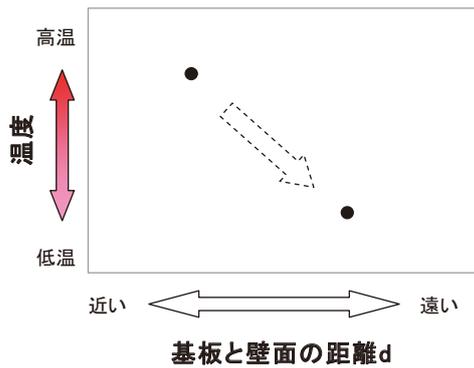


図-6 伝熱シミュレーション結果（壁面側）

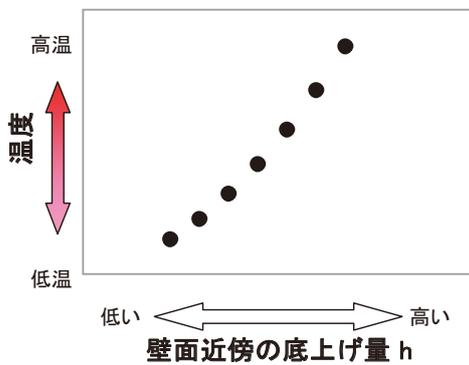


図-7 伝熱シミュレーション結果（底面側）

3-5. 狭波長化生産技術による効果

伝熱シミュレーションで得られた結果を元にサセプタを製作し成膜を実施した。その結果、基板外周部分の伝熱状態が変わり、基板外周部分の波長差はなくなり、基板面内の波長を均一にできることが確認できた。対策前と比較すると基板外周部分の波長外れエリアが低減され、有効なエリアが増えたことで、生産性を1.12倍にすることができた（図-8）。

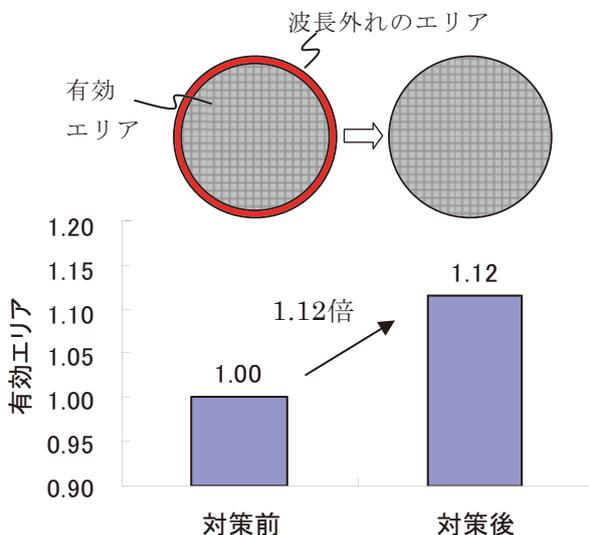


図-8 狭波長化技術による効果

4. チップ裏面 DBR 成膜生産技術

4-1. チップ光取出し向上について

LED チップの発光効率改善は現在市場ニーズとして求められており、今後も引き続き要求されることは必至である。これまで GaN 発光層からの光取出し効率向上をねらい、PSS の導入、透明電極の薄膜化、金属電極の狭配線化等の技術を導入し効率の改善を行ってきた。

2014 年より LED チップの発光効率をさらに向上するため、チップ裏面への DBR 膜を形成するための生産技術開発を行った。本報告では DBR 成膜制御技術について報告を行う（図-9）。

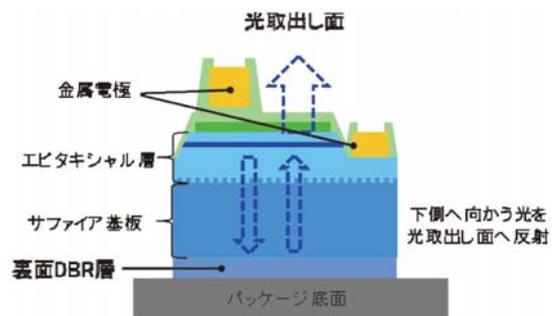


図-9 LED チップ構造と裏面 DBR

4-2. DBR 成膜時の重要点

DBR は図-10 に示すように、低屈折率層と高屈折率層を基板に対して交互に積層することで、入射する光の干渉効果を利用し非常に少ない損失で目的の波長の光を反射することができる反射膜である<sup>3)</sup>。

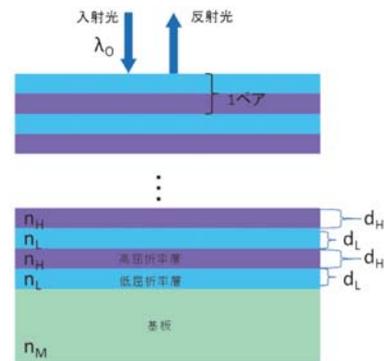


図-10 DBR 構造

特定の波長  $\lambda_0$  に対して高い反射率を示す DBR 膜を設計する場合、光の干渉効果を利用する為に各誘電体層の光学膜厚  $n \times d$  は

$$nd = \frac{\lambda_0}{4} \quad \dots \text{式②}$$

( $n$ : 層の屈折率  $d$ : 層の物理膜厚)

を満たすような膜厚設計を行う。一般にその反射

率 R は十分な積層数がある場合,

$$R \cong 1 - 4 \cdot \left( \frac{n_M}{n_H^2} \right) \cdot \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^p \quad \dots \text{式③}$$

$n_M$ : 基板の屈折率

$n_L$ : 低屈折率誘電体層の屈折率

$n_H$ : 高屈折率誘電体層の屈折率

$p$ : 積層構造のペア数

の関係が成り立つことが知られている。<sup>3)</sup> 高い反射率を得るためには、屈折率  $n_L$  と  $n_H$  の差を大きくすることや成膜ペア数を増加させるなど、材料選定や成膜条件の最適化を行うことが一般的である。図-11 に DBR 膜反射率 (波長依存) の例を示す。

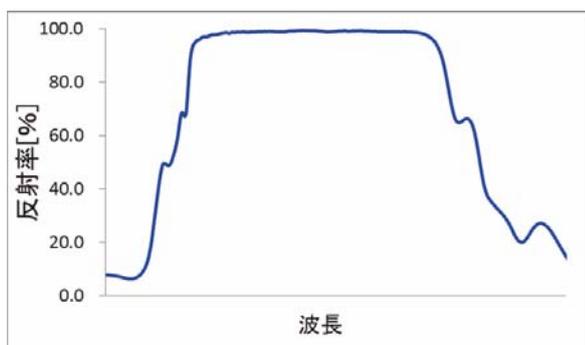


図-11 DBR 反射特性 (波長依存) の例

また DBR 膜は前述の通り光の干渉効果を利用した反射膜であり、膜面に対して入射角度に依存した反射特性を示す。これは式②の前提となっている膜面反射での反射光が強めあう条件 (式④) が、反射光 A / B の光路差が  $\cos \theta$  に依存するためである<sup>4)</sup>。

$$2nd \cos \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad \dots \text{式④}$$

図-12 は入射角度に対する DBR 膜の反射特性のシミュレーション例である。単一の波長に対して設計した DBR 膜は破線のように膜面に対する垂直入射付近で高い反射率を示すような反射特性を示す。積層する光学膜厚を適切に設定することで実線に示すように広角度の入射光に対しても高い反射率を示すような反射特性に改善することができる。

光学膜厚設計によって膜の反射特性を変化させることができるのは DBR 膜の大きな特長である。しかしながらその目的の反射特性を得るためには前述の通り各層の光学膜厚  $n \times d$  を設計値通りに成膜を行うことが重要となる。

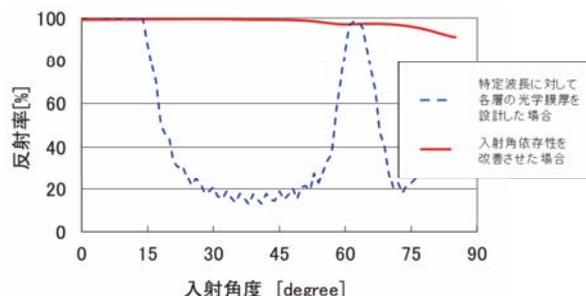


図-12 DBR 反射特性シミュレーション (入射角度依存)

### 4-3. DBR 成膜制御技術

前述の通り、DBR においては 2 種類以上の屈折率の異なる誘電体膜を積層する必要がある。誘電体各層の成膜方法としてはスパッタ・CVD (Chemical Vapor Deposition)・蒸着等が挙げられるが、弊社では蒸着の一種である IAD (Ion-beam Assisted Deposition) を採用している。蒸着機構を図-13 に示す。

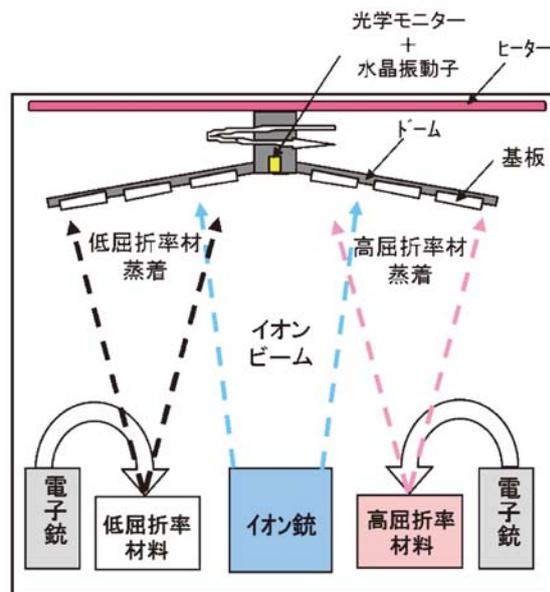


図-13 IAD による DBR 膜蒸着機構

IAD は従来の真空蒸着と装置構成が共通する部分が多い。特徴としてソースガスをチャンバー内でプラズマ化し、引出し電極で加速されたイオンを基板表面に照射することで膜の光学的特性や機械的特性を向上・安定化させることができる。

一般的な真空蒸着機ではその成膜終点の検出には水晶振動子型の膜厚計を用いることが多い。これは応答速度が速く、蒸発源 (抵抗加熱や電子線電源) の出力コントロールに向いているため、一般に広く採用されていると考えられる。水晶振動子型の膜厚計ではセンサーに付着する蒸発物質の重量から成膜膜厚を推定しているため、物理膜厚  $d$  を制御し成膜終点を検出することになる。4-

2項で示した通り、DBR膜において目的の反射特性を得るためには光学膜厚 $n \times d$ を設計値通り再現良く成膜する必要がある。

しかし水晶振動子型の膜厚計による終点検出機構では、何かしらの外的要因、例えば成膜室内の残留ガスや蒸着レートのバラツキなどで屈折率 $n$ が変動してしまった場合、物理膜厚 $d$ が安定していたとしても目的の反射特性を得ることが難しくなってしまう。

上記問題の解決のため、光学膜厚を代替指標で監視・制御する機構(光学モニター)が搭載されている設備にて開発を行った。設備の機構を図-14に示す。

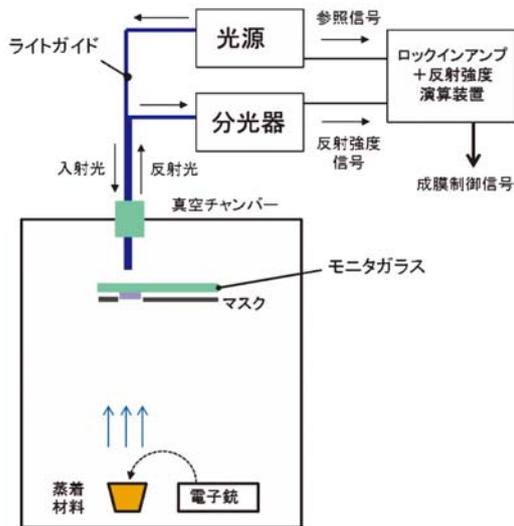


図-14 光学モニター機構

製品基板が配置されるドーム中央部に図-14の光学系が配置されている。基板にDBR成膜を行う間、モニターガラスに対しても基板同様に誘電体層が成膜される。これによりモニターガラスと誘電体層の屈折率差が発生するため反射光が分光器側へ戻ることになる。この反射光を増幅し、反射強度を成膜中常に監視している。このモニターガラスからの反射強度 $R_M$ は成膜量に依存し、その成膜量に応じてサインカーブのように変化する(図-15)。

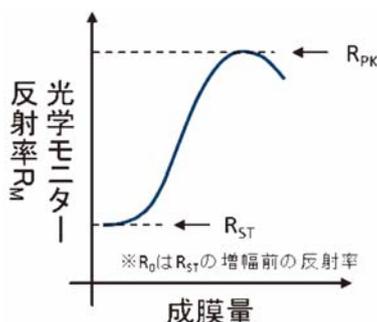


図-15 光学モニター反射率推移イメージ

例えば光学モニター側の制御波長を $\lambda_c$ としたとき、その反射率のピーク強度を $R_{PK}$ 、成膜開始時の強度を $R_{ST}$ 、増幅前のモニターガラスの反射強度を $R_0$ とすると $nd = \lambda_c/4$ が成立するピーク強度 $R$ に対しては

$$R = R_0 \cdot \frac{2R_{PK} - (1 + R_0)R_{ST}}{(1 - 2R_0)(1 + R_0)R_{ST} + 2R_0^2 R_{PK}} \dots \text{式⑤}$$

の関係が成立する<sup>5)</sup>。つまり、あらかじめ目的の光学膜厚を得るために制御波長を設定し、その反射強度を算出しておくことで、モニターガラスの反射強度変化を代替指標として光学成膜制御・終点検出を行うことができる。この制御方法により目的の反射特性が得られているかどうかを確認するため、目的の反射特性と実際のできばえの差を図-16に示すように比較した。反射率80%となる波長差を波長ズレ量 $\Delta$ として示した。

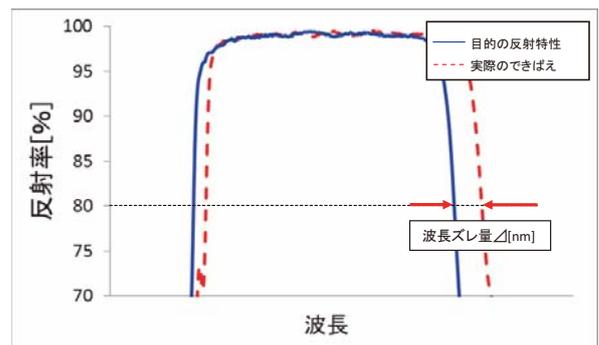


図-16 DBR 反射特性の設計値とのズレ量評価

図-17は従来型的水晶振動子で膜厚制御を行った場合と光学モニターにて膜厚制御を行った場合双方の設計値との波長ズレ量を比較したものである。

波長ズレ量が少なければ本来の設計した光学膜厚に近い出来栄で成膜制御できていることになる。今回、水晶振動子制御と比較し、光学モニター制御による成膜を行うことでその波長ズレ量を

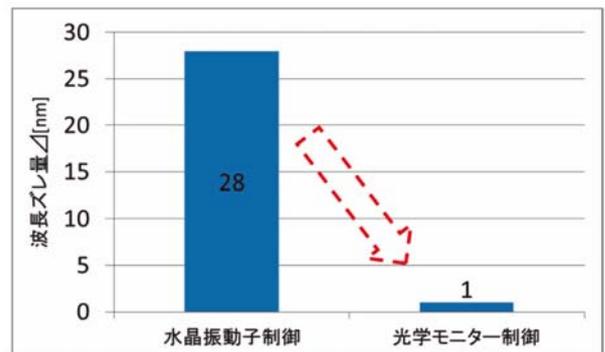


図-17 制御方式の違いによる波長ズレ量の変化

1/28 にまで抑えることが可能となった。実際の生産現場においては、目的の反射特性が得られる波長と実際のできばえ波長のズレ量 $\Delta$ を成膜バッチ毎に測定・評価を行い、設計中心に対して適切に補正をかけることで常に目的の反射特性を得られるような仕組みを取り入れている。

以上により青色 LED の光をあらゆる角度に対して高い反射率で反射させる光学膜厚設計と、その特性を高い精度で再現させる成膜制御技術により、製品品質の安定化および高い歩留まりへと貢献することができた。

## 5. おわりに

本報告では、狭波長化生産技術とチップ裏面 DBR 成膜生産技術を用い、LED チップの特性安定化ならびに生産性向上を実現した技術について報告した。

今後も LED の効率向上・低コスト化が求め続けられることが予想される。お客様に求められる製品を安定的に造ることができるよう LED の生産技術開発を推進していきたい。

## 参考文献

- 1) 米国エネルギー省 発行情報 (2015)
- 2) S.M. ジー, 半導体デバイス-基礎理論とプロセス技術, 産業図書
- 3) 杉浦宗男, 誘電体多層膜ミラーの発展, OPTRONICS (2013) No.10 (p.80-84)
- 4) 大津元一, 田所利康, 光学入門, 朝倉書店
- 5) 小椋山 光信, 光学薄膜の基礎理論, オプトロニクス社

## 著 者



牧 弘昭



稲澤良平



澤崎勝久

## 縦型 GaN パワーデバイス実現に向けた技術開発

岡 徹<sup>\*1</sup>, 伊奈 務<sup>\*1</sup>, 上野幸久<sup>\*1</sup>, 西井潤弥<sup>\*1</sup>, 田中成明<sup>\*1</sup>,  
長谷川一也<sup>\*1</sup>, 安西孝太<sup>\*1</sup>, 村上倫章<sup>\*1</sup>

### Technological Developments of Vertical GaN Power Devices

Tohru Oka<sup>\*1</sup>, Tsutomu Ina<sup>\*1</sup>, Yukihisa Ueno<sup>\*1</sup>, Junya Nishii<sup>\*1</sup>, Nariaki Tanaka<sup>\*1</sup>,  
Kazuya Hasegawa<sup>\*1</sup>, Kota Yasunishi<sup>\*1</sup>, Noriaki Murakami<sup>\*1</sup>

#### 要旨

自立 GaN 基板上縦型 GaN パワーデバイス開発の事例として、高耐圧・大電流動作縦型 GaN ショットキーダイオード (SBD), および、縦型 GaN トレンチ電界効果トランジスタ (MOSFET) の高耐圧化・低オン抵抗化技術に関して報告する。耐圧 800V 以上、電流 50A 以上で動作する SBD を作製し、SiC SBD と比較して逆回復特性が良好でリカバリー損失が低減できることを実証した。トランジスタに関しては、トレンチ MOSFET によりノーマリオフ動作させるとともに、フィールドプレート終端構造適用による高ブロッキング電圧 (1.6kV), および、チャンネル・ドリフト層設計最適化と正六角形セルレイアウト適用による低オン抵抗 (1.2kV 級で  $1.8\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ ) をそれぞれ実現した。

#### Abstract

This report describes technological developments in vertical GaN power devices fabricated on freestanding GaN substrates. A vertical GaN Schottky barrier diode (SBD) with simultaneous high forward current of over 50 A and high blocking voltage exceeding 800 V was fabricated. This SBD exhibited excellent reverse recovery characteristics. Normally-off vertical GaN trench metal-oxide semiconductor field-effect transistors (MOSFETs) with a record-breaking blocking voltage of 1.6 kV were demonstrated using a field-plate edge termination technique. In addition, by optimizing channel and drift layer structures and adopting a regular hexagonal gate layout, specific on-resistance was reduced to as low as  $1.8\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  while a blocking voltage of 1.2 kV was maintained.

\* (社) 応用物理学会の了解を得て、第3回先進パワー半導体分科会研究会 vol.02, No.02 (2015) pp. 5-10 より一部修正して掲載

## 1. はじめに

GaN はバンドギャップが広く電子速度や破壊電界強度が高い等の優れた材料物性を有することから Si に代わるパワー半導体向け材料として注目され、Si 基板上に形成された横型 GaN 電界効果トランジスタ (FET) は既に実用化が始まっている。この横型デバイスでは、安価でかつ大口径の Si を基板として用いることができ、また、AlGaN/GaN ヘテロ接合を用いて高移動度の 2 次元電子ガスを活用することにより低損失・高速スイッチングさせることができる等の利点がある一方、車載用デバイスで要求されるレベルのしきい値電圧で動作させることが困難である。高耐圧動

作させるにはゲート・ドレイン間距離を離す必要がありチップサイズが大きくなるため高電力密度での動作が難しい等の課題がある。これらの課題を解決しさらなる高耐圧・高出力化を目指すには、Si 絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) や SiC 電界効果トランジスタ (MOSFET) と同様、GaN においても縦型デバイスの実現が望まれる。

縦型 GaN デバイスを実現する上で必要となる自立 GaN 基板に関しては転位密度が  $10^4\text{-}10^6\text{cm}^{-2}$  と Si や SiC と比較して相当高いのが現状である。しかしながら、このような自立 GaN 基板上に作製した PN ダイオードにおいては、素子サイズは数十～数百  $\mu\text{m}$  と小さいものの 3kV を超える耐圧を有する素子や、直径 3mm もしくは一辺 4mm の大面積素子で耐圧 700V 以上および電流 100A を超える素子を実現されるなど、縦型 GaN

\*1 研究開発部

パワーデバイスの実力が伺える報告がここ数年増加しており、PN ダイオードの性能向上は目覚ましい進歩が見られる<sup>1-5)</sup>。一方、ショットキーバリアダイオード (SBD) については、小素子で耐圧 1.2kV、大面積素子では一辺 1.1mm の素子で耐圧 600V、電流 10A の動作が報告されているものの、性能の大幅な向上はここ数年見られていない<sup>6),7)</sup>。また、トランジスタに関しては低オン抵抗実現 ( $2\text{-}3\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ ) については報告があったものの、1kV を超える耐圧は昨年ようやく実現された状況であり、縦型 GaN パワートランジスタ実現に向けてまだ第一歩を踏み出したところである<sup>8-11)</sup>。

本報告では、自立 GaN 基板上縦型 GaN パワーデバイス実現に向けて我々のグループで開発を行ってきた高耐圧・大電流動作縦型 GaN SBD<sup>12)</sup>、および、縦型 GaN トレンチ MOSFET の高耐圧化技術<sup>11)</sup>・低オン抵抗化技術<sup>13)</sup> に関して紹介する。

## 2. 縦型 GaN SBD

図-1 に我々が開発している縦型 GaN SBD の断面構造の模式図を示す。市販の 2 インチ  $n^+$ -GaN 基板 (転位密度  $\sim 10^6\text{cm}^{-2}$  台) 上に MOCVD 法により  $10\mu\text{m}$  の  $n^-$ -GaN 層 (ドナー濃度  $2.5\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ ) を結晶成長した。アノードとなるショットキー電極には Ni、カソードとなる裏面オーミック電極には Al/Ti を用いている。アノード電極外側の素子周辺部には段差が形成されており、半導体表面は保護膜として  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  により覆われている。アノード電極上部には Al によるパッド電極を設けているが、このパッド電極を素子周辺から段差下部にまで広げることでいわゆるフィールドプレート

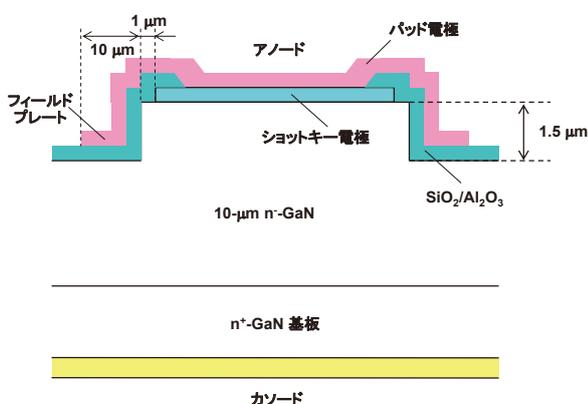


図-1 縦型 GaN SBD の断面構造模式図

(FP) 電極として用いており、ショットキー電極周辺部における電界集中の緩和を図っている。

図-2 にショットキー電極サイズ  $3\text{mm}\times 3\text{mm}$  のチップの順方向および逆方向電流-電圧特性を示す。順方向電流は 50A (我々の所有する計測器の最大値) に達している。また、リーク電流  $1\text{mA}/\text{cm}^2$  にてブロック電圧を定義した場合その値は 770V と高く、逆方向電圧が 800V を超えても素子は破壊しなかった。縦型 GaN の SBD としてこのような大電流でかつ高いブロック電圧を同時に達成した例はこれまでになく、PN ダイオードと同様<sup>3-5)</sup>、転位密度が  $10^6\text{cm}^{-2}$  と高い GaN 基板を用いても大電流かつ高耐圧で動作させられることが実証された。

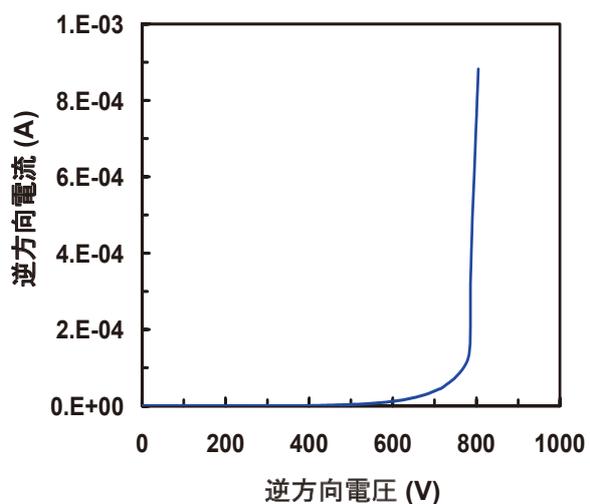
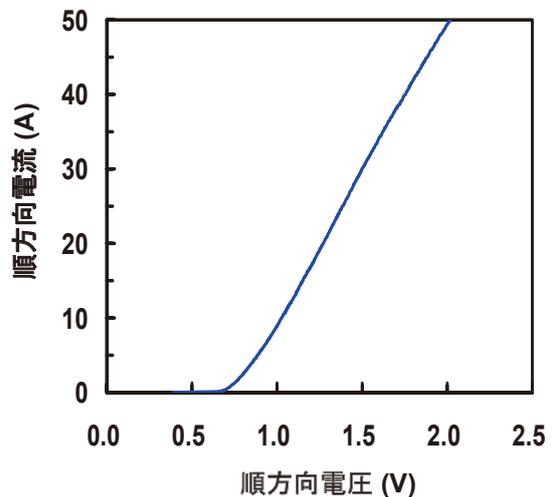


図-2  $3\text{mm}\times 3\text{mm}$  チップ縦型 GaN SBD の電流-電圧特性

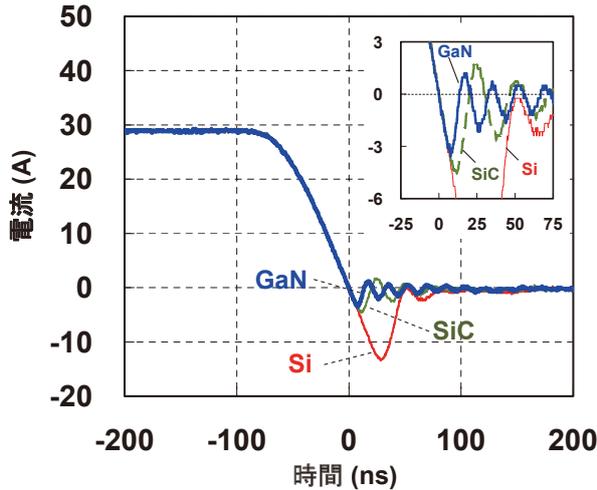


図-3 逆回復特性の比較

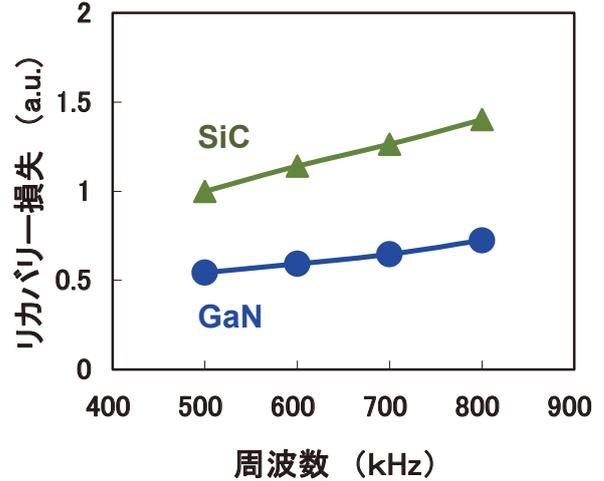


図-4 リカバリー損失の比較

図-3は作製したチップをTO-247パッケージに実装し逆回復特性を評価した結果であり、同レベルの耐圧・動作電流(600V/50A級)を有する市販のSi高速ダイオード(FRD)およびSiC SBDにて評価した結果と比較している。Si FDRと比較すると、SBDであるSiC、GaNとも十分に速い逆回復特性が得られており、また、SBD同士で比較するとGaNのほうが優れていることがわかる。このSiC SBDとGaN SBDとの特性差の有意性について確認するために昇圧コンバータを作製し、SiC SBDとGaN SBDでスイッチング周波数を変えてリカバリー損失を評価し比較した結果、GaN SBDの損失は図-4に示すようにいずれの周波数でもSiC SBDの約半分となっており、GaN SBDが高速スイッチング特性に優れていることが確認できた。

レンチ MOSFET の断面構造の模式図を示す。作製した素子のゲートは図面奥行き方向がゲート幅となる長方形構造を有している。基板には先述の SBD と同様、市販の  $n^+$ -GaN 基板を用い、その上に MOCVD 法によりドリフト層、チャネル (p ボディ) 層、およびソースコンタクト層を結晶成長している。p ボディ層へコンタクトを形成する領域およびゲートトレンチとなる部分は Cl 系ガスをを用いた ICP エッチングによって溝を形成している。p ボディコンタクト形成領域の溝の内部には p 電極となる Pd が形成され、その上を覆いかつソースコンタクト層と接するようにソース電極 Al/Ti を堆積することで、セルピッチ (ソース電極の中心間の距離) を微細化するように工夫している。セルピッチは  $15\mu\text{m}$  である。ドレイン電極となる裏面オーミック電極には SBD と同様に Al/Ti を用いている。ゲート絶縁膜は  $\text{SiO}_2$  であり、トレンチ内部の被覆性に優れた ALD 法を用いて堆積した。素子周辺には素子分離のための段差が形成されており、その表面は保護膜として

### 3. 縦型 GaN トレンチ MOSFET

#### 3-1. 高耐圧化技術

図-5に高耐圧化の検討に用いた縦型 GaN ト

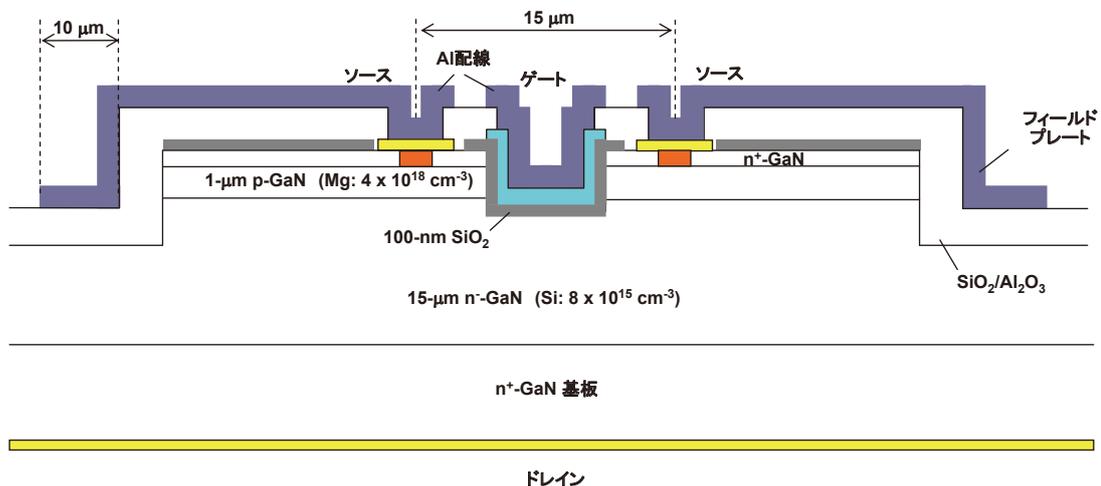


図-5 高耐圧化検討縦型 GaN MOSFET の断面構造模式図

SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>により覆われている。ゲート電極および配線電極にはAl系電極を用いている。ソースに接続されるAl配線電極を素子分離領域の外側まで引き伸ばすことでFP電極としたいわゆるFP構造を終端構造として採用し、素子分離段差部のpn接合端に集中する電界の緩和を図っている。段差の深さおよび保護膜の膜厚はFP電極がpn接合部分を側方から完全に覆うように設計・作製している。

図-6はV<sub>DS</sub>=0.5Vにおいて測定したI<sub>D</sub>-V<sub>G</sub>特性である。しきい値電圧は7Vとノーマリオフ動作をしている。単位セル(セルピッチ)あたりで算出したオン抵抗は12.1mΩ・cm<sup>2</sup>であり、これまで報告されている横型GaN FETと比較すると高いが、これはセルピッチが15μmと大きく素子の微細化が不十分であることに起因している。

図-7は同一ウエハ上に形成したFP電極を設けた素子および設けなかった素子について逆方向特性を比較した結果である。FP電極の有無によってドレイン電流に差が生じており、用いたFP構造が素子分離領域周辺に流れていたリーク電流の抑制に寄与していることがわかる。FP電極を設けなかった素子のブロッキング電圧は775Vで

あったが、FP電極を設けた素子では1605Vと大幅に向上させることができ、これまで報告されている縦型GaNトランジスタの中で最も高いブロッキング電圧を達成した。

### 3-2. 低オン抵抗化技術

図-8は低オン抵抗化の検討に用いた縦型GaNトレンチMOSFETの断面構造の模式図および顕微鏡写真である。この検討では、1.2kVクラスの耐圧でオン抵抗を極力低減することを狙いチャンネル層およびドリフト層の膜厚・濃度を最適化するとともに、単位面積あたりに占めるゲート幅の割合を高めるためにゲートのレイアウトを長方形から正六角形に変更した。またセルピッチは12.6μmと図-5に示す素子と比較して微細化を進め、ゲートレイアウト変更と合わせて単位面積あたりに占めるゲート幅の割合を図-5の素子の2倍に高めた。終端構造には図-5の素子と同様のFP構造を用いている。

図-9は作製した六角形ゲートレイアウトを有する縦型GaN MOSFETの逆方向特性であり、ブロッキング電圧は1250Vとほぼ設計通りの値が得られた。同一ウエハ上に作製した長方形ゲ

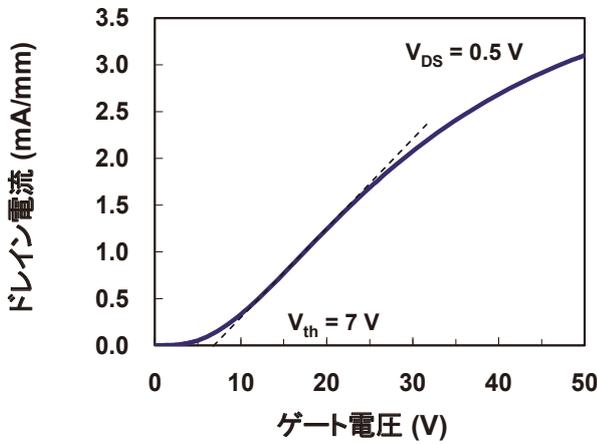


図-6 I<sub>D</sub>-V<sub>G</sub> 特性

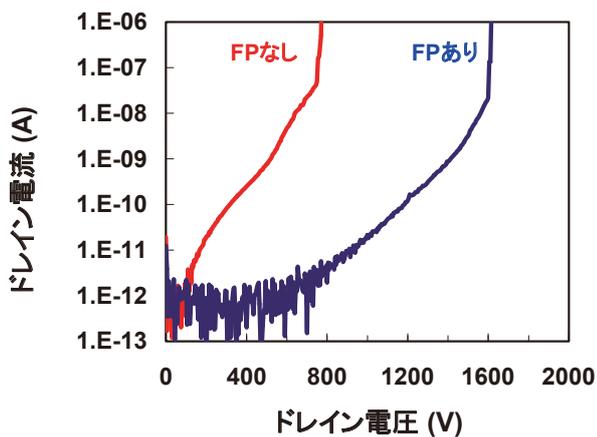


図-7 逆方向特性

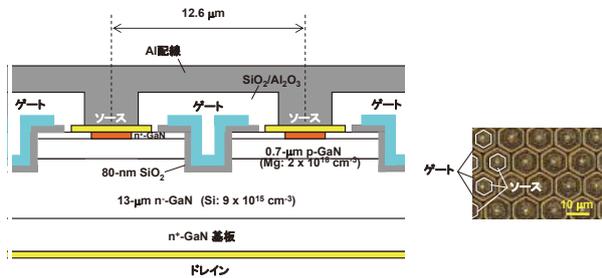


図-8 低オン抵抗化検討縦型GaN MOSFETの断面構造模式図および顕微鏡写真

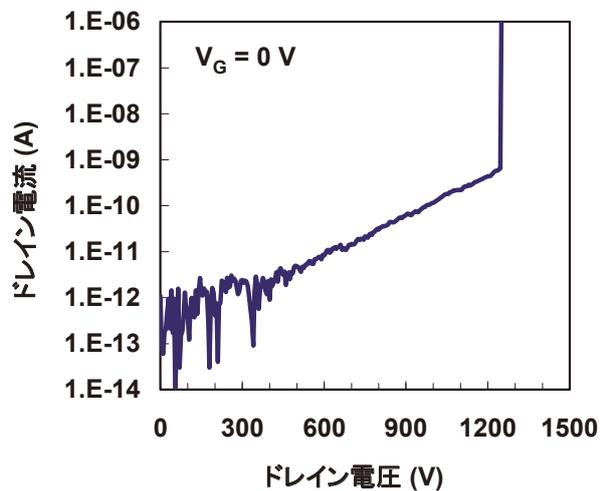


図-9 逆方向特性

トレイアウトの素子においても同レベルのブロッキング電圧が得られており、ゲートレイアウトの変更に伴う逆方向特性の劣化はみられていない。

図-10 および図-11 は作製した六角形ゲートレイアウトを有する縦型 GaN MOSFET の順方向特性である。図-10 は  $V_{DS}=0.5V$  において測定した  $I_D-V_G$  特性であり、しきい値電圧は  $3.5V$  とノーマリオフ動作をしている。図-11 は  $I_D-V_{DS}$  特性であり、 $V_{DS}=0.5V$  および  $V_G=40V$  におけるドレイン電流の値を用いて算出したオン抵抗は  $1.8m\Omega \cdot cm^2$  である。

図-12 はオン抵抗と耐圧の関係を比較した図であり、図にはこれまでに他社・他研究機関から報告されている縦型 GaN トランジスタ<sup>9, 10, 14</sup>、および最先端の性能を有するノーマリオフ横型 GaN トランジスタ<sup>15-17</sup> ならびに SiC MOSFET<sup>18, 19</sup> の結果も同時に記している。図に示すように、今回得られた結果はノーマリオフ動作する縦型 GaN MOSFET としてこれまで報告されている中で最も

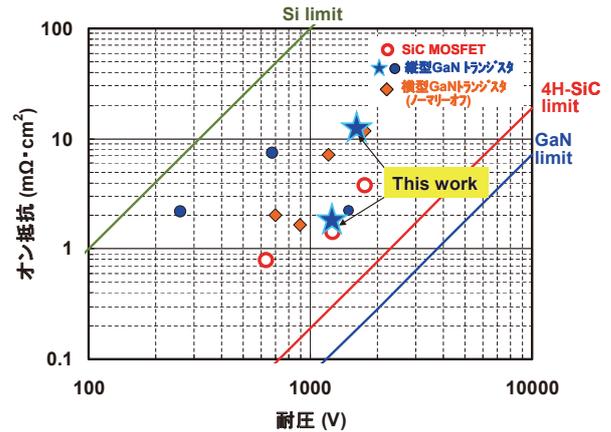


図-12 オン抵抗と耐圧の関係の比較

低い値であり、かつ  $1.2kV$  クラスの SiC MOSFET で達成されているトップクラスのオン抵抗に近づけることができたことがわかる。

#### 4. まとめ

縦型 GaN パワーデバイス実現に向けて我々がこれまでに開発を行ってきた高耐圧・大電流動作縦型 GaN SBD、および、縦型 GaN MOSFET の高耐圧化・低オン抵抗化技術について紹介した。自立 GaN 基板はウエハ径の主流が 2 インチと小さく、価格も SiC と比較してもまだまだ高いことから、縦型 GaN パワーデバイス実現に向けては基板の高品質化とともに大口径化・低コスト化が急がれる。トランジスタに関しては、今回作製した素子はサイズが小さく、またセルピッチが SiC MOSFET と比較して 2 倍以上大きいことから、大面積化・大電流化とさらなる低オン抵抗化に向けた素子の微細化が今後の課題である。

#### 謝辞

本研究開発を進めるにあたり、素子作製にご協力いただいた研究開発部エピ・プロセス開発ならびに設備管理の各チームの皆様へ感謝致します。また、デバイスの実装およびスイッチング特性の評価にご協力いただいた商品企画センター商品開発部電子技術室の皆様へ感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) Y. Hatakeyama et al., Jpn. J. Appl. Phys., **52**, 028007 (2013)
- 2) I. C. Kizilyalli et al., IEEE Electron Device Lett., **35**, 247 (2014)
- 3) I. C. Kizilyalli et al., IEEE Trans. Electron Devices, **62**, 414 (2015)

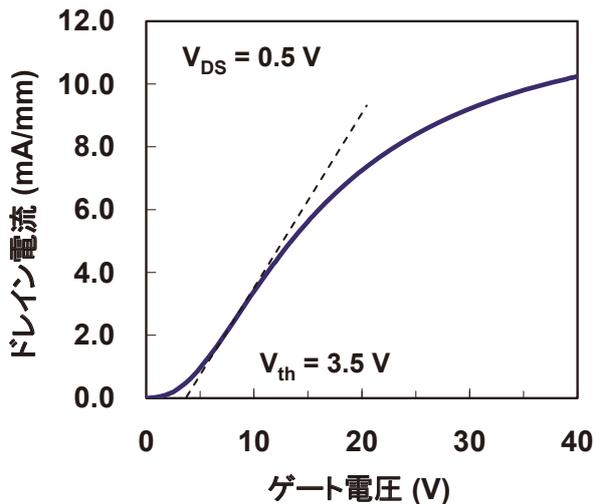


図-10  $I_D-V_G$  特性

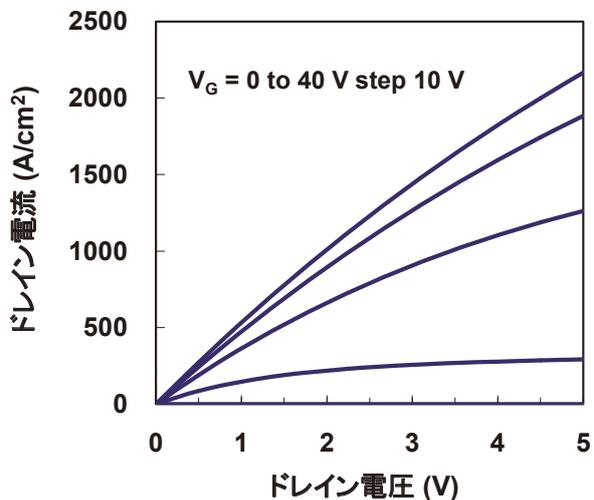


図-11  $I_D-V_{DS}$  特性

- 4) K. Nomoto et al., 20th Meeting on SiC and Related Wide Bandgap Semiconductors, 2011, p. 14
- 5) I. C. Kizilyalli et al., IEEE Electron Device Lett., **35**, 654 (2014)
- 6) Y. Saitoh et al., Appl. Phys. Express, **3**, 081001 (2010)
- 7) M. Ueno et al., Proc. Int. Symp. Power Semiconductor Devices and IC's, 2014, p. 309
- 8) M. Kanechika et al., Jpn. J. Appl. Phys., **46**, L503 (2007)
- 9) S. Chowdhury et al., IEEE Electron Device Lett., **33**, 41 (2012)
- 10) H. Nie et al., IEEE Electron Device Lett., **35**, 939 (2014)
- 11) T. Oka et al., Appl. Phys. Express, **7**, 021022 (2014)
- 12) N. Tanaka et al., Appl. Phys. Express, **8**, 071001 (2015)
- 13) T. Oka et al., Appl. Phys. Express, **8**, 054101 (2015)
- 14) M. Okada et al., Appl. Phys. Express, **3**, 054201 (2010)
- 15) N. Ikeda et al., Proc. Int. Symp. Power Semiconductor Devices and ICs, 2011, p. 284
- 16) M. Wang et al., IEEE Trans. Electron Devices, **61**, 2035 (2014)
- 17) 森田 他, パナソニック技報, **57**, 15 (2011)
- 18) T. Nakamura et al., IEDM Tech. Dig., 2011, p. 599
- 19) K. Wada et al., Proc. Int. Symp. Power Semiconductor Devices and ICs, 2014, p. 225

著 者



岡 徹



伊奈 務



上野幸久



西井潤弥



田中成明



長谷川一也



安西孝太



村上倫章

## 車室内空間における LED 照明のあり方と可能性

渡邊千穂<sup>\*1</sup>

### Concept and Possibility of LED Light in Vehicle Compartment Space

Chiho Watanabe<sup>\*1</sup>

#### 要旨

LED 照明の仕様の最適化は車内空間をより快適にすることにつながる。本論文では車室内空間での照明条件による感性評価結果を元にしながら、ユーザーニーズに応じたより快適な空間づくりのための可能性について述べる。

#### Abstract

Optimization of the specifications for LED lighting will lead to more comfortable interior spaces in automobiles. This paper discusses the possibility of creating more comfortable spaces based on the results of evaluation experiments using lighting specification conditions to respond to user needs.

## 1. はじめに

LED が日本の住宅用照明において主役の座を奪いつつあることは、周知の事実である。

自動車用照明においても価格の低下や発光効率の向上から、LED が適用されるようになってきた。その小ささによる設計の自由度や物理特性などの利点から適用が急速に広がっている。加えて昨今のユーザーの「光」に対するニーズの高さに応じ、車室内の様々な場所に LED を組み入れることで、これまでできなかった機能や効果を持った光を車室空間に与えることが期待されている。

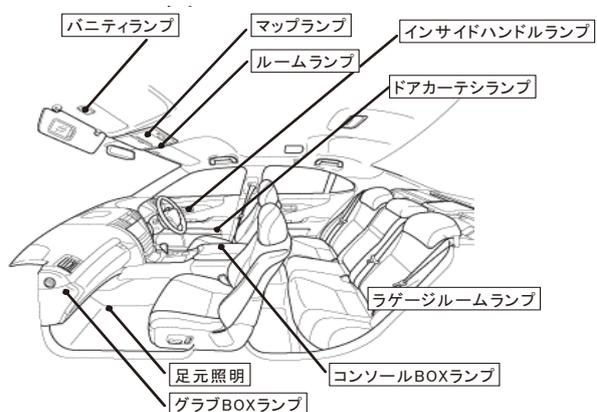


図-1 車室内の照明器具

一般的な車室内における照明の種類は図-1に示すように安全に乗り降りするためであったり、運転以外の操作や動作の補助などのための機能的



Mercedes-Benz S



BMW-MINI

図-2 アンビエント照明の例

\*1 デザイン企画部 企画開発室

照明として設置されている。それに加えて最近では図-2のように隙間などを利用したアンビエント照明が多く見受けられるようになった。これにより、これまで内装素材に頼ってきた上質感を光によっても与えることができるようになった。また、光は素材を際立たせる効果もある。素材と光の両方を効果的にデザインして、魅力的な車室空間を作っていくことが重要と考えられる。

## 2. LED 照明の仕様

そもそも、照明に対する要件は安全性や利便性といった機能性と、空間の雰囲気演出するといった効果を運転の妨げのないように作り出すことである。

照明光の仕様には明るさ、色、分光分布、光の配置、光の分布、面積などがある。

明るさは一般的に照度で規定される。車室内での安全や、物や文字が十分に見える照度でありながら、運転の妨げがない最低限の光の量で規定されている。また、運転しない場合での使用であったとしても、ユーザーは夜間の照明により外から見られることを嫌うため、必要以上の明るさは抑えるべきと考えられている。さらに注意点として、同じ照度であっても内装色によって反射光の量（輝度）が異なることを考慮し、車室内全体の雰囲気を設計する必要がある。

光の配置は光源が目に入らないようにすることが望ましい。光源が視野に入るとグレアを引き起こして運転の妨げになるだけでなく目が明順応してしまい、瞳孔が狭くなってしまふことから、実際に見たい場所が暗く感じて見えにくくなってしまふからである。

光の全体的な配置については効果的に使うことによって、空間自身の開放感や上品さを演出することができる。高橋らは車室内の光の配分による空間の快適性の向上について述べている<sup>1)</sup>。

また、光の分布については均斉度が重要とされ、スポット光のような急激な照度の変化はリーディングランプなどの視作業を行うための照明には目の順応状態が変化してしまうことから、疲労につながるとされている<sup>2)</sup>。更にデザインの観点からも光の境界の照度変化をどのように設計するかは照明光の見栄え要因の一つであり、展示照明などでは特に工夫されている。車室内照明でも考慮されるべきであろう。

光の色について、白色光は色温度で表され、温かみのある電球色が 3000K 程度、昼白色が 5000K 程度、やや青白く感じる昼光色が 6500K 程度であるが、LED はその範囲を超える色も十分に作ることができ、容易に色を変化させること

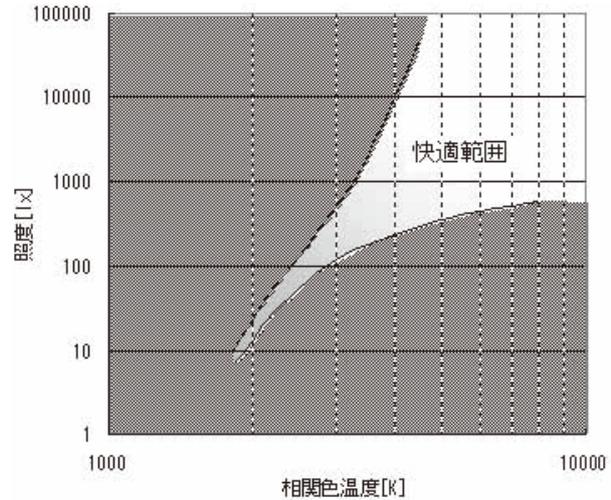


図-3 クルーズフによる照度と色温度の組合せの快適範囲

もできる。車室内の内装の色に合わせたり、雰囲気を作るうえで光の色は効果的である。ただし、図-3に示したように、照度と色温度の組み合わせで不快に感じてしまう範囲があることに注意しなければならない。また、青白い光は顔を暗く見せることにも注意が必要である。また、光の色が文字の読みやすさなどの機能的な面にも影響があると考えられる。3章、4章では実験評価を行った事例を示す。

## 3. リーディングランプを想定した可読性の検討（色温度条件）

### 3-1. 目的

一般照明において、可読性には照度が最も重要であり、通常光の色を考慮することはあまりない。しかし自動車の場合、最適な光色設定により、照度条件は抑えつつ、より読みやすい光環境を検討することが重要と考え、可読性が光の色によってどの程度異なるのかについて実験を行った。また特に加齢による影響について着目し、年齢に対応した設定の必要性についても検討を行った。

### 3-2. 被験者

被験者は 19 歳から 81 歳までの男女で表-1に示したような人数であった。通常読書を行う状態に眼鏡などで視力を矯正した状態で実験を行った。

表-1 年齢群別の被験者の数

被験者区分	人数
若年層（39歳以下）	11名
中年層（40歳～50歳）	13名
高年層（65歳以上）	11名

### 3-3. 実験方法

実験は暗室内で行い、実験照明以外の光源が被験者の目に入らないようにした。実験照明のレイアウト写真を図-4に示す。

照明はLEDで2700K、5000K、8800Kの3種類で行い、机上面照度は400lxとした。

被験者は暗順応の後、それぞれの光源の元で図-5に示した600文字程度の文章を黙読し、文字の見やすさについて図-6に示した7段階で回答した。照明条件の順序はランダムで行った。

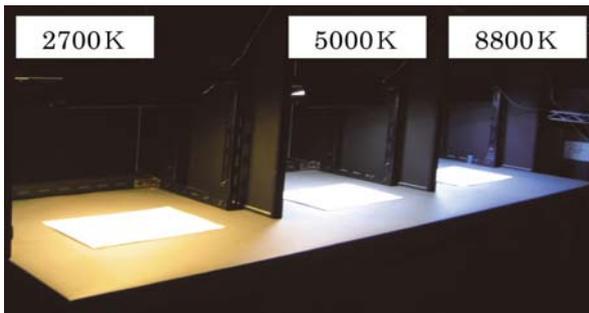


図-4 実験照明



図-5 読書課題

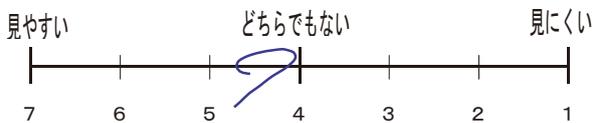


図-6 評価段階と回答例

### 3-4. 結果

各色温度照明下での文字の見やすさについて評価した7段階の点数を個人の評価幅のばらつきを考慮して規準化（平均を引き、標準偏差で除す）した。規準化した点数について被験者の年齢層別に平均値を求めた。結果を年代別に図-7に示す。エラーバーは95%信頼区間である。図中の\*は有意差の危険率<5%、\*\*は危険率<1%である。色温度条件ごとの統計的有意差をtukeyの多重比較で見たところ、20~30歳はばらつきが大

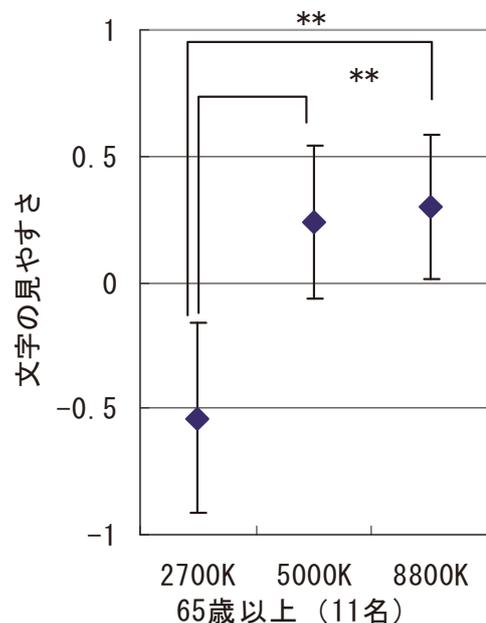
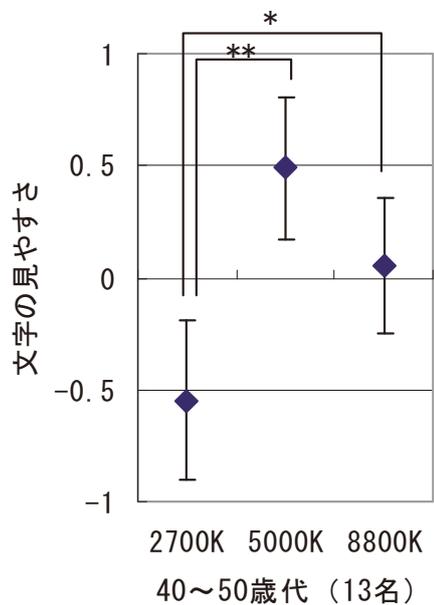
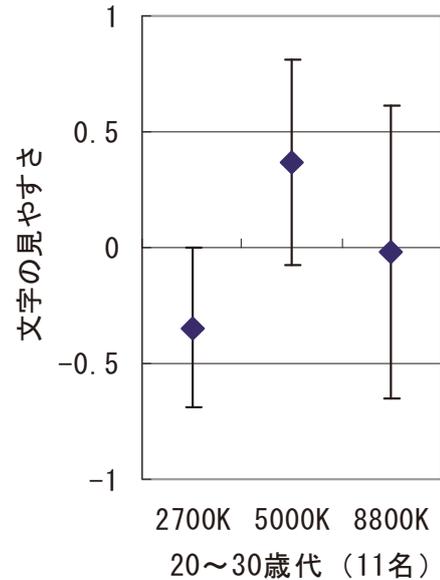


図-7 年齢群別の照明色の違いによる見やすさ

きく、有意差がなかった。40 歳以上の被験者は色温度による有意差があり、視覚的低下が見られる年齢では色温度が変わることによる見やすさへの影響があることが考えられる。

すべての年齢層において 2700K の照明は見難く、文字を見る環境としては好ましくないと考えられる。全ての年齢層において 5000K が見やすさが高いことが示されたが、65 歳以上の高齢者ではさらに、8800K の評価がやや上がる傾向が見られた。高齢者には色温度が高い照明下の方が文字を見やすいと考えられる。

### 3-5. 考察

実験結果より、文字の見やすさに対する色温度の違いは若齢者には感じにくいが高齢になるにしたがって感じやすくなる傾向があることがわかった。文字の見やすさは輝度コントラストと関係があることから<sup>3)</sup>、加齢による水晶体の黄変化に伴う分光視感度の変化によって、高齢者は色温度が高いほうがより白く感じられ、見かけのコントラストが高くなり、文字が見やすくと推測される。リーディングランプには 5000K 程度の白みの強い設定をすることですべての年齢に読みやすい照明を作ることができると考えられる。

## 4. バニティランプの光色

### 4-1. 目的

バニティランプは主にバニティミラーを使用するための照明である。バニティミラーはほとんどの場合図-8のようにサンバイザーの裏に設置される。まず、バニティミラーの使用頻度と使用目的を調査し、対象の被験者やニーズを洗い出した上で最適な照明色を求めることとした。

### 4-2. 事前調査

男性 115 名、女性 51 名の合計 166 名にアンケートを行ったところ、図-9 に示したように男性は 69% が「全く使用しない」「ほとんど使用しない」となり、女性は 54% が「毎回使用する」「たまに使用する」となった。メインユーザーは女性であると考えられる。

女性の使用目的のアンケート結果を図-10 に、使用時間帯を図-11 に示す。使用目的は化粧をチェックする用途が多く、その次にメイクの一部を行う頻度が高いことが分かった。

使用時間帯は昼間が多く、被験者が会社員であったため、出勤時の使用が多いことが伺える。

そのため、実際に照明の色によるバニティミラーの見え方について主に化粧の見え方や化粧の



図-8 バニティミラーとバニティランプ

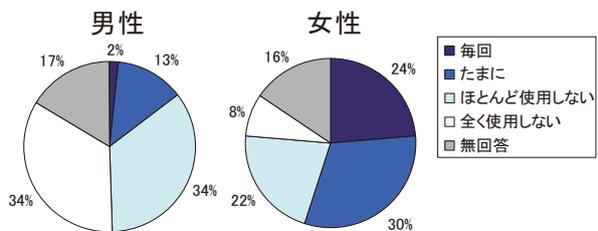


図-9 男女別バニティミラーの使用頻度

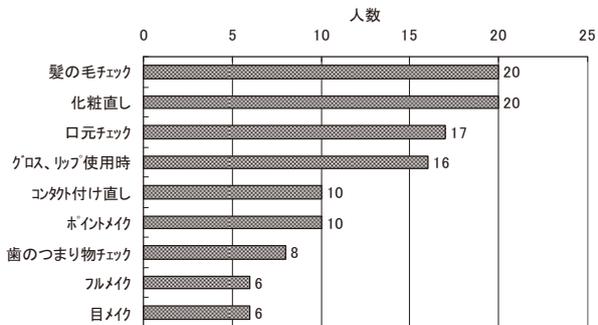


図-10 バニティミラーの使用目的 (女性)

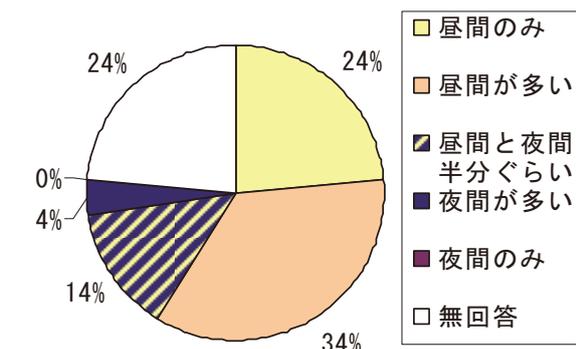


図-11 バニティミラーの使用時間帯 (女性)

しやすさについて質問を行い、用途に応じた最適な照明色を求めることとした。

### 4-3. 実験方法

バルブ (白熱電球) を基準として、色温度の異なる 4 種類の LED 照明の評価を行った。色温度は 2800K / 3300K / 4000K / 5000K で顔面照度を市販のバルブに合わせて 32 [lx] に統一した。表-2 に示す 8 項目に対し、バルブと同じであ

表-2 評価項目

肌がきれいに見える
化粧の色が正確に見える
健康そう
肌の透明感がある
自然な感じ
明るい
化粧がしやすい
好ましい



図-12 実験のレイアウト

る0を中心として、+3~-3までの7段階でLEDの評価を行った。LED照明の呈示順はランダムとした。

図-12に実験サンプルのレイアウトを示す。被験者はバルブ照明下での自分の顔を見ながら実験の説明を聞き、その間に順応するようにした。被験者はあご台にあごを置いて、観察距離や観察角度が一定になるようにした。ミラーからの距離は顔全体が見える距離として250mmにレイアウトした。被験者は20歳代~40歳代の15名で実験を行った。

4-4. 結果

15名の評価結果から、被験者間のばらつきをなくすため、規準化(平均を引き、標準偏差で除す)を行い、評価の平均値を求めた。

バルブのバニティランプを0としたときの平均点数を図-13に示す。バルブに対して2800KのLEDは点数が低く、特に「化粧の色が正確に見える」「明るい」について評価が低かった。3300Kで同等、4000Kと5000KのLEDは評価が全体的に高かった。また、被験者がどのように「好ましい」と判断しているかを求めるため、「好ましい」と他の評価用語との重回帰分析を実施し

た。結果を表-3に示す。「好ましい」に係る大きな要因は「自然な」と「化粧がしやすい」であった。

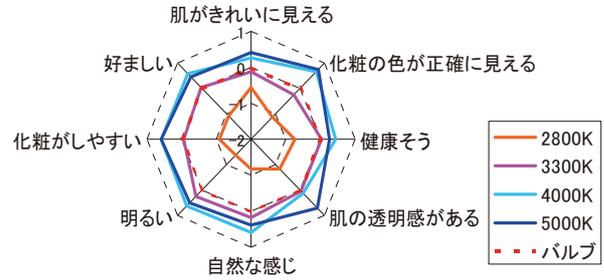


図-13 バルブに対する評価結果

表-3 重回帰分析結果

	偏回帰係数	標準誤差	t値	p値
自然な感じ	0.419	0.092	4.565	2.775 E-05
化粧がしやすい	0.425	0.075	5.650	5.591 E-07
肌の透明感がある	0.197	0.080	2.474	0.016
定数項	5.073 E-17	0.058	8.746 E-16	1

(分散分析表)

要因	平方和	自由度	平均平方	F値	p値
回帰	48.694	3	16.231	80.394	7.947 E-17
残差	11.306	56	0.202		
全体	60	59			

重相関係数	0.901
決定係数	0.812
自由度調整済み重相関係数の二乗	0.801

4-5. 考察

女性がバニティランプに求めるものは、肌がきれいに見えることや健康そうに見えることではなく、より正確に化粧ができる機能性であることがわかった。図-11にも示したとおり、出勤時

などの昼間の使用が多く、照明の色は自宅やオフィスの蛍光灯の色温度に近い昼白色である4000K～5000Kが望ましい照明光と評価されたと考えられる。

## 5. おわりに

3章、4章ではLEDの色温度が機能性に影響するかについて検討した内容を紹介した。実験結果から色温度の最適化は機能性の面で有意に影響を与え、明るさに加え重要な設計仕様であることが示された。LED化することで色温度を設定することが可能になったことはよりよい照明環境を作る上での利点であると言える。また、車室内の雰囲気や演出を与える意味では有彩色光も含め光の色は非常に効果的である。

さらにLEDは分光設計ができる。すでに家庭用照明においては照明メーカーから分光設計によって同じ色温度でもより魅力的な見え方をするランプが開発され、発売されている<sup>4) 5)</sup>。今後、LEDには様々な車内の素材との組み合わせで新しい車室内環境を作っていく大きな可能性が残されている。

ただし、色温度の高い照明（青白い、もしくは青い照明）を一定以上の時間使用する場合、夜間においては生体リズムの変調への懸念があることが知られており、このような生理的な影響も考慮する必要がある<sup>6)</sup>。

LED照明を使った、より快適で魅力的な空間

づくりにおいてはこのように、総合的な観点から照明設計を行っていくことが必要であり今後の車室内空間のデザインの可能性を大きく広げることができると考えられる。

## 参考文献

- 1) Takahashi et al, *Kansei Engineering International Journal*, 11,2 (2012) p59-65
- 2) 永井ら, 照明学会全国大会講演論文集 29 (1996) P374-375
- 3) 照明学会, 「視認性に関する研究調査委員会」報告 (2002) p44-47
- 4) 小谷朋子, 東芝レビュー, vol.66, No.4 (2010) p68-71
- 5) 山口サヤカ, Panasonic Technical Journal Vol. 58, No.2 (2012) P62-66
- 6) 照明学会「生体への生理的影響を考慮した光環境設計指針に関する研究」報告 (2009)

著 者



渡邊千穂

## 電子部品の寿命推定に関する要素技術の確立

婦木慎一郎<sup>\*1</sup>, 佐分主税<sup>\*1</sup>, 山田寛之<sup>\*1</sup>

佐藤 真<sup>\*1</sup>, 伊藤 修<sup>\*1</sup>

### Elemental Technology Establishment for Life Expectancy of Electronic Component

Shinichiro Fuki<sup>\*1</sup>, Chikara Saburi<sup>\*1</sup>, Hiroyuki Yamada<sup>\*1</sup>, Makoto Sato<sup>\*1</sup>, Osamu Ito<sup>\*1</sup>

#### 要旨

近年、低コスト化技術開発の必要性は高まるばかりであるが、低コスト化と品質保証の両立は固有技術として課題が多い。今回それらの相反するニーズを満足する電子部品の寿命推定に関する要素技術を開発したので以下に報告する。

#### Abstract

The need for low cost technical development keeps increasing in recent years, but there are many challenges in inherent technology to combine cost reduction and quality assurance.

We report an elemental technology developed to estimate life expectancy of electronic components that satisfy these competing needs.

## 1. はじめに

電子部品の低コスト化について我々は、

- 1) 流通量によるコスト低減
- 2) 複数の電子部品メーカーの選定
- 3) 複数の製造工場の選定
- 4) 設計上の部品点数削減

など1)～4)を中心に活動推進してきた。今回、昨今の更なる低コスト化要求に応じていくため、使用する電子部品の性能・寿命とコストの適正化を図ることに着手したので、その概要について報告する。実施したことは、オーバースペックの部品を抽出し、安価な適正スペックの部品に変更することである。

## 2. 問題の明確化

低コスト化と品質保証を両立した技術を確立するために部品寿命末期の磨耗故障寿命に着目した。オーバースペックの製品が存在する理由は母集団の磨耗故障寿命推定手法を確立していない電子部品メーカーにとっては極端なオーバースペックとすることで車載の磨耗故障寿命を確保する手

法が定着している事に起因する。

そこで本技術の着眼点として母集団の故障分布型から磨耗寿命推定し、お客様の期待寿命との関係を定量化する事により、明らかに過剰と思われる電子部品の寿命を最適化する事で低コスト化の効果を得ようと考えた。

寿命推定の前提条件として、可能な限り母集団の累積故障率の低い範囲を予測する事が必要である。しかし既存技術（ワイブル）などで区間推定を包含した予測可能範囲はせいぜい累積故障率10%以上の範囲であり、今回の前提条件である極めて低い累積故障率の予測範囲との乖離は少なく見積もっても10%以上の乖離がある事がわかった。

## 3. 既存技術の問題点

既存技術のワイブル解析における課題点について整理した。

図-1の解析は電子部品電解コンデンサCにおける解析例である。(N=200)累積故障率5.0%以下から区間推定ラインは大幅に開き始めFt0.5%以下では推定不可能な領域である事がわかる。この区間推定ラインは「不完全ベータ関数」により算出されたものであり、その理論解析を実

\*1 商品開発部 電子技術室

施したのでその参考文献を図-2に示す。ここから分かった事は不完全ベータ関数はノンパラメトリック理論により構築されているため厳密な故障分布型は考慮されていない事、また順序統計量によるノンパラメトリック解析では①時間の推定に対する当てはまりが悪いのは区間推定が時間tに対する累積故障率範囲を推定していることに起因する、②あらゆる条件に適合させる事の背反としてデータ数の少ない低故障率範囲では解が得られないという二つの仮説を結論付けた。

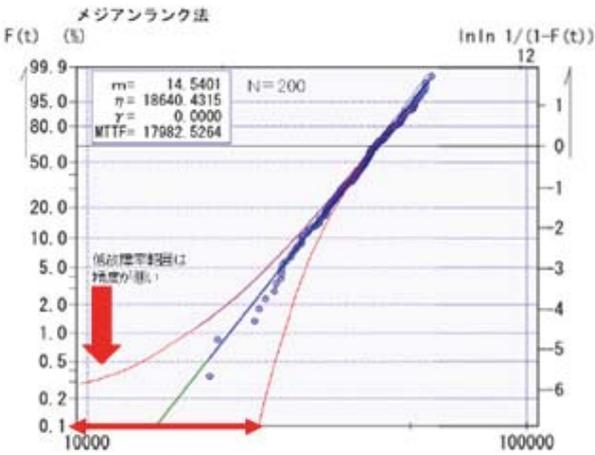


図-1 ワイブル解析 (電子部品 C N = 200)

ノンパラメトリック統計技法

母集団の型に関する情報がなく、しかもそれほどデータ数が大きくない場合、ある特定の母集団分布に依存しない手法が望まれる。このような場合に用いられる手法が、ノンパラメトリック手法であり、母集団の型によらない手法である。

1. ノンパラメトリック手法における不完全ベータ関数

n個の標本を大きさの順に並べる。

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_i \leq \dots \leq x_n$$

このとき  $x_i$  に対する分布関数の値  $F(x_i)$  を考察する。

そこで、いま確率密度関数  $f(x)$ 、分布関数  $F(x)$  の母集団から、n個の独立な標本  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) を得たとする。小さいほうから第i番目の標本を  $x_i$  とする。確率要素は図1から  $f(x_i)dx_i$  であり、 $x_i$  はn個から1つ選ばれるのでn通りの選び方がある。そして  $x_i$  以外は  $(n-1)$  個あるが、そのうち  $x_i$  以下のものが  $(i-1)$  個、 $x_i$  以上のものが  $(n-i)$  個とられる組合せは全部で

$${}^{n-1}C_{i-1} = \frac{(n-1)!}{(i-1)!(n-i)!}$$

である。

以上の考察から、 $x_i$  が区間  $(x_i, x_i + dx_i)$  にはいる確率は、

$$n \cdot \binom{n-1}{i-1} [F(x_i)]^{i-1} \cdot [1-F(x_i)]^{n-i} \cdot f(x_i) dx_i$$

である。

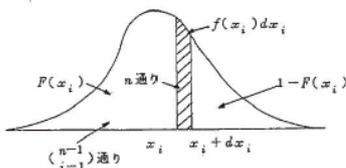


図-2 不完全ベータ関数理論の抜粋<sup>1)</sup>  
(著書「信頼性の分布と統計」より抜粋)

①, ②の仮説から特に低故障率範囲における寿命推定の解をワイブル解析から得ることは不可能と結論付けた。別の切り口としてサンプルサイズを増すことで区間推定範囲をある程度収束させる事が可能であるが、シミュレーションから得られた故障データをワイブル解析した結果、その必要N数は1000以上という結論に至った。(形状パラメータ  $m=14$  以上)

実使用上  $N=1000$  以上の解析は非現実的であることからN増による収束には限界があると判断した。以上の現状把握より開発現場や量産現場で適用できる寿命推定技術を確立するための条件としてN数を少量かつ低故障率範囲推定出来る手法が必要であるとの結論に至った。

4. 開発した技術の概要

以下に開発した技術の概要を示す。

- ・寿命推定に必要なN数 200個
- ・評価期間 4ヶ月以内
- ・目標推定精度 ±30%以内

従来の技術では困難であった、低故障率範囲 ( $F(t) < 1.0\%$ ) に対してN数少量かつ高精度な推定技術を確立した。

なお寿命推定に必要なN数設定の根拠は量産対応における品質評価数量を逸脱しない範囲の上限を設定した。評価期間も同様の考え方である。

5. 技術開発の説明

5-1. 考え方

電子部品の寿命を評価する場合、一般的には劣化を加速させる試験を実施し、1つ目のサンプルが壊れる時間を寿命と捉える。ただし、得られた結果の解釈には以下の点に注意する必要がある。

- ①サンプル数によって結果が異なる
- ②抜き取りデータであるため、真の寿命とは差異がある。まず、サンプル数によって結果が異なる点を考慮し、寿命の定義を「試験サンプル中の1つ目が壊れる時間」ではなく、「累積故障率が0.1%となる時間」とした。

次に、抜取データであるため真の寿命とは差異がある点については、図-3のように故障時間データのヒストグラムから母集団の故障時間分布を推定することで、寿命の推定値を算出した。

上記の考察を前提に推定式を立案した。なお推定対象となる故障分布系は正規分布とワイブル分布を想定した。今n個の電子部品の耐久試験を

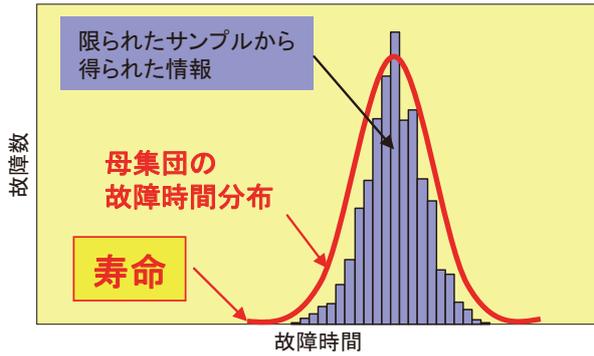


図-3 故障時間データのヒストグラム

実施し、故障時間データ  $\{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$  が得られたとすると、標本平均、標本分散、不偏分散が定義される。不偏分散式、母集団の区間推定をベースに寿命推定を構築した。

(詳細な導出過程は割愛する)

$$t = \bar{x} - 3.09 E(\sigma_x) \sqrt{\frac{n}{n-1}} - \frac{E(\sigma_x)}{\sqrt{n-1}}$$

### 5-2. 実施結果

構築した寿命推定式を評価するため、アルミ電解コンデンサで実証検証を行った。検証条件を表-1に示す。サンプル数が1000個であるため、1つ目のサンプルが壊れた時が累積故障率0.1%であり、その時間が寿命の実測値となる。

また、寿命推定値の算出条件を表-2に示す。ここに示すように、ランダムサンプリングによる標本データを用いた寿命推定値の算出を100回繰り返し、その統計量と寿命の実測値から推定誤差を評価した。推定に用いるサンプル数は200個以下、推定誤差は±30%以内を目標値とした。

実証検証での試験項目と測定項目は、測定値が経年劣化するものを選定する必要がある。そこであらかじめ対象部品の故障メカニズムを解析し、壊れ方とその要因を把握する必要がある。

表-1 実証検証条件の抜粋

供試品	アルミ電解コンデンサ ELXZ250ETD101MFB5D 日本ケミコン製
試験項目	105°C 2000時間品
測定パラメータ	静電容量(C) (故障判定基準: 初期値の±20%以上) 損失角の正接(tan δ) (故障判定基準: 初期値の±200%以上)
サンプル数	1000個
測定器	LCRメーター HIOKI 3532-50
測定ケーブル	4端子プローブ 9140
測定信号レベル	0.5Vrms
測定周波数	120Hz
測定者	電子技術室 佐藤

表-2 水準条件

サンプル数	5水準(10、30、50、100、200個)
サンプリング方法	ランダム
サンプリング回数	100回

表-3 にアルミ電解コンデンサの故障メカニズム一覧表を示す。これより静電容量及び tan δ が指数的に経年劣化し、且つ劣化が熱により促進されることが分かったため、高温放置試験にて静電容量・tan δ を測定するよう実験を計画した。

アルミ電解コンデンサの実証実験において、静電容量の変化を図-4に、tan δ の変化を図-5に示す。tan δ 変化率が静電容量変化率よりも先に故障判定基準に到達したことから、今回の実証実験においては tan δ 変化率を寿命推定の対象とした。

表-3 アルミ電解コンデンサの故障メカニズム<sup>4)</sup>  
(ニチコン(株)アルミ電解コンデンサテクニカルノートから抜粋)

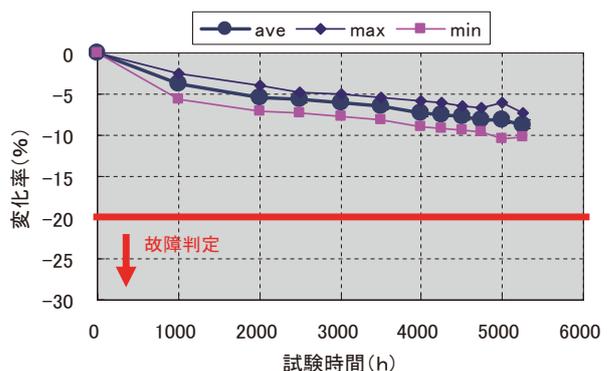
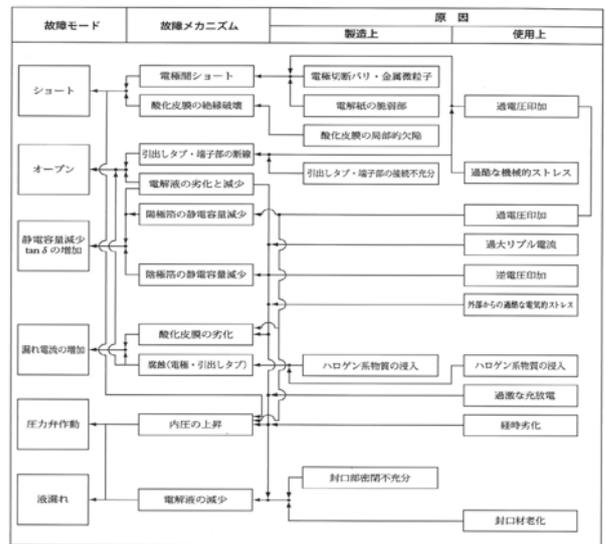


図-4 試験時間と静電容量変化率の関係

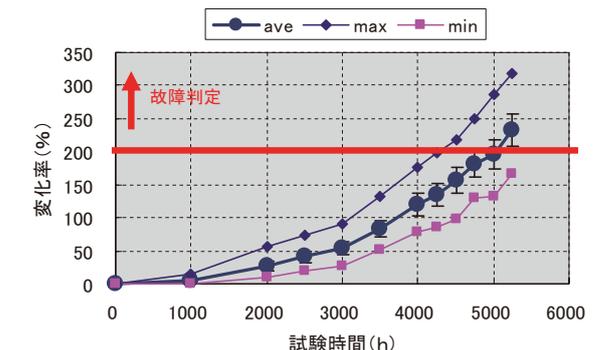


図-5 試験時間と tan δ 変化率の関係

電解コンデンサの故障時間分布を図-6に示す。故障の判定は  $\tan \delta$  変化率が200%となる時間とした。実証実験の結果、寿命は4391hであることがわかった。

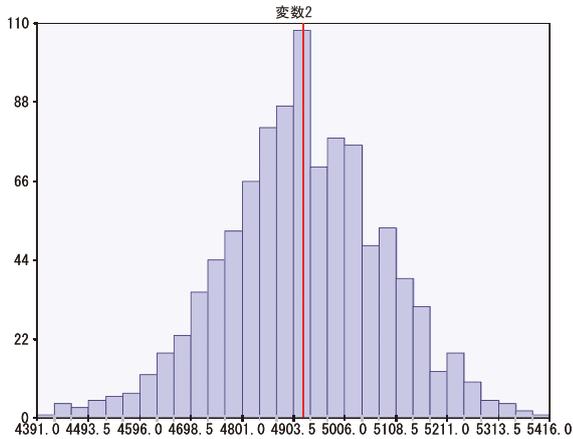


図-6 電解 C の故障分布

表-4 実測結果

項目	値	単位
データ数	1000	個
最小値	4391	h
最大値	5416	h
平均値	4922	h
標準偏差	161	h

確立した寿命推定式に  $N = 200$  個で評価したデータを代入し、得られた推定値と実証実験値を比較した結果、十分目標精度  $\pm 30\%$  を十分満足する結果を得た。またこの試行を大規模に32回繰り返し、予測値と実証値との相関係数を確認したところ0.89の係数を得たため、結果は有意であったと判断した。

推定誤差の評価結果を図-7に示す。サンプル数200個以下、推定誤差  $\pm 30\%$  以内でアルミ電解コンデンサの寿命を推定することができた。

但しこの試行には以下の前提条件に基づくことに注意が必要。

- 電子部品の故障分布がワイブル或いは正規分布、対数正規分布のいずれかであること。

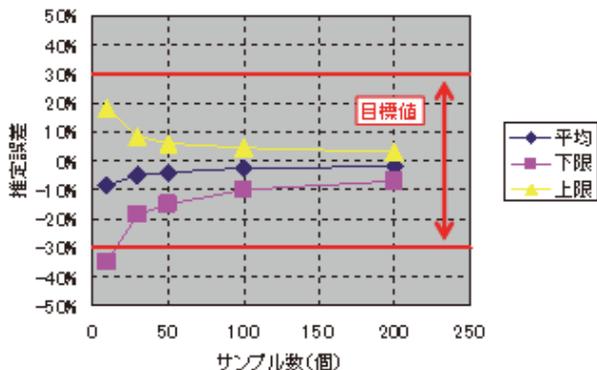


図-7 サンプル数と推定精度

- 寿命評価のデータ種類は完全データを想定した事。
- 寿命評価はロットばらつきを考慮したものであること。

これまでの過程を総括すると低故障率範囲の推定において、お客様の期待寿命に最適な部品を選定すれば、過剰スペックを回避できコストを最適化できると考える(図-8参照)。

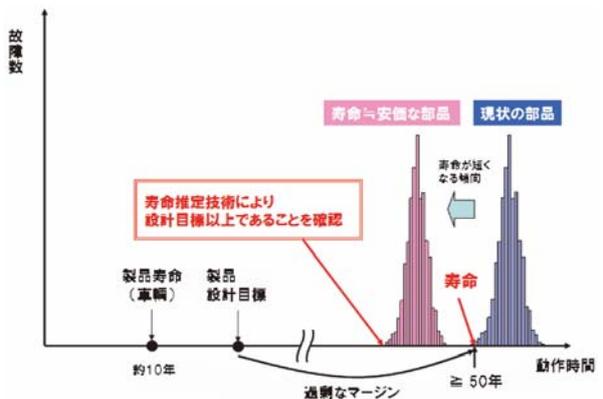


図-8 低コスト化モデル

## 6. 故障メカニズム解析

### 6-1. はんだ接合部

以下に電子部品の代表的な故障メカニズムを説明する。

表-5にはんだ接合部の故障メカニズム一覧表を示す。これよりオープン故障の寿命を把握するためには、はんだ熱衝撃試験にて静的繰り返し応力を印加し、クラックを発生させればよい。

表-5 はんだ接合部の故障モード一覧表

故障モード (結果)	故障メカニズム (原因)	発生頻度	故障時期	加速試験										
				初期	備用	廃耗	高温作動	高温放置	高温高湿作動	温度サイクル	はんだ熱衝撃	結露サイクル	振動耐久	落下衝撃
オープン	クラック	繰り返し応力	静的	◎							○◎			
		応力	動的	○									○	
		瞬時応力		△		○								◎
		クリープ		○		○	△	△						
		その他 (助長因子)	ボイド	○	○									
		リフトオフ	△	○										
		ウィッキング	△	○										
不濡れ	過剰加熱	擬似接触 (チップ立ち)	△	○										
		めっき相性	○	○										
		基板吸湿	△	○										
		部品破壊	過剰加熱 (調食われ)	△	○									
		めっき相性	○	○							◎			
ショート	マイグレーション	フラックス残渣+吸湿	◎					◎	○					
		ウイスカ	内部応力	△					◎	○				
		はんだボール	Sn潤滑	△									○	

繰り返し応力の測定はSn-Ag-Cuはんだの場合、応力と温度によって粗大化、分散していくAg3Sn(金属間化合物)密度が適している。図-9に熱衝撃試験のサイクル数毎のはんだ断面写真を示す。これより応力集中箇所のAg3Sn密度が変化している事が確認できる。

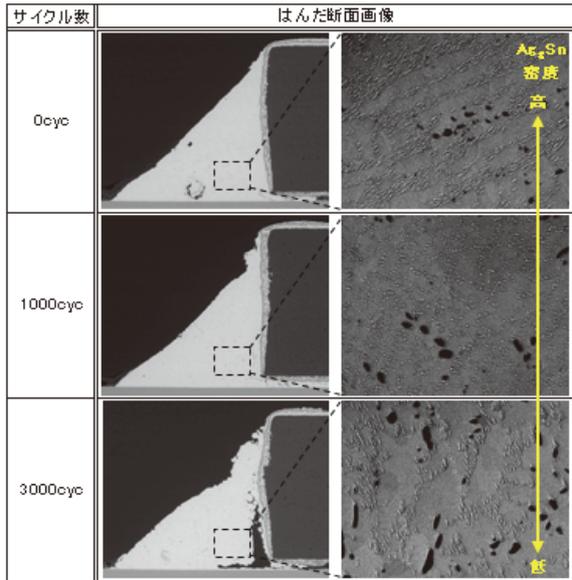


図-9 熱衝撃試験中のはんだ断面写真

6-2. プリント基板

表-6にプリント基板の故障メカニズム一覧表を示す。これよりオープン故障の寿命を把握するためには、はんだ熱衝撃試験にて繰り返し応力を印加し、スルーホール内壁にバレルクラックを発生させればよい。

表-6 プリント基板の故障モード一覧表

故障モード (結果)	故障メカニズム (原因)	発生 頻度	故障 時期	加速試験									
				初期	進展	最終	高温 動作	高温 高湿 動作	温度 サイクル	はんだ 熱衝撃	結露 サイクル	動的 落下 衝撃	
オープン	コーナークラック	繰り返し応力	○	○						○	◎		
	その他	スミア懸留		○									
	バレルクラック	繰り返し応力	◎	○							◎		
	基板破壊	瞬時応力	△	○					○				○
	パターン断線	膨れ・ボイド	△	○						○	◎		
ショート	レジスト中の有機物	めっき条件	△	○									
	レジスト剥離(腐蝕)	めっき条件	△	○									
	吸水	めっき条件	△	○									
	マイグレーション(デンドライト)	レジスト中の有機物	◎	○					◎	○		○	○
腐食	内部応力	Snめっき	△	○					◎	○		○	
	外部応力	コネクタ	△	○					◎	○		○	
	塩化・緑化	コネクタ	△	○					◎	○		○	
	塩化・緑化	塩化・緑化	△	○					◎	○		○	

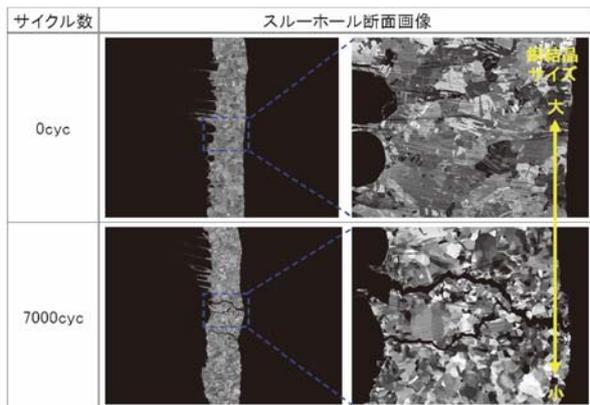


図-10 熱衝撃試験中のスルーホール断面写真

繰り返し応力の測定は、応力と温度によって粗大化していく銅結晶サイズが適している。図-10に熱衝撃試験でのバレルクラック発生前後の銅結晶サイズを示す。これより応力集中箇所の銅結晶サイズが変化している事が確認できる。

7. 今後の進め方

今後低故障率範囲の寿命推定は早期に寿命末期を予測することが可能となるため、今後は開発期間の短縮を視野に入れた技術開発を継続する。

8. まとめ

今回構築した寿命推定技術は前提条件があるものの、低故障率範囲を推定するための新たな切り口になったと考える。今後十分なばらつき検証やN増し検証を重ね推定技術に対する信頼性評価を継続する。

謝辞

本技術開発に関わって頂いた多くの関係者の皆様に深謝致します。

参考文献

- 1) 市田嵩, 鈴木和幸, 信頼性の分布と統計 (1984)
- 2) 立林和夫, 長谷川良子, 手島昌一, 入門 MT システム (2011)
- 3) 鹿沼陽次, 信頼性加速試験の効率的な進め方とその実際 (2006)
- 4) ニチコン(株), アルミ電解コンデンサテクニカルノート (2014)

著者



婦木慎一郎

佐分主税

山田寛之



佐藤 真

伊藤 修

## エアバッグ展開シミュレーションのガス流れの挙動に関する研究

井田 等<sup>\*1</sup>, 青木雅司<sup>\*1</sup>, 浅岡道久<sup>\*1</sup>, 大谷清信<sup>\*2</sup>

## A Study of Gas Flow Behavior in Airbag Deployment Simulation

Hitoshi Ida<sup>\*1</sup>, Masashi Aoki<sup>\*1</sup>, Michihisa Asaoka<sup>\*1</sup>, Kiyonobu Ohtani<sup>\*2</sup>

## 要旨

エアバッグ展開シミュレーションは、開発・設計段階で乗員保護性能を予測する重要な手法として活用されている。エアバッグ展開挙動のキーとなる要素の1つはインフレーターから噴き出るガスの流れ挙動である。この研究ではガスの流れ挙動を把握するため、運転席エアバッグに使われるディスク型インフレーターの大気開放状態におけるガス流れをシュリーレン法を使って可視化実験を実施した。リテーナをつけたインフレーターからのガス流れは強い指向性を持つことがわかった。そして、そのガス流れ挙動を汎用解析ソフトLS-DYNAによるシミュレーションを試み、良い再現性を得ることができた。再現のためには、ガスが噴き出る方向とガスが拡散する角度のコーン角が重要であることがわかった。次に運転席エアバッグの展開挙動について、実験とシミュレーションを比較し、ガスの流れが展開挙動に及ぼす影響を分析した。

## Abstract

Airbag deployment simulations have been utilized as an important technique to predict occupant protection performance in development and design stages. One of key elements of the airbag deployment behavior is gas flow behavior of jets from inflator. In this study, in order to understand the gas flow behavior of disk type inflator for driver side airbags, visualization experiments were conducted using the schlieren method. The gas flow from the inflator with a retainer has been found to have a strong directivity. Then, the gas flow simulations were conducted with a general purpose finite element program, LS-DYNA, it was possible to obtain good reproducibilities. For reproduction, it was found that jet direction and cone angle of gas diffusion were essential elements. Furthermore, comparison between simulations and experiments were conducted for deployment behavior of driver side airbags, the effect of the gas flow on deployment behavior was analyzed. It was found from the results that the reproduction of the gas flow from inflator was a major factor for reproduction on deployment behavior of driver side airbags.

## 1. はじめに

エアバッグ展開シミュレーションは、乗員保護性能の重要かつ効率的な評価技術の一つである。最初に開発された手法は、インフレーターから噴き出る混合ガスの出力特性と状態方程式によって得られた圧力をエアバッグ内側全体にかける均一圧法であった。この均一圧法は展開した状態のエアバッグのエネルギー吸収特性を評価することが可能で、主に機構解析と組み合わせて乗員拘束解析に用いられてきた。<sup>1)</sup>

しかし均一圧法ではインフレーターから噴き出るガスの流れを考慮していないため、展開途中のエアバッグの挙動やエネルギー吸収を正確に求めることができないという問題があった。その問題を解決するための手法として、ガスの流れを考慮する流体-構造連成のALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 法が導入されてきた。<sup>2)</sup>

このALE法をエアバッグ展開解析に適用した場合、折りたたまれたエアバッグの挙動を表現するには、膨大な計算資源とコストが必要であり実用性に問題があった。<sup>3)</sup>

その問題を克服するため汎用解析プログラムLS-DYNAでは、新たにエアバッグ内のガスの流れを粒子の運動に置き換えたCPM (Corpuscular Particle Method) が実装された。CPMではガス

\*1 実験部 開発実験室

\*2 東北大学 流体科学研究所

を連続体として扱わず、気体分子運動論に基づきながら、気体分子を全てモデル化するかわりに、全体の並進運動エネルギーが等価になるように一定数の粒子に置き換えている。<sup>4), 5)</sup>

この機能ではALE法のように流体が存在する空間を離散化する必要がないため、利用可能な計算機資源と実用的な計算時間で展開シミュレーションをできるようになってきた。カーテンエアバッグのようにチューブ状に規制された流路をガスが流れる場合、実機の展開挙動とインパクトの荷重-変位特性をシミュレーションで評価できるため、エアバッグの製品開発に用いられている<sup>6)</sup>。しかし、運転席エアバッグのように比較的広い空間にガスが放出される場合は、展開挙動において実現象とシミュレーション結果に差異が生じる事があった。そこで我々は、エアバッグ内のガスの流れに注目し、インフレーターからのガス流れをシュリーレン法で可視化することを試みた。これまでの研究では、インフレーター内部のガスの流れを観察した事例はあったが、インフレーターから噴き出るガスの流れを可視化して、展開挙動との関連について言及されたことはほとんどなかった。<sup>7)</sup>

本稿ではインフレーターから噴き出るガス流れを可視化する実験を実施し、解析プログラムLS-DYNAのCPMでガスの流れを再現することを行った。そして、その検討結果を運転席エアバッグに適用し、展開挙動を再現することを試みた。

## 2. 方法

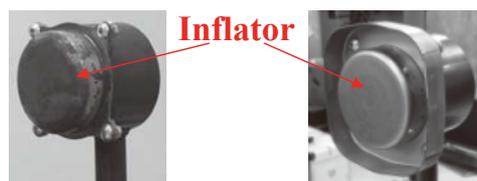
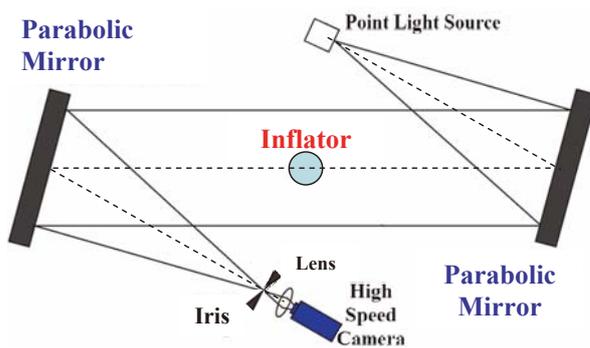
### 2-1. ガス流れの可視化実験

インフレーターから噴き出るガスの流れ挙動を把握するため、開かれた大気空間でシュリーレン法による可視化実験を行った。インフレーターから出るガスには二酸化炭素、窒素および水蒸気などが含まれるが、これらは無色の気体であるためガスの流れを明確に視認しにくい。インフレーターのガスの流れを観察する方法としては、従来、粉体などの微粒子をガスに混ぜてそのマーカー粒子の流れを観察するPIV (Particle Image Velocimetry) 法があった。<sup>8)</sup>

この方法では局所的な流速を計測することはできても、ガス全体は直接視認できないという課題があった。よって本研究では開放空間におけるインフレーターのガスの流れを直接観察するためにシュリーレン法を選択した。シュリーレン法とは光の屈折率の違いを利用して気体の流れを光学的に観測する方法であり、爆薬や航空機の衝撃波の可視化に用いられている。<sup>9), 10)</sup>

今回の実験装置の構成を図-1に示す。点光源からの光を凹面鏡に反射させて平行光線をつくり、その中で被写体であるインフレーターからガスを噴出させる。その光線を再び凹面鏡により集光する。屈折率の違いにより焦点のずれた光を虹彩紋りにより除去することで、明暗の差として得られる映像を高速カメラで記録する。シュリーレン法では一般に焦点のずれた光をナイフエッジで除去するが、今回は虹彩紋りによって除去することで、インフレーター中心から拡散するガスをより鮮明にとらえるようにした。また、インフレーターガスの挙動をエアバッグ展開範囲と同等以上の範囲で撮影するため、平行光線を作る凹面鏡は直径1m、焦点距離8mという世界最大級のものをを用いた。この装置はトロンボーン演奏時に発生する3kPa程度の圧力変動さえ可視化できる解像度を持つ。<sup>11)</sup>

この装置を用いて運転席エアバッグのインフレーターのガスの流れを、インフレーター単体の場合とインフレーターにリテーナを装着した場合の2条件で可視化を行い、ガスの流れを比較した。



Without retainer

With retainer



Parabolic Mirror

(Diameter: 1m, Focal Length: 8m)

図-1 シュリーレン法によるガス可視化装置  
(東北大学流体科学研究所)

## 2-2. インフレータのガス流れシミュレーション

解析プログラム LS-DYNA の CPM を使い、可視化実験によって確認したインフレータからのガスの流れをリテーナの有無で再現することを試みた。

インフレータのガス温度とマスフローレートはタンク圧試験結果を再現するように同定した。

そして各種パラメータを組み合わせて検討することで、実機のガス流れを再現できるシミュレーション条件の検討を行った。検討した CPM のパラメータを表-1 に示す。

表-1 シミュレーション (CPM) パラメータ

No.	Parameter	Without retainer	With retainer
1	Initial direction of gas flow	Radial	Radial / Axial
2	Cone angle at orifices	Inactive / 16°/25°	Inactive / 0.1~25°
3	Friction factor	0 (default)	0 ~ -0.2
4	Dynamic scaling of particle	Inactive / Active	Inactive / Active
5	Initial gas inside airbag	CV method / Particle	CV method / Particle
6	Number of orifices	16	16 / 4
7	Treatment of gas components	Mixed / Multiple	Mixed / Multiple

## 2-3. 運転席エアバッグの展開実験

運転席エアバッグ展開実験を行い、インフレータおよびリテーナからのガスの流れがエアバッグ展開に及ぼす影響を確認した。その実験装置、展開挙動を図-2 に示す。

ガスの流れがエアバッグの展開に与える影響を確認するため、テザーのないエアバッグを折りたたまない状態で設置した。

また、エアバッグを固定する治具には荷重計を取付け、取付け点に生じるエアバッグ展開荷重を実験とシミュレーションで比較できるようにした。

## 2-4. 運転席エアバッグの展開シミュレーション

図-2 の運転席エアバッグの展開実験をシミュレーションにて再現し、実験との比較を行った。エアバッグ基布材料の機械的特性である引張特性とせん断特性は、それぞれ引張試験とピクチャーフレーム試験により求めた。

CPM のパラメータはインフレータのガス流れシミュレーションにおいて効果のあった値を使用し、開放空間におけるガスの流れを再現することがエアバッグの展開に与える効果を確認した。

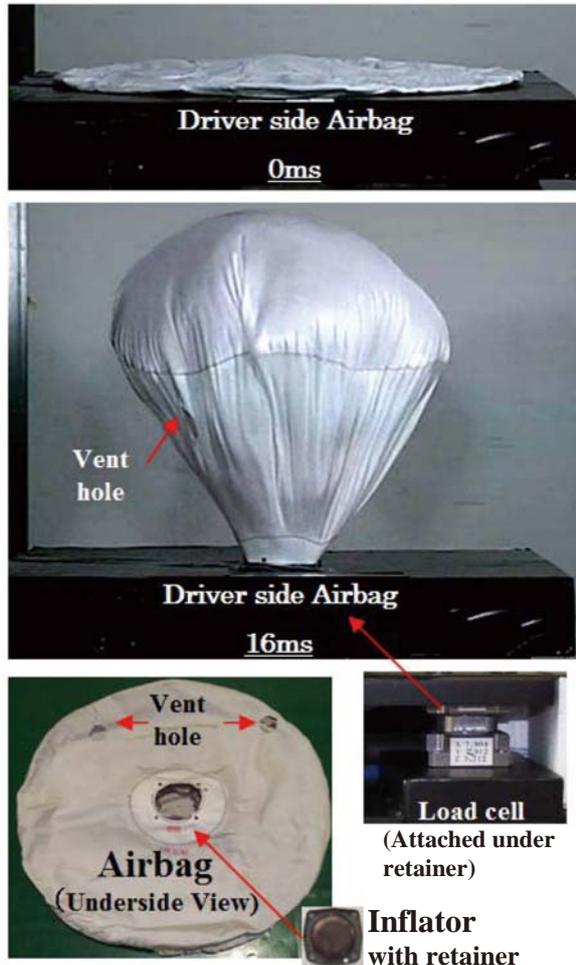


図-2 エアバッグ展開実験装置

## 3. 結果

### 3-1. ガス流れの可視化実験とシミュレーション

本実験にてガスの流れの様子が影となって明確に視認することができた。その結果を図-3 に示す。インフレータのガスは周囲の大気と比べ、高温、高圧であるため大きな屈折率の違いを生じ、図-3 のように暗い像として撮影され視認可能となった。

この可視化結果では、リテーナの有無によって流れに明確な差があることが観測された。リテーナがない場合は、インフレータの噴出孔に対して垂直にガスが出ていることが観察された。また、インフレータの噴出孔は円筒の側面に等間隔で配置されているので、インフレータの周囲から放射状にガスが噴き出して円盤状に拡散していくことが観測された。

一方、リテーナを装着するとリテーナの壁面に沿った流れに変化していることが観測された。さらにリテーナによって向きを変えたガスの流れはリテーナから出てもすぐに拡散しなかった(図-4)。

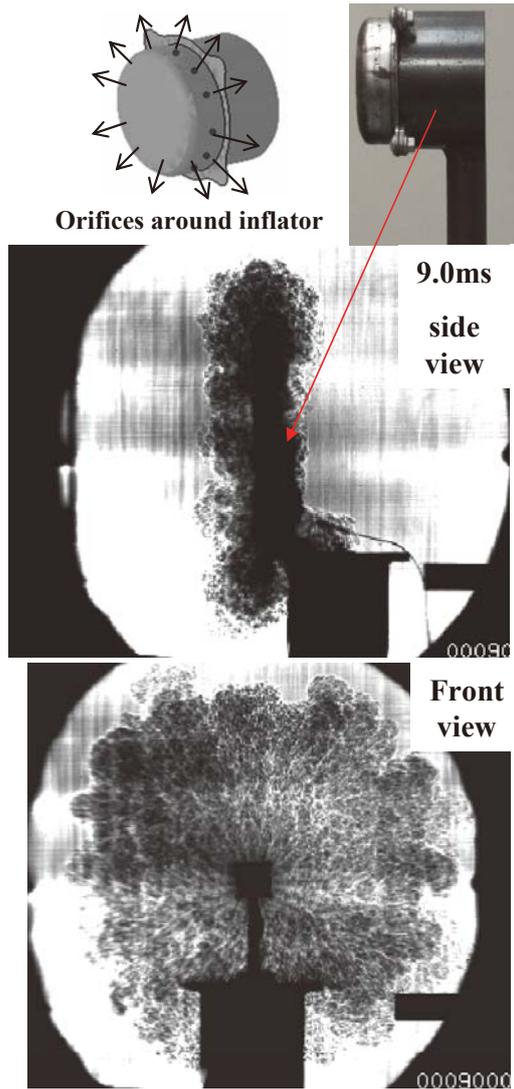


図-3 インフレーターガス可視化実験映像 (リテーナなし)

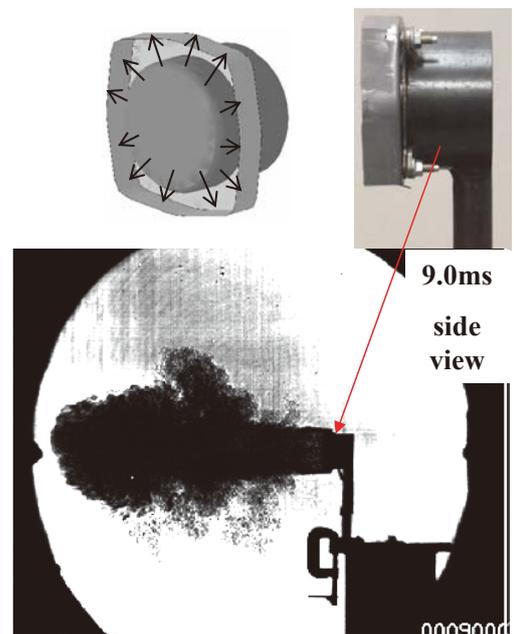


図-4 インフレーターガス可視化実験映像 (リテーナあり)

CPMによるシミュレーションで、表-1の各パラメータを検討し、実験相当のガス流れの挙動を再現する設定を見出した。

リテーナなしの条件では、インフレータの噴出孔にコーン角を設定することで、図-5のBに示すように、一定の方向と拡散角度を形成し、円盤状に拡散する傾向を再現することができた。

コーン角を設定しない場合、噴出孔から出たガスは一定の方向と拡散角度を形成せず、ランダムに拡散する傾向が見られた(図-5A)。

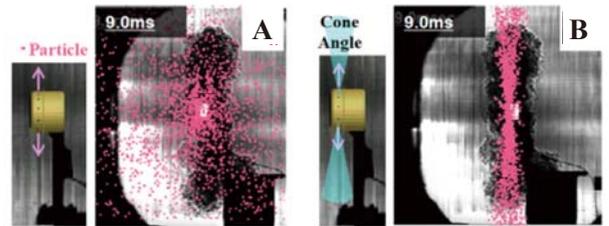


図-5 インフレーターガスシミュレーション結果 (リテーナなし)

リテーナを装着した条件では、ガスの噴き出し方向をインフレータの中心軸方向に設定し、さらにコーン角を設定することで、図-6のFに示すように実験相当の流れを再現することができた。

インフレーター噴出孔にラジアル方向の噴き出し設定をした場合、図-6のCのようにリテーナから出たガスはランダムに拡散した。

リテーナなしの条件で効果のあったコーン角を設定しても効果がなかった(図-6D)。

リテーナ壁面に衝突する粒子の反射角度を大きくする設定を行ったが、改善効果は見られなかった。

ガスの噴き出し方向をリテーナ壁面に沿って、インフレータの中心軸方向に設定したところ、図6-Eに示すように拡散範囲はわずかに狭まった。

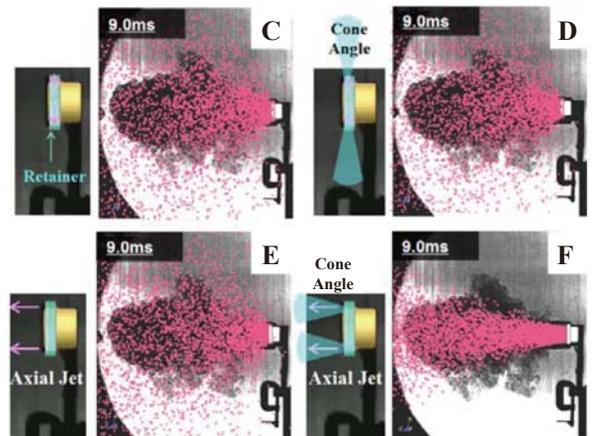


図-6 インフレーターガスシミュレーション結果 (リテーナあり)

表-1のパラメータのうち、No.3~7はほとんど影響がなかった。

### 3-2. 運転席エアバッグの展開実験とシミュレーション

運転席エアバッグ展開シミュレーションの再現性を実験との比較により評価した。

インフレーター噴出孔にラジアル方向の噴き出し設定をした図-6のCの設定と、ガス流れを再現した図-6のFの設定を運転席エアバッグ展開シミュレーションに適用した。その両者の結果と実験との比較を図-7に示す。

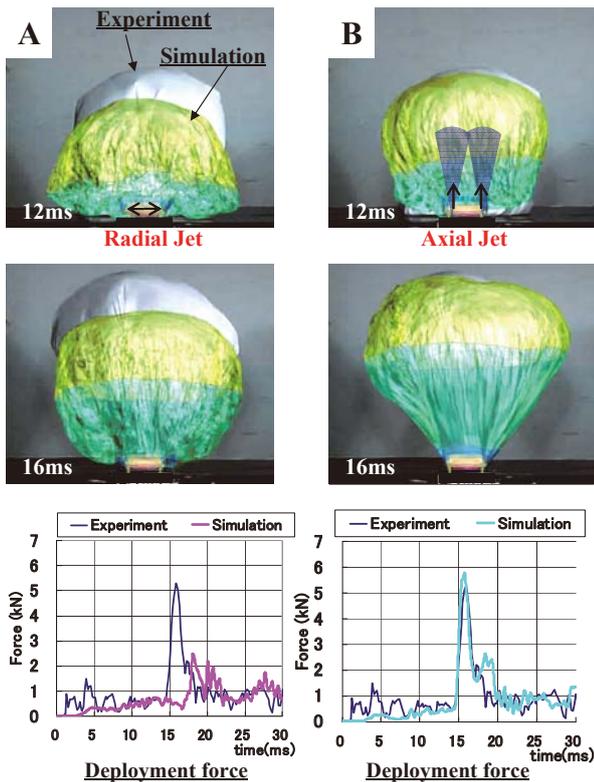


図-7 実験とシミュレーションのエアバッグ展開および展開荷重の比較  
(左:ラジアル方向、右:垂直方向にコーン角設定)

インフレーター噴出孔にラジアル方向の噴き出しを設定した場合、図-7のAに示すように展開が実験に対して遅れ、取付け部への展開荷重が実機の半分程度しか発生しなかった。

一方、リテーナ壁面に沿ってインフレーターに対して垂直な噴き出し方向とコーン角を設定した場合、図-7のBに示すように、展開時間、展開荷重ともにほぼ実機を再現することができた。

### 4. 考察

実験とシミュレーションの比較結果によると、CPMでは粒子が比較的広い空間に出ると、各粒子のランダムな動きが支配的になり、ガス流れの挙動を十分に再現できなくなると考えられる。

実機でインフレーター内から噴出孔を通して出るガスは、噴出孔に対して垂直な方向に出る。これは、閉空間内の圧力は壁面に垂直な向きに生じるためと考える。

実機でリテーナを介してガスが噴き出する場合、リテーナとインフレーターを一つのガス発生源と考え、リテーナの開放面がガス噴出孔となり、噴出孔に対して垂直にガスが出ていると考えられる。

CPMでガスの流れを再現するには、ガスの噴き出し方向の設定と、ランダムに拡散することを抑制するコーン角の設定を併用する必要があると考えられる。

### 5. まとめ

インフレーターから噴き出るガスの流れの可視化実験、運転席エアバッグ展開実験およびそれぞれのシミュレーションを実施した結果、以下の知見を得た。

- ・リテーナがない状態でインフレーターから開放空間に噴き出るガスは、噴出孔より垂直に出る。
- ・インフレーターにリテーナが装着すると、リテーナの壁面に沿った流れが生じ、インフレーターの中心軸方向の流れとなる。
- ・インフレーターから開放空間に噴き出るガスの流れをCPMによるシミュレーションで再現するには、噴き出し位置にコーン角を設定する必要がある。
- ・リテーナを介した流れをCPMで再現する場合、インフレーターとリテーナを一つのガス発生源と考え、リテーナの開放面に垂直な噴き出し方向を設定し、コーン角を設定する必要がある。
- ・閉空間でのガス流れを再現した設定を運転席エアバッグの展開シミュレーションに適用することで、挙動と荷重特性がより実機に近づくことがわかった。

### 謝辞

本研究の可視化実験を行うにあたって、東北大学高山和喜名誉教授より貴重なご指導、ご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Wang, J. T., & Nefske, D. J. (1988). A new CAL3D airbag inflation model.SAE Technical Paper 880654.
- 2) Fokin, D., Lokhande, N., & Fredriksson, L. (2003) . On airbag simulation in LS-DYNA with the use of the Arbitrary Lagrangian-Eulerian method. 4th European LS-DYNA Users Conference.
- 3) Zhang, N., Shi, L., & Tzeng, B. (2006). Issues on Gas-Fabric interaction in airbag simulation using LS-DYNA ALE.9th International LS-DYNA Conference.
- 4) Olovsson, L. (2007). *Corpuscular method for airbag deployment simulations in LS-DYNA* (Report R32S-1) .Huddinge, Sweden: Impetus AfeaAB.
- 5) Feng, B., & Coleman, D. (2008). Gas dynamics simulation of curtain airbag deployment through interior trims. 10th International LS-DYNA Conference.
- 6) Sugaya, H., Imura, K., & Mae, H. (2014). Development of Side Curtain Airbag Deployment Simulation Technology Using CPM. *Honda R&D Technical Review*, Vol.26, No.1.
- 7) Kratz, H., Pührer,C., Takazono, K., & Yano, K. (2008). Shockwave characterisation, parameter studies and visualization for a cold gas curtain inflator. *Airbag2008*.
- 8) Lee, J. S., Jang, G. Y., Kim, S., & Kim, S, C. (2006). Dynamic PIV measurement of a compressible flow issuing from an airbag inflator nozzle. *Journal of Thermal Science*, Vol.15, No.4, pp. 377-381.
- 9) Mizukaki, T., Miura, A., & Takayama, K. (2004). Experimental simulation of large-scale explosion using a micro-charge explosion (1) - Behavior of shock waves in a complicated closed-space -. *Science and Technology of Energetic Materials*, Vol.65, No.5, pp.180-188
- 10) Ukai, T., Ohtani, K., & Obayashi, S. (2015). Validation of measurement accuracy for near-field pressure around supersonic projectiles in a ballistic range. *Measurement, Journal of the International Measurement Confederation*, Vol.67, pp. 24-33.
- 11) Takayama, K., Ohtani, T., Ogawa, T., Kikuchi, T., Takayama, R.,&Takahashi, T. (2011). Visualization of weak shock waves emitted from trombone. *The Journal of the Acoustical Society of America 2011*. doi:10.1121/1.3588692

## 著者



井田 等



青木雅司



浅岡道久



大谷清信

## 電源カットデバイス

中村祥宜<sup>\*1</sup>，福山岳樹<sup>\*2</sup>，堀 啓介<sup>\*1</sup>

### Pyrotechnical Circuit Breaker for Electric Vehicle

Yoshiki Nakamura<sup>\*1</sup>，Takaki Fukuyama<sup>\*2</sup>，Keisuke Hori<sup>\*1</sup>

#### 1. はじめに

近年、ハイブリッド車をはじめとする電動車両の普及に伴い、高電圧部品の電気安全性の向上が求められている。特に衝突時の感電保護については米国法規 FMVSS No.305 を筆頭に今後も厳しくなっていくことが予想される。

一般に、衝突時の感電保護対応としては、高電圧回路中に搭載された電磁リレー等で強制的に電気遮断することが多い。しかしながら、電磁リレーは遮断に比較的時間がかかり、特に衝突時にはより高速に遮断したいというニーズがある。

我々は、エアバッグに使用されている火薬を用いて、その爆圧によって高電圧部のバスバーを高速に切断する遮断装置を開発しており、本稿ではその一部を紹介する。

#### 2. 製品コンセプト

開発品のコンセプト形状を図-1に示す。構成は、イニシエータとよばれるエアバッグ点火用火薬、樹脂製の矢じり、受け刃、筐体、バスバーから成る。異常時に車両から着火信号をうけると

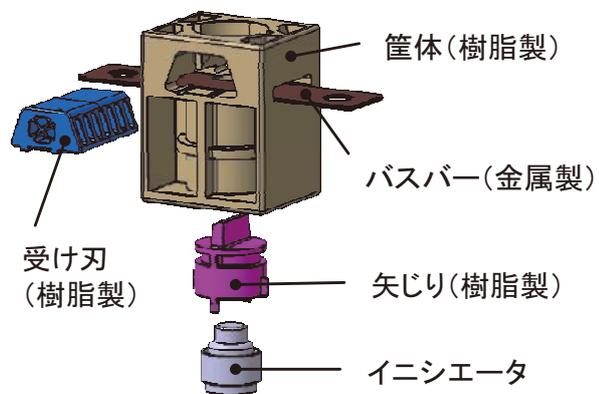


図-1 製品構成

即座にイニシエータが爆発し、その爆圧によって急加速した矢じりは、受け刃との間でバスバーをせん断的に圧縮・切断することで回路をオープンにする。製品設計上の主要な要素技術は下記の2点となる。

- 1) 安定的にバスバーを切断する構造設計
- 2) バスバー切断後のアーク消弧技術

#### 3. 要素技術の概要

##### 3-1. バスバー切断技術

バスバーに使用される金属材料は純銅が多く、引張り伸びが大きいことが特徴である。安定的に純銅を切断しようとする、引張モードよりもせん断モードを主とするような切断方式が適している。例えるなら、バスバーを引張りで引きちぎるよりも、はさみのように切ったほうが切断にかかるエネルギーが小さく、切断後の形状の再現性が高い。開発品では矢じりと受け刃ではさみの構造をつくり、両刃間のクリアランスを検討し、切断構造の最適化を実施した(図-2)。

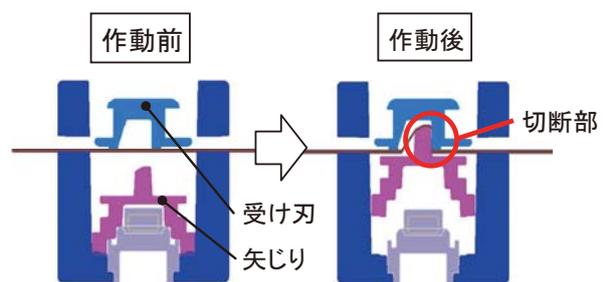


図-2 切断の模式図

##### 3-2. アーク消弧技術

高電圧回路を通電中に回路切断すると切断点間にアーク放電が生じる(図-3)。アークが継続すると周辺の金属・樹脂部品は溶融、気化し、最終的には発火に至るため、消弧技術を確実に盛り込む必要がある。

切断されたバスバー間のアークを消弧するには、過渡的に電源電圧よりアーク電圧を高くする

\*1 商品開発部 ユニット開発室

\*2 IE・SS 開発部 SS 開発室

ことが効果的である。一般には切断点間の距離を大きくとることが有効だが、車載向け製品では小型化が必須であるため、アークの通り道に細狭部を併設する方式を採用した。また、アブレーション効果といわれる、アーク放電によって樹脂が分解した際に発生するガスによる冷却効果も見込んでいる。これにより小型化とアーク電圧の向上を両立することができた。

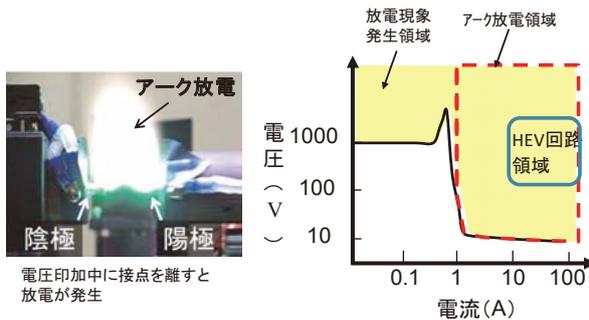


図-3 アーク放電の発生領域<sup>1)</sup>

#### 4. 性能評価結果

ハイブリッド車の電池領域を想定した回路にて(200V, 134A), 試作品の遮断試験を実施した。遮断グラフを図-4に示す。火薬の着荷信号を受けてから約0.3msecで火薬が発破し、0.7msec後にバスバーが切断され、1.7msec後にアーク消弧が完了している。この遮断時間は一般的な電磁リレーの1/2~1/10程度であり、高速遮断性能を確認することができた。

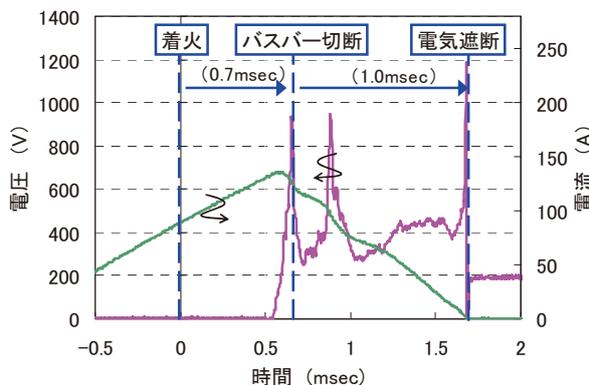


図-4 電気遮断波形

開発品の性能諸元を表-1に示す。遮断最大電圧は310Vでほとんどのハイブリッド車の電源電圧をカバーできる。

その他の特徴として、開発品はHV車回路のバ

スパーにぶら下げる形で搭載するため、回路抵抗を増加させることがなく、寄生インダクタンスの増加もほとんどない。そのため、燃費を悪化させずに安全性を向上させることができる。

表-1 開発品の主要性能

項目	特性	
遮断性能	最大遮断性能	310V×450A (0.24mH時)、600V×10A (0mH時)
	遮断時間	1.7msec (検討時の実測値)
環境特性	使用温度	120℃、-30℃環境下で電気遮断可 <sup>※)</sup>
	高温劣化	120℃×400H後に電気遮断可 <sup>※)</sup>
	高温高湿劣化	80℃×95%RH×400H後に電気遮断可 <sup>※)</sup>
	熱衝撃	105℃⇔-40℃×350cyc.後に電気遮断可 <sup>※)</sup>

※) 200V×134A×2mH条件にて遮断試験実施

#### 5. おわりに

車載向け回路遮断装置には電磁リレー以外にもヒューズや半導体スイッチなどが使用されており、車両の遮断要求に応じて用途が決められている。開発品は特に上記では達成しにくい衝突時や異常故障時の高速遮断に特化した性能を有しており、今後も、さらなる高電圧化への対応技術など、市場やお客様のニーズを捉えて開発を進めていく所存である。

最後に、本開発においてご支援、ご指導をいただいた静岡大学の関川准教授をはじめ、関係者の方々に厚く謝意を申し上げます。

#### 参考文献

- 高木相, 電気接点のアーク放電現象, コロナ社 (1995) p72

#### 著者



中村祥宜

福山岳樹

堀 啓介

## ブレーキホース用口金のシート面検査技術

宮地修平<sup>\*1</sup>，鯛 直樹<sup>\*2</sup>，長嶋千恵<sup>\*3</sup>

### Inspection Technology for Sheet Surface of Brake Hose Fitting

Shuhei Miyachi<sup>\*1</sup>，Naoki Tai<sup>\*2</sup>，Chie Nagashima<sup>\*3</sup>

#### 1. はじめに

ブレーキホースは柔軟性を持つホースと、相手部品と連結する口金で構成される（図-1）。口金はシート面と呼ばれる円錐状の接続部を持ち（図-2）、ブレーキキャリパー側の相手部品をねじの締め込みによって押し当てて連結される。シート面に微小な傷や異物が存在していると、ブレーキオイルが漏れ、ブレーキが効かなくなる恐れがあるため、欠陥品はすべて取り除かれなくてはならない。これまでこれらの検査は、熟練された検査員による目視検査により品質が確保されてきた。しかし、今後は熟練された検査員の確保が困難になるとともに、製品の低コスト化が求められているため、これらの課題を解決するためのアイテムとして、目視検査の自動化が必要である。

これまでにブレーキホース口金の表面部に発生した傷検出に関する報告例<sup>1)</sup>や、長嶋らによる金属円筒部品内壁面検査の報告<sup>2)</sup>例はあるが、シート面に関する報告例は見当たらない。

今回検査の自動化を目標として、シート面の傷や異物を感度良く撮像する、新しい検査技術を開発したので報告する。

#### 2. 検査対象製品

図-1に検査対象のブレーキホースの構成を、図-2に口金の構造を示す。ホースと口金のかしめにより締結される。口金は金属製で表面に防錆めっき処理が施され、中心部にブレーキオイルが流れる孔がある。シート面は梨地状となっている。

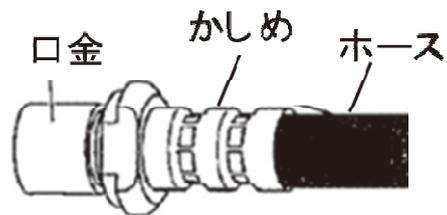


図-1 ブレーキホースの構成

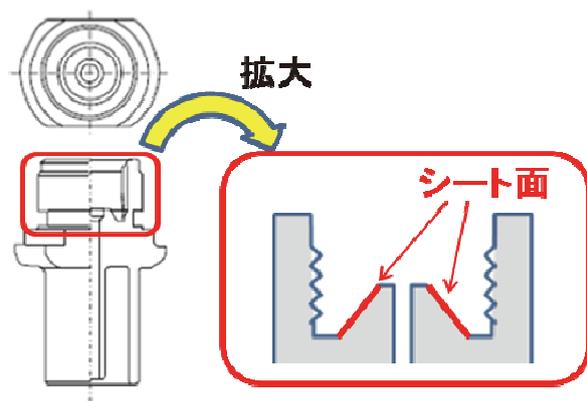


図-2 口金の構造

\*1 生産技術部 第1生技開発室

\*2 FC生産準備部 FC第3生技室

\*3 株式会社豊田中央研究所 材料・プロセス1部 計測・解析研究室

### 3. 照明方法の検討

一般的な光源で、めねじの奥に存在するシート面の異物を撮像すると、**図-3**のようになる。異物部分のコントラストが弱く検出できない。

傷や異物による凹凸を検出するためには、浅い角度で照明を行うことで表面の凹凸を際立たせることが有効と考えた。

シート面は、**図-4**で示すように、浅い角度の照明を一般的な光源を使用して実現しようとする。そこで、口金の中心部にある孔に着目した。シート面に対して浅い角度での照明を行うために、**図-5**に示すように、この孔の反対側に光源を置き、孔を通過した光をシート面上部に配置した円錐ミラー（**図-6**）で反射させる照明方法を考案した。この照明方法によってシート面の異物を撮像した結果、**図-7**に示すように異物が強調されていることが確認できた（その他の照明撮像系の仕様については**表-1**にまとめた）。

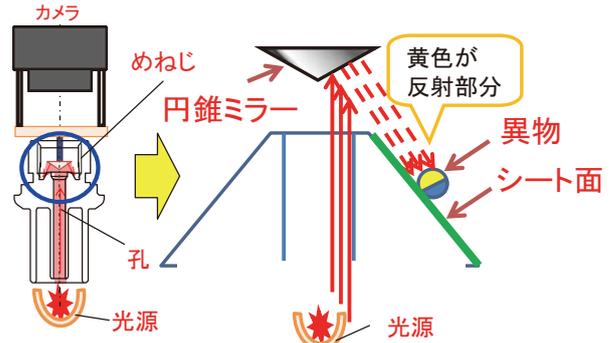


図-5 シート面に平行光を具現化する創案



図-6 円錐ミラー

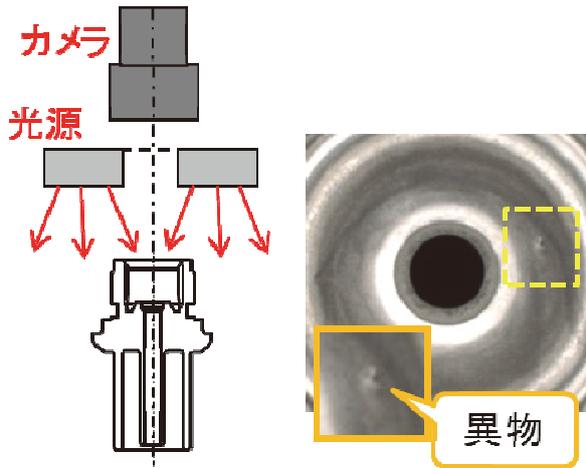


図-3 一般的な光源による異物撮像

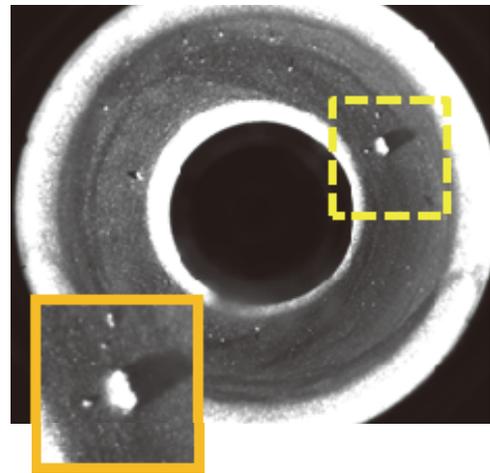


図-7 開発した照明方法による異物撮像

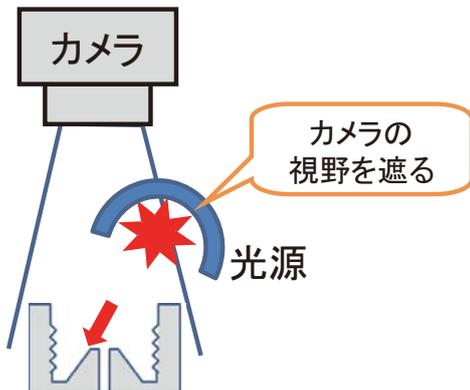


図-4 一般的な光源での問題点

表-1 照明撮像系の主な仕様

画素数	1280×1024画素
視野サイズ	13.6×10.8 mm
カメラレンズ	テレセン ×0.5
照明波長	650nm
円錐ミラー径	φ 3.5mm

#### 4. 検査アルゴリズム

得られた撮像の詳細を観察すると、シート面全体では面の角度が異なる内縁部・外縁部が明るく、円周方向にも多少のムラが生じている。しきい値処理により欠陥の検出を行う上で、この影響を排除する必要がある。そこで、ムラを除く効果のあるシェーディング補正（図-8）を行い、撮像全体を同じ明るさに補正したのち、しきい値処理によって欠陥を検出するアルゴリズムを考案した。図-9に欠陥の検出例を示す。

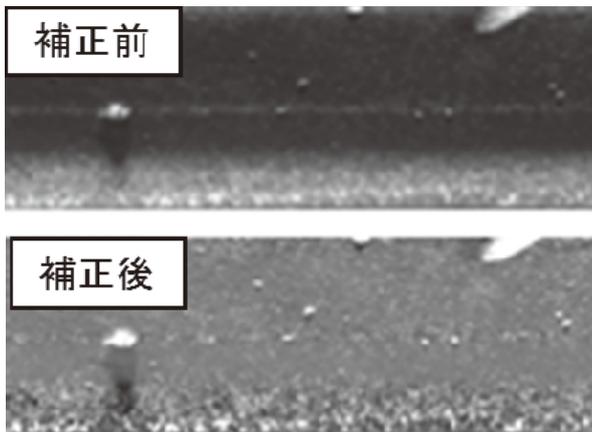


図-8 シェーディング補正の結果

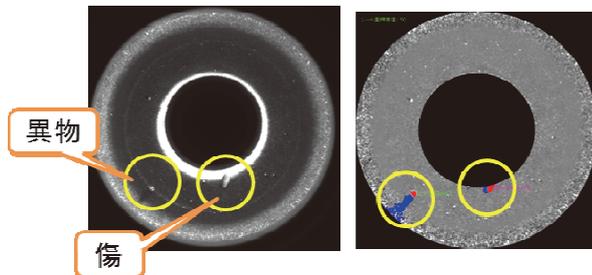


図-9 しきい値処理を用いた欠陥検出例

#### 5. 評価実験

考案した撮像系、検査アルゴリズムの有効性を確認するために評価実験を行った。実験では、目視検査により検出された欠陥のサイズを顕微鏡により測定してサンプルとした。このサンプルを撮像した画像に対して検査アルゴリズムにより欠陥の検出とそのサイズ測定を行った。図-10に、評価実験結果を示す。横軸が真値、縦軸が計測値である。目視検査により検出された欠陥のサイズと相関の高い計測結果が得られている。

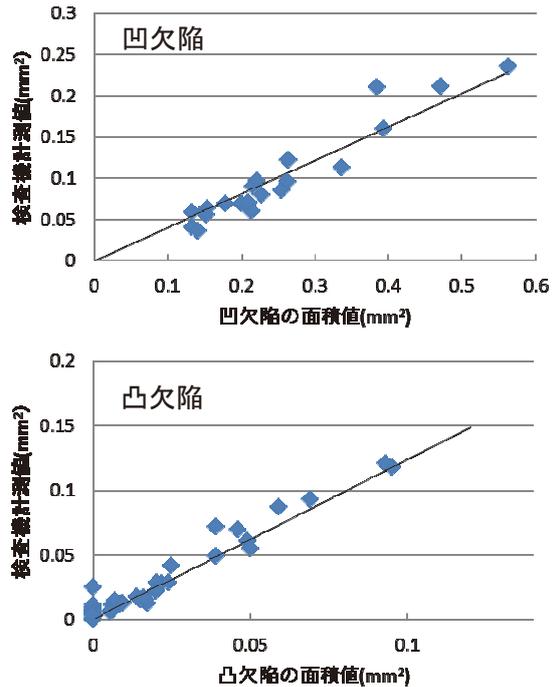


図-10 評価実験結果

#### 6. おわりに

口金シート面の自動検査を実現するための小型円錐ミラーを用いた照明方法と検査アルゴリズムを考案した。評価実験の結果、従来の目視検査と同等の検査性能を有することが確認できた。

最後に、ご協力いただきました豊田中央研究所の関係者、関係部署の皆様には厚く謝意を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 包躍, 小屋: ブロック分割による輝度情報を用いた金属部品表面のキズ検出, 計測助同制御学会産業論文集, vol.9, no.15, pp.108-114, 2010
- 2) 長嶋, 青木, 塚田, 三和田, 輿水: 内視鏡型センシングと気付きアルゴリズムによる自動車部品検査方式, ViEW2014, OS1-02, 2014

#### 著者



宮地修平

鯛直樹

長嶋千恵

## 漆黒めっき技術

仲谷幸司<sup>\*1</sup>, 堀田祐志<sup>\*1</sup>, 丸岡洋介<sup>\*2</sup>

### Jet Black Plating Technology

Koji Nakatani<sup>\*1</sup>, Yuji Hotta<sup>\*1</sup>, Yosuke Maruoka<sup>\*2</sup>

#### 1. はじめに

昨今の自動車デザインニーズとして、高級感やスポーティ感などの車両イメージを表現する加飾や、グレードマネジメント戦略に用いる差別化加飾など、加飾の多用化が求められている。特にスポーティ感を付与するため、ダークめっきよりさらに黒味を持たせためっきのニーズが高まっている。

しかし、黒いめっきはその黒味を表現するために多量の添加剤を必要とするため耐食性が低下する問題があり、そのため通常の6価クロムめっきにスモーク塗装を施した擬似ブラックめっきが採用されていた。しかしながら外装製品として用いる場合、めっき上スモーク塗装では走行中の飛石による塗膜の剥がれによる意匠低下や、塗装による面精度不足（ゆず肌）や金属の本物感には近づけない等、カーメーカーのデザイン要望に答えられていなかった。

このため、豊田合成ではめっきそのもので黒味を持たせる漆黒めっき技術の開発を行った。

#### 2. 漆黒感と金属感の両立の追求

従来漆黒というものは図-1<sup>1)</sup>に示す茶碗のような深みをもつ黒である。しかしながら茶碗のような黒味では艶が無く金属感を表現することができない。そのため、図-2<sup>2)</sup>のようなハマタイトもつ金属感の黒味と光沢感の両立を目指した。今回開発した漆黒めっきの目標値としては図-3に示す色座標で従来ダーククロムめっきのL値=65に対し、目標L値=50とし、a値、b値は5以下にすることで漆黒感と金属感を両立させる色調とした。



図-1 瀬戸黒茶碗



図-2 ハマタイト

【L値、a値、b値】色座標を表し、L値は色の明度（0は黒、100は白）、a値は赤と緑（a\*、負の値は緑、正の値は赤）、b値は黄と青（b\*、負の値は青、正の値は黄）となる。

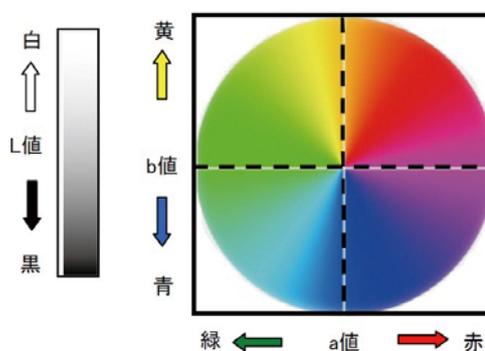


図-3 L,a,b色座標

#### 3. 手法の選定

自動車のめっきグリルはABS樹脂上に銅めっき、ニッケルめっき、クロムめっきの3層構造で作製される（図-4）。装飾樹脂めっきの耐食性はめっき表面のマイクロポーラスもしくはマイクロクラックによって、クロム層下部のニッケル層を優先して腐食させるメカニズム（犠牲防食）で耐食性を維持しており、各層の膜厚や電位差が耐食性能に影響を及ぼす。また最外層のクロムはめっきの外観を表現する重要なファクターであるため、この最外層クロムの組成に耐食性低下に繋がることのない成分を添加し黒色化を目指した。

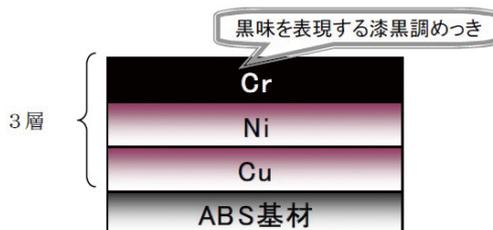


図-4 めっき製品の層構成

#### 4. めっき液開発

従来技術のダークめっきでは、黒色光沢外観を発現するために、めっき薬液組成として、3価ク

\*1 材料技術部 材料開発室

\*2 IE・SS開発部 IE開発室

ロムイオン溶液にチオシアン酸塩等の化合物を添加して、めっき電析時にクロム原子と同時に硫黄原子を皮膜中に取り込ませ、クロム金属皮膜中に黒色のクロム硫化物 (CrS) を供析させることで目的の色調を発現している (図-5)。

しかしながら、供析するクロム硫化物量は限られており、黒味に限度があった。

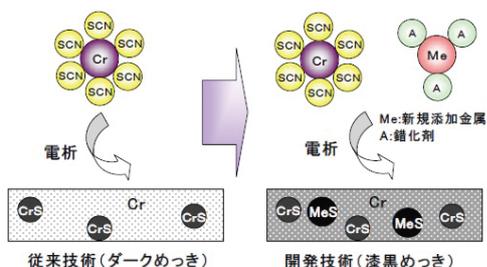


図-5 従来品と開発品の電析イメージ

本開発では、より黒味を表現できるめっき皮膜外観を得るために、めっき薬液組成の改良を実施した。

金属の基礎塩として、従来の3価クロムに加え、少量の新規金属イオンを薬液中に添加し、さらに錯化剤 A で金属錯体を液中に形成させた。

新規金属イオンはクロムイオンと比較して、酸化還元電位が高い金属を選定し、優先的にめっき析出することで、硫黄原子とともに皮膜中に取り込まれる。これにより、皮膜中に黒色の金属硫化物 (MeS) を供析させることができる。

このように、めっき薬液の金属塩を3価クロムイオン・新規金属イオンの2元化し、金属クロム皮膜中に、黒色のクロム硫化物に加え、黒色の金属硫化物をさらに供析させることで (図-6)、従来のダークめっきよりもさらに黒味の深い黒色を表現することに成功した (図-7)。

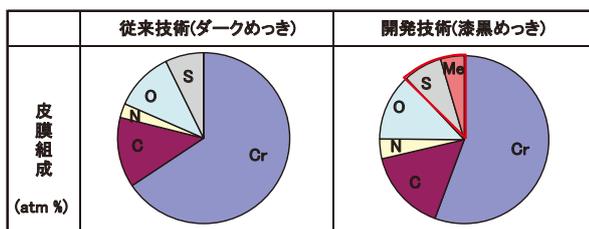


図-6 皮膜組成

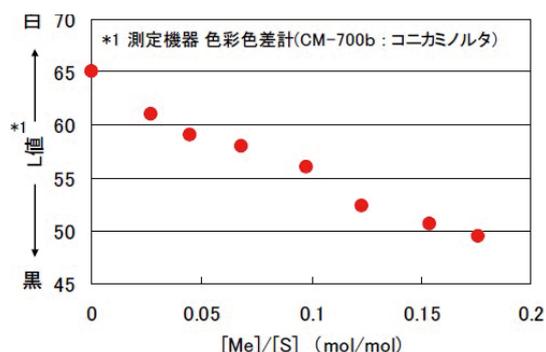


図-7 黒味と Me/S 濃度の相関グラフ

## 5. 結果

本開発により得られた漆黒めっきの品質を表-1に示す。外観について、明度は目標のL値を得られ、また平滑性は従来めっき同等の品質が得られた。性能については、要求される耐食性を満足し、また耐チップング性は従来めっき同等の性能を有し、めっき上スモーク塗装より向上することができた。

表-1 開発技術と従来技術の品質

	開発技術		従来技術	
	漆黒めっき	ダークめっき	めっき上スモーク塗装	
外観				
	耐食性 (キヤス80h)	○ 腐食なし	○ 腐食なし	○ 腐食なし
性能	耐チップング性	○ 打痕のみ	○ 打痕のみ	△ 塗膜ハガレあり

## 6. 適用例

本開発技術により、ニーズの高い黒味 (L 値 50) を表現するめっきグリルを提供することができた。

この技術によりめっき加飾のバリエーションを充足することでカーメーカーのグレードマネジメント戦略に貢献できた。例として Lexus RC (図-8) では従来のクロムめっき、スポーツ車両である Lexus RC F (図-9) では漆黒めっきを採用することでフロントグリルの意匠性価値を高め、ブランド戦略の一役を担う商品となった。



図-8 Lexus RC



図-9 Lexus RC F

## 参考文献

- MOA 美術館  
<http://www.moaart.or.jp/collection/japanese-ceramics158/>
- 天然石・パワーストーン意味辞典  
[http://www.ishi-imi.com/2009/05/post\\_433.html](http://www.ishi-imi.com/2009/05/post_433.html)

## 著者



仲谷幸司



堀田祐志



丸岡洋介

## 水系離型剤の適用技術

筒井良治<sup>\*1</sup>，福田秀喜<sup>\*1</sup>

### Mass Production Technology for Water-based Mold Release Agent

Yoshiharu Tsutsui<sup>\*1</sup>，Hideki Fukuda<sup>\*1</sup>

#### 1. はじめに

ウレタンハンドルの反応型射出成形（RIM 成形）において、成形ショット毎に離型剤を塗布することは不可欠である。一般的に離型剤の溶媒成分としては、有機溶剤等をベースとした溶剤系と、離型剤成分をエマルジョン化した水系が存在しており、それぞれの特徴・ニーズによって、使用用途が分かれている。

豊田合成では、従来乾燥性が優位な溶剤系離型剤を多く使用してきた。しかし昨今の環境対応へのニーズから、離型剤を水系化し成形工程の環境負荷物質の低減が望まれている。

今回水系離型剤特有の課題である乾燥性を改善し量産適用を行ったので紹介する。

#### 2. 水系離型剤の課題

水系離型剤のその溶媒である、水の沸点（100℃）故に溶剤系離型剤と比較して、乾燥性が悪く、乾燥時間を確保するために、成形サイクルの悪化が想定される。

また金型表面に離型剤の水分が残存したまま、ウレタン成形を実施した場合、ウレタンを注入することで、ウレタン表面に水による異常発泡

が発生し、成形外観不具合を引き起こす。そのメカニズムを図-1に示す。

水系離型剤の課題である乾燥性は、その水によるものであり、物理化学的には溶剤系離型剤には及ばないが、溶剤系離型剤の成形サイクル・成形外観品質を維持可能な水系離型剤の開発・適用技術が必要である。

#### 3. 水系離型剤の乾燥性改善

水系離型剤の乾燥性対策の洗い出しを要因系統図を用いて整理したものを図-2に示す。

改善方策としては、以下の2点において効果があると判断し、検討を進めた。

- ①水系離型剤の濡れ性を上げる
- ②水系離型剤の離型剤粒子径を小さくする

①は、離型剤の金型への濡れ性を上げることで、より離型剤と金型の接触面積を大きくし、金型からの熱を受け乾燥性を改善した。

②は、金型へ付着する離型剤粒子径を小さくすることで、離型剤エマルジョン粒子中の水分量を少なくすることで乾燥を改善した。①・②それぞれの乾燥性との関係を図-3に示す。

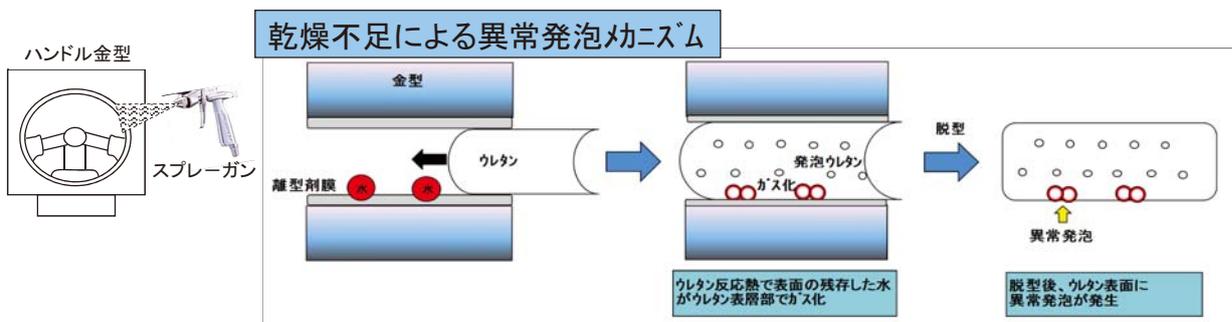


図-1 水系離型剤による異常発泡メカニズム

\*1 SS 生産準備部 SS 第4 生技室

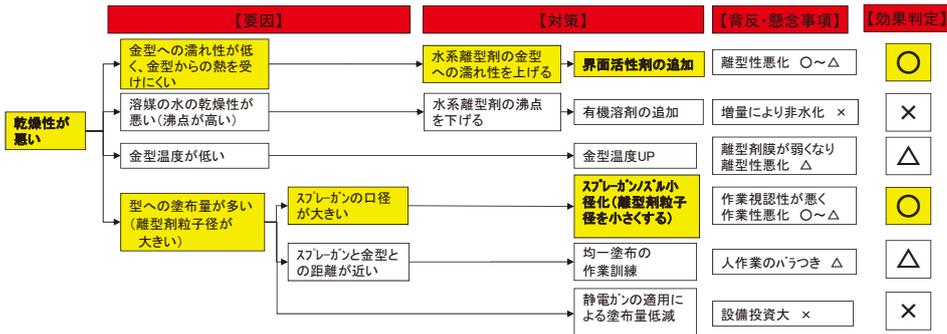


図-2 乾燥性改善の対策洗い出し(要因系統図)

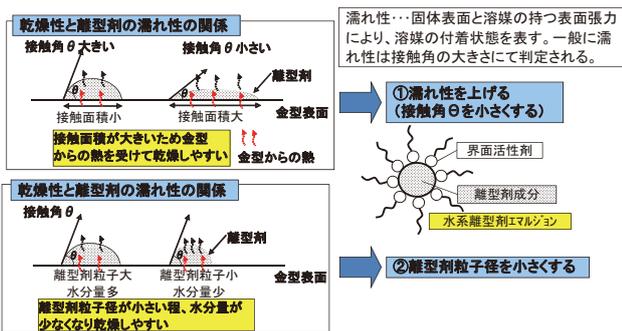


図-3 乾燥性と濡れ性及び離型剤粒子径の関係

### 3-1. 水系離型剤の濡れ性向上

水系離型剤の濡れ性向上のためには、離型剤成分をエマルジョン化している界面活性剤の検討が必要になる。

一方、図-2で示したように、界面活性剤追加の背反として、離型性の悪化が想定されるため、添加量は、濡れ性の指標である接触角の改善効果のみが見込まれるよう、適量での設定を行った。

界面活性剤の検討に関しては、離型剤のノウハウ技術になり、本報では詳細開示できないが、その検討結果について、図-4に示す。濡れ性の指標としては、接触角θの大きさを表した。

以上より界面活性剤の検討においては、接触角θを20%改善することができた。

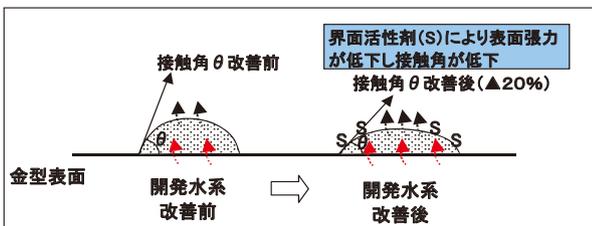


図-4 水系離型剤の濡れ性改善効果

### 3-2. 水系離型剤の粒子径検討

塗布時の離型剤粒子径を小さくするためには、塗布スプレーガンの仕様及びエア圧・吐出量によるところが大きい。その1つの因子であるスプレーガンノズル径と離型剤平均粒子径の相関を図-5に示す。ノズル径が小さくなると、離型

剤粒子径は小さくなるが、離型剤塗布・吐出状態が見えにくくなる(作業視認性の悪化)。本検討では作業視認性にも留意して、最適ノズル径を設定し、乾燥性改善につなげることができた。

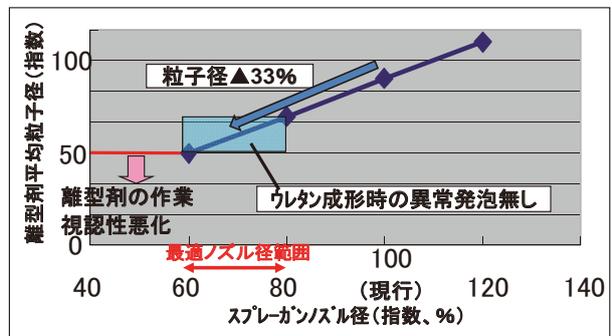


図-5 ノズル径と離型剤粒子径の相関

以上の検討より、濡れ性向上離型剤、小径スプレーガンを用いて、ウレタンハンドル成形を実施し、水系離型剤の乾燥性・成形性を確認した。その結果、溶剤系離型剤使用時と同等の成形サイクルを維持し、成形外観品質も現行同等レベルのものが達成できた。

## 4. まとめ

今回開発した適用技術は、今後のウレタンハンドル成形工程の、離型剤の水系化技術として、活用していただけるものである。

最後に、本件にご協力いただいた材料メーカー関係者、関係部署の皆様へ、厚く謝意を申し上げます。

著者



筒井良治



福田秀喜

## 昇降式カップホルダー

菱田 裕<sup>\*1</sup>

### Adjustable Cup Holder

Yu Hishida<sup>\*1</sup>

#### 1. はじめに

近年のセンターコンソール動向として、コンソールアッパー面の上昇、アームレストが大型化しており、カップホルダー搭載位置がセンターパネルに近づく傾向にある。

それによりペットボトル等高さのある容器を収納した場合、センターパネルの操作を阻害する恐れがある（図-1、図-2）。

今回、センターパネルの操作を向上させることが出来る、昇降式カップホルダーを開発、量産化したのでその概要について紹介する。

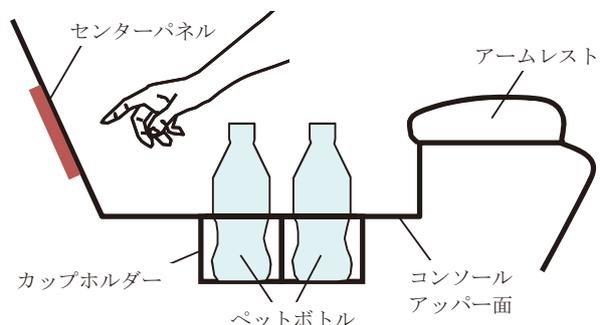


図-1 センターコンソール動向（従来）

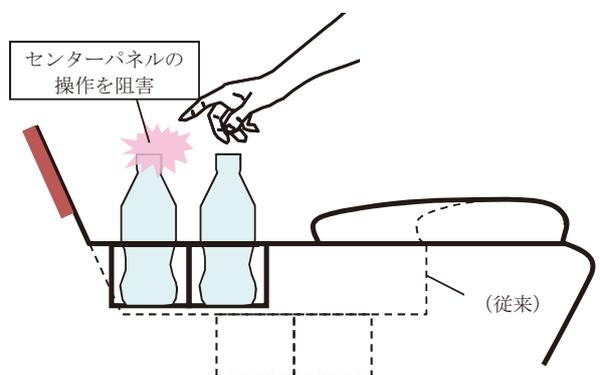


図-2 センターコンソール動向（近年）

#### 2. 製品の概要

本製品は、高さを2段階で変えることが可能で、上昇時は高さが低い容器、高さの高い容器はトレイを押下げ収納、ボタン操作で戻ることができる構成となっている（図-3）。

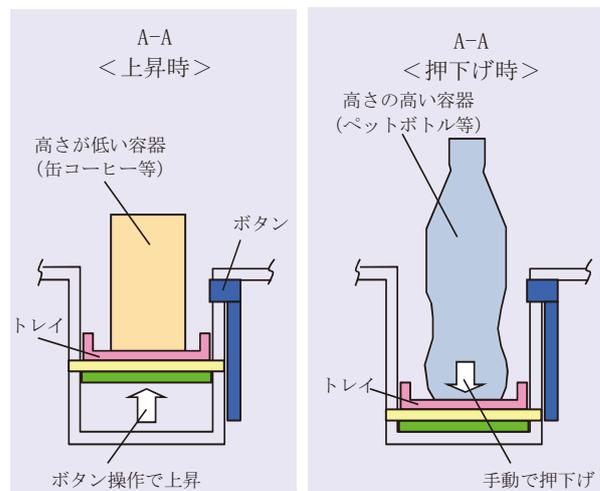


図-3 製品概要

\*1 IE 技術部 機構品技術室

### 3. 開発の狙いとポイント

今回の開発品は、トレイへ取付けられた回転式ロック機構により上昇後の保持、押下げ後のロックを両立させ、ボタンと連結したロッドによってワンアクションでの上昇操作を可能とした。昇降構造を図-4、C視(ロック機構)を図-5に示す。

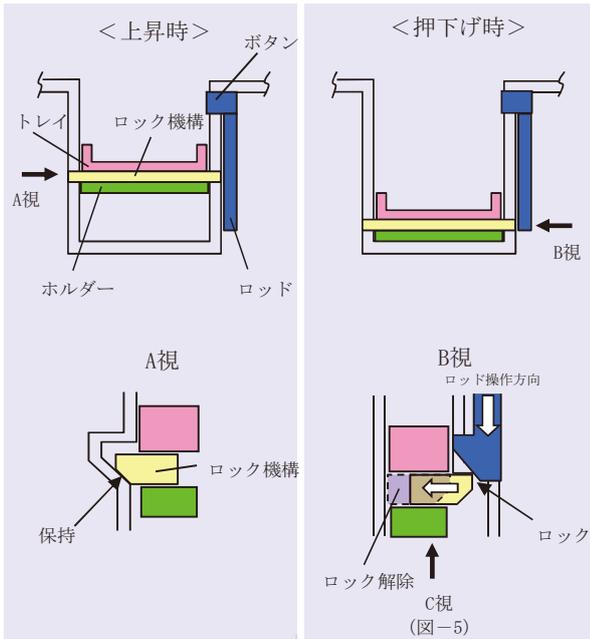


図-4 昇降構造

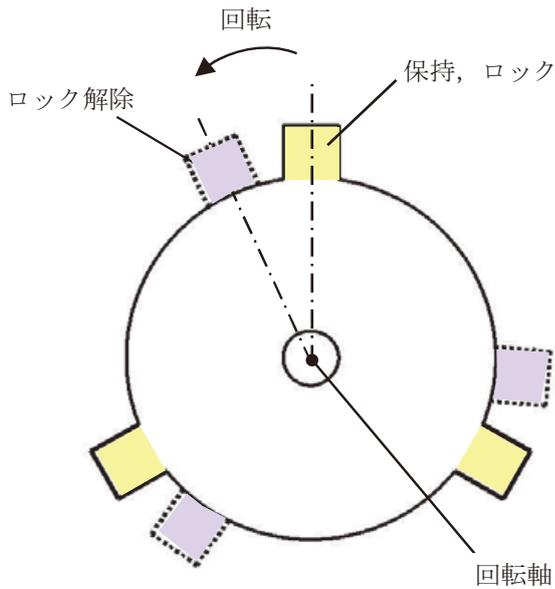


図-5 C視 ロック機構

### 4. おわりに

今回紹介したカップホルダーはレクサス RX に採用され量産化されることになりました。

最後に、この製品の開発・量産化に際し、ご支援・ご指導頂きましたトヨタ自動車株式会社 内装設計部、材料技術開発部、トヨタ自動車九州第2生産技術部並びに関係部署、関係会社の方々に厚くお礼を申し上げます。



著 者



菱田 裕

## 振動機能付ステアリングホイール

上坂 維志篤<sup>\*1</sup>

### Vibration Function for Steering Wheel

Yoshitoku Uesaka<sup>\*1</sup>

#### 1. はじめに

近年、多くの運転支援システムが車両へ搭載され、技術進化、普及が急激に進んでいる。ステアリングホイールにおいてもシステムの一部を担う機能の追加ニーズが高まっている。今回、新たな機能として振動システムを有したステアリングホイールを開発・量産化したので、その概要について報告する。

#### 2. 振動機能のニーズ

今回開発した振動ステアリングホイールは、運転支援システムの一つである車線逸脱警報（以下、LDW）において、警告伝達機能として使用される（図-1）。

従来のLDWにおいて、ドライバーへの警告伝達手段はブザー音及びディスプレイ表示が一般的であった。しかし、市場ではブザー音を不快と感じるユーザーも多く、ドライバーだけに静かに警告を伝える手段が求められていた。

振動ステアリングホイールの搭載によって、こ

のニーズに応えることが可能となり、ユーザー各々でブザー音、振動伝達の選択が可能となる。



図-1 車両逸脱警報

#### 3. 製品の概要

振動ステアリングホイールを用いたLDWのシステム略図を図-2に示す。車載カメラが車線逸脱を検知すると、振動要求信号をハンドルECUへ発信する。信号を受けたハンドルECUはモーターへの電力供給を開始。モーターに設置された偏心分銅が回転することで振動を発生させている。

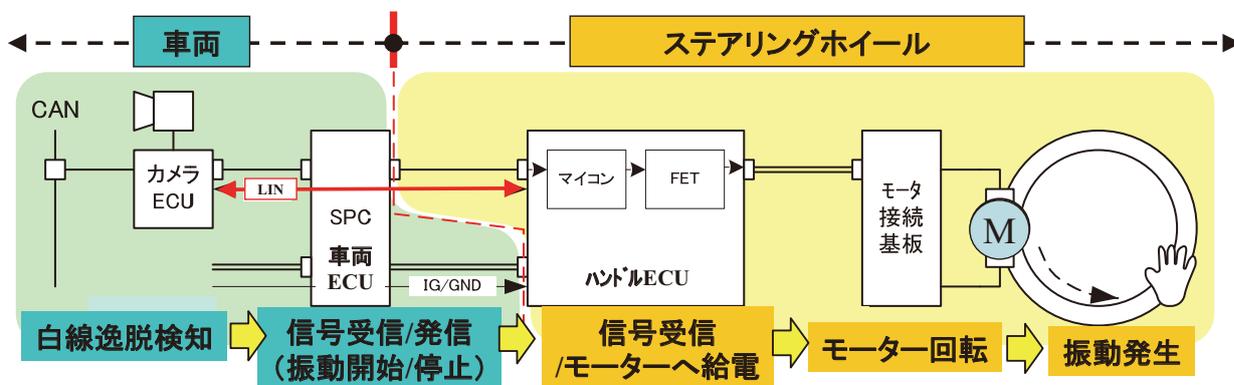


図-2 システム略図

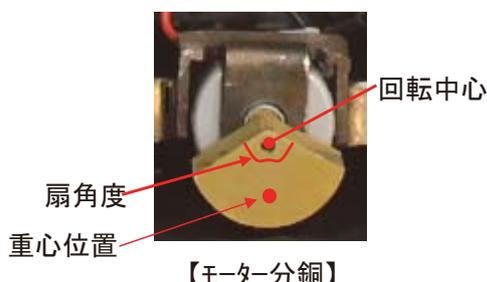
\*1 SS 技術部 SS 第1 技術室

### 3-1. 偏心分銅

振動は、モーターに取付けた分銅を回転させることにより発生させている。回転の中心であるモーター軸と分銅重心のズレによって生まれる遠心力を振動源としている。

この原理は携帯電話等のバイブレーション機能と同様である。しかし、ステアリングホイールのよう大きく重いものを振動させるためには、より大きな振動強度が必要である。

振動の強さ（＝遠心力）は分銅重心までの距離と分銅の質量に依存する。振動ステアリングホイールに要求される振動強度を達成するために、回転させる分銅の質量及び重心位置の設定が重要となる。また、意匠部品でもあるステアリングホイールは、デザイン性も維持する必要がある。限



【モーター分銅】

$m$ :モーター分銅質量(N)  
 $r$ :重心距離(mm)

振動強度(遠心力)  $F = m \times r \times (2\pi f)^2$   
 $f$ :回転数(Hz)

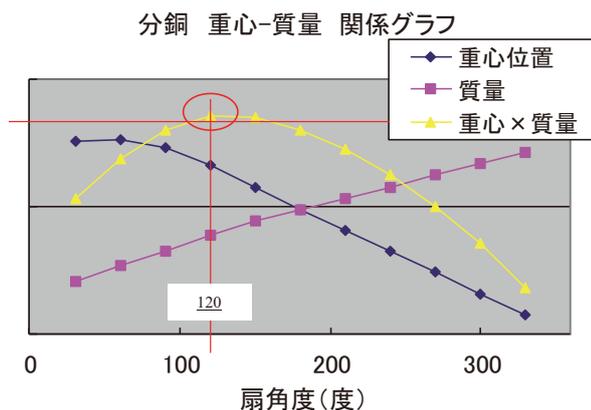


図-3 分銅重心-質量の関係

られたスペース内での配置が要求される。

そこで、より省スペースで効率的に振動強度を得ることができる分銅形状を検証した(図-3)。

分銅質量を増やしていくと、分銅が円形に近づき重心位置が近くなる。重心位置と質量の関係から、最も効率的に振動強度を得られる扇角度として120°を設定することで、制約スペース内で要求振動強度を得ることができた。

### 3-2. 統合 ECU

本開発品は、振動モーターの ON-OFF を電子的に制御する ECU もステアリングホイール内に追加しており、搭載スペースの検討が必要であった。

従来デザイン同等のスペースへ追加搭載するために、既に搭載されているハンドル ECU (ステアリングヒーター制御用) との統合化を実施。

ECU の統合化により、搭載スペースの縮小、ハーネス配線の簡略化を実現した。

また、振動用 ECU まではステアリングホイール内で完結することで、他車種への流用、展開をよりスムーズに進めることを可能としている。

## 4. おわりに

今回量産化した振動ステアリングホイール機構は、今後のレクサス車種の多くに展開していく予定である。最後に本製品の開発にご支援、ご指導頂いたトヨタ自動車株式会社ならびに関係各部署の方々には厚くお礼申し上げます。

著者



上坂 維志篤

## 車両デザインの変化に対応したインナー W/S の開発

高瀬智宏<sup>\*1</sup>，河合辰弥<sup>\*2</sup>

Sharp Angle Bended InnerW/S

Tomohiro Takase<sup>\*1</sup>，Tatsuya Kawai<sup>\*2</sup>

### 1. はじめに

昨今、自動車の燃費向上を目的に空気抵抗を下げる取組みがなされている。その1つとして、自動車のデザインの多様化・曲線化が進んでおり、ドアのベルトラインを急変するデザインが増加してきている（図-1）。インナー W/S への影響として、ドアのデザインに対応して曲げる必要がある。

今回、急角度に曲げ、かつ、ばらつきの少ないインナー W/S を量産化したので紹介する。



空気の流れ



図-1 車両デザイン

また、自動車メーカーの部品の共通化が進んできており、インナー W/S として、汎用化するために大型化してきている（図-4）。



図-2 製品全体図 (Rr ドア用)

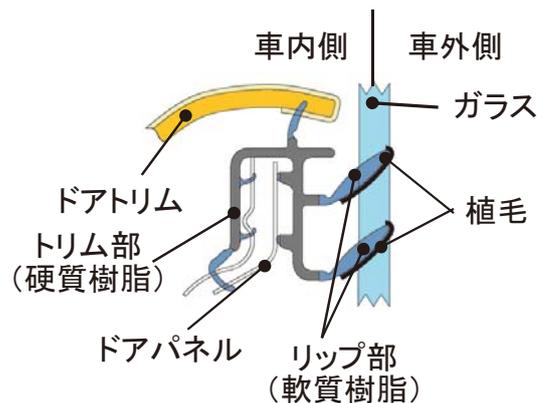


図-3 組付け状態 (A - A 断面図)

### 2. 製品概要

インナー W/S とは、自動車のドアに取り付ける部品で、その主な機能は、ホコリ・音の車内への進入防止、ガラス昇降時のガラス保持等である。図-2 に製品全体図、図-3 に組付け状態を示す。

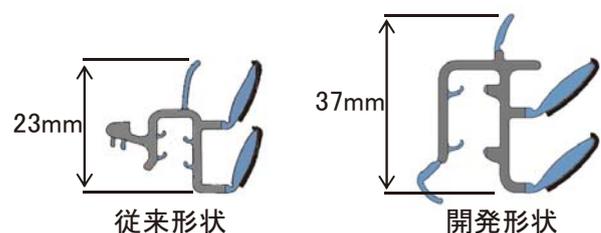


図-4 断面形状大きさ比較

\*1 WS 技術部 WS 開発室

\*2 AS 生産準備部 AS 第1 生技室

### 3. 製品の特徴

従来から曲げ加工のあるインナー W/S は量産されている。しかし、樹脂製のインナー W/S では曲げ時の断面形状の変形が発生し、角度 165°程度が限界であった。また、断面積の大きな製品は、特に曲げ加工が困難であった。今回、従来にない曲げ角度の加工が可能になり、設計的な自由度を上げることができた（図-5）。

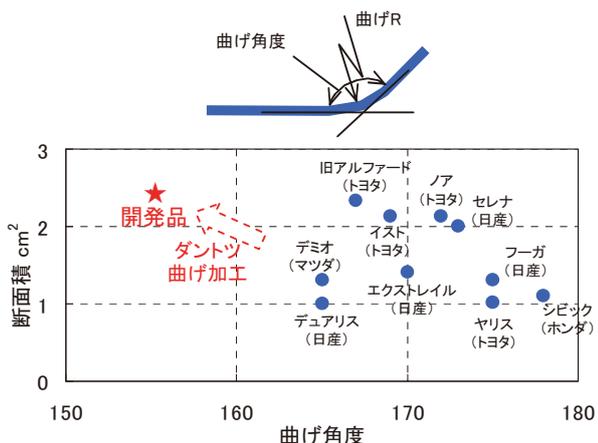


図-5 曲げR・曲げ角度ベンチマーク

### 4. 曲げ加工工程概要

樹脂製品を曲げるための加工方法として、加熱曲げ、ストレッチベンダー、ロールベンダー等様々な工法が存在するが、今回、曲げ角度のばらつき、設備の汎用性や投資コストなどを考慮し、加熱曲げ工法を選定した。その工法の概要を説明する（図-6）。ワークをヒーターにて、均一温度に加熱する。次に変形防止機構の付いた曲げ治具により、曲げ加工を実施する。最後に形状を保持した

まま冷却することにより曲げばらつきの少ない曲げ加工を実現した。

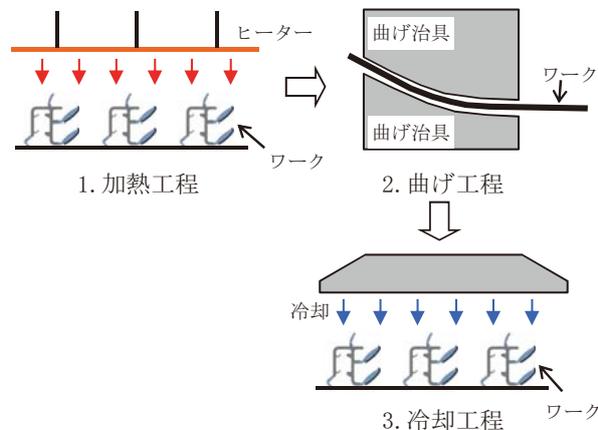


図-6 加工工程概要

### 5. おわりに

今回紹介したインナー W/S は、2015年1月に量産化されました。本製品の開発にご支援、ご指導いただいた関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

著者



高瀬智宏



河合辰弥

## 給油利便性向上キャップレスデバイス

大植 剛<sup>\*1</sup>

### Capless Device for Conveniently Refueling

Go Oue<sup>\*1</sup>

#### 1. はじめに

北米や欧州ではセルフ給油が主流であり、日本でもセルフ給油の普及が進んでいる。キャップレスデバイスは給油時の煩わしい燃料キャップ開閉操作をなくす利便性向上のうれしさを提供し、キャップの閉め忘れのリスクを低減する効果がある。

また、キャップレスデバイスには燃料タンクの内圧調整弁の機能や導電性も求められており、それらについても高い性能・信頼性を要求されている。

今回、日本の自動車部品メーカーとして初めてキャップレスを量産化したので、その概要を紹介する。



図-1 車両搭載位置

#### 2. 製品の概要

車両搭載位置を図-1に、製品構成を図-2に示す。キャップレスデバイスは、燃料タンクへ燃料を導入するフィルターパイプの先端へ取付けられ、2枚の樹脂製フラップにより構成されている。

給油ノズルを押込むことによりフラップが開き挿入され、給油後に給油ノズルを抜くとスプリングの反力により自動的にフラップが閉じるため、燃料キャップで必要だった開閉作業が不要となる。

また、2枚目のフラップには燃料タンク内圧調整弁の機能があり、通常時には燃料漏れを防ぎ、燃料タンク内の圧力が異常となったときには安全弁として機能する。また、導電性もあるため静電気による引火を防いでいる。

更に、1枚目のフラップと2枚目のフラップの間にはドレン穴があるため給油時に溢れ出した燃料の視認性や高圧洗浄時に浸入した水の排出性があり、実際の使われ方を配慮した製品となっている。

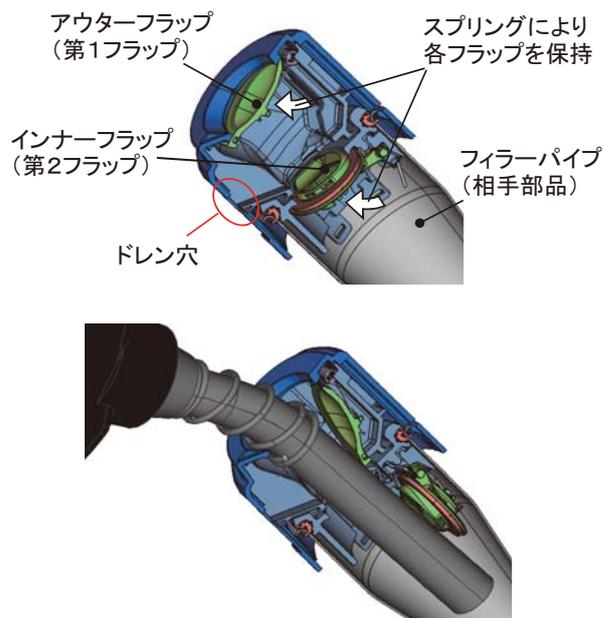


図-2 製品構成  
(上：フラップ閉状態、下：ノズル挿入状態)

<sup>\*1</sup> FC 技術部 燃料部品技術室

### 3. 技術の概要

#### 3-1. 燃料シール性とノズル挿入荷重

給油ノズルの挿入荷重はスプリングの荷重によって決まってくるが、同時に内圧調整弁の開弁圧も制御している。通常、燃料シール性を保持する為にはスプリングの荷重を高く設定する必要があるが、それによりノズル挿入荷重が高くなり、使い勝手が低下してしまう。開発品では、単純なヒンジ機構ではなく、ヒンジ軸に独自の軸受け形状を採用することにより、低いスプリング荷重での燃料シール性を実現し、相反する機能を両立させた（図-3）。

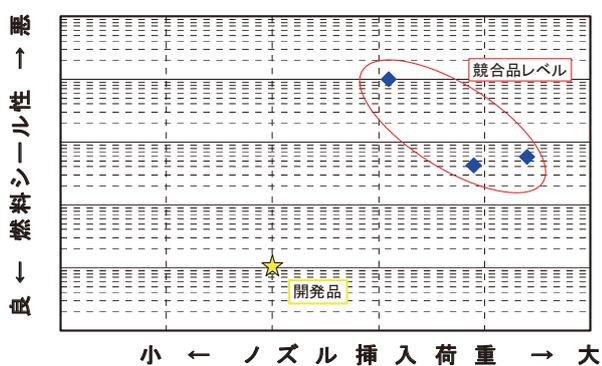


図-3 燃料シール性とノズル挿入荷重

#### 3-2. 軽量・コンパクト化

給油ノズル挿入時や車両衝突時に受ける衝撃力などの入力に対し、競合品は金属製フラップを採用しているが、FEM解析を活用した形状・肉厚設計をし、樹脂性フラップの採用を可能にした。

また、市場には長さや曲げ角度の違う様々な給油ノズルが存在するが、それらの給油ノズルが挿入・保持できるようフラップやカバー形状を最適

レイアウトし、軽量・コンパクトのキャップレスデバイスを実現した（図-4）。



図-4 相手パイプの大きさと重量

### 4. まとめ

今回紹介したキャップレスデバイスは世界最小・最軽量であり、15年5月より北米で量産を開始した。今後、採用車種の拡大によりユーザーの給油利便性向上へ繋がっていくことを期待しつつ、この製品の開発・量産化に携わって頂いた関係者の方々に深く感謝いたします。

著 者



大植 剛

## 創風機 Q (スマートサーキュレーター) 開発

本藤 学<sup>\*1</sup>

### Souhuki Q (Smart Circulator) Development

Manabu Motofuji<sup>\*1</sup>

#### 1. はじめに

空気清浄機事業の経験から得た設計・生産ノウハウを基盤に、新規でパナソニックエコシステムズ株式会社様より近年、流行している羽根の見えない扇風機 (スマートサーキュレーター) の生産委託 (開発, 成形, 調達~完成品出荷まで) の受注を頂くことができたので、その商品について紹介する。

この扇風機は、これまでにない全く新しい風を創り出す球体ということで、創風機 Q と命名された。また、Made in Japan の品質であることが顧客の強いこだわりであり、それを実現した商品である。

#### 2. 製品の概要

創風機 Q (図-1) は、製品下部より空気を吸い込み、吸い込んだ風量を約7倍 (風速約17.8m/s) にする大容量の誘引気流構造をしている。また、創風機 Q は、360度自由にエンドユーザーが設置できる。

人に心地よい自然の風である、1/f ゆらぎ (蓼科高原の風を再現した) も搭載した、直径25cmのコンパクトな扇風機である。

創風機 Q の加飾バリエーション (図-2) を示す。創風機 Q は、49 部品から構成されており、3 部品が塗装で加飾されている。品質確保のため、色調のバラツキを極小化する必要がある。

静音性に優れた商品であることも特徴で、球体である創風機 Q は、中央部分の部品の隙間合わせが重要であり、球体の実現と風漏れを防ぐため、家電業界としては高水準の寸法精度が要求される。

#### ■独自の誘引気流構造

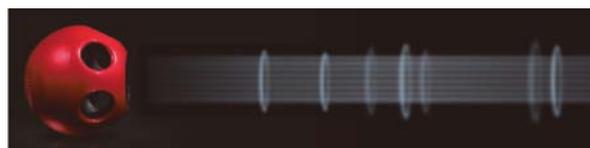
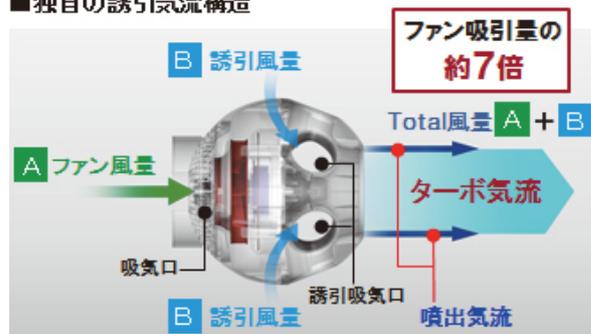


図-1 製品性能<sup>1)</sup>



図-2 仕様

\*1 特機部 技術室

### 3. 開発の狙いとポイント

#### 3-1. 金型の特徴

顧客デザインを実現するため、各部品が複雑な型構造を必要としている。金型(図-3)は、6ヶ所の穴形状がアンダーカット処理を必要とするため、キャビ・コアにスライド機構を有し、金型強度の確保、各スライドの合わせ精度、スライド機構の干渉回避配置、量産性の確保等を幾度も金型設計 DR 実施し、起工するに至った。

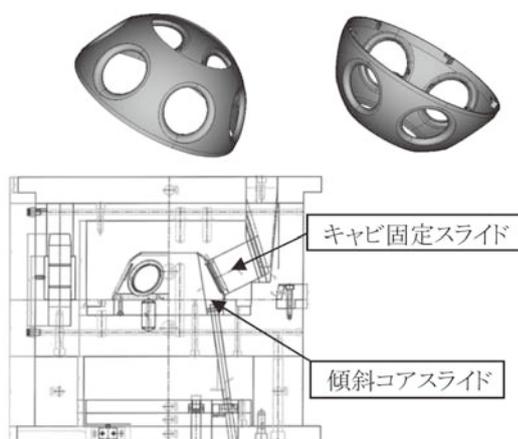


図-3 金型仕様

#### 3-2. 成形の特徴

創風機 Q の置き台である STAND (図-4) は、1次成形として、外観面の半透明材、2次成形として、製品の電源コードがどの角度に設置されても傷つかない軟質材を採用し、且つ、床の傷つき防止も兼ねた製品上下の2材成形を特徴とする。

この部品は、半透明材で内外面が意匠面になるため、意匠性の確保(入れ子段差の仕上げ、外観面にシボ加工、内側面は鏡面仕上げ)と成形性の両立が必要であった。

また、半透明材に密着する適正な軟質材の選定に苦慮したが、生産技術(金型構造、成形条件)の工夫により、高品位の外観品質が確保できた。

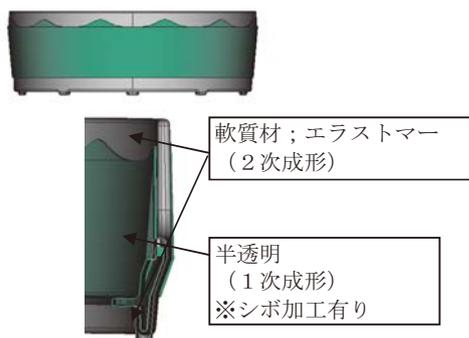


図-4 STANDの2色成形

#### 3-3. 塗装の特徴

顧客デザインの要望する輝度感・艶感を実現するため、通常2コート(トップにクリアコート)を採用するが、創風機 Q では、ウレタン系2液塗料の1コートを提案した。塗料にアルミ・パール等で輝度感を、膜厚で艶感を表現させる仕様を1コートで実現し、コストダウンに寄与している。

特に、クリスタルレッドは、顧客デザインの最も強いこだわりであり、量産オーダーの半分以上を占めている。

1コートで上述の輝度感・艶感を発色するに当たり、開発途中、幾度も調色・条件調整を繰返し、顧客デザインの要望に応えることができた。

#### 3-4. 短納期生産準備

創風機 Q は、5ヶ月(出図~L/O)の中での生産準備対応が必要であった。

綿密なマスタープラン(設計 DR, 金型起工・整備, 新規組立ライン設計・整備, 新規検査設備導入, 品質管理体制整備等)を立案し、定期的な節目管理の下、QCDの観点で進捗が見える化しながら、フロントローディング型(後戻りの無い)生産準備により達成できた。

### 4. まとめ

今回紹介した創風機 Q では、開発チームの総力を結集し、この超短期間で成し遂げた事で、顧客に喜ばれ高い評価を得ることができました。また、2015年5月より販売を開始し、様々なメディアで取り上げられ、注目されたヒット商品となりました。

今後の派生機種では、高輝度、自動車分野の加飾技術の応用展開、提案により、継続して検討を実施しています。

最後に、この製品の開発・量産化に際し、ご支援を頂きましたパナソニックエコシステムズ株式会社、各仕入先の皆様に厚く御礼を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) パナソニック株式会社のホームページの図より  
<http://panasonic.jp/fan/q/index.html>

著 者



本藤 学

## 発光素子

特 許 No 5543164

発明者 神谷真央

[発明の属する技術分野]

本発明は、透明電極を備える発光素子に関する。

[発明の概要]

複数の透明中間部と、透明中間部上に設けられる透明電極とが、共に p 型半導体層に接するよう形成され、透過率が

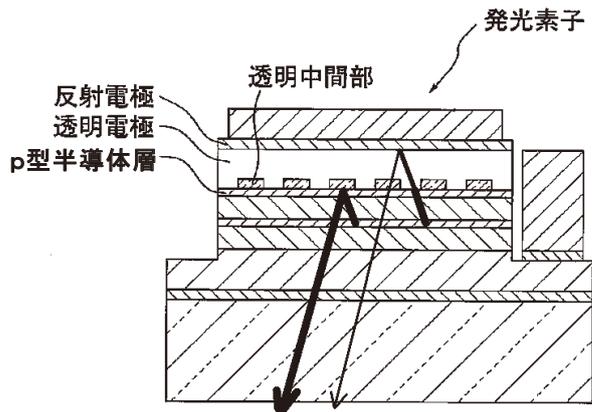
透明中間部 > 透明電極  
屈折率が

p 型半導体層 > 透明電極 > 透明中間部  
の関係を満たし、透明電極上に反射電極が設けられた発光素子。

[発明の効果]

透明中間部と p 型半導体層との界面に当たる光を p 型半導体層側に全反射させることにより、透明電極と反射電極とで吸収される光を低減出来るため、光の取り出し効率が向上する。

また、透明中間部が絶縁体であっても、透明電極による電流の拡散が確保される。



## シャッタ式物入れ

特 許 No 5561154

発明者 小玉易広, 井上真敬

[発明の属する技術分野]

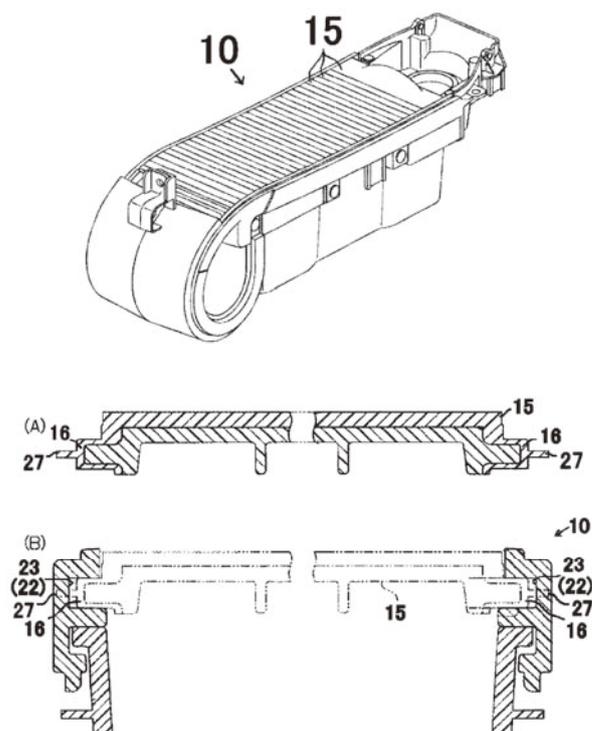
本発明は、シャッタをガイド溝部に沿ってスライドさせることにより、物入れ本体の開閉するシャッタ式物入れに関するものである。

[発明の概要]

隣合うシャッタ構成部材 15 が、ヒンジ部で連結され、シャッタ構成部材 15 の両軸部 16 が両ガイド溝部 22 を摺動するシャッタ式物入れ 10 で、各軸部 16 に軟質材からなる突出部 27 が突設されており、突出部 27 が弾性変形した状態で縦壁面 23 に接触されている。

[発明の効果]

本発明のシャッタ式物入れによれば、シャッタをスライド操作する際の操作荷重を、安定化させ、操作フィーリングの向上を図ることができる。



## インサートの製造方法及びそのインサートを有する長尺成形品の製造方法

特 許 No 5556611

発明者 堀田昌利, 清水 剛

[発明の属する技術分野]

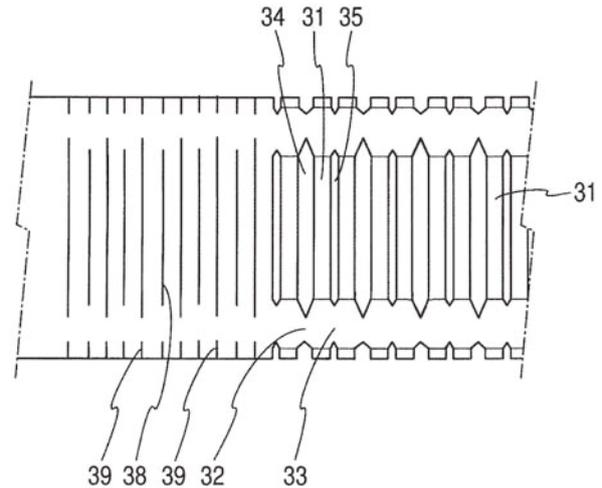
本発明は、自動車用ウエザストリップの長尺成形品に使用する、インサートの製造方法に関する。

[発明の概要]

帯状金属板に連結部 32, 33 を残して交互に幅方向に長短の切断線 38, 39 を入れ、切断線の無い連結部 32, 33 の部分を圧延と引張を加えて短冊部 31 とスリット 34, 35 を形成し、長手方向に幅の広い第 1 スリット 34 と幅の狭い第 2 スリット 35, 幅方向に幅の狭い第 1 連結部 32 と幅の広い第 2 連結部 33 を圧縮ロールと引取ロールの回転速度の差により形成する。

[発明の効果]

交互に長短の切断を入れて圧延と引張を加えることで、連結部の薄肉化と単位長さ当たりの短冊数の低減により軽量化ができる。



## 樹脂製コネクタ

特 許 No 4178463

発明者 金子健一郎

[発明の属する技術分野]

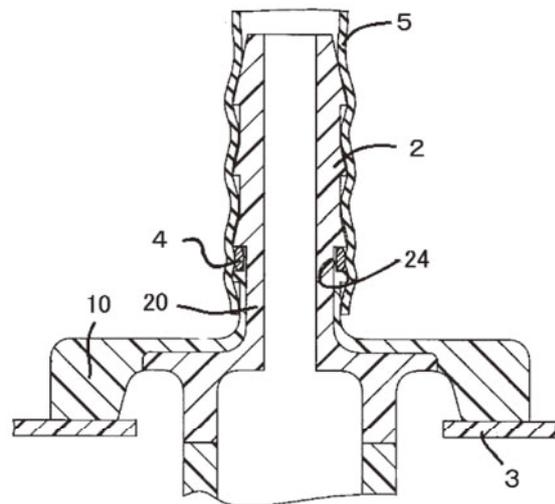
本発明は、燃料タンクに溶着され、先端にホースが圧入固定される樹脂製コネクタに関する。

[発明の概要]

樹脂製コネクタは、燃料タンク 3 に溶着する基部 10 と、外周にホース 5 が圧入されるファーツリ形状の筒部 2 を有する。根本部 20 の外周側は、第 1 樹脂で、根本部 20 の内周部と筒部 2 は、剛性の高い第 2 樹脂で形成されている。根本部 20 の外周には、底面が第 1 樹脂で覆われた Oリング溝 24 を有している。ホース 5 の圧入後期の際のみ Oリング 4 がホース 5 と摩擦される。

[発明の効果]

ホースの圧入後期の際のみ、Oリングが摩擦されることになるため、摩擦時間が短縮され捻れや傷付きを防止し、高いシール性を実現する。



## エアバッグ装置

特 許 No 5632814

発明者 石黒直彦

[発明の属する技術分野]

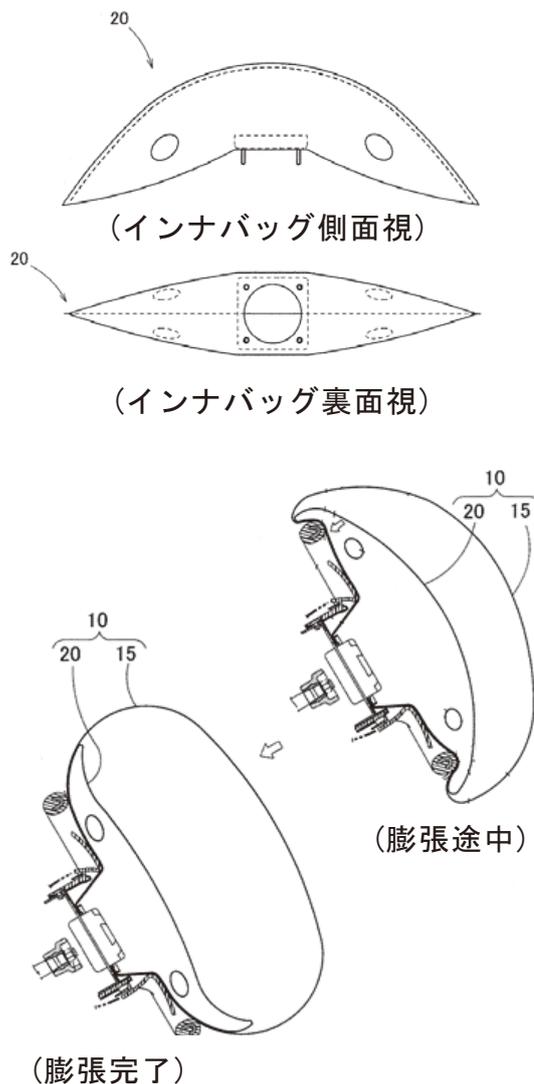
本発明は、ステアリングホイール等に好適なエアバッグ装置に関する。

[発明の概要]

エアバッグ 10 は、外周壁を構成するアウトバッグ 15 と、アウトバッグ 15 内で一方向に延びるインナバッグ 20 で構成され、インナバッグ 20 の後方側膜長を前方側膜長より長くするように構成されていることを特徴とするエアバッグ装置。

[発明の効果]

インナバッグ 20 は、膨張途中アウトバッグ 15 周縁をステアリングホイールに押し付けるため、アウトバッグ 15 周縁がステアリングホイールから浮き上がるのを抑制することができる。



## 編集後記

今号は、昨年ノーベル物理学賞を受賞された天野先生に特別寄稿をお願いし、特集「LEDの変遷とGaNデバイスの進展」として発刊いたしました。

豊田合成が赤崎先生、天野先生のご指導のもと青色LEDを製品化したこと、およびエンジニアの方には絶えず夢を持って困難に挑戦することが、大きな成果に結びつくということを知っていただきたいという思いで編集しました。

また自動車部品事業として新技術4テーマ、新製品5テーマについても紹介しておりますので、あわせてご覧ください。

最後にお忙しい中、原稿作成に尽力いただいた執筆者各位、ならびに編集に取り組んでいただいた委員各位にお礼申し上げます。

## 表紙デザインコンセプト

豊田合成の多岐に渡る製品群の中で自動車部品事業に続く第2の柱として成長を続けるLED事業。常に挑戦を続けるLED事業の認知度を高めたいという思いでビジュアルライズしました。

青色LEDをイメージさせる光とTG製品群のピクトグラムが重なり合い、輝いて流れるデザイン。豊田合成がグローバル市場に技術力で貢献しスピード感を持って未来に進んでいく姿を表現しました。

デザイン企画部



小山 達也

## 豊田合成技報編集委員会

編集委員長	可児 雅康	(技術管理部)
編集委員	守山 実希	(研究開発部)
	大野 芳生	(材料技術部)
	佐々 道成	(知的財産部)
	広瀬 吉一	(デザイン企画部)
	伊藤 修	(商品開発部)
	関谷 隆	(IE・SS開発部)
	大竹 正起	(IE技術部)
	林 和之	(WS技術部)
	杉崎 智弘	(FC技術部)
	西郷 栄人	(実験部)
	杉原 洋	(生産技術部)
	伊藤 孝幸	(生産技術部)
	石田 勝彦	(AS生産準備部)
	田中 克巳	(FC生産準備部)
	中野 伸二	(特機部)
	節田 重義	(IE生産準備部)
	酒井 政徳	(SS生産準備部)
	長坂 尚久	(オプトE要素技術開発部)
	成田 巧	(オプトE生産準備部)

事務局	佐藤 純一	(技術管理部)
	岩本 真由美	(技術管理部)
	家田 与一	(技術管理部)
	田代 忠	(技術管理部)

## TOYODA GOSEI TECHNICAL REVIEW

豊田合成技報 Vol. 57 2015 (禁無断転載)

2015年12月1日発行

発行所 豊田合成株式会社  
〒452-8564  
愛知県清須市春日長畑1番地

発行人 橋本 正一

編集人 豊田合成技報編集委員会

事務局 〒492-8540  
愛知県稲沢市北島町西の町30番地  
Tel 0587-34-3303  
Fax 0587-34-3309

印刷所 竹田印刷株式会社

Copyright(C) TOYODA GOSEI CO., LTD. All rights reserved.



**TOYODA GOSEI**

# **TECHNICAL REVIEW**

Vol. 57 2015

<http://www.toyoda-gosei.co.jp/>

