

# OMRON 163 Vol.52 No.1 2020 TECHNICS®

オムロングループ技術論文誌

特集

## 機械の五感としての センシング



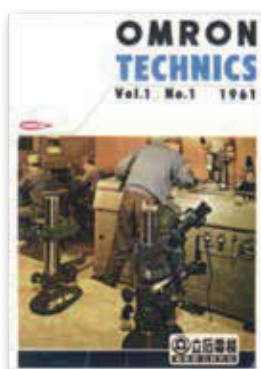
# OMRON TECHNICS のご紹介

オムロンでは、研究開発の成果を広く公開することで  
社会の発展に寄与できるよう、オムロングループ技術論文誌  
「OMRON TECHNICS」を1961年（昭和36年）5月より発行しております。

2008年（平成20年）から公開を一時休止しておりましたが、  
近年の技術革新の加速と社会的課題が深刻化する中、社会的課題を解決するイノベーションの創造に  
寄与していくためオムロングループの技術論文の公開を2018年（平成30年）より再開いたしました。  
これまで通巻162号発行し、約1,700編以上の論文を公開しております。

論文は、以下のホームページ上で公開するとともに、  
冊子としても発行しております。今後とも、「OMRON TECHNICS」を  
ご愛読いただきますようお願い申し上げます。

## 冊子版



1961年5月 創刊号



1975年 50号



1991年 100号



2004年 150号



2008年 160号



2018年 161号



2019年 162号

オムロンテクニクス

検索

<https://www.omron.co.jp/technology/omrontechnics/>

## WEB版



## オムロンのコア技術

# Sensing & Control + Think

オムロンは創業以来、時代に先駆けた価値を生み出すために、独自のコア技術を進化させてきました。「Sensing & Control + Think」はオムロンが誇る全社共通のコア技術です。

「Sensing」とは現場の知見に基づき、人やモノの状態・情報から必要なデータを取得することです。「Control」とは、「Sensing」によって得られた情報をもとに、現場に適切なソリューションを提供することです。

オムロンでは、この「Sensing & Control」に「人の知恵」を表す「+ Think」を新たに加えました。今後AI、IoTなどの技術革新が進む中で、より賢く価値に変換させる必要があるからです。

オムロンでは、「ファクトリーオートメーション」、「ヘルスケア」、「ソーシャルソリューション」を注力する事業領域として、これからも社会に貢献できる価値を最大限に生み出すべくコア技術の強化と進化に取り組んでいきます。

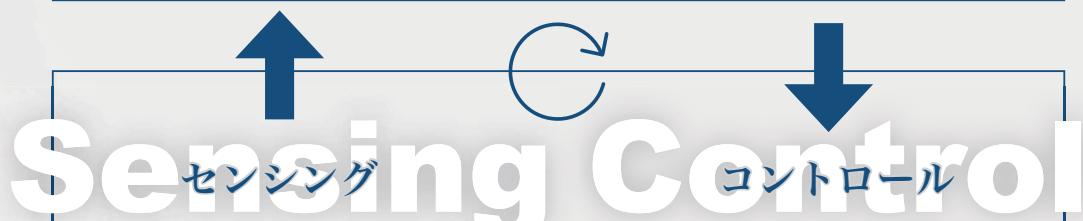
### Sensing & Control + Think

## +Think

蓄積した現場データ 人の知見

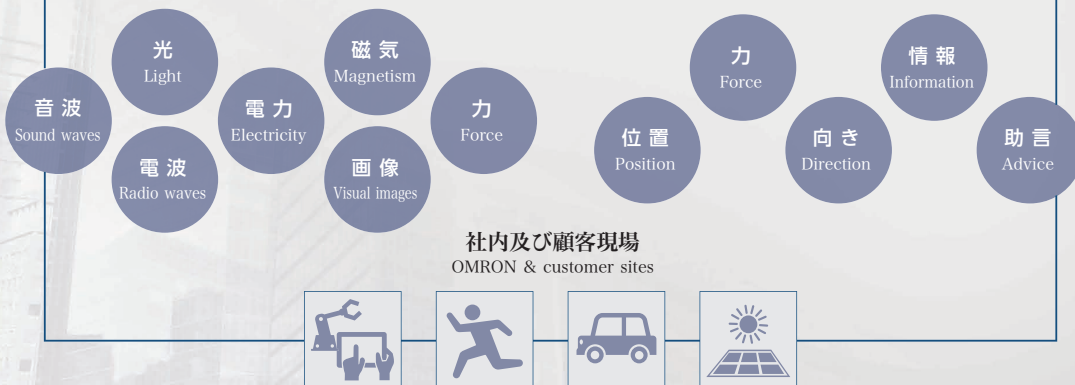
Accumulated field data: Human expertise

現場の知見に基づき、データから読み取れる現象に意味づけをする  
Based on knowledge at work sites, significance is given to phenomena identified from the data



現場の知見に基づき、必要なデータを取得する  
Based on knowledge at work sites, gathering necessary data

解釈に基づき、現場に適切なフィードバックをおこなう  
Based on interpretations, providing appropriate feedback to sites



## 機械の五感としての

### 1. センサとセンシング

オムロンテクニクスの特集「機械の五感としてのセンシング」の巻頭言を執筆するにあたり、今から約17年前のオムロンテクニクス（通巻145号）におけるセンシング技術特集号の巻頭言<sup>1)</sup>を読み返してみますと、そこでは「ユビキタスネットワーク社会においてセンシングが生み出す新たな価値」が述べられています。興味深いことに、この「ユビキタスネットワーク社会」という言葉をそのまま「IoT社会」に置き換えるだけで、今の時代においても現在進行形として捉えることができる内容になっています。それだけセンシングという技術は、いつの時代においても社会の進展の土台となる、なくてはならない存在ともいえるでしょう。

文頭から「センシング」という言葉を何の前触れもなく使用してきましたが、章題にも挙げたように世の中には「センサ」という技術用語も存在します。これらの違いは実は明確には区別されておらず、業界や規格によって定義が異なります。しかしながら、筆者の中では「センサ」「センシング」という言葉を明確に使い分けています。それらを簡単にここで述べますと以下ようになります。

センサ：外界のエネルギーや物理量、情報などを何らかの科学的手段によって電気信号に変換する素子  
センシング：センサの出力信号を何らかの意味のある（＝「与えられた目的に沿うか否か」の判断ができる）情報に変換するプロセス

これらを図で表すと図1に示すような構造として捉えることができます。

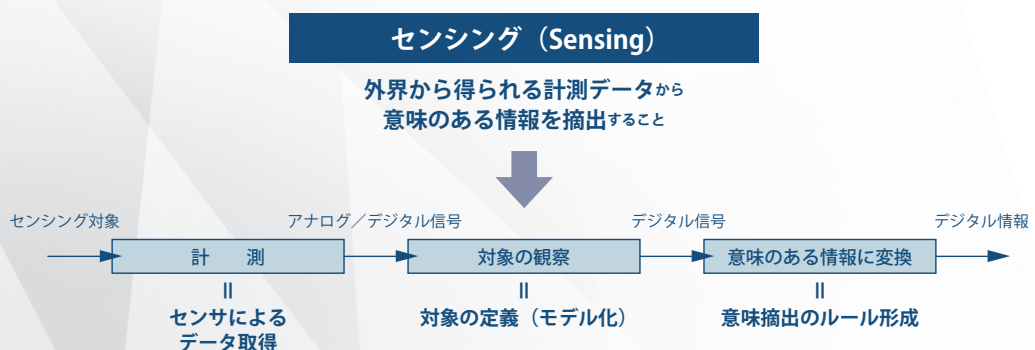


図1：センサとセンシング

センサ及びセンシング技術は、今後社会とどのような関わり合いを持ち続け、どのように進化していくのでしょうか？これを考えるヒントになるものの1つに、「人と機械が共存する社会」というものの過去・現在・未来の姿があります。

# センシング



## 2. センサ・センシング技術の社会的貢献とその存在意義

オムロンでは「人と機械が共存する社会」には大きく3つのパターンが存在すると考えています。1つめは（本来は人が担わなくてよいと考えられる）仕事を機械に「代替」させるパターンです。工場における自動化や自動改札機、あるいはスマートフォンなど身の回りにある多くの機械（道具）がこれに該当します。2つめは、人と機械の両者が「協働」するパターンです。例えば自動車における運転操作や、衝突防止などの安全技術は、人と機械が協働して安心・安全や快適性を実現している代表事例です。そして3つめが、人と機械が「融和」することにより人の能力が拡張されるパターンです。この融和という共存関係は、すでに社会実装が具現化している前述の2つのパターンと異なり、今後新たに社会実装される機会が増えていくでしょう。ここで述べたいずれのパターンにおいても、機械のさらなる技術進化が必要とされることは言うまでもありません。技術進化の肝となる要素の1つは、機械にとっての「頭脳」です。ここ10年で、機械の頭脳としてのAI技術は、深層学習が牽引した「機械学習」と呼ばれる技術分野で飛躍的に進化しました。AI技術は、2003年の巻頭言<sup>1)</sup>で語られているセンシングの進化にもっとも貢献した技術の1つであるとも言えます。

しかしながら人と機械の共存関係が、代替から融和まで幅広く社会実装されていくためには、機械にとっての頭脳の進化だけでは不十分です。そもそも「頭脳は頭脳だけでは存在し得ない」のです。機械の進化において「頭脳」と共に不可欠な要素が機械のもつ「身体性」です。身体性を構成するのは「五感」や「アクチュエーション」です。もちろん機械の身体性は、人間が有するものと同一である必要はありませんが、人間にとっての五感が、機械にとってのセンサ・センシング技術に相当することには変わりありません。人と機械の共存関係の進化の鍵を握る技術として、今後もセンサ・センシング技術がオムロンの実現する社会実装にますます反映されていくことになります。

人と機械の共存関係は、これまで様々な形で具現化されてきましたし、今もされつつあります。IoT社会もその1つです。IoTにおけるTとはすなわちセンサ・センシング機能そのものであるといっても過言ではないでしょう。

よく「AIをより汎用的に使えるようにするためには、AIが“フレーム問題”<sup>2-4)</sup>の壁を乗り越えないといけない」などと言われていますが、実はここでキーとなるのもセンシングです。環境に触れる、あるいは物理世界と接触することで初めて獲得できる知識があり、その知識獲得には（いささか逆説的ではありますが）身体性の物理的・機能的限界が不可欠であるということは非常に興味深い話であります。敢えて大胆に言いますと、センサ・センシング技術の進展が機械の頭脳（AI技術）のさらなるブレークスルーの鍵を握るということです。

### 3. センサ・センシングの技術展望

人と機械の共存関係の進化に向けて、センサ・センシング技術はどのように発展していくのでしょうか？紙面の都合上多くは語れませんが、3つほど筆者の私見を述べてみたいと思います。

#### (1) あらゆるセンサは「画像化」する

これはセンサのほとんどをカメラ（画像センサ）が担うという意味ではありません。センサの分解能が時空間軸で向上するだけでなく、（必ずしも同一機能である必要はない）複数のセンサ出力を一括して取り扱う機会が自ずと増えることから、「あたかも画像データを処理するかのような」データ処理の技術がさらに飛躍的に進化していくということを意味します。それに伴いオムロンのコア技術の1つでもある画像センシングの知見がますます多面的に活用されていくことになります。

#### (2) あらゆるセンサが“self-powered”に

センサは物理的エネルギーを電気信号に変換するエネルギー変換素子という側面を持っています。この電気信号は、センサ出力としてのみならず、自らのエネルギーとして活用することも可能です。さらには無線技術の進化により、将来的には無線給電も当たり前の時代になるでしょう。IoT社会における「T」のキ要素であるセンサは「自分の食い扶持は自分で稼ぐ」ことができる、というのが社会実装の上でますます求められるようになって考えられます。

#### (3) センサの性能がAIとの連携でさらに向上する

これまでのセンサの進化とは、すなわちハードウェアやデバイスの進化そのものでした。今後センサ（という身体性）はAI（という頭脳）との連携を深め、ハードウェアやデバイスの進化だけでは決して実現できないであろう性能（高分解能性、高速性、ローコスト化など）を実現していくはずで。人間のS/N（シグナル-ノイズ比）感度には限界がありますが、機械にとっては、大量のデータを「見る」ことができれば、人間の感度限界を超える微弱なS（シグナル）にも反応することが可能です。これがセンサ性能の飛躍的向上の新しい姿となるでしょう。

### 4. センシングの未来

本巻では特集「機械の五感としてのセンシング」以外の論文にもセンサやセンシング技術が陰に陽に登場します。それだけオムロンの技術はセンサやセンシング技術と密接に関わっているといえます。また冒頭では17年前のオムロンテクニクスに掲載されていたセンシング技術展望をあらためて今の時代に眺めてみました。この類似でいくと、17年後のセンシング技術展望では本巻頭はどのように見られているのでしょうか？—センサ・センシング技術がSINIC理論<sup>5)</sup>での自律社会において、身の回りのいたるところで社会実装され続けている時代において—

- 1) ユビキタスネットワーク社会のセンシング技術の展望. OMRON TECHNICS, 2003, Vol.43, No.1 (通巻145号).
- 2) McCarthy, J.; Hayes, P. J. Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. Machine Intelligence, 1969, Vol.4, p.463-502.
- 3) Dennett, D. "Cognitive Wheels : The Frame Problem of AI". The Philosophy of Artificial Intelligence. Boden, M. A., ed. Oxford University Press, 1984, p.147-170.
- 4) 谷口忠大, イラストで学ぶ人工知能概論, 講談社, 2014.
- 5) 未来接近へのSINIC理論. OMRON TECHNICS, 1970, Vol.10, No.3 (通巻34号).

オムロン サイニックス株式会社  
代表取締役社長

諏訪 正樹

オムロンのコア技術「Sensing & Control +Think」	1 (1)
巻頭言：機械の五感としてのセンシング	
オムロン サイニクエックス株式会社 代表取締役社長 諏訪 正樹	2 (2)
目次	5 (5)

### 特集 機械の五感としてのセンシング

<b>腕時計型血圧計を実現する動脈圧迫技術</b>	
久保 大, 西岡 孝哲	8 (8)
<b>顔画像センシング オンサイトカスタマイズ技術の開発</b>	
相澤 知禎, 星野 晃一, 榊原 恵	17 (17)
<b>非剛体物体・不規則形状物体ピッキングのためのモデルレス把持位置認識</b>	
仁科 有貴, 長谷川 昂宏	23 (23)
<b>外観検査における照明パラメータ高速自動決定技術</b>	
林 信吾	30 (30)
<b>小型熱式フローセンサによる3成分ガス中の酸素濃度測定技術の開発</b>	
中川 慎也	35 (35)
<b>高角度分離分解能を有する到来方向推定を導入した交通監視用ミリ波レーダ</b>	
谷本 雄大, 上野 大, 齋藤 啓介	41 (41)
<b>電池不要なワイヤレスセンサ向けマイクロ波安定給電技術の開発</b>	
村井 彬人, 杉本 義喜, グエン マイン タイ	47 (47)

### 1. オムロンの成長領域でイノベーションを生み出す技術

#### ーファクトリーオートメーションー

<b>盤異常の早期発見を可能にする到達温度予測技術の開発</b>	
池内 涼, 山田 隆章	56 (56)
<b>スイッチング電源小型化に寄与するノイズキャンセル技術</b>	
大西 浩之, 長岡 真吾, 財津 俊行	63 (63)

#### ーソーシャルソリューションー

<b>小型・軽量・高効率 太陽光発電用屋外設置型単相パワーコンディショナの開発</b>	
小林 健二, 野村 康祐, 田内 宏憲	70 (70)

### 2. オムロンのものづくりを支える技術

<b>金属被着体の構造検討による局所加熱での接着剤高速硬化の実現</b>	
平光 則仁, 小森 威和	78 (78)
<b>0402から大型部品までの混載実装を可能にするはんだ振動印刷技術</b>	
西田 勝稔, 山口 浩二, 野中 靖昭	86 (86)
<b>異方性材料を用いた樹脂部品の熱変形予測技術</b>	
早田 和也, 横手 康浩, 竹ヶ原 郁夫	92 (92)
<b>アーク遮断現象を定量化するシミュレーション技術</b>	
森地 高大, 濱 開, 井戸田 修一, 田代 真一, 田中 学, Anthony Bruce MURPHY	99 (99)
<b>商品開発における技術要素間のトレードオフを解消するバランス設計手法の革新</b>	
池田 正哲	105 (105)

### 3. 新たな成長領域を生み出す技術

<b>組込機器でリアルタイム実行可能なセキュリティ攻撃検知・分類アルゴリズムの実装</b>	
小河原 徹, 山本 泰生, 曾 珍, 廣部 直樹	112 (112)

最近発表した主な論文	119 (119)
------------	-----------

OMRON's Core Technology "Sensing & Control +Think" .....	1 (1)
Introduction; Sensing as the Five Senses of a Machine	
SUWA Masaki, President, OMRON SINIC X Corporation .....	2 (2)
Table of Contents .....	5 (5)

## Special issue: Sensing as the Five Senses of a Machine

<b>Arterial Compression Technology for a Watch-type Blood Pressure Monitor</b>	
KUBO Takeshi and NISHIOKA Takanori .....	8 (8)
<b>Development for On-site Customization Technology on Facial Image Sensing</b>	
AIZAWA Tomoyoshi, HOSHINO Koichi and SAKAKIBARA Kei .....	17 (17)
<b>Model-less Grasping Points Estimation for Bin-Picking of Non-Rigid Objects and Irregular-Shaped Objects</b>	
NISHINA Yuki and HASEGAWA Takahiro .....	23 (23)
<b>Fast and Automatic Lighting Parameters Determination Technology for Visual Inspection</b>	
HAYASHI Shingo .....	30 (30)
<b>Oxygen Gas Concentration Measurement in Ternary Mixture by Small Thermal Conductivity Gas Flow Sensor</b>	
NAKAGAWA Shinya .....	35 (35)
<b>Millimeter-Wave Traffic Monitoring Radar using High-Resolution Direction of Arrival Estimation</b>	
TANIMOTO Yudai, UENO Dai and SAITO Keisuke .....	41 (41)
<b>Development of Stable Microwave Wireless Power Transfer Technology for Wireless Sensor without Battery</b>	
MURAI Akito, SUGIMOTO Yoshiki and NGUYEN Manh Tai .....	47 (47)

## 1. Innovative Technology in OMRON's Growth Area

### - Factory Automation -

<b>Development of "Reaching Temperature Prediction Technology" that Enable Early Detection of Panel Abnormalities</b>	
IKEUCHI Ryo and YAMADA Takaaki .....	56 (56)
<b>Noise Cancellation for Miniaturization of Switched Mode Power Supply</b>	
ONISHI Hiroyuki, NAGAOKA Shingo and ZAITSU Toshiyuki .....	63 (63)

### - Social Solutions -

<b>Development of Small Size, Lightweight, High Efficiency Outdoor Single Phase Solar Inverter</b>	
KOBAYASHI Kenji, NOMURA Kosuke and TAUCHI Hironori .....	70 (70)

## 2. Technology Supporting OMRON's Manufacturing

<b>Realization of High-speed Adhesive Curing by Spot Heating and Structure Consideration of Metal Adhesive Parts</b>	
HIRAMITSU Norihito and KOMORI Takekazu .....	78 (78)
<b>Solder Vibration Printing Technology that Enables Mixed Mounting from 0402 to Large Components</b>	
NISHIDA Katsutoshi, YAMAGUCHI Koji and NONAKA Yasuaki .....	86 (86)
<b>Thermal Deformation Prediction Technology of Resin Parts Using Anisotropic Materials</b>	
SODA Kazuya, YOKOTE Yasuhiro and TAKEGAHARA Ikuo .....	92 (92)
<b>Simulation Technology to Quantify Arc Interruption Phenomena</b>	
MORICHI Takahiro, HAMA Kai, ITODA Shuichi, TASHIRO Shinichi, TANAKA Manabu and Anthony Bruce MURPHY .....	99 (99)
<b>Innovation of the Method for Balancing Trade-off Requirements in Product Design Process</b>	
IKEDA Masaaki .....	105 (105)

## 3. Technology Developing a New Growth Area

<b>Implementation of Real-time Security Attack Detection and Classification Algorithms for Embedded Devices</b>	
KOGAWARA Toru, YAMAMOTO Taisei, ZENG Zhen and HIROBE Naoki .....	112 (112)

New Publications .....	119 (119)
------------------------	-----------



# 特集

## 機械の五感としての センシング



# 腕時計型血圧計を実現する動脈圧迫技術

久保 大, 西岡 孝哲

オムロンヘルスケア株式会社では、いつでも、どこでも血圧を測定できる腕時計タイプのウェアラブル血圧計の開発に取り組んでいる。ウェアラブル血圧計の実現によって測定の機会が増加し1日の血圧変化を継続的にとらえることが可能になるのでさらなる高血圧治療への貢献が期待できる。

しかし常に身に装着しておくことができるようにするためには、従来機種のカフ（空気袋）の幅を半分以下の幅にする必要があった。カフ幅を狭くすると動脈を圧閉するのにより高い圧力が必要になることと、安定して脈波形状を検出できなくなるために、血圧測定精度が悪化するという課題があった。

従来機種では手首を押圧して動脈を徐々に圧閉することと、そのときに動脈内の血圧の脈動に応じて発生する微小圧力振動を含んだカフ内圧力を検出することを1つのカフで実施していた。これに対して手首を押圧することと、押圧される手首にかかる圧力の検出とをそれぞれ別のカフで行う構造とすることで、カフ幅を従来の52mmから25mmと半分以下の幅にすることができ、かつ世界で初めて医療機器認証を取得して測定精度を保証したウェアラブル血圧計の開発に成功した。

## Arterial Compression Technology for a Watch-type Blood Pressure Monitor

*KUBO Takeshi and NISHIOKA Takanori*

OMRON Healthcare Co., Ltd. is working on the development of a watch-type wearable blood pressure monitor that makes it possible to measure blood pressure anytime, anywhere. The increase of the measurement opportunity by the realization of the wearable blood pressure monitor can expect contribution to further hypertensive pressure medical treatment, because it makes it possible to catch a one-day blood pressure fluctuation continuously.

In order to be able to always wear it, it is necessary to make cuff (bladder) width half of conventional model. When the cuff width is reduced, there is a problem that blood pressure measurement accuracy is deteriorated because a higher internal pressure of the cuff is required to occlude the artery and a correct pulse waveform cannot be detected.

Conventionally, only one cuff carries out gradually pressurize of artery of wrist and detection of cuff internal pressure including the minute pressure vibration that occurs by pulsation of the blood pressure. The new cuff structure carries out pressurization the wrist and the detection of the real pressure to be applied to a pressed wrist, by another cuff. It enables it to do cuff width in 25mm and width less than half from conventional 52mm. And it acquired the medical equipment certification for the first time in the world and let the development of the wearable blood pressure monitor which guaranteed measurement accuracy succeed.

### 1. まえがき

#### 1.1 開発の背景

現在では高血圧の治療や血圧管理のために家庭血圧の意

義が臨床上也認められている。

家庭での血圧測定が普及した背景には特別な知識や手技を必要としないオシロメトリック法による血圧測定方法が開発されたこと、大迫研究等の家庭血圧の臨床的価値を裏付ける臨床研究、疫学研究<sup>1),2),3)</sup>の成果の蓄積に基づいた高血圧診断基準が確立したことなどがあげられる。

Contact : KUBO Takeshi takeshi.kubo@omron.com

一方で家庭用血圧計が普及して高血圧診療への利用が進んできた現在においても十分な降圧治療が行われていない事例も多いことが知られている<sup>4)</sup>。その原因の一つとして家庭で朝晩などに数回測定した血圧や病院で診察時に測った血圧だけでは必ずしもその人の1日のうちで様々に変動する血圧の高い部分をとらえられていない可能性があることが考えられる<sup>5)</sup>。

1日中装着して30分～2時間間隔で血圧を測る装置としてはABPM (Ambulatory Blood Pressure Monitoring, 24時間血圧測定)があるが上腕にカフを装着して腰に装着した血圧計本体までゴムチューブでつなぐという不自由なものであり、これを毎日装着して過ごすことは困難である。

そこでオムロンヘルスケア株式会社では、使用者への負担が少なく常時装着していつでも血圧を計測できるウェアラブル血圧計を開発して高血圧診療に更に貢献する取り組みを続けている。

## 1.2 血圧測定方式の選択

最近ではカフを用いずに血圧を測定する機能がスマートウォッチなどのウェアラブル機器に搭載されている例が見られる。しかし現時点では高血圧診療に有効であると認められ、医療機器として承認されているカフを用いた測定方式による血圧計をウェアラブルなものにするこの意義が大きいと考え本血圧計を実現することとした。

カフを用いない血圧測定方式は、動脈内の血流の速さや脈動の大きさなどの血圧変化に相関する特徴量を用いてその変化量を血圧変化量に換算し血圧値を推定する方法である。しかし、正確な測定のためには頻繁に基準とする血圧を別の血圧計で測定する必要がある。なぜなら血圧変化に相関する特徴量は動脈の硬さや弾性の変化にも影響を受けてしまい、そしてこの動脈の変化は自律神経系で調節され感情や運動、食事、睡眠、温度など日常生活の中で刻々と変わってしまうものだからである。

このような原理上の課題を克服できたとしても次に必要なことは、高血圧の診断や治療に用いて従来の血圧計より同等かそれ以上に臨床的な意味があると医学会や多くの血圧測定が必要な人々に向けて証明し、認知してもらうことである。

オムロン株式会社として初の家庭用血圧計を1978年に発売してから日本高血圧学会の高血圧治療ガイドライン2014年版<sup>6)</sup>にて「診察室血圧と家庭血圧の間に診断の差がある場合、家庭血圧による診断を優先する。」と認知されるまでに37年を要している。今後カフ方式に取って代わられる性能を持つ革新的なウェアラブル血圧計が実現できたときにはこれよりはるかに速いスピードで臨床的なエビデンス構築や認知が進むことは予想できるが、それが数年先である可能性は低い。やはり今認められている測定方式が開発することがいち早く高血圧診療に貢献できることだ

と考えられる。

しかし、さらに低拘束でいつでも正確に血圧を測定できる装置を開発することは、血圧管理を精密かつ容易にして高血圧に起因する脳・心血管疾患のイベントの発症を防ぐという社会的課題の解決に直接貢献できることであり、今後も革新的な血圧測定方式や装置の開発に取り組んでいく必要は十分にある。

## 1.3 カフ幅の目標値と技術的アプローチ

前節までに述べたような理由で本開発ではカフを使用した血圧測定方式を採用した。従来から小型で持ち運びに便利な手首式血圧計も開発してきたが、カフを含む手首への巻き付け部分の幅は狭いものでも64mmあり常時装着するには大きすぎる。ウェアラブルな装置とするためにはこの巻き付け部分の幅を少なくとも半分以下とし、それに見合うように本体部分の小型化も必要である。

巻き付け部分の幅の目標を30mmとするとその中に収納できるカフは25mm程度の幅しかとることができない。しかしカフ幅を狭くすると手首動脈を圧迫する力の不足、カフ内圧と実際に動脈にかかる圧力との極端な乖離などが発生するので正しく血圧値を計測できないという課題が発生する。

正確な測定のためには圧迫する腕や手首の太さに応じた適正なカフ幅が必要であることは古くから報告されている。

例えば、Alexanderらによるとカフ内圧を動脈に十分伝えるためには装着する腕の直径の1.2倍以上のカフ幅が必要だとされている<sup>7)</sup>。

自社の手首式血圧計では構造や材料の工夫により適用手首周の最大である215mmに対してカフ幅は52mm、直径比約0.8倍まで狭くすることができている。しかし本開発ではさらにその半分以下であるカフ幅25mmを開発目標とすることにした。これは従来構造の改良の延長では解決できない課題と考え、圧迫構造と圧力センシング方法について見直すこととした。

具体的には従来は一つのカフで手首と動脈の押圧と、その時の圧力と動脈から伝わった微小圧力振動の検出を実施していた。これに対して手首と動脈を押圧するためのカフ(押圧カフ)と手首表面にかかる圧力を検出するためのカフ(センシングカフ)とに機能分担し、さらに押圧時に動脈に伝わる圧力分布を適正にする背板構造を加えるという押圧センシング構造の変更を考えた。次章からこのカフ構造で測定精度を確保しつつカフ幅を半分以下することに成功した開発の詳細について説明する。

## 2. 血圧計の測定原理とカフ幅の課題

### 2.1 オシロメトリック法

血圧測定方法には、動脈内にカテーテルを置き直接圧力を計測する観血血圧計測法と、カフによって外部から加え

た圧力と動脈内圧との相互作用から発生する物理現象を利用して非侵襲的に血圧を推定する非観血血圧測定法がある。

家庭用血圧計としては、非観血血圧測定法であるオシロメトリック法が広く普及している。

オシロメトリック法では上腕や手首に巻いたカフ内の圧力（カフ内圧）を最高血圧以上に加圧した後、徐々に減圧させながらカフ内圧に重畳する圧力振動を検出する。この圧力振動は動脈の内圧すなわち血圧と動脈を締め付ける圧力との関係で発生する。カフ内圧が最高血圧より低くなると圧閉されていた動脈が少し開閉をはじめ、カフ内圧の減少とともに動脈が開くときの面積は大きくなる。さらに減圧して最低血圧よりも低くなると動脈は開いた状態から少し膨らむように動き面積の変化は小さくなる。この動脈の断面積変化はカフに伝達しカフ自体の容積を微小に変化させカフ内圧の微小な振動を発生させる。減圧と微小圧力振動の様子を図1に示す。

図1上段は減圧するカフ内圧と重畳した微小圧力振動を、下段はハイパスフィルタを用いて検出した微小圧力振動波形である。この脈動波形の大きさの変化から最高血圧と最低血圧を決定することができる。カフ内圧を徐々に加圧した場合でも同様の情報を得られるので加圧しながら測る血圧計もある。

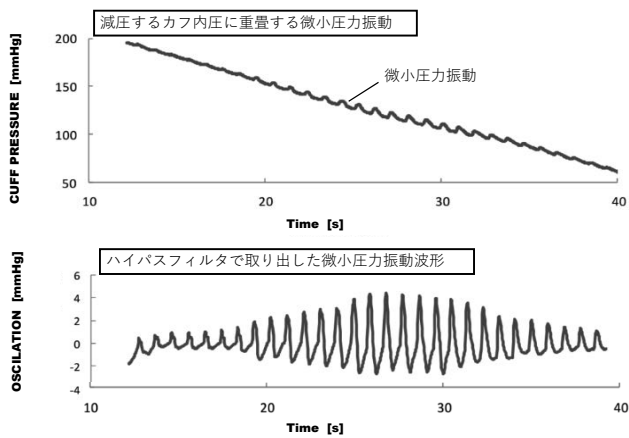


図1 オシロメトリック法のカフ内圧と微小圧力振動波形

## 2.2 カフ幅を狭くした場合の技術課題

血圧の測定に使用する圧力はカフの内圧である。押圧するカフの内圧が押圧下の動脈にかかる圧力とほぼ等しいことを前提として動脈の内外圧の相互作用を利用して血圧を測定する。

カフ幅を狭くすると以下の2つの課題が発生する。

- (1) 動脈を圧閉するのに高いカフ内圧が必要となる
  - (2) カフに重畳する振動のロバスト性が低下する
- それぞれの課題の発生原因について次節に説明する。

### 2.2.1 動脈を圧閉するのに高い圧力が必要

図2に示すように同じカフ内圧  $P_S$  で加圧しても幅を狭くしたカフでは膨らみが  $d_s$  だけ足りなくなる。いわゆるストロークが足りない状態である。この不足分  $d_s$  を補って動脈を圧閉するには、さらにカフ内圧を上昇させてカフを膨らませる必要がある。

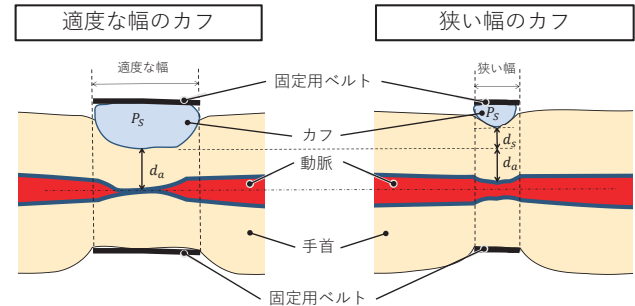


図2 カフ幅のカフ内圧への影響

カフ内圧と手首を押す圧力となるカフ外圧の差（内外圧差）はカフが膨らめば膨らむほど大きくなる。その様子を図3に示す。

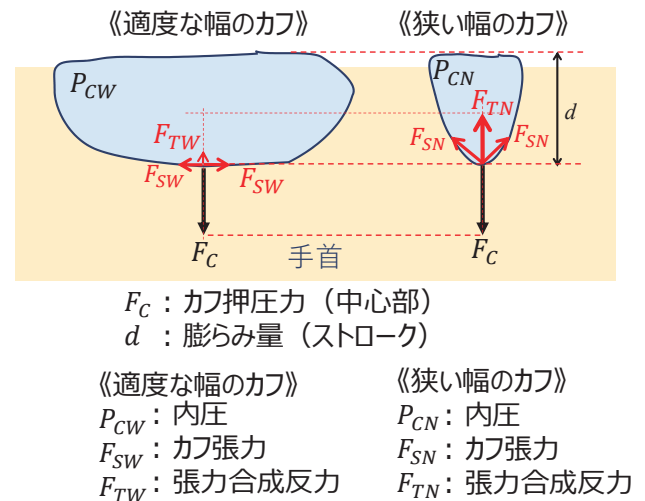


図3 表面張力の増加による圧迫力の阻害

カフの膨らみでカフシートがたくさん伸ばされると張力は増加する ( $F_{SW} < F_{SN}$ )。さらに膨らみによる作用角の増加も起きるので張力の合成力は格段に大きくなる ( $F_{TW} \ll F_{TN}$ )。従って手首に対して同じ押圧力  $F_C$  であってもカフ内圧は狭い幅のカフの方が非常に大きくなる ( $P_{CW} \ll P_{CN}$ )。

### 2.2.2 脈波振動のロバスト性の低下

カフ幅が広い場合は、動脈周辺に図4に示すように頂上部分が均一になる圧力分布を形成することができる。一方狭い幅のカフでは均一な部分がなくなり山形となる。

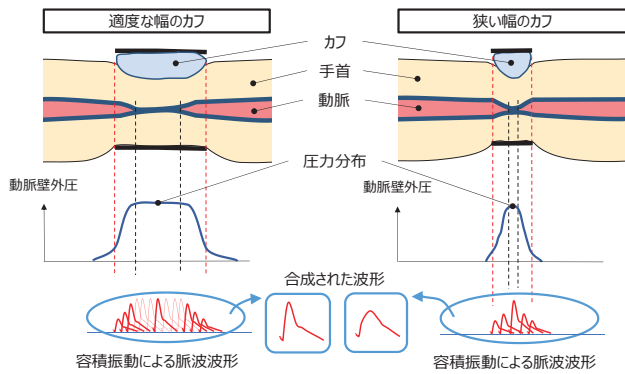


図4 圧分布と容積振動波形の変化

カフ内圧に重畳するカフ圧脈波は脈動する血圧と動脈の外圧との差から生じる動脈の容積変化がカフ容積を振動させて発生する。動脈外壁への圧力分布が均一でない場合には一様でない容積変化が合成されたものがカフ圧脈波として検出される。図4の合成された波形の部分にそのイメージを示す。狭い幅のカフの場合には合成前の主となる波形の割合が少ないので中心部分の波形からはかなりぼやけた形状となることが推測できる。圧分布の様子は手首周や骨格の形状、肉質などといった人それぞれの特徴に左右されるので人毎に誤差の傾向が異なりばらつきを大きくする。またカフ装着のわずかなずれがこの圧分布を変化させるので測定の再現性を悪くしてしまう。

### 3. ウェアラブル血圧計の実現

#### 3.1 装置外観とカフ構造

前章にてカフ幅を狭くすることで生じる課題について述べた。しかし常時装着できる血圧計を実現するためには腕時計のような大きさやデザインに血圧計の機能を持たせることが必要であると考えた。図5に今回開発したカフ構造を搭載した製品、ウェアラブル血圧計 HeartGuide™ を手首に装着した様子を示す。



図5 ウェアラブル血圧計 HeartGuide™

本製品のベルト幅は30mmでありその内側にあるカフの幅は25mmである。ここまで幅を狭くすると手首に時計のような感覚で常時装着することができる。

次にこの血圧計を手首に装着して測定状態にあるときのカフ構造と手首の断面を図6に示す。操作表示部がある本体は図の下部の手首の甲側にある。本体の両端に固定したベルトでカフ構造部分を手首に巻き上部掌側で締結して装着する。

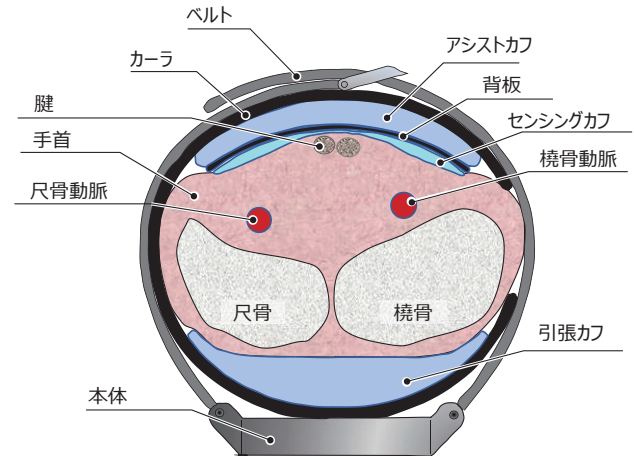


図6 カフ構造の断面図

カフ構造部分はベルトの内側にあるカーラに固定してあり位置決めと装着を容易にしている。上部からアシストカフ、背板、センシングカフの順に配置してあり手首の甲側には引張カフを配置してある。センシングカフが手首の掌側を覆うように位置決めして装着し血圧を測定する。

血圧測定時は引張カフとアシストカフが膨らむことで手首を表裏から挟み込むように徐々に圧迫する。センシングカフは押しつけられている手首表面の圧力とそこに重畳する微小圧力振動を検出する。この微小圧力振動は橈骨および尺骨動脈内の血圧の脈動と動脈周辺の圧力との関係によって変化する動脈の開閉振動がセンシングカフに伝わったものである。背板は動脈に対してできる限りフラットな圧力分布を与える働きをする。

#### 3.2 押圧カフの幅を狭くする

図6は実際の製品の構造を示しており、引張カフとアシストカフが膨らみ上下から手首と橈骨、尺骨各動脈を圧迫する構造となっている。しかしここでは説明をわかりやすくするために図7に示すように一つの押圧カフで手首を押圧する構造を考えることにする。

押圧カフには前章2.2.2節で述べたロバスト性の課題を発生させないためにフラットな圧力分布で動脈の押圧、圧閉ができること、という要求がある。

フラットな押圧分布をもって動脈を圧迫するためには手

首表面をフラットに押圧する必要がある。そのために背板を導入してフラットな押圧面を作ることにした。

図 7 に背板の有無による圧力分布の変化を示す。

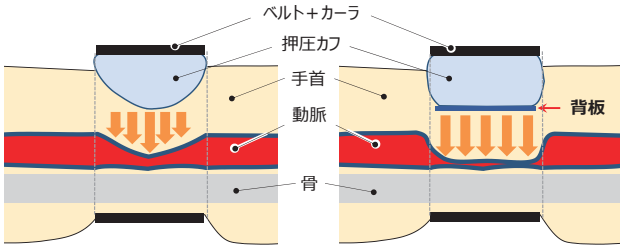


図 7 背板による圧分布のフラット化

### 3.3 背板によるフラットな押圧力分布の形成

フラットな押圧分布を作ることができるかどうかをまず CAE (Computer Aided Engineering) 解析プログラムを用いて動脈にかかる圧力分布をシミュレーションすることで確認した。

押圧カフの内圧を 300mmHg まで加圧したときの動脈周辺の圧力と皮膚表面の圧力分布を 3 種類のカフ幅でシミュレーションした結果を図 8 に示す。

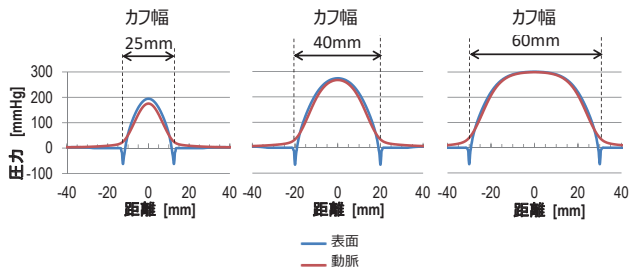


図 8 圧力分布シミュレーション

カフ幅 60mm (右) は既存の手首式血圧計のカフ幅に近い条件、カフ幅 25mm (左) は今回の目標である条件、中間条件としてカフ幅 40mm を加えた。

カフ幅 60mm では圧力分布の頂点は押圧した 300mmHg とほぼ一致しており頂上付近には若干フラットな部分も存在する。しかし他の 2 つの狭いカフ幅条件では圧力の最大部分でも 300mmHg には達しなかった。このシミュレーションでは前項 2.2.1 で述べた通りの結果が得られた。

次に幅 25mm のカフに背板を張り付けた条件でカフ内圧を 300mmHg まで加圧したときの動脈周辺の圧力と皮膚表面の圧力についてシミュレーションを実施した。結果を図 9 に示す。

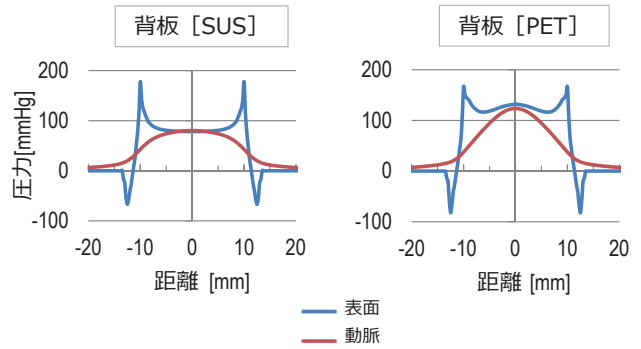


図 9 圧力分布シミュレーション (背板あり)

背板の条件は厚さ 0.15mm の金属板 (SUS) と PET 樹脂 (厚さ 0.35mm) とした。

シミュレーションの結果では動脈周囲にフラットな分布がみられるのは金属 (SUS) の背板の方だけであった。PET 樹脂は屈曲して手首表面自体をフラットに押しなくなったと考えられる。

しかしこの結果からフラットな圧力分布は軸方向の板の固さである程度コントロールできることが分かった。そこで手首の軸方向では屈曲しにくく周方向では手首の曲面にフレキシブルにフィットする構造の背板を製作して押圧カフに張り付け圧迫構造を実現することとした。

またどちらの条件でも動脈付近の圧力は押圧した 300mmHg よりもかなり低く 100mmHg 前後である。これは前述のようにカフ幅を狭くすると動脈への到達圧が低下するのに加えて、背板を導入するとさらに到達圧が低下する傾向にあることを示している。

### 3.4 押圧カフ+センシングカフ構造

背板を導入し調整することで 3.2 節 図 7 の右側に示した圧迫構造が実現できた。そこでこの圧迫構造で実際に人体の手首を押圧したときに動脈にかかる圧力と押圧カフの圧力との間にどの程度の差が生じるのかを確認する実験を行った。

図 10 にその様子を示す。最高血圧が 110 mmHg の被験者の手首を徐々に加圧していくと約 22 秒付近でフィルタ脈波の振動がほぼ消失した。フィルタ脈波は脈 1 拍ごとの最低血圧から最高血圧までの動脈内の圧力振動と動脈周囲の圧力との関係から生じる脈動を抽出したものである。被験者の動脈周辺に最高血圧の 110mmHg よりも若干高い圧力がかかったときに動脈は圧閉しフィルタ脈波は振動しなくなる。

この 22 秒時点での押圧カフの内圧は約 255 mmHg である。すなわち動脈に対して伝わった圧力との差圧は約 145mmHg 近く生じている。これは前の 3.3 節で述べたようにカフ幅を狭くしたことと背板を取り付けたことで生じた実際の圧力差である。

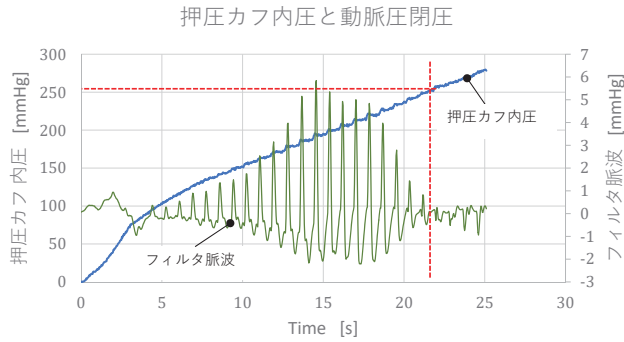


図 10 押圧カフ内圧と動脈圧閉圧

押圧カフの内圧が動脈付近の圧力とかけ離れており血圧計測にカフ内圧値は使用できない。したがって動脈付近にかかる圧力を別の手段で計測する必要がある。そこで背板と手首表面との間に圧力センサーを挟み圧力を検出することを考えた。

圧力センサーとしては面圧センサーやひずみゲージを複数取り付けなどの方法が考えられるが感圧面には手首の腱や骨格などの固い部分もありこれらの部位の押圧に対する反力は強いのでまだらな圧力分布が生じる。この圧力分布から動脈にかかる圧力を推定するには3次元での複雑な解析が必要になり現実的ではない。

またひずみゲージはゲージを張り付ける起歪体自身が感度や精度を決めるので手首の押圧に合わせてフレキシブルに変形する背板の下で血圧測定が可能な圧力分解能と精度得ることは困難である。

そこで考えたのが薄いシートの周囲を溶着して袋状の構造にしたセンシングカフである。図 11 に微量な流体を注入したセンシングカフが押圧カフに背板を介して押され生体を圧迫する様子を示す。

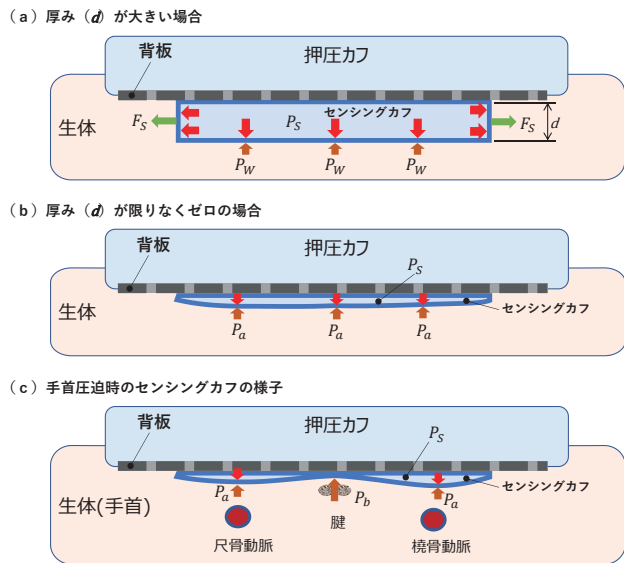


図 11 センシングカフによる圧力センシング

図 11 の (a)、(b)、(c)、においてセンシングカフ内圧を  $P_s$  とする。図 (a) はセンシングカフに左右の壁 (厚み  $d$ ) が大きい場合を示している。この場合内圧  $P_s$  によって生じた横向きの力  $F_s$  がセンシングカフの上下のシートを左右に引っ張るので生体の表面圧  $P_a$  とセンシングカフ内圧  $P_s$  は  $P_s > P_w$  の関係となる。両者の差を小さくするには限りなく壁の高さ  $d$  を小さくすればよいことが分かる。

図 (b) に  $d$  をほぼゼロとしたセンシングカフが生体を圧迫している様子を示す。このときは横向きに引っ張る力はほとんど発生しないので  $P_s \approx P_a$  が成り立つ。

次に図 (b) の構造で手首を圧迫したときの断面の様子を図 (c) に模式的に示す。手首には腱と橈骨、尺骨の両動脈を示してある。普通腱は硬く張力を持っているので押圧に対する強い反力  $P_b$  がセンシングカフを部分的に押しつぶす。逃げた流体が両動脈上の比較的柔らかい組織上に溜り内圧  $P_s$  と皮膚表面圧  $P_a$  がバランスしている。流量が微少で膨らみが小さい場合には  $P_s \approx P_a$  が成り立ち、生体を垂直に押ししているとすると皮膚表面圧  $P_a$  は動脈壁周辺にかかる圧力とほぼ等しいと考えることができる。従ってセンシングカフ内圧  $P_s$  は動脈壁にかかる圧力に非常に近い圧力であることが期待できる。

なおセンシングカフに注入する流体の材料は微量なので非圧縮であることや動脈の振動の伝達の妨げにならないように粘性が低いことが望ましい。しかし水などの流体をセンシングカフ内に一定微量保持しておくことは現実的ではない。したがって圧縮性はあるが血圧計のポンプや弁で制御可能な空気を測定のと度一定量を充填することにした。センシングカフ内の空気量は圧力検出感度に影響し、測定精度に直接関係するのでその注入量のロバスト性の確保や注入する量の最適化には多くの検討が必要であったがここでは説明を省略する。

### 3.5 背板とセンシングカフのしわと折れ

次に血圧の高い人を測定するためさらに高圧に加圧すると血圧測定誤差のばらつきが大きくなる現象が発生した。これは高圧になると手首がさらに圧縮されて装着時に背板とセンシングカフが乗った範囲の沿面距離が短くなってしまいうために屈曲や皺が発生することが原因であると考えられた。

模擬手首を圧迫して X 線 CT によって約 300mmHg で加圧したときのセンシングカフの屈曲の様子を図 12 に示す。

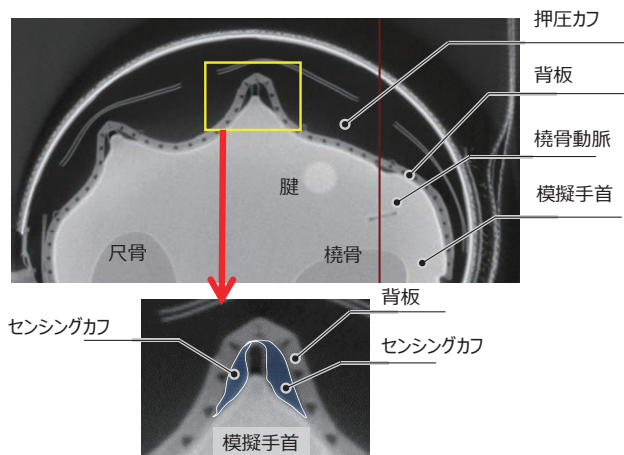


図 12 押圧方式による屈曲の例

屈曲したセンシングカフと背板が模擬手首を掴むような形になっており、その先端に空気が集まっている。この部分は手首表面に正対しておらず血圧と直接関係しない圧力なので測定誤差を大きくかつ、ばらつかせていると考えられた。正しく手首表面の押圧圧力を検出するためには突っ張りや皺ができないように背板とセンシングカフを押し付ける必要がある。

### 3.6 引張カフで屈曲を解決

そこで装着したときの状態のまま背板とセンシングカフを引張って手首を圧迫する方法を考えた。これを実現するために引張用のカフ（引張カフ）を手首の甲側に設けこのカフの膨らみを利用して圧迫することとした。

引張構造にすることでセンシングカフは突っ張ったり皺になったりすることなく掌側の手首表面に張り付き手首を押圧することができるようになった。改善した圧迫の様子を図 13 に示す。

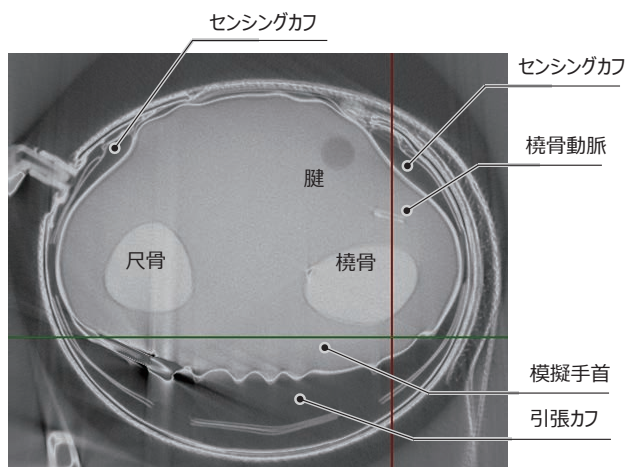


図 13 引張方式のセンシングカフの様子

実際の製品では手首の圧迫を効率的にしてユーザビリティを向上させるための補助として背板の外側にアシストカフを追加している。

### 3.7 狭い幅のカフでの圧迫構造の実現

手首式血圧では従来は52mm以上のカフ幅がないと医療機器としての血圧測定精度への要求を満たすことが難しかった。

しかし今回、背板、センシングカフ、引張カフなどを使った狭い幅の圧迫構造を開発したことで約25mmという狭いカフ幅でも十分な手首動脈の圧迫と圧力センシング性能を得られたので、目的とする“腕時計のように常時手首に装着していつでも測定することができる血圧計”を製品化することができた。

血圧測定精度とウェアラブル血圧計としての有用性、および製品仕様の概略については次章で説明する。

## 4. 腕時計型血圧計の測定精度と有用性

2019年1月にアメリカFDA（U.S. Food and Drug Administration, アメリカ食品医薬品局）の医療機器認証を取得した腕時計タイプのウェアラブル血圧計 Heart Guide™ を発売した。常に変化する血圧の変動を捉えることで、健康診断だけではわからない高血圧のリスクや個人ごとに異なる血圧変動の特徴を把握することが可能となる。

### 4.1 測定精度

血圧計の測定精度については、米国の採用する非観血圧計の自動血圧計の臨床試験規格であるANSI/AMMI/ISO81060-2:2013が要求する臨床精度を満足している。その結果を表1に示す。その精度論文はThe Journal of Clinical Hypertension<sup>8)</sup>に掲載され、本腕時計タイプのウェアラブル血圧計の正確性が示された。

表 1 臨床精度結果

	Validation for HEM-6410T-ZM (米国向け M サイズ)	Validation for HEM-6410T-ZL (米国向け L サイズ)
Difference of SBP for criterion1,mmHg	-0.9±7.6 (passed)	2.4±7.3 (passed)
Difference of SBP for criterion2,mmHg	-0.9±6.8 (passed)	2.4±6.5 (passed)
Difference of DBP for criterion1,mmHg	-1.1±6.1 (passed)	0.7±7.0 (passed)
Difference of DBP for criterion2,mmHg	-1.1±5.5 (passed)	0.7±6.5 (passed)

Date are expressed as means ± standard deviations.

また、ABPM（Ambulatory Blood Pressure Monitoring, 24時間血圧測定）とウェアラブル血圧計 Heart Guide™ の夜間を除く日中での血圧測定比較も実施され、ウェアラブル血



圧計 Heart Guide™ の測定値は、日中血圧計測のスタンダードである ABPM と同等であり、高血圧診療の信頼性を高める可能性が示された<sup>9)</sup>。

#### 4.2 製品仕様

図 14 に製品外観、表 2 に製品の主要な仕様を示す。バンド幅は、これまでの従来機種種の 64mm から半分以下の 30mm を実現した。



図 14 製品外観

表 2 製品仕様

Model	BP8000-M (HEM-6410T-ZM)
Dimensions	Diameter approximately 48 mm, Case thickness approximately 14 mm, Band width approximately 30 mm
Weight	Approximately 115 g
Display	Transflective memory-in-pixel LCD
Measurable wrist circumference	160 to 190 mm
Battery life	Two days (8times/day measurements)

## 5. むすび

カフ幅を狭くすると動脈を圧閉するのにより高い圧力が必要になることと、安定して脈波形状を検出できないために、血圧測定精度が悪化するという課題があった。従来機種種では手首を押圧して動脈を徐々に圧閉することと、そのときに動脈内の血圧の脈動に応じて発生する微小圧力振動を含んだカフ内圧力を検出することを 1つのカフで実施し

ていた。上記課題を解決するために手首を押圧することと、押圧される手首にかかる圧力の検出とをそれぞれ別のカフで行う構造とすることで、従来機種種のバンド幅 64mm から半分以下の 30mm を実現した。また、本稿では記載していないが、本体サイズも従来機種種の約 3分の1に小型化することで、腕時計タイプのウェアラブル血圧計を実現した。

オムロンヘルスケア株式会社は、血圧測定の頻度を高めて、危険な血圧変動をとらえ、疾病リスクを予測し、脳・心血管疾患の発症を防ぐ「ゼロイベント」に取り組んでいる。開発した腕時計タイプのウェアラブル血圧計は、その第一歩となる。今後は、より多くの人に身につけてもらうために、更なる小型化を行い、睡眠時の夜間計測も可能にすることで、いつでも、どこでも、だれでも血圧測定できることによって「ゼロイベント」の実現を目指す。

#### 参考文献

- 1) Kubota, H. History of blood pressure. The Japanese Journal of Medical Instrumentation. 2010, Vol.80, No.6, p.615-621.
- 2) Shirasaki, O. Roles and advancements of blood pressure monitors in cardiovascular medicine. The Japanese Journal of Medical Instrumentation. 2010, Vol.80, No.6, p.622-631.
- 3) 今井潤, 大久保孝義, 菊谷晶浩, 橋本潤一郎. 家庭血圧の臨床応用. 日本内科学会雑誌. 2004, Vol.93, No.9, p.202-209.
- 4) Rapsomaniki, E; Timmis, A; George, J; Rodriguez, M; Shah, A; Denaxas, S; White, I; Caulfield, M; Deanfield, J; Smeeth, L; Williams, B; Hingorani, A; Hemingway, H. Blood Pressure and Incidence of Twelve Cardiovascular Diseases: Lifetime Risks, Healthy Life-Years Lost, and Age-Specific Associations in 125 Million People. Lancet. 2014, Vol.383, No.9932, p.1899-1911.
- 5) Pickering, TG. The ninth Sir George Pickering memorial lecture. Ambulatory monitoring and the definition of hypertension. J Hypertens. 1992, Vol.10, p.401-409.
- 6) 日本高血圧学会高血圧治療ガイドライン作成委員会. 高血圧治療ガイドライン 2014 [JSH2014]. 特定非営利活動法人日本高血圧学会, 2014, p.15.
- 7) Alexander, H; Cohen, ML; Steinfeld, L. Criteria in the choice of an occluding cuff for the indirect measurement of blood pressure. Medical & Biological Engineering & Computing. January 1977, Vol.15, p.2-10.
- 8) Kuwabara, M; Harada, K; Hishiki, Y; Kario, K. Validation of two watch-type wearable blood pressure monitors according to the ANSI/AAMI/ISO81060-2:2013 guidelines: Omron HEM-6410T-ZM and HEM-6410T-ZL. J. Clin. Hypertens. 2019, Vol.21, p.853-858.
- 9) Kario, K; Shimbo, D; Tomitani, N; Kanegae, H; Schwarts, JE; Williams, B. The first study comparing a wearable watch-type blood pressure monitor with a conventional ambulatory blood pressure monitor on in-office and out-of-office settings. J. Clin. Hypertens. 2020, Vol.22, p.1-7.

## 執筆者紹介



**久保 大 KUBO Takeshi**  
オムロン ヘルスケア株式会社  
開発統轄本部 技術開発統轄部  
商品先行開発部  
専門：ソフトウェア工学



**西岡 孝哲 NISHIOKA Takanori**  
オムロン ヘルスケア株式会社  
開発統轄本部 技術開発統轄部  
商品先行開発部  
専門：材料工学

---

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

# 顔画像センシング オンサイトカスタマイズ技術の開発

相澤 知禎, 星野 晃一, 榊原 恵

本稿では、顔の大きな傷痕や、目、鼻、口などの顔器官の一部の欠損などが原因で顔画像センシングが困難なユーザに対して、オンサイトでのカスタマイズにより、顔検出や顔向き推定などを精度良く実施するための手法を提案する。この手法は、簡易なパラメータ設定のみを要し、顔画像処理時に画像から抽出される顔特徴量についての再学習を必要としない。元々精度良くセンシングできていた顔に対する性能や処理速度を維持しながら、カスタマイズ対象ユーザのセンシング精度を向上できる。併せて、カスタマイズおよびその精度検証に必要な顔画像データを、オンサイトに持ち運び可能な簡易な装置で、対象ユーザに大きな負担をかけることなく収集する方法も示す。実際に、人物の顔画像を用いた実験で、本提案手法の有効性を確認した。

## Development for On-site Customization Technology on Facial Image Sensing

AIZAWA Tomoyoshi, HOSHINO Koichi and SAKAKIBARA Kei

We propose a novel method for on-site software customization to improve performance of facial image sensing. In cases that a user has following facial characteristics, it is difficult to perform facial image sensing with high accuracy:

- Big scars on the face.
- Defects, deformations of the facial parts such as eyes, nose, and mouth.

According to our approach, only setting some simple parameters is needed, on the other hand, no relearning process on facial feature values is needed. So, it brings high performance of his/her facial image sensing as well as general. Also, we show how to collect the intended user's facial images for the software customization and its accuracy validation by using the portable and user-friendly equipment. We have confirmed the effectiveness of our proposed method by the experiments using actual facial images.

### 1. まえがき

画像から人の顔を検出し、顔の向き、目開閉、視線などを推定する顔画像センシング技術は、デジタルカメラの顔オートフォーカスや、映像監視システムの人物シーン抽出など、様々な分野で人々の利便性を向上させるための重要な役割を果たしてきた<sup>1)</sup>。

近年においても、自動車業界におけるドライバーモニタリング<sup>2)</sup> や、生活サービス業界における高齢者見守り<sup>3)</sup> など、各業界で顔画像センシング技術の活用がますます進んでおり、より多くの人々の安心・安全を支える技術として、一層期待が高まっている。

そのためには、ユーザに依存することなく、一人ひとりに対するセンシングが精度良く実施されることが重要である。しかしながら、ケガなどにより、顔に大きな傷痕がある場合や、目、鼻、口などの顔器官の一部が欠損、もしくは大きく変形している場合、又は先天性の疾患などにより、顔器官の配置が平均的な位置からずれている場合などには、顔画像処理時に画像から抽出される顔特徴量と、参照される学習済みの顔特徴量との差異が大きくなり、顔画像センシングを精度良く実施することが難しくなる(表1)。

そのような場合、例えば、ドライバーモニタリングにおいては、脇見や居眠りなどの状態判定精度に影響を及ぼし、ユーザの安心・安全を担保できない。個々人の走行履

Contact : AIZAWA Tomoyoshi tomoyoshi.aizawa@omron.com

歴など顔画像センシング以外の間接的情報に基づく運転状態推定の手法もあるが<sup>4)</sup>、顔向きや目の開閉を直接センシングするわけではなく、履歴情報からの間接的な推定であるため、非常事態への対応が困難である。

そこで、対象ユーザについての顔画像センシングを精度良く実施するためのカスタマイズが必要となる。ここで、ユーザにメーカーの事業所や工場などに足を運ばせることは、大きな負担感を抱かせることとなるため好ましくない。ディーラーなどオンサイトでのカスタマイズが重要である。本稿では、その実現手法について提案する。

表 1 顔画像センシング困難なユーザの例

分類	例
顔の大きな痕	大きな傷痕、火傷痕、手術痕
顔器官の欠損、変形	(恒常的) 眼帯装着、骨折後の変形
顔器官の配置ずれ	トリーチャーコリンズ症候群

## 2. 顔画像センシング技術の概要

我々の顔画像センシング技術の流れを図 1 に示す。静止画または動画から顔の領域を検出する。次に、顔器官上の特徴点（目、鼻、口の端点など）を検出すると同時に、その位置関係から顔向き角度を推定する。その後、検出特徴点に基づき、各種推定処理を行う。例えば、目の特徴点周辺領域の画像情報から目開閉や視線を推定する。

我々の顔画像センシングの特長は、小型・高速（処理に要する情報量と計算量が小さい）な独自のアルゴリズムにより、メモリや CPU が非常に貧弱な組込み機器・システムにおいてもリアルタイムで高精度に動作する点である。いくつか例を挙げる。顔検出においては、図 2 に示すように、顔の部分的な領域の明暗差に着目した特徴量による顔／非顔の判別を、負荷の軽い大まかな処理から次第に詳細な処理へと進めていく階層構造で行うことで、画像中の大半を占める明らかに顔ではない領域を早い段階で候補から排除し、リアルタイムでの動作を可能としている<sup>1)</sup>。また、顔器官検出・顔向き推定においても、回帰演算に基づき、様々な顔に適合可能な 3 次元顔モデルを 2 次元の顔画像に高速にフィッティングする独自の技術によって、リアルタイム処理を可能としている<sup>5)</sup> (図 3)。

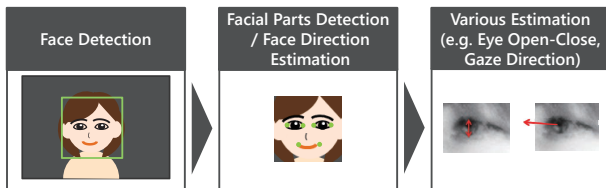


図 1 顔画像センシング技術の流れ

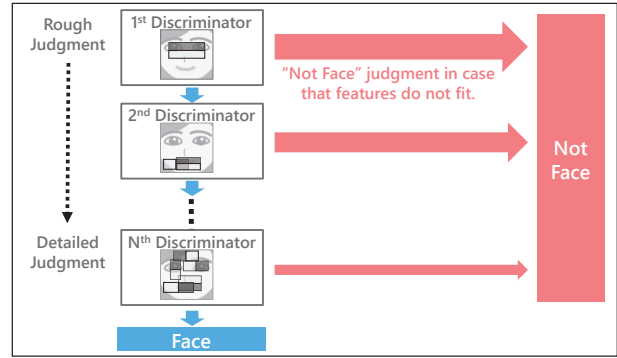


図 2 階層的な顔検出判別器の構造

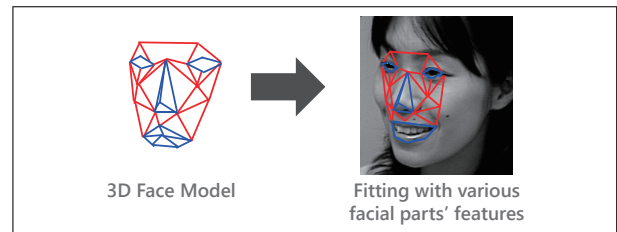


図 3 3次元顔モデルフィッティング

## 3. オンサイトカスタマイズ実現に向けた課題

顔画像センシングのオンサイトカスタマイズ実現のための重要課題として、次の 2 点が挙げられる。

### 3.1 カスタマイズ容易なアルゴリズム

対象ユーザ向けに顔画像センシングのカスタマイズを実施するにあたって、次の点に注意しなければならない。

- ・ 顔画像処理時に参照される学習済みの顔特徴量が、再学習で変更されると、元々精度良くセンシングできていた顔をセンシングできなくなる恐れがある。
  - ・ 対象ユーザのセンシングに特化した個別アルゴリズムを追加すると、センシングに要する処理時間が倍増してしまう。また、追加ソースコードの開発および品質保証で、都度、多くの工数と開発費を要してしまう。
- 以上から、簡易なパラメータ設定のみで、元々の精度や処理速度を維持しながら、対象ユーザのセンシングも精度良く実施するためのアルゴリズムの検討が必要である。

### 3.2 カスタマイズのための顔画像データ収集

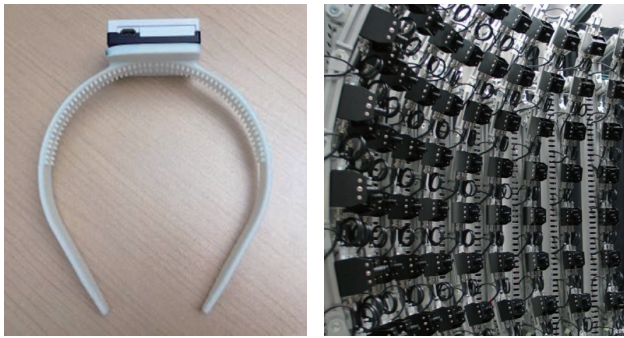
現地で、次の目的で対象ユーザの顔画像データ収集が必要である。

- ・ カスタマイズを実施するため。
- ・ カスタマイズの結果、顔検出や顔向き推定などを精度良く実施できるかどうか検証するため。

とりわけ、顔向き推定の検証に際しては、顔向き角度の真値が分かっている顔画像データを取得する必要がある。そのためには、加速度（ジャイロ）センサ<sup>6)</sup> や、複数台カメラで構成されるマルチアングル撮影装置などを使用すれば

よい（図4）。しかし、前者は、頭部などにセンサを装着しなければならないため、対象ユーザに嫌悪感・負担感を抱かせてしまう恐れがある。また、後者は、ディーラーなどスペースが限られた場所に大規模な装置を持ち込むことは非現実的である。

現場に持ち運び可能な簡易な装置で、対象ユーザにできるだけ負担をかけずに、顔向き角度の真値が分かっている顔画像データを収集する方法の検討が必要である。



(a) (b)

図4 頭部装着部付き加速度（ジャイロ）センサ (a) とマルチアングル撮影装置 (b) の例

## 4. 提案手法

### 4.1 カスタマイズ容易なアルゴリズム

提案手法の流れを図5に示す。本稿では、以下、顔画像センシングにおいて特に重要な、顔検出および顔器官検出・顔向き推定について順次説明する。

#### 4.1.1 顔検出

アルゴリズムの概要を図6に示す。図2に示した従来の顔検出判別器に、階層毎にカスタマイズ対象ユーザの顔の特徴量を登録しておき、その登録特徴量との相関を見る処理を付加した構成とする。従来通り、入力画像から、部分的な領域の明暗差に着目した特徴量を抽出し、階層構造の顔検出判別器で顔／非顔を判別する。ここで、ある階層で「非顔」と判別されても、抽出特徴量があらかじめ登録してある対象ユーザの顔についての特徴量と相関が高ければ、「顔」候補から排除せずに次の階層へと処理を進める。これにより、対象ユーザの顔について、全ての階層で非顔と判別されることなく、精度良く検出できるようになる。また、元々精度良く検出できていた顔については、従来通りの顔検出判別器による判別処理が実施されるため、元々の精度を維持できる。

本アルゴリズムによれば、パラメータ設定は、1ないし数枚の対象ユーザの顔画像から抽出される特徴量の付加のみで、元々学習済みの特徴量についての再学習は必要ない。また、新たに追加された相関演算フローに要する計算

量は、画像からの特徴量抽出や判別器による顔／非顔判別処理の1/10以下であり、リアルタイム性も維持できる。

図5に示すフローのとおり、この顔検出処理において、対象ユーザの顔の登録特徴量との相関が高いときは、対象ユーザの顔と判定し、以降、カスタマイズ対象ユーザ用の顔器官検出・顔向き推定や、目開閉、視線推定などを実行する。逆に、相関が低いときは、従来の顔器官検出・顔向き推定や、目開閉、視線推定などを実行する。

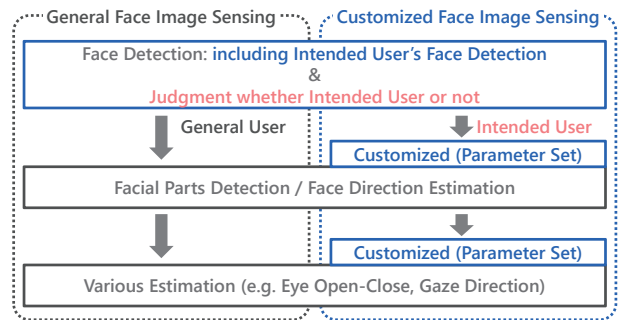


図5 提案手法の流れ

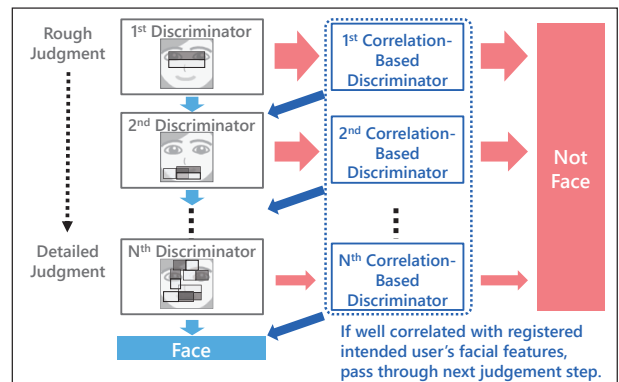


図6 顔検出についての提案手法概要

#### 4.1.2 顔器官検出・顔向き推定

前述したとおり、我々の顔器官検出・顔向き推定は3次元顔モデルフィッティングに基づいている。表1に示すようなケースにおいて、顔器官検出・顔向き推定が困難である理由は、この顔モデルが、対象ユーザの特定の顔器官部位へ適合できず、フィッティングが困難であるためと考えられる。例えば、右目に恒常的に白い眼帯を装着している場合、右目の部分のモデルが、右目の領域以外のところに誤ってフィッティングしてしまい、結果として、顔モデル全体のフィッティングがうまくできなくなる。そのため、特定部位の特徴量を使用せずにフィッティングすることが考えられるが、特徴点が少なくなる分だけ、安定性を欠いてしまう。

そこで、我々は、図7に示すアルゴリズムを提案する。最初は、特定部位の特徴量を使用せずに、3次元顔モデルフィッティング処理をする。ここで、特定部位を除く全て

の部位のフィッティング信頼度が所定の閾値以上の場合、特定部位も含めて精度良くフィッティングできたとみなし、次フレームからは、安定性を高めるため、以下に述べるような前フレームの結果をベースとする処理に移行する。

まず、前フレームのフィッティング結果から、画像上における特定部位の位置を推定し、画像加工により特徴量を補完する。これは、15ないし30フレーム/秒の動画においては、各顔器官点位置の1フレーム毎の動きは微小であるとみなせることを利用している。例えば、特定部位が右目の場合、前フレームのフィッティング結果から、画像上における右目の位置を推定し、その位置をあたかも目のように黒く塗りつぶす画像加工を施し、特徴量を抽出する。これにより、従来の（特定部位の特徴量も使用する）3次元顔モデルでのフィッティングが可能となり、安定して精度良く顔器官を検出し、顔向きを推定できる。

本アルゴリズムによれば、パラメータ設定は、対象ユーザの特定部位の登録のみで、元々の3次元顔モデルについての再学習は必要ない。また、新たな追加処理は、特定部位についての限定された小さな領域の画像加工のみであり、リアルタイム性も維持できる。

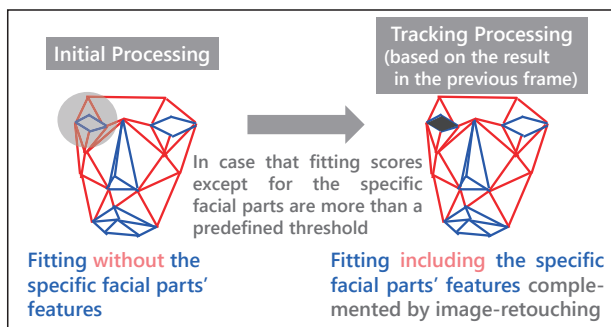


図7 顔器官検出・顔向き推定についての提案手法概要

#### 4.2 カスタマイズのための顔画像データ収集

データ収集システム構成を図8に示す。TOF（Time Of Flight）カメラなど、距離（深度）画像と2次元画像を同一視点で取得可能な撮像装置を用いて、対象ユーザに少しずつ（約5～10°刻みで）上下左右に顔向きを変えてもらいながら、順次、以下のデータの対を同一視点で取得していく。

- ・ 対象ユーザの距離（深度）画像データ
- ・ 対象ユーザの2次元顔画像データ

そして、取得したデータ対から得られる顔器官上の特徴点（目、鼻、口、耳の端点など）の3次元位置データを用いて、各2次元顔画像データにおける顔向き角度の真値を算出していく。まず、基準画像とその顔向き角度を定める。例えば、想定アプリケーションにおけるカメラ（センサ）とユーザの位置関係が正対の場合、任意の正面顔画像

を基準画像とし、その顔向き角度をヨー角（顔向き左右角）0°、ピッチ角（顔向き上下角）0°と定める。次に、図9に示すとおり、顔向き角度が近い2枚の画像間で、任意の3点以上の共通特徴点をテンプレートマッチングにより対応付け、それらの特徴点から成る平面（顔向き平面とは異なってもよい）の法線の相対ベクトル、すなわち、顔向きの相対角度を最小2乗法で算出する。以降、画像を切替えながら、順次、この顔向き相対角度算出処理を繰り返していくことで、各2次元顔画像データの顔向き角度真値を算出できる。ここで、顔の向きに依り、顔向き角度が近い2枚の画像間での共通特徴点異なる。例えば、正面顔では両目や口が共通特徴点となるが、斜め顔では片目が見えづらくなるため、もう片方の目や口に加えて耳などが共通特徴点となる。このように、顔の向きに応じて、適宜、特徴点を切替えて、顔向き角度真値を算出する。

本提案手法によれば、カメラ1台のみのシステム構成のため、現場に容易に持ち運び可能である。また、対象ユーザは撮影時に顔向きを変えるだけでよく、極力負担を抑えた中で、顔向き角度の真値付きの顔画像データが得られる。

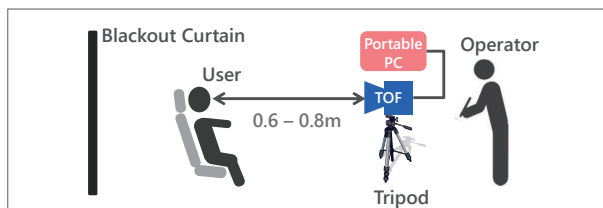


図8 データ収集システム構成

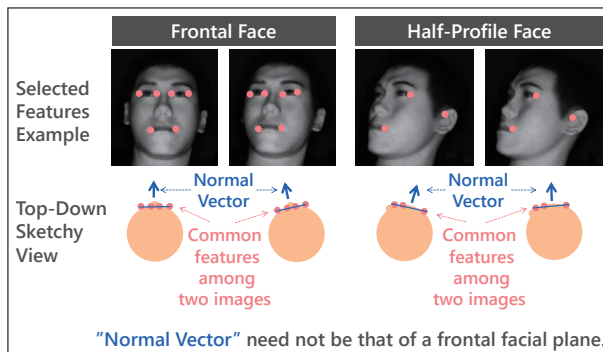


図9 顔向き角度の真値導出方法 補足図

### 5. 実験

提案手法による顔画像センシングのオンサイトカスタマイズの有効性を評価するために、以下の実験を行った。なお、本実験では、アプリケーションとしてドライバーモニタリングを想定した。車両のダッシュボード中央に設置されたカメラでユーザを斜め方向からモニタリングすることを模擬し、ヨー角右向き25°、ピッチ角上向き10°の顔向き角度の画像を真値導出時の基準画像とした。

## 5.1 真値導出の評価

最初に、オンラインで取得した対象ユーザの距離（深度）画像と2次元顔画像のデータ対から、顔向き角度真値が精度良く導出されるかを評価するために、マネキンを用いて実験を行った。まず、図10(a)に示すように、マネキンヘッドを多軸可動な精密ステージ上に置き、図8のデータ収集システム構成におけるユーザの場所に配置する。次に、 $10^\circ$ 刻みで上下左右にマネキンの顔向き角度を変えながら、データ対を取得し、提案手法に従い、各2次元顔画像における顔向き角度を算出する。そして、各々、精密ステージの角度と比較する。

図10(b)に実験結果を示す。グラフの横軸は参照値（精密ステージの角度）、縦軸は実測値（算出された顔向き角度）を示している。ピッチ角、ヨー角ともに、細線で示した傾き  $45^\circ$  の理想直線上にプロットが集中しており、顔向き角度が精度良く算出されていることが分かる。

以上より、カスタマイズ結果検証の際に、提案手法により算出された顔向き角度を真値として参照することの有効性を確認できた。

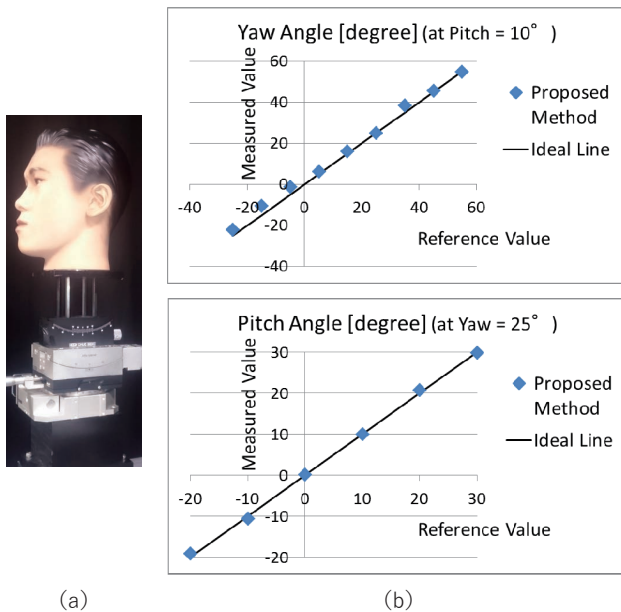


図10 顔向き角度真値導出の実験系 (a) および結果 (b)

## 5.2 カスタマイズの有効性の評価

次に、実際に、人物について、提案手法によるカスタマイズを実施し、顔検出や顔向き推定を高精度化できるかどうかを評価するために、図11に示す2ケースについて実験を行った。ケースAが顔に大きな痕があるケース、ケースBが顔器官の一部が欠損しているケースである。前者は、被験者の右目のすぐ下に直径3cmの灰色の色票（マンセルシート）を付けて大きな痕を模した。後者は、被験者の右目に眼帯を装着した。

実験では、まず、被験者に上下左右に徐々に顔向きを変

えてもらいながら、距離（深度）画像と2次元顔画像のデータ対の動画を取得する。そして、動画から顔向き  $10^\circ$  刻みでデータ対の静止画を抽出し、5.1の実験と同様に、各2次元顔画像における顔向き角度を算出する。本実験では、この値を顔向き角度真値とする。次に、提案手法に従い、カスタマイズ（パラメータ設定）を行う。具体的には、1ないし数枚の2次元顔画像から顔検出用の特徴量を抽出して登録し、また、顔器官検出・顔向き推定用の特定部位登録を行う。本実験では、2ケースともに、正面顔と斜め顔の画像から顔検出用の特徴量を抽出して登録し、また、特定部位として右目を登録した。最後に、データ対の動画のうち、2次元顔画像データを用いて、提案手法による顔画像センシング処理によって顔向き角度を求め、上記の顔向き角度真値と比較する。なお、顔向き角度を精度良く推定するためには、前段処理の顔検出が高精度で実行される必要があることから、本実験では、顔向き角度の比較評価をすることで、顔検出の評価も包含されるとみなす。また、顔向き角度を誤差  $\pm 5^\circ$  以内で推定することを目標とした。

図12に実験結果を示す。グラフの横軸は顔向き角度真値、縦軸は実測値を示している。また、図13に顔画像センシング結果例を示す。ここで、赤枠が顔検出結果、黄丸の各点が顔器官検出結果、そして、黄色の長方形が目の開閉度合の推定結果を表している。

ケースAにおいては、カスタマイズ無しの場合、図13(a)に示すとおり、大きな痕の影響で右目付近のフィッティングがずれてしまう傾向にあったが、提案手法では図13(b)に示すとおり改善された。結果として、図12(a)に示すとおり、ピッチ角、ヨー角ともに、細線で示した傾き  $45^\circ$  の理想直線に対して、各計測点が誤差  $\pm 5^\circ$  以内にプロットされており、顔向き角度が精度良く推定できていることが分かる。一方、ケースBにおいては、カスタマイズ無しの場合、眼帯の影響で顔検出できなかったが、提案手法では図13(c)に示すとおり、顔検出できるように改善されており、さらに、図12(b)から、誤差  $\pm 5^\circ$  以内で顔向き角度を推定できていることが分かる。

以上より、提案手法による顔画像センシングのオンラインカスタマイズの有効性を確認できた。

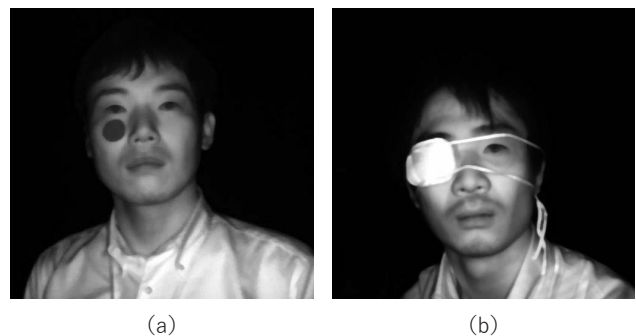
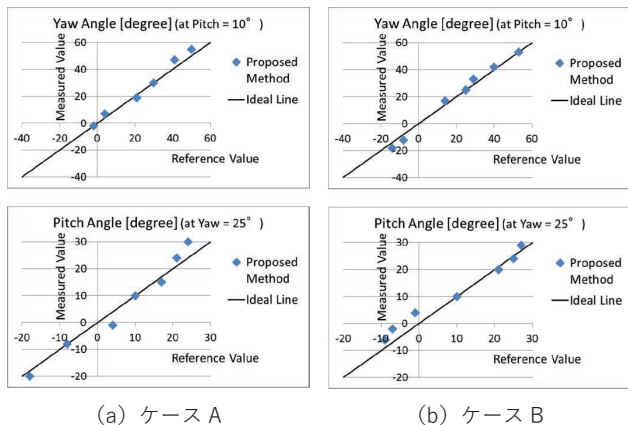


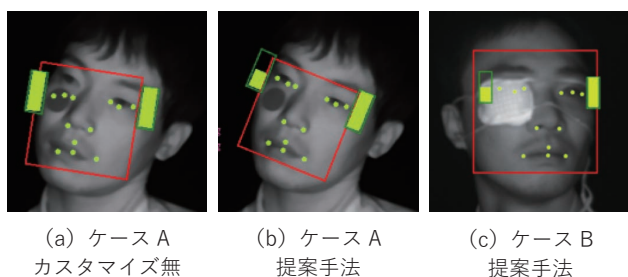
図11 実験ケースA (a) とケースB (b) の画像例



(a) ケース A (b) ケース B

図 12 実験結果：顔向き角度推定結果

(同意書により画像利用許諾確認済)



(a) ケース A カスタマイズ無 (b) ケース A 提案手法 (c) ケース B 提案手法

図 13 顔画像センシング結果例

## 6. むすび

以上、本稿では、顔の大きな傷痕や、目、鼻、口などの顔器官の一部の欠損、大きな変形などが原因で顔画像センシングが困難なユーザーに対して、オンサイトカスタマイズにより、顔検出や顔向き推定などを精度良く実施できるようにするための手法を提案した。

提案手法によれば、簡易なパラメータ設定のみで、カスタマイズ対象ユーザーの顔画像センシングの高精度化が可能であり、さらに、このときの顔向き推定などの精度検証を信頼性高く実施できることを確認した。また、パラメータ設定や検証に必要な顔画像データを、オンサイトに持ち運び可能な簡易な装置で、対象ユーザーに大きな負担をかけることなく収集する方法を確立した。

今後の課題としては、次のような項目が挙げられる。

- ・ 安定性向上：カスタマイズ対象ユーザーの様々な動作に依らず、顔器官点や顔向きなどの安定した検出／推定（顔を手で掻く、鼻や口など顔の一部を手で覆い続ける動作など）
- ・ ロバスト性向上：カスタマイズ対象ユーザーの様相が、オンサイトでの顔画像データ収集時と大きく異なる際の頑健性向上（マスクやサングラスの着用など）
- ・ 精度検証の信頼性向上：真値として参照する計測データ導出時に、特徴点を抽出し難い場合への対策（髪の毛で耳が隠されている場合など）

今後、これらの課題に対して改善を進めていき、ドライバーモニタリングの他、工場での作業者の疲労度センシングや、ヘルスケアのための人の状態理解など様々なフィールドへ技術展開していきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 今江文一，露口卓也，遠藤伸司，山元昌史. 顔検出技術のハードウェア化. OMRON TECHNICS. 2007, Vol.158, p.90-94.
- 2) 日向匡史，木下航一，青位初美，濱走秀人，山下隆義，藤吉弘巨，諏訪正樹，川出雅人. “時系列 Deep Learning を用いたドライバの運転復帰可否レベル推定”. 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU). 2016, No.PS1-63.
- 3) オムロン株式会社. “見守りカメラセンサ『家族目線』”. <https://plus-sensing.omron.co.jp/kazoku-mesen/> (参照 2019-11-01).
- 4) パナソニック IP マネジメント株式会社. 情報処理システム，情報処理方法，およびプログラム. 特開 2018-97804. 2018-06-21.
- 5) 木下航一，小西嘉典，勢世竝，川出雅人. “3D モデル高速フィッティングによる顔特徴点検出・頭部姿勢推定”. 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU). 2008, p.1324-1329.
- 6) 内田奈穂子，胡振程，董延超. “単眼距離カメラを用いた顔向きの推定”. 情報処理学会研究報告. 2014, Vol.2014-MBL-73, No.18/Vol.2014-ITS-59, No.18.

## 執筆者紹介



相澤 知禎 AIZAWA Tomoyoshi  
技術・知財本部 研究開発センタ  
専門：情報工学、画像処理  
所属学会：日本技術士会



星野 晃一 HOSHINO Koichi  
日本電産モビリティ株式会社  
開発統括室 技術開発部  
専門：光工学、画像処理



榊原 恵 SAKAKIBARA Kei  
日本電産モビリティ株式会社  
開発統括室 技術開発部  
専門：ソフトウェア工学

本論文で使用されている画像は、同意書により画像利用許諾確認済です。本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。



# 非剛体物体・不規則形状物体ピッキングのためのモデルレス把持位置認識

仁科 有貴, 長谷川 昂宏

本稿では、ロボットがコンテナにバラ積みされている物体をピッキングするための、把持位置認識を扱う。通常、把持対象物体の三次元 CAD を用いることで把持位置を認識するが、特定の三次元 CAD が存在しない非剛体物体・不規則形状物体では認識が困難になる。非剛体物体・不規則形状物体のピッキングを実現するため、三次元 CAD を用いずに把持位置を認識することを可能にするモデルレス把持位置認識を提案する。二指ハンド向けの提案手法では、左指・右指に対して独立に挿入候補を検出し、組み合わせることで複数の開き幅の把持候補を高速に認識する。吸着ハンド向けの提案手法では、距離画像の局所的な物体面の方向に基づいて平面領域を抽出し、最適な把持位置を認識する。提案手法を用いて、実際にロボットで非剛体物体および不規則形状物体のピッキングを行ったところ、二指ハンドおよび吸着ハンドの両方で 96% 以上の把持成功率を達成した。また、処理時間は Intel(R)Core(TM) i7-7700 @ 3.60 GHz の CPU 上でいずれも 250 msec 以内であり、リアルタイムの高速なピッキングを可能にする。

## Model-less Grasping Points Estimation for Bin-Picking of Non-Rigid Objects and Irregular-Shaped Objects

NISHINA Yuki and HASEGAWA Takahiro

In this paper, we deal with grasping points estimation for robotic bin picking. Usually, grasping points are estimated by using 3D CAD of the object to be grasped. However, it becomes difficult to estimate grasping points for non-rigid objects or irregular-shaped objects which do not have any specific 3D CADs. In order to realize bin picking of non-rigid objects and irregular-shaped objects, we employ a model-less grasping points estimation method that can estimate grasping points without using 3D CAD. As an estimation method for a two-fingered hand, we propose a method that detects insertion candidates independently for the left and right fingers and pairs the candidates to efficiently estimate grasping candidates with multiple opening widths of the hand. As an estimation method for a suction hand, we propose a method that extracts flat areas based on the variance of the local surface orientation of a depth map and estimates the optimal grasping points from the flat areas. Using the proposed methods for two-fingered hand and suction hand, a robot successfully grasped non-rigid objects and irregular-shaped objects with grasping success rate of 96%. Moreover, the computation time of both proposed methods is 250 msec on Intel(R) Core(TM) i7-7700 @ 3.60 GHz, which allows real-time bin picking.

### 1. まえがき

製造現場や物流倉庫において、物体をピッキングし、所定の場所へ移動させる作業を人が担うことが数多く存在する。例えば、自動車工場において生産ラインに部品供給する際には、コンテナ内にバラ積みされている部品を作業員が一つずつピッキングする。このようなライン生産方式は、多くの作業員を必要とし、その中には部品のピッキングのような単純作業のみを担当する作業員も存在する。一

方、近年は労働人口不足が深刻化しており、このような単純作業を機械で置き換えて自動化する需要が高まってきている。自動化するための方法の一つとして、パーツフィーダと呼ばれる部品供給専用の装置を用いることがある。しかし、パーツフィーダは部品毎で専用に設計される特注品であるため、生産ラインの立ち上げ工数が増加してしまう課題がある。これに対して、1台の汎用ロボットを用いてバラ積みされた様々な部品をピッキングし、供給を自動化することで、立ち上げ工数を短縮することが可能となる。

バラ積みピッキングを実現するには、把持対象物体を撮

Contact : NISHINA Yuki yuki.nishina@omron.com

影した画像／距離画像からロボットの最適な把持位置を認識する必要がある。工業用部品のような剛体をピックアップする場合、三次元 CAD モデルを用いて把持物体の位置・姿勢を認識する<sup>1,2)</sup>。しかし、ケーブルや袋物など形状が変化する物体（非剛体物体）や食品や農作物のような個体ごとに形状が異なるような物体（不規則形状物体）では特定の三次元 CAD モデルが存在しないため、把持物体の位置・姿勢を認識することが困難となる。これに対して、物体の位置姿勢を認識することなく、すなわち把持対象物体のモデルを必要とせず、ハンドの形状と計測データから直接、把持位置姿勢を認識するモデルレス把持位置認識が有効である。非剛体物体や不規則形状物体においてその物体の種類や姿勢の推定を必要とする場合、モデルレス把持位置認識を前段処理として使うことになるため安定した把持位置を認識しつつ高速な処理速度が求められる。

本研究では、非剛体物体や不規則形状物体の把持を対象とした高速なモデルレス把持位置認識手法を提案する。産業用ロボットに使われる一般的なハンドとして、二指ハンドと吸着ハンドが存在するが、本研究はそれぞれのハンドを対象とした手法を提案する。二指ハンドと吸着ハンドの例を図 1 に示す。



図 1 二指ハンド（左）および吸着ハンド（右）

## 2. 関連研究

モデルレス把持位置認識には、把持物体の最適な把持位置を学習によって推定する機械学習に基づく手法とロボットハンドのモデルを用いてハンド形状に適した把持位置を探索するハンドモデルに基づく手法に分けることができる。

### 2.1 機械学習に基づく把持位置認識

モデルレス把持位置認識では、事前に物体の情報が与えられないため、様々な物体の最適な把持位置を Deep Neural Network (DNN) により学習させる手法が多く提案されている<sup>3-10)</sup>。Redmon らは入力画像を 7×7 で分割したグリッドと DNN から出力される 7×7 の特徴マップを対応付け、特徴マップの各画素から二指ハンドの把持中心座標、幅・

高さ、回転角度、把持信頼度の 6 次元データを回帰により算出する手法を提案した<sup>6)</sup>。把持領域の推定を Fully Convolutional Network (FCN) によるセマンティックセグメンテーションによる分類問題として解く手法も提案されている<sup>7,8)</sup>。Dex-Net 3.0/4.0<sup>9,10)</sup> では、把持位置周辺のパッチ画像に対して把持の頑健性を確率で出力する DNN を学習する。これらの手法のように DNN を用いることで、高精度な把持位置を認識することが可能となるが、教示付きの大量の学習画像や高スペックな計算マシンが必要となるため導入が困難となる場合がある。

### 2.2 ハンドモデルに基づく把持位置認識

機械学習を必要としない把持位置認識手法としてロボットのハンド形状に基づいて画像から把持位置を探索する手法がある。Fast Graspability Evaluation (FGE)<sup>11,12)</sup> では、距離画像内の物体セグメントにハンド形状を表現した 2 次元バイナリ画像を畳み込むことで高速に把持位置を探索する。FGE を二指ハンドに適用する場合、非剛体物体や不規則形状物体では、個体ごとに大きさが異なるため、複数のハンド開き幅での把持位置探索が必要になり、開き幅の数だけ計算時間が増加してしまうという課題がある。FGE を吸着ハンドに適用する場合、抽出する物体セグメントには平面らしさが考慮されておらず、凹凸が存在するセグメントを吸着把持し、把持成功率が低下してしまうという課題がある。

本研究では、大量の学習画像を用意する必要がないというメリットにより、ハンドモデルに基づく把持位置認識を選定し、前述した FGE の課題を克服するモデルレス把持位置認識手法を提案する。二指ハンドと吸着ハンドの最適な把持位置を同一のアルゴリズムで定義することが困難であるため、本研究では二指ハンド向けモデルレス把持位置認識と吸着ハンド向けモデルレス把持位置認識をそれぞれ別のアルゴリズムとして提案する。

## 3. 二指ハンド向けモデルレス把持位置認識

### 3.1 アルゴリズムの概要

食品等のような非剛体物体や不規則形状物体では、個体ごとに大きさが異なるため、二指ハンドで把持位置を認識するには複数のハンド開き幅での探索が必要になり、開き幅の数だけ計算時間が増加してしまう。この問題に対して、本研究では二指ハンドの左指および右指の各々に対して独立に挿入候補を検出し（単指挿入候補検出）、左指挿入候補と右指挿入候補をペアリングすることで、複数の開き幅の把持候補を高速に認識する。図 2 にアルゴリズムの全体像を示す。からあげのバラ積み为例として用いる。三次元センサで計測した距離画像から把持位置を認識する。三次元センサの光軸回りに対する様々な方向からの把持候

補を探索するために、 $\Delta\theta$  毎に回転した距離画像を生成し、それらから単指挿入候補に基づいて把持候補を検出する。距離画像を斜め方向に探索せずに、距離画像を回転する理由は、画像の水平方向に探索することができ、その方が画像処理の効率が良いためである。各回転距離画像から検出した把持候補を統合し、優先順位付けを行うことで把持位置を認識する。以降、単指挿入候補検出、ペアリング、優先順位付けについて説明する。

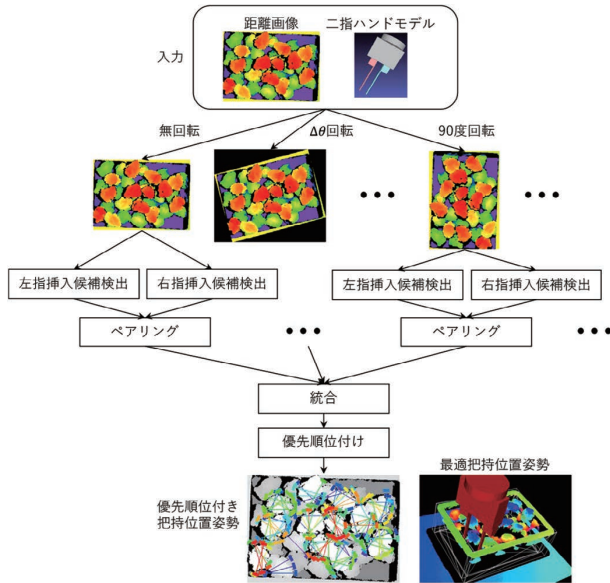


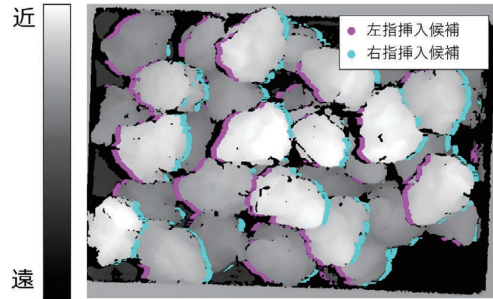
図2 二指ハンド向けモデルレス把持位置認識アルゴリズムの全体像

### 3.2 単指挿入候補検出

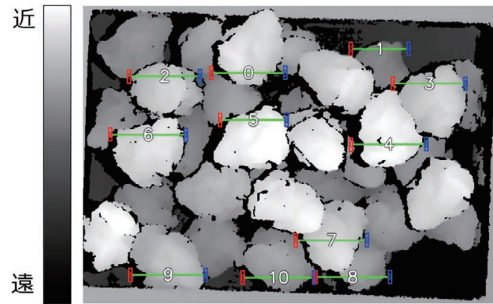
二指ハンドの左指および右指を挿入可能な候補位置をそれぞれ独立に検出する。二指ハンドにより物体を安定して把持するためには、以下の二つの把持条件が重要である。

1. 物体を確実に把持するための十分な高さのエッジが存在する
2. 指を挿入したときに干渉を起こさない十分なスペースが存在する

これらを満たす単指挿入候補を検出する。まず、距離画像に水平方向の微分フィルタを適用し、水平方向の距離エッジ強度を算出する。距離エッジ強度の絶対値が一定値以上の画素を取り出す。このとき、距離エッジ強度の符号が負の画素は、距離画像の  $x$  軸のプラス方向に沿って、三次元センサからの距離が遠くから近くに変化しているので左指挿入候補とし、符号が正の画素は近くから遠くに変化しているので右指挿入候補とする。この結果には干渉を起こす候補が含まれるので、求めたエッジ点に左指もしくは右指を挿入し、指と計測点群が干渉する場合には候補から除外する。図3(a)に単指挿入候補の例を示す。



(a) 単指挿入候補



(b) ペアリング結果

図3 単指挿入候補およびペアリング結果

### 3.3 ペアリング

左指挿入候補と右指挿入候補をペアリングすることで把持候補を生成する。任意の左指挿入候補に対するペアリング対象となる右指挿入候補は、事前に距離画像を回転しているため、同じ  $y$  座標の水平方向に存在する。左指挿入候補の右側かつハンドの開き幅内に存在する右指挿入候補に対してペアリングする。各ペアにおいて、左右の指で物理的に把持可能な物体の凸部の高さ（凸部高さ）を計算し、その値がしきい値よりも大きい場合には把持候補として登録する。左指挿入候補および右指挿入候補のそれぞれにおける、エッジの上端の距離を  $z_{top}^{\{Left, Right\}}$ 、下端の距離を  $z_{bottom}^{\{Left, Right\}}$  とするとき、凸部高さは  $\min(z_{bottom}^{Left}, z_{bottom}^{Right}) - \max(z_{top}^{Left}, z_{top}^{Right})$  として計算できる。把持候補は同じ位置に集中して求まることが多いため、近傍の把持候補をマージすることで把持候補の絞り込みを行う。図3(b)にペアリング結果の例を示す。{赤色、青色}の線は選択された{左指、右指}挿入候補を表しており、ペアが緑色の線で繋がれている。

### 3.4 優先順位付け

複数の回転距離画像から探索した把持候補を統合し、優先順位が高い順に並べ替えを行う。「把持しやすさ」は、距離が近い、凸部高さが高い、把持部の直線性が高いなど様々な観点で定義できる。提案手法では、距離、凸部高さ、把持部の直線性の3種類の評価指標を組み合わせて総合的な評価値を算出する。評価値が高い順に並べ替

えることで優先順位付けを行う。

## 4. 吸着ハンド向けモデルレス把持位置認識

### 4.1 アルゴリズムの概要

吸着ハンドにより物体を安定して把持するには、以下の二つの把持条件が重要である。

1. 確実な吸着を実現するために、実現把持物体の表面に対して垂直にアプローチ
2. 吸着パッドからの空気漏れを起こさないように、把持物体の平面領域を吸着

これらの二つの吸着把持条件を満たすために、距離画像の法線ベクトルの分散に基づいて平面領域を抽出し、把持候補を認識する。法線ベクトルは三次元距離データの局所的な面の向きを表すベクトルである。そのため、法線ベクトルが周囲で同じ方向を向いている場合、すなわち分散が小さい場合は平面領域であると言える。把持位置におけるアプローチ角度は、平面領域抽出時に算出した法線ベクトルを再利用することができるため、複雑な計算処理を必要とせず、高速な把持位置認識が可能となる。

提案手法による吸着把持位置認識の流れとして、まず距離画像から物体の平面領域を抽出し、平面領域の各画素から把持のしやすさ(把持評価値)を算出する。次に把持評価値の高い位置における把持姿勢から、周囲の三次元点群とハンドモデルの干渉判定を実施し、把持候補として登録する。以降、図4(a)の蝶番のバラ積みの距離画像を例として、提案手法の詳細を説明する。

### 4.2 法線ベクトルの分散に基づく平面領域抽出

入力距離画像の局所矩形領域内の三次元距離データ  $(x_i, y_i, z_i)$  に対して  $z_i = ax_i + by_i + c$  を満たす平面モデルを最小二乗法によりフィッティングする。平面モデルの係数  $a, b$  から法線ベクトルの  $x, y$  軸方向の角度を算出し、法線マップを生成する(図4(b))。

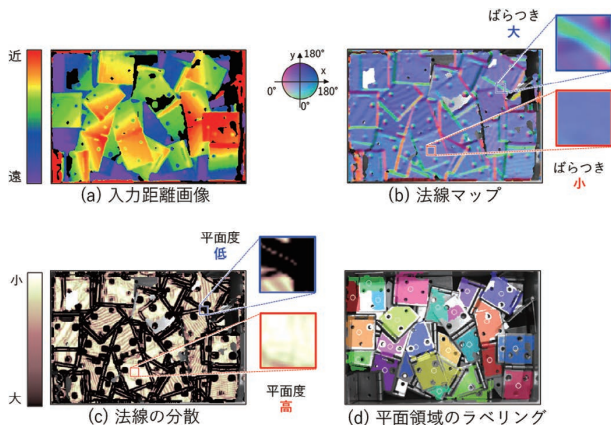


図4 平面領域の抽出処理

平坦な領域は法線ベクトルのばらつきが小さくなり、凹凸がある領域は法線ベクトルのばらつきが大きくなる。従って、局所矩形領域内において、法線ベクトルの分散を算出する(図4(c))。そして、局所矩形領域内から算出した法線ベクトルの分散が所定の閾値以下である場合に平面ラベルを割り当て、平面領域のバイナリ画像を生成する。平面領域のバイナリ画像に対してラベリング処理を施し、ラベル付き平面領域を取得する(図4(d))。

以上の処理により、バラ積み物体の平面領域を抽出することができる。しかし、同じ高さの把持物体が隣接している状況が発生した場合、物体境界付近の距離値の変化が微小であるため、複数の物体平面を単一の物体平面として抽出してしまうアンダーセグメンテーション問題が発生する。そこで、ラベル付き平面領域画像に対して watershed法<sup>13)</sup>による領域分割を適用する。watershed法は平面領域画像の距離変換処理、領域収縮、再ラベリング、ラベリング領域の膨張処理から構成される。距離変換は、平面領域の各画素に対して非平面領域から距離を計算する処理であり、非平面領域から距離が遠い平面画素は大きな値を持ち、非平面領域から距離が近い平面画素は小さな値を持つ画像となる。従って、距離変換値の小さな画素を平面領域から除外することで平面領域を収縮し、複数の物体の平面領域を分割できる。その後、収縮処理により分割した平面領域を再ラベリングし、ラベリングした平面領域を収縮前の元の領域サイズ、または平面領域同士が接触するまで膨張させる。この処理により、アンダーセグメンテーションを抑制することができ、正確な平面領域を抽出することができる。

### 4.3 把持評価値による把持候補の認識

抽出された平面領域内から、把持しやすい位置を決定するために把持評価値を算出する。把持評価値は平面領域内の把持のしやすさを表すスコアであり、平面重心までの距離、法線の分散、把持アプローチ角度等、数種類の把持指標を統合して算出する。実際には、各種類の把持指標に閾値を設定し、各把持指標における把持しやすさを三値{A, B, C}に分類する。最終的な把持評価値はAの数が多いほど評価値が高く、Cの数が多いほど評価値が低くなるように割り当てる。この処理を平面領域内の全ての画素に対して実行する。図5(a)に把持評価値の算出結果を示す。法線の分散は平面抽出の際に算出済みであり、把持アプローチ角度は法線方向を利用するため別処理で計算する必要はない。よって、各平面領域における把持評価値を高速に計算することができる。

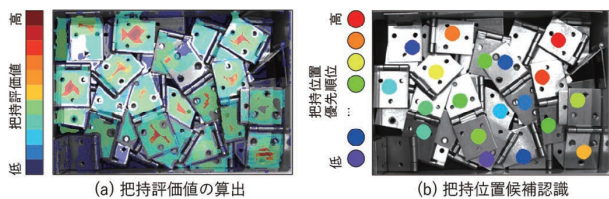


図5 把持評価値の算出結果と把持候補の認識

把持評価値を平面領域内の全面素で算出した後、把持評価値の高い画像座標から順番に把持姿勢を算出する。その後、算出した把持姿勢におけるハンドモデルと周囲の三次元点群との干渉判定を実施する。把持姿勢を算出する際のアプローチ角度は、平面領域抽出時に算出した法線ベクトルを再利用することで不要な計算を省くことができる。各座標位置で把持姿勢算出と干渉判定を繰り返し、干渉無しとして判定された時点でその座標位置を把持候補として登録する。この処理を全ての平面領域について実行する。各平面領域で登録された把持候補を図5(b)に示す。

#### 4.4 優先順位付け

把持候補を算出後、把持候補に優先順位を付ける。基本的には、高い把持評価値を持つ把持位置に高い優先順位を付与する。しかし、同等の評価値を持つ把持候補が複数存在する場合がある。そのような場合は、平面重心までの距離、法線の分散、把持アプローチ角度等の把持指標から任意の指標を選択し、同じ評価値の把持候補をソートする。

## 5. 評価実験

### 5.1 評価方法

評価実験により、提案手法の有効性を確認した。バラ積み状態の把持対象物体を三次元センサで撮影し、撮影画像から把持位置を認識した。認識した把持位置を6軸垂直多関節ロボットでピックし、所定の場所へプレースを実施した。ロボットの駆動範囲内にかつ優先順位の高い把持位置に対してロボットが把持をトライする。ロボットが把持をトライした回数と、物体を把持して所定の位置へプレースできた回数の割合により把持成功率を算出して評価した。また、1枚の画像における把持位置認識の処理時間も評価した。把持位置認識処理はロボットがトライする前に毎回実行するため、1回の把持位置認識処理における平均処理時間を算出した。三次元計測センサにはiDS社製のEnsenso X36、多関節ロボットにはOMRON社製のViper650を使用した。Intel(R)Core(TM)i7-7700 @ 3.60 GHzのCPUを搭載した計算機で処理時間を計測した。

### 5.2 二指ハンド評価結果

二指ハンド向けモデルレス把持位置認識の評価実験で用いる把持対象物体は図6に示す大きさ・形状・材質等が異

なる4種類の物体である。このうち、からあげ・じゃがいも・バナナは不規則形状物体であり、電源ケーブルは非剛体物体である。

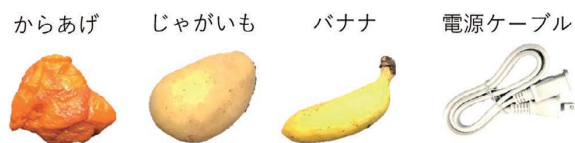


図6 二指ハンド把持位置認識の把持対象物体

各把持対象物体における把持成功率および処理時間を表1に示す。

表1 二指ハンド把持位置認識の評価結果

把持対象物体	プレース回数／トライ回数	把持成功率 [%]	処理時間 [msec]
からあげ	93/93	100.0	211
じゃがいも	159/160	99.4	285
バナナ	110/124	88.7	197
電源ケーブル	39/40	97.5	221
平均		96.4	229

表1に示す結果から、平均96.4%と高い把持成功率を達成することができていることが確認できる。これは、最適な開き幅を認識することで、固定開き幅と比べて把持候補数を最大化できていることが貢献している。からあげやじゃがいものような球体に近い形状の物体は、様々な角度から安定して把持候補を見つけることができるため、特に把持成功率が高くなっている。バナナのみ88.7%と把持成功率が低くなっているが、物体端部のような不安定な部位の把持が起きやすかったことが原因である。処理時間については、平均で約229 msecで把持位置認識できており、リアルタイムで高速なバラ積みピッキングが可能である。これは、単指挿入候補検出後にペアリングを行っているため、複数のハンド開き幅での把持位置探索を行う必要が無く、計算量を大幅に低減できていることが貢献している。図7に二指ハンドの把持位置認識の結果例を示す。

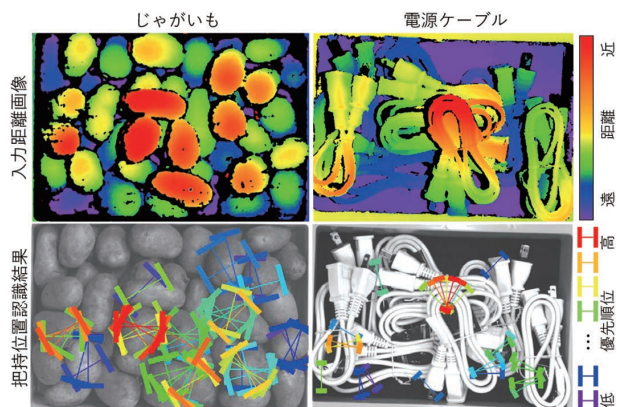


図7 二指ハンドの把持位置認識結果例

### 5.3 吸着ハンド評価結果

吸着ハンド向けモデルレス把持位置認識の評価実験で用いる把持対象物体は図8に示す大きさ・形状・材質等が異なる5種類の非剛体物体である。



図8 吸着ハンド把持位置認識の把持対象物体

各把持対象物体における把持成功率および処理時間を表2に示す。

表2 吸着ハンド把持位置認識の評価結果

把持対象物体	プレース回数／トライ回数	把持成功率 [%]	処理時間 [msec]
フラットケーブル	38/39	97.4	72
ハンドソープ	18/18	100.0	112
マヨネーズ	114/120	95.0	91
プラスチックパーツ	65/68	95.5	75
蝶番	73/75	97.3	67
平均		97.0	83

表2に示す結果から、全ての把持対象物体に対して95%以上の把持成功率であることが確認できる。平面らしさを考慮した平面抽出と適切な把持アプローチ角度の算出により、安定した吸着把持を実現した。特にハンドソープは、物体サイズが大きく、平面領域が比較的に広いことにより高い把持成功率が得られた。把持に失敗する主な理由としては、マヨネーズ等の厚さが薄い物体において、距離画像上での物

体境界の判別が困難となり、物体境界付近への把持アプローチが発生することである。また、プラスチックパーツは物体表面上に浅い溝が存在し、吸着時に空気漏れが発生し把持失敗することがあった。

処理時間については、平均で約83 msecで把持位置認識できており、リアルタイムで高速なバラ積みピッキングが可能である。ハンドソープは画像から抽出される平面領域の面積が広いこと、把持候補の探索や把持姿勢算出に多くの処理時間を要している。図9に吸着ハンド向け把持位置認識の結果例を示す。

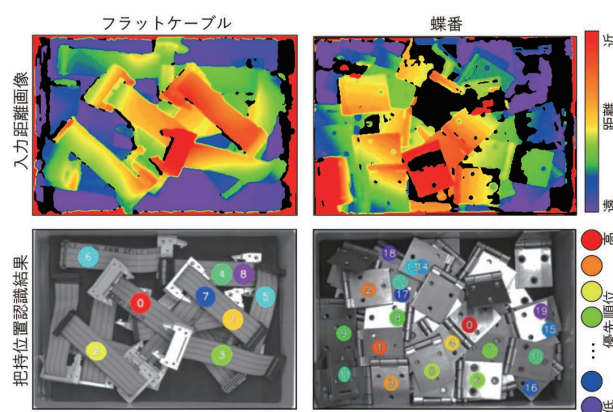


図9 吸着ハンドの把持位置認識結果例

## 6. むすび

本研究では、二指ハンド向けおよび吸着ハンド向けのモデルレス把持位置認識手法を提案した。二指ハンド向け把持位置認識では、二指ハンドの左指および右指それぞれに対して独立に挿入候補を検出し、左指挿入候補と右指挿入候補を組み合わせて高速に複数の開き幅の把持候補を探索する。吸着ハンド向け把持位置認識では、物体を安定して吸着把持するために、距離画像の法線ベクトルの分散に基づいて平面領域を抽出し、把持候補を認識する。二指ハンド／吸着ハンドそれぞれの提案手法を用いて、非剛体物体および不規則形状物体のバラ積みを実際にロボットでピッキングしたところ、平均で96.4%／97.0%の把持成功率を達成し、Intel(R)Core(TM)i7-7700 @ 3.60 GHz のCPU上で229 msec／83 msecという高速な処理を実現した。

今後の課題として、更なる把持成功率の向上が挙げられ、把持失敗原因に着目した対策が必要となる。また、提案手法では様々なパラメータが存在するが、現状は人手でチューニングを行っているため、自動チューニング機能を開発することで使用性を向上することも挙げられる。

## 参考文献

- 1) Konishi, Y.; Hanzawa, Y.; Kawade, M.; Hashimoto, M. “Fast 6D Pose Estimation from a Monocular Image Using Hierarchical Pose Trees”. Proceedings of European Conference on Computer Vision. 2016, p.398-413.
- 2) Konishi, Y.; Hattori, K.; Hashimoto, M.. “Real-Time 6D Object Pose Estimation on CPU”. Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2019, p.3451-3458.
- 3) Lenz, I.; Lee, H.; Saxena, A. Deep Learning for Detecting Robotic Grasps. International Journal of Robotics Research. 2015, Vol.34, No.4-5, p.705-724.
- 4) Mahler, J.; Liang, J.; Niyaz, S.; Laskey, M.; Doan, R.; Liu, X.; Ojea, J. A.; Goldberg, K. “Dex-Net 2.0: Deep Learning to Plan Robust Grasps with Synthetic Point Clouds and Analytic Grasp Metrics”. Proc. Robotics: Science and Systems. 2017.
- 5) Caldera, S.; Rassau, A.; Chai, D. Review of Deep Learning Methods in Robotic Grasp Detection. Multimodal Technologies and Interaction. 2018, Vol.2, No.3, p.57-80.
- 6) Liang, H.; Ma, X.; Li, S.; Grner, M.; Tang, S.; Fang, B.; Sun, F.; Zhang, J. “PointNetGPD: Detecting Grasp Configurations from Point Sets”. Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. 2019, p.3629-3635.
- 7) Redmon, J.; Angelova, A. “Real-Time Grasp Detection using Convolutional Neural Networks”. Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. 2015, p.1316-1322.
- 8) Kusano, H.; Kume, A.; Matsumoto, E.; Tan, J. “FCN-Based 6D Robotic Grasping for Arbitrary Placed Objects”. Proceedings of International Conference on Robotics and Automation: Warehouse Picking Automation Workshop. 2017.
- 9) Mahler, J.; Matl, M.; Liu, X.; Li, A.; Gealy, D.; Goldberg, K. “Dex-Net 3.0: Computing Robust Vacuum Suction Grasp Targets in Point Clouds Using a New Analytic Model and Deep Learning”. Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. 2018, p.1-8.
- 10) Mahler, J.; Matl, M.; Satish, V.; Danielczuk, M.; DeRose, B.; McKinley, S.; Goldberg, K. Learning Ambidextrous Robot Grasping Policies. Science Robotics. 2019, Vol. 4, No. 26. p.eaau4984.
- 11) Domae, Y.; Okuda, H.; Taguchi, Y.; Sumi, K.; Hirai, T. “Fast Graspability Evaluation on Single Depth Maps for Bin Picking with General Grippers”. Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. 2014, p.1997-2004.
- 12) Mano, K.; Hasegawa, T.; Takayoshi, Y.; Fujiyoshi H.; Domae, Y. “Fast and Precise Detection of Object Grasping Positions with Eigenvalue Templates”. Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. 2019, p.4403-4409.
- 13) Vincent, L.; Soille, P. Watersheds in Digital Spaces: An Efficient Algorithm Based on Immersion Simulations. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1991, No. 6, p.583-598.

## 執筆者紹介



仁科 有貴 NISHINA Yuki

技術・知財本部

研究開発センタ

専門：画像処理，画像認識

所属学会：情報処理学会，日本ロボット学会



長谷川 昂宏 HASEGAWA Takahiro

技術・知財本部

研究開発センタ

専門：画像処理，画像認識

所属学会：電子情報通信学会  
博士（工学）

---

 本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

# 外観検査における 照明パラメータ高速自動決定技術

林 信吾

基板の外観検査において、電極が薄膜の場合、結晶構造が不規則となり同軸照明で撮像すると反射特性の差がムラとなって表れることがある。このムラのため異色欠陥を見つけることが困難となる。ムラは基板に照射する光の角度と光の強さを最適化することで軽減できる。しかし、これには経験を持った作業員でも時間がかかるため、自動化するための方法が考案されている。従来方法ではパラメータとして取り得る組み合わせを間引いた後に終了条件を満たすまで総当たりにて最適化を行うが、照明パラメータ数に比例して最適化時間がかかるという問題があった。本論文ではムラのない照明パラメータを、段階的探索により、自動的かつ高速に求め、さらに従来方法と比べ分離度・誤検出を改善する方法を提案する。

## Fast and Automatic Lighting Parameters Determination Technology for Visual Inspection

HAYASHI Shingo

In the visual inspection of the substrate, the crystal structure becomes irregular when the electrode is in the form of a thin film, causing an inconsistent color in the reflection characteristics when the imaging is performed using coaxial lighting. The inconsistent color makes it difficult to detect discoloration defects, which can be improved by optimizing the angle and intensity of light applied to the substrate. Because this process can be time-consuming even for an experienced worker, an automatic method has been devised. Conventionally, optimization is performed heuristically until the termination condition is satisfied after all the combinations that can be taken as parameters are thinned out. However, this method needs a long optimization time, which is proportional to the number of lighting parameters. In this paper, we propose a high-speed and highly-accurate method based on a stepwise search for uniform illumination parameters.

### 1. まえがき

近年、自動車市場にてADAS（先進運転支援システム）や自動運転が一般的なものとなってきている。これらの機能は車載基板（以降、基板と呼ぶ）により制御されており、故障が人命に影響を与える可能性があることから、ゼロディフェクト（不具合ゼロ）が求められている。

これらの基板は、これまでの様に抜き取りではなく全数検査が求められており、基板上の異物についても走行中の振動により端子間のショートによる故障の原因となることから機能的な確認に加え外観上の検査についても重要となる。従来の外観検査では、検査員が基板を様々な角度に傾けることで光の当て方を変えながら目視で外観検査を行ってきた。しかし、人による検査は検査員のスキルや疲労の

影響により品質を一定に保つことが困難であることから外観検査機による自動検査ニーズが高まりを見せている。

外観検査機は、カメラ（レンズ）、照明を内蔵しており、これらを基板や検査したい欠陥に合わせてパラメータ設定する必要があり、これらの一つに照明パラメータがある。照明パラメータは基板に照射する光量を決めるものである。

オムロンの外観検査装置 VT-M12 シリーズでは照明として MDMC (Multi-Direction, Multi-Color) (図 1) を搭載している。MDMC 照明の特徴として、検査員が基板を傾け光の当て方を変えるのと同じように、基板に当てる光の方向を 13 方向（同軸照明+3 段ドーム照明×4 ブロック）に分けて変えることができる。MDMC 照明は、光の方向に加えて光の強さ（RGB（計 3 波長、各 127 段階））を変えることができ、13 方向×3 波長で計 39ch（チャンネル）の照明パラメータとして入力する。これらを基板や検出した

Contact : HAYASHI Shingo Shingo.Hayashi@omron.com



い不良に応じて設定を行う必要があるが、組み合わせは127<sup>39</sup>通りと膨大であり、照明パラメータを決めるためには、照明パラメータを変えながら試行錯誤しなければならず、知識や経験を持った作業でも時間を要する作業であり、スキルレス化と時間短縮が求められている。

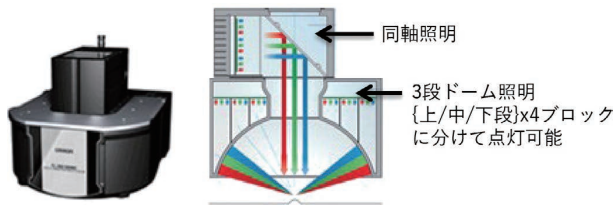


図1 MDMC 照明外観と模式図

これらの課題解決の手段として照明パラメータを自動的に求める取り組みがなされている。この取り組みの一つとしてシミュレーションによってBRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function, 双方向反射率分布関数)を計測し照明パラメータを求める方法があるが、BRDFを完全に計測するには、検査対象に対してあらゆる方向から照明したときの反射光をあらゆる視線方向から観測しなければならないが、これを実現することは物理的に困難である<sup>1)</sup>。このため検査対象表面を一様な反射特性と仮定し、反射係数をパラメータとして与えることで問題を簡単化する方法<sup>2)3)</sup>があるが、不均一な材質から構成される検査対象からBRDFを求めるのは困難である。別の方法として照明パラメータの最適な条件を定義し照明パラメータを順次変えながら、実験的に点灯させることで評価値を求め、最も評価値の良い照明パラメータに決定する行澤<sup>4)</sup>らの方法がある。しかし、この方法は組み合わせの数に比例して処理時間が長くなるため、MDMCのように組み合わせが多い場合には、照明パラメータを決定するまでに時間がかかる問題があった。この対策としてサンプリング数を減らすことで処理時間は短くできるが求めた照明パラメータの評価値が低くなる。

本論文では実験的に照明を点灯させる方法をベースに最適化を疎探索と詳細探索の2段階に分けることで、短時間かつ高精度に照明パラメータを決定する方法を提案する。

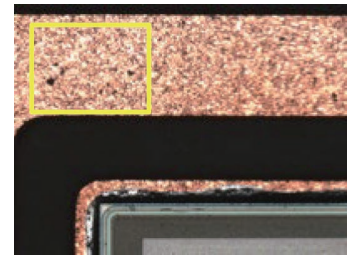
## 2. 技術内容

### 2.1 概要

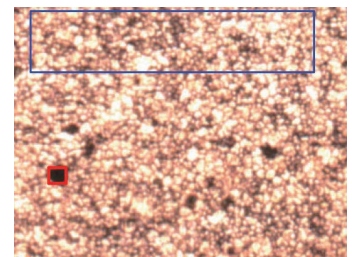
図2にて照明パラメータ決定までの流れを示す。検出したい欠陥のある基板を仮の照明パラメータで撮像する(図2(a))。この時の照明パラメータは画面上で欠陥と良品が目視で識別できれば良く、自動決定する照明パラメータに影響しない。次に欠陥と良品の場所(領域)を指定する(図2(b))。ここで指定した領域を対象として照明パラ

メータの決定を行うが、照明パラメータが最適であるかどうかは、検査時に画像に対してどのようなアルゴリズムで良品、不良品の判定を行うかによって異なる。つまり、照明パラメータの良し悪しを判断する評価軸を定義する必要がある。ここでは例として濃度差で良品・欠陥を判別するアルゴリズムとし、照明パラメータの組み合わせの中で良品と欠陥の濃度差(評価値と呼ぶ)が最大となるものを最適な照明パラメータとする。

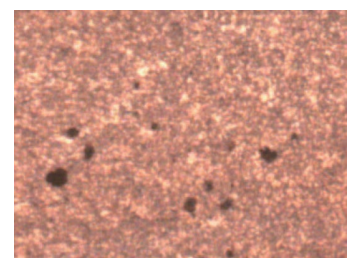
(a)同軸照明



(b)(a)黄枠部拡大  
(青枠：良品領域 赤枠：欠陥領域)



(c)疎探索



(d)詳細探索  
(赤枠部が欠陥)

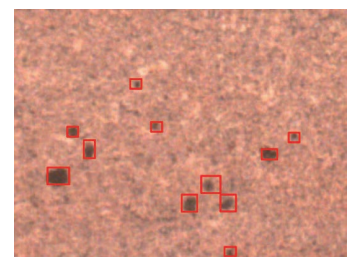


図2 最適化の流れ

照明条件の組み合わせはMDMCの場合、0～127段階で12chのため127<sup>39</sup>通りとなる。つまり照明パラメータの決定はこの中から良品と欠陥の濃度差が最大となるパターンを探すことになるが、1回の撮像、濃度差を求めるのに0.07秒かかるとすると $1.1 \times 10^{82}$  (127<sup>39</sup> × 0.07)秒となり現実的な時間で終わることができない。そこで、組み合わせの中からN個の組み合わせをサンプリングし、N個の照明パラメータの組み合わせの中から仮の最適な評価値を求める(これを疎探索と呼ぶ)(図2(c))。ここで求め

た評価値の照明パラメータの近傍を探索することで照明パラメータを決定する (図 2 (d))。

### 2.2 評価軸, 評価値の定義

照明パラメータを決定するにあたり, 何を以て最適とするかを定める評価軸を定義する必要がある。これはどのようなアルゴリズムで良品, 不良品の判定をするかによって評価軸は異なる。

外觀検査において代表的な欠陥である異色欠陥を例にする。これは, 基板にはんだくず等, 設計に含まれていないものが基板に付着している欠陥である。このような欠陥を検出する場合に最も単純なアルゴリズムは 2 値化である。つまり, 良品部分の濃度と欠陥部分の濃度を特徴量とした方法で, 誤判定なく判定するには, 良品部分と欠陥部分に濃度差が必要となる。式にすると下記となる。ここでは説明を簡単にするため画像はグレイスケールで良品部分と欠陥部分に濃度のばらつきはないものとする。

$$\text{Score} = |T - F| \tag{1}$$

ここで T は良品部分の画素値の平均濃度, F は欠陥部分の画素値の平均濃度, Score は評価値となり, 大きいほど良く分離できており良い照明パラメータということとなる。

つまり, 評価値は欠陥検出アルゴリズムにとってどれだけ良品, 欠陥を判別し易いかを式としたものと言える。

### 2.3 疎探索

疎探索とは, 膨大な照明パラメータの中から最適照明パラメータの近傍値を求める処理のことである。

照明パラメータの組み合わせは MDMC の場合 127<sup>39</sup> と膨大であるため, 制約条件を設けて組み合わせを削減する。

MDMC のドーム照明は上/中/下段 4 ブロックに分かれているがこれらをまとめて 1 ブロックとして扱う, さらに組み合わせの数を減らすため, RGB を一律に変化 (= 白色) という制約条件を加える, つまり RGB の 3 ch をまとめて 1 ch (グレイスケール) として扱うことで全 39 ch を 4 ch (同軸/上/中/下段, 白色) に削減する。これにより 127<sup>39</sup> 通りから 127<sup>4</sup> 通りとなる。さらに, 光の強さ 127 段階のうち N 個をサンプリングする。N はパラメータであり小さくするとサンプリング数が減り時間を短くできるが, 局所最適な値となる。サンプリング方法は, 光の強さ 0 ~ 127 段階を N 段階となるよう均等割りした方法, 即ち光の強さを 128 ÷ (N - 1) 段階刻みで変化させる方法である。本論文では N = 5 とし, 32{128 ÷ (5 - 1)} 段階刻みで変化させる, つまり光の強さを 0, 32, 64, 96, 127 (本来 128 であるが上限が 127 であるため丸め) と変化させる。これにより 127<sup>12</sup> 通りから 5<sup>4</sup> 通りとなり, この照明パラメータの組み合わせの中から最適値を求めるのに必要な時間は 1 回の評価値を求める時間が 0.07 秒とすると, 約 43

秒 (5<sup>4</sup> × 0.07 秒) となり, まずこの中で仮の最も高い評価値を求める。

つまり, 疎探索の意味は, 評価値のピークは組み合わせの中で 1 つ (図 3 (赤丸)) であるが, ピークに近い値 (ここでは山と呼ぶ) は複数存在する (図 3 (緑丸))。疎探索とは, 最も高い山を見つけるための処理である。

### 2.4 詳細探索

疎探索で求めた照明パラメータはサンプリングした組み合わせの中から求めており, 評価値のピーク (以下, 最適値) でない可能性があることから, 最適値を探索する。基本的な考え方としては角度 4 ch, それぞれに光の強さが 127 段階であるため大きさ 128 の 4 次元空間とし, この中から最適値を見つける問題と考える。疎探索で最適値の近傍がわかっていることからこれを起点に探索処理を行う。

図 4 を例に処理の流れを説明する。図 4 は縦軸が光の強さ, 横軸は ch (照明角度) である。疎探索で求めた照明パラメータを図 4 (a) の赤線とする。疎探索にてサンプリングは N = 5 の時 32 の倍数段階毎に変えているので, 赤線の ±32 段階の範囲に最適値がある。最適値を 2 分探索法の考え方で求めていく。まず, ±32 段階の半分の ±16 を初期値として探索幅 (図 4 (a) 黄色矢印) にする。次に各 ch の仮最適値 (赤線) の +探索幅, 0, -探索幅の評価値を求め, 最も小さい評価値の照明パラメータを次の仮最適値とする (図 4 (b) 赤線)。これを探索幅が 1 以下になるまで繰り返す。この時, 評価値を求める回数は次式となる。

$$(3^{chNum} - 1) \times \log_2 STEP = 400 \tag{2}$$

ただし, chNum は ch 数 (本論文の場合 4 ch), STEP は疎探索で変化させる段階 (本論文の場合 32) とする。

1 回の評価値 (撮像含む) を求める時間が 0.07 秒とすると 28 秒で最適値が求まる。

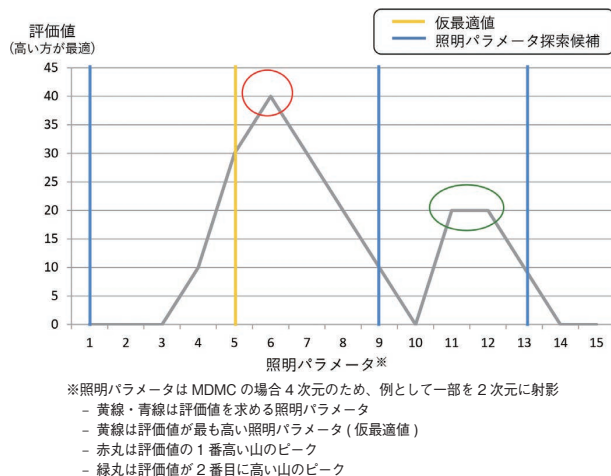


図 3 疎探索の例

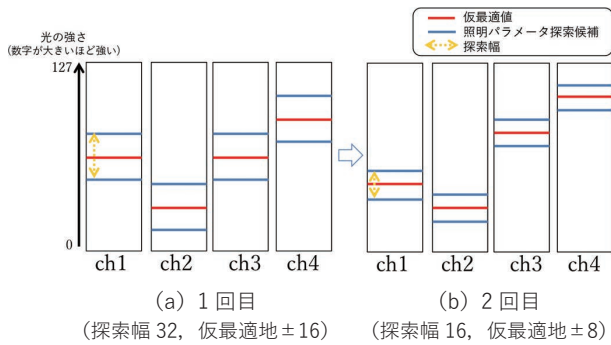


図4 詳細探索幅 32 と 16 の例

### 3. 性能評価

#### 3.1 評価方法

提案方法の性能評価として評価基板を用いて従来方法<sup>1)</sup>との比較を行った。使用した基板、評価機材を下記に示す。

表1 評価環境

評価基板	パワー MOSFET (異色欠陥あり)
画像センサ	形 FH-5050
照明	形 FL-MD180MC (MDMC 照明)
カメラ	FH-SCX12
レンズ	OMR-THV0575-220_S (画素分解能 6 μm/pixel)

評価基板の検査項目は異物 (異色欠陥)、変色、はんだボールとし、評価軸については良品と不良の判定は HSV 色空間での色相・彩度・明度を特徴量として、閾値にて判定 (2 値化) する単純かつ高速なアルゴリズムとした。このアルゴリズムとしたのは FA 現場では検査時間が検査コストに影響することから、高速なアルゴリズムが求められているためである。評価軸には、判別分析法<sup>5)</sup>と同様に、良品部と欠陥部の濃度のクラス間分散とクラス内分散比によって分離度を求めこれを評価値とする。即ち下記の式にて評価値 (分離度) を求め、評価値が最大の照明パラメータを採用する。

クラス間分散

$$\sigma_b^2 = \frac{\omega_1 \omega_2 (m_1 - m_2)^2}{(\omega_1 + \omega_2)^2} \quad (3)$$

クラス内分散

$$\sigma_i^2 = \frac{\omega_1 \sigma_1^2 + \omega_2 \sigma_2^2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (4)$$

分離度

$$sep = \frac{\sigma_b^2}{\sigma_i^2} \quad (5)$$

ただし、 $\omega_1, \omega_2$  はそれぞれ良品部と欠陥部の画素数、 $m_1, m_2$  はそれぞれ良品部と欠陥部の平均濃度 (RGB をグレースケールに変換後計算)、 $\sigma_1^2, \sigma_2^2$  はそれぞれ良品部と欠陥部の分散を意味する。

ただし、良品部又は欠陥部にハレーション (光量が強すぎることにより濃度値が飽和する現象) 起こしている場合 (グレースケール化後の平均濃度 240 以上) は濃淡の情報が失われることから評価値 0 とする。

領域指定については図 1 (b) の様に欠陥の内側を欠陥領域とし、良品部は欠陥領域を含まないように領域を選択した。

従来方法の抜き取りは疎探索が N=5, N=11, 提案方法は疎探索 N=5 と詳細探索の組み合わせとして、サンプル基板での評価値、誤検出、処理時間にて評価を実施した。

#### 3.2 評価結果

検査項目、異物、変色について従来方法 (N=5) は処理時間が 42 秒であるが分離度も低くそれぞれ 0.13, 0.01 であり、2 値化後に 3 画素以上の黒色を欠陥としたアルゴリズムで色相・彩度・明度を閾値として良品と欠陥を判定した場合、閾値を調整しても異物 1 箇所、変色 6 箇所を誤検出した (表 2 従来方法 (N=5))。提案方法 (N=5) では、処理時間が 69 秒となったが、分離度がそれぞれ 0.22, 0.04 に上がり、異物、変色について誤検出が 0 となった。参考として従来方法では N=11 にすると誤検出はなくなったが、処理時間は 1144 秒となった。また、はんだボールについてはいずれの方法でも誤検出は発生しなかった。これらの結果から、提案方法では、従来方法と比べ処理時間の伸びを抑え、分離度、誤検出を改善できている。

表2 欠陥検出性能

検査項目	方法	誤検出 [箇所]	評価値 [分離度]	処理時間 [秒]
従来方法 (N=5)	異物 (異色欠陥)	1	0.13	42
	変色	6	0.01	
	はんだボール	0	0.01	
提案方法 (N=5)	異物 (異色欠陥)	0	0.22	69 ※
	変色	0	0.04	
	はんだボール	0	0.22	
(参考) 従来方法 (N=11)	異物 (異色欠陥)	0	0.20	1144
	変色	0	0.03	
	はんだボール	0	0.20	

※疎探索と詳細探索の合計時間

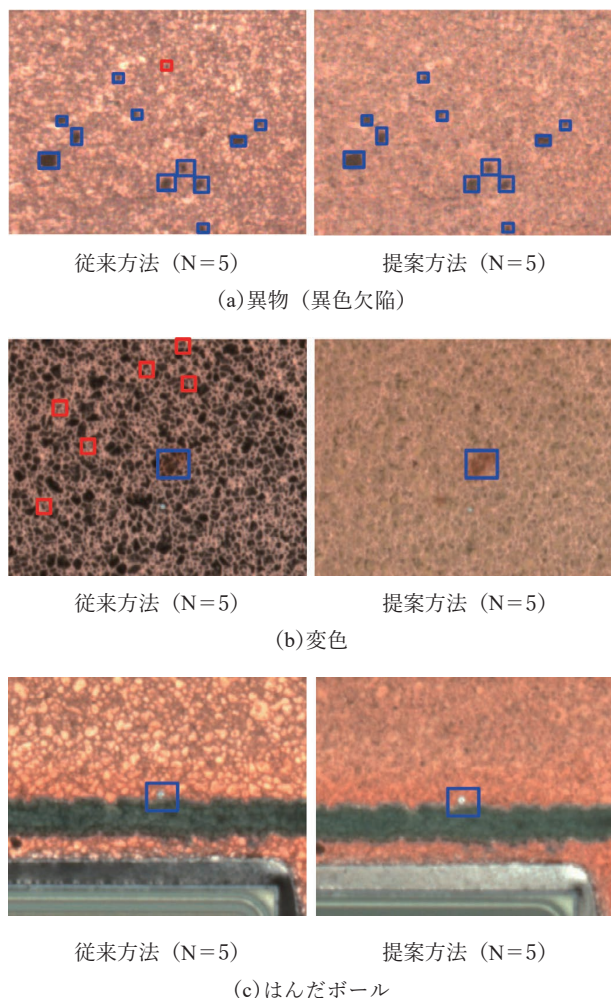


図5 従来方法，提案方法にて照明パラメータ決定後の欠陥検出結果（青四角は欠陥検出箇所，赤四角は誤検出）

#### 4. むすび

本論文では自動的かつ，従来方法（ $N=11$ ）と比べて高速に照明パラメータを決定可能なアルゴリズムを提案した。今回，車載基板及びMDMCを使用し評価を行ったが，本技術はこれらの検査対象物や照明に限定されるものではなく，照明は光の強さや角度をパラメータとして設定可能であれば適用可能である。今後の展望としては，グレイスケールに限定する制約をなくし，色差を特徴量とする判定アルゴリズムにも対応することを検討している。

#### 参考文献

- 1) 福田悠人，川崎洋，久野義徳，古川亮. 実3次元物体の表面反射特性パラメータの効率的推定手法. IPSJ SIG Technical Report. 2010, p.1234-1241.
- 2) Phong, B. T. Illumination for computer-generated images. Proc of Special Interest Group on Computer GRAPHics (SIGGRAPH'75). 1975, p.311-317.

- 3) Zhang, Z.; Yoshioka, H.; Ren, S.; Akiduki, T.; Miyake, T. Optimization of light source position in appearance inspection system for specular reflection surface. ICIC International 2017. 2017, p.575-589.
- 4) 行澤大悟，緒方大樹，高田俊之，植山剛，太田順. “ピッキングを対象とした撮影環境を含む画像認識システムの自動設計”. 2016年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集. 2016, p.155-156.
- 5) 大津展之. 判別および最小2乗基準に基づく自動しきい値選定法. 信学論 (D). 1980, Vol.J63-D, No.4, p.349-356.

#### 執筆者紹介



**林 信吾 HAYASHI Shingo**  
 インダストリアルオートメーションビジネス  
 カンパニー  
 検査システム事業部 AVI 事業推進部  
 専門：画像処理  
 所属学会：電子情報通信学会  
 博士（工学）

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

# 小型熱式フローセンサによる3成分ガス中の酸素濃度測定技術の開発

中川 慎也

慢性閉塞性肺疾患（COPD）による死亡者数が年々増加しており、この症状で低下した呼吸機能をサポートするための医療機器として酸素濃縮器の需要が今後増えてくると予想される。これは、空気中の酸素を濃縮して患者に供給するというもので、安定供給のため濃縮ガスの酸素濃度をモニターする必要がある。そこで弊社の開発したMEMSの熱式フローセンサを酸素濃度の測定に応用するための開発を進めている。一般的に、熱式センサはガスの熱伝導率から組成を判別するもので、小型で低コストという利点がある。ただし、酸素濃縮ガスは酸素、窒素、アルゴンの3成分からなるため従来の熱式センサの原理では酸素濃度を測定できない。そこで、2つの異なる温度でのガスの熱伝導率2値から3成分ガス中の酸素濃度を算出する独自のアルゴリズムを開発したので当論文で報告する。

## Oxygen Gas Concentration Measurement in Trinary Mixture by Small Thermal Conductivity Gas Flow Sensor

NAKAGAWA Shinya

The demand of oxygen concentrators that support COPD (Chronic Obstructive Pulmonary Disease) Patient would increase in the future. The device supplies oxygen gas that generated by concentrating surrounding air and it required to monitor oxygen concentration in the gas for stable supply. Therefore we are developing MEMS thermal flow sensor to apply to measuring oxygen concentration. Generally, thermal sensors that identify gas component by measuring thermal conductivity of the gas are relatively inexpensive and small. However concentrated oxygen gas is trinary gas that composed of oxygen, nitrogen and argon, and the oxygen concentration cannot be estimated by conventional method of thermal sensors. In this paper, we report about the unique algorism we developed that makes it possible to estimate the oxygen concentration in the trinary gas by acquiring 2 thermal conductivity values at 2 different temperature.

### 1. まえがき

慢性閉塞性肺疾患（COPD）は、肺が長期間有害物質に晒され、持続的な炎症を起こして呼吸機能が低下した症状で、ほとんどが喫煙により引き起こされるものである。喫煙率は年々低下しているが50年前の喫煙率は男性で80%程度であり、その世代が高齢化している現在、COPDによる死亡者数は増加している<sup>1)</sup>。ガイドライン記載のCOPDへの対処は呼吸機能の低下を補うための高濃度酸素の吸引が有効であり<sup>2)</sup>、この目的で大気から酸素を濃縮して供給する酸素濃縮器が用いられている。これまでの大型で室内に設置するタイプのものは、患者の行動範囲が制限されてし

まうという問題があったが、近年の患者のQOL (Quality Of Life) の向上が重視される背景から、今後は小型で軽いポータブルタイプの酸素濃縮器の需要が増えてくると予想される<sup>2)</sup>。そこで、サイズ要求の厳しい、これら製品のガス流量と酸素濃度を管理するためのセンサとして小型化が可能なMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) チップを使った熱式フローセンサを応用することを提案している。技術の新規性としては、センサのガス種判別機能を応用して酸素、窒素、アルゴンの3成分ガス中の酸素濃度を測定するという点があり、当論文ではこの手法について説明する。

Contact : NAKAGAWA Shinya shinya.nakagawa@omron.com

## 2. MEMS 熱式フローセンサの動作原理

### 2.1 センサチップ構造と原理

図1はMEMSフローセンサチップの外観で、サイズは1.55×1.55×厚さ0.4mmである。これについて先ずは構造と原理について説明する。

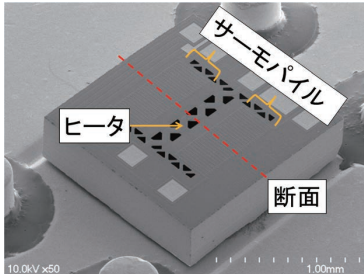


図1 センサチップ外観

図2は図1破線での断面構造及び気流による熱分布の変化を示したものである。チップの構成要素は、断熱のための薄膜メンブレンと支持部、中央のヒータ及び、ヒータと支持部との温度差を検知するサーモパイルである。

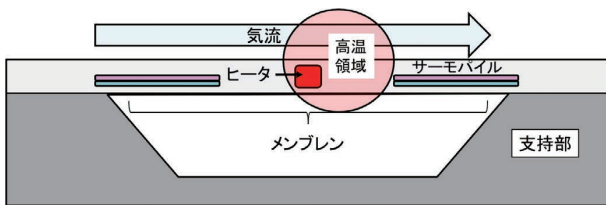


図2 センサチップ断面図と気流による熱分布変化

図2に示すようにセンサチップ表面でサーモパイルに平行な気流が生じるとヒータ熱がこれにより風下側にシフトし、風上側と風下側のサーモパイルの温度差が変化し、起電力差が生じる。この起電力差は気流の強さに応じて変化するためガスの流量を捉えることが可能となる。

### 2.2 ガス種判別による流量補正原理

ガス種の判別はガスの熱的性質を利用するものなので、ここではフローセンサの原理を熱設計の視点から説明する。図3は図2の構造の熱等価回路を示したものである。

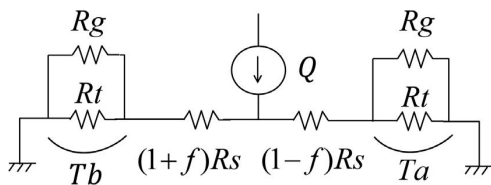


図3 センサの熱等価回路

各記号は以下のように対応している（括弧内は単位）。

- $Q$  (W)：ヒータの発熱量
- $f$ ：気流による熱抵抗変動係数 ( $0 \leq f < 1$ )
- $R_s$  (K/W)：ヒータとサーモパイル間の熱抵抗
- $R_t$  (K/W)：サーモパイルの熱抵抗
- $R_g$  (K/W)：ガスの熱抵抗
- $T_a$  (K)：サーモパイル両端温度差（風下）
- $T_b$  (K)：サーモパイル両端温度差（風上）

図3の気流により変化する係数 $f$ が $R_s$ のみに掛かるのは熱のシフトする範囲がヒータとサーモパイル間に留まるためである。熱等価回路は電気回路と同様に扱えるので、キルヒホッフの法則を用いれば $f$ とサーモパイル出力 $T_a, T_b$ との関係が得られる。先ずヒータの風下側（図3の右半分）の熱経路の総熱抵抗を $R_a$ 、風上側（図3の左半分）のそれを $R_b$ とするとそれぞれ以下の式が成立する。

$$R_a = \frac{R_g R_t}{R_g + R_t} + (1 - f) R_s \quad (1)$$

$$R_b = \frac{R_g R_t}{R_g + R_t} + (1 + f) R_s \quad (2)$$

風下側経路を流れる熱流束 $Q_a$ は式(3)で、 $T_a$ は式(4)で表される。

$$Q_a = \frac{R_b}{R_a + R_b} Q \quad (3)$$

$$T_a = \frac{R_g R_t}{R_g + R_t} Q_a \quad (4)$$

式(1)式(2)式(3)を式(4)に代入し整理すると風下サーモパイル出力 $T_a$ と $f$ の関係式(5)が、同様に風上側についても式(6)が導出できる。

風下サーモパイルの式

$$T_a = Q \frac{R_t R_g}{R_t + R_g} \left( \frac{1}{2} + \frac{f}{\frac{2R_t R_g}{R_s(R_t + R_g)} + 2} \right) \quad (5)$$

風上サーモパイルの式

$$T_b = Q \frac{R_t R_g}{R_t + R_g} \left( \frac{1}{2} - \frac{f}{\frac{2R_t R_g}{R_s(R_t + R_g)} + 2} \right) \quad (6)$$

実際のサーモパイル出力 $T_a, T_b$ には温度オフセットノイズが含まれており誤差要因となる。これを取り除くために以下のように風下出力と風上出力を差し引いて精度を向上させている。

$$T_a - T_b = \frac{fQ}{\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_g} + \frac{1}{R_t}} \quad (7)$$

ここで、 $R_g$ はガス種が不変の場合は定数として扱うことができるが、ガス種が変わって $R_g$ が変化する場合別

途これを求める必要がある。このため、フローセンサでは図4のように気流の方向に対してサーモパイルが垂直の向きになるように90°回転して実装された2個目のセンサチップを設けており、これをガス種の判別に使っている。

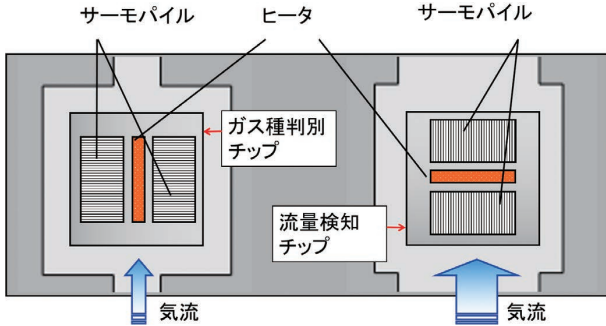


図4 流量検知チップとガス種判別チップ

ガス種判別チップは式(5)の $f$ が常に0であるため、これを変形した式(8)を使って、出力  $Ta'$  から  $Rg$  を求めることができる。

$$Rg = \frac{2Ta'Rt}{QRt - 2Ta'} \quad (8)$$

これを式(7)に入れて得られた式(9)により  $f$  を求めることができる。

$$f = (Ta - Tb) \left( \frac{1}{QRs} + \frac{1}{2Ta'} \right) \quad (9)$$

$f$  と流量の関係をキャリブレーションであらかじめ把握しておけば流量を求めることができる。以上がフローセンサで流量を求める原理である。酸素濃縮器用フローセンサはガス種判別チップの、ガスの熱抵抗を求める仕組みを酸素濃度の測定に応用するものである。

### 3. MEMS 熱式フローセンサの優位性

熱式センサの利点として比較的安価で特に MEMS 式は小型化ができる。また、流量測定機能も持っているため非常に付加価値が高いと言える。表1に代表的な酸素濃度センサの比較を示す。目標精度についてはジルコニア式に劣るが、酸素濃縮器用としては規格を満足している。

表1 酸素濃度センサ比較

形式	MEMS 熱式	超音波式	ジルコニア式
サイズ (mm)	50×18×20	100×20×20	17×17×19
コスト	← 同等 →		← 数倍 →
濃度測定精度	±2% (目標値)	±2%	±0.5%
流量検知	可能	可能	不可

図5の(a)は試作した、筐体込みの酸素濃縮器用フローセンサの外観であり、サイズは  $L=50\text{ mm}/W=18\text{ mm}/H=20\text{ mm}$  である(継ぎ手除く)。この中にセンサチップが2つ内蔵されている。(b)は超音波方式の酸素濃度センサのイメージで原理上長さは約倍となっている。

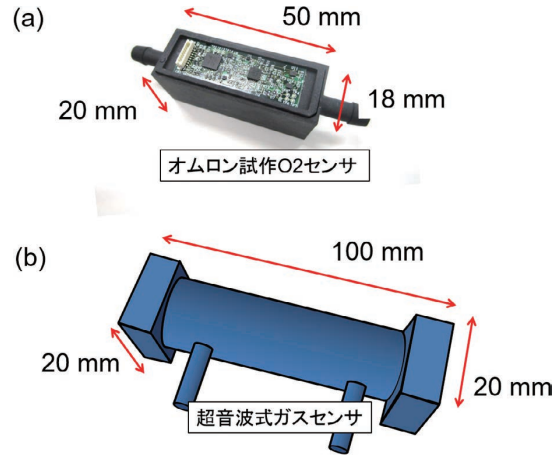


図5 試作のO<sub>2</sub>フローセンサと超音波式センサ概略図

## 4. 熱式センサの酸素濃度測定への応用

### 4.1 酸素濃縮器の仕組み

酸素濃縮器のブロックダイアグラムを図6に示す。仕組みは空気をコンプレッサーで加圧し、窒素を選択的に吸着するフィルターである Sieve bed に送り込むことで、後段から酸素濃縮ガスを患者に供給するようになっている。

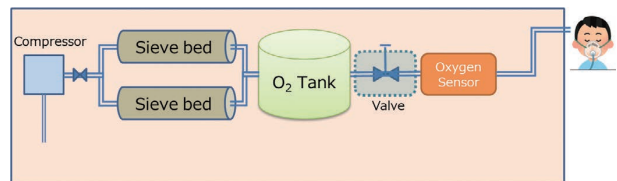


図6 酸素濃縮器ブロックダイアグラム

Sieve bed は継時的に窒素吸着率が低下するため長期間使い続けると窒素の混入割合が増えることで濃縮ガス中の酸素濃度が下がり、あるタイミングで交換が必要となる。酸素濃度センサは濃縮ガス中の酸素濃度の変化を捉え、適切なタイミングでの Sieve bed 交換を促す役割で使用される。

### 4.2 熱式センサによる2成分ガスの濃度測定原理

ここで、ガスの熱伝導率を測定することで、2成分ガスの濃度を測定する仕組みについて説明する。酸素濃縮器では酸素に対して窒素の混入割合が増えていくことが想定されている。23°C 雰囲気の場合、酸素の熱伝導率は 0.0265 W/(mK) で窒素は 0.026 W/(mK) であり両者は異なる。

従ってある割合でN<sub>2</sub>が混入したガスの熱伝導率と酸素濃度は対応関係があり、これによりガスの熱伝導率が測定できれば、酸素濃度を求めることが可能である。しかし、実際の濃縮ガスは酸素、窒素の2成分では無く、微量のアルゴンを含む3成分である。3成分のガスの割合がそれぞれ変化する場合はこの手法では酸素濃度を測定できない。そこで、これを可能にするアルゴリズムを新たに考案した。まずは酸素濃縮ガスにアルゴンが混入する影響について説明する。

### 5. 酸素濃縮ガスへのアルゴン混入の影響

一般に空気の成分は窒素78%、酸素21%、アルゴン1%とされている。酸素濃縮器はSieve bed内の吸着剤で、ここから窒素を選択的に吸着して酸素を濃縮する。吸着剤としては主にゼオライトが使用されており、ゼオライト格子のイオン極性とガスの4重極子モーメントの相互作用が窒素と酸素で異なることを利用して窒素を吸着している<sup>3)</sup>。この原理ではアルゴンは吸着されずほぼそのまま濃縮ガスに混入するため図7のように濃縮後のアルゴンは4.11%となる。

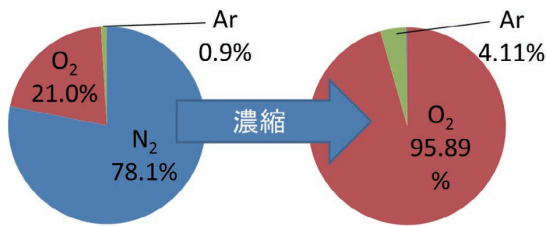


図7 濃縮前後のガスの組成変化

窒素のみが除去される場合は酸素に対するアルゴンの割合は濃縮前後で変わらず4.29%であるが、酸素もいくらかは吸着されるためこの割合は変動することがわかっている。また、空気中の水分などによりゼオライトの吸着能力が劣化することで<sup>4)</sup> 窒素も混入するため濃縮ガスは3成分となる。図8は各ガスの熱伝導率で、酸素との差は窒素と比較してアルゴンは非常に大きいことがわかる。

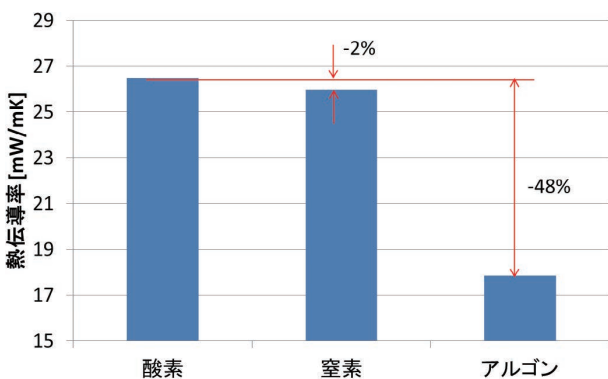


図8 各ガスの熱伝導率

従ってアルゴン割合は酸素に対して約4%と小さくともその影響を無視できない。そこで熱式センサでも3成分中の酸素濃度を算出できるアルゴリズムを開発した。

### 6. 熱式センサの3成分ガス中酸素濃度測定技術

#### 6.1 測定原理

3成分からなるガスの組成比と熱伝導率の関係を図9に示す。ここでxは酸素濃度であり、zは“酸素に対するアルゴンの割合”（以後単にアルゴン割合と表記する）、残りの1-x(1+z)が窒素濃度である。酸素濃度と熱伝導率の相関カーブはアルゴン割合に依存して変化するので、ある組成比のガスに対して熱式センサによって熱伝導率が得られても酸素濃度を求めることはできない。図9の例として熱伝導率y<sub>1</sub>に対してアルゴン割合の候補がz<sub>1</sub>, z<sub>2</sub>, z<sub>3</sub>の三種類であれば、酸素濃度もx<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, x<sub>3</sub>が候補となり、一つに定まらない。

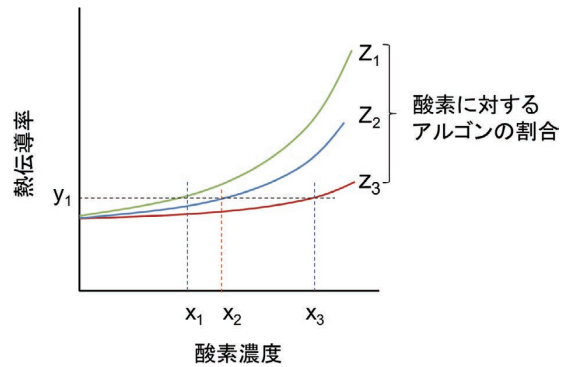


図9 3成分ガスの組成比と熱伝導率の関係

そこで、y<sub>1</sub>を取得した温度T<sub>1</sub>とは異なる温度T<sub>2</sub>で熱伝導率y<sub>2</sub>を得る。図10は両条件で取得した熱伝導率カーブの概念図である。

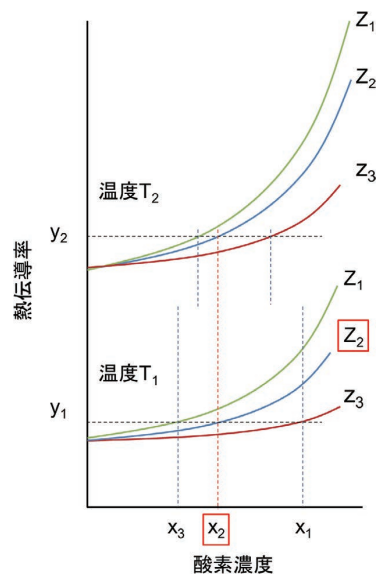


図10 2温度での3成分ガスの組成比と熱伝導率の関係



熱伝導率はガス組成に固有の温度特性を持つため、温度  $T_1$  で得られたカーブと温度  $T_2$  で得られたカーブは組成比に応じて変化が異なる。従って  $y_1$  と  $y_2$  で共通の酸素濃度を求めると  $x_2$  であると特定できる。因みにアルゴン割合も  $z_2$  と特定されるためアルゴン濃度は  $x_2 \times z_2$  となり残りが窒素濃度になるため原理的には3成分の組成比がわかる。

### 6.2 算出アルゴリズム

実際にはアルゴン割合  $z$  はランダムな値を取りうるため、これを求めるアルゴリズムについて説明する。混合ガスの酸素濃度を  $x$ 、熱伝導率を  $y$  とする。温度  $T_1$  で熱伝導率  $y_1$  が、温度  $T_2$  で  $y_2$  が得られたとする。酸素濃度と熱伝導率の関係は2次式で表されるので、係数の異なる2式が得られる。

$$y_1 = a_1x^2 + b_1x + c_1 \tag{10}$$

$$y_2 = a_2x^2 + b_2x + c_2 \tag{11}$$

ここで、 $c_1$  と  $c_2$  は、酸素0%のとき即ち純窒素の温度  $T_1$  及び  $T_2$  の時の熱伝導率であり既知である。従って式(10)と式(11)で未知数は  $x, a_1, b_1, a_2, b_2$  の5個となる。ここで、 $a_n$  と  $b_n$  はアルゴン割合  $z$  の関数  $f_{a_n}(z), f_{b_n}(z)$  でありキャリブレーションであらかじめこれを求めておけば未知数は  $x$  と  $z$  の2個となるので上記2式の連立からこれらを求めることができる。因みに酸素、窒素、アルゴンの3成分系において、 $a_n$  は  $z$  に依存しない定数で、 $f_{b_n}(z)$  は  $z$  の1次関数となった。実際の使い方としてはキャリブレーションで求めた関数のパラメータをマイコン等に記憶させておき、ヒータ出力を変えることで温度を変更して熱伝導率2値を取得すれば良い。現時点でのセンサ感度では関数のパラメータの必要有効桁数は4桁であり、マイコンの記憶容量に対して問題は無い。図11に算出フローチャートを示す。

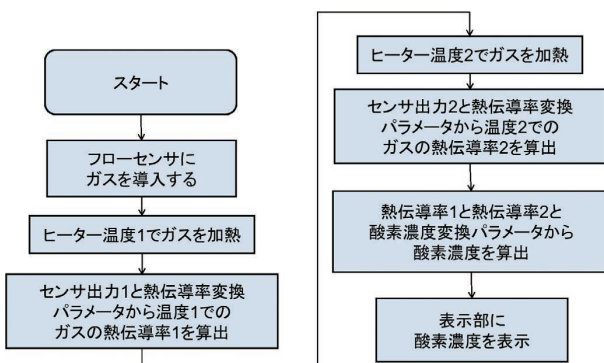


図11 組成比算出フローチャート

### 6.3 3成分ガス中の酸素濃度測定実験

以上のアルゴリズムにより実際に3成分ガス中の酸素濃度が測定できるかを実験で確認した。図12は評価装置のブロックダイアグラムである。

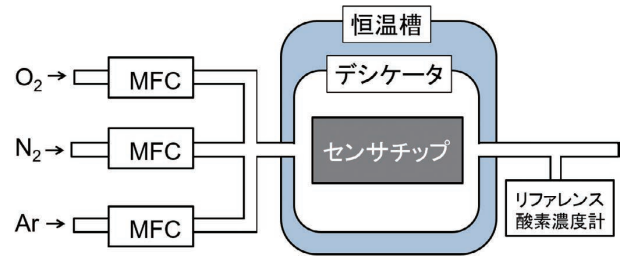


図12 評価系ブロックダイアグラム

酸素、窒素、アルゴンの配管を結合し、マスフローコントローラ (MFC) で各ガスの流量比を変えることで3成分ガスの組成比を変化させた。このガスをセンサチップを入れたデシケータに導入し、後段の酸素濃度計をリファレンスとして測定結果と比較した。以下に実験プロトコルを示す。

サンプル：セラミックパッケージ実装センサチップ

サンプル測定個数：1

環境温度：25°C

測定ガス組成：酸素、窒素、アルゴンの3ガスで、酸素に対するアルゴン割合を4%、5%、6%、7%の4水準とし、各水準において酸素濃度を最大値~0%まで振った。表2はアルゴン割合4%の例で、アルゴン濃度は酸素濃度に応じて変化するがアルゴン割合は4%で一定である。

表2 アルゴン割合4%の測定ガス組成

No.	O2%	Ar%	N2%
1	96.15%	3.85%	0%
2	94%	3.76%	2.24%
3	92%	3.68%	4.32%
4	90%	3.6%	6.4%
5	85%	3.4%	11.6%
6	82%	3.28%	14.72%
7	80%	3.2%	16.8%
8	78%	3.12%	18.88%
9	75%	3%	22%
10	70%	2.8%	27.2%
11	50%	2%	48%
12	0%	0%	100%

ガス流量：10 l/min

ガス濃度安定時間：2分

ヒータ発熱温度：135°C, 78°C

出力取得回数：1条件 50ポイント

リファレンス酸素濃度計精度：±0.1%

### 6.4 評価結果

図 13 はアルゴン割合を 4%~7%まで変化させて取得したデータに対して、まずは従来の 2 成分方式で算出した酸素濃度の誤差である。具体的にはアルゴン割合 4%の”アルゴン酸素”と”窒素”の 2 成分ガスとみなして算出した。

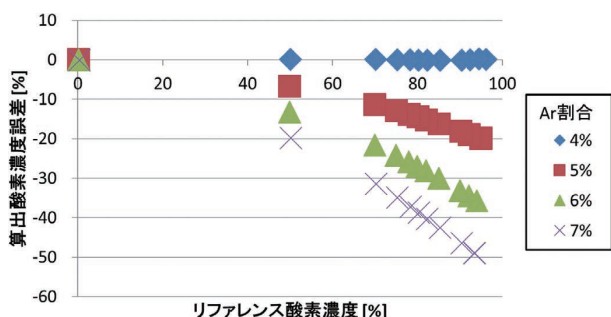


図 13 2 成分ガスと仮定した酸素濃度算出誤差

この方法ではアルゴン割合が 1%異なると酸素濃度は最大 20%近いずれを生じ、アルゴン割合 7%では誤差が 50%程度にもなる。これは”アルゴン酸素”の成分は不変でガスの熱伝導率は専ら窒素との混合比によって変化するという 2 成分系の前提に反して、アルゴン割合の変化により”アルゴン酸素”自体の熱伝導率も変化してしまっているためである。対して、3 成分ガス中酸素濃度算出アルゴリズムにより求めた酸素濃度の誤差を図 14 に示す。

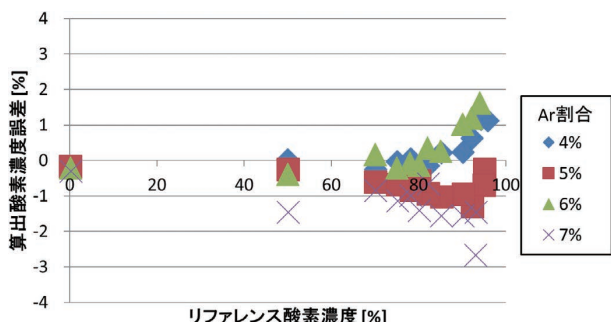


図 14 3 成分ガス中の酸素濃度算出誤差

このアルゴリズムを適用すると誤差は +2%/−3%に留まる。以上のように評価系にて作り出した 3 成分ガスに対する実際のセンサ出力からアルゴリズムを使って +2%/−3%の精度で酸素濃度を算出することができた。

なお、当技術は特許出願中である (特願 2019-152361)。

### 7. むすび

酸素濃縮器の酸素濃度モニターにおいて、サイズやコストで優位な熱式センサを使えばユーザビリティの向上に大きく貢献できるが、測定するガスが 3 成分であるためこれまで実現されていなかった。今回考案したアルゴリズムはこれを可能とする技術であり、これに加えて MEMS 技術を使うことにより従来のセンサの約半分のサイズを低コス

トで達成できる見込みができた。酸素濃縮器の小型化は COPD 患者の QOL の向上につながり、センサの小型化はこれに貢献するものである。現在開発中のセンサは感度に課題があるため、実用化に向けて高感度化に取り組み中である。

### 参考文献

- 1) 一般社団法人 GOLD 日本委員会, “COPD 情報サイト”. [http://www.gold-jac.jp/copd\\_facts\\_in\\_japan/](http://www.gold-jac.jp/copd_facts_in_japan/), (参照 2019-01-17).
- 2) 小松茂. 在宅酸素療法の現状と将来. Medical Gases. 2012, Vol.14, No.1, p.99-103.
- 3) 吉田智, 平野茂, 中野雅雄. イオン交換 LSX 型ゼオライトの窒素及び酸素吸着特性. 化学工学論文集. 2004, Vol.30, No.4, p.461-467.
- 4) 高坂彬夫, 松田良弘. 板谷産ゼオライトの窒素選択吸着による富酸素空気の製造. 材料. Vol.28, No.312, p.12-15.

### 執筆者紹介



**中川 慎也** NAKAGAWA Shinya  
 事業開発本部 MEMS 開発生産センタ  
 技術開発部  
 専門: 電気電子工学  
 所属学会: 電気学会

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

# 高角度分離分解能を有する到来方向推定を導入した交通監視用ミリ波レーダ

谷本 雄大, 上野 大, 齋藤 啓介

安心・安全な交通環境を実現するために、安全運転支援や自動運転技術に対する期待が高まっている。とくに、交差点や合流部など、複雑な交通シーンが想定される地点においては、車両に搭載されたセンサだけではなく、インフラ側に設置されたセンサの情報も活用するインフラ協調型システムが重要な役割を果たすと考えられ、実用化に向けた研究開発が進められている。

当社では、周囲環境によらないロバストな検出性能が期待できるインフラセンサとして、ミリ波レーダの開発を進めている。ミリ波レーダは、アンテナ数の制約から角度分離分解能が光学系のセンサと比較して不利となりやすいため、とくに車両並走シーンの分離検出が難しい。今回、ミリ波レーダに高角度分離分解能を有する到来方向推定を導入し、実際の車両並走シーンを対象にして、検出性能評価をおこなった。その結果、並走車両の分離が可能になることを確認し、到来方向推定の有効性を示した。

## Millimeter-Wave Traffic Monitoring Radar using High-Resolution Direction of Arrival Estimation

TANIMOTO Yudai, UENO Dai and SAITO Keisuke

Driving safety support and automated driving technology have attracted much attention for realizing a safe transportation society. Infrastructure coordinate system is expected to play an important role in complex traffic scenes such as intersections and junctions because infrastructure sensor can complement information from sensors installed in vehicles. Research and development are underway to put these technologies into practical use.

We are developing millimeter-wave radar as an infrastructure sensor that can be expected to have robust detection performance regardless of the surrounding environment. Millimeter-wave radar tend to suffer from lower angular resolution due to lack of the number of antennas compared to optical sensor. This will make detection and separation of a vehicle running on the adjacent lane side by side very difficult. To overcome this problem, we introduce Direction of Arrival (DOA) estimation with high angular separation resolution to millimeter-wave radar and evaluated the performance of angular resolution by a field experiment. As a result, it was confirmed that a vehicle running on the adjacent lane side by can be detected and the effectiveness of DOA estimation was verified.

### 1. まえがき

政府は、交通事故による年間死者数を2020年までに2500人以下に減らす目標を掲げている<sup>1)</sup>。死者数は年々減少しているものの、近年その減少数には下げ止まりの傾向がみられる<sup>2)</sup>。その他にも、主に都市圏における深刻な交通渋滞発生に伴う経済損失や、物流・移動サービスにおけるドライバー不足など、交通にかかわる社会的課題が数多

く顕在化している。

これらの課題を解決し、安心・安全かつ快適な交通社会を実現するために、安全運転支援システムや自動運転技術に関する様々な研究開発が進められている。例えば、内閣府は戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) において、自動運転を実用化し普及拡大することを目的として、産学官共同によるインフラ協調型自動運転システムの研究開発を推進している<sup>3)</sup>。

インフラ協調型システムでは、自動走行車両に搭載され

Contact : TANIMOTO Yudai yudai.tanimoto@omron.com

たセンサだけでは検出が困難な、見通し外に存在する物体を検出するため、インフラ側に設けられたセンサの検出情報も活用する。レーダは、カメラや LiDAR などの光学系センサと比較して、電波を用いることにより周囲の照度変化の影響を受けず、また雨・霧に対する透過性が高いため、検出性能が天候や時間帯に影響されにくいという特徴を持ち、インフラセンサとしての利用可能性が注目されている。

当社は、次世代のインフラセンサとしてミリ波レーダの開発を進めており、その到来方向推定に高角度分離分解能手法を導入することで、車両の分離検出能力を高められることを実証した<sup>4)</sup>。本稿では、その詳細について紹介する。

## 2. ミリ波レーダの動作原理

### 2.1 距離・速度の推定

ここでは Frequency Modulation Continuous Wave (FMCW) 方式を例として、図 1 を用いてレーダの動作原理を説明する。FMCW レーダは、周波数変調された連続信号(チャープ信号)を送信し、物標によって反射された受信信号と送信信号の一部をミキシングして得られた差周波成分(ビート信号)をもとにして、距離測定をおこなうものである。受信信号は、チャープ信号に対して物標との距離に対応した往復電波伝搬時間ぶんだけ遅延して受信されるため、ビート信号の周波数は遅延時間、すなわち物標との距離によって定まる。時間信号であるビート信号をフーリエ変換により周波数領域に変換することで、レーダと物標間の距離を算出することができる。また、物標が移動している場合、ドップラ効果によってレーダと物標の相対速度に対応した周波数成分が受信信号に重畳するため、距離算出と同様にして、レーダに対する物標の相対速度を算出することができる。

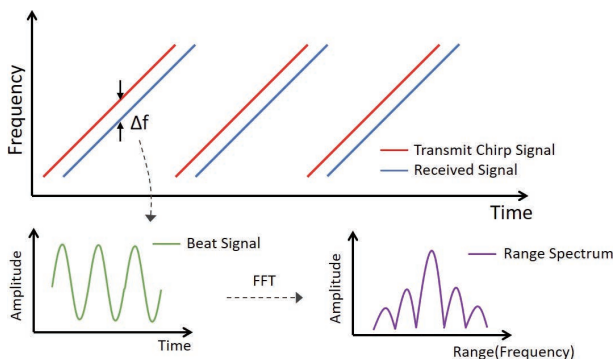


図 1 距離、速度推定の原理

異なる距離に存在する 2 つの物標を分離検出可能な最小距離である距離分離分解能は、送信信号の変調帯域幅によって定まり、帯域幅が広いほど向上する。また、レーダは物標の速度を距離と同時に算出することができるため、

速度に関する分離分解能も距離と同様に定義することができる。速度分離分解能は、フーリエ変換の性質からチャープ信号の繰り返し数の増加、すなわち観測時間が長くなるほど向上する。

ミリ波周波数帯は数百 MHz から数 GHz にわたる広帯域信号を利用可能であるため、高い距離分離分解能を実現することができる。また、周波数が高いほど電波の波長が短くなるため、対応するアンテナを小型化することができる。このため、ミリ波レーダは小型かつ高い距離分離分解能を実現することができる。

### 2.2 方位角の推定

レーダのアンテナが複数のアンテナからなるアレーアンテナで構成され、かつ物標とレーダ間の距離がアレーアンテナの寸法よりも十分に大きい場合、入射波は波面が平面である平面波とみなすことができる。このとき、図 2 に示すようにレーダに対する物標からの反射信号は、受信アンテナごとに物標の方位角にもとづく経路長差をもって入射する。そのため、各受信アンテナにおける受信信号の間には、経路長差による遅延量の違い、すなわち位相差が生じている。この位相差をもとに、物標の方位角を算出することができる。ここで、角度分離分解能は、同距離に存在する 2 つの物標を分離検出可能な最小角度として定義される。

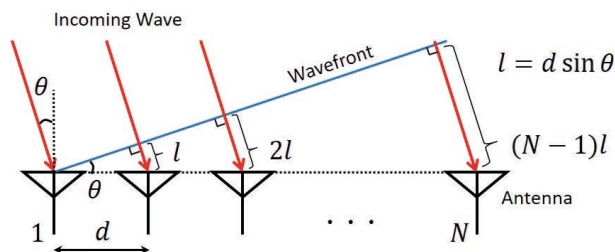


図 2 平面波到来時の受信アンテナ間経路長差

## 3. レーダに要求される分解能

表 1 は、車両走行の代表的なシーンと、レーダを用いてそれらのシーンで車両を分離検出する際に要求される分解能の種類を示している。

### 3.1 追従

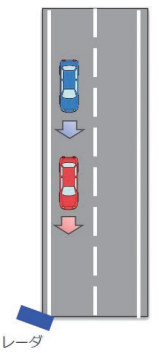
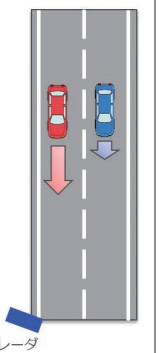
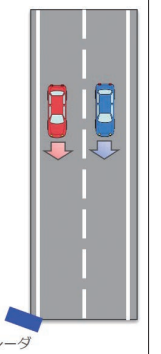
複数台の車両が、同一車線で一定間隔を保ちつつ走行する場合においては、レーダから見て各車両が同一速度、同一角度となる。このとき、各車両を分離検出するためには、距離情報をもとに分離する必要がある。距離分離分解能は周波数帯域幅によって定まるため、周波数帯域幅を広くすることで分解能を向上させることができる。

### 3.2 追越し・追抜き

速度の速い車両が、遅い車両の前方に出る場合におい

て、最も分離分解能が要求されるのは、各車線に車両が隣接して存在している場合である。この場合、レーダから見て各車両は同一距離となる。各車両を分離検出するためには、速度情報が角度情報のいずれかをもとに分離する必要がある。速度分離分解能は、観測時間が長くなるほど向上するため、観測時間を確保することで対応できる。

表1 車両走行の代表的なシーンと要求される分解能

シーン	追従	追越し・追抜き	並走
イメージ			
要求される分解能	距離	速度/角度	角度

### 3.3 並走

複数台の車両が隣接車線を並びあって走行する場合においては、レーダから見て各車両が同一距離、同一速度となるため、角度情報をもとに分離する必要がある。光学系センサと比較して、レーダはアンテナ数の制約により角度分離分解能を高めることが難しいため、並走はレーダが苦手とする検出シーンのひとつである。

角度分離分解能は、本質的にはアンテナのビーム幅に依存しているため、アンテナ単体のビーム幅を狭くしたり、アンテナの数を多くしたりする必要がある。これらをアンテナの特性によって実現しようとする場合、前者においては検出エリアが狭くなるという問題があり、後者においてはレーダが大型化したり、コストアップに繋がるといった問題がある。したがって、限られたアンテナ数で車両を分離検出できる角度分離分解能を実現することが求められる。

この場合、物標の方位角を推定する到来方向推定手法の特性が重要になる。従来利用されてきた Beamformer はフーリエ変換にもとづく手法であり、その限界を超える手法が求められる。表2は、Beamformer と、それよりも高い分離分解能が期待できる到来方向推定手法の特徴を比較したものである。

LP と MUSIC は、ともに高い角度分離分解能が期待できる手法だが、MUSIC は受信信号の相関行列の固有値展開をおこなう点に特徴がある。ここで得られた各固有値（固

有ベクトル）に対し、到来方向推定結果である角度スペクトルが得られるが、現実には雑音の影響などにより、誤った到来方向推定結果であるスプリアスが生じる場合がある。MUSIC では並列化による合成処理をそれらに適用した MUSIC スペクトルを利用することで、スプリアスを低減することができるという特徴をもつ。したがって、我々は従来の Beamformer に対して角度分離分解能の改善がもっとも期待でき、かつスプリアスの低減が可能な手法である MUSIC を到来方向推定手法として採用することで、インフラセンサとしてのミリ波レーダで従来不可能だった並走時の車両分離検出が可能になると考えた。

表2 到来方向推定手法の比較

手法	概要	分解能
Beamformer	メインローブを全方向に渡って走査し、アンテナからの出力が大きくなる方位角を算出	アンテナで形成されるビーム幅に依存
Capon <sup>5)</sup>	メインローブ以外の方位角度からの出力への寄与を最小化	アンテナで形成されるビーム幅に依存
LP <sup>6)</sup>	出力電力を最小化するようにヌルを走査	Beamformer/Capon より高い
MUSIC <sup>7)</sup>	部分空間による信号と雑音の直交性を利用し、MUSIC スペクトルを用いて走査	LP と同等 + スプリアス低減

## 4. 実験

MUSIC による分離検出の改善効果を確認するため、実際の車両並走シーンを対象とした実験をおこなった。

### 4.1 検証用ミリ波レーダ

表3は、実験に用いたミリ波レーダの仕様を示している。アンテナ数が送信2、受信4の Multiple Input Multiple Output (MIMO) レーダであり、仮想アレイによる受信アンテナ数は8となる。周波数帯域幅と観測時間から定まる距離分離分解能と速度分離分解能は、それぞれ0.4 m、1.0 km/h であり、追従や追越し・追抜きの分離検出に必要な性能を備えている。

表3 レーダの仕様

方式	FMCW
アンテナ数	送信 2、受信 4
中心周波数	76.5 GHz
周波数帯域幅	340 MHz
観測時間	6.5 msec

### 4.2 実験環境

図3は、設置されたレーダから見た実験環境を示している。レーダの設置高はインフラセンサとしての設置環境を想定し、地上高 6.75 m とした。道路幅は 5.8 m であり、2 車線を想定している。路肩から車両を監視するシーンを模擬し、レーダから奥行 50 m かつ図中に示す位置が 0 度となるようにレーダを設置した。2 台の車両は、レーダに近づく方向に約 30 km/h で並走する。

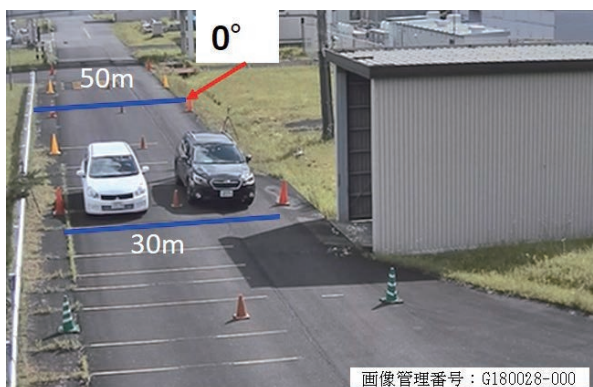


図3 実験環境

### 4.3 実験結果

レーダからの距離 30 m 地点を 2 台の車両が通過した際の角度推定結果から、並走車両の分離検出が可能かどうか検証をおこなった。

図4は、車両が 30 m 地点を通過した際の受信信号にもとづいて計算した、距離と速度の推定結果を示している。車両がレーダに近づいてくるとき、負の速度として検出される。図中において、距離 30 m、速度 -9 m/s (-32 km/h) にピークが出現していることがわかる。このピークは並走する車両を検出したものであるが、レーダに対して 2 台の車両が同距離・同速度で走行しているためにピークが同じ位置で重なっており、距離情報と速度情報にもとづく並走車両の分離検出ができないことを示している。

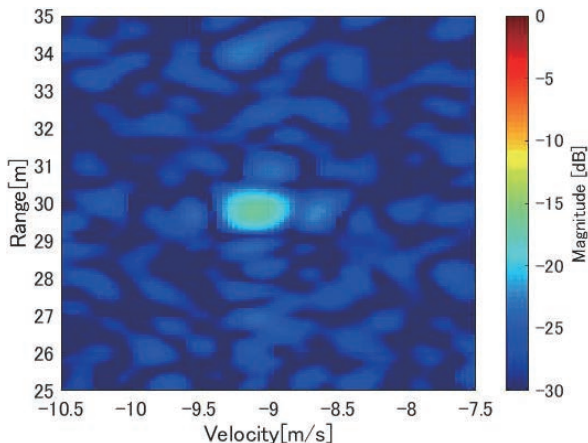


図4 距離・速度の推定結果

図5は、30 m 地点における Beamformer と MUSIC を用いた場合の方位角推定結果を示している。表4は、並走車両のレーダに対する真の方位角（真値）と、図5から読み取った推定結果のピーク値を示している。ここでは並走車両に対応した 2 つのピークの出現が期待されるが、結果から両手法ともに分離検出できていないことがわかる。MUSIC は、本来 Beamformer よりも高い角度分離分解能が期待されるが、受信信号の相関行列の固有値展開を用いる手法であるがゆえに、複数物標からの反射信号の間で相関が高ければ、その性能が低下するという欠点がある。今回、並走車両という近接した物体の反射信号に対して、それが強く現れたものと考えられる。

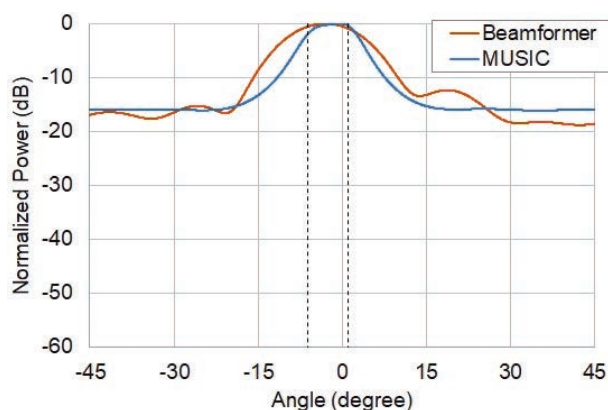


図5 方位角の推定結果

表4 方位角の真値と推定結果の比較

	真値	Beamformer	MUSIC
推定角度	-6.2, +1.0 deg	-2.9 deg	-0.3 deg

これに対処するため、相関を抑圧する処理である空間平均法<sup>8)</sup>を適用した。空間平均法は、方位角推定において相関行列を計算するとき、全体のアレーアンテナ配列をサブアレーと呼ばれる複数の部分的なアレー配列に分割し、それらサブアレーの相関行列の平均をとるというものである。相関のある信号であっても、その位相は受信位置をずらせば変化するので、サブアレー化により受信位置をずらした状態を実現し、それを平均することで相関を抑圧することができる。

図6は、MUSIC の計算時に空間平均法を適用した場合の方位角推定結果を示している。MUSIC の推定結果において、明確に 2 つのピークが出現していることがわかる。表5に示すように、2 つのピークが示す推定角度はそれぞれ真値とよく一致している。

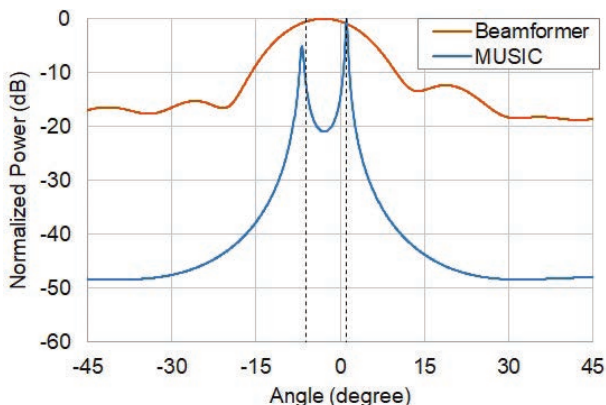


図6 方位角の推定結果（空間平均法適用後）

表5 方位角真値と推定結果（空間平均法適用後）

	真値	Beamformer	MUSIC
推定角度	-6.2, +1.0 deg	-2.9 deg	-6.9, +1.1 deg

#### 4.4 考察

MUSICの検出結果に対して、計算過程における相関行列から得られた到来波の受信電力と雑音電力の差(SNR)を計算した。物標を検出するためには、最低でも6 dB程度のSNRを確保することが望ましい。表5に示す2つのピーク角度に対してSNRを計算したところ、それぞれ9.1 dB (-6.2 deg)、9.9 dB (+1.0 deg)となった。スプリアスであれば、SNRはほぼ0 dB近くとなるため、今回得られた2つのピークはスプリアスではなく、車両由来のものと判断することができる。

以上のことから、空間平均法を適用したMUSICを用いることにより、従来手法であるBeamformerでは不可能だった並走車両の分離検出が可能になることがわかった。

### 5. むすび

インフラセンサとしてミリ波レーダの利用を想定し、とくに検出難易度が高い車両の並走シーンに対して、高角度分離分解能手法であるMUSICの適用により、車両分離検出が可能かどうか検証をおこなった。

路肩からの観測を模擬した実車両を用いた検証により、従来手法であるBeamformerでは不可能だった並走車両の分離が、MUSICでは可能になることを示した。また、並走車両からの反射信号に対しては、信号間の相関を抑圧するために空間平均法の適用が効果的であることがわかった。

以上のことから、インフラセンサとしてのミリ波レーダにおいて、従来手法では不可能だった並走車両の分離が可能になることを示した。

今後は、さらに様々な環境において評価実験をおこなうほか、同じアンテナ構成のまま角度分離分解能の向上が期

待できるKhatri-Rao積による仮想アレー拡張手法<sup>9)</sup>など、さらなる高角度分離分解能手法の適用や、検出エリアに適したアンテナ性能の最適化を進めていく。

### 謝辞

本稿は、国立大学法人新潟大学との共同研究成果の一部である。新潟大学 山田寛喜教授、堀内貴裕氏に深く感謝申し上げる。

### 参考文献

- 1) 中央交通安全対策会議. “第10次交通安全基本計画”. 内閣府. 2016-03-11. <https://www8.cao.go.jp/koutu/kihon/keikaku10/index.html>, (参照 2019-08-05).
- 2) 交通局交通企画課. “平成30年中の交通事故死者数について”. 警察庁. 2019-01-04. <http://www.npa.go.jp/news/release/2019/20190104jiko.html>, (参照 2019-08-05).
- 3) 内閣府. “東京臨海部実証実験の実施について～SIP「自動運転(システムとサービスの拡張)」～”. 内閣府. 2018-11-13. [https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/20181113\\_adusrinkai.html](https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/20181113_adusrinkai.html), (参照 2019-08-05).
- 4) 上野大, 堀内貴裕, 杉井裕太, 齋藤啓介, 山田寛喜. “ミリ波レーダにおける到来方向推定を用いた車両分離に関する検討”. 2019年電子情報通信学会総合大会. 2019, p. 165, B-1-165.
- 5) Capon, J. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis. Proc. IEEE. 1969, Vol. 57, No. 8, p. 1408-1418.
- 6) Tufts, D.W.; Kumaresan, R. Estimation of frequencies of multiple sinusoids: Making linear prediction perform like maximum likelihood. Proc. IEEE. 1982, Vol. 70, No. 9, p. 975-989.
- 7) Schmidt, R. O. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation. IEEE Trans. 1986, Vol. AP-34, No. 3, p. 276-280.
- 8) Shan, T. J.; Wax, M.; Kailath, T. On Spatial Smoothing for Estimation of Coherent Signals. IEEE Trans. 1985, Vol. ASSP-33, No. 4, p. 806-811.
- 9) Ma, W.-K.; Hsieh, T.-H.; Chi, C.-Y. DOA Estimation of Quasi-Stationary Signals With Less Sensors Than Sources and Unknown Spatial Noise Covariance: A Khatri-Rao Subspace Approach. IEEE Trans. 2010, Vol. SP-58, No. 4, p. 2168-2180.

## 執筆者紹介



**谷本 雄大** TANIMOTO Yudai  
技術・知財本部 研究開発センター  
専門：電気・電子工学  
所属学会：IEEE



**上野 大** UENO Dai  
技術・知財本部 研究開発センター  
専門：電気・電子工学



**齋藤 啓介** SAITO Keisuke  
技術・知財本部 研究開発センター  
専門：電気・電子工学  
所属学会：IEEE, 電子情報通信学会

---

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。



# 電池不要なワイヤレスセンサ向け マイクロ波安定給電技術の開発

村井 彬人, 杉本 義喜, グエン マイン タイ

多品種少量生産に伴う段取り替え時のセンサの配線工数と、センサ配線の断線によるダウンタイムの増加が、生産現場において問題となっている。そのため、配線の必要のない無線によるインターフェース (I/F) の導入が検討されている。センサの配線には主に信号と電源の2種類が存在し、信号は通信規格に準拠した方式により一部無線化が実現されている。一方、電源に対しては電池を用いたものもあるが、制御用途での使用を考えた場合、通信の頻度が多く、頻繁に電池交換が必要となる。したがって、電池を用いない電源の無線化が求められており、マイクロ波方式でのワイヤレス給電が有効である。しかし、生産現場は金属の装置や、治具が多く、安定した電力供給が困難である。

著者らは、マイクロ波方式において給電装置のアレイアンテナにより最大比合成方式を用いて、センサへの給電電力を安定させる制御技術を開発した。そして、給電電力を測定した結果、従来の制御を用いない場合と比較して、開発した制御技術によりセンサの動作閾値に対して高い受信信号強度であったことから、安定した給電を確認できた。

## Development of Stable Microwave Wireless Power Transfer Technology for Wireless Sensor without Battery

MURAI Akito, SUGIMOTO Yoshiki and NGUYEN Manh Tai

There are two problems that generating more wiring work of sensors with tooling change in high-mix low-volume production and increasing downtime by breaking. Therefore, it is considered to introduce a wireless interface. There are mainly two types of signal lines and power supply lines in the sensor. The signal lines are made wireless according to the communication standard. While, although the power supply lines are wireless by battery, it is frequently required to replace a battery for control application because communication of sensor data is high frequent. Thus, the wireless power supplying is required without battery, the microwave wireless power transfer is effective for it. However, it is difficult to provide stable power supply because, there are many metal devices and jigs at the production site.

It was developed that stable microwave wireless power transfer technology by setting up array antenna of power transmitter and applying maximum ratio combining algorithm. Then, as a result of measuring the received signal strength, the proposed technology was able to confirm stable power supply compared with conventional technology because the received signal strength had a sufficient margin with respect to the operation threshold of the sensor.

### 1. まえがき

現状、生産現場に導入されているセンサはPLC (Programmable Logic Controller) などの上位機器と有線で接続されていることがほとんどである。有線センサを生産現場

に導入する場合には主に以下の2点が課題となっている。

近年エンドユーザーニーズの多様化に呼応し、生産ラインには多品種少量生産への対応が要求される。そのため、レイアウト変更が頻繁に行われているが、多くのセンサが有線での接続のため、レイアウト変更が頻繁に必要となる。1つ目の課題は、そのような生産現場においてレイアウト

Contact : MURAI Akito akito.murai@omron.com

変更に伴って、配線の変更に必要な工数が増加し、生産稼働率の低下を防止する事である。

生産設備の可動部への有線センサの取り付けなど、配線部分に負荷がかかる場合に断線が発生する。2つ目の課題は、断線により生産ラインが停止するダウンタイムの発生を防止することである。

それらの課題を解決するために、センサ I/F が無線化された、ワイヤレスセンサの導入が検討されている<sup>1)</sup>。センサ配線には、主にセンサデータをやり取りする信号線と、センサが動作するために必要な電力を供給する電源線の2種類が存在する。信号線の無線化は、Wi-Fi や Bluetooth<sup>®</sup> などの通信規格に準拠した無線通信によって一部実現されている。電源線においてはセンサに電池を搭載することで無線化されているものがほとんどである。しかし、制御用途では通信頻度が多く、頻繁な電池の交換作業や充電が必要となる問題がある。また、センサの数が増加するに伴い、その作業の工数は増加する。したがって、電池を用いることなくセンサの電源線を無線化できる技術が必要とされている。

非接触でデバイスに電力を供給する技術には複数の方式があり、それを表1に示す<sup>2)</sup>。現在のワイヤレス給電方式は近距離で大電力を給電できる非放射型と、遠距離に小電力を給電できる放射型の大きく2種類に分類できる。非放射型である磁界結合方式と電界結合方式は給電側と受電側それぞれでコイルや電極を設け、コイル間の磁界や電界を利用して給電する方式である。これらの方式は給電電力が大きい一方で、給電距離が100 mm以下であること、位置ずれや異物による給電効率の低下が課題とされている。それに対して、放射型であるマイクロ波方式、レーザ方式、超音波方式では送信側が空間にそれぞれ電磁波、レーザ、超音波を放射し、受信したエネルギーを電力に変換することで給電する方式である。給電電力は非放射型に比べて1 W以下と小さいが、給電距離が5 m以下と長距離なのが特徴である。工場内でのセンサの使用状態を考えた場合、数mの範囲に複数のセンサを配置することが想定されるため、給電距離の短い非放射型の給電方式の適用は困難である。また、放射型においても超音波方式では風などの空気の流れの影響を受けること、また、レーザ方式では工場のような

埃や油が多い環境では光が遮断され、性能が劣化する問題点がある。

そのため、マイクロ波方式によるワイヤレス給電が適していると考えるが、工場内は周辺装置が金属により構成される複雑な電波伝搬環境であることから、従来検討されることが少なかった。そこで、本論文では2章で示す金属物が多い環境において、マイクロ波方式による安定給電性能についての検討を行う。

## 2. 想定する溶接工程環境

本論文ではワイヤレスセンサのアプリケーションとして、自動車部品の溶接工程でのワークの着座検知を想定する。自動車部品の溶接工程では溶接時に発生するスパッタによるセンサの配線部分が焼き切れる問題がある。1章で述べた有線センサによって発生する問題が存在する環境であり、問題を解決した場合の効果が大きいため本論文の想定環境とした。

自動車部品の溶接工程では、溶接ロボットによりワークの溶接が自動で行われる。ロボットにより溶接を自動で行うためにはワークが所定の位置に搬入されたかをセンシングする着座検知が行われる。決められた位置にワークが無い状態で溶接すると溶接の不良が発生するため、溶接工程において着座検知は重要である。

着座検知のためのセンサには近接センサ、フォトマイクロセンサ、光電センサなどが用いられている。溶接工程においては近接センサが最も多く用いられていることから、近接センサに対してマイクロ波ワイヤレス給電の適用を検討する。

図1に示される通り想定環境内には、壁面が4面と溶接対象のワーク、溶接ロボット、溶接治具が存在する。溶接ロボットは2台を想定しており、それぞれがワークの溶接を行う。設置治具はワークを固定しておくためのものである。実際の溶接工程の環境では、上記の設置物以外にも存在するが、電波伝搬の特性では波長より小さい構造物の影響は小さいとされている。本論文で検討する給電周波数である920 MHzの波長は約32 cmのため、それ以上の大きさの構造物を想定して設置物を検討した。

表1 ワイヤレス給電方式一覧

比較項目	非放射型		放射型		
	磁界結合	電界結合	マイクロ波	レーザ	超音波
給電電力	100 kW 以下	100 W 以下	1 W 以下	1 W 以下	1 W 以下
給電距離	100 mm 以下	10 mm 以下	5 m 以下	10 m 以下	5 m 以下
メリット	大電力	大電力	遠距離、複数に給電可能	遠距離	遠距離、複数に給電可能
デメリット	近距離、要位置合わせ	近距離、周辺金属に影響	小電力	小電力、複数に給電不可、埃による性能劣化	小電力、環境の物理変動で性能劣化

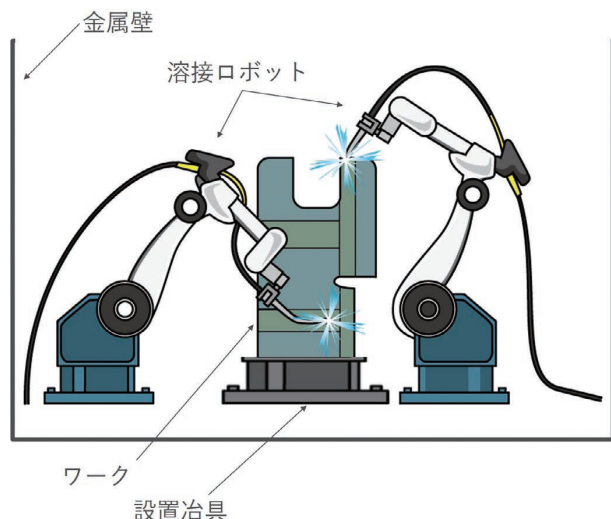


図1 想定環境のイメージ

### 3. マイクロ波給電における課題

マイクロ波方式では給電装置のアンテナから電波を放射し、ワイヤレス近接センサではアンテナで受信した電波を電力に変換し、センサを動作させる。したがって、センサで受信した信号強度が大きければ、変換される電力が大きく、センサが安定して動作するが、センサの受信信号が小さければセンサが停止又は不安定動作となる。本論文ではワイヤレス近接センサが動作できる受信信号の大きさは $-5$  dBm ( $320 \mu\text{W}$ )とする。これはワイヤレス近接センサの消費電力の設計値から算出された値である。そのため、 $-5$  dBm 以上であればセンサが動作し、それ以下であればセンサが停止することを想定し検証を行う。

無線通信の分野において電波の伝搬環境によって受信信号を低下させる要因は以下の3つとされている<sup>4)</sup>。

- 1) 距離減衰 (自由空間伝搬損失)
- 2) シャドウイング
- 3) マルチパスフェージング

距離による減衰は、送信点から電波を放射した際の距離に応じた受信点での損失を意味する。電波は送信アンテナから放射されると球面状に伝搬される。したがって、受信点までの距離が大きくなるに伴い、損失が大きくなる。また、給電周波数が高くなるに伴い損失が大きくなる。

シャドウイングは、送信点から受信点までの間に遮蔽物が存在する場合に発生する損失を意味する。発生する損失の大きさは遮蔽物の大きさや物質などの構造に依存する。

マルチパスフェージングは送信点から受信点まで直接到来する電波と、周辺物体に反射や回折して到来する複数の電波が干渉することで発生する損失を意味する。発生する損失は直接到来する電波と、反射や回折して到来する電波のそれぞれの振幅と位相の関係に依存する。

図1で示した想定環境において給電装置とワイヤレス近接センサを任意の場所に設置した場合、上記の3つの損失が発生する。それにより、受信信号強度がワイヤレス近接センサの動作電力の閾値である $-5$  dBm 以下となる場合がある。そのため、それぞれの要因に対して対策が必要である。

距離減衰に対しては給電装置とワイヤレス近接センサとの間の距離を回線設計から定義し、定義した距離の範囲でワイヤレス近接センサのシステムを運用することで対策できる。シャドウイングに対してはシステムを導入する際に給電装置のアンテナとワイヤレス近接センサのアンテナとの間に遮蔽物が存在しないように設置することで対策できる。しかし、マルチパスフェージングに対しては周辺物体の配置の情報から損失を設置時に対策することは困難である。

したがって、マイクロ波ワイヤレス給電技術においては周辺物体の存在により発生するマルチパスフェージングによる給電電力の低下が課題となり、技術的な対策が必要となる。4章ではマルチパスフェージングの影響を低減する安定給電技術について述べる。

## 4. マイクロ波安定給電技術

### 4.1 アルゴリズム選定

携帯電話の基地局で、送信機に複数のアンテナで構成されたアレイアンテナを設け、複数のアンテナの出力を制御させることでマルチパスフェージングを低減する技術が用いられている<sup>4)-5)</sup>。本論文で検討する制御アルゴリズムを表2に示す。表2に示される通り、3種類のアルゴリズムを比較選定する<sup>6)</sup>。

アンテナ選択方式は複数のアンテナの中でセンサに対して受信信号が最も大きくなるアンテナを選択して給電する方式である。各アンテナを切り替えながらセンサに給電と通信を行い、その時の受信信号やセンサからの返信信号を基にアンテナを選択する。そのため、マルチパスフェージング低減性能を向上させるためには、アンテナ数を増やす必要があるが、アンテナの数だけ応答時間が増加する。

フェーズドアレイ方式は各アンテナに入力される位相を制御することで指向性を切り替えて給電する方式である。アンテナ選択方式と同様にセンサの受信信号強度が最も高くなる指向性を選択する。したがって、指向性の数だけ応答時間が増加する。

最大比合成方式は各アンテナで受信したセンサからの信号を基に、各アンテナに入力される振幅と位相を制御する方式である。センサからの信号を基に各アンテナに入力する位相と振幅の最適解を導出できるため、マルチパスフェージング低減性能は3つのアルゴリズムの中で最も高い。また、1回のセンサとの通信で制御可能である。

本論文ではマルチパスフェージング低減性能が最も高く、応答時間が他の方式より短い最大比合成方式をマイク

表2 アルゴリズム一覧

比較項目	アンテナ選択方式	フェーズドアレイ方式	最大比合成方式
イメージ			
原理	センサに対する受信信号強度が大きくなるアンテナを選択	各アンテナに入力される位相を制御し、指向性をあらかじめ決められたパターンだけ切り替えて、センサの受信信号強度が大きくなる指向性を選択	センサからの受信信号を基に各アンテナに入力される振幅と位相を制御
性能	受信信号はアンテナ数や配置に依存	受信信号は決められた複数の指向性パターンに依存	受信信号を最適値に制御できる
応答時間	アンテナの数に比例して増大	指向性の数に比例して増大	1回の通信時間分

ロ波安定給電技術として適用する。

従来は本論文と同様にアレイアンテナを設け、アンテナの指向性制御を給電装置に実装し、給電効率を向上させる検討がされている<sup>7)</sup>。しかし、ワイヤレス給電システムをセンサに対して導入し、実環境で特性を確認した例はなく、その実現可能性について明らかにされていない。そのため次節以降で給電装置に最大比合成方式を実装し、自動車部品溶接工程環境へのワイヤレス近接センサシステムの適用可能性を検証する。

#### 4.2 最大比合成方式

図2に最大比合成方式を適用した際のシステム構成を示す。

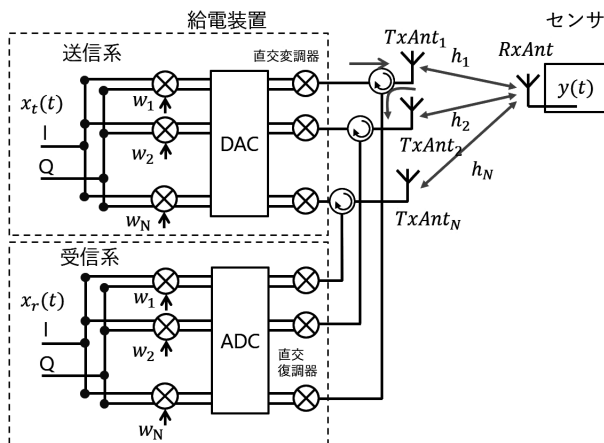


図2 最大比合成適用時のシステム構成図

$x_i(t)$  はアンテナに入力される給電信号である。 $x_r(t)$  はセンサからの受信信号である。 $w_i (i = 1..N)$  はアンテナに入力される給電信号の振幅と位相を制御するために乗算される重みである。また、送信アンテナ ( $TxAnt_i$ ) と受信アンテナ ( $RxAnt$ ) 間の伝搬チャネルを  $h_i$  とする。これらは複素数で表される。

センサでの受信信号 ( $y(t)$ ) は、給電信号  $x(t)$ 、重みベクトル  $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T$ 、伝搬チャネルベクトル  $\mathbf{H} = (h_1, h_2, \dots, h_N)$  を使って表現できる。伝搬チャネルベクトル  $\mathbf{H}$  はセンサに直接到来する電波と周辺物体に反射して到来する電波の両方が合成された電波の振幅変動と位相回転の情報を意味する。

$$y(t) = \mathbf{H}\mathbf{W}x(t)$$

ここで、マルチパスフェージングを低減させるためには受信信号の値が最大となる重みベクトル  $\mathbf{W}$  を求めることになる。受信信号の電力  $P_y$  を次式で求めることができる。

$$P_y = E[|y(t)|^2]$$

ここで  $E$  は平均計算である。 $P_y$  を最大にするということは  $|\mathbf{H}\mathbf{W}|^2$  を最大化させることに等しい。しかし、 $|\mathbf{H}\mathbf{W}|^2$  を最大化させるためには、重みベクトルの大きさ  $|\mathbf{W}|$  を無限に大きくすれば良いが、それは給電装置の空中線電力を無限に大きくすることと等価になる。したがって、空中線電力を変えずに  $|\mathbf{H}\mathbf{W}|^2$  を最大化させるために制約条件として  $\|\mathbf{W}\|^2 = 1$  を加える。したがって、 $P_y$  を最大にする重みベ

クトル  $\mathbf{W}$  を求める問題は  $\|\mathbf{W}\|^2 = 1$  の条件下で  $|\mathbf{H}\mathbf{W}|^2$  を最大化する問題となり、この問題を以下のように Lagrange の未定型数を用いて解くことができる。 $\mathbf{W}$  は以下の方程式を満たすものであるとする。次式の中の  $\lambda$  は未定係数である。

$$\begin{cases} Q(\mathbf{W}) = |\mathbf{H}\mathbf{W}|^2 - \lambda \|\mathbf{W}\|^2 \\ \frac{\partial Q(\mathbf{W})}{\partial \mathbf{W}} = 0 \end{cases}$$

上記の方程式を解いて  $\mathbf{W}$  は次のように求まる。式で示される通り、 $\mathbf{W}$  は伝搬チャネルの複素共役を各アンテナの電力の合計を 1 に正規化することで算出される。

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_N \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |h_i|^2}} \begin{pmatrix} h_1^* \\ h_2^* \\ \vdots \\ h_N^* \end{pmatrix}$$

算出された重みベクトル  $\mathbf{W}$  を給電信号  $x(t)$  に乗算することで、各送信アンテナから放射された給電信号が伝搬チャネルベクトル  $\mathbf{H}$  を介してセンサのアンテナにより同相で合成される。また、各送信アンテナに入力される給電信号の振幅比は伝搬チャネルベクトル  $\mathbf{H}$  の大きさの 2 乗に比例することから、信号が大きく伝わる伝搬チャネル  $h_i$  に大きな信号を放射することで、センサのアンテナでの受信信号強度を最大化することができる<sup>3)</sup>。

### 4.3 給電装置の開発

本論文では弊社製 UHF 帯 RFID のリーダライタをベースにアンテナ及び RF 回路を 4 つに増設して開発を行った ( $N=4$ )。また、前節で述べた最大比合成方式のアルゴリズムは FPGA (Field Programmable Gate Array) に実装する。前節で述べた通り、最大比合成方式で重みベクトル  $\mathbf{W}$  を計算する場合、各送信アンテナとセンサのアンテナの間の伝搬チャネルベクトル  $\mathbf{H}$  が必要である。本開発ではセンサからの信号の IQ 波形を高速フーリエ変換することで、伝搬チャネルベクトル  $\mathbf{H}$  を推定する。給電の 1 サイクルのフローを図 3 に示す。

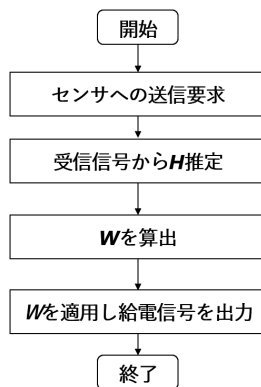


図 3 給電フロー

## 5. 模擬環境での性能検証

### 5.1 検証方法

本章では 2 章で示した想定環境を模擬した環境を作成し、その環境における安定給電性能の検証結果を報告する。模擬環境の外観を図 4 に示す。

想定環境では壁面、溶接ロボット、ワーク、設置治具が環境に設置されていたが、本検証では受信信号強度の測定用のアンテナ設置の制約上、壁面のみの再現とする。

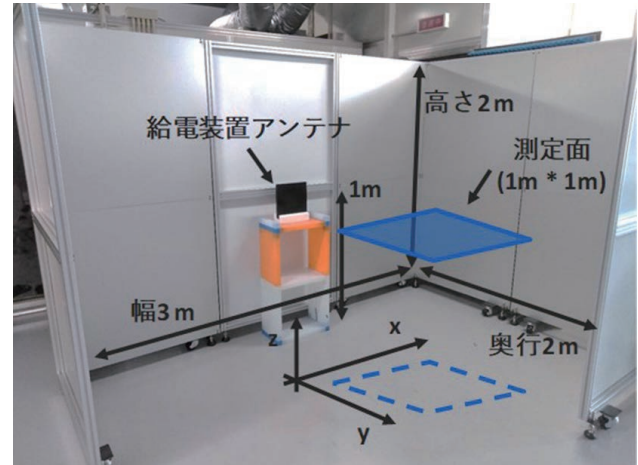


図 4 模擬環境の外観

模擬環境において給電装置のアンテナを正面方向に設置し、最大比合成方式適用後の 1 m 四方の範囲の受信信号強度を測定する。測定は波長の 1/8 の長さである 4 cm ごとに電動スライダ (MISUMI 社製、RSB2-LU-C21A-D-F1-R10-2500-S) を用いて自動で行う。水平方向は電波の反射が大きい金属壁で覆われているのに対して、垂直方向は天井が解放されていることからマルチパスフェージングの発生が水平方向に比べ小さいことが予想される。そのため、水平方向のみの測定とした。また、性能を比較するために最大比合成方式を適用しない場合の受信信号強度も測定する。適用しない場合は、4 つのアンテナへ入力する重みベクトル  $\mathbf{W}$  は同振幅、同位相に固定する。本検証の給電対象には UHF 帯 RFID パッシブタグを用いる。条件を表 3 に示す。給電装置の送信アンテナは ARIB T106 で定められた実効放射電力 36 dBm 以下となるよう 6 dBi に設計した。

表 3 測定条件

中心周波数	916.8 MHz
通信規格	UHF 帯 RFID EPC Global Gen2
空中線電力	30 dBm
給電装置アンテナ	右旋円偏波パッチアンテナ
給電装置アンテナ利得	6 dBi
給電装置アンテナ配置	半波長間隔平面配置
RFID タグアンテナ	半波長ダイポールアンテナ
RFID タグアンテナ利得	2 dBi
給電装置設置高さ	約 1 m
RFID タグ設置高さ	約 1 m
測定点数	676 点 (26 点×26 点)

### 5.2 検証結果

図 5 に最大比合成方式を適用しない場合と、適用する場合の受信信号強度のヒートマップを示す。

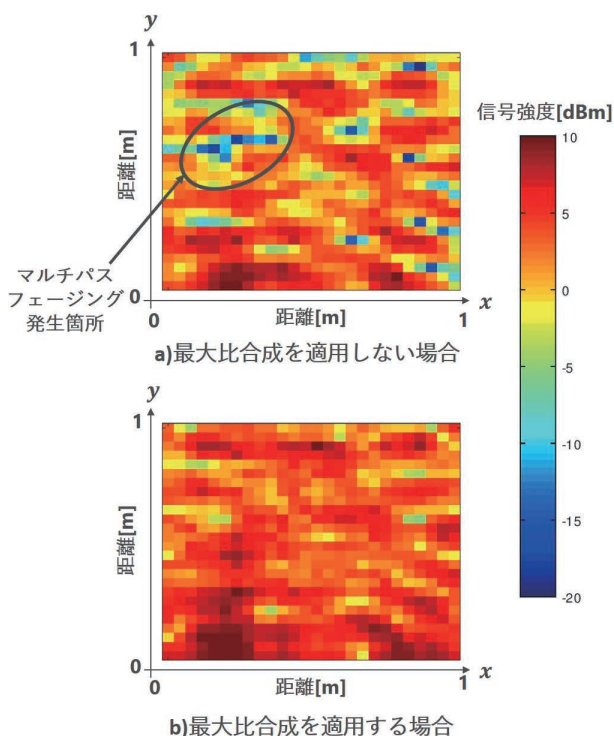


図 5 受信信号強度のヒートマップ

図 5 の a) に示される通り、最大比合成方式を適用しない場合には受信信号強度が -5 dBm 以下となる測定点が複数箇所を確認できる。それに対して、図 5 の b) に示される通り、最大比合成方式を適用する場合には、-5 dBm 以下となる測定点は確認できない。これは、最大比合成方式を適用しない場合には、給電装置のアンテナの指向性が固定であるため、マルチパスフェージングにより測定点での

受信信号強度が減少していると考えられる。それに対して、最大比合成方式を適用する場合には、測定点毎に重みベクトル  $W$  を計算することでマルチパスフェージングの影響を低減できている。

図 6 に最大比合成方式を適用した場合としない場合の受信信号強度の累積分布関数を示す。

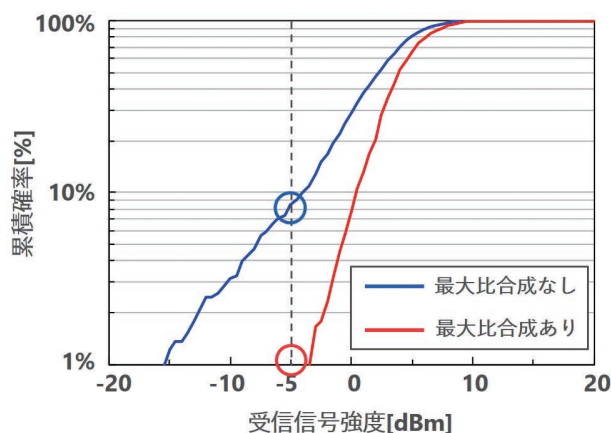


図 6 受信信号強度の累積分布関数

図 6 に示される通り、最大比合成方式を適用しない場合は、受信信号強度が -5 dBm 以下となる確率が 7.4% であるが、最大比合成方式を適用した場合には -5 dBm 以下となる測定点が存在しないことから、確率は 0.2% (1/626 点) 以下であることが確認できる。これは、マルチパスフェージングにより 7.4% の確率でセンサが動作不可となる環境において、最大比合成を適用することで動作不可であった場所でもセンサの動作が可能となることを意味する。

### 6. むすび

本論文では自動車部品の溶接工程のワーク着座検知を想定し、ワイヤレス近接センサへのマイクロ波ワイヤレス安定給電技術について述べた。模擬環境において従来のマイクロ波給電技術ではセンサが動作できない場所に対して、安定給電技術によりセンサが動作可能となり、本技術の有効性を示した。

今回は測定点での信号強度の測定のため UHF 帯 RFID パッシブタグを用いて検証を行った。また、検証した環境も弊社で構築した模擬環境であった。そのため、今後は実際のワイヤレス近接センサを用いて、稼働中の自動車部品溶接工程にてワークの着座検知の検証に取り組む必要がある。

本論文ではワイヤレス近接センサをターゲットとして開発を行った。マイクロ波安定給電技術は近接センサ以外の振動センサや温度センサなどにも適用できる。今後これらの様々な種類のセンサへの展開を考え、本論文では -5 dBm に設定した給電に必要な電力を変化させた場合と、壁面が 4 面存在する環境以外の場合の検証も行う。

最後に、今回開発にあたり多大なご支援をいただいた新潟大学工学部教授山田寛喜先生に深く感謝申し上げます。

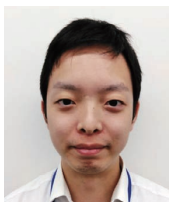
## 参考文献

- 1) 板谷聡子. “狭空間ワイヤレスプロジェクトの推進”. 総務省. 2017-2-27. [http://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/joho\\_tsusin/policyreports/joho\\_tsusin/gijutsusenryaku/02tsushin03\\_04000245.html](http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/gijutsusenryaku/02tsushin03_04000245.html), (accessed 2019-1-11).
- 2) 高橋俊輔. ワイヤレス給電の技術概要. 特技懇. 2017, Vol.279, p.3-14
- 3) 高田潤一. “電波伝搬の基礎理論”. 2005 Microwave Workshops & Exhibition (MWE 2005). 2007-2. <https://www.apmc-mwe.org/mwe2005/src/TL/TL05-01.pdf>, (accessed 2019-1-11).
- 4) 電子情報通信学会. アンテナ工学ハンドブック. オーム社, 2019, 1098p.
- 5) R. O. Schmidt. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation. IEEE Transactions on antennas and propagation. 1986, Vol.34, No.3, p.276-280.
- 6) D. G. Brennan. Linear Diversity Combining Techniques. Proceedings of the IRE. 1959, Vol.47, No.6, p.1075-1102.
- 7) 村田健太郎. “マルチセンサデバイス高速給電のための素子電力制約および整流器非線形性対応時空間ビームフォーミングアルゴリズム”. 2018年電子情報通信学会ソサエティ大会講演論文集. 2018, Vol.B-21-21, p.466.

## 執筆者紹介



**村井 彬人 MURAI Akito**  
技術・知財本部 研究開発センタ  
専門：電気・電子工学



**杉本 義喜 SUGIMOTO Yoshiki**  
技術・知財本部 研究開発センタ  
専門：電気・電子工学  
所属学会：IEEE、IET、電子情報通信学会



**グエン マイン タイ NGUYEN Manh Tai**  
技術・知財本部 研究開発センタ  
専門：電気・電子工学  
所属学会：電子情報通信学会

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。  
「Wi-Fi」は Wi-Fi Alliance の登録商標です。  
「Bluetooth®」は Bluetooth SIG, Inc. USA の商標または登録商標です。





# 1

## オムロンの成長領域で イノベーションを生み出す技術

—ファクトリーオートメーション—



# 盤異常の早期発見を可能にする到達温度予測技術の開発

池内 涼, 山田 隆章

近年、設備の老朽化に伴う盤内部品の異常な温度上昇による停電や発火事故などが増えてきている。それにより、例えば工場においては製造ラインが停止し、機会損失の発生や、社会的イメージの低下につながる恐れもある。保全員による定期的な設備保全を実施することで異常の発生頻度を抑えているが、温度異常は数日で進行するものも存在するため、完全には抑制できていない。そこで熱電対や赤外線センサ等の温度測定機器を常時設置して、遠隔で温度を監視するニーズが増えている。

一方で、数時間で発火や発煙までに至る異常の場合、温度監視装置で異常温度を検出してからユーザーが現場で対処するまでの時間的余裕がなく、対処が間に合わないケースも存在しており、さらなる早期異常検出が課題である。

著者らは温度の早期異常検出を目指し、異常機器の温度の変化傾向から最終的に到達する温度を予測する「到達温度予測」機能を開発した。より早期な異常検出を実現することで、発火事故や停電に至るまでにユーザーが適切な処置を実行できる時間的余裕を創出した。

本稿では、「到達温度予測」の概要と、それを実現するための技術的手法について述べる。

## Development of “Reaching Temperature Prediction Technology” that Enable Early Detection of Panel Abnormalities

*IKEUCHI Ryo and YAMADA Takaaki*

In recent years, power outages and ignition accidents caused by abnormal temperature rises in panel components due to aging of facilities have been increasing. Consequently, for example in factory, production line is shut down, which may lead to losing opportunities and decreasing in public image. Although periodic maintenance by maintenance personnel suppress occurrence frequency of abnormalities, there will be temperature abnormalities which progress in a few days, so it cannot be completely suppressed. Therefore, needs for remotely monitoring the temperature by constant setting temperature measuring devices such as thermocouples or infrared sensor is increasing.

On the other hand, in cases of abnormality that lead to ignition or smoke in a few hours, maintenance personnel may have no time to handle with the abnormalities on site after abnormal temperature with temperature monitoring device is detected. Also, countermeasure may not be done within the time. Therefore, further early abnormalities detection is needed.

The authors have worked on further early detection of temperature, and have developed “predictive reaching temperature” function that predicts final reaching temperature by considering temperature change trend in abnormal device. By realizing further early abnormalities detection, we have achieved creating sufficient time that users can take appropriate measures before the occurrence of ignition accident or power outage.

In this paper, we will give an overview of “predictive reaching temperature” and technical method to achieve it.

Contact : *IKEUCHI Ryo* ryo.ikeuchi@omron.com

## 1. まえがき

近年、工場の設備の老朽化<sup>1)</sup>により保全業務は増加傾向にある。また、人口減少などの影響もあり、企業は保全員の追加確保が困難である。それにより、一人当たりの保全作業量は増加していることが想定され、保全不足による設備の停電や発火事故などが増えてきている<sup>2)</sup>。製造ラインが停止し復旧までに多くの時間を費やすことで機会損失の発生が企業経営に大きな影響を与え、発火事故にまで至る場合は社会的イメージの低下につながる恐れもある。このような事態を回避するために保全員による定期的な設備保全を実施することで異常の発生頻度を抑えているが、温度異常は数日で進行するものも存在するため、定期点検の合間に発生した異常は抑制できていない。そこで熱電対や赤外線センサ等の温度測定機器を常時設置して、遠隔で温度を監視するニーズが増えている。

一方で、数時間で設備の突発停止や発火などの重大事故につながる温度異常もある。温度監視装置で異常温度を検出してからユーザーが現場で対処するまでの時間的余裕がなく、対処が間に合わないケースも存在しており、さらなる早期異常検出が課題である。

以上のような保全課題の解決のため「到達温度予測技術」として、数時間で進行する異常の早期検出技術を確立した。本稿では「到達温度予測技術」について記載する。

なお、上記課題解決のため盤内監視機器 K6PM-TH を開発し、到達温度予測技術を本体機能として実装した (図 1)。



図 1 K6PM-TH (本体 K6PM-THM とセンサ K6PM-THS)

## 2. 課題

### 2.1 異常モードの種類

保全業務の効率化に課題感を持つ工場の保全員 20 名にヒアリングした結果、盤内部品で特に異常発生が多い部品は、50A を超える大電流用の中継端子の配線やトランス、インバータであることがわかっている。これらの製品の異常モードを分析する。

上記部品は複数の異常モードを持つ。大きな分類として「進行型異常モード」と「突発型異常モード」である。「進

行型異常モード」は絶縁劣化に代表されるように、環境要因であるガス雰囲気、湿度などによる化学変化 (腐食、マイグレーションなど) や機械的ストレスによる機械的变化 (クラック、接触不良など) が進行するもので、数日～数十年の間で徐々に温度上昇し故障に至る異常モードである。

一方で「突発型異常モード」は保全員の作業ミスに起因した端子のねじ緩みによる発熱や空冷ファン故障による盤内温度上昇が発生した場合に、数時間で故障に至る異常モードである。

### 2.2 従来の検知方式

盤内で発生する発火事故や熱起因の故障の保全検知方式としては、保全員が現場でサーモビューワをかざして温度を計測する人型方式、熱電対などの温度測定装置を常設して計測する常設方式がある。

### 2.3 各異常モードへの対応

進行型の異常モードは数日～数十年で徐々に温度が変化する異常モードであるため、常設型の検知方式で温度傾向を監視することにより解決することができる。

突発型の異常モードは異常の発現から数時間で設備停止や発火に至る。そのため最終的な温度に到達する前に到達する温度を予測し早期に異常検出することにより保全員が盤内機器の改善修理、安全な停止を実行するための時間的余裕を確保することができる。

表 1 に各モードに対する検知方法をまとめている。本研究では常設型でも検出できない「突発型」の異常モードを早期に検出できる技術の確立を目指す。またそれによって他の異常モードに対して誤動作しないことも確認する。

表 1 異常モードと検知方法

異常モード	具体例	進行単位	人型	常設型
進行型	腐食、マイグレーション、クラック、接触不良 (環境により進行速度は様々)	年、月	対応可能	対応可能
		日	対応不可	対応可能
突発型	端子ねじの緩み (保全員の作業ミス) 空冷ファンの停止	時間	対応不可	対応不可

今回の課題解決の評価指標を、異常の発現から本技術で異常を検出できるまでの「通知時間」、およびその通知内容の信頼性を確保するための「通知精度」とし、これらの指標を「通知性能」と総称する。各指標の詳細について次項で示す。

## 2.5 通知時間

大電流用配線やトランス、インバータの異常は発現から機器表面の温度が上昇し故障リスクのある温度に到達するまで最短でも 60 分要することが温度上昇試験から分かった。これはインバータなどの対象機器に電源や負荷を投入してから温度が飽和するまでの時間を測定することで検証した。

保全員は異常を検知してから現場に向かい、設備の停止、修繕の実施などの判断をするまでの時間は現場までの距離によって変化するが、先のヒアリング結果から、9 割以上の工場で異常発生現場に到着するまでに 15 分、現場に到着し異常の原因の調査と分析、対策に約 15 分要することがわかった。よって異常の発現から対策が完了するまでの時間が 30 分である。故障リスクのある温度になるまでに 60 分であるため、30 分以内の時間でユーザーに知らせる機能の実現が望まれる。

異常現象の発生から最終的に到達する温度を  $T_{end}$  [°C]、実際の温度  $T$  が  $T_{end} \times 0.95$  ( $T_{end} - 5\%$  と表記する) になるまでの到達時間を  $t_{inf}$  [min]、予測による到達温度 (以下、予測温度という) を  $T_{pred}$  [°C]、予測を完了する時間 (通知時間) を  $t_p$  [min] とし、 $t_p \leq 30$  分を目指す。図 2 に  $T_{end} = 100^\circ\text{C}$  の時の各パラメータの概要を図示する。

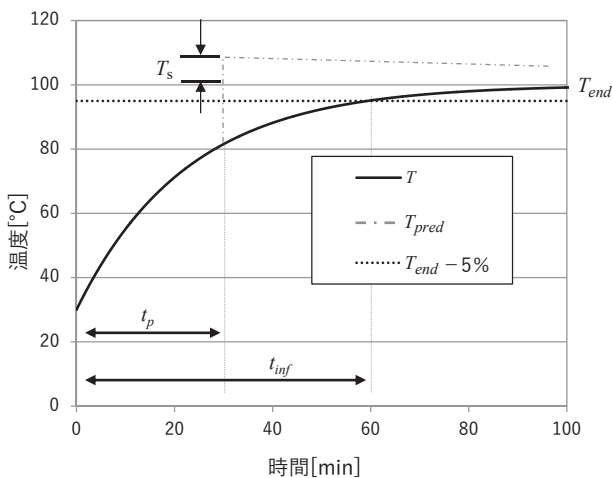


図 2 目標の定義

## 2.6 通知精度

図 2 の通り、最終的に到達する実際の温度  $T_{end}$  と予測温度  $T_{pred}$  の誤差を通知精度  $T_s (= T_{pred} - T_{end})$  とする。到達温度予測は装置の停止により発生する機会損失や発火発煙を防止する機能であるため、正常を異常と判定する誤検知よりも、異常を正常と判定することに起因する検知漏れを重要視する。温度センサで計測した場合、通知精度はセンサが持つ固有の精度定格にも依存する。そこで温度センサの精度定格を考慮したうえで検知漏れを最大限に防ぐため

マイナス側の誤差目標は  $-5^\circ\text{C}$  とする。

プラス側の誤差があると過剰通知により保全員に無駄な工数をかけてしまう。盤内に存在する樹脂材の中で最も発煙しやすい材料は配線材料などに使用されるポリ塩化ビニル (PVC) でその熱分解温度はおおよそ  $180^\circ\text{C}$  程度であると言われている。安全を期して  $100^\circ\text{C}$  以上が発火発煙リスクを伴う温度と定義する。盤内機器の使用温度範囲は  $50^\circ\text{C}$  で設計されることがほとんどで、使用環境は  $50^\circ\text{C}$  が上限と考えられる。また  $50^\circ\text{C}$  環境で盤内製品を仕様最大負荷で使用した場合、製品表面の温度は最大でも  $80^\circ\text{C}$  であることが実験結果から分かった。そのため通常の盤内製品の表面温度は  $80^\circ\text{C}$  以下が動作可能な範囲といえる。それぞれの温度範囲を Step に分けた時、Step1 が動作可能範囲で  $\sim 80^\circ\text{C}$ 。Step2 が  $80^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$  で注意喚起範囲、Step3 が  $100^\circ\text{C} \sim$  で緊急対応範囲とする。なお注意喚起範囲は監視対象が通常よりも発熱しており、監視対象の温度を下げる対策を実施したほうが良い温度範囲で、緊急対応範囲は監視対象が故障リスクに入っており、すぐにでも対策を要する温度範囲を意味する。Step2 の幅を超える誤差がなければ実際には Step1 で Step3 の誤検出が発生することはない。仮に予測温度が Step3 で実際の到達温度が Step2 であったとしても、注意喚起範囲であることが通知されるため、そこで改善対応等につなげることもできるため完全に無駄な工数になることもない。よってプラス側の通知精度目標は Step2 の幅である  $+20^\circ\text{C}$  以下に誤差範囲を設定する。よって  $-5^\circ\text{C} \leq T_s \leq 20^\circ\text{C}$  を満たすことを目指す。

## 2.7 突発型異常モードに対応するための課題

目標として掲げた「通知性能」を達成するために解決すべき課題として以下の 3 点を設定した。

- (a) 突発型異常モードによる温度変化を熱モデル化する計測した温度データから製品固有のパラメータを算出し、到達温度を予測できる熱モデルを構築する。
- (b) 熱モデルを利用して到達温度を予測する  
先に設定した目標である「通知時間」を満足する予測アルゴリズムを構築する。
- (c) 予測の精度を高める  
先に設定した目標である「通知精度」を満足する予測アルゴリズムを構築する。

## 3. 到達温度予測機能の開発

### 3.1 熱モデル化

熱モデル化を実行するにあたって、制御理論を用いて温度を予測できるモデルを構築する。制御理論による温度予測は体温計が瞬間的に人体の温度を予測する技術が知られ

ている<sup>3)</sup>。体温計の場合、熱源 (=人体) が一定の温度を保っており、人体-計測器の間にある構造物の熱容量や熱抵抗 (すなわち伝達関数) が一定であるモデルを採用することができる。しかしながら、盤内温度監視の場合は、監視対象の温度は逐次上昇しており、監視対象が持つ伝達関数が未知であるため、計測温度から未知のパラメータを算出して温度予測する必要がある。

突発型異常モードは正常状態から異常状態に瞬間的に変化して温度変化する。この状態の変化をステップ状の状態変化といい、このときの温度変化は1次遅れ系であることは一般的に知られている<sup>4)</sup>。これについては制御盤内に一般的に使用される DC 電源を一定の負荷状態で駆動したときの温度変化を計測したところ、図3のように1次遅れ波形になっていることから明らかである。

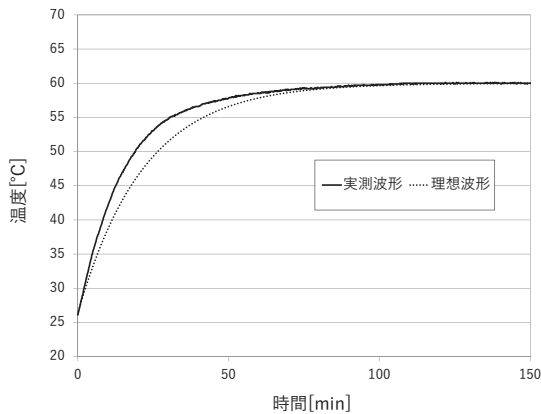


図3 1次遅れ波形

1次遅れ要素の伝達関数は式(1)のように示せる。ただし、 $s$ はラプラス演算子、 $K$ はゲイン定数、 $T$ は時定数を表す。

$$G(s) = \frac{k}{1+sT} \quad (1)$$

ステップ状信号が入力された場合、時間応答は図4のように表される。一般的にインデンシャル応答、またはステップ応答と呼ばれる。今回の場合、入力は異常の発現を意味する。

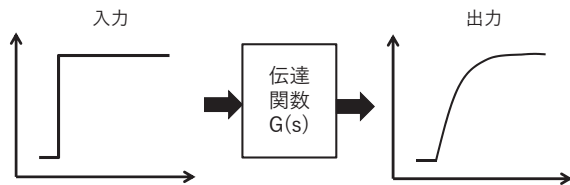


図4 1次遅れの時間応答

時間応答は次式(2)により求められる。

$$A(t) = K(1 - e^{-t/T}) \quad (2)$$

式(2)のステップ応答  $A(t)$  の変化率は、式(2)の時間微分で求められる。次に時間微分の式(3)を示す。

$$A'(t) = \frac{K}{T} e^{-t/T} \quad (3)$$

この変化率  $A'(t)$  は、時間  $t$  から  $\Delta t$  だけ経過すると、次式(4)のような比率となる。

$$\frac{A'(t+\Delta t)}{A'(t)} = \frac{\frac{K}{T} e^{-(t+\Delta t)/T}}{\frac{K}{T} e^{-t/T}} = e^{-\frac{\Delta t}{T}} \quad (4)$$

したがって、どの時刻  $t$  でも、経過時間  $\Delta t$  が一定であれば減衰率は一定であることが言える。これは変化率が  $T$  経過したとき  $e^{-1}$  倍になることを意味する。一般化するため  $e^{-1} = a^{\frac{1}{n}}$  と置き換えた時、式(4)は式(5)で表される。これを図で表したものが図5である。

$$\frac{A'(t+\Delta t)}{A'(t)} = a^{\frac{\Delta t}{th}} \quad (5)$$

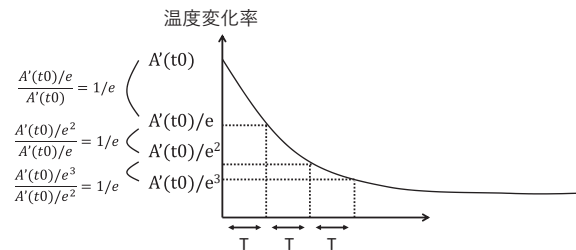
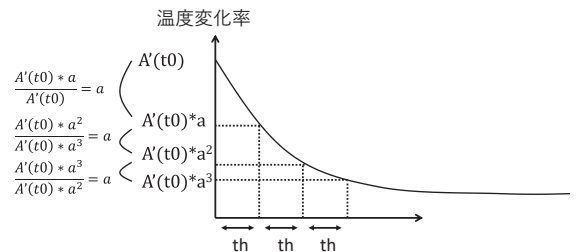


図5 温度変化率の時系列変化

式(5)により、時刻  $t_0$  から時間  $\Delta t$  経過後の温度変化率は式(6)で表される。これにより温度変化率が比率  $a$  変化したときの時間  $th$  を求めることで任意の時間における変化率を予測することができる。

$$A'(t_0 + \Delta t) = A'(t_0) * a^{\frac{\Delta t}{th}} \quad (6)$$

温度変化率を時刻  $t_0$  から  $\Delta t$  経過までの時間で積分することで時刻  $t_0$  からの温度変化量を求めることができる。まず、ある時刻  $t_0$  での  $A(t_0)$  と  $A'(t_0)$  および変化率の減衰期  $th$  を計測する。減衰期  $th$  は、変化率比が  $a$  になるのに要する時間である。 $A(t_0)$  および  $A'(t_0)$  を初期値として一定の減衰期  $th$  で変化する温度の収束値 (予測温度)  $T_{pred} = A(t \rightarrow \infty)$  は、次式(7)で計算することができる。なおここでは便宜上  $\Delta t$  を  $t$  として表す。

$$T_{inf} = A(t_0) + A'(t_0) \int_{t_0}^{\infty} a^{\frac{t}{th}} dt \quad (7)$$

これにより減衰期  $th$  を求めることで予測温度を算出する熱モデルを構築することができた。

### 3.2 予測アルゴリズム

検証のモデルケースとして正常温度 30°C、異常温度  $T_{end}=100^\circ\text{C}$ 、到達時間  $t_{inf}=60$  分とする。

$th$  を算出することで予測温度  $T_{pred}$  を算出できることが分かった。 $th$  はある時刻  $t$  における変化率が  $a$  倍されるまでに経過した時間から算出可能であることが図 5 や式 (5) から明らかである。

図 5 からわかるように異常の発現の直後に温度変化率は最大となる。そのため最大温度変化率から変化率がその  $a$  倍になるまでの時間を  $th$  とすることにより最速での予測が可能となる。このとき  $t_p = th$  となる。

$t_h = t_p \leq 30$  分となるようにモデルケースに適用させ計算した結果  $a=0.3$  であれば  $t_p \leq 30$  分以下となる。シミュレーションによる温度変化の結果を図 6 に示す。なお、 $T_{end} > 100^\circ\text{C}$  の場合でも 1 次遅れであることが変わらないため同様に成立する。

式 (7) に  $a=0.3$  とした結果を代入することで式 (8) を得ることができる。ただし、 $\log$  は自然対数である。

$$\begin{aligned} T_{inf} &= A(t_0) + A'(t_0) \int_{t_0}^{\infty} 0.3^{\frac{t}{th}} dt \\ &= A(t_0) - A'(t_0) \frac{th}{\log 0.3} \\ &\approx A(t_0) + A'(t_0) \times 0.83 \times th \end{aligned} \quad (8)$$

以上により、予測温度  $T_{pred}$  は、時刻  $t_0$  における温度  $A(t_0)$ 、温度変化率  $A'(t_0)$ 、変化率の減衰期  $th$  を用いて式 (8) により算出することができる。

上記内容の処理フローを図 7 に示す。

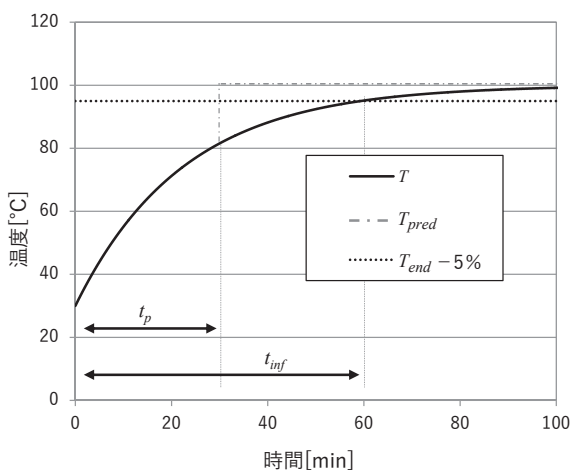


図 6 異常モデルケースのシミュレーション結果

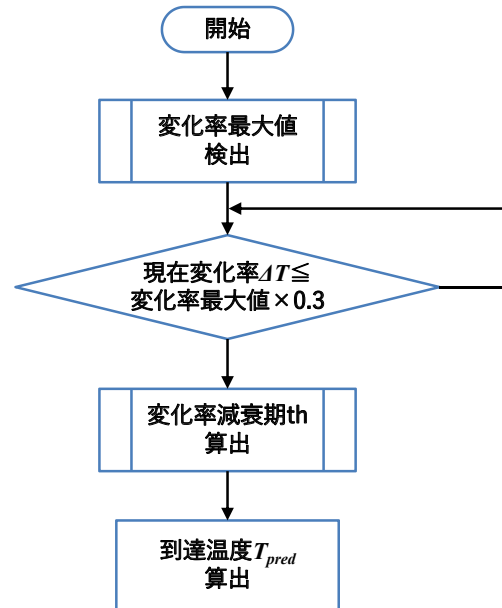


図 7 到達温度予測の処理フロー

### 3.3 温度センサを用いた到達温度予測

今回同時に開発した温度センサである K6PM-THS の性能を表 2 に示す。

表 2 K6PM-THS の性能

項目	性能
精度定格	±5°C
連続 2 回の計測値の最大バラつき	1°C/s

温度変化率  $A'(t_0)$  によって予測温度の精度が大きく影響することが式 (8) からわかる。K6PM-THS の連続する 2 回の最大変化率は 1°C/s 以下である。事前に検証した 1 次遅れ系の温度変化グラフから  $th=30$  分、 $A'(t_0)=1^\circ\text{C/s}$ 、最小サンプリング時間である 1 秒を適用したとき、予測温度  $T_{pred}$  は式 (8) から  $T_{pred} = A(t_0) + 1^\circ\text{C} \times 0.83 \times 30 \times 60 = A(t_0) + 1494^\circ\text{C}$  となる。つまり温度測定値の 1°C/s のゆらぎにより予測温度が 1494°C 変化することを示す。この温度測定値のゆらぎの影響を低減するため、計測温度に対してデジタルフィルタによるノイズ処理を実行する。

デジタルフィルタは以下の計算式 (9) で表される。

$$Y = X_{(n-1)} \cdot \alpha + X_{(n)} \cdot \beta \quad (9)$$

ただし

$$\alpha = 1 - \beta \quad (10)$$

$$\beta = \frac{t_s}{\tau} \quad (11)$$

ここで、 $\tau$  は時定数、 $t_s$  は基準サンプリング時間 (ここでは 1 秒) となる。注意点として、この時定数  $\tau$  が長くなるほどリアルタイムな温度から遅れた表示となってしまいます。

すなわち通知時間に遅れが発生する。これは変化率の減衰比率  $a$  を調整し、 $th=t_p$  を通知時間の遅れ分だけ小さくすることで対応できる。またデジタルフィルタは式(9)の通り1次遅れでノイズを減衰させるフィルタ処理であるため、製品の1次遅れ温度上昇と乗算され2次の遅れが発生する懸念がある。このとき図8からも明らかであるように2次遅れの最大変化率算出後の変化率は1次遅れの変化率より大きい。これはフィルタ時定数が大きいほど、フィルタ後の変化率も時間的に遅れるためである。そのため、予測温度が大きく出力され、通知精度に影響する。これについては時定数  $\tau$  を調整することで通知精度を満足させる。

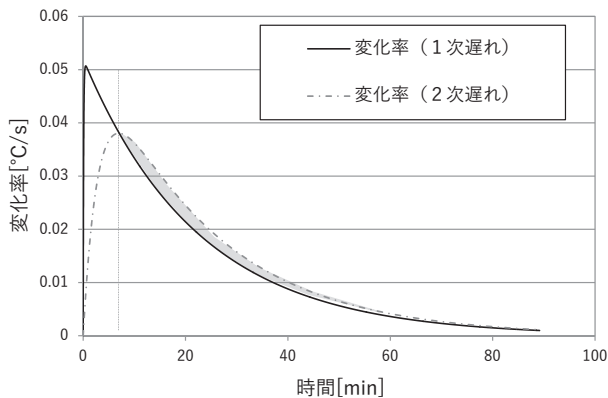


図8 1次遅れと2次遅れの変化率

最悪条件において通知時間を満足する  $a$  と  $\tau$  を決定する。予測式(8)の右辺右項が最大となる直前に連続する2回の計測結果が  $1^{\circ}\text{C/s}$  の速さで上昇したときが最悪条件であるため、モデルケースに最悪条件を組み合わせるシミュレーションを実行した。 $a=0.5$ 、 $\tau=3$  分で通知性能について満足することが分かった。表3にその時の通知性能結果を示す。なお図8で説明した通り、2次遅れを要因にして予測温度をマイナス側に算出することがないのは明らかであり、誤差はセンサが持つ精度定格に依存する。通知精度は目標とする  $-5^{\circ}\text{C} \leq T_s \leq 20^{\circ}\text{C}$  を満たすため問題ない。

表3 最悪条件下での通知性能結果

通知時間 $t_p$ [min]	通知精度 $T_s$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
25.1	+14.1

## 4. 実験結果

### 4.1 検証結果

今回開発した赤外線センサ K6PM-THS を用いて、実際のフィールドで監視対象に各種異常モードを実現し性能評価を実施した。監視対象と異常モードについては表4のとおりである。

実際の発火発煙や故障相当の異常を模擬することは困難

なうえに危険を伴うと判断し、温度上昇幅についてはモデルケースに対して大きくない到達温度  $40 \sim 60^{\circ}\text{C}$  程度の異常モードで検証した。また、実験対象とした電源や SSR (Solid State Relay) は今回対象と置いているインバータなどに比べて質量が小さく、温度が飽和する時間が短い。1次遅れは線形モデルの性質を持ち、時間方向、温度方向について時定数やゲイン定数を定数倍した場合に相似形であることがわかっている<sup>2)</sup>。つまり  $t_{inf}$  が定数倍された場合、 $t_p$  も定数倍される特性を持つ。よって、目標数値である  $t_{inf}=60$  分のとき  $t_p \leq 30$  分と同じ比率を用いて、通知時間は  $t_p \leq t_{inf}/2$  を満足することを目標とした。通知精度は  $-5^{\circ}\text{C} \leq T_s \leq 20^{\circ}\text{C}$  を目標とした。

検証結果を表5に示す。いずれの条件においても目標とした通知性能を満足していることがわかる。

表4 試験条件

監視対象	異常モード	詳細
電源 (60W)	端子ねじ緩みによる接触不良	ねじを緩ませた状態で電源投入。
SSR (定格 20A)	ファン停止	定格電流の100%の条件で電源投入&ファンを駆動。温度が安定してからファンを停止。
コンタクタ (定格 25A)	過負荷	定格電流の100%の条件で電源投入

表5 性能評価結果

監視対象	異常モード	通知時間		通知精度 $T_s$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
		通知時間 $t_p$ [min]	到達時間 $t_{inf}$ [min]	
電源	端子ねじの緩みによる接触不良	12.0	25.0	+2.1
SSR	ファン停止	13.5	27.5	+1.1
コンタクタ	過負荷	19.0	45.2	+1.5

## 5. むすび

突発型の異常モード発生に対して、提案するユニークな到達温度予測技術により早期の温度異常の検出が可能となった。さらに、通知性能を満足することで、事故や火災が発生する前に保全員が盤を改修する時間的余裕の創出が可能となった。本技術により特に異常発生が多いとされる大電流用の配線やトランス、インバータの温度早期検出ができる。

「盤内監視機器 K6PM シリーズ」では盤内監視に必要な小型、広視野角の温度センサをラインナップし、本体には先に説明した到達温度予測機能以外に、外気温の影響を

キャンセルする機能や異常と判断するための温度しきい値を自動で設定する機能を有している。これによって、人のスキルに頼らない、省工数の温度監視を実現するとともに、事後保全の最小化と予防保全への転換が図られると考える。

今後は減衰期をより短時間にすることで盤内温度異常のさらなる早期検出を実行していく。そのため、温度センサの高精度化やノイズキャンセル技術を開発していく。

## 参考文献

- 1) JEITA 半導体部会半導体生産技術専門委員会. “ $\phi$  200 mm 以下装置の長期利用における半導体製造ライン操業リスクの概観”. 2012, 5 p.
- 2) 東京海上日動火災保険株式会社. “リスクマネジメント最前線”. 2012, 3 p.
- 3) オムロン株式会社. 電子体温計, 特開昭 60-209125, 1985.
- 4) 近藤文治. 基礎制御工学. 森北出版, 1977, p. 35-36, 228 p.

## 執筆者紹介



### 池内 涼 IKEUCHI Ryo

インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー  
商品事業本部 コンポ事業部 第一開発部  
専門：電気電子工学



### 山田 隆章 YAMADA Takaaki

インダストリアルオートメーションビジネス  
カンパニー  
商品事業本部 コンポ事業部 第一開発部  
専門：制御工学

---

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。



# スイッチング電源小型化に寄与する ノイズキャンセル技術

大西 浩之, 長岡 真吾, 財津 俊行

近年、製造業では熟練技能者の不足や人件費高騰の影響を抑えるため AI や IoT を活用した業務効率の改善やコストの削減を求められている。これらのニーズを満たすため制御盤内の機器は増加し、スペースの確保が課題となっている。特に電源は制御盤内において大きなスペースを占有するため小型化が重要である。一般に、電源の小型化はスイッチング周波数の高周波化によって実現されてきた。しかし高周波化によりスイッチング素子から発生するノイズ量が増えることで EMI フィルタのサイズは大きくなり電源全体の小型化を阻害していた。本論文ではキャンセリング方式に着目し、新たにノイズキャンセル用補助巻き線の巻き数比を調整することで、低ノイズ化と EMI フィルタの小型化を両立する手法を提案する。本手法は入力電圧 AC 100 V ~ 240 V、出力電力 480 W のスイッチング電源に適用され、実機評価の結果従来比で EMI フィルタを約 50%、電源全体では約 10% 小型化することができた。

## Noise Cancellation for Miniaturization of Switched Mode Power Supply

ONISHI Hiroyuki, NAGAOKA Shingo and ZAITSU Toshiyuki

In recent years, it has been necessary to improve operational efficiency and reduce costs by using AI and IoT in the manufacturing industry to reduce the impact of the shortage of skilled workers and increased labor costs. To meet these requirements, the amount of equipment in the control panel is increasing, and the space for new equipment is an important issue. The power supply occupies a large space in the control panel and must be reduced in size. In general, miniaturization of power supplies has been realized by higher the switching frequency. However, the higher switching frequency increases the noise emission level and requires an additional EMI filter. We propose a new noise cancellation design process that optimizes the tradeoff between current injection capacitance and auxiliary winding voltage by adjusting the turns ratio of the cancellation winding. By applying this design process to a 100 V to 240 V AC, 480 W output power supply, the volume of the EMI filter is reduced by approximately 50%, and the overall power supply volume is reduced by approximately 10%.

### 1. まえがき

#### 1.1 スwitchング電源小型化の意義

近年、製造業では人口減少に伴う労働者不足や人件費高騰の影響を抑えるため AI や IoT を活用した業務効率の改善やコストの削減を求められている。これらのニーズを満たすため、オムロンでは装置の診断機能、寿命予測などを実現する様々な機器を開発している。このような商品を製造現場で使用するには工場のラインにある制御盤内に機器を

設置する必要がある。しかし現状の制御盤内に新たな機器を設置するスペースは限られている。一方、制御盤自体の省スペース化も求められておりこれら相反する要求を満たすため、特に大きなスペースを占有しているスイッチング電源を小型化する必要がある。

#### 1.2 スwitchング電源の小型化の課題

図1に制御盤内に用いられる数百Wクラスのスイッチング電源の構成を示す。スイッチング電源は商用 AC に直接つながるため、入力の EMI フィルタ、PFC (力率改善) 回路、絶縁 DCDC 回路の 3 つの回路で構成されている<sup>1)</sup>。

Contact : ONISHI Hiroyuki hiroyuki.onishi@omron.com

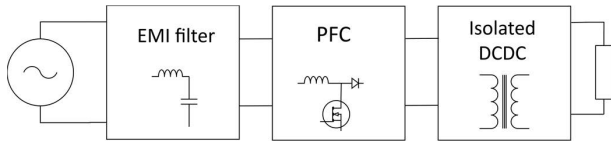


図1 スイッチング電源の構成

これらは体積的にそれぞれ約 20%、35%、35%の構成となっているのが一般的である。それぞれ小型化の検討はなされているが、本論文では特に EMI フィルタの小型化について述べる。なお、ノイズ発生源の PFC 回路と EMI フィルタは密接に関係しているため本論文では PFC 回路のノイズ発生メカニズムから EMI フィルタのノイズ低減策まで解説する。

PFC 回路の小型化は高周波化によって受動部品（磁性部品、キャパシタ）を小型化し、低ロスのパワー半導体を使いこなすことで実現してきた。しかしながら高周波化の副作用としてノイズ成分が高周波化し EMI フィルタサイズが大きくなる問題が顕在化してきた<sup>2)</sup>。

1.3 提案するノイズキャンセル手法

一般的に、ノイズ低減にはフィルタリング手法、キャンセルリング手法があるが、本研究は高周波ノイズの低減を行うため、キャンセル方式に着目して検討を行った。キャンセル方式の先行研究として PFC 昇圧用インダクタにキャンセル用補助巻き線を付加する手法がある<sup>3)</sup>。この方法は主巻き線と補助巻き線を同じ巻き数比 (1:1) で使うためノイズキャンセル効果的には理想的ではあるが、高電圧が発生するため安全上の制約（沿面距離等）から基板のサイズが大きくなってしまいう課題がある。他の先行研究では PFC 昇圧用インダクタのキャンセル用補助巻き線の巻き数を N:1 とし対策を行う手法がある<sup>4)</sup> が、N とキャパシタ容量の最適化については述べられていない。

本提案では PFC 昇圧用インダクタのキャンセル用補助巻き線の巻き数比 N:1 を調整することでキャンセル巻き線電圧と、キャンセル電流注入用キャパシタ容量の最適化を行う。この最適化によりノイズ低減効果と EMI フィルタの小型化の両立を図る。

第 2 章では PFC におけるノイズ発生メカニズムを説明し、第 3 章で本提案の PFC の既存巻き線を活用したノイズキャンセル手法について説明する。第 4 章ではパラメータの最適化を、第 5 章ではシミュレーション及び実験による本提案手法の有効性について説明する。第 6 章で実際の EMI 測定結果を示す。第 7 章では本論文のまとめと商品における小型化の効果について示す。

2. PFC 回路におけるノイズ発生のメカニズム

スイッチング電源回路から発生する主要なノイズはコモンモードである。PFC のコモンモードノイズ原因は①ダイ

ファレンシャルモード電流のモード変換、②パワー半導体の電圧変動により発生する FG（フレームグラウンド）電位への電流が挙げられる<sup>5)6)</sup>。特にノイズ量として支配的である後者について説明する。

PFC 回路のブロック図を図 2 に、商用 AC（50 Hz または 60 Hz）の半周期におけるインダクタ電流の挙動を図 3 に示す。一般的に電流連続モード（CCM）制御の PFC 回路は定格負荷動作時には動作モードは CCM であるが、軽負荷時には電流不連続モード（DCM）となる。この DCM 期間中に発生するノイズが EMI フィルタの大型化を招いていた。以下にその理由を示す。

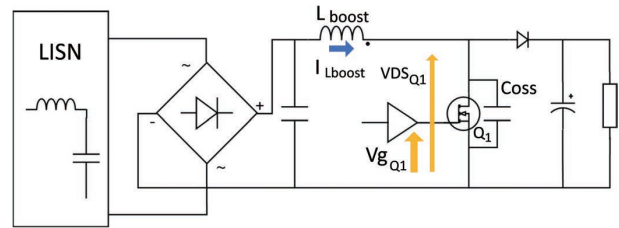


図 2 PFC 回路のブロック図

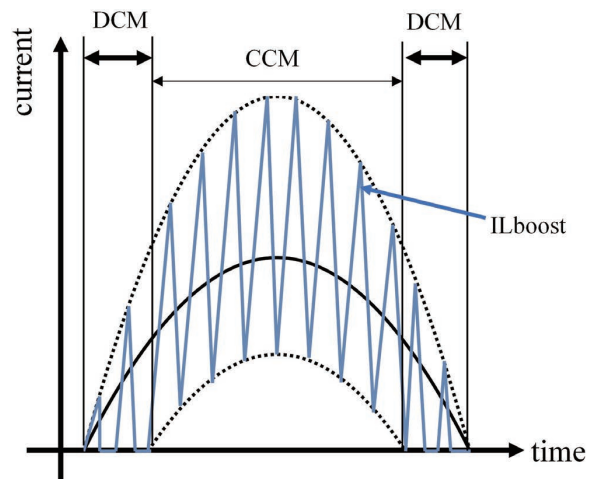


図 3 商用 AC 半周期におけるインダクタ電流

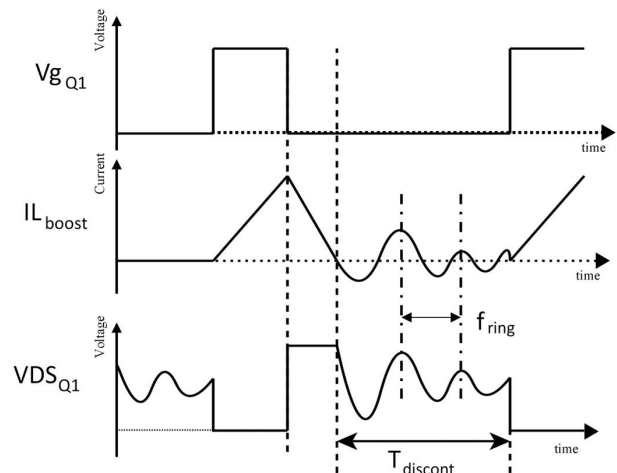


図 4 DCM 動作中のスイッチング波形

図4にDCM動作中のスイッチング波形を示す。DCM動作時の非導通期間  $T_{\text{discont}}$  において、パワー半導体 Q1 の出力容量  $C_{\text{oss}}$  と昇圧用インダクタンス  $L_{\text{boost}}$  との間で共振回路が形成され、パワー半導体のドレイン-ソース間で自由振動が発生し電圧リングングとして観測される。この時の電圧リングング周波数は式(1)で表される。

$$f_{\text{ring}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{boost}} \cdot C_{\text{oss}}}} \quad (1)$$

ここで、PFC のスイッチング周波数を高周波化すると  $L_{\text{boost}}$  インダクタンス値を小さくすることができるが  $C_{\text{oss}}$  は同等のため式(1)より電圧リングング周波数は上昇する。高周波側では EMI フィルタのノイズ抑制効果が低下するため、観測されるノイズが増加する。

この電圧リングングが、パワー半導体の寄生容量を介してノイズ電流として伝わり、コモンモードノイズになるメカニズムを説明する。

図5に示すように、パワー半導体は放熱のため FG 電位であるヒートシンクに接続されている。パワー半導体の冷却面であるドレイン端子の電位変動により、半導体-ヒートシンク間結合容量  $C_{\text{para}}$  を通して FG 電位への電流  $I_{C\_para}$  を発生させる。この電流はコモンモード電流  $I_{FG}$  として FG に流れる。図6(a)にキャンセル電流無しの場合の  $I_{C\_para}$ 、 $I_{FG}$  波形を示す。 $I_{FG}$  はスイッチング電源回路の外側へ流れ込

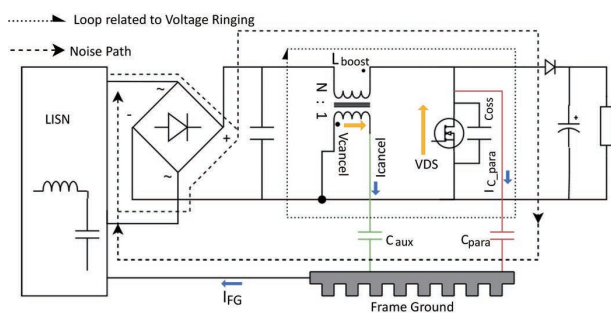


図5 巻き数比 N:1 のキャンセル巻き線を持つ PFC 回路

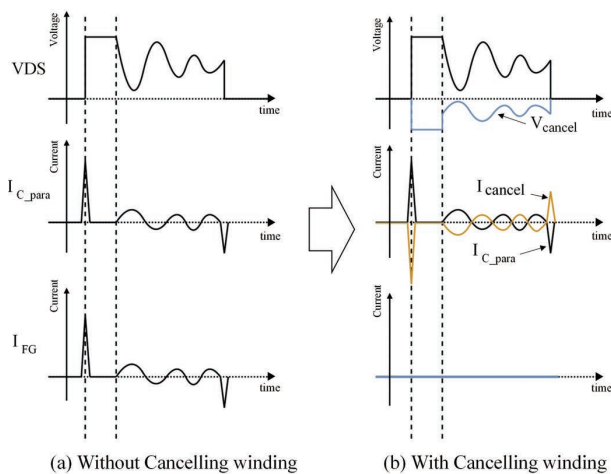


図6 各部の動作波形外観

むため、スイッチング電源以外の機器からはコモンモードノイズとして見える。式(1)で表される電圧リングングによりパワー半導体のドレイン端子の電位変動が大きくなるため、図6(a)に示すように、 $I_{C\_para}$  は増大し結果としてコモンモードノイズが増加する。

### 3. 提案するノイズキャンセル手法

ノイズキャンセル法を適用すると図6(b)に示すように、 $I_{C\_para}$  と逆相の電流  $I_{\text{cancel}}$  が FG 電位へ流れ込むため、 $I_{C\_para}$  と  $I_{\text{cancel}}$  が打ち消し合うことで  $I_{FG}$  は減少しコモンモードノイズを低減することができる。本研究では昇圧用インダクタにノイズキャンセル用の補助巻き線を活用する際に以下の2点を工夫した。①昇圧用インダクタ補助巻き線の巻き数比を N:1 にすることによる補助巻き線電圧の低減、②本巻き数比とキャンセル電流注入用キャパシタ容量の最適化を行う事で低ノイズ化を行う事で、十分なノイズ抑制効果を確保し EMI フィルタの小型化を実現する。

図5の昇圧インダクタに N:1 のキャンセル巻き線を追加することで、図6(b)に示すように、VDS とは逆相の電圧  $V_{\text{cancel}}$  が生成される。 $V_{\text{cancel}}$  のピーク値  $V_{\text{cancel\_peak}}$  は式(2)で表される。

$$V_{\text{cancel\_peak}} = \frac{V_{\text{DS}}}{N} = \frac{V_{\text{out}}}{N} \quad (2)$$

ここで、VDS ピーク値は PFC 出力電圧の  $V_{\text{out}}$  と同等となるため、 $V_{\text{cancel\_peak}}$  は  $V_{\text{out}}$  によって表現することができる。式(2)より  $V_{\text{cancel\_peak}}$  は N により調整可能であることがわかる。N を大きくし  $V_{\text{cancel\_peak}}$  を既存の補助電源用巻き線と同等の電圧に下げること、その他パターンとの沿面距離を緩和することができる。

一方ノイズ電流を完全にキャンセルするには図6(b)に示すように、 $I_{C\_para}$  に対して逆相で同じ大きさの電流  $I_{\text{cancel}}$  が必要である。ここで、キャパシタに流れる電流は印加する電圧の微分に比例するため  $I_{\text{cancel}}$  と  $I_{C\_para}$  は次式で表される。

$$I_{\text{cancel}} = C_{\text{aux}} \cdot \frac{dV_{\text{cancel}}}{dt} \quad (3)$$

$$I_{C\_para} = C_{\text{para}} \cdot \frac{dV_{C\_para}}{dt} \quad (4)$$

ここで  $C_{\text{aux}}$  はキャンセル電流注入用キャパシタ、 $V_{C\_para}$  は  $C_{\text{para}}$  に印加される電圧で、 $V_{C\_para}$  ピーク値は VDS ピーク値と同等となる。式(3)(4)および、 $V_{\text{cancel}} = V_{C\_para}/N$  より、 $I_{\text{cancel}} = I_{C\_para}$  を満たす  $C_{\text{aux}}$  は式(5)で表される。

$$C_{\text{aux}} = N \cdot C_{\text{para}} \quad (5)$$

以上より  $C_{\text{aux}}$  は N により調整可能であることがわかる。N を小さくする事で、キャンセル電流注入用キャパシタの容量を小さくする事ができ回路自体も小型化することができる。

### 4. パラメータの最適化

3章より  $V_{cancel\_peak}$  は  $N$  が大きい方が良い (小型)、 $C_{aux}$  は  $N$  が小さい方が良い (小型) 事がわかった。よって表 1 の条件の下で、 $N$  の最適化を図る。

表 1 解析のための前提条件

MOSFET-FG 間寄生容量	33 pF
昇圧用インダクタ	98 $\mu$ H
昇圧用インダクタ 1次側巻き数	36.5 Ts
$V_{out}$ 出力電圧	383 V
$C_{aux}$ 最大容量	1000 pF
$V_{cancel\_peak}$ 最大電圧	40 V
$C_{aux}$ 種類	村田製作所 DE1 KX シリーズ

表 1 において  $C_{aux}$  最大容量については部品サイズを考慮し、外形寸法が 8 mm のラインナップにおける最大容量である 1000 pF とした。また  $V_{cancel\_peak}$  最大電圧については安全規格を考慮し最大値 40 V と設定した。表 1 を基にした式(2)、および式(5)のプロットを図 7 に示す。

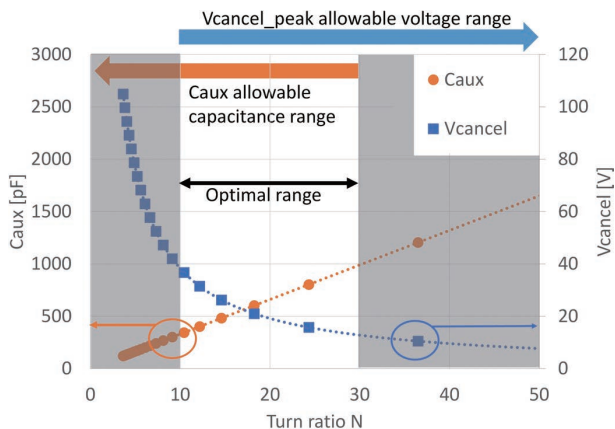


図 7 補助巻き線巻き数を変更したときの  $V_{cancel\_peak}$  と  $C_{aux}$  キャパシタ容量の値

$V_{cancel\_peak}$  最大電圧を考慮すると巻き数比  $N$  は 10 以上とする必要がある。また  $C_{aux}$  最大容量を考慮すると巻き数比は 30 未満とする必要がある。以上より巻き数比  $N$  の選択可能な範囲は 10 以上、30 未満となる。今回は巻き数比  $N$  として選択可能範囲の中央付近である 18.25 (補助巻き線巻き数が 2 Ts) を選択した。このとき  $V_{cancel\_peak}$  電圧は約 21 V である。 $C_{aux}$  容量は式(5)より計算上では約 600 pF となるが、これはノイズ電流を完全にキャンセルする場合である。本論文では事前のノイズ測定結果よりノイズレベルを 6 dB $\mu$ V 程度低減すれば良いのでキャンセル効果としてノイズ電流を 1/2 にすることを目標とした。このため  $C_{aux}$

容量として 600 pF のおおよそ半分である 330 pF を選択した。図 8 は  $C_{aux}$  を 330 pF にした場合の動作波形を示す。

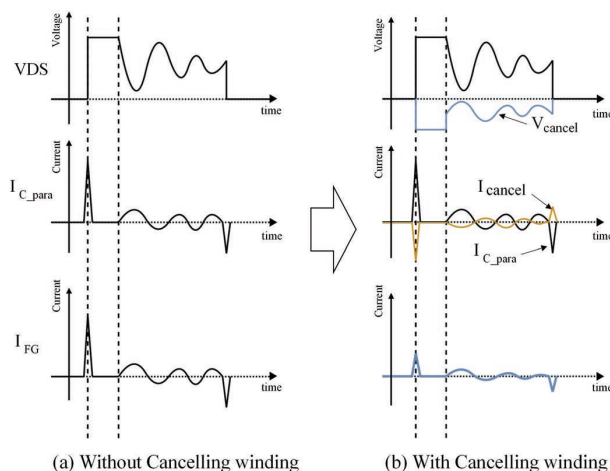


図 8  $C_{aux}$  を 330 pF にした場合の動作波形外観

### 5. シミュレーション及び実験結果

本提案のキャンセル方式の共振動作波形を確認するために、パラメータ最適化結果に基づきシミュレーションおよび実機で観測を行った。表 2 にシミュレーションパラメータおよび、実験に用いた電源スペックを示す。

表 2 シミュレーションパラメータおよび実験に用いた電源スペック

入力電圧	AC100-240 V 試験時 AC240 V
出力電圧	24 V
定格出力電力	480 W
PFC スイッチング周波数	140 kHz
MOSFET Co(er)	123 pF (VDS = 0-400 V, Vgs = 0 V)
昇圧用インダクタ (インダクタンス、巻き数比)	98 $\mu$ H 36.5 Ts:2 Ts
$C_{aux}$	330 pF

図 9 にシミュレーション波形を示す。DCM 動作時における電圧リングングによりノイズ電流  $I_{C\_para}$  が発生していること、キャンセル電流  $I_{cancel}$  は  $I_{C\_para}$  に対して逆相でおおよそ 1/2 の電流になっていることが確認できた。ノイズ電流  $I_{FG}$  については  $I_{C\_para}$  と比較して想定通り半分程度に抑えられている事が確認できた。また主巻線巻き数 36.5 Ts に対して補助巻き線巻き数を 2 Ts にする事で、 $V_{cancel\_peak}$  電圧を 40 V 以下に抑制できている。なおこの時のシミュレーションの電圧リングング周波数は 565 kHz であった。

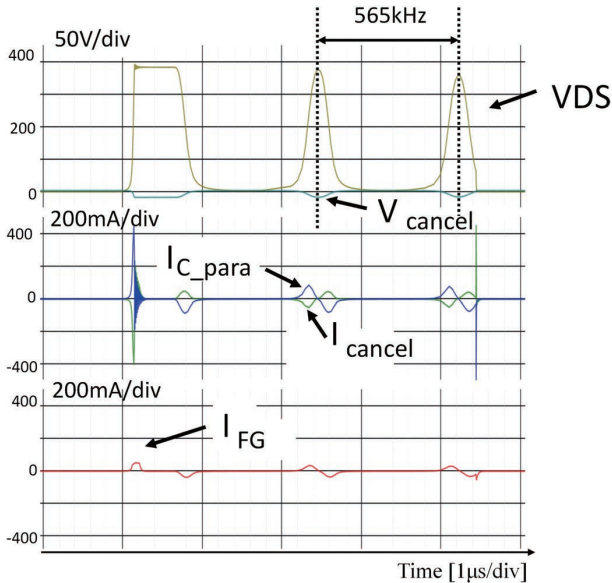


図9 シミュレーションによるノイズ電流とキャンセル電流

図10に実機における観測波形を示す。DCM動作による電圧リングングおよび補助巻き線による逆相電圧を確認できた。この時に観測された電圧リングング周波数は549kHzであった。パワー半導体の $C_{ross}$ は電圧依存性を持つためリングング周波数を計算で求めるのは困難である。よって、 $C_{oss}$ 電圧依存性を考慮した図9シミュレーション結果は妥当であると考えられる。

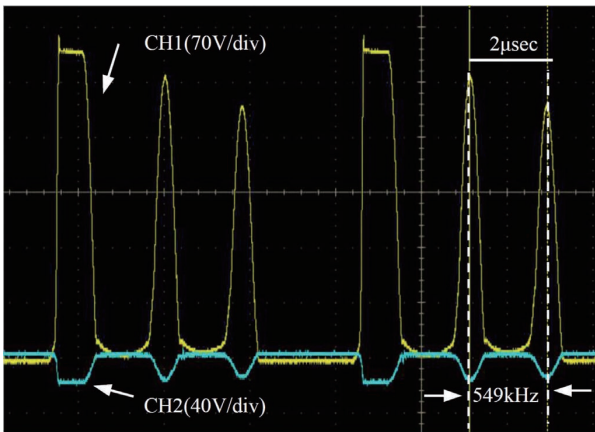


図10 実機でのスイッチング波形 (CH1: FET-VDS電圧、CH2: 補助巻き線電圧)

### 6. 伝導ノイズ測定結果

本提案のノイズキャンセル方式の有効性を確認するためにEMIフィルタを従来の2段構成から1段構成へと小型化し、実機により伝導ノイズの測定を行った。図11にノイズキャンセル無しの場合の伝導ノイズ測定結果を、図12に本提案のノイズキャンセル有りの場合を示す。図11、図12どちらもノイズの規格であるEN 55011 ClassBに準拠して測定を行った。図の縦軸にノイズレベル、横軸に周波数を示す。

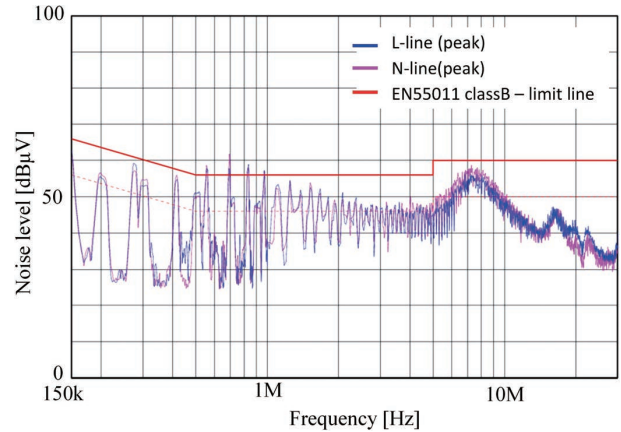


図11 実機でのEMI (ノイズキャンセル無し)

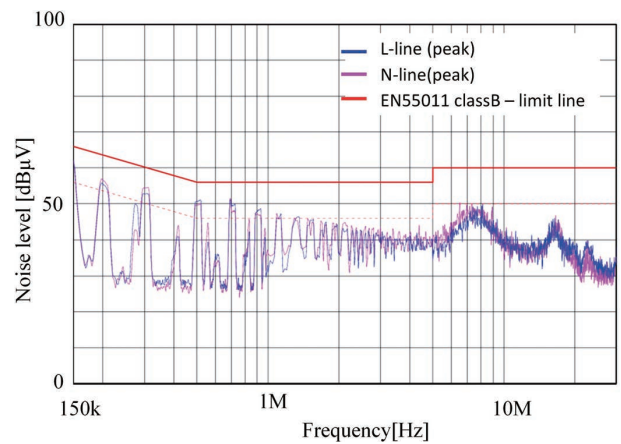


図12 実機でのEMI (ノイズキャンセルあり)

図11ではPFCスイッチング周波数である140kHzの高調波ノイズ(280kHz, 420kHz, ...)は全体的に高めに推移している。また140kHzの4次から7次の高調波である560kHz, 700kHz, 840kHz, 980kHz近傍に特徴的なノイズの増大が観測された。図10においてVDS電圧のリングング周波数が549kHzであるため、図11における560kHz近傍のノイズは電圧リングングの重畳が原因と考えられる。同様に700kHz, 840kHz, 950kHzのVDS電圧リングングが実機において確認できたため、スイッチング周波数の高調波にリングング周波数が重畳したのが原因であると考えられる。またノイズピークがEN 55011 ClassB限度値を超えている周波数帯域が存在するため、ノイズ試験に不合格となる事がわかった。

図12では本提案のキャンセル手法によってPFCスイッチング周波数の高調波およびVDS電圧リングング周波数のノイズピークが5~10dB低減されていることが確認できた。ノイズピークはすべての周波数において1段構成のEMIフィルタにおいてもEN 55011 ClassBを十分に満足する事がわかった。以上の結果より本提案のノイズキャンセル方式の有効性を確認できた。

## 7. むすび

本論文では高周波化によるスイッチング周波数起因の高調波コモンモードノイズ増大に伴う EMI フィルタ大型化の問題を解決するため、ノイズキャンセルを実現する新しい設計手法を提案した。PFC 昇圧用インダクタに追加したノイズキャンセル用補助巻き線の巻き数比 N:1 を調整することで、キャンセル巻き線電圧とキャンセル電流注入用キャパシタ容量の最適化し、低ノイズ化と EMI フィルタの小型化を両立した。本提案の有効性を確認するため、シミュレーションおよび実機検証を行った。その結果 EMI フィルタが 1 段構成であってもノイズキャンセル無しの条件と比較して、約 10 dB $\mu$ V の伝導ノイズ低減が認められ、十分なノイズキャンセル効果を確認した。本提案を適用した際の小型化効果について図 13 に、実際の形状の写真を図 14 に示す。本提案手法により電源全体の約 20% を占める EMI フィルタ体積を従来商品比約 50% に小型化することができた。電源全体としては従来比約 10% (=50% $\times$ 20%) 小型化することができた。

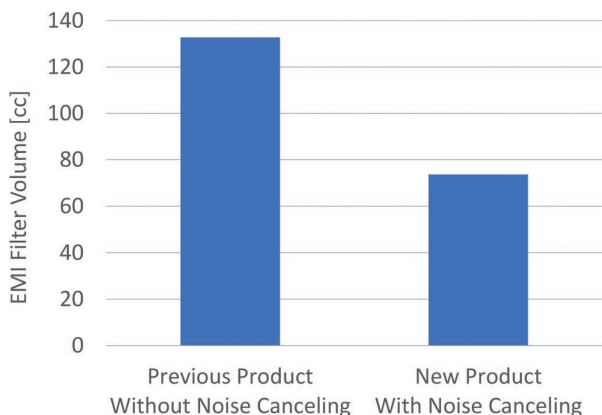


図 13 現行機種と従来機種間での EMI フィルタ体積比較

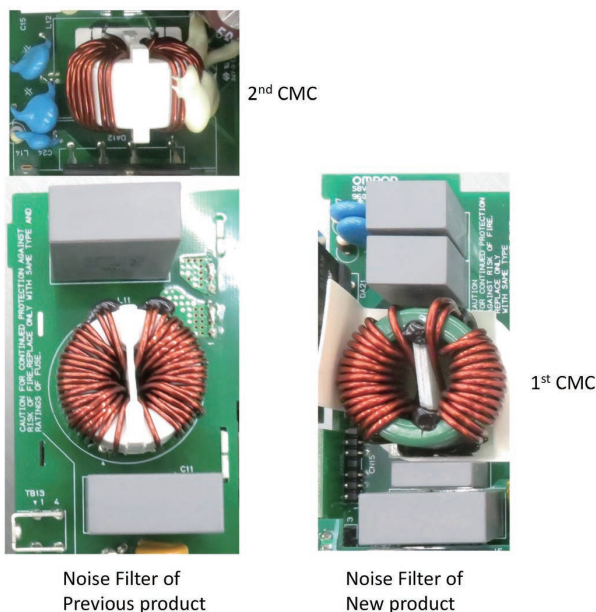
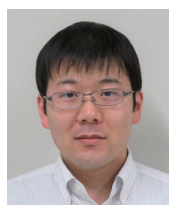


図 14 実機における EMI フィルタ周りの写真

## 参考文献

- 1) パワーエレクトロニクスハンドブック編集委員会 編, パワーエレクトロニクスハンドブック, オーム社, 2010, 717 p.
- 2) Lu, B.; Dong, W.; Wang, S.; Lee, F. C. High Frequency Investigation of Single-switch CCM Power Factor Correction Converter. Applied Power Electronics Conference and Exposition. 2004, Vol.3, p.1482-1487.
- 3) Cochrane, D.; Chen, D. Y.; Boroyevich, D. Passive Cancellation of Common-Mode Noise in Power Electronic Circuits. IEEE Transactions on Power Electronics. 2003, Vol.18, No.3, p.756-763.
- 4) Schmidt, M.; Stahl, J.; Albach, M. Influence of Parasitic Effects on Passive Cancellation of Common Mode Noise in a Boost Converter. Applied Power Electronics Conference and Exposition. 2004, p.471-477.
- 5) Wang, S.; Lee, F. C. Investigation of the Transformation Between Differential-Mode and Common-Mode Noises in an EMI Filter Due to Unbalance. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2010, Vol.52, No.3, p.578-587.
- 6) Intachot, T.; Klungwijit, W.; Prempraneerach, Y.; Nitta, S. A Study on Common-Mode Noise Generation in Switching Circuit due to Unbalanced Characteristic. Power Conversion Conference-Nagoya. 2007, p.429-434.

## 執筆者紹介



大西 浩之 ONISHI Hiroyuki  
 技術・知財本部 研究開発センタ  
 専門：電気工学



長岡 真吾 NAGAOKA Shingo  
 技術・知財本部 研究開発センタ  
 専門：電気工学



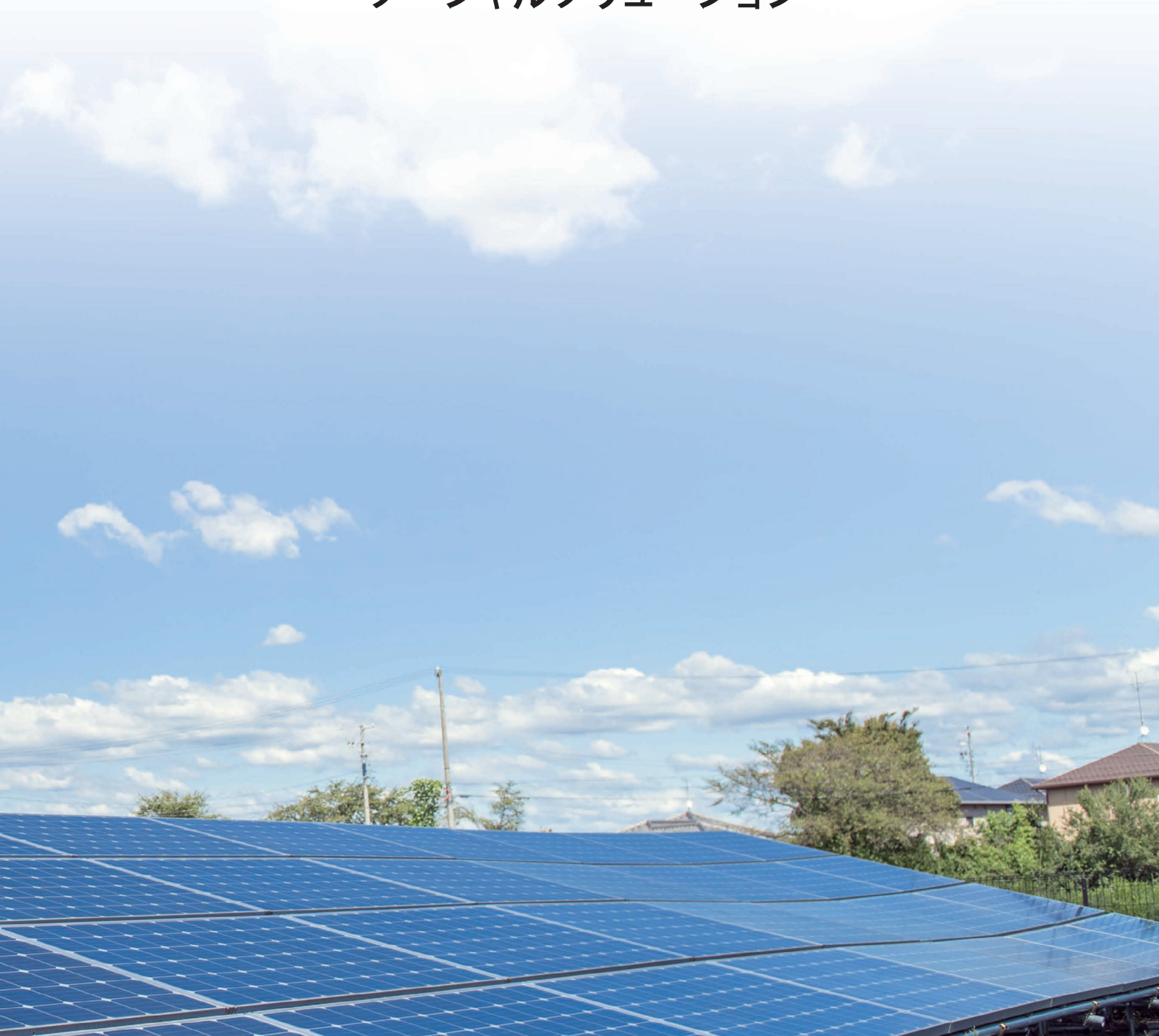
財津 俊行 ZAITSU Toshiyuki  
 技術・知財本部 研究開発センタ  
 専門：電気工学、制御工学  
 所属学会：電気学会、電子情報通信学会、  
 パワーエレクトロニクス学会  
 博士（工学）

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

# 1

## オムロンの成長領域で イノベーションを生み出す技術

—ソーシャルソリューション—



# 小型・軽量・高効率 太陽光発電用屋外設置型 単相パワーコンディショナの開発

小林 健二, 野村 康祐, 田内 宏憲

太陽光発電は、地球環境の負荷軽減やエネルギー自給率の向上などの観点から、注目を集めている。しかしながら、我が国における太陽光発電の発電コストは、加重平均での世界の発電コストと比較すると、2017年時点で約1.6倍と高く、更なる普及拡大には発電コストの低減が必要である。

今回、新たに太陽光発電用屋外設置型単相パワーコンディショナの KPV-A・KPW-A シリーズを開発し、商品化した。2相インターリーブ方式昇圧チョップの適用と高周波化、及び系統連系制御の最適化によって、KPV-A・KPW-A シリーズの小型・軽量化と高効率化を図った。これにより、20 kg の本体重量を実現し、1 人での設置作業を可能としたことに加え、500 W 程度の低出力時で 95.5%、定格出力時で 96.0% となる高い電力変換効率を達成した。KPV-A・KPW-A シリーズは、施工性の向上による初期導入費用の低減と高効率化による総発電量の最大化が図れ、太陽光発電の発電コストを低減することが可能である。

本稿では、KPV-A・KPW-A シリーズに適用した小型・軽量化技術と高効率化技術について報告する。

## Development of Small Size, Lightweight, High Efficiency Outdoor Single Phase Solar Inverter

KOBAYASHI Kenji, NOMURA Kosuke and TAUCHI Hironori

Photovoltaics is attracting attention because it reduces the global environmental load and improves the energy self-sufficiency rate. However, the power generation cost of photovoltaics in Japan is about 1.6 times higher than that of the world's weighted average in 2017, further promotion and spread of photovoltaics requires a reduction of the power generation cost.

We have newly developed and commercialized the KPV-A and KPW-A series of outdoor single phase solar inverter. The KPV-A and KPW-A series have achieved small size, lightweight and high efficiency by employing an advanced two-phase interleaved technology, a high frequency switching technology, and an optimization of the grid control. As a result, we have realized the solar inverter with a weight of 20 kg, enabling installation work by one person. And we have also realized high power conversion efficiency solar inverter with 95.5% at low output power around 500 W and 96.0% at rated output power. Therefore, it is possible to reduce the initial introduction cost by improving the workability and to maximize the total power generation by improving the conversion efficiency. They can be expected to contribute to promotion and spread of photovoltaics.

In this paper, we report small size, lightweight and high efficiency technology on the KPV-A and KPW-A series.

### 1. まえがき

2011年に発生した東日本大震災以降、国内発電量に占める原子力発電の比率は減少し、火力発電への依存度が増している。火力発電比率の上昇によって、二酸化炭素排出

量と燃料調達コストの増加、中東への依存度の高まりによる燃料調達安定性の悪化が懸念される。そこで、2015年に我が国のエネルギー政策として、長期エネルギー需給見通し（エネルギーミックス）が策定された<sup>1)</sup>。エネルギーミックスでは、2030年に総発電電力量における電源構成比率を、化石燃料全体（石油、石炭、LNG）で56%程度、

Contact : KOBAYASHI Kenji kenji.kobayashi@omron.com



原子力で22~20%程度とし、水力発電や風力発電、太陽光発電などの再生可能エネルギーを22~24%程度にする目標が示された。特に再生可能エネルギーは、二酸化炭素排出量の削減や火力発電における燃料調達コストの抑制、エネルギー自給率の向上が図れるため、期待を集めている。しかしながら、2016年時点で、再生可能エネルギーの導入量は15%程度に留まっていることから、更なる再生可能エネルギーの普及拡大が求められている。

2009年に施行された余剰電力買取制度と、2012年に施行された全量買取制度の影響によって、再生可能エネルギーの中で、普及率が急激に増加したのが太陽光発電である。しかし、加重平均での世界の発電コストと比較すると、我が国における太陽光発電の発電コストは、2017年時点で約1.6倍と高く、更なる普及拡大には発電コストの低減が必要である。発電コストは、燃料費を含む、設備導入から維持管理、撤去や廃棄までの間に掛かる費用を合計した総コストと、稼働期間中に得られた総発電量から決まる。太陽光発電の総コストは、燃料費が不要であるため、初期導入費用が大半を占める。初期導入費用について、太陽光発電の先進国であるドイツと比較すると、我が国の太陽光発電は工事費が高く、約3.7倍もの大きな乖離があるため、工事部材や工事工数の削減が必要である<sup>2)</sup>。また、稼働期間中の発電ロスを減らし、総発電量を増加させる必要もある。

当社は、太陽光発電の普及拡大を推し進めるために、太陽電池の発電電力を最大化し、太陽電池から得られた直流電力を系統電源で使用される交流電力に変換して、系統電源に逆流するための太陽光発電用パワーコンディショナを開発してきた。2016年には、太陽電池設計の自由度と耐環境性、施工性を向上させた屋外設置型单相パワーコンディショナのKPM2シリーズを開発し、商品化した。

今回、KPM2シリーズよりも更に、小型・軽量化と高効

率化を実現し、施工性の向上による工事費の低減と総発電量の最大化による発電コストの低減を可能とした屋外設置型单相パワーコンディショナのKPV-A・KPW-Aシリーズを開発し、商品化したので、以下に報告する。

## 2. パワーコンディショナ仕様と特徴

図1にKPV-A・KPW-Aシリーズの外観を示し、表1にKPM2シリーズとの主な仕様の比較を示す。



図1 KPV-A・KPW-Aシリーズの外観

KPV-AシリーズとKPW-Aシリーズは、筐体を共用しているため、同一外観となっている。また、KPV-Aシリーズは野立て太陽光発電システムなどの産業用途向けに、KPW-Aシリーズは戸建て住宅や小規模工場などの住宅用と産業用の建物設置用途向けに商品化した。

定格出力容量ラインアップは、KPV-Aシリーズで5.5 kW、KPW-Aシリーズで4.8 kWと5.5 kWである。KPV-A・KPW-Aシリーズの双方とも、海岸より500 m以内の塩害地域や直接波しぶきがあたらない海岸沿いの設置に対応した重塩害対応タイプを商品ラインアップに揃え、設置制約の解消を図っている。また、太陽光発電の大量導入による

表1 主な仕様比較

項目		KPV-A	KPW-A	KPM2 (従来)
容量		5.5 kW	5.5 kW/4.8 kW	5.5 kW/4.4 kW
直流入力	最大動作入力電流	4回線：40 A (10 A/回路) 3回線：33 A (11 A/回路)	4回線：44 A (11 A/回路)	4回線：38 A (9.5 A/回路)
	最大許容短絡電流	4回線：44 A (11 A/回路) 3回線：36 A (12 A/回路)	4回線：48 A (12 A/回路)	4回線：44 A (11 A/回路)
交流出力	定格出力 (連続)	5.5 kW (力率 0.95/1.0)	5.5 kW/4.8 kW (力率 0.95/1.0)	5.5 kW/4.4 kW (力率 1.0)
電力変換効率		96.0% (力率 0.95/1.0)	96.0% (力率 0.95/1.0)	94.5%/95.0% (力率 1.0)
外形寸法 (幅×高さ×奥行き)		450×484×232 mm	450×484×232 mm	720×400×220 mm
重量 (本体) 取付ベース板除く		20 kg	20 kg	31 kg
離隔距離 (左右)		3 cm	3 cm	15 cm

系統電源の安定化対策として、新たに規定化された出力制御への対応や、業界に先駆けて当社が独自開発し、系統連系規程にて規定化された単独運転を検出する新型能動的な方式（ステップ注入付周波数フィードバック方式）である AICOT<sup>®</sup>（Anti-Islanding COnTrol Technology）を搭載し、現行の最新規格に全て準拠した<sup>3)</sup>。

尚、KPV-A・KPW-A シリーズの主な特徴は、以下のとおりである。

- (1) 500 W 程度の低出力時で 95.5%、定格出力時で 96.0% となる高い電力変換効率を達成し、総発電量の最大化を実現
- (2) 12 A/回路の最大許容短絡電流仕様を実現し、高効率タイプで高電流仕様の太陽電池との接続が可能
- (3) KPV-A シリーズで過積載率 200% 以上、KPW-A シリーズで過積載率 250% 以上の過積載仕様を実現し、朝夕や曇天などの少ない日射量でも、より多くの発電量を得ることが可能
- (4) 20 kg の本体重量を実現し、1 人での設置作業を可能とすることで、施工性の向上を図り、周辺の設置物や複数台設置時のパワーコンディショナ間における左右の離隔距離と外形寸法の小型化による設置面積の小スペース化で、ケーブルなどの工事部材を削減でき、初期導入費用の低減が可能

### 3. パワーコンディショナ構成

図 2 に KPV-A・KPW-A シリーズの回路構成を示す。

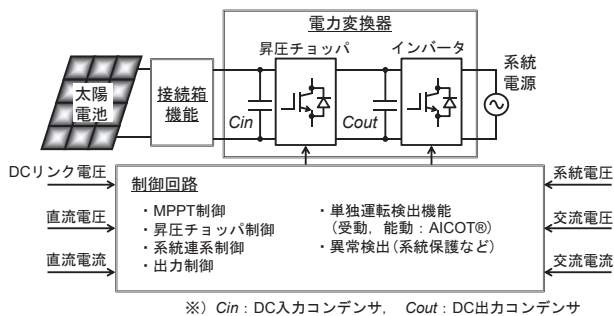


図 2 KPV-A・KPW-A シリーズの回路構成

KPV-A・KPW-A シリーズは、開閉器、逆流防止ダイオードなどから構成される接続箱機能部と、電力変換器である昇圧チョップパやインバータと、系統電源の保護機能や電力変換器の制御を行う制御回路部から構成される。昇圧チョップパは、最大電力点追従制御（MPPT: Maximum Power Point Tracking control）によって、太陽電池の発電電力を最大化するように動作し、インバータに太陽電池の発電電力を出力する。インバータは、昇圧チョップパから出力された直流電力を交流電力に変換し、系統連系制御によって、系統電源の電圧や周波数などの状態に合わせて、交流電力を系統電源に逆潮流する。制御回路部には、MPPT 制

御や昇圧チョップパ制御、系統連系制御、出力制御、単独運転検出機能の AICOT<sup>®</sup>、異常検出などの各種系統保護機能を搭載している。

### 4. 開発技術

今回、開発したパワーコンディショナの KPV-A・KPW-A シリーズは、従来機種の KPM2 シリーズに対して、体積比で 80%、重量比で 64% の小型・軽量化を実現している。また、KPV-A・KPW-A シリーズの電力変換効率は、従来機種の KPM2 シリーズに対して、550 W の低出力時で 3.2%、5500 W の定格出力時で 1.5% を向上しており、パワーコンディショナの高効率化を実現している。

パワーコンディショナが発生する電力損失の中で、大きな割合を占めるのが、電力変換器である。KPV-A・KPW-A シリーズは、電力変換器である昇圧チョップパの電力損失を低減することで、パワーコンディショナの高効率化を実現した。また、パワーコンディショナを構成する部品の中で、大きな体積・重量を占めるのがリアクトルであり、リアクトルと電力変換器を構成する半導体デバイスは、高温となる発熱部品である。このため、リアクトルと半導体デバイスの発熱を外気に放熱するための冷却構造物が必要になる。KPV-A・KPW-A シリーズは、リアクトルの小型・軽量化に加え、昇圧チョップパの半導体デバイスが発生する電力損失を削減し、発熱量を低減することで、冷却構造物の小型・軽量化を図り、パワーコンディショナ全体の外形寸法と本体重量の小型・軽量化を実現した。

KPV-A・KPW-A シリーズの小型・軽量化と高効率化を実現するために開発した具体的な技術要素は以下のとおりである。

- (1) 2 相インターリーブ方式昇圧チョップパ（以下、2 相昇圧チョップパ）の適用とスイッチング周波数の高周波化による DC リアクトルの小型・軽量化技術
- (2) 2 相昇圧チョップパの適用に加え、入力電流・入力電力領域に応じた 2 相昇圧チョップパの動作回路数とスイッチング周波数の切り替えによるパワーコンディショナの高効率化技術
- (3) 系統連系制御のロバスト化によるインバータ部を構成する AC リアクトルの小型・軽量化技術

以下に、昇圧チョップパ部とインバータ部それぞれに対する開発技術を説明する。

#### 4.1 昇圧チョップパ部における DC リアクトルの小型・軽量化技術

従来機種の KPM2 シリーズは、単相構成の昇圧チョップパ（以下、単相昇圧チョップパ）を適用している。

図 3 に単相昇圧チョップパの回路構成を示す。

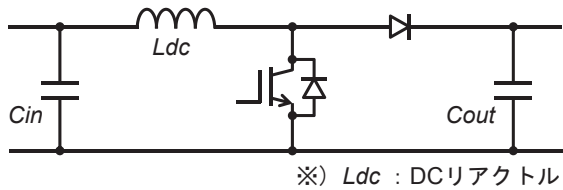


図3 単相昇圧チョップパの回路構成

単相昇圧チョップパは、半導体デバイスとDCリアクトルLdcで構成される。半導体デバイスのスイッチング動作によって発生する入出力電流リプルの大きさは、DCリアクトルのインダクタンス値と半導体デバイスのスイッチング周波数によって決定される。同一のスイッチング周波数で入出力電流リプルの大きさを比較した場合、インダクタンス値の大きい方が入出力電流リプルは小さくなり、逆にインダクタンス値の小さい方は入出力電流リプルが大きくなる。昇圧チョップパの入力には、照度変化によって発生する太陽電池の電圧変動を抑制するためのDC入力コンデンサCinが接続される。また、出力には、インバータが系統電源と連系するために必要なDCリンク電圧の平滑化用DC出力コンデンサCoutが接続される。この入出力コンデンサの内部温度上昇仕様や設計期待寿命を満足するために、入出力電流リプルを所望の大きさに制限する必要がある。従来機種のKPM2シリーズにおいては、DCリアクトルのインダクタンス値を大きく設定することで、所望の入出力電流リプルになるように設計していた。

また、DCリアクトルの電流仕様は、DCリアクトルの外形寸法と重量を大きく左右する仕様の一つである。単相昇圧チョップパの場合、DCリアクトルに流れる定常状態の平均電流は、太陽電池の発電電流と同一になる。当社のパワーコンディショナは、高効率タイプで高電流仕様の太陽電池にも対応が可能な入力電流仕様を設定しているため、従来機種のKPM2シリーズでは、最大44Aの平均電流がDCリアクトルに流れる。そのため、DCリアクトルの電流仕様は、太陽電池の最大電流に律速され、最大44Aの平均電流に耐え得る高電流仕様で設計していた。

以上のとおり、従来機種のKPM2シリーズにおいては、DCリアクトルの電流仕様を高電流仕様となる太陽電池の最大電流で設計していたことに加え、インダクタンス値の設計によって入出力電流リプルを制限していたために、DCリアクトルの大型化を招いていた。

今回、開発したKPV-A・KPW-Aシリーズは、2相昇圧チョップパを採用した。図4に2相昇圧チョップパの回路構成を示す。

2相昇圧チョップパは、従来機種の単相昇圧チョップパを2並列接続した構成であり、DCリアクトルの小型・軽量化に対して、主に2つのメリットがある。1つ目は、2回路ある昇圧チョップパのキャリア位相を回路間で180degずらすことによって、各回路で発生する入出力電流リプルを互

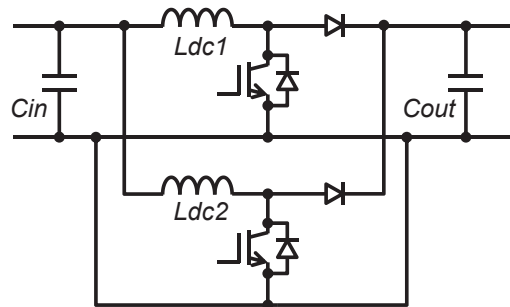


図4 2相昇圧チョップパの回路構成

いに打ち消し合い、入出力コンデンサに流れる電流リプルを低減できることである。そのため、単相昇圧チョップパよりも、DCリアクトルのインダクタンス値を小さく設定することができる。2つ目は、太陽電池の発電電流を2回路の昇圧チョップパで分流することが可能なため、DCリアクトルの電流仕様を低減できることである。ただし、前記2つのメリットを十分に享受するためには、太陽電池の発電電流を昇圧チョップパの2回路間で適正にバランスさせる必要がある。電流アンバランスが2回路間で生じると、入出力電流リプルを回路間で打ち消し合うことができずに入出力電流リプルが増大してしまうことに加え、DCリアクトルに流れる電流が、DCリアクトルの電流仕様を超過する恐れがある。そこで、2回路間の電流を適正にバランスさせるための電流バランス制御を昇圧チョップパ制御に付加した。

また、2相昇圧チョップパの適用に加え、DCリアクトルのインダクタンス値を更に低減するため、昇圧チョップパのスイッチング周波数を従来比の2倍に上げた。

以上のとおり、2相昇圧チョップパの適用と電流バランス制御の付加、及びスイッチング周波数の高周波化によって、KPV-A・KPW-AシリーズにおけるDCリアクトルの小型・軽量化を図った。

#### 4.2 高効率化技術

図5に2相昇圧チョップパの動作回路数とスイッチング周波数の切り替え領域を示す。

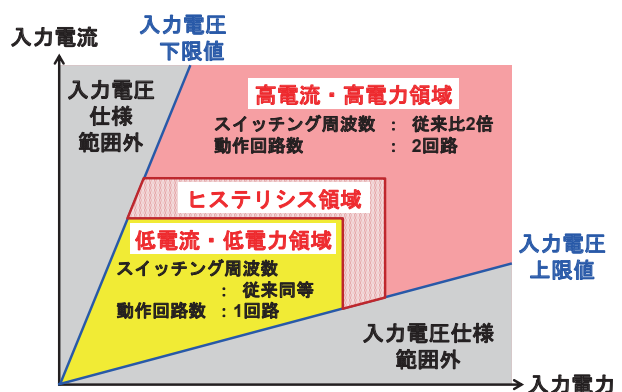


図5 動作回路数とスイッチング周波数の切り替え領域

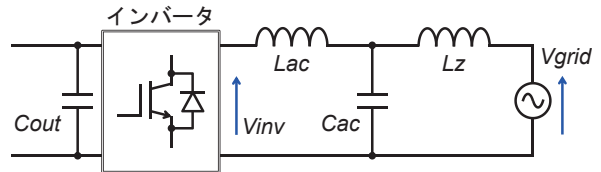
2相昇圧チョッパは、太陽電池の発電電流を2回路間で分流することが可能であるため、2相昇圧チョッパにおける1回路あたりの抵抗成分が、単相昇圧チョッパと同等とした場合、 $I^2R$ で決まる導通損失は半減する。そのため、2相昇圧チョッパにおける全体の電力損失の内、導通損失の割合が大きく占める高電流・高電力領域においては、2相昇圧チョッパを適用することによって、パワーコンディショナの高効率化が図れる。しかしながら、2相昇圧チョッパは、動作している回路数が単相昇圧チョッパよりも増えてしまうことから、半導体デバイスのスイッチング損失が増加してしまう欠点を持つ。また、DCリアクトルの小型・軽量化を図るために、昇圧チョッパのスイッチング周波数を従来比の2倍に上げたことで、DCリアクトルの鉄損と半導体デバイスのスイッチング損失が悪化する。このため、DCリアクトルの鉄損と半導体デバイスのスイッチング損失が、2相昇圧チョッパ全体の電力損失に占める割合が大きくなる低電流・低電力領域で、2相昇圧チョッパの動作回路数を2回路から1回路に制限し、片回路のスイッチング動作を停止した。更に、低電流・低電力領域で、昇圧チョッパのスイッチング周波数を従来機種と同一のスイッチング周波数に下げることによって、DCリアクトルの鉄損と半導体デバイスのスイッチング損失の悪化を防止した。また、照度変化などによって、太陽電池の発電電流や発電電力が変動した場合でも、動作回路数の切り替えやスイッチング周波数の切り替え動作にチャタリングが発生しないように、低電流・低電力領域と高電流・高電力領域の間にヒステリシス領域を設けた。

尚、低電流・低電力領域では、動作回路数の制限とスイッチング周波数の低減によって、2相昇圧チョッパの電力損失を低減することが可能であるが、入出力コンデンサに流れる電流リップルの増加が懸念される。しかし、低電流・低電力領域における昇圧チョッパの動作モードは、DCリアクトルに流れる電流リップルがゼロ電流にクランプされる電流不連続モードになることに加え、系統電源に逆潮流する出力電力が小さいことから、入出力コンデンサに流れる電流リップルは軽減される。また、DCリアクトルを構成する磁性材の磁化曲線に応じた直流重畳特性によって、低電流・低電力領域のインダクタンス値は、高電流・高電力領域よりも大きくなるため、電流リップルの低減が期待できる。これらの特性を考慮し、入出力コンデンサの内部温度上昇仕様と設計期待寿命を満足できるように、昇圧チョッパの動作回路数とスイッチング周波数を入力電流・入力電力領域に応じて、適正に切り替えている。

以上の技術要素を屋外単相パワーコンディショナに自社として初めて搭載し、低電流・低電力領域から高電流・高電力領域までの全領域で、KPV-A・KPW-Aシリーズの高効率化を図った。

### 4.3 インバータ部における AC リアクトルの小型・軽量化技術

図6に系統連系したインバータ出力部の回路構成を示す。



※)  $Lz$  : 系統インピーダンス(リアクタンス成分)  
 $Lac$  : ACリアクトル,  $Vgrid$  : 系統電圧  
 $Cac$  : ACコンデンサ,  $Vinv$  : インバータ出力電圧

図6 インバータ出力部の回路構成

パワーコンディショナは、系統電源に連系するため、インバータの出力部には、送配電網に接続される配電機器や一般負荷に悪影響を与えないための高調波電流を抑制するACリアクトル  $Lac$  やACコンデンサ  $Cac$  が接続される。また、パワーコンディショナが連系する系統電源には、柱上トランスのインピーダンスや送配電系統における線路インピーダンスなどのリアクタンス成分  $Lz$  を含む系統インピーダンスが存在する。特に、遊休地や農地の転用による野立て太陽光発電システムでは、柱上トランスなどの配電機器から遠く離れた送配電網が弱い地域に設置されることがあり、このような場合には系統インピーダンスが大きくなる。系統インピーダンスがインバータのACリアクトルとACコンデンサから形成されるインピーダンスの比率よりも大きくなると、系統インピーダンスとインバータのACリアクトルとACコンデンサ間で相互干渉が発生し、インバータの系統連系制御が不安定に陥る恐れがある<sup>4)5)</sup>。従来機種のKPM2シリーズにおいては、ACリアクトルのインダクタンス値を大きく設定することで、系統連系制御が不安定に陥らないように、系統連系制御のロバスト性を確保していた。このため、ACリアクトルの大型化を招いていた。

図7に系統連系制御の構成を示す。

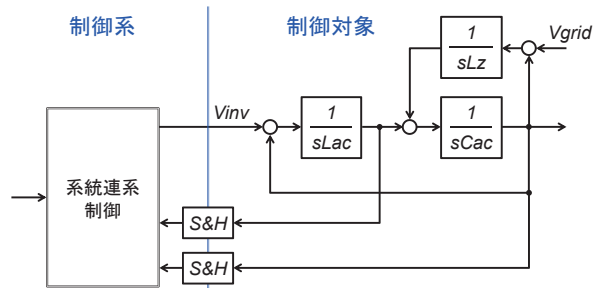


図7 系統連系制御の構成

KPV-A・KPW-Aシリーズにおいて、制御構成の見直しと安定性解析による制御定数の最適化を行い、必要な外乱抑制性能を確保した上で、系統連系制御のロバスト性能を

向上した。その結果、KPM2シリーズのACリアクトルに対して、インダクタンス値を半減し、ACリアクトルの小型・軽量化を図った。

## 5. 開発成果

図8にKPM2シリーズとKPV-A・KPW-AシリーズのDCリアクトル外観を示す。

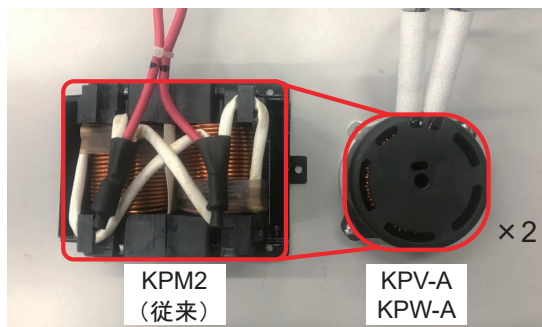


図8 DCリアクトル外観

KPV-AシリーズとKPW-Aシリーズは、同一のDCリアクトルを適用している。KPM2シリーズにおけるDCリアクトルの体積と重量は、0.93 Lと2.5 kgであり、KPV-A・KPW-AシリーズにおけるDCリアクトルの体積と重量は、使用員数となる合計2個で0.6 Lと1.6 kgである。2相昇圧チョップパの適用と電流バランス制御の付加、及びスイッチング周波数の高周波化によって、DCリアクトルのインダクタンス値と電流仕様の低減を図り、体積比で65%、重量比で64%となる小型・軽量化を実現した。

図9にKPM2シリーズとKPV-A・KPW-AシリーズのACリアクトル外観を示す。

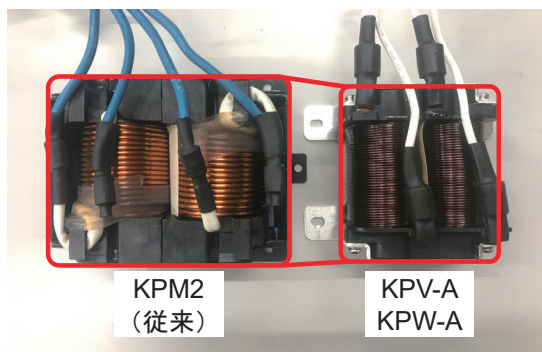


図9 ACリアクトル外観

KPV-AシリーズとKPW-Aシリーズは、同一のACリアクトルを適用している。KPM2シリーズにおけるACリアクトルの体積と重量は、0.93 Lと2.6 kgであり、KPV-A・KPW-AシリーズにおけるACリアクトルの体積と重量は、0.59 Lと1.8 kgである。系統連系制御のロバスト性能を向上したことで、ACリアクトルのインダクタンス値を半減し、体積比で63%、重量比で69%の小型・軽量化を実現した。

図10に、太陽電池電圧が320 V、系統電圧が202 V、系統周波数が60 HzにおけるKPM2シリーズとKPV-A・KPW-Aシリーズの電力変換効率比較を示す。KPV-A・KPW-Aシリーズは、2相昇圧チョップパの適用と、動作回路数の切り替え、スイッチング周波数の切り替え機能を付加したことによって、従来機種のKPM2シリーズに対して、550 Wの低出力時で3.2%、5500 Wの定格出力時で1.5%を向上し、低電流・低電力領域から高電流・高電力領域までの全領域において、大幅に電力変換効率を向上した。

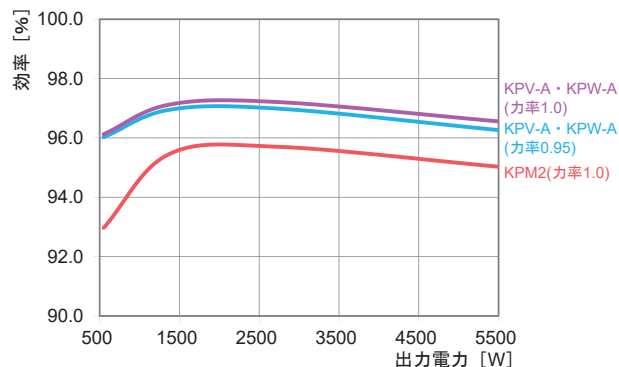


図10 電力変換効率比較 (実測値)

以上のとおり、リアクトルの小型・軽量化に加え、昇圧チョップパの電力損失を低減したことで、KPM2シリーズにおける本体体積の63 Lと本体重量の31 kgに対して、KPV-A・KPW-Aシリーズの本体体積を51 L、本体重量を20 kgとする小型・軽量化を実現した。

## 6. むすび

本稿では、小型・軽量化と高効率化を実現した屋外設置型単相パワーコンディショナのKPV-A・KPW-Aシリーズについて述べた。

KPV-A・KPW-Aシリーズは、2相昇圧チョップパの適用と高周波化、及び系統連系制御の最適化によって、大型部品であるリアクトルの小型・軽量化と昇圧チョップパの電力損失を低減した。これによって、パワーコンディショナ本体の体積を51 L、重量を20 kgとする小型・軽量化を実現し、500 W程度の低出力時で95.5%、定格出力時で96.0%とする高い電力変換効率を実現した。KPV-A・KPW-Aシリーズは、小型・軽量化による施工性の向上と全電力領域での高い電力変換効率を実現したことによって、初期導入費用の低減と総発電量の最大化が図れるため、太陽光発電の発電コストを低減することが可能であり、更なる太陽光発電の普及拡大への貢献が期待できる。

今後も、再生可能エネルギーの発展と更なる社会的ニーズに応えられるパワーコンディショナの開発を行い、持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。

## 参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁. “長期エネルギー需給見通し”. [https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/mitoshi/pdf/report\\_01.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/pdf/report_01.pdf), (参照 2019-04-26).
- 2) 一般社団法人 太陽光発電協会. “太陽光発電が自立した主力電源となるために”. [http://www.jpca.gr.jp/pdf/t180418\\_2.pdf](http://www.jpca.gr.jp/pdf/t180418_2.pdf), (参照 2019-04-26).
- 3) 一般社団法人 日本電機工業会 JEM 1498. “分散型電源用単相パワーコンディショナの標準形能動的単独運転検出方式 (ステップ注入付周波数フィードバック方式)”. 2017.
- 4) Y. Kamatani, T. Nishikawa, T. Zaitzu, and T. Uematsu. “A Compensator that Negate the Influence of Grid Impedance based on Frequency Sweep Estimation Technique”. OMRON TECHNICS. 2018, vol.161, p.54-59.
- 5) Y. Kamatani, T. Nishikawa, T. Uematsu, and T. Zaitzu. “Unique Self-Tuning Method for Stability of Grid-Connected Inverter”. IEEE International Conference on DC Microgrids, May 2019.

## 執筆者紹介



**小林 健二** KOBAYASHI Kenji  
環境事業本部  
商品開発部  
専門：電気工学、制御工学  
所属学会：パワーエレクトロニクス学会



**野村 康祐** NOMURA Kosuke  
環境事業本部  
商品開発部  
専門：制御工学  
所属学会：電気学会



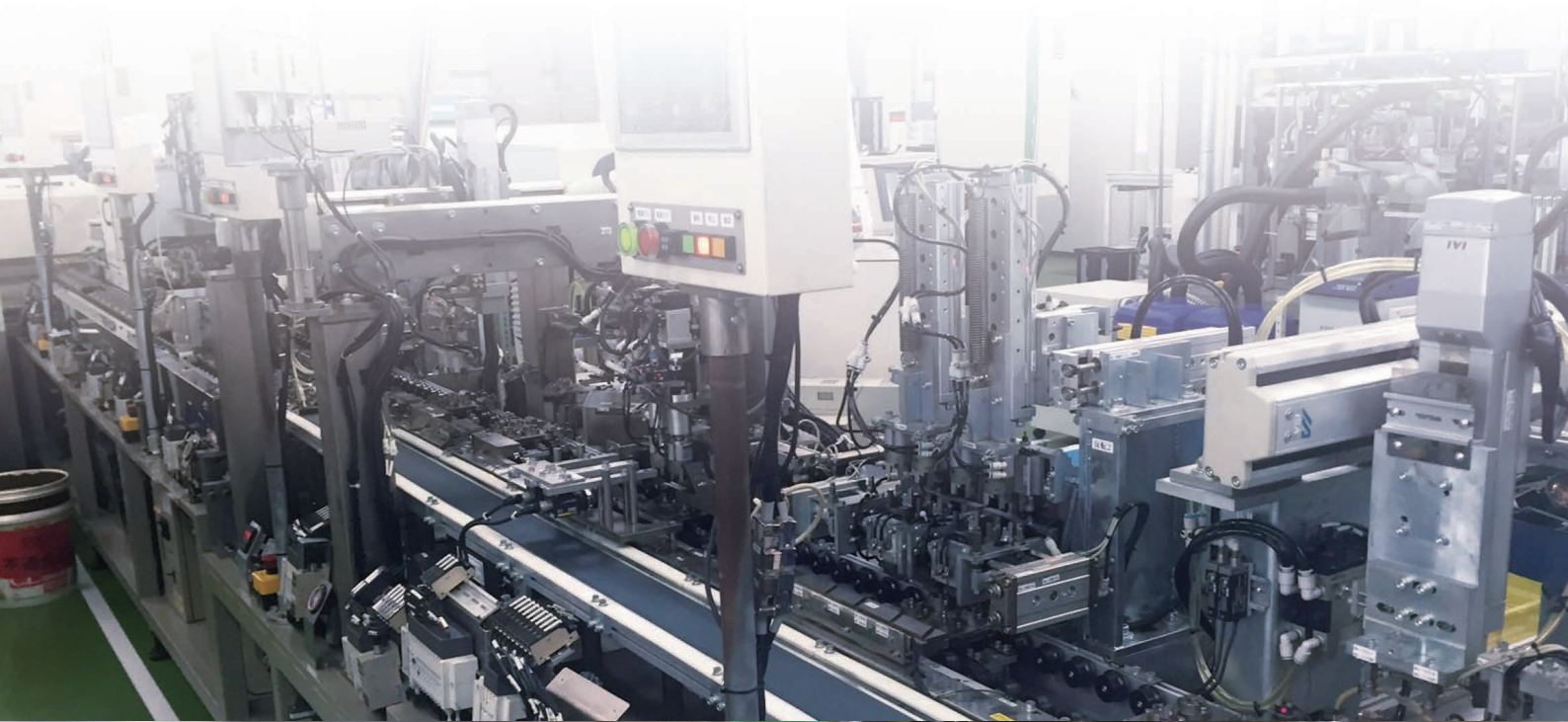
**田内 宏憲** TAUCHI Hironori  
技術・知財本部  
組込システム研究開発センタ  
専門：電気工学

---

AICOT® は、オムロン株式会社の登録商標です。  
本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

# 2

## オムロンの ものづくりを支える技術



## 金属被着体の構造検討による局所加熱での 接着剤高速硬化の実現

平光 則仁, 小森 威和

近年、環境問題に対する気運の高まりから、小型化・軽量化による商品のエネルギー効率の向上を目的とした異種材接合（金属と樹脂材など）が増えており、接合部には接合信頼性確保のために熱硬化接着剤が多く用いられている。

熱硬化接着剤の硬化工法は、接着される部品（以下：被着材）全体を熱硬化炉に投入、加熱するバッチ処理方式が主流である。この工法では硬化時間が長く生産効率が低い、加熱不要な被着材全体に熱エネルギーを付与するためエネルギー効率が低いという問題点がある。

そこでわれわれは、接着剤周辺の被着材にレーザーで局所的に熱エネルギーを付与して接着剤を高速硬化させる省エネルギーかつ生産性の高い工法の開発に取り組んでいる。

本稿では、熱伝導率が大きく局所加熱が難しい金属材における局所加熱での高速接着の実現を目指し、電子機器の筐体フレーム等で多く用いられるアルミ部材に対して熱伝導の通過面積を制御する被着材構造を検討した。その結果、熱硬化炉で数十分かかる接着剤の硬化時間が、本工法では 30 秒程度と大幅な硬化時間の短縮を実現した。これにより被着材の適用材質範囲の拡大と生産工程の制約が減り、接着剤工法の汎用性拡大が期待できる。

## Realization of High-speed Adhesive Curing by Spot Heating and Structure Consideration of Metal Adhesive Parts

*HIRAMITSU Norihito and KOMORI Takekazu*

In recent years, due to growing concerns about environmental issues, the bonding of dissimilar materials (metal and resin, etc.) has been increasing for the purpose of improving the energy efficiency of products by miniaturization and weight reduction, and heat curing adhesives are also often used for the bonding to secure joint reliability. The mainstream of the hardening method of the heat curing adhesives is a batch processing method in which the entire part to be bonded (hereinafter, adherend) is put into a thermal cure furnace and heated. However, this method has problems that the curing time is long, the production efficiency is low, and the energy efficiency is low since heat energy is applied to the entire adherend that does not require heating.

Therefore, we are working on the development of an energy-saving and high-productivity method of applying spot heating with a laser to the adherend around the adhesive to achieve high-speed curing.

In this paper, we considered the adherend's structure which controls the heat transfer area for aluminum material that is often used in the case body of electronic devices to achieve high-speed bonding by spot heating on metal materials that have high thermal conductivity. As a result, the curing time of the adhesive, which takes several tens of minutes in a thermal cure furnace was significantly reduced to about 30 seconds by this method. In addition, the versatility of the adhesive method can be expected because the range of applicable materials for the adherend was expanded and the restrictions of the production process were reduced.

Contact : *HIRAMITSU Norihito* norihito.hiramitsu@omron.com



## 1. まえがき

近年の環境問題に対する気運の高まりから、溶接・接合工法においても、必要な部分にのみ溶融・反応エネルギーを付与する「局所加熱」の開発が各社で取り組まれている。例えば、レーザを使用したはんだ付け、抵抗溶接を使用したろう付けなどである。

接着接合においては、小型化・軽量化による商品のエネルギー効率の向上を目的とした異種材接合での使用が増加している。異種材（金属－樹脂・ガラスなど）は抵抗溶接、アーク溶接などの溶接工法での接合が困難であり、リベットやボルト締結などの機械的接合工法や接着剤を用いた接合方式が採用されている。

接着接合は、面接着での応力集中の防止、気密性の確保、絶縁性、断熱性などの長所<sup>1)</sup>があり様々な産業分野で多く用いられている。接着剤の硬化形態には、熱硬化・UV硬化があり、電子部品用途では要求特性に合わせて使い分けられている。UV硬化接着剤では局所エネルギー付与による高速硬化が可能であるが、耐熱性などの接着信頼性の制約や接着剤コストが高いなどの問題点があり使用用途は限定される。これに対して熱硬化接着剤は、耐熱、耐薬品性に優れ、厚膜硬化が可能である、UVに比べ接着剤コストが安価である等の長所があり広く使われている。

オムロンにおける接着接合においても、熱硬化エポキシ接着剤の耐熱、耐水、耐候性、耐薬品性に優れる、隙間充填性がある等の長所<sup>2)</sup>により、接着固定・封止・充填という機能が要求される用途に使用されている。熱硬化接着剤の硬化方法は、熱硬化炉を用いて被着材と接着剤を同時に長時間加熱して接着剤全体を硬化させるのが一般的である。しかし、熱硬化炉によるバッチ方式は、本来は加熱不要な被着材全体に熱エネルギーを付与するため、製品全体加熱による商品性能への影響や、エネルギー効率が低いため環境負荷が大きく、硬化時間も長いなどの問題点がある。

そこでわれわれは、上記の問題点を解決するために被着材の接着周辺部に局所的に熱エネルギーを付与して加熱し、接着剤を高速硬化させる工法に着目した。この方法では、従来の熱硬化炉方式より少ない時間、少ないエネルギーで接着剤硬化が実現でき、生産効率の向上や省エネルギー化が図れる。さらに、熱硬化炉による一括バッチ処理から局所加熱による個別硬化処理へ移行することにより、生産工程のインライン化や個別品質保証が可能となり、多品種少量生産に適した生産ラインの構築、接着剤硬化工程におけるエネルギー効率や生産効率の観点で効果が大きい。

そこでわれわれは、FA部品・FA機器（リレー、センサー、スマートカメラなど）における異種材部品（金属－樹脂）の接着剤固定・封止を想定して、「高速硬化」、「熱硬化炉レス」を目指した局所加熱硬化による技術開発に取

り組んでいる。

本稿では、金属被着体に対する接着剤の高速硬化を目的として、金属被着体に対する局所加熱、局所熱滞留の効果を最大化させられる金属構造について述べる。

## 2. 局所加熱による接着剤高速硬化工法の取組み

### 2.1 レーザ局所加熱による接着剤の高速硬化技術

熱硬化炉レスを実現するためには、局所的に熱エネルギーを付加可能で制御容易な加熱方法が必要である。そこでわれわれは、上記要求を満足できるレーザによる局所加熱に着目した。レーザ光源も安価な半導体レーザを使用することで実用的に使えるものを目指した。レーザの指向性を利用して高密度のエネルギーを接着剤に付加することにより接着剤の硬化速度を加速させる。図1にレーザによる接着剤硬化の原理図を示す。接着剤にレーザ吸収成分を添加し、レーザ吸収成分によってレーザの光エネルギーを熱エネルギーに変換し発熱させ、接着剤の硬化反応を促進する<sup>3)</sup>。本工法は他社でも検討されており<sup>4)</sup>、オムロンにおいてもリレーの端子部に、この原理を利用した接着剤と工法を使用して実用化している。

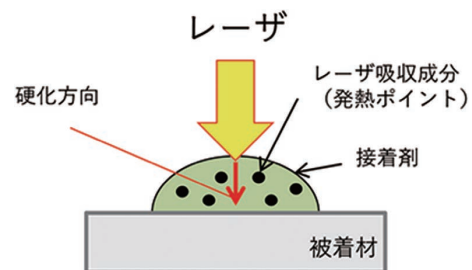


図1 レーザ吸収式硬化方法

このレーザ吸収式硬化方法では、レーザ照射によって接着剤表面から硬化が始まるため、接着剤が厚くなると被着材との界面の硬化が非常に難しいという問題がある。

この問題を解決するため、図2に示すレーザ透過型硬化方法<sup>5)</sup>を考案した。接着剤にレーザ吸収成分を添加せず、接着剤を透過したレーザによって被着材を発熱させ、接着剤を被着材界面から硬化させる方法である。

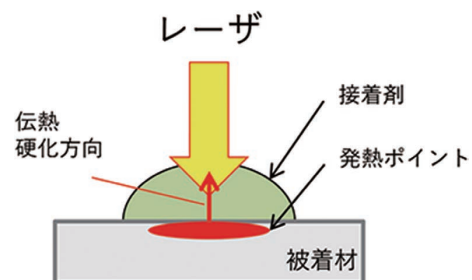


図2 レーザ透過式硬化方法

このレーザー透過式硬化方法により、被着材との界面から硬化が進行するため接着剤厚さが数ミリの厚膜硬化や接着強度の確保が実現できた。この方法は熱伝導が小さい被着材には有効であるが、金属のように熱伝導が大きい被着材の場合、レーザーによる入熱が金属内部へ伝熱してしまい接着剤に伝わり難く、接着剤が硬化しない問題がある。

オムロン商品においても金属-樹脂の接着接合が多く使われており、局所加熱による接着接合技術の展開を考慮すると、金属部品への高速接着が可能な技術が必要である。

## 2.2 金属部品への局所加熱接着工法<sup>6)</sup>の適用

そこで、われわれは被着材が金属でもレーザー局所加熱による接着剤高速硬化が可能な技術を検討した。加熱原理を図3に示す。レーザーを接着剤に直接照射せず、被着材の発熱を接着剤に伝熱することで、金属と接着剤の界面から接着剤を硬化させることができる。またレーザーが直接接着剤に照射されないため、接着剤成分や色など接着剤の制約が少ない接着剤選定が可能となる。

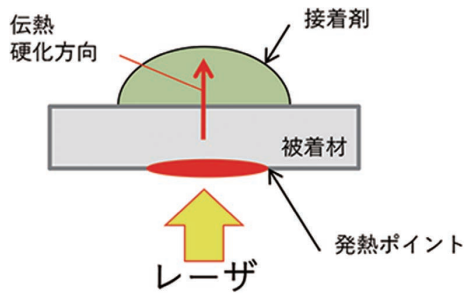


図3 金属伝熱式硬化方法

## 3. レーザ局所加熱による伝熱要因の特定

### 3.1 レーザ加熱の課題

レーザー照射による金属被着材の局所加熱での接着剤硬化が困難である原因として、被着材が高熱容量・高熱伝導体であることによる入熱エネルギーの局所滞留が難しいことが挙げられる。

このため、レーザー照射による入熱で接着剤高速硬化を実現するには、入熱エネルギーの周辺部への伝熱を抑制して、被着材内部で熱エネルギーを局所滞留させることが重要となる。そこで、被着材周辺部への伝熱要因である部材内への熱伝導、他部材への接触熱伝達、大気中への対流・放射熱伝達の各要因の影響度を検証し、レーザー照射による入熱エネルギーの局所滞留を確保する必要がある。

### 3.2 実験方法

実験に使用したアルミ部材形状を図4に示す。レーザー照射での被着材加熱において、被着材の局所滞留への影響が大きい伝熱形態（被着材の熱伝導、接触治具への熱伝達、

大気中への対流・放射熱伝達）について、被着材の温度変化に対する各要因の影響度を検証した。これにより、レーザー局所加熱により被着材の局所加熱を効率良く行うための対策方向性を明確にする。

実験サンプル（以下：アルミ部材）として、同一板厚で体積が異なるアルミ部材、同一体積で形状が異なるアルミ部材を用いた。

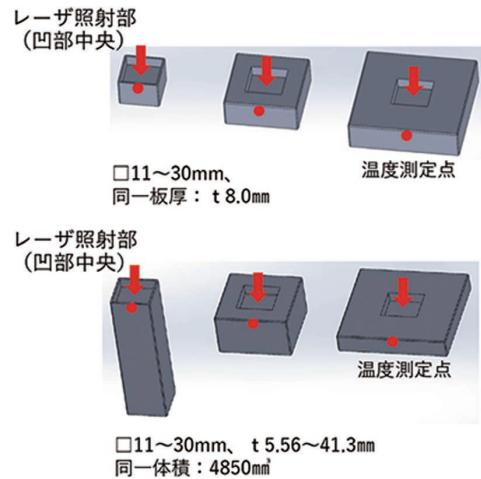


図4 アルミ部材形状（上段：同一板厚、下段：同一体積）

アルミ部材形状、設定条件を表1に示す。アルミ部材形状による熱伝導、接触治具による熱伝達、表面黒化処理による対流・放射熱伝達による温度上昇への影響を確認できるように条件を設定した。具体的には、アルミ部材形状6種類に対して、3種類の熱伝達条件（条件①～③）を組み合わせた18条件で実験した。アルミ部材間の比較により熱容量・熱伝導の影響、条件①と②の比較により対流・放射熱伝達の影響、条件②と③の比較により治具熱伝達の影響を明確に示せるように設定した。これらの実験パターンでレーザー照射による入熱後のアルミ部材の最高温度の比較によって温度上昇に関わる各伝熱形態の影響を確認する。レーザー照射条件を表2に示す。

表1 実験条件

伝熱形態	比較方法	実験パターン		
		1	2	3
熱伝導・熱容量	部材形状(同一板厚)	□11×11 mm	□20×20 mm	30×30 mm
熱伝導	部材形状(同一体積)	□11×t41.3 mm	□20×t12.5 mm	□30×t5.56 mm
治具熱伝達	治具接触	あり	なし	
対流・放射熱伝達	表面黒化処理	あり	なし	

治具熱伝達、対流・放射熱伝達条件の組み合わせ

条件	治具熱伝達	対流・放射熱伝達
①	あり	なし
②	あり	あり
③	なし	あり

表2 レーザ照射条件

項目	設定値
レーザー種類	半導体 (波長: 808 nm)
照射径	φ2 mm
照射出力	27 W
照射時間	30 sec

実験方法を図5に示す。レーザー照射時のアルミ部材表面温度をサーモグラフィーで測定して、アルミ部材、実験条件に対するレーザー照射30 sec後の最高温度の違いを確認した。

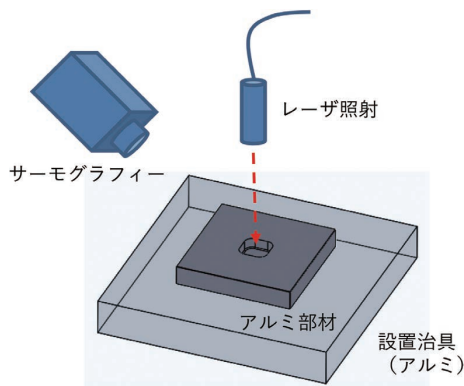


図5 実験状態

### 3.3 実験結果

アルミ部材の各条件でレーザー照射による入熱後の最高温度を比較したグラフを図6に示す。図6では、アルミ部材体積 (熱容量)、アルミ部材形状 (熱伝導形状) により、レーザー照射による入熱後の最高温度に大きな違いがあることがわかる。設置治具接触による熱伝達、対流・放射熱伝達の影響については、同一アルミ形状での条件変化による温度差となり、熱容量、熱伝導に比べると最高温度に与える影響は小さいことがわかる。

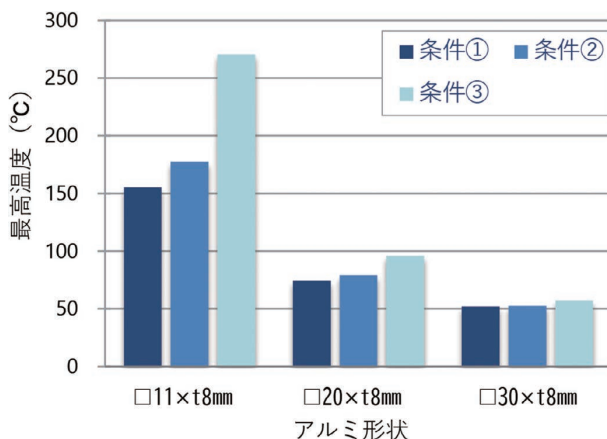


図6 アルミ部材形状 (同一板厚) と最高温度

さらに、熱伝導による温度差を確認するため、図7でアルミ部材同一体積でのアルミ部材形状の違いによる最高温度を比較した。その結果、同一形状での各条件間の温度差に比べ、アルミ部材形状の違いによる温度差の方が大きいことがわかる。

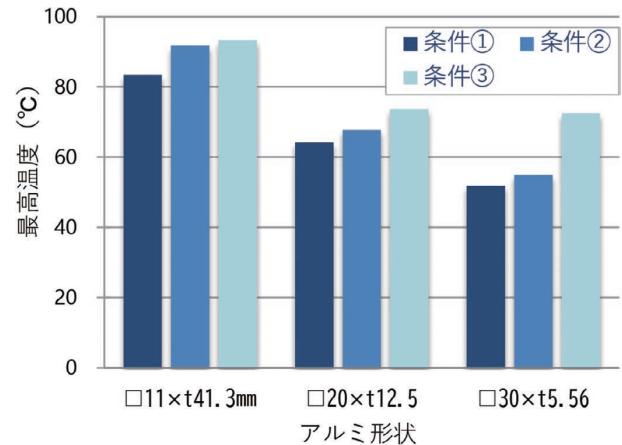


図7 アルミ部材形状 (同一体積) と最高温度

アルミ形状・体積、治具との接触、表面黒化処理の条件による最高温度の違いから、伝熱に影響の大きい3因子 (アルミ部材内の熱伝導、接触治具への熱伝達、大気中への対流・放射熱伝達) の最高温度に対する各要因の影響度を算出すると図8、図9に示すようになる。

影響度の算出方法は、表2の条件①~③の比較により発生する温度差と理論温度上昇の計算値を用いた。例えば (条件①-②の温度差) ÷ (理論温度上昇) により対流・放射熱伝達の影響割合が計算できる。理論温度上昇計算には以下の計算式を用いた。

$$\Delta T = P / (C \cdot \rho \cdot V) \quad (1)$$

P: 熱量、比熱: C、密度: ρ、体積: V

同一板厚・体積違いのアルミ形状の比較を図8に示す。治具への熱伝達は、表面積・体積、板厚が小さい□11×t8 mm アルミ部材で接触面積比率が大きくなり影響度が大きくなる。対流・放射熱伝達は、表面積・体積が小さい□11×t8 mm アルミ部材では最高温度が大きくなり、以下の放射熱量の計算式からも放射量が大きくなることがわかる。

$$Q = A \cdot h \cdot (T_f - T_a) \quad (2)$$

A: 面積、h: 放射熱伝達率、T<sub>f</sub>: 表面温度、T<sub>a</sub>: 雰囲気温度

これに対し表面積・体積が大きい□30×t8 mm アルミ部材では最高温度が小さく、大気中への対流・放射熱伝達の影響度は小さくなる傾向がある。熱容量・熱伝導は、体積が大きい□30×t8 mm アルミ部材では最高温度が小さくなる。このため治具熱伝達、対流・放射熱伝達の影響度につ

いても周辺部との温度差が小さく、影響度は小さくなっている。

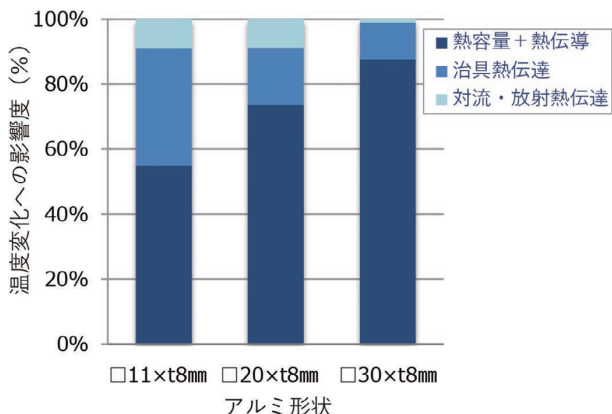


図8 アルミ部材形状 (同一板厚) の伝熱形態と影響度

同一体積・板厚違いのアルミ形状の比較を図9に示す。治具への熱伝達は、接触面積が大きい□30 mmの部材で最も影響度が大きくなっている。対流・放射熱伝達は、アルミ部材間の表面積、体積の違いが少なく最高温度がほぼ同じであることから影響度にもあまり差が出ていない。熱容量・熱伝導については、アルミ部材間は同一体積で熱容量差が無い場合、アルミ部材内の熱伝導の影響度とみることができる。これについては、治具への熱伝達面積が小さく、アルミ部材内の熱伝導面積も小さい□11×t41.3 mmアルミ部材で熱伝導の影響度が大きくなっている。

以上のことから、本実験のアルミ部材形状による各要因の影響度は、大きい順に①アルミ部材内での熱伝導 ②治具接触部への熱伝達、③大気中への対流・放射熱伝達 であることがわかった。特に、アルミ部材内での熱伝導は全てのアルミ部材形状において、温度変化に対する影響度50～80%程度と大きいことがわかる。

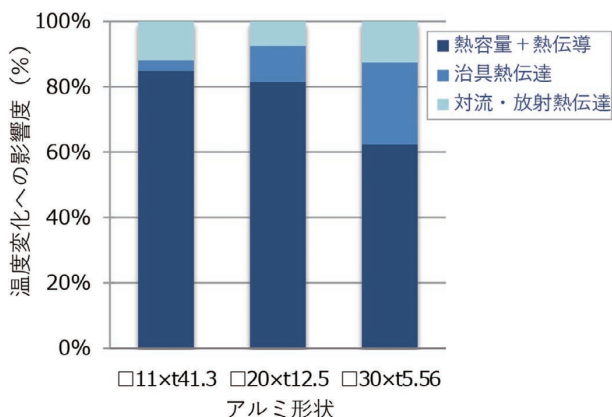


図9 アルミ部材形状 (同一体積) の伝熱形態と影響度

#### 4. レーザ局所加熱による熱伝導の制御

##### 4.1 熱伝導の理論と考え方

3.3項の実験結果からレーザー照射による入熱で被着材を局所加熱する場合には、アルミ部材形状による熱伝導の影響が大きいことがわかる。つまり、レーザー照射による入熱部から被着材周辺部への伝熱を抑制する被着材形状や被着材構造により、レーザー照射による局所加熱の効果が大きくなる。被着材内部の熱伝導に関しては、フーリエの法則により以下の式で表せる。

$$dQ = -\lambda \cdot d\theta/dx \cdot dA \quad (3)$$

dQ: 通過熱量、λ: 熱伝導率、dθ/dx: 温度勾配、

A: 通過面積

この式から、ある面の通過熱量は、被着材の熱伝導率、温度勾配、通過面積に比例する。つまり、被着材構造により通過面積を小さくしてレーザー入熱部から周辺部への通過熱量を抑制すれば、レーザー照射部付近の温度上昇を最大化することができる。

被着材が高熱伝導材のアルミ部材においても、部材表面に溝を設けてレーザー照射による入熱部から周辺への伝熱量を抑制することにより、入熱エネルギーの局所滞留を確保することが可能と考えられる。

##### 4.2 実験方法

レーザー局所加熱時の伝熱状態を変化させるため、アルミ部材表面に溝加工形状を設ける。図10に示すようなレーザー局所加熱点から同心円状の溝加工を、表3に示す条件でアルミ部材表面への溝幅、溝間隔、溝深さを変化させて、溝加工形状による熱伝導断面積、熱伝導距離の違いによるアルミ部材の温度上昇の変化を確認した。

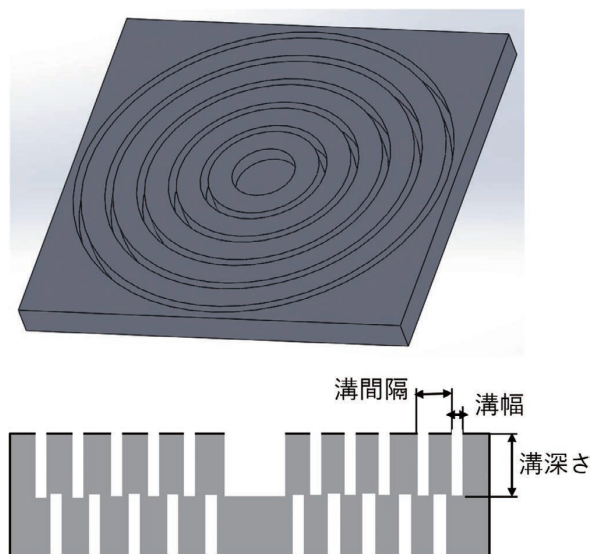


図10 アルミ部材の溝加工形状イメージ

表3 アルミ部材の溝加工形状

サンプル No	外形 (mm)	板厚 (mm)	溝幅 (mm)	溝深さ (mm)	溝間隔 (mm)
①	50×50	4	1.0	3.0	1.0
②			1.0	2.0	1.0
③			1.0	1.5	1.0
④			0.5	1.0	0.5

実験方法を図11に示す。レーザー照射時のアルミ部材表面温度をサーモグラフィーで測定して、アルミ部材の溝加工形状による温度上昇の違いを確認した。

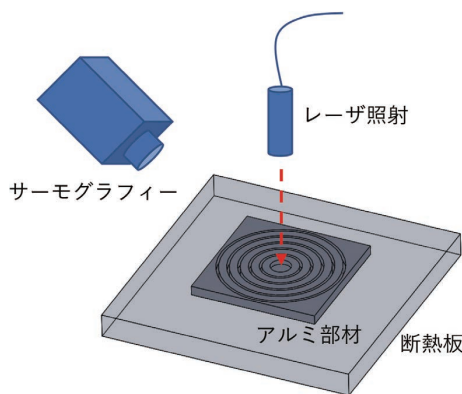


図11 実験状態

温度評価方法を図12に示す。レーザー照射部付近での局所加熱効果、周辺部での温度変化を確認するため、P1～P3の3点でサーモグラフィー温度を測定した。測定点間隔は、溝幅・溝間隔1mmでは8mm、溝幅・溝間隔0.5mmでは4mmとした。

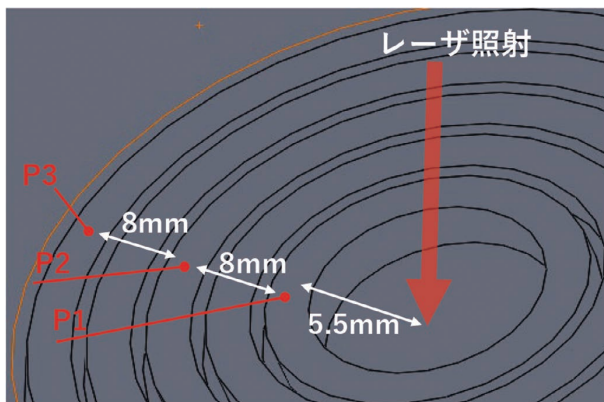


図12 温度測定点

### 4.3 実験結果

図13にアルミ部材の溝加工形状による温度上昇の違いを示す。アルミ部材の溝加工が有る形状①～④では、溝加

工のないアルミ板形状と比べて、P1温度が上昇しており、最大約1.8倍(約55℃⇒約100℃)の温度上昇となっている。これはP2・P3点温度の約1.4倍に比べて、明らかにP1点での温度上昇割合が大きく、溝加工形状によりアルミ部材のレーザー照射部付近を局所的に効率良く加熱できていることがわかる。溝加工形状因子による違いは、アルミ形状③・④を比較することで溝幅、溝間隔に比べて、溝深さの影響が大きいことがわかる。

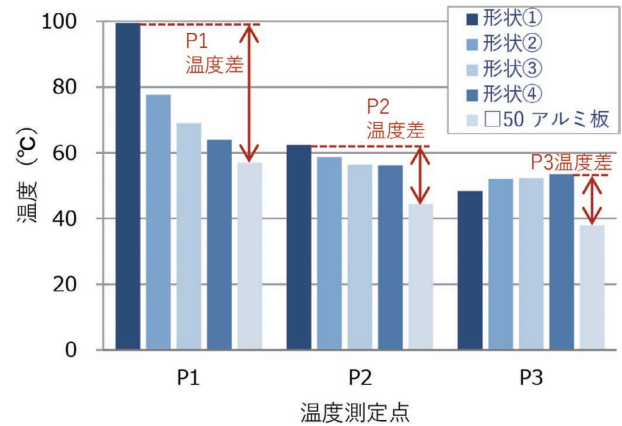


図13 アルミ部材の溝加工形状と最高温度

## 5. 商品展開に向けたレーザー局所加熱の効果検証

### 5.1 商品相当形状のアルミ部材での効果検証

4章では熱伝導に寄与する通過面積の制御による、熱エネルギーの局所滞留への影響を確認した。本技術を商品へ展開するためには、商品形状に適した溝形状にしなければならない。本章では、商品を想定した溝加工形状でのレーザー照射熱エネルギーの局所滞留効果を確認した。

### 5.2 実験方法

図14に示す商品形状を模したアルミ部材形状で局所加熱の熱通過面積の制御による効果を確認した。アルミ部材は、材質：A5052、最大外形：130×60mm、板厚2～4mm(レーザー照射部：4mm)、表面処理：黒色アルマイトとした。溝加工は図15に示す溝本数表面：1本、裏面：2本、溝幅：1mm、溝間隔：1mm、溝深さ：2mmとした。

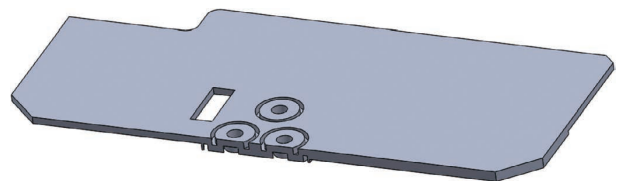


図14 アルミ部材形状

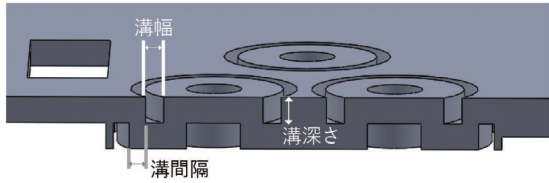


図 15 アルミ部材への溝加工形状

レーザー照射条件は、照射面：裏面、レーザー径：φ4 mm、出力：27 W、照射時間：30 sec、穴①～③に対し 1 点ずつ照射した。

温度測定点、レーザー照射状態を図 16 に示す。温度測定はサーモグラフィーで表面から穴底面の最高温度を測定した。

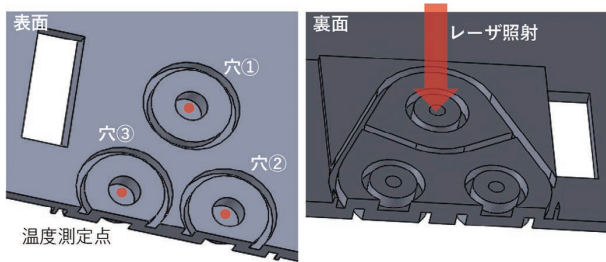


図 16 温度測定点、レーザー照射状態

### 5.3 実験結果

実験の結果、図 17 に示すように穴①～穴③の温度上昇は 80～100℃となっており、溝形状のない□50 mm、板厚 4 mm のアルミ板に比べて、アルミ体積は約 2 倍にも関わらず 1.5～1.8 倍の温度上昇をしている。穴①～穴③の温度比較においては、穴①の温度上昇が穴②、穴③に比べて小さい。これは穴①が穴②、穴③に比べて、周辺部への熱が逃げる面積が大きいためと考えられる。

温度上昇時間では、図 18 に示すようにレーザー照射開始 3 sec 後で 86℃まで温度上昇しており、接着剤の高速加熱の観点からもレーザー局所加熱の効果が大きいことがわかる。

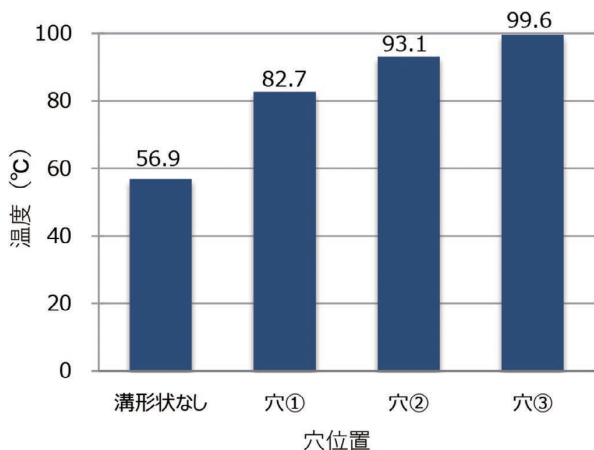


図 17 穴①～穴③での最高温度

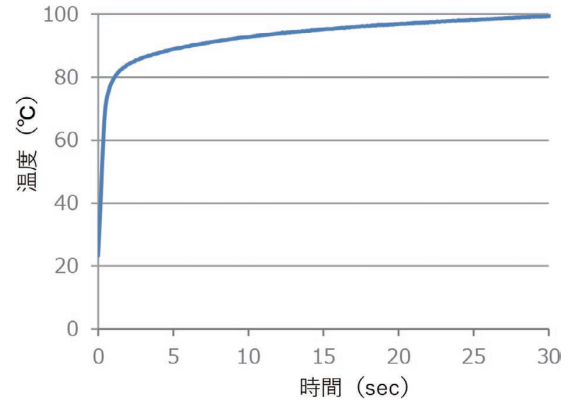


図 18 穴③での温度変化

### 5.4 レーザ局所加熱によるエポキシ接着剤硬化

商品相当構造においても熱の局所滞留が確認できたため、次にレーザー照射による熱硬化接着剤の硬化の実現性を確認した。

図 16 に示す温度測定点の穴内にエポキシ接着剤を注入し、穴内に樹脂棒を差し込んだ状態で、裏面からレーザー照射しエポキシ樹脂を硬化させた。評価指標として引張り接着強度を測定し、オープンで加熱硬化したものと比較した。図 19 にレーザー照射時のサーモグラフィー温度測定状態を示す。図 20 にそれぞれの加熱条件（レーザー照射 27 W・15 sec、レーザー照射 27 W・30 sec、オープン加熱 120℃・1 hour）での接着強度を示す。レーザー硬化 27 W・30 sec ではオープン硬化 1 hour とほぼ同じ接着強度が得られた。これに対し、レーザー照射 15 sec では接着強度がオープン硬化の 15%程度まで低下しており、オープン加熱と同等の接着剤硬化状態および接着強度が得られていないことがわかる。

このように、商品相当形状においても設計の工夫によって、レーザーによる局所加熱で短時間で必要な接着強度を確保できることが実証できた。

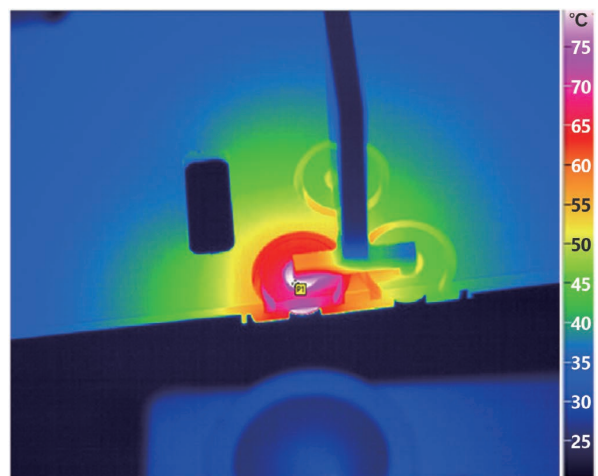


図 19 サーモグラフィー温度測定状態（穴③加熱時）

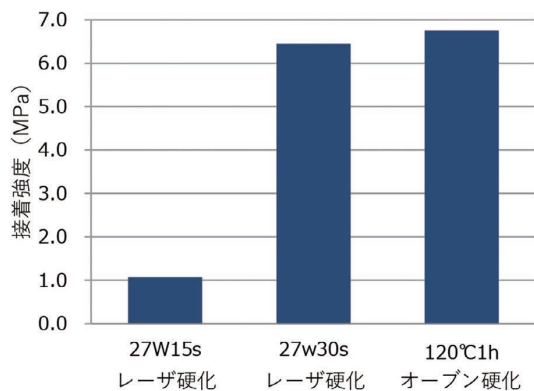


図 20 硬化条件と接着強度

## 6. むすび

被着材形状、構造を工夫してレーザー照射による入熱エネルギーを効率良く被着材の局所加熱に活用した結果、アルミ被着材における局所的な温度上昇を1.5～1.8倍程度まで高められた。これにより熱硬化接着剤の硬化の実現とオープン加熱と同等の接着強度が得られることがわかった。

接着接合法においてアルミ部材のような高熱伝導材での局所加熱が可能になったことで、省エネルギーで環境負荷が少なく、多品種少量生産に適したコンパクトな生産ラインが可能という局所加熱のメリットを保持しながら、被着材材質の適用範囲、接着剤工法の適用範囲を拡げられる。

さらに被着材の局所加熱により、これまで耐熱温度が低い部品があり、熱硬化炉が使用できなかった商品への熱硬化接着剤の適用が可能となる。

本工法の商品展開に向けた課題として、レーザー照射による局所加熱に適した接着材形状、被着材構造の最適化が挙げられる。これには商品設計段階からの被着材形状、接着剤塗布に適した構造設計検討が重要であり、構造設計を効率化するためには、被着材材質、形状、局所加熱条件を変更しながら温度状態を可視化できるCAE環境の構築が重要となる。

今後は熱CAEを活用した局所加熱構造のシミュレーションにも取り組み、商品開発段階での最適な接着構造や工法の提案を行えるように取り組んでいく。

## 参考文献

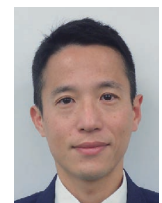
- 1) 原賀康介. 高信頼性接着の実務. 日刊工業新聞社, 2013, p. 3.
- 2) 日本接着学会. 初心者のための接着技術読本. 日刊工業新聞社, 2004, p.38.
- 3) オムロン. 樹脂組成物の硬化方法. 特許 6331525. 2018-05-11.

- 4) 杉浦昭夫, 鈴木克彦, 伊奈治, 加藤和生. 新硬化技術の開発. デンソーテクニカルレビュー. 2009, Vol.14, p.81-87.
- 5) オムロン. 接着剤組成物の硬化方法および接着構造体の製造方法. 特開 2019-001936. 2019-01-10.
- 6) オムロン. 接合品の製造方法および接合品. 特願 2019-126225. 2019-07-05.

## 執筆者紹介



平光 則仁 HIRAMITSU Norihito  
グローバルものづくり革新本部  
生産技術革新センタ 要素技術部  
専門: 機械工学



小森 威和 KOMORI Takekazu  
グローバルものづくり革新本部  
生産技術革新センタ 要素技術部  
専門: 機械工学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

# 0402 から大型部品までの混載実装を可能にする はんだ振動印刷技術

西田 勝稔, 山口 浩二, 野中 靖昭

工業製品の高機能化により、製品を構成する基板上に実装される部品サイズは、従来の 1608 (1.6×0.8mm) や 1005 (1.0×0.5mm) から、0603 (0.6×0.3mm) や 0402 (0.4×0.2mm) が主流になると予想される。FA 機器でこれらの部品を使用するには、大型部品との混載が不可欠である。部品と基板配線を電氣的に接続するはんだは、大型部品が求める量から 0402 が求める少量までを安定供給する事が求められる。この高アスペクト比のはんだ供給を印刷工法で行うため、はんだ特性、マスク表面加工、基板パターン寸法、振動印刷技術を評価した。本取り組みでは、材料の選定要素と振動印刷技術の効果を求めることで、前回取り組み<sup>1)</sup>の 2.4 を超えるアスペクト比 2.7 (マスク厚 0.12mm、開口寸法 Φ 0.18mm) で体積率 Cpk1.80 を達成した。

## Solder Vibration Printing Technology that Enables Mixed Mounting from 0402 to Large Components

NISHIDA Katsutoshi, YAMAGUCHI Koji and NONAKA Yasuaki

The size of passive components mounted on the boards composing a product has been decreasing. Mainstream size will be 0603 (0.6×0.3mm) and 0402 (0.4×0.2mm), whereas the conventional sizes are 1608 (1.6×0.8mm), 1005 (1.0×0.5mm). In order to use this part with FA equipment, it is essential to be mixed with large components. In mounting various components dimensions, it is required to accurately supply solder which electrically connects the components and the board pattern from the one required for large components to a small amount such as 0402 on the board. For this reason, solder characteristics, stencil surface processing, substrate pattern dimensions, and vibration printing technology were evaluated in order to supply solder with a high aspect ratio by the printing method. Printing with an aspect ratio of 2.7 (stencil thickness 0.12 mm, opening size Φ 0.18 mm) is realized. For that purpose, we searched for the effects of material extraction and vibration printing technology. As a result, we were able to exceed the previous<sup>1)</sup> 2.4, and achieved a volume ratio Cpk 1.80 of 2.7.

### 1. まえがき

工業製品の最近の情勢は、通信機能や AI 処理機能の追加、処理情報量の増加により、電子機器の高機能化・高付加価値化が図られている。そのため、電子機器を構成するプリント配線板は小さくなり、搭載する部品点数は増加する。これにより、搭載部品の寸法は小さくなり、0603 や 0402 といった部品が主流になってくる<sup>2)</sup>。FA 機器においては、0402 からコネクタなど大型部品までを、混載することが求められる。混載の課題の一つに、はんだ印刷工法による高アスペクト比の安定印刷が挙げられる。そのため、今回はアスペクト比 2.4 の安定はんだ印刷に取り組んだ。

本稿では、アスペクト比 2.7 の Cpk1.80 (印刷結果の体

積率の工程能力指数を表し、基準は下限 50% の上限 170% とした) を目標とした取り組みについて記載する。振動印刷の取り組みについては、実際の振動現象を測定して、振動量と印刷性の関係性を評価した。

### 2. 高アスペクト比のはんだ印刷課題

はんだ印刷は、マスク開口にペースト状はんだ (以下、はんだと表記) を供給 (以下、充填と表記) し、プリント配線板 (以下基板) を下降させて、電極パターンの上にマスク開口形状のはんだを転写する。この際、図 1 に示すように、はんだが基板の電極パターンに粘着する力と、マスク開口内壁に粘着して基板下降時 (以下、版離れと記載) のマスクとはんだ間に生じる摩擦力 (以下、ずり応力と記載) とのバランスにより、安定した印刷が行えるかが決まる。

Contact : NISHIDA Katsutoshi katsutoshi.nishida@omron.com



これらの力は、はんだの接触する面積に比例し、この面積比をアスペクト比として表す（図2 参照）。はんだ印刷技術においてはアスペクト比が重要な因子であり、この値が大きくなると印刷難易度が増すことが知られている<sup>3)</sup>。はんだが基板に接触する面積よりもマスクと接触する面積が増すことで、ずり応力が大きくなる。これにより、マスク開口内部にはんだが残りやすくなり、基板に転写する体積が減少する。アスペクト比を小さくするには、マスクを薄くすることが有効である。しかし、同一基板上にリード高さバラツキの大きいコネクタなどが搭載される場合、これらの部品の供給はんだ量不足により接合強度が低下する問題が生じる。そのため、小型部品を印刷する場合にマスク厚を薄く出来ない。FA 機器ではマスク厚 0.12 mm が主流であり、0402 の開口面積で印刷する際のアスペクト比は 2.4 となる。

前回の取り組みでは、レオメータではんだの粘弾特性を測定して、ずり応力を低減させるように版離れ速度を最適化した。この取り組みの中で、はんだ特性に応じて、マスク表面コートや版離れ制御などの印刷条件を最適化することが重要だとわかった。一方、アスペクト比が 2.7 と大きくなると、図3に示すように、はんだ高さの低下とマスク開口のはんだ目詰まりが多くなる。これは、はんだが基板パターンに十分に接触しないため、基板とはんだが粘着する力が不足することが原因と考える。この課題に対応するため、はんだ特性とマスク表面コート、基板パターンとマスク開口寸法の関係性、振動を用いた印刷法について評価した。

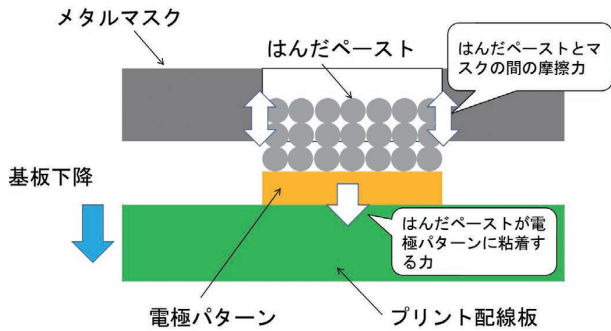
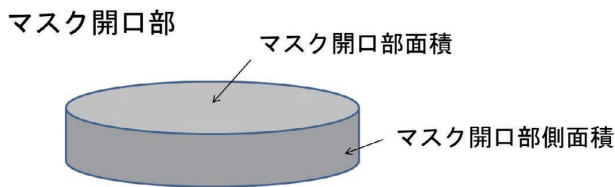


図1 はんだ印刷のメカニズム



$$\text{アスペクト比} = \frac{\text{マスク開口部側面積}}{\text{マスク開口部面積}}$$

図2 アスペクト比

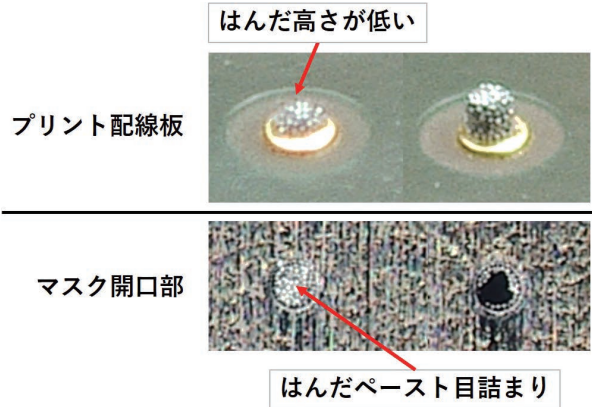


図3 アスペクト比 2.7 の課題

### 3. はんだ、マスク表面コートおよび基板パターン設計の印刷影響評価

#### 3.1 評価内容

はんだは新たに評価する A と、前回の取り組みで使用したはんだ B を、マスク表面コートは、はんだとの摩擦力を評価するために親水（親油）コートと撥水（撥油）コートを用いた。基板は、マスクとパターンをより密着させるためソルダレジスト厚を銅箔厚より薄くし、マスク開口を基板パターンより大きくした。

はんだの仕様を表 1、基板を表 2 に、評価した基板パターンとマスク開口の寸法関係を表 3 に示す。

表1 評価はんだの仕様

はんだ	粒径	粘度 Pa・s	フラックス含有量 Wt%
A	20-38 μm	117	11.5
B	10-15 μm	183	11.5

表2 評価基板の仕様

項目	内容
寸法 (mm)	115×180 t1.6
パターンサイズ (mm)	φ0.16、φ0.18、φ0.20、φ0.22、φ0.24、φ0.26、φ0.28、φ0.30、φ0.32
ソルダレジスト厚	25 μm
銅箔厚	35 μm
表面処理	無電解薄付け Au めっき
シルク	無し

表 3 基板パターンとマスクの寸法関係、アスペクト比

評価基板	パターン径 mm		0.20	0.22	0.16 ※	0.18 ※
	マスク	開口径 mm		0.16	0.18	0.16
マスク	加工基準面の アスペクト比狙い	基盤	3.0	2.7	3.0	2.7
		スキージ	2.8	2.5	2.8	2.5

※基板パターン径とマスク開口径が同径（従来の設計）

### 3.2 実験条件

評価で用いた印刷条件を表 4 に示す。はんだ印刷時の基板の反りの影響を排除するため、印刷時は装置の基板吸着機能を用いて矯正し、基板が平面となるようにした。印刷結果は、はんだ印刷検査機（CKD 製 VP-6000M）でレジスト開口パターンについて定量化した。実験は、条件毎にマスクの洗浄を行い、マスクに付着したはんだ残渣の影響を排除した。基板を 8 シート印刷して、印刷が安定する 3 シートから 8 シート目までの 6 シート分のデータにより印刷性を評価した。

表 4 印刷条件

印刷機	Panasonic 製：SP-60
スキージ	メタル（出代 10 mm）
基板バックアップ	ベタ治具、専用吸着 BOX
印刷速度	50 mm/sec
印圧	35×10-2N
アタック角度	60°
クリアランス	-0.2 mm
版離れ	等速 10 mm/s
	ストローク 3 mm
	下受け優先
版離れ待ち時間	0

### 3.3 評価結果

各はんだと各マスクを組み合わせで評価した体積率の Cpk を表 5 に示す。はんだの差は、マスク表面コートとアスペクト比に関係なく、A が B より Cpk の値が高くなり、優位性があると考えられる。マスク表面コートは、アスペクト比が 2.7 より大きい場合に、はんだに関係なく親水コートが撥水コートより高くなった。

表 6 に、アスペクト比 2.7 の体積率の Cpk を示す。この結果から、はんだに関係なく基板パターンをマスク開口より大きくしたことにより、Cpk が向上していることがわかる。

これらの因子の最適な組み合わせで印刷した結果、体積率の Cpk は 0.87 であった。

表 5 はんだ、マスクの組み合わせ結果（体積率 Cpk）

はんだ	マスク	設計アスペクト比			
		3.0	2.8	2.7	2.5
A	撥水コート	0.14	0.18	0.69	1.47
	親水コート	0.23	0.34	0.87	1.90
B	撥水コート	0.00	0.00	0.21	0.54
	親水コート	0.00	0.00	0.26	0.39

※スペック 50% < 印刷体積 < 170%

表 6 基板パターン設計による効果（体積率 Cpk）

寸法関係	はんだ A		はんだ B	
	基板=マスク 同径	基板>マスク	基板=マスク 同径	基板>マスク
撥水コート	0.62	0.69	0.09	0.21
親水コート	0.84	0.87	0.18	0.26

※アスペクト比 2.7 が対象。

### 3.4 考察と課題

マスク表面コートの結果について考察する。撥水コートに対する、親水コートの高さや面積率の増減を表 7 に示す。親水コートは、撥水コートに比べて面積率は増加し、高さは減少した。このことから親水コートは、充填時にははんだがマスク開口に流れ込みやすくなり、基板パターンの濡れ広がりが大きくなる。これにより、接触面積が増加して高さが減少したと考える。撥水コートは、はんだとマスクが反発するため、マスク開口が小さい場合は、はんだが流れ込みにくくになると考える。これらのことから、親水コートは高アスペクト比の印刷で優位性があったと考える。

次に、基板パターンの効果について考察する。基板パターンとマスク開口が同径に対して、基板パターンを大きくした場合の、高さや面積率の増減を表 8 に示す。この結果、はんだとマスク表面コートに関係なく面積率が増加した。これは、基板とマスクを密着させて、はんだを基板パターンに十分接触させることを狙った通りの結果であった。

これら高アスペクト比の印刷に優位な材料選定と基板設計を行っても、アスペクト比 2.7 の印刷では依然としてマスク開口内部のはんだ目詰まりが発生する。これは、基板パターンとはんだの粘着する力が不足しているためと推定し、よりはんだを基板パターンに十分接触させるための推進力（エネルギー）の向上が必要と考えた。

表 7 親水マスクの面積率の増加

	はんだ A	はんだ B
高さ平均	3%減少	増減なし
面積率平均	2%増加	5%増加

※撥水コート印刷結果に対する、親水コートの増減を表す。

表 8 基板パターン設計による面積率の増加

		はんだ A	はんだ B
撥水コート	高さ平均	6%減少	5%増加
	面積率平均	20%増加	16%増加
親水コート	高さ平均	6%減少	1%減少
	面積率平均	18%増加	12%増加

※寸法同径の設計（基板＝マスク）に対する、基板＞マスク設計の増減

## 4. 振動を用いた印刷評価

### 4.1 評価内容

充填するはんだ量を増やすための因子として、印刷機はスキージのアタック角、移動速度、印圧などの印刷条件と、はんだは粘度が挙げられる。しかし印刷条件を最適化しても、高アスペクト比においては、基板パターンにはんだを十分接触させるための推進力は得られないと考える。また、はんだの粘度は低くするほど、はんだの滲みやダレなど、印刷形状が悪化する。そこで、この推進力を得るために材料を振動させてはんだの流動性を向上させることを目的に、超音波振動の付加を評価した。これは、高周波の超音波振動により一時的にはんだの粘度を低下させた先行技術<sup>4)</sup>を参考にした。振動を用いた評価内容を表 9 に示す。

振動を与えるため、図 4 に示すように、振動子を基板ステージに取り付ける治具を作製し、振動子の負荷電圧を 30V と 100V に変更した場合の、振動の量を評価した。これには、レーザードップラー振動計を用い、基板ステージと評価基板およびマスクの、垂直方向の振動の量を測定した。

次に、振動の量と印刷の関係を求めるため、振動を付加しない場合（以下、負荷電圧 0V と記載）と、負荷電圧を 30V および 100V に設定した場合で、3.2 項と同じ評価を行った。振動については、スキージが下降してマスクに接触してから版離れが完了するまで与えた。

また、マスク表面コートの影響を確認するため、親水コートと撥水コートについて、負荷電圧 100V で評価した。

表 9 振動を用いた評価内容

		負荷電圧 V		
		0	30	100
○…測定、評価の対象				
振動の測定	レーザードップラー振動計		○	○
印刷評価	はんだ：A マスク：コートなし	○	○	○
	はんだ：A マスク：親水コート			○
	はんだ：A マスク：撥水コート			○

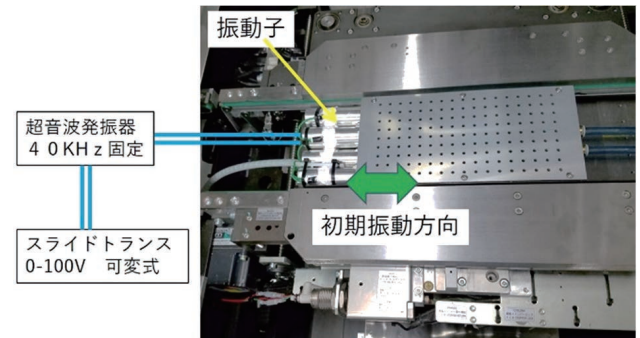


図 4 振動発生治具の外観

### 4.2 評価結果

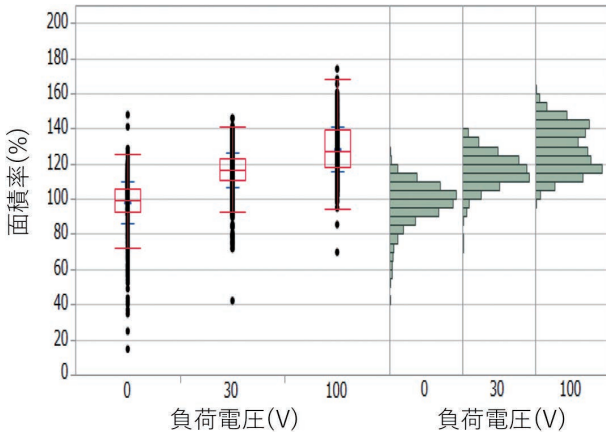
振動測定の結果、基板ステージと評価基板およびマスクが振動していることが確認できた。アスペクト比 2.7 の基板パターン位置の振動測定結果を表 10 に示す。各測定部位の振動の量は、負荷電圧 100V の時に、評価基板、基板ステージ、マスクの順に大きい。評価基板は、ガラスエポキシ樹脂と銅箔で構成され、これらの固有振動数が異なるため振動が増幅されて、評価基板の値が最も大きくなったと思われる。また負荷電圧 30V では、評価基板と基板ステージが同じ振動の量となり、マスクが最も小さくなる。

表 10 測定部位毎の振動

	振動量	
	負荷電圧 30 V	負荷電圧 100 V
基板ステージ	0.06 $\mu\text{m}$	0.10 $\mu\text{m}$
評価基板	0.06 $\mu\text{m}$	0.20 $\mu\text{m}$
マスク	0.03 $\mu\text{m}$	0.06 $\mu\text{m}$

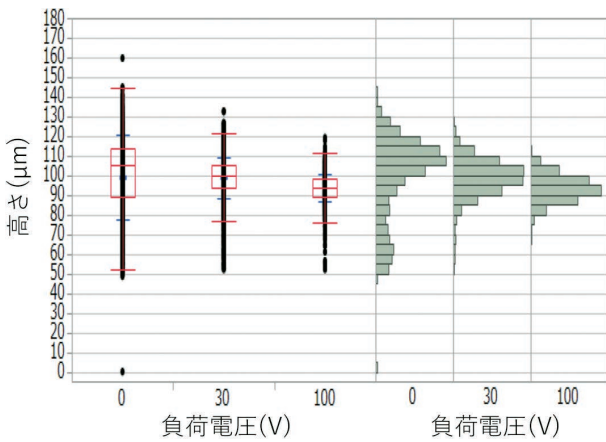
次に、負荷電圧により振動の量を変えた場合の印刷性を評価した。アスペクト比 2.7 の印刷結果を、面積率を図 5 に、高さを図 6 に示す。負荷電圧を上げるほど、面積率は増加し、高さは減少することから、振動の量が大きくなると、はんだが濡れ広がると考えられる。また図 7 に示すよう

に、マスク開口部のはんだ目詰まりが負荷電圧 100V の印刷で減少したことも、はんだが基板パターンに十分に接触する面積が増加したと考えられる。



負荷電圧	平均 (%)	標準偏差 (%)
0 V	97.8	12.0
30 V	116.4	9.8
100 V	128.3	12.9

図5 負荷電圧による、面積率平均の増減



負荷電圧	平均 (μm)	標準偏差 (μm)
0 V	99.1	21.7
30 V	98.7	10.1
100 V	93.5	6.9

図6 負荷電圧による、高さ平均の増減

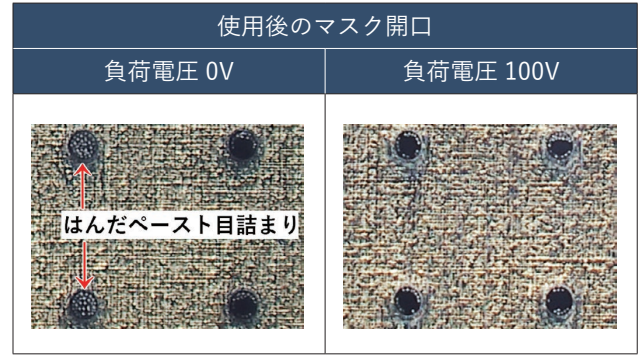
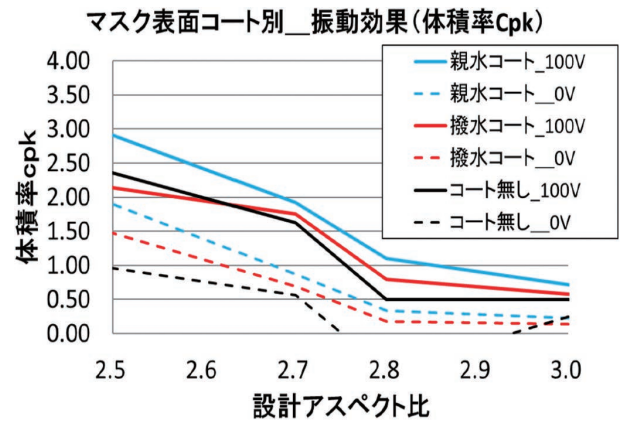


図7 振動によるマスク開口のはんだ目詰まりの減少

マスク表面コート別の印刷結果を図8に示す。表面コートに関係なく、負荷電圧 100V 時の Cpk は負荷電圧 0V の場合よりも 1.0 程度向上しており、振動の効果に差はない。はんだ特性とマスク表面コート、および基板設計を最適な条件で組み合わせて振動を与えた結果、アスペクト比 2.7 の Cpk は 1.92 であった。



はんだ	マスク	負荷電圧	設計アスペクト比			
			3.0	2.8	2.7	2.5
A	親水コート	0 V	0.23	0.34	0.87	1.90
		100 V	0.72	1.10	1.92	2.91
A	撥水コート	0 V	0.14	0.18	0.69	1.47
		100 V	0.58	0.80	1.75	2.13
A	コートなし	0 V	0.25	0.00	0.56	0.96
		100 V	0.49	0.50	1.62	2.35

図8 マスク表面コート別 振動の効果

### 4.3 振動効果のまとめ

アスペクト比 2.7 の印刷で必要となるはんだを基板パターンに接触させるための推進力を得るため、超音波振動によるはんだ流動性向上の効果を評価した。基板ステージや評価基板およびマスクは振動することで、印刷の面積率

は増加し、高さは減少した。また、マスク開口のはんだ目詰まりは減少した。これらの結果から、振動を与えることではんだの流動性が増し、印刷性が向上する効果があると考えられる。

## 5. むすび

0402 から大型部品までの混載実装を実現するためには、大型部品の接合強度が低下しないアスペクト比で、0402 の供給はんだ量を安定させて印刷することが求められる。

本取り組みでは、前回の 2.4 を超えるアスペクト比 2.7 の体積率  $Cpk1.8$  を目標に取り組んだ。高アスペクト比の印刷には、はんだと基板パターンを十分接触させ、両者の粘着する力を増やすことが重要だとわかった。そのため、はんだ特性やマスク表面コート、および基板パターン設計について、はんだがマスク開口に流れ込みやすい条件の選定が求められる。しかし、これらを最適な組み合わせで選定しても、アスペクト比 2.7 の  $Cpk$  は 0.87 が限界であった。そこで振動エネルギーを付加して、はんだを基板パターンに接触させるための推進力を増加させることで、 $Cpk$  が 1.92 まで向上した。このように振動印刷は、高アスペクト比の印刷に有効であると考えられる。

振動印刷の評価は基礎データの収集と印刷評価を開始したばかりであり、振動の繰り返し精度、基板面内の安定性、レジスト開口以外のパターンの効果、実装部品への影響をはじめ、多くの評価が今後必要な技術である。FA 機器における 0402 と大型部品の混載基板の安定量産を行う上でも、更に評価を行い、実用化を目指していく。

## 参考文献

- 1) 山口浩二. 0402 部品から大型部品までの混載実装を可能にする高アスペクト比はんだ印刷技術. OMRON TECHNICS. 2019, Vol.51, No.1, p.149-154.
- 2) Jisso 技術ロードマップ専門委員会. “第 4 章 電子部品”. JEITA2017 年度実装技術ロードマップ. 一般社団法人 電子情報技術産業協会, 2017, p.257.
- 3) 古賀裕一, 八甫谷明彦, 山本展大, Thin & Light PC の基板小型化技術. 東芝レビュー. Vol.60, No.8, p.17-18.
- 4) ナミックス株式会社 飯田英世. スクリーン印刷方法及びその装置. 特開 2010-149301 (P2010-149301A)

## 執筆者紹介



**西田 勝稔 NISHIDA Katsutoshi**  
グローバルものづくり革新本部  
生産技術革新センター 要素技術部  
専門：実装工学



**山口 浩二 YAMAGUCHI Koji**  
グローバルものづくり革新本部  
生産技術革新センター 要素技術部  
専門：実装工学



**野中 靖昭 NONAKA Yasuaki**  
グローバルものづくり革新本部  
生産技術革新センター 要素技術部  
専門：実装工学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

## 異方性材料を用いた樹脂部品の熱変形予測技術

早田 和也, 横手 康浩, 竹ヶ原 郁夫

機器の小型化や省エネルギー化のトレンドに伴う電子部品の小型化や高容量化ニーズが高まっているが、これらの要求は電子部品にかかる熱の影響を大きくしている。電子部品に多く使用される樹脂材料は金属材料より熱膨張率が大きいため、樹脂材料の熱による変形を正確に把握し、製品特性への影響を明確にすることがロバスト性の高い商品実現に重要である。

本検討では、異方性材を用いた樹脂部品の熱変形を予測するために、ガラスフィラーの配向特性を反映した解析手法を構築した。特定機種において検証を行い、熱変形による寸法変化が解析と実測で同様の傾向となることを確認し、解析手法の有効性を確認した。これにより、設計段階で解析による熱変形に強い形状検討が可能となり設計完成度の向上や設計期間短縮につながることを期待される。

## Thermal Deformation Prediction Technology of Resin Parts Using Anisotropic Materials

SODA Kazuya, YOKOTE Yasuhiro and TAKEGAHARA Ikuo

There is a growing need for miniaturization and high capacity of electronic components along with the trend of miniaturization and energy saving of equipment, but these requirements have increased the influence of heat on the electronic components. Because resin materials which are often used in electronic components have a higher coefficient of thermal expansion than metal materials, it is important to accurately understand the deformation of resin materials by heat and clarify the effect on characteristics in order to realize products with high robustness.

In this study, we developed analysis method that reflects orientation property of glass filler in order to predict the thermal deformation of resin parts with anisotropic materials. Using a specific model, it was confirmed that the dimensional change by thermal deformation had the same tendency about analysis results and actual measurement, and the effectiveness of the analysis method was confirmed.

As a result, it is possible to study a shape that is resistant to thermal deformation by analysis at the design stage, which is expected to lead to an improvement in design completeness and a shortening of the design period.

### 1. まえがき

機器の小型化や省エネルギー化のトレンドに伴い電子部品の小型化や高容量化ニーズが高まっているが、これらの要求は電子部品自体の発熱の増加など、電子部品にかかる熱の影響を大きくしている。このような社会ニーズに対応していくために、使用温度や発熱に対してもロバスト性の高い商品が求められる。

電子部品は保護構造や絶縁体等で樹脂材料が使用されている。その中でもリレーやコネクタのような小型の電子機構部品は、電気的な絶縁の確保に加え、薄肉であることや金属部品の保持や保持した部品の摺動や挿抜などの疲労に

耐えうる強度が必要とされるため、樹脂に針状のガラス繊維（以降ガラスフィラーとする）を数10%配合したガラスフィラー強化樹脂が広く使われている。ガラスフィラーを混合した場合、射出成型時の樹脂の流動方向により、フィラーが配向し、強度などの機械的特性や膨張率などの熱的特性などが配向方向で異なる。このような材料を異方性材料と呼ぶ。

樹脂材料は熱変化による膨張・収縮が金属材料に対して大きいため、樹脂部品の変形は電子機構部品の特性に大きく影響する。そのため、樹脂部品の熱変形による寸法変化を予測し、性能への影響を把握することが電子機構部品を設計する上では重要となる。

異方性材料について、これまでは射出成型時のそりなど

Contact : SODA Kazuya kazuya.soda@omron.com

の変形は流動解析にて実現できていたが、成形後部品の熱変形についての解析手法は検討できていなかった。本論文では、汎用 CAE (Computer Aided Engineering) を組み合わせ、ガラスフィラーを含んだ樹脂部品の成型後の熱変形による寸法変化を精度よく予測できる技術を構築した。

## 2. 解析手法

### 2.1 熱変形の原理

樹脂の熱変形原理について説明する。なお、本論文で扱う熱変形とは、熱起因の化学反応変化や劣化等による変形は含まず、熱が加わったときの熱膨張による樹脂の変形のみを指している。

図 1 にガラスフィラー強化された異方性樹脂材料の温度-膨張特性を示す。ガラスフィラー強化樹脂の温度-膨張特性はガラスフィラーの配向方向によって大きく異なる。温度の上昇に伴い線形的に膨張しているが、MD 方向 (樹脂の流れに沿った方向) は TD 方向 (樹脂の流れと垂直方向) に比べ膨張しにくいことが分かる。これは、ガラスフィラーは樹脂の流動方向に配向しやすくなっており、ガラスフィラー自体の膨張率は樹脂材の膨張率と比較すると小さいため、針状方向はガラスフィラーの膨張率の影響を受け樹脂として膨張率が小さくなることに起因する。なお、配向方向が中間の場合は一般的に MD と TD の中間の特性となる。

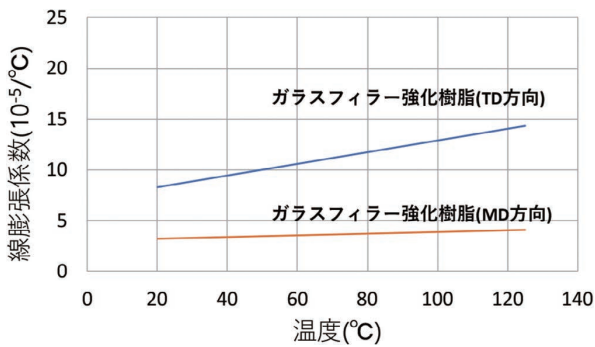


図 1 樹脂の線膨張係数の異方性と温度依存性

図 2 に示す原理形状モデルを実際に射出成型し、樹脂内部のガラスフィラーの配向を確認する。

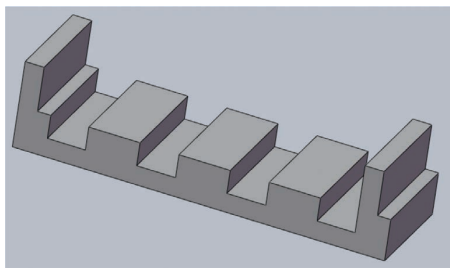


図 2 原理形状モデル

図 3 は成形された原理モデルの XZ 面におけるガラスフィラーの配向状態であり、代表的なガラスフィラーの配向方向を矢印で示したものである。ガラスフィラー配向は X 線 CT で計測した画像から取得している。図 3 の矢印で示すようにガラスフィラーの配向は部位ごとに異なっており、MD 方向、TD 方向がランダムに配置している。このように、ガラスフィラーの配向が各部位で連続性はあるものの配向性がランダムである場合、温度が上昇すると、ガラスフィラーの配向が樹脂の流れ方向に近い (MD 方向) 部位は膨張率が小さく、樹脂の流れと垂直方向 (TD 方向) に近い部位は膨張率が大きくなり、部位によって変形量と変形方向が異なってくる。

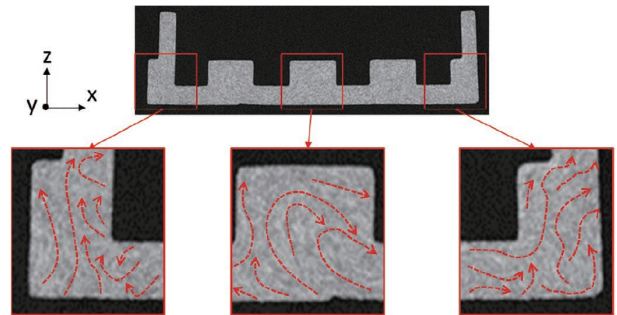


図 3 原理モデルの X 線 CT 画像

したがって、ガラスフィラー強化樹脂部品の熱変形を予測するためには、ガラスフィラーの配向分布を把握する必要がある。

### 2.2 熱変形解析の計算理論

次に熱変形解析で用いられる構造解析の計算理論を説明する。構造解析は解析対象を図 4 に示すような格子状の要素に細分化し下記(1)式に示す材料の剛性マトリックスを各要素に割り当てて計算される<sup>1)</sup>。

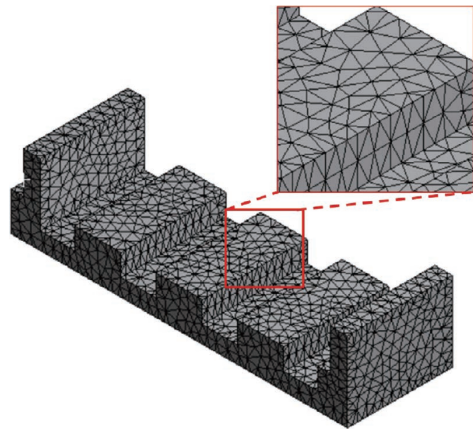


図 4 格子状の要素

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$\varepsilon_{ij}$  : ひずみ、 $\sigma_{ij}$  : 応力

$E_i$  : ヤング率 (Pa)  $\nu_{ij}$  : ポアソン比

$G_{ij}$  : 横弾性定数 (Pa)

ここで、i : 作用面の法線方向、j : 応力の作用方向を示す。

図 5 に ij の方向を示す。

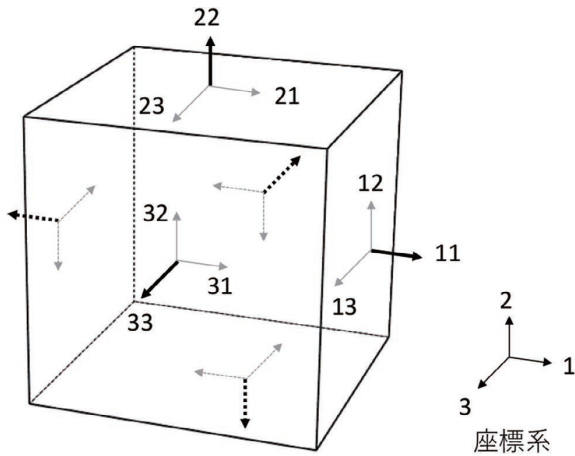


図 5 座標系

ガラスフィラーの配向が一様な場合は、要素毎に割り当てる(1)式で示す剛性マトリックスが各要素で同様の数式となるため、温度が上昇したとき、要素毎の膨張率は同じとなり全体として単純膨張として計算される。

一方で、ガラスフィラーの配向が一様でない場合は、樹脂部品の配向性に沿った係数の異なる剛性マトリックスを要素毎に割り当てることになる。そのため温度上昇によることで要素毎の膨張率が異なり、単純な膨張のみでなくそり等の変形が計算される。

### 2.3 ガラスフィラーの配向性を考慮した解析手法

ガラスフィラーの配向性を考慮した解析を実施するためには、配向性に沿った材料特性データを作成し、作成したデータに基づく熱解析を実行する必要がある。解析手順を図 6 に示す。

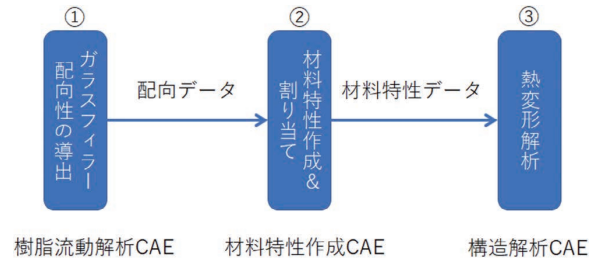


図 6 ガラスフィラー配向性を考慮した熱変形解析フロー

- ① ガラスフィラー配向性の導出  
樹脂流動解析<sup>2)</sup> を行い成型時のガラスフィラーの配向分布を求める。
- ② 材料特性作成  
樹脂流動解析より受け取ったガラスフィラーの配向データから、要素毎の配向に沿った材料特性データを CAE で作成し各要素に割り当てる。
- ③ 熱変形解析  
受けとった要素毎の配向性をもった材料特性データをもとに、構造解析 CAE にて熱変形解析を実施する。

## 3. 解析手法の検証

解析手法の検証として、図 6 に示す解析フローを実施し、加熱前後での変形量を求める。解析は、ガラスフィラーの配向が一様でない場合とガラスフィラーの配向が一様な場合で実施する。なお、配向が一様な場合の解析は、配向性を考慮する必要が無いため、図 6 に示す解析フロー③の構造解析 CAE のみで実施する。

### 3.1 解析モデルと条件

表 1 にガラスフィラーの配向性を考慮した解析を実施するための解析条件を示す。

表 1 解析条件

項目	条件
解析モデル	図 2 の原理形状モデル
材料特性	図 1 の異方性材料
温度条件	加熱前 25 度 加熱後 120 度
測定点	図 7 に示す 9 点

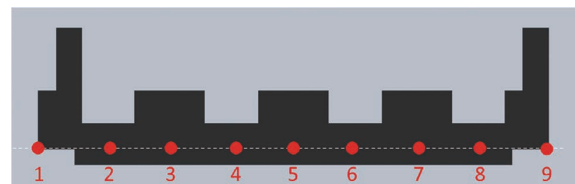


図 7 測定点



測定点における測定は、加熱前に対する加熱後の変位を変形量として計測する。

### 3.2 解析結果

#### 1) ガラスフィラーの配向性解析

図8に樹脂流動解析(図6-①)を行った結果であるXZ平面の断面におけるガラスフィラーの配向図を示す。色が赤いほど断面XZに沿った配向(以下強配向)であり、緑はランダムな配向、青に近づくほど断面XZ以外の配向(以下弱配向)になっていることを示している。図8からわかるように、ガラスフィラーの配向は部位によって一定ではないことが確認できる。

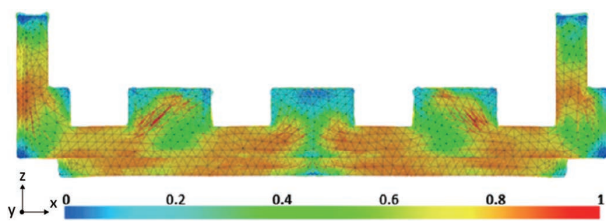
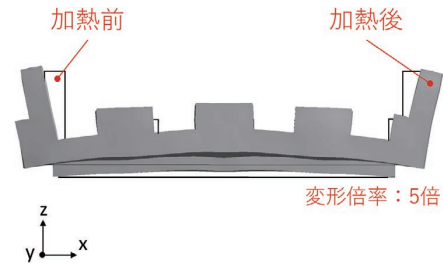


図8 ガラスフィラーの配向データ

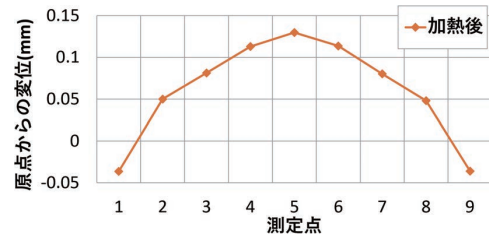
#### 2) 熱変形解析

ガラスフィラーの配向解析の結果をもとに材料特性作成(図6-②)を行い、ガラスフィラーの配向に合わせて材料特性を各要素に割り当てた上で構造解析CAE(図6-③)にて熱変形解析を実施する。

図9にガラスフィラーの配向性が一様でない場合(図8の配向データを用いた場合)、図10にガラスフィラーの配向性一様な場合の解析結果を示す。図9、図10において、左図は加熱前後の解析による形状変化の結果を示しており(変形度合いをわかりやすくするため変形倍率を5倍にしている)、右図は加熱後の各測定点におけるZ軸方向の変形量のプロットグラフを示している。ガラスフィラーの配向性が一様でない場合は、左右の上部先端になるほど外側への変形量は大きくなっており、また中央部が上にそっていることが確認できる。一方、配向性が一様な場合は、単純膨張した形状となっており、そりは生じていない。

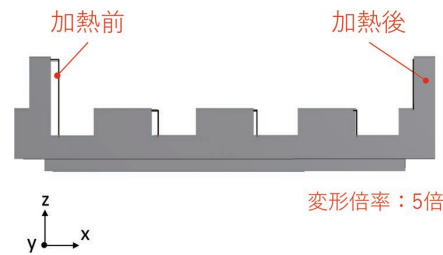


(a) 加熱前後の解析結果

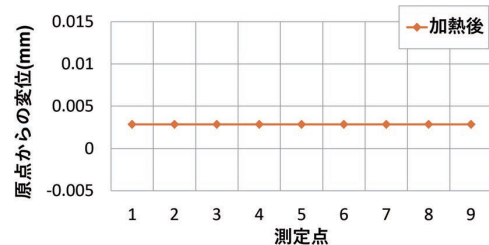


(b) 加熱後のZ方向の変位量

図9 ガラスフィラー配向性が一様でない場合の解析結果



(a) 加熱前後の解析結果



(b) 加熱後のZ方向の変位量

図10 ガラスフィラー配向性が一様な場合の解析結果

### 3.3 実測との比較

試作した図2の原理形状モデルの熱変形量の計測を行い、解析結果の妥当性確認を行う。実測方法は温度変更ができ、温度を一定に保つことができるボックスの中に試料を設置し、光学式カメラによる撮影により加熱前後の変形量を測定している。

図11に解析と実測の加熱後の各測定点のプロットグラフを示す。

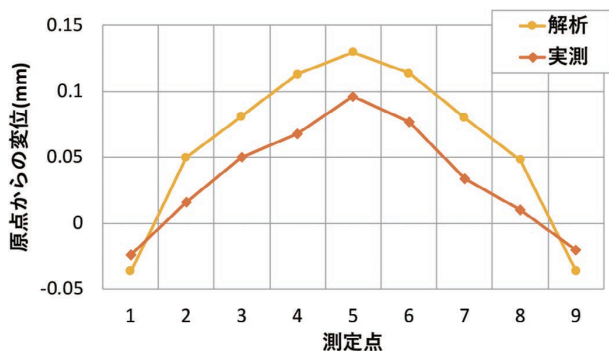


図 11 解析結果と実測結果の比較

解析値と実測値の変形量の絶対値は異なっているが、端部はマイナス方向で中央部に向かうに従いプラス方向に変形しており、変形形状が同様の傾向となっていることが確認できた。

本結果より、ガラスフィラーの配向を求め、配向に沿った材料特性を割り当てて熱変形解析するという解析手法が、そり等の変形状態を相対的に再現可能であることの検証を得た。

#### 4. 実機での有効性確認

代表的な電子機構部品であるリレーに、今回構築した解析技術を展開し有効性を確認する。図 12 にリレーの代表構造を示す<sup>3)</sup>。今回の検討では一般的にガラスフィラー強化樹脂材を使用しているリレーのベースを検証部品として採用し、解析手法の有効性と変形量のガラスフィラー配向性による予測可能性についての検証を行う。

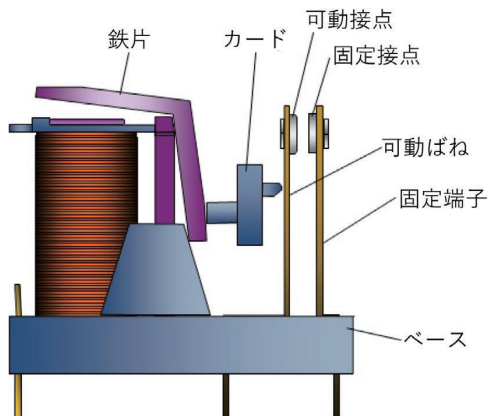


図 12 リレーの代表的構造

検証は、ガラスフィラーの配向に変化を持たせるように形状の工夫を行った 2 種類のリレーベースモデルの熱変形状態について、解析と実機にて比較する。

##### 4.1 解析条件

表 2 に示す条件でリレーベース部品の熱変形評価を実施する。

表 2 解析条件

項目	解析条件
解析モデル	図 13 に示すリレーベースモデル
材料特性	図 1 の異方性材料
温度条件	加熱前 25 度 加熱後 120 度
測定点	図 14 に示す 4 点

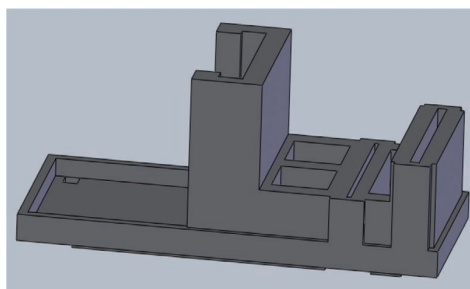


図 13 リレーベースモデル

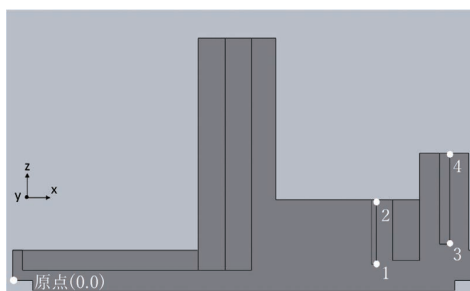


図 14 測定点 (断面図)

測定点①：

原点から 1、2 までの距離 (可動ばね挿入位置)

測定点②：

原点から 3、4 までの距離 (固定端子挿入位置)

##### 4.2 解析結果

2 種類のモデルの樹脂流動解析で得られた XZ 断面におけるガラスフィラーの配向データを図 15 に示す。図 8 と同様に XZ 面に対し、色が赤いほど強配向、緑はランダム配向、青に近づくほど弱配向となる。図 15 に示すように、モデル A とモデル B で場所毎の配向性が異なるモデルであることを確認できた。

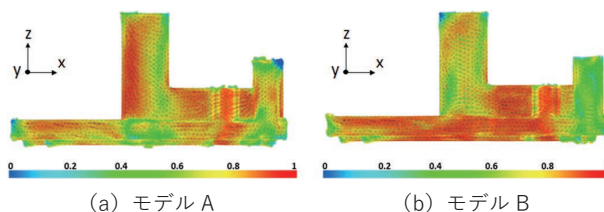
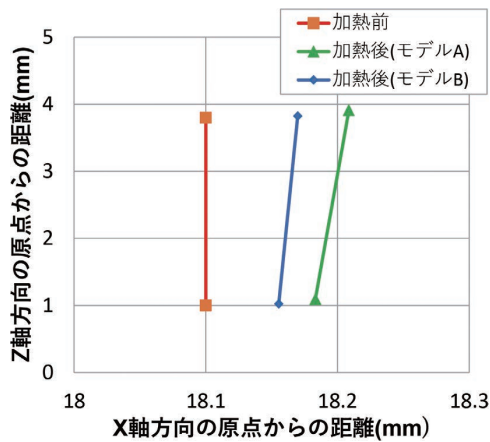
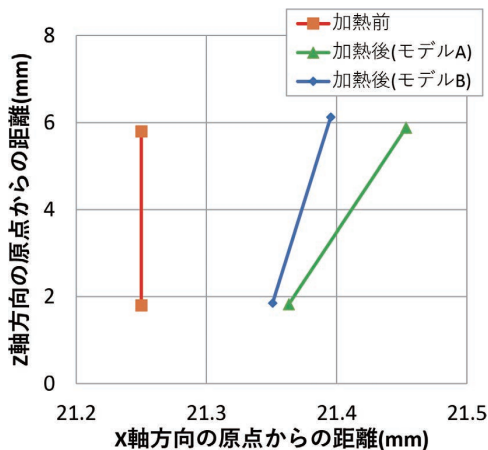


図 15 配向データ

次にこの2種類の配向を持った形状の熱変形解析を実施する。図16にモデルA形状とモデルB形状の熱変形による寸法変化の解析結果をグラフに示す。



(a) 測定点①の原点からの距離



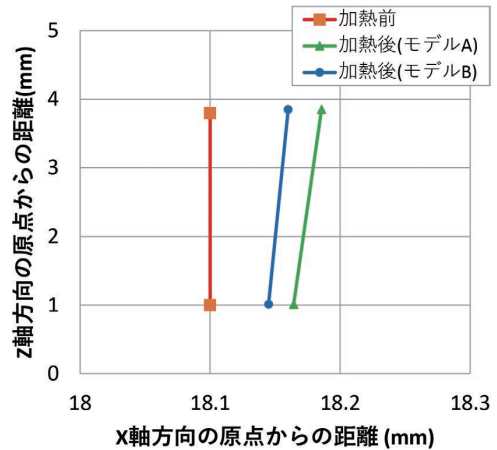
(b) 測定点②の原点からの距離

図16 解析による形状検討結果

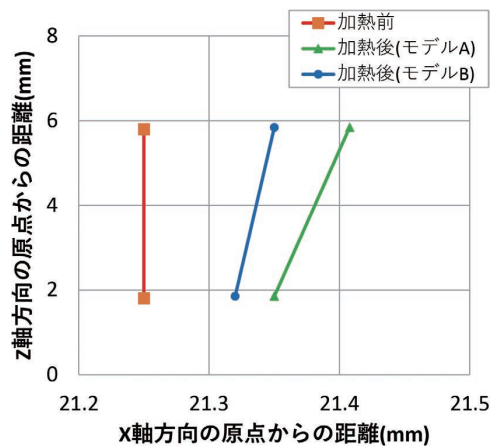
モデルAとモデルBを比較すると、熱変形による寸法変化が測定点①、測定点②ともに大きく異なることが確認できる。測定点①においては、x軸方向の変位量がモデルBの方が小さく、測定点②においては、さらに、z軸方向の傾きがモデルBの方が小さい。

### 4.3 実機での変形傾向確認

図15の配向性を持つ2種類の形状を試作し、図14と同様の測定点で変形量を実測し、実機と解析での変形傾向の比較を行う。図17に2種類の形状の実測結果を示す。試作品においても測定点①でのX軸方向の変位量、測定点②でのZ軸方向の傾き、共に解析結果と同様の傾向になることが確認できた。



(a) 測定点①の原点からの距離



(b) 測定点②の原点からの距離

図17 実測検証結果

本結果より、実機（リレーベース部品）形状においても解析手法が有効であること及び熱変形量の予測がガラスファイバーの配向性を考慮した解析で可能となることを示せた。

### 4.4 考察

測定点①、測定点②ともにモデルBがX方向の変位量、Z軸方向の傾きが小さい結果になったことについて考察する。

測定点①は上下方向の変位量の差が小さいため単純な膨張の違いによるものと考えられ、測定点②は上部の変位量が大きいことによるものと考えられる。表3に図15より得られるモデルA、モデルBの配向性の相対的な状態比較を示す。

表3 配向データの相対比較

比較箇所	モデル A	モデル B
底面	ランダム～強配向	強配向
測定点①	強配向	強配向
測定点②	弱～強配向	ランダム配向

測定点①については、単純な膨張率の違いとなるが、底面の配向と測定点①付近の配向が影響する。このうち測定点①付近の配向はモデルAとBでともに強配向となり違いはないため影響は小さいと考える。一方、底面の配向に違いがありモデルBは強配向分布が多くなっている。これらから、底面の配向がX軸方向の強配向を持っていることで、線膨張率が小さくなり、モデルBのX軸方向の変位量が小さくなったと考察する。

測定点②におけるZ軸方向の傾きについては、測定点②付近の配向が影響しており、モデルBはランダム配向となっている。ランダム配向の場合は各方向に線膨張率を持つこととなり、結果として単純な膨張を示し、そりが発生しにくくなるため、モデルBの方がそりにくくなっていると考察する。

## 5. むすび

今回の検討では、ガラスフィラーの配向性を考慮した解析手法の構築検討を行った。その結果、メカニカルリレーのベース部品のような複雑形状においても解析技術の有効性を確認することができた。

これにより、実際の使用条件により近い樹脂部品の熱変形による部品の寸法変化が予測可能になることで、設計段階での最適化が可能となり開発期間の短縮につながる事が期待される。

なお、今後は、他の成形部品においても熱変形解析で各成形部品が受ける熱の影響を明確にしていくことで、リレー全体としての熱変形予測技術の向上につなげていく。

## 参考文献

- 1) 橋本学, “第11回 FrontISTR 研究会 FrontISTR による弾性解析 (直交異方弾性体)”. FrontISTR 研究会. [https://www.frontistr.com/seminar/140730/orthotropic\\_elastic\\_material.pdf](https://www.frontistr.com/seminar/140730/orthotropic_elastic_material.pdf), (参照 2020-01-06)
- 2) Phelps, J. H.; Tucker, C. L. A model for fiber length attrition in injection-modeled long-fiber composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2013, Vol.51, p.11-21.
- 3) 一般社団法人 日本電気制御機器工業会, “制御機器の基礎知識 (使い方・選び方) リレー 編 総論”. 2018. [https://www.neca.or.jp/wp-content/uploads/CU\\_Ry\\_2%20Sou\\_1803.pdf](https://www.neca.or.jp/wp-content/uploads/CU_Ry_2%20Sou_1803.pdf), (参照 2020-01-06).

## 執筆者紹介



早田 和也 SODA Kazuya

エレクトロニック&メカニカルコンポーネンツ  
ビジネスカンパニー  
事業統轄本部 リレーアプリ事業部 設計部  
専門: 電気工学



横手 康浩 YOKOTE Yasuhiro

エレクトロニック&メカニカルコンポーネンツ  
ビジネスカンパニー  
事業統轄本部 リレーアプリ事業部 設計部  
専門: 計算力学



竹ヶ原 郁夫 TAKEGAHARA Ikuo

エレクトロニック&メカニカルコンポーネンツ  
ビジネスカンパニー  
事業統轄本部 リレーアプリ事業部 設計部  
専門: 計算力学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

# アーク遮断現象を定量化するシミュレーション技術

森地 高大, 濱 開, 井戸田 修一, 田代 真一, 田中 学, Anthony Bruce MURPHY

近年、環境問題への関心の高まりから再生可能エネルギーの高効率化が急務とされている。効率を高めるためにシステムは高電圧あるいは高電流化が進んでいる。したがってシステムに利用されるリレーにおいても高容量遮断性能が求められるようになった。これを実現するためには、遮断時に接点間に発生するアーク放電のメカニズムを理解し、制御方法を確立しなければならない。

そこで本検討では、アーク挙動を定量的に評価し、アーク遮断メカニズムを詳細に把握するため電磁熱流体モデルを用いたアークシミュレーション技術の構築を試みた。

アーク挙動のシミュレーション結果と実測との比較により、高い再現性があることを確認した。さらに構築したシミュレーション技術を用いて、磁気消弧におけるアーク遮断メカニズムを明らかにした。この技術はアーク放電のメカニズム解明に役立ち、今後のアーク挙動の制御方法確立に貢献できる。

## Simulation Technology to Quantify Arc Interruption Phenomena

MORICHI Takahiro, HAMA Kai, ITODA Shuichi, TASHIRO Shinichi, TANAKA Manabu and Anthony Bruce MURPHY

In recent years, the growing interest in environmental problems stimulates urgent spread and efficiency improvement of renewable energy. The energy efficiency makes rated voltage and current of electrical devices higher and the devices require higher interruption capability of relays. In order to achieve higher interruption capability, we have to understand the mechanism of arc discharge generated between electrical contacts at arc interruption and establish control methods for arc interruption.

In this study, we tried to construct arc plasma simulation technology based on magnetohydrodynamics model in order to measure arc behavior quantitatively and figure out arc interruption mechanism in detail.

We could replicate arc behavior measurement by this CAE technique. Furthermore, we could reveal the mechanism of magnetic blow-out arc interruption. We are going to contribute to the elucidation of arc plasma mechanism and control method of arc behavior.

### 1. まえがき

地球温暖化などの環境問題に対する意識の高まりや原油の高騰などを背景に、再生可能エネルギーや電気自動車の市場が拡大している。それらに用いられるエネルギーマネジメント機器やバッテリー制御回路においては、高絶縁性と低抵抗の観点から直流リレー（以下、リレーと呼ぶ）が使用されている。

リレーでは開極時に接点間で絶縁破壊が起こり、アーク

放電（以下、アークと呼ぶ）が発生する。アークとは空気などの気体が数千度以上の高温<sup>1)</sup>となり気体分子が電離および解離することで気体の電気伝導率が増加し<sup>2)</sup>、気体中に電流が流れる現象である。このとき電流によるジュール発熱でアーク導電経路の温度が維持されることにより、アークが継続する。アークが継続するとアークにより高温状態となり、筐体内部の損傷や接点の消耗が起こる。これら機器の破損は火災などの重大事故につながる可能性がある。近年では数百ボルトの高電圧あるいは数百アンペアの大電流での遮断が求められることが多く、従来にも増して

Contact : MORICHI Takahiro Takahiro.Morichi@omron.com

安全かつ確実にアークを遮断できることが重要となっている。

限られたスペースで直流の高電圧あるいは大電流を遮断するためには、電極の開閉時に生じるアーク挙動を予測し制御することが重要な技術課題となる。アーク挙動を左右する要因には、アーク発生時の温度場や圧力場、アークに発生するローレンツ力<sup>3)</sup>などにより生成される流れ場などがある。

これまでアーク挙動を把握するため電気波形計測や高速カメラによる観察が行われてきた。しかしながらそれらの観察ではアーク挙動を左右する要因である温度場や圧力場、流れ場を把握することは難しい。そこでこの課題を解決するため CAE (Computer Aided Engineering) によるシミュレーション技術に着目した。CAE を用いることにより温度場や圧力場、流れ場を解析でき、これらがアーク挙動にどのような影響を与えているか定量的に評価できる。これはアーク遮断に至るまでのメカニズムを把握することにつながり、リレーの性能を高めていく上で非常に効果的である。

そこで今回、CAE を用いて熱流体解析と電磁界解析を連成させたアークシミュレーション技術の構築に取り組んだ。シミュレーションする内容は接点开閉時に発生するアーク挙動であり、汎用の熱流体解析ソフトウェアの標準機能をベースに構築した。

本稿では、その取り組みについて、以下の構成で述べる。

第 2 章では、アーク挙動を記述するための仮定および支配方程式について述べる。

第 3 章では、解析モデルの詳細設定および、実測結果との比較をもってアークシミュレーション技術の妥当性を検証した。

第 4 章では、磁束密度を高くするほどアーク遮断時間が短くなる実験事実に着目し、複数の磁束密度の条件における解析結果を元に磁束密度とアーク継続時間との関係性について考察した。

第 5 章では、本解析モデルにおける課題と今後の展望について述べる。

## 2. アークシミュレーション手法

### 2.1 アークの取り扱い

アークシミュレーション技術を構築するにあたっての主な仮定を以下に示す。

- (1) 計算空間のすべての箇所でも局所熱平衡 (LTE=Local Thermodynamic Equilibrium) が成立する。すなわち、電子温度、ガス温度、励起温度などの温度は全て等しく一温度で記述できる。電離および解離など

の反応はすべて平衡状態となっている<sup>4)</sup>。

- (2) 流れ場は乱流 (Transition SST モデル) を考慮する。
- (3) 電極は溶融・変形しないものとする。

ここで局所熱平衡モデルについて説明する。アーク内部では種々の解離、励起、電離、再結合が同時に起こっているが、1 気圧以上の高気圧アークの場合はほぼ熱平衡状態にあり、アーク内の電子、中性粒子、イオンの温度は等しいと考えてよい。ただし、アーク内の各位置で平衡状態は異なるため、このような状態を局所熱平衡と呼ぶ<sup>5)</sup>。

### 2.2 支配方程式

局所熱平衡を仮定することにより、アークは電磁熱流体として扱うことができる。アークの電磁熱流体としての挙動は以下の質量・運動量・エネルギーの保存則により記述できる<sup>6)</sup>。気体の熱力学・輸送特性は温度に依存した物性値として方程式内で取り扱うことができる。

質量保存則

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

運動量保存則

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{j} \times \vec{B} \quad (2)$$

エネルギー保存則

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \vec{u}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \vec{j} \cdot \vec{E} - Q \quad (3)$$

電流保存則

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \varphi = 0 \quad (4)$$

オームの法則

$$\vec{j} = -\sigma \nabla \varphi = \sigma \vec{E} \quad (5)$$

ベクトルポテンシャル

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu_0 \vec{j} \quad (6)$$

磁場

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (7)$$

電気回路の式 (キルヒホッフの法則)

$$V_0 = Ri(t) + V_{arc}(t) \quad (8)$$

ここで、 $\rho$ : 密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\vec{u}$ : 速度ベクトル [m/s]、 $t$ : 時間 [s]、 $p$ : 圧力 [Pa]、 $\vec{\tau}$ : 粘性応力テンソル [Pa]、 $\vec{g}$ : 重力加速度ベクトル [m/s<sup>2</sup>]、 $\vec{j}$ : 電流密度ベクトル [A/m<sup>2</sup>]、 $\vec{B}$ : 磁束密度ベクトル [T]、 $h$ : エンタルピー [J/kg]、 $k$ : 熱伝導率 [J/m·K]、 $T$ : 温度 [K]、 $\vec{E}$ : 電界ベクトル [V/m]、 $Q$ : 放射損失 [W/m<sup>3</sup>]、 $\sigma$ : 電気伝導率 [S/m]、 $\varphi$ : 電位 [V]、 $\vec{A}$ : ベクトルポテンシャル、 $\mu_0$ : 真空の透磁率 [H/m]、 $V_0$ : 電源電圧 [V]、 $R$ : 負荷抵抗 [Ω]、 $i(t)$ : アーク電流 [A]、 $V_{arc}(t)$ : アーク電圧 [V] をそれぞれ表している。

本解析モデルでは電極を取り囲む空間 (以下、消弧空

間)に充填する気体は空気を想定している。空気の質量密度、粘度、熱伝導率、比熱、電気伝導率、放射損失は、THERMAL PLASMA で報告されたものを用いた<sup>7)</sup>。

### 3. 解析モデルの妥当性検証

#### 3.1 解析モデルについて

本アークシミュレーション技術では、直流アークを想定している。図1に示す直流電気回路の接点部分を取り出し、図2に示す解析モデルを作成した。解析モデルに用いた設定値を表1に示す。

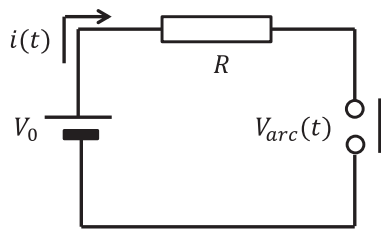


図1 直流電気回路

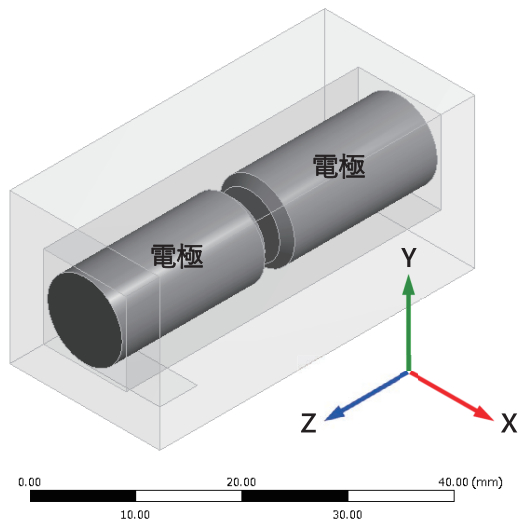


図2 解析モデル

表1 解析モデルに用いた設定値

項目	設定値
空間サイズ	42 mm × 20 mm × 20 mm
電極長さ	20 mm
電極径	Φ 5 mm
接点間距離	2 mm
負荷条件	200 V 60 A
磁束密度	+Y 方向に一様磁束

直流アークの遮断では消弧空間に磁石を配置し、ローレンツ力でアークを伸長させて遮断する磁気消弧が一般的で

ある。それに倣い、本解析モデルでも消弧空間内に一様磁束を与えた。

#### 3.2 アーク挙動の再現

図3に磁気消弧時のアーク形状を示す。図3の上段がCAEでのアーク温度コンター図(温度5000K以上)、下段が高速度カメラで実測したアーク形状である。接点間でのアーク発生からアーク遮断完了までのアーク形状変化の解析結果は実験結果をよく再現している。

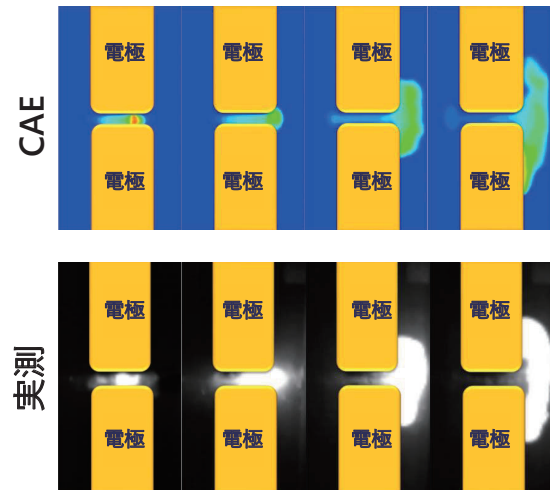


図3 磁気消弧時のアーク形状

図4にアーク遮断時のアーク電流およびアーク電圧波形を示す。アーク電圧の上昇やアーク電流の減少についても解析結果は実験結果をよく再現している。これらの比較結果より、アーク挙動を再現できたと判断した。

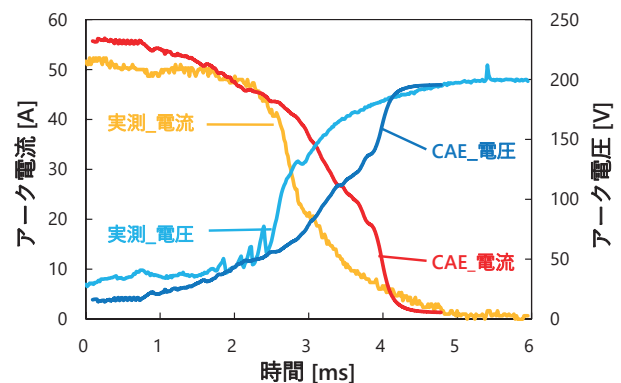


図4 アーク遮断時のアーク電流およびアーク電圧波形

図5に温度場と圧力場と流れ場のコンター図を示す。アークシミュレーション技術の構築により、これまで実測で見る事が難しかったアークの3次元挙動や温度場、圧力場、流れ場などを可視化できるようになった。

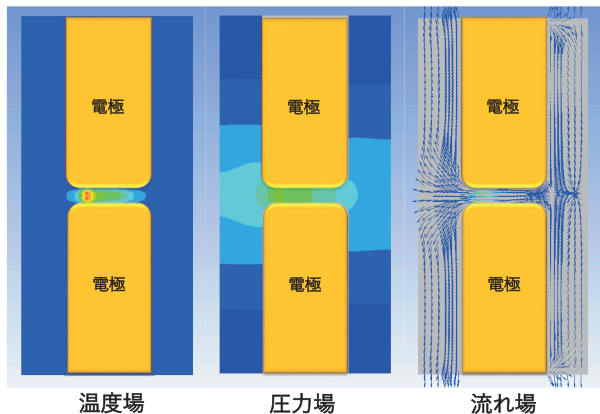


図5 温度場と圧力場と流れ図のコンター図

## 4. アーク磁気消弧メカニズムの解明

### 4.1 遮断性能向上の検討

先に述べたように高容量あるいは大電流での直流アーク遮断方法としては磁気消弧が一般的である。磁束密度を高くすることで早期にアーク遮断できることが実験事実として知られている。

そこで本検討では磁束密度とアークの挙動との関係性を把握するために4水準(20 mT、40 mT、70 mT、85 mT)の磁束密度にてアーク放電解析を行った。

### 4.2 アーク継続時間とアーク形状の関係性

図6に磁束密度とアーク継続時間の関係を示す。図より磁束密度が大きくなるにつれ、アーク継続時間が短くなること分かった。磁束密度とアーク継続時間の関係は線形的減少ではないことから、ある一定の値に収束していくことが予測される。これより、永久磁石を選定する際は一定以上の磁束密度を確保する必要があるが、ある閾値を超えると遮断時間が一定値に収束していくと考えられる。

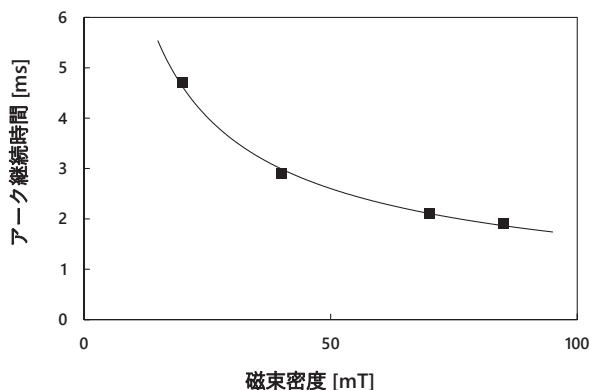


図6 磁束密度とアーク継続時間の関係 (CAE)

今回アークシミュレーション技術の構築により実測では困難とされる3次元データ取得が容易となった。そこで

アーク遮断において密接に関係するアーク形状に着目した。特にアーク長及びアークの太さ(以下、アーク径)は、アークの抵抗率に大きく関わるため関係性を明らかにする必要がある。

図7に磁束密度とアーク長の関係を示す。CAEによる結果では各磁束密度における遮断直前の温度場の等位面(5000K)からアーク長を算出した。また実測では画像より発光強度の高い部分から中心を導出し、その中心線の長さからアーク長を算出した。図7より解析および実測ともに磁束密度の増大に伴い、アーク長が短くなる傾向を確認した。

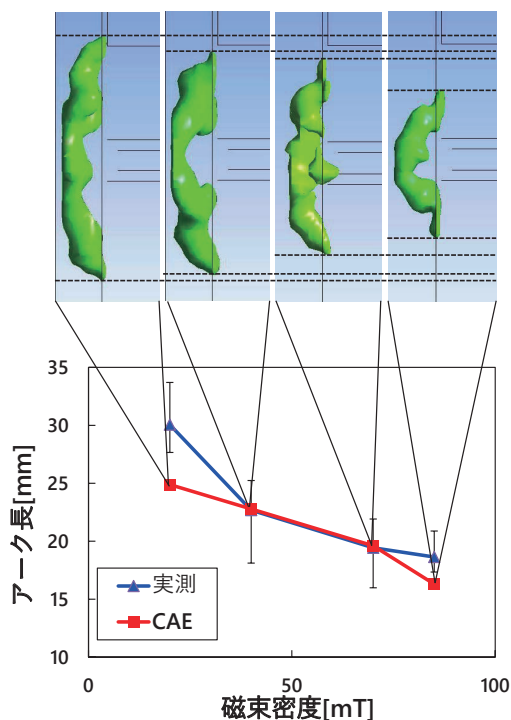


図7 磁束密度とアーク長の関係

アーク径の定義を図8に示す。アーク径の定義はアーク(温度5000K以上)を端子中心軸に対して垂直方向で切断した断面積を円形状に換算した際の直径とする。

図9に磁束密度とアーク径の関係を示す。ここでは各磁束密度における遮断直前のアーク径とした。図9より磁束密度が大きくなるに伴い、アーク径は小さくなる傾向を確認した。

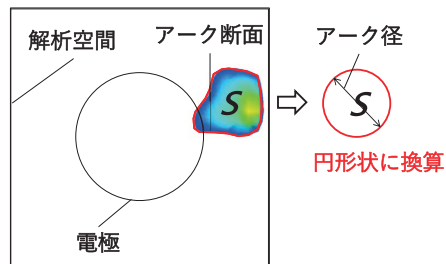


図8 アーク径の定義



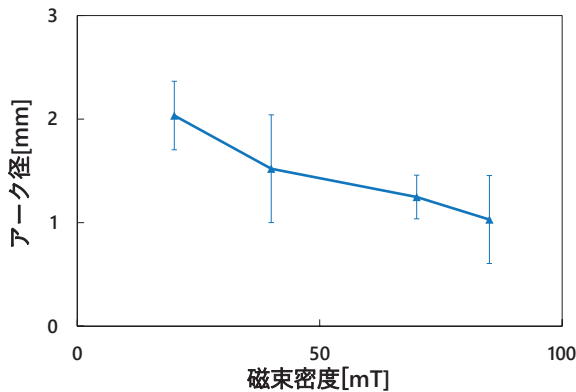


図9 磁束密度とアーク径の関係 (CAE)

### 4.3 考察及びメカニズム解明

前節より磁束密度を大きくすると、アーク長は短く、アーク径は小さくなることを解析上明らかにした。一般的にアークを遮断するためには、アーク抵抗  $R_{arc}$  を大きくし、アーク電圧を電源電圧  $V_0$  まで増加させる必要があることが知られている<sup>8)</sup>。これまでは負荷電流・電圧から遮断に必要なアーク長を推定してきた<sup>9)10)</sup>。アークを伸長させることで、アーク抵抗が大きくなり最終的にアークを遮断できた。

しかし磁気消弧では磁束密度が大きくなると、アーク長が短くなることが実測および解析結果から分かっており、負荷電流・電圧・アーク長のみで磁気消弧の遮断メカニズムを説明できない。そこでアークシミュレーション技術の構築により取得可能となったアーク径及び温度場の結果を用いて磁気消弧の遮断メカニズムについて考察をおこなった。

アーク抵抗  $R_{arc}$  は以下の式で表すことができる。

$$R_{arc} = \frac{l}{\sigma S} \tag{9}$$

ここで、 $\sigma$ : 電気伝導率 [S/m]、 $l$ : アーク長 [m]、 $S$ : アーク断面積 [m<sup>2</sup>] をそれぞれ表している。

この式から、磁束密度によりローレンツ力を大きくすることで、アーク径の低減、すなわち、アーク断面積の低減に伴うアーク抵抗  $R_{arc}$  の増大により短いアーク長での遮断が可能になったと考えられる。図10に磁束密度がアーク径に与える影響メカニズムを概略図で示す。磁束密度が大きくなるとアークに働くローレンツ力が大きくなり移動速度が大きくなる。そのため図10のようにアークの周囲は常に低温の空気に晒されてアーク径が緊縮する熱的ピンチ効果<sup>11)</sup>が働きやすくなっている。

熱的ピンチ効果によりアーク断面積が小さくなりアーク抵抗  $R_{arc}$  が増大して、迅速にアーク遮断に至ったと考えられる。

本検討では今回構築したアークシミュレーション技術を用いることでアーク磁気消弧メカニズムを定量的に明らかにした。

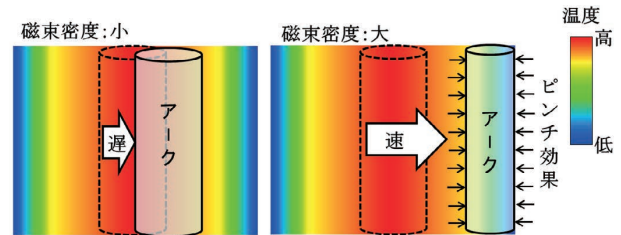


図10 磁束密度がアーク径に与える影響メカニズム

## 5. むすび

従来の実測評価で把握できていなかった温度場や圧力場、流れ場などを定量的に評価することがリレーの性能を高める上で効果的と考え、アークシミュレーション技術に取り組んだ。2次元断面でのアークの挙動の実測結果およびアーク遮断時の電流・電圧波形との比較をもって妥当性を検証し、アークシミュレーション技術の構築を完了した。

本技術によりアークの3次元挙動や温度場、圧力場などの可視化が可能となった。本検討では磁束密度を大きくすることで、遮断時間が短くなるメカニズムを考察した。アークにかかるローレンツ力が大きくなることで、アークの移動速度が上がりアーク周囲が冷却される。それによりアーク断面積が小さくなることでアーク抵抗が増大しアーク遮断時間が短くなったと考察した。

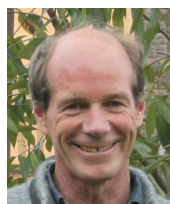
本稿ではアーク形状の3次元データと温度場を中心にアーク遮断のメカニズムについて検証を行った。今後は圧力場・流れ場がアーク挙動に与える影響についても検証し、遮断性能向上につながる制御方法の確立に取り組む。これにより、高電圧あるいは大電流のアークを安全かつ確実に遮断できるリレーを開発し、再生可能エネルギー社会の実現に貢献していく所存である。

## 参考文献

- 1) Y. Aoyama *et al.*, Spectroscopic analysis for the arc quenching effect of ablation gas on arc immobility phenomena. Thirty-Sixth IEEE Conference on Electrical Contacts, and the Fifteenth International Conference on Electrical Contacts. Aug. 1990
- 2) Y. Cressault *et al.*, Influence of metallic vapours on the properties of air thermal plasmas. Plasma Sources Sci. Technol. 17. 2008, p.1-9. IOPscience,.
- 3) H. Miyagawa *et al.*, Effect of Magnetic Blow-Out and Air Flow on Break Arcs Occurring between Silver Electrical Contacts with Copper Runners. IEICE TRANS. ELECTRON., Sep. 2017, VOL. E100-C, No9.
- 4) 渡辺隆行, 田代真一. 熱プラズマの解析に用いられる電磁熱流体モデル. J. Plasma Fusion Res. 2011, Vol.87, No.8, p.514-521.
- 5) 電気学会放電ハンドブック出版委員会. 放電ハンドブック.

電気学会. 2003, p.1945.

- 6) 田代真一, 田中学, 中田一博, 興石房樹, 鈴木啓一, 山崎圭. Ar-He 混合ガスタングステンアークにおける熱輸送特性の数値シミュレーション. 高温学会誌. 2006, Vol.32, No.1, p.69-73.
- 7) Maher I. Boulos *et al.*, THERMAL PLASMA Fundamentals and Applications. Vol.1, PLENUM PRESS, 1994, 452p.
- 8) 森口裕亮, 榎本英樹, 山本律, 福田純久, 尾崎良介, 池田陽司. EV・HEV 用大電流メインリレーの小型化技術. Panasonic Technical Journal. May 2015, Vol.61, No.1, p.72-76.
- 9) H. Ayrton. The Electric Arc. New York: D. Van Nostrand, 1902, 528p.
- 10) 佐藤充典. 電気接点—材料と特性. 日刊工業新聞社, 1984, 191p., ISBN-10:4526017299.
- 11) M. Tanaka *et al.*, 溶接アークの熱的ピンチ効果に関する一考察. 溶接学会論文集. 2007, Vol.25, No.2, p.336-342.



**Anthony Bruce MURPHY**  
CSIRO Manufacturing  
専門: 熱プラズマモデリング  
所属学会: 英国物理学会 他

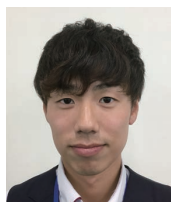
---

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

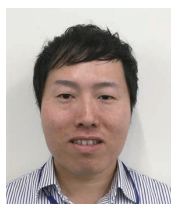
## 執筆者紹介



**森地 高大 MORICHI Takahiro**  
エレクトロニック&メカニカルコンポーネンツ  
ビジネスカンパニー 事業統轄本部  
技術統括部 要素技術部  
専門: 機械工学  
所属学会: IEEE



**濱 開 HAMA Kai**  
エレクトロニック&メカニカルコンポーネンツ  
ビジネスカンパニー 事業統轄本部  
技術統括部 要素技術部  
専門: 流体工学



**井戸田 修一 ITODA Shuichi**  
エレクトロニック&メカニカルコンポーネンツ  
ビジネスカンパニー 事業統轄本部  
技術統括部 要素技術部  
専門: 電気工学  
所属学会: 電気学会



**田代 真一 TASHIRO Shinichi**  
大阪大学  
接合科学研究所  
専門: 熱プラズマモデリング、アーク溶接  
所属学会: 溶接学会 他



**田中 学 TANAKA Manabu**  
大阪大学  
接合科学研究所  
専門: 熱プラズマ診断、アーク溶接  
所属学会: 溶接学会 他

# 商品開発における技術要素間のトレードオフを解消するバランス設計手法の革新

池田 正哲

商品開発においては、開発の後工程で不具合が発生すると設計変更が必要となり、開発リードタイムやコストの超過、更には品質の低下を招くことが共通的な問題になっている。発生する不具合は多岐にわたるが、複数の技術要素間のトレードオフが解消しきれないまま、後工程にリスクが持ち込まれることが、主要な原因の1つとして挙げられる。

本論文では、複数の技術要素間のトレードオフを商品開発の上流で解消するバランス設計手法として、設計最適化手法の活用を検討した。検討においては、実際の設計課題を対象に試行し、CAEと連携したコンピュータによる自動計算により、2週間で約1800件の設計案を検証すると共に、これまでの機能特性を超える最適解の抽出を実現した。試行を通じて、バランス設計を実現できる確証を得たことに加えて、従来の勘・コツ・経験ベースの設計では抽出しきれなかった最適解を抽出できる可能性を得た。

## Innovation of the Method for Balancing Trade-off Requirements in Product Design Process

IKEDA Masaaki

One of the common subject among the product development is the excess of development lead-time and cost, and also the degradation of the products due to the redesign work by the problems occurred at later part of the product development process. There are various problems, but in this paper, the problem caused by the risks of unbalanced trade-off between key requirements is targeted to be solved.

As the solution, the design optimization method is applied to realize the trade-off balancing design method. The trial was held on real trade-off design theme and as the result, 1800 designs were comprehensively evaluated in two weeks by automatic computer calculation. From those designs, the optimally balanced design which exceeds the performance of the conventional product was found. And as the result, the realization of the trade-off balancing design and the possibility to find optimal design, which is hardly found by conventional design method based on experience and intuition, are confirmed.

### 1. まえがき

商品開発においては、後工程で不具合が発生すると、設計変更が必要となり、開発リードタイムやコストの超過、更には品質の低下を招くことが共通的な問題になっている。発生する不具合は多岐にわたるが、複数の技術要素間のトレードオフが解消しきれないまま、後工程にリスクが持ち込まれることが、主要な原因の1つとして挙げられる<sup>1)</sup>。

この原因の背景には、2つの点が考えられる。第1に、近年、商品の高性能化や高機能化が急速に進み、限られた設計自由度の中で、新技術の活用、より詳細なすり合わせ

といった高度な設計力が必要となっていることである。これまで開発現場では、技術要素別に設計を分業化（例：メカ・エレキ・ソフトなど）し、個々の設計力を洗練化することで対応してきたが、技術要素間のすりあわせが不足しがちになっている<sup>1)</sup>。

第2に、商品開発に必要な開発リソース（期間、工数、経費など）の確保が難しくなっていることである。これまでは、人手による設計計算や、実機試作による検証を行っても十分な量の設計検証ができていた。しかし、近年では、検討が必要な技術要素・パラメータの数が膨大になり、従来の設計手法では対応しきれず、設計品質の低下を招く要因にもなっている<sup>1)</sup>。

Contact : IKEDA Masaaki masaaki.ikeda@omron.com

近年では、CAE (Computer Aided Engineering の略) などのコンピュータにより設計検証を行う技術が発達している。これらの技術活用により、個々の技術要素の設計に対し、手計算では対応できない複雑な計算を高速に実行すると共に、現物 (試作品) が無い中でも検証できるようになってきた。また、世間では、設計者の勘・コツ・経験といった設計知見による製品アイデアの発想や、設計結果の妥当性判断を支援するため、コンピュータにより、個々のCAE結果を統合して分析し、トレードオフなど多くの設計要件に対する最適な設計値の検証・探索を行う設計手法 (以後、設計最適化手法と呼ぶ) の研究も進められている<sup>2)</sup>。しかし、これらの技術を実際の商品開発で連携させて活用するには、設計者の手作業・判断に依存しているのが現状である。

本論文では、新たな設計手法として、複数の設計要件を満たす設計案 (以後、適正解と呼ぶ) を導出するために、設計者に代わりコンピュータがCAEと設計最適化手法を連携して実際の設計問題を解決する新たな設計手法を実践し、従来の設計者主導の設計手法と効率・効果の両面で有効性と、実用化に向けた課題について考察する。

## 2. 設計最適化手法

図1は、本論文で検討した設計最適化手法の全体像である。これまで設計者が行ってきた一連の作業や判断をコンピュータに実行させることを特徴としている。まず、設計者は、与えられた設計要件に対する設計内容として、目的関数、入力変数、および使用する設計手法・ツールをコン

ピュータに入力する (各語句の説明は、図1中に記載)。特に、設計手法は、設計者が商品を開発するために行う一連の計算、検証などの作業や、要件に対する合否判定などの判断の工程であり、この工程をコンピュータに行わせるために、図1右側のようにプログラム化する。

また、本手法における出力は、適正解のリストである。設計者はリストから最も良い設計値 (以後、最適解と呼ぶ) を判断・選定する。

本手法で重要なのは、図中に示した「設計案出し」工程と「CAE検証」工程を、コンピュータにより自動的に繰り返し実行させることである。これは、従来、設計者がより良い設計値を追求するために、多くの仮説立案と実験により行ってきた試行錯誤の取り組みに相当する。

### 2.1 「設計案出し」工程

従来、設計者は、多くの設計経験により培われた設計手法やノウハウを駆使し、設計案の検討を行ってきた。しかし、設計経験が無いコンピュータに設計案を抽出させるには、下記2つのロジックを与える必要がある。

- ・設計範囲の絞り込み
- ・最適解の絞り込み

各ロジックの概要と基本的な手法について次に述べる。

#### 2.1.1 設計範囲の絞り込み

商品の設計には、多くの設計パラメータが関与しており、各パラメータには寸法や材料特性などの許容範囲がある。設計とは、許容範囲がある設計パラメータのすべての

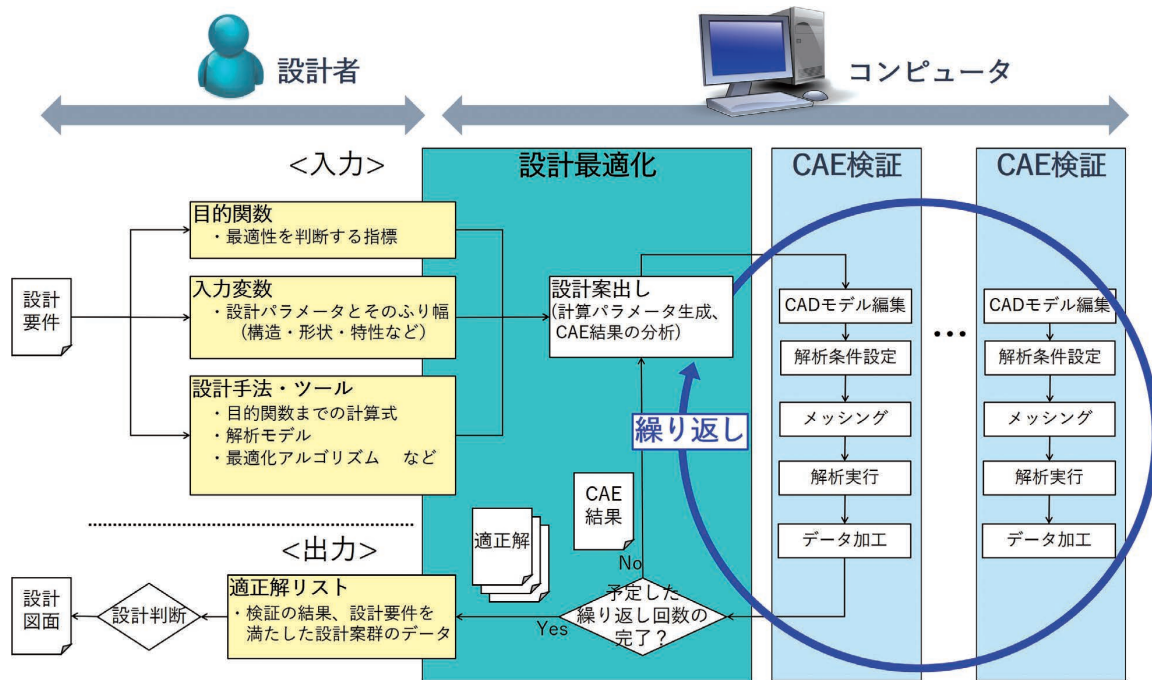


図1 設計最適化手法の全体像

組み合わせ（以後、設計空間と呼ぶ）から、設計要件を満たす設計値の組み合わせを抽出する行為である。無数の組み合わせがある設計空間から効率よく設計検証を進めるには、まず、設計要件を満たす可能性がある範囲（設計範囲）を抽出する必要がある。「設計範囲の絞り込み」とは、そのロジックであり、一般的に実験計画法を用いる。統計的に設計空間を均等に分割し、設計要件に対する特性をサンプリングすることで、設計空間全体の傾向を把握することができる。

<実験計画法の例<sup>2)</sup>>

一様乱数法、モンテカルロ法、ラテン超方格法など

### 2.1.2 最適解の絞り込み

抽出した設計範囲内から最適解を追求するロジック（以後、最適化アルゴリズムと呼ぶ）が「最適解の絞り込み」であり、主な手法としては、数理計画法と発見的手法がある<sup>1)</sup>。

前者は、数学的に解を求める手法である。厳密な解が得られるが、適用する設計内容には、「定式化できる」、「連続的な問題である」、などの制約がある。

一方後者は、サンプリングしたデータから、より良い解になる方向性を統計的に分析し、最適解を追求する手法である。時間的な制約などの影響により解の厳密性が数理計画法よりも低い、設計内容に対する制約が少ないため汎用性が高い。今回の試行では、多様な技術要素が関わる商品開発への適用を想定し、制約が少ない後者を最適化アルゴリズムとして採用している。

<最適化アルゴリズムの例<sup>2)</sup>>

- ・数理計画法（線形計画法、非線形計画法など）
- ・発見的手法（遺伝的アルゴリズム、焼きなまし法など）

## 2.2 「CAE 検証」工程

図1の「CAE検証」工程の枠中に、CAEを活用した設計検証の概略工程を示す。従来、これらの工程は、設計者の関与（手作業、判断など）によって行われるが、人の作業や思考のスピードに依存するため、限られた時間で多数の設計案を検証するには限界があった。従って、これらの工程を大量に繰り返し実行するには、一連の工程をコンピュータにより自動的に実行させる必要があり、そのためのプログラム（以後、計算プログラムと呼ぶ）を準備する必要がある。具体的には、API（Application Programming Interface の略）など、連携させるツールの機能やデータを外部から使用・操作するためにツール毎に定義されているインタフェースを活用してプログラムを記述する。しかし、このインタフェースは、連携させるツール毎に異なると共に、活用するには高度な知識・スキルが必要であるため、プログラムの準備は容易ではない。そこで、近年の設

計最適化ツールでは、主要な市販 CAD/CAE ツールに対するインタフェースが予め用意され、計算プログラムが記述しやすくなってきている<sup>3)</sup>。

## 3. 試行

具体的な実施事例として、リレー開発における設計最適化事例を紹介する。

### 3.1 適用事例

リレーとは、外部から入力された電気信号に応じて、電気回路のオン／オフを制御する部品である。図2に、代表的なリレーにおける主要な構成と動作状態を示す。

コイルへの通電が無い状態では、ばねには力が加わらないため、接点は離れている（接点オフ状態（図2a）。次に、コイルへの通電により電磁石が励起すると、発生した電磁力により鉄片が回転変位して可動ばねを押しこみ、2つの接点は接触する（接点オン状態（図2b）。その後、コイルへの通電が切れるとばねの反力により接点が離れ、接点オフ状態に戻る。電磁力とばね反力のバランスが崩れると、接点オン／接点オフ状態の切り替えがスムーズに行われなくなる。極端な場合、ばね反力が電磁力より強すぎると可動接点の変位しないため、接点オン状態に移行できず、リレーとしての機能が成立しない。このため、2つの力の最適なバランスの実現が重要な設計要件となる。

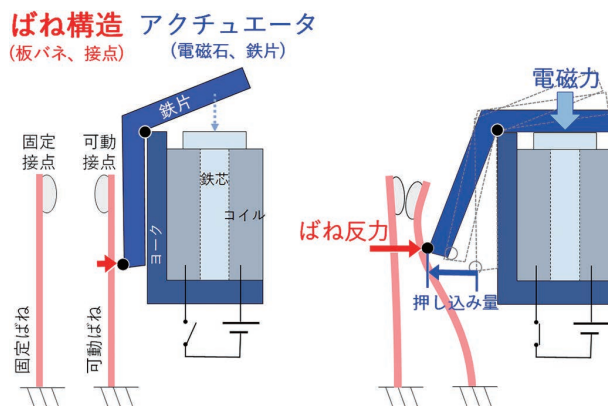


図2 リレーの主要構成と動作

本試行では、アクチュエータの電磁力特性を固定条件とし、最適なバランスを得るためのばね構造の導出に取り組んだ。

### 3.2 計算プログラム

図3に、試行に向けて準備した計算プログラムを示す。

#### 3.2.1 最適化条件の記述

まず、最適化を行う条件として、主に、下記4点について記述した（付記した例は、試行時の内容）。

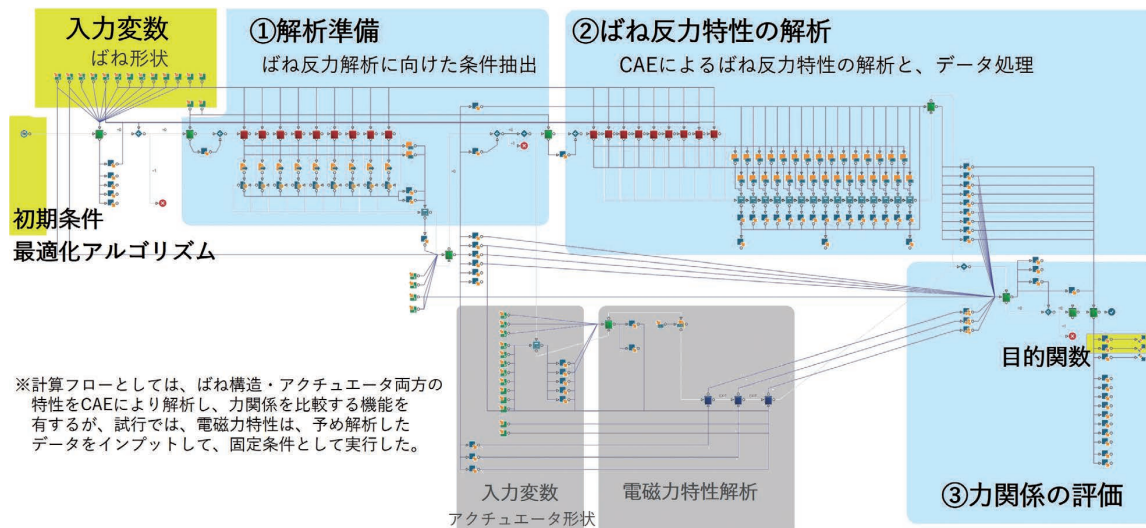


図3 計算プログラム

- ・初期条件：最適解探索の起点となる設計案  
設計空間全体を均等に分割するため、実験計画法として一様乱数法を用いて複数のばね設計案を生成し、入力した。
- ・最適化アルゴリズム  
適正解が離散的な設計空間や、複数の目的関数に対する設計内容に汎用的に対応させるため、遺伝的アルゴリズム (GA) を使用した<sup>4)</sup>。
- ・入力変数：設計案を構成するパラメータ  
ばねの厚み・幅・長さ方向の寸法、アクチュエータの可動ばね押し込み位置などのパラメータを設定した (9項目)。また、各パラメータに対して、設計上の許容範囲となる最小値-最大値を設定した。
- ・目的関数：各設計案の良し悪しを評価する指標・基準  
オン/オフ状態のスムーズな切り替えに必要な電磁力とばね反力の力関係 (2項目) を指標とした。

### 3.2.2 「CAE 検証工程」の記述

今回の試行テーマでは、市販の構造解析 CAE ツールと連携してばね反力の解析を行う工程 (図中②部) を中心に、解析条件を抽出する工程 (図中①部)、解析結果から目的の力関係を評価する工程 (図中③部) をタスクや設計パラメータの単位で記述した。記述には、設計最適化ツールで用意されたアイコン化されたインターフェースを用いた。また、従来人手で行ってきた作業や判断については、それぞれ専用のスクリプトやマクロなどを作成し、実装している。

## 3.3 計算結果

### 3.3.1 計算工程の実績

本節では、計算とは、図1で示した「設計案出し」、「CAE 検証」工程のくりかえしにより、適正解を収集する工程を示す。試行では、実際の開発テーマにおける構想設計段階を想定し、計算期間を2週間と設定した。

その期間で行った計算の実績を表1に示す。この期間中に、約1800件の計算を行い、728件の適正解を抽出することができた。この工程は、設計案出しの手計算に加えて、CADモデルの変更などの作業までを含んでおり、全てを実行すると1日に数件程度しか実行できなかった。工程をすべてコンピュータで自動化したことにより、従来の約180倍の効率で計算を実行したことになる。

表1 設計最適化計算の実績

計算期間	2週間
計算期間中に検証した設計案数	1800件
抽出した適正解数 (設計要件を満たした設計案)	728件

### 3.3.2 適正解の分析

計算結果 (適正解のリスト) から最適解を抽出する工程は、判別指標や基準の妥当性を見極めるため、設計者に依頼した。

図4は、計算結果から得られた適正解データの一覧を多次元解析チャートと呼ばれる手法で可視化したものである。図中、各適正解のデータ (9ケの入力変数値と、その検証結果である2つの目的関数値) は、横方向に配置した各パラメータ軸上の点をつなぐ折れ線 (青線) により、表示している。また、図中、縦軸のレンジは、パラメータ毎の最小値-最大値の範囲である。

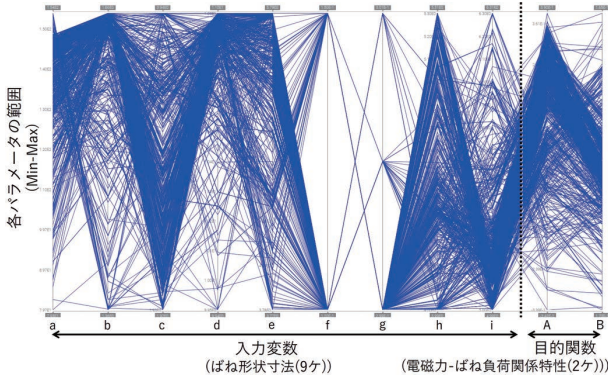


図4 適正解リスト (多次元解析チャート)

この結果から、入力変数が下記2つのグループに分かれることが分かった。

- ・設計上の自由度が高い入力変数 (図中、a ~ e, h, i)  
折れ線が通過した点が各軸のレンジ全体に分布している
- ・拘束条件となる入力変数 (例：f, g)  
折れ線の通過点がほぼ限られた値に集中しているパラメータ

### 3.3.3 最適解探索の履歴

次に、適正解の中から最適解を抽出するために、目的関数 A, B をそれぞれ X 軸、Y 軸に設定して、適正解リストをプロットしたグラフを図5に示す。図では、各適正解の点に対し、検証が行われた順で時系列的に、青から赤の順に色付けしている。

試行では、目的関数 A, B を最大化することを目的（望大特性）としているため、グラフの右上方向にある点ほど理想的な結果となる。グラフ上の右上方向に向かって赤色の点が増えていることから、最適化アルゴリズムが効果的に作用し、両目的関数の最大化に向け、着実に設計案の探索が行われたことが分かる。

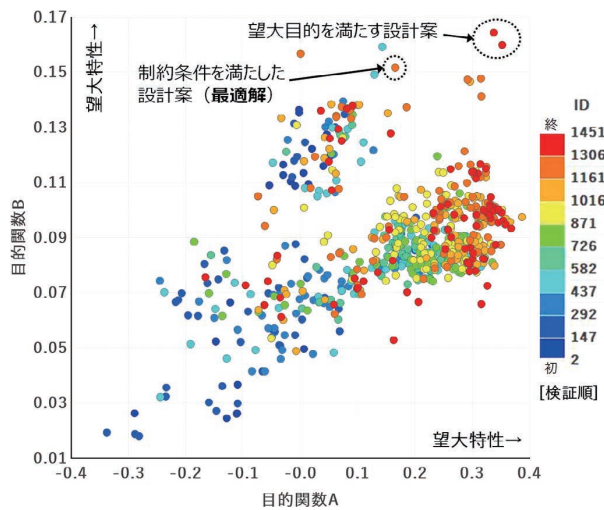


図5 適正解リスト (目的関数によるマッピング)

### 3.4 最適解の抽出

次に、図4、5を用いて、最適解を抽出した経緯について述べる。

まず、図5の右上端にある2点のように、2つの目的関数が同時に最大になる適正解を最適解の候補として、その妥当性の検証を行った。具体的な観点としては、入力変数値をCAD上で可視化したばね形状や、可動ばねの変位特性などの挙動が挙げられる。その結果、2つの構造上および電気的特性（以後、制約条件と呼ぶ）に対する設計要件の不足があることを確認した。これらの制約条件は、従来、設計者が経験を基に判断していた事象であり、熟練者の暗黙知を新たな設計要件として顕在化できた事例でもある。

図6は、図4の多次元解析チャートに、顕在化した2つの制約条件の軸を追加し、適正解の比較評価を行えるように改良ものである。各制約条件軸上に新たな判断基準（今回は、設計者の判断基準として両軸共に下限値）を設定してフィルタリングした結果、図5で最適解候補とした右上端の2点を含む多くの適正解が不適切であることが分かった（灰色の折れ線グラフ）。この結果から、フィルタリングの結果で残った適正解（青色の折れ線）の内、目的関数が最大となる設計案（赤色の折れ線）を最適解として選定した。なお、この最適解については実機試作による検証を行い、期待どおりの特性を実現できていることを確認している。

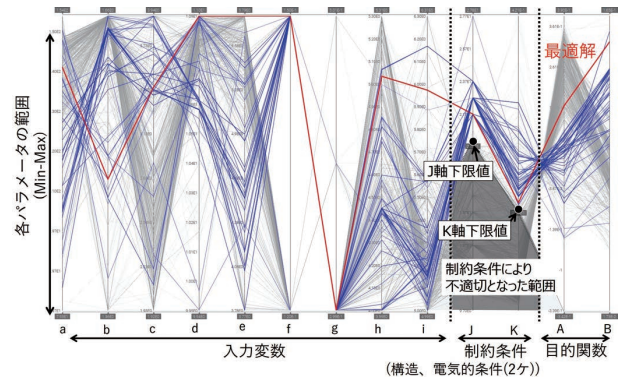


図6 制約条件によりリフィルタリングした適正解リスト

## 4. 考察

実際の設計課題を対象に試行した設計最適化手法について、その効果と、実用面での課題を考察する。

### 4.1 設計手法の効果

設計最適化手法の活用により、2つの目的関数に対するトレードオフを解消する最適なばね構造の設計案を抽出することを実現した。また、コンピュータにより算出した結果に頼らず、適正解リストを多次元解析チャートなどの手法で可視化し、設計者視点を加えることで、より実現性の

高い解を得たことは価値が高い。

更に、得られた最適解は、設計者が経験上、別の設計要件への影響を懸念して避けてきた形状だったが、実機確認の結果、懸念された設計要件も合わせて改善するものであることが分かった。この結果から、設計最適化手法は、設計空間全体を網羅的に検証することで、論理的に最適値を見出す手法として効果が期待できることを示している。

#### 4.2 実用化に向けた課題

今後の実用化に向けては、より多くの設計要件に対するトレードオフを解消できるようになる必要がある。試行でトレードオフ対象となった目的関数や制約条件は、製品全体に対する設計要件としては、ごく一部である。例えば目的関数が増えると統計上必要なサンプリング数が増え、CAE 検証の繰り返しにかかる時間が増加する。設計最適化手法の実用化に向け、現実的な計算時間で十分な設計検証を行うには、下記のような検討が必要である。

- ・ CAE 検証時間の削減
  - － CAD, CAE モデルの簡素化／合理化
  - － 計算インフラの強化 など
- ・ 設計要件、設計パラメータの最適化
  - － 検証する技術要素に対する寄与度による設計パラメータ数の削減
  - － 手戻り規模・頻度などによる設計要件の優先順位付け など

#### 4.3 設計知見の蓄積に向けた課題

設計最適化手法では、これまで現場で培われてきた設計手法・ノウハウを計算プログラムの形で形式知化できたことが重要な成果である。開発現場の設計者毎の作業、判断の工程や基準を集約して記述できたことで、属人的な設計の質のばらつきを抑えることが期待できる。さらに、3.4 節で追加した制約条件や、4.1 節で発見した従来の設計知見に代わる新たな設計知見のように、設計最適化手法の活用を通じて得られる新たな知見を計算プログラムにフィードバックし続けることで、設計力の継続的な改善が期待できる。

しかし、3.2 節で紹介した計算プログラムを構築するのに、約 1 年を要した。主な要因は、下記の 2 点である。

- ・ 熟練した設計者の長年の経験の蓄積に基づく感覚的・暗黙的な作業・判断の形式知化
  - ・ 活用する CAD・CAE ツールを計算プログラムから自動実行させるためのツール間インタフェースの構築
- 前者は、近年、社会でも重要な課題として取り上げられ、様々な取り組みが行われているが、まだ明確なソリューションの実現には至っていない。熟練の設計者と連携し、計算プログラムに実装する設計知見を効率的、効果的に収集、加工するしくみ・体制の構築が重要な課題と考える。

また、後者については、今回の試行では、2.2 節で述べ

た設計最適化ツールで用意されたインタフェースでは対応しきれない設計内容（複雑なモデル形状や、特殊な解析条件など）が多く、技術的に解決するのに時間がかかった。特に、インタフェース構築には、設計最適化・CAD・CAE など各ツールを高度に使いこなす専門的な知識（例：API など）が必要であり、各ツールのベンダとのテクニカルな連携が課題となる。

前記 2 つの課題から、設計最適化の実用化には、関係者（開発現場の設計者、設計最適化担当者（計算プログラム構築／運用担当）、各ツールベンダ）が密に連携するしくみやネットワークの構築が重要と考える。

## 5. むすび

本論文では、商品開発の上流で複数の技術要素間のトレードオフを解消する設計手法の 1 つとして、設計最適化手法の活用を検討した。また、試行テーマとして、リレー設計におけるアクチュエータの電磁力とばねの反力のバランス設計を行い、短時間で大量のばね形状の設計、検証を行い、従来の設計知見を超えてトレードオフを解消した最適解を抽出することができた。

今後は、社内の幅広い商品の開発現場に向けて、設計最適化手法の展開を目指す。そのために、多様な技術要素を対象にした設計最適化事例を獲得していく。そして、事例から得られる設計者知見やインタフェース情報を、主要な設計内容ごとに雛形となる計算プログラムを整備することで、効率的な本手法の展開と、設計手戻りのさらなる削減に向けた設計力強化を推進する。

## 参考文献

- 1) 池田義雄, プロントローディングによる上流設計力強化, 東芝レビュー, 2007, Vol.62, No.9, p.2-8.
- 2) 山川 宏, 他, 最適設計ハンドブック—基礎・戦略・応用—, 朝倉書店, 2003, 518p.
- 3) Esteco SpA, modeFRONTIER ユーザーガイド, 2019.
- 4) 三宮 信夫, 他, 遺伝アルゴリズムと最適化, 朝倉書店, 1998, 185p.

## 執筆者紹介



**池田 正哲 IKEDA Masaaki**  
グローバルものづくり革新本部  
開発プロセス革新センタ  
フロントローディング部  
専門：情報工学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。



# 3

## 新たな成長領域を 生み出す技術



# 組込機器でリアルタイム実行可能なセキュリティ攻撃検知・分類アルゴリズムの実装

小河原 徹, 山本 泰生, 曾 珍, 廣部 直樹

IoTの普及に伴い、インターネットには組込機器も接続されるようになり、セキュリティ攻撃の危機にさらされている。

セキュリティ攻撃によって組込機器の制御が停止させられると、大きな損失が予想される。従って、攻撃を受けても制御を停止させないような対策が求められている。

セキュリティ攻撃を受けた際、即座にその攻撃の種類を特定できれば、攻撃に合った対応を自動的に実施できる。結果、制御を停止させず損失を最小限に留めることが可能になる。そのため我々は、軽量な攻撃検知・分類アルゴリズムを開発・実装し、組込機器上でリアルタイムに実行できる性能であることを確認した。

## Implementation of Real-time Security Attack Detection and Classification Algorithms for Embedded Devices

KOGAWARA Toru, YAMAMOTO Taisei, ZENG Zhen and HIROBE Naoki

With the spread of IoT, embedded devices are also connected to the Internet, which is in danger of security attacks.

If a security attack stopped control of embedded devices, a large damage is expected. Therefore, a measure is demanded which does not stop the control even if the device is attacked.

If the device can immediately classify the type of attack when it receives a security attack, it can automatically respond to the attack. As a result, it is possible not to stop the control, and to minimize the damage. That is why we developed and implemented a lightweight attack detection and classification algorithm, and confirmed that it was possible to be run in real-time on embedded devices.

### 1. まえがき

多様な分野でのIoTの普及に伴い、インターネットにはパソコンやサーバだけでなく、様々な組込機器が接続されるようになってきた。その結果、従来のパソコンやサーバと同様、組込機器もまたセキュリティ攻撃の危機にさらされている。

中でも、自動車の車両制御装置や工場の機械の制御装置などは、物理的に動作する機械を制御しているため、セキュリティ攻撃によって人的・物的に大きな損害を受ける可能性がある。

例えば、自動車のハッキングに成功し、携帯電話回線経由で自動車のハンドルやエンジン・ブレーキまでを遠隔操作できたという報告がある<sup>1)</sup>。

また、工場や発電所などの制御機器を対象としたウイル

ス等の不正ソフトウェアも多数報告されており、機械の破損や停電などの大きな損失を受けている<sup>2)</sup>。

セキュリティ攻撃への対策を考えるにあたって、NIST(米国立標準技術研究所)発行の「サイバーセキュリティフレームワーク」<sup>3)</sup>を用いるのが一般的である。これはセキュリティ対策を大きく5つのフェーズ「特定」「防御」「検知」「対応」「復旧」に分けて取り組むためのものである。図1に、サイバーセキュリティフレームワークの概要を示す。

Contact : KOGAWARA Toru toru.kogawara@omron.com

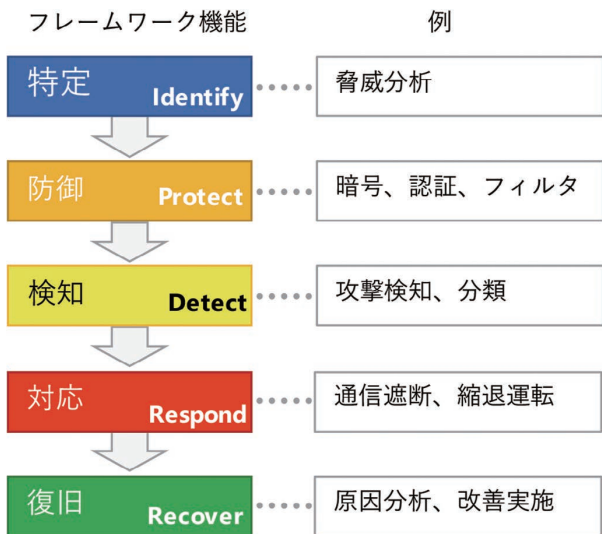


図1 NIST サイバーセキュリティフレームワークの概要

「特定」により対象システムのセキュリティリスクを分析し、「防御」によってセキュリティ攻撃から対象システムを保護するのが、セキュリティ対策の基本である。しかし、セキュリティ攻撃は日々進化しており、「防御」をすり抜ける攻撃がいずれ出現する。

そこで、「防御」を突破された場合でも、そのセキュリティ攻撃を「検知」すること、また検知した攻撃に対して適切な「対応」を行うことで、被害を最小化することが必要となる。

本稿では、低リソースな組込機器においても「対応」によって被害を最小化することを目的とした、組込機器上でリアルタイム実行可能な「検知」技術の開発および実装について述べる。

## 2. 課題

「検知」した攻撃に対して適切な「対応」を行うには、どのような攻撃であったか特定する必要がある。受けた攻撃の種類に応じて、適切な対応策を選択するためである。攻撃の検知と合わせて分類を行うため、本稿ではこれらを合わせて「検知・分類」と呼ぶ。

また、物理的に動作する機械を制御している機器においては、何らかの問題が発生した際には、周囲の人員や機械そのものに損害を与えないよう速やかに対処しなければならない。セキュリティ攻撃への対処も同様であるため、「検知・分類」はリアルタイムに実行できる必要がある。

従って本稿では、組込機器上でリアルタイムに攻撃検知・分類を行うことを課題とする。

## 3. 従来の攻撃検知技術

組込機器レベルにおけるセキュリティ対策はまだ始まったばかりであり、特に攻撃検知・分類機能をリアルタイムに実行できる製品は存在しない。

一方で、パソコンやサーバ等、IT系のセキュリティ対策ソフトウェアでは、攻撃検知・分類機能をリアルタイムに実行できるものも存在する。

IT系の攻撃検知・分類技術では、例えば検知したウィルスの亜種やバージョン名など、非常に詳細な内容まで特定する。また、未知の攻撃手口を機械学習+AIで検出するものもある。そのため、大量のデータと、それを検索するための大量の計算量を必要とする。

結果、IT系の攻撃検知・分類技術は非常に高速なCPUと、大きなメモリ・ストレージ容量とを必要とするため、組込機器にそのまま移植することはできない。

ここでは一例として、Blue Planet works社のAppGuard<sup>4)</sup>を挙げる。

AppGuardはWindows系OS上で動作するソフトウェアであり、非常に軽量であることをセールスポイントとしている。それでも、プログラム本体（防御エンジン）のサイズが1MB、ディスク容量は500MB、CPUの動作周波数は1.8GHz以上を要求する。Windows用アプリケーションとしては非常に軽量の部類ではあるが、それでも組込機器のスペックでは満たすことができない。

例えば今回の開発で使用した車載マイコンのスペックは、Flash ROM（パソコンのディスクに相当）の容量1MB、メモリ容量128KB、CPU動作周波数約100MHzであり、同技術をそのまま流用できるような環境ではない。

## 4. 攻撃検知・分類アルゴリズムの開発

ここでは、我々が開発した既に発表済みの攻撃検知・分類技術<sup>5)</sup>について説明する。これは、制御を行う組込機器を対象としたものであり、組込機器でリアルタイムに実行することを目的としている。

組込機器がセキュリティ攻撃を受けた場合、攻撃は機器の外部から行われるため、外部からの入力に正常でない入力が含まれている。正常でない入力を「異常」と定義し、異常を複数検出できれば、それは攻撃を受けていると判断できる。これを攻撃検知の基本的なアイデアとする。

攻撃を構成する異常の組み合わせは、攻撃の種類に依存する。従って、ある特定の異常の組み合わせを検出することは、ある特定の攻撃を検知することを意味する。

このような特定の攻撃に対する検知を、検知したい攻撃の種類それぞれについて実行することで、結果として攻撃検知と分類を同時に実施することができる。

攻撃検知・分類アルゴリズムの概念図を図2に示す。

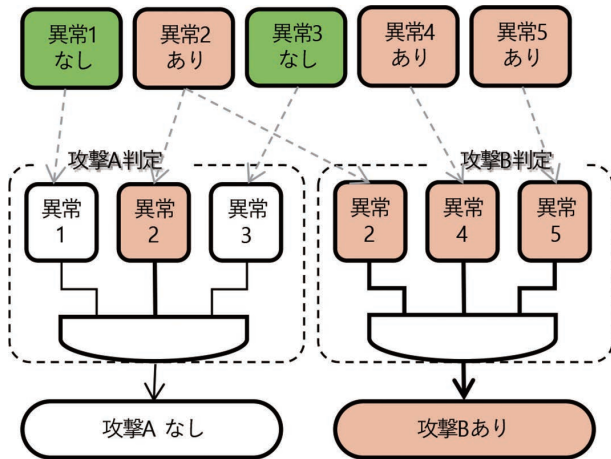


図2 攻撃検知・分類アルゴリズムの概念図

単純な異常のあり・なしの組み合わせを判定するだけであり、組込機器に要求される「高速に処理できる」「必要なデータ容量が小さい」の両方を満たせると考えられる。また、分類する攻撃の種類は、表1に示す6種類とした。一般的な脅威分析モデルの1つである STRIDE<sup>6)</sup> に沿ったものであり、S, T, R, I, D, E を頭文字とする6種類の脅威に対応している。

表1 分類対象となる攻撃の種類

攻撃の種類	具体例
なりすまし Spoofing	正規の機器になりすまし、偽の制御コマンドを送り込む
改ざん Tampering	ファームウェアや設定データを改ざんする
否認 Repudiation	侵入の証拠を消すため、ログを消去・上書きする
情報漏えい Information disclosure	特殊な通信コマンドや設定データ等、非公開の情報を取得する
サービス拒否 (DoS 攻撃) Denial of service	機器に大量の通信メッセージを送信し、サービスを停止させる
特権昇格 Elevation of privilege	不正に特権を取得する

さらに、複数の攻撃を組み合わせた複合的な攻撃を受けた場合、どの攻撃に対して優先的に対応すべきかを判断する必要がある。そのため、攻撃の進行を不可逆な状態遷移としてモデル化し、最も進行した攻撃について対応を行う、という手法を提案した<sup>7)</sup>。

攻撃の進行をモデル化した状態遷移図（攻撃遷移図と呼ぶ）を図3に示す。

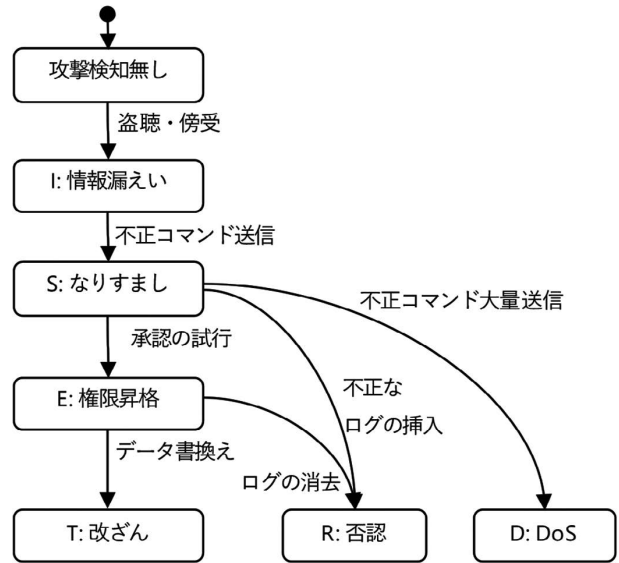


図3 攻撃遷移図の例

## 5. 攻撃分類の細分化

### 5.1 攻撃分類の粒度における課題

4章で紹介した技術では、攻撃を6種類に分類した。しかし、受けた攻撃の種類に応じて適切な対応を行うという目的に対しては、この6種類の分類ではまだ十分ではない。

例えばサービス拒否攻撃においても、単に通信バスが占有されてサービスが成立しない場合と、大量のメッセージの処理によってCPUの処理時間が間に合わなくなって機器が機能停止する場合とでは、とるべき対応は異なると考えられる。

従って、より攻撃を細分化して検知・分類する必要がある。

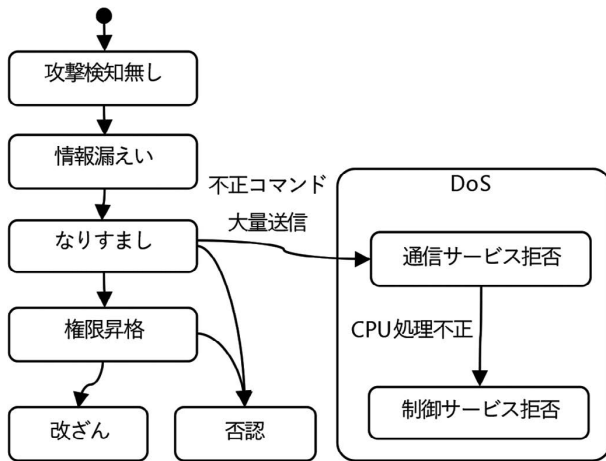
### 5.2 内部状態異常の統合による細分化

4章で紹介した攻撃検知・分類アルゴリズムでは、異常の検出対象を外部入力としていた。

一方で、5.1節で例を挙げた通り、適切な対応を行うためには、外部入力だけでなく組込機器の内部状態も併せて判断する必要がある。

機器の内部状態についても、正常でない状態や挙動を「異常」と定義する。さらに、内部状態による異常が発生したときに検知される攻撃を、新たな種類の攻撃であるとして細分化する。これを図3の攻撃遷移図に追加することで、外部入力異常と内部状態異常の両方を統合して攻撃検知を行うことができるようにした。

細分化した攻撃遷移図の例を図4に示す。



※図3と同じ遷移条件については省略

図4 内部状態異常を統合して細分化した攻撃遷移図の例

## 6. アルゴリズムの実装

### 6.1 車載 ECU 想定モデル

実装対象として、自動車に搭載される電子制御装置（以下、車載 ECU）を想定したモデルを構築した。車載 ECU は組込機器の中でも低リソースであり、また 1 章で述べたようにセキュリティ攻撃のリスクにさらされていることから、本技術の適用先として適切である。

表 2 にハードウェア仕様を示す。このハードウェアは車載用ワンチップマイコンを CPU とし、標準的な車載ネットワークである CAN を複数チャネル持つ。また、ECU を想定した機能として、指定されたメッセージを受信・送信する。

表 2 車載 ECU 想定モデル ハードウェア仕様

項目	仕様
CPU 動作周波数	96 MHz
Flash ROM	1 MB
RAM	128 KB
通信プロトコル	CAN
通信速度	500 kbps
制御周期	1 ms

### 6.2 アルゴリズムの実装方法

今回開発した攻撃分類アルゴリズムは、攻撃の種類ごとに独立して判定するため、ビット演算によって高速処理を行うことが可能である。

さらに攻撃の分類について、4 章で説明した通り、不可逆な状態遷移であるとモデル化した。そのため、特定の攻撃 A は「A まで遷移してくる遷移条件をすべて満たす」

(IN 条件) と「A から次へ遷移する条件を一つも満たさない」(OUT 条件) の両方を満たした場合に検知したと判定できる。図 5 に概念図を示す。

IN 条件は全て AND で成立するため、ビット列で表現できる。ビット列において、IN 条件を構成する異常に対応するビットの値を 1、それ以外のビットの値を 0 としたものを、IN 条件のビットマスクと呼ぶ。OUT 条件も同様にビットマスクで表現できる。

検出した異常についてもビット列を用意し、異常を検出したビットの値を 1、そうでないビットの値を 0 としておけば、IN 条件と OUT 条件の判定は、それぞれのビットマスクとの AND 演算 1 回で実現できる。つまり、1 つの攻撃検知を判定するにはビット演算 2 回で済む。

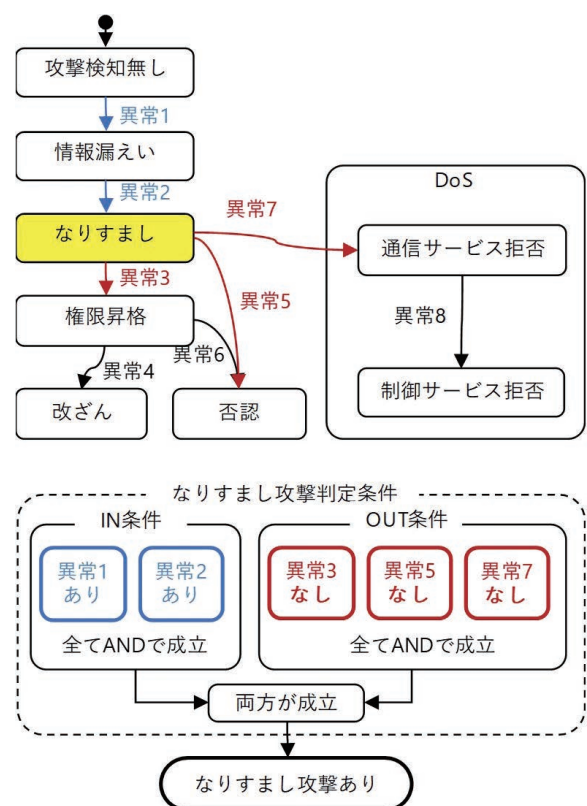


図5 攻撃遷移図を利用した判定条件

このように実装した場合の、CPU の演算量とデータ容量を試算する。

検知する攻撃の種類を n 種類、攻撃検知のために検出する異常の種類を m 種類とした場合の、各攻撃の IN 条件と OUT 条件のために必要なビットマスクを図 6 に示す。

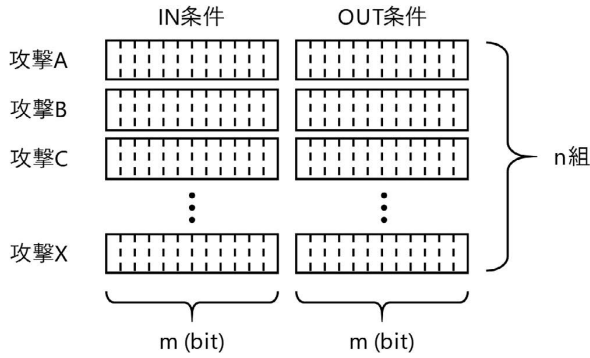


図6 攻撃検知に必要なビットマスク

CPU 演算量について試算する。車載 ECU で一般的な 32 bit CPU を想定すると、一度に 32 bit の演算が可能なので、演算回数は  $2 \times [m/32] \times n$  回となる。

同様に、必要データ容量について試算する。データはバイト単位で保持されるため (1 バイト=8 ビット)、必要なデータ容量は  $2 \times [m/8] \times n$  バイトとなる。

### 6.3 攻撃検知・分類機能仕様

車載 ECU 想定モデルに対して、セキュリティ対策を設計し、分類する攻撃と、攻撃検知のための異常検出について抽出した。その結果、攻撃分類をより細分化し、11 種類とした。

設計した攻撃検知・分類機能の仕様を表3と図7に示す。

表3 攻撃検知・分類機能仕様

項目	仕様
検知・分類可能な攻撃の種類	11
検知・分類に使用する異常の種類	45

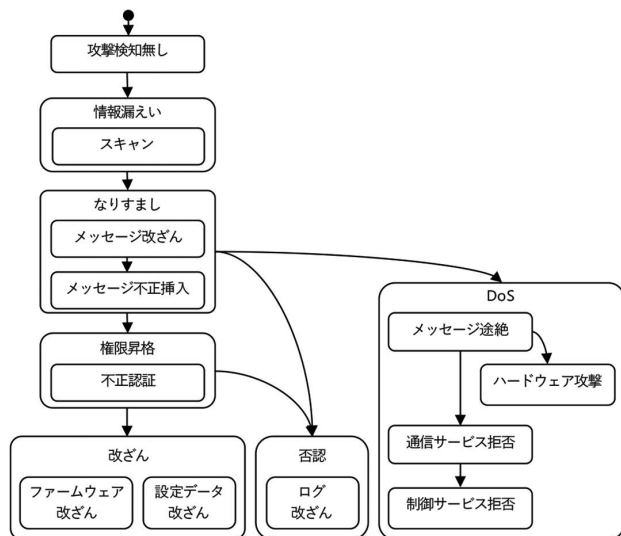


図7 設計した攻撃遷移図

この機能仕様と6.1節のハードウェア仕様を、6.2節の試算結果に当てはめて、実際の処理時間とデータ容量を見積もる。6.2節のパラメータ n, m については、それぞれ攻撃の種類  $n=11$ , 異常の種類  $m=45$  となる。

CPU 演算量の試算結果はビット演算 44 回となる。ビット演算が CPU クロック 1 周期で完了すると仮定すると、演算にかかる処理時間はおよそ  $44 / (96 \times 10^6) \approx 0.5 \mu\text{s}$  であり、制御周期 1 ms の 1/2000 程度となる。

また、データ容量の試算結果は 132 バイトとなるので、Flash ROM 容量 1 MB に比して 1/8000 程度となる。

以上より本アルゴリズムは、車載 ECU のような組込機器では、全く問題なく実装できる演算量とデータ容量であると見積もることができる。

## 7. 実装したモデルの評価

### 7.1 要件

攻撃検知・分類機能の要件として、以下の2点であると定義する。

- ・正しく機能していること  
定義した全ての攻撃の種類について、検知して正しく分類できる。
- ・組込機器本来の機能を阻害せず、リアルタイムに実行できる性能であること  
メモリ使用量が十分に小さい。(Flash ROM, RAM それぞれの容量の 10%未満)  
また、最も負荷が重い状態でも、全機能の処理時間が制御周期 (1 ms) を超えない。

### 7.2 機能評価

定義した全ての攻撃の種類それぞれについて、攻撃方法を設定した。表4に示す。

表4 攻撃検知・分類機能テストケース

No.	攻撃の種類	攻撃内容
1	スキャン	攻撃機器から通信経路に、CAN ID 総当たりのメッセージを注入
2	メッセージ改ざん	中間機器を通信経路に挟み、正規メッセージのデータを書き換えて転送
3	メッセージ不正挿入	攻撃機器から通信経路に、正規メッセージと同じ ID の不正メッセージを注入
4	不正認証	不正な暗号鍵を用いて、攻撃機器から認証シーケンスを開始

5	メッセージ途絶	中間機器を通信経路に挟み、特定 ID のメッセージのみを転送せず遮断
6	ハードウェア攻撃	特定 ID のメッセージが送信されている間だけ、攻撃機器から不正信号を送り、H/W エラーを起こす
7	通信サービス拒否	攻撃機器から通信経路へ受信対象でないメッセージを大量注入し、通信を飽和させる
8	制御サービス拒否	攻撃機器から通信経路へ受信対象のメッセージを大量注入し、制御処理を飽和させる
9	セキュリティログ改ざん	不揮発メモリ上のセキュリティログを改ざんしてモデル起動
10	ファームウェア改ざん	不揮発メモリ上のファームウェアを改ざんしてモデル起動
11	設定データ改ざん	不揮発メモリ上の設定データを改ざんしてモデル起動

テスト実施時のシステム構成の模式図を図 8 に示す。

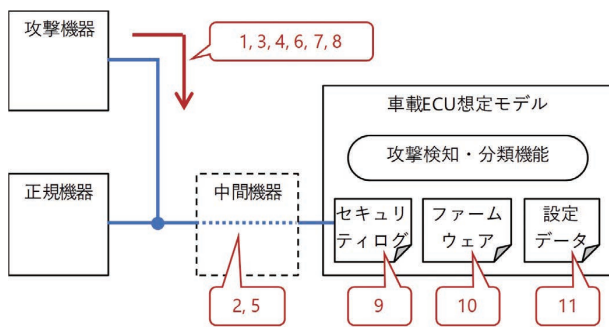


図 8 システム構成の模式図

表 4 のテストケース番号に対応する攻撃箇所を、図中の吹き出し内の番号で示している。

図 8 のシステム構成にて、表 4 の各テストケースを実施した結果を、表 5 に示す。

表 5 攻撃検知・分類機能テスト結果

No.	経過時間 (ms)	攻撃検知・分類結果	判定
1	1	スキャン	OK
2	1	メッセージ改ざん	OK
3	1	メッセージ不正挿入	OK
4	1	不正認証	OK
5	200	メッセージ途絶	OK

6	200	メッセージ途絶	OK
	226	ハードウェア攻撃	
7	1	スキャン	OK
	38	メッセージ途絶	
	1419	通信サービス拒否	
8	1	メッセージ不正挿入	OK
	27	メッセージ途絶	
	376	制御サービス拒否	
9	—	セキュリティログ改ざん	OK
10	—	ファームウェア改ざん	OK
11	—	設定データ改ざん	OK

No. 1~11 の各テストケースにおいて、検知・分類した攻撃と、攻撃開始から検知・分類までの経過時間を記載している。攻撃の種類によっては、まず他の攻撃として検知される場合もあるが、最終的には期待する攻撃として検知・分類されているため、問題ない。

なお No. 9~11 のケースについては、ECU 想定モデル起動時の初期化処理で検知されるため、経過時間は無効としている。

この結果から、実装した攻撃検知・分類機能が正しく機能していることを確認できた。

### 7.3 性能評価

まずメモリ使用量について確認結果を示す。

攻撃検知・分類機能が使用する Flash ROM 容量は、アルゴリズムのコード分と、6.2 節で示したビットマスクの分である。使用する RAM 容量は、実行時の状態を保存するための領域であり、静的に確保している。

メモリ使用量の測定結果を表 6 に示す。

表 6 攻撃検知・分類機能 メモリ使用量測定結果

項目	メモリ使用量	
	要件	性能
Flash ROM	100 KB 未満	6.2 KB
RAM	12.8 KB 未満	8.4 KB

Flash ROM 使用量、RAM 使用量いずれも、表 2 で示した Flash ROM、RAM それぞれの総容量の 10% 未満であり、要件を満たしている。

次に、処理時間の確認結果を示す。

処理時間の測定は、内部処理を切り替えるごとにデジタル信号を出力するようソフトウェアを改造し、デジタル信号の波形を観測することで実施した。なお、この改造による処理時間への影響は無視できる程度であった。

処理時間の測定結果を図9に示す。

処理時間が最大となった場合＝通信負荷が100%であった場合でも、要件である1ms以内を余裕をもって満たしている。

この結果から、実装した攻撃検知・分類機能が、組込機器本来の機能を阻害せずにリアルタイムに実行できる性能であることが確認できた。

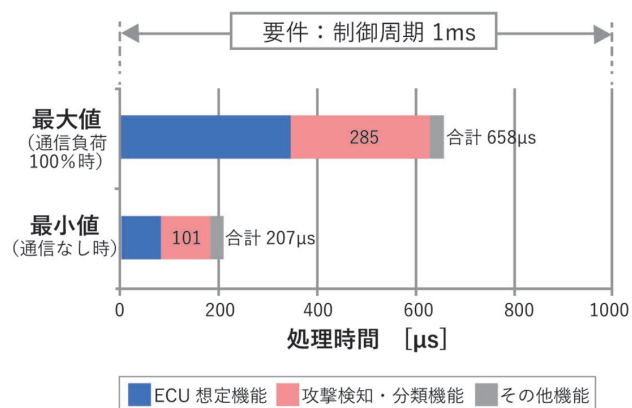


図9 車載 ECU 想定モデルにおける処理時間

以上から、今回実装したアルゴリズムは、低リソースな組込機器においても本来の機能を損なわずに攻撃検知・分類できる、実用可能なレベルの技術であるといえる。

## 8. むすび

組込機器上でリアルタイムに攻撃検知・分類を行うという課題に対し、組込機器上でも実行可能である高速・軽量の攻撃検知・分類アルゴリズムを開発した。また、攻撃をより細かく分類し、適切な対策が選択できるように攻撃検知・分類アルゴリズムを改良した。

さらに、開発したアルゴリズムを実際の組込機器ハードウェア上に実装して機能と性能を確認した。結果、細分化した分類を実現しつつ、リアルタイムに実行できる性能を持っていることを確認できた。

本技術を組込機器に搭載することで、セキュリティ攻撃を受けてから緊急対応までを即座に実行できる。さらに、攻撃分類を適切な粒度まで細分化できるため、受けた攻撃の種類に応じた緊急対応を選択し、自動的に実行させることも可能となる。

今後、攻撃の種類に応じた緊急対応を適切に設定することができれば、組込機器へのセキュリティ攻撃による被害を最小化できるようになる。

また今回は車載 ECU 上に実装するため、異常の検出方法やスケジューリング等、車載 ECU に特化した開発を行った。今後は、車載 ECU 以外の領域・分野の組込機器に向けても、本技術を展開していきたい。

## 参考文献

- 1) Miller, C.; Valasek, C. “Remote Exploitation of an Unaltered Passenger Vehicle”. [http://ilmatrics.com/Remote Car Hacking.pdf](http://ilmatrics.com/Remote%20Car%20Hacking.pdf), (参照 2019-11-27)
- 2) 阿部 慎吾. “制御システムに関する最近の脅威と JPCERT/CC の取り組み”. 第 5 回 制御部門マルチシンポジウム, [http://mscs2018.sice-ctrl.jp/program/\\_tutorials/mscs2018tutorial\\_abe.pdf](http://mscs2018.sice-ctrl.jp/program/_tutorials/mscs2018tutorial_abe.pdf)
- 3) 米国国立標準技術研究所. “Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity”. <https://www.nist.gov/cyberframework/framework>, (参照 2019-11-27)
- 4) Blue Planet-works. 製品紹介 AppGuard. <https://www.blueplanet-works.com/solution/appguard.html>
- 5) 廣部 直樹. “汎用組込機器向け攻撃検知・分類技術の紹介”. 第 4 回 IoT セキュリティフォーラム.
- 6) マイクロソフト. “The STRIDE Threat Model”. [https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/commerce-server/ee823878\(v=cs.20\)](https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/commerce-server/ee823878(v=cs.20)), (参照 2020-01-08)
- 7) 小河原 徹. “攻撃の遷移に着目した組込機器向け攻撃検知・分類技術の提案”. SCIS2020.

## 執筆者紹介



小河原 徹 KOGAWARA Toru  
技術・知財本部  
研究開発センタ  
専門：ソフトウェア科学



山本 泰生 YAMAMOTO Taisei  
技術・知財本部  
研究開発センタ  
専門：電気電子情報工学



曾 珍 ZENG Zhen  
技術・知財本部  
研究開発センタ  
専門：ソフトウェア工学



廣部 直樹 HIROBE Naoki  
技術・知財本部  
研究開発センタ  
専門：ソフトウェア工学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。



# 最近発表した主な論文

※所属は発表時の情報です。

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p><b>サーボドライブDCバスシステムのインピーダンスベース安定性解析</b>            Impedance-Based Stability Analysis of DC Bus System for Servo Drives            桐淵岳 (インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 商品事業本部 ドライブ事業部 開発部)、財津俊行 (技術・知財本部 研究開発センタ)、土井昌志 (技術・知財本部 研究開発センタ)、日下佳祐 (長岡技術科学大学 工学研究科 電気電子情報工学専攻)、伊東淳一 (長岡技術科学大学 工学研究科 電気電子情報工学専攻)            2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe)、2019年、IEEE、英語</p>	<p>Servo drive motor systems using PWM inverters has become very popular in industry due to its high controllability of torque, speed and position. Recently, the problems of EMI noise and complexity of wiring from 3-phase PWM inverter power line cables have become obvious in factory settings. Also, utilizing the regenerative energy of the motor has become important in industry. The DC bus system should be a good choice, however, it has a risk of system instability due to a negative impedance of the servo drives. In our previous study, an impedance-based stability analysis was introduced and the predicted critical point (DC bus current) of instability was confirmed by an experiment using a real motor. In this paper, a simulation model was created to see the behavior of the unstable waveform. Simulated waveforms successfully duplicated measured waveforms of the unstable oscillation behavior.            Copyright 2019 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.</p>
<p><b>ハンドの高バックドライブ性をワーク相対誤差推定に利用したリング高速挿入</b>            High-Speed Ring Insertion by Dynamic Observable Contact Hand            唐子征久 (技術・知財本部 知能システム研究開発センタ)、川上真司 (技術・知財本部 知能システム研究開発センタ)、小山佳祐 (東京大学大学院 情報理工学系研究科 創造情報学専攻)、下条誠 (東京大学大学院 情報理工学系研究科 創造情報学専攻)、妹尾拓 (東京大学大学院 情報理工学系研究科 創造情報学専攻)、石川正俊 (東京大学大学院 情報理工学系研究科 創造情報学専攻)            IEEE Conference Proceedings、2019年、IEEE、Vol.2019、No. ICRA、pp.2744-2750、英語</p>	<p>This study proposes a dynamic observable contact (DOC) hand as a new multi-fingered hand to ensure highspeed insertion in an assembly process with a small clearance between objects. To achieve insertion with a small clearance at high speed, a robot hand must realize both impact reduction and position-error compensation when the two objects contact each other. The DOC hand, with its features of 6-degrees-of-freedom dynamic passivity and object-pose observability, can realize both impact reduction and position-error compensation. To evaluate the effectiveness of the DOC hand, we construct a robot system using the DOC hand. We evaluate the performance of the system in the task of ring insertion with a small clearance (0-36 μm). The results indicate that the robot system performs at a higher speed than a human. In fact, the average cycle time is 2.42 s for the robot, whereas it is 2.58 s for a human. The DOC hand has opened up the possibility of achieving high-speed precision assembly using robots.            Copyright 2019 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.</p>
<p><b>真空パッドを用いたマニピュレーションシステム向け近接センサ</b>            土肥小也香 (技術・知財本部 センシング研究開発センタ)、古賀寛規 (技術・知財本部 センシング研究開発センタ)、奥野雄太郎 (技術・知財本部 センシング研究開発センタ)            第37回日本ロボット学会学術講演会予稿集、2019年、日本ロボット学会、日本語</p>	<p>真空パッドを用いて吸着把持するマニピュレーションシステムは産業用において広く使用されている。しかしながら、システム構築において厳密な位置決めが必要であり、治具の作製やティーチング作業に工数を要している。本稿では、静電容量式近接センサを用いて、真空パッドの変形からワークとの接触状態を検出するセンサを提案する。本センサにより、簡易な構成ながら、従来のシステム構築において、工数と熟練度を必要としていた厳密な位置決めやティーチングを不要とすることが期待できる。</p>

論文名・執筆者（所属）・掲載誌	抄 録
<p><b>法線ベクトルの分散を用いた吸着ハンド向け高速モデルレス把持位置認識</b></p> <p>長谷川昂宏（技術・知財本部 研究開発センタ）、丸山裕（技術・知財本部 研究開発センタ）、仁科有貴（技術・知財本部 研究開発センタ）</p> <p>日本ロボット学会 学術講演会、2019年、日本ロボット学会、日本語</p>	<p>製造現場や物流倉庫における自動化技術としてバラ積みピッキングのための把持位置認識が挙げられる。本研究では、可変形状物体や不定形状物体の把持を対象とした吸着ハンドによる高速なモデルレス把持位置認識手法を提案する。吸着ハンドにより物体を安定して把持するには、(1) 物体表面に対して垂直に把持アプローチ、(2) 物体の平面領域を吸着、の把持条件が重要である。これらの条件を高速な処理で満たすために、距離画像の法線ベクトルの分散に基づいて平面領域を抽出し、把持位置候補を認識する。把持位置におけるアプローチ角度は、平面領域抽出時に算出した法線ベクトルを再利用することができるため、高速な処理が可能である。</p>
<p><b>機械学習予測モデルを用いたウェブ搬送蛇行制御</b></p> <p>Predictive Control using Machine Learning Model for Web Handling</p> <p>阿部泰明（技術・知財本部 組込システム研究開発センタ）、上山優樹（技術・知財本部 組込システム研究開発センタ）、藤井高史（インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 技術開発本部 第1技術部）、菅原志門（株式会社エイシング 研究開発部）</p> <p>電気学会 産業応用部門大会、2019年、一般社団法人 電気学会、p.2-S15-1、日本語</p>	<p>二次電池をはじめとする様々な製品の製造過程で使用されている、金属や樹脂などの薄膜（ウェブ）の搬送装置では、ウェブ材料の蛇行が製品品質の低下の原因となっている。現在の生産現場では蛇行制御機構を設けることで蛇行を抑制しているが、フィードバック制御を用いるのが主流であり突発的な蛇行には対応できていない。そこで我々は、突発的な蛇行の発生を予測する蛇行予測モデルを、装置の稼働データにより作成し、既存の制御の補正に利用する方法について検討した。</p> <p>本稿では、蛇行予測モデルの作成に機械学習アルゴリズムである“力学系学習器（DLT）”を採用し、ウェブ搬送模擬実験機を用いて提案手法の効果を示した。</p>
<p><b>ワイヤレス給電用トランスの異物混入時の等価回路モデルの検討</b></p> <p>Equivalent Circuit Model for the Transformer using Wireless Power Transfer with Foreign Materials in Air Gap</p> <p>上松武（技術・知財本部 研究開発センタ）、中尾悟朗（エレクトロニック&amp;メカニカルコンポーネンツビジネスカンパニー 事業統括本部 センシング&amp;モジュールアプリ事業部 商品開発部）</p> <p>電子情報通信学会 技術研究報告、2019年、一般社団法人 電子情報通信学会、Vol.119、No.32（EE2019 1-6）、p.49-54、日本語</p>	<p>本論文では、非接触給電回路において異物混入時の給電用トランスの等価回路モデルを提案する。本等価回路モデルの特長は、磁気回路モデルより電気回路モデルを求めたことである。その際、インダクタマトリックスに複素要素を含む複素Lマトリックスとしてモデル化を行った。併せて、複素Lマトリックスの要素の測定方法を提示し、実験によりその有効性を示す。</p> <p>Copyright(c)2019 IEICE</p>

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p><b>セル生産ラインにおける作業者の標準外動作検知技術の開発</b></p> <p>Development of Worker's Nonstandard Motion Detection Technology in Cell Production Line</p> <p>西田一貴(技術・知財本部 知能システム研究開発センタ)、音田浩臣(技術・知財本部 知能システム研究開発センタ)、河合直浩(技術・知財本部 知能システム研究開発センタ)、鶴田浩輔(技術・知財本部 知能システム研究開発センタ)、笠原大聖(インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 技術開発本部 第1技術部)、藤本慎也(インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 技術開発本部 第1技術部)、戎野聡一(インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 技術開発本部 第1技術部)、後藤修一(オムロンソフトウェア株式会社 FAソリューション事業部 第1開発部)</p> <p>システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集、p.ROMBUN NO.GSf04-1、日本語</p>	<p>本論文では、セル生産ラインにおける作業者の標準外動作を検出する手法を提案する。我々の提案手法は、(1)人の動きの検知、(2)動的時間伸縮法(Dynamic Time Warping)を使用した動作時間の測定、(3)動作時間分析、の3つの機能で構成されている。本手法を工場のセル生産ラインに適用し、有効性を検証した。その結果、標準外動作の検出にかかる時間が、従来手法では10時間かかっていたところ、我々の手法を用いると2.5時間に短縮できることを確認できた。上記から、我々の方法はセル生産ラインの改善活動の効率を高めることができる、と結論付けた。</p>
<p><b>ガウス過程回帰を用いた卓球ロボットと対戦する人間の打撃結果予測</b></p> <p>田中一敏(東京大学 情報理工学系研究科)、金沢星慶(東京大学 情報理工学系研究科)、中山雅宗(技術・知財本部 研究開発センタ)、國吉康夫(東京大学 情報理工学系研究科)</p> <p>日本ロボット学会学術講演会、2019年、日本語</p>	<p>人間を含む環境で運用されるロボットは、変化し続ける環境を知覚、認識し、状況に応じた運動を短時間で計画、実行する必要がある。卓球は、そのようなロボットの機能評価に適した実験設定である。卓球においてロボットは、相手がボールを打撃してロボットが打撃するまでの短い時間に運動を計画して、実行する。このため、相手が打撃したボールの軌道を正確に予測することに加えて、相手の動きから打撃結果を予測できれば、運動に多くの時間を割くことができ、限られた運動性能を最大限に発揮して、より多くの打球に対応可能になる。本稿では、ロボット側に配置されたセンサによって計測した人間の上半身、ラケット、ボールの運動を用いて打撃結果を予測する手法を提案した。</p>
<p><b>周波数スイープによる系統インピーダンス推定法を用いた補償器の最適設計</b></p> <p>Optimization of Compensator using Grid-impedance Estimation Method by Frequency Sweep</p> <p>田内宏憲(技術・知財本部 研究開発センタ)、西川武男(技術・知財本部 研究開発センタ)、上松武(技術・知財本部 研究開発センタ)</p> <p>パワーエレクトロニクス学会誌、2018年、パワーエレクトロニクス学会、Vol.44、p.66-72、日本語</p>	<p>近年、再生可能エネルギーの一つである太陽電池の普及のために、太陽電池向けPCS (Power Conditioning System) の小型・ローコスト化が求められている。PCSの部品の中で出力LCフィルタのインダクタ(以下ACL)は体積・コストともに大きく占有しているため、小型化することでシステム全体の小型・ローコスト化に大きく貢献する。本論文では、周波数スイープによる系統インピーダンス推定法を用いた補償器の最適設計について述べる。系統インピーダンス推定には周波数をスイープし、制御系の構成を変化せず、補償器パラメータを最適値に調整する手法を提案する。そのため、設置場所によって異なる系統インピーダンスに対して想定される最大値で設計する必要がなく、ACLの小型化を実現できる。</p>



本誌掲載の論文及びバックナンバーの論文は  
OMRON TECHNICS web サイトよりご覧いただけます



<https://www.omron.co.jp/technology/omrontechnics/>

The English version of the papers and back  
issues in this journal are available on the  
OMRON TECHNICS Global Website.



<https://www.omron.com/global/en/technology/omrontechnics/>

オムロンの最新技術は Twitter でも発信しています

 **@Tech\_OMRON**



OMRON TECHNICS  
推進委員会

推進委員長	大平 真琴			
推進委員	阪元 智朗	澤野井 幸哉	篠原 正幸	高木 徳生
	浪江 正樹	西尾 英俊	馬淵 雅夫	(50音順)
事務局	荻野 裕貴	行衛 満智子		
編集協力	オムロン エキスパートリンク株式会社 三宅 慶幸			

## OMRON TECHNICS 非売品

第52巻 第1号  
通巻163号 (年1回発行)  
(禁無断転載)  
ISSN 0474-1315

編集兼発行人 宮田 喜一郎  
発行 オムロン株式会社 技術・知財本部  
〒619-0283 京都府木津川市木津川台9-1  
電話 0774-74-2000 (代)

2020年5月10日 発行

Published by OMRON Corporation  
9-1, Kizugawadai, Kizugawa-city,  
Kyoto, 619-0283 Japan  
TEL 0774-74-2000

OMRON

