

三菱電機技報

9

2026
Vol.100 No.9

イノベーティブカンパニーへの変革を牽引する
ものづくり技術

No.9

特 集	イノベティブカンパニーへの変革を牽引するものづくり技術	Manufacturing and Engineering Technologies Driving Transformation into Innovative Company
巻 頭 言		
イノベティブカンパニーへの変革を牽引するものづくり技術……………	1-01	Manufacturing and Engineering Technologies Driving Transformation into Innovative Company Yusuke Shijiki
志自岐雄介		
モデルベース開発を活用した電気・構造設計のリードタイム削減……………	2-01	Lead Time Reduction in Electrical and Structural Design Using Model-Based Development Masaki Tanimoto, Hirokazu Nakabayashi, Yuuya Yokoyama, Seiji Maruyama, Taichi Usami
谷本将貴・中林弘一・横山裕哉・丸山誠司・宇佐美太一		
次世代高性能水冷フィン“よりよりフィン”……………	3-01	“Yori-Yori Fins”: Water-Cooled Heat Sink with Three-Dimensionally Interlaced Helical Flow Channels for Enhanced Thermal Performance Masayoshi Tamura, Yuhei Nagashima
田村正佳・永島悠平		
物理センサーの限界を突破するバーチャルセンシング技術……………	4-01	Virtual Sensing Technology: Breaking Limits of Physical Sensors Naomichi Yanagidate, Kengo Komori
柳館直成・古森健吾		
シリコン薄膜の新規空孔形状の解析に基づく熱電性能向上……………	5-01	Thermoelectric Enhancement by Numerical Study of New Nanohole Designs in Silicon Thin Films Nobuhiko Kajinami, Misaki Hanaoka, Mitsuhiro Matsumoto
梶並信彦・花岡美咲・松本充弘		
インフラ設備の余寿命を短時間で評価する画像診断技術……………	6-01	Image-Based Diagnostic Technology for Rapid Assessment of Remaining Service Life of Infrastructure Facilities Masaki Umeda, Norihiko Hana
梅田政樹・葉名紀彦		
からくりを活用した安価な自動化による現場発のイノベーション……………	7-01	Innovation from Manufacturing Site through Low Cost Automation Using Karakuri Mechanisms Nao Shimosada, Yuki Ito, Kohei Murakami
下佐田直央・伊東佑規・村上光平		
基板穴あけ用レーザ加工機向けレーザ走査の高速化技術……………	8-01	High-Speed Galvano Scanners for Laser Drilling Machines Toshie Nakasuji, Koji Funaoka, Kengo Uchiyama, Naohiro Takahashi
中筋淑江・船岡幸治・内山研吾・高橋尚弘		
SiCインバーター・モーター製品の絶縁基盤技術……………	9-01	Electrical Insulation Technologies for SiC Inverter-Motor Systems Hirotaku Ishikawa, Kazutake Kadowaki, Yoshitaka Miyaji, Kazuki Endo
石川裕卓・門脇和丈・宮路仁崇・遠藤和樹		
抗菌プラスチックの品質向上に資する材料分析技術……………	10-01	Analytical Methods for Improving Quality of Antimicrobial Plastics Takeru Noda, Akira Shiga
野田 健・志賀 彰		
ネットワーク品質とアプリケーションモデルをマッピングするクロスレイヤー型品質評価技術……………	11-01	Cross-Layer Quality Evaluation Technique Mapping Network Quality and Application Models Naoki Kamiyoshikawa, Masahiko Hasegawa, Ikutoshi Katayama, Tetsuya Aoyama
上吉川直輝・長谷川仁彦・片山育星・青山哲也		
電波伝搬と生産ラインのシミュレーション連携……………	12-01	Integrated Simulation of Radio Wave Propagation and Production Lines Takuro Mamiya, Takayuki Nakanishi, Kazuki Niino, Kengo Nishimoto
間宮拓朗・中西孝行・新納和樹・西本研悟		

執筆者の所属は執筆時のものです。

本号に記載されている会社名、製品名はそれぞれの会社の商標又は登録商標です。

三菱電機では、サステナビリティ経営を実現するビジネスエリアとして、「インフラ」「インダストリー・モビリティ」「ライフ」を設定しています。

三菱電機技報ではこのビジネスエリアを中心に特集を紹介しています。

今回の特集では全エリアを支える基盤となる“イノベティブカンパニーへの変革を牽引するものづくり技術”をご紹介します。

巻頭言

イノベティブカンパニーへの変革を牽引する ものづくり技術

Manufacturing and Engineering Technologies Driving Transformation into
Innovative Company

志自岐雄介 Yusuke Shijiki

上席執行役員 ものづくり技術本部長

Executive Officer (Associate), Vice President, Corporate Manufacturing and Engineering



現在、私たち製造業は大きな転換点にあります。生成AIをはじめとする破壊的な技術の台頭、地政学リスクの複雑化、及び脱炭素社会への要請など、外部環境はかつてない速さで変化しています。一方、グローバル市場に目を向ければ、海外の先進企業はデジタル技術を基盤とした徹底的な標準化や自動化を推進し、開発から量産に至るリードタイムを極限まで短縮することで、高品質な製品を驚異的なスピードで市場に投入しています。こうした厳しい環境下で、変化に俊敏に追従できるものづくりを実現し、新たな付加価値を創出していくことが、競争力を左右する喫緊の課題になっています。

三菱電機は、この難局を打破し、持続的な成長を実現するため、デジタル基盤“Serendie”を活用したソリューション創出と、その核となるコンポーネント強化を両輪で推進し、現場データと知見の循環によって新たな価値を創出する“循環型 デジタル・エンジニアリング”を本格展開していきます。この変革を推進するに当たって、私たち一人一人が自律的に考えて、行動するためのよりどころが、当社グループ理念“飽くなき探求心と驚きの技術で、未来の価値を創造する”になります。私たちはこの理念の下、長年磨き上げてきた“現場の知見”と“最新のデジタル技術”を高い次元で融合させて、これまでの延長線上にはない革新を次々と形にしていくことで、新たな価値を社会に提示し続ける“イノベティブカンパニー”の姿を実現していきます。

ものづくり技術本部は、開発からサービスに至る広義の“ものづくり技術”で各事業本部を支えて、全社の強靱(きょうじん)な事業基盤を構築する牽引(けんいん)役を担っています。現在、私たちが力を入れている二つの取組みについて紹介します。

一つ目は、設計や製造領域で全社的な“横ぐし”を通して、経営体質を強化することです。設計領域では、設計手法やデジタルツールの共通化を推進し、その基盤の上で、実機試作やドキュメントに依存した従来手法を、シミュレーションやAIを駆使したフロントローディング設計へと刷新する設計プロセス改革に取り組んでいます。設計現場の無駄を徹底的に排除し、設計作業を抜本的に効率化することで、開発リードタイムの短縮と品質向上を高いレベルで両立します。製造領域では、事業間での仕様・設備・材料の標準化や知見・ノウハウ共有を徹底し、全社一体となったものづくりの最適化を進めることで、ものづくりコストの削減と技術力の更なる向上を追求しています。

二つ目は、こうした足元の基盤強化と並行して取り組んでいる、将来の“知能化工場”の実現に向けた開発です。AIエージェントによる自律的な生産計画や、人と機械が柔軟に協調するヒューマンアシストシステム、さらには無人化を担うヒューマノイドロボットの活用など、デジタルとフィジカルを高度に融合させた次世代のものづくり像を描いて、先端技術の現場実装を迅速に進めていきます。

本号では、こうした変革を具体化する成果として、設計・開発の高度化からコンポーネントの高性能化、さらにはAIやシミュレーションを駆使した現場改善に至るまで、幅広い技術を紹介しています。グローバル市場で、私たちが持つコンポーネントは大きな武器であり、それを支える“ものづくり技術”こそが競争力の源泉です。これらの成果は、グローバル競争での独自の優位性を切り拓く原動力になります。

私たちは、本号の成果を糧に、スピード感を持って変革を推進していきます。当社グループは、これからも一人一人の情熱と技術を掛け合わせて、ものづくりの絶え間ない改革を通して、社会に“驚き”と“確かな価値”を届ける挑戦を続けていきます。

モデルベース開発を活用した 電気・構造設計のリードタイム削減

Lead Time Reduction in Electrical and Structural Design Using
Model-Based Development

谷本将貴*
Masaki Tanimoto

中林弘一†
Hirokazu Nakabayashi

横山裕哉‡
Yuuya Yokoyama

丸山誠司*
Seiji Maruyama

宇佐美太一*
Taichi Usami

*三菱電機㈱ 設計技術開発センター

†同社 コンポーネント開発センター

‡三菱電機エンジニアリング㈱

要 旨

近年のインバーター開発では、高出力化・高周波化・小型高密度化に伴って、電力損失による温度上昇が設計上のボトルネックになっている。従来は電気設計と構造設計を別々に進めて、実機試験で温度上昇を検証していた。この結果、試作回数が増加し、開発リードタイムが長期化していた。今回、製品企画段階から損失計算を自動化・高精度化し、1D熱解析モデルと3D熱解析モデルを活用したモデルベース開発プロセスを構築した。回路シミュレーションによる損失計算と理論式ベースで熱計算を連成し、各部品及び空気の温度を半自動的かつ短時間で計算できる1D熱解析モデルを開発した。これによって、製品企画段階で筐体(きょうたい)の冷却方式の検討と最悪条件の把握を可能とした。また、計算時間と計算精度を両立させて、各部品内の温度分布を計算可能な3D熱解析モデルを開発した。これによって、試作レス、かつ短期間で品質・性能の作り込みを可能とした。

1. ま え が き

モデルベース開発(Model Based Development: MBD)、モデルベースシステムズエンジニアリング(MBSE)は、一般にシミュレーションモデルに限らず、文書や図面に記載されていない抽象化された要求や機能を表現したツリーやブロック図を共通言語として用いて、段階的に詳細化・具体化しながら事前評価を進める開発手法のことを指す。特に、MBDは実行可能モデルによる挙動検証と実装への橋渡しを重視し、MBSEはシステム全体の整合性・トレーサビリティ・ライフサイクル管理を重視する。本稿ではMBDを、1D-CAEと3D-CAEによる実機試験前の設計・検証に取り入れた開発手法と定義する。

一般的な開発プロセスでは、開発上流の製品企画段階で目標性能の検討や仕様分析が不十分な場合、開発下流の試作検証段階で手戻りが発生するという課題がある。開発下流では、部位・技術分野別で詳細設計するため部分最適になりやすいことや、製品システム全体の目標性能達成の目的が試作検証の段階でようやく得られるといった課題がある。近年注目されるMBDは、“システム全体の挙動を高速に把握・比較検討することで製品企画段階での主要諸元の決定精度を高めて、試作回数や開発手戻りを低減する”ことを目的としている。また、構想設計で1D-CAEを活用、詳細設計で3D-CAEを活用というように、位置付けを明確に区別している⁽¹⁾。

MBDを成功させるためには、各開発プロセスでボトルネックになっている工程を抽出して、これを解消できるシミュレーションモデルの構築が必要になる。今回、汎用インバーターでの従来の開発プロセスを題材とし、構想設計の1D-CAE活用と詳細設計の3D-CAE活用によるMBDプロセスを構築した。

2. 従来のインバーター開発プロセスの課題

モーターの回転速度やトルクを制御するための交流電源の周波数と電圧を変換する汎用インバーターには、近年高出力化・高周波化・小型高密度化が求められている。一方、電力損失による温度上昇に対して各部の保証温度を満足するための熱設計が設計上のボトルネックになっている。また、制御対象の定格容量に応じて機種がラインアップされており、複数の開発を同時に効率的に進める手法が求められている。

図1は、従来の開発と目指す姿について、汎用インバーターの開発を例にとって示したものである⁽²⁾。従来の開発では、詳細設計で部品個別に検討することが主流であり、かつ電気設計・電磁界設計、機械・熱設計を別々に進めて、システム的な相互影響を試作評価で確認していた。また、部品や制御条件のパラメーターが多く最悪条件の特定が困難であるため、勘と経験に基づいた設計になっていた。このため、様々な部品や制御条件の組合せによって想定以上の電力損失と温度上

昇が生じて、試作評価回数の増加と開発リードタイムの長期化が課題になっていた。また、顧客からの多様化する要求仕様に対して、検証が必要な制御パターン・負荷条件・冷却ファン条件など組合せが多く、上流工程で網羅的に検討することが困難であった。

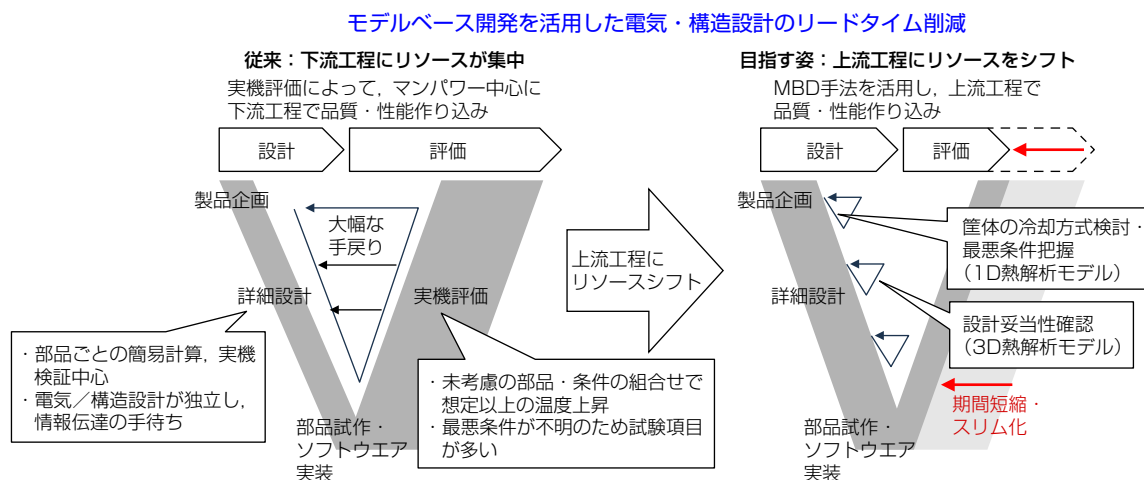


図1-従来の開発と目指す姿

本稿では、製品企画段階から損失計算を自動化・高精度化し、1D熱解析モデルと3D熱解析モデルを段階的に連成するMBDプロセスを述べる。具体的には、製品企画段階では回路シミュレーションによる自動化された損失と、1D熱解析モデルを用いて各部温度を短時間に計算することで、筐体の冷却方式検討と最悪条件を把握できる。また詳細設計段階では、3D熱解析モデルを活用することで、局所温度の特定による設計妥当性確認を短期間で行うことができる。これによって、従来は下流工程に集中していた品質・性能作り込みのリソースを上流工程にシフトする。上流工程では電気設計者と構造設計者の間で検討のサイクルを小さく回すことで、設計者間のコミュニケーションが加速し、迅速な意思決定が可能になる。なお、モデルを用いて設計知識を共有することで、設計思想や知識の継承・拡張に対しても効果を得られる。

3. 損失と温度の連成手法

この章では、損失と温度の連成手法について述べる。

3.1 連成手法の概略

基本方針は“製品企画段階では設計の妥当性や成立性を短時間で評価し、詳細設計段階では高精度な解析で精査する”ことである。今回開発した損失と温度の連成計算手法の概略図を図2に示す。電気設計者は、主回路コンデンサの静電容量、寄生抵抗等の回路条件及び電源電圧、モーター電流等の制御条件を回路シミュレーションや三菱電機製のパワーモジュール損失計算ツール“MELCOSIM”に入力して損失計算結果を出力する。構造設計者はヒートシンクや筐体の形状等の情報を1Dの熱計算モデルに与えて、損失計算結果を入力条件として設定することで温度を計算する。これらの入力設定及び出力結果を一元管理することによって、損失・温度計算を自動化・ライブラリー化して多数条件の計算を短時間で評価することを可能にした。計算で確認した最悪条件や温度上昇が厳しい箇所については、3D熱解析モデルで詳細に温度を確認する。

3.2 損失予測手法

この節では、製品企画段階と詳細設計段階での損失予測手法についてそれぞれ述べる。

(1) 製品企画段階での損失予測手法

汎用インバーターを構成する各部位の損失を計算する手法を図2の①、②、③、④、⑤に示す。まず対象の汎用インバーターの回路条件及び制御条件を設定する(図2の①)。そして汎用インバーターの主回路を模擬した回路シミュレーションによって各条件での主回路各部の電圧・電流の時系列波形を計算する(図2の②)。計算された時系列波形を用いて、

パワー素子及びコンデンサー、リアクトル等の主回路構成部品の損失を計算し、計算結果を集約・一覧化する(図2の③)。パワー素子の損失の計算では、三菱電機製のパワーモジュール損失計算ツールMELCOSIMによる計算結果(図2の④)に対して、パワーモジュールのパッケージが持つ寄生インダクタンスやパワー素子の温度特性等を考慮して素子内の損失発生比率を分配し、回路シミュレーション結果(図2の②)と突き合わせて精度向上を図って、計算結果を出力する(図2の⑤)。これらの手順をツール内で自動化し、使用者が損失を求めたい複数の“回路定数条件及び動作条件”を設定することで、短時間に各条件での各部損失計算結果を得る。

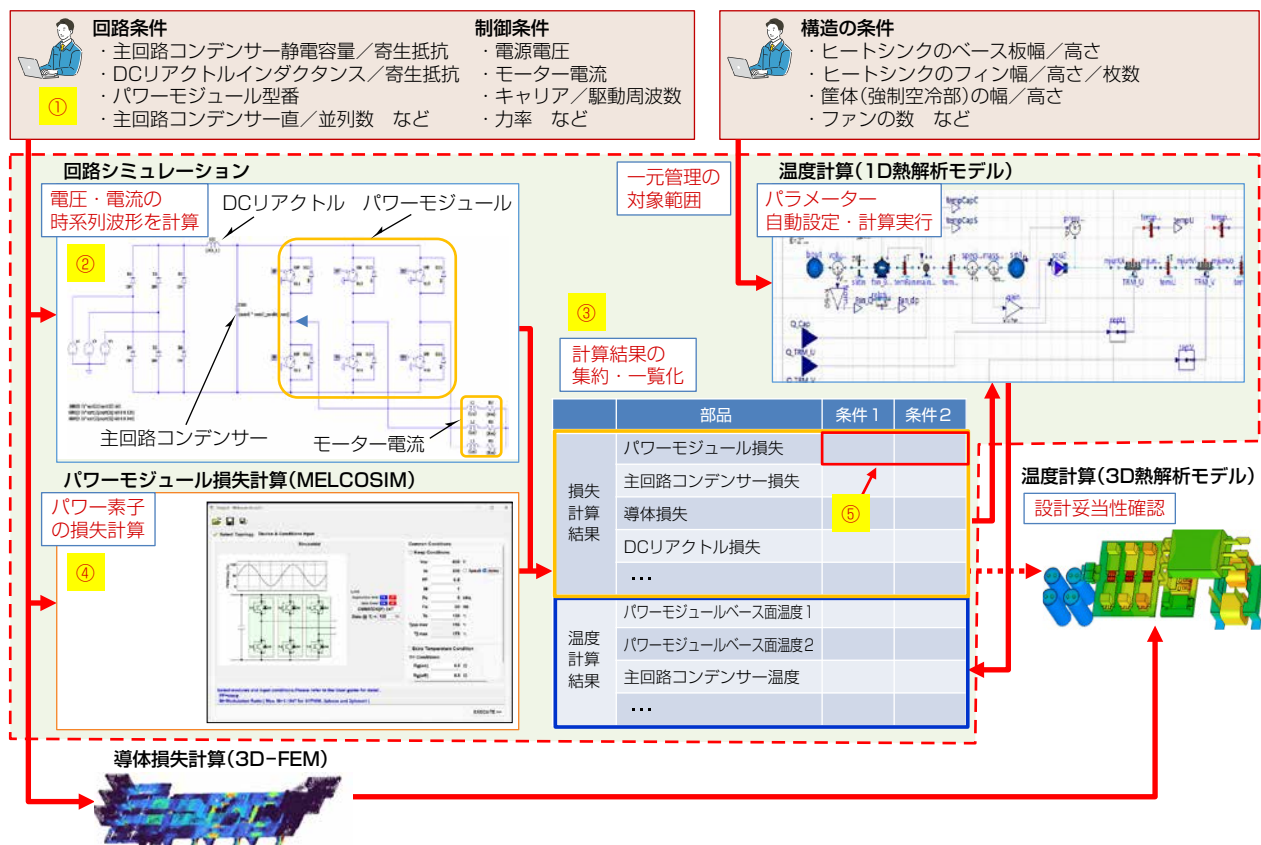


図2- 損失-温度連成計算手法の概略

(2) 詳細設計段階での損失予測手法

各部品間を電氣的に接続する導体の形状は様々であり、発生損失や熱的特性が導体形状に強く依存する。その課題に対してこの手法では、3D-FEM(三次元の有限要素法によるシミュレーション手法)を用いて損失密度分布を計算することで、損失予測精度を高めた。各部電流の時系列波形を用いた3D-FEMは計算時間が長くなることから、この手法では主回路の各部に流れる複雑な電流波形をDC電流値とAC電流実効値に分解し、それぞれ電流解析を行った結果を合成して電流及び損失密度分布を求める。これによって、解析精度を維持しながら計算時間を1/120に短縮し、複数の条件で損失計算の利便性を向上させた⁽³⁾。また得られた損失密度分布データを3D熱解析モデルへ引き継ぐことで、様々な導体形状での温度予測精度を高めた。

3.3 温度予測手法

この節では、製品企画段階と詳細設計段階での温度予測手法についてそれぞれ述べる。

(1) 製品企画段階での温度予測手法

図3は汎用インバーターを側面から見たときの概略の断面図であり、筐体と内装される主要発熱部品とその配置、及び主要発熱部品の空気と熱の流れの概略を示している。汎用インバーターは主に、パワーモジュールとそれを冷却するヒートシンク、主回路コンデンサー、ファンが配置された強制空冷側と、基板や導体等が配置された自然空冷側に分けることができる。構造設計では、主要発熱部品であるパワーモジュールと主回路コンデンサーを冷却するためのファンの仕様や

冷却用のヒートシンクサイズ、部品のレイアウトとそれに伴う筐体サイズを検討する。製品企画段階ではオブジェクト指向のマルチドメインモデリング言語(Modelica^(注1)等)を用いて1Dの熱解析モデルを構築し、装置全体の熱挙動を計算する。強制空冷側は汎用インバーター筐体内部の吸気から排気までの流路、主回路コンデンサー、ヒートシンクの要素を1Dでモデル化し、各要素を熱回路網で連成するモデルを構築した。自然空冷側はパワーモジュールに接続される導体や導体に接続される外装ケーブル等で構成される。導体の形状は詳細設計段階で検討するため1Dの熱解析モデル化の対象外とした。このモデルに3.2節で述べた手法で計算した損失を各部品に入力することで、主要部品の表面温度を数秒～数十秒で算出可能とした。これによって、短時間で複数条件の比較(ファンの風量、ヒートシンク形状等)や最悪条件の当たり付けが可能になった。

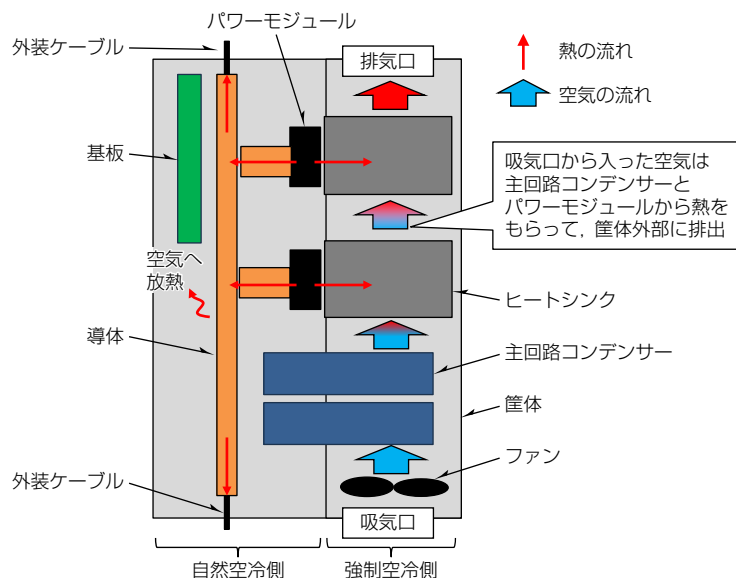


図3-汎用インバーターを側面から見た概略の断面図と主要発熱部品の熱の流れ

(2) 詳細設計段階での温度予測手法

詳細設計段階では3Dの熱流体解析手法(CFD)を用いて各部品の詳細な熱挙動を確認し、各部品の判定温度から設計の妥当性を判断する。CFDのモデル化の際は、精度と計算時間のバランスを考慮し、パワーモジュール、ヒートシンク、主回路コンデンサー、導体等の主要部品の解析メッシュを詳細に設定した。ヒートシンクは圧力損失を等価モデルとしており、主回路コンデンサーは最も高温になる中心温度を把握するために内部構造を含めた等価モデルとした。導体の温度計算では、導体の自己発熱と各部品との接続部からの伝熱を考慮する必要がある。そこで、3.2節で述べた手法で計算した導体の損失密度分布データをCFDモデルにインプットし、パワーモジュールとの接合部からの受熱と、外装ケーブルからの放熱をモデル化した。

(注1) Modelicaは、Modelica Associationの登録商標である。

4. 製品開発への適用

3章で述べた手法を汎用インバーター開発に適用し、実測と計算結果を比較した。図4にパワーモジュールを冷却する2種類のヒートシンクと主回路コンデンサーの表面温度の結果を示す。また、図5にパワーモジュールと外装ケーブルを接続する導体のうちのひとつについて、11点のノードの温度をプロットした結果を示す。いずれも実測と計算の値がほぼ一致しており、モデルベースによる温度予測が可能であることを確認した。

この開発手法を実際の製品開発プロセスに適用した結果、複数の制御条件、ファンの選定、冷却用のヒートシンクのサイズ及び部品のレイアウトと、これらに伴う筐体サイズを製品企画段階で検討することが可能になり、開発上流の品質・性能の作り込みを実現できた。また、詳細設計段階で各部品の温度計算による設計の妥当性を確認することで、手戻りなく温度評価試験を完了し、開発期間を30%削減した。さらにファンの仕様及びヒートシンクのサイズ、導体厚みの適正化を実現した。

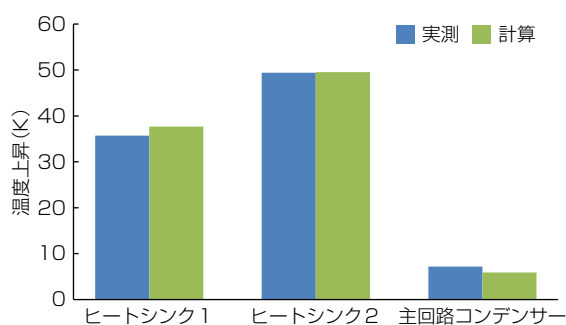


図4-ヒートシンクと主回路コンデンサの表面温度の実測と計算比較

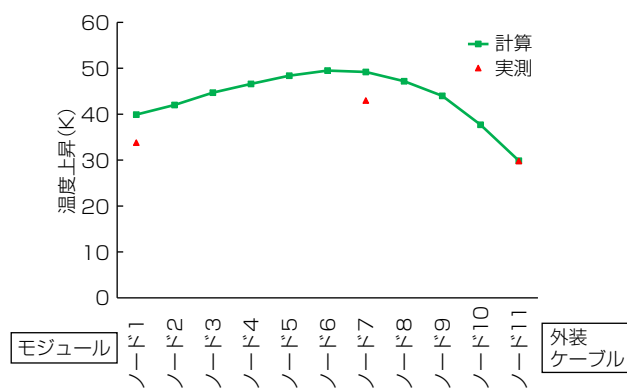


図5-一つの導体のノードの温度の実測と計算比較

5. む す び

損失計算と温度計算の自動化・統合化を核にしたMBDプロセスを開発した。製品企画段階では回路シミュレーションによって損失計算を自動化し、1D熱解析モデルを用いて各部温度を短時間に計算することで、筐体の冷却方式検討と最悪条件を把握した。また詳細設計段階では、3D熱解析モデルを活用することで局所温度を特定し、設計の妥当性を短期間で確認した。これによって、従来は下流工程に集中していた品質・性能作り込みのリソースを上流工程にシフトし、上流工程では電気設計者と構造設計者の間で検討のサイクルが小さく回ることで、設計者間のコミュニケーションが加速し、迅速な意思決定が可能になった。また、モデルを用いて設計知識を共有することで、設計思想や知識の継承・拡張が可能になった。

今後は、今回開発した手法を次世代汎用インバーターのラインアップ開発に活用していく。さらに要求から機能・構造までの設計情報を、MBSEを用いて階層化することで、機種開発時の新機能追加の影響確認を効率的に行っていく。

参 考 文 献

- (1) 野間口 大：モデルベース開発，その虚々実々，一般社団法人日本機械学会 2023年度年次大会，F121-2 (2023)
- (2) 経済産業省：自動車新時代戦略について 日本の電動化政策(xEV戦略)とAICEへの期待 (2018)
https://www.aice.or.jp/up_file/1584606982-937552.pdf
- (3) 電気自動車用インバーターの熱解析手法，三菱電機技報，99，No.1，1-5-06 (2025)

次世代高性能水冷フィン “よりよりフィン”

“Yori – Yori Fins” : Water – Cooled Heat Sink with Three – Dimensionally Interlaced Helical Flow Channels for Enhanced Thermal Performance

*設計技術開発センター

要 旨

車載インバーターやAIデータセンター向け的水冷ヒートシンクには、パワー半導体やGPU(Graphics Processing Unit)の高発熱密度化への対応と低コスト化の両立が不可欠である。従来のヒートシンクに用いられるピンフィンでは発熱体直下に高温の冷却水が偏在する水温むらという課題を抱えており、フィン形状の改善だけでは性能向上には限界があった。三菱電機は螺旋(らせん)流路を三次元的により合わせた独自の構造を持つ“よりよりフィン”を開発し、水温むらの根本的な解消、放熱面積の拡大、界面熱伝達率の向上を同時に実現した。これによって、フィン単体の放熱性能を示すベース面積基準熱伝達率を現行品(当社アルミニウム製ピンフィン)と同一条件の下で51%向上させた。この構造は有孔プレートを積層・接合することで実現し、順送プレス及びろう付による量産化の見通しが立った。これによって、アルミニウム製ながら銅ピンフィンと同等の熱抵抗を達成しつつ、銅ピンフィン比で67%のコスト低減を実現した。

1. ま え が き

近年、車載インバーターやAIデータセンターに用いられるパワー半導体やGPUの小型高出力化・高集積化が急速に進んでいる。これに伴って素子の発熱密度が増大し、冷却性能の確保が更に困難になっている。それに加えて海外サプライヤーとの競争激化によってヒートシンク自体の低コスト化も同時に求められている。

当社は従来、高熱伝導アルミニウム合金製又は銅製のピンフィン型ヒートシンクを採用してきた。しかし、フィン形状の最適化による性能向上には限界があり、新たな流路構造の創出といった根本的なアプローチの刷新が必要であった。

本稿では、その限界を超えた新型水冷フィンよりよりフィンの着想、製造技術、及び性能について述べる。

2. 従来型ピンフィンの課題

従来、水冷機器のヒートシンクには、円柱・角柱・六角柱・変形断面など多様な形状のピンフィンが用いられてきた(図1)。フィン間を流れる冷却水は発熱体から熱を受けて昇温するが、ピンフィンではベース面垂直方向への流れ成分が生まれにくい。このためベース面の遠方を流れる低温の冷却水との混合が起こりにくく、高温の冷却水がベース面近傍に偏在する。この現象を、本稿では“水温むら”と呼ぶ(図2)。水温むらの発生によってベース面-冷却水間の温度差が減少

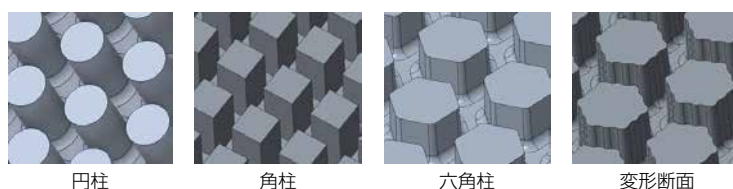


図1-従来型ピンフィンの形状例



図2-ピンフィンでの水温むら発生時の解析温度コンターの例

し、冷却性能が低下する。この現象はピンフィンに共通する根本的な課題であり、フィン形状改善だけでは解決に限界がある。銅のような高熱伝導材料の適用は有効な対策だが、コストが課題になる。

3. よりよりフィンの着想と構造

この章では、よりよりフィンの着想と構造について述べる。

3.1 水温むら解消の着想—螺旋流路のより合わせ—

2章で述べた課題を解決する鍵は、ベース面垂直方向を含む三次元的な攪拌(かくはん)を流路構造に組み込んで、ベース面近傍に常時低温の冷却水を供給し続けることにある。当社は、螺旋流路を複数本、互いに絡み合うように三次元配置した独自の構造よりよりフィンを考案した(図3(a))。よりよりフィンの名称は、隣接する螺旋流路が互いにより合わさるように三次元的に絡み合う構造的特徴に由来する。着想の核心は、螺旋流路を並べるのではなく“より合わせる”点にある。より合わせることで螺旋流路がフィン内部を密に占有し、ベース面積(発熱体搭載面積)当たりの放熱面積(フィン表面積)を最大化している。この構造が生み出す三つの放熱促進メカニズムを3.2節に示す。

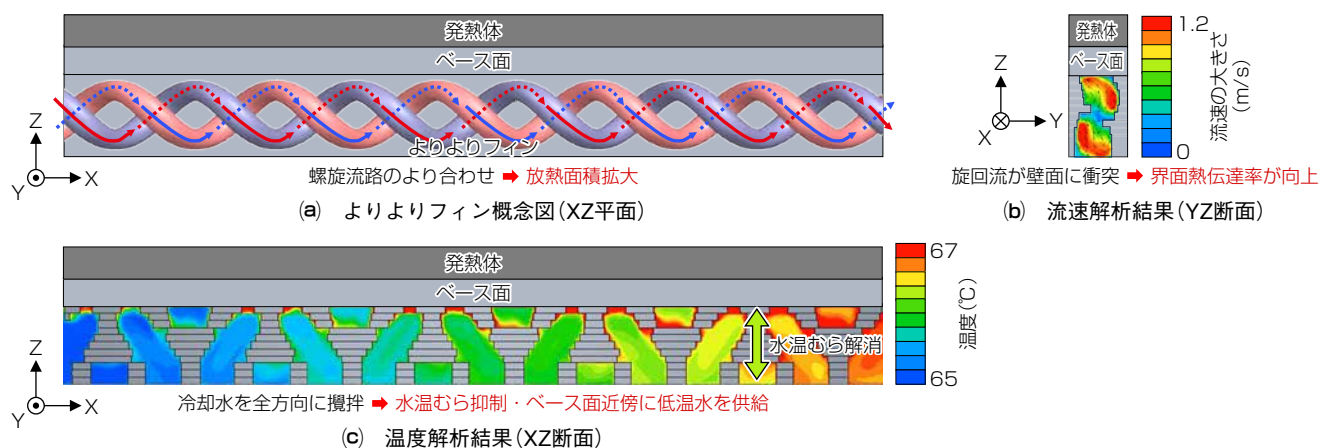


図3-よりよりフィンの構造概念と三つの放熱促進効果

3.2 三つの放熱促進メカニズム

よりよりフィンが従来型ピンフィンを大きく上回る冷却性能を発揮できる理由は、次に述べる三つのメカニズムの相乗効果にある。

(1) 放熱面積の拡大

図3(a)に示すように、高密度により合わされた螺旋流路によって、ベース面積当たりの放熱面積が従来型ピンフィンと比べて大幅に拡大する(現行品比40%拡大)。ただし、放熱面積の拡大が冷却性能向上に結び付くためには、拡大した表面が放熱面として有効に機能する必要がある。一般に、放熱面積の拡大は放熱利用率の低下を招きやすく、さらに水温むらが大きい場合には表面で十分な温度差が生じない。この点で、後述する(3)の水温むら解消が重要になる。

(2) 界面熱伝達率の向上

図3(b)に示すように、螺旋流路内に旋回流が生み出されて、冷却水が流路壁面へ連続的に衝突し続ける。特に、発熱体直下のベース面に対する冷却水の垂直衝突によって、温度境界層の発達を抑制し、界面熱伝達率を向上させる(現行品比6%向上)。

(3) 水温むらの根本的解消

螺旋流路によって冷却水はベース面垂直方向を含む全方向に自律的に攪拌される。この攪拌によって、図3(c)に示すように昇温した高温の冷却水がベース面近傍に偏在することを防ぐとともに、常に低温の冷却水をベース面近傍へ供給する。これによって、ピンフィンでは原理的に不可避であった水温むらを根本的に解消できる。

水温むら解消の効果は有効フィン効率 η_{eff} に波及する。ここで、 η_{eff} はフィン表面の放熱利用率を示す古典的フィン効

率 η_0 に冷却水温度の不均一の影響を加味した指標 ($\eta_{eff} = \eta_0 \cdot \phi$, $\phi \leq 1$ で定義) であり, 冷却水温度が一樣であれば η_0 と等しくなる。従来型ピンフィンでは, 水温むらによって ϕ が低下し η_{eff} が η_0 を下回る。よりよりフィンでは水温むらの解消によって, ϕ が 1 に近づいて η_{eff} が η_0 に回復する。一般に, 放熱面積拡大は η_0 を下げる方向に働くが, よりよりフィンでは, ϕ の向上が η_0 の低下分を上回る効果によって, 結果として η_{eff} を現行品比 2 % 向上させることができた。この 2 % は放熱面積拡大による η_0 低下分を差し引いた正味の改善効果であり, 水温むらの解消が(1)及び(2)の効果を損なわず機能させていることを示している。

3.3 有孔プレートによる積層構造

このような三次元螺旋流路を実製品として成立させるには, 構造を製造可能な形に落とし込む必要がある。 casting, ダイカスト, 金属 3D プリンター等の一般的な製造手法では, 内部形状の高精度な成形が困難, 又はコストが過大になる。当社はこの課題を“有孔プレートの積層構造”によって解決した(図 4)。具体的な量産プロセスへの展開は 4 章で述べる。

よりよりフィンは, アルミニウム製の有孔プレートを複数枚積層することで構成される(図 4(a))。各プレートはそれぞれ異なる穴形状を持ったシンプルな平板であり, 積層方向に適切な順番と向きで重ね合わせることで三次元的により合わせた螺旋流路が形成される仕組みである。これによって, 板金プレス加工とろう付という簡便な製造プロセスで, 複雑な内部流路を形成できる。

本稿で述べるフィンは, 6 種類の穴形状を持つ流路プレートと, 発熱体搭載面になるベースプレートで構成される。なお, 隣接する螺旋流路同士を部分的に連結する設計によって, 万一, 異物詰まりが発生した場合にも冷却水の迂回(うかい)経路が確保され, 冗長性を備えた流路構成を実現している(図 4(b))。

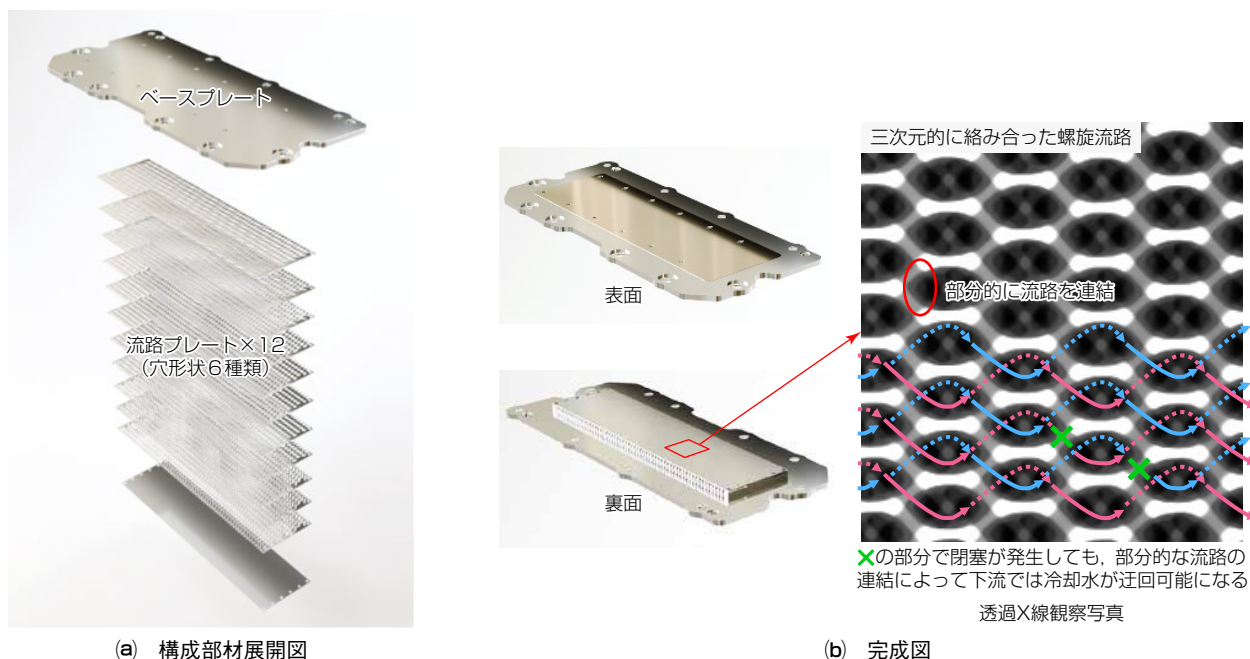


図 4-よりよりフィンの構成部材展開図と内部螺旋流路 (透過X線観察)

4. 量産製造技術の確立

複雑な螺旋構造を持つよりよりフィンを実用化するに当たっては, 二つの製造技術の新規開発が不可欠であった。

4.1 精密プレス加工技術

流路プレートには非対称・微細な穴形状が 6 種類存在し, 各穴の寸法精度が冷却性能に直結する(図 5)。このような微細かつ複雑な穴形状の高精度成形は, 一般にプレス加工での難易度の高い課題の一つである。当社は順送プレス金型を用いた連続加工技術を確立し, 6 種類全ての穴形状を一貫した製造工程内でコイル材から連続的に成形することを可能にした。

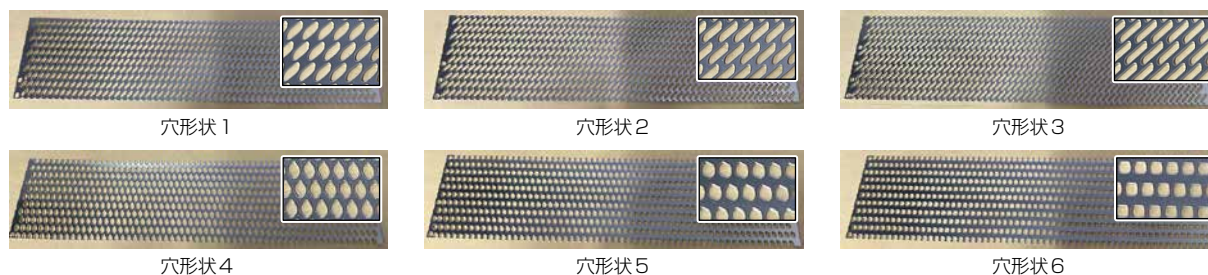


図5-精密プレス加工によって製造した6種の流路プレート

4.2 独自のプレート接合技術

よりよりフィンでは、高い冷却性能を引き出すために熱伝導率の高い6000系アルミニウム合金を使用することとした。一般的なアルミニウム部品のろう付には、表面酸化皮膜を除去するフラックス塗布工程が必要であるが、同合金は代表的な量産ろう付手法であるノコロック^(注1)ろう付で、合金に含まれるマグネシウムがフラックスの酸化膜除去能力を低下させるため、安定接合が困難な材料である。このようなケースでは、真空パッチ炉によるフラックスレスろう付が一般的であるものの、この工法はコストが課題である。

当社はこれらの課題に対して、独自の接合手法を開発し、6000系アルミニウム合金の安定接合を、従来困難とされてきた大気圧連続炉のプロセスで実現することに成功した(図6(a))。これによって、熱伝導率の高い6000系アルミニウム合金の適用による冷却性能向上、フラックス塗布工程の廃止によるプロセス簡略化及びコスト低減、さらに真空パッチ炉に代わる大気圧連続炉の採用による製造コスト抑制の3点を同時に実現した。

また、よりよりフィンの流路は微細な穴の連結によって形成されるため、ろう材量が僅かに過剰になるだけで流路の狭窄(きょうさく)を招いて、冷却性能に悪影響を及ぼす。一方、ろう材量が不足した場合には接合不良を招く。そこでろう材量を適正範囲内に制御するプロセスを確立し、高品質な接合と流路狭窄の抑制を同時に実現した(図6(b))。

(注1) ノコロックは、ソルベイ・ゲゼルシャフト・ミット・ベシュレンクテル・ハフツングの登録商標である。



図6-新規接合手法による接合品質の改善とろう材量の適正化

5. 冷却性能評価

本稿では、冷却性能の評価指標としてベース面積基準熱伝達率 h_b を用いる。放熱設計でチップ-冷却水間の温度上昇を決定する熱抵抗は h_b の逆数に比例し、 h_b は式(1)で定義される。

$$h_b = h_f \cdot (A_f/A_b) \cdot \eta_{eff} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 h_f は冷却水-フィン界面の熱伝達率、 A_f/A_b は放熱面積とベース面積の比、 η_{eff} は有効フィン効率である。これらの指標を統合した h_b は、フィン形状によらず冷却性能を公平に比較できる利点がある。

よりよりフィンと当社製ピンフィン、及び他社製フィンの冷却性能の解析比較結果を図7に示す。流量及び冷却水の物性は全ての比較対象で共通とし、他社製品については各社固有の流路構成を変更せずに解析評価した。当社製品については、流路の幅と流れ方向長さを固定した上で、現行品と同等以下の圧力損失条件でベース面積基準熱伝達率が最大になるようフィン寸法を最適化した。

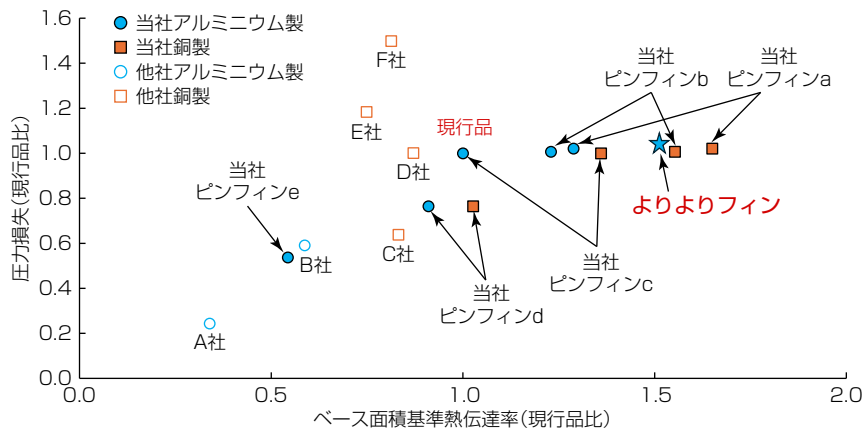


図7-フィンの冷却性能比較結果

解析の結果、よりよりフィンのベース面積基準熱伝達率は現行品と同一圧力損失条件で51%向上することが示された。式(1)に基づいてこの向上要因を分析すると、3章で示した放熱面積の40%拡大、界面熱伝達率の6%向上、及び有効フィン効率の2%向上の相乗効果として述べられる。その寄与は $1.40 \times 1.06 \times 1.02 = 1.51$ と表されて、ベース面積基準熱伝達率の51%向上に対応する。アルミニウム製でこの性能域に到達するフィンは存在せず、よりよりフィンは新たな性能領域を開拓した。また、試作品の冷却性能評価試験で、よりよりフィンのベース面積基準熱伝達率、圧力損失の実測値が製造ばらつきを考慮した解析予測範囲内に収まることを確認し(図8)、解析結果の妥当性を実証した。

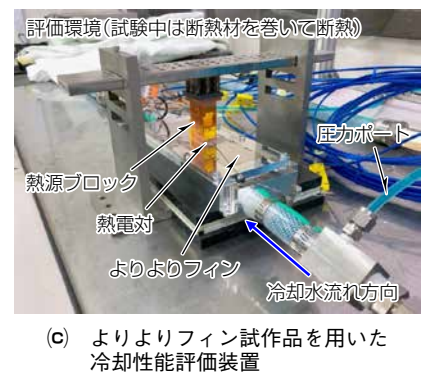
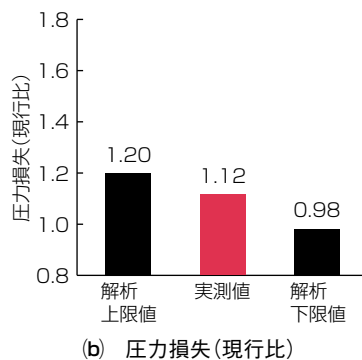
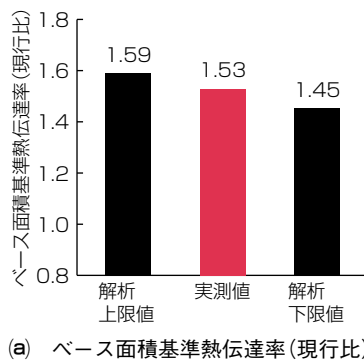


図8-よりよりフィン冷却性能の解析値と実測値の比較

6. バリエーション展開

よりよりフィンは“Openタイプ”と“Closeタイプ”の2構成を展開する(図9)。Openタイプは、従来型ピンフィンと同等の形態でウォータージャケット内に組み込んで使用する構成であり、既存機器への適用が容易である。ベースプレートには銅製・アルミニウム製の2仕様を用意し、発熱体の実装条件や熱膨張係数等の要件に応じて選択できる。

一方、Closeタイプは原価低減と性能向上の両面で今回の開発の主力と位置付ける構成である。Openタイプは、ベースプレート、フィン、ウォータージャケットがそれぞれ別部材として機能を分担しているが、Closeタイプは積層されたプレート群に機能を統合する。具体的には、①ベースプレートとしての発熱体搭載機能、②放熱フィンとしての冷却機能、③ウォータージャケットとしての水密機能を統合する。

従来型ピンフィンでは、被冷却機器への組み付けに必要な機械的強度を確保するため、ある程度の厚さを持つベースプレートが必要であった。これに対してCloseタイプは、螺旋流路群を上下から薄板の外殻プレートが取り囲む構造であり、プレート群全体でウォータージャケットの機能と機械的強度を両立する。その結果、発熱体実装面であるベース面を極めて薄く設計できて、ベース面垂直方向の熱抵抗を大幅に低減できる。よりよりフィンCloseタイプは、高いベース面

積基準熱伝達率と低いベース面熱抵抗を両立することで、アルミニウム製ヒートシンクでありながら銅ピンフィンと同等のチップ-冷却水間熱抵抗を実現した(図10)。それに加えて、材料費(銅→アルミニウム)と加工費(鍛造・切削→プレス+ろう付)の両面での低減によって、Closeタイプは銅ピンフィン比で約67%のコスト低減を実現した。

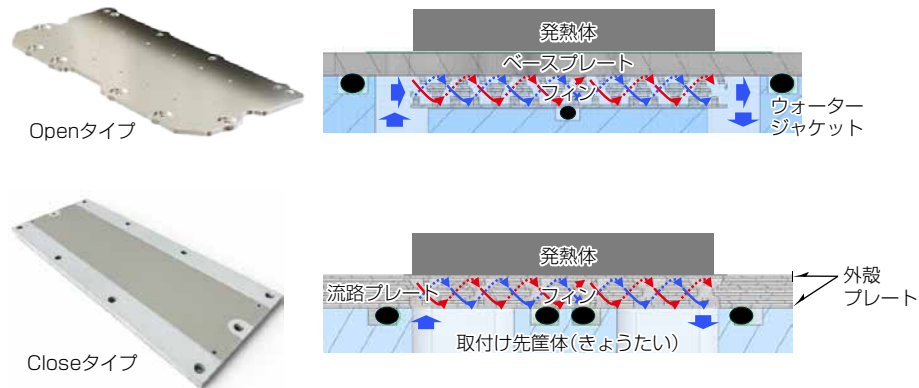


図9-OpenタイプとCloseタイプ

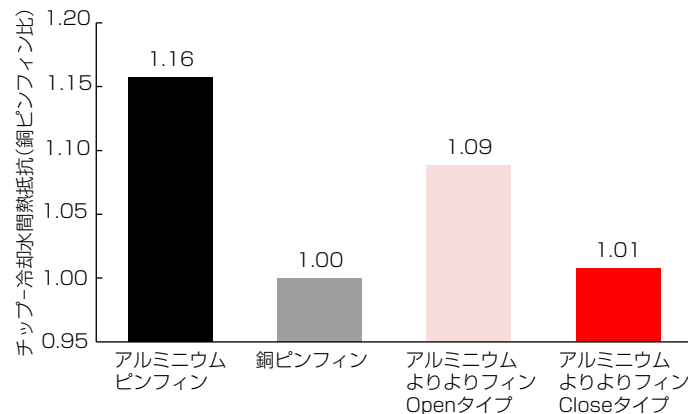


図10-チップ-冷却水間熱抵抗の比較

7. む す び

従来型ピンフィンの流路が原理的に抱える水温むらという課題を、螺旋流路をより合わせるという発想によって根本から解消した次世代水冷フィンよりよりフィンの開発成果を述べた。

主な成果を次に示す。

- (1) 螺旋流路のより合わせによって水温むらを根本解消し、同時に放熱面積拡大と界面熱伝達率向上を両立した。
- (2) 有孔プレートの積層というシンプルな構成によって螺旋流路を実現し、量産プロセス適用の見通しを得た。
- (3) 有孔プレートに要求される非対称・微細な穴形状の高精度成形を、順送プレス加工技術の確立によって実現した。
- (4) 新規接合手法を開発し、有孔プレートへの6000系アルミニウム合金の適用を低コストに実現した。
- (5) 現行品比でベース面積基準熱伝達率51%向上を実現した。
- (6) Closeタイプは銅ピンフィンと同等の熱抵抗と約67%のコスト低減を両立し、性能とコストのトレードオフを克服した。

今後は、車載インバーター及びAIデータセンター向けヒートシンクへの適用を目指して実用化開発を継続する。

物理センサーの限界を突破する バーチャルセンシング技術

Virtual Sensing Technology: Breaking Limits of Physical Sensors

*設計技術開発センター

要 旨

製品競争力向上と市場投入の迅速化に向けて、高度な数値解析を活用した設計と、評価試験レスの実現による開発リードタイム短縮が求められている。しかし、複雑化する昨今の製品を数値解析だけで設計することは難しく、計測点が数百点に及ぶ評価試験を実施しているケースもある。このため、少ない工数で、製品全体を網羅的かつ高精度に計測する手法が求められている。今回、限られた物理計測データと数値解析モデルを融合することで、製品に作用する加振力、加速度分布、応力分布を網羅的かつ高精度に推定するバーチャルセンシング技術を開発した。この技術を、複雑構造を持つ製品の一つである空調室外機に適用することで、高精度に加速度及び応力を推定できて、計測工数を80%削減可能である。

1. ま え が き

年々加速する市場環境の変化に対応するためには、製品競争力の向上と迅速な市場投入の両立が必要である。このため、開発リードタイムの短縮が強く求められている。高精度な数値解析を活用して設計を進めることで評価試験レスが実現できれば、開発リードタイムの大幅な短縮が可能になる。しかし、昨今の製品は高度に複雑化しており、数値解析だけで製品全体の挙動を高精度に予測することが難しいという問題がある。そのため現在は、数値解析で予測した製品全体の応答結果に基づいて、特に実測が必要と判断した位置に物理センサーを設置して評価試験を実施している。このように、数値解析と評価試験を相補的に活用する運用としているが、必要とする物理センサー数を増やしたとしても、複雑化する製品全体の応答(加速度、応力など)を実測できない。また、計測箇所が数百点に達するケースもあり、多大な計測工数が生じている。したがって、少ない工数で、製品全体を網羅的かつ高精度に計測する手法が求められている。

そこで、限られた物理計測データと数値解析モデルを掛け合わせて、互いの弱点を補うことで先に述べた課題を解決するバーチャルセンシング技術を開発した。この技術は、最小限の物理計測データと数値解析モデルを高度に融合し、製品に作用する加振力、加速度分布、応力分布などを網羅的かつ高精度に推定するものである。これによって高い安全性及び信頼性の製品を製造することが可能になる。

本稿では、バーチャルセンシング技術について述べるとともに、複雑化している製品の一例として、多くの配管が組み合わされた空調室外機を対象にして、加速度及び応力の推定精度を検証した結果について述べる。

2. 製品の機械特性把握に関する従来手法の限界

この章では、製品の機械特性把握に関する従来手法の限界について述べる。

2.1 物 理 計 測

開発時に製品の振動や応力を把握する最も一般的な手法が、物理センサーを用いた計測である。製品の実際のデータが取得できるため、真の状態を把握する有効な手段であるが、コスト、センサー設置制約、網羅性の課題がある。設計段階の解析や評価試験に用いる計測データは高精度に取得する必要があるため、計測機器が高価であり、製品に対して網羅的にセンサーを配置すると莫大(ばくだい)なコストを要する。一方、限られた計測機器を用いて、センサー位置を変更しながら計測することも可能であるが、膨大な時間を要する。コストをかけて膨大な計測環境を構築できたとしても、最も故障が起きる回転部や可動部に対しては、物理的にセンサーを設置すること自体が不可能な場合も少なくない。さらに、基本的に一つのセンサーで得られる物理情報は一つに限られるため、加速度、応力など複数の物理量を把握しようとするとならばそれだけの種類のセンサーを要する。同一箇所に複数のセンサーを設置することはできないため、網羅的な計測は不可能

である。このように、多大なコストと物理的制約を伴う計測アプローチ単独での課題解決は不可能である。

2.2 数値解析

2.1節で述べた物理計測の課題を補う目的で、有限要素法などの数値解析を実施することがある。単純な構造であれば解析結果と計測結果は一致するが、実際の製品は多くの部品が複雑に組み立てられているため、互いの部品の締結関係や接触条件などを精密に解析モデルに反映することは不可能である。これらの微小な差異が蓄積するため、特に高周波数帯では実機の挙動と一致しなくなる。また、複雑で非線形な挙動を示す箇所を、計算コスト削減のために単純化(線形化)して計算せざるを得ない点も、物理現象を正確に再現できない要因である。さらに、稼働時の加振力の把握が困難な点が挙げられる。例えば、発電機の電磁加振力のように、空間を移動しながら複雑に作用する動的な力を正確に計測し、数値解析モデルに入力することは困難である。このように、微小な差異の蓄積、計算の単純化、加振力把握の難しさという課題があるため、現在も解析による製品挙動の完全な予測はできていない。

3. バーチャルセンシング技術

バーチャルセンシング技術⁽¹⁾の概要を図1に示す。2章で述べたとおり、物理計測と数値解析にはそれぞれの課題があった。例えば振動解析では、物理的な計測データとデジタル上の数値解析モデルを、振動特性(共振周波数や振動モードなど)という共通の次元で比較することで、互いの課題を補う運用がなされてきた。しかし、図1左の従来手法で示すように、両者を完全に一致させることは極めて困難であった。これは、数値解析モデルの一部(局所的な剛性など)を修正すると全体の振動特性に複雑な影響を及ぼすため、モデルの修正、再解析、実測データとの比較という多大な試行錯誤のサイクルが発生してしまうからである。結果として、解析モデルを物理計測データと完全に一致させない限り、製品稼働時のリアルな振動挙動を予測することは不可能とされていた。これに対して、限られた物理計測データによって不完全な数値解析をリアルタイムに補完・同期させる技術がバーチャルセンシングである。図1右に示すように、この技術を用いることで、実機の複雑な挙動をデジタル空間で高精度に再現することが可能になる。

この章では、これを実現した技術的ブレークスルーについて述べる。

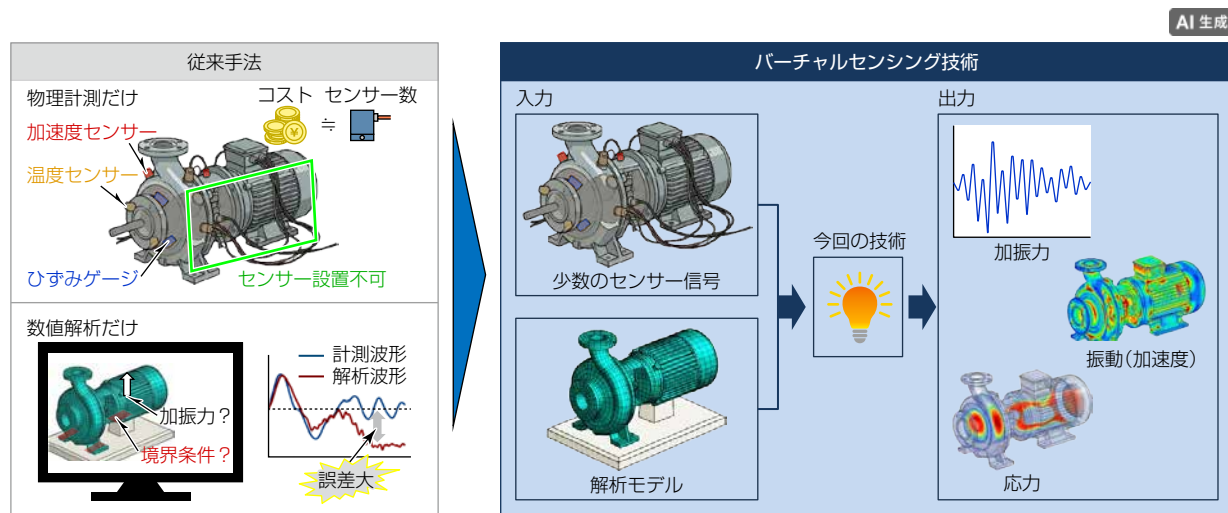


図1-バーチャルセンシング技術の概要

3.1 物理計測と数値解析の融合

今回の技術の優位性を示すために、振動解析での三つの計算手法の違いを図2(a)~(c)を用いて述べる。

図2(a)に示すように、通常の数値解析では、加振力を解析モデルに設定することで、加振力が作用したときの状態(変位、速度、加速度、応力)などを算出するアプローチである。計算が一方通行であるため、単純な構造であれば計測結果と一致するが、実際の複雑な製品構造ではモデルの不完全さや入力となる加振力の設定がそのまま誤差につながって、現実の挙動と一致しなくなるという課題がある。

この誤差の課題を解決する手法が、図2(b)に示す状態オブザーバーである⁽²⁾。対象モデルから導出したフィルターに対して、図の下方から“センサー信号”(物理計測データ)を注入しているのが特徴である。この物理計測データをガイドとして計算をリアルタイムに補正することで、モデル上のセンサー位置の応答はセンサー信号と一致するように補正される。まず、予測ステップで、モデル上のセンサー位置での状態を予測する。次に、更新ステップで、予測値とセンサー信号との乖離(かいり)具合から、モデル全体の状態をどのように補正すれば実態と一致するのかを計算し、センサーが存在しない部位の状態までも高精度に推定することが可能になる。ただし、依然として入力となる加振力の設定がそのまま誤差につながるという課題が残されている。

これらの二つの手法に対して、加振力と状態を同時に推定し、非定常状態にも適用可能にしたのが図2(c)に示す今回の開発の拡大カルマンフィルター(Augmented Kalman Filter: AKF)である。最大の特長は、図の下部に示された“状態から加振力へと戻る矢印”(z^{-1} : 1ステップ前の状態のフィードバック)が追加されている点である。これは、AKFでは加振力そのものを状態量に組み込んで、加振力も推定対象に含めることを示している。この手法によれば、仮に未知の加振力に対して実態と異なる初期値を設定したとしても、センサー信号による補正と、フィードバックのループを通じた“予測と更新”の反復サイクルによって、数サンプル後には誤差が自動的に吸収される。このように、加振力と状態の双方を同時に自己補正し続ける構造を持つため、時々刻々と変化する非定常振動に対しても極めて精度の高い推定が可能になる。

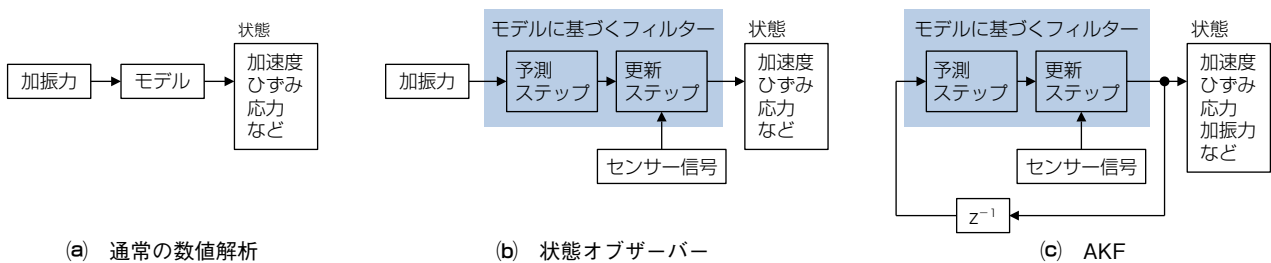


図2-各計算方法の違い

3.2 加振力の推定

AKFによって加振力を状態量に組み込むことで、従来の入力(加振力)と出力(振動や応力など)を同時に推定することが可能になる。2章で述べたとおり、解析モデルには不完全さが残るため、実測データを用いて状態量をリアルタイムに補正しながら推定するこのアプローチは非常に有効である。

しかし、同様の先行研究は存在するものの、実際の計測作業で取扱いが容易な加速度センサーで取得したデータを用いる場合、推定誤差の拡大や、推定途中で計算が発散するなどの課題があった。これは、センサーのデータから内部状態を正しく逆算・補正するための数学的な前提(可観測性)が失われやすいためである。対策として、架空のセンサーデータを付加することで、計算を強制的に安定させる方法が知られているが、架空のデータによる人為的な調整に依存するこのアプローチは物理的な厳密性に欠けており、真の意味での問題解決には至っていなかった。

そこで、今回の開発では人為的なパラメーター調整に頼らずに、一意にこれらの課題を解決できる理論を構築した。この理論の要点は、“空間的配置条件”及び“サンプリング周波数のしきい値条件”を同時に満たす条件で加速度データを取得するという点である。空間的配置条件とは、加速度センサーでデータを計測する点と加振点とが、振動モードの節(振幅が0になる点)にならないようにセンサーを配置するという条件である。また、サンプリング周波数のしきい値条件とは、加速度計測時のサンプリング周波数を、推定したい最大の周波数に対して $\sqrt{2}\pi$ 倍よりも高く設定するという条件である⁽³⁾。数値解析モデル自体に局所的な不完全さがあっても、これらの条件を満たすことでフィルター計算の可観測性が担保され、計算を発散させることなく実機データを基にした高精度な状態推定が可能になる。

世界で初めて^(注1)の、片持ち梁(はり)によるこの手法での検証方法を図3に示す。図3に示すように、ロードセルが組み込まれたハンマーで片持ち梁を叩(たた)いた際の振動応答を加速度センサーで計測し、片持ち梁の有限要素モデルをAKFに適用することで、ハンマーで叩いた際の加振力を推定した。加振力の推定結果を図4に示す。図4はロードセルで計測した加振力の真値と、従来手法及び今回の手法で推定した加振力の時間波形である。黒線で示す真値に対して、青線の従来手法は0.002秒でのピーク値が真値と大きく異なり、また、時間経過とともに推定誤差が蓄積する様子が分かる。

一方、赤線で示す今回の手法の結果は、高い精度で真値と一致していることが分かる。このことから、大きさや周波数が不明な加振力を受けて振動する構造物であっても、安定かつ高精度な状態推定が可能であることが確認できた。

(注1) 2026年8月9日現在、三菱電機調べ

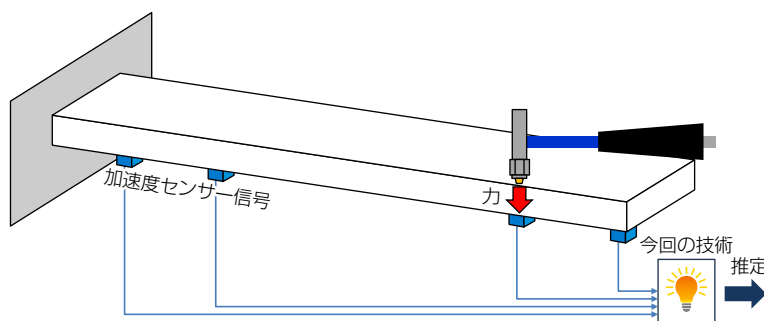


図3-加振力推定の試験セットアップ

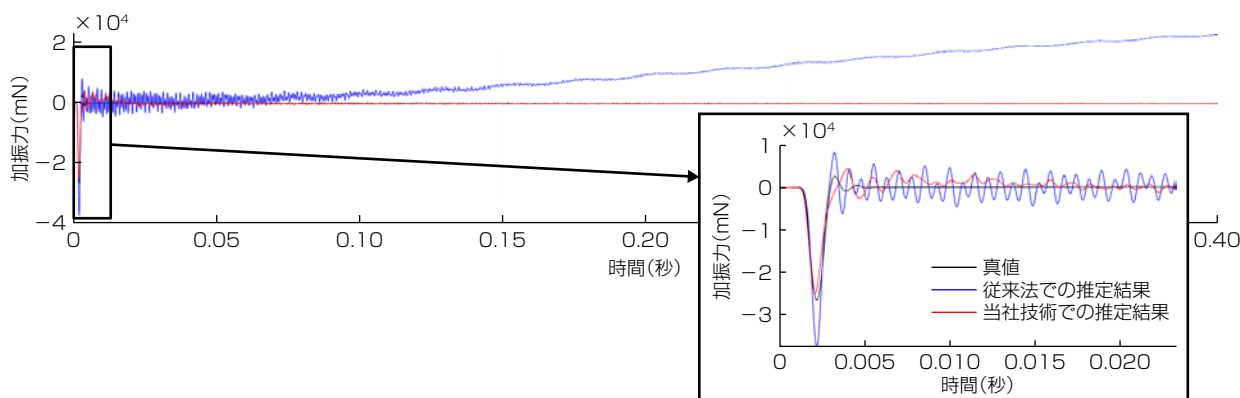


図4-加振力の推定結果

3.3 数値解析モデルの低次元化

今回の技術で用いる数値解析モデルは有限要素法で構築する。一般的に、有限要素モデルは対象構造物の形状が複雑になるほど、また、着目する周波数帯域が高くなるほど、モデル自由度(解くべき方程式の数)が増大する。ときにはモデルが数百万自由度に達することもあり、このような大規模モデルをそのままAKFに入力しても、膨大な計算時間が必要になるため実用的ではない。そこで今回の開発では、数百万自由度の大規模有限要素モデルを、システム本来の物理的特性(主要な固有振動数やモード変形)を厳密に維持したまま数百自由度にまで圧縮するモデル低次元化手法として、モード縮退法を利用した。モード縮退法は加振力が作用する場所が変化しても縮退モデルを再生成する必要がない利点がある。これによって、エッジデバイスや一般的なパソコンであっても、現実的な処理時間内でのリアルタイム演算が可能になった。

4. 空調室外機を対象とした検証結果

今回の手法の検証に用いた空調室外機のモデルを図5に示す。このモデルは、圧縮機、アキュムレーター、弁、配管、及び支持構造体によって構成されている。室外機の稼働時には、圧縮機が回転する際に生じる加振力に加えて、ファンを駆動するモーターの回転による加振力も発生し、これらが起振源になって配管などの部品が振動する。

計測対象機種の数値解析モデルを構築し、3,869,892自由度であったフルモデルを、モデル低次元化技術によって315自由度に低減した。このモデルから導出したフィルターに対して、図2で述べたように、センサー信号を注入した。このとき、注入したセンサー信号は4か所の3軸加速度センサーの信号である。これによって、センサーが存在しない部位の状態までも推定可能になる。センサーが存在しない部位の状態の推定精度を検証するために、本稿では推定位置に検証用のセンサーを設けた。加速度の推定結果を図6に、応力の推定結果を図7に示す。

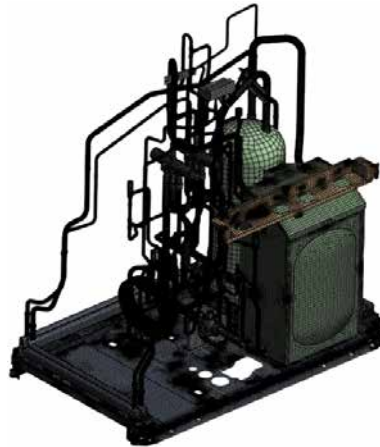


図5-空調室外機のモデル

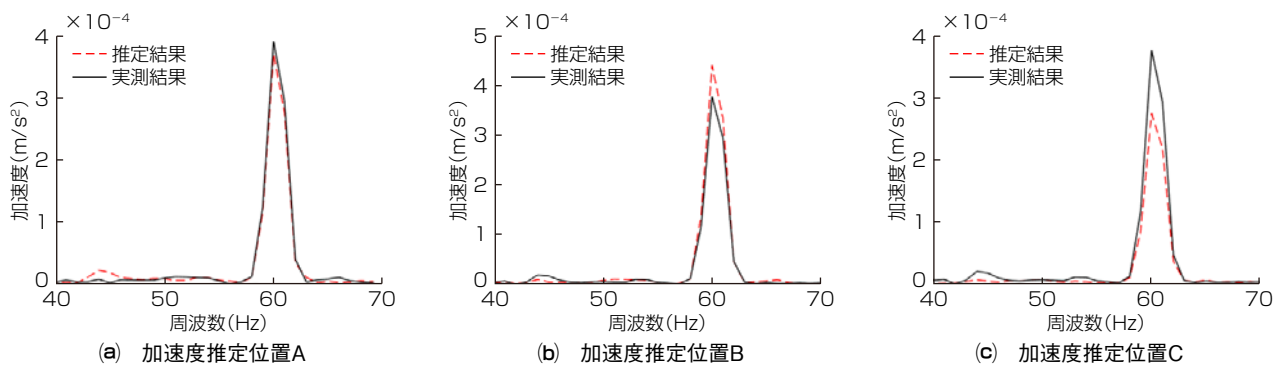


図6-加速度の推定結果

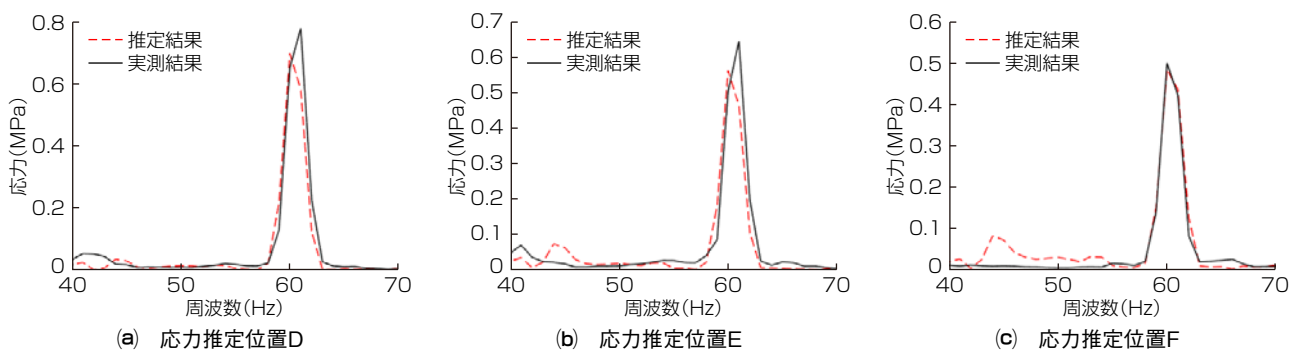


図7-応力の推定結果

図6及び図7に示したように、加速度及び応力のどちらの応答でも、圧縮機の運転周波数である60Hzの成分が卓越している。主成分である60Hzの値に着目すると、今回の技術の狙いどおり実測値と推定値がよく一致しており、応力に関しては疲労評価で実用上問題のない精度であることが確認できた。

一方、図7の応力の推定結果では、45Hz付近の帯域で実測値との誤差が比較的大きく表れている。しかしながら、配管などの疲労強度評価の観点では、振幅が最大になる主要周波数(今回の検証では60Hz)での応答が寿命に対する影響として支配的になるため、このような非主要帯域での局所的な誤差は実用上問題にならないことが多い。

さらに、図7に示した各3か所の計測結果は、異なる位置の異なる配管から選定した計測位置での比較である。このように異なる位置で、いずれも高い精度で応答が一致していることから、今回の手法によって特定の局所部位に限らず、室外機全体の振動や応力状態を網羅的かつ高精度に推定できているものと考えられる。今回の手法によって、従来のひずみ検査試験を数点の加速度センサーで代替可能になる。その結果、試験期間を5日間から1日程度へと大幅に短縮できて、計測工数を80%削減できる見込みである。

5. む す び

年々高まる開発プロセス効率化の要求に応えるため、少ない工数で製品の機械特性を網羅的かつ高精度に把握する手法としてバーチャルセンシング技術について述べた。この技術は、最小限のセンサーデータと解析モデルを高度に融合することで、製品に作用する加振力、振動、応力などを網羅的かつ高精度に推定する技術である。特に、振動を励起する加振力を振動応答などと同時に推定することで、過渡的な事象での予測精度の向上を実現した。この技術で取得したデータを、設計現場や検査現場で活用することで、次世代の“ものづくり技術”の発展が見込まれる。具体的には、この手法によって従来のひずみ検査試験を数点の加速度センサーで代替可能になる。その結果、計測工数を80%削減できる見込みである。今回は空調室外機への適用事例を述べたが、今後は全事業領域へこの技術の横展開を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 柳館直成, ほか: バーチャルセンシングによる振動推定の高精度化, 日本機械学会論文集, **89**, No.918 (2023)
- (2) Yanagidate, N., et al.: Application of virtual sensing to an outdoor air-conditioning compressor unit, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, **45**, No.1 (2025)
<https://doi.org/10.1177/14613484251391417>
- (3) Yanagidate, N., et al.: Observability Restoration in Acceleration-Based Force Estimation: A Modal-Rank Perspective on Augmented Kalman Filters Using Zeroth-Order Random Walk Models, SSRN Electronic Journal (2025)
<https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5379098>

~~~~~

シリコン薄膜の新規空孔形状の  
解析に基づく熱電性能向上Thermoelectric Enhancement by Numerical Study of New Nanohole  
Designs in Silicon Thin Films\*三菱電機㈱ 設計技術開発センター  
†同社 先端技術総合研究所(理博)  
‡京都大学(理博)

## 要 旨

近年、脱炭素や省エネルギーの観点から未利用熱を電力として回収する技術が注目されている。熱電変換は温度差を直接電力に変換する技術であり、排熱利用の有効な手段として期待されているが、現状では発電効率(熱電性能)の低さが課題である。今回の研究では、材料中のシリコン薄膜に形成されたナノスケールの孔(以下、“空孔部”という。)を設けることで性能を向上させる手法に着目し、性能向上に有効な空孔形状を解析的に検討した。検討対象は安価で量産性に優れたシリコン薄膜とした。検討の結果、熱流方向と直交する切り欠きを備えた空孔形状が特に有効であることを明らかにした。この知見に基づいて新規構造を提案し、空孔部を持たないシリコン薄膜と比べて熱電材料の性能を表す指標 $ZT$ を約4倍に向上させることを示した。

## 1. ま え が き

近年、エネルギー問題の解決に向けて、排熱をはじめとする環境中の未利用エネルギーを活用するエナジーハーベスト技術の重要性が高まっている。中でも熱電変換技術は、環境中に存在する僅かな温度差からでも発電可能であり、排熱利用の有効な手段として注目されている。一方、現在実用化されている熱電変換材料には、ビスマスや鉛のように希少性が高いものや、有害元素を含むものが多い等の課題がある。そのため、低コストかつ環境負荷が小さく、大量生産に適した代替材料の活用が望まれている。こうした観点から、資源面でも有利で安全性が高く、半導体プロセスとの親和性にも優れて、量産にも適したシリコンが、有力な候補材料として注目されている。

熱電変換材料の性能は、式(1)に示す無次元性能指数 $ZT$ によって評価される。 $ZT$ は、その値が大きいほど熱電変換性能が高いことを示し、熱電材料の性能を評価する代表的な指標として広く用いられている。ここで、 $S$ はゼーベック係数であり、材料内の温度差に応じて発生する起電力の大きさを表す物性値である。 $\sigma$ は電気伝導率、 $T$ は絶対温度、 $\kappa$ は熱伝導率である。

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa} \dots\dots\dots (1)$$

式(1)に示すように、熱電性能に優れた高 $ZT$ の材料は、電気伝導率 $\sigma$ が大きく、かつ熱伝導率 $\kappa$ が小さい材料である。しかし、通常これらの物性値は正の相関関係にあるため、その両立は一般的に困難である。特にシリコンは熱伝導率が非常に高いため、そのままでは熱電材料としての性能が低いといった課題がある。そこで近年では、シリコンにナノ構造を導入し、熱伝導率だけを選択的に低下させることで、 $ZT$ を高める研究が進められている。中でも、シリコン薄膜にナノスケールの孔を形成する手法は、半導体プロセスを用いた生産が可能であるため量産性の観点で有望であり、多くの研究が行われている。今回の研究では、複雑な形状の空孔部を持つシリコン薄膜の性能を解析的に評価する手法を構築するとともに、空孔部の幾何学的特性が $ZT$ に与える影響を評価し、それらの知見に基づいて新規の空孔を提案した。図1に、ナノ構造を持つシリコン薄膜と薄膜内を流れる熱流の模式図、及びナノ構造を形成したシリコン薄膜の走査型電子顕微鏡(SEM)の写真例を示す。この研究では、薄膜の面内方向に流れる熱流をナノ構造によって制御することを対象としている。模式図及びSEM写真に示すのは、後述する $ZT$ 向上が見込まれるH形状の空孔部を持つ構造である。SEM写真は、電子線リソグラフィ及び反応性イオンエッチングによって作製した試作構造の一例であり、このような複雑なナノ構造であっても半導体プロセスによって製造可能であることを示している。

本稿では、試作構造の選定に至った解析的検討結果をまとめた。2章では、解析的検討に用いた新規手法の開発について述べる。3章では、熱電性能の向上に有効なナノスケール空孔形状の選定に関する検討結果を示す。

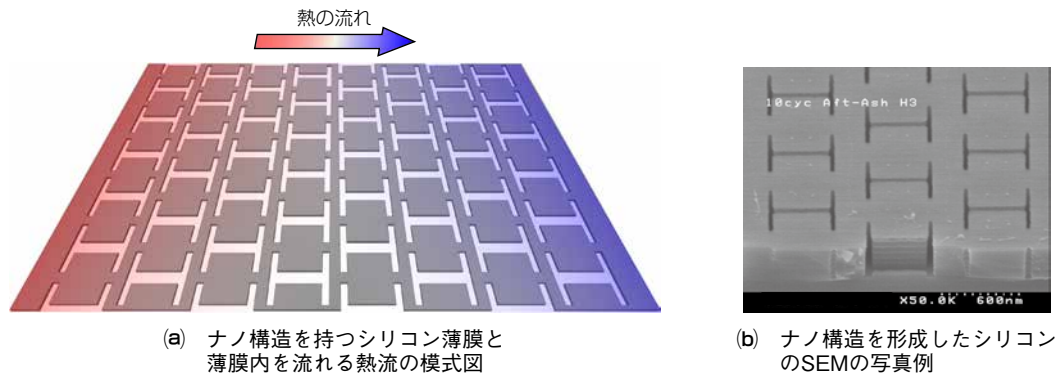


図1-ナノ構造を持つシリコン薄膜の、熱流の模式図及びSEMの写真例

## 2. ナノ構造を持つシリコン薄膜のキャリア輸送解析手法

この章では、ナノ構造を持つシリコン薄膜のキャリア輸送解析手法について述べる。

### 2.1 ナノ構造がキャリア輸送に与える影響

シリコン材料では、電気伝導のエネルギーキャリアは電子及びホール、熱伝導のエネルギーキャリアはフォノンである。固体中のキャリア輸送現象は、これらのエネルギーキャリアの粒子的描像で示されて、キャリア同士が散乱を繰り返しながら材料中を移動する。キャリアが散乱を受けずに進行できる距離は平均自由行程と呼ばれる。

図2に、エネルギーキャリアの平均自由行程と空孔界面間の距離の関係が輸送特性に与える影響を模式的に示す。白色部は空孔部、灰色部は材料部を示す。また、矢印は、一つのキャリアが他のキャリア又は界面との散乱を受けながら輸送される挙動を模式的に示している。図2(a)のように空孔界面間の距離がキャリアの平均自由行程よりも十分に大きい場合、キャリアは界面に到達するまでに複数回の散乱を受けるため、キャリアの輸送で界面での散乱の影響はキャリア同士の散乱と比べて小さい。このような輸送は拡散的輸送と呼ばれ、特に熱輸送では、熱流が温度勾配に比例するフーリエ則で表すことができる。一方、図2(b)のように、空孔界面間の距離が平均自由行程と同程度、又はそれ以下になると、キャリアの輸送が弾道的になる。その結果、キャリア同士の散乱よりも、界面散乱の影響が増大する。このようにキャリアの弾道性が高まる条件では、特に熱輸送でフーリエ則が成り立たなくなる。室温のシリコン結晶では、電子・ホールの平均自由行程は数nmから数十nm程度であるのに対して、フォノンの平均自由行程は数百nmから $\mu\text{m}$ オーダーに及ぶ。この差を利用してナノ構造の寸法を適切に設計することで、電気伝導率の低下を抑えつつ熱伝導率だけを効果的に低下させることができるため、熱電性能の向上が期待される。このような構造の検討には、数値解析が有効である。しかし、キャリアの弾道性が高いナノスケールの熱輸送ではフーリエ則が成り立たないため、一般的な熱伝導解析では十分な評価が難しく、フォノン輸送を考慮した解析手法が用いられる。2.2節では、今回の研究で開発したフォノン輸送解析での新規手法について述べる。

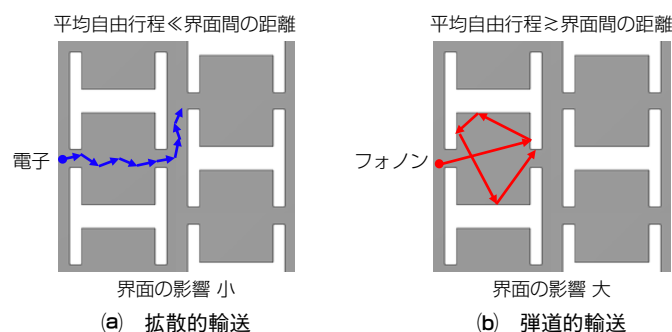


図2-エネルギーキャリアの平均自由行程と空孔界面間の距離の関係が輸送特性に及ぼす影響を示す模式図

## 2.2 複雑なナノ構造を対象とした新規解析手法

フォノン輸送解析は、一般的な熱伝導解析に比べて計算負荷が非常に高い。特に、複雑なナノ構造を持つ材料では、ナノ構造の界面に沿った複雑なメッシュが必要になり、解析負荷が更に増大する。そこで今回の研究では、単純な正方形メッシュを用いながら複雑なナノ構造の界面を表現できる新規手法を開発し、効率的な熱輸送解析を可能にした<sup>(1)</sup>。図3に、材料Aと材料Bの2種類の材料から成る系に対して、この手法を適用した場合のナノ構造界面の表現を模式的に示す。この手法では、複数材料から成る系を等間隔の計算セルに分割し、材料Aだけを含むセル、材料Bだけを含むセル、及び両材料の界面を含むセルとして取り扱う。さらに各セルに対して、材料Aの占有率及び構造界面の法線ベクトルの情報を与える。これによって、複雑な形状の界面であっても、単純な計算格子で表現した上で、界面でのフォノン散乱の影響を効率的に評価できる。なお、この手法の詳細については参考文献(1)を参照されたい。電気伝導については、今回の研究で対象とする界面間の距離が電子及びホール平均自由行程に比べて十分に大きいことから、一般的な連続体モデルに基づく電気伝導解析を採用した。

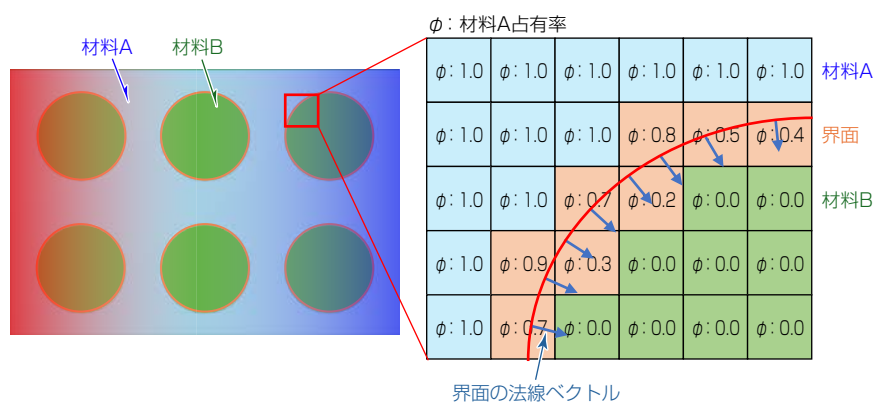


図3-新規解析手法でのナノ構造界面の模式図

## 3. 熱電性能向上に有効なナノスケールの空孔形状の検討

この章では、熱電性能向上に有効なナノスケールの空孔形状の検討について述べる。

### 3.1 従来構造及び新規構造

シリコン薄膜に形成される従来の空孔形状の例を図4(a)に示す。従来構造には、円形や正方形などの単純形状に加えて、熱流方向に沿って切り欠きを設けた形状が挙げられる。これらの構造は、空孔部の側壁や切り欠き部がフォノンの進行方向に対する障壁になり、フォノンを後方に散乱させて熱伝導率を低減することを目的とする。図4(a)では、単純形状の一例としてSquare(正方形)形状を、熱流方向に沿った切り欠き部を持つ形状の一例としてHourglass(砂時計)形状を示している。本稿では、熱流の主方向をX方向と定義し、熱流方向に沿った切り欠き部をX方向のフォノントラップと呼ぶ。図4(a)の青線部がX方向のフォノントラップに該当する。これに対して今回の研究では、熱流方向と直交するY方向の切り欠き部、すなわちY方向のフォノントラップに着目した。図4(b)に、Y方向のフォノントラップを持つ新規構造の一例を示す。図4(b)の赤線部は、上下に配置された二つのY方向のフォノントラップが一对になる構造単位である。Y方向のフォノントラップは、従来構造のようにフォノンの進行方向に対する障壁として後方散乱を促すものではなく、図2(b)に示すように、上下一対のトラップ内部でフォノンを複数回散乱させることで、その進行の抑制を期待したものである。

本稿では、従来構造を含む様々な空孔形状に対して熱伝導率、電気伝導率及びZTを比較した。さらに、これらの従来構造及び新規構造に対して、図5に示すように、空孔配置としてStaggered(千鳥)配置及びAligned(整列)配置の2種類、空孔間隔として大・中・小の3種類のモデルを設定し、ナノ構造を持つ系の熱伝導率、電気伝導率、及びZTを評価した。解析モデル及び計算条件の詳細については、参考文献(2)を参照されたい。

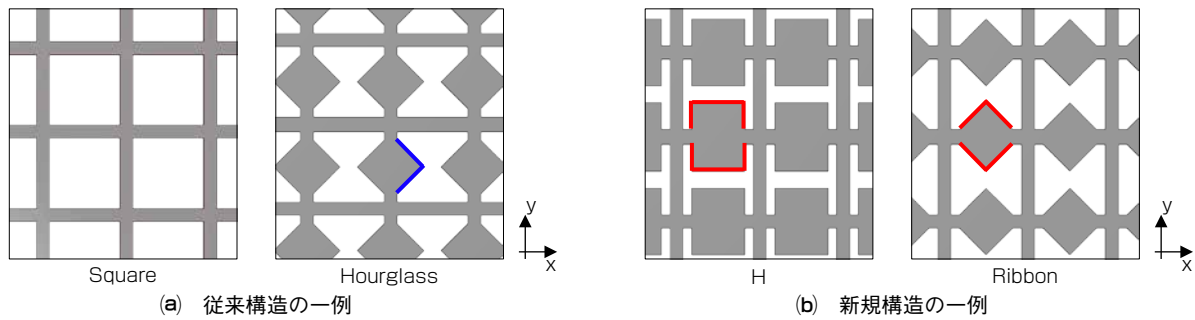


図4-解析で評価した空孔形状

|                 | 空孔間隔 小 | 空孔間隔 中 | 空孔間隔 大 |
|-----------------|--------|--------|--------|
| Aligned<br>配置   |        |        |        |
| Staggered<br>配置 |        |        |        |

図5-空孔配置と空孔間隔の影響評価に用いた解析モデル

### 3.2 解析結果及び考察

結果の詳細は後述するが、 $ZT$ を向上させるためには、①空孔配置をStaggered配置とすること、②空孔間隔を更に小さくすること、③Y方向のフォノントラップを持つこと、の3点が重要であることが明らかになった。そこで今回の研究では、これらの有効な特徴を組み合わせた構造として、Inverse fishbone(逆フィッシュボーン)構造を新たに提案した。図6左に、両端に高温部及び低温部を設定したInverse fishbone構造の定常状態での温度分布を示す。なお、この構造の幾何形状は、参考文献(3)での検討結果に基づいて選定したものであり、詳細は参考文献(3)を参照されたい。Y方向のフォノントラップの効果を確認するため、図6左の破線に沿った温度分布を抽出し、電気伝導解析によって得られた電位分布と比較した。その結果を図6右に示す。図6から、Y方向のフォノントラップで囲まれた領域では、温度分布の勾配が電位分布の勾配に比べて小さくなることが確認できる。この差異は、電気と熱のキャリアの拡散性／弾道性の違いを表している。この条件で熱のキャリアであるフォノンは弾道性が高く、界面の影響を受けやすいため、Y方向のフォノントラップによって進行が阻害されると考えられる。

図7に全空孔形状、空孔間隔、配置条件での相対熱伝導率 $\kappa/\kappa_0$ 、相対電気伝導率 $\sigma/\sigma_0$ 、相対無次元性能指数 $ZT/ZT_0$ を示す。ここでは簡易的な比較のため、空孔を持たない系の熱伝導率 $\kappa_0$ 、電気伝導率 $\sigma_0$ 、無次元性能指数 $ZT_0$ を基準とした相対評価を行った。従来の研究で述べられているように、①空孔をStaggered配置とすること、②空孔間隔を小さくすること、の2点によって $ZT/ZT_0$ が増大する傾向が得られている。さらに、従来のSquare形状やX方向のフォノントラップを持つHourglassと比較すると、Y方向のフォノントラップを持つ新規構造では $ZT/ZT_0$ が高い。例えば、Staggered配置かつ空孔間隔が小さい条件では、H形状で従来構造と比較して1.5倍以上の $ZT$ 向上の効果が得られている。

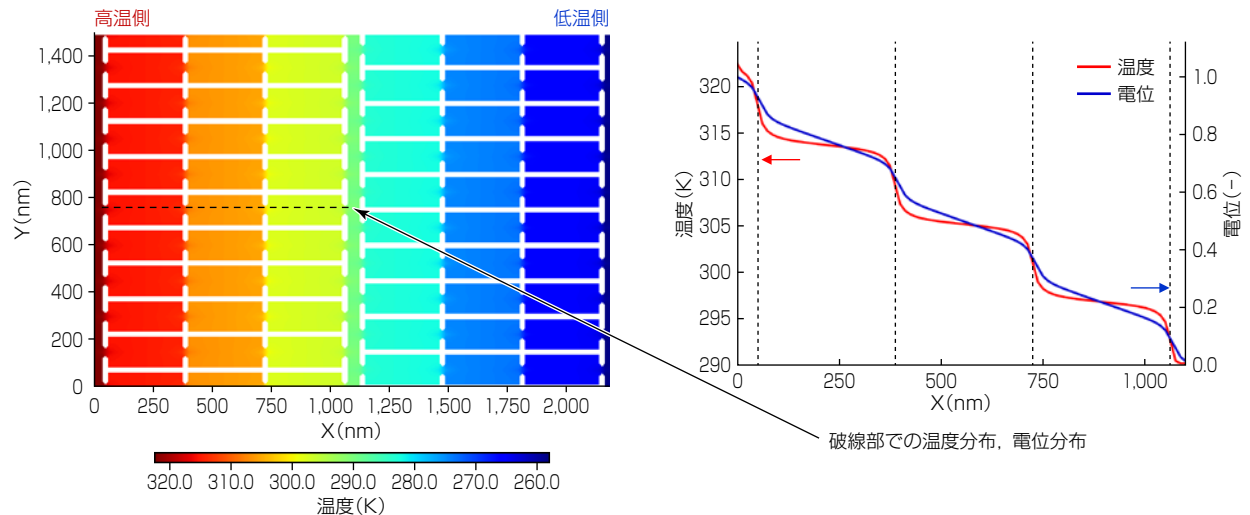


図6-Inverse fishbone構造の定常状態での温度分布(左)及び左図破線部での一次元温度分布、一次元電位分布の比較(右)

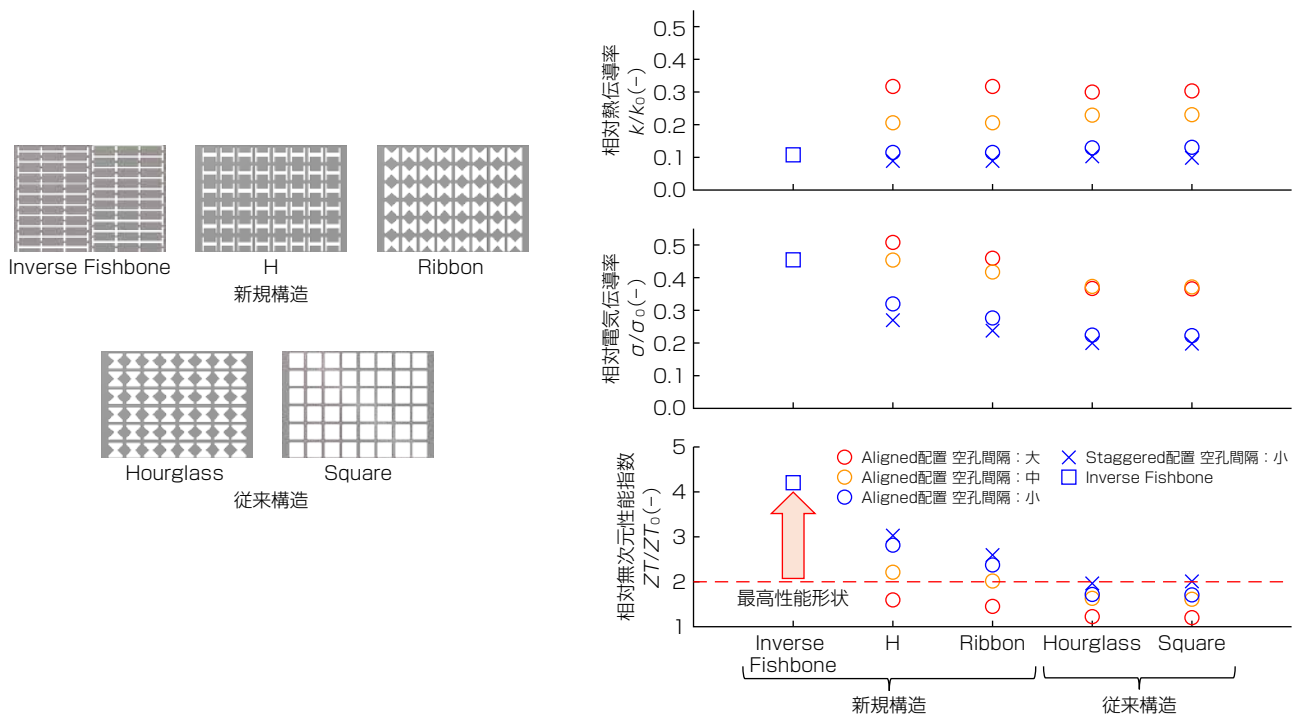


図7-各空孔形状、配置条件及び空孔間隔での相対熱伝導率、相対電気伝導率、相対無次元性能指数

Y方向のフォノントラップが有効な理由として、この構造が、拡散的な電気伝導特性と弾道的な熱輸送特性に対して異なる影響を与えることが挙げられる。図7に示す相対電気伝導率 $\sigma/\sigma_0$ の結果では、空孔面積が大きいほどキャリアが輸送できる有効面積が減少するため、空孔面積の大きいSquare形状ほど電気伝導率は低下する傾向にある。一方、相対熱伝導率 $\kappa/\kappa_0$ は逆の傾向を示しており、特に界面の影響が顕著になる空孔間隔が小さい条件では、Square形状よりもY方向のフォノントラップを持つ新規構造の方が熱伝導率は小さい。これは、Y方向のフォノントラップが、空孔面積の増加による影響を上回ってフォノン輸送を妨げる効果を持っているためと考えられる。さらに、提案構造であるInverse fishbone形状では、性能が最大になり、空孔を持たないシリコン薄膜に対して $ZT$ は4倍以上向上し、従来構造と比較すると2倍以上の $ZT$ 向上が見込まれることが分かった。

## 4. む す び

今回の研究では、シリコン薄膜にナノスケールの空孔を導入した構造に着目し、熱電性能向上に有効な形状について解析的に検討した。まず、ナノスケールの熱輸送を効率的に評価するための新規解析手法を構築し、空孔形状、空孔配置、空孔間隔が熱電性能に与える影響を評価した。その結果、 $ZT$ 向上には、Staggered配置、空孔間隔の低減、及びY方向のフォノントラップが有効であることを明らかにした。さらに、これらの知見に基づいてInverse fishbone構造を提案し、空孔を持たないシリコン薄膜に対して性能指数を4倍以上向上させて、正方形など過去に提案された単純な構造と比較しても2倍以上の向上が期待できることを示した。

## 参 考 文 献

- (1) Takahara, Y., et al. : Phonon transport simulation with an extended VOF scheme for nano-structured thin film, Applied Physics Letters, **124**, No.17, 172204 (2024)
- (2) Kajinami, N., et al. : Si Thin Film With Nanohole Structures to Improve Thermoelectric Performance Part 1: Effects of Shape and Arrangement in Periodic Holes, ASME Journal of Heat and Mass Transfer, **148**, No.1, 012501 (2026)
- (3) Kajinami, N., et al. : Si Thin Film With Nanohole Structures to Improve Thermoelectric Performance Part 2: Inverse Fishbone Holes, ASME Journal of Heat and Mass Transfer, **148**, No.2, 022501 (2026)

~~~~~

インフラ設備の余寿命を短時間で評価する画像診断技術

Image-Based Diagnostic Technology for Rapid Assessment of Remaining Service Life of Infrastructure Facilities

*設計技術開発センター(工博)

要 旨

サステナブルな社会を実現するために、老朽化したインフラ構造物の安全性と補修の必要性を評価する検査技術が重要である。構造物にき裂が生じると進展して故障につながるおそれがあるが、インフラのような大型構造物のき裂を検査するには多大な時間を要する。三菱電機は、短時間で構造物内部のき裂を広範囲にわたって検査する手法として、デジタル画像相関法(Digital Image Correlation : DIC)で画像から表面変形を測定し、表面変形とき裂の内部形状の相関を学習したAIを用いてき裂の内部形状を推定するCrack Shapes Prior EAP(CSP-EAP)法を開発した。今回、当社のAI技術“Maisart”(マイサート)の一つであるき裂推定手法のCSP-EAP法を、橋梁(きょうりょう)や電力機器の構造物の溶接不溶着部の検査に適用できるように改良した。従来はひずみ(変位の一次微分)の変化量をAIの入力に用いていたが、溶接不溶着部のように表面にき裂が表れる場合では測定誤差が増大しやすいという課題があった。AIへの入力をひずみよりも測定誤差の影響を受けにくい変位に変更し、き裂の開口方向と面外方向の2方向の変位に変更することで、測定誤差を低減した。この技術を用いて、溶接不溶着部を模した試験片のき裂を推定し、推定結果が実際のき裂とおおむね同じ形状で、面積も約3%の誤差で一致していることを確認した。き裂の大きさと形状から余寿命を高精度に推定し、インフラ構造物の補修要否・メンテナンス時期の判断がこの技術を用いて短時間で可能になる目途を得た。

1. ま え が き

サステナブルな社会を実現するためには、既存の社会インフラや電力設備を安定的に保全することが重要である。社会インフラや電力設備の健全性を把握するためには、構造物のき裂の有無や進展状況を定期的に検査する必要がある。特にインフラ構造物の余寿命を適切に評価するには、き裂の内部形状を把握することが不可欠である。インフラや電力設備のような大型の構造物を広範囲に検査する場合、超音波探傷のような接触型の検査手法では検査時間が長くなる。広範囲を短時間で検査するため、当社はドローンなどに搭載可能なカメラを用いて検査する手法を開発した。カメラを用いた検査は主に表面のき裂に限られる。そのため、表面情報から内部のき裂形状を推定する技術が必要である。そこで、DIC⁽¹⁾で得られる表面のひずみ分布からき裂の内部形状を推定する手法としてCSP-EAP法⁽²⁾を開発し、当社のAI技術Maisartの一つとして適用を進めている。

CSP-EAP法では、破壊力学に基づく多数のき裂形状の候補と、それぞれが発生した場合に予測される表面の変形を用いてき裂を推定する。この報告では、大型構造物で多く用いられる溶接継手の不溶着部の検査を想定し、開発手法を検証した結果を示す。先行研究⁽²⁾では入力の変形としてひずみ(変位の一次微分)を用いていたが、き裂の開口で局所的に大きな変形が生じるとひずみの測定誤差が大きくなるという課題があった。そこで、本稿では入力をひずみから変位分布に変更することでき裂開口による誤差の影響を低減した。改良手法を検証するために、表面に現れている溶接不溶着部を模した試験片の画像から得た変位分布を入力に用いて、き裂の形状を推定した。その結果、従来手法では面積比で10%以上あった誤差を3%に低減し、更に高い精度で補修要否・メンテナンス時期の評価を行えることを確認した。

2. き裂形状を推定する手法の改良

今回は、橋梁などに用いられる溶接継手の不溶着部を対象に、開発手法で内部き裂の形状を推定する。対象の形状とき裂推定の模式図を図1に示す。図1左は不溶着部を持つ溶接継手の模式図であり、この側面を撮影した画像からき裂の形状を推定する。図1中央は繰り返し荷重での撮影タイミング、図1右上は撮影画像からDICで得た変位分布、図1右下はその変位分布から逆解析によって推定したき裂の開口量の分布を示す。ステレオカメラ三次元の変位をDICで求めた。

図1左に示すように、溶接不溶着部のき裂は測定面に現れており、DICで計測した変位量は、図1右上に示すように溶接不溶着部の開口によって大きな値になる。このような場合、変位の急激な変化によって、ひずみ計算時の誤差が増大しやすい。そこで、先行研究⁽²⁾では入力にひずみを用いているが、今回は更に測定誤差の影響を受けにくい変位を入力に用いることで、この測定誤差の影響を低減した。また、先行研究⁽²⁾では荷重方向のひずみだけを入力としていたが、き裂の仮想面での形状を精度良く推定するために、面内方向(図1左Z方向)と面外方向(図1左Y方向)の2方向の変位を入力するようにき裂推定モデルを改良した。き裂の内部形状によっては観測面が湾曲する。この湾曲をき裂の推定に取り入れるために、面外方向の変位を入力に追加した。

入力を面内・面外の2方向の変位とするため、観測値である表面の変位からき裂の形状を求める観測方程式は、次のとおりである。

$$\tilde{U}_Z = H_Z \cdot u + \beta_Z, \quad \tilde{U}_Y = H_Y \cdot u + \beta_Y \quad \dots\dots\dots (1)$$

$\tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y$: 表面のZ方向及びY方向の変位分布の測定結果

u : き裂の開口量の分布

β_Z, β_Y : 計測誤差を含む誤差を離散化したベクトル

H_Z, H_Y : それぞれ、 U_Z と U_Y と u の関係を表す定数行列

ただし、 U_Z と U_Y はそれぞれZ方向とY方向の誤差を含まない表面の変位量であり、有限要素法で求められる⁽²⁾。

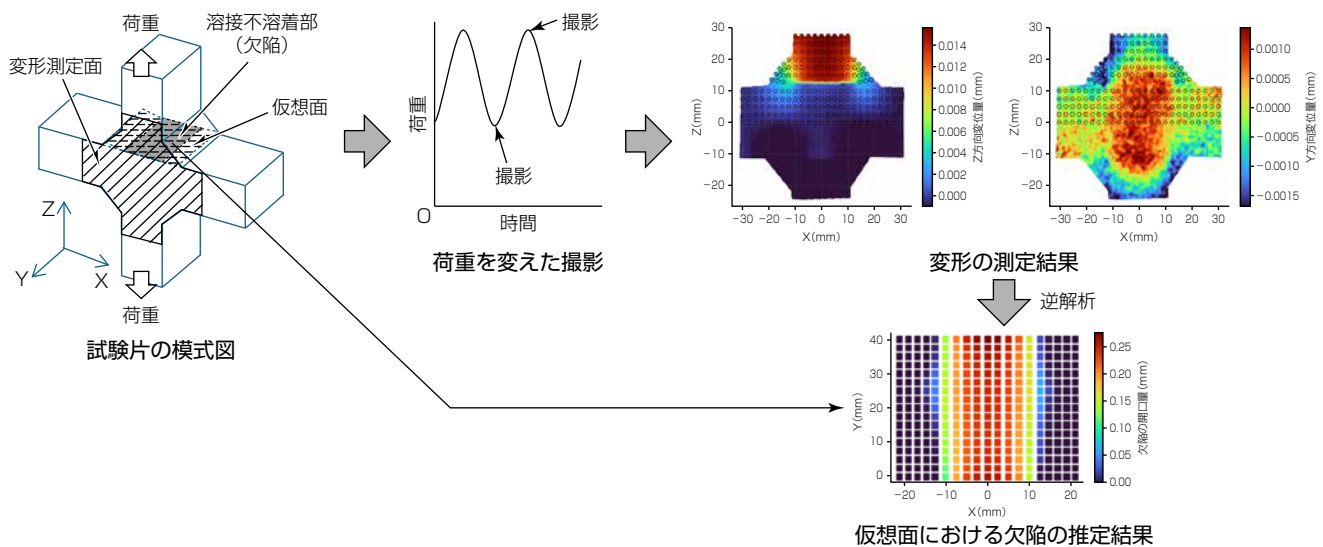


図1 - き裂の推定の模式図

3. き裂推定手法

CSP-EAP法では、発生し得るき裂形状の候補(以下、“候補形状”という。)を準備し、各候補形状に対する表面の変形を解析で求めて、測定結果と比較してき裂形状を推定する。候補形状として、溶接不溶着部の想定形状と、そこからき裂が進展した形状を作成した。破壊力学に基づいてき裂が進展した形状を作成し、合計56,747個の候補形状を用意した。

作成した候補形状からき裂を推定するために、AIの予測計算に用いられるベイズ推定の一つであるEAP法⁽³⁾を使用し、各候補形状の事後分布を求める。なお、事後分布は、事前分布(観測前の各候補形状の確率)と尤度(ゆうど)(観測結果に基づく各候補形状の生起確率)の積に比例して与えられる⁽⁴⁾。この研究では事前分布を $Pri[\gamma] = 1/56,747$ の一様離散分布と仮定し、全候補形状が等しく発生し得るとした。

図2に尤度を求める模式図を示す。ある候補形状(γ)の尤度は、解析で算出した表面のZ方向変位分布とY方向変位分布とDICの測定結果($\tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y$)との差で算出する。具体的な尤度 $L[\gamma | \tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y]$ の算出式は次のとおりである。

$$L[\gamma | \tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y] = N[U_Z(\gamma) - \tilde{U}_Z | \mu, \Sigma] \times N[U_Y(\gamma) - \tilde{U}_Y | \mu, \Sigma] \quad \dots\dots\dots (2)$$

γ : 候補形状の番号を示すパラメーター
 $N[U | \mu, \Sigma]$: 平均ベクトル μ , 分散・共分散行列 Σ の多次元正規分布の,
 U における確率密度

μ と Σ の値は、次のとおりである。

$$\mu = 0, \Sigma = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 \\ 0 & \sigma^2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(2)では、Z方向変位分布とY方向変位分布がDICでの計測結果に近いほど候補形状の尤度が大きくなる(その形状である確率が高くなる)ことを表している。

上記の $Pri[\gamma]$ と尤度 $L[\gamma | \tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y]$ を用いて、観測量 $\tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y$, γ を使用した事後分布は、次のとおりである。

$$Pos[\gamma | \tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y] = \frac{L[\gamma | \tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y] Pri[\gamma]}{\sum_{\gamma} L[\gamma | \tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y] Pri[\gamma]} \quad \dots\dots\dots (4)$$

最後に、各仮想面のき裂の開口量 $u(\gamma)$ の事後分布 $Pos[\gamma | \tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y]$ での重み付き平均で、き裂の推定結果 $\tilde{u}$ を得る。

$$\tilde{u} = \sum_{\gamma} u(\gamma) Pos[\gamma | \tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y] \quad \dots\dots\dots (5)$$

このようにして、開発手法では、面内方向と面外方向の二つの変位を入力し、破壊力学に基づいて作成した事前分布、尤度分布からバイズ推定でき裂の形状を推定する。

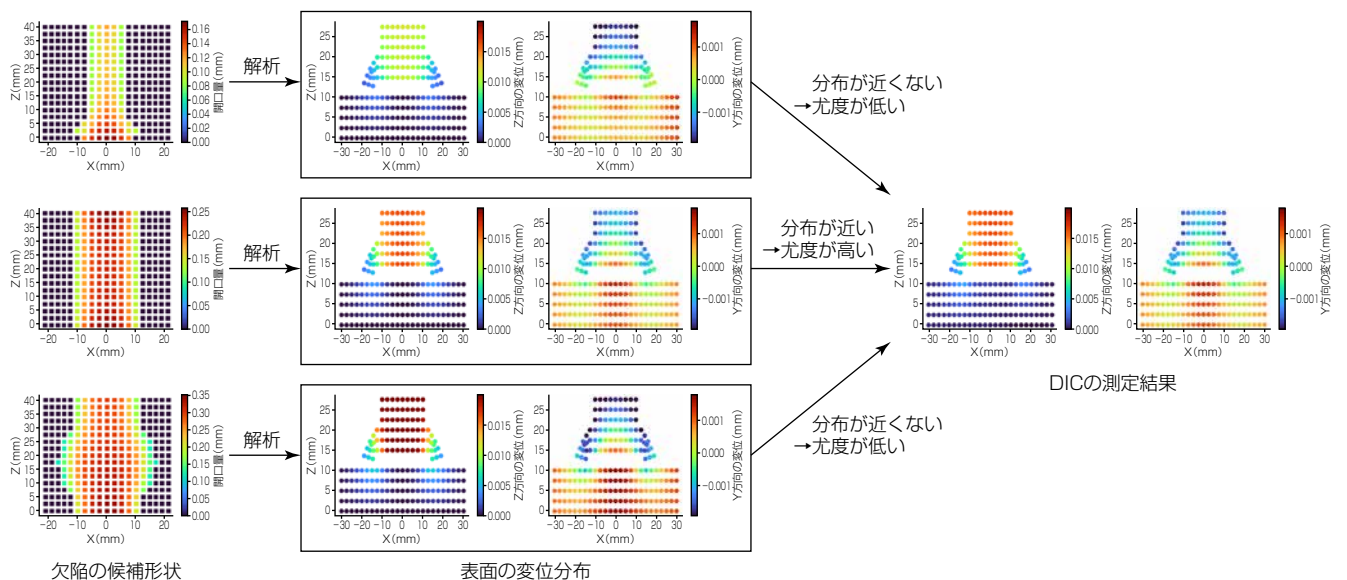


図2-各候補形状の表面の変位分布から尤度を算出する模式図

4. 推定方法の検証結果

この章では、推定方法の検証結果について述べる。

4.1 試験片と試験条件

図3(a)(b)に試験片の形状を示す。この試験片の表面に、DICで変位を計測しやすくするために、ランダムパターン(図3(c))を塗布した。荷重が異なるタイミングで撮影した画像から、DICで変位分布を取得した。

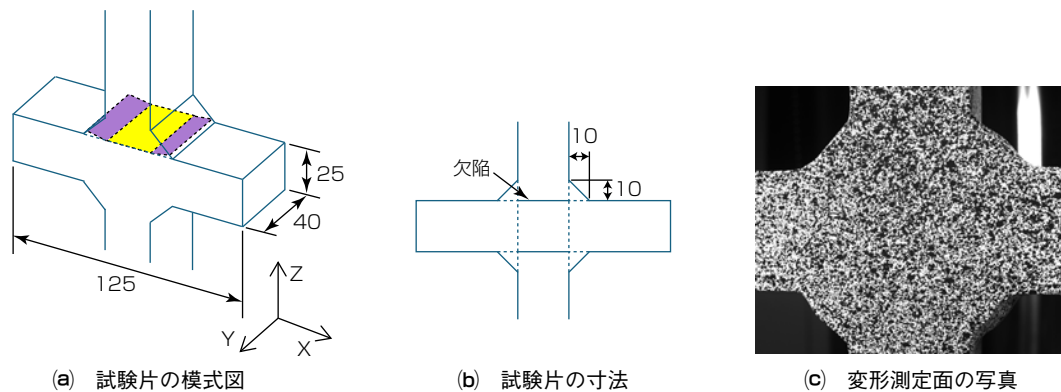


図3-試験片の模式図と、表面のランダムパターン

4.2 計測結果

図4にDICで得られた変位分布を示す。座標軸は図3の軸と同一である。図4(b)のY方向はき裂面に対して面外方向の変位であり、撮影面が盛り上がる(凸状)場所では値が正に、凹(くぼ)む(凹状)場所では値が負になっている。図4の(a)(b)それぞれに表示されている丸印は、式(2)の $\tilde{U}_z$ と $\tilde{U}_Y$ として入力した点である。

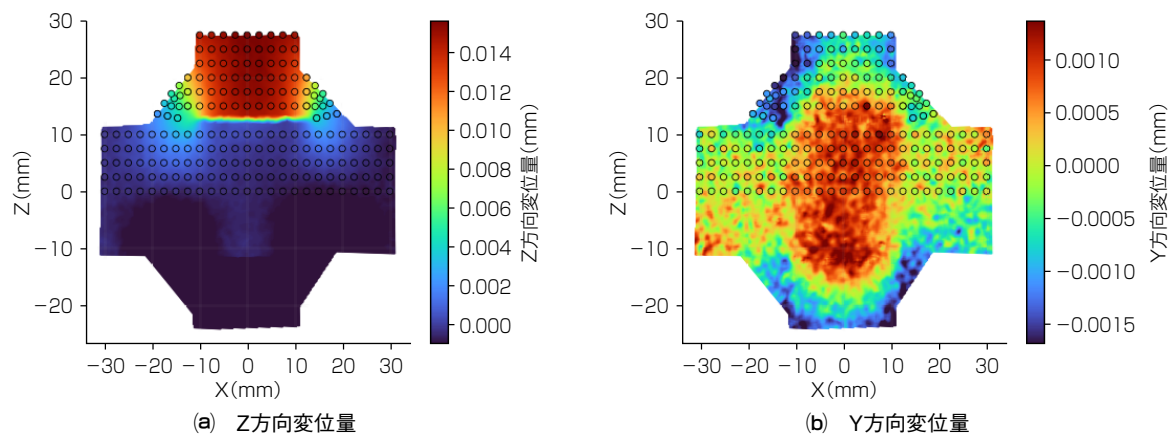


図4-DICの測定結果

4.3 検証結果

図5に、試験片の破面の写真(図5(a))、実際のき裂形状(図5(b))、3章の方法でき裂を推定した結果(図5(c))、及び今回の手法の開口量の推定結果(図5(d))と先行研究の手法での推定結果(図5(e))を示す。図5(c)のき裂の領域を決定する際は、先行研究⁽²⁾を踏襲し、き裂の最大開口量の10%をしきい値として、図5(d)と図5(e)の赤破線の領域で示す。き裂の推定結果は、先行研究の手法では実際のき裂と面積が10%以上異なるが、この手法では約3%の誤差で一致し、形状もおおむね一致していることを確認できた。

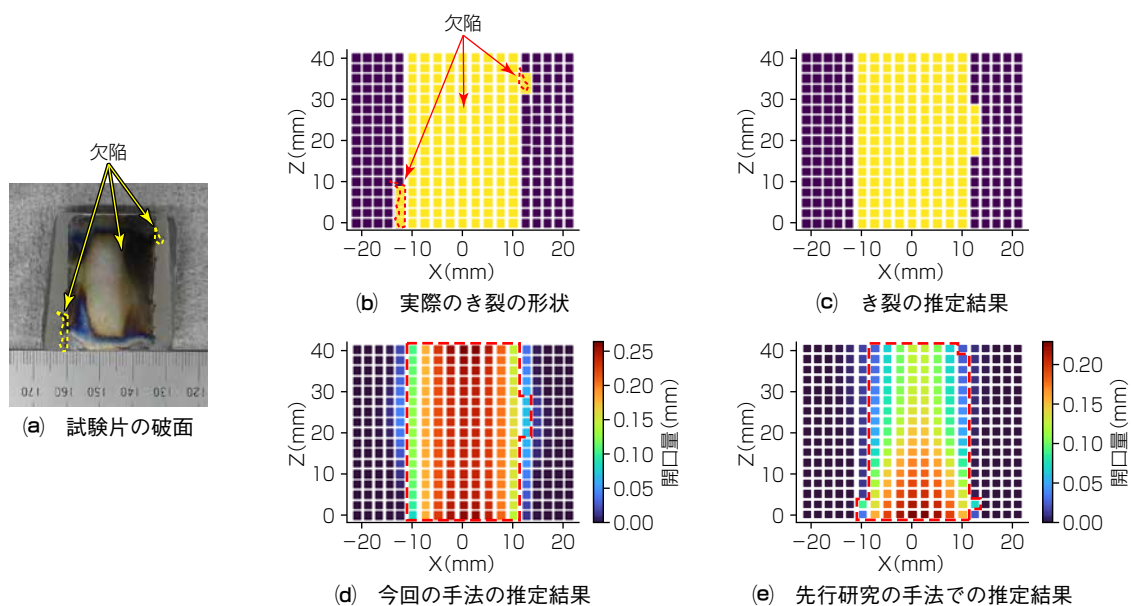


図5-実際のき裂と推定結果の比較

5. む す び

当社のAI技術Maisartの一つである、表面に現れていないき裂を表面のひずみ分布から予測する技術を、橋梁や電力機器での溶接不溶着部のき裂検査に適用できるよう改良した。改良した手法では、入力をひずみから変位分布に変更した。さらに、先行研究⁽²⁾が最大変化方向のひずみだけを入力としていたのに対して、今回は推定精度の向上を目的に面内及び面外の変位を入力とするようアルゴリズムを改良した。改良後のアルゴリズムを用いて溶接不溶着部を模した試験片のき裂を推定した。き裂の推定結果は実際のき裂とおおむね形状が一致し、面積も先行研究の手法では10%以上の誤差が生じていたところ、3%未満に改善した。き裂の形状と大きさを正確に把握することは、余寿命の評価を行う上で非常に重要であり、インフラ構造物の補修要否・メンテナンス時期の判断がこの技術を用いて短時間で可能になる目途を得た。

参 考 文 献

- (1) Sutton, M., et al. : Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, 81 (2009)
- (2) Hana, N., et al. : Crack Identification by Digital Image Correlation Method Using Crack Shape as Prior Information: Journal of Pressure Vessel Technology, 145, No.4, 041601 (2023)
- (3) Mazzoni, T. : Expected A Posteriori Estimation in Financial Applications (2008)
- (4) 竹村彰通：新装改訂版 現代数理統計学，学術図書出版社（2020）

からくりを活用した安価な自動化による現場発のイノベーション

Innovation from Manufacturing Site through Low Cost Automation
Using Karakuri Mechanisms

*生産技術センター
†同センター(工博)

要 旨

近年、労働力の高齢化やダイバーシティーの進展によって“人にやさしい現場”への要求が高まって、重筋作業の改善ニーズが増大している。また、市場変化の激化によって、製造現場では工程変更の頻度が高まっている。これらの課題に柔軟かつ迅速に対応するためには、現場主体の改善を一層強化することが不可欠である。そこで三菱電機では、からくり機構や簡易な電動機器を活用する“からくりLCA(Low Cost Automation)”改善を導入した。現場主体で“安く、早く、自分で”自動化を実現することで、作業者の負担軽減と生産性向上をもたらすとともに、現場発の自主的な変革を促す。

この取組みの全社施策として、①教育体制、②実践を支えるナレッジ群、③定着に向けた施策を整備し、現場の挑戦と創意工夫を促進することで、自発的・継続的な改善の組織風土醸成を誘導した。

1. ま え が き

当社では生産体質強化を目的に、5S(整理・整頓・清掃・清潔・躰(しつけ))3定(定位・定品・定量)、徹底した無駄取り、自発的・継続的改善を基盤としたJIT(Just In Time)改善活動を展開している⁽¹⁾。しかし近年の事業環境の変化に対応するには、この活動の更なる深化と拡大が不可欠である。こうした背景から現場改善の新たな切り口として着目したのが、からくりの活用である。からくりを用いた改善は製造業で古くから知られる手法だが、当社内では認知度が低く一部の職場を除いて採用が進んでいなかった。そこで、からくりの仕組みを拡充したからくりLCAの概念を構築して全社展開を図って、人財育成と改善風土の醸成に取り組んでいる。

本稿では、現場主導で安価な自動化を実現する、からくりLCAによるJIT改善活動の拡大に向けた全社的な推進活動の取組みと成果を述べる。

2. からくりLCAの特長と普及に向けた課題

この章では、からくりLCAの特長と普及に向けた課題について述べる。

2.1 からくりLCAの特長

当社では、からくりを活用した安価な自動化をからくりLCAと呼んで、現場改善活動への適用を推進している。“からくり”とは、てこ、リンク、滑車などの機構や重力を利用してものを動かす仕組みであり、これによって“持ち上げ”“反転”など、ものの動きを伴う課題を解決できる。しかしながら、重量物の持ち上げや重量・寸法にばらつきがある多品種ワークへの対応は苦手としている。そこで、必要に応じて簡易な電動機器や制御器を追加し、更に広範な課題に対して確実かつ効果的な改善を実現できるように拡充したものが、からくりLCAである。図1に示すように、この手法は、単純な台車や作業台を自作する従来の現場改善より効果や適用範囲を拡大するとともに、大がかりな自動機より安価かつ短期間で導入可能なため、経営課題である投資抑制や事業環境変化への追従性向上の効果も期待できる。

基本的な進め方は、図2に示すように、まずはからくりによるシンプルで安価な改善を志向し、更に高い機能が求められる場合に電動化による機能追加を検討する。ただし、電動機器の活用は最低限になるよう工夫し、図3のように電動ドライバーなど市販品を動力アシスト源として活用するなど、追加コストの抑制に努める。この改善プロセスで現場が構想、設計、製作を担って試行錯誤を繰り返しながら導入を果たすことで、成功体験が蓄積されて改善スキルを向上させる。さらに、安く、早く、自分で作業を楽に簡単にすることが改善意欲の持続と現場発のイノベーションの促進につながる。

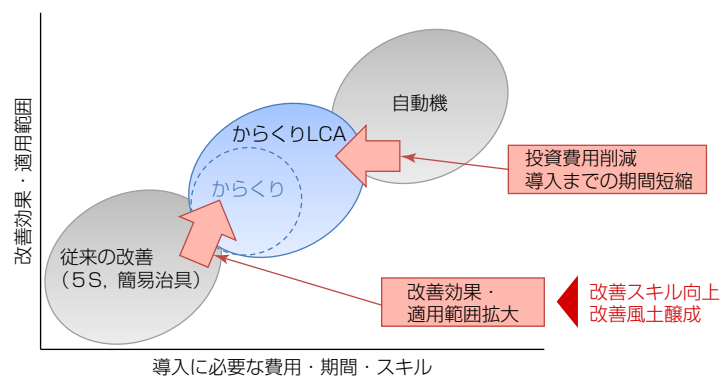


図1-からくりLCAの位置付け

従来の改善	からくりLCA	
作業台や台車の自作 ○ 安価、簡単 （パイプ材などを活用） × 動作の改善	+からくり ○ 動作の改善が可能 （持ち上げ、反転等） × (△)ワークの変化	+からくり +動力アシスト(機器) ○ ワークの変化によらず安定動作 △ 追加コスト発生、安全対策強化
移載作業の例 汎用台車 無理な姿勢(かがむ) 無駄な作業(大きな動作)	ばね式昇降台車（ばね+滑車） 姿勢改善(作業高さ一定) 動作改善(小さな動作)	電動昇降台車（電動機器+滑車） 機能改善(異なるワーク重量、サイズに対応) 追加コスト抑制(市販品の活用)

図2-からくりLCA検討のステップと改善例

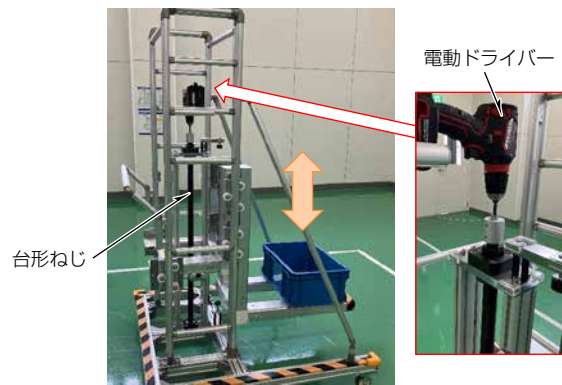


図3-電動ドライバーを活用したからくりLCAリフター

2.2 普及に向けた課題

からくりLCAを全社的に展開するに当たって、次のような課題が顕在化した。

(1)

からくり自体の認知度が低くその特性や原理など基礎知識を持つ人財に限られるため、着手のきっかけが生まれず現場で自立的に推進できない。

(2)

座学による教育だけでは構想から設計、製作に至る実践ノウハウが不足しており、現場導入のハードルが高い。

(3)

この手法の有効性への理解が不十分で、高いモチベーションで継続的に活動するための基盤が現場に整っていない。

それに加えて、当社は製品種別に製造部門が独立しているため、導入事例の横展開が進まず、職場ごとの工夫に依存しやすい。

これらを踏まえて、“教育”“実践支援”“定着化・展開”の三本柱で全社施策を設計した。3章以降では、これら施策の具体的内容について述べる。

3. 国内外での教育施策

この章では、国内外での教育施策について述べる。

3.1 国内向け教育

からくりLCAを現場主体で運用できるよう、基礎から実践までをカバーする3段階の講座体系を整備した。第1段階として、オンデマンドのからくり入門講座を設けて、からくり活用の目的・特徴、改善の進め方、基本機構の知識を、場所・時間を問わず全社で習得可能にした。第2段階では、実践編として“からくりシューター製作実習”を行い、アイデア出しから設計、組立て・調整までを体験することで、からくりを具現化するための実践力を養成した。さらに第3段階のからくりLCA講座では、実習を通して簡易電動化に必要な電動機器・制御器に関する知識やスキルを習得できるようにした。これらの体系的な教育カリキュラムによって、改善リーダーの育成を図っている。また、受講者は事後課題として自職場内でからくりLCA改善を検討し、必要に応じて講座の講師が導入を支援することで挑戦を後押ししている。なお、講座は現場作業者に加えて生産技術スタッフにも受講を推奨しており、開講以来、社内及び関係会社の多数の社員を育成している(表1)。

表1-国内講座受講者数(～2025年度末)

講座	開催形式	開講時期	社内拠点数	関係会社数	受講者数(人)
1. からくり入門講座	オンデマンド	2022年7月	20	18	376
2. からくり実践講座	集合形式	2023年2月	15	8	55
3. からくりLCA講座	集合形式	2024年11月	9	4	34

3.2 海外拠点向け教育

からくりLCAへの関心は海外でも高く、特に製造拠点の多い中国とタイでは、2023年度から毎年、各拠点から受講者を募って集合形式の講座を開催している。教育カリキュラムは実施地域のニーズに応じて国内向けから再構成しており、中国では実習中心で実践力向上を、タイではケーススタディーを追加し企画力向上を狙っている。さらに個別要望のある拠点には出前型講座を提供しており、座学に加えて現地課題に対するからくりLCA改善をOJT(On the Job Training)で実施している。これまでに中国、タイ、インド、マレーシア、トルコにある計7拠点で、課題抽出から設計・製作・導入まで伴走支援を行い、ナショナルスタッフの育成と現地自立化を推進してきた。これらの教育・OJTによって各拠点での実践力と成功事例が蓄積されて、自発的改善の風土醸成につながっている。

4. 実践促進のためのナレッジ整備

現場が自立的に改善を実践するための定着化支援として、参考になるドキュメント及び導入事例を整備している。

4.1 実践マニュアル

図4に示すように、からくりLCA改善の進め方をチャート化し、手順ごとのノウハウを形式知化した要領書を作成・展開している。課題抽出から導入に至るまでを体系化することで、属人的な技術依存を低減し、各現場が自立的に改善活動を推進、定着化できるようにした。整備した要領書は次のとおりである。

- (1) からくりLCAによる現場改善の手引き：活動目的、からくりLCAの特徴、改善の進め方
- (2) 改善テーマ選定要領：課題抽出方法及び抽出した課題と改善手段の結び付け方
- (3) 設計要領：アルミフレームを用いた構造設計手順、からくり機構検討の要点
- (4) 組立て・調整要領：構造物の組立て手順と代表的なからくり機構の組立て・調整時の留意点
- (5) 安全性確認要領：安全に対する考え方、確認手順、確認すべき項目やタイミング

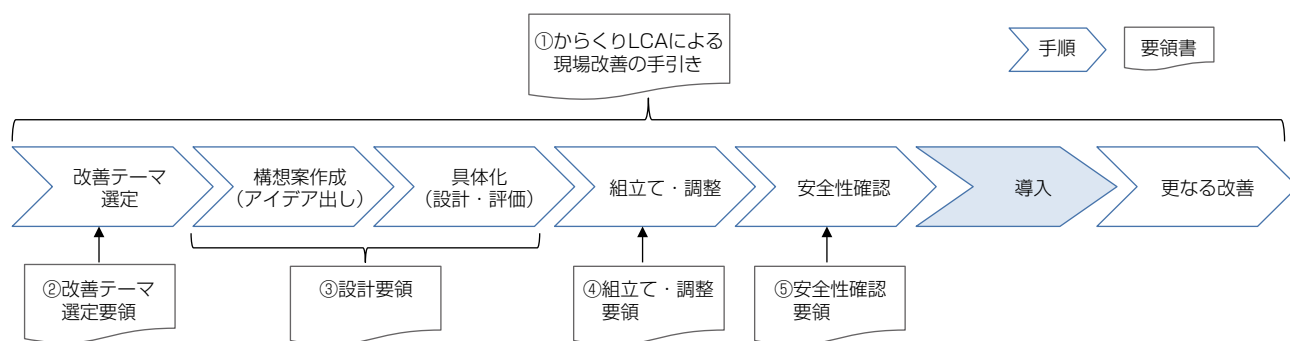


図4-からくりLCA改善の実施手順と要領書

4.2 からくりLCAの現物展示

当社には、ものづくり技術本部が開発した技術を各製造拠点に展開することを目的とした展示施設があり、ここに生産技術センターが開発したからくりLCAを現物展示している。製造現場での材料・部品の供給から、製品の組立て・検査・出荷までの各工程で多用される装置(図5)を集約しており、実際に動作するからくりLCAを体感することによって、効果を直感的に理解できる。この展示によって、改善アイデアの創出、人材育成、技術共有を同時に促進している。さらに、各機器の図面・部品リストを整備・公開することで、体感→図面入手→試作→導入の流れを支援している。

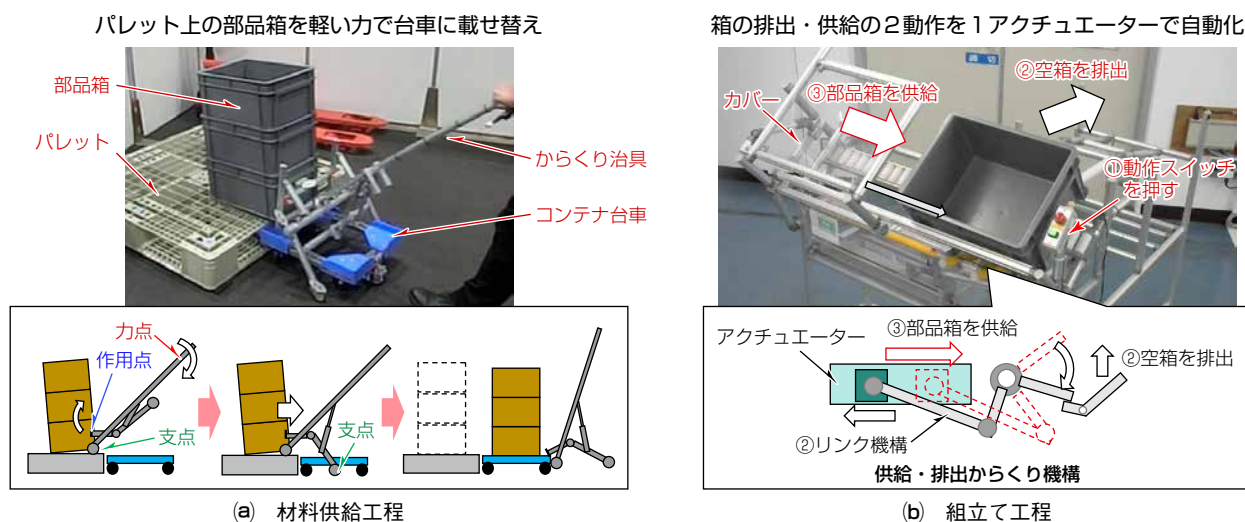


図5-展示品の例

4.3 社内サイトによる改善事例の全社共有

各拠点で導入した改善事例を社内サイト上の事例集で共有する仕組みを整備している。事例集は動画と参考資料(改善前後の状態、機器構成、改善効果等を記載)で構成し、“持ち上げ”“反転”など課題になる動作ごとに分類している。これによって他職場で改善案検討時の参照性を高めて、横展開による効果の拡大を図っている。また、事業部を横断した全社での情報共有によって、ノウハウ移転を促進し、新たな改善アイデアや実践意欲を喚起する役割も果たしている。

5. 定着に向けた取組み

この章では、定着に向けた取組みについて述べる。

5.1 社外展示への出品

現場の改善風土づくりと現場発イノベーションの促進を狙って、“第30回からくり改善^(注1)くふう展2025”^{(注2)(2)}に、4拠点合同で6作品を出品した(図6)。この展示会は、製造業各社が創意工夫を凝らしたからくりによる改善事例を共有する

場であり、当社にとっては初の出品であった。出品の主目的は、①現場作業者が自らの改善成果を外部に提示して評価・賞賛を受けることで内発的動機付けを高めること、②来場者からのフィードバックや他社作品との比較を通じて新たな知見を獲得して改善スキルを高めること、の2点である。全116社から429作品が出品される中で、当社作品がアイデア賞を受賞した。出品した当社スタッフへの事後アンケートでも“出品がモチベーション向上や経験値の蓄積に寄与した”との回答が多く、出品活動が個々の自信と挑戦意欲を醸成する効果が確認されたことから、2026年度も継続出品を予定している。

(注1) からくり改善は、公益社団法人 日本プラントメンテナンス協会の登録商標である。

(注2) 公益社団法人 日本プラントメンテナンス協会主催



図6-からくり改善くふう展への出品

5.2 今後の展開

これらの施策の効果を最大化するため、各施策のブラッシュアップと効果検証を一体で進める。また、新たな施策として海外拠点を含む当社グループ全体での社内コンペを計画しており、競争を通じて改善意欲を喚起するとともに、優れた事例の収集とグローバルでの横展開を促進する。併せて、各拠点のからくりLCA改善推進者が定期的に集うワーキンググループを立ち上げて、それぞれの取組みやノウハウの共有、事例展開を行うことで、拠点間の人的つながりを強化し、活動の定着と継続的な拡大を図る。

6. む す び

からくりLCA改善は、現場自ら“作業を楽に、簡単に”するための手段であるが、活動で醸成される自主性は現場の景色だけでなく風土を変える可能性を持っている。近年AI/DX(Digital Transformation)活用が進んでいるものの、製造現場の課題解決には自主的な創意工夫による改善実行力が依然として不可欠であり、この施策を通じた実行力向上、さらには現場発イノベーションへの進展に期待したい。今後も、からくりLCA改善活動で現場一人一人の改善マインドを後押しして、持続的なイノベーションと強い現場づくりに貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 玉置哲也, ほか: JIT改善活動の深化と拡大, 三菱電機技報, 93, No.12, 679~682 (2019)
- (2) 公益社団法人 日本プラントメンテナンス協会: からくり改善くふう展 開催案内
<https://jipm-event.com/karakuri/exh/exh-guide>

基板穴あけ用レーザ加工機向け レーザ走査の高速化技術

High-Speed Galvano Scanners for Laser Drilling Machines

中筋淑江*
Toshie Nakasuji
船岡幸治†
Koji Funaoka
内山研吾‡
Kengo Uchiyama

高橋尚弘‡
Naohiro Takahashi

*生産技術センター(工博)
†同センター
‡産業メカトロニクス製作所

要 旨

電子機器の小型・高機能化を支えるプリント基板穴あけ用レーザ加工機は、生産性を高めるため、レーザ光を走査するガルバノスキャナ(以下,“スキャナ”という。)を高速に駆動することが求められている。スキャナはエンコーダを用いてミラーの角度を検出し、ミラーを目的角まで回転させて位置決め制御する。三菱電機は、このエンコーダに注目して高速化技術を開発した。まず、エンコーダを小型・軽量化することでスキャナを高剛性化し、応答周波数を高めた。さらにエンコーダ受光部で複数のセンサ配置によって不要な信号歪(ひず)み成分を相殺し、併せて受光部内に多くのセンサを配列することでS/N比(信号とノイズの比率)を高めて、分解能を向上させた。これらの高速化技術を新型スキャナに内蔵し、加工速度の向上に貢献した。

1. ま え が き

自動車、家電、データセンター、生成AI等、あらゆる電子機器にプリント基板が搭載されて、現代のデジタル社会の基盤を支えている。この基板には層間接続用の穴が必要であり、生産性と品質の面からレーザによるミクロン単位の微細な穴あけ加工が標準的な加工方法として適用されている。近年は電子機器の小型・高性能化が進んで、微細加工や多層構造による高密度化が進展しており、生産性が高い加工機の市場ニーズが高まっている。

本稿では、レーザ光を走査するスキャナの高速化技術と基板穴あけ用レーザ加工機の実産性向上について述べる。

2. プリント基板穴あけ加工技術

この章では、プリント基板穴あけ加工技術について述べる。

2.1 レーザビアとその動向

プリント基板は、図1のマザーボード基板やパッケージ基板等に適用されており、配線を立体的に引き回す多層構造で実装密度を上げている。図2に示すレーザビアの工法では、絶縁層である樹脂にレーザを照射し、除去した後、めっきを施して、最後に表面をエッチングすることで回路パターンを形成する。レーザビアの穴数の推移を図3に示す。基板1層当たりの穴数が2010年では50万穴程度であったが、今では500万穴を超えて、指数関数的に増加している⁽¹⁾。

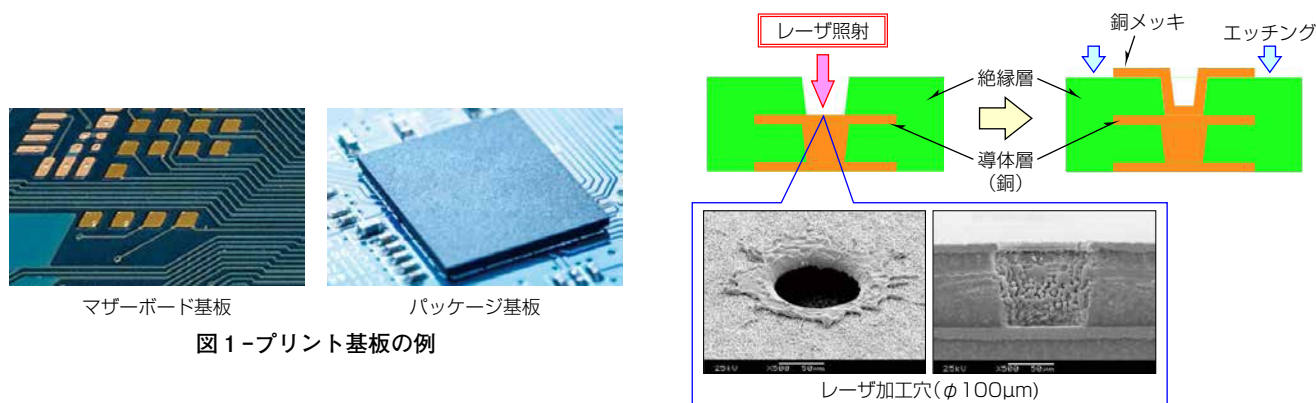


図1-プリント基板の例

図2-レーザビアの工法

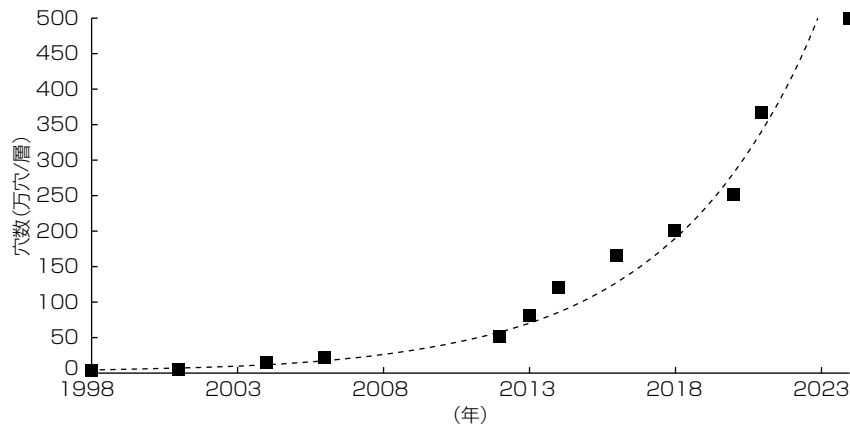


図3-レーザビアの穴数の推移

2.2 加工機の構成と開発方針

基板穴あけ用レーザ加工機の構成を図4に示す。レーザ光の加工穴間の移動にスキャナを用いている。スキャナはエンコーダを搭載しており、モータの回転軸に取り付けられたミラーの回転角度を検出している。そして、ミラーを目的角まで回転させて、レーザ光の光路を狙いの穴位置に向ける。ミラー位置決め後、レーザパルスを発振して穴を加工する。スキャナは1秒間に数千か所もの位置決め(加速・減速・停止)をして、高速加工している。穴あけ加工時間は、スキャナの位置決め時間の占める割合が大きく、加工時間短縮のボトルネックになっている。スキャナの更なる高速の位置決め制御を目指して、スキャナの位置決め応答周波数を高めるとともに、エンコーダの分解能を向上させる。

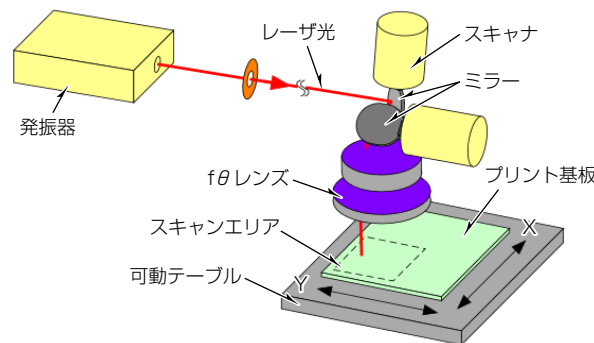


図4-基板穴あけ用レーザ加工機の構成

ここで位置決め応答周波数とは、指令値に対して安定して追従できる周波数の最高値である。位置決め応答周波数が機械共振周波数に近づくと、制御系の不安定化を引き起こす。位置決め応答周波数を拡大するために、スキャナの剛性を高めてその機械共振周波数を高い領域へ引き上げる。また、エンコーダの分解能向上には、角度誤差の低減が求められる。エンコーダ信号には、光学的・電氣的なノイズ成分が含まれる。そこで、まず光学的ノイズ成分を減らした上で、必要な信号を強めることで相対的に電氣的なノイズ成分を低減する。

3. スキャナの位置決め応答周波数の向上

この章では、スキャナの位置決め応答周波数の向上について述べる。

3.1 課題

スキャナに搭載される反射型エンコーダは、図5に示すように、主に光源、スケール板、受光部から構成され、スケール板には目盛りとなるスリットパターンが設けられている。光源から射出された測定光をスケール板に照射し、反射した光を受光部で検出することで、スケール板と受光部との相対角度を測定する。ロータリ型のスケール板は円盤形状をしており、スキャナの剛性を高めるために、スケール板を小径・軽量化する。

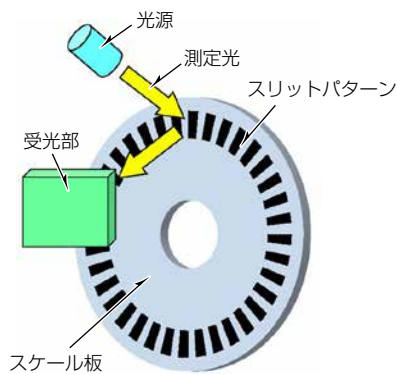


図5-反射型エンコーダの構成

3.2 スケール板の小径・軽量化

スキャナはミラーをある一定の角度範囲内で揺動させる。スケール板の小径化のため、円盤形状から、円盤の走査角度部分を切り出したセグメント形状にする(図6左と中央)。ハブを介してスケール板をモータの回転軸に固定する。スケール板を径方向に小さくするには、ハブとスリットパターンを重ねるとともに、ハブで反射した光がノイズ光になって受光部に届くのを防止する必要がある。そこで、スケール板のスリットパターンの裏面に光吸収膜を設けた(図6右の側面図)。光吸収膜によってハブの反射光の影響をなくして、スケール板の光学半径を小径・軽量化した。これによって、エンコーダの慣性モーメントを低減し、スキャナの剛性を高めることで、位置決め応答周波数を向上させた。

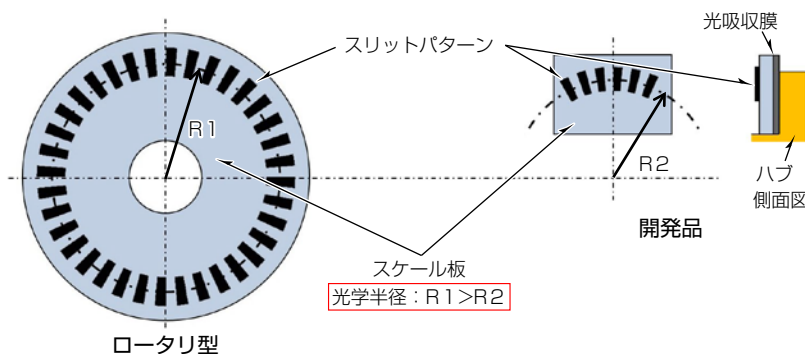


図6-スケール板の小径・軽量化

4. エンコーダの高分解能化

エンコーダ光学系の概略図を図7に示す。エンコーダでは、スリットパターンで回折された光が受光部上に干渉縞(じま)を形成する。ここでTalbot効果⁽²⁾を利用し、受光部上にスリットパターンと相似の干渉縞を形成する。スケール板の回転移動に伴って、受光部上の干渉縞が移動する。受光部は、アレイ状に配置した複数のセンサで構成し、各センサで入射光強度の変動を抽出する。入射光の強度分布から、正弦波信号と余弦波信号で成る角度検出信号を生成し、信号を内挿処理することによって、高い分解能で回転角度を検出する。

4.1 課題

製作上の制限から、スリットパターンの周期を変えずにスケール板を小径化する。図8に示すように、光学半径を $R1$ から $R2$ に小さくすると、周期 P が同じであるため、同じ走査角度の範囲内でスリット数が少なくなる。その結果、受光部上の干渉縞の移動量が減る。従来よりも高い分解能を得るには、角度誤差を低減し、内挿分割数を増やす必要がある。一方、スリットパターンから不要な高次の回折光が発生しているため、理想的な角度検出信号に歪みが生じている。また角度検出信号には、受光部のセンサ自身等から発生するノイズが含まれている。内挿分割数を増やすことでエンコーダの分解能を高めるため、角度検出信号の歪みを抑えけるとともに、信号の強度を高めることで、S/N比を向上させる。

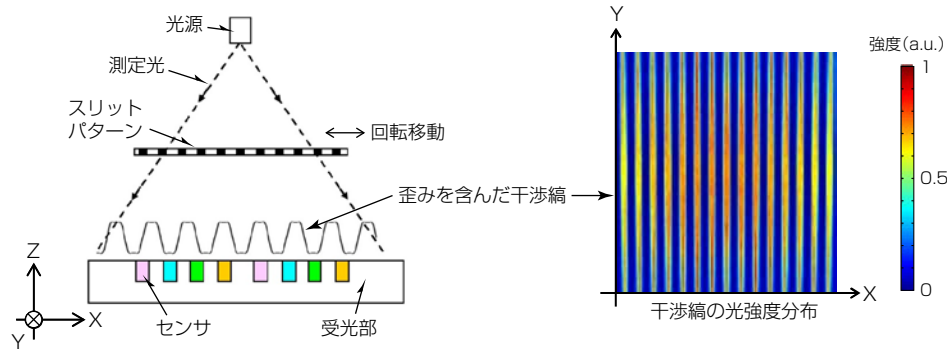


図7-エンコーダ光学系の概略図

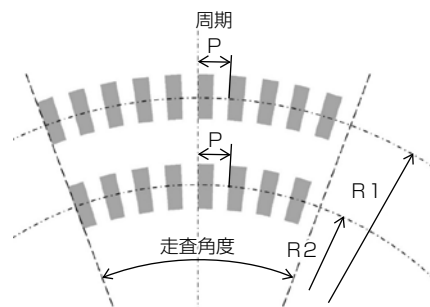


図8-光学半径の小径化

4.2 受光部の角度誤差低減

受光部では、角度検出信号として理想的な正弦波の基準位相信号S1、及び位相差90度、180度、270度の信号S2、S3、S4を生成する。図9に示すように、干渉縞の理想的な正弦波の光強度波形を黒字細線で示している。この理想的な正弦波の90度ピッチに相当する位置に複数のセンサを配置している。

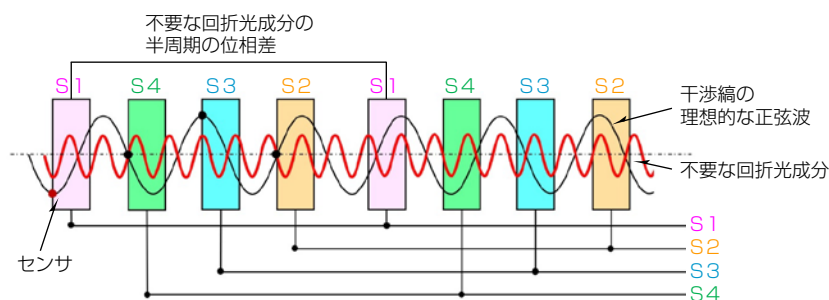


図9-干渉縞とセンサの配置

4.2.1 光学的ノイズの低減

角度検出信号が歪む要因になる不要な回折光成分の周期に着目した。アレイ状に配置したセンサのうち、一部のセンサを不要な回折光成分の半周期分に相当する距離だけずらすことで、不要な回折光成分を相殺する。具体的には図9の赤字太線が不要な回折光成分の光強度波形である。一番左のS1と左から2番目のS1で赤線の波が反転しており、これらを重ね合わせて不要な回折光成分を精度高く相殺する。

4.2.2 電氣的ノイズの相対的な低減

角度検出信号の強度を高めるためには、受光部内で光を検出する領域を増やすことが有効である。図10①に示すセンサ配列のグループ1の隣に同じ配列のグループ1を並べる場合、2番目のグループ1の一番左のS1は、クロストーク等を考慮するとAの位置になる。ここで、図10②のように、グループ2としてセンサS1～S4の並びを変える。グループ2

の一番左をS3とするとBの位置に設置できて、グループ1とグループ2の間隔を狭くできる。この結果、受光部内に多くのセンサを配列することが可能になり、信号強度を高めてS/N比を向上させた。

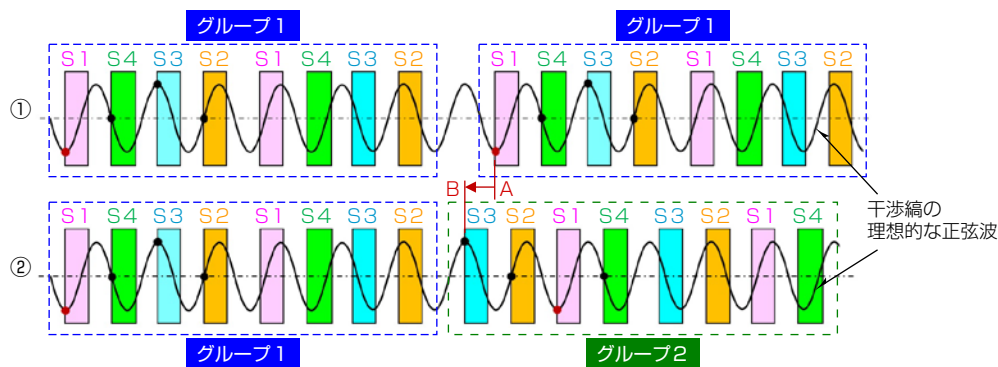


図10-受光部のセンサ配列

5. 生産性向上

スケール板を小径・軽量化することでスキャナの位置決め応答周波数を向上させた。また、光学的・電気的ノイズを低減することでエンコーダの分解能を向上させた。これらの高速化技術を、他の高速化技術と併せて新型スキャナ“3200GL”に内蔵し、スキャナ的高速駆動に貢献した。高速スキャナ3200GLを搭載した基板穴あけ用レーザ加工機のラインアップを表1に、GTW6シリーズの外観を図11に示す。当社独自の発振器と高速スキャナ3200GLの搭載によって毎秒7,000穴^(注1)の超高速・高精度加工を実現し、従来比25～30%の生産性向上^(注1)を達成した。

(注1) 生産性は機種や加工内容によって異なる。

表1-高速スキャナ3200GLを搭載した基板穴あけ用レーザ加工機

シリーズ	GTW6	GTF6	GTF5-UVP
レーザの種類	クロスフローレーザ	クロスフローレーザ	UVレーザ
発振器の出力(W)	540	315	26
構成	2ワーク2ビーム	2ワーク4ビーム	2ワーク4ビーム
特徴	次世代に対応するグローバルスタンダード機	高速高精度を追い求めたハイパフォーマンス機	当社のレーザ技術を結集したUVレーザ加工機

UV：Ultraviolet



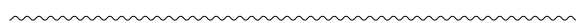
図11-GTW6シリーズの外観

6. む す び

基板穴あけ用レーザー加工機のキーテクノロジーの一つであるスキャナ的高速化技術を述べた。今後も、電子機器の市場拡大を背景に、プリント基板の小型・高性能化が進むと考えられる。それに伴って基板の穴数もますます増加し、更なるレーザー穴あけ加工の生産性向上が求められる。これに応じて、スキャナをはじめレーザー発振器やf θ レンズ、制御機器等のキーテクノロジーを継続的に開発することで、高い製品性能と品質を提供していく。

参 考 文 献

- (1) 小林信高, ほか: レーザ穴あけ加工の品質を向上させるミラーの発明, 三菱電機技報, **92**, No.4, 257~260 (2018)
- (2) Bryngdahl, O.: Image formation using self-imaging techniques, Journal of the Optical Society of America, **63**, No.4, 416~419 (1973)



SiCインバーター・モーター製品の 絶縁基盤技術

石川裕卓*
Hirofuku Ishikawa
門脇和丈†
Kazutake Kadowaki
宮路仁崇*
Yoshitaka Miyaji

遠藤和樹*
Kazuki Endo

Electrical Insulation Technologies for SiC Inverter-Motor Systems

*先端技術総合研究所(工博)
†パワーデバイス製作所

要 旨

SiC(シリコンカーバイド)パワーデバイスを搭載したインバーター・モーターシステムの社会実装は、近年ますます進んでいる。機器のSiC化に伴って、スイッチング駆動周波数の増加、電圧立ち上がり速度の高速化、サージ電圧の上昇などが生じることは、電気絶縁に対して不利に働く要素になる。また電動化の広がりに伴って、従来製品では信頼性が保証されていないような環境への対応が求められることもある。これらの状況下で製品の絶縁信頼性を確保していくためには、製品開発時の絶縁設計技術から、運用後の状態監視技術までを網羅した、絶縁基盤技術全体の高度化が必要である。三菱電機は、特にSiCを搭載するパワーエレクトロニクス機器向けに絶縁技術を開発した。

1. ま え が き

近年、SiCパワーデバイス製品のラインアップ拡充が進んできたことで、幅広い分野のインバーター・モーターシステムでSiCが採用されるようになってきた。機器のSiC化によってインバーターの損失低減や、小型・大容量化といったメリットがある一方で、図1に示すようにスイッチング駆動周波数の増加、電圧立ち上がり速度の高速化、サージ電圧の上昇などは製品の電気絶縁に対して不利に働くことが知られている。更に信頼性の高い製品を開発するためには、部分放電や空間電荷などの電気絶縁に関与する現象を、従来以上に詳細に理解する必要がある。また、SiCの普及とともに、先行する電車・電気自動車だけでなく、航空機や船舶などでも積極的な電動化開発が進められている。特に航空機では、軽量化の観点からSiCの採用可能性が高いが、航空機搭載機器には極めて高い信頼性が要求される。それに加えて、高高度の低気圧環境は放電発生リスクが高いため、部分放電を発生させない絶縁設計技術に加えて、放電発生を検知する状態監視技術が重要である。

これらのことから、絶縁設計から運用中の状態監視に至る包括的な絶縁基盤技術の高度化が、安心・安全な製品開発の前提になる。本稿では、特にSiCを搭載するインバーター・モーター製品向けに開発した四つの絶縁技術を述べる。

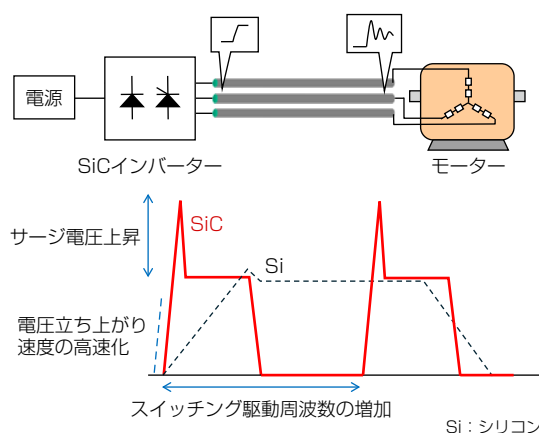


図1-SiCインバーター・モーターシステムと高電圧スイッチング波形の模式図

2. SiCインバーター・モーターの絶縁技術

この章では、SiCインバーター・モーター製品向けに開発した四つの絶縁技術について述べる。

2.1 高速矩形波によるモーターの放電評価技術

インバーター素子のスイッチングによって発生するサージ電圧(図1のスイッチング波形の模式図)は、インバーターとモーターをつなぐケーブルを介してモーター端子に届く過程でLC共振やモーター端子-インバーター間の反射によって増幅される。その結果、モーター端子にはインバーター素子で発生したサージ電圧以上の大きな過電圧が発生することが知られている。そして、このような急峻(きゅうしゅん)な電圧がモーター巻線に輸入された場合、巻線間に電位差が発生し、部分放電が発生する可能性がある。部分放電はモーター巻線を劣化させて、最終的に絶縁破壊を引き起こすため、モーター絶縁での大きな課題になっている⁽¹⁾。特にSiC化によって巻線に与えるストレスは高まっており、当社では、SiCインバーターで駆動するモーターの絶縁信頼性を評価するため、サージ電圧を模擬した高速矩形(くけい)波電圧を巻線に印加した場合の部分放電評価技術及びシステムを開発・構築した。

部分放電とは、気中で生じる微小な放電のことであり、急峻な電気信号として観測される。そのため、商用周波数で使用される電力機器等では、印加電圧波形と放電波形の周波数成分が異なることを利用し、選別・増幅することで部分放電を測定するのが一般的である。一方、サージのような急峻な電圧波形が印加される場合、サージ電圧波形と放電波形の周波数成分による切り分けが困難になるため、従来手法では部分放電の測定が難しいという課題がある。そこで当社では、部分放電発生時に生じる微小発光を利用した部分放電検出システムを構築した。図2に高速矩形波によるモーター巻線の部分放電評価システムを示す。この評価システムでは、矩形波電源からサージ電圧を模擬した高速矩形波電圧を巻線試料に印加する。高電圧プローブで印加電圧をモニターしながら、放電光を光電子増倍管で捉えることで部分放電の有無を評価する。図3に部分放電の評価例を示す。矩形波電圧が印加されている最中に光電子増倍管が反応しており、部分放電の発生を確認できる。この評価システムに採用した矩形波電源は、スイッチ部がSiC素子で構成されて、またパルス数・パルス幅・繰り返し周波数が広い範囲で可変であるため、SiCインバーターから出力されるサージ電圧を模擬可能である。それに加えて、電圧レベルのシーケンス制御が可能であるため、IEC/TS 61934 Ed.3.0の定義に基づいて、部分放電開始電圧(PDIV)及び繰り返し部分放電開始電圧(RPDIV)も簡便に評価可能である。この評価技術を用いて、SiC駆動モーターの絶縁信頼性向上を目指した研究開発を進めている。

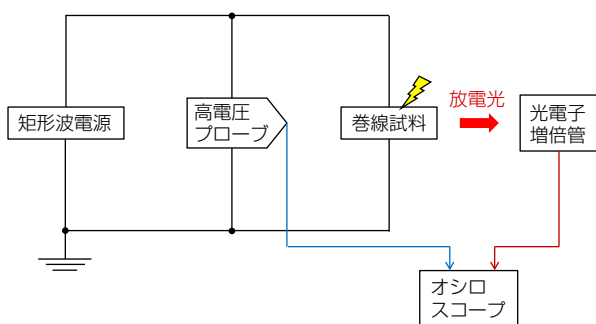


図2-高速矩形波による巻線部分放電評価システムの構成

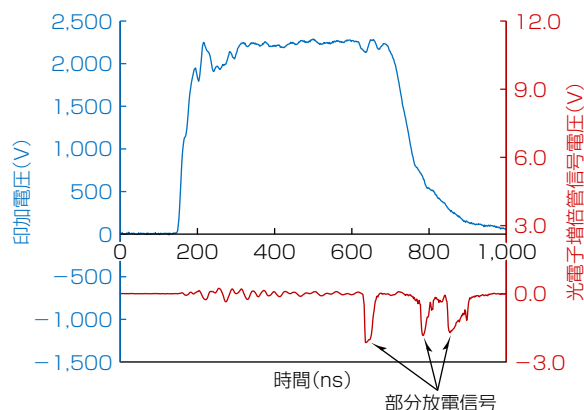


図3-部分放電の評価例

2.2 パワーモジュール製品の高速矩形波による絶縁寿命評価技術

パワーモジュール内部の絶縁材料は単極性の高速矩形波の電界ストレスを受けている。直流電圧から高周波まで幅広い周波数成分が組み合わせられるため、様々な劣化現象を同時に考慮することが必要になる。従来は交流電圧又は直流電圧を用いた長期課電試験で製品の絶縁寿命を評価していたが、実際の電界ストレスに近い高速矩形波を用いれば、絶縁寿命を更に高精度に評価できると考えられる。そこで高速矩形波による絶縁寿命評価技術を開発し、パワーモジュールの封止樹脂

脂として広く用いられているエポキシ樹脂に対して適用し、従来手法の結果と比較した。

図4に、開発した高速矩形波による絶縁寿命評価システムを示す。試料に正極性の矩形波電圧を課電し、課電開始から絶縁破壊までの時間を測定することによって、絶縁寿命を評価する。また、試料に並列接続したコンデンサーの容量を調整することで、矩形波の立ち上がり時間を可変とした。従来手法との比較のため、エポキシ樹脂封止した針-平板電極系の要素モデルを用いて、絶縁寿命を評価した。矩形波の立ち上がり時間には、SiCインバーターを想定した25nsとSiインバーターを想定した200nsを設定した。図5に評価結果を示す。塗り潰しは絶縁破壊したプロット、白抜きは試験を打ち切った絶縁破壊に至っていないプロットである。図5から、立ち上がり時間25nsで絶縁破壊に至った条件が、立ち上がり時間200nsの場合は絶縁破壊せず、矩形波電圧の立ち上がり時間が短いと絶縁寿命が短くなることが分かる。高電界になる針電極先端近傍では、電界強度があるしきい値を超えると電極から空間電荷が注入されて蓄積することで、徐々に電界を緩和することが知られている。しかし、立ち上がり時間が短い場合にはこの電界緩和効果が十分に発揮されない。これによって、立ち上がり時間が短いと同じ印加電圧でも電界ストレスが高くなり、その結果、絶縁寿命が短くなったと考えられる。このように、SiC搭載機器での絶縁現象の把握には、空間電荷の影響を考慮することも重要と考えられる。SiC搭載機器での絶縁現象を把握するための評価技術について2.3節で述べる。

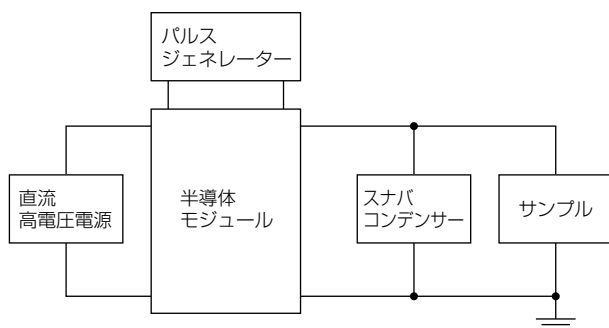


図4-高速矩形波による絶縁寿命評価システム

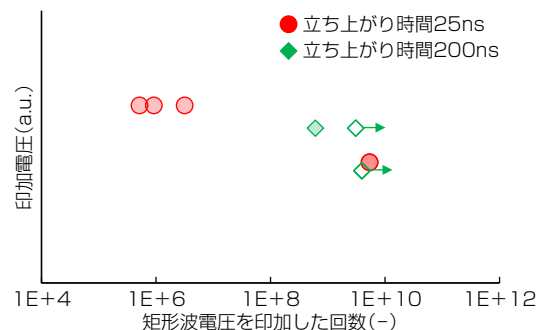


図5-高速矩形波によるエポキシ樹脂の絶縁寿命

2.3 絶縁材料の高速矩形波電圧下の空間電荷分布評価

2.2節で述べたように、高速矩形波電圧下の絶縁現象の把握には、絶縁材料内部に存在する空間電荷を考慮することが重要だと考えられる。直流電圧下の空間電荷分布の評価方法は、パルス静電応力 (Pulsed Electro Acoustic : PEA) 法が代表例として知られている。PEA法は、試料にパルス電圧を印加することで試料内の空間電荷に起因する圧力波を発生させ、その圧力波を圧電素子によって測定することで、試料内の空間電荷の分布を測定する手法である。当社でも、直流電圧下ではその手法を用いて絶縁材料の評価を行ってきた。高速矩形波電圧下の評価技術は、近年開発されつつある⁽²⁾。そこで当社は、その手法の開発を進めている東京都市大学と共同研究を行い、高速矩形波電圧下の評価方法の高度化を進めている。

図6に高速矩形波電圧下の空間電荷分布評価システムを示す。また、図7に高温中のエポキシ樹脂に対して、矩形波電圧下の空間電荷分布を評価した一例を示す。図7から、印加する電圧条件によって電荷の蓄積位置や分布形状が異なるこ

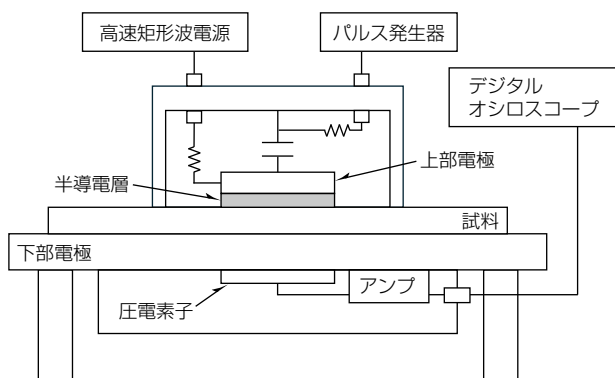


図6-PEA法を用いた空間電荷分布測定システム

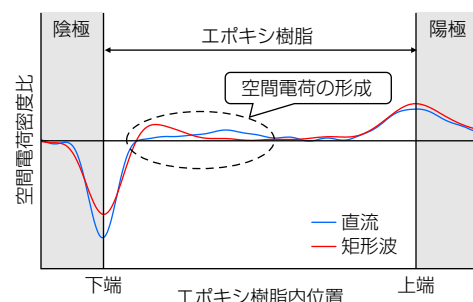


図7-エポキシ樹脂の空間電荷分布波形

とを確認できる。これは、直流電圧印加時には電界が連続的に作用するのに対して、矩形波電圧印加時には電圧の立ち上がり・立ち下がりや印加時間の周期的変化を伴うため、電荷の注入、輸送、蓄積及び緩和の過程が変化し、結果として空間電荷挙動が異なるためだと考えられる。この評価方法によって、当社製品に用いられる絶縁材料で、印加電圧波形や周波数が空間電荷挙動に与える影響を評価可能である。

2.4 電力変換器の部分放電検知技術

電動航空機に搭載されるインバーター・コンバーターといった電力変換器では、航空機搭載機器に求められる高い信頼性を確保することが課題になる。インバーター・モーターシステム同様、電力変換器内部でも、スイッチングで生じるサージ電圧によって部分放電が発生する懸念がある。そこで、部分放電が発生させない絶縁設計に加えて、新たな部分放電検知機能を開発した。部分放電検知部とスイッチング回路の制御部とを連動させることによって、運転中に部分放電を検知した場合には、即座に部分放電発生アラートを制御部に出力し、電源電圧を下げる、遮断するといった制御を行い、運転中の機器故障を未然に防ぐものである。

部分放電の検知には、部分放電信号とノイズを適切に切り分けることが重要である。交流電圧によって発生する部分放電に対しては、電流トランス(CT)とハイパスフィルター(HPF)で取得した信号に対して、いわゆる位相パターンを用いて部分放電信号を識別する手法がある。一方、スイッチング電圧波形は交流と異なって一定した位相が存在せず、また、スイッチング時に生じるサージ電圧が部分放電信号と同様のスパイク波形であり、両者を識別するのが困難であるといった課題もあり、従来手法が適用できなかった。そこで当社では、部分放電検知部に電源の制御信号を入力することでスイッチング回路の動作状態に応じた条件で部分放電判定を行うことができる新たな検知手法を開発した。この機能を実現するハードウェア構成を図8に示す。この機能は、航空機に搭載される電力機器の信頼性向上に寄与するものである。

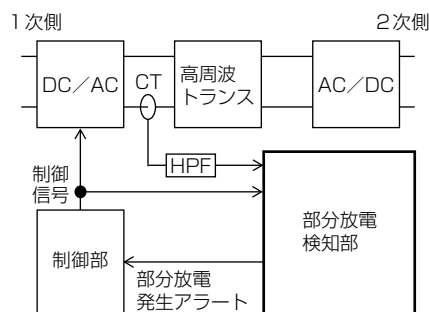


図8-電力変換器の部分放電検知機能ブロック図

3. む す び

SiCインバーター・モーター製品の絶縁信頼性確保に資する絶縁基盤技術について述べた。

今後も基盤技術の進化を通して、当社製品の信頼性向上に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 適用拡大が進むインバータ駆動回転機の絶縁の現状調査専門委員会：適用拡大が進むインバータ駆動回転機の絶縁の現状，電気学会技術報告，No.1533（2022）
- (2) 峯岸太一，ほか：エポキシ樹脂における矩形波電圧が空間電荷蓄積に与える影響，令和8年電気学会全国大会，2-028，33（2026）

抗菌プラスチックの品質向上に資する材料分析技術

Analytical Methods for Improving Quality of Antimicrobial Plastics

*先端技術総合研究所
†ライフBA戦略室(工博)

要 旨

プラスチック材料の衛生機能を安定的に発現させるためには、最終製品の品質検査に加えて、原料中の有効成分濃度を定量し、工程管理を行うことが重要である。三菱電機は、抗菌プラスチックの品質向上に資する抗菌有効成分の分析評価技術の開発に取り組んできた。この技術を工程管理に適用することで、不適合品の流出防止と不具合発生時の原因特定の迅速化を実現した。特に、無機系抗菌剤を含有するプラスチックを対象に、プラスチックペレット中の有効成分濃度、及び成形品表面の有効成分分布を評価する技術を検討し、これら技術の工程管理への導入効果を検証した。

1. ま え が き

新型コロナウイルスの流行を契機に、消費者の公衆衛生に対する意識は高まって、住環境の清潔さや安心・安全への要求が定着した。これに伴って、微生物の増殖を抑制する機能を備えた家電・デバイスの市場は拡大している。当社グループでも、“ヘルスエアー”技術をはじめとする空気清浄技術⁽¹⁾⁽²⁾や、抗菌・抗ウイルス・防カビなどの衛生機能を付与したプラスチック材料を開発し、製品に適用してきた。これらIEQ(Indoor Environmental Quality：室内環境の質)ソリューションの提供を通じて、安心・安全な住環境の構築に貢献してきた。

製造業で、品質トラブルを未然に防ぐためには、品質管理体制の構築が不可欠である。一般に、品質管理は、品質検査、工程管理、品質改善の3要素から構成される。図1に抗菌プラスチック製品の製造工程を示す。従来、抗菌機能の品質は、主として最終検査である抗菌試験によって担保されてきた。しかし、抗菌試験までに複数の工程を経るため、機能に問題が発生した場合、原因工程の特定に時間を要しており、工程管理及び品質改善の面で課題があった。この課題の解決には、各工程で原料中に含まれる有効成分濃度を定量する中間検査の導入が有効である。

本稿では、種々ある抗菌剤の中でも、最も汎用的に使用される無機系抗菌剤を含有するプラスチックに焦点を当てて、品質向上に資する材料分析・評価技術を述べる。

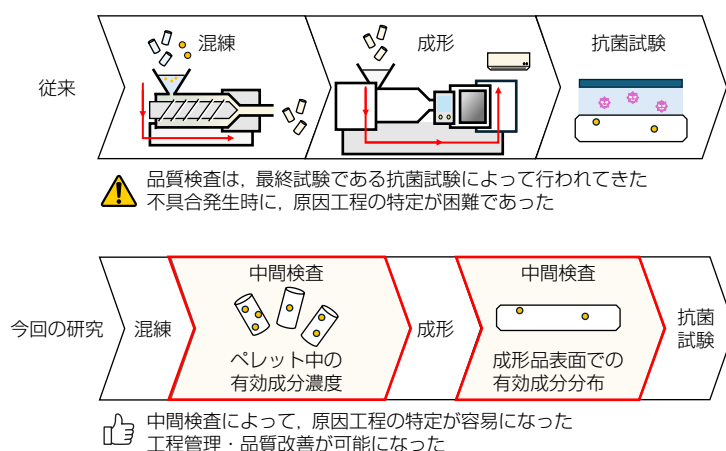


図1-抗菌プラスチック製品の製造工程

2. 無機系抗菌剤含有プラスチックでの課題

市場に流通するプラスチック用抗菌剤は、無機系、有機系、天然系に大別される。中でも、無機系抗菌剤は、人体への安全性や耐熱性に優れていて、家電をはじめ幅広い製品に用いられる。一般に、無機系抗菌剤は、ゼオライトやガラスなどの担体に、銀や亜鉛などの有効成分を担持させた粒子状物質である。

プラスチックと無機系抗菌剤を混合したとき、これらの材料は混和せず、不均質な構造を形成する。そのため、無機系抗菌剤含有プラスチックでは、抗菌剤粒子の分散状態が性能に直結し、分散状態を定量する手法が求められていた。

3章以降では、ペレット中の有効成分濃度、及び成形品表面での有効成分分布を評価する手法の概要を述べる。

3. プラスチックペレット中の有効成分濃度の定量

プラスチック製品の成形加工で原料になるプラスチックは、ペレットと呼ばれる粒状の形態で成形機に供給される。ペレットは、プラスチックの主成分であるポリマーと、安定化剤や抗菌剤などの添加剤を押出機で熔融混練し、製造される。押出機の運転条件が不適切であると、ペレット中の有効成分濃度がばらついて、最終製品の性能に悪影響を及ぼす。

ペレット中の有効成分濃度は、外観から推定できる場合がある。図2に規定条件で静置したゼオライト系抗菌剤含有プラスチックペレットの外観を示す。ゼオライトには有効成分として銀が含まれていて、銀の酸化、又はプラスチックの変性によって変色する。ペレット中の有効成分濃度が高いほど、褐色への変色の程度が大きい。このように、ペレットの外観変化から、有効成分濃度の簡易的な評価が可能である。



図2-プラスチックペレット

ペレット中の有効成分濃度を更に精密に定量するには、誘導結合プラズマ発光(Inductively Coupled Plasma: ICP)分析が有用である。ICP分析では、ペレットを酸又はアルカリ処理によって溶液化し、溶液に含まれる有効成分を測定することで、元のペレットに含まれる有効成分濃度を定量する。図3に、抗菌剤添加量が異なるペレットのICP分析の結果を示す。有効成分として銀及び亜鉛を定量した。プラスチックへの抗菌剤添加量と有効成分濃度はおおむね比例関係を示しており、ICP分析によってペレット中の有効成分濃度を高精度で定量できることが分かる。ICP分析はペレット一粒単位での測定が可能であるため、同一製造ロット内での有効成分濃度の変動を可視化し、変動抑制に向けた工程条件の策定に活用できる。

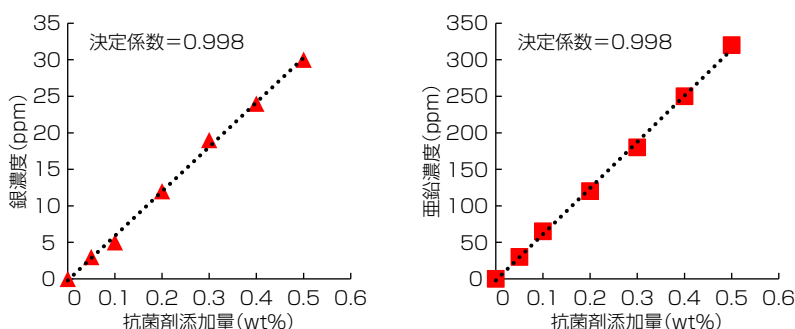


図3-プラスチックペレット中の有効成分量の定量結果

4. プラスチック成形品表面の抗菌有効成分分布の定量

この章では、プラスチック成形品表面の抗菌有効成分分布の定量について述べる。

4.1 成形品表面の抗菌有効成分分布の定量技術

プラスチック製筐体(きょうたい)の大半は射出成形によって製造される。射出成形では、熔融したプラスチックを金型内に高圧で注入し、冷却・固化させて成形品を得る。成形品の表面性状は、射出速度や金型温度などの成形条件に大きく左右される。抗菌試験で、試験片表面に存在する有効成分が試験液中の菌に作用することで性能が発現するため、性能安定化には、試験片表面に適切な有効成分が分布していることが不可欠である。成形条件の変動によって抗菌剤の露出状態が変化し、抗菌性能を低下させる懸念があるが、当社の知る限り、成形条件の影響が検証された例はない。成形品表面の抗菌剤分布を定量評価することは、成形工程の妥当性確認と抗菌性能の予測の両面で有効である。

そこで当社は、成形品表面の無機系抗菌剤の分布の定量法として、電子プローブマイクロアナライザー(Electron Probe Micro Analyzer: EPMA)を用いる手法を開発した⁽³⁾。EPMAは微小領域の元素を高感度に分析できて、抗菌剤微粒子の位置を検出する。図4に、無機抗菌剤を添加したスチレン系プラスチックの反射電子組成像(Compositional image in BSE mode)、及び抗菌有効成分である亜鉛のマッピング像を示す。反射電子像の白色点と亜鉛の検出位置は一致しており、これらは成形品表面に存在する抗菌剤粒子を検出している。さらに当社は、亜鉛マッピング像から、抗菌剤領域を統計的に判別し、単位面積当たりの抗菌剤粒子数(以下、“面密度”という。)を算出する解析プログラムを作成した。この手法によって、成形品表面の抗菌剤の定量評価が可能になった。

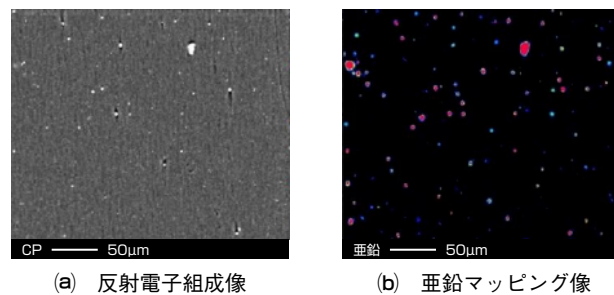


図4-抗菌剤含有プラスチック

図5に抗菌剤添加量が異なる試験板にこの手法を適用し、抗菌剤粒子数の面密度を算出した結果を示す。プロットはN=5の平均値であり、エラーバーは最大値・最小値を表す。その結果、抗菌剤粒子の面密度の平均値は添加量に対しておおむね比例関係を示しており、試験板表面の抗菌剤を精度高く定量できることが確認された。一方、エラーバーに示されるように、同じ添加量の試験片を評価しても、測定視野ごとにばらつきが見られた。これは、抗菌剤含有プラスチックが微視的には不均一な構造を持っていて、抗菌剤濃度の濃淡が生じているためと推察される。表面濃度だけでなく、抗菌剤の分散状態の定量が重要である。

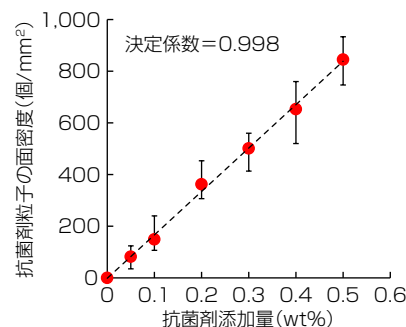


図5-抗菌剤添加量が異なる試験板表面の面密度の定量結果

そこで、抗菌剤粒子の分散状態を評価するため、ボロノイ分割を検討した⁽³⁾。ボロノイ分割では、マッピング像から得られた二値化画像中の抗菌剤粒子の重心を母点として、各母点から最近する領域を、境界線によって分割する操作を行う。図6にボロノイ図の例を示す。分割された各領域はボロノイ領域と呼ばれる。抗菌剤粒子の分散状態を評価する指標として、ボロノイ領域の平均面積 μ 及び標準偏差 σ を基に、次の式からAD(Area Disorder)を算出した。

$$AD = 1 - (1 + \sigma/\mu)^{-1}$$

ボロノイ領域の面積変動が小さいほど、ADは小さくなり、抗菌剤粒子の分散状態が良好であると示唆している。粒子間に引力や斥力などの相互作用が働かない場合、抗菌剤粒子は理想的にはランダムに分布する。

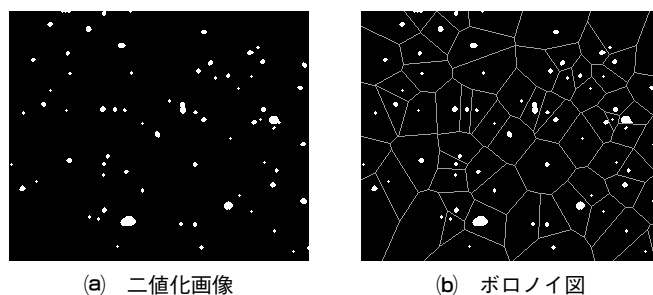


図6-亜鉛マッピング像から算出した二値化画像とボロノイ図

4.2 成形条件が異なる成形品表面の抗菌有効成分分布の評価

射出成形で良好な成形品を得るためには、材料特性のばらつきを考慮してプロセスウィンドウを設定する。図7に示すプロセスウィンドウでは、良品を製造するために、二つ以上の制御パラメーターを変化させて、各パラメーターの上下限を見極める。得られたプロセスウィンドウの重心を量産条件として設定し、条件変動による不良発生を抑制する。この研究では、成形条件が抗菌剤の分散状態に与える影響を調査するに当たって、良好な成形品が得られるプロセスウィンドウをあらかじめ策定した。図7のプロセスウィンドウの頂点(A, B, C, D)の条件で成形した試験片に対して、表面抗菌剤濃度及び抗菌性能を評価した。金型温度及び射出速度を制御因子とし、成形条件が抗菌剤の分散状態に与える影響を検討した。

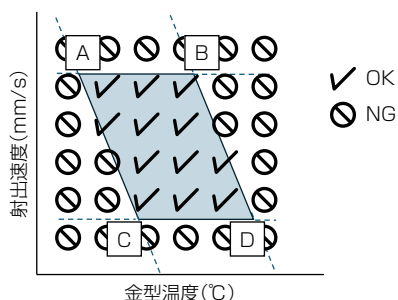


図7-射出成形条件のプロセスウィンドウ

成形条件が異なる抗菌剤添加量0.50wt%の試験片について、抗菌剤粒子の面密度及びADを定量した。結果を図8、図9に示す⁽³⁾。図9には、抗菌剤がランダムに分散している場合のシミュレーション結果を併記している。成形条件によって抗菌剤粒子の面密度に顕著な差異は確認されず、どの成形条件でも抗菌剤はランダム分散に近いことを確認した。

次に、抗菌剤添加量0.05又は0.10wt%の試験片の抗菌活性値を表1に示す。評価は、JIS Z 2801に準拠して実施した。JIS Z 2801では、抗菌活性値が2.0以上(生菌数の減少率が99%以上)のとき、製品に抗菌効果があると判断される。表1のデータは、N = 9の平均、標準偏差を示している。添加量が0.05wt%の試験片では、抗菌活性値の平均が1.1~2.4の範囲になり、どの成形条件でも生菌数は90%以上減少し、明確な性能差は確認されなかった。また、活性値の標準偏差が大きく、性能にばらつきが見られた。性能ばらつきが見られた要因としては、試験の手順や条件による変動や、有効成分濃度が局所的に不足した可能性が挙げられる。抗菌剤はランダムに分散しており、局所的に有効成分濃度が不足した領域が生じて、菌の不活化が十分に進行しなかったと考えられる。一方、添加量0.10wt%の試験片では、成形条件によらず、

生菌数が検出下限以下まで減少し、抗菌性能にばらつきは見られなかった。これは、抗菌剤添加量の増加によって、局所的な有効成分濃度不足が解消されて、抗菌剤の分散状態の影響が顕在化しなかったためと推定している。これらの結果から、抗菌有効成分が十分量添加されている場合には、射出速度及び金型温度などの成形条件が抗菌性能に及ぼす影響は小さいと考えられる。

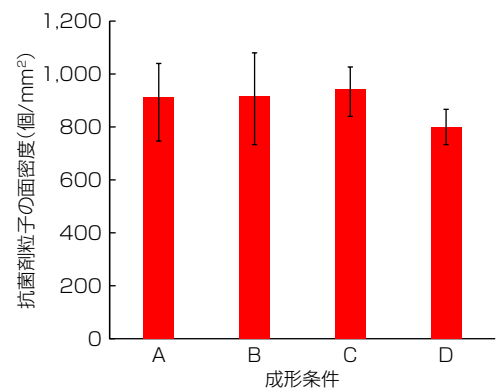


図8-抗菌剤粒子の面密度の成形条件依存性

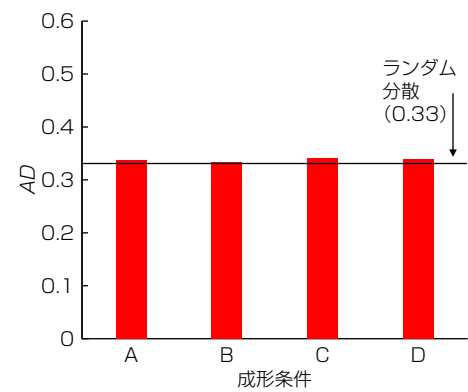


図9-抗菌剤粒子の分散状態の成形条件依存性

表1-成形条件が異なる試験片の抗菌活性値

添加濃度 (wt%)	成形条件	抗菌活性値	
		平均	標準偏差
0.05	A	2.4	0.38
0.05	B	1.3	0.24
0.05	C	2.0	0.51
0.05	D	1.1	0.23
0.10	A	>3.9	0
0.10	B	>3.9	0
0.10	C	>3.9	0
0.10	D	>3.9	0

5. む す び

プラスチックの衛生機能の品質安定化に寄与する分析評価技術を述べた。これら技術の適用によって、従来の品質検査だけでは困難であった高度な工程管理及び品質改善が可能になった。衛生機能プラスチック材料は、様々な家電製品や昇降機に適用されており、今後も快適で安心・安全な住環境の実現に貢献していく。

最後に、本稿では詳細に述べていないが、衛生性能を継続的に発揮・持続させるためには、製品表面を清潔に保つ必要があることに注意願いたい。製品表面に付着した汚れは、プラスチック中の有効成分と微生物の接触を妨げて、衛生性能を低下させる。定期的な清掃・メンテナンスの実施を推奨する。

参 考 文 献

(1) 古橋拓也：“ヘルスエアー”技術による微生物抑制，三菱電機技報，**94**，No.10，606～609（2020）
(2) 斎木あゆみ：“ヘルスエアー”技術の空調機への適用，三菱電機技報，**96**，No.10，356～359（2022）
(3) 野田 健，ほか：電子プローブマイクロアナライザによる抗菌プラスチックの有効成分分布の定量，成形加工，**38**，No.4，141～143（2026）

ネットワーク品質とアプリケーションモデルをマッピングするクロスレイヤー型品質評価技術

上吉川直輝* Naoki Kamiyoshikawa
長谷川仁彦† Masahiko Hasegawa
片山育星* Ikutoshi Katayama

Cross-Layer Quality Evaluation Technique Mapping Network Quality and Application Models

*情報技術総合研究所
†通信システムエンジニアリングセンター

要 旨

近年の無線通信技術の発展とIoT(Internet of Things)の普及に伴って、多種多様な情報の伝送ニーズが拡大する一方で、時間帯や場所によって変化する通信環境で、ネットワークの設計から構築、運用までのライフサイクルを通じて、アプリケーションごとに要求されるサービス品質を安定的に提供することが求められる。そこで、無線リンクからアプリケーションレイヤーまでの品質を横断的に評価するクロスレイヤー型品質評価技術と、評価結果に基づくアプリケーション・通信制御技術を開発し、ネットワークライフサイクルを通じた安定的なサービス品質の実現に向けた検証を行った。

1. ま え が き

無線通信技術の発展とIoTの普及によって、多様なサービスが無線通信を介して享受できるようになっている。さらに、少子高齢化に伴う省人化・省力化に対するニーズの高まりから、モビリティ向けの自動運転や無人機による遠隔監視、工場等での様々な機器やセンサーのネットワーク接続による機器の状態監視の実現等、モバイル通信だけでなく、産業分野でも、無線通信が果たす役割の重要性が高まっている。一方、無線通信では時間帯や場所、他ユーザーとの周波数・帯域の共有状況に応じて、通信環境が常に変化することから、ユーザーが求めるサービス品質を維持できない可能性がある。そのため、通信環境の変化に応じて、アプリケーションごとに最適なサービス品質を維持することが求められる。

そこで、アプリケーションごとに最適な通信環境の提供を実現するための要素技術として、無線リンク・物理レイヤーからアプリケーションレイヤーまで横断的にサービス品質を評価するクロスレイヤー型品質評価技術に関する開発に取り組んできた。

本稿では、クロスレイヤー型品質評価技術を活用したネットワークライフサイクルシステムの概要と、クロスレイヤー型品質評価技術について実環境や模擬環境で取得したデータによる具体例を用いて評価した結果を述べる。また、評価結果に基づくアプリケーション・通信制御技術を適用した際のサービス品質改善指針について述べる。

2. ネットワークライフサイクルシステム

異なるサービス品質要件を持つ複数のアプリケーションが同一の無線回線を共用することが想定されるため、ユーザーが求めるサービス品質を維持するためには、従来の回線(セッション)単位の品質である無線品質(RSSI(Received Signal Strength Indicator), SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio))やネットワーク品質(遅延・ジッター、パケットロス等)での評価では不十分である。そこで、アプリケーション単位でのサービス品質(Quality of Experience: QoE)や、ユーザーが実際にサービスを通じて得る感情、使いやすさ及び満足度等を含む包括的なユーザー体験(User eXperience: UX)を評価する必要がある。本稿では、サービスの提供者がユーザーに約束するサービス品質の指標をQoEとし、実際にユーザーが体感する品質をUXと定義する。サービス品質はアプリケーションパラメーター(例:映像の場合、解像度やフレームレート等)の設定値だけでなく、無線品質やネットワーク品質によっても変化するため、無線リンクからアプリケーションレイヤーまでの各レイヤーの品質について、レイヤー横断的に関係性を明らかにして定量的に評価するクロスレイヤー型の品質評価技術が必要になる。また、接続される無線通信システムに関する設計情報やサービス運用が想定される事業ドメイン情報についても考慮して評価する必要がある。そこで、クロスレイヤー型品質評価技術を活用し、運用の中で各レイヤーの品質を横断的に評価したデータを、継続的にフィードバックして、ネットワークを設計、構築することで、変動する通信特性によらず、アプリケーションごとに最適なサービス品質でのサービス提供を実現する。

図1にクロスレイヤー型品質評価技術を活用したネットワークライフサイクルシステムの構成を示す。このシステムは、無線品質及びネットワーク品質からサービス品質を推論する機械学習モデルで構成され、クロスレイヤー型品質評価技術によって、アプリケーションごとに最適なサービス品質でのサービス提供を実現する。実際の運用環境に適用後、このシステムはまず学習フェーズとして、通信やアプリケーション、サービス品質の情報をレイヤー横断的に対応付けたマッピング情報に加えて、設計情報や事業ドメイン情報を学習し、モデル構築を行う。学習後は運用フェーズに入って、学習フェーズで構築したモデルに基づいて、実際の環境で取得した無線品質及びネットワーク品質から、アプリケーションのサービス品質を推定・評価する。そして、評価結果に応じてアプリケーションのパラメーターや伝送方法(回線選択, 冗長・連送, 優先制御等)を適切に制御することで、アプリケーションごとに最適なサービス品質でのサービス提供を実現する。また、運用フェーズで得られたデータは、学習フェーズにフィードバックして、モデルを更新し、実際の運用環境に適応する。この際、サービス品質の適切な推定・評価のために重要な技術がクロスレイヤー型品質評価技術である。

3章にクロスレイヤー型品質評価技術について示す。

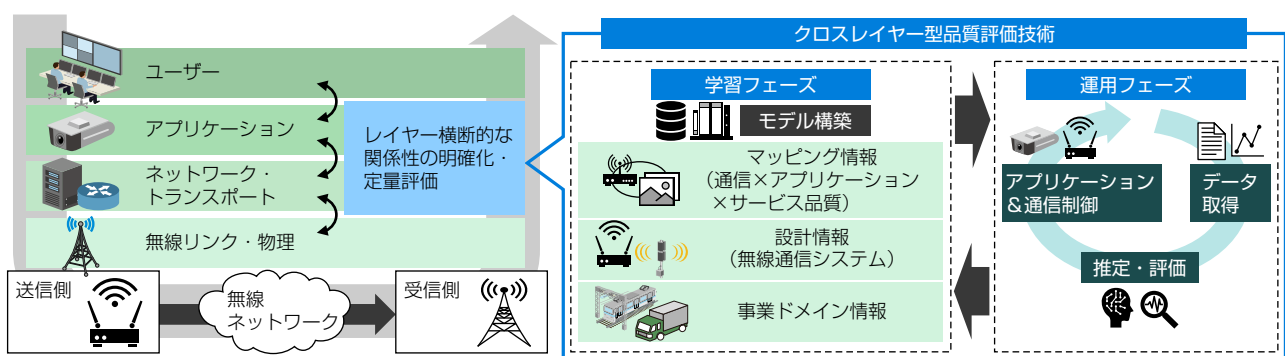


図1-クロスレイヤー型品質評価技術を活用したネットワークライフサイクルシステムの構成

3. クロスレイヤー型品質評価技術

この章では、クロスレイヤー型品質評価技術について述べる。

3.1 概要

この技術では、無線品質やネットワーク品質に係る通信品質とアプリケーションのパラメーター、サービス品質をマッピングし、その関係性を明らかにすることで、通信特性の変化からアプリケーションのサービス品質を推定する。マッピングに当たって、まず、サービス品質の定量評価のため、定量的な評価値を導出する品質評価手法が必要になる。そこで、実環境や模擬、シミュレーション環境から取得したデータや蓄積されたノウハウを基に、この技術を各レイヤーの品質パラメーターの制御装置等に導入するエンジニアが、サービス品質に影響のある各レイヤーの品質パラメーターを抽出する。次に、パラメーター間の関係性、及びシステムの状態遷移等を分析することで、各レイヤーのデータ間での品質情報のマッピング、すなわち、レイヤー間のデータマッピングを行う。その際、パラメーター間の関係性や状態遷移は、接続される無線ネットワークシステムの設計条件やアプリケーションのサービス運用が想定される事業ドメインによっても異なるため、前提になる無線通信システムの設計情報やサービス運用が想定される事業ドメイン情報も考慮する必要がある。これらの情報をクロスレイヤー型品質評価モデルとしてモデル化し、アプリケーションごとに各レイヤーの品質パラメーターの制御装置等に事前に構築することで推定・評価を行う。

3.2 QoE・サービス品質評価手法

アプリケーションのサービス品質の定量化に向けた、映像及び音声サービスでのQoE・サービス品質評価手法の一例を表1に示す。

表1-QoE・サービス品質評価手法の一例

手法分類		評価手法(映像)	評価手法(音声)
主観評価手法		・ITU-R BT.500 ・ITU-T P.910	・ITU-T P.800 ・ITU-T P.835
客観評価手法	Full Reference (FR)	・PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio) ・SSIM(Structural SIMilarity Index)	・PESQ(Perceptual Evaluation of Speech Quality) ・POLQA(Perceptual Objective Listening Quality Analysis)
	Reduced Reference (RR)	・ITU-T J.246 ・ITU-T J.249	
	No Reference (NR)	・BRISQUE(Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator) ・NIQE(Naturalness Image Quality Evaluator) ・MUSIQ(Multi-scale Image Quality Transformer) ・CLIP-IQA(Contrastive Language-Image Pre-training Image Quality Assessment)	・ITU-T P.563
		・ITU-T P.1201	

品質評価手法には、個々人の主観的判断に基づいて品質評価を行う手法もあるが、評価対象データや評価環境等の前提条件の差異によって評価結果も異なるため、更に再現性のある品質評価結果を得ることを目的として、国際標準化機関である国際電気通信連合(ITU)では評価対象データや評価環境等を含む条件を規定し、主観評価手法に関わる方法論として、ITU-R BT.500(映像)や、ITU-T P.800(音声)等を勧告化している。これらの主観評価手法は、人間の知覚を最も忠実に反映できる一方で、多大な時間や労力、専用の試験設備を必要とするため、実運用ネットワークの継続的な品質監視には適さない。

一方、客観的評価手法については、アプリケーションのメディア信号やサービス／通信に関わる物理的な特徴量から主観品質を推定する手法であり、多大な労力を要することなく客観的な品質評価指標を提供できる。また客観評価手法は、評価に利用する情報に応じてFR、RR及びNRの3種類に分類される。FRは、評価対象データを参照情報と比較し、RRは、評価対象データを、参照情報から抽出した特徴量情報と比較して品質を評価する。例えば映像のアプリケーションであれば、評価対象の映像情報を、参照情報である基準映像と比較して品質を評価する。そしてNRは評価対象データだけで品質を評価する。FRやRRはNRと比較すると、参照情報と比較して品質を評価しているため評価値の確度は高い一方で、評価に当たっては、参照情報が必要になる。本稿では、更に評価値の確度が高いFRによる評価手法を採用した。

4. レイヤー間のデータマッピングの適用例：移動体端末での映像伝送アプリケーション

レイヤー間のデータマッピングに当たって、無線ネットワーク種別(5G(第5世代移動通信システム)、LTE(Long Term Evolution)等)、無線端末・基地局の位置及びエリア特性(都市部、郊外等)等の接続される無線ネットワークシステムの設計条件や、アプリケーションのサービス運用が想定される事業ドメイン情報等、各レイヤーの品質に影響を与える要因を把握する必要がある。

無線端末が移動を伴う場合、無線端末の位置に応じて接続する無線ネットワークが変化し、ネットワーク品質が変動することが想定される(図2左)。そこで、三菱電機では、無線端末と無線ネットワークを介して接続するサーバー装置との間の遅延情報から無線ネットワークの接続状態を判定する手法⁽¹⁾を開発し、検証した。複数無線アクセス環境下では、通信特性の異なる無線ネットワークごとに遅延水準が変化することから、遅延量(移動平均)の時系列データから抽出した特徴量に基づいて、機械学習によって運用時の接続状態(無線ネットワークごとの定常区間・遷移区間)を判定できることを確認した(図2右)。

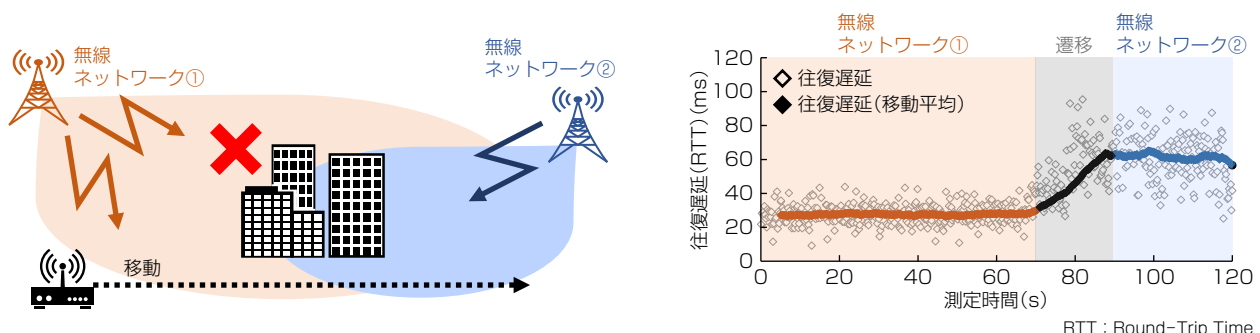


図2-無線ネットワークシステムの設計条件がネットワーク品質(遅延)に与える影響の把握

次に、映像のアプリケーションを対象としてサービス品質に寄与する項目を抽出し、ネットワーク品質やアプリケーションのパラメーターに変化が生じた際のサービス品質への影響を評価し、レイヤー間のデータマッピングを実施した⁽²⁾。このとき、映像アプリケーションのサービス品質を評価するための評価指標としては客観評価手法のFRモデルのPSNRを用いており、値が高いほど劣化が少なく原画像に近いことを示す。

ネットワーク品質とサービス品質間のデータマッピングの検証結果を、図3に示す。この検証ではネットワーク品質としてPERと帯域幅が変化した際のサービス品質への影響について評価した。結果としてPERの増加とともに映像品質は劣化傾向にあることが確認できる。また帯域幅については、PERが0.1%以下の場合、帯域幅の増加とともに映像品質は向上するが、PERが0.5%以上の場合は、帯域幅の増加に伴って、欠落するパケット数も増加するため、映像品質は10Mbpsをピークに、帯域幅の増加とともに劣化することを確認した。

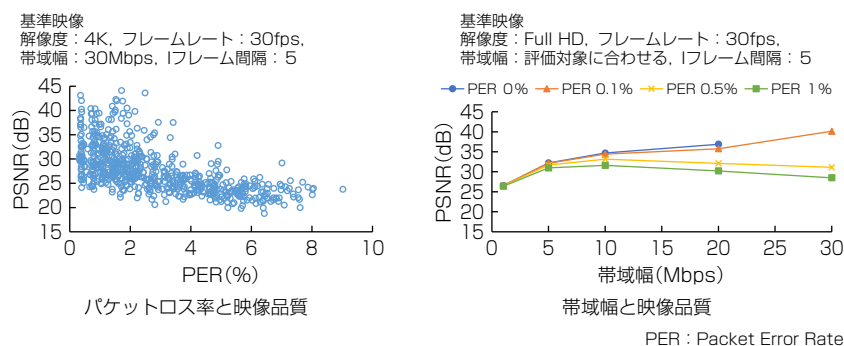


図3-ネットワーク品質とサービス品質間のデータマッピング

アプリケーションパラメーターとネットワーク品質、サービス品質間のデータマッピングの検証結果を、図4に示す。アプリケーションのパラメーターとしては、解像度、フレームレート、Iフレーム間隔を対象として、これらのパラメーターが変化した際のサービス品質への影響について評価した。またネットワーク品質との関係性も合わせて図示するため、PER別にサービス品質の変化をプロットしている。解像度については、基本的に解像度が高いほど映像品質は向上するが、PERの増加に伴って、その勾配は減少傾向にある。またフレームレートについては、PERが固定の場合はフレームレートが上昇するほど映像品質は向上する傾向にある。一方、PERごとに見ると、PERが増加するほど映像品質は劣化する傾向にある。そして、映像のキーフレームであるIフレーム間隔については、PERが0%の場合はほとんど映像品質に影響していない一方で、PERが0.1%以上の場合はIフレーム間隔が長いほど映像品質が劣化する。

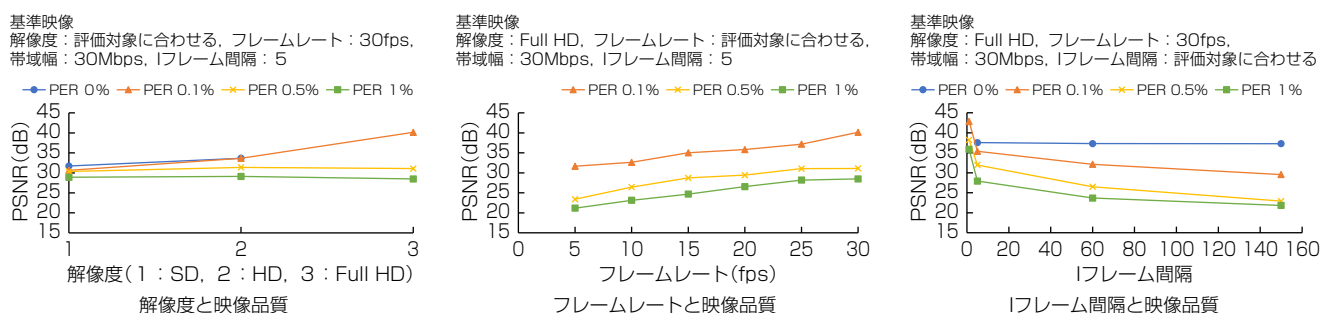


図4-アプリケーションパラメーターとネットワーク品質、サービス品質間のデータマッピング

このように、PERや帯域幅等を含むネットワーク品質や、解像度やフレームレート、Iフレーム間隔等を含むアプリケーションパラメーターの変化による映像のサービス品質への影響を評価し、ネットワーク品質とサービス品質のレイヤー間のデータマッピングを実施した。

5. クロスレイヤー型品質評価結果に基づくアプリケーション・通信制御技術

4章の評価結果に基づいて、アプリケーションのパラメーターや伝送方法に係る通信制御を行うことでUX向上を実現する。当社では、サービス品質の改善に向けたアプリケーションのパラメーター制御技術や、複数無線アクセス環境下での回線切替え、パケット複製による冗長・連送制御、アプリケーション間の優先制御等を含む通信制御技術に関する開発に取り組んでいる⁽³⁾。これらの制御技術を通信状態に応じてアプリケーションごとに適切に選択することでUXを改善させる。この章では、これらのアプリケーション制御技術及び通信制御技術について示す。

移動体(エッジ)側の複数の映像コンテンツが無線ネットワークを介して監視センターに伝送され、監視センター側のユーザー(運用管理者)が配信された複数の映像を確認するユースケースを例に、クロスレイヤー型品質評価結果に基づくアプリケーション・通信制御技術の概要を図5に示す。移動体端末側の移動によって無線ネットワークの通信環境が変化すると、受信パケットの受信タイミングに対するゆらぎやパケットロス等を含む通信品質劣化が生じることでアプリケーションのサービス品質が変化する。ただし、アプリケーションの前提条件によってサービス品質への影響度は異なるため、3章で示したクロスレイヤー型品質評価技術を適用し、レイヤー間のデータマッピングによって構築したモデルを用いて、アプリケーションごとに評価を行う。図5の例では、通信環境の変化によってアプリケーション①に関してはサービス要件を満たせなくなった一方で、アプリケーション②に関してはサービス品質に変化はあるものの、サービス要件を満たしている。このときサービス要件を満たせなくなったアプリケーション①に対して、アプリケーション・通信制御技術を適用する。アプリケーションの制御としては、対象になるアプリケーションは映像であるため、解像度やフレームレート等のパラメーターを制御することが想定される。通信制御としては、無線ネットワークの接続状態に応じて回線切替えや冗長・連送、優先制御等が適用される。アプリケーション・通信制御技術によって、サービス要件に則して通信環境に応じた最適なサービスを提供することで、UX向上を実現する。

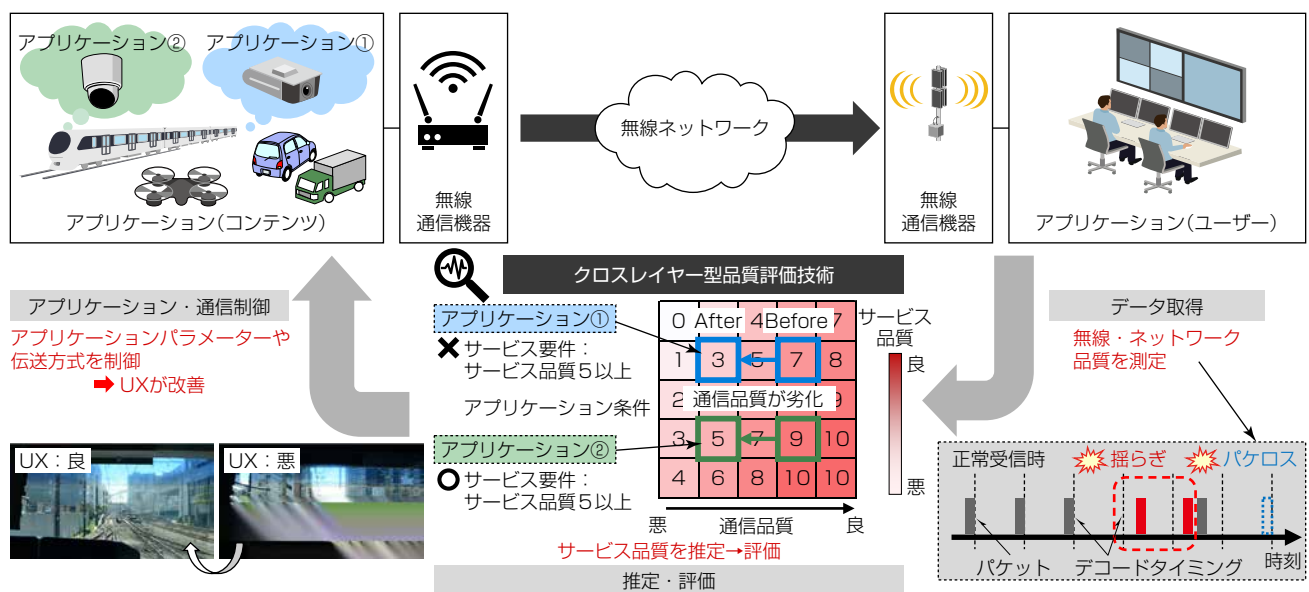


図5-クロスレイヤー型品質評価に基づくアプリケーション・通信制御技術の概要

6. む す び

無線リンクからアプリケーションレイヤーまでを横断的に分析するクロスレイヤー型品質評価技術を活用したネットワークライフサイクルシステムの概要と、このシステムのクロスレイヤー型品質評価技術の評価結果に基づくアプリケーション・通信制御技術の適用によるサービス品質改善指針を述べた。実環境や模擬による取得データから各レイヤーのデータ間の関係性を明確化するとともに、評価結果に基づいて適切な制御手法を選択することでアプリケーションごとに最適な通信環境を実現し、要件に応じたサービス提供に貢献できることを確認した。

参考文献

- (1) 長谷川仁彦, ほか: 複数無線アクセス環境における通信システム特性を考慮した通信品質評価手法の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, **125**, No.225, NS2025-131, 1~6 (2025)
- (2) 上吉川直輝, ほか: フレーム種別ごとのパケット欠落が映像品質に与える影響の評価, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-6-59 (2025)
- (3) 長谷川仁彦, ほか: アプリケーションごとの通信品質評価結果に基づくマルチ無線連携制御技術に関する検討, 電子情報通信学会総合大会, B-8-11 (2026)



電波伝搬と生産ラインの シミュレーション連携

Integrated Simulation of Radio Wave Propagation and Production Lines

間宮拓朗*

Takuro Mamiya

中西孝行†

Takayuki Nakanishi

新納和樹‡

Kazuki Niino

西本研悟*

Kengo Nishimoto

*情報技術総合研究所(博士(工学))

†同研究所

‡同研究所(博士(情報学))

要 旨

生産ラインの自動化は多くの分野で急速に進んでいる。工場には多数の機器が導入され、その多くが有線通信によってデータのやり取りを行っている。筆者らは、将来の生産ラインが省人化・自動化の進展に伴って、多数の移動体と協働ロボットの高度な連携によって構築され、それを支えるのは無線通信であると考えている。そこで、工場内の無線通信を最適に設計・運用するための技術として電波デジタルツインを開発している。

1. ま え が き

近年、労働力不足などを背景に、様々な業界で生産ラインの省人化／自動化のニーズが高まって、AGV(無人搬送車)やAMR(自律移動ロボット)の導入が急速に進んでいる。これら移動体の制御や位置把握等には無線通信が必須である。また現状の工場内の有線通信についても配線コストが高いため、6G(第6世代移動通信システム)等の無線通信の進展に伴って無線化が進んで、電波の利用範囲が広がっていくと考えられる。しかし、工場内は多数の製品・部品、生産設備・機器、移動体が混在して複雑な電波環境であり、また多数の無線システムが導入されていくため、安定した無線通信の実現のための設計や干渉調査、電波障害発生時の原因究明と対策に多大な手間と時間を要している。

一方、実空間から集めたデータを基にデジタルな仮想空間を構築して様々なシミュレーションを行い実空間にフィードバックする、実空間とデジタル空間をシームレスに統合したデジタルツイン技術が近年進展している⁽¹⁾。製造現場にデジタルツインを適用することで、スピーディーなライン立ち上げ、予測保全による生産ラインのダウンタイム削減、生産工程の最適化などが可能になる。しかし、現行の製造デジタルツインは、電波環境を考慮した無線通信のシミュレーションを十分に行えないことが多い。そこで、実空間の電波環境を仮想空間上に再現する電波デジタルツインを実現し、製造デジタルツインと連携させることで、設計段階から運用段階まで無線通信品質を一貫して評価・最適化できる技術の開発を進めている。本稿では、工場内での電波伝搬シミュレーションの精度検証結果と無線設計へのフィードバック例と、動的状況下の電波環境をリアルタイムに把握・予測する電波デジタルツインの価値と将来構想について述べる。

2. 電波デジタルツイン

この章では、電波デジタルツインについて述べる。

2.1 無線通信を活用した工場での課題

工場では、電波に大きな影響を及ぼす大型の金属構造物が多く、製品、生産設備・機器、配線が混在しているため、複雑な電波環境になる。また、製品がコンベヤー等で移動する場合や部品を搭載したAGV／AMR等の移動体が多く存在する場合には、複雑な電波環境が動的に変化する。したがって、次に例を挙げる様々な無線通信のリスクが顕在化しやすい。

- (1) 一つのAP(アクセスポイント)に無線アクセスが集中し、無線接続台数がオーバーフローしてネットワークが輻輳(ふくそう)
- (2) 不適切なAPの配置によって、ある領域で電波強度が不足してAPと接続できず通信断が発生、又は複数のAPの電波が干渉して通信不良が発生
- (3) 生産設備・機器が発生するノイズによる通信不良が発生

これらのリスクを事前に洗い出して、電波・通信に起因するトラブルを未然に防止すること、また発生したトラブルの要因を素早く特定して対策を実行する機能を持たせることが、生産ラインを安定的に運用するための課題である。

2.2 電波デジタルツインによる通信環境のシミュレーション

2.1節で述べた課題を解決する電波デジタルツインは、電波伝搬シミュレーターをベースに電波環境の可視化や通信性能の評価、通信トラブルが発生した際の要因分析、少し先の通信環境予測などを行う技術である。製造デジタルツインと電波デジタルツインは、図1のように相互を補完する関係にある。電波デジタルツインは、製造デジタルツインのベースになる生産ラインシミュレーターから生産ラインのジオメトリ情報、AGV/AMR等の移動体の経路情報、機器動作情報などを受け取ることで、生産ラインを再現した3Dモデルを構築できて、その中でシミュレーションを実行する。その結果は、電波マップ・干渉状況・通信品質等の通信環境情報や通信トラブルの要因分析情報、通信最適化情報などとして製造デジタルツインにフィードバックされて、通信トラブルを未然に防ぐための無線管理/制御やAGV/AMRの経路制御の最適化などに活用される。電波デジタルツインの精度は、ベースになる電波伝搬シミュレーターの精度に大きく依存する。3章で、電波伝搬シミュレーションの精度検証結果を述べる。

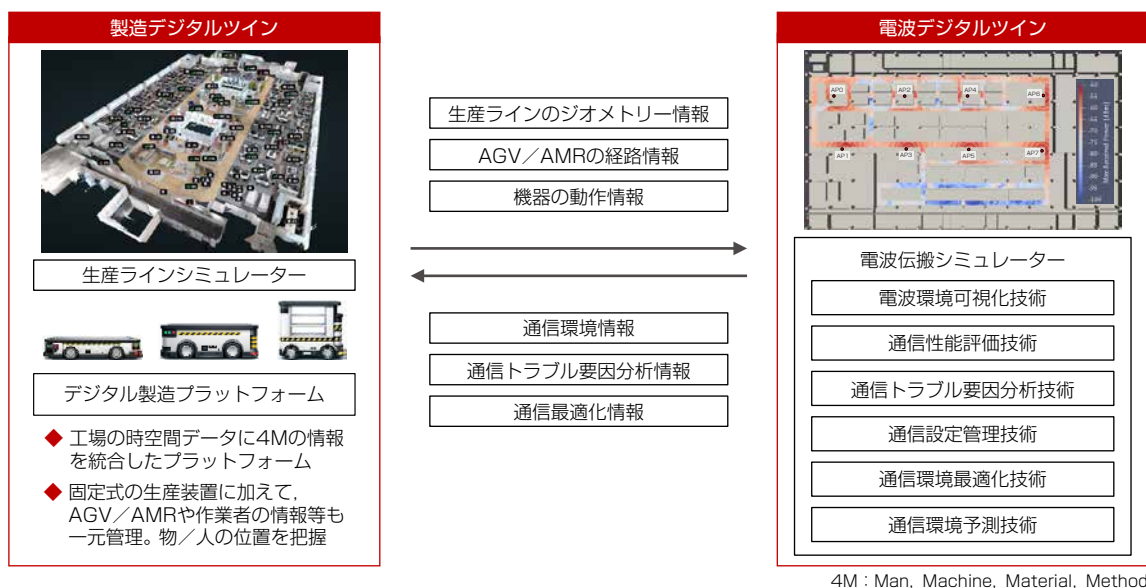


図1-製造デジタルツインと電波デジタルツイン

3. 工場環境での電波伝搬シミュレーションの精度検証

この章では、工場環境での電波伝搬シミュレーションの精度検証について述べる。

3.1 検証環境

電波デジタルツインのベースになる電波伝搬シミュレーション⁽²⁾の精度について、実際の工場環境内を走行するAGVの通信を対象に検証した結果を示す。図2に検証に使用した工場環境の3Dモデルを示す。白線がAGVの走行ルートを示している。実際にAGVが走行している様子を図3に示す。AGVは、位置番号：0から出発し、矢印の方向に沿って周囲コースを走行し、元の位置(最終位置番号：2550)に戻る。工場の天井には複数のAPが設置されており、図2にはAPの位置を、それぞれAP1～AP5で示している。AGVは、自己位置に合わせてAPを切り替えながら走行している。検証用データとして、AGVでのWi-Fi^(注1)のRSSI(Received Signal Strength Indicator：電波強度)を取得した。

(注1) Wi-Fiは、Wi-Fi Allianceの登録商標である。

3.2 電波伝搬シミュレーションの諸元

表1に電波伝搬シミュレーションの諸元を示す。レイトレーシング法を用いてAGVのRSSIを計算する。周波数、APの位置、送信電力、アンテナ高さ、AGVの位置などは実際と一致した条件を設定している。一方、アンテナ指向性やシステム損失は、詳細な値を得ることが難しいため、実測値を融合したデータ同化から推定している。

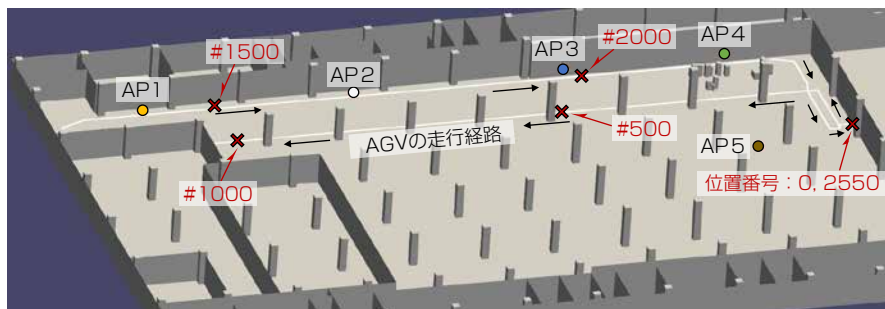


図2-工場環境の3DモデルとAGVの走行経路



図3-実際に走行しているAGV

表1-電波伝搬シミュレーションの諸元

項目	詳細
シミュレーション方法	レイトレーシング法
周波数	5.2GHz
AP-送信電力	15dBm
AP-アンテナ指向性	無指向性
AP-アンテナ高	4.5m又は5.5m
AGV-アンテナ指向性	前方-3dBi, 後方+6dBi
AGV-アンテナ高	0.2m
システム損失(推定値)	8dB

3.3 検証結果

図4に測定とシミュレーションを比較検証した結果を示す。グラフの横軸はAGVの位置番号，縦軸はAP3から電波のRSSIを示している。測定とシミュレーションのRSSIはよく一致しており，シミュレーションが精度良く実際の電波環境を再現できていることが分かる。AGVが移動する中で，RSSIはAPに近くなると上昇し，APから遠ざかると低下する傾向が確認できる。これは，この検証の環境が電波の遮蔽を発生させる生産ラインが少ない状態であり，APとAGVの見通しが確保しやすい条件であったためと考える。

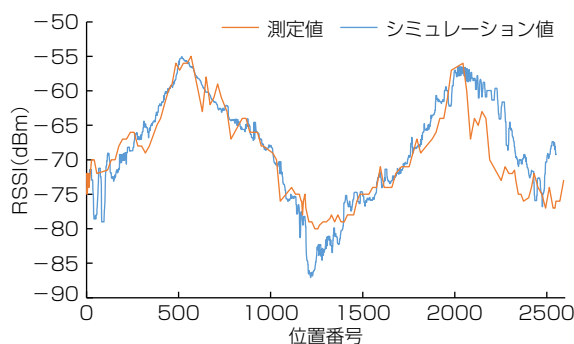


図4-AP3のRSSIの検証結果

3.4 APの設置位置最適化

電波伝搬シミュレーションを用いてAPの設置位置を最適化する例を示す。先ほどの工場環境で建屋内全体に生産ラインが構築され，APとAGVとの見通しが生産ラインによって遮蔽されやすい状況を仮定してシミュレーションを実施した。図5にAPの設置位置最適化の効果を表すAGVのRSSI特性を示す。図5(a)はAPの設置位置最適化前であり，実際に設置されているAPの位置である。シミュレーション結果からは，位置番号1700～2200(AGVが建物壁側を走行しているとき)でRSSIが低下している。これは，壁側にAGVが位置しているとき，生産ラインがAPとAGV間の見通しを遮蔽して電波が到達しにくくなっているためである。それ以外の範囲では，APのカバー範囲が密に重複しており，全体としてバランスが悪いことが分かる。このAPの設置位置では，AGVのRSSIの最低値が-75dBmであった。これに対して図5(b)

がAP設置位置最適化後である。壁側の電波強度の低下を解消するためにAP 1, AP 3は壁側へオフセットさせた。その結果、壁側でのAPとAGV間の見通しが確保されて電波強度が低い領域が解消された。全体としてもAPのカバー範囲がバランス良く重複しており、RSSIの最低値は -68.3dBm まで改善できることが分かる。

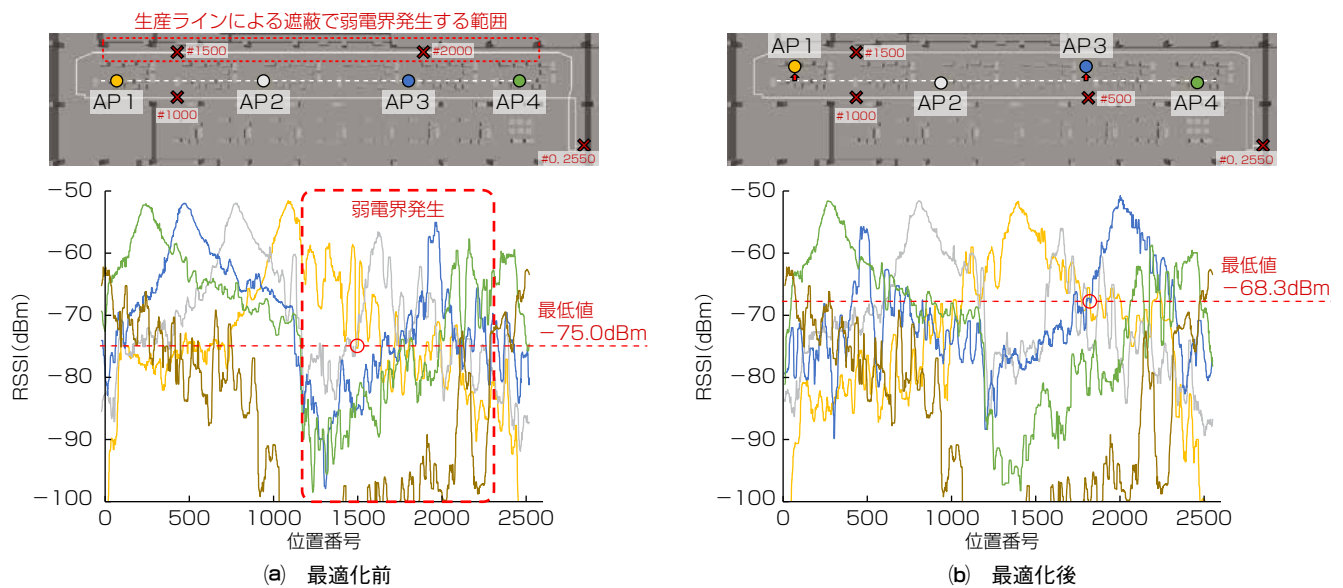


図5-APの設置位置最適化

4. 電波デジタルツインの将来構想

将来の生産方式は、多様化する顧客ニーズに対応するために多品種少量生産が主流になっていくであろう。我々は、市場動向の調査と各種製造業への独自のヒアリングに基づいて、生産効率の高い従来のコンベヤー式の生産ラインと移動体を活用したフレキシブルな生産ラインを併用する工場が今後増えると予想している。また省人化・自動化の進展に伴って多数の移動体と協働ロボットの高度な連携が求められて、それを支える無線環境の安定性の要求は一層高まると考えられる。

図6に多数の移動体と生産設備が連携した将来の工場でのデジタルツインの概念図を示す。図6では前工程と生産ライン

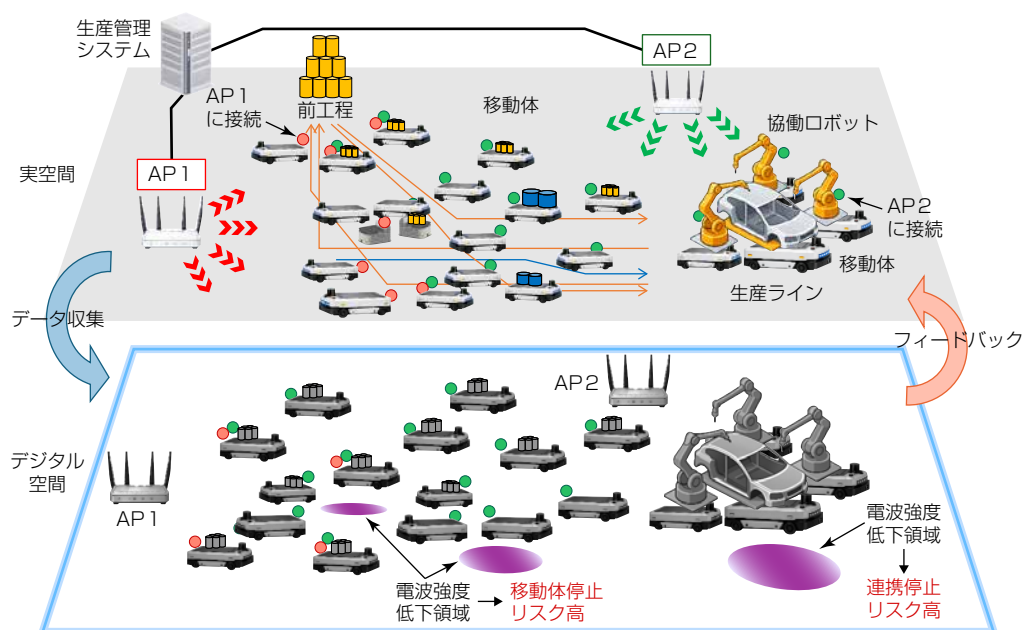


図6-多数の移動体と生産設備が連携した将来の工場でのデジタルツインの概念図

ン間を移動体が走行して部品を搬送し、生産ラインでは移動体と協働ロボットが連携して作業している。このような移動体と協働ロボットの高度な協調制御を実現するためには、低遅延のリアルタイムな無線通信が必要になる。フレキシブルな生産ラインでは電波環境は動的かつ複雑に変化するため、2.1節で述べたリスクが更に顕在化し、移動体やロボットの停止に伴う生産工程全体の遅延と効率低下が懸念される。そこで電波デジタルツインによって時々刻々と変化する工場内の電波環境をリアルタイムかつ高精度に把握・予測し、予測結果に基づいて周波数やアンテナ指向性などを変える通信の最適化や、電波強度が低下する領域を回避するための移動体の経路変更などを実空間にフィードバックする。電波デジタルツインと製造デジタルツインを連携させて将来工場の生産性を向上させるため、複数のAGVやロボット等が動き続ける動的状況下の電波環境をリアルタイムに計算する電波伝搬シミュレーション技術と、実空間で収集した電波データをシミュレーションに取り込んで高精度な電波環境推定を実現するデータ同化技術を開発していく。

5. む す び

工場内の無線通信を支える技術として、電波デジタルツインの価値と将来構想、そしてベース技術である電波伝搬シミュレーションの精度検証結果について述べた。実際に工場内に導入されているAGVを対象にした電波伝搬シミュレーションでは良好な精度が得られることを確認し、APの設置位置最適化についての例も示した。

今後は、電波伝搬シミュレーションの先にある通信性能評価及びその関連技術の開発を進める。それに加えて、リアルタイム性を持たせるための高速化や製造デジタルツインとの連携技術の深化によって、電波デジタルツインの実用化に向けた取組みを進めて、将来の生産ラインの自動化と生産性向上を達成する無線通信技術の実現に貢献する。

参 考 文 献

- (1) Fuller, A., et al. : Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research, IEEE Access, **8**, 108952~108971 (2020)
- (2) 橋本貴博, ほか : 非一様な光線発射分布を用いたレイトレーシングの高速化, 電子情報通信学会技術研究報告, **120**, No.97, 33~38 (2020)



三菱電機株式会社