

Fundamentals Review

2026 January Vol.19 No.

3

https://www.ieice.org/ess/ess_r/jpn/publications/Fundam-Review/

ごあいさつ

133

システムデザイン技術サブソサイエティの紹介

前田義信

解説論文

134

AI の適用による半導体設計の効率化・自動化の取り組みと現状

小田川真之, 牧井 徹

139

レーザにより励振した超音波を利用した非破壊検査技術

林 高弘

146

電力インフラを支える通信技術の現状・課題と将来への展望

赤川蒼介, 山口明哲, 山岡林蔵, 尾造宏之

153

照明光スペクトルの制御により選択した物体色の見え方を変化させる
照明システムの開発

山口真理子, 土田 勝, 松元崇裕

その他

160

ESS ニュース

160

NOLTA, IEICE 特集号

宇佐美雄生

161

NOLTA, IEICE 特集号

安田裕之

162

研究会に行こう！

162

バイオメトリクス研究会 (BioX)

高橋健太

162

高度交通システム研究専門委員会 (ITS)

羽多野裕之

164

回路とシステム研究会 (CAS)

高瀬恭英

164

システム数理と応用研究会 (MSS)

宮本俊幸

165

思考と言語研究会 (TL)

坪田 康

166

安心・安全な生活と ICT 研究会 (ICTSSL)

水野 修

166

ハードウェアセキュリティ研究専門員会 (HWS)

佐藤俊寛

167

技術と社会・倫理研究会 (SITE)

村上祐子

168

だより

168

地域とともに成長する九州産業大学

石田健一

170

開催案内

170

ASP-DAC 2026

172

論文募集

172

NOLTA 2026

173

NLS 大会

Review

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館内
電話 (03) 3433-6691 (代) FAX (03) 3433-6659
E-mail: office@ieice.org 振替口座: 00120-0-35300

IEICE 電子情報通信学会
基礎・境界ソサイエティ / NOLTA ソサイエティ

Preface

133

Introduction to the System Design Technology Sub-Society

Yoshinobu MAEDA

Review Papers

134

Efficient LSI Design Enablement by AI

Masayuki ODAGAWA, Toru MAKII

139

Non-Destructive Testing Using Laser Generated Ultrasonic

Takahiro HAYASHI

146

Current Status, Challenges, and Future Prospects of Communication Technologies Supporting Power Infrastructure

Sosuke AKAGAWA, Hiroaki YAMAGUCHI, Rinzou YAMAOKA, Hiroyuki OZOU

153

Development of Lighting System for Changing Color Appearance of Selected Object by Controlling Illumination Spectrum

Mariko YAMAGUCHI, Masaru TSUCHIDA, Takahiro MATSUMOTO

Miscellaneous Articles

160

ESS News

162

Let's go to IEICE Workshops!

168

Report

170

Call for Participations

172

Call for Papers



システムデザイン技術サブソサイエティの紹介

Introduction to the System Design Technology Sub-Society

基礎・境界ソサイエティ 副会長 前田 義信

システムデザイン技術サブソサイエティは、回路とシステム (CAS)、VLSI 設計技術 (VLD)、システム数理と応用 (MSS) の三つの研究専門委員会から構成されるサブソサイエティです。これまで信号処理 (SIP) を含めた四つの研究専門委員会「システムと信号処理サブソサイエティ」を運営してまいりましたが、2025 年の SIP の独立に合わせて解散し、同時にこの新サブソサイエティが始動いたしました。まずはこれまで長年にわたり、システムと信号処理サブソサイエティの運営に貢献してこられました先輩の皆様に深く感謝と敬意を表します。

システムと信号処理サブソサイエティがこれまで行ってきた回路とシステムワークショップ、国際会議の ITC-CSCC、4 研専合同研究会におけるパネル討論会など、蓄積された貴重な経験を土台として新サブソサイエティを運営してまいります。新サブソサイエティでもこれまでの形式を踏襲し、正副サブソサイエティ長 (サブソ長)、庶務幹事、会計幹事、各研専委員長でメンバー構成しました。今後とも関係者各位からのご指導ご鞭撻のほど、どうぞよろしくお願い申し上げます。

研究分野としての始まりは「回路」であり、そこから派生して、システム、信号処理、VLSI 設計、数理モデル分析と多くの研専が分離しました。それらを束ねる“バンド”としてサブソサイエティが位置づけられたと伺っております。しかし、今、その“バンド”としてのサブソサイエティの吸引力が弱まりつつあります。それは各研専が飛躍し大きく発展したことを意味する点では大変喜ばしいことではありますが、切磋琢磨する各研専の相互作用が失われるのは残念でもあります。この相互作用は各研専に新しい知見や動きをもたらし、それぞれが目指すものをより豊かにしますので、失ってしまえば取り返しのつかない事態にもなりかねません。

そこで各研専委員長と相談しまして、“バンド”のキーワードとして“デザイン”を採用いたしました。なぜなら、回路とシステム研究、VLSI 設計研究、システム数理と応用研究のいずれにも共通して扱われる概念は“デザイン”だからです。

筆者はこれまで回路とシステム研究専門委員会幹事 (2012)、委員長 (2022) を拝命し、主に回路とシステム研究の分野からシステムと信号処理の分野に参加してきま

した。筆者の元来の研究テーマは、神経興奮の電気現象を力学系理論の用語を用いて解釈することであり、その目的のために神経方程式 (例えばホジキン・ハクスレイ方程式など) を使って数理的に分析をしてきました。それらの結果を踏まえ、トランジスタなどの電子回路で神経興奮や神経方程式の振る舞いを定性的に再現する研究をしてきました。神経の電子回路モデルの内部にある負性抵抗回路は、そのまま神経の電子回路モデルを相互につなぐシナプスのモデルになり得ます。そして、四肢動物で観察される複数の歩行パターン (歩く、走るなどの 5 種類の歩容) を少数の電圧パラメータ (スイッチ) で切り替え可能な単一の中枢パターン発生器ネットワークを設計してきました。

一方で、人工物の観点から各歩行パターンを再現する電子回路を複数設計し、それらをスイッチで切り替える研究もなされています。しかし、実際の生物はそのようなデザインでシステム化されているわけではありません。生物の場合、システムはできる限り小さく最適化されていて、かつ少数のスイッチでできる限り多くの歩容を実現しようとしています。生物のしくみを理解するためにも、またそれを応用した技術開発のためにも、デザインされる電子回路はできる限り少数の素子からなり、制御パラメータの数は少ない必要があるでしょう。このような最適化デザインでもってシステム化を行うスキルは、あらゆる技術分野で求められることでしょう。

このように、これからもシステム設計においてデザインが重要になることは間違いないでしょう。システムデザイン技術サブソサイエティは、これからデザインの観点で各研専を引き込む“アトラクタ”として活動していきたいと思います。

著者紹介

前田義信 (正員：シニア会員)

1998 大阪大学大学院基礎工学研究科修了。博士 (工学)。1995 日本学術振興会特別研究員 DC1.1998 より新潟大学工学部助手、助教授、准教授を経て、2015 より教授。福祉情報工学、数理社会工学、生体医工学研究に従事。2009 本会ヒューマンコミュニケーション賞、2012,2022 生体医工学シンポジウムベストリサーチアワード受賞。現在、本会基礎・境界ソサイエティ副会長、日本生体医工学学会理事など。

AIの適用による半導体設計の効率化・自動化の取り組みと現状

Efficient LSI Design Enablement by AI

小田川真之 Masayuki ODAGAWA

牧井 徹 Toru MAKII

アブストラクト 近年、様々な分野において人工知能（AI：Artificial Intelligence）が適用され始めている。設計技術者の不足が深刻化している半導体業界においても、電子設計自動化（EDA：Electronic Design Automation）ツールのAI化が進んでいる。本稿では、ケイデンスのデジタル設計プラットフォーム「Cadence® Cerebrus™ Intelligent Chip Explorer」を中心に、AI適用による設計効率向上の現状とEDAツールのこれからについて述べる。AI化が進むことで、少人数の設計者による高度な設計が可能となり、設計の品質向上と設計期間の短縮が期待される。

キーワード 電子設計自動化（EDA）、人工知能（AI）、LSI設計

Abstract In recent years, AI has begun to be applied in a variety of fields. Even in the semiconductor industry, the shortage of design engineers is becoming more serious. Therefore, the integration of AI into EDA tools is processing. In this paper, we focus on Cadence's digital design platform, Cadence® Cerebrus™ Intelligent Chip Explorer, and describe the current state of design efficiency improvement through the application of AI and the future of EDA tools. The advancement of AI will enable the realization of advanced designs by a small number of design engineers, which is expected to improve design quality and shorten design time.

Key words EDA, AI, LSI design

1. イントロダクション

半導体チップは、スマートフォンや自動運転、IoT、AIなどの多岐にわたるデバイスやシステムの発展に伴い、複雑化・大規模化の一途をたどっている。こうしたデバイスの多様化・高度化に 대응するため、より小さく、高性能で、エネルギー効率に優れた半導体チップが求められており、その実現には先端技術の適用と多くの設計者が必要とされている。しかしながら現在、設計者の人材不足が業界全体の課題となっており、特に高度な設計技術を要求されるプロセスノードの縮小に対応するには、半導体設計にもAI技術を積極的に取り入れた効率化が不可欠となっている。

こうした中、Cadence Design Systems, Inc. は、2018年にDARPA（Defense Advanced Research Projects Agency、アメリカ国防高等研究計画局）のERI（Electronics Resurgence Initiative）が立ち上げたIDEA（Intelligent Design of Electronic Assets）プログラムに採択され、半導体設計へのAI適用の研究開発を推進してきた⁽¹⁾。現在、様々な設計エリアで

AI/Machine Learning 化を進めている（図1）。

その中でいち早くAIの採用が始まったのがデジタル設計の領域である。2021年7月、デジタル設計自動化を進めるAIプラットフォームCerebrus Intelligent Chip Explorer（以降Cerebrus）を発表し（図2）、既に多くのユーザーで採用事例がある（図3）。2025年Q2の段階で1000製品以上のTape Out^(注1)実績がある。こうしたAIプラットフォームは、少人数で高度な設計を実現し、設計者不足の課題解決に寄与する。

本稿では、第2章においてAI適用によるデジタル設計への効果について具体例を交え紹介し、第3章において機能検証へのAI適用、第4章において今後の展開、第5章でまとめを述べる。

2. AIがもたらす効果

2.1 半導体設計の複雑化と人材不足の背景

半導体の設計工程は、年々複雑化している。例えば、28nmから7nm、更には3nm、2nmへの移行に伴い、数百以上の新しいデザインルールが追加され、これに対応するための知識や技術が高度化している。図4にプロセスごとのデザインルール数、検証コーナー数を示す。先端プロセスである3nmや2nmでは更にデザインルール数、検証コーナー数ともに指数関数的に増加している。また、プロセスノードが縮小するほど、消費電力

（注1）：最終設計データの製造工程への納品。

小田川真之 正員 日本ケイデンス・デザイン・システムズ社

E-mail odagawa@cadence.com

牧井 徹 日本ケイデンス・デザイン・システムズ社

E-mail makii@cadence.com

Masayuki ODAGAWA, Member and Toru MAKII, Nonmember (Cadence Design Systems, Japan, 2-100-45 Shin-Yokohama, Kohoku-ku, Yokohama, 222-0033, Japan).

電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ

Fundamentals Review Vol.19 No.3 pp.134-138 2026年1月

©電子情報通信学会 2026

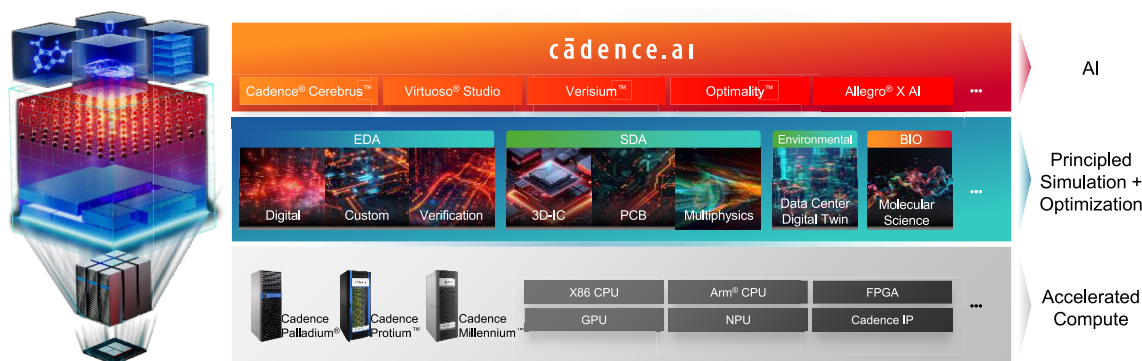


図 1 Cadence.AI 概要



図 2 Cerebrus リリース

CadenceLIVE China, Taiwan and Japan	
Company	Session
Alibaba	Using Cadence Cerebrus with Genus to Push PPA
Jaguar Micro	High-Performance CPU Core Implementation with Cadence Full Flow and Machine Learning
MediaTek	MediaTek Enable Cerebrus AI for Next Generation Mobile CPU
MediaTek	ML-Driven PPA Boost with Cadence Cerebrus
Arm	Arm Enables Cerebrus ML Optimization to Push Performance for Next-Generation 3nm Infrastructure CPU
Renesas	Renesas Advanced ASIC/ASSP Performance Improvement and Early Market Release with Cerebrus and Tempus ECO Solutions
Sony	Sony tried Cerebrus at CIS design to find best PPA
Canon	Canon adopted Cerebrus on production design. Reduced design TAT and design total power

図 3 CadenceLIVE での Cerebrus 発表事例

や性能のバランス (PPA : Power, Performance, Area) を保ちながらの最適化は急激に難易度が上昇する。こうした中、限られた設計者が複数のプロジェクトを同時に担当しなければならない状況が生まれており、これがデジタル設計におけるボトルネックとなっている。

更に近年の半導体業界は、シリコンからガリウムナイトライドやシリコンカーバイドなどの新素材を取り入れ、エネルギー効率や放熱性を向上させる取り組みも進んでいる。こうした新素材や新しいプロセスの登場も、設計者にとって大きな負担となっている。これらの課題を克服し、デザインの効率化を実現するために AI 技術が重要になっている。

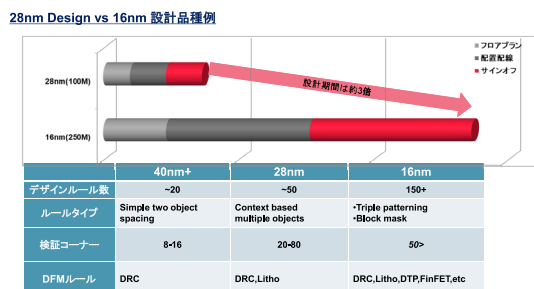


図 4 プロセスの進化と設計難易度の上昇

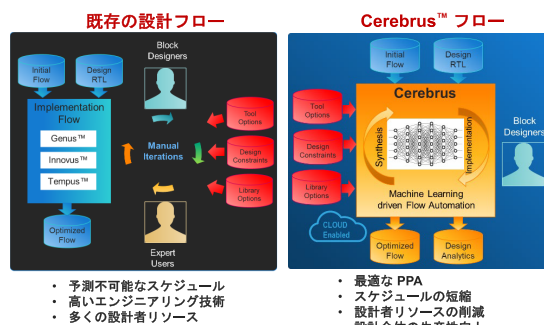


図 5 Cerebrus の仕組み：既存環境と AI による環境

2.2 AI がもたらす設計の自動化と最適化

ケイデンスの AI プラットホーム Cerebrus は、効率的な設計の自動化と最適化を提供する。Cerebrus は、特に複雑なフロアプランや PPA の最適化において、設計者が抱える課題を解消する。従来、設計者は経験と試行錯誤を重ねて最適解を導き出す必要があった。Cerebrus は数千通りの設計パターンを AI で一気に試し、設計者が 1 人で対応する場合よりも速く、精度の高いフロアプランを出力する。これにより、設計者は詳細な設計調整から解放され、創造的かつ戦略的な業務に注力できるようになる (図 5)。

具体例として、200M ゲート規模のデジタルデザインにおける PPA 最適化を示す (図 6)⁽²⁾。従来の方法では 10 人の設計者が 1 か月かけて行っていた設計作業を、ツールに AI を適用することで 1 人の設計者が 10 日間で完了させることができ、以下の成果が得られた。

- 性能向上：クロック速度を従来設計よりも 14% 向上させ、

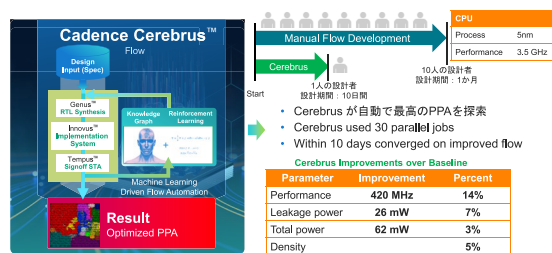


図 6 AI による PPA 最適化と設計リソース削減

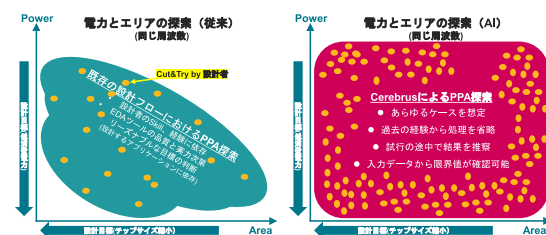


図 7 従来設計手法と AI による設計の違い

420 MHz の増加を実現

- 消費電力削減：リーク電力を 7%削減し、トータル電力も 3%削減
- 設計密度：5%向上

これにより、設計者は少人数であっても高度なパフォーマンスを要求される設計を効率よく行える。

AI による PPA 探索は、従来の設計手法と比較しても大きなアドバンテージをもつ。例えば、特定のターゲット周波数や消費電力、チップ面積の目標を満たすために、AI が複数の試行を通じて設計パターンを自動で最適化する。図 7 に示すように、従来の設計者主導の探索では、検討できるパターン数は多くても数十に限られるのに対して、AI を活用した設計では PPA のバランスポイントを数千パターンの中から迅速に探索できるため、設計者が個別に調整する手間を大幅に省くことができる。

しかし、AI がもたらす効率化がいかに進化しても、設計者の知識と直感が不要になることはない。例えば、AI が出力するフロアプランや PPA は、広大な設計空間において有限回数の試行の中での最適解であり、絶対的な最適解ではない。AI の出力が設計要件を満たすかどうか、また製品の市場性を考慮した最終的な判断は設計者の専門的な見解に委ねられる。AI は、設計者の業務を補完する役割を担い、設計者はこれまで以上に高次の戦略やイノベーション創出に貢献できるようになる。

3. 機能検証への AI 適用

複雑化・大規模化する大規模半導体集積回路 (LSI : Large Scale Integration) 開発において、機能検証にかかる工数や時間は増大の一途をたどっている。論理シミュレーションや静的検証によるブロックレベル検証に始まり、上位レベルに統合したサブシステムやチップレベルでの結合検証、ユースケースシナリオの実行など、設計・検証チーム内で複数レベルの検証が行われる。また、バグの修正には設計者がシミュレーション波形を目で追い、不具合箇所を見つけ出し、ハードウェア記述言

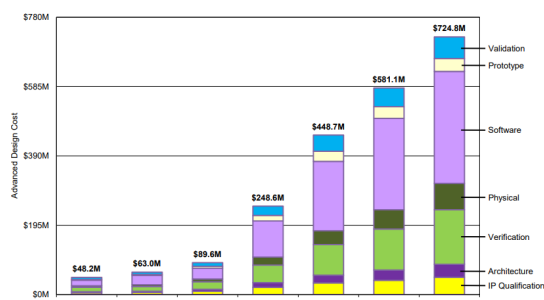


図 8 先端プロセスでの開発コスト (3)

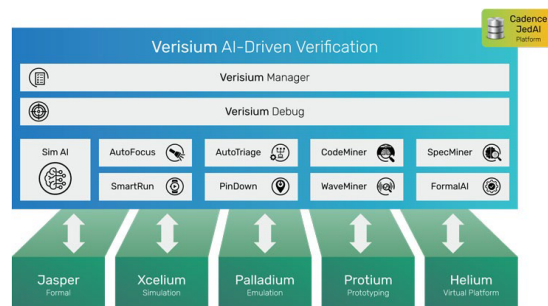


図 9 Verisium 概要

語で記述された RTL (Register Transfer Level) の修正を行うため、時間がかかっている。図 8(3)に各プロセスノードでの工程ごとの開発コストを示す。先端プロセスになるほど検証にかかるコストが増大している。

ケイデンスの Verisium™ AI-Driven Verification Platform (以降、Verisium) は AI を活用し、膨大なシミュレーションデータを分析することにより効率的な機能検証を実現する。図 9 に Verisium の概要を示す。Verisium は RTL シミュレータ (Xcelium™)、静的検証ツール (Jasper™)、エミュレータ (Palladium™)、SystemC シミュレータ (Helium™) などのシミュレーションデータを分析し、効率的な機能検証を設計者に提供する。

Verisium Manager, Verisium Debug を検証の基軸に置き、AI 技術を適用したリグレッション実行ソリューション Sim AI および静的検証を効率化する Formal AI, RTL, デバッグを効率化する CodeMiner, PinDown, AutoTriage, WaveMiner などにより構成されている。ここでは具体例として Sim AI によるリグレッションテストの効率化について述べる。機能ブロックの検証は、上位レベルのサブシステムや、チップレベルの検証過程で、仕様を見直し、性能や消費電力の観点で論理を修正し、そのたびにリグレッション検証が実施される。Sim AI は元となるランダム検証のシナリオと機能カバレッジの結果を学習し、その後実行されるリグレッションテストに必要なテスト数を削減する。同等の機能カバレッジ結果を得るために必要なテストを、1/2 から 1/3 に減らすことが可能である (図 10)。既に、ルネサスエレクトロニクス株式会社(4)、(5)と Samsung Electronics Co., Ltd.(6)から成功事例が発表されている。

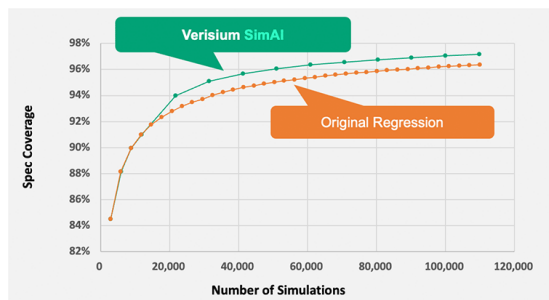


図 10 Sim AI の効果

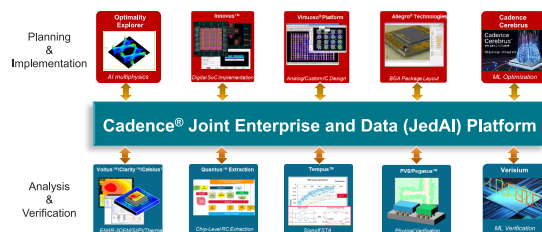


図 11 AI 解析に向けた設計データ統合管理

4. 今後の展開

一般的に大規模 LSI 設計では、多くの機能ブロックを積み重ねて階層設計が行われており、各ブロックの設計処理中に膨大な量のデータが生成される。これらのデータの一部は設計者により確認されるが、膨大な量のデータの全てを確認することは困難であり、大部分は全く手を付けられることなく削除される。半導体製品の規模と複雑さが増大し続ける中で、設計チームに対して実用的な情報を提供し、より早く設計開発を収束するためにも、手付かずのデータを体系的にかつ効率的に利用されることが望まれる。

ケイデンスの提供する Cadence Joint Enterprise Data and AI (以降、JedAI) Platform は、AI を活用して設計開発を大幅に加速するためのビッグデータ解析用プラットフォームであり、ケイデンスの全てのツール上で膨大なデータセットを統一管理する新しいプラットフォームである。図 11 に示すように JedAI は、ケイデンスのツール群から生成された設計情報を保存管理し、解析ソリューションを提供する。これにより、設計チームは、生成される膨大な量のデータからの恩恵を受けられるようになる。

大規模 LSI 設計時に生成されるデータは、汎用的な環境においては保存と処理が容易ではない様々な構造化情報と非構造化情報を幅広くカバーしている。LSI のレイアウトデータの標準フォーマットである GDS (Graphic Data System) によるフィジカル形状や検証波形のようなバイナリファイルから、セルライブラリ情報である LEF (Library Exchange Format)/DEF (Detailed Extracted Format)、分析レポートやツールログのようなテキストファイルまで様々な形式で生成される。図 12 に示すように JedAI は、ケイデンスツールへの専用データコネクタを使用して、この多種多様なデータソースをシンプルかつスケーラブルな方法で取り込む。汎用的なデータコネクタが提供されるため、設計者は必要に応じてサードパーティーツール

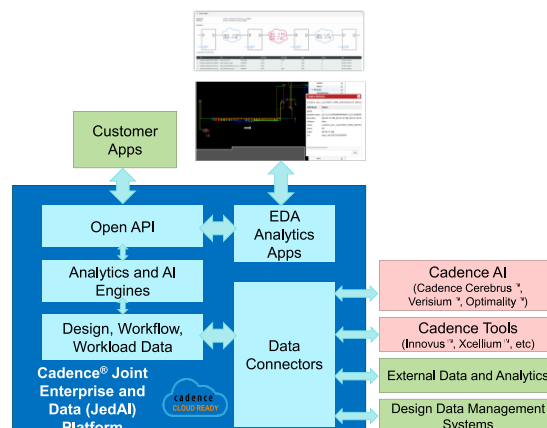


図 12 JedAI 構成概要

のデータをインポートすることも可能である。データが取り込まれると、データベースアクセスに必要な API (Application Programming Interface) と AI 主導のビッグデータ分析を可能にする Python, Jupyter Notebook, REST API などの業界標準のスクリプト作成ツールにより、設計者がデータと傾向を視覚化し、実用的な設計改善戦略を生成できるようになる。

JedAI は、Cerebrus, Verisium などのケイデンスツール全体で大量のデータセットを統合する重要なインフラストラクチャである。まだ未活用の膨大なデータを分析し、より効率的な半導体設計にむけたプラットフォームとして今後更に活用していく。

5. まとめ

今後、AI 技術の更なる進展により、設計の自動化は一層加速することが予想される。AI が設計の主要な部分を担うことで、設計者は上流工程における戦略的意思決定に専念することができるようになる。更に、AI が蓄積した過去の設計データを活用し、新製品の設計にも役立てられるようになることで、開発期間の短縮化や製品の高性能化が可能となる。

EDA 業界全体で、今後も AI を適用したツール群、AI に必要なデータベースプラットフォームの開発と提供を通じて、半導体業界の設計者不足解消に貢献するだけでなく、設計者と AI の共創による新しいエコシステムの構築も目指していく。設計者と AI が協力可能なプラットフォームを提供し、プロジェクトのスピードと質をともに向上させることで、半導体業界の持続可能な成長に貢献していく。

文 献

- (1) Cadence Design Systems, “ケイデンス、DARPA ERI の機械学習プロジェクトに採択、電子設計のイノベーションを加速,” https://www.cadence.com/ja_JP/home/company/newsroom/press-releases/pr-jp/2018/cadence-selected-for-darpa-eri-machine-learning-contract-to-acce.html, 7, 2018.
- (2) N. Hanchate, “Improving chip design performance and productivity using machine learning,” International Symposium on Physical Design (ISPD) 2022, 2022.
- (3) IBS, “Design activities and strategic implications,”

Global Semiconductor Industry Service Report, vol.31, no.7, pp.77–85, July 2022.

- (4) Renesas and Cadence, “Boosting productivity by 6X by leveraging xcelium ML and verisium platforms,” https://www.cadence.com/ja_JP/home/resources/success-stories/renesas-and-cadence-ss.html, July 2023.
- (5) C.L.P. Nguyen, et al., “Enhancing functional verification productivity through an automated workflow with Machine Learning based tools,” 2024 9th International Conference on Integrated Circuits, Design, and Verification (ICDV), Hanoi, Vietnam, 2024.
- (6) J. Kwon, et al., “Functional coverage closure in SoC interconnect verification with iterative machine learning,” DVCon US, San Jose, U.S., 2025.

(VLD 研究会提案, 2025 年 8 月 25 日受付,
2025 年 10 月 2 日再受付)



小田川眞之 (正員)

1988 京都大学・工学. 2021 広島大大学院後期博士課程了. 2014 ケイデンス・デザイン・システムズ社入社. システムソリューションの提供に従事. 博士 (工学). IEEE, 情報処理学会会員.



牧井 徹

1995 山形大学・工学. 1995 イノテック (株) 入社. 2004 ケイデンス・デザイン・システムズ社転籍. 技術営業およびファウンダリ担当に従事.

レーザにより励振した超音波を利用した非破壊検査技術

Non-Destructive Testing Using Laser Generated Ultrasonic

林 高弘 Takahiro HAYASHI

アブストラクト レーザにより超音波を励振し、超音波を検出するという非接触の超音波送受信方法はレーザ超音波法と呼ばれ、固体材料の非破壊検査に利用されている。しかし、非破壊検査ではユーザがもつ対象物に合わせてカスタマイズが必要になることが多く、そのためにはレーザ超音波法の仕組みを知ることが重要である。著者らは特に、超音波の励振技術に特徴のある研究を進め、新しい非破壊検査法を提案している。そこで本報では、はじめにレーザにより超音波が発生する原理と発生する超音波の制御方法について述べ、配管検査及び三次元積層造形体の検査に対し、これまで著者らが進めてきた研究を紹介している。

キーワード レーザ超音波、非破壊検査、配管検査、金属三次元積層造形

Abstract The noncontact ultrasonic generation and detection technique using lasers is called laser ultrasonics, which is employed for the nondestructive testing of engineering products. However, such nondestructive testing often requires customization to suit the user's specific object, making it important to understand the principle of laser ultrasonics. In particular, the authors have carried out advanced research studies on distinctive ultrasonic excitation techniques and proposed new nondestructive inspection methods. In this paper, the authors first explain the principle of laser-generated ultrasonic waves and methods for controlling them. It then introduces the authors' researches to date, the application to pipe inspection and the process monitoring in metal additive manufacturing.

Key words Laser ultrasonics, Non-destructive testing, Pipe inspection, Metal additive manufacturing

1. はじめに

レーザを用いて固体材料中に超音波を励振し、別のレーザ光により固体材料表面の超音波を計測することで、非接触による材料内部の検査が可能となる。この技術はレーザ超音波法と呼ばれ、1980年代には世界的に広く研究が進められ⁽¹⁾、国内でも（一社）日本非破壊検査協会内でレーザ超音波法に関する特別研究会「レーザ非破壊試験研究会」が発足している。以降多くの基礎的検討から非破壊検査への応用まで、その研究開発は多岐にわたっている^{(2)~(11)}。近年では、Photo Acoustics として医療分野での応用も進み、広く利用される一般的な技術となった⁽¹²⁾。

一般に市販されているレーザ超音波法を用いた非破壊検査装置では、レーザにより材料内に1~20 MHz 程度のパルス波を励振し、そのパルス波が材料内部で反射して得られるエコー波形を振動検出用レーザで受信する、いわゆるパルスエコー法により材料の非破壊検査を行うことが多い。そのような手法で検査が可能であれば、1980年代から積み上げられてきた研究成果や実績のあるレーザ超音波検査機器をそのまま利用することがで

きる。しかし、非接触で検査を行いたい対象物は多岐にわたり、単に既存のレーザ超音波装置を購入すれば検査ができるようなものではない。例えば、薄板では表面とエコーが反射する裏面が近いと、入射波と反射波が分離されず、パルスエコー法が使えない。また、配管の遠隔診断への適用では、レーザ超音波による検査システムと対象配管までの距離を数 m 離したいという要求がある上、曲面であるがゆえの計測の難しさもある。更に、三次元積層造形体の検査は喫緊の課題であるが、その複雑な形状がレーザ超音波計測に制限を与えている。

このような検査現場固有の課題に対し、古くからある超音波探触子を利用する接触法では、検査技術者が検査方法や検査システムをカスタマイズして検査を実行可能にしてきた。このような現場に合わせた検査手法の考案やシステムのカスタマイズは、超音波探触子の仕組みや特性を熟知しているからこそ可能であり、現在では、超音波探触子を用いた数多くの検査方法及び検査システムが提供され、JIS⁽¹³⁾やNDIS⁽¹⁴⁾といった規格にもなっている。一方、レーザ超音波法では、そのような検査方法のラインナップが少なく、検査現場固有の課題に、それぞれの現場で対応しないといけないことが多い。すなわち、レーザ超音波法による新しい検査方法を提案しようとする場合、まずはレーザ超音波計測の原理を正しく理解するところから始まなくてはならない。

先にも示したとおりレーザ超音波法では、超音波の励振と検出には異なる装置を利用する。光軸が同一になっており、超音

林 高弘 大阪大学
E-mail hayashi@mech.eng.osaka-u.ac.jp
Takahiro HAYASHI, Nonmember (The University of Osaka, Japan).
電子情報通信学会 基礎・境界サイエンス
Fundamentals Review Vol.19 No.3 pp.139-145 2026 年 1 月
©電子情報通信学会 2026

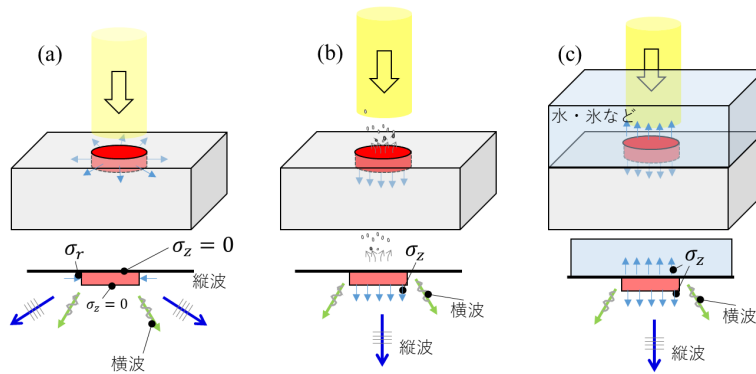


図1 レーザ照射による超音波の発生原理 (a) 熱弾性効果によるもの、(b) アブレーションによるもの、(c) 表面に拘束がある場合。

波の送受信が一つの検査装置で行われているように見える計測システムもあるが、内部では完全に分かれている。著者らは、特にレーザによる超音波の励振部分に種々の改良を加え、新しい非破壊検査手法を提案してきている。そこで、本報では、初めにレーザにより超音波が発生する原理及び発生する超音波を制御する方法について述べた後、著者らが行ってきた配管検査や三次元積層造形体検査への適用を目指した研究について紹介する。

2. レーザ照射による固体材料内の超音波の発生

金属材料表面にレーザパルスを照射すると、瞬間的に熱ひずみやアブレーションによって超音波が発生する(図1)。(a)は、比較的弱い(エネルギー密度の低い)レーザ光を照射した場合の超音波の発生原理を示したものである(熱弾性効果)。レーザのエネルギーによりレーザ照射位置表面の温度が上昇し、熱ひずみが生じる。一般的な金属材料に対し、レーザの侵入深さは数nm程度であるため、レーザを照射している瞬間は極表面のみが加熱され、図1(a)の赤く示した領域のように円盤状の領域が加熱されると考えてよい⁽¹⁵⁾。この熱は金属材料内を拡散するが、その拡散スピードは超音波の伝搬速度に比べ十分小さいので、この円盤状の領域が熱ひずみを起こして、そのひずみにより超音波が発生すると考えることができる。(a)では材料表面に拘束がないため、熱ひずみが生じて垂直応力 σ_z が0である。加熱部下面も表面にごく近いため、垂直応力 σ_z が0と考えてよい。一方で、円盤状の領域の側面は、金属材料の内部であるため、隣り合う面による拘束があり、温度の上昇に対し圧縮方向の垂直応力 σ_r が発生する。非破壊検査に利用されるレーザパルスは、数十ns程度の照射持続時間があり、その間の温度上昇によって圧縮応力が発生するが、その後レーザ照射が止まると徐々に温度は低下し、温度低下とともに熱ひずみも緩和される。この一連の熱ひずみの変化により、レーザ持続時間に対応する程度の応力変化が発生し、MHzの周波数帯域をもつ超音波パルスとなって材料中に伝搬する。この熱弾性効果による超音波の発生原理では、円盤の側面から斜め方向に横波及び縦波が発生することが知られている。

レーザ光の出力エネルギーを増大させると、材料表面を溶融・蒸発し、原子や分子、プラズマが飛散するアブレーションが起こ

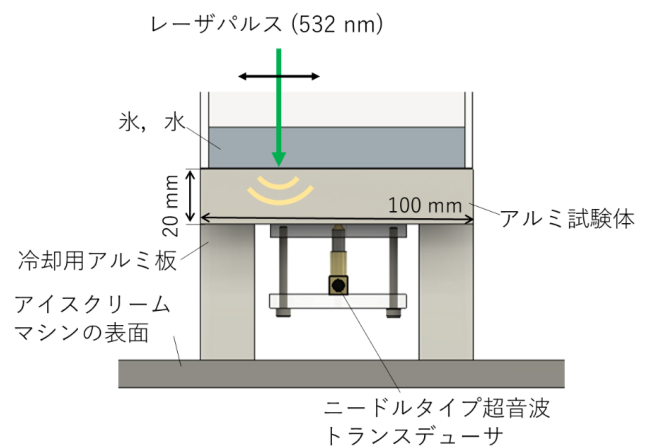


図2 レーザにより励振された縦波、横波の伝搬方向の確認実験⁽¹⁶⁾

る(図1(b))。このとき、表面物質の飛散の反作用として固体材料下向きに圧縮応力が負荷される。この場合には、下向きに円状の垂直応力を与えたのと等価と考えることができ、下向きに縦波が大きく発生し、斜め方向に横波が現れる。

表面が水や氷などレーザ光が透過する物体で覆われている場合、若しくは表面に透明な素材が塗布されている場合には、表面の拘束により下向きの垂直応力が支配的になることが知られている(図1(c))。このとき、超音波はレーザ照射領域から下に向かって縦波が大きく発生し、横波が斜め方向に伝搬することが知られている。ちょうど(b)アブレーションの場合と(c)表面拘束がある場合は、応力方向が一致するため同じような超音波伝搬形態を示す。

著者らは、論文⁽¹⁶⁾の中で、レーザによる超音波の励振と水中での超音波検査を組み合わせた Laser Cryo-UT の基礎的な検討のため、水や氷により表面が覆われている金属材料に対する縦波、横波の発生強度分布について、実験的に検討した。図2は、その実験装置の側面図である。100×100×20mm³のアルミニウムブロックの上部からレーザを照射し、下部の中央において先端の径が2.3mmのニードルタイプ超音波トランスデューサで波形を受信した。レーザ照射位置をアルミブロック表面に対し二次元的に走査することで、図3のような到達波形の強度分布を得た。受信された超音波波形は、縦波と横波に時間的に

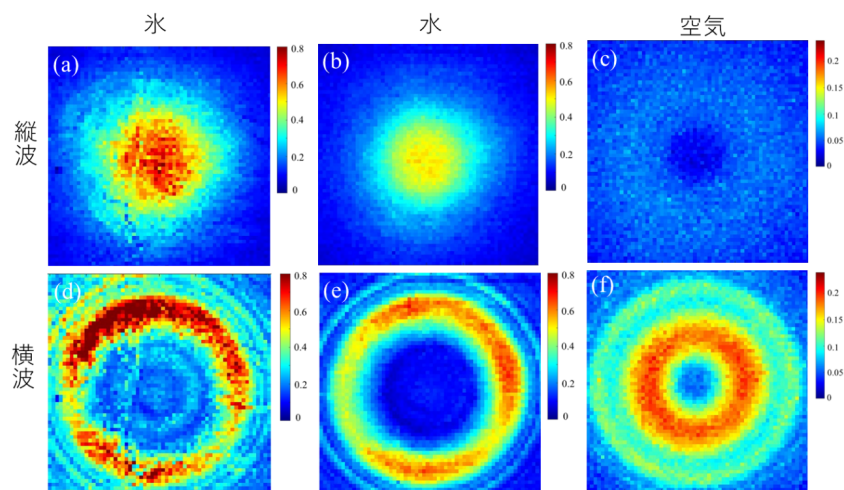


図3 レーザ照射点を走査した場合の受信波形の強度 レーザ照射点から超音波が伝搬し、深さ 20 mm の平面上で縦波、横波を受信した強度に対応する。(a), (b), (c):縦波, (d)~(f):横波, (a), (d):表面に水, (b), (e):表面に水, (c), (f):表面に空気が接している場合⁽¹⁶⁾。

分離されているため、縦波と横波それぞれの強度を得ることができた。アルミ試験体の表面には、水を入れることができるコンテナを取り付け、アルミ試験体の下部から製氷機（アイスクリームマシン）で冷やすことで、水をゆっくりと下から冷却し、気泡を含まない氷を作成した。これにより、表面が氷で覆われている場合 (a), (d)、水で覆われている場合 (b), (e)、空気の場合 (c), (f) の縦波及び横波の強度分布を得た。(a)~(f) の六つの図の中から取り出した最大値により正規化して表示しているので、(a)~(f) は強度の比較が可能である。すなわち、空気の場合のみ強度が小さく、水、水では大きな信号が得られた。実験では、レーザの照射位置を二次元的に移動させて図3の強度分布を得たが、中央にレーザを照射して受信位置を二次元的に移動させたものと等価である。すなわち図3の結果が、中央にレーザ照射した場合に深さ 20 mm の位置で受信される縦波、横波の強度分布と置き換えることができる。

縦波の強度分布 (a)~(c) に注目すると、表面に氷、水といった拘束がある場合には、中央に縦波強度が集中しており、ちょうど図1(c)のように縦波が発生していることが分かる。逆に表面に拘束がない図3(c)の場合には、縦波が斜め方向に伝搬する図1(a)の状態を示している。横波の強度分布 (d)~(f) では、いずれの場合もリング状の分布となっており、図1(a), (c)の状態が実験的に示されている。また、表面が水で覆われている(a), (d)の場合に、縦線が1本現れているように見える。これは、水中に現れたクラックによりレーザ光が屈折・散乱した結果、強度が減退したことを示している。

一般に、レーザ照射により発生する超音波は、直径 1 mm 以下の範囲にレーザを集光させ、その局所的に発生するひずみを利用する。そのため、レーザ照射点が点音源として振る舞い、材料中を球面上に拡散する。この場合、ある距離離れた受信点に到達した波形は非常に小さくなっていることが多い。一方、超音波探触子により発生させた超音波は指向性を有しており、ビーム状に伝搬するため、エネルギーの拡散が少ない状態で計測をしている。このような違いから、レーザにより発生する超音波は超

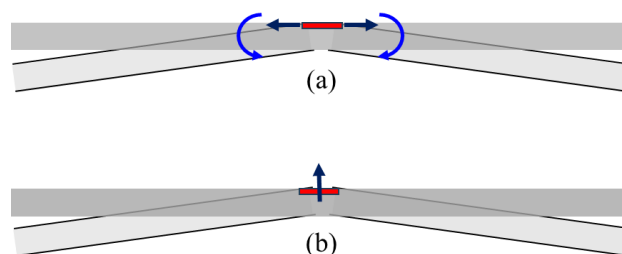


図4 レーザ照射による薄板の屈曲振動モード（ラム波 A0 モード）の発生原理 (a) 熱弾性効果の場合、表面に発生する対の面内応力により曲げモーメントが起こる。(b) アブレーションまたは表面拘束の場合、表面に発生する面外方向の垂直応力により面外方向に変位が発生する。

音波探触子によるものより、信号レベルが極端に小さくなることもあり、このことが非破壊検査への適用範囲を制限している。

しかし、薄板構造の場合、超音波エネルギーは薄板内に閉じ込められていることから、エネルギーの拡散が比較的小さく、レーザを利用して大きな信号が検出されることが知られている。そのため、レーザにより励振され薄板内を伝搬するガイド波を利用した研究が盛んに行われてきた^{(17)~(21)}。これらの多くは、薄板にレーザを照射した場合に大きく発生し、レーザ干渉計などでも検出が容易な薄板の面外方向の振動、すなわちラム波 A0 モード（若しくは屈曲振動モード）を扱っている。図4は中央にレーザを照射したときの薄板の屈曲振動の発生の様子を、熱弾性効果の場合とアブレーション若しくは表面拘束の場合について示したものである。高周波になる、すなわち波長が板厚よりも十分に小さくなるにつれ、図1に近くなるが、ここでは波長が板厚よりも大きいような低周波数帯域を扱っていると考えて頂きたい。このような場合でも、熱弾性効果やアブレーションまたは表面拘束の場合に、レーザ照射によって表面近傍に発生する応力場は同じである。すなわち、熱弾性効果の場合には、表面に左右反対方向に面内の垂直応力が発生し、アブレーション

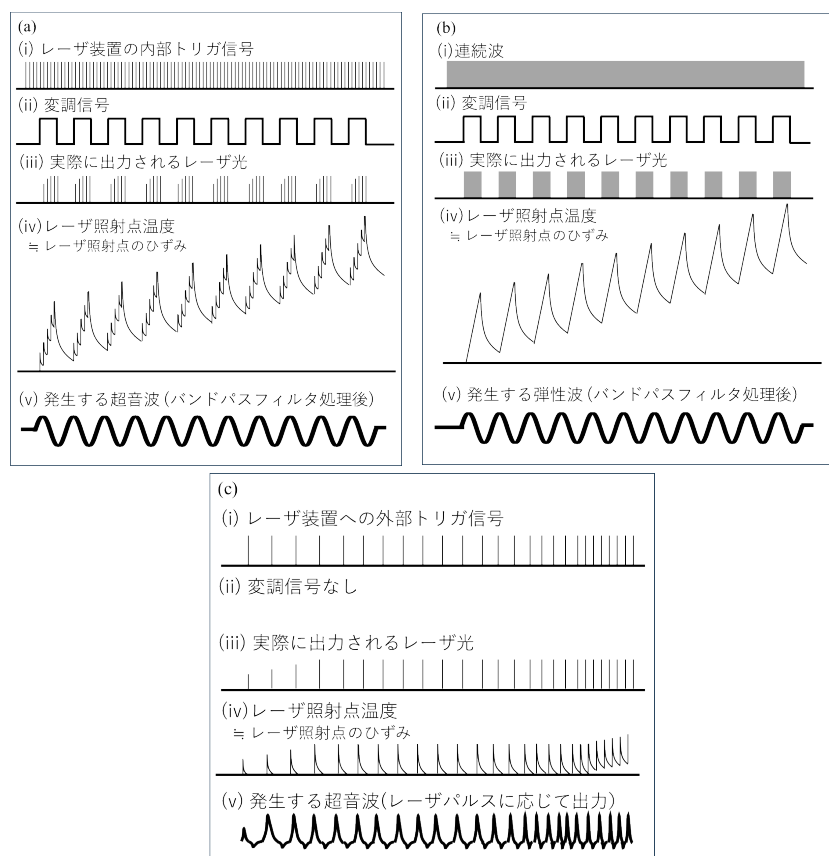


図5 変調信号とレーザー出力，照射点温度，発生する超音波の関係を示した模式図 (a) 高繰り返しパルス波を出力できるレーザーに対し変調を掛けた場合，(b) 連続波を出力できるレーザーに対し変調を掛けた場合，(c) 高繰り返しパルスレーザーに対しパルスのトリガタイミングで超音波を制御した場合。

ンまたは表面拘束の場合には，面外の垂直方向の力が働く。このとき，熱弾性効果 (a) の場合には，薄板に曲げモーメントが起こり，屈曲の振動（ラム波 A0 モード）が発生する。同時に長手軸方向にも振動は発生するが，面内方向変位のため検出が容易ではないことが多い。アブレーションまたは表面拘束の場合 (b) には，局所的な垂直方向の力が働き，上下方向の屈曲振動を発生させる。すなわち，レーザー光を薄板状構造の表面に照射すると，レーザー照射点が点状の場合には，その点から円状に広がる屈曲振動が支配的なラム波 A0 モードが伝搬し，レーザー照射点を線状とすれば，線状の法線方向に指向性をもつラム波 A0 モードが伝搬する。

3. レーザ照射による超音波励振の制御

非破壊検査に用いられる一般的なレーザー超音波法では，数十 ns 程度の持続時間をもつレーザーパルスを照射して，MHz オーダの超音波を発生させる。一方で，超音波探触子を用いた非破壊検査では，機器の進歩によりパルス波だけでなく，複数の正弦波サイクルをもつバースト波や，時間とともに周波数が変化するチャープ波など種々の超音波を利用することで，信号レベルの改善や波形処理の高度化が図られている。著者らは，レーザー照射による超音波の励振においても，バースト波やチャープ波といった超音波波形の制御の非破壊検査への適用を試みてい

る⁽²²⁾。

図5は，変調信号とレーザーの出力，レーザー照射点温度，発生する超音波の関係を示した模式図である。(a) が高繰り返しパルス波を出力できるレーザーに対し変調を掛けた場合，(b) は連続波を出力できるレーザーに対し変調を掛けた場合，(c) は高繰り返しパルスレーザーに対し，外部変調信号ではなく，パルスのトリガタイミングで超音波を制御した場合の図である。いずれも著者らがこれまで超音波を発生させるのに利用した方法である。高繰り返しパルスを利用する場合（図5(a)と(c)）には，レーザー装置のもつ内部トリガ信号または外部から与えたトリガ信号のタイミングでレーザーを照射することができる。それに変調信号を与えた場合 (a) には，出力されるレーザー光が変調信号に倣って変化をする ((a) の (iii))。連続波を用いた場合 (b) や高繰り返しパルスを変調信号なしにそのまま用いた場合 (c) でも同様に図 (iii) のようなレーザー光が出力される。このとき，レーザー照射位置の温度はレーザーが照射されるたびに (iv) に示したように上昇し，その温度上昇が照射点の体積ひずみに対応する。このひずみが前出の図1，図4のような応力負荷となり，超音波となって伝搬する。実際の応力波は，(a)，(b) に顕著にみられるようなひずみの持続的な増大による直流成分や，(a) 中に見られるようなパルスによる高周波成分も付加されているが，受信デバイスの特性やアンプ中のバンドパスフィルタにより，(v) に示すような正弦波状の波形が得られる。また，この変調信号やトリ

が信号を工夫することにより、単一周波数の正弦波だけではなく、(c)に示したようなチャープ波のような波や、複数の周波数を重ねたような波などを利用することも可能である。

4. 配管検査への適用

上述したような超音波の励振技術を利用した事例として、ここでは、配管検査への適用を紹介する。プラントには膨大な量の配管が張り巡らされており、内容物や設置環境、負荷される荷重の状況などにより、定期的な検査が必要とされる配管も多い。多くの配管は高所や高温などアクセスの難しい環境に設置されており、簡単な肉厚検査を行うだけでも、プラントユーザにとって大きな負担となっている。レーザ超音波による配管検査は、レーザ光を照射できるむき出しのパイプのみを対象とするという制限があるものの、遠隔からの検査が可能になれば、大きな負担軽減となりプラント管理のやり方が大きく変わる箇所も現れる。

そこで著者らは、レーザ超音波による非接触非破壊検査をプラント内の配管に適用することを目指して研究を進めてきた。数 m から十数 m 程度離れた位置からの曲面状の表面を有する配管にレーザ超音波法の適用を想定した場合、レーザ照射位置によっては、表面からの散乱光が返ってこないことがあるため、対象物からの散乱光を必要とする超音波の検出には、原理的に非常に大きな困難が伴う。一方、超音波の励振は、対象物表面に適切なスポット径サイズでレーザ照射できさえすれば、2章で示したような原理で超音波は発生するため、比較的容易に実現できる。著者らはこのことを考慮して、超音波の検出用レーザは、ある計測しやすい位置に固定し、超音波の励振用のレーザを走査することで、配管内面の減肉や付着物を検出可能な手法を考案し、現場適用できる装置の開発を進めている。

図6は、配管内面にある減肉の検出原理を示した模式図である。超音波励振用のレーザ光をパイプのような薄い板状構造に照射すると、図4に示した原理で薄板を屈曲させるような振動が発生する。この際、レーザ照射位置の厚みが厚い場合には、曲げ剛性が大きくなり（つまり曲げにくくなり）、発生する振動が小さくなる。逆に、減肉があるような薄くなっている箇所にレーザを照射すると振動が大きくなる。超音波を発生させるレーザ光を二次元的に走査しながら、この振動のある表面上の固定位置で受信すると、受信される波形の振幅やその周波数スペクトルピークが、発生させた超音波の振動エネルギーに対応する⁽²³⁾、⁽²⁴⁾。つまり減肉の分布に対応する振動エネルギー分布が取得され、減肉が画像化される。

この原理を利用して、図7に示す装置構成により、減肉の画像を取得した例を図8に示す⁽²⁰⁾。レーザ装置は連続波を最大出力 300 W で出力できるレーザ加工用の装置に、外部のデジタルアナログ変換器から図5(b)に示すような変調信号を与えた。変調を与えている上パースト波の休止時間も長い。実際に出力されているレーザのエネルギーは 300 W の 1/20~1/100 程度になっており、対象物に損傷を与える程度のエネルギーが出力されるわけではない。レーザヘッドから出るレーザ光は、適切

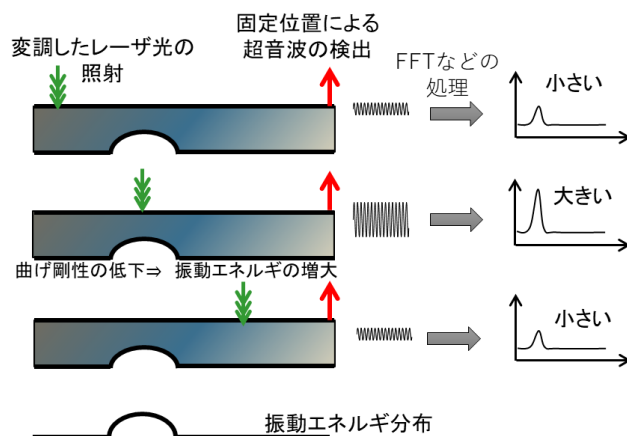


図6 レーザ照射した際に発生する屈曲振動エネルギーを利用した減肉検査の原理⁽²⁰⁾

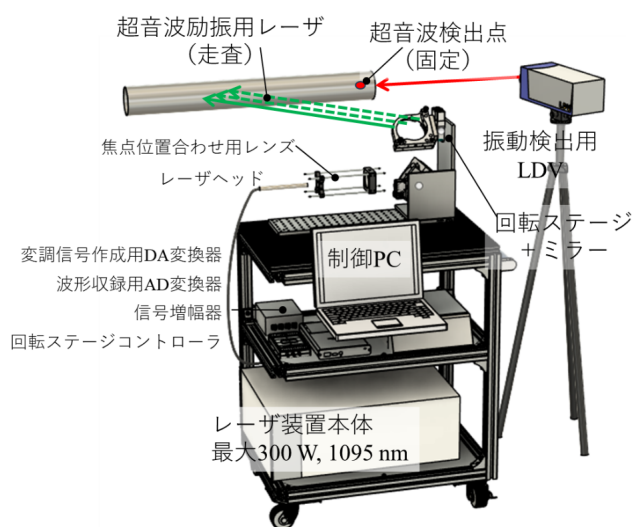


図7 配管減肉及び付着物の画像化装置⁽²⁵⁾

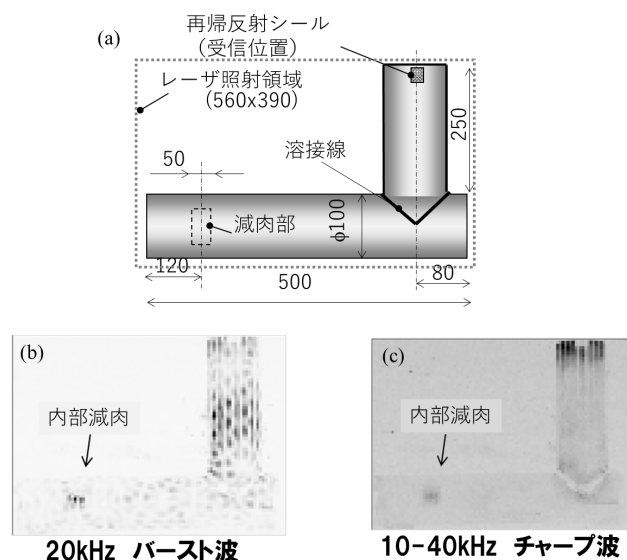


図8 模擬減肉の画像化結果の例⁽²⁰⁾

な凹レンズと凸レンズの組み合わせによりおおむねパイプ表面近傍で焦点を結ぶようにした。また、回転ステージに取り付けたミラーによって、レーザ光を二次元的に走査できるようにしている。超音波の検出は、市販のレーザドップラー振動計によ

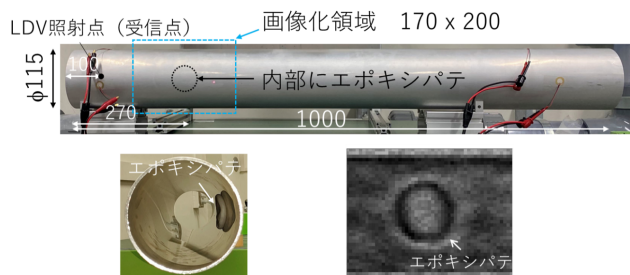


図 9 付着物の検出事例⁽²⁵⁾

り数 m 離れた位置から計測した。これまで薄肉裏面の模擬欠陥や種々の配管内の減肉の計測を行っており、図 8 はその一例として、溶接された分岐があるような管に対し、内部の模擬減肉を検出した結果を示す。受信位置は試験体の上部にあり、減肉部は試験体の左下部にある。その間に、溶接線のような信号レベルを減退させるとともに、波形を乱すような複雑な構造が存在するものの画像化が可能であることが示されている。これは本手法において、レーザ照射点で発生した振動エネルギーを計測すればよいという単純な原理であることから、拡散場を使って計測していることに起因する⁽²³⁾、⁽²⁴⁾。また図 8 (b) は、変調信号に 20 kHz のパースト波を利用しているのに対し、図 8 (c) は、10~40 kHz まで時間とともに徐々に変化するチャープ波を変調信号に利用して取得した画像である。(c) の方が広帯域になることから、特定周波数による共振パターンが画像から低減することができ、より鮮明になっている。

減肉部では曲げ剛性が小さくなるため、レーザが照射されると大きな振動エネルギーが得られた。反対に内部に付着物がある場合にはその部分の曲げ剛性が大きくなり、レーザを当てた場合の振動エネルギーが小さくなる。このことを利用して現在、配管内部の付着物検出に関する研究を進めている (図 9⁽²⁵⁾)。パイプ内部にエポキシパテを取り付け、外部からレーザ照射して画像化を行った。ちょうどパテの箇所が丸く現れ、内部の付着物が検出できていることが分かる。この技術は、福島第一原子力発電所の廃炉作業の中で、パイプ切断をする際に、放射性廃棄物が内部に存在していないことを遠隔から確認するために利用することを目標として研究・開発を進めているところである。

5. 金属三次元積層造形体の検査に向けた基礎検討

近年、金属部材にも三次元積層造形を適用するようになってきている。強度が必要なために金属で作るしかない部材も、切削加工ではできない複雑な形状にすることで、軽量化や高機能化を図るのが主目的である。しかし、製造過程でのボイドやクラック、剥離などが強度や余寿命の低下を招く可能性もあり、今後その安全性を担保するための検査技術が必須である。現在、試作や製造現場で利用しやすい技術として X 線 CT があるものの、X 線が透過しにくい大きな金属部材には適用できず、金属三次元積層造形体の非破壊検査のための有効な手段が見当たらない。

そこで、著者らは、選択的レーザ溶融法 (SLM) による積層造

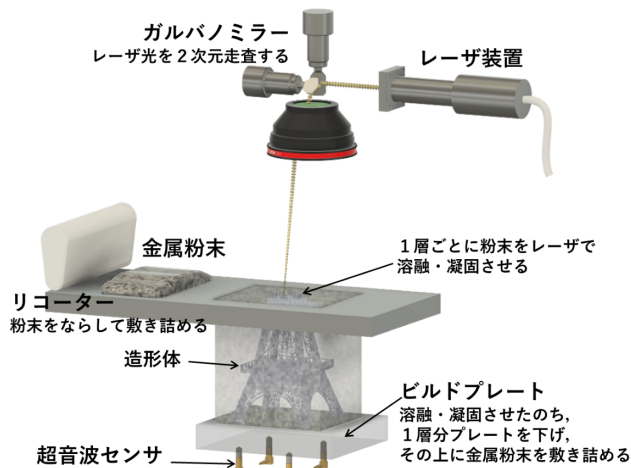


図 10 金属三次元積層造形体の製造時検査⁽²⁷⁾

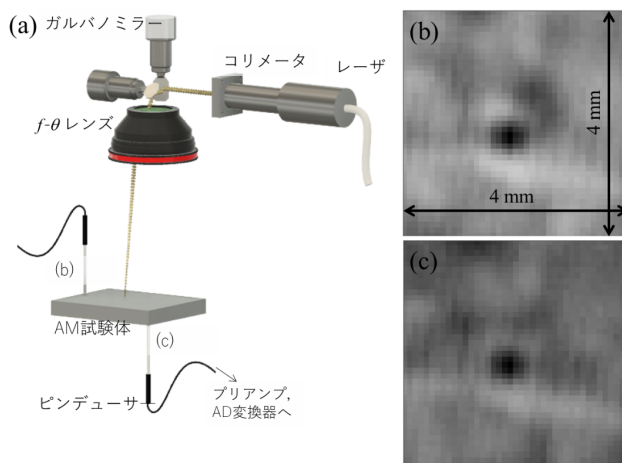


図 11 表面直下の欠陥の検出結果⁽²⁶⁾

形のセットアップにおいて、レーザ照射により発生した超音波をビルドプレート裏面の超音波センサにより検出し、レーザ照射部直下の欠陥を検出する技術を開発している⁽²⁶⁾、⁽²⁷⁾ (図 10)。レーザを走査することにより、造形面全体の検査が可能であり、数層の積層ごとにこのような検査工程を挿入することにより、造形体全体の検査が可能となる。

図 11 は、積層造形によって作製された試験体の検査を行った例である。試験体には表面直下に直径約 0.8 mm の円状の空洞が与えられており、その点を中心に 4 mm 角の領域を画像化したものである。表面直下に欠陥がある場合には振動が大きく得られるため、欠陥のない領域と明瞭な差が現れ、欠陥を画像として取得することができた。また、(b)、(c) は試験体表面、試験体裏面で超音波を検出した場合の結果であり、どちらも良好な結果であった。現在、図 10 のようなセットアップで実験を繰り返しており、ビルドプレート裏面での計測でも欠陥が検出できることを確認している。

6. おわりに

レーザ照射により発生する超音波を利用した非破壊検査につ

いて、著者らの研究事例を含め紹介した。はじめにレーザ照射による超音波の発生原理について、過去の研究や著者らの実験結果を含めて解説し、その後、配管検査や金属三次元積層造形体の検査への適用を目指した研究成果を紹介した。

レーザ超音波法による非破壊検査自体は古くから提案されているが、レーザ装置や光学部品、波形処理ハード・ソフトウェアの進歩が目覚ましく、それに材料中を伝搬する波動場の特長をうまく組み合わせることで、ますます発展する技術分野であると考えている。また、レーザ超音波を用いた非接触検査のニーズはあらゆる場面で想定され、製造分野のみならず、インフラメンテナンスや医療など広く利用されていくものと期待できる。

謝辞 本研究の一部は、令和5年度 CLADS 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業、課題解決型廃炉研究プログラム「非破壊検査を応用した配管ジオメトリ可視化技術開発」により実施された。

文 献

- (1) C.B. Scruby and L.E. Drain, *Laser Ultrasonics: Techniques and Applications*, Adam Hilger, Bristol, Philadelphia, and New York, 1990.
- (2) 特集 レーザ超音波の基礎と応用 I, 非破壊検査, vol.49, no.5, 2000.
- (3) 特集 レーザ超音波法の原理と応用 II, 非破壊検査, vol.49, no.6, 2000.
- (4) 特集 レーザ超音波の新展開, 非破壊検査, vol.51, no.4, 2002.
- (5) 特集 最新のレーザ超音波技術 I, 非破壊検査, vol.57, no.1, 2008.
- (6) 特集 最新のレーザ超音波技術 II, 非破壊検査, vol.57, no.4, 2008.
- (7) 特集 非接触超音波法の展開, 非破壊検査, vol.58, no.7, 2009.
- (8) 特集 非接触超音波探傷の進展, 非破壊検査, vol.61, no.10, 2012.
- (9) 特集 LU2013 I —先進超音波計測—, 非破壊検査, vol.63, no.3, 2014.
- (10) 特集 LU2013 II —先進超音波計測—, 非破壊検査, vol.63, no.4, 2014.
- (11) 特集 超音波による非接触非破壊計測・先進評価技術, 非破壊検査, vol.65, no.12, 2016.
- (12) 特集 光超音波 3D イメージング技術の開発, 非破壊検査, vol.68, no.12, 2019.
- (13) “超音波による固体中の音速測定方法,” JIS Z 2353:2021, 2021.
- (14) “端部エコー法によるきず高さの測定方法,” NDIS2418:2005, 2005.
- (15) J.D. Achenbach, “Laser excitation of surface wave motion,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol.51, pp.1885–1902, 2003.
- (16) T. Kawabata, T. Hayashi, and F. Simonetti, “Ice-enhanced thermoelastic excitation of ultrasonic waves,” *Applied Physics Letters*, vol.124, no.5, 052202, 2024.
- (17) D.A. Hutchins, K. Lundgren, and S.B. Palmer, “A laser study of transient Lamb waves in thin materials,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.85, pp.1441–1448, 1988.
- (18) R.J. Dewhurst, C. Edwards, A.D.W. McKie, and S.B. Palmer, “Estimation of the thickness of thin metal sheet using laser generated ultrasound,” *Appl. Phys. Lett.*, vol.51, pp.1066–1068, 1987.
- (19) T. Hayashi and M. Fukuyama, “Vibration energy analysis of a plate for defect imaging with a scanning laser source technique,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.140, pp.2427–2436, 2016.
- (20) T. Hayashi, “Non-contact imaging of pipe thinning using elastic guided waves generated and detected by lasers,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol.153, pp.26–31, 2017.
- (21) T. Hayashi, “High-speed non-contact defect imaging for a plate-like structure,” *NDT & E International*, vol.85, pp.53–62, 2017.
- (22) T. Hayashi and K. Ishihara, “Generation of narrow-band elastic waves with a fiber laser and its application to the imaging of defects in a plate,” *Ultrasonics*, vol.77, pp.47–53, 2017.
- (23) T. Hayashi, “Imaging defects in a plate with complex geometries,” *Appl. Phys. Lett.*, vol.108, 081901, 2016.
- (24) T. Hayashi, “Defect imaging for plate-like structures using diffuse field,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.143, pp.EL260–EL265, 2018.
- (25) S. Tanaka, T. Hayashi, and N. Mori, “Detection of deposits adhered on the back surface of plate-like structures using a scanning laser source technique,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol.212, 105303, 2024.
- (26) T. Hayashi, N. Mori, and T. Ueno, “Non-contact imaging of subsurface defects using a scanning laser source,” *Ultrasonics*, vol.119, 106560, 2022.
- (27) 林高弘, “三次元積層造形体の表面直下に現れる欠陥の検出,” 検査技術, vol.29, no.5, pp.1–5, 2024.

(US 研究会提案, 2025 年 8 月 28 日受付,
2025 年 10 月 9 日再受付)



林 高弘

1995 京大・工・機械卒。1997 同大学院修士課程了。同年工業技術院資源環境技術研究所入所。その後、名古屋工業大学、ペンシルベニア州立大学、(株)豊田中央研究所、京都大学、大阪大学にて、超音波非破壊評価技術の研究・開発、特にガイド波を用いた非破壊評価、レーザ走査による損傷画像化に関する研究に従事。現在、大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻、教授。博士（エネルギー科学）。著書『超音波による非破壊材料評価の基礎』。

電力インフラを支える通信技術の現状・課題と将来への展望

Current Status, Challenges, and Future Prospects of Communication Technologies Supporting Power Infrastructure

赤川蒼介 Sosuke AKAGAWA
山岡林蔵 Rinzou YAMAOKA

山口明哲 Hiroaki YAMAGUCHI
尾造宏之 Hiroyuki OZOU

アブストラクト 一般送配電事業者は、電力の安定供給を維持するため、電力設備を遠隔から監視・制御する電力保安通信網を構築・運用している。このネットワークは、特に系統保護システムにおいてマイクロ秒単位の遅延管理など極めて厳しい要件が課せられるため、従来から特殊な通信方式が用いられ、IP化はまだこれからといったところである。また、設備の維持コスト増大や激甚化する自然災害への対策も喫緊の課題である。本稿では、電力保安通信の現状と課題を整理し、オールフォトリクス・ネットワーク（APN）、非地上系ネットワーク（NTN）、AI技術などの活用による将来展望について述べる。

キーワード 送配電、電力制御、電力保安通信、IP化、レジリエンス、APN、NTN、AI

Abstract To ensure a stable power supply, transmission and distribution operators deploy and manage dedicated communication networks for power system security, enabling the remote monitoring and control of power facilities. These networks are subject to extremely stringent requirements—such as microsecond-level latency management—particularly in protection systems. Consequently, highly specialized communication technologies have traditionally been employed, resulting in a slow transition to IP-based architectures. Moreover, escalating maintenance costs and the urgent need for resilience against increasingly severe natural disasters pose significant challenges. In this paper, we provide a comprehensive review of the current status and key issues in power security communications and examine future directions, including the integration of all-photonic networks (APN), non-terrestrial networks (NTN), and artificial intelligence (AI) technologies.

Key words Power transmission and distribution, Power system control, Power system security, Communication network, IP networking, Resilience, APN, NTN, AI

1. はじめに

現代社会において、電力は産業活動、医療、情報通信、そして我々の日常生活のあらゆる側面に深く浸透しており、その安定供給は国民生活と経済活動の根幹をなす極めて重要な社会基盤である。この電力インフラは、東日本大震災という未曾有の災害を契機として、そのあり方を見直す大きな変革期を迎えた。電力供給のレジリエンス（強靱性）強化、電気料金の抑制、そして需要家が多様なサービスを選択できる環境の構築を目的とした一連の電力システム改革が段階的に進められた⁽¹⁾。この改革の集大成として、2020年4月には、送配電網の公平性・透明性を高めるため、大手電力会社の送配電部門の「法的分離」が実施された⁽¹⁾。

この制度改革により、九州電力送配電株式会社をはじめとする一般送配電事業者は、特定の発電事業者や小売事業者から中立な立場で送配電網の維持・運用を担い、担当エリアにおける電力の安定供給に対して最終的な責任を負う主体となった。電力の安定供給という使命を果たすためには、九州全域に広がる数多くの発電所、650箇所を超える変電所、そして総延長18万km以上に及ぶ送配電線を、あたかも一つの生命体のように統合的に運用する必要がある⁽²⁾。これを可能にしているのが、電力設備の隅々まで神経網のように張り巡らされた「電力保安通信ネットワーク」である。このネットワークは、電力系統の状態をリアルタイムに監視し、需給バランスを調整し、万一の事故発生時には瞬時に対応するための指令を伝達する（図1）、まさに電力インフラの生命線といえる⁽³⁾。この堅牢かつ高精度な通信ネットワークに支えられ、日本の電力供給は世界でも類を見ない高い信頼性を長年にわたり維持してきた。

しかし、長年にわたり電力の安定供給を支えてきたこの電力保安通信ネットワークは、設備の老朽化や激甚化する自然災害という大きな変化の波に直面している。また、世の中の通信がIP（Internet Protocol）ネットワークへ移行する中、電力保安通信全体としてはIP化が進みつつあるものの、特に系統保護システムに代表される、マイクロ秒（ μ s）単位の遅延管理といった極めて厳しい要件が課せられる分野では、その移行が進んで

赤川蒼介 九州電力送配電株式会社系統技術本部通信技術グループ
山口明哲 九州電力送配電株式会社系統技術本部通信技術グループ
山岡林蔵 九州電力送配電株式会社系統技術本部通信技術グループ
尾造宏之 九州電力送配電株式会社系統技術本部通信技術グループ
Sosuke AKAGAWA, Hiroaki YAMAGUCHI, Rinzou YAMAOKA, Hiroyuki OZOU, Nonmembers (Telecommunication Technology Group, Power System Operation & Engineering Division, Kyushu Electric Power Transmission and Distribution Co., Inc., 2-1-82 Watanabetori, Chuo-ku, Fukuoka-shi, Japan).

電子情報通信学会 基礎・境界サイエンス
Fundamentals Review Vol.19 No.3 pp.146-152 2026年1月
©電子情報通信学会 2026

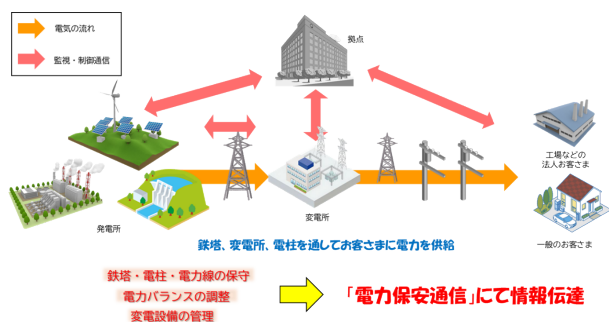


図1 電気の流と電力保安通信の情報の流れ

いないという課題がある。本稿では、電力の安定供給に不可欠な電力保安通信の現状と、その根幹をなす厳しい技術的要件を概説する。次に、現在直面している「系統保護分野などにおけるIP化の遅れ」「保守コストの増大」「自然災害への対策」という三つの主要な課題を、具体的な事例やデータを交えて明らかにする。最後に、それらの課題を克服し、将来にわたって持続可能かつ強靱な電力インフラを維持するための解決策として、オールフォトリクス・ネットワーク（APN）、非地上系ネットワーク（NTN）、AI技術といった先進技術の活用可能性について、その展望を論じる。

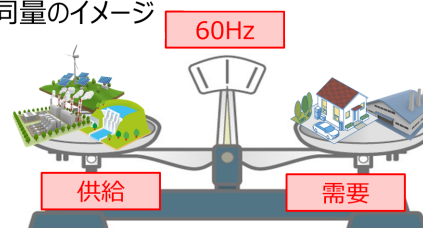
2. 電力保安通信の現状と必要性

2.1 電力保安通信の役割と法的根拠

電気がほかのエネルギーと決定的に異なる特性は、「大量に貯蔵することが極めて困難」とであるという点にある。このため、電力システムは、図2のように発電量（供給）と消費量（需要）を常に、秒単位、あるいはそれ以下の時間スケールで一致させ続けなければならない。これは「需給同時同量」の原則として知られる⁽³⁾。もしこのバランスが僅かでも崩れれば、電力システム全体の周波数が基準値（西日本では60Hz）から逸脱する。需要が供給を上回れば周波数は低下し、逆であれば上昇する。この周波数の乱れは、精密機械の誤作動や工場の生産ラインの停止など、産業活動に深刻な影響を及ぼすだけでなく、最終的には発電機が連鎖的に停止し、広範囲に及ぶ大規模停電（ブラックアウト）の引き金となりうる⁽³⁾。

この需給バランスを維持するため、中央給電指令所は、電力システムの電圧、電流、周波数といった情報をリアルタイムに収集し、火力発電の出力調整や再生可能エネルギーの出力制御などの指令を各電力設備に送る。また、落雷や台風などによる送電線事故といった異常発生時には、瞬時に事故区間を切り離し、被害の拡大を防止する。これらの重要な監視・制御情報を確実に伝達する役割を担うのが電力保安通信である。その重要性から、電気事業法及びそれに基づく「電気設備の技術基準の解釈」では、電力の安定供給に不可欠な給電指令所、発電所、変電所などの拠点間には、公共の通信網とは独立した「専用」の通信設備を設けることが義務付けられている⁽⁴⁾、⁽⁵⁾。これは、公共インフラが広範囲に途絶するような大規模災害時においても、電力

同時同量のイメージ



需要（電気を使用する量）と供給（電気をお届けしなければならない量）が常に一致していなければならない

⇒ 過不足が生じると、電圧や周波数が乱れ、
大規模停電につながる恐れがある

図2 電力需要供給の同時同量のイメージ

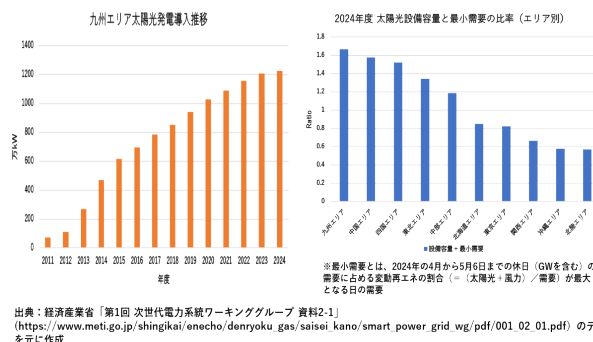


図3 各電力会社における再生エネルギー導入率

システムの運用に必要な通信機能を確実に維持し、社会機能の早期回復に貢献するための規定である⁽⁵⁾。このような法制度と、それを具現化するための高度な自営通信ネットワークの存在こそが、日本の電力システムが世界最高水準の信頼性を維持してきた大きな要因の一つである。

2.2 九州エリアの特殊事情と通信への要求

九州エリアは、全国的に見ても特徴的な環境下にあり、電力保安通信にはより高度な要件が求められる。第一に、日照条件に恵まれていることなどから、太陽光発電を中心とした再生可能エネルギーの導入が進んでいる点である⁽²⁾。2020年度には九州エリアの太陽光発電の接続量が1,000万kWを超え、需要の少ない春の昼間には太陽光発電だけで需要を上回る状況が発生しており、図3に示すようにこの傾向は全国の中でも特に顕著である⁽⁶⁾、⁽⁷⁾。天候に左右され、発電量が急しゅんに変動する再生可能エネルギーを最大限活用しつつ、安定供給を維持するためには、より広範囲の発電事業者の発電状況をリアルタイムに把握し、的確に出力制御指令（システムの周波数維持のために発電事業者に対して一時的に発電を抑制する指令）を伝達するための、高速かつ信頼性の高い通信ネットワークが不可欠となる。

第二に、地理的・気象的な要因から、自然災害のリスクが極めて高い点である。台風の常襲地帯であることに加え、近年では2016年の熊本地震、2017年の九州北部豪雨、2020年の令和2年7月豪雨など、頻繁に大規模な地震や豪雨災害に見舞われている。熊本地震では、約47万戸が停電し、熊本県内で2,000

基以上の電柱が損壊、送電鉄塔も傾くなど甚大な被害が発生した⁽⁸⁾。

また、九州北部豪雨では、河川の氾濫や土砂災害により、山間部の電力設備へのアクセスが長期間困難になる事態も生じた。このような大規模災害時においても、被災状況を迅速に把握し、復旧作業を円滑に進めるためには、物理的な被害を受けにくく、万が一の際にも冗長性を確保できる強靱な通信網が求められる。

第三に、多くの有人離島を抱えている点も九州エリアの特徴である⁽²⁾。離島では、独自の発電設備（内燃機発電所など）で電力が供給されており、本土と同様の安定供給を維持するためには、これらの小規模な電力システムを遠隔から監視・制御し、保守員と確実に連絡を取り合うための通信手段が不可欠である。しかし、本土との間に海底ケーブルを敷設したり、無線中継所を設置・維持したりするには多大なコストと労力がかかるという課題がある。これらの特殊事情は、九州エリアの電力保安通信に対して、他エリア以上に高いレベルの信頼性、即時性、そして経済性を同時に要求する背景となっている。

3. 「系統保護」と通信への厳格な要求

3.1 系統保護リレーシステムと通信の役割

電力保安通信の中でも、技術的に最も厳格な性能が要求されるのが、送電線の事故から電力システム全体を守る「系統保護リレーシステム」用の通信回線である⁽⁹⁾。送電線は、広範囲にわたって屋外に設置されているため、落雷、鳥獣の接触、台風による飛来物など、様々な外的要因によって短絡や地絡といった事故が発生する。事故が発生した箇所では、異常な大電流が流れ、これを放置すれば、電線の溶断や電力機器の焼損、更には周辺の健全な系統へ事故が波及し、大規模停電に至る危険性がある。

系統保護リレーシステムは、図4のようにこの事故を瞬時に検出し、事故が発生した送電線の両端にある遮断器（CB）に「トリップ指令（開放指令）」を送り、事故区間を系統から高速で切り離す役割を担う。その中でも、特に重要な基幹系統で採用されているのがPCM（Pulse Code Modulation）電流差動リレー方式である^{(3)・(9)}。この方式は、保護対象となる送電線の両端の発電所で、電流の波形（瞬時値）を極めて高い精度で同期してサンプリングし、そのデータを通信回線を通じて互いに交換する。そして、健全時には両端に流入する電流と流出する電流の和は（充電電流を除けば）ゼロになるというキルヒホッフの法則に基づき、両端の電流値の差を計算する。その差が一定以上になった場合に、送電線の「内部」で事故が発生したと判定する。この高精度な判定により、保護範囲外の事故で不要な動作をすることなく、確実に保護範囲内の事故だけを切り離すことが可能となる。この「差動」という原理は、事故点までの距離や系統構成の変化に影響されにくく、最も重要な送電線の主保護として標準的に採用されている⁽³⁾。

◆ 系統保護システムの動作原理

1. 保護対象の送電線に流れる電流データを両端で解析
2. 事故点が送電線の内部か外部（別の送電線）かを判定
3. 事故点が内部であれば、両端のしゃ断器（CB）を動作させ事故区間を高速に切り離す

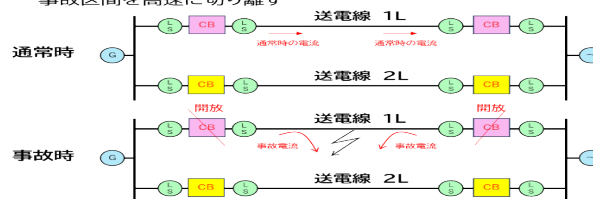


図4 系統保護リレーシステムの動作原理

3.2 通信回線への要求条件

このPCM電流差動リレーが設計どおりに機能するためには、両端の発電所を結ぶ通信回線に対して、一般のデータ通信とは比較にならないほど厳しい性能が要求される。電気協同研究や電気学会技術報告によれば、その主な要求条件は以下のとおりである^{(3)・(9)・(10)}。

- 伝送遅延時間：保護システム全体（事故発生検知から遮断器の動作完了まで）に許される時間は、周波数が60Hzの系統で僅か数サイクル（1サイクルは約16.7ms）である。このうち、通信回線に許容される時間はごく僅かであり、60Hzの系統では4ms以下と規定されている⁽¹⁰⁾。
- 伝送遅延時間変動（ジッタ）：両端で電流波形を正確に比較するためには、サンプリングのタイミングが完全に一致している必要がある。この同期精度を保証するため、通信回線における伝送遅延の「ゆらぎ」は20μs以下という極めて微小な値に抑えなければならない^{(3)・(9)}。60Hzの交流波では1サイクル（約16.7ms）を12点でサンプリングし、その電流値に同期信号や制御信号を加えたデータを連続して伝送する。このとき、サンプリング間隔は約1.4msであり、更に各サンプルのビット列は厳密なタイミングで受信される必要がある。もし通信回線で20μsの遅延変動が発生すると、この同期が崩れ、ビットの読み取り位置を誤る原因となりうる。
- 伝送品質：通信途上でのデータ誤りは、リレーの誤動作に直結するため、符号誤り率（BER）は 1.0×10^{-7} 以下という極めて高い品質が求められる⁽¹⁰⁾。なお、通信速度（帯域）については、保護リレー通信は数百kbps程度で十分であり、特段の厳格要件はない。

これらの要求、特にμsオーダーでの遅延変動管理は、伝送経路やトラヒック状況によって遅延が変動しやすいイーサネットなどのIPネットワークで標準的に保証することは極めて困難である。これが、電力保安通信における系統保護の分野でIP化が容易に進まない最大の技術的障壁となっている。

3.3 要求条件を満たすための通信方式

この厳しい要求を満たすため、電力会社は回線ごとに専用帯域を割り当て、遅延変動を極小化できるPDH（Plesiochronous Digital Hierarchy）やSDH（Synchronous Digital Hierarchy）といった「TDM（時分割多重）網」を自営で構築・維持してき

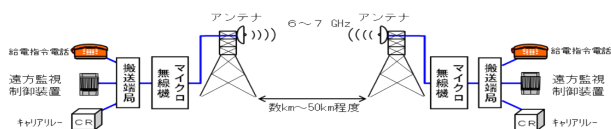


図5 固定マイクロ波無線伝送路の概要

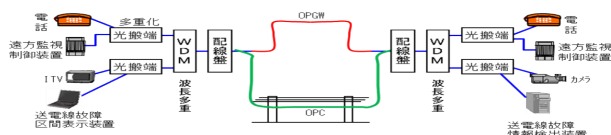


図6 OPGW及び光ファイバ伝送路の概要

た⁽³⁾。これらの信号を伝送する物理的な伝送路としては、固定マイクロ波無線や光ファイバケーブルなど、それぞれの特性を活かし、ルート二重化などの冗長構成を組み合わせ運用している。

- 固定マイクロ波無線：図5のような伝送路で山頂や見晴らしのよい場所に無線鉄塔を建設し、パラボラアンテナを用いて6.5 GHz、7.5 GHz、12 GHz 帯などのマイクロ波で見通し通信を行う方式⁽³⁾。地上ケーブルを介さないため、地震による地盤変動や土砂災害、洪水などの影響を受けにくく、極めて高い信頼性と耐災害性を有する。そのため、社会経済への影響が特に大きい基幹送電線の保護用通信回線（主系）として、不可欠な設備と位置づけられている。
- 光ファイバケーブル：電力保安通信において、高速・大容量の通信路を提供する重要な伝送媒体である。図6のように光ファイバケーブル網には一般的な電柱などの地上支持物に敷設されるタイプと、送電鉄塔の最上部に張られる架空地線に光ファイバを組み込んだ OPGW（Optical Fiber Composite Ground Wire）がある。OPGW は、雷保護と通信を兼ね備えた効率的な方式として広く採用されている。OPGW は、送電線ルートに沿って経済的に構築できる利点があり、系統保護のバックアップ回線や、増大する監視制御データ、業務用通信など、幅広い用途に活用されている⁽¹¹⁾。

4. 電力保安通信が直面する現代的課題

4.1 課題1：電力保安通信における IP 化

世の中のあらゆる通信が IP をベースとしたネットワークに移行する中で、電力保安通信の分野もその流れと無縁ではない。PDH や SDH といった TDM 網を構成する通信機器は、技術の陳腐化に伴い、メーカーによる製造や保守サポートが次々と終了しており、将来的な設備の維持が困難になりつつある⁽³⁾。汎用的な IP 機器を導入できれば、コスト削減や、多様なサービスを柔軟に収容できるといったメリットが期待できる。

しかし、前章で述べたとおり、系統保護システムが要求する μ s 単位の厳格な遅延・遅延変動要件は、IP ネットワークの基本的な特性とは相容れない部分がある⁽¹⁰⁾。IP ネットワークでは、パケットがほかのパケットとの衝突を避けたり、ルータでの輻輳を回避したりするために、伝送遅延が確率的に変動すること

（パケット遅延変動：PDV）が本質的な特徴である。この課題への対応策として、TDM 信号を IP パケットにカプセル化して伝送する「TDM over IP」や「Circuit Emulation Service」といった擬似ワイヤ技術が移行期のソリューションとして存在する。しかし、これらはあくまで従来のレガシーインタフェースを IP 網上で模擬する技術であり、IP 網自体の遅延ゆらぎの問題を根本的に解決するものではないため、最もクリティカルな系統保護への適用は限定的である。IP ネットワークの「ベストエフォート」的な性質が、時刻同期を絶対的な前提とする系統保護システムの信頼性を損なうリスクとなるため、全面的な IP への移行が進んでいないのが現状である。

4.2 課題2：設備保守コストの増大

電力保安通信インフラ、中でも特に高い信頼性を誇る固定マイクロ波無線ネットワークの維持には、莫大なコストが継続的に発生している。マイクロ波通信は、電波の直進性を利用するため、遠距離通信や山間地を越える通信を行うためには、山頂などの遠隔地に無線中継所や反射板を建設・維持する必要がある。これらの設備は、アクセス道路が未整備な厳しい自然環境の中に立地している場合も多く、保守・点検作業には険しい山道を徒歩で登るといった多大な労力と時間を要することもある。更に、設備の建設から数十年が経過し、無線鉄塔やアンテナ、基礎部分のコンクリートなどの老朽化が進んでいる。これらの安全性を確保し、性能を維持するための大規模な更新・補修工事には巨額の投資が必要である。加えて、これらの特殊なレガシー設備に対応できる専門技術者も高齢化が進んでおり、その技術継承が困難になっているという人的資源の課題も深刻化している。このような状況が、送配電事業の経営上の大きな懸念材料となっている。光ファイバ網についても、ケーブルの寿命や、鳥獣害・自然災害による損傷からの復旧など、継続的な費用が必要であり、通信インフラ全体の保守コストの抑制が大きな経営課題である。

4.3 課題3：激甚化する自然災害への対策

近年の気候変動の影響により、台風の強化や線状降水帯による集中豪雨など、自然災害は激甚化・頻発化の一途をたどっている⁽¹²⁾。これにより、従来は想定されていなかった規模でのインフラ被害が発生するリスクが高まっている。光ファイバケーブルは、土砂崩れや河川の氾濫、強風による電柱倒壊などで物理的に断線するリスクが高い。通信ルートを地理的に離れた2系統で構成（ルート二重化）していても、広範囲に及ぶ大規模災害時には両ルートが同時に被災する可能性も否定できない。一方、災害に強いとされるマイクロ波無線も、想定を超える強風によるアンテナの方向ずれや損傷、あるいは局地的な豪雨（ゲリラ豪雨）による急激な電波の減衰（降雨減衰）によって通信品質が劣化するリスクを抱えている。

2018年に発生した北海道胆振東部地震では、大規模な土砂崩れなどで電力設備が甚大な被害を受け、日本初のエリア全域に

わたるブラックアウトが発生した。この未曾有の事態において、電力保安通信は、非常用電源によってその機能を維持し続け、給電指令所の状況把握や復旧指令の伝達に不可欠な役割を果たしたことが報告されている⁽¹³⁾。この教訓は、いかなる過酷な災害下でも通信機能を失わないためのレジリエンス強化が、電力会社にとって最重要課題の一つであることを改めて示している。単にバックアップ回線を用意するだけでは不十分であり、ネットワーク全体が一度に停止することを防ぎ、障害発生時にも重要な通信を優先できる設計が求められる。また、既存の通信手段の強靱化に加え、それらが機能しなくなった場合を想定した、全く異なる原理に基づくバックアップ手段の確保、すなわち通信手段の多様化が強く求められている。

5. 課題解決に向けた将来構想と技術的展望

5.1 IP 化推進のための技術：APN と TSN

IP 化の最大の障壁である遅延・遅延変動の問題を解決する革新的な技術として、NTT が提唱する次世代コミュニケーション基盤 IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) の中核技術であるオールフォトリクス・ネットワーク (APN) に大きな期待が寄せられている⁽¹⁴⁾、⁽¹⁵⁾。APN は、図 7 のようにネットワークの末端から末端まで、情報を光信号のまま伝送することを目指す技術であり、光電融合により O/E/O 変換を最小化し、通信要求に応じてエンド・ツー・エンドで専用の光パス(波長)を割り当てることで、他トラフィックの影響を受けない確定的な通信と超低遅延を実現する。系統保護回線ごとに専用の光パスを割り当てれば、物理的に独立した専用線と同等の分離性・性能を確保でき、電力保安通信の IP 基盤への統合を加速させる可能性がある。

また、既存の IP ネットワーク技術の延長線上にある解決策として、TSN (Time-Sensitive Networking) の活用も有望である。TSN は、以下の主要な規格を組み合わせることで、ネットワーク全体を制御し、遅延や帯域を保証する確定的な通信を実現する^{(16)~(18)}。

- 時刻同期 (IEEE 802.1AS) : PTP (Precision Time Protocol) をベースとしたプロファイルで、ネットワーク内の全機器の時刻をナノ秒 (ns) レベルで同期させる⁽¹⁸⁾。
- トラフィック制御 (IEEE 802.1Qbv) : 保護信号のような高優

先度トラフィックの通信時間を予約し、ほかの通信から隔離することで遅延上限を保証する⁽¹⁷⁾。

- 低遅延化 (IEEE 802.1Qbu) : フレームプリエンプション (割り込み) 機能により、優先度の低い長いパケットの伝送中に、緊急のパケットが割り込んで先に通過することを可能にする⁽¹⁷⁾。

これらの TSN 規格を適用することで、電力保安通信の IP 化を段階的に進めていく道筋が見えてくる。

5.2 自社設備削減と強靱化に資する技術：NTN

設備保守コストの削減と災害時レジリエンスの抜本的な強化を両立する技術として、非地上系ネットワーク (NTN : Non-Terrestrial Network) が急速に現実味を帯びてきている⁽¹⁹⁾。ロケット打上げコストの低下と小型衛星の進展を背景に、民間主導の衛星コンステレーションが相次いでおり、GEO/LEO 衛星や成層圏プラットフォーム (HAPS) を地上網と一体的に運用する包括的ネットワークが議論されている⁽²⁰⁾、⁽²¹⁾。

これらのコンポーネントは、電力インフラの多様な要求に対して異なる利点を提供する。

- GEO 衛星 (静止軌道衛星) : 地上から約 36,000 km 上空に位置し、地球の自転と同期しているため、地上からは静止して見える。この特性により、広大なエリアを常時カバーできるという強みがある。一方で、伝送遅延は約 500~600 ms と大きく、リアルタイム性が求められる制御には不向きだが、気象データの一斉配信や広域監視、災害時の初動通信など、遅延が問題にならない用途で有効である。
- LEO 衛星 (低軌道衛星) : 高度数百~2,000 km を高速で周回するため、地上との距離が近く、伝送遅延は数十 ms レベルに抑えられる。これにより、従来の衛星通信では困難だった SCADA (監視制御) や分散型エネルギーリソース (DER) の遠隔制御にも適用可能性がある。また、山間部や離島の通信確保において、既設の回線を LEO 衛星で代替することで、大幅なコスト削減と広帯域化が期待される。
- HAPS (High Altitude Platform Station) : 高度約 20 km の成層圏に無人航空機を滞空させ、直径 50 km 以上の広域に通信サービスを提供する技術である。HAPS はスマートフォンなどの小型端末との直接通信を得意とし、「移動無線の代替」「山間部・離島のセンサ情報収集」「リモートセンシングを利用したリアルタイム映像受信」などの用途が期待されている。更に、スターリンクなどの LEO 衛星と比較して、「木陰などでも通信が可能となるポテンシャル」や、「HAPS 自体が任意の場所に移動できる柔軟性」を備えており、図 8 のように災害時などの局所的なニーズに応える特性をもつ。近年は、Massive MIMO や TDD 周波数帯の活用による高速大容量化、災害時の迅速なエリア形成など、Beyond 5G/6G 時代を見据えた高度化技術の研究が進んでいる⁽²²⁾。

NTN の導入により、高圧線などの電力設備付近において連絡手段となる移動無線の基地局廃止や、長距離光ファイバの新設・更新の削減が期待される。それらの実現により、設備の維持管

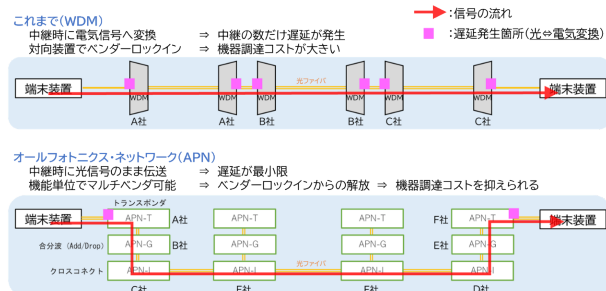


図 7 既存 WDM による通信回線構成と APN による通信回線構成の比較

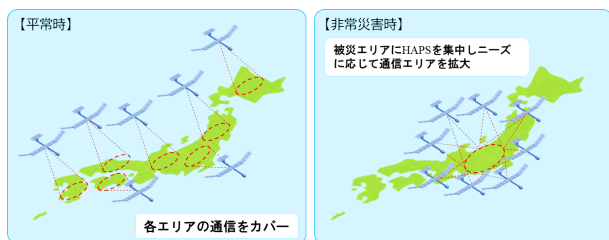


図 8 HAPS による通信容量の一時的な拡大

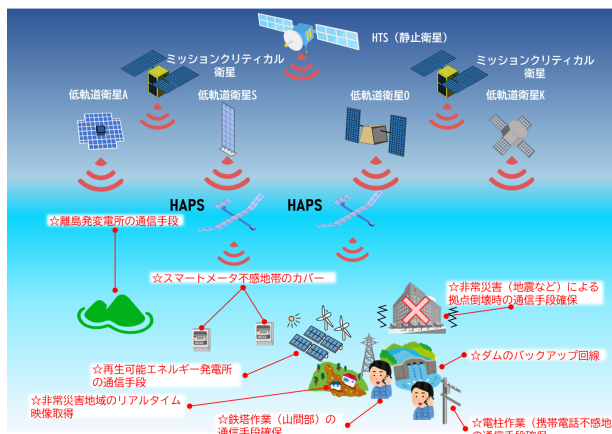


図 9 NTN で期待される電力保安通信のユースケース

理コスト、老朽化設備の更新コストを抑制できる可能性がある。特に、離島や山間部では、従来の物理回線構築に比べて大きなコスト削減効果が期待される。

また、これらの NTN を組み合わせたハイブリッドな利用により、光ファイバ（第 1 ルート）＋マイクロ波無線（第 2 ルート）に続く、故障要因が異なる「第 3 のルート」を確保でき、共通要因故障リスクを低減できる⁽²³⁾。図 9 のように NTN には電力保安通信における幅広いユースケースが期待されるが、ミッションクリティカル適用に向けては、ベストエフォートではない SLA（遅延・帯域の厳格保証）や、衛星通信特有の脅威に対するセキュリティ強化が今後の重要課題となる。

5.3 業務効率化のための技術：AI 活用によるネットワーク監視の高度化

増大する保守コストを抑制し、限られた人員で高品質な運用を維持するためには、業務そのもののデジタルトランスフォーメーション（DX）が不可欠である。九州電力送配電でも、DX の取り組みの一環として、AI（人工知能）や IoT 技術の活用を推進している⁽²⁴⁾。

通信ネットワークの運用保守分野においては、AI の応用範囲は単なる障害検知にとどまらない。デジタルツインは、物理ネットワークと一対一で対応する仮想モデルを構築し、リアルタイムの運用データで同期させる技術である。例えば、ソフトウェア更新や経路変更といった作業を実網適用前にツイン上でシミュレーションし、影響を事前評価することで、作業ミスによる大規模障害のリスクを低減できる。また、障害時にはツイン上で復旧シナリオを高速に試行し、最適手順を導出できる。

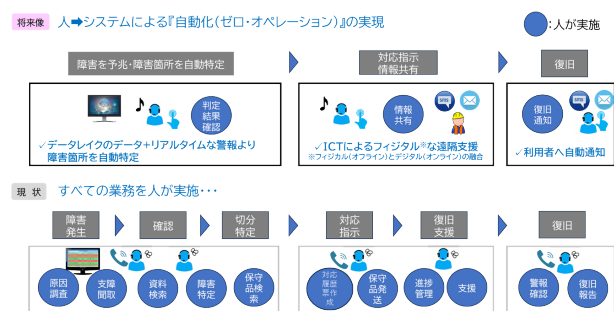


図 10 システムによる「ゼロ・オペレーション」の実現イメージ

これは、電力系統で研究されている RSDT（Real-time Smart Digital Twin）構想とも相通じる考え方である⁽³⁾。更に、AI は予兆検知においても高度化が進む。光ファイバの伝送品質の微細な変化や、マイクロ波無線の受信電力の変動パターンを AI が常時監視し、通常とは異なる傾向を捉えることで、「ケーブルの劣化進行」や「アンテナの軽微な方向ずれ」といった、人間の目では見過ごしがちな異常の予兆を早期に発見できる可能性が広がる。将来的には、図 10 のように検知から原因分析、復旧手順の自動生成、更にはネットワークリソースの自律的最適化までを行うゼロ・オペレーション（運用業務を完全に自動化し、人手による操作をゼロにすることを目指す概念）を目指すことで、保守業務の大幅な効率化と人的ミスの削減が期待される。

6. まとめ

電力の安定供給は、社会経済活動の根幹を支えるインフラであり、その背後には、極めて厳格な技術的要件に応える「電力保安通信」が存在する。本稿では、九州電力送配電の置かれた状況を例に、電力保安通信、特に系統保護システムに求められる超低遅延・超低遅延変動・超高信頼という厳しい要件と、それを満たすための自営通信網の実態を解説した。

同時に、この重要なインフラが、①レガシー技術からの脱却を阻む「IP 化の推進」、②設備の老朽化に伴う「保守コストの増大」、そして③激甚化する「自然災害への対策」という、避けては通れない三つの大きな課題に直面していることを示した。これらの課題は相互に関連しあっており、従来の技術の延長線上だけでは、その解決はもはや困難である。

しかし、本稿で論じたように、新たな技術の光も見えている。APN や TSN は IP 化の壁を打ち破る可能性を秘め、NTN はコスト削減と強靱化を両立するゲームチェンジャーとなりうる。更に、AI とデジタルツインの活用は運用のあり方を変革し、ゼロ・オペレーションという未来を現実のものにするだろう。電力供給の維持と早期復旧という変わらぬ社会的使命を果たすため、これら先進技術の継続的な研究開発と現場適用が不可欠である。電力と通信、二つの分野の技術者が知見を融合させ協働することが、未来社会を支える電力インフラをより強靱で持続可能なものへと進化させる原動力となる。

謝辞 本稿で紹介した電力保安通信の将来展望は、平松佑太氏（国立研究開発法人情報通信研究機構へ出向中）によって先

行して検討が進められたものであり、筆者はその成果を引き継ぎ、整理及び補足を行った。ここに、平松佑太氏の多大なご尽力に深く感謝の意を表する。

文 献

- (1) 経済産業省資源エネルギー庁, “電力システム改革について,” https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/system_reform.html, アクセス: 2025 年 10 月 1 日.
- (2) 九州電力送配電 (株), “九州電力送配電統合報告書 2024,” <https://www.kyuden.co.jp/company/annual/integratedreport2024.html>, アクセス: 2025 年 10 月 1 日.
- (3) 宮下充史, 加川敏規, 土屋弘昌, “電力ネットワークにおける高信頼通信の現状と将来,” 信学 FR 誌, vol.16, no.3, pp.176–184, 2023.
- (4) eGov 法令検索, “電気設備の技術基準の解釈,” <https://laws.e-gov.go.jp/law/409M50000400052/>, アクセス: 2025 年 10 月 1 日.
- (5) 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部産業保安グループ電力安全課, “電気設備の技術基準の解釈の解説,” https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/law/files/dengikaishakukaisetsu.pdf, アクセス: 2025 年 10 月 1 日.
- (6) 九州電力送配電 (株), “出力制御の必要性について,” <https://www.kyuden.co.jp/td/renewable-energy/purchase/control/necessity.html>, アクセス: 2025 年 10 月 1 日.
- (7) 経済産業省, “第 1 回次世代電力システムワーキンググループ資料 2-1,” https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei.kano/smart-power-grid-wg/pdf/001_02.01.pdf, アクセス: 2025 年 10 月 1 日.
- (8) 九州電力株式会社, “熊本地震への対応実績,” <https://www.kyuden.co.jp/company/history/energy/disaster/disaster-1.html>, アクセス: 2025 年 10 月 1 日.
- (9) 保護リレーにおける通信利用技術の現状と高度化調査専門委員会 (編), “保護リレーにおける通信利用技術の現状と高度化,” 電気学会技術報告, No.1276, 2013.
- (10) 新しい通信技術による保護リレーシステムの設計合理化専門委員会, “新しい通信技術による保護リレーシステムの設計合理化,” 電気協同研究, vol.71, no.1, pp.1–211, 2015.
- (11) 金丸公春, 豊田重裕, “OPGW 利用送電線保守情報システムの伝送方式に関する検討,” 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), vol.114-B, no.2, pp.152–160, 1994.
- (12) 国土交通省, “令和 3 年度国土交通白書第 1 部持続可能な社会の実現に向けた国土交通行政の展開,” <https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r03/hakusho/r04/html/nj010000.html>, アクセス: 2025 年 10 月 1 日.
- (13) 星英樹, “北海道胆振東部地震において電力保安通信が果たした役割について,” 信学誌, vol.103, no.12, pp.1228–1232, 2020.
- (14) 日本電信電話 (株), “IOWN,” <https://www.rd.ntt/iown/>, アクセス: 2025 年 10 月 1 日.
- (15) NTT R&D, “Activities for Detailing the Architecture of the Open APN and Promoting Its Practical Application,” https://www.rd.ntt/e/research/JN202312_24189.html, アクセス: 2025 年 10 月 1 日.
- (16) IEEE 802.1, “IEEE 802.1 TSN – An Introduction,” <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/19/11-19-1298-01-00be-ieee-802-1-tsn-an-introduction.pdf>, アクセス: 2025 年 10 月 1 日.
- (17) S. Brooks and E. Uludag, “Time-sensitive networking: 産業用オートメーションの理論から実装まで,” インテル (株) ホワイトペーパー, <https://www.intel.co.jp/content/dam/www/public/ijkk/jp/ja/documents/product-briefs/wp-01279-time-sensitive-networking-theory-to-implementation-in-industrial-automation-jp.pdf>, アクセス: 2025 年 10 月 1 日.
- (18) S. Rodrigues and J. Lv, “Synchronization in time-sensitive networking: An introduction to IEEE Std 802.1AS,” IEEE Magnetics Society, https://ieeemagnetics.org/files/ieeemagnetics/2023-06/Synchronization_in_Time-Sensitive_Networking_An_Introduction_to_IEEE_Std_8021AS.pdf, アクセス: 2025 年 10 月 1 日.
- (19) X. Lin, S. Rommer, S. Euler, E.A. Yavuz, and R.S. Karlsson, “5G from space: An overview of 3GPP non-terrestrial networks,” IEEE Commun. Standards Mag., vol.5, no.4, pp.147–153, 2021.
- (20) 中田晃司, 福原始, “小型衛星コンステレーションビジネスの現状と将来,” 日本リモートセンシング学会誌, vol.41, no.2, pp.290–293, 2021.
- (21) 加納寿美, 松井宗大, 阿部順一, 山下史洋, “Beyond 5G/6G に向けた多層型 NTN のアーキテクチャと経路制御技術,” Bplus, vol.18, no.2, pp.158–166, 2024.
- (22) 外園悠貴, 谷崎雄太, 深澤賢至, 森広芳文, 岸山祥久, “HAPS を介した携帯端末向け直接通信システムの高度化技術と災害対策への応用,” 信学誌, vol.108, no.5, pp.449–455, 2025.
- (23) 日本電信電話 (株), “NTT とスカパー JSAT, 株式会社 Space Compass の設立で合意,” <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/04/26/220426a.html>, アクセス: 2025 年 10 月 1 日.
- (24) 九州電力送配電 (株), “DX の取り組み,” <https://www.kyuden.co.jp/td/supply/dx.html>, アクセス: 2025 年 10 月 1 日.

(RCC 研究会提案, 2025 年 9 月 1 日受付,
2025 年 10 月 8 日再受付)



赤川 蒼介

2019 九州大・工・電気情報卒。2021 同大学院修士課程了。同年九州電力 (株) 入社。以来、電力保安通信設備の保守運用、工事計画、施工管理、技術開発に従事。現在、九州電力送配電 (株) 系統技術本部通信技術 G。



山口 明哲

2012 大阪大・工・電気電子情報工卒。2014 同大学院修士課程了。同年九州電力 (株) 入社。以来、電力保安通信設備の保守運用、工事計画、施工管理、技術開発などに従事。現在、九州電力送配電 (株) 系統技術本部通信技術 G。



山岡 林蔵

1991 明治大・工・電子通信工卒。同年九州電力 (株) 入社。以来、電力保安通信設備の保守運用、工事計画、施工管理、技術開発、グループ会社におけるデータセンター建設、保守運用などに従事。現在、九州電力送配電 (株) 系統技術本部通信技術 G。



尾 造宏之

1995 豊橋技術科学大・情報工卒。1997 同大学院修士課程了。同年九州電力 (株) 入社。以来、電力保安通信設備の保守運用、工事計画、施工管理、技術開発、社員教育などに従事。現在、九州電力送配電 (株) 系統技術本部通信技術 G。

照明光スペクトルの制御により選択した物体色の見え方を変化させる照明システムの開発

Development of Lighting System for Changing Color Appearance of Selected Object by Controlling Illumination Spectrum

山口真理子 Mariko YAMAGUCHI
松元崇裕 Takahiro MATSUMOTO

土田 勝 Masaru TSUCHIDA

アブストラクト 舞台やライブ、ショーウインドーなどにおいて、見る人の注目を集め、感情を動かす照明演出は、エンターテインメントや広告といった分野で重要な役割を果たしている。本稿では、見る人に強い驚きを与える新たな照明演出の実現を目的とし、照明光スペクトルを精密に制御することでメタメリズムという光学現象を意図的に引き起こす照明システムについて述べる。本システムは、演出対象となる物体の分光反射率に応じて照明光スペクトルを最適に制御することで、白の色の見えを保ちながら、分光反射率が異なる表面同士を同一の色の見えに変えたり、特定の表面の色のみを変化させたりすることが可能である。本システムは、世界最大のファッション関連イベントの一つである Paris Fashion Week 2024 Spring/Summer の公式プログラムに掲載されたファッションショーの一つに演出照明として採用された。

キーワード 色の見え、メタメリズム、照明光スペクトル、分光反射率、マルチチャネル LED

Abstract Lighting technology that attracts the audience's attention and evokes their emotions in settings such as stages, live performances, and show windows plays a significant role in the fields of entertainment and advertisement. In this paper, we describe a lighting system that intentionally induces an optical phenomenon called metamerism by precisely controlling the illumination spectrum, with the aim of achieving a new lighting effect that leaves a strong impression, such as evoking surprise, on the audience. This system can make objects with different spectral reflectances appear in the same color or change the color of only one object while maintaining the appearance of white color by optimizing the illumination spectrum according to the spectral reflectance of the objects. This system was adopted as stage lighting for one of the fashion shows listed in the official program of the Paris Fashion Week 2024 Spring/Summer, one of the world's largest fashion-related events.

Key words Color appearance, Metamerism, Illumination spectrum, Spectral reflectance, Multichannel LED

1. はじめに

物体の色が人にどのように知覚されるかは、照明の影響を大きく受ける。デザイナーが指示した色に合わせて商品を作制しても、デザインの現場と生産の現場との照明の違いにより、仕上がった商品の色彩がデザイナーの意図と異なる場合がある。また、売り場の照明下と太陽光下では色の見え方が異なる場合があり、商品が消費者の意図した期待の効果を発揮できないことにもつながる。

これらの特殊な例として、ある照明下では異なる色に見える二つの物体が、別の照明下では同じ色に見えることがある。この現象は一般的にメタメリズムと呼ばれている。メタメリズム

はデザイナーや色彩管理者にとって厄介な現象であり、多くの先行研究では、メタメリズムの悪影響を抑制することが目的となっていた^{(1)~(3)}。

一方で我々が開発した照明システムは先行研究とは異なり、メタメリズムを積極的に活用して見る人に強い驚きの印象を与える演出の実現を目的とする。すなわち、演出対象の素材に最適化した照明光スペクトルを合成することで、メタメリズムを意図的に発生させる。

本システムでは、メタメリズムにより等色効果 (isochromatic effect) と特定色変化 (specific color change effect) という二つの視覚効果を実現する。いずれの効果においても、見る人に照明が変化したことを気付かせないよう、照明の切り替えの前後で白色の見えは維持されている。等色効果は、ある照明下では異なる色に見える二つの表面の色が、最適化された照明光スペクトル下では同一色に見える。また特定色変化では、素材に最適化された照明下では、一方の素材の表面の色を維持しつつ、他方の素材の表面の色だけを変化させる。設計した照明光スペクトルの合成には、多色の LED で構成される照明装置 (マルチチャネル LED) を使用する。

以下に本稿の構成を述べる。第 2 章では関連研究を挙げながら本システムの位置づけを明確にする。第 3 章では白の見た目

山口真理子 NTT 株式会社

E-mail mrk.yamaguchi@ntt.com

土田 勝 正員 NTT 株式会社

E-mail masaru.tsuchida@ntt.com

松元崇裕 NTT 株式会社

E-mail takahiro.matsumoto@ntt.com

Mariko YAMAGUCHI, Nonmember, Masaru TSUCHIDA, Member, Takahiro MATSUMOTO, Nonmember (NTT Inc. Japan).

電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ

Fundamentals Review Vol.19 No.3 pp.153-159 2026 年 1 月

©電子情報通信学会 2026

を維持しつつメタメリズムを発生させる照明光スペクトルの最適化手法を説明する。更に第4章では本システムをファッションショーの演出照明として実装する方法について述べ、実際の舞台演出においても有効であることを示す。

2. 関連研究

可変な光スペクトルを照射できる照明装置の代表的な例として、マルチチャネル LED が挙げられる。マルチチャネル LED はアート作品の照明⁽⁴⁾、小売での照明⁽⁵⁾、医療分野での色の識別⁽⁶⁾、工業製品の品質検査⁽⁷⁾など様々な用途で利用されている。対象とする物体の分光反射率に着目し、対象物の色をより鮮やかに見えるように、または異なる色の差異を強調するように各色の LED の明るさを調整し、目的に最適な照明光スペクトルが合成されてきた。

マルチチャネル LED を用いたメタメリズムに関する研究例としては、人間の目の等色機能の評価⁽⁸⁾、絵画における芸術的表現の創出⁽⁹⁾などがある。これらの研究では主に、照明光の色温度（白の色の見え）を変えたり、彩色の照明光を用いたりすることで、対象物の色の見えを変化させている。そのため、これらのアプローチでは対象物以外の色の見えにも影響を与え、多くの場合では照明光が切り替わったことが観察者にも知覚される。図1は彩色の照明光でメタメリズムを発生させ、異なる彩色照明光に切り替えることにより二つの異なる文字がそれぞれの彩色照明光に応じて浮かびあがる視覚効果の例である。ここで使用する被写体（図1(a)）は、①薄灰色の背景、②赤色のアルファベット“A”、③青色のアルファベット“Z”、④赤色と青色の二つの文字の混色の4色で構成されている。青色の照明下では①と③が同一の青系表色となり、②と④が同一の暗色となり、文字“A”のみが知覚される（図1(b)）。赤色の照明下では①と②が同一の赤系表色となり、③と④が同一の暗色となり、文字“Z”のみが観察される（図1(c)）。しかしこれらの照明の彩色は白色点から大きく離れているため、図1(a)を見た観察者にとって図1(b)及び図1(c)は不自然なシーンに見えてしまう。また彩色明は、「温かい」「冷たい」といった、演出者が意図しない印象を観察者に与えてしまう問題が生じる。

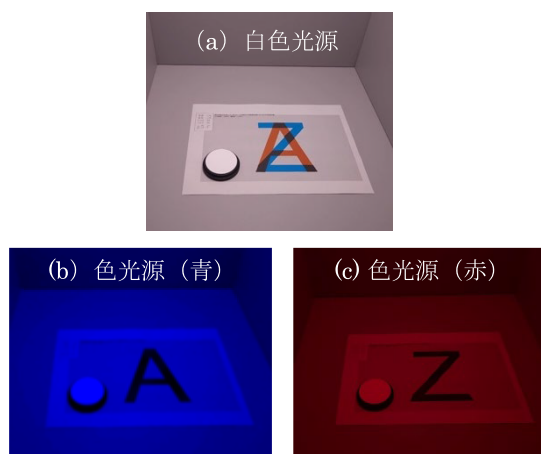


図1 色光源を用いたメタメリズムの問題

これらの問題を解決するため、我々は白の色の見えを保ちながら特定の対象色のみの彩度や色相を変化させる技術を開発した^{(10), (11)}。この技術を応用することで、メタメリズムの二つの効果、等色効果と特定色変化効果が実現できる。

3. メタメリズムと照明光スペクトルの最適化

3.1 物体表面における反射モデル

光源から射出された明光は物体表面で反射し、その反射光の一部が観察者の目に入射する（図2）。物体表面のある1点に関し人間が知覚する色 v_t は、物体表面に入射する照明光スペクトル $w(\lambda)$ と物体の分光反射率 $r(\lambda)$ 、人間の目の感度に相当する等色関数 $C_t(\lambda)$ を用いて式(1)のように表すことができる。

$$v_t = \int C_t(\lambda)w(\lambda)r(\lambda)d\lambda, \quad (1)$$

$$t = \{X, Y, Z\}$$

t は国際照明委員会（CIE）が定める CIE1931 表色系の三刺激値 (X, Y, Z) を示す。物体の色が理想的な白の場合、その分光反射率 $r_{\text{white}}(\lambda)$ はすべての波長で一定値となり式(2)が成り立つ。

$$v_{\text{white}} = p \int C_t(\lambda)w(\lambda)d\lambda, \quad (2)$$

$$p = \text{const.}, \quad t = \{X, Y, Z\}$$

メタメリズムが発生する条件は、異なる分光スペクトル $r_1(\lambda)$ 、 $r_2(\lambda)$ をもつ二つの物体表面からの反射光を人が同色に知覚することである。本条件は式(3)で表すことができる。

$$\int C_t(\lambda)w(\lambda)r_1(\lambda)d\lambda = \int C_t(\lambda)w(\lambda)r_2(\lambda)d\lambda \quad (3)$$

ここで計算に用いる光の波長分布の範囲を人間の目が識別できる波長帯域 380~780 nm とし、式(3)を行列式で表現することを考える。401次元の正方行列 C_X, C_Y, C_Z の対角成分を X, Y, Z の各々等色関数とし、物体の分光反射率を $r_i (i = 1, 2) = [r_{380}, \dots, r_{780}]^T \in \mathbb{R}^{401}$ 、照明光スペクトルを $w = [w_{380}, \dots, w_{780}]^T \in \mathbb{R}^{401}$ とすると、式(3)は以下の行列式に書き直すことができる。

$$C R_1 w = C R_2 w, \quad (4)$$

$$C = [C_X, C_Y, C_Z]^T, \quad R_{1,2} = \text{diag}(r)$$

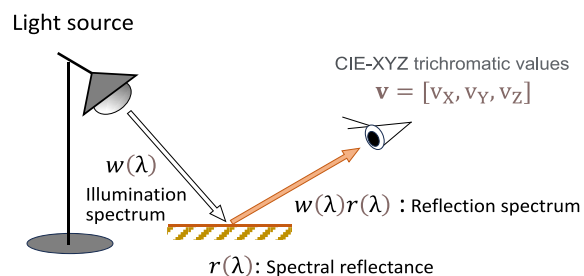


図2 物体表面の反射モデル

異なる分光反射率 (R_1, R_2) をもつ二つの物体が、照明光 w' の下ではメタメリズムにより同じ色として知覚される条件は、式 (5) で表すことができる。

$$CR_1 w \neq CR_2 w, \quad CR_1 w' = CR_2 w' \quad (5)$$

対象物体の分光反射率 R_1 と R_2 が既知で、また照明光スペクトル w と w' のうち片方が既知の場合に、もう一方の照明光スペクトルを目的に合わせて設定することを照明光スペクトルの最適化と呼ぶ。メタメリズムを応用した二つの視覚効果、等色効果と特定色変化も式 (5) を用いて表現することができる。

3.2 等色効果

等色効果では、分光反射率が R_1, R_2 の二つの物体が、照明光スペクトル w_2 の下では同じ色として観察者に知覚されるが、照明光スペクトル w_1 の下では知覚される色の差が最大となる場合を考える。また図 1 で示したように、照明光スペクトル w_1 と w_2 の色の差が大きいと、対象物の色を変化させる際に、照明光の彩色が変化していることに観察者が気付いてしまい、視覚効果が観察者へ与える驚きを損なう。そこで二つの照明下での白の色の見えが等しくなる条件を加えると、分光反射率と照明光スペクトルの関係は式 (6) で表される。

$$\begin{aligned} & \underset{w_1}{\text{maximize}} \|U(CR_1 w_1) - U(CR_2 w_1)\| & (6) \\ \text{s.t.} \quad & \|U(CR_2 w_2) - U(CR_2 w_1)\| \leq \delta, \\ & \|U(Cw_1) - U(Cw_2)\| \leq \delta_{\text{white}}, \\ & |C_Y w_1 - C_Y w_2| \leq \delta_Y \end{aligned}$$

$U(\cdot)$ は XYZ 値を $u'v'$ 値に変換する演算子である。また $\|U\|$ は $u'v'$ 色空間上の距離を求める演算子であり、その距離は $\{(u')^2 + (v')^2\}^{1/2}$ で求められる。 δ_Y は二つの照明光の明るさの差のしきい値であり、 δ_{white} は各照明下での白の色の見えの変化量に関するしきい値である。 δ_{white} を小さい値に設定するほど、各照明下での白の色の見えが等しくなるが、照明光スペクトル w_1 における二つの物体の色の差が小さくなる場合がある。その場合には、求められる演出効果に応じて許容できる δ_{white} の値を設定する。

3.3 特定色変化効果

特定色変化効果では、分光反射率 R_1 の物体は照明光スペクトルが w_1 から w_2 へ変化することで知覚される色の差が最大となるが、分光反射率 R_2 の物体は異なる照明光スペクトル w_1, w_2 の下でも同じ色として観察者に知覚される場合を考える。特定色変化効果は、等色効果の式 (6) を次のように変更することで定式化できる。

$$\begin{aligned} & \underset{w_1, w_2}{\text{maximize}} \|U(CR_1 w_1) - U(CR_1 w_2)\| & (7) \\ \text{s.t.} \quad & \|U(CR_2 w_1) - U(CR_2 w_2)\| < \delta, \\ & \|U(Cw_1) - U(Cw_2)\| \leq \delta_{\text{white}}, \end{aligned}$$

$$|C_Y w_1 - C_Y w_2| \leq \delta_Y$$

等色効果と同様に、 δ_{white} を小さく設定するほど各照明下での白の色の見えが等しくなるが、対象色の見えの変化量が小さくなる場合がある。その際には求められる演出効果に応じて、許容できる δ_{white} に調節する。

4. 照明システムの構成

本照明システムは、スペクトル計測装置、マルチチャネル LED、カラーシミュレーション・ソフトウェアの三つの要素で構成される。

4.1 スペクトル計測装置

分光スペクトルが既知であることを前提とした照明光下で、分光放射輝度計若しくはハイパースペクトルカメラを使用して物体からの反射光スペクトルを計測する。物体表面の分光反射率は、反射光スペクトルを照明光スペクトルで除算することで求められる。計測対象が単色からなる場合には分光放射輝度計（通称、分光計）を使用すればよい。計測対象が複数の配色からなるテクスチャを有する場合には、ハイパースペクトルカメラを用いることで各色に相当する反射光スペクトルを同時に記録することが可能になる。

4.2 マルチチャネル LED

マルチチャネル LED は、可視光域の異なる波長にスペクトルのピークをもつ複数種類の LED で構成される。各 LED の明るさを制御することで任意の照明光スペクトルを有する照明光を合成し、物体へ照射する。

式 (6) と式 (7) における照明光スペクトル w_i ($i = 1, 2$) は、 N 種類の単色 LED の分光スペクトル e_k ($k = 1, 2, \dots, N$) の線形和として、次式で表現する。

$$w_i = \sum_{k=1}^N \alpha_{i,k} e_k \quad (8)$$

$\alpha_{i,k}$ は各 LED の明るさ ($0 \leq \alpha_{i,k} \leq 1$) を示す。式 (8) を用いて、式 (6) または (7) を満たす $\alpha_{i,k}$ を算出し、 $\alpha_{i,k}$ に基づいて各 LED の発光強度を制御することで、目的の視覚効果に最適化された照明光スペクトルを合成することができる。

4.3 カラーシミュレーション・ソフトウェア

カラーシミュレーション・ソフトウェアは、物体の分光反射率とマルチチャネル LED を構成する各 LED の照明光スペクトルのデータセットをもち、対象とする物体と目的とする照明効果に応じて最適化された照明光スペクトルを計算する。そして照明光スペクトルを生成するための各 LED の明るさ（式 (8) の各 $\alpha_{i,k}$ ）を算出する。式 (5) に示すメタメリズムが成立する条

件と成立しない条件を導くには2通りの方法がある。一つ目は照明光スペクトル w , w' の組み合わせを固定し、式 (5) を満たす物体の分光反射率 R_1 , R_2 の組合せを求める方法。二つめは物体の分光反射率 R_1 , R_2 の組合せは固定し、式 (5) を満たす照明光スペクトル w , w' の組合せを求める方法である。本システムを実装したファッションショーにおいては、一般にドレスの素材が先に決まるため、後者の方法を用いた。

5. 本照明システムを用いた舞台演出の実装

本照明システムのファッションショーにおける演出用照明としての有効性を検証するため、Paris Fashion Week 2024 におけるステージに本照明システムを実装した。まず 5.1~5.4 では、ファッションショーの事前に行ったドレスの素材の分光反射率の測定及び最適な照明光スペクトルの計算について述べる。また、マルチチャネル LED で実際に合成された照明光下におけるドレスの色の变化を定量的に評価した結果を示す。更に 5.5 で、本番ステージでの照明装置のレイアウトと、実際に演出されたドレスの色の变化を示す。

5.1 ドレスに使用した素材

今回のファッションショーで使用したドレスは、デザイナーが選定したフォトクロミック素材で製作される。フォトクロミック素材は太陽光などの紫外線を含む光が当たると化学構造が変化し、透明から有色へと変化する特性をもつ。また着色状態は紫外線の照射を止めても一定時間は維持されるが、その後は徐々に透明に戻る特性をもつ。今回使用したフォトクロミック素材は 380 nm の紫外線に最も強く反応する。図 3 にドレスで使用した2種類のフォトクロミック素材が、透明から有色に変化する様子を示す。

5.2 ドレス素材の分光反射率の計測

紫外線を照射して有色化させたフォトクロミック素材の分光反射率を計測した。照明光には、可視波長域で連続スペクトルを有する人工太陽光照明 (SOLAX XC-500AF, SERIC inc., 平均演色評価数 $R_a = 98$, 色温度約 5500 K) を使用した。また紫外線ライトとして、中心波長 380 nm の紫外線 LED を使用した。図 4 に計測の様子を示す。暗室内で人工太陽光照明 2 灯を使用し、被写体に対して左右 45 度から照射した。また有色状態を保つため、紫外線 LED も照射し続けた。ショー本番では白の色のインナーの上にフォトクロミック素材を着用するため、被写体は白色板の上に取り付け、その反射光は分光放射輝度計 (SR-3, TOPCON) を用いて正面から計測した。次に紫外線 LED を消した状態で白色板からの反射光を計測し、人工太陽光照明の照明光スペクトルとした。図 5 に分光反射率の計測結果を示す。

5.3 マルチチャネル LED 照明

計測実験用及びステージ演出用の照明として、12 色の可視 LED

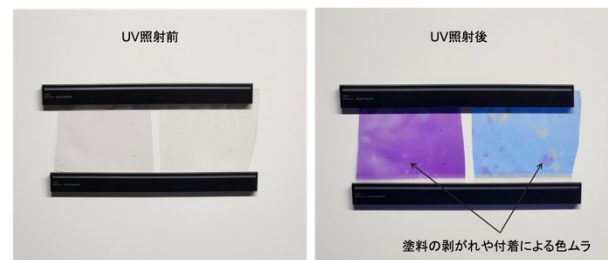


図 3 紫外線照射前後のフォトクロミック素材の色

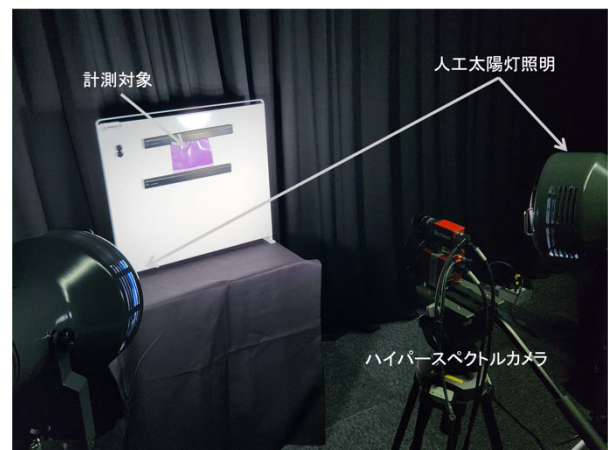


図 4 素材の反射スペクトルの計測

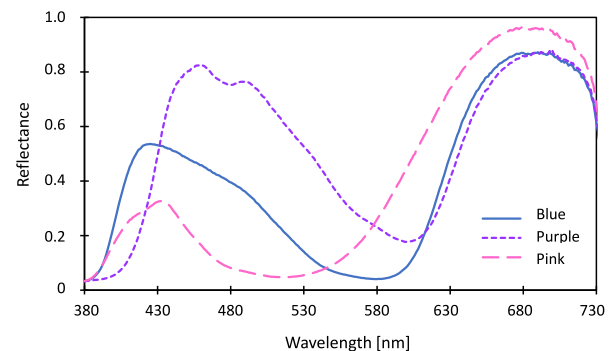


図 5 ドレス素材の分光反射率

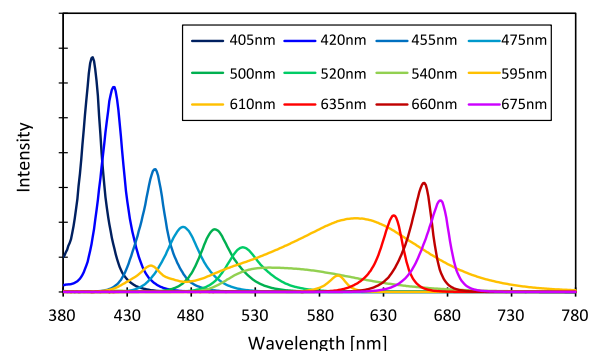


図 6 マルチチャネル LED の分光特性

をもつマルチチャネル LED 照明装置 (LED Cube, Thouslite Inc.) を使用した。各色の LED の分光スペクトルを図 6 に示す。

本体は箱型の形状をしており、その一面に LED が配置され、拡散板を介して光が射出される。本装置はシリアル通信により外部から各 LED の明るさを制御することが可能である。また

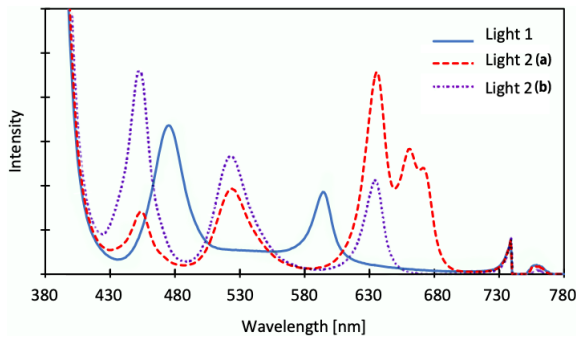


図 7 Light 1 と特定色変化効果 Light 2(a) と等色効果 Light 2(b) の照明光スペクトル分布

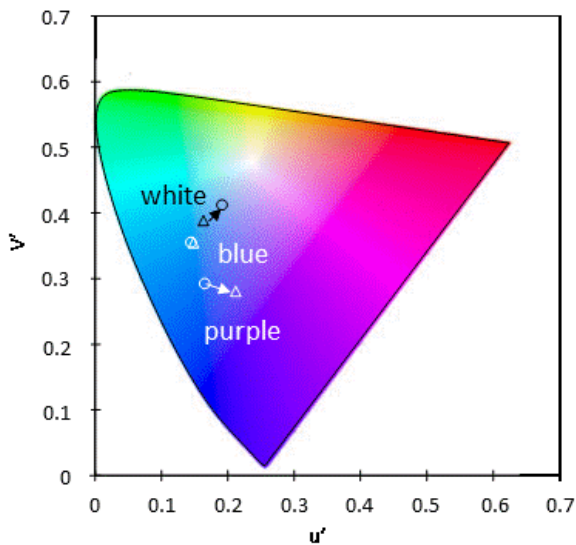


図 8 特定色変化効果の測定結果

照射対象の領域が広い場合には、複数の同装置をデジジェーション接続することで同時に制御することが可能である。

5.4 色変化の定量的評価

メタメリズムを応用した 2 通りの演出における色の変化を計測し、CIE $u'v'$ 色空間で評価した。演出の作成にあたって式 (6) 及び (7) のパラメータである δ と δ_{white} は、デザイナーと協議の上で $\delta = 1.0 \times 10^{-1}$ 、 $\delta_{\text{white}} = 8.5 \times 10^{-2}$ とした。

特定色変化効果における照明光スペクトルを図 7(a) に、また CIE $u'v'$ 色度図上での色の変化を図 8 に示す。照明光スペクトルにおける 380 nm 付近のピークと 730 nm 以降のエネルギー分布は励起光源として用いた UV ライトによるものである。照明を Light 1 から Light 2(a) への切り替えにより異なる色の見えに変化した紫色の素材では $u'v'$ 色差（以降、色差と呼ぶ）は 4.8×10^{-2} であった。一方で、照明を切り替えてもほとんど見た目の色に変化がなかった青色の素材に関する色差は 3.1×10^{-3} であった。なお照明 Light 1 と Light 2(a) の色の色差は 3.7×10^{-2} であった。

次に等色効果における照明光スペクトルを図 7(b) に、CIE $u'v'$ 色度図上での色の変化を図 9 に示す。Light 1 のスペクトル分布は特性色変化効果の実験と同じである。Light 2(b) の

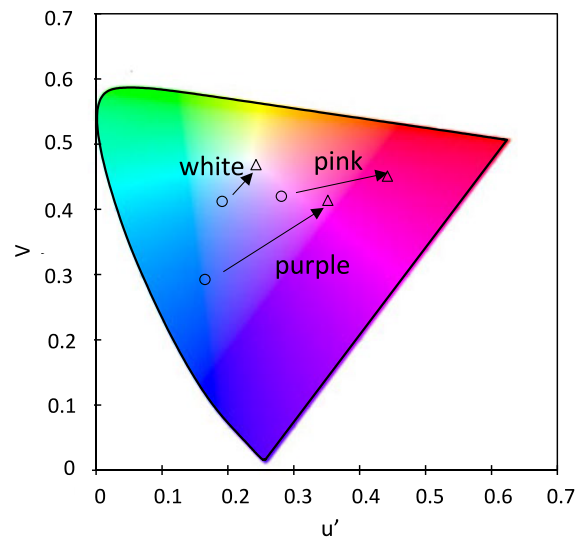


図 9 等色効果の測定結果

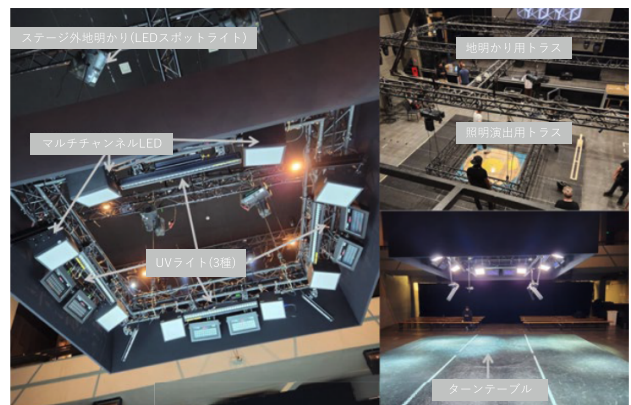


図 10 LED と UV ライトの設置状況

スペクトル分布を特定色変化効果の Light 2(a) と比較すると、ピーク波長の高さに加え、赤色に相当する 630 nm 以降のスペクトル形状が大きく異なっている。ピンクと紫の素材の色差を計算した結果、両素材が異なる色に知覚された Light 1 の下では 1.9×10^{-1} と大きく、Light 2(b) に切り替えれば同じ色に知覚された際の色差は 9.8×10^{-2} であった。なお照明 Light 1 と Light 2(b) の色の色差は 8.1×10^{-2} であった。

5.5 Paris Fashion Week 2024 における演出

演出用照明として 5.3 で述べたマルチチャンネル LED を 8 セット用いた。各マルチチャンネル LED はステージの上に箱型に組んだトラスフレームに取付けられ、モデルの立つステージ中央を照らすように設置角度を調整した。またフォトクロミック素材を着色するための UV ライト 12 個を同様にトラスフレームへ設置した (図 10)。

照明光の制御は、照明光スペクトルを w_1 から w_2 へ瞬時に切り替えるカット型の演出と、 w_1 から w_2 へと徐々に値を変化させるディゾルブ型の演出の 2 種類を採用した。ディゾルブ型の演出は、式 (8) に記した各 LED の強度を制御する $\alpha_{i,k}$ の値を $\alpha_{1,k}$ から $\alpha_{2,k}$ へと時間的に連続変化させる。一般的に、

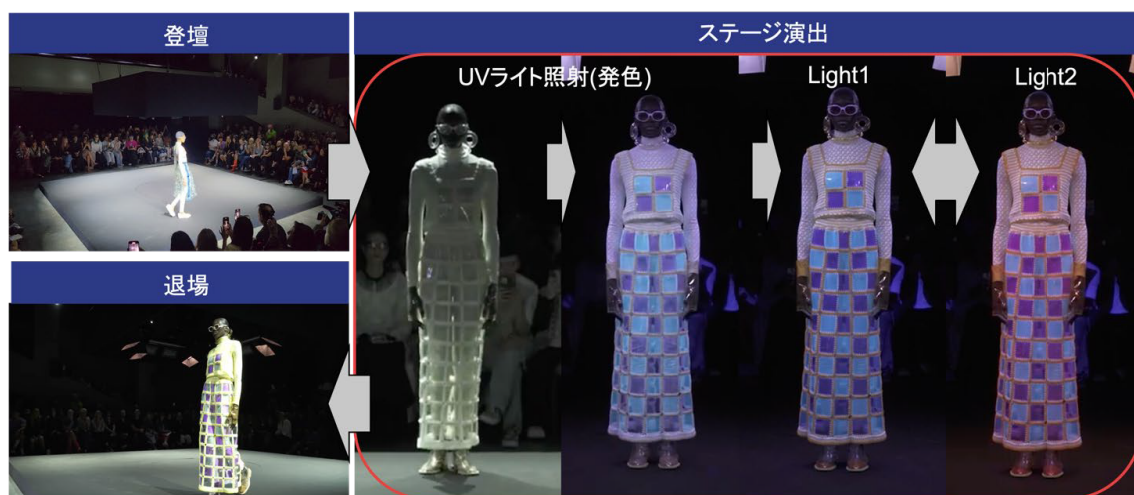


図 11 ショーの演出の流れ

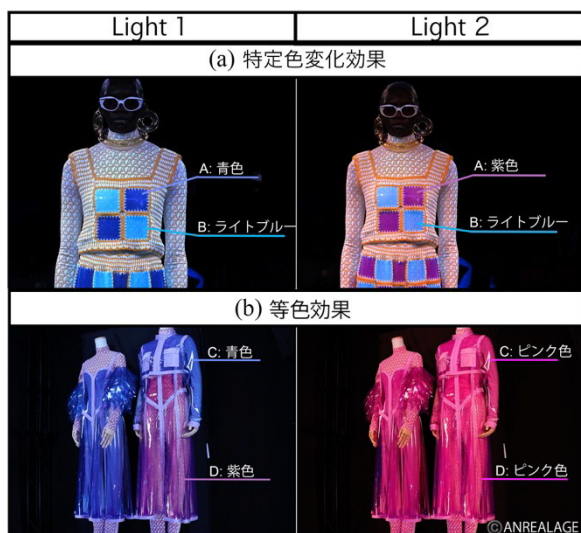


図 12 照明光スペクトルを最適化した提案システムによる演出

アニメーションなどの時間経過に基づく変化は、自然界の物体が重力や摩擦などによって加速・減速することから、時間に比例する等速変化は不自然に感じられることが知られている。今回の照明光の切り替えにおいても、 $\alpha_{1,k}$ から $\alpha_{2,k}$ へ時間に比例して値を変化させたところ違和感を生じることが事前検証で明らかになった。そこで、今回の照明演出では $\alpha_{1,k}$ から $\alpha_{2,k}$ へシグモイド関数に基づき変化するように実装することで、見た目の色の変化に関して連続的かつ緩急のある視覚効果が実現された。

今回のドレスの色の演出は 2 段階で構成され、第 1 の演出は紫外線による透明から有色への変化、第 2 の演出は本システムによるメタメリズムを応用した見た目の色の変化とした (図 11)。モデルが舞台上がると UV ライトが点灯され、衣装のフォトクロミック素材が透明から着色された状態に変化する。続けて本システムの照明光を切り替えることで、特定色変化効果によるドレスの色の移り変わりを演出した。特定色変化効果の演出では、青色とライトブルーに着色されたフォトクロミック素材

のうち、青色のみ見え方が変わり、紫色とライトブルーの組み合わせに変化した (図 12 (a))。等色効果の演出では、着色後に青色と紫色になった 2 種類のフォトクロミック素材が、照明システムの視覚効果によって両方ともピンク色のドレスへと変化した (図 12 (b))。

いずれの演出においても観客からは感嘆の声が上がり、本照明システムが大規模な舞台においても有効で、観覧者へ印象的な体験を与える照明演出の有効性が確認された。

6. ま と め

本稿では、対象物の分光反射率に基づいて照射する照明スペクトルを最適化することで、メタメリズムによる等色効果と特定色変化効果の二つの照明効果を実現する照明システムについて述べた。また、本システムをファッションショーに適用し、Paris Fashion Week 2024 で実施した演出について紹介した。

本技術は、舞台・ライブ・ショーウィンドーなどのエンターテインメント、広告分野で活用だけでなく、アパレル・製造・建築などの分野におけるデザイン・検査・修繕など幅広い場面でも応用可能と考える。

謝辞 Paris Fashion Week 2024 での実証実験において、株式会社アンリアレージには実装機会の提供及び演出作成・衣装制作、また株式会社 IMAGICA EEX には舞台照明の構築・運用で協力頂きました。

文 献

- (1) A. David, T. Esposito, K. Houser, M. Royer, K.A.G. Smet, and L. Whitehead, "A vector field color rendition model for characterizing color shifts and metamerism mismatch," LEUKOS 16, pp.99–114, 2020.
- (2) 村田幸男, "メタメリズム (等色条件) について," 繊維機械学会, 技術論文, pp.279–291.
- (3) 釜口昌平, "歯の審美性と色の調和," 光学, vol.34, no.2, pp.111–112, 2005.
- (4) A. Tuzikas, A. Zukauskas, R. Vaicekauskas, A. Petrulis, P. Vitta, and M. Shur, "Artwork visualiza-

tion using a solid-state lighting engine with controlled photochemical safety,” Opt. Express, vol.22, no.14, pp.16802–16818, 2014.

- (5) B. Barati, E. Karana, D. Sekulovski, and S. Pont, “Retail lighting and textiles: Designing a lighting probe set. Lighting Research and Technology,” LR&T, vol.49, no.2, 2015.
- (6) K. Ito, H. Higashi, Y. Ota, and S. Nakauchi, “Spectral-difference enhancing illuminant for improving visual detection of blood vessels,” Proc. ICAICTA, 2015.
- (7) S. Nakauchi, T. Himeno, and K. Nishino, “An efficient designing method of spectral distribution of illuminant for the enhancement of color discrimination,” Proc. CIC 19th, pp.304–309, 2011.
- (8) A. David, T. Esposito, K. Houser, M. Royer, K.A.G. Smet, and L. Whitehead, “A vector field color rendition model for characterizing color shifts and metamerism mismatch,” LEUKOS, vol.16, no.2, pp.99–114, 2020.
- (9) D. Miyazaki, K. Nakamura, M. Baba, R. Furukawa, M. Aoyama, S. Hiura, and N. Asada, “A first introduction to metamerism art,” Proc. SIGGRAPH Asia, Posters, 17:1, 2012.
- (10) M. Tsuchida, A. Kimura, and N. Harada, “Color saturation control by modulating spectral power distribution of illumination using color enhancement factors,” J. EI, vol.30, no.6, 2021.
- (11) M. Yamaguchi, M. Tsuchida, T. Matsumoto, T. Tokunaga, and T. Mochizuki, “Controlling the color appearance of objects by optimizing the illumination spectrum contributors,” Proc. SIGGRAPH, e-tech, 2024.

(IMQ 研究会提案, 2025 年 5 月 24 日受付,
2025 年 9 月 20 日再受付)



松元 崇裕

2012, 慶應義塾大学理工学研究科修士課程を修了。同年, 日本電信電話(株) サービスエボリューション研究所に入所。2016~2021 (株) NTT ぶららにてスポーツ向けライブ配信 PF の企画・開発に従事。2022 現所属へ復職。同年に慶應義塾大学理工学研究科博士課程を修了。専門はヒューマンロボットインタラクション, 3D 点群メディア処理, ハイパースペクトルイメージングメディア処理。博士(工学)。現在, NTT 人間情報研究所サイバー世界研究プロジェクト主任研究員。



山口 真理子

2015, 東京工業大学総合理工学研究科修士課程を修了。同年, 日本電信電話(株) サービスエボリューション研究所に入所。超高臨場感通信技術 Kirari! の被写体抽出技術にの研究開発に従事。2018~2022 (株) NTT ぶららにて EC プラットフォームのコア開発に従事。2022 現所属へ復職。専門はカメラビジョンを用いた画像処理技術, 感性情報処理技術。現在, ハイパースペクトルカメラ画像を用いた新演出についての研究開発に従事。現在, NTT 人間情報研究所サイバー世界研究プロジェクト研究主任。



土田 勝 (正員)

2002, 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程を修了。同年, 日本電信電話(株) コミュニケーション科学基礎研究所に入所。2003~2006, (独) 情報通信研究機構(NICT)へ出向, ナチュラルビジョンの研究開発プロジェクトに従事。同プロジェクト終了後, (株) NTT データにて委託研究や実証実験に従事した後, 2009 現所属へ復職。同年より立命館大学客員研究員, 2015 より東京学芸大学非常勤講師を兼務。文化財デジタルアーカイブや医療分野等での分光画像処理技術, 画像認識技術の開発に従事。博士(工学)。現在, NTT コミュニケーション科学研究所メディア情報研究部研究主任。

ESS ニュース

NOLTA, IEICE 特集号

Guest Secretary 宇佐美雄生

特集号タイトル：

Special Section on Recent Progress in Neuromorphic AI Hardware

掲載誌：

NOLTA, IEICE, 2026 年 1 月発行

現在、あらゆる分野で AI 技術の活用が急速に進む一方、その消費電力の増大は持続可能な社会の実現に向けた大きな課題となっています。この課題に対処するために、エネルギー効率の高い演算機能を有する脳を模倣したニューロモルフィック AI ハードウェアの開発が求められています。

2019 年より毎年度開催されている国際シンポジウム (International Symposium on Neuromorphic AI Hardware) では、物質に内在するダイナミクスをニューロモルフィック AI の演算資源として活用する材料研究、ニューロモルフィック AI の数理モデル研究、材料及び数理モデルを AI システムとして構築する回路研究、更にはロボットへの応用研究という、四つの主要分野に関する発表と議論の場を提供してきました。これにより、ニューロモルフィック AI ハードウェア実現に向けた異分野融合を推進しています。本特集は、国際シンポジウム発表者を対象とした企画として、昨年度に続き 2 年連続で実施されました。2025 年 3 月に開催された第 6 回国際シンポジウムの発表者から投稿された論文が NOLTA, IEICE の通常の査読プロセスに従って審査され、8 件の論文が掲載されることとなりました。ニューロモルフィック AI ハードウェアに関する最新の研究成果を、是非ご覧頂きたく存じます。

最後に、貴重な研究成果をご投稿頂きました著者の皆様、本特集の編集作業にあたり多大なご協力を頂きました編集委員の皆様、査読委員の皆様、事務局の皆様に深く感謝申し上げます。



宇佐美雄生 (非会員)

2015 大阪大・理・化学卒。2019 日本学術振興会特別研究員 (DC2)。2020 同大学大学院博士後期課程了。博士 (理学)。同年九州工業大学・生命体工学研究科助教着任。現在に至る。材料を用いた演算デバイスに関する研究に従事。

ESS ニュース

NOLTA, IEICE 特集号

Guest Secretary 安田裕之

特集号タイトル：

Special Section on Nonlinear Science and Its Applications to Ultra-Early Disease States

掲載誌：

NOLTA IEICE, 2026 年 1 月発行

近年の非線形科学、数理モデリング、データ駆動型アプローチの進展により、生体システムにおける疾患の進行過程や早期介入に関する新たな知見が得られてきています。健康から疾患への臨界遷移における前疾病状態（pre-disease states）の検出と治療は、現代医学において極めて困難でありながら重要なフロンティアの一つです。

本特集号は、非線形理論とその関連分野における最近の進展を扱い、超早期医療への応用を目的として企画されました。ご投稿頂いた論文は、NOLTA, IEICE の査読プロセスに従い審査され、最終的に 8 編の論文が掲載されることとなりました。これらの論文は、J-STAGE (<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/nolta/~char/ja>) にて無料でご覧頂けます。

最後に、本特集号の企画並びに編集作業にあたり、多大なご協力を頂きました NOLTA, IEICE 編集委員会、IEICE 事務局、編集委員、査読委員の皆様、そして貴重な研究成果をご投稿頂いた著者の皆様に深く感謝申し上げます。



安田裕之（正員）

2011 東京理科大・工・電気工卒。2016 同大学院博士後期課程了。博士（工学）。同年東大生産技術研究所特任研究員、2017 同特任助教、2020 同大学院法学政治学研究科助教を経て、2023 より同大国際高等研究所 IRCN 特任助教。非線形力学、複雑系数理モデル、同期理論、組合せ最適化問題の研究などに従事。2014 通ソ Best Paper Award 受賞。IEEE 会員。

研究会に行こう！

「研究会に行こう！」では基礎・境界ソサイエティの研究会などの様子を御紹介しています。情報交換や懇親、新たな研究との出会いの場としてはいかがですか？

■バイオメトリクス研究会（BioX）

バイオメトリクスは、ヒトやモノを認識・認証する様々な技術に関連する研究分野であり、生体認証はパーソナルユースから社会インフラに至るまで、実社会において必要不可欠な技術になりつつあります。

バイオメトリクス研究会では、センサ、デバイス、生体計測、信号処理、パターン認識、機械学習、セキュリティ、システム運用や社会科学的な諸問題までといった、バイオメトリクス及び関連する認識・認証技術を広範に扱っています。複合領域の研究分野のため、多岐にわたる研究会との共同開催を行っています。今後の活動は以下のようになっています。

開催月	開催地	テーマ	共催／併催
2026年3月	種子島	バイオメトリクスとコミュニケーション	クラウドネットワークロボット研究会（CNR）
2026年5月	未定	マルチモーダル認証、信号・映像・マルチメディアデータの取得・処理・解析と応用	画像工学研究会（IE）、信号処理研究会（SIP）、医用画像研究会（MI）、メディア工学研究会（ITE-ME）、情報センシング研究会（ITE-IST）
2026年7月	札幌	セキュリティ、一般（セキュリティサマーサミット2026）	情報セキュリティ研究会（ISEC）、技術と社会・倫理研究会（SITE）、情報通信システムセキュリティ研究会（ICSS）、マルチメディア情報ハイディング・エンリッチメント研究会（EMM）、ハードウェアセキュリティ研究会（HWS）、コンピュータセキュリティ研究会（IPSJ-CSEC）、セキュリティ心理学とトラスト研究会（IPSJ-SPT）
2026年10月（予定）	沖縄（予定）	バイオメトリクス一般	
2026年11月（予定）	未定	バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム（SBRA2026）	

毎年11月には、バイオメトリクス及び関連分野の研究者が一堂に会する「バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム（SBRA）」を開催しています。SBRAでは、招待講演、一般発表、ポスター発表に加えて企業講演や展示があり、企業の研究者も多数ご参加頂いています。2024年は群馬県の伊香保温泉で開催し、風情と格式のある温泉旅館の会場でディープな議論が交わされました。懇親会では毎年、各地から選りすぐりの日本酒が振る舞われ、参加者同士の親睦を深めるひとときをお楽しみ頂いています。

バイオメトリクス研究は、異分野との接点が多いため、思いもよらない視点からコメントをもらえることが多々あります。様々な研究分野の方々のご参加を心よりお待ちしております。



高橋健太（正員）

2000 東京大学大学院理学系研究科情報科学専攻修士課程修了。2012 同大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻博士後期課程修了。2000 日立製作所入社。以来、バイオメトリクス、認証、暗号、情報セキュリティなどの研究開発に従事。市村産業賞、長尾真記念特別賞、ドコモ・モバイル・サイエンス賞など受賞。ISO/IEC SC37 Expert、静岡大学客員教授、東京大学非常勤講師。

岡大学客員教授、東京大学非常勤講師。

■高度交通システム研究専門委員会（ITS）

高度交通システム（Intelligent Transport Systems：ITS）は、情報通信技術（ICT）の進展に伴い急速に研究開発が進められてきました。本研究会も1999年に発足して以来、高度なセンシング技術、画像処理、情報通信、そしてそれらを支える高信頼な制御技術などの広範にわたる分野の研究者や技術者が一堂に会し、活発な議論を繰り広げてまいりました。そしてこれからも未来のモビリティ社会を創造するための知的基盤を構築する場であり続けることを目指しています。

本研究会は、今年度も年間5回の研究会やワークショップを開催してまいります。実施回によってはハイブリッド開催を積極的に行い、対面での熱意ある議論と、地理的制約を超えたオンラインでの参加メリットの両立により、より多くの方々に議論に参加頂く機会を引き続き提供してまいります。



図1 第1回研究会@名古屋大学. 講演会場の様子



図2 ワークショップ@愛知県豊田市 (a) スマートポール交差点の見学の様子. (b) 講演会場の様子.



図3 第2回研究会@群馬大学 次世代モビリティ社会実装研究センター CRANTS での自動運転バス体験.

- ・ 第1回研究会（7月開催）：名古屋大学にて開催（図1）.
- ・ ワークショップ（7月開催）：愛知県豊田市開催. AA-ITS 研究会と併催. スマートポール交差点見学ツアーを開催（図2）.
- ・ 第2回研究会（9月開催）：群馬大学開催. 情報処理学会，電気学会の ITS 研究会との連催. 群馬大学次世代モビリティ社会実装研究センター CRANTS 見学（図3）.
- ・ 第3回研究会（11月開催）：大分県別府市開催. 高信頼制御研究会，ワイドバンドシステム研究会などとの共催.
- ・ 第4回研究会（2月開催）：北海道大学開催. 画像工学研究会，映像情報メディア学会などとの共同開催.
- ・ 第5回研究会（3月開催）：愛知県常滑市中部国際空港開催. 電気学会の ITS 研究会との連催.

広範な ITS 研究ゆえ，多様な分野の研究会と連携をし，多角的な視点からの議論を促進しています．また，各回，通常の研究

発表に加え、最先端の ITS 実証実験施設の見学会や、社会実装の最前線で活躍されている方々を招いた招待講演などを企画し、参加者の皆様に新たな刺激とインスピレーションを提供できるよう努めます。

ITS が社会の根幹を変革しようとしている今、本研究会での研究に基づく議論は、技術開発の種として極めて重要と考えています。皆様の積極的な研究発表と参加を心よりお待ちしております。



羽多野裕之（正員：シニア会員）

平 20 名古屋大学工学研究科電子情報システム博士課程後期。平 20～平 25 静岡大・工・電気電子・助教、平 25～平 27 宇都宮大・工・情報・助教、平 27～平 31 同准教授、平 31 より三重大・工・電気電子・准教授、Beyond-5G/6G 無線通信応用技術研究センター兼務、博士（工学）、GNSS (Global Navigation Satellite System)、

レーダー／センサネットワーク、高度交通システム (ITS)、及び移動体通信に関する研究に従事。本会高度交通システム研究専門委員会委員長、車載 ICT と AD/ADAS-ITS インフラを核とする地域 ICT プラットホームに関する特別研究専門委員会幹事、IEEE、情報処理学会、自動車技術会、各会員。

■回路とシステム研究会（CAS）

回路とシステム（CAS）研究会の名称に含まれる『システム』という言葉は、切り口次第では理論的なモデルの議論をすることも、電子回路的な実装の議論をすることもできます。そのためか本研究会には、一見共通項がないように見えるほど幅広い分野の専門家が集まり、互いの研究に素直に興味をもち、議論を通して互いに刺激を与えています。更に、年 5 回開催する研究会全てが他研究会との共催であることも、多様な視点からの議論を後押ししています。

本研究会は、若手研究者のデビューの格好のデビューの場にもなっています。発表の 25 分間だけでなく、発表後の休憩時間や懇親会などでも、その日初めて顔を合わせた若手とベテラン研究者、そして企業からの参加者が入り混じって会話している光景は珍しくありません。

また、研究会ごとに魅力的な発表を行った若手を学生優秀賞で表彰しており、更に IEEE CAS Society Japan Joint Chapter の協賛を得て、Chapter Best Student Award への優秀発表の推薦も行っております。

CAS 研究会関連の今年度の予定は次のとおりです。皆様の研究会へのご参加をお待ちしております。

6 月	研究会（八戸工業大学 VLD, MSS 共催）	テーマ：システムデザイン技術及び一般
9 月	ソサイエティ大会（岡山大学）	
10 月	研究会（名古屋大学 NLP 共催）	テーマ：NLP, CAS, 一般
11 月	研究会（高知県 MSS, IPSJ-AL 共催）	テーマ：システムのモデリングと制御・検証・最適化の手法、機械学習的アプローチ及び一般
1 月	研究会（工学院大学 ICTSSL 共催）	テーマ：学生セッション、一般
3 月	研究会（沖縄 CS 共催）	テーマ：ネットワークプロセッサ、通信のための信号処理回路、無線 LAN/PAN, 一般
	総合大会（九州産業大学）	



高瀬恭英（正員）

平 15 東工大・工・電気電子卒。平 17 年同大学院修士課程了。現在、(株)村田製作所でアナログ IC 開発に従事。IEEE 会員。

システム数理と応用研究会（MSS）

システム数理と応用研究会（MSS）は、電子情報通信分野をはじめとする広範な領域におけるシステムの設計・解析・制御・検証を、数理的手法に基づいて体系的に探究する研究会です。本研究会では、システム数理学の基礎理論から、サイバーフィジカルシステム（CPS）、社会・ビジネスプロセス、生体・ヒューマンシステム、及びデータ駆動型知能システムまで、多様な応用分野を対象としています。グラフ理論、ゲーム理論、最適化、離散事象・ハイブリッドシステム、確率モデルなどの従来の理論的基盤に加え、データサイエンスや機械学習、AI を活用したモデリング・制御、更には量子計算やマルチエージェントシステムとの融合的研究も推進しています。

2026 年 1 月以降の研究会は以下のように開催予定です。

2025 年度

2025 年 1 月 8 日, 9 日: オンライン (単独開催)

2025 年 3 月 18 日, 19 日: シンフォニアテクノロジー響ホール伊勢 (非線形問題研究会 (NLP) 共催)

2026 年度 (予定)

6 月: 回路とシステム研究会 (CAS), VLSI 設計技術研究会 (VLD) 共催

11 月: 回路とシステム研究会 (CAS) 共催, 情報処理学会アルゴリズム研究会 (IPSJ-AL) 連催

2027 年 1 月: 単独開催

2027 年 3 月: 非線形問題研究会 (NLP) 共催

これらの研究会活動に加え, “International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications” に参画し, 英文論文誌 A では「システム数理と応用」小特集を企画しています。更に, 年間の発表論文の中から 1 件を優秀論文賞として表彰しています。また, 2026 年 1 月の研究会では, 学生さんを対象に Work-in-Progress (WIP) セッションを開催します。WIP セッションでの発表に対する表彰制度もあります。

MSS 研究会は, 分野横断的でオープンな議論の場として, 産学官の研究者・技術者が数理的アプローチを通じて新たなシステム科学の発展に寄与することを目指しています。皆様の積極的なご参加を心よりお待ちしております。なお, MSS の活動の詳細は <https://www.ieice.org/~mss/> をご参照ください。



宮本俊幸 (正員)

1992 阪大・工・電子工卒。1994 同大学院工学研究科博士前期課程了。1997 同大学院工学研究科博士後期課程了博士 (工学)。1997 阪大工学部助手, 2003 阪大大学院工学研究科講師, 2006 同大学院助教授, 2022 阪大情報科学部教授, 現在に至る。2000-2001 カーネギーメロン大学客員研究員。離散事象システム, マルチエージェント

システムなどの研究に従事。2025 よりシステム数理と応用研究専門委員会委員長。

■思考と言語研究会 (TL)

思考と言語研究会 (TL) 委員長の坪田康です。思考と言語研究会では, 人間の知能の根幹に深く関わる「思考と言語」の本質やその運用を探究しています。また, 教育・学習との関係を考察しつつ, 工学的応用の可能性についても検討しています。常に新たなテーマを掲げ, 探究の幅を広げてきました。

2019 年度からは「芸術と言語」をテーマとした研究会を開始しました。2022 年度から 2023 年度前半にかけての研究会を通じて, 「エージェントと環境との意味的インタラクション」が全てのテーマを貫く共通の視点であるという認識が共有されました。近年は, 「ELF」, 「会話分析」, 「マルチモーダル・インタラクション」, 「異文化間コミュニケーション」に加え, 「Assistive Language Tools」や「Generative AI」などのテーマも取り入れ, より充実した研究領域となっています。

2020 年度以降は主にオンライン開催が中心でしたが, 2021 年度からは対面形式の研究会も再開し, オンラインやハイブリッド形式での開催も継続しています。更に, 2023 年度からは台湾・国立清華大学を会場としたハイブリッド開催を実施し, 国際的な研究会へと発展しつつあります。

今年度のテーマも, 「省察を通じた学び」, 「メタバース」, 「人間の心的特性に寄り添った学習環境のデザイン」, 「芸術と言語」, 「場の共創」, 「創発とイノベーション」, 「言語と学習」, 「言語の学習」, 「人間の言語処理と学習」, 「ELF」, 「会話分析」, 「マルチモーダル・インタラクション」, 「異文化間コミュニケーション」, 「Assistive Language Tools」, 「Generative AI」, 「知識・概念・語彙とその構造」, 「言語景観」, 「言語接触」, 「通訳・翻訳」, 「異文化対話」など, 非常に多彩です。

皆様のご発表・ご参加を心よりお待ちしております。

開催スケジュール

第 1 回: 2025 年 7 月 12 日 (土) オンライン開催 (主: オンライン, 副: 愛媛大学)

テーマ: 「省察を通じた学び」, 「メタバース」, 「人間の心的特性に寄り添った学習環境デザイン」, 「芸術と言語」, 「場の共創・創発とイノベーション」, 「言語と学習」, 「言語の学習」

第 2 回: 2025 年 9 月 8 日 (月)~9 日 (火) 早稲田大学リサーチイノベーションセンター

テーマ: 「人間の心的特性に寄り添った学習環境のデザイン」

- 第3回：2025年12月13日（土）ハイブリッド開催（主：オンライン、副：立命館大学大阪いばらきキャンパス）
 テーマ：「ELF・会話分析・マルチモーダルインタラクション・異文化間コミュニケーション」, 「Assistive language tools・generative AI・知識・概念・語彙とその構造」, 「言語景観・言語接触・通訳翻訳・異文化対話・言語と学習・言語の学習」
- 第4回：2026年3月5日（木）～6日（金）ハイブリッド開催（主：オンライン、副：国立清華大学（台湾））予定
 テーマ：「ELF・会話分析・マルチモーダルインタラクション・異文化間コミュニケーション」, 「Assistive language tools・generative AI・知識・概念・語彙とその構造」, 「言語景観・言語接触・通訳翻訳・異文化対話・言語と学習・言語の学習」



坪田 康（会員）

1999 京都大学工学部情報学科卒業。2002 京都大学大学院情報学研究科知能情報学専攻博士後期課程中退。2002 より京都大学学術情報メディアセンター助手を務め、2015 より京都工芸繊維大学基盤科学系准教授。コンピュータを用いた外国語学習に関する研究に従事。

■安心・安全な生活と ICT 研究会（ICTSSL）

私たちは突発的に発生する地震や豪雨からクマの出没に至るまで様々な脅威に向かいながら日々を過ごしています。安心・安全な生活と ICT 研究会（ICTSSL）は、このような脅威に立ち向かうにあたり、情報通信技術がどのように貢献できるかをテーマとする研究会です。内容としても、「そもそも安心・安全と生活とは何か？」から、様々な事例に対処紹介まで幅広く扱っています。特に、研究会としては『現場主義』を大切にしており、開催場所、見学会、選奨で大きな特徴があります。

2025 年度の研究会は 5 月は神戸市長田区、7 月は仙台、10 月は富山市と過去大きな災害に見舞われた場所で開催し、当時の模様やその後の対策、復興した姿を感じることができました。2026 年 1 月は、東日本大震災の際に多くの帰宅困難者を受け入れた工学院大学新宿キャンパスで実施予定です。

また、研究会と併せて行っている見学会では、7 月にネクスコ東日本様の高速道路管制センター、10 月に富山県危機管理センターの施設を訪れました。インフラを維持すること、緊急時に対応する体制や訓練を実施することの重要性を感じることができました。

発表に対しても、優秀研究賞や研究奨励賞のほかに、現場での実証事例に関する研究を奨励する「安全・安心ベストプラクティス賞」を制定しており、様々な脅威に対抗できる ICT 技術の発展を推奨しています。

研究会は、現地開催とオンライン配信のハイブリッドで実施していますが、現場主義に則り現地での参加を期待しております。



水野 修（正員：シニア会員）

1985 年東工大・修士課程了。日本電信電話（株）にて情報通信サービスの研究開発などに従事。2009 年 9 月より工学院大学。現在、同大学教授。災害・減災のための通信方式、情報指向ネットワークとセンサーネットワーク、IoT セキュリティなどに興味をもつ。博士（国際情報通信学）。

■ハードウェアセキュリティ研究専門委員会（HWS）

ハードウェアセキュリティ研究専門委員会（HWS）は、2018 年 4 月から常設の研究専門委員会となり、前身の時限研専・特別研専を含めて約 9 年半にわたり研究会及びフォーラムを開催してきました。HWS では、ハードウェアセキュリティに関する最新の幅広い研究内容（例えば、各種暗号の設計・実装、ハードウェアやシステムへのサイドチャネル攻撃・耐タンパ性、ハードウェアの真贋性判定・トロイ検出、計測機器への攻撃と対策）の議論を行っています。また、次世代を担う若手研究者・学生の育成を目指し、若手優秀賞などの選定を行い、研究分野の活性化に努めています。更に、合同研究会も多く開催しており、情報セキュリティ研究専門委員会（ISEC）、情報通信システムセキュリティ研究専門委員会（ICSS）、VLSI 設計技術研究専門委員会（VLD）、集積回路研究専門委員会（ICD）などとの連携活動を通じて、融合領域であるハードウェアセキュリティ分野において関連分野の専門家からの意見を取り入れる仕組みを作っています。

2025 年度の活動は次のとおりです。

2025 年

4 月 HWS 研究会（東京都／ソニーシティ大崎）

- 5月 LSI とシステムのワークショップ 2025 (ICD・VLD 等と共催)
- 7月 セキュリティサマーサミット 2025 (北海道) ISEC・ICSS 等と共催
- 9月 電子情報通信学会・ソサイエティ大会
- 11月 HWS 研究会 (熊本／熊本大学) ICD と共催
- 12月 ハードウェアセキュリティフォーラム 2025 (東京／セコム本社)

2026 年

- 3月 HWS 研究会 (沖縄県) ICD・VLD と共催
- 3月 電子情報通信学会・総合大会

最新の情報は研究会の Web (<https://www.ieice.org/ess/hws/>) で発信していきます。多くの皆様のご発表とご参加をお待ちしております。

【HWS 研専門問い合わせ先・連絡先】 hws-sec@mail.ieice.org



佐藤俊寛 (正員)

水晶発振器メーカー、半導体デバイスの設計会社を経て、2008(株)エッチ・ディー・ラボに入社、2024 から取締役。半導体の研究・開発に従事。2024(株)SCU の取締役を兼務。ハードウェアセキュリティの研究・開発に従事。

■技術と社会・倫理研究会 (SITE)

技術と社会・倫理研究会 (Social Implications of Technology and Information Ethics, SITE) では、情報通信や工学一般に関する倫理問題を中心として、情報リテラシー、知的財産権、情報セキュリティなど、種々の分野を対象として講演発表、意見交換を行っています。2025 年 6 月の研究会では国際セッション「今日のラテンアメリカにおける電子情報通信技術の倫理・法・社会的課題：とくに自由と寛容の観点から」を開催し、招待講演「メキシコにおける特許の適切性」「e-ラーニングにおけるブロックチェーン」「富の偏在と教育の権利」を考察しました。更に「災害時の通信」「コード決済事業者の収益構造」「電子帳簿保存法」「AI 倫理教育」「生成 AI の作風模倣の倫理的問題」などの研究発表が行われ、連催を引き受けられた IPSJ-EIP 研究会からも各国の AI 法政策やサイバネティック・アバターの実装における課題などのご発表を頂き、議論が大いに進みました。また、2025 年 7 月にはセキュリティサマーサミットに参画し、「個人の再現における本人性検証」「労働代替」「量子コンピュータの消費電力」「ヘルスデータと安全確認措置」などの研究発表を行いました。

当研究会は学際研究の要として、他研究会との共催や、他学会の他研究会との連催を積極的に行っており、知的財産では IPSJ-EIP、情報セキュリティでは ISEC、BIOX、HWS、ICSS、EMM、IA、IPSJ-CSEC、IPSJ-SPT、LOIS、IPSJ-IDT、教育関係では IPSJ-CE と議論を深めております。最新の情報は、<https://www.ieice.org/~site/>をご覧ください。

会員の皆様、研究者の皆様の御発表・御参加をお待ちしています。



村上祐子 (正会員)

1991 東京大学教養学部教養学科科学史及び科学哲学分科卒業。2005 インディアナ大学 Ph.D. (philosophy)。現在、立教大学大学院人工知能科学研究科・教授、人工知能の哲学・倫理、人工知能の社会受容、情報教育などを研究している。2025 年度技術と社会、倫理研究会副委員長。

地域とともに成長する九州産業大学

石田健一（九州産業大学）

1. 九州産業大学のプロフィール

1960年の開学以来、「産学一如」を理想に掲げ、地域社会とともに発展してきた九州産業大学は、福岡市東部、豊かな自然と立花城跡で知られる立花山の近くに位置する私立総合大学で、10学部22学科と大学院5研究科を擁しています。一つのキャンパスの中で文系・理工系・芸術系と幅広い分野の学びを提供し、実践的教育を重視しています。特色ある教育プログラム「KSU 基盤教育」では、基礎教養と外国語力を全学共通で養成し、プロジェクト型教育やグローバル教育、キャリア教育を通じて、社会で活躍できる人材を育成します。また、国際感覚を磨く留学制度や産学連携プロジェクトも充実しており、地域社会や産業界と連携しながら、次代を担う人材育成を目指しています。



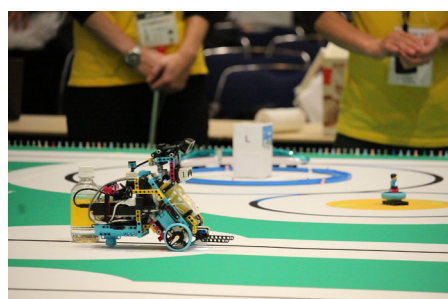
憩いの場となっている中庭、後方に立花山



入学式なども行われる 5,000 人収容の大楠アリーナ 2020

2. KSU プロジェクト型教育の学び

「KSU プロジェクト型教育」は、学生主体で企業・地域・行政と連携し、課題解決に挑む実践型プログラムです。理工学部で取り組むプロジェクトの一つ、産学連携による「プロジェクトベース設計演習」では、学生が現役技術者を顧客役に、品質・納期・コストを意識した演習を通じ、実務に近い経験を積みながら、Web系や組込み系システムの開発に取り組んでいます。ETロボコンなどロボットコンテストへの挑戦も盛んで、分析・設計・制御モデリングから実装まで一連の工程を実践しています。更に、理工と芸術の融合による学生の取り組み「ゲーム作ろうラボ」では、プログラミングとデザインを組み合わせたゲーム制作を行い、東京ゲームショウに出展するなど成果を挙げています。専門知識だけでなく、行動力・共創力・人間力を育む場となり、社会で即戦力となる人材を育成しています。



ET ロボコン参加を通じた実践教育



「ゲーム作ろうラボ」受賞

3. 「新・理工学部」の紹介

令和8年度（2026年度）から理工学部を改組し、「情報科学科」、「機械電気創造工学科」、「スマートコミュニケーション工学科」の3学科体制で再始動します。情報科学科では、プログラミングやアルゴリズムの基礎力を土台に、AI、IoTやネットワークなどの情報技術を体系的に学び、社会のデジタルトランスフォーメーションを牽引できる人材を育成します。機械電気

創造工学科では、自動車・ロボット・スマート機器など現代のモノづくりに不可欠な機械工学と電気工学の融合を学び、幅広い専門知識を備えたエンジニアを育成します。スマートコミュニケーション工学科は、AI やデータサイエンスを活用し、デザインと工学の分野を横断して学び、人と社会をつなぐ仕組みづくりをユーザー視点でプロデュースできる人材を目指します。更に、学部共通「SMArtFusion（スマートフュージョン）プログラム」や最新設備を備えた創造スペース「コラボリウム」で、実践的なプロジェクト型教育を展開します。そして「次代を描く感性、世界を動かす実践力」を育む学びが始まります。



融合教育を実践する創造スペース「コラボリウム」



次世代エンジニアを育成する産学連携プロジェクト型教育

4. キャンパスの交通案内と周辺情報

九州産業大学は、JR 鹿児島本線「九産大前駅」から徒歩約 1 分とアクセス抜群です。西鉄バスでは「九州産業大学前」または「九州産業大学南口」停留所で下車してください。周辺には商業施設や飲食店が充実しています。大学から車で約 30 分の志賀島は、国宝「漢委奴国王」金印が発見された金印公園や、海の神を祀る志賀海神社、潮見公園展望台からの絶景が魅力です。エリア近くにある香椎宮は、国の重要文化財「香椎造り」の本殿や樹齢 1800 年の御神木「綾杉」が見どころです。また、クスノキ並木の参道や名水「不老水」も人気です。更に、夏の伝統行事「博多祇園山笠」では、豪快な昇き山笠と華麗な飾り山笠を通じて、まちの活気を体感できます。歴史と自然に触れながら、学びの合間にリフレッシュできる環境が魅力です。



大学より志賀島方面の夜景



学内に展示された博多祇園山笠の昇き山笠



石田健一（正員）

平 4 九大・工・情報工卒。平 9 九大院・システム情報科学研究科情報工学専攻博士課程修了（博士（工学））。同年九大助手。平 14 九州産業大に移り、現在、同大理工学部情報科学科教授。この間、電磁界理論、電磁波の逆散乱問題などの研究に従事。電気学会、IEEE 各会員。著書に『微分積分講義テキスト』。

開催案内

ASP-DAC 2026: The 31st Asia and South Pacific Design Automation Conference

日程: 2026 年 1 月 19 日(月)~22 日(木)

会場: Hong Kong Disneyland Hotel, Hong Kong SAR

Web サイト: <https://www.aspdac.com/>

1. 概要

ASP-DAC は、VLSI およびシステム設計技術に関するアジア・南太平洋地区最大の国際会議で、電子設計自動化 (EDA) 技術の最新成果発表や将来動向の議論の場を提供するとともに、EDA の研究者/開発者とシステム/回路/デバイス設計者との交流促進を目的としています。ASP-DAC 2026 では、最新の研究成果が発表されるテクニカルセッションの他、世界的研究者による招待講演、チュートリアル、デザインコンテスト、企業展示など、多彩な企画を予定しています。皆様のご参加をお待ちしています。

2. 基調講演

以下の 6 件の基調講演が予定されています。

- Chenming Hu (University of California, Berkeley), “FinFET - from Lab to Foundry to EDA/Fabless”
- Yiran Chen (Duke University), “Edge AI: Everything, Everywhere, All at Once”
- Yuan Xie (Hong Kong University of Science and Technology), “From 2D IC to 3D IC and Chiplet : A Retrospective View”
- Charles Alpert (Cadence Design Systems), “Harnessing Agentic AI to Accelerate Designer Productivity”
- Charles Alpert (Cadence Design Systems), “Unlocking Hyper-Scale AI: Navigating the Future of 3DIC Design Solutions”
- Takefumi Miyoshi (QuEL and University of Osaka), “Quantum Computing and EDA: Bridging the Next Frontier”

3. チュートリアル

以下の 6 件のチュートリアルが予定されています。

- On-Device AI to Better Mobile and Implantable Devices in Healthcare
- Design Methodologies and Toolchains for Compute-in-Memory: From Architectures to Systems
- Design Automation for the Early Fault Tolerant Quantum Computing
- Bi-Directional Synergy: A Tutorial on Hardware Design for Agentic AI and Agentic AI for Hardware Design
- APS: An MLIR-Based Hardware-Software Co-design Framework for Agile Processor Specialization
- Post-Silicon Validation & Hardware Security in Modern Processors

4. 特別セッション

以下の 6 件の特別セッションが予定されています。

- From Uniform to Adaptive: The Precision-Scalable Computing Era for Edge Intelligence
- Design Automation for Quantum Error Correction: From Algorithms to Architectures

- Advances in AI-Driven Circuit Verification and Reliability Analysis
- Toward Fully Automated DTCO: ML Frameworks across Technology, Cell, and Library Layers
- From Solvers to Layout: Cross-Layer Approaches for Reliable and Scalable IC Design
- 100 Years of the FET: From Technology Foundations to the EDA Ecosystem

5. デザインコンテスト

大学での最先端 LSI/システムの設計事例を完成度の高さと競い合います。アナログ設計から LLM/AI 推論、FPGA アクセラレーションまで広く優れた設計が発表されます。

6. Student Research Forum@ASP-DAC

博士課程の学生が学位論文研究について発表し、参加者と議論します。学生の人脈形成や、企業・研究機関が最新の研究や優秀な人材を発見する機会を提供します。

7. 参加申込

上記 web サイトよりお申し込みください。

8. 運営体制

General Chair	Tsung-Yi Ho (The Chinese University of Hong Kong)
Technical Program Chair	Takashi Sato (Kyoto University)
TPC Vice Chair	Seokhyeong Kang (Pohang University of Science and Technology)
Tutorial Co-Chairs	Evangeline F.Y. Young (The Chinese University of Hong Kong), Jinwei Liu (Hong Kong Baptist University)
Design Contest Chair	Fengbin Tu (Hong Kong University of Science and Technology)

- 主催: ACM SIGDA, IEEE CEDA, IEEE CASS
- 協賛: Cadence, Synopsys, INFINIGENCE, Amedac, MediTek Inc., Siemens, Empyrean, PRIMARIUS, The Hong Kong University of Science and Technology (Guanzhou), The Chinese University of Hong Kong



2026 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications

Grenoble, France | November 17-20, 2026

First Call for Papers

The 2026 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2026) will be held in Grenoble, France, November 17-20, 2026. The objective of the symposium is to provide a forum for exchange of the latest results related to nonlinear theory and its applications. Papers describing original results in all aspects of nonlinear theory and its applications are invited. Topics include, but are not limited to:

Nonlinear Phenomena

- Chaos and Bifurcation
- Oscillations and Synchronization
- Chemical Reactions

Computational Intelligence

- Neural Networks
- Deep Learning and Artificial Intelligence
- Evolutionary Computation
- Fuzzy Systems

Engineering Applications

- Nonlinear Circuits and Systems
- Control Systems
- Communication Networks and Systems
- Signal Processing
- Applied Mathematics

Complex Networks/Systems

- Large-Scale Networks
- Social Dynamics
- Neuro Dynamics
- Mathematical Economics

Symposium Committee

General Co-Chairs

Gildas Besancon (GIPSA-lab, CNRS)
Norikazu Takahashi (Okayama Univ.)

Technical Program Co-Chairs

Daniele Fournier-Prunaret (INSA Toulouse)
Isao Tokuda (Ritsumeikan Univ.)

Technical Program Co-Secretaries

Yoshiki Sugitani (Osaka Metropolitan Univ.)
Koki Yoshida (O.M.U.C.T.)

Special Session Co-Chairs

Arturo Buscarino (Univ. of Catania)
Kuntal Mandal (URV)
Ali Haidar (Beirut Arab Univ.)
Yuichi Tanji (Kagawa Univ.)

Special Session Co-Secretaries

Hisashi Aomori (Chukyo Univ.)
Toshihiro Tachibana (Shonan Inst. of Tech.)

CCMS Workshop Co-Chairs

Suk-Hwan Lee (Dong-A Univ.)
Deokwoo Lee (Keimyung Univ.)
Noriaki Kamiyama (Ritsumeikan Univ.)

CCMS Workshop Secretary

Ryo Nakamura (Fukuoka Univ.)

Finance Chair

Haruna Matsushita (Kagawa Univ.)

Finance Secretary

Hidehiro Nakano (Tokyo City Univ.)

Publication Chair

Daisuke Ito (Gifu University)

Publication Secretary

Yuu Miino (Naruto Univ. of Edu.)

Publicity Chair

Shintaro Arai (Okayama Univ. of Sci.)

General Co-Secretaries

Takayuki Ito (GIPSA-lab, CNRS)
Hiroyuki Asahara (Okayama Univ. of Sci.)
Yoshitaka Itoh (Hokkaido Univ. of Sci.)
Takemori Orima (Teikyo Univ.)

Paper Submission

Authors are invited to submit papers (maximum 4 pages) in PDF format via the conference website: <https://nolta2026.org>

Only electronic submissions will be accepted. Corresponding authors of accepted papers will be requested to submit a final camera-ready version (maximum 4 pages).

Special Sessions

NOLTA2026 welcomes proposals for Special Sessions. We will evaluate proposals based on the timeliness, relevance, and scientific quality of the proposed topic, and we will notify the organizers of the results by March 15, 2026. Please submit proposals by February 28, 2026 via email to ss@nolta2026.org.

Important Dates

- Deadline for Special Session Proposals: **February 28, 2026**
- Notification of Acceptance for Special Sessions: **March 15, 2026**
- Deadline for Paper Submissions (Regular & Special Sessions): **April 30, 2026**
- Notification of Paper Acceptance (Regular & Special Sessions): **June 30, 2026**
- Deadline for Early Registration: **July 31, 2026**
- Deadline for Submission of Camera-Ready Papers: **July 31, 2026**

Student Paper Award

The NOLTA2026 Symposium Committee will present Student Paper Awards. Eligible candidates must be full-time students and must serve as the first author and presenter of the paper at NOLTA2026. Candidates should indicate their eligibility and submit a 4-page paper at the time of initial submission. Anonymous reviewers will select award recipients based on the quality, originality, and clarity of both the submitted paper and the conference presentation.

Organizer

IEICE NOLTA Society



In Cooperation With

Technical Committee on Nonlinear Problems, IEICE NOLTA Society

Technical Committee on Complex Communication Sciences, IEICE NOLTA Society

For more information, please visit the conference website: <https://nolta2026.org>



論文募集

2026年 電子情報通信学会 NOLTAソサイエティ大会

2026年6月13日(土)
於: 大阪市 I-siteなんば

2026年電子情報通信学会NOLTAソサイエティ大会を大阪市のI-siteなんばにて開催いたします。本大会がカバーする学問領域は、非線形系や複雑系の理論とそれらの応用から、実在する非線形システムや複雑システムの解析や制御に至るまで広範に及んでおり、特に電気・電子・通信や情報処理に関する非線形理論・応用に特徴を持っています。皆様からの積極的な論文投稿をお願い申し上げます。

《大会組織》

委員長

杉谷 栄規 (大阪公立大学)

総務・庶務

吉田 晃基 (大阪公立大学
工業高等専門学校)

会計

井岡 恵理 (芝浦工業大学)

【主催】

電子情報通信学会 NOLTAソサイエティ



【投稿分野】

発表はNOLTAソサイエティが対象とするテーマに関連する研究、調査、設計、開発、工事報告、現地試験報告などで、学術的価値があるものに限ります。

テーマ例 (これに限るものではありません)

「カオス」「フラクタル」「ファジー」「ニューロダイナミクス」
「カオスニューラルネットワーク」「セルラニューラルネットワーク」
「バイオサイバネティクス」「複雑系」「非線形回路とシステム」
「結合発振器」「モデリングとシミュレーション」「精度保証数値解析」
「進化論的計算」「予測とシステム同定」「最適化問題」の他、
非線形理論の「同期」「ネットワーク」「通信」「信号処理」「制御」
「電力システム」への応用、さらに「情報科学」「物理学」「応用数学」
「化学」「神経科学」「光学」「生態学」「経済学」など

【大会Webサイト】

[http://www.ieice.org/
~nolta/society_conf/2026/](http://www.ieice.org/~nolta/society_conf/2026/)



【発表概要】

講演はポスター発表となります。原稿は邦文又は英文のA4版1ページでご執筆ください。査読の上、採否通知を行います。また、原稿の作成が不適切な場合、不採択となることがあります。

【スケジュール】

投稿受付: 2月15日より受付開始
投稿締切: 3月31日
採否通知: 4月10日
最終原稿締切: 4月24日
事前参加登録期間: 4月24日～5月9日(発表者は登録必須)
～6月5日(聴講者)

【お問い合わせ】

nlsc2026@gmail.com

【奨励賞】

大会においてソサイエティの発展に貢献しうる講演論文を発表した35歳以下の著者に対し、NOLTAソサイエティ大会奨励賞を贈呈します。

基礎・境界ソサイエティ運営委員会

会長
次期会長
ソサイエティ編集長
副会長 (事業担当)
副会長 (システムデザイン技術)
副会長 (音響・超音波)
副会長 (情報理論とその応用)
副会長 (信号処理とその応用)
庶務幹事
庶務幹事
会計幹事
会計幹事
事業担当幹事
事業担当幹事
大会担当幹事
大会担当幹事
電子広報担当幹事
電子広報担当幹事
論文誌編集委員長
論文誌編集幹事
論文誌副編集委員長
論文誌副編集幹事
ソサイエティ誌編集委員長
ソサイエティ誌担当幹事
ソサイエティ誌担当幹事
編集特別幹事 (オブザーバ)
出版委員会委員 (オブザーバ)
研究会連絡会幹事 (オブザーバ)
ハンドブック／知識ベース委員 (オブザーバ)
男女共同参画委員会 (オブザーバ)
プラチナクラブ運営委員会 (オブザーバ)
事務局

尾上 孝雄 (大阪大学)
岩本 貢 (電気通信大学)
和田山 正治 (名古屋工業大学)
澁谷 智治 (上智大学)
前田 義信 (新潟大学)
青柳 学 (室蘭工業大学)
楯 勇一 (名古屋大学)
市毛 弘一 (横浜国立大学)
傘 昊 (東京都市大学)
藤澤 匡哉 (東京理科大学)
筒井 弘 (北海道大学)
古田 隆弘 (日本大学)
西新 幹彦 (信州大学)
西川 広記 (大阪大学)
伊藤 大輔 (岐阜大学)
花谷 嘉一 (株式会社東芝)
古賀 崇一 (近畿大学)
中井 雄士 (豊橋技術科学大学)
岡田 実 (奈良先端科学技術大学院大学)
林 和則 (京都大学)
國廣 昇 (筑波大学)
鈴木 幸太郎 (豊橋技術科学大学)
定兼 邦彦 (東京大学)
松井 健太郎 (日本放送協会)
宮北 和之 (新潟大学)
相川 直幸 (東京理科大学)
藤沢 匡哉 (東京理科大学)
中野 秀洋 (東京都市大学)
葛岡 成晃 (和歌山大学)
小西 たつ美 (愛知工業大学)
前田 義信 (新潟大学)
永井 宏, 中嶋 彩乃 (電子情報通信学会)

基礎・境界ソサイエティサブソ・研専会議

副会長 (事業担当)
副会長 (システムデザイン技術)
副会長 (音響・超音波)
副会長 (情報理論とその応用)
副会長 (信号処理とその応用)
事業担当幹事
事業担当幹事
回路とシステム (CAS)
情報理論 (IT)
信頼性 (R)
超音波 (US)
応用音響 (EA)
VLSI 設計技術 (VLD)
情報セキュリティ (ISEC)
信号処理 (SIP)
ワイドバンドシステム (WBS)
システム数理と応用 (MSS)
思考と言語 (TL)
技術と社会・倫理 (SITE)
ITS (高度交通システム) (ITS)
スマートインフォメディアシステム (SIS)
イメージメディアクオリティ (IMQ)
高信頼制通信 (RCC)
バイオメトリクス (BioX)
安全・安心な生活と ICT (ICTSSL)
ハードウェアセキュリティ (HWS)
光輝会 (SSA) (オブザーバ)
技術と歴史 (オブザーバ)
技術者教育と優良実践 (オブザーバ)
ヒューマンコミュニケーション G (オブザーバ)
会長 (オブザーバ)
次期会長 (オブザーバ)
庶務幹事 (オブザーバ)
庶務幹事 (オブザーバ)
研究会連絡会幹事 (オブザーバ)
事務局

澁谷 智治 (上智大学)
前田 義信 (新潟大学)
青柳 学 (室蘭工業大学)
楯 勇一 (名古屋大学)
市毛 弘一 (横浜国立大学)
西新 幹彦 (信州大学)
西川 広記 (大阪大学)
下田 真二 (ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社)
野上 保之 (岡山大学)
岡村 寛之 (広島大学)
垣尾 省司 (山梨大学)
西浦 敬信 (立命館大学)
富山 宏之 (立命館大学)
清水 晋作 (KDDI 総合研究所)
西川 清史 (東京都立大学)
落合 秀樹 (大阪大学)
宮本 俊幸 (大阪工業大学)
坪田 康 (京都工芸繊維大学)
辰巳 丈夫 (放送大学)
羽多野 裕之 (三重大学)
笹岡 直人 (鳥取大学)
土田 勝 (NTT 株式会社)
石井 光治 (香川大学)
高橋 健太 (日立製作所)
水野 修 (工学院大学)
秋下 徹 (ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社)
大塚 玲 (情報セキュリティ大学院大学)
篠田 庄司 (中央大学)
横田 光広 (宮崎大学)
根岸 一平 (金沢工業大学)
尾上 孝雄 (大阪大学)
岩本 貢 (電気通信大学)
傘 昊 (東京都市大学)
藤澤 匡哉 (東京理科大学)
中野 秀洋 (東京都市大学)
永井 宏, 中嶋 彩乃 (電子情報通信学会)

NOLTA ソサイエティ運営委員会

ソサイエティ会長
ソサイエティ次期会長
庶務幹事
庶務幹事
会計幹事
電子広報担当幹事
大会担当幹事
運営委員
運営委員
運営委員
運営委員
運営委員
運営委員
運営委員
運営委員
運営委員
運営委員
運営委員
運営委員
運営委員
運営委員
運営委員
運営委員

関屋 大雄 (千葉大学)
小西 啓治 (大阪公立大学)
荒井 伸太郎 (岡山理科大学)
杉谷 栄規 (大阪公立大学)
井岡 恵理 (芝浦工業大学)
加藤 秀行 (大分大学)
伊藤 大輔 (岐阜大学)
鳥飼 弘幸 (法政大学)
高橋 規一 (岡山大学)
上田 哲史 (徳島大学)
清水 邦康 (千葉工業大学)
中野 秀洋 (東京都市大学)
長谷川 幹雄 (東京理科大学)
久門 尚史 (京都大学)
保坂 亮介 (芝浦工業大学)
木村 真之 (摂南大学)
内田 淳史 (埼玉大学)
上山 憲昭 (立命館大学)
菅野 円隆 (埼玉大学)
堀尾 喜彦 (帝京大学先端総合研究機構)
浅井 哲也 (北海道大学)
松下 春奈 (香川大学)
佐藤 雅俊 (玉川大学)
若宮 直紀 (大阪大学)

Fundamentals Review 編集委員会

編集委員長	定兼 邦彦 (東京大学)
編集委員会幹事 (正)	松井健太郎 (日本放送協会)
編集委員会幹事 (副)	宮北 和之 (新潟大学)
編集委員会幹事補佐	高安 敦 (東京大学)
編集委員	
編集委員 (CAS)	篠宮 紀彦 (創価大学)
編集委員 (VLD)	新谷 道広 (京都工芸繊維大学)
編集委員 (SIP)	京地 清介 (工学院大)
編集委員 (MSS)	澤田 賢治 (大阪大学)
編集委員 (IT)	柴田 凌 (信州大学)
編集委員 (ISEC)	海上 勇二 (パナソニックホールディングス)
編集委員 (WBS)	荒井 剛 (岡山県立大学)
編集委員 (US)	吉田 憲司 (千葉大学)
編集委員 (EA)	若山 圭吾 (NTT 株式会社)
編集委員 (NLP)	伊藤 大輔 (岐阜大学)
編集委員 (R)	吉川 隆英 (富士通研究所)
編集委員 (TL)	谷村 緑 (立命館大学)
編集委員 (SITE)	多川 孝央 (筑紫女学園大学)
編集委員 (ITS)	自見 圭司 (群馬大学)
編集委員 (SIS)	二神 拓也 (同志社大学)
編集委員 (IMQ)	山添 崇 (湘南工科大学)
編集委員 (BioX)	河原 智一 (東芝インフラシステムズ株式会社)
編集委員 (RCC)	鍋谷 寿久 (株式会社東芝)
編集委員 (CCS)	佐々木智志 (東京都市大学)
編集委員 (ICTSSL)	宇津 圭祐 (東海大学)
編集委員 (HWS)	矢嶋 純 (富士通株式会社富士通研究所)

(上記に含まれない右側の編集幹事会の委員も編集委員として含む)

学会事務局

永井 宏, 中嶋 彩乃
電子情報通信学会

Fundamentals Review 編集幹事会

編集委員長	定兼 邦彦 (東京大学)
編集幹事会幹事 (正)	松井健太郎 (日本放送協会)
編集幹事会幹事 (副)	宮北 和之 (新潟大学)
編集幹事補佐	高安 敦 (東京大学)
編集幹事 (総務)	松田 哲直 (埼玉大学)
編集幹事 (渉外)	傘 昊 (東京都市大学)
編集幹事 (企画)	山岸 昌夫 (法政大学)
編集幹事 (Web : 正)	古賀 崇了 (近畿大学)
編集幹事 (Web : 副)	中井 雄士 (豊橋技術科学大学)
特別編集幹事 (Vol. 19, No. 1)	海上 勇二 (ISEC)
特別編集幹事 (Vol. 19, No. 2)	(パナソニックホールディングス株式会社)
特別編集幹事 (Vol. 19, No. 3)	山添 崇 (IMQ)
特別編集幹事 (Vol. 19, No. 4)	(湘南工科大学)
編集顧問	澤田 賢治 (MSS)
編集顧問	(大阪大学)
編集顧問	二神 拓也 (SIS)
編集顧問	(同志社大学)
編集顧問	牧野 光則 (中央大学)
編集顧問	高橋 篤司 (東京科学大学)
編集顧問	國廣 昇 (筑波大学)
編集顧問	関屋 大雄 (千葉大学)
編集顧問	高島 康裕 (北九州市立大学)

編集後記

毎号、様々な分野の解説論文を掲載していますが、今号はハードウェアや物理現象に関する解説論文が多く、自分に馴染みのない分野の成果を知れて勉強になりました。読者の方のお役に立てば幸いです。(定兼邦彦)

主に「ごあいさつ」の編集を担当しました。ご執筆頂いた皆様並びにご担当頂いた事務局・出版社の皆様にお礼申し上げます。今号の発行は2026年の元旦となります。こういった出版物にありがちなのですが、この編集後記を書いている今はまだ2025年、編集作業の真っ只中であり、そのため、フライング気味の気まずさが若干あるのですが、2026年が皆様にとってよい一年となりますよう祈念申し上げます。(松井健太郎)

主に「ESS ニュース」「だより」「開催案内」「論文募集」「委員会・編集後記」を担当しました。例年行われているような国内シンポジウムや国際会議でも、開催時期が大幅に変わることがあります。これまで時期の都合で参加できなかった国際会議などがあった場合でも、改めてFR誌の「開催案内」「論文募集」の記事をご覧頂いて、ご参加の検討に役立てて頂ければと思います。(宮北和之)

このたび、「研究会へ行こう」の特別編集幹事を仰せつかりました。FR誌の編集に携わるのは初めてであったため、至らぬ点多々あったかと思いますが、快くご執筆くださった著者の皆様、編集の皆様、並びに各研究専門委員会の皆様に厚く御礼申し上げます。基礎・境界ソサイエティの研究会では、ソサイエティの特徴を反映し、基礎的な研究から萌芽的な技術まで、幅広いテーマの研究発表が精力的に行われています。次世代の革新につながる研究や技術にいち早く触れたい方々には、ぜひ研究会への参加をお勧めいたします。(澤田賢治)

Fundamentals Review へのお問い合わせ

- ・本誌への御意見、御要望、入手など：fr-ess@ieice.org
- ・Fundamentals Review Homepage：https://www.ieice.org/ess/ESS/Fundam-Review.html

複写される方へ

一般社団法人電子情報通信学会は、本誌に掲載された著作物の複写複製に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。複写複製を御希望の方は、一般社団法人学術著作権協会 (<https://www.jaacc.org>) が提供している複製利用許諾システムを通じて申請して下さい。

なお、複写以外の許諾（著作物の転載、翻訳等）に関しては、委託致しておりませんので、直接本会へお問い合わせ下さい。

<問合せ先> 一般社団法人電子情報通信学会

TEL [03] 3433-6691 FAX [03] 3433-6659

著作物利用許諾申請：<https://www.ieice.org/jpn/copyright/tensai.html>

Reprographic Reproduction outside Japan

Making a copy of this publication

The IEICE authorized Japan Academic Association For Copyright Clearance (JAC) to license our reproduction rights of copyrighted works. If you wish to obtain permission of these rights, please refer to the homepage of JAC (<https://www.jaacc.org/en/>) and confirm appropriate organizations to request permission.

Obtaining permission to quote, reproduce; translate, etc.

Please contact the copyright holder directly.

IEICE Secretariat Office,

E-mail: permission@ieice.org

Permission request form: <https://db.ieice.org/chosaku/sinsei/index-e.php>

Fundamentals Review 第十九巻 第三号

令和八年一月一日発行

発行人	白石 智
発行所	一般社団法人 電子情報通信学会 基礎・境界サイエンス 〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館内) 電話 03-3433-6691(代) FAX 03-3433-6659
WEB化担当	山岡影光
WEB化担当会社	三美印刷株式会社 東京都荒川区西日暮里 6-28-1