

Kyoto  
Lab for  
a Greener  
Future

京都グリーンラボ

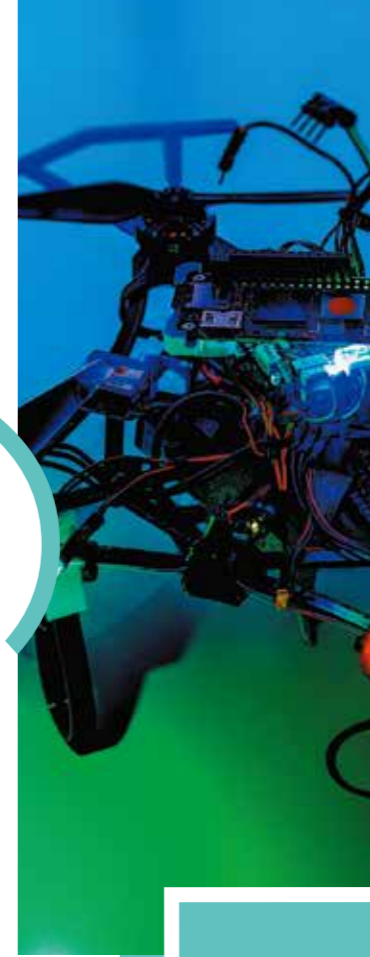


Address  
〒606-8585  
京都市左京区松ヶ崎橋上町1

Tel/Fax  
075-724-7452

Mail  
電気電子工学系 小林 和淑 教授  
greenlab@kit.ac.jp

Kyoto  
Institute  
of  
Technology



KYOTO

Lab for

a Greener  
Future

Kyoto Institute of Technology

京都工芸繊維大学 京都グリーンラボ

活動報告書 2023

# KYOTO Lab for a Greener Future

## 京都グリーンラボとは

本学にグリーンイノベーション分野の研究拠点を確立することを目指し、2015年に教育研究プロジェクトセンター「グリーンイノベーションセンター」が発足し、2018年10月の研究力及び産学連携機能強化の一環として重点研究「ラボ」の一つとして「グリーンイノベーションラボ」が設置されました。2022年度からは、電気電子工学だけではなく機械工学、情報工学の研究分野も取り込み、近領域の連携を目指す「京都グリーンラボ」として再出発いたしました。

本報告書は、京都グリーンラボで新たに始めた「近領域研究」の研究内容を紹介するものです。2023年度の「近領域研究」は本学所属教員による7テーマからなります。この研究は、設計工学域を中心に、これまで近くて遠かった機械・情報・電気電子を横断する研究を新たに開始し、国・産業界からの大型の外部資金を調達することを目的に立ち上げました。

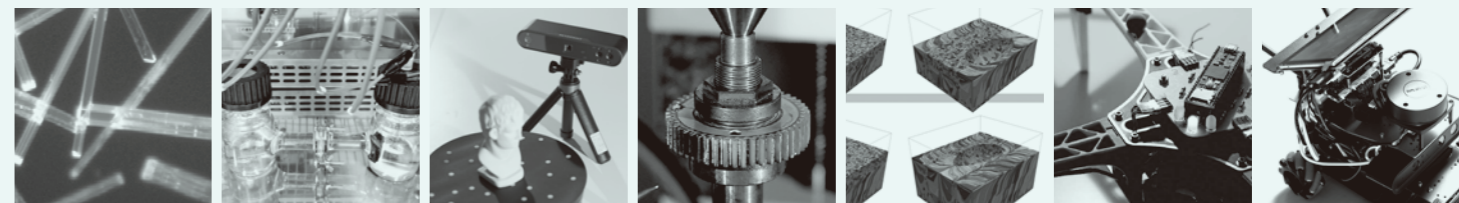
近年は研究領域の細分化が進みすぎた反動で、蛸壺的な研究が多くなっています。蛸壺を全否定することはできませんが、例えば、AI（人工知能）応用の研究は、設計工学域で広く行われています。それらの研究を俯瞰することで、新たな気付きが生まれることもあるでしょう。近領域研究では、少なくとも他学系、広くは他の研究機関との連携での新たなテーマの研究を実施します。さらに広い学際領域での研究立ち上げを目指した「AGORA」も未来デザイン・工学機構の主導のもとで進んでおりますが、もう少し狭い分野での融合を目指した近領域研究の今後の発展にご期待ください。

また2022年度より、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）が推進する「ムーンショット型研究開発事業」目標6のプロジェクトマネージャーに採択され、本学ならびに他研究機関の研究者とともに「スケラブルな高集積量子誤り訂正システムの開発」の研究を推進することとなりました。本研究の概要についても紹介します。



京都グリーンラボ長  
小林 和淑

# Activity Report 2023





# 01 ペロブスカイト系材料によるマイクロLEDディスプレイ

研究代表者 西中 浩之 准教授  
電気電子工学系



研究協力者 山下 兼一 教授  
電気電子工学系

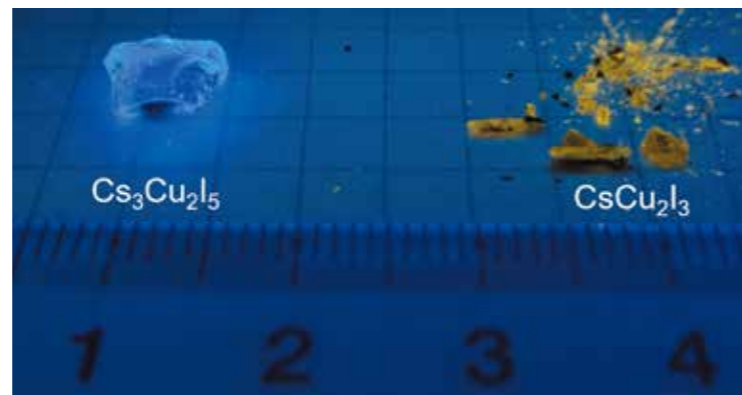
## 特筆すべき実績

- ▶ 国内会議日本材料学会半導体エレクトロニクス部門研究会にて成果発表
- ▶ Japanese Journal of Applied Physics誌に論文投稿中
- ▶  $\text{Cs}_2\text{CuI}_3$ と $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5$ の単結晶マイクロロッドの形成に成功
- ▶ 電極形成用のマスク設計完了

### 研究内容

表示素子であるディスプレイには、液晶や有機ELが利用されているが、より高精細な量子ドットディスプレイや、より低消費電力なマイクロLEDの研究開発が行われている。特にディスプレイのモバイル用途が一般的になっている中、より低消費電力のマイクロLEDへの期待が大きくなっている。

本研究では、次世代ディスプレイとして期待されているマイクロLEDとして高効率な発光が可能なペロブスカイト系材料を合成し、ディスプレイ応用に向けてそれを整然と並べる技術の研究開発を行うことを目的とする。このペロブスカイト材料は高効率で発光しながらも、溶液などから容易に合成することが可能であり、太陽電池や発光材料として盛んに研究がなされている。さらに薄膜形状から単結晶の合成も溶液プロセスで形成ができることから、低コスト化が実現できる材料として注目されている。本研究では、マイクロLEDにペロブスカイト系材料の単結晶マイクロロッドを利用する。そのマイクロロッドの液中での合成方法として、貧溶媒法や逆温度結晶化法などを採用して検討を行う。それらの検討で、合成方法や合成条件によって得られるペロブスカイト系マイクロロッドの形成の調査を行い、マイクロLEDに適した構造の形成を行っていく。また、マイクロLEDとして利用するために、電極間にマイクロロッドを整然と並べる必要があるが、その手法には電気泳動を利用する。液中に浸漬した電極間に電圧を印加することで、電気泳動によってマイクロロッドが液中を移動して電極間に固定される。これらのマイクロロッドの合成技術や電極間への固定技術はLEDなどのディスプレイ応用だけでなく、センサーやレーザーなどへの利用も考えられる。



青色発光する $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5$ 単結晶と黄色発光する $\text{CsCu}_2\text{I}_3$ 単結晶

### 研究成果

本研究では、ペロブスカイト系マイクロロッドを利用したマイクロLEDの形成技術の確立に向けた検討を進めている。その検討として、(1)マイクロロッド単結晶の成長及びその制御、(2)形成したマイクロロッドを電極間に並べる技術の開発を行っている。最終的にこの(1)と(2)を組み合わせて電流注入によるLED動作を行うことを目標とする。また、このマイクロロッドを電極間に並べる技術は、LEDのみならず、センサーやFETなどへの応用も可能であると考えている。

#### (1) マイクロロッド単結晶の成長及びその制御

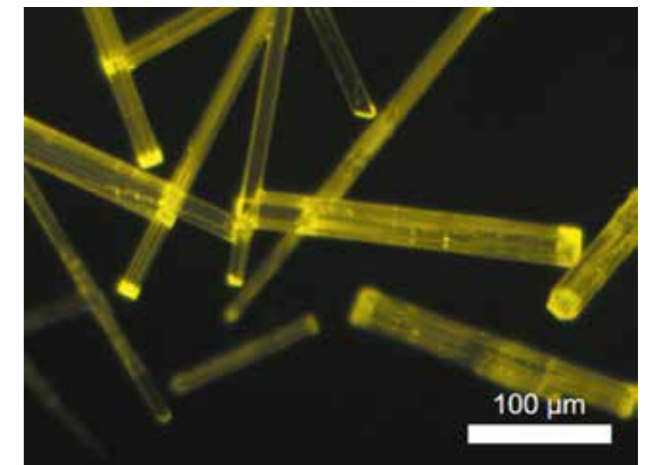
$\text{CsPbBr}_3$ 系のマイクロロッド形成でよく利用されている貧溶媒法を利用して、 $\text{CsCuI}$ 系のマイクロロッドの形成を試みた。 $\text{CsPbBr}_3$ 自体も高効率発光し、盛んに研究はなされているものの、有害なPbが含まれることから、有害なPbを含まない $\text{CsCuI}$ 系のマイクロロッドの形成を行っている。貧溶媒法は、① $\text{CsCuI}$ 系を溶解させた前駆体溶液を用意、② $\text{CsCuI}$ 系材料の溶解度が低い溶媒を別途用意、③それを蒸発拡散により、前駆体溶液に取り込ませることによって、 $\text{CsCuI}$ 系材料が徐々に析出、結晶化する方法である。急激な結晶化を防ぐことができるため、比較的大きなマイクロロッドが形成できる。この手法を用いて $\text{CsCuI}$ 系のマイクロロッドの育成に成功した。得られたマイクロロッドはばらつきがあるものの、径が $10\sim 50\mu\text{m}$ 、長さが数十～数百 $\mu\text{m}$ のものが得られた。また得られたマイクロロッドはXRD解析などから黄色発光する $\text{CsCu}_2\text{I}_3$ であることが分かった。

$\text{CsCuI}$ 系マイクロロッドの形成手法として逆温度結晶化法での検討も行った。この手法は、温度を上昇させることで溶解度を下げて、結晶を育成する手法である。溶液の温度や濃度を調整することで様々な形状のマイクロロッドを形成することに成功した。得られたマイクロロッドの光学特性を評価すると、青色発光しており $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5$ であることが分かった。このように異なる手法を採用することで $\text{Cs}_2\text{CuI}_3$ と $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5$ の2種の材料を作り分けることに成功した。

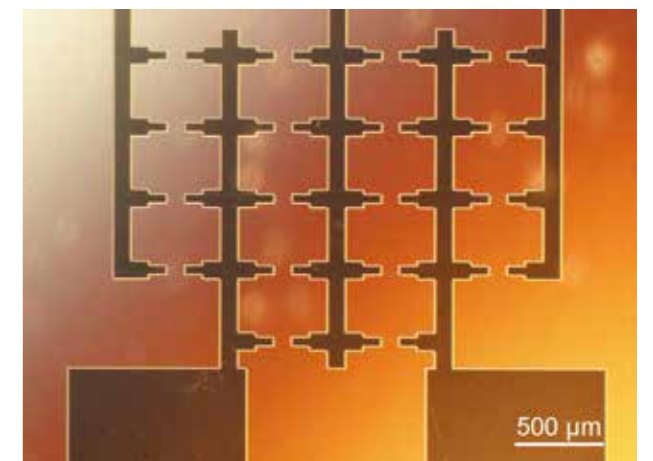
#### (2) 形成したマイクロロッドを電極間に並べる

##### 技術の開発

マイクロロッドを並べる技術開発として、まずは電極形成用のフォトリソ用マスク設計を行った。電極としていくつかのパターンを設計しており、マイクロロッドのサイズに合わせて利用する予定である。現在このフォトリソ用マスクを利用して電極の形成を試みている。電極の形成後、電気泳動手法を用いて電極間にマイクロロッドを並べる検討を進めていく。



マイクロロッド



フォトリソ用マスク



# 02 半導体を利用した微生物人工光合成によるCO<sub>2</sub>還元

研究代表者 西中 浩之 准教授  
電気電子工学系



研究協力者 Werner Carl Frederik 助教  
電気電子工学系

野田 実 教授  
電気電子工学系

井口 博之 准教授  
京都先端科学大学  
バイオ環境学部 食農学科

## 特筆すべき実績

- ▶ 2023年度科研費挑戦的研究(萌芽)に採択。「細胞外電子伝達菌と光半導体による高効率人工光合成への挑戦」
- ▶ 国際会議E-MRS Spring Meeting、UWO2023、国内会議日本材料学会半導体エレクトロニクス部門研究会にて成果発表
- ▶ 国際論文誌Materials Chemistry and Physicsにアクセプト

## 研究内容

カーボンニュートラル社会の実現は人類にとって大きな意義を持つが、その実現に向けて超高効率CO<sub>2</sub>還元システムの開拓を進めるために、半導体と微生物を組み合わせた人工光合成によるCO<sub>2</sub>還元エネルギー材料の生成について検討を行っている。近年外部から電子を取り込んだり、放出したりしながら代謝をする微生物(細胞外電子伝達菌)が見つかり、この微生物を利用するプロセスの開発が進んでいる。本研究では、この電子を取り込む微生物に、太陽光と光半導体で形成した電子を供給することでCO<sub>2</sub>固定化技術の開発を行う。一般に光合成を行う微生物は光の変換が得意ではなく、半導体はCO<sub>2</sub>の還元が得意ではない。一方で、微生物はCO<sub>2</sub>の還元が得意であり、半導体は光の変換が得意である。そこで、これらを組み合わせることで、太陽光による超高効率のCO<sub>2</sub>還元につながる可能性があると考えている。

また、通常微生物は多孔質材料には棲みつくことができるものの、光半導体などのつるつるした表面構造には棲みつくことが難しい。この光半導体と微生物間の効率的な電子授受は、人工光合成システムにおける物質生産効率のカギとなる。そこで本研究では、半導体の微細構造作製技術を駆使して、表面に凹凸形状を形成することで、光半導体表面に微生物が棲みつく場所を形成する。その凹凸構造形成には、光半導体となるナノワイヤーを利用する。このナノワイヤーに微生物を棲ませて、そのナノワイヤーに太陽光を照射することで、電子を微生物に供給してCO<sub>2</sub>還元を行う。



微生物電気化学評価系

## 研究成果

本研究では、光半導体と細胞外電子伝達菌を組み合わせた人工光合成システムの構築を目標に検討を進めている。その検討として、(1)太陽光に反応する光半導体の形成技術の開発、(2)電子を細胞外で授受して、CO<sub>2</sub>を還元しメタンを生成する微生物による電気化学反応系の開発、(3)これらを組み合わせた人工光合成システムの構築を行う。本年度はこの(1)と(2)の検討を進めてきた。

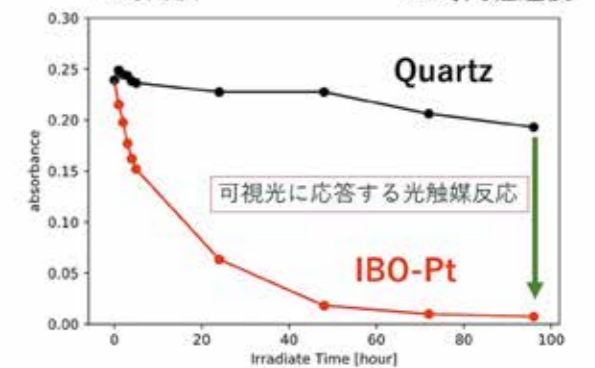
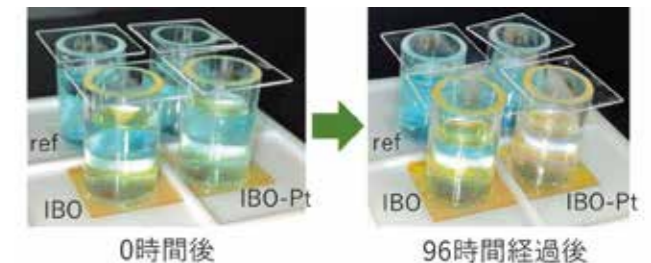
### (1) 太陽光に反応する光半導体の形成技術の開発

多くの光触媒材料(光半導体)は、紫外光に反応するものが多く、太陽光の幅広い利用には可視光を吸収する材料が必要である。また、可視光を吸収する光触媒に適した光半導体として、CdSなどの硫化物が存在するが、これらは光触媒反応によって自己酸化するという課題がある。そこで本研究では、インジウム酸化物(In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)にBiを添加する(IBO)ことで中間準位が形成されることを利用して、可視光を吸収する光半導体の検討を行った。そのIBO薄膜の形成にはミストCVD法を用いた。その薄膜の光学物性を評価したところ、可視光領域に吸収を持つIBO薄膜の形成に成功した。

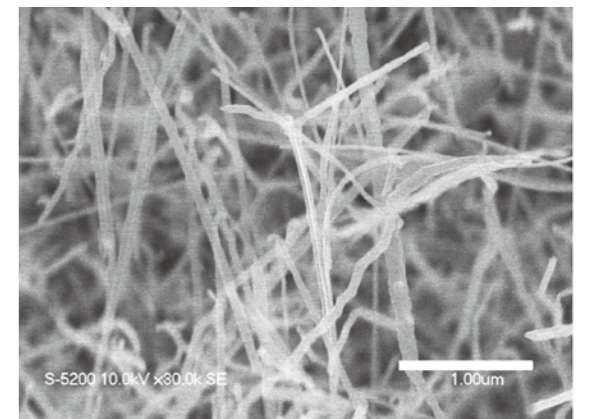
さらにその光触媒特性をメチレンブルー分解実験にて評価したところ、可視光に吸収を持たないIn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜は光触媒反応を示さなかったものの、IBO薄膜は可視光に反応して光触媒反応を示した。このIBOに微生物が棲みつきやすくするために、IBOのナノロッドの形成を試みた。IBOナノロッドの形成には、ミストCVDと金触媒を利用したVLSを利用した。このミストCVDとVLSによって、数十nm程度の径のナノロッドの形成に成功した。

### (2) 電子を細胞外で授受して、CO<sub>2</sub>を還元しメタンを生成する微生物による電気化学反応系の開発

光半導体と組み合わせる微生物の評価を行うため、電気化学反応系の構築とその電気化学反応系を利用した細胞外電子伝達菌による電気化学反応の評価を進めている。そのCO<sub>2</sub>を還元し、メタンを生成



IBOの可視光触媒反応



ミストCVD法により形成したIBO結晶のナノロッド

する細胞外電子伝達菌には当初はMethanobacterium palustreを検討していたが、安定した育成が難しいことから、Methanosarcina barkeriへ変更して検討している。このMethanosarcina barkeriを利用して電気化学評価を進めており、メタンの生成の傾向が見られてきた。今後この再現性の検証や必要な電圧の評価などを進め、光半導体と組み合わせるための条件の調査を進めていく。



# 03 ワイヤレスセマンティックコミュニケーションによるデジタルツインの構築

研究代表者 梅原 大祐 教授  
情報工学・人間科学系



高井 伸和 教授  
電気電子工学系



特筆すべき実績

▶ 電子情報通信学会コミュニケーションシステム研究会 (2024年3月に研究発表予定)

研究内容

本研究グループではセマンティックコミュニケーションにより高い伝送効率、電力効率、ならびに情報の信頼性を実現するデジタルツインの構築を目指す。現実空間の情報をデジタル空間に再現し、デジタル空間上で現実空間をシミュレーションすることで、現実の人間社会に有益なフィードバックを行うデジタルツインシステムの構築が期待を集めている。現実空間の双子となるデジタル空間を構築するには、固有のタスクを有する多数のセンサがセンシングした情報をワイヤレス通信によりクラウド/エッジサーバ上に集約する必要がある。一方で、時々刻々と変化する現実世界の情報をワイヤレス通信で伝送するためには、現行のワイヤレス通信より高い伝送効率、電力効率、情報信頼性が要求される。セマンティックコミュニケーションは、現実世界の情報のうち必要な特徴のみを検知して伝送することで高い伝送効率、電力効率、信頼性を実現するコミュニケーション技術である。図1は、クリティカルシーンを複数のセンサが協調して収集し、クラウド/エッジサーバにて必要な情報を提示するセマンティックコミュニケーションシステムの一例である。このとき、クラウド/エッジサーバ上でクリティカルシーン前のデジタル空間が構築されていることを前提とする。現実空間と無線通信チャンネルの状態に応じて、深層学習モデルにおける学習に基づき、セマンティック符号化器・復号器とチャンネル符号化器・復号器は適切に構成される。このようなマルチモーダルなセンシングデータを知識ベースで情報処理するデジタルツインの実現が本研究テーマの最終的なゴールである。

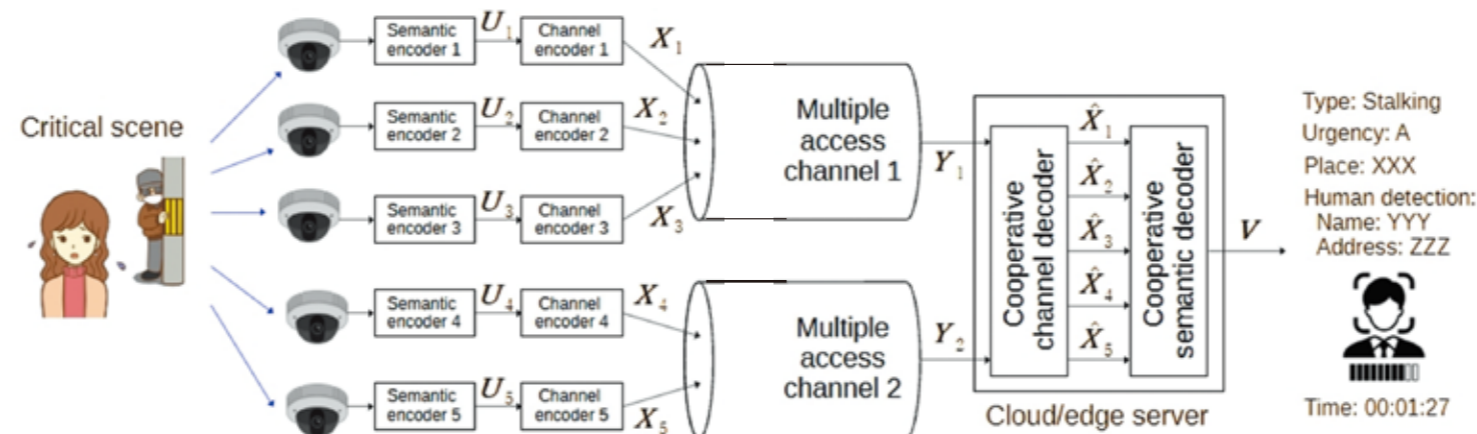


図1 クリティカルシーンを検知して状況を報告するためのセマンティックコミュニケーションシステム

研究成果

現在、本研究グループは、ワイヤレスセマンティックコミュニケーションの実現には無線通信デバイス並びに無線通信信号に要求される品質に課題があると考え、今までに提案されたセマンティックコミュニケーションの特性の調査を、既存のセマンティックコミュニケーションの再現シミュレーションを通じて実施している。

論文[1]では、深層学習アルゴリズムSwin Transformerを利用した画像無線伝送のためのセマンティックコミュニケーションを提案している。本研究グループにおいてこの方式の再現シミュレーションを実施した。画像データセットCIFAR-10における、加法的白色ガウス雑音(AWGN)チャンネルと振幅位相変動を伴うレイリーチャンネル上のSNR (Signal-to-Noise Ratio) に対するMS-SSIM (Multi-Scale Structural Similarity) をそれぞれ図2と図3に示す。横軸のSNRはワイヤレスチャンネルにおける受信信号電力と雑音電力との比、縦軸のMS-SSIMは元の画像ファイルと復元した画像ファイルの構造的類似度を示す指標で、いずれも高い値が良い品質を表す。AWGNチャンネルではSNR 10 dB、レイリーチャンネルではSNR 3 dBで学習し、それぞれの符号化器および復号器を構成した。パラメータCは送信チャンネル数を表し、この数値が小さいほど無線チャンネル上で画像の情報が圧縮されていることを意味する。高い圧縮率は伝送効率を高める一方、これらの図からMS-SSIMが低下していることが分かる。無線通信チャンネルでは、周辺環境の変化に伴い受信信号の振幅及び位相が変化していく。図3に

図2 AWGNチャンネル上のSNRに対するMS-SSIM

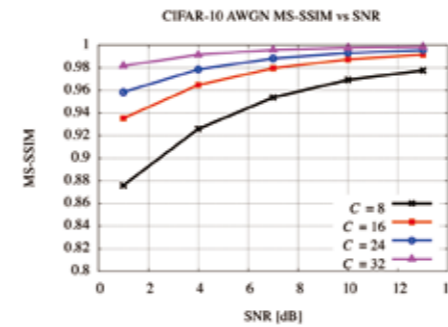
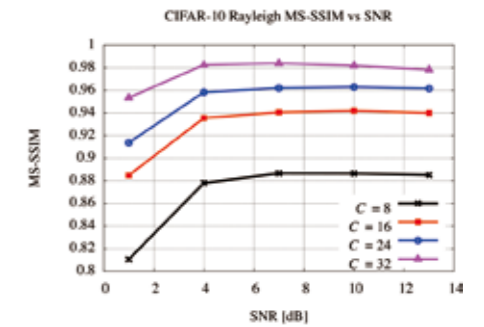


図3 レイリーチャンネル上のSNRに対するMS-SSIM



においてチャンネル状態が良い高SNR環境においてMS-SSIMが低下している現象が見られるのは、SNR 3 dBで学習した符号化器・復号器が、変動する無線通信チャンネルの状況に十分に追従できていないことを示している。この再現シミュレーションを通じて、変動する無線通信チャンネルへの適応性に課題があることが判明した。今後、本研究グループでは、多様な状態を有する無線通信チャンネルに適応的に追従できる深層学習モデルの設計及び開発に取り組む予定である。

論文[2]では、音声無線伝送のためのセマンティックコミュニケーションを提案している。本研究グループでは、音声無線伝送の方式についても再現シミュレーションを実施した。論文では、学習のための音声データセットは英語音声であり、客観評価指標の一つであるPESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality) で英語音声を評価している。本研究グループでは現在、この方式を日本語音声データセットに対して適用して主観的に評価している段階である。今後、深層学習モデルが異なる言語の音声においても汎化能力を有しているかどうか、例えば、学習用データセットを英語音声、評価用データセットを日本語音声にするなど、検証していく予定である。これらの汎化性能に関する検証を通じて、音声、画像、映像、点群などのマルチモーダルデータに対するセマンティックコミュニケーションの統一的な設計手法の考案につなげていきたいと考えている。

無線通信デバイスでは非線形な増幅器を介して信号を伝送するため、送信する無線通信信号の振幅変動が小さいほうが望ましい。また、無線通信では隣接する無線チャンネルの与干渉・被干渉を避けるために、無線通信信号は適切に帯域制限を行う必要がある。今後は、このような無線通信デバイスおよび無線通信信号における制約条件を考慮に入れたセマンティックコミュニケーションの設計手法を確立することも視野に入れて研究開発を進めていく予定である。

[参考文献]

[1] K. Yang et al., "WITT: A Wireless Image Transmission Transformer for Semantic Communications," 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Jun. 2023. DOI: 10.1109/ICASSP49357.2023.10094735  
 [2] Z. Wang and Z. Qin, "Semantic Communication Systems for Speech Transmission," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 39, no. 8, pp. 2434 – 2444, Aug. 2021. DOI: 10.1109/JSAC-2021.3087240

# 04 スマートギヤの開発

研究代表者 射場 大輔 教授  
機械工学系



研究協力者 島崎 仁司 准教授  
電気電子工学系

本宮 潤一 講師  
鳥取大学 工学部  
機械物理系学科

## 特筆すべき実績

- ▶ The 9th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT)およびVDI International Conference on Gears 2023で研究発表
- ▶ 日本機械学会年次大会で研究発表
- ▶ SPIE Smart Structures and Nondestructive Evaluation 2024で3月に研究発表予定

## 研究内容

「サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会」という未来社会「Society 5.0」の実現を目的に、第6期科学技術・イノベーション基本計画が策定された。情報社会(Society 4.0)の発展により、人と機械を繋ぐ人工知能等の技術が実用化されたが、機械内部の個々の機械要素から回収される情報は十分であるとは言えない。厳しい環境で使用され、壊れる可能性が高い機械要素から情報を発信する技術開発が、より良い未来社会「Society 5.0」構築のための鍵となる。

例えば歯車は、性能・精度・生産コスト面での優位性から、現在でも各種機械の動力伝達機構で用いられる代表的な機械要素である。こうした歯車が損傷すると機械は動力を損失することになり、その機能を失う。特に自動車や航空機といった輸送機器における動力の損失は重大な事故につながることから、歯車の健全性をモニタリングすることは大きな課題である。近年、自律移動ロボットやドローンを利用したデリバリーサービスに関連した社会実験が数多く行われており、近未来を支える新しいシステムとして話題となっている。近く本格的に導入されるデリバリーサービスで用いられる自律移動ロボットは、配達物を基地局から各家庭へ配送する際に人々の生活空間内を移動することから、高い安全性と信頼性の確保が求められることになる。

そこで我々の研究グループでは、自身の完全性を自覚できる機械装置の具現化を目指し、樹脂歯車に導電性インクを直接印刷することによりセンサとアンテナ機能を与え、高速回転中に歯車の状態がモニタリングできる「スマートギヤ」を開発している。スマートギヤに印刷した歯元き裂検知センサが断線するとスマートギヤのアンテナ特性が変化し、スマートギヤと磁界結合させて観測アンテナの周波数特性に影響が現れ、歯車の運転中にき裂の有無を非接触で検知することが可能である。



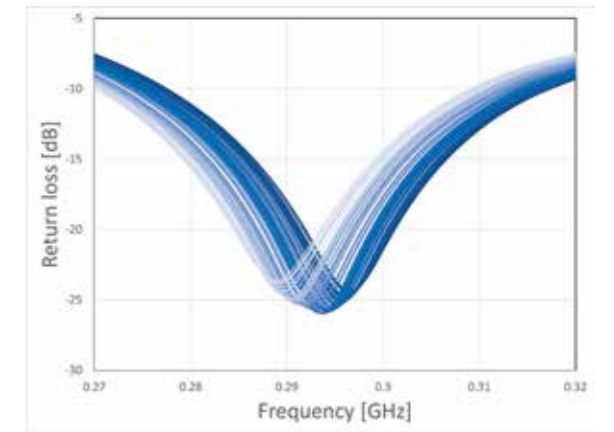
き裂検知センサとアンテナを印刷したスマートギヤ

## 研究成果

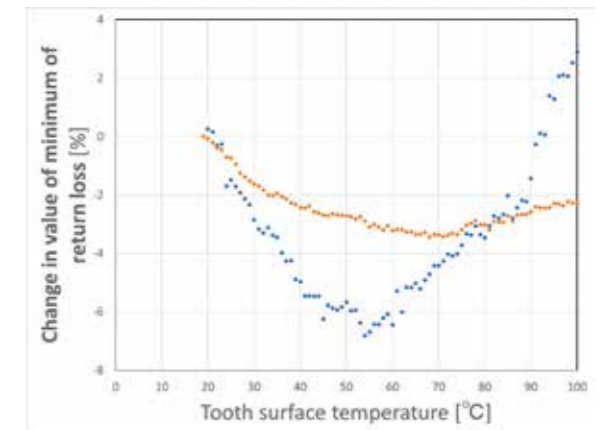
研究グループのメンバーは、月に1度程度のペースで集まり、導電性インクを樹脂歯車表面に塗布してレーザーで焼結することによって、センサとアンテナ回路を印刷し、スマートギヤを製作する技術を開発してきた。また、歯車に印刷したアンテナと同形状の観測アンテナをネットワークアナライザに接続して電力を供給し、このアンテナに隣接させたスマートギヤのセンサの状態を、観測アンテナの周波数特性を介して観測する方法を提案した。これまでに歯車に発生したき裂がセンサ部回路の断線を引き起こし、その影響で観測アンテナの周波数特性を表すリターンロスに変化が生じることを確認していた。一方で、歯車にき裂が発生する以前から観測アンテナのリターンロスに変化が現れてくる現象が生じていた。このような変化は、き裂発生などの損傷に至るよりも前から、自己の機能を維持する能力(レジリエンス)が徐々に低下しており、そうした微小な状況の変化が観測アンテナ特性に現れていると仮定し、新たな研究計画を立てた。観測アンテナと磁界結合しているスマートギヤのアンテナは、運転中の摩擦熱による温度上昇、力学的作用による歯形形状変化と樹脂材料内部の分子構造変化が主に関連していると考え、これら熱と力がスマートギヤシステムに対する影響を明らかにすることにした。

そこで、はじめに樹脂歯車の温度変化がスマートギヤシステムの周波数特性に及ぼす影響を調べた。ヒーターによって歯車を加熱し、スマートギヤの温度上昇に伴い磁界結合中の観測アンテナの周波数特性を測定し、遺伝的アルゴリズムを用いて2自由度の電気回路でモデル化したシステムのパラメータを同定した。この実験では温度上昇に対する単純な影響のみならず、歯車材料であるナイロンのガラス転位温度を超えると温度上昇に対してアンテナ周波数特性変化の傾向が異なってくる結果が得られ、樹脂の分子構造の変化が、提案するスマートギヤシステムで捉えられることを示す結果となった。

次に、運転試験でのばらつきを抑えるために、同じアンテナ周波数特性を有するスマートギヤの製作に取り



温度上昇に対するアンテナリターンロスの変化



ガラス転位温度におけるアンテナ特性の傾向変化

掛かった。これまで行っていた導電性インクのレーザー焼結では製作される回路の特性が安定しなかったため、新しい製作工程としてマグネトロンスパッタリング法による下地電極の製作、銅メッキによる電極厚みの付与、レジスト材の露光と現像による回路パターン製作とエッチングによる不要電極の除去を導入し、それぞれの工程における適切なパラメータを実験的に導出した。そして歯車性能試験により運転中のスマートギヤの特性変化を計測し、かみ合いによる力学的作用がシステムに与える影響について調査を開始した。

本年度、研究グループでは、本研究テーマで科学研究費助成事業 基盤研究BとNSKメカトロニクス技術高度化財団への予算申請を行った。



# 3Dプリンタ積層造形のスキャンストラテジー最適化システムの開発

研究代表者 高木 知弘 教授  
機械工学系



研究協力者 森田 辰郎 教授  
機械工学系

武末 翔吾 助教  
機械工学系

坂根 慎治 助教  
機械工学系

## 特筆すべき実績

- ▶ 武末翔吾助教, 公益法人マザック財団 優秀論文賞, 2023年5月19日受賞
- ▶ 武末翔吾助教, 日本材料学会関西支部 支部長賞, 2023年4月17日受賞
- ▶ 高木知弘教授, 日本計算工学会 川井メダル受賞, 2023年5月23日受賞

### 研究内容

日本国内では3Dプリンタや積層造形の名称で呼ばれることが多い付加製造(additive manufacturing)は、従来の加工法では製造不可能な内部構造を有する複雑な製品の造形が可能な最先端加工技術であり、世界中で活発に研究が行われている。このような中、2022年度本学が申請した概算要求が採択され、2023年度中に3Dプリンタが導入されることになった。本設備を、ものづくりのみならず、研究にも積極的に活用するべく、本研究グループを立ち上げた。

3Dプリンタは、複雑な構造物を作製可能であるが、材料の溶融凝固を伴うため大きな残留応力が発生し、製品の質が低下する課題を有している。また、この残留応力は形成される材料組織に強く依存する。さらに、製品の強度に代表される様々な特性は、材料組織に強く依存する。このため、積層造形時の材料組織を適切に制御することが重要となる。材料組織は、様々なレーザー走査条件とレーザーパターンを意味するスキャンストラテジーによって大きく変化するため、その最適化による材料組織の制御を通じ、残留応力を低下させる方向性が極めて重要である。

本研究では、高品質な製品を造形するための最適なスキャンストラテジーを導き出すシステム開発を最終的な目的としている。これを達成するために、本学に導入される3Dプリンタを用いた実験と、高性能数値シミュレーション技術を融合し、3Dプリンタにおける材料開発のマテリアル・デジタルトランスフォーメーション(マテリアルDX)を開発することで、スキャンストラテジーをバーチャル空間で最適化する。



GPUクラスター

### 研究成果

#### 【数値シミュレーション研究】

組織予測に関する研究を3つのスケールから行っている。最も解像度の高いスケールでは、溶融池底から成長するセル/デンドライトを再現した。温度場は汎用凝固シミュレータであるflow-3Dを用いたレーザー走査シミュレーションから取得し、組織予測には二元合金の急冷凝固に対するフェーズフィールドモデルを採用した。計算コストが膨大となるため、細分化適合格子(AMR)法を複数GPU並列計算環境で用いるparallel-GPU AMRを導入し、大規模計算を高速化した。中間スケールの組織予測では、溶融池内の液相流動の影響を受ける組織予測に対するフェーズフィールドモデルを構築した。ここで、固気液混相流を表現するフェーズフィールドモデル、多結晶凝固組織予測を可能とするフェーズフィールドモデル、気相と液相で流動を解くNavier-Stokes方程式、熱伝導方程式を連成させた。最も大きなスケールでは、様々なスキャンストラテジーにおける組織評価を目指すフェーズフィールド計算法[T. Takaki, Y. Takahashi, S. Sakane, Mater. Trans., 64 (2023) 1150-1159]を開発した。図1はシミュレーション例である。双方向スキャンストラテジーを用い、4トラック・4層のビーム走査を行うシミュレーションを行った。図中、くぼんだ領域が溶融池に対応し、溶融池前方では溶融、後方では多結晶凝固による特徴的な組織が形成されていることがわかる。

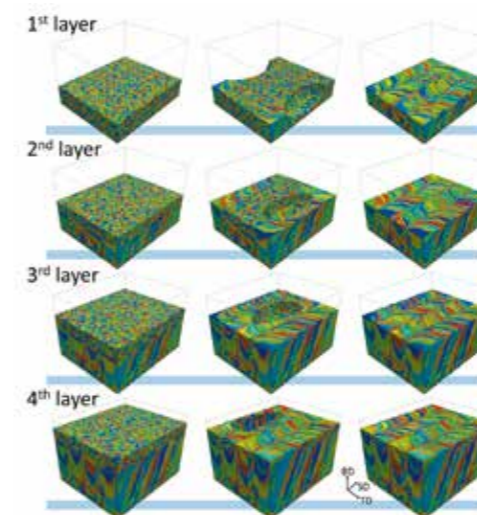


図1 双方向スキャンストラテジーによる4トラック・4層ビーム走査における組織予測シミュレーション

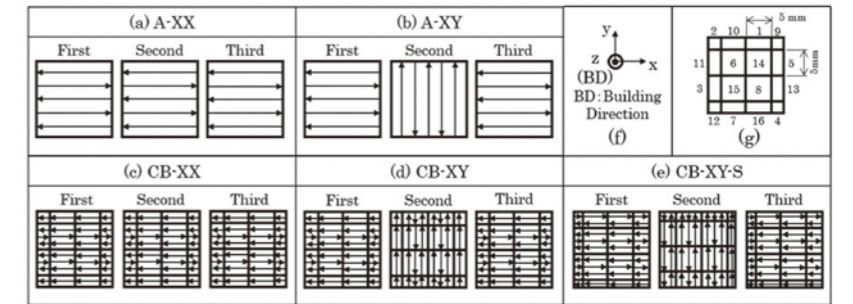


図2 使用したレーザーの走査パターン

#### 【実験的研究】

レーザー粉末床溶融結合法により造形したマルテンサイト系ステンレス鋼SUS420J2について、スキャンストラテジー(図2)と組織形態、硬さ分布および残留応力分布等の基本特性との関係を実験的に調べた。図2(a)では、第1層の全域で走査方向をx方向に固定して折り返しレーザーを走査し、第2層以降でも同じパターンとした。図2(b)では、第1層では全域で走査方向をx方向に固定して折り返しレーザーを走査し、第2層ではレーザーの走査方向をy方向に変更した。図2(c)~(e)では、走査領域をチェスボード状の小区画に分割した。各走査パターンで作製した一辺15 mmの立法体形状試料を用いて、硬さおよび残留応力を測定した。各AM材の硬さは、展伸材(焼入れ・焼戻し材)よりも高かった。しかし、すべてのAM材の硬さは同程度であった。その一方で、異なる5種類のレーザー走査パターンで造形したAM材では、走査パターンの変更により残留応力の低減が可能であることが示された。その内、最も残留応力の低減に効果的であったのは、走査領域をチェスボード状に小区画化するとともに、走査方向を交互に変更しながら位置をシフトさせた場合であり、走査方向を一方に固定して全域走査した場合の25%の水準まで低下した。以上のように、スキャンストラテジーの工夫により、硬さ水準を維持しつつ、製品の形状変化をもたらさる残留応力の低減が可能であることが、オーステナイト系ステンレス鋼に関して示された。なお、本件については日本材料学会誌『材料』に投稿中である。

#### 【海外における研究活動】

カリフォルニア大学デービス校との共同研究で、3Dプリンタの一種である指向性エネルギー堆積法により造形したステンレス鋼薄板内に生じた残留応力を中性子線により測定し、薄板内の位置によって残留応力の値が変化すること、残留応力は異方性を有すること、レーザー走査条件が変化することで残留応力分布は変化することを明らかにした。本成果は現在Manufacturing Letters(IF=3.9)に投稿中である。



# 06 空飛ぶクルマ高精度リアルタイムシミュレーション技術構築

研究代表者 山川 勝史 教授  
機械工学系



研究協力者 東 善之 助教  
機械工学系

## 特筆すべき実績

- ▶ Springerより発刊の“Lecture Notes in Computer Science”に空飛ぶクルマシミュレーションの研究成果「Numerical Simulation of the Octorotor Flying Car in Sudden Rotor Stop」および「Turning Flight Simulation with Fluid-Rigid Body Interaction for Flying Car with Contra-Rotating Propellers」2編掲載(2023年7月)
- ▶ 東京ビッグサイト “第4回フライングカーテクノロジー” 展にて「空飛ぶクルマ高精度飛行予測技術開発」出展(2023年9月)

## 研究内容

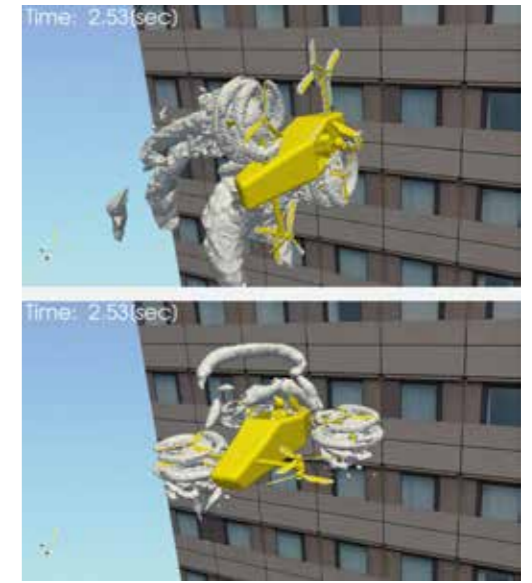
本研究では空飛ぶクルマ(フライングカー)の飛行に関するシミュレーション技術の構築を進めている。独創的な点はこのフライングカーの飛行試験をコンピュータ内で全て実施可能とするシミュレーション技術であり、本学が商標登録を持つ「デジタルフライングカー」の実現に向けた研究である。一般的にこのような飛行機体に対するシミュレーション技術は、風洞型と呼ばれる一様流中に機体を設置し評価するものである。この手法では機体が等速直線運動をする場合のみの計算であり、実際の飛行状態を評価できていないと言え難い。これに対して本研究では「移動計算領域法」という特殊な計算手法を考案・採用することで加減速、旋回、離着陸を含むほぼ全ての飛行状態を再現できるものであり、様々な飛行試験をコンピュータ内で実施することができる。この実試験をシミュレーションによる仮想実験に置き換えることで、フライングカーに関する様々な開発が可能となる。まず機体開発の期間短縮と低コスト化である。フライングカーはその歴史が浅いこともあり機種形態が絞られていない、つまりあらゆる形状、あらゆる推力システムの検討が要求されており、それに合わせて開発項目が膨大となっている。つまり、この機体開発のために必要とされるパラメトリックスタディには本シミュレーション技術が最適であると言える。また従来法では表現が困難である強風下の不安定飛行や失速および墜落時のシミュレーションも可能であり、実験そのものが不可能な状態での評価および回避のための開発も行うことができる。まさに夢の計算手法と言える。



空飛ぶクルマシミュレーションのコーディング

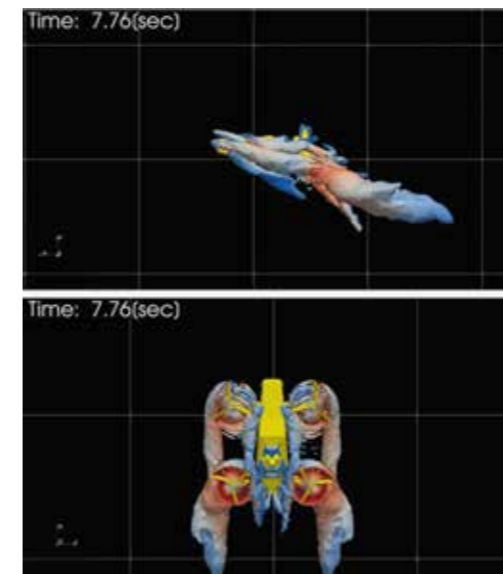
## 研究成果

このデジタルフライングカーはロータの回転により発生する推力と機体にかかる空力との連成計算により機体姿勢を算出するものである。本技術構築にあたり、まず基本動作となる前進、停止(ホバリング)、加減速、旋回、離着陸についてのシミュレーション技術を完成させた。特に減速動作(図:減速シミュレーション)については機体の迎角と停止挙動との関係について仮想実験を行い、適正な迎角を算出している。リフトクルーズ型やベクタードスラスト型とは異なり、マルチロータ型のフライングカーでは迎角の最適化は機体の安定性と直接に関係し重要なパラメータとなっている。これらを安全に実施できているところに大きなメリットがある。また非常時のシミュレーションとしてロータ停止時の機体挙動についてシミュレーションを実施した。本研究では8個あるロータの内、1つまたは2つを停止させた。その際、残りの6つもしくは7つのロータは瞬時に機体安定化への制御を実行させ、墜落の防止を試みている。ただ一つの組み合わせ、同じ箇所の上下2つのロータを同時停止させた場合を除き、全てにおいて墜落を回避できた。図(墜落シミュレーション)上段には墜落を回避できなかった唯一の事例を示している。この図は左前の上下のロータを停止したものである。ロータ停止により発生し



墜落シミュレーション

た反時計回りのローラを回避するため、対称位置になる右後のローラを停止するものの、左前ローラ停止による慣性力により、機体の不安定化から墜落に至っている。この問題を解決するため、コンピュータ自身にその解決法を考えさせた。その結果、停止ローラの対称位置のローラを「逆回転」させることを提案してきたのである。逆回転はそもそも設計思想には無く、逆回転により逆向きの揚力が発生する保証も無い。本ロータの場合、逆回転による揚力は正回転の半分程度であるものの、ローラを回避するには十分な大きさであったため、最終的に墜落を回避している(図:墜落シミュレーション下段)。今回の試行では墜落を回避する手段を見つけたことよりも、手動では解決できない制御上の問題を計算機が解決するという新たなプロセスを見いだせたことに大きな意義があると考えている。人工知能には程遠い稚拙な自動化ではあるが、機体制御におけるAI利用の可能性を見いだせたと言える。本研究の最終目的に「リアルタイム」シミュレーション技術を挙げている。このシミュレーションは流体計算(圧縮性流体に対する空力計算)がベースとなっており、例えば数分の飛行計算にPC利用では数か月の計算時間を要する。超並列計算やGPU計算により数十〜数百倍の計算の可能性は残るものの、「リアルタイム」とは程遠いものである。現在、この流体計算を瞬時に終わらせるため「機械学習」による時短を進めている。研究につき具体的な手法名は秘匿するものの、2次元計算ではこの「瞬時計算」の目処を得ている。続報をお待ちいただきたい。



減速シミュレーション



# 07 社会・産業インフラ維持のための自律的サイバーフィジカルシステム

研究  
代表者

増田 新 教授  
機械工学系



研究  
協力者

射場 大輔 教授  
機械工学系

東 善之 助教  
機械工学系

## 特筆すべき実績

- ▶ 学術論文1件  
(構造ヘルスマニタリングセンサに関するもの)  
DOI: 10.3390/machines11080826
- ▶ 国際会議PHMAP2023にて成果発表2件  
(センサネットワーク・物理リザーブコンピューティングに関するもの)
- ▶ 国内会議発表 5件  
(センシングロボット、ドローン、深層学習による診断・予測、デジタルツインモデルに関するもの)
- ▶ 外部資金(共同研究1件)
- ▶ その他、特許登録、MTA

## 研究内容

少子化による労働人口の急激な減少の影響が顕在化している現在にあって、社会・産業インフラの維持管理を自律化し人手から解放することは、これからの人間社会を健全・幸福に持続させる上で極めて重要な意味を持つ。本研究グループでは、情報と物理が本質的に統合されたサイバーフィジカル結合領域の開拓により、人間をパートナーとして自らを生きながらえさせる自律的・自覚的・自活的人工物システム、いわば自律ロボット化したインフラ人工物、の実現を目指し、3つのテーマで研究を行う。

### (1) 物理世界への能動的プローブとしての

#### センシングロボット・ドローンの自律化技術

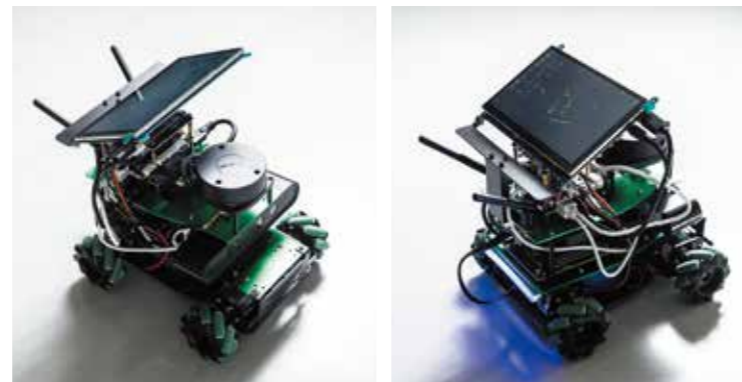
ドローンやロボットによるインフラ構造物の自動検査を目指すものである。永電磁石 (EPM) に関する基本技術(特許公開中)を基盤とし、鋼構造物に空中から接近し機体を自動的に吸着固定して近接画像検査および接触検査を行う飛行ロボット、および構造物に吸着して歩行移動を行うマイクロセンシングロボットを開発する。

### (2) デジタルツインによる寿命予測技術

産業機械に組み込まれた回転機械要素を対象とした診断・寿命予測の研究。深層学習によるデータ駆動型アプローチとデジタルツインモデルによる逆問題的アプローチを組み合わせることで、対象機械の個別特性や運転条件へのドメイン依存性を除去した寿命予測モデルを構築する。

### (3) 革新的な高密度センサネットワーク

計測対象である構造物自体の弾性波動場を情報媒体とするニューラルネットワークを構成することにより、物理的な配線や無線通信手段を必要としないセンサネットワークを実現し、構造物監視点の革新的な高密度化への道を拓く。



構造物検査移動ロボット実験機

## 研究成果

(1) センシングロボット・ドローンのモビリティを向上させる研究、および移動・検査の自律化技術。前者については、高所にある配管などの円筒鋼管にドローンが下方から接近・吸着するための磁気吸着グリッパの開発、ドローンが垂直壁に前方から接近、速やかに吸着・離脱するための機体の新規開発を行った。また、構造物表面に吸着して歩行移動するセンシングロボットの踏破性向上のための脚構造の改良を行った。後者については、vSLAMを用いた自己位置推定と対象物およびその表面性状の画像マッピング技術を汎用実験機体を用いて開発中。

(2) 回転機械に組み込まれた機械要素の診断・寿命予測に深層学習アルゴリズムが多用されるようになっているが、それらの多くはドメイン依存性、すなわち対象機械の個別特性や運転条件へのデータ依存性を上手く取り扱うことができない。いっぽうで機械要素に発生する損傷モードとその進展機序は組み込み対象や運転条件にかかわらず共通である。そこで、データからドメイン依存性を「剥ぎ取る」ためのデジタルツインモデルを構築し、非線形カルマンフィルタを用いたデータ同化とスパース回帰アルゴリズムにより軸受内部の損傷状態を推定する手法を提案、ベンチマークデータセットおよび2022年度に立ち上げた転がり軸受負荷試験装置から取得したデータセットを用いた検証を行った。今後は、推定した損傷状態の進展予測モデルを機械学習アルゴリズムによって構築する。さらに、歯車状態監視用のデジタルツインモデルを構築する共同研究を実施中。

(3) センサ・アクチュエータを持つセンサノードを分散配置し、これらをニューロンと見立てると、構造物上に「寄生した」ニューラルネットワークを構築できる。ニューロンとなるセンサノードは計測した構造物振動波形に非線形な活性化関数を作用させたもので構造物を加振する機能を持ち、構造物の弾性波動場を媒体として相互結合する。このネットワークはセンサネットワークでありながら、その上である種の演算を行い構造物動特性の変化を検出する判別器として動作する。2023年度は二種類のコンセプトを提案・検討した。一つは、ネットワークが吸引されるアト

ラクターの質的变化(分岐)によって損傷による構造物の変化を検出するネットワーク、もう一つは、特定のタスクを学習する物理リザーブとして動作し、予測誤差の増大によって構造物動特性の変化を検出するネットワークである。いずれも数値モデルによる概念検証を報告した。



検査ドローン用エンドエフェクタ



弾性波動場ニューラルネットワーク実験装置



垂直壁吸着ドローンの機体設計

## ムーンショット型 研究開発事業 目標6

### 研究開発 プロジェクト

#### スケーラブルな高集積量子誤り訂正システムの開発

国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)が推進する「ムーンショット型研究開発事業」目標6に採択され、本プログラムを2022年度からスタートしました。

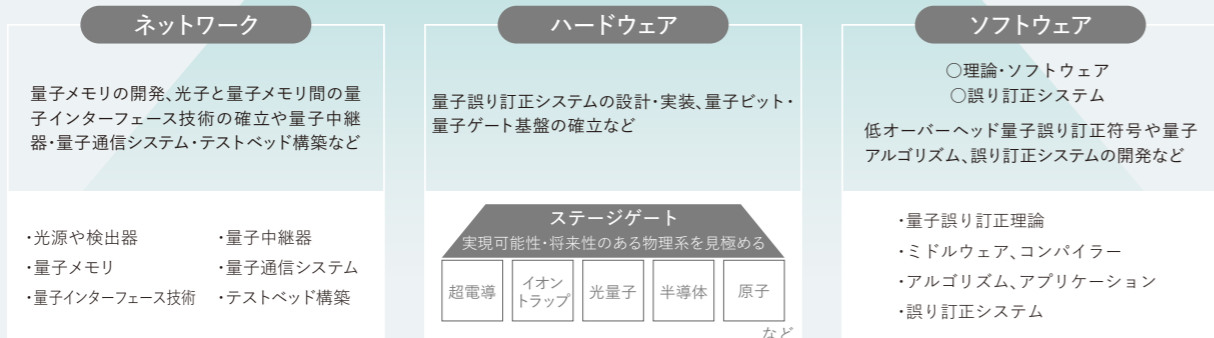
本研究開発プロジェクトのゴールは、超伝導量子ビットから中性原子まで多岐にわたる量子ビット実現方式にアジャイルに対応するエラー訂正システムの実現と、超伝導量子ビット向けの小型かつ省電力な量子ビット制御装置の実現です。

本ムーンショット目標6の2050年までの目標は、大規模な誤り耐性汎用量子コンピュータの実現です。本研究開発プロジェクトにおいては、上位に位置する中規模量子ビット間の通信ネットワーク、最上位の量子ビットハードウェアとの組み合わせにより、100万量子ビットまで対応可能なエラー訂正システムならびに量子ビット制御装置を実現可能とする技術の研究開発を行います。

#### 目標達成に向けたムーンショット目標6の研究開発の全体像

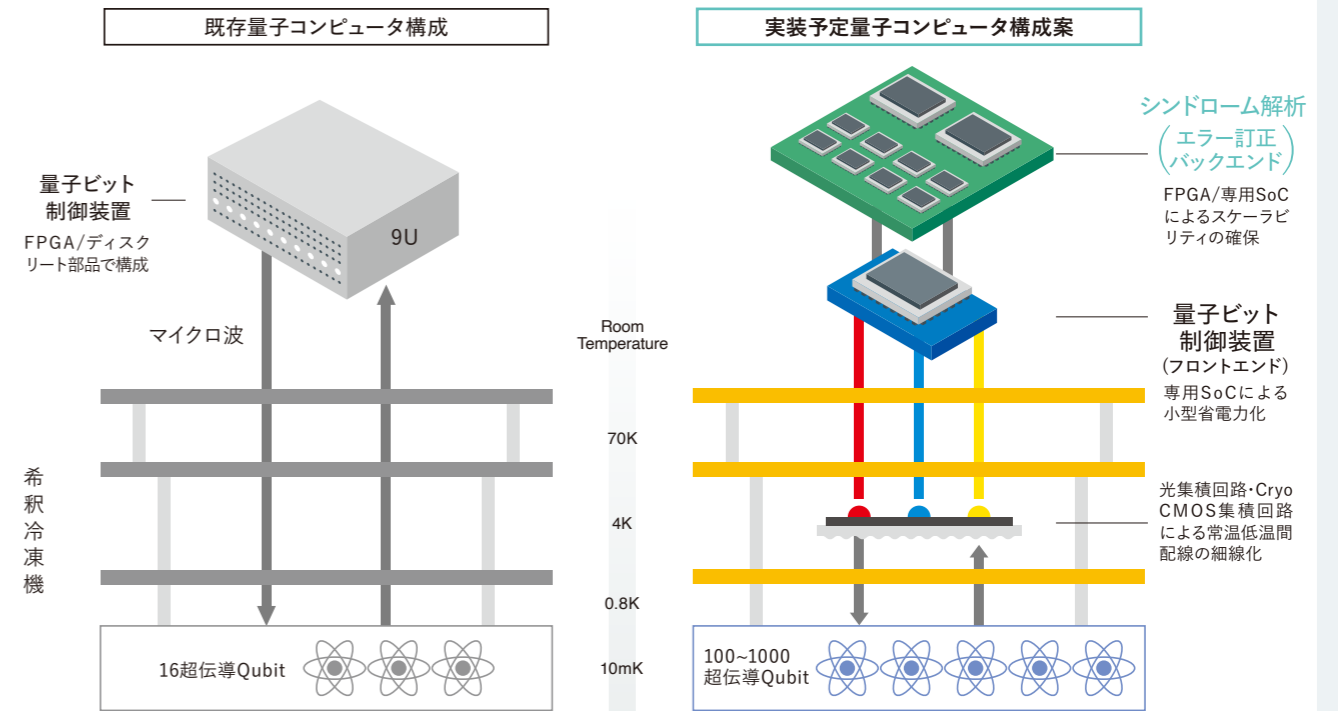
2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性汎用量子コンピュータを実現

- 2050 大規模化を達成し、誤り耐性汎用量子コンピュータの実現
- 2040 分散処理型NISQ量子コンピュータの実証 量子誤り訂正下での有用タスク計算  
NISQ : Noisy Intermediate-Scale Quantum
- 2030 一定規模のNISQ量子コンピュータの開発と量子誤り訂正の有効性実証



#### 小林プロジェクトの研究開発概要

NISQ (中規模エラー訂正なし) から FTQC (大規模エラー訂正あり) へ  
FTQC : Fault Tolerant Quantum Computer



#### 研究推進者一覧

- |  |                                      |                                     |                                       |  |
|--|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--|
| 小林 和淑<br>京都工芸繊維大学・教授<br>集積回路・パワーエレクトロニクス   | 佐野 健太郎<br>理研・チームリーダー<br>計算機アーキテクチャ   | 門本 淳一郎<br>東京大学・助教<br>プロセッサ設計        | 長名 保範<br>熊本大学・准教授<br>FPGA間高速通信        | 三好 健文<br>キュエル・CTO<br>量子ビット制御装置             |
| 塩見 準<br>大阪大学・准教授<br>光集積回路                  | 新谷 道広<br>京都工芸繊維大学・准教授<br>トランジスタモデル生成 | 佐藤 高史<br>京都大学・教授<br>設計技術            | 土谷 亮<br>滋賀県立大学・准教授<br>CMOS RF回路       | 高井 伸和<br>京都工芸繊維大学・教授<br>機械学習を使ったアナログ回路自動設計 |
| 宮原 正也<br>高エネルギー加速器研究機構・准教授<br>CMOS高速アナログ回路 | 今川 隆司<br>明治大学・助教<br>デジタル回路のRTL設計     | 岸田 亮<br>富山県立大学・講師<br>デジタル回路のレイアウト設計 | 五十嵐 正利<br>株式会社ソシオネクスト<br>微細アナログCMOS設計 |  |

#### 5つの研究開発項目とその概要

- 研究開発項目1 エラー訂正バックエンド**  
概要 : Qubit数に対してスケーラブルなエラー訂正バックエンドシステムの研究開発を行う  
課題推進者 : 佐野 健太郎 (理化学研究所・チームリーダー) 門本 淳一郎 (東京大学・助教) 長名 保範 (熊本大学・准教授)
- 研究開発項目2 量子ビット制御フロントエンドの先鋭化**  
概要 : デジタル信号処理の活用とシステムのSoC化により既存のフロントエンドの性能向上と小型化を図る  
課題推進者 : 三好 健文 (キュエル株式会社・CTO)
- 研究開発項目3 光/Cryo CMOS集積回路によるスケーラブルな古典-量子インターフェース**  
概要 : 極低温領域で動作する光/CMOS集積回路でスケーラブルな古典-量子インターフェースを実現する  
課題推進者 : 塩見 準 (大阪大学・准教授) 新谷 道広 (京都工芸繊維大学・准教授) 佐藤 高史 (京都大学・教授)
- 研究開発項目4 フロントエンド・バックエンドのASIC/SoC化**  
概要 : ASIC/SoC化によりフロントエンド・バックエンドを低電力・省面積化し、装置の小型化を図る  
課題推進者 : 小林 和淑 (プロジェクトマネージャー (京都工芸繊維大学・教授) 土谷 亮 (滋賀県立大学・准教授) 高井 伸和 (京都工芸繊維大学・教授) 宮原 正也 (高エネルギー加速器研究機構・准教授) 今川 隆司 (明治大学・助教) 岸田 亮 (富山県立大学・講師)
- 研究開発項目5 常温で動作するフロントエンドアナログRF部のLSI化**  
概要 : フロントエンドアナログRF部の主要な機能ブロックを微細CMOSデバイスで設計し、TEGを試作・評価、課題抽出を行い、実現性を踏まえた統合化の設計指針を確立する  
課題推進者 : 五十嵐 正利 (株式会社ソシオネクスト)