



京都大学電気関係教室技術情報雑誌

No.50 SEPTEMBER 2023

[第50号]

..... 巻頭言

吉川 潔

..... 大学の研究・動向

計算電磁気学とその応用

工学研究科 電気工学専攻 電磁工学講座

電磁エネルギー工学分野

..... 産業界の技術動向

京大発スタートアップの核融合への挑戦

京都フュージョニアリング株式会社 小西 哲之

新設研究室紹介

研究室紹介

令和4年度修士論文テーマ紹介

高校生のページ

学生の声

教室通信

編集後記

cue：きっかけ、合図、手掛かり、という意味
の他、研究の「究」（きわめる）を意味す
る。さらに KUEE（Kyoto University
Electrical Engineering）に通じる。

cue は京都大学電気教室百周年記念事業の一環とし
て京都大学電気教室百周年記念事業基金と賛助会員
やその他の企業の協力により発行されています。

cue 50 号 目次

巻頭言

AI 技術と大学教育

..... 昭和 41 年卒業 京都大学名誉教授 吉川 潔..... 1

大学の研究・動向

計算電磁気学とその応用

.....工学研究科 電気工学専攻 電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野..... 3

産業界の技術動向

京大発スタートアップの核融合への挑戦

.....京都フュージョニアリング株式会社 小西 哲之..... 9

新設研究室紹介..... 14

研究室紹介..... 16

令和 4 年度修士論文テーマ紹介 33

高校生のページ

プラズマの光から何がわかる？ ～プラズマ分光学への第一歩～

エネルギー理工学研究所 エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野（稲垣研）

..... 門 信一郎..... 54

学生の声

起源探究の醍醐味

.....工学研究科 電気工学専攻 松尾研究室 博士後期課程 2 年 飛田 美和..... 61

研究雑感

.....工学研究科 電子工学専攻 野田研究室 博士後期課程 2 年 勝野 峻平..... 61

教室通信

令和 4 年度卒業生の進学就職状況

.....土居 伸二、木本 恒暢..... 62

編集後記..... 63

巻頭言

AI 技術と大学教育

昭和 41 年原子核工学科卒 京都大学名誉教授 吉 川 潔



昨年末より対話型 AI (ChatGPT など) について、とくに大学におけるその使用方法を巡って学生の思考力、想像力育成への大きな疑念が表明されてきました。また、さる 6 月 30 日日経に掲載された マイケル・サンデル ハーバード大学教授の「技術の未来」を考えよう」という記事によれば米国でも

「対話型 AI 『Chat (チャット) GPT』 や大規模言語モデルについて人々が話し始めたのは 2022 年 11 月からだ。私の授業でも来学期に向け、従来の筆記課題に加えて口頭試問を取り入れることを助手らと議論している。学生がチャット GPT に頼らず自分で発想力を広げられるようにするためだ」「うまくいけば学生の成果を評価する、より創造的な方法となるだろう。ただ、1 年前にはこんな議論はなかった。技術が登場していなかったからだ。大学だけでなく政府や社会全体も、新たな展開に追いつこうとしている」「技術が民主主義を置き去りにすることがないよう、市民社会や大学といった公共の場で倫理をめぐる課題を広く議論していかなければならない。悪用の危険を最小化するために判断を下せるだけの知識をもった議員や規制当局者の存在も必要だ」

とあります。そこで早速この「対話型 AI 技術革新の下で 今後の大学の教育はいかにあるべきか?」を、ChatGPT に尋ねてみましたところ、以下の回答 (原文のまま) を得ました。

『対話型 AI 技術の革新は、大学の教育に多くの可能性をもたらしています。以下に、今後の大学の教育がどのように変化する可能性があるかについていくつかの考えを示します。

1. カスタマイズされた学習体験：対話型 AI 技術を活用することで、学生は個々の学習ニーズやスキルレベルに合わせたカスタマイズされた学習体験を受けることができます。AI は学生との対話を通じて進行状況や理解度を把握し、必要な説明や教材を提供することができます。
2. 協力的な学習：対話型 AI は、学生同士の協力的な学習を促進する役割を果たすことができます。AI はグループのディスカッションやプロジェクトに参加し、異なる視点やアイデアを提供することで、より深い学習と知識の共有を可能にします。
3. フィードバックと評価：AI は、学生の学習成果や課題への取り組みに対してフィードバックを提供することができます。従来のテストや試験だけでなく、AI が学生との対話を通じて継続的な評価を行うことで、学生の強みや改善点を特定し、適切なサポートを提供することができます。
4. アクセスと柔軟性の向上：オンライン学習や遠隔教育がますます一般的になる中、対話型 AI 技術は学生により柔軟な教育の選択肢を提供します。AI を活用した対話型のオンライン講義やチュータリングプログラムは、地理的な制約や時間制約を受けずに学習を進めることができるようになります。
5. ライフロングラーニングの促進：対話型 AI 技術は、学生が大学を卒業した後もライフロングラー

ニングを継続することを支援します。AIは個々の学習ニーズに基づいたカリキュラムや学習プランを提案し、専門知識の更新やキャリアの変化に対応するためのサポートを提供することができます。

これらの変化に伴い、大学の役割も変化する可能性があります。大学は単に知識を提供するだけでなく、学生の学習プロセスをサポートし、批判的思考や問題解決能力を育成する場として重要な役割を果たすことになるでしょう。また、倫理的な側面やAIの限界についても注意が必要です。』

教育の本質は、人類の幸福実現に貢献するために、多くの知識や先端技術を適切に駆使し、創造力を発揮できる能力と高い志を持った意志強固な人材の育成にあると考えます。個人的な感想では、この回答は至極まっとうなものだと思います。ただし、対話型AIの回答にはまだ改善の余地があると感じます。つまり、大学教育の普遍的な目標は、学生の心に人類愛の火をつけることに要約されます。そして、これは技術がどれほど発展しようとも、人間同士の心の通ったコミュニケーションを通じてしか実現できないと考えています。

本巻頭言を終えるにあたり、サンデル教授の最後の含蓄ある言葉を紹介します。

「私たちが発明したはずの道具が、私たち自身や人間であることの意味を変え始めたように感じられ、私たちは技術の犠牲者であるかのように思えることがある。だが私たちの生活や未来は自分たち次第だということを忘れないでほしい」

「技術を制御できなくなるのは、我々が手放したときだけだ。もし私たちが人々を教育し、民主主義社会の市民として技術の使い道を熟議することができなかったら——。『人間の価値ある目的を達成するために技術をどのように使うべきか』という命題は、どんなに賢い機械も私たちに代わって決めてくれることはないだろう」

2023年7月1日

大学の研究・動向

計算電磁気学とその応用

工学研究科 電気工学専攻 電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野

教授 松 尾 哲 司

講師 美 船 健

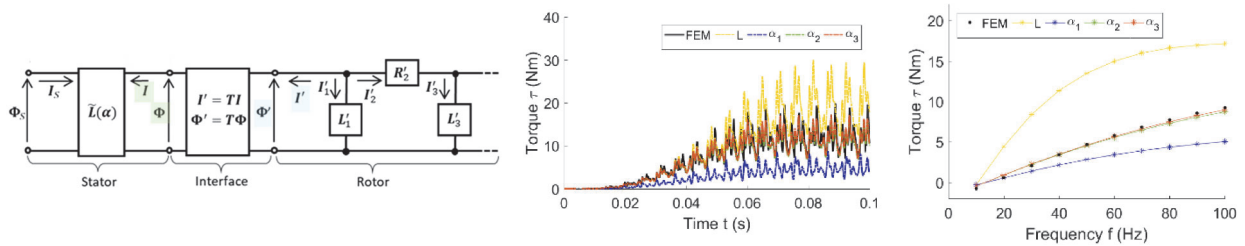
助教 比留間 真 悟

電気自動車やロボットなどに用いられるモータとその制御装置の開発において、計算機による電磁界シミュレーションが不可欠のツールとなっています。その際、制御装置と連成してのモータ応答解析が、多岐にわたる運転条件下において必要となります、そのために高精度な磁界解析法である有限要素法を繰り返し使用することは、膨大な計算時間を要することから現実的ではありません。他方で、電力機器の小型化への要請から、電力制御におけるスイッチング周波数の向上が求められています。半導体技術の進歩により高速スイッチが可能になっていますが、スイッチング周波数の上昇により、鉄芯材料の損失の増大や浮遊容量による共振現象の招来といった設計上の問題が生じます。さらには数値解析においても、時間刻み数の増加や、表皮厚の減少に伴う空間格子数の増加が避けられず、計算コストが増大します。このような問題に対して、計算電磁気学の観点から解決を図るべく、1. 電気機器のモデル縮約、2. 磁性材料特性の現象論的 / 物理的モデリング、3. 容量効果を考慮した効率的な電磁界解析手法、4. モータ最適設計手法の開発 などの研究テーマに取り組んでいます。

1. 電気機器のモデル縮約

有限要素法は高精度な反面、膨大な数の未知数に対する連立方程式の求解が必要で、数多くの繰り返し計算を行うには計算時間の面から実用に適さない場合がしばしばあります。そこで、精度を保ちつつ未知数の数を減らして電気機器の応答を再現する、モデル縮約法の開発が近年進められています。本研究室は、最近注目を集めている、Cauer ladder network (CLN) 法 [1] の開発に当初から参画しており、その応用範囲を拡大してきました。これまで、マルチポート化、展開点の導入 [2]、非線形化、モータモデル縮約への応用に成功しています。ここでは、誘導モータの非線形モデル縮約 [3] について概説します。

まず、誘導モータの固定子と回転子を別々にモデル縮約します。CLN 法では、縮約モデルを多端子対 Cauer 回路にて表現します。その上で、固定子・回転子両縮約モデルを空隙部にて接続します (図 1(a))。その際、固定子・回転子両座標間の座標変換を境界条件に組込むことにより、幅広い運転条件において速度起電力が自然にかつ正確に表現されます。次に、固定子の飽和の度合いを、入力電源部における、電流振幅 (a_1) または 磁束振幅 (a_2)、あるいは、空隙部磁束振幅 (a_3) でパラメータ表示します。各パラメータ値に対して、Cauer 回路の回路定数を算出しておき、パラメータの変化に対して回路定数を変化させることにより、鉄芯の飽和の影響を表現します。図 1(b) は、有限要素磁界解析と縮約モデルによりトルクの時間波形を算出した結果を比較しています。線形縮約モデル (図中 L) ではトルクを過大評価しており、電源電流によるパラメータ化 (a_1) では過小評価しています。これに対して、電源磁束 (a_2) あるいは空隙部磁束 (a_3) にてパラメータ化すると、精度よくトルク波形が算出されています。また、平均トルク (図 1(c)) についても、広い周波数範囲で高精度に算出できています。



(a) 誘導モータモデル縮約の概念図

(b) トルクの時間波形

(c) 平均トルクの周波数特性

図 1 誘導モータの非線形モデル縮約

2. 性材料特性の現象論的 / 物理的モデリング

半導体技術の進歩により、MHz に達するスイッチング動作が可能になっていますが、磁性材料における損失が大きく、さらなる高周波化は容易ではありません。そこで、磁性デバイスの設計支援用の現象論的な磁性材料モデル化手法と、発現する磁化特性の理解のための物理的なモデル化手法を開発しています。

2.1 現象論的モデル

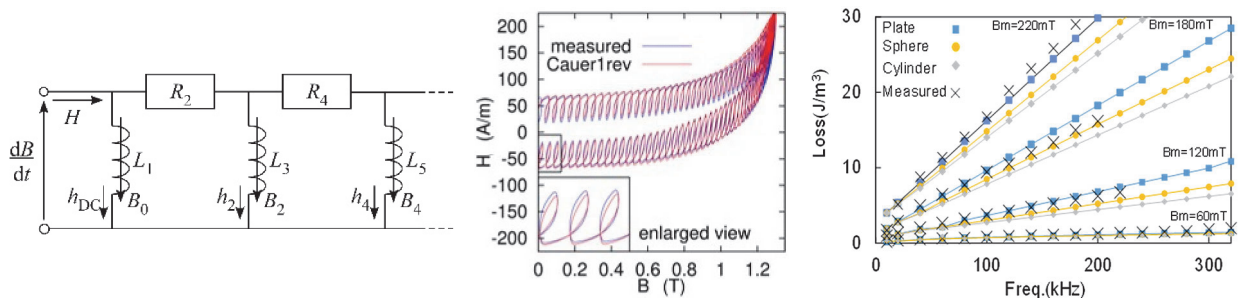
静的なヒステリシス特性に対してはプレイモデルという優れたモデルが存在し、ベクトルヒステリシス特性を含めた高精度な表現が可能になっています [4]。動的なヒステリシス特性に対しては、プレイモデルと Cauer 回路 (図 2(a)) の組合せによる表現が有望です [5]。同図で、 L_1 は直流特性を表現するインダクタであり、その特性がプレイモデルにより表現されます。Cauer 回路表現は、まず、電磁鋼板の磁気特性表現に応用され、PWM 励磁下のマイナーループを含む BH 曲線を図 2(b) のように正確に表現することに成功しています。電磁鋼板のような薄板磁性体に対しては、線形磁気特性の場合の解析解を応用して、Cauer 回路の回路定数を

$$R_{2k} = (4k-1)R, \quad L_{2k+1} = L_1 / (4k+1) \quad (k = 1, 2, \dots), \quad R = 4 / (\sigma d^2) \quad (1)$$

のように与えることができます。ここで、 σ は導電率、 d は鋼板厚みです。球状の磁性体の場合は、解析解から、

$$R_{2k} = (4k+1)R_2 / 5, \quad L_{2k+1} = 2L_1 / (4k+3) \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (2)$$

となります。ナノ結晶材料に対して、Cauer 回路表現により損失の周波数特性を算出した結果を図 2 (c) に示します [6]。式 (2) の球状磁性体を仮定した場合 (図中 sphere) に実測値 (図中 measured) とよく一致しています。このような Cauer 回路は、磁性材料内部の微細構造に由来して決まる平均的な磁気特性を表現するものであり、均質化表現として用いることができます。すなわち、Cauer 回路表現を有限要素磁界解析に組み込むことにより、磁性材料内部の渦電流磁界を直接考慮することなく、磁性デバイスのマ



(a) Cauer 回路

(b) 電磁鋼板の BH ループ

(c) ナノ結晶材料の損失特性

図 2 Cauer 回路による動的ヒステリシス特性表現

クロな磁気特性を算出できることが期待され、高周波磁性デバイスの最適設計への応用が見込まれています。

2.2 物理的モデル

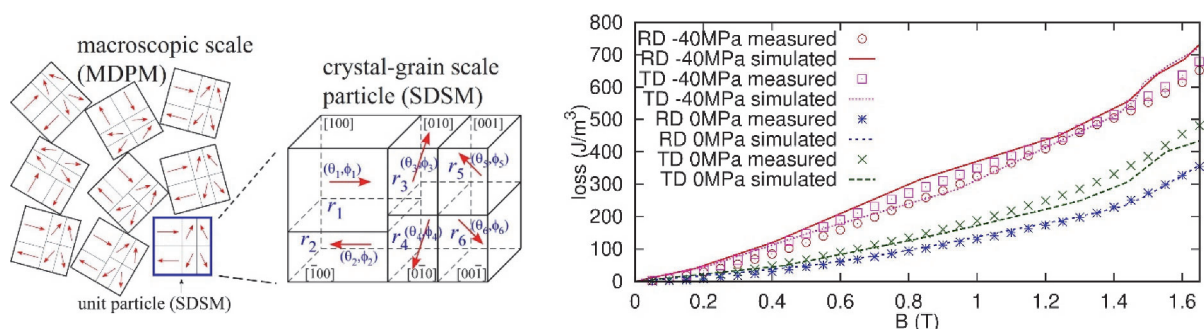
前述の現象論的モデルでは、モデルパラメータの決定に材料特性の計測データを要します。しかし、複数の物理現象を考慮する必要がある場合、全ての物理的条件で計測することは現実的ではありません。例えば、代表的な鉄芯材料である電磁鋼板は、鋼板に加わる機械的な応力により、磁気特性が悪化しますが、励磁方向と応力方向の膨大な組合せで磁気計測することは実用上無理があります。もし、材料定数から材料特性を予測できる物理的な手法があれば、材料特性の計測は必要ないので、磁性材料あるいはデバイスの開発の際、大変有用です。そこで、本研究室では、電磁鋼板の物理的な磁化モデルとして、多磁区粒子集合モデルを開発しています [7]。

多磁区粒子集合モデルは、磁区・結晶粒スケールの磁化モデルとして simplified domain structure model (SDSM) を用います。電磁鋼板に対しては、6 磁区の粒子を用い、多数の粒子の磁化容易軸の方向を分布させます (図 3(a))。各粒子の磁化状態は、6 磁区の体積比と各磁区の磁化ベクトルの方向で表現され、全磁気エネルギーを極小化することによって決定されます。ここで、考慮されるエネルギー成分は、外部磁界エネルギー、結晶磁気異方性エネルギー、磁気弾性エネルギー、ピンニングエネルギー、静磁界エネルギーです。

多磁区粒子集合モデルに用いるピンニング磁界の分布を決定するため、無方向性電磁鋼板 50A470 の無応力下での BH ループの計測結果から、非履歴磁化特性を差し引いてピンニング磁界を算出します。その結果をブレイモデルにて同定することにより、ピンニング磁界をモデル化します。材料定数として、飽和磁化を $\mu_0 M_s = 2.07 \text{ T}$ 、異方性定数を $K = 4.2 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ 、磁歪定数を $\lambda_{100} = 2.4 \times 10^{-5}$ および $\lambda_{111} = -9.5 \times 10^{-6}$ としています。上記モデルパラメータを決定する際には応力下における計測結果は必要ありません。

図 3(b) に 40MPa の圧縮応力を印加した / しなない場合における 1 周期あたりヒステリシス損の計算結果を計測結果と比較して示します。図では、圧延方向 (RD) と直角方向 (TD) の両方向とも、応力下の鉄損特性を予測できていることがわかります。

今後、本モデルを動的モデルに拡張することにより、高周波磁性材料へ応用することを予定しています。



(a) 多磁区粒子集合モデル

(b) 電磁鋼板ヒステリシス損に対する機械的応力の影響

図 3 多磁区粒子集合モデルによる電磁鋼板の応力依存磁化特性

3. 容量効果を考慮した効率的な電磁界解析手法

モータ等の電気機器の電磁界解析手法として、マクスウェル方程式中の変位電流の項を無視する準静磁界モデルが広く用いられていますが、準静磁界モデルでは解析対象の持つ容量効果を考慮することが

できません。一方、近年のインバータ駆動される電気機器においてキャリア周波数の高周波化が進んでおり、それらの設計開発のための電磁界解析において、寄生容量・寄生インダクタンスの影響を考慮することの必要性が顕在化しつつあります。準静磁界モデルに基づく電磁界解析に容量効果を取り入れる手法として Darwin モデル [8] を検討していますが数値的な安定性の面で大きな困難があり、本研究室では補助変数の導入など、数値安定性の改善のための新しい計算手法の開発に取り組んでいます。

一般に有限要素法に基づく電磁界解析では、以下の形で表される連立方程式が導かれます。

$$A \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad \dots\dots\dots (3)$$

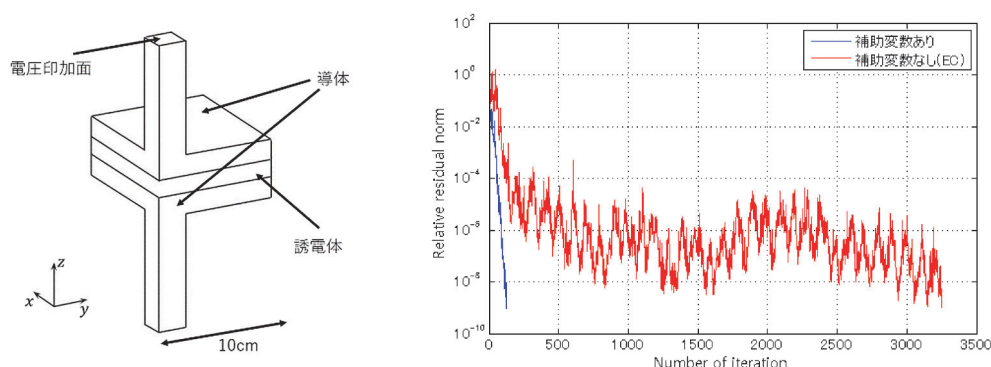
ここで A , $\mathbf{x}$, $\mathbf{b}$ はそれぞれ、係数行列、解ベクトル、右辺ベクトルを表します。通常、式(3)は反復求解によって解かれますが、Darwin モデルによって導出される係数行列は極めて悪条件であり、反復求解の収束性に関する困難が現れます。それに対して本研究室では、 $\mathbf{x} = \mathbf{y} + B\mathbf{z}$ を満たす変数 $\mathbf{y}$, $\mathbf{z}$, 行列 B を導入し、拡大された連立方程式

$$\begin{pmatrix} A & AB \\ B^T A & B^T AB \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{b} \\ B^T \mathbf{b} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (4)$$

について求解を行う手法について提案を行っています。行列 B を適切に設計することで問題の悪条件性が解消されることが期待できます。

提案手法の有効性を確認するため、図 4(a) に示すような簡易的なキャパシタモデルについて解析を行いました。これは容量効果が支配的なモデルとなっており、従来の準静磁界モデルで扱うことはできません。Darwin モデルによる解析において導出される連立方程式に対して、通常の解法と提案手法による反復求解を行ったときの反復収束性を比較したものを図 4(b) に示します。横軸は反復回数、縦軸は得られた近似解の相対残差ノルムを示し、相対残差ノルムが 10^{-9} 以下になったときに反復求解が収束したとみなしています。式(3)に対する反復求解(赤線)では相対残差ノルムが激しく振動し安定的な求解を行えていないのに対して、提案手法(青線)を用いることで収束特性を劇的に改善できることが示されています。

提案手法は収束特性の改善の面で大変効果的ですが、行列・ベクトルを拡大することによって計算コストが増大するデメリットも含んでいます。提案手法の収束改善効果を行列を拡大することなく求解プロセスに取り込む計算手法について、現在さらに検討を進めています。



(a) 簡易キャパシタモデル (b) 反復求解の収束特性
図 4 容量効果を考慮する Darwin モデルによる電磁界解析例

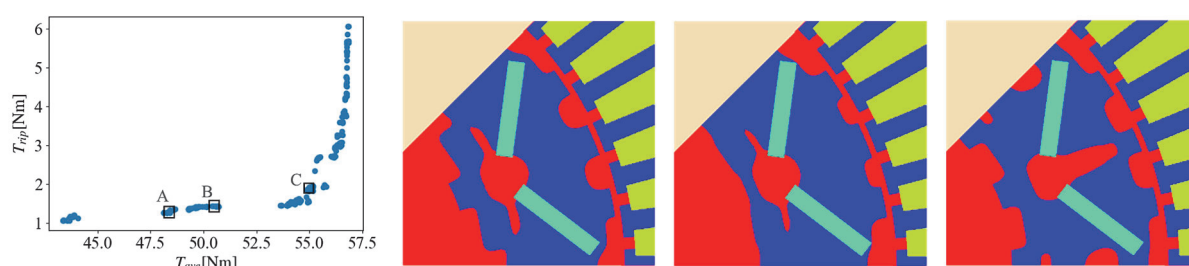
4. モータ最適設計手法の開発

永久磁石モータは高効率・小型・軽量といった特徴を備え、制御性に優れたモータです。その中でも埋込型永久磁石同期モータ (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor: IPMSM) は回転子部分に

ネオジム磁石が埋め込まれた構造をしており、強力な磁石によるマグネットトルクと構造由来のリラックストルクの両方を活用した高トルクかつ高効率なモータとして電気自動車や家電製品に広く用いられています。そのため、IPMSMの省エネルギー化や高性能化は社会に大きな影響があり、それを達成するための設計・開発は自動車メーカーや電気メーカー含む幅広い産業から高い関心を集めています。IPMSMは磁石を回転子に埋め込むという特徴によって、回転子は磁気的な観点から見ると複雑な磁気回路を形成しています。磁石の埋込位置やフラックスバリア(磁束障壁)の形状を工夫することによって磁路が変化し性能を向上させることができます。しかしながら、多数の設計要件を満足する形状を得るためには膨大な試行錯誤が必要となり、また通常の最適設計に用いられるパラメータ最適化では複雑な磁路を表現するためのパラメータ設定を事前知識なしに行えないという問題点があります。そこで本研究室では、形状を柔軟に表現できるトポロジー最適化をベースにした自動設計手法の開発と応用に取り組んでいます[9]。

図5にIPMSMに対してトポロジー最適化を適用した例を示します。この例では出力向上と騒音の低減を目的として平均トルク最大化、トルクリプル最小化を目的関数に設定しています。また、製造可能な形状をトポロジー最適化で作るために応力制約と連結制約を加えた最適化を行っています。図5左は2目的最適化のパレート解、右はパレート解の代表形状です。青の領域は磁路となる電磁鋼板、赤色の部分は磁路を妨げるフラックスバリア、水色の部分は永久磁石を表す領域です。最適化中では連結制約と応力制約が加えられているため、実際に製造可能な形状が探索されていることが分かります。特に図5の一番右の形状に着目すると磁石端部に大きなフラックスバリアができていることが分かります。これは磁束の短絡を防ぐためのもので平均トルクの向上に寄与していると考えられます。また回転子表面中央付近には大きな二つの溝があります。これは空間高調波を制御するためのものと考えられ、トルクリプルの抑制に寄与していると考えられます。このように設計者がすぐに思いつくことが難しいような形状もトポロジー最適化によって得ることができます。昨今は商用ソフトウェアにも実装され始めており、トポロジー最適化は今後設計に必須のツールとして広がっていくことが予想されています。

現在は磁界解析や応力解析の精度を担保するためにメッシュのクオリティを反映したトポロジー・パラメータ最適化を検討しています。また、今後の展開としてトポロジーの表現能力を維持しつつ設計変数の数を削減できるような効率的な形状表現法の設計、技術者が容易に使用できるように問題例のテンプレート化、良い形状を得るための問題の設定方法に関する知識の蓄積が考えられます。



(a) 多目的最適化により得られたパレート解 (b) パレート解上の代表形状 (左から A, B, C)
図5 制約条件付き多目的最適化のパレート解と代表的な形状

5. むすび

簡単ながら、計算電磁気学に関する研究を紹介しました。今後、先進的な電気電子機器・デバイスの設計開発のため、AI技術を利用した電磁界解析技術の開発を進めていく必要があります。

文献

- [1] A. Kameari, H. Ebrahimi, K. Sugahara, Y. Shindo, and T. Matsuo, Cauer ladder network representation of eddy- current fields for model order reduction using finite-element method, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, 7201804 2018.
- [2] K. Kuriyama, T. Mifune, T. Matsuo, Multiport model order reduction with multiple expansion points, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 57, 6301505, 2021.
- [3] M. Tobita and T. Matsuo, Nonlinear model order reduction of induction motors using parameterized Cauer ladder network method, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 58, 8205504. 2022.
- [4] T. Matsuo, Anisotropic vector hysteresis model using an isotropic vector play model, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, pp. 3041-3044, 2010.
- [5] Y. Shindo, T. Miyazaki, T. Matsuo, "Cauer circuit representation of the homogenized eddy-current field based on the Legendre expansion for a magnetic sheet, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, 6300504, 2016.
- [6] I. Okuda, T. Matsuo, Dynamic modeling of magnetic core materials for sub-MHz range using Cauer circuit, *Compumag 2023*, PB-M3:8, 2023.
- [7] T. Matsuo, Y. Takahashi, K. Fujiwara, Anisotropic vector play model and its application in magnetization analysis, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 59, 7300204, 2023.
- [8] H. Kaimori, T. Mifune, and A. Kameari, Investigation of Darwin model with two types of Coulomb gauge condition in frequency-domain electromagnetic finite-element method, *Proceedings of Progress in Industrial Mathematics at ECMI 2021*, pp. 463-469, 2022.
- [9] S. Hiruma, M. Ohtani, S. Soma, Y. Kubota and H. Igarashi, Novel Hybridization of Parameter and Topology Optimizations: Application to Permanent Magnet Motor, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 57, 8204604, 2021.

産業界の技術動向

京大発スタートアップの核融合への挑戦

京都フュージョニアリング

小西 哲之

1. 今なぜ核融合スタートアップなのか

2023年4月14日、内閣府から「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」が発表され、わが国が新たな低炭素エネルギー技術としてのフュージョンの開発を推進し、かつその産業化を次世代のエネルギー産業として育成する方針が示されました。この背景には、近年のGX（グリーントランスフォーメーション）に向けた世界の政治、産業界、経済界の大きな潮流があり、また米国英国を中心とした「核融合ベンチャー」の勃興が大きく影響しています。ここでこれまで公的計画のみであったわが国の核融合開発政策を大きく転換させた要因の一つが、実は京都大学発、2019年設立の「京都フュージョニアリング（株）」なのです。京都大学は、そもそも湯川博士が1957年原子力委員会核融合反応懇談会の会長を務めたことなど、わが国核融合研究の草創期から主導的な役割を担ってきましたが、60年を経て再び新たな流れの源流となったといえるかもしれません。

公的計画としての核融合は、国際熱核融合実験炉ITERの国際共同事業、あるいは日欧協力によるJT60SA装置や核融合研における大学共同利用施設LHDなど、大型装置が中心です。これらは着実な成果を上げ、技術的実現性が高い確度で期待されながらも、その実用化は今世紀半ば、とみられていました。ところが世界のスタートアップは、高温超電導など最新の技術を用い、ずっと小型の装置で、2030年代にも発電実証や商業化を目論んでいます。気がつけば公的な大型計画は、予算や人員の制約、「失敗できない」という圧力でリスクを避けて保守的な技術オプションを志向していますし、ITERなどは2000年代初頭にすでに設計が固定されていて最新のイノベーションは使われにくいのです。これに対し「ベンチャー」企業は最新技術でイノベーションを狙い、しかもリスクを取って先進的な挑戦を行う傾向があります。失敗する確率も多いでしょうが、成功したものが社会に残ります。今世紀に入ってより一層加速した先進国の技術開発において、イノベーションの主体は大企業や公的機関でなく、今やスタートアップ企業に移っているのです。夢のエネルギーといわれて久しいフュージョンエネルギーも、その例外ではなく、画期的な技術革新や早期実現には新たな企業が必要とみられています。

図1に米国における核融合研究資金の、公的予算とプライベートの投資の比較を示します。それまで数百億円規模で安定的に供給されてきた公的予算を、ここ3年くらいは民間投資が凌駕していることがわかります。これらの資金は、核融合研究設備の製造建設と研究開発人材に投じられています。これは核融合装置の市場はすでに1000億円規模で成立していて、現在これらを提供できる企業がすでに市場シェアをつかみつつあること、また技術力を持つ人材もまた圧倒的にこれらの企業が雇用している、ということです。核融合は数10年後の夢ではなく、すでに十分大きな市場として現存しています。そして、米国の宇宙開発の主力がSpaceXに代表されるような民間に移ったと同じように、核融合実用化の主役としてのスタートアップの競争がはじまっているのです。

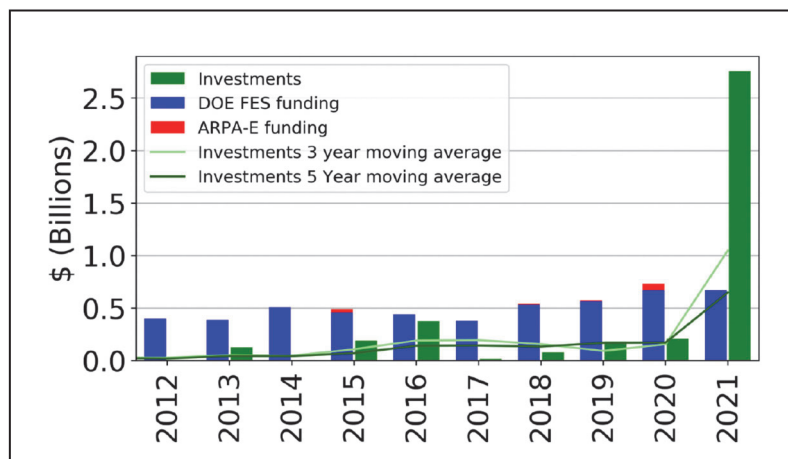


図 1. 米国における近年設立された核融合スタートアップの研究資金と公的資金の比較

2. 京大発ベンチャーとしての役割と狙い

この新たな技術革新の流れの中で、大学発ベンチャーというメカニズム、つまり独創的なアイデアと小規模で小回りの利く大学の研究開発を社会実装につなげる、というスタイルは、大学の果たすべき社会的な機能のひとつとして今や必須といえます。わが国や京大は世界レベルでは残念ながらその先端ではないながらも、遅れてはいません。大学は、技術シーズとしては宝の山ではあるものの、資金集めや実社会のビジネスでのつながりにおいて特に疎いことがあり、起業には精神的バリアも含めて困難を伴います。京都大学は京大イノベーションキャピタル、という投資会社を擁し、また学内の起業を志す研究者などに助言やネットワークの紹介などのサポートを行っていて、筆者にとっても京都フュージョニアリング社の成立の大きな要因となりました。

京大は核融合研究開発では老舗ではあるのですが、京都フュージョニアリング社は、エネルギー理工学研究所、エネルギー科学研究科、という学際的で工学志向の分野の研究の社会実装を狙って2019年10月に設立されました。筆者の専門領域は核融合研究の中でも特に炉工学と呼ばれる核融合装置の工学であり、核融合反応の結果生じる高速中性子のエネルギーを安全に使える形に変換し、また総合的に社会や環境に適合するシステムとして構築することです。一方、京大内の学際研究組織「生存基盤科学研究ユニット」として、人類の持続可能な生存を支えるエネルギー、環境、経済システムの研究に取り組んできました。核融合という技術体系と、スタートアップ起業におけるビジネスモデル構築、という意味では、革新的な核融合技術を開発し、それを供給する、というエンジニアリングサービスを提供するBtoBが主な業務になります。公的機関では国などの予算によって核融合実験炉、さらに原型炉などの装置を建設し運転するわけですが、その能力を持つ主体が現在あるわけではありません。様々な核融合企業がプラズマ装置を開発していますが、核燃焼プラズマに成功したとしても核融合装置、さらにプラントを構築する技術はまだ世界にありません。そこで京都フュージョニアリング社は、この核融合装置とエンジニアリング、という事業に着手したわけです。現在、約100名の従業員、100億以上の資金を集め、日米英に拠点を置いて活動しています。

現在の事業分野は大きく3つに注力しています。第一は、プラズマを生成加熱するのに不可欠な電子サイクロトロン共鳴周波数帯の発振器、ジャイロトロンとその周辺装置です。核融合装置はエネルギー増幅器であり、1GWの核融合出力が得たければ、数10MWの加熱入力が必要で、100GHz周波数帯で連続的に発振するシステムを供給しています。第二は中性子エネルギーを変換し、燃料であるトリチウムを製造する装置「ブランケット」システムの技術です。これは単にプラズマの周りで核融合反応のエネルギーを受け止める部分だけでなく、そこに熱媒体を循環してエネルギーを電力に変換したり、水

素を製造したり、あるいは燃料となるトリチウムを連続的に抽出する、というプラントになります。第三はこのトリチウム燃料を循環して連続的にプラズマに供給する燃料サイクルです。核融合のプラズマは数%しか燃焼せず、排ガスの大部分が未燃焼なのでこれを処理して再利用し、また前記ブランケットでの生成分を加えないと運転を継続できません。また水素の放射性同位体であるトリチウムを安全に閉じ込め、従事者や環境への影響を最小限に制限する機能も持っています。

図2にこのトリチウム燃料系の概念図を示します。現在、カナダのチョークリバー国立研究所と協力して、世界初となるこの技術の実証試験施設の建設プロジェクトを開始しています。このシステムは、核融合のトリチウムシステムを統合的に実証しようとするもので、磁場方式、慣性方式などの多くの方式に共通に使えて、燃料を処理循環し、精製回収、同位体分離する一方、空気や水からトリチウムを除去するプラント全体を構築するものです。これにより、近い未来の世界の核融合実験にトリチウム取り扱い技術を提供できるようになる計画です。

さらにもう少し先に目を向ければ、京都フュージョニアリングは、前述の技術分野に加え、超伝導磁石やプラズマ計測など核融合プラントに固有な技術の需要にこたえ、最終的には核融合炉プラント全体の構築の可能な企業を目指しています。

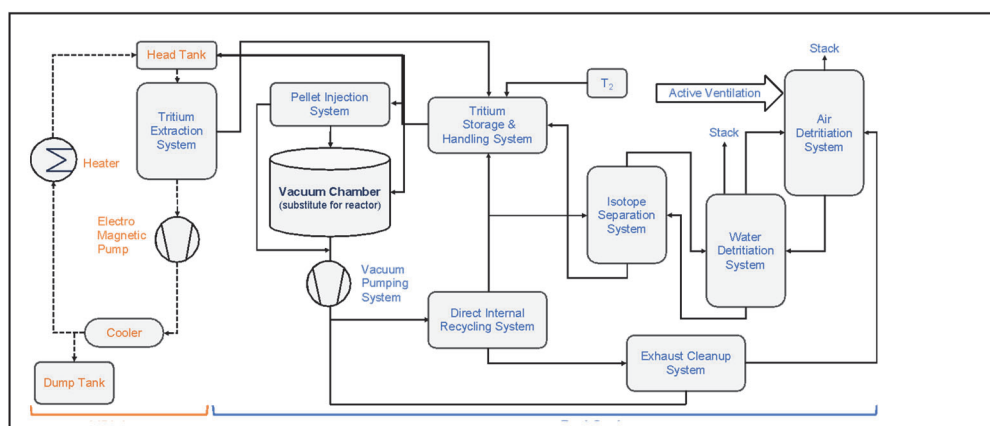


図2. 京都フュージョニアリングとチョークリバー国立研究所の共同事業 UNITY-2 の概要

3. スタートアップと実用化戦略

少なくとも大学発スタートアップ企業の主要な活動は販売ではありません。イノベーションであり、それを通じた企業自体の成長です。研究者や学生さんからよく「何で儲けるのですか？」と聞かれるので誤解されていることがわかるのですが、投資は借金ではなく、国家予算でもなく、社会の蓄えた資産を期待される分野の成長のために使うものです。現在プライベート核融合に投資が集まる理由は、それまで化石資源を資産と思ってきた社会が、石油や石炭が燃やせない—二酸化炭素を出せない、という理由でその資産の先行きに不安を感じる一方、核融合を脱炭素エネルギーの切り札と期待していることが一因にあります。投資は会社自体になされるので、その企業価値（valuation）が増えれば成功で、投資者は保有資産を増やすことができるのです。いま世界で動いているのは、脱炭素と持続可能性を目指した社会資源、資本の大きな流れの変化であり、資源ではなく、科学技術を中心とした価値社会の構築とみなせるのです。

核融合スタートアップは早期実現を目指している、といってもそれが簡単な目標でなく、まだ多くのイノベーションが必要なことは理解しており、それに挑戦することで企業価値を高めます。数年単位の早い周期での研究開発設備の拡充と技術革新は不可欠であり、これができなければ次の段階の資金調達ではできません。技術開発の成功は、もちろん顧客獲得につながる売り上げの見込みがなければ投資は

受けられないのですが、技術自体の斬新さや魅力、産業として自立できる成熟度が重要です。スタートアップはイノベーションを目指すもの、といっても起業されるベンチャーの大部分はITやバイオなどの大型設備を要しない分野に偏っています。起業はしても実験室レベルと産業化の間にはいわゆる「死の谷」があって、電気などエネルギー分野では特に、投資環境や人材、設備、行政による規制、様々な企業との取引環境など、成長を可能とする「エコシステム」の課題が多くなっています。

大学発ベンチャーには、初期的には大学の研究インフラとして産学共同利用設備や大学との共同研究、特に高度な計測分析装置やその利用技術、端的には大電力の受電など、通常民間では利用困難な資源が使える利点があります。さらに研究者ネットワークや卒業生の就職先を通じた企業との連携、あるいは人材そのものの供給源でも大学とその卒業生は重要な意味を持っています。資金調達や、様々な特殊原材料、加工技術を持った会社との付き合いもそうですが、最終的に、その分野のサプライチェーンを構築することが起業の目的なのです。工学を理工系の学問として狭くとらえるのではなく、経済や経営、社会まで視野を広げると、スタートアップの役割が見えてきます。フュージョンを産業化しようとするとき、その技術を社会で実際に使うことを可能にする「装置」として、「会社」という形式を選択し、また実際にそれを構築したことになります。会社は、自分で投資を集め、人材を集め、会社のネットワークを組み、サプライチェーンを構築することで、新たな産業分野をつくることができます。同じことをやりたい人が集まっているので、異なる意見を調整する組織よりはるかに意思決定が早く、また資金さえ獲得できれば予算の制約も緩和されます。なにより、急速に拡大する会社は、自在に合目的な組織を構築することができます。核融合は、始まって60年、少し実施体制が古くなり、柔軟性が失われているようです。予算や人員が急速に変化しづらい既存組織の困難を克服し、人材や知識の継承を図る必要があるでしょう。

これまでわが国では、原子力分野でもふげんやもんじゅなどの新型炉は技術開発はともかく、産業化に至っていません。拡大するスタートアップとして、京都フュージョニアリング社は、新たに構築するフュージョンエネルギー産業の中核となることを意図しています。わが国には優れたモノづくりの技術があり、原子力や電気、あるいはエネルギー産業には多くの高度技術がありますので、核融合ではそれらの組み合わせ、すり合わせを再構築することで新たな産業の発生が期待できるのです。

4. まとめ

大学発ベンチャーの事業についてご紹介してきましたが、おかげさまで京都フュージョニアリング社は順調に成長し、当初目的のフュージョンエネルギーの実用化、さらにその先にある、人類社会の持続的なゼロカーボンサイクルの達成に貢献したいと考えています。京都フュージョニアリングは単に核融合の工学研究の実用化を目指す会社ではなく、総合的なエネルギーとカーボンの新たな社会システムを構築するというコンセプトを持っています。京大の特徴的な学際研究スタイルの一つの事例といえると思いますが、工学分野にとどまらず、「生存基盤科学研究ユニット」等の複数部局にまたがる研究の成果もその起業コンセプトに含まれています。図3はその実例ですが、フュージョンをエネルギー源として一つの重要な要素にありますが、それをもとに持続可能なエネルギー社会を構築するコンセプトです。こうした研究を深めることが、結果として投資家に理解を得たり、核融合の市場性、経済性を分析して会社経営に役立てることもつながっています。

京大は現在は産学連携本部など、組織的機構的な体制もかなり整っていて、恵まれたサポート環境があります。一方では、昔からの学術ディシプリンも残っているので、意思決定の遅さや新たな枠組みの構築には困難もありますが、これはわが国大学の共通の問題でもあるでしょう。学生や教員も、必ずしもスタートアップや起業に前向きな人ばかりではない、というかここでも世界のトップレベルとは相当な開きがあります。その一方で、大学の研究成果を学会や学術誌にとどまらず、社会につなげたい、実

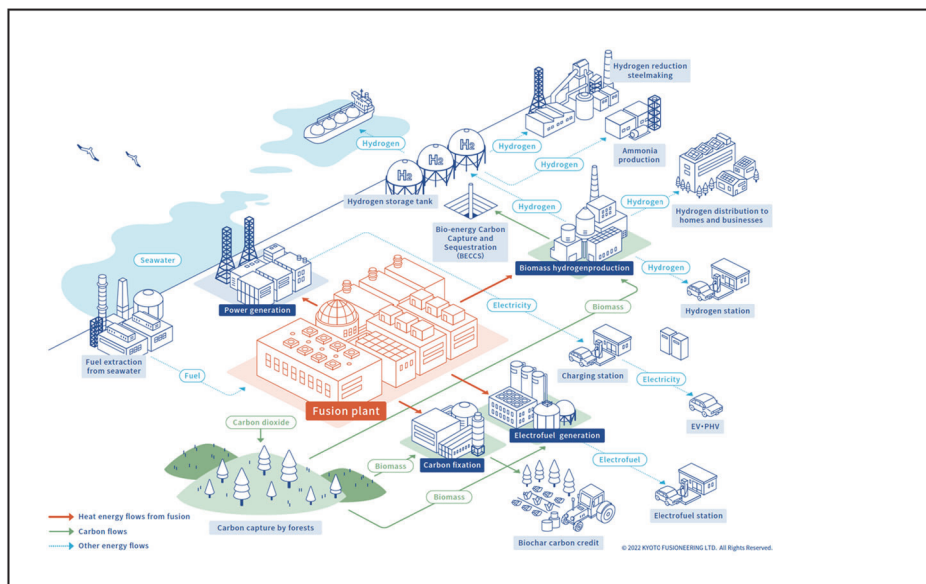


図 3. フュージョンエネルギーと持続可能社会システム

新設研究室紹介

生存圏開発創成研究系 生存科学計算機実験分野（海老原研究室）

<http://space.rish.kyoto-u.ac.jp/ebihara-lab/>

計算機シミュレーションによる宇宙環境変動の理解と予測

オーロラ、磁気嵐、放射線帯変動など地球周囲の宇宙空間で起こる擾乱現象を研究対象としています。太陽から恒常的に吹き出すプラズマの流れ（太陽風）の中に固有磁場を持つ地球が置かれているシンプルな構成でありながら、地球周囲の宇宙空間ではきわめて複雑で多様な現象が現れます。オーロラ、磁気嵐、放射線帯変動はその代表例で、それらを理解することは太陽と地球の関係や人類の生存圏としての宇宙空間の理解につながります。私たちは計算機シミュレーションを駆使し、歴史的課題であるオーロラ、磁気嵐、放射線帯変動について、太陽から地球に至るエネルギーと物質の流れ、粒子と電磁波動との相互作用、マクロ過程とミクロ過程の連関の観点から迫り、送電網や人工衛星など社会インフラへの影響を予測し、安心・安全な社会の構築と宇宙環境利用に貢献したいと考えています。

オーロラ爆発

オーロラは宇宙空間から降下する粒子（主に電子）によって起こる大気発光現象です。明るいオーロラが急拡大するオーロラ爆発と呼ばれる現象がおこると 100 万アンペア近くの電流が宇宙空間と地球の間を流れ、高さ 100 km 付近の電離圏では 1000 億ワットものエネルギーがジュール熱として消費されます。大気加熱によって大気が膨張すると、低高度衛星の姿勢や軌道が乱れます。電気回路に例えると電離圏は負荷になりますが、電源に対応する領域や仕組みはよく分かっていません。明るいオーロラが光ると同時に電離圏の電気伝導度が上がり、宇宙空間にフィードバックすると考えられていますが、電源への影響やオーロラ構造との対応はよく分かっていません。中性大気との衝突やスケール間の結合を考慮したシミュレーションを用い、その全容解明に挑みます。

磁気嵐

双極子型の地球磁場が卓越する地球近傍の宇宙空間では様々なエネルギーを持つ荷電粒子が捕捉されています。とくに太陽フレアで放出されたプラズマの塊が地球に到来するとプラズマ対流が速まり、数億から数十億度の高温プラズマ（keV 帯粒子）が太陽の反対側から地球方向に運ばれます（図 1）。その結果、地球を取り囲むように流れる反磁性電流が強まり、地球磁場を乱します。これが磁気嵐です。地球磁場が乱れ、地面に電場が誘導されると、変圧器の中性点を介して電力網に準直流電流が流れます。

地磁気誘導電流と呼ばれ、1989 年にカナダで発生した長時間の停電の原因となりました。オーロラについて記述されている歴史文献によると、1989 年の磁気嵐を超える規模の巨大磁気嵐は過去に何度も起きていたようです。今後巨大磁気嵐が再び発生する可能性があることを意味します。電力網の耐性評価のため、シミュレーションを用いて過去に発生した巨大磁気嵐を復元しその発生過程を明らかにするとともに、想定すべき巨大磁気嵐の規模とそのとき電力網を流れうる地磁気誘導電流を定量化します。

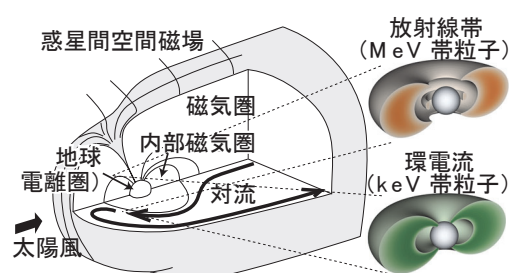


図 1. 地球周囲の宇宙空間

放射線帯

地球磁場に捕捉されているほぼ光速で飛び交う荷電粒子 (MeV 帯粒子) の集合を放射線帯と呼びます。放射線帯粒子は人工衛星や宇宙飛行士の被ばくの原因となり、その理解と予測は喫緊の課題です。放射線帯を構成する MeV 帯粒子の変動は keV 帯粒子とは全く異なり、大きな謎となっています。とくに問題となる放射線帯の再生については高エネルギー粒子が外側から運ばれるという説と、比較的低エネルギーの電子が VLF 帯の電磁波動によって加速されるという説があり、決着がついていません。太陽風から電子加速に至る全ての過程を包含する大規模な連結シミュレーションを開発し、予測可能な数値モデルの実現を目指します。

研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(☆は「大学の研究・動向」、#は「高校生のページ」、*は「新設研究室紹介」に掲載)

電気関係研究室一覧

工学研究科 (大学院)

電気工学専攻

先端電気システム論講座

システム基礎論講座自動制御工学分野 (萩原研)

システム基礎論講座システム創成論分野 (阪本研)

生体医工学講座複合システム論分野 (土居研)

生体医工学講座生体機能工学分野

電磁工学講座超伝導工学分野 (雨宮研)

電磁工学講座電磁回路工学分野

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野 (松尾研) ☆

優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座 (中村武研)

電子工学専攻

集積機能工学講座 (米澤研)

電子物理工学講座極微電子工学分野 (白石研)

電子物理工学講座応用量子物性分野 (竹内研)

電子物性工学講座半導体物性工学分野 (木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野

量子機能工学講座光材料物性工学分野 (川上研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野 (野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野

光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野

情報学研究科 (大学院)

知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野

知能メディア講座コンピュータビジョン分野 (西野研)

通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野 (原田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野

通信システム工学講座知的通信網分野 (大木研)

集積システム工学講座情報回路方式分野 (佐藤研)

集積システム工学大規模集積回路分野 (新津研)

集積システム工学講座超高速信号処理分野 (橋本研)

システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野 (石井研)

システム情報論講座医用工学分野

エネルギー科学研究科 (大学院)

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野 (下田研)

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野 (中村祐研)

エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野 (土井研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野 (長崎研)

エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野 (稲垣研) #

エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野 (松田研)

生存圏研究所

中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野 (山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野 (橋口研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏電磁環境探査分野 (小嶋研)

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野 (海老原研) *

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野 (篠原研)

先端電気システム論講座

<https://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/ja/>

「SiC MOSFET の性能を引き出すデジタルアクティブゲート駆動技術の開発」

電力を所望の形へと変換する機能を担う電力変換回路の性能を左右するのが、大きな電圧・電流のオン・オフを切り替えるパワー半導体素子である。近年、次世代半導体材料として期待される炭化ケイ素 (SiC) パワー素子の研究開発および実用化が進展しており、その優れた電氣的・熱的特性を活かした電力変換回路の小型集積化が期待されている。一方で、その高速な過渡が誘起するノイズやサージ等が回路動作に支障をきたす恐れがある。それらを防ぎつつ、SiC 素子のポテンシャルを最大限引き出す回路技術の開発が課題となっている。

そこで着目されているのが、アクティブゲート駆動 (AGD) 技術である。AGD は、パワー素子を駆動する IC であるゲートドライバの出力を数ナノ秒単位で調整することで、電流や電圧の立ち上がり / 下がりの速度やタイミング等を制御し、所望の特性を得る技術である。その有効性は多くの研究において実証されているが、その設計に高度なノウハウが必要になるほか、素子や適用する回路に応じた個別設計が必要となり、汎用性に難がある。

本研究室では、同技術をデジタル化し、計算機の援用を受けた最適化システムを構築することを目指している。信号領域で用いられるデジタル・アナログ変換技術に着想を得て、ゲート駆動回路へと応用したデジタルアクティブゲート駆動回路 (DAGD) を開発した [1]。その回路図と写真をそれぞれ図 1 および図 2 に示す。同回路は、従来のような 1/0 の 2 状態での制御ではなく、ゲート電圧の波形を時系列データとして扱うことで、AGD 動作の調整を組み合わせ最適化問題として解くことを可能にした。ハードウェアを一般化し、動作の変更をすべてソフトウェアが担当することで、ノウハウに頼らない汎用な AGD 技術の確立が期待できる。さらに、素子のばらつきや劣化など、事前の予測が困難な、不確かさを有する要因による回路動作の不良に対しても、センシングデータ等に基づく動作調整によって、オンラインでの対応が可能となる。

そのようなシステムの実証例として、メタヒューリスティクスの一つである遺伝的アルゴリズムによる最適化システムを開発した。SiC パワー素子の駆動波形を図 3 に示すように遺伝子表現し、所望の目的関数を最小化するような各変数の組み合わせを探索することで、様々な条件下で最適な駆動波形が得られることを確認した [2]。

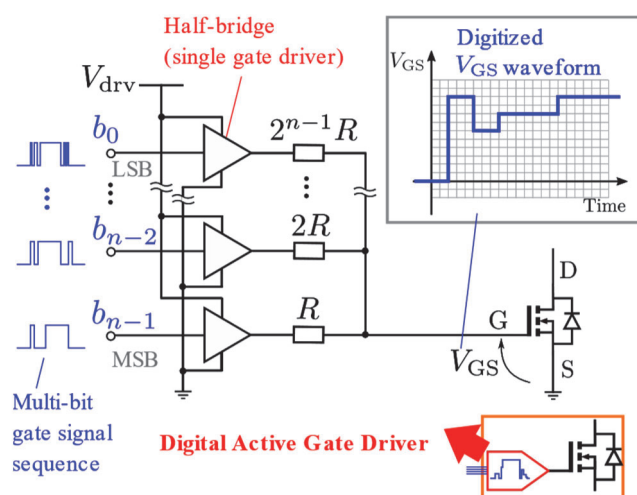


図 1 DAGD の回路構成

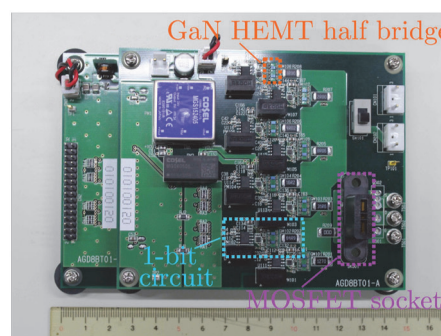


図 2 開発した DAGD の写真

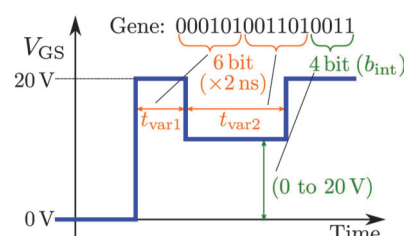


図 3 AGD 動作時のゲート電圧波形の遺伝子表現

- 文献 [1] H.Takayama, T. Okuda, T. Hikihara, *Int J Circ Theor Appl.* **50** (1), 183-196 (2022).
 [2] H.Takayama, S. Fukunaga, T. Hikihara, *Proc. EPE2022 ECCE EUROPE* (2022).

システム基礎論講座 システム創成論分野 (阪本研究室)

<https://www.ist.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「電波による非接触心拍・脈波計測のためのレーダ人体イメージング」

医療やヘルスケアの分野において、レーダによる非接触人体計測への期待が高まっている。特に、心拍や呼吸などの生体計測では、計測される人体部位によって異なった特徴がみられるため、特定部位のみを選択的に計測することが重要である [1]。これを実現するためには、人体の形状および電波の反射部位を特定する人体イメージング [2] が不可欠であるが、レーダイメージングの生体計測応用は報告が極めて少ない。そこで、我々は生体計測で注目されるアレーレーダを円弧状に機械走査させるレーダシステムを試作し、人体イメージングを試みた。本稿で紹介する技術の詳細については [3] を参照されたい。

本研究では中心周波数 79 GHz、帯域幅 4 GHz、送信 6 素子、受信 8 素子の 2 次元アレーを有するミリ波帯多入力多出力 (MIMO) アレーレーダ (図 1) を用いた。同レーダの 2 次元アレーにより、2 方向の角度分解能に加え、距離分解能を用いて 3 次元イメージングが可能となる。同レーダは yz 平面の原点 O を中心とする半径 $R=1.1$ m の円弧上を機械走査される (図 2)。レーダアンテナが走査される中、一定の間隔で 3 次元レーダ画像を生成するため、アンテナ位置に応じた複数の画像が得られる。これらの複数 3 次元画像を統合することで、特定の視線方向からの画像では得られない広範囲の画像を得ることができ、これにより人体イメージングの性能向上が期待できる。

開発技術の性能を検証するため、仰臥位 (仰向け) の被験者 1 人 (健康な成人男性) に対してミリ波レーダおよび 3 次元レーザスキャナ iReal 2E による計測を行った (図 2)。計測データに開発レーダイメージング法を適用して人体画像が得られることが確認された (図 3)。図 3 では、3 次元レーザスキャナにより得られる参照用の形状データを水色で示している。両者の比較により、頭部・胸部・腹部・両肩の形状が提案法で得られていることが確認できる。今後、開発技術を用いて人体の対象部位の座標を特定し、そこから、その部位の心拍・脈波の計測に最も適したレーダ位置を自動的に推定し、レーダを移動させたうえで、心拍・脈波を高精度で計測するシステムを整備する予定である。同システムにより、対象者の位置や姿勢に依存せず、安定した精度でのレーダ計測の実現が期待される。

- 参考文献 [1] T. Sakamoto *et al.*, *IEICE Trans. Commun.*, vol. E104-B, no. 4, pp. 463-471, 2021.
 [2] T. Sakamoto *et al.*, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 52, no. 2, pp. 658-670, 2016.
 [3] 加藤雅也, 阪本卓也, 信学技報, vol. 122, no. 365, EST2022-99, pp. 125-128, 2023.

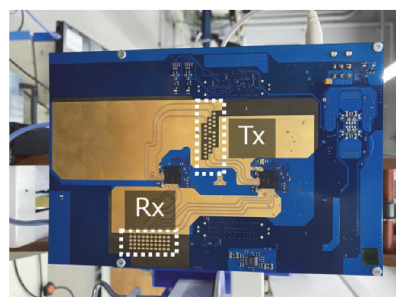


図 1 計測に用いるミリ波帯多入力多出力アレーレーダ

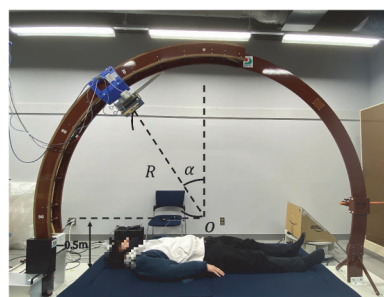


図 2 円弧状にレーダを機械走査して被験者を計測する様子

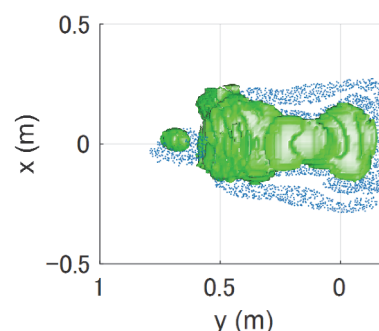


図 3 開発技術により実現されたレーダ人体イメージング

電磁工学講座 超伝導工学分野 (雨宮研究室)

<http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「液体・ガスヘリウムで冷却された複合多芯超伝導線の結合時定数測定法の構築」

超伝導体を電線にした超伝導線は、多くの場合、非常に細い超伝導線（超伝導フィラメントと呼ぶ）を多数集合化した構造をとっています。このような超伝導線を複合多芯超伝導線と呼び、マルチフィラメント化することによって超伝導状態の安定性が高く、かつ交流損失と呼ばれる超伝導体特有の損失が低くなるという効果が得られます。複合多芯超伝導線では超伝導フィラメント間は母材と呼ばれる常伝導金属を介して電氣的に接続されています。複合多芯超伝導線に外部から磁界が印加されると、母材を介して超伝導フィラメント同士をつなぐように流れる電流ループが生じます。このループ状の電流を結合電流と呼びます。結合電流が流れている状態は超伝導フィラメント同士が電氣的に一体となっている（結合している）状態であり、フィラメント化の効果が得られなくなるため、実用上は結合電流が十分に減衰し、超伝導フィラメント同士が結合していない条件で使用する必要があります。この結合電流が減衰するまでに要する時間が結合時定数であり、複合多芯超伝導線を応用できる条件を決定する極めて重要な特性です。結合時定数は母材の電気抵抗に強く支配され、一般に母材の電気抵抗は温度依存性をもつため、結合時定数は温度依存性を持ち、これを実験的に評価する手法が必要です。

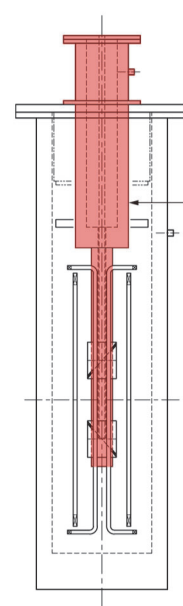
我々の研究室では、液体・ガスヘリウムで超伝導線を冷却し、複合多芯超伝導線の結合時定数を測定することができる装置を開発しました。測定装置の外観と概念図を図1に示します。図1(a)はクライオスタットと呼ばれる冷却容器であり、これに液体・ガスヘリウムを充填します。図1(a)下部の細くなっている領域に試料を配置し、この部分を図1(c)のようにマグネット（図1(b)）に挿入することで、液体・ガスヘリウムで冷却されている試料に磁界を印加し、結合時定数を測定します。また、クライオスタットはGFRPと呼ばれる非金属の材料で製作されている、あまり一般的ではないものです。これは、もし金属製クライオスタットを使用すると外部から試料に磁界を印加するときにクライオスタットに渦電流が誘導されてしまい、これがガスヘリウムの温度上昇の原因となったり、試料への磁界印加の妨げとなったりするためです。この測定法によって、より広い温度領域における超伝導応用に向けて必要となる、種々の超伝導線の結合時定数測定が可能になります。



(a) クライオスタット



(b) マグネット



(c) (a) と (b) の組合せの概念図

図1 液体・ガスヘリウム中での結合時定数測定装置

優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座（中村武研究室）

<http://aem.kuee.kyoto-u.ac.jp>

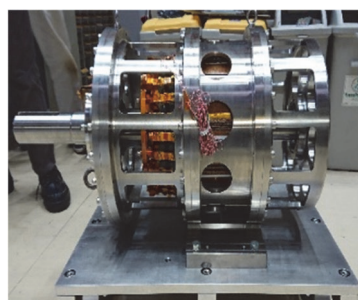
「高温超伝導誘導同期モータの非超伝導駆動に関する研究」

当研究室では、かご形回転子巻線を高温超伝導体によって構成する高温超伝導誘導同期モータ（High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM）の研究を行っている [1]。同機は、高温超伝導体の非線形電流輸送特性を効果的に利用することで、同期トルクと非同期（すべり）トルクの両立など従来機に無い特性を実現することができる [1]。現在では、基本回転特性の明確化、最適化設計技術、非線形ベクトル制御技術などを確立しつつあり、実用化を目指した研究開発を複数企業と共に進めている。例えば、水素サプライチェーン構築に向けた企業主体型の NEDO プロジェクトが採択され、HTS-ISM を用いた液体水素サブマージドポンプの開発を開始している [2]。また、2023 年 5 月 27 日～28 日に富士スピードウェイ（静岡県小山町）にて開催された「ENEOS スーパー耐久シリーズ 2023 第 2 戦 NAPAC 富士 SUPER TEC24 時間レース」において、メディア・関連企業・政府関係者向けに当研究室が開発した 20 kW 級 HTS-ISM のデモ試験を行い、液体水素搭載水素エンジン向け HTS-ISM の可能性についてプレゼンテーションを行った [3]。HTS-ISM は、いよいよ高温超伝導回転機として世界初となる実用化を達成するフェーズにある。

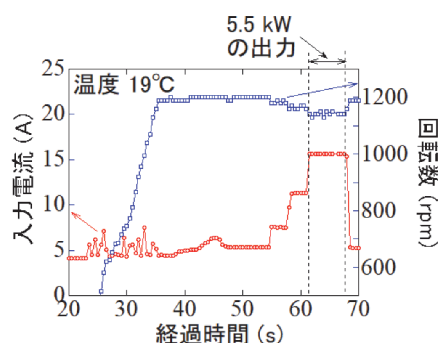
上記実用化を確かなものにするためには、高温超伝導モータの安全性や信頼性を保証する技術の実現が極めて重要である。特に、高温超伝導モータの一般的特長として高出力密度特性が挙げられるが、例えば冷却系の故障に伴って蓄積しているエネルギーが一気に放出されれば甚大な事故に直結することになる。当研究室は、HTS-ISM の豊富な試験データを元にして、さらなる安全性や信頼性を保証するため、高温超伝導体と常伝導体を並列化するハイブリッドかご形巻線構造を提案している [4]。回転磁界によって供給される速度起電力に対して、上記巻線が超伝導状態のときには高温超伝導巻線に流れる超低損失電流が発生トルクを支配する。一方で常伝導状態では、高温超伝導体が酸化物であることからその抵抗値が非常に大きく、誘導電流の抑制に伴って焼損が回避される。一方で、当該状態では常伝導巻線に Ohm の法則に従う電流が誘導され、低出力ながら運転が継続される。図には、50 kW 級機（同図（a））を用いた温度 19℃における回転試験結果（同図（b））を示すが、5.5 kW 出力を実現している。今後は、HTS-ISM に本特性をフェールセーフ機能として付与し、実用化を目指していく予定である。

参考文献

- [1]（応用物理学会 HP）<https://www.jsap.or.jp/columns/gx/e2-11>（2023 年 8 月 6 日閲覧）
- [2]（NEDO HP）<https://www.nedo.go.jp/content/100961947.pdf>（2023 年 8 月 6 日閲覧）
- [3]（Motor-Fan HP）<https://motor-fan.jp/mf/article/141777/>（2023 年 8 月 6 日閲覧）
- [4] T. Nakamura, et al., Superconductor Science and Technology, 22 (4) (2009) 045022
- [5] T. Nakamura, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 33 (5) (2023) 5200205



(a) 外観写真



(b) 室温（19℃）における回転試験結果

図：50 kW 級 HTS-ISM の室温（19℃）における回転試験例 [5]

電子物理工学講座 極微電子工学分野 (白石研究室)

<https://cmp.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「トポロジカル物質でのベリー曲率双極子の強誘電的不揮発制御」

近年、トポロジカル材料が固体物理学において大きな着目を浴びている。トポロジーとは、「穴の数」や「表裏が区別可能か」などの図形の持つ不変な指標のことである。この考え方を電子の波動関数に適用することで、トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体などの新規材料が発見され、近年盛んに研究されている。電子の波動関数のトポロジーを定義する上での重要な物理量としてベリー曲率があげられる。ベリー曲率は電子に対して仮想的な磁場のような作用を持つ物理量であり、磁化や外部磁場が存在しない環境下でも、印加電流に対して横方向の起電力をもたらし、一種のホール効果を生じることができる。空間反転対称性の破れたトポロジカル物質では、電流の向きと大きさによってベリー曲率が変化する。この変化の程度を表す指標をベリー曲率双極子 (BCD) と呼ぶ [1]。BCD が存在すると電流により仮想的な磁場を生むことになるため、電流に依存した横方向電圧の変化 (非線形ホール効果) を測定することで、BCD の観測が可能である。従来から、BCD はいくつかの材料で観測されてきたが、BCD の発現や制御は低温に限られてきた。さらに BCD の向きを反転させた状態で不揮発に保持する性質は未発見であった。BCD の「室温」における「不揮発」な制御が実現すれば、トポロジカル材料と BCD のさらなる応用可能性が示される。

これを実現するために我々が着目したのがトポロジカル結晶絶縁体の材料である $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ (PST) である。PST は結晶対称性によりトポロジカルな性質を有する材料であるとともに、原子中の陽イオンと陰イオンが逆方向に配位することで強誘電的な分極を示す点が特徴的な材料である。結晶対称性に保護されたトポロジーと分極により任意の向きの結晶対称性が破られるという性質を利用することで、BCD の向きの制御が可能となることが期待される。分極を制御するためのパルス電界を与えた後に、BCD を観測するための非線形ホール効果の測定を行った。図 1 にパルス電界を x 方向の正方向と負方向から加えた後に測定した後に測定した非線形ホール電圧を示す。正方向 (赤) と負方向 (青) の結果で明らかに信号の符号が反転していることが分かる。これは分極が反転したことで BCD の向きが反転したことを示しており、パルス電界を加えた後も反転した BCD が不揮発に保持されていることを示す結果である (図 2)。さらに特筆すべき点はこれまで低温で観測されてきた BCD の制御とは異なり、室温 (300 K) での不揮発制御が達成された点である。また、理論式を用いて実験結果から BCD の大きさを算出したところ、150 nm 程度の先行研究と比較しても大きな値が得られた。本研究では BCD の不揮発制御を、室温という応用展開に重要な領域で達成しており、メモリー材料などとしてのトポロジカル材料の新たな応用可能性を展開する結果であると言える [2]。

[1] I. Sodemann *et al.*, Phys. Rev. Lett. **115**, 216806 (2015). [2] T. Nishijima, M. Shiraishi *et al.*, Nano Lett. **23**, 2247 (2023).

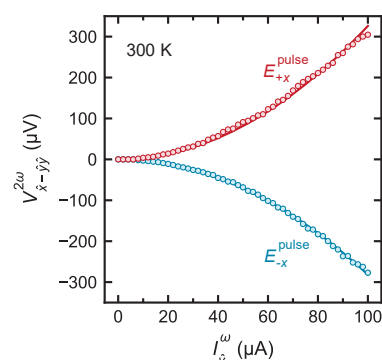


図 1 分極制御後の非線形ホール電圧の電流依存性。

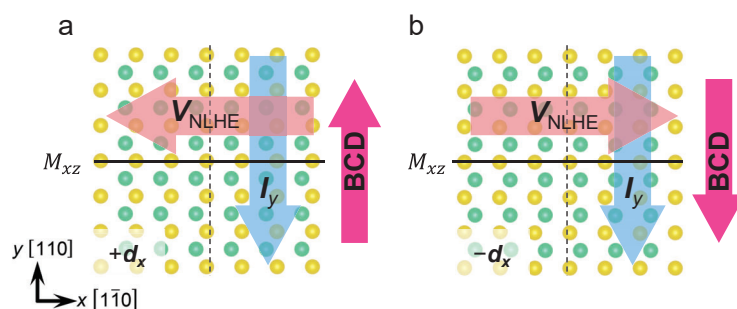


図 2 分極 d の向きと BCD、非線形ホール電圧 V_{NLHE} の関係図。a と b で分極の向きが反転しており、それに伴い BCD と V_{NLHE} も逆向きになっている。

量子機能工学講座 光材料物性工学分野 (川上研究室)

<https://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「自在な構造制御に基づく窒化物半導体 InGaN 系多波長発光ダイオード」

窒化物半導体 InGaN を用いた量子井戸構造は、可視光領域の高効率な発光ダイオード (LED) やレーザダイオード (LD) の発光層として重要である。特に近年では、テラヘルツ照明、可視光通信 (Li-Fi)、マイクロ LED ディスプレイなど、高スペクトル制御性への要請が高まっている。しかし、従来の量子井戸は平坦な積層構造であり、面内均一なバンドギャップの InGaN 量子井戸からの単色発光となるため、多波長発光スペクトルの合成・制御は困難である。代替技術として、青色 LED と黄色蛍光体を組み合わせた白色 LED が広く普及しているが、蛍光体と LED の発光を独立に制御できないことや、蛍光体での色変換によるエネルギー損失など、多くの課題がある。当研究室では、2000 年代中頃から、選択成長法によって自然形成される複数の結晶面で囲まれたマイクロ構造 (マルチファセット構造) をベースに、蛍光体フリーな多波長発光構造を提案してきた [1]。ただし、選択成長法で現れる結晶面は少数の安定面に限られ、構造の制約があった。そこで本研究では、テンプレート上に自在なマイクロ構造をあらかじめ形成することで、微傾斜の効果によって多波長発光が得られることを示す。

本研究で作製したマイクロレンズ構造の概要図を図 1 に示す [2]。(0001) 面からのオフ角が構造内で連続的に変化するため、結晶成長時の In 取り込みの面方位依存性によって InGaN 層の In 組成分布が形成される [2]。作製方法は次の通りである。始めに、サファイア基板上 (0001) 面 GaN テンプレート上に、フォトリソグラフィによって円形レジストを形成した。次に、サンプルをホットプレート上で加熱し、レジストを凸レンズ形状に熱変形させた (サーマルリフロー法)。そして、ドライエッチングによりレジスト形状を GaN 表面に転写し、最後に有機金属気相成長法によって n-GaN 層、InGaN 量子井戸層、p-GaN 層を成長した。

LED 構造の作製に先立って、GaN マイクロレンズ構造上 InGaN 量子井戸 (p-GaN 層無し) の形状と発光波長分布を評価した。成長後のマイクロレンズ構造は、(0001) 面からのオフ角が 0° から 8° 程度まで連続的に変化する非常に緩やかな三次元構造であった [2]。一方で、InGaN 量子井戸の発光ピーク波長は、構造頂点部の 490 nm から構造底部の 400 nm まで連続的に変化し、多波長発光特性が確認された (図 2) [2]。最後に、GaN マイクロレンズ構造上 InGaN LED を作製し、デバイス動作特性を評価した。通常の平坦膜 LED と同じ電極デザインを用い、複数のマイクロレンズ構造に同時に電流注入される構造とした。電流-電圧特性は明瞭な整流性を示し、多波長発光特性によって 380 nm から 520 nm 付近まで広がる広帯域な EL スペクトルを示した (図 3) [3]。将来的には、各波長領域に独立電極を形成することで、自在なスペクトル制御が可能になると期待される。

[1] M. Funato *et al.*, *Applied Physics Letters* **93**, 021126 (2008). [2] Y. Matsuda *et al.*, *Applied Physics Express* **15**, 105503 (2022). [3] Y. Matsuda *et al.*, *Applied Physics Express* **16**, 015511 (2023).

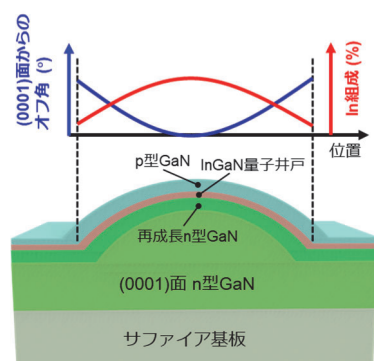


図 1. マイクロレンズ構造による多波長 LED の断面の概要図。

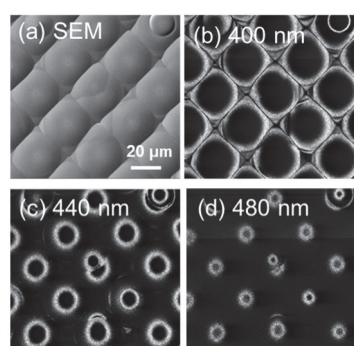


図 2. GaN マイクロレンズ構造上 InGaN 量子井戸の (a) 表面 SEM 像と (b - d) 各モニター波長における CL マッピング像

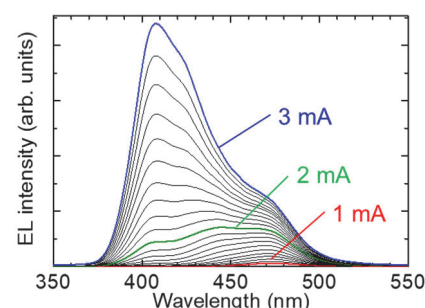


図 3. マイクロレンズ LED からの EL 発光スペクトル。

工学研究科 附属光・電子理工学教育研究センター ナノプロセス工学分野

<http://www.nano.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「高速自己変化可能なフォトニックナノ構造による高ピーク出力・短パルス光の発生」

来るべき超スマート社会 (Society 5.0) においては、自動運転等のスマートモビリティにおいて必須である高精度光センシングや、熱の影響を受けない超精密なレーザー加工を実現するため、数 10 ピコ秒以下の極めて短いパルス幅をもつ高ピーク出力光源が必要とされている。しかしながら、従来の半導体レーザーは、高出力化のために光出射面積を増大すると、発振モードが多モード化してビーム品質が劣化するため、ピーク出力の限界 (1~10 W 程度) が存在する。本研究では、従来の限界を大幅に超えるピーク出力の短パルス発振を得るための新たな工夫として、数 10 ピコ秒以下という僅かな時間の間に、面内の共振波長分布が自己変化するフォトニックナノ構造を考案し、それを面発光レーザーの内部に導入することで、パルス幅 30 ピコ秒未満で、ピーク出力 80 W 超の短パルス発振を実現した [1]。なお、本研究は、電子工学専攻光量子電子工学研究室と共同で行った。

提案するフォトニックナノ構造の模式図と、短パルス発振が生じる原理を図 1 (a) および図 1 (b) に示す。本構造は、楕円空孔と真円空孔を 2 次元的に周期的に並べつつ、その周期 a を面内一方向 (図の u 軸方向) に沿って徐々に増大させていることを特長とする。同構造では、構造の周期に応じて共振波長が面内で異なっており、発振初期 [図 1 (a)] においては、光の侵入を妨げる禁制帯の存在により、光は図の左下の狭い領域に局在する。この状態は、面外への光漏れの大きい高損失状態となるため、レーザー発振が生じるまでに、通常よりも多くのキャリアがレーザー内部に蓄積される。一方、レーザー発振が開始された後 [図 1 (b)] は、誘導放出による屈折率変化に伴って、発振領域の長波長化が生じるため、デバイス全体の共振波長分布がより平坦な分布へと自己変化し (self-evolution)、光は面全体に広がるようになる。このとき、共振器の面外に光が漏れる損失は減少するため、等価的な Q スwitchング動作が生じ、高いピーク出力の短パルス発振を得ることが可能となる。

以上の原理に基づき、実際に自己変化フォトニックナノ構造を導入した直径 1 mm のレーザーデバイスの作製を行い、出射光強度の空間的および時間的変化を、ストリークカメラを用いて測定した。注入電流 20 A のときに、得られたストリークカメラ画像を図 1 (c) に示す。同図において、時間方向に断続的に光が検出されていることから、作製したレーザーから断続的な短パルス光が射出されていることが確認出来る。また、各パルスに注目すると、光が u 軸方向に移動している様子が観測され、図 1 (a) (b) に示した光の移動を実験的に観測することに成功した。図 1 (d) には、取得したストリークカメラの画像を空間的に積分することで得られた、光出力の時間変化を示す。パルス幅 30 ps 未満で、ピーク出力 80 W 以上の短パルス・高ピーク出力発振の実現に成功した。今後、デバイスのさらなる大面積化およびフォトニックナノ構造の改良により、さらなる高ピーク出力化 (>kW) が実現し、冒頭で述べた各種応用への展開が可能になると期待される。

参考文献 [1] T. Inoue, R. Morita, M. De Zoysa, S. Noda, *et al.*, *Nature Commun.* **14**, 50 (2023).

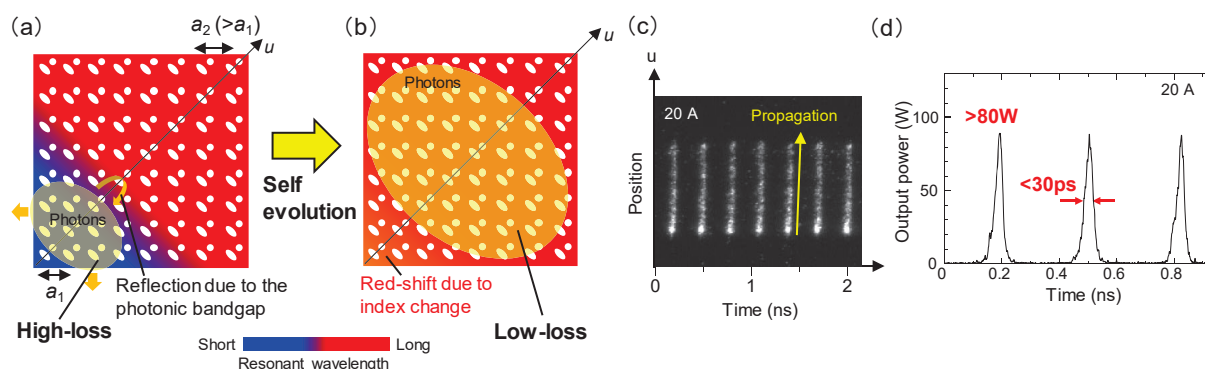


Fig. 1. (a) (b) Schematic and working principle of self-evolving photonic nanostructures. (c) (d) Measured streak camera image and temporal waveform of the fabricated surface-emitting laser with self-evolving photonic nanostructures at 20A.

知能メディア講座 言語メディア分野

<https://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/>

「言語ステガノグラフィ」

ChatGPT に代表される対話型 AI の急激な性能向上により、我々の研究室が取り組んでいる自然言語処理は変革期を迎えています。対話型 AI の技術的中核は大規模言語モデルです。大規模言語モデルは、その名の通り大規模であることが特徴で、2019 年頃からの大規模化競争により、数十億から数千億規模のパラメータを持つに至った人工ニューラルネットワークです。ただし、言語モデル自体の歴史は 20 世紀までさかのぼります。

言語モデルの役割は、単語列 $w_1, w_2, \dots, w_{n-1}$ が与えられたとき、次の単語 w_n の確率 $P_\theta(w_n | w_1, w_2, \dots, w_{n-1})$ を予測することです。ここで θ はモデルのパラメータ集合で、大規模なテキスト集合を使った訓練により推定されます。要するに、次に来る単語を正しく予測できるようにひたすら θ を調整しているだけなのですが、大規模なモデルであれば、文法はもちろん、この世界に関する広範な知識を獲得できることが経験的にわかってきました。

言語モデルを使うと、テキスト生成が再帰的に行えます。 $w_1, w_2, \dots, w_{n-1}$ が与えられたとき、何らかの方法で次の単語 w_n を選べるとすると、同様に、次は $w_1, w_2, \dots, w_{n-1}, w_n$ に続く単語 w_{n+1} を選べます。単語の選び方はいろいろ考えられます。モデルが予測した確率分布 $P_\theta(\cdot | w_1, w_2, \dots, w_{n-1})$ にしたがってサンプリングしても良いですし、もっと単純に、確率が最大の単語を選んでかまいません。

大規模言語モデルは外形的にはまったく違和感のないテキストを生成できますが、中の仕組みは人間の言語生成のモデルとして自然でしょうか？ AI と人間の関係は飛行機と鳥に似ていて、飛行機が羽ばたかずに飛ぶように、AI も人間離れした使い方ができます。言語モデルのそうした応用例の一つが言語ステガノグラフィです。

言語ステガノグラフィは第三者が気づかないようにテキストに秘密のメッセージを埋め込む技術です。任意の離散情報はビット列で表せますので、ビット列を埋め込むことにします。右図の例では、Hello my name ... という何の変哲もないテキストに 10000100... というビット列が隠されています。送信者がテキストに秘密のメッセージを埋め込む手続きと、それと対になる、受信者がテキストから秘密のメッセージを取り出す手続きをうまく定められれば完成です。

秘密のメッセージ: 10000100...

$P(w_1)$			$P(w_2 w_1)$			$P(w_3 w_1, w_2)$			
単語	確率	符号	単語	確率	符号	単語	確率	符号	...
A	0.21	00	my	0.25	00	friend	0.35	00	
The	0.20	01	world	0.21	01	name	0.25	01	
Hello	0.15	10	three	0.20	10	cell	0.12	10	
Once	0.13	11	fellow	0.13	11	new	0.09	11	

言語ステガノグラフィは言語モデルを使うと簡単に実現できます。送信者は言語モデルを使って 1 単語ずつテキストを生成します。送信者は、各時点で言語モデルが予測した確率分布をもとに、適当な手続きに従って単語候補に符合を割り当て、割り当てられた符合が秘密のメッセージに対応する単語を選びます。受信者は言語モデルと符合割り当て手続きを事前に共有しておけば、送信者の操作を順番になぞることで秘密のメッセージが取り出せます。言語モデルを使ってステガノグラフィを実現するというアイデア自体は昔からありましたが、言語モデルの能力が急激に向上したことで、単なる概念実証を超えた実用化が射程に入ってきました。

ところで、言語モデルは有限語彙（例えばサイズ 3 万）を仮定しますが、実際の語彙サイズは事実上無限です。この問題に対応するために低頻度の単語を細分割するサブワードという手法が広く用いられています。例えば、低頻度語 unusable は un ##us ##able と分割されるかもしれません（## は後続サブワードを表す特殊記号）。

言語ステガノグラフィの場合、第三者にこのような素のサブワード列を見せるわけにはいかないので、送信者は分割を解除して unusable を送信することになります。問題は、受信者が元の分割を再現できるとは限らないことで、例えば、un ##usable と分割すると、メッセージの抽出に失敗してしまいます。そこで、我々はこの曖昧性問題が発生しないようなアルゴリズムを提案しました [1]。この手法は、分かち書きしない日本語にも応用できます。

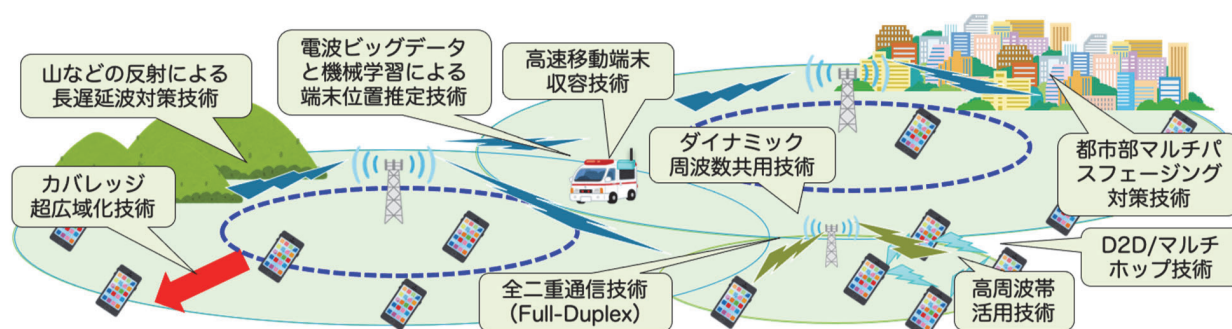
[1] Jumon Nozaki and Yugo Murawaki. Addressing Segmentation Ambiguity in Neural Linguistic Steganography. In Proc. of ACL-IJCNLP 2022.

通信システム工学講座 デジタル通信分野（原田研究室）

<http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

「第6世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究」

昨今、誰もが携帯電話を所持する時代となり、音声通話やメール機能のみならず、ソーシャルネットワークサービスや動画コンテンツ、ソーシャルゲームなど、伝送情報量の爆発的増大とともに、より高信頼性およびリアルタイム性のある通信サービスが要求されています。また、これまでのように人と人の通信のみならず、物と物（M2M）との通信など、新たな次元の無線サービス創出も期待されています。しかし、無線通信用途に使用可能な周波数資源には限りがあるため、今後益々周波数の枯渇逼迫が重要な問題になります。2020年からは世界各国で5Gのサービスが開始されましたが、先に述べた厳しいユーザ要求に応えるためには更なる技術革新が必要です。現在、すでに5G以降のシステム（Beyond 5G）および6Gの研究開発が国際的に始まっており、そこでは単にセルラシステムの進化という枠に収まらない、固定通信網や無線LAN、無線PAN、および無線M2Mセンサネットワークなども包括的に議論が行われています。この様な国際的な動向も踏まえ、当研究室ではBeyond 5G/6Gに関する研究として、超広域ブロードバンド移動通信システム、全二重複信（Full-duplex）セルラシステム、周波数共用システム、新信号波形・新物理層方式、ミリ波帯、テラヘルツ帯等高周波帯活用技術、高度ソフトウェア無線技術、大規模高密度マルチホップ国際標準無線通信システム Wi-SUN、機械学習の通信システムへの応用、仮想空間における電波模擬システム技術の高度化などの研究テーマを中心に研究活動を進めています。特にVHF帯広域無線通信システムは、200 MHz帯周波数において公共ブロードバンド移動通信システムとして実用化され、1ホップ100km伝送や、30ホップ伝送に成功しています。また開発した新信号波形技術（UTW-OFDM）は、商用ローカル5Gシステムにおいて実用化され、さらに6Gに向けた高度化を推進しています。大規模高密度マルチホップ国際標準無線通信システム Wi-SUNは、電力スマートメータの分野で広く実用化され、最近では1000台のWi-SUN無線機を利用した大規模マルチホップメッシュ型多段中継通信実証試験に成功しています。



本研究室における第6世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究開発概要



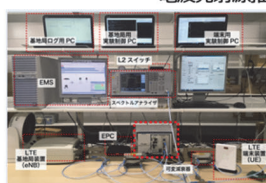
実用化したVHF帯公共ブロードバンド移動通信システム装置
(左: 5W出力機, 右: 1W出力機)



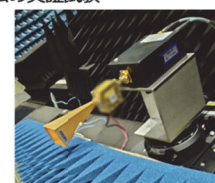
VHF帯公共ブロードバンド移動通信システムの電波と機械学習による
電波発射源推定システムの実証試験



大規模マルチホップメッシュ型多段中継通信実証試験



UTW-OFDM方式搭載LTEシステム



ミリ波電波伝搬実験システム

本研究室における最近の主な研究成果

集積システム工学講座 超高速信号処理分野 (橋本研究室)

<https://vlsi.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

「多様な中性子施設で半導体ソフトエラー評価を可能にするエラー率換算技術」

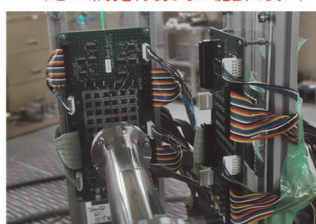
今日の社会は、大量のコンピュータや情報通信機器によって支えられており、これらに誤作動が生じた場合、重大な被害が引き起こされるリスクがあります。コンピュータや情報通信機器の中核は半導体チップであり、安心・安全の観点から半導体チップの信頼性確保が重要となっています。

半導体チップの誤作動の原因の一つにソフトエラーと呼ばれる現象があります。ソフトエラーとは半導体チップ内で宇宙線によって引き起こされる一時的な誤作動であり、半導体チップ内に保持されているデータが宇宙線により誘起されたノイズにより書き換わることで発生します。地上環境では宇宙線に含まれる中性子がソフトエラーを引き起こす主要因と考えられています。中性子を遮蔽することは困難なため、ソフトエラーが発生する前提で半導体チップの設計を進める必要があります。特に、高い信頼性が求められる半導体チップの設計では、ソフトエラーが発生する頻度(ソフトエラー率)の把握が不可欠です。ソフトエラー率の評価は、地上環境を再現する中性子源を用いて行う方法が一般的です。地上に降り注ぐ中性子はさまざまなエネルギーを持っており、そのエネルギー分布を再現する中性子源がソフトエラー率評価に用いられてきました。しかし、そのような中性子源は世界に5つ程度しかなく、半導体チップのソフトエラー率評価には不十分な状況にあります。

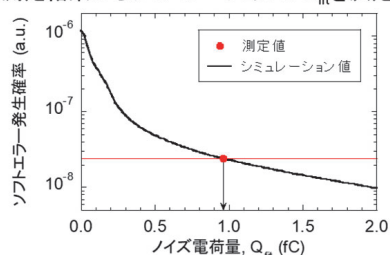
様々な中性子施設でソフトエラー測定実験を行うとともにシミュレーションによる解析を行い、任意の中性子源による1つの測定結果とシミュレーションを組み合わせることにより、地上ソフトエラー率を求める手法を開発しました(図1)。半導体チップのソフトエラー発生確率は中性子のエネルギーとエラー発生に必要なノイズ電荷量(Q_{fit})によって異なります(図1③左)。図2の測定に用いた中性子源のエネルギー分布、シミュレーションによって求めたソフトエラー発生確率を用いて、測定結果を再現する Q_{fit} を求めます(図1②)。 Q_{fit} が求まると、ソフトエラー発生確率と中性子のエネルギーの関係が分かるので、地上の中性子エネルギー分布(図1③右)と組み合わせて計算することで、地上のソフトエラー率を求めることができます。65nm設計ルールの1V動作SRAM(Static RAM)を用いた実験で、用いた中性子源によるソフトエラー率の違い(最大値と最小値の比)が、2倍以内に収まることを確認しました(図3)。本研究成果により、世界中に多数ある中性子源を活用して半導体チップのソフトエラー率の評価が可能となります。

(参考) プレスリリース: <https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2023-06-08>

① 任意の中性子源で測定
(地上環境を再現しない施設で良い)



② 測定結果からシミュレーションの Q_{fit} を決定



③ シミュレーションで得たソフトエラー発生確率に地上の中性子スペクトルを乗じて積分

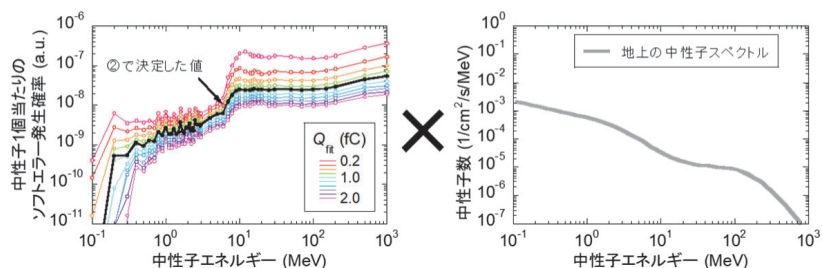


図1. 地上環境のソフトエラー率の見積もり手順

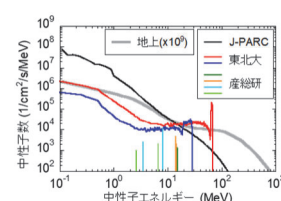


図2. 研究で用いた地上と異なる中性子源のエネルギー分布

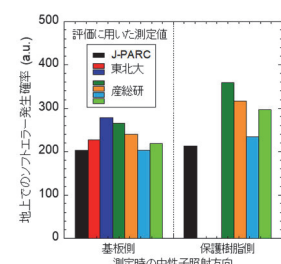


図3. 各測定値を用いたソフトエラー率の見積結果

システム情報論講座 医用工学分野

<http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp>

「MRI による生体内分子の時空間動態イメージング」

生体内には、疾患に関連する様々な分子が存在する。その時空間動態を可視化する分子イメージング技術は、疾患の診断、進行度や悪性度の評価、発症メカニズムの解明などへの利用が期待されている。当研究室では、磁気共鳴イメージング (MRI) による分子イメージング技術の開発研究を進めている。本稿では、その試みのひとつを紹介する。

MRI の原理である核磁気共鳴 (NMR) 現象を生じる核種として ^1H や ^{13}C があるが、同じ核種でも分子構造が異なるとその共鳴周波数が異なるため、周波数スペクトルのパターンの違いから分子を同定できる。このような NMR 計測に空間情報を付与した磁気共鳴スペクトルイメージング (MRSI) は分子の空間分布を観測できるが、生体内分子を対象とした MRSI には次のような課題がある。1) 生体内には多種多様な分子が混在するため、その選択性の向上が必要である。2) 生体内分子は低濃度で存在するため、検出感度の向上が必要である。これらの課題を解決するため、当研究室では MRSI への ^1H - ^{13}C HMQC 法の導入を提案した。 ^{13}C は異なる分子間での共鳴周波数の違いが ^1H よりも大きいため、分子の選択性が高い。一方で、 ^1H の NMR 信号強度は ^{13}C よりも強いいため、分子の検出感度が高い。これら二つの核種の特徴を活用し、分子の選択性と検出感度を両立する手法が ^1H - ^{13}C HMQC 法である。しかしながら、 ^1H - ^{13}C HMQC MRSI 法により周波数スペクトルの空間分布を再構成するには、多数の計測信号を収集する必要があるため、撮影に膨大な時間を要するという欠点がある。例えば、生体内では様々な代謝過程を通じて分子種が変化するが、このような時間変化を追跡する目的には利用できない。そこで、 ^1H - ^{13}C HMQC MRSI 撮影の高速化手法として、再構成に必要な全ての信号をサンプリングするのではなく、アンダーサンプリングしたデータから圧縮センシング (CS) を用いて再構成する手法を提案した。ここでは、分子の時空間分布のスパース性と時間変化の滑らかさを事前知識とした。また、分子の周波数スペクトルを再構成するのではなく、基底スペクトルを用いて分子の時空間分布を直接再構成することにより、単一のタイムフレームあたりに必要なサンプリング数を大幅に削減可能とした。本手法を実験動物のデータセットに対して適用した例を図に示す。ここでは、担癌マウスの腹部にグルコースを投与した際のグルコースとその代謝産物である乳酸について、体内動態および代謝過程を時間分解能 4 秒で再構成した。図には再構成画像の一部のタイムフレームを示すが、腫瘍部位特異的にグルコースが乳酸に代謝し蓄積していく過程 (ワールブルグ効果) が明瞭に観察できている。従来の ^1H - ^{13}C HMQC MRSI の時間分解能は 4.5 時間であったが、提案手法により大幅な時間分解能の向上を達成し、生体内分子の時空間動態を追跡可能であることを実証した。

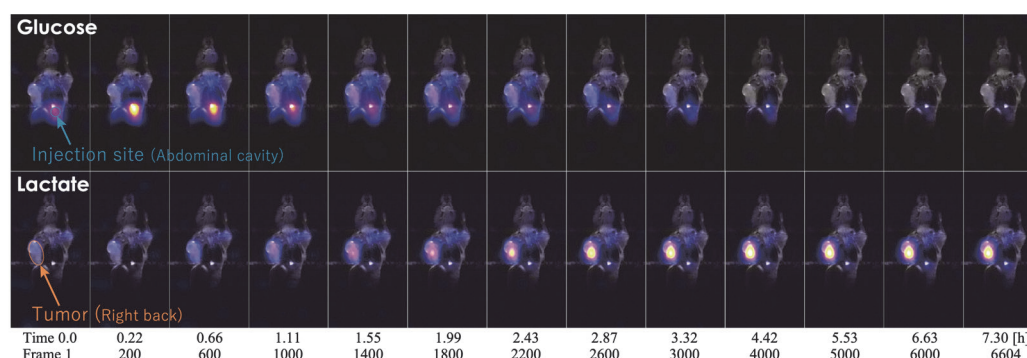


図. 担癌マウスにおけるグルコース投与後のグルコースおよび乳酸の時空間動態再構成画像。

参考文献: U. Yamamoto, H. Imai, K. Sano, M. Ohzeki, T. Matsuda, T. Tanaka. Spatio-temporal reconstruction of substance dynamics using compressed sensing in multi-spectral magnetic resonance spectroscopic imaging. *Expert Systems With Applications* (2023), doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120744>.

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野（下田研究室）

<https://hydro.energy.kyoto-u.ac.jp/wp/>

「コンフリクトが生じる合意形成実験タスクの設計と好感度変化に着目した分析」

エネルギー・環境問題が深刻化する現在、合意形成はますますその重要性を増しており、適切な合意形成の方法について考えることはエネルギー・環境問題を解決する上で重要である。そして、合意形成後の双方の円満な関係のためには、意見調整の際に快適なコミュニケーションを実現することが重要であり、そのために「感性」が重要な役割を果たす。ここで、合意形成を感性の観点から分析することで、円満な合意形成を実現するための示唆を得ることができ、エネルギー・環境問題の解決に貢献できる可能性がある。また、実験室環境で合意形成実験を行う場合には、①実際の重要な場面の合意形成を模倣するために、譲り合いではなくコンフリクトが生じる、②分析に十分なデータを得るために必要な、合意形成の発言数および対話時間が確保できる、という条件を満たすタスクが重要であるが、このようなタスクは開発されていない。

そこで、本研究では「コンフリクトが生じ、十分な発言数・対話時間が確保できる合意形成タスクを開発すること」により「主観的評価に基づいて合意形成を分析し、感性、とりわけ好感度と合意形成との関連を調べることを」を目指した。そのために、食品を交渉材料として用いることで、「実験終了後にどちらが3時間後まで何もせずにひたすら待つか」を決定する「NoForT（Negotiation on Favorites or Time）ゲーム」というタスクを設計し40件の合意形成実験を実施した。ゲームの概要を図1に示す。実験はテキストチャットシステムを用いて行い、メッセージ受信時には「相手への好感度変化」を、メッセージ送信時には「相手からの好感度変化の予想」を回答してもらった。

その結果、NoForT ゲームにより、①譲り合いではなくコンフリクトが生じること、②分析に必要な合意形成の発言数および対話時間が確保できることがわかった。また、図2に示すように、合意形成のステージが進むにつれて、同じ発言に対する相手への好感度変化（真値）と相手からの好感度変化の予想（予想値）との差が大きくなるということがわかった。



図1 NoForT ゲームの概要

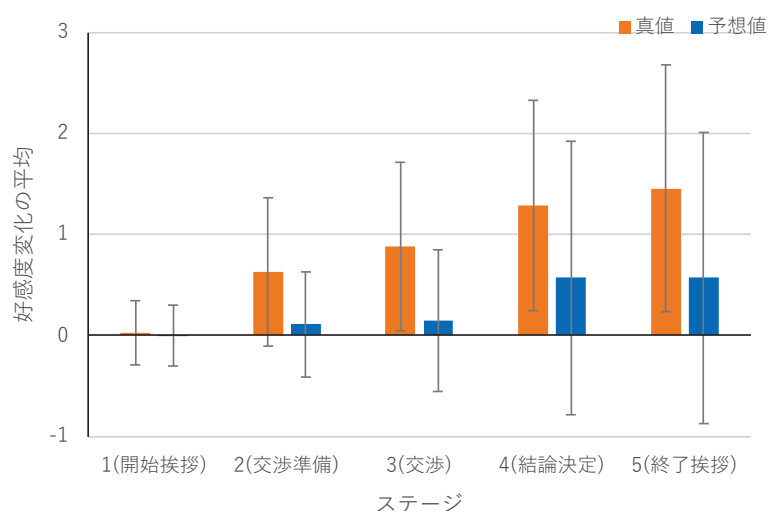


図2 ステージ毎の好感度変化の真値と予想値

エネルギー材料学講座 エネルギー応用基礎学分野（土井研究室）

<http://www.device.energy.kyoto-u.ac.jp/>
「ポリイミドシート上へのリチウムイオン電池正極活物質 LiCoO_2 の室温成膜」

自動運転や工場の完全自動化のためには膨大な数の IoT センサをネットワークに接続して情報のやり取りをする必要があるが、その際にはデータのやり取りと同時に IoT センサへの電源供給も必要である。有線でデータ通信や電源供給を行う場合、配線数、配線距離が膨大になるため現実的ではない。データのやり取りは IoT センサとネットワーク間の無線通信によって解決することができる。しかし、IoT センサは様々な場所に設置される必要があるため、給電装置（送信機）と IoT センサ（受信側）の間に障害物が存在する可能性が高く、膨大な数の IoT センサ全てに無線で給電を行うことは難しい。そこで、使用環境に応じて、太陽光発電、熱電発電、振動発電などのエネルギーハーベスティング技術を用いることになると考えられるが、それらは常時発電しているわけではなく、また発電時の電圧、出力も一定ではないため、蓄電デバイスとの組み合わせが望まれる。

IoT センサの普及には小型化と低価格化が必須の要件であり、そのためには多様な基板上にセンサ素子、通信素子、メモリ、プロセッサ、発電素子、蓄電素子を混載することが望ましいが、蓄電素子に関する研究は少ない。そこで、我々はポリマーなどのフレキシブルな基材や Si ウェハ上には薄膜 Li イオン電池の作製を目指している。ポリマーや Si 上に Li イオン電池を作製するためには低温で結晶化した Li イオン電池材料薄膜を形成する技術が必要になるが、我々はイオンビームアシストパルスレーザー蒸着法により、室温で（恐らく）世界で初めて結晶化した LiCoO_3 正極薄膜の作製に成功した。

図 1 に、ポリイミドシート上に集電体としてアルミニウムを蒸着し、その上に室温（加熱無し）でイオンビームを照射しながらパルスレーザー蒸着（IBAPLD）法で LiCoO_3 正極薄膜を作製した試料断面の走査型電子顕微鏡（SEM）観察結果を示す。界面での拡散、反応のない良好な積層膜が得られていることが確認できる。X 線回折測定結果から、 LiCoO_3 からの回折ピークが観測され、室温で成膜したにもかかわらず結晶化していることが確認できた。また $\{100\}$ 極点図測定の結果、イオンビーム照射方向 $// <100>$ 方向、かつ基板法線 $// <111>$ 方向の関係を満たすように全ての LiCoO_3 結晶の向きが単結晶のように揃っていることが分かった。

図 2 に、正極を室温で成膜した LiCoO_2 薄膜、負極を Li 金属箔、セパレータに不織布、電解液に LiPF_6 をエチレンカーボネート系有機溶媒に溶解した液体を使用して作製した試験電池の充放電曲線を示す。サイクルを重ねるにしたがって充放電容量が低下しているものの、電池として動作することが確認できた。

この結果は、ポリマーなどの低コスト可撓性シート上や Si ウェハ上に Li イオン電池を作製することが可能であることを意味し、今後、幅広い応用展開が期待できると考えている。

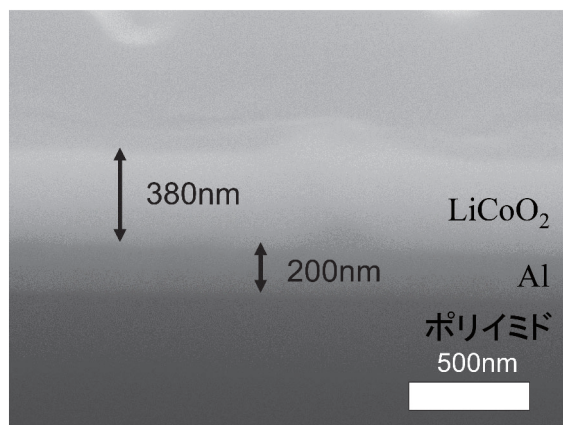
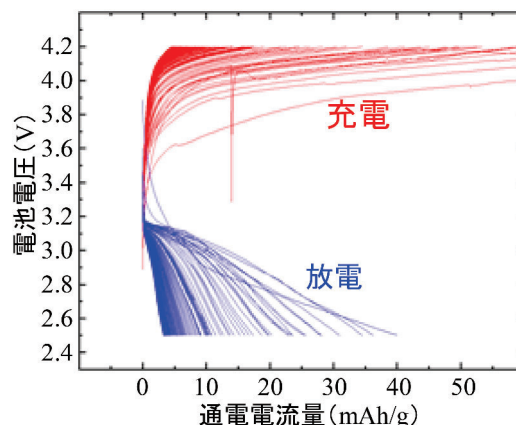


図 1 試料断面の SEM 観察結果

図 2 ポリイミドシート上 LiCoO_2 薄膜電極の特性

エネルギー材料学講座 プロセスエネルギー学分野

<https://dpe.energy.kyoto-u.ac.jp/>

「テラヘルツ放射顕微鏡による半導体デバイス表面 / 界面評価」

我々は、フェムト秒パルスレーザーを試料に照射することにより発生するテラヘルツ (THz) 波を利用した材料・デバイスの評価技術として、レーザーテラヘルツ放射顕微鏡 / 分光 (LTEM/LTES) の開発を進めている。本手法を用いて、様々な材料やデバイスの表面および内部における電荷のダイナミクスや電界分布・分極構造の計測・可視化を行っている。我々が注目している材料の一つが、ワイドギャップ半導体である GaN や GaN をベースとしたヘテロ接合構造である。結晶表面やヘテロ接合界面から発生する THz 波を計測し、ワイドギャップ半導体材料・デバイスの評価手法として確立することを目指している。GaN は青色 LED などの光デバイスとして広く普及しており、また、省エネルギーパワーデバイス材料や太陽電池材料としても期待されており、c 軸方向に自発分極を持ち、加えて構造歪みよりピエゾ分極が発生する。これらの分極により、ノーマリーオフ動作が困難であることが課題となっている一方、InGaN/GaN ヘテロ構造界面に誘起される自発・ピエゾ分極を利用し高濃度な 2 次元電子ガスが実現されており、このように積極的に分極構造を利用する「分極エンジニアリング」と呼ばれる研究も精力的に行われている。

近年、我々は GaN ベースの HEMT 構造や InGaN/GaN 多重量子井戸構造にフェムト秒パルスレーザーを照射することにより誘起される様々な超高速現象を、テラヘルツ電磁波放射として観測した [1-2]。図 (a) に示すように、InGaN/GaN 多重量子井戸構造にフェムト秒パルスレーザーを照射すると、図 (b) に示すような波形をもつ THz 波が観測された。この現象は、1) InGaN/GaN 界面の歪より生じた内部電界の光励起キャリアによる遮蔽、2) 歪の緩和により生成された音響フォノンが衝撃波となり結晶表面に到達、3) 多重量子井戸がナノキャパシタの役割を果たし量子井戸内で電荷が振動、の 3 つの要因により THz 波が励起され、自由空間に放射されたためと解釈できる。この結果は、ワイドギャップ半導体デバイス内部の高速電荷ダイナミクスを時空間で分析できることを示しており、様々なデバイス開発における性能向上に貢献できると考えている。また、それぞれの THz パルス時間差から保護層の厚さを広範囲で 10nm 精度で分析できるため、デバイス実用化レベルでの工程管理への応用も可能と考えている。

[1] A. Mannan *et al.*, “Terahertz emission spectroscopy of GaN-based heterostructures”, Journal of Applied Physics Vol. 129, 245702 (2021)

[2] A. Mannan *et al.*, “Ultrafast Terahertz Nanoseismology of GaInN/GaN Multiple Quantum Wells”, Advanced Optical Materials, Vol. 9, 2100258 (2021)

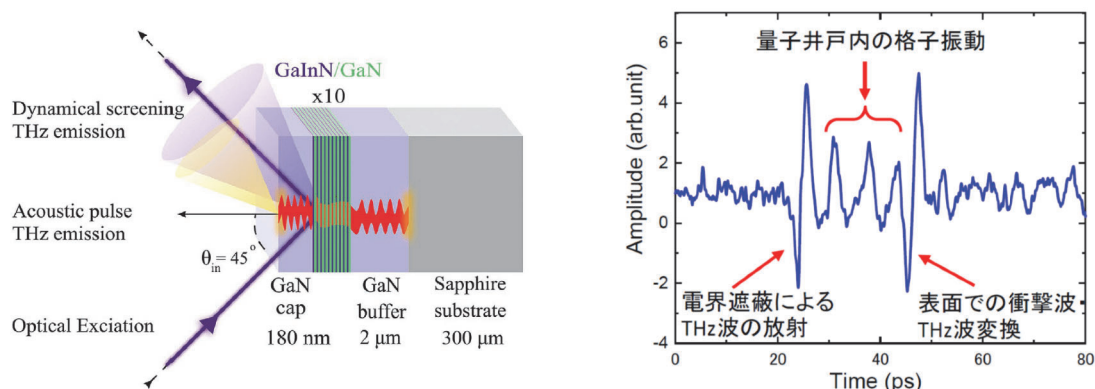


図 (a) InGaN/GaN 多重量子井戸構造を有する試料から発生する THz 放射の模式図、および (b) 発生した THz 波の波形。

エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野（松田研）

<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/conv/>

「二次元半導体人工ヘテロ界面における自発的光起電力の発生とそのデバイス応用」

近年、その厚みが原子数層（1 nm 以下）の二次元層状半導体に関する研究が注目を集めている。それら二次元層状物質を、ファンデルワールス力で積層し形成された人工ヘテロ構造界面は、その様々な物質の組み合わせと、個々の物質では見られない物性発現の観点から、新たな研究対象となっている[1,2]。このような人工ヘテロ構造界面において、特定の角度で異なる回転対称性を持つ二次元層状物質を積層することで、面内の空間対称性が一つの鏡面对称性のみに縮退し対称性が破れ、面内分極が発現することが報告された[3]。この面内で発現する分極は、どちらも非分極物質の組み合わせである二セレン化タングステン（WSe₂）/黒リン（Black Phosphorene: BP）ヘテロ構造で報告されている。この面内分極により、従来の太陽電池（光起電力）デバイスで用いられている半導体 pn 接合なしに、自発的な光起電力効果を示している。しかしながら、このような二次元半導体人工ヘテロ構造界面における、自発的光起電力特性の報告は非常に限られており、その起源とされるシフト電流についても未解明の部分が多い。加えて pn 接合を用いないため、将来的に太陽電池デバイスの光電変換効率における重要な因子である、開放電圧がバンドギャップに制限されないことが期待される。

そこで本研究では、二次元半導体人工ヘテロ界面として二硫化モリブデン（MoS₂）/四硫化クロム燐（CrPS₄）と四端子電極からなるヘテロ構造デバイスを実際に作製し（図 1（a）挿入図）、その光起電力特性を詳細に調べた（図 1（a））。ここで用いる層状物質である CrPS₄ は大気中で比較的安定であり、図 1（b）に示すように結晶構造として二回回転対称性と一軸の鏡面对称性を有する。そのため、三回回転対称性と三軸の鏡面对称性を有する二次元半導体 MoS₂ と適切な角度で積層することにより、界面で空間対称性が破れ、面内分極の発生が期待される。実際に、この MoS₂/CrPS₄ ヘテロ構造デバイスに、波長 532 nm のレーザーを照射しながらその電流・電圧特性を測定した。図 1（c）に示すように、まずレーザー照射しない場合には（Dark）、電圧 0 V において起電力が生じていないことがわかる。これに対してレーザーを照射しながら、ヘテロ構造界面において分極発生が期待できる方向（P_{||}）で検出した電流・電圧特性では、電圧印可なしの状態において自発的起電力が生じ、レーザー光の強度に応じて増大している様子がわかる。さらに、分極方向と垂直方向（P_⊥）で検出した電流・電圧特性では、自発的光起電力が生じていない。このことから、確かにヘテロ構造界面において面内分極が生じ、シフト電流が発生している。さらに CrPS₄ は 40 K において、常磁性・反強磁性転移を示すことから、空間反転対称に加え、時間反転対称性の破れに起因する自発的起電力の実験結果も参考にしながら、シフト電流の物理の理解を進めるとともに、デバイス特性の向上に対する新たな指針を得ることを目指して研究を進めている。

[1] K. Shinokita, K. Matsuda *et al.*, ACS Nano **16**, 16862 (2022)

[2] K. Shinokita, K. Matsuda *et al.*, Nano Lett. **21**, 5938 (2021)

[3] T. Akamatsu *et al.*, Science **372**, 68 (2021)

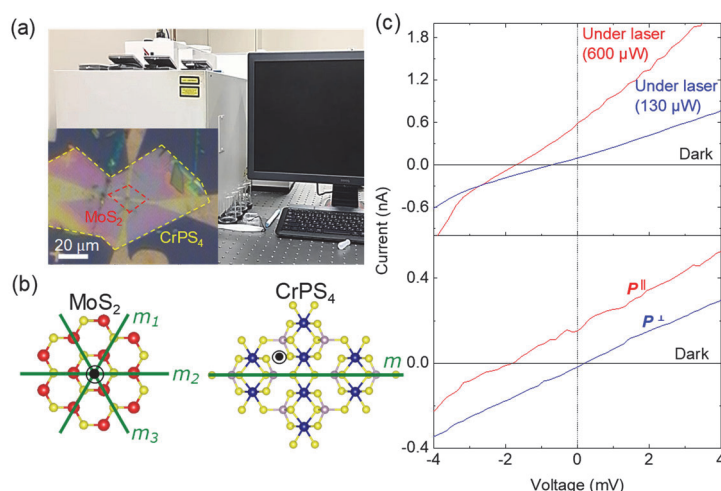


図 1 (a) 測定システムの写真、挿入図：MoS₂/CrPS₄ ヘテロ構造デバイスの光学顕微鏡写真、(b) MoS₂ と CrPS₄ の面内結晶構造の模式図、(c) ヘテロ構造デバイスの電流・電圧特性

生存圏研究所 生存圏診断統御研究系 大気圏精測診断分野 (橋口研究室)

http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/hashiguchi_lab/

「大気観測用 MIMO レーダーの開発」

当研究室は、先端的大気レーダー・リモートセンシング技術を開発し、大気圏の諸現象の解明に挑んでいる。MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, マイモ) は、送信・受信の双方で複数のアンテナを使う技術で、通信分野において古くから研究されており、通信速度や通信品質を向上させるために実用されている。ここでは、MIMO 技術を我々の大気レーダーに応用する研究について紹介する。レーダー観測における空間分解能 (ビーム幅) は一般にアンテナ開口の大きさで決まるが、MIMO 技術を用いると、物理的なアンテナより広い開口を仮想的に得ることができ、空間分解能を向上させることが可能となる。MIMO レーダーの基本原則を図1に示す。フェーズドアレイレーダーにおいて、直交性のある信号を異なる送信 (Tx) アンテナから同時送信し、受信 (Rx) アレイで取得された信号を送信アンテナ毎に分離・処理することで、少数のアンテナ素子で仮想的に大開口を得て、鋭いビームを形成するものである。通信分野では今世紀に入って広く使われ出した技術であるが、特に大出力のレーダーに実用された例はない。

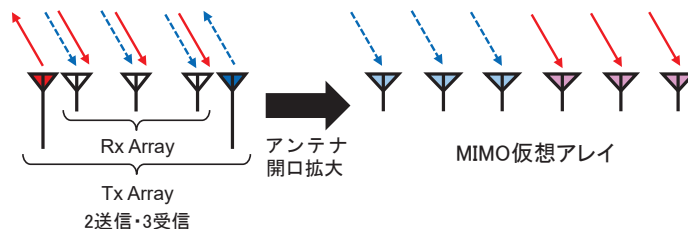


図1. MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) レーダーによるアンテナ開口拡大の基本原則

MU レーダーは滋賀県甲賀市信楽町に設置された、直径 103m の敷地に 475 基の八木アンテナが設置されたアクティブ・フェーズドアレイ・システムの大型大気レーダーである。柔軟なシステム設計により多様な新観測技術の開発を行うことが可能で、MU レーダーを用いて MIMO 技術の実証実験を行っている。前述の通り、MIMO レーダーでは直交性のある複数の信号を異なるアンテナから同時に送信し、複数のアンテナ (受信機) で受信する。信号処理により、これらの送信信号を同一とみなすことで、受信仮想開口を形成する。直交信号を得るため、ドップラー分割多重アクセス (DDMA) 方式という、ドップラー領域で送信信号を分離する方法を用いた実験を行った。図2に MU レーダーの物理アンテナ位置 (赤) および6波で構成される直交送信信号により得られる仮想アンテナ位置 (緑) を示す。MIMO による仮想開口が物理面積より大きく形成できることがわかる。1MW の送信出力を有する MU レーダーでは、38 万 km 離れた月からの反射エコーを受信可能である。MIMO 技術による空間分解能向上の検証として、月面反射エコーを用いた実験を実施した。結果は良好で、メインビームにおいてはほぼ理論通りの分解能向上が見られ、MIMO 仮想開口が形成できていることが確認できた。さらに、MIMO によりチャンネル数が大幅に増えるので、Capon 法などのアダプティブ信号処理を適用することで、さらに分解能を向上できることも確認された。

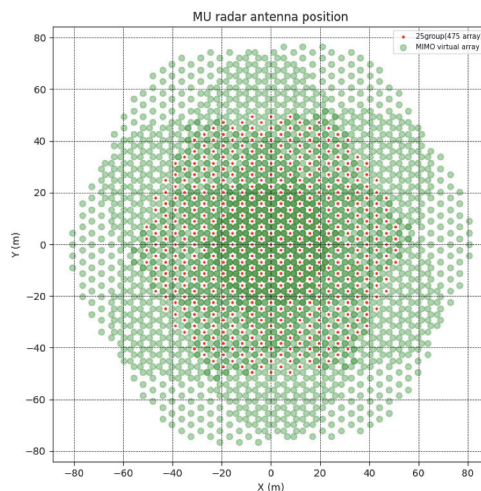


図2. MU レーダーの物理アンテナ位置 (赤) および MIMO による仮想アンテナ位置 (緑)。

地球温暖化や都市化の影響で、いわゆるゲリラ豪雨と呼ばれるような極端な豪雨現象の頻度が増しており、毎年のように被害が発生している。このような降水現象の全貌を捉えるために気象レーダーは非常に強力な測器であるが、気象庁が現業利用しているようなパラボラアンテナを用いた通常の気象レーダーでは 10 仰角程度の全天観測に 5 ~ 10 分の時間がかかるため、特に急発達する降水雲の時間変化を捉えることは困難である。近年、研究用にいくつかのフェーズドアレイ気象レーダーが開発されているが、その最大の利点は時間分解能 30 秒で 100 仰角以上の観測が可能なことである。これは多数のアンテナ素子を用いてデジタルビームフォーミングにより仰角方向に複数のビームを形成する技術によって実現可能となったものである。しかし、フェーズドアレイレーダーは大気レーダー以外ではまだ普及しておらず、多数のアンテナ素子が必要なためコスト面での課題が大きく、気象庁や国交省の現業気象レーダーに実用されるには至っていない。少数のアンテナ素子で十分な空間分解能が得られる MIMO 技術が、その解決策になる可能性がある。現在、MU レーダーよりも高周波で気象レーダーにより近い、1.3GHz 帯ウィンドプロファイラーに MIMO 技術を応用する研究も進めている。

令和4年度修士論文テーマ紹介

工学研究科 電気工学専攻

青 木 勇 磨 (引原教授) 「単方向結合双安定系の自励振動とモード遷移～電気回路を用いたモード遷移の実験～」

本論文は、リザーバの故障を検出する新しいセンサである単方向結合双安定系の自励振動特性を調べたものである。外部信号の対称性が変化した場合のモード遷移の変化を数値的と実験的に検討した。同時に、結合項を変化させることでセンシングの感度向上を図った。

馬 場 達 也 (引原教授) 「吸引領域の大きさの定量化に基づく非線形振動子のパラメータ変動に関する検討」

本論文は、吸引領域の大きさの定量化手法を提案し、非線形振動子の共存する同期解の間の遷移特性を検討したものである。励振された単一および結合非線形 MEMS 共振器の励振振幅の変動に対する応答特性を解析し、提案手法が有効であることを示した。

藤 井 俊 輔 (引原教授) 「配電系統における電圧変動の可到達集合に基づく危険性評価手法に関する検討」

本論文は、分散型電源を有する配電系統の電圧変動現象に着目し、可到達集合に基づく危険性評価手法を検討したものである。本手法を用いることにより、負荷や分散型電源の接続された各節点に対し、危険性の定量的な把握が可能であることを明らかにした。

間 宮 崇 弘 (引原教授) 「電力パケットの無線伝送とそのシステム間電力融通への応用」

本論文では、電力と情報を統合管理する電力パケットの概念を無線電力伝送 (WPT) の管理へ拡張することを提案した。選択的な WPT、系内の有線電力供給に並行した系間 WPT、ロボットハンドへの WPT と操作の 3 点を実験で実証し、サイバーフィジカルシステムの可能性を示した。

道 谷 優 貴 (萩原教授) 「Contraction 解析に基づく離散時間非線形確率系の状態フィードバック制御」

i.i.d. 過程で特徴づけられる確率的な動特性をもつ離散時間非線形系の、変分システムを用いた Contraction 解析について述べた。そして、解析のための LMI 条件を導出した。さらに応用として、安定化制御器設計のための LMI 条件を導出した。

森 山 翔 太 (萩原教授) 「アンサンブルカルマンフィルタを用いた確率系のパラメータ分布推定およびゲインスケジュールド制御」

非線形フィルタを用いた確率制御に関する既存の成果をより広い確率系に適用することを目的とし、背後にある確率分布が時変な確率系について、その分布をアンサンブルカルマンフィルタを用いて推定してゲインスケジュールド状態フィードバックを設計する手法を提案した。

山 岸 凌 (萩原教授) 「ランダムな通信遅延が生じる環境下での自動車の横位置と縦速度の遠隔制御」

ランダムな通信遅延が生じる環境下での自動車の遠隔型自動運転実現を目指し、その横位置と縦速度の遠隔制御を論じた。横位置制御ではフィードバック制御に加えてフィードフォワード制御も用いるこ

と、また縦速度制御では積分補償器を導入することにより応答の改善を試みた。

湯 山 太 智（萩原教授）「線形周期時変系の L_∞/L_2 ハンケルノルム解析と critical な境目の特徴づけ」

線形周期時変系の L_∞/L_2 準ハンケルノルムと L_∞/L_2 ハンケルノルムの表現法、および L_∞/L_2 誘導ノルムとの関係をリフティングを用いない議論を通して導いた。さらに、 L_∞/L_2 準ハンケルノルムを最大とする critical な境目の特徴づけについて考察した。

岩 田 俊 亮（阪本教授）「呼吸の皮膚変位特性を用いたレーダによる複数人体計測技術」

本研究では、電波による呼吸の非接触計測において、呼吸波形の特徴を活用した信号処理法の開発を行った。呼吸波形の周波数スペクトルの特徴を用い、対象者の位置および姿勢の推定法を提案した。成人および乳幼児を対象とした実験を通じ、提案法の性能を評価した。

越 坂 武 仁（阪本教授）「脈波計測のための電磁波散乱解析に基づくアレーレーダ配置最適化技術」

本研究では、非接触血圧計測に必要な人体複数部位の計測法を開発した。対象者の3次元形状をもとに、電磁波散乱解析により反射部位を特定し、レーダ位置を最適化するシステムを開発した。開発システムにより、対象者の姿勢によらず、所望の人体部位の計測が可能となった。

川 崎 皓 介（土居教授）「移動型非線形局在振動の周波数 - 波数空間における表現に基づく初期値推定に関する研究」

結合振動子における移動型局在振動について、周波数 - 波数空間での分布を、エネルギー・周波数・移動速度に対して解析した。また、その結果を用いて静止型局在振動から所望の速度を有する移動型局在振動の初期値を生成することに成功した。

佐 藤 豪 洋（土居教授）「共同注意を成立させる幾何学的制約に基づいた遠隔プレゼンテーションシステム設計」

遠隔会議システムでは、お互いが注視している対象を認識しづらいことが意思疎通や共同作業の妨げになっているという問題がある。本研究では、幾何的拘束を考慮したカメラの配置と表示を提案し、共同注意が発生しやすい遠隔プレゼンテーションシステムを設計した。

敷 田 暁（土居教授）「総作業時間最小化を目的とした無制限ブロック積み替え問題に対する解法の検討」

垂直に積まれたブロックを取り出す際に発生する積み替えに必要な処理時間の最小化を目的としたブロック積み替え問題について、積み替え可能なブロックに制限を設けない無制限問題を対象とし、分枝限定法に基づく厳密解法と、蟻コロニー最適化による近似解法を構成して計算機実験による比較を行った。

高 橋 克 弥（土居教授）「注意状態が日常的な動作に与える影響の筋活動計測による分析」

自分の周囲の対象に対して注意を向けている場合とそうでない状態で動作中の筋活動が異なることを仮定し、頸部の筋電位の分析を行った。動作の初期から中期にかけて特徴的な違いが認められ、直接計測することが難しい注意状態の推定に関して良い指針を得た。

Ma, Xinyi (土居教授)「心臓プルキンエ繊維モデルにおけるイオン濃度変数が細胞内振動子とモデル全体の動特性に及ぼす影響に関する検討」

イオン濃度変数を含む心筋細胞の電気生理学モデルは、モデルが表現する諸過程の時定数が大きく異なるなど数学的解析を行う上で種々の問題を孕んでいる。本研究では、細胞内振動子に着目することで、これらの問題を一部解決し、心筋細胞全体の動特性を明らかにした。

早 川 龍 成 (土居教授)「膵 β 細胞のグルコース応答性インスリン分泌に及ぼす膵 α および δ 細胞の傍分泌の影響に関する研究」

膵 β 細胞の電気生理学モデルとインスリン分泌過程モデル、膵 α 、 δ 細胞の電気生理学モデルを統合した膵島全体のモデルを構築し、血糖値に応じて膵 β 細胞が行うインスリン分泌に及ぼす膵 α 、 δ 細胞のホルモン分泌の影響、膵島が行う血糖値制御の仕組みを明らかにした。

宮 崎 健 太 (土居教授)「結合共振回路における局在モードの移動型不純物に対する最大追従速度に関する研究」

平面コイルアレイからなる結合共振回路において、外部コイルが移動する場合の局在モードのダイナミクスについて解析した。その結果、局在モードの追従速度に限界があることを明らかにし、それが回路定数に依存することを示した。

遠 藤 紘 矢 (伊藤講師)「スピンロックシーケンスを用いた微小磁場計測における MR 位相画像の有効性の検討」

神経磁場を検出する機能的 MRI の検出感度の向上を目指し、新たに phase detection SIRS (PD-SIRS) という手法を提案し、シミュレーションとファントム実験により、PD-SIRS を含めた各種スピンロックシーケンスにおける MR 位相画像の特徴を明らかにし、MR 位相画像の有効性について検討した。

大 村 剛 史 (伊藤講師)「M 系列によるポンプ光変調を用いた光ポンピング磁気センサの多チャンネル化に関する検討」

光ポンピング磁気センサの多チャンネル化に向け、ポンプ光の偏光度を M 系列で変調する直接拡散方式を用いた多点同時計測法を提案した。正弦波や疑似心磁波形の同時計測をシミュレートし、M 系列のパルス幅が復号信号に与える影響や多チャンネルへの干渉を調査した。

南 部 康 太 (伊藤講師)「光ポンピング磁気センサのノイズ低減方法に関する検討」

光ポンピング磁気センサのノイズ低減に関して検討を行った。ハードウェア面からは磁気シールドの層数の増加やグラジオメータ構成によるノイズ低減効果を検証し、ソフトウェア面からは主成分分析や経験的モード分解の効果をノイズの主要成分の違いから検証した。

堀 拓 真 (伊藤講師)「パルス光を用いたスカラー型光ポンピング磁気センサの最適動作パラメータに関する検討」

スカラー型光ポンピング磁気センサの最適な動作条件について理論的・実験的に検討した。数値計算により計測感度に特に影響を与えるパラメータがセル温度とパルス光の繰り返し周波数であることを明らかにし、実験によりその妥当性を検証した。

重 政 茉 於（雨宮教授）「銅複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線の線材幅・フィラメント幅・銅層厚さ・スパイラル層数と磁化損失特性」

短尺の直線形状、およびスパイラル形状の銅複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線の磁化損失を測定した。スパイラル形状にすることで磁化損失を効果的に低減することができ、フィラメント幅・線材幅・銅層厚さが小さくなるほど磁化損失が減少した。

藤 田 寛 和（雨宮教授）「低温容器をマグネット内部に有する装置を用いた複合多芯超伝導線の結合時定数測定法」

種々の複合多芯超伝導線における結合時定数を、ガスヘリウム雰囲気中において異なる温度で測定するための測定法を構築した。構築した測定系における冷却特性などの評価を行うとともに、いくつかの複合多芯超伝導線を対象として異なる温度での結合時定数測定に成功した。

葛 西 大 浄（和田教授）「光 Ethernet トランシーバ IC の EMC 評価法の検討」

1Gbps の光 Ethernet 規格（1000BASE-RH）のトランシーバ IC を対象として、IEC で審議中の EMC（エミッションおよびイミュニティ）評価規格の技術的妥当性について検討し、トランシーバ IC の電源端子に妨害波注入を行った際の誤動作発生機構について調査した。

坂 本 一（和田教授）「時変回路による伝送線路無反射終端におけるエネルギー収穫」

伝送線路の終端を無反射にするためには、時不変線形回路では抵抗を接続する必要があるが、入射したエネルギーは熱に変換される。本論文では、時変の自由度を利用することにより、エネルギー収穫も可能な無反射終端を提案し、実験によりその有効性を確認した。

山 口 駿（和田教授）「参照電圧を必要としない量子化器を用いた適応的サンプリングデジタル LDO」

半導体集積チップにおいて細粒度で電源管理を行うために、小型で低消費電力のデジタル LDO が必要である。本論文では、適応的なサンプリングを行うデジタル制御を提案し、過度応答を速くするための量子化手法を 65nm プロセスにて試作した回路にて実証した。

鈴 木 渉（松尾教授）「ブロッククリロフ部分空間法に基づく展開点付きマルチポート CLN 法に関する研究」

電磁界を効率的に等価回路表現する、展開点を導入したマルチポート CLN 法の理論について議論した。展開点を 2 つ以上用いるマルチポート CLN 法を、ブロッククリロフ部分空間法の観点から導出できることを理論的に示し、その周波数特性の評価を行った。

丸 毛 雄 貴（松尾教授）「2 段階エネルギー極小化を用いた磁区モデルによる鉄芯材料応力依存磁化解析に関する研究」

鉄芯材料の物理的な磁化モデルである多磁区粒子集合モデルについて、磁化状態を磁壁移動と磁化回転の 2 段階のエネルギー極小化により効率的に算出する手法を開発した。本手法により、磁化方向と異なる方向の機械的応力の影響を評価する手法の検証を行った。

三 浦 廉（松尾教授）「カウア型磁気回路を用いた渦電流磁界の縮約表現に関する研究」

渦電流磁界のモデル縮約法である CLN 法について、磁気回路的な表現の検討を行った。ベクトルポ

テンシャルを入力として等価カウア回路を構成すると、出力は磁界と見なされることを用いて、誘導モータの新たな非線形モデル縮約法を導出し、表現精度を検討した。

宮 本 雄 太（松尾教授）「蓄熱発電用誘導発熱機の構造要因が発熱特性に及ぼす影響に関する研究」

蓄熱発電用の回転型誘導発熱機について、発熱導体の大きさと配置、磁極の数と幅など、構造的な要因が発熱特性に及ぼす影響を検討した。永久磁石あるいは電磁石を用いる場合について、発熱量を最大化するための発熱導体と抜熱流体部分の体積比を検討した。

後 藤 芳 隆（中村（武）特定教授）「移動平均変調法を用いたかご形誘導モータの過渡・定常回転特性に関する基礎研究」

移動平均法を用いたパルス幅変調電圧波形の生成法を提案し、その物理的意義や基本特性を解析的に検討した。さらに、同方法で生成した電圧波形をプレミアム規格の三相かご形誘導機に入力し、その優位性を効率、振動（騒音）、および温度上昇の観点から明らかにした。

工学研究科 電子工学専攻

大 住 知 暉（後藤准教授）「フィールドエミッタアレイの陰極材料としての窒化ハフニウムの窒素組成制御による膜物性最適化」

微小電子源であるフィールドエミッタアレイの電子放出特性向上を目指して、陰極材料の窒化ハフニウム薄膜の膜物性の最適化を行った。窒素組成を制御した薄膜の結晶性、仕事関数を評価し、NaCl構造を有するものの中で、窒素組成が最も低い薄膜が最適と評価した。

小 林 亮 太（掛谷准教授）「超伝導テラヘルツ光源における同期現象の解析およびモデル化」

ビスマス系銅酸化物高温超伝導体からなるテラヘルツ光源の放射強度の向上を目指し、複素素子同期発振現象観測の定量的解析を行い、結合パラメータの発振周波数依存性を明らかにした。また、励起電磁波の高効率放射設計を可能にする数値モデルを提案した。

今 村 真（白石教授）「アインシュタイン＝ド・ハース効果観測用スピン素子の設計と振動特性の研究」

角運動量と磁化の関係を実験的に示したアインシュタイン＝ド・ハース効果について、スピン角運動量の流れであるスピン流を用いた研究が行われている。本研究では、機械振動の観測用のスピン流注入可能なカンチレバーの作製と、その設計指針について検討した。

大 西 康 介（白石教授）「電気的手法を用いた原子層トポロジカル物質のスピン状態の計測」

現代の物性物理において中心的役割を果たしているトポロジカル物質で発現するスピン構造の電氣的計測を、特にワイル半金属 WTe₂ とトポロジカル p 波超伝導体 FeTeSe を対象材料として行い、それぞれ特徴的なスピン偏極を成功裏に観測した。

清 水 智（白石教授）「非縮退シリコンスピndeバイスにおける磁気抵抗比向上に関する研究」

シリコンは現代の半導体デバイスの基軸となる材料である。スピントロニクス観点でも良好なスピンコヒーレンスが期待されており、シリコンをチャネルとしたスピントランジスタ等が期待されている。本研究ではシリコンにおけるスピン性能の向上のために、強磁性体電極やチャネル形状の最適化、新規

強磁性体の探索等を実施し、スピン依存抵抗の向上を実現した。

福 本 直 樹（白石教授）「ビスマスにおける g 因子に起因した異方的スピン変換」

ビスマスは非放射性元素で最大のスピン軌道相互作用（SOI）を持つため、SOIが素子動作効率を決定するスピン流を用いた新奇メモリ素子への応用が期待されてきたが、何故かその効率は従来ゼロであった。本研究ではこの長年の未解決重要問題を結晶構造と g 因子に着目することで解決し全元素で最大級の効率を実現した。

前 草太郎（白石教授）「フェリ磁性絶縁体中のマグノン伝搬の抑制効果に関する研究」

磁性体中で整列したスピンの励起状態であるスピン波（マグノン）は、磁性体中を波として伝搬するため電子が担うスピン流に比べ長距離の伝搬が可能となる。本研究では、この伝搬が外部の入力電極等の導体の存在により抑制される効果について研究した。

井 上 真奈人（竹内教授）「単一発光体を用いた連続適応量子状態推定の実現」

個々の光子の偏光状態を、最も精度よく推定する方法として、適応量子状態推定がある。しかしこれまでの検証実験は、レーザー光を微弱にした光源などを用いた物であった。本研究では、六方晶窒化ホウ素中の単一発光体から放出された光子に対して初めて適応量子状態推定による状態推定を実現、物理限界であるクラメル・ラオ限界の精度を達成することに成功した。

佐々木 駿 輔（竹内教授）「量子もつれ光子対による原子・分子の 2 光子吸収観測に向けた研究」

極短時間相関を持つ量子もつれ光では、極めて高効率の 2 光子吸収が予想されている。本研究ではその定量的な評価実験の実現に向け、ルビジウム原子およびローダミン分子の古典光による 2 光子吸収係数の定量的な評価を実施し、観測に向けた指針を得た。また周波数量子もつれ光を用いてローダミン分子の 2 光子吸収観測を試みた。

中 村 暖（竹内教授）「窒化シリコンリング共振器による多光子対生成に関する研究」

オンチップ光量子回路のための光子対源として、窒化シリコンリング共振器が注目されている。本研究では、多光子を用いた光量子回路の実現に向け、窒化シリコンリング共振器による多光子対生成を直接的な検証に知る限り初めて成功した。さらにスクイーミングパラメータの評価や非古典性の実証にも成功した。

Kaur, Jasleen（竹内教授）「Study on quantum infrared spectroscopy with pulse laser pumping」（パルスレーザー励起による量子赤外分光の研究）

量子赤外分光は、量子もつれ光と量子干渉を組み合わせることで、可視域の検出器を用いて、赤外域の吸収分光を可能にする技術である。本研究では、励起光限としてパルスレーザーを利用した場合について理論・実験的に検討した。その結果、可視分光器を用いて赤外吸収波長を特定する方式においては、分解能が劣化することを定量的に明らかにした。

藤 井 開（木本教授）「半導体デバイスプロセスによって SiC 中に形成される欠陥準位の深さ方向解析」

SiC 電子デバイスを作製するためには、イオン注入、反応性イオンエッチング、熱酸化などのプロセスが必要である。本研究では、これらのデバイスプロセスにより生成される SiC 結晶内の点欠陥の種類

と熱的安定性を調べた。独自に開発した評価手法および解析方法を用いて、表面近傍における欠陥密度の深さ方向分布を精密に決定することに成功した。

前 田 憲 幸（木本教授）「相補型 JFET 論理回路実現に向けた SiC JFET のデバイスモデル確立と動作限界の検討」

SiC の接合型電界効果トランジスタ（JFET）は高温や輻射下等の厳環境で動作可能な電子デバイスとして有望である。本研究では、本グループが提案する SiC の相補型 JFET の特性を記述するデバイスモデルを構築し、これを用いて回路シミュレーションによる動作特性の解析を行った。室温から高温での特性や短チャネル化した際の特性の変化を予測することに成功した。

松 岡 大 雅（木本教授）「S イオン注入 n 型 SiC 層の物性解明と相補型 JFET への応用」

SiC の伝導性制御にはドナーとして通常、窒素（N）が用いられるが、これをチャネルに用いた SiC 相補型 JFET インバータでは論理しきい値電圧が温度上昇と共にシフトする。この問題を解決するために、本研究では比較的深いドナーを形成する硫黄（S）に着目し、イオン注入による n 型層の形成と JFET への応用に取り組んだ。この結果、顕著に高い移動度と温度変化に対して安定な相補型 JFET 特性を得た。

三 上 杏 太（木本教授）「高温動作集積回路実現に向けた SiC p チャネル MOSFET の基礎研究」

従来、SiC MOSFET の研究開発は n チャネル型に特化され、相補型 MOS (CMOS) 作製に必須の p チャネル MOSFET に関する研究は極めて限定的であった。本研究では、SiC の p チャネル MOSFET の基礎研究に初めて体系的に取り組み、ボディ領域や結晶面が MOSFET のチャネル移動度やしきい値電圧に与える影響を明らかにした。特に、非極性面を活用することにより最高のチャネル移動度を達成した。

河 野 祐 紀（小林准教授）「原子間力顕微鏡を用いた有機薄膜トランジスタのキャリア挙動評価に関する研究」

ミリ〜マイクロ秒オーダーの時間分解能で局所的な表面電位を計測できる時間分解ケルビンプローブフォース顕微鏡を用いて、有機薄膜トランジスタのオン／オフ時におけるチャネルへのキャリア注入／排出過程の表面電位分布の過渡応答を可視化することに成功した。

合 原 岳（小林准教授）「原子間力顕微鏡による生体分子間特異結合能評価および結合サイト可視化に関する研究」

ビオチン分子と特異的に強く結合するタンパク質であるストレプトアビジンに対し、ビオチン分子で探針修飾した原子間力顕微鏡を用いてストレプトアビジンの高分解能観察と同時に結合破断力計測を行い、ストレプトアビジンのビオチン結合サイトの可視化に成功した。

梅 本 隆之介（川上教授）「自在な発光波長集積を目指した InGaN 系多面体構造における局所的オフ角制御」

複数の傾斜面で構成された GaN 三次元構造上に形成した InGaN 可視 LED では、発光波長が構造の傾斜角によって制御できることを示した。各斜面に独立に電極を形成することにより、外部から発光スペクトル制御も可能であり、所望のスペクトルを持った光源の実現に向けて有望な構造であることを示した。

神 谷 君 斗 (川上教授)「UVC-LED 高効率化を目指した半極性面上の組成傾斜 AlGaIn による分極誘起 p 型伝導層の設計と試作」

半極性面上では、分極効果が抑制されて輻射再結合確率が高まることが知られており、高効率な深紫外 LED の実現に向けて期待されている。一方、分極効果を利用した伝導性制御も最近注目を集めている。分極効果を抑制した半極性面上でもこの技術が活用できることを数値計算で示し、実験的に検討した。

菊 池 瑛 嗣 (川上教授)「p 型酸化イリジウム系薄膜の高速成長と物性に関する研究」

次世代超ワイドギャップ半導体として酸化物半導体が期待されているが、両極性の伝導型制御が一般に困難である。ここでは、p 型伝導を示す Ir 酸化物に注目し、n 型 Ga 酸化物との混晶化による禁制帯幅の拡大と混晶での p 型伝導の実現、実用に向けた高速成長に関して、現時点での技術的課題を明らかにした。

田 中 志 樹 (川上教授)「AlGaIn 量子井戸の 10 K から 500 K におけるキャリアダイナミクスに関する研究」

殺菌などの応用に向けて波長 200 nm 台の AlGaIn 系紫外 LED の開発が進められている。本研究では、AlGaIn 量子井戸発光層の特性を光学的に評価し、輻射・非輻射再結合寿命の温度依存性の定量とその解釈など、実用化に向けて重要な知見を得ることができた。

福 井 崇 人 (川上教授)「InGaIn 系可視長波長 LED を目指した窒化物半導体 /ScAlMgO₄ ヘテロ構造の界面制御」

可視長波長 LED で用いる高 In 組成 InGaIn の高品質化に向けて、研究室では ScAlMgO₄ 基板の利用を提案している。しかし、基板と窒化物半導体の界面制御法が確立されておらず、高品質化の妨げとなっていた。ここでは、Al 原料による基板表面処理などにより結晶性の改善が見込めることを実験的に示した。

石 野 航 哉 (野田教授)「高効率近接場熱光発電の実現に向けた低抵抗太陽電池の設計およびデバイス構造の最適化に関する研究」

光源と太陽電池を光の波長以下の距離まで近接させて発電を行う近接場熱光発電の高効率化に向けて、太陽電池の直列抵抗を考慮した発電特性の理論解析を行い、デバイス構造全体の最適化を行った。その結果、p 側および n 側に櫛状電極を採用しつつ、熱輻射光源と中間基板の厚さを最適化することで、発電効率 47.6 %、発電出力密度 5.61 W/cm² が得られる可能性を示した。

今 村 陽 (野田教授)「変調フォトリック結晶レーザーへの二重格子構造の導入に関する研究」

変調フォトリック結晶レーザーの大面積高輝度動作に向けて、結合係数の制御性を向上させることができる二重格子構造を提案した。そして、空孔の大きさのみを変調する新たな設計を行うことで、不要な回折成分を抑制可能であることを解析的に示した。さらに、結合係数を調整したデバイスの作製・評価によって直径 250 μm での高輝度動作の実証に成功した。

十 鳥 雅 弘 (野田教授)「GaIn 系フォトリック結晶レーザーの CW 高出力化に向けた温度補償構造導入に関する検討」

GaIn 系材料を用いた青色フォトリック結晶レーザーについて、CW 動作時の温度上昇に伴う発振閾値増大の原因を考察し、その影響を打ち消す補償構造の導入することで、低閾値化と高出力化を実現した。

また、発振面積の拡大による低閾値化・高出力化も検討し、青色面発光レーザーとして世界最高出力となる 800mW の CW 動作を実現した。

三 橋 凌 太（野田教授）「フォトニック結晶共振器間での光転送の高効率化・高速化に関する研究」

フォトニック結晶光ナノ共振器間での光転送の高速化、高効率化を目標として共振器結合系の構造最適化とプロセス改善に取り組み、従来の 3 倍の結合定数と 2 倍の光保持時間をもつデバイスの作製に成功した。その結果、光転送の高速化は実現されたが、転送後に光損失の増加が観測された。今後、高効率化のためには電気制御機構の改善等が必要である。

片 桐 光 陽（杉山准教授）「同位体シフト測定に向けた Yb^+ の $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ 時計遷移用レーザーの開発」

線幅狭窄化レーザーに位相雑音 0.07 rad で位相同期された、2 系統目の時計遷移用光源を開発した。温度安定化した外部共振器型半導体レーザーと十分なパワーの第 2 高調波を光共振器なしで発生する結晶を用いて、12 時間以上の連続動作と時計遷移スペクトル取得を達成した。

中 村 隆 央（杉山准教授）「ファイバー結合型テラヘルツ時間領域分光系と切替波長板機能をもつメタ表面の開発」

ファイバー結合型テラヘルツ時間領域分光系を構築し、分散補償によって発生するテラヘルツ波の帯域が広帯域化することを確認した。また、1/4 波長板機能と 1/2 波長板機能を切り替え可能な反射型メタ表面の設計および作製を行った。

光・電子理工学教育研究センター

二 五 和 樹（De Zoysa Menaka 講師）「大域的バンド端周波数勾配導入によるフォトニック結晶レーザーの短パルス・高ピーク出力発振の実現」

大域的バンド端周波数勾配を導入したフォトニック結晶レーザーの短パルス・高ピーク出力化に向けて数値解析を行い、直径 1mm のデバイスに対して周波数勾配の最適化を行った。また、設計したデバイスを実際に作製し、過渡応答特性の評価を行った結果、ピーク出力 200W 級、パルス幅 30ps 程度の短パルス発振の実証に成功した。

吉 田 溪 介（De Zoysa Menaka 講師）「二重格子フォトニック結晶におけるエルミート・非エルミート光波結合制御に基づく特異な分散関係の実現」

光波同士の相互結合を自在に制御可能な独自のフォトニック結晶構造である「二重格子フォトニック結晶」において、エルミート・非エルミート光波結合制御に基づく光の分散関係制御について体系的な考察を行い、多様な分散関係が実現可能であることを理論的に導いた。また、その中で明らかとなった、 Γ 点からずれた波数域において例外点を伴う周波数縮退域が形成されるという、特異な分散関係の実験的観測にも成功した。

情報学研究科 知能情報学専攻

清 水 周一郎（黒橋教授）「異言語話者の対話を仲介する音声翻訳システムの高度化」

本研究では、異言語話者の対話を仲介する音声対話翻訳という新しいタスクを提案し、そのためのデー

タセットを構築した。音声対話翻訳においては異言語の文脈を利用することが重要であるため、実験により文脈を考慮した音声対話翻訳の有効性を示した。

高 橋 力 斗（黒橋教授）「複数動画に対する抽象的キャプション生成に関する研究」

本研究では、複数動画の共通内容を自然言語で説明するという、抽象的な動画理解に着目したタスクを提案した。データセットを構築し、さらにモデルに関する広範な評価実験を行い、提案タスクのための研究基盤を構築した。

和 田 有輝也（黒橋教授）「生成モデルと識別モデルの統合によるニューラル教師なし単語分割」

本研究では、入力文の文脈全てを活用して単語分割を予測する、ニューラル言語モデルと識別モデルを統合した新しいニューラル教師なし単語分割モデルを提案した。日本語、中国語、タイ語に対する実験で、識別モデルを導入が分割精度向上に寄与することを確認した。

渡 邊 幸 暉（黒橋教授）「ニューラル分類器の予測の解釈に基づく集団に特徴的なテキスト表現の抽出：アメリカ人を例に」

本研究では、ある集団に特徴的なテキスト表現をその他の集団との比較により抽出する手法を提案した。具体例としてアメリカの文化や歴史を背景とした表現に取り組み、データセットの構築や評価実験を行った。

Zhengdong Yang（黒橋教授）「End-to-end Speech-to-text Translation with Spoken-to-written Conversion」（話し言葉書き言葉変換を用いたエンドツーエンド音声翻訳）

講義音声翻訳において、音声データと機械翻訳の訓練データの間には話し言葉・書き言葉というスタイルのギャップがあり、翻訳精度向上の妨げになっている。本研究では、そのギャップに注目し、話し言葉書き言葉変換によるエンドツーエンドの音声翻訳システムを考案し、講義翻訳の性能を改善させた。

Yihang Li（黒橋教授）「Study on Visual Scene-Aware Machine Translation」（視覚シーンに着目した機械翻訳に関する研究）

本研究では、視覚シーンを考慮した機械翻訳データセットを構築した。さらに、データセットの動画を曖昧性解消に活用するために、視覚シーン対応機械翻訳モデル SAFA を提案した。実験では、視覚情報と提案手法によって既存のニューラル翻訳モデルよりも大幅に翻訳性能が向上することを示した。

Zhen Wan（黒橋教授）「Introducing Nearest Neighbor Approach to Improve Relation Extraction」（関係性抽出を改善するための最近傍アプローチの導入）

既存の関係性抽出モデルの課題として、言語の複雑性に起因する暗黙の表現を考慮できないことと、教師ラベルの分布の偏りが原因でうまくモデルを訓練できないことがある。本論文では、まず上記2つの問題に対するシンプルかつ効果的な手法として kNN-RE を提案した。

Felix Giovanni Virgo（黒橋教授）「Improving Event Duration Question Answering Based on Commonsense Understanding」（常識理解に基づくイベント時間幅の質問応答の改善）

本研究では、補助質問応答データを生成するために、大規模なウェブ文章を利用した半教師あり学習

と既存の時間的タスクからのデータセット変換を提案した。実験の結果、イベント時間幅の質問応答の精度が大幅に向上できたことを示した。

市 川 知 樹（西野教授）「フレネルマイクロファセット BRDF モデル：偏光・輝度及び表面・内部反射の統合」

本研究では、実物体表面の微細幾何構造におけるフレネル反射・透過及びその表面化光輸送を輝度のみならず偏光においても正確に表現できる新たな反射モデルを導出し、その有効性を実観測との比較により定量的に示した。

史 一 鳴（西野教授）「End-to-End Transformer-Based Stroke Decomposition, Classification and Trajectory Recovery for Offline Handwritten Chinese Characters」 （トランスフォーマを用いたオフライン手書き漢字のストローク分解分類および軌跡復元）

本研究では、手書き漢字のストローク（払いなどの構成要素）の分解および分類、さらにそれらの軌跡復元を実現する、トランスフォーマに基づいた深層学習モデルを提案した。手書き漢字文字のデータセットを新たに整備し、提案手法の有効性を定量的に示した。

長谷川 浩太郎（西野教授）「歩行者の注意履歴推定」

本研究では、低解像度の歩行者画像から歩行者の頭部方向を頑健に推定する手法を提案し、これにより得られる頭部方向の系列から歩行者がこちらに気づいているか、その注意履歴を推定し、車載映像を用いた実験によりその有効性を示した。

福 田 太 一（西野教授）「車載映像における死角道路領域推定」

本研究では、あらゆる車載映像から死角の真値を自動的に作成する手法を導出し、生成された大量のデータを用いて死角を推定するニューラルネットワークを訓練することにより、車載映像からの死角推定を実現し、実映像を用いた実験を通してその有効性を示した。

吉 武 佑 汰（西野教授）「TransPoser：多視点観測から物体の姿勢と形状を推定する深層生成・最適化モデル」

本研究では、漸増する観測から即時かつ正確に物体の姿勢と形状を推定する、深層指向性距離場関数（DeepDDF）と深層最適化ネットワークで構成される新たな深層学習モデル TransPoser を提案し、合成画像および実画像を用いた実験により、その有効性を定量的に示した。

情報学研究科 通信情報システム専攻

石 橋 直 樹（原田教授）「低消費電力マルチホップ IoT 無線ネットワークにおける送信電力制御法に関する研究」

低消費電力マルチホップ IoT 無線ネットワーク規格である Wi-SUN Field Area Network (FAN) の伝送特性について、計算機シミュレーション及び実機測定によって評価すると共に、既存方式の問題点を示した。さらに Wi-SUN FAN 標準フレームを活用した環境適応型の送信電力制御法を提案し、計算機シミュレーションによりその有効性を示した。

市 川 遊（原田教授）「波形整形を用いた高効率周波数資源利用 OFDM 伝送技術」

現状の CP-OFDM 方式に波形整形技術を適用することで、周波数・時間利用効率を改善する OFDM 方式に基づく新しい通信方式を提案した。計算機シミュレーションによる評価、並びにソフトウェア無線機を用いた検証系を構築して実機実証を実施し、その有効性を示した。

太郎丸 北 斗（原田教授）「端末連携 MIMO 受信における信頼度情報を利用した端末間誤り制御手法に関する研究」

端末連携 MIMO 受信において、連携に要するトラフィックの削減と伝送特性の改善を同時に実現するために要求に応じて端末連携を行うオンデマンドな端末連携 MIMO システムを提案した。計算機シミュレーションならびに屋外伝送実験での測定データを利用することで提案法の有効性を示した。

森 聖 太（原田教授）「帯域内全二重通信システムにおける基地局自己干渉低減法に関する研究」

上りリンク通信と下りリンク通信を同時に同じ周波数で実施する帯域内全二重通信を、5G 以降のセルラシステムに導入するための、現行の 5G 信号フォーマットに基づくデジタル自己干渉キャンセラを提案した。計算機シミュレーションによる評価、並びにソフトウェア無線機を用いた物理層プロトタイプを開発して実験的評価まで実施し、その有効性を示した。

森 川 雄 大（原田教授）「異種通信方式を利用した全二重無線 IoT システムに関する研究」

IoT を実現する無線通信規格である Wi-SUN について、低消費電力性に優れた FSK 方式を物理層に用いた現行 Wi-SUN システムと、高伝送レートを実現可能な OFDM 方式を物理層に用いた次世代 Wi-SUN システムを全二重通信によって高効率に収容するシステムを提唱し、実現するために必要な物理層信号処理技術を提案した。計算機シミュレーションによって評価しその有効性を示した。

神 田 高 望（山本（高）准教授）「Firmware-Agnostic Vital Sign Monitoring and Reliable ACK-Less Broadcasting Based on WLAN Frame Capture」（無線 LAN フレームキャプチャに基づく Firmware-Agnostic バイタルセンシング及び高信頼 ACK-Less ブロードキャスト）

無線 LAN によるバイタルセンシングの適用範囲を拡大するために、ビームフォーミングフィードバックを用いた、ファームウェアに依存しない呼吸数・心拍数推定を実現した。また高信頼なブロードキャスト無線 LAN に向けて、分布強化学習を用いた ACK-less レート制御を提案した。

近 藤 綜 太（山本（高）准教授）「Firmware-Agnostic WLAN Sensing Based on Beamforming Feedback with Commodity Devices」（市販機器を用いたビームフォーミングフィードバックに基づくファームウェアに依存しない WLAN センシング）

ビームフォーミングフィードバック (BFF) センシングの精度向上を実現するセンシングフレームワークを提案した。また、BFF センシングの精度定量化手法として、ストリーム利得の変動係数の利用を提案し、呼吸数推定タスクにおけるセンシング精度を評価した。

花 原 遼 祐 (山本 (高) 准教授) 「Utilization of Beamforming Information Toward Integrated Sensing and Communication」 (ISAC に向けたビームフォーミング情報の活用)

センシングと無線通信の融合のための2つの検討を行った。まず無線 LAN において、ビームフォーミング情報によるチャネル状態情報復元の実現可能性を確認した。また、ミリ波通信によるセンシング領域の拡大が音波を用いて実現できることの有効性と妥当性を実験を通じて確認した。

Han Zhang (大木教授) 「Unavailability-Aware Shared Backup Allocation Based on Workload-Dependent Failure Rate」 (処理負荷に依存する故障率に基づく可用性を考慮した共有予備割り当て)

本論文は、処理負荷に依存する故障率に基づく可用性を考慮した共有予備割り当てモデルを提案した。待ち行列理論を用いて、共有予備割り当ての探索過程において、各ミドルボックスが非可用となる確率を計算した。

Jingxiong Zhang (大木教授) 「Service Deployment Model on Shared Virtual Network Functions with Flow Partition」 (フロー分割を用いた共有仮想ネットワーク機能におけるサービス配備モデル)

本論文は、サービス遅延条件を満足し仮想ネットワーク機能の配置コストを最小化する、フロー分割を用いた共有仮想ネットワーク機能配置モデルを提案した。提案モデルの共有仮想ネットワーク機能配置問題を、混合整数2次元錐計画問題として定式化した。

Zixiao Zhang (大木教授) 「Deployment and Scheduling of Virtual Network Functions in Dynamic Scenario」 (動的シナリオにおける仮想ネットワーク機能の配置とスケジューリング)

本論文は、動的シナリオにおいて、ネットワークサービスの遅延制約条件を考慮して、仮想ネットワーク機能配置モデルとスケジューリングモデルを提案した。提案モデルにおいて、深層強化学習、数値計画法、及び、発見的アプローチを適用し、深層強化学習が有効であることを示した。

赤 星 圭 梧 (大木教授) 「Service Deployment Model with Virtual Network Function Resizing and Priorities」 (仮想ネットワーク機能リサイジングと優先度を用いたサービス配備モデル)

本論文は、資源の共有と優先度付きキューを利用して配備コストを最小化することを目的とした、ネットワーク機能仮想化におけるサービス配備モデルを提案した。また、フロー毎に異なる優先度を与える per-flow priority を提案した。

上 岡 輔 乃 (大木教授) 「Inter-Core Crosstalk-Aware Backup Network Design Model against Probabilistic Link Failures in Multi-Core Fiber Optical Path Network」 (マルチコアファイバ光パスネットワークにおける確率的リンク故障に対するコア間クロストークを考慮したバックアップネットワーク設計モデル)

マルチコアファイバを用いた光パスネットワークのための、クロストークを考慮したバックアップネットワーク設計モデルを提案した。コア間クロストークによる保護の失敗を一定確率で許容する確率的保護を適用し、設計モデルおよび焼きなまし法による発見的アプローチを開発した。

尾 崎 伸太郎 (大木教授) 「Allocation Models of Network and Computation Resources in Service Chaining」 (サービスチェイニングにおけるネットワーク資源および計算資源割り当てモデル)

ネットワーク上で仮想ネットワーク機能の連鎖を構成するサービスチェイニングにおける、資源配備問題について論じた。仮想ネットワーク機能が引き起こすトラフィック量の変化に対処する配備モデル、および、複数の送信元を用いた高信頼なマルチキャストを行う配備モデルを提案した。

徳 田 魁 吏 (大木教授) 「Online deep reinforcement learning for network operations under variable number of service requests」 (サービス要求の数が変動する状況下におけるネットワーク運用のためのオンライン深層強化学習)

仮想化ネットワーク環境やエッジコンピューティングにおいて、サービス要求の数が変動する状況下で運用を行うためのオンライン深層強化学習について検討した。ネットワークスライス上でのサービスチェーン再構成モデル、および、エッジサーバにおける計算資源割り当てモデルを提案した。

林 聖 悟 (大木教授) 「フローの伝送レートの確率密度分布に基づくネットワーク更新スケジュール決定手法」

Software-defined network において、複数のフローを古い経路から新しい経路に更新する際のスケジューリング手法について検討した。伝送レートの確率密度分布に基づいてスケジュールを決定することで、更新中の輻輳によって発生するパケットロス量を抑制できることを示した。

堀 本 信 弥 (大木教授) 「Reliable Delay-Aware Virtual Network Function Placement Models against Failures」 (故障に対する遅延を考慮した高信頼な仮想ネットワーク機能配置モデル)

遅延を考慮し、確率的保護によるバックアップ容量の最小化を目的としたバックアップ仮想ネットワーク機能配置モデルを提案した。可用性と遅延の確率的保護を考慮し、サービス展開コストの最小化を目的とした、プライマリとバックアップの仮想ネットワーク機能の配置モデルを提案した。

村 田 寛 也 (佐藤教授) 「MOSFET のリーク電流ばらつきを用いた高エネルギー効率ハードウェアリザーバ」

電界効果トランジスタ (MOSFET) のリーク電流ばらつきをリカレントニューラルネットワークの一種であるエコーステートネットワークの中間層 (リザーバ) として用いて、時系列分類タスクを高エネルギー効率に行う回路を提案した。既存の MOSFET リザーバに対し 90% 以上の効率向上を達成した。

松 岡 航太郎 (佐藤教授) 「HOGE: A Fast FPGA Implementation Using Radix-32 Four-Step NTT for a Homomorphic Logic Gate of TFHE」

完全準同型暗号の一つである TFHE の FPGA 実装 HOGE を提案した。HOGE は暗号上での論理演算評価を単体のハードウェア上で実行できるハードウェアアーキテクチャである。FPGA (Xilinx Alveo U280) 上での暗号上の NAND ゲート評価が、最新の CPU 実装に対し 5 ~ 6 倍高速に実行できることを確認した。

門 井 駿 介 (佐藤教授) 「高精度モンテカルロシミュレーションに向けた統計的デバイスモデリング」
半導体デバイスの特性ばらつきを低次元の潜在空間で表現する、統計的デバイスモデル dGPLVM の

適用範囲を拡大した。実デバイスを対象として、電圧電流特性を温度依存性を含めてモデル化し、高い精度が得られること、特に、しきい値電圧モデルに対し誤差を75%低減できることを示した。

一 柳 優 太 (佐藤教授)「動画像からの高精度な心拍数推定のための総電力に基づく適応的スペクトル選択」

ビデオ画像を用いた非接触の心拍数推定手法を提案する。画像フレームを矩形に分割し、低ノイズで心拍数推定に適する矩形を高速に選択するアルゴリズムを与え、顔の一部がマスクで隠れている動画や、後頭部を撮影した動画からも心拍数推定が可能であることを確認した。

金 岩 佑 門 (佐藤教授)「生体信号の安定取得に向けた有機薄膜トランジスタによるセンサインタフェース回路の設計」

有機薄膜トランジスタ (OTFT) は柔軟性や低製造コスト等の利点がある一方、経時的な特性変動や低歩留まり等の課題がある。特性変動に追従して安定動作する増幅回路や、少素子数で構成するアナログ・デジタル変換回路等、OTFT に特に適する生体センサインタフェース回路を設計・試作し、動作を確認した。

瀬 川 七 央 (佐藤教授)「回路二分割による高忠実度量子回路マッピング」

一つの量子回路に対する物理量子ビットの割り当ては多数ある。本論文では、回路の入力とともに回路中間位置から誤り率を伝播させることで、量子ビット交換回数やゲート演算の誤り率をより広い範囲で考慮し、全体として忠実度の高い計算を実現する量子ビットの割り当て手法を提案した。

情報学研究科 システム科学専攻

清 水 智 史 (石井教授)「Confidence-based Locomotion Control Framework for Sim-to-Real Motion Transfer」(Sim-to-Real モーション転送のための確信度に基づく移動制御フレームワーク)

サイバー環境で最適化したロボットシミュレータの運動を実環境の実機制御に用いることを Sim-to-Real 転移と呼ぶ。実環境での不確実性に依存したシミュレータ最適化とその転移を行い、安定したロボット実機の歩行運動が実現できることを示した。

後 藤 直 央 (石井教授)「四脚ロボットの歩容制御におけるノイズロバスト階層的強化学習」

四脚ロボットによる歩容の自律的生成を可能とするため、中枢パターン生成器に基づく強化学習法と敵対事例強化学習法を組み合わせた手法を提案し、傾斜地や摩擦係数の低い平坦地などのいくつかの環境で安定した歩容が獲得できることを示した。

安 部 直 也 (石井教授)「誤差逆伝播信号の補正によるニューラルネットワーク学習の高速化」

深層ニューラルネットではしばしば用いられる活性化関数 ReLu は簡便であるものの、勾配が非線形に変化するため学習は効率的でない。学習勾配の局所的低次統計量を用いることで学習を高速化する手法を提案、各種アーキテクチャで有効であることを示した。

岡 本 尚 之 (石井教授) 「Model-based analysis of how humans estimate action-outcome relations in an uncertain environment」 (不確かな環境におけるヒトの行動 - 結果関係推定に関するモデルベース分析)

自身の行動の性能に応じて報酬がもらえる状況とそうでない状況とが時々入れ替わる環境におけるヒトの意思決定を行動データに基づきモデル化を進めた。混合モデルを用いてベイズ推定により行動が良く説明できることが分かった。

伊 東 諒 (石井教授) 「不確実性が引き起こすマカクザルの損失回避行動の計算論的解説」

報酬の獲得と損失が確率的に決まる場合に、損失確率の予測は意思決定に影響を与える。マカクザルは不確実性が高く予測ができないときに、損失回避行動をおこなうことが分かった。また、計算論モデルからこの行動を内部パラメータで特徴づけることに成功した。

林 浩次郎 (石井教授) 「感覚情報と事前情報の不確実性に伴う神経表現の解明」

ヒトは感覚情報と事前情報を組み合わせて環境の推定を行っていると考えられている。段階的に自然さの異なる画像を見ている時のヒトの脳活動を計測することで、2種の情報の不確実性を脳がどのように表現し、処理しているのかを示した。

三 橋 晟 (石井教授) 「Triangle Inequality for Inverse Optimal Control」 (価値関数についての三角不等式とそれを用いた逆最適制御)

制御軌道の最適性を表す Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 方程式を用いることで逆最適制御ができる。それに加えて有効な制約条件である三角不等式条件を導出し、HJB と合わせることで効率の良い逆最適化制御ができることを示した。

白 木 遼 (石井教授) 「不確実な環境での階層的な推論における確信度の影響」

階層的な推論をすることで効率よく解ける Tiger maze 課題を提案した。それに基づくヒトの行動実験とイメージング実験を組み合わせることで、高次推論の不確実性に応じて階層性を制御する推論の可能性と、それに関わる脳処理の基盤が示唆された。

宋 子 辰 (石井教授) 「EEG study on subjective prediction of difficulty for auditory tasks」 (聴覚タスク難易度の主観的予測に関する脳波研究)

ヒト脳波から音識別の難易度の予測が識別可能かを調べた。二つの周波数の異なる音刺激を出した後、第三の音刺激の周波数がどちらに近いのかを答えてもらった、前頭部電極からの脳波 (予測的な活動) により回答の難易度が解読可能ということが分かった。

エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻

永 藤 大 翔 (下田教授) 「魔法の杖メタファを用いた環境撮影支援システムの開発」

3次元環境再構成に用いる画像の撮影時の問題を解決するために、魔法の杖メタファを用いた環境撮影支援システムを開発した。評価の結果、既存の撮影システムと比較して、迷いなく撮影でき、心理的負荷も低減できることが示された。

鎌 苺 亮 汰（下田教授）「コンフリクトが生じる合意形成実験タスクの設計と好感度変化に着目した分析」

実験室環境で合意形成を観察するために「NoForT ゲーム」というタスクを設計し、実験を行った結果、本タスクによりコンフリクトが生じることわかった。また、好感度が上昇する際には合意が進んだと感じ、下降する際には合意が進んでいないと感じる試行が見られた。

佐々木 眞 帆（下田教授）「自己肯定感向上のための透明人間体験隠消現実感システムの開発」

本研究では、透明人間体験システムを開発した。本システムでは、カメラで外界の映像を取得した後、深層学習を用いて自分の身体を透明化した映像をリアルタイムに生成し、HMD 上で提示する。本システムの評価実験を行い、透明人間体験時の心理変化について調査した。

浅 場 渉（下田教授）「身近な環境における VR 災害体験が防災意識に及ぼす影響の評価」

自室などの身近な環境における VR 災害体験が防災意識にどのような影響を及ぼすのかを、人を対象とする実験により評価した。また、その影響のメカニズムを調べるため、VR 災害体験における心理モデルを構築した。

村 山 真 大（下田教授）「複数の画像を利用した深層学習によるデプス画像のリアルタイム精度向上」

RGB-D カメラで撮影して得たデプス画像は、多くのノイズが含まれ、計測値が不正確である場合が多い。本研究では、リアルタイムにデプス画像を高精度化する手法の実現を目指し、複数のデプス画像を入力とする深層学習による新たな高精度化手法を開発した。

北 山 翔（下田教授）「執務中のマイクロリフレッシュが知的集中に与える影響に関する実験研究」

オフィス環境における労働生産性向上を目的として、知的作業中の執務者に対し 7 分 30 秒おきに 20 秒間の休憩を促すことを提案した。この効果を評価する実験を行い、知的集中が向上する可能性や精神的負担が抑制される可能性を定量的に示した。

エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻

糸 井 海空斗（中村（祐）教授）「三次元 MHD 平衡コード HINT2 を用いた非軸対称トカマク平衡の解析」

入れ子状の磁気面の存在を仮定せずに計算をすることができる HINT2 コードの境界条件を改良するとともに、これを用いてトカマクプラズマの非軸対称 MHD 平衡計算、特にヘリカルコアの計算を行い、トカマクの三次元平衡における磁気面破壊の影響を明らかにした。

岸 本 啓 希（中村（祐）教授）「反復法を用いた非軸対称トラスプラズマの MHD 平衡計算」

非軸対称トラスプラズマにおける MHD 平衡計算が重要となっている。本研究では反復法に基づき、3 次元スプライン補間、ビオ・サバール計算、磁力線追跡を組み合わせ MHD 平衡を直接求める新たな 3 次元コードの開発を行うとともに、この計算アルゴリズムの有用性を示した。

矢 部 怜（中村（祐）教授）「トカマクプラズマにおける捕捉電子モードによる乱流輸送のベータ値依存性」

プラズマ圧力上昇にともなう平衡磁場構造の変化が、捕捉電子モード（TEM）の線形成長率と乱流

輸送に及ぼす影響を調べ、密度勾配とグローバル磁気シアの重要性を明らかにした。また、非線形計算からはベータ値の増加に伴いエネルギー流束も増加することが示された。

山 澤 慎太郎（中村（祐）教授）「フェライト鋼によるトラスプラズマの磁場構造制御」

低放射化フェライトがプラズマ周辺領域の磁場構造に及ぼす影響について、3次元平衡コードを用いて調べるとともに、ヘリオトロンJ装置に対して、フェライト鋼を用いた磁場構造制御による粒子閉じ込め改善について理論的に検討し、その有用性と可能性を示した。

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

青 木 星 也（土井教授）「新規構造 YBa₂Cu₃O₇ 超伝導線材の実用化に向けた Sr (Ti_{0.85}Nb_{0.15}) O₃ 導電性中間層の連続成膜」

{100}<001> 集合組織をもつ Ni/Cu/SUS316 貼合せテープを基材とした新規 YBCO 線材構造の開発を目的に、導電性中間層の連続成膜技術の開発に取り組み、膜品質と、温度、成膜雰囲気、成膜速度などの成膜パラメータとの相関を明らかにして、導電性中間層の連続成膜に成功した。

太 田 和 希（土井教授）「イオンビームアシスト法によるリチウムイオン電池正極材料用 LiCoO₂ の低温成膜」

Si デバイスとの混載やポリマー基板上に搭載可能な全固体薄膜型リチウムイオン電池の作製を目指し、イオンビームアシストパルスレーザ蒸着法にて室温で結晶化した LiCoO₂ 薄膜の作製を行い、充放電可能な LiCoO₂ 薄膜正極の作製に成功した。

嶋 瑞 生（土井教授）「Al 基板上への LiCoO₂ 薄膜作製と全固体リチウムイオン電池への応用」

リチウムイオン電池の正極集電体に一般的に使用される Al 板上に、Li イオン電池の代表的な正極材料である LiCoO₂ 薄膜、電解質薄膜、負極活物質薄膜、負極集電体を順次成膜して全固体薄膜型リチウムイオン電池の作製に取り組んだ。Al～電解質薄膜までは正常に動作させることに成功したが、電解質薄膜/負極活物質薄膜界面の抵抗が高かったため、全体としての電池特性を発現させるには至らなかった。

滝 川 太 郎（土井教授）「組成制御した LiCoO₂ 焼結体の広帯域電気伝導度計測」

テラヘルツ時間領域分光法を用いて、Li イオン電池の代表的な正極材料である LiCoO₂ および Li 欠損を導入した Li_{0.9}CoO₂ 焼結体試料の導電率および誘電率を 0.3～2 THz の周波数範囲で測定し、Li 欠損が導入されることで誘電率が増加することを明らかにした。

山 崎 輝（土井教授）「テープ型 MgB₂ 超伝導線材に向けた Fe 基材の検討」

MgB₂ 超伝導線材の特性向上に有効なポストアニール時に問題となっている基材金属テープから MgB₂ 層への金属元素拡散を抑制するため、ポストアニール時間の短時間化を検討し、従来の 1/100 以下的大幅短時間化に成功した。またその結果を用いて Fe テープ上に実用レベルの高い J_c を有する MgB₂ 薄膜を作製することに成功した。

石 村 一 輝（白井教授）「変圧器磁気遮蔽型超電導三相限流器の模擬電力系統における事故電流の限流特性」

高温超伝導 REBCO パンケーキコイルを用いた変圧器磁気遮へい型三相超電導限流器を製作し、模擬電力系統において限流動作試験を行い、限流器の事故電流抑制効果によって、母線電圧が維持され系統安定度向上に寄与することがわかった。

大 矢 輝（白井教授）「ねじりテープを挿入した円筒発熱体の液体水素強制対流熱伝達特性と液体水素浸漬冷却 Bi2223 超電導コイルの過電流通電実験解析」

ねじりテープを挿入した SUS 製の円筒発熱試験体の管内に液体水素を強制対流させた時の熱伝達特性を測定し、数値解析とあわせて伝熱促進メカニズムについて検討した。また、Bi2223 超電導線材で製作した試験コイルを液体水素中で通電し、熱暴走現象を観測した。

新 田 直 生（白井教授）「配電系統における三相不平衡補償を目的とした無効電力補償装置制御モデルの検討」

三相電圧不平衡状態である配電系統に対して、配電線における電圧降下の情報を用いて三相不平衡補償を行う新たな静止型無効電力補償装置（SVC）の制御構成の提案と、その動作特性の評価、従来型の SVC との比較検討を系統シミュレーションによって行った。

松 本 郁 哉（白井教授）「液体水素浸漬冷却下における REBCO 短尺試験体およびダブルパンケーキコイルの過電流通電試験」

液体水素浸漬冷却下における REBCO 線材の過電流領域における通電特性の把握を目的とし、異なる安定化銅厚みを持つ REBCO 線材を使用した短尺試験体およびダブルパンケーキコイルを作成し、水素浸漬冷却して外部磁場下において通電試験を行った。

エネルギー理工学研究所

伊 藤 龍 志（長崎教授）「ヘリオトロン J における非共鳴マイクロ波加熱プラズマ中の高エネルギー X 線スペクトル解析」

シンチレータを用いた高速電子由来の制動放射 X 線エネルギースペクトル計測とモンテカルロシミュレーションによる解析を組み合わせることで、ヘリオトロン J において非共鳴マイクロ波を入射した際に生成される高速電子のエネルギースペクトルを推定する手法を確立した。

Zhao, Haochen（長崎教授）「Design and construction of 320 GHz interferometer for electron density measurement in Heliotron J」(Heliotron J における電子密度計測用 320 GHz 干渉計の設計と構築)

磁場閉じ込め核融合装置 Heliotron J において電子密度計測のための 320 GHz サブミリ波干渉計システムの開発を行い、多チャンネル計測に向けたシートビーム形成用非軸放物線ミラーを設計するとともに、ビーム分布の最適化と伝送効率を向上させることで、中心・周辺領域の 2 チャンネルの計測に成功した。

朝 田 秀 一 (松田教授) 「二次元半導体人工ヘテロ構造界面における自発的光起電力の観測とその解明」

二次元物質を積層した人工ヘテロ構造界面において、新たな物性発現やデバイス応用の研究が注目されている。本研究では、pn 接合を用いない太陽電池デバイスに向け $\text{MoS}_2/\text{CrPS}_4$ ヘテロ構造を作製し、面内分極の発生による自発的光起電力特性を調べ、その物理的機構を明らかにした。

岡 村 勇 輝 (松田教授) 「微細加工された半導体 $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ ヘテロ二層構造におけるモアレ励起子状態に関する研究」

二次元半導体ヘテロ構造において形成されるモアレ超格子とその物理に関する研究が盛んに行われている。本研究では、微細加工技術を適用し単一のモアレポテンシャルとそこに閉じ込められた励起子（モアレ励起子）の検出に成功し、それが関与する光学特性を明らかにした。

Duanfei Dong (松田教授) 「Study of gate tunable moiré excitonic states in twisted semiconducting $\text{WSe}_2/\text{MoSe}_2$ van der Waals heterobilayers」 (ツイストした半導体 $\text{WSe}_2/\text{MoSe}_2$ ファンデルワールスヘテロ二層構造におけるゲート制御モアレ励起子状態に関する研究)

二次元半導体を積層して形成された人工ヘテロ構造における、物理とその光学応用に関する研究が注目されている。本研究では、ゲート電圧制御が可能な二次元半導体ヘテロ構造を作製し、モアレポテンシャルに閉じ込められた荷電励起子（モアレトリオン）が関与する光学特性を明らかにした。

Hengkai Wu (松田教授) 「Determination of the complex refractive index spectra of single-chirality carbon nanotubes assembly」 (単一カイラリティカーボンナノチューブ集合体の複素屈折率スペクトルの決定)

ナノメートルスケールの筒状物質であるカーボンナノチューブは、エネルギー変換材料として期待され研究がなされている。本研究では、カーボンナノチューブを利用した高効率な光熱変換デバイスの設計とその実現に向け重要となる、幅広い波長範囲に渡る光学定数を明らかにした。

Samneang Heng (松田教授) 「Simulation study of thermal effect due to electron-phonon coupling in two-dimensional layered semiconductors」 (二次元層状半導体における電子-フォノン相互作用による熱効果のシミュレーション研究)

近年、第一原理計算手法の進展により物質の電子状態や光学特性が、詳細に予測できるようになりつつある。本研究では、二次元半導体を含む層状物質を対象として、第一原理計算によるアプローチから、電子-フォノン相互作用によるバンドギャップの変化とその光学スペクトルの計算を行った。

生存圏研究所 中核研究部

王 元 (橋口教授) 「Development of Low Altitude Observation Technology by Bistatic Radar」 (バイスタティックレーダーによる低高度域観測技術の開発)

受信専用アンテナを用いたバイスタティック方式により、大型大気レーダーの低高度観測技術を開発した。MU レーダーを用いた実証実験を行い、光学ディレイラインを用いて低高度エコーを受信可能とすることで、風速観測下限高度を向上させることに成功した。

中 田 雅 彦（小嶋教授）「基本波型直交フラックスゲート磁力計電子回路部の小型化に関する研究」

衛星に搭載して磁場を観測する「基本波型直交フラックスゲート磁力計」のセンサー用電子回路部の小型化に ASIC（特定用途向け集積回路）を開発して成功した。この電子回路部のチップ化は、超小型衛星などリソース条件が厳しい将来ミッションにおける磁場観測に貢献する。

江 田 大 輝（小嶋教授）「あらせ衛星で観測されるコーラスに関連した静電波の研究」

地球磁気圏で励起されるコーラス放射に伴い、プラズマ中に特有の静電波が同時に観測される事例について統計解析を行い、この事象の出現する磁気圏内の領域の特定、静電波を引き起こすコーラスの周波数帯域などを明らかにし、この現象に関するモデルを提案した。

鎌 田 紘 行（篠原教授）「ワイヤレス給電ビーム制御簡易化のためのフェーズドアレイアンテナの研究」

本研究では無線電力伝送に供するフェーズドアレイアンテナを題材として、多素子化により高価・複雑になるビーム制御を簡易化する構成の検討に取り組んだ。本研究では進行波型の移相器構成を近傍界に適用した焦点ビーム手法、間引き給電方式等を検討し、高ビーム効率を維持するアレイ簡易化手法の有用性を示した。

豊 永 雄 郎（篠原教授）「電磁界結合型マイクロ波加熱システムの次元拡張に関する研究」

本研究では、電磁界結合型マイクロ波加熱装置について、複数試料同時加熱が可能であるという利点に着目して、その被加熱試料配置を二次元方向に拡張する検討を行った。複数試料同時加熱に関しまず検討し、リピータの挿入によるばらつき改善を行い、次元拡張の実証実験等により、最終的にその有用性を示した。

高校生のページ

プラズマの光から何がわかる？ ～プラズマ分光学への第一歩～

エネルギー理工学研究所 エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野（稲垣研
門 信一郎

1. はじめに

中学理科の「電気」の内容で、オーロラ、雷、ネオンサイン、蛍光灯、真空放電（正しくは気体放電）など、「プラズマ」という用語は使われなくても、皆さんは、プラズマ現象について多く学んできています。さらに高校の物理や化学では、水素原子が発する輝線スペクトルや炎色反応について学び、気体が発光する原理にも触れつつあると想像します。そこで、本稿では、自然界のプラズマや実験室のプラズマを例に、その現象解明に大きな役割を担っている「分光学」について紹介します。

2. 地上の放電現象、天空の光とプラズマでつながる！

天空からは様々な光がやってきました。太陽光は私たちに最もなじみのある光です。1666年、ニュートンはプリズムを用いて初めて太陽光を観察し、虹色の「連続スペクトル」を発見しました。1814年、フラウンホーファーは三角プリズムを望遠鏡の対物レンズの前に配置し、精密な角度調整によって太陽光のスペクトルを観測し、574本ものとびとびの黒い暗線（吸収線）を同定しました（図1）。さらにシリウス星に現れる暗線と比較し、地球ではなく、太陽由来のものであることも示しましたが、その物理的な解明にまでは至れませんでした（彼はその後、260本の平行ワイヤーを使った回折格子分光器を開発[1]）。太陽や他の様々な恒星が発する光のスペクトルだけでなく、北極や南極近辺に見られる大気が発光現象であるオーロラも天空からの光です。

一方地上では、ボルタ電池と真空技術の発明で、ペトロフ、デービー（1803年）が独立にアーク放電ランプを発明しました（1821年に光がアーク状に曲がることから命名）。本格的な気体放電（グロー放電）をファラデーが確立（1835頃）すると、真空技術の進歩とともに放電研究が進展しました。クルックスは、ファラデーの講演録「物質は、固体・液体・固体・ラジアント（radiant matter）からなる」、を引用し、後に陰極線（1876年）、現代では電子ビームと言われる radiant matter の研究を精力的に行い、エッ

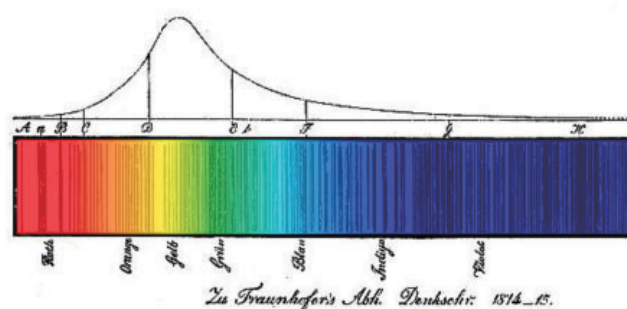


図1 フラウンホーファーが発見した太陽スペクトルにおける無数の暗線（1817年図の再現[2]）と、演示実験の様子[Public domain, Wikimedia]。望遠鏡の先にプリズムが見える。

クス線を発生するクルックス管 (1872 年) を発明しました。中学高校の理科で学ぶ**真空放電**の項目には、グロー放電と陰極線が同等に掲載されていますが、**プラズマ中の電子の衝突で気体が発光するグロー放電と、陰極から放出された電子ビームの衝突によりガラス管が光る陰極線**は異なる素過程によるものです。

このグロー放電陽光柱に電極を挿入し、電流電圧特性を調べることで、その物性が次々と明らかになってきました。陽光柱の中の物質（正確には物質の状態）をラングミュアは「**プラズマ**」と名付けました。1928 年 6 月 21 日のことです（プラズマ記念日？）。

1838 年にファラデーが気体放電によってオーロラに似た光を発光させると、両者の関連性を見出そうとする研究が盛んになりました [3]。オーロラの発光が物質固有の色であろう、と思いついたのは、ブンゼンとキルヒホフの**炎色反応**のことを知ったオングストロームです。キルヒホフは、1859 年、この暗線が太陽大気の原因による吸収スペクトルであることを示し、オングストロームはオーロラグリーンとして知られる代表的な緑色の発光 (557.7 nm) のスペクトルを観測し、これを 5567 という数字で表しました (1868 年)。この値は、**オングストロームという長さの単位**の起源にもなりました。1923 年になると、夜空に微弱なオーロラグリーンを放つ**夜間大気光**が干渉法といわれる手法で測定され、 5577.350 ± 0.001 という正確な値が得られています。やがて、太陽はプラズマの塊、オーロラは地球上空のプラズマによる発光現象という事が明らかになっていきます。

3. プラズマ発光分光法

3.1 プラズマで炎色反応？

光のスペクトルとは光の強度の波長依存性です。スペクトルには 2 種類あります。輝線 / 暗線を表す**線スペクトル**と**連続スペクトル**です。線スペクトルの波長は物質固有のものなので、炎色反応のように、元素分析さらには、その価数の同定が可能です。炎色反応では、火炎の熱エネルギーを励起源にするので、アルカリ金属やアルカリ土類金属など、電子の結合の弱い、周期表の左寄りのものが主体となりますが、プラズマを使えば、原理的には（可視光に限定しなければ）**周期表のあらゆる元素を光らせる**ことができます（図 2）。たとえば法医学や科捜研のドラマにでてくる（と思う）、ICP 発光分光分析装置は、アルゴンの高周波誘導結合プラズマ（ICP）を励起源として、元素を光らせ、スペクトルの波長から物質の種類を、スペクトル強度から濃度を特定するものです。

一方、連続スペクトルは温度で決まり物質によりません。これは放射温度計の原理と同じです。青白

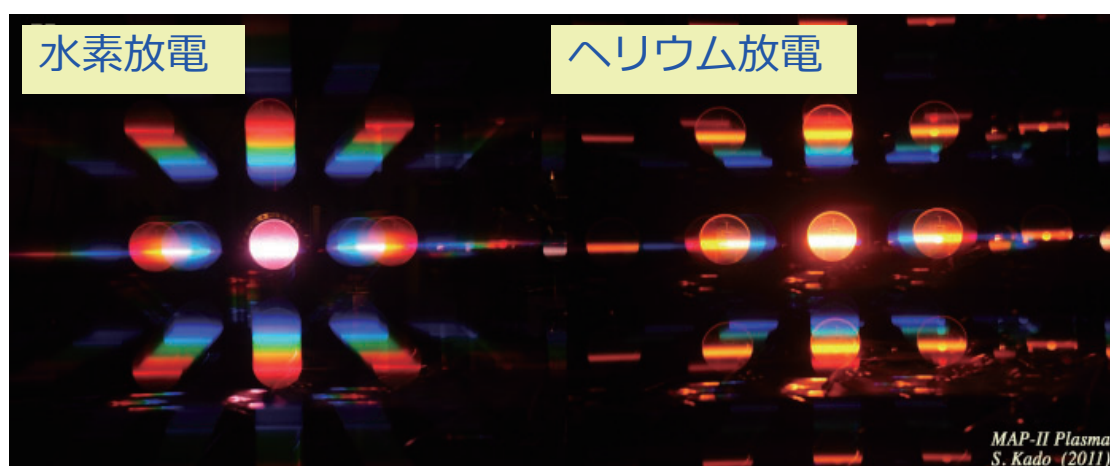


図 2 直線型装置 MAP-II 装置における、水素とヘリウムの直流アーク放電放電のスペクトル写真。クロス回折格子フィルムを通してカラー撮影。

い星は高温、赤い星は低温、というように、星の温度も連続スペクトルを用いて測定します。放射温度計は「透き通った物質」の温度は測れません。星はプラズマの密度が極めて高いために、分光学の言葉を借りれば「光学的に厚い」＝「透き通っていない」と言います。

3.2 励起・発光の物理モデル

プラズマの輝線強度は、多くのパラメータ（電子密度、電子温度、対象とする元素の種類や密度、輝線を発する量子準位）に依存します。前節のICP分析は、励起源のプラズマ条件を一定にし、既知の濃度の物質を測定して較正されている「検量線」を使って、対象物質の濃度を推定します。しかし、プラズマ実験の多くは、プラズマも混入元素も未知であるため、輝線強度を与える「物理モデル」を構築して、それを数式で表現する必要があります。まずは図3（a）を例にしましょう。[M] から [L] への水の流量を測定量とします。この場合、[M] の容器に着目します。[M] へは [K] にある水から毎分 10% を汲み上げて注ぎます。[K] 以外の所の水からは汲み上げない、と想定します。[M] からは [L] と [K] に、毎分 [M] の水の 3%、5% をそれぞれ流出します。[M] の水量のバランスを考えると、[L] からの行き先は無視します。やがて、[M] での流入量と放出量がつりあったとき、[M] の水量は定常状態になります。[M] の出入りを考えます。[M] に溜まった水量を [M]、時間の単位を分で書くと

$$\frac{d[M]}{dt} = [\text{Kから流入}] - \sum_{\text{行き先}} [\text{Mから流出}] = [K] \times 0.01 - [M] \times (0.03 + 0.05)$$

と表せます。定常になった状態を式に書くと、時間変化を表す左辺が 0 ですから、 $[M]/[K] = 1/8$ 、すなわち、[M] には [K] の水溜めの 1/8 の量が溜まった状態に維持されていることになります。[M] から [L] への流量の絶対値が測定可能なら、[K] にある水量の絶対値を推定することが可能です。[K] に水がないと、汲み上げることもできませんから、これは大切な物理量です。

これを図3（b）に示すプラズマ中の水素原子集団に適用します。水素は原子核と電子 1 個からなりますので、その 1 個の電子が基底状態にあるものを状態 [K] の水素、励起状態 [L 殻]、[M 殻] にあるものを、状態 [L][M] の水素とし、それ以外の殻に励起電子をもつ水素は無視できるほど少ないと仮定します。

ここで、(a) の組み上げる水の量は (b) の電子衝突による励起に対応します。(a) の蛇口からの水の流出量は (b) の輝線の発光強度に対応します。したがって、[M] から [L] への電子遷移に伴う発光を観測することで、[K] すなわち基底状態にある水素の量を推定することができます。しかし、もし外に

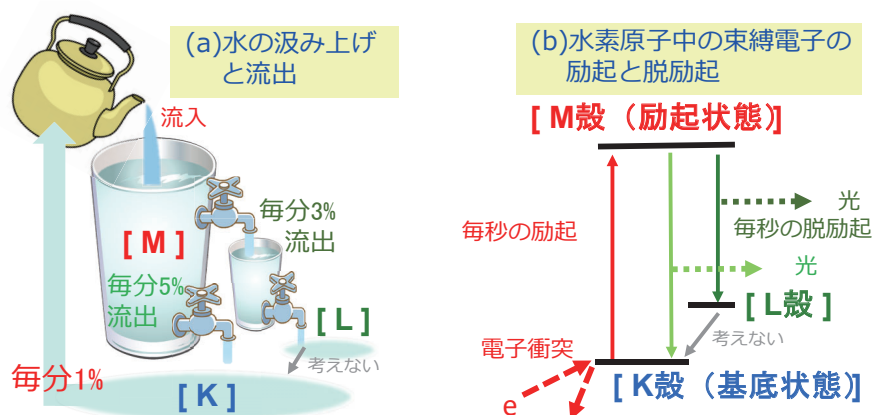


図3 (a) 水の汲み上げと放出のバランス方程式を与える物理モデル。(b) 3準位に着目した、プラズマ中の原子過程を記述する物理モデル。

流出する蛇口がとても狭く、たとえばポタポタ水漏れするぐらいだったとしましょう。[M]の水の行き場がなく、溜まる一方です。原子では、励起準位にある電子の寿命が極めて長く、発光も極めて微弱になります。このような励起準位を「準安定準位」、準安定準位からの発光を「禁制遷移」と言います。その遷移が許容遷移か禁制遷移か、というのは量子論からわかります。

禁制遷移を実験室で観測することは、極めて困難です。遷移1回につき、放出する光子が1個なので、寿命が長い、ということは、単位時間あたりの放出光子数が少なく、極めて微弱な発光となるからです。発光前に電子が再度衝突してきたり、自分が壁にあたったりすると、発光をせずに基底に戻りますから、光りません。

4. オーロラ発光の謎

この禁制遷移は、美しいオーロラの発光の原因なのですが、その素過程は長い間謎でした。気体放電でも出ない、窒素ではない、アルゴンでもない、... クリプトン説 (Ramsay, 1915 年) までありました。やがて、1924-1925 年頃、ヘリウムやアルゴンの気体放電に酸素を少し入れるとそれっぽいのがでていることが McLennan と Shrum によって確認され、McLennan のイギリス王立協会学術誌講演録 (1928 年) で、**酸素の禁制遷移**であることが述べられています。

図4にオーロラの写真 (a) とエネルギー準位 (b) を示します。量子準位の記号 S、P、D や全角運動量の量子数 J も記載されていますが、現段階ではそれらは無視して、波長 (λ) と秒 (s) で表される準位寿命に着目してください。禁制遷移は M1、E2 とラベルされています。許容遷移の寿命は $10^{-7} \sim 10^{-8}$ s すなわち、ナノ秒のオーダーですので、557.7 nm の緑の発光 0.8 秒、さらには 630.0、636.4 nm の数 100 秒は桁違いに長く、すなわち発光強度も桁違いに小さいことが読み取れます。

オーロラは上空 100-300 km に現れます。上空では、酸素分子が解離しており、窒素も少ないため、酸素原子が主要な粒子種です。プラズマの密度が低く、壁もないため、酸素が励起したまま長時間存在し、ゆっくり発光する「猶予」があります。酸素原子の赤と緑の色の違いは励起準位の違いで、これは、高度によって生成や消失する素過程が異なるためで、窒素が触媒的に作用して生じる緑が下方に現れ、緑より準位寿命がさらに長い赤は、他粒子との衝突による消失も増えてきます。この赤いオーロラ (Type-D オーロラと分類される) は、太陽活動が活発であれば、低緯度の地域でも観測されていて、日本でも

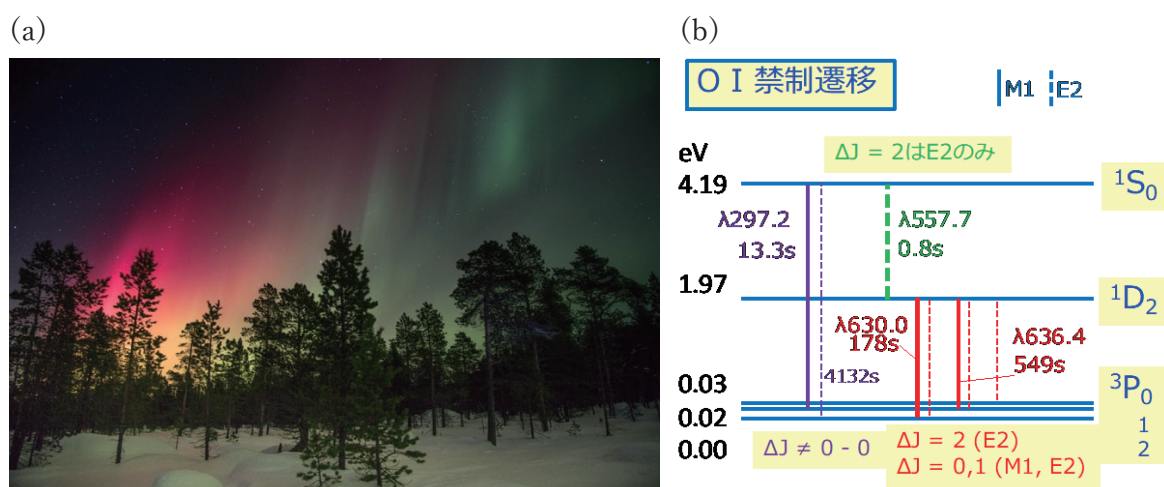


図4 (a) 典型的な緑 (557.7nm) と赤 (630.0、636.4 nm) の Type-A オーロラ [Public Domain, <https://publicdomainq.net>]. (b) 酸素原子 (O I) の禁制遷移を表すエネルギー準位図。λ は波長 [nm]、s の前の数字は準位寿命 [秒]

1400 年前の日本書紀や 1204 年藤原定家の明月記に「赤気（せっき）」として記録が残っています。

このように、オーロラが緑や赤の光を発する素過程は、酸素原子の発光でありながら、地上の放電とは異なる励起過程が関連していますので、それを地上で再現することは極めて困難なのがおわかりでしょうか。

一方、低高度下限付近では、気体密度が増え、さらに窒素の割合が増えるため、窒素分子、窒素分子イオンの紫のスペクトルが鮮やかに見えます。**Type-B オーロラ**として知られます。太陽活動が活発で、その高度まで到達するほど、高いエネルギーのプラズマが降り注ぐ必要がありますが、こちらは許容遷移による発光であるため、窒素を含む放電実験によって再現することができます。

5. 準安定準位を利用するガスレーザー

プラズマからの発光の利用は、前述のアークランプ（開放型）に始まりますが、放電管が最初に光源として利用されたのはムーア管（1893 年）です。その後、ネオン管（1910 年）や蛍光灯（1938 年）、最近ではプラズマディスプレイパネル（1992 年）などに応用されてきました [4]。

アインシュタインが 1917 年に光の共鳴吸収・誘導放出の原理を導くと、それから 40 年の時を経て、反転分布と共振器を利用したメーザー（1954 年）やレーザー（1960 年）として実を結びました。本節では、放電プラズマ中の準安定準位を巧みに利用した「ガスレーザー」の発振原理を見てみましょう。

単一ガスによる放電では、下の方の準位ほど、エネルギー的に安定しているので、下から上への遷移で光を吸収する過程のほうが、上から下への遷移で光り放出する過程よりも多く発生します。

そこで、「準安定準位」の登場です。ヘリウムの準安定準位は、ネオンの励起準位のすぐ近くにあり（そういう「相方」を探してきます）。図 5 のように、混合ガスを用いることで、ヘリウムの準安定準位を蓄積し、共鳴的に特定のネオン原子を励起します。上準位の密度のほうが下準位よりも高い状態、これを「反転分布」と言います。反転分布した上準位からの発光を「共振器」と言われる「合わせ鏡」構造内に閉じ込めると、吸収より発光のほうが多く、共振器の中を光が行き来するうちに、だんだん増幅されて、レーザー発振に至ります。図中の写真は He-Ne レーザーの放電管を回折格子フィルムを介

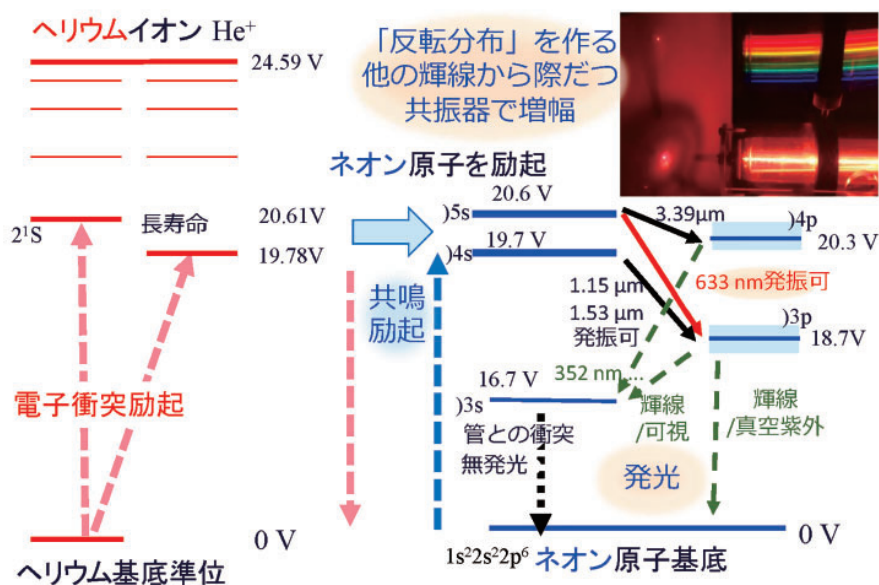


図 5 ヘリウム・ネオンレーザー発振に関連するエネルギー準位図。ネオンの励起準位の“()”は、便宜上、基底にあった 2p 電子の 1 つが“()”の後に書かれた軌道に励起していることを表す。

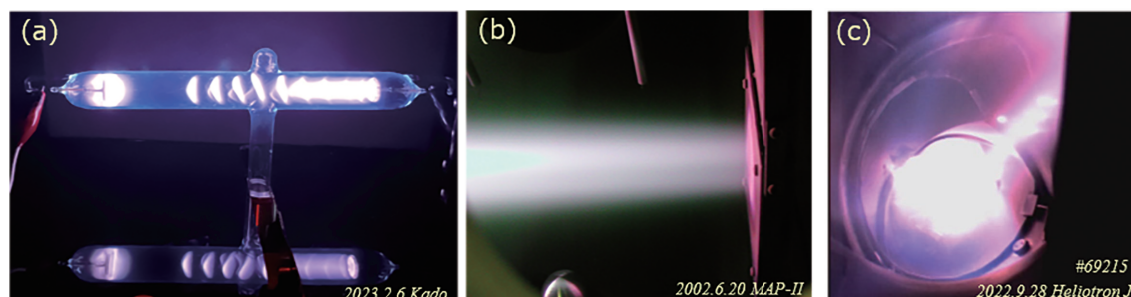


図6 (a) 直流グロー放電による水素プラズマ（電子温度約4万℃）、(b) 直線型ダイバータプラズマ模擬装置 MAP-II において、ヘリウム放電に水素を混合しプラズマの温度を下げる実験（約1～2万℃）。(c) ヘリカル型核融合実験装置ヘリオトロンJにおける重水素放電に固体軽水素を入射する実験（約1千万℃）。

して観測し、スペクトルの色を観察したものです。黄、赤、緑、青などのネオンの輝線が多数観測されます。そのうち、反転分布となった上準位より発する633nmの赤い輝線のみ増幅され、単色のレーザーが発振されます。

6. プラズマ核融合とプラズマ分光

太陽がプラズマの塊であり、その発光のエネルギー源が核融合反応 [6] であることが示され、プラズマによる核融合が可能であるとの理論が生まれることにより、高温プラズマの生成・加熱実験が盛んになると、弱電離を扱う放電（図6 (a)）と完全電離を扱うプラズマ物理（図6 (c)）は乖離していきました。太陽内部や核融合炉心のプラズマは完全電離しており、軌道電子をもたず、輝線を発しないからです。しかし近年、ダイバータ・境界層プラズマと言われる、核融合プラズマ周辺部は、壁からリサイクルされた原子分子や意図的に入射された中性の気体により、電離度が低い領域が重要視されています。太陽大気も弱電離のプラズマであり、様々な元素が存在しています。現代の分光学、素過程の知見で、実験室、太陽、オーロラなど、様々なプラズマを比較することで、フ라운ホーファーやキルヒホフが思い描くことすらできなかった、両者の素過程の類似性や相違点が明らかになってきています（図6 (b)）。

スペクトルの波長はプラズマ中の不純物の種類や価数の特定に、強度は元素の量や励起源である電子の温度や密度を、スペクトルのシフト（ドップラー効果）からプラズマの流れ速度を、熱運動によるスペクトルの広がりから発光元素の温度を・・・など、分光診断から得られる情報は多岐にわたります。さらには意図的に不純物元素をトレーサーとして導入したり、レーザーや粒子ビームを打ち込んだりして誘起された発光を計測するなど、様々な能動的計測法も実用化され、活躍しています。

5. おわりに

プラズマの「素過程」と「分光診断」は、量子論や原子物理学などの聞き慣れない用語が次々出てくるので、最初はとっつきにくい印象を感じる方が多いと思います。しかし、正直にいうと、量子論を完璧に理解して、分光診断に利用する、というわけではなく、先人たちの知見の蓄積のなかから、実験的に検証された「評価済みデータベース」を利用します。その過程で、実験との矛盾が確認されれば、新しい現象の発見や、それまで無視していた素過程の重要性につながることも少なくありません。

扱うプラズマのパラメータ領域や元素が近年ますます拡大し [6]、分光診断は、プラズマ中の元素分析や価数、励起源であるプラズマの密度や温度等を調べる手法として、様々な装置、様々な分野において、重要な計測手段として発展を続けています。

この先、読者の皆さんと一緒に研究できる機会があればこの上なく喜ばしいです。そうでなくても、

どの分野に進んでも、分光光学に支えられた分析装置や解析方法を目にしたいと思います。その時に、ふと本稿を思い出して、核融合や天体、オーロラなどのプラズマ研究が、どれだけ進歩したか、振り返って関心をもってもらえたら嬉しい限りです。その時の期待に答えられるよう、我々研究者は探求し続けます！ [7]

参考文献（オープンアクセスの和文誌と一般入門書を挙げました）

- [1] 波岡 武「第1 講分光器概論」分光研究（1985）34 巻1 号 41-53
- [2] <http://www.exo.net/~pauld/workshops/Stars/Stars.htm>（2023 年 7 月閲覧）
- [3] 小口 高 著 「オーロラの物理学入門」（2.6 節） 名古屋大学太陽地球環境研究所編集 [https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/public-notice/post_25.html]
- [4] 板谷良平「20 世紀におけるプラズマ物理の歴史と将来展望」応用物理 69, p971（2000）
- [5] 「プラズマエネルギーのすべて」 日本実業出版社（2007/2/22）
- [6] 「図解でよくわかる 核融合エネルギーのきほん」 誠文堂新光社 （2021/1/12）
- [7] 門信一郎「すぐにわかるプラズマと核融合エネルギー」国立大学共同利用・共同研究拠点協議会 YouTube [<https://youtu.be/YwkTx9W918Q>]（2021 年 1 月配信）

学生の声

起源探究の醍醐味

工学研究科 電気工学専攻 松尾研究室 博士後期程2年 飛田 美和

最近、心に余裕ができたのか、起源に思いを馳せることが好きになった。日本の特許制度はなぜこんな形になったのだろう、とか、人類はいつか絶滅するのに科学技術の進歩をやめられない、この意欲はどこから来るのだろう、等々。研究室のミーティングでも、なぜその手法はそうなったのか、別のアプローチはないのか、とアホな質問をして、後輩に迷惑がられている。反省しています。

さて、起源の中でも特にハマったのは、英単語の語源である。語源から覚えましょうみたいな単語帳にはちっとも興味が湧かないのだが、自分で調べると途端に面白くなる。せっかくなので、気に入ったものを以下に紹介する。

Plunge - 「急落する」。元々はラテン語の Plumbum - 鉛から来ているようである。鉛がぽちゃんとして落ちてストーンと底まで落ちていく感じが良く出ている。また、鉛の元素記号が Pb であることにも納得した。

Taper off - 「徐々に弱まる」。語源ははっきりしていないのだが、taper には先細のロウソクという意味もあって、もしかしたら paper と関連するかもしれない、ということである。たしかに紙ロウソクは先細りした形が多いようだ。単語自体に関しては、そういえばテーパードパンツとか言うではないか、と元ある知識とつながった。

皆様も気が向いたら調べてみてください。

研究雑感

工学研究科 電子工学専攻 野田研究室 博士後期課程2年 勝野 峻平

中高生の頃に新聞や雑誌で「フォトリソグラフィ」について読んで以来、その研究をすることが私のあこがれとなりました。当時、光の物理については深い理解を持っていませんでしたが、光を自在に操るという着想や、その実現に取り組む人々も含めて興味深いと思ったのです。そういうわけで、野田研究室に配属された学部4年生時に、張り切って博士前後期連携プログラム（連携コース）により進学することを決めました。研究への適性があるか不安もありましたが、困難があっても、それもまた一興と楽観的に考えていました。私は、半導体レーザー単一素子によるレーザー加工実現が期待できる『フォトリソグラフィレーザー（PCSEL）の高輝度連続動作』というテーマで研究することになりました。

研究を始めて5年目になりますが、中高生の頃に抱いた「フォトリソグラフィ、面白そう」という直感は正しかったと感じています。例えば、PCSELの連続動作では、キャリア注入によって素子が発熱し、フォトリソグラフィに温度や屈折率のムラが生じて、これが共振状態に影響します。このようにキャリア・熱・光など様々な物理が絡み合っているのが、この研究の面白いところの一つです。研究チームで議論を重ね、最近作製したPCSELでは、金属板を切断できるようになってきました。PCSELの応用範囲を広げられたことに達成感を感じています。

これまで博士課程進学という決断を後悔することなく研究を続けられているのは、熱心に指導して下さる先生方のおかげです。また、先輩や後輩には、研究だけではなく、休日に飲みに行ったりボードゲームで遊んだり音楽ライブに出かけたりと、気分転換の面でも助けられています。普段、感謝の気持ちを伝える機会があまり無いため、せめてここに記しておきたいと思います。研究室のみなさん、いつもありがとうございます♡

教室通信

令和4年度卒業生の進学就職状況

土居伸二、木本恒暢

令和4年度の電気系教室卒業生の進学就職状況について簡単にご報告いたします。工学研究科電気工学専攻・電子工学専攻の進路・就職に関しましては、7名が博士後期課程に進学し、56名が就職いたしました。産業界全般に亘って比較的景気が安定している状況を反映して、電気系教室に対して非常に多くの企業から以前と変わらぬ学校推薦枠を頂戴し、最終的には、ほぼ100%の就職率を得ることができました。就職先は、昨年と同様に、電気・通信関連企業に加えて、自動車・機械メーカーや重工業関係企業の志望者が多い状況です。ただ、なぜか電力関係への学生の就職数が減少しました。本年も、学校推薦を希望する学生は多く、約6割の学生が学校推薦枠により就職しています。ただ、学校推薦とはいえ事前に企業側で、学生が希望する部署との整合性を検討する例も多く見られました。また、博士後期課程修了者については、約半数が民間企業に就職し、残りが大学の助教・博士研究員等に採用されました。博士後期課程学生の受け入れに関して企業側が積極的に間口を拡げている印象です。電気工学・電子工学専攻の博士後期課程については、修士から5年一貫の連携教育プログラムを活用して、早期から博士の学位を目指した研究に没頭し、国内外の学会で活躍する学生が増えています。

情報学研究科通信情報システム専攻および電気電子工学科に関しましても、同様に多くの学校推薦枠を頂戴し、また見学会等OB・OGの方々の強力なご支援により、多くの学生が当初より希望する企業に就職しております。特に、学部卒で就職をする学生のために、推薦枠を修士と独立に設けていただいている企業もありました。内訳をみますと、専攻の専門性から少し距離のある、ソフトウェア、金融、サービスプロバイダ等の業種にチャレンジする学生も見受けられますが、通信インフラ関係の企業と総合電機メーカーへの就職が今年も多くなっています。また、自動車関連企業に就職する学生が一層増えている印象です。自動運転等を実現するためハードウェアとソフトウェアの両方を理解する素地のある学生が求められているものと考えています。さらに半導体関連企業へも、一定数の学生が希望し就職を決めております。このように、就職先分野にも産業界の状況が反映された形にはなっていますが、幸い卒業生はいずれも希望する企業に就職を決めることができました。

今回も産業界を中心に卒業生の皆様から多大なご支援とご高配をいただきましたこと、心より感謝申し上げます。

編集後記

雑誌 CUE の今号は、いつもとは少し異なる趣の記事が取り入れられています。「巻頭言」はいつも名誉教授の先生方に寄稿をお願いしておりますが、吉川潔先生から、今まさに旬のトピックである生成 AI「ChatGPT」にまつわる考察をお寄せいただきました。生成 AI については京都大学も強い興味を示しています。京大本部は、最近、新しい技術としてポジティブに捉え、研究や教育に取り入れることを「注意してススめ」とする方針をまとめたところです。記事の話題に戻りますと、「産業界の技術動向」について、大会社でご活躍中の先輩方からのご寄稿を掲載してきたところですが、今後は自ら起業をされた方々からもお声を集めようということを考えました。今号ではその初めとして、小西哲之名誉教授から 2019 年に起業された京都フュージョニアリング（株）をご紹介いただきました。核融合という夢の新エネルギーの実現にむけた、小西先生の強い思いがわかる熱い記事になっています。最後に「教室通信」について、今号では最近の就職事情についてご寄稿をいただきました。最近では多くの企業が博士後期課程修了者の雇用を増やしておられるようです。国・社会・企業の発展に科学技術は不可欠です。素晴らしい取り組みであると感じております。

[M.Y. 記]

協力支援企業

鉄道情報システム株式会社
日本製鉄株式会社
株式会社村田製作所
ローム株式会社

発行日：令和5年9月

編集：電気系 cue 編集委員会

川上 養一、山本 衛、下田 宏、
橋本 昌宜、田中 俊二、三谷 友彦、
デゾイサ メーナカ、北野 正雄（洛友会）

E-mail: cue@kuee.kyoto-u.ac.jp

www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/cue

発行：京都大学電気関連教室

援助：京都大学電気系関係教室同窓会洛友会
電気教室百周年記念事業基金

印刷・製本：株式会社 田中プリント

