

# プラズマエレクトロニクス分科会会報 No. 81

2024 年（令和 6 年）12 月発行

天野、佐々木、財前、田中

## 目次

### 巻頭言

青信号はゴーでない、赤信号は・ ・ ・ ・ ・	東京大学	寺嶋 和夫	1
— 昭和 100 年の独創的な研究、研究者・技術者・ 企業家へ —			

### アカデミックロードマップ改定

アカデミックロードマップの改定	アカデミックロードマップ 2050 委員会		2
-----------------	-----------------------	--	---

### 研究室紹介

埼玉大学 大学院理工学研究科 電力研究室	埼玉大学	稲田 優貴	10
----------------------	------	-------	----

### 研究紹介

Physics-informed neural networks を活用した ボルツマン方程式解析と電子輸送係数測定	室蘭工業大学	川口 悟 高橋 一弘 佐藤 孝紀	15
---	--------	------------------------	----

### 応用物理学会講演奨励賞

プラズマ生成原子状水素による 低温 CO <sub>2</sub> メタネーションの促進	東京科学大学	金 大永	24
---	--------	------	----

### 第 22 回プラズマエレクトロニクス賞

プラズマエレクトロニクス賞を受賞して	ソニーセミコンダクタ ソリューションズ	久保井 信行	27
--------------------	------------------------	--------	----

中圧低温プラズマスパッタリングによる Si/Sn ナノワイヤー膜のシングルステップ堆積と 高容量 Li イオン電池の安定駆動	名城大学	内田 儀一郎 益本 幸泰 榊原 幹人 池邊 由美子	30
	九州大学	小野 晋次郎 古閑 一憲	
	大阪大学	小澤 隆弘	

### 国際会議報告

第 5 回データ駆動プラズマ科学国際会議 (ICDDPS-5)	大阪大学	浜口 智志	34
------------------------------------	------	-------	----

12th International Workshop on Microplasmas (IWM-12)	大阪公立大学	白藤 立	35
--	--------	------	----

10th International Conference on Plasma Medicine (ICPM-10) / 9th International Workshop on Plasma Cancer Treatment (IWPCT-9) 報告	名古屋大学	田中 宏昌	36
---	-------	-------	----

77th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2024)	成蹊大学	村上 朝之	37
--	------	-------	----

### 国内会議報告

第 18 回プラズマエレクトロニクス インキュベーションホール	名古屋大学 北海道大学	石川 健治 富田 健太郎	38
------------------------------------	----------------	-----------------	----

2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 PE 分科内招待講演 (English セッション) 報告	名古屋大学	石川 健治	39
2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 分科内招待講演 大阪大学 工学研究科 浜口 智志 「オングストロームノード世代における半導体製 造プラズマプロセスの物理」	ウェスタンデジタル	平松 亮	40
第 44 回プラズマ新領域研究会「大気中非平衡プラ ズマの多種多様な応用展開とそれを支える基礎研 究の最前線」	北海道大学	富田 健太郎	42
<b>行事案内</b>			
17th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials / 18th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (ISPlasma2025 / IC- PLANTS2025)	豊田工業大学 中部大学	佐々木 実 小川 大輔	43
2025 年第 72 回応用物理学会春季学術講演会 プラズマエレクトロニクス分科会企画	名古屋大学 九州大学	石川 健治 林 信哉	46
26th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC26)	東北大学	茂田 正哉	49
ICPIG2025: International Conference on Phenomena in Ionized Gases XXXVI Edition	北海道大学	佐々木 浩一	50
78th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2025)	東北大学	金子 俊郎	51
<b>掲示板</b>			
2024 年度(令和 6 年度) プラズマエレクトロニクス分科会幹事名簿			52
2024 年度(令和 6 年度)分科会幹事役割分担			54
2024 年度(令和 6 年度) 分科会関連の各種世話人・委員			55
活動報告			56
プラズマエレクトロニクス関連会議日程			58
当会報への広告掲載について			59
編集後記			60

## 巻頭言

# 青信号はゴーでない、赤信号は . . . . . — 昭和 100 年の独創的な研究、研究者・技術者・企業家へ —

東京大学・新領域創成科学研究科 寺嶋 和夫

研究活動をスタートし始めた直後の学生さん、新しい社会人研究者、あるいは、研究室を立ち上げたばかりの PI の皆さんにとっての一番の悩みは、研究テーマの設定であろう。

皆さん頭を絞り、進歩性と新規性の両面に気を遣いながら、独創的な研究テーマを必死で探し、思い巡らす。後々振り返ると、この瞬間が一番ウキウキする珠玉の時である。

しかしながら、現実はそう甘くはない。面白そうな研究テーマの多くは既に先行研究があり新たな新規性の付与に頭を悩ます。また先行研究のない研究テーマの多くは、その実現には現在の周辺の基礎科学や基盤技術の飛躍的な進歩の必要性や、その遂行を支える研究時間や予算の非現実的なスケールに圧倒され、心が折れることが多々である。

著者も卒論研究から既に 40 数年にわたる研究生活が過ぎた。その後半、およそ半分以上の 20 数回程の期間をこの応用物理学会プラズマエレクトロニクス (PE) 分科会でお世話になった。改めて関係の皆様にお礼をお伝えしたい。また、その中で素晴らしい独創性に富む先輩同輩後輩の研究を拝見して感心させて戴いた。その基本的な研究のストラテジーは次のようなものであった。

- (1) 本質的な基本科学あるいは技術のパラメーターの極限領域における新領域研究に加えて、
- (2) 本質的な基本科学あるいは技術のパラメーターを複数掛合わせた新規の超多次元ハイパーメタ領域における新領域研究さらには、
- (3) 世に出る前の (1) や (2) などの地下に潜む新領域研究の芽の最強の **First follower** (応援団) としての新領域研究そして何より、
- (4) 全ての研究において、外部の評価はさておき、己を信じ研究を続けた新領域研究の 4 つに主に集約されるように思われる。

来年 2025 年は、昭和 100 年の記念すべき年。軍靴の足音が鳴り響いた最初の 20 年を経て、先人らの尽力と犠牲を礎に、幸運にもこの昭和、平成、令和の 80 年間、3 世代に渡り平和な日々を過ごせた我が国に於いては、エネルギー問題、環境問題、人口問題などの社会的な課題はあるものの、今や世界をも舞台に活躍する優秀な若者がスポーツ界を中心に生まれている。広義の意味での教育の賜物であろう。PE 分野でも大谷翔平、松山英樹、藤井聡太のような圧倒的な独創性に富む研究者/技術者/企業家の出現の日がそこまで来ている。

## アカデミックロードマップ改定

# アカデミックロードマップの改定

## アカデミックロードマップ 2050 委員会

応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会では、2008年3月に初版のロードマップ(RM) (2010年代から2040年代まで) [1]を、2010年3月に改訂版(2010年代から2040年代まで) [2,3]を作成した。また、2014年9月に日本学術会議第三部報告「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ 2014 (夢ロードマップ 2014)」において、(7) 総合工学分野の応用物理学：プラズマ科学に関するロードマップ (2013年から2040年代まで) [4]を作成した。

かつてのRMで想定されたプラズマ科学を基盤とする未来技術のいくつかは、今後も継続的な研究・開発が必要なものがまだ多くあるが、すでに製品となって市場に現れているものもある。その代表的な例として、フレキシブルディスプレイやFin-FET, 3D-NANDに代表される超微細加工を挙げることができる。一方、新たな可能性を秘めたAI, 機械学習, 量子コンピュータなどの新規な研究・開発の目標も顕在化してきた。そこで、RMの改訂が企画された。その際、今回のRM作成の目的を、PE分科会関係者が専門家にPE分野の研究の方向性を説明する資料として、研究費獲得のための補助資料として、ならびに政府関係者などにプラズマ科学の重要性を理解してもらうための資料として使うため、とした。

この目的達成のために、ロードマップの構成は、2050年代に至るまでのアウトプット(製品やサービス)を想定し、その表紙に政府関係者などの素人にもわかる出口から見たロードマップ概要をつけることとした。なお、今回のロードマップでは、現状のプラズマ科学の構成を反映させるために、

これまでとは異なる領域に改めてブレークダウンしなおし(表1), それぞれの専門家によって構成された小委員会(表2: ◎は主査, ○は副主査)において新たな視点に基づくロードマップがまとめられた。本稿では、先述の「表紙」であるロードマップの全体像(図1)とその概要(日本語・英語)のみを示した。全体像の元になった各領域のロードマップについては分科会のwebに掲載した。

- [1] 応用物理学会編著：応用物理分野のアカデミック・ロードマップの作成報告書(社団法人応用物理学会, 2008年3月), pp. 117-129.
- [2] 応用物理学会編著：応用物理分野のアカデミック・ロードマップ改訂版(社団法人応用物理学会, 2010年3月), pp. 127-139.
- [3] プラズマ・プロセス技術クラスター：プラズマ・プロセス技術, 応用物理 **79**, 717-718 (2010).
- [4] 日本学術会議第三部編著：理学・工学分野における科学・夢ロードマップ 2014(日本学術会議第三部, 2014年9月19日), pp. 72-73, p. 100.

表1. プラズマ科学ロードマップの構成

---

### これまでの分類

- ・気相・表面計測技術+制御技術
- ・シミュレーション技術
- ・有機・C系成膜技術
- ・Si・無機系成膜技術
- ・微細加工技術

---

### 今回の分類

- ・生成・計測・制御
  - ・モデリング・シミュレーション
  - ・成膜・材料合成
  - ・加工
  - ・バイオ
  - ・新分野  
(省資源・低炭素社会, 宇宙・推進)
-

表 2. プラズマ科学ロードマップ 2050 委員

---

【総括】◎白谷正治（九州大学），○白藤立（大阪公立大学），堀勝（名古屋大学）、辰巳哲也（ソニーセミコンダクターソリューションズ），栗原一彰（キオクシア），節原裕一（大阪大学）

【生成・計測・制御】◎赤塚洋（東京科学大学）○豊田浩孝（名古屋大学），中村圭二（中部大学），小川大輔（中部大学），酒井道（滋賀県立大学），富田健太郎（北海道大学），占部継一郎（京都大学），伊藤剛仁（東京大学），小野亮（東京大学），本村大成（九州 AIST），竹田圭吾（名城大学），中川雄介（東京都立大学），稲田優貴（埼玉大学）

【モデリング・シミュレーション】◎朽久保文嘉（東京都立大学），○茂田正哉（東北大学），伊藤篤史（NIFS），浜口智志（大阪大学），内田諭（東京都立大学），小田昭紀（千葉工業大学），佐藤孝紀（室蘭工業大学），川口悟（室蘭工業大学），村上朝之（成蹊大学），守屋剛（東京エレクトロン），古免久弥（大阪大学），兒玉直人（名古屋大学），小室淳史（AIST）

【成膜・材料合成】◎田中康規（金沢大学），○北嶋武（防衛大学校），平松美根男（名城大学），岡田健（東北大学），加藤俊顕（東北大学），田中学（九州大学），鎌瀧晋礼（九州大学），板垣奈穂（九州大学），白井直機（北海道大学），市來龍大（大分大学），篠原正典（福岡大学），中谷達行（岡山理科大学），布村正太（AIST），上坂裕之（岐阜大学），太田貴之（名城大学），山田英明（AIST）

【加工】◎関根誠（名古屋大学），○江利口浩二（京都大学），戸村幕樹（東京エレクトロン宮城），堤隆嘉（名古屋大学），豊田紀章（兵庫県立大学），篠田和典（日立製作所），深沢正永（AIST），伊澤勝（日立ハイテク），伊藤智子（大阪大学），佐々木実（豊田工業大学），酒井伊都子（キオクシア），中村守孝（MAMO）

【バイオ】◎石川健治（名古屋大学），○神野雅文（愛媛大学），古閑一憲（九州大学），林信哉（九州大学），奥村賢直（九州大学），田中宏昌（名古屋大学），栗田弘史（豊橋技科大学），金子俊郎（東北大学），佐々木渉太（東北大学），高島圭介（当時，東北大学）、内田諭（東京都立大学），北野勝久（大阪大学），高木浩一（岩手大学），高橋克幸（岩手大学），熊谷慎也（名城大学），伊藤昌文（名城大学），清水鉄司（AIST），池田善久（愛媛大学），王斗艶（熊本大学），村上朝之（成蹊大学）

【新分野】◎野崎智洋（東京科学大学）〈省資源・低炭素社会〉，○高橋和貴（東北大学）〈宇宙・推進〉，内田儀一郎（名城大学），神原淳（大阪大学），古閑一憲（九州大学），山本直嗣（九州大学），鷹尾祥典（横浜国立大学），古川武留（神戸大学），桑原大介（中部大学），本村大成（AIST），金賢夏（AIST），立花孝介（大分大学），竹内希（東京科学大学），高橋克幸（岩手大学），白井直機（北海道大学），高島圭介（当時，東北大学）

---

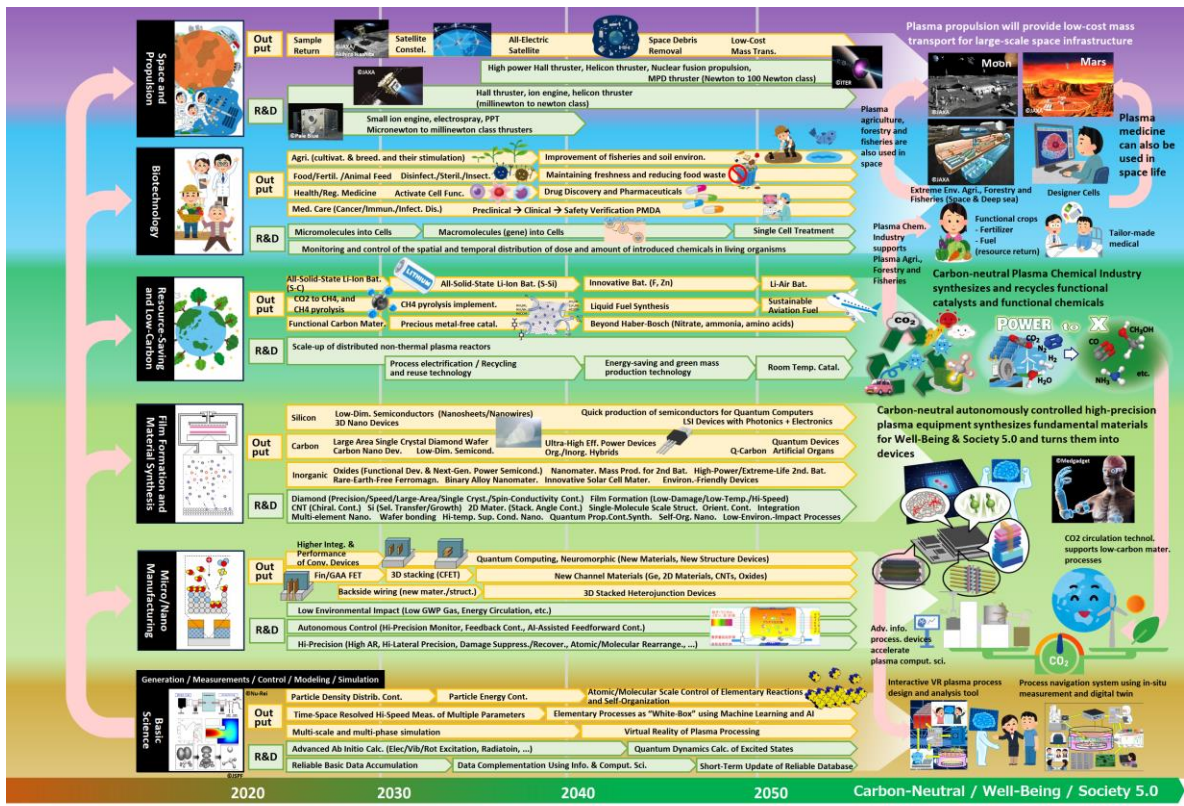
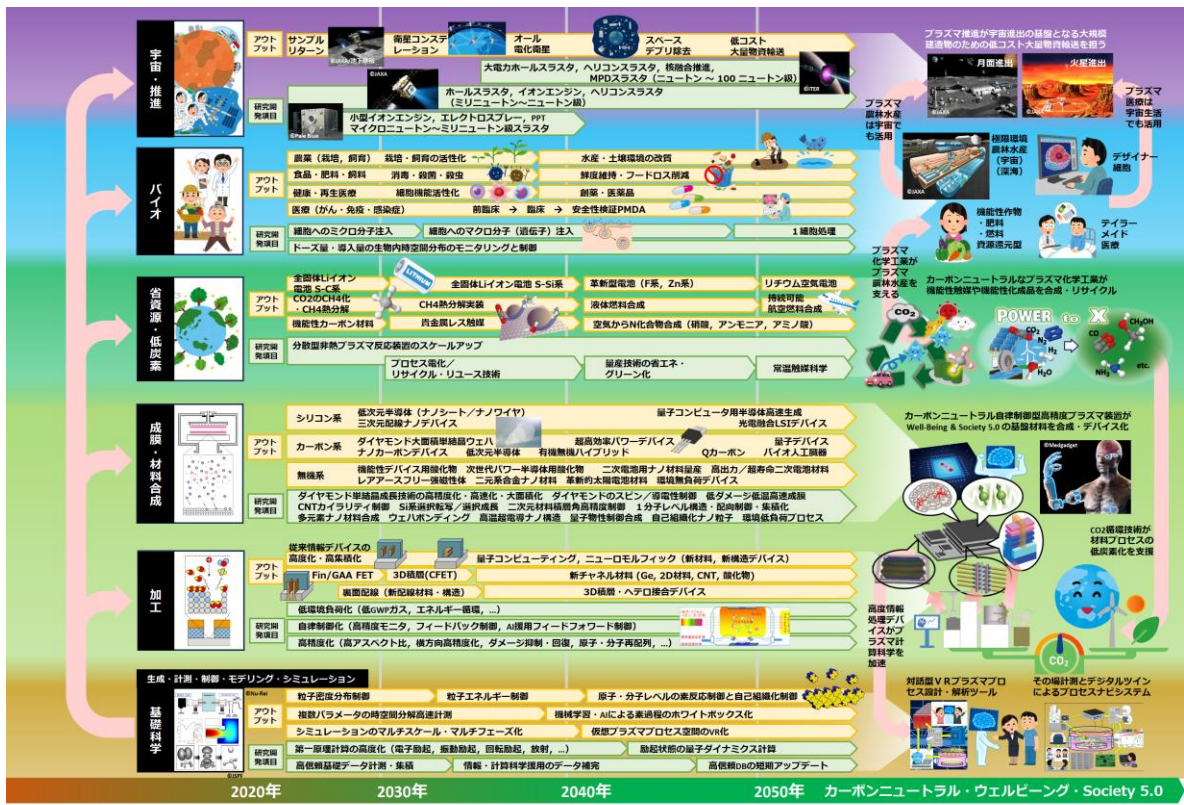


図 1. プラズマ科学ロードマップ 2050 概要 (日本語版と英語版)

## プラズマ科学ロードマップ 2050 概要

(2024 年 12 月 15 日)

応用物理学会 プラズマエレクトロニクス分科会 プラズマ科学ロードマップ 2050 委員会

人類が目指す豊かで持続可能な未来社会の実現のために、国連によって地球規模の 17 の開発目標「SDGs」が示されている。我が国では、「Society 5.0」が提案された。これは、AI や IoT が社会実装された超スマート社会を実現し、革新的技術を最大限活用することにより、SDGs 達成に向けて社会的課題を解決すると共に、経済発展も両立する未来社会のコンセプトである。本ロードマップは、Society 5.0 の達成年代を 2050 年代とし、その社会で必須となる革新的技術をプラズマ科学で創出するために必要な研究・開発項目をバックキャストしたものである。以下にその概要を述べる。

### 加工技術

2030 年代中頃までに加工精度を原子レベルにまで微細化するとともに、ダメージレス化を達成する。その後、その高精度加工技術をベースとして新材料（Ge、二次元材料、酸化物半導体）や新構造（裏面配線、三次元積層、ヘテロ接合）を導入し、Society 5.0 の根幹を支える超低消費電力半導体デバイスを実現する。また、プラズマ生成への再生可能エネルギー利用とプラズマ生成の超低消費電力化によって、加工技術のカーボンニュートラル化を達成する。

### 成膜・材料合成技術

プラズマを用いた成膜・材料合成技術においては、究極の制御である原子配置制御とその高速化を追求する。この成果は、カーボンニュートラルを支える超高効率パワーデバイスや高度情報処理を支える量子コンピューティングデバイスに必要な大面積単結晶ダイヤモンドウエハ、ウェルビーイングを支える人工臓器に必要な機能性ダイヤモンドドライカーボン、エネルギーから医療に至る広範な用途で必要となる機能性複合ナノ材料の実現など、Society 5.0 を支える多岐にわたる革新的技術の実現につながる。

### 省資源・低炭素技術

CO<sub>2</sub> リサイクルのためのメタネーションと、生成されたメタンの熱分解による再利用の実装を 2030 年末頃までに達成する。この成果は Society 5.0 での航空産業に必須となる持続可能航空燃料（SAF）の実現にもつながる。また、プラズマ材料プロセスを用いた全固体リチウムイオン電池の高効率・長寿命化を 2030 年末頃までに達成する。その成果を利用し、Society 5.0 ではリチウム空気電池を実現する。CO<sub>2</sub> リサイクルや電池に必須となる触媒についても、プラズマ材料プロセスによって貴金属レスの高効率触媒を実現する。その技術の活用により、2050 年代にはハーバーボッシュ法を超えるアンモニア合成技術や、各種の窒素化合物を空気・水・再生可能エネルギーだけを用いてオンサイト・オンデマンド合成する技術を確立する。

### バイオ技術

食料生産と健康医療へのプラズマ技術の発展が見込まれる。プラズマ農業技術は、栽培・飼育環境の改質、成長の促進、農林水産物の機能性付与を実現する。Society 5.0 とも連携し、農林水産業を持続可能にするとともに、極限環境である宇宙や深海への展開も発展的に実現する。特に、プラズマ殺菌技術は、食品の鮮度維持に寄与することで食品ロス問題の解決に結び付く。プラズマ細胞工学は、遺伝子導入などの技術を発展させることで、再生能力を有する細胞機能を設計す

るなど、デザイナー細胞を実現する。プラズマ医療技術は、すでに前臨床試験の段階から、臨床試験と安全性検証（PMDA）を経て社会実装を実現し、予防治療とも統合したプラズマバイオ医療技術はウェルビーイングを支える革新的技術となる。

## 宇宙・推進技術

地球ならびに宇宙規模の情報網の活用を前提とする Society 5.0 では、地上だけではなく宇宙開発のための革新的技術も必須となる。その中で、プラズマ技術は「はやぶさ」で実証された推進という重要な要素を担う。その推力は、ミリニュートン級からニュートン級を経て、2050 年には 100 ニュートン級の推力を実現する。その過程で、2030 年後半には、化学燃料を用いないプラズマ推進のオール電化衛星を実現し、それを Society 5.0 に必須の衛星コンステレーションとして配備する。その後、スペースデブリ除去などを経て、低コスト大量物資輸送を実現する。これにより、地上だけではなく、宇宙ステーション・月、さらには火星においても Society 5.0 を実現する。

## 基礎科学

プラズマ科学においては、Society 5.0 を支える以上の革新的技術を実現するためにプラズマの理解と制御に関する学理を深化させる。

トップダウンプロセスである「加工」・「バイオ」技術では、反応種の空間・エネルギー領域における分布制御を実現する原理を見出す。これにより、エネルギー制御した単活性種の選択照射や実用的な反応速度を持つ単原子層の堆積・エッチング、或いは生体分子操作が実現される。固体表面上でのボトムアッププロセスである「成膜・材料合成」では、実用的な原子配列制御に必須となる自己組織化成長を生産技術として実現するとともに、その高速化・無欠陥化の可能性を追求する。律速機構の解明とトップダウンプロセス研究の活性種輸送の成果を融合し、自己組織化援用反応場制御原理を確立する。

気相中でのボトムアッププロセスであるメタネーションなどの分子変換プロセスでは、トップダウンプロセス研究の活性種の空間・エネルギー領域における分布制御を活用し、特定の励起状態を高効率で生成することで、所望の分子変換プロセスを実現する。

基礎科学に共通の基盤技術としては、計測技術とシミュレーションの技術を高度化する。計測できないものは制御・加工できない。原子レベルの生産プロセスの実現には、精度を不確定性原理の極限まで追求し、反応場に影響を与えない無擾乱計測や反応制御と融合した計測、瞬時計測、全反応場の同時計測、ナノ構造の反応計測、プロセス中のデバイス特性その場計測やオペランド計測、シミュレーションと融合した予測計測の原理を追求する。

シミュレーションでは、高精度化に加え、マルチスケールでの高速計算・モデル化手法を開発する。シミュレーションに必要な基礎データについては、未調査の原子分子の電子・光励起断面積や反応確率、表面反応素過程の高精度なデータの収集を推進するとともに、利用しやすいデータベースを確立する。現時点ではまだ未解明の励起状態活性種の素過程と活性表面の素過程については、データ収集を推進するとともに、そのモデル化・シミュレーション技術を確立する。上記基礎研究により確立した反応制御の原理をこれまでに掲げた各技術にフィードバックし、現実の生産技術へ展開する。その際、モニターやシミュレーターを利用しやすい生産技術を開発し、リアルタイムフィードバックによってその生産性・制御性を高める。反応制御原理に基づき、高精度・大面積・高安定性・高生産性を追求する。



**Plasma Science Roadmap 2050 Abstract**  
**(December 15, 2024)**  
**Plasma Science Roadmap 2050 Committee,**  
**Plasma Electronics Division, Japan Society of Applied Physics**

The United Nations has outlined 17 global development goals, known as the Sustainable Development Goals (SDGs), to achieve the prosperous and sustainable future society that humanity aspires to. In line with these goals, the Japanese government has proposed "Society 5.0", a concept for a future society aiming to realize both economic development and solutions to social issues through the full utilization of innovative technologies such as artificial intelligence (AI) and the Internet of Things (IoTs). This roadmap outlines backcasted research and development items in plasma science necessary to create the innovative and essential technologies required for Society 5.0, which is envisioned to be realized in the 2050s. The roadmap is detailed below.

**Micro/Nano Manufacturing Technology**

By the mid-2030s, we will achieve atomic-level processing precision and damage-free manufacturing. This high-precision processing technology will then be applied to new materials (e.g., Ge, two dimensional (2D) materials, and oxide semiconductors) and new structures (e.g., backside wiring, three dimensional (3D) stacking, and heterojunctions) to create ultra-low-power semiconductor devices that will serve as a foundation for Society 5.0. In addition, carbon-neutral processing technology will be realized by employing renewable energy for plasma generation and optimizing the power consumption for plasma generation.

**Film Formation and Material Synthesis Technology**

Plasma-based film formation and material synthesis technologies will focus on achieving high-speed atomic arrangement control, the pinnacle of precision. These advancements will enable a diverse array of innovative technologies integral to Society 5.0, including:

- Large-area single-crystal diamond wafers for ultra-high-efficiency power devices, supporting carbon neutrality.
- Quantum computing devices to enable advanced information processing.
- Functional diamond-like carbon for artificial organs, promoting well-being.
- Functional composite nanomaterials for applications spanning energy to medicine.

**Resource-Saving and Low-Carbon Technologies**

By the late 2030s, we aim to achieve methanation for CO<sub>2</sub> recycling and reuse of methane through thermal decomposition. These developments will also facilitate the production of sustainable aviation fuel, a critical component of the aviation sector in Society 5.0. High efficiency, long-life all-solid-state lithium-ion batteries will be realized through plasma material processing around the same time. Building on these advancements, lithium-air batteries will be introduced as a pivotal energy storage solution for Society 5.0. For catalysts, essential to CO<sub>2</sub> recycling and battery technologies, plasma material processing will enable the development of high-efficiency catalysts devoid of precious metals. This technology will further support the establishment of ammonia synthesis surpassing the efficiency of the Haber Bosch process by the 2050s. In addition, on-site, on-demand synthesis of various nitrogen compounds will be achieved using only air, water, and renewable energy sources.

## **Biotechnology**

The development of plasma technology for food production and healthcare is anticipated. Deepening the understanding of plasma agriculture will revitalize cultivation and breeding practices, improve marine and soil environments, and enable the cultivation and breeding of functional products in terrestrial agriculture, forestry, and fisheries. This will ensure sustainability within Society 5.0, as well as in extreme environments, such as space and deep sea. Plasma sterilization technology is being developed to maintain food freshness, thereby addressing the issue of food waste. In the plasma cell engineering, development of gene transfer and other techniques will lead to the creation of designer cells with engineered functions and regenerative capabilities. Plasma medical technology, currently in the preclinical testing stage, will be implemented in society after clinical testing and safety verification under the Pharmaceuticals and Medical Devices Agency (PMDA). Plasma biomedical technology, which integrates clinical and preventive technologies, will emerge as an innovative technology supporting well-being within Society 5.0.

## **Space and Propulsion Technology**

Society 5.0, which relies on global and space-scale information networks, will necessitate groundbreaking innovations on Earth and in space exploration. Plasma technology, already proven in propulsion systems such as Hayabusa's ion engines, will play a pivotal role. Thrust capabilities will advance from the millinewton scale to the newton scale, achieving up to 100 newtons by 2050. In the latter half of the 2030s, the deployment of all-electric satellites with plasma propulsion systems—eliminating the need for chemical fuels—will become a reality. These satellites will form essential constellations for Society 5.0. Subsequent innovations, including space debris removal and the development of low-cost, large-scale material transportation, will facilitate broader access to space. These advancements will extend Society 5.0 beyond Earth, enabling its realization on space stations, the moon, and eventually Mars. This integration of plasma technology into space exploration will ensure sustainable and efficient resource use in the expanding frontiers of human activity.

## **Basic Science**

In plasma science, we will deepen our understanding of plasma behavior and refine theories of its control to develop the innovative technologies that underpin Society 5.0.

In top-down processes, such as microfabrication and biotechnology, we aim to uncover principles for controlling the spatial and energy distribution of reactive species. This will enable the selective irradiation of energy-controlled single active species, deposition and etching of monoatomic layers at practical reaction rates, and precise manipulation of biomolecules.

In bottom-up processes, such as film formation and material synthesis on solid surfaces, we will achieve self-organized growth—a critical component for practical atomic arrangement control—by advancing its speed and minimizing defects. This will be facilitated by establishing principles to control the reaction fields of self-assembly, supported by research into rate-limiting mechanisms and the transport of active species derived from top-down processes.

For molecular conversion processes like methanation (a gas-phase bottom-up process), we will achieve targeted molecular conversion by leveraging the control of spatial and energy distribution of active species. This will enable the generation of specific excited states with high efficiency, driven by insights from top-down process research.

To support these advancements, we will prioritize measurement and simulation technologies, as accurate control and processing depend on precise measurements. Our goals for atomic-scale production processes include:

- Achieving measurement precision at the limits of the uncertainty principle.
- Developing principles for disturbance-free measurement that does not affect the reaction field.
- Combining measurement with reaction control.
- Enabling instantaneous and simultaneous measurement across the entire reaction field.
- Measuring reactions of nanostructures, conducting in-situ device characterization during processes, operando measurement, and predictive measurement integrated with simulation.

In the area of simulation, we will improve the accuracy of existing models and develop methods for high-performance computing across multiple scales. This will involve collecting highly accurate data on electronic and photoexcitation cross sections, reaction probabilities of previously unexplored atoms and molecules, and elementary processes in surface reactions. In addition, we will establish accessible databases for this critical information. To address gaps in understanding excited-state active species and active surface reactions, we will advance data collection and establish modeling and simulation techniques for these phenomena.

The principles of reaction control derived from these basic research efforts will be integrated into practical production technologies. By utilizing advanced monitoring and simulation tools, we will improve productivity and controllability through real-time feedback mechanisms. The resulting production systems will prioritize high precision, large-scale applicability, stability, and productivity, ensuring they align with the demands of Society 5.0.

## 研究室紹介

# 埼玉大学 大学院理工学研究科 電力研究室

## 埼玉大学 稲田優貴

### 1. はじめに

研究室メンバー【写真1】は、前山光明教授、稲田優貴准教授、石田亜希子秘書と大学院生11名（M1・M2がそれぞれ7・4名）および学部生8名で構成されている。研究室の卒業生・修了生は電力・重電業界をはじめとし、半導体やガス・石油業界など多岐にわたる。

当研究室では、実に多彩な性質・特徴を有する「放電・プラズマ」を活用することで、環境・エネルギー・医療・農業といった喫緊の社会問題を解決すべく研究開発を行っている。本稿では、研究

室の運営方法や研究内容の一端を紹介する。

### 2. 研究室の運営

ありきたりかもしれませんが、研究室メンバーの成長を通して学問と社会に貢献する、というのが研究室運営の基本理念です。研究室を運営するうえでは、学生の自発性を最も大切にしています。そのため、コアタイムはありません。緻密な進捗管理もありません。自分で責任が取れる範囲で自由にのびのびと研究活動を進めてもらいます。そのなかで、研究資源や人間の能力には限りがある

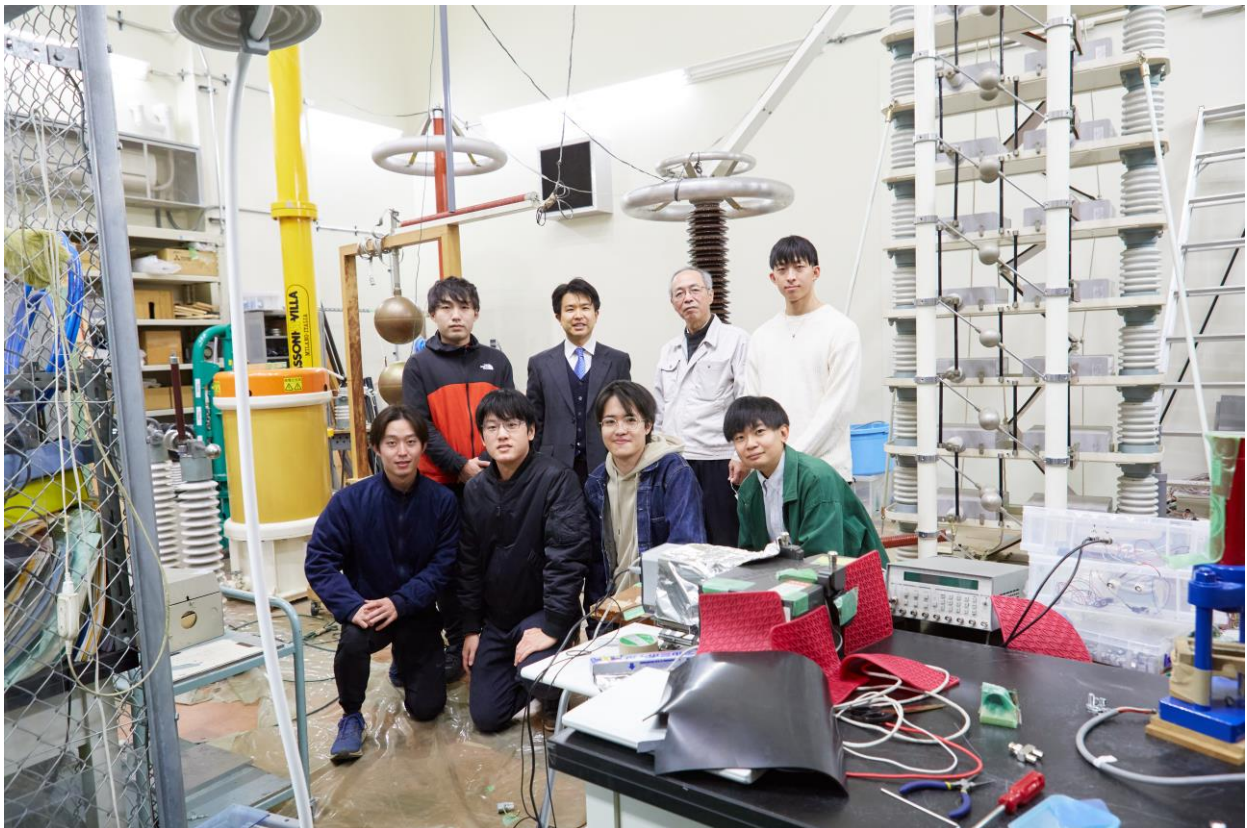
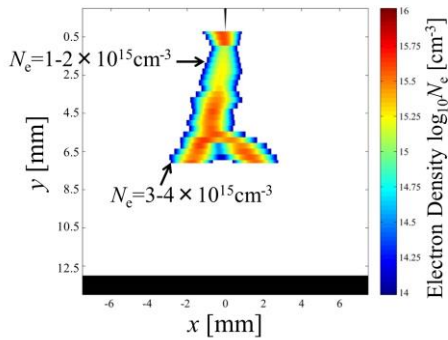
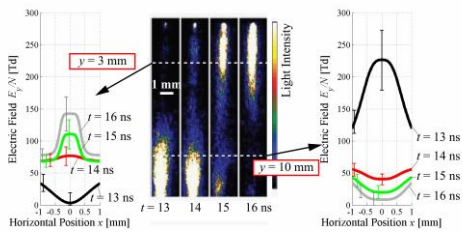


写真1 研究室集合写真（2023/12/6撮影，前山：上段右から2人目，稲田：上段左から2人目）



(a) 正極性1次ストリーマ放電の2次元電子密度[1]



(b) 1次・2次ストリーマ遷移過程の電界分布 [3]

図1 大気圧空气中ストリーマ放電の電子密度・電界測定

こと、そういった制約条件の中で成果を上げるために優先すべきことは何か、などといった自問自答を繰り返すことで、卒業・修了までに教員がこれまで知らなかった知識や世界の仕組みを少しでも社会に向けて提示してもらえれば、教員としてはそれでおおむね満足です。

このような研究室の運用をしているため、研究室の学生に対し、テーマを教員から一方的に指定することはありません。独創的なアイデアや新しい技術を自分で生み出す必要がある斬新なテーマを少なくとも一度は当該学生に考えてもらいます。状況に応じて、周囲の学生や教員も含めて一緒に考えることもあります。こうして決まったテーマ遂行する過程で失敗はつきものですが、そうした失敗の積み重ねからしか成功は生まれないことを実感してほしいと思っています。研究を進める過程で自分にしかできない強みを手に入れて、“替えのきかない”人材に育ててほしいと思います。また、

常識は鵜呑みにせず、疑問を持ったり、不思議だと思ふ姿勢を大切にしたいとも思っています。そのような姿勢の有無で、研究や仕事の成果に大きな差を生まれることを学生のうちに身をもって体験しておけば、社会に出てから生かせることも多いと思います。

ここまでは主に学生に対する研究室運営ですが、学生に自発性を求める以上、教員側も折に触れて手本を見せる必要があります。すなわち、教員側も自由にのびのびと研究を行い、成果を出している姿を見せる必要があります。そのため、学生を付けずに教員自身が自発的に行う研究テーマも確保しています。このように、全てのメンバーの自発性による相互刺激・相乗効果により学問と社会へ貢献することに取り組んでいます。

### 3. 研究室での取り組み

#### 3.1 大気圧空气中ストリーマ放電の電子密度・電界測定

大気圧空气中ストリーマ放電は現在、環境・バイオ・医療・表面処理・燃焼支援・農業など様々な応用分野を有する。これらの応用技術では、放電内で生成された活性種 ( $O \cdot N \cdot OH \cdot O_3$  などのラジカル, イオン, 励起種など) が活用されているが、その生成メカニズムには未解明な点が多く残されている。大気中ストリーマ放電を含む大気圧非平衡プラズマの内部では、電界で加速された電子が雰囲気分子と衝突することで活性種が生成される。そのため、活性種の生成機構を解明するためには、活性種の生成源である電子の数密度および、電子の活性種生成能力を決定する電界を詳細計測する必要がある。しかしストリーマ放電は、①進展速度が速く、②ランダムかつ複雑に分岐し、③電子密度・電界が低い場合もあるため、電子密度・電界が測定できるセンサは存在しませんでした。そこで本研究では「JST さきがけ」や「JST 創

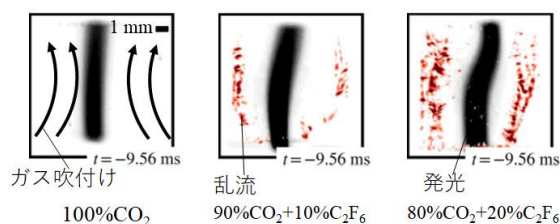


図2 アーク放電によって誘起された乱流ダイナミクスの分子性ガス種依存性[4]

発」をはじめとした各事業からの支援を受け、これまで不可能だった計測を可能にするセンサの開発と、これらのセンサを駆使した電子密度・電界計測により活性種生成メカニズムの解明を進めている【図1】[1, 2, 3]。

### 3.2 分子性ガスアーク誘発乱流の研究

大気圧などの高気圧下で生成された熱プラズマは、機能性ナノ材料合成や、アーク溶接、大電流スイッチング技術、プラズマ溶射・切断、フラーレン・ナノチューブ合成、プラズマ製錬、レーザー加工、廃棄物処理、化学重合などに広く活用されている。熱プラズマは数ある放電プラズマの中でも、最も初期に実用化された形態であるが、熱プラズマには、他の放電プラズマにはない様々な困難が存在するため<sup>1,2,3)</sup>、現象理解は容易ではない。現象解明を阻んできた困難の一つに、熱プラズマが誘起する乱流がある。乱流は熱プラズマの形状に非再現性を誘起するだけでなく、エネルギーや活性種の輸送現象を複雑化させる。そのためこの困難の解決には、まず熱プラズマによって誘起される乱流そのものを捉え、その特性を実験的に明らかにする必要がある。乱流は通常、様々なサイズの多次元構造を有する。しかし従来の乱流センサーでは、様々なサイズの乱流構造が全て混ざった状態で測定されてしまうか、特定方向の構造のみしか感知できないため、測定結果の解釈が困難であった。そこで本研究では、特定のサイズの多次元構造のみを抽出して可視化できるセンサ

を開発することで、これまでほとんど理解されていない「分子性ガス中のアーク放電によって誘発された乱流【図2】」の現象解明と電力用ガス遮断器応用に、「NEDO 若サポ」や「JSTALCA-Next」の支援を受けて取り組んでいる[4]。

### 3.3 球雷放電の研究

近年、難分解性有機物などによる水質汚染が大きな社会問題となっている。難分解性有機物の処理には、酸化ポテンシャルが高く反応性が高いOHラジカルが有効であるため、OHラジカルの大量生成法は長年所望されている。OH生成に用いられてきた従来の放電に比して、球雷放電【図3】では2桁高い密度のOHが生成可能である。さらに直径は最大で数10cm、電力の供給を断った後の持続時間は最長で数100msにもなる。そのため、OHラジカルが大量かつ長時間供給できる手法として期待されている。当研究室では、難分解性有機物の疑似物質であるインジゴカルミンを球雷放電で分解することにより、水処理過程の解明と更なる処理性能の改善を目指している。具体的には、OHラジカルの時空間変化測定や処理溶液の質量分析により分解素過程を解明し、そのメカニズム

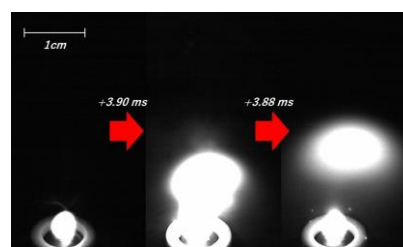


図3 球雷放電の発光画像

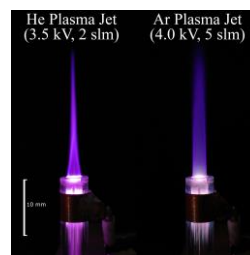


図4 プラズマジェットの発光画像

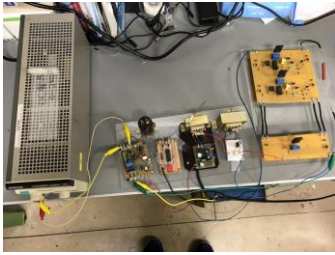


図5 パルスパワー発生装置

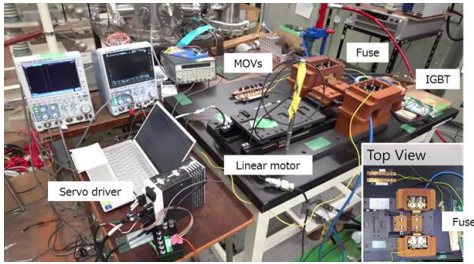


図6 限流遮断器

に基づいて、放電の上部から処理溶液をミスト状に散布する等の新手法を講じることで、処理性能の改善を図っている。

### 3.4 プラズマジェットの高次元電界分布測定

誘電体管に高電圧をかけ、大気圧空气中で希ガスを誘電体管に沿って吹き流すとトーチ状のプラズマ(プラズマジェット)が生成される【図4】。プラズマジェットでは、ガス温度が室温程度に維持されているため、変形を伴わない処理を大気圧環境下で行うことができる。この特徴を利用し、表面処理や創傷治療をはじめとした様々な分野への応用が期待されている。プラズマジェットを制御するためにはプラズマパラメータを詳細に知る必要がある。当研究室では化学活性種の選択的生成を司る電界分布に注目し、発光分光スペクトル解析と画像処理を組み合わせることで、電界の高次元分布が簡便に取得できるイメージ手法の開発を行っている。

### 3.5 高電圧パルス発生回路の開発

蓄積した電気エネルギーを短時間で放出すること

によって得られる大電力をパルスパワーと呼ぶ。従来のパルスパワー発生装置は慣性核融合やX線レーザーに適用されるなど、大型のものが多かったが、産業分野への普及を促進するためには、小型で長寿命かつ高繰り返し、低電力といった性能が要求される。当研究室では、マルクス回路のスイッチング素子をギャップスイッチから半導体に置き換える試みや、半導体ドライブ回路の簡易化、消費電力の低減などを達成することで、パルスパワー発生装置の産業界への普及を推進している【図5】。

### 3.6 限流遮断器の開発

送配電システムで地絡や短絡が発生すると、定格電流の数10倍にもなる事故電流が発生する。再生可能エネルギーの大量導入や大電力の地域間融通を実現するためには、現状の交流だけでなく、直流の事故電流も遮断できる電力用遮断器が必須である。しかし、直流には電流がゼロとなる時刻が存在しないため、交流に比して遮断は格段に難しい。そこで当研究室では、ヒューズと半導体を並列接続した新構成を採用することで、そもそも従来の事故電流を発生させずに、交・直どちらの電流も確実に遮断する新しい遮断器を開発している【図6】[5, 6, 7]。本研究では「NEDO 未踏チャレンジ 2050」「パワーアカデミー」からの支援を受け、次世代の送配電システムだけでなく、電気鉄道や電気自動車、電動航空機、電動船舶といった電気モビリティへの適用も視野に入れ研究開発を行っている。

## 4. おわりに

埼玉大学へのアクセスは、電車とバスを乗り継いで羽田空港から約1時間半、東京駅から約1時間、新宿・池袋駅から約50分、大宮駅から約40分です。埼玉大学のあるさいたま市内には、さい

たまスーパーアリーナや埼玉スタジアム 2002 といった大型イベント施設をはじめ，世界最古の開門式運河として知られる見沼通船掘りなどの史跡，肉汁うどんやスイーツ，うなぎなどのグルメがございます。また，最古と考えられている万葉仮名資料が出土した埼玉古墳群(この「埼玉」は「さきたま」と読み実はこれが埼玉県の名前の由来)や，新一万円札の肖像に採用された渋沢栄一の記念館，秀吉も落とせなかった難攻不落の忍城などには，電車・バスもしくは車のいずれでも約 1 時間でアクセスできます。関東圏に仕事や観光などで来られた際には，お気軽にお立ち寄りください。

#### 参考文献

- [1] Y. Inada, K. Aono, R. Ono, A. Kumada, K. Hidaka, and M. Maeyama: Two-dimensional electron density measurement of pulsed positive primary streamer discharge in atmospheric-pressure air. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **50** (2017) 174005
- [2] Y. Inada, A. Komuro, R. Ono, A. Kumada, K. Hidaka, and M. Maeyama: Two-dimensional electron density measurement of pulsed positive secondary streamer discharge in atmospheric-pressure air. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **52** (2019) 185204
- [3] Y. Inada, T. Shioda, R. Nakamura, M. Maeyama, A. Kumada, S. Nakamura, and Ryo Ono: Systematic 1D Electric Field Induced Second Harmonic Measurement on Primary-to-Secondary Transition Phase of Positive Streamer Discharge in Atmospheric-Pressure Air. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **55** (2022) 385201
- [4] Y. Inada, R. Kikuchi, Y. Hirano, Y. Maede, Y. Tanaka, Y. Nakano, M. Shigeta, T. Fujino, and A. Kumada: Spatial-frequency-resolved schlieren sensor for turbulence visualization in arc discharge. *Plasma Chem. Plasma Process.*, **44** (2023) 1203–1215
- [5] Y. Inada, Y. Yamano, M. Maeyama, S. Zen, and W.

- Ohnishi, “Current interruption device and current interruption method,” 2020/09/15. PCT/JP2020/034978. 2021/03/25. WO 2021/054338 (2021)
- [6] S. Zen, Y. Inada, W. Ohnishi, Y. Fukai, N. Takayasu, M. Maeyama, and Y. Yamano: Prototype Current-Limiting Hybrid DC Circuit Breaker Incorporating a Fuse and a Semiconductor Device, *IEEE Trans. Power Del.*, **36** (2021) pp. 2231-2233
  - [7] W. Ohnishi, Y. Inada, S. Zen, R. Sasaki, Y. Takada, Y. Miyaoka, K. Tsukamoto, and Y. Yamano: Proof-of-Concept of a Fuse-Semiconductor Hybrid Circuit Breaker with a Fast Fuse Exchanger, *IEEE Trans. Power Del.*, **38** (2023) pp. 937-946



# Physics-informed neural networks を活用した ボルツマン方程式解析と電子輸送係数測定

室蘭工業大学 川口悟, 高橋一弘, 佐藤孝紀

## 1. はじめに

### 1.1 Physics-informed neural networks

近年、微分方程式を解くための新しい方法として、Physics-informed neural networks (PINNs) が注目を集めている[1]。PINNs では、データおよび微分方程式を満たす関数を人工ニューラルネットワーク(Artificial Neural Network: ANN)を用いて表現する。ANN の学習において、データだけではなく、微分方程式そのものを利用する点が、通常の教師あり学習と異なる。ANN によって関数を表現すると、偏導関数を自動微分によって離散化せずに正確に計算することができ、メッシュフリーで微分方程式を取り扱うことができる。

PINNs では、微分方程式の順問題および逆問題を取り扱うことができる。順問題とは、ある境界条件・初期条件のもとで微分方程式を解く問題である。これまでに、伝熱解析[2]、流体解析[3]、熱流体解析[4]、計算電磁気学[5]など広範な分野にわたって、PINNs を用いた数値計算法が検討されている。また、Zhong et al.[6]は直流電界下におけるボルツマン方程式、ドリフト拡散方程式、Elenbaas-Heller 方程式といったプラズマシミュレーションに関連する微分方程式の解析に PINNs を適用している。逆問題とは、計測などによって得られたデータから、データが従う微分方程式、境界条件・初期条件、パラメータなどを推定する問題である。PINNs を提案した論文[1]においては、Navier-Stokes 方程式の数値計算結果の一部を教師データとして用いて、元の方程式に現れるパラメータを PINNs によって正確に推定

できることを示している。他には、温度場の測定データを用いた速度場と圧力場の推定[7]、流れの中にある物体の形状最適化[8, 9]が試みられている。

### 1.2 電子輸送特性の解明への PINNs の応用

電子はプラズマ中において最軽量の化学種であり、電界によって加速されて高エネルギーとなりやすく、電子と気体分子の衝突反応がプラズマ内の化学種生成において極めて重要となる。電子-気体分子衝突反応のレート係数は、電子速度分布関数 (EVDF: Electron velocity distribution function)あるいは電子エネルギー分布関数 (EEDF: Electron energy distribution function)と電子衝突断面積を用いて計算することができ、両者の精度がレート係数の精度に直結する。EVDF または EEDF を求めることができれば、電離係数、電子ドリフト速度などの電子輸送係数を求めることもできる。反応レート係数や電子輸送係数はプラズマを用途に応じて最適化するための指針を与える重要な情報であるとともに、プラズマシミュレーションにおいて必要となるデータである。また、電子スオーム法による電子衝突断面積の評価と推定においても必要である[10]。EVDF や EEDF はボルツマン方程式を解くことで求めることができるため、ボルツマン方程式を正確に解く方法が求められている。

電子輸送係数は、電子スオーム実験によって測定することが可能であり、さまざまな種類の電子スオーム実験が行われている。ここで、測定でき

る電子輸送係数の種類は、電子スオーム実験の種類によって異なる。よって、多種類の電子輸送係数を一つの実験で正確に決定できる方法が望まれる。

本稿では、PINNsによる交流電界下のボルツマン方程式解析ならびに電子スオーム実験の一種である Scanning drift tube 実験で測定されたデータから PINNs を用いて多種類の電子輸送係数を決定する方法について紹介する。

## 2. PINNs による交流電界下のボルツマン方程式解析

### 2.1 計算方法

空間的に一様かつ時間周期が  $T$  である交流電界  $\mathbf{E}(t) = (0, 0, E(t))$  が印加された自由空間における時間周期的に定常な EVDF を PINNs によって求める方法を考える。電界の対称性より、EVDF は電界方向に対して軸対称であると考えられるため、2次元の速度空間を考える。時間周期的に定常な EVDF は電子数密度  $n(t)$  および規格化された EVDF  $f(v_x, v_z, t)$  の積によって表されると考えられる[11]。

$$G(v_x, v_z, t) = n(t)f(v_x, v_z, t) \quad (1)$$

ただし、

$$C = 2\pi \int_{\mathbf{v}} f(v_x, v_z, t) d\mathbf{v} = 1 \quad (2)$$

$$f(v_x, v_z, t) = f(v_x, v_z, t + T) \quad (3)$$

$f(v_x, v_z, t)$  は次のボルツマン方程式を満たす。

$$\left( \frac{qE(t)}{m} \frac{\partial}{\partial v_z} + \bar{R}_l(t) + \frac{\partial}{\partial t} - J_c \right) f(v_x, v_z, t) = 0 \quad (4)$$

ここで、 $q$  は電子の電荷量、 $m$  は電子質量、 $\bar{R}_l(t)$  は実効電離衝突周波数、 $J_c f(v_x, v_z, t)$  は衝突項を表す。以後、(4)式を  $\hat{L}_{\text{beq}} f(v_x, v_z, t) = 0$  と表記する。

図1は PINNs によって、(4)式を満たす EVDF を求める手順を示す。まず、EVDF を ANN によって表現する。この ANN は Wang et al. [12] が提案したフィードフォワードニューラルネットワークをベースとしており、Periodic Layer [13] を導入している。Periodic Layer を用いることで、任意の周期性を ANN の出力値に与えることができる。ここでは、学習に依らず ANN の出力値  $f(v_{x,i}, v_{z,i}, t_i; \theta)$  が周期的境界条件[(3)式]を満たすようにする。 $\theta$  は ANN 内の調整可能なパラメータを表す。

点  $(v_{x,i}, v_{z,i}, t_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) をランダムにサンプリングする。各点において(4)式の左辺  $\hat{L}_{\text{beq}} f(v_{x,i}, v_{z,i}, t_i)$  を計算し、それらの絶対値の平均値を計算する[(5)式]。(4)式中に現れる偏導関数は自動微分によって正確に計算できる。

$$\mathcal{L}_{\text{beq}}(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{L}_{\text{beq}} f(v_{x,i}, v_{z,i}, t_i; \theta)| \quad (5)$$

ANN の出力値があらゆる点でボルツマン方程式

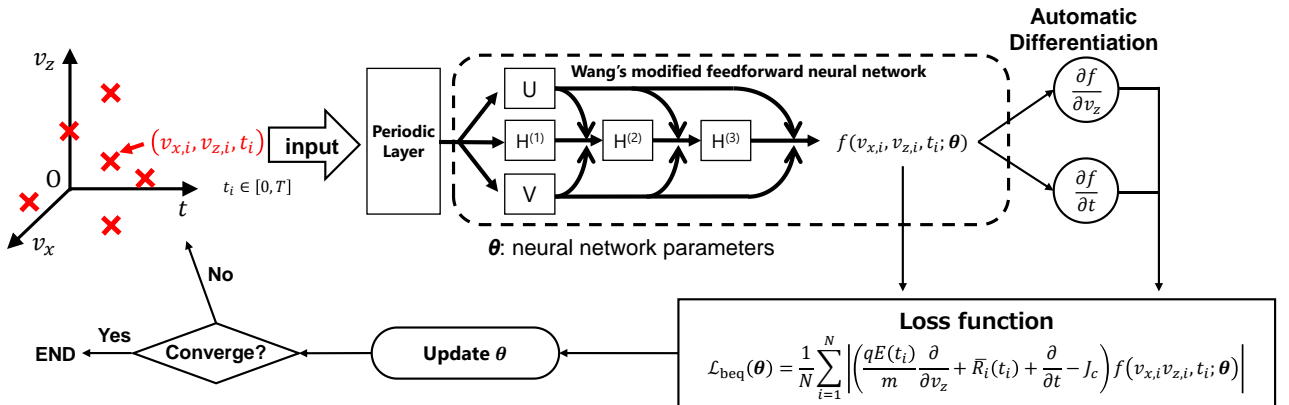


図1 PINNs による AC 電界下のボルツマン方程式解析

を満たすならば、 $\mathcal{L}_{\text{beq}}(\boldsymbol{\theta}) = 0$ となる。よって、 $\mathcal{L}_{\text{beq}}(\boldsymbol{\theta})$ の値が最小となるように $\boldsymbol{\theta}$ を最適化できれば、ボルツマン方程式を満たす関数(EVDF)をANNに表現させることができる。以上より、ボルツマン方程式を解く問題は、 $\boldsymbol{\theta}$ の最適化問題に置換された。

## 2.2 計算条件

換算電界 $E(t)/N$ を次のように設定する。

$$E(t)/N = E_m/N \cos(2\pi ft) \quad (6)$$

$N$ は気体分子数密度を表す。 $E_m/N$ を 250 Td (1 Td =  $10^{-21}$  Vm<sup>2</sup>)とし、電界周波数 $f$ を 10 MHz とする。

雰囲気ガスを SF<sub>6</sub>とし、Itoh et al.[14]の電子衝突断面積セットを使用する。

ANN については、中間層の層数を 3 層、各層のニューロン数を 100 とする。中間層および出力層の活性化関数を Mish 関数[15]および Softplus 関数とする。学習アルゴリズムに Adam を使用し、初期学習率を  $10^{-3}$  として、5000 回学習毎に減衰させる。

## 2.3 計算結果

図 2 は学習後の ANN により得られた EVDF および EEDF  $f(\varepsilon)$ を示す。比較のためにモンテカル

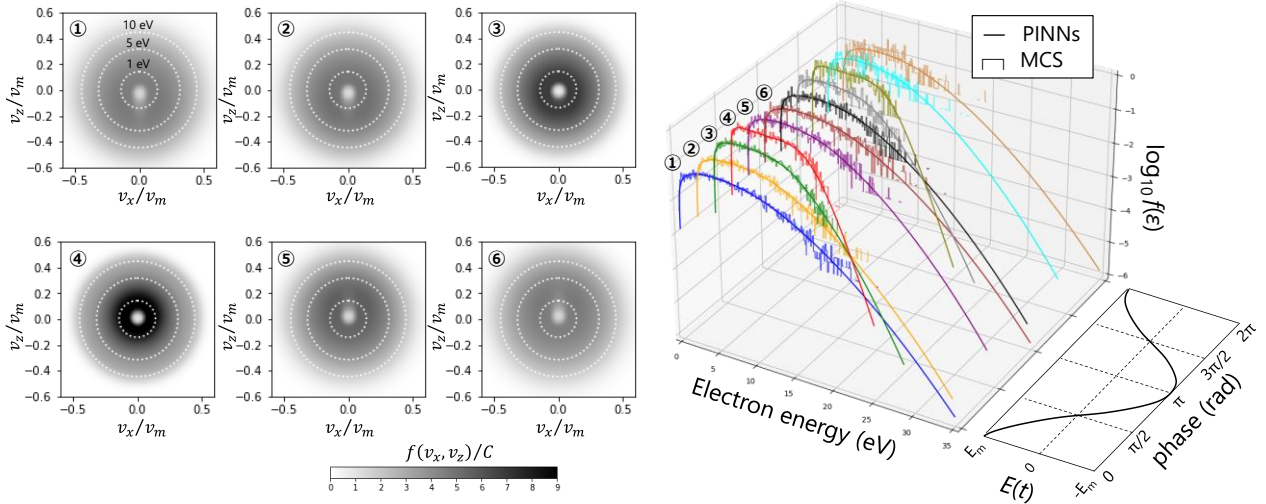


図 2 EVDF および EEDF の計算結果(SF<sub>6</sub>,  $E_m/N = 250$  Td,  $f = 10$  MHz,  $v_m = 4.2 \times 10^6$  m/s)

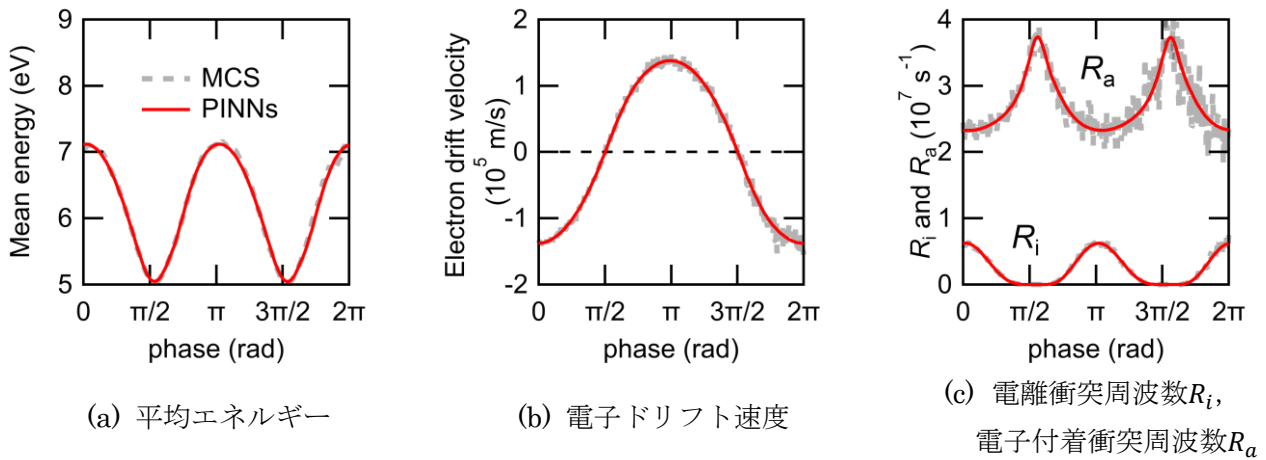


図 3 SF<sub>6</sub> ガス中の電子輸送係数

ロシミュレーション(MCS : Monte Carlo simulation)による EEDF の計算結果を併せて示している。PINNs によって得られた EEDF は MCS による計算値と一致しており、PINNs によって得られた EVDF の妥当性が確認できる。電子付着による電子数減少のため、MCS の計算結果には統計変動がみられるが、PINNs では滑らかな EEDF が得られている。 $\varepsilon < 1$  eV の低エネルギー領域において、EVDF が低い値になっている。 $\text{SF}_6$  は低エネルギー領域において大きな電子付着断面積を有する分子であり、 $\text{SF}_6$  への電子付着によって低エネルギー電子の多くが消失し、EVDF の値が低下したと考えられる。

図 3 は PINNs および MCS によって得られた電子ドリフト速度、電子の平均エネルギー、電離衝突レート係数、電子付着レート係数を示す。PINNs によって得られた電子輸送係数、レート係数は MCS による計算値と一致しており、電子輸送係数の観点からも PINNs によって正確に EVDF を計算できることが確認できる。

### 3. PINNs による連続の式の発見と電子輸送係数測定への応用

#### 3.1 Scanning drift tube 実験および理論

近年、Z. Donkó らの研究グループは、直流電界が印加されたドリフトチューブ中に生成した孤立電子スオームの電子数密度  $n(t, z)$  の相対値を高時空間分解能で測定している [16, 17]。  $n(t, z)$  の相対値は電子スオームマップと呼ばれる。彼らは、雰囲気ガスを合成空気、 $\text{D}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{Ar}$ , [17] および炭化水素 ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ) [18] として、様々な  $E/N$  における電子スオームマップを測定し、電子スオームマップから各種ガスの電子ドリフト速度、縦方向拡散係数、電離係数などの電子輸送係数を決定している。

$n(t, z)$  の時空間進展は以下に示す 2 種類の電子

数密度連続の式 [19] に従うと考えられる。

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} - \bar{R}_i + W_r \frac{\partial}{\partial z} - D_L \frac{\partial}{\partial z^2} + Q_L \frac{\partial}{\partial z^3} - \dots \right) n(t, z) = 0 \quad (7)$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial z} - \alpha_T + W_m^{-1} \frac{\partial}{\partial t} - \alpha_2 \frac{\partial}{\partial t^2} + \alpha_3 \frac{\partial}{\partial t^3} - \dots \right) n(t, z) = 0 \quad (8)$$

以後、(7)式および(8)式を  $\hat{L}_\omega n(t, z)$  および  $\hat{L}_\alpha n(t, z)$  と表記する。電子数密度連続の式に現れる各係数は、それぞれ電子輸送係数を表している。 $W_r$  は重心の位置のドリフト速度、 $D_L$  は縦方向拡散係数、 $Q_L$  は縦方向の 3 次の係数、 $\alpha_T$  は実効電離係数、 $W_m$  は平均到着時間ドリフト速度、 $\alpha_2$  は 2 次の  $\alpha$  パラメータ、 $\alpha_3$  は 3 次の  $\alpha$  パラメータである。(7)式および(8)式が電子スオームマップの測定値を表現できるように、電子数密度連続の式に現れる各係数を最適化することで、一つの電子スオームマップから多種類の電子輸送係数を決定できると考えられる。このような考えに基づく電子輸送係数の決定を、PINNs を利用して行う方法について紹介する [20]。

図 4 は PINNs によって電子スオームマップから(7)式を発見する手順を示す。ANN を用いて電子スオームマップを表現する。電子スオームマップの測定点から、 $N$  点の  $(t_i, z_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) をランダムにサンプリングする。各点において ANN の出力値  $n(t_i, z_i; \theta)$  を計算し、実験値  $n_i = n(t_i, z_i)$  との差の絶対値平均を計算する。

$$\mathcal{L}_d(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |n(t_i, z_i; \theta) - n_i| \quad (9)$$

ANN が電子スオームマップの実験値を表現しているならば、この値は非常に小さくなる。よって、 $\mathcal{L}_d(\theta)$  が小さくなるように  $\theta$  を更新することで、電子スオームマップを学習できる。これは、通常の教師あり学習と同じである。

さらに、 $n(t_i, z_i; \theta)$  を用いて、(7)式の左辺

$\hat{L}_\omega n(t_i, z_i; \theta)$ を計算し、それらの絶対値の平均値を計算する。ここでは、(7)式の左辺第4項以降は十分に小さいとみなして考慮しない。

$$\mathcal{L}_\omega(\theta, \bar{R}_i, W_r, D_L, Q_L) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{L}_\omega n(t_i, z_i; \theta)| \quad (10)$$

ここで、(7)式に現れる係数 $\bar{R}_i, W_r, D_L, Q_L$ を調整可能なパラメータとして取り扱う。 $\mathcal{L}_\omega(\theta, \bar{R}_i, W_r, D_L, Q_L)$ が十分小さな値であるとき、ANNが表現する電子スオームマップは(7)式を満たし、係数 $\bar{R}_i, W_r, D_L, Q_L$ は電子スオームマップと矛盾しない値であると考えられる。

以上より、 $\mathcal{L}_d(\theta)$ と $\mathcal{L}_\omega(\theta, \bar{R}_i, W_r, D_L, Q_L)$ の和[(11)式]が最小となるように、 $\theta$ および $\bar{R}_i, W_r, D_L, Q_L$ を最

適化することで、電子スオームマップを表現するANNの学習と電子輸送係数の決定ができる。

$$\mathcal{L}(\theta, \bar{R}_i, W_r, D_L, Q_L) = w_r \mathcal{L}_\omega(\theta, \bar{R}_i, W_r, D_L, Q_L) + w_d \mathcal{L}_d(\theta) \quad (11)$$

$w_r$ および $w_d$ は重み係数であり、ここでは $w_r = 1, w_d = 100$ とした。(10)式において、 $\hat{L}_\omega n(t_i, z_i; \theta)$ の代わりに、 $\hat{L}_\alpha n(t_i, z_i; \theta)$ を計算し、 $\alpha_T, W_m, \alpha_2, \alpha_3$ を調整可能なパラメータとして最適化することで、(8)式に関する電子輸送係数を決定できる。

### 3.2 使用データおよび計算条件

Korolov et al. [17]が測定したArガス中の電子スオームマップを使用する。

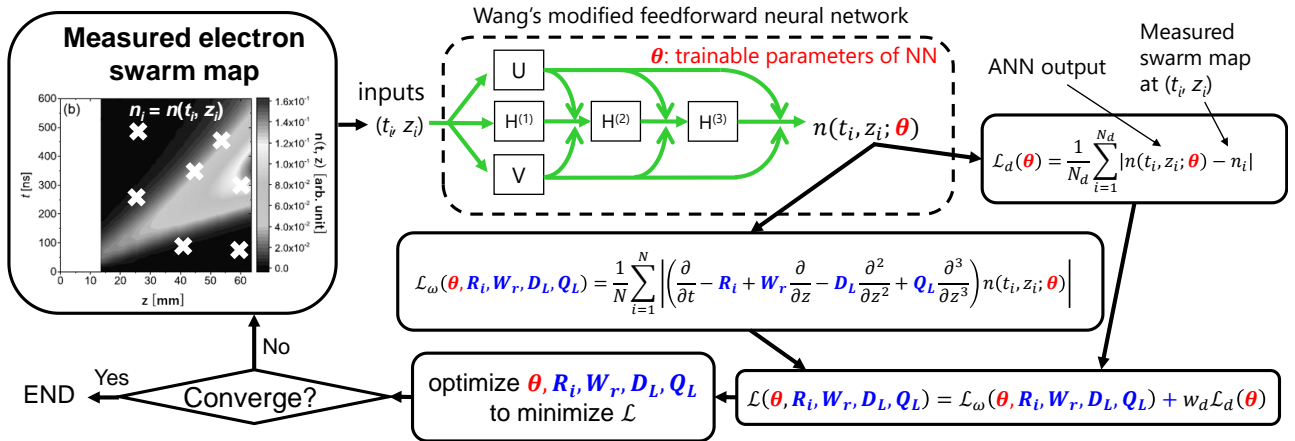


図4 PINNsによる電子数密度連続の式の発見

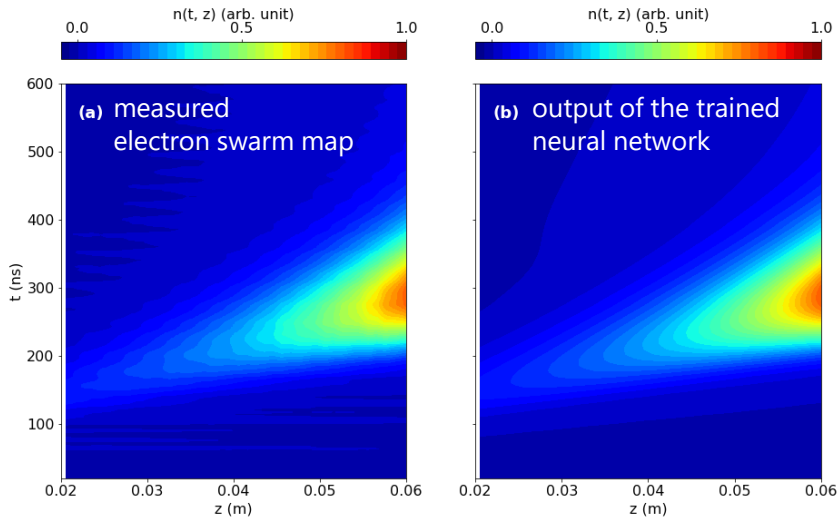


図5 電子スオームマップの学習結果( $E/N = 438$  Td)

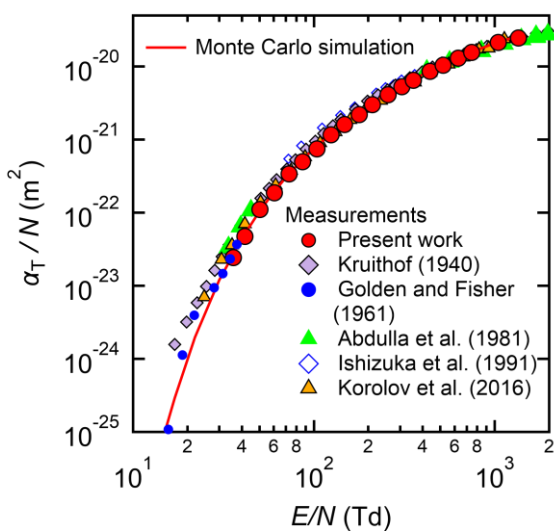
ANN については、中間層の層数を 4 層とし、各層のニューロン数を 50 とする。中間層および出力層の活性化関数を  $\tanh$  関数および恒等関数とする。学習アルゴリズムに Adam を使用する。

### 3.3 Ar ガス中の電子輸送係数

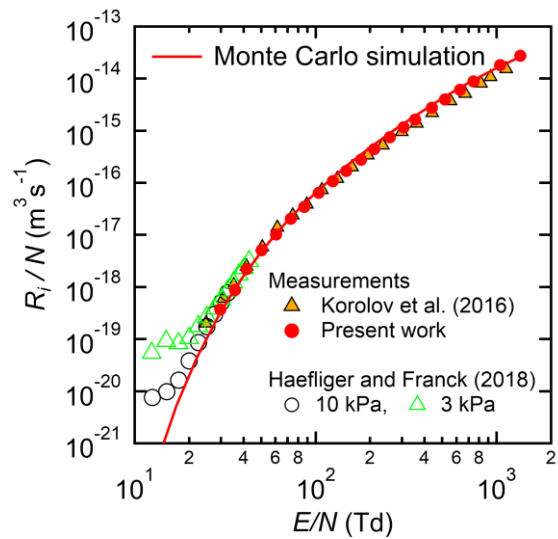
図 5 は  $E/N = 438$  Td における電子スオームマップの実験値および学習後の ANN の出力値を示す。ANN が電子スオームマップの実験値を学習

できていることが確認できる。

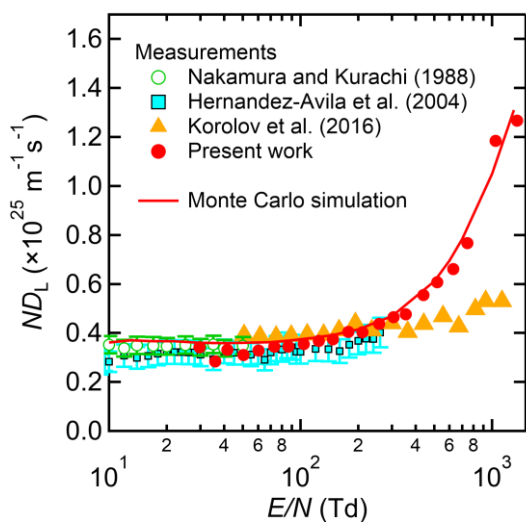
図 6(a)および図 6(b)は提案方法によって決定した Ar ガス中の電離係数  $\alpha_T/N$  と電離衝突レート係数  $R_i/N$  を、従来の実験値[17, 21-25]およびモンテカルロ法による計算結果と併せて示す。計算においては, Yanguas-Gil et al. [26]の電子衝突断面積セットを使用した。PINNs による決定値は従来の実験値および MCS による計算値と非常によく一致している。



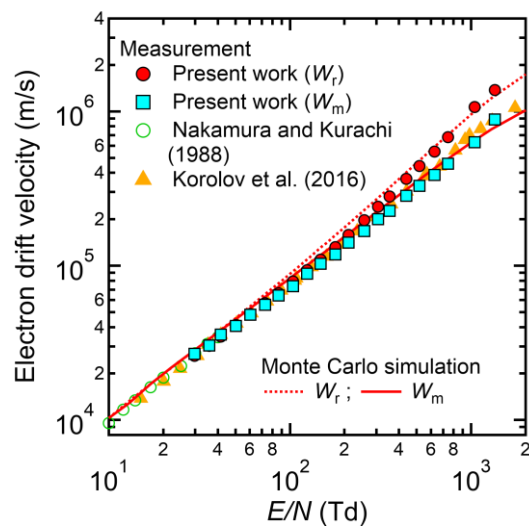
(a) 電離係数



(b) 電離衝突レート係数



(c) 縦方向拡散係数



(d) 電子ドリフト速度

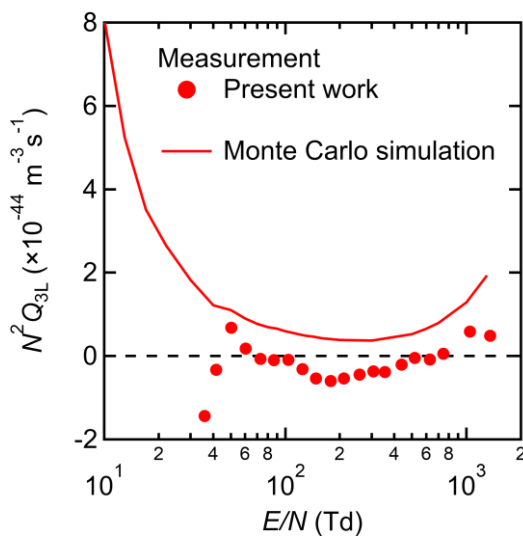
図 6 Ar ガスの電子輸送係数

図 6(c)は提案方法によって決定した Ar ガス中の縦方向拡散係数 $ND_L$ を従来の実験値[17, 27, 28]および MCS による計算値と併せて示す。PINNs による決定値は $E/N$ が 300 Td 以下の範囲においては従来の実験値とよく一致した。PINNs による決定値は MCS による計算値に近い値となっているが、 $E/N$ が高くなるに従い、Korolov et al.の実験値よりも高い値となった。Korolov et al.は、(7)

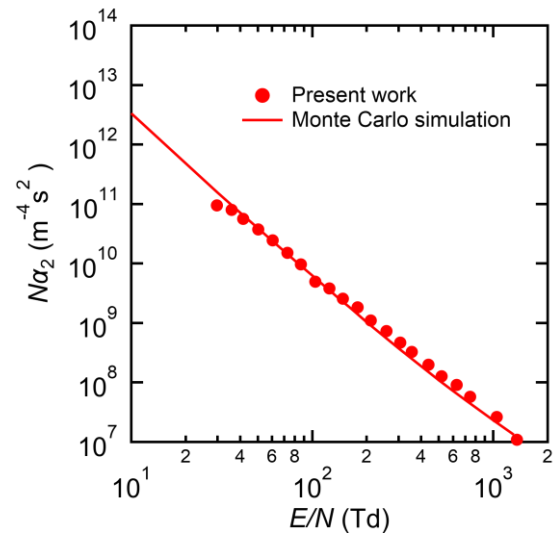
式の左辺第 3 項以降を無視した際に得られる解析解の一つ[(12)式]を電子スオームマップの実験値に当てはめることで電子輸送係数を決定している。

$$n(t, z) = \frac{n_0}{\sqrt{4\pi D_L t}} \exp\left[\bar{R}_i t - \frac{(z - W_r t)^2}{4D_L t}\right] \quad (12)$$

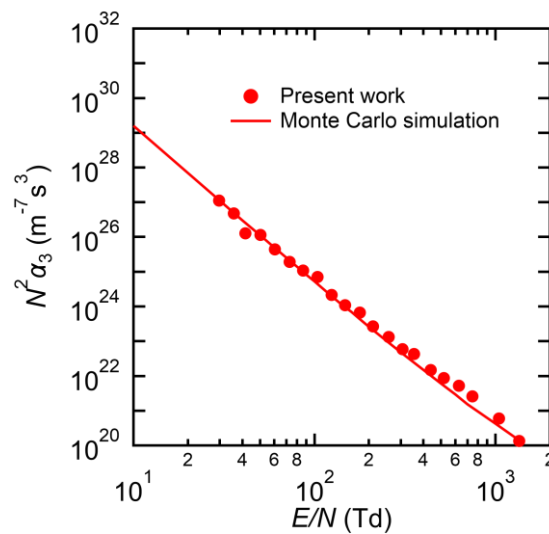
PINNs および MCS によって得られた $ND_L$ と Korolov et al.の実験値に見られる差は、 $E/N$ が高くなるに従って、電子スオームマップから電子輸



(a) 縦方向 3 次の係数



(b) 2 次の  $\alpha$  パラメータ



(c) 3 次の  $\alpha$  パラメータ

図 7 本研究で決定した Ar ガスの新たな電子輸送係数

送係数を正確に決定するためには、(12)式では考慮していない高次の項の考慮が必要となることを示唆している。

図 6(d)は提案方法によって決定した Ar ガス中の電子ドリフト速度を従来の実験値[17, 27, 28]および MCS による計算値と併せて示す。提案方法を用いると、2 種類の電子ドリフト速度を決定することができる。PINNs による $W_m$ および $W_r$ の決定値は、低 $E/N$ においては一致しており、 $E/N$ が高くなるに従い、 $W_m$ が $W_r$ よりも低い値となり、その傾向は MCS の計算値と一致している。ここで、 $W_r$ と $W_m$ の関係は次のように表される[19]。

$$W_m = W_r - 2\alpha_T D_L + 3(\alpha_T)^2 Q_L - \dots \quad (13)$$

$Q_L$ などの高次の係数は値が非常に小さく、右辺第 2 項が $W_m$ と $W_r$ の大小関係に大きな影響を与えると考えられる。図 6(a)および図 6(e)に示すとおり、 $\alpha_T/N$ および $ND_L$ の値は $E/N$ に対して増加するため、 $E/N$ が高くなるにしたがって $W_m$ は $W_r$ よりも低くなる。なお、(12)式が妥当であるならば、Korolov et al.の実験値は $W_r$ に相当するが、PINNs による $W_m$ の決定値に近い値となっており、(12)式では電子スオームマップを正確に表現できないことを示唆している。

図 7 は提案方法によって決定した Ar ガス中の縦方向 3 次の係数 $N^2 Q_L$ 、2 次の $\alpha$ パラメータ $N\alpha_2$ 、3 次の $\alpha$ パラメータ $N^2\alpha_3$ を、MCS による計算結果と併せて示す。Ar ガス中におけるこれらの電子輸送係数を実験的に決定した例は、本研究が初めてである。本研究による $N^2 Q_L$ については、低 $E/N$ における数点を除き、 $E/N$ に対する決定された値の傾向は計算値の傾向と似ている。 $N\alpha_2$ および $N^2\alpha_3$ については、決定した値と MCS による計算値が非常によく一致した。

#### 4. おわりに

本稿では、PINNs による交流電界下のボルツマ

ン方程式解析ならびに電子スオーム実験の一種である Scanning drift tube 実験で測定された電子スオームマップから PINNs を用いて多種類の電子輸送係数を決定する方法について紹介した。なお、PINNs によるボルツマン方程式解析については、直流電界下および直流電界+直流磁界下における EVDF や EEDF に関しても、PINNs を用いて正確に計算できることを確認している[29, 30]。

PINNs を利用すると、データと微分方程式を組み合わせて未知のパラメータなどを推定することが可能であり、今後、プラズマ診断などへの応用も期待される。

#### 謝辞

本研究は東京エレクトロンテクノロジーソリューションズ株式会社の支援および JSPS 科研費 JP22K14245 の助成を受けて行われた。本研究で使用した電子スオームマップは、Dr. Z. Donkó (Wigner Research Centre for Physics), Dr. I. Korolov and Dr. M. Vass (Ruhr-University Bochum)より提供いただきました。

#### 参考文献

- [1] M. Raissi, P. Perdikaris, and G. E. Karniadakis ; J. Comput. Phys. 378 (2019) 686.
- [2] N. Zobeiry and K. D. Humfeld ; Eng. Appl. Artif. Intell. 101 (2021) 104232.
- [3] X. Jin, S. Cai, H. Li, and G. E. Karniadakis ; J. Comput. Phys. 426 (2021) 109951.
- [4] Y. Takehara, Y. Okano, S. Dost ; J. Chem. Eng. Japan, 56 (2023) 2236656.
- [5] 藤田 ; 信学論(C), J107-C (2024) 250.
- [6] L. Zhong, B. Wu, and Y. Wang ; Phys. Fluid 34 (2022) 087116.
- [7] S. Cai, Z. Wang, F. Fuest, Y. J. Jeon, C. Gray,



- and G. E. Karniadakis ; *J. Fluid Mech.* 915 (2021) A102.
- [8] 渡邊, 長谷川 ; “Physics-informed neural networks を用いた新たな形状最適化フレームワーク”, 日本流体力学会年会 (2022).
- [9] 渡邊, 長谷川 ; “PINNs を用いた円柱周り流れにおける抵抗低減及び伝熱促進のための形状最適化”, 第 37 回数値流体力学シンポジウム (2023).
- [10] 佐藤 ; *応用物理*, 89 (2020) 253.
- [11] T. Makabe and Z. Lj. Petrovic ; “Plasma Electronics”, (CRC Press, loc, 2015) Chap. 5.
- [12] S. Wang, Y. Teng, and P. Perdikaris ; *SIAM J. Sci. Comput.* 43 (2021) A3055.
- [13] S. Dong and N. Ni ; *J. Comput. Phys.* 435 (2021) 110242.
- [14] H. Itoh, T. Matsumura, K. Satoh, H. Date, Y. Nakao, and H. Tagashira ; *J. Phys. D: Appl. Phys.* 26 (1993) 1975.
- [15] D. Misra ; *arXiv:1908.08681* (2020).
- [16] I. Korolov, M. Vass, N. Kh. Bastykova, and Z. Donkó ; *Rev. Sci. Instrum.* 87 (2016) 063102.
- [17] I. Korolov, M. Vass, and Z. Donkó ; *J. Phys. D: Appl. Phys.* 49 (2016) 415203.
- [18] N. R. Pinhão, D. Loffhagen, M. Vass, P. Hartmann, I. Korolov, S. Dujko, D. Bošnjaković, and Z. Donkó ; *Plasma Sources Sci. Technol.* 29 (2020) 045009.
- [19] K. Kondo and H. Tagashira ; *J. Phys. D: Appl. Phys.* 23 (1990) 1175.
- [20] S. Kawaguchi, K. Takahashi, and K. Satoh ; *J. Phys. D: Appl. Phys.* 56, 244003 (2023).
- [21] A. A. Kruithof ; *Physica* 7 (1940) 519.
- [22] D. E. Golden and L. H. Fisher ; *Phys. Rev.* 123 (1961) 1079.
- [23] R. R. Abdulla, J. Dutton, and A. W. Williams ; “Ionization coefficients in Argon”, *Proc. 15th Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases*, pp. 367-368.
- [24] F. Ishizuka, M. Shimozuma, K. Kitamori, and H. Tagashira ; *電学論 A*, 111 (1991) 175.
- [25] P. Haefliger and C. M. Franck ; *Rev. Sci. Instrum.* 89 (2018) 023114.
- [26] Á. Yanguas-Gil, J. Cotrino and L. L. Alves ; *J. Phys. D: Appl. Phys.* 38 (2005) 1588.
- [27] Y. Nakamura and M. Kurachi ; *J. Phys. D: Appl. Phys.* 21 (1988) 718.
- [28] J. L. Hernández-Ávila, E. Basurto and J. de Urquijo ; *J. Phys. D: Appl. Phys.* 37 (2004) 3088.
- [29] S. Kawaguchi, K. Takahashi, H. Ohkama, and K. Satoh ; *Plasma Sources Sci. Technol.* 29 (2020) 025021.
- [30] S. Kawaguchi and T. Murakami ; *Jpn. J. Appl. Phys.* 61 (2022) 086002.

## プラズマ生成原子状水素による低温 CO<sub>2</sub> メタネーションの促進

東京科学大学 金 大永

### はじめに

この度は、第 56 回 (2024 春季) 応用物理学会講演奨励賞という名誉ある賞を授与していただき、大変光栄に存じます。この場を借りてプラズマエレクトロニクス分科会関係者の皆様に心より感謝申し上げます。本稿では、受賞対象となった見出しの研究内容についてご紹介させていただきます。

### 研究背景

近年、プラズマ触媒と称される非平衡プラズマと触媒を組み合わせた複合反応は、電気化学触媒および光触媒に次ぐ化学プロセスの電化を推進できる新しい低炭素技術として注目を集めている [1, 2]。プラズマ触媒が多くの関心を集めている主な理由は、非平衡プラズマを触媒に作用させることで発現する相乗効果である。相乗効果とは、律速反応に対する活性化エネルギーがプラズマによって明確に低下する現象を指しており、分子の励起エネルギーよりも 1 桁以上大きなエネルギー障壁の低下をもたらす反応を低温で促進させる現象である。これまでに、プラズマ触媒反応に関して多くの論文が報告されているが、そのほとんどは現象論的な理解にとどまっており、非平衡プラズマと触媒の相互作用は十分に理解されていない。プラズマ触媒に使用されるテーラーメイド触媒の合理的設計のためには、プラズマ気相および/または触媒表面でのプラズマ活性種挙動、すなわち反応機構に対する科学的な理解と、演繹的な考察に基づき、プラズマおよび触媒表面における吸着種の挙動、すなわち反応機構に対して科学的に理解する必要がある。本研究では、熱およびプラズマ条

件で Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (非貴金属触媒) に対する CO<sub>2</sub> メタネーション ( $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\Delta H_{298\text{K}} = -165 \text{ kJ mol}^{-1}$ ) の比較研究を実施し、プラズマ条件で CH<sub>4</sub> 収率を大きく向上できるとともに反応機構を解明した。そのために、速度論的解釈、*in situ* プラズマ触媒反応分析および DFT 計算を行った。

### 結果と考察

Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に対する CO<sub>2</sub> メタネーション性能は、固定層電体バリア放電 (Dielectric Barrier Discharge: DBD) 反応器で評価された (図 1)。

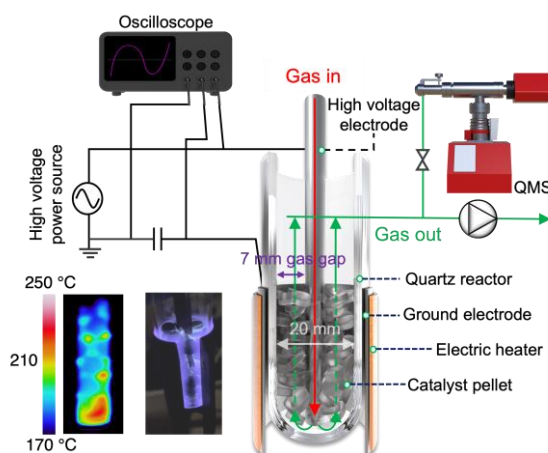


図 1 固定層 DBD 反応器および実験装置の概

図 2a は Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に対する CO<sub>2</sub> 転換率を示す。列条件に比べ、DBD 条件における CO<sub>2</sub> 転換率は 300 °C 以下の低い温度で促進されるとともに、>98% の高い CH<sub>4</sub> 選択度を維持する (図 2b)。プラズマによって促進された触媒活性をより理解するため、熱および DBD 条件で CO<sub>2</sub> および H<sub>2</sub> の反応次数を決定した。熱条件の場合、CO<sub>2</sub> および

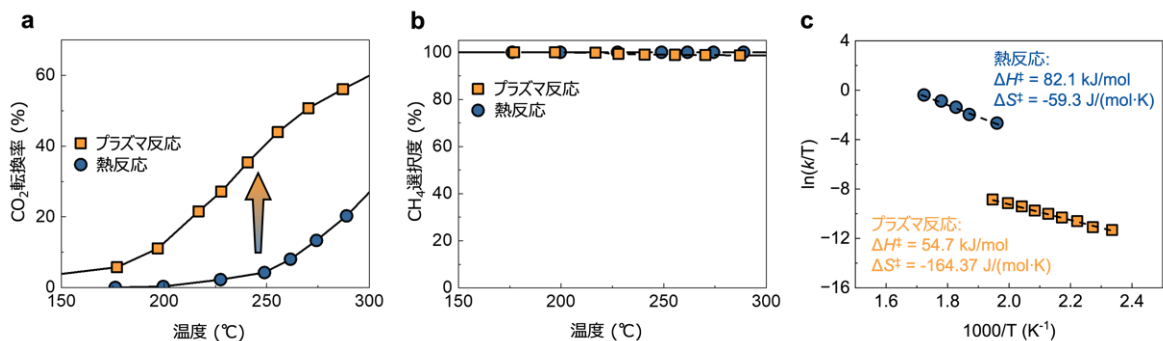


図2 (a) CO<sub>2</sub> 転換率. (b) CH<sub>4</sub> 選択率. (c) アイリングプロット.  $k$ : 反応速度定数,  $T$ : 触媒温度.

H<sub>2</sub> の反応次数はそれぞれ 0.27 および 0.31 で、両方とも 0 次依存性を示し、熱条件において CO<sub>2</sub> メタネーションは Langmuir–Hinshelwood (L–H) 反応を通じて進行されることを示唆する[3]。一方、DBD 条件での CO<sub>2</sub> 反応次数は 0.06 として 0 により近づく、これはプラズマによって活性化された CO<sub>2</sub> が触媒表面により早く吸着されることを示す[4]。DBD 条件における H<sub>2</sub> の反応次数は 1.27 で、一次依存性を示した。熱条件と比較して H<sub>2</sub> の反応次数の差はプラズマによって活性化された H<sub>2</sub> が CO<sub>2</sub> メタネーションを促進するのに骨子であることを示唆する。一方、プラズマで電子衝突を通じた水素の分解で原子状水素は簡単に生成でき、プラズマによって活性化された水素の中で最も豊富な活性種である[5]。したがって、プラズマ条件で触媒表面が CO<sub>2</sub> から由来した吸着された中間体で覆われており、これらと原子状水素の直接反応 (Eley–Rideal: E–R 反応) を通じて CH<sub>4</sub> が形成されると解釈することができる。この場合、CH<sub>4</sub> 生成の反応速度は H<sub>2</sub> 分圧に比例し、H<sub>2</sub> の反応次数が 1 に近い場合がある。図 2b はアイリングプロットを示し、これにより遷移状態にある中間生成物に対する活性化パラメータを推定した。活性化エンタルピー ( $\Delta H^\ddagger$ ) と活性化エントロピー ( $\Delta S^\ddagger$ ) は DBD 条件で顕著に低下した。特に、 $\Delta S^\ddagger$  が大幅に減少するのは、反応律速段階が大き

なエントロピー低下を伴う反応経路に変更されたことを示し、フリーラジカルとしての原子状水素が有する高い運動自由度が触媒表面で中間体と直接反応することで失われることを示唆する。すなわち、熱条件と比較してプラズマ生成原子状水素が低い活性化障壁を有する新しい反応経路を創出し、低温で CO<sub>2</sub> メタネーションを大きく促進させるものと解釈できる。

さらに、*in situ* 赤外吸収分光を用いて (図 3) 反応の中間体を識別し、それらの反応性を厳密に調査した。その結果、b-HCOO\* (\*は表面吸着を意味する) が CO<sub>2</sub> メタネーションの主要中間体であり、プラズマ調査によって b-HCOO\* が CH<sub>4</sub> に

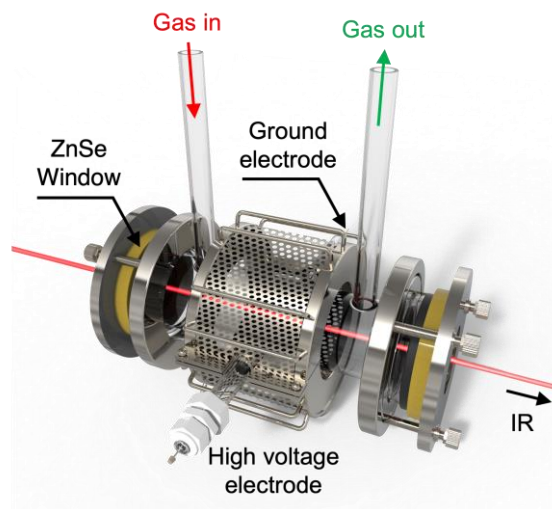


図3 固定層 DBD 反応器および実験装置の概略.

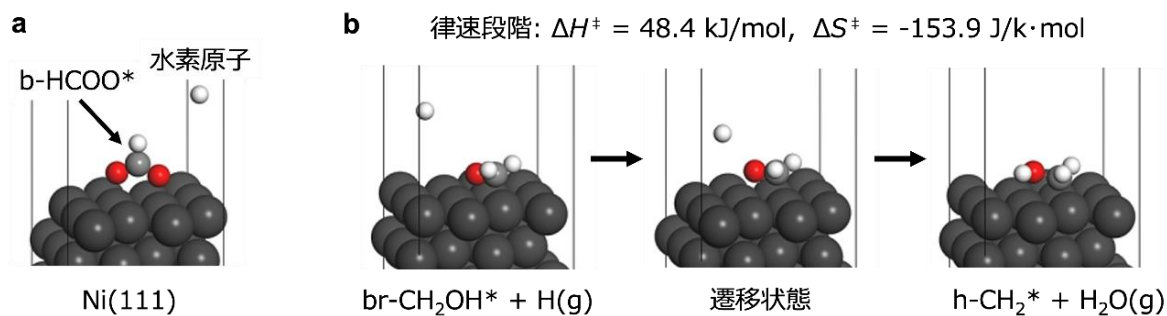


図4 (a) 計算に使用したモデル. (b) 律速反応. br: bridge, h: hollow.

転換される反応が促進されることを明らかにした。実験的観察に基づき、Ni (111) に吸着された b-HCOO\* に対して原子上水素を攻撃することで E-R 反応に対する DFT 計算を行った (図 4a)。b-HCOO\* から CH<sub>4</sub> に至るまで 8 つの反応過程があり、最も高い  $\Delta H^\ddagger$  (48.4 kJ/mol) は br-CH<sub>2</sub>OH\* の h-CH<sub>2</sub>\* への脱水酸化から現れた (図 4b)。この段階で大きな負の  $\Delta S^\ddagger$  (-153.9 J/K·mol) を示したが、これは気体状態で存在する原子状水素のエントロピー損失に起因する。この段階で計算された  $\Delta H^\ddagger$  および  $\Delta S^\ddagger$  は、アイリングプロットで推定した実験値 (図 2c) とよく一致し、原子状水素が E-R 反応によって律速反応のエネルギー障壁を低くしていることを明らかにした。

## おわりに

本稿では、CO<sub>2</sub> メタネーションでプラズマ生成原子状水素の役割を強調し、その重要性を示している。フィッシャー・トロプシュ法による炭化水素の合成やハーバー・ボッシュ法によるアンモニア合成などの反応において、水素の活性化は長年研究されてきた。触媒反応における水素化段階は、触媒 (金属) 表面における水素分子の化学吸着を経て生成された原子状水素によって行われる [6]。この過程で原子上水素は吸着すれば安定化して反応性が低下し、触媒上を 2 次元的に動くようになるため、本来水素が有る高い反応活性を十分に生かすことができず、高温が必要だという欠点があ

る。本稿で立証したプラズマ生成原子状水素の低温反応性と非金属触媒に対する知見は、効率的で費用合理的な触媒開発の糸口と原子上水素を反応ガスとして使用する多様な応用分野の展開が期待できる。

## 謝辞

本研究は、JST CREST (JPMJCR19R3) および科研費 (24K17036, 24H00199) の支援を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] T Nozaki, D-Y Kim, X Chen; *Jpn J Appl Phys*, **63** (2024), 12pp.
- [2] A Bogaerts, X Tu, JC Whitehead, G Centi, L Lefferts, O Guaitella, F Azzolina-Jury, H-H Kim, AB Murphy, WF Scheneider; *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **53** (2020), 443001.
- [3] F Koschany, D Schlereth, O Hinrichsen; *Appl. Catal. B*, **181** (2016), 504.
- [4] D-Y Kim, H Ham, X Chen, S Liu, H Xu, B Lu, S Furukawa, H-H Kim, S Takakusagi, K Sasaki, T Nozaki; *J. Am. Chem. Soc.*, **144** (2022), 14140.
- [5] Z Wang, Y Zhang, EC Neyts, X Cao, X Zhang, B Jang, C-J Liu; *ACS Catal.*, **8** (2018), 2093.
- [6] M Xiong, Z Gao, Y Qin; *ACS Catal.*, **11** (2021), 3159.

## 第 22 回プラズマエレクトロニクス賞

### プラズマエレクトロニクス賞を受賞して

ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社  
久保井 信行

#### 【はじめに】

第 22 回プラズマエレクトロニクス賞を論文「Modeling and simulation of coverage and film properties in deposition process on large-scale pattern using statistical ensemble method」[1]に賜りましたこと、共著者共々、大変光栄に存じます。ご推薦・ご選考していただいた委員の先生方に対しましては、深く感謝申し上げます。今後も応用物理の発展に貢献できればと考えております。本論文の内容は、DPS2022 口頭発表したのですが、掲載後は、AVS2023 招待講演としても報告しております。以下に、本受賞論文の研究背景と概要について紹介させていただきます。

#### 【論文内容】

近年では、CMOS デバイスは、超微細化路線から、FinFET や GAA といったより複雑な 3D 構造に進化してきています。このような状況下では、高アスペクト比での成膜プロセスの高度な制御が重要になってきます。それに加えて、従来の CMOS に有機 EL を積層した VR ゴーグルやディスプレイといったデバイスの需要も強まっており、封止膜としての SiN 膜の重要性が高まっています。よって、低温でも良いカバレッジと膜質（膜密度、透水性、密着性）を両立する SiN 成膜の理解が不可欠です。ただ、高アスペクト比パターンでの膜質の実測は困難であるため、我々は、実パターンにおけるカバレッジと膜質を予測できるシミュレーション技術を開発しました。

これまでの膜質シミュレーションでは、分子動

力学計算が使われてきましたが、半導体製造での実パターン（100 nm オーダー）に対して、現実的時間内での計算領域が狭い（数 nm）こと、実プロセスの時系列を追えないことが課題としてありました。そこで、数千の原子を 1 つの Voxel（結合状態は平均化）として見立て、この Voxel 同士の相互作用を解くことをモデルの基本コンセプトにしました（図 1）。

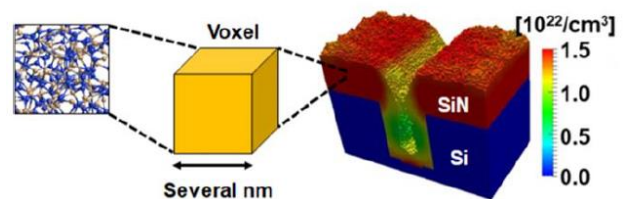


図 1：本モデルのコンセプト

図 2 に成膜表面反応モデルの概要を示します。

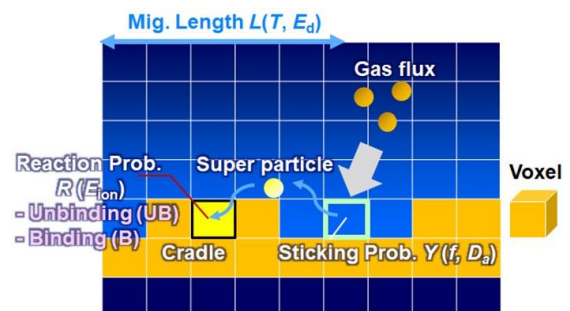


図 2：成膜表面反応のモデル

モデルでは、入射するガスフラックスと想定される平均膜密度から超粒子数（数 10 個）を計算し、この各超粒子に対して、基板温度と活性化エネルギーで規定されるマイグレーション長内でポテンシャルの安定している凹局所形状を検索し、そこ

に超粒子を移動させます。そこで確率的に、結合状態 (B) か未結合状態 (UB) かを判断させ、Voxel として可視化させます。特に、下地に接する Voxel は、下地のダメージ量に応じて確率判定の閾値を変化させています。以上を時間ステップ内で繰り返すことで、膜形成が進むことになります。

結合状態の判定時には、表面 Voxel でのイオンエネルギーも考慮して、B/UB を判定する閾値を変化させます。これにより、イオン入射量による膜質変化を表現しています (図 3)。

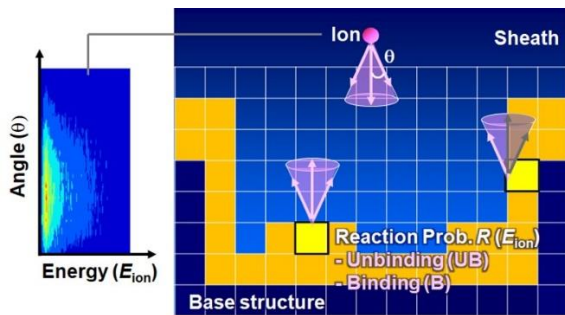


図 3: 結合状態判定での入射イオンの考慮

膜質の導出に関しては、図 4 に示すように、B、UB、Void の Voxel に重み値を設定し、平均化領域 (Averaged area) 内でそれらの値を使って平均化することで、膜密度と透水性を導出します。密着性は、下地に接する Voxel に対して同様に導出します。このような Voxel を用いた表面反応のモデル化には、これまでの著者らのエッチングモデル開発の知見を応用しました。

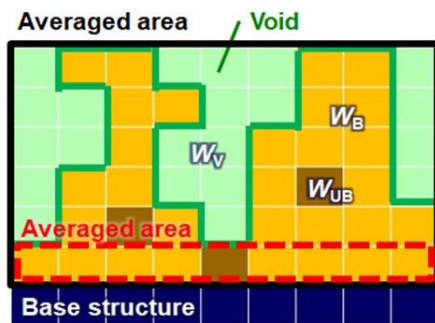


図 4: 膜質計算の概要

本モデルを使ったシミュレーションの 1 例を図 5 に示します。エッチング時のダメージ量を反映して SiN 膜が徐々に成膜され、50 sec 後にはトレンチを埋め込んだ状態となりました。トレンチ内部には Void が形成しており、側壁にはイオン照射量が少ないことによる膜質悪化が成膜時間に沿って定量的に分かりました。

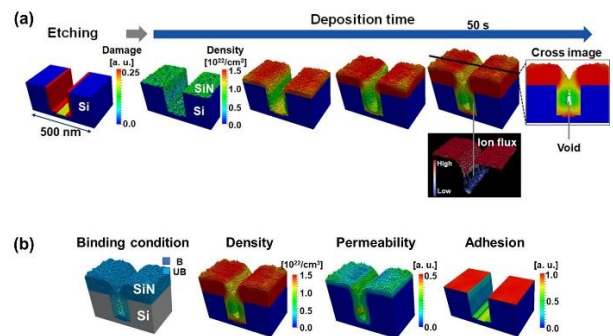


図 5: (a)カバレッジと膜密度、(b)その他の膜質

実際の低温 (120°C) の SiN-PECVD プロセスでは、低 SiH<sub>4</sub> 流量時に、膜モフォロジーとして特徴的な柱状構造 (局所的に高密度と低密度の領域) が見られました (図 6)。一方、SiO<sub>2</sub>-PECVD では見られなかったため、このメカニズムを考えることにします。

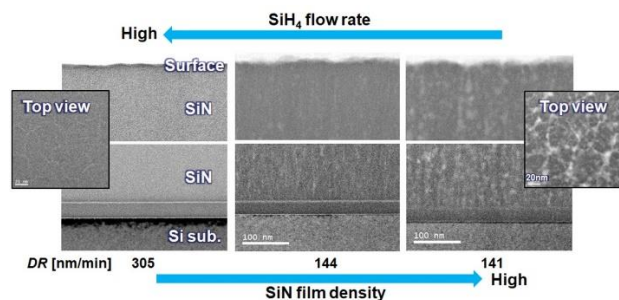


図 6: モフォロジーの SiH<sub>4</sub> 流量依存

想定メカニズムとしては、SiN-PECVD の方が、(1)気相中での滞在時間が長く重合がより進み重いプリカーサーが生成され、(2)そのマイグレーション長が短いことから局所的に高密度な領域が形

成されることで柱状構造となったと考えられます。

(1)については、気相反応の第一原理計算[2]やプラズマシミュレーション結果[3]、さらには、著者らの SiN 膜密度のガス解離度に関するプロセスノブ（圧力、流量、パワー）依存の実測結果などからその可能性が高いと考えられます。一方、(2)については、本モデルを用いた Si 平坦膜上の SiN 成膜計算から、重いプリカーサーを仮定した場合には、実測の柱状構造（高密度・低密度領域のサイズ）や膜密度の高さ、さらに、成膜レートの実測再現性が確認できました（図7、図8）。

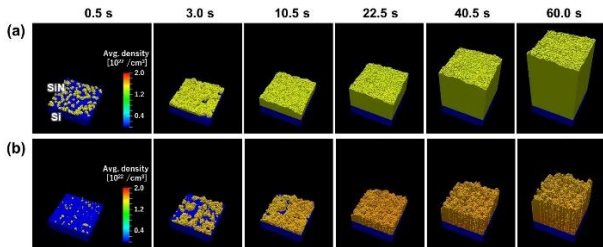


図7：プリカーサーが(a)軽い、(b)重い、場合

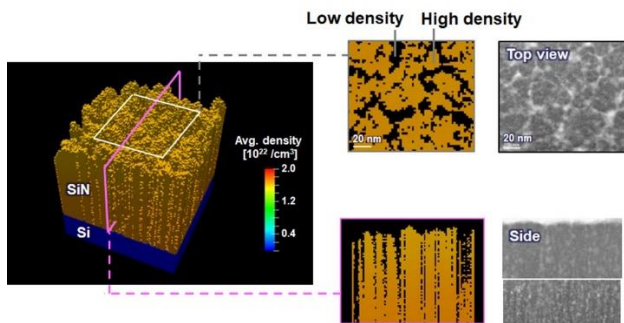


図8：本モデルによる予測と TEM 像

また、Si トレンチ上に SiN 成膜した結果を図9に示します。実測では低 SiH<sub>4</sub> 流量の場合に、側壁での SiN 膜モフォロジーは柱状構造となっており、本モデルでもその様子を再現することができました。さらに、カバレッジ（底部膜厚 B/上部膜厚 A）の予測値（ピンク）も、実測に近い値として再現することが分かりました。

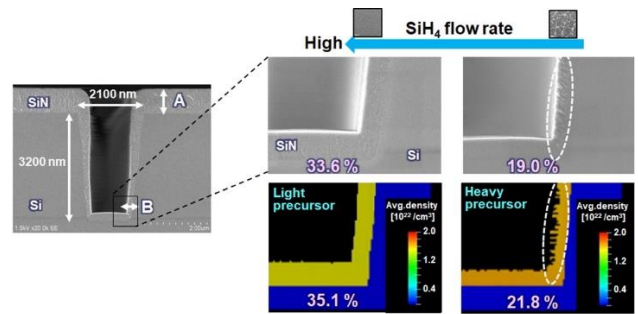


図9：Si トレンチ内の SiN 成膜

以上のことから、前述の想定メカニズムの妥当性が確認され、低温の SiN-PECVD では滞在時間を短くすることが、カバレッジと膜質を良くする上で重要であることが分かりました。また、本モデルが実プロセス・実パターンでの予測として有効であることも示すことができました。

### 【今後の展望】

本モデルの応用範囲は広く、2024 年第 71 回応用物理学会春季学術講演会では、SiO<sub>2</sub>-ALD プロセスでのホール側壁の膜質予測に適用し、イオン入射角度分布が膜質変化に大きな影響を及ぼしていることを議論しました[4]。今後は、多様な膜種への応用、PVD やエピタキシャルといった CVD/ALD 以外の成膜プロセスへも応用を進めていきます。また、モデルの高精度化には、プリカーサーの解離状態、表面での付着確率、マイグレーションの活性化エネルギーなどの詳細な情報が必要であり、計測技術の更なる進化を期待したいと思います。

### 参考文献

- [1] N. Kuboi et al., JJAP 62, S11006 (2023).
- [2] G. Kovacevic et al., Phys. Chem. Phys. 19, 3826 (2017).
- [3] M. J. Kushner, J. Appl. Phys. 74, 6538 (1993).
- [4] T. Hamano et al., JSAP Spring meeting (2024).

## 第 22 回プラズマエレクトロニクス賞

# 中圧低温プラズマスパッタリングによる Si/Sn ナノワイヤー膜の シングルステップ堆積と高容量 Li イオン電池の安定駆動

名城大学 内田儀一郎, 益本幸泰, 榊原幹人, 池邊由美子  
九州大学 小野晋次郎, 古閑一憲  
大阪大学 小澤隆弘

### はじめに

この度は荣誉あるプラズマエレクトロニクス賞(2023 年度)を賜り, ご多忙の中ご選考を戴きました審査員の先生方, また, 日頃よりご指導を戴いております PE 分科会の諸先生方にこの場を借りて深く感謝申し上げます. 本稿では受賞対象論文「Single-step fabrication of fibrous Si/Sn composite nanowire anodes by high-pressure He plasma sputtering for high-capacity Li-ion batteries」[1]に関しましてご紹介させていただきます.

### 【背景】

筆者らは 0.1~3 Torr の中圧領域での低温プラズマプロセスによる半導体ナノ構造膜の作製を近年推進している[1-6]. 中圧領域低温プラズマの特徴は電子の平均自由行程が短くプラズマ領域が 10 mm 程度と狭く反応場が局所的であること, この局所領域に熱プラズマと類似したガス流れや温度勾配が発生し, 熱流体的性質を併せ持つことである. 本研究では開発した中圧低温プラズマプロセスにより Si/Sn ナノワイヤー負極をシングルステップで作製し, Li イオン電池の高容量かつ安定駆動を実証した. 現在の Li イオン電池グラファイト負極の理論容量は 372 mAh/g であるが, 次世代の新規負極材料として高い理論容量を持つ IV 族半導体 Si(4,200 mAh/g)に着目した. Si 負極の課題として, 充電時の Li との合金化で体積が 4 倍にも膨張し, Si 材料の破損や集電極からの剥離が発

生し, そのため耐久性が課題となる. これを解決するために比表面積が大きく粒子中心まで短時間で均一に膨張するナノ材料の利用が提案されている. 通常の電極作製方法は, 微粒子を有機バインダーと混合してペースト化し塗布し, 最後に焼成を行う多段階のプロセスである. 一般にナノ粒子同士の凝集を制御することは難しく, 界面活性材の利用などナノ粒子表面の処理が必要となる. これに対し本研究で取り組んだ中圧低温プラズマの利点は, 凝集を制御しながらナノ構造膜をバインダーフリーのシングルステップで作製できる点である. 実際に多彩な Si ナノ構造膜により従来の 2 倍以上の高容量 Li イオン電池を実現し, 低温プラズマプロセスの高い優位性を実証した.

### 【実験方法】

Si ナノ構造膜堆積のために中圧ガス領域での RF スパッタリングを行った. 図 1(a)に実験装置の概略を示す. Si ナノ構造膜は 0.1~0.5 Torr の中圧ガス環境下で 13.56 MHz の RF マグネトロンスパッタリングにより生成した. 1 インチサイズのスパッタリングターゲット材料に Si または SiSn(Sn 含有量 = 3, 6, or 10 at%)を使用した. 図 1(b)の放電プラズマ写真に示すようにサブツールと比較的高いガス圧力環境下では, カソード前面約 10 mm の領域に局所的に高密度のプラズマが生成される. イオンによるスパッタリングにより, ターゲットから放出された Si や Sn 原子の平均自



由行程はマイクロオーダーと短く、原子同士の高頻度の衝突により、プラズマ気相中で Si 系ナノ粒子の核形成が予想される。また図 1(a)に示すように Ar または He 放電ガスをマグネトロンカソード電極から基板の方向に向かって供給しており、気相で生成されたナノ粒子はガス流により下流に設置した基板へと輸送できる。具体的な実験条件はガス流量を 16~94 sccm, プラズマ投入 RF 電力を 80 W (15.7 W/cm<sup>2</sup>), またカソード電極と成膜基板との距離を 10~30 mm とした。

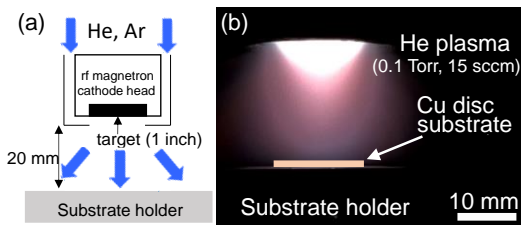


図 1 中圧パッタリング実験装置の概要[3].

### 【実験結果】

図 2(a)に Si ターゲットを用いて Ar と He スパッタリングで作製したナノ構造膜の SEM 写真をそれぞれ示す。Ar スパッタリングでは、比較的緻密なナノ構造膜となった。一方、He スパッタリングでは表面に大きい凹凸が観測され平均粒径 60 nm のナノ粒子で構成されたナノ粒子膜となった。断面像では膜中に多数の空洞が観測され多孔度 18%のポーラス膜であった。このように放電ガスに He を使用することにより空洞を含むポーラス膜が作製できた。He 原子は Si 固体への固溶度が低いとされ、膜中に取り込まれた He 原子はガスとなり膜中で空隙を形成することが報告されておりポーラス膜形成の一因と考えられる[7]。図 2(b)に SiSn(Sn 含有量 = 6 at%)ターゲットで作製したナノ構造膜の SEM 像を示す。Ar スパッタリングと He スパッタリングでさらに大きな違いが見られた。Ar スパッタリングではカリフラワー状にナノ粒子が凝集した 3 次元的なナノ構造となった。

一方、He スパッタリングでは 1 次元的なナノワイヤー形状へと構造は大きく変化した。ここでワイヤーの平均直径は 287 nm であった。このようにターゲットに 2 元系 SiSn 材料を使用し、さらに He プラズマで材料を堆積することにより、膜形態を 3 次元的ポーラス構造から 1 次元ワイヤー構造までに制御できることが明らかになった。低温プラズマを用いた Si ナノワイヤー作製に関しては、最初に触媒金属の金をナノドット状に基板に配置し、その後、基板を加熱し金ドットを液滴にしながら Si 原子を供給する手法が多数報告されている[8]。これに対し、本研究の新規性は、触媒となる低融点金属 Sn をスパッタリングターゲットに含有させ、基板加熱なしのシングルステップのプロセスで自己組織的に Si ナノワイヤー膜を作製できる点である。また Si の原料として気体ではなく固体の Si ターゲットを使用し、安全かつ大面積に作製できる点も特筆すべき点である。

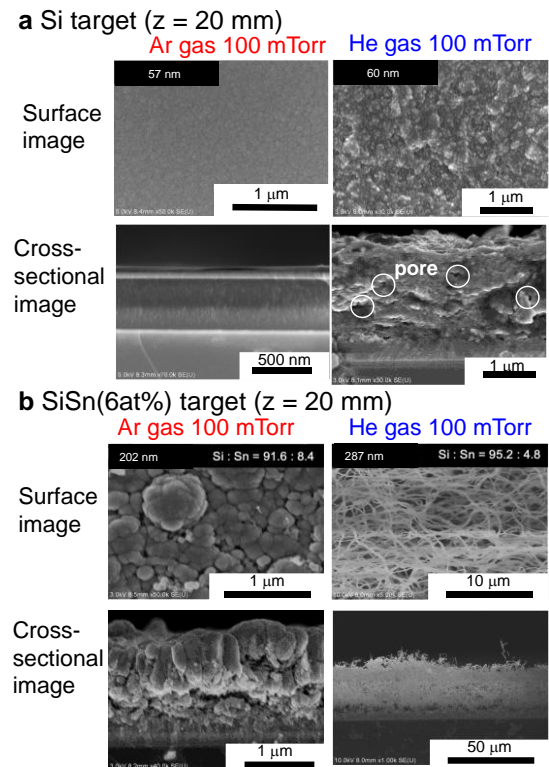


図 2 Si ナノ構造膜の SEM 写真[1].

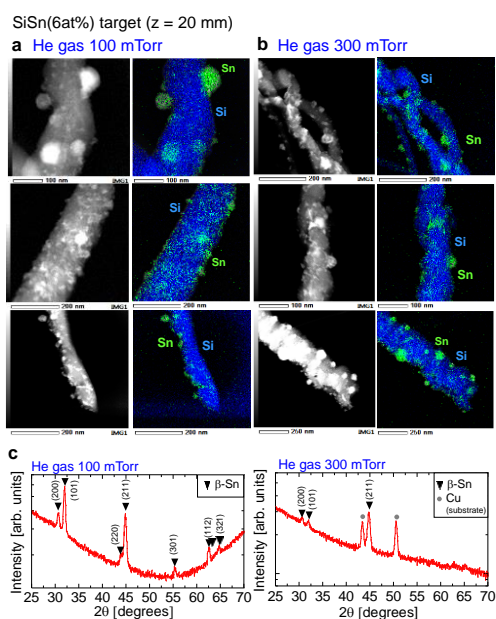


図3 (a)(b) Si ナノワイヤーの TEM 像と EDX 組成マッピング[1]. (c) XRD 測定結果[1].

図3(a)(b)に He 中圧スパッタリング法で作製した Si ナノワイヤーの TEM 写真と EDX 分析による組成マッピングを示す。青色が Si 原子領域、緑色が Sn 原子領域となる。図3(a)の He ガス 0.1 Torr で作製したワイヤー写真から明らかなように、ワイヤー表面に 40 nm 程度のナノ粒子が多数付着している様子が観測された。組成マッピングよりその表面ナノ粒子は Sn であり、またワイヤーのコア部分は Si で構成されていた。中段に示す別の場所での TEM 写真より、40 nm より小さいナノ粒子が大量に付着している部分も観測され、Si と Sn のコアシェル構造となっている様子が確認できた。下段の写真からナノワイヤー先端部にナノ粒子が特異的に存在している様子は観測されず、ナノ粒子は表面にランダムに付着していることも明らかになった。また図3(b)の He ガス 0.3 Torr においてはワイヤー直径が 155 nm へと細くなり、また上段の写真のようにナノ粒子が数珠状に配列している様子も観測された。図3(c)に XRD 測定による結晶構造解析結果を示す。0.1 Torr と

0.3 Torr の両ナノワイヤー膜から鋭いピークが観測され、Si-Sn 結晶のピークと同定された。一方、Si の結晶ピークは観測されなかった。これよりナノワイヤーは、結晶 $\beta$ -Sn とアモルファス Si のコアシェル構造であることが明らかになった。また材料作製のプロセスパラメータである 1) He ガス圧力、2) カソード/基板間距離、3) ターゲット中 Sn 含有率を変化させることにより図4に示すような3つの特徴的な構造；(a) クモの巣状の繊維構造(ワイヤー直径 155 nm)、(b) ナノワイヤー/ナノ粒子の混合構造(ワイヤー直径 133 nm)、(c) ロッド構造(ロッド直径 605 nm)を作製できた。

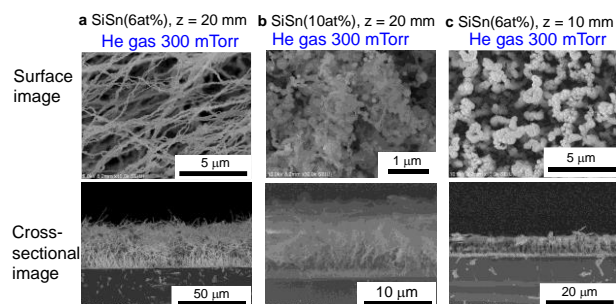


図4 3つの特徴的な Si ナノワイヤー構造膜の SEM 写真[1]. (a) クモの巣状の繊維構造、(b) ナノワイヤー/ナノ粒子混合構造、(c) ロッド構造。

最後に Si ナノワイヤー負極膜を持つ Li イオン電池の充放電サイクル特性と電圧-容量曲線を図5に示す。電池は $\phi 15$ の負極を用いたコインセルサイズとした。負極に各種 Si 膜を、対極に厚み 250  $\mu\text{m}$  のリチウム箔を使用した。電極間にポリプロピレン製のセパレータを挟み、電解液には一般的な  $\text{LiPF}_6$  (溶媒 EC:EDC) を用いた。図の電圧-容量特性に示すように Li 電極を用いたハーフセルでは、起電力は 0.5 V 程度で推移する。図5(a)(b)(c)の電池特性は、図4の SEM 写真に示した(a) クモの巣状の繊維構造(ワイヤー直径 155 nm)、(b) ナノワイヤー/ナノ粒子の混合構造(ワイヤー直径 133 nm)、(c) ロッド構造(ロッド直径

605 nm)にそれぞれ対応している。グラフ中の 0.01-C などの値は充放電試験の電流の大きさを表しており、0.01-C は従来のグラファイト負極の充電電流量と同等となる。一般に電流量に反比例して容量は小さくなり、試験では 0.01-C から 5-C まで充電電流を変化させた。0.01-C の電流において(a) 繊維構造、(b) ワイヤ/粒子混合構造の Si 負極はそれぞれ 1,193 mAh/g, 973 mAh/g で劣化なく初期 54 サイクル充放電を繰り返した。これは現在のグラファイト負極の約 3 倍の高容量となる。一方、(c) ロッド構造の Si 負極は 1,700 mAh/g から 1,174 mAh/g まで 54 サイクルで容量は大きく低下した。次に電流量を 10 倍の 0.1-C に変化させた。特に(b) ナノワイヤ/ナノ粒子混合 Si 負極はこの電流量でも劣化なく 135 サイクル充放電を繰り返し 580 mAh/g を維持した(容量維持率 90%)。しかしながら高速充電の 1-C, 2-C, 5-C の電流量では 132 mAh/g, 6.95 mAh/g, 0.7 mAh/g となり、グラファイト負極の 372 mAh/g を下回った。先行研究の Si ナノ粒子負極では 150 nm 以上のナノ粒子径で容量の大きな低下が観測された[9]。本研究でもワイヤ直径が 605 nm と特に大きい(c) ロッド構造の Si 負極で顕著な容量低下が見られ、ワイヤ径が重要なパラメータであることが示唆された。

### 【まとめ】

次世代 Li イオン電池用の高容量 Si ナノ構造負極を実現するために基板加熱なく 0.1~0.5 Torr の中圧 He プラズマスパッタリングを開発し、Si/Sn ナノワイヤ膜をシングルステップで作製した。Si/Sn ナノワイヤはアモルファス Si コアと結晶 $\beta$ -Sn シェルで構成された。Si ナノワイヤ負極を持つ Li イオン電池は、電流量 0.01-C の初期 54 サイクル充放電後で、従来の約 3 倍の 1,219mAh/g の高い容量を示した。また電流量が

10 倍の 0.1-C においても 135 サイクル後、644mAh/g の高容量を維持した。

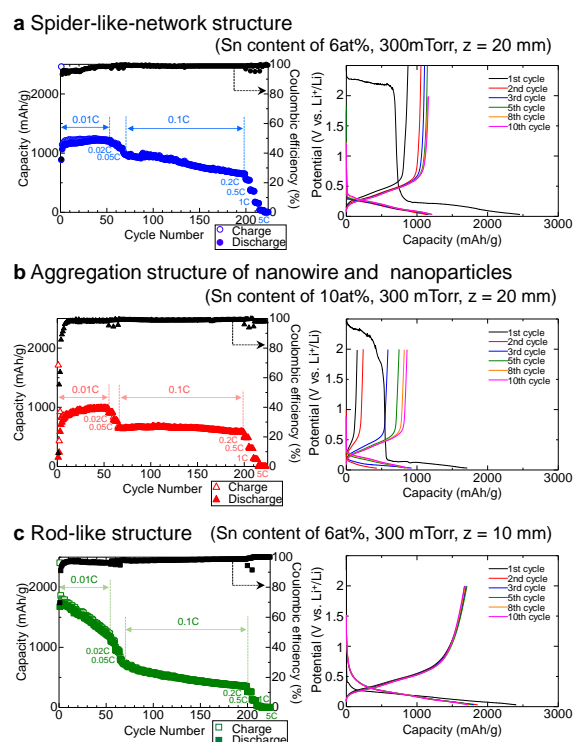


図 5 Li イオン電池の評価。容量の充放電サイクル特性と充放電時の電圧-容量曲線[1]。(a) クモの巣状の繊維構造、(b) ナノワイヤ/ナノ粒子混合構造、(c) ロッド構造。

### 参考文献

- [1] G. Uchida *et al.*, *Sci. Rep.* **13**, 14280 (2023).
- [2] G. Uchida *et al.*, *IEEE Open J. Nanotech.* **3**, 153 (2022).
- [3] G. Uchida *et al.*, *Sci. Rep.* **2**, 1742 (2022).
- [4] J. Hayashi *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **61**, SA1002 (2022).
- [5] G. Uchida *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **62**, SL1010 (2023).
- [6] T. Omae *et al.*, *Appl. Phys. Express* **17**, 026001 (2024).
- [7] V. Godinho *et al.*, *Nanotechnology* **24**, 275604 (2013).
- [8] V. Schmidt *et al.*, *Adv. Mater.* **21**, 2681 (2009).
- [9] M. McDowell *et al.*, *Nano Lett.* **13**, 758 (2013).

# 第5回データ駆動プラズマ科学国際会議 (ICDDPS-5)

大阪大学 浜口 智志

第5回データ駆動プラズマ科学国際会議 (The 5th International Conference on Data-Driven Plasma Science: ICDDPS-5) が、2024年8月12日から16日にかけて、カリフォルニア大学バークレー校(UCB)のBanatao Auditoriumで開催された。共同プログラム委員長/現地組織委員長は、UCB 化学生体分子工学科のAli Mesbah 准教授と、ローレンスリバモア国立研究所のJim A. Gaffney 博士である。

会議名の通り、本会議は、プラズマ科学分野における、人工知能(AI)や機械学習(ML)等のデータ駆動科学技術に関する国際会議である。対象とするプラズマ科学の分野は非常に幅広く、核融合用高温プラズマから、宇宙プラズマや半導体製造プロセス・医療応用低温プラズマに及ぶ。AIやMLの応用研究は、プラズマ科学分野では、早い時期から、核融合プラズマ制御を目的に進められたが、現在では、産業応用も含めて、極めて広い分野で、AIやMLの活用が進んでいる。

第5回ICDDPSは、Lam Research Corp.上級副社長のRichard Gottscho 博士による基調講演で始まった。同講演は、技術者とAIの共同作業による半導体製造プロセス最適化の効率化に関する最新の研究成果を披露したものであった。本会議では、パラレルセッションはなく、参加者全員が一堂に会する会議場で多数の最先端研究成果が発表された。基調講演では、プラズマの専門家ではない、データ駆動科学専門家による最先端研究の話題も提供された。本会議の組織委員会では、既存のデータ駆動科学のプラズマ科学分野への応

用ばかりでなく、プラズマ科学分野における独自のニーズや専門知識(domain knowledge)に基づく、プラズマ科学からデータ駆動科学への貢献も期待しており、その方針に基づいたプログラム構成であった。

ICDDPSは、第一回会議が、2018年7月11-13日にイギリスのヨーク大学で開催され、第2回会議が、2019年5月13-17日にフランスのエクスマルセイユ大学で開催された。引き続き2020年4月に日本で開催予定であった第3回会議が、コロナ禍で延期となり、online 会議として、ほぼ1年後の2021年3月29日-4月2日に短縮して開催された。第4回会議は、2023年4月17日から21日に、沖縄科学技術大学院大学(OIST)で開催された。筆者は、第一回ICDDPSの創設から関与し、この分野が2018年ごろから急速に発展するのを見てきた。近年の計算技術の急速な発展により、データ駆動プラズマ科学が、今後のプラズマ科学の発展に必要な基礎科学として定着することは間違いない。特に、第2回ICDDPSの成果を受け、筆者が責任著者として、多数の専門家の共著による、約90ページに及ぶreview論文をまとめた[1]。同論文は、現在、この分野の唯一の総合的な解説論文であり、本分野の概要に興味のある方には、一読をお勧めする。

次回、第6回ICDDPSは、2025年8月4-8日、Santa Feにおいて開催される。

### 参考文献

[1] R. Anirudh, et al., IEEE Tran. Plasma Sci., 51 (7) 1750-1838 (2023)

## 12th International Workshop on Microplasmas (IWM-12)

大阪公立大学 白藤 立

2024年6月3日～7日にOrléans, Franceにて12th International Workshop on Microplasmas (IWM-12, Chair Rémi Dussart, Univ. Orléans)が開催された。この会議は、橋邦英先生(京都大)の文部科学省特定領域研究「プラズマを用いたマイクロ反応場の創成と応用(略称マイクロプラズマ)」の開始直前にマイクロプラズマをテーマにして開催されたBANPIS-2003(2003年2月7日～8日)をIWM-1と位置づけて継続している会議である[1]。会議のスコープは、マイクロプラズマの生成・診断・モデリング・応用である。

今回の参加者数は約100人、発表件数は75件で、招待講演10件、一般オーラル38件、ポスター27件であった。日本ではAPPJの応用が盛んであるが、本会ではAPPJの基礎、MHCD及びそのアレイ、表面DBDなどもあり、それらに関する詳しい診断・モデリングや、新しい応用に関する討議がなされた。IWM-12のBook of AbstractsはHALで入手可能である[2]。

日本からは、国際組織委員でもある酒井道先生とともに、伊藤剛仁先生(東大)、高島圭介先生(東北大、招待)、村上朝之先生(成蹊大)、白藤立(大阪公大、招待)が参加した。

個人的に興味を持った発表は、電磁波制御のためのリコンフィギュラブルメタマテリアルやメタサーファスの実現(酒井先生とGherardi(Univ. Bologna)らイタリア勢)、迷路状マイクロ流路内プラズマによる迷路解き現象のエントロピーによる解析(酒井先生)、電磁波攻撃に強いマイクロプラズマ援用通信システム(Callegari, Univ. Toulouse)であった。プラズマ診断ならびにモデ

ル化・シミュレーションに興味を持ったのは、Pockels-based Muller polarimetryによる誘電体上蓄積電荷ダイナミクスの解析(Sobota, TU/e)、可視域CARS電場計測(伊藤先生)、高速液柱流中RNS診断(高島先生)、APPJ電離波伝播シミュレーション(村上先生)、液中ナノボイド中電子雪崩の初期過程のモデル化とシミュレーション(Bonaventura, Masaryk Univ.)であった。

応用に関しては、環境、バイオ、表面処理、触媒、スラスタなど多岐にわたっていた。白藤は、その中の一つとしてマイクロプラズマコンタクターによる液体処理に関する発表を行ったが、プラズマ援用マイクロフロー化学(Guillermain, Chimie ParisTech)という先行する対抗馬の存在を知ることとなった。

IWMの国際組織委員会は、Achim von Keudell(RUB, Chair)、Jose Lopez(Seton Hall Univ., past Chair)を含む12名で構成されている。今回でvon Keudellはpast Chairとなり、酒井先生がChairとなった。また、委員であった寺嶋和夫先生(東大)のご退職に伴い、白藤が後任を担当することとなった。

次回のIWM-13は2026年6月中下旬に韓国で開催される。開催地はDaejeon(by Sanghoo Park and Wonho Choe, KAIST)、またはBusan(by Hae June Lee, Pusan Nat. Univ.)の予定である。

### 参考文献

- [1] 寺嶋和夫: BANPIS-2003, プラズマエレクトロニクス分科会会報 No. 38 (2003.6) p. 20.
- [2] <https://hal.science/hal-04614757>

## 国際会議報告

# 10th International Conference on Plasma Medicine (ICPM-10)/ 9th International Workshop on Plasma Cancer Treatment (IWPCT-9) 報告

名古屋大学・低温プラズマ科学研究センター 田中宏昌

第10回プラズマ医療国際会議 (ICPM-10) は第9回プラズマがん治療国際ワークショップ (IWPCT-9) と合同で、スロベニアポルトロシュ市で、2024年9月8日(日)から9月13日(金)にかけて開催された。

初日の日曜日には招待講演者のみからなるスクールが開催された。2日目の月曜日からはICPMに関するプレナリー招待講演4件とIWPCTに関するプレナリー招待講演1件が行われ、ICPMからは、Steffen Emmert 教授(University Medical Center Rostock / Germany)による”Star Wars in Dermatology - Plasma medicine”、Theresa Freeman 教授 (Thomas Jefferson University / USA)による “Cold plasma as a combinatorial therapy to combat orthopaedic infection”、Sander Bekeschus 教授 (Leibniz Institute for Plasma Science and Technology Greifswald / Germany) による ”Plasmas for Biology and Medicine、Medicine - Now and Next”、Eric Robert 教授(University of Orleans / France)による”From transient and localized plasma surface inetraction to deep tissue biological effects in Plasma Medicine”のプレナリー招待講演が行われた。IWPCTからは僭越ながら、小生が”Cancer therapy using plasma-activated solutions”と題したプレナリー招待講演を行わせていただいた。

ICPMに関するセッションとIWPCTに関するセッションは2つの会場に分かれて、それぞれの

セッションで各種招待講演及び口頭発表が行われた。韓国の Eun Ha Choi 教授とドイツの Kai Masur 教授による創傷治癒医療用プラズマ装置に関する国際標準化のセッションも設けられた。プラズマ活性溶液に関するセッションやプラズマ農業に関するセッション、臨床研究に関する発表がまとめられたセッションなどが設けられていたことが印象的であった。3日目の午後と5日目の午後にはポスターセッションが設けられ、活発な議論が行われた。

生涯にわたりプラズマ医療研究に貢献された研究者に授与される Plasma Medicine Awards はドイツ University Medical Center Rostock の Steffen Emmert 教授と米国 Drexel University の Vandana Miller 教授が受賞された。また、若手研究者に授与される Early Career Award in Plasma Medicine はフランス University of Orleans の Augusto Stancampiano 先生が受賞された。

次回の第11回ICPMも第10回IWPCTと合同開催され、2026年5月31日(日)から6月6日(土)まで、岐阜市長良川国際会議場で開催される予定である。

## 国際会議報告

# 77<sup>th</sup> Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2024)

成蹊大学 村上朝之

77<sup>th</sup> Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2024) が 2024 年 9 月 30 日 (月) から 10 月 4 日 (金) にわたり合衆国カリフォルニア州サンディエゴにおいて Double Tree by Hilton San Diego Mission Valley を会場として開催された。メジャーリーグの応援に盛り上がる雰囲気やメキシコに近いラテンの雰囲気などが混じるサンディエゴ。日中は夏日ほどの日差しが照りつけるものの乾燥して朝夕は涼しく、日本の暑い夏を過ごした我々にとっては快適な街であった。

本 GEC は American Physical Society の国際会議であり、プラズマ源・計測・モデリング・原子分子衝突過程などの基礎研究に加え、マイクロエレクトロニクス・航空宇宙応用・生物医療応用・環境応用などの応用研究を含み、広く低温プラズマ理工学についての議論を行う場となっている。学会参加者数は、前回・前々回と同程度であった。一方、日本からの参加者は例年と比較してやや少なめであったようである。

今会議も例年通り月曜のワークショップに始まり金曜のクロージングセレモニーで幕を閉じた。初日のワークショップ 4 件は Numerical Simulations of Low Pressure Plasma Using Particle-in-cell Codes: Issues, Future Directions and V&V procedures, Plasmas for sustainability, Fundamentals of Gas Breakdown、Data-driven Plasma Science であり、午後からはサンディエゴを活動拠点の一つとする General Atomics 社の DIII-D tour が催された。本会議において比較的多くのセッションを占めたテーマは、Modeling & Simulation、Plasma Diagnostics、Discharge

Plasma、Plasma – Liquid 関連、Biological, Medical and Agricultural Applications of Plasmas、Electric Propulsion 等であった。

隔年で授与される Will Allis Prize を Professor Vincent M. Donnelly (University of Houston) が受賞した。10 月 2 日 (水) に、その記念講演「Looking for plasma diagnostic techniques in unusual places」が (終始笑いで聴衆を沸かせつつ) 行われた。

次回 78<sup>th</sup> Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2025) は、2025 年 10 月 13 日 (月) から 17 日 (金) 韓国ソウルにて COEX Convention & Exhibition Center を会場とし、完全対面方式にて開催予定である。

Web site <https://www.apsgec.org/gec2025/>  
学術界・産業界・ベテラン・若手が集う活気ある GEC に、多くの方々の参加を期待したい。



学会開催会場

## 国内会議報告

# 第18回プラズマエレクトロニクスインキュベーションホール

名古屋大学 石川 健治

北海道大学 富田 健太郎

第18回プラズマエレクトロニクスインキュベーションホールを2024年9月4日(水)～6日(金)に、東京オリンピック記念青少年総合センター(東京都渋谷区)で開催しました。本イベントはこれまで、(コロナ禍でのオンライン開催をはさみ)静岡県御殿場市の国立中央青少年交流の家で開催されておりましたが、交通の便改善と参加者の増加を期待し、開催地の東京都内への変更を敢行しました。

本企画は、プラズマエレクトロニクス分野の初学者(学生・若手研究者・社会人技術者)を対象として、プラズマの理解を深めて頂くために、一流の講師陣を招いて実施する合宿的な講習会です。今回の受講者は41名(うち企業からの参加者は1名)でした。

大野哲靖先生による特別講座、田中宏昌先生による英語講座に加え、プラズマの基礎から応用を網羅する各分野のプラズマエレクトロニクス研究の最前線について、4名の講師陣による専門講座を開講しました。

初日及び2日目夕刻には、ポスターセッションを設け、講師、幹事、ならびに参加者による評価得点により、優秀ポスター賞3名が選出されました。また、参加者同士の親睦を深めるため、懇親会を行いました。

### ポスター賞受賞者【敬称略】

優秀賞：高橋 理志(筑波大学)  
長谷川 瑠偉(東京大学)  
南 智貴(成蹊大学)

### 講座内容【敬称略】

#### <専門講座>

「放電・プラズマの発生と制御」

高橋克幸(岩手大学)

「プラズマエッチングの原理と実践」

大矢欣伸(東京エレクトロン宮城(株))

「プラズマのバイオ応用」

栗田弘史(豊橋技術科学大学)

「大気圧プラズマプロセス」

市来龍大(大分大学)

#### <英語講座>

「研究留学のための英語講座」

田中宏昌(名古屋大)

#### <特別講座>

「核融合研究とプラズマ応用研究との橋渡し」

大野哲靖(名古屋大)

#### 担当幹事【敬称略】

校長：石川 健治(名古屋大学)

幹事：富田健太郎(北海道大学)

川崎仁晴(佐世保工業高等専門学校)

清水鉄司(産業技術総合研究所)

村上朝之(成蹊大学)

大島多美子(長崎大学)

田中文章(石川工業高等専門学校)

大下辰郎(東京エレクトロン宮城(株))



写真1：集合写真



## 国内会議報告

# 2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 PE 分科内招待講演 (English セッション) 報告 名古屋大学・低温プラズマ科学研究センター 石川健治

第 85 回応用物理学会秋季学術講演会の大会初日となる 2024 年 9 月 16 日 (月) 午前、会場を新潟の朱鷺メッセの 4 階 A41 において English セッションを開催し、海外招待 2 件の講演をお願いした。ウェブと対面の両方で参加できるハイブリッドの形式で、参加者は凡そ 50 名であった。

1 件目は、韓国光云大学校 (Kwangwoon University) の Eun Ha Choi 先生に “Atmospheric pressure plasma and its nitric oxide (NO) water for agriculture and environmental science” というタイトルの海外招待講演をお願いした。韓国で進められているプラズマ農業の現在進行中の研究について紹介いただいた。Choi 先生の研究室、ならびに Plasma Bioscience Research Center では、複数の誘電体バリア放電機を並べて、大気から一酸化窒素を高効率に生成する装置を開発している。この装置を使用して数百リットルレベルの大量の市水を処理することで、水素イオン濃度 (pH) がほぼ中性領域を保って、窒素酸化物を多く含むプラズマ処理水 (硝酸が含まず NO 水と呼称している) を用意している。この NO 水を農業用水にして各地で実地試験を進めていて、今回の講演では Kyunggi (京畿道) の Yeon-Chon 農業技術センターで行っている、レタスやイチゴ、大根、サボテンの栽培での結果が紹介された。野菜や果物で生育が促進するなど、作物栽培に有益な効果が得られている。他にも、畜産場内で、このプラズマ処理水を噴霧することで異臭の除去効果が得られている。試験は、養鶏や養豚、酪農ほかへの応用が実施されて

いることと紹介された。

2 件目は、フィリピン国立大学ディリマン校 (University of the Philippine Diliman) の Magdaleno Jr Vasquez 先生に “Utilizing custom built plasma sources for natural materials processing” というタイトルの海外招待講演をお願いした。プラズマ処理を竹などの天然素材とする加工製品の製造工程に応用する例を紹介いただいた。Vasquez 先生は特定の用途に合わせて、大気圧および低圧のプラズマ装置システムの開発している。自前で開発されたプラズマ装置を使用して、例えば、竹の加工品の製作時に、竹の表面をプラズマ処理し、表面の濡れ性を変え、ポリビニルアセテートの接着強度が 55% (最大) で向上と説明した。また、プラズマ処理は表面撥水性の効果をもたらし、竹の耐火性が未処理の竹に比べて 2 倍以上に向上している。他にも、バイオマス由来のセルロースやカラギーナンの粉末に、プラズマ処理を施すことで、塩化リチウム-ジメチルアセトアミド溶液 (セルロースを溶解する溶媒) への溶解性向上による混和性の改善効果があり、複数の材料を混合使用する上で有益であると結論した。プラズマ処理の活用は、廃材であった様々なバイオマスベースを原料でも製品の加工を実現することができ、今後の発展が期待される。

ご多忙の中、新潟に来日いただき講演をいただいた講師の先生方、ご準備にご尽力いただいた幹事の方々に、この場を借りて感謝の意を表す。

## 国内会議報告

### 2024 年 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 分科内招待講演

大阪大学 工学研究科 浜口 智志

### 「オングストロームノード世代における半導体製造プラズマプロセスの物理」

ウェスタンデジタル 平松 亮

第 85 回応用物理学会秋季学術講演会（2024 年 9 月 16~20 日、朱鷺メッセ、新潟市）の 2 日目の午前中に分科内招待講演が開催された。今回は、大阪大学工学研究科の浜口智志先生をお招きして、「オングストロームノード世代における半導体製造プラズマプロセスの物理」の題名でご講演をいただいた。

ご講演では大まかに、①半導体産業とプラズマプロセスの概況、②プラズマを用いた原子レベルの表面反応の実験、③原子層エッチングのシミュレーション、④人工知能 (AI) /機械学習 (ML) を用いたシミュレーション、についてお話いただいた。

まず初めに、近年の半導体産業とプラズマプロセスについてご説明いただいた。半導体産業は年々継続的に成長してきており、世界で生み出されるデータ容量が 2025 年には 175 ZB に到達する見込みである。このデータ容量増大に対応するため、最先端デバイスでは回路構造の微細化が進んできており、ゲート長が原子レベルに近づいてきている。また、デバイス構造についても従来の Planar 構造から FinFET、Gate-all-around (GAA) や Complementary FET (CFET) など多次元化、複雑化してきている。このような複雑かつ微細な構造の作製にはプラズマプロセスを用いた原子レベルの制御が必要である。講演の中では CFET

向けの Si/SiGe 多層膜構造における SiGe 層の選択的かつ等方的なナノメートルオーダーの加工技術をご紹介いただき、今後のプラズマプロセスによる原子層レベルの制御の必要性を示された。

次に、プラズマを用いた原子レベルの表面反応の実験についてご説明いただいた。冒頭で述べたようにデバイスの加工寸法はナノメートルに達しており、今後の原子層レベルの加工制御のためには、表面反応の素過程の理解が必要である。そこで、イオン種やイオンドーズ量の制御機構を有する UHV チャンバーを用いて、表面反応を測定する実験を行った[1]。また、分子動力学シミュレーションを用いて実験結果との比較を行った。この評価では、表面から脱離した原子量を入射イオン量で割った、エッチングイールドを指標として用いた。被エッチ膜として Si、SiO<sub>2</sub>、SiN の各膜種、入射イオンとして Cl<sup>+</sup>、CF<sub>3</sub><sup>+</sup>のイオンを用いた。実験とシミュレーションを比較した結果、イオンエネルギーに対するエッチングイールドの振る舞いが良く一致した。すなわち、プラズマ表面反応を実験およびシミュレーションの両面で理解できることが示された。

3 番目に、分子動力学シミュレーションによる原子層エッチング (ALE) について説明された。異方性 ALE では、まず化学的反応性が高いガスまたはプラズマを用いて原子（または分子）を吸

着させ表面改質を行い、続けてイオンを入射することで改質層のみ除去する。これを繰り返すことで原子層レベルに制御されたエッチングが達成できる。理想的な ALE は最表面だけを改質し、改質層のみ除去する、自己制御反応である。この ALE 反応の理解のために動力学シミュレーションを用いて表面反応を調査した[2]。被エッチ膜として Si を用い、吸着原子として Cl<sup>+</sup>、イオンとして Ar<sup>+</sup>を用いた。ALE の吸着過程において異なる Cl<sup>+</sup>入射エネルギーを持つ 2 条件を用意し、それぞれに対して同じ入射エネルギーをもつ Ar<sup>+</sup>イオンを照射し、その表面状態および反応を調査した。2 条件ともに 1 サイクルあたりのエッチング量 (EPC) は一定の変化を示したものの、Cl<sup>+</sup>入射エネルギーが高い場合により大きな EPC を得た。シミュレーションの途中過程を比較すると、吸着段階で Cl<sup>+</sup>入射エネルギーが高い場合は表面改質層の膜厚が増加することが分かった。すなわち、ALE は界面のみが改質して除去される理想的な状況とは異なり、表面が乱された状態でエッチングが進行することが示された。

最後に、最近の動向として分子動力学シミュレーションに AI/ML を組み合わせた事例についてご紹介いただいた。まずは、分子動力学シミュレーションに適用するために、ML を用いた原子内力場計算を行った。通常、密度汎関数理論 (DFT) によって物性値を計算するが、今回 ML による物性値予測の代理モデル (Surrogate Model) を使用した。具体的には、ニューラルネットワークの

入力層に各原子位置を入力し、中間層で回帰分析を行い、出力層から原子内力場やポテンシャルエネルギーを得ることで物性値を見積もった。ここで得られた物性値と、原子配置や原子構造に対する各種パラメータの設定値を適用することでエッチングのためのモデル構造を構築した。この構造に対して、ZBL ポテンシャルや計算モデルを適用して、第 2 章で述べたように、Ar<sup>+</sup>入射エネルギーに対するエッチングイールドのデータを得た。ML を適用した本方法での結果は、過去文献結果と比較して実験結果と良い一致を示し、AI/ML を用いた理論計算の実用性を実証した。今後、AI/ML 技術が発展していき、AI/ML を用いたプラズマ反応の研究が標準的に用いられる事が期待される。

最後に、ご発表いただきました浜口先生、ご参集いただきました聴講者の皆様、本講演の開催に当たり準備いただきましたプラズマエレクトロニクス分科会の幹事の方々に厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

[1] K. Karahashi and S. Hamaguchi, "Ion beam experiments for the study of plasma-surface interactions", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 47, 2014, 224008.

[2] E. J. C. Tinacba, M. Isobe, and S. Hamaguchi, "Surface damage formation during atomic layer etching of silicon with chlorine adsorption", *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 39, 2021, 042603.

## 第 44 回プラズマ新領域研究会 「大気中非平衡プラズマの多種多様な応用展開と それを支える基礎研究の最前線」

北海道大学 富田健太郎

第 44 回プラズマ新領域研究会は、9 月 27 日（金）13:00-17:30、北海道大学 札幌キャンパス内（工学部 A 棟 4-67 室）にて、対面と Zoom を用いたハイブリッド形式で開催された。現地参加者は講演者 4 名と聴講者 12 名であった。Zoom での参加者は 21 名であった。

大気圧下で生成される熱的に非平衡なプラズマは、活性分子種（ラジカル）や紫外線の供給源として、材料改質、電子デバイス、医療、農業などの多岐にわたる応用が期待されている。例えば、種子への短時間（分単位）のプラズマ照射が、発芽や収穫特性の向上に寄与することが報告されている [T. Okumura et al, Sci Rep. 12525 (2022)]。しかし、プラズマがなぜ複雑な生命システムである種子の成長を促進できるのか、そのメカニズムは明らかになっていない。今後、さらなる大気圧プラズマの応用展開を図るうえで、プラズマの「何が」、「どのように」、様々な照射対象に影響を与えるかを、学理として構築することが望まれている。そのためには、反応源であるプラズマの物理機構（電子エネルギー状態から活性種生成に至るまでのプロセス）はもとより、表界面（プラズマと液体界面など）での反応の定量化、さらには照射対象が生体の場合は、分子動態（オミクス）までの包括的な理解が必要となる。

このような背景の下、本研究会では 1. 反応源となるプラズマ（空気中ストリーマ放電）、2. プラズマ液体相互作用、3. プラズマの農業・バイオ

応用の、各分野の第一線で活躍される先生方に一同に会して頂き、議論していただいた。

竹内副幹事長の開催挨拶に続いて、東京大学の小野亮先生から、「空気ストリーマ放電の発生とラジカル生成までの基礎過程」と題して、空気中放電の物理過程を、小野先生が長年研究されているストリーマ放電を中心に、チュートリアル的な形で説明いただいた。また、学術変革領域（九州大の古閑先生が代表）における最新の取り組みについても紹介いただいた。

続いて埼玉大学 稲田優貴 先生（遠隔でのご講演）では、「E-FISH 法を用いた空気ストリーマ放電の電界計測」と題して、最新の電界計測や、シヤックハルトマンセンサーを用いた電子密度計測の原理や最近の結果について発表いただいた。

プラズマ液体相互作用に関しては、開催地の北海道大学から、白井直機先生と稲垣慶修先生に、それぞれ「プラズマ液体相互作用を利用した物質変換プロセスへの展開」、「プラズマ・液体界面における水和電子の検出と特異な反応機構解明への挑戦」という題目で発表していただいた。

大気圧プラズマ農業・バイオ応用としては、九州大学 奥村賢直 先生から「種子へのプラズマ照射量の定量測定最前線」と題して、種子に対するプラズマ由来の化学種の定量化などについて、最新の研究発表を紹介いただいた。

最後の総合討論では、現地・Zoom 参加者が入り混じった、活発な議論が展開された。

## 行事案内

# 17<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials / 18<sup>th</sup> International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (ISPlasma2025 / IC- PLANTS2025)

豊田工業大学 佐々木実, 中部大学 小川大輔

### 会議の概要

第 17 回先進プラズマ科学と窒化物及びナノ材料への応用に関する国際シンポジウム/第 18 回プラズマナノ科学技術国際会議 (ISPlasma2025/IC-PLANTS2025) が 2025 年 3 月 3 日から 7 日まで 中部大学 春日井キャンパスにて開催されます。本会議は、日本の低温プラズマコミュニティが企画・運営し、毎年開催される唯一の国際学会であり、例年、日本国内の研究者だけではなく、台湾などの東アジアから国々からの多くの研究者が参加されます。この会議では、海外に出ることなく国際会議に参加できるというメリットもあり、特に学生や若い研究者にとって国際経験を積める絶好の機会となっております。

今回のシンポジウムでは、第 1 日目の 3 月 3 日にプラズマ科学技術、ワイドバンドギャップ半導体、ナノ材料、バイオ応用分野からそれぞれ一流の講師を招待しチュートリアルが実施されます。続いて、第 2 日目の 3 月 4 日の午前中に基調講演・受賞講演などのこの会議を代表する講演があり、その後、招待講演 (25 件程度) や一般講演による口頭発表が始まります。この会議は 5 日目の 3 月 7 日のお昼頃まで開催され、途中、第 3 日目の 3 月 5 日夕方に懇親会が中部大学で催されます。さらに、今回の会議では、第 5 日目の 3 月 7 日の午後に愛知県犬山市にある明治村へのエクスカー

ションが実施されます。研究者同士で交流や情報交換、あるいは国際的な共同研究をお考えの方はぜひこの機会をご利用ください。

会期:2025 年 3 月 3 日(月)~3 月 7 日(金)

場所: 中部大学 春日井キャンパス

### 会議のスコープ

本会議では、4 つの分野 (プラズマ科学技術、ワイドバンドギャップ半導体、ナノ材料、バイオ応用) をテーマとして取り扱います。なお、投稿はすでに締め切られていますが、**12 月以降にも Late News として投稿ができます。**

[Plasma Science & Technologies]

Plasma Source, Modeling & Simulation, Thin Film Deposition Process, Flexible Electronics, Advanced Plasma Diagnostics, Plasma in Liquid, Etching Process, Plasma for Nano & Green Technologies, Thermal Plasma, Aerospace/Space Applications

[Nitride Semiconductors]

Crystal Growth of GaN & Related Materials, Characterization, Optical & Optoelectronic Devices, MBE Growth & Nitrogen Source, Device Processing, Electron & Power Devices

[Nanomaterials]

Nanodots& Nanoparticles, 2D Nanomaterials, Composites& Functionally Graded Materials, Applications for Energy, Nanotubes, Nanowires & Nanorods, Porous Materials & Membranes, Surface Modification & Functionalization, Nanomedicine & Sensing

[Bio applications]

Plasma Biology & Medicine, Plasma Agriculture, Biomaterials, Biomarkers, Bioimaging, Bio-Devices, uTAS, Lab on a Chip, Biosensors, Device Fabrication Technologies

**注目講演**

本会議における主な講演は以下の通りになります。講演日時などは Web ページにて最新の情報をご確認ください。

プレナリ講演 (Plenary talk)

- Prof. Hisashi Yamamoto (Chubu University, JAPAN)

基調講演 (Keynote talks)

- Prof. Mark J. Kushner (University of Michigan, USA)
- Prof. Tomohiro Nishitani (Nagoya University, JAPAN)
- Prof. Mingwei Chen (Johns Hopkins University Baltimore, USA)
- Prof. Toby Jenkins (University of Bath, UK)

チュートリアル (Tutorial)

- Prof. Hiroshi Fujioka (The University of Tokyo, JAPAN)
- Dr. Kai Masur (Leibniz Institute for Plasma

Science and Technology (INP), GERMANY)

- 他 2 件

招待講演 (Invited talks)

[Plasma Science & Technologies]

- Dr. Yoshiyuki Teramoto (AIST, JAPAN)
- Prof. Ronny Brandenburg (Leibniz Institute for Plasma science and Technology, Greifswald, GERMANY)
- Prof. Tsuyohito Ito (The University of Tokyo, JAPAN)
- Dr. Eugen Stamate (Technical University of Denmark, DENMARK)
- Dr. Nathan Stafford (Air Liquide, U.S.A.)
- Prof. Fan Beam Wu (National United University, TAIWAN)

[Wide Band Gap Semiconductors]

- Prof. Jia Wang (Nagoya University, JAPAN)
- Prof. Shigefusa Chichibu (Tohoku University, JAPAN)
- Prof. Hiroyuki Nishinaka (Kyoto Institute of Technology, JAPAN)
- Prof. Tomoki Harada (University of Miyazaki, JAPAN)
- Dr. Jan Kuzmik (Slovak Academy of Science, SLOVAKIA)
- Prof. Akira Kusaba (Kyushu University, JAPAN)
- Prof. Atsushi Yamaguchi (Kanazawa Institute of Technology, JAPAN)
- Dr. Satoshi Anada (Japan Fine Ceramics Center, JAPAN)
- Prof. Shigeya Naritsuka (Meijo University, JAPAN)

[Bio Applications]

- Prof. Hideyuki Yoshitomi (Dokkyo Medical University Saitama Medical Center, JAPAN)
- Prof. Kyohei Terao (Kagawa University, JAPAN)
- Prof. Hiromitsu Toyoda (Osaka Metropolitan University, JAPAN)

[Nanomaterials]

To be announced.

**ウェブページ・問い合わせ先**

本会議についての最新情報などはオフィシャルウェブページ( <http://www.isplasma.jp/> )にてご確認ください。また、本会議への参加登録もこちらのウェブページにて承ります。なお、早期参加登録の場合、参加費の割引がありますので、お早めにご登録をお願いします。

その他、本会議における問い合わせなどがございましたら、以下の会議事務局までお願いいたします。

ISPlasma2025 / IC-PLANTS2025 事務局

TEL: 052-581-3241 / FAX: 052-581-5585

E-mail: [isplasma2025@intergroup.co.jp](mailto:isplasma2025@intergroup.co.jp)

## 行事案内

# 2025 年第 72 回応用物理学会春季学術講演会 プラズマエレクトロニクス分科会企画

名古屋大学 石川 健治, 九州大学 林 信哉

### ■ はじめに

2025 年 3 月 14 日 (金) ~17 日 (月) に千葉県野田市東京理科大学野田キャンパスとオンラインのハイブリッドで第 72 回応用物理学会春季学術講演会が開催されます。本稿では、プラズマエレクトロニクス分科会企画の概要とスケジュールを紹介いたします。脱稿時点で未定の部分も含まれるため、詳細につきましては応用物理学会の HP でご確認をお願いいたします。

### ■ (第 1 日) チュートリアル講演

今春季講演会も、講演会初日に、チュートリアル講演を開催いたします。今回は、日立ハイテクの篠田和典氏より、「原子層エッチングの基礎と開発事例」と題して、微細化が進み Å 精度で高アスペクト比構造が要求されるデバイス加工に向けてデバイス構造に対して加工の縦構造と横方向の制御性を向上させる技術についてご講義して戴きます。チュートリアル講演は事前予約制となっています。定員がありますので、お早めにご予約頂きますようお願い致します。

日程：3 月 14 日 (金) 午後 (予定)

講師：篠田和典氏 (日立ハイテク)

講演題目：「原子層エッチングの基礎と開発事例」

### ■ (第 2 日) プラズマエレクトロニクス賞受賞式

講演会 2 日目午前中には、第 23 回プラズマエレクトロニクス賞の受賞式を予定しています。今回の受賞候補論文の推薦締め切りは 2024 年 12 月 13 日 (金) ですので、この記事が皆様に届いた

時点ではまだ募集中かと思われます。自薦、他薦は問いませんので、是非とも奮って推薦下さいませようをお願い致します。

日程：3 月 15 日 (土) 午前 (予定)

受賞者 1 (敬称略)：

久保井信行\*、松谷弘康、辰巳哲也、小林正治、萩本賢哉、岩元勇人 (ソニーセミコンダクタソリューションズ (株)) (\*ご講演予定者)

選考の対象となった業績：

“Modeling and simulation of coverage and film properties in deposition process on large-scale pattern using statistical ensemble method”, Jpn. J. Appl. Phys. 62, S11006 (2023).

受賞者 2 (敬称略)：

内田儀一郎<sup>1\*</sup>、益本幸泰<sup>1</sup>、榊原幹人<sup>1</sup>、池邊由美子<sup>1</sup>、小野晋次郎<sup>2</sup>、古閑一憲<sup>2</sup>、小澤隆弘<sup>3</sup> (<sup>1</sup>名城大学、<sup>2</sup>九州大学、<sup>3</sup>大阪大学) (\*ご講演予定者)

選考の対象となった業績：

“Single-step fabrication of fibrous Si/Sn composite nanowire anodes by high-pressure He plasma sputtering for high-capacity Li-ion batteries”, Sci. Rep. 13, 14280 (2023).

詳細は、下記の HP をご確認ください。

([https://annex.jsap.or.jp/plasma/PE\\_files/pe\\_award.html](https://annex.jsap.or.jp/plasma/PE_files/pe_award.html))

### ■ (第 2 日) 分科内招待講演

講演会 2 日目午前中に、PE 分科内招待講演として、日本の半導体デバイスのトップメーカーであるキオクシア (株) の栗原一彰氏をお招きしてご講



演をしていただく予定です。皆様には是非ともご参加頂きますよう、お願い申し上げます。

日程：3月15日（土）午前（予定）

ご講演者：栗原一彰氏（キオクシア（株））

ご講演題目：「高アスペクト比ホールエッチング研究：昔から今」

#### ■（第2日）PE分科会企画シンポジウム

講演会2日目午後には、分科会企画シンポジウム「プラズマ活性溶液とその応用」を開催いたします。プラズマ照射した溶液（ここではプラズマ活性溶液と呼ぶ）の研究は、バイオや環境科学など様々な分野で応用・実用化が進んでいる。その一方で今後の更なる技術発展のため、液中放電の効率改善や活性種量増加、ターゲットとの反応制御等、解決すべき課題が多く残る。本シンポジウムでは、液中プラズマ放電、並びにプラズマ活性溶液に関する基礎技術や応用事例を紹介し、今後注力し解決すべき課題とその解決指針を明確化することを目的とします。是非とも奮ってご参加ください。

日程：3月15日（土）午後（予定）

講演者（順不同）：

1. 白藤立（大阪公立大学）「高効率液中プラズマ源の開発」
2. 堀部博志（栗田製作所）「液中プラズマ電源」
3. 宗岡均（東京大学）「フェムト秒レーザー等で生成した液中プラズマによる無機微粒子改質プロセス」
4. 竹内希（東京工業大学）「プラズマ技術によるOHラジカル生成と高度水処理応用」
5. 原宏和（岐阜薬科大学）「プラズマ活性溶液によるがん治療研究」
6. 伊藤昌文（名城大学）「ラジカル照射溶液の開発とその応用」

7. 近藤隆（名古屋大学）「低温プラズマによるアミノ酸水溶液のフリーラジカル生成—スピン捕捉法による検討」

#### ■（第3日）大分類合同企画シンポジウム

講演会3日目午前中および午後、大分類13半導体と合同でシンポジウム「原子層プロセスの基礎と最新技術動向」を開催いたします。微細化や三次元化が進む半導体製造プロセスにおいて、原子層堆積（ALD）や原子層エッチング（ALE）などの原子層プロセス（ALP）は益々重要性を増しています。このようなプロセスサイエンスとALPの最先端技術動向を議論し、材料・デバイス・プロセス等の幅広い分野の研究者・技術者が問題意識を共有し、この分野の更なる技術革新を推進する事を目的とします。是非とも奮ってご参加ください。

日程：3月16日（日）午前・午後（予定）

講演者（順不同）：

1. 松本 皓太（PFCC）「汎用ニューラルネットワークポテンシャルを用いたウェットエッチング反応機構解析」
2. 楊 天任（QunaSys）「量子コンピュータによる量子化学計算の最先端と展望」
3. 久保井 信行（ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社）「TBD」
4. 本田 昌伸（東京エレクトロン宮城株式会社）「TBD」
5. 深沢 正永（産業技術総合研究所）「TBD」
6. Jin-Seong Park (Hanyang University) 「Recent Progress on Atomic Layer Deposited Oxide Semiconductor Channel Layers for Emerging Memory Application」

### ■ 講演奨励賞受賞記念講演

前回の秋の講演会に於いて、「応用物理学会講演奨励賞」が、本会の応用物理学の発展に貢献する優秀な一般講演論文を発表した若手会員の功績を称えて授賞されています。受賞者による記念講演が予定されています。

受賞者（敬称略）：

加藤 有真（キオクシア株式会社）片岡 淳司 1，  
斎藤 僚 2，飯野 大輝 1，福水 裕之 1，佐藤 哲也  
2，栗原 一彰 1（1.キオクシア株式会社，2.山梨  
大・工）「F<sub>2</sub>/Ar/H<sub>2</sub> ガス系を用いた SiO<sub>2</sub> 膜のクラ  
イオエッチングにおける反応メカニズム解明」

### ■ English Session

今回もプラズマエレクトロニクス分野を横断するトピックスで「Plasma Electronics English Session」と題した English Session を予定しています。留学

生の方に限らず、日本人学生の方も是非とも奮って参加頂ければと思います。なお、春季には海外招待講演を予定しておりません。

### ■ おわりに

上記案内いたしました行事の他に3月15日（土）の昼には、大分類意見交換会、PE 分科会のインフォーマルミーティング、同日夕刻には恒例となっておりました PE 分科会懇親会も企画される予定です。詳細は担当幹事から改めて案内があると思いますので、是非、スケジュールに加えておいて下さい。不明な点がございましたら、お気軽にお問合せください。

連絡先：石川 健治（名古屋大学）

ishikawa.kenji@nagoya-u.jp

## 行事案内

# 26th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC26)

東北大学大学院工学研究科機械系 茂田 正哉

The 26<sup>th</sup> International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC26) が 2025 年 6 月 15 日～20 日の日程でアメリカ・ミネアポリスの University of Minnesota, West bank of Mississippi River (main campus) で開催されます。実行委員長は、Prof. Peter Bruggeman (University of Minnesota, USA) です。また、シンポジウムに先立ち、6 月 14～16 日の日程でサマースクールも開催されます。著名な研究者による初学者向けの講義を聴講できるほか、サマースクールでしか得られない講義資料を入手できるため、毎回好評を得ています。また、各国から優秀な大学院生やポストドクターの研究者が多数参加していますので、日本人学生・若手研究者にとってコミュニケーション力を高めながら海外ネットワークを作ることのできる機会として大変有意義な行事です。

本会は、International Plasma Chemistry Society (IPCS) が母体となり運営されている国際会議で、Board of Directors のメンバーとして日本からは渡辺隆行教授 (九州大学)、野崎智洋教授 (東京科学大学 (元東京工業大学))、茂田 (東北大学) が選挙を経て加わっています。ISPC は Gordon Research Conference と交互に隔年で開催されています。プラズマ化学を基軸としながら、原子・分子から電磁熱流体に至るマルチスケール性と、基礎物理から応用研究までを広くカバーしているのが特徴で、この分野では最大規模の国際会議の 1 つです。

基調講演は全 5 件で、そのうち日本から高木浩一教授 (岩手大学) が招聘されています。招待講

演は 16 件のうち日本から 2 件で、久保井信行氏 (ソニーセミコンダクタソリューションズ)、田中学准教授 (九州大学) の講演が予定されています。

現時点では公表されていませんが、今回もまた若手研究者を対象とした賞が設けられることが予想されます。過去の ISPC でも多くの日本人若手研究者が受賞対象となっていますので、積極的にチャレンジしてもらえればと思います。

以上の詳細は、学会およびサマースクールのウェブサイト (<https://www.ispc-conference.org/>, <https://bruggeman.umn.edu/4th-us-plasma-summer-school>) をご参照ください。

1973 年に第 1 回 ISPC が催されて以来、プラズマ化学の黎明期から多くの日本人研究者がこの分野に参画し、分野の発展に貢献してきました。また、ISPC25 は渡辺隆行教授 (九州大学)、浜口智志教授 (大阪大学) が実行委員長を務め、大盛況を博したことも、記憶に新しいと思います。ISPC26 においても多くの皆さまに研究成果をご発表していただき、参加者数だけでなく研究の質においても日本の存在感をいっそう高められるよう、ご貢献いただければ幸甚です。10 年後のプラズマ研究および国内外の組織運営を考えると、若手研究者の育成は急務と考えています。

なお、ISPC26 の国際組織委員として、日本から渡辺隆行教授 (九州大学)、野崎智洋教授 (東京科学大学 (元東京工業大学))、浜口智志教授 (大阪大学)、金賢夏博士 (AIST)、小野亮教授 (東京大) および茂田 (東北大学) が参画していることを付記します。

## 行事案内

# ICPIG2025: International Conference on Phenomena in Ionized Gases XXXVI Edition

北海道大学 佐々木 浩一

第36回電離気体現象国際会議(XXXVI<sup>th</sup> ICPIG)は、2025年7月20-25日に、南フランス・マルセイユ近郊の Aix-En-Provence において開催される予定です。

ICPIGは1953年に第1回が開催された低温プラズマ・電離気体分野における最も伝統ある国際会議であり、第34回が本分科会主催の反応性プラズマ国際会議(ICRP)との合同で2019年に札幌において開催されたことから、本分科会の会員各位にはなじみの深い学会であるかと思えます。ICPIGのスコープは、基礎分野では、プラズマ中の素過程、放電物理、輸送現象、プラズマと固体の相互作用、プラズマ計測などであり、応用分野では、プラズマ表面処理、プラズマ医療および農業、プラズマの環境応用、流体制御へのプラズマの応用などです。プラズマの種類は、低ガス圧プラズマ、高ガス圧条件における非平衡および熱プラズマ、核融合装置における周辺プラズマ、高層大気や星間プラズマなどであり、研究の手法は、実験、理論、計算機シミュレーションです。核融合炉心プラズマを除くほとんどすべてのプラズマ・電離気体現象という広いスコープを持ちながら、アットホームで一体感のある会議であることも特徴です。

ICPIG2025は、5件の General invited lectures および26件の Topical invited lectures の招待講演から構成され、一般投稿論文から選出される36件が Oral contributions として口頭発表される他、月曜から木曜の毎日ポスターセッションが予定されています。ICPIGの招待講演に選出されること

は優れた研究であることの証であり、ICPIG2025では、我が国から1件の General invited lecture および4件の Topical invited lectures が予定されています。加えて、ICPIGでは毎回、本分野において顕著な業績を残した著名な研究者に Von Engel and Franklin Prize が授与され、受賞記念講演が執り行われますが、今回の受賞者は CWI Amsterdam and Eindhoven University of Technology の Ute Ebert に決まりました。一般投稿論文の質が高いことも ICPIG の特徴であり、自身の研究発表の場としてだけでなく、情報収集を目的とした場合でも、ICPIGに参加することは非常に有益だと思います。

以上のようなサイエンスそのものに加え、Social Program として、ウエルカムレセプション、エクスカージョン、および、懇親会が予定されています。世界で活躍する優秀な研究者が一堂に会する機会ですので、中堅研究者はこの会議を通じて人脈を形成するため、若い研究者は世界に顔を覚えてもらうための絶好の機会になります。ICPIGは日本から毎回多数の参加者を得ています(ICPIG2023の国別投稿論文数は1位、参加者数は2位)。ICPIG2025は旅行先としても魅力のある南フランスでの開催です。本分科会会員各位の積極的な論文投稿をお願いいたします。投稿に必要なのは1ページの簡単なアブストラクトで、投稿締切は2025年3月25日の予定です。ICPIG2025の詳細は以下のホームページを参照ください。

<https://icpig2025.sciencesconf.org/?lang=en>

## 行事案内

# 78th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC 2025)

## 東北大学 金子俊郎 (GEC2025 Executive Committee Member)

第78回気体エレクトロニクス会議(GEC 2025)が、2025年10月13日から10月17日の日程にて、韓国・ソウルにて開催されます。アジアでの開催は、2022年の日本・仙台での開催に次いで、2度目となります。

GECは、アメリカ物理学会(APS)のDivision of Atomic, Molecular and Optical Physicsの傘下、低温プラズマの物理と化学、及び、その応用を主たるテーマとして毎年開催される会議で、プラズマ医療・農業を含むプラズマバイオテクノロジー、マルチフェーズプラズマ、環境応用などの新分野の講演も数多く行われています。プラズマエレクトロニクス(PE)分科会との親和性も高く、これまでにPE分科会主催の反応性プラズマ国際会議(ICRP)との合同会議が4回行われています。GECには、日本から毎年多くの皆様に参加しており、ここ数年は米国に次ぐ参加人数でありまして、PE分科会会員にとって大変有益な会議であるといえます。

今回のGEC2025では、皆様からの推薦を基にExecutive Committeeで承認された、合計50件強の招待講演が予定されており、原子・分子の基礎過程から低温プラズマ応用まで質の高い講演が期待されます。

GECでは、優れた研究を行う学生を奨励するために、GEC Student Award for ExcellenceとGEC Student-Poster Prizesという賞が設けられています。前者は口頭発表、後者はポスター発表が対象で、いずれも事前申請が必要となります(詳細は今後掲載予定のGECのHPを参照して下さい)。

GECが3年ぶりにアジアで開催されることになりましたので、GECに参加する欧米のみならずアジアのプラズマ研究者との良好な関係を維持しながら、PE分科会が益々発展するためにも、多くの会員の皆様のご参加をお願い申し上げます。

プログラムとしても、韓国開催の特色となるワークショップや半導体企業の見学会などのイベントも企画される予定でありますので、是非ソウルに足を運んでいただき、研究とともに皆様同士の情報交換も楽しんでいただきたいと思います。

なお、発表申込および予稿投稿の締め切りは、まだ正式には決まっておりませんが、2025年6月上旬の予定です。

### 【重要日程】

- 発表申込および予稿投稿の締切：  
2025年6月上旬予定
- GEC Student Award for ExcellenceとStudent Travel Grantの締切：  
2025年6月上旬予定
- GEC Student-Poster Prizesの締切：  
2025年9月下旬予定
- 会議会期：2025年10月13日～10月17日

### 【会議ホームページ】

[URL] <https://www.apsgec.org/gec2025/>

[QRコード]



## 2024 年度(令和 6 年度) プラズマエレクトロニクス分科会幹事名簿

	氏名	所属	住所・電話	メールアドレス
幹事長	古閑 一憲	九州大学 システム情報科学研究院	〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744 TEL: 092-802-3734	koga@ed.kyushu-u.ac.jp
副幹事長	石川 健治	名古屋大学 低温プラズマ科学研究センター (工学研究科 電子工学専攻)	〒464-8601 愛知県名古屋千種区不老町 NIC 4 階 TEL: 052-788-6077	ishikawa@plasma.engg.nagoya-u.ac.jp
副幹事長	竹内 希	東京科学大学 工学院 電気電子系	〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-S3-4 TEL: 03-5734-2566	takeuchi@ee.e.titech.ac.jp
副幹事長	松井 都	株式会社日立製作所 計測イノベーションセンタ ナノプロセス研究部	〒185-8601 東京都国分寺市東ヶ窪1丁目280 TEL: 080-8709-9778	miyako.matsui.sh@hitachi.com
幹事 任期 2025 年 3 月	天野 智貴	パナソニックホールディングス株式会社 マニュファクチャリングイノベーション 本部	〒571-8502 大阪府門真市松葉町2番7号 TEL: 080-9940-7737	amano.tomoki@jp.panasonic.com
"	伊藤 智子	大阪大学 工学研究科 マテリアル生産科学専攻 生産科学コース 浜口研究室	〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 アトミックデザイン研究センター TEL: 06-6879-7917	ito@ppl.eng.osaka-u.ac.jp
"	川崎 仁晴	佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科	〒857-1193 長崎県佐世保市沖新町 1-1 TEL: 0956-34-8468	h-kawasa@sasebo.ac.jp
"	佐々木 渉太	東北大学 大学院工学研究科 電子工学専攻 金子・加藤研究室	〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05 TEL: 022-795-7046	s.sasaki@tohoku.ac.jp
"	塩田 有波	三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 環境システム技術部 放電応用グループ	〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1 TEL: 06-6497-3545	Shiota.Arufa@dp.MitsubishiElectric.co.jp
"	清水 鉄司	産業技術総合研究所 電子光基礎技術研究部門 先進プラズマプロセスグループ	〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2	tetsuji.shimizu@aist.go.jp
"	全 俊豪	青山学院大学 理工学部 電気電子工学科	〒252-5258 神奈川県相模原市中央区 淵野辺5-10-1 TEL: 042-759-6253	zen@ee.aoyama.ac.jp
"	田中 宏昌	名古屋大学 低温プラズマ科学研究センター	〒465-8603 愛知県名古屋市千種区不老町 ES 館 425 号室 TEL: 052-788-6230	htanaka@plasma.engg.nagoya-u.ac.jp
"	谷出 敦	株式会社 SCREEN ホールディングス イノベーション推進室 推進 2 課	〒520-2323 滋賀県野洲市三上 2426-1 TEL: 080-2509-4207	tanide@screen.co.jp
"	富田 健太郎	北海道大学 大学院工学研究院 応用量子理工学部	〒060-8628 北海道札幌市北区 13 条西 8 丁目 北海道大学工学部 A 棟 4 階 4-28 室 TEL: 011-706-5594	tomita.kentaro@eng.hokudai.ac.jp
"	平松 亮	ウェスタンデジタル合同会社	〒512-8550 三重県四日市市山之一色町 800 番地 TEL: 059-330-1402	ryo.hiramatsu@wdc.com
"	宗岡 均	東京大学 新領域創成科学研究科 物質系専攻 寺嶋・伊藤研究室	〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5-504 基盤棟5階5A1 TEL: 070-1557-6046	muneoka@plasma.k.u-tokyo.ac.jp

幹事 任期 2026年3月	岩井 貴弘	株式会社日立製作所	〒185-8601 東京都分寺市東恋ヶ窪1丁目280 TEL: 042-323-1111	takahiro.iwai.qw@hitachi.com
"	内田 儀一郎	名城大学 理工学部 電気電子工学科	〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1丁目501 TEL: 052-838-2579	uchidagi@meijo-u.ac.jp
"	呉 準席	大阪公立大学 大学院工学研究科 電子物理系専攻	〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1-1 TEL: 072-274-6191	jsoh@omu.ac.jp
"	檜森 慎司	東京エレクトロン宮城株式会社 大和事業所 アドバンステクノロジー ソリューション開発本部	〒981-3629 宮城県黒川郡大和町テクノヒルズ1 番 TEL: 022-346-3225	shinji.himori@tel.com
"	大島 多美子	長崎大学 大学院工学研究科 電気・情報科学部門	〒852-8521 長崎市文教町1-14 TEL: 095-819-2538	ohshima@nagasaki-u.ac.jp
"	片岡 淳司	キオクシア株式会社 先端技術研究所 コアテクノロジー研究開発センター	〒221-0022 神奈川県横浜市神奈川区守屋町 3丁目13-1 4F TEL: 045-394-7260	junji.kataoka@kioxia.com
"	田中 文章	石川工業高等専門学校 電気工学科	〒929-0392 石川県河北郡津幡町北中条タ1 TEL: 072-274-6191	f_tanaka@ishikawa-nct.ac.jp
"	田中 学	九州大学 工学研究院 化学工学部門	〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 TEL: 092-802-2755	mtanaka@chem-eng.kyushu-u.ac.jp
"	堤 隆嘉	名古屋大学 低温プラズマ科学研究センター	〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町 IB 電子情報館北棟 223 号室 TEL: 052-788-6230	tsutsumi@plasma.engg.nagoya-u.ac.jp
"	長澤 寛規	広島大学 大学院先進理工系科学研究科	〒739-8527 広島県東広島市鏡山1丁目4-1 工学部 A4 棟 222 TEL: 082-424-7719	nagasawa@hiroshima-u.ac.jp
"	新田 魁洲	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 先進パワーエレクトロニクス研究センター	〒563-8577 大阪府池田市緑丘 1-8-31 TEL: 050-3522-7130	kaishu.nitta@aist.go.jp
"	村上 朝之	成蹊大学 理工学部 理工学科	〒180-8633 東京都武蔵野市吉祥寺北町3-3-1	tomo- murakami@st.seikei.ac.jp
"	財前 義史	ソニーセミコンダクタソリューションズ 株式会社 第2研究部門	〒243-0014 神奈川県厚木市旭町4-14-1 TEL: 050-3141-4363	Yoshifumi.Zaizen@sony.com

## 2024 年度(令和 6 年度)分科会幹事役割分担

役割分担	留任		新任	
幹事長			古閑 一憲	九州大学
副幹事長			石川 健治	名古屋大学
			松井 都	日立製作所
			竹内 希	東京科学大学
1. 庶務・分科会ミーティング	宗岡 均	東京大学	堤 隆嘉	名古屋大学
2. 春秋講演会シンポジウム シンポジウム・海外招待講演 分科内招待講演 チュートリアル講義			石川 健治	名古屋大学
			松井 都	日立製作所
			竹内 希	東京科学大学
	谷出 敦	SCREEN ホールディングス	長澤 寛規	広島大学
	平松 亮	ウエスタンデジタル	新田 魁洲	産業技術総合研究所
	田中 宏昌	名古屋大学	呉 準席	大阪公立大学
3. プラズマプロセッシング研究会			竹内 希	東京科学大学
			松井 都	日立製作所
	全 俊豪	青山学院大学	呉 準席	大阪公立大学
	田中 宏昌	名古屋大学	田中 学	九州大学
	谷出 敦	SCREEN ホールディングス	村上 朝之	成蹊大学
	伊藤 智子	大阪大学	内田 儀一郎	名城大学
4. 光源物性とその応用研究会				
5. プラズマ新領域研究会			竹内 希	東京科学大学
	清水 鉄司	産業技術総合研究所	長澤 寛規	広島大学
	伊藤 智子	大阪大学	田中 文章	石川工業高等専門学校
	富田 健太郎	北海道大学	田中 学	九州大学
6. インキュベーションホール			石川 健治	名古屋大学
	清水 鉄司	産業技術総合研究所	田中 文章	石川工業高等専門学校
	川崎 仁晴	佐世保工業高等専門学校	檜森 慎司	東京エレクトロン宮城
	富田 健太郎	北海道大学	大島 多美子	長崎大学
			村上 朝之	成蹊大学
7. プラズマエレクトロニクス講習会			松井 都	日立製作所
	佐々木 渉太	東北大学	新田 魁洲	産業技術総合研究所
	天野 智貴	パナソニックホールディングス	片岡 淳司	キオクシア
	平松 亮	ウエスタンデジタル	財前 義史	ソニーセミコンダクタソリューションズ
	塩田 有波	三菱電機	檜森 慎司	東京エレクトロン宮城
	谷出 敦	SCREEN ホールディングス	岩井 貴弘	日立製作所
8. 会誌編集・書記	佐々木 渉太	東北大学	田中 学	九州大学
	天野 智貴	パナソニックホールディングス	財前 義史	ソニーセミコンダクタソリューションズ
9. ホームページ	宗岡 均	東京大学	堤 隆嘉	名古屋大学
10. 会計	川崎 仁晴	佐世保工業高等専門学校	大島 多美子	長崎大学
11. プラズマエレクトロニクス賞			古閑 一憲	九州大学
12. アカデミックロードマップ (戦略企画室)			古閑 一憲	九州大学
			石川 健治	名古屋大学
			松井 都	日立製作所
	(白谷 正治)	九州大学	(白藤 立)	大阪公立大学
13. PE 懇親会	塩田 有波	三菱電機	岩井 貴弘	日立製作所
	全 俊豪	青山学院大学	内田 儀一郎	名城大学
ICRP 委員 (オブザーバー)	柘久保 文嘉	東京都立大学		
	金子 俊郎	東北大学		



## 2024年度（令和6年度）分科会関連の各種世話人・委員

### 1. 応用物理学会講演会プログラム編集委員

8	大分類代表	林 信哉	(九州大学)
8.1	プラズマ生成・診断	竹田 圭吾	(名城大学)
8.2	プラズマ成膜・エッチング	荻野 明久 篠田 和典	(静岡大学) (日立ハイテク)
8.3	プラズマナノテクノロジー	小川 大輔	(中部大学)
8.4	プラズマライフサイエンス	栗田 弘史 橋爪 博司	(豊橋技術科学大学) (名古屋大学)
8.5	プラズマ現象・新応用・融合分野	呉 準席	(大阪公立大学)
8.6	Plasma Electronics English Session	小野 亮 北崎 訓	(東京大学) (福岡工業大学)
8.7	プラズマエレクトロニクス分科内招待講演	石川 健治	(名古屋大学)
8.8	PE 賞受賞記念講演	石川 健治	(名古屋大学)

### 2. 応用物理学会理事

木下 啓藏 (副会長)	(アイオーコア)
伊藤 昌文	(名城大学)
伊藤 貴司	(岐阜大学)
栗原 一彰	(キオクシア)

### 3. フェロー

応用物理学会フェロー名簿

<https://www.jsap.or.jp/jsap-fellow/fellow-members>

をご参照下さい。

このほか、応用物理学会の代議員、本部委員会などにおきましても、多くの分科会会員の方にご活躍頂いておりますが、誤った掲載でご迷惑をおかけしてしまうリスクを考慮して、掲載を取りやめております。

## 活動報告

プラズマエレクトロニクス分科会幹事会は Zoom を用いたオンライン会議にて 2024 年 10 月 7 日にインフォーマルミーティングとして開催された。

### 1. PE インキュベーションホールの開催報告・授賞報告

富田幹事 (北大), 石川副幹事長 (名大) から第 18 回 PE インキュベーションホールについて, 参加者数, 会計報告, アンケート結果などに関して報告があった。

### 2. 春季講演会 (東京理科大学野田キャンパス 2025.3.14~17) 分科内招待講演について

石川副幹事長 (名大) から今秋のシンポジウム等について, 参加者数などの報告があった。

また, 来春のシンポジウム等について, それぞれ下記の提案がされ, 承認された。

- ・来春分科内講演

「(仮) 半導体プラズマプロセスの表面反応に関する研究 (キオクシア 栗原様)」

- ・来春シンポジウム

「(仮) プラズマ活性溶液とその応用」

- ・大分類 13 半導体との合同シンポジウム

「(仮) 原子層プロセス」

### 3. 春季学術講演会のシンポジウムについて

田中(宏)幹事 (名大) から来春シンポジウム「(仮) プラズマ活性溶液とその応用」についての詳細が説明された。

### 4. 春季学術講演会のチュートリアル講演のテーマおよび講師案

平松幹事 (ウェスタンデジタル) から来春のチュートリアル講演の内容が提案され, 承認された。

「原子層エッチングの基礎と開発事例 (日立ハイテク 篠田様)」

### 5. プラズマエレクトロニクス講習会の進捗状況

松井副幹事長 (日立) から 2024 年度プラズマエレクトロニクス講習会の詳細について報告があった。

### 6. プラズマ新領域研究会の進捗状況

竹内副幹事長 (科学大) から第 44 回プラズマ新領域研究会について, 開催報告があった。(9 月 27 日開催済, 会報 No.81 で報告掲載)

また, 第 45 回・第 46 回について, 現時点の開催予定の報告があった。

### 7. プラズマプロセッシング研究会 (SPP-42) の進捗状況

竹内副幹事長 (科学大) から SPP-42 の進捗状況が報告された。参加申込締切は, 11 月 9 日。

### 8. 分科会会報 No.81 の進捗状況

田中(学)幹事 (九大) から分科会会報 No.81 の進捗状況が報告された。

### 9. 関連会議の紹介

宗岡幹事 (東大) から各関連会議の紹介がされた。

### 10. 分科会 HP リニューアルについて

宗岡幹事 (東大) から分科会 HP のリニューアルについて, 方針が説明された。分科会のこれまでの積み重ねや活動を整理して, アーカイブ化を進め, 入会したいと思われるコンテンツの拡充を考えている。現状について, 新 HP 案を作成した段階で, 今後データ整理を進め, 外部業者へ委託する予定。良い HP 制作業者をご存じの方は宗岡幹

事（東大）までご連絡をお願いしたい。

また、古閑幹事長（九大）から、データ整理のための学生バイトへの支出について進めて良いかどうかを全体に確認し、承認された。

#### 11. 第 23 回応用物理学会プラズマエレクトロニクス賞の候補論文募集

古閑幹事長（九大）から、第 23 回応用物理学会プラズマエレクトロニクス賞の候補論文募集について、説明された。

#### 12. その他（古閑幹事長（九大））

12.1 アカデミックロードマップ改定版進捗報告  
アカデミックロードマップの状況について報告された。アカデミックロードマップの各分野で代表 1 人を選出したシンポジウム等の開催を予定したい。

12.2 DPS 共催時の予稿著作権の帰属について  
DPS 予稿著作権について、応物での管理は難しいとのことで、当面は DPS 側で管理することとなった。

12.3 2025 プラエレ事業計画と予算案  
事業計画と予算案について、報告された。

12.4 2 年目幹事の後任推薦（内諾）のお願い  
内諾も取りながらぜひ後任推薦を進めていただきたい（10 月 19 日締切）。

12.5 ICRP2026（予定）の準備状況  
ICRP2026 の開催準備状況が報告された。

記：佐々木（東北大）

## プラズマエレクトロニクス関連会議日程

新型コロナウイルスの影響で、開催日程および開催形態が不確定なものがあります。詳細は各会議の web ページをご参照ください。

### 【 国際会議 】

**2025.3.3 – 7**

17th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials, 18th International Conference on Plasma Nano Technology and sciences (ISPlasma 2025/IC-PLANTS 2025)

Chubu University, Aichi, Japan

<https://www.isplasma.jp/index.html>

**2025. 6.15 – 20**

26th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC26)

University of Minnesota, Minneapolis, USA

<https://bruggeman.umn.edu/4th-us-plasma-summer-school>

**2025. 7.20 – 25**

International Conference on Phenomena in Ionized Gases 36th Edition (ICPIG 2025)

Aix en Provence, France

<https://icpig2025.sciencesconf.org/>

**2025. 10.13 – 17**

The 78th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC 2025)

COEX Convention & Exhibition Center, Seoul, Korea

<https://www.apsgec.org/gec2025/>

### 【 国内会議・会合 】

**2025. 3.14 – 17**

第 72 回 応用物理学会 春季学術講演会

東京理科大学 野田キャンパス, 千葉県野田市

<https://meeting.jsap.or.jp/>

**2025. 9.7 – 10**

第 86 回 応用物理学会 秋季学術講演会

名城大学 天白キャンパス, 愛知県名古屋市

<https://www.jsap.or.jp/jsap-meeting/future>

**2026. 3.15 – 18**

第 73 回 応用物理学会 春季学術講演会

東京科学大学 大岡山キャンパス, 東京都目黒区

<https://www.jsap.or.jp/jsap-meeting/future>

**2026. 9.8 – 11**

第 87 回 応用物理学会 秋季学術講演会

北海道大学 札幌キャンパス, 北海道札幌市

<https://www.jsap.or.jp/jsap-meeting/future>

## 当会報への広告掲載について

応用物理学会 プラズマエレクトロニクス分科会では、分科会会員への情報提供を旨とし、会報への広告出展を募集しております。広告の掲載にあたっては下記のような条件としておりますので、是非ご検討の程よろしくお願い申し上げます。

### 1. 契約の種類

#### (A) 年間契約コース

1年間にわたる掲載。通常は6月、12月に発行される2号にわたって掲載されます。掲載号ごとに新規原稿に差替えできません。

#### (B) 単号契約コース

特定の号のみの掲載。

### 2. 掲載位置

掲載位置は編集後記の後になります。基本五十音順の掲載になりますが、レイアウト等の都合で適宜変更になる可能性があります。何卒ご了承ください。また裏表紙への依頼がない場合には年間契約の中からまわす場合があります。不都合がある場合にはご相談ください。

### 3. 入稿

原稿はA4版ネガ、もしくは電子ファイル(pdf)とします。これ以外の場合、かかる費用を別途請求させていただきます。

### 4. 広告掲載料

掲載料は下表の通りとします。なお、年間契約の場合も申し込み時点で一括請求とさせていただきます。

	(A) 年間契約 コース	(B) 単号契約 コース
半ページ	5万円 (4万円)	4万円 (3万円)
1ページ	8万円 (6万円)	5万円 (4万円)
2ページ (見開き指定可)	12万円 (9万円)	8万円 (6万円)
裏表紙	12万円 (9万円)	8万円 (6万円)

※カッコ内は賛助会員企業

### 5. 問い合わせ先

〒113-0031 東京都文区根津 1-21-5

応物会館 2階

公益社団法人 応用物理学会

TEL: 03-3828-7723

FAX: 03-3823-1810

Email: [divisions@jsap.or.jp](mailto:divisions@jsap.or.jp)

HP: <http://annex.jsap.or.jp/plasma/>

## 編集後記

この度、プラズマエレクトロニクス (PE) 分科会会報 No.81 を発行することが出来ました。ご多忙の中、原稿をご執筆いただいた方々、多くのご助言をいただいた方々にこの場を借りて心から御礼申し上げます。本当にありがとうございました。

巻頭言では、東京大学 新領域創成科学研究科 寺嶋和夫先生より、「青信号はゴーではない、赤信号は・・・—昭和 100 年の独創的な研究、研究者・技術者・企業家へ—」をご執筆頂きました。示唆に富む貴重な原稿をご執筆頂けたこと、特に厚く御礼申し上げます。

また、アカデミックロードマップ 2050 委員会から、代表して大阪公立大学の白藤立先生に、「アカデミックロードマップ改定」を本会報用に御纏め頂きました。PE 分科会関係者が専門家に PE 分野の研究の方向性を説明する資料として、研究費獲得のための補助資料として、ならびに政府関係者などにプラズマ科学の重要性を理解してもらうための資料として使うため、という目的で企画されたロードマップ改定 (2050 年代に至るまで) について経緯を含めてご執筆頂きまして感謝申し上げます。

研究室紹介のコーナーにおきましては、埼玉大学 大学院理工学研究科 電力研究室について、稲田優貴先生にご紹介いただきました。研究の取り組みを中心に、大変わかりやすくご紹介頂いた内容に加え、埼玉への造詣が深いことも垣間見える魅力的な記事をご執筆頂きました。御礼申し上げます。

研究紹介では、近年注目を集めている微分方程式を解くための新しい方法としての Physics-informed neural networks (PINNs) の応用事例についてご解説頂きました。電子輸送特性の解明への PINNs の応用として、PINNs による交流電界

下のボルツマン方程式解析、PINNs による連続の式の発見と電子輸送係数測定への応用、という極めて画期的な取り組みをご解説頂いた力作であると強く感じました。ご執筆、誠にありがとうございました。

応用物理学会講演奨励賞を受賞された東京科学大学の金大永先生、第 22 回プラズマエレクトロニクス賞を受賞されたソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社の久保井様、同賞を受賞された名城大学の内田儀一郎先生には、受賞対象の研究をわかりやすくご解説いただきました。重ねまして厚く御礼申し上げます。

国際・国内会議報告、行事案内につきましても、ご執筆頂いた先生方のそれぞれの思いが伝わってくる原稿であると感じました。熱量のこもった報告・案内記事をご執筆賜りましたこと、心より感謝申し上げます。本稿に記載されている案内記事を是非ご一読いただき、奮ってご参加くださいますようお願い申し上げます。

最後に、本号の原稿執筆を快く引き受けてくださいました著者の皆様、幹事長、副幹事長を始めとする分科会会員の皆様および応用物理学会事務局分科会担当の白石様にこの場を借りて、改めて感謝を申し上げます。尚、分科会会報では、各種報告や行事案内を随時募集しております。今後ともプラズマエレクトロニクス分科会会報をどうぞ宜しくお願いいたします。皆様のお手元に届く頃には、日ごとに寒さがつのっていることと思いますが、くれぐれもご自愛頂きましたら幸甚でございます。

記：田中 (九州大学)

(令和 6 年度会報編集担当：

佐々木、天野、田中、財前)

プラズマエレクトロニクス分科会会報 No.81  
2024年 12月15日 発行  
編集:公益社団法人応用物理学会  
プラズマエレクトロニクス分科会  
幹事長 古閑 一憲  
発行:公益社団法人応用物理学会  
〒113-0031 東京都文京区根津一丁目 21 番 5 号  
応物会館  
(©2024 無断転載を禁ず)