

目次

巻頭言

プラズマエレクトロニクスにおけるこれからの人材育成のスキーム	名城大学	平松 美根男	1
--------------------------------	------	--------	---

寄稿

Reactive Plasma Award と紫綬褒章をいただいて～若手へのエンカレッジ～	名古屋大学	堀 勝	6
---	-------	-----	---

学生のためのページ

プラズマ農学研究のこれまでーラボから農場までー	九州大学	奥村 賢直 アタリ パン カジ 古閑 一憲	8
-------------------------	------	--------------------------------	---

委員会紹介

日本学術振興会 R052 DXプラズマプロセス委員会	東北大学	金子 俊郎	19
----------------------------	------	-------	----

研究室紹介

名古屋大学 低温プラズマ科学研究センター 石川・田中研究室	名古屋大学	田中 宏昌 石川 健治	21
----------------------------------	-------	----------------	----

研究紹介

プラズマ照射とランプ加熱を用いた 各種薄膜材料の等方性原子層エッチング	日立製作所 日立ハイテク 名古屋大学	篠田 和典 三好 信哉 小林 浩之 伊澤 勝 石川 健治 堀 勝	27
--	------------------------------	---	----

第21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 東京大学 小池 健 34
宗岡 均
寺嶋 和夫
伊藤 剛仁

プラズマエレクトロニクス賞を受賞して 名古屋大学 市川 景太 37
Chu Manh Hung
森山 誠
鈴木 陽香
豊田 浩孝
飯野 大輝
福水 裕之
栗原 一彰

キオクシア

応用物理学会講演奨励賞

水ジェット/低ガス圧プラズマ相互作用環境における水和電子のレーザー誘起脱溶媒和信号の印加電圧依存性 北海道大学 稲垣 慶修 41

国際会議報告

15th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials / 16th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (ISPlasma2023 / IC-PLANTS2023) 岐阜大学 上坂 裕之 44

国内会議報告

第70回応用物理学会春季学術講演会チュートリアル報告 ソニーセミコンダクタソリューションズ 深沢 正永 46

2023年 第70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シンポジウムT16.プラズマ駆動型科学とは何か～プラズマプロセスの新展開に期待して～ 名古屋大学 石川 健治 47

2023年 第70回応用物理学会春季学術講演会分科内招待講演 名古屋大学 堀 勝 熊谷 慎也 49
「ラジカル制御によるプラズマエレクトロニクスの進化」

2023年 第70回応用物理学会春季学術講演会分科内招待講演 大阪大学 御手洗 光祐 石川 健治 50
「量子コンピュータによる機械学習アルゴリズムの現状」

第 38 回プラズマ新領域研究会 「プラズマプロセスが切り拓く次世代表面処理技術 の開発動向」開催報告	岐阜大学	上坂 裕之	51
第 39 回プラズマ新領域研究会 「プラズマ諸特性理解の新展開」開催報告	苫小牧工業高等専門 学校	奥山 由	52
第 40 回プラズマ新領域研究会 「熱プラズマの可視化研究の最前線」開催報告	大阪大学	古免 久弥	53
第 5 回原子層プロセスワークショップ	大阪大学	唐橋 一浩 浜口 智志	54
行事案内			
2023 年 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 プラズマエレクトロニクス分科会企画	名城大学	伊藤 昌文	55
第 44 回ドライプロセス国際シンポジウム 44th International Symposium on Dry Process (DPS2023)	ラムリサーチ 中部大学 日立製作所	大場 富仁 小川 大輔 松井 都	57
第 17 回インキュベーションホール	名城大学 室蘭工業大学	伊藤 昌文 川口 悟	59
掲示板			
第 22 回プラズマエレクトロニクス賞受賞候補論文の 募集	大阪公立大学	白藤 立	61
2023 年度(令和 5 年度) プラズマエレクトロニクス分科会幹事名簿			62
2023 年度(令和 5 年度)分科会幹事役割分担			64
2023 年度(令和 5 年度) 分科会関連の各種世話人・委員			65
活動報告			66
プラズマエレクトロニクス関連会議日程			68
当会報への広告掲載について			69
編集後記			70

プラズマエレクトロニクスにおける これからの人材育成のスキーム

名城大学 平松 美根男

皆さんご存じの通り、応用物理学会に限らず、多くの学会が会員数を減らしているようです。応用物理学会の場合、秋季学術講演会の前に会員数は一旦増加、年度末に減少というのを毎回繰り返していますが、3月末で比較すると、2018年に20,000人を越えていた会員数が、2023年には18,000人を割るまで減少しています。企業会員の減少が顕著であり、応用物理学会ではこれを払拭するため2015年末に企業会員を中心とするインダストリアルチャプターを設立し、企業会員向けサービスの向上をはかっています。加えて、講演会で発表するために会員となった学生・院生も卒業・修了と同時に退会してしまうケースも多く、若手会員を学会に留めるための方策の検討も行われています。

縁あって応用物理学会理事に推薦していただきました。2022年より人材育成・教育企画委員会を担当し、応用物理学会の人材育成に関わることを取り纏める立場にあります。この度、表題のような執筆の機会を頂き、巻頭言として相応しいか分かりませんが、応用物理学会が行う教育・人材育成の観点からプラズマエレクトロニクス分科会の現状や今後の方向性について思うことを綴ります。

1. プラズマエレクトロニクス分科会でやってきた人材育成事業

プラズマエレクトロニクス分科会では、研究会から分科会への昇格当初から人材育成も重要視し、大学院生・若手研究者やこの分野に新しく参入し

た研究者を対象に、プラズマエレクトロニクスの基礎や現状について実習を含めて研修してもらうことを目的とした講習会が企画され、現在のプラズマエレクトロニクス講習会やインキュベーションホールへと引き継がれています。さらに、異分野の研究者を交えた討論を行い、新学術領域の創成を目指すべく新領域研究会が2008年より継続的に実施されています。そして2019年には若手有志によってプラズマ若手チャプターが設立され、産学官をまたぐプラズマ分野の若手研究者ネットワークの構築及び、他分野若手チャプターとの交流により新分野創成への展開を目指しています。後述しますが、応用物理学会は若手のネットワーク作りを支援しており、プラズマ若手チャプターの活躍は大いに期待されます。

2. 人材育成・教育企画委員会は何をしている？

本部委員会にあった会員サービス委員会と教育企画委員会が統合され、2022年より人材育成・教育企画委員会として活動しており、①チャプター運営支援、②応用物理学会が行うべき教育事業の整理、および、③リフレッシュ理科教室関連科学啓発活動の取り纏めを行っています。

応用物理学会では、会員相互のネットワーク構築のためのプラットフォームを提供し、運営を支援しています。これらのプラットフォームとして、スチューデントチャプター、若手チャプター、インダストリアルチャプター、および、海外会員チャプターの4種類のチャプターがあります。人材

育成・教育企画委員会では、主にスチューデントチャプターや若手チャプターの設立や運営の支援、学生と企業若手会員（インダストリアルチャプター）との交流の支援など、学生会員・若手会員の活性化促進に向けた取り組みを行っており、これらをチャプター運営支援と称しています。若手研究者が自身の研鑽やネットワーク構築などを目的として継続的に活動を担う若手チャプターでは、2023年4月の時点で7つの集団が立ち上がっていますが、その中にはプラズマ若手チャプターもあります。コロナ禍も明け、プラズマ若手チャプターには、産官との連携や他分野との交流を積極的に進めてプラズマエレクトロニクスの新展開に繋がっていただければ幸いです。

リカレント教育あるいはリスキリング教育の重要度が高まっています。各支部や分科会・研究会では、学生・若手向けの入門セミナーや第一線で活躍する技術者・研究者向けの専門講習会等のイベントを定期的で開催しています。学会には様々な分野の専門家も多く属しており、リスキリング教育として提供できるコンテンツは数多くあるものの、残念ながらどんな教育イベントを何時何処で実施しているか見つかりにくい状態にあります。現在、応用物理学会が取り組んでいるこれらの教育関連事業を整理し、会員および非会員が学会のホームページから容易にアクセスできるよう準備を進めています。プラズマの分野で活動しているが関連する応用分野のことをもっと知りたい、あるいは、他分野の技術者が手段としてプラズマを利用する際にプラズマのことをもっと知りたい、となった場合に、学会のホームページから関連する教育イベントが容易に見つかって試しに受講することができ、さらに関連するネットワークを使って疑問を解決！といった、役に立つ学会の実現を目指しています。

また、少し腰を落ち着けて学び直しができるリ

カレント教育の提供も準備しています。今年の後半には「半導体セミナー」の実施を計画しており、3時間×3回のシリーズもので、半導体デバイスの基礎から最新動向までを扱います。半導体をもっと知りたい、半導体をもう一度学び直したい方は是非とも受講して下さい。また、こんなことを勉強したいというトピックスがあればお知らせ下さい。

3. プラズマエレクトロニクス分科会の人材育成活動に課題はあるか？

プラズマエレクトロニクス分科会では、大学院生・若手研究者やこの分野に新しく参入した研究者を対象に、プラズマエレクトロニクス講習会やインキュベーションホールを毎年実施しており、会員サービスとしての教育事業を継続的に行っています。特にプラズマエレクトロニクス講習会に関しては、企業からの幹事、副幹事長ならびに熟練した講師陣の尽力もあり、受講者の満足度は常に高く、講習会の収入は分科会の財政を支えています。また春・秋の学術講演会では他分野との交流も積極的であり、併せて、若手有志によってプラズマ若手チャプターが設立され、産学官をまたぐプラズマ分野の若手研究者ネットワークの構築及び、他分野若手チャプターとの交流により新分野創成への展開を目指すなど、十分健全な組織と言えるかと思います。

プラズマエレクトロニクス分科会の幹事構成をみると、約3割が企業からの幹事であり、企業会員のニーズに応えることができる体制ができています。現状では、ソニーとキオクシア（東芝メモリ）はプラズマエレクトロニクス賞の常連ですが、他の企業からの応募は減多にありません。企業で基礎研究に携わる研究者の人口が減少していると言われていています。一方で、今年の春季学術講演会では非会員の参加者数が伸びており、学会を情報

収集の場と捉える企業が増えているようです。このようなグループのニーズにどのように応えるか、皆で知恵を出していく必要があります。

プラズマエレクトロニクス分科会創設 20 周年特集の記事の中で、後藤俊夫先生が分野の開拓において異分野間の融合と世代間の融合の必要性に触れておられます。プラズマエレクトロニクス分科会の目的は「プラズマエレクトロニクスに関する研究の推進及び技術の向上をはかること」であり、より広く応用物理学会会員の参加を得て、組織的な体制の下に先見的な活動を展開し、かつきめ細かく会員の要望に応えうる会の運営を行っていくという設立時の趣旨を忘れず、会員側は何を知りたいかを積極的に発信し、運営側は要請に広く耳を傾け、異分野間および世代間の交流の場を効果的に提供できるよう、持続的な努力を続けていただくことを願っています。

4. プラズマエレクトロニクス分科会が過去に行った科学啓発活動

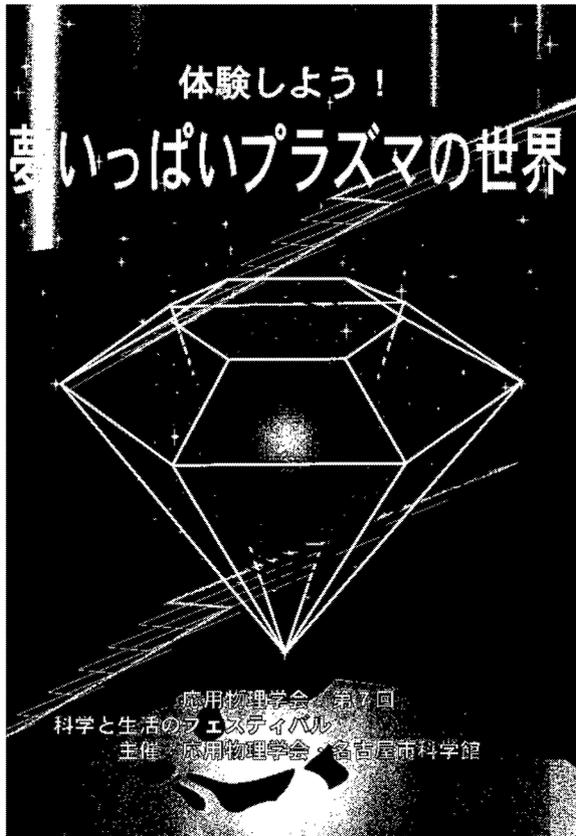
応用物理学会では、科学啓発活動としてリフレッシュ理科教室を北海道、東北、東海、北陸・信越、関西、中国四国、九州の7つの支部と応用物理教育分科会(関東をカバー)が実施しています。児童の理科離れを食い止めるにはまずは先生からということで、小中学校の先生が教育現場で利用できる理科実験・教材工作の紹介や先端科学技術に関する講演を行うことから始まったリフレッシュ理科教室には四半世紀の歴史があり、各支部ならびに応用物理教育分科会はサイエンスのあるオリジナルな工作・実験を提供し続けています。そのリフレッシュ理科教室は 1997 年に始まっていますが、少し前の 1995 年より各支部といくつかの分科会が協力して 1 年に 1 回「科学と生活のフェスティバル」を開催しました(計 7 回)。科学啓

発事業にはプラズマエレクトロニクス分科会は関係無いと思われるかもしれませんが、実は東海支部とプラズマエレクトロニクス分科会の合同企画が科学と生活のフェスティバルのトリを務め、2001 年 6 月 23 日、24 日に名古屋市科学館で開催の「夢いっぱいプラズマの世界」をキャッチフレーズとした第 7 回では、60 近い企業・組織の協賛を得て、18,000 人を越える科学館入場者を集め大成功を収めました¹⁾。

図 1 は、第 7 回科学と生活のフェスティバル「体験しよう!夢いっぱいプラズマの世界」で配布された 100 ページを越えるテキストの表紙と目次のコピーです。プラズマに関連する 41 の展示ブースと特別展示 2 ブースの計 43 ブースに加えて 4 テーマの工作教室を行っていますが、各ブースにおいて、一般市民や子供達への説明は、科学の面白さを伝えるべく第一線で活躍している研究者が直接丁寧に行いました。故板谷良平先生の名前もあります。この企画を成功させた 2000-2001 年度プラズマエレクトロニクス分科会幹事長・藤山寛先生ならびに副幹事長・堀勝先生の熱量に巻き込まれた当時の幹事の皆さんも多かったかもしれませんが、プラズマの有用性・面白さを一般市民にアピールする絶好の機会となったに違いありません。こういったイベントを 10 年に 1 度くらいの割合で実施するのも必要かと思います。当時参加してくれた小学生達も今や 30 歳を迎えており、そこから日本の科学や技術を支えてくれるような人材が生まれていると非常に嬉しく思います。

参考文献

- 1) 堀 勝、藤山 寛:小特集 科学啓発教育とプラズマの世界 2.「プラズマの世界」の実施状況、プラズマ・核融合学会誌、79 巻、6 号(2003) 557-558



応用物理学会 第7回 科学と生活のフェスティバル
体験しよう！ 夢いっぱい プラズマの世界

2001年6月23日(土)～24日(日)

名古屋市科学館

理工館1F および天文館1F

主催 (社) 応用物理学会、名古屋市科学館

後援 愛知県教育委員会、中日新聞社、NHK名古屋放送局、中部日本放送、日本物理学会名古屋支部、電学情報学会名古屋支部、電機学会名古屋支部、プラズマ・核融合学会、IIBB名古屋支部、応用物理学会応用物理教育分科会

協賛 (株) アイリン真空、応化院 (株)、(株) アドテック、アネルバ (株)、伊勢電子工業 (株)、イムラアメリカ (株)、(株) インターグループ、(株) インダコ、オザワ科学 (株)、I 融軍工業 (株)、カナル電気 (株)、産業科学研究所、(有) 北野製作所、(株) コンチネンタル牧場、(株) サムウェイ、サンテック (株)、三洋電機 (株)、(株) シンク、(株) 十倉、ソニー (株)、(株) 大和テックシステム、(株) 中日電子、中電電力 (株)、(株) デンソー、テクノ西村、東京エレクトロニクス (株)、(株) 東京インストルメンツ、工業興業 (株)、(株) 東芝、豊田合成 (株)、トヨタ自動車 (株)、(株) 豊田中央研究所、(株) ナガラ、名古屋興産 (株)、名古屋大学、(株) コシリン、巨野産業 (株)、巨野イオン機器 (株)、日本ガイシ (株)、日本電気 (株)、日本レーザ電子 (株)、日本電産 (株)、(株) ノリタケカンパニーリミテド、(株) ハイテック 21、浜松トニックス (株)、富士通 VLSI (株)、ブラザー工業 (株)、VLSI システムズジャパン (株)、三菱重工 (株)、三菱電機 (株)、松下電器産業 (株)、(株) マシナックス、(株) 龍コーポレーション、ムフセロ (株)、横河電機 (株)、(株) ラボアテック、ラサニ業 (株)

企画・実行 応用物理学会教育・公益事業委員会、応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会、日本物理学会応用物理教育分科会、応用物理学会東海支部、科学と生活のフェスティバル、実行委員会

もくじ
目次

ブース配置図 1

「科学と生活のフェスティバル 夢いっぱい プラズマの世界」 3

ご挨拶 名古屋工業大学 工学研究科 種村 榮

美しいプラズマの世界へようこそ！ 6

長崎大学 工学部 藤山 寛

フェスティバルへようこそ 8

大同工業大学 藤田 周治

【 エレクトロニクス 】 12

1. 細い管を検査するマイクロマシン 13

(株) デンソー 基礎研究所 松ヶ谷 和沖

2. 太陽電池で発電しよう 15

岐阜大学 工学部 吉田 憲充、野々村 修一

3. プラズマでテレビを見よう 17

京都大学 国際融合創造センター 白藤 立

4. 身近にある光、発光ダイオード 19

名城大学 理工学部 天野 浩

5. ULSIを見よう 21

日本電気 (株) シリコンシステム研究所 木下 啓蔵

6. カーボンマイクロコイル・ナノコイル 23

豊橋技術科学大学 工学部 滝川 浩史

7. カーボンナノチューブでざらざら光らせる 25

三重大学 工学部 斎藤 弥八

8. 原子の世界のサッカーボール 27

静岡大学 理学部 三重野 哲

9. シャープペンの芯からプラズマができる！ 29

名古屋大学 大学院工学研究科 豊田 浩季

10. あなたもダイヤモンドが作れます 31

東海大学 工学部 広瀬 洋一

11. ロウソクの炎から炭素の積木が出現 33

名古屋大学 大学院工学研究科 佐々木 浩一

12. 炎の中を電気を通そう 35

名古屋工業大学 大学院工学研究科 木村 高志

【 光 】 38

13. クルクル回るプラズマを見てみよう 39

文部科学省核融合科学研究所 藤澤 彩英

14. 放電の様子を調べてみよう 41

愛知教育大学 野田 三喜男

15. レーザーアート 43

中部大学 工学部 岡島 茂樹

16. レーザーの中を見てみよう(He-Ne レーザー) 45

中部大学 工学部 岡島 茂樹

17. レーザーの中を見てみよう(Ar イオンレーザー) 47

神奈川工科大学 工学部 後藤 みき

18. プラズマの色が変わる 49

京都大学 名誉教授 板谷 良平

19. プラズマボールに触ってみよう	51
静岡大学 工学部 犬塚 博	
20. 電子レンジの中に光るプラズマ	53
名古屋大学 大学院工学研究科 庄司 多津男	
21. 黒い炎を見よう	55
名古屋大学 科学館 山田 吉孝	
22. 無人島でも大丈夫？ - 身のまわりのものでプラズマの 明かりをつけよう -	57
京都大学 大学院工学研究科 節原 裕一	
23. プラズマ写真館	59
名古屋大学 大学院理学研究科 鎌田 美奈子	

【暮らしと環境・バイオ】	62
24. プラズマ処理で水玉をころがそう	63
名古屋大学 大学院工学研究科 井上 泰志、高井 治	
25. 火の玉をつくる	65
名古屋大学 先端技術共同研究センター 河野 明彦	
26. オゾンの働き	67
大岡工業大学 近藤 芳孝	
27. 電気でチリを集めよう!!	69
大岡工業大学 石川 寛十、関谷 昌久	
28. プラズマで「葉」の性能アップ	71
岐阜薬科大学 菅谷 昌之	
29. プラズマで地球を守れ	73
日本電子(株) 依光 勝彦	

30. 未来の健康診断 - ヘルスケアチップ -	75
東洋大学 工学部 一木 陸範	
31. 巨大金魚がやってきた	77
名古屋大学 大学院工学研究科 船 勝	
32. 金属同士をくっつける！- プラズマ・スポットウェルダ -	79
中部大学 工学部 中村 圭二	
33. プラズマはプラスチックも溶らす	81
京都大学 名誉教授 坂谷 良平	

【宇宙・エネルギー】	84
34. 未来のエネルギー 核融合	85
文部科学省核融合科学研究所 井戸 毅	
35. レーザーで作る地上に輝く太陽	87
京都大学 大学院工学研究科 節原 裕一	
36. プラズマで宇宙旅行	89
防衛大学校 中野 俊樹	
37. プラズマのなかを踊る微粒子	91
名古屋大学 大学院工学研究科 大野 哲靖	
38. 宇宙からの放射線を見てみよう	93
文部科学省核融合科学研究所 佐久間 洋一	
39. 宇宙をシミュレートしよう	95
名古屋大学 太陽地球環境研究所 荻野 龍樹	
40. 超伝導で遊ぼう - 磁力で浮かそう -	97
文部科学省核融合科学研究所 カ石 浩孝	

41. 人工オーロラ	99
長崎大学 工学部 藤山 寛	

【子どものための工作教室】	102
A 静電気をためてプラズマを作ろう - 現代版ライデン瓶 -	103
和歌山大学 工学部 伊藤 昌文	
B 100円で雷をつくらう	105
岩手大学 工学部 高木 浩一	
C プラズマでネームプレートを作ろう	107
静岡大学 工学部 永津 雅幸	
D ビカビカキーホルダーを作ってみよう	109
名古屋大学 大学院工学研究科 岸本 茂	

【特別コーナー】	112
毛利さんからメッセージ	113
名古屋大学 大学院工学研究科 堀 勝	
猫バスで作曲しよう!	114
名古屋大学 大学院工学研究科 高井 吉明	
名古屋大学 大学院工学研究科 堀 勝	
ご家族の方へお願い	115
展示にご協力いただいた方々	116
第7回「科学と生活のフェスティバル」実行委員会名簿	117

図1 第7回科学と生活のフェスティバル
「体験しよう！夢いっぱいプラズマの世界」で配布されたテキストの表紙と目次

寄稿

Reactive Plasma Award と紫綬褒章をいただいて ～若手へのエンカレッジ～

名古屋大学 低温プラズマ科学研究センター 堀 勝

図らずも、2022年10月5日に Reactive Plasma Award (RPA)を受賞し、11月3日に紫綬褒章を受章する榮譽に浴しました。RPAは、International Conference on Reactive Plasmas (ICRP)が反応性プラズマの基礎と応用で並外れた功績を挙げた研究者に授与する最高の賞であり、ICRP国際委員会が2～3年に1度、受賞者1名を選考します。

私は、本格的な国際会議として開催されたICRP-2(1994年、横浜)に、若手の研究者として、また事務局の一員として参画しました。会場の下見、ロゴマークの創案やプロシーディングスの体裁など、世界に冠たる国際会議としての形作りのために、多くの諸先輩のご指導を受けながら、国際会議の設立や運営を学んだことは現在の自己の貴重な財産になっています。横浜で開催されたICRPは、プラズマエレクトロニクス分科会の発展のためのグローバルな活動のエンジンとなりました。それ以来、ICRPは、自己が最も大切にしてきた会議となり、ICRP-7(2010年)では、組織委員長としてパリでGEC-63との共同開催をすることができました。

このような経緯から、RPAを受賞できたことは大きな喜びです。

一方、紫綬褒章の一報を受けたときは、まさに青天の霹靂でした。特に、低温プラズマ科学の功績への評価は、紫綬褒章の歴史の中で初めて本分野に光を照らしていただいたものであり、本分野の発展に尽くされた多くの諸先輩の努力を礎としての受章です。

このような素晴らしい賞や褒章をいただくことができたのは、一重にプラズマエレクトロニクス分科会の皆様方のご指導、ご協力とご支援のお蔭であり、誌面をお借りして、心からお礼申し上げます。

今回、これらの授与を鑑み、若手へのエンカレッジについて原稿の依頼を受けました。一昨年に愛知工業大学竹内和歌奈先生が大学にお越しになり、応用物理学会誌の記事として、多様な観点からインタビューを受けました。非常に上手にナビゲーションされたため、つい調子に乗って、自己の過去を披露してしまいました。昨年、その内容がインタビューの記事として応用物理学会誌(91巻、11号、2022年)に掲載され、さらに、フルバージョンはJ-Stageにアップされました。これらの記事の後半に若者へのメッセージを語っているので、ご高覧していただければ幸甚です。

・冊子に載ったPDF版

https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/91/11/91_699/_pdf/-char/ja

・フルバージョン

https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/91/11/91_699/_supplement/_download/91_699_1.pdf

さて、本年3月26日に、名古屋大学低温プラズマ科学研究センター主催のグローバルプラズマフォーラムの中で、私の最終講義「工学を生ききる」を公開で行い、自己の大学教員としての教育・研究の総括を行うことができました。1.5時間の最

終講義の予定でしたが、気がついたら3時間も講義してしまいましたが、ご出席していただいた方々は、皆さん、超優等生であり、最後まで聞いていただきました。

4月からは、低温プラズマ科学研究センター特任教授として、これまでと同じ環境の下で活動できる幸運な機会をいただくことができました。現在、本分野の発展に貢献できるように継続して努力しています。

このような自己の経験を基にして、若手へのエンカレッジとして、以下の3つのメッセージを送ります。

1) なるべく早いうちに大きな目標を掲げ、その目標の達成に向かって、寸刻を惜しんで努力して欲しい。

2) 一番重要なのは、「今」であり、その瞬間、瞬間を大事にして、何事にも全力を尽くして取り組んでいただきたい。

3) 人との出会いとつながりが、人生を豊かにするため、人の輪を広げて欲しい。

これらのメッセージの背景は、先に示したインタビューの記事で述べているので、興味があれば参考にしてください。

最後に、プラズマは、多様な領域に起爆剤として作用し、破壊的イノベーションを起こします。そして、多様な分野を紡ぎ、融合することで、システムイノベーションから社会イノベーションまでを実現することができる最も魅力的かつ戦略的な科学領域です。

若手の皆さんは、来る地球規模での課題を取り上げ、その課題解決のために必要な研究領域をバックキャストしてください。どの領域に起爆剤を落とすのかは、皆さんが自由に選ぶことができます(非常に重要な選択です)。プラズマという一つの学理を基軸として、多様な分野を取捨選択して、ダイナミックなアクションができるのも、プラズマ科学領域の特徴であり、皆さんは、他分野にはないアドバンテージを持っています。起爆剤を落としたい、あるいは、すでに落とした領域において、1)から3)を実践し、それを発展させる場として、プラズマエレクトロニクス分科会以上のものはないと確信しています。

分科会は、約35年にわたって、社会の変遷とともに、諸先輩から、駅伝のように知恵と行動のタスキを受け渡し続けて、継続的な活動をより発展させてきたコミュニティです。このようなコミュニティの歴史と営みの中にこそ、人生を豊かにする知恵と難局に対峙し、解決するためのヒントがあります。さらに、今後の未来に向かって、人類の直面する課題を捉え、絶えず分科会を変革していくことが必要です。組織も物事の本質にアプローチして、変革なくして、その成長はありません。

プラズマエレクトロニクス分科会の活動に参画することは、貴重な自己研鑽の機会を得て、明るい未来を共創することにつながります。未来を創るのは、若手です。若手の勇気と叡智、私心を離れ使命感に基づくアクションで人類の発展に貢献し続けることに大きな期待を寄せます。

プラズマ農学研究のこれまで ーラボから農場までー

九州大学 奥村 賢直、アタリ パンカジ、古閑 一憲

はじめに

植物は、水不足、湛水、毒性、高塩分、極端な高温など、様々なストレスを常時受けている。これらのストレスは、作物の収量を減少させる。インド、オーストラリア、中国、アメリカ、南アメリカ、中央アジア、アフリカなどの国々は、食用作物の重要な生産国であり、定期的に干ばつに直面している。このような環境下で種子の発芽や成長を促進するために、化学的、物理的、生物学的処理などの技術が開発されている。種子への物理的な活性化処理は、種子の形態や遺伝子発現、タンパク質レベルに変化をもたらす。その結果として、発芽率の向上や成長促進が起こると考えられている。図1に示すように、播種前の種子への物理的な処理法としては、磁場、電磁波、電離放射線、超音波、非熱プラズマなどがある¹⁾。本解説では植物種子の発芽・成長促進における非熱プラズマ(NTP)の役割について記述する。

NTPは、図2に示すように医療、殺菌、農業などへの応用が進み、近年注目されている¹⁾⁻¹⁹⁾。NTPは電子やイオン、活性種、紫外線、電界といった粒子種を発生する。活性種とは活性酸素窒素種のことで、暴露された溶液はpH、電気伝導度、酸化還元電位が変化する。これらの溶液は、種子の発芽率や植物の成長促進に影響を与え、農作物の収量を増加させる。農業におけるNTPの応用は、処理時間が短く、処理温度が低いため種子や作物への破壊が小さく、従来の処理方法と異なる利点がある。

一般に、農業におけるプラズマの応用は、プリハーベストとポストハーベストに分類される。図



図1. 種子処理に用いられる様々な物理的手法の模式図¹⁾。



図2. 非熱プラズマ(NTP)の応用例の模式図¹⁾。

3に示すように、食品保存や食品加工などのポストハーベストプロセスにおけるNTPの利用は、レビュー論文等で扱われている²⁰⁾⁻²⁵⁾。一方、プリハーベストにおけるNTPの利用については、限られたレビュー論文しか存在しない²⁶⁾⁻²⁹⁾。NTP技術はプリハーベストにおいて、種子の殺菌や発芽の改善、土壌中の病原菌の侵入の低減など、さまざまなレベルで使用される。本解説では、低压から大気圧といった圧力範囲で発生させたNTPが種子の発芽と苗の成長に与える役割に焦点を当てる。さらに、プラズマ処理水(PTW; プラズマ活性水(PAW)としても知られる)が種子の発芽と植

物の成長に及ぼす影響についても述べる。最後に、プラズマ農業における NTP と PTW 処理の機序や実際のシナリオにおける本技術の展望について議論し、実際の農業現場でのプラズマ利用の研究成果を紹介する。

低圧・中圧 NTP が種子の発芽と生育促進に及ぼす影響

低圧・中圧とは、ここでは $6.7 \times 10^{-2} - 5.3 \times 10^4$ Pa を指す。これまで、多くの種類の種子が異なる時間間隔で、かつ異なる種類の供給ガスの存在下で、低圧または中圧で NTP 処理されている。プラズマ照射およびプラズマ処理水処理による種子の発芽・成長促進効果は Pankaj らによってまとめられている¹⁾。

ダイコン(*Raphanus sativus*)の種子は O₂ および N₂ を供給ガスとして 50 W, 13.56 MHz, 100Pa の低圧高周波(RF)プラズマで処理された(図 4a)³⁰⁾。O₂ および N₂ 低圧プラズマ処理では、種子の発芽に対する影響はないものの、無処理区(コントロール)と比較して、O₂ 低圧プラズマでは、芽の平均長さが 60%増加した(図 4b)。一方、N₂ 低圧プラズマでは変化が見られなかった³⁰⁾。Hayashi らは、誘導結合 RF プラズマ(13.56 MHz, 40 Pa, 入力電力 50 W)がダイコンの芽の種子に与える影響を調べた。周囲空気の下で 20 分間作用させたところ、ダイコンの新芽の成長促進がみられた³¹⁾。シロイヌナズナ(*Arabidopsis*

thaliana)とダイコンの種子を、O₂ 存在下で電力 60 W, 20-80 Pa, 13.56 MHz にて処理すると、ダイコンの新芽の長さは圧力により変化し、20 Pa で最大長となること、さらにシロイヌナズナ種子はコントロールと比較して、茎の長さが 1.5 倍、葉の面積が 2 倍増加することが示された³²⁾。

重要な作物であるコムギ(*Triticum aestivum*)は、多くの研究によって使用されている。コムギ種子は空気/O₂ の混合ガスを用いて 1333 Pa, 3-5 kHz で 3-9 分間、グロー放電プラズマで処理された。6 分間の処理は種子の発芽を 95-100%、収量を 20%増加させた³³⁾。最近の研究では、空気中で 13.56 MHz で 180 秒間作動させた RF プラズマで同じコムギ種子が処理された。その結果、プラ

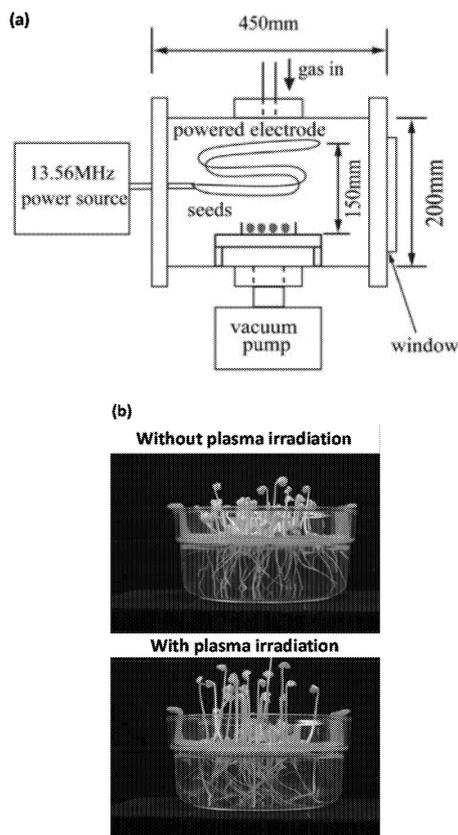


図 4 (a) 低温プラズマ炉の模式図、(b) O₂ プラズマ照射の有無で栽培したラディッシュプラウト。参考文献³⁰⁾より転載。Copyright (2012) The Japan Society of Applied Physics.

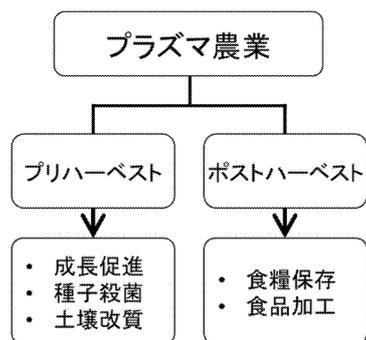


図 3. プリハーベストおよびポストハーベクトプロセスにおけるプラズマの役割¹⁾。

ズマ処理後、煙害ストレスが存在する対照と比較して、穀物および穂状（すいじょう）花序の収量が 58 および 75%に向上することが示された³⁴⁾。Iqbal らは、コムギ(Galaxy-2013)種子を 600-850 V の Ar 低圧プラズマで処理し、コントロールと比較して発芽率が 57-60%高くなることを示した³⁵⁾。別のグループは、同じコムギ種子を、150 Pa, 3×10^9 Hz, 60-100 W で He プラズマを 15 秒間処理した。80 W では、コントロールと比較して、種子の発芽能と発芽率がそれぞれ 6 および 6.7%改善され、幼苗の高さや根の長さ、新鮮重量がそれぞれ 20.3, 9, 21.8%増加した。その結果コムギの収量はコントロールに対し 5.89% 増加した³⁶⁾。Šerá らは、出力 500 W, 140 Pa の処理によってコムギの発芽促進が抑制されることを示したが、オート麦の穎果には有意な効果は認められなかった²⁾。一方、Dubinov らは、13 Pa のグロー放電プラズマ処理によるオート麦種子の発芽率の 27%の増加を示している³⁾。

Bormashenko らは、誘導性空気プラズマ放電を用いて、10 MHz, 6.7×10^{-2} Pa, 20 W で 2 分間、マメ種子を処理した。プラズマ処理したサンプルとコントロールの間で発芽率に有意な変化は見られなかったが、発芽速度はプラズマ処理したサンプルの方がコントロールよりも早期化した³⁷⁾。別の研究では、ダイズ(*Glycine max*)種子が 13.56 MHz, 150 Pa, 60-120 W で処理された。シュート長、シュート乾燥重量、根長、根乾燥重量は、コントロールに対して、それぞれ 13.77, 21.95, 21.42, 27.51% 増加した³⁸⁾。

Hosseini らは、アーティチョーク(*Cynara cardunculus* var. *scolymus* L.)種子を RF 容量結合型(CCP)プラズマ(1.8 Pa, 10 W)で処理した。著者は、10 分および 15 分のプラズマ処理後に根の長さがそれぞれ 28.5 および 50%増加することを示した。また、根の乾燥重量は、10 分および 15

分のプラズマ処理でそれぞれ 13 および 53%増加した³⁹⁾。Gholami らは、13.56 MHz, 9.9 Pa の CCP プラズマでアジュワイン(*Trachyspermum ammi*)種子を 2 分間処理し、50 W では発芽率と発芽指数がそれぞれ 11.1, 1.22%増加し、根の長さは 34%増加した。しかし、80 W と 100 W では、根の長さの増加はそれぞれ 2%と 10%であった。著者らは、電力が 50 W を超えると、発芽率と発芽指数の値が低下すると結論づけた⁴⁰⁾。

ケシ(*Papaver somniferum*)種子は、マグネトロン入力 500 W の 2.45 GHz マイクロ波プラズマで異なる時間間隔で処理された。5 日目の種子発芽率は、3 分と 5 分のプラズマ処理でそれぞれ最大 104%と 102%と上昇した⁴¹⁾。Ling らは、13.56 MHz, 100 W, 150 Pa の He プラズマで 15 秒間処理したナタネ(*Brassica napus* L.)種子の発芽率がそれぞれ 6.25%と 4.44%、改善することを示した⁴²⁾。Sera らはヘンプ(*Cannabis sativa* L.)種子を 140 Pa, O₂および Ar ガス存在下で 2.45 GHz, 500 W のマイクロ波プラズマで処理し、プラズマ処理による負の効果を示した⁴³⁾。

ニンニクの種球根(*Ptujski spomladanski*)が 15-60 Pa にて 60 秒間 O₂ 低圧 RF プラズマで処理され、15 Pa では乾燥球根質量が 11%増加する結果が得られた。さらに、30 Pa と 45 Pa で処理した場合、乾球の質量はほとんど増加しなかった。60 Pa では乾燥球根の質量が減少した⁴⁴⁾。Singh らによる別の最近の研究では、O₂(80%)と Ar(20%)の混合ガス中で、13.56 MHz, 40 Pa, 30-270 W の RF プラズマ処理を行うと、スイートバジル(*Ocimum basilicum* L.)種子の発芽率が増加することが示された。90 W と 150 W では、コントロールよりも発芽率が 16.3%と 20.5%増加した⁴⁵⁾。最近の研究では、ケツルアズキ(*Vigna mungo*)の種子が 5.3×10^4 Pa で DBD プラズマ(5 kV, 4.5 kHz, 45 W)で処理され、種子の発芽率と苗の成長

率はコントロールと比較してそれぞれ 13.67%と 37.13%増加した報告がある⁴⁶⁾。

大気圧下での NTP が種子の発芽と成長促進に及ぼす影響

最近では、種子の処理には低圧プラズマよりも大気圧非熱プラズマ(AP-NTP)の使用が増加している。この傾向は、両装置の処理コストの違いに加え、大気圧プラズマ装置の操作性の良さが理由である。AP-NTP の結果についても、Pankaj らによってまとめられている¹⁾。

Sarinont らはスケラブル誘電体バリア放電(SDBD)により、ダイコン、イネ(*Oryza sativa*)、ナズナ、プルメリア(*Plumeria* spp.)、ヒヤクニチソウ(*Zinnia*)種子を、放電電圧 9.2 kV、放電電流 0.2 A、放電電力密度 1.49 W/cm² で処理し、250, 80, 60, 30, 20%の成長促進効果を示した^{47),48)}。同様の SDBD (図 5a)で処理されたシロイヌナズナ種子は、図 5b に示すように、成長の促進、収穫時間の短縮、種子総重量の増加、および種子数の増加を示す⁴⁹⁾。Kitazaki らは同じ SDBD プラズマを用いて、コンビナトリアル解析によりダイコンの新芽の成長を解析し、種子を $x=5$ と $y=3$ mm に配置した場合、250%の成長促進がみられることを明らかにしている⁵⁰⁾。He, Ar, N₂, Air, O₂, NO(10%)+N₂ といった異なる供給ガスの存在下で 3 分間 SDBD 処理されたダイコン種子の応答はガス種に依存する。He, N₂, Ar の供給ガスでは、プラズマ処理は植物の成長に限定的な影響を与えたが、O₂, Air, NO (10%) + N₂ ガスでは、プラズマは成長促進に大きな影響を与えた⁵¹⁾。

Hayashi らは、ダイコン(*Raphanus sativus* var. *longipinnatus*)種子をプラズマトーチ(O₂ および空気、12kHz, 7-10 kV)で 60 分間処理したところ、コントロールに比べて、全長(茎と根の長さ)は O₂ プラズマ処理で 1.6 倍、空気プラズマ処理で 1.2 倍増加した⁵²⁾。別の研究では、ダイコン種子は Ar-

プラズマジェットで処理され、140W では未処理の種子と比較して総質量が 9-12%増加し、平均長さが 30 mm 増加した⁵³⁾。別の研究では、ダイコン種子を 20 分間表面放電プラズマ処理した結果、発芽応答に変化はなかった。しかし、根と芽は 11%, 10%伸長し、重量は 30%と 15%増加した⁵⁴⁾。

コムギ種子に対しては低圧および大気圧プラズマの両方で効果が調べられている。Dobrin らはコムギ(*Triticum aestivum* L.)種子を、1 L/min の気流で 15 kV, 50 Hz の正弦波電圧、2.7 W の表面放電プラズマで 15 分間処理した。プラズマ処理による発芽率への影響は小さいものの成長解析の結果、根と芽の比率(R/S)は、未処理のサンプルよりも処理したサンプルの方が高いことが明らかとなった⁵⁵⁾。Meng らは、コムギ(Xiaoyan 22) 種子を 0-50 kV, 50 Hz、作動ガス Air, N₂, Ar, O₂ などの異なる DBD プラズマで処理した。プラズマ処理後、発芽力はコントロールに比べ、Air, N₂, Ar の供給ガスプラズマでそれぞれ 24, 28, 35.5%に増加した⁵⁶⁾。Li らは、Air-DBD (1.50 W, 13.0 kV)を用いて同じくコムギ種子を 7 分間処理した。その結果、発芽率、発芽電位、発芽指数、活力指数がそれぞれ 9.1, 26.7, 16.9, 46.9%増加することを示した⁵⁷⁾。同グループは前述の DBD を用い、コムギ種子の発芽と苗の成長に及ぼす乾燥ストレスの悪影響について研究し、プラズマ処理後、発芽力は 27.2%、発芽率は 27.6%に増加すること、さらに根と地上部長さも増加することを示した⁵⁸⁾。最近、Lotfy らは、N₂ プラズマジェット(放電電圧 2.6 kV, 放電電流 38.1 mA)でコムギ種子(Giza 168)を処理し、4 分間の処理が対照試料に比べて平均乾燥重量を 54.3%増加させることを示した⁵⁹⁾。

ヒマワリの種子とスプラウトは、食品産業、バイオ燃料、化粧品、潤滑油への応用により、高い需要がある。そのため、ヒマワリ(*Helianthus annuus*)の生産性向上に向けたプラズマ利用の研

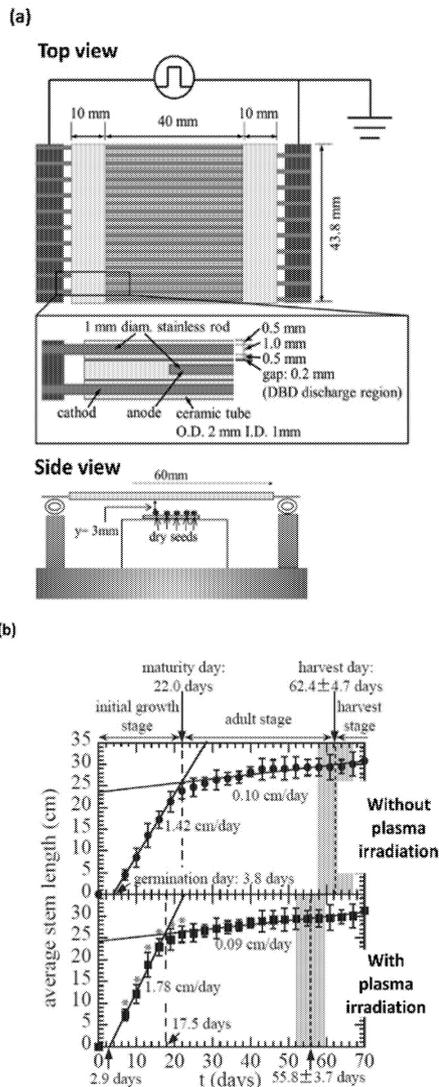


図5 (a) スケーラブル誘電体バリア放電プラズマ装置の模式図 (b) プラズマ処理の有無による植物の平均莖長を時間の関数で示す。文献⁴⁹⁾より転載、Copyright (2016) The Japan Society of Applied Physics.

究が活発化している。Zukiene らはヒマワリの種子を 9.2kV、放電電流 0.2A で 7 分間および 11 分間 SDBD 処理し、プラズマ処理による発芽特性の低下を示した。しかし根の長さは 44% 増加し、苗の重量と葉の重量はそれぞれ 16% と 15% 増加した。さらに、DBD プラズマ処理を 11 分間行った場合、根の長さおよび芽の重量は変化がなかった

ものの、DBD 処理の結果、葉の重量は 15%、葉の数は 10% 増加した⁶⁰⁾。Matra らは、同じヒマワリの種子を NTP(7.451 kV, 0.073 mA, Ar および O₂ 混合ガス)で処理したところ、乾燥重量はコントロールの 1.79 倍、平均シュート長は 2.69 倍となった⁶¹⁾。最近の研究では、ヒマワリ種子に対して 90 W で 120 秒間 DBD 処理が行われ、ヒマワリ種子の発芽促進が示されている⁶²⁾。

エンドウ(*Pisum sativum*)の種子は、拡散共面表面バリア放電(DCSBD; 14 kHz, 10 kV, 370 W, 電力密度 2.3Wcm⁻²)で 120 秒間処理された。発芽率は 95% に有意に増加したのに対し、コントロールの発芽率は 77.5% であった。同様に、シュートと根の長さ、乾燥苗重量もコントロールと比較して増加した⁶³⁾。Khatami と Ahmadinia は、自作のプラズマ源を用い、15kV、空気ガス流量 5L/min でエンドウ種子に 30 秒および 60 秒のプラズマ照射を行った。30 秒および 60 秒のプラズマ処理では、それぞれ 80% および 74% の種子が発芽したが対照試料では 14 日後に 40% の種子しか発芽しなかった⁶⁴⁾。

Zhou らは、9.0 kHz のマイクロプラズマアレイを使用して、Air, O₂, N₂, He などの異なる供給ガスの存在下で、水溶液中のリョクトウ種子を処理した。その結果、発芽と成長は供給ガスと処理時間に依存することが示された。空気では、他の供給ガスプラズマ(O₂, N₂, He)と比較して、種子の発芽率および苗の成長が改善し発芽 index(発芽勢の指標)がそれぞれ 58.3% と 41.7% と大幅に向上したが、He や N₂ プラズマではコントロールと比較して有意差は見られなかった⁶⁵⁾。Pérez-Pizá らは N₂ または O₂ ガス存在下にて DBD プラズマ(0-25 kV, 50 Hz)でダイズ種子を処理した。N₂ および O₂ プラズマを 3 分および 2 分処理した結果、総湿重量はコントロールの 1.2 倍に増加し、全長は 4-10% に増加した⁶⁶⁾。

Zahoranová らは、DCSBD プラズマ(14 kHz, 20 kVpp, 電力密度 80 Wcm⁻³, 400 W)を用いてトウモロコシ(*Zea mays* L. cv. Ronaldinio)種子を処理した。60 秒および 120 秒の処理では、無処理と比較して、発芽に有意な差は認められず、300 秒の DCSBD 処理では発芽率は 7%低下したが、60 秒プラズマ処理では、コントロールと比較して、活力指数が 23%増加した⁶⁷⁾。さらに、イネ種子は Ar 存在下にて大気圧グロープラズマ(14 kVpp, 700 Hz, 4.8 W)で処理された。最終的な発芽率は、プラズマ処理したイネ種子が 98%であったのに対し、コントロールは 90%であった。苗の長さに変化しなかった⁶⁸⁾。Amnuaysin らは、イネ(*Oryza sativa* L.)種子を 5.5 kHz で 60 秒間 Air-DBD で処理した。プラズマ処理後の発芽率は 92.67%であり、対照では 85%であった。また、プラズマ処理により活力指数、発芽率、苗の成長、新鮮重(根と芽)、乾燥重(根と芽)が改善した⁶⁹⁾。

トマト種子(*Lycopersicon esculentum*)ハイブリッド Belle F1 を、空気下にて同軸 DBD(流量 15 L/min, 50 Hz, 1.43 W)で処理した結果、5 分間の DBD 処理で 77%の発芽率を示し、コントロールは 68%であった。5 分間の DBD 処理により、根の平均長さはコントロールの種子の 3 倍に増加した。さらに、コントロールの種子の根とシュートの比(R/S)は 0.51 であったが、5 分および 30 分のプラズマ処理では、それぞれ 0.87 および 0.73 であった⁷⁰⁾。パルス振幅 8 kV、パルス周波数 6 kHz、パルス幅 1 μs、パルス立ち上がり・立ち下がり時間 70 ns 以下の高電圧パルス DC 駆動のプラズマジェット処理されたカボチャ(*Cucurbita pepo*)種子は、発芽および成長促進を示した⁷¹⁾。Schnabel らは *Brassica napus* L.の種子を 5.7 kHz で DBD 処理し、コントロールと比較して種子の発芽に大きな変化がないことを示した。しかし、10 分間の処理により、24 時間後と 48 時間後

にそれぞれコントロールの種子と比較して発芽率が 3%と 13%増加した⁷²⁾。

DBD プラズマ(4250 V で 10 秒、5950 V で 20 秒)処理されたセンシシレン(*Andrographis paniculata*)種子は発芽促進を示した⁷³⁾。続いて Ar-プラズマジェット(16 kV, 24 kHz)で処理されたフェヌグリーク(*Trigonella foenum-graecum*)種子の発芽率は接地電極の有無でそれぞれ 7 倍と 4 倍に向上した⁷⁴⁾。He-DBD(10 kV, 750 Hz, 150 W)で処理したムルング(*Erythrina velutina*)種子は、60 秒処理では、コントロールより 5%高い発芽率を示した⁷⁵⁾。*Hybanthus calceolaria* の種子は 8.1 kV, 720 Hz にて 1 分間 He-プラズマジェットで処理すると、未処理の種子に比べて発芽率が 3.5 倍上昇した⁷⁶⁾。Molina らは、ナスタチウムの種子(*Tropaeolum majus* L.)を He-DBD プラズマで 10 秒および 30 秒処理し、干ばつ条件下で発芽率がコントロール種子と比較して、それぞれ 68.3 および 61.7%に上昇することを明らかにした。しかし、より長時間のプラズマ処理により、発芽効率は低下した⁷⁷⁾。乾燥 N₂ 下にてグライディングアークプラズマ(680 V, 50 Hz, 33 mA, 40 W)処理した *Lavatera thuringiaca* 種子の発芽率は、2 分および 5 分の処理では 60%であったのに対し、対照種子では 36.25%であった⁷⁸⁾。別の研究では、湿潤空気を 10 L/min の流量で流し、50 Hz にてグライディングアークプラズマをヘンプ種子に照射したところ、苗の長さ、苗の着生、苗の重量が増加した⁴³⁾。

キュウリ (*Cucumis sativus*) と トウガラシ (*Capsicum annuum*) の種子が DCSBD プラズマ(空気、15kHz, 400W)で処理された。キュウリおよびトウガラシの発芽率は、処理時間が短いほど上昇し、プラズマ処理時間が長いほど低下した⁷⁹⁾。Mitra らは、ヒヨコマメ(*Cicer arietinum* L.)の種子を、10 mW/cm² の電力密度を持つ大気中の表面

マイクロ放電(SMD)プラズマで処理した。1 分間の SMD 処理後、種子の発芽率は 89.2%向上し、平均発芽時間もコントロールより 2.7 日に短縮した⁸⁰⁾。別の研究では、ホウレンソウ(*Spinacia oleracea*)種子が高電圧ナノ秒パルスプラズマ(NPP; 6 kV, 0.7 kA、パルス 1 回あたりの放電エネルギー0.3 J)およびマイクロ DBD プラズマ(N₂, 6 kV, 14 mA, 22 kHz)で処理された。その結果、NPP 処理した種子は、1 回または 5 回の放電で 75-80%の発芽率向上を示した。一方、NPP を 10 回照射すると、発芽率は低下した。苗の成長と乾燥重量は、Air DBD 処理で増加したが、N₂ DBD 処理では大きな変化は見られなかった⁸¹⁾。

最近、オオムギ(*Hordeum vulgare*)、トウガラシ(*Capsicum*)、クロマツ(*Pinus nigra*)、バジルの種子に対し異なるプラズマ処理が実施された⁸²⁾⁸³⁾⁸⁴⁾⁸⁵⁾。Song らは、オオムギ種子を表面誘電バリア放電プラズマ(14.4 kHz, 8 kVpp, 51.7 W)で処理した。6 分間のプラズマ照射により、オオムギの全苗の新鮮重量が 137.5%増加した⁸³⁾。DC パルスで 15 秒間 Ar-プラズマ処理したトウガラシ種子の発芽率は、コントロールは 24.35%であったのに対し、0.41, 0.48, 0.55, 0.61W でそれぞれ 86.53, 100, 95.51, 94.23%だった⁸²⁾。DCSBD プラズマで処理したクロマツ種子を、各処理期間において 400W で 1-60 秒間処理したところ、発芽 index は 3 秒間のプラズマ処理で最も高く、60 秒間のプラズマ処理で最も小さかった⁸⁴⁾。バジルの種子を湿度の高い空气中で DBD 処理したところ、コントロールと比較して 1 分および 3 分の処理で急速な発芽を示した⁸⁵⁾。

プラズマ処理水が種子の発芽および成長促進に及ぼす影響

ここ数十年、プラズマ処理水(PTW)は農業や食品産業への応用が期待されている⁸⁶⁾⁸⁷⁾⁸⁸⁾⁸⁹⁾。水へのプラズマ照射により、さまざまな活性酸素・窒

素種(RONS)が生成されるため、PTW には H₂O₂, NO₂⁻, NO₃⁻などの寿命の長い RONS を中心にさまざまな RONS が混在する。本解説では PTW が植物の発芽・生育に与える影響について解説する。

H₂O-O₂ 放電プラズマ(3-6 kV, 3-10 kHz)で生成された PTW でケツルアズキ(*Vigna mungo*)種子が処理された。H₂O-O₂ プラズマが 3, 6, 9, 12, 15 分間照射され得られた PTW により、コントロールと比較して、PTW 処理後に苗の成長に有意な改善がみられた。6 分間プラズマ処理した PTW は、最も高い累積発芽率を示し、3 分間プラズマ処理した PTW は、高い活力指数を示した。また、3, 6, 9 分プラズマ処理した PTW で処理した種子は、無処理試料と比較して、シュートと根が長くなった。さらに、12 分間プラズマ処理した PTW は、他の PTW 処理サンプルの中で最も高いシュートの乾燥重量を示した⁹⁰⁾。

Sarinont らは、空気, O₂, N₂, He, Ar などのさまざまなガス存在下にて SDBD 照射して得た PTW をダイコン種子に処理した。空気, O₂, N₂, He, Ar に対し放電電力はそれぞれ 5.85, 4.51, 3.54, 8.95, 9.64W であった。短寿命活性種の影響を最小限にするため、SDBD 処理後、PTW は 1 時間および 1 日間室温で保管した。空気, O₂, He, N₂, Ar プラズマ照射で生成し 1 時間保管した PTW を処理すると、コントロールに対し、幼苗が 1.62, 1.38, 1.13, 1.12, 1.04 倍に伸長した。さらに各プラズマ照射で生成し 1 日保存した PTW を処理すると、それぞれ 1.52, 1.28, 1.13, 1.10, 1.08 倍とコントロールよりも幼苗が伸長した⁹¹⁾。Sivachandiran と Khacef は、15 分または 30 分間の二重 DBD(40kV, 1kHz)照射で生成した PTW をダイコン種子に処理した。その結果、15 分または 30 分照射により生成された PTW による処理は、60%または 100%と高い発芽率を示し(コントロールは 40%)、また、3 日後にはそれぞれ平均苗

長 5mm と 15mm と成長促進を示した⁹²⁾。

空気下にて 80kV, 50Hz で発生させた NTP から生成した PTW で処理されたダイズ(*Glycine max*)種子は、未処理の種子と比較して発芽が促進された⁹³⁾。

パルス繰返し周波数 250 pulse per second (pps)、ピーク電圧 30 kV にて 10 分および 20 分間水中放電で生成した PTW で処理したコマツナ (*Brassica rapa var. perviridis*)種子は栽培後、植物体の乾重量が 3.9 倍および 6.6 倍に増加し、さらに、葉長が 2.1 倍および 2.5 倍に増加することを示した⁹⁴⁾。Zhang らは、He-APPJ で生成した PTW でレンズマメ種子を処理したところ、80%の発芽率を示した。コントロールでは 30%であった。さらに、PTW 処理されたサンプルは、市販肥料(コントロール)で栽培される場合より、茎の伸長率や最終的な茎の長さが高い点も指摘されている⁹⁵⁾。

Adhikari らは、プラズマジェット(83.5 kHz, 70.39 mA, 0.66 kV, 照射時間 0-60 分)から得た PTW でトマト(*Solanum lycopersicum* L.)種子を処理した。15 分および 30 分照射した PTW の場合、コントロールの苗に比べ、形態的に良好な成長が見られ、より高いシュート長と根長を示した。しかし、60 分照射した PTW では、有意な変化はみられなかった⁹⁶⁾。アブラナ(*Brassica napus*)種子に関する最近の研究では、Ar と O₂ の供給ガスで生成した PTW で処理すると、コントロールと比較して、発芽率と苗活力が有意に改善されることが示されている⁹⁷⁾。

推定されるメカニズムおよび今後の展望

複数の研究グループによる総合的な研究成果として、直接プラズマ処理(低/中/大気圧プラズマ)または PTW 処理は発芽率や苗の生育を促進する。ここでは、発芽率や苗の生長が促進されるメカニズムや、世界中の研究グループから観察された種子の遺伝子変異の可能性について解説する。

Hayashi らは、シロイヌナズナの種子において、O₂ 低圧プラズマから発生する活性酸素が、細胞伸長タンパク質を担う遺伝子を活性化させることを明らかにした。さらに、第 2 世代では、これらの遺伝子は活性化されないことから、種子には遺伝子変異がないと結論づけられた³²⁾。以下および図 6 に発芽率の向上と苗の成長メカニズムを示す。

Volin らは、異なる供給ガス中でのプラズマ処理によって発芽特性の変化を示した¹²⁾。四フッ化炭素の存在下で種子を処理すると、エンドウの 2 品種(*Pisum sativum* cv. Little Marvel および *P. sativum* cv. Alaska)、さらにダイコンの発芽を遅延させられる。同時に、シクロヘキサン存在下でのプラズマ処理は、ダイズの発芽率を著しく促進させる¹²⁾。

Saberi らは、低圧プラズマ処理したコムギ種子において光合成速度、気孔コンダクタンス、クロロフィル含有量の改善を示した³⁴⁾。Ji らは、空気 DBD 処理後のハウレンソウ苗のクロロフィルおよび総ポリフェノール含有量の増加を示した⁸¹⁾。最近の報告では、Sajib らが、PTW 処理後のケツルアズキ種子のクロロフィル含有量の増加を示した⁹⁰⁾。

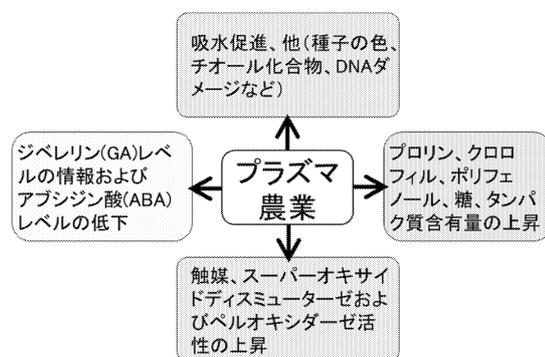


図 6. プラズマによる発芽率の向上と苗の成長メカニズム

植物ホルモンは、種子の表現型応答に不可欠な役割を果たす。Zukiene らは、ジベレリン(GA)/ア

13.56 MHz)、大気圧マイクロ波プラズマ(500 W)、大気圧 DBD プラズマ(He, 35 kHz, 15 kV)で処理し、低圧 RF で得られた収量は他の照射法より比較的高かったが、コントロールほど高くはなく、コントロールとプラズマ処理の間の収量差に統計的な有意性はないと結論づけた¹⁰²⁾。我が国では Hashizume らが水田にて、初期(1 ヶ月目)、後期(2 ヶ月目)、全期間(2 ヶ月目)においてイネのシュート頂端分裂組織に直接法と間接法とでプラズマ照射を行っている¹⁰³⁾。間接法は、リングル乳酸溶液にプラズマを照射して調製したプラズマ活性乳酸(PAL)溶液の異なる希釈液にイネを浸漬し、根を介した効果を検討したものである。その結果、直接法では、初期に照射した植物の生育と収量が増加し、穀物収量はコントロールに対し最大で15%増加した。一方、後期または全期間に照射した場合、植物の成長と穀物収量はそれぞれ減少効果または負の効果がみられた。PAL 処理では、主茎の成長に関連する形質が改善されたが、分蘖(ぶんげつ)したシュートの成長が抑制されたため、植物全体の穀物収量は減少した¹⁰³⁾。

まとめ

本解説では、直接プラズマ処理と PTW 処理による種子の物理・生化学的特性の変化による発芽や苗の成長の促進について、最近の研究動向を取り上げた。今後、機序解明やフィールド実験の実施等により、プラズマ農業の社会実装が進むものと考えられる。学生諸君にとって本解説がプラズマ農業における最新の研究動向について学ぶ足がかりとなり、ひいては本研究領域の発展へつなぐと幸いである。

参考文献

- 1) P. Attri, *Processes* **2020**, *8* [8], 1002 (2020).
- 2) B. Šerá, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38**, 2963 (2010).
- 3) A. E. Dubinov, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** [1], 180 (2000).
- 4) P. Attri, *Anticancer. Agents Med. Chem.* **19** [4], 436 (2019).
- 5) P. Attri, *PLoS ONE* **8**(9): e75096 (2013).
- 6) P. Attri, *Sci. Rep.* **5** [1], 17781 (2015).
- 7) P. Attri, *Sci. Rep.* **8** [1], 1 (2018).
- 8) J. H. Park, *Sci. Rep.* **6**, 1 (2016).
- 9) P. Shaw, *Sci. Rep.* **8** [1], 1 (2018).
- 10) N. Kumar, *RSC Adv.* **5** [19], 14670 (2015).
- 11) P. Attri, *Sci. Rep.* **6**, 1 (2016).
- 12) J. C. Volin, *Crop Sci.* **40** [6], 1706 (2000).
- 13) P. Attri, *Int. J. Biol. Macromol.* **148**, 657 (2020).
- 14) P. Attri, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **19** [37], 25277 (2017).
- 15) P. Attri, *Sci. Rep.* **7** [1], 1 (2017).
- 16) J. Hoon Park, *Sci. Rep.* **5**, 1 (2015).
- 17) P. Attri, *Sci. Rep.* **5**, 1 (2015).
- 18) P. Attri, *Sci. Rep.* **8** [1], 1 (2018).
- 19) S. Choi, *Sci. Rep.* **7** [1], 1 (2017).
- 20) C. Sarangapani, *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* **9**, 609 (2018).
- 21) S. K. Pankaj, *Trends Food Sci. Technol.* **35** [1], 5 (2014).
- 22) S. K. Pankaj, *Curr. Opin. Food Sci.* **16**, 49 (2017).
- 23) R. Thirumdas, *Food Biophys.* **10** [1], 1 (2015).
- 24) M. López, *Front. Microbiol.* **10**, 1 (2019).
- 25) Q. Guo, *Trends Food Sci. Technol.* **67**, 236 (2017).
- 26) L. K. Randeniya, *Plasma Process. Polym.* **12** [7], 608 (2015).
- 27) M. Ito, *Plasma Process. Polym.* **15**, 1700073 (2018).
- 28) F. Tochikubo, *Jpn. J. Appl. Phys.* **60**, 1 (2021).
- 29) N. Puač, *Plasma Process. Polym.* **15** [2], 1 (2018).
- 30) S. Kitazaki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**, 01AE01, 1 (2012).
- 31) N. Hayashi, *J. Photopolym. Sci. Technol.* **28** [3], 445 (2015).
- 32) N. Hayashi, *Plasma Med.* **6** [3–4], 459 (2016).
- 33) N. C. Roy, *Plasma Chem. Plasma Process.* **38** [1], 13 (2018).
- 34) M. Saberi, *J. Agric. Sci. Technol.* **21** [7], 1889 (2020).
- 35) T. Iqbal, *J. Laser Appl.* **31** [4], 042013 (2019).
- 36) J. Jiang, *Plasma Sci. Technol.* **16** [1], 54 (2014).
- 37) E. Bormashenko, *J. Exp. Bot.* **66** [13], 4013 (2015).
- 38) L. Li, *Sci. Rep.* **4** [1], 1 (2014).
- 39) S. I. Hosseini, *Phys. Plasmas* **25** [1], 1 (2018).
- 40) A. Gholami, *Plasma Med.* **6** [3–4], 389 (2016).
- 41) B. Šerá, *Plasma Sci. Technol.* **15** [9], 935 (2013).
- 42) L. Ling, *Sci. Rep.* **5**, 1 (2015).
- 43) B. Sera, *Plasma Chem. Plasma Process.* **37** [1], 207 (2017).

- 44) M. Holc, *Plants* **8** [11], 1 (2019).
- 45) R. Singh, *J. Appl. Res. Med. Aromat. Plants* **12**, 78 (2019).
- 46) M. Billah, *Arch. Biochem. Biophys.* **681**, 108253 (2020).
- 47) T. Sarinont, *J. Phys. Conf. Ser.* **518** [1] (2014).
- 48) T. Sarinont, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **1723**, 34 (2015).
- 49) K. Koga, *Appl. Phys. Express* **9** [1], 5 (2016).
- 50) S. Kitazaki, *Curr. Appl. Phys.* **14**, S149 (2014).
- 51) T. Sarinont, *Arch. Biochem. Biophys.* **605**, 129 (2016).
- 52) N. Hayashi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **54** [6], 4 (2015).
- 53) K. Matra, *Procedia Comput. Sci.* **86**, 132 (2016).
- 54) A. L. Mihai, *Rom. Reports Phys.* **66** [4], 1110 (2014).
- 55) D. Dobrin, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **29**, 255 (2015).
- 56) Y. Meng, *Plasma Chem. Plasma Process.* **37** [4], 1105 (2017).
- 57) Y. Li, *Plasma Chem. Plasma Process.* **37** [6], 1621 (2017).
- 58) Q. Guo, *Sci. Rep.* **7** [1], 1 (2017).
- 59) K. Lotfy, *Plasma Chem. Plasma Process.* **39** [4], 897 (2019).
- 60) R. Zukiene, *Appl. Phys. Express* **12** [12], 7 (2019).
- 61) K. Matra, *Jpn. J. Appl. Phys.* **57** [1], (2018).
- 62) S. Yawirach, *J. Phys. Conf. Ser.* **1380** [1], 1 (2019).
- 63) T. Stolarik, *Plasma Chem. Plasma Process.* **35** [4], 659 (2015).
- 64) S. Khatami, *J. Theor. Appl. Phys.* **12** [1], 33 (2018).
- 65) R. Zhou, *Sci. Rep.* **6**, 1 (2016).
- 66) M. C. Pérez-Pizá, *Sci. Rep.* **10** [1], 1 (2020).
- 67) A. Zahoranová, *Plasma Chem. Plasma Process.* **38** [5], 969 (2018).
- 68) N. Khamsen, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8** [30], 19268 (2016).
- 69) N. Amnuaysin, *Songklanakarin J. Sci. Technol.* **40** [4], 819 (2018).
- 70) M. Măgureanu, *Plasma Chem. Plasma Process.* **38** [5], 989 (2018).
- 71) A. G. Volkov, *Bioelectrochemistry* **128**, 175 (2019).
- 72) U. Schnabel, *Plasma Process. Polym.* **9** [6], 569 (2012).
- 73) J. Tong, *Plasma Sci. Technol.* **16** [3], 260 (2014).
- 74) S. A. Fadhlalmawla, *Plasma Sci. Technol.* **21** [10], (2019).
- 75) C. A. Junior, *Sci. Rep.* **6**, 1 (2016).
- 76) D. L. S. Da Silva, *Rev. Caatinga* **31** [3], 632 (2018).
- 77) R. Molina, *Sci. Rep.* **8** [1], 1 (2018).
- 78) J. Pawlat, *Plasma Process. Polym.* **15** [2], (2018).
- 79) V. Štěpánová, *Plasma Process. Polym.* **15** [2], 1 (2018).
- 80) A. Mitra, *Food Bioprocess Technol.* **7** [3], 645 (2014).
- 81) S. H. Ji, *Arch. Biochem. Biophys.* **605**, 117 (2016).
- 82) M. Thisaweck, *Chiang Mai J. Sci.* **47** [1], 73 (2020).
- 83) J. S. Song, *J. Phys. D. Appl. Phys.* **53** [31], (2020).
- 84) M. Sery, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **48** [4], 939 (2020).
- 85) P. F. Ambrico, *J. Phys. D. Appl. Phys.* **53** [10], (2020).
- 86) P. J. Bruggeman, *Plasma Sources Sci. Technol.* **25** [5], (2016).
- 87) P. Bourke, *Trends Biotechnol.* **36** [6], 615 (2018).
- 88) U. Schnabel, *Foods* **8** [2], (2019).
- 89) H. I. Yong, *Plasma Process. Polym.* **15** [2], 1 (2018).
- 90) S. A. Sajib, *Plasma Chem. Plasma Process.* **40** [1], 119 (2020).
- 91) T. Sarinont, *MRS Adv.* **2** [18], 995 (2017).
- 92) L. Sivachandiran, *RSC Adv.* **7** [4], 1822 (2017).
- 93) C. Lo Porto, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **49** [July], 13 (2018).
- 94) K. Takaki, *J. Phys. Conf. Ser.* **418** [1], (2013).
- 95) S. Zhang, *RSC Adv.* **7** [50], 31244 (2017).
- 96) B. Adhikari, *Sci. Rep.* **9** [1], 1 (2019).
- 97) S. Islam, *Gesunde Pflanz.* **71** [3], 175 (2019).
- 98) L. Degutyte-Fomins, *Jpn. J. Appl. Phys.* **59**, 1-7 (2020).
- 99) S. Kyzek, *Plasma Chem. Plasma Process.* **39** [2], 475 (2019).
- 100) X. Q. Wang, *Sci. Rep.* **7** [1], 1 (2017).
- 101) K. Koga, *Jpn. J. Appl. Phys.* **59**, (2020).
- 102) C. Ahn, *Sci. Rep.* **9** [1], 1 (2019).
- 103) H. Hashizume, *Plasma Process. Polym.* **18** [1], 1 (2021).

委員会紹介

日本学術振興会 R052 DXプラズマプロセス委員会

東北大学 大学院工学研究科 金子 俊郎
(DXプラズマプロセス委員会 委員長)

はじめに

R052 DXプラズマプロセス委員会は、日本学術振興会の産学協力委員会[1]の一つであり、日本学術振興会プラズマ材料科学第 153 委員会[2]の後継として令和 5 年 4 月に設立いたしました。

令和 5 年 5 月 16 日に、第 1 回総会を開催しまして、筆者が委員長として承認されるとともに、副委員長として田中康規氏（金沢大学）と福水裕之氏（キオクシア株式会社）が承認され、また 13 名の企画運営委員ならびに 68 名（原稿執筆時）の学界委員・産業界委員の皆様が認められまして、本格的に活動を開始いたしました。

本稿では、日本学術振興会産学協力委員会について説明いたしまして、今回設立しました『DXプラズマプロセス委員会』の活動についてご紹介したいと思います。

日本学術振興会 産学協力委員会

日本学術振興会は、昭和天皇の御下賜金をもとに昭和 7 年に創設され、その活動は、学術研究の助成、研究者の養成、学術に関する国際交流の促進、大学改革や大学のグローバル化の支援など多岐にわたっています。日本学術振興会では、これらの意義・目的を踏まえた事業として、その趣旨に賛同した学界と産業界の会員が参加するフォーラムとして産学協力委員会を設定しており、主な活動内容として、以下の要素を挙げています。

- 学界から産業界に対する新たな課題解決の提案。
- 産業界の複数の業種が共有する問題意識への

取り組みを想定した学界への学術研究実施の提案。

- 学界および産業界から提案される協調領域の設計の検討。
- 社会実装を見据えた委員会メンバー内で行う戦略的研究課題の検討。

これらの活動内容を鑑み、令和 4 年度末で設置期間が終了しました「プラズマ材料科学第 153 委員会」を発展的に引き継ぐ形で『DXプラズマプロセス委員会』を立ち上げました。

DXプラズマプロセス委員会

本委員会では、「プラズマ材料科学」と「情報科学」の分野融合に産学協力事業として取り組むことにより、データサイエンス/デジタルトランスフォーメーション (DX) に基づいたプラズマプロセスの科学的現象解明とその解明プロセスの産業応用、さらにはプラズマ装置設計最適化の超高速化を推進することを目指しています。

プラズマ材料科学は、半導体製造技術に代表されるように、我が国の現・未来産業を支える基盤であり、産学共に重要な研究分野といえます。一方、情報科学では、利用可能な大量データを取り扱い、機械学習・強化学習を行うことや、さらには量子アニーリング型/量子ゲート型コンピューティングが既に提案され、最適化問題の超高速処理が可能となる手法が確立してきています。

本委員会では、極複雑系を有する「プラズマ材料科学」の社会実装への道筋に対して、立ちはだかる共通課題の抽出、解決法の検討および社会実

装を、「情報科学」を駆使して推進していきます。

本委員会で扱う極複雑系のプラズマ材料科学分野においては、この情報科学は(i)プラズマ物理・化学のサイエンスにおけるデータ不足からくる未解明現象の科学的解明, (ii)産業応用におけるプラズマ材料生成・プラズマ装置の最適化問題・社会実装, の両者に革新的に貢献できると考えております。また、情報科学とプラズマ材料科学に関連する学界・産業界の交流を促進することにより、(iii)情報科学分野においても、極複雑系マルチスケール問題への適用法の探索とその展開や応用先の開拓, 更には、(iv)次世代量子計算機製造用プラズマプロセスの強化とその装置設計・社会実装の加速等, 幅広い展開が見込めると考えています。

具体的な活動としましては、図1に示しますように、既に技術として適用が進められている①機械学習・強化学習の強化と、他の分野で成果報告がある②量子アニーリングのプラズマ材料科学への適用と実装, ③量子ゲートの導入などの情報科学とプラズマ材料科学との融合に関する未来の構想を設立, さらに④若手人材育成の4点を、5年間の設置期間の間に実施していきたいと考えております。

そのために本委員会では、データサイエンス/DXに基づいたプラズマプロセスの現象解明とその産業応用を推進すべく、プラズマ材料科学の学界委員, プラズマを用いた, あるいは用いようとしている産業界委員, および情報科学分野にお

ける学界・産業界委員に対して、次のことを実施します。

- 研究会：プラズマ材料科学×データサイエンス/DXに関連する講演と討論。
- 基礎講座：プラズマ材料科学およびデータサイエンス/DXにおける産学協力に必要な初心者向けの講座。
- 個別講習会：特定テーマに関する講習会を産業界会員の希望に応じて開催。
- HPを用いた情報共有:本委員会での活動に関する資料をアーカイブ化。産学協力を加速する「知」を積極的に提供。

おわりに

DXプラズマプロセス委員会では、本委員会活動に興味を持っていただいた企業の皆様の入会申し込みを随時受け付けております。本委員会のホームページ[3]に詳細が記載されておりますので、ご参照いただきお申込みいただけますと幸いです。

これからも日本学術振興会 R052 DXプラズマプロセス委員会の活動にご協力賜りますよう、どうぞよろしくお願いいたします。

参考 URL

- [1] https://www.jsps.go.jp/j-renkei_suishin/
- [2] <https://plasma153.org/>
- [3] <https://DXplasma.org/>

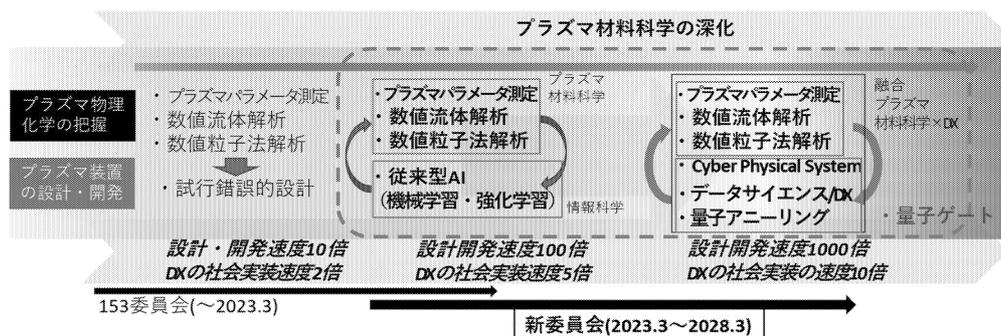


図1：データサイエンス/DXに基づいたプラズマ材料科学の深化。

研究室紹介

名古屋大学 低温プラズマ科学研究センター 石川・田中研究室

大学院工学研究科 電子工学専攻

生命エレクトロニクス 田中研究室・プラズマナノプロセス科学 石川研究室

名古屋大学 田中 宏昌、石川 健治

1. はじめに

本研究室は、2023年3月に堀勝先生が定年退職されたことに伴い、教育・研究体制を引き継ぐ形で、プラズマナノプロセス科学石川研究室と生命エレクトロニクス田中研究室が合同で運営しており、教授2名、准教授1名、講師1名に加え、数多くの特任教員、客員教員、研究員、事務職員と、博士後期課程12名、博士前期課程15名、学部4年生4名で構成されています(図1)。

2. 研究内容

(1) 生命エレクトロニクスと、(2) プラズマナノプロセス科学に関する研究を紹介いたします。

(1) 生命エレクトロニクス

本研究室では、生命エレクトロニクスとして、①プラズマ生命科学、②生命エネルギー制御、③生命ナノ加工、④生命デバイスに関わる研究に取り組んでいますので、研究内容のいくつかを紹介いたします。以下のホームページも参照ください。
<https://www.htanakalab.plasma.nagoya-u.ac.jp/>

① プラズマ生命科学

近年、低温プラズマの医療応用研究、農業応用研究は活発で、低温プラズマによる止血、創傷治癒、がん治療、低温プラズマの種子照射による発芽促進など画期的な現象が報告されています。低温プラズマが細胞、組織、個体などの生体に与える影響は非常に複雑で、その反応プロセスを理解し、低温プラズマによる生体応答効果が、なぜ起こるのかを解明することを考えています(図2)。

低温プラズマから細胞応答への反応プロセスは大きく、気相、液相、細胞内と分けることができ、それぞれの反応プロセスを解析するためには物理学的手法、化学的手法、生物学的手法と幅広い計測技術を駆使する必要があります。そのため、低温プラズマセンターでは学部の垣根、産学の垣根、更には国の垣根を越えた幅広い連携ネットワークを通して、以上の課題に取り組んでいます。

低温プラズマを照射した溶液(以下プラズマ活性溶液と呼びます)によるがん治療に結びつく研究をしています。2011年に、低温プラズマを照射した培養液がアストロサイト正常細胞に対して脳



図1：研究室構成メンバー(2023年3月)

腫瘍培養細胞を選択的に殺傷することを見出し、プラズマ活性培養液 (Plasma-activated medium, PAM) と名付けました[1]。

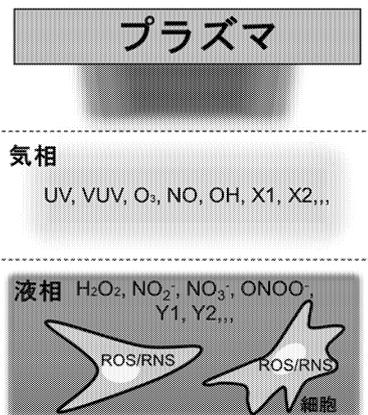


図 2 : プラズマ入力から細胞応答に至る分子機構

その後、臨床で点滴として用いられている乳酸リンゲル液にプラズマ照射した溶液 (プラズマ活性乳酸リンゲル液、Plasma-activated Ringer's lactate solution, PAL) を開発し、核磁気共鳴 (NMR)、液体クロマトグラフィー質量分析法 (LC-MS/MS) を駆使して PAL に含まれる有機物の成分を解析した結果、ピルビン酸、酢酸、ギ酸、グリオキシル酸、2,3-ジメチル酒石酸などを検出しました (図 3)。

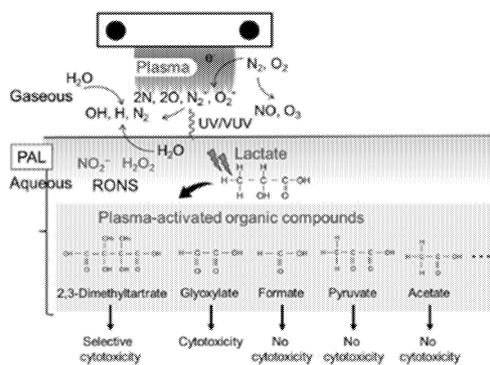


図 3 : PAL 中の成分解析

それぞれの物質について、がん細胞と正常細胞への細胞毒性を調べたところ、グリオキシル酸はがん細胞にも正常細胞にも細胞毒性を示すにもか

かわらず、2,3-ジメチル酒石酸は限定される濃度範囲で正常細胞に対してがん細胞に選択的毒性を示し、その他の有機物は細胞毒性を示さないことが分かりました[2]。

更に、脳腫瘍培養細胞において PAM の処理は酸化ストレス依存性の細胞死を引き起こすのに対して PAL は酸化ストレス非依存性の細胞死を引き起こします [3]。悪性中皮腫細胞では PAL の処理を施すことによって、オートファジー機構を開始して防御反応を示し、そのフェーズが経過した後はリソソームに一酸化窒素 (NO) が細胞内に蓄積することにより、二価鉄誘導の細胞死 (フェロトーシスと呼ばれます) へ移行することが分かってきました[4]。

PAL の臨床応用に向けた取り組みとして装置メーカーと共同で、プラズマと処理液を完全密閉系の PAL 作製装置を開発しました。この厳密に制御された装置を用いて創傷治癒に適した PAL を作製し、動物実験で有効性と安全性を確認した上でファーストインヒューマン (注 ヒトに初めて投与すること) の段階に入ろうとしています。

低温プラズマの農業応用としてイネやイチゴを用いた研究を行い[5]、低温プラズマの水産学応用として金魚、コイ、ゼブラフィッシュ、アルテミアを用いた研究を行っております。低温プラズマによる分化・細胞運命の制御や再生治療研究を推進するために再生研究のモデル生物であるプラナリアを用いた研究も展開しております。

以上のような幅広いアプローチから低温プラズマによる細胞応答に関する統一的な細胞内分子機構の理解や低温プラズマの個体レベルでの生体応答の機構解明を目指した研究を展開しております。

② 生命エネルギー制御

真核生物ではミトコンドリアと呼ばれる細胞内小器官が存在し、生体のエネルギー通貨ともいわれる ATP を産生しています。ミトコンドリアは

内膜と外膜の二重膜構造を取っており、内膜に局在するミトコンドリア呼吸鎖（電子伝達系）複合体と呼ばれるプロトンポンプ群により内膜と外膜の間にプロトンを蓄積することにより電気化学ポテンシャルを増大し、内膜に局在する ATP 合成酵素を通じてプロトンがミトコンドリア内部に流入する際に ADP と ATP に変換することにより大量の ATP を合成することが知られています。

低温プラズマやプラズマ活性溶液がミトコンドリアの活動を正にも負にも調整しうること [6,7] に着目し、低温プラズマによる生命エネルギーの制御を目指したいと考えております。

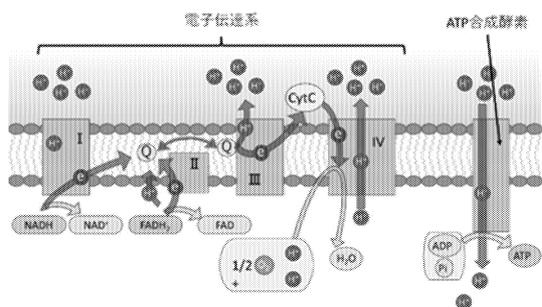


図4：ミトコンドリアと生命エネルギー

③ 生命ナノ加工

細胞、組織、個体を制御するためにナノ加工技術を適用するアプローチを行っております。例えば、carbon nanowall (CNW) と呼ばれる、基板上に垂直に多層ナノグラフェンシートが壁のように立ち並ぶナノ材料を成膜した細胞培養皿を用いて様々な壁間隔で骨芽細胞を培養したところ、ある条件下で、骨分化マーカーの *RUNX2* 遺伝子の発現量が増大することが分かりました [8]。

④ 生命デバイス

最先端の医療器具や医療検査を目的としたデバイスが工学部や企業で開発され、これらデバイスを使って、医学部と共同でヒトの血液や患者検体を用いた実験を行うなど、医工連携や産学連携を活発に推進しております。最近、ガラスデバイス

を用いて血中循環がん細胞 (CTC) やがん関連線維芽細胞 (CAF) を捕獲するデバイスの開発及び評価を行い、論文として公表いたしました [9]。

(2) プラズマナノプロセス科学

本研究室では、プラズマナノプロセス科学として、⑤先端プラズマプロセス、⑥グリーンプラズマ科学に関わる研究に取り組んでいます。これらのトピックに関連した研究内容を紹介いたします。以下のホームページも参照してください。

<https://horilab.nuee.nagoya-u.ac.jp/>

⑤ 先端プラズマプロセス

最先端半導体デバイスの製造はプラズマプロセスが不可欠となっています。集積回路のトランジスタの大きさは 10 年以内のうちに、ついにナノメートルを下回ることになりそうです (図 5)。

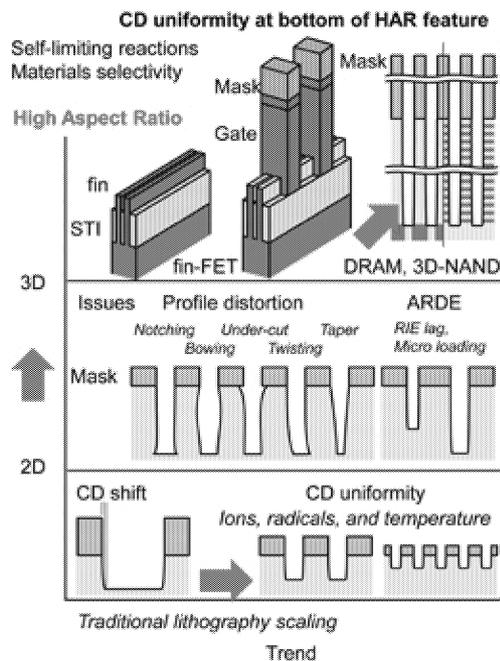


図5：高アスペクト比 3次元形状加工 [10]

これほどまでに小さい原子・分子の大きさのデバイスを量産できるのはプラズマプロセスが唯一の手段であり、その科学的な解明の重要性がさらに増しています。

プラズマの内部では、原料ガスの電子衝突反応によるイオンやラジカル生成から、それらの反応表面への輸送を経て、プラズマからの発光も照射される下で、非平衡に表面反応を生じています。プラズマプロセスの制御は、半導体プロセスにプラズマが導入された 1980 年代頃から、課題として取り上げられ続けています (図 6, [11])。

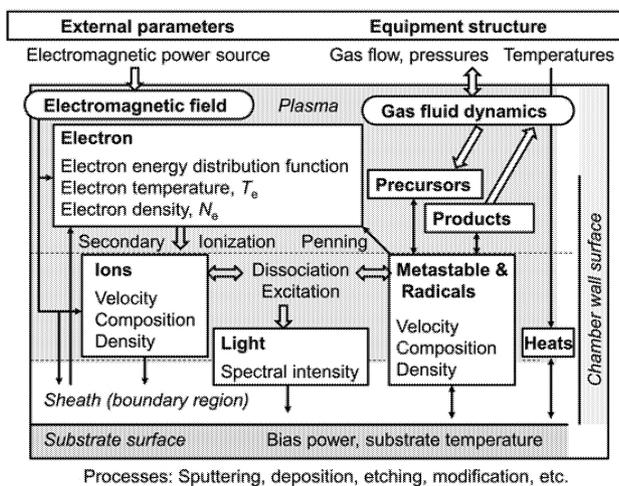


図 6 : プラズマの外部で、装置の操作によって決定される内部パラメータとの相関を表す概略図 (元 板谷良平先生)。内部パラメータを計測により取得し実時間でプラズマプロセスを制御 [11]

プロセス制御に限らず、プロセス成果には加工形状に加え、材料に損傷の低減が求められます。そのため、プラズマ装置の構造は然り、その装置でのレシピから、プラズマ内部でどのような化学反応が生じ、容器壁と相互作用もしながら、化学活性種が表面に到達し、どのように表面での反応が進行しているのか、を解明しなければなりません。メートルサイズの装置スケールからナノメートル以下となる表面スケールに渡る寸法で、様々な物理現象が階層的に折り重なる構造の複雑な系を構成しています。プロセス制御の実現手段は、プロセスをその場で実時間の精密な計測と物理化学の理解に基づくものと信じています[11]。

⑥ グリーンプラズマ科学

プラズマは電力印加から生成され、あらゆる製造技術に活用され、プラズマの化学反応への促進効果は、現代の電子工業をはじめとする産業化を先導する存在と言えます。今日の情報化社会の到来と発展の恩恵との裏表に、大量生産・大量消費・大量廃棄は社会的な課題となっています。その解決には、省資源・低消費エネルギー・再利用・再生循環を実現する未来社会が創成されなければなりません。循環経済の構築にはプラズマ技術は適しています (図 7, [12])。さらにいま直面している問題に半導体集積回路の製造装置の電力消費量の肥大化があるので、活性種の生成の効率化や損失の低減などに着眼したグリーンプラズマプロセスの創成を目指したいと考えております。

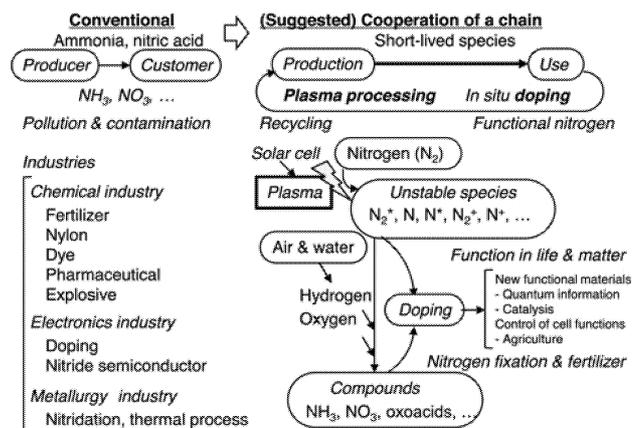


図 7 : 窒素循環を例にプラズマを社会に組み込み大量生産・大量消費・大量消費からの脱却 [12]

本研究室の最近の成果には、プラズマプロセス中の表面反応へ与えるウェハ温度の影響について調べた結果があります。Si 系をはじめ Ti, Ta, W などの窒化膜の F 系エッチングでは、反応生成物が塩 ((NH₄)SiF₆ など) として表面に残留するのでエッチング量が変わることで、材料選択的なエッチングが実現することもあり、表面反応の制御が重要となっています [13-15]。他にも GaN のプラズマ促進原子層エッチング(PE-ALE)を基板温

度が 400°C で施すと Ga 塩化反応物の揮発除去が促進され、損傷の低減を見出しました[16]。とどまらず、先進デバイス製造には、アナログ動作などに損傷の低減が高い制御レベルで要求されており、グラフェンなど 2 次元材料の加工[17]や量子回路の作製に向けたプラズマプロセスの量子レベル制御を目指しています。

優れた計測技術に基づき、アモルファスカーボン(a-C)の製膜の条件設定に情報科学的な最適化手法を使い、活性種の質量分析器(QMS)計測結果から、エッチング速度や屈折率などの物性値との相関を算出する方法の研究も行っています[18]。

新たな試みとして、これまでに使用されてこなかった金属化合物で、二元以上の化合物や金属炭化物、貴金属などの難エッチング材料を除去する方法の開発に、その材料選択性の実現の観点で取り組んでいます。比較的高い kPa のオーダーの圧力で蒸気の原料からプラズマを生成し、金属炭化物のエッチングを実現しました(図8、[19])。処理圧力の観点のみならず、電子や光を照射するプロセスなど、原理に遡って新しいプロセスの再構築に取り組んでいます。

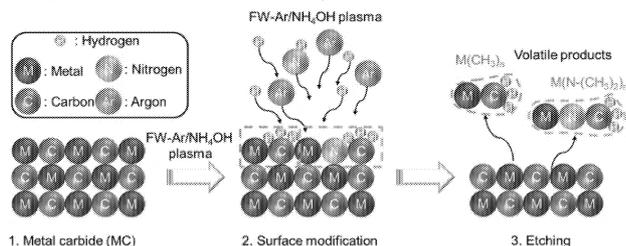


図8：金属炭化物のエッチングを kPa オーダープラズマプロセスで施す時の表面反応モデル[19]

PEALE の狙いのやや詳しいところは総説にまとめています[20]。さまざまな材料で原子スケールの構造を加工するため、例えば、シリコン酸化膜(SiO₂)表面に極薄のフルオロカーボン膜を堆積した後で、酸素プラズマ処理することで、カーボン膜の残留を制御して SiO₂ の原子層エッチング

を可能としました [21]。シリコン窒化膜 (SiN) に水素プラズマを予め処理することで、フッ素プラズマで SiN の水素化部分だけを自己停止する形で数原子層分だけ除去技術の操作パラメータを明らかにしました[22]。パーフルオロトリクロロシラン (POCl, CF₃(CF₂)₆CH₂SiCl₃) というシランカップリング剤型のエッチャントを供給することで、SiN に無反応で、SiO₂ にのみ選択的な吸着を得て、低エネルギーの付与で SiO₂ の原子層レベルでの選択除去を可能にしました(図9、[23])。いずれの制御においても、その場実時間で計測に基づく、反応の物理化学的理解が欠かせません。

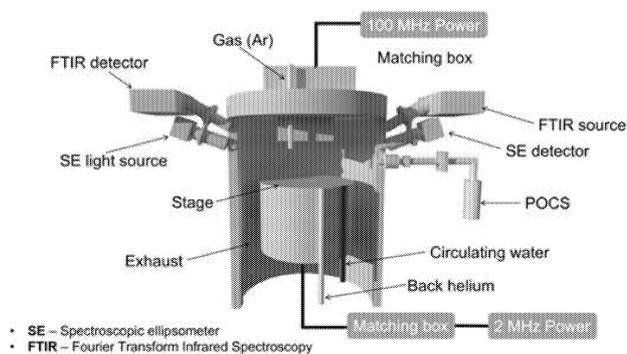


図9：反応表面その場観察装置を具備するプラズマエッチング装置 [23]

3. おわりに

本研究室で進めるプラズマ生命エレクトロニクスとプラズマナノプロセス科学の研究内容について紹介してきました。お互いの研究対象に関連性はないように感じた方もいるのではないのでしょうか。いずれの研究も生物や材料を対象にプラズマを作用させ、新しい価値が産み出されている点を共通にしています。すなわち、このプラズマプロセスによる価値変換の原理の究明によって、プラズマの新価値を産み出すメカニズムを探究し、その実現のために制御法を工学することが研究の目的となっています。ですから、プラズマの複雑さを読み解く精密な計測を基盤とし、その場実時間

のモニタリング制御を進め、材料の機能化や生物の応答という観点に考えを深めています。このことは、プラズマの複雑なシステムと被処理対象のシステムとの相互関係による応答と見られ、その機構、機序の解明を目指しています。別の見方から、常温常圧の標準状態の現象では滅多に見られない現象を人工的に産み出す方法になります。自然な観察の立場では、プラズマの駆動する、これまでに見出すことのできなかった現象と、その法則性を発見することが期待されます。このように、我々はプラズマプロセスの創り出す思いがけない現象の発見と、精緻な計測科学に根ざしたシステム応答の理解を通して、プラズマ駆動型科学の創成、そして、その制御を実現する技術の創出に、研究を続けています。

本研究室は、名古屋大学東山キャンパス内IB電子情報館北棟2階とナショナルイノベーションコンプレクス4階の名古屋大学低温プラズマ科学研究センター内で活動しています。本センターは、2023年4月より東海国立大学機構直轄研究拠点として、岐阜大学プラズマ応用研究センターと統合する低温プラズマ総合科学研究拠点としても活動を始めています。

分科会の諸先生方には、何卒今後ともご指導とご鞭撻をいただきますよう宜しくお願い申し上げます。是非とも名古屋にお越しの際には、研究室にお立ち寄りをいただけたら幸いです。

謝辞（敬称略、順不同）本原稿をまとめるにあたり、名古屋大学病院 水野正明、医学研究科 豊國伸哉、梶山広明、加藤昌志、生命農学研究科 北野英己、前島正義、松本省吾、榊原均、江原宏、内田浩二、柴田貴広、低温プラズマ科学研究センター 堀勝、関根誠、林俊雄、近藤隆、ノヴァン・ノン、小田修、清水尚博、宮下直人、服部圭、小林伸好、シャオ 世男、ミロン カメリア、ブ

リトン ニコライ、近藤博基、堤隆嘉、橋爪博司、グエン ティ・トゥイ・ガー、ダシヤン アルン・クマール、グエン トラン、三輪和弘、井上健一、研究室学生、秘書各位、名城大学 伊藤昌文、平松美根男、熊谷慎也、内田儀一郎、太田貴之、竹田圭吾、豊田工業大学 佐々木実、愛知工業大学 竹内和歌奈、共同研究先関係者各位に、この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- PPaP: Plasma Process. Polym.; JJAP: Jpn. J. Appl. Phys.; JVST: J. Vac. Sci. Technol. と略記
- [1] H. Tanaka, et al, Plasma Med. 1 (2011) 265-277.
 - [2] H. Tanaka, et al., Sci Rep 11 (2021) 18488.
 - [3] H. Tanaka, et al., Sci Rep, 9 (2019) 13657.
 - [4] L. Jiang, et al. Redox Biol. 43 (2021) 101989.
 - [5] H. Hashizume, et al., PPaP 18 (2021) 2000181.
 - [6] H. Tanaka, et al., PPaP 18 (2021) 2100056.
 - [7] H. Tanaka, et al., JJAP 61 (2022) SA1007.
 - [8] T. Ichikawa, et al., AIP Adv. 12 (2022) 025216.
 - [9] H. Tanaka, et al., Sci. Rep. 13 (2023) 4130.
 - [10] K. Ishikawa, et al., JJAP 57 (2018) 06JA01.
 - [11] K. Ishikawa, et al., JJAP 62 (2023) SA0803.
 - [12] T. Kaneko, et al., JJAP 61 (2022) SA0805.
 - [13] K. Shinoda, et al., JVST B 40 (2022) 022201.
 - [14] SN. Hsiao, et al., Appl. Surf. Sci. 541 (2021) 148439.
 - [15] SN. Hsiao, et al., Vacuum 210 (2023) 111863.
 - [16] S. Nakamura, et al., J. Appl. Phys. 133 (2023) 043302.
 - [17] H. Sugiura, et al., Carbon 170 (2020) 93.
 - [18] J. Kurokawa, et al., Vacuum 205 (2022) 111351.
 - [19] TTN. Nguyen, et al., Sci. Rep. 12 (2022) 20394.
 - [20] K. Ishikawa, et al., JJAP 56 (2017) 06HA02.
 - [21] T. Tsutsumi, et al., JVST A 35 (2017) 01A103.
 - [22] K. Nakane, et al., ACS Appl. Mater. Interf. 11 (2019) 37263.
 - [23] A. P. Osonio, et al., JVST A 40 (2022) 062601.

プラズマ照射とランプ加熱を用いた 各種薄膜材料の等方性原子層エッチング

(株) 日立製作所 篠田 和典、三好 信哉、小林 浩之、
(株) 日立ハイテク 伊澤 勝、名古屋大学 石川 健治、堀 勝

1. はじめに

ムーアの法則が提唱されてから半世紀以上が経つ。その間、半導体集積回路の加工寸法は微細化を続けてきた。近年は、物理的な限界が近づいたことにより微細化の進行速度は低下している。しかし、レイアウトルールを見直すことで素子間や配線間の距離を縮小する設計・製造協調最適化技術 (DTCO: Design Technology Co-Optimization) の採用などにより、引き続き世代ごとに着実な微細化が進んでいる[1]。現在は、いよいよ原子層オーダーの超微細加工が求められるようになっている。このため原子層デポジション (ALD: Atomic Layer Deposition) や原子層エッチング (ALE: Atomic Layer Etching) などの、原子層プロセスの研究開発が活発化している[2]。

また、トランジスタの素子構造は、微細化の進行に伴うリーク電流の増大を抑制するために、従来の二次元プレーナ型から、チャネル周囲の三方向をゲートで覆った三次元フィン型に変化してきた。また今後は、技術ノード 3 nm 以降の世代において、チャネルの周囲を完全にゲートで覆った GAA (Gate All Around) 構造が実用化段階を迎えようとしている[1]。このように、今後の半導体集積回路を製造するためには、原子層レベルの寸法精度で三次元構造を加工する必要がある。このため、異方性および等方性の ALE の研究開発が、近年大変に活発化している。本稿では、我々が開発を進めている、プラズマ照射による膜表面の改

質と、赤外線ランプ加熱による表面改質層の除去を繰り返すことを特徴とする等方性 ALE 技術を紹介する。

2. プロセスフロー

本節では、 Si_3N_4 の等方性 ALE プロセスを例にとり、ハイドロフルオロカーボン (HFC: Hydrofluorocarbon) 系のプラズマ照射と赤外線ランプ加熱のサイクルを用いた ALE プロセスについて説明する[3]。図 1 に本 ALE プロセスの模式図を示す。

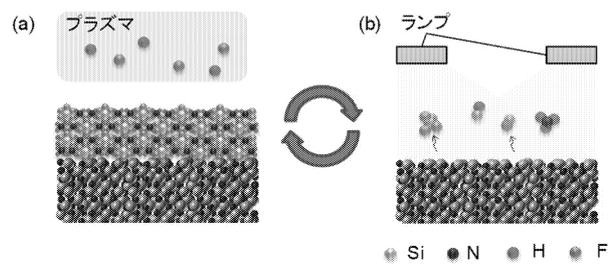


図 1 プラズマ照射とランプ加熱のサイクルによる Si_3N_4 の等方性 ALE プロセス

本プロセスでは、 Si_3N_4 膜の表面にプラズマ処理によりケイフッ化アンモニウム ($(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$) を主たる成分とする表面改質層を形成し、これを赤外線ランプで加熱することにより分解脱離させる。そして、それらを繰り返すことでステップ・バイ・ステップに Si_3N_4 表面をエッチングする。水素化・酸化された Si_3N_4 の表面に CF_4 系のプラズマを照射することにより、 Si_3N_4 膜の表面にケ

イフ化アンモニウムが生成することは、1988年に発見されている[4]。プラズマ照射により Si_3N_4 上に形成されたケイフ化アンモニウムが、 300°C の加熱により消失することが、1998年に X線光電子分光法 (XPS : X-ray Photoelectron Spectroscopy) により見出されている[5]。また、 SiO_2 において、 NF_3/NH_3 系のプラズマ照射により膜表面にケイフ化アンモニウムを形成し、これを加熱することで SiO_2 をエッチングできることが、1993年に報告されている[6]。本研究における Si_3N_4 の ALE プロセスは、これらの先行研究において得られた知見に基づいたものであり、プラズマ照射による表面改質層形成と、ランプ加熱による表面改質層除去により Si_3N_4 をサイクリックに原子層レベルの制御性でエッチング除去する。また、本プロセスの手法は、 Si_3N_4 だけではなく、 TiN の等方性 ALE にも応用できることを実証した[6]。

3. 実験装置

本研究で使用した実験装置を図2に示す。図2(a)は、プラズマ照射後および真空加熱後の表面原子反応の XPS 測定に用いた in-situ 分析装置である。本装置は、反応チャンバと、試料ステージ、 2.45 GHz のマイクロ波キャビティからなる。反応チャンバは超高真空のサンプルハンドリング機構を介して、in-situ 分析用の XPS チャンバに接続されている。プラズマは、キャビティ内を通過する形で配置された石英管に供給される、ハイドロフルオロカーボン系混合ガスにより生成される。プラズマ照射後の試料は、真空中で XPS チャンバ内に搬送され、表面分析される。

図2(b)は、サイクルエッチング用に開発した 300 mm ウェハ対応装置である[8]。本装置は、反応チャンバ、冷却ステージ、誘導結合プラズマ発生用コイル、イオン遮蔽板、赤外線ランプ、膜厚

測定用の in-situ 分光エリプソメータからなる。プラズマ照射中のウェハ温度は、裏面ヘリウムガスを用いて $-20\sim 40^\circ\text{C}$ の一定温度に制御されている。プラズマ照射で膜表面に改質層を形成した後、赤外線ランプでウェハを $50\sim 300^\circ\text{C}$ に急速加熱することで、改質層を脱離させる。

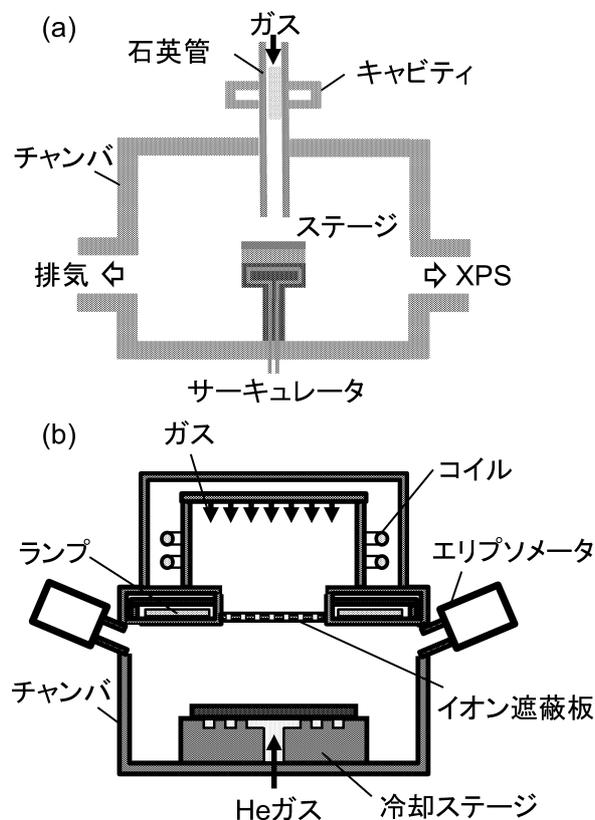


図2 (a) In-situ XPS 分析に用いた実験装置の構造 (b) サイクルエッチングに用いた 300 mm ウェハ対応装置の構造[8]

4. 原子層反応の表面分析

図3(a)は、プラズマ照射した Si_3N_4 試料を in-situ XPS 分析した際に得られた窒素 $1s$ スペクトルである。この実験では、混合ガス中のハイドロフルオロカーボン濃度をパラメータとして用いた。ハイドロフルオロカーボンガスの濃度が $10\sim 70\%$ の範囲では、プラズマ照射後にアンモニウム塩に起因する 402 eV のピークが観測された。図

3 (b) は、 Si_3N_4 表面にプラズマを連続的に 40 min 照射した際の、 Si_3N_4 エッチング量の HFC ガス濃度依存性である。HFC ガスの濃度が 10%以上では、 Si_3N_4 のエッチングは抑制された。この 10~70%の濃度範囲は、アンモニウム塩からなる改質層が形成されている領域である。また、HFC ガスの濃度が 0~70%ではフルオロカーボン系のデポジションは生じないが、80%以上ではフルオロカーボン系のデポジションが生じることが知られている。この結果から、アンモニウム塩からなる表面改質層が Si_3N_4 膜のエッチングの進行を抑制していることが分かる。このように、プロセス時間が増大しても反応が一定量以上に進まずに停止する性質は、セルフリミティング性と呼ばれる。プロセスがセルフリミティング性を持つことは原子層エッチングの大きな特徴であり、エッチング量

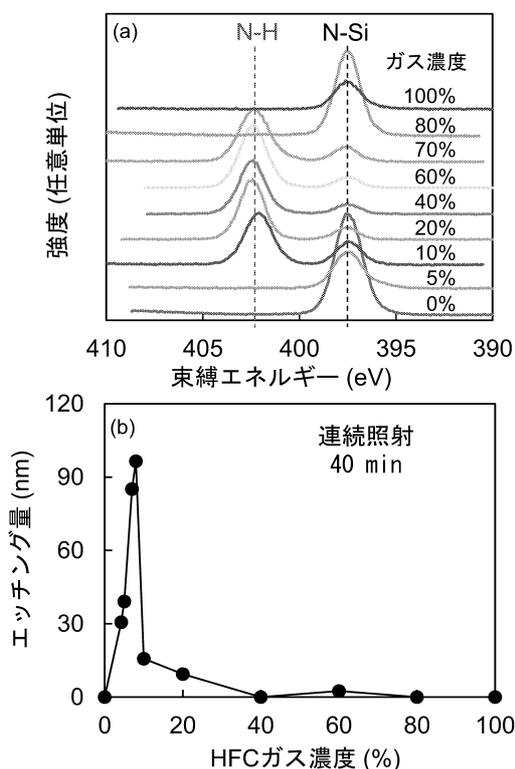


図 3 (a) HFC プラズマを照射した Si_3N_4 の窒素 1s スペクトル (b) HFC プラズマを 40 min 連続照射した Si_3N_4 のエッチング量[3]

の均一性の観点で大きなメリットとなる。

次に、HFC プラズマの照射ステップと 120 °C における真空加熱のステップを繰り返す ALE プロセスにおいて、 Si_3N_4 、TiN、および SiO_2 表面における各ステップの後の窒素 1s スペクトルを図 4 に示す。 Si_3N_4 および TiN の場合は、HFC プラズマの照射後にアンモニウム塩に起因するとみられる 402 eV のピークが検出された。また、真空加熱ステップ後にはこれが消失した。また、これらのステップを繰り返し行うと、同じ表面反応が繰り返し起こることが分かった。一方、 SiO_2 の場合は、プラズマ照射後の表面に、アンモニウム塩に対応する 402 eV のピークは検出されなかった。これは、 SiO_2 の場合には、膜中および気相中に、アンモニウム塩の形成に必要な窒素原子が含まれていないためである。この結果、HFC プラズマの照射と真空加熱の繰り返しにより、アンモニウム塩を含む表面改質層を Si_3N_4 および TiN の表面のみにおいて選択的に形成/除去できることが分かった。

図 5 は、ケイフ化アンモニウムの熱分解反応に関する熱力学計算の結果である。ギブズ自由エネルギー変化の温度依存性を、圧力をパラメータとしてプロットした。この計算では、次式の分解反応を仮定した。



この反応式におけるギブズ自由エネルギーの変化 (ΔG) が 0 以下となる温度と圧力の条件では、右辺が左辺と比較して安定であるため、ケイフ化アンモニウムの分解が起こる。図 5 に示すように、1~10 Pa の圧力では、温度が 100 °C 前後より高くなった場合に、 ΔG の値が負となる。したがって、改質層に起因する 402 eV のピークが 120 °C の真空加熱で消失したことは、改質層の

主たる成分がケイフッ化アンモニウムであると考えると妥当である。したがって、この計算結果は、表面改質層の主たる成分がケイフッ化アンモニウム塩であることを裏付けるものである。

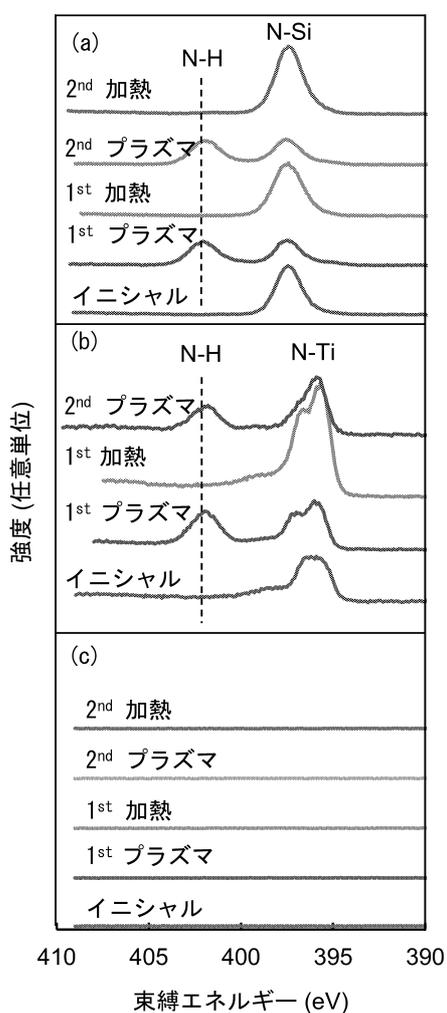


図 4 原子層エッチングサイクルにおけるプラズマ照射ステップおよび真空加熱ステップ後の窒素 1s スペクトル (a) Si₃N₄、(b) TiN、(c) SiO₂[3]

次に、表面改質層の膜組成を分析した結果を示す。図 6 は、この表面改質層の原子濃度を、XPS スペクトルから評価した結果である。表面改質層の原子濃度は、フッ素が 67.7%、窒素が 22.4%、

シリコンが 9.8%、炭素が 0%、酸素が 0.09%であった。XPS では水素を検出できないために水素の有無は不明であるが、窒素：シリコン：フッ素の組成比は概ね 2：1：6 であり、ケイフッ化アンモニウム ((NH₄)₂SiF₆) における窒素：シリコン：フッ素の組成比と一致した[9]。

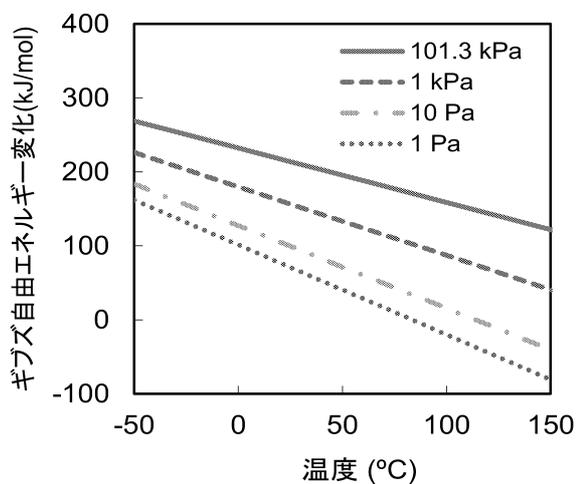


図 5 ケイフッ化アンモニウム分解反応の熱力学計算結果[2]

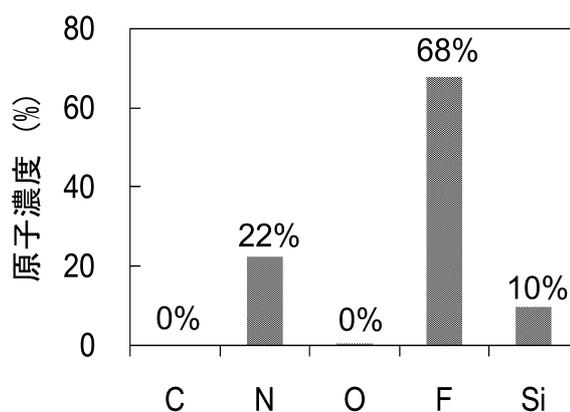


図 6 XPS により評価した Si₃N₄ 表面改質層の原子濃度[9]

表面改質層の化学組成をより詳細に調べるため、熱脱離スペクトル (TDS : Thermal Desorption

Spectroscopy) を用いて表面改質層を評価した [10]。TDS による測定は、改質層に水素原子が存在することを確認するためにも有効である。図 7 は、ハイドロフルオロカーボン系のプラズマで表面改質層を形成した Si_3N_4 試料において、100～250 °C の温度範囲で得られた熱脱離スペクトルである。

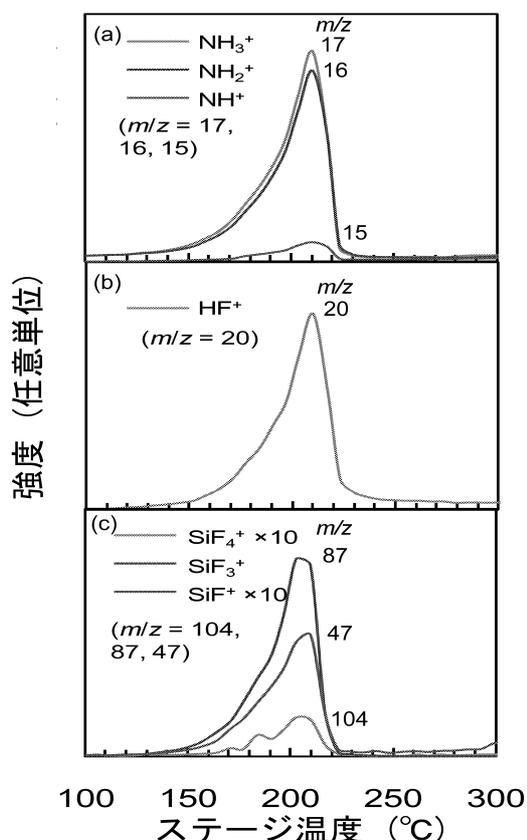


図 7 プラズマ照射した Si_3N_4 表面改質層の熱脱離スペクトル (a) NH_x (b) HF (c) SiF_x [10]

この結果、 NH_x に由来する質量/電荷比 15、16、17 の脱離種が 130～230 °C の温度範囲で検出された。なお、 OH^+ についても NH_3^+ と同じ質量/電荷比 17 であるため、質量/電荷比 17 の全強度から OH^+ の量を差し引いて、 H_2O の量を推定している。また、HF に由来する質量/電荷比 19 の脱離種が 130～230 °C の温度範囲で検出された。さらに、 SiF_x に由来する質量/電荷比 47、66、

85、104 の脱離種も同じ温度範囲で検出された。これらのことから、表面改質層からの脱離種は NH_3 、HF、 SiF_4 であることが分かった。これは、プラズマ照射により Si_3N_4 表面にケイフッ化アンモニウムが生成し、加熱により NH_3 、HF、 SiF_4 に分解するという仮説を支持する強い証拠である。

5. 300 mm 装置による原子層エッチング

300 mm ウェハ用の ALE 装置を用いて、ハイドロフルオロカーボン系混合ガスを用いたプラズマ照射と赤外線ランプ加熱を繰り返し、 Si_3N_4 、TiN、 SiO_2 、poly-Si をサイクリックエッチングした結果を図 8 に示す。TiN の場合はプラズマ照射時間をパラメータとして、15～60 秒の間で変化させた。エッチング量は、in-situ エリプソメータで評価した値である。この結果、サイクル数が 0 から 10 に増加するにつれて、 Si_3N_4 と TiN のエッチング量がステップ・バイ・ステップに直線的に増加した。このとき、 Si_3N_4 の 1 サイクルあたりのエッチング量 (EPC: Etched amount Per Cycle) はおよそ 0.9 nm であり、TiN の 1 サイクルあたりエッチング量は 0.3 nm であった。一方、 SiO_2 と poly-Si の膜厚は変化しなかった。この結果、 Si_3N_4 および TiN を、 SiO_2 および poly-Si に対し

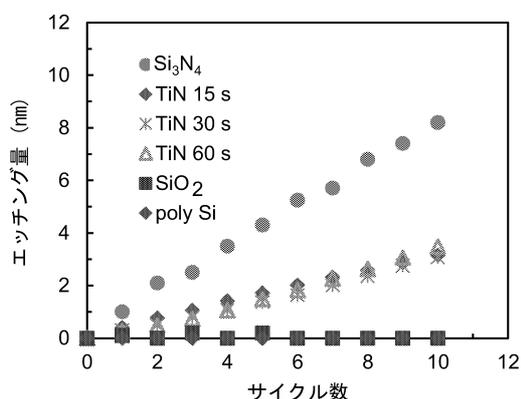


図 8 プラズマ照射とランプ加熱によるサイクルエッチング

て選択的に ALE できた。TiN の EPC が、プラズマ照射時間に対して変化しないことは、本プロセスのセルフリミティング性を示している。

図 9 は、300 mm ウェハ対応装置でエッチングした、パターン付きサンプルの透過型電子顕微鏡 (TEM : Transmission Electron Microscopy) 画像である。左上の画像はエッチング前のパターンの断面形状、その他の画像は 10、40 サイクル後の断面形状である。パターン上部と下部でエッチング量は同じであり、Si₃N₄ をコンフォーマルにエッチングできることが確認された。また、40 サイクルのエッチング後にも poly-Si や SiO₂ が侵食されていないことから、これらの膜に対して高い選択性があることが確認された。

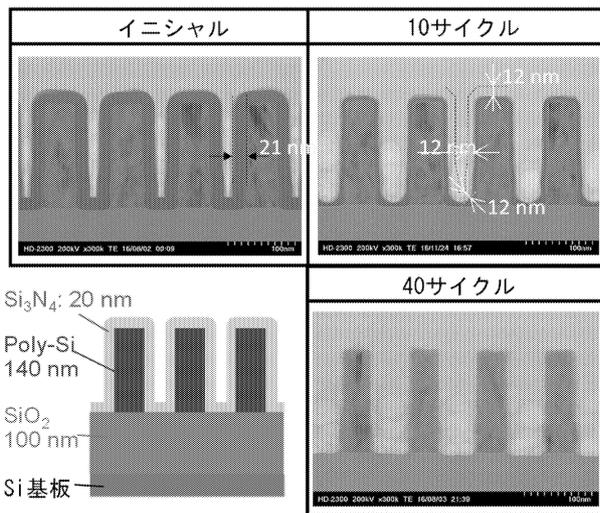


図 9 パターンサンプル加工形状の断面写真[8]

6. ランプ加熱時間による材料選択性制御

多様な膜種の極薄膜が用いられる次世代デバイスの製造プロセスでは、材料選択性の制御が重要である。本稿で紹介した、プラズマ照射とランプ加熱を用いた ALE プロセスでは、表面改質ステップと脱離ステップのプロセス温度を変えることができるため、これにより材料選択性を制御する

ことができる。ここでは、ランプ加熱時間 (到達温度) を変化させることで材料選択性を制御する方法について説明する[11]。本実験では、タングステン (W) と TiN のサンプルに対して、HFC 系ガスのプラズマ照射とランプ加熱のサイクルを繰り返した。プラズマ照射は -20 °C で行った。また、ランプ加熱時間は 4~24 秒の間で変化させた。ランプ加熱時の昇温速度は 7 °C/sec であるので、このランプ加熱時間の範囲は、ウェハの到達温度が

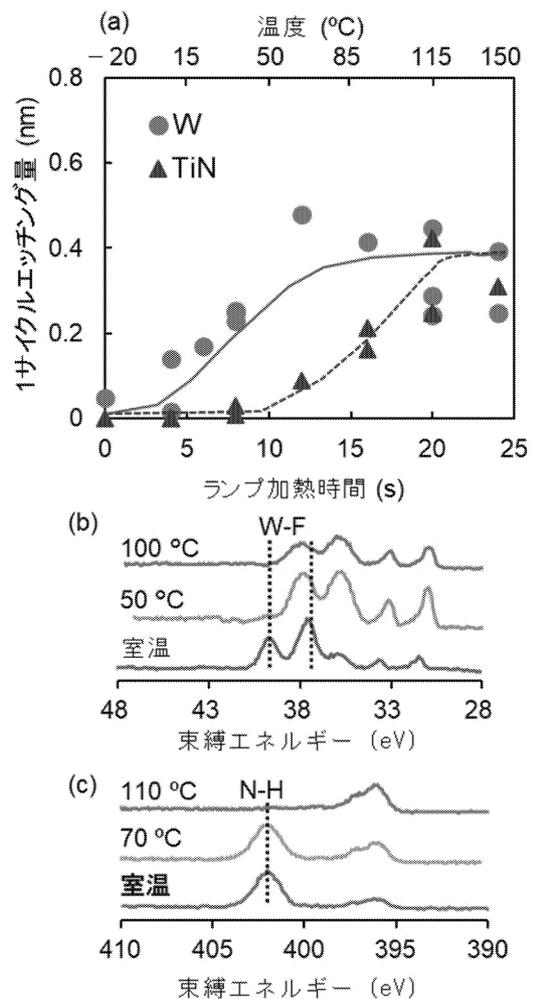


図 10 (a)W、TiN における 1 サイクルエッチング量の加熱時間依存性、(b)W 表面の XPS スペクトルの加熱温度依存性、(c)TiN 表面の XPS スペクトルの加熱温度依存性[11]

8~148 °Cの範囲で変化することに対応している。図 10 (a) は、ランプ加熱時間の関数として、W と TiN の EPC をプロットしたものである。

ランプ加熱時間が 0~8 秒の範囲では、ランプ加熱時間が長くなるにつれて W の EPC は増加した。このとき TiN の EPC はほぼゼロであった。ランプ加熱時間が 8 秒では、W の TiN に対する選択エッチングになっている。一方、ランプ加熱時間が 20 秒以上では、W と TiN の EPC はほぼ同じであり、W と TiN の非選択エッチングになっている。このように、ランプ加熱時間を変化させることで、高選択から非選択まで、材料間の選択性を制御することができる。図 10 (b) (c) は、W および TiN の XPS スペクトルの、真空加熱温度依存性である。W の表面改質層に起因する W-F のピークが消失する温度が 50 °C であるのに対し、TiN の表面改質層に起因する N-H のピークが消失する温度は 110 °C と、W の場合と比較して高いことが分かる。このように、それぞれの材料に形成される表面改質層の揮発性に違いがあることが、ランプ加熱時間を用いて材料選択性を制御することができるメカニズムである。

7. おわりに

本稿では、プラズマ照射とランプ加熱のサイクルによる等方性原子層エッチング技術を紹介した。その代表例として、アンモニウム塩の表面反応を

利用した Si₃N₄ や TiN などの窒化膜の選択 ALE 技術や、ランプ加熱時間により材料の選択性を制御する技術を紹介した。今後、本プロセスが先端半導体の進展に貢献することを期待している。

参考文献

- [1] <https://irds.ieee.org/editions/2022>.
- [2] K. Ishikawa et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 06HA02 (2017).
- [3] K. Shinoda et al., *J. Vac. Sci. Technol. A* **37**, 051002 (2019).
- [4] W. Knolle et al., *J. Electrochem. Soc.* **135**, 2574-2578 (1988).
- [5] Y. Kataoka et al., *J. Electrochem. Soc.* **146**, 3435-3439 (1999).
- [6] H. Nishino, N. Hayasaka, and H. Okano, *J. Appl. Phys.* **74**, 1345 (1993).
- [7] K. Shinoda et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52**, 475106 (2019).
- [8] K. Shinoda et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, 194001 (2017).
- [9] K. Shinoda et al., *Appl. Phys. Express* **9**, 106201 (2016).
- [10] N. Miyoshi et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 06HB01 (2017).
- [11] K. Shinoda et al., *J. Vac. Sci. Technol. B* **40**, 022201 (2022).

第 21 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

東京大学 小池 健、宗岡 均、寺嶋 和夫、伊藤 剛仁

はじめに

この度は、第 21 回プラズマエレクトロニクス賞を賜りまして、大変光栄に思っております。ご支援いただきました皆様、またご推薦いただいた先生、ご選考していただいた委員の皆様へ深く御礼申し上げます。今回の受賞対象論文「**Electric-Field-Induced Coherent Anti-Stokes Raman Scattering of Hydrogen Molecules in Visible Region for Sensitive Field Measurement**」 [1] に関しまして、紹介をさせていただきます。

【背景】

大気圧近傍でのプラズマ応用研究が精力的に進められている。電界は、プラズマを理解・制御するうえで最も重要なパラメータの一つと考えるが、大気圧近傍での計測手法は、未だ限定的であった。特に、プラズマ生成前等、十分な励起粒子密度を伴わない空間においても適応が可能な手法は限られており、赤外領域の電場誘起コヒーレントアンチストークスラマン散乱 (**E-CARS_i**) [2] および電場誘起二次高調波発生 (**E-FISH**) [3] が代表的な 2 手法であった。これらの方法は、いずれも 3 次非線形光学効果を用いたものである。

E-CARS_i では、エネルギー差がラマン活性な振動エネルギーに一致する 2 つのレーザー光源を使用する。位相整合をとるために、同軸上にレーザーを配置したうえで集光することで、電界強度に対応した赤外光が放出される。シグナルへの変換効率が高い共鳴現象を用いている点が利点と言える。**E-FISH** では、使用するレーザー光源は一つで良く、シグナルの波長を可視光領域に設定する

こともできる。この様に、どちらも極めて有用な測定手法ではあるものの、前者においては測定が困難な赤外光領域にシグナル光が存在する点、後者においては、非共鳴現象故に変換効率が低い点が、その適応において考慮すべき点と言えた。

そのため、共鳴現象と可視光領域の両立を実現できる手法として、可視光領域の電場誘起コヒーレントアンチストークスラマン散乱 (**E-CARS_v**) に着手することとした。なお、当該論文は、既知電界中での実証実験であり、プラズマ中の **E-CARS_v** 計測については、今後の続編をご期待頂きたい。

【実験方法】

図 1 に、**E-CARS_v** の光学遷移図を示す。ラマン活性な振動エネルギーに対応した赤外光を入射することにより、電界が存在する場合にのみ、電界強度に依存した強度を持つ可視光が誘起される。なお、本手法の提案は既に存在していた [4] もの、その検証は行われていない状態であった。

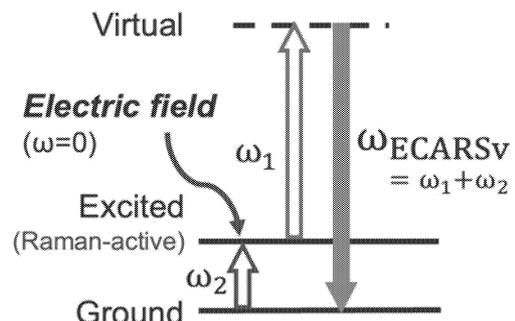


図 1. **E-CARS_v** の光学遷移図

該当論文では、水素分子をプローブ分子とした E-CARS_v 生成に取り組んだ。水素分子の場合、2.4 μm の赤外レーザー(Laser Vision)を入射光の一つとして用いる。もう一方の光は、シグナル光を計測しやすい可視光領域に誘起することができることも有り、532 nm の光を用いた。どちらも、3-5 ns のパルス幅を持つナノ秒パルス光源である。図 2 の装置概略図に示す様に、二つの光は同軸上に配置され、焦点距離 75 mm の集光ミラーによって電極間隙中央に集光した。レーザー強度は 10 mJ (532 nm)および 3 mJ (2.4 μm)とし、繰り返し周波数は 10 Hz である。石英レンズを用いた集光でも、十分なシグナル強度は得られたものの、赤外光と可視光との色収差を避けるため、ミラーを用いることとした。水素セルから出てきた光は、プリズムによって分離され、それぞれ受光素子を用いて検出した。436 nm におけるシグナル光の検出に対する 532 nm の入射レーザー光の影響は大きく、ノッチフィルターおよび分光器を通した上で、光電子増倍管(PMT)を用いて検出した。

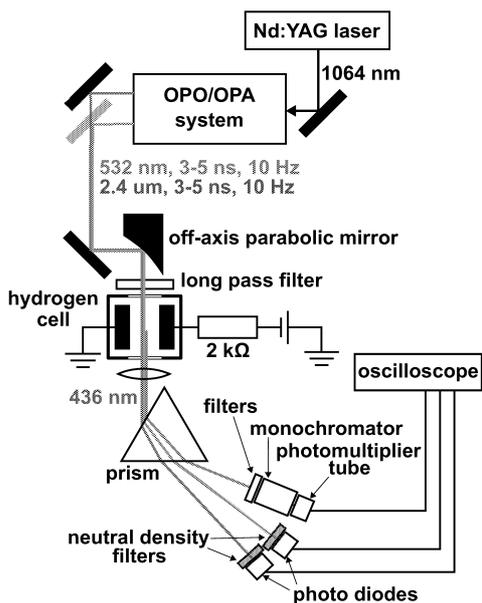


図 2. 装置概略図 [1]

【結果と考察】

図 3 には、横軸に既知の電界強度、縦軸に 436 nm のシグナル強度の平方根を示している。直線関係が見られ、確かにシグナル強度を測定することによって、電界強度が算出できることを確認した。特筆すべきは、0.5 V/mm といった弱い電界におけるシグナルも、直線関係を示している点である。大気圧雰囲気における E-FISH が、5 V/mm までの報告に留まっていたことから、共鳴現象と可視光による検出の両者を用いることにより、確かに高感度の電界計測が実現できることを実証できた報告となった。

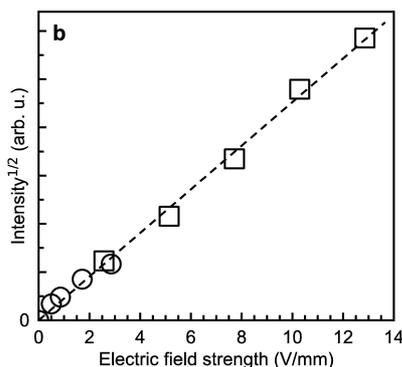
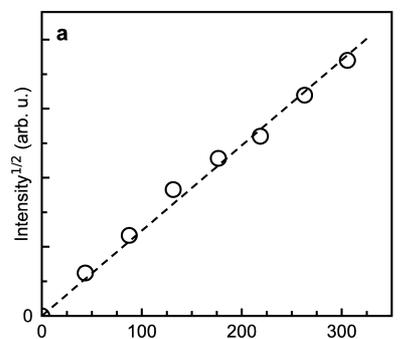


図 3. シグナル強度の平方根の電界強度依存性 (a)約 300 V/mm までの高電界強度領域、(b)14 V/mm 以下の低電界強度領域 [1]

また、水素分圧を変化させた計測も行った。シグナル強度の平方根は、水素分圧とも比例することが確認でき、電界強度とプローブ分子密度にその平方根が比例する理論通りのシグナル強度が得

られ、確かに、高密度雰囲気において優位な手法であることが確認できた。

更に、赤外レーザーの周波数を掃引することによる、E-CARS_v スペクトルも取得した。回転準位に対応したスペクトルが観測され、その強度分布から、回転温度が室温付近であり、E-CARS_v による温度計測の可能性も示すことができた。一方、周波数スペクトルにおいて、使用したレーザーのバンド幅に対応したスペクトル形状が見られた。これは、照射した赤外レーザーの一部、共鳴に寄与できるエネルギー領域のみしか利用できていないことを示唆している。既存の赤外レーザーにおける最大強度を用いており、赤外レーザーにおける技術改良が、更なる高感度化をもたらすことを示す結果ととらえている。今後、更なる高感度化、また、それを用いたプラズマの理解、応用技術の革新的改良などにつながることを期待している。

【まとめと今後の展望】

以上の様に、水素分子を用いた E-CARS_v によって、大気圧雰囲気など、高密度雰囲気における高感度電界計測を実証した。より汎用性が高いと思われる窒素分子を用いた計測が可能である点も、その続報として報告をさせて頂いている [5]。また、プラズマ雰囲気での電界計測も、遠くないうちに報告できると考えている。

一方、本 E-CARS_v においては、未だに課題も多い。上述のような色収差は、測定を適応するにあたって考慮すべき技術的課題と言える。特に、窒素分子等、より長波長の赤外光を用いる必要がある場合にはなおさらである。また、赤外レーザーの強度や線幅においても改善が望まれる。技術的な課題は時間が解決してくれるものと考えているが、より本質的な課題として、共鳴に関わる分子密度の変化をどう考慮していくかといった課題が残されている。E-CARS_v スペクトルによって、

回転温度が算出できる点は述べたものの、より簡易かつ直接的に測定できる手法が望ましい。

本受賞を一つの励みに、E-CARS_v の更なる改良や、その発展による新規計測手法の開発など、今後も、プラズマ計測手法の開発とその応用に、精力的に取り組んでいきたい。

【謝辞】

本研究は、科研費(16H05988、19H01885、21H04450)の支援を受けたものとなります。E-CARS_v への着手は、Stanford University の Cappelli 教授との議論を経てのものとなります。また、先行研究にあたる E-CARS_i 測定 [6–8]における共同研究者の Ruhr-University Bochum の Czarnetzki 教授、Luggenhölscher 博士、Mueller さん、大阪大学の浜口教授、小林氏、金澤氏 (所属・肩書は研究実施当時)にも、謝意を表します。

参考文献

- [1] T. Koike, H. Muneoka, K. Terashima, and T. Ito; *Phys. Rev. Lett.* **129**, (2022), 033202.
- [2] O.A. Evsin, E. B. Kupryanova, V.N. Ochkin, S. Y. Savinov, and S. N. Tskhai; *Quantum Electron.* **25**, (1995), 278.
- [3] A. Dogariu, B. M. Goldberg, S. O'Byrne, and R. B. Miles; *Phys. Rev. Applied* **7**, (2017), 024024.
- [4] M. A. Buldakov, N. F. Vasil'ev, S. V. Lazarev, and I. I. Matrosov; *Sov. J. Quantum Electron.* **14**, (1984), 278.
- [5] T. Koike, H. Muneoka, K. Terashima, and T. Ito; *Jpn. J. Appl. Phys.* **62**, (2023), SA1015.
- [6] T. Ito, K. Kobayashi, S. Mueller, D. Luggenhölscher, U. Czarnetzki, and S. Hamaguchi; *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42**, (2009), 092003.
- [7] T. Ito, K. Kobayashi, U. Czarnetzki, and S. Hamaguchi; *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, (2010), 062001.
- [8] T. Ito, T. Kanazawa, and S. Hamaguchi; *Phys. Rev. Lett.* **107**, (2011), 065002.

第 21 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

名古屋大学 市川景太*, Chu Manh Hung**, 森山誠***, 鈴木陽香, 豊田浩孝
キオクシア (株) 飯野大輝, 福水裕之, 栗原一彰

はじめに

このたびは、第 21 回プラズマエレクトロニクス賞を賜りましたこと、大変光栄に存じます。ご選考頂きました委員の先生方ならびに、これまでご支援をいただきました多くの方々に厚くお礼申し上げます。今回受賞対象となりました論文「Angular distribution measurement of high-energy argon neutral and ion in a 13.56 MHz capacitively-coupled plasma」[1]に關しまして、ご紹介をさせていただきます。

論文概要

【研究背景】

異方性エッチングは半導体デバイス製造に必須のプロセスですが、チャージングに伴う形状異常は従来からよく知られている問題です。例えばノッチングやボウイング、マイクロトレンチなどはその事例として知られています。一方、近年の半導体デバイスの高集積化に伴って、デバイス構造の 3 次元化が進んでいます。その中でもメモリデバイスとして多く用いられている NAND フラッシュメモリは高精度の高アスペクト比ホールエッチングを必要とし、これはメモリ高集積化に直結する重要なプロセスになっています。

しかしながら、高アスペクト比ホールエッチングではホール内におけるチャージング[2,3]や加工形状異常[4,5]、エッチング速度の低下が課題になっており、RF 電極に入射する荷電粒子の振

舞いを明らかにすることが必要とされています。

その中でも入射イオンの角度分布はホール側壁へのチャージングを引き起こす大きな要因ですが、その測定例は全くといってよいほど報告がなされておらず、これまではシミュレーションなどで推測するしかありませんでした。また、RF 電極に入射する高エネルギー粒子はイオンだけでなくシース内での電荷交換によって生成される中性粒子もありますが、こちらも測定例が皆無でシミュレーションでの議論があるのみでした。

そこで本研究では、自己バイアスが加わった RF 電極に入射するイオンおよび中性粒子の入射角度を精度よく計測する装置を独自に開発し、入射高エネルギー粒子の角度分布計測に成功しました。[1]

【実験方法】

高エネルギー粒子の角度分布計測においては、拡がり角度が非常に小さいことが予想されることから、測定においては高精度の測定が可能となる方法が求められます。そこで我々は、13.56 MHz でプラズマを生成し、RF 電極に入射した高エネルギー粒子をオリフィスにて抽出し、その後にドリフト空間を走行させることで、角度拡がりを経験的な拡がりの情報として得ることとしました。また、空間的な拡がりの情報を得るにはビーム分布形状を 2 次元的な画像情報として得ることが望ましいと考え、マイクロチャンネルプレートと蛍光面を組み合わせたイメージングプレートでビーム拡がり分布を計測することとしました。さらに、

*現 マイクロン, **現日本エア・リキード

***現 キオクシア

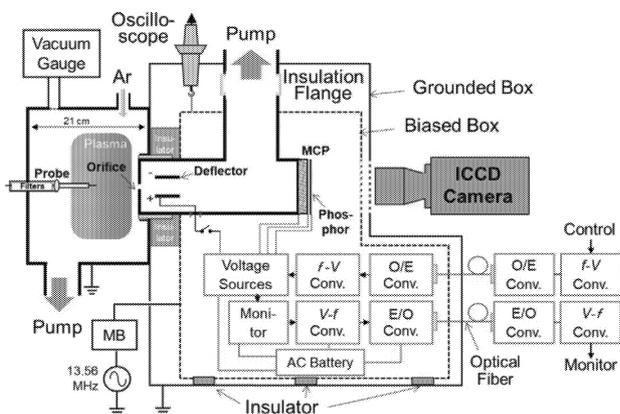


図1 実験装置図. [1]

シース内ではイオンだけでなく電荷交換衝突により高エネルギー中性粒子も発生する可能性があることから、飛行空間内に偏向電極を配置し中性粒子とイオンの分離もおこなうこととしました。

しかしながら、この方法はシンプルな方法である反面、測定に影響を与えるさまざまな要因を考慮しておく必要があります。ひとつはオリフィスそのものの持つアスペクト比が角度分布に影響を与える可能性です。我々はできる限りアスペクト比の小さい(穴の長さ/直径比 ~ 9)オリフィスを製作して実験に用いました。また、粒子の入射角度に対するオリフィス透過率を計算した結果、入射面に対して 0.5° (後述の高エネルギー粒子のおよその角度拡がり幅となります)の斜め入射において97.5%以上の透過率があることを確認しています。また、オリフィスを通過したイオンに静電気力などの外力を加えないことは測定において必須となることから、オリフィス通過後の走行空間は無電界でなければなりません。このことから、我々はオリフィスの背後に設けたドリフト空間(長さ30cm)をRF電極と同電位とし、この中に粒子を通過させる構造としました(図1)。また、ドリフト管だけでなくイメージングプレートもRF電極を基準電位として動作させることになるため、イメージングプレートを駆動するための高圧電源や偏向電極の基準電位もすべてRF電極と同電位

とし、電源類をすべてRF電極と同電位の金属箱内に据え付けました。そのうえでこれらの電源はAC出力バッテリーで動作させることで、すべての機器を電氣的に完全に浮かせた状態で動作させています。なお、これらの電源の制御やモニタ信号はすべて電気光変換系によって光ファイバを介してやり取りを行っています。また、イメージングプレートによって得られるビーム分布も、メッシュを介して接地側に配置したICCDカメラで撮影しています。

その他に考慮すべきもうひとつの点は、ビームの持つ空間電荷やドリフト管内を通過する際の鏡像効果により荷電粒子に加わる静電気力です。これに対しては、引き出したイオンビームの空間電荷を抑えるために小径オリフィスを用いるとともに、空間電荷効果を考慮したシミュレーションによる検討を行いました。その結果、本研究の $27\mu\text{m}$ オリフィス、 $\sim 10^{17}\text{m}^{-3}$ のプラズマ密度(イオン電流密度 \sim 数 10A/m^2)において入射イオンエネルギーが $\sim 500\text{eV}$ 以上であれば空間電荷による影響が十分に小さいことを確認しています。

以上の検討をおこなったうえで、角度精度を検討しますと、ドリフト管長さ30cmとイメージングプレートの分解能 $25\mu\text{m}$ から得られる角度精度は非常に高く、分解能は約 0.01° となります。

【実験結果】

圧力4Pa, RF電力200WのArプラズマにおいて得られたビーム拡がりの撮影例を示します。図2(a),(b),(c)は偏向電極に加える電圧がそれぞれ0, 4, 8Vにおけるイメージングプレートの画像です。電圧印加とともにスポットが2つに分かれますが、偏向板による電界は図のx軸方向に加わっており、右にずれたスポットは電圧の極性から正イオンであることがわかりました。また、偏向板の電圧によらない中心のスポットは電荷をもた

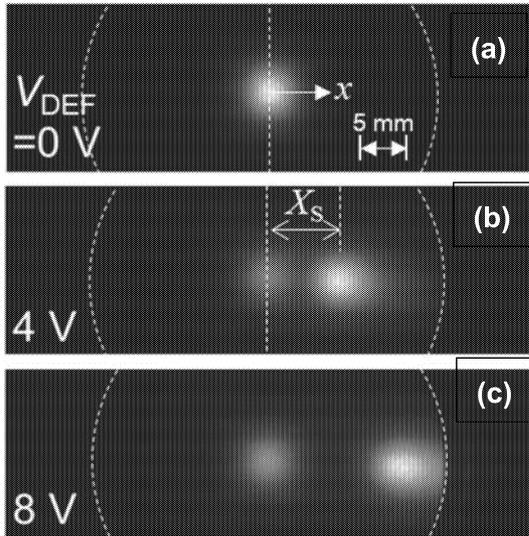


図2 偏向電圧を変えながら測定されたビーム画像例. [1]

ない中性粒子によるものとなりますが、イメージングプレートは熱速度程度の低エネルギー中性粒子にはまったく感度がなくこのスポットは電荷交換生成された高エネルギー中性粒子に起因するものとなります。したがって、図2(a)のビームスポットはイオンと中性粒子が重なったものとなり、図2(a)から図2(c)の中心部のスポットを差し引くことで、イオンのスポットを得ることができます。

この方法をもとに、イオンと高エネルギー中性粒子の角度分布を x 方向に対する分布として表した結果を図3(a),(b)にそれぞれ示します。ここで入射角度はドリフト管の走行距離とイメージングプレート上でのビームスポット中心からの距離より得たものです。横軸の範囲は $\pm 2^\circ$ であり、高い角度分解能を持っていることがお分かりいただけると思います。また、縦軸の信号強度は対数にて示してあり、ビームの拡がり幅は非常に狭いこともわかります。さらに、RF電力を50から400Wに増加させることにもとない、拡がり幅が徐々に狭くなっていることもこの図からみて取れます。

入射イオンや中性粒子の角度拡がり形成する要因として、シースに入射する際に粒子が持つ熱運動が考えられます。例えばイオンの熱運動が温

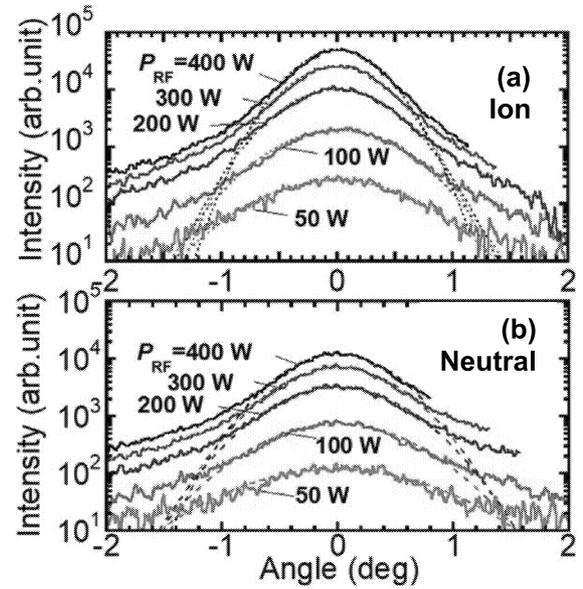


図3 イオンおよび中性粒子の角度拡がり分布. 点線はガウスフィッティング結果. [1]

度 T_i^{eff} の Maxwell 分布では、シース-プラズマ界面方向の熱速度を v_\perp とし、速度分布は

$$f(v_\perp) \propto \exp\left(-\frac{\frac{1}{2}Mv_\perp^2}{k_B T_i^{eff}}\right) \quad (1)$$

で表されます。シース加速方向にイオンが加速され電極に入射したときの速度を v_\parallel とすると、イオンの入射角度 θ は近似的に v_\perp/v_\parallel であることから、角度拡がりの分布は θ に対してガウス分布となり、

$$f(\theta) \propto \exp\left(-\frac{\theta^2}{\theta_w^2}\right) \quad (2)$$

となります。ここで、 θ_w は角度拡がり幅で

$$\theta_w = \left(\frac{k_B T_i^{eff}}{E_\parallel}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

にてあらわされ、シース方向のイオン入射エネルギー E_\parallel と熱エネルギー $k_B T_i^{eff}$ の比の平方根となります。これをもとに実験結果にフィッティングをした分布を図3中に点線で示します。これを見ると、中心部のピークはガウス分布で比較的良好に説明されている一方、拡がりの裾では実験結果の方がかなり裾広がりを見せていることがわかります。この原因のひとつとして、RF電極へ入射するイオンはシース振動やシース中での電荷交換衝突に

伴いエネルギー分布を持ち、その結果としてイオン、中性粒子がさまざまなエネルギーで RF 電極に入射していることによるものと考えられます。

最後にイオンおよび中性粒子の積分信号強度と角度拡がり幅 θ_w を自己バイアス電圧に対して両対数にてプロットした結果を図4に示します。自己バイアス電圧の増加にともない信号強度が増加していますが、これはプラズマ密度の増加や高エネルギー化にともなうイメージングプレートの感度増加にともなうものです。また、角度拡がり幅 θ_w は自己バイアス電圧の増加にともないイオン、中性粒子ともに狭くなっています。これは式(3)において $E_{||}$ が増加することによるものと考えられ、これによると、 θ_w は $E_{||}$ の平方根の逆数に比例します。これをもとにイオンに対して実験結果に対するフィッティングを示したのが図中の赤実線です。実験結果はおよそ式(3)の傾向を示しており、およそモデルに合致していることがわかります。また、このフィッティングから T_i^{eff} を算出することも可能であり、この結果では $T_i^{eff} \sim 0.54$ eV となり、およそ妥当な温度を示していることもわかりました。

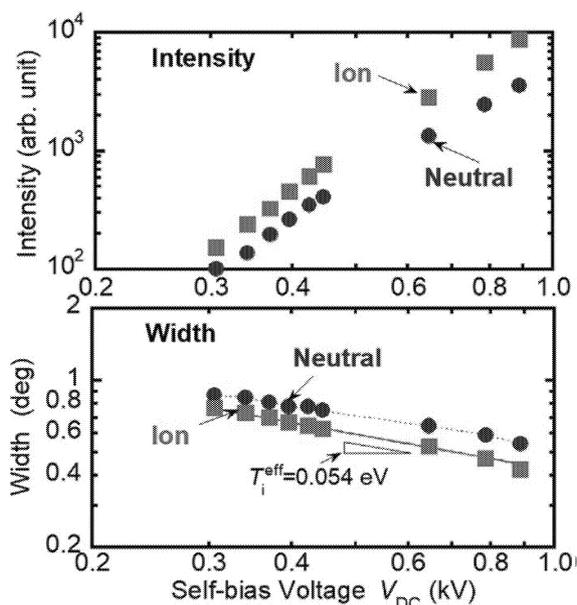


図4 イオンおよび中性粒子の信号強度および拡がり幅の自己バイアス電圧依存性。 [1]

ただし、この結果における θ_w および T_i^{eff} はあくまで角度分布中心部のピーク、すなわち最大エネルギーに相当するものをフィッティングした結果であり、実際には図3に示すように単純な角度分布ではないことを改めて記したいと思います。

【最後に】

本論文の報告は 13.56MHz 単周波における結果ですが、現在は 40/2MHz 二周波容量結合型プラズマにおけるイオン、中性粒子角度分布計測や Ar/CF₄ 混合プラズマでの計測も進めており、興味深い結果が得られつつあります。これらの結果は高アスペクト比エッチングの形状異常やチャージングの解析に役立つものと考えており、関係の研究者に有益な情報となることを願っております。またこの研究を通して、これまで気づかれなかった新たな知見が得られる可能性もあり、本研究をさらに発展させたいと考えております。

参考文献

- [1] K. Ichikawa, M. H. Chu, M. Moriyama, N. Nakahara, H. Suzuki, D. Iino, H. Fukumizu, K. Kurihara, and H. Toyoda, *Appl. Phys. Express*, **14** (2021) 126001.
- [2] M. Moriyama, N. Nakahara, A. Mitsuya, H. Suzuki, K. Kurihara, D. Iino, H. Fukumizu, and H. Toyoda, *Jpn. J. Appl. Phys.* **59** (2020) SJJB03.
- [3] M. Moriyama, N. Nakahara, K. Kurihara, D. Iino, H. Fukumizu, H. Suzuki, and H. Toyoda, *Jpn. J. Appl. Phys.* **60** (2021) 016001.
- [4] T. Kinoshita, M. Hane, and J. P. McVittie, *J. Vac. Sci. Technol. B* **14** (1996) 560.
- [5] M. Boufnichel, S. Aachboun, F. Grangeon, P. Lefauchaux, and P. Ranson, *J. Vac. Sci. Technol. B* **20** (2002) 1508.

水ジェット/低ガス圧プラズマ相互作用環境における 水和電子のレーザー誘起脱溶媒和信号の印加電圧依存性

北海道大学 触媒科学研究所 稲垣慶修

はじめに

水のような極性をもつ溶媒に自由電子が輸送あるいは生成されたとき、溶媒分子は配向して溶媒和電子(水和電子)が生成される。古くから放射線化学において反応性が調べられてきた水和電子は、ナトリウム原子と同程度の強い還元性をもつため、プラズマ・液体相互作用においても重要な役割を果たすことが予想される。しかしながら、水和電子は存在する領域が界面から数 nm の領域に限定され、計測難度が非常に高いことから、実験的研究が遅々として進んでいない。そこで、我々は気液界面に選択性を持つレーザー誘起脱溶媒和を利用した水和電子の検出手法を開発した[1]。水和電子は、脱溶媒和エネルギーを超える光子エネルギーをもつレーザー光を照射すると、脱溶媒和をおこし、自由電子となって気相に放出される。脱溶媒和により生成した自由電子のうち、液体分子との衝突による運動エネルギーの損失を経ても十分な運動エネルギーを持つ自由電子のみが気相に輸送されるため、レーザー誘起脱溶媒和を利用すれば気液界面直下 10 nm 以下の領域に存在する水和電子を選択的に検出できる[2]。我々は、水ジェットと低ガス圧プラズマが相互作用する環境で、水ジェットにレーザー光を照射し、レーザー誘起脱溶媒和によって生じる電流変化を計測している。本稿では、この電流変化が、水ジェットに印加した電圧によって、どのように変化するかを示し、そこから低ガス圧プラズマと相互作用した水表面における水和電子のキネティクスについて考察す

る。

実験方法

図 1 に実験装置の概略図を示す。水とプラズマの電位差を制御するため、水マイクロジェットを真空容器内部で噴射し、誘導結合プラズマと相互作用させた。図 1(a)に示すように、液体窒素で冷却したトラップを真空容器内部に配置することで、真空容器内部を数 mTorr 程度まで減圧することができる。実験では、内径 75 μm のプラスチック (PEEK) 製のノズルから、流量 1.8 mL/min で 10 % の NaOH 水溶液 (35 S/m) を噴出させ、水ジェットを生成した。He を分圧が 100 mTorr になるように流し、150 W の電力を ICP アンテナに供給して、誘導結合プラズマを発生させた。図 1(b)に示すような回路を形成して、水ジェットのタンクからバイアス電圧 V_{dc} を印加した。誘導結合プラズマのプラズマ電位は、真空容器の電位によって決定することから、バイアス電圧を変化させることで、プラズマと水の電位差を制御することができる。これに対して、Nd:YAG レーザーの 4 倍 (30 mJ/pulse) を照射した。このとき発生したパルス電流は、ノズル直上にあるステンレス継手を介して、オシロスコープで計測した。

実験結果

図 2 に、Nd:YAG レーザーパルスを入射した前後の水ジェットとプラズマ間に流れる電流変化を示した。電流の向きは、プラズマから水ジェットの方向を正とした(図 1(b)参照)。レーザー光を照

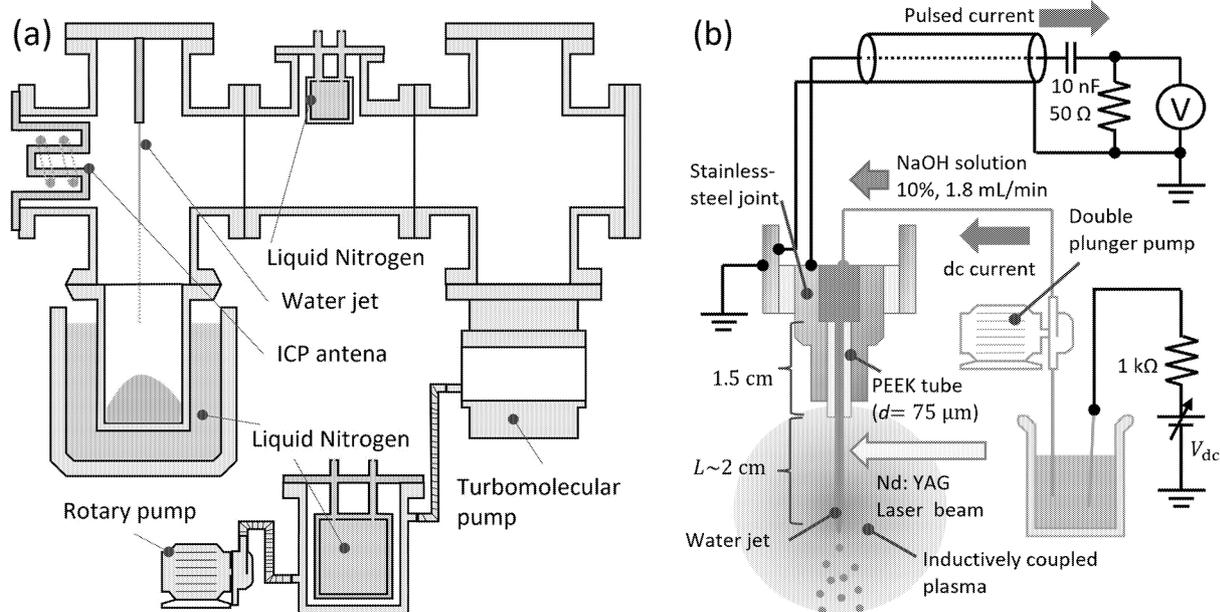


図 1 実験装置の概略。(a)は真空容器全体、(b)は水ジェット周辺を表している。

射すると、水ジェットからプラズマに電子が輸送される方向に電流が流れた。このパルス電流は、レーザー誘起脱溶媒和によって、水ジェットからプラズマに水和電子由来の電子が飛び出し、電流として計測されたと考えられる。そこで、図 2 のようなパルス電流の振幅を水ジェットに印加した電圧で整理したものを図 3 に示す。図 3 には、定常的にプラズマと水ジェットの間で流れている電流も示した。電流の向きは、水ジェットからプラズマの方向に定義している(図 1(b)参照)。パルス電流振幅の電流方向と逆の定義であることに注意されたい。加えて、水ジェットは流路が細長く、大きく電圧降下するため、別途シミュレーションで水ジェットの電位を求め、図 3 の第 2 軸にノズル端から 4 mm(照射するレーザービームの中心)における水ジェットの電位を示した。図から分かるように、定常的に流れる電流は、バイアス電圧が負のときにイオン電流が支配的になり、バイアス電圧が正のときに電子電流が支配的になった。また、バイアス電圧が正のときは、電子電流が大きいいため、流路で大きく電圧降下し、水ジェット

電位の上昇が抑えられている。パルス電流振幅については、バイアス電圧を負に大きくしたとき、振幅が大きくなる一方で、バイアス電圧を正に大きくしたとき、振幅は変化しなかった。

考察

水和電子の生成過程には、①水分子のイオン衝突電離で生じた自由電子が水和する過程、および②自由電子がプラズマから輸送され水和する過程が考えられる。図 3 の結果は、これら 2 つの生成過程が $V_{dc} = 0 V$ 付近で切り替わっていると考えられる。バイアス電圧が負のとき、①イオン衝突が支配的な水和電子の生成過程になる。バイアス電圧が高くすると、イオンエネルギーが大きくなり、水分子の電離頻度が高くなるため、図 3 のように、パルス電流振幅が大きくなったと考えられる。一方で、バイアス電圧が正のとき、②プラズマから輸送された自由電子が水和する過程が支配的になるはずであるが、電子フラックスの増加に対して、パルス電流振幅が増加しなかった。これは、電子照射によって、水和電子のスカベンジャーも生成していることを示唆している。

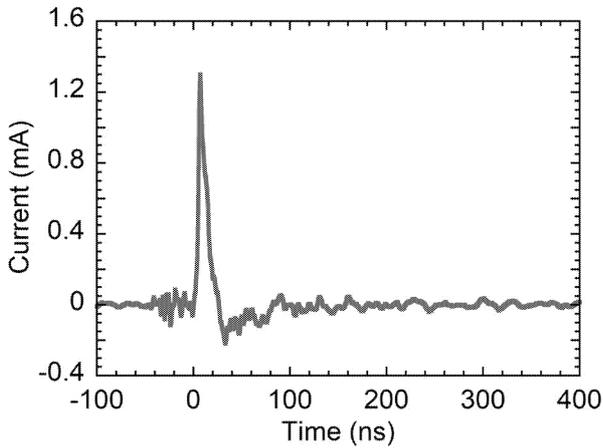


図 2 レーザー照射前後に水ジェットとプラズマに流れる電流変化。

Tochikubo らは、水表面に電子照射したとき、水分子の励起状態が解離することで、OH ラジカルが生成されることを指摘している[3]。バルクにおいて OH ラジカルと水和電子の反応速度定数は、 $3.0 \times 10^{10} \text{ s}^{-1} \text{ M}^{-1}$ であり[4]、本実験の電子照射の環境で支配的な消滅過程になっていたと考えられる。

謝辞

この度は、第 53 回（2023 年秋季）応用物理学会におきまして、講演奨励賞という名誉ある賞を賜りましたこと、大変光栄に存じます。審査委員の先生方をはじめ関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。また、本誌において受賞内容について紹介する機会を頂きましたこと有難く存じます。そして、本研究を進めるにあたり、多くのご指導とご助言を賜りました北海道大学の佐々木浩一教授、

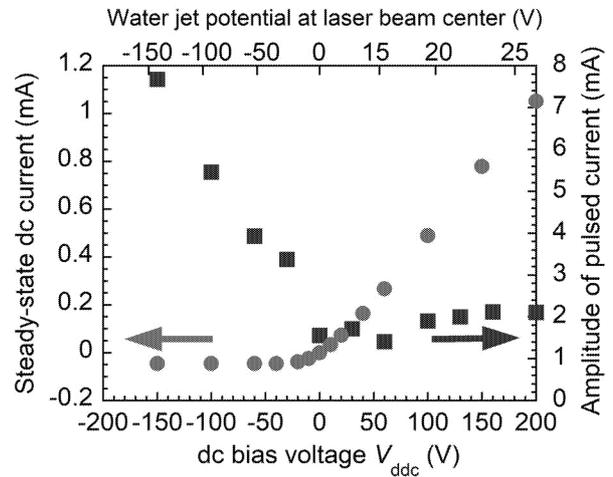


図 3 水ジェットに印加したバイアス電圧に対する定常電流およびパルス電流振幅の依存性。照射するレーザービームの中心の電位も同時に示している。

白井直機准教授にこの場を借りて感謝申し上げます。最後に、本研究は JSPS 科研費(21J11632, 20H00135, and 19K21861)の支援を受けて実施されました。

参考文献

- [1] Y. Inagaki et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* **31** (2022) 03LT02.
- [2] D. Luckhaus et al., *Sci. Adv.* **3** (2017) e163224.
- [3] N. Akiyama et al., *J. Appl. Phys.* **129** (2021) 163304.
- [4] G. V. Buxton et al., *J. Phys. Chem. Ref. Data.* **17** (1988) 513.

国際会議報告

15th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Application for Nitrides and Nanomaterials / 16th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (ISPlasma2023/IC-PLANTS2023)

岐阜大学 上坂 裕之

本会議は2023年3月5日（日）～9日（木）に岐阜大学（岐阜市柳戸）で開催された。ISPlasma/IC-PLANTSとしては実に4年ぶりのオンライン開催であった。（文中敬称略）組織委員長・伊藤貴司、実行委員長・著者（岐阜大、共に2022年4月に開所した工学部附属プラズマ応用研究センターを兼務）、プログラム委員長・関根誠（名大）、プログラム副委員長・プラズマ分野・小川大輔（中部大）、窒化物分野・岩田直高（豊田工大）、ナノ分野・武野昭義（岐阜大）、バイオ分野・栗田弘史（豊橋技科大）であった。COVID-19の状況にらみながらであったが、本会議の設立趣旨にかんがみてオンライン開催を早い段階で決めた。オンライン開催となった会場や懇親会の熱気に触れて、実行組織メンバーとしてはそうしてよかったとつくづく思った。幸いなことに、COVID-19に関する問題が生じることはなく、滞りなく進めることができ、参加者を含め委員の方々、その他関係者には、ここに感謝の意を表す。

今回の会議をもって開催は15回を数え、東海地域で推進する先進プラズマ科学分野ならびに窒化物半導体、ナノ材料、さらに最近ではプラズマのバイオ応用に関する最新の研究成果が発表され、参加者との間での分野を超えた幅広い議論が活発になされた。特に産業界への技術移転の仕組み作りなど、本会議でしか得られない情報交換の場は高く評価されている。

今回の会議の参加者は、世界14ヶ国から346名を数え、全発表件数は268件であった。招待講演の件数が40件、一般口頭講演が66件、ポスターが162件であった。分野毎の発表件数の内訳は、プラズマ114件、バイオ47件、窒化物37件、ナノ67件であった。

3月5日には4つのチュートリアル講義が開催された。この主旨には、若手への基礎知識の供与に加えて、異分野の理解を深め、分野間融合による新たな価値創造の目的がある。プラズマ科学：Miles Turner先生（Dublin City University, IRELAND）からは“Global and Hybrid Modeling”、窒化物：Hao-Chung Kuo先生（National Yang Ming Chiao Tung University, TAIWAN）からは“Micro-LEDs and Quantum based-Full Color Devices for Display and Visible Light Communications”、ナノ材料：Jon Tomas Gudmundsson先生（University of Iceland, ICELAND）からは“On Ion Recycling and Electron Heating in High Power Impulse Magnetron Sputtering Discharges”、プラズマバイオ：Eun Ha Choi先生（Kwangju University, KOREA）からは“Nonthermal Atmospheric Pressure Plasma Characteristics and International Standards for Plasma Bioscience, Medicine, Agriculture, and Environmental Sciences”というタイトルで講義を頂いた。

初日3月6日には、組織委員長・伊藤貴司による開会挨拶で会議は幕を開けた。ISPLASMA PRIZE2022の受賞を記念して、Alexander Fridman先生(Drexel University)から、プラズマバイオの過去から現在に至る発展と、今後の展望についてご講演を頂いた。プレナリー講演として、神原信志先生(岐阜大学)から“Plasma Membrane Reactor for Pure Hydrogen Production from Ammonia”というタイトルでアンモニアからの水素合成に関するご講演を頂いた。さらに、プラズマ科学分野の基調講演として、東清一郎先生(広島大学)から“Atmospheric Pressure Thermal Plasma Jet Technology for Semiconductor Device Manufacturing”と題するご講演を頂いた。また、ナノ材料分野の基調講演として、岩谷素顕先生(名城大学)から“Crystal Growth of High Quality AlGaIn Thick Films and UV-B Laser Diodes Fabricated on it”と題するご講演を頂いた。午後からは、3つの口頭講演の会場にわかれて、プラズマ科学、窒化物半導体、ナノ材料、のそれぞれのセッションで、招待講演と一般講演による最新の話題に対して専門性の高い活発な議論が繰り広げられた。また、最後のポスター講演会場では活発な議論が行われた。

二日目には、まず午前中にプラズマ科学、窒化物半導体、ナノ材料、バイオ応用のそれぞれのセッションで、招待講演と一般講演による最新の話題に対して専門性の高い活発な議論が繰り広げられた。また、Meng-Jiy Wang先生(National Taiwan University of Science and Technology)によるバイオ応用分野の基調講演“Biocompatible and Anti-Corrosion Thin Films Prepared by Plasma Polymerization”が行われた。午後には、Plasma Materials Science Hall of Fame Prize Award ceremonyが開催され、2022年の同賞受賞者である白谷正治先生(九州大学)とGottlieb S. Oehrlein

先生(University of Maryland)から記念講演を頂戴した。またこの夜に長良川温泉旅館の十八楼でバンケットが行われ、長良川鵜飼の鵜匠による英語の解説つきの実演などもあり、盛況であった。

3日目には、Tomas Palacios先生(Massachusetts Institute of Technology)による窒化物分野の基調講演“GaN CMOS, MoS₂ Chipllets and other Hardware Accelerators for the Future of Electronics”が行われた。また午後には2つのトピカルセッションが開催され、南條拓真氏(三菱電機)からは“Demonstration of E-Mode Operation in EID AlGaIn/GaN MOS-HEMT”、前田拓也先生(東京大学)からは、“ScAlN as a Material to Boost Next-Generation High-Frequency GaN-Based FETs”と題するご講演を頂戴した。

最終日には、各4分野の一般セッションに引き続いて、プラズマ科学分野の基調講演として石川健治先生(名古屋大学)から“Plasma-Driven Science for Emerging Plasma-Processing Technologies”と題する講演が行われた。本講演をもって学術プログラムは終了し、伊藤組織委員長による閉会式に移った。閉会式では、2023年のIsplasma PrizeをPietro Favia先生(University of Bari)が受賞すること、ISPlasma Special Recognition AwardをJong-Shinn Wu先生(National Yang Ming Chiao Tung University)が受賞されることが発表され、ビデオメッセージが上演された。また各4分野から1件ずつ、Best Presentation Award受賞者が発表された。また、The Best Poster Presentation Awardsには8件が選ばれた。

(<https://www.isplasma.jp/www2023/award.html>)

次回のISPlasma2024/IC-PLATNS2024は、名古屋大学において、2024年3月7日から、国際会議APSPT-13との合同で開催される予定である。

第 70 回応用物理学会春季学術講演会チュートリアル報告

ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社 深沢 正永

2023 年 3 月 15 日の春季応用物理学会において、「半導体装置メーカーによる最新技術の動向」と題したチュートリアル講義が、現地/オンラインのハイブリット開催形式で、ラムリサーチ合同会社大場富仁先生により行われた。参加申込者は 63 名（現地参加 22 名、オンライン参加 41 名）であった。今回の講義はドライエッチング装置メーカーの講師であった事から、学生のみならず、企業の参加者も多かった。

本講義では、最初に、最先端の 3D NAND フラッシュメモリや DRAM 製造で課題となる超高アスペクト比 (High Aspect Ratio: HAR) 構造の加工と、それに用いる低温プロセスの概要を説明頂いた。その後、原子レベルの加工制御を実現する Atomic Layer Etching (ALE) について、基礎となる表面反応メカニズムの説明がなされた。最後に、等方的な原子レベル加工技術として、Thermal ALE 技術について講義された。

1. メモリデバイス向け HAR 構造の最先端加工

現在、メモリデバイス向けに高アスペクト比構造 (>60) の加工が求められており、従来の高バイアスパワー化等の対応だけでは限界を迎えている。その対策として現在、低温エッチングが再注目されている。Blanket 膜では、低温化によって高レート化出来る事は報告されていたが、近年、低温化と Lean (C 系堆積物の少ない) なガス系の組み合わせで、所謂マイクロローディング効果 (微細パターンでのレート低下) を抑制できる事が明らかになった。このような最先端の現象について、物理/化学吸着の違いや表面拡散、さらには、ホール内の輸送も含めたメカニズムも含めて紹介頂く

と共に、その最新の解決手法についての説明もあり、学生のみならず企業の若手エンジニアにとって非常に有益な講義となった。

2. プラズマを用いた異方性の ALE

次に、最先端の原子レベル加工技術の一つである異方性の ALE 技術について、表面反応を中心に説明された。ALE を特徴づける自己停止反応 (Self-limitation) により、理想的 (良好な面内均一性、スムーズな加工表面等) な加工が実現できるが、完全な自己停止反応でない場合も実用上の利点がある事について説明頂いた。

3. 等方性の Thermal ALE

最後に、様々な金属、金属酸化物、窒化物、半導体、酸化物半導体に対して有用な Thermal ALE について講義された。Thermal ALE は、高アスペクト比の横方向の加工において、アスペクト比依存性の無い加工だけでなく、超高選択比加工が出来るので、将来のデバイス製造プロセスに新たな可能性が生まれる。更なる微細化に向けた今後の展望として、Thermal ALE のマルチパターンニング技術への応用に関する説明もあった。今後の微細化は、原子/分子レベルの制御が重要になる事から、ALE は非常に有用なプロセスと考えられる。

近年、半導体プロセスでは、これまでには無かった高アスペクト比構造や原子/分子レベルの制御が求められ、プロセスの難易度が飛躍的に高まっている。今回講義頂いたようなメカニズムに基づくプロセス開発は、今後ますます重要になる事が予想され、更なるエッチング技術の進展が大いに期待される。

2023 年 第 70 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シンポジウム
T16. プラズマ駆動型科学とは何か～プラズマプロセスの新展開に期待して～

名古屋大学 石川 健治

講演会 2 日目となる 2023 年 3 月 16 日 (木) 13 時 30 分よりプラズマエレクトロニクス分科会企画によるシンポジウム「プラズマ駆動型科学とは何か～プラズマプロセスの新展開に期待して～」が開催された。

最初のセッションは、プラズマインフォマティクスに焦点をあてており、大阪大学の浜口智志教授より、「はじめに:プラズマインフォマティクス」と題して、プラズマ科学分野における機械学習や人工知能の活用について、ごく最近の発展が紹介された。続いて、量研機構の成田絵美博士より、「磁場閉じ込め核融合プラズマのデータ駆動型研究の進展」と題して、磁場閉じ込め核融合炉において、プラズマを制御する磁場と加熱、ならびにプラズマの閉じ込め領域外に排出される粒子や熱に関連する汎用性をもつ機械学習モデルの開発やデータ駆動型の研究が説明された。続いて、九州大学の白谷正治教授より「機械学習・量子アニーリングを活用したプラズマプロセスの解析と制御」と題して、プラズマプロセスの入出力関係の中間に、ラジカル密度といったプラズマの内部状態の階層を設けることにより、部分的にホワイトボックスすることが有効であり、説明できる変数の依存性を追い求めてデータを取得することに終始するのではなく、真に探索すべき値や画期的な目標値について探究の方が重要であり、探索パラメータ空間内での飛び値をとるデータに気付くことや、広域な条件における最適値の在り方を求めべきであると提唱された (図 1)。

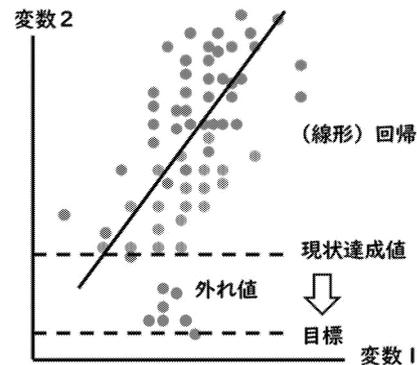


図 1 : 概念図. 入力 (変数 1) と出力 (変数 2) の間に回帰することで、両者の関係を導くことができるが、本来の目標値は外れ値に見られる可能性がある。(聴講を元に著者作成)

二番目のセッションは、マテリアルインフォマティクスに焦点をあてており、ソニーセミコンダクタソリューションズの富谷茂隆博士から、「半導体における計測インフォマティクス」と題して、半導体デバイスの製造での例、産総研の室賀駿博士から、「マルチモーダル AI 材料インフォマティクスによる複雑材料機能予測」と題して、物理や化学の側面を多角的に取り入れた AI 手法による材料開発について紹介された。

三番目のセッションは、プラズマ化学に焦点をあてており、室蘭工業大学の佐藤孝紀教授から「プラズマ気相・液相の化学的相互作用の解明」と題して、大気圧下において水面上で放電発生された時に、気相と液相で生成される化学種の生成過程を統合的に解析した結果について講演された。続

いて、東京工業大学の野崎智洋教授から「触媒反応における非平衡プラズマ化学の活用」と題して、プラズマ触媒の現象論から振動励起分子やフリーラジカルに係わるプラズマ特異な化学反応について講演された。続いて、大阪公立大学の吉田朋子教授から「プラズマ駆動型化学反応系の複合分析と機能材料の開拓」と題して、人工光合成の実現に向けた取り組み、チタン酸化物 (TiO_2) への窒素導入により、窒素ドーピング TiO_2 のエネルギーバンド構造が変化することで、可視光応答するレベルまでバンドギャップを下げることが説明された。

最後に、口頭セッションに引き続き、招待講演者をパネラーとして、パネルディスカッションが開催された (図2)。インフォマティクスを利用する上で物理的なモデルは必要なのか? という質問を受け、物理モデルの深層学習 (Physics-informed neural networks: PINNs) に議論の焦点があてられ、偏微分方程式に基づく機械学習や、支配的な偏微分方程式の探索といった視点でのインフォマティクスの利用価値に多くの支持が得られた。プラズマプロセスで得られる結果が到達目標に対して達成していないという実験者の認識が明確化されることで、達成目標に到達できる可能性のある解決策の探究方法としてインフォマティクスの活用が必要である。本分科会をはじめとする学界の係わりは重要である。研究の道具としてインフ

ォマティクスを利用でき、その有用性が高まっている。しかしながら、このアプローチが主題のようにも捉えがちであるが、あくまでも道具であり、それを使う目的が何なのか、どのように使うのか、といった観点が重要である。これまでのプラズマプロセスの発展の中でも、複雑な過程を計測や計算のさまざまな手法によって解明されることで、原理を探究され、工学としてなしてきた。今後も、プラズマバイオ分野などで、複雑な現象を取り扱うプラズマプロセスへの科学がインフォマティクスの活用と共に深化し、工学と為していくことを願ってやまない。「プラズマ駆動型科学」に基づく新たなプラズマプロセスの創成に向け、今後の発展に、ご期待いただきたい。

謝辞 (敬称略) ご多忙の中、ご講演をいただいた講師の方々、最後まで会場ならびにオンラインで聴講いただいた参加者、この場をお借りして感謝を申し上げたい。本シンポジウムの開催にあたり、講師の先生方、座長をお務めいただいた古閑一憲、辻享志、準備の段階からご担当をいただいた伊藤昌文、熊谷慎也をはじめ、プラズマエレクトロニクス分科会幹事各位に感謝の意を表す。(本稿は応用物理学会ホームページ学術講演会アーカイブ講演会報告の掲載分から抜粋です。)



図2 「プラズマがもたらす新たな現象や新たな法則の発見を導く」ことを討論するパネルディスカッションの様子 (写真)

2023年 第70回応用物理学会春季学術講演会
分科内招待講演 名古屋大学 堀勝
「ラジカル制御によるプラズマエレクトロニクスの進化」

名城大学 熊谷 慎也

プラズマエレクトロニクス分科会分科内招待講演は、2023年3月16日、名古屋大学 堀勝先生をお招きして実施された。会場は満員であり、白藤分科会幹事長による詳細な講師紹介の中で、堀先生が令和4年秋の紫綬褒章を受章されたことが述べられた。改めて祝意を表させていただきたい。

堀先生のご講演のタイトルは『ラジカル制御によるプラズマエレクトロニクスの進化』である。ご講演の序盤では、どのようにしてプラズマエレクトロニクスの研究を志すに至ったのか、エピソードが話された。電子デバイスや半導体微細加工に興味を持ったことから、プラズマの重要性がわかり、プラズマエレクトロニクスの研究に進まれたこと、学位を取得した後は、民間企業でエッチング加工の最前線で活躍されていたときに、赤崎勇先生のお導きがあつて名古屋大学に異動されたこと、名古屋大学では工学研究科後藤俊夫先生の研究グループに所属することとなり、多くの学生を指導する中で自らの研究の時間を捻出し、プラズマ中のラジカルの計測に取り組まれたことが紹介された。

分科会会員の方々にとっては既にご存じのことではあるが、プラズマを用いたエッチングやデポジション等の微細加工技術が開発されて以降、多くの研究者・技術者がプラズマ装置の外部制御パラメータを最適化して驚異的な微細加工を実現していたが、プラズマ装置が変わると、また一から条件探索をし直さなければならないという状況が

続いていた。この状況を打開すべく、プラズマの内部状態と実際の微細加工の結果との相関を解明すべきとの考えに早くから行きつかれ、プラズマ計測・診断に正面から取り組み、ラジカル計測に関して、レーザーを用いた高精度計測をはじめとし、オリジナルな吸収分光計測装置を開発され、数々の世界最先端の成果を挙げられたことは、枚挙にいとまがない。

さらにプラズマ計測・診断で得られた研究成果によって、プラズマ加工装置に計測機器を融合させ、プラズマの内部状態、つまり、ラジカルの状態をリアルタイムでモニタリング・制御しながら、材料加工を行う、自律型ナノプロセス装置の開発につながった。このようにラジカル制御によって、プラズマエレクトロニクス分野が大きく進化する道が拓かれたといえよう。

さらに、堀先生のプラズマ科学研究は、半導体材料加工分野のみに留まらず、バイオ分野にも波及し、大きな研究の潮流が生み出されたことは、周知の通りである。

招待講演全体を振り返り、研究者、技術者、そして、若い学生にとって、多くの示唆に富む内容であった。如何にして物事の本質を見抜くか、如何にして研究の潮流を作り出すか。薫陶を受けた方々がプラズマ科学分野の発展、ひいては Science, Technology, & Industry の発展に寄与されることを願いたい。

2023年 第70回応用物理学会春季学術講演会
分科内招待講演 大阪大学 御手洗 光祐
「量子コンピュータによる機械学習アルゴリズムの現状」

名古屋大学 石川 健治

1. はじめに

最終日、午後の最初の講演では分科内招待講演で大阪大学の御手洗光祐先生に登壇いただき、「量子コンピュータによる機械学習アルゴリズムの現状」と題して、最近話題となっている量子コンピュータのデータアクセスモデルの説明をいただいた。将来に実現を目指すハードウェアが紹介されることで、プラズマプロセスの開発の重要性と、その実現への期待を抱かせる講演であった。

2. 講演内容

最初に量子計算の基礎について、量子ビットの量子ゲートや量子回路の動作を説明された。量子ビットは複素ベクトルの重ね合い状態を表せるので、 n 個の量子ビットがあると2の n 乗の状態を同時に表すことができる、このような量子回路に入出力をもつコンピュータによって、機械学習させるアルゴリズムを氏は論文発表している[1]。

本題の前に機械学習とは与えられたデータ列から関連付けられるデータへの対応関係を構築することである。本来 $x^2+y^2=k$ (円形データ) を満たすであろうデータ列を線形回帰しても学習結果は得られない。しかしながら x^2+y^2 をパラメータに変換すれば、 k の特徴として学習できる (図1)。

このような例に留まらず、量子回路による機械学習によって解くことができる場合がある。そのため、量子回路へのデータの入出力の方法が鍵であり、古典コンピュータとのやりとりで、アドレスとデータを同時並列的に量子状態に書込み、そ

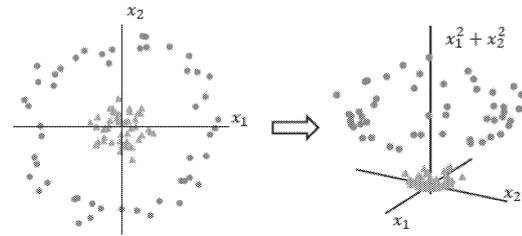


図1：円形データの線形回帰の問題と変数変換による学習容易性 [2]

の後、量子状態で読み出しができる Quantum random access memory (QRAM) と名付ける装置の実現への期待が述べられた。

3. おわりに

量子ビット数への数の要求を受け、量子デバイスの作製にも微細化の波が押し寄せており、プラズマプロセスが実現すべき材料加工の研究にも新たな局面といえるだろう。

謝辞 この場をお借りして講師の御手洗先生に、ご多忙の中、ご講演をいただき感謝を申し上げたい。開催にあたり、準備を担当いただいた伊藤昌文先生、石島達夫先生をはじめ、プラズマエレクトロニクス分科会幹事各位に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] K. Mitarai, et al., Quantum circuit learning, Phys Rev. A 98 (2018) 032309.
- [2] 御手洗光祐, 物性研究 10 (2022) 10121

国内会議報告

第38回プラズマ新領域研究会 「プラズマプロセスが切り拓く次世代表面処理技術の開発動向」 開催報告

岐阜大学 上坂 裕之

表記の会合は2022年12月5日(月)に、東京お台場にある東京都立産業技術研究センター本部において、対面で開催された(Fig.1)。研究会のタイトルを「日本-ベルギー 二国間研究交流ワークショップ〜プラズマプロセスが切り拓く次世代表面処理技術の開発動向〜」と題し、ベルギー王女主宰経済使節団の来日の機会に合わせて、日本学術振興会およびベルギー国立科学研究基金(F.R.S.-FNRS)の後援の元、プラズマプロセスに携わる日本-ベルギーの研究者間の研究交流ワークショップとして企画され、ベルギー側講師5名、日本側講師4名の計9名による講演がなされた。本研究会の開催においては、東京都立産業技術研究センター、表面技術協会高機能トライボ表面プロセス部会、応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会との共催行事として開催され、大学、企業から合わせて約70名の方々にご参加をいただき、活発な議論が行われた。(当日の講演プログラム：<https://www.jvss.jp/jpn/activities/40/detail.php?eid=00013>)

研究会は、日本学術振興会三輪善英副理事のご挨拶により開会され、各共催団体代表者による挨拶および二国間交流事業の紹介の後、午前の部として、Rony Snyders 先生(Mons 大)・井上泰志先生(千葉工大)により、斜入射スパッタリングを用いたナノ構造形成による表面機能発現に関するご講演をいただいた。午後の最初のセッションでは、現 IUVSTA 会長の François Reniers 先生(ブリュ

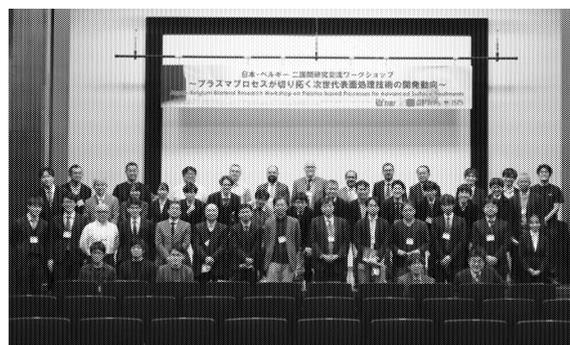


Fig.1 Group photograph at the end of the workshop

ッセル自由大)による DBD 放電による大気圧プラズマ形成に関する講演や、太田貴之先生(名城大)と Matthieu Michiels 先生(Hainaut 州立高専)により、炭素プラズマの時間分解質量分析に関する取り組みやバイポーラ型 HiPIMS を用いた成膜事例に関する研究紹介がなされた。次のセッションでは、Nikolay Britun 先生(名古屋大)による HiPIMS 放電のレーザ誘起蛍光分析に関する研究紹介や Stéphane Lucas 先生(Namur 大)によるモンテカルロシミュレーションを用いたバーチャルコーター開発に関する講演がなされた。最後のセッションでは、鈴木巧一様(Surftech Transnational 社)によるプラズマ表面処理に関する日欧技術協力開発に関するご紹介や Stephanos Konstantinidis 先生(Mons 大)による液面スパッタリングによるナノ粒子形成に関するご講演をいただいた。

以上の通り、スパッタリングを始めとしたプラズマプロセスの最先端技術動向からその発展性に至る充実した内容の講演がなされた。

第39回プラズマ新領域研究会 「プラズマ諸特性理解の新展開」開催報告

苫小牧工業高等専門学校 奥山 由

第39回プラズマ新領域研究会「プラズマ諸特性理解の新展開」は2023年3月22日（水）に、北海道苫小牧市の苫小牧商工会議所にて、対面形式で開催された。

近年、プラズマに関する応用研究は大気圧プラズマの発展と共に医療分野から農業分野まで幅広く行われている。それら応用研究の基盤のためにプラズマの諸特性の理解が重要であり、プラズマ温度や密度計測などのプラズマ計測技術に加え、いわゆる放電基礎課程を知るための電子衝突実験やイオン輸送係数測定実験、イオン・分子反応の反応速度定数測定で得られた知見が必要不可欠である。本研究会ではこのようなプラズマ諸特性を理解するための新展開について、新たな手法としての機械学習や、液体の介在した大気圧プラズマのプラズマ計測技術、磁化プラズマシミュレーション、大気圧プラズマのイオン移動度やイオン・分子反応測定に至るまで幅広い研究成果の講演を通じて、プラズマ諸特性理解の現状と課題、将来展望について討論を行った。

はじめに岐阜大学の上坂裕之先生からご挨拶を頂き、本新領域研究会の趣旨などについてご説明頂いた。全5件のご講演をいただき、前半の3件はシミュレーションを主とした内容で、後半2件については実験による計測技術について、それぞれプラズマ諸特性理解の新たな展開をご講演いただいた。

最初の講演は室蘭工業大学の川口悟先生より、放電基礎課程を知るための新たな手法として、近年、様々な分野で研究が進められている機械学習

を用いた方法についてご講演いただき、Physics-informed Neural Networks を活用した電子輸送特性の解明についてご紹介いただいた。

続いて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金珍錫様より、同じく機械学習を用いた手法として、Physics-informed Neural Networks を用いて換算電界 E/N を変化させた場合のボルツマン方程式の解法について紹介いただいた。

3番目は北海道大学の菅原広剛先生より、誘導結合磁化プラズマ中の電子輸送シミュレーションによる放電基礎過程に及ぼす磁界の諸効果、電子の挙動などについての研究をご紹介いただいた。

4番目は北海道大学の白井直機先生より、液体の介在した大気圧プラズマの計測技術と課題についてルミノール化学発光によるラジカル計測手法や液体に向けて照射したプラズマの自己組織化現象などについてご紹介いただいた。

最後は苫小牧工業高等専門学校の奥山由より、大気圧下におけるイオン移動度と反応速度係数の測定技術について紹介した。

いずれのご講演についても、活発な意見交換が行われたため、総合討論の時間がほとんど取れない状況となったが、議論については懇親会会場に移動してからも継続され、今後のプラズマ諸特性理解のための機械学習を用いた研究の課題や磁化プラズマ中の放電基礎過程についての議論、液中のラジカル計測、大気圧下でのイオン輸送係数測定の将来展望について幅広い意見交換があり、大変有益な研究会となった。

第40回プラズマ新領域研究会 「熱プラズマの可視化研究の最前線」 開催報告

大阪大学接合科学研究所 古免 久弥

第40回目のプラズマ新領域研究会にあたる「熱プラズマの可視化研究の最前線」は、2023年の3月27日（月）にZoomを使ったオンライン形式で開催され、最大で27名の方が参加された。

1万K以上の高温を有する熱流体である熱プラズマは、ナノ粒子生成、廃棄物処理、溶射、溶接などで用いられており、低コストで形成・維持可能な熱源として今後ますます利用拡大されることが期待されている。他方、電力用遮断器などにおいては、その動作時に電極間にアーク放電が発生し、消弧まで電流が流れ続けることで迅速な回路遮断の妨げとなっている。このような熱プラズマ利用技術や熱プラズマの遮断技術の高度化には、熱プラズマの詳細な理解が課題となっており、分野の枠を超えた議論と最新の知見の共有が必要不可欠である。

本研究会は熱プラズマを対象とした最先端の研究の成果の講演を通じて、最新の知見と課題を共有するとともに、各分野における将来の進展の方向性について議論することを目的として開催された。

まず大阪大学の古免より、開会の挨拶と本研究会の趣旨が説明された後、以下の3件の講演がなされた。

- ・「高温アークのガス特性解析に基づく電力遮断技術の高性能化」 兒玉 直人先生（名古屋大学）
- ・「熱プラズマ診断に基づく革新的熱プラズマ発生とその応用」 田中 学先生（九州大学）

・「SF6系アークプラズマの乱流誘発メカニズム解明に向けた数値シミュレーション」 茂田 正哉先生（東北大学）

1件目の兒玉直人先生のご講演では、複雑なプラズマの物性計算についての詳細な説明や、限流ヒューズ設計を目的とした最新の研究成果について説明がなされた。

2件目の田中学先生のご講演では、交流のアークプラズマプロセス用に新たに開発したトーチについての説明がなされた他、複数の波長を用いた新たなプラズマ温度計測手法についても説明がなされた。

最後の茂田正哉先生のご講演では、開発された計算手法についての説明がなされるとともに、その計算手法を用いたSF6系アークプラズマの乱流可視化結果のご紹介があった。

いずれのご講演においても質疑応答の時間いっぱいを使って活発な議論がなされただけでなく、その後の全体討論の場でも講演内容について再度質疑応答がなされるなど、今回の講演に対する参加者の高い関心が見られた。

最後に、大変有益な情報をご提供いただいた3名の講演者の先生方に改めて厚くお礼を申し上げますとともに、ご多忙のところご参加いただいた方々にもこの場をお借りして重ねてお礼申し上げます。

第5回原子層プロセスワークショップ

大阪大学 唐橋 一浩、浜口 智志

コロナ禍により一昨年、昨年と開催を見送っておりました第5回原子層プロセスワークショップを2023年2月10日(金)13:00~18:00, 大阪大学大学会館(豊中キャンパス)において開催いたしました。

原子層堆積法(ALD)に原子層エッチング法(ALE)を加えた原子レベルの加工法としての原子層プロセス(ALP)の研究には、半導体の微細化、三次元化等の進展にともない多くの関心が寄せられてきており、様々な材料に対するALPへの期待は大きい。本ワークショップは、大学・国立研究機関、半導体デバイスおよび半導体製造装置メーカーだけでなく、ガス・材料等の関連する民間企業の幅広い研究者・技術者によってALP技術の問題意識を共有することにより、同技術のさらなる技術革新を推進することを目的として企画され、主催:高等プラズマ科学国際研究拠点, 共催:日本学術振興会(JSPS) 拠点形成事業(Core-to-Core Program)、先端拠点形成型「データ駆動プラズマ科学国際共同研究拠点形成」で行われた。

本稿筆者のひとりである浜口による本ワークショップ開催の趣旨説明の後、以下の講演をしていただいた。

- 1 木野日織 (物質・材料研究機構)
「新機能材料設計のための自動計算と機械学習用データの生成と活用」
- 2 廣瀬文彦 (山形大学)
「室温原子層堆積法によるナノ周期薄膜形成」
- 3 石川健治 (名古屋大)
「原子層エッチング反応の設計と制御」

- 4 久保井信行 (ソニーセミコンダクタ)
「CVD モデリングと ALD/ASD への応用」
- 5 伊澤勝 (日立ハイテク)
「ドライエッチング装置を用いた原子層プロセスと課題」
- 6 西塚哲也 (東京エレクトロン)
「微細パターンニングにおける原子層レベル保護膜を用いたエッチング形状制御技術」
- 7 安原重雄 (ジャパン・アドバンスド・ケミカルズ)
「原子層プロセスに用いるプリカーサの設計」
- 8 西里洋 (堀場エステック)
「ピエゾバルブによる原子層プロセス材料パルス供給の高度化」

対面での会議の開催がまだ少ない時期であったにもかかわらず聴講者は80名であり、その内訳はデバイスメーカー、半導体装置メーカー、ガス材料メーカー、装置関連部品メーカーおよび大学関連にわたり、偏ることなく幅広い分野の方々に参加していただき大変盛況であった。今回は、3年ぶりの開催ということで、ALDおよびALEの直面する装置開発およびプリカーサ探索などの全体的な問題点に関して活発な議論が行われた。

現在、ALDとALEを組み合わせることで新たな加工技術が開発されつつある。本ワークショップのように多様な分野の研究者がともに議論する場が原子層レベルの微細加工の技術革新を推進すると期待される。今後は、最新の研究から実際の装置およびプロセス開発の現場での問題点に関してまでを紹介する場として頻繁に開催していきたい。

行事案内

2023年 第83回応用物理学会秋季学術講演会 プラズマエレクトロニクス分科会企画

名城大学 伊藤 昌文

■ はじめに

2023年9月19日(火)～23日(土)に熊本城ホールほか3会場(熊本県熊本市)とオンラインのハイブリッドで第83回応用物理学会秋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2日) プラズマエレクトロニクス賞受賞記念講演

第21回プラズマエレクトロニクス賞受賞者による受賞記念講演が行われます。この場を借りてお祝い申し上げます。プログラムを御確認の上、受賞記念講演会場まで是非とも足をお運び下さい。

[関連サイト] プラズマエレクトロニクス賞：
https://annex.jsap.or.jp/plasma/PE_files/pe_award2.html

□ プラズマエレクトロニクス賞受賞記念講演

日程：9月20日(水) 午前(予定)

受賞者(敬称略)：小池健、宗岡均、寺嶋和夫、伊藤剛仁* (東京大学) (*ご講演予定者)

選考の対象となった業績：“Electric-Field-Induced Coherent Anti-Stokes Raman Scattering of Hydrogen Molecules in Visible Region for Sensitive Field Measurement”, *Physical Review Letters* **129**, 033202 (2022).

受賞者(敬称略)：市川景太¹、Manh Hung Chu²、森山誠³、鈴木陽香¹、飯野大輝³、福水裕之³、栗原

一彰³、豊田浩孝^{1*} (1名古屋大学、²日本エア・リキード、³キオクシア(株)) (*ご講演予定者)

選考の対象となった業績：“Angular Distribution Measurement of High-Energy Argon Neutral and Ion in A 13.56 MHz Capacitively-Coupled Plasma”, *Applied Physics Express* **14**, 126001 (2021).

■ (第2日&第3日目) 分科内招待講演

今回のPE分科会企画の分科内招待講演は2件企画いたしました。1件目はPE分科会幹事長としてもPE分科会の発展に大きな寄与をされてきました東京大学の寺嶋和夫先生をお招きして「DX時代のフロンティアプラズマ」と題してご研究の集大成と次世代研究者への期待などを話していただく予定です。2件目は、他分野の研究者との交流を深めることを目的に、他分野からの分科内招待講演者をお招きしました。今回は、大阪公立大学医学部の豊田宏光先生をお招きして今後プラズマの応用が期待されるプラズマによる再生医療についてお話いただく予定です。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・会場：9月20日(水) 午前

ご講演者：寺嶋 和夫 先生(東京大学)

講演題目：「DX時代のフロンティアプラズマ」

日程・会場：9月21日(木) 未定

ご講演者：豊田 宏光 先生(大阪公立大学医学部)

講演題目：「低温プラズマ技術を用いた運動器再生医療への挑戦」

■ (第2日) 分科会企画シンポジウム(Technical)

学会2日目の20日(水)に、分科会企画シンポジウム「資源循環社会実現に挑むプラズマ科学」を開催いたします。近年、プラズマ気相中やプラズマ-固体界面、プラズマ-液体界面で特異的に起こる化学反応を活用した、CO₂資源化やNH₃合成などの資源循環に資する「分子変換」技術が発展しています。一方で金属や炭素繊維強化プラスチック、バイオマスなどの材料を再利用・利活用する「マテリアル変換」の技術開発も資源循環の重要課題であり、ここでもプラズマの活躍が期待されています。本シンポジウムでは、資源循環技術に係る「分子変換」と「マテリアル変換」について第一線で活躍する研究者から最新動向を紹介していただき、現状および将来展望を議論します。是非とも奮ってご参加ください。

日程:9月20日(水) 13:30~18:30(予定)

会場:未定

講演者案(現在調整中・順不同・タイトルは仮題)

1. 渡辺隆行(九大)「熱プラズマによる水素製造技術の動向」
2. 金賢夏(産総研)「プラズマを用いた窒素循環技術の創出」
3. 春山哲也(九工大)「元素循環を担うプラズマ/液相反応」
4. 金子俊郎(東北大)「大気圧空気プラズマを活用した持続可能な食糧生産システム」
5. 所千晴(早大)「マテリアル資源循環の実現に向けた分離技術」
6. 守富寛(岐阜大学)「炭素繊維強化プラスチックの再利用技術の最新動向(仮題)」
7. 南英治(京大)「バイオリファイナリー技術創出に向けた低温プラズマの活用」

■ (第3日以降予定) 海外招待講演

現地開催で開催を予定しておりますが、講演者の都合でオンライン講演となる場合があります。時間

枠は現在検討中です。皆様奮ってご参加下さい。

[ご講演者 1] Prof. Mohammed Yousfi,

Paul Sabatier University, Toulouse, France

[講演題目](仮題) Plasma source modelling and spectroscopy diagnostics for atmospheric pressure plasma

[ご講演者 2] Prof. Dheerawan Boonyawan,

Chiang Mai University, Thailand

[講演題目](仮題) Atmospheric pressure plasma jet for agricultural application

■ 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。

■ おわりに

上記案内いたしました行事の他に9月20日(水)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す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。また、今回も8.3.プラズマナノテクノロジーは、9.2. ナノ粒子・ナノワイヤ・ナノシートとのコードシェアセッションの企画を予定しております。他分類とのよい交流の機会だと思っておりますので、奮ってご発表いただければ幸いです。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:伊藤 昌文(名城大学)

ito@meijo-u.ac.jp

行事案内

第 44 回ドライプロセス国際シンポジウム 44th International Symposium on Dry Process (DPS2023)

ラムリサーチ (合) 大場 富仁 (プログラム委員長)
中部大学 小川 大輔 (実行委員長)
(株) 日立製作所 松井 都 (組織委員長)

今年のドライプロセス国際シンポジウム (DPS) は、2023 年 11 月 21 日 (火) から 22 日 (水) にかけてウインクあいち (名古屋市) で開催されます。中部国際空港、新幹線名古屋駅からのアクセスも容易な会場です。同一会場での懇親会も予定されています。本年は新型コロナウイルス感染症対策の緩和を受けまして 2019 年以来となります対面形式のみでの開催となります。多くの著名な方々の講演も予定されており、活発な議論がなされることと存じます。つきましてはぜひとも最先端の研究について投稿をご検討いただければと思っております。会議後に JJAP 特集号の発刊を 2024 年 7 月で予定しております。

今年で 44 回目を迎える DPS はプラズマエッチングやプラズマ CVD を中心とした、半導体集積回路の微細加工プロセス技術ならびに表面反応研究の分野で世界をリードする国際会議です。例年、国内外の大学や企業から 300 名程度の参加をいただき、当該分野の最先端の研究結果が発表されています。

半導体デバイスのさらなる微細化・高性能化に向けた新しいプロセス技術のほか、その裏付けとなる計測技術や装置技術、またプラズマを用いるうえで避けては通れないダメージ等について、その現象からメカニズム探求に至る各種の報告がなされています。また、近年では、これら解析やモデリングにおけるシミュレーションのほか、広範な分野にわたる AI の活用も盛んになっており

ます。さらに大気圧プラズマ技術や表面改質へのプラズマ応用、バイオや医療、環境保全分野への応用など、急速に発展するドライプロセスにかかわるすべての分野につきまして、幅広く報告を募集しております。

DPS では今年の注目テーマとして、3 つの Arranged Session を設定しました。1 つ目は、高層化・3D 化への挑戦が依然として続くデバイスに対応する「Challenges to overcome the limits for high aspect ratio etching」、2 つ目には原子層レベルのプロセス制御手法として定着しつつある ALD/ALE 技術のさらなる革新に向けた「Atomic layer processes (ALE/ALD/ASD) toward 2nm and beyond」、3 つ目は近年、その急速な進展が社会的にも大きな注目を浴びている AI 技術がもたらすドライプロセスの変革を議論する「How AI and Machine Learning are transforming dry process technologies」です。いずれのセッションにおきましても、各分野で著しい成果を挙げられている研究者をお招きして、ご講演を頂く予定にしております。その他の新材料・新技術につきましても、招待講演を準備しております。

本シンポジウムは、ドライプロセス分野の世界最先端の研究に触れることができる機会であるとともに、世代を越えたネットワークを形成する絶好の機会でもあります。関連する研究内容の多い PE 分科会会員の皆様の、積極的な論文投稿とご参加をお待ちしております。

【会期】

2023年11月21日(火) - 22日(水)

【会場】

ウインクあいち

【テーマ】

ドライプロセスおよびその関連技術

【トピックス】

ホームページをご参照ください

【西澤アワード記念講演】

(西澤アワードはドライプロセスの進展に多大な貢献を頂いた研究者に贈られる賞です)

- Nobuo Fujiwara
(Mitsubishi Electric Corp.)
- J. P. Booth
(CNRS/Ecole Polytechnique)

【アレンジセッション・招待講演】

A1. Challenges to overcome the limits for high aspect ratio etching

◆招待講演者

Mark J. Kushner (University of Michigan)

Jaeho Min (Samsung Electronics Co., Ltd.)

A2. Atomic layer processes (ALE/ALD/ASD) toward 2nm and beyond

A3. How AI and Machine Learning are transforming dry process technologies

◆招待講演者

Richard A. Gottscho (Lam Research Corp.)

Jun Haeng Lee (Samsung Electronics Co., Ltd.)

【投稿受付】

開始: 2023年5月15日(月)

締切: 2023年7月21日(金)

【参加申し込み】

早期参加登録締切: 2023年10月6日(金)

オンライン参加登録締切: 2023年10月31日(火)

*当日の受付も可能です。早期参加登録の場合、参加費の割引があります。また、協賛学会会員につきましても割引があります。

【会議ホームページ・連絡先】

<http://www.dry-process.org/2023/>

事務局: dps2023@officepolaris.co.jp

※最新の情報は上記ホームページをご覧ください。

Call for Papers - DPS 2023
44th International Symposium on Dry Process
November 21(Tue) - 22(Wed), 2023
Winc Aichi, Nagoya, Japan

Paper Submission Deadline: July 21, 2023
Author instructions and information about DPS can be found at:
<http://www.dry-process.org/2023/>

The 44th International Symposium on Dry Process (DPS2023) will be held at Winc Aichi, Nagoya, Japan, from November 21 to 22, 2023. The Symposium covers all aspects of the rapidly evolving fields of dry processes, including but not limited to plasma etching and deposition processes, diagnostics and modeling of plasmas and surfaces, and surface modifications by plasmas, for the applications in, e.g., microelectronics, power devices, sensors, environmental protection, biological systems, and medicine. The DPS has provided valuable forums for in-depth discussion among professionals and students working in this exciting field for more than three decades.

Theme: Dry processes and related technologies from fundamentals to applications

Topics:

1. Etching Technologies
2. Manufacturing Technologies (AEC, APC, EES, FDC)
3. Surface Reaction and Damage
4. Plasma Diagnostics and Monitoring Systems
5. Computational Approaches (Modeling, Simulation, Machine Learning, AI, Informatics, DX) for Dry Process
6. Plasma Generation (Equipment/Source)
7. Deposition Technologies (CVD / PVD)
8. Atomic Layer Processes (ALD/ALE)
9. Dry process for Green Transformation:GX (Energy saving technology, Alternative gas, 3D-IC/Packaging)
10. Plasma Processes for New Material Devices (MRAM, Power, Organic, III-V, 2D)
11. Plasma Processes for Biological and Medical application, MEMS
12. Atmospheric Pressure Plasma and Liquid Plasma
13. New Dry Process Concepts

Arranged session:

AS1 - Challenges to overcome the limits for high aspect ratio etching
AS2 - Atomic layer processes (ALE/ALD/ASD) toward 2nm and beyond
AS3 - How AI and Machine Learning are transforming dry process technologies

For further general information, please contact: e-mail: dps2023@officepolaris.co.jp

Organizing Committee Chair: Miyako Matsui (Hitachi, Ltd.)
Executive Committee Chair: Daisuke Ogawa (Chubu University)
Program Committee Chair: Tomihito Ohba (Lam Research Corp.)
Publication Committee Chair: Kazunori Koga (Kyushu University)

URL: <http://www.dry-process.org/2023/>

行事案内

第 17 回 インキュベーションホール

名城大学 伊藤 昌文
室蘭工業大学 川口 悟

応用物理学会プラズマエレクトロニクス (PE) 分科会が主催するサマースクール (名称: インキュベーションホール) を本年度も開講いたします。この行事は、プラズマの応用や研究を始めたばかりの方 (学生・若手研究者・社会人技術者) を対象としており、一流の講師陣を招き、プラズマエレクトロニクスへの理解を深めて頂くための短期集中型の講習会です。

このインキュベーションホールでは、プラズマ診断計測、プラズマ生成・制御、プラズマエッチングなどの、幅広い分野に関する専門講座を開講します。講述内容は、初学者が基礎学理をしっかりと理解したうえで、当該分野における最新科学の話題にも触れられるように構成されており、海外経験、産学連携経験などの豊富な講師陣からは、留学・在外研究経験、産学連携のエピソードなどを適時交えた講義を頂き、受講生のプラズマプロセス研究への興味を喚起します。

また、新しい研究分野を切り拓かれてきた講師を招き、当該分野の最新動向や指導者に必要とされる資質について学ぶ機会を提供する特別講座を行いますので、学生の皆様に初め若手研究者および技術者の皆様お誘い合わせのうえ、奮ってご参加申込をいただけますようお願いしております。

記

【会期】2023年9月4日(月)～9月6日(水)

【会場】国立中央青少年交流の家

〒412-0006 静岡県御殿場市中畑 2092-5

【交通】JR 御殿場駅より富士急行バス「青少年交流の家」行き、「青少年交流の家」下車
(富士山口バス乗り場より 約 20 分)

【参加費】(宿泊費、食費、テキスト代、懇親会費等を含む。消費税込み。) (予定)

[1] PE 分科会正会員

一般 40,000 円 大学院生・学生 14,000 円

[2] 応物学会会員 (ただし PE 分科会に所属なし)

一般 43,000 円 大学院生・学生 17,000 円

[3] 協賛学協会会員および PE 分科会準会員

一般 50,000 円 大学院生・学生 22,000 円

[4] その他

一般 60,000 円 大学院生・学生 27,000 円

* 1 応物学会賛助会員および PE 分科会賛助会員所属の方はそれぞれの個人会員扱いとします。

* 2 応物学会企業若手会員は大学院生・学生と同じ扱いとします。

* 3 本分科会会員 (年会費 3,000 円) に同時入会頂くと、会員価格で参加できます。さらに会員には、年 2 回の会報、PE 分科会主催の講習会への会員料金での参加など会員だけの特典があります。応物学会及び PE 分科会への入会手続きについては、応物学会公式ウェブサイト (<https://www.jsap.or.jp/>) より行って下さい。

【協賛学協会 (予定)】プラズマ・核融合学会、電気学会、日本表面真空学会、静電気学会、表面技術協会、IEEE-NPS05

【講義内容（暫定）】

- ・ 白谷 正治 先生（九州大）
特別講義
- ・ 田中 学 先生（九州大）
プラズマ生成・制御
- ・ 中川 雄介 先生（都立大）
プラズマ診断・計測
- ・ 深沢 正永 先生（ソニーセミコンダクタ
ソリューションズ）
プラズマエッチング
- ・ 山田 英明 先生（産総研）
プラズマ成膜
- ・ 田中 宏昌 先生（名古屋大）
英語講座

【ポスターセッション】

参加者間の交流が深まるよう、ポスターセッションを中心とする談話会を行います。なお、優秀なポスター発表者には表彰を行います。発表内容は参加者自身のバックグラウンドに関連したもの（プラズマに関係しないものも歓迎します）、例えば、

- 学生の場合：現在の研究テーマにまつわるもの、学部での卒業研究など（4年生の場合これから行う研究など）
 - 社会人の場合：仕事にまつわるもの、企業・自社製品のPR、入社前の大学での研究など
- であれば、内容・分量は一切問いません。幅 0.9 m × 高さ 1 m 程度のボードが用意されますので、あらかじめポスターのご準備をお願いします。本ポスターセッションは全員の方の発表を原則としますが、発表に支障がある場合は事前参加登録時にその旨をご記入下さい。

【その他】 懇親会、レクレーションを予定しています。本企画HPに当日の詳細スケジュールを記載しておりますので参考にして下さい。

【参加申込】 本企画ホームページにある参加フ

ォームからお申込みおよび参加費振り込みをお願いいたします。ポスター内容を示すキーワードを3つ程度ご記入いただきます。一旦支払われた参加費は、原則として返金いたしません。

【定員】 60名（予定）

【参加申込方法】 下記のウェブページに参加フォームを設置しておりますので、ご覧ください。

【参加申込締切】 7月5日(水)

【参加費支払期間】 参加申込後～8月18日(金)

【問合せ先】 川口 悟

〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1

室蘭工業大学大学院工学研究科

もの創造系領域電気電子工学ユニット

TEL : 0143-46-5548

e-mail: skawaguchi@mmm.muroran-it.ac.jp

【担当幹事】

校長：伊藤 昌文（名城大学）

幹事：会田 倫崇（東京エレクトロンテクノロジソリューションズ）

大澤 直樹（金沢工業大学）

川口 悟（室蘭工業大学）

川崎 仁晴（佐世保工業高等専門学校）

清水 哲司（産業技術総合研究所）

富田 健太郎（北海道大学）

吉木 宏之（鶴岡工業高等専門学校）

【ウェブページ】

http://annex.jsap.or.jp/plasma/PE_files/PE_SS_2023

第 22 回プラズマエレクトロニクス賞受賞候補論文の募集

大阪公立大学 白藤 立

応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会では、毎年、プラズマエレクトロニクスに関する学術的あるいは工業的に価値のある優秀な論文を対象とし、その著者に「プラズマエレクトロニクス賞」を贈り表彰を行っています。候補論文は自薦・他薦を問いません。下記の要領により奮ってご応募下さい。

授賞対象論文

プラズマエレクトロニクス分科会が主催する研究会、国際会議などで発表され、かつ 2021 年、2022 年、2023 年に発行の国際的な学術刊行物（JJAP など）に掲載された原著論文。受賞者は、表彰の時点においてプラズマエレクトロニクス分科会会員あるいは応用物理学会会員とする。

プラズマエレクトロニクス賞はプラズマエレクトロニクス分野の優秀な論文の著者に授与される論文賞ですが、プラズマエレクトロニクス分科会が強く関与する会議等（直接に主催する会議、応物学会学術講演会の大分類 8. プラズマエレクトロニクス等）での発表や議論を通じて生み出された優れた論文を表彰したいという考えに基づき、賞規定に「プラズマエレクトロニクス分科会が主催する研究会、国際会議などで発表され」という要件が付与されています。

提出書類

以下の書類各 1 部、およびそれらの電子ファイル(PDF ファイル) 一式

- 候補論文別刷（原著論文 1 件、コピーでも可、第 1 ページに候補論文と朱書する。関連論文があれば 2 件以内の別刷またはコピーを添付）

- 当該論文の内容が発表されたプラズマエレクトロニクス分科会が主催する研究会、国際会議等の会議録（Program book や Abstract 集、Proceedings 等の会議に関する記載箇所[会議名、日付、場所等]ならびに当該発表が記されたプログラムの箇所）のコピー、2 件以内。
- 著者全員について和文で以下を記入した書類。氏名、会員番号、勤務先（連絡先）
- 推薦書（自薦、他薦を問わず、論文の特徴、優れた点などを 400 字程度でわかりやすく記述）

表彰

2024 年の応用物理学会春季学術講演会中に受賞者の発表を行います。2024 年応用物理学会秋季学術講演会中に受賞者の表彰式（賞状および記念品を贈呈）を行い、記念講演を依頼する予定です。

書類提出期限

2023 年 12 月 8 日（金）当日消印有効

書類提出先

〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138

大阪公立大学 工学研究科 電子物理系専攻
白藤 立

（プラズマエレクトロニクス分科会幹事長）

※ 封筒表に「プラズマエレクトロニクス賞応募書類在中」と朱書のこと

なお、プラズマエレクトロニクス賞規定他、詳細な情報については、プラズマエレクトロニクス分科会のホームページ

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

をご覧ください。

2023 年度(令和 5 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	白藤 立	大阪公立大学 工学研究科 電子物理系専攻	〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本3-3-138 TEL: 06-6605-2681	shirafuji@omu.ac.jp
副幹事長	伊藤 昌文	名城大学 理工学部 電気電子工学科	〒468-8502 愛知県名古屋市中天白区塩釜口 1-501 TEL: 052-838-2306	ito@meijo-u.ac.jp
副幹事長	上坂 裕之	岐阜大学 工学部 機械工学科	〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1 TEL: 058-293-2511	kousaka.hiroyuki.e2@f.gifu-u.ac.jp
副幹事長	深沢 正永	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: 050-3141-4362	Masanaga.Fukasawa@sony.com
幹事 任期 2024 年 3 月	会田 倫崇	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 成膜技術開発センター シミュレーション技術開発部	〒407-0192 山梨県韮崎市穂坂町三ツ沢650 TEL: 0551-23-4228	michitaka.aita@tel.com
"	大澤 直樹	金沢工業大学 工学部 電気電子工学科	〒921-8501 石川県野々市市扇が丘 7-1 TEL: 076-248-9907	n.osawa@neptune.kanazawa-it.ac.jp
"	鎌滝 晋礼	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: 092-802-3723	katataki@plasma.ed.kyushu-u.ac.jp
"	川口 悟	室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 電気デバイス計測ユニット	〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1 TEL: 0143-46-5548	skawaguchi@mmm.muroran-it.ac.jp
"	川島 淳志	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: 050-3140-3201	Atsushi.Kawashima@sony.com
"	桑原 彬	名古屋大学 工学研究科 総合エネルギー工学専攻	〒464-8603 愛知県名古屋市中千種区不老町 工学部 8 号館南棟 301 TEL: 052-789-5936	akuwahara@energy.nagoya-u.ac.jp
"	鈴木 陽香	名古屋大学 工学研究科 電子工学専攻	〒464-8603 愛知県名古屋市中千種区不老町 IB電子情報館北棟205 TEL: 052-789-2726	suzuki.haruka.c3@f.mail.nagoya-u.ac.jp
"	竹中 弘祐	大阪大学 接合科学研究所 接合プロセス研究部門 エネルギー変換機構学分野	〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1 TEL: 06-6879-8651	k.takenaka@jwri.osaka-u.ac.jp
"	辻 享志	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 ナノカーボンデバイス研究センター 先端素材研究チーム	〒305-8565 茨城県つくば市東 1-1-1 TEL: 029-861-0254	takashi.tsuji@aist.go.jp
"	橋本 惇一	キオクシア株式会社 先端メモリ開発センター	〒512-8550 三重県四日市市山之一色町 800 番地 (四日市工場)	junichi8.hashimoto@kioxia.com
"	八田 章光	高知工科大学 システム工学群 電子・光システム工学教室	〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185 TEL: 0887-57-2113	hatta.akimitsu@kochi-tech.ac.jp
"	三浦 勝哉	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 東京都国分寺市東恋ヶ窪1丁目280	katsuya.miura.aq@hitachi.com
"	吉木 宏之	鶴岡工業高等専門学校 創造工学科 機械コース	〒997-8511 山形県鶴岡市井岡字沢田 104 TEL: 0235-25-9146	yoshiki@tsuruoka-nct.ac.jp

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 マニファクチャリングイノベーション 本部		amano.tomoki@jp.panasonic.c om
"	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.MitsubishiE lectric.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	東京工業大学 工学院 電気電子系 安岡・竹内研究室	〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-S3-3 TEL: 03-5734-2900	zen@ee.e.titech.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 第二技術開発室	〒612-8486 京都府京都市伏見区羽東師古川町 322 TEL: 075-931-7925 内線: 8305467	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	ウエスタンデジタル合同会社		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

2023 年度(令和 5 年度)分科会幹事役割分担

役割分担	留任		新任	
幹事長	白藤 立	大阪公立大学		
副幹事長	伊藤 昌文	名城大学		
	上坂 裕之	岐阜大学		
	深沢 正永	ソニセミコンダクタソリューションズ		
1. 庶務・分科会ミーティング	竹中 弘祐	大阪大学	宗岡 均	東京大学
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	伊藤 昌文	名城大学		
	深沢 正永	ソニセミコンダクタソリューションズ		
	上坂 裕之	岐阜大学		
	八田 章光	高知工科大学	谷出 敦	SCREEN ホールディングス
	辻 享志	産業技術総合研究所	平松 亮	ウエスタンデジタル
	鎌滝 晋礼	九州大学	田中 宏昌	名古屋大学
3. プラズマプロセッシング研究会	上坂 裕之	岐阜大学		
	深沢 正永	ソニセミコンダクタソリューションズ		
	鎌滝 晋礼	九州大学	全 俊豪	東京工業大学
	竹中 弘祐	大阪大学	田中 宏昌	名古屋大学
	川口 悟	室蘭工業大学	谷出 敦	SCREEN ホールディングス
	桑原 彬	名古屋大学	伊藤 智子	大阪大学
4. 光源物性とその応用研究会				
5. プラズマ新領域研究会	上坂 裕之	岐阜大学		
	八田 章光	高知工科大学	清水 鉄司	産業技術総合研究所
	大澤 直樹	金沢工業大学	伊藤 智子	大阪大学
	鈴木 陽香	名古屋大学	富田 健太郎	北海道大学
6. インキュベーションホール	伊藤 昌文	名城大学		
	大澤 直樹	金沢工業大学	清水 鉄司	産業技術総合研究所
	会田 倫崇	東京エレクトロニクステクノロジーソリューションズ	川崎 仁晴	佐世保工業高等専門学校
	吉木 宏之	鶴岡工業高等専門学校	富田 健太郎	北海道大学
	川口 悟	室蘭工業大学		
7. プラズマエレクトロニクス講習会	深沢 正永	ソニセミコンダクタソリューションズ		
	辻 享志	産業技術総合研究所	佐々木 渉太	東北大学
	橋本 惇一	キオクシア	天野 智貴	パナソニックホールディングス
	川島 淳志	ソニセミコンダクタソリューションズ	平松 亮	ウエスタンデジタル
	会田 倫崇	東京エレクトロニクステクノロジーソリューションズ	塩田 有波	三菱電機
	三浦 勝哉	日立製作所	谷出 敦	SCREEN ホールディングス
8. 会誌編集・書記	鈴木 陽香	名古屋大学	佐々木 渉太	東北大学
	川島 淳志	ソニセミコンダクタソリューションズ	天野 智貴	パナソニックホールディングス
9. ホームページ	竹中 弘祐	大阪大学	宗岡 均	東京大学
10. 会計	吉木 宏之	鶴岡工業高等専門学校	川崎 仁晴	佐世保工業高等専門学校
11. プラズマエレクトロニクス賞	白藤 立	大阪公立大学		
12. アカデミックロードマップ (戦略企画室)	白藤 立	大阪公立大学		
	伊藤 昌文	名城大学		
	深沢 正永	ソニセミコンダクタソリューションズ		
13. PE 懇親会	三浦 勝哉	日立製作所	塩田 有波	三菱電機
	桑原 彬	名古屋大学	全 俊豪	東京工業大学
ICRP 委員 (オブザーバー)	朽久保 文嘉	東京都立大学		
	金子 俊郎	東北大学		

2023 年度（令和 5 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	篠田 和典 荻野 明久	(日立製作所) (静岡大学)
8.3	プラズマナノテクノロジー	北嶋 武	(防衛大学校)
8.4	プラズマライフサイエンス	栗田 弘史	(豊橋技術科学大学)
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	伊藤 昌文	(名城大学)
8.8	PE 賞受賞記念講演	伊藤 昌文	(名城大学)

2. 応用物理学会理事

木下 啓藏 (副会長)	(アイオーコア)
平松 美根男	(名城大学)
伊藤 昌文	(名城大学)

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

本幹事会は、2023年3月16日（木）の大分類8意見交換会終了後に、現地（上智大学四谷キャンパス）とZoomを用いたオンラインとのハイブリッド会議にて、インフォーマルミーティングとして実施された。

1. 春季および秋季学術講演会における分科会の企画

伊藤副幹事長（名城大学）より、今後の分科会企画について紹介がなされた。

海外招待講演担当の八田先生（高知工科大学）より、講演者候補のノミネートを幹事に依頼する予定である旨が紹介された。

秋季学術講演会のシンポジウム担当の辻様（産業技術総合研究所）より、資源循環×プラズマ科学と題したシンポジウム企画の紹介がなされ、講演者の候補が示された。堀先生（名古屋大学）より、企業からおよび女性の講演者が入っていることが望ましいとの意見があった。

2. 第38回プラズマ新領域研究会報告

上坂副幹事長（岐阜大学）より、第38回プラズマ新領域研究会の開催報告がなされた。日本表面真空学会スパッタリングおよびプラズマプロセス技術部会と表面技術協会高機能トライボ表面プロセス部会との共催で行った旨の説明がなされた。

3. プラズマエレクトロニクス講習会報告

深沢副幹事長（ソニーセミコンダクタソリューションズ）より、プラズマエレクトロニクス講習会の開催報告がなされた。参加者75名、講師5名の計80名の参加であった。デバイスメーカーの若手の参加が多い。アンケートの結果、オンライン開催の希望が90%近くと多いことから、次年度の開催形態については継続的に検討することとした。全ての講義が高評価であった。担当幹事が集まり、来年度への申し送り事項をまとめた。

4. ICRP-11/GEC2022/SPP-40/SPSM35 開催報告

ICRP-11/GEC2022/SPP-40/SPSM35 の開催報告が金子先生（東北大学）よりなされた。Abstract投稿数は600件、参加者は550名（海外250名）と、現地開催としては、2015年のハワイ開催以来の参加者数であった。次回のGECはミシガンで開催される。

5. SPP-41 準備状況報告

上坂副幹事長および現地実行委員長の赤塚先生（東京工業大学）より、SPP-41の準備状況について報告がなされた。2024年1月23日～25日に東京工業大学大岡山キャンパスで、対面での開催を予定している。学振委員会の状況が金子先生より説明され、現状ではSPSMとの共催が可能であるかどうか不明であるため、SPP-41単独開催の方向で進めることとした。運営に関しては以前のSPPで使った業者に依頼予定である。また、現地実行委員会のメンバーの紹介がなされた。

6. 第21回プラズマエレクトロニクス賞選考結果報告

第21回プラズマエレクトロニクス賞選考結果の報告が白藤幹事長（大阪公立大学）よりなされた。朽久保先生（東京都立大学）に選考委員長を依頼し、朽久保先生に選任いただいた選考委員で議論の結果、8件の応募から下記2編の論文が選考された。受賞者はプラズマエレクトロニクス分科会会員あるいは応用物理学会会員である必要があるため、その確認をもって受賞者を確定する。秋季学術講演会中に授賞式を執り行う。

対象論文 1 :

Electric-Field-Induced Coherent Anti-Stokes Raman Scattering of Hydrogen Molecules in Visible Region for Sensitive Field Measurement, Physical Review Letters 129, 033202 (2022)

著者 : Takeru Koike, Hitoshi Muneoka, Kazuo Terashima, and Tsuyohito Ito

対象論文 2 :

Angular Distribution Measurement of High-Energy Argon Neutral and Ion in A 13.56 MHz Capacitively-Coupled Plasma,

著者 : Keita Ichikawa, Manh Hung Chu, Makoto Moriyama, Naoya Nakahara, Haruka Suzuki, Daiki Iino, Hiroyuki Fukumizu, Kazuaki Kurihara, and Hiroataka Toyoda

7. 2022 年度会計報告

白藤幹事長より, 2022 年度の会計報告がなされた。繰越金が大きく、計画的に使用していく必要がある。繰越金の中には、ICPIG への参加補助といった若手補助に使用する経費が含まれている。来年度、若手補助や HP の更新などに経費を使用していく予定である。

8. 2023 年度分科会幹事について

退任幹事、留任幹事、新任幹事の紹介が竹内(東京工業大学)よりなされた。また、新旧合同幹事会の予定が竹中先生(大阪大学)より紹介された。

9. プラズマエレクトロニクス分科会 30 周年記念事業

30 周年記念事業の状況が白藤幹事長より説明された。新規ロードマップ作成については、白谷先生(九州大学)に取りまとめをお願いして進めている。

アーカイブ化(電子ファイル)の進捗状況が石

川先生(名古屋大学)より説明された。下記が承認された。

- ・アーカイブは、会員のみアクセスできる分科会 HP にアップロードし、会員には無料で配布する。非会員への有償配布は行わない。

- ・開催年ごとに目次を作り、著作権承諾者分のみリンクを貼る。

また、プラズマエレクトロニクス分野のロードマップ改訂について、白谷先生より説明がなされた。4 月に全体会合を行い、具体的な改訂作業を進める。

10. 会報について

川島(ソニーセミコンダクタソリューションズ)より、会報 No.78 の状況説明がなされた。執筆者未定の記事については、執筆者選定を進める。

11. 分科会予算による学生海外国際会議発表補助について

白藤幹事長より、ISPC 25 に併催される The IPCS Summer School に、分科会から 40 万円を協賛金として支出する旨の説明がなされた。海外からの講師招聘の費用などに使用予定である。

12. その他

- ・The IPCS Summer School の案内が渡辺先生(九州大学)からなされた。

- ・ICPIG 2023 について、白谷先生からアナウンスがなされた。白谷先生の ICPIG 委員退任に伴い、佐々木先生(北海道大学)に次期委員を打診している。

- ・呉先生(大阪公立大学)より、RONS 濃度フィッティングプログラムの紹介がなされた。

記 : 竹内(東京工業大学)、鈴木(名古屋大学)、川島(ソニーセミコンダクタソリューションズ)

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 】

2023.7.9 - 14

International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG XXXV)
Egmond aan Zee, Netherlands
<https://www.icpig2023.com/home>

2023.10.9 - 13

76th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2023)
University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA
<https://www.apsgec.org/main/iops.php>

2023. 11.24 - 25

The 44th International Symposium on Dry Process (DPS2023)
Winc Aichi, Nagoya, Japan
<http://www.dry-process.org/2023/index.html>

【 国内会議・会合 】

2023. 9.4 - 6

第 17 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
国立中央青少年交流の家、静岡県御殿場市
http://annex.jsap.or.jp/plasma/PE_files/PE_SS_2023/index.html

2023. 9.19 - 23

第 84 回 応用物理学会 秋季学術講演会
熊本城ホールほか 3 会場、熊本県熊本市
<https://www.jsap.or.jp/jsap-meeting/future>

2024. 3.22 - 25

第 71 回 応用物理学会 春季学術講演会
東京都市大学 世田谷キャンパス、東京都世田谷区
<https://www.jsap.or.jp/jsap-meeting/future>

2024. 9.16 - 20

第 85 回 応用物理学会 秋季学術講演会
朱鷺メッセほか 2 会場、新潟県新潟市
<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ひ申し上げます。

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頂く場合があります。

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

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

編集後記

梅雨の季節を迎えましたが、会員の皆様におかれましてはいかがお過ごしでしょうか。この度、プラズマエレクトロニクス分科会会報 No.78 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にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

巻頭言では、名城大学の平松美根男先生より「プラズマエレクトロニクスにおけるこれからの人材育成のスキーム」と題しまして、22年前の科学啓発活動のご紹介を交え、プラズマエレクトロニクス分科会の現状や今後の方向性についてご執筆いただきました。

また、名古屋大学の堀勝先生からは、「Reactive Plasma Award」と紫綬褒章をいただき「～若手へのエンカレッジ～」と題したご寄稿で、若手の皆様に向けての熱いメッセージを頂戴しました。

学生のためのページのコーナーでは、九州大学の奥村賢直先生に、プラズマ農業に関する詳細な研究動向の解説記事をご執筆いただきました。プラズマは工学や理学だけではなく、農学の分野へも適用されており、学生の皆様が進学される際の研究テーマ選択の参考にしていただければと思います。

委員会紹介では、4月に設立された「日本学術振興会 R052 DX プラズマプロセス委員会」に関しまして、委員長である東北大学の金子俊郎先生にご紹介いただいております。

研究室紹介のコーナーにおきましては、堀勝先生の定年退職に伴い、教育・研究体制を引き継ぐ形で発足した、名古屋大学の石川・田中研究室の研究内容についてご紹介いただきました。

研究紹介では近年、学会発表が活発な分野の1つである ALP 関連といたしまして、プラズマ照射とランプ加熱による等方性原子層エッチングに

関する研究内容を、日立製作所の篠田和典様にご解説いただいております。

また、第21回プラズマエレクトロニクス賞を受賞されました東京大学の伊藤剛仁先生、名古屋大学の豊田浩孝先生、応用物理学会講演奨励賞を受賞されました北海道大学の稲垣慶修様には、受賞論文の解説記事をご執筆いただきました。

国内外の会議報告を、各実行委員よりいただきました。私も約3年ぶりに現地開催の学会に参加することができましたが、オンラインと対面のハイブリッド開催や、現地開催の会議がかなり増えております。

今後予定されている応用物理学会秋季学術講演会、ドライプロセス国際シンポジウム、インキュベーションホール、プラズマエレクトロニクス賞についてもご案内いただきました。案内記事をご一読いただき、奮ってご参加、ご応募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小田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。蒸し暑い日が続きますが、くれぐれもご自愛ください。

記：川島（ソニーセミコンダクタソリューションズ）

（令和5年度会報編集担当：

佐々木、天野、鈴木、川島）

プラズマエレクトロニクス分科会会報 No.78
2023年 6月20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 白藤 立
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
(©2023 無断転載を禁ず)

