

プラズマエレクトロニクス分科会会報 No. 79

2023 年（令和 5 年）12 月発行

鈴木、川島、天野、佐々木

目次

巻頭言

プラズマエレクトロニクス分野への期待	株式会社日立製作所	松井 都	1
--------------------	-----------	------	---

寄稿

プラズマ合成ダイヤモンドの現状と将来展望	産業技術総合研究所	山田 英明	2
----------------------	-----------	-------	---

研究室紹介

九州大学 大学院総合理工学研究院 林研究室	九州大学	林 信哉	7
-----------------------	------	------	---

研究紹介

プラズマを活用した新規表面改質技術の開発	(株)魁半導体	山原 基裕 富川 弥奈 植野 伸哉 柏木 大樹 登尾 一幸	11
----------------------	---------	---	----

応用物理学会講演奨励賞

プラズマ—高速水流を用いた液相短寿命活性窒素 種減衰の実験的検出	東北大学	武田 一希	21
-------------------------------------	------	-------	----

国際会議報告

XXXVth International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG)	北海道大学	佐々木 浩一	24
The 76th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2023)	大阪大学	浜口 智志	25

国内会議報告

第 17 回プラズマエレクトロニクスインキューベ ションホール	名城大学 室蘭工業大学	伊藤 昌文 川口 悟	26
第 84 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主催シンポジウム T11「資源循環型社会実現に挑むプラズマ科学」	産業技術総合研究所 岐阜大学 高知工科大学	辻 享志 上坂 裕之 八田 章光	27
第 84 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内招待講演	九州大学	鎌滝 晋礼	29
第 84 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内招待講演 (English Session)	名古屋大学	田中 宏昌	31
第 41 回プラズマ新領域研究会「電子ビームとプ ラズマプロセスの新しい展開へ向けて」	高知工科大学	八田 章光	32
2023 年度プラズマエレクトロニクス講習会	産業技術総合研究所	深沢 正永	34

行事案内

2024 年 第 71 回応用物理学会春季学術講演会プラズマエレクトロニクス分科会企画	名城大学	伊藤 昌文	36
16th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials / 17th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science / 13th Asia-Pacific Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (ISPlasma2024 / IC-PLANTS2024 / APSPT-13)	金沢大学 名城大学	田中 康規 伊藤 昌文	38
The 77th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2024)	成蹊大学	村上 朝之	40

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	41
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			42
2023 年度(令和 5 年度)分科会幹事役割分担			44
2023 年度(令和 5 年度) 分科会関連の各種世話人・委員			45
活動報告			46
プラズマエレクトロニクス関連会議日程			48
当会報への広告掲載について			49
編集後記			50

巻頭言

プラズマエレクトロニクス分野への期待

(株) 日立製作所 松井 都

この度、2023 年の組織委員長を務めておりますドライプロセスシンポジウムがプラズマエレクトロニクス分科会の共催となったことから、本会誌の巻頭言の執筆をご依頼頂きました。本シンポジウムは、西澤潤一先生を委員長として、1979 年に第 1 回が開催されました。創設当初、海外の研究者をご招待して、世界最先端の研究を学び日本の技術力を高めたいとのご意向があったそうです。コロナ禍を経て、現在は以前とは比べ物にならないくらい手軽に Online で海外の研究に触れる機会が増えました。便利で有難いことではありますが、お互いの顔が見えず、人的ネットワークという点では希薄になったと感じられます。是非、日本に居ながら世界の一流の研究者の生の講演を聞けるドライプロセスにご参加頂きたいと存じます。

さて、プラズマエレクトロニクス分野に関して、私は半導体プロセスの分野に長年関わってきました。日立に入社した当時の 1900 年代は、日本の半導体分野の最盛期でしたが、その中で私は半導体の表面解析関連の部署に配属されました。数年でプラズマプロセス開発の部署に異動となり、旧通産省（現在の経産省）の主導で設立された ASET（技術研究組合超先端電子技術開発機構）の一員として派遣となりました。当時 10 社あった国内半導体デバイスメーカから各 1 名ずつの研究者が派遣された集中研究方式のコンソーシアムで、最新の装置が国内の装置メーカより導入され、大学が有する世界最先端のプラズマ/表面の計測技術を駆使して、実用性を持ったエッチングモデルが生まれました。そのモデルは現在もエッチングモデルの基盤となっていると感じております。

当時、私は若輩者でしたので、皆様にお世話ばかりをおかけしてしまいましたが、このときに一緒に研究させて頂いた方々が、今日の日本のプラズマエレクトロニクス分野を支えることとなっています。また、幸いにも若い頃にプラズマプロセスという非常に複雑な現象を制御する技術にサイエンスを持って取り組む重要性を学びました。その後も企業の研究者として、このことを頭の片隅において研究を進め、何かしら本分野の技術の発展に役に立つ本質的な現象を解析し、自分の仕事を論文に残すように努めています。

現在も半導体の高集積化は留まるところを知らず、リソグラフィによるパターン寸法の微細化と同時に、三次元化による高集積化、貼り合わせによる三次元積層等、新しい技術の登場によってさらなる高集積化が進んでいます。その中でもプラズマプロセスは大面積の加工を原子レベルの精度で加工していく重要で高度な技術として引き続き発展を続けていくと考えています。さらに、デジタル技術との融合も加速し、急速に発展していくことが予想されます。日本国内でも半導体分野は、安全保障上の問題と絡みつつ再び盛り上がりを見せており、産官学の協力体制でさらなる発展が望まれています。また、プラズマ技術の発展は半導体のみならず、生命、医療分野への応用、環境課題解決のための技術も期待されており、各分野へのさらなる応用が期待されています。そのような中で、所属の壁を越えて、プラズマエレクトロニクス分野の学术界と産業界との人的、技術的繋がりがプラエレ分科会を通じて発展していくことを心より祈念しております。

プラズマ合成ダイヤモンドの現状と将来展望

(国研) 産業技術総合研究所 山田英明

研究背景

人工ダイヤモンドの宝飾品としての市場が近年拡大しているとされるが、ダイヤモンドが持つ最大の特徴や魅力の一つは、複数の物性値が物資中最高水準である点にあり、これに基づき様々な産業応用展開に期待されている。しばしば Ultra-Wide-Band-Gap (UWBG) 材料と位置付けられ、特に半導体材料として抜群の物性値から、電子素子としての応用のみならず、近年は量子素子としての応用にも特に注目されている。

所謂パワーデバイスとしての期待は、SiC や、GaN、Ga₂O₃ などの次世代パワー半導体材料よりも更に高いバンドギャップ、絶縁破壊電界強度や高いキャリア移動度、バルク材料中最も高い熱伝導率に基づく。残念ながらパワーデバイスとして製品化された例はまだ無いと思われるが、近年、ダイヤモンド製デバイスを扱うベンチャー起業が相次いでいる[1]。

量子素子としての期待は、常温常圧で量子情報を扱うことができ、他の競合材料と比較して長いスピンコヒーレンス時間を持つことなどに起因する。実際的な産業応用例はまだ無いと思われるが、2 量子ビットからなるダイヤモンド製の量子素子を搭載した量子計算機が製品化されつつある[2]。

一方、ダイヤモンドの高熱伝導率や耐環境性などを活かして、高熱伝導率は異種パワー半導体デバイスからの放熱や、耐環境性は過酷環境で動作する電子デバイスの実現などにおいて、上記パワーデバイス・量子応用と比較して短・中期的な実現が期待されている。

パワーデバイスのトレンドとして、扱うパワー

は増大する一方で、素子のサイズは不変若しくは小型化する傾向がある。素子の効率も向上しているものの、デバイス中の局所的な加熱による素子温度が一定程度以上となる事を回避して、素子本来の性能を発揮するには、放熱機能を向上する必要がある。そこで、例えば GaN-HEMT デバイスにダイヤモンドを接合することで、素子からの放熱性能を向上させることが考えられる。欧米では多結晶ダイヤモンドを採用した研究が続けられており、最近、米国企業から GaN-HEMT オンダイヤモンドを搭載した MMIC が製品化された[3, 4]。

一方、ダイヤモンドのバンドギャップが大きいことから高温でも意図しないキャリア生成がされにくい、200℃を超える様な高温でも動作することが実証されている[5]。また、Si などに比べると放射線照射による核変換も起こりにくい。そこで、ダイヤモンド製の電子素子を搭載した放射線検出器は、例えば廃炉環境に持ち込む可能性に期待されている。同様に、宇宙環境などへの適用も検討されている。

素材供給状況

市場規模にもよるが、こういった様々な応用を実現するには、素材の供給状況が整備されることが大前提である。現在供給される人工単結晶ダイヤモンドは絶縁性（不純物濃度が極めて低い、もしくは窒素ドーピングされたもの）が多い中で、比較的高品質で導電性（p 型）を持った基板は、ロシア企業から研究用に供給されていた。現在は、世界情勢の変化により、この様な基板はほぼ入手不可能となり、ダイヤモンド縦型パワーデバイスの

研究開発は大きな影響を受けている。他分野でも叫ばれる素材供給源確保の重要性がこの様な面でも表れている様に思われる。n型については、薄膜並びに素子形成の報告事例はあるものの、基板は未だ供給事例が無いと思われる。

人工的にダイヤモンドを高温高压法で作製した実証例が米国企業から報告された後、世界中で主に機械用途（砥粒など加工用）向けのダイヤモンドの生産手法として採用されている。この手法を用いたダイヤモンドの生産量の大半は現在では中国が担っているとされる。一方、高温高压法ではなく、プラズマ CVD 法でも作製できることを我国の研究所が報告した。その後、様々なプラズマ源（マイクロ波、パルス DC、ICP）、熱源（火炎、フィラメント）を用いてダイヤモンドを結晶成長し得ること自体は実証されたが、先に述べた様な電氣的・量子的応用を指向した成長手法としては、世界的に専らマイクロ波プラズマ CVD 法が採用されている。無電極放電で比較的高いプラズマ密度が達成できることがその理由として考えられる。

上述の通り、近年では材料としてではなく、デバイスを扱うベンチャー起業が相次いでいるが、それ以前に、この 10—15 年の間に、CVD 製のダイヤモンドを扱う企業が多数起業され、我国でも産総研発ベンチャーとして 2009 年に起業された後、2022 年には株式上場した[7]。CVD 製ダイヤモンド基板の最大供給元は、宝飾品としてのダイヤモンドを扱う老舗であるデビアス社の子会社である、エレメントシックス社であろう[8]。不純物濃度を管理して、量子応用向けに特化した素材の供給も行っている。

こういった素材としての供給において、基板・ウェハの大型化、合成効率の向上、品質の制御、高精度加工技術に課題がある。

ダイヤモンドウェハの種類と特徴

人工ダイヤモンドウェハ・基板の内、高温高压製のものは最大で 10mm 角程度ものが供給されている。一般的に CVD 製よりも転位密度が低く高品質な点が特長である。これは、成長主面が拡大する結晶成長モードが確立されている点が大きな原因である。一般的に、種結晶に存在する転位や成長界面から成長層にも転位が形成され、成長主面と垂直な方向に転位が伸展する。そこで、成長主面を拡大させ、拡大した領域（主面と水平な方向の位置が種結晶と異なる領域）から結晶を切り出し、それを新たな種結晶として用いることで、高品質化が可能である[9]。

一方、CVD 製の場合、成長面が拡大しにくいので、この様なアプローチが適用し難い。このため、現状、ほぼ種結晶の品質で決定されている状況である。CVD 製のダイヤモンドウェハは、ホモエピ（成長する基材も単結晶）とヘテロエピ（基材が高融点金属や、Si、MgO、Ir、YSZ、サファイアなど）に大別される。前者はダイヤモンド本来の物性を担保することが期待できる反面、ウェハサイズの拡大が容易でない。単結晶で 15mm 角が最近販売開始された[7]。単結晶同士を高精度に一体化させたモザイクウェハも 1 インチ角が販売されていて、実験室レベルでは 2 インチウェハの作製実証例が報告されている[7, 10]。

一方、ヘテロエピウェハは米国企業が 4 インチウェハの作製実証例を報告した[11]。国内企業でも 2 インチ程度の作製例があるが、いずれにせよ、量産レベルでのサイズは不明である。10mm 角程度は購入できる様である。ホモエピ単結晶よりも一般的には転位密度が数桁高い点や、これにも起因するウェハの反り、内部応力などが原理的に乗り越えられるかが課題であろう。

多結晶ウェハは作製方法によっては単結晶並みの透過率・熱伝導率を達成できることが知られているが、多数の面方位が形成されている点からの

加工性困難さや、その様な良好な物性値を達成する際には、通常は成長速度が極めて低い条件となる点などがコスト押し上げ要因となっていると思われる。

デバイス開発状況

電子デバイスに関しては、これまでもダイオードやトランジスタなどの作製事例が多く報告されており、高温や放射線環境でも動作するロバストな特性や、反転層型 MOSFET の動作原理実証などが報告されている[5, 12]。これらは、それぞれ先に述べた様な過酷環境への適用や、所謂パワーデバイス応用を指向した研究だが、電極サイズの拡大と共にデバイス特性の劣化が見られることも知られており、電極直下のキラーク陥低減の重要性を示唆している。一方、表面伝導層（トランスファードーピングと呼ばれる機構により形成された基板表面終端状態に起因する 2 次元ホール蓄積層）を利用したトランジスタにより、高出力高周波動作を目指す開発も進められている[13]。以上の様なディスクリート素子としての開発は進められているものの、モジュール化された報告例は未だ無い様に思われる。先に述べた欠陥低減の問題に加え、素子性能の再現性（最頻性能の分散低減）などが課題の一つとして挙げられる。

量子応用においては、原理的な検証が進められている段階だが、その中で、利用したい信号以外の雑音となる要因として、不要な不対電子を持った転位や歪、また、カラーセンター同士の干渉などが調べられている。コヒーレンス時間や ODMR スペクトルの S/N 比などへの影響が調査されている[14]。パワーデバイス応用では、リーク源となる貫通転位などのキラーク陥を可能な限り低減する必要があるが、それが必ずしも量子的応用における“キラークカラーセンタ”とは限らない。他の材料でも幅広く展開されているパワーデバイス開

発と比して、アプリケーション自体がまだまだ可能性が広がっている状況に思われ、それを考えた際に、何が鍵となるのかを明確にする必要がある。上記した様に、目指すべき品質に直結する点であり、この点が開発の行方を左右すると思われる。

いずれにせよ、こういったハイエンドな応用を実現するためにも、要求を満足する品質を持った素材、ウェハの供給体制が確立することが求められることは間違いないであろう。

ウェハ及びその周辺技術に求められるもの

サイズを限定すれば、転位密度が $10^2/\text{cm}^2$ 程度以下で、1nm を下回る平滑性を実現することは可能である。高温高压法はインチサイズ化が実際上困難とされるため、CVD 法で結晶品質を向上させる手立てが無くては、高温高压製の種結晶の品質で成長層の品質が制限されることになる。また、実際には、基板サイズをインチサイズ化することが要求される。サイズに関する課題を手っ取り早く解決する手法として多結晶やヘテロエピウェハのアプローチが提案されているが、転位密度を減らす実地的な対策や、加工困難性、内部応力低減などに課題が残る。

この様な品質やサイズなどの複数の要求に「アノド」で応えられるウェハの実現を目指して、我々は成長方向を変化して種結晶に内在する転位を引き継がせずに、且つ、ウェハサイズを拡大する成長手法や、従来の機械加工とは異なる化学反応援用による平坦化・平滑化手法の開発に取り組んできた。これまでに、オーダで転位密度が下がる事例や、加工変質層が導入されにくい高効率性などを確認してきた。また、サイズアップが比較的容易なモザイクウェハにおいては、単結晶同士の境界の影響が精密加工表面状態に殆ど影響せず、GaN-HEMT—オナーダイヤモンド形成時に、単結晶と同等の抜熱効果を実現することも確認されている

[15]。今後、これらの開発を統合的に推し進め、ウェハそのものの大型化と高品質化とを両立させたインチサイズウェハを実現し、各種応用へ向けた研究開発の加速に結び付けたいと考えている。

一方で、結晶成長装置にも刷新が必要に思われる。現状、2.45GHz 周波数帯を用いたマイクロ波プラズマ CVD が世界的に採用されており、市販装置も複数提案されている。しかしながら基板近傍のプラズマは、どれも球状の体積波放電であり、様相に大きな差があるとは言い難い[16]。これは、プラズマ CVD とは言え、原料ガス圧が比較的高く設定されることが多く、どれも殆ど熱プラズマの様な状態となっている点に起因する。基板温度は 1000℃前後に設定する必要がある反面、プラズマの中心温度は 3000℃程度まで加熱され、且つ、プラズマの中心から基板表面までの距離は 10mm 程度しかなく、熱的非平衡性が高い成長環境と言える。

現状の市販装置は大抵 5 – 6 kW 程度の投入パワーに対して 2 インチ程度以下の成長面積への対応を仕様とするものが多いと思われる。投入パワーを増すことでプラズマのサイズが拡大し、結晶成長面積や成長速度を増加させられそうに思うが、実際には高いプラズマ密度がもたらす表皮効果により一定程度以上はマイクロ波が一様には吸収されないため限度がある。また、実際には導波路で意図しない放電が起きるため、装置形状（＝共振器形状）が決定された時点で投入できるパワーの上限が決まると言ってもよいであろう。一方で、大面積成膜の代表格であるフィラメント CVD は成膜面積に“マイクロ波の波長”の様な制限が無い反面、一般的には成膜速度がマイクロ波プラズマ CVD よりも更に低い。フィラメント温度（或いは基材－フィラメント間距離）・本数密度の向上により多少改善する余地はあるが、一様性を犠牲にする傾向となる[17]。

放電領域の広がりマイクロ波の波長に強く依存するため、915MHz 帯のマイクロ波を適用することで成長面積を拡大することは技術的には容易である。市販の 915MHz 装置を用いれば 4 – 6 インチ径程度の成膜面積をカバーできる。波長に応じてプラズマの体積が拡大するため、電源容量の規模は 60 – 100 kW となる。原料ガス圧が比較的高いことから、基板から離れた場所でのパワー吸収は結晶成長に直接寄与しないと思われるため、パワー効率が悪いと言える。また、特に我国では電磁波漏えい対策が必要になることもあり、装置本体のみならずコスト面ではかなり負担が大きい。この程度のウェハ面積を扱う必要がある場合を除いては、この規模の成膜装置を積極的に導入することは稀に思われる。

以上の様に、結晶成長装置にも刷新が必要と考えており、我々は装置形状の最適化のみならず、パルス化、位相制御等、次世代の装置実現へ向けて研究開発を進めている。まずは絶縁性基板に対して適用できる装置の開発が進められているが、p 型、n 型基板の作製も意識する必要がある。高濃度ドーピング時に煤が発生することが知られており、基板・ウェハだけでなく、電子デバイス作製時の薄膜成長にあっても課題となる。

まとめ

ダイヤモンドの産業応用実現へ向けた研究開発の中でプラズマプロセスが担う役割は大きい。結晶成長における CVD のみならず、デバイス構造形成などに用いられるエッチングにも用いられる。また、p 型や n 型の導電性結晶や量子応用向けのカラー（例えば NV⁻）センターの形成にもプラズマ CVD が用いられる。本稿で概観した課題を解決するためには各要素技術にブレークスルーが必要に思われ、これによりダイヤモンドが持つ物性本来のポテンシャルが利用可能となると期待する。

参考文献

- [1] 国内では大熊ダイヤモンドデバイス、Power Diamond Systems、国外では Advent Diamond (アメリカ) など。
- [2] Quantum Brilliance (オーストラリア) など
- [3] J. C. Mendes, M. Liehr, and C. Li, *Materials* 2022, 15(2), 415.
- [4] Akash systems (アメリカ) の製品紹介ホームページ, <https://akashsystems.com/power-amplifiers/>(最終アクセス日: 2023 年 11 月 14 日)
- [5] H. Umezawa, *Materials Science in Semiconductor Processing* 78, 147 (2018).
- [6] T. Yamaguchi, H. Umezawa, S. Ohmagari, et al., *Appl. Phys. Lett.* 118, 162105 (2021).
- [7] EDP 社のホームページ, <https://www.d-edp.jp/>(最終アクセス日: 2023 年 11 月 14 日)
- [8] E6 社のホームページ, <https://www.e6.com/ja/home>(最終アクセス日: 2023 年 11 月 14 日).
- [9] H. Sumiya and K. Tamasaku, *Jpn. J. Appl. Phys.* 51, 090102 (2012).
- [10] H. Yamada, A. Chayahara, Y. Mokuno, et al., *Appl. Phys. Lett.* 104, 102110 (2014).
- [11] C. Mils, *THE WALL STREET Journal*, Nov. 3 (2023).
- [12] 松本翼, *応用物理* 87, 106 (2018).
- [13] K. G. Crawford, I. Maini, D. A. Macdonald, *ProgressInSurfaceScience* 96, 100613 (2021).
- [14] 眞榮力, 増山雄太, 宮川仁, 他, *ニューダイヤモンド* 39, 12 (2023).
- [15] 檜座秀一, 今村謙, 白柳裕介, 他, *電気学会論文誌C* 142, 354 (2022).
- [16] F. Silva, et al., *J. Phys.: Condens. Matter* 21, 364202 (2009).
- [17] H. Yamada, and T. Shimaoka, *Functional Diamond* 2, 46-52 (2022).

研究室紹介

九州大学 大学院総合理工学研究院 林研究室

九州大学 林 信哉

1. はじめに

九州大学筑紫キャンパスは福岡市に隣接する春日市に位置し、九州大学の幾つかあるキャンパスの中でも二番目に小さいですが、自然の中に研究施設が立ち並ぶ研究オリエンテッドなキャンパスとなっています。当研究室（高エネルギー応用力学講座）はこの筑紫キャンパス内にあり、昭和 59 年に河合良信教授（現名誉教授）が設立されて以来、40 年の歴史を持つ研究室です。その間、プラズマの基礎物理研究、プロセス用プラズマ源の開発研究、プラズマによる環境改善、プラズマの農業、医療応用など、時代をリードするフロンティアを目指して研究を推進してきました。

2. 研究室について

現在の研究室構成としては、教員 1 名、秘書 1 名、博士課程 4 名、修士課程 10 名、学部生 3 名となっています。当研究室が属する総合理工学研究院では、九州大学の学部から進学する学生は 2 割程度にとどめ、大学院生の多くは九州大学以外から大学院に入学してきます。そのため、出身大学も学部も学科もさまざまで、授業等には多少の工夫等が必要ですが、学生同士は刺激になりお互いを高めあう良い機会になっているようです。多様な知識やスキルが持ち寄られることで、研究に関する発見の serendipity もあり、毎日がとても楽しいです。

私も 30 年ほど前に本研究室（当時の河合研究室）で学んでおりましたが、開放的な気風は今も昔も変わりません。

3. 教育について

教育の motto は「好きこそものの上手なれ」で、研究テーマは極力学生がしたいことをさせています。教育方針は基本的に放任主義です。植物も動物細胞も人間も同様に、環境を整えて栄養を供給すれば放置して自発的に成長するのを待つだけです。中にはうまく育ちにくいものもありプラズマ

やその他の方法で刺激を与えなければならないこともあります。そのとき上手に刺激を与えることで人であっても植物と同じように成長促進効果が生じます。これを見届けるのも教育や研究の醍醐味だと思っています。ゼミは週一回、金曜日の午後一杯を使って行っており、ゼミでの公用語は留学生も多いことから英語としています。ゼミ終了後はだいたい飲み会に突入です。

研究室での国際交流としては、ポーランドブリン大学や台湾逢甲大学と交流協定を結び、教員や学生の交流、交換を行っています。特に台湾逢甲大学からは、毎年教員学生合わせて 30 名が九大に 10 日間ほど滞在し、授業と学生実験からなるサマースクールを開催しています。その期間に、教員同士の交流や共同研究も行っています。



図 1 九州大学－台湾逢甲大学サマースクール（2023 年 8 月実施）の参加者。

4. 研究紹介

研究は、プラズマの基礎から応用まで、特に根底にあるメカニズムを解明することを主眼に置いて推進しています。研究テーマは、その時々で必要とされる技術や解決すべき課題のために、もしくは気になる科学分野に、プラズマでコミットするという観点で設定しています。当研究室の実験装置は小さくて安物ばかりですが、なにか研究のアイデアが思い浮かんだら忘れないうちに実験室に駆け込んですぐに試せますし、装置が壊れても構わないので少々無理をしても良いです。このようにして出てくる研究結果は発散しがちで、そ

れらをまとめ上げるのに最も腐心しています。以下、研究内容を簡潔に記述します。

① プラズマを用いた環境保全

地球温暖化係数（GWP）の大きな揮発性化合物（HC、窒素酸化物、フロン等）を、比較的高いエネルギーを持つ粒子を比較的大体積で生成可能なストリーマコロナ放電により分解し、GWP のより小さな物質に分解する研究を行っています。特に、プラズマ分解後の再結合を抑制する技術の開発を行っています。また、2008 年に開催された北海道洞爺湖サミットに先立ち、経産省からの依頼で二酸化炭素（CO₂）の排出削減技術を検討し、CO₂に水を添加してプラズマ分解しジメチルエーテルを作る方法を開発しました。本技術はサミット中に紹介され、サミット後には広く一般に公開されました。企業が一部実用化し、また現在でも実用化開発が引き続き行われています。



図 2 酸素プラズマ処理により生成された酢酸鉛の沈殿物。

オゾンを使った水処理技術の開発も行っており、カット野菜の洗浄機、養殖カキ内部に蓄積されたビブリオ菌の殺菌機を企業と共同開発しています。また、ヒマラヤ山脈の鉱脈から溶け出したヒ素等の重金属で汚染されたバングラデシュの飲料水から金属イオンを沈殿除去する研究を行っています。

② プラズマ医療用滅菌器の開発

大学病院に歯の治療に行った際に、口腔外科部長からプラズマで菌の不活化は出来るのか、と訊

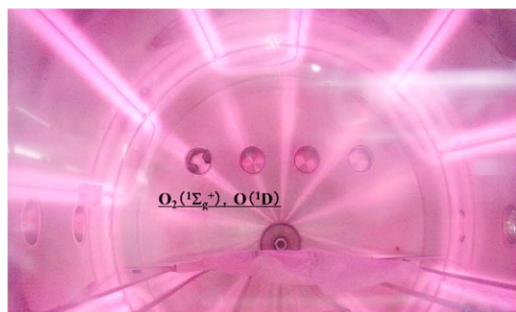


図 3 高周波酸素プラズマを用いた低温プラズマ滅菌器の庫内。

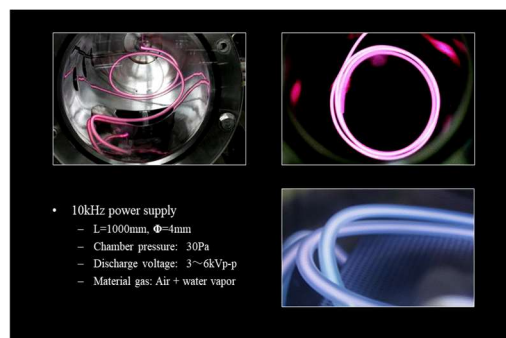


図 4 長さ 1 メートルのカテーテル内部に生成したプラズマの様子。

かれたことから始めた研究です。プラズマを高速・高密度で菌にあてれば蒸発させることも可能ですが、注射針や細いカテーテルの内面といった荷電粒子が到達できない挟空部の滅菌や、医療機器自体にプラズマによる損傷や劣化を与えない素材適合性を担保する必要があることから、プラズマを慎重に選ばなければなりません。そこで、電氣的に中性な活性酸素種を生成して滅菌を行った結果、上記の課題がほぼ解決することが明らかとなりました。この際の放電電極の設計には、基礎プラズマ実験に用いているマルチカスプミラー磁場閉じ込め型の熱陰極放電プラズマ源が大変役に立ちました。その際に作成した少々独特な高周波電極で特許を取得し、その特許を企業数社に実施許諾しています。

③ プラズマによる植物の応答

2006 年に農家からの依頼でカイワレ大根種子のプラズマ殺菌をした際に、カイワレ大根の成長が早まることを発見しました。稲妻の語源である日本古来の言い伝え「雷が鳴ると稲が良く育つ」を科学してみようと思い立ちました。本現象は種

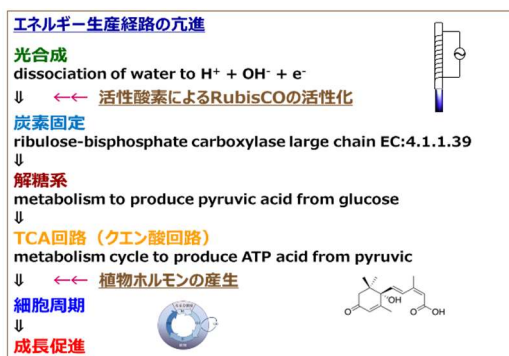


図 5 植物種子への酸素プラズマから成長促進が生じるまでの推定されるルート。

子にプラズマを照射することで、発芽後の植物の成長が継続的に促進するのが特徴です。プラズマによる成長促進のメカニズムの一つとして、当初より遺伝子に着目しており、特に遺伝子発現の変化、つまり転写因子のプラズマによる活性化変動が起きているのではと推察しました。遺伝子解析を行う学内ベンチャー企業の協力を仰ぎ遺伝子発現解析等の手法を用いてメカニズム解明を進めています。私は理学系の出身であることもあり、このようなメカニズムをあれやこれや考えている時間が最も楽しいです。

また、プラズマ照射の効果（成長促進）が次世代に継承される場合と一代限りで継承されない場合とが観察され、プラズマ刺激の遺伝に関しても調べています。プラズマを照射した植物の遺伝子の発現がエピジェネティックに制御されている可能性が見出されました。

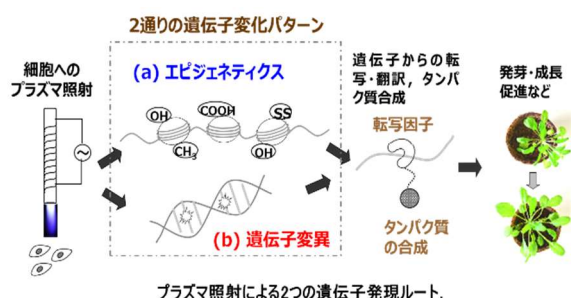


図 6 細胞への酸素プラズマ照射により生じる遺伝子変化の2つのパターン。

本研究の応用としては、各種農産物の成長促進に加え、杉・ヒノキの種子の発芽・成長促進による林業の活性化が期待されます。また、成長だけでなく、植物内の有用成分の産生促進も観察され、薬用植物の薬効成分や活性酸素応答によるブドウやイチゴの抗酸化活性向上が可能です。

本研究は、NHK ニュースのおはようニッポン「サイカル研究室」のコーナーや民放番組でも取り上げられました。

④プラズマによる農産物の防菌防黴・鮮度保持

プラズマ滅菌の応用先開拓の目的で、植物種子や農産物の殺菌を行っています。この場合も、細菌やカビを不活化し、農産物自体は傷めないという厳しい選択性が要求されます。比較的エネルギーの低い活性酸素種を用いて、微生物のタンパク

質は分解し農産物表面のクチクラ（キューティクル）層は分解しない条件にすることで、農産物の殺菌を行っています。

海運会社と各地 JA と共同しコンテナ船のコンテナ内に各種農産物を積載して、プラズマ環境下で 14 日間保管する実験を行い、80 種類中 50 種類程度の農産物の商品価値が 14 日後でも保たれていることが分かりました。加えて、果実表面のエチレンレセプターが変化することにより、レモンを長期間未熟のままで保管可能としています。本プラズマ殺菌で学内ベンチャー企業を設立し、現状では主にミカン表面の細菌やミドリカビの抑制を行う装置開発と販売事業を日本国内やトルコで行なっています。当社は、2024 年 1 月に「博士は今日も嫉妬する 人生が楽しくなる最新テクノロジー」（日本テレビ ntv.co.jp）に出演します。

⑤プラズマによる免疫細胞の活性化

免疫細胞は動物が細菌やウイルスなどの微生物から身を守るために持つミクロの戦士です。免疫細胞の不調は、がんだけでなくアレルギーなど多くの疾患に関係していることが明らかとなっています。現在免疫細胞の活性調整には薬剤が用いられていますが、多種の免疫細胞が関与する体内の免疫システムを調整するのは容易ではありません。そこで、薬剤に加えてプラズマという全く異なる手段を併用することで、より選択的かつ短時間での免疫細胞の活性調整を試みています。

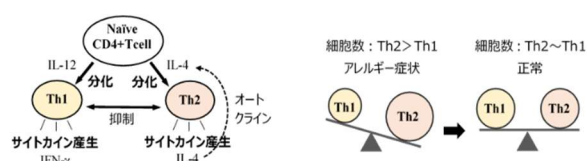


図 7 T 細胞の分化とサイトカイン放出/Th1, 2 細胞数比のバランス。

口腔外科で骨の研究をされている先生から、骨粗しょう症の治療にプラズマが使えないかとの漠然とした話が寄せられ、体内で破骨細胞の活性を誘導する RANKL という物質をプラズマで抑制しました。破骨細胞は免疫細胞の一つであるマクロファージの亜種であることから、その知見を基に、免疫細胞にプラズマを照射してその活性を制御する試みを行っています。



図 8 免疫細胞へのプラズマ照射から免疫機能向上/抑制に至るルートと未解明ポイント。

これまで、免疫細胞のうちマクロファージ、NK細胞、T細胞に主に酸素プラズマを照射し、免疫活性や分化特性の変動を観察しています。またメカニズムを解析するために、EL-4 T細胞の遺伝子発現解析を行った結果、細胞周期のある時期にプラズマを照射したときに、細胞の応答が顕著に現れることが明らかとなりました。

⑥ プラズマの宇宙利用

宇宙でプラズマと言えば電気推進が有名ですが、当研究室では違う切り口でプラズマを宇宙空間に持って行きたいと考えています。上述のプラズマ滅菌法は、殺菌剤が不要で有害な排ガスも排出しないことから閉鎖空間である宇宙での利用に適します。JAXAの深宇宙探査プロジェクトTansa-Xの一環として、長距離有人宇宙船のための医療用滅菌器を開発しています。また、惑星保護の観点から、打ち上げ時および将来的には地球への帰還時に宇宙船の外部を滅菌する必要があります。特に地球に帰還する直前の滅菌法としてプラズマ滅菌が有効です。また、例えば月面での効率的な農業や宇宙空間では貴重な資源である水の再利用処理に適したプラズマ源の開発も行っています。

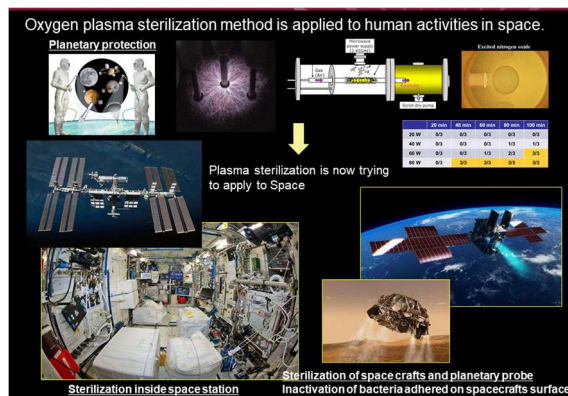


図 9 宇宙でのプラズマ殺菌技術の応用例。

⑦ 低緯度高層大気模擬

当研究室は九州大学国際宇宙惑星環境研究センターにも属しており、宇宙環境に関する研究も実施しています。特に、実験室で模擬的に電離層付近のプラズマを生成し、その中で生じる反応が地球の環境や生物に与える影響を検討しています。ここでは、古代地球大気(CO₂95%)と太陽風(主に水素とヘリウムの低密度プラズマ流)との相互作用による水(海)の生成の可能性について実験を行い、理論やシミュレーションとの対比を行っています。また、隕石にプラズマを照射して発生するガスについても調べています。

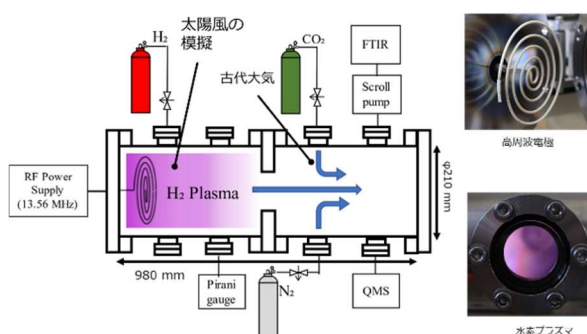


図 10 古代大気反応の模擬実験装置。

磁気圏近傍プラズマに関しては、電子のみが捕捉される程度の磁場構造を持つプラズマ中の中性粒子の流れ構造をLIFを応用して明らかにしています。また、カusp発散磁場中でマイクロ波プラズマを生成し、磁場への荷電粒子の捕捉に与える中性粒子流れの寄与を明らかにしています。このような中性粒子流れを考慮することで地球近傍プラズマをより詳細に理解できるようになると考えています。

5. おわりに

以上、当研究室を紹介しましたが、このような着地点はおろか右に進むべきか左なのかも分からないような研究にいつも付き合ってくれる学生君たち、また今でもご指導くださる河合先生を始め研究室OB諸氏には本当に感謝しております。当研究室のある九大筑紫キャンパスは、福岡市のJR博多駅から電車でわずか10分で着きます。令和の里、大宰府にも近いですので、仕事でも観光でも福岡に来られましたらお気軽にお寄りいただければ幸いです。

研究紹介

プラズマを活用した新規表面改質技術の開発

(株) 魁半導体 プロセス開発部 山原基裕 富川弥奈 植野伸哉
技術部 柏木大樹 登尾一幸

1. はじめに

材料の表面に機能を持たせる方法として、大きく分類するとウェットプロセスとドライプロセスが存在するが、産業界では、より環境負荷の低いドライプロセスへ移行が進んでいる。その代表例としては紫外 (ultraviolet; UV) 技術やプラズマ技術が存在するが、処理効果やプロセスの豊富さからプラズマ技術が主要な手法であるのは間違いない。

しかしながら、プラズマ技術にも処理効果の持続性や安全性など多くの課題が存在する。本稿では、それらの問題を解決する我々が開発した以下の2つの方法について紹介する。

● PE-MBF (Plasma Enhanced Molecular Bond Formation: プラズマによる分子結合形成) 法による新規 SAM (Self-Assembled Monolayer; 自己組織化単分子層) を形成する技術[1-3]

● DH (Direct Humidity: 直接的蒸気) 法による新規ガスフリープロセス技術[1,4-7]

前者については、プラズマによる効果を長期化することを目的として開発した技術である。図1は、それぞれの材料表面へ従来法によるプラズマ処理を施し、後に水を滴下し接触角を測定する事で経時変化を確認したものである。この結果が示す事は、従来の表面への機能性を付与する技術では、特性を長期にわたって保持できない事を意味する [1]。

この様に、基板材質の種類により経時変化のスピードは異なるが、プラズマ処理後 2、3 日で親水性の性質は消滅する。その為、コーティング剤

のレジンや接着剤等の塗工前処理として表面へ機能性を付与した処理を施した場合、処理後と塗工工程との間の滞留時間が長く取れないことから、処理効果の長期保持の要望がなされている。

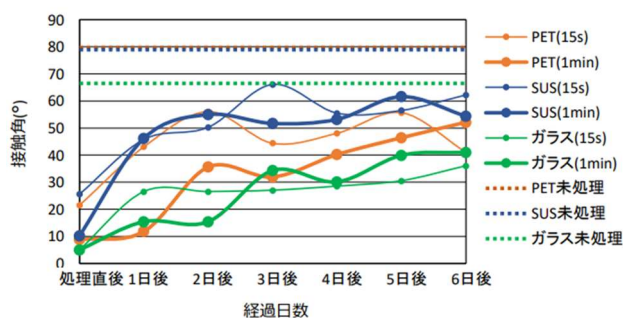


図1 従来のプラズマ親水化処理による水に対する接触角の経時変化[1]

図2に従来のプラズマ処理とSAMの相異を示す[1]。このようなSAMを形成することは、従来から知られているが、主にゾル・ゲル法等の湿式プロセスで形成され、溶媒や触媒を使用することが知られている[8]。しかし、ウェットプロセスは残留する微量の溶媒や触媒、重合開始剤による汚染を避けたい用途には採用できない問題がある。また、従来の気相法では、化学反応に長時間を費やす必要があり[9]、生産工程での利用が難しい。

一方で、PE-MBF法はドライプロセスであり、無溶媒・無触媒の状態SAMを形成し、従来のSAM形成法と比較して、プロセス時間を1/4以下に短縮することを特徴とする。新規表面改質技術について、活用例を含めて紹介する。

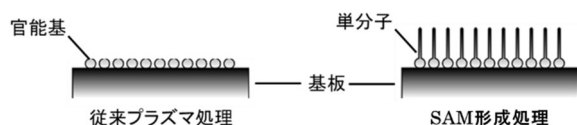


図2 従来のプラズマ処理と SAM 形成表面のイメージの相異

DH 法によるガスフリープロセス技術については、プラズマプロセスの簡易化を目的として開発した技術である。プロセスに使用する原料を液体状態でチャンバー内に設置し処理を施す技術である。従来のプラズマ技術において、真空チャンバーの外で気化させた原料を供給することにより、プラズマ処理を行っている為、設備や操作が複雑である。また、危険性の高い材料を使用する場合は防爆設備等の周辺の設備が不可欠となる。プラズマ処理に使用する液体化合物を液体状態で真空チャンバー内に設置した状態で、安全にプラズマ処理を行うことを特徴とする技術である。

2. PE-MBF 法による新規 SAM 形成技術

2. 1 PE-MBF 法プロセス

近年、表面特性を保持できる表面改質技術として、基材表面にひも状の高分子を生やすポリマーブラシ技術が研究されている[10]。この技術は、リビングラジカル重合法[11]やリビングアニオン重合法[12]を用いることにより、表面分子をグラフト化する技術である。これらの重合法に於いて、溶媒と重合開始剤が必要とされる為、揮発性有機化合物 (VOC) 削減の方向には向き難い。

それに対し、PE-MBF 法は全く溶媒と重合開始剤や触媒を必要とせず、基材表面分子に SAM 分子を共有結合により導入することができる。PE-MBF 法のプロセスの概要について図 3～5 に示す[2,3]。

① 基材表面の活性化 (図 3)

水蒸気プラズマに於いて、水の解離反応により OH^- イオンや OH ラジカル等が生じ、基材表面に OH 基が導入されることにより活性化する。

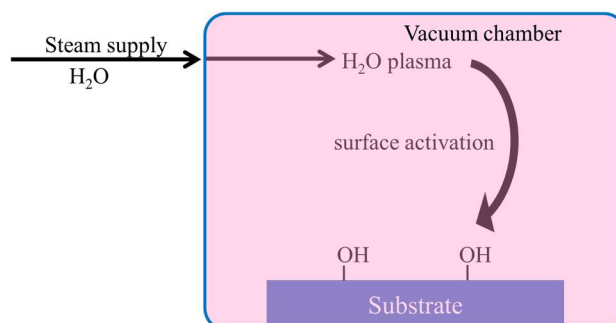


図3 基材表面の活性化メカニズムの概要[2,3]

② SAM の原料供給と形成 (図 4)

SAM 原料の蒸気を真空プラズマ装置のチャンバー内に供給し、水の解離反応による生成物と SAM 原料の化学反応により SAM 中間体を生成する。その後、SAM 中間体とサンプル表面の OH 基により水素結合を形成する。

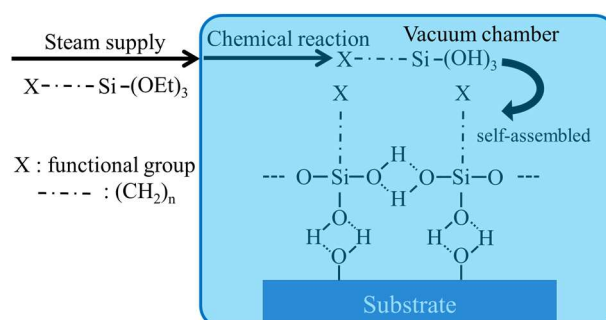


図4 SAM 形成メカニズムの概要[2,3]

③ SAM 形成の定着 (図 5)

脱水縮合反応により、SAM を定着する。

上記①～③を、大気開放を経ずに、連続 1 工程プロセスで行い、基材の表面活性と SAM 形成の化学反応をほぼ同時に進行させるところに特徴を

有する。上記のプロセスを行うことにより従来の SAM 形成法と比較して、プロセス時間を 1/4 以下に短縮することが可能である。表 1 に従来の SAM 形成法との比較を示す。

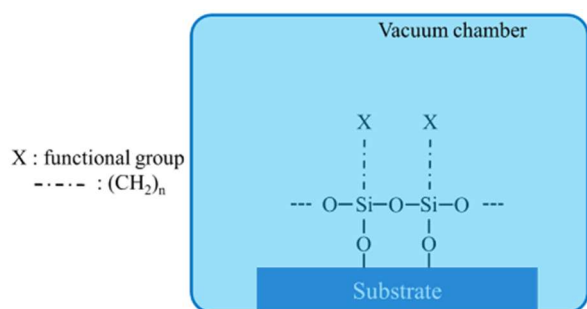


図 5 SAM 分子の定着メカニズムの概要[2,3]

表 1 PE-MBF 法と従来法との比較

SAM 形成 の手法	PE-MBF 法	従来 湿式法	研究等で の乾式法
試薬調整	○ 無し	× 必要	△ 必要な場合がある
リンス工 程	○ 無し	× 必要	○ 無し
乾燥工程	○ 無し	× 必要	○ 無し
プロセス 時間	0.5~1 時間	2~24 時間	12~48 時間

2. 2 プラズマ効果の長期保持

表面の機能性を長期保持するには、修飾する官能基の長さや大きさが影響する。近隣のポリマー分子の主鎖と立体障害となる分子鎖を、最表面ポリマー分子の主鎖に導入することにより、プラズマ処理の長期保持を実現することが可能となる。しかし、従来のプラズマ処理の機能性付与に於いては、水酸基やカルボキシル基、カルボニル基、アルデヒド基、アミノ基等の小さく、長さの短い官能基が表面に修飾される。これらの官能基が修飾された表面は活性化され、表面自由エネルギー

が高い状態となる。ところが、固体表面は常に表面自由エネルギーを下げようとしている。その為、保存雰囲気に応じて、これらの導入された官能基を内転することにより、表面自由エネルギーを下げようとする。

PE-MBF 法により、シランカップリング剤を使用して先端に水酸基を有する親水性 SAM を形成し、親水性表面改質を行うことができる。図 6 に水に対する接触角 (θ/2 法) の経時変化を示す。その表面改質特性は、大気中保管に於いて水に対する接触角 10° 以下を少なくとも 27 日間以上保持し、通常のプラズマ処理による親水化・活性化処理と比較して長期に渡る処理効果の保持を確認した。これにより、塗工工程までの滞留時間を長期化することが可能となる。

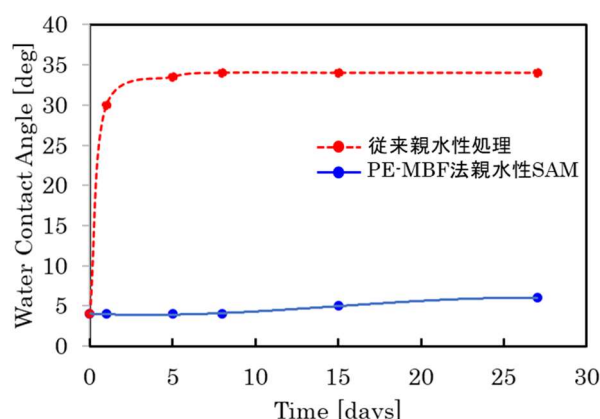


図 6 従来の親水化処理と親水化 SAM 処理との処理効果維持の相異

従来の撥水化プラズマ処理した樹脂表面に於いて、水雰囲気中の保存により経時変化が生じ、親水性の方向に変化する。その後、そのサンプルを大気雰囲気に移し、乾燥することにより、撥水性の表面特性が復活することが報告されている[13]。

それに対して、撥水性 SAM を形成した表面では、高温高湿の信頼性試験中に於いても水に対する接触角を 110° 以上を保持し、データ化できていないが 60 日間以上の撥水性表面特性が確認さ

は、高温高湿の信頼性試験中に於いても水に対する接触角を 110° 以上を保持し、データ化できていないが 60 日間以上の撥水性表面特性が確認されている。撥液性 SAM を形成した表面に対して、常温の大気中に保存した条件に於ける水の接触角 ($\theta/2$ 法) の経時変化を図 7 に示す。

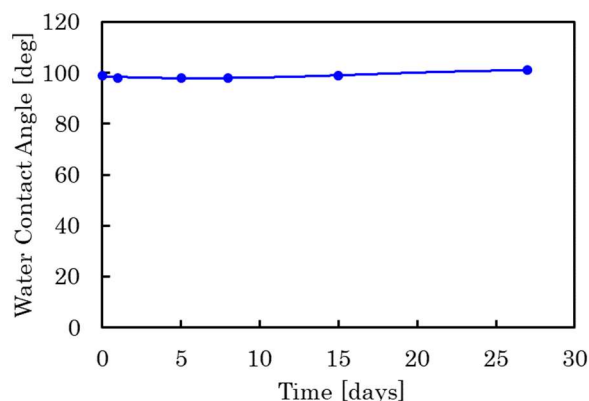


図 7 PE-MBF 法撥水化 SAM 処理の水に対する接触角の経時変化

2. 3 液滴制御・液切れ向上処理

撥液性には、静的撥液性と動的撥液性がある。前者は、固体表面の表面自由エネルギーと表面粗さによって決まる。後者は、液滴転落角と液滴転落挙動を指す[14]。我々は PE-MBF 法による SAM 形成技術の応用として、動的撥液性の液滴転落角を制御することによる「液滴制御・液切れ向上処理」に成功した。

従来の液切れ改善に於いて、処理対象物に撥液素材を用いること、表面に微細加工を施すことや、従来の表面コーティングを行うといった方法が用いられていた。しかし、素材が限定されること、ハイコストであることや、残留溶媒や不純物が発生することなど、課題点があった。

図 8 に未処理時の水に対する液垂れ現象を示す[1]。水が先端の外側に回り込みながら液滴が落下する。その時、回り込んだ液滴の全てが落下するのではなく、半分程度が残留し、液垂れや一部が先端部に残留する。それらが、次滴における不

純物の混入や濃度変化を招くばかりでなく、液戻りによる容器内の液体への影響も懸念される。それだけではなく、薬品や研究等では一滴の分量のバラツキが試験等の再現性に影響を与える。

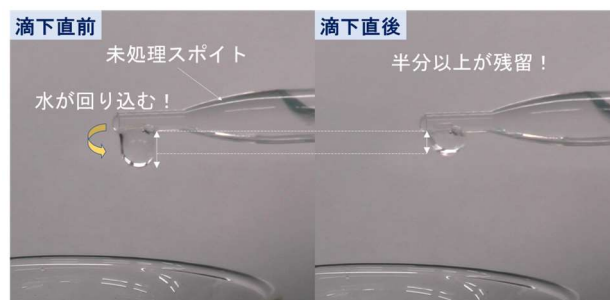


図 8 未処理時の水に対する液垂れ現象[1]

そこで、ここに PE-MBF 法 SAM による生理食塩水に対する動的撥水性を考慮した「液滴制御・液切れ向上処理」の検討について示す。パーフルオロ系シランカップリング剤と C_8 , C_{12} , C_{16} のアルキル鎖長の異なるシランカップリング剤により撥水性 SAM を形成した表面の静的な接触角 ($\theta/2$ 法) の結果を表 2 に示す[15,16]。

表 2 アルキル鎖長による静的接触角の相異 [15,16]

Reagent	Contact angle ($^\circ$)	
	Before treatment	After treatment
(1H,1H,2H,2H-Tridecafluorooctyl)trimethoxysilane	103	118
Trimethoxy-n-octylsilane C_8		105
Trimethoxy (hexadecyl)silane C_{16}		74
Dodecyl trimethoxysilane C_{12}		82

そして、SAM 形成前後の転落角の変化を表 3 に示す。形成した SAM 分子としては、パーフルオ

ロ系シランカップリング剤と C₈ であるオクチル基シランカップリング剤のサンプルである。

表 3 SAM 形成前後の転落角の変化[15,16]

Reagent	Slope angle(°)
Before processing	More than 90
(1H,1H,2H,2H-tridecafluoro-n-octyl)trimetoxysilan	More than 90
Trimetoxy-n-octylsilan	58

パーフルオロ系シランカップリング剤は静的接触角が 110° を超えており、最も撥水特性を示しているが、動的撥水性を示す滑落角は 90° 以上でも水滴が滑落することが無かった。これに対しオクチル鎖は 58° で転落した。CF 結合と H₂O 分子間には CH 結合よりも更に強い相互作用が働いており[17]、水滴は CF 結合上では流動性が失われる。反面、オクチル基は相互作用が弱い為、水滴の流動性は失われない。その結果、オクチル基シランカップリング剤の SAM をスポイトに形成すると、図 9 に示す様にスポイトノズルの液滴のキレが向上した。

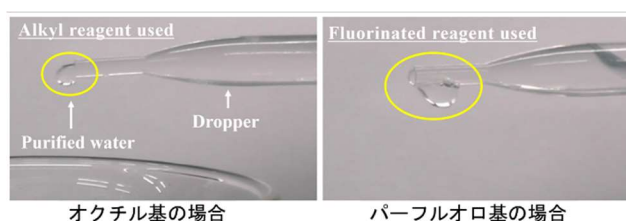


図 9 液滴のキレ向上の様子[15,16]

その時の未処理と処理済みのスポイトノズルに対して、液滴のバラツキと個体差間のバラツキについて図 10 に示す[1,16]。未処理品については、液滴の滴下重量も個体差間もバラついている。一方、処理品については、液滴の滴下重量も個体差

間も明らかにバラツキが減少していることが確認された。そして、処理対象の材質や形状を選ばず、使用する液体に合わせた処理が可能となる。

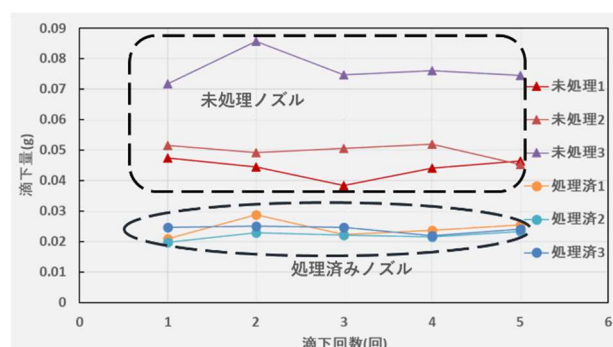


図 10 処理の有無による生理食塩水に対するスポイトノズルの液滴と個体差間バラツキ[1,16]

2. 4 反応性官能基の導入とボンディング

通常のパラズマ処理に於いて、一部の素材に対する密着性の向上を図れるが、PB-MBF 法による SAM 形成を採用することにより、密着性向上を可能とする素材の範囲が拡大される。従来から、塗工レジンの濡れ性は向上するが、乾燥後、塗工層が剥がれるとの声を多数頂いている。

SAM 分子の先端に結合性の官能基を有する化合物を用いることが可能なことから、接着剤やコーティング剤との重合反応を進行させることができ、従来のパラズマ処理では形成できない結合を形成することが可能となる。ここで、表 4 に PE-MBF 法による SAM 表面官能基と結合例を示す。基材表面と接着剤やコーティング剤との反応による共有結合形成でボンディングすることにより、密着性を向上することが可能となり、対象となる材料の種類の範囲が拡大される。

表 4 の結合例を利用して、接着剤やコーティング剤とのボンディングだけでなく、固体と固体のボンディングをすることが可能である。このボンディングの概要を図 11 に示す。

通常のパラズマ処理や VUV 照射による活性化

によるダイレクトボンディングは、基板表面に導入された OH 基同士の水素結合から脱水縮合反応により、酸素原子を介した 1 次元の共有結合が形成される。この結合は、室温に於いては共有結合により強力に結合されるが、高温高湿下に於いては、加水分解され易く、耐環境性に課題を有する。それに対し、SAM 分子は分子構造を選定することにより 3 次元構造の結合を形成することが可能であり、疎水性のアルキル鎖を導入することも容易である為、高温高湿下に於いても高信頼性を有する結合を実現することが可能である。図 12 に Si ウェハ上に形成した Cu スパッタ膜同士をダイレクトボンディングした写真を示す。横に滑らそうとしてもズレないことを確認した。約 3 カ月後にも接合が維持している事を確認している。

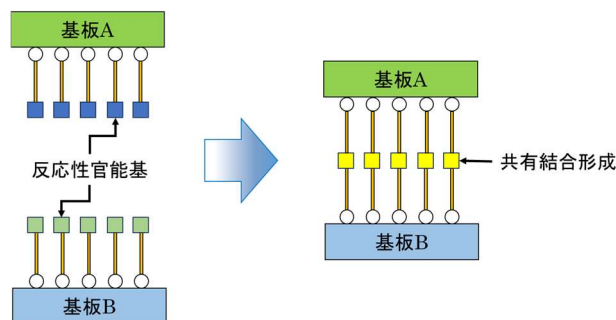


図 11 固体-固体ボンディングの概要

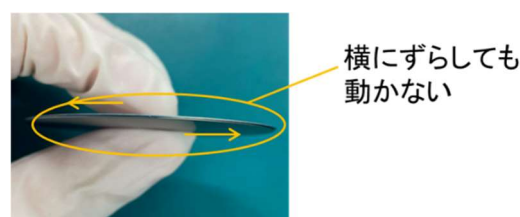


図 12 SAM による Cu 同士のボンディングの様子

表 4 PE-MBF 法による SAM 表面官能基と結合例

SAM分子先端官能基	他方反応官能基	結合
水酸基 -OH	水酸基 -OH	脱水縮合反応 $-O-$
	アミノ基 $-NH_2$	水素結合
	イソシアネート基 $-NCO$	ウレタン結合
	カルボキシ基 $-COOH$	水素結合
アミノ基 -NH ₂	エポキシ基	エポキシ開環反応
	アミノ基 $-NH_2$	水素結合
	イソシアネート基 $-NCO$	ウレイド結合 $-NHCONH-$
	カルボキシ基 $-COOH$	カルボン酸との塩 $-N^+H_3OOC-$
カルボキシ基 -COOH	エポキシ基	エポキシ開環反応
	イソシアネート基 $-NCO$	付加反応
メルカプト基 -SH	イソシアネート基 $-NCO$	チオウレタン化反応
	ビニル基	エン・チオール反応 $-S-CH_2-$
(メタ)アクリル基 $-O-C(=O)-C(R_1)=CH_2$	(メタ)アクリル基 $R-O-C(=O)-C(R_1)=CH_2$	共重合

2. 5 粉体への SAM 形成とポリマー中への分散性向上

従来のプラズマによる粉体処理について、主に親水化・活性化処理を行い、粉体表面に極性を持たせる処理である。最近、粉体をバインダーとなるポリマー内に様に分散させる要望が目立つ傾向にあり、特に、分散剤を使用せずに分散させるプラズマ処理が望まれている。従来法では分散剤が不純物となる為である。ところが、ポリマーには無極性の物、極性を有する物等があり、バインダーポリマーの種類に合わせて分散させる粉体表面の改質処理を行う必要がある。バインダーポリマーが無極性の場合には粉体表面を無極性表面に改質し、バインダーポリマーが極性を有する場合は粉体表面を極性表面に改質する必要がある。そこで、粉体の表面を親水化のみならず、疎水性表面に改質する必要性が生じる。図 13 に鉄系粉体を疎水性表面に改質した時の例を示す。処理前に沈降していた粉体が、疎水性処理をすることにより、水に浮く様になっている。この様に、混ぜる

バインダーポリマーに相溶性のある官能基を有する SAM 分子を粉体表面に導入することができる。そして、極性を有する粉体表面を無極性に、無極性の粉体表面に極性を持たせる処理を施すことが可能となる。図 14 にポリマーへの分散性向上のイメージを示す。この様に、従来のプラズマ処理と比較して格段に処理範囲が拡大している。



図 13 疎水性 SAM 形成前後の鉄系粉体の様子

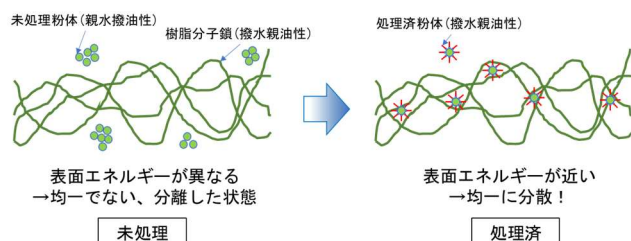


図 14 SAM による分散性向上のイメージ

3. DH 法による新規ガスフリープロセス技術

3. 1 DH-CVD (Direct Humidity Chemical Vapor Deposition : 直接気化式化学気相成長)

従来のプラズマ CVD は、通常、気体原料を供給するか、又は形成する薄膜原料が液体の場合、ガス化した反応性ガスをチャンバーに供給する必要がある。液体をガス化するには、温度を上げ

て蒸気を発生させる場合や、希ガス等のキャリアガスでバブリングすることによって蒸気をチャンバーに供給することになる。従って、液体のガス化には時間やエネルギーを掛けることになる。

近年、さまざまな機能性を有するドライプロセスによるコーティング膜の要望が高まっているが、有機化合物や無機化合物の薄膜だけではなく、有機無機ハイブリッド化合物薄膜の要望もあり、薄膜原料がガス状の物質である種類が少なく、制限されているため、揮発性のある液体原料を活用する必要がある。しかし、有機無機ハイブリッド化合物の原料には気化したときに危険な化合物が多い傾向にある。その為、従来の方法では試験することが難しい実験系も少なくない。そこで、低圧下でも揮発性の低い二価アルコール（ジオール）以上の液体のポリオールを利用する。膜の液体原料を液体のポリオールと混合することにより、低圧下でも膜の液体原料の揮発する速度を遅くすることが可能となる。このことを利用し、原料液含有の二価アルコール（ジオール）以上の液体のポリオール組成物から直接成膜する当社独自の CVD 技術を開発することに成功した[1,4,5]。

図 15 に、従来の CVD 装置の構成と DH-CVD の構成の概要を示す[1]。DH-CVD の特徴は、膜原料含有のポリオール組成物を液体の状態で真空チャンバー内に直接設置するところにある。

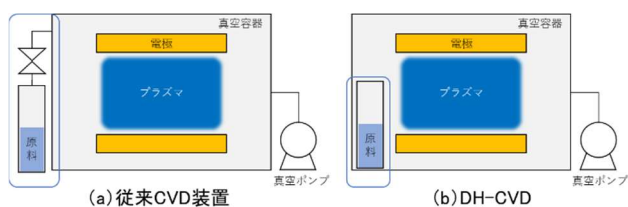


図 15 従来の装置の構成と DH-CVD の構成[1]

まず、Si 基板上に 1- プロパノールを原料とした DH-CVD による炭化水素膜を成膜した時の

様子を図 16 に示す[1]。処理後の基板は干渉色が確認され、FT-IR スペクトルにより薄膜が形成されていることを確認した[4,5]。

また、2 価以上のポリオールにグリセロールを使用し、Tetraethoxysilane (TEOS) を原料として成膜した。その時の FT-IR スペクトルを図 17 に示す。SiO₂ を主成分とする CVD 膜が形成されていることを確認している。

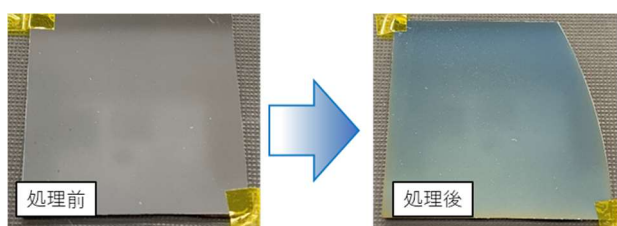


図 16 Si 基板上に 1- プロパノールの DH-CVD で成膜した時の様子[1]

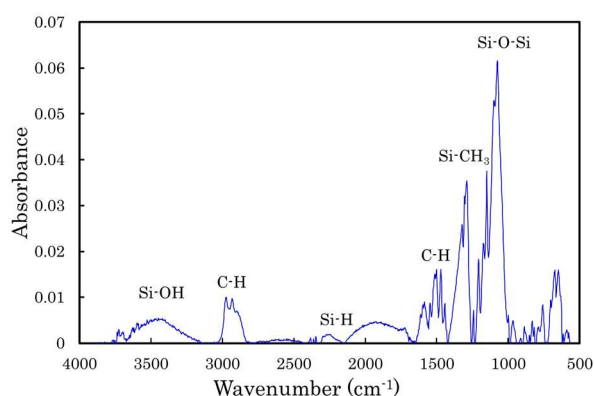


図 17 TEOS の DH-CVD 膜に対する FT-IR スペクトル

DH-CVD 技術は、金属アルコキシドを原料とする金属酸化物の成膜も可能である。また、液体を気化する工程も不要なため、今迄 CVD で使用するには危険な有機金属物質による新規金属酸化物 膜の成膜や、生産効率の向上も期待される。

3 . 2 DH-Reduction (Direct Humidity Reduction : 直接気化式還元)

金属は日常生活から工業分野に於ける広範囲な分野で用いられる重要な素材である。特に、導電性の高い金や銀、銅等の貴金属は、現代のエレクトロニクス部品において必須の素材である。しかし、銀や銅は大気中で自然酸化膜を形成するため、しばしばトラブルの原因となっている。これに対し、還元剤を用いた化学処理や、水素プラズマ還元処理などが行われてきた。これらの還元方法は金属表面が変形しやすいものや、工程に環境負荷の高い条件、作業に危険を伴うなど、簡易とは言えないのが課題である。そこで、前項の DH-CVD 技術を基に二価以上のポリオールを真空チャンバー内に直接供給し、プラズマによる還元反応が促進することを確認する試験に成功し、当社独自の DH-Reduction 技術を開発した[1,6,7]。従来のプラズマ還元装置と DH-Reduction 装置の構成を図 18 に示す[1,6,7]。従来の水素プラズマ処理とは異なり、水素フリーで大掛かりな安全設備が不要になる。

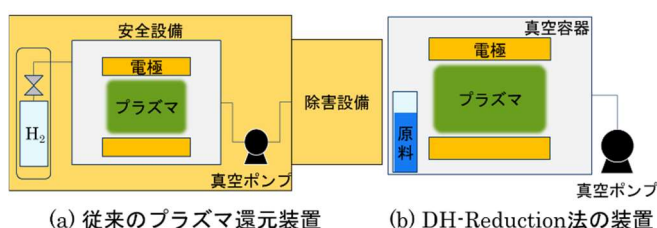


図 18 従来のプラズマ還元装置と DH-Reduction 装置の構成

図 19 に 2 価以上のポリオールとしてグリセロールを使用し、10 円玉の還元を DH-Reduction により実施した時の様子を示す。処理前は黒ずんでいた 10 円玉が処理により明確に金属光沢を取り戻したことを確認した[1,6,7]。

XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) の

wide scan による酸化された銅箔に対する DH-Reduction 処理前後の分析結果を図 20 に示す。処理前に比べ、処理後は 530eV 付近に存在する O1s が低くなったのに対し、550eV から 750eV 付近及び 930eV から 960eV 付近に存在する Cu のピークは高くなった。このことから、表面の酸化膜が除去されたことが示唆された[6,7]。



図 19 DH-Reduction による
10 円玉の処理前後の様子

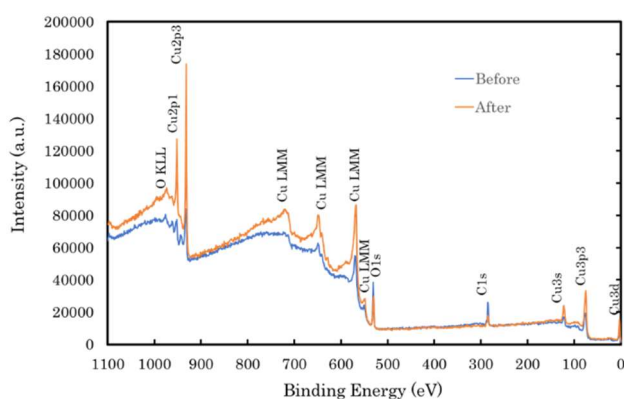


図 20 酸化銅箔の DH-Reduction 処理前後
での XPS 評価結果(wide scan)[6,7]

本技術は乾式処理であり、湿式と比較して廃液処理が不要になる。また、同じく乾式の水素などを用いた還元処理と比べて、安全設備や排ガス処理設備が不要となる。従って、従来手法と比較して、イニシャル・ランニングコストを大きく低減し、生産効率を大きく向上させることが期待される。

4. おわりに

本稿では、PE-MBF 法による新規 SAM 形成技術と真空チャンバー内にプロセス原料を設置する新規ガスフリー DH 法プロセス技術について紹介した。

近年、プラズマ技術を活用できる分野は大きく広がってきており、表面処理を必要としている分野が大きく広がっている。従来は親水性や撥水性等の定性的な制御の要望であったが、近年では水に対する接触角等の定量的な制御の要望が増えている。本来であれば、水に対する定量的な制御ではなく、表面に付与する機能が重要であるため、更に踏み込んだ議論が出来る事を望む。

しかしながら、今後、本プロセスが科学技術や産業の進展に貢献することを期待するとともに、我々は、更に機能性の高いプロセスを実現する技術開発を展開する。

参考文献

- [1] 登尾一幸, 山原基裕 ; 繊維学会誌, 第 79 巻第 4 号, (2023), 129-137.
- [2] 山原基裕, 富川弥奈, 登尾一幸, 田口貢士 ; 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-A205-4 (2023).
- [3] M. Yamahara, M. Tomikawa, K. Noborio and K. Taguchi ; ISPC25, 2-A-102 (2023).
- [4] 柏木大樹, 山原基裕, 登尾一幸, 田口貢士 ; 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 23a-B101-1, (2022.)
- [5] D. Kashiwagi ; DPS2022, P-43 (2022).
- [6] 植野伸哉, 山原基裕, 登尾一幸, 田口貢士 ; 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-A205-7 (2023).
- [7] S. Ueno, M. Yamahara, K. Noborio and K. Taguchi ; ISPC25, POS-7-217 (2023).

- [8] 馬 曉媛, 小川一文, 須崎嘉文;2017年度精密, 工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2017), 467-468.
- [9] H. Sugimura, N. Nakagiri ; J. Photopolym. Sci. Technol., 10, (1997), 661.
- [10] M. Kobayashi, Y. Terayama, H. Yamaguchi, M. Terada, D. Murakami, K. Ishihara and A. Takahara ; Langmuir, 28, (2012), 7212–7222.
- [11] J. Jiang, X. Wang, X. Lu and Y. Lu ; Applied Surface Science, 255 (5, Part 1), (2008), 1888.
- [12] J. Min, Y. Lin, J. Zheng and T. Tang ; Chemical Communications, 51 (27), (2015), 5921.
- [13] Y. Taru, K. Kobayashi, M. Takasago and K. Takaoka ; Kobunshi Ronbunshu, 50, 1, (1993), 1-9.
- [14] N. Yoshida and T. Watanabe ; J. Surf. Finish. Soc. Jpn., 60, (2009), 9-15
- [15] 富川弥奈, 山原基裕, 登尾一幸, 田口貢士 ; 第70回応用物理学会春季学術講演会, 17p-A205-5 (2023).
- [16] M. Tomikawa, M. Yamahara, K. Noborio and K. Taguchi ; ISPC25, POS-7-216 (2023).
- [17] P. M. Claesson and H. K. Christenson ; J. Phys. Chem. **92**, (1988), 1650.

プラズマ—高速液流システムによる短寿命活性種の挙動解析

東北大学 武田 一希
(東北大学 金子 俊郎)

はじめに

この度は第 54 回 (2023 年春季) 応用物理学会講演奨励賞を賜り、大変光栄に存じます。また、選考に関係されました審査員や運営の方々にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。本稿では受賞対象となりました「プラズマ—高速液流システムによる短寿命活性種の挙動解析」(武田一希, 佐々木渉太, 高島圭介, 金子俊郎) に関して, 概要と現在取り組んでいる内容をご紹介します。

研究背景

近年, 大気圧プラズマを液体接触させる技術が医療, 農業, 環境科学等で注目されています。多くの場合, プラズマから生成・輸送された寿命 1 ms 以下の短寿命活性種が主要な作用因子であるとされています。しかし, 厚さ μm スケールのプラズマ—液体界面は多種多様な活性種が急峻な密度勾配で分布するため, 特に短寿命活性種の挙動は殆ど研究されていません。そこで本研究では, 短寿命活性種の挙動と反応過程を解明するべく“プラズマ—高速液流システム”を構築しました。

本系は大気圧プラズマ中へ微細 ($D \approx 130 \mu\text{m}$) かつ高速 ($v > 10 \text{ m/s}$) な液流を導入するものとなっております。典型的なバルク液体と比較して, 均一かつ軸対称な界面をもつため, モデル化に適しているだけでなく, 比表面積の増大による顕著な活性種輸送が期待されます。上記過程で形成された“活性種移流”に対して目的活性種の化学プローブを 1 mm の空間分解能で距離制御注入します。10 m/s 以上の移流により, 1 mm の空間分解能は

約 $80 \mu\text{s}$ の時間分解能に変換可能となります。

実験方法

実験系概要を図 1 に示します。4 slm の He もしくは He /0.5% N_2 ガスを石英管内部へ導入し, 外部に巻かれた銅箔に高電圧を印加してプラズマを生成します。上部より内径 0.13 mm の SUS 管を挿入し, 精製水を流量 10 mL/min でプラズマ中へ射出します。放電部下流では, 裏面に接地電極を持つ PTFE プレートに直径 0.8 mm の孔を開けて設置し, 水流のみを通過させます。その下流では, OH ラジカル検出試薬としてテレフタル酸 (TA) を, NO_2^- 及び NO_3^- に至る短寿命活性窒素種 (NO_x^- 前駆体) の捕捉試薬として p-ヒドロキシフェニル酢酸 (p-HPA) を距離 d_g だけ移動させ射出します。TA においては, ヒドロキシテレフタル酸 (HTA) の蛍光強度より OH 濃度を定量します。p-HPA では, $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ 濃度を高速液体クロマトグラフィで計測し, p-HPA 有無による蓄積濃度の差分から NO_x^- 前駆体濃度を定量しました。

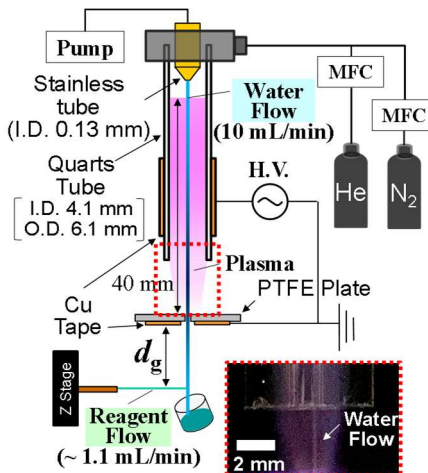


図 1 実験装置概略図 (写真: 放電部様相)

実験結果

○極短寿命活性種 OH

図 2 に TA 射出距離 (d_g) 依存で得た OH 時間減衰結果を示します. $d_g = 1$ mm において, OH の液流断面平均濃度 ($[\text{OH}]_{\text{csa}}$) は 88 nM 程度であり, 約 0.1 ms 程度の半減期で減衰しました.

界面の OH 局在度を評価するため, OH が一様分布と仮定した際の減衰特性の比較を行いました.

$$\frac{\partial[\cdot\text{OH}]}{\partial t} = -2k_{\text{OH}}[\cdot\text{OH}]^2$$

初期 OH 濃度 ($[\text{OH}]_0$) として, 実験で得られた $[\text{OH}]_{\text{csa}} = 88$ nM を用いた場合と, 表面局在を想定して $[\text{OH}]_0 = 1800$ nM を仮定した計算結果を実験減衰と比較して示します. $[\text{OH}]_0 = 88$ nM の場合, 実験で得た非常に速い濃度減衰を全く説明できない一方で, $[\text{OH}]_0 = 1800$ nM を与えると実験結果と良い一致を示しました. 本結果は, プラズマ接触直後の液流表面における, OH ラジカル局在度が約 20 倍程度であることを示唆しています.

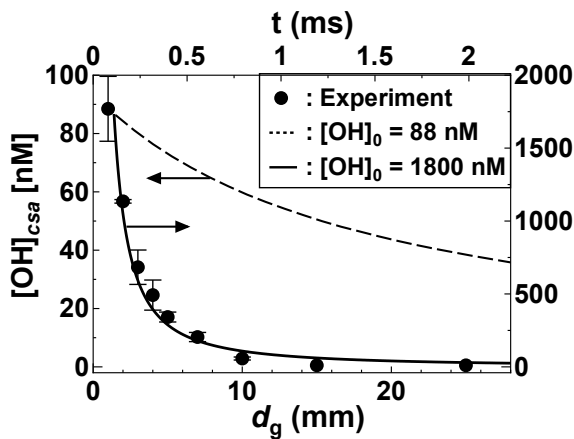


図 2 OH 減衰と一様分布モデル比較[1]

○短寿命活性窒素種

図 3(a) に液流回収後に測定された $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ 濃度の d_g 依存性を示します. d_g を短くする, すなわちプラズマ照射から p-HPA 混合までの時間を短くしていくと, NO_2^- の蓄積濃度のみが顕著に減少しました. これは, 最終的に

NO_2^- へと行き着く前駆体を捕捉していると考えられます. また, p-HPA 導入無しとの差分から見積もった NO_2^- 前駆体濃度減衰を OH と比較して図 3(b)に示します. この NO_2^- 前駆体の半減期は約 2 ~ 3 ms 程度であり, OH の半減期 (~ 0.1 ms) よりも明らかに長いうえ, 濃度も高いことがわかります. $d_g = 1$ mm における, NO_2^- 前駆体濃度は 700 nM にも達し, これは最終的な蓄積濃度である 1750 nM の約 40% も占めていることになります.

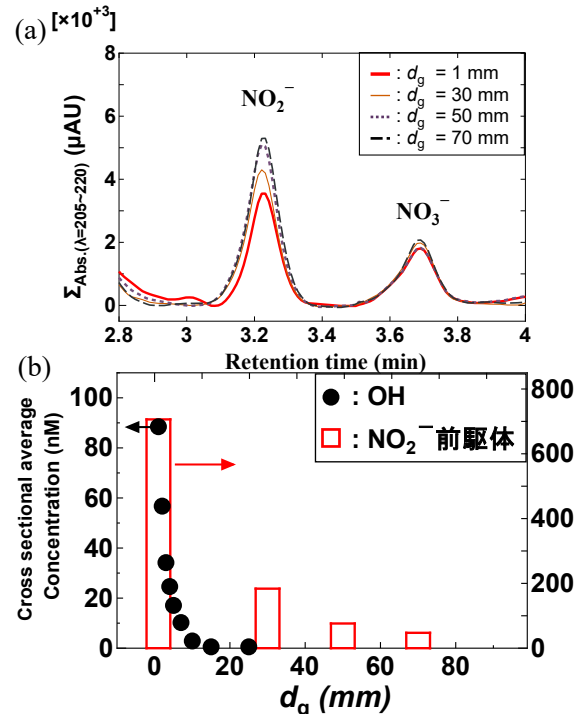


図 3 (a) $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ クロマトグラム d_g 依存性
(b) NO_2^- 前駆体濃度の d_g 依存性

考察

p-HPA が捕捉している NO_2^- 前駆体の推定も行いました. 図 4 に他の報告で提案されている液相 NO_2^- の生成経路図を示します[2, 3]. 主な経路は気相 NO_2^- の溶解, 過酸化亜硝酸 (ONOO^-) 経由, OH と一酸化窒素 (NO) の界面反応, そして三酸化二窒素 (N_2O_3), 四酸化二窒素 (N_2O_4) 経由の 5 つに分けられます. まず OH との比較より, プラズマ照射直後における OH 濃度

88 nM に対して NO_2^- 前駆体は約 700 nM と多量であることから OH と NO の界面反応経路以外であると考えました。また、 NO_3^- の蓄積濃度は有意に減少しなかったことから、 NO_2^- と同時に NO_3^- を生成する ONOO^- および N_2O_4 の経路も同様に除外できると考えました。以上より、p-HPA が捕捉する NO_2^- 前駆体の候補としては N_2O_3 が最有力候補であり、プラズマ生成した NO_2^- 全量のうち約 40% 程度は N_2O_3 を経由している可能性が示唆されました。

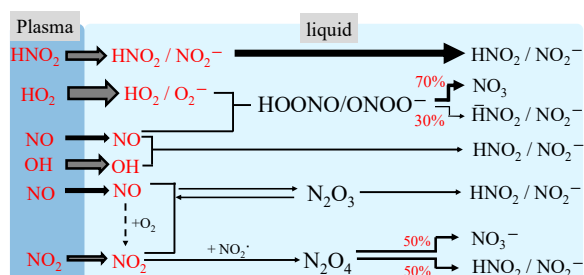


図 4 液相 NO_2^- の生成経路

海外での共同研究

現在我々は、界面における活性種挙動をより詳細に理解する為に、プラズマから液流表面に降り注ぐ活性種のフラックス評価も試みています。本節では OH レーザー誘起蛍光法 (LIF) 習得に向けて 2023 年 7 月末～10 月末までミネソタ大学の Peter Bruggeman 研究室に滞在したので、その所感を報告します。

渡航先ではプラズマ高速液流システムを新たに立ち上げ、OH-LIF によって水流近傍の気相 OH 密度を取得しました。短パルスレーザーの取り扱いには殆ど初めての経験でしたが、ポストドク研究員の Shubham さん協力のもと測定系の構築に成功しました (図 5 参照)。計測では 4 つの遷移 ($P_1(2)$, $Q_1(3)$, $Q_1(4)$, $Q_1(5)$) からの蛍光シグナルとレイリー散乱測定および OH 蛍光寿命による空気・水蒸気密度分布を取得しました。現在は OH 絶対密度への較正と、得られたガス温度・ガス組

成分分布による密度補正を計算しています。最終的に液流近傍の密度勾配から、OH 界面フラックスを評価予定ですので、結果がまとまり次第そちらも報告する予定です。

生活面では、5 年ぶりの海外中期滞在でしたので、英語のやり取りが最大の懸念点でした。しかし、Bruggeman 研はインド、中国、ドイツ出身の方も在籍する国際色豊かなグループであったため、私のことも非常に暖かく迎え入れて頂きました。また、Bruggeman 研も研究テーマが多彩でしたが、何か実験中に不明点が生じた際にはポストドク研究員の方を主体にチーム全体で協力し、時間効率よく実験データを取得してなるべく全員で帰宅するという研究スタイルが根付いていました。3 か月と海外の滞在期間としては短めではありましたが、生活や文化・研究スタイルの違いを直接肌で感じるものの出来る非常に有意義な時間となりました。

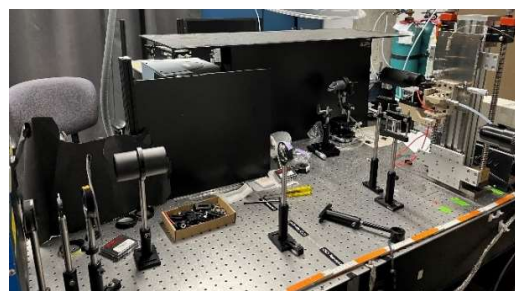


図 5 OH-LIF 測定系の様子

おわりに

研究を進めるにあたり多大なご指導、ご助言くださった金子俊郎教授、Peter Bruggeman 教授、佐々木渉太助教、高島圭介助教に御礼申し上げます。今後も研究に邁進していく所存でありますので、ご指導ご鞭撻の程宜しくお願い申し上げます。

参考文献

- [1] K. Takeda *et al.*, *Appl. Phys. Express* **14** (2021) 05600.
- [2] S. Goldstein *et al.*, *Chem. Rev.* **105** (2005) 2457.
- [3] C. C. W. Verlack *et al.*, *Chem. Phys.* **20** (2018) 6845

XXXVth International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG)

北海道大学 佐々木 浩一

2023 年 7 月 9-14 日にオランダ・アムステルダム郊外の Egmond aan Zee において開催された第 35 回電離気体現象国際会議 (XXXVth ICPIG) に参加する機会を得たので、その概要を報告する。本分科会に所属のベテラン研究者はよくご存じのように、電離気体現象国際会議は低温プラズマおよび気体放電の分野において最も長い歴史と伝統を持つ国際会議であり、2 年に 1 度の頻度で主として欧州において脈々と開催されてきた。第 35 回の会議は 2021 年に開催される予定であったが、新型コロナウイルスの世界的感染拡大の影響により 2023 年の開催に延期された。

今回の全論文数は 332 件であり、そのうちの 36 件が招待講演で、日本からの招待講演は 7 件であった。日本からの招待講演者には若手・中堅クラスの研究者が多数含まれ、頼もしく感じた。一般投稿論文については、国際科学委員会による採点（口頭発表希望論文について実施）を経て上位にランクされた 36 件が口頭発表として採択され、残りがポスターセッションで発表された。日本人の口頭発表者は 4 名で、うち 1 名は学生であった。ポスター発表を含む一般投稿論文の質は大変高く、電離気体現象国際会議は当分野におけるトップレベルの国際会議であると言える。

参加者総数は 303 名であり、そのうちの 20% が女性で、35% が学生であった。国別では、開催国のオランダが 52 名、日本 51 名、フランス 47 名の順になっていた。開催国のオランダとほぼ同数の参加者が日本から得られたことを喜ばしく感じるとともに、現地組織委員長の Sander Nijdam か

ら「何故こんなにたくさんの日本人研究者が参加してくれるの？」という率直な質問を受けたことを報告しておく。その一因は、2019 年に札幌において開催した第 34 回電離気体現象国際会議の余剰金を応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会において管理していただき、第 35 回会議への参加を希望する我が国の学生等への旅費補助として支出いただいたことにある。本旅費補助事業に関してご尽力いただいた各位にこの場を借りて感謝申し上げたい。

電離気体現象国際会議では、毎回、von Engel and Franklin prize の受賞記念講演が執り行われる。今回の受賞者は University of Toulouse の Jean-Pierre Boeuf であった。プラズマ中の複雑現象を信頼性の高い計算機シミュレーションによって解明してきた彼の受賞記念講演はまさに圧巻の内容であり、文句のつけようがない受賞であると感じた。

次回の第 36 回電離気体現象国際会議は、2025 年 7 月 20-25 日の日程で、フランス・マルセイユ近郊の Aix en Provence において開催される予定である（日程は tentative ですので確認をお願いします）。日本人にとっては旅行先としても魅力の高い開催地であり、次回も多くの日本人研究者の参加を期待したい。なお、本会議の国際科学委員会の日本代表委員は白谷正治氏が担当してこられたが（第 35 回会議では国際科学委員会委員長）、今後は筆者がその任を引き継ぐことになった。電離気体現象国際会議に関するご意見・ご要望などは筆者までお寄せください。

国際会議報告

The 76th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2023)

大阪大学 浜口智志

第76回気体エレクトロニクス会議(GEC 2023)が、米国ミシガン州アナーバー(Ann Arbor)のミシガン大学アナーバー校ミシガン・リーグ会議場で、2023年10月9日(月)から13日(金)にかけて、開催された。(写真1)

GECの恒例に従い、初日の月曜日は、会議の本格的開催前日として、基本的に招待講演者のみからなるワークショップが開催された。今年は、“Alternative Propellants for Electron Propulsion”, “US DOE-Funded Collaborative Low Temperature Plasma Research Facilities,” “Don Madison Memorial Workshop: Don. H. Madison’s Impact on the Fields,” 及び “Opportunities for Plasma Science and Engineering in Microelectronics Fabrication”の4件が開催された。筆者は、上記4番目のワークショップ「Opportunities...」に参加・講演した。同ワークショップでは、米国で2022年8月に成立した「CHIPS および科学法(CHIPS and Science Act)」を受けて、プラズマ科学がどのように半導体製造能力の強化に貢献できるかが、技術面、政策面から議論された。CHIPSプログラムの中には、各種半導体の米国内生産に対する支援ばかりでなく、「半導体の研究開発における米国のリーダーシップの強化」という大きな項目と関連予算があるが、ここでの「研究開発」の大半がデバイスや設計に関するものと広く認識されている。そうした中で、プラズマを必要不可欠とする半導体製造技術における研究開発の先進性・重要性を社会に広くアピールしていく必要性が語られた。

GECの基調講演は、隔年で、Wills Allis Prize

Talk と Foundation Talk と交互に行われるが、Wills Allis Prize 審査のない本年の基調講演は、Foundation Talk であり、水曜日に、ミシガン大学の Mark J. Kushner 教授が、“When Plasmas Meet Phase Boundaries” という題目の基調講演を行った。低圧プラズマから、液体に接触する大気圧プラズマまで、相界面の観点から、プラズマの物理化学を整理し直した、大変興味深い講演であった。

我が国からの招待講演として、佐賀大学の天津康德教授のマグネトロンスパッタに関する研究、東北大学の佐藤岳彦教授の液中ストリーマーの研究、名古屋大学の田中宏昌教授によるプラズマ活性水の研究、東京エレクトロン宮城(株)の戸村幕樹氏による高アスペクト比(HAR)エッチングに関する研究発表があった。

次回の第77回GECは、2024年10月7日から11日まで、米国 San Diego で開催される。



写真1：会場となったミシガン大学
Ann Arbor 校キャンパス

国内会議報告

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

名城大学 伊藤 昌文 室蘭工業大学 川口 悟

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を2023年9月4日(月)～6日(水)に、国立中央青少年交流の家(静岡県御殿場市)で開催しました。対面形式での開催は、コロナ禍前に行われた第13回(2019年)以来です。

本企画は、プラズマエレクトロニクス分野の初学者(学生・若手研究者・社会人技術者)を対象として、プラズマの理解を深めて頂くために、一流の講師陣を招いて実施する合宿的な講習会です。今回の受講者は42名(うち企業からの参加者は3名)でした。

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

初日夕刻には、ポスターセッションを設け、講師、幹事、ならびに参加者による評価得点により、最優秀ポスター賞1名と優秀ポスター賞3名が選出されました。また、参加者同士の親睦を深めるため、懇親会、野外レクリエーション(ウォークラリー)および野外炊事を行いました。

ポスター賞受賞者【敬称略】

最優秀賞：郡司崇秀(東京大学)

優秀賞：大竹将平(名城大学)

佐波陽平(滋賀県立大学)

松村尚紀(株式会社日立ハイテク)

講座内容【敬称略】

<専門講座>

「プラズマ診断・計測」

中川雄介(東京都立大学)

「プラズマ生成・制御」

田中学(九州大学)

「プラズマエッチング」

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)

「プラズマ成膜」

山田英明(産業技術総合研究所)

<英語講座>

「研究留学のための英語講座」

田中宏昌(名古屋大学)

<特別講座>

「プラズマプロセスの革新のために」

白谷正治(九州大学)

担当幹事【敬称略】

校長：伊藤昌文(名城大学)

幹事：川口悟(室蘭工業大学)

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)

大澤直樹(金沢工業大学)

吉木宏之(鶴岡工業高等専門学校)

清水鉄司(産業技術総合研究所)

川崎仁晴(佐世保工業高等専門学校)

富田健太郎(北海道大学)



写真1：集合写真

2023 年 第 84 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シンポジウム
T11 資源循環型社会実現に挑むプラズマ科学

産業技術総合研究所 辻享志, 岐阜大学 上坂裕之, 高知工科大学 八田章光

資源の循環利用により天然資源使用量や廃棄物量を極力削減する資源循環型社会の構築が重要な社会課題となっている。シンポジウムではこの課題解決への貢献が期待される分子変換技術とマテリアル（固体材料）の循環技術を取り上げ、これらの技術動向の紹介し、課題や展望を議論した。

前半のセッションは分子変換に焦点をあてており、まず渡辺隆行先生（九大）に「熱プラズマによる水素製造技術の動向」と題して、熱プラズマを用いたメタン分解により CO_2 ではなく固体炭素を副生させる水素製造技術をご紹介頂いた。本技術は米国の Monolith 社により実用化され、副生したカーボンブラックが Goodyear 社のタイヤへの採用が検討されている。使い勝手の良い電気が高価値のメタンから水素製造することは、エクセルギー的に不利であるが、高付加価値の炭素材料の生産により経済的価値は高まる。渡辺研究室では熱プラズマを用いたメタンの改質反応により、グラフェンライクな固体炭素が副生された。将来的には水素、炭素の原料に鶏糞などのゴミを用い、ゴミ処理、炭素製造、水素製造を行えるより優れた技術に発展することに期待を示された。続いて金賢夏先生（産総研）に「プラズマを用いた窒素循環技術の創出」と題し、Power-to-X を担う最新技術としてスパーク放電による窒素固定化 (NO_x 生成) の紹介を頂いた。低い換算電界による N_2 分子の振動励起の促進と高いガス温度による逆反応の抑制がこの反応の高い効率に寄与する。スパー

ク放電発生の高周波数化による更なる振動励起の促進などによりエネルギー効率が 1.2 MJ/mol-N まで下がってきており、ハーバーボッシュ法を再エネで行ったときのエネルギーコスト (1 MJ/mol-N) まで下げられれば、企業との共同研究の段階まで近づいている状況である。一般講演を挟んだ後、春山哲也先生（九工大）に「元素循環を担うプラズマ相/液相反応」と題したご講演を頂いた。大気と水とを構成する N、O、C、H を化合し、合成した化合物を使用した後は、大気、水に戻る元素循環のコンセプトを、先生が開発された 2 つのプラズマ相/液相界面反応 (P/L 反応) の実例を用いて提唱された。一例として、窒素と水の P/L 反応においては、原子状窒素による相界面で水分子から水素を引き抜きにより高い選択性でのアンモニア合成が実現した。合成したアンモニアは水中に溶存蓄積させ、気相中には一酸化窒素と水素を生成させることに成功している。続いて高島圭介先生（東北大）に「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」と題して、SDGs にも適合する持続可能な食糧生産システムの構築に向けたプラズマ応用についてご紹介頂いた。高島先生のグループでは、空気と水を原料に、大気圧プラズマで病害防除や肥料付与を実現するシステムの構築を進められている。一例として世界で初めてとなる空気由来の N_2O_5 選択合成装置を作り、 N_2O_5 ガスの吹き付けにより植物の免疫を活性化できることや、施肥効果として窒素を除いた土壌

に N_2O_5 を吹き付けると土壤に生える植物の窒素欠乏病状が軽減されたことが紹介された。

後半のセッションはマテリアル（固体材料）の利用技術に焦点を当てた。まず**所千晴先生（早大・東大）**に「**マテリアル資源循環の実現に向けた分離技術**」と題したご講演を頂いた。マテリアル循環は、回収、輸送、分離に多くのエネルギーが必要であり思うように進んでいない。マテリアルを原子、イオンまで分解するのではなく、機能単位ごとに選択性高く分離する技術が求められる。その方法として新規電気パルス法をご紹介いただいた。剥離面に直接放電し、熱や剥離力の発生を制御する精緻な剥離方法である。マイクロ秒程度のパルスなので必要なエネルギーも少ない。事例として LiB、太陽光パネル、CFRP への応用を紹介された。続いて、**守富寛先生（守富環境工学総合研究所・岐阜大）**に「**繊維強化プラスチックの再利用技術**」と題したご講演を頂いた。需要が右肩上がりで見込んでいる CFRP においては、大量に発生する廃材の再利用が課題である。CFRP 作製時にその 1/3 が廃材となるだけでなく、今後は航空機などの退役廃材が増加する。守富先生は企業と共同で、CFRP から炭素繊維を低エネルギーで取りだせる装置を開発した。CFRP の樹脂の熱分解ガスを燃料に使用する仕組みであり、完成させた年間処理能力 2000 t の世界最大級の再利用設備は、エネルギーコストが 8.5 MJ/kg-CF と他の方法と比較しても 1 桁程度低い。また再利用品の用途開発についても様々な例を紹介された。最後に**南英治先生（京大）**に「**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応用**」と題して、大気中の CO_2 の 10%もの量を 1 年で固定している木質バイオマスの有効利用に関するご講演を頂いた。木質バイオマスの合成ガス (H_2+CO) 化においてはタール・コークが発生して配管を閉塞する問題がある。南先生は、木質バイオマスの熱分

解における反応機構に基づき、ガス反応の促進とタール・コーク発生を抑制させる水素添加プラズマの利用を提案された。実証実験の一つとして、木質バイオマスの成分の一つであるリグニンの基本芳香族核をモデル分子として使用し、プラズマ処理すると、ガス化が促進され水素添加によって固形物生成が抑制した。加熱によるガス化は 600°C 以上の高温が必要だが、プラズマでは高々 $100\text{--}200^\circ\text{C}$ で反応が進行した。

口頭セッションに引き続き、**上坂裕之先生（岐阜大学）の司会により「総合討論」**が開催された。窒素固定における触媒技術に対するプラズマの優位性に関する議論や太陽光パネルから出るシリコン廃材の利用方法に関する議論などが行われた。

本シンポジウムを通じてプラズマによる分子変換が循環社会に貢献できる技術として非常に発展していることが共有された。また、エネルギー、コストを極力かけない精緻なマテリアル分離技術の必要性や、再利用材に適した用途開発など課題が共有された。これからは再利用を想定したモノづくりが大切であり、モノづくり側と再利用処理側の相互理解が重要になる。それに加え、応用物理をはじめ科学技術に関わる研究者、技術者が各人の持つ技術、材料が資源循環に貢献する要素にならないかを真剣に考える。このような動きが活発化すれば、資源循環型社会をより早期に構築していけるのではないかと期待される。そのきっかけとして本シンポジウムが少しでも貢献できれば幸甚である。

謝辞 ご多忙の中、ご講演を頂いた講師の先生方、会場ならびにオンラインで聴講頂いた参加者に感謝申し上げます。また、準備の段階からご助言いただいた伊藤昌文先生、石川健治先生をはじめ、プラズマエレクトロニクス分科会幹事の先生方に感謝申し上げます。

2023 年 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会
分科内招待講演
東京大学 大学院新領域創成科学研究科 寺嶋 和夫
「DX 時代のフロンティアプラズマ」

九州大学 鎌滝 晋礼

第 84 回応用物理学会秋季学術講演会（2023 年 9 月 19～23 日、熊本城ホール他、熊本県）の 2 日目の午前中に 1 件目の分科内招待講演が開催されました。今回は、東京大学大学院新領域創成科学研究科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、ご講演をいただきました。

ご講演では、大きく 3 つの内容①フロンティアプラズマ-大切な 3 つの切り口-、②DX 時代の事象の捉え方-点をつなぎ、次元を増やす-、③DX 時代のフロンティアプラズマ研究、についてお話いただきました。まず、寺嶋先生の研究室が取り組まれてきたこれまでにないプラズマの温度領域/圧力領域の開拓（フロンティアプラズマ）について説明がなされた [1-3]。これは“プラズマの概念”の拡張を意味しており、新しいプラズマの学理につながったということでありました。プラズマのガス温度が室温以下から極低温までのプラズマ（Cryoplasma：クライオプラズマ）の特性変化と自己組織化など新規プラズマ現象を明らかにし、プラズマと氷の相互作用の研究や深宇宙空間の氷惑星における特異的な赤色発色物質の生成に関する研究など幅広い科学分野での成果を説明された。

次に、高温・高圧にある気体と液体の中間的な状態である超臨界流体(Supercritical Fluid :SCF)のプラズマ研究への拡張について説明された。密

度揺らぎをもつ超臨界流体プラズマの前駆現象としての絶縁破壊の局所的低下、超臨界流体プラズマを用いた高次ダイヤモンド合成や Si ナノ粒子合成など興味深い特異性があることが説明された。また、実は 100 年以上前からある高圧ランプは、超臨界流体プラズマであり、このプラズマは、第 4 の物質のイオン化状態といえるのではないかと、ということであった。

寺嶋先生は、理工学研究の 3 つの切り口として、①Design of Frontier Plasma (フロンティアプラズマの生成)、②Design for Frontier Plasma (フロンティアプラズマの診断)、③Design with Frontier Plasma (フロンティアプラズマを用いた社会課題の解決)、を示された。

2 番目の内容として DX 時代の事象の捉え方-点をつなぎ、次元(層数)を増やす- について説明された。AI の歴史と機械学習の説明から行われ、現在は、第三次 AI ブームとして、プラズマ研究でも多くの取り組みがなされているとのことであった。その中で、ディープラーニングとは、数理的に、超次元空間における偏微分方程式の誤差最小化アルゴリズム【最適の(全体 or 局所)近似解の計算】でしかないと説明があった。高次元化による問題解決（特異点の解消）として「代数多様体および解析多様体の特異点の解消」の内容で 1970 年にフィールズ賞を受賞された広中平祐先生（ハーバード大学名誉教授）について説明され、

全ての事象は、高次元に次元を上げて、偏微分方程式を解けば、多くのプラズマの問題も解決につながるだろうとメッセージをいただいた。

最後に、DX時代のフロンティアプラズマ研究について説明された。ここでは、真のフロンティア（先駆者）とは、ということで、TEDのムーブメントの起こし方の動画を参考に説明され、現在のネットワーク社会におけるフロンティア研究がさらに進展するためには、フロンティア研究を始めた研究者に対してのフォロワー（他の研究者や分科会など）がいかに大事であるかということを示された。

さらに、Apple創始者の一人であるスティーブ・ジョブズのスタンフォード大学の卒業式のスピーチの中の、「将来を見据えて、点と点をつなぎあわせることができないが、後からつなげることはできる。だから、今やっていることがどこか実を結ぶと信じるしかない。」という言葉が引用され、フロンティアプラズマでは、未開領域のため（まだ）点が少ない。だからこそ、だれも知らない点を作ること、苦勞が伴うが、価値がある。そして今意識していない事象も、後につながる、ということの重要性を示され、「超次元空間で、点をつなげ（Connecting the Dots in Hyper-dimensional space）」というメッセージを説明されました。

「研究の中で苦勞されたことは？」という質問の中で、寺嶋先生は、実験でうまくいかないことは多くあったが、学生が頑張ってくれた、と言われた。そして、その学生が、明日どのような面白い結果がでるだろうかと思いつきながら、研究室の往復の通学時間を過ごしていたということ、また、大学院生が学部生に対して、自身の研究室について、「ここでは今まで誰かがやった研究はしません。誰もしていない研究をします」と自信をもって説明している姿を見て、研究室での教育研究でやってきたことが学生らに伝わっていたことを

実感したと話されたことが印象的でありました。また、講演全体を通じて、寺嶋先生のいうプラズマの定義の拡張とは、まさに寺嶋グループの研究への挑戦の歴史であったと感じました。



図1 講演の様子

最後になりましたが、大変興味深く、また有意義なご講演を頂きました寺嶋先生にお礼を申し上げます。また、開催にあたり、準備を担当いただいた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示します。そして、多くの聴講者のご参集・活発な議論に感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] S. Stauss, H. Muneoka, K. Terashima, “Review of plasmas in extraordinary media: plasmas in cryogenic conditions and plasmas in supercritical fluids”, Plasma Source Science and Technology, **27** (2018) 023003.
- [2] K. Terashima and S. Baalrud, “Section2 Extreme plasma regimes” in “The 2022 Plasma Roadmap; low temperature plasma science and technology”, Journal of Physics D: Applied Physics, **50** (2017) 323001.
- [3] 榊原 教貴, 伊藤 剛仁, 寺嶋 和夫, “マルチフェーズプラズマ反応場-革新的な材料プロセス創成に向けて” J. Plasma Fusion Res., **94** (2018) 441-448.

国内会議報告

2023 年第 84 回応用物理学会秋季学術講演会 PE 分科内招待講演 (English セッション) 報告

名古屋大学・低温プラズマ科学研究センター 田中宏昌

第 84 回応用物理学会秋季学術講演会の大会 3 日目となる 2023 年 9 月 21 日 (木) に、English セッションが開催された。

海外招待講演が 2 件と一般講演が 3 件からなり、熊本城ホール内の会場での参加者は 50 名弱であった。コロナ禍に発展したウェブと対面の両方で参加できるハイブリッドの形式で行われ、海外招待講演者の先生方はウェブでご講演いただいた。

1 件目の海外招待講演は、タイチェンマイ大学の Pipath Poramapijitwat 先生と Dheerawan Boonyawan 先生による “Air Plasma-activated Bio-medical Media for Cancer Therapy: Effective dose to LRI” というタイトルのご講演で、Pipath 先生が、乳酸リンゲル液に非熱空気プラズマジェットを照射した溶液 (PA-LRI) による肺がん細胞 (A549、H1299) への正常細胞 (WI-38) に対する選択的殺傷効果について報告された。プラズマ活性乳酸リンゲル液 (Plasma-activated Ringer's lactate solution) によるがん細胞の選択的殺傷効果については名古屋大学から 2016 年に公表[1]して以来、イタリアのグループ [2]など世界の各地で同様な効果が報告されてきたが、本研究では、更に、乳酸リンゲル液にカンナビジオールナノエマルジョン (CBD-NE) を混入したものにプラズマ照射した PA-LRI with CBD-NE による選択的殺傷効果を調べられていた。近年、NMR や LC-MS/MS を用いた PAL の成分解析が活発に進められており、低温プラズマと有機物質との相互

作用により産生されるプラズマ活性有機物の生理活性が明らかになっており、これらの研究により、様々なプラズマ活性溶液の開発が進められ、新規薬剤が創出されることが期待される。

2 件目の海外招待講演は、フランストゥールーズ大学の Mohammed Yousfi 先生による “Spectroscopy diagnostics and modelling of electron kinetics in non-equilibrium plasmas at atmospheric pressure” というタイトルのご講演で、非平衡大気圧プラズマの応用のために、電子密度と電子温度の計測が重要であることを述べられた後、窒素分子の主要な発光スペクトルである SPS (Second positive system) と FNS (First negative system) を利用した電子密度計測法や水素のバルマー系列である $H\alpha$ や $H\beta$ を用いた電子密度と電子温度の計測方法についてご紹介いただいた。

参考文献

- [1] H. Tanaka, K. Nakamura, M. Mizuno, K. Ishikawa, K. Takeda, H. Kajiyama, F. Utsumi, F. Kikkawa, M. Hori, *Sci Rep*, **6** (2016) 36282.
- [2] A. Bisag, C. Bucci, S. Coluccelli, G. Girolimetti, R. Laurita, P. De Iaco, A.M. Perrone, M. Gherardi, L. Marchio, A.M. Porcelli, V. Colombo, G. Gasparre, *Cancers (Basel)*, **12** (2020) 476.

第 41 回 プラズマ新領域研究会 『電子ビームとプラズマプロセスの新しい展開へ向けて』

高知工科大学 八田 章光

通算第 41 回、2023 年度の最初のプラズマ新領域研究会を 10 月 20 日（金）13:25～17:40、高知市にある高知工科大学永国寺キャンパスの教室で開催した。中国・四国支部、および高知工科学が共催した。会場参加に加えオンラインでの同時配信を行った。会場参加は講演者 5 名と聴講者 10 名（分科会員 6、その他 1、学生 3）、オンラインは 4 名（分科会員）と有明高専の学生も聴講した。

表題の通り、放電プラズマと電子ビームを関連付けて、プラズマプロセスの新しい展開を模索することを研究会の目的とした。一般に放電プラズマは放電維持機構によって電子エネルギーが支配されがちであり、反応プロセスに求められる電子温度を制御することは容易ではない。放電機構と独立に電子エネルギーを制御する試みとして、電子ビーム励起プラズマや光電子励起放電プラズマの先駆的な研究成果と、電子ビーム照射技術の最新動向を学び、今後の展開を議論した。

上坂副幹事長の開会挨拶に続いて、有明高専の鷹林将先生から「光を用いたプラズマによる新しい電気－化学反応系への挑戦」と題して、光電子を用いたタウンゼンド放電によるプラズマプロセスの精密制御、特に、ダイヤモンドライクカーボンの物性制御の成果について講演があった。鷹林先生は東北大学で高桑雄二先生（現在は名誉教授）の発案による光電子励起放電の応用に取り組み、現在も放電メカニズムの基礎からプロセス応用まで広く研究を展開している。電子ビームそのものではないが、電圧、電場を任意に制御できる条件下で光電子を加速するタウンゼンドライクな放電

は、電子温度と電子密度を独立制御できる可能性から、さらなる展開が期待される。電子密度と電子温度の独立制御の重要性について、同じ電力でも負荷のインピーダンスによって電圧と電流の組み合わせはさまざまであることを引き合いに、電圧と電流を独立制御することの意義の説明は高専の学生にもわかりやすい内容であった（先生の講演を有明高専の学生がオンライン聴講）。

次に豊田工大名誉教授の原民夫先生に「EBEP の開発と応用展開」と題する招待講演をお願いした。当初プログラムでは開会挨拶の直後の予定であったが、交通機関のトラブルで到着が遅れたため、プログラムを入れ替えた。EBEP（電子ビーム励起プラズマ）は、電子源としてのアルゴン放電プラズマから電子を引き出し（ $\sim 10\text{A}$ ）加速して（ $\sim 100\text{V}$ ）、プロセスガス（窒素など）を励起する方法で、プラズマプロセスの電子温度制御として先駆的な業績と位置付けられる。アトム窒化処理と呼ぶ金属材料の表面窒化では化合物層が生成されず、機械特性が大きく改善するなどの特長が報告された。原先生は成果の産業応用を目指し、ベンチャー企業を設立して現在も意欲的に研究開発に従事しておられる。

プラズマプロセスと関連しつつも、対極的な位置づけとして大気中電子ビーム照射について、NHV コーポレーションの奥村康之氏より「電子線照射装置のしくみと工業利用について」と題する講演を行った。真空中で加速した電子ビームをチタン薄膜の真空窓材を貫通させて $150\text{ keV}\sim 5\text{ MeV}$ の電子ビームとして大気中に取り出し、ロー

ルフィルムなどの材料に照射する装置の構造と、高分子材料の改質などの応用について紹介された。照射に伴う X 線の対策に加えて、大気中ではオゾンが生成することへの対策を行っている。電子ビーム照射プロセスはフィルム材料などを貫通させて主にバルクの処理を行うものである。仮に雰囲気ガスを制御してビームエネルギーを低下させると、プラズマプロセスのような表面処理も可能ではないかと想像されたが、最低のビームエネルギーは 80 keV 程度で、これ未満では薄膜を電子がほとんど透過できず取り出しが困難とのことであった。

九州大学のスクマワイユ フィットリアーニ先生は、今年 5 月まで高知工科大学で筆者らとともに研究してきた。高知工科大でのこれまでの成果を「裏面励起光電子放出放電プラズマの生成と応用」と題して講演した。光電子放出の電子を種にしたタウンゼンドライクな放電は鷹林先生らの研究成果から着想したものであり、大気圧放電への応用を意図して、ナノ膜厚の金薄膜フォトカソードを裏面から励起する方法に特徴がある。大気圧の 1mm ギャップで、アルゴン、ヘリウム、窒素、空気による安定な直流放電が確認されている。電極電圧を増加すると電流は基本的に増加するが、純窒素ガスの放電の場合に限って、一部で電圧増加とともに電流が低下する現象が見いだされた。しかも、電流が低下しても窒素の発光強度は増加するという面白い現象が紹介された。メカニズムを考えるうえで、電子衝突による励起過程について議論が盛り上がった。

タウンゼンドライク放電での電子衝突励起過程に興味が高まったところで、最後に、室蘭工業大学の川口悟先生から「窒素および酸素の電子衝突断面積と電子スオームのシミュレーション」の講演となった。タウンゼンド放電は電子スオーム実

験とほとんど同じで、電子衝突断面積のデータは、光電子励起のタウンゼンド放電を理解する上で重要である。川口先生は従来の実験データと突き合わせながらシミュレーションによる断面積データの算出を系統的に行って発表している。得られた断面積データを用いて、光電子放出励起のタウンゼンドライク放電の電圧電流特性をかなり精度よく再現することができる。光電子励起のタウンゼンドライクな放電は、放電シミュレーションと実験との新しい接点となることが期待される。

それぞれの講演で十分な質疑を行ったため予定終了時間を過ぎ、総合討論の時間が取れなかった。代わりに研究会終了後、講演者 5 名と現地参加者 7 名で情報交流会を開催し、約 2 時間にわたり研究成果の情報共有や今後の研究展開について深い議論することができた。

今回の研究会から遡ること 4 年、ちょうどコロナ直前の 2019 年 11 月、日本学術振興会の第 153 委員会が主催した第 14 回プラズマ橋掛け研究会が、今回と同じ高知工科大学永国寺キャンパスのしかも同じ教室で開催された。今回と同じく鷹林先生から光電子励起放電の話題提供があり、筆者は電子温度制御の可能性について、非常に強いインスピレーションを受けた。これをきっかけに筆者らは、大気圧放電への応用や薄膜フォトカソードの裏面励起等の着想に至り、新しい研究テーマに発展させることができた。今回は改めて、電子エネルギー制御の観点からプラズマ新領域研究会を企画したところ、研究会、情報交流会ともに活発な議論が続き、参加者の今後の研究展開に有意義な情報を有することができた。今回の研究会を機に新しいプラズマプロセス研究が展開することを期待したい。

国内会議報告

2023 年度プラズマエレクトロニクス講習会開催報告

産業技術総合研究所 深沢 正永

第 34 回プラズマエレクトロニクス講習会が 2023 年 11 月 17 日に、大阪「JEC 日本研修センター心斎橋」と、オンライン (Zoom ウェビナー) のハイブリッド会議という形で開催されました。副題は、昨年に引き続きプラズマプロセスの基礎と先端応用技術としました。過去 3 年間は、ウェビナー開催でしたが、今回、恒例となっていた懇親会も久しぶりに開催しました。オンライン参加者は残念ながら参加できませんでしたが、懇親会でも、会議中に質問できなかった内容を議論する等、有意義な会になったと感じます。今後も講習会の内容を毎年アップデートできるように、幹事で議論していきたいと考えています。

今回の講義内容は以下の 5 件です。講師の先生方には丁寧な資料作りと講義を提供して下さい、幹事一同、心より感謝いたします。

『低温プラズマ生成・制御の基礎』

東京都立大学 朽久保 文嘉 先生

『高周波プラズマの生成制御とプロセス～減圧から大気圧まで～』

名古屋大学 鈴木 陽香 先生

『分光学的手法によるプラズマの電子状態計測－EUV 露光光源用プラズマを題材に－』

北海道大学 富田 健太郎 先生

『ドライエッチングと原子層エッチングの基礎と応用』

名古屋大学 堤 隆嘉 先生

『機械学習のプラズマプロセス応用』

日立製作所 大森 健史 先生

過去には、6 件の講義があった時代もありましたが、昨年より 5 件に絞り、各テーマでじっくり議論する方針としました。現状では 5 件が講習会に最適な件数と感じます。

次にアンケート結果を含めて講習会の詳細状況をお知らせします。講師の先生 5 名と、参加者 90 名の計 95 名の参加者があり (現地 38 名 / オンライン 57 名)、非常に盛況であったと思います。その内訳ですが、今回は約 14% が学生で、企業からはデバイスメーカーと装置 / 材料メーカーが約 72%、大学 (学生以外) や国研が約 14% を占めました。各企業の若手の学習の場として活用されているケースが多いようですが、それ以外の方にも有益な講習会となるよう、講義内容については引き続き議論していきます。

満足度を 5 点満点で評価すると開催時期に関しては 4.46、参加の有意義度は 4.71、分かりやすさは 4.25、基礎と応用の分量は 4.27 との評価を得ました。昨年より全ての項目で点数が上回りましたが、特に、参加の有意義度に関する点数が極めて高かったのは、講師の先生方のご講演内容が素晴らしかった為と考えております。

今後の開催形態に関しては 約 75% の方がハイブリッドでの開催を希望されていました。特に、企業の参加者にとっては、オンライン参加の選択肢がある方が好ましいという結果でしたので、今後もハイブリッド開催を検討していく必要があると考えます。一方で、今回、オンラインの音声トラブルが散見されたので、開催方式については、来年度の新しい幹事の皆様と継続的に議論してい

く予定です。

講義内容については平均的にどの講義も高評価でしたが、その中でも、『ドライエッチングと原子層エッチングの基礎と応用』の報告は好評でした。ドライエッチングを業務で行っている参加者が多かった様で、「実際の業務で役立つ」というコメントを頂きました。

アンケートのコメントを総括すると、全てのご講演に対し、「有意義であった」との回答があった事からも、原理原則に基づく理解や実践的な技術を提供する専門講習会としての役割を十分果たせたと感じています。

今後に取り扱って欲しいテーマもいくつか挙げられましたが、成膜関連やプラズマのプロープ計測に関する報告を求める声がありました。また、今回機械学習をテーマとして取り上げましたが、継続的に DX 関連のテーマを希望するとの意見もあり、これらは今後のテーマ選定に役立てたいと考えています。

プラエレ分科会活動費獲得において専門講習会としての重要な任務である会計に関しましては昨年と同等以上の利益を上げることが出来ました。特に広告については、昨年より 4 件増やす事ができました。今回のノウハウを生かし、今後も、継続的に呼びかけを行っていきたいと考えております。

最後に開催準備に多大なる貢献をしてくださった分科会幹事の会田倫崇氏（東京エレクトロンテクノロジーソリューションズ）、天野智貴氏（パナソニックホールディングス）、川島淳志氏（ソニーセミコンダクタソリューションズ）、佐々木渉太氏（東北大学）、塩田有波氏（三菱電機）、谷出 敦氏（SCREEN ホールディングス）、辻 享志氏（産業技術総合研究所）、橋本惇一氏（キオクシア）、平松 亮氏（ウエスタンデジタル）、三浦勝哉氏（日立製作所）の皆様に感謝いたします。

行事案内

2024 年 第 71 回応用物理学会春季学術講演会 プラズマエレクトロニクス分科会企画

名城大学 伊藤 昌文

■ はじめに

2024 年 3 月 22 日（金）～25 日（月）に東京都市大学世田谷キャンパス（東京都世田谷区玉堤 1-28-1）とオンラインのハイブリッドで第 71 回応用物理学会春季学術講演会が開催されます。本稿では、プラズマエレクトロニクス分科会企画の概要とスケジュールを紹介いたします。脱稿時点で未定の部分も含まれるため、詳細につきましては応用物理学会の HP でご確認をお願いいたします。

■（第 1 日）チュートリアル講演

今春季講演会も、講演会初日に、チュートリアル講演を開催いたします。今回は、ナノテクリサーチの野尻一男氏より、半導体デバイス製造プロセスでたびたび問題となるチャージングダメージの発生メカニズムから対策についてご講義して戴きます。チュートリアル講演は事前予約制となっています。定員がありますので、お早めにご予約頂きますようお願い致します。

日程：3 月 22 日（金）9:00～12:10（予定）

会場：未定

講師：野尻一男氏（ナノテクリサーチ（株）代表）

講演題目：「(仮) プラズマプロセスにおけるチャージングダメージ発生メカニズムから対策まで」

■（第 2 日&第 3 日）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 件目は昨今、日本半導体の復活に関するニュースが多く取り上げられておりますが、日本の半導体デバイスのトップメーカーであるキオク

シア（株）の技術統括責任者 宮島秀史氏をお招きして「高積層 3 次元フラッシュメモリにおけるプロセス開発の課題とその対策」と題してご講演をいただく予定です。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、九州大学の小菅佑輔先生をお招きして、新たな展開が期待される核融合プラズマ分野の流体シミュレーションと実験の進展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：3 月 23 日（土）11:00～11:45

ご講演者：宮島秀 史氏（キオクシア（株）CTO）

講演題目：「高積層 3 次元フラッシュメモリにおけるプロセス開発の課題とその対策」

日程：3 月 23 日（土）午後（未定）

ご講演者：小菅 佑輔 先生（九州大学）

講演題目：「(仮) プラズマの乱れと巨視的流れ構造」

■（第 2 日）プラズマエレクトロニクス賞受賞式

講演会 2 日目には、第 22 回プラズマエレクトロニクス賞の受賞式を予定しています。今回の受賞候補論文の推薦締め切りは 2024 年 1 月 9 日（火）ですので、この記事が皆様に届いた時点ではまだ募集中かと思われます。自薦、他薦は問いませんので、是非とも奮って推薦下さいますようお願い致します。詳細は、下記の HP をご確認ください。

(https://annex.jsap.or.jp/plasma/PE_files/pe_award.html)

日程：3月23日（土）13:15～13:30（予定）
場所：分科会企画シンポジウムと同一会場の予定

■（第2日）分科会企画シンポジウム

学会2日目の23日（土）に、分科会企画シンポジウム「プラズマが拓くナノ粒子・量子ドットの新展開」を開催いたします。ナノ粒子・量子ドットに関するプラズマに関する研究は古くからあり、ダストプラズマ物理分野からはじまり、現在は、熱プラズマや低圧プラズマなどを用いた材料合成への応用が大きく進展しています。本シンポジウムでは、「プラズマが拓くナノ粒子・量子ドットの新展開」と題して、プラズマプロセスにおけるナノ粒子合成、機能性量子ドット合成などそれぞれの分野において、これまでの研究の経緯や基礎的な理解と、それを支えとする応用発展に関する最新動向を、第一線で活躍されている学术界および産業界からの先生方にご講演いただき、当該分野のさらなる発展に資する機会としたいと考えています。是非とも奮ってご参加ください。

日程：3月23日（土）13:30～18:00（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. 布村 正太（産総研）
「プラズマ反応場とナノ粒子生成：成長制御と応用展開」
2. 橘勝（横浜市立大学）
「マイクロ波プラズマによるCQDs合成とその応用」
3. 中村 圭太郎（日清製粉（株））
「熱プラズマにおける機能付加ナノ粒子開発」
4. 神原 淳（阪大）（室蘭工大）
「ナノ粒状デバイスの実装指針とナノ粒子表界面制御」
5. 今井 隆浩（東芝（株））
「ナノ粒子の応用－電気絶縁材料の高性能化－」
6. 高橋 和生（京工繊大）
「微粒子プラズマの物理－クーロン結晶から微粒子間相互作用」

用、微小重力科学まで」

■ 講演奨励賞授業記念講演

2023年秋季学術講演会での第55回講演奨励賞の受賞者が応物事務局から発表され、プラズマエレクトロニクスの分野から受賞者が選出されました。記念講演会が開催される予定ですので、プログラムをご確認の上、会場まで是非とも足をお運びください。過去の講演奨励賞受賞者につきましても下記のHPよりご確認頂けます。

(<https://www.jsap.or.jp/young-scientist-presentation-award>)

■ English Session

今回もプラズマエレクトロニクス分野を横断するトピックスで「Plasma Electronics English Session」と題したEnglish Sessionを予定しています。留学生の方に限らず、日本人学生の方も是非とも奮って参加頂ければと思います。なお、春季には海外招待講演を予定しておりません。

■ おわりに

上記案内いたしました行事の他に3月23日（土）の昼には、大分類意見交換会、PE分科会のインフォーマルミーティング、同日夕刻には恒例となっております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.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しますので、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

16th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials / 17th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science / 13th Asia-Pacific Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (ISPlasma2024 / IC-PLANTS2024 / APSPT-13)

金沢大学 田中康規, 名城大学 伊藤昌文

ISPlasma2024/IC-PLANTS2024/APSPT-13 合同国際シンポジウムが、2024 年 3 月 3 日から 7 日まで、名古屋大学で開催されます。多数の方の奮ってのご参加をお願い申し上げます。

今回のシンポジウムでは、これまで合同開催してきた ISPlasma / IC-PLANTS とともに、さらに APSPT とが合同で開催します。ISPlasma は 2009 年から IC-PLANTS は 2008 年から開催されており、2014 年からは ISPlasma/IC-PLANTS として毎年合同で開催されています。先端プラズマナノ科学、ナノ材料、窒化物半導体、バイオ応用の研究を対象としています。一方、APSPT は、当初は台湾のプラズマ科学技術者と日本のプラズマ科学技術者との交流を意図して作られた国際シンポジウムであり、隔年で台湾にて開催されてきました。日本側の受け入れ主団体は電気学会放電プラズマパルスパワー技術委員会です。今期の ISPlasma2024/ IC-PLANTS2024/ APSPT-13 合同国際シンポジウムでは、合同開催することで、研究者間の相互情報交換を促進し、その相乗効果を期待して開催するものです。台湾の方々にも多くの方の参加を呼び掛けています。是非とも参加の上、現地での活発な討論をお願いいたします。

会期：2024 年 3 月 3 日（日）～3 月 7 日（木）
場所：名古屋大学

【関連分野】：関連分野も ISPlasma2024/ IC-PLANTS2024 と APSPT-13 のそれぞれの分野から設定しています。

Plasma Science & Technologies:

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

Nitride Semiconductors:

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

Nanomaterials:

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

Bio applications:

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

Technologies

<プレナリ講演 Plenary talk : 1 件>

-Prof. Jiro Kasahara, Nagoya University, Japan

<基調講演 Keynote talk : 4 件>

-Dr. Yoshihide Kihara, Tokyo Electron Miyagi Ltd., Japan

-Prof. Jong-Shinn Wu, National Yang Ming Chiao Tung University, Taiwan (The ISPlasma Special Recognition Award 2023 Winner)

-Prof. Kevin Chen, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China

-Prof. Vandana Millar, Drexel University, USA

<受賞講演 Award talk>

-Prof. Petoro Favia, University of Bari Aldo Moro, Italy (The ISPlasma Prize 2023 Winner)

-(2023 年度プラズマ殿堂賞受賞者× 1~2)

<チュートリアル Tutorial: 3-4 件>

-Prof. Bruno Daudin, CEA-Grenoble, France

-Prof. David Graves, Princeton University, USA

-TBA

<招待講演 Invited talk>

Plasma Science & Technologies

-Dr. Naoto Kodama, Nagoya University, Japan

-Dr. Kazunori Takahashi, Tohoku University, Japan

-Prof. Oi Lun (Helena) Li, Pusan National University, Korea

Prof. Po-Yu Chang, National Cheng-Kung University, Taiwan

Prof. Ying-Hao Liao, National Yang Ming Chiao Tung University, Taiwan

Nitride Semiconductors

-Prof. Hironori Okumura, University of Tsukuba, Japan

-Dr. Yongzhao Yao, Japan Fine Ceramics Center, Japan

-Dr. Shuhei Ichikawa, Osaka University, Japan

-Prof. Makoto Kasu, Saga University, Japan

-Dr. Masataka Imura, National Institute for Materials

Science (NIMS), Japan

-Dr. Yoshitaka Taniyasu, NTT Basic Research Laboratories, Japan

-Dr. Ziyi Zhang, Asahi Kasei, Japan

-Dr. Shinya Ohmagari, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan

-Mr. Alessandro Floriduz, Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL), Switzerland

-Prof. Srabanti Chowdhury, Stanford University, U.S.A.

Nanomaterials

-Prof. Jun Xu, Nanjing University, China

-Prof. Hiroharu Kawasaki, National Institute of Technology, Sasebo College, Japan

-Dr. Masashi Akabori, Japan Advanced Institute of Science and Technology, Japan

-Dr. Takayuki Hoshino, Hirosaki University, Japan

-Dr. Kazuhiro Gotoh, Niigata University, Japan

Bio Applications

-Prof. Yun-Chien Cheng, National Yang Ming Chiao Tung University, Taiwan

-Dr. Sang Hye Ji, KFE, Korea

-Dr. Kathrina Lois M. Taaca, University of the Philippines Diliman, Philippines

【参加申し込み】

下記のウェブページからご登録ください。早期参加登録の場合、参加費の割引があります。

【ウェブページ】

<http://www.isplasma.jp/>

【問い合わせ先】

ISPlasma2024 / IC-PLANTS2024 / APSPT-13 事務局

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

E-mail:

isplasma2024_apspt-13@intergroup.co.jp

行事案内

77th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2024)

成蹊大学 村上朝之

Gaseous Electronics Conference は American Physical Society の国際会議であり、プラズマ源・計測・モデリング・原子分子衝突過程などの基礎研究に加え、マイクロエレクトロニクス・航空宇宙応用・生物医療応用・環境応用などの応用研究を含み、広く低温プラズマ理工学についての議論を行う場となっている。GEC における日本のコミュニティの貢献とプレゼンスは大きく、応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会が主導する ICRP との共催を行っている。さらに、GEC2022 が仙台で開催されたことも記憶に新しい。

77th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2024) が 2024 年 10 月 7 日（月）から 11 日（金）合衆国カリフォルニア州サンディエゴ Double Tree by Hilton San Diego Mission Valley を会場とし、完全対面方式にて開催予定である。Web site <https://www.apsgec.org/gec2024/>

日本と現地を結ぶ空の便は、サンディエゴ国際空港との直行便の他、ロスアンゼルスやサンフランシスコなどの西海岸都市を経由する選択肢が豊富であり、アクセスしやすいといえる。西海岸ロスアンゼルスからサンディエゴへは国内線で南へ 1 時間程度である（そこからサンディエゴフリーウェイを南へ走ればすぐメキシコとの国境線）。もちろん温暖な気候に恵まれており、ビーチに面したダウンタウン（サンディエゴ国際も至近）と学会会場は数 km 以内の距離にある。

学術界・産業界・ベテラン・若手が集う活気ある GEC に、多くの方々の参加を期待したい。

GEC コミュニティは、若い世代の育成に力を入れており、学生・ポスドクに対して様々な賞や補助を設けている。以下に概略を記す。

- **GEC Student Award for Excellence** : 口頭発表を行う学生（博士後期課程最終年度レベル）に対する表彰であり賞金授与を含む。1 次書類選考を通過した最終候補者（5 名程度）に対し、当日 2 次審査を行う。
- **GEC Student Poster Awards** : ポスター発表を行う学生に対する表彰。事前の応募者に対し当日の審査を行う。
- **Student Travel Grant** : 口頭あるいはポスター発表を行う学生に対し、学会登録費全額および宿泊費の一部を補助するもの。
- **Child Care Grants** : 本人とともに家族が学会に参加する場合、あるいは本人は学会に参加している間の家族にケアが必要な場合などに対する補助（特にポスドクや大学院生向け）。

いずれに対しても日本からの応募は非常に少ない傾向にあるが、博士後期課程学生であれば学生賞への積極的な応募をお勧めしたい。GEC Student Award for Excellence は非常にレベルが高く、最終候補者に残るだけでも大変な栄誉となる。1 次審査においては、本人の応募書類は言うまでもなく指導教員の推薦書のクオリティも重要である。当日の 2 次審査は口頭発表と同等かそれ以上に質疑応答が重要視される（もちろん英語が巧みであることは前提）。簡単なことではないが、十分な準備をして挑戦するだけの価値があるといえる。

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

2024 年 1 月 9 日（火）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	産業技術総合研究所 先端半導体研究センター	〒305-8569 茨城県つくば市小野川 1 6 - 1 TEL: 050-3648-4587	Masanaga.Fukasawa@aist.go.jp
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-u.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-u.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 計測インベーションセンタ 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	〒571-8502 大阪府門真市松葉町2番7号 TEL: 080-9940-7737	amano.tomoki@jp.panasonic.com
〃	伊藤 智子	大阪大学 工学研究科 マテリアル生産科学専攻 生産科学コース 浜口研究室	〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 アトミックデザイン研究センター TEL: 06-6879-7917	ito@ppl.eng.osaka-u.ac.jp
〃	川崎 仁晴	佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科	〒857-1193 長崎県佐世保市沖新町 1-1 TEL: 0956-34-8468	h-kawasa@sasebo.ac.jp
〃	佐々木 渉太	東北大学 大学院工学研究科 電子工学専攻 金子・加藤研究室	〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05 TEL: 022-795-7046	s.sasaki@tohoku.ac.jp
〃	塩田 有波	三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 環境システム技術部 放電応用グループ	〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1 TEL: 06-6497-3545	Shiota.Arufa@dp.MitsubishiElectric.co.jp
〃	清水 鉄司	産業技術総合研究所 電子光基礎技術研究部門 先進プラズマプロセスグループ	〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2	tetsuji.shimizu@aist.go.jp
〃	全 俊豪	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 愛知県名古屋市中千種区不老町 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	〒512-8550 三重県四日市市山之一色町 800 番地 TEL: 059-330-1402	ryo.hiramatsu@wdc.com
〃	宗岡 均	東京大学 新領域創成科学研究科 物質系専攻 寺嶋・伊藤研究室	〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5-504 基盤棟5階5A1 TEL: 070-1557-6046	muneoka@plasma.k.u-tokyo.ac.jp

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	ソニー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	ソニー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	ソニー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	東京エレクトロン 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	ソニー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・エレクトロニクス
	川島 淳志	ソニー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	東京エレクトロン 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	ソニー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・エレクトロニクス
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	ソニー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)	柘久保 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 啓蔵 (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

プラズマエレクトロニクス分科会幹事会は Zoom を用いたオンライン会議にて 2023 年 9 月 29 日にインフォーマルミーティングとして開催された。

1. 春季講演会における分科会の企画

伊藤副幹事長（名城大）から、2024 年春季講演会での分科会企画について説明がなされた。シンポジウム、チュートリアルは後述の通りである。

・シンポジウム

鎌滝幹事（九州大）から、シンポジウムの企画案として、「ナノ粒子」の提案がされ、承認された。次々回以降は「先進半導体」または「プラエレクトロマップ」で検討予定。

・チュートリアル

深沢幹事（ソニーセミコンダクタソリューションズ）から、「チャージングダメージ」および講師候補者が提案され、承認された。

2. PE インキュベーションホールの開催報告

川口幹事（室蘭工大）から、インキュベーションホールの開催報告があった。地方の学会と日程が重なったため、参加者数は定員に達しなかったが、ポスターセッションでは活発な議論が行われた旨、報告があった。

3. プラズマ新領域研究会の進捗状況

上坂幹事（岐阜大）から、新領域研究会の開催計画の説明があった。10 月 20 日（高知）、11~12 月（オンライン）、1~2 月（名古屋）に 3 回実施予定。

4. PE 講習会の進捗状況

深沢幹事（ソニーセミコンダクタソリューションズ）から開催計画の説明があった。11 月 17 日に大阪「JEC 日本研修センター 心斎橋」およびオンライン（Zoom ウェビナー）にてハイブリッド開催予定。

5. プラズマプロセッシング研究会 (SPP-41) の進捗状況

上坂幹事（岐阜大）、赤塚幹事（東工大）から SPP-41 の開催計画の説明があった。予稿投稿締め切りは 10 月 29 日、参加申し込み締め切りは 12 月 14 日予定。

6. 関連会議について

6.1 DPS について

白藤幹事長（大阪公大）から 2023 年度から DPS が分科会共催となる件について説明があった。分科会が共催の場合は、著作権帰属を応物学会にすることはできないため、今年度は DPS 組織委員会の帰属とする。今後の著作権の取り扱いには組織委員会と分科会で継続審議とする。

6.2 ISPlasma2024 について

田中幹事（金沢大）から開催についての説明があった。今回は APSPT と共同開催となるが、特集号の取り扱いについては未定。

6.3 Hakone XVIII について

朽久保幹事（都立大）から開催案内があった。High pressure low temperature plasma chemistry に関する国際シンポジウム。予稿投稿締め切りは 2024 年 2 月 15 日。

6.3 International Workshop on Microplasmas について

白藤幹事長（大阪公大）から開催案内があった。マイクロプラズマに関するワークショップ。フランスにて来年 6 月開催予定。予稿投稿締め切りは未定。

8. 第 22 回プラズマエレクトロニクス賞の候補論文募集

白藤幹事長（大阪公大）から案内があった。募集締め切りは 2024 年 1 月 9 日。

9. その他（白藤幹事長（大阪公大）から）

9.1 IPCS サマースクール 2023 共催報告，ICPIG2023 共催・学生補助報告について

2 学会の共催報告があった。IPCS は分科会から学生向けサマースクールの援助を行った。ICPIG は前回（北海道開催）の余剰金の活用で，学生（19 名）の旅費支援が今回限りで行われた。

9.2 アカデミックロードマップ改定版進捗報告
進捗状況について報告があった。2050 年を念頭に置いたロードマップを作成中。8 月 20 日までに全体まとめ案が完成し，現在，関係者に案を開示し意見を収集している。秋応物のシンポジウムで公開を目指す方針。

9.3 日本学術会議「学術の中長期研究戦略」に採択公表

ロードマップと併せて秋応物でのシンポジウム開催を目指す方針。

9.4 講演奨励賞規定の改定（応物要請：表彰は母数の 10%以内）

応物の表彰ガイドラインが 7 月に制定されたことに伴い，分科会の規定も改定。改定後は「表彰件数は，講演会等毎に定め，各々，審査対象者総数の 10%を最大として選考する」とした。「審査対象者総数」の計算方法は今後検討。

9.5 2024 プラエレ事業計画と予算案

事業計画と予算案について説明があった。2024 年の特記事項として，ICRP の定常的準備体制を構築および予算の積み立て，ホームページのリニューアル費用および科学イラスト・挿絵・動画作成の委託についての説明があった。

9.6 ICRP2025（予定）の準備状況

ICRP2025 の準備を至急進めていく旨，説明があった。

記：鈴木（名大）

プラズマエレクトロニクス関連会議日程

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

【 国際会議 】

2024.3.3 - 7

16th International Symposium on Advanced Plasma Science and its application for nitrides and nanomaterials, 17th International Conference on Plasma nanotechnologies and sciences (ISPlasma 2024/IC-PLANTS 2024) and 13th Asia-Pacific International Symposium on the basic and applications of plasma technology (APSPT)

Nagoya University, Nagoya, Japan

<https://isplasma.jp>

2024.8.3 - 7

5th International Conference on Data-Driven Plasma Science (ICDDPS-5)

Univeristy of California, Berkeley, CA, USA

<https://na.eventscloud.com/website/63026/>

2024.9.8 - 13

10th International Conference on Plasma Medicine (ICPM10), together with 9th International Workshop on Plasma for Cancer Treatment (IWPCT)

LifeClass Hotels & Spa Portorož, Slovenia

2024. 10.7 - 11

77th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC)

Double Tree by Hilton San Diego Mission Valley, San Diego, CA, USA

<https://www.apsgec.org/gec2024/>

2024. 11.14 - 15

45th International symposium on dry process (DPS)

Chitose, Hokkaido, Japan

【 国内会議・会合 】

2024. 1.23 – 25

第 41 回プラズマプロセッシング研究会 (SPP-41)

東京工業大学 大岡山キャンパス, 東京都目黒区

<https://gakukai-gran.jp/spp41/>

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://meeting.jsap.or.jp/jsap2024s/>

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>

2025. 3.14 – 17

第 72 回 応用物理学会 春季学術講演会

東京理科大学 野田キャンパス, 千葉県野田市

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

当会報への広告掲載について

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

1. 契約の種類

(A) 年間契約コース

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

(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

プラズマエレクトロニクス分科会会報 No.79 を発行することが出来ました。大変お忙しい中、原稿をご執筆いただいた方々、多くのご助言をいただいた方々に心からお礼申し上げます。ありがとうございます。

巻頭言では、株式会社日立製作所の松井都様より「プラズマエレクトロニクス分野への期待」と題し、この度ドライプロセスシンポジウム (DPS) がプラズマエレクトロニクス分科会の共催となることを受けまして、DPS の成り立ちから今後のプラズマエレクトロニクス分野の発展への期待についてご執筆いただきました。

また、産業技術総合研究所の山田英明先生からは、「プラズマ合成ダイヤモンドの現状と将来展望」と題したご寄稿で、ダイヤモンド合成の意義と現状、そしてプラズマプロセスの担う役割について、ご解説頂きました。

研究室紹介のコーナーにおきましては、九州大学の林信哉先生に研究室の様子や研究内容をご紹介いただきました。研究室の特色が出やすい教育方針やイベントのご紹介の他、多彩な研究内容を分かりやすくご解説いただき、大変興味深く拝読しました。

研究紹介では、近年産業界で需要の高まりを見せるプラズマを用いた表面改質技術についてご解説頂きました。プラズマ処理効果の持続性や安全性といった課題解決に向けた取り組みを 10 ページにわたってご解説頂き、とても内容が充実した力作になっていると感じました。

また、応用物理学会講演奨励賞を受賞されました東北大学の武田一希様には、受賞対象の講演内容に関する解説のみならず、最近ミネソタ大学への留学をしていたことを踏まえ、その様子につい

ても簡単に触れていただきました。

国内外の会議報告を拝読しますと、新型コロナウイルス感染症の影響が完全に無くなったと言えないものの、以前の形を取り戻した例も多く見られます。少し前までは、オンライン、あるいは対面とオンラインのハイブリッド開催が多かったように思いますが、完全対面開催の会議がかなり増えてきました。個人的にも、対面での学会参加が増えつつあり、休憩時間の自由な議論など、対面開催の価値を改めて認識しつつあります。オンライン開催にも、気軽に参加しやすく、時間効率の面で優れている等の利点がありますが、早く良いところ取りの VR 技術が発展しないかな等とつい想像してしまいます。

今後予定されている応用物理学会春季学術講演会、ISPlasma2024 / IC-PLANTS2024 / APSPT-13, GEC2024 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、皆さま奮ってご参加くださいますようお願い申し上げます。

最後に、本号の原稿執筆を快く引き受けてくださいました著者の皆様、幹事長、副幹事長を始めとする分科会会員の皆様および応用物理学会事務局分科会担当の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。皆様のお手元に届く頃には、日ごとに寒さがつのっていることと思いますが、くれぐれもご自愛ください。

記：佐々木（東北大学）

（令和 5 年度会報編集担当：

鈴木、川島、佐々木、天野）

プラズマエレクトロニクス分科会会報 No.79
2023年 12月15日 発行
編集:公益社団法人応用物理学会
プラズマエレクトロニクス分科会
幹事長 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)