

## プラズマエレクトロニクス分科会会報 No. 76

2022年（令和4年）6月発行

高橋、末次、鈴木、川島

### 目次

#### 幹事長交代の挨拶

幹事長退任にあたって	大阪大学	節原 裕一	1
幹事長就任にあたって	大阪公立大学	白藤 立	3

#### 学生のためのページ

プラズマシミュレーション	ペガサスソフトウェア (株)	田中 正明	4
--------------	-------------------	-------	---

#### 研究室紹介

東京工業大学 工学院 電気電子系 竹内研究室	東京工業大学	竹内 希	10
------------------------	--------	------	----

#### 研究紹介

高密度収束プラズマスパッタリング装置と 磁気ミラー型マグネトロンカソードの紹介	産業技術総合研究所	本村 大成	15
--	-----------	-------	----

#### プラズマエレクトロニクス賞

Portable Plasma Device for Electric N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Production from Air	東北大学	佐々木 渉太 高島 圭介 金子 俊郎	22
Measurement of electron temperature and density of atmospheric-pressure non-equilibrium argon plasma examined with optical emission spectroscopy	東京工業大学	大西 広 山崎 文徳, 箱崎 喜郎 竹村 将沙樹 根津 篤 赤塚 洋	26

#### 国際会議報告

ISPlasma2022 / IC-PLANTS2022	名古屋大学	石川 健治	30
------------------------------	-------	-------	----

#### 国内会議報告

第39回プラズマプロセッシング研究会/第34回プラズマ材料科学シンポジウム(SPP-39/SPSM34)	名城大学	内田 儀一郎	33
第69回応用物理学会春季学術講演 チュートリアル報告	ウエスタンデジタル 合同会社	中塚 滋	35
2022年 第69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	九州大学	古閑 一憲	36
第36回プラズマ新領域研究会 「計測技術の基礎と最新動向」	東北大学	岡田 健	38
第37回プラズマ新領域研究会 「ピーミング推進の最新動向」	静岡大学	松井 信	39
第32回プラズマエレクトロニクス講習会	キオクシア (株)	栗原 一彰	40

## 行事案内

2022 年第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 岐阜大学 上坂 裕之 42  
プラズマエレクトロニクス分科会企画

第 43 回ドライプロセス国際シンポジウム (株) アルバック 森川 泰宏 44  
43rd International Symposium on Dry Process 大阪公立大学 白藤 立  
(DPS2022) (株) 日立製作所 松井 都

第 16 回インキュベーションホール 名城大学 伊藤 昌文 46

## 掲示板

第 21 回プラズマエレクトロニクス賞 大阪公立大学 白藤 立 48  
受賞候補論文の募集

2022 年度(令和 4 年度) プラズマエレクトロニクス分科会幹事名簿 49

2022 年度(令和 4 年度)分科会幹事役割分担 51

2022 年度(令和 4 年度) 分科会関連の各種世話人・委員 52

活動報告 53

プラズマエレクトロニクス関連会議日程 55

当会報への広告掲載について 56

編集後記 57

# 幹事長退任にあたって

大阪大学 節原 裕一

2020年4月に平松美根男前幹事長の後任として就任させて戴いてから、本年2022年3月までの2年間に亘り、プラズマエレクトロニクス分科会幹事長の大役を務めさせて戴きました。

振り返りますと、就任時の2020年の春は新型コロナウイルス感染症の流行初期で、それ以降もウイルスの変異に伴って、未曾有の感染状況と鎮静化の山谷を繰り返し、当分科会の行事運営においても、感染拡大防止の観点から、従来に無い制約のもとでの様々な工夫（ある意味での挑戦！）が求められ、何とか乗り切って参りました。このような困難な状況においても、当分科会の活動を何とか推進していくことが出来たのは、当分科会の会員の皆様の御協力、古閑一憲副幹事長、田中康規副幹事長、栗原一彰副幹事長をはじめ、2020年度と2021年度に当分科会の幹事に御就任をいただいた皆様の献身的な御尽力、小田康代様をはじめ応用物理学会事務局の皆様の強力な御支援のお陰であり、この場をお借りして、心より篤く御礼申し上げます。

この2年間は感染拡大防止の観点で、対面での行事運営に制約が課されていたことから、対面ではなくリモート会議システムを活用せざるを得ない特殊な状況でした。研究者同士のコミュニケーションの場を提供することは学会活動の要諦ですが、従来の対面での行事開催と比較して、多少非力であったことは否めません。一方で、リモート会議の積極的な活用で、幹事会に関わる議論の場を、従来よりも多く持つこともできました。

さて、当分科会の沿革は、1984年に発足された「プラズマエレクトロニクス談話会」に遡り、翌

年の1985年に「プラズマエレクトロニクス研究会」そして学術講演会中分類分科「プラズマエレクトロニクス」が応用物理学会に設置され、1990年3月にプラズマエレクトロニクス分科会に昇格して現在に至っており、2020年で、プラズマエレクトロニクス研究会の発足から35周年、プラズマエレクトロニクス分科会の発足から30周年の節目を迎えました。このため、幹事長在任中の2020年からの2年間は、これまでを俯瞰しつつ、新たな時代への方向性に繋げていくことを願って、分科会30周年（研究会35周年）の記念行事として、下記を鋭意企画し実施して参りました。

### 【1】第68回応物春季学術講演会（2021年3月）

コロナ禍のためオンライン開催となりましたが、2021年3月に開催された応用物理学会春季学術講演会において、以下を企画し実施しました。

#### ・分科会30周年記念特別セッション

プラズマインキュベーションホールでの若手教育を念頭に置いて、2021年3月16日に、午前中にチュートリアル、午後にプラズマエレクトロニクス分科会30周年記念特別セッション（キャリア体験、英語講座、若手セッション）を開催しました。若手セッションでは、応物の学術講演会では初めての試みとして、質疑・応答を重視した時間配分〔講演5分、質疑応答10分〕で、教育効果を重視したセッションを開催しました。

#### ・分科会30周年記念シンポジウム

続いて、2021年3月17日午後に、プラズマエレクトロニクス分科会30周年記念シンポジウムを『ニューノーマル時代の躍進に資するプラズマエレクトロニクス』と題して開催しました。この

シンポジウムでは、冒頭で応用物理学会の波多野会長からご挨拶をいただき、2部構成（第1部：設立当時の歩みと国際展開を俯瞰、第2部：記念講演）で、当分科会の歩みを振り返ると共に、今後を展望するご講演を戴きました。

## **[2]プラズマエレクトロニクス講演奨励賞の創設**

上記の分科会30周年記念特別セッションにおける若手セッションでの優秀な講演者の表彰を機に、「プラズマエレクトロニクス講演奨励賞」を創設しました。本表彰は、プラズマエレクトロニクス分科会が企画して行う講演会、研究会、シンポジウム等に於いて、プラズマエレクトロニクスおよび関連学術・技術分野の発展に貢献する優秀な講演論文を発表した学生・若手研究者に「プラズマエレクトロニクス講演奨励賞」を授与し、その功績を称えることを目的としており、2021年度以降は、プラズマプロセッシング研究会での学生・若手研究者の表彰として引き継いでおります。

## **[3] 会報(2021年12月)分科会30周年特集記事**

プラズマエレクトロニクス分科会の歩みを記録し、後世に残すという意味合いから、分科会20周年から30周年までの歩みを俯瞰して収録することを目的に、会報No. 75(2021年12月)において、「分科会30周年特集記事」を企画しました。

この特集では、上述の[1]第68回応物春季学術講演会(2021年3月)で開催した分科会30周年記念シンポジウム『ニューノーマル時代の躍進に資するプラズマエレクトロニクス』にご登壇いただいた先生方を中心に講演内容を纏めていただき、加えて、分科会20周年以降の幹事長経験者の先生方、産業界の先生方、当時の副幹事長の先生方に執筆をお願いしました。

## **[4]PE分科会ロゴの作成**

分科会30周年を記念して、当分科会のロゴを作成することを幹事会で決定し、当分科会の会員に広く公募して、応募いただいたデザインの中か

ら素晴らしい作品を選考させていただきました。次世代に受け継がれるロゴとして、会員の皆様に親しまれることを願っております。

## **[5]PE30周年記念アーカイブズの発刊**

当分科会の主要行事である「プラズマエレクトロニクスインキュベーションホール」と「プラズマエレクトロニクス講習会」では、第一線でご活躍の著名な方々にご登壇いただき、講演テキストをご執筆いただいております。著名な方々に脈々とご執筆いただいていた毎回のテキストの集積は、英知の宝庫であり、集約してアーカイブズとして発刊することを企画して参りました。ご担当をいただいた幹事の皆様の絶大な御尽力により、大方の講演テキストの電子データの集約を終えることができましたので、今後、完遂に向けて助力して参ります。

## **[6]アカデミックロードマップの改訂**

プラズマエレクトロニクス分野のアカデミックロードマップは、2008年3月28日に発刊された「応用物理分野のアカデミック・ロードマップの作成報告書」に収録されており、分科会30周年を迎えた2020年の時点で10年以上の年月が経過しております。このため、分科会30周年を記念して、改訂版を策定することを幹事会で決定し、準備作業を進めております。

コロナ禍の終息後も、ウクライナ侵攻に附随した不安定な世界情勢の下、平穏な時代にすぐさま戻れるようには思えませんが、会員の皆様の優れた研究と学会講演、論文投稿を通じた活発な議論が当分科会の活力の源泉であることは、変わることはありません。今後の新たな時代に向けて、白藤立新幹事長の指揮の下、当分科会が益々の発展を遂げることを心より祈念しており、上述の在任期間中の残務課題の完遂を含めて、私も微力ながら尽くして参りたいと思っております。

# 幹事長就任にあたって

大阪公立大学 白藤 立

2022年4月1日より2年間、プラズマエレクトロニクス分科会の幹事長を務めさせていただきます大阪公立大学の白藤立であります。2020年に発足30周年を迎えた伝統ある分科会がこれまで以上に活発な分科会となるように努めてまいりたいと思います。何分と非力な小職であります。何卒よろしくお願ひ申し上げます。

現在のプラズマエレクトロニクス分科会の会員各位の研究は、CVDやエッチングなどの材料プロセスに加えて、バイオ、医療、農業、エネルギー、環境浄化などの様々な方向性と可能性をもった研究が推進されています。この状態に至るための原動力は、プラズマ分野を産業界として強力に牽引してきた日本の半導体産業の低迷の際に、分科会各位が「このままではだめだ」という意識を持ったからだと思ひます。これは、分科会発足当初の先生方が、その後大きく発展することになる半導体プロセスへと大きく舵を切ったことに相当する極めて重要な意識変革であったと思ひます(会報 No.55)。

ただ、現時点では、新展開されているプラズマプロセスが、ドライエッチングのようにがちりと社会実装されるには至っていませんので、時とともに淘汰されるのでは、という危機感もあります。その理由は、現在のドライエッチングのように、「これはプラズマだからこそできる」「プラズマ以外ではできません」という確固たる位置づけが、それを使う側の人達によって十分に認知されていないように思ひます。

また、危機感を覚える要因として、応用に関する研究が多いことが挙げられます。かつてのプラ

ズマ分野では、プラズマ中の物理化学過程を議論するための基盤である電子原子分子過程の研究がしっかりと行われていました。例えば、特定研究「原子過程科学の基礎」(昭和54年～56年、代表者：高柳和夫)を挙げることができます(この当時、私は研究室に配属すらされていないのですが)。こうした基盤を持つ方々が分科会を起こしたからこそ、半導体プロセスにおけるプラズマの問題に、プラズマ屋として取り組むことができたのだと思ひます。

現在のプラズマエレクトロニクス分科会の中には、こうした基礎的な研究を推進されている方がずいぶんと少なくなっています。これが、土台の欠如につながるかという危機感を持つ理由です(自分自身にとっても)。現在の日本では、応用研究と比較すると、基礎研究の研究費獲得のための応募選択肢が少ないという状況が確かにあります。しかし、応用で研究費を獲得しつつも、裏では可能な範囲で基礎をやる、あるいは同じ志を持つ方々と基礎研究に関する(もしくはそれを含む)大型科研費を獲得して推進する、ということが必要ではないかと思ひます。

分科会発足時は、「基礎ばかりやったらだめだ」という意識でしたが、今は「応用ばかりやったらだめだ」という逆の意識で、分科会を変革する時期にあるのかもしれない。

着任早々にネガティブなことばかりで恐縮なのですが、「このままではだめだ」の意識は、変革のための重要な要素だと思ひますので、分科会各位とともに、分科会の発展に尽力してゆきたいと思ひますので、何卒よろしくお願ひ申し上げます。

# プラズマシミュレーション

ペガサスソフトウェア（株） 田中 正明

## 1. はじめに

一般にシミュレーションには、明確な目的、適用するモデルの妥当性、結果の信頼性が求められる。プラズマシミュレーションの必要性を考えると、プラズマの応用技術としてエネルギー、物質・材料、環境、航空宇宙、医療そして農業など多岐にわたっており、その目的も多種多様である。プラズマシミュレーションにおいては、気相中、固体表面での物理的、化学的そして光学的な実現象を正確に取り入れるモデルの構築は不可能に近い。なぜなら、気相中そして固体表面での複雑な反応に伴う基礎データの欠如、そして取り扱う境界条件が時々刻々変化している場合が多いからである。しかし、解析体系内の各種条件に適合した、理論的背景に基づくモデルによるシミュレーションは、実現象を模擬したものと考えられ、得られる数値も定性的には信頼に値するものである。また、物理現象が比較的明確な対象によっては定量的に信頼できる結果が得られる。

プラズマの種類は、主に熱プラズマ、完全電離プラズマそして非平衡低温プラズマに分けられる。本稿では、非平衡低温プラズマを対象としたプラズマシミュレーションに関して述べる。非平衡低温プラズマの場合、ボルツマン方程式の速度分布関数をどのように求めるか、そしてマクスウェル方程式とどのように結合させるか、ということが重要である。非平衡低温プラズマを理解するうえで文献[1]、[2]にその詳細が記述されている。

## 2. プラズマシミュレーションに用いられる計算手法

大別して粒子モデルを用いる方法と流体モデル

を用いる方法がある。またそれぞれのモデルにおいて、荷電粒子（電子・イオン）の挙動に関するものと中性粒子（供給ガスや反応により生成されるラジカル・励起種等）の挙動に関するものがある。

### 2.1 PIC/MC 法(荷電粒子のための粒子モデル)

PIC/MC 法は、Particle-in-Cell(PIC)法と Monte Carlo Collision(MC)法を組み合わせる装置内の荷電粒子の挙動をシミュレーションする手法である。PIC (Particle-In-Cell) 法は 50 年以上前から流体解析分野で用いられ、およそ 30 年前から弱电離プラズマ（非平衡低温プラズマ）シミュレーションに使用され今日に至っている。計算手法の詳細は、PIC 法について文献[3]、[4]、[5]また MC 法については、文献[5]を参照して頂きたい。フリーソフトウェアとして整備され、1 次元、2 次元版が公開されている[6]。

計算手順の概要は次のようなものである。

#### 1. 静電位に関するポアソン方程式を解く

ポテンシャル計算のために各セルの電荷密度を求め、電位の境界条件を考慮した上で各セルのポテンシャルと電界を計算する。

#### 2. 荷電粒子の運動方程式を時間積分する

セル境界上の電界、磁界を粒子位置に内挿して  $\Delta t$  後の粒子の速度と位置を計算する。

#### 3. 壁面での境界条件

壁面での荷電粒子の消滅や散乱、2 次電子放出、電界放出など境界上での処理を行う。

#### 4. 中性粒子との衝突

荷電粒子と中性原子・分子間の衝突の種類(弾性散乱、電離、励起、解離などの非弾性散乱)

を衝突断面積に従った確率で決定し、衝突後の速度を計算し、電離によるイオンと電子の生成も考慮する。この手順を、プラズマの密度分布や電位分布が(周期)定常状態になるまで短い時間ステップ  $\Delta t$  で繰り返していく。

上記の 1,2 のみを繰り返して計算するのが PIC 法であり、4 が MC 法である。PIC/MC 法では、例えば  $10^8 \sim 10^{10}$  個の荷電粒子をまとめて 1 個の超粒子として扱い、この粒子の運動を追跡する。メッシュ分割した解析空間内に電子とイオンの超粒子を配置し、その超粒子の分布から決まる空間電荷をグリッド上に振り分ける。そして与えられた境界条件(電極の電圧やアースの配置など)の下で、誘電率が一様でない場合を考慮したポアソン方程式を解いて電位を計算し、さらに電位の勾配から電界を計算する。そして静電気力と磁場からのローレンツ力を外力とする、荷電粒子の運動方程式を解くことになる。この運動方程式を良く知られている蛙飛び法、ベルレ法もしくはルンゲクッタ法などで定式化して  $\Delta t$  後の位置と速度を計算すればよい。ポアソン方程式を高速に解く必要があるため、等間隔メッシュの場合は、FFT 法と Cyclic Reduction 法 (もしくはガウスの消去法) を併用した[3]、また不等間隔メッシュの場合はクリロフ部分空間法による反復解法を使用する。なお粒子モデルの場合、電界を精度良く求める必要がある。

## 2.2 DSMC 法 (中性粒子のための粒子モデル)

解析体系内の原料ガスの流れ場などのように圧力が低い流れ場について解析する場合、もしくは常圧下であっても解析体系が数  $\mu\text{m}$  以下となる時、気体を連続体であるとみなして取り扱うナビエ-ストークス方程式は適用できず、ボルツマン方程式にまでさかのぼって考えなくてはならない。ところが、このボルツマン方程式は複雑な非線形積分微分方程式であり、その取扱いは非常に難し

い。DSMC 法 (Direct Simulation Monte Carlo method、直接シミュレーションモンテカルロ法) はボルツマン方程式を直接解くのではなく、ボルツマン方程式の基になっているそれぞれの粒子の衝突過程を確率的に取り扱うことによって流れ場を解析する方法である。この手法の詳細は文献[7]、[8]を参照して頂きたい。

DSMC 法では、気体分子を PIC/MC 法と同様、超粒子として取り扱う。解析体系内の全ての気体分子を計算機で追跡することは不可能で、例えば  $10^{15} \sim 10^{20}$  個の気体分子をまとめて 1 個のサンプル粒子として扱う。数万~数 100 万個程度の超粒子を取り扱い、各粒子の位置、速度、内部状態等をメモリ内に記録し、衝突や境界の影響によってそれらの値を更新していくという手続きを繰り返す。衝突過程については、与えられた衝突断面積に従って確率的に引き起こし、衝突後の 2 粒子の速度もその衝突物理モデルに従い確率的に決定する。具体的には、流れ場を適当な大きさのセルに分割し、同一セル内の 2 個の粒子を物理モデルに基づいた確率則に従って衝突対として選択するというものである。衝突後の粒子対の速度は、エネルギー、運動量等が保存するように決める。希薄気体の場合、流れ場の物理量の変化の代表的な長さは平均自由行程程度であることから、セルのサイズは平均自由行程程度の大きさとする。DSMC 法により直接得られるものは、多数の粒子の位置、速度等のサンプルデータである。このデータを加工することにより、粒子の速度分布関数、密度分布、流速分布、温度分布などを得ることができる。統計誤差はサンプル数の  $1/2$  乗に反比例するので、時間平均のゆらぎが小さくなり、十分な精度を持つまでサンプリングを行うことになる。またプラズマ装置内もしくは真空装置内内では、密度差が大きく異なる原子・分子が存在し、小さな密度を持つ原子・分子の挙動を正確にシミュレ

ーションするには、従来の DSMC 法ではすべての粒子種の重みは同一であるため、膨大なサンプル数が必要であるが、Weight algorithm[5]を採用することにより、ほぼ同数のサンプル数で行える。

### 2.3 ドリフト-拡散モデル (荷電粒子のための流体モデル)

ガス圧が高くなると荷電粒子の平均自由行程が小さくなるので、粒子モデルを用いようとすれば空間のメッシュ分割幅と時間進展の  $\Delta t$  をともに相当小さくする必要があり計算時間が実用的な範囲を超えてしまう。そのような場合には電子やイオンの集団をそれぞれ流体として取り扱うモデルを用いる。

流体モデルでは、電子と各種イオンの各々について数密度、温度、流速ベクトル等のマクロな量が位置と時間の関数として定義される。これらは一般的には流体力学的な質量保存則を表す連続の式、運動量保存則を表す運動方程式、そしてエネルギー保存則を表すエネルギー方程式を電位に関するポアソン方程式と共に解くことによって求められる。連続の式には電離等の反応による生成項が含まれ、また運動方程式とエネルギー方程式にはそれぞれ中性分子との衝突による運動量とエネルギーの損失レートを表す項が含まれる。ドリフト-拡散モデルは運動方程式において時間微分項と慣性項を省略した式から導かれ、流速を電界に比例する速度 (ドリフト速度) と、圧力勾配に起因する拡散速度の和として表す近似モデルであり、広く用いられている。ドリフト速度の電界に対する比例係数は移動度と呼ばれ、拡散係数と共にこのモデルの重要なパラメータである。(これらを輸送パラメータとかスオームパラメータと呼ぶことがある。) 電界は電位の空間勾配として得られる。なお静磁場を考慮する場合には、移動度と拡散係数は異方性を持つテンソル量となる[9]。電子が電界から獲得するエネルギーはプラズマ生成の源で

あり、エネルギー方程式を解いてその時間-空間的な分布を求める必要があるが、イオンに関してはそのエネルギーは電離や再結合などの反応にはほとんど影響しないので、エネルギー方程式を解かずに温度は一定値と仮定して (例えば分子の温度と同程度) 既知とする場合が多い。なお基板への入射イオンエネルギーについては、流体モデルで得られる時空間電界分布、イオン生成率分布を用いてモンテカルロ法計算により求めることができる[8]。

ところでこれらの方程式を解くためには輸送パラメータや、電子やイオンの生成/消滅レート、電子エネルギーの損失レートなどの値を知る必要がある。これらは各種衝突の衝突周波数によって定まり、その衝突周波数は速度分布関数と衝突断面積の速度空間における積分によって計算されるため、速度分布関数の型に関して何らかの仮定が必要である。電子の分布関数に対する仮定は主に以下の2種類ある。

#### 1. マクスウェル分布を用いる

空間の位置ごとに、そこにおける電子温度で平衡状態にある速度分布関数 (マクスウェル分布) を用いて各種衝突周波数を計算する。移動度と拡散係数は運動量移行衝突周波数から求める。

#### 2. 一様電界中の電子スオームの分布関数を用いる

この場合は通常2項近似のボルツマン方程式を別途解く。衝突周波数は換算電界 (電界の大きさをガスの密度で除した量) の関数となるので、事前にある範囲の換算電界の値に対する速度分布関数を求めて電子の平均エネルギーを計算し、各種衝突周波数、移動度、拡散係数を平均エネルギーの関数としてテーブル化しておく。そして方程式を解く際には、計算セルの電子温度 (エネルギー) に対応する輸送パラメータを、テーブルを参照して求める。

イオンの移動度と拡散係数については、換算電界の関数として実験によって得られている値を用いるのが望ましいが、それらの情報が得られない場合には衝突断面積を一定とした剛体球モデルとマクスウェル分布を仮定した平均速度から計算した値を用いる。文献[10]にはイオンの移動度と拡散係数に関する理論と実測データがよくまとめられている。

## 2.4 ハイブリッドモデル (荷電粒子のための流体モデルと粒子モデルとの混合モデル)

ハイブリッドモデルには主に以下のモデルが存在する。

### (1) 電子のモンテカルロシミュレーションを併用する

電子の速度分布関数(実際にはエネルギー分布関数)についてのみ PIC/MC 同様の手法を用いて計算セルごとに値を求める。ただしこの場合にはプラズマ密度の空間分布によってプラズマ中の電界が変化するので、流体モデルによるプラズマ密度および電界の計算とモンテカルロ計算を数周期 ~ 数十周期ぶんずつ交互に行いながら計算を進めていく。計算時間が多少増えるが、分布関数を仮定する必要が無いのが利点である。

得られた電子エネルギー分布関数から各セルにおける電子温度、電子衝突による反応レートが求まる[9]。

### (2) 電子を PIC/MC で計算しイオンは流体モデルで計算する

マグネトロンスパッタ装置におけるマグネトロンプラズマシミュレーションは PIC/MC 法のみで計算する方法と電子のみ PIC/MC 法を用い、イオンの生成率を基にしたイオンに関する流体モデルによりイオン密度を求める方法がある。マグネトロンプラズマに限らず、電子の非線形性が強く、流体モデルで近似できない場合に採用される[2]。

## 2.5 中性粒子のための流体モデル

プラズマ中の中性粒子のみに着目して、それを一つの混合流体と考える。この流体中では粒子種毎に質量密度、圧力、流速ベクトル、および単位質量当たりの内部エネルギーが位置と時間の関数として定義される。そして混合流体の質量密度および圧力はそれぞれ各粒子種の密度の和および圧力の和として定義され、流速ベクトルおよび内部エネルギーはそれぞれ各粒子種の密度で重み付けされた加重平均量として定義される。また温度は粒子種に依存しないものと仮定し、粒子種毎に理想気体の状態方程式が成り立つものとする。このような仮定の下に各粒子種の密度、混合流体の流速ベクトル、および混合流体の内部エネルギーを未知変数として各粒子種についての連続の式、混合流体についての運動方程式およびエネルギー方程式を解く。これらの方程式は時間微分を含むので、通常は短い時間間隔で積分することにより解を求めていく。

プラズマの場合の特徴的なこととして次の点があげられる。

- ・プラズマ中では電子衝突による電離や解離等を含めて様々な反応が生じているので、連続の式にはそれによる生成項が入っている。それを計算する為には反応の速度定数(レートコンスタント)と荷電粒子の密度の情報が必要である。

- ・電子やイオンと中性粒子との間で衝突による運動量とエネルギーの交換が起こっている。特に大気圧プラズマのような高圧力の場合は電子-分子間の弾性衝突が頻繁に起こるため気体の温度も上昇し、密度も変化する。したがってエネルギー方程式にそのような項を付加する必要がある。

- ・固体表面では粒子の吸着や、反応によりそこで生成された粒子が空間に放出されたりするので、連続の式の境界条件としてそれらを考慮する必要がある。具体的には粒子種毎に表面での反射率(あ

るいは吸着率) と反応確率を与える。

## 2.6 荷電粒子シミュレーションと中性粒子シミュレーションとのカップリング

プラズマ中では原料となる分子の他に電子やイオンとの衝突によって生じる励起種や原子が生成される。また一般には装置の一部から原料ガスが供給され、排気口から流出させるためガスの流れが生じ、それによって分子、原子密度の空間分布が変化する。中性粒子種の密度変化は電離や付着に影響を与えるし、原子や励起種の密度やフラックスに関する情報が必要な場合も多い。したがってプラズマシミュレーションにおいては、荷電粒子だけではなくガスの流れも解くことが望ましい。

流体モデルを用いる場合、荷電粒子と中性粒子に対する支配方程式を時間積分して解を求めていくが、そこで問題となるのが時間積分の間隔  $\Delta t$  である。荷電粒子は電界の作用を受けるため、その運動をシミュレートするためには電界の1周期にわたる変化を充分解像できる  $\Delta t$  ( $10^{-12} \sim 10^{-10}$  秒程度) を用いる必要があるが、中性粒子の輸送は荷電粒子に比べるとゆっくり行われるので、同じ  $\Delta t$  を用いると定常状態に達するまでに膨大な計算時間がかかってしまう。そこで(周期)定常状態が存在する場合は、両者の計算を切り離して、それぞれ異なった  $\Delta t$  を用いて独立におこなう。中性粒子に関する時間積分では  $\Delta t$  はだいたい  $10^{-8} \sim 10^{-5}$  秒程度である。通常荷電粒子に対する計算を数周期分行ってからガス流れの計算を数ミリ秒程度行うことを反復する。流体モデルによるカップリング計算は多くの論文に掲載されているが、粒子モデルのカップリング計算については、文献[11]を参照して頂きたい。

## 3. 並列化について

プラズマシミュレーションに限らず

現在の科学技術計算において、並列化は必須である。特にスーパーコンピュータを使用する場合に

は、並列化しなければその性能を十分に発揮することが出来ない。1000 並列を超えるような計算では、ノード間は MPI, ノード内は OpenMP による並列化を施した hybrid 並列化が行われる。廉価版の PC でも複数コアが当たり前、32 コア程度の PC を用意することも難しくない。また GPU による並列化も話題になった。OpenMP による並列化は比較的容易であるが性能が出にくい印象がある。ここでは数十並列程度までを想定した MPI による並列化について述べる。

### 3.1 粒子分割

PIC/MC 法の超粒子追跡部分や、スパッタ粒子の挙動を追跡するなどの場合に用いられるテスト粒子モンテカルロ法では粒子分割を行うことで、非常に高い並列化効率を得られる。100 万個の超粒子を 1 並列で追跡するところを、25 万個ずつ 4 並列で追跡すれば、計算速度はほぼ 4 倍になることが理解できるであろう。この場合、それぞれのコアで別の乱数列を使い、4 並列のサンプリングの結果を集計すればよい。メモリはほぼ並列数倍だけ必要になる。

### 3.2 領域分割

多くの問題で、領域分割による並列化が行われる。DSMC 法では、同じセル内の超粒子同士を衝突させるため、先に述べた粒子分割では相性が悪く、領域分割を行うのがよい。ロードバランスを取るために、粒子モデルでは分割した各領域の超粒子数がほぼ同数になるように分割する。連続体モデルでは、単に各領域のセル数が同数になるように分割すれば良い。いずれも、分割した各領域の接する境界面が小さいほうが、通信量が減って効率が良くなると考えられる。問題によるが、比較的よい並列化効率を得ることが出来る。

### 3.3 線形方程式解法の並列化

ポアソン方程式やエネルギー方程式などを解くために、反復法や直接法のソルバーが用いられる

が、このソルバーも並列化する必要がある。高い並列化効率は得にくい場合が多い。領域分割や粒子分割の部分で良い並列化効率が得られても、ソルバーの並列化効率がネックになって全体としての並列化効率が上がらない場合がある。

#### 4. 原子分子データについて

プラズマシミュレーションにおいて、必要不可欠なデータとして、衝突断面積、反応レート係数などがある。これらのデータは、半世紀前から多くの研究者が、理論、実験から蓄積したものである。近年この非常に重要な基礎データ構築に関する研究者が少なくなってきた。幾つかの学会では、学会ごとにそれらをまとめてきたが、統一されたデータベースを入手することが困難であった。唯一原子分子過程における、理論、世界のデータベースについてまとめた、教科書もしくはハンドブックが発行された[12]。国内では核融合科学研究所、日本原子力開発機構を中心に NPO 法人原子分子データ応用フォーラムが活動している。しかし、プラズマと固体表面との表面反応を含む相互作用に関するデータベースはまだ存在していない。

#### 5. おわりに

すでに、熱・流体・構造・電磁界などのシミュレーション技術は、建築物・自動車・飛行機・電子機器などの設計に広く使われており、実験および試作コストの大幅な低減に成功している。またこの分野では、使い勝手の良い商用ソフトウェアも数多く販売されており、シミュレーション技術の普及に寄与している。

プラズマシミュレーションに関する研究も多くの研究者によって広く行われており、プラズマ現象の理解に大いに役立ってきた。しかし、未だ装置のデザインツールとして技術者に広く受け入れられるまでには至っていないのが本当のところであろう。理由としては、計算負荷が大きい、断面積データの不足、表面で生じる化学反応がよくわか

らない、装置内の測定データがほとんど無く計算結果の精度の評価も難しい、などといった点があげられる。

#### 参考文献

- [1] M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg ; ``Principles of Plasma Discharges and Materials Processing'', Second Edition (Wiley-Interscience, John Wiley Sons, Inc., 2005)
- [2] 真壁利明 ; ``プラズマエレクトロニクス" (培風館, 1999)
- [3] R.W. Hockney and J.W. Eastwood ; ``Computer Simulation Using Particles" (Adam-Hilger, Bristol and New York, 1981)
- [4] C.K. Birdsall and A.B. Langdon ; ``Plasma Physics via Computer Simulation" (McGraw-Hill, New York, 1985)
- [5] K.Nanbu ; IEEE Trans. Plasma Sci., 28, (2000), 971.
- [6] C.K. Birdsall, J.P. Verboncoeur, et al. The Plasma Theory and Simulation Group ; <https://ptsg.egr.msu.edu/>
- [7] G.A. Bird ; ``Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flow"(Clarendon Press, Oxford, 1994)
- [8] 南部健一 ; ``原子・分子モデルを用いる数値シミュレーション"第1編3章、(コロナ社, 1996)
- [9] M.J. Kushner ; J. Phys. D: Appl. Phys., 42, (2009) 194013.
- [10] E.W. McDaniel and E.A. Mason ; ``The Mobility and Diffusion of Ions in Gases" (Wiley, New York, 1973)
- [11] M. Shiozawa and K. Nanbu ; Thin Solid Films, 457, (2004) 48.
- [12] 浜口智志、村上泉、加藤太治、プラズマ核融合学会編 ; ``プラズマ原子分子過程ハンドブック" (大阪大学出版会, 2011)

## 研究室紹介

# 東京工業大学 工学院 電気電子系 竹内研究室

## 東京工業大学 竹内希

### 1. はじめに

東京工業大学工学院電気電子系竹内研究室は、大岡山キャンパス南3号館に位置し、主に大気圧プラズマやハイブリット直流遮断器に関連する研究を行っています。古くは林泉先生の研究室にルーツを持ちます。私が東京工業大学に入学した2001年には、石井彰三先生と安岡康一先生が共同で運営されていた石井・安岡研究室があり、安岡研究室の単独運営になった後の2004年に安岡研究室に卒研配属になりました。2009年に博士課程を修了し、半年間のポストドクを経て安岡研究室の助教として着任し、2012年12月に講師へと昇任した際に安岡・竹内研究室となりました。関連研究室のOBとして、浦井一先生や浦壁隆浩先生、白井直機先生、立花孝介先生が、プラズマエレクトロニクス分科会や電気学会などで活躍されてい

ます。2016年には全俊豪先生が助教として着任され、2021年3月の安岡先生のご定年退職に伴い、2021年4月より竹内研究室として運営しています。現在は竹内と全先生、事務員さん1名、博士課程学生3名、修士課程学生10名、学部4年生1名で構成されています。

### 2. 研究紹介

竹内研究室では、プラズマの電力・環境・材料応用をキーワードとした研究を主に行っています。プラズマを用いた高度水処理技術を安岡先生が精力的に研究されたことをきっかけに、プラズマと液体が接する、いわゆる『気液界面プラズマ』の応用研究、および、プラズマ-液体界面での複雑な現象に着目した研究を進めてきました。近年は水処理技術に加えて、気液界面プラズマを用いた



写真1：2022年度の研究室集合写真

炭素材料の改質・合成や、液中アンモニアの転換などへと展開しています。また、全先生を中心として、アンモニアや窒化マグネシウムなどのエネルギーキャリア合成技術、また、直流電力系統での電流遮断に用いる、直流遮断機の研究を行っています。ここでは、1. 高度水処理技術、2. 気液界面プラズマシミュレーション、3. 炭素材料改質、4. エネルギーキャリアの合成、5. ハイブリッド直流遮断器について紹介したいと思います。

## 2.1 高度水処理技術

みなさんご存じの通り、気液界面プラズマでは水分子を原料として、反応性の高いOHラジカルを生成することができます。OHラジカルは、オゾンでも分解できない難分解性有機物の分解が可能であり、気液界面プラズマを難分解性有機物分解のための高度水処理技術として用いる研究が多くなされています。プラズマ以外の方式も含めて、OHラジカルを用いた水処理技術は促進酸化処理と呼ばれています。我々は、水中気泡内プラズマや気液二相流プラズマ、水面上プラズマなどを用いた促進酸化処理の研究を進めてきました[1]。

当然、気液界面プラズマにより酢酸などの難分解性有機物の分解が可能なのですが、実用化を見

据えると、分解速度および分解エネルギー効率の向上が必須となります。分解速度の向上のためには、OHラジカルの生成量を増やせばよいので、プラズマへの投入電力を大きくすればよいのですが、OHラジカルは別のOHラジカルと反応して、過酸化水素(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)を生成してしまいます。この過酸化水素生成反応の速度はOHラジカルの密度の二乗に比例するので、OHラジカル密度が高くなるとこの反応によるOHラジカルの損失が増大し、有機物分解に寄与するOHラジカルの割合が激減します。この結果、分解速度と分解エネルギー効率の間にトレードオフが発生してしまうことが課題でした。そこで我々は、気液界面プラズマを過酸化水素生成に特化させ、別途、オゾン発生器で生成したオゾン処理水中に供給して、過酸化水素とオゾンとの反応によりOHラジカルを再生する、プラズマ-オゾン併用方式の研究を進めています(図1)。これは、従来の薬品としての過酸化水素とオゾンとを組み合わせてOHラジカルを生成する促進酸化処理と同様の反応を使っていますが、電気エネルギーさえあれば、プラズマによってオンサイトで過酸化水素とオゾンを生じさせるため、海上油田や僻地などといった、過酸化水素の輸送・保管が困難な場所での、分散型の水処

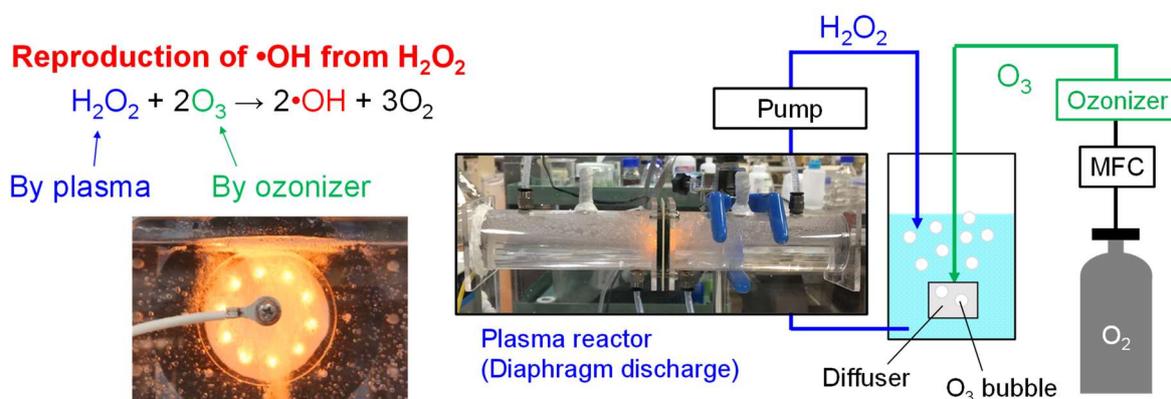


図1：プラズマ-オゾン併用方式

理システムとして有用であると期待しています。とはいえ、過酸化水素生成効率の向上は必要であり、ダイヤフラム放電プラズマなどを適用して試行錯誤しているところです。

酢酸以外の分解対象として、有機フッ素化合物である PFOS (ペルフルオロオクタンスルホン酸) および PFOA (ペルフルオロオクタン酸) の気液界面プラズマによる分解処理も行っています。PFOS や PFOA は強固な炭素-フッ素結合に起因する化学的安定性と、優れた界面活性剤としての性質から、半導体産業や泡消火薬剤など、様々な用途に用いられていました。しかし、環境残留性や毒性などの問題から、POPs 条約や化審法などで製造・使用の制限がなされています。しかしながら、世界中の環境水や飲料水での検出が相次

いでおり、有効的な分解技術の確立が喫緊の課題となっています。PFOS・PFOA 分解には促進酸化処理は有効ではなく、超音波キャビテーション処理や亜臨界処理などが研究されています。我々は水中気泡内プラズマを用いた PFOS・PFOA 分解を行い、図 2 上に示すように、他方式よりも高効率な分解を達成しました。これは、図 2 下に示すように、界面活性剤としての性質により気液界面に吸着した PFOS・PFOA 分子が、プラズマ中の電子やイオン、中性粒子などの高エネルギー粒子により直接分解されるためであると考えています[2]。

## 2.2 気液界面プラズマシミュレーション

気液界面プラズマを用いた高度水処理では、どこでどのように OH ラジカルが生成され、有機物と反応しているかを理解することが重要です。OH ラジカルの密度は、分光計測やレーザ誘起蛍光法などで定性または定量評価がなされることが多いですが、プラズマと処理水の界面近傍での OH ラジカルの挙動は実験的に観測することが困難です。そこで我々は、COMSOL Multiphysics® を用いて気液界面プラズマのシミュレーションを行い、OH ラジカルを中心とした反応場の解析を行っています[3]。気液界面では、各粒子に対してヘンリーの法則に基づく気液平衡が成り立っていると仮定し、また、気相と液相での界面を通してのフラックスを連続として、物質輸送(ガス吸収)をモデル化しています(図 3)。水面上プラズマのシミュレーションでは、気相および液相での OH ラジカルの過酸化水素生成反応の他、液相での OH ラジカルと過酸化水素、および、HO<sub>2</sub> ラジカルとの反応が、OH ラジカルの主要損失反応であることが分かりました。また、OH ラジカルの処理水への浸透深さは、1 μm 以下と非常に小さく、OH ラジカルによる有機物分解反応は、ほとんど

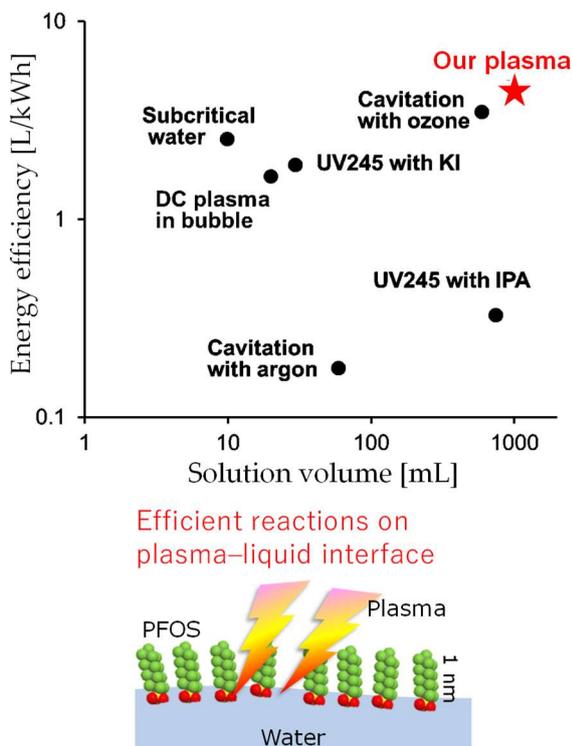


図 2 : 気液界面プラズマによる高効率 PFOS 分解

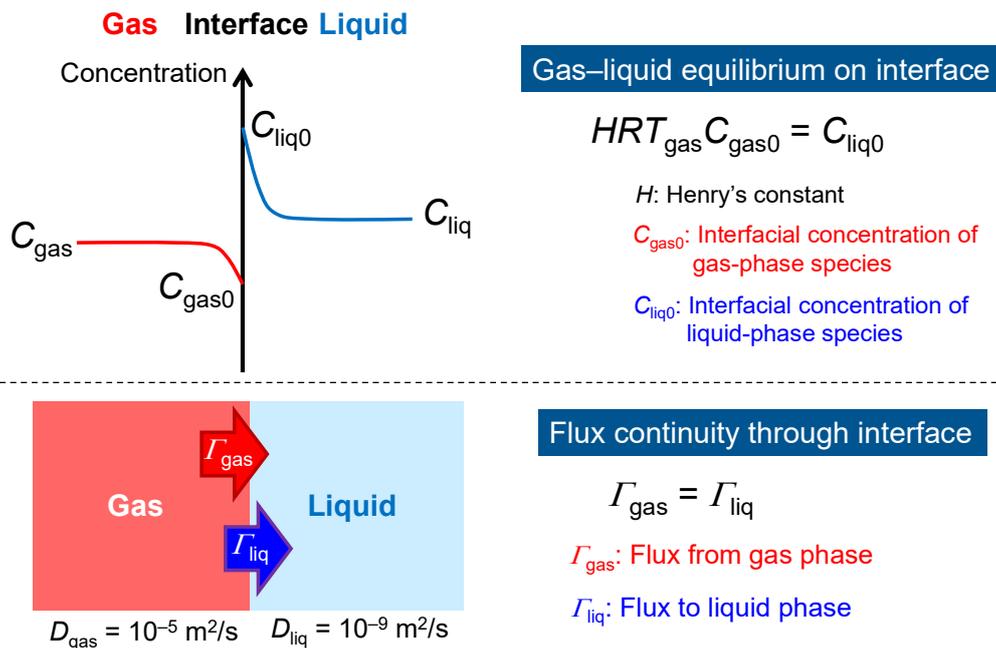


図 3：気液界面プラズマシミュレーションでの気液界面の境界条件

プラズマ処理水界面での界面反応のようなものであることが分かっています。

### 2.3 炭素材料改質

カーボンナノチューブやグラファイトなどの炭素材料粉体を処理水中に懸濁して、気液界面プラズマを生成することで、炭素材料に OH 基や COOH 基を修飾して、親水性を向上させることが可能です[4]。最近、釜山大学の Oi Lun Helena Li 先生、名古屋大学の稗田純子先生、岩手大学の高橋克幸先生、大分大学の立花孝介先生との共同研究として、希硫酸中に炭素材料を懸濁してプラズマ処理し、スルホン基 (-SO<sub>3</sub>H) を修飾する研究を進めています。スルホン化した炭素材料は、セルロースをバイオ燃料へと転換する過程における加水分解触媒として用いることができます。スルホン化においては、プラズマ処理水界面から硫酸分子がプラズマ中に供給され、熱分解により生成された SO<sub>3</sub>ラジカルが重要な役割を果たしていると考えています[5]。

### 2.4 エネルギーキャリアの合成

低炭素社会の実現に向けてエネルギー貯蔵システムが必要とされる中、新型エネルギーキャリアとして窒化マグネシウムという物質に着目しています。窒化マグネシウムは乾燥雰囲気下で化学的に安定であり、さらに常温で水と容易に反応してエネルギーキャリアとして有望なアンモニアを生成します。竹内研究室では大気圧プラズマにより酸化マグネシウムの窒化による窒化マグネシウム合成研究を進めています。エネルギー貯蔵システム全体で二酸化炭素を排出しないクリーンエネルギー循環システムを目指しています。

また、低炭素社会の実現に向けたエネルギーキャリアとしてのアンモニアが注目されているため、現在のハーバーボッシュ法ではなく、二酸化炭素を排出しない小規模分散型のアンモニア合成手法が必要となります。竹内研究室では独自の大気圧流動層プラズマを用いたプラズマ触媒複合プロセスでアンモニア合成手法を開発しようと考えています。

## 2.5 ハイブリッド直流遮断機

大規模太陽光発電や洋上風力発電といった分散型電源の普及や、直流送配電の増加に伴い、直流遮断器の需要が高まっています。事故発生時には遮断器により電流を直ちに遮断する必要がありますが、直流は電流零点をもたないため、電流遮断が困難です。そこで、通常時の電力損失が小さく、かつ事故電流の高速遮断が可能な、電気接点と並列に半導体素子を挿入したハイブリッド直流遮断器の研究を進めています。安岡先生が進めていたアークレスハイブリッド直流遮断器の研究では特定条件下でアーク放電を発生させずに電気接点から半導体素子への転流・遮断技術を開発し、電磁ノイズがなく、電気接点の損耗もほとんどないハイブリッド直流遮断器を開発しました。

最近では全先生が中心となり、埼玉大学の稲田優貴先生、東京大学の西大亙先生、名古屋大学の兒玉直人先生、金沢大学の中野裕介先生との共同研究として、ヒューズと半導体素子を並列運用した新型のハイブリッド直流遮断器の研究を開始しました。

## 3. おわりに

東京工業大学の大岡山キャンパスは、大岡山駅正面口から徒歩1分の位置に正門があり、南3号館は正門から歩いて数分の距離です(図4)。研究室見学も大歓迎ですので、東京近辺にお越しの際は、是非ご連絡いただければと思います。

## 参考文献

- [1] N. Takeuchi and K. Yasuoka ; Jpn. J. Appl. Phys., vol. 59, (2021), SA0801.
- [2] N. Takeuchi, Y. Kitagawa, A. Kosugi, K. Tachibana, H. Obo, and K. Yasuoka ; J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 47, (2014), 045203.
- [3] N. Takeuchi, M. Ando, and K. Yasuoka ; Jpn. J. Appl. Phys., vol. 54, (2015), 116201.
- [4] S. Hoshino, K. Kawahara, and N. Takeuchi ; Jpn J. Appl. Phys., vol. 57, (2018), 0102B1.
- [5] S. Deng, N. Takeuchi, J. Hieda, K. Takahashi, K. Tachibana, and O.L. Li ; J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 55, (2022), accepted.



図4：大岡山キャンパスマップ

# 高密度収束プラズマスパッタリング装置と 磁気ミラー型マグネトロンカソードの紹介

産業技術総合研究所 本村大成

## 1. はじめに

本稿では著者が開発した以下の2つのスパッタリング装置について紹介する。

① 高密度収束プラズマスパッタリング装置 (High-density convergent plasma sputtering device: CPSD) [1-4]

② 磁気ミラー型マグネトロンカソード (Magnetic Mirror-type Magnetron Cathode: M3C) [5-9]。

どちらのスパッタリング装置にも独自考案した磁場配位に関するアイデアを盛り込んでいる。両者に共通する設計コンセプトは、プラズマ反応場と基板近傍領域とが接触しないような装置構造にすることである。そうすることでスパッタリングターゲットから発生する二次電子の基板への流入が抑制され、これら二次電子の流入による熱流束が低減する。その結果、一般的なスパッタリング装置と比較して基板温度の上昇を抑制する効果をもたらす。一般的なスパッタリング成膜では、基板裏面に配置したヒーターなどで数百℃程度まで基板を加熱し、基板に堆積した粒子の表面熱拡散運動を促進することで成膜した結晶の品質向上を図る。この時の成膜品質には先に説明した二次電子流入の影響も含まれている。我々は、二次電子による熱流束を低減することでスパッタリングプロセスそのものの現象理解ができるのではないかと考え、CPSD、M3Cの両装置を用いた研究、特にこれまでは反応性スパッタリングを対象とした研究を進めてきた。

1章でCPSDの装置構造の概略について述べる。次に本装置の特長である高密度プラズマをターゲットに収束照射するプローブ測定の実験結果について紹介し、続いて非加熱ガラス基板を用いた窒化ガリウム (GaN) 成膜結果の例を紹介する。

2章では、磁気ミラー閉じ込め効果を用いて低電力・低ガス圧力放電を可能にしたM3Cの装置構造および放電特性についての実験結果を紹介する。

## 2. 高密度収束プラズマスパッタリング装置 (CPSD)

図1にCPSDの概略図を示す。CPSDはイオンビームスパッタリング (IBS) 装置と類似性がある。プラズマ源から発生させたプラズマ (IBS装置ではイオンビーム) をターゲットに照射するという装置構造上の類似性がある。一般的なスパッタリング装置で用いるスパッタリングカソードは、ターゲット近傍にプラズマを生成してスパッタリングを生じさせることから、プラズマ生成条件とイオン引き込みの条件を個別に制御することができない。すなわち投入電力に応じて、イオン引き込み電圧が固定となる。CPSDはプラズマ生成部と、イオン引き込みのためのターゲット印加電圧を個別に制御可能であり、反応性媒質であるプラズマの生成条件と被スパッタ粒子量を個別に制御可能な構造となっている。

CPSD では、生成部で発生したプラズマのターゲットへの効率的な輸送を実現するために、水冷のソレノイドコイルと液体 Ga を保持したターゲットホルダの裏面に配置した円柱状のネオジウム磁石 (厚さ 9mm、直径 25mm) により、Ga ターゲットまで収束する磁場配位が構成されている。図 1 に、ソレノイドコイル電流  $I_c = 70 \text{ A}$  時のベクトルポテンシャルを黒線で表記している。カラーの等高線は  $x$ - $z$  平面の磁場強度 (Tesla) を示している。ソレノイドコイル中心の磁場強度とターゲット表面の磁場強度はそれぞれ、 $0.088 \text{ T}$  および  $0.43 \text{ T}$  となり収束磁場配位が形成されている。装置中心軸上 ( $x = 0$ ) では、 $I_c = 70 \text{ A}$  時において、電子サイクロトロン共鳴 ( $\sim 0.0048 \text{ T}$  at  $13.56 \text{ MHz}$ ) が生じない程度の磁場に調整してある。CPSD の収束磁場配位は、前述したターゲット表面から発生する基板温度増加に影響する二次電子流入の抑制に加えて、プラズマ中のイオンの膜表面への直接的な暴露も抑えられるため、膜へのイオンダメージの低減も期待できる。液体 Ga ターゲット (純度 99.999 99%) はボウル状の水冷ホルダに設置しており、Ga は融点が  $303 \text{ K}$  であり成膜中は十分に安定な液体状態にある。そのためプラズマ支援の抵抗加熱蒸着法と異なり、液体金属によるスパッタリング成膜が進行している。液体 Ga を保持するボウル状のホルダは直径  $25 \text{ mm}$  の SUS 製である。ターゲットホルダは  $-450 \text{ V}$  に負バイアスされており、プラズマ生成状態に依存せずにターゲットにイオンの引き込みを行い、Ga 表面をスパッタリングすることができる。負バイアス印加時には  $45 \text{ mA}$  のターゲット電流がターゲットに流入し、ターゲット印加電力はおよそ  $4 \text{ W/cm}^2$  となっている。この印加電力は一般的なスパッタリング装置と同程度である。用いた基板は Corning Eagle XG (ガラス基板、 $10 \times 10 \times 1.1 \text{ mm}$ ) であり、ターゲット基板間距離は  $\sim 45$

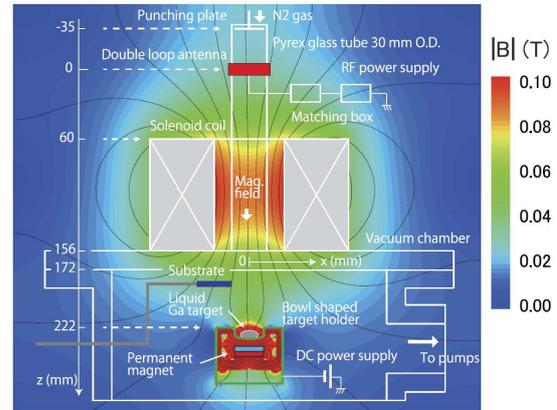


図1 CPSDの概略図[1]。Reprinted from T. Motomura and T. Tabaru, Rev. Sci. Instrum., 89, (2018), 063501., with the permission of AIP Publishing.

mm である。背景圧力は  $< 5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$  であり、 $\text{N}_2$  ガス ( $13.0 \text{ sccm}$ ) を装置上方から導入し、典型的に  $0.2 \text{ Pa}$  で成膜を実施している。ガラス管には 2 回巻 RF アンテナを巻き付け、右回り円偏波 (ヘリコン波) により高密度プラズマを生成している。ガラス管溶融を生じさせないように、 $200/100 \text{ 0ms}$  のパルス ON 時間として間欠的にプラズマを生成し、 $300 \text{ min}$  の装置運転により、 $60 \text{ min}$  の成膜時間を確保している。方向性結合器により、入射パワーと反射パワーをモニタし、反射率  $0.05$  以下でプラズマ生成を行っている。イオン飽和電流の測定に用いたラングミュアプローブの電極は、長さ  $2 \text{ mm}$ 、直径  $0.2 \text{ mm}$  のプラチナ製である。ラングミュアプローブ測定により、 $x = 0 \text{ mm}$ ,  $z = 172 \text{ mm}$  においては電子温度  $4.5 \text{ eV}$  程度であることを実験により確かめている。電力の伝送効率を求めるために、アンテナ出力部に電流プローブを設置し、プラズマに投入された正味の電力  $P_{\text{net}}$  を計算した[1]。膜の結晶構造を調べるために、X線回折測定 (XRD, RINT 2110V and SmartLab, Rigaku) を用いた。

図 2(a)は  $I_c$  に対する電子密度  $n_e$  の変化 ( $P_{\text{net}} \sim 500 \text{ W}$ ) であり、図 2(b)は  $P_{\text{net}}$  に対する  $n_e$  の変化 ( $I_c = 70 \text{ A}$ ) である。プローブ測定位置は、 $x = 0 \text{ mm}$ ,  $z = 172 \text{ mm}$  であり、ガラス管と拡散チャンバの接続部となっている。図 2(a)において、最大  $3.3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  のプラズマ密度を得た。図 2(b)においては、200 W 以上で電子密度が線形増加している。なお図 2(b)の  $P_{\text{net}} < 200 \text{ W}$  と同様に、図 2(a)の  $I_c < 20 \text{ A}$  においても、 $x = 0 \text{ mm}$ ,  $z = 172 \text{ mm}$  ではイオン飽和電流が測定下限を下回っていた。図 2 の実験結果より、 $P_{\text{net}} = 500 \text{ W}$ 、 $I_c = 70 \text{ A}$  を高密度プラズマが Ga ターゲットに照射される条件と定め、GaN 成膜実験により図 3 の結果を得た。

図 3 に非加熱ガラス基板 (Eagle XG)を用いた、直交表  $L_9(3^4)$  による GaN 成膜実験結果を示す [4]。図 3(a)-(i)に対応する実験条件は、表 1 のようになっている。図 3 に記載するそれぞれの記号は、 $q = 1/d_{\text{hkil}} = 2\sin\theta/\lambda$  であり、 $d_{\text{hkil}}$ 、 $\theta$ 、 $\lambda$  はそれぞれ、(hkil) 面の面間距離 ( $i = -h -k$ )、X 線の入射角、X 線の波長を表す。||と⊥の記号は、膜表面に対して平行、垂直であることを示す。 $q\perp$  は out of plane スキャン方向であり、測定範囲は 20-80 deg.の範囲とした。表 1 に示した  $L_9(3^4)$  の直交表実験は、4 因子 3 水準の直交表を用いる実験であり、総当たりで 81 回の実験が必要な実験操作を 9 回にまとめ、各因子や水準の作用を評価するための、実験計画法に基づいた実験方法である。総ガス流量に対する  $\text{N}_2$  ガス流量比  $R_{\text{N}_2} = \text{N}_2/(\text{Ar}+\text{N}_2)$ 、ターゲット流入電流  $I_t$ 、スパッタ時のガス圧力  $p$ 、ターゲット基板間距離  $l_s$  を直交表の制御因子として用いた。図 3 では  $R_{\text{N}_2}$  に対して顕著な回折パターンの違いが見られた。図 3(a)では、明確な回折ピークが表れていないことから結晶成長が進んでいない、すなわちアモルファス構造であることが示された。図 3(b)-(i) では、ウ

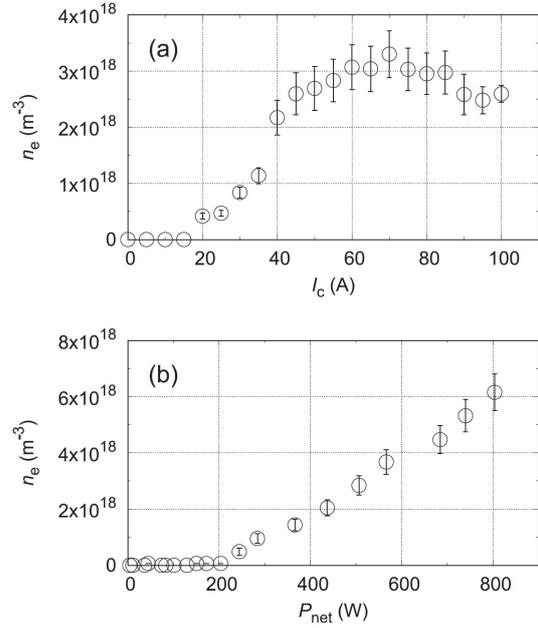


図2 (a)ソレノイドコイル電流 $I_c$ に対する電子密度 $n_e$ の変化 (プラズマに投入された正味の電力  $P_{\text{net}} \sim 500 \text{ W}$ )。 (b)  $P_{\text{net}}$  に対する $n_e$  の変化 ( $I_c = 70 \text{ A}$ ) [1]。Reprinted from T. Motomura and T. Tabaru, Rev. Sci. Instrum., 89, (2018), 063501., with the permission of AIP Publishing.

表 1 図 3(a)-(i)に対応する成膜条件

Exp.	$R_{\text{N}_2}$ (%)	$I_t$ (mA)	$p$ (Pa)	$l_s$ (mm)
1	70	35	0.1	45
2		45	0.15	54
3		55	0.2	63
4	85	45	0.1	63
5		55	0.15	45
6		35	0.2	54
7	100	55	0.1	54
8		35	0.15	63
9		45	0.2	45

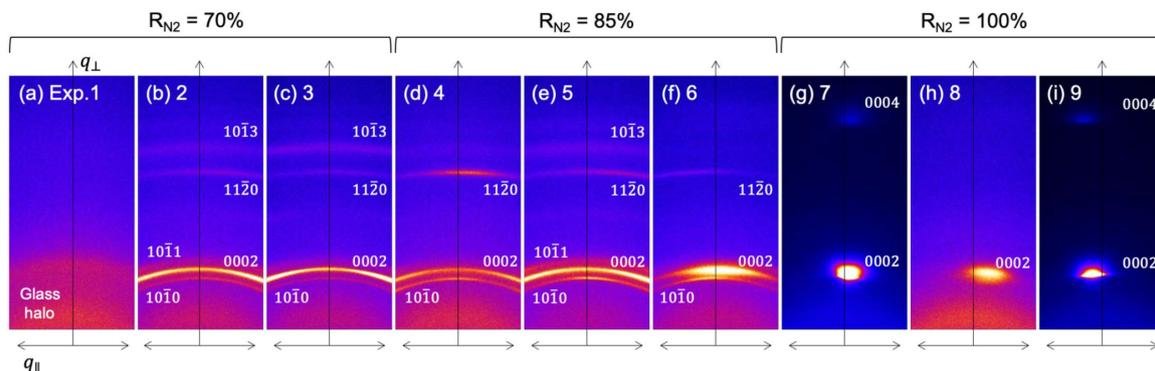


図3 直交表実験により得た逆格子マップ[4]。本実験では、総ガス流量に対するN<sub>2</sub>ガス流量比  $R_{N_2} = N_2/(Ar+N_2)$ に着目してデータをまとめている。(a)-(c)  $R_{N_2} = 70\%$ 、(d)-(f)  $85\%$ 、(g)-(i)  $100\%$  である。Reprinted with permission from T. Motomura, T. Tabaru, Y. Fujio and T. Okuyama, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 39, (2021), 013001. Copyright 2021, American Vacuum Society.

ルツ鋳型 GaN の X 線回折パターンが生じている。その中でも図 3(b)-(f)においては複数のブロードな回折パターンが表れており、GaN(0002)が支配的ながら基板面に対しては揺らいで成長した膜となっている。図 3(g)-(i)では、GaN(0002)の鋭いピークが得られていることから、*c* 軸配向のウルツ鋳型 GaN 薄膜が得られたことがわかった。図 3 の実験結果より、CPSD を用いた非加熱ガラス基板による GaN 成膜実験においては、 $R_{N_2} = 100\%$  の時のみウルツ鋳型の *c* 軸配向 GaN 薄膜が得られることが明らかとなった[4]。

また、CPSD は収束磁場配位を用いた装置構造をとることから、ターゲット金属の磁性に依らずスパッタが可能であることが確かめられている[2]。本稿ではこれまでに得られた実験結果について簡潔に述べたが、詳細は参考文献[1-4]を参考にいただければ幸いである。

### 3. 磁気ミラー型マグネトロンカソード (M3C)

結晶品質の改善が見込まれる低ガス圧力環境においてもスパッタ成膜の持続運転を実現するために、磁気ミラー閉じ込め効果を活用した M3C を

開発してきた[5-9]。開発当初に 0.1 Pa のガス圧力環境における持続運転をカソード運転特性の目標と定めた。磁場計算により、ターゲット表面に磁気ミラー領域（磁力線収束部）が形成されるように磁場配位を決定した。図 4(a)では、磁場計算により得られた永久磁石とヨークによる磁力線を M3C の概略断面図に重ね合わせて示している。点線で囲まれた円領域が磁気ミラー領域である。図 4(b)には M3C に内蔵する永久磁石の上面図を示す。M3C の特徴的な磁場配位を実現するために、PM1 は中心に細孔を開けた径方向磁化の永久磁石を採用している。PM1 の中心軸はターゲット中心と一致し、PM1 の細孔が小さくなるほど、ターゲット中心部の磁力線収束度が大きくなり、ターゲットの中心部の磁力線がターゲット法線方向に対して平行に鎖交するようになる。PM2 の内径をターゲット外径と等しくし、かつ PM2 の上面を PM1 の厚みの半分の位置に合わせると、ターゲット中心部だけでなくターゲット外縁部でも磁力線がターゲット法線方向に対して平行に鎖交するようになる。以上の永久磁石の構成により、磁気ミラー比はターゲット中心近傍と外縁部に鎖交する

磁力線に沿っておよそ 25 となる [最強磁場強度  $\sim 150$  mT ( $|r|=0, z=0$  mm), 最弱磁場強度  $\sim 6$  mT ( $|r|=25$  mm,  $z=20$  mm)]. ここで  $r$  および  $z$  は径方向および軸方向位置であり、ターゲット中心が  $r, z=0$  である。磁力線の垂直方向に運動する粒子の速度を熱速度と仮定して計算すると、電子と Ar イオンのラーマ半径はそれぞれ  $< 0.8$  mm,  $< 1.7$  mm である (電子温度 4 eV, イオン温度 0.4 eV と仮定)。従来のマグネトロンカソードでは PM1 に細孔がなく、軸方向に磁化した永久磁石を用いるため、ターゲット中心部の磁力線がカソード上方に発散し Unbalanced magnetron cathode と呼ばれるのに対し、M3C はターゲット中心部においても磁力線がターゲット上方にほとんど発散しない Balanced magnetron cathode と呼ばれる。M3C のように、磁気ミラー比がおよそ 25 の Balanced magnetron cathode は著者の知る限りではこれまでに例がなく (一般的なマグネトロンカソードは磁気ミラー比がおよそ 5)、そのカソード特性を明らかにするために研究を進めている。

図 5 に放電実験により得られた ArII 発光パターンを示す。中心波長 488 nm の干渉フィルタを用いてカソード上方から ArII の自発光分布を撮像した。放電実験ではアルミニウム (Al) ターゲットを用いた。プラズマ生成用電源として、DC 電源 (DCS0052B, 株式会社アルバック) を用いた。約  $5 \times 10^{-4}$  Pa に到達するまで真空排気を行い、放電時には Ar ガス圧力を一定値に保持するようマスフローコントローラでガス流量を制御した。ガス圧力は放電領域からおよそ 350 mm 離れた Ar ガス導入位置付近でイオンゲージにより計測した。図 5 において、Ar ガス圧力を下げるとプラズマ粒子の平均自由行程が長くなるために発光領域が広がる。投入 DC 電力を増加させると発光強度 (電子密度の二乗に比例) は増加する。また投入

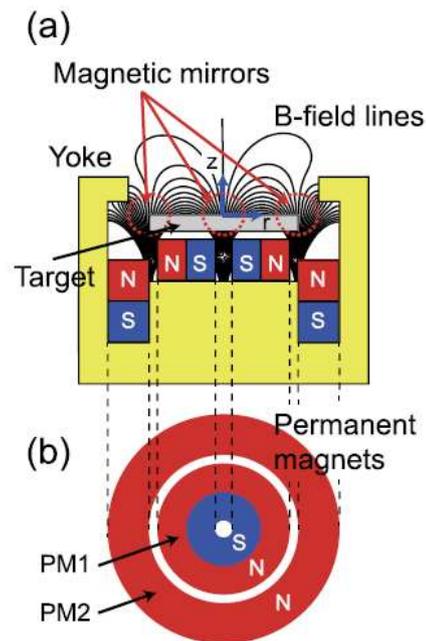


図4 (a)M3Cの概略図。(b)永久磁石を鉛直方向から見た図[5]。Reprinted from T. Motomura, and T. Tabaru, AIP Adv. 7, 125225 (2017); licensed under a Creative Commons Attribution (CC BY) license.

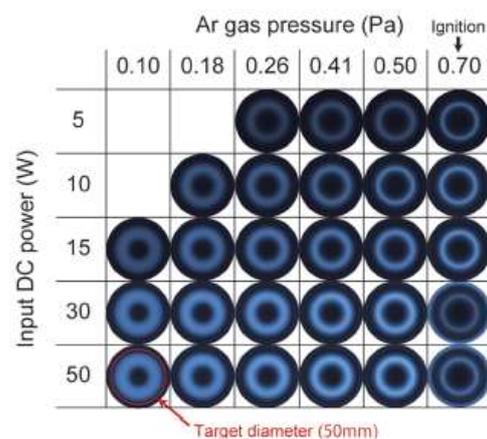


図5 M3Cのプラズマ発光パターンのArガス圧力と投入DC電力の依存性[5]。Reprinted from T. Motomura, and T. Tabaru, AIP Adv. 7, 125225 (2017); licensed under a Creative Commons Attribution (CC BY) license.

DC 電力の大小に依らず Ar ガス圧力 0.70 Pa 以上にするとプラズマ放電が開始する。この放電開始ガス圧力は従来のマグネトロンカソードの 1/3 程度あるいはそれ以下である。DC 電力 5 W の場合には, Ar ガス圧力 0.26Pa 以上でプラズマの持続放電が可能である。このときの電力密度はおよそ 0.25 W/cm<sup>2</sup> となり、先行研究の投入 DC 電力密度と比較しても同程度かそれ以下である[5]。さらに 15 W 以上では、0.1 Pa でも持続放電が可能となる。図 5 の実験結果より、研究開始時に目標とした 0.1 Pa のガス圧力環境における持続放電が達成されたことがわかる。このような低ガス圧力環境下での放電は、これまでは HiPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering) のような高い DC 電力を間欠的に投入する電離効率の良いカソードでしか得られておらず、2 インチカソードながらわずかに 15 W の投入 DC 電力で 0.1 Pa での持続放電を実現できたことは、M3C の磁気ミラー閉じ込めが効果的に機能したことを裏付けている。投入 DC 電力 15 W, Ar ガス圧力 0.1 Pa, ターゲット-基板間距離 (TS 距離) 280 mm で成膜実験を実施したところ、およそ 0.2 nm/min の成膜速度を得た。低ガス圧力運転が可能になったことで、このように極めて長い TS 距離での成膜も実現できるようになっている。長い TS 距離が実現できると、スパッタ装置への組込みに当たり、膜厚の面内均一性が向上するとともに、複数カソード組み込み時の設計自由度が広がるといったメリットが期待できる。M3C のターゲット使用率は、体積比でおよそ 50% となり、従来のマグネトロンカソードと比較して約 10% 以上の向上となっている。ターゲット外縁部の端まで放電領域を伸長できたことが、ターゲット使用率向上の主な理由となっている。

最後に、M3C のターゲット使用率のさらなる改善を目指して開発した改良型 M3C について簡単

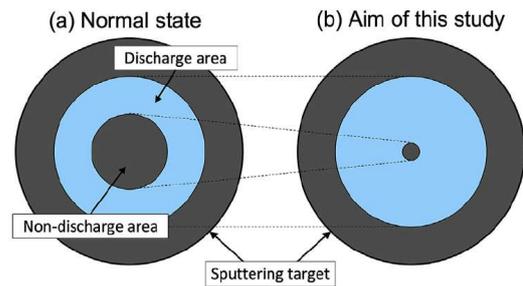


図6 (a)一般的なマグネトロンカソードの放電領域を上方から見た時のイメージ。(b)改良型 M3C の放電領域を上方から見たイメージ[6]。Copyright : Reprinted from Vacuum 169, T. Motomura, and T. Tabaru, Magnetron sputtering cathode for inward enlargement of doughnut-shaped plasma discharge area, 108869 (2019), with permission from Elsevier.

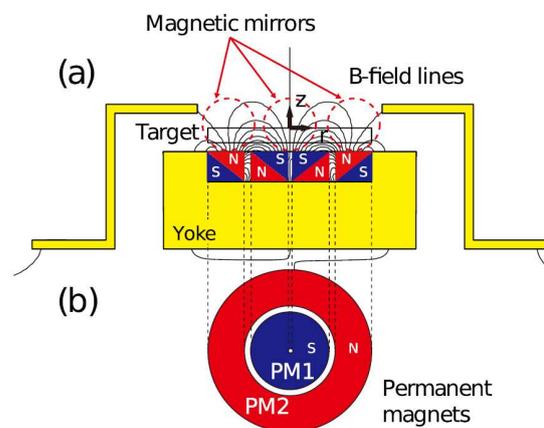


図7 (a)改良型M3Cの概略図。(b)永久磁石を鉛直方向から見た図[6]。Copyright : Reprinted from Vacuum 169, T. Motomura, and T. Tabaru, Magnetron sputtering cathode for inward enlargement of doughnut-shaped plasma discharge area, 108869 (2019), with permission from Elsevier.

に述べる。ターゲット使用率を高めるためには、図 6 のように  $E \times B$  ドリフトによって生じるターゲット中心部の不可避な非放電領域を小さくすることが一案として考えられる。ターゲット中心部の磁力線を M3C のものよりもさらに収束させ、ターゲット法線方向に平行に整列させることで、図 6(b)に示したように放電領域を内側に拡張できるのではと考えた。そのための磁場計算を実施し、目的の性能を実現したのが、図 7 に示す改良型の M3C である[6]。図 6 に示した放電領域が実現できたかどうかに関しては、紙面の都合上、参考論文 6 にゆずるのでご興味のある方はご確認いただきたい。

#### 4. おわりに

本稿では、著者が開発した 2 つのスパッタリング装置について紹介した[1-9]。磁場配位に独自の工夫があるスパッタリング装置を開発したことで、装置運転の自由度を向上させ、低ガス圧力・低電力運転が可能になるなどの効果を得た。現在は、一般的なスパッタリング装置と比較して基板温度の上昇を抑制できる特徴 (<80°C 程度) を活用して、M3C を利用した低耐熱基材への薄膜形成に取り組んでおり、それらの実験結果については、近日中に紹介できると期待している。

最後になりましたが、本研究の遂行にあたり産総研 田原竜夫博士、上原雅人博士、藤尾侑輝博士、久留米高専 奥山哲也教授をはじめとした研究者

の皆様、川戸勇人様（現在は奈良先端科学技術大学院大学）、御園樹様をはじめとした学生諸氏にご協力をいただきましたので、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- [1] T. Motomura and T. Tabaru, Rev. Sci. Instrum., 89, (2018), 063501.
- [2] T. Motomura and T. Tabaru, e-J. Surf. Sci. Nanotechnol, 17, (2019), 27-31.
- [3] T. Motomura and T. Tabaru, J. Plasma Fusion Res., 96, (2020), 695-700. (in Japanese)
- [4] T. Motomura, T. Tabaru, Y. Fujio and T. Okuyama, J. Vac. Sci. Technol. A, 39, (2021), 013001.
- [5] T. Motomura and T. Tabaru, AIP Adv., 7, (2017), 125225.
- [6] T. Motomura and T. Tabaru, Vacuum, 169, (2019), 108869.
- [7] T. Motomura, T. Tabaru, M. Uehara, Y. Fujio and T. Okuyama, J. Vac. Sci. Technol. B, 38, (2020), 032205.
- [8] T. Motomura and T. Tabaru, Vacuum and Surface Science, 63, (2020) 283-288. (in Japanese)
- [9] Y. Kawato, T. Motomura, T. Tabaru, M. Uehara and T. Okuyama, Jpn. J. Appl. Phys., 61, (2022) 046001.

## 第 20 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

東北大学 佐々木 渉太, 高島 圭介, 金子 俊郎

#### はじめに

この度は、第 20 回プラズマエレクトロニクス賞という大変栄誉ある賞を賜りまして、大変光栄に思っております。ご支援いただきました皆様、ならびに選考に関係されました諸先生方に深く御礼申し上げます。今回、受賞の対象となりました論文「Portable Plasma Device for Electric  $N_2O_5$  Production from Air」(佐々木 渉太, 高島 圭介, 金子 俊郎) [1] に関しまして、その研究背景や経緯、内容の一部を以下に簡単にご紹介させていただきます。

#### 論文内容

##### 【研究背景・経緯】

近年、大気圧プラズマを多方面（医療・農業・環境・材料分野等々）に応用する機運が高まっております。特に、バイオ分野に目を向けてみますと、大気圧プラズマ応用に関する文献報告は、医療分野で先行して 2000 年代初頭から増え始め、その後を追うように農業分野でも発展していく兆

候が見られます（図 1）。また、医療用低温プラズマの市場規模についても、文献報告数を後追いつくような形で発展してきており、今後も成長していくと予想されています。しかしながら、現在の文献数・市場規模はともに、他の成熟した産業技術と比較するとまだまだ小さいものであり、まさに今が黎明期であると言えます。そして、この時期には、大気圧プラズマの学術基盤構築はさることながら、『キラーアプリケーションが作れるかどうか』が、その後の命運を大きく左右する重要課題なのではないかと思われまます。すなわち、実応用で“使える”大気圧プラズマ技術を 1 つでも多く世の中に発信することが求められているといま強く感じます。

さて、大気圧プラズマ技術が古くから活用されてきた応用の一つに、オゾン ( $O_3$ ) 生成があります。 $O_3$  は、大気中の誘電体バリア放電 (Dielectric Barrier Discharge; DBD) によって生成されることがよく知られており、最初の実験実証は 1857 年に報告された W. Siemens らによるものだとされております [2]。この 1 世紀以上も前の発見から、現代の生成効率は格段に向上しており、これには近年のプラズマ生成技術の発展が大きく寄与しています [3]。 $O_3$  の強力な酸化作用を用いることで、殺菌・消臭などの幅広い用途に、現在も世の中で広く活用されています。

我々の研究グループでも、2010 年頃から大気圧プラズマの医療・農業応用に関連する研究を推進して参りました（ちなみに、金子研究室には、2012 年：佐々木が学部生として配属、2014 年：高島が

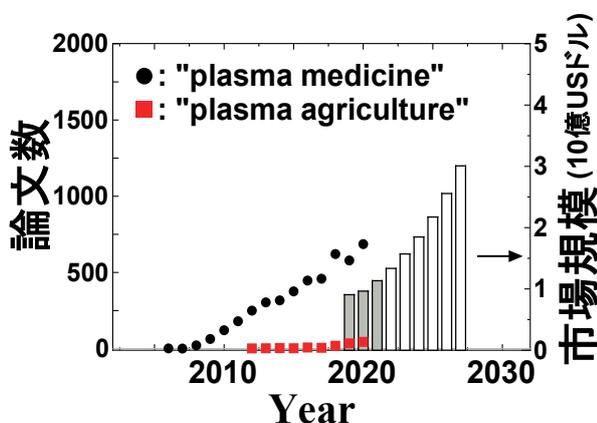


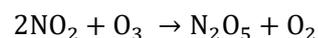
図 1. プラズマ医療・農業の論文数と市場規模。参照元：Scopus, DataM Intelligence.

助教として着任). 当初は, 遺伝子導入などの医療応用を主に佐々木が担当し, 殺菌や植物免疫向上などの農業応用を高島が担当しておりました. 農業応用では, 処理面積の拡大と価格コストの低減が要求されたため, 空気と水を用いたプラズマが主な研究対象となりました. そうなると必然的に,  $O_3$  が主要な気相活性種となる傾向が強くなり,  $O_3$  の物性や化学的特性を考慮に入れながら, 様々な農業向けプラズマ装置を開発してきたという経緯があります [4-6]. この空気プラズマが持つ多様な作用の内,  $O_3$  の効果として説明可能なものも多数ありましたが, 一方で説明が出来ない作用も多く見つかりました. その中の一つがニトロ化作用です. そこで, その機能を担った活性種を探したところ, 有力候補として, 受賞対象論文のタイトルにもある五酸化二窒素 ( $N_2O_5$ ) が浮上しました [7]. しかし, 2018 年当時の  $N_2O_5$  密度は,  $O_3$  よりも 1~2 桁程度は低かった上に, 常に多量の  $O_3$  の影響を考慮しなくてはならないこともあり, 非常に難しい実験が要求されるものでした. また,  $N_2O_5$  密度を何とか 1 桁程度向上させたとしても, それは  $O_3$  モードから窒素酸化物 ( $NO_x$ ) モードへの移行域で運転する必要があり, 同じ密度を数分も保てられないほど不安定な運転条件での実験が要求されました. 一方で, 低密度にも関わらず, 明確な作用が再現性良く観測されたことは, その反応性の高さを示すと同時に, プラズマ作用の中で重要な役割を担っているのではないかという疑いをより強くするものでもありました. この  $N_2O_5$  の重要性に気付いたこと, 金子の含窒素活性種に注力したいという強い意向, そして東北大学内の研究プロジェクト「新領域創成のための挑戦研究デュオ〜Frontier Research in Duo (FRiD)〜」に採択されたことが契機となり,  $N_2O_5$  のプラズマ選択合成に挑戦するプロジェクトを 2019 年末に開始することができました.

## 【研究内容】

$N_2O_5$  は, 非常に高い酸化・ニトロ化能を有しており, 常温では固体の物質ですが, 蒸気圧が高くおよそ  $32^\circ\text{C}$  で昇華します. 別名「無水硝酸」とも呼ばれ, 吸湿性が非常に高く (水と反応しやすく), 反応後はすぐに硝酸となります. また, 熱に非常に弱い物質でもあり,  $NO_x$  が多量に生成される高温のプラズマではほぼ観測できません. ガス状の  $N_2O_5$  も, 室温で分解するため保管が非常に困難な物質となっています. 従って, 工場等での集中生産には不向きであり,  $O_3$  と同様, プラズマ技術でその場生成する価値がある物質であると言えます.

先行研究により, プラズマ中の  $N_2O_5$  は, 主に  $O_3$  と  $NO, NO_2$  から生成されることは, 化学量論的な議論から明らかとなっていました [7].



従って,  $O_3 \cdot NO \cdot NO_2$  をバランス良く生成することが,  $N_2O_5$  選択合成の重要な鍵を握ると言えます. しかし, 一般に空気プラズマ中では, 低いガス温度域では  $O_3$  が主に生成される  $O_3$  モードとなり, 高いガス温度域では,  $NO$  や  $NO_2$  が主に生成される  $NO_x$  モードになることが良く知られて

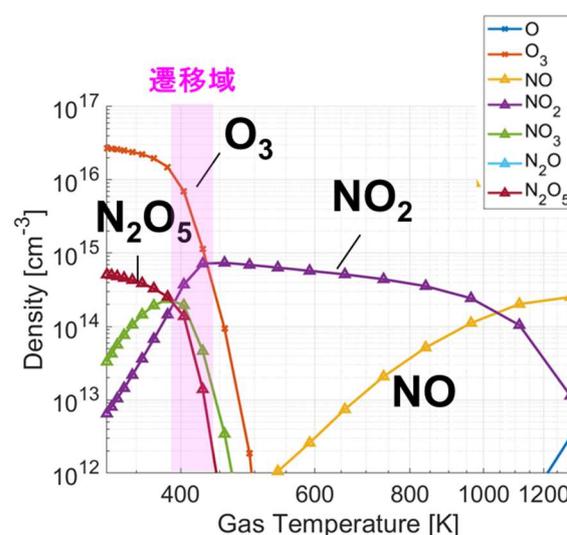


図 2.0 次元化学反応シミュレーションによる各活性種密度のガス温度依存性. 一定の N ラジカル・O ラジカル供給を仮定し, 安定後密度を图示.

います (図 2)。この遷移域では、わずかな温度変化にも敏感に反応し、活性種密度が急激に変化するため、密度の安定制御が困難です。そこで、我々は、プラズマ反応リアクタを、 $O_3$  を専門に合成する低温リアクタと  $NO, NO_2$  を専門に合成する高温リアクタに分け、後にガス混合することで、これら活性種の安定した密度制御合成を実現しました。さらに、 $N_2O_5$  の生成反応には、数十秒の時間を要することを見出し、混合遅延反応器を設けることで、 $N_2O_5$  の選択比を格段に向上させることに成功しました。その結果、図 3 に示すように、他の活性種 ( $O_3 \cdot NO \cdot NO_2 \cdot HNO_3$ ) と比較して 10 倍以上高い  $N_2O_5$  密度 (およそ 200 ppm) を達成することが出来ました。

この  $N_2O_5$  選択合成において、もう一つ技術的に難しいと感じた点は、乾燥環境を維持することでした。 $N_2O_5$  はわずかな水分とも反応し、すぐに  $HNO_3$  へと変換されるため、 $N_2O_5/HNO_3$  密度比を高く (少なくとも 10 以上に) 保つためには、蓄積

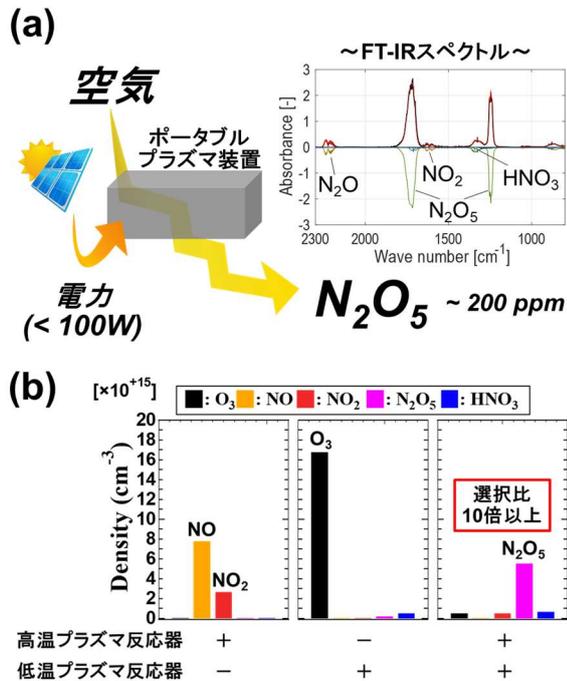


図 3. (a) 空気から  $N_2O_5$  を選択合成と典型的な FT-IR スペクトル. (b) 各プラズマ反応器の ON/OFF スwitching による活性種組成制御.

濃度で水の不純物混入を 10 ppm 以下に抑える必要があります。そのため、モレキュラーシーブスといった強力な乾燥材を使用する他にも、プラズマリアクタ内も含めてガス配管内で金属製 (特に SUS) を使用しない工夫などが必要でした。

現在では、この  $N_2O_5$  プラズマ合成システム (図 4) は、更なる改良が進められ、原料ガスとなる空気も、ボンベ供給ではなく周囲大気を用いることができ、 $N_2O_5$  密度も最大で 400 ppm 程度、選択比も 30 を超えるような性能になってきております。近年、急速な進化を遂げているモバイルバッテリーを搭載することで、運搬可能で、かつどこでも周囲大気から  $N_2O_5$  をその場生成し、供給できる装置の稼働実証まで完了しています。

#### 【今後の展望】

$N_2O_5$  はまだまだマイナーな化学物質であり、昨年の Science で特異な界面反応が報告されるなど [8]、物性、化学反応性ともに未知な部分が多くあ

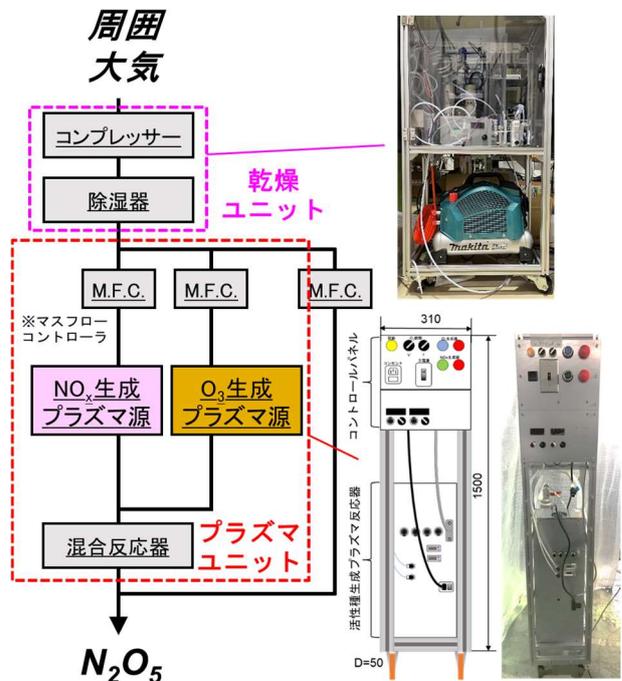


図 4. 遍在型  $N_2O_5$  供給装置の概略図. 希釈機構を備え、所望密度の供給が可能になっている。

ります。また、 $\text{N}_2\text{O}_5$ の応用研究は、有機化合物合成以外では、ほとんど報告が無い状況であり、誰も手が付けられていない未開拓領域となっています。本研究グループでは、 $\text{N}_2\text{O}_5$ の基礎特性を調べるとともに、応用研究を強く推進しており、特に殺菌やウイルス不活化、薬剤合成、植物免疫活性化などへの活用を狙っております。最近では、バクテリオファージやヒトカゼコロナウイルスを $\text{N}_2\text{O}_5$ 処理した実験において、有望な結果が得られつつあり、明瞭な殺菌作用を有することが判明してきました。

さらに、研究背景・経緯で紹介した東北大学内のプロジェクト 挑戦研究デュオの一環で、本 $\text{N}_2\text{O}_5$ 合成装置は、学内の農学研究科や生命科学研究科にもそれぞれ設置され、異分野の共同研究者とともに、主に植物への作用を重点的に調べております。このプロジェクトは、「プラズマアグリ ― 機能性窒素を活用したサステナブルファーム ―」という題目で、植物工場のような閉鎖空間において、プラズマ技術を最大限に活用して 1. 窒素源供給、2. 殺菌・ウイルス不活化、3. 植物の免疫活性をもたらし活性種を作り分ける技術システムの実証を狙うものです[9]。最近の研究で、モデル植物であるシロイヌナズナを対象として、 $\text{N}_2\text{O}_5$ の様々な効果が見出されつつあります。 $\text{N}_2\text{O}_5$ が液中に吸収されやすく、植物にとって重要な栄養素である $\text{NO}_3^-$ に変換されるという特性に着目し、窒素源供給として機能することが実験的に確かめられました。その他にも、植物の免疫活性に関して、農学研究科の安藤杉尋先生が中心となって、遺伝子解析のみならず植物病害菌の接種試験まで実施し、 $\text{N}_2\text{O}_5$ の植物免疫活性化効果が実証されております[10]。今後も、プラズマ合成 $\text{N}_2\text{O}_5$ の応用を広く展開していこうと考えております。

## 【おわりに】

$\text{N}_2\text{O}_5$ のプラズマ制御合成は、まだまだ未熟な技術であり、発展の余地が多く残されております。特に、本装置はシンプルな DBD 放電を用いており、ナノ秒パルス放電やグライディングアークなどで報告されている $\text{O}_3$ や $\text{NO}_x$ 生成効率と比較すると、低い値となっています。従って、現在の $\text{N}_2\text{O}_5$ 合成エネルギー効率（ $\sim 2.8 \text{ g/kWh}$ ）はまだまだ改善の余地があるといえます。この $\text{N}_2\text{O}_5$ を用いた応用を、大気圧プラズマの「キラーアプリケーション」へと成長させることが出来るように、一層邁進していく所存でおりますので、今後ともご指導ご鞭撻の程、よろしくお願い申し上げます。

## 参考文献

- [1] S. Sasaki, K. Takashima, and T. Kaneko: *Ind. Eng. Chem. Res.* **60** (2021) 798.
- [2] U. Kogelschatz: *Plasma Chem. Plasma Process.* **23** (2003) 1.
- [3] D. Wang and T. Namihira: *Plasma Sources Sci. Technol.* **29** (2020) 23001.
- [4] A. Ochi *et al.*: *Plant Pathol.* **66** (2016) 67.
- [5] K. Shimada, K. Takashima, Y. Kimura, K. Nihei, H. Konishi, and T. Kaneko: *Plasma Process. Polym.* **17** (2020) e1900004.
- [6] K. Takashima, Y. Hu, T. Goto, S. Sasaki, and T. Kaneko: *J. Phys. D. Appl. Phys.* **53** (2020) 354004.
- [7] Y. Kimura, K. Takashima, S. Sasaki, and T. Kaneko: *J. Phys. D. Appl. Phys.* **52** (2019) 064003.
- [8] M. Galib and D.T. Limmer: *Science* **371** (2021) 921.
- [9] <https://w3.tohoku.ac.jp/frid/project/page-55/>
- [10] D. Tsukidate, K. Takashima, S. Sasaki, S. Miyashita, T. Kaneko, H. Takahashi, S. Ando: *PLOS ONE*, in press (2022).

## 第 20 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

東京工業大学 大西 広, 山崎 文徳, 箱崎 喜郎,  
竹村 将沙樹, 根津 篤, 赤塚 洋

#### 【はじめに】

この度は、第 20 回プラズマエレクトロニクス賞を賜り、共著者全員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・ご選考していただいた委員の皆様には厚く御礼申し上げます。今回の受賞対象論文「Measurement of electron temperature and density of atmospheric-pressure non-equilibrium argon plasma examined with optical emission spectroscopy」[1]に関しまして、研究背景と概要について紹介させていただきます。

#### 論文概要

##### 【背景】

大気圧非平衡プラズマが、学術・技術の最前線で頻りに議論される様になってから、既に 20 年以上が経過しました。水中・液中放電でも生成可能ですし、医療・農業・食品工業・繊維産業など、新たな応用も増えていることは、分科会の皆様には繰り返すまでもないでしょう。

そのような新たなプラズマ源の応用には、基礎的パラメーター、特に電子温度  $T_e$ 、電子密度  $N_e$  の計測は必須と思われまます。ところが、いまだに大気圧非平衡プラズマの計測については、実験室規模で簡便に実行可能な標準的方法が確立されておりません。無衝突シースの仮定が成立しないため、プローブ計測は適用困難です。レーザー散乱法などは原理的には可能ですが[2]、経済性・操作性などの点で産業現場や医療現場とは整合しないでしょう。さらに、非平衡プラズマですから、励起状

態の放つ線スペクトル強度を発光分光計測(OES)しても、その解釈は複雑です。原子衝突による励起状態のクエンチングを取り入れた衝突輻射モデル(CR モデル)を適用すれば、 $T_e$ 、 $N_e$  の測定は、原理的に不可能ではありません。しかし、原子衝突による励起状態間の励起脱励起の速度係数は、それほど精度は良くないですし、そもそも CR モデルで励起状態密度を記述できる放電気体は限られています。つまり、線スペクトル測定による  $T_e$ 、 $N_e$  計測にも限界があります。

そこで、汎用的な大気圧非平衡プラズマの  $T_e$ 、 $N_e$  の計測手段が是非とも必要です。このような状況のもと、韓国 KAIST の Park, Choe らのグループにより、減圧プラズマでは強度不足で計測困難な連続スペクトルが、電子温度・密度の計測に有用であることが報告されました[3]。ただ、続報や妥当性の検討報告例が乏しく、文献[3]の方法の実験検証が必要です。このような状況のもとで、我々も大気圧非平衡プラズマを生成し、その連続スペクトル計測から、電子温度・密度を計測しようと研究を計画し実行しました。

##### 【実験方法】

図 1 のように、内側-外側の 2 重の石英管構造を有する放電装置を用意します。内側のガラス管は左右に 2 つ配置してそのギャップ間隔を 1 mm とし、対向面は石英封じ切りとして、内部に冷却促

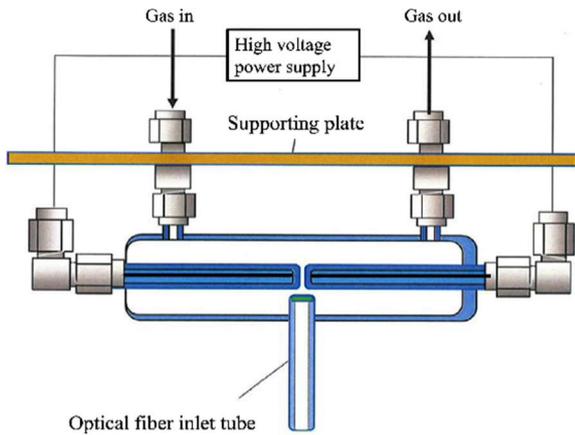


図1 本研究で利用した大気圧非平衡プラズマ生成装置[1]. © (2021) The Japan Society of Applied Physics.

進のため水に浸漬した形で放電電極をセットし、誘電体バリア放電を生じる構造とします。外側ガラス管と内側ガラス間の間は大気圧の放電気体の流路とし、常に新たな放電気体を供給し続けて不純物対策としました。誘電体（ここでは石英）で覆われた針対針電極を構成し、放電の生じる空間を1点に限定することで、発光分光計測が常に石英窓を通して実施できる様にします。大気圧の希ガスを流路に流し、7–9kV<sub>p-p</sub>の20 kHz 交流を印加すると、安定してギャップ間で大気圧非平衡プラズマが得られます。

連続スペクトルを、かなり幅広い波長範囲（300–900 nm）で測定する必要があります。T<sub>e</sub>測定にも波長の相対感度校正が必要ですし、特にN<sub>e</sub>まで求めるには、絶対感度校正も必要となります。これには、照度標準としてのハロゲン電球と、その照度標準を輝度標準に変換するための白色拡散反射版を用いることで対応しました。実際のスペクトル測定例を図2（フィッティングも併載）に示します。この様に、大気圧ゆえに衝突対象の中性原子が多数存在することから、連続スペクトルとしての制動放射が十分な強度で計測可能です。

この発光スペクトルを、制動放射の分光放射強度の理論曲線とフィッティングすることにより、T<sub>e</sub>, N<sub>e</sub>を求めようとするのが、本実験のストラテジ

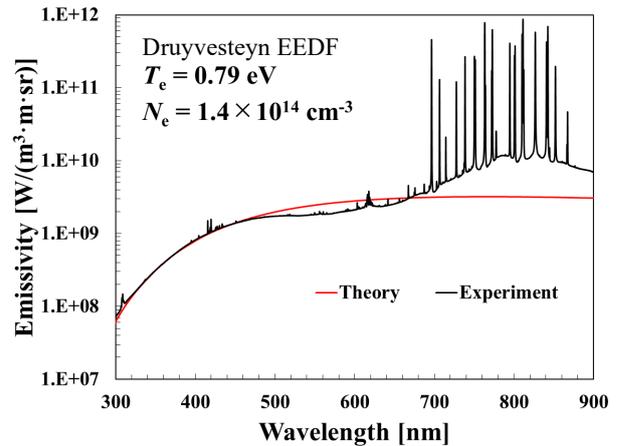


図2 大気圧非平衡アルゴンプラズマの連続スペクトルのOES計測結果. 赤線は式(1)による理論フィッティング[1]. © (2021) The Japan Society of Applied Physics.

一となります。

### 【理論解析】

今回測定した制動放射による連続スペクトルの場合、分光放射率 $\epsilon_{ea}$ は理論的に求められており、次式で与えられます[2].

$$\epsilon_{ea}(\lambda) = \sqrt{\frac{2}{m_e}} \frac{N_e N_a}{\lambda^2} \frac{hc}{4\pi} \int_{h\nu}^{\infty} Q_{ea}^B(\lambda, \epsilon) \sqrt{\epsilon} f(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

ここに $m_e$ は電子質量、 $N_a$ は衝突対象原子密度、 $\lambda$ は光子波長、 $\nu$ は対応する光子振動数、 $\epsilon$ は電子エネルギー、 $h$ はPlanck定数、 $c$ は光速、 $f$ は電子エネルギー分布関数(EEDF)で $\int_0^{\infty} f(\epsilon) d\epsilon = 1$ と規格化、 $Q_{ea}^B$ は電子原子制動放射断面積で運動量移行断面積 $Q_{ea}^{mom}$ から式(2)のように求められます。

$$Q_{ea}^B(\lambda, \epsilon) = \frac{8\alpha}{3\pi} \frac{\epsilon}{m_e c^2} \left(1 - \frac{hc}{2\lambda\epsilon}\right) \sqrt{1 - \frac{hc}{2\epsilon}} Q_{ea}^{mom}(\epsilon) \quad (2)$$

$\alpha$ は微細構造定数です。要するに、放電に利用する気体の $Q_{ea}^{mom}$ がわかっているならば、発光現象は電子衝突に関して線形ですから、異種の気体が混入された場合もそれぞれの $Q_{ea}^{mom}$ を調べて式(1)の発光を

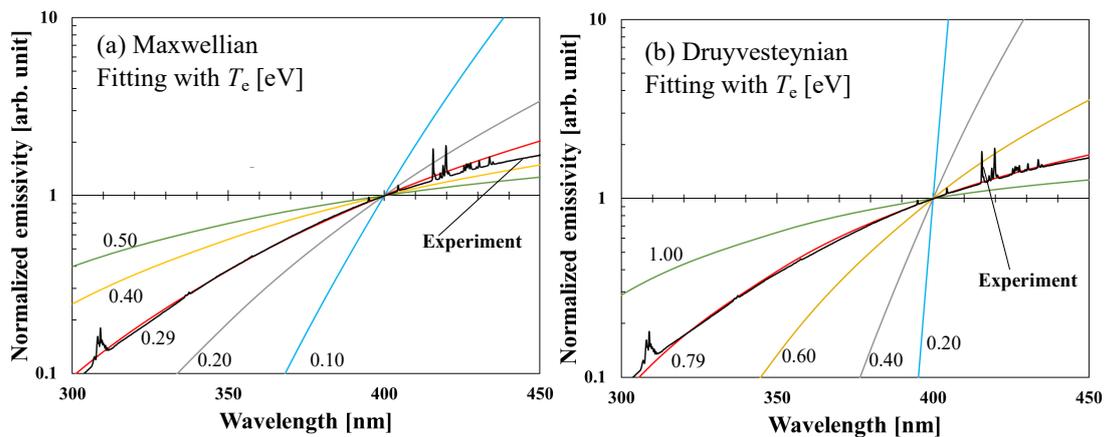


図3 大気圧非平衡 Ar プラズマの連続スペクトルの、式(1)によるフィッティング例。(a) Maxwell EEDF を仮定した場合、(b) Druyvesteyn EEDF を仮定した場合[1]. © (2021) The Japan Society of Applied Physics.

足し合わせることで、式(1)から  $T_e$ ,  $N_e$  の関数として連続スペクトルを計算することが可能です。ただし、そのためには、式(1)中の EEDF が既知でなければなりません。本研究では、Maxwell 分布と、Druyvesteyn 分布の 2 通りを仮定して、連続スペクトルを計算し、実験結果をフィッティングして電子温度・密度を決定する、という手法を採用しました。

具体的手続きとしては、高次回折光の影響を減らしたいこともあり、まず 300–450 nm 以下の短波長に着目し、その波長域の相対強度変化を、仮定した EEDF を用い、式(1)でのベストフィッティングにより、 $T_e$  を決定します (図 3)。次に、その  $T_e$  を固定して、絶対発光強度をフィッティングし、 $N_e$  を決定する、という手順を取りました。図 2 には、Druyvesteyn EEDF を仮定してベストフィットした式(1)による連続スペクトルも、滑らかな “Theory” の曲線で示しました。

### 【結果と考察】

Ar プラズマの場合 500 nm 以上の長波長側では、一致はそれほど良くはなく、この程度がフィッティングの限界でした。おそらく、600 nm を超えた長波長側では、様々にアルゴンの線スペクトルが

混入するため連続スペクトルのベースが上昇することで良い一致を得にくくなること、あるいは高次回折光の混入の影響、さらには EEDF の関数形を Druyvesteyn と仮定したこと、等により、完全に現象を捉え切れていないため、このような不一致が生じたものと理解しています。

今回の研究では、Maxwell EEDF を仮定すると、極めて低温・高密度な  $T_e$ ,  $N_e$  が導出され、一方 Druyvesteyn EEDF を仮定した場合には、他の研究者からの報告例[2]とも一致するような範囲の、リーズナブルな  $T_e$ ,  $N_e$  が導出されました。それぞれの EEDF を用いて電子温度のフィッティングを行った結果を図 3 (a), (b) にそれぞれ示します。

しかし今回 EEDF の手がかりがなく、Maxwell か Druyvesteyn かいずれかを仮定せざるを得なかったことが問題点と言えます。すなわち、今回の研究で得られた  $T_e$ ,  $N_e$  が妥当であるかどうかについて、物理的に異なるメカニズムで検証して、初めて正しい結論を導くことが可能と言えます。

そこで、本研究では、原子衝突励起脱励起過程も素過程として取り入れた Ar - CR モデルを用いた励起状態密度計算と、計測スペクトルに現れる線スペクトル強度とを比較し、それらの一致を確認することで、今回の連続スペクトル計測によっ

て求めた  $T_e$ ,  $N_e$  の妥当性を検証することとしました. すなわち, 仮定した EEDF と, 連続スペクトル計測から導かれた  $T_e$ ,  $N_e$  を入力として, 大気圧放電に適用可能な Ar - CR モデルによって計算を行うと, Ar 原子の各励起状態数密度を求めることができます[4]. この Ar 励起状態密度の計算値と, 線スペクトル発光強度から求めた Ar 励起状態数密度との比較により, Druyvesteyn EEDF を仮定して求めた  $T_e$ ,  $N_e$  の妥当性が確認されました. また, Maxwell 分布を仮定した場合には桁違いに高い励起状態密度が得られてしまい, 実験結果の線スペクトル強度を説明することはできませんでした.

### 【まとめ】

以上の様に, 電子-中性原子制動放射による連続スペクトルを発光計測分光して求め, EEDF の関数形を仮定して理論フィッティングをおこなうことにより, 大気圧非平衡 Ar プラズマの電子温度・密度を測定できる, ということが結論されました.

実際の実験室や, 産業・医療などの現場で適用する際に必要となるのは, 小型で汎用的な分光器のみで十分で, それほど分解能も必要としないのが, 本方法の長所です. ただし, それに先立ち, 輝度標準光源によって発光強度の感度校正が必要です. また, もちろんプラズマ源によっては, EEDF の形状は, 今回の様に Druyvesteyn とは限りませんから, 何か他の方法で EEDF の妥当性に関する検証を, 実用の場面に先立って行っておくことが必要と思われます.

### 【終わりに】

本論文内容をさらに発展させ, Ar-N<sub>2</sub> 混合気体の大気圧非平衡プラズマについても, 本方法の妥当性を確認することができております[5].

また, EEDF に関する仮定を排除し, 式(1)を実際得られた連続スペクトルに適用することで,

EEDF そのものが求められないかという問題にも, この数年, データ科学・機械学習の手法を駆使し取り組んでおります. すなわち, 実験では式(1)の左辺  $\varepsilon_{ea}(\lambda)$  が得られますが, 我々が求めたいものは EEDF, 即ち右辺の積分の中にある  $f(\varepsilon)$  となります. 理想的には, 第1種 Volterra 積分方程式の解を求めることに対応しますが, 実際に測定できる  $\lambda$  には上限・下限があります. 従って問題は不完全積分方程式となり, 解としての  $f(\varepsilon)$  も有限の電子エネルギー範囲のみ求められる, というような興味深い結果が得られております[6].

本研究は, 実用的な応用を様々に提供できる可能性を有する一方, 上記の様に「逆問題」にも帰着し, 学術的にも興味深いものと思われまふ. プラズマの OES 研究は, まだまだ尽きることはありません. なお一層の研究が必要と思っております. この分野への皆様のご支援・ご指導を, 引き続きよろしくお願い申し上げます.

### 【謝辞】

本研究の成果の一部は, JSPS 科研費 19H01867 の助成を受けたものです. 記して謝意を表します.

### 参考文献

- [1] H. Onishi, F. Yamazaki, Y. Hakozaki, M. Takemura, A. Nezu, and H. Akatsuka; JJAP **60** (2021) 026002.
- [2] S. Hübner, J. S. Sousa, J. van der Mullen, and W. G. Graham; Plasma Sources Sci. Technol. **24** (2015) 054005
- [3] S. Park, W. Choe, H. Kim, and J. Y. Park; Plasma Sources Sci. Technol. **24** (2015) 034003.
- [4] H. Akatsuka; Adv Phys: X **4** (2019) 257 – 281.
- [5] 石塚良, 根津篤, 赤塚洋, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会 (2021) 10a-S301-3.
- [6] T. van der Gaag, H. Onishi, and H. Akatsuka; Phys. Plasmas **28** (2021) 033511.

## 国際会議報告

# 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Application for Nitrides and Nanomaterials / 15th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (ISPlasma2022/IC-PLANTS2022)

## 名古屋大学 石川健治

本会議は 2022 年 3 月 6 日 (日) ~10 日 (木) にオンライン会議の形式で開催された。(文中敬称略) 組織委員長・大野哲靖、実行委員長・豊田浩孝 (名大)、プログラム副委員長・プラズマ分野・梶田信 (東大)、窒化物分野・寒川義裕 (九大)、ナノ分野・神原淳 (東大・現阪大)、バイオ分野・熊谷慎也 (名城大)、プログラム委員長を著者が務めた。直前まで、オンサイト開催、ポスター講演の準備をしていたところ、コロナ禍の状況が芳しくなく、急遽二年連続のオンライン開催となったが、それも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も 14 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 19 ヶ国から 318 名を数え、全発表件数は 226 件であった。招待講演の件数が 74 件、一般投稿の分野毎の発表件数の内訳は、プラズマ 85 件、バイオ 30 件、窒化物 18 件、ナノ 19 件であり、通常の間頭講演とは

別に、ポスター講演に相当する講演を事前録画のショートプレゼンテーションによって 133 件おこなった。

本会議の初日前日(3 月 6 日)には、プラズマ科学で世界的に先導した特筆ある業績を称える「プラズマ殿堂表彰」の授与式が開催され、同時に受賞者らから受賞記念講演がおこなわれた。昨年受賞者 M. J. Kushner (Michigan 大、米国) より “Integrated plasma reactor and feature scale modeling for semiconductor: Retrospect and looking forward” と題して、特に高アスペクト比 (HAR) 構造のプラズマエッチング作製技術の進展と今後の展望が講演された。現状、エッチャーの電力供給には例として 80M と 10M、さらに 5M Hz などの多周波数の高周波電力が重畳されて印加されている。また、その電力も増大の一途で、シース加速されるイオンのエネルギーは約 4keV に及ぶと見積もられている。これほど高エネルギーをもつイオンが HAR 構造内で側壁衝突によって帯電する現象と、斜入射のため正反射によって生じる高速中性粒子の計算での結果が示され、HAR 構造内の深さにして 2 ミクロン入ったところでの帯電現象が、HAR 底部での形状の変形をもたらすことを説明した。将来的に、ウェハ表面へのイオンのパルス入射や、プラズマを励起する電力の自励現象など、解決の糸口になる内容について

て議論がなされた。続いて、D. B. Graves (Princeton 大、米国)からは、将来の量子計算機の実現に向けて、量子効果デバイスのプラズマ加工への提言がなされ、材料欠陥密度のデバイス影響が大きく、欠陥数の極限的な低減が要求されると指摘された。橘邦英(京大名誉教授)先生からは、BANPIS やプラズマ化学国際会議 (ISPC)、プラズマと液体の国際研究会など、数多くの学会を創設時に振り返って紹介いただき、仏教にある発菩提心の思想になぞり、プラズマ研究遂行の教訓とし、若手に向けた鼓舞激励をいただいた。プラズマを解析する時にも、実格子空間と逆格子空間の関係、形と空(くう、無の意)の視点の切りかえが、ここまで新しい研究分野を生み出した原点と回顧され、その有用性、また研究者間の共同研究や研究環境作りへの想いが語られ、受賞された先生方の普段伺うことのできない奥深い考えを拝聴でき、有益な場であったに違いない。

同日チュートリアル4つの講義が開催された。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:真壁利明(慶応大名誉教授)先生からはプラズマを二体衝突(低圧)と多体衝突(高圧)の二象限に区別し、さらに原子・分子衝突のデータベースの構築から、各種反応の時定数の概念を際立たせることによって整理された。プラズマプロセス現象では、例えば、負性イオンを含むシース近傍には、両極性拡散領域に二重層が生じることや、微小な幾何構造がもたらす局所的な帯電現象など、気がつきにくい重要な現象を通して、基礎から応用に結びつく諸現象について講義された。バイオ応用:高木浩一(岩手大)先生からは、題目にある“AgriTech”という農業応用の観点で、マイクロ波とプラズマの利用方法と、それらの生体への刺激としての作用機序について講義された。他の講師には、ナノ材料:

宇佐美徳隆(名大)先生、窒化物半導体:只友一行(九大)先生が務めた。その夜にも、前回第二回の「プラズマ賞」受賞者であられる名西徳之(立命館大)先生より電子サイクロトロンプラズマ励起分子線エピタキシー(MBE)による製膜技術や窒化物の物性に関して受賞講演された。

初日3月7日には、組織委員長・大野哲靖による開会挨拶で会議は幕を開けた。天野浩(名大)より"Frontier electronics as "painkiller" of our society and environment"と題した特別基調講演がおこなわれ、2014年ノーベル物理学賞を受賞した功績である窒化ガリウム半導体を用いたパワーエレクトロニクス最新の開発内容について講演された。引き続き、基調講演がおこなわれ、田畑仁(東大)より酸化物半導体を用いたバイオセンサーなど、A. B. Murphy (CSIRO、豪国)より、金属3Dプリンターの熱プラズマ技術の関連する最新の研究内容が紹介された。

各日19時~20時の1時間、録画ショートプレゼンテーションをおこなった講演者全員への質疑時間が設けられおり、Zoomのブレイクアウトセッションで各自活発な討論が交わされた。

2日目の3月8日の分野別セッションには、宮副裕之(IBM)より、現代社会を支える情報通信技術の要になる計算機の最新状況と将来動向について、古典ビットと量子ビット、さらにニューラルネットワークの3つの観点から講演された。2つ目の量子計算システムの構築では100nm角程度の超伝導ジョセフソン結合を作製する方法などについて、3つ目の必要性はデータ量低減の前処理として抵抗変化型メモリアレイ構造によるメモリ上のアナログ計算方法であり、そのデバイス作製などについて紹介された。他にも、竹内大輔(産総研)よりダイヤモンドの負性電子親和力表面から電子放出を使った真空スイッチに関する研究、佐々木浩一(北大)から窒素プラズマの消光時の

再結合事象、高島圭介（東北大）からパルス放電のイオン波進展の詳細な解析から振動励起分子の表面反応によるアンモニア分子合成等の最新の結果が紹介された。

3日目の3月9日には、基調講演が一木隆範（東大）より、バイオ分析ガラスデバイス上（オンチップ）で微小液滴を検出し、健康診断をポータブルに実施できる技術内容について紹介された。

最終日3月10日には、科学ベースのデータ情報学を活用するプラズマプロセスに関するアレンジセッションを開催し、若林勇希（NTT 基礎研）より強磁性  $\text{Sr}_3\text{OsO}_5$  酸化物のMBEのプロセス条件をガウシアン過程回帰とベイズ推定を使い、効率的に材料合成を進めた結果について、大森健史（日立）よりエッチングプロセス開発における機械学習の利用方法の提案として、複数ガス種の混合でエッチング形状断面の予測への適用の最新の成果が講演された。西島大輔（UC サンディエゴ校米国）からは、プラズマを多波長カメラで取得した発光スペクトルとトムソン散乱で求めたプラズマ密度と電子温度の相関について衝突放射モデル解析を介して機械学習させて、多波長カメラで取得したスペクトルの入力からプラズマパラメータを予測する最新の結果が紹介された。浜口智志（阪大）よりプラズマ内のプラズマ密度分布を計算コストが高いパーティクル・イン・セル（PIC）計算結果を、ニューラルネットワーク上に代理モデルを構築することで機械学習させることで、プラズマ密度データが高速に予測可能になる例が紹介された。他にも、過去のスパッタ率の報告データを機械学習させることで、瞬時にスパッタ率予測できる手法について講演された。H. J. Lee（釜山大、韓国）から誘導性結合熱プラズマ内での微粒子合成の計算結果、川口悟（室蘭工大）から非線形方程式であるボルツマン方程式のニューラルネットワークを使った解法について最新の研究成

果が紹介された。セッションの最後には、データ駆動科学に向けてパネルをもち、各講師と機械学習の普及に向けて、できること、すべきことについて討論された。

その日の午後には、産学連携研究のアレンジセッションも開催され、神野雅文（愛媛大）より細胞への分子・遺伝子のプラズマ導入の装置開発について紹介があり、一つの新しい技術の社会実装を進めてきた経緯で、技術経営できる人の存在が大きいと述べられた。他にも、田中亮（富士電機）より窒化ガリウムのパワーデバイスに関する最新の開発結果について、イオン注入を使ったマグネシウムの導入とその後の高圧熱処理に関する議論や、永田健吾（豊田合成）よりウィルス不活性化で注目を浴びることが多い深紫外（波長 210-280 nm）の発光ダイオードの開発の最新動向について紹介された。最後に、T. Wernicke（ベルリン大、独国）から基調講演され、基板の光透過が問題となる紫外ダイオードの作製には、製膜後に基板側を電気化学エッチング除去して反転（フリップフロップ）させて接合する作製方法が紹介された。

口頭講演の受賞者が発表され、小池健（東大）、Dae-Yeong Kim（東工大）、Dogyun Hwangbo（名大）、小林康之（NTT/弘前大）、伊藤善常（名大）、伊藤大貴（名大）と、ショート講演の受賞者には、大島多美子（佐世保高専）、岩井綾星（名大）、関悠斗（名大）、末元大地（熊本大）、間瀬駿（名工大）、井上健一（東大）、加藤大志（名城大）らが出選された。

本会議のオンライン開催は、名古屋大学の講義室を借り切り、実行委員にサポートいただいた。ここに感謝の意を表す。

次回の ISPlasma2023/IC-PLATNS2023 は、岐阜大学において、組織委員長・伊藤貴司、岐阜大学工学部附属プラズマ応用研究センターを中心に2023年3月5日～9日に開催される予定である。

## 国内会議報告

# 第 39 回プラズマプロセッシング研究会(SPP-39) 第 34 回プラズマ材料科学シンポジウム(SPSM34)

名城大学 内田 儀一郎

応用物理学会プラズマエレクトロニクス(PE)分科会主催(節原裕一幹事長)の第 39 回プラズマプロセッシング研究会(SPP-39)/第 34 回プラズマ材料科学シンポジウム(SPSM34)を、2022 年 1 月 24 日～27 日の 3 日間、オンライン Webex で開催しました。SPSM は日本学術委員会 153 委員会が主催となって開催されてきたシンポジウムではありますが、昨年度に続き SPP と合同での開催となりました。PE 分科会同様にプラズマ技術・学術分野と深く関係する日本物理学会、プラズマ・核融合学会、電気学会、日本表面真空学会、表面技術協会、静電気学会の協賛で、SPP-39/SPSM34 を開催しました。当初、名城大学(名古屋市)での現地開催を予定していましたが、新型コロナウイルス感染症拡大に伴い、昨年度に続き事務局を名城大に設置してのオンライン会議となりました。全国 34 の大学、高専、会社から 126 名の参加登録を頂き、盛況のうちに会議を終了することが出来ました。この場を借りて改めて PE 分科会会員の皆様に御礼申し上げます。以下に会議内容について、簡単にご報告させていただきます。

今回、下記の 3 件のプレナリー招待講演と 6 件の招待講演を企画し、その分野の超一流の先生方に、最先端の研究結果を大変分かり易くご講演頂きました。どの講演にも 50 名以上の聴講者が集まり活発な議論がなされました。お忙しい中、ご快諾頂きました先生方に御礼申し上げます。

### 【プレナリー招待講演(敬称略)】

- 榊田創(産業技術総合研究所)「低侵襲プラズマ止血機器の基礎・開発と国際標準の推進」

- 平松美根男(名城大学)「カーボンナノウォールの合成と新規応用」
- 浜口智志(大阪大学)「サブナノメータノード半導体デバイス製造をめざしたプラズマプロセスの理解」

### 【招待講演(敬称略)】

- 野崎智洋(東京工業大学)「Fluidized-bed DBD reactor for better plasma-catalyst coupling: a new reactor design concept」
- 中谷達行(岡山理科大学)「DLC の医療応用の現状と将来展望」
- 富田健太郎(北海道大学)「トムソン散乱法を用いた空気ストリーマ放電や EUV 光源用プラズマの研究」
- 神野雅文(愛媛大学)「プラズマ遺伝子・分子導入法の機序と応用」
- 守屋剛(東京エレクトロン株式会社)「半導体製造プロセス最適化への機械学習技術の適用」
- 大熊崇文(パナソニック株式会社)「多相交流アークの高速度温度計測とナノ粒子合成」

一般投稿の口頭発表に関して、3 日間で 78 講演プログラムすることができました。トピックでまとめますと「プラズマの医療・バイオ分野・農業応用」14 件、「プロセッシングプラズマの診断・計測・モニタリング」16 件、「大気圧プラズマ・熱プラズマの生成及び応用」10 件、「液相・気相界面プラズマの生成および応用」11 件、「プラズマによる薄膜・表面プロセス」19 件と、これら 5 トピックスで招待講演を含めた全 87 講演中の 70 講演をしめ、現在のプラズマエレクトロニクス分野の核と

なる領域であることが視えました。また、今回、プラズマエレクトロニクス講演奨励賞が企画され、21件の応募がありました。厳正な選考の結果、以下の2講演が奨励賞に選出されました。

- 岩本 拓仁(東北大学)「プラズマ合成  $N_2O_5$  によるカルシウム系植物全身防御応答活性化」
- 羽生 侑真(名城大学)「全固体 Li イオン電池のためのスパッタリング LiPON 薄膜のイオン導電率制御」

敬称略

最後に本会議のプログラム編成と講演奨励賞選考を担当頂いた以下のプログラム委員の先生方、また、会議運営全般を担当頂いた名城大の先生方

に感謝の意を表し、会議報告とさせていただきます。

【プログラム委員(敬称略)】 田中康規委員長(金沢大)、栗原一彰(キオクシア)、中村圭二(中部大)、市来龍大(大分大)、明石治朗(防衛大)、大久保雄司(大阪大)、熊谷慎也(名城大)、石川健治(名古屋大)、古免久弥(大阪大)、渡辺隆行(九州大)、伊藤昌文(名城大)、大熊崇文(パナソニック)、竹内希(東京工業大)、小野亮(東京大)、神原淳(東京大)、平岡尊宏(ウシオ電機)、王斗艶(熊本大)、大矢根綾子(産総研)

【名城大 実行委員(敬称略)】 太田貴之、竹田圭吾、熊谷慎也、伊藤昌文、平松美根男、村瀬唯子



SPP-39/SPSM34 会期中に第 23 回プラズマ材料科学賞の受賞式が執り行われ、日本学術委員会 153 委員会 渡辺隆行委員長(九州大)、伊藤昌文副委員長(名城大)より以下の 4 名が表彰されました。

【基礎部門賞】 浜口智志(大阪大学)

【技術部門賞】 守屋剛(東京エレクトロン株式会社)

【奨励部門賞】 田中宏昌(名古屋大学)、富田健太郎(北海道大学) 敬称略

## 第 69 回応用物理学会春季学術講演チュートリアル報告

ウエスタンデジタル合同会社 中塚 滋

2022年3月22日の春季応用物理学会のチュートリアルにおいて「プラズマプロセスと情報工学の融合」と題した講義が現地/オンラインのハイブリット開催形式で滋賀県立大学 酒井道先生により行われた。参加申込者は23名であった。プラズマ分野への情報系手法の導入自体は第二次 AI ブームを受けて 1990 年代から始まっている。本講義では、はじめに機械学習のアプローチ方法について基礎的な概要の説明をいただいた後に具体的なプラズマ分野への応用を最新の事例を交えながら講義が進められた。

まず初めに機械学習の概要について基礎的な内容の説明があり、「教師有り学習」の例として回帰分析・ニューラルネットワークを「教師無し学習」の例としてクラスター分析を紹介いただいた。筆者含め、機械学習初学者にとっても分かり易く解説いただけたのではないと思う。昨今注目を集めているニューラルネットワークを用いた深層学習は複雑な依存性も魔法のように導出可能であるが、そのためには多くのデータセットが必要でありことは留意する必要がある。

プラズマのような様々なパラメータが複雑に作用し合っている系(図 1)では、まずネットワーク解析(複雑ネットワーク科学分野)により統計的因果推論を行うことが重要である。これにより独立/従属変数としての役割を可視化でき、交絡因子や干渉因子を仮定することで機会学習がスムーズに行えるようになるとの事。機会学習と言えど、統計的因果推論を行う上ではまだ研究者・エンジニアの経験則・直感を必要とする場面があるように感じた。酒井先生のコメントでも「機会学習の適用

を、人間の判断の援用ツールにとどめるのも一案」とあったことも印象的であった。

具体的なプラズマ分野への機会学習の応用例としては、ニューラルネットワークを用いたドライエッチングやプラズマ CVD の教師有り学習(エッチ/デポレート、面内均一性等を予測)や OES(発光分析)データによる教師有り学習が紹介された。生産現場として最も多く上がってくるデータセットは OES の発光波形であり、その機会学習への応用は期待がかけるところである。また核融合の分野でも機械学習を用いた研究は多数あるとのことであった。今後の展望として、ネットワーク解析により複雑な現象から重要因子を抽出する次元削減法のアプローチが盛んに研究されているようである。プラズマのような複雑な系では重要因子の抽出が必須であり今後の進展に期待したい。

近年プロセスの物理現象理解はますます難しくなっている。今回講義いただいた機会学習を用いたサポートは増々不可欠になってくるものと思われ、進展に期待したい。

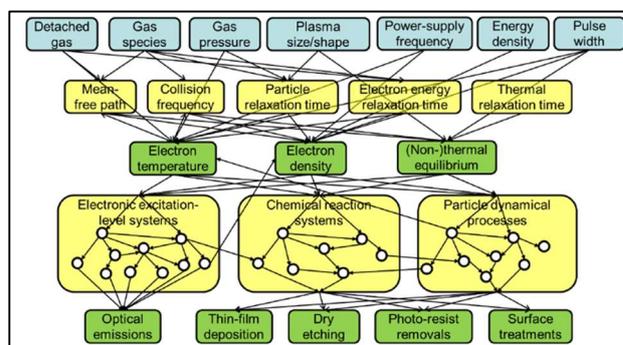


図 1. プラズマにおけるパラメータの因果関係。(チュートリアル講義資料より)

## 行事案内

# 2022 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

九州大学 古閑 一憲

### ■ はじめに

東北大学とオンラインのハイブリッドで開催されることとなった第 83 回応用物理学会秋季学術講演会は 2022 年 9 月 20 日から 23 日の日程で開催されます。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。なお、脱稿時点で未定の部分も含まれるため、詳細については応用物理学会の HP 等で確認をお願いいたします。

### ■ (第 1 日) プラズマエレクトロニクス賞受賞記念講演

第 20 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](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（火）午後（予定）

受賞者（敬称略）：大西 広（レーザーテック株式会社）、山崎 文徳（三菱電機株式会社）、箱崎 喜郎（東芝エネルギーシステム株式会社）、竹村 将沙樹（東京工業大学）、根津 篤（東京工業大学）、\*赤塚 洋（東京工業大学）（\*ご講演予定者）

選考の対象となった業績：“Low-Temperature Graphene Growth by Forced Convection of Plasma-

Excited Radicals”, Hiroshi Onishi, Fuminori Yamazaki, Yoshiro Hakozaki, Masaki Takemura, Atsushi Nezu and Hiroshi Akatsuka, Japanese Journal of Applied Physics, 60 (2021) 026002.

受賞者（敬称略）：\*佐々木 渉太（東北大学）、高島 圭介（東北大学）、金子 俊郎（東北大学）（\*ご講演予定者）

選考の対象となった業績：“Portable Plasma Device for Electric N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Production from Air”, Shota Sasaki, Keisuke Takashima, and Toshiro Kaneko, Industrial & Engineering Chemistry Research 60 (2020) 798.

### ■ (第 2 日) シンポジウム(Technical)

日程：9月21日（水）13:30～18:00（予定）

シンポジウム(Technical)は、今回プラズマエレクトロニクス分科会主催で「細胞運命を制御する応用物理：プラズマ・バイオ研究の融合による革新」を学会2日目に開催します。細胞が外部からの刺激に応じて応答することは古くから知られています。研究開発において、細胞に刺激を与えて、人にとって有用な細胞を創り出してきました。本シンポジウムでは、細胞の運命を制御するため、プラズマ科学をはじめとする応用物理がどのように貢献できるかについて議論します。以下に招待講演の先生のリストとテーマを記載します。一般講演も募集いたしておりますので皆様のご参加をお待ちしております(すべて仮題です)。

1. K. Tomoda (Gladstone Inst.)「iPS細胞の作成およびその分化制御」
2. 神野雅文(愛媛大学)「プラズマ遺伝子導入」

3. 荻朋男(名古屋大学)「外的要因によるDNA損傷およびその修復メカニズム」
4. 田中宏昌(名古屋大学)「化学的刺激による細胞制御」
5. 星野隆行(弘前大)「電気的作用による細胞制御」
6. 大橋俊朗(北海道大学)「機械的刺激による細胞制御」
7. 清水鉄司(産総研)「プラズマ医療技術の応用展開」
8. 三宅丈雄(早稲田大学)「マイクロデバイスを用いた遺伝子導入」

### ■ (第3日) 海外招待講演

昨年はコロナの影響によりキャンセルとした海外招待講演ですが、3日目午前英語セッションにおいて、開催することとしました。下記欧米とアジアの研究者にオンラインで講演いただく予定です。皆様奮ってご参加ください。

[ご講演者 1] Prof. Hae June Lee,  
Pusan National University, Department of  
Electrical Engineering, Republic of Korea

[講演題目 (仮題)] TBD

[ご講演者 2] Prof. Annemie Bogaerts,  
University of Antwerp, Department of  
Chemistry, Belgium

[講演題目 (仮題)] Towards a sustainable future:

Plasma-based CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub> conversion into value-added compounds or renewable fuels

### ■ 分科内招待講演

従来 PE 分科会企画の分科内招待講演では、産業界もしくは大学等の研究者をお招きし講演をいただいていたのですが、新たな試みとして、他分野からの研究者との交流を深めるべく、各中分類プログラム編集委員から他分野からの分科内招待講演者を推薦いただき、各セッションにて招待講演を実施することにいたしました。皆様には是非ともプログラムをご参照の上、セッションにご参加頂きますよう、お願い申し上げます。

### ■ おわりに

新型コロナウイルスの影響もだいぶ収まってきた状態です。可能であれば現地にて、皆様と直接お会いして議論できることを期待しております。加えて、PE 分科会懇親会などでまた皆様とお会いできるようなるといいのですが、来年でしょうか。以上、皆様と会場かオンラインでお会いできることを楽しみにしております。

連絡先：古閑 一憲 (九州大学)

koga@ed.kyushu-u.ac.jp

## 第36回プラズマ新領域研究会 「計測技術の基礎と最新動向」

東北大学 岡田 健

第36回プラズマ新領域研究会「計測技術の基礎と最新動向」は、2022年2月16日（水）にZoomによるオンライン形式で開催された。

近年のプラズマ応用研究は半導体やナノ材料科学分野だけでなく、バイオ、医療分野においても重要性が広く認識されている。そのためプラズマ応用研究において観るべき対象は従来の気相や固体材料に加え、液相、気液界面、固液界面にまで拡張しており、計測技術の理解が研究を大きく展開する重要な要素になっている。そこで第36回新領域研究会では様々な状態を探る先端計測技術の基礎と最新動向を学び、プラズマ応用研究との接点と将来展望について討論を行った。

冒頭に東北大学の岡田が開催の挨拶と趣旨説明を行った。

最初の講演では、猪俣直生先生（東北大学・工学研究科）が「マイクロ温度センサを用いた細胞の温度計測」と題し、微細加工技術で作製したマイクロ温度センサを用いた細胞の熱計測に関する研究について講演された。

2件目の講演では、熊谷明哉先生（東北大学・材料科学高等研究所）が「ナノ電気化学イメージングの応用：蓄電デバイスから細胞の動的観察まで」と題し、局所的に電気化学反応を可視化し、反応領域の定量評価するナノ電気化学イメージング技術について講演された。

3件目の講演では、梶本真司先生（東北大学・薬学研究科）が「細胞内の水のラマンイメージングによる細胞内温度の可視化」と題し、ラマン顕微鏡を使って細胞内の水を直接観測し、そのスペ

クトル形状から細胞内温度をラベルフリーで可視化する研究を紹介された。

休憩をはさみ、日本原子力研究機構の植田寛和先生から「表面吸着水素分子の核スピン転換」と題し、水素の液化に伴うボイルオフ問題や宇宙における分子雲での分子進化に関連して広く興味をもたれている水素オルト・パラ転換の計測について紹介があった。

戸田雅也先生（東北大学・工学研究科）は、「カンチレバー磁力センサを用いた3次元電子スピン共鳴イメージング」と題したご講演で核磁気共鳴現象を機械的に力として検出、可視化する技術解説と計測例の紹介があった。

後半のセッションでは、菅原克明先生（東北大学・材料科学高等研究所）が「ARPESによる原子層材料の電子状態イメージング評価」と題して講演を行った。原子レベルの堆積技術に有効な角度分解光電子分光（ARPES）の基礎と近年の成果である原子層材料の特異な電子状態について紹介があった。

最期の講演では小宮敦樹（東北大学・流体科学研究所）が「光学手法を用いた熱物質移動現象の可視化とマイクロ・ナノスケール高精度計測への挑戦」と題した講演を行った。顕微鏡では不可視なサブミリ領域における温度場・濃度場を高精度に可視化計測する光学干渉技術の紹介があった。

研究会の最後には総合討論として各講演を振り返り共同研究の可能性などについて議論を行った。いずれの講演もプラズマ応用研究の新展開を感じさせるものであり有益であった。

## 第37回プラズマ新領域研究会 ビーミング推進の最新動向

静岡大学 松井 信

第37回プラズマ新領域研究会「ビーミング推進の最新動向」は2022年3月7日 Zoom によるオンライン形式で開催された。

ビーミング推進は『レーザー』や『マイクロ波』などにより伝送されたビームをエネルギー源とする推進システムであり、1970年代に Kantrowitz によりレーザー推進が提唱され各国で研究が続けられてきた。これまでは実用的な高出力ビーム源がなかったためその多くが基礎研究に留まっていたが、近年ファイバレーザーやジャイロトロンといった 100kW-1MW 級ビーム源の出現により『打上ロケット』や『宇宙デブリ除去』などを目的としたビーミング推進の実現性が現実味を帯びてきた。本研究会ではその基幹技術であるビームによるプラズマ、アブレーション生成、推力発生機構に関する最新の研究成果の講演を通じてビーミング推進の現状と課題、将来展望について討論を行った。

はじめに静岡大学の松井から開催の挨拶とビーミング推進の概念、需要の移り変わりなど本研究会の趣旨を説明した。

最初の講演は摂南大学の小田靖久先生よりマイクロ波源として 1MW ジャイロトロンをクラスター化することで 100MW を超えるシステム構築に向けた要素技術およびビーム径の制御についてご紹介いただいた。

続いて筑波大学の嶋村耕平先生より 28GHz、550kW のジャイロトロンを利用した大気中での伝播するプラズマに対してのプローブや分光による診断、推進機としての推力生成、測定や、ビーム

伝送技術の観点で進めているドローンを利用したビーム、推進機 協調制御技術についてご紹介いただいた。

3 番目は福井大学の福成雅史先生より 303 GHz のジャイロトロンを用いたミリ波大気放電について可視化による集光部から平行光内に至るまで放電構造及び衝撃波構造についてご紹介があった。

休憩をはさみ 4 番目のご講演は東北大学の高橋聖幸先生より複数放物面レーザー推進機の基礎特性およびミリ波駆動管内加速機に向けた集光特性についてのご紹介があった。

5 番目のご講演は鳥取大学の葛山浩先生よりパルスレーザー、CW レーザーを用いた推進機の特長評価、システム解析、コスト計算などの実現可能性についてご紹介があった。

6 番目のご講演は大阪府立大学の森浩一先生より静電浮遊炉を用いた模擬スペースデブリへのレーザーアブレーション推力計測実験についての現状と本年度に国際宇宙ステーションで行う予定の実験についてご紹介があった。

最後のご講演は名古屋大学の中村友祐先生よりパルスレーザーによるスペースデブリ除去に向けたアブレーション特性調査としてターゲット材料による比推力の違いなどのご紹介があった。

講演後は総合討論としてビーム源としてファイバレーザー、ジャイロトロン of 将来的な低コスト化に向けての課題、電力源として専用発電所の必要性などの実現可能性について、またスペース X を代表とする半再使用化学推進とのコスト競争性など幅広い議論があり大変有益であった。

## 国内会議報告

# 2021 年度プラズマエレクトロニクス講習会開催報告

キオクシア（株） 栗原一彰

第 32 回プラズマエレクトロニクス講習会が 2021 年 11 月 12 日にウェビナー会議という形で開催されました。副題はプラズマプロセスの基礎と先端応用技術としました。また、講演後にはネットですが懇親会を企画しました。今回の講義内容は以下の 6 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り感謝いたします。

『非平衡プラズマの生成と温度・エネルギー制御の基礎』

東北大学 金子 俊郎 先生

『プラズマ計測技術の基礎・応用の最近の動向』

東京工業大学 赤塚 洋 先生

『ドライエッチング技術の進展と今後の展望』

ナノテクリサーチ 野尻 一男 先生

『スパッタリング成膜技術の基礎と最新動向』

九州大学 板垣 奈穂 先生

『大気圧プラズマの基礎・応用技術の最新動向』

北海道大学 白井 直機 先生

『プラズマ誘起ダメージ機構の基礎とその評価手法』

京都大学 江利口 浩二 先生

今回の講義はビデオ動画と Live 配信の両者がありました。ビデオ動画の作成は講師への負担が生じますが、講演内容の時間配分が適切になりネット接続の不具合が生じた場合の対策にもなりますので、講師の方と相談しながら選択するのが良いようです。

次にアンケートの結果を含めて講習会の詳細状況をお知らせします。参加者 61 名の内、約 3 割が学生で、企業からはデバイスメーカーと装置メ

ーカーで約 5 割、大学や国研が 2 割を占めました。以下に満足度を 5 点満点で評価すると開催時期に関しては 4.08、参加の有意義度は 4.56、分かりやすさは 4.15、基礎と応用の分量は 3.93 との評価を得ました。今後はどのような形での開催が良いかに関しては 7 割がオンラインでの開催を希望されていました。昨年に続きオンラインでの希望が多いことから、今後は少なくともオンラインによる配信は必要と思われます。現地も含めたハイブリットも可能ですが、現地のみでの開催は難しいのかなと思われます。講義の内容に関しては『非平衡プラズマの生成と温度・エネルギー制御の基礎』と『プラズマ誘起ダメージ機構の基礎とその評価手法』への評価が高く、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はいくつか挙げられましたが特に CVD に関する基礎から応用・メカニズムに関する情報の提供を求める声が多いです。今後のテーマ選定に役立てます。

また、今回昨年は無かった懇親会をオンラインで開催しました。多くの先生方にも参加していただいたのですが、幹事も含めて思ったよりも参加者が得られませんでした。オンラインによる懇親会に関しましては改めて開催の有無を考慮する必要があるようです。

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。特に広告費の貢献が重要ということですので、掲載企業の探索と依頼を今後も続ける必要性があり

ます。

最後にネット開催という慣れない環境の中で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高橋和生氏(京都工芸繊維大学)、阿部知央氏(キオクシア)、石川健治氏(名古屋大学)、梅澤義弘氏(東京エレクトロン宮城)、川那辺哲雄氏(日

立製作所)、金載浩氏(産業技術総合研究所)、白岩利章氏(ソニーセミコンダクターソリューションズ)、末次大輔氏(パナソニックインダストリー)、中塚滋氏(ウェスタンデジタル)、弓削政郎氏(三菱電機)の皆様に感謝いたします。

## 行事案内

# 2022 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

岐阜大学 上坂 裕之

### ■ はじめに

引き続き COVID-19 の影響により東北大学とオンラインのハイブリッドで開催されることとなった第 83 回応用物理学会秋季学術講演会は 2022 年 9 月 20 日から 23 日に口頭セッション、ポスターセッション共に開催されます。ただし、ポスターセッションは現地会場のみで開催されます。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。なお、脱稿時点で未定の部分も含まれるため、詳細については応用物理学会の HP 等で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 20 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](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 21 日（水）午前（予定）

受賞者（敬称略）：\*大西 広（レーザーテック株式会社）、山崎 文徳（三菱電機株式会社）、箱崎 喜郎（東芝エネルギーシステム株式会社）、竹村 将沙樹、根津 篤、赤塚 洋（東京工業大学）（\*ご講

演予定者）

選考の対象となった業績：“Measurement of electron temperature and density of atmospheric-pressure non-equilibrium argon plasma examined with optical emission spectroscopy”, Japanese Journal of Applied Physics, 60, 026002 (2021).

受賞者（敬称略）：\*佐々木 渉太、高島 圭介、金子 俊郎（東北大学）（\*ご講演予定者）

選考の対象となった業績：“Portable Plasma Device for Electric N2O5 Production from Air”, Industrial & Engineering Chemistry Research, 60, 798-801 (2021).

### ■ (第 2 日) シンポジウム(Technical)

日程：9月21日（水）13:30～18:30（予定）

シンポジウム(Technical)は、「細胞運命を制御する応用物理:プラズマ・バイオ研究の融合による革新」というテーマで学会2日目に開催します。細胞が外部からの刺激に応じて応答することは古くから知られていました。科学者は、刺激を与えて細胞の運命を導き、人にとって有用な細胞を創り出してきました。プラズマ科学分野では、物質の第4の状態であるプラズマを細胞に与える刺激として活用することで、細胞増殖の促進や腫瘍細胞の選択的死滅などを実現してきました。本シンポジウムでは、細胞の運命を制御する刺激作用が何であるか、その作用メカニズムと合わせて議論します。ライフサイエンス、プラズマ科学、バイオMEMS、機械工学などの分野の研究者を招き、細胞への刺激作用を様々な観点から総合的に議論します。下に招待講演の先生のリストとテーマ(共に仮案を含

む)を記載します。一般講演も募集いたしておりますので皆様のご参加をお待ちしております(すべて仮題です)。

1. K. Tomoda (Gladstone Inst.) 「iPS細胞の作成およびその分化制御」
2. 神野雅文(愛媛大学)「プラズマ遺伝子導入」
3. 荻朋男(名古屋大学)「外的要因によるDNA損傷およびその修復メカニズム」
4. 田中宏昌(名古屋大学)「化学的刺激による細胞制御」
5. 星野隆行(弘前大)「電気的作用による細胞制御」
6. 大橋俊朗(北海道大学)「機械的刺激による細胞制御」
7. 清水鉄司(産総研)「プラズマ医療技術の応用展開」
8. 三宅丈雄(早稲田大学)「マイクロデバイスを用いた遺伝子導入」

## ■ (第2日) 海外招待講演

オンラインで開催いたします。時間枠は時差等を考慮して検討中です。皆様奮ってご参加下さい。

[ご講演者 1] Annemie Bogaerts,  
University of Antwerp, Department of Chemistry

[講演題目] Carbon bed post-plasma to enhance the CO<sub>2</sub> conversion and remove O<sub>2</sub> from the product stream. (Online)

[ご講演者 2] Prof. Hae June Lee,  
Pusan National University, Department of Electrical Engineering

[講演題目] No-ozone cold plasma can kill oral pathogenic microbes in H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-dependent and independent manner. (Online)

## ■ (第1日) 分科内招待講演

従来 PE 分科会企画の分科内招待講演では、産業界もしくは大学等の研究者をお招きし講演いただいていた。今回は、東京エレクトロン 瀬川澄江様をお招きして、半導体およびフラットパネルディスプレイ製造装置業界における持続可能なサプライチェーン構築に向けた取り組みなどについてご講演いただきます。

さらに、他分野からの研究者との交流を深めるべく、各中分類プログラム編集委員から他分野からの分科内招待講演者を推薦いただき、各セッションにて招待講演を実施することにいたしました。今回は、埼玉大学 稲田優貴先生をお招きして時空間制御された大気中シングルフィラメントストリーマ放電の電子密度・電界測定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。

[ご講演者 1] 瀬川澄江 氏 (東京エレクトロン)  
[講演題目] 「持続可能な社会を実現するプラズマプロセスの課題と展望」(2日目午前)

[ご講演者 2] 稲田優貴 先生 (埼玉大学)  
[講演題目] 「時空間制御された大気中シングルフィラメントストリーマ放電の電子密度・電界測定」(1日目、講演セッション: 8.1)

## ■ おわりに

新型コロナウイルスの影響がまだ残っておりますが、感染症法上の位置づけの見直しに向けた議論等が開始されるような機運もあり、憂いなく現地開催ができる方向に進んでいく兆しを感じます。可能であれば現地にて、皆様と直接お会いして議論できることを期待しております。加えて、PE 分科会懇親会も企画が進んでおります。皆様とお会いできることを楽しみにしております。

連絡先: 上坂 裕之 (岐阜大学)

kousaka@gifu-u.ac.jp

## 行事案内

# 第 43 回ドライプロセス国際シンポジウム 43<sup>rd</sup> International Symposium on Dry Process (DPS2022)

(株) アルバック  
大阪公立大学  
(株) 日立製作所

森川 泰宏 (プログラム委員長)  
白藤 立 (実行委員長)  
松井 都 (組織委員長)

今年で 43 回目を迎えるドライプロセス国際シンポジウム(DPS)は、2022 年 11 月 24-25 日の二日間、対面とオンラインの Hybrid 形式で開催することとなりました。会場は大阪国際会議場です。

プラズマエッチングやプラズマ CVD など、半導体集積回路を中心とした微細加工プロセス技術や表面反応研究の分野で世界をリードする国際会議です。是非とも最先端の研究に関し、投稿のご検討をお願い申し上げます。なお、本シンポジウムでの報告内容については 2023 年 7 月に JJAP の特集号の発刊を予定しております。

本学会では、例年、国内外の大学や企業から 300 名程度の参加者を迎え、当該分野について基礎から応用に至るまで最先端の研究結果が発表されております。近年では、デバイスの微細化に対応する新しいプロセス技術はもとより、計測技術や装置技術、そして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おります。また、これら解析やモデリングにおいてシミュレーションや AI の活用事例の報告もあり、Informatics や DX への応用にも感心が高まってきています。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、バイオや医療分野への応用、脱炭素社会向けとして”Dry process for Green Transformation(GX)”を新設し、より幅広く報告を募集します。

今年は 3 つの Arranged Session を設定しまし

た。1 つ目は未だ止まる所を知らないデバイスの高層化・3D 化に対応する「Challenges to limits for high aspect ratio etching」と題し、昨年に引き続き本セッションを設定しました。2 つ目は「Novel control of surface reaction in atomic layer processes (ALE / ALD / Area selective ALD)」と題した原子層レベルのプロセス制御に関するセッションです。3 つ目は「3D-IC packaging for energy-saving and high-density interconnection」と題し、最近注目が高まる先端実装技術のセッションを設けました。その他、Heterogeneous Integration to Lead the New Era of Moore's Law と題し、今後の後工程実装の重要性について IBM と Samsung のキーマンの方々に Keynote Lecture(オンデマンド配信のみ)を頂きます。何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、ご講演頂く予定です。

本シンポジウムは、多くの団体から協賛を頂いておりますが、今回新たにエレクトロニクス実装学会(JIEP)からの協賛を頂きました。これを機に、本 DPS 含め応用物理学会と業界/世代を越えた新たなネットワーク形成や異分野技術融合、学術的研究への連携や展開など、より一層の好機場の提供に繋がる事を願っています。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】

2022年 11月24 日(木) - 25 日(金)

【会場】

大阪国際会議場

【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)

• Geun Young Yeom

(Sungkwan University)

【アレンジセッション・招待講演】

**A1. Challenges to limits for high aspect ratio**

**etching**

◆招待講演者

Zoltan Donko (Wigner Research Center for Physics)

Meihua Shen (Lam RESEARCH)

**A2. Novel control of surface reaction in atomic**

**layer processes (ALE / ALD / Area selective ALD)**

◆招待講演者

Alok Ranjan (Tokyo Electron America)

Stacey F. Bent (Stanford Univ.)

**A3. 3D-IC packaging for energy-saving and**

**high-density interconnection**

◆招待講演者

Arkalgud Sitaram (TEL America)

Clinton Goh (Applied Materials, Inc.)

**Keynote Lecture (オンデマンド配信のみ)**

**Heterogeneous Integration to Lead the New Era of Moore's Law**

◆招待講演者

Mukta Ghate Farooq (IBM Research)

Seung Wook Yoon (Samsung Electronics)

【投稿受付】

開始 2022年 5月 16日(月)

締切 2022年 7月 22日(金)

【参加申し込み】

早期参加登録締切：2022年 10月7日(金)

参加登録締切：2022年 12月2日(金)

\*当日の受付もオンラインのみ可能です。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/2022/index.html>

事務局: [dps2022\[at\]officepolaris.co.jp](mailto:dps2022[at]officepolaris.co.jp)



**DPS**  
2022

**Call for Papers – DPS 2022**  
43<sup>rd</sup> International Symposium on Dry Process  
November 24(Thu) – 25(Fri), 2022  
Osaka International Convention Center, Osaka, Japan  
HYBRID SYMPOSIUM

Paper Submission Deadline: July 22, 2022  
Author instructions and information about DPS can be found at:  
<http://www.dry-process.org/2022/>

The 43<sup>rd</sup> International Symposium on Dry Process (DPS2022) will be held at Osaka International Convention Center, Osaka, Japan & Online from November 24 to 25, 2022. DPS2022 will be a hybrid symposium that will run in-person (number of attendees limited) and virtually. 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.  
<Possibility of Change of Meeting Format>  
Please note that DPS2022 may go fully online depending on the COVID-19 situation.

**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)
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 limits for high aspect ratio etching
- AS2 – Novel control of surface reaction in atomic layer processes (ALE / ALD / Area selective ALD)
- AS3 – 3D-IC packaging for energy-saving and high-density interconnection

For further general information, please contact: [e-mail:dps2022@officepolaris.co.jp](mailto:e-mail:dps2022@officepolaris.co.jp)

Organizing Committee Chair: Miyako Matsui (Hitachi, Ltd.)  
Executive Committee Chair: Tatsuru Shirafuji (Osaka City University)  
Program Committee Chair: Yasuhiro Morikawa (ULVAC Inc.)  
Publication Committee Chair: Hirotaka Toyoda (Nagoya University)

URL: <http://www.dry-process.org/2022/>

## 行事案内

# 第16回インキュベーションホール

名城大学 伊藤 昌文

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、学生の皆様を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】2022年(令和4年)9月11日(日)~13日(火)

【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 48,000 円 大学院生・学生 22,000 円

[4] その他

一般 53,000 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, 電子情報通信学会, 日本セラミックス協会, 日本表面真空学会, 静電気学会, 日本金属学会, 表面技術協会, 日本鉄鋼協会, 日本オゾン協会, 電気化学会, 原子衝突学会, IEEE-NPS05

**【講義内容（暫定）】**

- ・ 畠山力三先生（東北大）  
特別講義 プラズマナノ材料・デバイス科学
- ・ 鈴木陽香先生（名古屋大）  
プラズマ生成・制御
- ・ 竹田圭吾先生（名城大）  
プラズマ診断・計測
- ・ 栗原一彰先生（キオクシア）  
プラズマエッチング
- ・ 布村正太先生（産総研）  
プラズマ成膜
- ・ 小川大輔先生（中部大）  
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、レクリエ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からお申し込みください。ポスター内容を示すキーワードを3つ程度記入いただきます。参加登録の確認を通知

します。参加費を銀行振込願います。なお、参加費の振込では必ず個人名と「PEIH」という4文字のアルファベットを記載してください（例：木村太郎さんの場合“キムラタロウ PEIH”など）。一旦振り込まれた参加費は、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7日(木)

**【参加費振込期間】** 7月8日(金)～8月19日(金)

**【振込先】** 三井住友銀行 本店営業部（本店でも可）口座(普通)3339808 (公社)応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会

**【問合せ先】** 高橋 一弘

〒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  
電気通信システムユニット

TEL : 0143-46-5560

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

**【担当幹事】**

校長： 伊藤 昌文（名城大学）

幹事： 高橋 一弘（室蘭工業大学）

奥山 由（苫小牧工業高専）

古里 友宏（長崎大学）

会田 倫崇（東京エレクトロンテクノロジーツリビューションズ）

大澤 直樹（金沢工業大学）

川口 悟（室蘭工業大学）

吉木 宏之（鶴岡工業高専）

**【ウェブページ】**

[http://annex.jsap.or.jp/plasma/PE\\_files/PE\\_SS\\_2022](http://annex.jsap.or.jp/plasma/PE_files/PE_SS_2022)

# 第 21 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 2020 年、2021 年、2022 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

2023 年春季応用物理学関係連合講演会期間中に行う予定です。受賞者には賞状および記念品を贈呈いたします。また、2023 年秋季応用物理学学術講演会期間中に記念講演を依頼する予定です。

## 書類提出期限

2022 年 12 月 9 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。

## 2022 年度(令和 2 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 大阪市住吉区杉本3-3-138 TEL: 06-6605-2681	shirafuji@osaka-cu.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 名古屋市天白区塩釜口 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@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.Fukusawa@sony.com
幹事 任期 2023 年 3 月	石川 健治	名古屋大学 低温プラズマ科学研究センター (工学研究科 電子工学専攻)	〒464-8601 愛知県名古屋千種区不老町 NIC4 階 TEL: 052-788-6077	ishikawa@plasma.engg.nagoya-u.ac.jp
"	奥山 由	苫小牧工業高等専門学校 創造工学科 電気電子系	〒059-1275 北海道苫小牧市錦岡 443 番地 TEL: 0144-67-8074	yokuyama@tomakomai.kosen-ac.jp
"	加藤 俊顕	東北大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉 6-6-05	kato12@tohoku.ac.jp
"	熊谷慎也	名城大学 理工学部 電気電子工学科	〒468-8511 名古屋市天白区塩釜口一丁目 501 番地 TEL: 052-838-2307	skumagai@meijo-u.ac.jp
"	古免 久弥	大阪大学 接合科学研究所	〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1 TEL: 06-6879-8648	h.komen@jwri.osaka-u.ac.jp
"	末次 大輔	パナソニックインダストリー株式会社 モノづくり革新センター	〒571-8502 大阪府門真市大字門真 1006 番地 TEL: 080-9940-4637	suetsugu.daisuke@jp.panasonic.com
"	高橋和生	京都工芸繊維大学 電気電子工学系	〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町 TEL: 075-724-7418	takahash@kit.jp
"	高橋 一弘	室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 電気通信システムユニット	〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1 TEL: 0143-46-5560	ktakahashi@mmm.muroran-it.ac.jp
"	竹内 希	東京工業大学 工学院電気電子系	〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-S3-4 TEL: 03-5734-2566	takeuchi@ee.e.titech.ac.jp
"	田中 康規	金沢大学 理工研究域 電子情報通信学系	〒920-1192 石川県金沢市角間町 TEL: 076-234-4846	tanaka@ec.t.kanazawa-u.ac.jp
"	中塚 滋	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: 059-390-9941	shigeru.nakatsuka@wdc.com
"	古里友宏	長崎大学 大学院工学研究科 電気・情報科学部門	〒852-8521 長崎市文教町1-14 TEL: 095-819-2560	t-furusato@nagasaki-u.ac.jp
"	弓削 政郎	三菱電機(株) 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 尼崎市塚口本町 8-1-1 TEL: 06-6497-2745	Yuge.Seiro@ay.MitsubishiElectric.co.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-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	kamataki@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 名古屋市千種区不老町 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 名古屋市千種区不老町 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ー 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

## 2022年度(令和4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	ユニセコング・クオリティソリューションズ
1. 庶務・分科会ミーティング	竹内 希	東京工業大学	竹中 弘祐	大阪大学
2. 春秋講演会シンポジウム シンポジウム・海外招待講演 分科内招待講演 チュートリアル講義	石川 健治	名古屋大学	伊藤 昌文	名城大学
	中塚 滋	ウエスタンデジタル	深沢 正永	ユニセコング・クオリティソリューションズ
	熊谷 慎也	名城大学	上坂 裕之	岐阜大学
			八田 章光	高知工科大学
			辻 享志	産業技術総合研究所
3. プラズマプロセス研究会  2022年度：ICRP/GEC/SPP/SPSM (2022年10月)	加藤 俊顕	東北大学	上坂 裕之	岐阜大学
	熊谷 慎也	名城大学	深沢 正永	ユニセコング・クオリティソリューションズ
	石川 健治	名古屋大学	鎌滝 晋礼	九州大学
	古免 久弥	大阪大学	竹中 弘祐	大阪大学
			川口 悟	室蘭工業大学
		桑原 彬	名古屋大学	
4. 光源物性とその応用研究会				
5. プラズマ新領域研究会	奥山 由	苫小牧工業高等専門学校	伊藤 昌文	名城大学
	古免 久弥	大阪大学	八田 章光	高知工科大学
	高橋 一弘	室蘭工業大学	大澤 直樹	金沢工業大学
		鈴木 陽香	名古屋大学	
6. インキュベーションホール	奥山 由	苫小牧工業高等専門学校	上坂 裕之	岐阜大学
	古里 友宏	長崎大学	大澤 直樹	金沢工業大学
	高橋 一弘	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
			吉木 宏之	鶴岡工業高等専門学校
			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	高橋 和生	京都工芸繊維大学	深沢 正永	ユニセコング・クオリティソリューションズ
	末次 大輔	パナソニック・ストーリー	辻 享志	産業技術総合研究所
	中塚 滋	ウエスタンデジタル	橋本 惇一	キオクシア
	弓削 政郎	三菱電機	川島 淳志	ユニセコング・クオリティソリューションズ
	石川 健治	名古屋大学	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
		三浦 勝哉	日立製作所	
8. 会誌編集・書記	高橋 和生	京都工芸繊維大学	鈴木 陽香	名古屋大学
	末次 大輔	パナソニック・ストーリー	川島 淳志	ユニセコング・クオリティソリューションズ
9. ホームページ	竹内 希	東京工業大学	竹中 弘祐	大阪大学
10. 会計	古里 友宏	長崎大学	吉木 宏之	鶴岡工業高等専門学校
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
	(節原 裕一)	(大阪大学)	深沢 正永	ユニセコング・クオリティソリューションズ
13. PE 懇親会 2022秋@東北大川内, 2023春@上智四谷	弓削 政郎	三菱電機	三浦 勝哉	日立製作所
	竹内 希	東京工業大学	桑原 彬	名古屋大学
大分類8との連絡調整			伊藤 昌文	名城大学
GEC 委員 (オブザーバー)	酒井 道	滋賀県立大学		
	金子 俊郎	東北大学		

## 2022年度（令和4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	石島 達夫	(金沢大)
8.1	プラズマ生成・診断	竹田 圭吾	(名城大)
8.2	プラズマ成膜・エッチング・表面処理	篠田 和典 荻野 明久	(日立) (静岡大)
8.3	プラズマナノテクノロジー	北嶋 武	(防衛大)
8.4	プラズマライフサイエンス	栗田 弘史	(豊橋技科大)
8.5	プラズマ現象・新応用・融合分野	呉 準席	(大阪公立大)
8.6	Plasma Electronics English Session	林 信哉 石島 達夫	(九大) (金沢大)
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)
8.8	PE 賞受賞記念講演	伊藤 昌文	(名城大)
2.	応用物理学会理事	辰巳 哲也 (副会長) 平松 美根男	(ソニーセミコンダクタソリューションズ) (名城大学)
3.	GEC 組織委員会委員	金子 俊郎 清水 鉄司	(東北大) (産総研)

### 4. 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いても、多くの分科会会員の方にご活躍頂いておりますが、間違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、コロナ禍のため ZOOM を用いたオンライン会議にて 2022 年 3 月 23 日 (水) に開催され、大分類 8 意見交換会に引き続き、インフォーマルミーティングとして実施された。

### 1. 学術講演会における分科会の企画について

#### ・シンポジウム

熊谷幹事 (名城大) から 2022 年秋季学術講演会におけるシンポジウム「細胞運命を制御する応用物理：プラズマ・バイオ研究の融合による革新」が提案され、承認された。世話人は栗田弘史先生 (豊橋技科大)。様々な分野の研究者に講演を頼む予定。

#### ・海外招待講演

石川幹事 (名大) から候補者 2 名および予備候補者 1 名が提案され、承認された。

#### ・分科内招待講演

石島達夫先生 (金沢大) から他分野の研究者に招待講演をお願いする事業について報告された。(なお本事業は、2021 年度新旧合同幹事会で実施が承認されている。)

### 2. アーカイブズ出版の進捗状況

松井幹事 (静岡大) から第 5 回インキュベーションホールテキストの電子ファイル提出について周知依頼があった。著作権について説明がされた。販売方法については今後検討していく必要がある。

### 3. 会報 76 号について

末次幹事 (パナソニック) から会報 No.76 の構成案について紹介された。また研究室紹介等の執筆の希望者を募る旨が報告された。

### 4. 第 36,37 回プラズマ新領域研究会報告

岡田幹事 (東北大) から第 36 回「計測技術の基礎と最新動向」について、また松井幹事から第 37 回「ビーミング推進の最新動向」についての開催報告があり、講演や議論の内容が紹介された。

### 5. プラズマエレクトロニクス講習会報告

栗原副幹事長 (キオクシア) から講習会の開催報

告があり、前回より参加者および収入が増えた旨が報告された。

### 6. SPP-39/SPSM34 開催報告

田中副幹事長 (金沢大) からプラズマプロセッシング研究会の開催報告があり、講演トピック毎の発表件数分布や参加人数が 126 人に上った旨が紹介された。

### 7. 国際会議 ICRP-11/GEC2022 準備状況報告

金子俊郎先生 (東北大) から会議内容について以下の情報が提供された。GEC が日本で初めて開催される。真壁利明先生 (慶応大名誉教授) の Will Allis Prize 受賞記念講演がある。開催方式は現地開催もしくはオンライン開催のいずれかである。

### 8. 第 20 回プラズマエレクトロニクス賞選考結果報告

節原幹事長 (阪大) から次の 2 編の論文が受賞した旨が報告された。[1] H. Onishi, F. Yamazaki, Y. Hakozaki, M. Takemura, A. Nezu, and H. Akatsuka: Jpn. J. Appl. Phys. **60**, 026002 (2021). [2] S. Sasaki, K. Takashima, and T. Kaneko: Ind. Eng. Chem. Res. **60**, 798 (2021). また当賞において、著者は受賞の時点で入会済みであれば受賞の権利がある旨が報告された。

### 9. 2021 年度 会計報告

節原幹事長から会計報告がされ、ICRP の積立金についても説明がされた。

### 10. 2022 年度分科会幹事について

節原幹事長から幹事候補者選挙の説明があり、候補者全員が満票で承認された旨が報告された。

### 11. その他

節原幹事長から分科会 30 周年記念事業のうち、ロードマップについて来年度も作業を継続する旨、

またロゴマークについて新旧合同幹事会において決定する予定である旨が伝えられた。また竹内幹事(東工大)から分科会の正式英語名称が“**Plasma Electronics Division**”である旨,また分科会 HP を一新する計画について情報が提供された。

また最後に節原幹事長から, 昨今頻発する地震

などの自然災害時に, 被災した研究者が他機関の分析装置などを簡易に利用できるような相互協力体制を構築していくことが提案された。

記: 市來(大分大)、末次(パナソニック)

## プラズマエレクトロニクス関連会議日程

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多いです。詳細は各会議の web ページを参照ください。

### 【 国際会議 】

**2022.7.24 - 29**

Plasma Processing Science, Gordon Research Conference  
Andover, NH, USA

<https://www.grc.org/plasma-processing-science-conference/2022/>

**2022.10.3 - 7**

75th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2022) /  
11th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-11)  
Sendai International Center, Sendai

<https://www.ecei.tohoku.ac.jp/plasma/ICRP-11>

**2021. 11.24 - 25**

The 43<sup>rd</sup> International Symposium on Dry Process (DPS2022)  
Osaka, Japan & Online

<http://www.dry-process.org/2022/index.html>

### 【 国内会議・会合 】

**2022. 9.20 - 23**

第 83 回応用物理学会秋季学術講演会  
東北大学 川内北キャンパス, 宮城県

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

**2022. 9.12 - 15**

2022 年日本物理学会秋季大会 (物性)  
東京工業大学 大岡山キャンパス, 東京都

<https://www.jps.or.jp/activities/meetings/future.php>

**2023. 3.15 - 18**

第 69 回応用物理学会春季学術講演会  
上智大学 四谷キャンパス, 東京都

<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

この度、プラズマエレクトロニクス分科会会報 No.76 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。

本号は二年に一度の幹事長交代のタイミングでの発行となりましたので、通常の巻頭言に代えて退任されました大阪大学の節原前幹事長と就任されました大阪公立大学の白藤幹事長からそれぞれご挨拶頂きました。

研究室紹介コーナーでは、東京工業大学の竹内希先生に研究室の様子をご紹介頂きました。研究室の成り立ちや、数々の研究内容について大変分かりやすくご紹介頂きました。

学生のためのページでは、ペガサスソフトウェアの田中正明様から、『プラズマシミュレーション』と題して、計算手法の解説と合わせて、並列化やデータベースについて触れるなどしていただきました。学生の方々のみならず、プラズマシミュレーションの必要性を感じている企業の方々にとっても興味ある内容であったと思います。

研究紹介では、産業技術総合研究所 本村大成様から、『高密度収束プラズマスパッタリング装置と磁気ミラー型マグネトロンカソードの紹介』と題して、独自考案された磁場配位を有するスパッタリング装置について紹介いただきました。詳細な情報を紹介しておりますので、関連する研究をされている分科会会員の方には大変有益な解説であったと思います。

第 20 回プラズマエレクトロニクス賞を受賞されました東北大学の佐々木先生、東京工業大学の赤塚先生に原稿をお寄せいただき、受賞論文を明快にご紹介頂きました。

名古屋大学の石川先生には、コロナ禍でオンライン開催された国際学会の ISPlasma2022/IC-

PLANTS2022 について報告を頂きました。

国内会議報告として、ウエスタンデジタルの中塚様から応物春季講演チュートリアル、九州大学の古閑先生から応物春季講演 PE 分科会企画、東北大学の岡田先生と静岡大学の松井先生から新領域研究会、キオクシアの栗原様からプラズマエレクトロニクス講習会について報告頂きました。このような状況下での開催について参考になる内容であったと思います。

次回の応用物理学会や国際会議、インキュベーションホール、第 21 回プラズマエレクトロニクス賞についても案内いただきました。ご一読頂き奮ってご参加頂ければと思います。

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。

(令和 4 年度会報編集担当：

末次、高橋、川島、鈴木)

プラズマエレクトロニクス分科会会報 No.76  
2022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  
(©2020 無断転載を禁ず)