

## プラズマエレクトロニクス分科会会報 No. 68

2018年（平成30年）6月発行

内藤、山家、大島、向笠

### 目次

#### 幹事長交代の挨拶

幹事長退任挨拶 幹事長退任にあたって 首都大学東京 朽久保 文嘉 1

幹事長就任挨拶 幹事長就任にあたって 名城大学 平松 美根男 3

#### 寄稿

ICT と地域課題とプラズマエレクトロニクスと 滋賀県立大学 酒井 道 4

#### 第16回プラズマエレクトロニクス賞

第16回プラズマエレクトロニクス賞について 首都大学東京 朽久保 文嘉 7

プラズマエレクトロニクス賞を受賞して 北海道大学 西山 修輔 9

核融合科学研究所 中野 治久  
後藤 基志

プラズマエレクトロニクス賞を受賞して 九州大学 富田 健太郎 11

佐藤 佑太  
築山 晶一  
江口 寿明  
内野 喜一郎  
ギガフォトン 神家 幸一郎  
戸室 啓明  
溝口 計  
Purdue Univ. 砂原 淳  
大阪市立大 西原 功修

#### 研究室紹介

岐阜大学工学部機械工学科 上坂・古木研究室 岐阜大学 上坂 裕之 15

#### 学生のためのページ

触媒反応の基礎 東京工業大学 野崎 智洋 20

## 海外の研究事情

ミネソタ大学滞在記	三菱電機	生沼 学	25
-----------	------	------	----

## 応用物理学会講演奨励賞

N <sub>2</sub> ガス中の正確な電子輸送解析と電子衝突断面積の推定	日本学術振興会特別 研究員 (PD)、室蘭工 業大学	川口 悟	28
パルス放電照射における水中生成種のレート方程式解析	室蘭工業大学	高橋 一弘	31

## 国際会議報告

10th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Application for Nitrides and Nanomaterials / 11th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (ISPlasma2018/IC-PLANTS2018)	名城大学	平松 美根男	33
2nd International Workshop on Plasma Agriculture	名城大学	太田 貴之 伊藤 昌文	35
The 10th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-10)	金沢大学	田中 康規	36

## 国内会議報告

2018 年第 65 回応用物理学会春季学術講演会 チュートリアル講演報告	サンディスク	吉元 諒	38
2018 年第 65 回応用物理学会春季学術講演会 第 20 回分科内招待講演報告	名城大学	太田 貴之	39
2018 年第 65 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シンポジウム 「二次元シート合成とプラズマプロセス～超薄膜 から原子層まで～」の報告	東北大学 東京大学	加藤 俊顕 神原 淳	40
第 28 回プラズマエレクトロニクス講習会 ～プラズマプロセスの基礎と先端分野への応用～	東芝メモリ	林 久貴	42
第 26 回プラズマ新領域研究会 『熱プラズマの電磁熱流体構造を開拓する』	大阪大学	茂田 正哉	43

第 27 回プラズマ新領域研究会 「プラズマプロセスと表面/界面モニタリング」	防衛大学校	北嶋 武	45
第 28 回プラズマ新領域研究会 『液体および生体とプラズマの相互作用』	愛媛大学	前原 常弘	46

## 行事案内

2018 年度第 79 回応用物理学会秋季学術講演会 分科会企画（分科会内招待講演・シンポジウム）	九州大学	古閑 一憲	47
第 12 回インキュベーションホール	東京工業大学	赤塚 洋	49
第 40 回ドライプロセスシンポジウム 40th International Symposium on Dry Process (DPS2018)	ソニーセミコンダクタソリューションズ 名古屋大学 アイオーコア	深沢 正永 堀 勝 木下 啓蔵	51
第 71 回気体エレクトロニクス会議 71st Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2018)	首都大学東京	朽久保 文嘉	53
第 36 回プラズマプロセッシング研究会(SPP36) 第 31 回プラズマ材料科学シンポジウム(SPSM31)	高知工科大学	八田 章光	54
第 34 回電離気体現象国際会議／第 10 回反応性プラズマ国際会議 XXXVI International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXVI ICPIG) / 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP10)	北海道大学	佐々木 浩一	55

## 掲示板

第 17 回プラズマエレクトロニクス賞 受賞候補論文の募集	名城大学	平松 美根男	56
平成 30 年度プラズマエレクトロニクス分科会 幹事名簿			58
平成 30 年度分科会幹事役割分担			60
平成 30 年度分科会関連の各種世話人・委員			61
活動報告			63
プラズマエレクトロニクス関連会議日程			66

広告掲載企業一覧	68
編集後記	69

## 幹事長交代の挨拶

# 幹事長退任にあたって

首都大学東京 朽久保文嘉

2016年4月から2018年3月までの2年間、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いただきました。胸を張って職務を全うしたと言い切れる何かを残せたわけではありませんが、無事に務めてこられたのは、平松副幹事長、林副幹事長、神原副幹事長、庶務幹事をはじめとする幹事の皆様、諮問委員の皆様、応用物理学会事務局の小田様のお力による所が大きく、また、本分科会会員の皆様には幹事団の活動を支援いただきました。ここに、厚く御礼を申し上げます。

幹事長を務めさせて頂く中、今後の分科会の方向性を考える上で、現状を正確に把握することが重要と考え、いくつかの具体的なデータを調べました。この情報を皆様と共有するために、この紙面を使わせていただきます。図1は本分科会の会員数の推移です。分科会として発足した当時には300名程度だった会員数は、2012年に500名を超え、今に至っています。会員数は何月に集計するかによって異なりますが、これまでの最大数は2015年11月の570名です。これは、2015年10月に行われたICRP-9/GEC-68を前に、会員数が

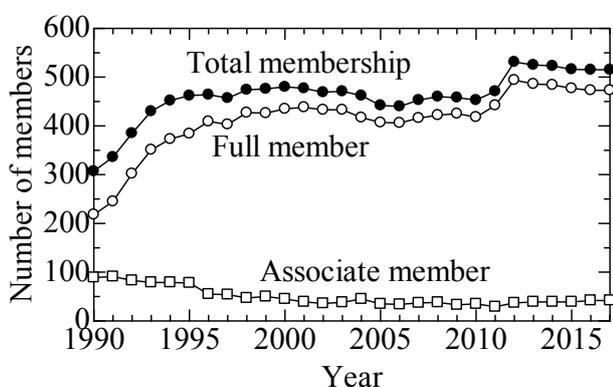


図1 PE分科会の会員数の推移

増えたためと推測されますが、この増分を十分に維持できていない所は課題です。また、私の任期中に会員数を増やせていないことは私にとっての大きな反省点です。将来を見据えた上で問題と感じているのは、図2に示した会員の年齢構成です。2016年11月時点でのデータを見ますと、30代、特に、これから中心的な役割を担うことが強く期待される35-39歳の会員数が少なくなっています。また、65歳以上の会員が一定割合を占めており、この点はとても感謝しておりますが、今後を考えたとき、いかに若手、中堅の会員を増やしていくかは課題です。その第一歩として、2018年より学生会員の年会費を3,000円から1,000円に下げました。学生会員がプラズマエレクトロニクスと当分科会に愛着を感じ、どれだけ正会員として定着するかが鍵です。

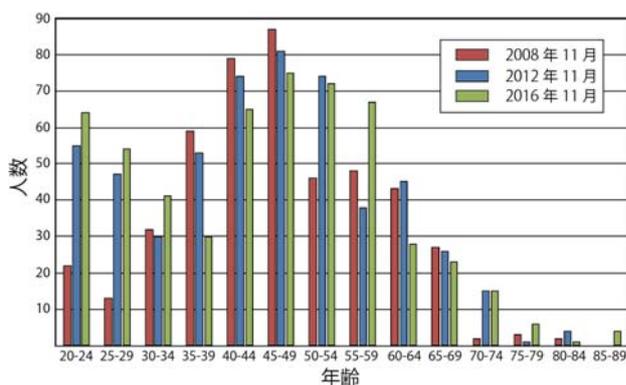


図2 年齢別会員数の推移

このように会員数が推移する中、春秋の応用物理学会におけるプラズマエレクトロニクスの発表件数は図3のように推移しています。2005年から2009年までは合同セッションの数を含むため、単

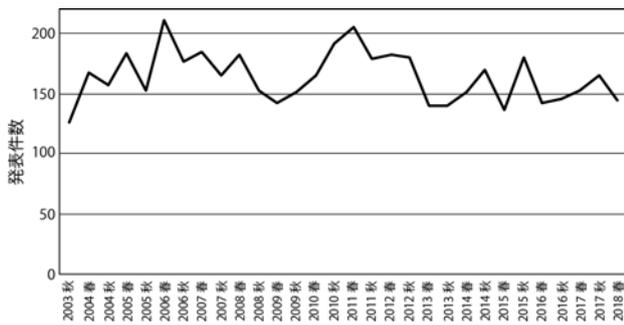


図3 春秋の応物学会での発表件数の推移

純な比較はできませんが、およそ 150~180 件の間で変動しており、その増減は開催地等にも依存するので詳細な分析はできておりません。2018 年春に中分類の組み替えが行われたことからわかるように、発表が多く行われる分野は徐々に変化しています。これは図 4 に示すように、プラズマプロセス研究会においても顕著です。1980-90 年代には、プラズマ生成、計測、素過程、モデリングなど基礎研究が急速に広がり、2000 年以降は応用研究の比率、特に最近ではバイオ・医療応用分野の発展が著しくなっています。また、高気圧プラズマの比率が増加しています。

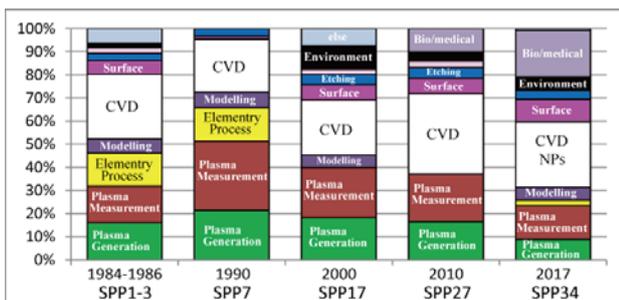


図4 プラズマプロセス研究会における講演分野の推移 (分科会誌 No.55 に記載された菅井先生のデータに新しいデータを加えて作成した)

2017 年 11 月に開催された Plasma Conference 2017 のシンポジウム「プラズマ研究の歩みと今後進むべき道を考える」において、本分科会を代表して「プラズマエレクトロニクス分科会におけるプラズマ研究の歩みと今後の展開」という題目で講演する機会を得ました。このとき、今一度、本分科会の発足理念、目指す学術と応用分野、これを具現化するための分科会の活動と仕組みや仕掛けについて振り返りました。その結果として改めて思いましたのは、活発な研究会活動の場、新たな方向性を探索する場、人材の育成、会員間の交流の促進、国際化、そして財政を安定化させる仕組みが上手に設計されており、かつ、うまく機能していることです。これらは諸先輩方の弛まぬ努力によって実現されてきましたが、その根底には一貫して、プラズマに対する好奇心、探究心と愛着、名大の堀勝先生のお言葉をお借りすれば、Plasma Love があったように思います。反応性プラズマの科学への探求を堅持しつつ、周囲にアンテナを張りながら魅力的なプログラムを編成し、活気ある討論の場を作っていくことが、地道ではありますが、プラズマエレクトロニクスの進化と本分科会の発展、更には日本の産業には必要であり、同時に、Plasma Love が増殖し、伝承されるように思います。

平松幹事長の下、今後も本分科会が益々発展していくことを心より願うとともに、私も一兵卒に戻って、少しでも本分野の発展に貢献したいと考えております。最後に、改めまして皆様に感謝を申し上げ、これを退任の挨拶とさせていただきます。

# 幹事長就任にあたって

名城大学 平松美根男

この4月より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名城大学の平松です。本分科会会員は500名を超え、2020年には本分科会発足30周年を迎えます。この30年でプラズマエレクトロニクスの扱う対象も産業界からの要請も随分様変わりしました。設立当時のプラズマエレクトロニクスの理念を踏襲しつつ、時代の要請にも応え、若手研究者も伸び伸び活躍できる環境作りを心掛け、本分科会の発展に向けて精一杯努めさせていただきます。

プラズマエレクトロニクス分科会の前身であるプラズマエレクトロニクス研究会は1985年に発足し、応用物理学会講演会の「放電・プラズマ・核融合」分科を発展的に解消して、「プラズマエレクトロニクス」分科が設けられました。歴代委員長（堤井信力先生、後藤俊夫先生、加藤勇先生）の御尽力により、応用物理学会講演会における分科会シンポジウムや総合講演をはじめ、プラズマプロセッシング研究会（SPP）や光源物性とその応用研究会を通して現在の分科会に移すべく地盤が構築されました。当初数十名であった会員数も5年間で300名に達し、プラズマエレクトロニクスが包含する分野の広がり、会員数増加、活動の拡大に対応すべく、1990年よりプラズマエレクトロニクス分科会に改組されました。設立発起人は、前述の歴代研究会委員長と橘邦英先生（分科会設立準備委員長・初代分科会幹事長）です。分科会昇格後は、人材育成も重要視し、若手研究者やこの分野に新しく参入した研究者を対象に、プラズマエレクトロニクスの基礎や現状について実習を

含めて研修して貰うことを目的とした講習会が企画され、現在のプラズマエレクトロニクス講習会やインキュベーションホールへと引き継がれています。さらに、異分野の研究者を交えた討論を行い、新学術領域の創成を目指すべく新領域研究会が2008年より継続的に実施されています。

1984年に始まったプラズマプロセッシング研究会（SPP）は現在も続いており、次のSPP36は2019年1月に高知で開催されます。SPPは3年毎に国際化（反応性プラズマ国際会議：ICRP）され、Gaseous Electronic Conference（GEC）等との共催で、ハワイやパリなど海外で開催されたこともあります。今回はInternational Conference on Phenomena in Ionized Gases（ICPIG）が日本にやってきて、2019年7月に札幌でICPIG-34/ICRP-10が開催されます。

分科会設立時の「プラズマエレクトロニクス」が包含する分野は、(1)気体放電現象、プラズマ中の電子原子分子過程、光過程やそれらの診断技術、(2)光・プラズマプロセス、気体レーザ、光源、その他のプラズマの応用技術の基礎などでした。現在は、大気圧プラズマを使った研究が盛んになり、応用範囲もエネルギー・環境・生体・農業へと広がっています。一方、分科会の目的は「プラズマエレクトロニクスに関する研究の推進及び技術の向上をはかること」であり、より広く応用物理学会会員の参加を得て、組織的な体制の下に先見的な活動を展開し、かつきめ細かく会員の要望に応えうる会の運営を行っていくという設立時の趣旨を踏襲し、分科会発足30周年に繋げて行きます。

## ICT と地域課題とプラズマエレクトロニクスと

滋賀県立大学 工学部 酒井 道

(電子システム工学科、地域ひと・モノ・未来情報研究センター)

### プラズマエレクトロニクスが包摂する多様性

先日、ある企業の方から、「プラズマは、大気圧やバイオや、と研究トピックスとして話題性はあるが、分野としての発展性・見通しがあるのか？」という質問をいただきました。もちろん、私は Yes とお答えしたわけですが、以下のような理由を付けて説明したところ、なるほど、と納得いただけましたようです。すなわち、私たちのグループでは、プラズマエレクトロニクス分野が主なターゲットとする弱電離プラズマについて、決してメジャーではない萌芽的な研究も行っていますが、そのうちの2つの内容については、民間企業との共同研究として行っています。つまり、幸いなことに、学術的な興味に終わらず、産業界としても注目いただけるような内容が多数、可能性を帯びて水面下に存在していると感じています。

このような状況がなぜ生じるかを考えてみると、私たちの研究グループに先進性や先見性があるから、ではなく（他のグループも同様に萌芽的テーマを力強く推進しておられます）、プラズマエレクトロニクス分科会が包含する科学技術分野の多様性のおかげ、と思っています。つまり、私が片足を突っ込んでいる他の複数の分野と比較してみると、本分科会には本当にいろいろな研究がありえます。例えば、弱電離プラズマの中に投入する気体の種類を変えるだけで、プラズマの特性やその応用先は大きく変化しますし、そもそもプラズマのパラメータの種類やその値の範囲は大変広範囲です。すなわち、分野として一致団結して突き進んで大型プロジェクトを獲得する、という勢いを

もたらずやり方とは少し異なるやり方として（これも重要ですが）、いろいろな研究を並行する分散型の発展が生来可能と思います。これは、私が最近興味を持って研究に取り入れている複雑ネットワーク科学の分野の知見[1]で解釈すると、広く種々の研究内容が並行して進行したり、関連して広がること（“百面相”の様相）は、システムとしてみたときに極めてロバストである（部分がうまくいかなくても、他の部分がそれを補って、システム全体が安定）、という説明が可能です。他の分野の方から見ると、いろいろなことをして節操が無い、と思われるかもしれませんが、個人的には、我々が大事にするべき特徴と思います。

前置きが長くなりました。以上のような背景の元、本稿では、プラズマエレクトロニクス分野は下記のような貢献もしていけるのでは、という話題提供を、我々の経験や取組を基にご説明します。

### ICT とプラズマ？

ICT (Information and Communication Technology) とは、一昔前の IT 分野に対して通信技術が融合することで可能となる技術であり、情報科学分野を越えて広く種々の分野で活用が始まっています。例えば大量のデータ（“ビッグデータ”）を人工知能分野の手法で“学習”することで行う予測ビジネスもその範疇ということができ、産業界で（発表されているものも密かに利用されているものも含めて）すでに多くの成果が得られており、効果も実証済みです。学术界でも、新物質創成・探索の手法等として“データ駆動科学”として注目さ

れており、同様の検討はプラズマを対象としてもありえるでしょう[2]。

このような ICT 分野との関連で、少し別の角度(2つ)からプラズマ現象を概観してみます。プラズマの中の粒子(原子や分子)は、お互いに独立した運動を行っており、一方固体中では原子が固定された位置で結晶・アモルファス構造等を取っています。コンピュータ機能を実現した電子産業の発展においては、機能性の素子を作ろうとしたとき、秩序や制御性が必要であるため、位置が固定されていて電気・磁気効果で狙い通りに操作することが可能な固体を用いてきました。橘邦英先生(京都大学名誉教授、大阪電気通信大学名誉教授)がけん引されたマイクロプラズマ研究・技術[3]においては、その考え方・方向性を共有しつつプラズマの独自性を生かし、微小で制御性の良いプラズマが種々開発され、新たなプラズマ分野の展開を拓かれたと思います。

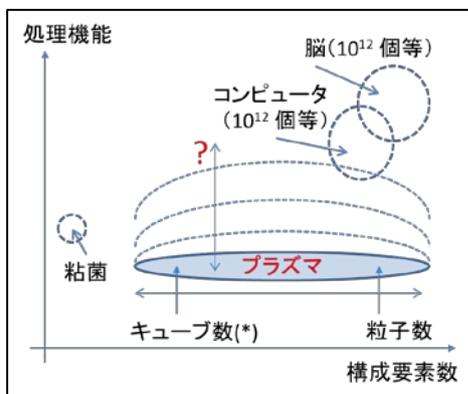


図1. プラズマが持ちうる情報保持・処理能力の可能性。(\*)キューブ数とは、プラズマ空間に占めるデバイ長を1辺とする立方体の数として定義した。粘菌は、単細胞ながら、多核細胞として学習能力や問題解決能力を持つことが知られている。

ここでは、プラズマ現象をもう少し自然体で眺めてみます。プラズマ物理やプラズマ工学の教科書で最初に初学者が見るように、プラズマ中では、クーロン力による集団効果・衝突によるエネルギー

緩和効果を除けば、電子やイオン等はお互いに独立して運動しています。もし、電子やイオン・原子・分子が個々に“情報”を持っているとすれば、その情報量は何ビットでしょうか? とてつもない大容量です。もちろん、実際にその1ビット1ビットを制御性を持って使いこなすことはほとんど無理ですが、例えばデバイ長程度の寸法の領域で区切ると、原理的には「情報プロセッサ」と見なすことが可能になります。それをどう使いこなすか、という視点はありえると思います。我々の検討においては、電磁波放射・電磁波制御(透明マント効果等)のデバイス応用として、このようにプラズマを解釈・利用しようとしています[4]。

しかし、一方で、プラズマ現象の面白さは、その内部での自己決定的・自己組織化的な構造・機能形成とも言えます。故板谷良平先生(京都大学名誉教授)は、言うことをきかないプラズマのこのような点を強調して「プラズマはネコである」という至言を残されました。例えば、分子性ガスを用いた弱電離プラズマ内には、複雑な化学反応ネットワーク(先に述べた複雑ネットワーク科学[1]で解釈可能)が形成されており、我々は一種のニューラルネットワーク機能が自己組織化された状態で収束しているという立場で解釈しています[5]。ニューラルネットワークとは、今の流行の言葉でいう深層学習機能の元となるアルゴリズム形態です。

このように、プラズマ現象に対して ICT 分野の考え方を投影すると、新たなプラズマの可能性が立ち現れてくると感じます。

## 地域課題とプラズマ?

さて、議論の展開に少し無理があるかもしれませんが、次に地域課題とプラズマ分野の関係についてご説明します。地域課題とは、一地方のローカルな問題、という理解は少し古めかしい捉え方

と思われ、例えば昨今の「地方創生」の考え方には、先に述べた複雑ネットワーク科学の知見からも“グローバル”性の価値を見出しているものと言えます。個々の地域課題はある意味では些末かもしれませんが、その解決に取り組むことで科学分野における最先端課題に出くわすことは珍しくありません。むしろ、問題を有限サイズの地域内に限定することで、茫漠としがちな問題点の絞り込みに成功しているとも言えます。

昨年度、小職らは滋賀県立大学に「地域ひと・モノ・未来情報研究センター」[6]を設立し、地域課題に対してICT手法を適用する検討を始めました。特に、農業・看護・観光という3テーマにICT手法を適用しますが、“グローバル”な研究テーマは星の数ほどあり、基本は都道府県に1つこのようなセンターがあるべきと思っています。前々項と前項で述べたように、ICT分野の知見の1つとしての複雑ネットワーク[1]の考え方を援用することで、種々に入り組んだ地域課題に対する研究と、プラズマ科学における研究には、親和性を感じます。プラズマ現象がもたらす“百面相”と“ネコ性”は、本センターの活動においてもうまく地域課題解決に整合しつつ独自性を発揮するものと考えており、実際にプラズマ技術を適用した検討も開始しました。地域課題という多様な研究フィールドに刺激を受けて、新たなプラズマ研究の展開につなげたい、という抱負を持っています。

## 謝辞

地域ひと・モノ・未来情報研究センターの設立・運営にあたっては、滋賀県および内閣府（地方創生推進交付金）等の支援をいただいております。深く感謝いたします。

## 参考文献

[1] R. Albert and A. Barabasi; Rev. Modern Phys. 74

(2002) 47.

[2] 辰巳哲也; 応用物理 85 (2016) 761.

[3] 橘邦英、石井彰三、寺嶋和夫、白藤立; マイクロプラズマ (オーム社, 2009年).

[4] O. Sakai *et al.*; Plasma Phys. Control. Fusion 59 (2017) 014042.

[5] O. Sakai *et al.*; AIP Advances 5 (2015) 107140.

[6] <http://www.ict.usp.ac.jp/>



写真1. 滋賀県立大学地域ひと・モノ・未来情報研究センター[6]の設立シンポジウム（平成29年5月31日）の様子。（上から）会場の様子（1、2）、ポスター発表・懇親会の様子。

## 第 16 回プラズマエレクトロニクス賞

### 第 16 回プラズマエレクトロニクス賞について

首都大学東京 朽久保文嘉

第 16 回プラズマエレクトロニクス賞の受賞候補論文を、2017 年 12 月 22 日を応募締切として募集し、9 件の応募がありました。今回は、例年にも増して、数多くの優れた論文が応募された印象を持ちます。応募論文の著者や分野を勘案の上、後述の 6 名の委員で選考委員会を構成しました。選考の手順としては、各委員がそれぞれの論文に対して評価を行なった上で、全委員が出席して選考委員会を開き、合議にて最終的な選考を行いました。厳正な審査の結果、以下の 2 件の論文を選考しましたので、報告いたします。

#### 受賞論文 (1) :

論文名 : Stark spectroscopy at Balmer- $\alpha$  line of atomic hydrogen for measuring sheath electric field in a hydrogen plasma

著者名 : Shusuke Nishiyama, Haruhisa Nakano, Motoshi Goto, and Koichi Sasaki

雑誌名 : Journal of Physics D: Applied Physics, **50**, 234003 (2017)

#### 受賞者 (現所属) :

西山 修輔 (北海道大学)

中野 治久 (核融合科学研究所)

後藤 基志 (核融合科学研究所)

佐々木 浩一 (北海道大学)

#### 受賞理由 :

本論文は、飽和吸収分光法を用いて水素原子のバルマー  $\alpha$  線のシュタルクスペクトルを測定することにより、10 V/cm の高感度および 0.2 mm 未満の高空間分解能を有する電界分布計測手法を提案し、シース部の電界計測に適用・実証したもの

である。従来の電界計測研究では高励起準位のシュタルク効果を計測することに注力してきたが、従来の方法よりも桁違いに波長分解能の高い飽和吸収分光法を用いることにより、低励起状態間の遷移であるバルマー  $\alpha$  線を用いても高感度の電界計測が可能であることを示している。提案手法の新規性に加え、レーザー分光計測の光源として安価で扱いやすい半導体レーザーを用いることが可能となり、シース電界計測を身近な実験技術とした意義は非常に大きい。よって、今年度のプラズマエレクトロニクス賞を授与するに相応しい論文である。

#### 受賞論文 (2) :

論文名 : Time-resolved two-dimensional profiles of electron density and temperature of laser-produced tin plasmas for extreme-ultraviolet lithography light sources

著者名 : Kentaro Tomita, Yuta Sato, Syouichi Tsukiyama, Toshiaki Eguchi, Kiichiro Uchino, Kouichiro Kouge, Hiroaki Tomuro, Tatsuya Yanagida, Yasunori Wada, Masahito Kunishima, Georg Soumagne, Takeshi Kodama, Hakaru Mizoguchi, Atsushi Sunahara, and Katsunobu Nishihara

雑誌名 : Scientific Reports, **7**, 12328 (2017)

#### 受賞者 (現所属) :

富田 健太郎 (九州大学)

佐藤 祐太 (九州大学)

築山 晶一(九州大学)  
江口 寿明(九州大学)  
内野 喜一郎(九州大学)  
神家 幸一郎(ギガフォトン株式会社)  
戸室 啓明(ギガフォトン株式会社)  
溝口 計(ギガフォトン株式会社)  
砂原 淳(Purdue 大学)  
西原 功修(大阪大学)

#### 受賞理由：

シリコン半導体デバイスのさらなる微細化を支えるために、EUV 露光光源（波長 13.5 nm）の高出力化が強く望まれているが、EUV 発光強度を決定するプラズマの密度や温度、イオン価数の詳細な計測例はこれまでなかった。本論文では、協同的トムソン散乱で得られるイオン項に着目し、迷光除去と高波長分解を両立する分光システムの開発によってイオン項の観測に成功し、電子温度・密度や平均イオン価数の時間分解二次元空間分布を初めて計測した。また、高効率 EUV 光源条件下では、プラズマ中心部の密度および EUV 発光強度が周辺部より低い中空様構造であること、この特異な構造が優れた光源の実現に重要であることを明らかとし、更なる高効率 EUV 光源への道筋を示した。よって、今年度のプラズマエレクトロニクス賞を授与するに相応しい論文である。

#### 第 16 回プラズマエレクトロニクス賞選考委員会

白谷 正治（委員長・九州大学）  
赤塚 洋（東京工業大学）  
高木 浩一（岩手大学）  
辰巳 哲也（ソニーセミコンダクタソリューションズ（株））  
寺嶋 和夫（東京大学）  
朽久保 文嘉（首都大学東京）

#### プラズマエレクトロニクス賞規程について

プラズマエレクトロニクス賞規程に、「表彰の対象論文は、原則として、プラズマエレクトロニクス分科会が主催する研究会、国際会議等で発表され、且つ募集期間から過去 3 年の間に国際的な学術刊行物に掲載された原著論文とする」という要項があります。この中で、“プラズマエレクトロニクス分科会が主催する”は“研究会、国際会議等”を修飾するのですが、“プラズマエレクトロニクス分科会が主催する研究会”または“国際会議等”と解釈された応募が複数ありました。これについては、趣旨を説明の上で応募資料の一部を差し替えてもらいましたが、誤解のない文面にする必要があろうかと思えます。また、“プラズマエレクトロニクス分科会が主催する研究会、国際会議等で発表され”の範囲について、今回も問い合わせがありました。この点についても、誤解のないよう、また、応募の妨げにならないよう、説明の追加を検討する必要があります。なお、この要項の精神は、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で発表・議論され、そこから生み出された優れた論文を表彰したいということであり、分科会が主催するプラズマプロセッシング研究会、ICRP、新領域研究会に加え、応用物理学会の春秋の学術講演会における大分類 8 プラズマエレクトロニクスでの発表は当然含まれます。

#### おわりに

今年も 2018 年 12 月中旬から下旬を締切として、第 17 回プラズマエレクトロニクス賞への応募論文の募集があります。募集日程等の詳細は、分科会 HP やメール、「応用物理」の案内（おそらく 9 月号）でご確認ください。是非、奮ってご応募ください。

## 第 16 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

北海道大学 西山修輔, 佐々木浩一  
核融合科学研究所 中野治久, 後藤基志

#### はじめに

この度は、第 16 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光栄に存じます。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厚く御礼申し上げます。今回の受賞対象となりました論文「Stark spectroscopy at Balmer- $\alpha$  line of atomic hydrogen for measuring sheath electric field in a hydrogen plasma」[1] に関しまして、その研究背景と内容の一部を簡単にご紹介させていただきます。

#### 論文内容

**[背景]** プラズマと物体の界面に生成されるシース領域における電界は、イオンの界面への衝突エネルギーに直接的にかかわるため、プラズマプロセスにおいても重要な役割を担っています。プラズマ中の電界計測は、これまでにもエミッシブプローブによるポテンシャルの空間分布計測やリュドベルグ状態のシュタルク分光法によって行われてきました。しかしながら、十分な空間分解能で簡便にプラズマ中の電界を計測する方法が無いために電界計測は一般的には行われておらず、シースの物理自体の理解もまだ十分に確立しているとは言えない状況にあります。

プラズマへの擾乱を避けるためには光学的な手段であるシュタルク分光法が適していますが、シース領域における 100V/cm 以下の弱い電界強度では、通常の発光あるいは吸収スペクトルに認識できる程度のシュタルク効果は現れません。その

ため、シュタルク効果がより顕著に生じる、主量子数が大きいリュドベルグ状態への励起や脱励起のスペクトルから電界強度を計測する方法が用いられてきましたが、遷移確率は主量子数とともに急激に減少するためにリュドベルグ状態の検出が難しく、電界計測法としての困難さにつながっていました。

本研究では、水素プラズマを対象に、水素原子のバルマー- $\alpha$ 線のシュタルクスペクトルを飽和吸収分光法で計測し、プラズマ中の電界強度を求めました。水素原子は 1 次のシュタルク効果を示すことと、バルマー- $\alpha$ 線の吸収スペクトルは主量子数が 2 から 3 への可視光域での遷移であり、吸収スペクトルのドップラー広がりを取り除くことができる飽和吸収分光法を適用することで微細構造スペクトルを個々に分離できるため、弱い電界強度におけるシュタルク効果が観測可能になります。また、理論計算で求めたシュタルクスペクトルと比較することで電界強度を得ることが可能となりました。

**[実験方法]** 図 1 に実験体系の概要を示します。真空チャンバー内にアンテナと平面電極を備えた ICP 装置で電子密度がおおよそ  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  の水素プラズマを生成し、平面電極の表面近傍に半導体レーザーのレーザー光を通過させました。レーザー光は、高強度のポンプ光と弱強度のプローブ光を対向する方向からチャンバー中心で交差するようにほぼ同軸上に配置し、プローブ光の透過強度を測定しました。レーザー光の直径(FWHM)は 0.3mm で、電極表面とレーザー光の距離、レー

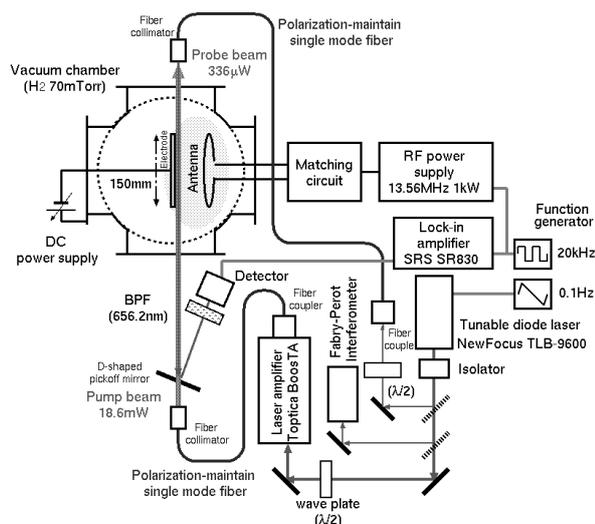


図 1: 実験体系の概要図

レーザー光の偏光方向は制御可能としました。半導体レーザーの発振波長を掃引することで吸収スペクトルが得られ、ポンプ光の有無による差スペクトルがドップラーフリーの波長分解能の微細構造スペクトルとなります。小規模な低温水素プラズマではバルマー  $\alpha$  線の吸収が小さいため、プラズマの生成を 20kHz で ON-OFF 変調して同期成分をロックインアンプで検出することで  $10^{-4}$  オーダーの吸収が測定可能となりました。

**[結果]** 電極をチャンバーと同電位として電極表面とレーザー光の距離を近づけていったときの飽和吸収スペクトルは図 2 のようになりました。水素原子のバルマー  $\alpha$  線の微細構造スペクトルが FWHM で 420MHz(=0.6 pm)程度の幅で得られ、電極表面とレーザー光との距離によって変化していることがわかります。定量的に評価するため、A と B のピークの間隔を実験と理論計算で求めたシュタルクスペクトルとで比較すると、図 3 に示す電界分布が得られました。スペクトルのピーク間隔の読み取り精度から電界強度の検出下限は 10V/cm、レーザー光の空間プロファイルから空間分解能は 0.15mm と評価され、0.7mm 程度の厚さのシース領域における電界分布を得ることができました。

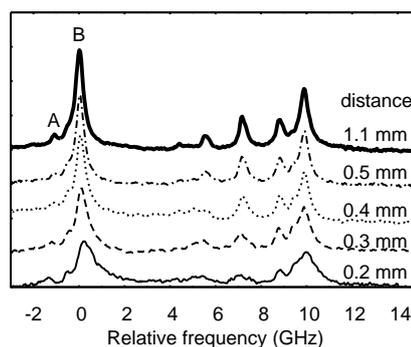


図 2: レーザー光を電極表面に近づけていったときのシュタルク効果によるスペクトルの変化

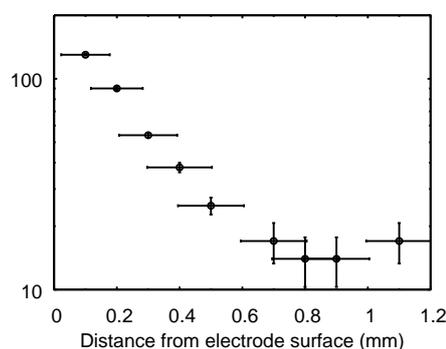


図 3: スペクトルから読み取った電極表面近傍の電界分布

**[まとめ]** 本研究では、水素プラズマを対象に半導体レーザーを用いたシュタルク分光計測を行い、シース領域の電界計測を十分な感度と空間分解能で実施可能なことを示しました。半導体レーザーは他の波長可変レーザーと比較して低価格で運用も容易であり、電界計測がより簡便に実施可能になったといえます。一方で、本測定法を適用できるプラズマの範囲を拡大するためには、よりレーザー光の吸収が小さいプラズマへの対応が必要と考えております。

## 参考文献

- [1] S. Nishiyama, H. Nakano, M. Goto, and K. Sasaki, J. Phys. D: Appl. Phys. 50 (2017) 234003.
- [2] S. Nishiyama, K. Katayama, H. Nakano, M. Goto, and K. Sasaki, Appl. Phys. Express 10 (2017) 036101.

## 第 16 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

九州大学 富田健太郎, 佐藤佑太, 築山晶一, 江口寿明, 内野喜一郎  
ギガフォトン株式会社 神家幸一郎, 戸室啓明, 溝口計  
Purdue Univ. 砂原淳  
大阪市立大 西原功修

#### はじめに

この度は栄誉あるプラズマエレクトロニクス賞を受賞することができ、大変光栄であると同時に、選考委員の先生方をはじめ、関係者の皆さまに感謝の念で一杯です。この場を借りて、お礼を申し上げます。受賞対象となった論文「Time-resolved two-dimensional profiles of electron density and temperature of laser-produced tin plasmas for extreme-ultraviolet lithography light sources」[1]にまとめました我々が得た成果を端的に述べるならば、その重要性が認識されていながら、10年以上にわたり世界中誰一人として実現するに至らなかった、極端紫外光源プラズマの温度及び密度の時空間分解計測に成功し、光源の更なる高出力化に向けた道筋を拓いたこと、となります。受賞対象論文[1]では、九州大で開発した計測システムを、ギガフォトン株式会社の平塚分室にある、実用レベルに達した EUV 光源用プラズマの診断に適用し、「優れた光源のプラズマ状態はどのようなか」という問いに、一定の答えを示せたと考えています。ところで、インパクトとしてはこの論文に及ばないかもしれませんが、個人的には、この論文の成果に至るまでに開発を続けた計測システムにも大変思い入れがあります。それらは参考文献[2-4]にあります。ご一読いただけますと幸いです。

#### 論文内容

##### 【背景】

シリコン半導体デバイスのさらなる微細化をコスト面から支えるためには、高スループットの露光装置が不可欠であり、極端紫外 (Extreme ultraviolet, EUV, ここでは波長 13.5nm を指す) リソグラフィの一刻も早い実用化が望まれています。その光源は高温 (~30 eV)・高密度 ( $10^{24}$ - $10^{25}$  m<sup>-3</sup>) のスズ (Sn) プラズマです。商用化には出力パワーと変換効率(入力から 13.5 nm 光への効率)の向上が必須であり、その達成には光源プラズマの電子密度・温度や平均イオン価数の最適化が不可欠であると言われています。計測の重要さは10年以上前から指摘されていました。しかし微小 (~0.5 mm)・短命 (~20 ns) なプラズマの時間・空間分解計測の困難さゆえ、有効な手法は確立されてきませんでした。この課題に対して、我々は協同的トムソン散乱 (レーザー散乱に関与する波数ベクトルと対象プラズマのデバイ長の積が 1 以下の領域で得られる散乱) [5]で得られるイオン項スペクトルに着目し、その検出を実現するべく、計測システムの開発を進めてきました。最大の問題は、計測レーザー波長 (波長 532 nm) に現れる迷光を除去しつつ、その周辺の極めて狭い波長広がり (~0.1nm 程度。イオン音波周波数程度の広がり) のスペクトル形状を計測する必要があった点です。

解決には、従来にはない計測システムの構築が必要となりました。準備実験として、まずはスズよりも軽く、イオン項スペクトル幅の広い、アルゴン[2]や炭素[3]のプラズマをターゲットとして、安定したイオン項計測の実証を行いました。さらにスズプラズマ計測のために、必要かつ実現可能なシステム構成の立案を行い、最終的に、超狭帯域の物理ノッチを4枚の回折格子を用いて構築し、EUV光源用スズプラズマのトムソン散乱計測の道筋を示しました[4]。この計測システムを、共同研究先であり、最先端のEUV光源用プラズマ実験が可能な、ギガフォトン株式会社の平塚分室に移植し、実験を進めました。

#### 【実験装置と結果】

実験配置を図1(a)に示します。ターゲットは液滴スズであり、ドロップレットジェネレータから供給され、その直径は26  $\mu\text{m}$  です [図1(b)]。プラズマ生成用レーザーは、ピコ秒パルス幅の予備レーザーとナノ秒パルス幅のメインレーザー（炭酸ガスレーザー）の2本となります。予備レーザー入射により、図1(c)に示すように、スズターゲットをドーム状に膨張させます。図1(d), 1(e)はそれぞれ、特製分光器で分光した後にICCDカメラで得られたトムソン散乱スペクトルと、その一部を切り取ったもので、 $\Delta\lambda$  は計測レーザーからの差波長です。イオン音波周波数に対応する位置に、2本のピークが明確に見えており、この強度とピーク幅、形状（中央のくぼみ具合）から、電子密度、電子温度、平均イオン価数を求めました。図1(d)のイオン項からプラズマ状態の空間分布がわかりますが、2本のピークの中心は、ほとんどの位置で計測レーザー波長 ( $\Delta\lambda=0$ ) にならないことがわかります。これは各位置でプラズマが移動しているからです。すなわち図1(d)は、メインレーザーで加熱したプラズマが、前後に噴出していく様子を如

実にとらえていることとなります（図1(d)については言及したい事は他にも多くありますが、

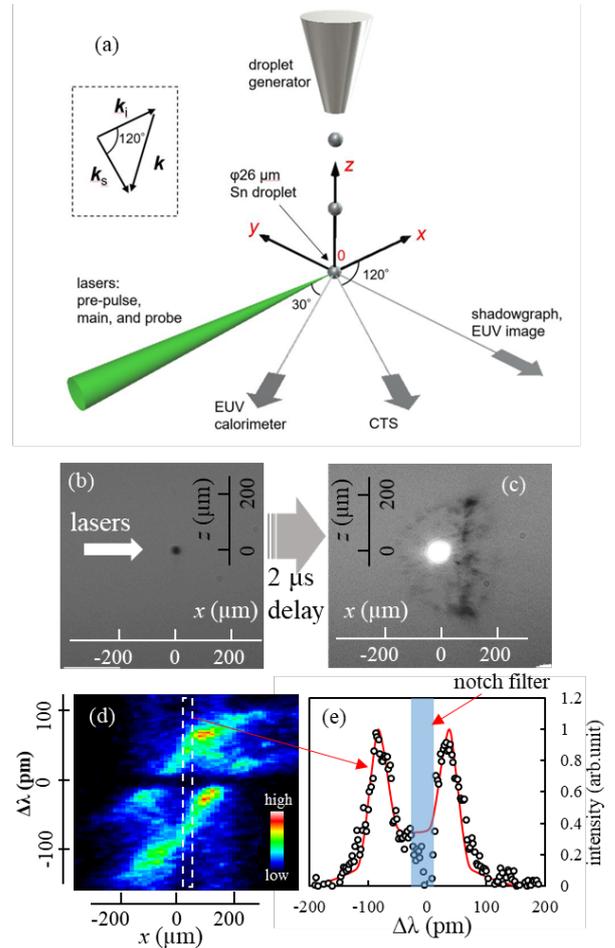


図1. 実験装置の概要、他 [1]

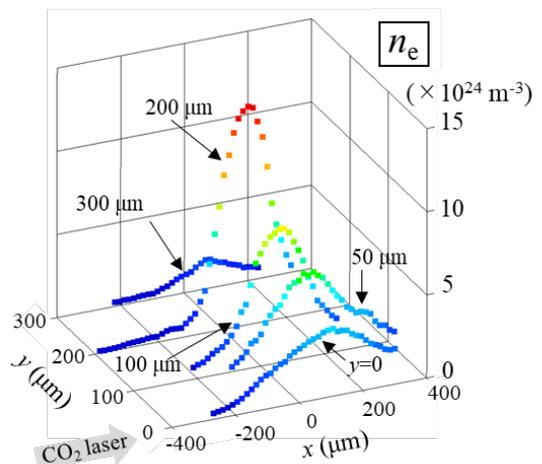


図2. 電子密度計測結果の一例 [1]

この辺りで止めておきます)。図 2 はあるプラズマ生成状態での電子密度の空間分布を示したものです。光源プラズマのサイズは図 1(c)で示したドーム程度(半径で 200  $\mu\text{m}$  程度)であり、それよりも高い空間分解能が必要ですが、今回の計測では 20  $\mu\text{m}$  程度の分解能があるため、図 2 に示すように、プラズマ内の密度構造が捉えられています。EUV 光源用プラズマの性能指標の一つに変換効率(Conversion Efficiency, CE)があります。CE は投入したメインレーザーエネルギーに対して、EUV 光(波長 13.5 nm、2%幅)がどれだけ発生しているかを示すもので、EUV 露光実現に向けて、重要な指標となります。図 2 で示したプラズマの CE は 4%であり、今回の実験では最高値となります。高い CE 条件では、電子密度はレーザー軸上( $y=0$ )では低く、プラズマ周辺部でピークを持つことが示されました。次に図 3 では、3 つのプラズマ生成条件での計測結果を示します。生成条件の違いは、予備レーザーからメインレーザーまでの時間( $\tau$ )です。 $\tau$ の値に対応して、論文内では各プラズマを 1.3  $\mu\text{s}$  plasma というように呼んでいます。なお図 3 では(図 2 もそうですが)、対象性を考慮し、プラズマの片側を計測しました。 $\tau$ の増加に伴い、スズターゲットが膨張していきまので、スズ原子密度が低下し、イオン密度や電子密度も減少することが予想されました。計測の結果、やはり電子密度は、 $\tau$ の増加とともに減少していくことがわかりました。 $\tau=1.3 \mu\text{s}$ では、メインレーザーのカットオフ密度(約  $10^{25}\text{m}^{-3}$ )を超える領域が広範囲で形成されていることがわかります。一方、 $\tau=2.5 \mu\text{s}$ では、電子密度はカットオフ密度を大きく下回っています。3 条件で、2.5  $\mu\text{s}$  plasma が最低の CE を示しましたが、その理由は、EUV を放射するスズイオンの絶対数が他の 2 条件よりも明確に少ないためであると考えられます。次に電子温度の計測結果を見ると、 $\tau=1.3 \mu\text{s}$ では、 $x$ 方向

で急激に温度が減少しています。これは  $x>0$ ではプラズマがカットオフ密度に達し、その直前の高い密度勾配空間で、レーザーが吸収されているためだと解釈できます。それに対して  $\tau=2.0 \mu\text{s}$ では、ほとんどの位置で電子密度はカットオフに到達していないと同時に、適度なレーザー吸収が期待できる密度領域が広がっています(電子密度・温度とレーザー吸収長の議論は、文献[6]に詳しくあります)。このため、 $x$ 方向並びに、半径方向にも、EUV 放射に適した領域が広範囲に広がります。得られた電子密度・温度(および平均イオン価数)と原子過程モデリング計算[7]から、各位置での EUV 光強度(Emissivity,  $\eta_{\text{EUV}}$ 、単位は  $\text{W}/\text{m}^3/\text{eV}/\text{sr}$ )を計算したものが図 3 の最終段となります。 $\tau=1.3 \mu\text{s}$ の条件では、広範囲でカットオフ密度を超えているため、レーザー吸収が狭い範囲でしか起きず、高密度かつ高温部分が一部分しか形成されていないことがわかります。結果として  $\eta_{\text{EUV}}$ は狭い範囲でしか達成されていません。 $\tau=1.3 \mu\text{s}$ でのもう一つの特徴は、高  $\eta_{\text{EUV}}$ の半径方向への拡がりがないことです。最終的な EUV 総量は体積が関連するため、図 3 で示した以上に、半径方向の拡がりには CE に影響します。 $\tau=2.0 \mu\text{s}$ の状態は、適度な密度・温度状態が広範囲、特に半径方向に拡がっており、最高 CE はその結果であることがわかります。実験当初は予想していませんでしたが、照射されるレーザーパワー密度が最も高いプラズマ中心部では、 $\eta_{\text{EUV}}$ は高くないことがわかりました。ある程度の電子密度(イオン密度)がないと、当然ながら高い CE は見込めませんが、高すぎる密度は広範囲でのカットオフ密度領域形成につながり、逆効果であることがわかります。

## おわりに

本研究により、EUV 光源の CE がプラズマパラ

メータで説明可能であることを示しました。より重要なのはさらなる CE 向上に向けた指針ですが、今回の実験結果は、メインレーザープロファイルの整形に一つの鍵があることを示唆しています。これ以上中心部分は加熱せずに、(許容エタンデュ範囲内で) 周辺部に存在する、追加熱すれば大幅な  $\eta_{EUV}$  向上が見込める ( $\eta_{EUV}$  は電子温度に対して極めて非線形) プラズマを、狙い撃ちすることが重要と思われます。

### 参考文献

[1] K. Tomita *et al.*, *Scientific Reports* **7**, 12328 (7pp) (2017).

[2] K. Tomita *et al.*, *J. Plasma Fusion Res Ser.* **8** 488–91 (2009).

[3] K. Tomita *et al.*, *Appl. Phys. Express* **6**, 076101 (4pp) (2013).

[4] K. Tomita *et al.*, *Appl. Phys. Express* **8**, 126101(4pp) (2015).

[5] J. Sheffield *et al.*, “*Plasma Scattering of Electromagnetic Radiation*”, 2nd Edition (Academic Press, 2010).

[6] Y. Sato, K. Tomita *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 36201 (2017).

[7] A. Sasaki *et al.*, *J. Appl. Phys.* **107**, 113303 (2010).

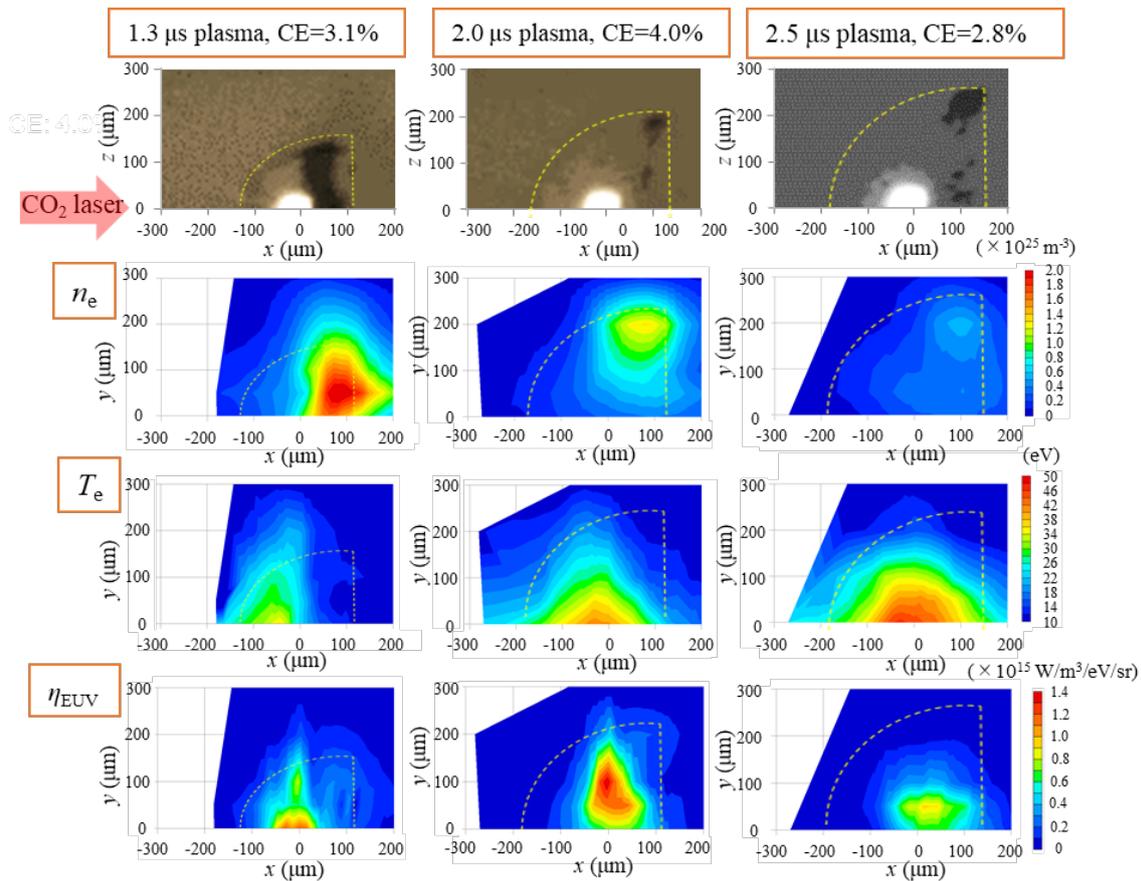


図 3. 電子密度・電子温度と EUV 強度分布 [1]

## 研究室紹介

### 岐阜大学 工学部 機械工学科 上坂・古木研究室

#### 岐阜大学 上坂 裕之

#### はじめに

本研究室は、古木辰也先生が2016年4月に助教として、少し遅れて上坂が2016年7月に教授として岐阜大学に着任したところからはじまった新しい研究室です。上坂が機能性表面の創製・加工法と評価をメインとする研究を行い、古木助教が機械加工や金属AM (additive Manufacturing) をメインとする研究をそれぞれ独立して行っています。

平成30年4月末現在で、上記2名の教員（工学博士）が、博士後期課程学生1名（社会人）、大学院研究生1名、博士前期課程学生10名（うち留学生1名：ベトナム人）、学部4年生8名を指導しています。まだ新しい研究室なので、外部に出た卒業生は少なく、図1の写真の田中研究員（平成30年4月より兵庫県立大学助教）、山口氏（平成30年4月より愛知県の機械メーカー勤務）を含む若干3名が、OBとして巣立ったところです。これからも彼らに劣らない優秀な人材を多く輩出したいと意気込んでいます。

両教員とも地域連携・次世代金型技術研究センターの教員を兼務しており、学生たちの多くが岐阜大学の金型コースを受講・修了しています。岐阜県は全国でも有数の加工系事業所の集積地であるので、県内関連企業の皆様と協力して、共同研究や研究シーズの社会実装を果たしていくこともセンター所属教員の大きなミッションの一つです。また本年の6月に岐阜大学のスマート金型開発拠点が正式に発足するため、拠点の目標である金型製作・利用プロセスのIoT化に向けて新しいテーマを立ち上げていく準備をしています。



図1 研究室のメンバー（2018年3月 謝恩会）

#### 上坂グループの研究内容

上坂グループの研究テーマでは、プラズマ・イオンプロセスをはじめとする各種の表面加工法を駆使して機能性表面を創製する。その中でも、相対運動する二面間の界面現象、すなわち摩擦、摩耗、付着などの機械的応答特性を適切に制御することを目指すテーマが多い。また、表面加工法の高速度など加工法そのものの生産技術的な課題に取り組むことも多い。それらの研究を高いレベルで遂行するためには、トライボロジーやプラズマに関する基礎知識に加えて、様々な先端特種加工技術を使いこなす必要があると考えている。以下に研究例を紹介する。

（1）高密度・基材方位プラズマによる1ピースフロー型・超高速・三次元DL C成膜装置の開発（平成23-27年度-NEDO先導的産業技術創出事業、研究代表者：上坂）

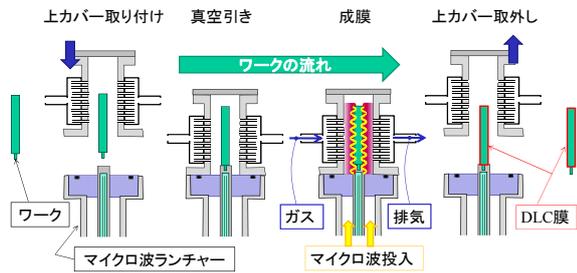


図2 MVP方式の超高速成膜技術を用いた省スペース・一品・短時間処理型DLC成膜装置のコンセプト

DLCの成膜コストが高いことがDLCの適用拡大を妨げている。DLC成膜の低コスト化への要求に応えるべく、従来の大型装置による大量バッチ処理方式にかわる、小型装置による1品処理方式の成膜技術(図2)が望まれ始めた。そこで本研究では、従来の100倍以上の成膜速度(100 $\mu$ m/h以上)で大量バッチ処理と同じスループットが出せる1品処理型・超高速・三次元DLC成膜装置の開発を目指した。具体的には、基材近傍のシーラ領域でマイクロ波のエネルギーを局部的に吸収させ、基材近傍のプラズマ密度をDCやRF放電を用いた場合の100倍以上にすることで、短時間で必要な膜厚が得られるようなプラズマCVD技術の確立を目指した。そのために、図3の小型装置を試作し、DLC成膜を行ったところ硬度20GPaのSi含有DLC膜を156 $\mu$ m/hの超高速で成膜することに成功した(図4)。本研究の成果はその後、自動車部品へのDLC成膜装置を小ロット化する開発プロジェクトに繋がり、代表企業：(株)CNKが開発した新装置による受託加工が開始された(雑誌「メカニカルサーフェステック」2017年2,12月号, 広告掲載)。

(2) MVPによる高密度プラズマ生成に関する基礎研究やシミュレーション手法の検討

MVP法では、表面波モードのマイクロ波が基材表面のプラズマ-イオンシーラ境界に沿って伝

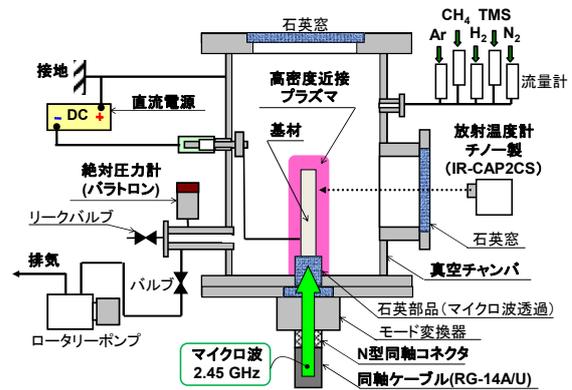


図3 MVP法を用いた超高速DLC成膜装置の模式図

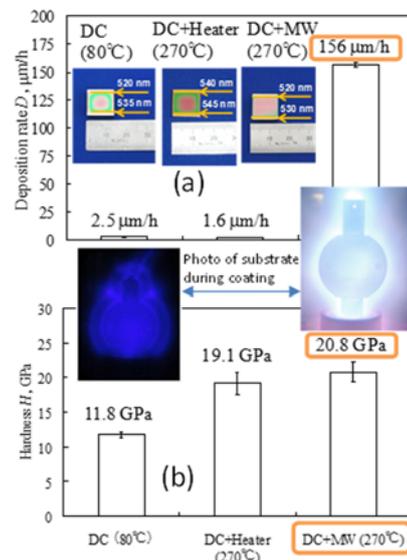


図4 DC放電とMVP法によるDLC成膜結果。(a)成膜速度と(b)膜の硬度。

搬し、そのエネルギーで高密度プラズマが基材の3次元形状面に沿って生成維持される。電磁波の伝搬に偏りが生じると、プラズマの不均一化につながる。従ってMVP法を表面加工法としてつかいこなすには、プラズマと電磁波が相互作用しながらどのように3次元形状面に沿って分布を形成するのかを、CAE的に予測できることが望ましい。しかしながら、そのような複雑現象を収束性良く、定量性をもって計算することは難しかった。筆者らはそのようなマルチフィジクス現象を収束性良く解くための手段として、テキサス大学オース

ティン校の Laxminarayan L. Raja 教授らと EsgeeTechnologies (米国) が開発した商用ソフトウェア Vizglow に期待した。そこで日本の販売代理店 ((株)ウェーブフロント) を通じて過去の実験 (R. Matsui, et al., JJAP 52, pp. 11NA01, 2013) で行った細穴内面プラズマ生成を対象とするデモ計算を依頼した。装置構成や Ar プラズマ生成条件は文献の値と同じにした (SUS パイプへの印加電圧-200V, 投入マイクロ波 1kW)。その計算結果としてマイクロ波パワーの吸収分布を図 5 に示す。パイプ内面に形成されたイオンシースと高密度プラズマの境界に沿って、マイクロ波を強く吸収する領域が生じることが示された。より詳細にみると、共鳴的なマイクロ波パワーの吸収は、カットオフ密度のラインを中心に起きており、これはプラズマ-イオンシース境界の表面波伝搬の特徴である。そのような特徴が良く再現されていることから、本結果は文献に示される MVP 法による細穴内面プラズマ生成を定性的によくシミュレーションできていると考えている。今後の計算結果に対する定量的な検証が必要であるが、電磁波伝搬、プラズマ分布の形成、電荷密度分布 (イオンシース) の形成を Self-consistent に解くことが可能なシミュレーションで、収束性の問題がなく、MVP

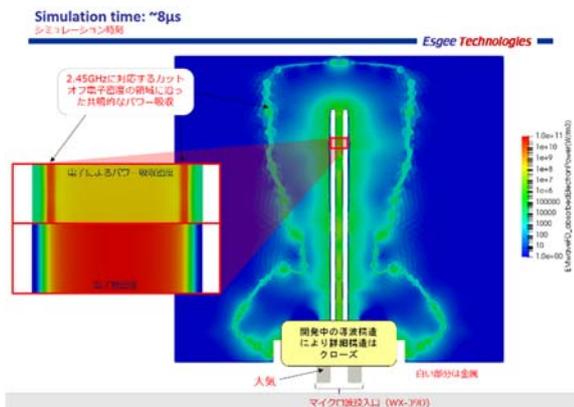
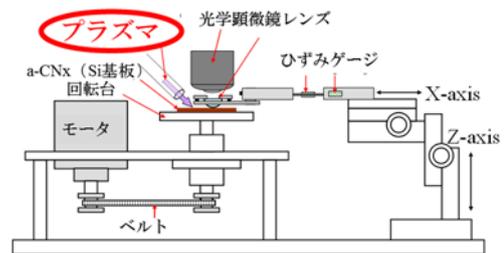


図5 プラズマ-電磁波連成解析による、マイクロ波パワーの吸収分布。MVP 法による細穴内面プラズマ生成実験 (文献 23) の条件を対象として計算を行った。

法によるプラズマ生成の特徴をよくとらえた計算結果が得られたのは、これが初めての事例である。今後、シミュレーションを活用して MVP 法への理解を深めることを考えつつ、MVP 法を用いた表面加工プロセスの有効な CAE 手段として Vizglow に期待している。

### (3) プラズマ支援潤滑

機能性炭素系コーティングによって低摩擦~超低摩擦現象が発現する際には、長い距離や時間をかけてなじんでいく過程を経ることが多い。従ってそのようななじみ過程を短縮することが望まれている。そこで我々はプラズマ照射によるなじみ



**実験条件 (しゅう動条件)**  
 ピン: サファイア半球 φ8 mm  
 荷重: 0.1 N  
 すべり速度: 0.083 m/s  
 (400 rpm, 回転半径 2 mm)  
 吹付ガス: He (0.5~5 L/min)  
 プラズマ照射: 1 min

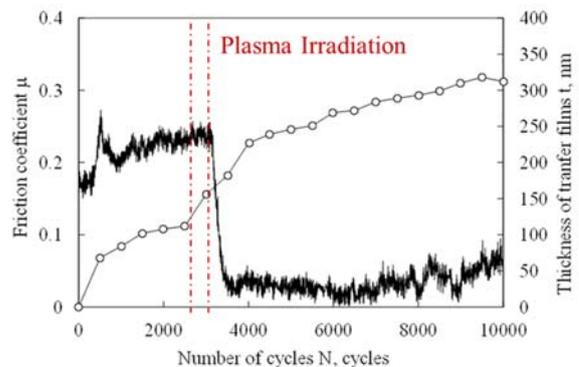


図6 プラズマ支援潤滑の一例: 摩擦サイクル数にともなう摩擦係数の変化 (a-CNx vs サファイア半球)。左縦軸は摩擦係数を、右縦軸は移着物厚さを示す。プラズマ照射後になじみが急速に進展する。

過程短縮の可能性を示した (H. Kousaka et al., Tribology Conference 2016 Spring in Tokyo, 2016-05, F12.). ピンオンディスク装置で、垂直荷重 0.1N, すべり速度 0.083m/s の摩擦条件で、サファイア半球(直径 8mm)と a-CNx 膜を大気開放下でしゅう動した場合、0.2 から 0.3 の高い摩擦係数で安定する (図 6). そこで、その段階で 0.5L/min のヘリウムガス流を大気圧プラズマ発生装置によりプラズマ化し、摩擦痕上に 1 分間照射すると、照射終了直後から急激に摩擦係数が低下するという現象が見られた。このような新しい現象を活用することを目指して、現象の工学的な理解を進めている。

### 古木グループの研究内容

切削や研削、研磨などの機械加工技術の高精度化を目標に研究を遂行している。特に、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) やチタン合金、超硬合金のような難削材を対象として、新工具や加工プロセス、加工機上工具測定手法の開発などが現在のメインテーマである。さらに最近では、金属積層造形 (AM) の適用アプリケーション拡大に向けて、金属 AM 材の加工特性の解明を目指している。本報では、その一例について紹介する。

#### (1) 炭素繊維強化プラスチック (CFRP) /チタン合金スタック材 cBN 電着エンドミルの開発(平成 29-31 年度-若手研究 B, 研究代表者：古木)

低比重、高強度などの優れた特性を有する CFRP を構造材として使用する場合、親和性の問題からチタン合金が相手材として用いられている。スタック材は外周・穴あけ加工を必要とするが、両者の材料特性が異なるため、同時加工が難しく、個別加工して重ね合わせており、加工時間や加工コストの増加が問題となっている。そこで本研究では、CFRP の高精度加工に有効な電着砥石と、

チタン合金の効能率加工に有効なエンドミルを組み合わせた電着エンドミルを開発した。また、砥粒には耐熱性に優れる cBN (立方晶窒化ホウ素) を用いることで、低熱伝導率なチタン合金を加工した際の高温の加工熱による砥粒摩耗の著しい進行を抑制している。図 7 に示すように切削と研削を組み合わせたことで、通常の加工速度下でも表面粗さで  $1 \mu\text{m Ra}$  程度かつバリや未切断炭素繊維が発生せずに高精度加工が可能であることを明らかとした。

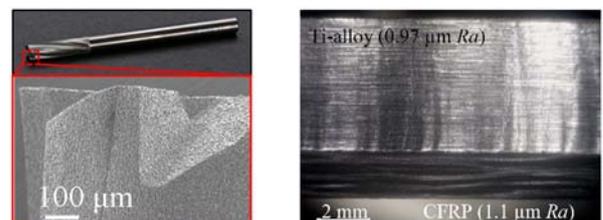


図 7 cBN 電着エンドミルと加工したスタック材の側面図

#### (2) 金属 AM 製 Ti-6Al-4V の機上磁気研磨法の開発

近年、金属 AM とマシニングセンタの機能を組み合わせたハイブリッド機が普及してきており、複雑な冷却管を持つ射出成形金型や人工関節などの人工置換成品の効能率加工に寄与することが期待されている。特に後者では医療用 CT スキャンデータに基づいたリバースエンジニアリングに対して当該機を適用することで、各患者に最適形状な製品を安定して製造できると思われる。そこで本研究では、金属 AM 機上で造形物の鏡面仕上げが可能な磁気研磨手法を開発している。本手法は、エンドミル形状の永久磁石製工具に磁性流体や砥粒などで構成される磁気研磨剤を付着させ、造形物上で走査することで鏡面化する。ボールエンドミル加工した造形物に対して、マシニングセンタで磁気研磨加工した結果、図 8 に示すように切削痕が除去された鏡面を得られることがわかった。

### (3) ダイヤモンド電着砥石の加工機上形状測定法の開発

超合金の使用拡大にともない、ダイヤモンド電着砥石の注目度が高まっている。当該砥石は砥粒突き出し量が不均一なため、これを主軸に取り付けた状態で評価し、加工条件に適用することで超合金の高精度加工の実現を容易にすることを

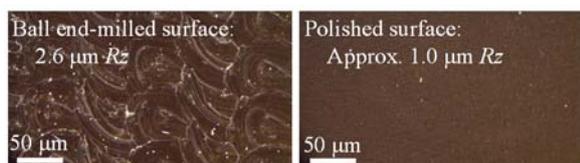


図8 金属 AM 製 Ti-6Al-4V の磁気研磨前後の加工面比較

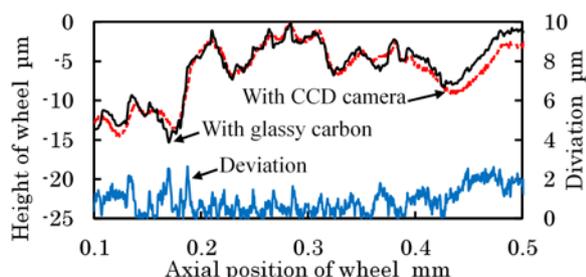


図9 開発する工具測定法の評価結果の一例

目指している。本手法では、CCDカメラを用いて高速回転する砥石を観察し、砥石輪郭形状を測定する手法を開発している。主軸の回転誤差（一般に数  $\text{min}^{-1}$  の誤差を持つ）を補正するため、撮影画像の特徴量抽出や膨大な画像データの処理に深層学習などを用いて、図9に示すように砥石輪郭形状を機上で評価することを可能にしている。今後はより微細な砥粒を用いた砥石の評価を目指す。

### おわりに

上坂・古木研究室では今後も、表面加工・機械加工の最先端研究・開発を目指して新しいテーマにどん欲に取り組んで参ります。興味を持たれた方はぜひお気軽にお問い合わせ下さい。またお気軽にお立ち寄りください(メール:kousaka@gifu-u.ac.jp)。また、研究室のHPは近日公開に向けて

鋭意準備中です。代わりに研究室の日々の活動をブログで公開しております。よろしければご覧下さい。(https://blog.goo.ne.jp/kousaka\_furuki)

## 触媒反応の基礎

東京工業大学工学院機械系 野崎智洋

### 1. はじめに

プラズマと触媒を組み合わせた反応系を用いて、 $\text{CO}_2$ や $\text{CH}_4$ を水素などに転換する研究が注目を集めている。とは言うものの、研究者人口が爆発的に増加している訳ではなく、プラズマ化学のフロンティアを探索する1分野、という位置づけで広く認識されているようである。本稿のテーマである(不均一)触媒反応とCVD(Chemical Vapor Deposition)には共通点が多く、後述するようにLangmuir-Hinshelwood's(L-H)機構などに基づいて、表面反応を定式化し理解を深めることができる。

本稿で述べることは、プラズマCVD、エッチング、ALD(Atomic Layer Deposition)など、プラズマ材料科学がカバーする表面処理・製膜技術の範疇で十分議論されてきたことに過ぎない。しかし、触媒化学、反応工学など、プラズマ研究では馴染みの薄い切り口で諸現象を俯瞰することで、プラズマ分野における触媒化学の理解、あるいはプラズマそのものに対して理解が深まることを期待している。

本稿では、プラズマ研究に関わりが深いカーボンナノチューブ(CNT; Carbon Nanotube)合成を取り上げ、プラズマと触媒反応の関係を紹介し本稿の導入とする。さらに、我々が取り組んでいる $\text{CH}_4$ 改質反応を例に、プラズマが介在する触媒反応について概要を紹介する。

### 2. 触媒CVD

カーボンナノチューブ合成では、触媒微粒子を核として繊維状炭素を成長させるため触媒CVDと言われることがある。ダイヤモンド合成などに

用いるプラズマCVD装置に軽微な改良を加えるだけでCNTを合成できるため、「プラズマCVDによる炭素系薄膜合成」という範疇で、ダイヤモンドやDLC(Diamond-like carbon)なども包括して、CNT研究が大きく発展した。一方、ダイヤモンドやDLCの場合は触媒を用いないため、所望のCNTを合成するためには、現象の理解に基づいた新しいプラズマ反応場のデザインが必要になる。

なお、「触媒CVD」をキーワードに文献を検索すると、Hot-wire CVD, cat-CVDに関する情報が多く得られる。1000°C以上に加熱したタングステン・フィラメント(Hot-wire)の表面では、分子の吸着、熱分解(表面反応)、ラジカルの脱離が行われ、典型的な不均一触媒反応によってラジカルが供給される。イオンが生成されないため基板ダメージが少ないこと、選択的ラジカル供給が可能などの利点がある。一方、製膜はHot-wireと物理的に隔離された基板で行われ、そこには触媒機能は付与されていない。プラズマが介在する触媒反応では、イオン、光、熱も含めた多様な”活性種”が触媒と直接的に反応することが前提になっており、Hot-wire CVDとは一線を画している。プラズマによってもたらされるプロセスの低温度化、反応の高速化を「プラズマの触媒機能」または「プラズマが誘起する新規な触媒機能」と捉え、これを学術的にまとめながら波及効果の大きい応用に展開することが目的である。近年は、これを「プラズマ触媒(Plasma Catalysis)」という造語を用いて表現しており、 $\text{CH}_4$ 転換、アンモニア合成などの分野で研究されている[1,2]。

### 3. カーボンナノチューブ合成

図1は、アセチレン ( $C_2H_2$ ) を触媒粒子で分解して多層CNTを合成する反応をモデル化したものである[3]。 $C_2H_2$ は触媒に吸着し、逐次的に脱水素される。吸着種 ( $C_nH_m$ ) は表面に存在するが、完全に脱水素した炭素は容易に触媒微粒粒子に取り込まれ、固溶体を形成する。炭素リッチな殻状の固溶体が形成され、炭素濃度が飽和すると繊維状炭素を析出する。炭素原子が固溶体の中を拡散する速度がCNTの成長速度を律速する。炭素の拡散速度をアレニウス型の式で表し、活性化エネルギーを用いてCNT成長の速度論的な解析がなされる。

触媒で炭化水素をクラッキングすると炭素繊維が生成されることは、触媒化学では古くから知られている。1972年 Bakerらは炭素繊維の形成について、図1とほぼ同じ機構で炭素繊維の形成・成長メカニズムを説明している(図2)[4]。炭素析出は触媒を劣化させるだけでなく、重篤な場合は反応管を閉塞し破損させるため、絶対に避けなければならない。遷移金属と炭素が固溶体を形成する平衡論的な考察に基づき、相図を使って炭素析出を抑制する方策が議論されている[5]。

プラズマが介在することで現象は複雑になるが、活性種の高い反応性を利用してCNT合成温度(基板温度)を低くすることが期待された。ま

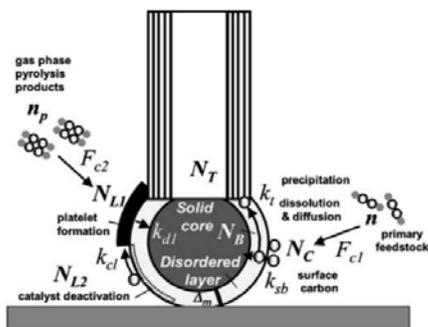


図1 多層カーボンナノチューブの成長モデル[3]

た、プラズマシースの大きな電位差(電界)を利用して、CNTを垂直配向成長できるため、半導体のビア配線や電子放出源などの応用が検討された。他方、プラズマの高い反応性が仇となり、グラファイト構造にダメージを与えたり、アモルファス炭素を析出するなど、プラズマが有する負の側面も明らかになってきた。ビア配線、電界放出源、AFMプローブなどの応用では、多層CNTで十分利用に耐えうる。最も望まれたのは、半導体物性を有する単層CNTを選択的に合成し、ドーピングやフラーレン内包などによってn型・p型機能を顕在化させ、最先端デバイスを開発する研究である。一方、プラズマCVDで単層CNTを合成した研究は報告がなく、「プラズマCVDで単層CNTは合成できるのか?」という根本的な疑問が2003年のレビュー論文で呈されている[6]。2005年以降、リモートプラズマを用いて基板へのダメージを抑制すれば、垂直配向した単層CNTを合成できることが報告された。種々のリモートプラズマCVD装置(減圧環境)が考案され、プラズマCVDによって単層CNTが当たり前のよう合成されるようになった[7-9]。一方、大気圧プラズマを用いれば、非リモートプラズマ

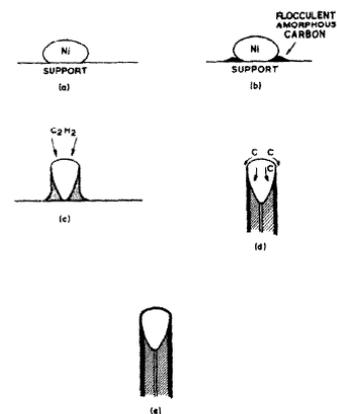


Fig. 5. Stages in the growth of filaments.

図2 カーボンファイバーの成長モデル[4]

でも単層 CNT の合成が可能であることが報告されている[10]。

CNT 合成技術が日進月歩で進化を続けるなか、少なくともプラズマのコミュニティーでは、触媒化学者がルーチンで行うような触媒微粒子の物理的、化学的キャラクタリゼーションや、表面反応解析、速度論的研究を実施した例は少なかったように記憶している。触媒反応の素過程を知らなくても、スパッタリングなどドライプロセスによる触媒合成（触媒化学ではウェットプロセスが用いられる）、プラズマ源の開発などに新規性を見出そうとし、あるいは CNT の表面改質など応用研究を行うことで、ある一定の研究成果を得ることができたためと考えられる。さらに、半導体分野のプラズマ研究と異なり、CNT の応用が大きな波及効果を生まなかったため、踏み込んだプラズマ基礎研究に進展しなかった感もいなめない。

#### 4. 表面反応機構

我々の研究室では、触媒そのものを開発する研究は行っておらず、むしろ反応性が高く劣化しにくい市販触媒を購入しプラズマ研究に利用している。具体的には、CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O 改質によって合成ガス（H<sub>2</sub>、CO）を得る反応である。プラズマ反応場に固体触媒を介在させることで、低温で安定な CH<sub>4</sub> を分解し、水素や CO に転換できる。遷移金属触媒を使って炭化水素をクラッキングする、という観点で CNT 合成と共通点が多い。

##### 4-1. L-H 機構

ここでは、CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> を不均一触媒反応系で改質する場合について概要を説明する。

図 3 は数 nm の大きさを持つ触媒金属の表面で CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> を改質する反応の概略を表している。炭素の析出が無いことを除けば、図 1、図 2 に示した反応モデルと基本的に同じである。

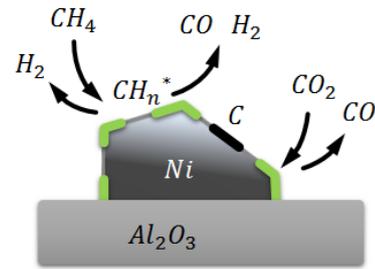


図 3 CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> 改質の表面反応モデル

CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> 改質を例に、総括反応式および総括反応速度式を(1)–(2)式で表す。



$$r = -\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = -\frac{d[\text{CO}_2]}{dt} = \frac{1}{2} \frac{d[\text{H}_2]}{dt} = \frac{1}{2} \frac{d[\text{CO}]}{dt} \quad (2)$$

CO の生成速度あるいは CH<sub>4</sub> の消費速度を実験で測定し、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 分圧の関数として以下の式で表す。

$$r = kP_A^n P_B^m \quad (3)$$

総括反応速度では、反応次数  $n$ 、 $m$  は整数になるとは限らない。分子の吸着と脱着の間に熱平衡が成立すると仮定すれば、触媒の活性サイトに吸着する分子はラングミュアの等温吸着式で表される。吸着種の表面反応速度定数を  $k_s$  とおけば、総括反応速度  $r$  は、表面被覆率  $\theta$  および活性サイトの密度  $n$  を使って(4)式で与えられる。

$$r = k_s n_A n_B \theta_A \theta_B = k_s n_B n_A \frac{K_A K_B P_A P_B}{(1 + K_A P_A + K_B P_B)^2} \quad (4)$$

(4)式は、CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> が共通の吸着サイトを競合する場合の反応式である。一般に、CH<sub>4</sub> は金属触媒表面に吸着し、CO<sub>2</sub> は金属触媒・担体の界面または担体に選択的に吸着すると考えられる。このように、吸着サイトが異なる場合には、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> それぞれに対してラングミュアの等温吸着を仮定すれば(5)式が得られる。

$$r = k_s n_A n_B \frac{K_A K_B P_A P_B}{(1 + K_A P_A)(1 + K_B P_B)} \quad (5)$$

触媒ナノ粒子の表面には、ステップやエッジが豊富に存在し反応性が高い。そのため  $\text{CO}_2$  も一部は金属触媒に吸着すると考えるのが妥当であるが、(5)式では簡単のため  $\text{CH}_4$  と  $\text{CO}_2$  が異なる活性サイトに独立に吸着すると仮定した。一般に  $\text{CO}_2$  の吸着は強く、 $K_B P_B \gg 1$  が成立すると考える。その結果、(5)式は(6)式に簡略化できる。

$$r = k_s n_A n_B \frac{K_A P_A}{(1 + K_A P_A)} \propto P_B^0 \quad (6)$$

つまり、 $\text{CH}_4$  転換 ( $\text{CO}$  生成) 速度に対して、 $\text{CO}_2$  分圧の寄与は無いことを意味する (反応次数がゼロ)。水蒸気改質の場合も同様に、酸化剤である  $\text{H}_2\text{O}$  を過剰に供給しても  $\text{CH}_4$  の反応速度は本質的に増大しないことが知られている[11]。(5)式から明らかのように、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  分圧 ( $P_A$ 、 $P_B$ ) は分母、分子に含まれている。 $P_A$ 、 $P_B$  を大きくしても互いにキャンセルすれば反応速度  $r$  は大きくならない。換言すれば、吸着サイトが  $\text{CO}_2$  によって完全に占拠されると、それ以上分圧 ( $P_B$ ) を高めても反応が進まないことを表している ( $m = 0$ )。同様に、 $\text{CH}_4$  の吸着は弱いため  $K_A P_A \ll 1$  を改定すれば、(6)式は(7)式に簡略化できる。

$$r = k_s n_A n_B K_A P_A \propto P_A \quad (7)$$

$k = k_s n_A n_B K_A$  とおき (3)式と比較すれば、総括反応速度定数  $k$  を表面反応速度定数 ( $k_s$ )、吸着平衡定数 ( $K_A$ 、 $K_B$ )、活性点密度 ( $n_A$ 、 $n_B$ ) などの寄与に細分化して考察できる。巨視的な実験で測定できる諸量としては、反応速度  $r$ 、反応次数  $n$ 、 $m$  である。 $r$ 、 $n$ 、 $m$  を用いて活性化エネルギーを求めて推論を進めることができる[12]。

$\text{CH}_4/\text{CO}_2$  改質の場合、総括反応速度  $r$  は、 $\text{CO}_2$  分圧と無関係に  $\text{CH}_4$  分圧に比例して増加する。しか

し、 $\text{CH}_4$  リッチな条件では炭素析出が避けられないため、 $\text{CO}_2$  分圧を量論以上に高めなければならない。 $\text{CO}_2$  分圧を高めると必然的に  $\text{CH}_4$  分圧は下がるため、改質反応では加圧することが多い (平衡論的に有利なら)。炭素の析出を防ぎつつ  $\text{CH}_4$  改質反応を加速するために (経済性を担保するために)、 $800^\circ\text{C}$  を超える反応温度が必要とされる。これは(7)式において、表面反応速度定数  $k_s$  を高温によって大きくすることに相当する。 $800^\circ\text{C}$  を超える高温熱源は、一般に原料  $\text{CH}_4$  の一部を燃焼することで賄うため、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  の生成が避けられない。つまり、 $\text{CH}_4$  改質反応を高温で行う以上、燃焼技術から脱却した環境負荷低減を図ることは本質的に不可能である。再生可能電力を利用し、プラズマ改質によって低温で  $\text{CH}_4$  改質が可能になれば、大幅な  $\text{CO}_2$  排出量削減を実現できる可能性がある[13]。

(5)–(7)式に基づき、プラズマを使った  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  改質の特徴をまとめると以下ようになる：

- ① 活性種を供給することで相対的に活性化エネルギーを下げ、表面反応速度定数 ( $k_s$ ) を大きくする。
- ② 反応次数  $n$ 、 $m$  を大きくする。一般に  $m = 0$  になるが、プラズマによって  $\text{CO}_2$  が活性化されれば  $m > 0$  となる可能性があり、反応促進効果が得られる。同様に、 $n > 1$  となれば反応促進が期待できる。
- ③  $m > 0$  によって炭素析出を抑制できれば、プロセスウィンドウを広くしてフレキシブルな改質反応を設計できる。
- ④ 熱反応にはない新しい反応パスが発現する。例えばラングミュアの吸着等温 (熱平衡) を超えた含酸素種の取込みが可能になるなど、新しい現象が見つかっている。

(5)–(7)式は基底状態の分子が熱平衡に基づき吸脱着することを念頭に導出されている。分子が気

相で励起状態にあるとき、吸着の状況は大きく異なる。特に、多原子分子が振動励起されている場合には、化学吸着の速度が数桁速くなるのが分子線を使った実験で明らかになっている。これをプリカーサー吸着と言ひ、熱平衡（ラングミュアの等温吸着）とは異なる機構で吸着種が生成される。最近では赤外レーザー吸収を利用して特定の振動モードを選択的に励起することで、反応機構の詳細が解明されている。詳細は既報の解説を参照されたい[14]。一方、振動励起分子を効率よく生成する方法について、ほとんどの基礎研究では述べられてない。プラズマを使えばラジカル種を生成するより、低温で振動励起分子を生成しやすい。近年は、CO<sub>2</sub>のプラズマ分解に関して、振動励起CO<sub>2</sub>の役割が詳細に検討されている[15]。

#### 4-2. E-R 機構

L-H 機構とは別の重要な反応機構に、Eley-Rideal (E-R) 機構がある。吸着した分子に対して気相の分子が衝突して反応する。紙面の都合で定式化は省略するが、詳細は成書を参照されたい[16]。

振動励起種やラジカルが、触媒金属のエッジやステップと直接的に相互作用する場合は、前述のプリカーサー吸着の範疇で説明がなされる。一方、気相から供給される活性種が吸着種と直接反応する場合、プリカーサー吸着ではなく、E-R 機構に基づいて反応促進が行われる可能性がある。しかし、吸着種と励起分子が衝突した時に生成される中間生成物やその反応ダイナミクスはほとんど解明されていない。大気圧プラズマの場合、RIE のようなイオン効果は期待できないが、触媒表面で荷電粒子の再結合が生じると、数 eV 相当のエネルギーが直接的に吸着種に与えられ、表面反応あるいは吸着種の表面拡散を促進する可能性がある。

## 5. おわりに

プラズマが介在する触媒反応は大変複雑で、素過程について分かっていないことが多い。そのため、熱平衡を仮定した L-H 機構をベースに触媒反応の解析を行い、プラズマ触媒反応と熱反応の違いを考察し現象の理解に努めている。やや受動的なアプローチであるが、触媒の材料評価などとあわせて活用すると、プラズマ特有の反応機構を考察するうえで大変便利である。最近注目を集めている ALD/ALE でも同様の機構に基づいて表面反応を説明できる。触媒化学では金属（金属結合する固体表面）や金属酸化物が研究の対象になるが、エッチングやプラズマ CVD では、シリコン（共有結合する固体表面）を取り扱うことが多い。また、プラズマプロセスは真空環境で構築される。異なる応用分野で独自にまとめられた諸現象の共通点と相違点を理解することが重要であることは言うまでもない。

## 参考文献

- [1] W Wang et al, *ChemSusChem* **10** (2017) 2145.
- [2] T Nozaki et al, *Catalysis today* **211** (2013) 29.
- [3] AA Puretzky et al, *Appl. Phys. A* **81** (2005) 223.
- [4] RTK Baker et al, *J Catal.*, **26** (1972) 51.
- [5] H.C. Dibbern et al, *Hydrocarb. Proc.* **65** (1986) 71.
- [6] M Meyyappan et al, *Plasma Sources Sci. Technol.* **12** (2003) 205.
- [7] H Kawarada et al, *Chem. Vap. Dep.* **11** (2005) 127.
- [8] E J Bae et al, *Chem Mater.* **17** (2005) 5141.
- [9] T Kato et al, *Nanotechnology*, **17** (2006) 2223
- [10] T Nozaki et al, *Plasma Process. Polym.* **5**, 300.
- [11] J Wei et al, *J. Catal.* **225** (2004) 116.
- [12] T Nozaki et al, *Energy & Fuels* **21** (2017) 2525.
- [13] 野崎智洋, 亀島晟吾, 応用物理, **86** (2017) 214.
- [14] 野崎智洋, 亀島晟吾, 伝熱, **56** (2017) 31.
- [15] R. Snoeckx *Chem.Soc.Rev.* **46** (2017) 5805.
- [16] 御園生ら, 触媒化学, 丸善, 2003 年 (第 4 版).

## ミネソタ大学滞在記

### 三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 生沼 学

#### 1. はじめに

筆者は2015年10月から1年間、在籍する会社からの派遣で、米国ミネソタ大学の High Temperature and Plasma Laboratory にて客員研究員として研究に従事しました。本稿では、その研究生活と研究概要をご紹介します。

#### 2. 経緯

ミネソタ大学 High Temperature and Plasma Laboratory の Peter Bruggeman 教授は、大気圧プラズマの研究において数多くの業績をあげてこられました。特に、高度なプラズマ計測技術に基づく、プラズマと液体の相互作用の研究において世界をリードする存在です [1]。

筆者の在籍する会社では、オゾン発生器、CO<sub>2</sub>レーザー、空気清浄デバイスなど、様々な放電応用機器の事業を手掛けており、先端技術総合研究所はこれら製品の研究開発を担っています。近年は、気液界面放電を用いた水処理技術の研究開発にも取り組んでおり [2]、プラズマと水の相互作用の理解と、原理に基づいた技術開発が求められています。また、急速な発展を見せるプラズマの医療、農業、バイオ応用研究でも明らかのように、プラズマと液体の相互作用に関わる素過程の理解は、現在のプラズマ研究における最も重要なテーマの一つです [3]。

筆者のような企業の研究者にとって、大学での先端の研究成果を製品開発に反映させること、また将来の事業の種となる技術を基礎研究の段階で見出すことは重要な任務です。大気圧プラズマの

潜在力と様々な産業応用の可能性を考えると、プラズマと液体の相互作用に関する知識を深め、その扱いや評価方法に習熟することが求められます。今回、幸運にも Bruggeman 教授に客員研究員としての受け入れの承諾をいただき、また会社の後押しもあり、ミネソタ大学滞在が実現しました。

#### 3. 研究室について

筆者は、ミネソタ大学 High Temperature and Plasma Laboratory のなかで、低温プラズマの計測と応用の研究を主に行う Bruggeman 教授のグループ（以下、Bruggeman group）に在籍しました。Bruggeman group は当時、教授と7~8名の学生および研究員で構成されていました。特筆すべきはその多様性で、インド、中国、中東など様々な国から教育背景も年齢も異なる人たちが集まり、研究に従事していました。また、短期長期を問わず、筆者のような客員研究員が多く在籍するの一つの特徴でした。

Bruggeman group の研究テーマは多岐にわたりますが、何よりもレーザー等を用いた高度な大気圧プラズマ計測技術が最大の強みです。多くの研究は、プラズマ自身の特性と、それを何かに適用した際に生じる物理・化学・生物学的変化とを関連付けることで、現象を解明するという内容でした。例えば、大気圧プラズマによるウィルス不活化の評価においては、プラズマの状態を把握したうえで、様々なスカベンジャーを添加した養液を用いる [4]、あるいはプラズマ照射条件を変えることで [5]、不活化に有効な活性種を同定すると

いった内容です。また、異なるプラズマ生成条件や溶液条件での比較から、金属ナノ粒子の生成メカニズムを解明する[6]といったものです。当然、プラズマ計測そのものの研究にも取り組んでおり、DBD [7]、RF [8]、パルス放電 [9]の光学的測定にも注力していました。

#### 4. ミネソタ大学での研究内容

筆者はミネソタ大学で「プラズマと液体の相互作用 (Plasma-liquid interactions)」と題した研究を行いました。本研究では、将来的なプラズマの産業応用の可能性を視野に入れつつも、プラズマと水の接触にともなう基礎現象に焦点を当てました。系を単純化するため、定常かつ一様なプラズマを形成可能な大気圧 He の RF グロー放電を用い、ピエゾドライブのディスペンサーにより一定の径の水滴を所定の周波数でプラズマに滴下し、その挙動を評価しました。また、プラズマ中の OH ラジカル等を計測し、プラズマとの相互作用で生じる水滴の物理化学的变化を評価しました [10]。また、主テーマ以外にも、Bruggeman group の他の多くの研究に参加させて頂きました。プラズマや液体の計測技術とその背景にある理論の理解、さらにモデリングに至るまで、幅広い経験を得ることができました。多様性に富んだメンバーとともに働くことは国内では得難い経験であり、大変貴重な財産となっています。

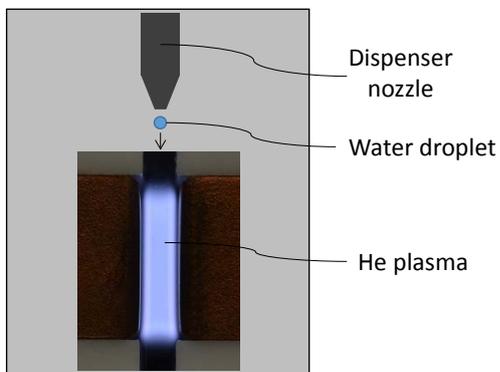


図1 プラズマの写真と試験体系の概念図

#### 5. ミネソタでの生活

ミネソタ州は米国中西部にあり、その北端はカナダと接しています。同州最大の都市は、しばしば双子の都市 (Twin cities) と呼ばれるミネアポリス-セントポール都市圏です。ミネソタ大学の主要キャンパスも Twin cities にあり、筆者の在籍した研究室は、ミネアポリスの中心部からほど近い、ミシシッピ川の東岸のキャンパスにありました。近年開通した校内を通るトラム (LRT) に乗れば、空港や中心街まで 20~30 分程度で行けるように、大変立地が良いのが同大学の魅力の一つです。ミネソタ州は“Land of 10,000 lakes”と呼ばれるほど湖が多く、自然豊かで美しい反面、内陸性気候ゆえに夏は 35°C 近くまで、冬はマイナス 30°C 以下にまで下がる気象条件の大変厳しいところ です。筆者は札幌在住が長く、寒冷地での生活には慣れていましたが、マイナス 30°C の、息をすると咳き込むような寒さはさすがに厳しいものでした。



図2 ミネソタ大学の様子

#### 6. 研究生生活を通じて感じたこと

なによりも、Bruggeman 教授の学生に対する熱心な指導に感銘を受けました。1日に1度は必ず実験室に足を運び、全てのメンバーと現場でコミュニケーションを取り、課題や研究の方向性を議論していました。また、学生同士の協力も円滑

で、それぞれの技能を持ち寄り協力することで、互いの研究成果を最大化する仕組みができていました。バックグラウンドの異なるメンバーが集う同研究室では、この多様性と協力体制が研究を推進する大きな原動力になっていたと思います。また、学内の他の学部との協力や、各国の大学・研究機関との連携も非常に活発に行われており、外部の優れた技術や知見を積極的に取り入れる姿勢がうかがわれました。このような取り組みが、規模はそれほど大きくない同グループが、世界に冠たる成果を上げている大きな要因だと感じました。

今回の研究では実験装置の製作から着手したため、装置の設計から物品の購入に至るまで、日本と米国の違いを経験することができました。印象深かったのは、米国では研究に必要な物品が意外と手に入りやすいことです。厳密に言えば、ほとんどの物は入手できるのですが、輸入品が多く納期が長くサポートが受けづらい傾向にあります。電気機器や配管部材など、日本では簡単に購入できる小物の手配にさえ苦労することがありました。逆に言えば、研究開発に必要なほとんどの物品を国内で迅速に、かつ高品質のものを調達できる点において、日本は極めて例外的な存在です。産業の裾野が広く、高い技術力を有する多くの企業の存在が、日本の科学技術の根底にあることを、海外での研究生活を通じて強く感じました。

## 7. おわりに

大気圧プラズマ技術は大きなポテンシャルを有し、様々な産業応用の可能性を秘めているものの、実用に至った例は多くありません。この状況は日本も米国も変わらないと感じました。その一方で、今回の滞在を通じて、基礎研究が着実に発展していること、また世界中の研究者がプラズマの発展のために多大な努力をされていることを実感しました。今後も企業の一研究者として、大学等で

げられた素晴らしい基礎研究の成果を、製品として社会に還元できるよう努力していく所存です。また、ミネソタ大学滞りは、そうするための礎を与えてくれたと思います。

最後になりましたが、Bruggeman 教授をはじめ、High Temperature and Plasma Laboratory の皆さん、そして米国滞在中にお世話になった全ての方々に心よりお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] P. Bruggeman and C. Leys, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42, (2009), 053001.
- [2]<http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/spotlight/a25/index.html>.
- [3] P. J. Bruggeman, et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* 25, (2016), 053002.
- [4] H. A. Aboubakr, U. Gangal, M. M. Youssef, S. M. Goyal and P. J. Bruggeman, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 49, (2016), 204001.
- [5] G. Nayak, Master's Thesis, University of Minnesota, (2016).
- [6] V. S. S. K. Kondeti, U. Gangal, S. Yatom and P. J. Bruggeman, *J. Vac. Sci. Technol. A* 35(6), (2017), 061302.
- [7] Y. Du, G. Nayak, G. Oinuma, Z. Peng and P. J. Bruggeman, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 50, (2017), 145201.
- [8] Y. Du, G. Nayak, G. Oinuma, Y. Ding, Z. Peng and P. J. Bruggeman, *Plasma Sources Sci. Technol.* 26, (2017), 095007.
- [9] S. Yatom, Y. Luo, Q. Xiong and P. J. Bruggeman, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 50, (2017), 415204.
- [10] G. Oinuma, G. Nayak and P. Bruggeman, *IEEE International Conference on Plasma Science*, (2016)

## N<sub>2</sub> ガス中の正確な電子輸送解析と 電子衝突断面積の推定

日本学術振興会特別研究員(PD) 川口 悟  
室蘭工業大学

### はじめに

電子衝突断面積は電子とガス分子の衝突確率を表す最も基礎的なデータである。また、電子衝突断面積を用いて電子ドリフト速度、電離係数などの放電基礎パラメータを導出することができ、これらのパラメータを用いることで気体放電プラズマをシミュレートすることも可能となる。したがって、各種気体材料に関して正確な電子衝突断面積を整備することが望まれており、本研究では N<sub>2</sub> ガスに着目した。

N<sub>2</sub> ガスの電子衝突断面積セットに関しては、Ohmori et al. [1]や Alves [2]の断面積セットが報告されており、LXCat [3]には、Alves の断面積セットを含む7種類の断面積セットが収録されている。このガスにおいては、非弾性衝突後の電子の散乱方向依存性[4]や電離衝突で生成される電子のエネルギー分布[5]に関する実験データが報告されており、それらが高換算電界  $E/N$  ( $E$ : 電界,  $N$ : 気体分子数密度)における電離係数に影響を及ぼすことが指摘されている[6]。一方、前述の断面積セットにおいては、散乱方向依存性や電離衝突で生成される電子のエネルギー分布に関する情報は考慮されておらず、高  $E/N$ における電離係数の実測値を再現できない可能性がある。

本研究では、非弾性衝突後の電子の散乱方向依存性および電離衝突で生成される電子のエネルギー分布を考慮した N<sub>2</sub> ガス中の電子輸送解析を Monte Carlo simulation (MCS)によって正確に行うとともに、MCS より導出される電子輸送係

数の計算値が実測値と一致する N<sub>2</sub> ガスの電子衝突断面積セットを提案した。ここでは、その結果について紹介する。

### 計算方法

Monte Carlo 法によって N<sub>2</sub> ガス中の電子の振る舞いを正確にシミュレートし、サンプリングによって電子ドリフト速度、縦方向拡散係数、電離係数、励起係数を導出する。電子励起衝突および電離衝突においては、微分断面積  $q_{DCS}(\chi, \varepsilon)$ を用い、(1)式によって、電子の散乱角 $\chi$ を計算する。ここで、 $\xi$ は[0,1]の間で生起する一様乱数、 $\varepsilon$ は電子のエネルギーを表す。

$$\xi_1 = \frac{\int_0^\chi q_{DCS}(\chi', \varepsilon) \sin \chi' d\chi'}{\int_0^\pi q_{DCS}(\chi', \varepsilon) \sin \chi' d\chi'} \dots\dots\dots(1)$$

電子励起衝突に関する  $q_{DCS}$  については実測値[4]を使用する。電離衝突に関する  $q_{DCS}$  については、実測値が報告されていないため、電子励起衝突に関する  $q_{DCS}$  の総和を使用し、 $\varepsilon \geq 100$  eV においては、Rutherford の散乱公式を使用する。その他の衝突においては、等方散乱を仮定する。電離衝突で生成された電子のエネルギー $\varepsilon_{ej}$ を、Stojanović and Petrović [6]が電離衝突で生成される電子のエネルギー分布の実験データ[5]に基づいて導出した(2)式によって決定する。ここで、 $\varepsilon_{th}$ は電離衝突断面積のしきい値を表す。

$$\varepsilon_{ej} = 11.4 \tan \left[ \xi_2 \tan^{-1} \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_{th}}{11.4} \right) \right] \dots\dots\dots(2)$$

回転状態  $J$  から  $J \pm 2$  への回転(脱)励起衝突においては、(3)式にしたがって衝突周波数を算出し、 $N_2$  分子の回転状態の分布を考慮する[7]。

$$v_{J \rightarrow J \pm 2} = N \delta_J q_{J \rightarrow J \pm 2}(\varepsilon) v_e \dots\dots\dots(3)$$

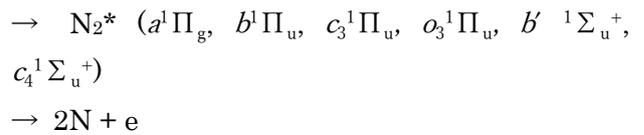
ここで、 $q_{J \rightarrow J \pm 2}$  は回転(脱)励起衝突断面積、 $v_e$  は電子の速さ、 $\delta_J = C g_J \exp(-\varepsilon_J / k_B T_g)$  である。ただし、 $C$  は規格化定数、 $\varepsilon_J$  は回転エネルギー、 $k_B$  は Boltzmann 定数、 $T_g$  はガス温度、 $g_J$  は縮重度[3(2J + 1) ( $J$  が奇数), 6(2J + 1) ( $J$  が偶数)] である。

### 電子衝突断面積

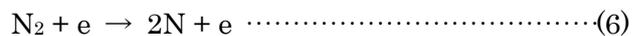
図 1 は本研究で提案した  $N_2$  ガスの電子衝突断面積セットを示す。回転(脱)励起断面積に関しては、Born 近似より得られる 31 種類 [ $J \rightarrow J+2$  ( $J = 0, 1, 2, \dots, 30$ ) の  $q_{J \rightarrow J+2}$  と 29 種類 [ $J \rightarrow J-2$  ( $J = 2, 3, 4, \dots, 30$ ) の  $q_{J \rightarrow J-2}$ ] [8] を使用した。振動励起断面積  $q_{vib}$  については、Laporta et al.[9] が R-matrix 法によって導出した 10 種類 [ $v = 0 \rightarrow v = 1, 2, 3, \dots, 10$ ] の振動励起に関する断面積を使用した。ただし、 $v = 0 \rightarrow v = 1$  に関する  $q_{vib}$  については、Sohn et al.[10] の実測値に基づいて、 $\varepsilon \leq 2$  eV における断面積の形状を修正した。電離断面積  $q_i$  については、Shemansky and Liu [11] が報告した  $N_2^+(X^1\Sigma_g^+)$ ,  $N_2^+(A^2\Pi_u)$ ,  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$  の生成に関する 3 種類の断面積および Lindsay and Mangan [12] が報告した  $N^+$  と  $N^{2+}$  の生成に関する

2 種類の断面積に基づいて断面積の形状を決定した。弾性衝突運動量移行断面積  $q_m$  については、 $q_m$  と  $\sum_J \delta_J q_{J \rightarrow J \pm 2}$  の和  $q_{vib, mom}$  が測定されているため [13], 断面積セットから得られる  $q_{vib, mom}$  が実験データと合うように決定した。電子励起断面積  $q_{ex}$  については、17 種類の電子励起 ( $A^3\Sigma_u^+$ ,  $B^3\Pi_g$ ,  $W^8\Delta_u$ ,  $B'^3\Sigma_u^-$ ,  $a'^1\Sigma_u^-$ ,  $a^1\Pi_g$ ,  $w^1\Delta_u$ ,  $C^3\Pi_u$ ,  $E^3\Sigma_g^+$ ,  $a'^1\Sigma_g^+$ ,  $b^1\Pi_u$ ,  $c_3^1\Pi_u$ ,  $o_3^1\Pi_u$ ,  $b'^1\Sigma_u^+$ ,  $c_4^1\Sigma_u^+$ ,  $G^3\Pi_u$ ,  $F^3\Pi_u$ ) を考慮しており、実測値 [14] に基づいてそれぞれの断面積の形状を決定した。

中性解離断面積  $q_{nd}$  については、次の 3 種類の解離反応に関する断面積を考慮した。ただし、丸括弧内に示した各電子励起状態の  $N_2$  分子が解離する確率(分岐率)を角括弧内にそれぞれ示している。  
 $N_2 + e$



$$[12\%, 96.7\%, 100\%, 100\%, 87.9\%, 10\%] \dots(4)$$



反応(4)に関する断面積については、関係する電子励起断面積に分岐率を乗じて求め、反応(5)に関する断面積については、Spence and Burrow [15] の実測値を使用した。また、反応(4)と反応(5)に関する断面積の総和は中性解離断面積の総和  $\Sigma q_{nd}$  の推奨値 [16] よりも低いため、断面積セットから得られる  $\Sigma q_{nd}$  がこの推奨値と合うように、反応(6)に関する断面積を決定した。

### 計算結果

図 2 は  $N_2$  ガス中の電離係数の計算値を実測値 [17,18] と併せて示す。 $E/N > 1,500$  Td において、実測値の傾向を再現できているのは本研究で提案した断面積セットによる計算値のみであり、 $E/N$  の増加に伴って低下する電離係数を再現するため

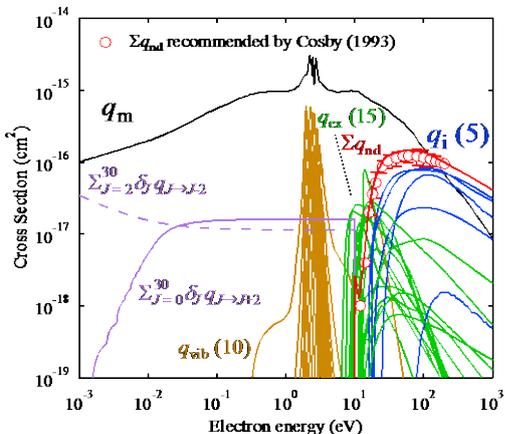


図 1  $N_2$  ガスの電子衝突断面積セット

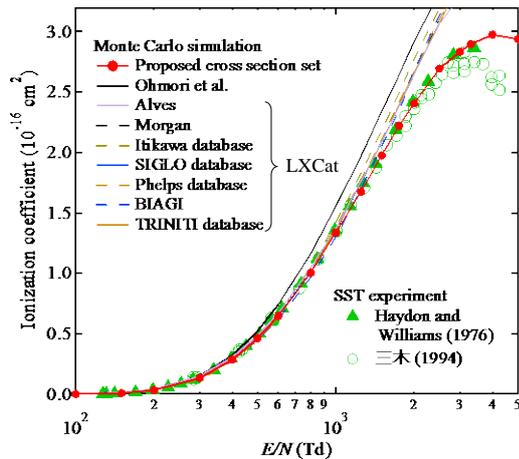


図2 N<sub>2</sub>ガス中の電離係数

には、非弾性衝突後の電子の散乱方向依存性と電離衝突で生成される電子のエネルギー分布を考慮する必要があることがわかる。電子ドリフト速度、縦方向拡散係数、励起係数( $A^3\Sigma_u^+$ ,  $C^3\Pi_u$ )においても、本研究で提案した断面積セットによる計算値と実測値が非常によく一致することを確認しており、提案した断面積セットの妥当性が確認された。

## おわりに

この度は、第43回応用物理学会講演奨励賞という栄誉ある賞を賜りまして、大変光栄に存じます。選考に関係されました先生方に対し厚く御礼申し上げます。また、本誌において受賞内容について紹介させていただく機会を頂き、有難く存じます。最後に、本研究はJSPS科研費JP17J11124の助成を受けて実施されました。

## 参考文献

[1] Y. Ohmori et al.; J. Phys. D **21**, 724 (1988).  
 [2] L. L. Alves; J. Phys.: Conf. Ser. **565**, 012007 (2014)  
 [3] LXCat [<https://nl.lxcat.net>]  
 [4] Khakoo and coworkers; Phys. Rev. A **71**, 062703 (2005), **77**, 012704 (2008), **79**, 032704 (2009)  
 [5] C. B. Opal et al.; At. Data **4**, 209 (1972)

[6] V. D. Stojanović and Z. Lj. Petrović; J. Phys. D **31**, 834 (1998)  
 [7] M. A. Ridenti et al.; Plasma Sources Sci. Technol. **24**, 035002 (2015)  
 [8] E. Gerjuoy and S. Stein; Phys. Rev. **97**, 1671 (1955)  
 [9] V. Laporta et al.; Plasma Sources Sci. Technol. **23**, 065002 (2014)  
 [10] W. Sohn et al.; J. Phys. B **19**, 4017 (1986)  
 [11] D. E. Shemansky and X. Liu; J. Geophys. Res. **110**, A07307 (2005)  
 [12] B. G. Lindsay and M. A. Mangan; “Photon and Electron Interactions with Atoms, Molecules and Ions” (Springer, New York, 2003) Vol.1/17C  
 [13] S. K. Srivastava et al.; J. Chem. Phys. **64**, 1340 (1976) / T. W. Shyn and G. R. Carigan; Phys. Rev. A **22**, 923 (1980) / W. Sun et al.; Phys. Rev. A **52**, 1229 (1995) / J. Muse et al.; J. Phys. B **41**, 095203 (2008) / I. Linert and M. Zubek; J. Phys. B **42**, 085203 (2009)  
 [14] S. Trajmar et al.; Phys. Rep. **97**, 219 (1983) / M. J. Brunger et al.; Phys. Rev. A **37**, 3570 (1988) / L. Campbell et al.; J. Phys. B **34**, 1185 (2001) / P. V. Johnson et al.; J. Geophys. Res. **110**, A11311 (2005) / C. P. Malone et al.; J. Phys. B **42**, 225202 (2009) / C. P. Malone et al.; Phys. Rev. A **85**, 062704 (2012)  
 [15] D. Spence and P. D. Burrow; J. Phys. B **12**, L179 (1979)  
 [16] P. C. Cosby; J. Chem. Phys. **98**, 9544 (1993)  
 [17] S. C. Haydon and O. M. Williams; J. Phys. D **9**, 523 (1976)  
 [18] 三木維康; 「定常タウンゼント法による気体の電離係数および電子付着係数の測定」, 室蘭工業大学大学院 修士論文 (1994)

## パルス放電照射における水中生成種のレート方程式解析

室蘭工業大学大学院工学研究科 しくみ情報系領域 高橋 一弘

### はじめに

放電プラズマを水に照射することで、水中に  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{ONOOH}$ ,  $\text{NO}_2^-$  などの ROS/RNS (Reactive Oxygen Species/Reactive Nitrogen Species) が生成され、これらが殺菌[1]や植物の成長促進[2]に寄与することが報告されている。しかし、用途により必要な ROS/RNS の種類や量が異なるため、ROS/RNS の生成を制御、すなわち、必要な種を選択的に生成できることが望ましい。本研究は、放電プラズマを水に照射したときの水中の ROS/RNS の反応・生成過程を解明し、ROS/RNS の生成を制御することを目的としている。

これまでに  $\text{N}_2$  ガス雰囲気下で水上にパルス放電を発生させることで、水中に  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_2^-$  および  $\text{NO}_3^-$  が生成されること、およびこれに伴い pH が低下することが明らかになっている[3]。本稿では、水中に生成される種とそれらの反応に基づくレート方程式を用いて各物質の濃度を計算し、実測値と比較した結果について紹介する。

### 計算方法・条件および結果

表 1 は、本モデルで考慮した水中の ROS/RNS 反応を示す。なお、 $[\text{H}^+]$  は水素イオンのモル濃度 (M) を示し、(2) 式の反応速度定数は推定値である。放電照射に伴い、水中に  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_2^-$  および  $\text{NO}_3^-$  が生成されるものとし、単位時間当たりの生成量は、放電領域に比例するものとしている。なお、イオンの溶解により、水の導電率が増加し、放電領域が減少するため、その変化を  $\text{NO}_2^-$  と  $\text{NO}_3^-$  の濃度の上昇率の変化から推定している。さらに、放電照射後のサンプリングから分析までにおいても、(1)-(5) 式の反応を考慮している。なお、(1) 式に示す  $\text{HNO}_2$  の解離度の算出には、水中のイオン濃度から算出した pH を用いた。また、生成物および水素イオンの濃度は水中で一様であるものとした。以上のモデルに基づくレート方程式を 4 次の Runge-Kutta 法を用いて解析し、水中の  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{ONOOH}$ ,  $\text{HNO}_2$ ,  $\text{OH}^-$  および  $\text{NO}_2$  の濃度を算出した。

表 1 水中 ROS/RNS 反応

Reaction	Rate constant	Eq.	Ref.
$\text{HNO}_2 \rightleftharpoons \text{NO}_2^- + \text{H}^+$ ( $\text{p}K_a=3.3$ )	immediately	(1)	—
$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HNO}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{ONOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+$	$9.0 \times 10^3 \text{ M}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (w/ plasma exposure)	(2)	—
	$4.6 \times 10^3 \text{ M}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (w/o plasma exposure)		
$\text{ONOOH} \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}^+$ (76%) or $\text{OH} + \text{NO}_2$ (24%)	$0.13 + 0.87[\text{H}^+] \text{ s}^{-1}$	(3)	[4]
$\text{OH} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	$4.2 \times 10^9 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$	(4)	[5]
$2\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+$	$1.0 \times 10^8 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$	(5)	[6]

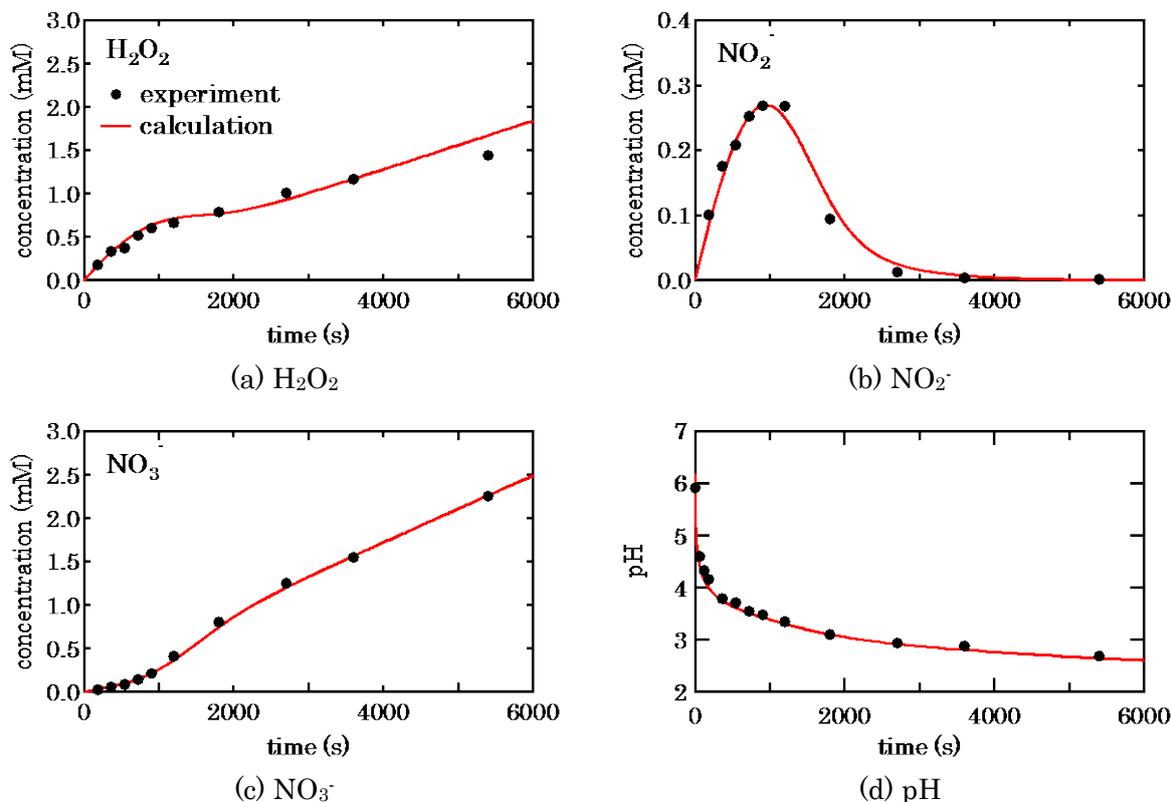


図1 計算結果

図1は、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{NO}_2$ および $\text{NO}_3^-$ の濃度とpHの計算結果を実測値と併せて示す。計算値は、実測値とおおむね一致していることがわかる。ただし、実測値の傾向を再現するには、(2)式の反応速度定数に放電照射時と非照射時で異なる値を用いる必要があり、放電照射時の生成物や水素イオンの濃度勾配を考慮したモデルを構築する必要があると考えられる。

## 謝辞

この度は第78回応用物理学会秋季学術講演会における発表に対し第43回応用物理学会講演奨励賞を賜りましたこと、大変光栄に思います。本稿は、第65回応用物理学会春季学術講演会での受賞記念講演に基づくものであり、改めて紹介する機会を頂き、ありがたく存じます。また、本研究の一部はJSPS科研費JP17J11124の助成を受けて実施されたものです。

## 参考文献

- [1] S. Ikawa, A. Tani, Y. Nakashima and K. Kitano; *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** (2016) 425401.
- [2] D. P. Park, K. Davis, S. Gliani, C.-A. Alonzo, D. Dobrynin, G. Friedman, A. Fridman, A. Rabinovich and G. Fridman; *Curr. Appl. Phys.* **13** (2013) S19.
- [3] K. Takahashi, K. Satoh, H. Itoh, H. Kawaguchi, I. Timoshkin, M. Given and S. MacGregor; *Jpn. J. Appl. Phys.* **55** (2016) 07LF01.
- [4] C. E. Anderson, N. R. Cha, A. D. Lindsay, D. S. Clark and D. B. Graves; *Plasma Chem. Plasma Process.* **36** (2016) 1393.
- [5] A. J. Elliot and D. R. McCracken; *J. Chem. Soc., Faraday Trans.* **86** (1990) 1539.
- [6] Y.-N. Lee and S. E. Schwartz; *J. Phys. Chem.* **85** (1981) 840.

## 国際会議報告

# 10<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Plasma Science and its Application for Nitrides and Nanomaterials / 11<sup>th</sup> International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (ISPlasma2018/IC-PLANTS2018)

名城大学 平松美根男

ISPlasma は、東海広域ナノテクものづくりクラスター事業の一環として、当地域に国際競争力を有する先進プラズマナノ科学研究拠点を形成するために 2009 年から毎年開催されている国際会議で、今回は 10 回目の記念大会となった。プラズマ分野で長い歴史と研究実績を有する東海地域に国内外から優れた研究者が集い、先進プラズマ科学、窒化物半導体とナノ材料への応用、産業界への技術移転の仕組み作りについて広く議論するとともに、最新の研究成果を発表して分野を超えて活発に情報交換を行う場となっており、プラズマを中心とする異分野交流の国際会議として認知されつつある。

一方、IC-PLANTS は、本邦唯一の産業応用プラズマセンターである名古屋大学工学研究科附属プラズマナノ工学研究センターの主催の国際会議として 2008 年から毎年開催されており、半導体プロセスからバイオ応用まで多様なプラズマプロセス技術と、プラズマの生成・計測・シミュレーションなど先進プラズマ科学に関して熱心に議論が繰り返されている。

2014 年からはこの 2 つの国際会議の合同シンポジウムとなり、先進プラズマナノ科学、およびナノ材料、窒化物半導体研究に加え、農業・バイオ分野までも包括的に対象分野とし、2018 年 3 月 4 日から 5 日間にわたり名城大学ナゴヤドーム前キャンパスにおいて開催された。プラズマを中心としてその応用分野の窒化物半導体やナノ・バイ

オ分野を 1 つの学会で議論できることから、数多く国際会議がある中で、プラズマを中心とする異分野交流の国際会議として認知されつつある。世界 18 ヶ国から約 500 名の参加があったが、近年はアジアの国際会議という位置付けが定着し、台湾・韓国などの東アジアからの参加が全体の 3 割近くを占めた。また、全発表件数は 400 件であった。

ISPlasma の 10 回大会を記念して、ISPlasma Prize と ISPlasma Special Recognition Award が制定された。第 1 回 ISPlasma Prize は、プラズマ科学およびその応用に関する分野における優れた業績と ISPlasma/IC-PLANTS に対する絶え間ない貢献を讃えて、Uwe Czarnetzki 教授（ルール大ボーフム、ドイツ）に授与された。また、Jeon G. Han 教授（成均館大、韓国）、名西徳之教授（立命館大）、および飯島澄男教授（名城大）には、基調講演やチュートリアル講演などを通じたこれまでの ISPlasma/IC-PLANTS への大きな貢献を讃えて ISPlasma Special Recognition Award が授与された。

本会議の前日にチュートリアルが実施された。若手への基礎知識の供与というよりも、異分野の理解を深め、分野間融合による新たな価値創造を目的としており、プラズマ科学・窒化物半導体・ナノ材料・バイオセンシングの各々の分野で活躍する研究者やベテランにも有意義となるよう、基礎から最先端の動向を含んだ講義が行われた。チ

ュートリアル講師は以下の通りである。プラズマ科学：Pascal Chabert 教授（エコール・ポリテクニク、フランス）、窒化物半導体：名西徳之教授（立命館大）、ナノ材料：斉藤弥八教授（名古屋大）、バイオ応用：Pietro Favia 教授（バリ大、イタリア）および榊田創氏（産総研）。

初日午前は、組織委員長・平松による開会挨拶に続いて、飯島澄男教授（名城大）による特別講演 "Carbon Nanotubes: Discovery, Impact and Beyond"、Jeon G. Han 教授（成均館大、韓国）による基調講演 "New Horizon of Novel Plasma and Films for Next Generation Flexible Devices"、および Uwe Czarnetzki 教授（ルール大ボーフム、ドイツ）による基調講演 "Ten Years of Plasma Diagnostics as ISPlasma: Progress, Challenges and Perspectives"が行われた。

午後からは、4つの会場にわかれて、プラズマ科学、窒化物半導体、ナノ材料、バイオセンシングのそれぞれのセッションで、招待講演と一般講演による最新の話題に対して専門性の高い活発な議論が繰り広げられた。夕方にはポスター発表が行われ、活発な議論が行われた。パラレルセッション方式の発表は、2日目以降は午前中に行われた。またポスター発表は、2日目の昼と3日目の夕方にも行われた。

本会議の特徴は、分野間融合セッション（トピカルセッション）である。2日目午後のバイオ応用を特集した「State-of-the-art plasma-bio applications」では、A. Fridman教授（ドレクセ

ル大、米国）、K. Weltmann (INP Greifswald、ドイツ)らによる招待講演が行われた。

3日目午後に行われた「GaN plasma process」では、窒化物半導体のプラズマプロセッシングをフィーチャーし、S. Chowdhury教授（カリフォルニア大学デービス、米国）、野尻一男氏（ラムリサーチ）、渡部平司教授（大阪大）らによる招待講演が行われた。

最終日午前後半に行われたナノ材料のトピカルセッション「Energy nanomaterial」では、Chen-Hao Wang教授（国立台湾科技大）、野崎智洋教授（東京工業大）、白谷正治（九州大）らによる招待講演が行われた。

最後にBest Presentation Award受賞者が発表された。Oral部門では、板垣宏知（産総研）、Vladimir Kolobov（University of Alabama Huntsville）、Faizulsalihin Bin Abas（立命館大）、Taige Dong（南京大学）、Xu Zhao（秋田大）、Cheng-Kuang Chiang（台湾科技大学）、Nevena Puač（University of Belgrade）ら7名が選出された。Poster部門では、Juan Pablo Trelles（University of Massachusetts Lowell）、隠田一輝（金沢大）、Dhasiyan Arun Kumar（名古屋大）、Kai-Sheng Lin（台湾科技大）、糞谷紗季（名城大）ら5名が選出された。

次回のISPlasma2019/IC-PLATNS2019は、名古屋工業大学において、2019年3月中旬に開催の予定である。



## 国際会議報告

### 2nd International Workshop on Plasma Agriculture

名城大学 太田貴之, 伊藤昌文

近年、低温大気圧プラズマの開発が契機となり、プラズマによる農産物の殺菌・洗浄だけでなく、植物の生長促進などが報告され、プラズマのバイオ応用の一つとして大きな注目を浴びている。プラズマの農水産業への応用とそれを支えるプラズマとバイオ試料との相互作用に関する科学や技術を対象分野とした 2nd International Workshop On Plasma Agriculture (IWOPA2) が、2018年3月9日ー11日の日程で、高山市民文化会館で開催された。

講演プログラムは招待講演 25 件、一般口頭講演 5 件、ポスター講演 56 件で構成された。

オープニングは、プラズマ農業応用研究の国際的なコミュニティの設立に携わった中心人物であり、IWOPA-1 の開催にも尽力された米国 Drexel University の Alexander Fridman 氏から「DBD and Glid Arcs in Plasma Agriculture and Food Safety」というタイトルで、プラズマ技術によって処理された霧状の水をトマトなどの生鮮食品の噴霧することによる食品表面に付着する大腸菌などの雑菌の殺菌技術および装置システムについての紹介がなされた。また、ドイツでのプラズマ医療およびバイオ応用研究を先導する低温プラズマ技術に関する研究所である Leibniz Institute for Plasma Science and Technology (INP Greifswald) の Klaus-Dieter Weltmann 氏から、「Overview of Plasma Applications in Agriculture in Germany and the EU」というタイトルで、ドイツをはじめとする EU での農業へのプラズマ技術の応用研究とその実用化に関する状況が報告された。さらに、宇宙航空研究開発機

構 (JAXA) の Tetsuhito Fuse 氏から、宇宙空間においてコメなどの植物の栽培にプラズマ技術を応用するなどの JAXA で進められている計画についての紹介が成された。その他、各国の研究機関で行われているプラズマ農業応用をはじめ、食品加工やその輸送技術など様々な研究に関する現状が最新成果とともに報告されるとともに、聴衆との間で活発な議論がなされた。

最終的な聴講を含む全参加者数は 111 名をかぞえ、その内訳は、日本 64 名、台湾 11 名、韓国 9 名、米国 5 名、スロベニア 4 名、フランス 4 名、ドイツ 3 名、タイ 3 名、イタリア 2 名、その他 6 カ国 6 名であった。

次回の IWOPA3 は、2020 年にドイツ Greifswald で開催する予定です。



エクスカージョンでの一コマ

## 国際会議報告

# The 10th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-10)

金沢大学 田中康規

APSPT-10 が 2017 年 12 月 15 日～12 月 17 日の 3 日間にわたり台湾桃園の中原大学にて開催された。

APSPT (Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology)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た。日本側共催団体は電気学会プラズマ技術委員会であり、電気学会プラズマ研究会の国際版として位置するものである。これまでに 9 回開催されており、第 9 回は初めて台湾を出て日本・長崎で開催された。今回が APSPT の記念すべき 10 回目にあたり、再び台湾にての開催となった。これ以降は、日本と台湾の交互開催が予定されている。

今回 2017 年度の APSPT-10 については、台湾の中原大学と台湾電漿科技協会(TAPST)とが主催である。日本からの協賛団体は、電気学会プラズマ技術委員会、電気学会パルス電磁委員会、電気学会放電技術委員会、日本学術振興会 153 委員会であった。大会委員長は、中原大学の Prof. Ta-Chin Wei 先生が務められた。

今回の APSPT-10 会議においては、これまでの APSPT でのトピックに昨今の日本・台湾、さらには世界のプラズマ研究動向も踏まえ、以下の 14 個のトピックを設定した。トピックに対して Keynote 招待講演・一般口頭講演および一般ポスター発表が行われた。トピックは以下の通りである：

1. Plasmas in biomedical applications

2. Plasmas in semiconductor materials processing
3. Plasmas in nano-materials processing
4. Plasma coating and surface modifications
5. Plasmas in agricultural applications
6. Plasmas in energy & environmental applications
7. Plasmas in aerospace/space Applications
8. Fundamentals and applications of atmospheric-pressure and multiphase plasmas
9. Plasmas-in-liquid
10. Fundamentals and applications of low pressure plasmas
11. Plasma diagnostics and modeling
12. Advanced and novel plasma technologies and sources
13. Thermal plasmas
14. Space plasmas

基調招待講演(Plenary Invited Lecture) は、下記のように 6 名の著名な方をお呼びし、欧米から 2 名、日本から 2 名、台湾から 1 名、韓国から 1 名からの講演となった。内容としては昨今のプラズマ基礎応用の重要な話題であり、大気圧プラズマの基礎物理と先端計測技術、プラズマ-液界面でのラジカル計測・解析と制御、静電気物理・大気圧非平衡プラズマと触媒との組み合わせによる環境問題応用、非平衡プラズマによるグラファイト系ナノ粒子生成、プラズマ科学技術の食品・農業応用、グラフェンなどの二次元材料への非平衡プラズマ応用であった：

1. Prof. Uwe Czarnetzki (Ruhr-Universität Bochum,

Germany), Helium Ns-Pulsed Atmospheric Pressure Discharges and the Key Role of Rydberg Molecules

2. Prof. Peter Bruggeman (University of Minnesota, USA), Multiphase Plasmas: Understanding and Controlling Plasma-Liquid Interactions
3. Prof. Akira Mizuno (Toyohashi University of Technology, Japan), Electrostatic Precipitation and Non-Thermal Plasma Combined with Catalysts for Environmental Technology
4. Prof. Masaaki Nagatsu (Shizuoka University, Japan), Multi-functionalized Graphite-encapsulated Nanoparticles Prepared by Plasma Technology for Biomedical and Environmental Application
5. Prof. Wonho Choe (Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea), Perspective of Plasma Science and Technology for Food and Agriculture
6. Prof. Li-Chyong Chen (National Taiwan University, Taiwan), Functionalization and Defect Engineering by Plasma-assisted Process in Graphene and 2D Materials and their Applications in Hydrogen Evolution and CO<sub>2</sub> Reduction Reaction

各セッションには（全てではないが）Keynote Invited Lecture が設けられ、その合計 25 名となった。そのうち日本側委員会からの招待講演推薦者は 6 名であり、台湾側から 19 名の推薦があった。一般投稿講演は、口頭発表が 72 件、ポスター発表が 100 件であり、合計 172 件であった。会期中 3 つの Tutorial も行われた。事前登録があった若手の発表者に対しては、口頭発表に対して 8 件、ポスター発表 8 件の Presentation Award が贈られた。元来、APSPT は日本と台湾とで行ってきた国際会議であったが、10 カ国からの参加があった。参加登録者数は 10 カ国から合計は 256 名（招待講演

を含む）となった。この数は歴代の APSPT の中で最も多く、各セッションにおいても活発な質疑が行われた。Banquet への参加人数も多く、会議全体を通じて盛況であった。

次回の APSPT-19 は、日本・金沢にて、電気学会プラズマ・パルスパワー技術委員会が主催団体となり、電気学会放電技術委員会、日本学術振興会第 153 委員会が共催団体となって、2018 年 12 月 12-14 日に開催する予定である。



図 1. 永津先生の基調講演風景

## 国内会議報告

# 2018年 第65回応用物理学会春季学術講演会 チュートリアル講演報告

サンディスク株式会社 吉元 諒

第65回応用物理学会春季学術講演会(早稲田大学西早稲田キャンパス開催)の初日 2018年3月17日(土) 9:00~11:30に、プラズマエレクトロニクス分科会企画のチュートリアル講演が実施されました。今回は「プラズマ微細加工技術の基礎と応用—エッチング基礎から原子層エッチングまで—」と題して、株式会社日立製作所の栗原 優先生よりご講義いただきました。2時間半という短い時間で、プラズマエッチングの原理から最先端の技術事例まで非常に丁寧に、密度濃くお話いただきました。

講義前半では、半導体デバイス(メモリーデバイス、ロジックデバイス)の基本構造から始まり、プラズマエッチングの歴史(装置、プロセス)、プラズマエッチングの原理について解説がありました。エッチング反応の基礎の部分では、 $\text{Cl}_2$ ガスプラズマによる Si エッチングを例に、エッチングが進行する過程を、数式を用いて初学者にも非常に分かりやすく説明していただきました。後半では、プラズマエッチングの応用について、特にエッチング形状の制御という観点からご説明がありました。ゲートエッチングを例にとり、エッチングの前工程である成膜やリソグラフィーのバラつきを考慮した、フィードフォワード型のエッチングプロセスによる微細加工寸法制御技術や、高選択比、垂直形状、疎密パターン差なしのエッチングが要求される3D構造の加工における、ウエハバイアス/プラズマ/ガスパルス技術によるエッチング性能の改善、また、近年注目を集めて

いる原子層エッチングの必要性と事例について詳しく解説していただきました。

講義のまとめとして、LSI性能は微細3次元化により向上し、エッチングの技術も継続して進化が必要であること、デバイス構造の変化により、求められるエッチングの性能も変化する必要があるとお話がありました。また、講義終了後の質疑応答の時間では、寸法制御技術の詳細に関する質問や、原子層エッチングの課題・アプリケーションに関する質問等があり、有意義なディスカッションの場となりました。

今回は50名程度の多くの方にご参加いただき、半数以上が企業からの参加でした。半導体製造プロセスにおけるプラズマエッチング微細加工技術の重要性、最先端のエッチング技術への関心の高さの顕れと見受けられます。

最後に、ご講演いただきました栗原先生、ならびにチュートリアル講演にご参加いただきました皆様方に深く感謝を申し上げます。



写真：講演の様子

## 国内会議報告

# 2018 年 第 65 回応用物理学会春季学術講演会 第 20 回分科内招待講演報告

## 名城大学 太田貴之

第 65 回応用物理学会春季学術講演会（2018 年 3月13日～16日，東京，早稲田大学）の2日目に、分科内招待講演が開催されました。第20回目を迎える今回は、株式会社日立ハイテクノロジーの伊澤 勝氏をお招きして「IoT時代のプラズマ微細加工技術」と題してご講演を頂きました。

前半では、ULSI や 3D-NAND メモリ密度の歴史や加工技術の発展について話された。2021 年には全世界の年間 IP トラフィックは 3.3ZB になると言われており、より多くのデータを処理するためには高速性とメモリの大容量化、低消費電力化が求められるとのことであった。ロジック ULSI では、微細化や無駄なスペースを少なくすることに加え、スイッチング特性改善のために新材料導入や立体的な（アンダーカットをいれる等）FinFET 構造が導入されており、さらにナノワイヤーの検討が進められているとのことであった。メモリでは、現在 96 層の 3D-NAND が製造されており、今後は倍の層数になるであろうことが示された。そのため、プラズマエッチング技術は、高選択性と垂直加工性の向上に加え、デバイスの構造の立体化・複雑化による高アスペクト比構造に対して横方向にコンフォーマルな加工が求められているということであった。

後半では、これらを実現する技術として rapid thermal cyclic atomic layer etching (ALE)を紹介された。Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜に対しては CHF 系ガスを用いて、

はじめに ICP プラズマ照射（低温）によりコンフォーマルに変質層を形成させる。その後、IR 加熱源による高温アニーリングで変質層を除去することを繰り返す手法である。ICP プラズマとアニールの温度差は 200℃程度であり、反応脱離過程は活性化エネルギーで説明された。また、同じガスでも温度を制御すると一層一層の反応ガス種の吸着脱離を制御でき、エッチング選択性を高められること、酸化膜でも窒化膜でも W でも高い選択性で実現可能とのことであった。

また、次世代の High-k 材料として検討されている La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> や Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> のエッチング例についても示された。これらの材料は揮発温度が高く、従来手法ではエッチングが難しかったが、有機金属（ケトン系）ガスと N<sub>2</sub> の混合ガスを用いたプラズマ照射とランプ加熱を、処理の温度差を持たせながらサイクリックに繰り返すことで、ALE が実現可能とのことであった。

改めて、大変に感銘深いご講演を頂きました伊澤様に御礼申し上げますと共に、多くの聴講者にご参集いただきましたことに感謝いたします。



## 2018 年第 65 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シンポジウム「二次元シート合 成とプラズマプロセス～超薄膜から原子層まで～」の報告

東北大学 加藤俊顕、東京大学 神原淳

### 1. はじめに

第 65 回応用物理学会春季学術講演会（2018 年 3 月 17 日～20 日、東京；早稲田大学）の 2 日目午後（13:45-18:00）に、本分科会企画シンポジウム「二次元シート合成とプラズマプロセス～超薄膜から原子層まで～」が、C204 会場にて開催された。

カーボンナノチューブ、グラフェン、及び類似の二次元シート材料は、従来物質を大きく凌駕する極めて優れた物性を持つことが明らかとなり、様々な分野への応用展開が期待されている。これら二次元シートを始めとした次世代薄膜材料本来の物性を最大限活用した産業応用の実現には、高品質な薄膜合成技術が必須であり、世界中で熾烈な開発競争が展開されている。本シンポジウムでは、各分野第一線で活躍されている研究者から講演を頂き、原子層物質・超薄膜合成分野における現状と課題、及び現在の半導体産業を支えているプラズマプロセスの当該分野における今後の展望に関して議論することを目的に企画された。

### 2. 講演の概略

最初に、企画担当である加藤俊顕（東北大学）から「はじめに」の題目で本シンポジウム開催の趣旨、及び本シンポジウムにおける各講演者とその内容がプログラムに基づき紹介された後、カーボンナノチューブやグラフェンナノリボン等の原子構造制御におけるプラズマプロセスの有用

性を例にプラズマプロセスと二次元シート材料合成の現状が紹介された。

続いて、本間芳和先生（東京理科大学）に「二次元シートとしてみた単層カーボンナノチューブ」の題目で講演頂いた。国内外含め単層カーボンナノチューブのカイラリティ制御合成に関する最新の研究状況をご紹介頂いた。また、カーボンナノチューブ表面に吸着した特異な水分子の挙動に関しても紹介された。さらに、化学的に分離した単一カイラリティナノチューブを種結晶として特定のカイラリティのみを合成するクローニング合成に関して、成長を促進するために必須なナノチューブエッジの活性化において、プラズマプロセスの貢献の可能性をご提案頂いた。

続いて、吾郷浩樹先生（九州大学）に「高結晶性 2D マテリアルの CVD 成長」の題目で講演頂いた。単層グラフェンと多層グラフェンそれぞれの合成に適している銅触媒とニッケル触媒を適切な配分で合金化することで、バンドギャップ発現が期待できる二層グラフェンの層選択的大面積高品質合成を実現した最新の成果をご紹介頂いた。また、他の二次元シート材料である六方晶窒化ホウ素 (h-BN) や遷移金属ダイカルコゲナイドの高品質合成に関しても、合成中の水素ガスの制御により結晶配向性が制御可能となる等興味深い結果が紹介された。

続いて、近藤博基先生（名古屋大学）に「プラズマプロセスによるカーボンナノウォールの制

御合成とナノバイオ応用」の題目で講演頂いた。ラジカル注入型のカーボンナノウォール合成に関する最新の成果をご紹介頂いた。また、カーボンナノウォールの形状、及び表面濡れ性を制御することによりナノウォールを足場として成長する細胞形態に大きな変化が現れる興味深い結果が紹介された。

続いて、若林整先生（東京工業大学）に「MoS<sub>2</sub> 膜のスパッタ合成とトランジスタ応用」の題目で講演頂いた。ナノスケールオーダー膜の中で既存の半導体材料より高いキャリア移動度を持つ二硫化モリブデン（MoS<sub>2</sub>）に着目し、具体的な産業ロードマップと照らし合せ、原子層物質の産業応用に関する可能性を詳細にご紹介頂いた。また、スパッタリングにより低温合成した MoS<sub>2</sub> 薄膜における優れたトランジスタ性能に関しても、最新の成果を紹介頂いた。

15分の休憩を挟み、渡邊賢司先生（物質材料機構）には「六方晶窒化ホウ素の発光機構解明のためのホモエピタキシャル成長」の題目で講演頂いた。原子層物質が従来基板（例えば SiO<sub>2</sub>）と接触した際に問題となる、表面不純物散乱による特性劣化に関して、原子レベルの表面平坦性を持つ絶縁材料である h-BN をバッファ層として利用することで、特性劣化を解決できる成果が紹介された。また、高輝度紫外光源として期待されている h-BN の発光特性に関しても、発光の起源を含め最新の成果をご紹介頂いた。

続いて、板垣奈穂先生（九州大学）には「格子整合条件を超えて原子平坦表面を実現する新規スパッタエピタキシー技術の開発～ZnO on sapphire を例に～」の題目で講演頂いた。従来薄膜合成において問題となる格子不整合を積極的に活用した独創的なサファイア表面への ZnO 薄膜の合成技術に関してご紹介頂いた。薄膜合成時における窒素添加量を制御することで、粒径が小

さく高結晶性のアイランド層が形成可能である興味深い結果が紹介された。

続いて、節原裕一先生（大阪大学）に「プラズマ支援反応性プロセスを用いた高移動度 IGZO 薄膜の低温形成」の題目で講演頂いた。フラットパネルディスプレイ等の具体的な応用をターゲットとした IGZO 薄膜の低温合成に関する最新の成果をご紹介頂いた。通常的手法では合成温度の低温化に伴いキャリア移動度も低下するのに対し、プラズマ支援反応性スパッタリング法を活用することで、150℃以下の低温でも高移動度を維持した高品質 IGZO 薄膜の合成が可能であることが紹介された。さらに、合成後の IGZO 膜に対するポストプラズマトリートメントにより、移動度及び安定性の向上が実現できる興味深い結果が紹介された。

最後に、長谷川雅考先生（産業技術総合研究所）に、「おわりに」という題目で本シンポジウムの各講演のハイライトをご紹介頂いた。また、高品質グラフェンの大面積合成に関しても、最新の成果をご紹介頂き、プラズマプロセスの二次元シート合成分野における今後の展望に関してまとめて頂いた。

### 3. おわりに

本シンポジウムでは、上記9件の招待講演において、プラズマプロセスと二次元シート材料合成に関する最新の結果が紹介され、各発表に対して活発な議論が交わされた。またプラズマエレクトロニクスに加え、ナノカーボン、及び表面科学等多数の分野からも合計150名以上の多くの参加者がみられ、盛況なシンポジウムとなった。

最後に、シンポジウムで講師を頂きました先生方、活発な議論をして頂きました参加者の皆様、シンポジウムの開催にご協力を頂きました分科会幹事の皆様に、深い感謝の意を表します。

## 国内会議報告

# 第 28 回プラズマエレクトロニクス講習会 ～プラズマプロセスの基礎と先端分野への応用～

東芝メモリ 林 久貴

題記講習会を開催しました。以下、報告します。

- 1) 協賛：日本物理学会、電気学会、プラズマ・核融合学会、日本化学会、電子情報通信学会、放電学会、日本真空学会、ドライプロセスシンポジウム、化学工学会 CVD 反応分科会
- 2) 日時：2017 年 11 月 15 日 9:30～19:00
- 3) 場所：東京大学 本郷（浅野）キャンパス 武田先端知ビル 「武田ホール」
- 4) 参加者：75 名（昨年比+15 名、企業からの参加者約 9 割）
- 5) 収支：  
【収入】2,168,000 円  
（参加費 1,673,000 円、広告 465,000 円）  
【支出】652,252 円  
（会場 121,000 円、印刷 121,143 円、  
謝金 79,599 円、懇親会/会議 199,500 円、  
雑費/旅費/輸送他 95,694 円）  
【残金】1,515,748 円
- 6) プログラムと概要

### ■ 第 1 部：プラズマ技術の最前線 ■

1. 『プロセスプラズマの計測・診断技術』  
中部大学 中村 圭二 先生
2. 『プラズマによるデバイスへのダメージ』  
京都大学 江利口 浩二 先生
3. 『最先端エッチング技術—ALE および HARC 加工技術—』  
東京エレクトロン宮城 本田 昌伸 先生

### ■ 第 2 部：プラズマプロセスの基礎 ■

4. 『ドライエッチングの基礎』  
ラムリサーチ 野尻 一男 先生
5. 『各種ビームを用いた表面反応解析』  
大阪大学 唐橋 一浩 先生

各先生から、①電気的手法や光学的手法を中心に、プロセスプラズマに適用できるモニタリング手法の原理と最先端技術、②プラズマダメージの形成メカニズムとデバイスへの影響、将来展望、③Atomic Layer Etching などの最先端エッチング技術の状況、および、高アスペクト比エッチング技術について、④ドライエッチングの反応機構、およびエッチングを支配するパラメータとその制御方法について、⑤ビーム実験を用いて明らかになった様々なエッチング反応について、をご講義頂きました。参加者との活発な議論もあり、基礎から応用までを効率的に学べる有意義な講習会となりました。また、講習会後の懇親会で、相互の交流も深めました。

有意義なご講義を頂いた講師の皆様、講習会企画・運営にご尽力頂いた朽久保幹事長をはじめとする担当幹事の皆様、会場運営にご協力を頂きました東京大学の一木先生、神原先生、竹原先生、事務手続き全般をサポート頂いた応物分科会担当の小田様にお礼申し上げます。

- 7) 次回の予定（詳細未定）  
日時：2018 年 11 月  
会場：東京大学 武田ホール

◎担当幹事：

大森健史（日立製作所）、三好康史（ソニーセミコンダクターソリューションズ）、山澤陽平（東京エレクトロン宮城）、今村翼（東芝メモリ）、赤塚洋（東京工業大学）、大澤直樹（金沢工業大学）、内藤皓貴（三菱電機）、吉元諒（SanDisk）、林久貴（東芝メモリ）

## 第 26 回 プラズマ新領域研究会 『熱プラズマの電磁熱流体構造を開拓する』

大阪大学 茂田正哉

平成 30 年 1 月 27 日 (土) の 13 時より 17 時に大阪大学接合科学研究所荒田記念館において、第 26 回プラズマ新領域研究会が開催され、熱プラズマの電磁熱流体的な内部構造の解明に取り組んでいる最近の研究に関する講演を通じて、新たな熱プラズマプロセッシングの開拓に向けた議論が行われた。

熱プラズマは 1 万°C を超える高温場と強い発光を伴う流体であるため、実験計測においては機器と技術の限界に苛まれ、数値シミュレーションにおいては数桁に渡る物性値変化を扱う収束解の得にくい厳しい条件が課される。研究の困難さから、その内部構造はほとんど不明のまま熱源ツールとして工業的に応用されてきたが、最近の計測機器や計算機の性能向上により、それまで未踏であった領域（内部の熱流動構造や時間進展過程）によりやくメスが入り、ここ数年で劇的に解明が進んでいる。

研究会では、この分野の最先端の研究を担っている 5 人の研究者による講演が行われた。最初の講演者である九州大学の渡辺隆行先生からは「熱プラズマ流の可視化計測」という題目で、新規の熱プラズマ発生システムである多相交流アークの電極温度やアーク温度を、高速度カメラとバンドフィルターを組み合わせたシステムを用いて計測する手法 (図 1) についての講演があった。また、交流アークでは電極消耗が激しく、その原因として電極からの液滴飛散と金属蒸気の蒸発が重要な機構であることを示す研究成果が報告された。

金沢大学の田中康規先生からは「ガス吹付け減衰アークの反応論的非平衡数値解析ーレーザトムソン散乱電子密度計測値との比較ー」と題する講演があった。ガス遮断器内における SF<sub>6</sub> プラズマの減衰過程を反応論的非平衡モデルによって詳細に扱った数値解析 (図 2) の報告がなされた。SF<sub>6</sub> 吹付けアーク内において分子が解離・電離している。アーク減衰過程においてはそれらが再結合・会合反応するとともに、負イオン F<sup>-</sup> が生成される。電子から F<sup>-</sup> への生成が電子密度低下に寄与すると言われている。講演ではこの F<sup>-</sup> には F<sub>2</sub>, SF への解離性電子付着が支配的であることが示された。

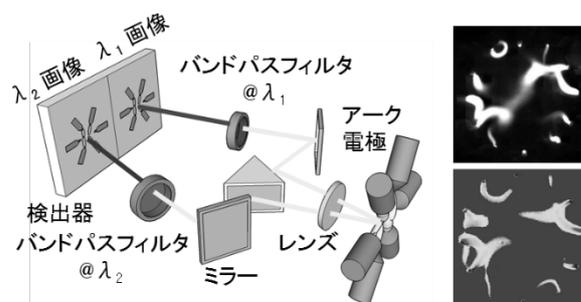


図 1 可視化システム概略図と計測結果例

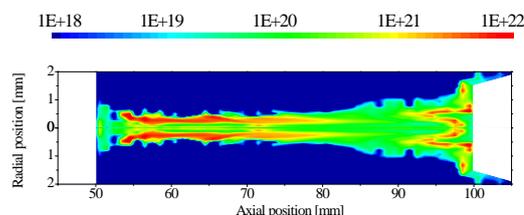


図 2 電極間空間での減衰 SF<sub>6</sub> アーク中の F<sup>-</sup> の密度分布解析例

大阪大学の野村和史先生からは「三次元発光分光法による非軸対称溶接アークの可視化」として、非軸対称アークプラズマの三次元的な温度分布の測定に関する講演があった。アークの多方向・多色・同時発光分光計測を行い、そのデータをトモグラフィ技術によって画像再構成して非軸対称溶接アークを三次元的に可視化するものである(図3)。多電極アークや、金属蒸気を含む溶接アークの複雑な三次元挙動を捉えた研究成果が報告された。

大阪大学の荻野陽輔先生からは「アーク溶接におけるプラズマ溶滴輸送現象の連成シミュレーション」として、熔融した電極材料がアークプラズマを通過し、熔融池へと落下するという固体・液体・気体・プラズマが共存する現実のアーク溶接プロセスを連成シミュレーションによって再現する研究の講演があった。電極近傍の電流密度分布によって、熔融電極の移行挙動が異なること(図4)が明らかとなったとの報告がなされた。

最後に著者からは「熱プラズマ流動構造解明に向けた数値計算手法の開発」と題した講演が行われた。大きな密度変化や物性値変化を伴う熱プラズマの乱流的な流動現象をシミュレートするための数値計算手法[1]について解説がなされ、最近のシミュレーション結果が紹介された。熱プラズマジェットに誘起される渦構造(図5)がその一例である。熱プラズマジェットが高温の太い渦輪を形成する一方で、その周囲に低温の細かい多数の渦群が誘起されることが示された。

以上、5名の講師の講演と討論により、熱プラズマの電磁熱流体的な構造に関する最新の情報が共有され、極めて有意義な研究会となったと言える。最後に、講師の先生方、また研究会に参加していただきご議論を頂いた皆様に御礼を申し上げます。

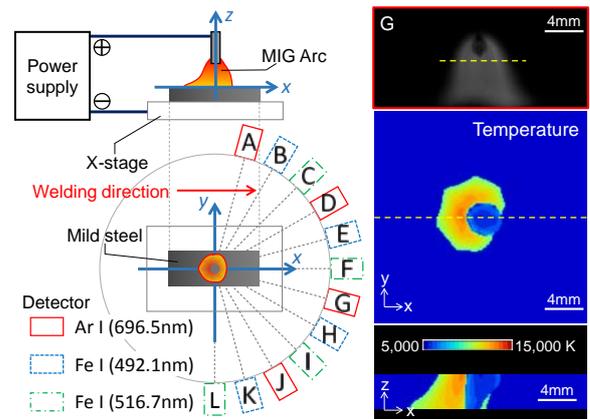


図3 多方向同時多色計測装置の模式図と計測結果例

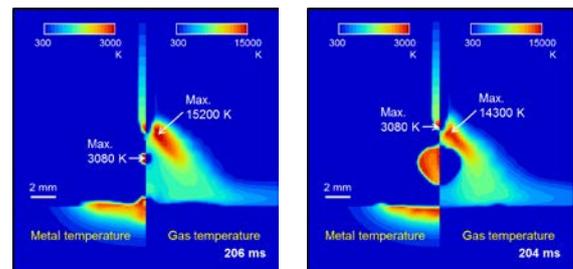


図4 熔融電極の輸送現象のシミュレーション例

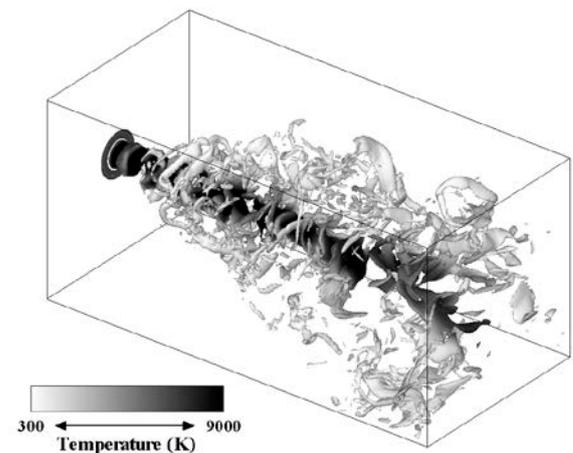


図5 熱プラズマジェットに誘起される渦構造

## 参考文献

- [1] Masaya Shigeta; Journal of Physics D: Applied Physics, 49, (2016), 493001.

## 第 27 回プラズマ新領域研究会 「プラズマプロセスと表面/界面モニタリング」

防衛大学校 北嶋 武

平成 30 年 2 月 9 日（金）午後東京都神田の会議室シェアミィにて「プラズマプロセスと表面/界面モニタリング」と題してプラズマ新領域研究会を開催しました。CVD や原子層エッチング、2 次元シートプロセスなどの近年注目されるプラズマ表面相互作用のテーマに関して、各種表面分析法の活用例を交えた成果発表がされました。

### 1. 布村 正太（産総研）「シリコン PECVD 中の膜評価」

太陽電池業界の現状と将来予測、今後の高性能化に向けたプラズマ技術の活用可能性に関して概観し、アモルファスシリコンのプラズマ CVD 技術で重要な欠陥モニタリングと水素終端のリアルタイム制御を可能とする光励起電流検出システムの実例について解説されました。質疑応答では欠陥形成と回復のメカニズムについて活発な議論が繰り広げられました。

### 2. 篠原 正典（佐世保高専）「プラズマ照射表面の ATR 分光」

プロセス最表面の分子振動情報を高感度に捉える ATR 分光の原理と応用における要点を技術発展の歴史を踏まえながら解説されました。実例ではカーボン系 CVD 表面の分子検出に加え、近年プラズマプロセスの応用例も多い生体分子表面をターゲットとした液中プラズマプロセス下のリアルタイム診断結果についても示し、今後の技術発展の多様化を印象づける内容でした。質疑応答では基板温度と吸着、エッチングレートの関係を中心に議論されました。

### 3. 篠田 和典（日立製作所）「プラズマを用いた原子層レベルエッチングとその表面分析」

3D-NAND を典型例とした近年の半導体デバイスの多層化の流れを紹介し、高アスペクト比構造の形成を可能とする原子層レベルエッチングの実例が示されました。XPS と TDS を活用したラジカル表面反応診断のデータからは表面反応の自己飽和と加熱に伴う脱離によりデジタルなエッチングプロセスが実現された様子が示されました。質疑応答ではデバイスメーカーのスループット要求と原子層レベルエッチングの関係、更にはラジカル-表面反応の飽和メカニズムなどが議論されました。

### 4. 北嶋 武（防衛大）「プラズマ照射表面ナノ構造の XPS, AFM 測定」

各種半導体デバイスのナノサイズ化に伴ったプロセス表面の診断法として、XPS による化学状態分析と AFM による各種物理情報の取得法について解説されました。例として極薄膜やグラフェン、ナノ粒子をターゲットとしたプラズマプロセスを挙げて有用性を示し、同時にシステム構築から運用までの問題点を洗い出しました。質疑応答ではナノ粒子触媒の活性メカニズムや AFM を用いた化学状態分析 (TERS) の例など、ナノ構造由来の各種効果に関して議論されました。

講演後は意見交換会として聴講者と講演者の交流の時間を設けました。聴講者は大学関係者、自治体の研究機関に加え、半導体装置メーカーからの参加が多く、名刺交換に続いてプラズマ表面プロセスの細部に渡る個別のテーマについて議論が活発に交わされました。

## 国内会議報告

# 第 28 回 プラズマ新領域研究会 『液体および生体とプラズマの相互作用』

愛媛大・理 前原常弘

平成 30 年 3 月 9 日(金)の午後半日にわたり、愛媛大学メディアホールにて、第 28 回プラズマエレクトロニクス分科会プラズマ新領域研究会『液体および生体とプラズマの相互作用』を愛媛大学理工学研究科(工学系)拠点形成プロジェクト「オレンジプラズマ」および愛媛大学リサーチユニット「プラズマ医療、農水産応用研究ユニット」との共催で開催しました。

本研究会は、液中や気液界面プラズマの研究が近年、盛んに行われ、有機物の分解・成膜・ナノ粒子の生成・水素の製造など、幅広い応用が見られることや、気液界面プラズマがさらに、遺伝子導入や生体との相互作用へとフィールドを広げ、農業応用への道を開いたことを受けたもので、愛媛大学からの 3 名と外部からの 3 名の計 6 名の研究者に最近の研究成果をご講演いただきました。

はじめに、野村信福先生(愛媛大学学長特別補佐)から背景と趣旨説明が行われました。竹内希先生(産総研)は「気液界面プラズマを用いた界面活性剤 PFOS 分解の特徴」と題して、有機フッ素化合物の分解や酢酸の分解について講演され、気液界面プラズマによる水処理について述べられました。前原(愛媛大)からは「水中プラズマの発生と利用」という題目で、金ナノ粒子の生成や電極から離れた位置での水中高周波プラズマに関する話がありました。向笠忍先生(愛媛大)は「高圧水中プラズマの特性について」と題して、豊富な画像データを使い、水中プラズマ発光や温度の空間分布について述べられました。朽久保文嘉先生(首都大)は「液体の導電率を考慮した液体電

極放電のシミュレーション」という題目で公演され、多様な気液界面プラズマが紹介された後、液体電極利用時の粒子の輸送について述べられました。池田善久先生からは「プラズマ遺伝子導入の農水産分野への応用」という題目で、魚卵への遺伝子導入や植物への遺伝子導入など今後の発展が期待できる研究の報告がなされました。近藤隆先生(富山大)は「大気圧プラズマの生体作用—細胞内外の活性酸素生成と細胞死—」と題して講演され、アルゴンプラズマと放射線の作用の比較など興味深い説明があった。会の最後には朽久保先生に閉会のあいさつを頂きました。各講演後は参加者との活発な質疑応答があり、とても有意義な会議になりました。

最後に、講師及び参加者の皆様、そして準備でお世話になりました応用物理学会関係各位に厚く御礼申し上げます。



写真 1 講演中の竹内先生

## 行事案内

# 2018 年第 79 回応用物理学会秋期学術講演会 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

2018 年 9 月 18～21 日に名古屋国際会議場（愛知県名古屋市）にて第 79 回応用物理学会秋期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。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）特別シンポジウム

日程：9 月 18 日（火）13:30～17:30（予定）

第 1 日目午後には、プラズマエレクトロニクス分科会の企画による特別シンポジウム「最先端プラズマ科学技術が創る未来社会 ～半導体から医療・農業・宇宙探査まで～」を一般公開形式で開催いたします。プラズマは、半導体、環境技術、その他多くの分野で活躍をしてきましたが、最近ではバイオテクノロジーへの応用も期待されています。第 1 次産業から第 3 次産業までが情報技術により有機的・総合的に結合した未来社会において、プラズマが果たす役割はますます重要になると予想されます。本シンポジウムではプラズマ科学技術が示す大きな可能性について様々な面から議論したいと思いますので是非とも奮ってご参加下さい。

### ■（第 2 日）プラズマエレクトロニクス賞受賞記念講演／講演奨励賞受賞記念講演

第 16 回プラズマエレクトロニクス賞受賞者 ([https://annex.jsap.or.jp/plasma/PE\\_files/pe\\_award2.html](https://annex.jsap.or.jp/plasma/PE_files/pe_award2.html))

による受賞記念講演が行われます。また、2017 年春季の講演奨励賞は、細井 祐吾氏（名大院工）と吉川 侑汰氏（京大院工）が受賞されました (<https://www.jsap.or.jp/young-scientist-presentation-award/recipients44>)。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。

### □ プラズマエレクトロニクス賞受賞記念講演

日程：9 月 19 日（水）9:45～10:45（予定）

受賞者（敬称略）：\*西山修輔（北大），中野治久（NIFS），後藤基志（NIFS），佐々木浩一（北大）（\*ご講演予定者）

選考の対象となった業績：“Stark spectroscopy at Balmer- $\alpha$  line of atomic hydrogen for measuring sheath electric field in a hydrogen plasma”, Shusuke Nishiyama, Haruhisa Nakano, Motoshi Goto and Koichi Sasaki, J. Phys. D: Appl. Phys. 50 (2017) 234003.

受賞者（敬称略）：\*富田健太郎（九大），佐藤祐太（九大），築山晶一（九大），江口寿明（九大），内野喜一郎（九大），神家幸一郎（ギガフォトン），戸室啓明（ギガフォトン），溝口計（ギガフォトン），砂原淳（Purdue Univ.），西原功修（阪大）（\*ご講演予定者）

選考の対象となった業績：“Time-resolved two-dimensional profiles of electron density and temperature of laser-produced tin plasmas for extreme-ultraviolet lithography light sources”, Kentaro Tomita, Yuta Sato, Syouichi Tsukiyama, Toshiaki Eguchi, Kiichiro Uchino,

Kouichiro Kouge, Hiroaki Tomuro, Tatsuya Yanagida, Yasunori Wada, Masahito Kunishima, Georg Soumagne, Takeshi Kodama, Hakaru Mizoguchi, Atsushi Sunahara, and Katsunobu Nishihara, Sci. Rep. 7 (2017) 12328.

□ 講演奨励賞受賞記念講演

日程・会場：未定

受賞者：細井 祐吾氏（名大院工）

選考対象発表：プラズマ活性乳酸の物理化学解析

受賞者：吉川 侑汰氏（京大院工）

選考対象発表：プラズマ誘起ダメージを受けた局所構造の第一原理計算による解析

■（第2日）分科会企画シンポジウム

日程：9月19日（水）13:30～17:30（予定）

学会2日目の19日（水）に、分科会企画シンポジウム「プラズマ・インフォマティクス～ビッグデータ解析の活用によるプラズマ科学の発展」を開催いたします。プラズマ科学は巨大データの宝庫です。本シンポジウムでは、プラズマ研究で得られる巨大データから現象の物理機構を効率的に抽出したり、各種センサーから得られるデータをもとにプラズマ装置を効率的に制御する手法等の可能性について議論します。そのための学術的アプローチは、プラズマ科学の知識に基づき、最新の「データ科学」の成果と高速計算技術を活用することが不可欠と考えられます。ここで、「データ科学」とは、従来の統計学や情報学に基づくデータ解析を含む、確率的推論、データマイニング、機械学習、人工知能など、広範なデータ処理に関する科学の他、GPUコンピューティング等データ解析に有効な新規の数値計算技術を指します。本シンポジウムは、こうしたデータ科学一般の紹介も含めて、プラズマに関する幅広い観点での講演を予定していますので是非とも奮ってご参加下さい。

■ 海外招待講演／English Session

日程・会場：未定

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「8.6 Plasma Electronics English Session」と題した English Session を予定しています。本 English Session に先立ち、海外の著名な研究者より招待講演を戴きます。留学生に限らず日本人学生の方も是非とも奮って参加いただければ幸いです。

1. Prof. L. Mangolini (University of California, Riverside, USA)

“Nanoparticles for energy storage and conversion” (tentative)

2. Dr. Endre Szili (University of South Australia, Australia)

“Developing In Vitro Models to Analyze the Metrology of Plasma-Tissue Interactions” (tentative)

■ おわりに

本案内執筆の時点では、プログラムの詳細は未定ですが、学会2日目には分科内招待講演を実施予定です。最終プログラムを確認の上で会場までお越しください。今回は通常の分科会企画の他に特別シンポジウムも開催予定であり盛りだくさんの内容となっています。加えて9月19日（水）の昼には、PE分科会のインフォーマルミーティング、同日夕刻には恒例の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が、是非、スケジュールに加えておいて下さい。

連絡先：古閑 一憲（九州大学）

koga@ed.kyushu-u.ac.jp

## 行事案内

# 第12回インキュベーションホール

## 東京工業大学 赤塚 洋

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、プラズマ生成・制御、プラズマ診断計測、プラズマ CVD、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。講義内容は、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、企業経験、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、企業で必要とされる資質、産学連携のエピソードなどを適時交えた講義を頂き、受講生のプラズマプロセス研究への興味を喚起します。

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

記

【会期】2018年 (平成30年) 9月3日(月)~5日(水)

【会場】国立中央青少年交流の家

〒412-0006 静岡県御殿場市中畑 2092-5

【交通】JR 御殿場駅より富士急行「青少年交流の

家」行き路線バス (富士山口1番乗り場より) (約20分) 「青少年交流の家」下車

【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。)

[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 遠方からの参加の大学院生・学生に対して交通費の一部を補助する予定です。

\* 4 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)】日本物理学会, 電気学会, プラズマ・核融合学会, 日本化学会, 電子情報通信学会, 高分子学会, 日本セラミックス協会, 放電学会, 日本表面真空学会, 日本学術振興会プラズマ材料科学第153委員会, 静電気学会, 日本金



## 行事案内

# 第 40 回ドライプロセスシンポジウム 40th International Symposium on Dry Process (DPS2018)

ソニーセミコンダクタソリューションズ（株）深沢 正永（プログラム委員長）  
名古屋大学 堀 勝（実行委員長）  
アイオーコア（株） 木下 啓蔵（組織委員長）

本年のドライプロセス国際シンポジウム(DPS)は、2018年11月13-15日の三日間、名古屋大学（東山キャンパス）にて開催されることとなりました。今年は40周年という事で、記念講演会が11月13日に、通常のシンポジウムが11月14-15日に開催されます。多くの著名な方々の招待講演も予定されており、例年以上に活発な議論がされる事と存じます。

つきましては、是非とも最先端の研究の投稿をご検討頂ければと思っております。会議後にJJAP 特集号の発刊を2019年6月号で予定しています。

今年で40回目を迎えるDPSはプラズマエッチングやプラズマCVD等、半導体集積回路の微細加工プロセス技術並びに表面反応研究の分野で世界をリードする国際会議です。例年、国内外の大学や企業から200名程度の参加を頂き、当該分野の最先端の研究結果が発表され、熱い議論が交わされています。また近年は、微細加工を必要とする新材料・新デバイス向けのプラズマ応用プロセス技術や、デバイス性能に直接影響するプロセス誘起ダメージとそのメカニズムに関する研究、プラズマ装置/プロセスの長期安定性とモニタリング、大気圧プラズマ技術についても発表件数が増えて来ており、新たな流れになっています。DPSでは、これらプラズマを用いた幅広い応用技術に関して柔軟にテーマ設定を行っています。

今年のDPSのプログラム企画は、プログラム

委員会を中心に順調に進行しています。以下にその一端をご紹介します。

会議初日の記念講演会では、40年間のDPSの歴史を振り返ると共に、プラズマプロセスの将来展望についてのSessionを予定しております。具体的には、IoT、宇宙、コンピューティング、社会インフラ、医療等の幅広い視点から、プラズマプロセスへの期待や展望をご講演頂きます。プラズマプロセスの発展にご尽力を頂きました諸先輩方の研究を元に、現在のプラズマプロセスの発展がありますが、今後のプラズマプロセスを支える若手研究者・エンジニアの皆様にも、是非、ご参加頂ければと考えております。

またDPSでは毎年、本技術分野に多大な貢献をされた研究者に、本国際会議を創始された西澤潤一先生のお名前を冠したNishizawa Awardを差し上げていますが、初日にその授賞式を開催致します。今年は、最先端プロセス技術の発展と本シンポジウム運営に多大なるご尽力を頂いた辻本和則氏(元(株)日立製作所)、早坂伸夫氏(東芝メモリ(株))、中村守孝氏(MAMO)の3氏と、プラズマエッチングの基礎科学、Simulationから応用まで長きに渡り貢献されている斧高一先生(京都大学名誉教授、大阪大学教授)の4氏に本賞をお受けいただくことになりました。

2日目、3日目は、例年通りの講演会となります。会議冒頭のKeynote speakerとしては、ドライエッチングの研究開発で存在感のある活動を続

けている Lam Research から Rick Gottscho 氏をお招きして、将来のドライエッチング技術の方向性や展望についてご講演頂く予定です。また、今年は 2 つの注目テーマを Arranged session に設定しました。Arranged session では、一般投稿論文から選ばれた関連内容の口頭講演に加え、その分野で実績を上げられている招待講演者をお招きして session 編成を行います。

1 つ目は、「Control of surface reactions in atomic-precision plasma processing (ALE/ALD)」として、近年注目されている原子層レベルの微細加工技術及び成膜技術に関する session です。本テーマに関して、Atomic layer etching (ALE) プロセスの第一人者である Prof. Gottlieb S. Oehrlein (Univ. of Maryland, College Park) と、Simulation を活発にご検討されている Prof. Emilie Despiau Pujot (Univ. of Grenoble Alpes) にご講演頂きます。又、Atomic layer deposition (ALD) 関連では、近年大変注目を浴びている Area-selective deposition に着目し、その著名な研究者である、Dr. Silvia Armini (imec) と Dr. Gert Leusink (Tokyo Electron U.S. Holdings, Inc.)を招待講演者としてお招きします。2 つ目は、「Etching challenges in extremely high-aspect-ratio (HAR) features (AR > 100)」として、高アスペクト比構造を有する最先端 3 次元デバイスの開発と量産について Dr. Bang Jinyoung (Samsung) よりご講演を頂きます。Arranged session はテーマがホットなだけでなく、その分野の第一人者と接点を持つ良いチャンスです。若い技術者、研究者の投稿を特に encourage したいと思います。

上記以外では、半導体製造の後工程でのプラズマプロセスの応用について Dr. Yasuhiro Morikawa (ULVAC)より、又、新材料の加工技術については、Dr. Nathan Marchack (IBM)よりご

講演を頂く予定となっております。

DPS 会議は世界最先端の研究に触れ、議論を行える絶好の機会です。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申し上げます。

### 【重要日程】

・発表申込および予稿投稿の Web 受付：

開始 2018 年 5 月 10 日(木)

締切 2018 年 7 月 13 日(金)

口頭講演とポスター講演を予定しております。

・早期参加登録締切：

2018 年 10 月 5 日(金)

・会期：2018 年 11 月 13 日(火) - 15 日(木)

### 【会議ホームページ・連絡先】

<http://www.dry-process.org/2018/>

事務局: [dps2018\[at\]officepolaris.co.jp](mailto:dps2018[at]officepolaris.co.jp)



## 行事案内

# 第 71 回気体エレクトロニクス会議 71st Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2018)

首都大学東京 朽久保文嘉

第 71 回気体エレクトロニクス会議(GEC2018)は、2018 年 11 月 5-9 日に、アメリカ合衆国オレゴン州ポートランドのオレゴンコンベンションセンターで開催されます。現地実行委員長は Lam Research の Douglas Keil 氏です。GEC はアメリカ物理学会の Division of Atomic, Molecular and Optical Physics の傘下で、低温プラズマの物理と化学、及び、その応用を主たるテーマとして毎年開催される会議です。当分科会との親和性は極めて高く、これまでに ICRP との合同会議が 3 回行われ、また、毎年、日本からも多くの方々が参加されています。GEC は当分科会会員の方々にとって有益な会議であることは間違いなく、GEC との良好な関係を維持しながら当分科会が益々発展するためにも、多くの会員の皆様に参加いただけますよう、お願い申し上げます。なお、発表申込および予稿投稿の締め切りは米国東部夏時間で 2018 年 6 月 15 日 (金) 23 時 59 分です。本会報が届く頃には既に投稿期限が過ぎているかもしれませんが、聴講のみの参加も大歓迎です。

今回は、第 60 回 APS の Division of Plasma Physics の年次大会と同時開催されます。合同セッションも検討されていると聞いており、低温プラズマのみならず、高温プラズマまでの最先端の情報を得るには絶好の機会になるかと思えます。

招待講演は、Will Allis Prize 受賞講演を含め、31 件 (日本からの 3 件) が予定されており、原子・分子の基礎過程から低温プラズマ応用まで、質の高い講演が期待されます。Will Allis Prize 受賞講演はフランス CNRS の Leanne Pitchford 先

生によって行われます。受賞理由は、“荷電粒子の輸送係数や反応レートの計算手法の開発、及び、低温プラズマのモデリングへの適用” とのことです。なお、GEC における招待講演者の推薦方法が 2015 年より改正され、誰でも招待講演者を推薦できるようになりました。逆に言えば、この時点で推薦リストに載っていないければ、招待講演者として推薦することが困難です。今後、2019 年の GEC における招待講演者推薦に関する電子メールが届きましたら、本分科会会員の皆様には積極的な推薦をお願いいたします。

GEC では、優れた研究を行った学生を奨励するために、GEC Student Award for Excellence と GEC Student-Poster Prizes という賞が設けられています。前者は口頭発表、後者はポスター発表が対象で、いずれも事前申請が必要となります(詳細は GEC の HP を参照)。特に、博士後期課程の学生さんのチャレンジに期待します。

会場となるポートランドですが、アメリカ太平洋岸北西部に位置する都市で、11 月でも過ごしやすい気候のようです。ポートランド国際空港からダウンタウンへはライトレールで簡単に移動でき、食事も美味しいとのです。利便性も高く、街歩きを楽しむこともできるのではないのでしょうか。

### 【重要日程】

- ・発表申込および予稿投稿の締め切り：  
2018 年 6 月 15 日 (米国東部夏時間)
- ・会議会期：2018 年 11 月 5-9 日

### 【会議ホームページ】

<http://apsgec.org/gec2018/>

## 行事案内

# 第 36 回プラズマプロセッシング研究会 (SPP36) 第 31 回プラズマ材料科学シンポジウム (SPSM31)

高知工科大学 八田 章光

第 36 回プラズマプロセッシング研究会と第 31 回プラズマ材料科学シンポジウムを合同で、2019 年 1 月 15 (火) ~17 (木)、高知で開催することとなりました。本来なら詳細までお知らせするべきところですが、経験のないメンバーが中心で現地の準備がはかどっていないため、これまでの準備状況についてご報告します。

プラズマプロセッシング研究会は基本的に毎年開催ですが、約 3 年毎に反応性プラズマの国際会議として、また 3 年毎にプラズマコンファレンスの一部として開催されています。前回のプラズマプロセッシング研究会は 2017 年 1 月に札幌で開催された第 34 回で、第 35 回は 2017 年 11 月にプラズマコンファレンス 2017 として姫路で開催されました。

プラズマプロセッシング研究会は、プラズマプロセスに関わる基礎科学、放電プラズマの生成や反応制御、薄膜・表面などの材料技術など広範な領域の研究者が、互いに境界を越えて成果発表や討論を行い、プラズマプロセスの課題解決や新しい可能性を探求する機会となっています。

プラズマ材料科学シンポジウムは、日本学術振興会プラズマ材料科学第 153 委員会が毎年主催する国内学会で今回が第 31 回となります。材料科学の視点でのプラズマ応用を、特に産学連携の推進を目的に開催されています。今回は札幌に引き続いての合同開催で、プラズマプロセス、プラズマ材料科学の重要な国内会議と位置づけられます。

さて私自身が前回 SPP に携わったのは 10 年前

の 2008 年 1 月に山口で開催された第 25 回でした。応用物理学会の中では同じ中国・四国支部に所属するものの、高知から山口へは日帰り往復ができないという地理的状况で、ほとんどお手伝いできなかったことを思い出します。当時、現地実行委員を確保するために、中国・四国支部で PE 分科会の会員を検索したところ、実はとても少なく寂しかったのですが、現在はもうすこし増えているのではないかと思います。今回、現地の実行委員として PE 分科会ではない応物会員や学内の材料研究でプラズマを使ったことのある先生方に広くお願いし、また、近いとは言えないですが隣の愛媛から神野先生の応援もお願いして準備に取りかかったところです。

日程について 1 月 14 (月) は休日、連休明けの 15 (火) から 17 (木) の 3 日間とし、週末のセンター試験までに 1 日空けました。会場は、高知城に隣接する高知城ホール (高知県教育会館) を予定しています。1 月は高知でもかなり寒い日もありますが、大政奉還から約 150 年、幕末から明治維新で活躍した志士たちの足跡に触れていただく機会にもなれば幸いです (志国高知幕末維新博~2019 年 1 月 31 日まで)。

発表申込および投稿の締切は 2018 年 10 月の中下旬となる見込です。詳細は今後、分科会のサーバーにホームページを立上げて、またメール等でも配信してお知らせします。多くの皆様にご参加いただきたく、まずは日程の確保を、できれば直前の連休も含めてお願いします。

## 行事案内

# 第 34 回電離気体現象国際会議／第 10 回反応性プラズマ国際会議 XXXVI International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXVI ICPIG) / 10<sup>th</sup> International Conference on Reactive Plasmas (ICRP10)

北海道大学 佐々木 浩一

このたび、2019 年 7 月 14-19 日の日程で、第 34 回電離気体現象国際会議を、第 10 回反応性プラズマ国際会議と合同で、札幌市教育文化会館(札幌市中心部)にて開催することになりました。プラズマエレクトロニクス分科会会員の皆様には、論文投稿および出席のご予定をいただきたく、お願い申し上げる次第です。

皆様ご承知のように、反応性プラズマ国際会議(ICRP)はプラズマエレクトロニクス分科会が運営する国際会議で、3 年に 1 度の頻度を目安として開催されています。直近の ICRP9 は、2015 年にホノルルにおいて、米国の気体エレクトロニクス会議との合同会議として開催され、本分科会からも多くの皆様に出席いただきました。毎年開催の国内会議であるプラズマプロセッシング研究会と並び、ICRP は本分科会にとって最も重要な行事に位置づけられると思います。

一方、電離気体現象国際会議(ICPIG)は、低温プラズマ関連の国際会議としては最も長い歴史と伝統を持ち、2 年に 1 度の頻度で主として欧州にて開催されています。これまでの 70 年近い歴史の中で欧州外での開催は 3 回しか無く、そのうちの 1 回は 2001 年に名古屋で開催された ICPIG でした。筆者と同年代の方々には、盛況に開催された名古屋 ICPIG をよく覚えておられると思います。

XXXVI ICPIG/ICRP10 の合同会議は、2019 年 7 月 14 日(日)夕刻のレセプションから開始し、7 月 19 日(金)の正午頃に終了する予定ですが、7 月

14 日(日)の午後および 20 日(土)には関連するサテライトワークショップを 5 件程度開催する予定で準備を進めています。このようなことから、この週に札幌に滞在すれば低温プラズマ研究の最前線がすべてわかるという会議になるものと思います。また、17 日(木)の午後にはエクスカージョンが企画され、18 日(金)夜のバンケットはサッポロビール園にてカジュアル形式で開催の予定です。本会議の会議録は、招待講演論文については PSST (Plasma Sources Science and Technology) および JJAP (Japanese Journal of Applied Physics) に分かれての掲載となり、一般投稿論文については、これまでの ICRP と同様に、JJAP にて特集号を発刊する予定です。一般論文の投稿締切は 2019 年 2 月 25 日の予定です。また、本合同会議に関わる情報は、随時、ホームページ

<http://icpig2019.qe.eng.hokudai.ac.jp/>

にてお知らせしますので、是非ご覧ください。

低温プラズマ分野の国際会議のキングとも言える ICPIG は、これまで他会議との合同開催の経験がありません。このような中であって、ICRP が ICPIG にとっての初の合同会議のパートナーに選ばれ、我が国において開催されることは非常に画期的なことであり、我が国の低温プラズマコミュニティの総力を結集して、この合同会議を成功させることが重要であると考えられます。プラズマエレクトロニクス分科会の会員各位のご協力をよろしくお願い申し上げます。

# 第 17 回プラズマエレクトロニクス賞受賞候補論文の募集

名城大学 平松 美根男

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、その著作者に「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。

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

## ■ 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、国際会議等で発表され、かつ 2016、2017、2018 年の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作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、応用物理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、国際会議等で発表され”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 (コピーでも可、第 1 ページに候補論文と朱書すること。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等のコピー (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 字程度わかりやすく記すこと。)

## ■ 表彰

2019 年応用物理学会春季学術講演会期間中に行います。受賞者には賞状および記念品を贈呈いたします。また 2019 年秋季学術講演会期間中 (例年では会期 2 日目) での記念講演を依頼する予定です。

## ■ 書類提出期限

2018 年 12 月 21 日 (金)

## ■ 書類提出先

〒113-0031 東京都文京区根津 1-21-5

応物会館

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

(封筒表に「プラズマエレクトロニクス賞応募」と朱書のこと。)

なお以下の賞規定もご参照下さい。

### プラズマエレクトロニクス賞規定

1. この規定は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表彰の対象論文とし、その著作者にたいして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（以後プラズマエレクトロニクス分科会と言う）が行う表彰について定める。
  2. この表彰を「プラズマエレクトロニクス賞」という。
  3. 表彰の対象論文は、原則として、プラズマエレクトロニクス分科会が主催する研究会、国際会議等で発表され、且つ募集期間から過去3年の間に国際的な学術刊行物に掲載された原著論文とする。
  4. 受賞者はプラズマエレクトロニクス分科会会員あるいは応用物理学会会員とする。
  5. 受賞者は公募に応じた自薦および他薦候補者から選考する。
  6. すでに公に顕著な賞を受けた論文は、プラズマエレクトロニクス賞の対象論文としない。
  7. 表彰は原則として毎年2件以内とする。
  8. 表彰は賞状授与および記念品贈呈とする。
  9. 表彰は毎年応用物理学会春季講演会において行う。
  10. プラズマエレクトロニクス分科会幹事会は、毎年11月までに授賞候補者募集要項を「プラズマエレクトロニクス分科会会報」および応用物理学会機関誌「応用物理」誌上に公表し、広く募集する。
  11. 受賞者の選考はプラズマエレクトロニクス分科会幹事長が委嘱した「プラズマエレクトロニクス賞」選考委員会が行う。
  12. 受賞者が決定したときは、「プラズマエレクトロニクス賞」選考委員会委員長が、プラズマエレクトロニクス分科会幹事会に選考の経過および結果を報告する。
  13. プラズマエレクトロニクス分科会幹事長は、選考の経過および結果を応用物理学会理事会に報告する。
  14. この賞の実施に関する必要な事項の審議および決定はプラズマエレクトロニクス分科会幹事会が行う。
  15. 本規定は、理事会の承認を経て改訂することができる。
- 付則：この規定は、平成14年4月1日より施行する。

## 2018(平成 30)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	平松 美根男	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: 052-838-2298 FAX: 052-832-1235	mnhrmt@meijo-u.ac.jp
副幹事長	赤塚 洋	東京工業大学 科学技術創成研究院 先導原子力研究所	〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1-N1-10 TEL: 03-5734-3379 FAX: 03-5734-3379	hakatsuk@nr.titech.ac.jp
副幹事長	古閑 一憲	九州大学大学院 システム情報科学研究院 電子デバイス工学部門	〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 TEL: 092-802-3734	koga@ed.kyushu-u.ac.jp
副幹事長	友久 伸吾	三菱電機(株) 先端技術総合研究所 SiC パワーデバイス技術部	〒661-8661 尼崎市塚口本町8-1-1 TEL: 06-6497-7082 FAX: 06-6497-7285	Tomohisa.Shingo@cw.Mitsubishi Electric.co.jp
幹事 任期 2019年3月	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 FAX: 076-294-6798	n.osawa@neptune.kanazawa- it.ac.jp
"	太田 貴之	名城大学 理工学部 電気電子工学科	〒468-850 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-501 TEL: 052-838-2565	tohta@meijo-u.ac.jp
"	黒木 智之	大阪府立大学 大学院工学研究科 機械系専攻	〒599-8531 堺市中区学園町1-1 TEL: 072-254-9233 FAX: 072-254-9233	kuroki@me.osakafu-u.ac.jp
"	篠原 正典	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: 0956-34-8478 FAX: 0956-34-8478	sinohara@sasebo.ac.jp
"	白井 直機	北海道大学大学院 工学研究院 量子理工学部門	〒060-8628 札幌市北区北13条西8 TEL: 011-706-6659 FAX: 011-706-7128	nshirai@qe.eng.hokudai.ac.jp
"	高橋 克幸	岩手大学理工学部 システム創成工学科 電気電子通信コース	〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5 TEL: 019-621-6460 FAX: 019-621-6941	ktaka@iwate-u.ac.jp
"	田中 学	九州大学大学院 工学研究院 化学工学部門	〒819-0395 福岡市西区元岡744 TEL: 092-802-2765 FAX: 092-802-2765	mtanaka@chem-eng.kyushu- u.ac.jp
"	内藤 皓貴	三菱電機(株) 先端技術総合研究所 環境システム技術部	〒661-8661 尼崎市塚口本町8-1-1 TEL: 06-6497-7069 FAX: 06-6497-7285	Naito.Teruki@bc.mitsubishielectr ic.co.jp
"	針谷 達	豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 プラズマエネルギーシステム研究室	〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1 TEL: 0532-44-6728 FAX: 0532-44-6728	harigai@ee.tut.ac.jp
"	柳生 義人	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: 0956-34-8478 FAX: 0956-34-8478	yyagy@y@sasebo.ac.jp
"	山家 清之	新潟大学大学院 自然科学研究科	〒950-2181 新潟市西区五十嵐二の町8050 TEL: 025-262-6140 FAX: 025-262-6730	yambe@eng.niigata-u.ac.jp
"	吉元 諒	サンディスク株式会社	〒512-8550 三重県四日市市山之一色町800 TEL: 059-330-3816 ext. 8817 FAX: 059-330-1117	ryo.yoshimoto@sandisk.com

幹事 任期 2020年3月	飯野 大輝	東芝メモリ株式会社	〒235-0017 神奈川県横浜市磯子区新磯子町 33 TEL: 050-3175-6200	daiki.iino@toshiba.co.jp
"	伊藤 剛仁	東京大学大学院 新領域創成科学研究科	〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5-504 TEL: 04-7136-3797 FAX 04-7136-3798	tsuyohito@plasma.k.u-tokyo.ac.jp
"	内田 諭	首都大学東京 システムデザイン研究科	〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL: 04-2677-2749 FAX 04-2677-2756	s-uchida@tmu.ac.jp
"	江藤 宗一郎	(株)日立製作所 研究開発グループ	〒185-8601 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-2 80 TEL: 050-3159-9219	soichiro.eto.tm@hitachi.com
"	呉 準席	大阪市立大学 工学研究科	〒545-8585 大阪市阿倍野区旭町1-4-3	jsoh@osaka-cu.ac.jp
"	大島 啓示	ソニー(株) 厚木T e c ・IDDプロセス設計2部開発2 課	〒243-0014 神奈川県厚木市旭町 4-14-1	Keiji.Ohshima@sony.com
"	近藤 博基	名古屋大学 大学院 工学研究科 電子 情報システム専攻 堀・関根研究室	〒464-8603 愛知県名古屋市中区不老町	hkondo@nagoya-u.jp
"	清水 一男	静岡大学イノベーション社会連携推進機 構	〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1 TEL: 05-3478-1443 FAX: 05-3478-1443	shimizu@cjr.shizuoka.ac.jp
"	鈴木 歩太	東京エレクトロンテクノロジーソリュー ションズ(株)	〒407-0192 山梨県韮崎市穂坂町三ツ沢 650 TEL: 05-5123-4228	ayuta.suzuki@tel.com
"	高島 圭介	東北大学電子工学専攻・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	takashima@ecei.tohoku.ac.jp
"	光木 文秋	熊本大学 大学院自然科学研究科環境エ レクトロニクス研究室	〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2 丁目 39-1 黒髪南キャンパス総合研究棟 TEL: 096-342-3572 FAX: 096-342-3572	mitsugi@cs.kumamoto-u.ac.jp
"	向笠 忍	愛媛大学 理工学研究科・生産環境工学 専攻・熱及び物質移動学研究室	〒790-8577 愛媛県松山市文京町3	mukasa.shinobu.me@ehime-u.ac.jp
"	山田 英明	産業技術総合研究所 関西センター	〒563-8577 大阪府池田市緑丘 1 丁目 8 番 31 号 TEL: 072-751-9631 FAX: 072-751-9631	yamada-diamond@aist.go.jp

## 2018(平成30)年度分科会幹事役割分担

役割分担	新任		留任	
幹事長	平松 美根男	名城大学		
副幹事長	赤塚 洋	東京工業大学		
	古閑 一憲	九州大学		
	友久 伸吾	三菱電機		
1. 庶務・分科会ミーティング	内田 諭	首都大学東京	高橋 克幸	岩手大学
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	古閑 一憲	九州大学		
	山田 英明	産業技術総合研究所	赤塚 洋	東京工業大学
	呉 準席	大阪市立大学	太田 貴之	名城大学
	近藤 博基	名古屋大学	柳生 義人	佐世保工業高等専門学校
	飯野 大輝	東芝メモリ	吉元 諒	SanDisk
3. プラズマプロセス研究会  H30 年度：SPP H31 年度：ICRP/ICPIG	赤塚 洋	東京工業大学	針谷 達	豊橋技術科学大学
	伊藤 剛仁	東京大学	大澤 直樹	金沢工業大学
	呉 準席	大阪市立大学	黒木 智之	大阪府立大学
	清水 一男	静岡大学	篠原 正典	長崎大学
	向笠 忍	愛媛大学	白井 直樹	北海道大学
			田中 学	九州大学
4. 光源物性とその応用研究会				
5. プラズマ新領域研究会	古閑 一憲	九州大学		
	光木 文秋	熊本大学	白井 直樹	北海道大学
	伊藤 剛仁	東京大学	柳生 義人	佐世保工業高等専門学校
	清水 一男	静岡大学	山家 清之	新潟大学
6. インキュベーションホール	赤塚 洋	東京工業大学		
	内田 諭	首都大学東京	太田 貴之	名城大学
	鈴木 歩太	東京エレクトロンテクノロジーソリューションズ	篠原 正典	長崎大学
	高橋 圭介	東北大学	高橋 克幸	岩手大学
	近藤 博基	名古屋大学	針谷 達	豊橋技術科学大学
7. プラズマエレクトロニクス講習会	友久 真吾	三菱電機		
	山田 英明	産業技術総合研究所	赤塚 洋	東京工業大学
	飯野 大輝	東芝メモリ	大澤 直樹	金沢工業大学
	大島 啓示	ソニーセミコンダクタソリューションズ	内藤 皓貴	三菱電機
	鈴木 歩太	東京エレクトロンテクノロジーソリューションズ	吉元 諒	SanDisk
	江藤 宗一郎	日立製作所		
8. 会誌編集・書記	向笠 忍	愛媛大学	内藤 皓貴	三菱電機
	大島 啓示	ソニーセミコンダクタソリューションズ	山家 清之	新潟大学
9. ホームページ	高島 圭介	東北大学	白井 直樹	北海道大学
10. 会計	光木 文秋	熊本大学	黒木 智之	大阪府立大学
11. プラズマエレクトロニクス賞	平松 美根男	名城大学		
12. アカデミックロードマップ (戦略企画室)	古閑 一憲	九州大学		
	平松 美根男	名城大学		
13. PE 懇親会 秋：名古屋、春：東京	江藤 宗一郎	日立製作所	田中 学	九州大学
	呉 準席	大阪市立大学	針谷 達	豊橋技術科学大学
GEC 委員 (オブザーバー)	枋久保 文嘉	首都大学東京		

## 2018（平成30）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 酒井 道 (滋賀県立大)
  - 8.1 プラズマ生成・診断 富田 健太郎 (九大)
  - 8.2 プラズマ成膜・エッチング・表面処理 竹中 弘祐 (阪大)
  - 木村 光広 (東芝メモリ)
  - 8.3 プラズマナノテクノロジー 古閑 一憲 (九大)
  - 8.4 プラズマライフサイエンス 神野 雅文 (愛媛大)
  - 8.5 プラズマ現象・新応用・融合分野 白井 直機 (北大)
  - 8.6 Plasma Electronics English Session 酒井 道 (滋賀県立大)
2. 応用物理学会理事 辰巳 哲也 (ソニーセミコンダクタソリューションズ)
3. 応用物理学会代議員  
(分科会推薦, 各支部推薦等)
  - 板垣 奈穂 (九大)
  - 伊藤 昌文 (名城大)
  - 古閑 一憲 (九大)
  - 霜垣 幸浩 (東大)
  - 辰巳 哲也 (ソニーセミコンダクタソリューションズ)
  - 本村 英樹 (愛媛大)
4. GEC 組織委員会委員 朽久保 文嘉(11月より) (首都大)
5. 応用物理学会本部委員会
  - 会員サービス委員会 高井 まどか (東大)
  - 機関誌企画・編集委員会 伊藤 剛仁 (東大)
  - 論文誌企画・編集委員会 木下 啓藏 (PETRA)
  - 栗原 一彰 (東芝研究開発センター)
  - 伊藤 剛仁 (東大)
  - 講演会企画・運営委員会 酒井 道 (滋賀県立大)
  - 倫理委員会 辰巳 哲也 (ソニーセミコンダクタソリューションズ)
6. フェロー  
(受賞時の所属で記載。元分科会会員を含む。)
  - 大森 達夫 (三菱電機)
  - 岡本 幸雄 (東洋大)
  - 小田 俊理 (東工大)
  - 斧 高一 (京大)
  - 河野 明廣 (名大)
  - 近藤 道雄 (産総研)
  - 寒川 誠二 (東北大)
  - 白谷 正治 (九大)
  - 菅井 秀郎 (名大)
  - 橘 邦英 (京大)
  - 辰巳 哲也 (ソニーセミコンダクタソリューションズ)
  - 寺嶋 和夫 (東大)
  - 永津 雅章 (静大)
  - 中山 喜萬 (阪大)
  - 庭野 道夫 (東北大)
  - 畠山 力三 (東北大)
  - 藤山 寛 (長崎大)
  - 堀 勝 (名大)

真壁 利明	(慶大)
渡辺 征夫	(九州電気専門学校)
平松 美根男	(名城大)
木下 啓藏	(PETRA)

本リストは、応用物理学会の各種委員会等で活躍されている PE 分科会会員を記したのですが、一部を除き、分科会が直接に委員推薦等に関与しているわけではないため、記載漏れがあるかもしれません。記載漏れにお気づきの場合は、会誌担当幹事までお知らせ頂けると幸いです。

## 活動報告

### 2017年度 第3回プラズマエレクトロニクス分科 会幹事会 議事録

開催日時：2018年3月19日(月) 12:30～13:30

開催場所：早稲田大学 C204 会場

進行：朽久保幹事長（首都大）

本幹事会は、第16回プラズマエレクトロニクス  
賞授賞式および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. 応用物理学会（早稲田大学・2018.3）シンポジ ウムなどの状況

神原副幹事長（東大）から春季講演会シンポ  
ジウムの状況について報告があった。

#### 2. 応用物理学会（早稲田大学・2018.3）チュート リアルの状況

神原副幹事長（東大）から春季講演会チュ  
ートリアルについて報告があった。

#### 3. 2018年度秋季学術講演会・シンポジウム企画 など

神原副幹事長（東大）から2018年度秋季  
応用物理学会シンポジウム案として「プラズマ・  
インフォマティクス（阪大 浜口先生）」が提案  
され、承認された。

#### 4. 第28回プラズマエレクトロニクス講習会

林副幹事長（東芝メモリ）から会議報告があ  
った。参加者は75名で、企業からの参加者が  
9割を占めたと報告があった。

#### 5. 第26回・第27回・第28回プラズマ新領域研 究会報告

平松副幹事長（名城大）から平成29年度に  
開催されたプラズマ新領域研究会について報  
告があった。

#### 6. Plasma Conference 2017 報告

平松副幹事長（名城大）から昨年11月20日  
から24日に開催された Plasma Conference  
の報告があった。参加者は917名。次回以降  
のあり方については今後プラズマ科学連合運  
営委員会で検討する旨が説明された。

#### 7. SPP36の準備状況

八田先生（高知工科大）より2019年1月15  
日から17日に開催される SPP36/SPSM31 の  
準備状況について報告があった。

#### 8. ICRP-10/ICPIG2019の準備状況、及びICRP Awardについて

朽久保幹事長（首都大）から2019年1月15  
日から17日に開催される ICRP-  
10/ICPIG2019 の準備状況と ICRP で制定を  
予定する賞名称について報告があった。

#### 9. 会報について

内藤幹事（三菱電機）から目次案が提案され、  
承認された。

#### 10. 2017年度 会計報告

王幹事（大阪府大）から2017年度の分科  
会決算について報告があり、承認された。

#### 11. 関連会議 実施報告・開催予定

各先生方から、関連会議の実施報告および開  
催予定について説明がなされた。

## 12. 2018年度 分科会新幹事について

朽久保幹事長（首都大）から分科会新幹事の紹介があった。

2018年度第1回目の幹事会は4月の新旧幹事会（2018年4月14日、東工大）にて実施予定。

（記：内藤 皓貴（三菱電機））

## 2018年度 第1回プラズマエレクトロニクス分科会幹事会 議事録

開催日時：2018年4月14日（月）13:30～16:40

開催場所：東京工業大学 田町キャンパスキャンパスイノベーションセンター2階（多目的室2）

進行：平松幹事長（名城大）

### 1. 幹事紹介・挨拶

朽久保前幹事長（首都大）、平松幹事長（名城大）および出席した新旧幹事より挨拶がなされた。

### 2. 役割紹介

平松幹事長（名城大）より各幹事の役割が提案され、承認された。

### 3. 応用物理学会（早稲田大学・2018.3）シンポジウムなど

神原前副幹事長（東大）からシンポジウムを含む春季講演会の概要について報告があった。応用中心に企画した結果、企業からの参加が多く盛況だったと説明された。

### 4. 応用物理学会（名古屋国際会議場・2019.9）について

古閑副幹事長（九大）から、名大より秋季講演会のシンポジウム一般化公開の依頼があった旨の報告があった。議論の結果、公開化には

内容を一般向けに変更するなど懸念があることから、今後関係者間で要協議する。

### 5. プラズマ新領域研究会について

平松幹事長（名城大）より、プラズマ新領域研究会の概要について説明があった。

### 6. 第12回インキュベーションホール（2018.9）について

針谷幹事（豊橋技大）から第12回インキュベーションホールの準備状況について報告があった。開催日時は2018年9月3日から5日で、例年同様御殿場にて行う予定。なお、本年度から研究活性化支援金による支援なし。

### 7. 第29回プラズマエレクトロニクス講習会について

友久副幹事長（三菱電機）から第29回プラズマエレクトロニクス講習会の実施案について報告があった。開催は例年同様11月頃、東京近郊で行う予定。

### 8. 第36回プラズマプロセッシング研究会について

呉幹事（大阪市大）からSPP36の準備状況と会場について報告があった。

### 9. 会報について

内藤幹事（三菱電機）から会報No. 68の準備状況について報告が行われた。

### 10. その他

特になし

### 11. 新旧幹事による引継ぎ

各担当による引継ぎ作業が行われた。

2018年度第2回目の幹事会は、9月の応用物理学学会（於：2018.9.18-9.21、名古屋国際会議場（愛知県名古屋市））会期中にて実施のインフォーマルミーティング内で執り行う予定。

（記：内藤 皓貴（三菱電機））

## プラズマエレクトロニクス関連会議日程

(国際会議)

**2018. 6.24-28**

The 45th IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS 2018)

Denver, USA

<http://www.icops2018.org/>

**2018. 7. 1-6**

EPS 45th Conference on Plasma Physics 2018

Prague, Czech

<https://www.eli-beams.eu/en/media/events/eps-conference-plasma-physics-2018/>

**2018. 7. 17-21**

24th Europhysics Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases (ESCAMPIG)

Glasgow, UK

<https://www.gla.ac.uk/schools/physics/research/groups/astro2/escampig/>

**2018. 8. 5-10**

2018 Gordon Research Conference on Plasma Processing Science

Smithfield, USA

<https://www.grc.org/plasma-processing-science-conference/2018/>

**2018. 9. 2-7**

22nd International Conference on Gas Discharges and their Applications (GD2018)

Novi Sad, Serbia

<http://gd2018.ipb.ac.rs/>

**2018. 9. 2-7**

The 16th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry

(HaKone XVI)

Beijing, China

<http://hakone.csp.escience.cn>

**2018. 10. 21-26**

AVS 65th International Symposium & Exhibition

Long Beach, USA

<https://www.avs.org/Symposium>

**2018. 11. 5-9**

60th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics Co-Located with the 71st Annual Gaseous Electronics Conference

Portland, USA

<https://www.aps.org/meetings/meeting.cfm?name=DPPGEC18>

**2018. 11. 11-16**

2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP 2018)

Kanazawa, Japan

<http://aappsdp.org/AAPPSDPPF/>

**2018. 11. 13-15**

The 40th International Symposium on Dry Process (DPS2018)

Nagoya, Japan

<http://www.dry-process.org/2018/>

**2018. 11. 25-30**

2018 Material Research Society (MRS) Fall Meeting and Exhibit)

Boston, USA

<https://www.mrs.org/fall2018/>

**2019. 2. 3-8**

European Winter Conference on Plasma Spectrochemistry 2019

Pau, France

<http://www.winterplasma2019.com/index.php>

**2019. 7. 14-19**

34th International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG2019)/10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP10)

Sapporo, Japan

<http://icpig2019.qe.eng.hokudai.ac.jp/>

(国内会議・会合)

**2018. 9. 4-5**

電気学会 平成 30 年基礎・材料・共通部門大会

イーグレひめじ、兵庫県

<http://www.iee.jp/fms/>

**2018. 9. 9-12**

日本物理学会第 73 回秋季大会

同志社大学 京田辺キャンパス、京都府

<http://www.jps.or.jp/activities/meetings/index.php>

**2018. 9. 18-21**

第 79 回応用物理学会秋季学術講演会

名古屋国際会議場、愛知県

<https://www.jsap.or.jp/index.html>

## 広告掲載企業一覧

### 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ご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](mailto:divisions@jsap.or.jp)

HP: <https://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.68 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朽久保前幹事長と就任されました平松幹事長からそれぞれご挨拶を頂きました。

寄稿は滋賀県立大学の酒井道先生から、2017年に滋賀県立大学に「地域ひと・モノ・未来情報研究センター」が設立されたことを記念して『ICTと地域課題とプラズマエレクトロニクスと』という題目で寄稿頂き、プラズマエレクトロニクスが包摂する多様性と ICT の関係性、および ICT についてはプラズマと地域課題の関係性についてご紹介頂きました。

第 16 回プラズマエレクトロニクス賞を受賞された北海道大学の西山修輔先生および九州大学の富田健太郎先生に原稿をお寄せいただき、受賞論文について明快にご紹介頂きました。

研究室紹介コーナーでは、岐阜大学の上坂裕之先生に上坂・古木研究室の様子をご紹介頂きました。大学・研究室の雰囲気及び研究内容について分かり易く紹介されており、興味深く読んでいただけるとは思いませんか。

学生のためのページでは東京工業大学の野崎智洋先生より『触媒反応の基礎』と題し、プラズマが介在する触媒反応についてカーボンナノチューブ合成や野崎先生らが行われている  $\text{CH}_4$  改質反応を例として、分かりやすく紹介頂きました。

海外の研究事情では、三菱電機の生沼学様にアメリカのミネソタ大学滞在記として、客員研究員として滞在された High Temperature and Plasma Laboratory の研究内容やミネソタでの生

活についてご紹介頂きました。企業研究員からみた日米の違いなど面白い内容かと思えます。

優れた研究を紹介する欄では、応用物理学会講演奨励賞をされた室蘭工業大学の川口悟様および高橋一弘先生に受賞対象研究を解説頂きました。

最後に、本号の原稿執筆を快く引き受けくださいました著者の皆様、幹事長、副幹事長をはじめとする分科会会員の皆様及び応用物理学会事務局分科会担当の小田様にこの場をお借りして感謝の意を表します。本号を発行することができましたもの、ひとえに皆様のお力添えが有ったことと存じます。心より御礼申し上げます。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。

(平成 30 年度会報編集担当：

内藤、山家、大島、向笠)

プラズマエレクトロニクス分科会会報 No.68  
2018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 平松 美根男  
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  
(©2018 無断転載を禁ず)