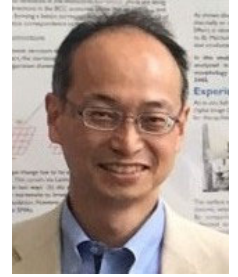


わたしたちの研究 (14) 推進工学研究室

江利口浩二 (H1/1989卒)



1. 自己紹介～再び京都大学にお世話になるまで～

私は昭和60年4月に本学工学部機械系学科に入学し、平成元年に工学部物理工学科を卒業、平成3年(1991年)に本学大学院工学研究科物理工学専攻を修了しました。卒業論文、修士論文は物理工学専攻物性分工学研究室の藤本孝先生にご指導いただきました。当時の研究室には、吉田キャンパス本部構内以外に北部構内に実験室(プラズマ実験棟)があり、私はプラズマ実験棟でWT-IIIトカマクプラズマ中の水素や不純物元素の分光計測手法[1]を学びました。藤本孝先生はじめ、研究チーム内では末満英俊先生、当時研究チームの先輩だった現信州大学の澤田圭司先生にも大変お世話になりました。修士課程修了後は、松下電器産業株式会社(現パナソニック株式会社)に入社しました。大阪府守口市にあった半導体研究センターに配属され、「プラズマ」という縁もあり、当時(1990年頃)日本が世界を席巻していた大規模シリコン半導体集積回路の製造工程の1つであるプラズマ加工の開発を担当しました。グロー放電領域に属する低温プラズマを用いれば、大規模集積回路製造に必須の超微細加工が実現されます。いわゆるナノテクノロジーでは、最小加工寸法は入社当時0.5 μm でしたが、昨今話題となっている最先端半導体デバイスの加工では10 nm以下にまで進化しています。

その後、次世代のプラズマ加工技術を開発する中で、プラズマ加工を経たデバイス材料(特に絶縁膜)の特性劣化が問題となり、絶縁膜の経時的破壊現象を明らかにして劣化を防止するプラズマ源の開発に携わりました。環境にも恵まれ、この頃から学会・論文発表[2-4]の機会が増え、藤本孝先生に再びご指導いただき、平成16年1月に学位を取得しました。平成17年には、富山県魚津市にある工場で、最小加工寸法65 nmの大規模集積回路の量産化を経験しました。それら集積回路の信頼性に関わっていたこともあり、それら集積回路が搭載されたブルーレイレコーダー(ディーガ:DIGA)は高価でしたが購入しました。現在も自宅で問題なく動作しており、開発・信頼性の責任者として安堵しています。量産化を経験後、縁があって、平成17年7月に本学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻の現在の研究室に助教授として採用されました。当時、教授として研究室を運営されていた斧高

一先生(2016年3月に定年退職されました)には大変お世話になりました。

2. 京都大学着任後～プラズマと固体との相互作用の研究～

私が学生の頃は、航空宇宙工学専攻とは縁がなかったのですが、現在の研究室でプラズマ応用をテーマとした研究を進めることになりました。当時の推進工学研究室は、居室は吉田キャンパスに、実験室は宇治キャンパスにありました(図1)。

この時に、初めて宇治キャンパスの詳細を知ることになりました。建物(超空気が学実験室)は私と同じくらいの「年齢」で古く、様々な小動物が実験室に現れることもありま



図1 宇治キャンパス内にある航空宇宙工学専攻超空気が学実験室の外観(左)と実験室(右)

した(現在も現れます)。推進工学研究室では、斧高一先生とともに、プラズマと固体との相互作用の基礎的理解や電気推進器の高信頼性化に関する基礎研究をはじめました。現在プラズマは様々な分野で利用されています。多くの場合、何らかの容器(チャンバー)内で放電が行われ、プラズマ自身は固体壁と接します。低温プラズマと固体壁との相互作用を人工的に所望の反応系に設計・制御することで、前述のナノスケールの超微細加工が実現されます。例えば小惑星探査機「はやぶさ」などに搭載されているイオンエンジンは低温プラズマを利用した電気推進器に分類されます。容器壁やイオン加速電極はプラズマと接することで損耗し、推進器信頼性を制約します。一方で、宇宙産業分野では高信頼性を目的とした人工衛星の超小型化が着目されています。超微細加工に代表されるプラズマ応用とナノテクノロジーをうまく応用展開することで、これらの要望に応えることができるという考えのもと、研究を進めています。斧高一先生が定年退職された後、2016年7月から現在の立場で研究室を運営しております。2022年2月時点で研究室には、占部継一郎助教(2018年4月～、図2)と松本雅子秘書(非常勤)のスタッフと、博士後期課程4名(含:社会人1名)、修士課程6名、学部4年生4名が在籍しています。学生諸君は、桂キャ

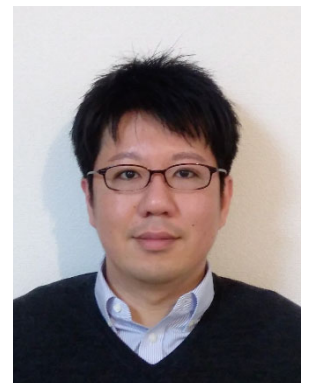


図2 占部継一郎助教

ンパスと宇治キャンパスを往来しながら研究活動を行っています。教員は、講義は吉田キャンパスと桂キャンパス、実験は桂キャンパスと宇治キャンパスという状況で、どこかで忘れ物をすると大変です。

現在のわれわれの研究テーマは大きく分けて以下の3つです。

(1) プラズマと固体との物理的・化学的相互作用に関する研究

例えば、セラミック材のような絶縁体材料がプラズマと接するとその絶縁特性が劣化します。そもそもの要因は、絶縁体材料中に形成される局所的な電子状態が想定外となった構造(欠陥)です。大規模集積回路製造でこの欠陥形成機構はプラズマダメージと呼ばれています[5]。プラズマダメージには電氣的、物理的、光学的相互作用の3つのメカニズムがあります。絶縁体材料であれば、トンネル電流や微分電気容量を指標にして、そのメカニズム理解に迫ることができます。半導体材料も同様で、電氣的インピーダンスを指標にすることができます。図3で示す誘導結合型プラズマやマイクロ波プラズマを用いて、照射するイオンのエネルギー

およびフラックスを制御し、絶縁体や半導体材料表面近傍数nmに形成される改質層(ダメージ層)を種々の手法(図4)で解析し、

そのメカニズムの解明を目指してきました。これまで、微分電気容量解析などにより、イオンの入射エネルギー効果が従来の理解と異なること[6]やガス種やフラックス効果を明らかにしてきました[7]。

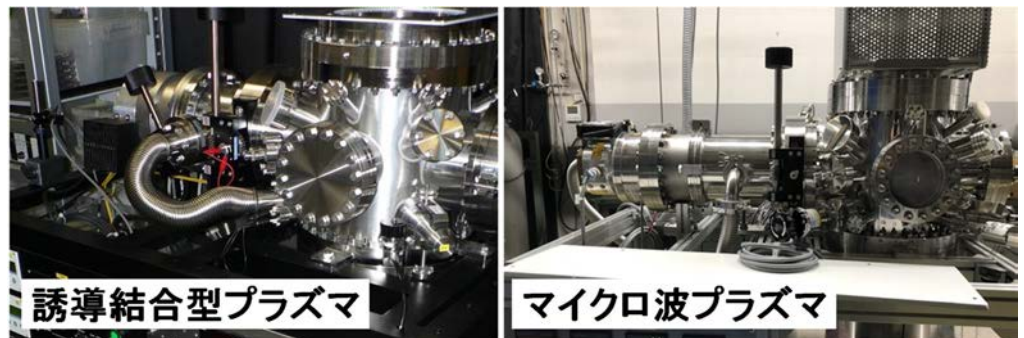


図3 当研究室で大活躍の2つのプラズマ発生装置

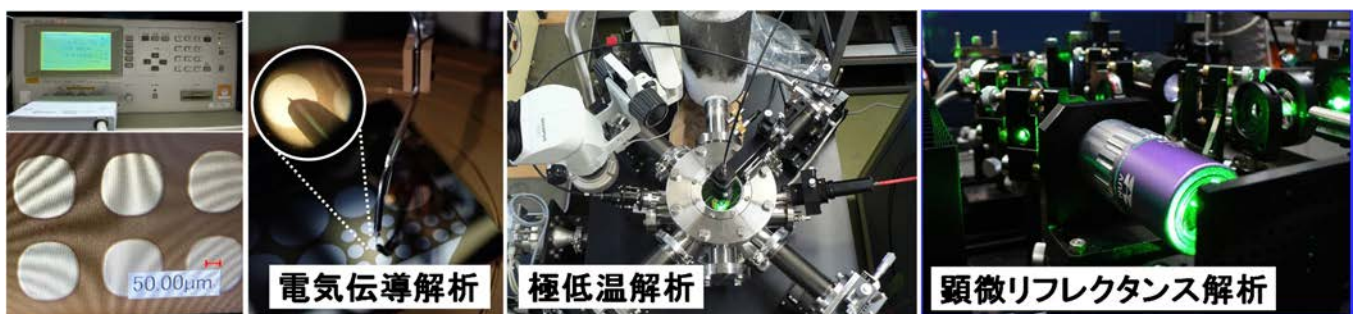


図4 当研究室内で用いているプラズマ曝露表面解析システムの一例

半導体材料中に形成されるダメージ層(欠陥層)に対して、製造工程でのモニタリングモデルを構築しました[8]。このモデルは、現在のスマートフォンに搭載されているCMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)イメージセンサーの製造工程管理モデルとして利用されています。また、分子動力学法を用いたシミュレーションから、材料中の欠陥形成機構には、従来の統計的モデルに加え確率的散乱モデルを取り入れる重要性を指摘しました[9]。この予測は、最先端のCPU(Central Processing Unit)の心臓部にも欠陥が存在していることを示唆します。その後、CMOSイメージセンサーを駆使した大規模解析により、この確率的散乱機構による欠陥形成を明らかにしました[10]。これらの成果は、学生諸君の日々の努力、共同研究先との協力体制によるものであります。

一方で、イオンエンジンで問題となるプラズマと固体との相互作用に、イオン引き出し加速電極(金属材料)の損耗があります。加速電極に形成された貫通孔の形状はイオンエンジン動作時間とともに徐々に変化することが知られています。それはイオンが金属電極に衝突することで、金属元素がはじき出される「スパッタリング」という現象です。貫通孔の形状変化はプラズマ源から放出されるイオンの軌道を変化させ、結果として推進力、すなわち推進性能を劣化させます。また、はじき出された粒子が推進器内部に再付着することで、電氣的短絡を誘発し、動作不良に至ります。図5

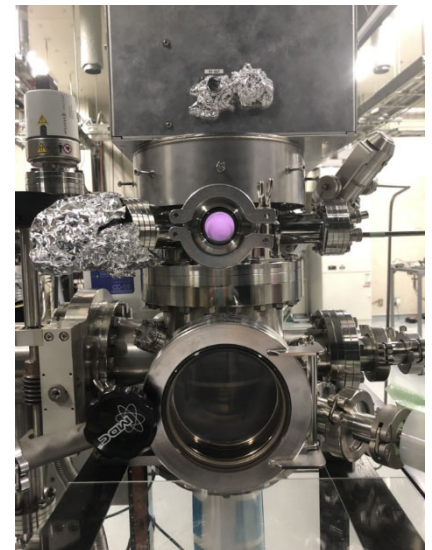


図5 電気推進器用
イオン照射実験機

で示すイオンエンジンの吹き出し方向を鉛直方向に配置した実験装置を用いて、加速電極の損耗機構やイオン軌道の空間分布を明らかにする研究を進めています。これらのプロセスを経て、宇宙推進工学、特に電気推進器の高信頼性化に関する基礎研究に役立てたいと思っています。

(2) 次世代のプラズマ計測に関する研究

プラズマからのイオンを中心とする粒子輸送や電荷蓄積については、被照射体の情報からその機構を知る以外に、直接粒子輸送を捉える方法が必要となります。占部継一郎助教が中心となって、レーザー誘起蛍光法(Laser Induced Fluorescence: LIF)を用いた粒子数密度の空間分布や蛍光スペクトルのドップラー広がりから、イオンの速度を計測する方法の確立に取り組んでいます。Arプラ

ズマ中の準安定Arイオンをターゲットに、電子サイクロトロン共鳴型プラズマ中での空間分布の評価ができるようになりました。また、サブミリ秒でのLIF蛍光信号の取得にも成功しています。現在、この手法はイオンエンジンからのプルーム解析に適用できるのか？について検討しています。占部継一郎助教の研究内容については、別の機会に紹介できればと思っています。

(3) 極限環境に耐えうる新しい材料創製に関する研究

プラズマによる材料表面の改質や損耗機構の解明(プラズマダメージ)に取り組む過程で、プラズマ耐性の高い材料ができないか？という考えに至りました。京都大学に着任してから5年ほど経った頃、日本真空協会(現日本表面真空学会)の幹事を担当している中で、トライボロジー分野の研究者の方々と接する機会ができました。その中で、切削工具のハードコーティング膜として窒化ホウ素(BN)膜

が研究されてきた、という話を聞きました。BN膜は物理的・化学的に安定であり、宇宙推進器(ホールスラスタ)の内壁材としても注目されている材料です。図6で示すようにⅢ族元素のBとⅤ族元素のNからなるBN膜には、ダイヤモンドやグラファイトにそれぞれ対応する立方晶BN(sp^3 結合)や六方晶BN(sp^2 結合)が存在

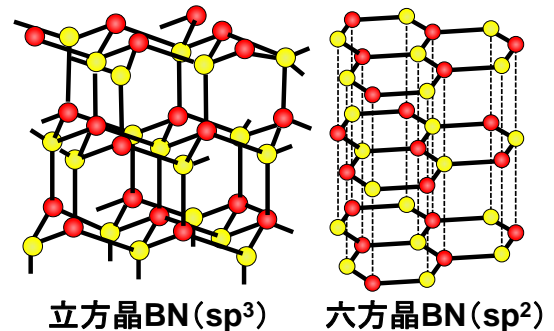


図6 窒化ホウ素の典型的な結晶構造

し、幅広い応用が期待されています。トライボロジー分野では超高硬度を実現する立方晶BNの研究が進められてきました。立方晶BN形成の最大課題は母材からの膜の剥離です。これを克服できれば、という(素人の安易な)気持ちで、BN膜をわれわれのプラズマ技術により作製することを目指しました。桂キャンパスへの移転のタイミングで、プラズマプロセスチャンバーを新設しました。桂キャンパスの実験室に磁場閉じ込め型アーク放電を応用したBN成膜チャンバーを設計しました(図7)。下部チャンバーでは電子ビームを用いてホウ素を蒸発させ、一方で上部チャンバーではArと N_2 からなる磁場閉じ込め型プラズマを形成します。ホウ素と窒素を反

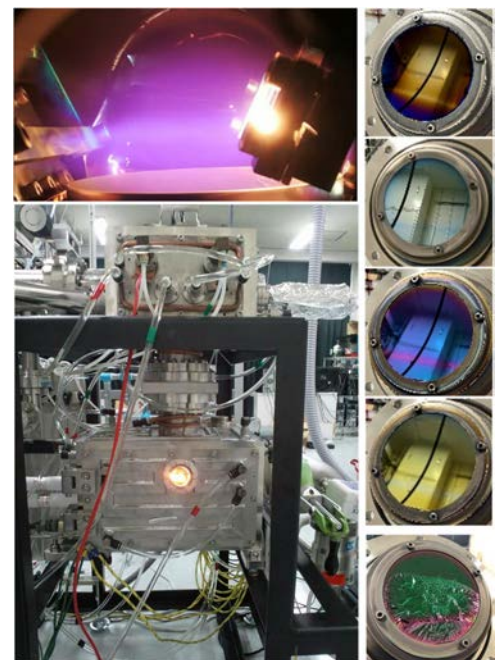


図7 BN成膜プラズマ源(左上)、装置(左下)と成膜例(右)

応させながらArイオン照射によるエネルギー移送を利用して、母材(単結晶シリコンウエハ)にBN膜を形成するコンセプトです。我々はこの手法を反応性プラズマ支援成膜法(Reactive Plasma-Assisted Coating: RePAC)と命名しています。装置の自作から様々なトラブルを経験しながら、最初の安定成膜まで約2年かかりました。やってみるとこれが難しいことがわかりました。過去からの教訓通り、剥離の問題に苦労しました(図7右下の写真)。その後、学生諸君のがんばりもあって、イオンエネルギー(~200 eV)のみならず、イオンフラックスを制御することで様々なBN膜が形成できることがわかりました[11]。現在、大まかなプロセス設計指針は得られています。BN膜のプラズマ耐性を調べるために、RePACで作製したBN膜を再びプラズマ曝露すると、膜厚に依存した剥離の問題を除けば、BN膜は物理的に安定であることが実験で明らかになってきました[12]。今後は剥離の制御とsp²/sp³結合の制御を目指し、プラズマ曝露環境下で耐久性の高いBN膜の実現を進めるつもりです。

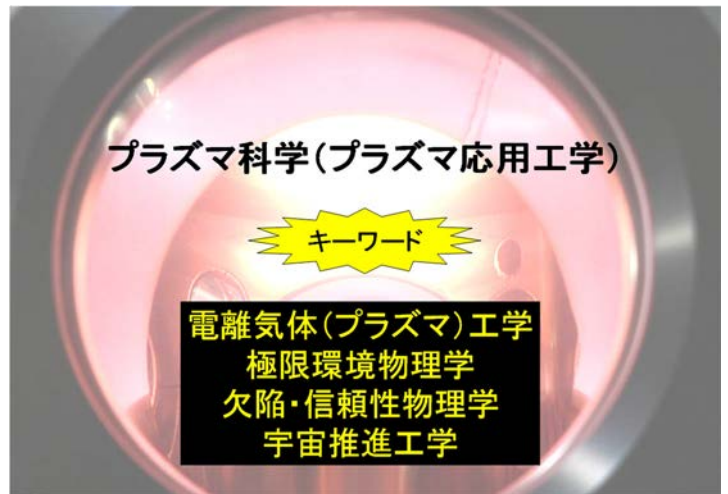


図8 わたしたちの研究分野

上記のように、現在のわたしたちの研究は、極限環境物理学、欠陥・信頼性物理学、宇宙推進工学を基軸とするものです(図8)。

3. おわりに

「わたしたちの研究」、という題目で私の自己紹介と現在に研究テーマについて書かせていただきました。前職では約15年間、プラズマ加工からはじまり、プラズマダメージ(固体との相互作用)の研究、そして薄膜の信頼性劣化現象の研究に携わりました。ここでは省略しましたが、私の学位論文の一部は、本学在学中に講義で学んだ金属疲労モデル(線形マイナー則)を利用した絶縁膜の電氣的絶縁破壊モデルの構築[2]です。当時、二酸化シリコン膜(SiO₂)の絶縁破壊寿命評価には、定電圧印加ストレスモードと定電流注入ストレスモードが存在し、開発現場ではそれぞれ独立に評価・解析を行っていました。時々算定した寿命が矛盾する結果に遭遇しているうちに、ふと線形マイナー則をヒントに、劣化現象を欠陥形

成に置き換えれば本質的に同等であることに気づきました。意外なところに繋がりを感ずることができました。また、SiO₂膜の信頼性劣化を支配する要素の1つに膜中の水素の輸送があります。学生時代にプラズマ～固体壁境界領域での水素の運動をプラズマ診断の対象としていましたが、企業ではSiO₂/Si界面近傍での水素の輸送と信頼性寿命の関係を対象とした研究をすすめました[3]。BN膜の剥離においても、プラズマ中の水素が原因の1つであることがわかりました。さらに、BN膜の研究開発では、トライボロジー分野でもご活躍のマイクロエンジニアリング専攻の松原厚先生とお話する機会が増え、また、ナノテクノロジーの経験を活かした形でトライボロジー分野の学会で発表することもできました[12]。材料中の電子状態の変化を電氣的に捉える取り組みに加え、最近では、超微小押し込み硬さ試験(ナノインデンテーション)を用いた機械特性変化にも興味を持っています。大学卒業後、企業の研究所、量産工場、そしてアカデミアに戻ってきてから、多くの皆さんのお力添えで楽しく研究活動をさせていただいています。その中で、これまで学んだことが意外な場面で役に立ち、これまでの人脈が意外な場面で背中を押してくれるものだ、というありがたい経験も得ました。今後は立場を変えて、学生をはじめ、まわりに将来に生きる何かを伝えたいと思っています。この度はこのような貴重な機会をいただきましたことに感謝申し上げます。

参考文献

- [1] "Hydrogen-atom spectroscopy of the ionizing plasma containing molecular hydrogen: Line intensities and ionization rate," K. Sawada, K. Eriguchi, and T. Fujimoto, J. Appl. Phys. 73, 8122 (1993).
- [2] "New method for lifetime evaluation of gate oxide damaged by plasma processing," K. Eriguchi and Y. Uraoka, IEEE Electron Device Lett. 16, 187 (1995).
- [3] "Temperature and stress polarity-dependent dielectric breakdown in ultrathin gate oxides," K. Eriguchi and M. Niwa, Appl. Phys. Lett. 73, 1985 (1998).
- [4] "Effects of strained layer near SiO₂-Si interface on electrical characteristics of ultrathin gate oxides," K. Eriguchi, Y. Harada, and M. Niwa, J. Appl. Phys. 87, 1990 (2000).
- [5] "Modeling of defect generation during plasma etching and its impact on electronic device performance- plasma-induced damage," K. Eriguchi, J. Phys. D 50, 333001 (2017).
- [6] "Model for bias frequency effects on plasma-damaged layer formation in Si substrates," K. Eriguchi, Y. Nakakubo, A. Matsuda, Y. Takao, and K. Ono, Jpn.

- J. Appl. Phys. 49, 056203 (2010).
- [7] "Investigation of spatial and energy profiles of plasma process-induced latent defects in Si substrate using capacitance–voltage characteristics," T. Hamano, K. Urabe, and K. Eriguchi, J. Phys. D 52, 455102 (2019).
- [8] "Modeling of ion-bombardment damage on Si surfaces for in-line analysis," A. Matsuda, Y. Nakakubo, Y. Takao, K. Eriguchi, and K. Ono, Thin Solid Films 518, 3481 (2010).
- [9] "Effects of straggling of incident ions on plasma-induced damage creation in "fin"-type field-effect transistors," K. Eriguchi, A. Matsuda, Y. Takao, and K. Ono, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 03DE02 (2014).
- [10] "Evaluation of residual defects created by plasma exposure of Si substrates using vertical and lateral pn junctions," Y. Sato, S. Shibata, K. Urabe, and K. Eriguchi, J. Vac. Sci. Technol. B 38, 012205 (2020).
- [11] "Spectroscopic ellipsometry characterization of boron nitride films synthesized by a reactive plasma-assisted coating method," T. Hamano, T. Matsuda, Y. Asamoto, M. Noma, S. Hasegawa, M. Yamashita, K. Urabe, and K. Eriguchi, Appl. Phys. Lett. 120, 031904 (2022).
- [12] "Characterization of surface modification mechanisms for boron nitride films under plasma exposure," T. Higuchi, M. Noma, M. Yamashita, K. Urabe, S. Hasegawa, and K. Eriguchi, Surf. Coat. Technol. 377, 124854 (2019).