

プラズマエレクトロニクス分科会会報 No.58

2013 年（平成 25 年）6 月発行

池田、市來、市川、向川、川崎、松隈

目 次

巻頭言

新時代を創造する	九州大学	白谷 正治	1
----------	------	-------	---

寄稿

ミニマルファブシステムによる半導体デバイス製造	長崎大学	藤山 寛	3
-------------------------	------	------	---

第 11 回プラズマエレクトロニクス賞

第 11 回プラズマエレクトロニクス賞について	東京大学	寺嶋 和夫	5
プラズマエレクトロニクス賞を受賞して	名古屋大学	石川 健治	7
プラズマエレクトロニクス賞を受賞して	大阪大学	伊藤 智子	10

研究室紹介（その 53）	東京農工大学	篠原 俊二郎他	12
--------------	--------	---------	----

研究紹介（その 6・7）

高速かつ高精度非接触、 リアルタイム基板温度計測システムの開発	名古屋大学	堤 隆嘉	19
分子動力学法を用いたハロゲン系プラズマによる Si エッチング表面反応解析	京都大学	中崎 暢也	21

海外の研究事情（その 35）	名古屋大学	上坂 裕之	23
----------------	-------	-------	----

学生のためのページすぐに役立つプラズマエレクトロニクス

大気圧プラズマの理解へ向けて	京都大学	酒井 道	30
----------------	------	------	----

国際会議報告

5th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2013)	豊橋技術科学大学	若原 昭浩	36
6th International Conference on Plasma Nanotechnology and Science (IC-PLANTS 2013)	金沢大学	石島 達夫	39

国内会議報告

第 12 回プラズマエレクトロニクス新領域研究会 「プラズマ先端材料プロセス」 (電気学会プラズマ／パルスパワー合同研究会との共催)	首都大学東京	朽久保 文嘉	40
第 4 回プラズマ医療・健康産業シンポジウム 第 13 回プラズマエレクトロニクス新領域研究会 新学術領域研究「プラズマ医療科学の創成」東京拠点会議 合同開催	産業技術 総合研究所	榊田 創	42
第 30 回プラズマプロセッシング研究会(SPP-30)	静岡大学	永津 雅章	44
第 27 回光源物性とその応用研究会報告	岩手大学	向川 政治	46
	室蘭工業大学	佐藤 孝紀	
2013 年第 60 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	株式会社東芝	市川 尚志	47
2013 年第 60 回応用物理学会春季学術講演会 第 10 回分科内招待講演報告	大阪大学	北野 勝久	48
2013 年第 60 回応用物理学会春季学術講演会 海外招待講演報告	産業技術 総合研究所	金 載浩	49
2013 年第 60 回応用物理学会春季学術講演会 シンポジウム報告	名古屋大学	豊田 浩孝	50

行事案内

第 35 回ドライプロセス国際シンポジウム(DPS 2013)	(株)日立ハイ テクノロジーズ	根岸 伸幸	51
2013 MRS-JSAP Symposium O	九州大学	白谷 正治	53
2013 年第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 プラズマエレクトロニクス分科会企画	東京工業大学	野崎 智洋	55
2013 年第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 分科主催シンポジウム	大阪大学	北野 勝久	58
第 7 回 プラズマエレクトロニクス インキュベーションホール案内	佐賀大学	三沢 達也	59
Gaseous Electronics Conference 2013	九州大学	白谷 正治	61
American Vacuum Society (AVS) 60th International Symposium & Exhibition	大阪大学	浜口 智志	62
第 24 回プラズマエレクトロニクス講習会	ソニー(株)	辰巳 哲也	64

6th International Symposium on Advanced Plasma Science and its
Applications for Nitrides and Nanomaterials / 7th International Conference
on Plasma-Nano Technology & Science (ISPlasma2014 / IC-PLANTS2014)

名城大学

平松 美根男

65

掲示板

平成 25 年度プラズマエレクトロニクス分科会幹事名簿	66
平成 25 年度分科会幹事役割分担	68
平成 25 年度分科会関連の各種世話人・委員	69
平成 24 年度後期および平成 25 年度前期活動報告	
平成 24 年度第 3 回幹事会議事録	70
平成 24 年度第 4 回幹事会議事録	72
平成 25 年度第 1 回幹事会議事録	74
第 12 回プラズマエレクトロニクス賞受賞候補論文の募集	76
プラズマエレクトロニクス関連会議日程	78
広告掲載企業一覧	81
編集後記	82

研究室紹介

東京農工大学 大学院工学研究院

篠原研究室 篠原 俊二郎、桑原 大介、研究室メンバー

本研究室紹介では、篠原の記述(前半 3 ページ)、及び桑原と研究室メンバーによる記述(後半 4 ページ)という構成となっています。

1. はじめに

本研究室は篠原が九州大学 大学院総合理工学研究院から、現大学の東京農工大学 大学院総合理工学研究院へ異動した 2010 年 10 月からスタートしました。現在、広域プラズマ科学分野で、高密度プラズマ源開発、それをを用いたプラズマ中の構造形成などの非線形現象の理解と制御、及び種々の応用への展開を主眼として研究しています。

特に最近は高密度ヘリコンプラズマを用いた無電極プラズマ推進(ロケット)を中心研究として、本大学内、宇宙科学研究所、東海大学、九州大学、ウクライナ原子核研究所、アイオワ大学をはじめ、多くの内外の研究機関と共同研究を、HEAT (Helicon Electrodeless Advanced Thruster) プロジェクトとして精力的に行っています(図 1: 研究内容は後述)。



図 1 HEAT 関連メンバーとの研究会後の会食

本研究室の構成を述べます。現在の教員は、篠原俊二郎教授と、東京工業大学 大学院総合理工学

研究科で博士号を取得し、核融合科学研究所 研究員から 2012 年 9 月から赴任した桑原大介助教(詳しくは後述)(北條秘書 1 名)です。段々と学生は増え、平成 25 年度は 7 名の博士前期課程大学院生と 5 名の学部 4 年生の研究指導を賑やかに行っています(図 2)。



図 2 現研究室メンバー

2. 最近の主な研究内容

(1) 高密度ヘリコンプラズマ源開発とその特性評価

ヘリコン波 [1,2] を用いると、プラズマは容易にまた幅広い運転領域で高電子密度 ($\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$)・高電離(数 10%)となるため、種々の展開研究が可能です。現在まで 8 台に及ぶヘリコンプラズマ源(図 3、4 が例)を開発し、世界最大サイズ、最小サイズ、最強磁場、最小アスペクト比(軸長と直径の比)、最高の粒子生成効率(スケールリング則も導出)をはじめ、多くの世界記録を達成しました(文献 [2-4] などを参照)。またアンテナスペクトルの影響、エンドプレート効果、励起波動構造、定在波などの特性評価も行い、長年懸案の生成機構も国際共同研究でほぼ解明できました:へ

リコン波とモード変換した短波長の TG 波が重要と考えられます。またこれらの研究成果として高周波プラズマ生成・制御関連で特許も 2 件取得できました。

プラズマ計測開発（詳しくは学生のページ）では、データ収集系の整備と共に、様々の静電的、磁氣的プローブ測定に加え、半導体レーザー（レーザー誘起蛍光法によるイオン速度分布関数測定）、1.5 m の高分解能可視分光器（波長分解能が 0.005 nm）、1 MFS（1 秒間に 100 万コマ）を超える高速度カメラなど充実させてきました。



図 3 開発した高密度ヘリコンプラズマ装置例：上から大きいサイズ順に LHPD (Large Helicon Plasma Device : 宇宙科学研究所で開発した世界最大の装置、直径 74 cm、長さ 486 cm)、LMD (Large Mirror Device : 種々の基礎から応用までの研究に寄与)、HFD (High Field Device : 完成当時世界最強磁場 1 T で、 10^{13} cm^{-3} の電子密度を十分超える)、SHD (Small Helicon Device : 世界最小口径の 0.5 cm まで達成し更に開発中)

(2) 高密度プラズマ源を用いた基礎から応用研究 [1-5]

ヘリコンプラズマ源を用いて、磁場が印加された円筒真空容器内のエンドに設置した多重同心電極に電圧を印加し、以下の非線形の構造形成現象の解析と制御研究を行いました。

i) プラズマプロセスや基礎研究に重要なホローからピークまでの密度分布制御、ii) 核融合や遠心分離研究にも関連する周方向の高シェア流制御、iii) 基礎から核融合研究までの応用にも関連する自励双安定遷移現象、などです。

科学研究費の特別推進研究（分担）の援助を受けて、密度勾配が重要なドリフト波乱流現象も、高密度ヘリコンプラズマを用い、開発した 100 ch. 以上の稠密プローブによる非線形解析手法などで詳細に調べました。更に従来達成が困難であった興味深い高ベータ研究も、高密度・低磁場の条件で始めています。

なお図 4 には、様々な高密度ヘリコンプラズマ光を示します。



図 4 様々なヘリコンプラズマ光（左上：LHPD でのアルゴンガスを用いた中心部分が青い所謂ブルーモード、外部設置したスパイラルアンテナも見える、左下：LHPD のアルゴンプラズマ、アンテナ部からの写真、右上：LMD のブルーモードとなったアルゴンプラズマ、右下：LMD のネオンプラズマ）

(3) 高密度ヘリコン源による無電極プラズマ推進研究 [2,4]

長年研究を続けて来た特徴ある高密度ヘリコンプラズマを生かして、無電極プラズマ推進研究を科研費の基盤研究(S) (代表) により、斬新なアイデアを出すには他分野の研究者との議論・交流が大事との観点で、内外から多くのご協力を得て鋭意進めています。

即ち ECR (Electron Cyclotron Resonance) とグリッド電極を用いたプラズマ推進による「はやぶさ」は快挙でありましたが寿命に問題があります。それを克服すべく HEAT プロジェクトによる研究を行っています (図 5)。つまり、ヘリコン高密度プラズマを用いたオール無電極 (プラズマに電極が直接触れない) での推進 (プラズマロケット) 構想です。「はやぶさ」を開発したメンバーも入って戴き、回転磁場 RMF (Rotating Magnetic Field)、回転電場 REF (Rotating Electric Field)、周方向モード $m=0$ 、ポンデロロ力 (Ponderomotive Force + Ion Cyclotron Acceleration) の加速方法などを新規に考案し、先進研究を鋭意進めています：若い人にも夢を与えるように留意しながら、積極的に活動できるよう努力しています。



図 5 将来の先進的無電極ヘリコンプラズマロケットエンジンを搭載する宇宙船イメージ例

3. 終わりに

篠原の過去の高温プラズマ・核融合研究 (東京大学)、基礎から応用までの低温・高密度プラズマ

研究 (九州大学) の経験と多くの方々との共同研究を生かし、現在更に新領域への研究展開も試みています。プラズマ推進研究では、故都木恭一郎教授との共同研究が大きな礎となっており心から感謝したいと思います。

なお、長年の「広域ヘリコンプラズマ研究」で篠原は、H22 年度に文部科学大臣表彰科学技術賞 (研究部門) を戴きました。これを励みに、「プラズマ制御による地上から宇宙までの展開」をモットーとして、更に研究を推進する予定です。プラズマエレクトロニクス分科会の皆様もはじめ、今後も多くの研究者との議論も楽しみにしています。

本研究室の詳細は下記ホームページに公開しています。現在、本研究室に興味のある、社会人を含む博士後期課程大学院生、ポスドク、共同研究者を募集していますので宜しくお願いします。

<http://www.tuat.ac.jp/~sinohara/>

<http://tuatshinohara.web.fc2.com/index.html>

参考文献

- [1] 篠原俊二郎：プラズマ・核融合学会誌、**78** (2002) 5. (解説)
- [2] 篠原俊二郎：日本物理学会誌、**64** (2009) 519. (解説：表紙写真もあり)
- [3] S. Shinohara and H. Mizokoshi: Rev. Sci. Instrum. **77** (2006) 036108.
- [4] S. Shinohara, T. Hada, T. Motomuta, K. Tanaka, T. Tanikawa, K. Toki, Y. Tanaka, K. P. Shamrai: Phys. Plasmas **16** (2009) 057104. (Invited Paper)
- [5] T. Yamada, S.-I. Itoh, T. Maruta, N. Kasuya, Y. Nagashima, S. Shinohara, K. Terasaka, M. Yagi, S. Inagaki, Y. Kawai, A. Fujisawa, K. Itoh: Nature Phys. **4** (2008) 725.

(篠原俊二郎)

4. 桑原助教による研究内容説明

昨年 2012 年 9 月に篠原研究室助教として赴任した桑原大介です。修士・博士課程を東京工業大学 大学院総合理工学研究科において修了し、2012 年 3 月に博士号を取得、半年間研究員として核融合科学研究所に勤務しました。大学院時代から東京農工大学に赴任するまでは、核融合科学研究所との共同研究で「マイクロ波を用いた磁場閉じ込め核融合プラズマの 3 次元イメージング計測器開発」を行っていました。

主に現在従事しているのはヘリコンプラズマ電気推進機の電磁加速評価のための計測器開発です。外部からプラズマに印加する径方向磁場 B_r とプラズマに誘起した周方向電流 J_θ によるローレンツ力でプラズマを加速・噴射し推力を得るのですが、この J_θ の誘起法として本研究室では RMF と $m=0$ コイルを用いることを提案しています。

これら加速法の最適化、推力計測として従来は方向性プローブによるイオン流速計測を行っていたのですが、加速部プラズマの詳細な振る舞いを観測することが重要と考え、分光器、高速度カメラ以外に、昨年度立ち上げに成功したレーザー誘起蛍光法によるイオン流速計測の、1 次元・2 次元拡張を計画しています。多次元計測はチャンネル数の増加による装置の複雑化、コスト増が付きものですが、これまでのマイクロ波計測器開発で培った電子回路技術、機械学科学生の創造力・機械知識を持てれば可能であると日夜図面を引く日々です。

また、直接的な推力計測として円筒ターゲットを用いたスラストスタンド開発も並行して進めています (図 6)。スラストスタンドとは推進機を振り子やねじりばねの先に載せ、その変位を計測することで推力を推定する計測器で、微小な推力しかもたない電気推進機分野で良く用いられる計測法です。一般的なスラストスタンドは推進機全体

をスタンドに載せますが、LMD ではその重量・大きさから搭載が難しいため本研究室では噴射するプラズマを受け止め、その反力から変位を得るターゲット法を採用することとしました。プラズマを受けるターゲットは噴射されたプラズマからの運動量を漏れなく受け止めることが求められます。このためターゲットは多数のリング状板で作った円筒、後端のコーン状反射板でプラズマを多重反射させる構造としています。

また、本研究室で並行して研究を行っている SHD を用いた小型ヘリコンプラズマ推進機の基礎研究にも従事しています。SHD は LMD と比較して装置が小型なため、容易に装置を改造でき大変小回りが利きます。現在は内径 0.5 cm の石英管でのヘリコンプラズマ放電に成功しています。

篠原研究室に赴任して半年が過ぎ、この分野の様子がやっと理解できたところです。学生時代はマイクロ波計測一本でしたので、ヘリコンプラズマおよびプラズマ一般には疎い部分が多分にある若輩者です。先輩諸氏の皆様方には今後御指導御鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。



図 6 ターゲットスタンド校正台とターゲット部の概念図

5. 研究室メンバーによる研究内容説明

(1) 回転磁場による加速実験

修士 2 年の石井です。既述したように、プラズ

マに回転する磁場 RMF (図 7 上) を印加して周方向に流れる電子電流 J_θ を誘起させます。ここに外部から径方向の磁場 B_r を印加します。 J_θ と B_r によって軸方向のローレンツ力 F_z が生じ、これを利用して推進機の推力の向上を目指しています。 B_r は昨年度新たに研究室で製作した永久磁石 (図 7 下) によって増強され、電磁石との併用により加速機構に適した磁場配位が生成できています。

現在は、外部磁場強度や回転磁場の周波数などのパラメータを変え、回転磁場が推力を発生させているかどうかの評価を行っています。なかなか良いデータが得られず苦労していますが、まだまだ試せることがたくさんあるので、実験に励もうと思っています。

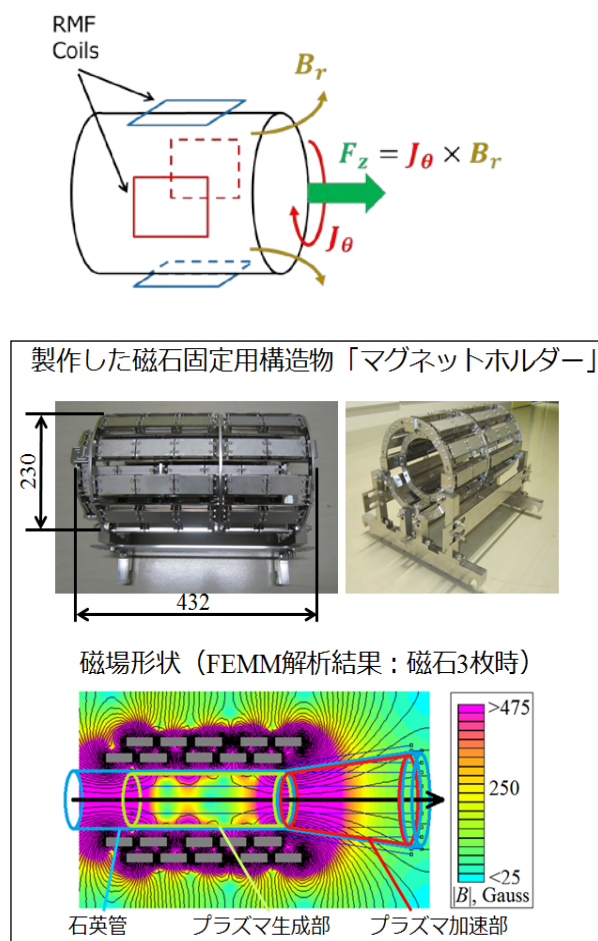


図 7 回転磁場加速概念図 (上) と製作した永久磁石部 (下)

(2) レーザー誘起蛍光法

(LIF: Laser Induced Fluorescence)

修士 2 年の勅使河原と申します。プラズマ中にレーザーを入射し、蛍光を読み取ることでプラズマ流の流速やイオン温度を計測します (図 8)。本手法はマッハプローブ等のプローブ法と異なり、非接触かつ高空間分解能な計測が可能です。その反面、光軸調整は mm 単位の精度を求められるため、日々苦戦しています。誰かが実験機器に誤ってぶつかろうものなら、肩をがっくりと落としてしまいます。でも、初めて信号が得られた時の感動は今でも忘れられません。本当に鳥肌ものです。

現在、計測システムの設計・構築を終え、プラズマ生成条件 (プラズマ投入パワー、ガス流量等) を変更させた実験を行っています。今後は、プラズマ断面を計測可能な二次元ステージの開発に取り組み、加速機構の評価へ繋げる予定です。

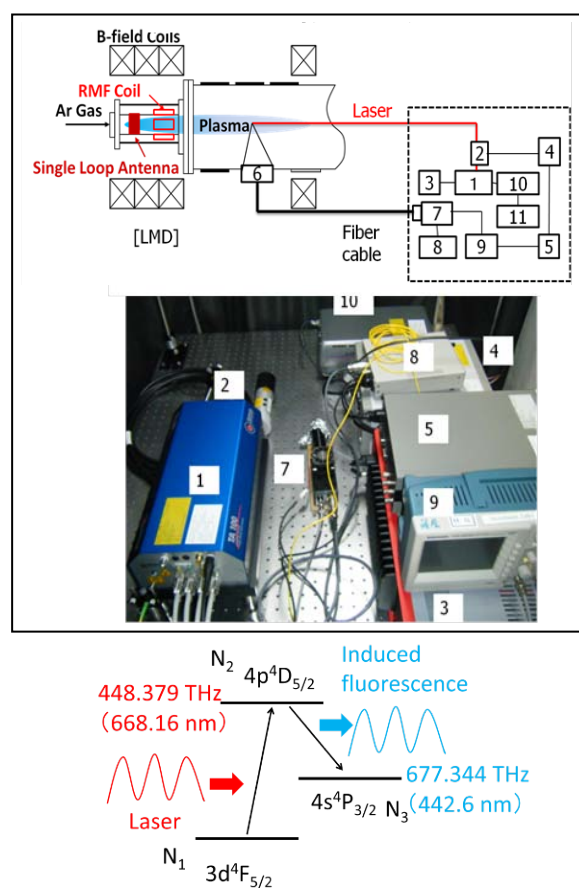


図 8 LIF 装置構成と概念図

(3) 高速度カメラ計測

高速度カメラによる計測（図 9）を担当している修士 2 年の早稲田と申します。このカメラに干渉フィルターを装着することで、Ar イオンからの発光と中性粒子からの発光を分けて取り込み、プラズマ断面の電子・中性粒子密度分布を計測することを試みています。断面分布の再構成を行うために種々の光学系、逆変換方法を試行中ですが、難しい数学式がつきもので理解するだけで大変です。また、十分な光量が得られず高速度カメラの性能を活かせず苦勞しています。現在詳細な密度分布の計測のためにレンズとファイバーからなる光学系を設計中です。

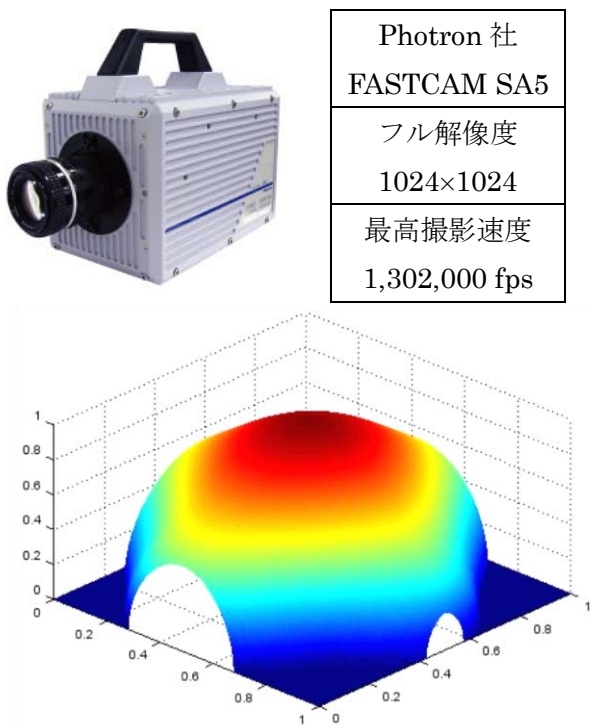


図 9 高速度カメラ（上）と導出した電子密度分布（下：ART 法による）

(4) 分光器計測

修士 2 年の藤墳です。全長 1.5 m の高波長分解能 (0.005 nm) の分光器（図 10）を使用することによってドップラーシフト、スペクトルの半値幅、光強度の測定を行い、プラズマ流速、イオン

温度、電子密度、中性粒子密度の評価を行っています。波長分解能が高いため 500 m/s 程度のプラズマ流速から測定が可能です。また、分光計測はプラズマに対して非接触で、測定対象に影響を与えないという特徴があります。

分光器の性能を最大限生かした実験を行い回転磁場加速などの原理実証に貢献したいと思います。



図 10 高分解能の分光器

(4) 小ヘリコン装置

小ヘリコン装置 SHD（図 11 上）で研究をしている修士 1 年の中川です。この装置は本研究室で主に使われている LMD と比べ小さく設計されたもので、この装置を用いて簡易・小型な電気推進機の開発やプラズマ生成部口径差によるスケール効果の検証をしています。さらに 0.3 ~ 13.56 MHz に加え 50 ~ 150 MHz の範囲で RF 周波数を励起できる広帯域高周波電源装置も使用してプラズマパラメータの比較なども行っています。

電気推進ロケットエンジンの研究ではプラズマ加速や推力計測が多いですが、小口径かつ広帯域高周波でのプラズマのパラメータ比較というのは殆ど行われていません。そのため非常に研究のやりがいがあるのですが、何が起こるかわからないため予想外の出来事が起こることもあります。

例えば実験装置にはテフロンチューブを通してアルゴンガスを送っているのですが、本体のプラズマ生成中に、チューブ内でプラズマが生成され発光を起こしてしまうという妙な現象が見られました（図 11 下）。光の色はアルゴンガス特有の淡

いピンクや青ではなく眩しい黄緑色で（図 11 下の写真では青いですが）、見ていて非常に綺麗です。詳しく調べてみたいとも思うのですが、そのままにしておくわけにもいかず応急処置としてガスフレンジに銅線を巻きつけることで予防をしました。

ほかにも RF ノイズによってマスフローコントローラの表示が狂ったり、磁場コイル用の電源が落ちたり、また更に見覚えのない色のプラズマができたりと、好奇心を刺激する現象から頭痛の種まで様々なハプニングがあり非常に面白い研究対象だと感じています。

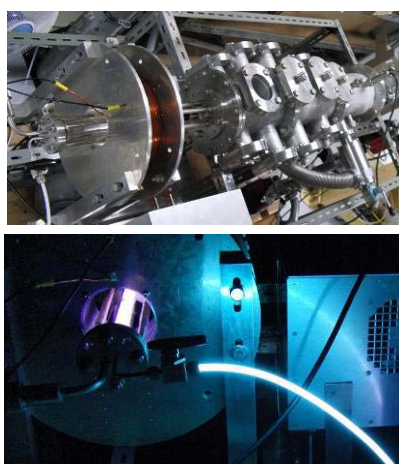


図 11 小ヘリコン装置（上）と Ar プラズマの発光例（下）

6. 研究室生活

（1）修士 1 年

修士 1 年の大塚と申します。私からは、本研究室の生活環境についてお話ししたいと思います。研究の魅力については既述されていますが、本研究室の魅力はそれだけではありません。非常に温かく刺の全くない雰囲気があり、それ故研究テーマの違いに囚われず、互いに協力して研究に臨める環境は本研究室の魅力です。このような環境のために、メンバーは苦と思わず朝から晩まで楽しく実験し、時に激しい議論を交わしながら研究を進

めています。これは研究生活を送る上で非常に大事な要素だと考えています。お尻を叩かれることなく、自ら進んで研究を楽しめている状況というのは、研究室環境として最高ではありませんか？

（2）学部 4 年

学部 4 年の酒田と申します。私がこの研究室を選んだ理由は 2 つあります。1 つ目は、ロケットエンジンをつくる！という夢のある研究テーマです。私は高校生の頃から航空宇宙関係の研究をしたいと思っていたので、微力ながら希望の研究に携わることができてとても嬉しいです。2 つ目は、研究室の雰囲気です。ご多忙の中どんな質問でも優しく丁寧に答えてくださる篠原先生、幅広い知識をもつ桑原先生、女性が少ない中で生活面でも頼りになる北條さん、その中でも特に、先輩方が明るく楽しく真面目に研究しているところに魅力を感じました。まだ右も左もわからない状態ですが、少しでも力になれるよう精進していきます。

（3）秘書

秘書の北條と申します。昨年 10 月より、研究室の会計や事務全般を担当しています。篠原教授や桑原助教、学生の皆さんがとても温かく受け入れて下さり、大きなギャップもなく、すんなりと研究室に馴染むことができました。来客や会合時の懇談会、研究室旅行、有志でのバーベキューなどにも参加させていただき、この時のインフォーマルな会話が仕事を進める上においても役立っています。また、素直で協調性がある学生ばかりなので、日々楽しく仕事をしています。

篠原教授は、誰に対しても紳士で、学生にも丁寧な指導をされています。研究知識は勿論のこと、学問に対して真摯に向き合う姿勢、準備を怠らず計画的に物事を完成させていく姿が素晴らしいと思います。私も教授を見習い、日々努力していきたいと思っています。