

氏名：四竈 泰一

所属専攻・職名：機械理工学専攻・講師

派遣国：アメリカ合衆国

派遣先(研究機関名)：California Institute of Technology

受入研究者(職・氏名)：Professor・Paul M. Bellan

派遣期間：2011年7月30日～2012年7月29日(365日間)

派遣先での研究テーマ：偏光分離分光計測によるカルテック同軸磁化プラズマジェット実験における磁場ベクトル測定法の開発

(Development of a polarization resolved spectroscopic diagnostic for measurements of the vector magnetic field in the Caltech coaxial magnetized plasma jet experiment)

【研究実施概要】

カリフォルニア工科大学応用物理学科のポール・M・ベラン教授の研究グループではプラズマジェットおよびループ状プラズマを生成可能な放電装置を用いて研究を行っている。これらの装置はスフェロマックと呼ばれるトーラスプラズマの一種を生成するための放電技術をもとにしてベラン教授が独自に考案したものである。プラズマの生成・発展過程はプラズマ理工学分野の未解決問題であるトーラスプラズマの自己組織化や磁力線再結合現象を内在しており、核融合プラズマや天体プラズマの模擬という応用研究に加え、基礎研究としても興味深い対象となっている。滞在中は著者が専門とするプラズマ偏光分光計測法をこれらのプラズマに対して適用し、プラズマの基礎特性のひとつである磁場構造を明らかにするとともに背後の物理現象に迫ることを目的として研究を進めた。先方の研究グループは特に高温プラズマの物理やパルスパワー技術について造詣が深いためそれらを部分的にでも習得することも目的とした。

実施した測定の実理は磁場中のイオン発光スペクトル線を偏光分離して測定し、スペクトル線 σ 成分のゼーマン効果によるピーク波長シフトを計測することで磁場強度を求める。この原理を利用した測定は過去にも行われているが、本研究では観測視線に沿った発光の線積分として得られるスペクトル線の実験データに対して、プラズマの軸対称性を利用した逆変換を適用することで、磁場ベクトルを空間分解して求めた点で新規性を有する。渡航前にベラン教授との打合せを行い、計測システムを設計、製作し性能評価まで終えてから出発した。この作業を経たことで渡航後は製作したシステムの設置、校正、実験条件の最適化に集中することができ効率的に研究を進めることができた。最終的にプラズマジェットの磁場構造を測定することに成功し、プラズマ中の磁場の拡散に関する知見を得ることもできた。パルスパワー技術については1年という短期間で容易に習得できるものではなかったが、基本的な回路構造や実験時のノウハウについてある程度学ぶことはできた。

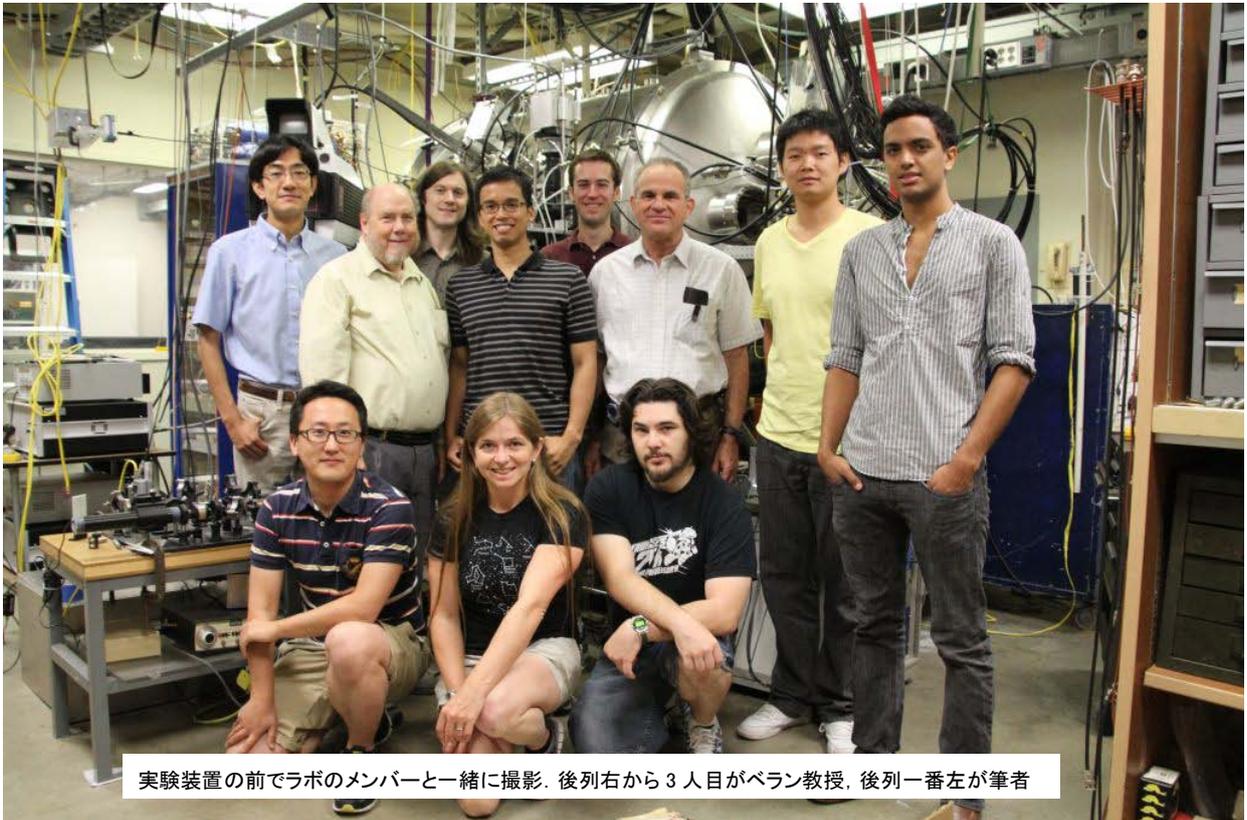
派遣期間中に測定システムの開発および測定結果について4つの国際学会(ICCG2011, 53rd APS DPP, 2011 PROM, HEDLA2012)でポスターおよび口頭発表を行った。さらに、最終的な成果を国際学会(54th APS DPP)でポスター発表することを予定している。研究成果をまとめた論文はPhysics of Plasmas誌に投稿し査読中である。

【研究成果概要】

派遣前の研究計画ではプラズマ中の水素原子発光線の偏光分離計測により非等方電子、イオンの速度分布関数を測定することを考えていたが、プラズマの電離度が高く原子密度が小さいため、発光線強度について必要なS/N比を得ることが難しいことが分かった。このため研究テーマを変更し、同様の偏光測定システムを利用して実施可能であり、かつプラズマパラメータとして重要な意味を持つ磁場を測定した。開発した測定システムは、電気双極子放射を磁力線に沿った方向から観測した場合の σ 成分に相当する左右円偏光成分を $\lambda/4$ 板により直交する直線偏光へと変換し、これらの直線偏光成分をグラントムソプリズムを利用して分離する。分離した偏光成分は光ファイバにより分光器へと伝送し、ICCD(Image-intensified charge coupled device)を用いてスペクトルを検出する。実験は窒素プラズマジェットを用いて行い、波長500nm付近に存在する1価の窒素イオンからの発光線を測定した。実験で測定される発光スペクトル線は観測視線上に存在する発光の線積分となるため、プラズマの軸対称性を仮定した逆変換を行い、局所的な磁場ベクトルの空間分布を求めた。さらに、磁場方向を反転させた追実験を行い、逆変換により求めた磁場ベクトル空

間分布の妥当性を検証した。

最終的に当初の目的を達成したが、より複雑なプラズマダイナミクスを内在する非軸対称なプラズマへの適用が今後の課題である。加えて、スペクトル線を短い露光時間に十分な S/N 比で観測することが必要なため、比較的電子密度が高く発光強度の大きいプラズマに対してしか測定が成功しておらず、低密度のプラズマで測定を行うための計測システムの光量損失低減も今後の課題である。一連の共同研究を通じて偏光測定システムの設計や校正方法等の分光計測手法をベラン教授や大学院生に伝え、逆に先方の専門とするパルスパワー技術や高温プラズマの物理について学ぶという互助関係を構築できた。



実験装置の前でラボのメンバーと一緒に撮影。後列右から3人目がベラン教授、後列一番左が筆者

研究以外では、大学や学部の運営および教育方法についてベラン教授や他の教員から話を聞いたり、講義に出席させてもらうことで調査した。カリフォルニア工科大学は私立大学であり、大学の歳入の大部分は寄付と運用で賄われている。学内の建物は全て寄付金で建てられており、寄付をした人の名前が付けられ、入り口には肖像画がかけられている。例えば筆者が滞在した応用物理学科は IBM の創始者であるトーマス・J・ワトソンの寄付により建てられたためワトソンという名で呼ばれていた。基本的な大学の運営方針としては、優秀な教員を集めることで大学を対外的に魅力的にし優秀な学生が集まるようにするという方法をとっているようだった。良い教員を集めるために、(1) 競争的な給与と他大学からの人材の引き抜き、(2) 良い研究環境作り、が行われていた。(1)については、大学教員の平均給与ランキングで全米 10 位以内に入っており、他大学から Full Professor レベルの研究者の引き抜きもしばしば行われていた。(2)については全教員約 400 人に対してスタッフが約 2500 人もおり、教員の雑用負担が極力少なくなるような体制が取られていた。本学の工学研究科と理学研究科では教員約 700 人に対してスタッフは約 250 人なので違いがよく分かると思う。さらに、各教員は大学院 1 コマ、学部 1 コマの講義を担当することが推奨されるが、義務ではないという措置が執られていた。このため、教員は研究状況によっては講義を必ずしも持たなくても良く、また隔年での開講もしばしば行われていた。各教員に対しては、これらの見返りとして、世界トップレベルの研究成果と十分なグラントの獲得が要求されることは言うまでもない。大学や学部の運営は小規模大学の利点を生かして柔軟に行われていた。特に、何かを決める際にはルールを固定せずメンバーや状況に応じて柔軟に対応するという方法が取られている点が印象的だった。

教育方法については、学生数が少なく少数精鋭体制を取っていることがカリフォルニア工科大学の特徴としてあげられる。前述の全教員数に対して学部生は約 1000 人、大学院生は約 1200 人、したがって 1 学年の全学生数は約 250 人程度である。このため各学部の教室は小さく、授業に出席する学生数は 20 人程度で、教員と学生の間で密接なコミ

コミュニケーションが取れるように配慮されていた。参考までに、本学の工学研究科と理学研究科では学部生は約 5700 人、大学院生は約 3200 人であり、教員数 1 人に対する学生数はカリフォルニア工科大学の約 2 倍である。講義等の方法論自体については以前から書籍その他で読んでいたアメリカの標準的方法と大きくは変わらないように見受けられた。先進国の大学ではどこでも言われていることだが、学生には対して斬新な発想をすることが特に奨励されていた。

総じて、カリフォルニア工科大学はアメリカの中でも特徴的な大学であり、本学のような大きな総合大学で同様のシステムを取り入れることは難しい。ただ、世界トップレベルの研究者を集めるためにはこの程度の研究環境作りが必要であるという点については参考になった。



ベラン教授宅での夕食会。手前がベラン教授、その左が筆者と家内、1 人はさんでテーブルの一番奥がベラン教授夫人。滞在中、ラボのメンバーと共にベラン教授宅に何度も呼んで頂き、家族ぐるみでのおつきあいをさせて頂いた

【外国語のスキルアップ・コミュニケーション能力の向上、海外におけるネットワークづくり】

研究に関するコミュニケーションでは英語力よりも研究内容が重視されており、多少の英語下手は問題にならないと感じた。科学の議論をする上では意見が論理的根拠に基づいているか否かという点が最も重要であり、その認識はベラン教授や大学院生と議論する際も共通であった。誤解が生じる可能性のある複雑な内容については適宜文章化してやりとりすることで解決した。アメリカのトップレベル大学は外国からの留学生やポスドクが多いため、他国の大学に比べると教員や学生が英語が下手な外国人とのコミュニケーションに慣れているという違いはあるかもしれない。

研究以外の日常生活での英語スキル・コミュニケーションについては「読む、書く、聞く、話す」のうち「読む、書く」についてはあまり困ることは無かったが、「聞く、話す」については大きな障害を感じた。「聞く」については、実際の日常会話の英語は国際会議等で話される標準的な英語とは大分違い、多様な人種が多様なアクセント、スピード、言い回しの英語を話し、なおかつ常に周囲にノイズが存在する。いざそのような場に身をおいてみると初めの頃はしばしば相手の言うことが分からず何度も聞き返す羽目になった。特に筆者はノイズが苦手で、騒がしい場所での会話は最後まで苦痛だった。これは母国語ではできている部分的な単語から文章を推測するという作業ができていないためだと思われる。日常の場面に即したテレビドラマや映画がかなり聞き取れるようになるまで練習しておくのと役に立つのではないかと思った。「話す」については、良く言われるように日本人は子音の発音が弱くネイティブにはそれが聞き取りづらいようなので、はっきりと大きな声で話すのが良いようだ。スピードや文法についてはネイティブレベルで話すことはまず不可能なため、多少の文法ミスは気にせず自分のペースで大きな声で話すことが大切のように思う。加えて、定型文句について練習しておくレストランや店舗等での会話は困らなくなる。

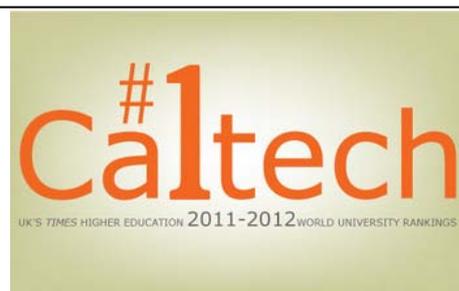
ベラン教授および研究室のメンバーとは公私に渡って親交を深めることができた。派遣期間中に参加した学会やベラン教授宅で開かれたホームパーティーを通して研究室の卒業生やかつてのポスドクで現在全米各地の研究機関の研究者となっている人々とも知り合うことができた。一部の人々とは研究内容について有意義な議論を交わすことができ、今後も親交を深めていきたいと考えている。カリフォルニア工科大学には教員やポスドク、学生の夫人を主な対象とした女性のためのクラブ活動があり、同行した家内も週1回の英会話やハイキンググループに参加させて貰った。これら活動を通じて家内が様々な国の友人を作り、その繋がりによって筆者自身も専門分野の違う研究者や留学生と知り合い親交を深めることができた。

【派遣の感想】

カリフォルニア工科大学（カルテック）はロサンゼルス市の中心部から北東に車で30分ほどいったところにあるパサデナ市の中心部近くにある。キャンパス周辺は閑静な高級住宅街として知られている。大学から徒歩圏内には学生がドンチャン騒ぎできるような飲食店やバーが殆ど無く、滞在当初から、いったい学生は研究や勉強の息抜きをどこでしているのだろうかと思議に思っていた。ある日、応用数学を専攻する大学院生の友人に「カルテックの周りにはバーが無いけど、学生はいったいどこで飲むんだい？」と聞いたところ、「カルテックの学生は酒を飲んで騒ぐ暇なんて無いからバーは無いよ。大学院生の寮の冷蔵庫には大学が学生に配慮して準備したフリーのビールが山積みになっているぐらいなんだから。」と真面目な顔で返答された。実際は、学生は個人の家を集まってバーベキューをしたり近所のレストランを利用したりして比較的慎ましく息抜きをしているということが後から分かったが、この友人の発言には驚いた。折しも筆者の滞在中にカリフォルニア工科大学はNew Times Higher Education RankingでNo.1となったが、アメリカのトップスクールで学ぶ大学院生の意気込みはそこまで違うのかと考えさせられた出来事だった。

アメリカでは自分のキャリアを積極的に構築するという意識が日本よりも強いように思う。筆者が訪問した研究室にもPh.Dを取った後はタコツボのサイエンス研究ではなく、科学分野の知識を活用した政策決定に関わるような仕事がしたいと言ってパブリックスピーキングのトレーニングを受けている学生がいた。これに対して、京都は古都として周囲からやや隔絶された環境下にあるためか、本学は保守的な学生が多いように感じる。学生にとっても海外の同世代の学生がどのような意識を持って勉強、研究をしているのかを知ることは自分のキャリアやそのためにどのような勉強、研究をすべきかということを考える上でも有益ではないかと感じた。本派遣プログラムでは研究を遂行すること自体もちろん重要ではあるが、研究、教育、ひいては人生に対する異なった考え方を学ぶという意味で若手研究者や学生にとって大変大きな教育的意義を持つと考える。もう少し年齢の若い学部生の段階で同様のプログラムがあれば、自分の将来をより柔軟に考える機会が得られるためなお良いと思う。

最後に、本研究の機会を与えて頂きました榎木教授はじめ派遣プログラム審査委員の先生方、筆者の所属する光工学研究室の蓮尾教授に感謝致します。



ランキング No.1 になった際に作られたロゴ。大学構内の書店ではこのロゴが付いたグッズが売られている。