

氏 名：鷹尾 祥典

所属専攻・職名：航空宇宙工学専攻・助教

派遣国：ドイツ

派遣先(研究機関名)：ギーセン大学 (Justus-Liebig-University Giessen)

受入研究者(職・氏名)：電気推進グループ長・Dr. Davar Feili

派遣期間：2011 年 10 月 1 日 ～ 2012 年 3 月 25 日(177 日間)

派遣先での研究テーマ：高周波放電式マイクロイオンエンジンの性能最適化

(Performance optimization of a radio-frequency micro ion engine)

【研究実施概要】

ギーセン大学の電気推進グループは高周波プラズマ源を利用したイオンエンジンの研究に 50 年以上前から取り組んでおり、直径 50 cm の大電力・大推力から直径 2 cm の低電力・微小推力まで幅広い種類のイオンエンジンを扱っている。この中から、私の開発した数値計算コードが適用可能な直径 2 cm の低電力イオンエンジンに焦点を当て、数値解析による高周波放電式マイクロイオンエンジンの性能最適化を試みた。

イオンエンジンは大きく分けて、イオンを生成する高周波放電式プラズマ源、イオンを引き出す高電圧グリッド電極、イオンエンジン本体が電荷蓄積しないように引き出したイオンを電氣的に中和する電子源、推進剤ガス供給機構、そして高周波生成機構の 5 つのシステムからなる。6 ヶ月という限られた期間の中でこれら全てのシステムを最適化するのは不可能であるため、本研究が対象とするのはプラズマ源およびイオン引き出し部であり、特に前者のプラズマ源に注力して研究を行った。

高周波プラズマ源は円筒状の誘電体容器とそれを取り巻く螺旋状コイル、そして、それら全体を覆う静電シールドからなる。コイルに高周波電流を流すことで誘電体容器内に軸方向の磁場が誘起され、さらにその磁場により誘導される周方向電場を用いてプラズマを生成する仕組みである。ここで、イオンを引き出すためにプラズマ源全体は 1-2 kV の高電位にあるが、静電シールドにより周囲の電子が大量に流れこむことを防いでいる。

私がこれまでに開発していた計算コードはこのうち誘電体容器より内側のプラズマそのものだけを計算領域として扱っていた。し

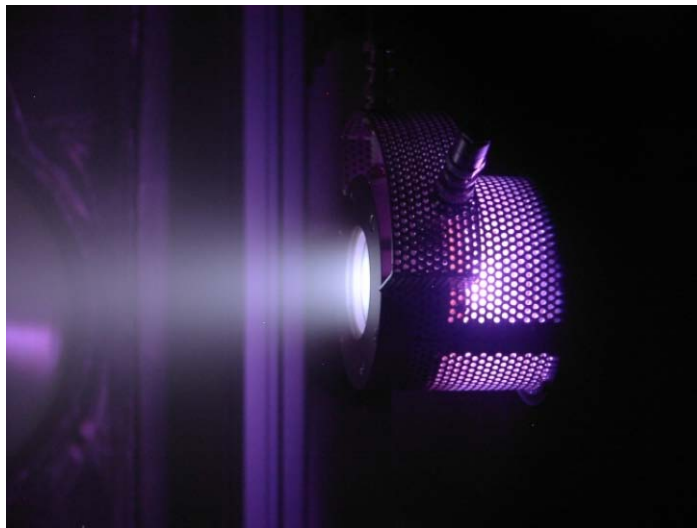


ギーセン大学の研究室にある大型真空装置前で

かし、このままではイオン引き出しを模擬することが不可能であるため、本研究期間において、計算領域を静電シールドまで拡張しイオンの引き出しを模擬できるところまで計算コードを発展させた。数値解析手法としては、イオンエンジンのような低ガス圧力下でのプラズマ解析に適している Particle-in-Cell/Monte Carlo Collisions (PIC/MCC) 法を用いた。なお、プラズマそのものは誘電体容器内にしか存在しないため、荷電粒子の解析はこれまでと同じ計算領域で取り扱える一方、静電ポテンシャルは静電シールド内全ての領域を解く必要があることに注意を要する。

本研究では、ギーセン大学で研究している直径 2 cm 級のイオンエンジンの寸法・構造等を確認し、それに適合するように計算方法を検討した。実機を計算コードで 100%再現するのは不可能なため、節目ごとにギーセン大学のメンバーと議論をしながら、必要不可欠な点、妥協可能な点を確認し合う形で進めていった。また、計算結果を実験結果と比較することで計算コードを順次発展させていき、最終的には、イオンエンジンを低電力で運用した場合に数値計算による実験結果の再現性を確認でき、本コードの有用性が実証された。

【研究成果概要】



高周波放電式イオンエンジン(ギーセン大 HP より)

派遣前の研究計画では、事前の Dr. Feili とのやり取りから実験と計算の両方を行うこととしていたが、先方のプロジェクトが変更となった都合上、実験に関しては携わることがほぼ不可能な状況になったため、数値解析による研究が中心となった。また、実際に先方の装置を見せていただいて初めて分かることも多く、結果として滞在期間の大半が計算コードの新規構築に費やされてしまい、結果に対する議論は最後の 1 ヶ月半程度しか時間を取ることが出来なかった。インターネットの普及で海外とのコミュニケーションは格段に取りやすくなったとは言え、やはり現地に赴き実物を見て、その場で議論することがいかに大事かということを改めて実感した。

数値解析においては、コイルに流れる高周波電流、プラズマ密度・温度・導電率、そしてイオンビーム電流を実験値等と比較することで計算コードの改良を行い、低電力でイオンエンジンを運用した際の実験結果とよく合致することが分かった。特に、Dr. Feili らがイオンエンジン設計用に開発した回路モデル(プラズマを高周波回路素子の一部として取り扱う)で予想される最適な導電率が私の計算モデルで算出したものとほぼ一致することが分かり、エンジン設計の最適化に有効な計算ツールになることが分かった。帰国後も引き続き研究を続けてモデルの精度を上げ、イオンエンジンの更なる小型化・低消費電力化へ向けた共同研究を行う予定である。

研究「成果」とは呼べないが、イオンエンジン全体のシステムに関する技術を数多く習得できた点は非常に有意義な滞在であった。ギーセン大学は欧州宇宙機関(ESA)や航空宇宙産業界とも結び付きが深く、いくつかの商業衛星にそのイオンエンジンが採用されるなど、実際の宇宙ミッションにおいても多くの実績を持っており、単にイオンエンジンのスラストヘッド部だけでなく、その周辺のシステム構成に関しても豊富な技術蓄積がある。私がプラズマそのものだけを扱っているのに対して、プラズマを生成する高周波電源・回路構成や、イオンビームを高精度に制御するシステム等を学べた点が特に有益であった。

【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】

語学に関しては、ドイツに派遣となったため、ドイツ語でのコミュニケーションもと考えていたものの、大学での会話は基本的に全て英語で行われ、また、街中においても大体は英語で会話が成り立つために、結果的にはほとんどドイツ語を使う必要がない状況であった(ドイツ語しか絶対に話してくれない方も多少は居たが)。そのため、ドイツ語を用いるのは最初と最後の挨拶程度であった。

英語でのコミュニケーションに関しては、ドイツ人にとっても母国語ではないため、話すスピードがアメリカやイギリスのネイ



共同研究先の DLR Göttingen にある大型真空装置前で

タイプが話すよりは多少ゆっくりしており、かつ、単語も比較的はつきり発音されるので、会話そのものは行いやすかったと感じている。ただ、Dr. Feili の研究室にはポスドクとしてイギリス出身の研究者が一人滞在しており、その方との会話は聞きなれないイギリス英語のために特に聞き取りが難しいと感じた。

6 ヶ月の間で会話力そのものが大きく向上したとは思わないが、普段会話をするなかで瞬間的に言葉が出るようになってきたという実感は持てた。ただ、深い議論になると本当に表現したい内容を 100%表現できないもどかしさは最後まで取れることは無かった。これは今後の大きな課題である。

ネットワークに関しては、受け入れ先の Dr. Feili およびその学生の皆さんとはもちろん深いつながりを得ることができた。また、研究室そのものがかなり多くの研究機関・企業との共同研究を行っているために、隔週くらいの頻度で新しい研究者と巡り合う機会に恵まれた。残念ながら、その場で挨拶を交わすだけで終わってしまう場合も多かったが、それでも以下の 4 名の研究者とはその方々の研究室見学および私自身の研究紹介講演をしたり、私的にも食事をともにしたり等で深いつながりを得ることが出来た。

- ・ Prof. Dr. Markus Thoma, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE), Garching
- ・ Dr. Klaus Hannemann, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Göttingen
- ・ Dr. Peter Spädtke, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Darmstadt
- ・ Prof. Richard Wirz, University of California, Los Angeles (UCLA)

特に Prof. Wirz とは研究テーマが近く、かつ、ほぼ同世代のため、ここで得られたつながりは Dr. Feili とのつながりに加えて今後の研究生活において大きな出会いの一つになると思われる。

【派遣の感想】



MPE 訪問時のクリスマスマーケットにて

今回の渡航において、単に旅行や学会等で短期間外国を訪ねるのと実際に外国でビザを取得して生活を送ることは全然違うということをも身をもって体験できた。特に今回は妻と生後三ヶ月(渡航時)の娘を帯同していたため、渡航前の準備はかなり大変なものであった上、滞在ビザの取得においても適合する健康保険がなかなか見つからず非常に苦労した。また、現地での生活もほとんど日本人が居ないギーセンという町での生活であったため、娘の予防接種や離乳食のための日本食材探しなど日本に居れば何の問題も無いことが簡単に障害に変わってしまった。ただ、それらも一度経験してしまえば後はすぐに適応可能な範囲であるので、今では良い経験になったと思う。さらに、日本の良さ悪さを客観的に評価できるのも外国で生活を送る経験の良い点と思う。ギーセン大学での生活において、お互いを知らなくてもすれ違えば笑顔で挨拶を交わす習慣は過ごしていて非常に心地の良いものであった。日本の大学でも見習うべき習慣であろう。

研究面においては、実際の宇宙ミッションにおいても既に利用されている実績あるイオンエンジンに関して、そのシステムの完成度の高さを学べた点は大変貴重なものであった。特に、普段の学会・論文発表等ではあまり具体的に触れられていない内容についても

色々情報を得られたことが何より大きい。また、国際会議等での僅かな時間の交流と比較して、実際に現地に赴きともに研究生活を送ることはお互いの信頼関係構築に大きく貢献したものと考えられる。上記のようにノウハウ的な部分まで情報開示をしてもらえたのは良い信頼関係を築けた成果と思われる。さらに、研究室内だけでなく共同研究機関先とのネットワークを広げられたことも貴重な経験であった。地理的な近さから、ドイツ国内にとどまらず、イタリア、イギリ

ス、ロシア等とも共同でプロジェクトを進めており、幅広い交流を行っていることが日本の研究室内に閉じこもっている私にとっては大きな魅力であった。これらの交流の中で思いもかけず私自身の研究に興味をもってもらうこともあり、そのおかげで、マックスプランク研究所(MPE)やドイツ航空宇宙センター(DLR)、GSI 等に招待してもらい、研究設備の見学、および私の研究紹介講演によるそれら研究機関の研究者との交流が出来たのは渡航前には想定していなかった大きな収穫の一つであった。

末筆ながら、これまでに面識が無いにも関わらず温かく受け入れていただいたギーセン大学の Dr. Feili、本プログラム総括委員会委員長の榎木先生をはじめ関係者の皆様、そして、半年間研究室を不在にする許可を与えていただいた斧先生をはじめ研究室の皆様に心から感謝の意を表したいと思います。