

イオンエンジンの運用で
はやぶさプロジェクトに参加

— 小泉先生は宇宙開発における電気推進の研究に携わっておられるとお聞きしています。まずは、これまでどのような研究やプロジェクトに取り組んでこられたのか、概要をお聞かせいただけますでしょうか。

小泉 現在、私は東京大学大学院の新領域創成科学研究科というところで、研究・指導を行っています。准教授として東京大学に来たときは工学系の航空宇宙工学専攻というところにおり、現在もこの宇宙工学専攻をベースに活動をしています。居室は本郷キャンパスの工学部7号館にあり、この7号館で実験も行っています。

新領域創成科学研究科は1998年にできた新しい研究科で、千葉県の柏キャンパスにあります。この学科は様々な分野を融合して新しい学問領域を創出することを目的に作られました。工学系の電気や機械、理学系の物理などいろいろな学科から人が集まり、皆、

いずれかの学科を親学科としています。

私は東京大学に移る前の2007年から2011年まで、JAXAの宇宙科学研究所に勤務していました。JAXA宇宙科学研究所は東京大学の研究機関だった宇宙航空研究所が大学から独立し、別の宇宙開発機関と統合されてできた組織です。元々が大学の研究機関だったこともあり、宇宙科学研究所には教授や准教授などがいます。私は東京大学の宇宙工学専攻で博士号を取得した後、宇宙科学研究所の助教となり、研究を行いながら、いくつかのプロジェクトに参加していました。

母校の慶応義塾大学では、流体の数値計算をメインで研究していました。現在と分野は異なりますが、数値流体の基礎を学べたことは現在の研究に大いに役立っています。

— 先生が関わってこられたプロジェクトを、いくつかご紹介いただけますか。

小泉 JAXAで多くのプロジェクトを経験し、そこで培ったノウハウを

もとに、現在、大学でプロジェクトを進めています。

私の専門はイオンエンジン（イオンスラスター）をはじめとした宇宙推進機の研究開発です。

JAXAに入り2007～2010年に携わったのが、「はやぶさ1号機」が小惑星から地球へ帰ってくるフェーズです。「はやぶさ」プロジェクトで有名になった國中均先生の指導のもと、イオンエンジンの運用の一端を担いました。

また、2010年には「はやぶさ」が地球に帰還した際にオーストラリアの砂漠に落としたカプセルの回収にも参加しています。回収の準備は2008年ごろから始めました。宇宙推進機の開発とは全く違う分野でしたが、その分、専門分野以外の様々な人に会うことができ、とても良い経験になりました。

そのほかでは、2009～2012年にアラブ首長国連邦（UAE）の中の一つ、ドバイ首長国が作っている人工衛星「ドバイサット2」のプロジェクトに参加しました。この衛星にはイオンエンジンと似た推進機（ホールスラスター）が搭載されています。この推進機の中で中和器と呼ばれるイオンエンジンに



2010年 オーストラリア・ウーメラ砂漠にて「はやぶさ」が落としたカプセルの回収プロジェクトに参加（後列左から3人目が小泉先生）



ドバイ首長国が打ち上げた人工衛星「ドバイサット2」のプロジェクトに参加（左から4人目が小泉先生）

科学の萌芽 01

東京大学大学院新領域創成科学研究科
准教授
小泉 宏之 先生



小泉 宏之 先生のプロフィール

東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻(本務)
東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻(兼任)

〈経歴〉

- 1996年 東京都立町田高等学校卒業
- 2000年 慶応義塾大学理工学部機械工学科卒業
- 2002年 東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻修士課程修了
- 2002年 東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻博士課程進学
- 2003年 東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻助手(博士課程退学)
- 2006年 博士(工学)(論文博士、東京大学)取得
- 2007年 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所助手(4月)・助教(9月)
- 2011年 東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻准教授
- 2011年 東京大学先端科学技術研究センター准教授
- 2015年 東京大学大学院新領域創成科学研究科准教授

〈専門分野〉

宇宙推進工学(電気推進・小型推進・小型宇宙機)

〈学会〉

日本航空宇宙学会会員



宇宙開発と「電気推進&イオンエンジン」の研究上

『科学の萌芽』とは
各分野で活躍する次世代の科学技術の担い手たち。彼らの成功までの軌跡や知られざるエピソードなど、サイエンスの“今”と“未来”が見えてくる新企画です。

聞き手：

- | | | |
|-------|----------|--------|
| 南 明則 | 日本科学機器協会 | 広報副委員長 |
| 佐藤 文俊 | 同 | 〃 |
| 山口美奈子 | 同 | 広報委員 |
| 鈴木 裕之 | 同 | 〃 |
| 藏満 邦弘 | 同 | 専務理事 |
| 岡田 康弘 | 同 | 事務局長 |

(取材・撮影・編集協力：クリエイティブ・レイ(株) 安井久雄)

取材日：2015年12月15日
日本科学機器協会 会議室

ができるエネルギーは基本的にはこの2つに限られます。

そのほかの重力、運動、熱、光エネルギーなどは携帯するのが難しいですし、原子力エネルギーは、今のところ携帯できるほど安全ではありません。

宇宙推進機は運動エネルギーを出すのが目的ですが、そのエネルギー源を電気、あるいは化学エネルギーから変換しています。化学エネルギーから運動エネルギーを得るのが「化学推進」、電気エネルギーから運動エネルギーを得ているのが「電気推進」です。私が研究をしているイオンエンジンは、電気エネルギーを使って、運動エネルギーを得る推進機ということになります。

**プラズマを利用し
秒速約40kmの速さで進む**

— イオンエンジンはどのようにして宇宙空間を進むのか、原理をご説明いただけますか。

お湯を温めたり、何かをすることが出来る能力と定義しています。

エネルギーにはいろいろなタイプがありますし、高い位置からモノを落とすと速度が与えられるように、別のタイプのエネルギーに変換されることもあります。水力発電もエネルギー変換装置のひとつで、高い位置から水を落とすこと、つまり重力エネルギーを運動エネルギーに変換することで電気を作っています。そのほかでエネルギーの変換例を挙げれば、電気エネルギーを運動エネルギーに変換するモーター、モノを燃やして、その中に入っている化学エネルギーを取り出す火力発電や、光のエネルギーを電気に変換する太陽光発電などが挙げられます。

このように様々なエネルギーの中でも、私たちにとって便利なのが電気エネルギーと化学エネルギーです。電気エネルギーはほとんどのエネルギーと可換性がありますし、化学エネルギーは貯蔵が容易でコンパクトな高エネルギーです。今日、宇宙へ携帯すること

化学推進 (化学エネルギー → 運動エネルギー)

推進剤：燃料/酸化剤
エネルギー源：燃料/酸化剤 (の反応)

電気推進 (電気エネルギー → 運動エネルギー)

- 推進剤：何でもOK
エネルギー源：太陽電池, 原子炉, etc
- 電気加熱 (例：ヒーター) を利用
- 静電力 (例：静電気) を利用
…イオンスラスタ, ホールスラスタなど
- 電磁力 (例：モーター) を利用

宇宙空間での運動エネルギーに適した「化学推進」と「電気推進」

ます。スケートをする人は靴のエッジで氷を押していますし、同じように車はタイヤで地面を押し、ジェット機はジェットエンジンで空気を押しているのです。

しかし、宇宙には押すモノがありません。ごくわずかな空気はありますが、地球の数億分の一、数兆分の一以下といった、かぎりなくゼロに等しい量です。このため、宇宙まで押すモノを自分で持っていき、モノを投げることによって押す作業を行います。その押し出す力を生み出す手段のひとつが「電気推進」なのです。

例えば、ボールを投げることは、ボールを押していることと同じです。地上でボールを投げるとその反動を受けます。銃も撃つと反動を受けます。これと同じことで、宇宙推進機は反動によって、モノを投げる機械とも言えます。

基本的に、投げる速度が速くなればなるほど、効率的に推進力を得ることができます。宇宙へは持っていくもの、そして投げられるものの量が限られるので、できるだけ速く投げ、効率よく推進力を得る必要があります。このため速く投げることが重要になってくるのです。

— いろいろなエネルギーがある中で、なぜ電気を使うのでしょうか。

小泉 モノを投げる動作を言い換えると、モノに運動エネルギーを与えることです。物理学では、エネルギーとはモノを持ち上げたり、

— イオンエンジンは海外でも研究や開発が進められているのでしょうか。

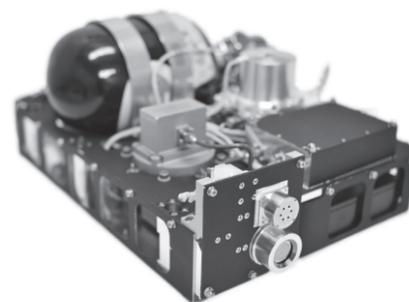
小泉 研究、開発ともに行われています。これまで主に研究開発してきた小型のイオンエンジンと競合するものも作られています。海外製は仕様や方式が若干異なります。

**宇宙空間で
電気推進を使う理由**

— 小泉先生の専門である電気推進とは何か、また、イオンエンジンとは何か、ご説明いただけますか。

小泉 「電気推進」という大きなくりの中に「イオンエンジン」があるという関係になります。電気推進を簡単に言うと、電気を使って高速でモノを投げる装置です。

ロケットの役割は、人工衛星を高く放り投げ、一定の速度を与えることです。モノに加速を与えているわけですが、そのために必要になるのがモノを押すことです。人を例に挙げると、地上で人が走るときは、足で地面を押してい



ほどよし4号に搭載された小型イオンエンジン

とって、非常に重要なパーツをJAXAが提供しています。この人工衛星は2013年に無事、宇宙へ打ち上げられ運用が行われています。

— 機器の提供は無償だったのでしょうか。

小泉 機器は無償で提供されました。JAXAとしては、その見返りに宇宙へ機器を持って行ってもらう、実証を行う機会を得ているわけです。提供された機器は、はやぶさのイオンエンジンの中和器よりも5倍の出力を持つ新型の中和器でした。

これまで宇宙開発はアメリカ・ロシア・ヨーロッパなどが中心でしたが、最近では様々な国が参入するようになりました。ドバイ首長国も新しい参入国のひとつです。

衛星自体のオーナーはドバイですが、衛星を作っているのは韓国の宇宙機関からスピンオフした新しい企業です。ドバイとしては自国の科学技術を高めたいので、若手の技術者を韓国へ派遣して、経験を積ませているようです。

**小型衛星のための
小型イオンエンジンを開発**

— 東京大学へ移られてからのプロジェクトには、どのようなものがあるのでしょうか。

小泉 私の研究室で行ったものをご紹介しますと、2011～2014年に

かけて関わった「ほどよし4号」におけるイオンエンジン開発プロジェクトがあります。

「ほどよし4号」は東京大学の中須賀真一先生の主導で進められた「ほどよしプロジェクト」の小型衛星の1つです。この衛星の重量は50kgほどで、小型のイオンエンジンを搭載しました。このサイズでイオンエンジンを積んだ衛星は「ほどよし4号」が世界初でした。

2013年からは「PROCYON(プロキオン)」という「ほどよし」とだいたい同じくらいのサイズの小型衛星のプロジェクトに携わっています。「PROCYON(プロキオン)」は2014年12月に打ち上げられ、すでに運用が始まっています。100kg以下の小型衛星では「PROCYON(プロキオン)」は、地球圏外へ出て行き、単体として深宇宙で活動した世界で初めての衛星ということになります。なお、「PROCYON(プロキオン)」は、地球ではなく太陽を周回するため、「人工衛星」と言うよりも「人工惑星」と呼んだ方が正しいかもしれません。通常は、探査機あるいは宇宙機という表現をしています。

また、2014年からは宇宙デブリ、いわゆる宇宙ゴミを除去しようというプロジェクトもスタートしています。この計画はアストロスケールというシンガポールのベンチャー企業が進めているもので、打ち上げはこれからですが、宇宙デブリを除去するための実証機に搭載する推進機の開発に携わっています。

大型の推進機の実験では穴の大きさが1cmぐらいのイオンエンジンも作動させています。

——プラズマにするガスは、主にどのようなものが使われるのでしょうか。

小泉 原理的にはどんなものでもプラズマ化するのですが、原子から電子をはじき出しやすいものの方がプラズマ化が容易なので、キセノンを使っています。

例えば、水素は1つの原子核に1つの電子が回っています。それに比べ、原子番号54のキセノンには54個の電子が原子核の周りを回っているため、もっとも外側の電子を1つ、原子の外へはじき出すことは比較的容易です。

ちなみに、昔は水銀を使っていました。アメリカが初めて宇宙へ飛ばしたイオンスラスタも水銀を使用していました。しかし、人体への影響が問題となり、現在では使われていません。安全性を除けば、常温でも液体で貯蔵も簡単な水銀は非常に優れた推進剤です。

一方、キセノンは希ガスなので反応性がなく安全です。人が吸い込んでも、若干麻酔作用があるくらいです。ただ、小さくするために相当圧縮しており、タンクから漏れて、なくなってしまうという難点があります。

次号「科学の萌芽」では小泉宏之先生「宇宙開発と“電気推進&イオンエンジン”の研究（下）」において続きをお話いただけます。

小泉 プラズマを生成している部屋の中には、電子が剥ぎ取られたイオン、電子、もとのガスである中性粒子の三者が混ざった状態で存在しています。

中性粒子は、イオンを生成する材料なのですが、ある割合はそのまま外部に排出されてしまいます。しかも、排出される中性粒子は推進力にはほとんど貢献していないため、その多くが無駄になってしまっています。中性粒子を有効活用するためにも、できるだけ電気的性質を持ったイオンのみを出したいという願望があります。

そのためのテクニックの1つが、グリッドの穴の大きさを変えることです。イオンは1枚目のグリッドの穴に飛び込んでくると加速されて出て行きますが、中性粒子は穴に入っても何の力も受けませんし、入ったあと、2枚目のグリッドの壁に当たって戻ることもあります。この性質を利用し、2枚目のグリッドの穴を小さくして、中性粒子をできるだけ閉じ込め、イオンだけを外に排出するようにします。

——グリッドの穴の大きさは、どのくらいなのか。

穴の大きさはかける電圧やプラズマの状態から、最適な組み合わせを決めていくのですが、「はやぶさ」のエンジンでは、大きい穴が3mm、小さい穴が1.8mmぐらいでした。私が研究している小型イオンエンジンでは穴の大きさを0.8mmと0.4mmに設定していますが、

す。一方、電子はグリッドの穴に入っていこうとしても、1000Vの壁を越えることができず、部屋の方へ押し戻されてしまいます。

ここで技術的なポイントの1つとなるのが、電圧とグリッドの設計です。グリッド電極に引きずられるようにして動き出したイオンは、適切な電圧とグリッドの設計により、2枚目のグリッドをうまく通り抜け、収束されたイオンビームとなって排出されます。イオン自体が軌道を決定するので、簡単ではありませんが、この点が設計の1つのポイントになります。

なお、この装置は地球の大気中では全く動かない設計になっています。大気中にはたくさんの粒子があるため、この装置を作動させたとしても、ほんの0.1マイクロメートルも進まないうちに他の粒子と衝突してしまいます。

——プラズマの技術は産業にも応用されていますね。

小泉 このような装置は、プラズマプロセスという分野でも使われています。推進させるためのものではありませんが、イオンビームは高いエネルギーを持っているので、タングステンやモリブデンなど固い物質の表面を削ったり、削ったものを付着させたり、コーティングしたりと、産業用に広く使われています。

——そのほかにイオンエンジンで技術的なポイントになることはありますか。

電子レンジが思い浮かびますが、イオンエンジンは、電子レンジの中にガスを入れて、十万℃ぐらいの温度まで温めているようなものと言えます。

技術的なポイントは かける電圧やグリッドの設計

——生成されたプラズマの中の粒子は、どうすれば一定の方向へ動き出すのでしょうか。

小泉 イオンエンジンには、プラズマを生成させる部屋の後ろにグリッドと呼ばれる、ハチの巣状に穴の開いた板（電極）が2枚あるいは3枚あります。その1枚目のグリッドに約1000Vの電圧を与えます。2枚目および3枚目のグリッドには、マイナスあるいはゼロ付近の電圧を与えます。プラズマを生成する部屋の中にはイオンや電子があり、グリッド電極にかけられたマイナスの電気に引きずられる形で、プラスの電荷を持ったイオンだけが1枚目のグリッドを通過していきま

例えば、モノを温めると、やがて気体になりますが、それを超えて数千℃、数万℃という極限のレベルにまで温度を上げると、すべてがプラズマになります。

プラズマを物質の構成要素である原子のレベルで見ると、原子から電子が剥ぎ取られた状態の粒子（イオン）と、電子が含まれています。なぜなら、原子・電子に極めて高いエネルギーを与えていくと、粒子間での衝突により原子から電子が飛び出していってしまうからです。プラズマはイオンと電子が混ざった状態であるため、電気的な性質を帯びているわけです。

次に、イオンエンジンの構成についてお話しします。イオンエンジンの中には部屋があり、そこにガスを送り込むと同時に、電力を与えます。電気エネルギーを与え続けると、部屋の中のガスがプラズマ化していき、プラズマが充満した状態になります。

「はやぶさ」のエンジンの場合、電力としてマイクロ波を与えています。身近なマイクロ波と言えば、

小泉 イオンエンジンは秒速40kmほどの速さで粒子を吐き出しています。それがモノを投げる役割を果たし、推進力を生みだしているわけです。秒速40kmというのはフルマラソンが1秒で終わってしまうぐらいの極めて速い速度ですから、イオンエンジンはたいへん効率的な推進機と位置づけられています。

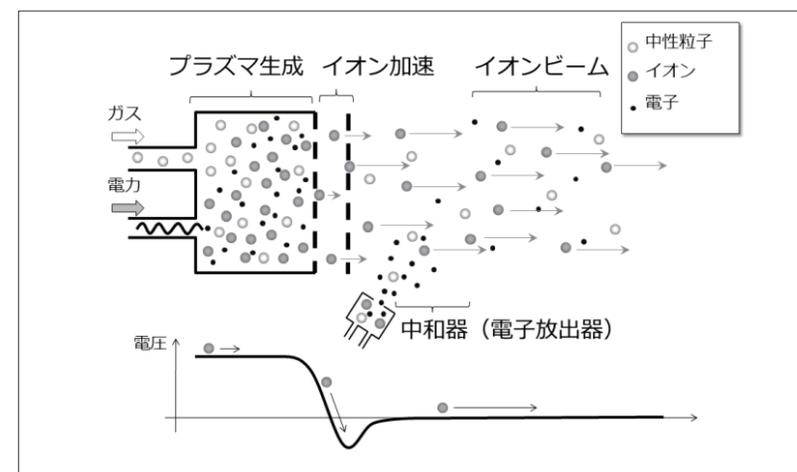
現在、ほとんどの電気推進でプラズマが使われています。プラズマを簡単に表すと、「電気的な性質を持ったガス」となります。私たちの身の回りには水や空気は電気的に中性です。中性のものに電気的な効果を与えても、何も起こりません。

プラズマはモノではなく状態を表す言葉で、「あるものがプラズマである」というのが正しい言い方です。なりやすいもの、なりにくいものはありますが、世の中のモノはすべてプラズマになり得ます。

私たちの身近なところにあるプラズマとしては、蛍光灯やネオンランプがあります。自然界では、稲妻、オーロラ、太陽、恒星、星雲などがプラズマです。太陽はプラズマが発光しているもので、夜空で輝いている星は、惑星を除くすべてがプラズマです。

——人工的にプラズマをどうやって作るのでしょうか。

小泉 プラズマは温めることによって作られます。別の言い方をすると、エネルギーを与えて生成します。



イオンエンジンの仕組み 人工的にプラズマを生成し、イオンビームを排出する