

イオンエンジン(スラスト)における中和器の役割

— 前はイオンエンジンについてお話をいただきましたが、イオンエンジンにとって重要な働きをする中和器について、お聞かせいただけますか。

小泉 イオンエンジンはイオンを放出することによって加速する力を得ているわけですが、イオンエンジンからイオンだけを外に出していると、エンジンおよび衛星は電子が過剰な状態になってしまいます。そうすると人工衛星自体の電位が上がり、放出したイオンを引きつけてしまい、ブーメランのようにイオンが戻ってくるという現象が起きてしまいます。これでは加速することにはなりません。

そこで必要になるのが中和器です。中和器にはイオンエンジンと同じようにガスが流されていて、これに電気をあたえ、プラズマ化します。ただし、イオンエンジンとは少し構造が違って、外に電子だけを排出します。つまり、中和器とは役割から言うと電子放出器ということになります。

イオンエンジンの仕組みは①内部でプラズマを作り出す。②プラズマからイオンを吐き出す。③そのとき、中和器からも同数の電子が吐き出される。この3段階がイオンエンジンの仕組みの核となっています。

イオンと同数の電子を放出する

のは難しいのではないかと、よく尋ねられます。実はこれは簡単で、放出される電子が足りないと、衛星の電位が下がって電子を吐き出しやすい状態になり、逆に電子が出過ぎると、衛星の電位が上がって電子が出にくい状態になります。つまり、衛星の電位が変わることで、電子放出量が自動的にバランスを保とうとするのです。

— プラズマを作るためのキセノンガスは地上から圧縮して持っていくということでしたが、宇宙では電気をどのようにして得ているのでしょうか。

小泉 電気は太陽光を使って発電しています。このため、太陽から離れた惑星へ行く場合は、離れるほど発電量が減ってしまうことが問題になります。

太陽の光で発電できるエネルギーは距離が2倍になると、その2乗で減っていきます。例えば、太陽から木星までの距離は太陽から地球までの距離の約5倍になるので、木星まで行くと発電量は25分の1になってしまいます。

そこで、太陽光が届かないような宇宙空間では、太陽光に代わるエネルギーが必要になります。今のところ、それに代わるエネルギーには原子力が有力です。多くの人がその研究に取り組みたいとは思っているのですが、やはり原子力の研究は制約が多いため、なかなか研究が進んでいません。

— 海外では原子力を宇宙開発に利用するという研究は進んでいるのでしょうか。

小泉 アメリカでは原子力電池が使われています。これはプルトニウム238の崩壊熱を使ってモノを温め、電気を作る技術です。

1970年代に打ち上げられた探査機「ボイジャー」には原子力電池が搭載されています。今、ボイジャーは太陽系の外を飛んでいますが、今でも地球と通信ができるのは、この原子力電池から電気を得ているからです。

以前、私の知合いがアメリカの宇宙開発に携わっているスタッフに「原子力電池が使えていいね」と話をしたところ、「原子力電池を使うのがどれだけ大変なことか分かるか?」と返されたという話を聞きました。やはり、アメリカと言えど原子力を使うのは、それだけ困難も伴うということなのです。また、原子力電池は効率が低い（質量に対する発生電力の割合が低い）ため、イオンエンジンの電力源としては適していません。さらに、イオンエンジンの電源として使うには小型原子炉が必要となります。

小型衛星によって宇宙産業の活性化を図る

— 小泉先生は小型の宇宙推進機とともに、大型の宇宙推進機の研究にも取り組まれる意図や目的をお話いただけますか。

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(兼担)

〈経歴〉

1996年 東京都立町田高等学校卒業
2000年 慶應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

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)



『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にご登壇いただき、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。

取材日：2015年12月15日
日本科学機器協会 会議室

イオンエンジン(スラスト)における中和器の役割

— 前はイオンエンジンについてお話をいただきましたが、イオンエンジンにとって重要な働きをする中和器について、お聞かせいただけますか。

小泉 イオンエンジンはイオンを放出することによって加速する力を得ているわけですが、イオンエンジンからイオンだけを外に出していると、エンジンおよび衛星は電子が過剰な状態になってしまいます。そうすると人工衛星自体の電位が上がり、放出したイオンを引きつけてしまい、ブーメランのようにイオンが戻ってくるという現象が起きてしまいます。これでは加速することにはなりません。

そこで必要になるのが中和器です。中和器にはイオンエンジンと同じようにガスが流されていて、これに電気をあたえ、プラズマ化します。ただし、イオンエンジンとは少し構造が違って、外に電子だけを排出します。つまり、中和器とは役割から言うと電子放出器ということになります。

イオンエンジンの仕組みは①内部でプラズマを作り出す。②プラズマからイオンを吐き出す。③そのとき、中和器からも同数の電子が吐き出される。この3段階がイオンエンジンの仕組みの核となっています。

イオンと同数の電子を放出する

のは難しいのではないかと、よく尋ねられます。実はこれは簡単で、放出される電子が足りないと、衛星の電位が下がって電子を吐き出しやすい状態になり、逆に電子が出過ぎると、衛星の電位が上がって電子が出にくい状態になります。つまり、衛星の電位が変わることで、電子放出量が自動的にバランスを保とうとするのです。

— プラズマを作るためのキセノンガスは地上から圧縮して持っていくということでしたが、宇宙では電気をどのようにして得ているのでしょうか。

小泉 電気は太陽光を使って発電しています。このため、太陽から離れた惑星へ行く場合は、離れるほど発電量が減ってしまうことが問題になります。

太陽の光で発電できるエネルギーは距離が2倍になると、その2乗で減っていきます。例えば、太陽から木星までの距離は太陽から地球までの距離の約5倍になるので、木星まで行くと発電量は25分の1になってしまいます。

そこで、太陽光が届かないような宇宙空間では、太陽光に代わるエネルギーが必要になります。今のところ、それに代わるエネルギーには原子力が有力です。多くの人がその研究に取り組みたいとは思っているのですが、やはり原子力の研究は制約が多いため、なかなか研究が進んでいません。

— 海外では原子力を宇宙開発に利用するという研究は進んでいるのでしょうか。

小泉 アメリカでは原子力電池が使われています。これはプルトニウム238の崩壊熱を使ってモノを温め、電気を作る技術です。

1970年代に打ち上げられた探査機「ボイジャー」には原子力電池が搭載されています。今、ボイジャーは太陽系の外を飛んでいますが、今でも地球と通信ができるのは、この原子力電池から電気を得ているからです。

以前、私の知合いがアメリカの宇宙開発に携わっているスタッフに「原子力電池が使えていいね」と話をしたところ、「原子力電池を使うのがどれだけ大変なことか分かるか?」と返されたという話を聞きました。やはり、アメリカと言えど原子力を使うのは、それだけ困難も伴うということなのです。また、原子力電池は効率が低い（質量に対する発生電力の割合が低い）ため、イオンエンジンの電力源としては適していません。さらに、イオンエンジンの電源として使うには小型原子炉が必要となります。

小型衛星によって宇宙産業の活性化を図る

— 小泉先生は小型の宇宙推進機とともに、大型の宇宙推進機の研究にも取り組まれる意図や目的をお話いただけますか。

産学官との連携

が組織の進退に直結するほどインパクトが大きいものです。その結果、基本的な設計は保守的なものばかりになってしまいました。宇宙機は最先端技術の結晶と言われますが、必ずしもそうとは限りません。中には90年代のコンピューターが使われていたり、昔ながらのコマが回っているジャイロという技術が使われていたりします。信頼性の観点からは新しい技術よりも、古くても実績のある技術が優先されるのです。

保守的で、長い期間をかけて設計するので、革新的な技術がもたらされず、コストダウンもままならない、人材の育成も進まない。そういった課題をどうにかして改善していきたいというのが私が小型衛星の分野に取り組む理由です。仮に、人工衛星1基が数億円ならば、新規参入の障壁を格段に下げることができます。失敗を過度に恐れなくてもよくなるので、新しい技術が取り入れやすくなり、開発サイクルも短縮され、人材の育成も効率的にできるようになるはずです。

私の目標の1つはこれまでのような20年をかけて1つのプロジェクトを成し遂げる世界ではなく、2年サイクルで人工衛星が開発できる環境をつくりだすことです。

—— 小型衛星の研究や開発に対して否定的な意見はあるのでしょうか。

小泉 小型衛星に賛同する人が

たくさんいる一方で、否定的な意見や懐疑的な意見をもっている人もたくさんいます。小型衛星は大型衛星に比べ、スペックが下がるので、それで何ができるのかというのが主な理由です。さらに、これまでの大型衛星の保守的な設計も、必要に応じて生まれたわけで、好きで過度な設計をしているわけではありません。確かに、小型衛星はこれまでのところ、大型衛星ほどの実績は残していません。ただ、これまでは実証がメインだった小型衛星も、壮大なミッションを抱えたPROCYON（プロキオン）をはじめ、現在、実用のステージに入りつつあります。また、予算規模が1桁2桁異なる小型衛星においては、大型衛星とは別の作り方があるはずです。したがって、今後、如何に実用性を示すことができるかが小型衛星の鍵です。そして、この小型衛星による宇宙産業のイノベーションの加速がなければ、超大型宇宙機の開発や、さまざまな場所へ探査機を送るといった宇宙開発の未来はないというのが私たちの考えです。



PROCYON（プロキオン）のフライトモデルを囲む研究室の学生たちと（一番右が小泉先生）

2年サイクルでプロジェクトを進められる環境を

—— 今日の宇宙産業が抱えている問題とは、具体的にはどのようなことでしょうか。

小泉 まずコストが高すぎるという点です。静止衛星はよく使われるため、価格は安いほうですが、それでも1基につき、200～300億円程度と言われています。さらに、これが1点ものの衛星になれば、さらに価格が上がります。たとえば、米国の地球観測衛星「ランドサット-8」に関して言えば、およそ8億5500万ドルでした。現在の日本円に換算すると900億円程度です。人工衛星の開発費用は、打ち上げ費用を入れて、数百億円というのが相場です。

資本金6億円以上の上場企業の年間の平均売上高は1252億円（2012年度）だといわれています。これと比較しても、相当な企業であっても人工衛星を買おうということにはならないでしょう。買えるのは、一部の超巨大企業か政府などに限られてしまいます。

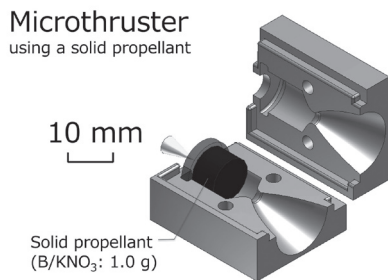
別の例で言えば、日本のスタートアップ企業462社の合計調達額が1154億円（2014年）ということですから、スタートアップ企業が数百社が集まり投資を募って、やっと衛星を1基買えるかどうかというのが実情なのです。

宇宙産業ではこのように莫大なコストがかかるため、一度の失敗

それが「はやぶさ」プロジェクトで初めて宇宙機を実際に扱い、エンジンが数ある衛星機器の中でどのように使われ、どのように関係しているのかがよく分かりました。この理解がなければ、よりよい研究・開発はできないはずです。

それと、「はやぶさ」プロジェクトでは会議の進め方に大きな感銘を受けました。日本社会では上下関係が重視され、大学においてもスタッフと学生、スタッフの中でも教授、准教授、助手という関係があります。上下関係には良い点もありますが、下の人から上の人に対してはものが言いにくいという点も欠点としてあるかと思います。

それに対し、「はやぶさ」プロジェクトにおける会議では、プロジェクト初心者など、末端の意見もすべからく吸い上げていたことが印象的でした。私なりの解釈としては、上下関係や立場などは後回しで、プロジェクトの成功こそが最優先であったからだと考えています。現在進行形のプロジェクトでは、判断の結果が即座に衛星の生き死にとして現れます。少しでも良い選択を行うために、自然とそのような形になっているのだと思います。



小泉先生が研究している小型イオンスラスタ

産学官との連携

小泉 まず、「はやぶさ」プロジェクトについてお話ししたいと思います。私は宇宙科学研究所において「はやぶさ」プロジェクトに携わり、非常に多くのことを学ばせてもらいました。「はやぶさ」は、20年以上にわたる長期プロジェクトで、私が担当したのはその最後、帰還フェーズの部分です。「はやぶさ」の原案が出たのは1985年頃で、それが正式に提案されたのが1993年。打ち上げられたのが2003年で、ミッションが終了したのが2010年です。25年にも及んだプロジェクトは、プロジェクトマネージャー、スタッフが入れ替わりながら、ミッションを引き継ぎ、成功を収めました。その最後に関われたことは大変に光栄なことですし、先輩方の努力に最大限の敬意を表しています。

しかし、別の視点でみると、立ち上げからミッション完了までが25年というのはあまりにも長すぎる事実だと思います。たとえば、脂の乗った優秀な若い研究者によい発想が生まれ、よい仲間や運に恵まれ、それらが結実して、やっとミッションとして終了するのが定年間際なのですから。

技術を発展させ、人を育てるには、プロジェクトはもっと短いサイクルで回っていく必要があると思います。

プロジェクトに参加する前、私は大学でアカデミックな研究をしていました。実は大学で宇宙機を研究しているといっても、実際に宇宙機を操ったことがある人は多くありません。

小泉 電気推進機を電力レベルで分けると、10kW以上が大型、100W～10kWが中型、100W以下が小型に分類されます。その中でも、需要もあり、研究および開発のメインストリームとなってきたものが中型の宇宙推進機です。

アメリカの探査機「ドーン」の電気推進機の電力は1基あたり3kW、ゴーシェは数kWで、中型機に分けられます。「はやぶさ」は1基300Wのイオンエンジンが4基搭載され、最大3基の同時作動が可能であり、世界の主流の推進機よりは小さめです。

中型推進機は世界中で競合していて、技術的には性能も寿命も既に成熟期にはいつているため、基礎研究がカバーできる範囲は少なくなってきました。その点、小型と大型、小電力か大電力の推進機にはまだまだ研究すべき課題がたくさんあります。小型推進機は100 kg以下の小型衛星に、大型推進機は大きな加速を必要とする大規模なミッションに不可欠です。

人工衛星を標準的な車に例えると、超小型衛星は軽自動車にあたります。通常の車に比べ、軽自動車は性能面で劣りますが、価格が安い分、多くの人に使ってもらえます。超小型の推進機や人工衛星も同じことが言えると思います。より多くの人に宇宙産業に参入してもらい、宇宙産業を取り巻く環境を変えていきたいです。

—— どのような点を変える必要があるのでしょうか。

産学官との連携

ていました。

宇宙に興味を持ったのは、家にあったことも向けの図鑑の影響です。10巻セットぐらいで、その第6巻が宇宙に関するものでした。その中の天体のページを見るのが好きで、よく眺めていました。

こうして天体に興味を持ったのですが、次に楽しそうだったのが無重力についてです。無重力の中で遊んでみたいと思い、宇宙飛行士になって宇宙へ行ってみたいと思っていた時期もありました。しかし、小学校の高学年になり、宇宙飛行士は遊んでいるわけではなく、決められた仕事をこなすということがわかってくると興味が薄れていきました。それから、宇宙飛行士のように大変な思いをしなくても、誰もが宇宙へ気軽に行けるようなロケットを作りたいとの思いから、次第に興味の対象がロケットに移っていきました。こうした原体験が、今日私が宇宙開発に取り組む、モチベーションになっています。



サイエンスの世界に導いたお父様と

次号「科学の峰々」では
東京薬科大学薬学部 教授
野水 基義先生に
お話しいただきます。

きません。地上から望遠鏡で覗いても見えません。そういったニーズに応えるため、宇宙空間で撮影した人工衛星の画像を提供するサービスが現実のものになるかもしれません。ただし、事業としての実現性やターゲット顧客などの詳細は、当然、事業秘密なので詳しいことまではわかりません。

こども向けの図鑑が
宇宙に興味をもつきっかけに

——最後に、小泉先生が理科に興味を持つようになった原体験や、宇宙産業の道に進もうと思われたきっかけや動機などをお聞かせいただけますか。

小泉 私が理科に興味を持ったのは化学実験だったと思います。ただし、アカデミックなものではなく、科学者に扮したドリフターズのメンバーがカラフルな色の液体を混ぜ、爆発させるような実験のコントをテレビで見たことでした。それを面白く思ったのをよく覚えています。

それと、父の影響も大きかったと思います。父は土木工学が専門で、大学で教職に就いており、小さい頃から私に理科の話をしてくれました。温度には限りがあり、絶対温度というものがあるとか、アインシュタインの相対性理論では、早く進むと時間が遅くなるといったことを教えてくれました。

小学生の頃には理科が好きだと感じていて、文系か理系かを選ぶとしたら自分は理系だと確信し

しまうわけです。

このプロジェクトを進めているアストロスケール社では、注文を受け、デブリを除去するサービスを計画しています。除去の方法としては、デブリを除去する衛星をデブリに接近させ、衛星に貼ってある粘着材でデブリを捕まえます。そこで火薬を使ったエンジンを吹き、瞬間的に大きな力を与えて、デブリを大気圏に向けて落下させ、燃やしてしまうわけです。

宇宙デブリは大きな問題だと誰もが認識していますが、有効な解決策がないという状態が数十年間続いています。要因はいくつもありますが、主な理由としては技術的に難しいことと、継続的に行うシステムが確立されていないことが挙げられます。

アストロスケール社の衛星は2018年に打ち上げ予定ですが、デブリの除去は技術的なハードルが高く、非常に挑戦的なプロジェクトと言えます。

——その衛星は宇宙デブリを除去するためだけに使われるのでしょうか。

小泉 デブリを除去するだけでなく、ランデブーという技術を使って、宇宙空間を飛んでいる人工衛星に対するサービスも検討されているようです。

人工衛星というのは一度打ち上げてしまうと、人工衛星がどのような状態になっているのか、特別な装置でもない限り見ることはで

ちなみに、2003年にこの火薬を利用した研究を始めるにあたり、火薬の取り扱いには厳格な法令があり、取り扱いには免許が必要であることを学びました。今でもこの研究を行う者は（学生を含めて）資格試験を受けて免許を取得する必要がありますし、火薬を購入するたびに都庁に許可を受けに行かなければなりません。

現在は、小さい火薬を複数組み合わせて使っています。当然のことながら、大きな火薬を1つ利用するという方法もあります。以前、火薬を扱っている企業にオーダーメードで火薬を作ってほしいとお願いしたところ、莫大な金額がかかると言われてしまいました。また、自分たちで火薬を製造するとなると、取り扱いよりも一段高い免許が必要になります。そこで、既存の小さい火薬を組み合わせ、自由なサイズに対応する推進機を作ろうということが研究の1つの焦点となっています。

また、缶に詰め込むぐらいの量の火薬であれば、大学の施設で実験が可能です。それに対し、大量の火薬で実験をしようとする、実験に必要な設備を用意するだけでも相当な金額がかかってしまいます。

宇宙デブリの怖さは映画『ゼロ・グラビティ』にも描かれていましたが、宇宙空間には不要になった宇宙機の破片などが弾丸よりも速いスピードで回っているため、小さなデブリが人工衛星にぶつかりでもしたら、致命的な事故に陥って

産学官との連携

——世界的には小型衛星の分野は、どのように捉えられているのでしょうか。

小泉 世界的にも大きな流れがあります。アメリカではスタートアップ企業がどんどんできていて、その中から成果を上げ始めている企業も出てきています。

なお、アメリカでは現在、宇宙ベンチャーへの投資が非常に活発です。投資額の合計は2014年で約100億 円、2015年 では約2000億円にものぼりました。2015年の値はアメリカの全ベンチャー投資額の1～2割が宇宙関連への投資で占められたということを意味しています。

夢は木星へ探査機を送り
見たことのない世界を見ること

——人材や技術を育て、その上で小泉先生はどのようなことをしたいとお考えなのでしょうか。

小泉 最終的に私がやりたいことは木星、土星、さらに遠くへ探査機を送り、これまで誰も見たことがないような世界を見ることです。

たとえば、木星には、大赤斑（だいせきはん）と呼ばれる巨大な台風のような渦があります。この渦のサイズはおよそ地球3つ分に相当します。ガリレオ・ガリレイが発見したときからすでに、この渦は確認されていて、これは永久的に続く現象なのか、それとも数百年や数千年で消えるものなのか、研究の対象

として注目されています（なお、近年の研究では年々、小さくなっていると報告されているようです）。

地球上にも美しい自然現象がたくさんあり、今日でも新たな現象が次々に発見されています。木星へ行けば、想像を絶するような物理現象が起きていて、地球とは比較にならない風景が広がっているはずです。

宇宙ゴミを除去する
画期的なサービス

——前回、シンガポールのベンチャー企業が進めている宇宙デブリを除去するプロジェクトにも携わっているという話をお聞きしましたが、どのようなことを研究されているのでしょうか。

小泉 このプロジェクトでは、宇宙デブリの除去を行う衛星に搭載する推進機を研究開発しています。私達の研究室では1kgfほどのキューブサットという小さな衛星用に1gほどの小さい火薬を用いた推進機から研究をはじめ、最近では、250mlの飲料缶ぐらいの大きさの推進機に、その1gfほどの小さい火薬を100個程度搭載し、キューブサットのデオービット（運用を終えた人工衛星などを軌道上から離脱させ、大気圏に再突入させて燃やすこと）に利用する研究を行っていました。デブリを除去する衛星には、その飲料缶ほどの推進機をさらに30個ほどクラスタ化して搭載し、推進力を与えます。