



IPMU Interview

川口淳一郎教授に聞く

聞き手：エド・ターナー

「はやぶさ」はハイリスク・ハイリターンプロジェクト

ターナー 「はやぶさ」の素晴らしい成功、おめでとうございます。全世界から注目を集め、驚かせ、そして賞賛を得ました。

川口 正直なところ、びっくりするほど運が良かったと思います。

ターナー 私が割に良く知っている他の宇宙関係のミッション、主にはNASAですが、それと「はやぶさ」を比べてみて一番強く感じたことは、リスクの許容度が非常に高いこと、つまり失敗の可能性を

進んで受け入れたことです。そういった勇気のある大胆なアプローチは意図的な決定だったのですか？

川口 実際、リスクだらけでした。「はやぶさ」は、大きなリ

川口淳一郎さんは宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所 (ISAS) の宇宙航行システム研究系研究主幹・教授で、月・惑星探査プログラムディレクターを兼務すると共に、小惑星探査機「はやぶさ」のプロジェクトマネージャーとして、開発から打ち上げ、帰還までを指揮しました。1983年に東京大学大学院工学系研究科航空学専攻課程を修了し、工学博士。同年宇宙科学研究所助手。同研究所助教授を経て2000年に教授。主な研究対象は惑星探査機の軌道力学、航法・軌道決定論、姿勢・軌道制御など。

スクを冒す代わりに、成功すれば大きな成果が得られる類のミッションです。このミッションを政府に提案したのは1995年ですが、当時、私共の機関（宇宙科学研究所）は文部省に所属していました。一方、現在のJAXA（宇宙航空研究開発機構）の主要部分は、当時はNASDA（宇宙開発事業団）で、政府機関ではありませんでした。宇宙科学研究所は研究開発機関でしたので、このミッションは研究形式で提案されたのです。ミッションの本来の役割はただ一つで、イオンエンジンによる推進の実証でしたが、政府はこのプロジェクトの実施を認めてくれました。当時、私たちはイオンエンジンの1,000時間運転を最低限の成功基準として設定しました。また、このミッションは最初から最後までが一つながりで、途中で何か故障するとその先は全てが失われてしまうというものです。ですから非常に大きなリスクを抱えていました。政府はミッションの提案時点でそれに留意し、承認しています。ですから、政府はある種のリスクを容認してくれたのです。

ターナー そして勿論、間一髪が何度もありました。公式にミッションが失敗する可能性を事前評価するようなことは行われましたか？ 実際は、例えば最終段階である試料の回収についてのどの程度成算があるか、工学的な事

前評価をされたのではないかと
思いますが、いかがですか。

川口 それほど厳密な手続きは
実施していません。ただ、初の
イオンエンジンによる推進、自
律的な小惑星への着地、試料採
取、探査機の大気圏への再突入
から成るミッションの概念的、
定性的な議論といったようなも
のは行いました。ま、どの要素
も50%くらいの成功確率と想定
されましたから、最終的にミ
ッションを完遂するチャンスはも
のすごく低くなります。私たち
はそれを承知し、政府も承知し
ていました。正直なところ、私
たちでさえこのミッションを完
遂できるという確信はそれほど
もっていませんでした。です
から、これは大きな挑戦でした。

ターナー 勇敢に挑戦されたこ
とに感嘆しています。イオンエ
ンジンの試験をもってミッシ
ョンの成功と定義することは可
能ですが、あなたやミッション
に関わった多くの人たちが何年
もの努力を傾けた後では、是非
完全な成功を得たいと切望する
に違いないのですから。

川口 その通りですね。ありが
とうございます。

通信途絶から奇跡的に回復

ターナー ほとんど絶望的な状
況が何度も発生し、その度に見
事に切り抜けたことにより、こ
のミッションは極めて劇的なも
のとなりました。その中で、何
が最も満足のゆく成功だったと
お考えですか？これが最高だ
ったとを感じるのは、どの時点、ど
のできごとでしたか？

川口 幾つかありましたが、極
めつけはカプセルが回収された
ときですね。しかし、大気圏再
突入に向けての帰還途中でさ
え、探査機との交信が5、6週間

完全に途絶えたことがありまし
た。通信が約7週間中断した後
に再び探査機から電波を受信し
た、この時もやはり最高でした。

ターナー それはアンテナの方
向を制御できなくなったため
ですか？

川口 いえ、探査機と通信シ
ステム全体がダウンしたのです。
私たちは一つ一つ徐々に機器を
立ち上げ、探査機にいろいろな
コマンドを送信してみたので
す。私たちにとっても奇跡のよ
うなもので、実に大きなでき
ごとでした。その次は、イオン
エンジンシステムの新しい構成を
工夫してエンジンを再スタート
できたときです。

ターナー その記事は
読みました。すごい
ことですね！

川口 実際にその組み
合わせが機能したとき、私たち
はこれで探査機を地球に帰還さ
せられるかもしれないと悟った
のです。それが最高に次ぐ2番
目ですね。

ターナー 実に素晴らしい。で
は、対になる質問ですが、ミ
ッションで一番がっかりした故障
あるいは損失は何でしたか？

川口 極めて複雑な技術である
イオンエンジン、自律的な航法
誘導、それから大気圏再突入は、
多分私たちの予想に反して、非
常にうまくゆきました。ところが、
リアクションホイールのよ
うな、いわばローテクとって
良いようなものが航行中に故障
しました。こういった基本的な
ものが故障しやすいとは予想し
ません。ですから、これにはと

エド・ターナーさんはプリンスト
ン大学の天体物理科学科教授で、
IPMUの客員上級科学研究員です。
太陽系外惑星、宇宙生命科学、宇宙
論、重力レンズ、クエーサー、天体
物理学における統計的問題など、広
範囲の研究を手がけています。



てもがっかりしました。

ターナー 小惑星の上を跳ね回るはずだった小さなロボット*についてはいかがですか？

川口 そうですね。探査機が上空にある間に着陸探査ロボットを放出しなければなりません。私たちは探査機が着地する際に放出することを意図しましたが、余り複雑な運用は避けるべきであると考え、その結果ロボットは探査機の着地という重要なイベントの前に分離されることになりました。しかし、当時、私たちの航法制御技術は、そのような分離を可能とする域に達していませんでした。

*「はやぶさ」に掲載されていた小型探査ロボット「ミネルバ」

ですから、あれは私たちの失敗です。今回学んだ教訓は、次のミッションに生かされるでしょう。それから、サンプル採取のための弾丸が発射されませんでした。探査機が小惑星表面からサンプルを採取しようとする、表面に向けて弾丸を発射するはずでしたが、実際はプログラミングの誤りにより発射されませんでした。あれも人為的なミスです。

ターナー ミッションで特に驚かされたこと、まさか起きるとは予想もしなかったことはありますか？

川口 実際は、私たちは困難や重大な結果につながりかねないできごと全てに対して適切な対

応策を講じました。それは、推定に基づいて考え出されたものであり、実際、通信の回復を図った時でさえそうだったので。私たちは、対応策が有効な範囲や限界を種々検討しました。しかし、推定が正しいという保証はありませんでした。推定が実際に正しいかどうかは、人間や私たちのプロジェクト自身ではコントロールできなかったので。ですから、私達は実に大きな幸運に恵まれたと思います。

宇宙探査における科学と工学の相互関係

ターナー 通常、この種の宇宙探査では、科学と工学のそれぞれの観点から、ある程度緊張関係が生じます。科学者はある種のデータをほしがるのであるし、工学者は制約条件が課されているので、実際に考えます。両者の境界は非常に複雑で微妙なバランスになり得ます。「はやぶさ」のミッションでは、これはどのように扱われたのでしょうか。

川口 「はやぶさ」は工学実験の探査計画であり、技術の実証を目的として提案されました。しかし、単に技術の実証だけを望むとするなら、実際は小惑星まで飛行する必要はありませんでした。地球の近傍で探査機をイオンエンジンで推進し、そこから大気圏再突入もできるわけです。しかし、私たちはこう考えます。どのような技術実証試験のミッションであっても、科学的成果を目指すべきであり、貴重な機会を利用するべきであると。そこで、私たちは小惑星「イトカワ」への宇宙飛行することに決定しました。ただし、これは私たちの場合についてのことです。普通は、科学目的による

推進、工学目的による推進の2種類のミッションがあります。

多分30年以上にわたる個人的な経験に基づいて言いますと、私は科学研究の実施は工学的ミッションの範囲内で可能になるという印象をもっています。ミッションは科学的目的によって推進されるべきであると主張し、そのために必要な技術を求める科学者もおります。しかし、往々にして技術は適切でないか、十分に成熟していません。その場合、計画された科学的ミッションは取り消される危険があります。宇宙開発は大きな予算を必要とし、それは政府による巨大な投資なのです。ミッションの安全な実施を確実にするため、科学的ミッションは工学的基盤を見渡して計画されるべきです。つまり、科学者は極度に複雑なミッションを要求すべきではありません。ある意味で、工学的目的で推進されるミッションは科学のためにも良い方法と言えます。私はそう考えます。

ターナー 「はやぶさ」のケースに特有なことですが、小惑星を探査するという科学的推進目標が、信号の伝達に長い時間遅れがある運用を行うという、容易ではない工学的複雑性をもたらしたいと思います。工学的な観点から見て、そのために運用がさらに著しく困難なものになりましたか？

川口 そうですね、工学的な観点からでさえ、交信に要する時間が長いことが探査や科学的観測を困難にします。しかし、私たちは、運用担当者も研究者も、皆、容易にそのような運用に慣れるということに気がつきました。小惑星の周囲に滞在した最初のうちは、実際に困難に遭遇しました。しかし、実際は徐々にうまく扱えるようになったので



「はやぶさ」は2003年5月9日に打ち上げられ、小惑星「イトカワ」探査に向けて旅立ち、2005年9月にイトカワに到着しました。この図はイトカワに接近して着地の目標となるターゲットマーカーを放出した瞬間の想像図（提供：池下章裕）です。はやぶさはイトカワに着地し、試料採取後、数々の困難を乗り越えて2010年6月13日に地球に帰還しました。

す。私たちは、もっとずっと遠くでもあのミッションの運用は可能だと思います。ですから、困難は困難ですが、とんでもなく大きなものではないと思います。

ターナー では、重要なことを学んだわけですね。

川口 多くのことを学びました。

ターナー 信号の往復にかかる時間は？

川口 およそ35分から40分です。まだそれほど大きいものではありません。しかし、探査機がさらに先へ5～6年飛行を続けられれば、信号の往復にかかる時間はかなりのものになります。

ターナー そうですね、今後の太陽系の探査にとって、それが重要な問題になります。仮に、再度ミッションを繰り返すとしたら、打ち上げ前でも後でも、重要な点で異なるやり方をするであろうということはありませんか？ 特定の問題というより、ミッションの全体計画、あるいはミッションの選択といったようなことまで、いかがでしょうか。結局は、満足されましたか？ 勿論、最後は大成功を収めたのですから、とても満足されているに違いないと思いますが。

川口 今のところ、探査機がこんなにひどく傷ついても何とか切り抜けて帰還できたことで、私は比較的満足しています。それは、どの部分が頑丈であるべきか、従って今後のミッションでは手当しななければならないか、言うことができることを意味しています。これは非常に大きな強みです。もしミッション

**このインタビューは2010年10月16日に行われましたが、その後JAXAから「はやぶさ」の持ち帰った微粒子の起源が発表されました。微粒子は岩石質で、ほとんどが地球外物質であり、確実に小惑星イトカワ起源であると判断されました。http://www.jaxa.jp/press/2010/11/20101116_hayabusa_j.html



はやぶさは2010年6月13日に地球の大気圏に再突入し、その直前に切り離された試料カプセルはオーストラリアのウーメラ砂漠で回収されました。写真(提供:JAXA、ウーメラで撮影)は左下から大気圏に突入し、燃え尽きるはやぶさ本体の火球。右上方に切り離されたカプセルの光跡が伸びています。

が途中で中断されたらこういうことを言うことはできません。

ターナー 「はやぶさ」ミッションは今や幾つか世界記録を保持しています。持ち帰ったサンプルは、今までで一番遠くから地球に持ち帰った物質に違いありません。

川口 そう願っています。詳細な解析結果の一部は数ヶ月の内に得られると思います。まだその結果を待たなければなりません。たとえ得られたものが極めて小さく、微粒子ばかりでも、中には小惑星起源の化合物を含む粒子があると私は確信しています。*

ターナー 既にテレメトリーによって送信されたデータから、2005年から2006年のサイエンスの特集号に主な結果が発表されています。今回持ち帰ったサンプルの解析から、大量の成果が同じように発表されるのでしょうか？

川口 そう思います。来年の早い時期に分かるのは、多分、初

期の解析結果だけでしょう。しかし、多分それは世界に新しい結果として示せるものでしょう。また、私たちは世界に向けて研究の提案を呼びかける公募を計画しています。サンプルと得られた結果を科学者に提供します。

ターナー 世界中の科学者が、小惑星の物質を研究する機会を得られるということですね。

川口 沢山の粒子が得られていれば、そうなります。

夢がかなう

ターナー 次にもう少し個人的なことを伺いたと思います。このような素晴らしい探査プロジェクトを率いることは、何ともロマンティックに感じられます。子供の頃や青年時代に、こういうことをするようになると想像しましたか？

川口 それが夢だったのです。私の小さかった頃から小学校の頃はアポロ、ジェミニ、マーキュリーなど、つまりジェミニ・

アポロ時代と完全に重なっていました。多くの機会に恵まれた時代でした。冷戦中、ロシアとNASAは宇宙レースを競っていました。私は月面からのテレビ中継を、本当にリアルタイムで見たのです。

ターナー 私も鮮やかに記憶しています。

川口 あれは歴史的に重要なできごとで、私は大きな感銘を受けました。アポロ11号のミッションは1969年で、日本の最初の小さな人工衛星が一番低い軌道に打ち上げられたのは翌年のことです。日本は世界で4番目に人工衛星打ち上げに成功したのですが、それでも世界では先頭を走っている方でした。とは言え、NASAやロシアには大きく引き離されていました。私は宇宙開発で我々には何ができるのだろうと考えたものですが、高校時代は日本の宇宙開発計画の将来に懐疑的でした。しかし、宇宙の探究にはとても興味があったのです。まだ先の見

通しは全く立たなかったのですが、私は大学院で宇宙開発の研究を手がけることを決意しました。この時期、1985年に日本がハレー彗星を目指して最初の惑星間探査機の打ち上げを試みるという機会に恵まれました。これが大きな契機となって、私はそれまでの観点とは異なる方向に踏み出したのです。つまり、それまでは懐疑的だったのですが、以後、宇宙開発に専念する決意を固めたのです。その後、バイオニア10号と11号、バイキング1号と2号、ボイジャーから大きな影響を受けました。これら深宇宙探査機が目標に向けていかに正確に航法誘導されたか、実感したのです。これは私の人生にとって、もう一つの大きな衝撃でした。それで、私は遠隔的あるいは自律的な操作、制御、誘導について考え始めました。探査機を極めて遠い地点まで制御し、ロボットのあるいは自律的に働かせ、そして地球に帰還させる、それこそ私がやりたかったことです。長年の後、私の夢は本当に成功を収めました。

ターナー 人生を賭けた夢を実現することができた。素晴らしいことですね。

川口 全く幸運でした。

ターナー 小惑星に到達して着陸するとは、実に素晴らしい夢です。そして、あなたの夢はミッションの期間を通して、また、特にミッションの終了後、人々の賞賛を博しました。「はやぶさ」は驚くほど多くの人々に愛されています。多分、火星着陸探査機や、有人月面着陸が似ているかもしれませんが、「はやぶさ」は多くの点でこれまでの宇宙ミッションで最も人気を博したものの一つに数えられます。

川口 特に日本ではそうです。

ターナー いや、世界中ですが、特に日本ではそうですね。それを予期しましたか？あなたにとっても驚きですか、それとも当然のことでしょうか？

川口 こういうことになるとは思いませんでした。一般の人たちからこういう反応を得ようと計画したことはありません。しかし、私たちの活動が、特に小惑星に着陸の時はそうでしたが、外部の世界から良く見えるように試みしました。インターネットを通じて、また通信の公開により、私たちがしていることを、ありのままに見せたのです。地球への帰還の旅も大気圏再突入も同様です。全て外部からはっきり見ることができました。

ただの機械とは思えない「はやぶさ」

ターナー 往って還るということでしょうか、このミッション全体に人間の感情に訴えるものがあります。旅に出た人が数々の苦難を乗り越えた末に戻る、小説か民話の筋書きのようです。人々が「はやぶさ」に感動を覚えるのも当然だと思います。勿論、プロのエンジニアや科学者としてはそれがテープレコーダーや携帯電話や自動車のような単なる機械であることは承知しています。しかし、同時に、個性を持っているかのように感じてしまいがちでもあります。つまり、探査機の「擬人化」です。あなた方の運用チームも、ある程度は「はやぶさ」が単なる機械ではなく、本物の鳥のように感じたのではないですか？

川口 打ち上げ以前、探査機の開発中はそういう感覚はありませんでした。しかし、打ち上げ直前に、思いがけなくある音楽家がジャズでミッションのテー

マ曲を作曲してくれました。彼らはそれをCDにして、ミッションがどういうものであるか、彼らが感じたことを私たちと共有してくれたのです。ジャズを作曲することにより、彼らはミッションが単なる機械あるいは探査機についてのものではないという感覚を伝えてくれました。幼い子供のように地上に戻ってくるというような。彼らは既にそれに気がついていたのですが、私たちはそういう印象は持っていませんでした。しかし、打ち上げ後、探査機は高度の自律性をもったのです。自律性はプログラムによって与えられるので、私たちは数々の規則をプログラム化して探査機に組み込みました。この自律性がなければ、イオンエンジンさえ駆動できませんでした。探査機には、多分、何百、何千という非常に多くの規則が徐々に蓄積されました。私たちは探査機が自律的に規則に従うことを期待するしかなかったのです。つまり、私たちは7年間にわたり探査機を育てたのです。徐々にプロジェクトチームは「はやぶさ」を機械ではなく、育て上げた子供のように考え始めました。

ターナー まさに育てたのですね。それは人間のとても自然な反応だと思います。さて、このミッションの間、あなたはほとんどの時間をそのために使ったと思います。一方、あなたは、JAXAの月・惑星探査プログラムのディレクターでもあります。ミッション終了後はどのようにされているのですか？今後の目標、あるいは将来に向けてこうしたいということをお聞かせ下さい。

川口 まず第一に、次のミッションを担うのは次の世代です。従って、この種の活動に従事

する専門家を増員することはできませんが、次の世代の養成に極めて重要な点は、技術や知識といったものの継承です。私は次のミッションにはっきりした形で参加することはありませんが、アドバイザーとして働くことは可能です。私は第一世代だと思われているようです。「はやぶさ」の第一世代は探査機を製作して運用することを求められました。多分、これは簡単だったと思います。しかし、それは次世代のコミュニティの力をつけることにはつながりません。私は定年までまだ8年から10年ありますが、次のミッションを提案しようとしています。それは簡単には政府に認められないかもしれません。しかし、新たなミッション、新たなプログラムの提案こそ私たちがすべきことなのです。プロジェクトチームに、新たなミッションの実施に責任をもつ次の世代が育つことを切望しています。

ターナー 最後の質問は「はやぶさ」という名前についてです。猛禽類の鳥で、英語ではファルコンですが、その名前を選んだ理由を聞かせて下さい。

川口 探査機がサンプルをつかむ様子から名付けました。はやぶさは急降下して着地し、獲物を捕らえます。探査機の任務とサンプル採取も、着地して飛び立つというやり方で実施されます。それが探査機を「はやぶさ」と名付けた理由です。

ターナー なるほど、そういうことですか。さて、「はやぶさ」についていろいろなお話を直接伺い、大変楽しい一時を過ごさせていただきました。実に素晴らしい物語です。どうもありがとうございました。