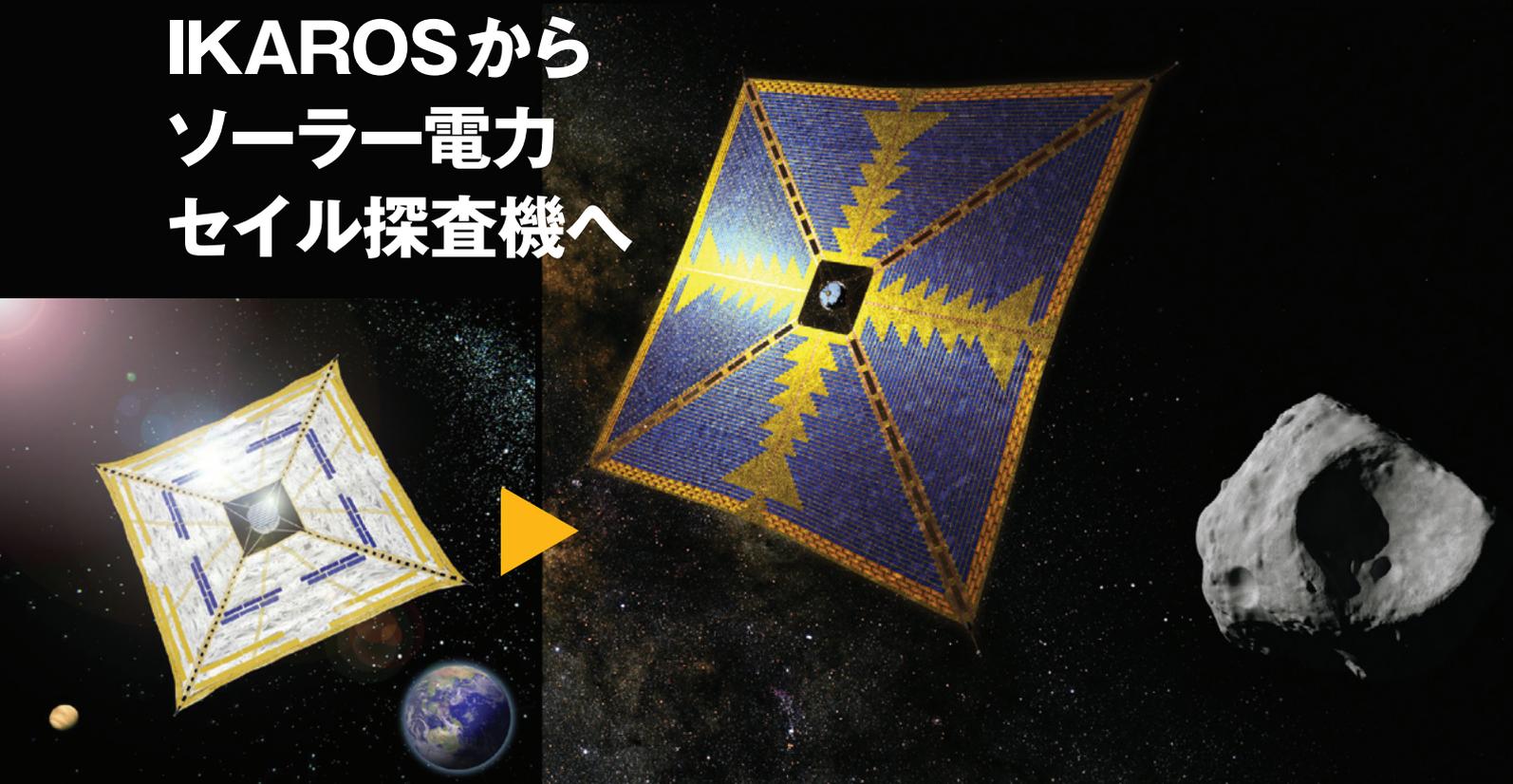


特集

IKAROSから ソーラー電力 セイル探査機へ



小型ソーラー電力セイル実証機IKAROS（左）とソーラー電力セイル探査機

はじめに

IKAROS その出生の秘密と意義

川口淳一郎

2010年6月、私は小惑星探査機「はやぶさ」の帰還とソーラーセイルの展開という、あり得ない二重のプレッシャーを感じていた。二つとも失敗に終わっていたら……、極悪非道の大悪人とでも言われていたかもしれない。

ソーラーセイルの名前はIKAROS (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun, イカロス)。失敗した神話の人物名を使うなんて、とよく言われるのだが、そうではない。イカロスの父、ダイダロスは発明家だった。創意工夫で挑戦を、という思いを込めたかった。そして、名前を国際的にしたかったことも理由の一

つだった。世界が親しめる名前として、まさに不足はあるまい。

IKAROSは、単独のミッションではない。「ソーラー電力セイル」の実験機として投げられたものだ。ソーラー電力セイルとは、太陽光と、それによって得られる電力を用いた電気推進機関を併用するハイブリッドな宇宙船である。太陽光の利用としては、ソーラーセイルによる光子推進となる。ハイブリッドというのは、この光子推進に太陽光発電を加えることを指し、さらに電気推進を行うという意味でもある。

画期的な計画だと自負している。惑星探査が人々を引き付けるのは、到達すべ

き空間が、文字通りフロンティアであるからだ。惑星探査は未踏の領域を目指すべきではないか。そういう思いから生まれた計画である。もちろん、究極的な動力源としては原子力（原子力電池ではなく原子炉）が挙げられるだろう。しかし、中・小型の宇宙船には大掛かりな原子力は不向きであるし、当面は、太陽光エネルギーを活用する時代が続くと考えられる。それを意識して、新たな宇宙船をつくろう。ちょうど、発動機と帆を備えた機帆船が登場したように。それが、ソーラー電力セイル計画なのである。実に、2000年から取り組んだ検討だった。

しかしながら、ソーラー電力セイルによって世界で初めて木星トロヤ群小惑星を目指す壮大な計画は、技術的実現性が問われ、承認されなかった。活路を見いだすべく、まずは周囲を納得させるために実験機を打ち上げなくてはならな

い。そういう考えに至る。当時開発が始まっていたイプシロンロケットでの打上げが検討されたのだが、経費が掛かり過ぎる、と追い詰められていった。たまたま、金星探査機PLANET-C(あかつき)の打上げロケットを決める理事会に陪席して、窮地に活路を見いだすことになる。余剰ペイロードがあるなら、それを下さい、と身を乗り出して言ってしまったのである。当時の立川敬二JAXA理事長が、よくそれを考慮してくださったものである。それが、IKAROS計画の誕生。

IKAROSは、いろいろなものに挑戦した。かつて、これほどまでに形状を大きく変えた宇宙機があったらうか。薄

膜太陽電池、こうして丸めて搭載できたことで世間も実現性を納得したに違いない。液晶デバイス、光圧の差で姿勢制御を行うことで光をもって光を制す。世界が「クール」と驚いた。そして分離カメラ、自画像を撮らなければ膜が開いているとは納得してくれないだろう。そうこだわって最後まで死守した、世界最小の惑星探査機だった。何の言葉も要らず、ミッションの大成功を語る。さらに、GAP(ガンマ線バースト偏光検出器)などの観測機器も世界的な科学成果を挙げた。載せていて本当によかったと思う。

IKAROSを通じて、多くの人材が育

た。IKAROSがやりたくて、宇宙研にやって来た学生も多い。若い集団にはリスクも多かったが、成長も目覚ましかった。私自身も大きな経験ができたと思う。いまや「はやぶさ2」を支える主力は、こうしてIKAROSで育った人たちだ。これからもそうでありたいし、次のIKAROSを登場させなくてはなるまいと思う。

多くの人たちが、実験機とは何か?そして実験機を投ずる価値を認識してくれたはずだ。「やれないリスクがあるから、やらない」ではない。「やれる可能性があるから、やる」のである。

(かわぐち・じゅんいちろう)

IKAROSとソーラー電力セイル探査機のミッション概要

森 治

地球を周回する人工衛星と異なり、深宇宙探査機では燃料の節約が大きな課題となります。例えば「あかつき」では、全体重量500kgのうちガスジェットの燃料は200kgになります。そこで「はやぶさ」では、ガスジェットより10倍も燃費の良いイオンエンジンを開発して搭載しました。この優れたエンジンのおかげで、「はやぶさ」は世界で初めて小惑星サンプルリターンを実現できたのです。実は、イオンエンジンを上回る究極の燃費のエンジンがあります。それがソーラーセイルです。ソーラーセイルは、太陽の光さえあれば燃料なしで推進力を得ることができるため、夢の宇宙帆船とも呼ばれます。

しかし、太陽から遠く離れるほど光が弱くなるため、ソーラーセイルで得られる推力は小さくなります。また、イオンエンジンを駆動するための電力を確保することも難しくなります。そこで、新たに日本が考案したのがソーラー電力セイルで、セイルに薄膜太陽電池を貼り付けることで大電力も得るというものです。この電力で高性能なイオンエンジンを駆動すれば、ソーラーセ

イルと合わせたハイブリッド推進となり、外惑星領域でかつてないほどの加速量を得ることができるはずです。

私たちはこのコンセプトを踏まえ、2003年に木星圏探査計画を提案しましたが、あまりにも野心的すぎるという懸念を払拭できず、採用されませんでした。代わって木星圏探査計画に向けた実験機として登場したのが、小型ソーラー電力セイル実証機IKAROSです。

IKAROSは実験機ですが、世界で初めてソーラーセイル、ソーラー電力セイルを実証することを目指したもので、単独でも十分な意義があります。具体的には、次の4項目を主ミッションとして掲げました。

打上げ後、まずは①一辺14mの正方形のセイルを広げて、張ります(展開・展張)。これを受け、②セイルに貼り付けられた薄膜太陽電池で発電します。これらを最低限達成すべきミッション(ミニマムサクセス)として、打上げ後、数週間以内で行うこととしました。

続いて、③ソーラーセイルによって加速することを実証します。そして、④ソーラーセイルによる航行技術とし

て、セイルを操作することで軌道を制御し、光子加速下でも精密な軌道決定を行う技術を獲得します。これらを達成できれば満点(フルサクセス)とし、半年かけて実施することとしました。

ずばり、四つの中で最難関は①です。これを実現するために、まず思いつくのが、マスト(支柱)にセイルを取り付けて伸ばす、という方法です。実際にほとんどのソーラーセイルの開発チームが、この方式を採用しています。これは小型のセイルには適していますが、セイルが大きくなるとマストが重くなるため使えません。そのため大型のセイルでは、セイル全体をスピンさせてその遠心力で展開・展張する必要があるのですが、挙動が複雑になるため非常に難しくなります。しかし我々は、木星圏探査計画に向けて技術課題をクリアするため、あえて難しい、このスピン方式を採用しました。

また、③以降は地球の重力の影響を完全に排除するため、地球周回軌道ではなく惑星間軌道で実施する必要があります。この条件を満たしてくれたのが「あかつき」との相乗り打上げで、

イカロス君にとってあかつきと一緒に旅ができたのは、とても幸運なことなのです。

2010年5月21日に打ち上げられたイカロス君は大成功を収め、2010年12月の金星通過後も追加ミッション(エクストラサクセス)を次々と達成し、気が付けば6歳を迎えようとしています。次は、いよいよ木星圏探査計画を実施したいとの思いが強まってきました。

この計画では、IKAROSの10～15倍の面積のセイルと「はやぶさ」の2～3倍の燃費のイオンエンジンを組み合わせたソーラー電力セイル探査機が、地球スイングバイと木星スイングバイも使って、木星圏にあるトロヤ群小惑星に世界で初めて到達します。トロヤ群小惑星をリモート観測した後は、子機を切り離します。子機は、小惑星に着陸して表面および地下サンプルを採取し、その場で分析を行います。さらにオプションとして、子機が離陸して親機にサンプルを引き渡し、親機が木星経由で地球へ帰還するサンプルリターンを行います。

ソーラー電力セイル探査機は、トロヤ群小惑星へ向かうクルージング期間も有効活用し、複数の天文科学観測を行います。特に地球出発から木星スイングバイまでの太陽距離が大きく変化していく環境はとても重要で、この間に主な成果を出すことができます。実はIKAROSで観測機器として搭載したALADDIN(大面積惑星間塵検出アレイ)

とGAP(ガンマ線バースト偏光検出器)は、このための先行実証という位置付けであり、科学成果も挙げています。

約15年前にソーラー電力セイルの検討を始めたころは、トロヤ群小惑星探査は世界に例のないミッションでした。その後、トロヤ群小惑星が注目されるようになり、我々の計画を参照しながら欧米でも盛んにミッション検討を行うようになりましたが、トロヤ群小惑星へのマルチフライバイかランデブーが限界となっています。我々のミッションで着陸や往復を実現できるのは、ま

さにソーラー電力セイルの優位性を示しているといえるでしょう。親機の代わりに子機が着陸すること、フレッシュな地下サンプルを採取すること、すぐにその場で分析することなど、「はやぶさ」シリーズと比べてもより高度な探査を目指します。

ソーラー電力セイル探査機は、はやぶさ君やイカロス君が切り拓いた太陽系大航海時代を先導し、宇宙科学に大きく貢献できると確信しています。本番計画の実現に向け、全力で頑張っていきたいと思います。(もり・おさむ)

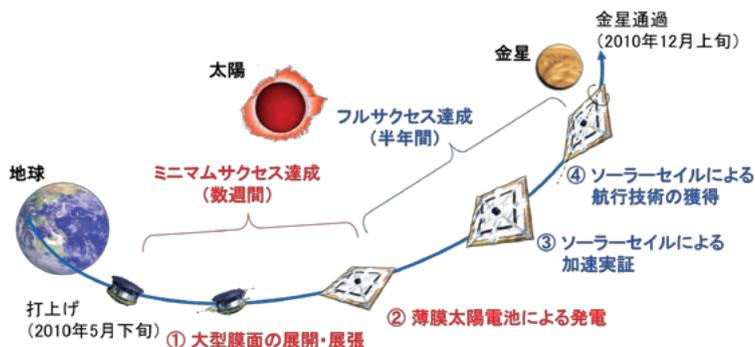
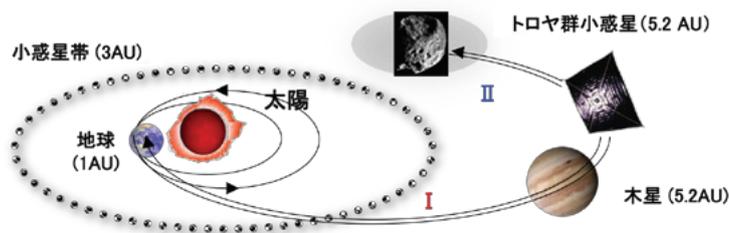


図1 IKAROSのミッションシーケンス



- I. クルージングサイエンス
- ・宇宙赤外線背景放射の掃天観測
 - ・黄道光の立体的観測・分光観測
 - ・太陽系ダスト分布のその場計測
 - ・ガンマ線バーストの偏光観測
 - ・磁場観測

- II. トロヤ群小惑星サイエンス
- ・リモート観測
 - ・表面&地下サンプル採取・分析

図2 ソーラー電力セイル探査機のミッションシーケンス

コラム

IKAROSのコスト・スケジュール管理

森 治

IKAROSは、「あかつき」の打上げ振動を緩和するためのダミーウェイトの代わりとして打上げを認められたものです。IKAROSとしては、相乗りでありながら、ソーラーセイル航行の実証にとって最も望ましい惑星間軌道へ投入してもらえ、願ってもない機会であったといえます(ちなみに、IKAROSの「I」はInterplanetary, すなわち「惑星間」を指しています)。

しかし、IKAROSは計画開始から打上げまでわずか2年半で、従来の科学衛星の1/2～1/3しかありませんでした。さらに、プロジェクト経費も従来の科学衛星の1/10規模しかなく、スケジュールとコストに常に悩まされることとなりました(何度も夢に出てきました)。

この無理難題を克服するため、IKAROSではいくつもの思い切った開発方針を取りました。まず、熱・構造試験モデルを製作しない方針とし、その代わりに熱真空試験で問題があった場合には、本体下面にある放熱面の面積を調整できる設計としました(実際には、これを行ったにもかかわらず、打上げ直後

に温度が冷えて肝を冷やしました……。また、本体を単純な円柱形として機械環境を予測しやすくし、質量をケチらずに頑丈な設計とすることで、振動試験を一発で確実にクリアできるようにしました。

次に、バス部とミッション部のI/F（インターフェース）を明確にすることでそれぞれ独立に開発できるようにし、詳細設計審査も別々に実施しました。バス部は、M-Vロケット、月探査機LUNAR-A、「はやぶさ」、データ中継技術衛星「こだま」など、ほかのプロジェクトの利活用品を積極的に流用しました。また、多少オーバースペックであっても、「あかつき」などの既開発品をそのまま再製作することで開発リスクを軽減しました。一方、ミッション部については、マンパワーを集中させ、若手職員・学生が開発を主導しました。

IKAROSの開発が間に合わない場合、打上げ延期は認められず、ダミーウエイトの役割を果たすために未完成のまま強制的に打ち上げられることとなります。この罰ゲームを避けるため、どんなに苦しくてもスケジュールに適切なマージンを確保するようにしました。特に「あかつき」と交互に実施する

熱真空試験・振動試験はスケジュール変更が困難であることを踏まえ、その前に1ヶ月の予備期間を用意しました。結果、フライト品の製作の遅れをここで吸収し、スケジュールをキープできました。また、射場への移動前にも2ヶ月の予備期間を設けましたが、ここも総合試験で判明した問題点の改修作業などに充てることができ、ギリギリ間に合わせることができました。

このように、IKAROSの開発には多くの困難を伴いましたが、IKAROSのミッションは世界で初めてソーラーセイルに挑戦するという大変魅力的なものであったため、チームの士気を維持するのは比較的容易でした。この厳しい条件で開発されたIKAROSが大成功を収めることができた一番の要因は、やはりワーキンググループで事前研究をしっかりとやっていたことだと思います。

上記の体験から、コスト・スケジュールの制約は決して甘く見ることはできませんが、工夫次第で何とかなるものであり、やりたいことを諦める理由にはならない、と考えるようになりました。

(もり・おさむ)

セイル

横田力男 田中孝治 相馬央令子

■セイルの構成

IKAROSは2010年5月に打ち上げられ、差し渡し20mの翼を広げ太陽の光を受けて惑星間を航行しました。ギリシャ神話に出てくるイカロスは、ろうで固めた鳥の羽でつくられた翼で大空を飛びましたが、現代のIKAROSの翼であるセイル膜は、厚さわずか7.5 μ mの非常に薄いポリイミドフィルムでつくられています。食品用ラップフィルムの厚さが十数 μ mなので、それよりももっと薄いフィルムです。IKAROSでは2種類のポリイミドフィルムが用いられました。

一つは、1960年代のアポロ計画のころに開発された米国デュボン社のKaptonに類似したポリイミドです。この材料は、放射線や紫外線に耐え、かつ高い耐熱性があります。そのため、

フィルム同士は熱融着ではなく接着剤で貼り合わせる必要があります。もう一つは、JAXAで開発された熱融着可能なポリイミドで、ISAS-TPIと呼ばれています。Kaptonのような一般的なポリイミドの特徴である対称性芳香族複素環の単位基本構造を崩す（非対称構造）ことにより、高い耐宇宙環境性を有しながら熱可塑性を発現させることを実現したものです。加熱することでスーパーのレジ袋のようにフィルム同士を熱融着できるため、接着剤を使用する必要がなく、接合部の品質管理評価、製造工程の削減が可能になります。当初IKAROSでは、時間的な制約により接着膜を基本としましたが、将来を見据えて部分的に熱融着膜も取り入れて、広く薄い膜をつくりました。

セイル膜の全体図を図1に示します。

セイル膜面上には、薄膜太陽電池、宇宙塵の衝突を検出するALADDIN（大面積惑星間塵検出アレイ）、姿勢制御を担う液晶デバイスなどの薄膜状デバイスが搭載されました。また、一辺14mの膜面は、四つの台形ペタルに分割されて製作されました。四つのペタルはブリッジと呼ばれる面ファスナで接続されて、正方形状になります。正方形の四隅には、遠心力による膜の展開・展張維持のための先端マスが取り付けられています。図2にペタルの写真を示します。

■薄膜太陽電池

通常の人工衛星には、ガラス板のような太陽電池が使用されています。しかし近年、プラスチックフィルムを基板とした薄膜状の太陽電池が民生用として開発されてきました。厚さは、基板を含めて30 μ m程度です。この太陽電池は、耐放射線性が高く、フィルム状で柔軟性にも優れています。IKAROSでは、このような太陽電池を

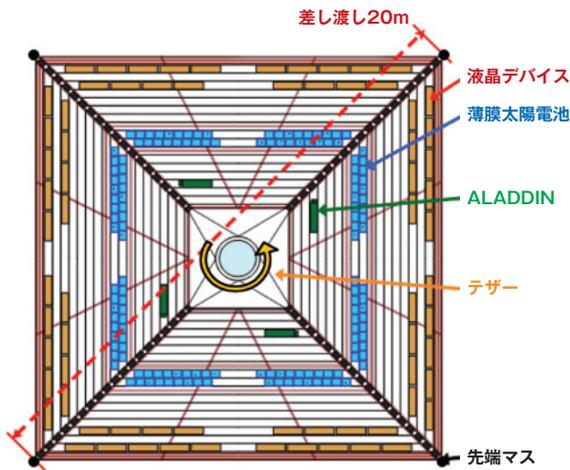


図1 ソーラーセイル膜面の全体像と
主なデバイスの配置



図2 フライトモデル予備
ペタル表面（太陽面）



図3 薄膜太陽電池ユニット

膜面上に搭載し、軌道上で展開、発電を行う実験が実施されました。搭載された太陽電池ユニットを図3に示します。この薄膜太陽電池ユニットは多層構造をしていて、ベースのセイル膜に薄膜太陽電池と宇宙環境から太陽電池を守る保護膜（ISAS-TPI）を接着剤で貼り合わせました。どれもコピー用紙よりも薄く、さらに電極や集電回路も薄膜です。試作の際には、「その辺にあるもので薄膜の太陽電池に10 μmの接着剤を塗って、保護膜を貼り付けて

きて」ということが、よくありました。接着剤を薄く均一に塗れる装置があるわけではなく、家庭用ラップフィルムより薄いペラペラの保護膜を、しわを入れず、空気も入れず、ピッタリ貼り付けるには、どうしたらいいでしょう？ IKAROSは締め切りが本当にタイトだったので、最適な装置や道具がない状況での試行錯誤がずっと続きました。ベストなものをつくりたいとギリギリまで粘っていたら、結果的にプロトタイプモデルまでのすべての薄膜太陽電

池のユニットは宇宙研で手づくりすることに。そんな薄膜太陽電池開発でしたが、無事軌道上で地上検証データと近い発電特性が得られました。ミッション成功です。IKAROSの観測画像やイラストを見たときには、ぜひ薄膜太陽電池を探してみてください。イカロス君の歌の歌詞にも登場しますよ。

（よこた・りきお、たなか・こうじ、
そうま・えりこ）

コラム

学生としての参加1：材料部会

三柘裕也

IKAROSの材料部会というのは、セイルを製作するに当たって組織された部会です。セイル材料であるポリイミドの専門家の先生や、セイル上に搭載されている複数のデバイスの担当者、および学生で構成されていました。学生の役割は、セイルの巻き付けやセイルに搭載するデバイスの要素試験の実施など、多岐にわたっていました。私は、（メーカーさんの協力のもと）セイル全体のインテグレート（統合）とスケジュール管理の補佐役を任されていました。もちろん担当の職員さんがいらっしやったのですが、ご多忙だったこともあって、かなりの部分を任せていただき、学生でありながら実プロジェクトの中での立ち回りなど、大変勉強させていただきました。

ただ、それだけが大変苦しい学生時代を送ったのも事実です。本分が学生である以上、自身のテーマの研究は必ずやらなければならないわけですが、実プロジェクトに組み込まれると、もはやそれどころではありません。スケジュール管理や調整といったことを手始めに、セイルのインテグレートの中で起こるさまざまな問題を解決するため、とにかく奔走する毎日でした。そういった形で、福島県にあるメーカー工場と宇宙研を行き来する日々の合間に、何とか並行して自身の研究を進めるよう努めていました。今思うと、このときの経験があったからこそ、今の自分がいるように思います。あのとき、苦しいながらも走り続け複数のことを同時に進めていた経験が、現在の複数のプロジェクトの中で仕事を進めていくスキルの礎となったのかもしれない。そして、いつも何かに追われて死にかけているスタイルも、このとき身に付いてしまった負の遺産なのでしょう……。 （みます・ゆうや）

セイル展開ミッション

澤田弘崇

一番感動した瞬間——宇宙空間でセイルを広げたIKAROSの姿を確認できたときの感想を聞かれ、こう表現しました。自分の設計した展開機構、設計だけでなく手づくりした分離カメラが撮った画像データ、シミュレーションでしか見ることのできなかったセイルを広げた姿。セイル展開ミッションの重圧から解放された瞬間でもありました。その後、「はやぶさ2」の開発に携わりましたが、「一番」はいまだ変わっていません。

セイルの展開成功を画像で確認した瞬間と同様に、ロケット打上げを種子島で見送ったときの重圧感も、今でも鮮明に思い出すことができます。今では笑い話として語っていますが、開発当時は本当に寝る時間がなくらい苦勞をして開発した探査機で、複雑なセイル展開機構と分離カメラ。十分試験を積んでいるとはいえ、打上げ時にはやはり不安になるものです。

打上げから約1週間後、先端マス分離の日がやって来ました。セイルの四隅

に取り付けられている先端マス。このスタート一歩目をコケると、そこから先には進めません。ロンチロック(固定具)の信頼度を上げつつも展開の信頼度を上げるよう、苦心して産み出した機構アイデアです。機構が正常に動き、先端マスが機体から外れたことを示すテレメトリが返ってきたときには、ホッと胸をなで下ろしました。

次は、セイルの展開です。展開は11シーケンスに分割した準静的な1次展開と、動的な2次展開とで行います。地上で試験と検証を十分にやっても、宇宙では何が起るかわかりません。モニタカメラなどで確認しながら着実に進めていきました。

2010年6月9日、ついに2次展開実行。IKAROS最大のイベントです。2次展開ではセイルが動的に広がるため、機体のスピンドールが急激に変化します。テレメトリにより、スピンドールと姿勢が急激に変動したことが確認できました。運用室に緊張が走ります。

スピンドールの振動がほぼ解析値通りに落ち着いたことを示すグラフ。それは世界初の宇宙ヨット誕生を示すものでした。大きく広がったセイルにいっぱいの太陽光を受け、宇宙ヨットとしての航海が始まりました。

世界初のセイル展開成功を喜んでいのもつかの間、IKAROSでは、もう一つユニークな世界初のミッションが控えていました。本体固定のカメラ画像では、どうしてもセイルの形状を正確にモニタすることはできず、ましてやセイルを広げた全景を撮ることはできません。超小型のカメラを本体から分離し、離れながら撮像した画像データを本体まで無線で送る分離カメラミッションです。分離カメラは直径6cm×6cm程度と超小型ですが、れっきとした宇宙機で、後に世界最小の惑星間子衛星としてギネス世界記録に認定されました。

分離カメラから最初の画像が送られてきました。そこまできれいな画像が送られてくるとは思っていなかったので、徐々に表示される画面に写っているものが何か理解できず、「何だこれ?」と思ったのを覚えています。それは本体の太陽電池セルで、1枚1枚がハッキリ分

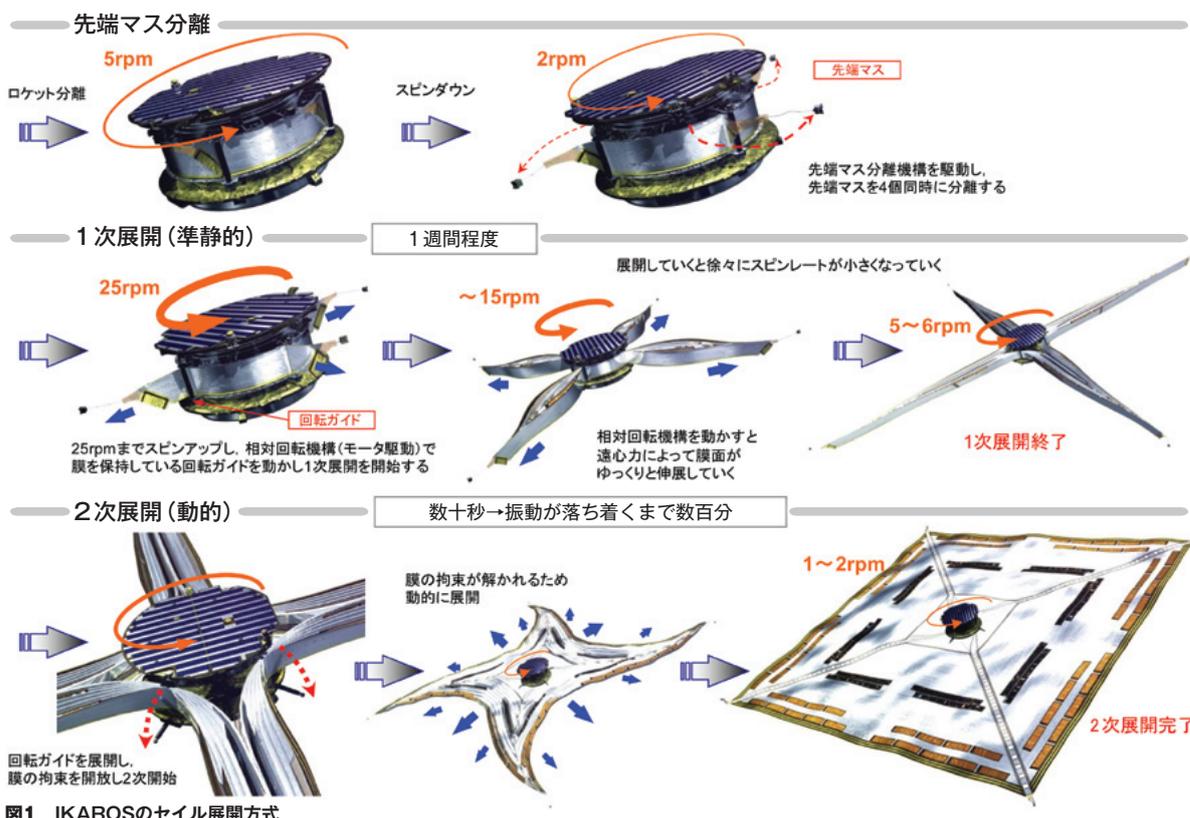


図1 IKAROSのセイル展開方式

かるほど鮮明な画像でした。その後、分離カメラは本体から離れながら画像を撮り、IKAROSの全景が明らかになっていきます。

宇宙空間で広がったセイルがどのような様子であるかは、数値シミュレーションでしか知るすべはありません。開発した我々全員、実際に広がった姿を目で見るのは初めてのことなのです。太陽光を受け輝かしく光るセイルは神々しくもあり、冒頭に書いた「一番感動した瞬間」でした。セイルの展開機構、分離カメラ、苦勞して産み出した機構たちは本当にパーフェクトに動いてくれ、セイル展開ミッションを成功させることができました。

IKAROSで産み出した技術を、現在検討されているソーラー電力セイル探査ミッションへつなげられるようにするにはいけません。今の“一番”を超えられるようなミッションを実現したいですね。（さわだ・ひろたか）

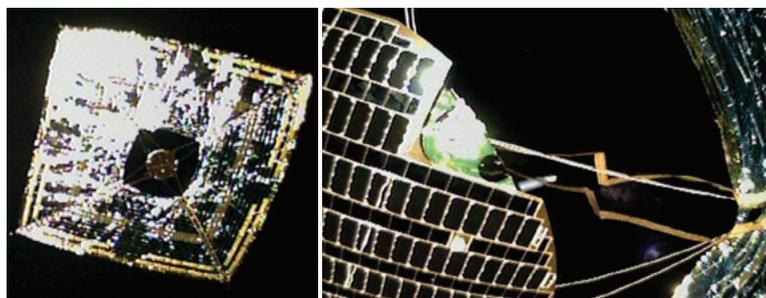


図2 分離カメラが送ってきたIKAROS全景画像と本体近傍画像



図3 セイル展開機構フライトモデル（左）とセイルを収納している様子（右）

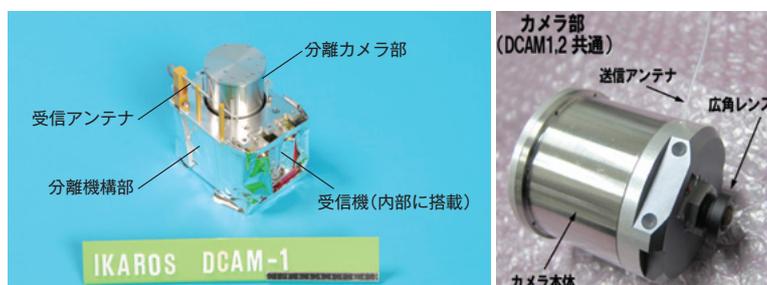


図4 分離カメラ (DCAM1) と分離されるカメラ部のフライトモデル

コラム

学生としての参加2：構造部会 会議は踊る、そして進む

白澤洋次

修士論文発表が終わったところに何となく参加したその定例会議は、長時間会議が敬遠されるこのご時世において、7時間を超えるものでした。私が参加する前にはさらに長いときもあった、という恐るべき会議です。

それが、IKAROSのセイルの収納・展開方式について検討する「構造系専門部会（構造部会）」の会議でした。宇宙研以外からも構造系の先生方、そしてその研究室の大学院生たちも集めて行われ、毎回、白熱の議論がなかなか収束しない展開となりました。

このような議論の“燃料”である解析や実験の結果を供給するのが、当時の私たち学生の立ち位置でした。通常の研究室のゼミとは異なり、この結果がプロジェクトの進行を左右するかもしれないという緊張の中で議論のやり玉に挙げられるのは、とても刺激的な体験でした。プロジェクト開発の生の現場に触れながら研究できる、宇宙研の学生の醍醐

味といえるでしょう。

IKAROS、そして構造部会にとって一つの山場は、セイルを最終的に展開する2次展開実行コマンドをIKAROSに送る直前の4日間にあったと思います。実は、セイルを展開する最終準備を進める中で、その挙動に予想外の現象が見られ、このまま進行すると展開に不具合が発生するのではという懸念が出たのです。

この期に及んで実験か……と思いつつも急ぎよ週末に集話し、IKAROSのセイル試験モデルを使った検証実験を実施。さらに解析結果や運用フローチャートもそろえ、展開前の最後の“燃料”を投下しました。その燃料をもとに連日開催された臨時構造部会で慎重に議論した結果、ようやくセイル展開再開の結論に収束し、2010年6月9日の2次展開実行コマンド送信にこぎ着けたのです。

展開成功を確認した後に撮った部会メンバーの集合写真は、連日の長時間会議の疲れにもかかわらず、みんな満面の笑みで写っています。世間では忌避される長時間会議も、各人の論点を整理し、IKAROSプロジェクトを前に進め成功に導くためには必須の、重要な儀式だったのかもしれませんが。

（しらすわ・ようじ）

IKAROSの姿勢系・航法誘導技術

津田雄一

IKAROSは、機体全体をスピンさせることで姿勢安定とセイルの形状維持を実現している。セイルは180m²、厚み7.5μmという大面積・超柔軟構造物であり、このセイルを太陽に対して適時に適切な方向に向けてやるのが、ソーラーセイル船にとって本質的に重要である。その一方、IKAROSはH-IIAロケット初の深宇宙相乗りミッションであり、JAXAの探査機としては異例の低コスト・短期開発が強い。そこで、IKAROSの姿勢系システムは、この束縛を好機と捉えて多くの工夫を採用した。例を三つ挙げよう。

第一に、気液平衡スラスタ、液晶デバイスなど新規技術の積極的な採用。

特に、液晶デバイスをソーラーセイル技術へ採用した意義は非常に大きい。無燃料推進システムのソーラーセイルが、この液晶デバイスにより、無燃料姿勢制御システムとしての機能も得ることになる。まさに、オールフォトンのソーラーセイルシステムへつながる技術といえよう。

第二に、通信電波をフル活用した計測手法。実はIKAROSには、姿勢決定のためのセンサとしては太陽センサを一つしか搭載していない。通常これでは探査機が宇宙空間でどの方向を向いているかを定めるには次元が足りないのだが、IKAROSから送信される電波のドップラー計測を地上で行うことで

補っている。こんなことをする理由はコスト節約のためだったのだが、ソーラーセイルの性能を計測するためには、もともと精密なドップラー計測の仕立てが不可欠だったため、このような一石二鳥の創意工夫ができたといえる。期せずして原理上の最小構成の姿勢決定システムをつくり上げたことは、副産物的ながら、技術のどんな高みにも挑むIKAROSならではの成果だ。

第三に、大面積・柔軟膜面を持つ機体を自在に操る姿勢制御ロジック。柔軟構造物は、宇宙技術では対処が最も難しいものの一つである。それは、大きな構造物の挙動を地上で実験的に確認することができないからである。IKAROSの開発でも、膜面挙動の把握のために計算技術を重視した。国内の構造・計算技術の研究者が集まり、我々の過去の多種多様な実験結果を踏まえて、膜面挙動計算技術を磨いていったのである。その成果が、IKAROSの気液平衡スラスタを使った姿勢制御ロジックに「Flexラムライン制御」という名前で盛り込まれ、液晶デバイスでセイルそのものの向きを直接制御する手法の実現につながったのである。

次に、IKAROSの誘導航法技術について紹介しよう。IKAROSは打上げから3週間後の2010年6月9日、見事セイルの完全展開に成功した。ドップラー信号を見ていた私たちがその瞬間目の当たりにしたのは、明確な“加速”であった(図1)。計測された加速度は、事前の予想通りの $3.6 \times 10^{-6} \text{m/s}^2$ 。これほどきれいに設計通りの加速が見えると、設計当事者でも身震いがする。まさに、世界初のソーラーセイル船実現の瞬間に立ち会っていることを実感するデータであった。

その後の6ヶ月間の航行で見えてきたのは、探査機の複雑な姿勢運動であった。その原因は、セイルの細かいシワにある。セイル一面の微細なシワの凹凸で太陽光の反射の仕方が有意に変わるのである。ソーラーセイル機においては、軌道制御イコール姿勢制御である。IKAROSをできるだけ長く運用するためにも、また将来のソー

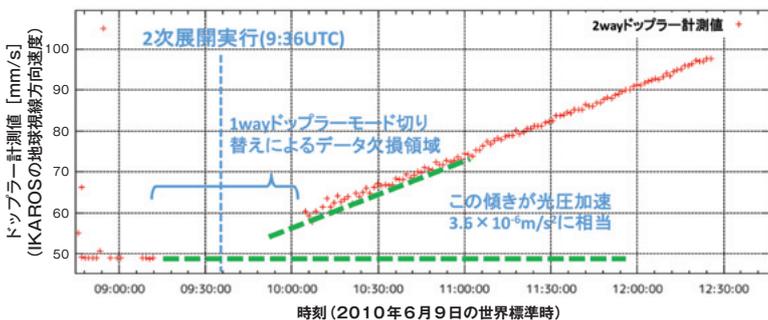
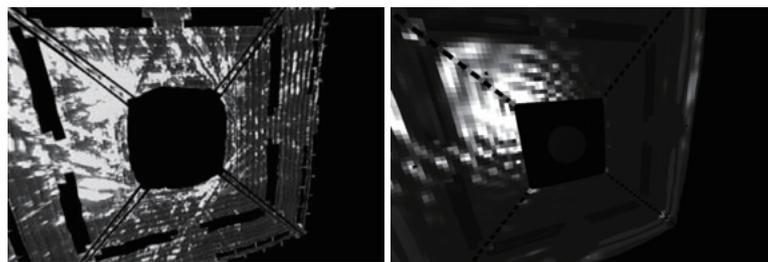
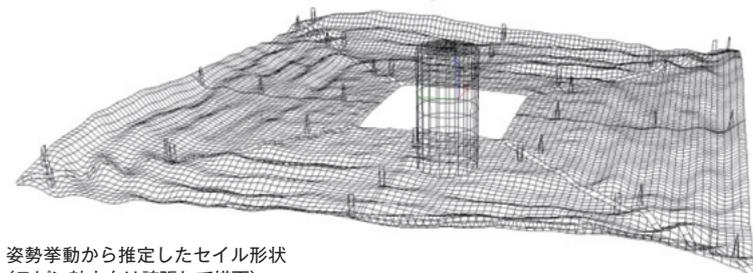


図1 光圧加速が確認された瞬間の2wayドップラーデータ



分離カメラによる実画像

形状推定の3Dレンダリング結果



姿勢挙動から推定したセイル形状 (スピン軸方向は誇張して描画)

図2 IKAROSの姿勢挙動データからセイル形状を推定した結果と実画像の比較

ラーセイル技術のためにも、できるだけ効率よく、思った方向にセイルを向ける手法を習得する必要があった。プロジェクトメンバー総出で試行錯誤すること1ヶ月、ついにシワの影響を読み、それに逆らわずうまく受け流して帆の向きを制御する手法が編み出された。その手法は、その後「Generalized Spinning Sail Model」という名で理論化されることになる。この手法で帆の向きを制御したところ、当初約半年分として搭載していた姿勢制御燃料を3倍以上長持ちさせることができた。また、姿勢運動からセイルのシワの状態を逆推定する手法も編み出され(図2)、ここに、ソーラーセイルの材料・構造・姿勢制御・航法誘導システムを統合した体系が、IKAROSを通じて出来上がったのである。まさに工学実証ミッション冥利に尽きる作業であった。

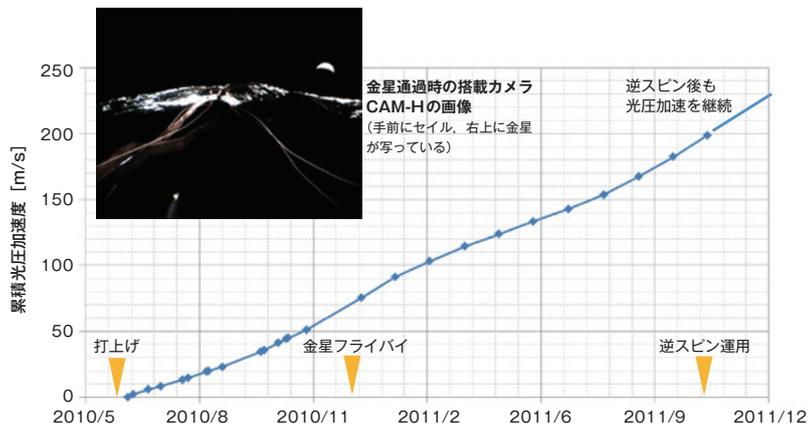


図3 IKAROSの太陽光圧加速実績と金星フライバイ時の画像

IKAROSは、2010年12月8日に金星をフライバイした。ソーラーセイルによる軌道制御の結果、同じロケットで打ち上がった「あかつき」とは反対側の、金星の夜側、距離8万kmの点を通過させることができた。その後も、1年当たり130m/sの光圧加速を

し続けている(図3)。太陽と帆がある限り、IKAROSの加速は続く。行き着く限り、光圧加速の記録を更新し続けてほしいものだ。(つだ・ゆういち)

コラム

学生としての参加3：加速度部会

山口智宏

IKAROS加速度部会は、IKAROSのアストロダイナミクス(宇宙航行力学)に関する研究を議論する場です。この加速度部会では、IKAROSのメインミッションである「ソーラーセイルによる加速」と「ソーラーセイルによる航行技術の獲得」に関する活発な議論が行われていました。世界初のソーラーセイルであるIKAROSで、どのようにすれば正確にソーラーセイルの加速度を求めることができるのか、どのような航法誘導を行えば将来の宇宙探査に活かすことができるのか、貴重な軌道上実証の機会に成果を最大化するためさまざまな提案が行われました。その結果、精密なソーラーセイルの加速度推定だけでなく、ソーラーセイルを打ち上げて初めて分かった運動が解明され、大きな成果を挙げることができました(「IKAROSの姿勢系・航法誘導技術」参照)。

このIKAROS加速度部会は、JAXAのスタッフや大学の先生方だけではなく、学生にも広く門戸が開かれていました。私は、宇宙機の軌道工学に関する研究を行うために、2007年から2012年まで博士課程の学生として相模原キャンパスに在籍してい

ました。そのため、IKAROSの打上げ前から後期運用まで、IKAROSプロジェクトの最も面白い期間に携わることができました。特に、セイルの展開を開始した2010年6月3日には、世界中のアストロダイナミクス関連の研究者がうらやむソーラーセイルのフライトデータに、いち早く触れることができました。これらを通じて、宇宙探査における目標設定、その目標を達成するための開発、そして運用を通じてデータを取得し、その目標を達成する、という一連の流れを学ぶことができました。10年に1回ともいわれる深宇宙探査機の運用期間に、相模原で研究できたことは非常に幸運だったと思います(2010年は、IKAROSの打上げに加え、「あかつき」の打上げ、「はやぶさ」の地球帰還もありました)。もちろん私だけではなく、多くの学生がこの加速度部会に参加していました。現在もIKAROSのフライトデータは貴重なソーラーセイルの実データとして、多くの学生の研究に使用されています。

ちなみにIKAROS加速度部会は、ときおりIKAROS“過食度”部会と名を変えて活動しています(現在進行形)。この分科会は、焼肉食べ放題の現地調査を主目的としています。開催日の翌日は、十中八九、胃の調子が悪くなるため、その後の予定を十分に吟味した上、覚悟を決めて挑む必要があります……。(やまぐち・ともひろ)

液晶デバイス

船瀬 龍

IKAROSのソーラーセイル膜面には、電氣的に光学特性（反射率や吸収率）を変化させることのできるデバイス（液晶材料を使っていることから液晶デバイスと呼びます）が搭載されています。セイル膜面の外周部に搭載したデバイスの反射特性を場所ごとに変化させることによって、セイルに印加される太陽輻射圧を不均一にし、セイル全体の姿勢を変更するためのトルクを発生させるという考えです。IKAROSのようなスピン型ソーラーセイルは、セイルを展開するための構造部材が必要ないという観点で軽量（すなわち光圧による加速度を稼げる）というメリットがある反

面、その大きなセイルを回転させていることによる大きな角運動量の方向を変える（姿勢制御する）には、多くの推進剤が必要になるという欠点がありました。液晶デバイスは、電気エネルギーのみで姿勢制御トルクを発生させることができます。軽くて性能が良く、さらに（軌道制御だけでなく姿勢制御にも）推進剤を必要としない、究極の宇宙船につながる革新的なコンセプトを、IKAROSで実証しようとしたのでした。

一方で、液晶デバイスを実現するに当たっては課題もたくさんありました。デバイスの小片を試作しながら各種放射線や温度・真空などの宇宙環境耐性

の評価をし、何とかいけそうとめどが立った後には、IKAROSの大きな膜面に搭載できるだけの大面積のデバイスを用意するために、効率的で再現性のある製造方法をメーカーさんと一緒に試行錯誤するなど、開発スケジュールに追われる忙しい日々を過ごしました。

ここでは書き切れないほどの苦勞をして搭載までこぎ着けた液晶デバイスは、軌道上で無事に機能し、分離カメラによってその動作の様子撮影に成功。姿勢制御実験においても想定した姿勢制御トルクをきちんと発生できました。開発者自身、「原理的にはちゃんと姿勢制御できるはずなんだけど、本当に物理法則の通り動くんだなあ」と半分安心、半分驚きをもって、IKAROSのテレメトリを眺めていました。

（ふなせ・りゅう）

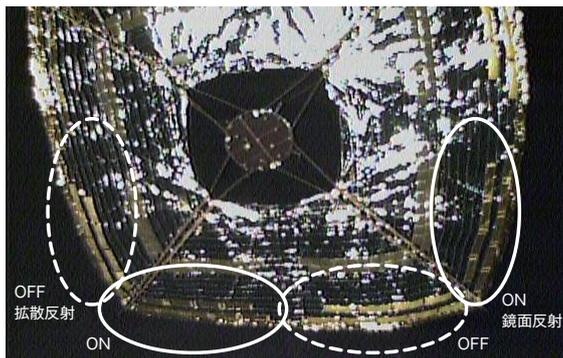


図1 液晶デバイスの動作の様子

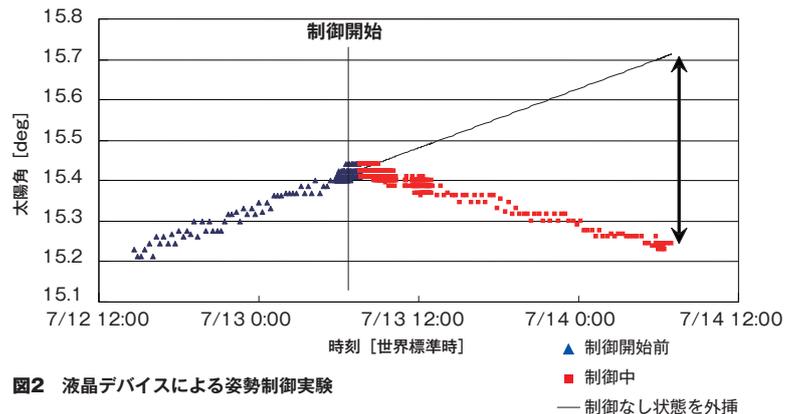


図2 液晶デバイスによる姿勢制御実験

コラム

液晶デバイスの改良

中条俊大

IKAROSでは、セイルのねじれ変形により太陽光圧の作用で勝手に探査機のスピンレートが減少してしまう効果（風車効果）が見られました。IKAROSの燃料のほとんどは風車効果を相殺して姿勢を安定させるために消費されています。新しいソーラー電力セイル探査機では、燃料を消費せずにこれを相殺するために、IKAROSの液晶デバイスを改良した新型液晶デバイスを開発中です。改良ポイントは、電圧をかけることで反射率だけでなく反射方向まで変化させることです。これにより、姿勢制御に加えスピンレート制御も可能に

なります。ソーラー電力セイル探査機には必須の機能です。

現在、私は博士課程の学生という立場で開発に取り組んでいます。私が宇宙研に来た当時、IKAROSはすでに1回目の冬眠モードに入っており、新しいソーラー電力セイルミッションの検討が始まって日が浅いころでした。私にとって、本格的な検討に初めから携わることができている思い入れのあるミッションです。宇宙研3年目のころから新型液晶デバイス開発の主なスタッフとなり、開発初期段階という最も面白くおいしいところを経験させていただいています。

新型液晶デバイスの基本的な構造は、IKAROSの液晶デバイスを踏襲しています。IKAROS時代の開発話などを当時の担当者からヒアリングした

り、反射方向を変えるための基本的な実験をしたりすることなどから始めました。しかし改良といっても簡単なものではなく、ほかの研究室、メーカー、大学などさまざまな人たちに協力していただきながら、試行錯誤を繰り返しては結果に一喜一憂する日々です。それでもこの一つのデバイスに多く

の人たちが携わり、少しずつつくり上げていくことは楽しく、ある意味、宇宙探査機開発の醍醐味がこのデバイスにも凝縮されている気がします。

今は新型液晶デバイスが宇宙で機能する日を頭に思い描きながら精進するのみです。

(ちゅうじょう・としひろ)

IKAROSの推進系

山本高行

IKAROSの推進系には、新規開発された気液平衡スラスタと呼ばれるシステムを採用しました。気液平衡スラスタとは、推進薬として液化ガスを使用し、液体状態でタンクに貯蔵して推進薬自身の蒸気のみを抽出し、コールドガスとして噴射することで推力を得るスラスタです。従来の推進系としては、コールドガススラスタやホットガススラスタなどがあります。気液平衡スラスタは、高圧気蓄器を用いたコールドガススラスタに比べるとエネルギー密度効率に優れており、また燃焼器を必要とするホットガススラスタよりもシステムが簡素になることが特徴です。

気液平衡スラスタの推進薬には液化ガスであればどんなものでも使用することができますが、IKAROSでは推進薬として代替フロン的一种であるHFC-134aを採用しました。HFC-134aは無毒・不燃性であるため取り扱い性が良く、ダストブローやカーエアコンの冷媒など、身の回りの商品にも使用されています(ただし、温暖化係数が高いため将来的には使用が禁止される予定です)。このように取り扱い性の良い推進薬の特性は小型宇宙機に適しています。

IKAROSの推進系は、約20kgの推進剤が充填された推進薬タンク一つと、主系(A系)4本、従系(B系)4本の計8本のスラスタから構成されています。これらのスラスタの中から目的に応じて噴射を行う組み合わせを適切に選択することによって、スピンレート

調整やスピン軸の方向制御を行います(図1, 2)。

推進薬を液状で噴射してしまうと、効率が悪化して推進薬を早期に使い果たしてしまうことになるため、無重力環境下においても確実に推進薬の気液

分離を行い、気体のみを噴射することが重要となります。そのためIKAROS推進薬タンク内部には発泡金属という多孔質状の金属が充填されており、液体推進薬が保持されています。その上部にはメッシュがあり、液体と気体を

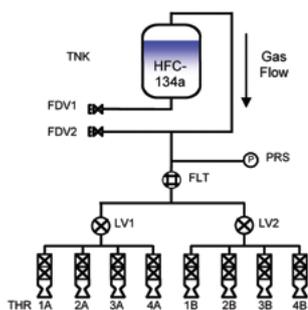


図1 推進系機能系統図

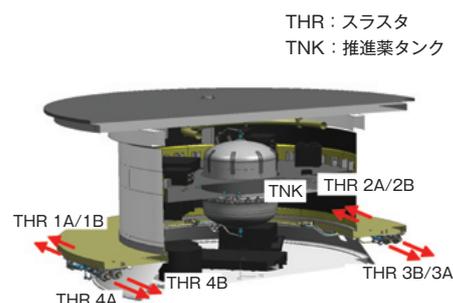


図2 スラスタ配置図

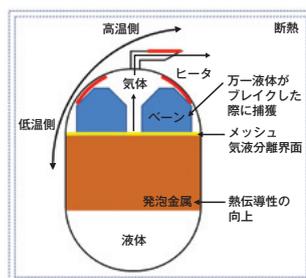


図3 タンク内部構造と気液分離概要

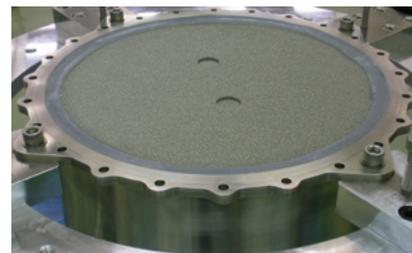


図4 タンクに敷き詰められた発泡金属

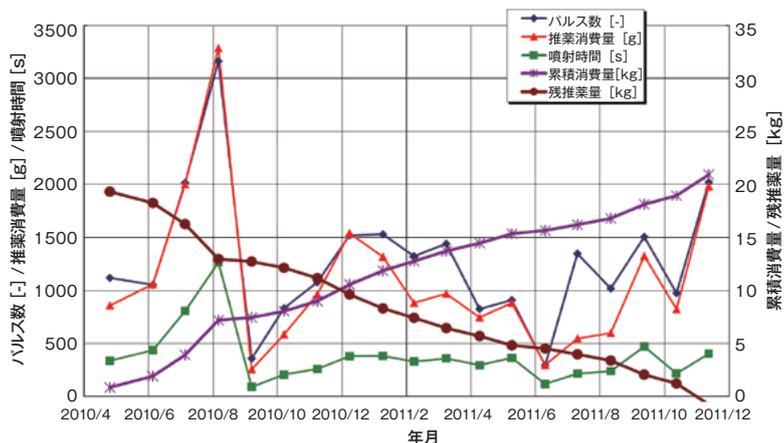


図5 バルスカウント推進薬積算結果。2010年8月に推進薬の消費量が増大したのは、姿勢制御の試行錯誤のため。

分離する役目を果たしています(図3, 4)。さらに、補助的な機能として、飛び出してしまった液体を平板の表面張力を用いて捕獲するペーン(羽根)や、タンク内に温度勾配を設けて気化を促進するためのヒータを有しています。

IKAROS推進系は打上げ後、クリティ

カルフェーズにおける初期機能確認を行い、運用期間中にはスピンレート調整、スピン軸方向制御を継続的に行ってきました。2011年12月には液体推進薬がすべて気化したことが確認され、新規開発された本推進系の消費推進薬効率がほぼ100%であると確定させる

ことができました(図5)。これにより運用期間中、常に気液分離が正常に行われていたことが証明されるとともに、推力の妥当性が確認されたことと合わせて、IKAROS推進系で採用した気液平衡推進系の気液分離機能が軌道上で実証されました。(やまもと・たかゆぎ)

コラム

イカロス君 Twitter

澤田弘崇



Twitterの裏話ならイカロス君本人に聞いてくれ、と思ったのですが、今は冬眠中で寝てるのか起きてるのかも分からないので、私に分かる範囲で代弁してみます。

イカロス君のつぶやきは、打上げが迫った2010年の1月末くらいから始まりました。最初はイカロス応援キャンペーンの告知くらいで静かなものでした。フォロワーがほとんどいなかったのに、種子島宇宙センターでの射場作業が始まったくらいから、「ちょっとは自分の様子を報告しろよ」ってことで、報告を始めさせました。

それでも、まだまだ知名度は上がりません……。射場で試験しながら「んー、どーしよっかねえ？」とチーム内で悩んでいて、「じゃあ、ちょっと、『はやぶさ』とか『あかつき』のTwitterに絡んでみるよ」と、半分漫才みたいなことをさせ始めました。これが功を奏したらしく、みるみるフォロワーが増え、調子に乗ったイカロス君はしゃべるしゃべる。浮かれ過ぎで心配になるくらいでした。

2010年5月18日、打上げ予定日でしたが、打上

げ数分前に延期決定……。発した「あ…」という言葉には「何言ってんだコイツ」と思ったのですが、我々チームの何とも言えない感情を代弁してくれていたのでしょう。3日後の5月21日、何を思ったのか、打上げ直前に素顔を公開してしまいました(図)。その後はご存じの(?)通り、元気に「いってきまーす」と地球から出発し、すべての実証実験を成功させました。日々、Twitterで深宇宙での状況を伝えながら、表情を変えるなんてこともやりだしました。チーム内でも「ちょっとコイツ調子に乗り過ぎてないか？」と心配したのですが、心配をよそに大反響を呼び、フォロワー数だけで見たら主衛星の「あかつき」をブッチギリにして知名度が上がってしまいました。

IKAROSのミッションは大成功でしたが、もちろんすべてが順調だったわけではありません。実際に運用している裏では大変なことも多々あったのですが、それでもチーム一丸となって楽しく運用できたのはイカロス君のおかげだと思っています(もちろんDCAM1ちゃん、DCAM2君も)。森さんはじめ、チーム内にはムチャなことばっか言う人が多いのですが、それに見事に応じてくれたイカロス君にありがとうと言いたいですね。そのうちまた、冬眠から目覚めて「おはよう」と涼しい顔であいさつしてくれることを期待しています。(ざわだ・ひろたか)

IKAROSの熱制御系

佐伯孝尚

分離カメラで撮影されたIKAROS本体の写真をみると、太陽電池セルがIKAROS本体上面のパネルに貼られていることがわかります。でも、よく見ると、セルはびっしり貼られているの

ではなく、隙間が結構あることがわかります。一般的な探査機や衛星は、本体とは独立した太陽電池パネルを持っており、太陽電池パネルの熱は、太陽と反対側のパネル裏面から逃がすこと

ができます。これにより太陽電池パネルが著しく高温になることはありません。そのため、太陽電池セルをびっしり貼り付けることができます。一方で、IKAROSは太陽電池パネルの裏には本体があり、さらに本体と太陽電池パネルの間は断熱するような構造となっているため、太陽電池パネルの熱を裏面に逃がすことができません。そのため、

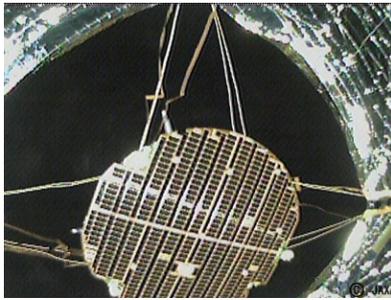


図1 太陽電池セル

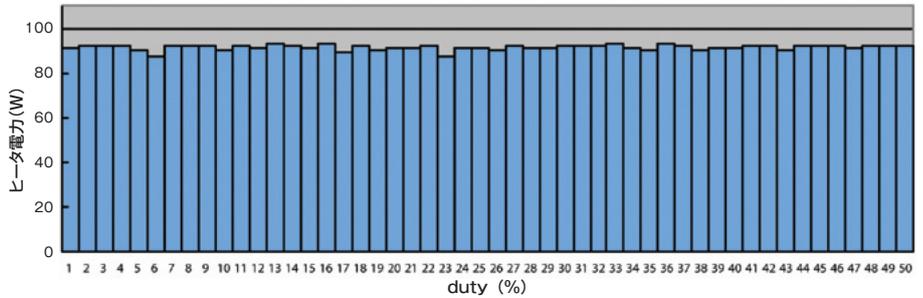


図2 ヒータ電力を均等化したヒータON許可テーブル

表面から熱を逃がすように、放熱性の良いOSR (Optical Solar Reflector) と太陽電池セルを混在させ、太陽電池パネルの温度が上がり過ぎることを防いでいます。

このように熱をうまく逃がすことが熱設計のポイントです (どんな衛星・探査機もですが)。太陽電池パネルだけでなく、本体についても同様です。IKAROSでは本体内部の熱の流れを極力シンプルにし、本体の裏面 (反太陽側) を放熱面として、そこに探査機外部から入ってきた熱や探査機内部で発生した熱を逃がすような設計としています。逃げる熱の量は、放熱面の大きさに依存します。当然、放熱面を広くすると熱が多く逃げるためIKAROS全体の温度が低くなり、逆に狭くするとIKAROSの温度は高くなります。ミッション期間中の太陽距離の変化や姿勢の変化を考慮して、うまい具合に放熱面の面積を決定することが、熱設計の最も大事なこととなります。

放熱面の面積をうまく設定したからといって、温度がずっと均一であるわけではありません。なるべく温度変化が小さいように設計していますが、当然、太陽からの距離や姿勢によってIKAROSの温度は変わります。そのため、主要な機器やバッテリー、推進系などはヒータで温度を積極的に制御しています。ヒータのON/OFFは温度計で温度を計測しながら行っているのですが、すべてのヒータが同時にONになってしまうと、発生電力が小さいIKAROSでは電源供給ができなくなります。そのため、ヒータ電力のピークを極力抑える必要があります。つまり、一度に多くのヒータがONしないように、ONしてよい時間を各ヒータに適切に配分するような制御を行うわけです。

通常、このような制御は専用のコンピュータで行います。「はやぶさ2」などでも専用のコンピュータにより、瞬時のヒータ電力を設定値以下にするような制御が行われています。一方でIKAROSは、ご存知の通り低コストミッションなので、専用のヒータ制御用コンピュータは持っていません。そのため、テレメトリとコマンドの処理を行うメインコンピュータ (DHU) がON許可のテーブルに従い、ヒータのスイッチに対してON許可のコマンドを発行するという変わった方式を採用しました。

この方法では、事前にヒータON許可テーブルを人の手で作成する必要があります。これは、たくさんの種類の積み木が与えられたときに、それらをすべて使って高さがほぼ等しくなるタワーを複数つくる作業に似ています。極端に高いタワーをつくってしまうと、ヒータの瞬間電力が大きくなってしまいうので好ましくありません。IKAROSでは、ヒータが27chで50のヒータON許可コマンドを使用していました。これは、27種類の800個近い積み木を使って、高さのほぼ等しいタワーを50本作製するような作業に相当します。最初は人の手でこのヒータON許可テーブルを作成しており、何日もかかるような大変な作業でした。そこで、面倒くさがり屋の私は、こっそり「自動テーブル作成プログラム」を作成しました。これは、高いタワーから低いタワーに積み木を移していくような作業を繰り返し行うもので、人の手で何日もかかるような作業を1秒程度で終わらせることができました。これを打上げ直後に使うことになるとは思ってもいませんでしたが。

というのは、IKAROSの運用が打上げ直後にいきなり試練を迎えたからで

す。最初の運用でIKAROSからの電波を受信して各部の温度を確認したところ、軒並み低かったのです。これは放熱面の面積の見積もりが甘く、大き過ぎたことから、IKAROS全体が冷えてしまったためでした。これには非常に慌てました。対策は、ヒータ電力を増やすことしかありません。すぐにIKAROSの発生電力の実力値を推定し、余剰電力はすべてヒータに回すようにヒータON許可テーブルの更新を試みました。ここで役に立ったのが前述の、こっそりつくったプログラムでした。私はすぐにプログラムを使用して新しいヒータON許可テーブルを作成し、それをIKAROSに送信した結果、IKAROSの温度は上がっていったのです。

いきなりの難所を無事越えたIKAROSは、その後、世界初の惑星間ソーラセイルになることができました。こんなこともあるかと準備していたものが役に立ち、非常にホットした出来事でした。(さいき・たかなお)



IKAROS運用室での記念撮影

IKAROS-blog

佐伯孝尚

皆さん、IKAROS-blogなるものをご存知でしょうか？ IKAROS 打上げ前の2010年4月30日に開始されたblogであり、打上げ前は種子島宇宙センターでの作業内容を、打上げ後は運用に関する情報をタイムリーに発信する目的で立ち上げられました。今読み返してみても、打上げ時の緊張感や、膜面展開の成功時の喜びなどが伝わってきます。私も運用メンバーの一人として、しばしば記事を書かせていただきました。

前述の通り情報をタイムリーに発信するという目的なので、基本的には、運用があった日は記事が更新されます。最初のころはイベントも多く、それなりに話題は豊富だったので、いわゆる記事のネタには困らない状態でした。ところが、IKAROSのメインミッションである膜面展開に関する運用は6月には完了してしまい、定常運用に移行したあたりから徐々にblogに掲載するネタが乏しくなってきました。それでも一度始めたものをそうそう簡単にやめるわけにもいかず、また、せっかくの増え始めた読者の方々には楽しんでいただきたいため、あの手この手でネタを模索することになっていきました。

最初のうちは真面目に各種運用の説明で何とかやりくりしていましたが、そのうち運用メンバーの自己紹介が始まり、運用の中身というよりは運用室の様子を暴露し始め、さらには記事の中でメンバー間でむちゃ振りをし合うようになりました。中には健康診断の結果を公表するというふざけたものまでありましたが、結果としては、読者の方々に運用の雰囲気や臨場感を共有していただき、親しみを持って読んでいただくことができたと考えており、非常に良い試みであったと自負しています。

IKAROS-blogは、IKAROSの運用がほとんどなくなった2013年末まで続けられ、その間にとても多くの記事を掲載してきました。執筆担当も特にあらかじめ決められているわけではなく、運用中に「しばらく書いてないから自分が書きます」といった感じで何となく決まり、記事の内容も特に誰かがチェックするわけでもなく、適度に緩い感じでできたことに加え、何よりメンバーが(時にはネタ探しに苦労しつつも)非常に楽しんでいただけ、長く続けられた秘訣なのかもしれません。

IKAROS-blogは、情報発信の一つの良い見本になったのではないかと考えています。今後も宇宙研Webサイトなどで皆さんと情報を共有できるようにしたいと考えていますので、よろしくお願い致します。(さいき・たかなお)

低スピンレート・逆スピン運用

逆回転にかける逆転の芽

白澤洋次

2010年12月の金星フライバイを経て後期運用に入ったIKAROSには、新たなミッションが与えられました。その一つが、「セイル膜面の挙動・形状の変化を積極的に引き出して展張状態の力学モデルを構築する」というものでした。

IKAROSには、ヨットで言う帆を張るためのマストがありません。代わりに、回転することによって遠心力でペラペラの薄膜セイルをピンと張っています。もし、ここから回転を遅く、あるいは止めてしまえば、どうなるでしょうか？ 重力のない宇宙空間では、そのま

まの形状を維持しそうな気がしますが、「太陽光圧」による力があります。非常に小さく、日常ではまず感じることはないのですが、場合によっては数百秒でIKAROSのセイルは大きくたわんで姿勢が乱れてしまうのでは、と予想されていました。

しかし実際、どこまで回転を遅くしてよいのだろうか。それを調べるのが、「低スピンレート運用」です。遠心力を小さくしてセイルのたわんだ状態を調べることで、セイルの運動についてより深く知見を得るとというのが目的です。

2011年6月から、低スピンレート運

用が開始され、セイル展開完了後1rpm(毎分1回転)以上を維持してきた回転速度を徐々に下げながら、モニタカメラによる膜面の撮影を行いました。その結果、0.055rpmにおいても、太陽光圧に対しセイルがほとんどたわまないことが確認されました。このことから、事前に予想していたよりも、セイルが柔らかくならないように振る舞うことが分かってきました。

実は、この低スピンレート運用の裏には、もう一つある重要な期待が込められていました。スピン衛星の姿勢の制御は、主に2種類に分けられます。回転軸方向の制御と、回転速度の制御です。IKAROSにおいて、前者は、太陽光圧をうまく利用することで自動的に姿勢を維持する安定な状態を確立していました。一方で、後者は、ガスジェツ

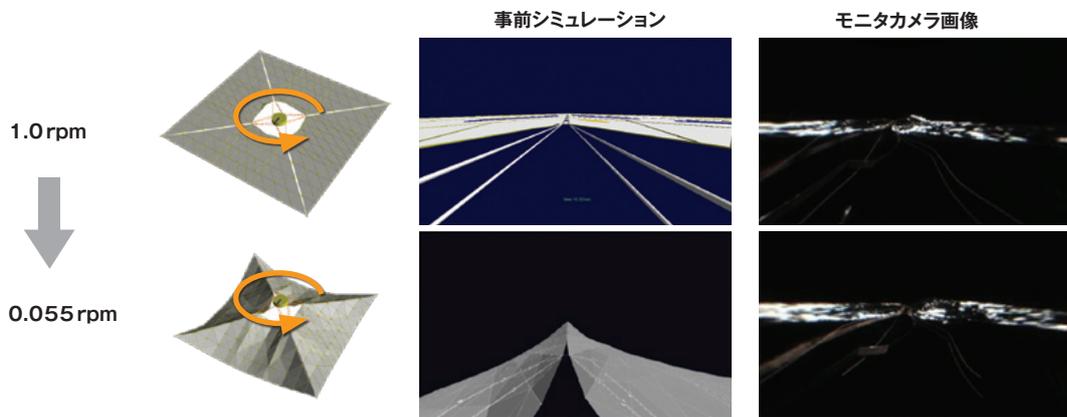


図1 セイル形状の事前シミュレーション予想(左)と軌道上で得られたモニタカメラ画像(右)。セイルが大きikutawむと予想されたのに対し、ほとんどたわまないことが確認された。

トのスラスト噴射によって行っていました。これはつまり、燃料がなくなると回転速度が制御できなくなることを意味します。悪いことに、太陽光圧による「風車効果」によって、回転速度は常に減少する状態でした。燃料が枯渇したらIKAROSの回転は止まってしまう、太陽光圧でたわんだIKAROSのセイルは、その機能を果たさなくなるでしょう。さらに、たわんだセイルが探査機本体に絡み付き、探査機として死んでしまってもおかしくありません。これは、真綿で首を絞められるように迎えるIKAROSの危機でした。

しかし、これを回避する逆転の芽がありました。風車効果は、風車のような形になったセイルに太陽光圧が作用することで起こると考えられていました。もしうまくセイルの形状を変化させることができれば、燃料なしでも回転速度を制御できるのではないかと考えていたのです。低スピンの運用では、スピンの回転速度に対する風車効果の影響を調べ、セイルの形状との関係を整理することができました。その結果、セイルの形状を変えることはできませんでしたが、スピンを反時計回りから時計回りに持っていけば、風車効果が

そのまま維持され、回転速度を増す側に働くことが予想されたのです。つまり、回転が止まるという危機を回避できるのです。

この結果を受け、挑戦的なミッションとして「逆スピン運用」が計画されました。これは、一時的にIKAROSの回転を止めることになるため、大きなリスクを伴っていました。しかし、低スピンレート運用で得たデータからセイルの剛性を見直した上でシミュレーションを重ねた結果、残り少ない燃料を使いスラストを噴射させ短時間で回転方向を逆転させれば、安全に逆スピン状態に移行できると判断しました。

2011年10月18日、緊張の中で逆スピン運用が実行されました。初期スピンレート0.15rpmの状態から、約20分間スラストを断続的に噴射させ、マイナス0.25rpmを目指して一気に回転速度を変えていきます。この間、懸念された姿勢の乱れなどによる通信途絶や電力喪失もなく、見事、目標通りの逆スピン状態に移行することができました。この状態で、予想通り風車効果が回転速度を増す側に働き、ある程度速くなったところで落ち着くようになりました。IKAROSの回転が止まって

しまう危機を脱することができたのです。このおかげで、その後続く冬眠運用までIKAROSの運用を継続できるようになりました。

これらの運用結果は、将来のソーラー電力セイル計画にも反映されようとしています。見直したセイルの力学モデルを活用することで、将来計画では、最低スピンのレートをより低く設定できるようになりました。通信アンテナやカメラなどの観測機器は特定の方向を向いている必要があるため、スピンをキャンセルするデスパン機構などの仕組みが必要となりますが、スピンのレートを小さくすることで、この負担を軽減することができます。また、風車効果をうまく操り、ガスジェットの燃料を使わずにスピンのレートを制御する方法についても研究が進んでいます。

低スピンレート運用、逆スピン運用ともにリスクの高い運用でしたが、将来に向け非常に重要なデータを得ることに成功しました。ミニマムサクセス、フルサクセスを着実に達成し、後期運用においてさらに挑戦的な運用が可能であったIKAROSだからこそ、このような望外の結果を得ることができたのだと思います。(しらすわ・ようじ)

コラム

事前のセイル展開実験

津田雄一

遠心力でソーラーセイルを展開する方式に注目し、スケールモデルを使って展開実験を始めたのは2002年のことであった。コンパクトに畳んだ

セイルを遠心力だけでいかに高い再現性で展開できるかが、課題の中心であった。軌道工学部門助手として宇宙研に着任した私の最初にやる仕事が折り紙とは思ってもよらなかったが、新たな折り方を考案しては、真空チャンバやスピンのテーブル、さらには大気球を使っての展開実験を幾度となく行った。2004年に実施したS-310観測ロケット

を使った10m級セイルの展開試験の成功は、私たち自身がこの独自のセイル展開技術に自信を持つ転機となった。

それでもまだ、私たちが目指している最終ゴール、20m級セイルには届いていなかった。摩擦の小さい巨大な平面を求めて、深夜のスケートリンクで20m級セイルの展開実験をした。夜な夜なスケートリンクに現れる、大風呂敷と巨大な回転装置を持ったスケート靴を履かない集団は、さぞや怪しい存在だっただろう。

これだけ実験を重ねても、IKAROSのセイル様式を一つに絞る会議は紛糾した。何しろ宇宙研内

外のワーキンググループメンバーがそれぞれ、さまざまな様式のセイルのアイデアを温めていたのだ。選定の会議は明け方まで続き、数百の評価項目にわたって議論をしたのだから、(精神的)若さのなせる業だ。ただし、この会議には構造を専門とする小野田淳次郎 前宇宙研所長や名取通弘 宇宙研名誉教授も参加されていたから、精神的な若さと肉体的な若さは無関係。このような真剣な熱意のエネルギーから、S-310観測ロケット実験で成功した方式をベースに、メンバーみんなの創意に富んだ改良が盛り込まれた、IKAROSのセイルの基本構想がまとまったのであった。(つだ・ゆういち)

冬眠・探索運用

三柘裕也

IKAROSは2011年12月末に、太陽角および地球角の増大により、電力の発生、地球との通信が困難となり、いわゆる冬眠モードへと突入しました。太陽光圧トルクの影響で流れていってしまう姿勢を元に戻すための姿

勢制御用の燃料がいよいよ枯渇したため、IKAROSの姿勢が太陽方向から離れる方向に流されてしまったのです。ソーラーセイルは、太陽光圧によって大きく軌道が遷移します。姿勢がモニタできていない状況であればセイルの舵

取りをすることが可能ですが、一度通信途絶となると、姿勢のモニタができません。そうなると、セイルが太陽に対してどの方向を向いているのかを予測した上で、さらに軌道を予測する必要があります。この性質上、IKAROSの探索は、「はやぶさ」を通信断から復帰させた運用と比較しても、非常にハードルの高い挑戦でした。しかし、通信途絶となったIKAROSをそのまま

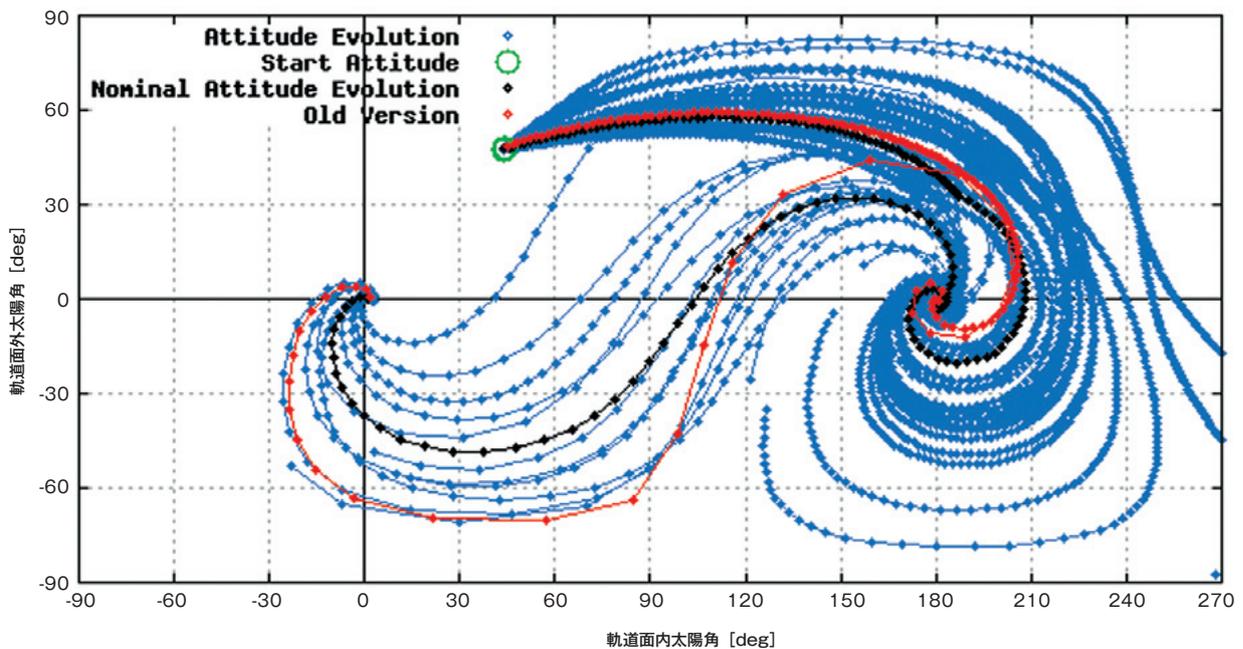


図1 姿勢プロファイルを探索するための姿勢運動のシミュレーションの例。1本1本のラインが天球上でのIKAROSのZ軸方向の数ヶ月分の予測履歴をメルカトル図法で表現したもの。わずかな光学定数の変化でプロファイルがまったく異なり、各運用日での姿勢予測が無数に存在していた。

漂流させておくわけにはいかない、そういったチームメンバーの強い思いから、自然と翌年の2月にIKAROSの探索運用が開始されました。

IKAROSを発見するための条件は三つありました。一つ目は電力を発生させるために太陽角が十分小さくなっていること、二つ目は通信を確立させるために地球方向とアンテナ方向が近い状態になっていること（地球角が小さくなっていること）、三つ目は白田宇宙空間観測所の64mアンテナの通信可能な領域の幅にIKAROSが捉えられていること（軌道が決定されていること）です。どの条件についても、姿勢がどのように遷移するかによってまったく

異なる結果になり得ます。

我々はまず、IKAROSの姿勢がどのように遷移するかシミュレーションを行ってみました。しかし、セイル裏面の光学定数などのモデル化しきれていない運動の効果による不確定要素が多過ぎて、無数の姿勢のプロファイルがあり得ました。ノミナルミッションが終了していることもあって、IKAROSの運用は、もはや週1回程度でしかできません。その少ない運用期間の中で大量の姿勢プロファイルを試行してみることは現実的ではありませんでした。とにかく、運用を実施する日に上記の3条件がそろそろようなプロファイルだけを抽出して探索を続けました。

こうして探索運用を続けたところ、何と探索運用開始から7ヶ月後の2012年9月にIKAROSとの通信を回復することに成功したのです。後から分かったことですが、この時期が冬眠後最初にIKAROSが見つかるチャンスがあったタイミングでした。望みが薄いことは承知の上で、それでも必ずIKAROSが復帰すると信じ続けた結果でした。このときのチームメンバーの歓喜は、打上げ成功に勝るとも劣らないものでした。IKAROSを信じる心、これが発見のための四つ目の条件だったのです。（みます・ゆうや）

コラム

IKAROSの最新運用状況

尾川順子

現在IKAROSは、太陽の光がセイルのおもて面（太陽電池がある面）に当たらなくなると冬眠し、光が当たり始めると冬眠から目覚めるというサイクルを、10～11ヶ月ごとに繰り返しています。IKAROSの最初の冬眠明け（2012年9月）については「冬眠・探索運用」で紹介していますが、その後2013年6月、2014年5月、2015年4月と合計4回の冬眠明けを経て、運用チームの探索技術はどんどん進化しています。

冬眠明けの最初の難関は、白田宇宙空間観測所の64mアンテナから見てIKAROSがいる方向をいかに正確に割り出すかです。IKAROSは2011年を最後に、地球からの距離を測定するレンジングができていないため、予想される方向にはかなりの不確定性があります。軌道決定チームから毎回候補を提示してもらい、白田の64mアンテナをそちらに向け、我々SV（スーパーバイザー）と運用支援の方とで、スペアナ（スペクトラムアナライザ）に表示される電波強度の微小な変化を連係プレーで見守ります。

何としてもIKAROSを見つけようと、運用前には毎回チームで知恵を出し合い、日々新たな手法にトライしています。2015年にはスペアナでも見つからないほど微弱な信号を、後解析で積分することで見つけ出す手法を確立することができ

ました。ノイズの大海の中からIKAROSの特徴的な信号パターンを文字通り浮かび上がらせることができ、検出能力が飛躍的に高まっています。

こうして電波が見つかったも、キャリア（搬送波）が弱過ぎてロックオンしないため、テレメトリは通常の方法では確認できません。そこで「のぞみ」「はやぶさ」でも活躍したピーコン運用の出番です。IKAROSからの信号強度が変調の有無により上下することを「1」と「0」に見立て、調べたいテレメトリの値を「1」「0」の羅列に変換させてシリアル通信の要領で地上に送信させます。スペアナ画面上でピークが上下するのを読み取ればデータが得られるわけですが、かつては“心眼”でスペアナを凝視しながらデコードしていたのが、今では専用ツールのおかげでそれほど苦勞なく情報を得られるようになりました。さらにピーク周波数の周期的な変動から、地球との相対姿勢やスピン周期の情報さえも得ることができます。

テレメトリがまったく見えず、QL（クイックルック装置。探査機の状態を数値などで画面に表示する装置）も数年来立ち上げていないというのは、衛星運用として極めて異例ですが、変調オフのコマンドを送ると確かに信号強度が上下して、IKAROSが生きていてこちらの命令に答えているのを実感できます。ほかの衛星では味わえない面白さがあります。このような信号強度ギリギリでの運用技術はマニアックな話題ではありますが、将来の超遠距離での探査にきっと役立つのではと期待しています。（おがわ・なおこ）

観測・実験機器1：ALADDIN

ソーラーセイルを“魔法のじゅうたん”にする大面積惑星間塵検出アレイ

矢野 創

惑星間空間での宇宙塵研究は、半世紀余りの歴史を持つ宇宙科学の老舗です。すでに人類は、地球近傍から冥王星の彼方まで、太陽系内の各領域で宇宙塵を実測しました。また、太陽系外から到達する星間塵や、探査天体ごとのユニークなダスト成分（例えば、彗星コマダスト、月面の静電浮遊微粒子、火星衛星のダストトラス、土星衛星エンケラドスの海氷プリューム微粒子など）の探索にも役立っています。

太陽系以外の惑星系（系外惑星系）の研究でも、「系外黄道光」の光学特性や、惑星との平均運動共鳴^{*}にある周星ダストバンド構造への理解が重要性を増しています。そこで、太陽系において赤外線波長程度の大きさを持つ大型の宇宙塵の分布が、太陽からの距離や各惑星の重力・軌道などどのような関係を持つかを理解できれば、系外惑星系一般のダスト円盤やその中に埋もれた惑星群に関するベンチマーク情報となり得ます。

実測の戦略を大別すると、黄道光や彗星ダストトレイルの太陽光散乱光、大気中の流星発光などを捉える光学観測機器と、宇宙機に直接衝突する個々の宇宙塵の物理量や物質情報をひもとくダスト計測器、さらに地上へサンプルリターンするためのダスト捕集器の3系統に整理できます。

しかし、従来の手法に限界もあります。光学観測は、視線方向に重なる宇宙塵による太陽光散乱光の積分値です。衝突電離型のダスト計測器は、開口面積が小さいために μm オーダー未満の小さ

な宇宙塵の計測が主体です。両者の欠点を克服するには、光学観測対象と同等な大型の宇宙塵を統計的に有意なほど多数検出できる大面積のダスト計測器が必要ですが、通常の宇宙機のペイロード面積とは大きな乖離があります。

2000年代初頭、深宇宙に100～1000 m^2 オーダーの面積を持つセイル膜を長期間広げてこそ可能になるサイエンスを分野横断的に検討していたソーラーセイル・ワーキンググループ内の研究会で、筆者の頭にこのジレンマを解消するアイデアがひらめきました。セイル膜材の一部を薄膜軽量のダスト計測器に置き換えることで、宇宙塵研究にとっての“魔法のじゅうたん”にするのです。ALADDIN（大面積惑星間塵検出アレイ）構想の誕生でした。

それ以降、大気球、観測ロケット、M-Vピギーバック衛星と続くソーラーセイルの段階的開発に寄り添いながら、PVDF（ポリフッ化ビニリデン）センサを用いたALADDINシステムの開発を続けました。2006年に「SSSAT」、2009年に「かがやき」という地球周回小型衛星への搭載に挑んだ後、2010年にIKAROSによって約16ヶ月間、地球一金星軌道間で深宇宙運用が実証できました。その間、約2800個の宇宙塵のデータを取得し、そのうち400個以上は直径10 μm を超える大型のものでした。現在もデータ解析とモデル研究は続いています。主な科学成果として、①日心距離1～0.7 AU（1 AUは地球と太陽の平均距離で約1.5億km）間の大

型宇宙塵の分布を解明、②地球の公転軌道上の周太陽ダストバンドの計測から標準宇宙塵分布モデルの限界を指摘、③金星の公転軌道上の周太陽ダストバンドの発見、が挙げられます。

PVDF式ダスト計測器は海外でも実績があり、日本の独創ではありません。しかし面積0.54 m^2 、視野角 2π の反太陽指向で宇宙塵の衝突を常時待ち受けるALADDINは、断トツで宇宙探査史上最大の有効開口部を持ったダスト計測器となりました。もう一つ重要な点は、ALADDINは日本人が独自に設計・開発・製作・試験・運用・校正・解析を完遂した、日本初の純国産ダスト計測器だったことです。IKAROS実測データを使って博士号を取得した次世代の研究者を育成する機会にも恵まれました。それは1995年以降、宇宙研や東京大学で固体微粒子を射出できる独自の超高速衝突実験設備を整備してきた、宇宙塵研究者たちの地道な努力のたまものです。20世紀末まではドイツがダスト計測器の総本山であり、工学実験衛星「ひてん」と火星探査機「のぞみ」に搭載された装置もドイツ製だったのだから。

IKAROSの実績と教訓から、本来の目標である、ソーラー電力セイルの膜面に4 m^2 以上のALADDINシステムを搭載し、内惑星領域から小惑星帯、外惑星領域の木星トロヤ群小惑星まで大型宇宙塵の分布構造を連続的に測り、赤外線光学望遠鏡とも同時観測を行う準備は、ほぼ整いつつあります。さらにALADDINの技術と経験は、スペースデブリ環境の常時モニタを可能にする地球周回衛星用の汎用軽量ダスト検出システムにもスピノフできると考えています。（やの・はじめ）

^{*} 平均運動共鳴：惑星と宇宙塵それぞれの公転軌道の周期が整数比となる時、毎回同じ位置で最接近するため、両者の軌道は長い間安定な状態に入る場合があり、平均運動共鳴と呼ばれる。

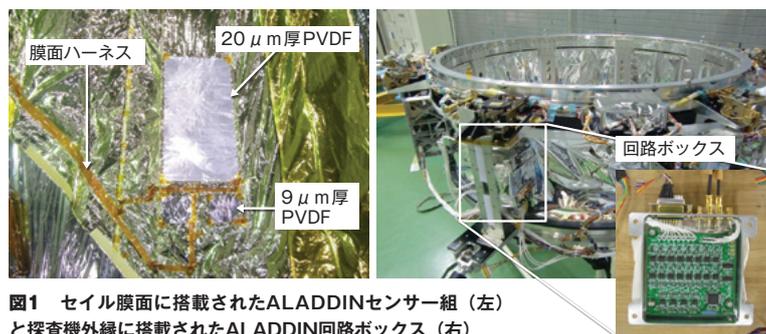


図1 セイル膜面に搭載されたALADDINセンサー組（左）と探査機外縁に搭載されたALADDIN回路ボックス（右）

観測・実験機器2：GAP

ガンマ線偏光観測によるガンマ線バーストのジェット内部の研究

米徳大輔

■宇宙最大の爆発「ガンマ線バースト」と偏光観測

ガンマ線バースト (GRB) とは、100 億光年以上先の、初期宇宙から数十秒間という短時間にだけ大量のガンマ線が飛来する現象です。ガンマ線の総エネルギーは超新星爆発をはるかにしのぐような、宇宙最大の爆発現象と認識されています。最近、このGRBという現象がとても注目されています。GRBは一瞬だけではありますが非常に明るく輝くため、はるか昔の初期宇宙を見渡せる光源として利用されているからです。

金沢大学・山形大学・理化学研究所のグループは、GRBの放射メカニズムを探求するために「ガンマ線偏光」を観測できる小型の観測装置GAP (Gamma-ray Burst Polarimeter) を開発し、IKAROSに搭載しました。光 (電磁波) は電場と磁場が振動しながら伝わる波です。電場が振動している向きを偏光方向と呼び、たくさんの光を観測したときに全体として電場がそろっている場合は「偏光している」といいます。自然現象で発せられる光は、ほとんど偏光していません。偏光した光は、特別な条件下でないとつくられないのです。

偏光した光の最も有名な例として、磁場のまわりに絡み付く電子が発する光 (シンクروتロン放射光) があります。逆に、光が偏光している場合、そこにはよくそろった磁場があると推測できます。磁場は目に見えないので直接観測することは困難です。偏光観測は、磁場の存在を明らかにする最も良い手段と考えられていて、電波や可視光では頻繁に利用されています。ガンマ線は波長の短い電磁波ですが、これまでにガンマ線の偏光観測はほとんど例がなく、信頼度の高い観測結果もありませんでした。我々はGAPにより、世界に先駆けたガンマ線偏光観測を行うことができました。

■GAPによる偏光観測

図1にGAPのフライトモデルの写真を示します。直径17cm、高さ16cm、重量3.7kg、消費電力5Wとガンマ線観測装置としては非常に小さいですが、ガンマ線の偏光を測定する機能を持った世界的に見ても大変ユニークな観測装置です。ガンマ線は偏光方向と垂直に散乱しやすいという性質があるため、その散乱角度分布を測定できるようになっています。

GAPはIKAROSが宇宙を航行している最中に、30例のGRBを検出しました。その中で特に明るい3例のバースト (GRB 100826A, 110301A, 110721A) から、統計的に有意なガンマ線偏光を検出しました。このうち最初の例であるGRB 100826Aは継続時間が100秒程度と長かったため、バーストの前半と後半で偏光を調べたところ、偏光角の方向が大きく変化していることを検出しました。前後半の平均的な偏光度としては、 $27 \pm 11\%$ であるという結果が得られました。一方で、GRB 110301AとGRB 110721Aからは70%程度の高い偏光度を検出しましたが、バースト中の偏光角の変化は検出されませんでした。

これらの観測結果より、GRBを発生させる相対論的な速度を持ったジェット内部には強い磁場が存在していて、かつ内部構造 (いくつかの放射領域) を持っていると考えられます。そして、GRBのガンマ線放射は、ジェット内部の磁場を利用したシンクروتロン放射の可能性が極めて高いことを示しました。GAPによるガンマ線偏光観測で、これまでは見えなかったジェットの内部を調べることができたのです。より詳しいGAPの観測については、『ISAS ニュース』2014年6月号にも記事が掲載されていますのでご覧ください。

■偏光で時空構造を捉える

偏光した光が方解石のような異方性のある結晶の中を通過すると、電磁波の振動する電磁場が結晶から影響を受けて、偏光方向が回転するという現象がよく知られています。もし、宇宙空間に何らかの異方性が存在している場合、100億光年先から飛んでくるガンマ線はその影響を受け、偏光方向が回転してしまうはずですが。

一般的に、電気のプラス・マイナスを反転させても、座標を反転させても (鏡に映したような世界でも)、時間の流れを反転させても、物理学の本質は

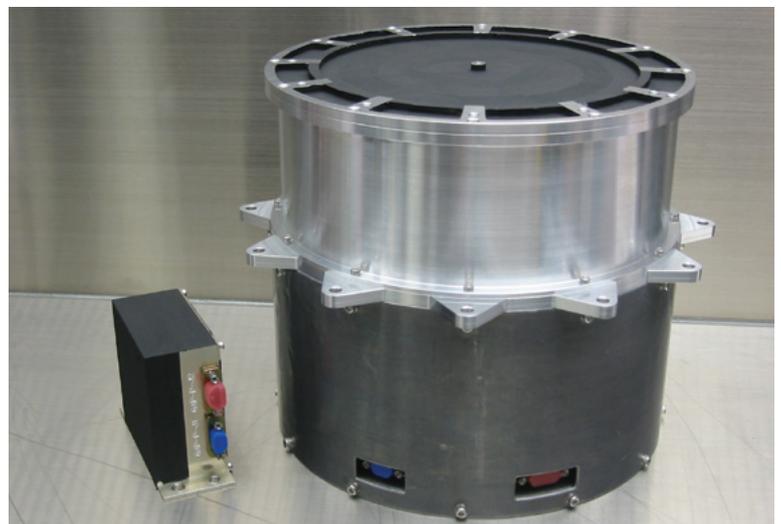


図1 GAPのフライトモデル。右の円筒形のが偏光検出器で、左の小さな箱は検出器を駆動するための電源。

変わらないと考えられています。しかし、物理学の究極理論である量子重力理論などでは、これらの対称性（CPT対称性）が保たれている場合と、破れている場合の二つが考えられています。もし対称性の破れている時空の中を偏光したガンマ線が100億光年という途方もない距離を飛んでくると、異方性

のある結晶の中を進むときと同じように偏光方向が回転してしまうので、偏光観測によって時空の対称性が保たれているかどうかを検証することができます。

そのような効果を考慮して、GAPで観測した偏光データを詳細に解析したところ、我々の宇宙は極めて正確に対

称的である（CPT対称性が保たれている）ことを実証することができました。未開拓の分野であったガンマ線偏光に挑戦した結果、GAPのような小さな観測装置であっても、物理学における最先端の究極理論の検証もできたのだと思います。（よねとく・だいすけ）

観測・実験機器3：VLBI計測用マルチトーン送信器

Delta-DOR 実証実験

竹内 央

従来の深宇宙探査機の軌道計測手法（ドップラー・レンジ計測）は、視線（奥行き）方向の探査機位置は高い精度で計測できるものの、視線方向と垂直な

天球面上の位置については精度が著しく劣るという欠点がありました。この欠点を補うために、大陸間で遠く離れた2台の地上アンテナで同時に探査機

からの電波を受信し、信号の受信時刻差を計測することにより天球面上の探査機位置を高い精度で直接計測する手法が、Delta-DOR（Delta Differential One-way Ranging）計測です。この手法は、NASAでは古くは惑星探査機ボイジャーの時代から用いられていましたが、2000年代に入り地上デジタル受信技術が発展し、GPS観測網が整備され地球対流圏や電離層による大気遅延モデルの精度が向上したことなどに伴い、この10年で急速に精度が向上しました。最近では数ナノラジアン（約1000万分の1度）の角度精度が得られるようになっており、東京スカイツリーから富士山頂にいるミジンコ（0.3mm）をのぞき込む分解能に相当します。1AU（地球と太陽の平均距離で約1.5億km）先の探査機であれば、数百mの精度で位置を計測することができます。

JAXAはDelta-DOR用地上デジタル受信装置に関しては、NASAと同等以上の性能のものを早くから開発することができていました。しかし、従来のJAXAの探査機にはDelta-DOR計測用信号の送信機能が備わっていなかったため、地上からトーン信号を送信して機上で折り返したり（「はやぶさ」の例）、テレメトリの副搬送波を利用したり（「あかつき」の例）して、疑似的なDelta-DOR計測を行っていました。いずれの場合もトーン間の帯域幅が狭いため、

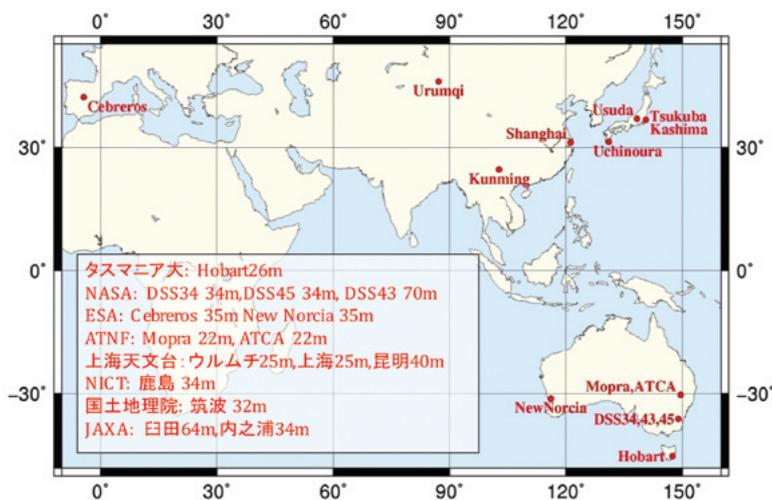


図1 IKAROSのDelta-DOR実証実験参加局

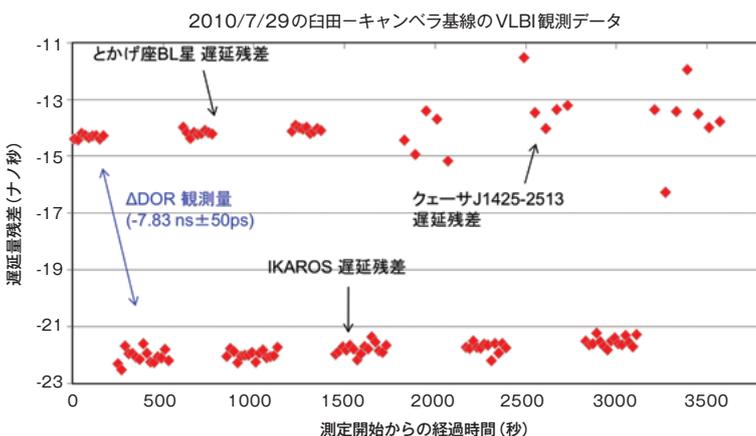


図2 JAXA臼田局—NASAキャンベラ局間のDelta-DOR計測結果

従来の軌道決定精度（1マイクロラジアン程度）に比べて大幅な精度向上は望めない状況でした。そこでIKAROSの飛行機会を利用して、JAXAの深宇宙探査機では初となるDelta-DOR計測専用トーン送信機を開発・搭載し、「はやぶさ2」などの将来ミッションに向けたフロントローディングとしてDelta-DORによる軌道決定技術の獲得を目指すことになりました。Delta-DOR計測用信号送信機能は、本来はバス系のトランスポンダの機能の一部として提供され、テレメトリ・コマンド運用と排他的に利用されるべきものです。しかし、IKAROSでは新規開発リスクを避けるため、送信アンテナやアンプまで含めて完全に独立な専用系として開発を行いました。

Delta-DORでは遠く離れた複数の地上アンテナを同時に使用する必要があるため、海外機関との連携が必須になります。我々が開発した地上受信信号処理システムは、受信信号をPCベースのソフトウェアで処理する方式を採用しているため、対外機関ごとに柔軟にフォーマット変換を行うことができるといった強みがあります。ソフトウェアを整備することにより、2010年7月1日から8月22日の期間に、図1に示した計8機関の15アンテナとの間で、合計24回のIKAROSのDelta-DOR実証実験を実施しました。現時点で世界で運用中のほぼすべての深宇宙局・VLBI観測局のシステムと互換性を持つようソフトウェアを整備したため、海外に深宇宙局を持たないJAXAにとっては運用の自律性確保という観点において大きなメリットになります。

JAXA臼田局—NASAキャンベラ局間で取得したIKAROSのDelta-DORデータは、JAXAとNASAのおおののシステムで独立にデータ処理を行い、得られた計測値や品質など詳細な比較を行いました。その結果、「あかつき」の20倍の精度に相当する50ピコ秒という高い精度（低い熱雑音）で計測ができており、NASA—JAXA間のデータの処理も30ピコ秒という高い一貫性が得られていることが確認できました（図2）。

JAXA/NASA/ESAは共同で、国際機関であるCCSDS（宇宙データシステム諮問委員会）においてDelta-DORデータの国際標準フォーマット（Delta-DOR raw data exchange format）を提案していました。規格が正式に発効するためには、規格に準拠したDelta-DORデータの処理を異なる複数の機関で独立に行い、精度評価を含めた結果を比較の上、レポートにまとめることが必要条件でした。JAXAとNASAが行ったIKAROSデータの処理結果は詳細レポートにまとめ、CCSDSに報告されました。その結果、2013年にDelta-DORデータの国際標準規格がCCSDSにて正式に発効することになりました。IKAROSの実験結果は、JAXA単独の技術実証にとどまらず、世界中の宇宙機関がDelta-DOR計測を共同で実施できるようにする礎をつくるという点で、世界の宇宙コミュニティ全体に対して貢献することができたのです（現在ではインド、ロシア、中国などもCCSDS規格に準拠したシステムを保有するに至っています）。

IKAROSでの技術実証が成功したこ

とにより、「はやぶさ2」では日本で初めて、バス系トランスポンダの正式機能が搭載されました。また、地上の軌道決定ソフトウェアの高精度化や定常運用に向けたデータ処理の自動化なども進められ、「はやぶさ2」の実運用においてDelta-DORが多大な貢献をするに至っています。これらの成果は、また別の機会にご報告することにします。

（たけうち・ひろし）



コラム

IKAROSから「はやぶさ2」へ

津田雄一

IKAROSの技術や経験は、「はやぶさ2」へ多く引き継がれている。IKAROSは、真にすべてが限界に挑戦したプロジェクトであった。「のぞみ」や「はやぶさ」では救援運用時に使われたビーコン運用が、

通信性能の低いIKAROSでは普段使いで採用された。おかげで、IKAROSメンバーは、地上に届く電波の波形をスペクトラムアナライザで見るだけで探査機の状態を読み取る“心眼”を身に付けた。「はやぶさ2」では、このビーコン送出機能はさらに進化したものが装備されている。最後にビーコン運用がある、という安心感は、運用の信頼性という意味で絶大である。

また、IKAROSで習得した太陽光圧を積極的に利用したスピン衛星の姿勢制御テクニックは、非スピンの衛星用に理論拡張され、「はやぶさ2」の巡航運用に採用された。この制御手法の解析には、JAXAの若手の職員や学生が意欲的に関わっている。

「はやぶさ2」に搭載されている分離カメラはDCAM3という名だが、これはIKAROSに搭載した分離カメラDCAM1、DCAM2の弟分に当たるから。姉・兄を踏み台にして、この弟はずいぶん機能・性能が向上した。

IKAROSで実験的に搭載されたDelta-DOR（高精度

軌道決定技術）用のVLBI計測用マルチトーン送信器。IKAROSでのこの技術の成功が、「はやぶさ2」での日本初の主通信機へのDelta-DOR機能正式搭載へとつながった。

そして何よりも貴重なことは、IKAROSで限界の運用技術を経験したメンバーの多くが、「はやぶさ2」で主要な立場を担っていることである。この人たちのすぐギリギリ限界を試してしまいたくなる習性には要注意(!?)だが、IKAROSが我が国の旗艦ミッションである「はやぶさ2」への太陽系探査技術の継承に大きな役割を果たせたことは、望外の喜びだ。 (つだ・ゆういち)

ソーラー電力セイル探査機システム

佐伯孝尚

IKAROSは大成功を収めました、それで終わりではありません。IKAROSはソーラー電力セイル実証機であり、将来の探査ミッションのための重要技術の実証が目的でした。現在、我々はソーラー電力セイル探査機による木星圏探査ミッションについて検討しています。

ソーラー電力セイルというのは、ソーラーセイルを拡張したJAXAのオリジナルのコンセプトです。ご存知の通り、ソーラーセイルとは太陽光を大きな膜面に受けて推進力を発生させる推進方法であり、推進のための燃料が必要ないというのが大きな特徴です。一方で、太陽光から受ける力は非常に小さなもので、IKAROSではその大きさは1mN程度でしかありませんでした。これは地球上で1円玉にかかる重力の1/10程度

の大きさでしかなく、有限な時間では加速量が非常に限られることを示しています。もちろん、セイルの径を何百m、何kmと大きくすれば力も大きくなりますが、あまりに大きなセイルは現実的ではありません。そこで考えられたのがソーラー電力セイルです。

ソーラー電力セイルでは、大きな膜面に大量の太陽電池セルを貼り付け、大電力を発生させます。これだけでは推進力は得られないので、同時に高比推力（非常に燃費の良い）イオンエンジンを搭載します。これにより、純粋なソーラーセイルより圧倒的に大きな推進力を得ることができます。もちろん、イオンエンジンを搭載するので燃料も必要になりますが、燃費が良いため燃料自体は少なくて済みます。高比推力

イオンエンジンは駆動に大量の電力が必要なのですが、それも大きなセイルに貼り付けられた太陽電池セルによって賄えます。また、日本が経験したことのない木星圏以遠でも、探査機が活動するための電力を発生させることが可能なのです。

太陽—木星系のラグランジュポイントであるL₄点、L₅点（主星・従星を一边とする正三角形の頂点）のまわりには多数の小惑星が存在することが知られています。これを木星トロヤ群小惑星といいます。木星トロヤ群は、小惑星のスペクトル分類でいうとD型やP型に属し、「はやぶさ」が探査したItokawa（イトカワ）が属するS型小惑星や「はやぶさ2」が向かうRyugu（リュウグウ）が属するC型小惑星より、さらに始原的な天体であるといわれています。そこで我々は、世界で初めてトロヤ群小惑星のランデブー探査を行うことを検討しています。ランデブー探査とは、小惑星との相対速度をゼロにして行う探査であり、小惑星を一瞬で通り過ぎるフライバイ探査に比べてはるかに難しい探査の形式です。ランデブー探査のためには大きな軌道変更が必要となり、従来の化学推進では大量の燃料が必要となります。また、木星トロヤ群小惑星は太陽からの距離が大きいため、従来形式の太陽電池パネルを搭載した探査機では発生電力が十分ではありません。ソーラー電力セイルはその二つの課題

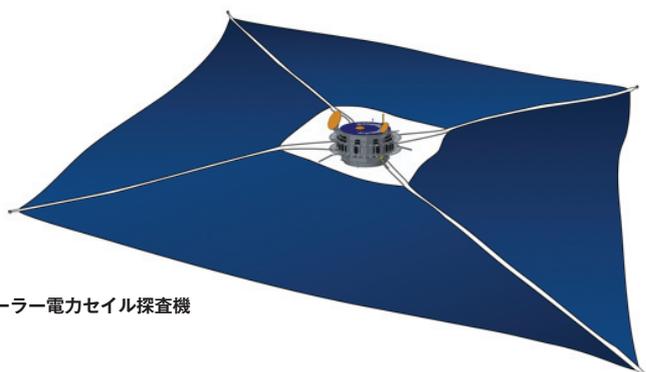


図1 ソーラー電力セイル探査機

を克服でき、現状では、大きなペイロードを持って木星トロヤ群でランデブー探査するための唯一の方法といえます。

探査機は、IKAROSのように円筒形の本体を持ち、そのまわりに大きな膜を広げる形態となっています。膜の大きさは一辺がおよそ50m (IKAROSは14m) で、その大部分に薄膜の太陽電池セルを貼り付けます。それにより木星圏でも5kW程度の発電が可能となります。それはNASAの木星探査機Junoの10倍以上であり、その豊富な電力により木星圏でイオンエンジンを噴射して軌道を変更し、小惑星にランデブーすることが可能となるのです。小惑星に到着後の表面探査は、子機(ランダー)が行います。ランダーの重さはおよそ100kgで、探査機全体の重さはおよそ1300kgです。ランダーとして100kgのフィラエを搭載したESAの彗星探査機ロゼッタがおよそ3トンであることを考慮すると、ソーラー電力セイル探査機が非常に高い輸送能力を持っていることが分かります。

探査機は打上げ後、火星より遠い領域まで飛行した後、約2年後にいったん地球に戻ってきます。このフェーズを「2年EDVEGA」(Electric Delta-V Earth Gravity Assist: イオンエンジン併用の地球スイングバイ)と呼んでいます(図2)。この間にイオンエンジンにより加速し、地球スイングバイを経て木星に飛行します。さらに木星スイングバイをして、小惑星に向かって飛行します。この間にもイオンエンジンを噴射し、小惑星との相対速度がゼロになるように制御するわけです。図3は、ある木星トロヤ群小惑星に到着するための軌道

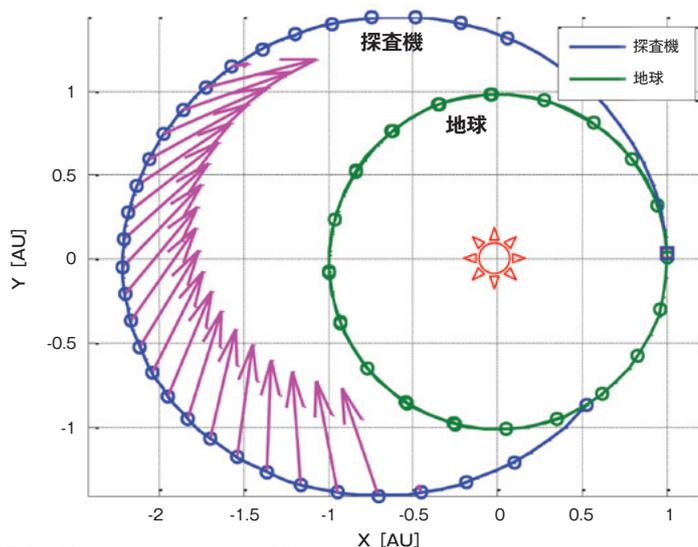


図2 2年EDVEGAフェーズの軌道

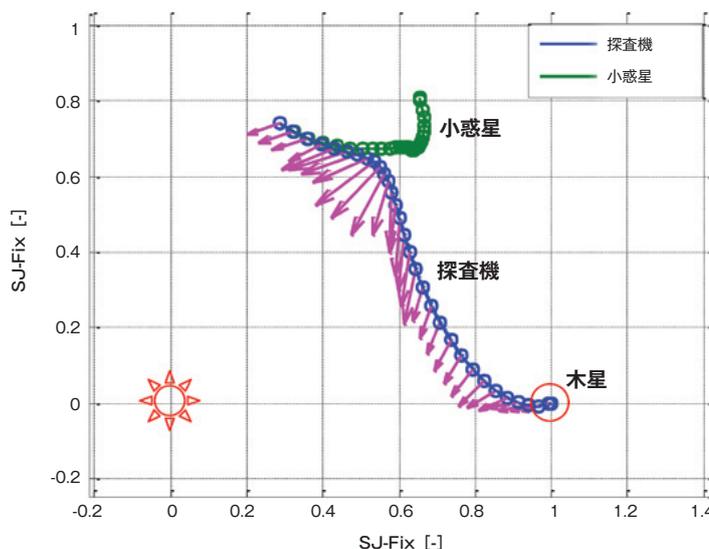


図3 木星からトロヤ群小惑星に向かう往路の軌道例(太陽-木星固定座標系)。矢印はイオンエンジンによる推力方向を指す。

例を示しています。トロヤ群到着のためには10年以上の飛行時間が必要となります。とても長い時間と思われませんが、深宇宙探査では、ある程度やむを得ないことです。そのため、技術をきちんと若い人に引き継いで、この壮大なミッションを進めていくことが大事だと考え

ています。技術的な課題はいろいろあり、野心的なミッションであるとは思いますが、工学的にも理学的にも大きな成果が期待できるミッションだけに、何とか実現したいと考えています。

(さいき・たかなお)

ソーラー電力セイル探査機開発状況

加藤秀樹 松本 純

ソーラー電力セイル探査機は、“日本独自のアイデア”であり、2001年度の検討チーム(ワーキンググループ)発足

以来、多くのJAXA職員、大学や研究機関の専門家、学生が、その実現に向けて研究開発を積み重ねてきました。

その結果として、木星トロヤ群小惑星への「ソーラー電力セイル探査機による外惑星領域探査の実証」ミッションは、宇宙研公募中型計画の二つの候補のうちの一つとして選定されています。現在は次フェーズへの移行に向けた準備の段階です。

ここでは、今までの研究開発成果がどのように実を結ぼうとしているかについて、その一部をご紹介します。

①ソーラー電力セイル

ソーラー電力セイルには、探査機に必要な電力を発電するための薄膜太陽電池のほか、姿勢を制御する機器や薄膜構造の理学観測機器が搭載されます。

各種バス機器とイオンエンジンを駆動するための電力は、地球近傍で約5.6kW、トロヤ群小惑星近傍で約3kWです。太陽から遠く離れたトロヤ群小惑星では、太陽光強度が地球近傍に比べて1/30程度まで弱くなるため、最も発電が苦しくなる小惑星での要求電力を確保することが、ソーラー電力セイルの大きさを決める要素になります。現在、この要求を満たすようにソーラー電力セイルを設計すると、一辺が約50mの大きさになります。

このソーラー電力セイルの設計と製作工程を検証するため、実際と同じ大きさである50m級セイルの試作と、その収納展開試験を進めています。試験の際は、大きさや清浄度・温度などを考慮し、より良い環境をえる筑波宇宙センターの設備を用いています。

搭載する薄膜太陽電池（CIGSタイプ）は、耐宇宙環境性に優れ、かつフレキシブルで軽量なものです。ソーラー電力セイルの製作をシンプルにするため、薄膜太陽電池1枚の大きさは、できるだけ大きくすることにしています。現在は、フライト品を想定した試作品の性能・温度特性の取得、紫外線や放射線などの耐宇宙環境性評価のほか、ソーラー電力セイル製作や軌道上でセイルを展開する際にかかる荷重による影響の評価を行っています。

②子機(ランダー)

今回のミッションでは、小惑星を探索するための子機（ランダー）を搭載して

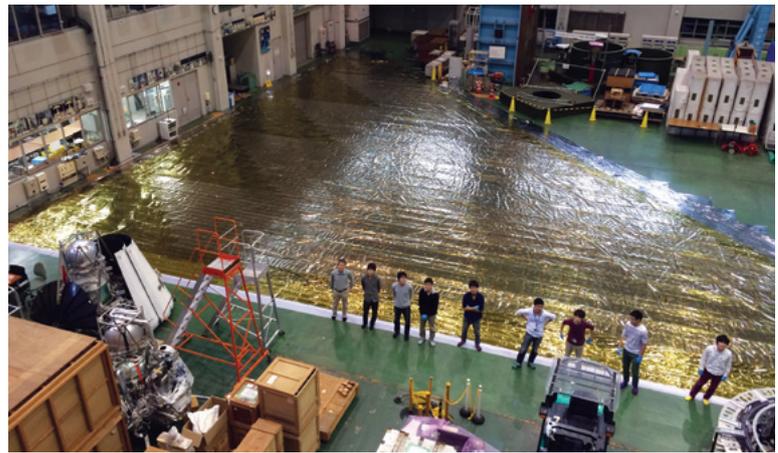
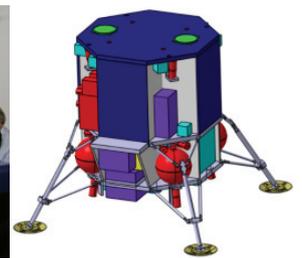


図1 一辺50mのセイルの試作



図2 CE Study (2015年8月) の様子と子機の検討結果



います。この子機が単独で小惑星へ降り立ち、その素性を明らかにするわけです。この子機が持つメインの機器は、「サンプル採取機器」と「サンプル分析器」の二つです。子機は小惑星の表面および地下1mのサンプルを採取した後、その場ですぐに分析を行います。小惑星まで片道10年以上の飛行時間を要する気の長いミッションです。世界に先駆けていち早く小惑星を調べるため、サンプルを地球へ持ち帰ることなくデータを取得できるようにしているのです。この子機開発はDLR（ドイツ航空宇宙センター）と共同で進めており、2年間にわたる合同検討会と、DLRの設備を利用したCE Study（Concurrent Engineering Study：1週間の集中検討会）により、概念設計を行いました。

③サンプルリターン

小惑星で分析を行った後はオプションとして、小惑星のサンプルを地球へ持ち帰る「サンプルリターン」を行います。これを実現するためには、子機が採取したサンプルをソーラー電力セイル探査機に受け渡さなければなりません。地球周回衛星では、国際宇宙ステーションと宇宙ステーション補給機「こうのとり」に代表されるような2機間のドッキングが頻繁に行われていますが、本ミッションのように地球から遠く離れた場所での例は過去にありません。地球からのサポートなしに2機が自律ドッキングをすることを目指し（まるでSF！）、現在はアンテナを用いて互いの相対位置を認識する手法の検討や、安全にドッキングするための機構・サンプルを搬送する機構の試作、試験を進めています。

（かとう・ひでき、まつもと・じゅん）

ISAS ニュース No.420 別冊 2016.3 ISSN 0285-2861

発行／国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
発行責任者／ISASニュース編集委員会 委員長 山村一誠
〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1
TEL: 042-759-8008

本ニュースは、インターネット（<http://www.isas.jaxa.jp/>）でもご覧になれます。
デザイン／株式会社デザインコンビニア 制作協力／有限会社フォトンクリエイト

編集後記

世界初の宇宙ヨットIKAROSの挑戦はまだ終わっていません。次のソーラー電力セイル探査機につなげて、太陽系探査を先導することが真のゴールなのです。果てしなき夢を追い続けるイカロス君とその弟の旅が幸多からんことを願って……。[Bon Voyage! (よい旅を!)] (プロジェクト側編集担当 森 治)

*本誌は再生紙（古紙100%）、植物油インキを使用しています。

