

IKAROS とは何だったのか？

JAXA 宇宙科学研究所学際科学研究系 教授 森 治

1. IKAROS の立ち上げ

1.1. ソーラーセイル・ソーラー電力セイルとは何か？

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る。例えば、金星探査機あかつきの全体重量は 500kg であるが、その内、ガスジェットの燃料は 200kg になる。そこで、はやぶさでは、ガスジェットより燃費が 10 倍よい（燃料が 1/10 になる）イオンエンジンを開発して搭載した。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。実はこのイオンエンジンを上回る究極の燃費のエンジンがある。ソーラーセイルである。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る。

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の推力は小さくなる。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る。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ある。これは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ある。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て、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。

2001 年に発足したソーラーセイルWG（Working Group）はこのコンセプトを踏まえ、2003 年にはやぶさに続く工学ミッションとしてソーラー電力セイルを用いた木星・トロヤ群小惑星探査計画を提案した（図 1）。

このミッションの先進性については、M-V ロケット（固体ロケット）による打ち上げを前提とした中規模の計画でありながら、木星極域探査とトロヤ群小惑星マルチフライバイ探査の両方を目指していることから確認できる（実際に後年、NASA が前者を JUNO、後者を LUCY で 2 つに分けて実施した）。

この計画は宇宙工学委員会に推薦され、2006 年 2 月にフェーズ A 候補となったが、技術的実現性が問われ承認されなかった（当時、米国のソーラーセイルが立て続けに打ち上げ失敗している状況であった）。そこで、イプシロンロケットによって実験機を打ち上げる計画も検討したが、今度はコストがかかりすぎると判断され、追い詰めら

れた。ちょうどそのころ、あかつきの打ち上げが M-V ロケットから H-IIA ロケットに切り替わったことで余剰ペイロードが発生した。この情報をソーラーセイル WG の主査である川口先生がいち早くキャッチし、その場で実験機の相乗り打ち上げを提案した。これが起死回生の一手となり実験機が認められ、IKAROS が誕生したのである。

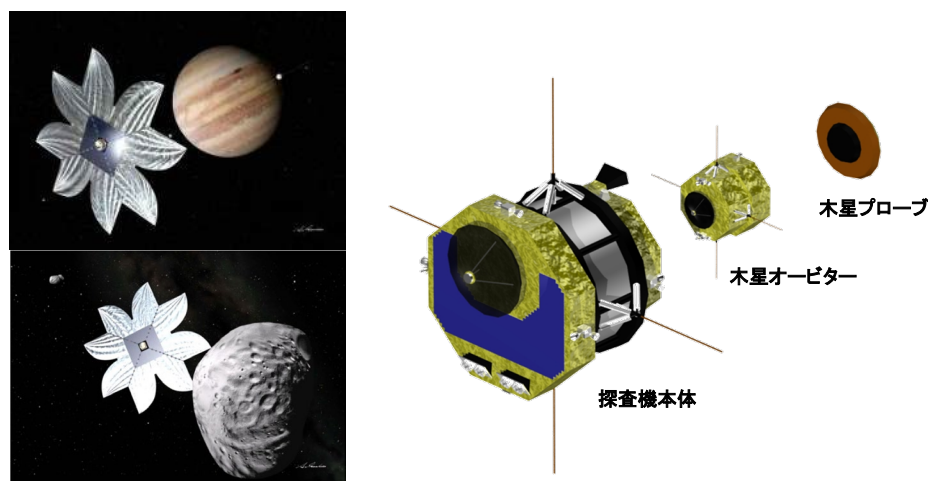


図1 ソーラー電力セイルを用いた木星・トロヤ群小惑星探査計画

1.2. IKAROS のミッション設定とチーム発足

IKAROS は実験機であるが、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すこととし、単独でも十分な意義を持たせた。具体的には、次の4項目を主ミッションとして設定した(図2)。

打ち上げ後、まずは①大型の膜を広げて張る(展開・展張)。これを受け、②膜に貼り付けられた薄膜太陽電池で発電する。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、打ち上げ後、数週間以内で行うこととした。

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

いずれも成功すれば世界初の快挙となる。

ずばり4つの中で①が最難関である。一般に膜の展開・展張方法として、ブーム(マスト)に膜を取り付けて伸展するブーム方式が採用されている。これはブームが伸びた分だけ膜を展開できるが、膜のサイズが大きくなるとブームの重量が増大するという課題がある。特に木星・トロヤ群小惑星探査機では膜面積は 2000m^2 程度とな

るため、この方式では対応できない。そこで、私たちは、探査機全体をスピンさせてその遠心力で広げるスピン方式を検討してきた。これは軽量で大面積の膜を展開できるが、膜の展開運動・展張形状が予測しにくいこともあり、技術リスクとなる。地上実験と数値シミュレーションを組み合わせ評価を進めてきたが、モデルの正しさを確認するためにも、空気抵抗や重力のない宇宙空間である程度のサイズの展開・展張実験を行いたい。それがまさに①なのである。IKAROS では 2000m^2 の $1/10$ にあたる 200m^2 の膜をスピン方式にて展開・展張することとした。このサイズは絶妙である。というのは、将来計画に向けた技術実証が可能であるだけでなく、短期間でコンパクトに作れるため安価な打ち上げのチャンスがつかめるからである。

③,④を実施するためには、太陽光圧が地球の空気抵抗・重力を凌駕する必要がある、地球周回ではなく惑星間軌道で実験を実施することが望ましい。しかし、そのようなチャンスはめったになく、あかつきとの相乗りはまさに理想的な条件といえる。実験機が世界初のソーラーセイルを実証できたのは、このようなラッキーをつかみ取れたことも大きな要因であるといえる。

ミッション設定の次はチーム発足である。ソーラーセイル WG の多数のメンバーが IKAROS に加わったが、中心メンバーは若手で構成された。IKAROS はその先も見据えたミッションであり、若手がリードすべきというコンセプトからこのような体制になった。ただし、これが成立したのは、川口先生をはじめ、ベテランの研究者・技術者がアドバイザーとして加わり、技術開発だけでなく、チーム運営も含めて、しっかり見守ってくれていたからだと思う。IKAROS に加わった多数のメンバーが、その後、はやぶさ 2 をはじめとする多くの探査ミッションで活躍できている主な理由として、IKAROS という実践の場を任せてもらえたことがあげられる。改めて感謝したい。

当時、宇宙機の名前は打ち上げ後に公募で決めることが一般的であったが、打ち上げ後だと愛着がわかないこと、公募だと「タコ」になる可能性が高そうなことから、早々に自分たちで名前を決めることとした。個人的には太陽神の化身として信じられた SPHINX にしたいと考え、Solar Power Sail の頭文字をうまく当てはめられないか考えていたのであるが、川口先生が IKAROS (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun) を提案した。神話ではイカロスは太陽に接近しすぎて落ちてしまうため、不吉な名前ではないかという意見が出たが、果敢に挑戦して最初に飛び立ったことが重要であり、落ちるくらい飛んだのであれば本望である、という説得(?)に皆が納得した。IKAROS という名前は、これから始まる厳しい開発に一致団結して立ち向かう決意の表れでもあったと思う。

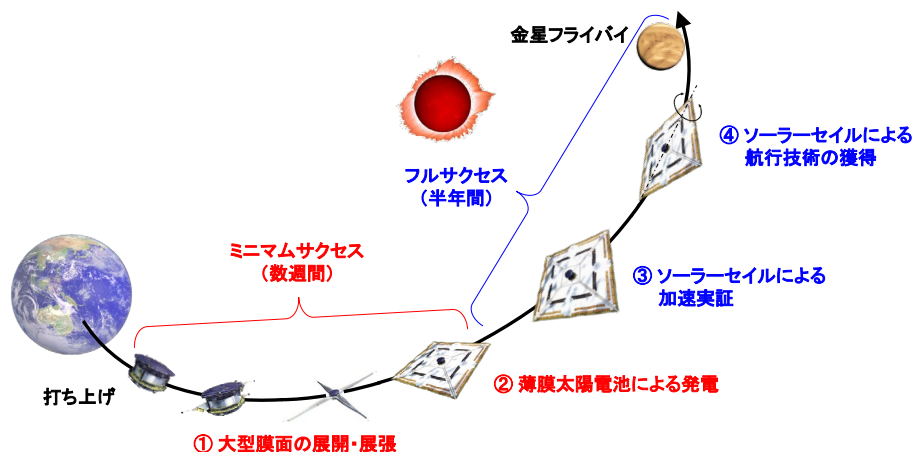


図2 IKAROS のミッションシーケンス

2. IKAROS の開発

2.1. 膜展開構造の決定

スピン方式では膜の挙動が複雑になるため、実際に回転させて広げてみるのが手っ取り早い。ただし、地上には空気抵抗・重力があるため、これらの影響をなるべく小さくして、大きな膜を展開するには大気球や観測ロケットを用いる必要がある。いずれも頻繁に行うことができない実験のため、その前に真空槽やスピンテーブル、スケートリンク等を用いて小さな膜を展開する実験を繰り返し、膜展開構造を改良していった (図3)。

特に苦労したのが、スケートリンク実験である。クローバ型から四角型に改良した膜をゆっくりと (準静的に) 広げる方法・装置を練り上げることを目指したのだが、膜が途中で引っ掛かり破れるトラブルが多発した。スケートリンクは昼間営業しているため、実験は夜間に行う。明け方にボロボロになった膜を回収している時は身も心も寒い。装置の改良よりも $\phi 10\text{m}$ の膜の修復が大変で、2週間程度かけて立て直し再挑戦・・・ということを15回以上も繰り返した。うまく展開したのは2回のみであったが、何とか気球実験に間に合わせ、 $\phi 20\text{m}$ のスピン展開を実現した (これが IKAROS のベースになった)。ちなみに、四角型では各頂点におもりを取り付けてこの遠心力によって膜を引っ張るのだが、スケートリンク実験では、このおもりにカーリングのストーンが用いられた。冬のオリンピックになると今でもこの実験を思い出す (図4)。

膜展開では実験を先行して進めたが、実験で得られた膜の挙動を数値シミュレーションで再現させることで、モデルも地道に構築していった (図5)。

以上は四角型で実施された活動である。これ以外にも平行扇子型、らせん折り、複

合らせん折り、回転二重折りなどの方式がソーラーセイル WG の様々な研究者によって検討されていた (図 6)。

IKAROS の実施が決まったタイミングで、これらの中から一つに絞り込むことになった。選定会議は 6 回に分けて開催され、数百の評価項目を議論した。6 回目の会議では徹夜で議論が行われ、四角型が選ばれた。選定会議には、小野田元所長や名取宇宙研名誉教授など構造の大家といわれる先生方も参加していたのだが、若手が実施した実験・解析結果を尊重して議論してくれた。四角型は意中の方式ではない先生も多かったと思うが、四角型に決まった後は、真剣にサポートしてくれた。心より感謝申し上げたい。

膜の実験・解析を支えたのは、日本の伝統文化「折り紙」であると思う。やわらかい膜を丁寧に折り畳み収納するのは骨が折れるが、「折り紙」をやった記憶がよみがえり、不思議と楽しいものである。ソーラーセイルは約 100 年前に提案され、SF にもよく登場する。IKAROS 以前に何度も宇宙実証が試みられたが実現していなかった (2025 年現在でも成功例は少ない)。なぜ、日本の IKAROS が最初の挑戦で成功できたのか？それは「折り紙」に魅せられた研究者たちがひたすら実験・解析を重ね、切磋琢磨したからであろう。

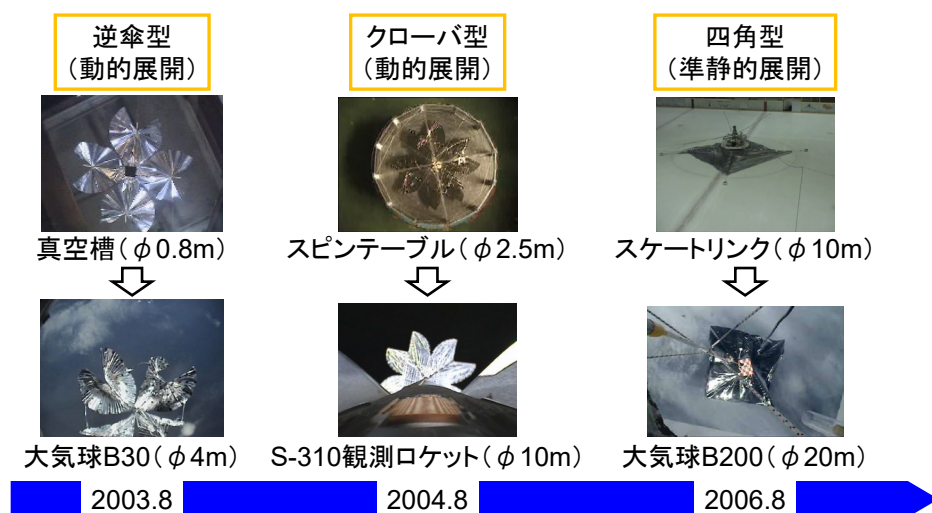


図 3 膜展開構造の改良

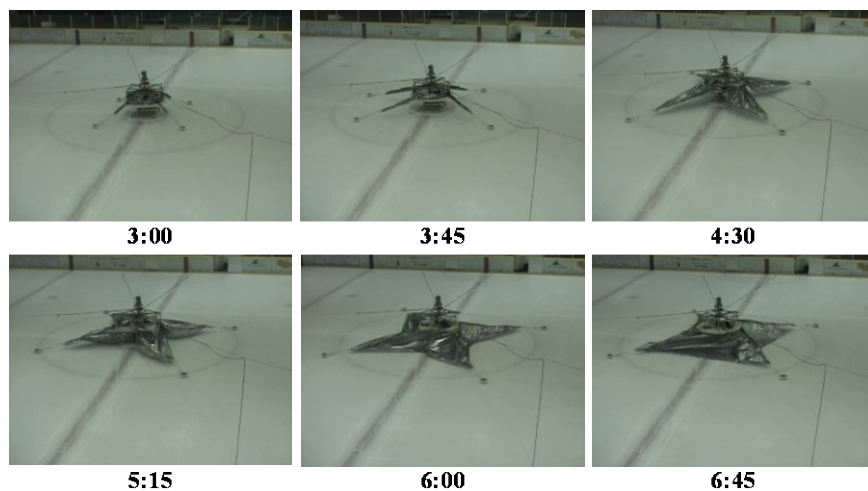


図4 スケートリンク実験での膜展開挙動（成功例）

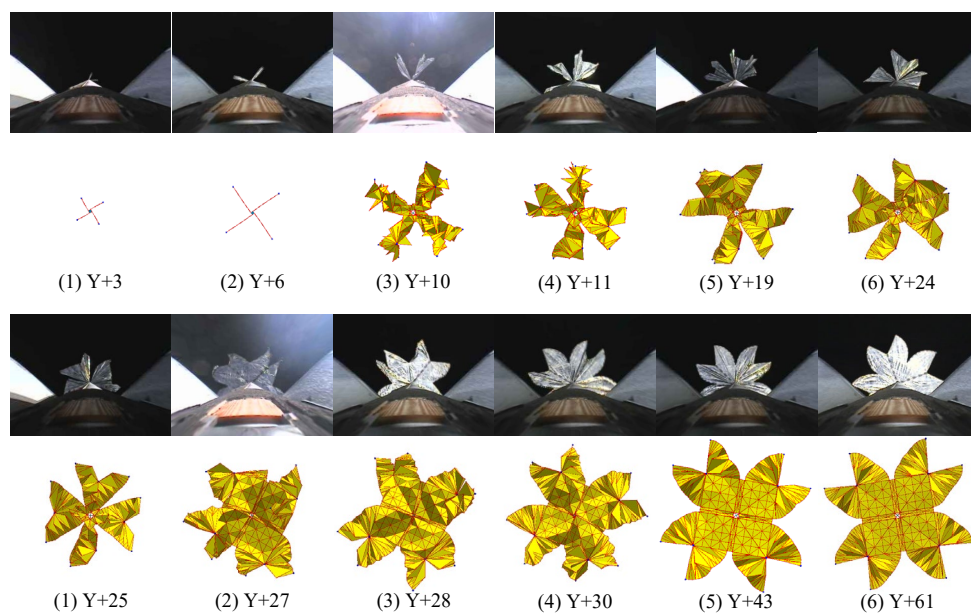


図5 観測ロケット実験での膜展開挙動と数値シミュレーションによる再現

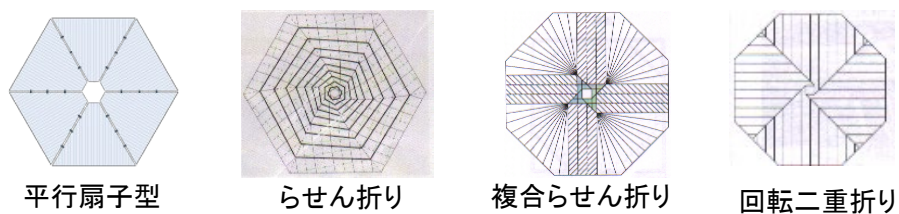


図6 スピン方式膜展開構造の検討例

2.2. スケジュール・コストの制約

上述したように IKAROS 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る機会が得られた（ちなみに、IKAROS の I は Interplanetary すなわち「惑星間」を指している）。

しかし、IKAROS 発足時あかつきの打ち上げまでは 2 年半しかなかった。惑星間ミッションは軌道条件で打ち上げ時期が決まるため、遅らせてもらうことはできない。それどころか、IKAROS はあかつきの打ち上げ振動を緩和するためのダミーウェイトという位置づけのため、完成していなくてもこの役割を果たすために飛ばさなければならない。

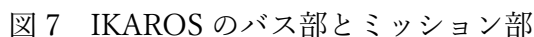
計画開始から打ち上げまでが 2 年半というのは、従来の科学衛星の 1/2～1/3 しかない。さらに、プロジェクト経費も 15 億円であり、当時の科学衛星の 1/10 規模しかなく、スケジュールとコストに常に悩まされることとなった（何度も夢に出てきた）。

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とった。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た（実際には、これを行ったにもかかわらず、打ち上げ直後に温度が冷えて肝を冷やした・・・）。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た。

次にバス部とミッション部の I/F 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（CDR）も別々に実施した（図 7,8）。バス部は M-V ロケット、LUNAR-A、はやぶさ、DRTS 等の他プロジェクトの利活用品を積極的に流用した。また、多少オーバースペックであっても、あかつき等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、若手研究者・学生が開発を主導した（図 9,10）。

IKAROS の開発が間に合わない場合、打ち上げ延期は認められず、ダミーウェイトとして強制的に打ち上げられることとなる。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、この前に 1 カ月の予備期間を用意した。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た。また、射場への移動前にも 2 カ月の予備期間を設けたが、ここも総合試験で判明した問題点の改修作業等に充てることができ、ギリギリ間に合わせることができた（図 8）。

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ないが、工夫次第で何とかなるものである、むしろ、素早い打ち上げ機会にも対応できるように研究開発を地道にやっておくべきである、と考えるようになった。

図 8 IKAROS の開発スケジュール

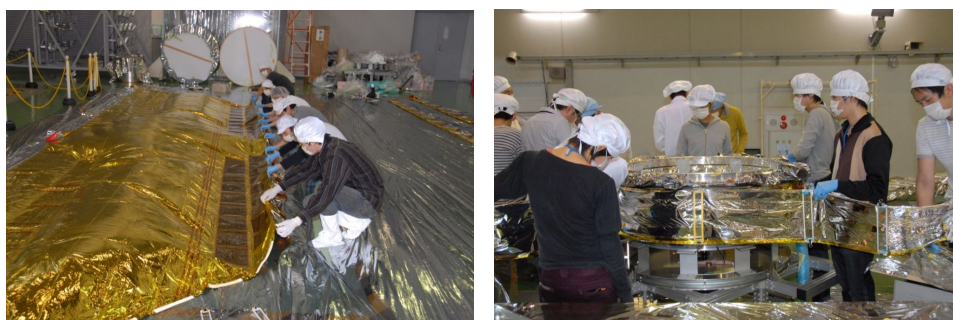


図 10 若手研究者・学生たちによる膜の折り畳み・巻き付けの様子

3. IKAROS の運用

3.1. ソーラーセイル・ソーラー電力セイルの実証

IKAROS は 2010 年 5 月 21 日に H-IIA ロケット 17 号機によりあかつきと相乗りで打ち上げられた (図 11)。まず①大型膜面の展開・展張を行った。先端マス解放、一次展開、二次展開において展開機構が正常に動作し、膜展開に成功した。続いて、2 機の分離カメラによる撮影にも成功した。IKAROS が光を受けて深宇宙の暗闇の中を推進する画像は世界に衝撃を与えた。これにより展張形状を把握し、膜に異常がないことも確認した。膜展開後には、②薄膜太陽電池による発電についてデータを取得し、地上試験を踏まえた予測値とほぼ一致することを確認した。さらに、データ取得を週 1 回の頻度で継続し、惑星間環境における薄膜太陽電池システムの特性評価を行った。①,②を完了したことで、ミニマムサクセスを達成した (図 12,13)。

③ソーラーセイルによる加速実証において、膜展開前後のドップラーの変化から太陽光圧による推力を 1.1mN と算出し、設計値とほぼ一致した。これにより世界初のソーラーセイルが実証された。その後は軌道決定により太陽距離・太陽角が異なる条件下で太陽光圧による推力を評価し、11 月までに累積加速量は 100m/s となった。④ソーラーセイルによる航行技術の獲得では、分離カメラ画像で液晶デバイスが正常に動作することを確認した後、液晶デバイスで太陽指向制御を実現し、想定通りの性能となっていることを確認した。さらに、スラストで膜面の方向を調整し、軌道制御も行った。12 月 8 日には金星からおおよそ 8 万 km の距離を通過した。このときにモニタカメラで金星の撮像にも成功し、フライバイ観測を実現した。③,④を完了したことで、フルサクセスを達成した (図 12,13)。

追加ミッションとして、⑤ソーラーセイルによる広範囲姿勢制御を実施した。低スピンドレート運用や逆スピン運用では、遠心力が小さくなるため太陽光圧によって膜が大きくたわむと事前に予想していたが、膜形状はほとんど変化しなかった。膜に貼り

付けたデバイスの反りにより膜の剛性が高かったと考えられる。また、逆スピン運用や大マヌーバ運用後に姿勢の変化をモニタした結果、スピンレートが低下し、スピン軸が倒れていくことが明らかになった。前者は膜のねじれ、後者は膜のたわみにより太陽光圧トルクが発生したと考え、それぞれ風車効果、渦巻き運動と名付けた。これらは膜の設計、ソーラーセイルの運用において有益である。①～⑤により、世界初のソーラーセイル・ソーラー電力セイルを実証し、ソーラーセイルの膜構造・航法誘導等に寄与する深い知見を獲得した（図 12,13）。



図 11 IKAROS とあかつきの H-IIA ロケット 17 号機による相乗り打ち上げ

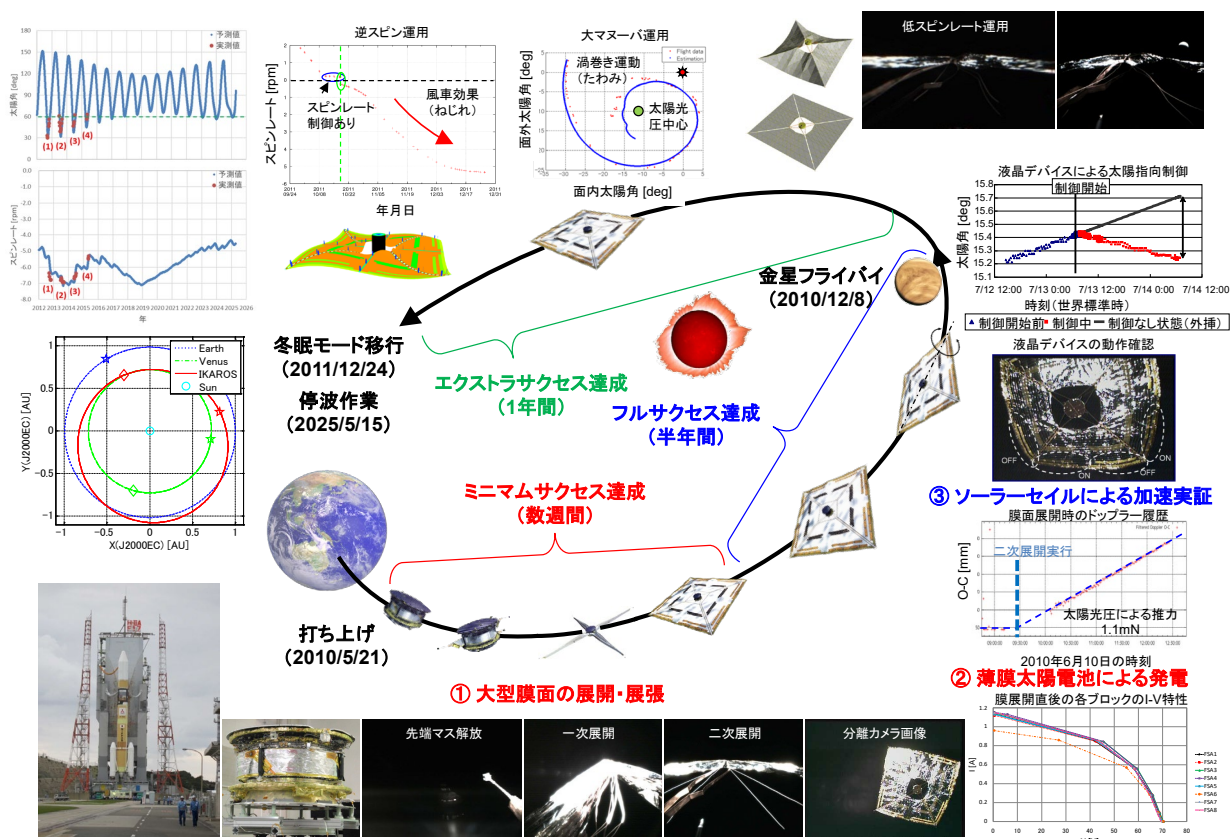


図 12 IKAROS の運用結果

年月日	主要イベント
2010年5月21日	H-IIAロケット17号機によりあかつきと相乗りで打ち上げ
2010年5月26日-6月9日	大型膜面の展開・展張(先端マス解放・一次展開・二次展開)
2010年6月10日	薄膜太陽電池による発電の確認
2010年6月14,19日	分離カメラ(2機)による撮影実験
2010年7月9日	ソーラーセイルによる光子加速の実証に世界で初めて成功
2010年7月15日	液晶デバイスによる姿勢制御の確認
2010年12月8日	金星フライバイ
2010年12月21日	定常運用終了確認会
2011年1月	後期運用開始
2011年6-9月	低スピンドレート運用
2011年9-10月	大マヌーバ運用
2011年10月18日	逆スピン運用
2011年11月29日	燃料ほぼ枯渇, 姿勢制御停止
2012年1月	冬眠モード(1回目)に移行
2012年9-10月	冬眠明け(1回目)のIKAROS電波受信
2012年11月	冬眠モード(2回目)に移行
2013年3月8日	プロジェクト終了確認会
2013年6-9月	冬眠明け(2回目)のIKAROS電波受信
2013年9月	冬眠モード(3回目)に移行
2014年5-7月	冬眠明け(3回目)のIKAROS電波受信
2014年8月	冬眠モード(4回目)に移行
2015年4-5月	冬眠明け(4回目)のIKAROS電波受信
2015年5月	冬眠モード(5回目)に移行(これ以降, IKAROS電波受信不可)
2025年5月15日	停波コマンド送信

図 13 IKAROS の運用履歴

3.2. 探索運用・停波作業

2011 年 11 月末に IKAROS の燃料がほぼ枯渇し、姿勢制御が困難になった。太陽角が 60deg を超えると冬眠モード（シャットダウン状態）となるため、2012 年以降、冬眠モードと冬眠明けを繰り返すようになった。冬眠明けに電波を受信するためには冬眠モード期間中の軌道・姿勢を正確に予想することが必要である。IKAROS はソーラーセイルによって軌道・姿勢が変化するため、膜が受ける光圧・光圧トルクを高い精度でモデル化することが重要であり、逆に、冬眠明けに IKAROS を探索することでこのモデルの妥当性を検証できる。探索運用を実施した結果、4 回目の冬眠明けまでは IKAROS の電波を受信することができ、ソーラーセイルの長期間の運動を高精度に予測できるようになった。しかし、2015 年 5 月に 5 回目の冬眠モードに移行した後は、IKAROS の電波を受信できなかった（図 12,13）。

IKAROS の運用を継続するために、国際電気通信連合 (ITU) に対し IKAROS 周波数割り当て有効期限の延長申請を行ってきたが、有効期限を 15 年 (2025 年 5 月 21 日満了) から 20 年 (2030 年 5 月 21 日満了) への延長する申請では、運用実績がないことから保留にされた。IKAROS の電波を受信できていない期間が長くなるほど軌道・姿勢の誤差分散が大きくなり探索が困難になる。今後、IKAROS の電波を受信できる可能性は極めて小さいと考え、有効期限満了前の 2025 年 5 月 15 日に停波作業を行った (図 12,13)。

3.3. クルージング環境を利用した観測・実験

IKAROS の余剰スペースに 3 つのオプション機器を搭載し、主ミッションに影響しない範囲で、クルージング環境を利用した観測・実験を行った (図 14)。

- ・ガンマ線バースト偏光検出器 GAP (GAMMA-ray burst Polarimeter) : 数 10 のガンマ線バーストを検出、3 例の明るいガンマ線バーストから世界で初めて偏向度の測定に成功した。

- ・大面積宇宙塵検出器 ALADDIN (Arrayed Large-Area Dust Detectors for INterplanetary Space) : 宇宙塵衝突を 2789 個検出し、内惑星領域における宇宙塵分布の日心距離依存性にかつてない微細な区分で計測した。地球-金星間の往復軌道におけるダスト分布の解明に成功した。

- ・VLBI (Very Long Baseline Interferometry) 計測用マルチトーン送信器 : VLBI 実験を計 24 パス実施した。熱雑音 50 ピコ秒で計測に成功し、10~20 倍の精度向上を達成した。△VLBI を用いた高精度軌道決定を行えるようにした。

これらのオプション機器は地球から離れた深宇宙でできる観測・実験を実施した。また、ALADDIN については IKAROS の膜に搭載することで、ダスト検出器の大面積化を実現した。いずれも大きな成果が得られたことにより、クルージング環境を利用した観測・実験が有力な探査手法であることが明らかになった。



図 14 IKAROS のオプション機器

4. IKAROS で獲得した技術・ノウハウの継承

4.1. OKEANOS

IKAROS はソーラー電力セイル探査機の実験機という位置付けである。IKAROS の成功を踏まえて、ソーラー電力セイル探査機の本格的な検討を再開した。ただし、ミッションの前提・内容が少し異なる。まず、M-V ロケットが終了となっていたため、H-IIA ロケットまたは H3 ロケットで打ち上げることにした。これによりトロヤ群小惑星のマルチフライバイではなく、トロヤ群小惑星のランデブー・往復が可能となった。さらに、木星オービターの代わりに子機を搭載し、トロヤ群小惑星へ着陸してサンプルを採取することにした。このサンプルを親機に渡せばサンプルリターンも実現できる。2015 年 2 月に戦略的中型計画としてソーラー電力セイル探査機 OKEANOS (Oversize Kite-craft for Exploration and AstroNautics in the Outer Solar system) によるトロヤ群小惑星直接探査ミッションを提案した。MDR, プリフェーズ A2 計画審査を経て、2016 年 9 月にはソーラーセイルWGからプリプロジェクト候補チームに移行した。

OKEANOS のミッション内容は以下通り (図 15,16)。

1) 航行技術の実証

ソーラー電力セイル探査機により外惑星領域を航行 (・往復) し、着陸に必要なペイロードを輸送する技術を実証する。

2) 探査技術の実証

D/P 型トロヤ群小惑星にランデブーし、子機を着陸させ、試料を採取し・その場分析 (・サンプルリターン) に必要な探査技術をまとめて実証する。

3) 理学観測

深宇宙空間のクルージング環境を利用した理学観測およびトロヤ群小惑星での理学観測を実施する。

このミッションははやぶさ、はやぶさ 2 の小惑星探査をより遠方に拡張するものであり、当時、外惑星領域からのサンプルリターンを実現する唯一の解と考えられた。

ただし、検討を進めるにつれ、2 つの課題が浮き彫りになった。まずは時間である。このミッションは片道 13 年、往復 30 年以上かかる。遠方探査になるほど時間を要するのは当然なのであるが、開発に関わった研究者自身が成果を得ることが難しいとミッションに対する支持が広がらない。また、長期ミッションを確実に実施できるようにシステム信頼性を確保するのは容易ではない。そこで、片道ミッションをノミ

ナル、往復ミッションをオプションとし、着陸後にその場分析を実施することで片道でも十分な成果が得られるようにした。また、クルージングサイエンスをメインミッションと位置づけ、目的地に到達する前の早い段階から成果を創出するようにした。

もう一つはコストである。当時の戦略的中型計画ではコストキャップとして総額 300 億円が設定されていた。この条件がどれだけ厳しいかということは、はやぶさ 2 でははやぶさのヘリテージを十分に生かすことができ、開発時の円相場は 1 ドル 80 円台、消費税は 5%、人工費も 1 時間当たり 1000~2500 円安いにもかかわらず 300 億円をオーバーしていたことから分かる。そこで、サンプルリターンをやらないことでシステムを簡略化した。特に子機については 100kg 級から 40kg 級に小型・軽量化し、はやぶさ 2 で MASCOT を担当した DLR に開発いただくことにした。イオンエンジンは高価格のため、なるべく基数を減らした。さらに、フロントヘビーな開発計画とすることで、リスクを低減し、プロジェクト立ち上げ段階での総費用を下げる方針とした。しかし、それでもコストは 20 億円程度超過する見通しとなった。

2019 年 5 月に戦略的中型計画のダウンセレクションが行われたが、OKEANOS は選ばれなかった。300 億円以下という明確な条件に合致することができなかったためである。巨大な膜を扱う懸念も完全に払拭することはできなかった。外惑星探査であっても、規模やリスクが大きいミッションは許容されにくいことを痛感した。

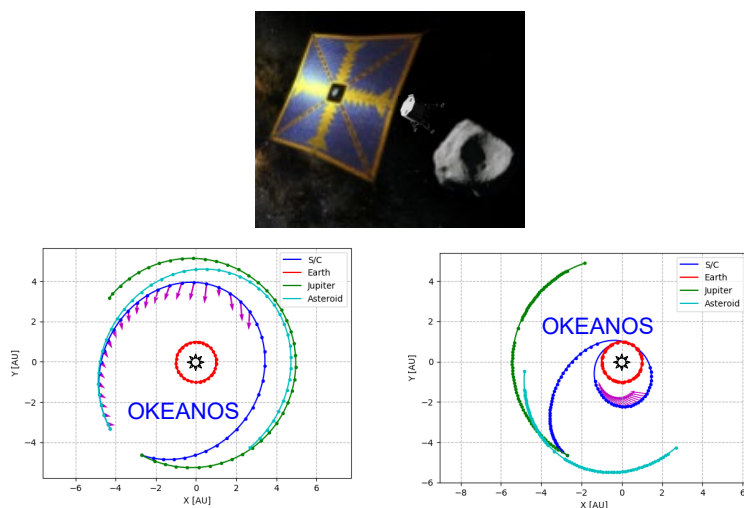


図 15 OKEANOS の外観・軌道例

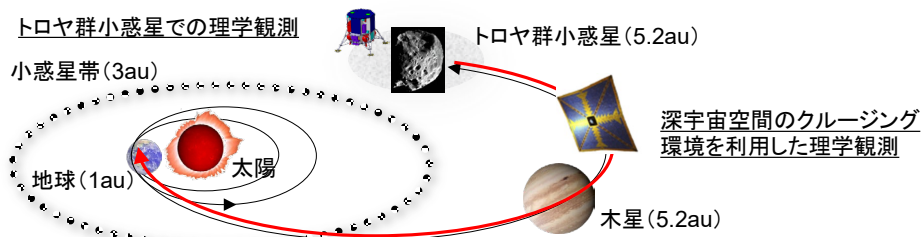


図 16 OKEANOS のミッションシーケンス

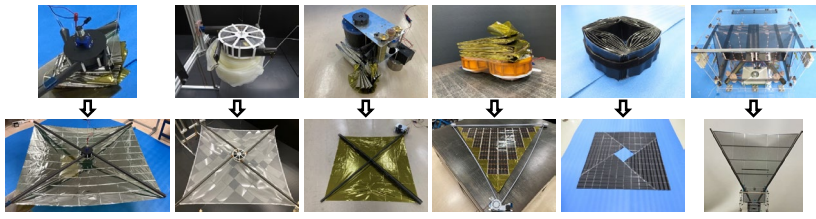
4.2. HELIOS プログラム

OKEANOS が戦略的中型計画に不採択になったことを踏まえ、超小型・小型計画にソーラー電力セイルを適用する方針に切り替えた。そして、膜にさまざまなデバイスを貼り付けることで高機能・多機能膜とするコンセプトを新たに提案した。例えば、膜に薄膜太陽電池を貼り付けることで大電力発電が可能になる（太陽電池膜）。また、アレーアンテナ、干渉計、反射シートを貼り付けることで、それぞれ、大容量通信、高分解能観測、高精度航法が可能になる。さらに、デバイスが貼りついていない部分も、ソーラーセイルやデオービットセイルとして活用できる。膜の展開・展張方法については、IKAROS、OKEANOS で採用したスピン方式の場合、膜のサイズを数 1000m² まで拡大可能であるが、宇宙機全体を回転させる必要があるため適用先が限られる。一方、ブーム方式の場合、3 軸姿勢制御の宇宙機に適用可能であるが、膜のサイズは数 10m² が限界である。超小型・小型の宇宙機であれば、膜は数 10m² で十分と判断し、ブーム方式を採用することにした。そして、これに対応する膜展開構造を急ピッチで開発した（図 17）。

OKEANOS が不採択になったほぼ 1 年後に、この高機能・多機能膜を革新的衛星技術実証 3 号機（RAISE-3）のミッションコンポーネントとして実証することを提案し、採択された。これが HELIOS (Harvesting Energy with Lightweight Integrated Origami Structure) ミッションである。HELIOS では一辺 1m の四角形ポリイミド膜をブームで展開し、薄膜太陽電池による発電、5G ミリ波アンテナによるビームフォーミング、干渉計による膜形状計測の実験を行う予定であったが、RAISE-3 を搭載したイプシロンロケット 6 号機の打ち上げに失敗したことによりミッションが実施できなかった。そこで、革新的衛星技術実証 4 号機（RAISE-4）で改めて宇宙実証する機会が得られた。これが HELIOS-R ミッションである。ミッション内容は HELIOS とほぼ同じであるが、OPENS-0（4.3 節参照）の膜の形状・材質に合わせて、HELIOS-R の膜も三角形三軸織物に変更した。また、形状記憶ポリマーによる膜形状制御の実験も

追加した（図 18）. 2025 年 11-12 月の打ち上げに向け準備が進められている.

高機能・多機能膜は準小型プログラム（4.5 節参照）や超小型・小型衛星ビジネスへの適用が期待される. 特にビッグデータを活用する Society 5.0 の時代には, 超小型・小型衛星コンステレーションにより大量の情報を収集することが想定されるため, 超小型・小型衛星に大電力発電, 大容量通信, 高分解能観測の機能を加えることは非常に有意義である. このコンセプトを踏まえて, 高機能・多機能膜の事業化を進めており, そのためにも HELIOS-R での宇宙実証が重要になる.



	HELIOS			HELIOS-R		
膜の折り方	短冊折	回転二重波折	短冊折	短冊折	波型パネル	短冊折
膜の形状	四角形	四角形	四角形	三角形	四角形	三角形
ブームの形態	双安定性ブーム	双安定性ブーム	結合ブーム	ビーコンブーム	—	双安定性ブーム
ブームの本数	4	4	1	3	0	2
展開力	モータ	自己伸展	モータ	自己伸展	自己展開	モータ

図 17 ブーム方式膜展開構造の検討例

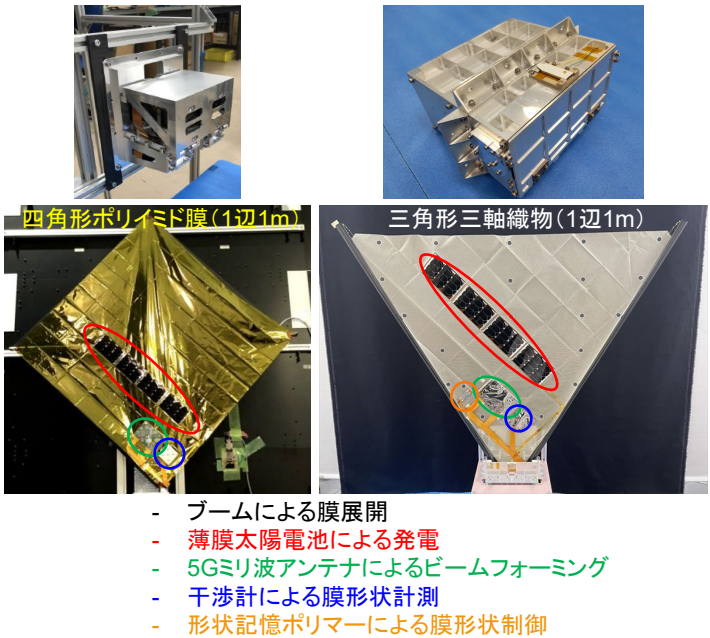


図 18 HELIOS, HELIOS-R の外観・ミッション内容

4.3. OPENS プログラム & 深宇宙 OTV

イプシロンロケットや相乗り打ち上げを想定した 100kg 級の探査機による外惑星探査 OPENS (Outer Planet Exploration by Novel Small spacecraft) プログラムが提案され、2019 年度にその初号機 OPENS-0 の WG が設置された。OKEANOS が不採択になった直後でソーラー電力セイルの新しいミッションを検討中だったこともあり、ブーム方式の太陽電池膜を OPENS-0 に適用することを思いついた。この太陽電池膜の発電質量比は 200W/kg となる見通しで、太陽電池パドルの世界最高値 150W/kg を優に超えるため OPENS-0 に質量メリットをもたらす。これを OPENS-0 WG に提案したところ、OPENS-0 の主要なミッション目標の一つに太陽電池膜による外惑星探査の実証を掲げてもらえることとなり、新たに始まった宇宙研の技術のフロントローディングにて太陽電池膜を開発できることとなった。

OPENS-0 WG では、2020 年度に公募型小型計画として土星圏からのフライバイサンプルリターンミッションを提案したが採択されなかった。そこで、さらに規模を小さくして 2024 年度に公募型小型計画の ECO&FAST クラスに土星圏フライバイミッション（クルージング環境を利用した観測・実験も含む）を提案したところ採択され、WG はプリプロジェクト候補チームに移行した（図 19）。

これまで太陽電池で土星圏探査を実現したミッションはない。OPENS-0 でこれに挑戦できることにわくわくし、ソーラー電力セイル技術を継承するミッションが見つかったことにほっとした。しかし、ソーラー電力セイルの真価は外惑星領域でイオンエンジンを駆動してこそ発揮されると考える。そこで、2024 年度に OPENS プログラムの 2 号機 OPENS-1 の RG (Research Group) を立ち上げ、太陽電池膜とイオンエンジンを用いた発展的な外惑星領域探査のミッション検討に着手した。

OPENS-1 では OPENS-0 に相当する機体に $\mu 10$ 相当のイオンエンジンを搭載して小型ソーラー電力セイル探査機とし、数 1000m/s の ΔV を発生させる。これにより、メインベルト、トロヤ群小惑星、ケンタウルス族などの遠方小天体のランデブー・着陸が可能になる（図 20）。

OPENS プログラムの 3 号機 OPENS-2 では OPENS-1 と同等の小型ソーラー電力セイル探査機を深宇宙 OTV (Orbit Transfer Vehicle: 軌道間輸送機) で運搬し、分離後に着陸・サンプル採取して地球に帰還する。これにより、トロヤ群小惑星、ケンタウルス族などのサンプルリターンが可能になる（図 21）。

OPENS-1,2 は OKEANOS と同様にトロヤ群小惑星の着陸・サンプルリターンを実現できる。OPENS-1,2 の小型ソーラー電力セイル探査機は共通設計で、OPENS-0 + $\mu 10$ イオンエンジンをベースに開発し、質量は 250kg、膜サイズは 34m² と見積もって

いる。また、OPENS-2 では、往路は深宇宙 OTV、復路は小型ソーラー電力セイル探査機が受け持つため、それぞれの運用期間は 10 数年にできる。さらに、深宇宙 OTV も他の探査ミッションと共通化することを想定している。このように OPENS プログラムでは、OKEANOS が不採択になった主な理由であるコスト・リスクの問題点を小型化・プログラム化によって解消し、持続可能な外惑星領域探査を実現することを目指す (図 22)。

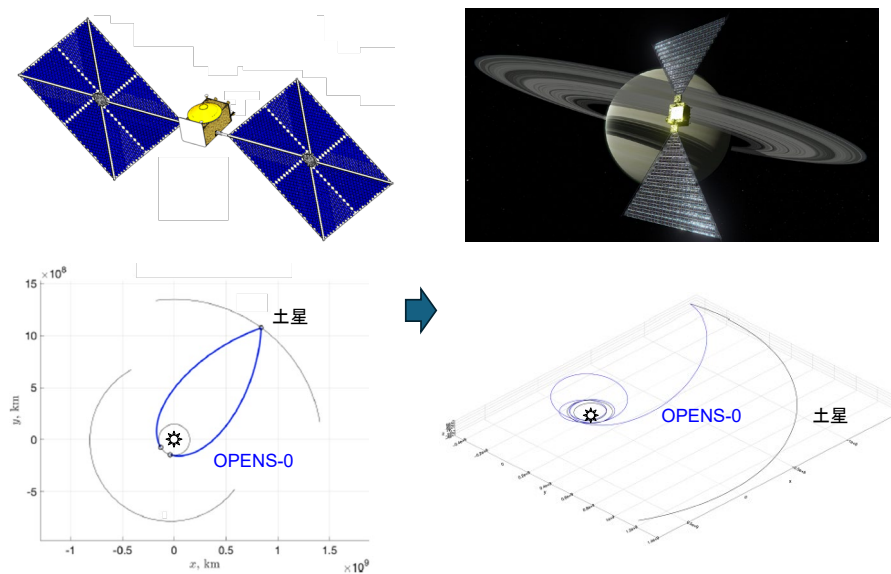


図 19 OPENS-0 の外観・軌道例

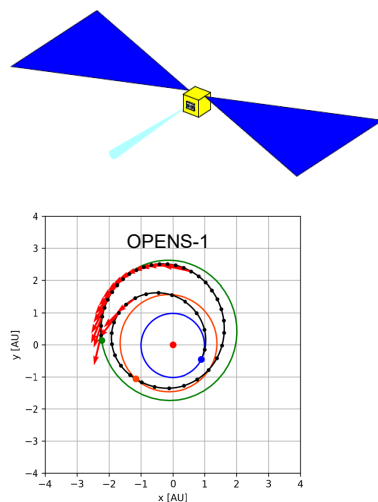


図 20 OPENS-1 の外観・軌道例

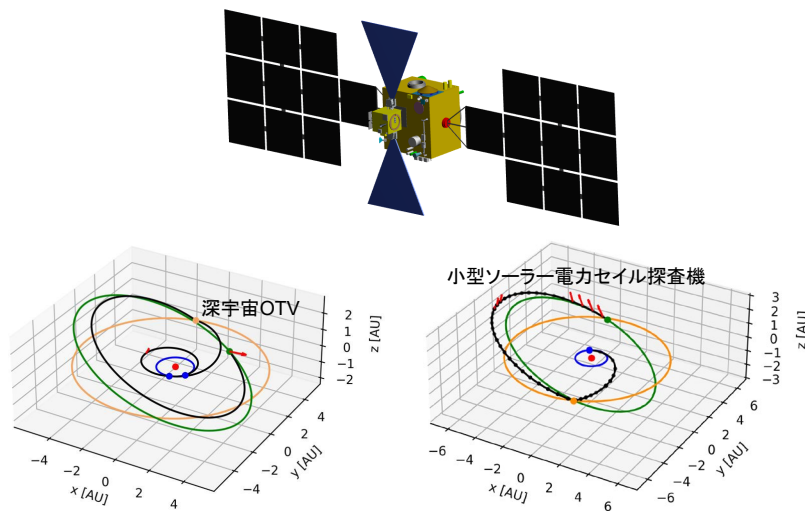


図 21 OPENS-2 の外観・軌道例

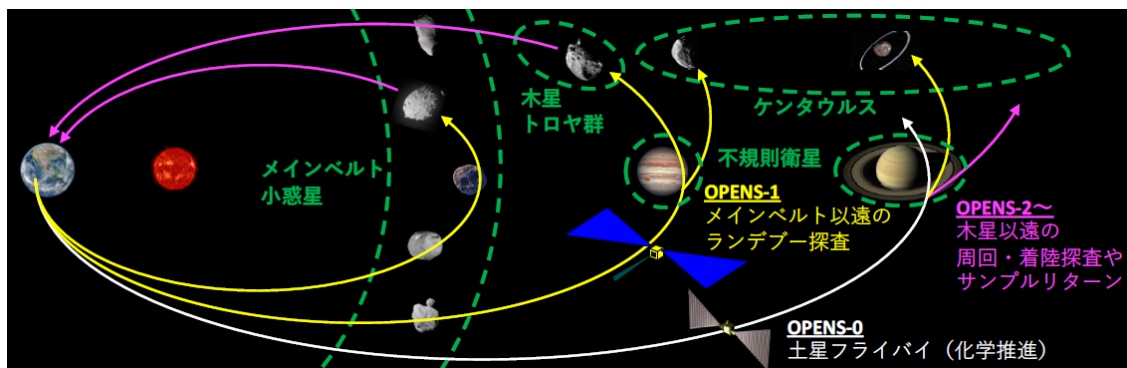


図 22 OPENS プログラム

4.4. PIERIS

上記はいずれもソーラー電力セイル技術を継承するミッションである。一方、ソーラーセイル技術を継承するミッションとして PIERIS (Powered Innovative Earth-orbiter with Reorientable Inclined Sail)を進めている。IKAROS では光圧によって加速するだけでなく、太陽光圧トルクによって姿勢が変動する現象（風車効果、渦巻き運動等）が確認された。この太陽光圧トルクを制御するために、スラスタの推力・推力方向を調整する方法、液晶デバイスによって太陽光の反射率だけでなく、反射方向を変更する方法、ジンバル、スピン励振、形状記憶ポリマーを用いて膜形状を変化させる方法等が考えられる。PIERIS ではピラミッド型の膜をジンバル駆動することで姿勢・軌道統合制御を実証することを JAXA-SMASH プログラムに提案し、採択された。OPENS プログラムでも太陽電池膜をジンバル駆動し軌道制御や姿勢制御に役立てることを想定している。

4.5. 準小型プログラム

2024 年度に行われた公募型小型計画の ECO&FAST 公募に続き、2025 年度には準小型プログラムが打ち出されるなど、今後の宇宙研の活動に超小型・小型計画が欠かせない状況になりつつある。IKAROS チームを立ち上げた当時と現在では社会情勢・経済状況が異なるが、IKAROS のプロジェクトの進め方で準小型プログラムに参考になりそうなことを記載する。

- ・相乗りミッションにしたことでロケット関連費用を大幅に引き下げることができ、ミッション採択につながった。
- ・中型計画に必要なキー技術・システムの先行実証と位置付けたことで、中型計画のメンバーがチームに加わり、それまでの中型計画の研究開発成果を存分に活用して、世界初の実証を実現することができた。
- ・スケジュール・コストの制約は非常に厳しかったが工夫すること（熱・構造試験モデルを製作しない、バス部とミッション部を独立に開発する、ミッション部にマンパワーを集中する、スケジュールマージンを確保するなど）によって何とか対応できた。
- ・ミッション内容が分かりやすく魅力的であったため、チームの士気を維持するのは容易であった。
- ・超小型・小型計画であっても世界初・世界一級の成果を創出でき、該当する分野の技術・システムを大きく発展させた。後継ミッションを実施する機運が高まった。
- ・挑戦的なミッションに主体的に加わったことで、多数の若手研究者・学生が探査ミッションを支える人材に成長し、キャリア形成にもつながった。

5. IKAROS の広報・アウトリーチ活動

5.1. ツイッター（現 X）

2010 年 1 月 29 日に IKAROS のツイッターアカウントとしてイカロス君 (@ikaroskun) が誕生、2 月 5 日よりツイートを開始した。IKAROS に関心を寄せてくれているファンの多くが、イカロス君がきっかけだったのではないだろうか？当時 JAXA としては広報活動にツイッターを使った経験がほとんどなく、イカロス君をどう扱ってよいか分からなかった。このため、キャンペーン実施当初のフォロワー数は

200 未満であり、ツイッターでの広報効果は目に見えて分かるものではなかった。

転機を迎えたのは、はやぶさ (@Hayabusa_JAXA)、あかつき (@Akatsuki_JAXA) の両探査機がツイートを開始したことであろう。ツイッターでは、お互い返信しあうことができ、はやぶさファン、あかつきファンと情報共有することで、フォロワーが大幅に増加した。打ち上げ当日には現在のツイッターで公開されている素顔を公表したことでも話題になり、打ち上げ翌日に宇宙の様子を3人で会話し出すと、フォロワー数が10000を突破した。IKAROSの広報活動として画期的な効果が表れた瞬間であった。

その後、分離カメラによる撮影実験に合わせ、DCAM2 君 (@DCAM2)、DCAM1 ちゃん (@DCAM_1) も登場し、イカロス君とのやり取りを通じてミッションの様子をほぼリアルタイムで伝えた。実際に撮影された画像は非常に鮮明で、ソーラーセイルが実現されたこと証明する決定打となった。はやぶさの帰還と合わせ、日本の探査技術を世界中にアピールすることができた。

イカロス君は宇宙での情報をツイートによって分かりやすく発信し、宇宙や科学に触れる機会のなかった多くの人の関心を集めたということで、第8回 Web クリエーション・アワード「気になる Web 人で賞」を受賞した。

2010 年以降、ご当地もののゆるキャラグランプリが開催されるようになったことを考えると、イカロス君の誕生はゆるキャラ時代の到来とも合致していて、イカロス君は宇宙機のゆるキャラの火付け役になったとも言える。2022 年 3 月に第 1 回宇宙研ゆるキャラ総選挙が開催され、イカロス君がぶっちぎりで第一位になったのはそれを象徴している（2025 年 10 月の第 2 回総選挙ではアンバサダーとして活躍した）。

5.2. ブログ・ホームページ

2010 年 4 月に射場作業を始めたころ、IKAROS の情報公開といえばもっぱらツイッターのイカロス君中心であった。IKAROS の広報普及活動をより活性化させるために、4 月 30 日に IKAROS-blog を立ち上げ、射場作業に関して報告を開始した。射場作業は一般の方には未知の世界であり（我々もほとんどのメンバーが初めてのことであったが・・・）このブログでの情報公開は、既に IKAROS のことを知ってもらっているファンの方に非常に喜ばれた。

打ち上げ後、IKAROS-blog は毎日の運用報告に使われた。ブログではコメント欄に質問を書けるようになっており、全てに答えることはできないが、多くの方が関心ある事項についてはブログで説明するよう努めていて、IKAROS や深宇宙探査がより身

近に感じる手助けになっていると思われる。運用室で実際に運用しているメンバーの様子が分かるのも人気の一つのようなのである。

さらに、IKAROS のホームページ「～翼を広げて～IKAROS 専門チャンネル」も 5 月 7 日に立ち上げた（図 23）。このホームページではブログ・ツイッターと相互にリンクされており、この効果によりアクセスが急増した。このように IKAROS は WEB を最大限に活用した広報活動を展開することができた。

～翼を広げて～
IKAROS (イカロス) 専門チャンネル
小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS (イカロス)」

→ ENGLISH

IKAROS-blog

自己紹介です。<南野>
星野君までできたので、次は私だと覚悟しました。。。 はじめまして。IKAROSチームの南野 浩之（みなみの ひろゆき）と申します。いつもIKAROSを応援していただき本当にありがとうございます。

今日の IKAROS (11/13)...
本日は少しだけスピンのアップをして25rpmにしました。今後、2rpm前後での運用を計画しているために、25rpmでの運動を次の運用までモニタすることになります。 その他、いつも通...

今日の IKAROS (11/12)...
11/12の運用は、データレコーダー（DR）へ蓄積したIKAROSの健康状態やGAP（ギャップ）やALDN（アラジン）の状態を示すデータの再生、そして再生レンダリングを行うとともに、ス...

[IKAROS-blogはこちら](#) [RSS表示](#)

最新情報

2010年10月7日(更新)
通信不可帯の説明をアップしました
通信不可帯に関して「どうして通信ができなくなるの？」という質問が多数寄せられましたので、説明ページを作成しました。分かりやすくするために簡略化した説明になっていますが、通信不可帯について疑問に思った方は是非ご覧ください！

[詳しくはこちら](#)

2010年9月30日(更新) 2010年10月4日(更新) **第8回Webクリエーション・アワードの受賞式が行われました！**
2010年9月29日にイカロス君が呼ばれるWeb上で賞を受賞した第8回Webクリエーション・アワードの受賞式が行われました。授賞式に先立ってツイッター上ではDCAM1ちゃん、DCAM2君によるインタビューが行われました！！イカロス君も急に二人にインタビューをされビックリしたようです。でも、久しぶりの二人との会話が楽しかったみたいです。たくさん話してくれました。

[詳しくはこちら](#)

関連リンク

- [JSPEC イカロス](#)
- [イカロスキャンペーンサイト](#)
- [JAXA イカロス](#)
- [JAXAの宇宙情報\(電波・宇宙\)](#)

図 23 IKAROS のホームページ（ブログ・ツイッター含む）

5.3. メッセージキャンペーン

IKAROS では打ち上げに先立って、2009 年末より「君も太陽系をヨットに乗って旅しよう！」と銘打ち、広報キャンペーンを展開した。具体的には IKAROS への応援メッセージや宇宙に持っていきたいメッセージを世界中から募集し、名前と共にアルミプレートに刻印、もしくは電子データをガラス製 DVD に保存し、これらを IKAROS 本体に取り付け、深宇宙まで一緒に飛ばそうというものである（図 24）。

キャンペーン開始当初は IKAROS の認知度が低く、参加者も少なかった。そこで、学校等への説明、市町村の校長会への説明、博物館／科学館等への協力願い、著名人への協力願い等、地道な活動を行った結果、徐々に応募者が増加していった。最終的には 15 万人以上の方に本キャンペーンに参加してもらうことができた。

はやぶさ以降、多くの宇宙機でメッセージキャンペーンが行われているが、本キャンペーンの最大の特徴は TPS（惑星協会）と共同で実施したことである。当時、TPS で「ライトセイル 1 号」というソーラーセイルを打ち上げ予定だったこともあり、IKAROS とライトセイル 1 号の相互協力キャンペーンとして世界中からメッセージを募った。その結果、キャンペーン参加の 6 割弱が海外からの参加となり、これをきっかけに海外のメディアでも IKAROS が多数取り上げられた。このため、IKAROS が世界中で広く認識されるに至ったのはこのキャンペーンのおかげである、と言っても過言ではない。

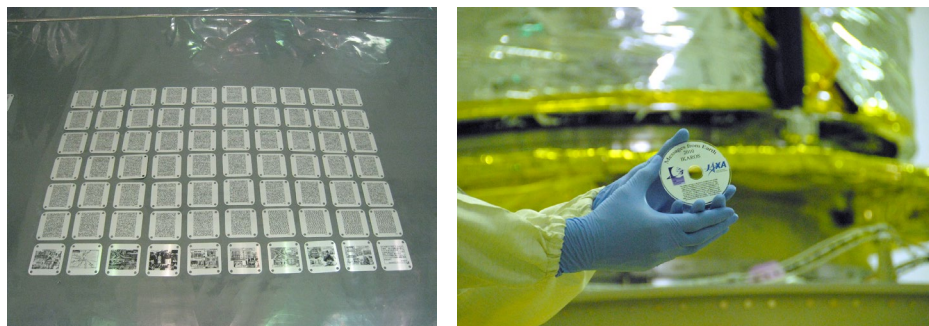


図 24 メッセージキャンペーンのアルミプレートと DVD

6. まとめ

以上を踏まえると「IKAROS とは、小規模なミッションでも世界にインパクト（学術成果，人材育成，社会的効果）を与えて将来ミッションの礎となった宇宙機」ということになる。そして、これらを可能にしてくれたのがあかつきとの相乗りである。一緒に旅に連れて行ってもらえたことに改めて感謝したい。あかつきと IKAROS が打ち上げられ、はやぶさが帰還した 2010 年は「太陽系大航海時代の幕開け」となった。その後、はやぶさ 2，SLIM の成功を経て、2025 年にあかつきと IKAROS の両方が運用を終えることになったことは感慨深い。探査ミッションは一筋縄ではいかずヒリヒリするものばかりであるが、だからこそ人を惹きつけるのだと思う。探査に対する技術・システムに加えて熱意が継承され、探査ミッションがますます発展していきますように・・・Bon Voyage！（良い旅を！）（図 25）

<学術成果>

世界初のソーラーセイル・ソーラー電力セイルの実証により多数の学術成果が得られた（投稿論文：110 件，表彰：17 件）．これによりソーラーセイル等の学術コミュニティも成長し，例えば，国際ソーラーセイルシンポジウムが定期開催されるようになった．

<人材育成>

挑戦的なミッションに主体的に加わったことで，多数の若手研究者・学生が探査ミッション（はやぶさ2 など）を支える人材に成長し，キャリア形成にもつながった（ポスドク・学生→JAXA プロパー職員：14 名，ポスドク・学生→教育職：6 名，IKAROS 関連テーマ博士号取得者数：9 名）．

<社会的効果>

ソーラーセイルのアイデアは約 100 年前からあり，SF 等でも頻繁に登場するが，実現されていなかった．IKAROS でこれを初めて実証したことで，日本国民や世界から高い評価・支持を得た（マスコミ報道：約 500 件）．広報・アウトリーチ活動（メッセージキャンペーン：15 万人以上，一般講演・一般展示：約 300 件，ブログ：運用毎，ツイッター/X：約 5 万フォロアー，文庫本・絵本・映画・CD 等の制作）を通して，宇宙科学探査の魅力をアピールし，科学技術への理解増進に貢献した．

<将来ミッションの礎>

IKAROS は 2024 年 4 月に日本航空宇宙学会の航空宇宙技術遺産に認定され，IKAROS で獲得した技術やノウハウを将来ミッションへ継承していくことが期待されている．

- ・ソーラー電力セイル技術：(OKEANOS)，HELIOS プログラム，OPENS プログラム
- ・ソーラーセイル技術：PIERIS，OPENS プログラムなど
- ・クルージング環境を用いた観測・実験：(OKEANOS)，OPENS プログラムなど
- ・超小型・小型計画の進め方・位置付け：準小型プログラムなど



図 25 Bon Voyage! (良い旅を!)