

ポリイミドが可能にする宇宙帆船ミッション

(JAXA) 森 治, ソーラー電力セイル WG

1. 要旨

JAXA では IKAROS 計画において, 世界で初めてソーラーセイルによる推進と薄膜太陽電池による発電を行い, ソーラー電力セイルを実証した. 特に, ソーラーセイルの課題として, 大型膜面の展開・展張があげられていたが, IKAROS では, 宇宙環境にも耐えられるポリイミド樹脂を用いることによって, 超薄膜の大型セイルを製作し, スピンの遠心力を用いてこれを展開・展張することでこれを解決した. JAXA では, IKAROS の成果も踏まえ, ソーラー電力セイルによる外惑星領域探査計画を検討中である.

2. はじめに

「ソーラーセイル」は, 宇宙空間でセイル (帆) を展開し, 太陽の光の圧力を受けて宇宙空間を航行する宇宙帆船であり, 燃料なしで推進力を得ることができる. このアイデア自体は約 100 年前からあり, SF やアニメでもよく登場する. しかし, これまで世界中で研究¹⁾が進められているにもかかわらず実現されていなかった.

一方, 「ソーラー電力セイル」は, セイルの一部を薄膜の太陽電池とすることで, ソーラーセイルに加え, 太陽光発電も同時に行う日本独自のアイデアである. ソーラー電力セイルは光子加速により燃料を節約できるだけでなく, 太陽から遠く離れた場所でも, 大面積の薄膜太陽電池を利用して十分な電力を確保できる. そして, この大電力を用いて, 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な推進が実現でき, 次世代の推進機関として広く応用が可能となる.

JAXA ではこのコンセプトを適用したソーラー電力セイルによる外惑星領域探査計画²⁾を提案している. そして, この計画のリスク軽減のフロントローディングとして開発されたのが, 小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun)」³⁾であり, 世界で初めてソーラーセイルおよびソーラー電力セイルを実証することに成功した (図 1).

本論文では, IKAROS のミッションおよびシステムの概要を説明し, 運用結果を示す. また, IKAROS の成果も踏まえた今後の計画・課題について紹介する.

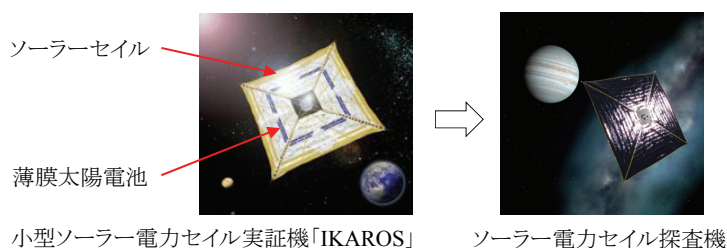


図 1 ソーラー電力セイル

3. IKAROS のミッション

IKAROS は以下の 4 つのミッションによりソーラー電力セイルを実証した. いずれも世界初の快挙となった.

(1) 大型膜面の展開・展張

海外では主として, マスト (支柱) を使って膜面を展開・展張する方式^{4, 5)}が検討されているが, セイルのサイズが大きくなるほど支柱の重量も大きくなるという問題が発生する. そこで JAXA では, 数 1000m²級の超大型膜面を宇宙空間で広げることを見据

え、支柱を持たずに遠心力を用いるスピン方式⁶⁾を考案した。ただし、地上での展開実験では空気抵抗と重力の影響を受け、これらを完全に除去することはできない。そこで、IKAROSにおいて、実際に宇宙空間で200m²の大型膜面を同じ方式で展開・展張して、減衰係数や圧縮剛性など、膜面の挙動に大きく影響を及ぼすパラメータを同定し、数値シミュレーションモデルを構築した。

(2) 薄膜太陽電池による発電

IKAROSではハーネスを含めた薄膜太陽電池システムの宇宙環境での発電性能を評価した。地上でも要素試験は可能であるが、大面積での総合的な評価は不可能である。

(3) ソーラーセイルによる加速

太陽光の圧力は1AUにて、約 $5 \times 10^{-6} \text{N/m}^2$ であり非常に小さい。空気抵抗や地球重力の影響を完全に排除できる深宇宙にて膜面の運動やしわ等の影響も含めた膜面全体の光子加速をドップラーや軌道の変化により精度よく評価した。

(4) ソーラーセイルによる航行技術の獲得

膜面の操舵により光子加速の方向を変化させ、航法誘導制御を実現する技術や光子加速状態で軌道決定を行う技術を、実際に宇宙実証することにより獲得した。

(1), (2)はミニマムサクセスクライテリア, (3), (4)はフルサクセスクライテリアに相当するミッションである。図2にIKAROSのミッションシーケンスを示す。①IKAROSは種子島宇宙センターからH-IIAロケットにて金星探査機「あかつき」と相乗りで2010年5月に打ち上げられ、図3に示す金星直行軌道に投入された。スピンによる遠心力を用いて大型膜面を展開・展張し、③薄膜太陽電池による発電を実証した。この時点でミニマムサクセス達成となり、数週間で実現できた。④膜面に太陽光圧を受けることでソーラーセイルとして加速し、⑤膜面の操舵により航法誘導制御を行った。ソーラーセイルの影響を評価するためには光子加速状態での軌道決定が必要であり、これも合わせて実現することでソーラーセイルによる航行技術を獲得した。この時点でフルサクセス達成となり、約半年間で実現できた。⑥ちょうどこの時期に金星に対しフライバイした。

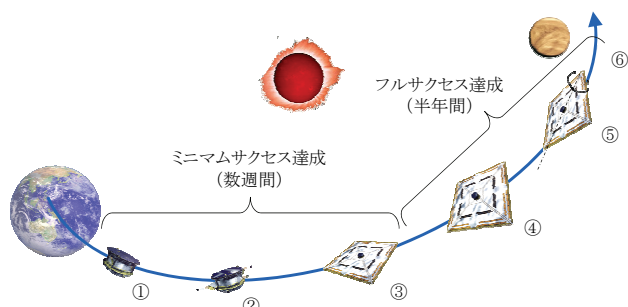


図2 ミッションシーケンス

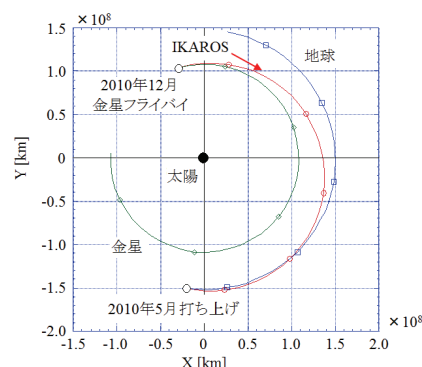


図3 IKAROSの軌道

4. IKAROSのシステム

4.1 本体とセイル

IKAROSの質量は全体で308kg(セイル15kgを含む)である。図4にIKAROSの本体とセイルを示す。IKAROSの本体は直径1.6m、高さ0.8mの円柱形であり、打ち上げ時には本体側面にセイルが巻き付けられている。

セイルの膜面⁷⁾は1辺14m(差し渡し20m)の正方形であり、厚さはわずか7.5 μ mである。膜材には宇宙環境にも耐えられるポリイミド樹脂⁸⁾を採用し、表面(太陽面)には太陽光を反射するようアルミニウムが蒸着してある。膜面には亀裂の進展を防止するために補強処理が施してある。ポリイミド樹脂を接着で貼り合わせる場合、接着剤の

アウトガス、耐宇宙環境性能、質量、厚さ等が問題となるため、熱融着可能なポリイミド樹脂も新たに開発し、膜面の一部に取り入れた。膜面には図 5 に示す厚さ $25\mu\text{m}$ の a-Si (アモルファスシリコン) セルの薄膜太陽電池⁹⁾以外に液晶デバイス、ダストカウンタ等も貼り付けられている。膜面と本体はテザーとハーネスで機械的・電氣的に結合されており、膜面は遠心力によって展開・展張する。これをサポートするため、膜面の各頂点にはそれぞれ 0.5kg の先端マスが取り付けられている。

なお、セイルの折り畳み、巻き付け等の作業は、学生中心に人海戦術によって行った (図 6)。セイルを大型化する場合には、作業人員の確保・精度向上の観点から、作業工程をある程度自動化する必要がある。

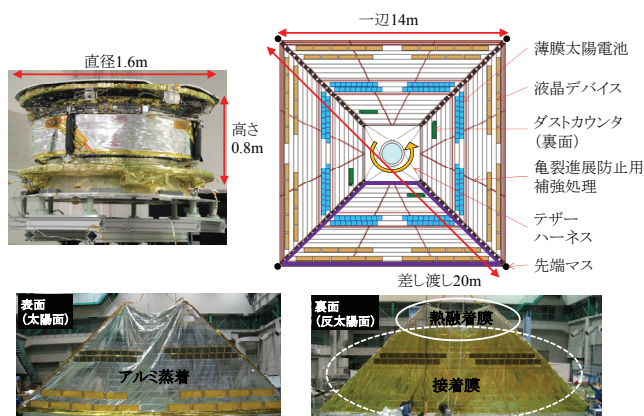


図 4 本体とセイル

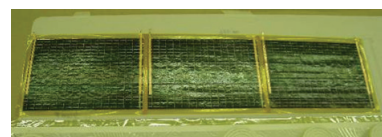
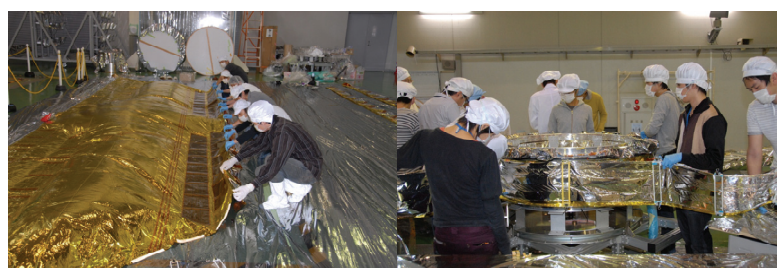


図 5 薄膜太陽電池



折り畳み

巻き付け

図 6 セイル作業

4.2 展開システム

図 7 に IKAROS の膜面の展開手順¹⁰⁾を示す。IKAROS はスピンの遠心力を用いて膜面を展開する。膜面展開は主に、(1) 先端マス解放、(2) 一次展開、(3) 二次展開の 3 つのプロセスに分けられる (いずれのプロセスにおいても、角運動量保存によりスピンの回転率は低下する)。

(1) 4 つの先端マスの拘束を同時に解放する。このとき、先端マスが本体に衝突しないよう事前に十分スピンダウンしておく。

(2) 本体の側面に巻き付けられた膜面を解きながら展開する。ただし、一気に展開すると姿勢を乱すため、回転ガイドで膜面の根元を押さえ、本体に対してゆっくりと相対回転することで、準静的に膜面を繰り出す。このとき、膜面が回転ガイドに引っかからず引き出されるよう事前に十分スピニアップしておく。一次展開終了時には、膜面は十字の形状となる。

(3) 4 本の回転ガイドを同時に倒して、膜面の拘束を解放し一気に膜面を展開する。このとき振動が発生するが、しばらくすると減衰して、膜面は正方形の展張状態となる。

図 8 に示すように IKAROS は膜面の展開・展張状態を把握するためにモニタカメラおよび分離カメラ¹¹⁾を搭載している。モニタカメラは水平面角 90deg 以上の広角レンズを採用し、4 台のカメラヘッドで 360deg の視野を持つよう構成されている。分離カメラは、それぞれ直径 55mm、高さ約 60mm の超小型カメラであり、本体から放出されて、離れた視点から撮像したデータを IKAROS 本体に無線で伝送する。宇宙空間にて宇宙機自身の全景写真を撮るシステムは世界でも初の試みであり、大型宇宙構造物は もちろん不具合時の宇宙機の状態確認等にも広く応用できる。

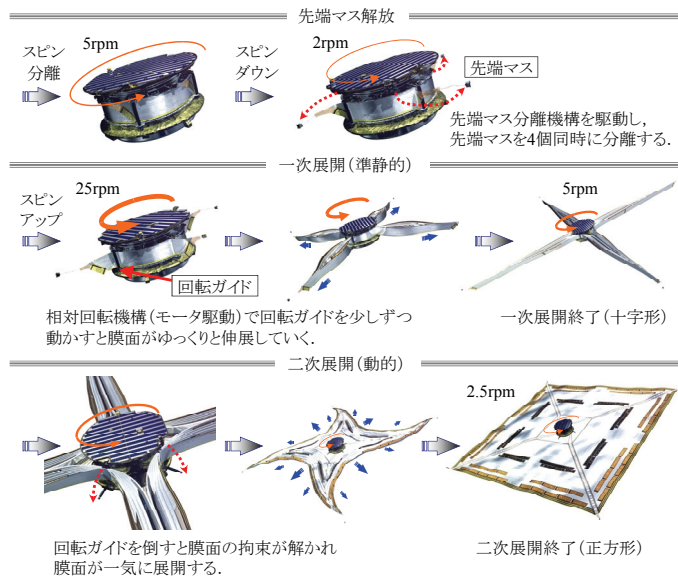


図 7 膜面展開手順

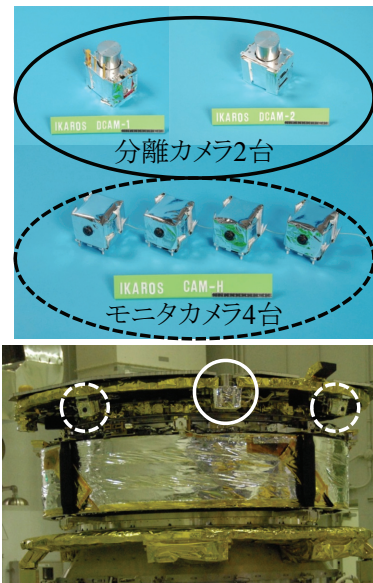


図 8 モニタカメラと分離カメラ

4.3 液晶デバイス

図 9 にソーラーセイルによる軌道制御の原理を示す。ソーラーセイルは太陽光により受ける力の向きによって加速または減速し、加速時には太陽から遠ざかり、減速時には太陽に近づく。よって、膜面の方向を調整することで軌道を制御できる。IKAROS の場合、推進系で本体を姿勢制御することによって膜面の方向を変更する。このとき柔軟構造物である膜面の振動を励起させないよう注意する必要がある。

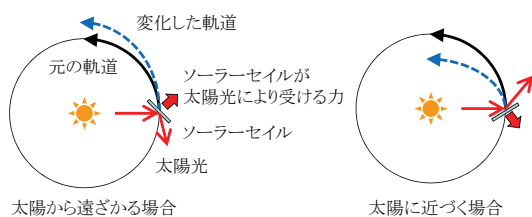


図 9 ソーラーセイルによる軌道制御の原理

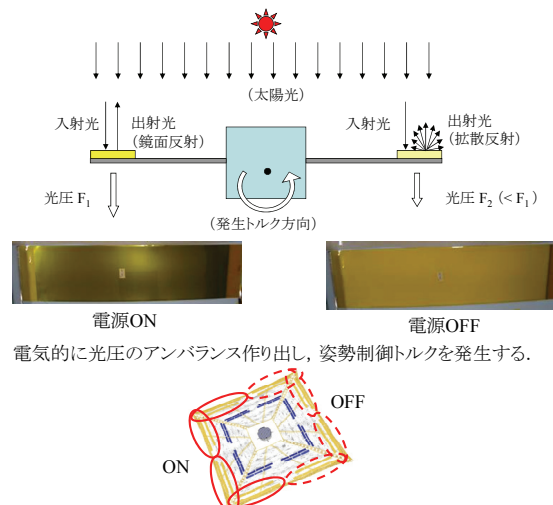


図 10 液晶デバイスの動作原理

IKAROS では、スラスタ以外の姿勢制御システムとしてセイル端部に液晶デバイス¹²⁾を有している。図 10 のように電氣的に光学特性（鏡面反射率/拡散反射率/吸収率）を変化させることでセイル端部に印加される太陽光圧に不均一を発生させ姿勢制御を実現する。本デバイスは太陽光圧という微小でかつ持続的に作用する力を用いてトルクを発生させるため、インパルスのなトルクによって膜面の振動を励起することがなく、燃料も消費しないという点で有利である。

5. IKAROS の運用

5.1 大型膜面の展開・展張

図 11 にモニタカメラ画像と膜面状態予想図を示す。先端マス解放後のモニタカメラ画像から先端マスが正常に本体から切り離されたことが分かる。一次展開は回転ガイドを少しずつ駆動して実施した。モニタカメラ画像から膜面が少しずつ繰り出され、最終的に膜面が十字形状になっていることが分かる。二次展開は回転ガイドを解放して実施した。モニタカメラ画像は膜面が回転ガイドに引っかかることなく展開できていることを示している。

図 12 に本体の角速度のデータを示す。スピン軸は z 軸となる。先端マス解放後は、図 12(a)を見ると角運動量保存により z 軸の角速度が低下しているが、一方で x, y 軸の角速度が 0 のままであることからニューテーション（首振り運動）は発生しておらず、4 つの先端マスがすべて同時に解放されたと考えられる。二次展開では図 12(b)のように x, y, z 軸の角速度のデータから、膜面を一気に展開したことで、ニューテーションが発生していることが分かる（数時間後には減衰した）。

膜面展開後に分離カメラによる全景連続撮影を 2 回行った。図 13 に分離カメラの画像データの一例を示す。以下のことが確認できる。

- ・各ペタルがブリッジにて結合され、セイル全体で正形状を維持できている。
- ・セイルと本体、セイルと先端マスがテザーにて接続されている。
- ・セイル上に亀裂が見られない（亀裂が発生していないか、発生していても進展しないよう管理できている）。
- ・薄膜太陽電池、液晶デバイス、ダストカウンタ、補強処置、ブリッジ等各種デバイス等の外観に問題がない。

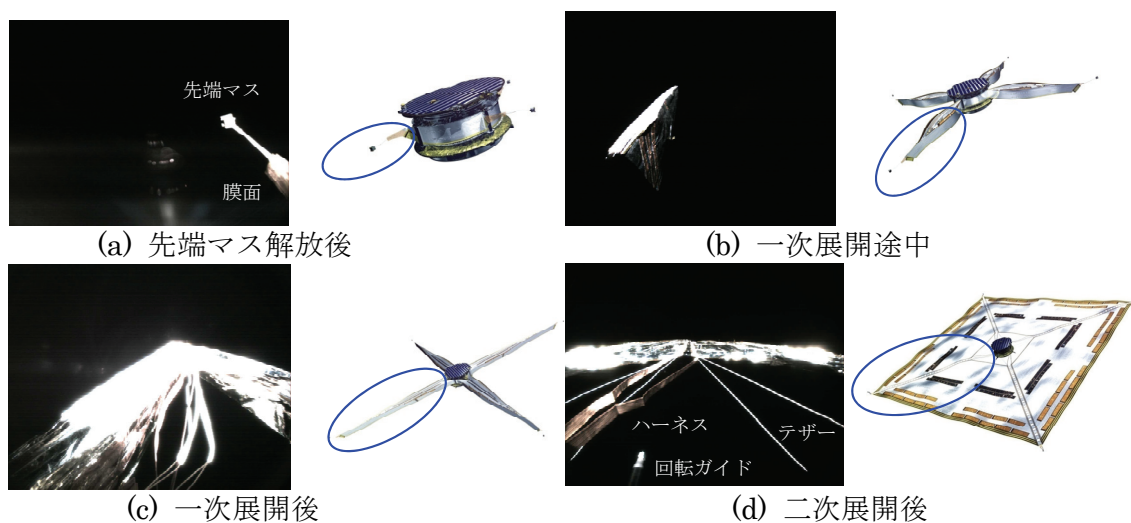


図 11 モニタカメラ画像と膜面状態予想図

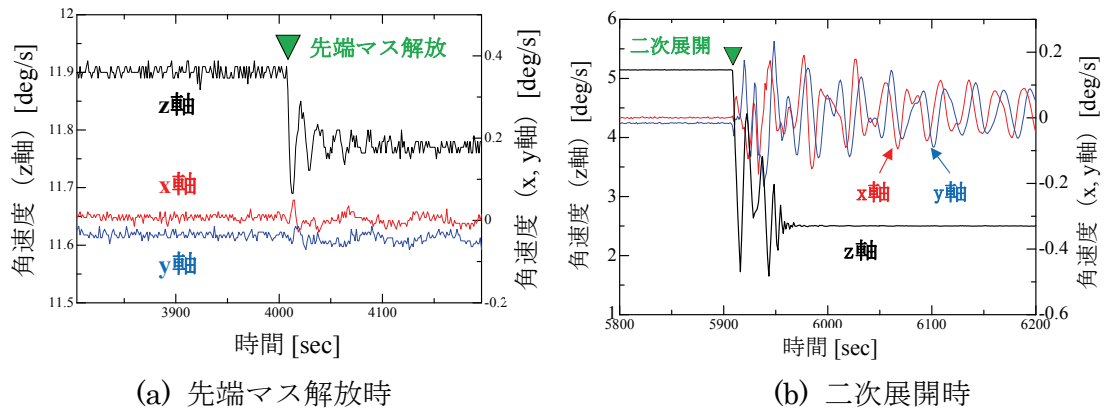


図 12 本体の角速度

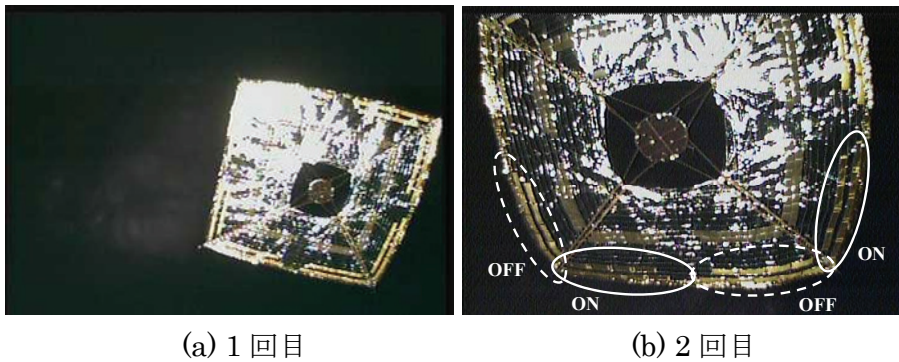


図 13 分離カメラ画像

なお、2回目には液晶デバイスの動作確認も行った。ON状態（鏡面反射）の液晶デバイスは暗く写り、OFF状態（拡散反射）の液晶デバイスは少し明るめに写っている。なお、本撮影時にはON/OFFが交互に並ぶよう制御しており、実際の姿勢制御時のON/OFF状態とは異なっている。

5.2 ソーラーセイルによる航行

膜面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算出した結果、1.1mNとなり設計値とほぼ一致した（図14）。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で太陽光圧による推力を評価した。2010年11月までに累積加速量は100m/sとなった。

並行して、スラスタや液晶デバイスを用いて膜面の方向を調整し、軌道制御も行った。図15に液晶デバイスで太陽指向制御を行った場合の結果を示す。太陽角の変化から想定通りの制御性能が達成されていることが確認できた。

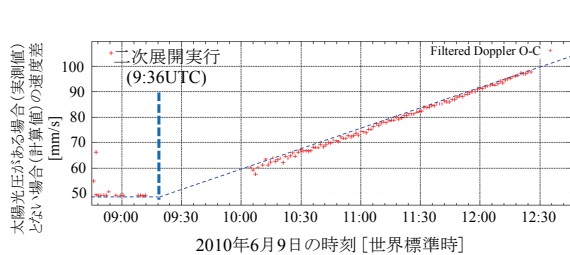


図 14 膜面展開時のドップラー履歴

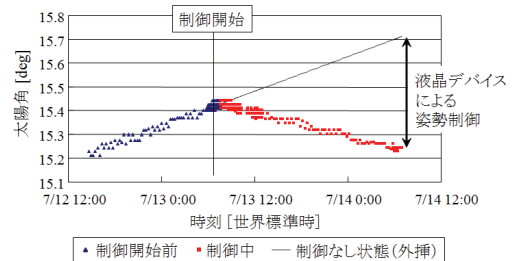


図 15 液晶デバイスによる太陽指向制御

6. 今後の計画・課題

IKAROS の成果も踏まえて、ソーラー電力セイルによる外惑星領域探査計画を検討中である(図 16). 新たに開発するソーラー電力セイル探査機は大型ソーラーセイル(面積: 3000m², IKAROS の 15 倍) で光子加速するだけでなく、高比推力イオンエンジン(比推力: 6000~9000 秒, はやぶさの 2~3 倍) も駆動し、外惑星領域で大きな増速量(数 km/s 規模) を達成する. これは通常の化学推進では成立しない. また、セイル全体に薄膜太陽電池を貼り付け、外惑星領域で大電力(5kW@5AU) を確保する. これも既存の発電方式では実現が困難である.

本探査機はハイブリッド推進に地球スイングバイおよび木星スイングバイを併用して、太陽-木星系のラグランジュ点付近に存在するトロヤ群小惑星領域に世界で初めて到達し、探査を行う. 小惑星帯以遠のダストおよびトロヤ群小惑星のサンプルを採取して地球へ帰還する. 本計画では深宇宙空間での巡航飛行環境を利用した複数の天文学観測を行うことも大きな特徴であり、①小惑星帯を主たる起源とする黄道面ダストによって、地球近傍の観測では従来遮られてきた赤外線背景放射の掃天観測、②黄道光の立体的観測・分光観測、③太陽系ダスト分布のその場計測、④ガンマ線バーストの偏光観測、⑤小惑星帯における小惑星フライバイ観測、⑥木星磁気圏観測などを行う.

この計画に向けて、セイル製作の課題としては、耐宇宙環境性の向上、接着剤、粘着テープの熱融着膜への移行、薄膜化、たわみ、剛性の管理、自動化(折り畳み、巻き付け)、薄膜太陽電池、液晶デバイスの性能向上、膜アレーアンテナの新規開発等があげられる. 大面積の薄膜太陽電池システムは、外惑星領域でも原子力電池を用いずに電力を確保できるだけでなく、宇宙太陽光発電システムにも応用できる. また、重量制約の厳しい超小型衛星がまとまった電力を確保するための手段となりうる. 低コスト化が進めば、商業利用や地球環境にも貢献できる.

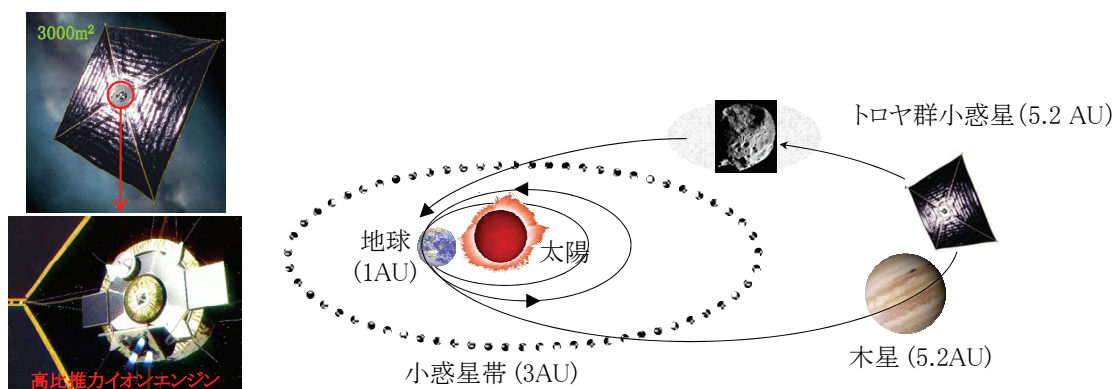


図 16 ソーラー電力セイルによる外惑星領域探査計画

7. おわりに

本論文では、IKAROS のミッション・システムを紹介し、開発・運用の概要を報告した. IKAROS は、2010 年 5 月 21 日に打ち上げられ、4 つのミッション(大型膜面の展開・展張、薄膜太陽電池による発電、ソーラーセイルによる加速、ソーラーセイルによる航行技術の獲得) をすべて達成し、世界初のソーラーセイルおよびソーラー電力セイルの実証に成功した. これらの実績も踏まえて、ソーラー電力セイルによる外惑星領域探査計画を検討中である.

参考文献

- 1) McInnes, C. R.: Solar Sailing, Technology, Dynamics and Mission Applications, Springer-Praxis, London, 1999.

- 2) Kawaguchi, J.: A Solar Power Sail Mission for a Jovian Orbiter and Trojan Asteroid Flybys, COSPAR04-A-01655, 35th COSPAR Scientific Assembly, Paris, 2004.
- 3) Mori, O., Sawada, H., Hanaoka, F., Kawaguchi, J., Shirasawa, Y., Sugita, M., Miyazaki, Y., Sakamoto, H. and Funase, R.: Development of Deployment System for Small Size Solar Sail Mission, Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci. Space Technol. Jpn., 7 (2009) Pd_87-Pd_94.
- 4) Greschik, G. and Mikulas, M. M.: Design Study of a Square Solar Sail Architecture, J. Spacecraft Rockets, 39 (2002), pp. 653-661.
- 5) Hinkle, J. D., Warren, P. and Peterson, L. D.: Geometric Imperfection Effects in an Elastically Deployable Isogrid Column, J. Spacecraft Rockets, 39 (2002), pp. 662-668.
- 6) Y. Tsuda, O. Mori, S. Takeuchi, and J. Kawaguchi: Space Technol., 26, (2006) pp. 33-39.
- 7) 遠藤 達也, 横田 力男, 宮内 雅彦, 三桝 裕也, 松本 純, 船瀬 龍, 白澤 洋次, 森 治, 津田 雄一: IKAROS のソーラーセイル膜面開発, 日本航空宇宙学会誌, Vol.60, No.11, pp.413-420, 2012.
- 8) Yokota, R., Miyauchi, M., Suzuki, M., Andoh, A., Kazama, K., Iwata, M., Ishida, Y., Shimamura, H. and Ishizawa, J.: Heat Sealable, Novel Asymmetric Aromatic Polyimide Having Excellent Space Environmental Stability and Application for Solar Sail, IKAROS Membrane, 2011-o-4-02v, 28th International Symposium on Space Technology and Science, Okinawa, 2011.
- 9) Soma, E., Endo, T., Tanaka, K., Miyauchi, M., Yokota, R., Shimazaki, K., Tsuda, Y., Mori, O. and IKAROS Demonstration Team1): Flexible Solar Array of Small Solar Power Demonstrator "IKAROS," 2011-o-4-03v, 28th International Symposium on Space Technology and Science, Okinawa, 2011.
- 10) Sawada, H., Mori, O., Okuizumi, N., Shirasawa, Y., Miyazaki, Y., Natori, M., Matunaga, S., Furuya, H. and Sakamoto, H.: Mission Report on The Solar Power Sail Deployment Demonstration of IKAROS, AIAA-2011- 1887, 12th AIAA Gossamer Systems Forum, Denver, 2011.
- 11) Matunaga, S., Inagawa, S., Nishihara, T., Kimura, S., Sawada, H., Mori, O., Kitamura, K. and Structure Team IKAROS: On-Orbit Demonstration of Deployable Camera System for Solar Sail IKAROS, 2011-o-4-07v, 28th International Symposium on Space Technology and Science, Okinawa, 2011.
- 12) Funase, R., Mori, O., Tsuda, Y., Shirasawa, Y., Saiki, T., Mimasu, Y. and Kawaguchi, J.: Attitude Control of IKAROS Solar Sail Spacecraft and Its Flight Results, IAC-10.C1.4.3, 61st International Astronautical Congress, Prague, 2010.