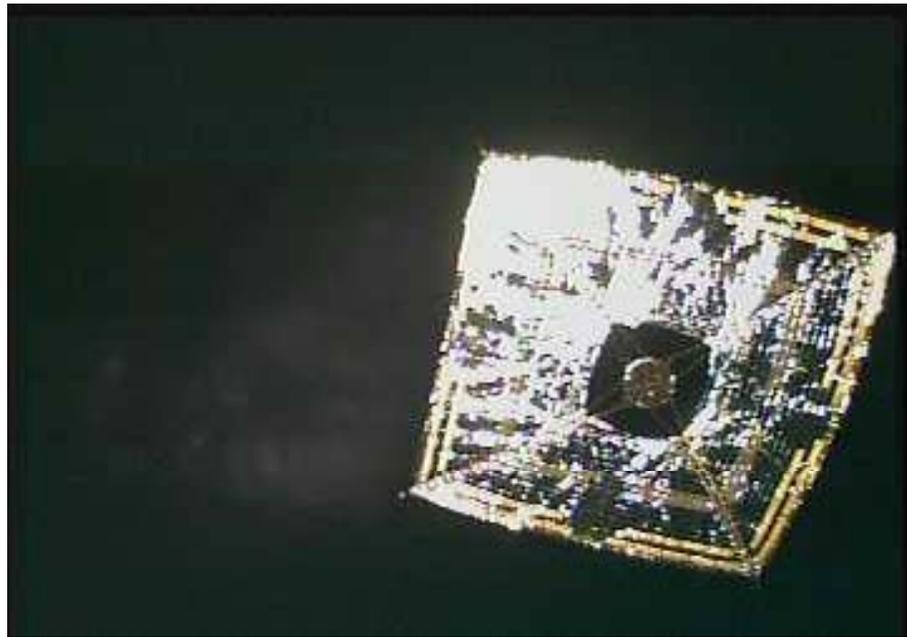


小型ソーラー電力セイル実証機 (IKAROS)の定常運用終了報告



平成23年1月26日(水)
宇宙航空研究開発機構
森 治

0. 本日の報告事項

小型ソーラー電力セイル実証機 (IKAROS) は、約6か月間にわたり定常運用を実施し、得られた成果に基づき、ミッションの達成状況を確認した。また、併せて今後予定している後期運用計画について報告する。

1. ミッションの目的と意義

小型ソーラー電力セイル実証機の目的

- ・次に実現を目指すソーラー電力セイル探査機の開発リスク軽減のためのフロントローディングであり、単独ミッションとしても世界初・世界最先端の技術実証を目指す。
- ・世界で初めてソーラーセイルによる航行を実証し、同時に将来のハイブリッド推進に向け薄膜太陽電池での発電を確認する。
(イオンエンジンは搭載しない)

IKAROS = Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun

1. ミッションの目的と意義

IKAROSミッション定義

IKAROSは、下記の4項目を主ミッションとする。いずれも成功すれば世界初となる。

(1) 大型膜面の展開・展張

【目標1】

- ・将来探査機と相似の機構を用いて、真空かつ無重量状態で差し渡し20mの大型膜面を展開・展張する。
- ・展開運動および展張状態を評価し、展開・展張シミュレーションに使用する解析モデルに反映する。

(2) 電力セイルによる発電

- ・セイル上に搭載された薄膜太陽電池で発電し、膜面上ハーネスを通じてIKAROS本体で確認する。
- ・セイル上に搭載された薄膜太陽電池のデータを取得し、特性を把握する。

(3) ソーラーセイルによる加速実証

【目標2】

- ・ソーラーセイルによる加速効果を、軌道決定(測距データ、距離変化率データ)により確認する。
- ・加速性能を評価し、目標天体までの軌道を設計する計算手法に反映する。

(4) ソーラーセイルによる航行技術の獲得

- ・光子加速状態での探査機の軌道決定技術を確認する。
- ・セイル操舵による光圧ベクトル(光子加速の方向)の能動的制御、および、それを用いた航法誘導技術を確認する。

目標1; ミニマムサクセス相当

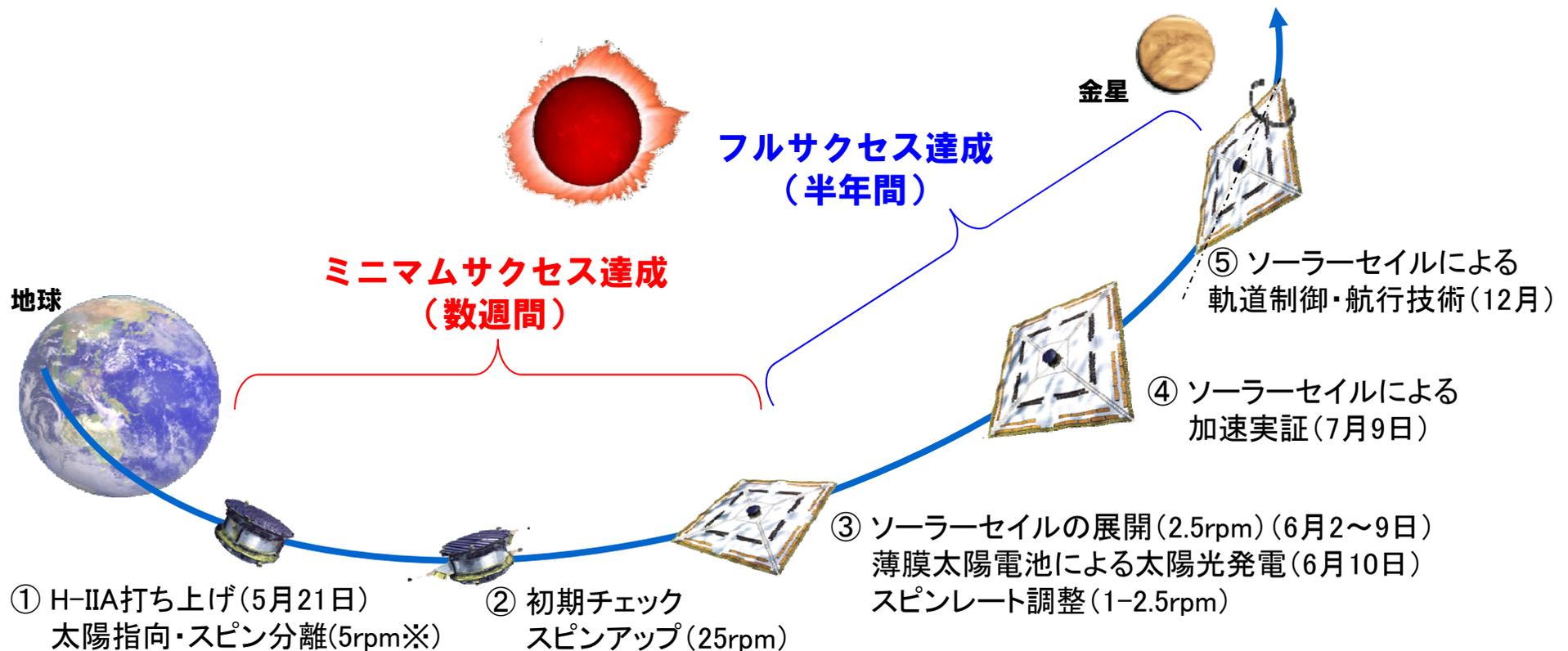
目標2; フルサクセス相当

2. ミッション要求に対する確認結果

ミッション項目	ミッション要求	確認結果
(1) 大型膜面の展開・展張	将来探査機と相似の機構を用いて、真空かつ無重量状態で差し渡し20mの大型膜面を展開・展張する。	<完了> 5月26日に先端マス分離、6月2-8日に一次展開、6月9日に二次展開を実施し、その後も、スピンにより展張状態を維持した。
	展開運動および展張状態を評価し、展開・展張シミュレーションに使用する解析モデルに反映する。	<達成> スピン展開・展張挙動についてシミュレーションによる事前予測と比較し、おおむね一致することを確認した。不一致の原因を検証し、解析モデルに反映した。
(2) 電力セイルによる発電	セイル上に搭載された薄膜太陽電池で発電し、膜面上ハーネスを通じてIKAROS本体で確認する。	<完了> 6月10日に薄膜太陽電池システムの発電を実証した。
	セイル上に搭載された薄膜太陽電池のデータを取得し、特性を把握する。	<達成> 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週1回程度実施し、地上試験での予測劣化曲線と比較し、特性を把握した。
(3) ソーラーセイルによる加速実証	ソーラーセイルによる加速効果を、軌道決定(測距データ、距離変化率データ)により確認する。	<完了> 膜面展開後、軌道決定により光子加速の効果を確認し、推力が設計値とほぼ一致することを確認した。
	加速性能を評価し、目標天体までの軌道を設計する計算手法に反映する。	<達成> 光学特性を考慮した姿勢軌道ダイナミクスを構築し、光学パラメータ同定法を確立し、軌道計画系へ反映した。
(4) ソーラーセイルによる航行技術の獲得	光子加速状態での探査機の軌道決定技術を確認する。	<達成> 光子加速モデルを構築し、トラッキングを含む実運用に耐える軌道決定手法を確立した。また実運用にて有効性が確認できた。
	セイル操舵による光圧ベクトル(光子加速の方向)の能動的制御、および、それを用いた航法誘導技術を確認する。	<達成> 能動的にセイル姿勢状態を制御することで、想定通りの軌道制御ができることを確認した。金星相対の誘導を実施し、航法誘導技術を確認した。

達成:ミッション要求内容を一通り満たすことが確認できた。後期運用のデータも含めた追加解析によってさらなる成果が期待できる。
完了:ミッション要求内容を完全に満たすことが確認できた。

2. ミッション要求に対する確認結果 運用手順

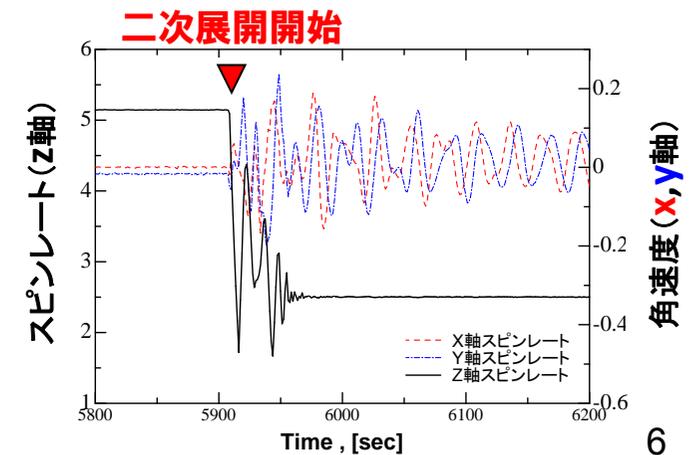
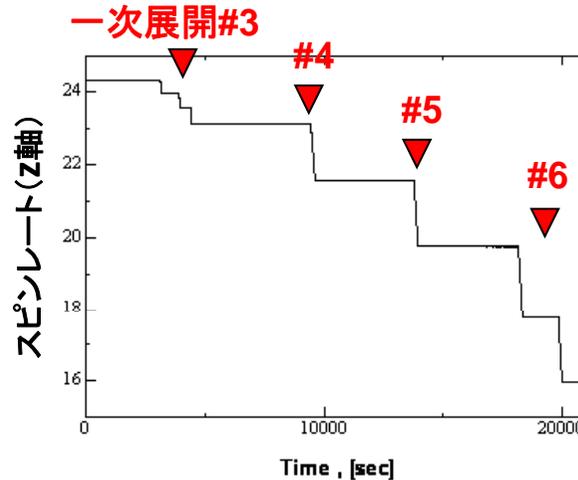
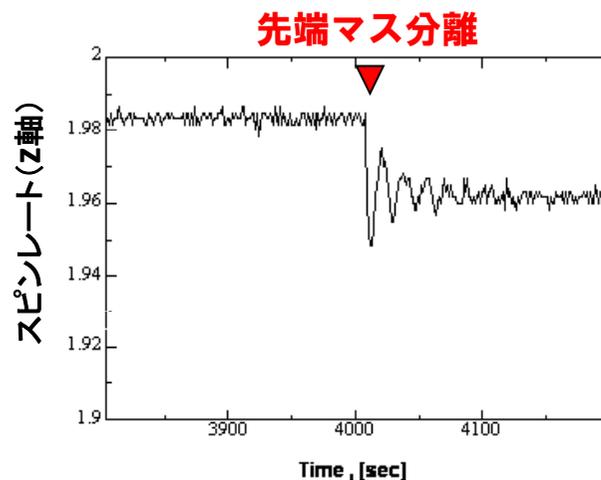
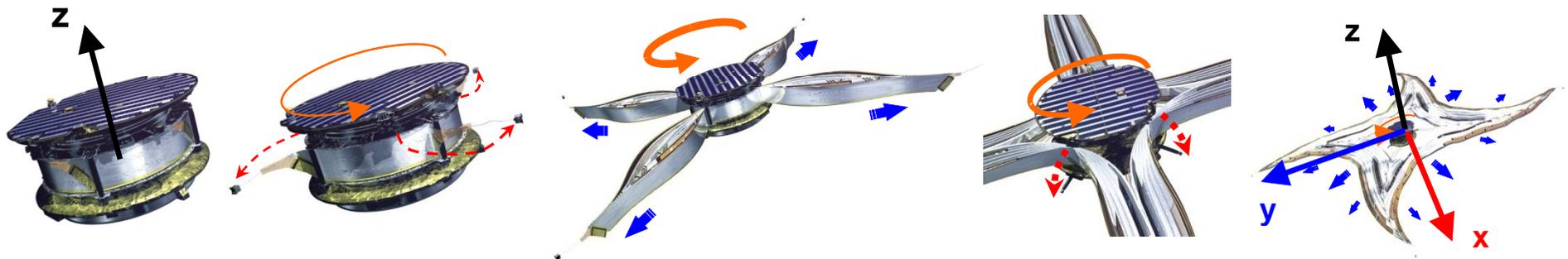


※rpm= rounds per minute

ミニмумサクセス相当：大型膜面の展開・展張，電力セイルによる発電
フルサクセス相当：ソーラーセイルによる加速実証・航行技術の獲得

2. ミッション要求に対する確認結果 大型膜面の展開・展張(姿勢データ)

- 5月26日に先端マス分離, 6月2-8日に一次展開, 6月9日に二次展開を実施し, 膜面展開に成功した. 展開機構が正常に動作し, スピン展開挙動が事前の予測とほぼ一致することが確認できた.
- 6月14,19日に分離カメラによる撮影を行い, 展張形状を確認し, かつ, 膜面に異常がないことが確認できた.



2. ミッション要求に対する確認結果 大型膜面の展開・展張(カメラ画像)

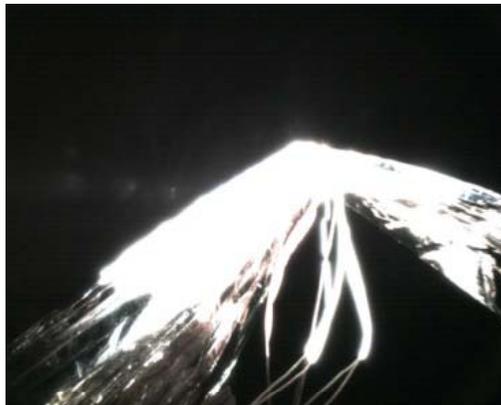
<モニタカメラ画像>



先端マス分離後



一次展開中

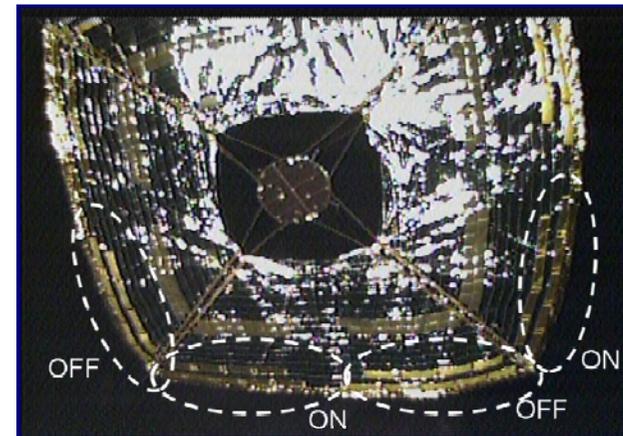
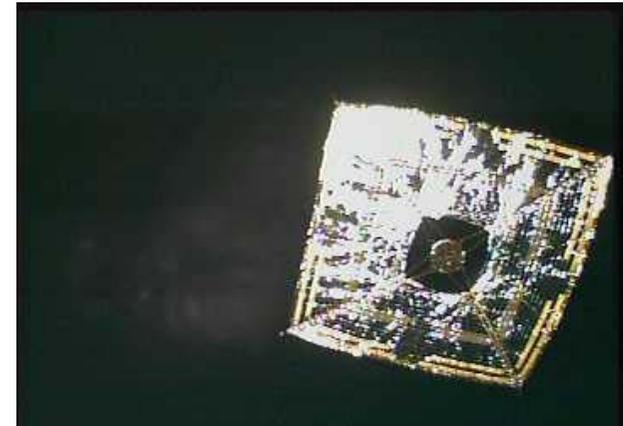


一次展開後



二次展開後

<分離カメラ画像>



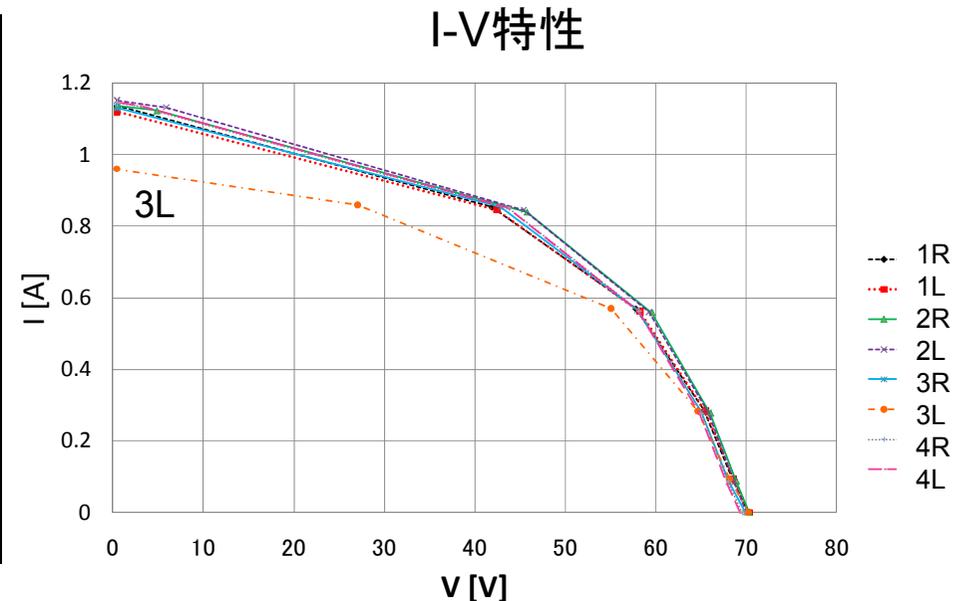
ON: 鏡面反射 OFF: 拡散反射

液晶デバイスの動作確認

2. ミッション要求に対する確認結果 電力セイルによる発電

- ・6月10日に薄膜太陽電池の発電を実証した。
- ・惑星間環境における薄膜太陽電池システムの実験評価を週1回程度実施した。
- ・地上試験を踏まえた予測値とほぼ一致することが確認できた。

No.	計測膜	Isc [A]	Pmax [W]	Imp [A]	温度 [°C]
	予測値	1.15±0.08	40±4	0.85±0.08	42~68
1	1R	1.135	35.73	0.853	49.38
2	1L	1.120	35.90	0.8468	54.67
3	2R	1.137	38.40	0.839	57.24
4	2L	1.150	38.39	0.845	48.94
5	3R	1.13	36.56	0.853	65.76
6	3L	0.960	31.36	0.569	57.38
7	4R	1.144	37.20	0.849	58.23
8	4L	1.146	37.18	0.852	55.17



計測日: 2010年6月10日22:50

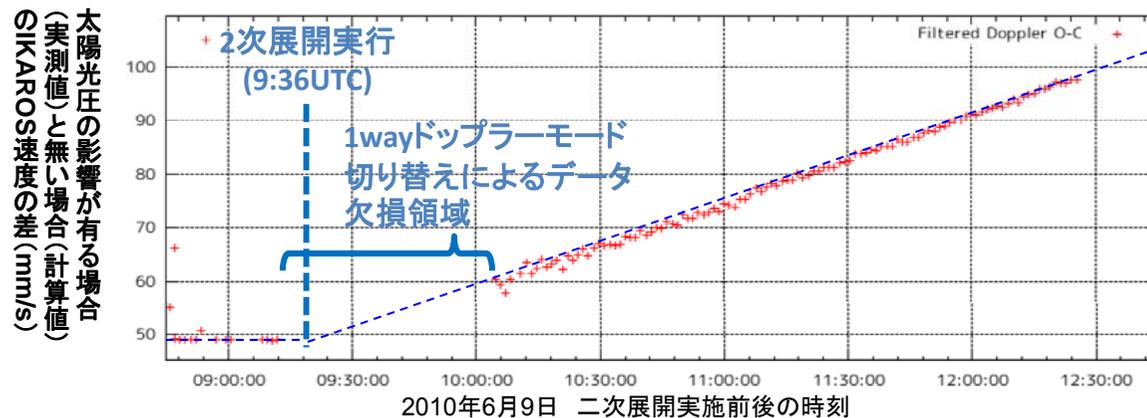
太陽距離: 1.05 [AU] 地球距離: 7860133 [km]

太陽角: 13 [deg.] スピンレート: 2.5 [rpm]

2. ミッション要求に対する確認結果 ソーラーセイルによる加速実証

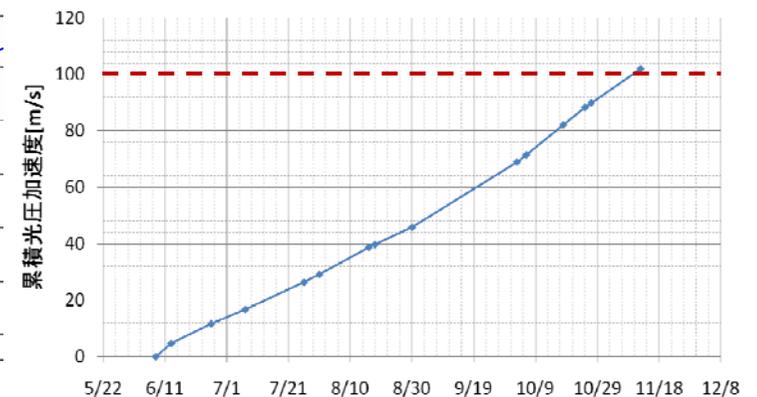
- ・膜面展開後、ドップラーにて光子加速を実証した。
- ・太陽光圧による推力を算出した結果、設計値とほぼ一致した。
⇒世界初のソーラーセイルの誕生
- ・太陽距離・太陽角が異なる条件で太陽光圧による推力を評価した。
⇒累積光圧加速量は100m/sとなった。

膜面展開時のドップラー履歴



ドップラーから算出される太陽光圧による推力 = 1.1mN

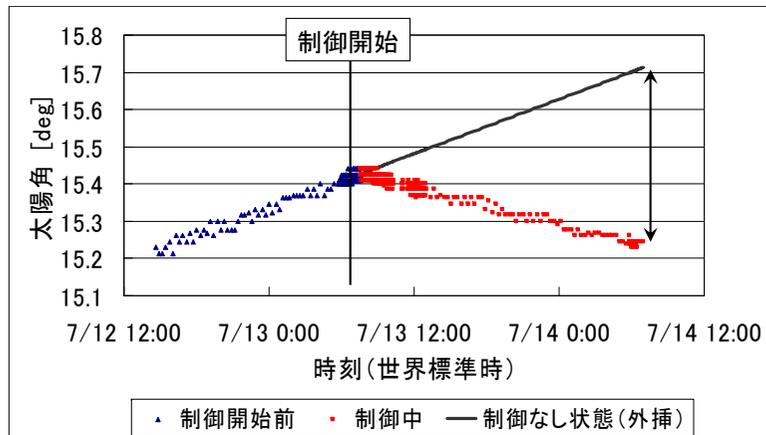
累積光圧加速量



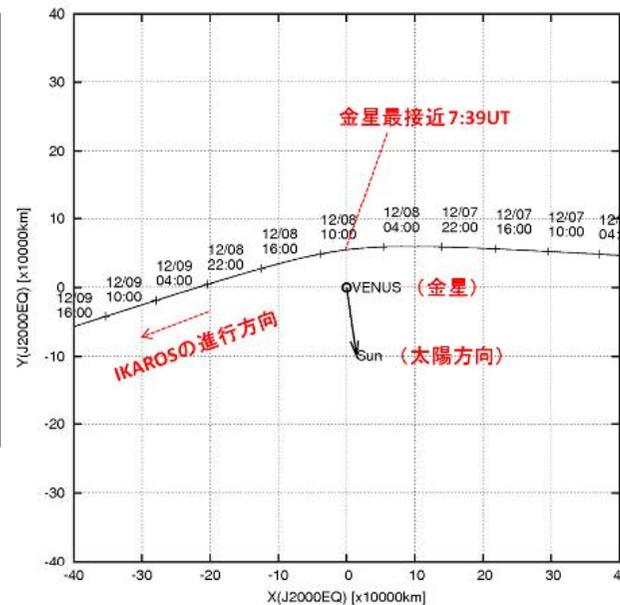
11月までに累積加速量100m/sを達成

2. ミッション要求に対する確認結果 ソーラーセイルによる航行技術の獲得

- ・液晶デバイスについて、動作チェック、姿勢制御実験を行い、想定通りの制御性能を達成していることを確認した。
- ・2010年12月8日に、金星からおよそ8万kmの距離をフライバイした。ソーラーセイルによる非弾道飛行をした結果、あかつきより1日遅く最接近した。あかつきは金星の太陽側へ誘導されたのに対し、IKAROSは金星の夜側へ誘導された。



本実験実施時の実証機のスピンレート、太陽距離、太陽角等を加味した初期評価により、想定する姿勢制御角の90%以上の制御性能を達成していることを確認した。



※ひずみ補正処理
未実施

3. 後期運用計画 概要

後期運用計画の概要を以下に示す。

- ・期間：2012年3月末頃まで
(後期運用終了時に継続運用の是非を判断)
- ・使用地上局：臼田64mアンテナ
- ・後期運用の目的
後期運用では、ソーラー電力セイル技術の基盤となり得る、航法誘導等に関する、より深い知見を得ること及び後継機の開発に寄与する以下の技術実証と観測を実施する。
ソーラー電力セイルミッション 新規：4テーマ，継続：3テーマ
オプション機器(GAP, ALDN, VLBI)ミッションの継続
新規開発機器(気液平衡スラスタ, 中利得アンテナ, ミッション系エレキ)の評価

3. 後期運用計画 主ミッションに関するテーマ

(1) 大型膜面の展開・展張	<p>＜継続1＞展開運動および展張状態を評価し、膜面の機械的な劣化を評価する。 ＜新規1＞膜面挙動・膜面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。</p>
(2) 薄膜太陽電池による発電	<p>＜継続2＞発電性能を評価し、薄膜太陽電池システムの劣化を評価する。</p>
(3) ソーラーセイルによる加速実証	<p>＜継続3＞膜面の加速性能を評価し、膜面の反射特性の劣化および光子加速の姿勢依存性を評価する。 ＜新規2＞膜面形状変化から太陽光圧の反射率と面積の分離精度を向上させて膜面の光学パラメータモデルを構築する。</p>
(4) ソーラーセイルによる航行技術の獲得	<p>＜新規3＞IKAROSと地球の距離が大きくなることを利用して、光子加速下の軌道決定精度を評価する。 ＜新規4＞軌道周期単位の長期的な誘導制御性を評価する。</p>

- ・いずれのミッションも2012年3月31日までに達成予定で、IKAROSが「世界で唯一」取得できるデータであり、ソーラー電力セイル技術の基盤となりえる。
- （日本がこの分野をリードすることは、木星・トロヤ群小惑星探査計画を含む、次世代の外惑星探査において有益）
- ・新たに後期運用にて実施するミッションは、大型膜構造の研究や太陽輻射圧を含む軌道決定・誘導制御の研究に寄与する。これらは、ソーラーセイルに限定されない重要な技術であり、さまざまなプロジェクトに応用可能である。

3. 後期運用計画 新規テーマの補足

＜新規テーマ1, 2＞大型膜構造の研究に寄与

定常運用の結果、太陽角・スピントを変化させると膜面形状が変化し、太陽光圧下での膜面挙動が変化することを確認した。後期運用では、太陽角・スピントの組合せを積極的に広範囲に変化させて以下を実施する。

- ・**展張状態の力学モデルを構築する。**

(膜面形状・膜面挙動の変化を積極的に引き出して実現。)

- ・**膜面の光学パラメータモデルを構築する。**

(膜面形状変化から太陽光圧の反射率と面積の分離精度を向上させて実現。)

＜新規テーマ3, 4＞太陽輻射圧を含む軌道決定・誘導制御の研究に寄与

定常段階に比べ、IKAROS・地球・太陽の相対位置が大きく変化することを積極的に利用して以下を実施する。

- ・**光子加速下の軌道決定精度を評価する。**

(地球距離に連動して軌道決定精度が劣化する。)

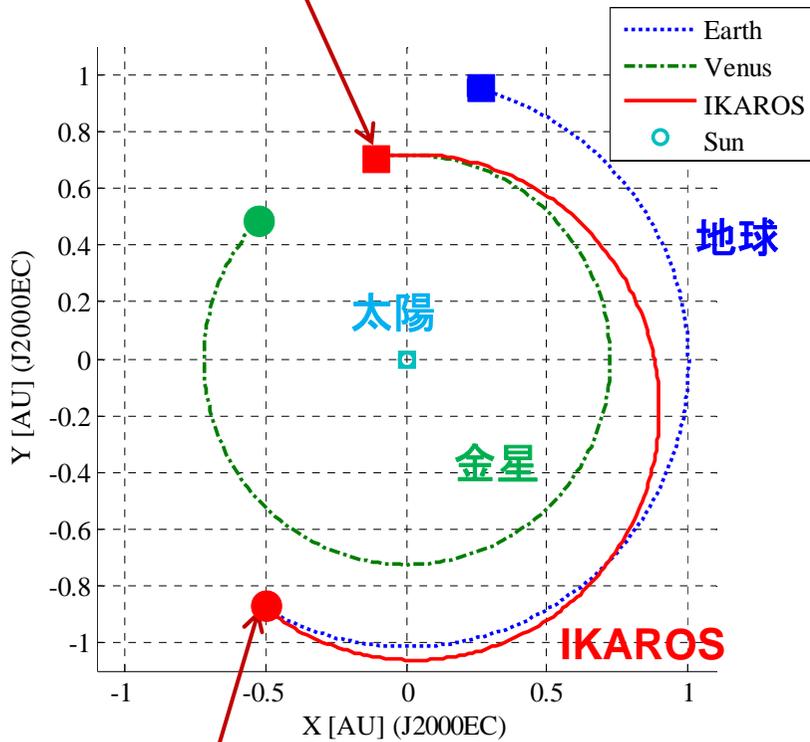
- ・**長期的な誘導制御性を評価する。**

(太陽まわりの周回を単位とした期間で探査機の軌道制御を評価する。)

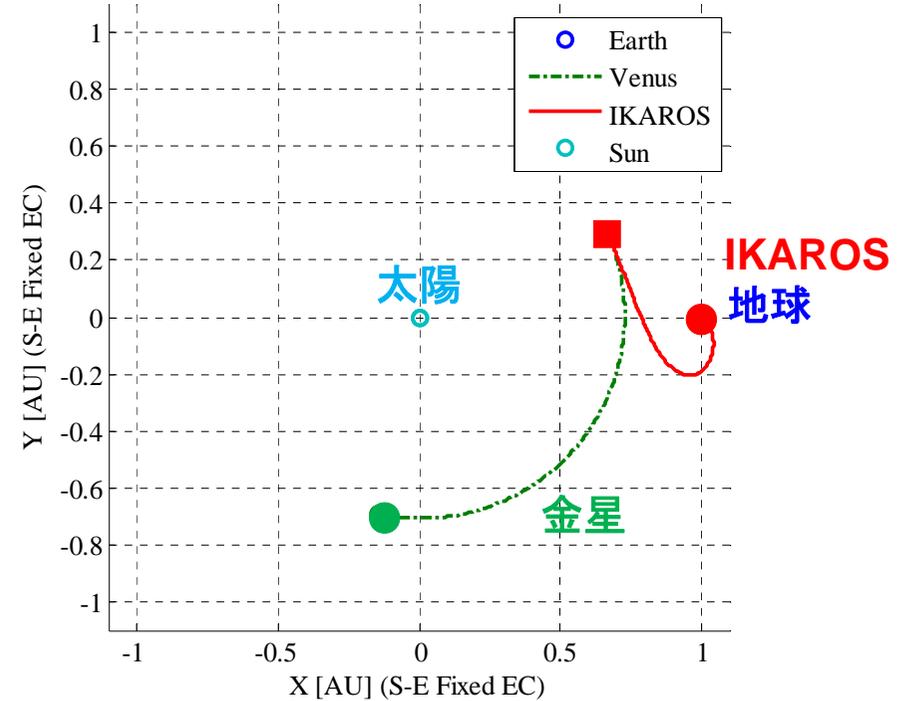
3. 後期運用計画 軌道計画(打上げ～金星最接近)

●: 打上げ(2010年5月21日)
■: 金星最接近(2010年12月8日)

金星最接近(2010年12月8日) ■



太陽・地球固定系

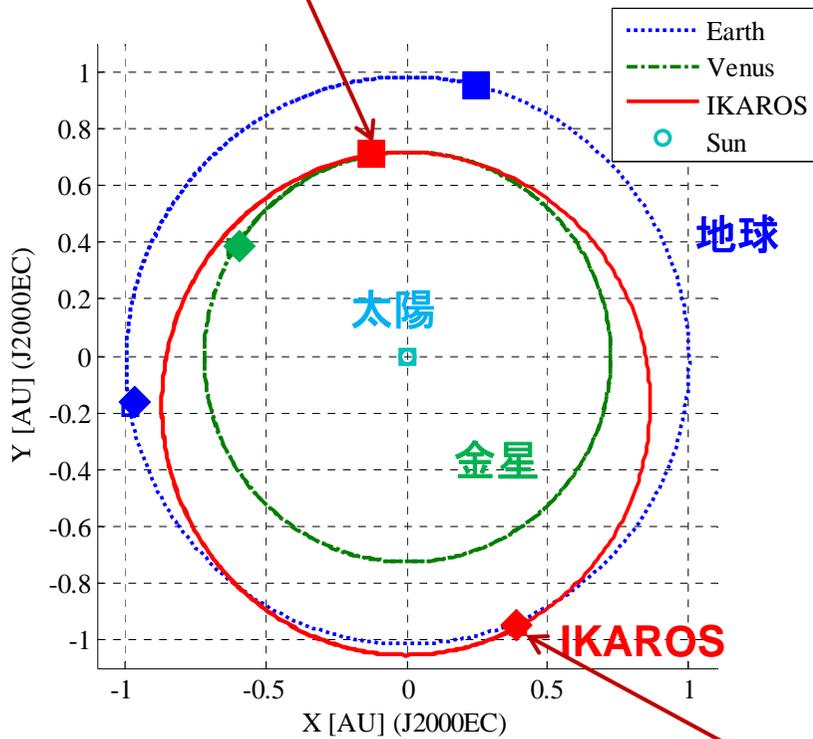


打上げ(2010年5月21日) ●

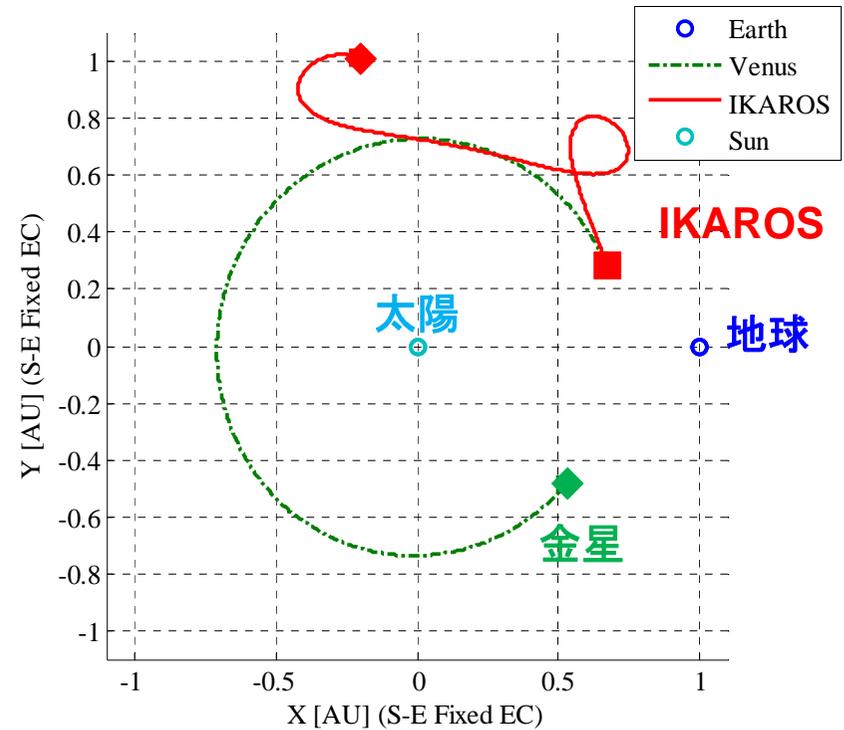
3. 後期運用計画 軌道計画(金星最接近~FY11末)

■ : 金星最接近(2010年12月8日)
◆ : 2011年度末(2012年3月31日)

金星最接近(2010年12月8日) ■



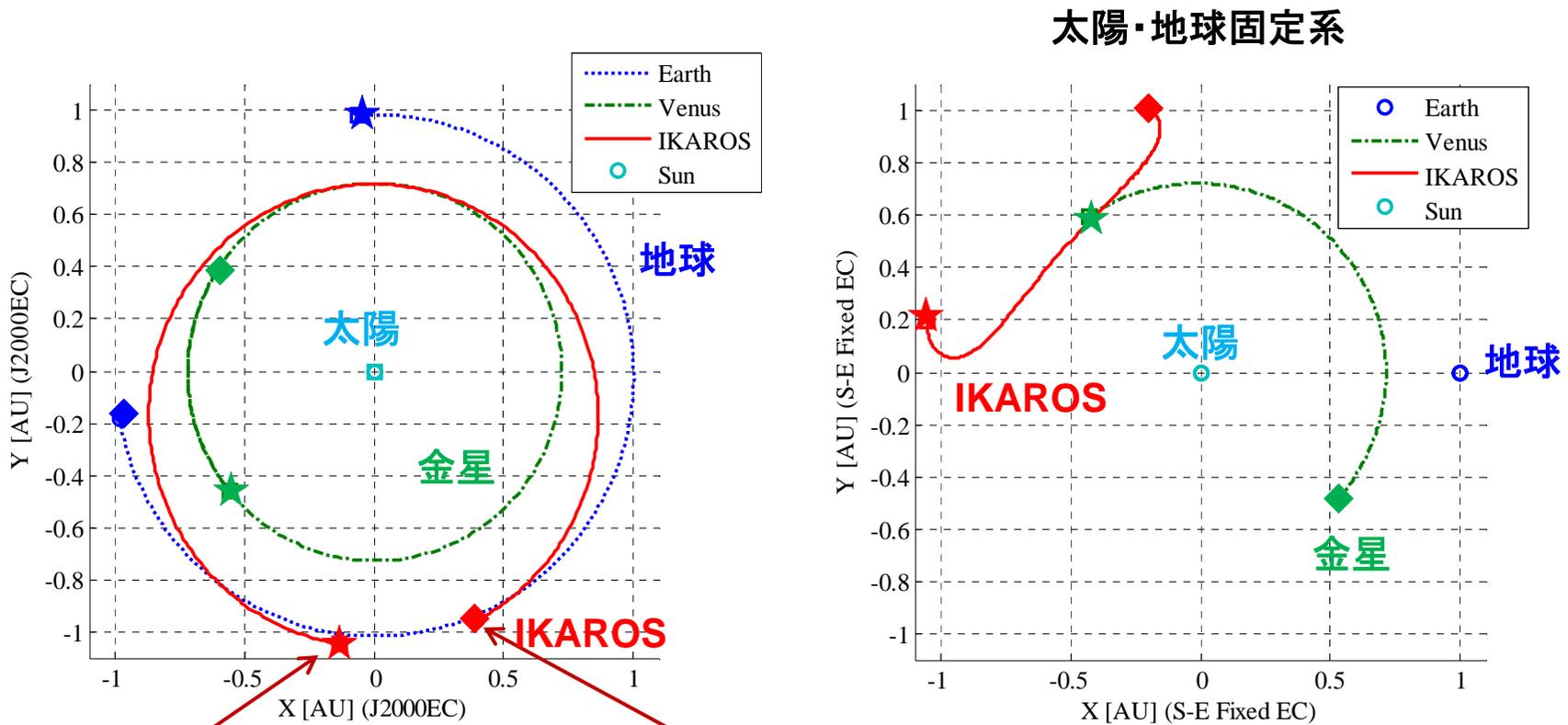
太陽・地球固定系



2011年度末(2012年3月31日) ◆

3. 後期運用計画 軌道計画 (FY11末～最遠点)

◆: 2011年度末 (2012年3月31日)
★: 最遠点 (2012年12月6日)



最遠点 (2012年12月26日) ★

2011年度末 (2012年3月31日) ◆

3. 後期運用計画

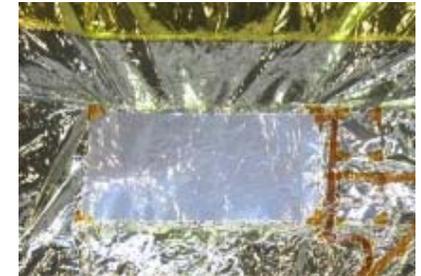
オプション機器ミッションの継続

(1) **GAP:ガンマ線バースト偏光検出器 (GAP= GAMMA-ray burst Polarimeter)**
 中心の散乱体とそれを取り囲む12枚の蛍光検出器からなる、散乱型ガンマ線偏光検出器で、**世界で初めてガンマ線バーストの偏光度を測定する。**



(2) **ALDN:大面積宇宙塵検出器**

(**ALLADDIN= Arrayed Large-Area Dust Detector for INterplanetary Space**)
 宇宙塵の衝突時刻, 信号ピーク値, 信号の減衰時間などを記録し,
地球より太陽に近い領域での宇宙塵の分布を解明する。



(3) **VLBI計測用マルチトーン送信器**

(**VLBI= Very Long Baseline Interferometry**)

非常に遠くで輝いているクエーサーを利用して, IKAROSの軌道を正確に測定する**ΔVLBI技術を確実に習得し**, 将来ミッションにおいて, 定常的に**ΔVLBIを用いた高精度軌道決定を行えるようにする。**



＜オプション機器の成果＞

- ・GAP, ALDN, VLBIはいずれも, 正常に機能し, 順調に成果を出しているが, システム運用を優先したためにまだ十分な運用時間がとれていない.
- ・いずれも長期運用を実施することで世界一級の成果が期待できる。

3. 後期運用計画 運用方針

通信回線状況を踏まえた、IKAROSの後期運用の成果を最大化するための運用方針は以下の通り。

2月：姿勢・軌道決定(⇒新規3,4, 継続3)

展張状態・薄膜太陽電池発電確認(⇒継続1,2)

GAP, ALDN観測データの再生

5, 6月：姿勢・軌道決定(⇒新規3,4, 継続3)

展張状態・薄膜太陽電池発電確認(⇒継続1,2)

GAP, ALDN観測データの再生, VLBIによる工学実験

スピンレート・太陽角の広範囲変更後, 姿勢・軌道決定(⇒新規1,2)

7月以降の運用については、6月までの運用結果を踏まえて判断する。

＜現状案＞スピンレート・太陽角の広範囲変更により、

- ・通信状況を改善できる場合 ⇒ 燃料を節約しながら、長期の運用を継続する。
- ・通信状況を改善できない場合 ⇒ 燃料を消費しながら、中利得アンテナのリンク姿勢を維持する。

4. 参考資料

技術的背景 ソーラー電力セイルとは？

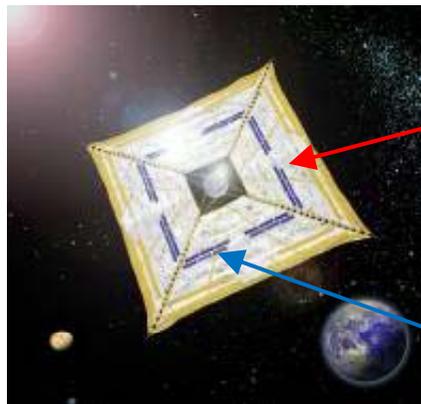
・ソーラーセイルとは・

太陽光圧の力をセイル(膜面)に受けて宇宙空間を航行する宇宙帆船であり、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。このアイデア自体は100年程度前からあり世界中で検討されているが、これまで実現されていなかった。⇒IKAROSでついに実現した。

・ソーラー電力セイルとは・

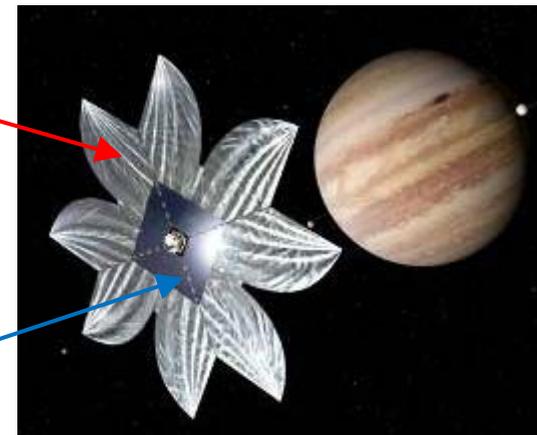
ソーラーセイルに加え、膜面の一部に薄膜の太陽電池を貼り付けてあり太陽光発電も同時に行う日本独自のアイデアである。⇒IKAROSで初めて実証した。

ソーラー電力セイルはソーラーセイル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探査機に十分な電力を確保できる。この大電力を用いて、高性能なイオンエンジンを駆動することで、さらに効率的な光子加速とのハイブリッドな推進を実現する。⇒次の計画で実現を目指す。



超薄膜太陽帆

薄膜太陽電池



IKAROS計画
(小型ソーラー電力セイル実証機)

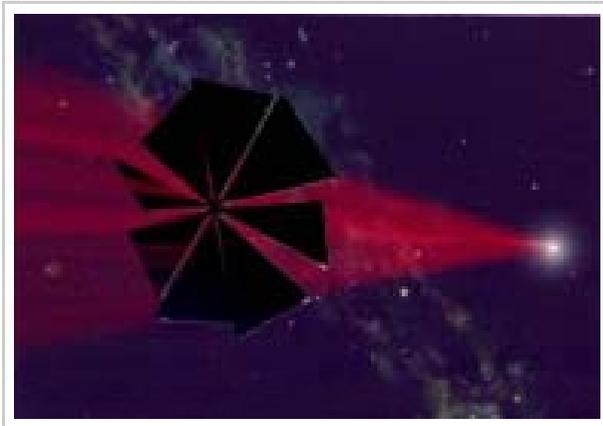
木星・トロヤ群小惑星探査計画
(ソーラー電力セイル探査機)

4. 参考資料

ソーラー電力セイル研究開発の意義

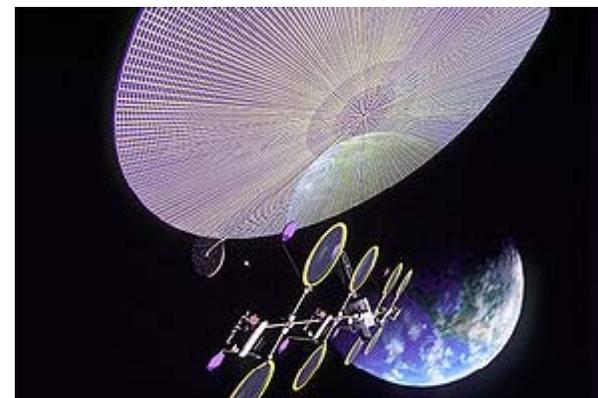
- ・従来より格段に効率が良いソーラーセイルと電気推進のハイブリッド推進を世界で初めて実証し、柔軟な探査を実現する。
ソーラーセイルは欧米でミッションを検討中であるがまだ実現されていない。
ソーラー電力セイルにより日本が太陽系探査を先導する。
- ・薄膜太陽電池により木星圏でも十分な電力供給を可能とする。
宇宙太陽光発電システムの電池開発の先駆けとなる。
商業利用や地球環境へ貢献する。
- ・木星以遠に行く外惑星探査技術を日本が獲得する。

<海外で検討されているソーラーセイル>

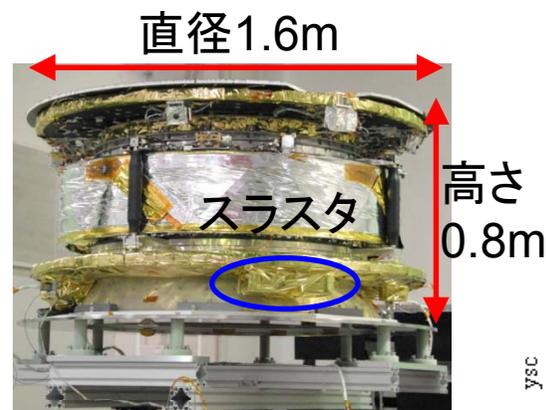
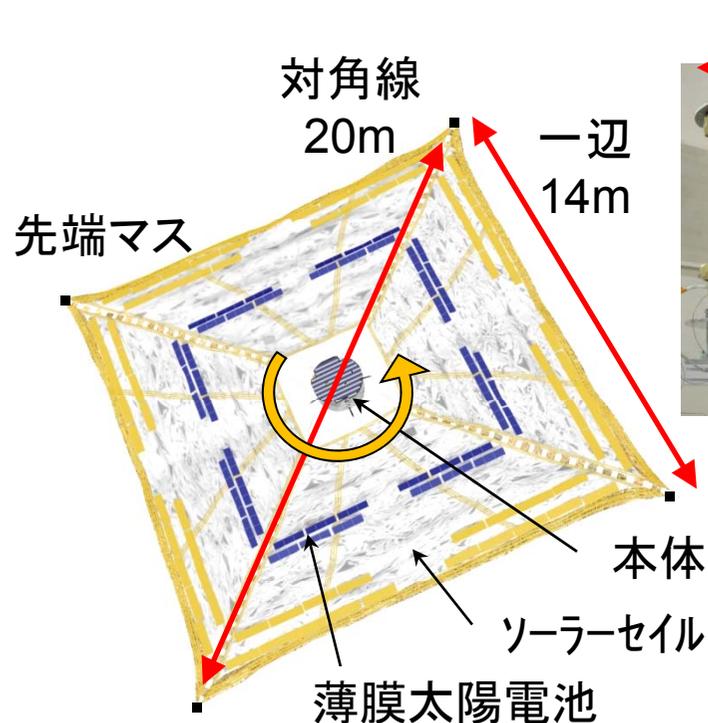


インフレーター型ソーラーセイル

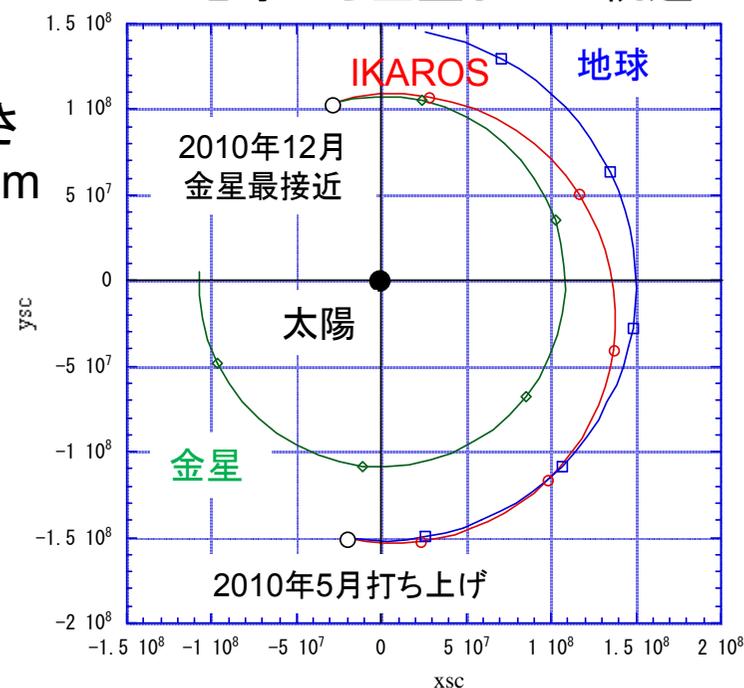
<宇宙太陽光発電システム>



4. 参考資料 IKAROSの諸元



地球から金星までの軌道

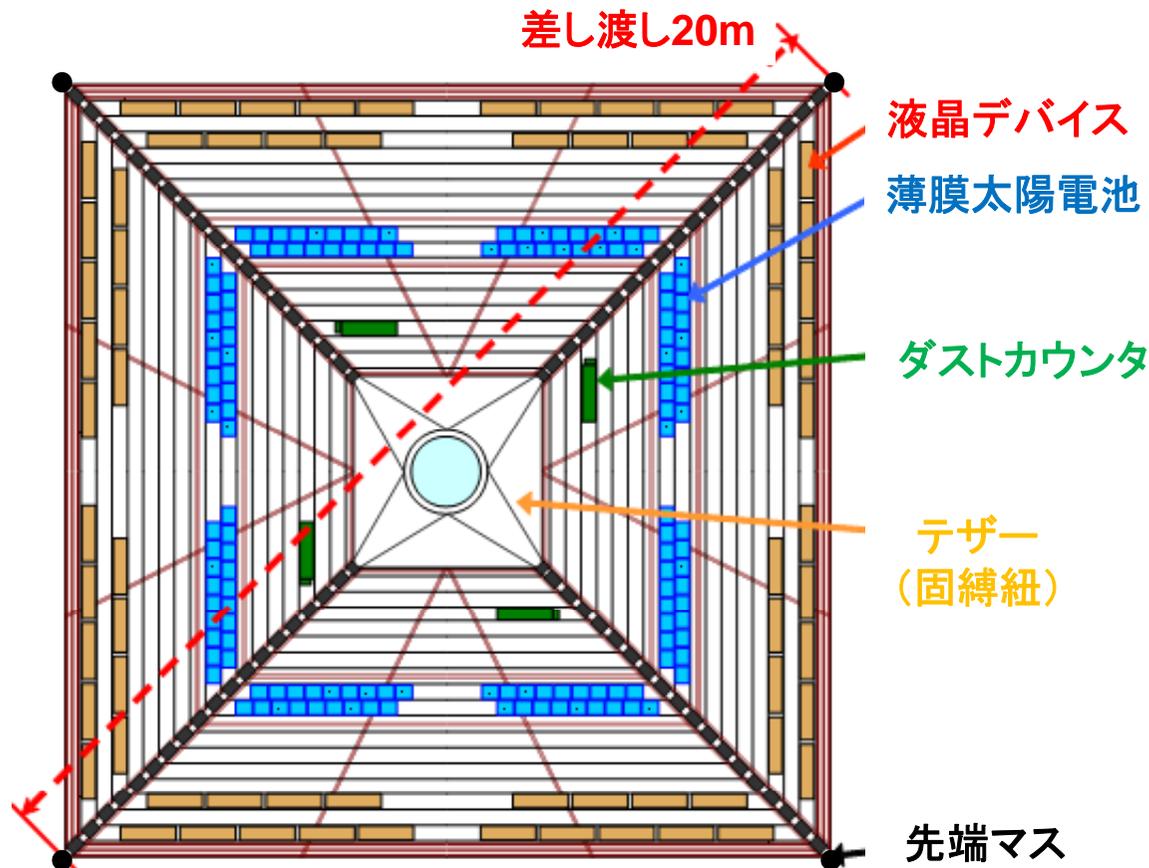


【諸元】

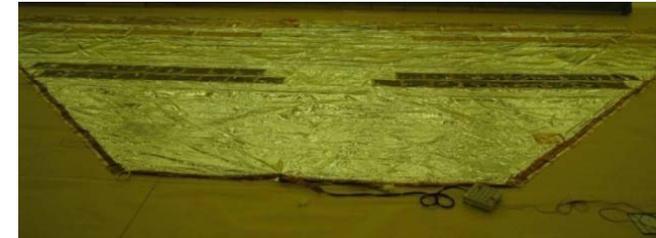
- ・寸法: 本体 直径1.6m × 高さ0.8m
膜面 差し渡し20m × 厚さ7.5 μ m
- ・重量: 308kg (うち, 膜面 16kg)
- ・打上げ: 平成22年5月21日
- ・打上げロケット: H-IIA (「あかつき」との相乗り)
- ・ミッション期間: 半年間以上

- ・軌道: 金星直行軌道
- ・軌道決定: レンジ (測距) ・ドップラー (距離変化率)
- ・姿勢制御方式: スピン (膜面の展開・展張)
- ・推進系: コールドガスジェットスラスタ (気液平衡スラスタ)
- ・通信系: 低利得アンテナ (2個), 中利得アンテナ (1個)

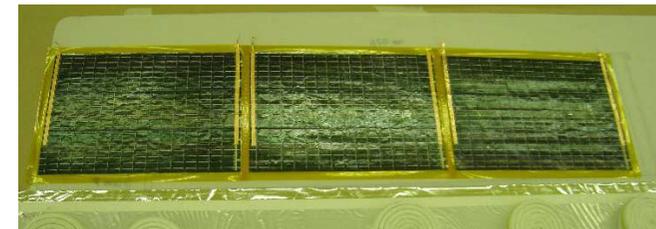
4. 参考資料 膜面形状・配置



- ・膜面は差し渡し20mの正方形
- ・テザーにより膜面と本体を結合
- ・先端マス(0.5kg×4個)により膜面・展張をサポート



膜面材料:ポリイミド(厚さ7.5 μ m)



薄膜太陽電池:a-Si*1セル(厚さ25 μ m)
*1 アモルファスシリコン(薄膜シリコンの一種)



電源ON
(鏡面反射)

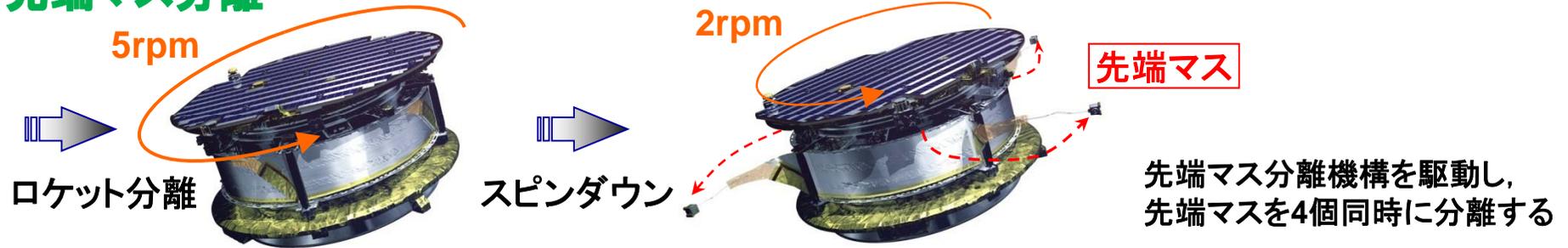
電源OFF
(拡散反射)

液晶デバイス:電源ON/OFFにて
反射条件を切り替え,トルクを発生

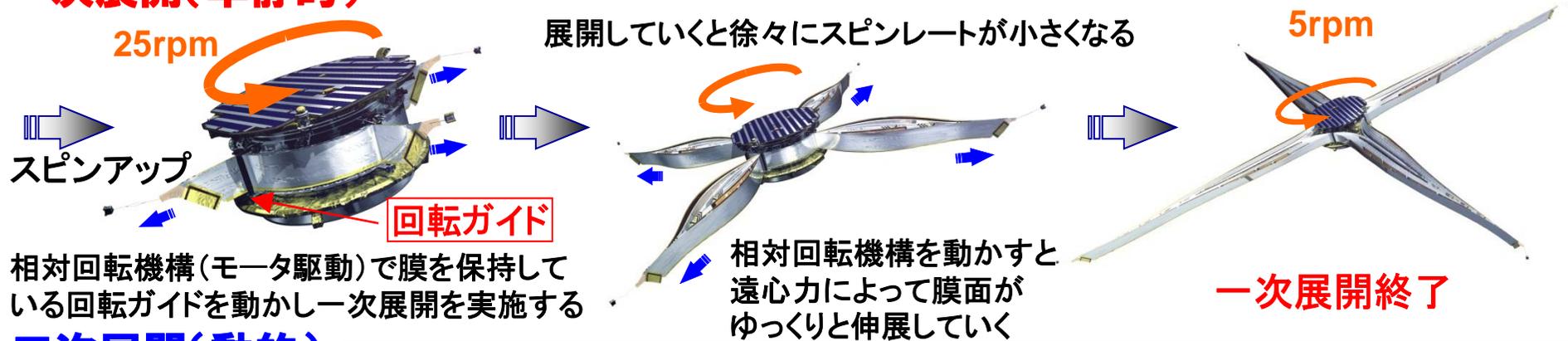
4. 参考資料 膜面展開手順・機構

マスト(支柱)タイプに比べ、
展開機構が軽量化でき、
膜面の大型化が可能。

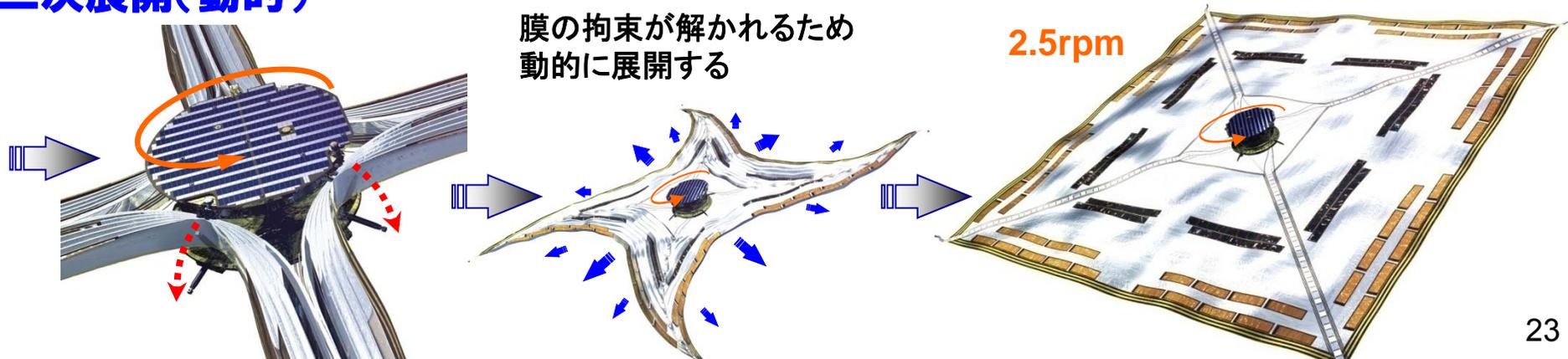
先端マス分離



一次展開(準静的)



二次展開(動的)



4. 参考資料

ガンマ線バースト偏光検出器 (GAP)

イカロス衛星には、ガンマ線バーストの偏光を観測する装置:GAPが搭載されている。GAPは、ガンマ線バースト(GRB)の偏光を専門に観測する世界で初めての装置である。GRBは、星の寿命の最後に迎える巨大な爆発で、超新星の爆発よりも巨大である。この明るさを使って、遠い宇宙(初期の宇宙)を観測する手段としても注目されている。事実、現在までに知られる最も遠い天体の観測記録は、すばるやハッブル望遠鏡ではなく、ガンマ線バーストによるものであり、132億光年果となっている。このように遠くからも観測できる巨大な爆発のメカニズムを説明する理論として、ブラックホールの形成に伴い、物質が光速の99%にまで加速されているとする理論(火の玉モデル)がある。これを偏光(磁場)を測る事から実証するのがGAPの目的である。

観測装置は、右図のように、直径が17cm、重さが4kgの小さな装置ではあるが、世界で始めて、GRBのコンプトン散乱同時計数を実現した、野心的な装置である。打ち上の一ヶ月後に電源を入れ、それ以来、故障も無く順調に観測をしている。GRBを検出後、メモリーに保存し、それを地球に送り届けている。今までに受かったGRBと代表的な強度曲線を表1に示す。GRBは突然現れ、激しい強度変動を示す。

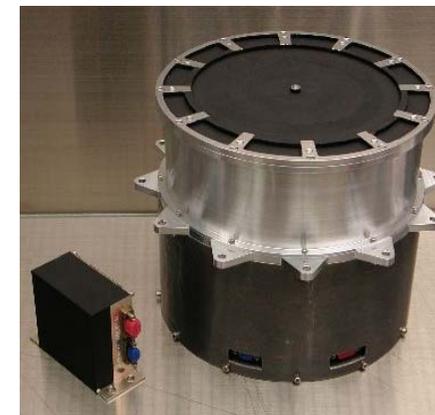
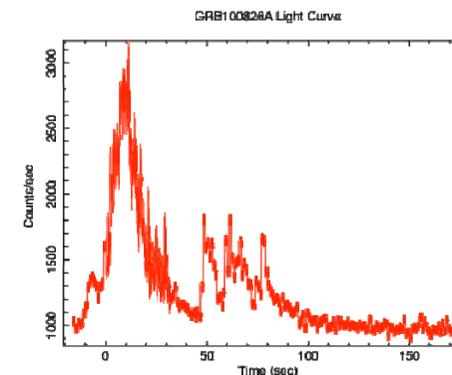
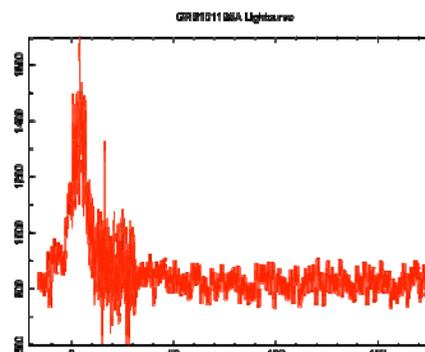
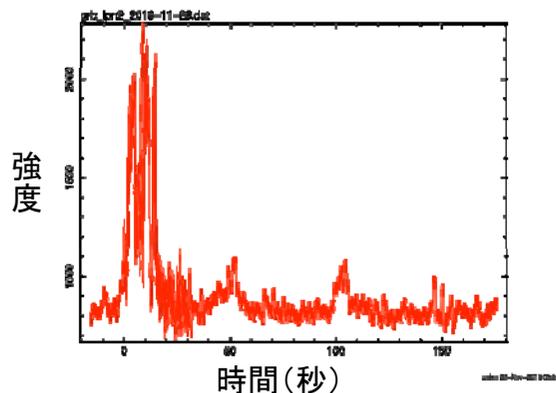


表1 GAPが観測したGRB.

GRB名称	トリガー時刻	距離 (km)	α (deg)	δ (deg)	入射角 (deg)	同時観測
GRB100707A	00:47:22.878	17917783.43	-150.290	-24.320	89.9	S,F,K
GRB100715A	00:12:32.568	20806431.98	-147.515	-24.896	18.6	S,K,I,M
GRB100719B	23:44:15.407	22520208.30	-145.650	-25.286	145.2	F,K
GRB100722A	02:17:25.963	23218963.10	-144.838	-25.455	33.6	F,K
GRB100804A	02:28:45.837	27050613.80	-139.749	-26.476	62.7	F,K
GRB100809A	00:32:17.858	28337922.70	-137.683	-26.867	non	K
GRB100820A	08:55:31.696	30602741.24	-133.100	-27.668	29.5	F,K
GRB100826A	22:57:20.805	31472564.09	-130.590	-28.046	20.8	S,F,K,M,MO
GRB101014A	04:12:15.610	29017161.30	-129.807	-24.919	60	F,K
GRB101021A	00:14:23.267	28983861.16	-134.666	-22.451	40.5	F,K
GRB101113A	11:37:44	29063225.85	-129.393	-25.124	25.63	F,K
GRB101123A	22:51:41.536	48964008.95	-151.749	-10.295	74.55	F,K,I,MO,Sw,A
GRB101126A	04:45:50	51445521.45	-151.467	-10.175	61.98	F,K
GRB101219A	02:35:2.551	80403597.405	-140.516	-11.774	51.69	K,Sw

(S:Suzaku, F:Fermi, K:KONUS, I:INTEGRAL, M:MESSSENGER,
MO:Mars Odyssey, Sw:Swift, A:AGILE)

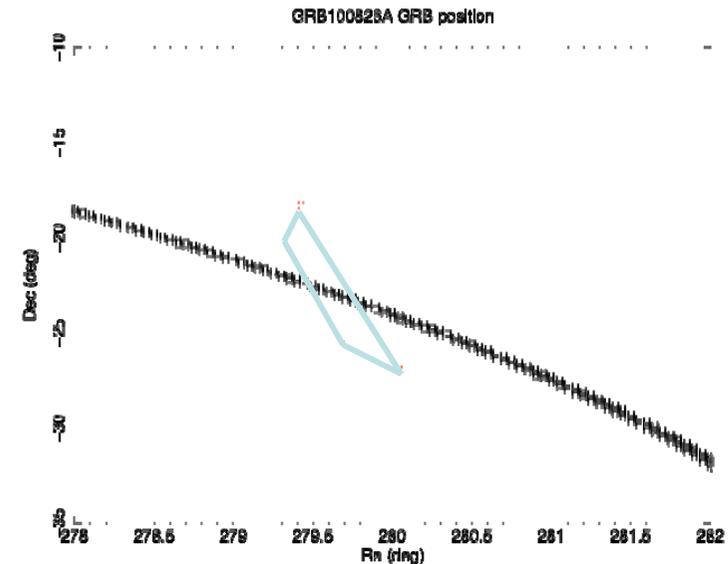


4. 参考資料

ガンマ線バースト偏光検出器 (GAP)

GAP検出器の本来の目的は、偏光を測り、巨大な爆発のメカニズムに迫ることだが、偏光の存在の結論を得るには、まだ十分な数のGRBの数に達していない。打ち上げから8ヶ月が経ったが、GAPの実質的な運用時間が4ヶ月に留まるからである。

以下の報告は、GRB観測用に開発された世界中の人工衛星との国際共同観測により行われている発生方向の決定についての作業である。GRBは突然に発生する短時間現象で、あらかじめ発生方向を予言が出来ない。待ち受ける複数の衛星で受かったGRBの観測時刻の差から、発生方向が決められる。これは、光の速度が有限であることを使った、観測時刻差法(time of flight)による方向決定である。前ページの一覧表には、他の衛星での受信状況をK (ソビエトKonus衛星), F (アメリカFerml), S (アメリカ+イタリアSwift)などと表記しているが、それらの衛星での検出時刻とGAPの検出時刻の差と、それぞれの衛星の位置を使って、GRBの方向を決める。光の速さが有限であることを使った、実に面白い決定方法である。このような形で、世界中のGRB衛星が国際共同で仕事をしている。しかし、数多くの衛星の中で、偏光を測れるのは、イカロスGAPだけである。

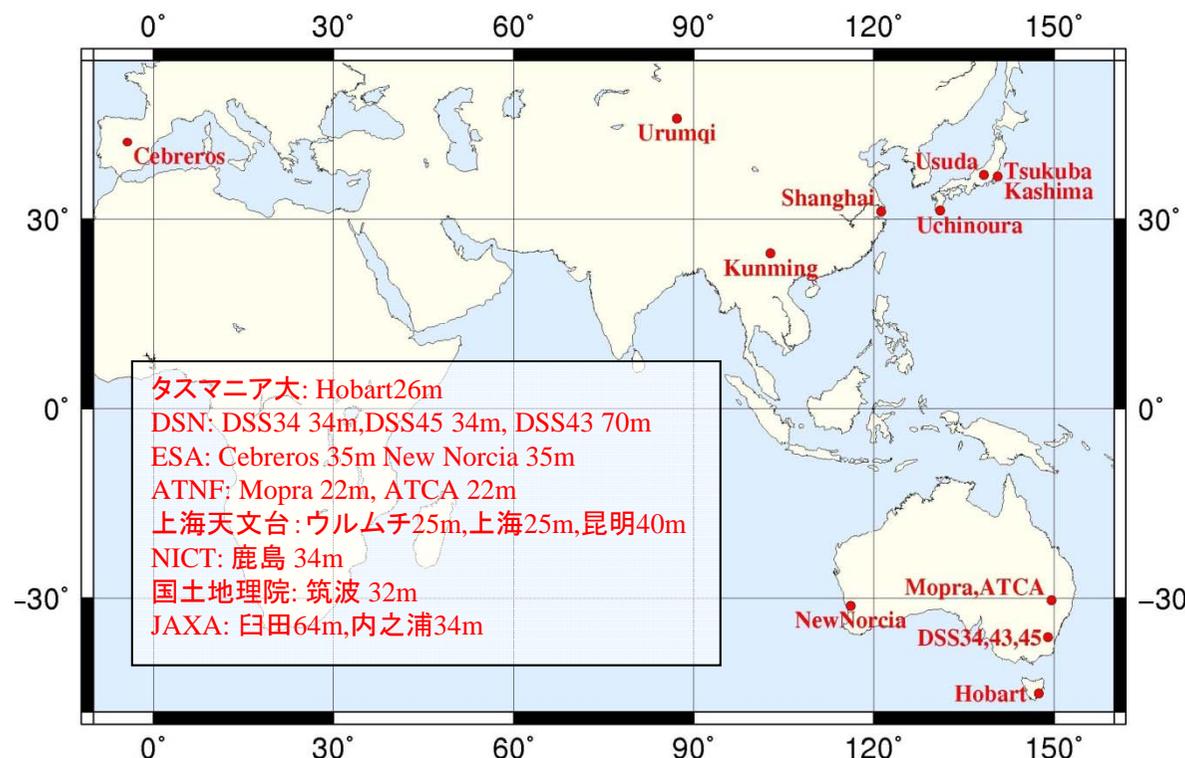


GRB 100826A(2010年8月26日発生)は、他の衛星により、上の図で青で囲まれた領域内と決められた。惑星空間にいる(距離が遠い)イカロスを使うと、その距離が遠いだけ、より高い精度で決まる。黒い帯状に走る線が、イカロスにより決められた制限帯で、他の衛星に比べて、許される領域が細い帯になる。両者を組むと、許される領域がとて狭い事がわかる。このように、幾つかの衛星の情報を使うと、GRBの発生方向が極めて良く決まり、その中から、GRBを発生させた対応天体を探す武器となる。特に、惑星空間に出たイカロスGAPの情報は、距離が遠いだけに重要な情報となっている。この狭い場所内を探せば、非常に遠い距離(初期宇宙)の天体を探せると同時に、GRBを起こす奇妙な天体の情報となる。現在の宇宙は137億光年の広がり知られるが、GRBにより132億光年まで見えている。

4. 参考資料

VLBI計測用マルチトーン送信器 (VLBI)

実験の成果: 熱雑音**50ピコ秒**という極めて高い精度で計測に成功。JAXAの従来の深宇宙探査機(はやぶさ、あかつき)に比べ、**約20倍の精度向上**を達成。



のべ8機関15アンテナが参加。合計24パスの実験を実施。

あかつき

精度(熱雑音): 700ピコ秒

確度: 1-2ナノ秒

IKAROS

精度(熱雑音): 50ピコ秒

確度: 50-150ピコ秒

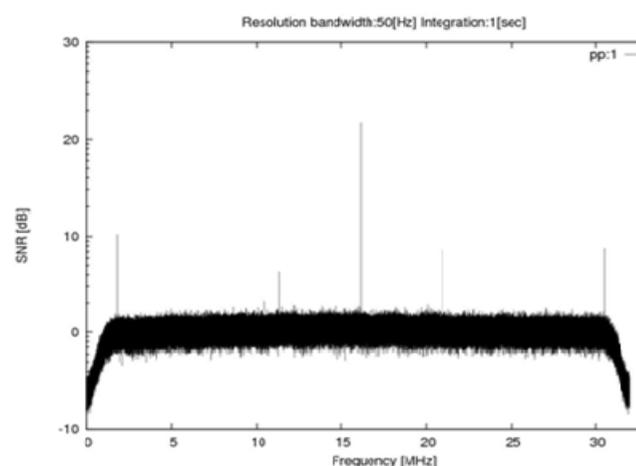
実験の目的・背景

遠方の電波星からの電波を補正信号として用いて深宇宙探査機の天球面上の位置を精密に計測する手法である、DDOR(Delta differential one-way range)技術の実証を目的とするミッションである。地球上の遠く離れた複数のアンテナで同時に電波を受信して干渉させる事(VLBI:超長基線干渉計)により、三角測量の原理で、探査機の天球面上の位置を精密に決定することができる。近年はJPLを中心にほぼ全ての深宇宙探査機で利用されるようになりつつある技術であり、例えば、あかつきの金星軌道投入直前の精密軌道決定が必要な時期においては、NASA DSN局においてほぼ毎日DDOR計測が行われていた。しかし、JAXAのこれまでの深宇宙探査機には、DDOR技術において本質的に重要な、マルチトーン送信機能が備わっていなかったため、本来得られるべき性能に比べはるかに低い精度しか得られていなかった。そこで、今回、IKAROSの飛行機会を利用し、VLBI専用のマルチトーン送信機と、広帯域のデジタル受信器を新規に開発し、DDOR技術の実証を行う事になった。

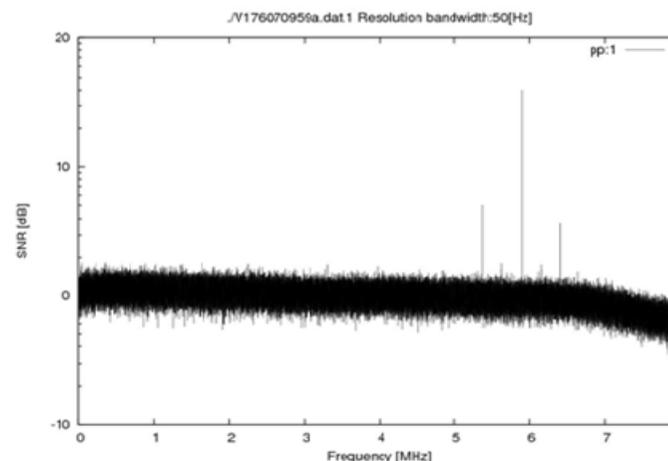
4. 参考資料

VLBI計測用マルチトーン送信器 (VLBI)

世界最高の記録データレート (64MSPS/16ch/4bit, 4096Gbps) の
DDOR用デジタルベースバンドコンバータを開発



デジタル広帯域システムによる
記録データ (32MHz bw)
(デジタルベースバンドコンバータ
サンプリング速度世界最速を記録！)

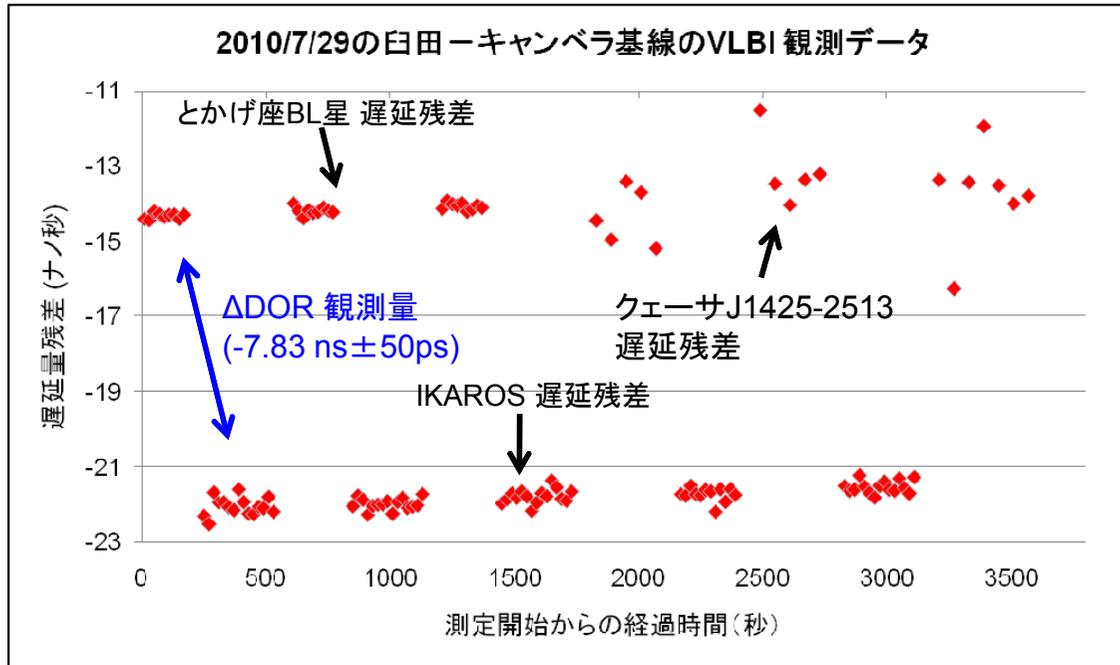


従来型アナログ狭帯域システムによる
記録データ (上図はバス系信号 8MHz bw)
8MHz帯域幅のアナログ信号を複数組み合わせる必要がある。帯域内のゲイン・位相がフラットではない。

海外の従来システムに比べ8倍のクエーサー観測帯域幅を利用する事により、探査機からの離角がより小さい、微弱なクエーサまでcalibratorとして利用する事が可能に。将来のKa帯による広帯域DDORにも余裕をもって対応可能。

4. 参考資料

VLBI計測用マルチトーン送信器 (VLBI)



左図において、下の6つの点の集まりがIKAROSのVLBI遅延残差、左上の3つ及び、右上の3つが、天球面上においてIKAROSの近傍に位置している、位置がよく知られている2つの天体の遅延残差。IKAROSのプロットは、レンジ・ドップラーで得られた決定軌道をもとにした遅延残差であり、軌道が正しければ、天体の残差と同一直線上にのるはずであるが、明確なバイアスが残っている。すなわち、レンジ・ドップラーでは推定しきれない軌道誤差が測定された事になる。クェーサ J1425-2513はとかが座BL星に比べ強度が弱いためノイズが大きいですが、遅延残差は同一直線上にのっている。異なる仰角の天体にも関わらず同一直線上にのっている事から、大気遅延誤差等の系統バイアスが取り除けている事がわかる。

今後の運用方針

VLBI用送信アンテナはバス系アンテナに比べビーム幅が狭いため、今後の観測機会は限られ、計測精度も高くはないが、将来の探査機において定常運用に資するシステムになるよう観測システムの改良(パイプライン化・半自動化)を進める事を目的として実証観測を継続する。これまでの観測で、軌道決定精度向上を評価する上で十分な量の良質なデータが得られているが、従来に比べ格段に高い計測精度が得られるようになったため、軌道決定システムに数cmの精度の局位置モデル・観測モデルを導入(従来の深宇宙軌道決定では数mの精度で十分)する必要がある。近地球衛星等で用いられる高精度モデルの導入を進め、軌道決定精度向上を実証する。

4. 参考資料

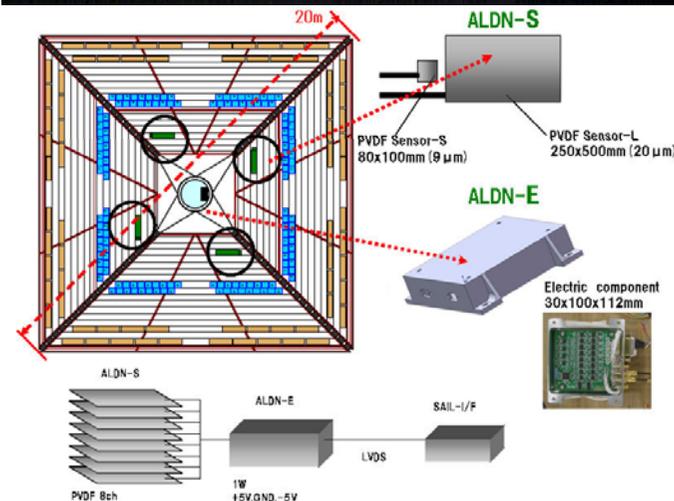
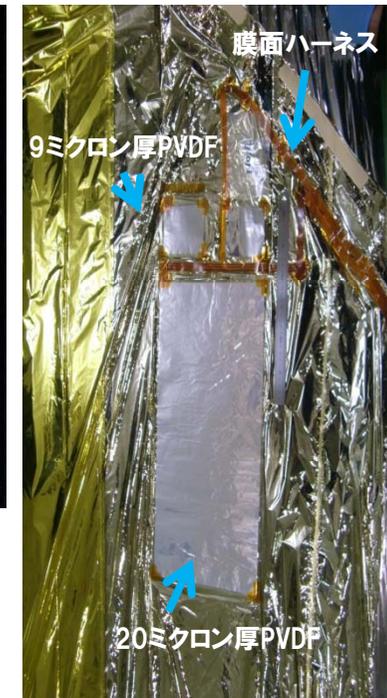
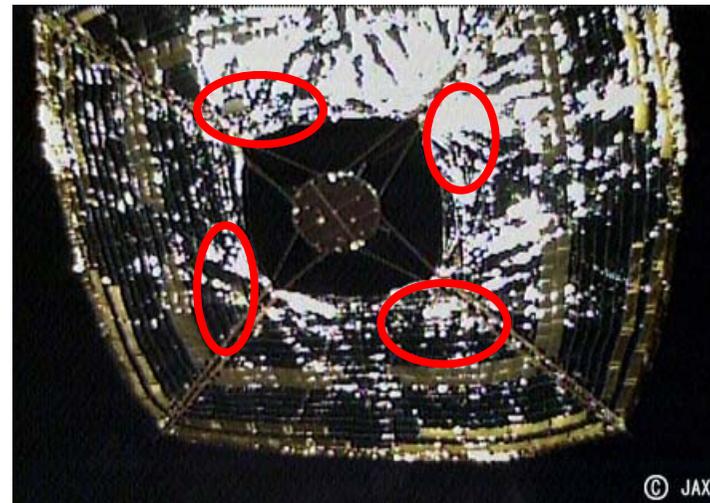
大面積薄膜ダスト検出アレイ(ALDN)

<ミッション目標>

- * 「アラジン(ALADDIN = Arrayed Large Area Dust Detectors in Interplanetary space)」とは、「魔法のじゅうたん」のようなイカロスに搭載される、日本初の純国産宇宙塵検出器。将来の木星圏探査など、外惑星領域用の大面積宇宙塵検出器の宇宙での技術実証と、地球より太陽に近い領域での宇宙塵の検出とその分布の理学研究を目指して搭載された。

<機器構成>

- * 総面積200m²のセイル膜面上の0.3%(0.54 m²)占めるだけだが、太陽系探査史上最大の面積を持つ宇宙塵検出器である。このため、同一計測時間内で過去の他国の探査機の実績より一桁以上多い衝突を検出でき、宇宙塵の存在量や分布を、統計的に高い信頼性の元、より微細な分布構造まで計測できる。
- * セイル膜面に厚さ9/1000mmと厚さ20/1000mmの国産「PVDF(ポリフッ化ビニリデン)」圧電素子薄膜を4チャンネルずつ配置したセンサ部(ALDN-S, 約40g)と、宇宙塵の衝突信号を検出するエレキ部(ALDN-E, 210g)から構成される。千分の数mm以上の宇宙塵の超高速衝突で生じる電荷信号を増幅し・変換し、衝突時刻、信号ピーク値、信号の減衰時間などを記録する。



4. 参考資料

大面積薄膜ダスト検出アレイ(ALDN)

<運用成果>

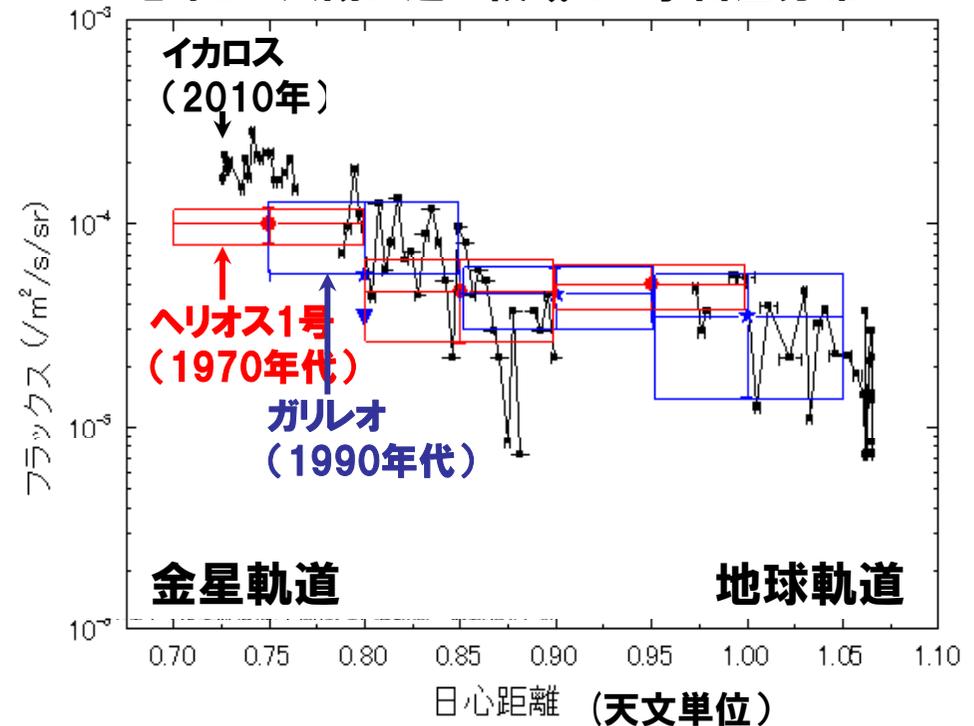
(1) 国産初、世界最大面積の宇宙塵検出器の宇宙実証

2010年6月21日から稼働を開始。日本で初めて製作・校正された宇宙塵計測器として、宇宙塵の超高速衝突データを取得。また宇宙探査史上最大の検出面積を持ち、8チャンネル全てで衝突を検出。2010年6月30日からの累積25日間分の待ち受け時間で、数ミクロンより大きな宇宙塵の衝突信号を100個以上検出。この数は火星探査機「のぞみ」に搭載されたドイツ製ダスト計測器(MDC)が、1998年8月から45か月間にわたって検出した全データ数に相当。短期間で宇宙塵衝突を大量に検出でき、統計的に精度の高いデータを生み出す大面積ダスト検出器の有効性を実証し、将来の木星圏探査での宇宙塵計測に向けた、日本独自の技術基盤を確立。

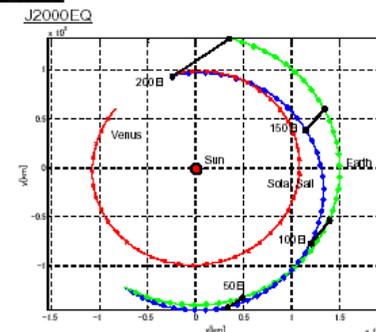
(2) 太陽系内宇宙塵分布の日心距離依存性の研究

イカロスの航行期間中に連続計測して、地球公転軌道よりも太陽に近い内惑星領域における、宇宙塵分布の日心距離依存性を評価。1970年代、1990年代の海外の探査機では、同領域で日心距離とフラックスともに大きな不確定性を持ったデータしか取得できなかったが、イカロスは累積24時間ほどの細かい時間分解能、つまり日心距離をかつてない微細な区分で宇宙塵の分布を計測することに成功した。これにより、地球から金星近傍までの領域で、太陽に近づくに連れて、多少ばらつきを持ちつつも、ほぼ1ケタ連続的に上昇する宇宙塵の分布構造が明らかになった。なお、後期運用でも連続観測を続ければ、宇宙塵分布の日心距離依存性だけでなく、黄道面上の位相や惑星との位置関係における分布依存性も調査できると期待される。

地球より太陽に近い領域での宇宙塵分布



【探査機軌道】



太陽-地球固定系

