

# S1-07 IKAROSによる世界初の ソーラー電力セイルの実証



- 森治, 津田雄一, 澤田弘崇, 船瀬龍, 山本高行, 佐伯孝尚, 米倉克英, 星野宏和, 南野浩之, 遠藤達也, 川口淳一郎, IKAROSデモンストレーションチーム

# ソーラー電力セイルとは？

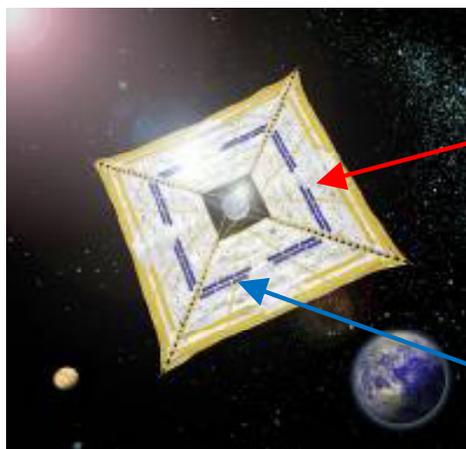
## ・ソーラーセイルとは・・・

風を受けて海を走る帆船のように、宇宙空間で大型の薄い帆(セイル)を展開し、太陽からの光の粒子を反射する力で推進する宇宙ヨット。ソーラーセイルのアイデアは100年程度前からあったが、IKAROSで初めて実証する。

## ・ソーラー電力セイルとは・・・

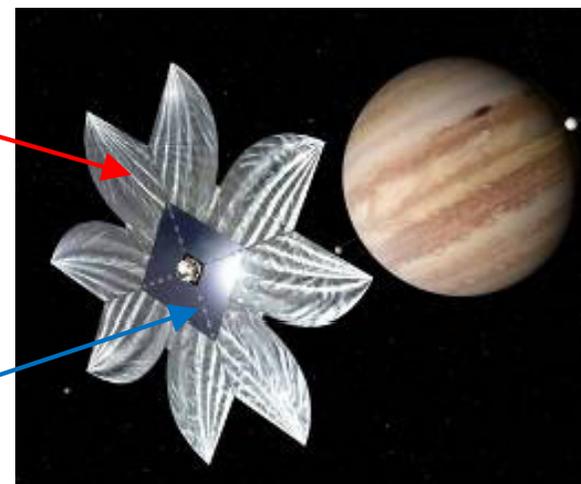
ソーラー電力セイルは、ソーラーセイルによる推進と薄膜太陽電池を貼り付けた電力セイルによる発電を組み合わせた日本オリジナルのコンセプトであり、IKAROSで初めて実証する。

次の計画では、この電力を用いて高性能イオンエンジンを駆動することで、ソーラーセイルとのハイブリッド推進を実現する。



超薄膜太陽帆

薄膜太陽電池



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)

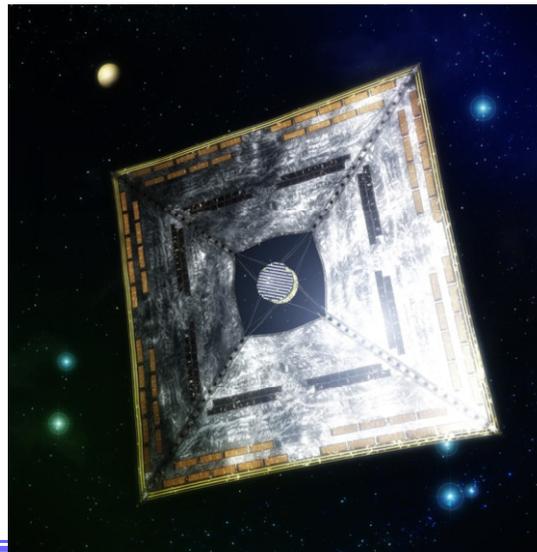
IKAROS計画

(小型ソーラー電力セイル実証機)

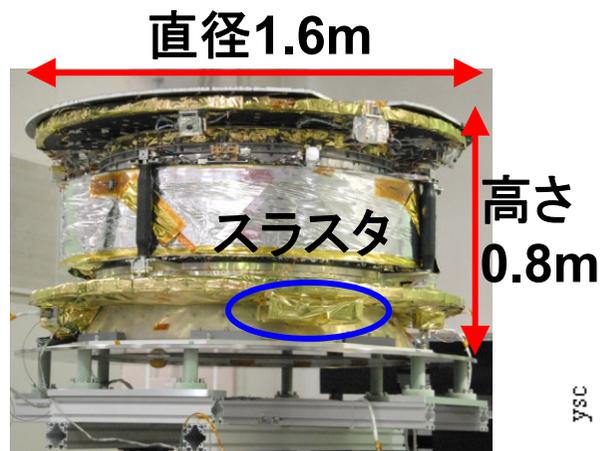
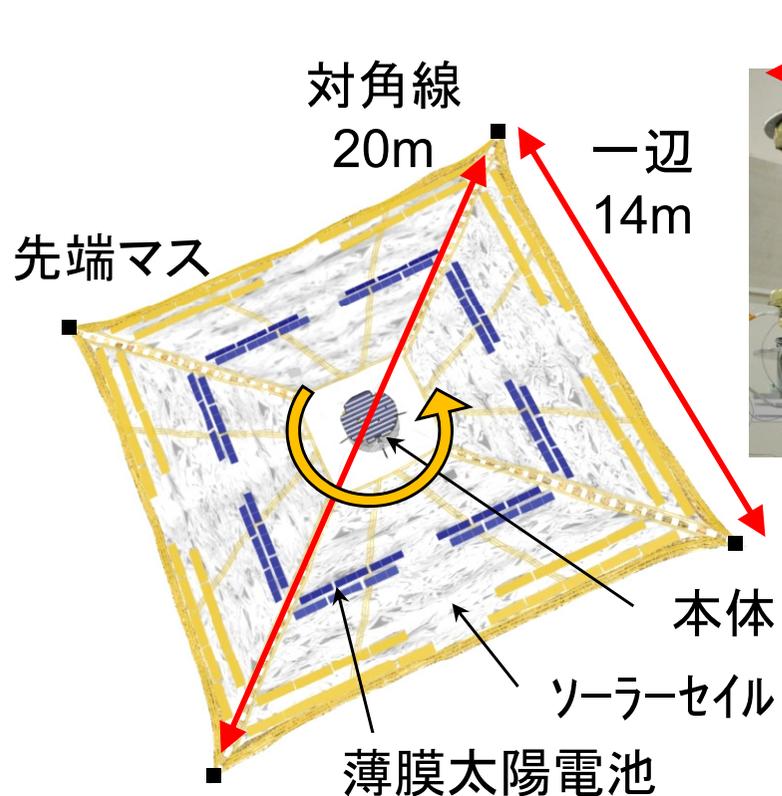
# 小型ソーラー電力セイル実証機の概要

- ・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)

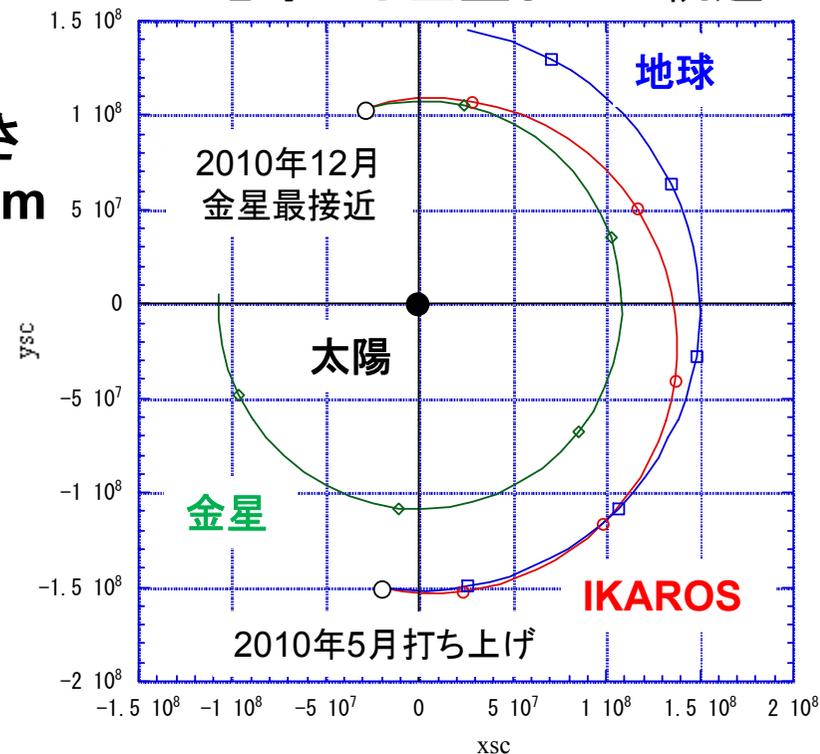
IKAROS = Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun



# 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 $\mu$ m
- ・重量: 310kg (うち, 膜面 15kg)
- ・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: LGA (2個), MGA (1個)

# 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の快挙となる。

## (1) 大型膜面の展開・展張

【ミニマムサクセス】

- ・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) 薄膜太陽電池による発電

- ・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

【フルサクセス】

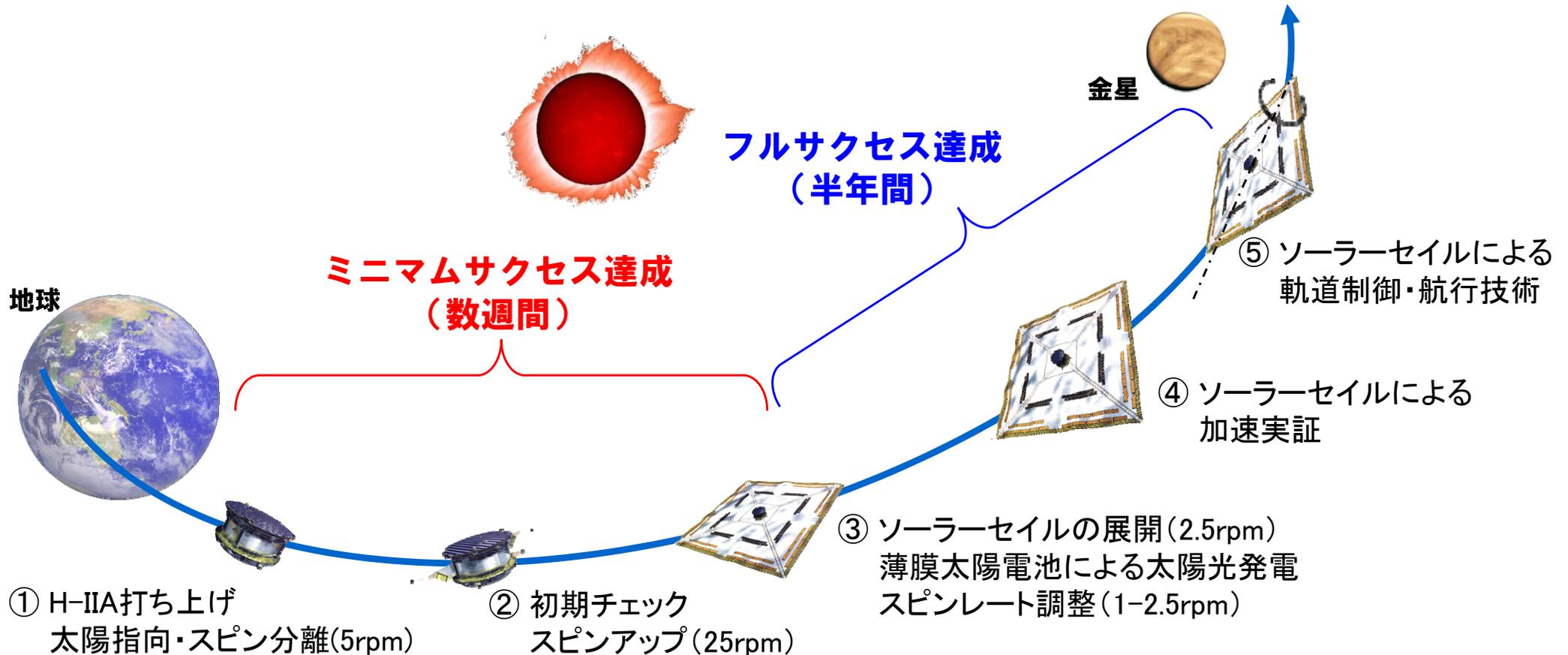
- ・ソーラーセイルによる加速効果を、軌道決定(測距データ、距離変化率データ)により確認する。
- ・加速性能を評価し、目標天体までの軌道を設計する計算手法に反映する。

## (4) ソーラーセイルによる航行技術の獲得

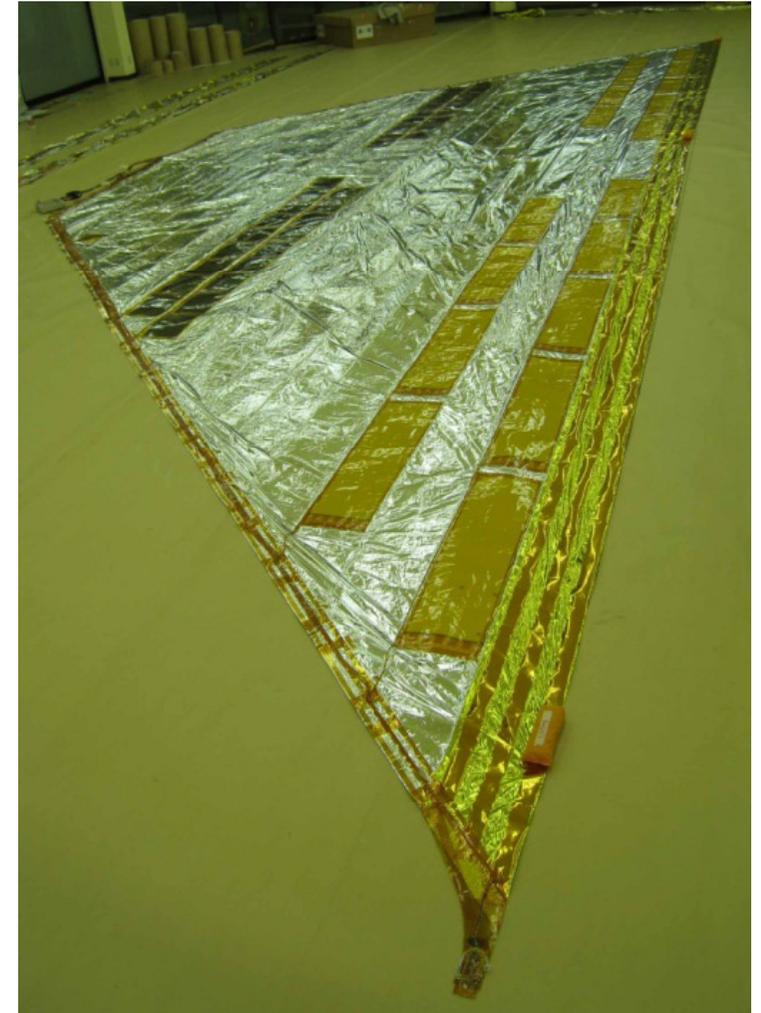
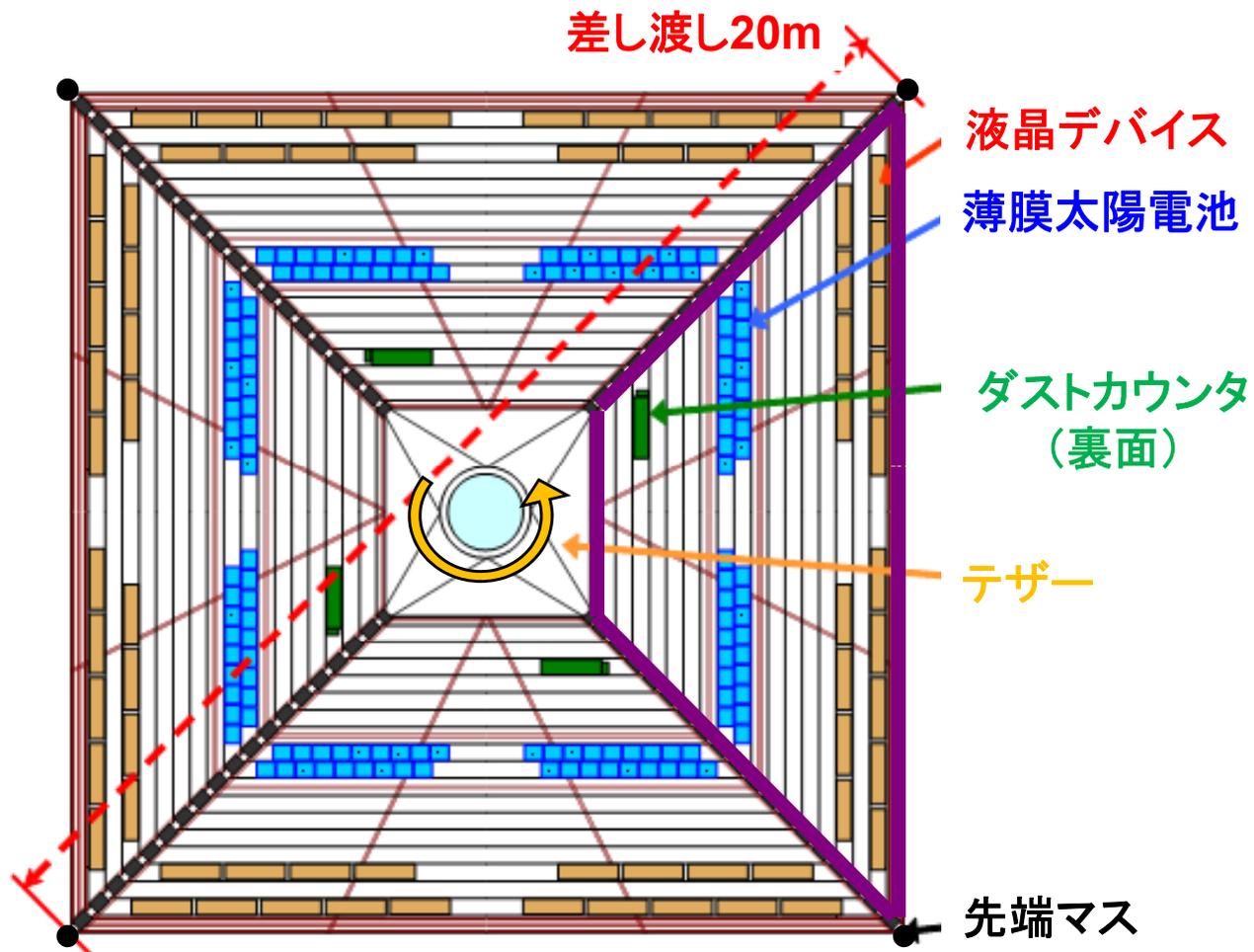
- ・光子加速状態での探査機の軌道決定技術を確認する。
- ・セイル操舵による光圧ベクトル(光子加速の方向)の能動的制御、および、それを用いた航法誘導技術を確認する。

# ミッションシーケンス

ミニマムサクセス：大型膜面の展開・展張，薄膜太陽電池による発電  
フルサクセス：ソーラーセイルによる加速実証・航行技術の獲得

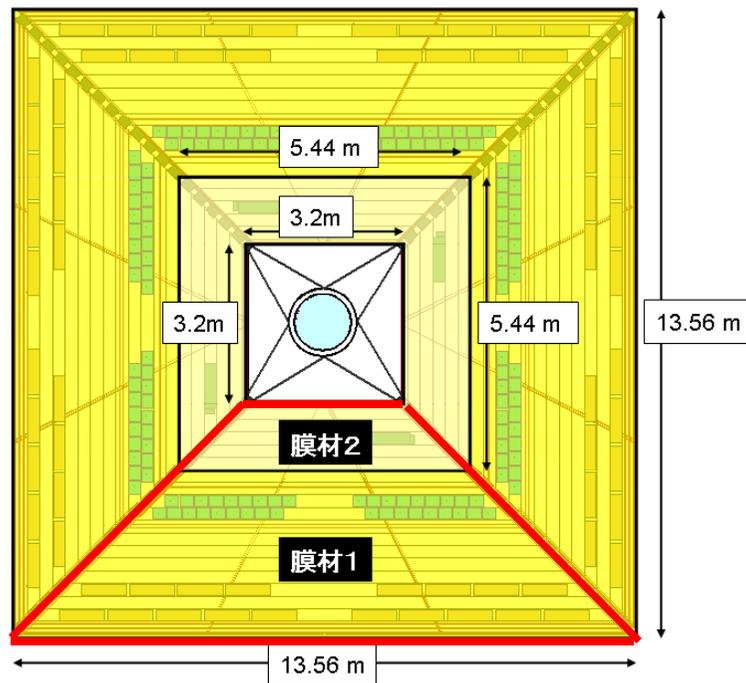


# 膜面形状・配置



- ・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)により展開・展張をサポート

# 膜面

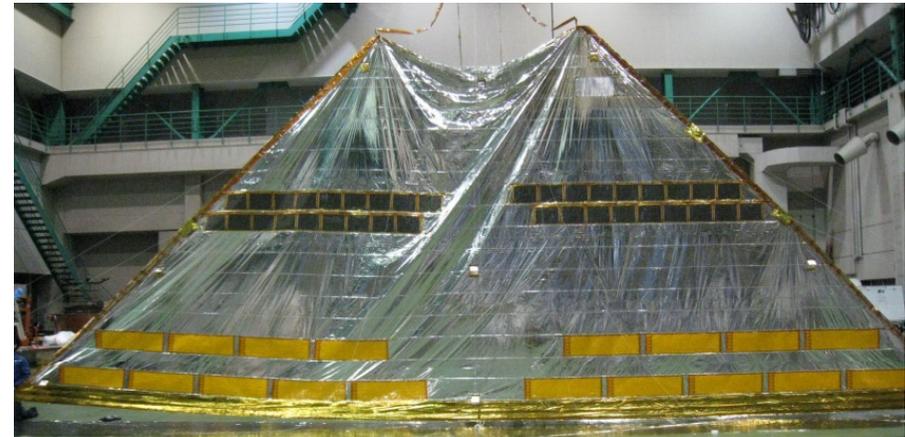


ポリイミド樹脂 (PI)

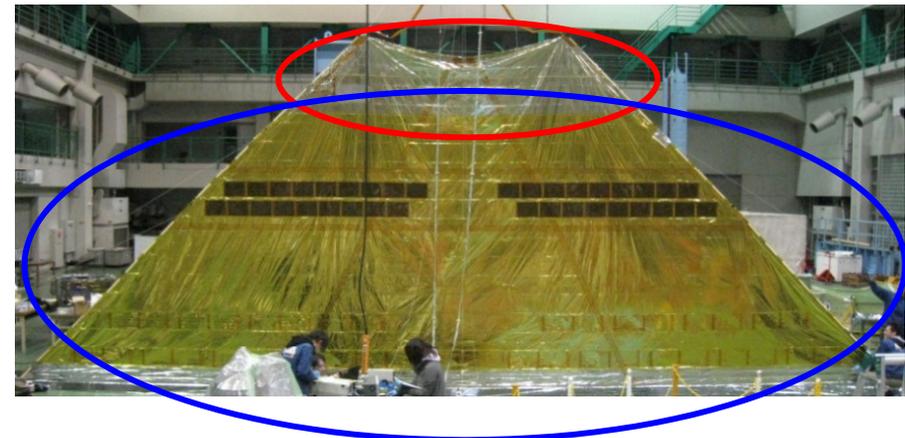
- ・厚さ: 7.5 $\mu$ m
- ・アルミ蒸着: 80nm (太陽面)
- ・補強処理: 16 or 50mmテープ (亀裂進展防止)

- ・膜材1: 接着膜 (市販品)
- ・膜材2: 熱融着膜 (新規開発品)

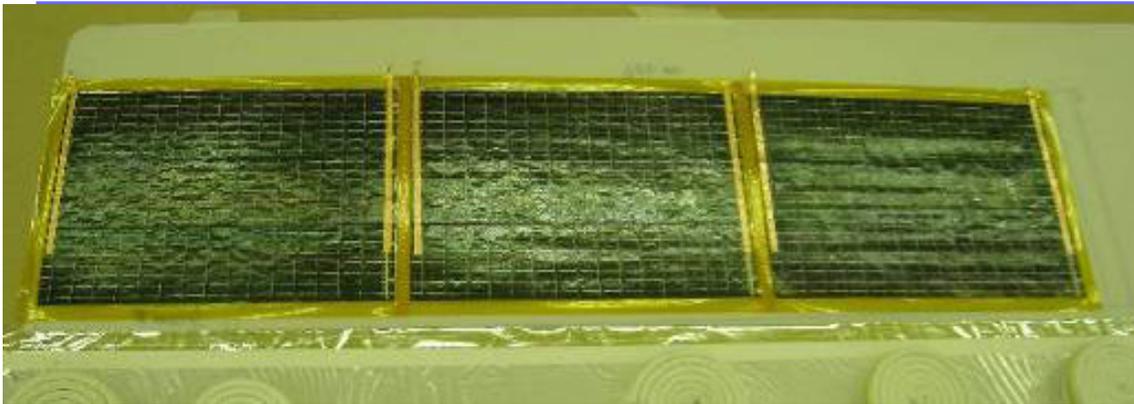
表面 (太陽面)



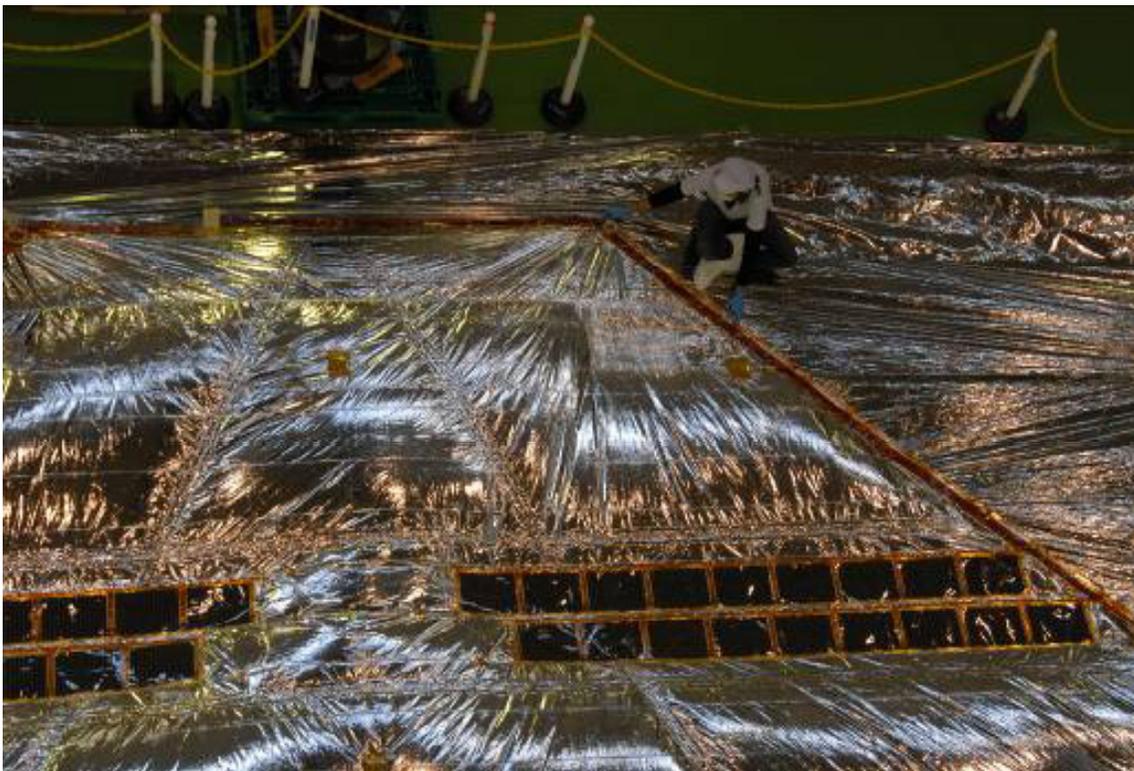
裏面 (反太陽面)



# 薄膜太陽電池・ハーネス



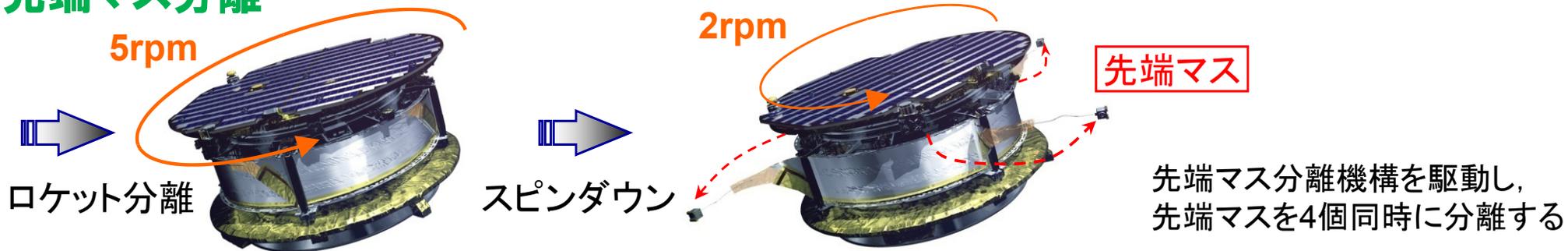
- アモルファスシリコンセル (a-Si)
- ・厚さ: 25 $\mu$ m
- ・効率: 5% (全体で数100W)



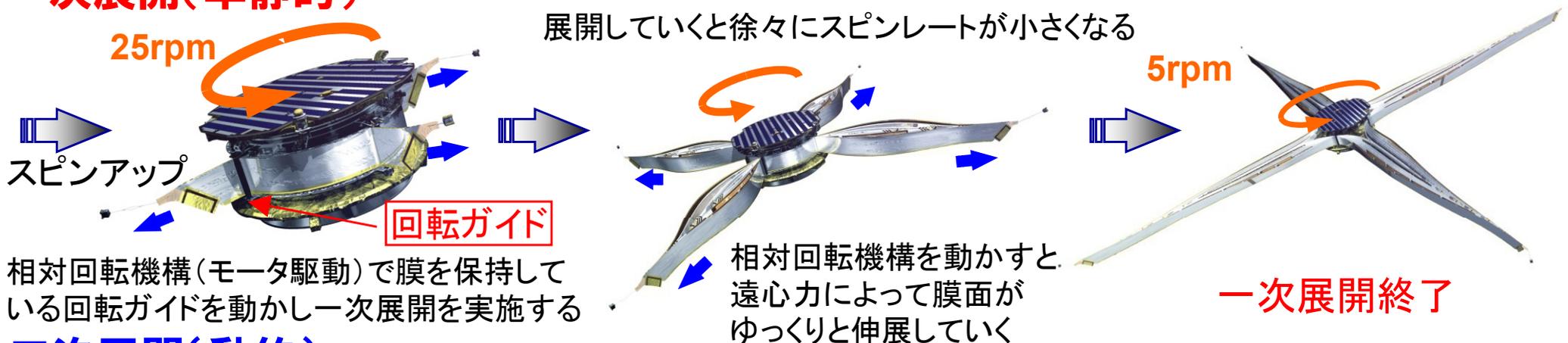
# 膜面展開手順・機構

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。

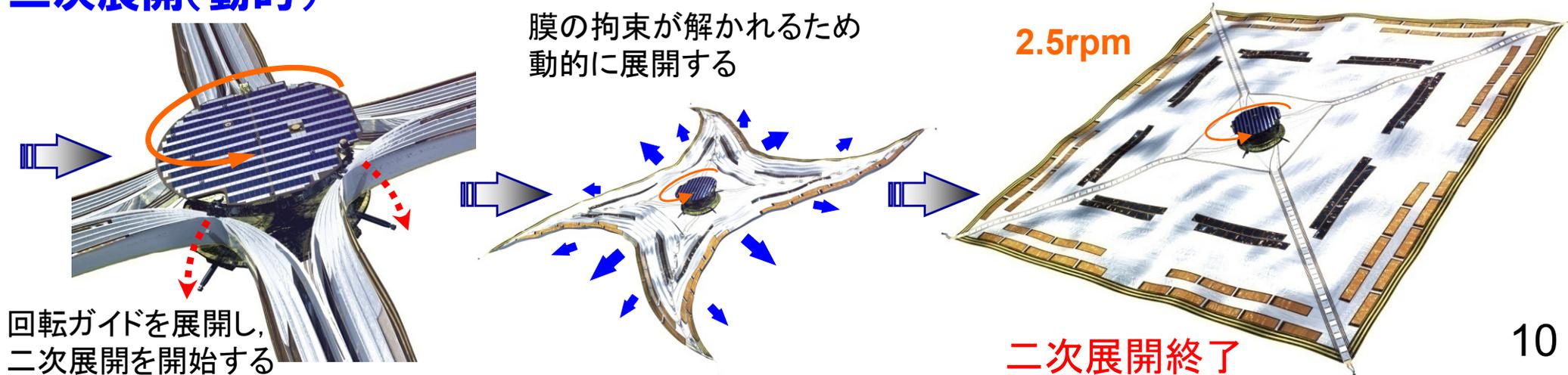
## 先端マス分離



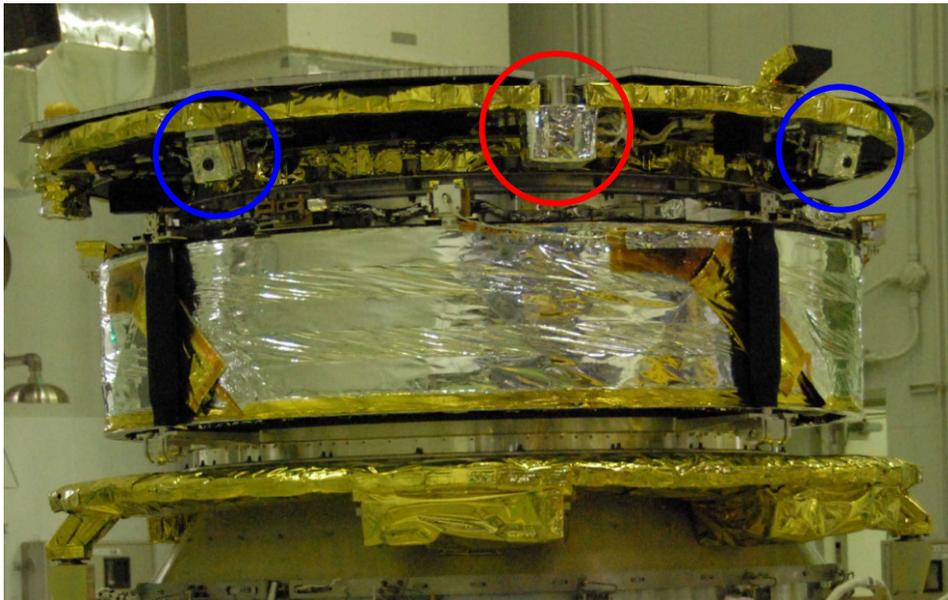
## 一次展開(準静的)



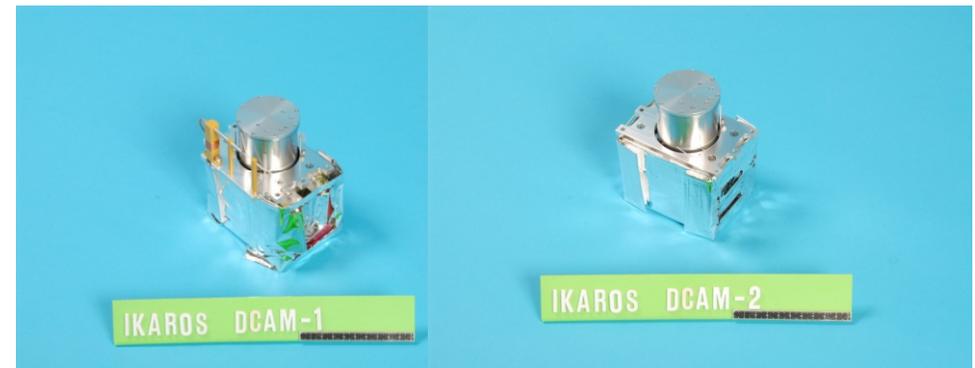
## 二次展開(動的)



# モニタカメラと分離カメラ



モニタカメラ(4台)

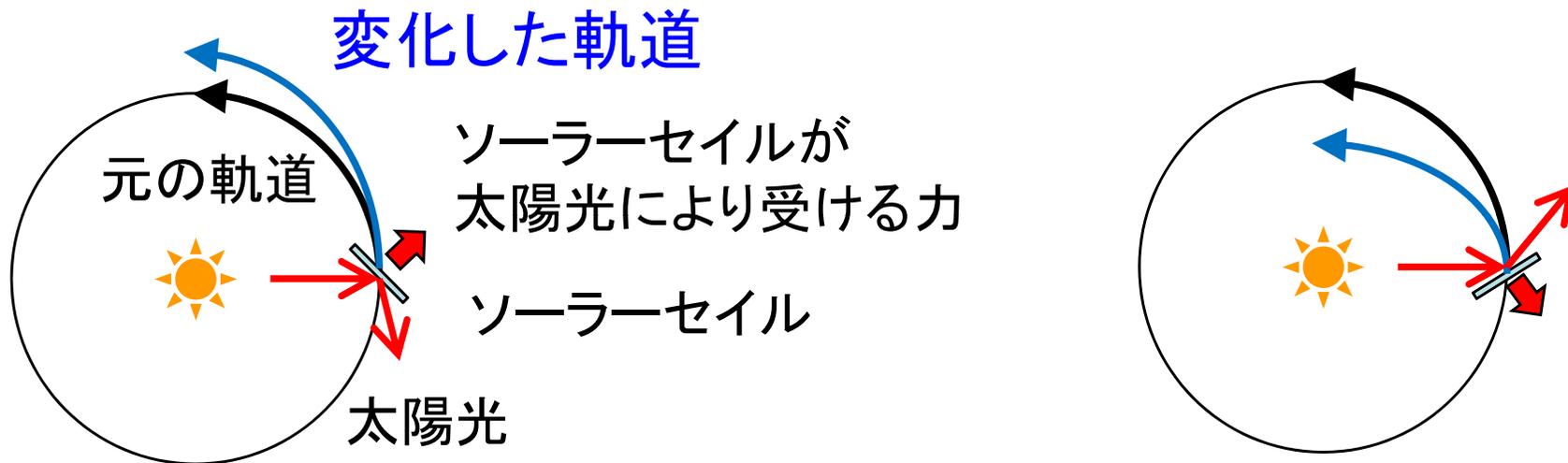


分離カメラ(2台)

# 太陽光による軌道制御

ソーラーセイルの向き（太陽角）を制御すれば軌道制御が可能となる。

## 軌道制御の原理



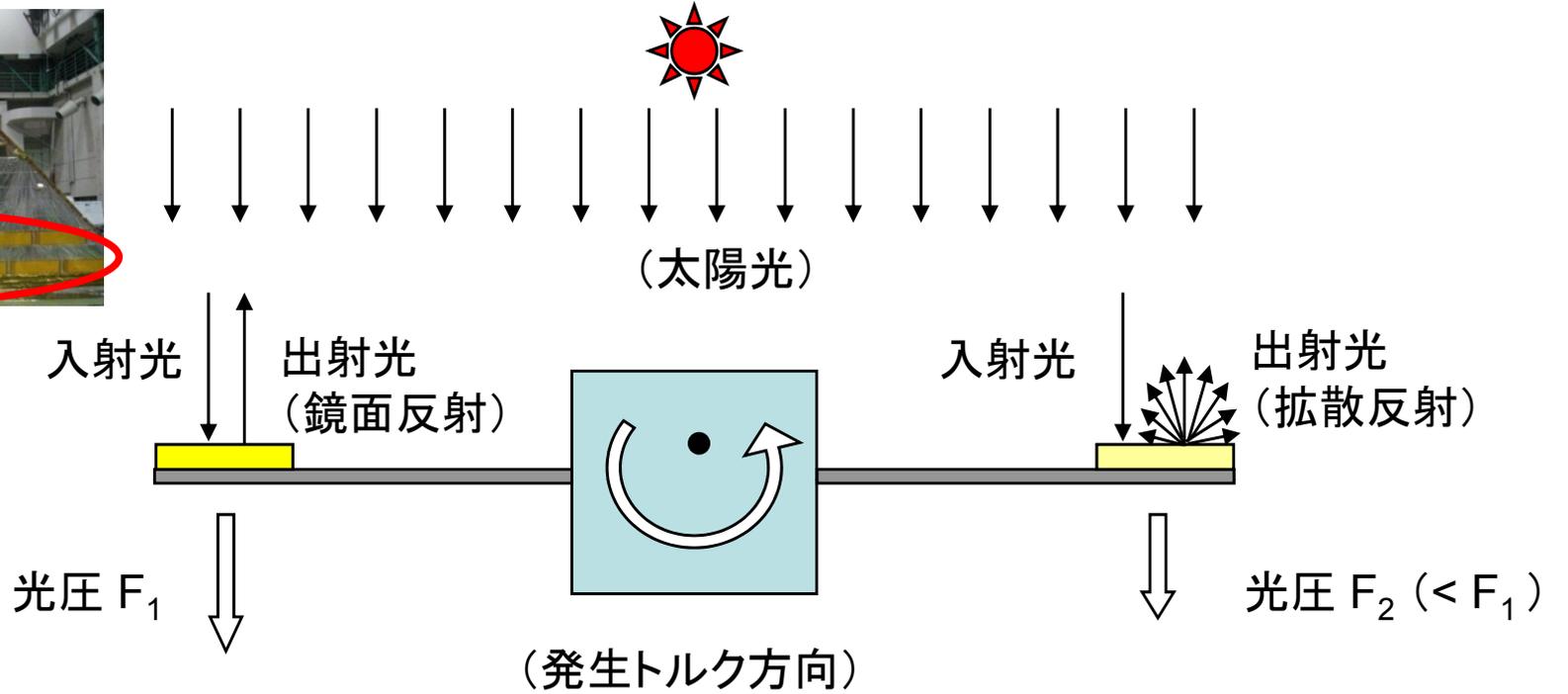
太陽から遠ざかる場合

太陽に近づく場合

## 姿勢制御の方策

- ガスジェットスラスタ(本体搭載)
- 液晶デバイス(膜面搭載)
- 太陽光圧トルク

# 液晶デバイス



電源ON

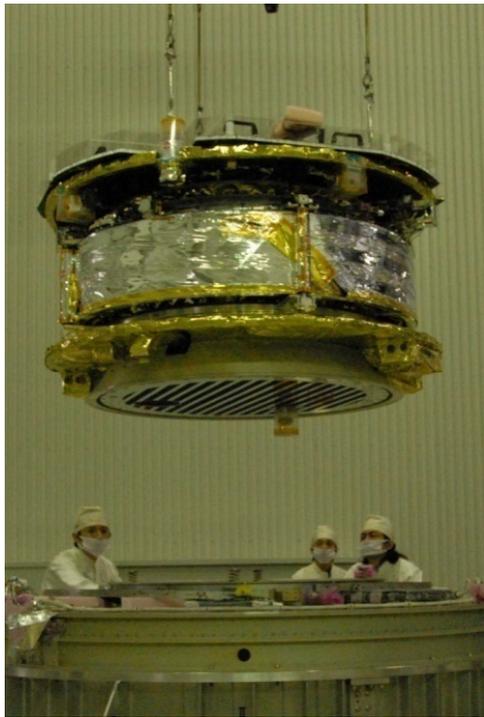


電源OFF

電氣的に光圧のアンバランス作り出す ⇒ 姿勢制御トルクを発生

# IKAROSの搭載・打ち上げ

2010年5月21日(金)6時58分22秒(日本標準時),  
H2Aロケット17号機により金星探査機「あかつき」と相乗りで  
種子島宇宙センターから打上げられた.



IKAROS搭載



H2Aロケット17号機



打ち上げ

# IKAROSの運用実績

---

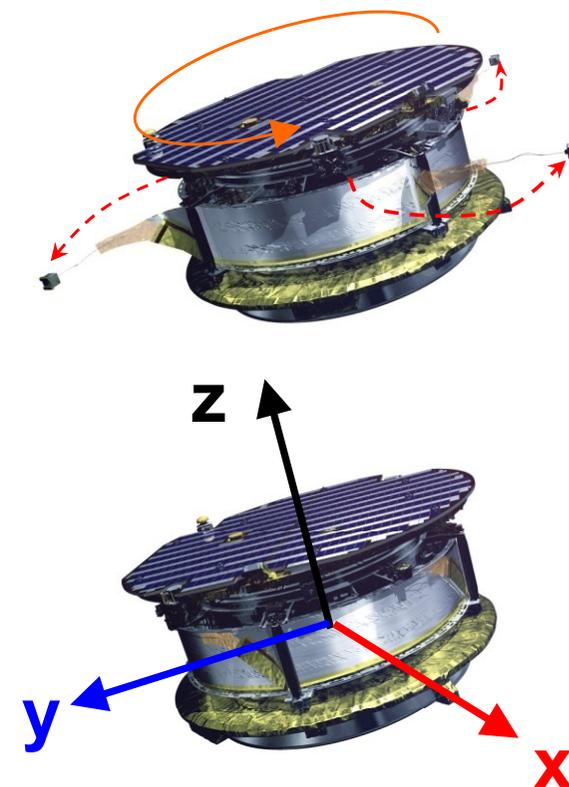
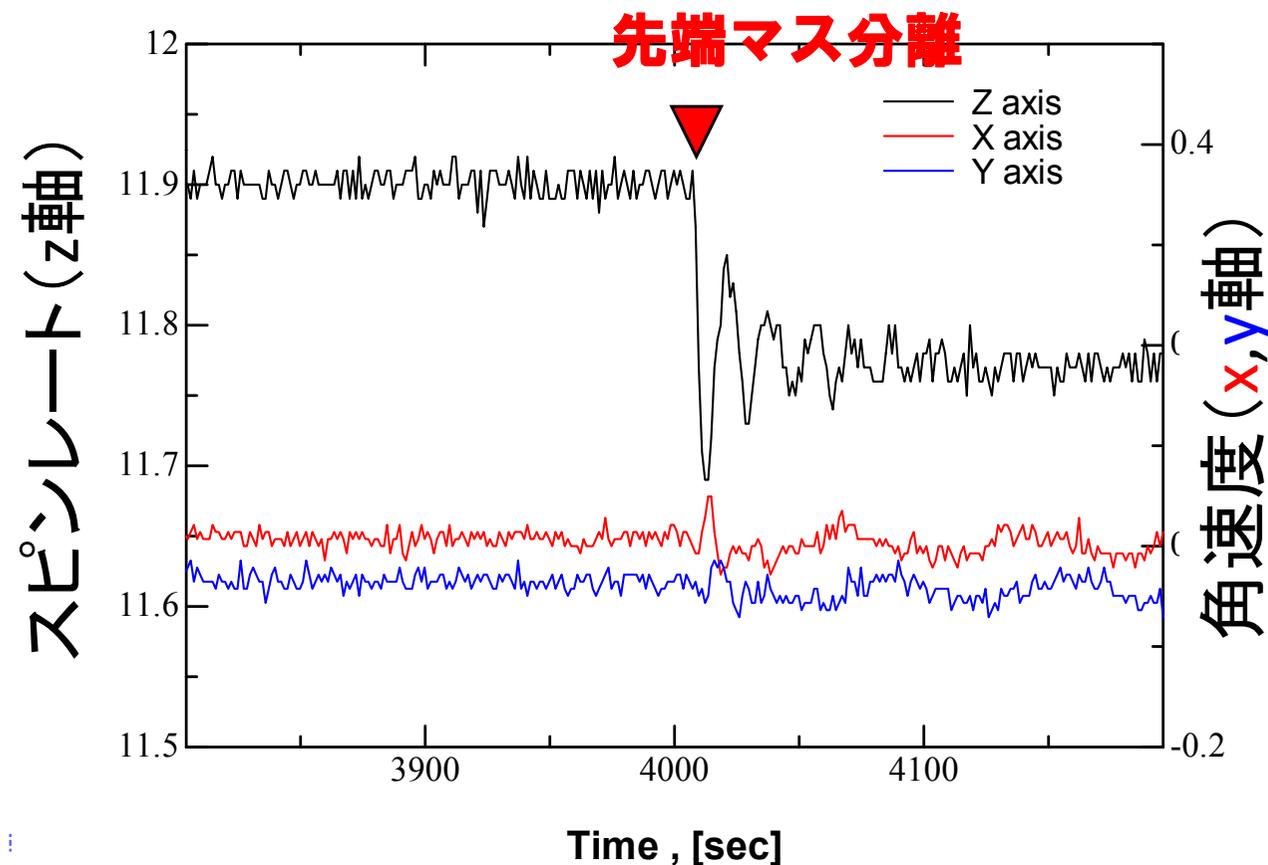
---

5月21日	打ち上げ・スピン分離⇒5rpm
5月23日～25日	スピンドアウン⇒2rpm
5月26日	先端マス分離
5月27日～29日	スピンアップ⇒25rpm
<b>6月2日～8日</b>	<b>一次展開を実施</b>
<b>6月9日</b>	<b>二次展開を実施</b>
<b>6月10日</b>	<b>薄膜太陽電池による発電の確認</b>
6月14日	分離カメラ2の撮像実験を実施
6月16日～18日	スピンドアウン⇒1rpm
6月19日	分離カメラ1の撮像実験を実施
6月21日～25日	オプション機器の立ち上げ, 観測・実験開始
<b>7月9日</b>	<b>光子加速の確認</b>
<b>7月13日</b>	<b>液晶デバイスによる姿勢制御の成功</b>
9月14日～17日	通信不可帯通過
<b>12月8日</b>	<b>金星フライバイ</b>
12月31日	定常運用終了→後期運用へ

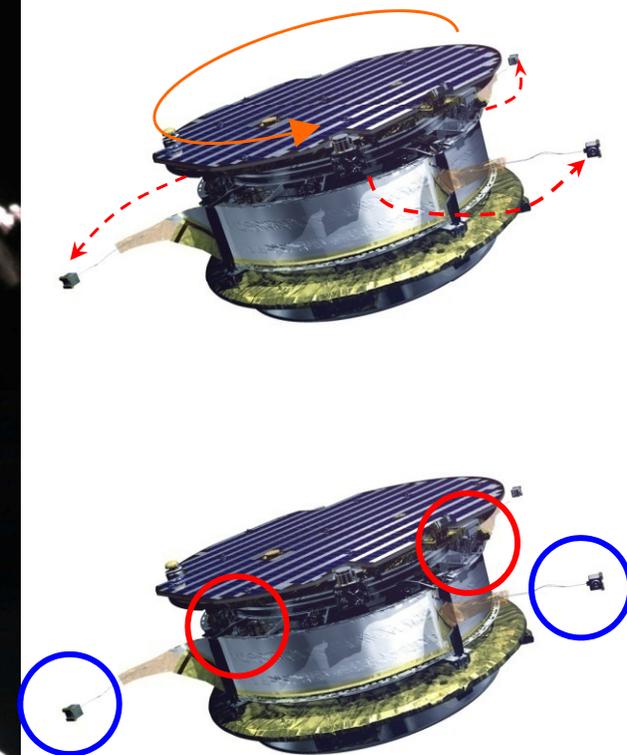
# 先端マス分離

5月26日に実施

ワイヤーテンション保持開放機構を駆動することによって、ワイヤーが緩み、先端マスを把持している機構が動作。先端マス4つを同時に本体から初速度0で分離。

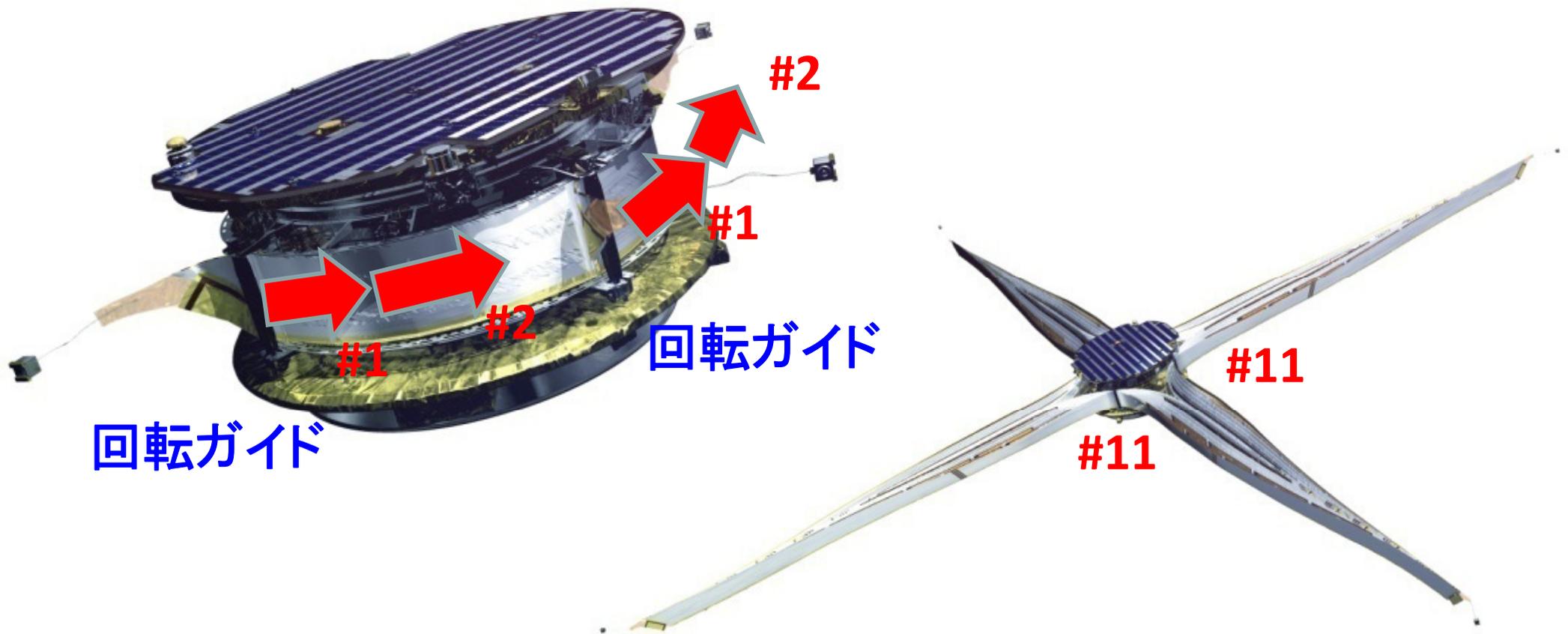


# モニタカメラ画像（先端マス分離後）



# 一次展開

- ・一次展開は相対回転機構を570deg回転
- ・一次展開を11シーケンスに分割して実行。  
⇒シーケンス間に姿勢データおよびモニタカメラ画像で展開を確認しながら進行

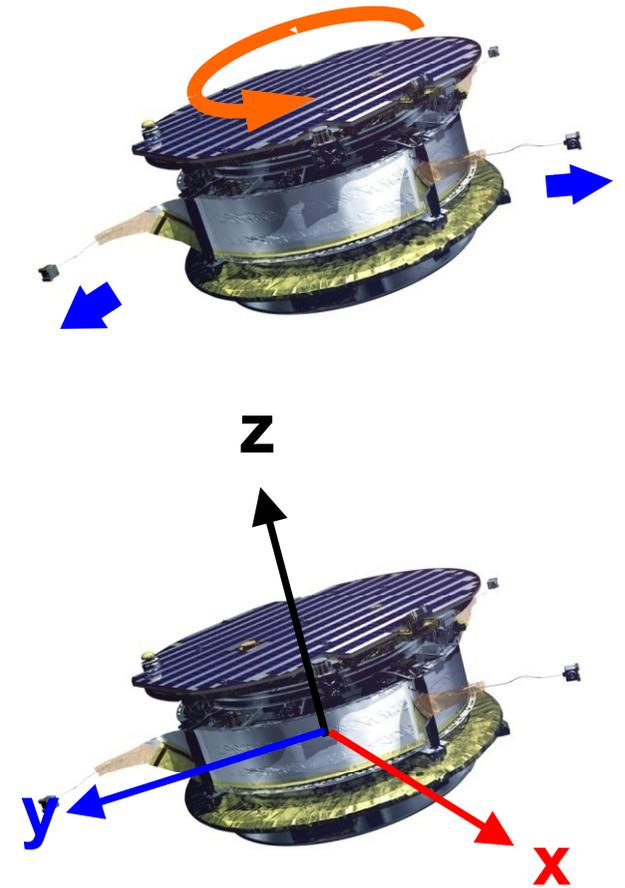
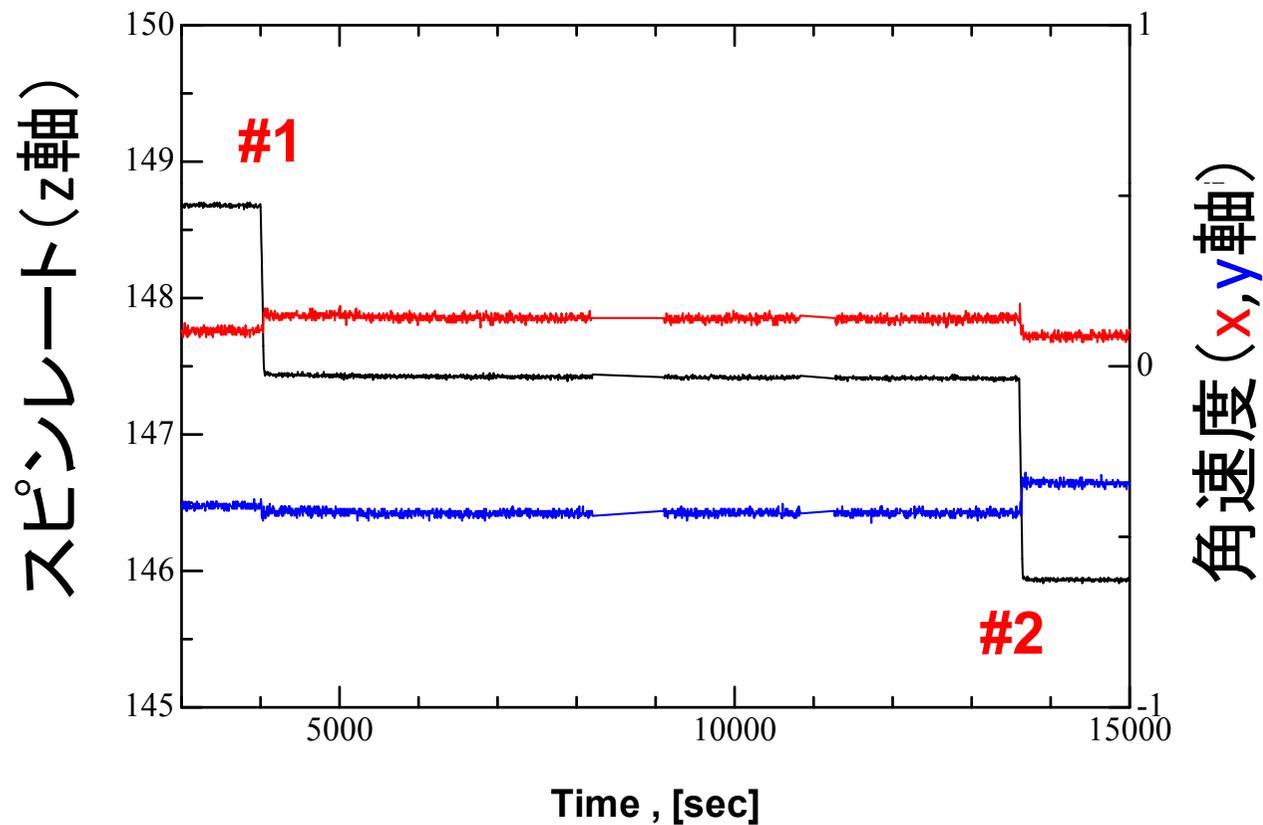


# 一次展開#1~#2

6月2日にシーケンスの#1~#2を実施

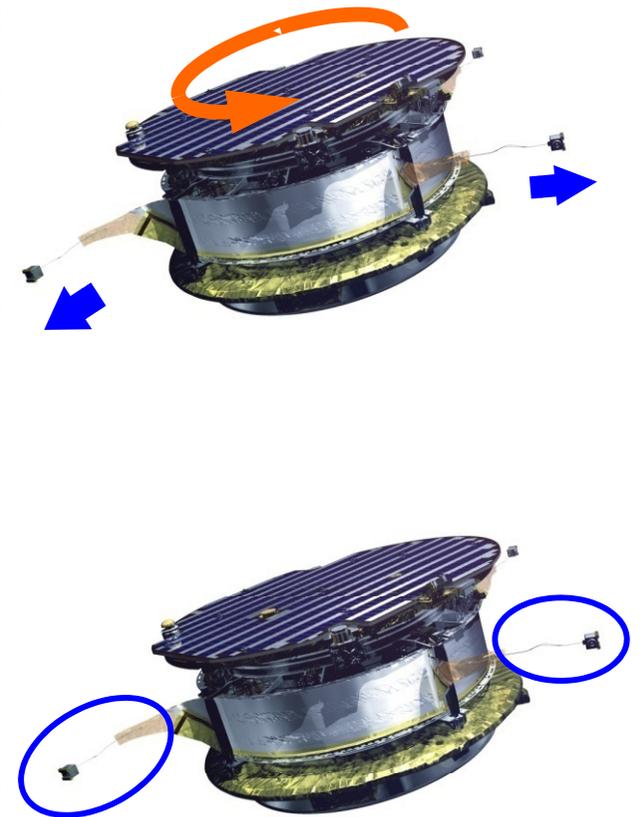
#1: 10degまで駆動 (10deg回転)

#2: 21degまで駆動 (11deg回転)



# モニタカメラ画像(#2動作中)

シーケンス#2の動作中にモニタカメラによって撮像した画像(3秒毎に撮像)



# 一次展開#3~#6

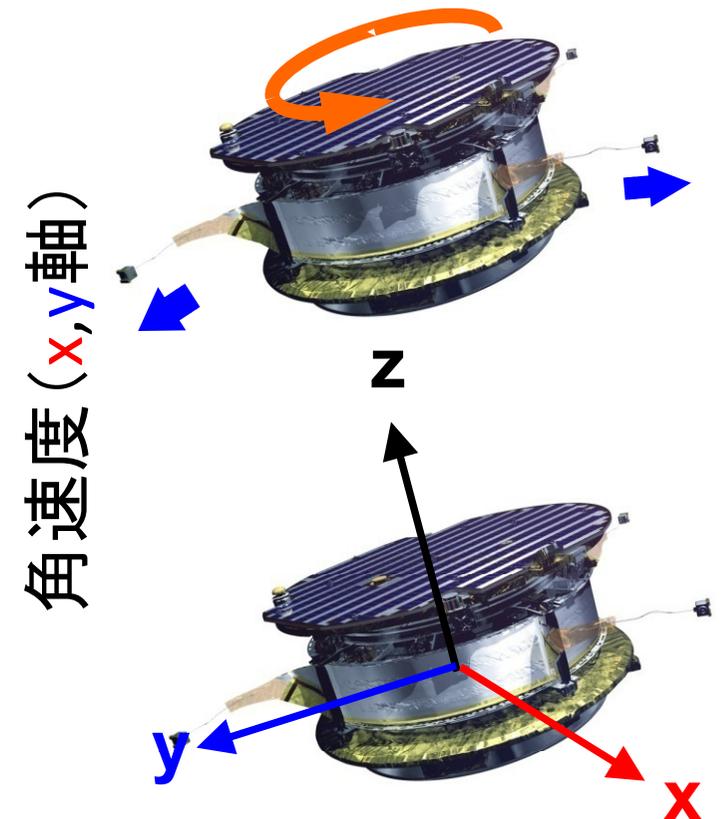
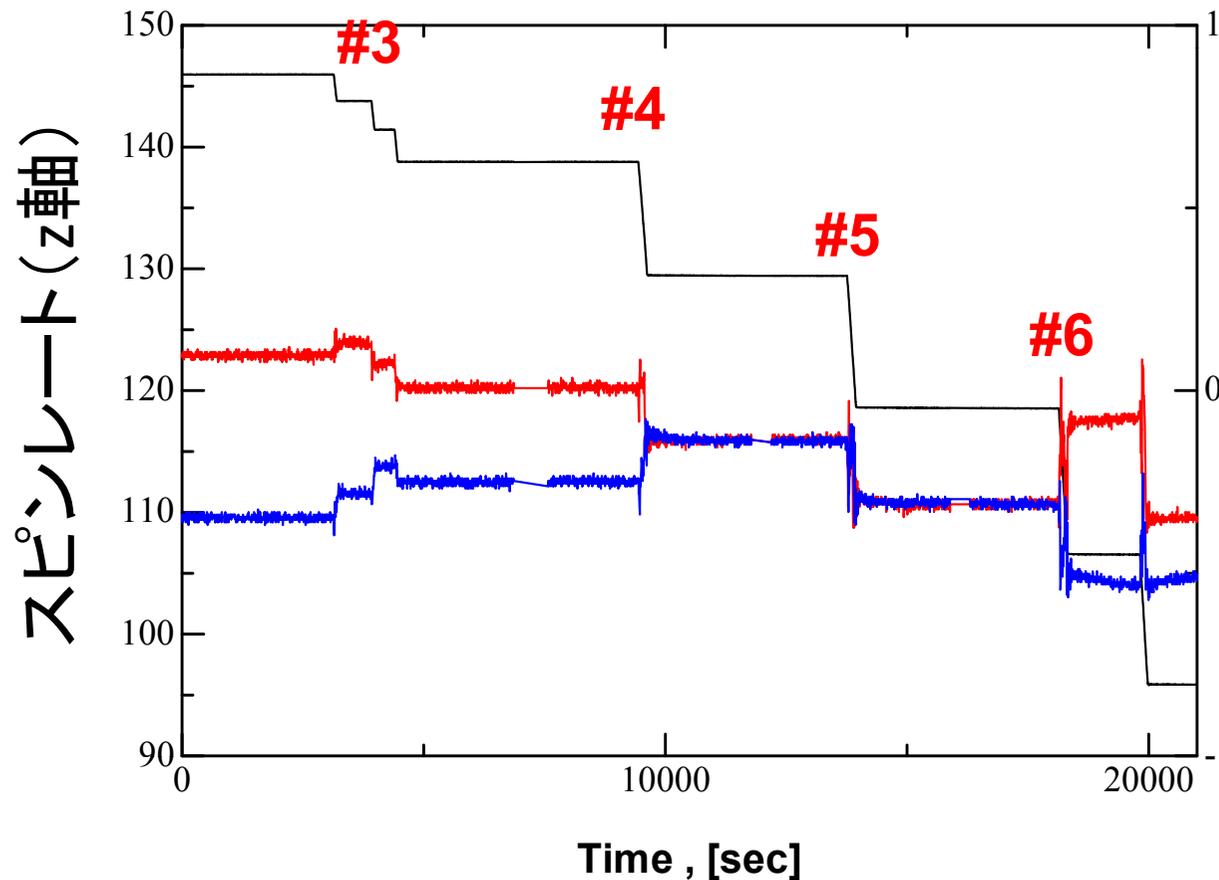
6月3日にシーケンス#3~#6を実施

#3: 66degまで駆動 (45deg回転, 15degずつ3分割)

#4: 111degまで駆動 (45deg回転)

#5: 156degまで駆動 (45deg回転)

#6: 246degまで駆動 (90deg回転, 45degずつ2分割)



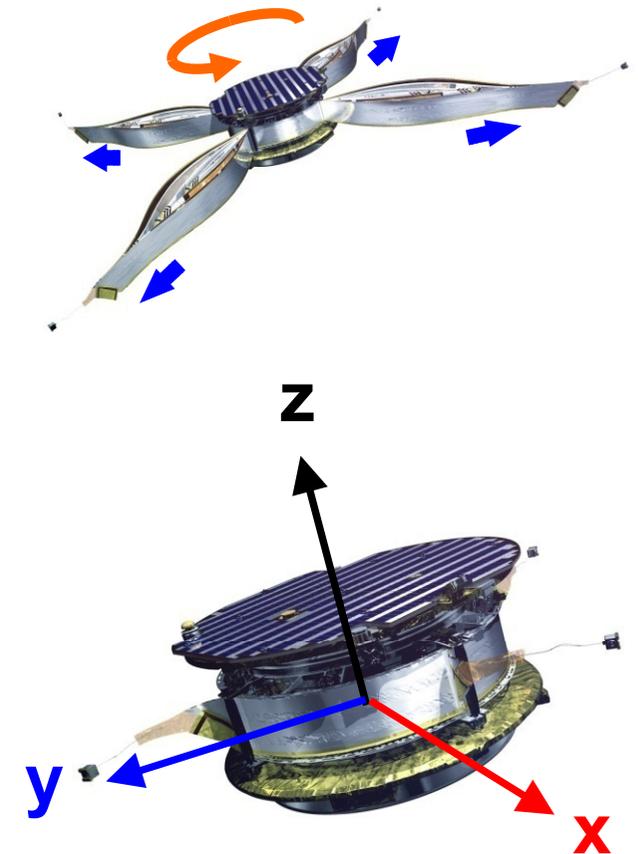
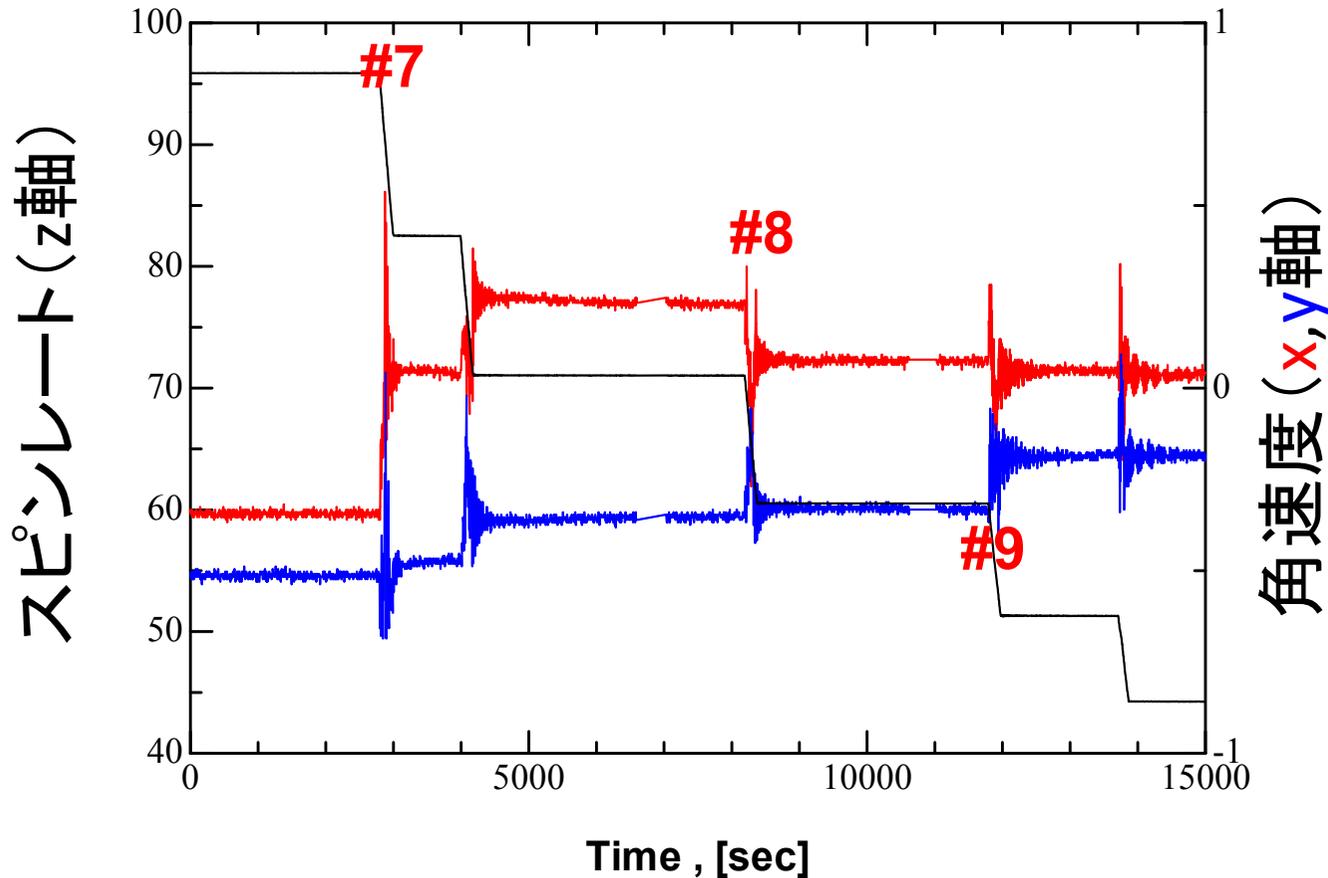
# 一次展開#7~#9

6月4日にシーケンス#7~#9を実施

#7: 336degまで駆動 (90deg回転, 45degずつ2分割)

#8: 381degまで駆動 (45deg回転)

#9: 471degまで駆動 (90deg回転, 45degずつ2分割)



# モニタカメラ画像(#8終了後)

シーケンス#8終了

モニタカメラ1



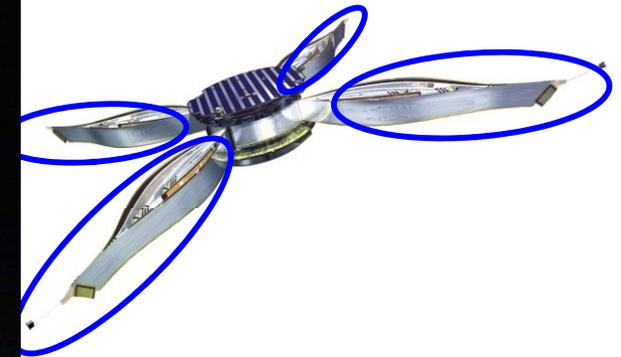
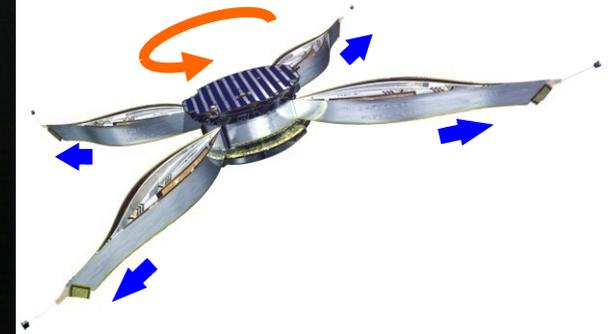
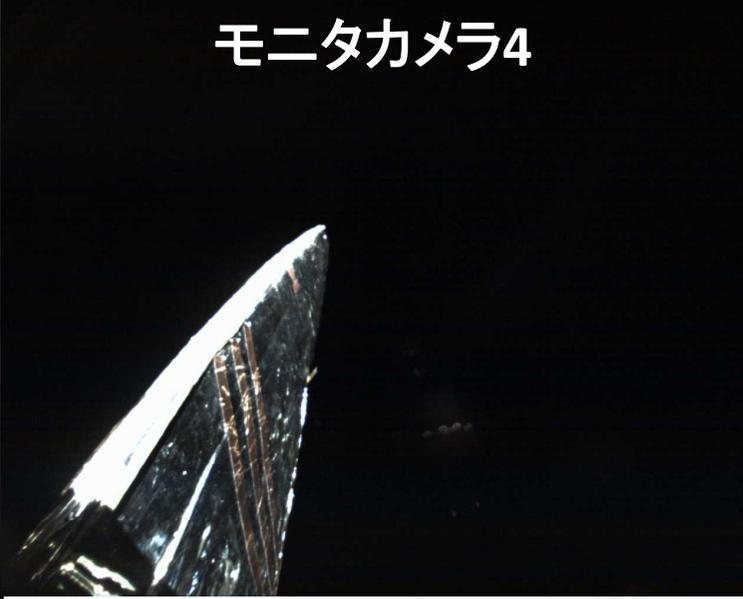
モニタカメラ2



モニタカメラ3



モニタカメラ4

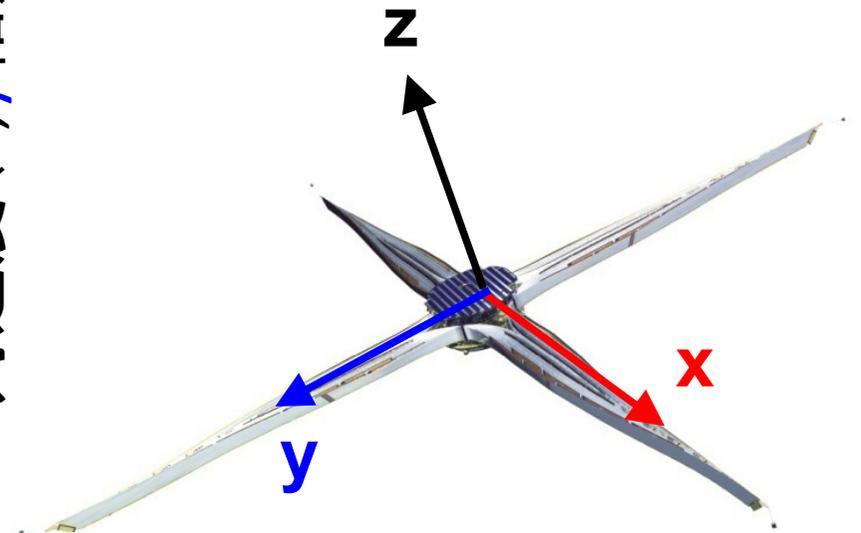
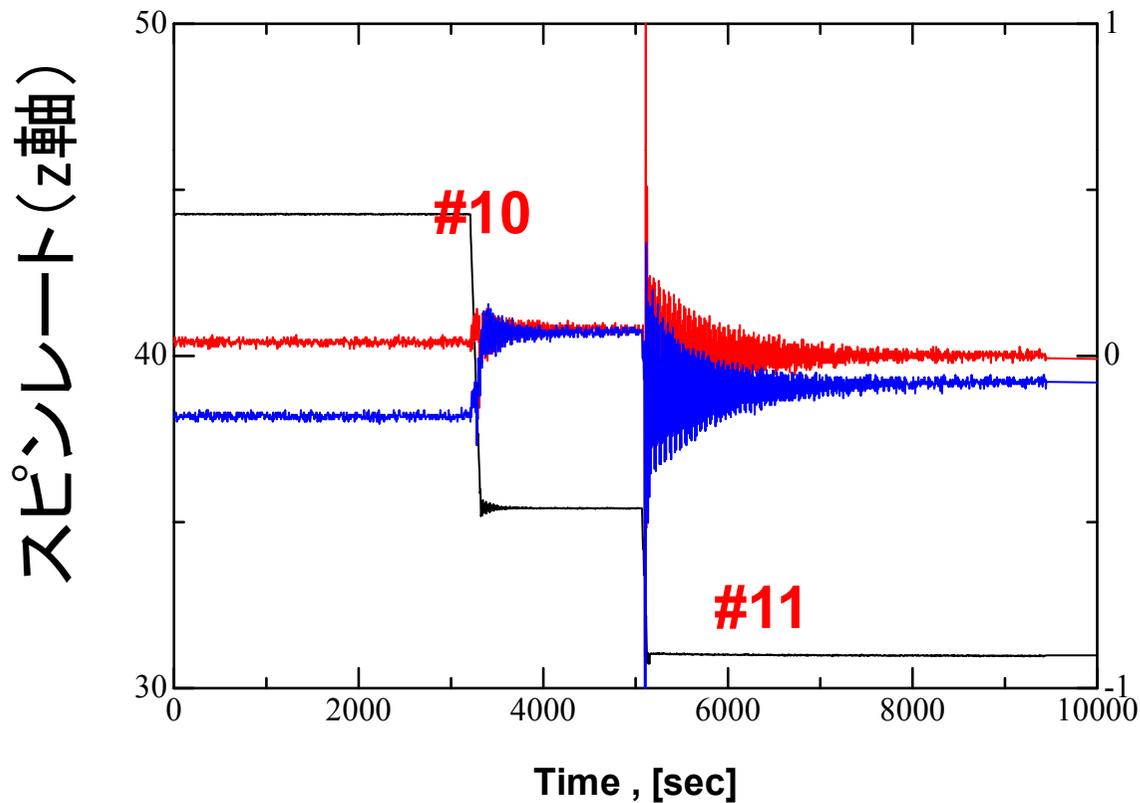


# 一次展開#10~#11

6月8日にシーケンス#10,#11を実施

#10:530degまで駆動 (59deg回転, 30degずつ2分割)

#11:570degまで駆動 (40deg回転)



# モニタカメラ画像(#11終了後)

シーケンス#11終了

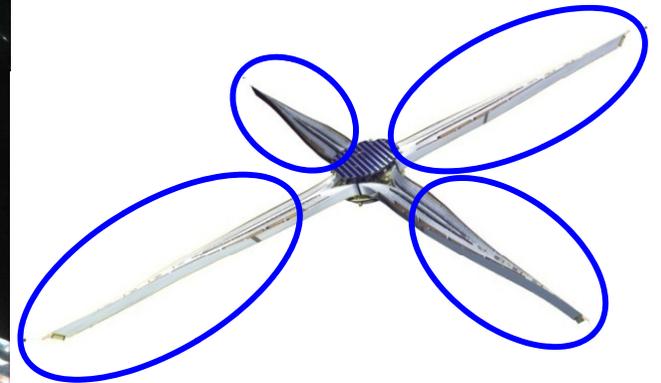
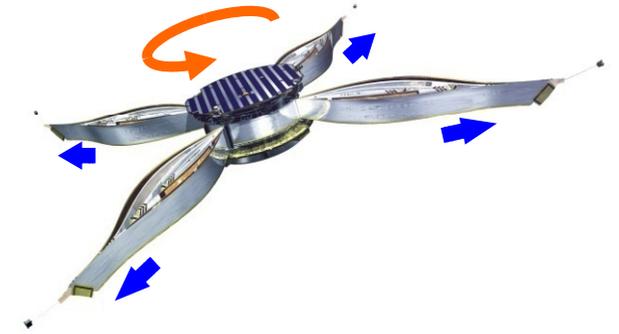
モニタカメラ1

モニタカメラ2



モニタカメラ3

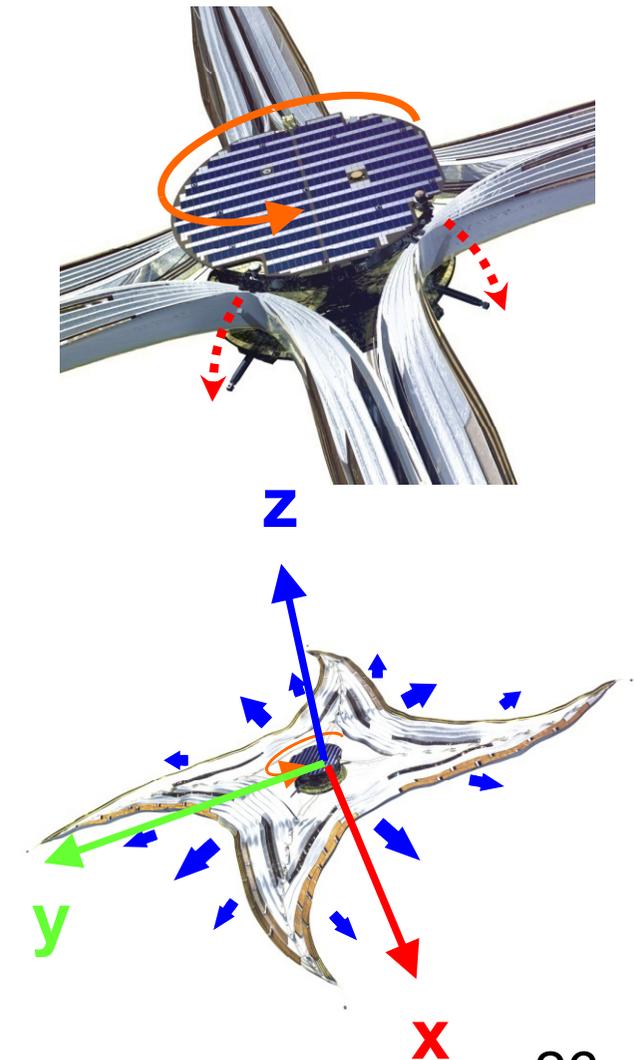
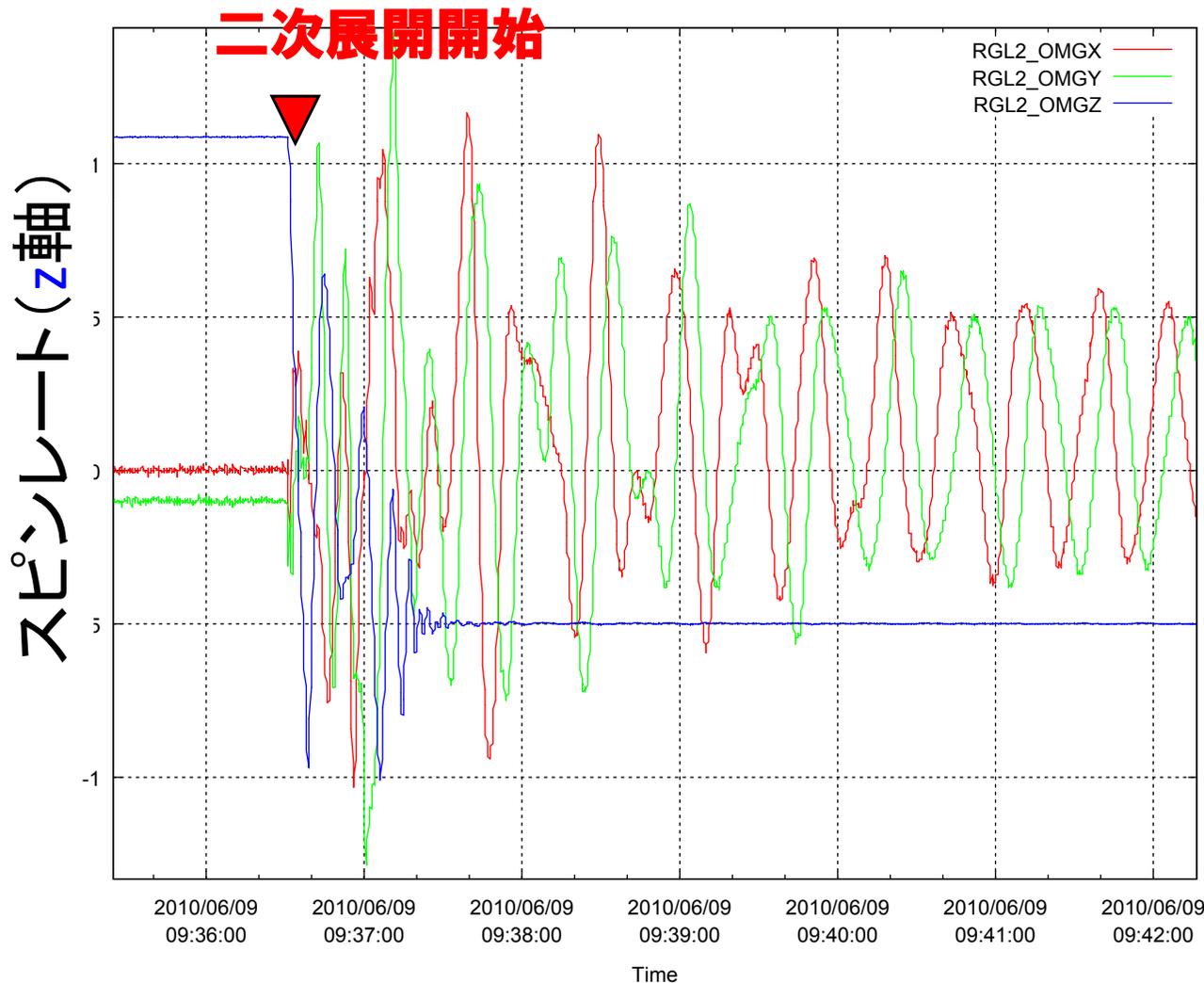
モニタカメラ4



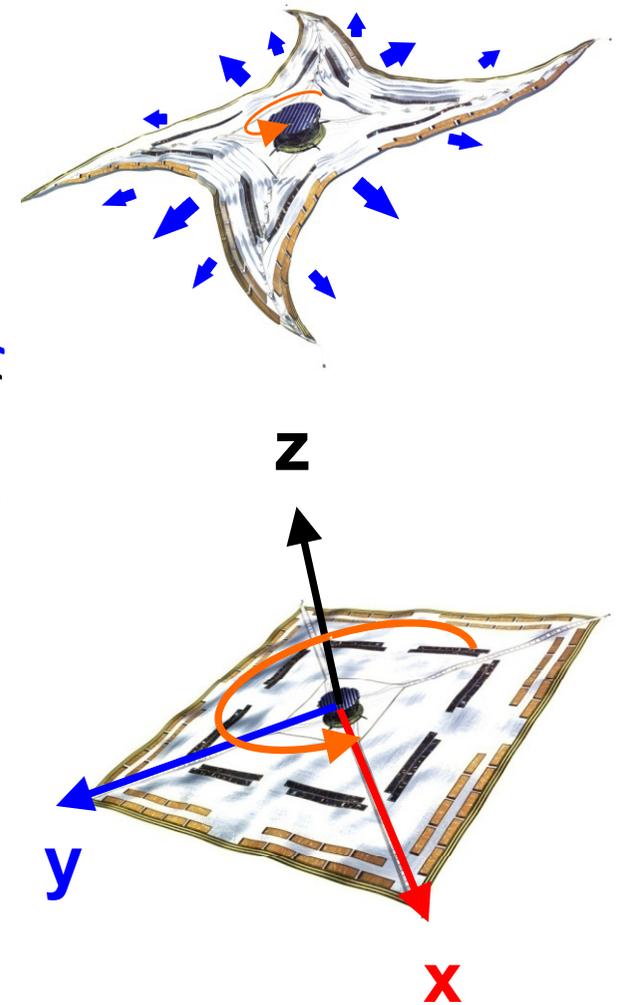
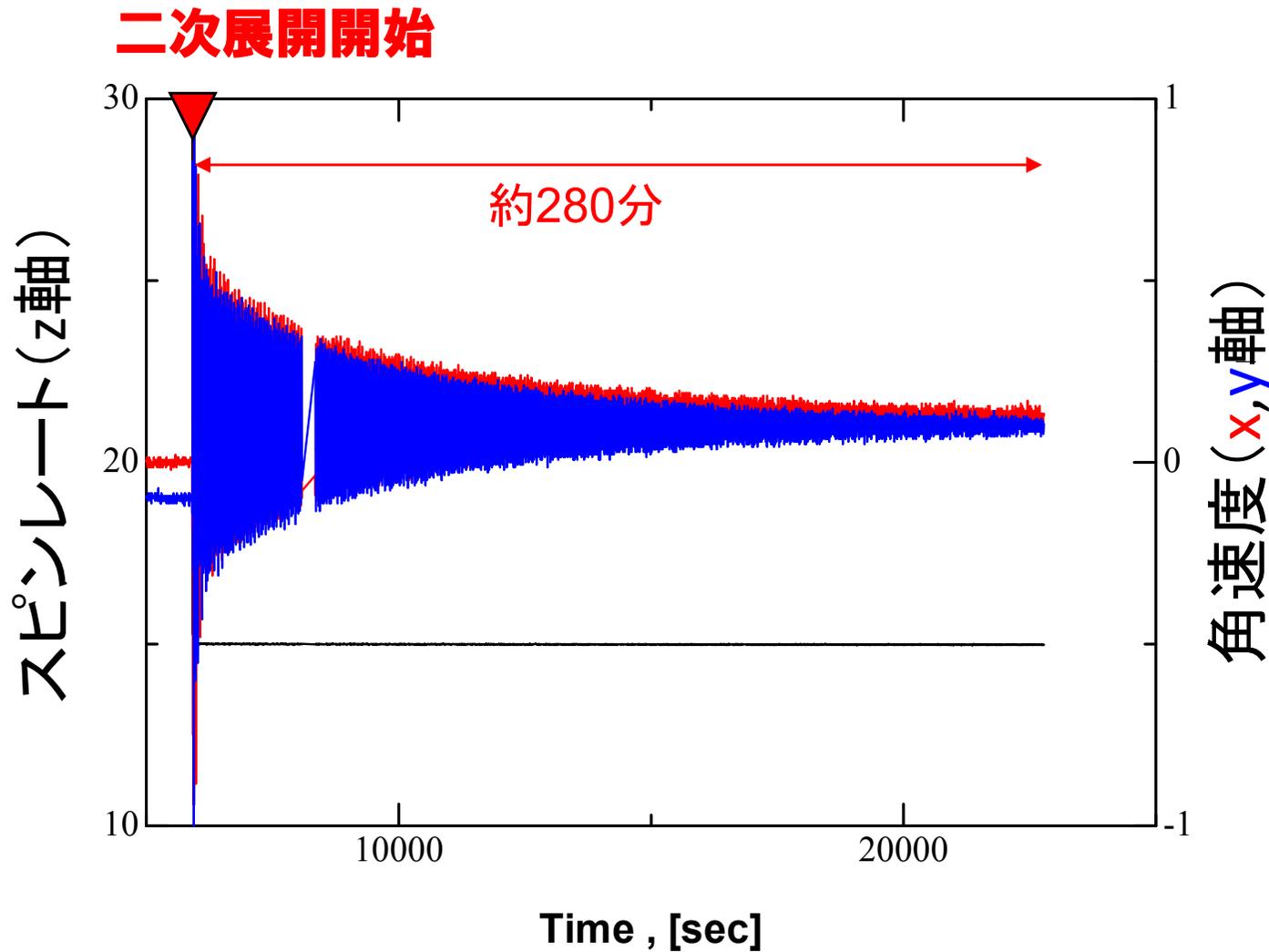
# 二次展開

6月9日に二次展開を実施

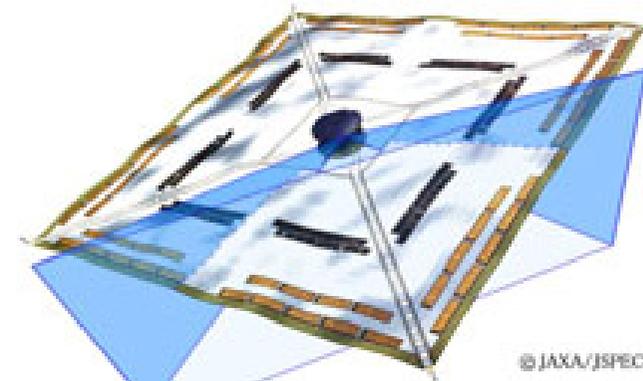
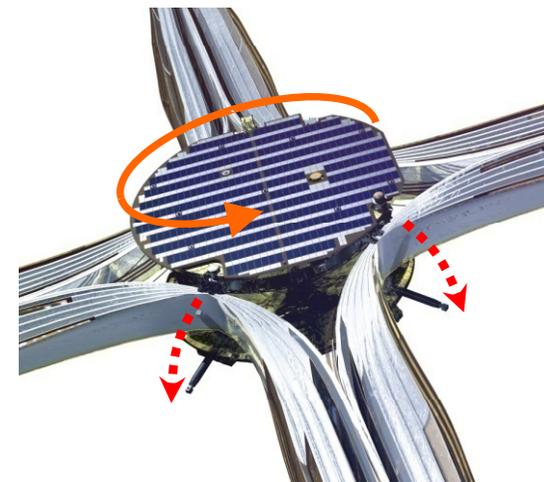
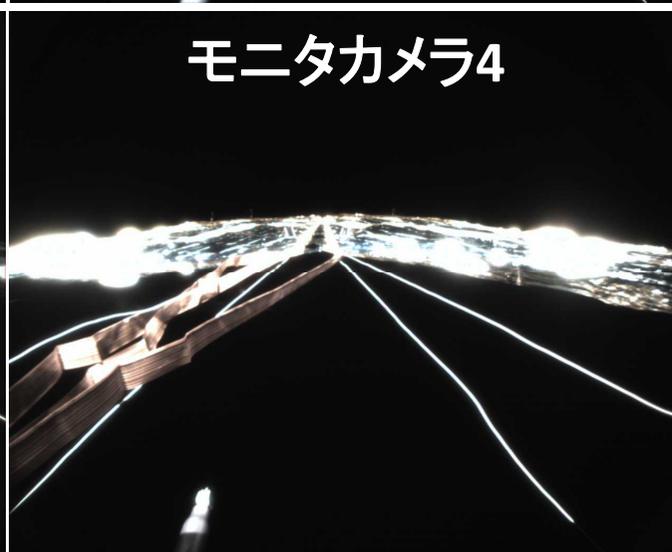
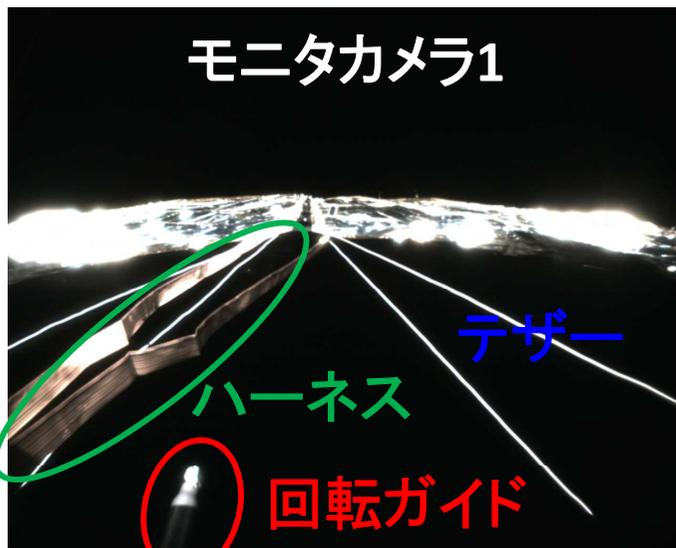
回転ガイド展開機構を駆動することによって4本の回転ガイドがほぼ同時に110deg展開され、十字の状態から動的に展開される



# 二次展開後の振動減衰



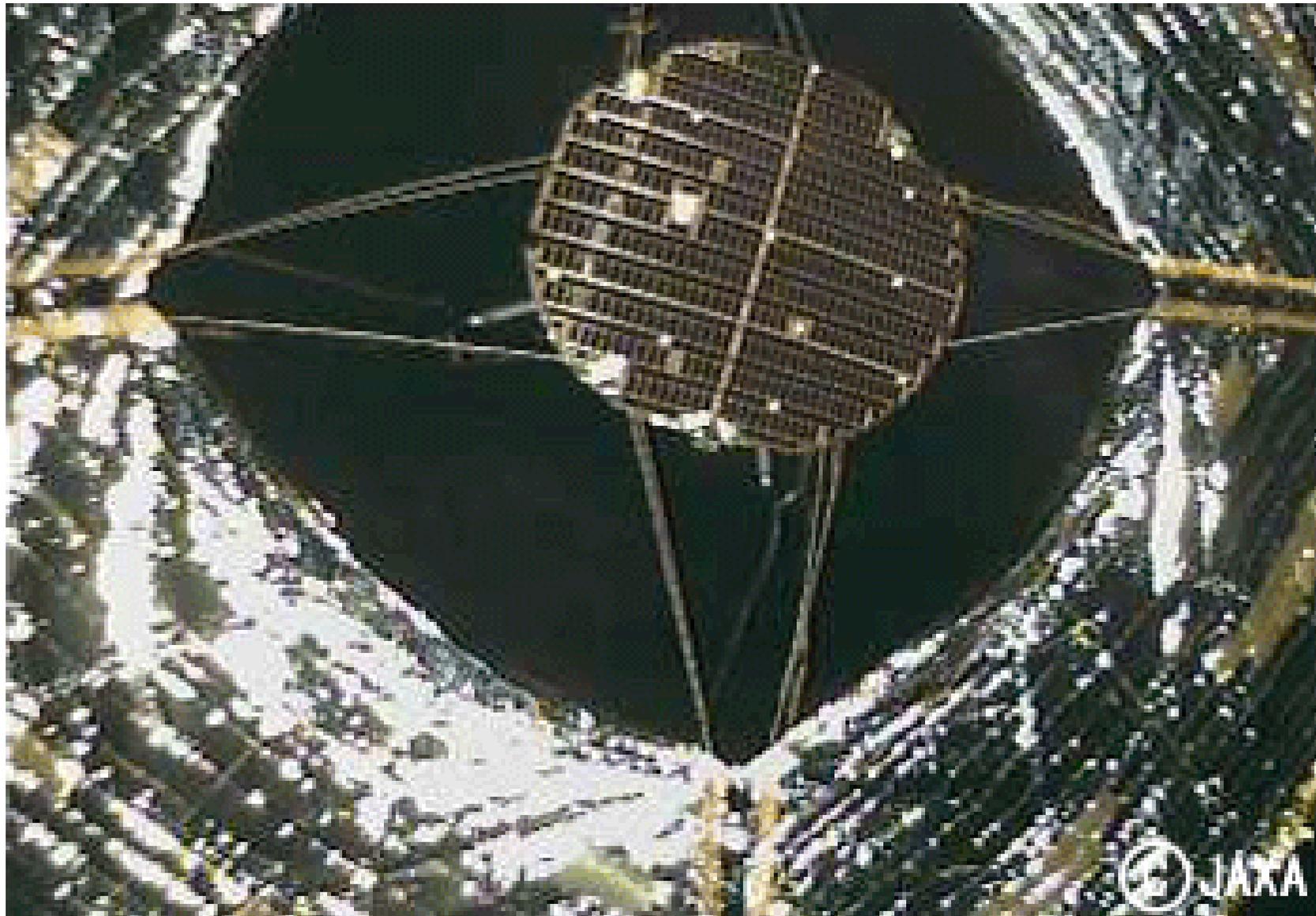
# モニタカメラ画像（二次展開終了後）



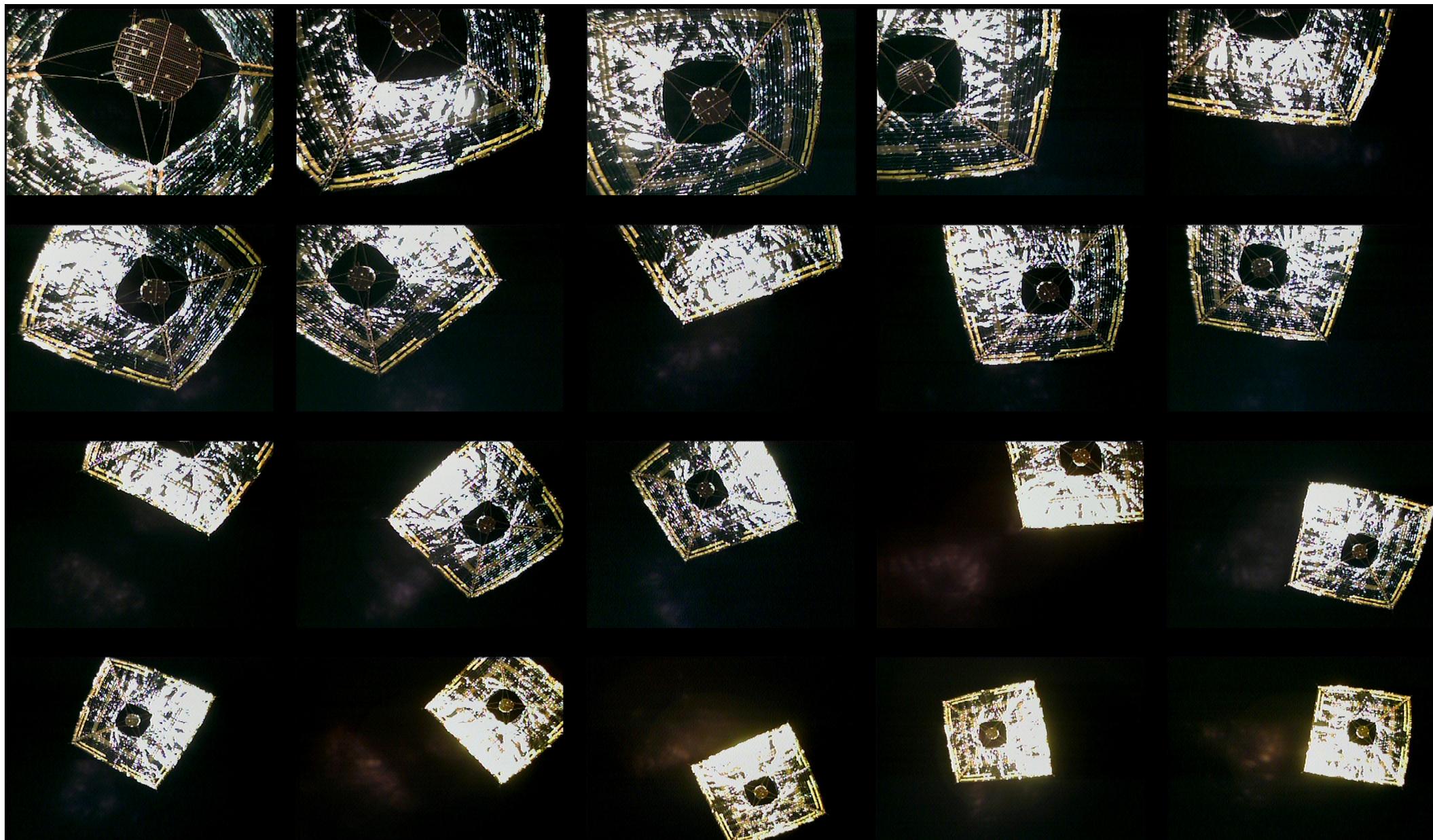
# 分離カメラ2実験

6月14日に分離カメラ2の撮像実験を実施

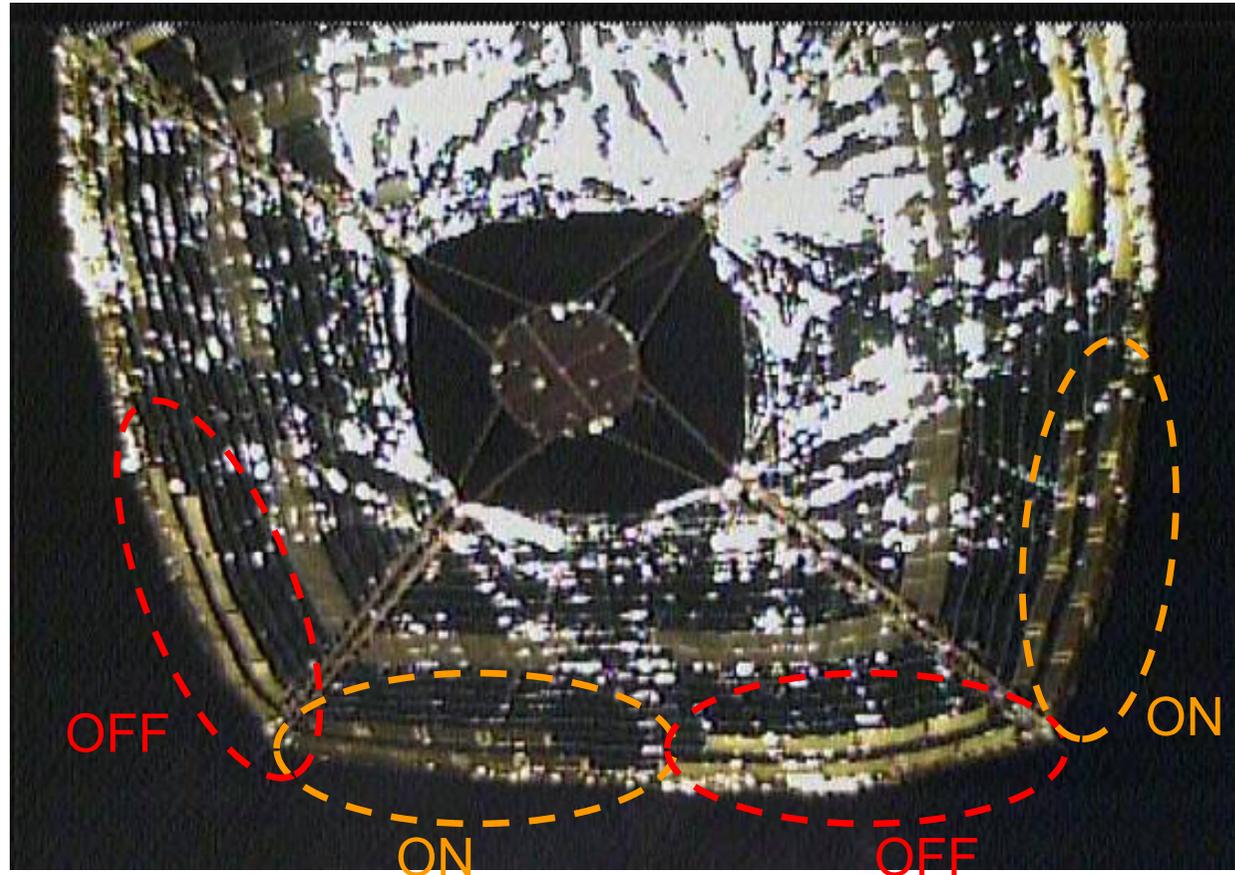
分離速度: 65cm/sec(推定), スピンレート: 2.5rpm



# 分離カメラ2画像



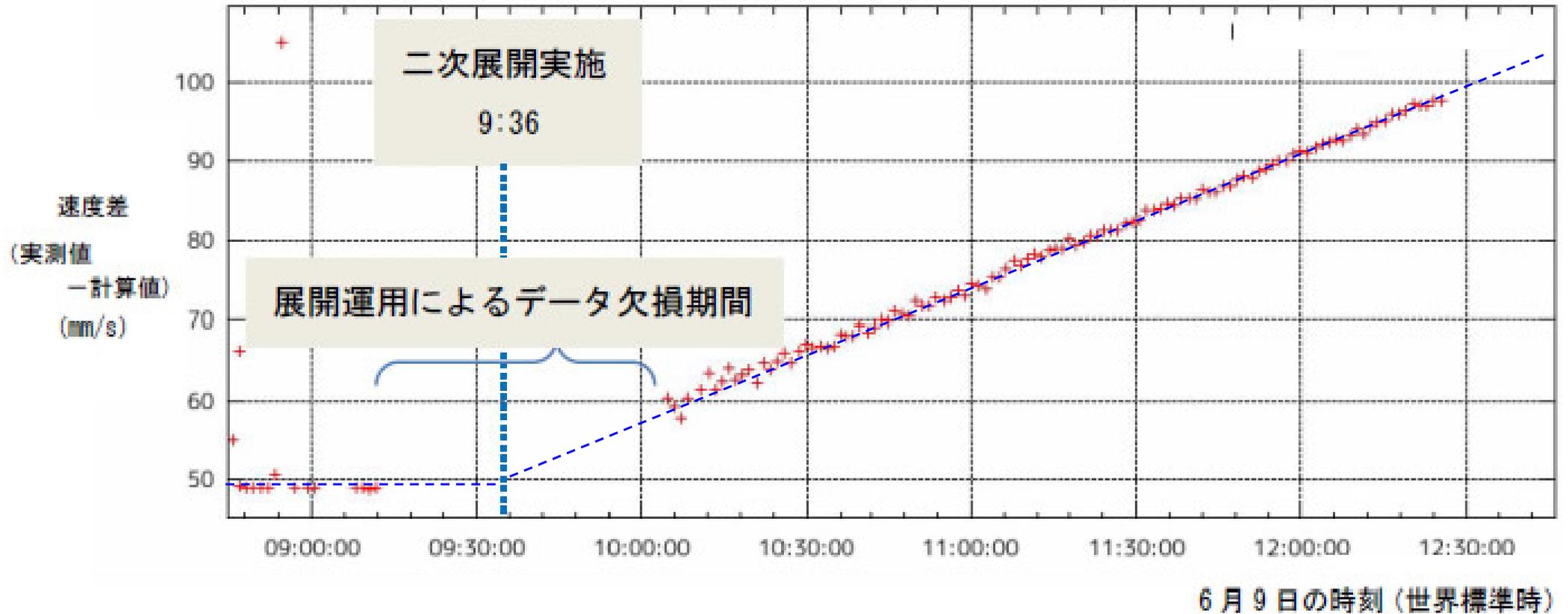
# 液晶デバイスの動作確認



(鏡面反射)

(拡散反射)

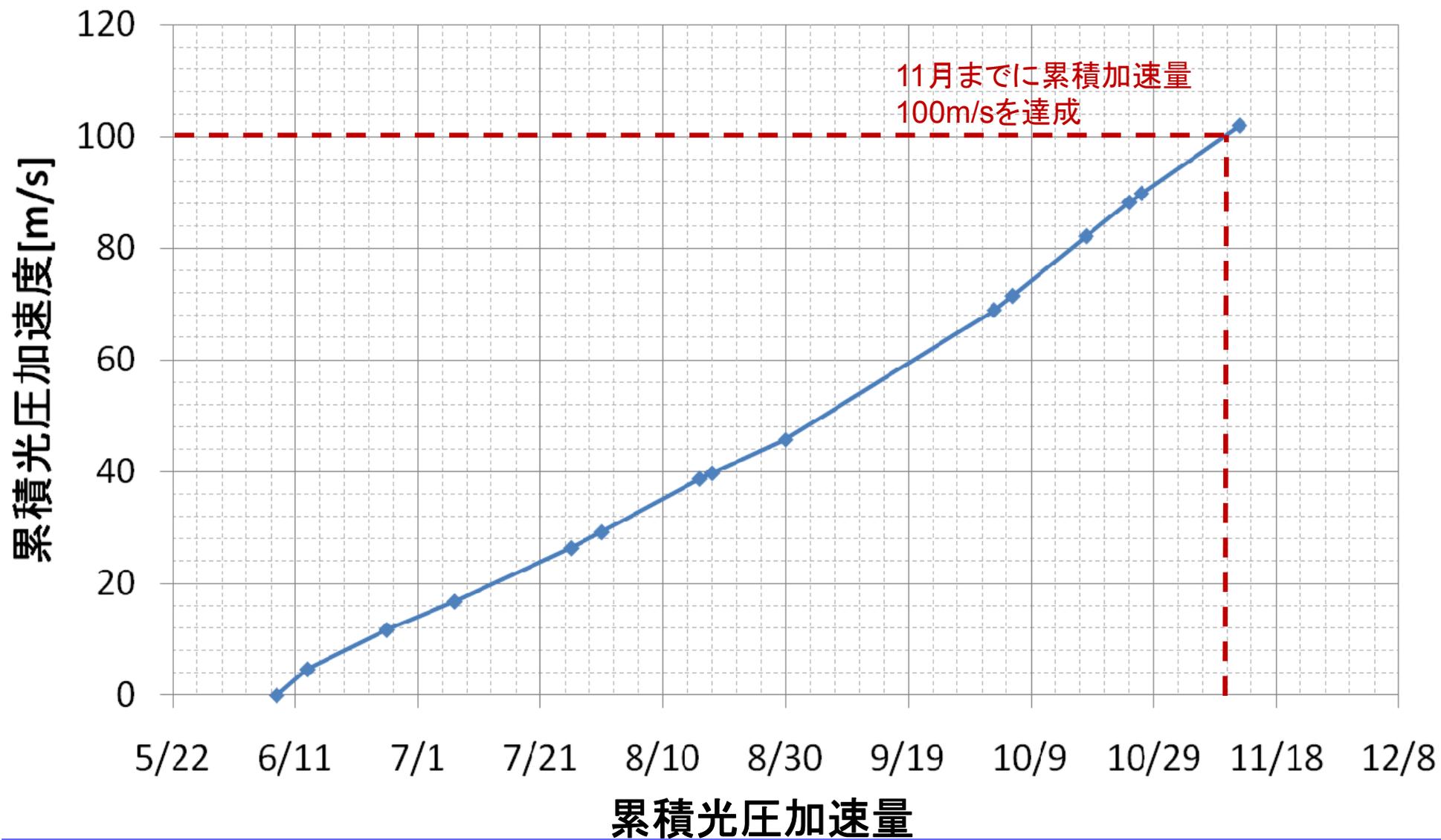
# ドップラー変化による光圧確認



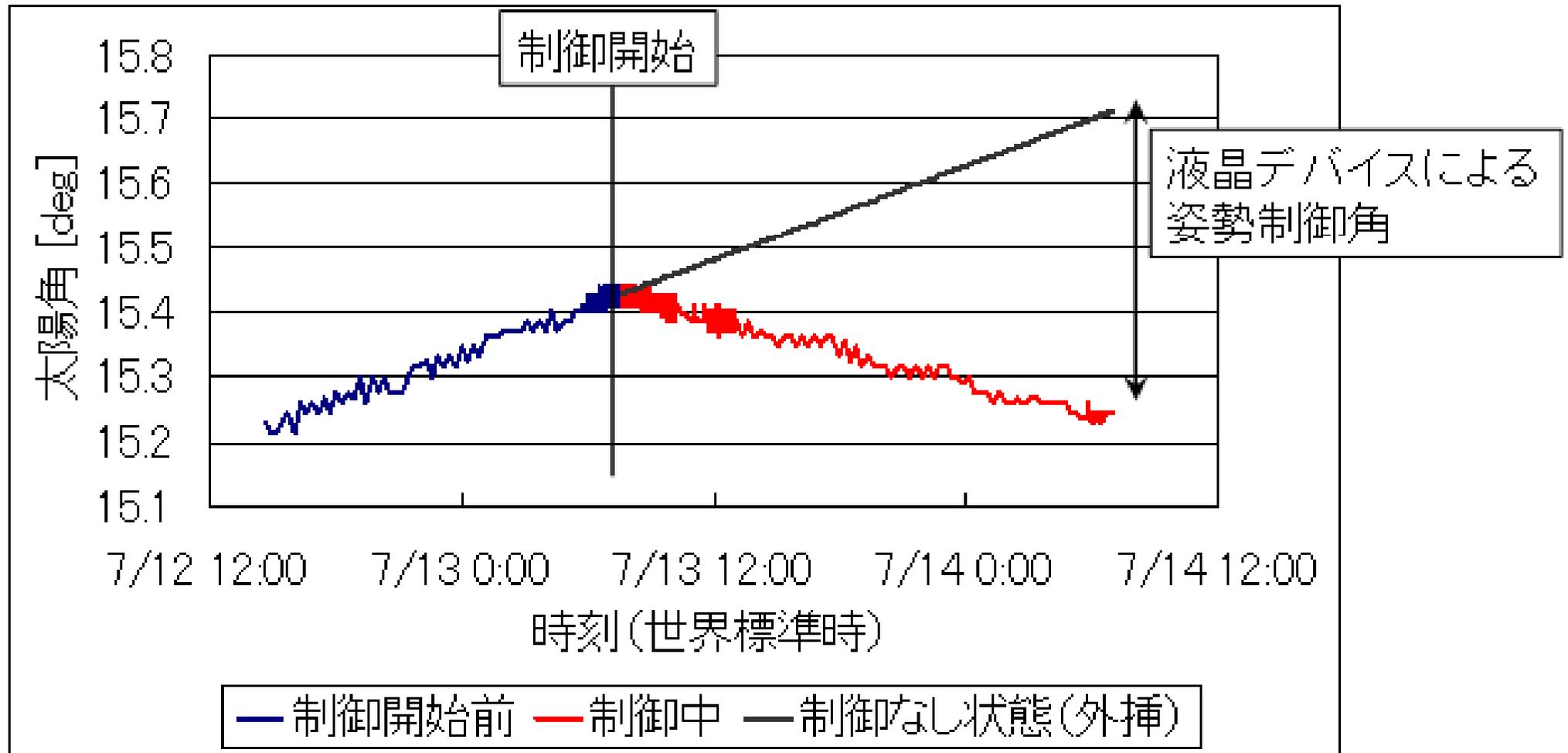
ドップラーから算出される太陽光圧による推力 = 1.1mN

**世界初のソーラーセイルの誕生！**

# ソーラーセイルによる加速実証



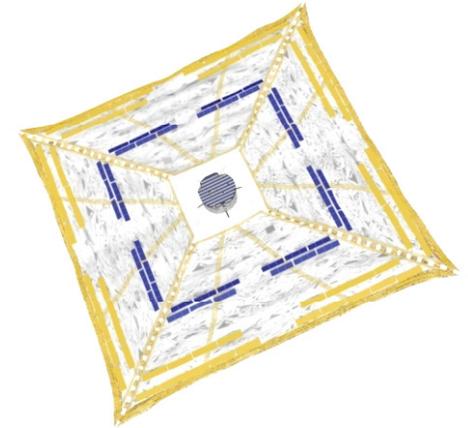
# 液晶デバイスによる姿勢制御



本実験実施時の実証機のspin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

# 薄膜太陽電池による発電実証

- ・6月10日に薄膜太陽電池の発電を実証した。
- ・薄膜太陽電池システムの発電・集電性能を初期評価した。  
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。  
(展開時の力学環境で性能が劣化することがない)



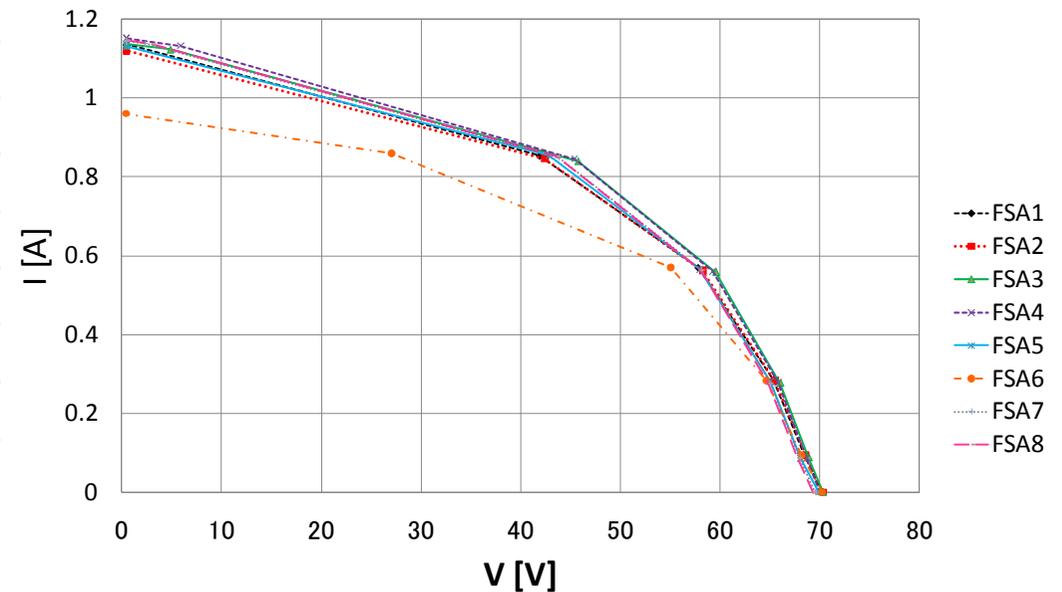
No.	計測膜	Isc [A]	Pmax [W]	Imp [A]	温度 [°C]
	予測値	1.15±0.08	40±4	0.85±0.08	42~68
1	1R	1.135	35.73	0.853	49.38
2	1L	1.120	35.90	0.8468	54.67
3	2R	1.137	38.40	0.839	57.24
4	2L	1.150	38.39	0.845	48.94
5	3R	1.13	36.56	0.853	65.76
6	3L	0.960	31.36	0.569	57.38
7	4R	1.144	37.20	0.849	58.23
8	4L	1.146	37.18	0.852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

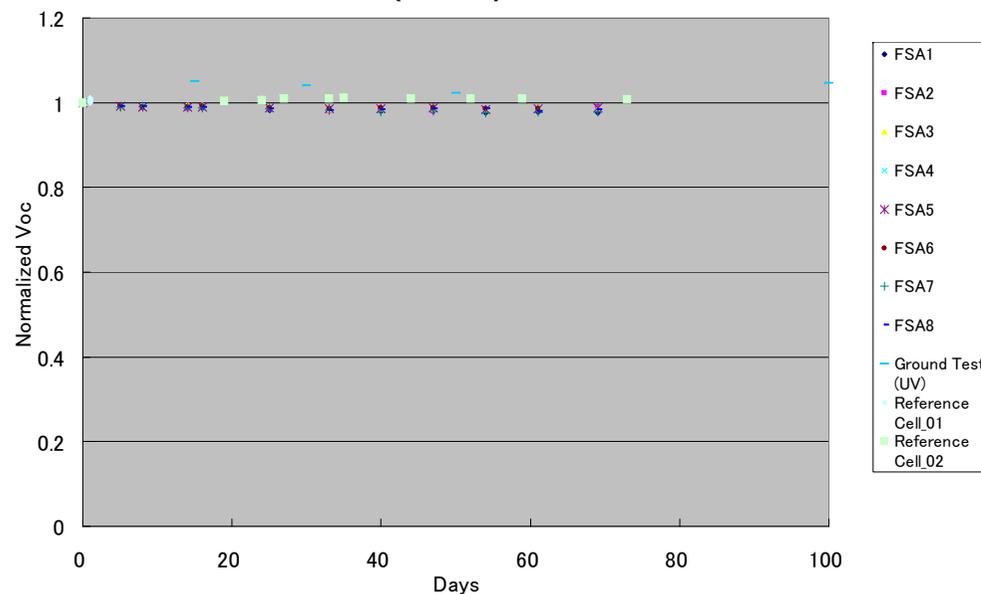
I-V特性



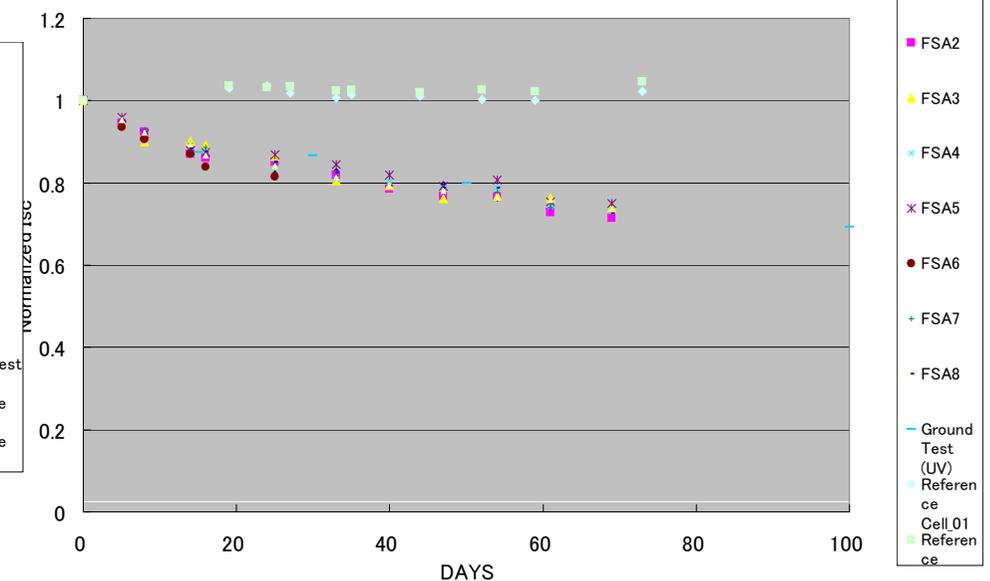
# 薄膜太陽電池による発電評価

- ・惑星間環境における太陽光発電システムの実験評価を週1回程度実施した。
  - ・地上試験での予測劣化曲線と比較し、よく一致する。
- ※惑星間探査機用薄膜発電システム開発のために有用なデータとなっている。

## 開放電圧(Voc)の特性変化

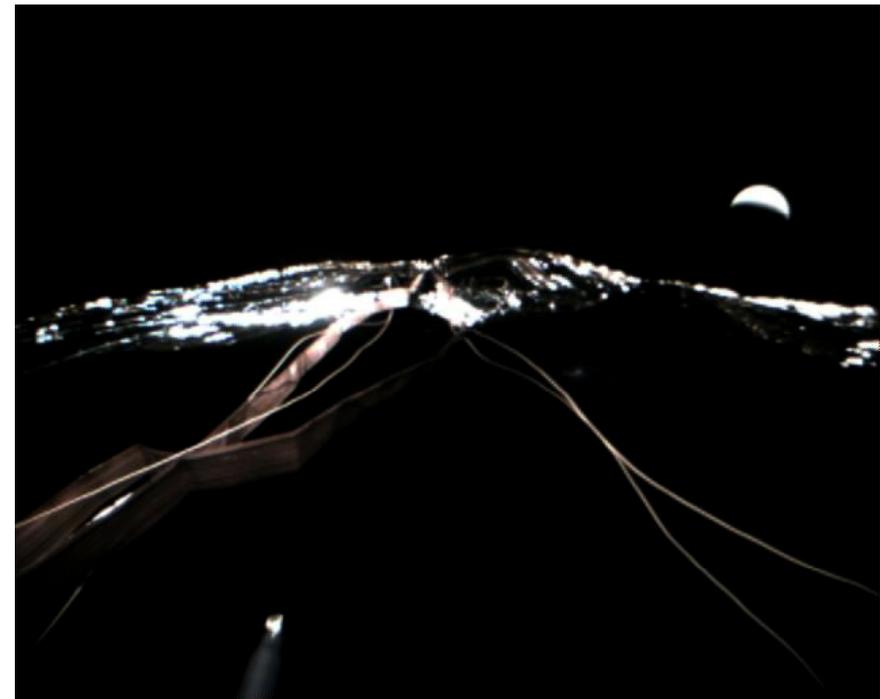
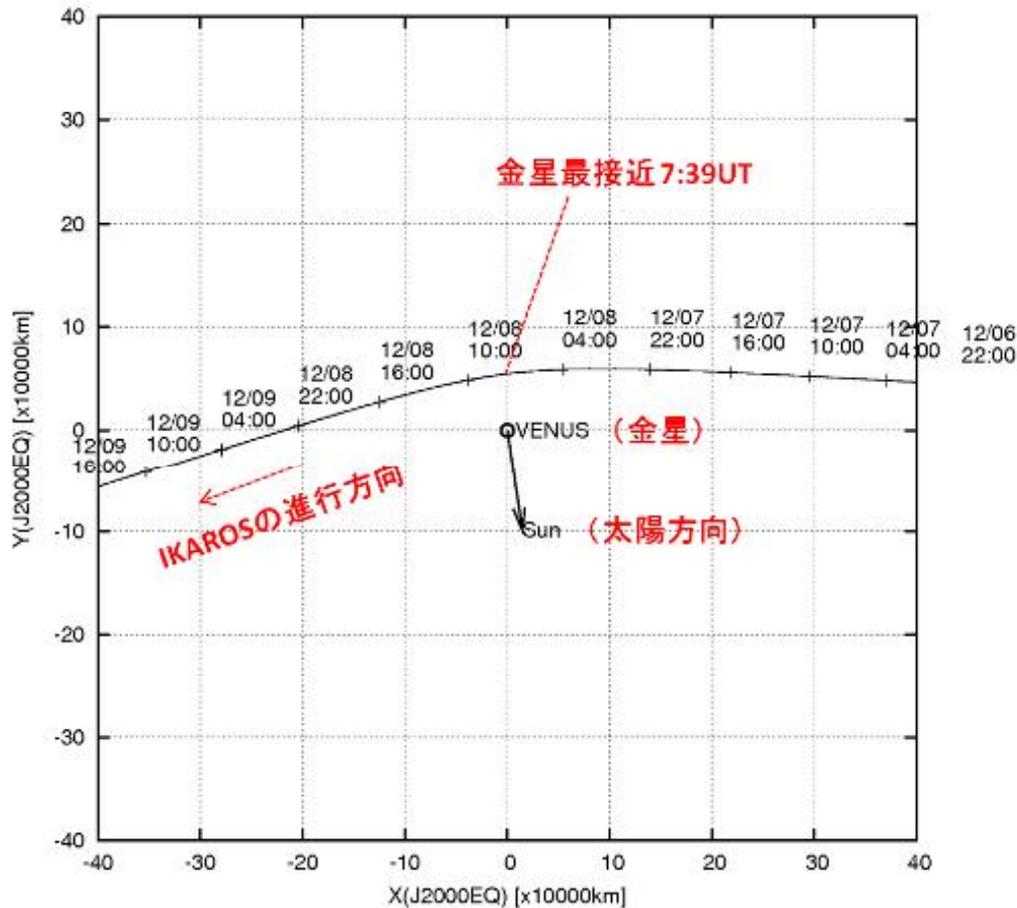


## 短絡電流(Isc)の特性変化



# 金星フライバイ

- ・12月8日16:39JSTに金星に最接近した(距離:80800km)



※まだ、ひずみ補正処理をしていない。

# IKAROS延長ミッション

(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。</p> <p>＜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。</p> <p>＜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。</p> <p>＜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。



# 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・スピントが変化すると膜面が太陽を追尾する挙動が変化し, 膜面形状を推定できることが判明. 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.

(膜面挙動・膜面形状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. 木星・トロヤ群ミッションの最遠点(6AU)に対し, 今回約1/4の距離で事前評価することは大変重要.)

- ・**長期的な誘導制御性を評価**する.

(一般に, 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. 木星・トロヤ群ミッションでは軌道周期2周期で木星に到達するため, 今回これと同期間の運用により事前評価することは大変重要.)

# オプション機器ミッション

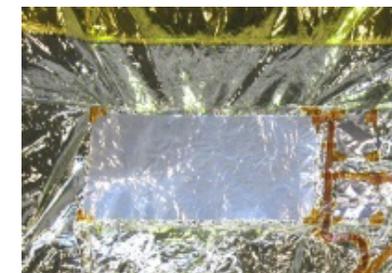
## (1) GAP:ガンマ線バースト偏光検出器

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) ALADDIN:大面積宇宙塵検出器

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

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



- ・GAP, ALADDIN, 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。**

# 結論

- ・IKAROSは、2010年5月21日に打ち上げられ、世界初のソーラー電力セイルの実証に成功した(ミニマムサクセス・フルサクセスを達成)。
- ・2010年12月8日に金星をフライバイした。2011年以降も、ソーラーセイルにより深宇宙を航行し、各種試験を行う。
- ・オプション機器による観測・実験も実施中。
- ・これらの実績も踏まえ、ソーラー電力セイル探査機による木星・トロヤ群小惑星探査計画を検討中。



絵本  
イカロス君の大航海  
(¥360)

IKAROSホームページ: [http://www.jspec.jaxa.jp/ikaros\\_channel/index.html](http://www.jspec.jaxa.jp/ikaros_channel/index.html)  
(ブログ, twitter)

# 発表リスト

---

---

## <IKAROS関連>

- S1-07 IKAROSによる世界初のソーラー電力セイルの実証
- P1-070 IKAROSの推進系
- P1-071 シミュレーションとフライトデータによるIKAROSセイル膜面の展開・展張挙動の評価
- P1-072 IKAROSの膜面ミッション材料の軌道上評価
- P1-073 IKAROS搭載ガンマ線バースト偏光検出器(GAP)の初期成果
- P1-074 IKAROSの光加速実証について
- P1-075 IKAROSソーラー電力セイル展開ミッションの軌道上実験結果
- P1-076 小型ソーラー電力セイル実証機IKAROSの姿勢制御運用について
- P1-077 IKAROS搭載薄膜発電システムの性能評価

## <ソーラー電力セイル探査機関連>

- S3-16 木星圏探査用ソーラー電力セイル(中型セイル)の研究開発状況
- S3-17 国際共同木星圏総合探査ミッション
- P3-100 落下塔での微小重力実験による気液平衡スラスタの開発
- P3-101 耐低温2液推進系の研究
- P3-102 ソーラー電力セイルにむけた低温推進系統合型燃料電池の研究
- P3-103 ソーラー電力セイル探査機に向けた大型展開膜面構造に関する研究
- P3-104 次期ソーラーセイル用膜開発の課題
- P3-105 ソーラー電力セイル理学観測機器開発の現状
- P3-106 太陽光圧を利用したソーラーセイル用燃料フリー姿勢制御系の軌道上実証結果と今後の開発展望
- P3-107 ソーラー電力セイル用薄膜軽量発電システムの開発
- P3-108 国際共同木星圏探査ミッション～ソーラー電力セイルを用いた木星オービター, システム検討について～
- P3-109 国際共同木星圏探査ミッション～木星探査衛星システム検討について～
- P3-110 欧米将来木星探査EJSM:オイロパ周回機JEO, ガニメデ周回機JGOに対する日本としての対応計画