

ソーラーセイルによる深宇宙探査・航行 技術の実証的研究

JAXA宇宙科学研究所
津田雄一

謝辞

本研究成果は、もとより個人では成し得なかったものであり、チームとしての研究開発活動の結果です。下記に、本研究に直接的にお力添え頂いた方々の名前を挙げて感謝の意を表します。

川口淳一郎様, 森治様, 佐伯孝尚様, 山本高行様, 澤田弘崇様, 米倉克英様, 星野宏和様, 三柁裕也様, 白澤洋次様, 横田力男様, 竹内央様, 池田人様(以上, JAXA), 船瀬龍様(東京大学), 遠藤達也様(三菱電機), 山口智宏様(GMV), 中宮賢樹様(京都大学) 北出賢二様, 梅里真弘様, 服部雅人様, 岡橋 隆一様(以上, NEC) 谷口正様(富士通), 石橋史朗様(会津大学), Daniel J. Scheeres様(コロラド大学) IKAROSデモンストレーションチームの開発・運用メンバーの皆様 宇宙科学研究所 ソーラーセイルワーキンググループメンバーの皆様 10年に渡るソーラーセイル研究開発の各場面で参画したISAS所属の学生の皆様 IKAROSプロジェクトに支持・支援をいただいたJAXA役職員, 関連メーカーの皆様

また、本研究の一部は、下記の助成を受けて実施しました。関係各位に謹んで御礼申し上げます。

日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究C)

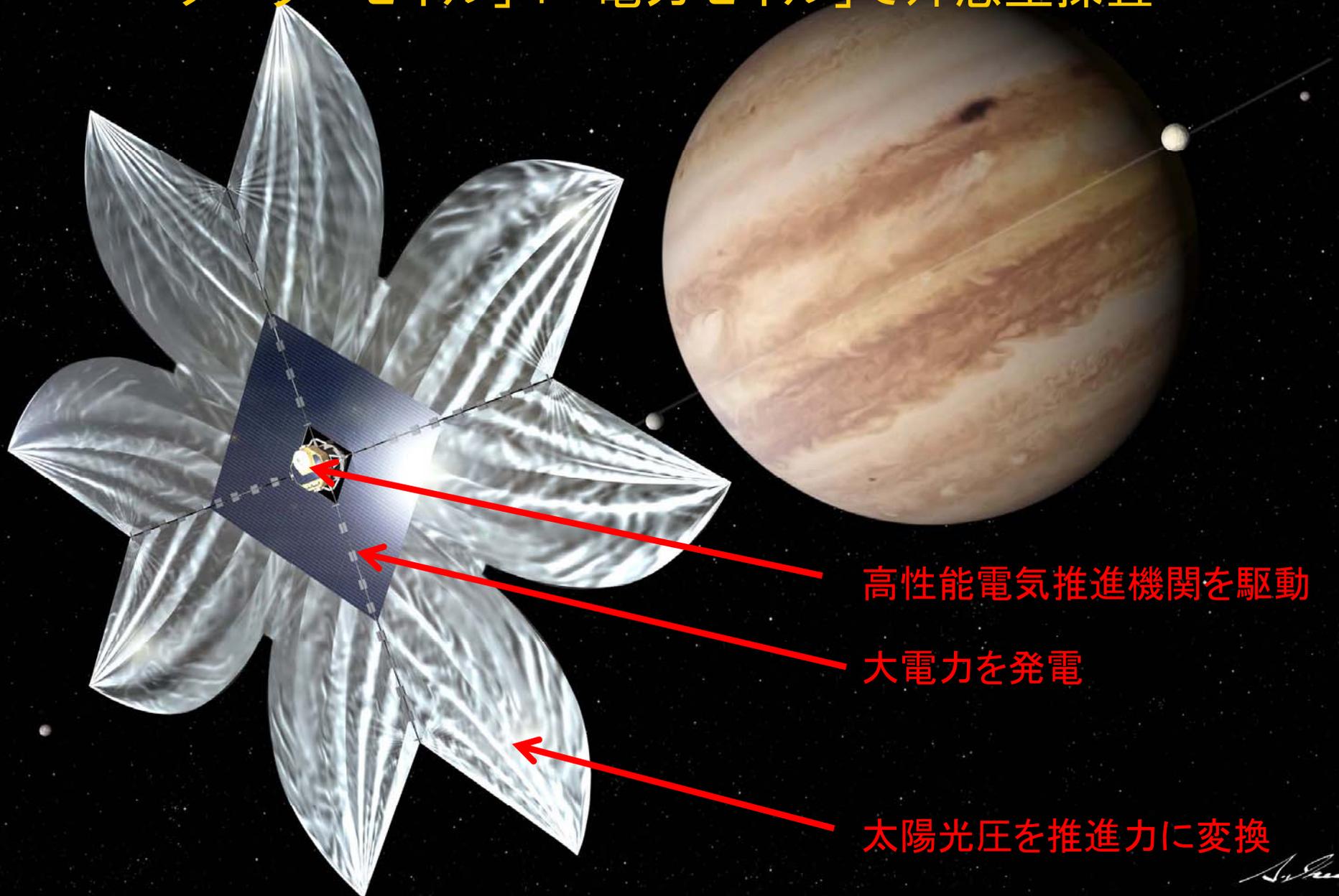
最後に、宇宙科学振興会の皆様, 本賞選考委員会の皆様に心から感謝申し上げます。

なぜ、ソーラーセイルか？

- ・ ツィオルコフスキーらが提唱して以来の、100年来の人類の夢の技術.
- ・ 世界各国が実用化に向けてしのぎを削ってきた技術.
- ・ わが国が外惑星探査を行う際に必要な技術.
=ソーラー電力セイル技術

ソーラー電力セイル技術

「ソーラーセイル」+「電力セイル」で外惑星探査



高性能電気推進機関を駆動

大電力を発電

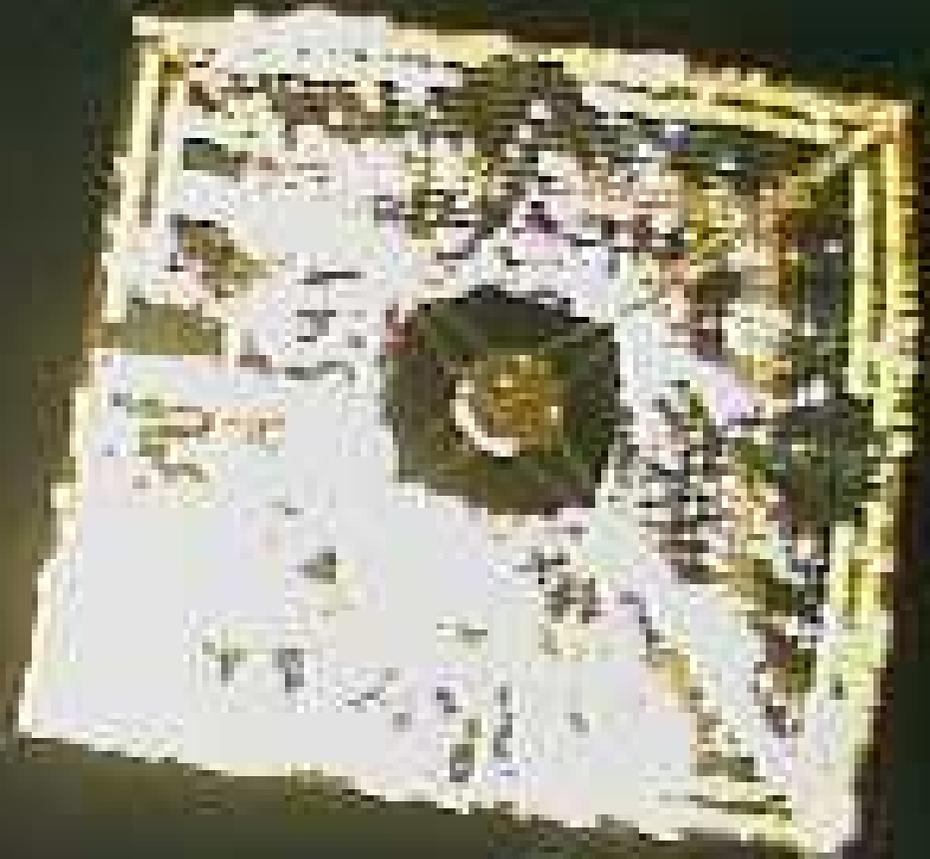
太陽光圧を推進力に変換

Signature

IKAROS

Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation of the Sun

小型ソーラー電力セイル実証機



Sail Size: 14m x 14m

S/C Weight: 307kg

Orbit: Venus Transfer

Launch: May 21, 2010

Sail Deployment: June 9, 2010

(1) ソーラーセイルの遠心力展開技術の開発

- 遠心力展開セイルに適した, セイルの折り方・収納法を考案・開発
- 観測ロケットにより宇宙での直径10m級セイルの遠心力展開に成功(2004)
- セイル膜面の数値シミュレーション技術の確立

(2) ソーラーセイルの姿勢制御システムの開発

- IKAROSのソーラーセイル航行システム, 姿勢制御システムを開発・実現した.
 - 太陽・地球をリファレンスとする姿勢決定システムの考案・開発.
 - 可変反射率素子による新しい姿勢制御方式の考案・実現.
 - 柔軟構造物を有するスピン衛星の姿勢制御システムの考案・開発.

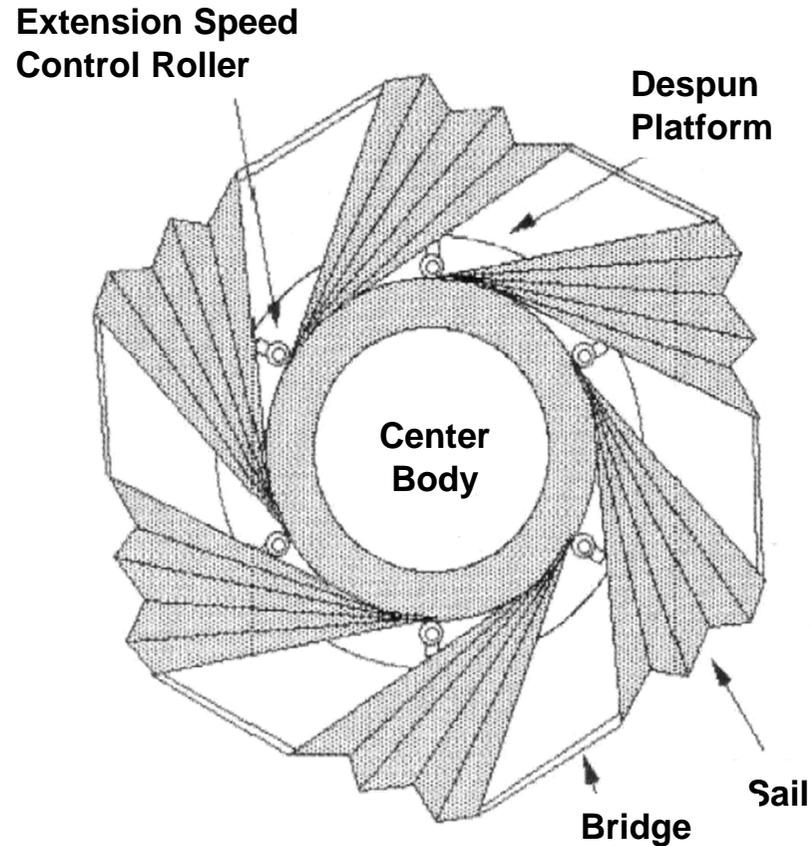
(3) 飛翔実証結果を用いてソーラーセイル航行技術に新たな知見をもたらした

- セイル形状と姿勢運動を結びつけるダイナミクスモデル(Generalized Spinning Sail Model)の発見・構築.

折り方の考案／遠心力展開技術の開発

遠心力だけで展開するセイルシステム

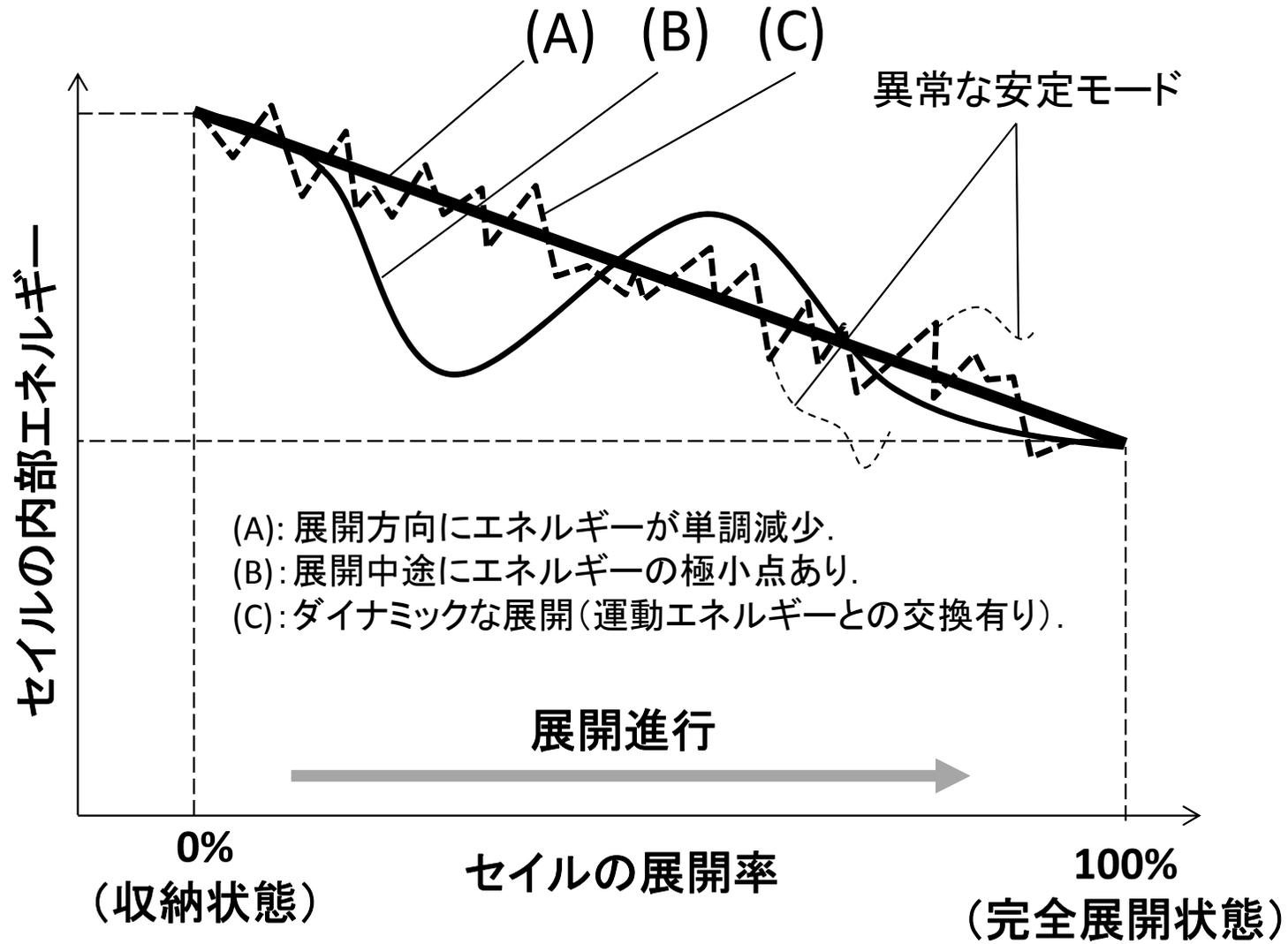
初期の構想図



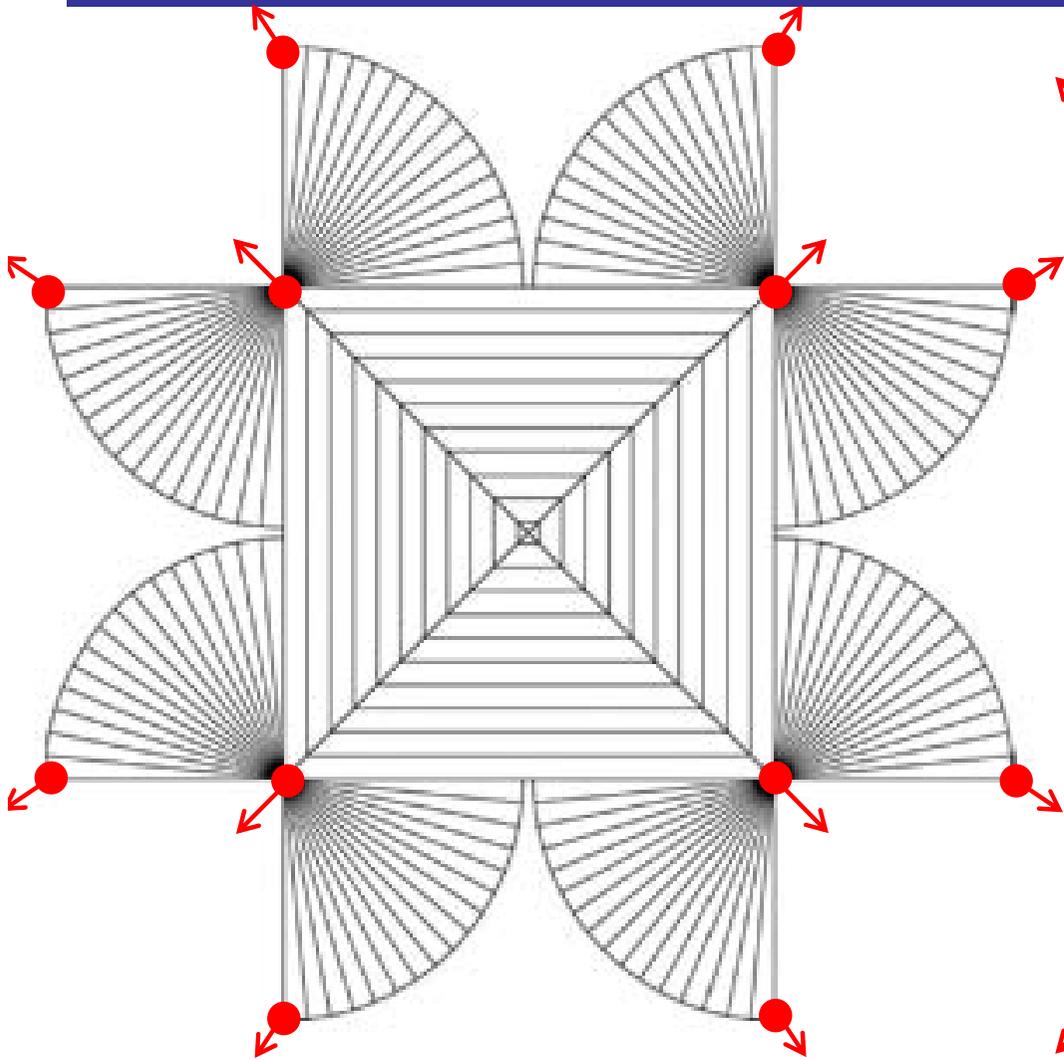
- いかにかコンパクトに畳めるか？
- 数値モデル化しやすい収納方法・展開方法は？
- いかにか引っ掛かりなく展開できるか？

- 折り紙による試行錯誤
- 数値モデルの開発・準静的展開の実現
- 多数の実験

遠心力展開におけるエネルギー遷移

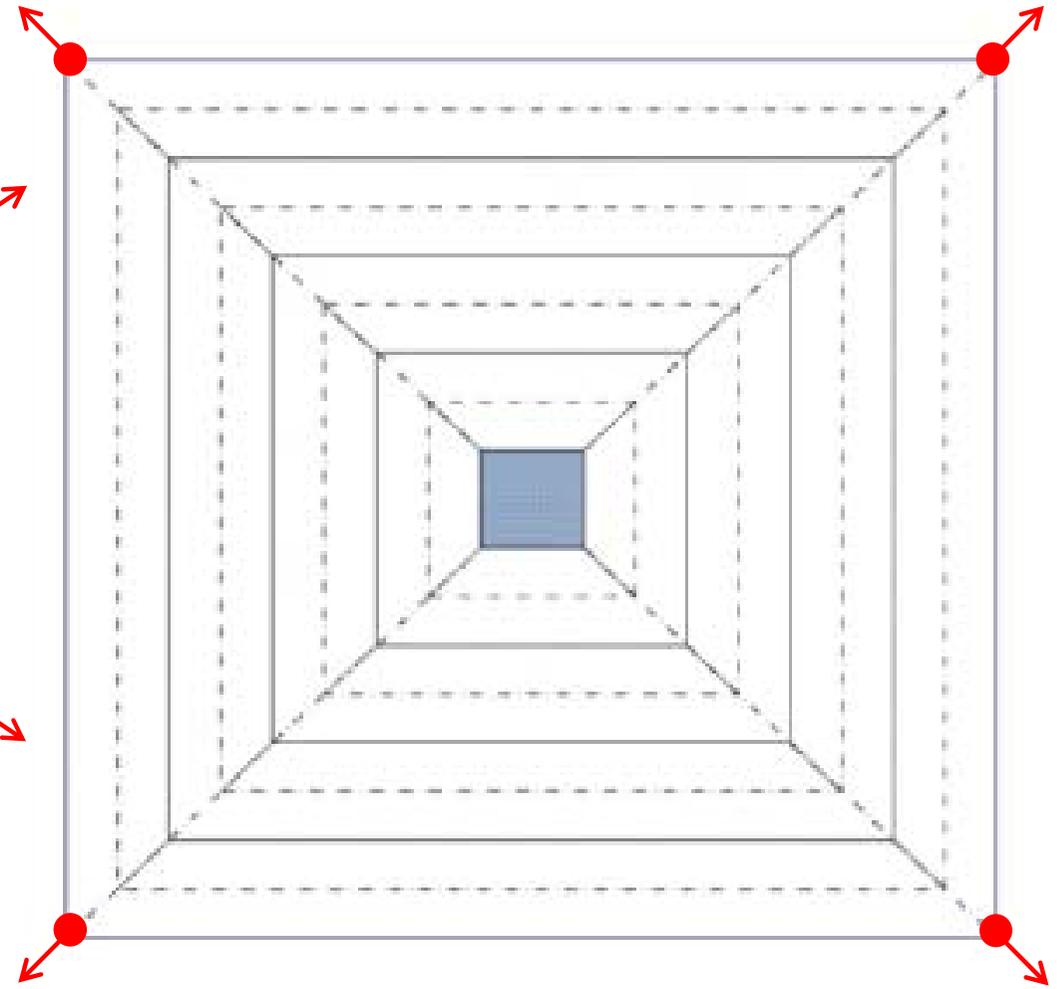


折り紙から生まれた, セイル折り畳み法



クローバー型セイル (S310観測ロケット実験, 2004)

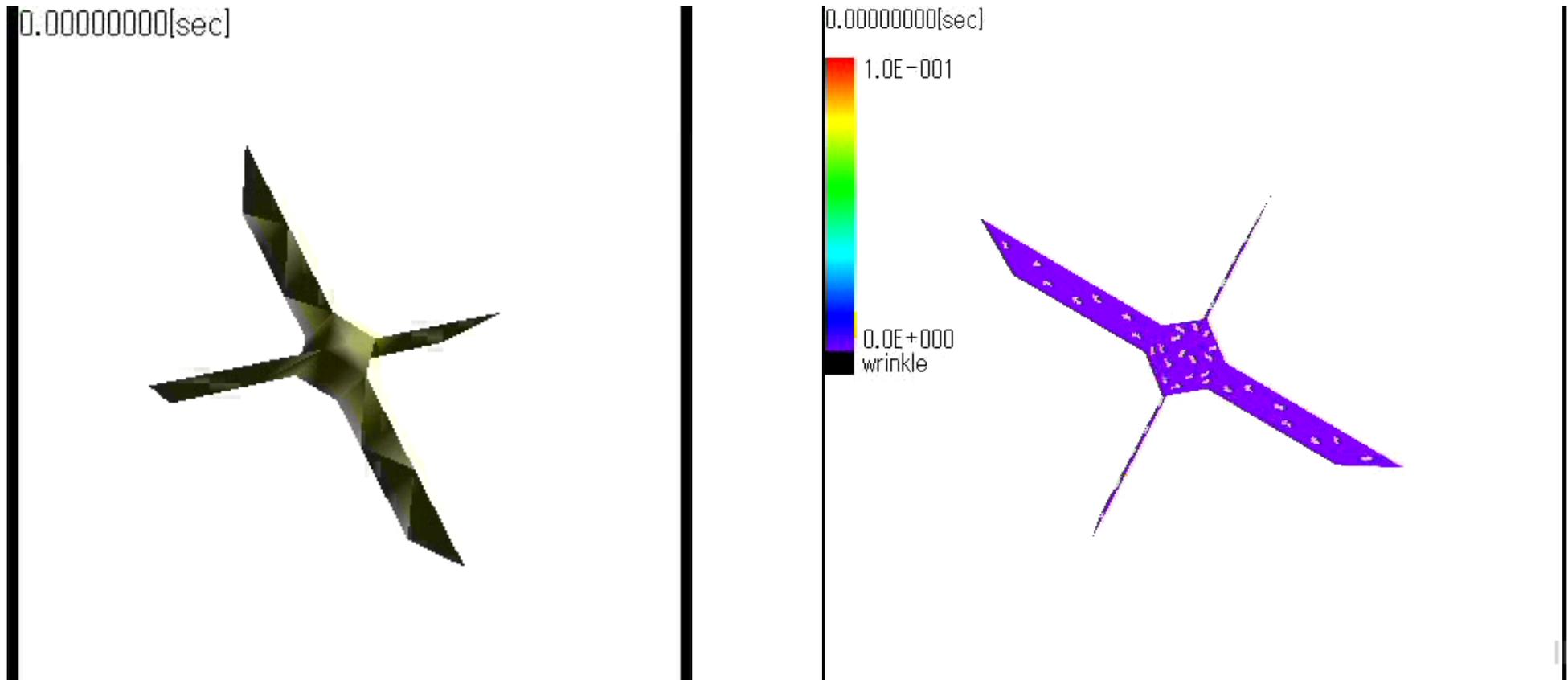
- 12隅を引っ張れば自然に開く折り方.
- 折り目はあるが切れ目はない.



正方形型セイル (IKAROS, 2010)

- 4隅を引っ張れば自然に開く折り方.
- 折り目はあるが切れ目はない.

Multi-Particle Model Simulation



無重力・真空での大面積セイル挙動は, (実際飛ばすまでは) 数値モデルでしかわからない.

→地上試験・気球実験・観測ロケット実験結果を使って数値モデルをrefine.

遠心力展開実験の足跡

	真空塔 (1m)	気球から落下 (4m)	風防付きスピ ンテ ー ブル (2m)	S310口 ケツ (10m)	M-Vサ ブペイ ロード 超小型 衛星 (5m)	気球吊 り下げ (20m)	スケー トリンク (10m)
大きな膜を				○		○	○
真空・	○	△	△	○	○	△	
無重力下で	○	△		○	○		
ゆっくり						○	○
たくさん	○		○				○
展開したい	2002- 2003	2003	2003- 2004	2004	2006	2006	2005- 2007

S310観測ロケット34号機実験のフライト画像

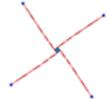


実験によりシミュレータをチューニング

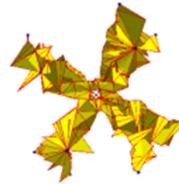
First Stage



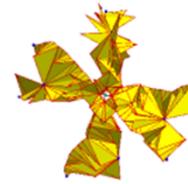
(1) Y+3



(2) Y+6



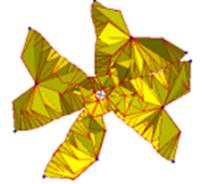
(3) Y+10



(4) Y+11

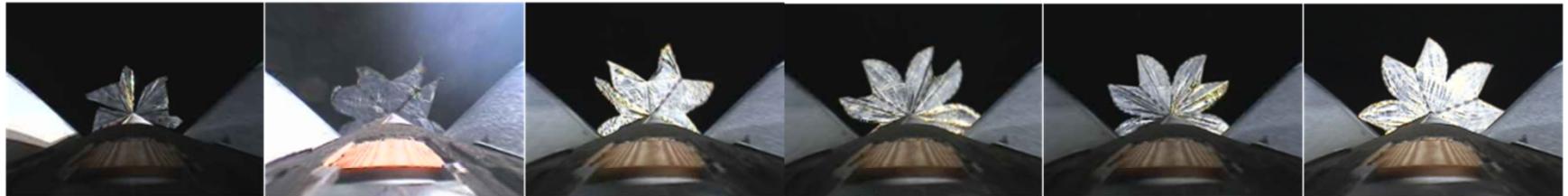


(5) Y+19

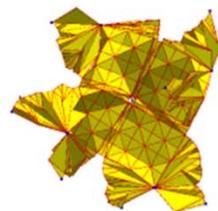


(6) Y+24

Second Stage



(1) Y+25



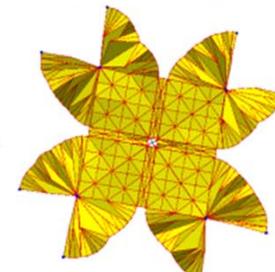
(2) Y+27



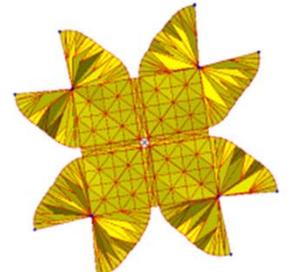
(3) Y+28



(4) Y+30

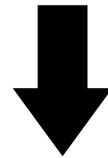


(5) Y+43

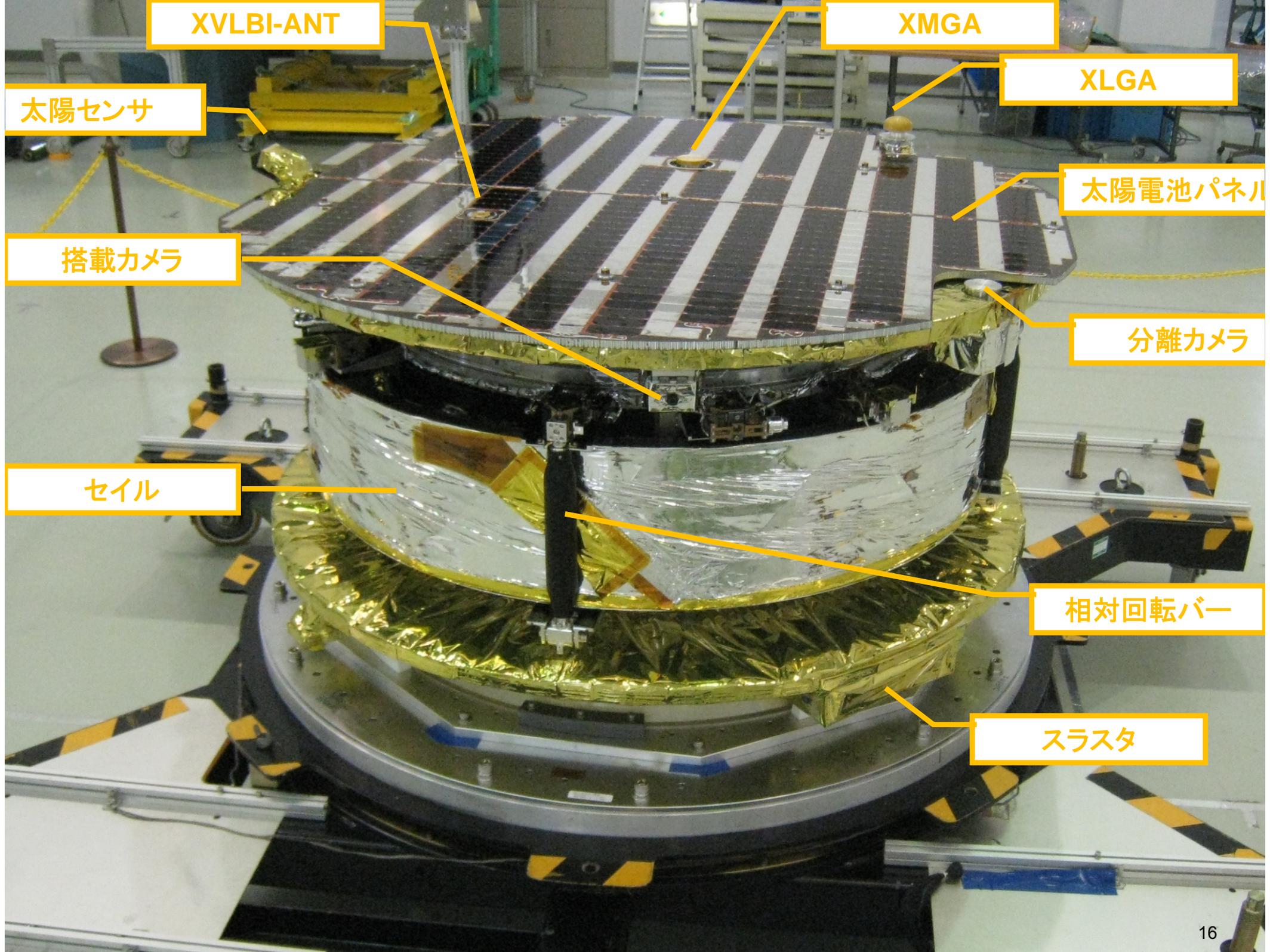


(6) Y+61

展開システムを開発した。
遠心力展開方式を実現した。



帆の向き制御法, ソーラーセイル
航行システムの開発



XVLBI-ANT

XMGA

XLGA

太陽センサ

太陽電池パネル

搭載カメラ

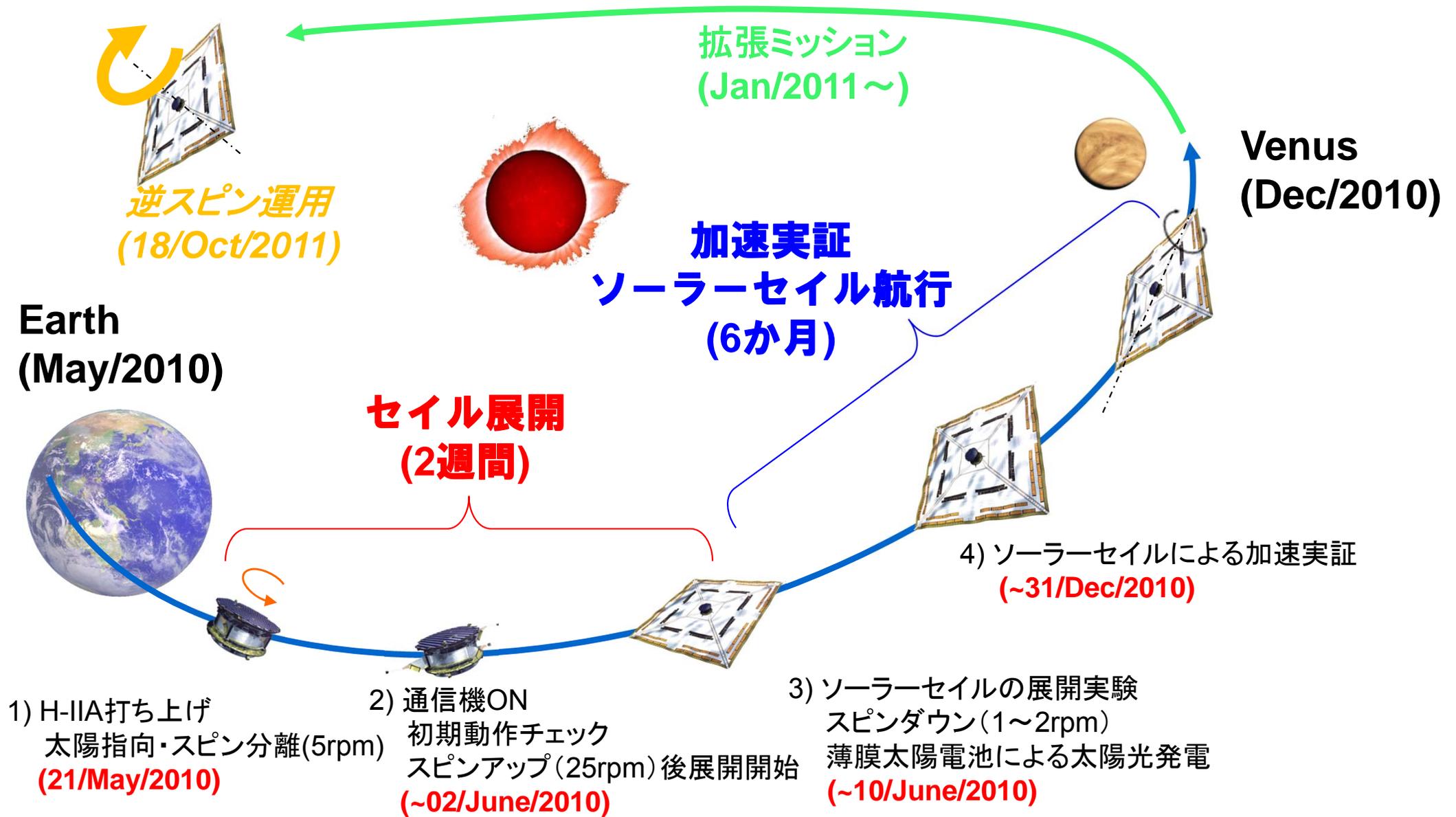
分離カメラ

セイル

相対回転バー

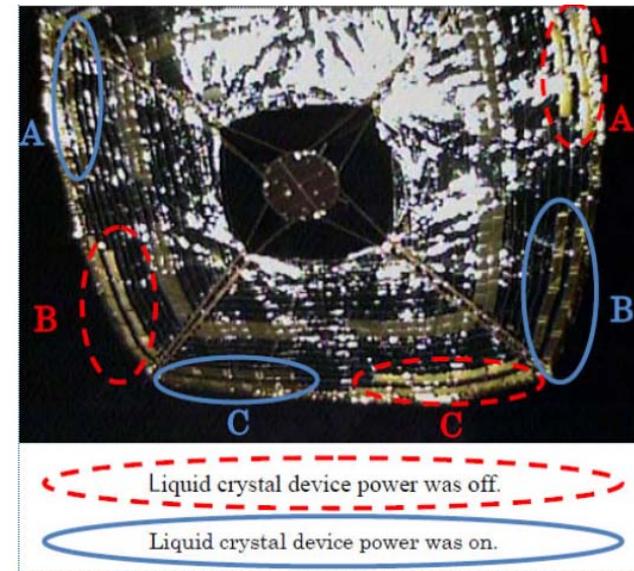
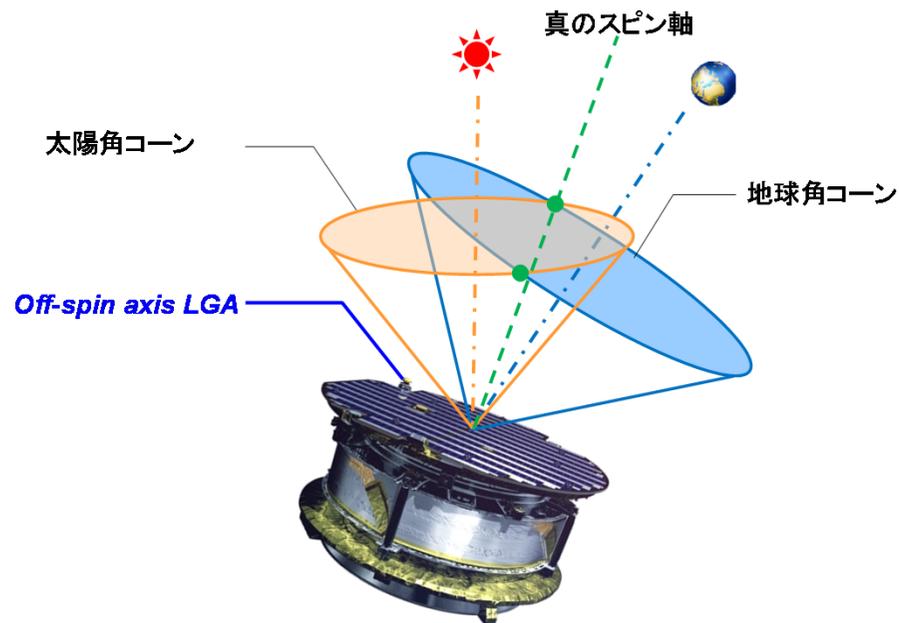
スラスタ

IKAROSのミッションシーケンス

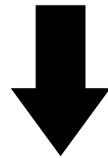


IKAROSのために開発したソーラーセイル特有の姿勢制御システム

1. 地球・太陽を用いた深宇宙での低廉な姿勢決定システム
2. セイルの柔軟性を考慮したスピン探査機の姿勢制御法
3. 可変反射率素子による姿勢制御法



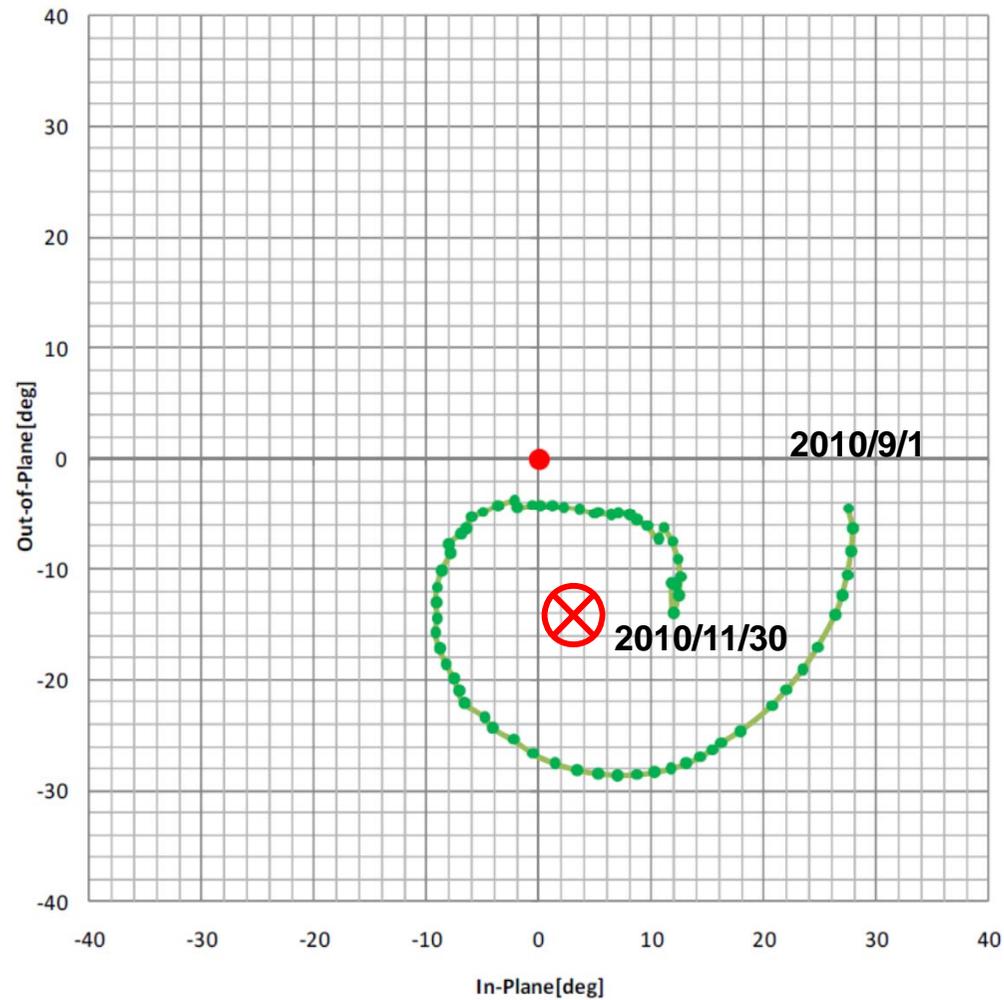
ソーラーセイル航行システムを開発した.



飛ばしてみたら, 予想外の挙動をした.
スピン型ソーラーセイルの姿勢運動モデルの構築.

- ソーラーセイルは, そもそも太陽光圧の影響をたくさん受けるように作られている.
- セイルは薄膜で作られている. まったいらではないし, 光学特性も一様ではない.
- そんな現実のセイルで, 太陽光圧加速度【=並進運動】はどれだけ獲得できる?
→ 高精度軌道決定
- そんな現実のセイルは, 姿勢【=回転運動】にも影響を及ぼすはず・・・とは考えていたが意外な挙動であった.
→ “Generalized Spinning Sail Model” (GSSM) の構築

実際のIKAROSの姿勢運動



とある収束点まわりの渦巻き運動に見える. すくなくとも, 円運動ではない.

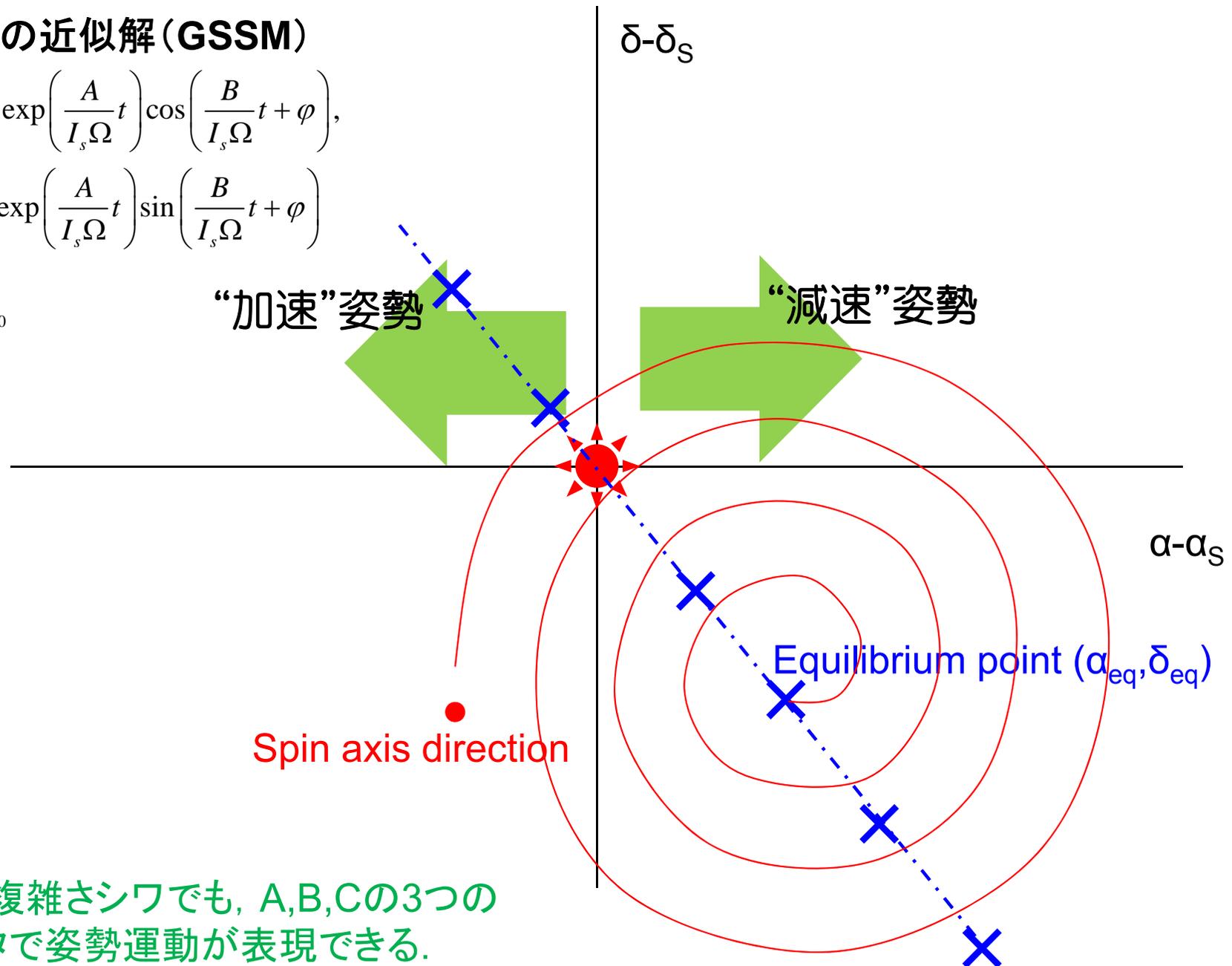
セイルのしわが生み出す「渦巻き運動」とGSSMの構築

姿勢運動の近似解 (GSSM)

$$\alpha = \alpha_{eq} + D \exp\left(\frac{A}{I_s \Omega} t\right) \cos\left(\frac{B}{I_s \Omega} t + \varphi\right),$$

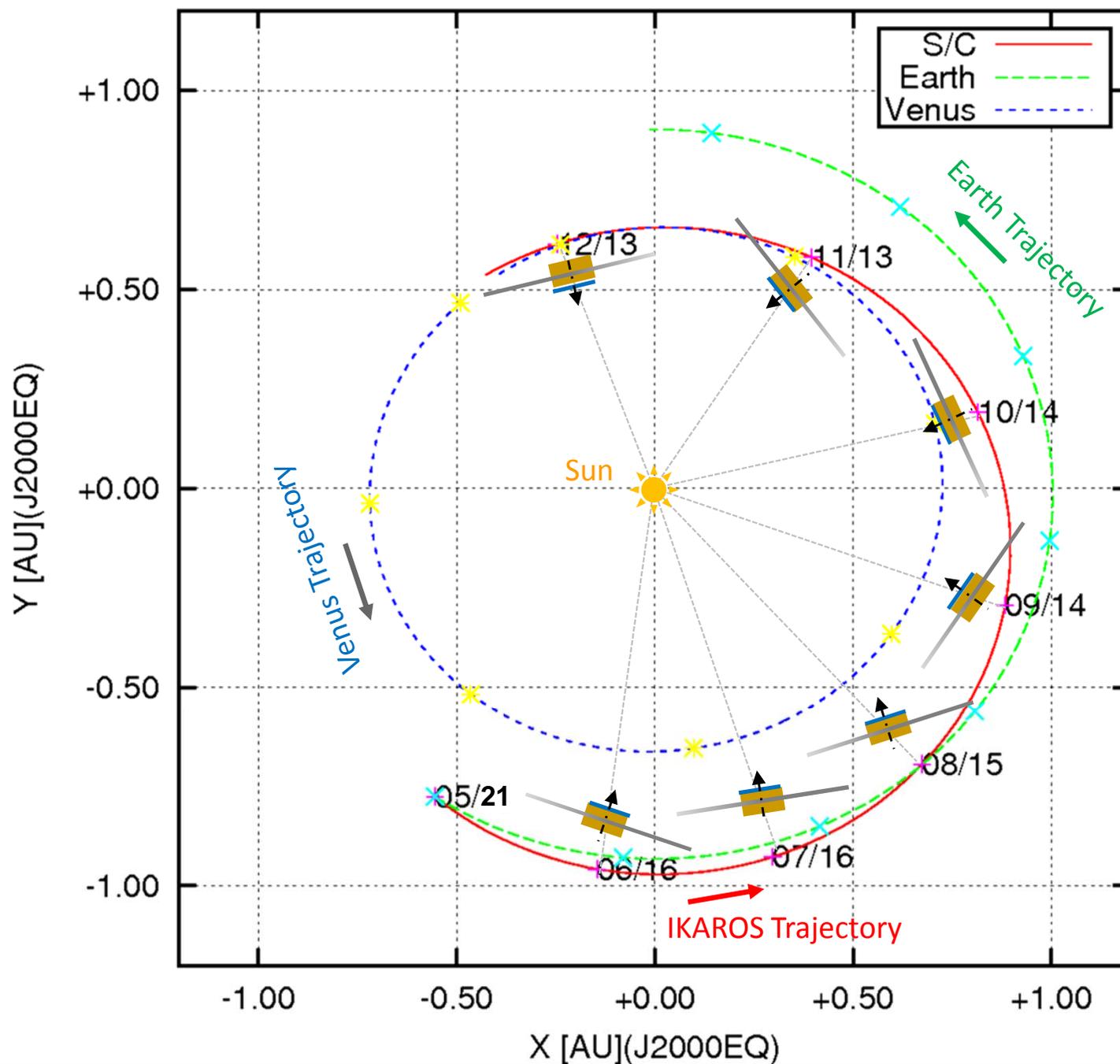
$$\delta = \delta_{eq} + D \exp\left(\frac{A}{I_s \Omega} t\right) \sin\left(\frac{B}{I_s \Omega} t + \varphi\right)$$

$$\Omega = \frac{C}{I_s} t + \Omega_0$$



どんなに複雑さシワでも, A, B, C の3つのパラメータで姿勢運動が表現できる.

渦巻き運動を利用した、省燃料での太陽追尾



渦巻き運動を発見後、すぐに運用への活用を検討。

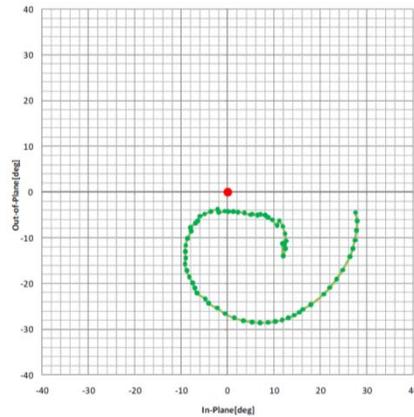
左図のIKAROSの半年間の姿勢運動は、スピン軸変更燃料をほとんど使うことなく実現できた。

姿勢運動から、セイル形状を推定する

IKAROSのやったこと

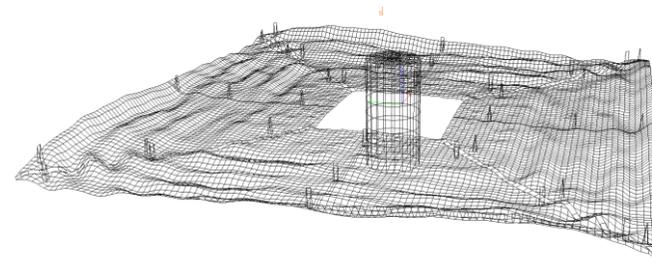
姿勢挙動

(フライトデータ)

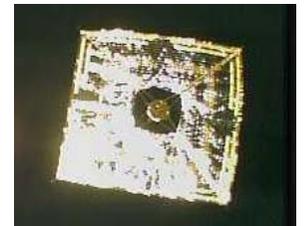


セイル形状

(推定)



比較



将来のソーラーセイルでは

姿勢挙動

(姿勢要求)

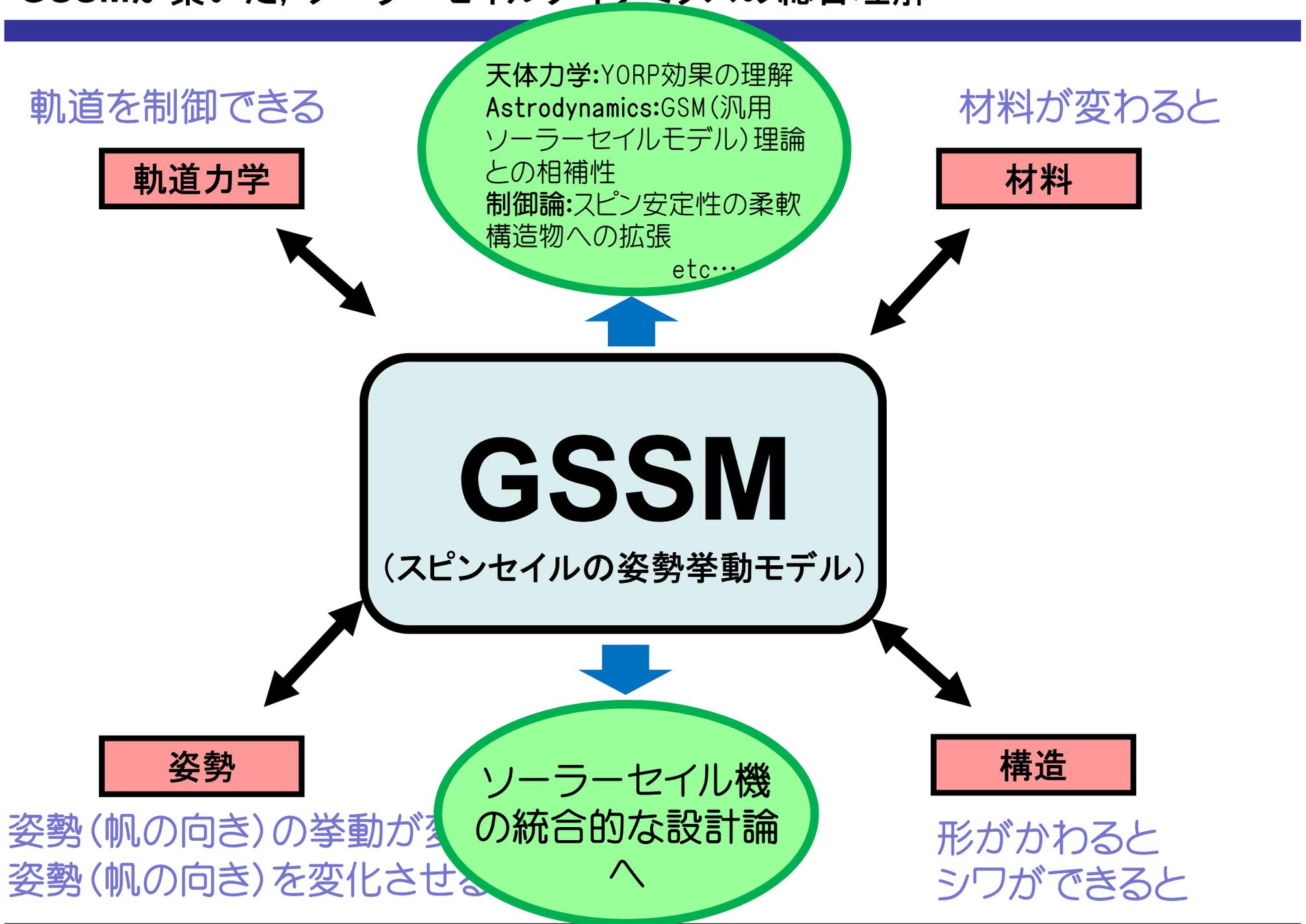


セイル形状

(平面度要求, 表面光学特性の要求)

機体のダイナミクスと、「セイル」に求められる性能を明確に結びつけることができた。

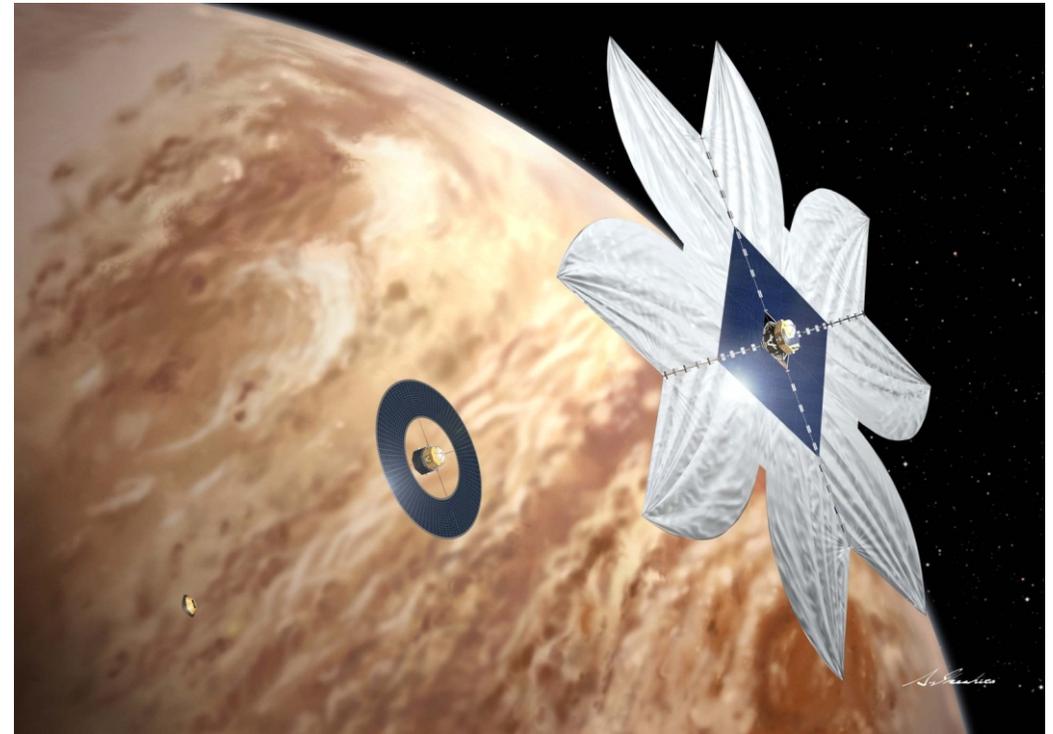
GSSMが繋いだ、ソーラーセイルダイナミクスの総合理解



本研究の意義, 次の目標

- 世界中でのしのぎを削って開発競争が行われてきた, 人類の「夢の技術」であったソーラーセイルを, “成立するシステム”として世界で初めて実現した.
- 世界中で行われていたのは, 展開実証(=ソーラーセイルを使うまでのお膳立て)どまり. 深宇宙での光圧加速航行という, ソーラーセイルを“使う”ことまで実証したのはIKAROSのみ.
- 実際, IKAROSの運用から多くの他では得難い知見を得た. そのひとつが, Generalized Spinning Sail Model(GSSM)の構築へ繋がる発見である.

- IKAROSは, 「技術実証ミッション」であった.
次の目標は, 本格的な外惑星探査.
木星トロヤ群小惑星帯の探査.



2010年5月21日 IKAROS運用室にて、
IKAROS出航を祝して。

