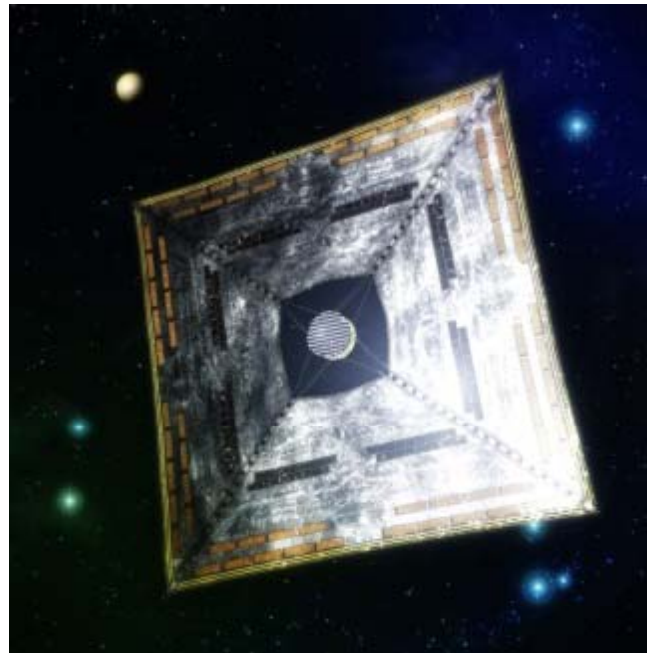

小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」 後期運用報告



平成24年3月21日
宇宙航空研究開発機構
IKAROSデモンストレーションチームリーダー
森 治

0. 今回の報告内容とこれまでの経緯

【今回の報告内容】

IKAROSの後期運用(平成23年1月～平成24年3月)で予定していたミッションを達成することができた。後期運用で得られた成果について報告する。

【これまでの経緯】

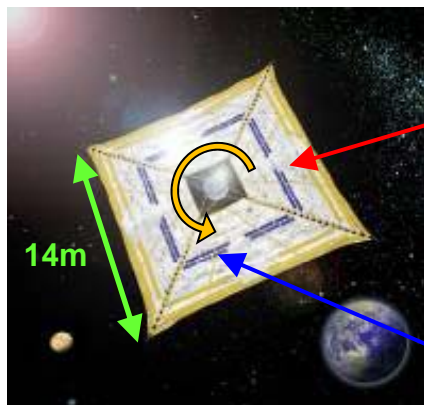
1. 平成22年5月21日の打ち上げ以降、同年12月までに、フルサクセス相当の運用を全て達成(定常運用を終了, 付録1参照)。
2. 平成23年1月, 宇宙開発委員会にてIKAROS定常運用の終了と後期運用計画について報告(平成24年4月以降の後期運用継続については, 平成24年3月までに運用継続の是非を判断することとしていた)。
3. 平成23年1月から, IKAROSの後期運用を実施。
4. 平成24年1月6日, IKAROSの太陽角・太陽距離が増加し, 発生電力が消費電力を下回ったため, 予測通り, 冬眠モードに移行した。

1. IKAROSとは？

小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」

ソーラー電力セイルとは・・・

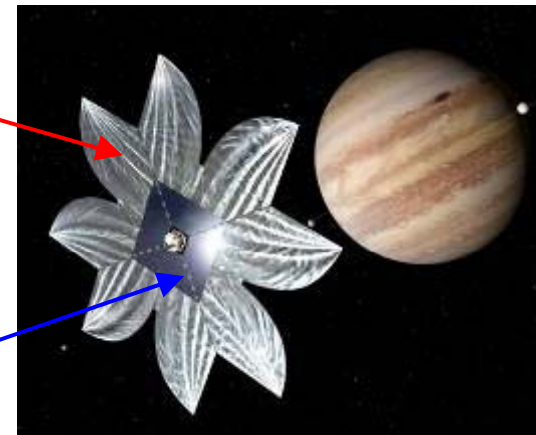
ソーラーセイルのセイルの一部に薄膜太陽電池を貼り付けることで、太陽光を受けて加速するだけでなく、太陽光発電も同時に行う日本オリジナルのコンセプトであり、IKAROSで初めて実証した。将来構想として、ソーラーセイルと高性能イオンエンジンのハイブリッド推進による木星・トロヤ群小惑星探査を研究中である。



IKAROS計画

ソーラーセイル

薄膜太陽電池



木星・トロヤ群小惑星探査計画

2. 後期運用のミッション概要

●ソーラー電力セイルミッション

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	(1-1) 展張状態を評価し、膜面の機械的な劣化を評価する。	達成
	(1-2) 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。	達成
(2) 電力セイルによる発電	(2-1) 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。	達成
(3) ソーラーセイルによる加速実証	(3-1) 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。	達成
	(3-2) 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。	達成
(4) ソーラーセイルによる航行技術の獲得	(4-1) 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。	達成
	(4-2) 軌道周期単位の長期的な誘導制御性を評価する。	達成

●その他のミッション(付録2参照)

・オプション機器(GAP, ALADDIN)による理学観測

GAPによって世界で初めてガンマ線バーストの偏光を確認した。

ALADDINによって内惑星領域でほぼ1ケタ連続的に上昇する宇宙塵分布を明らかにした。

(注) GAP(GAMMA-ray burst Polarimeter):ガンマ線バースト偏光検出器

ALADDIN(Arrayed Large-Area Dust Detector for INterplanetary Space):大面積宇宙塵検出器

・新規開発機器(気液平衡スラスタ)の性能評価

気液平衡スラスタの推力, 比推力を評価し, 気液分離機能を実証した。

小型宇宙機用推進系として幅広く使用できる見通しを得た。

3. 後期運用の成果報告

後期運用では、次ページの「表-1 後期運用ミッションの確認結果」に示す通り、各テーマが全て達成されたことを確認した。

なお、後期運用においては、以下の2つのテーマに関し、定常運用において設定していた太陽角及びスピンレートの制約(※)を外し、積極的に広範囲に変化させ、目的を達成した。

※太陽角(<30deg), スピンレート(>1rpm)

(1-2) 展張状態の力学モデルを構築する。⇒(実施方法) **低スピン運用**, **逆スピン運用**
(膜面形状の変化を積極的に引き出して実現。)

(3-2) 膜面の光学パラメータモデルを構築する。⇒(実施方法) **大姿勢変更運用**
(太陽光圧トルクによる膜面姿勢運動を積極的に引き出して実現。)

これらの運用により、膜面形状データ及び膜面姿勢運動データを取得し、力学モデル及び光学パラメータモデルを構築した。

本報告では、特に(1-2)及び(3-2)に関し、想定外の現象を確認したので、3. 1項及び3. 2項で紹介する。

表－1 後期運用ミッションの確認結果

(平成23年1月～平成24年3月)

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	(1-1) 展張状態を評価し、膜面の機械的な劣化を評価する。	<達成> モニタカメラにて膜面の状態を評価した。
	(1-2) 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。	<達成> 低スピン運用、逆スピン運用を行い、膜面剛性が想定よりも十分大きい現象が判明した【想定外の現象1】。これを踏まえて、展張状態の力学モデルを構築した。 ただし、膜面形状を予測するには膜面剛性の発生メカニズムを知る必要がある。
(2) 電力セイルによる発電	(2-1) 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。	<達成> 定期的に発電データを取得し、発電性能の劣化を評価した。
(3) ソーラーセイルによる加速実証	(3-1) 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。	<達成> 複数の姿勢変更を行い、光子加速の姿勢依存性をより広範囲の姿勢で評価した。また、膜面の反射特性の劣化についても評価した。
	(3-2) 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。	<達成> 大姿勢変更運用を行い、スピン軸、スピンレートが渦巻き運動、風車効果によって変化することが判明した【想定外の現象2】。これを踏まえて、光学パラメータモデルを構築した。 ただし、膜面姿勢運動を予測するには膜面変形(たわみ、ねじれ)の発生メカニズムを知る必要がある。
(4) ソーラーセイルによる航行技術の獲得	(4-1) 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。	<達成> 定常運用時で確立した軌道決定手法を、後期運用において実践し、その有用性を確認した。地球距離の変化による軌道決定精度の変化も評価した。
	(4-2) 軌道周期単位の長期的な誘導制御性を評価する。	<達成> 1太陽周回以上におよぶ軌道データを取得することができ、様々な地球距離・太陽距離における誘導制御性を評価した。また、複数の姿勢変更を行い、積極的に光子加速を用いた誘導制御性を評価した。

3. 1 膜面形状に関する想定外の現象(1/2)

【設計段階】

膜面形状は、遠心力、太陽光圧、膜面剛性で決まり、十分な遠心力 > 太陽光圧 > 膜面剛性と想定した。

【定常運用結果】

十分な遠心力が得られるスピンレートを設定して、膜面がフラット状態になると想定していたが、完全なフラット状態にはならなかった。これにより、膜面剛性が想定以上に大きいことが分かった。

【後期運用結果1】(低スピン運用)

スピンレートを下げて遠心力を小さくすると太陽光圧が支配的となり、膜面が大きくたわむと想定していたが、ほとんど変化しなかった。このことから、膜面剛性が想定以上に大きいことが分かった。

【対応】

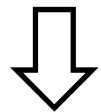
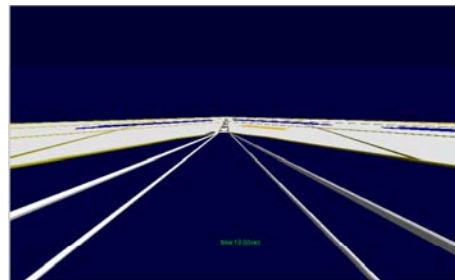
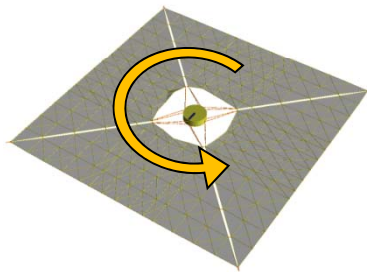
膜面形状を再現するよう、力学モデルを見直した。

このモデルの見直しを踏まえて、次頁の逆スピン運用が可能である見通しを得た。

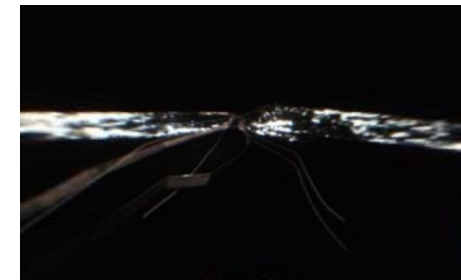
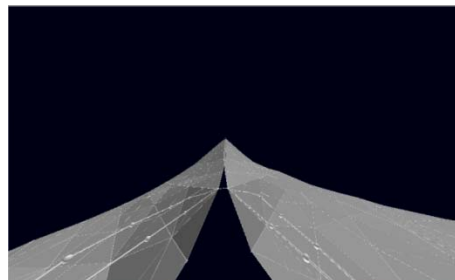
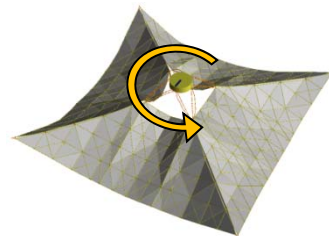
事前シミュレーション

モニタカメラ画像

1.0rpm
(定常運用)



0.055rpm
(低スピン運用)



3. 1 膜面形状に関する想定外の現象(2/2)

【後期運用結果2】(逆スピン運用)

スラスタ噴射により逆スピンさせた。

→スピンレートがゼロ付近でも膜面が大きくたわむことなく、逆スピン状態に移行した。

→スラスタ噴射時の膜面の振動が、見直した力学モデルによる事前シミュレーションとフライトデータでほぼ一致した。このことから、力学モデルが妥当であることが確認された。

ただし、膜面剛性の発生メカニズムについては未解明。

CAM-H4

CAM-H3

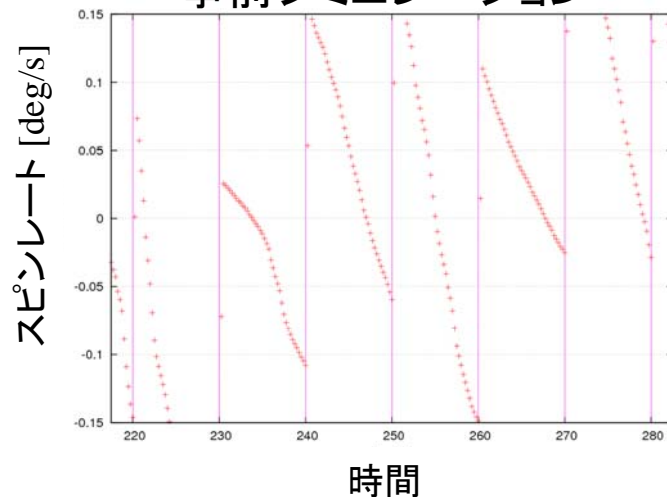
CAM-H2

CAM-H1

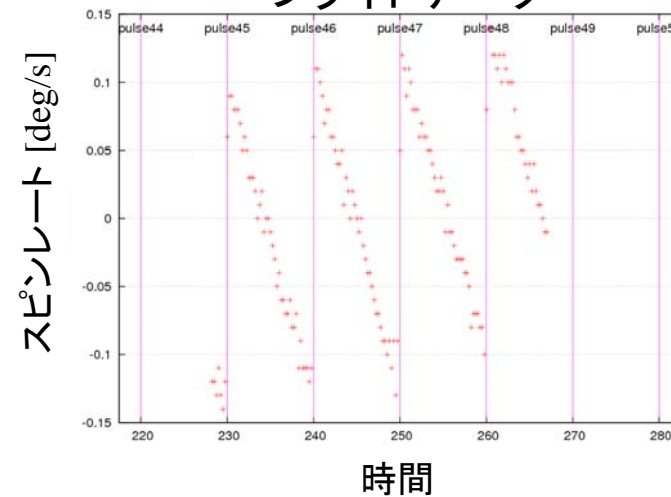
0rpm
(逆スピン運用)



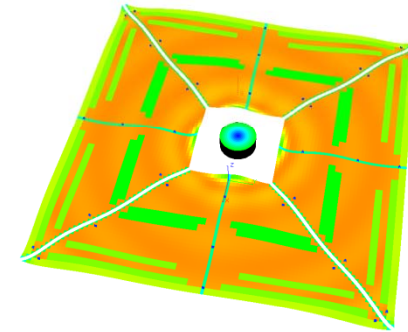
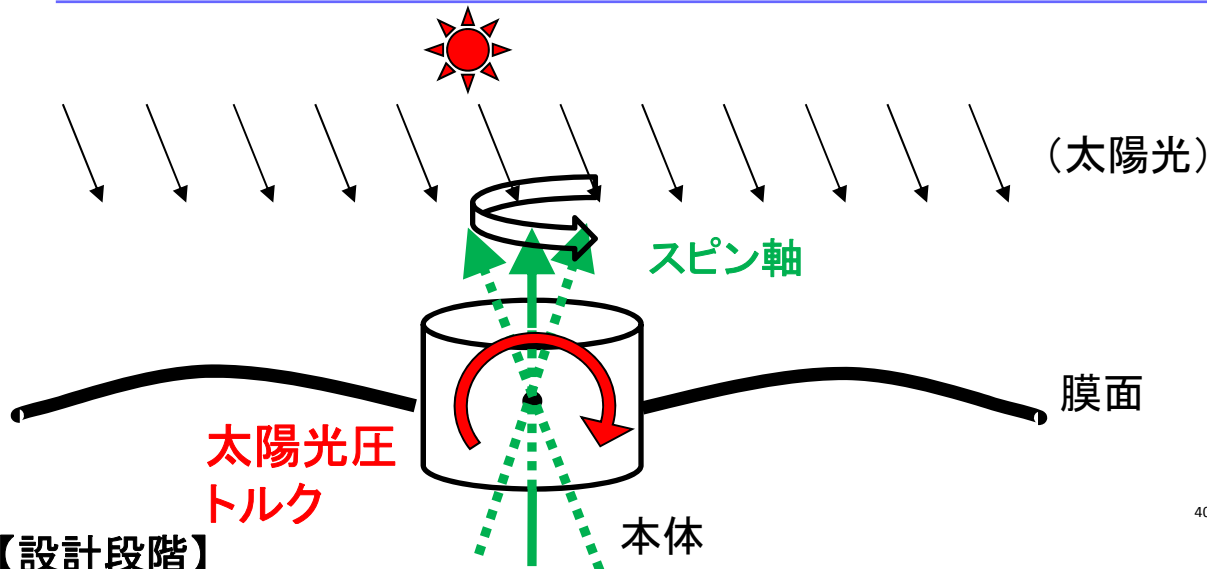
事前シミュレーション



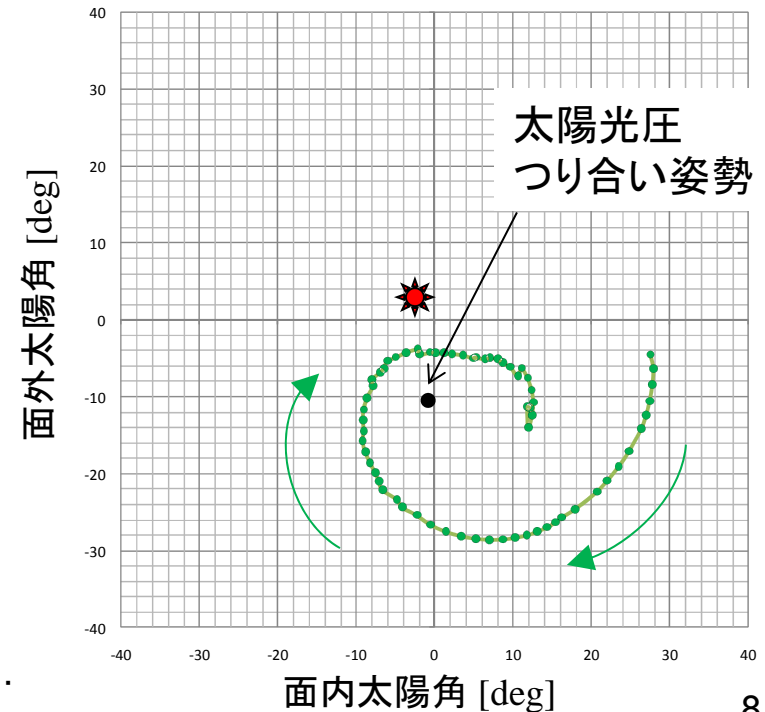
フライトデータ



3. 2 膜面姿勢運動に関する想定外の現象(1/2)



2010/9/2-2010/11/6の姿勢履歴



【設計段階】

はやぶさと同様，太陽光圧トルクを受け，スピン軸が太陽光圧つり合い姿勢まわりに**円運動**する(すりこぎ運動をする)と想定した(付録3参照).

【定常運用結果(右図)】

IKAROSでは，**膜面変形(たわみ)**が原因で，スピン軸が太陽光圧つり合い姿勢まわりに**渦巻き運動**する(すりこぎ運動の首振り角度が徐々に小さくなる)ことが判明した.

【後期運用結果】(大姿勢変更運用)

大姿勢変更にて渦巻き運動を幅広い範囲において確認した.

【対応】

大姿勢変更により渦巻き運動を積極的に利用した航法誘導制御を行った. 渦巻き運動から膜面変形(たわみ)を推定した. ただし，たわみの発生メカニズムは不明.

3. 2 膜面姿勢運動に関する想定外の現象(2/2)

【設計段階】

膜面変形(ねじれ)が原因で風車効果が発生し、スピンレートが変化する可能性があることは予測できていたが、具体的な傾向を把握できていなかった。

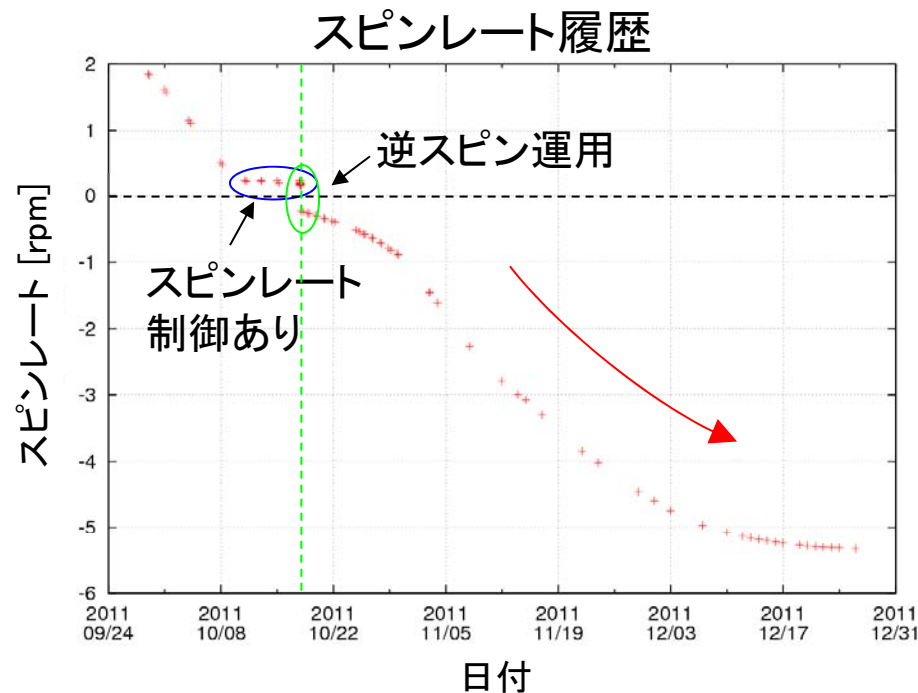
【定常&後期運用結果】

幅広い範囲において風車効果によりスピンレートが変化する様子を確認した。
→通常:減少傾向, 逆スピン移行後:増加傾向 (スピンレートによって変化率が異なる)

【対応】

風車運動を利用した航法誘導制御を行った。

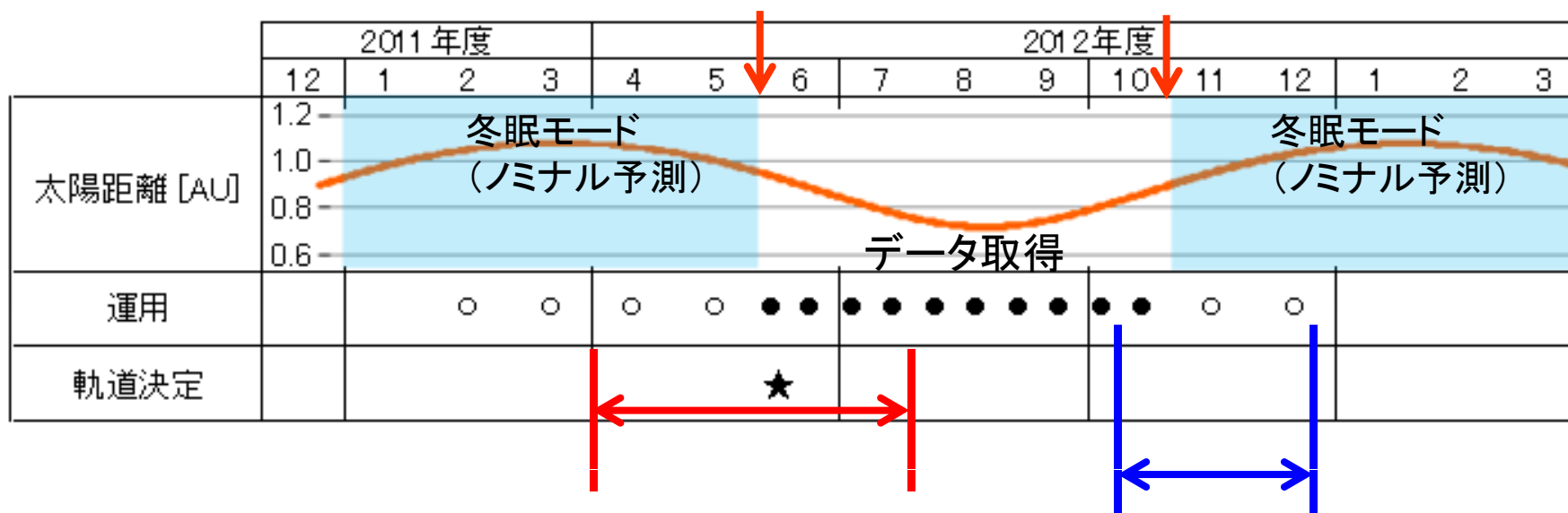
風車効果から膜面変形(ねじれ)を推定した。ただし、ねじれの発生メカニズムは不明。



4. 平成24年度のIKAROS運用の考え方

・IKAROSは現在冬眠モードにあるが、姿勢・軌道予測から平成24年6月～10月の間データ取得できる可能性がある。ただし、冬眠モードから復旧する時期については、姿勢・軌道運動によって2カ月程度の誤差を有する。

・復旧した場合には、膜面形状データ及び姿勢運動データを取得する。これにより、前述の想定外の現象について、発生メカニズムを詳しく調べ、すでに構築した膜面の力学モデル及び光学パラメータモデルの精度を向上させる。



冬眠モードから復旧する時期のずれ(前後2カ月)

冬眠モード移行再現性確認, 等

付録

付録1. 定常運用(平成22年5月～平成22年12月)

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。

付録2. 1 オプション機器ミッション

(1) GAP(ギャップ):ガンマ線バースト偏光検出器

(GAP= GAMMA-ray burst Polarimeter)

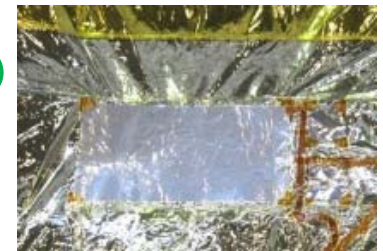
中心の散乱体とそれを取り囲む12枚の蛍光検出器からなる, 散乱型ガンマ線偏光検出器で, **世界で初めてガンマ線バーストの偏光度を測定する.**



(2) ALADDIN(アラジン):大面積宇宙塵検出器

(ALADDIN= Arrayed Large-Area Dust Detectors 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 **Δ VLBI技術を確実に習得し, 将来ミッションにおいて, 定常的に Δ VLBIを用いた高精度軌道決定を行えるようにする.**

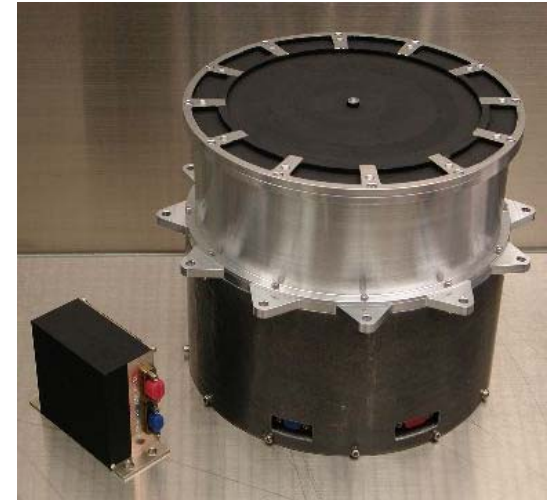
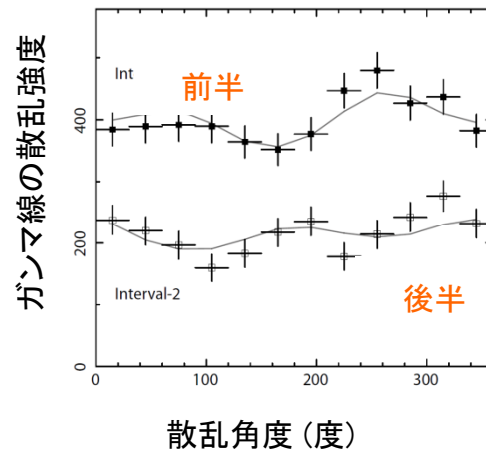
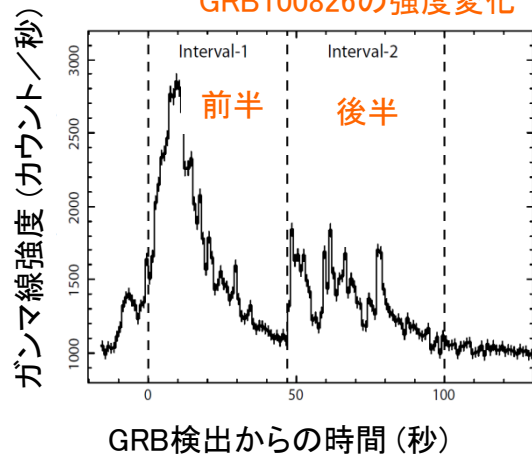


付録2. 2 GAP(ガンマ線バースト偏光検出器)の成果

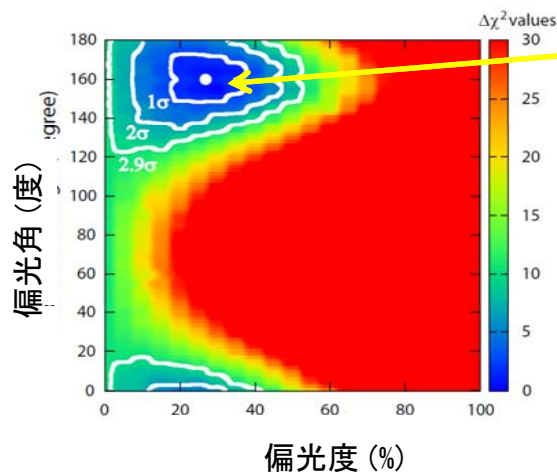
- (1) 約30例のガンマ線バースト(GRB)を検出した。
- (2) 数例で、GRBに偏光を確認した(世界初)。
- (3) しかも、短時間で偏光角が変化する。

金沢大、山形大、理研、宇宙研

論文: ApJL.743,L30,2011 PASJ. 63,626,2011
 GRB100826の強度変化 散乱角分布



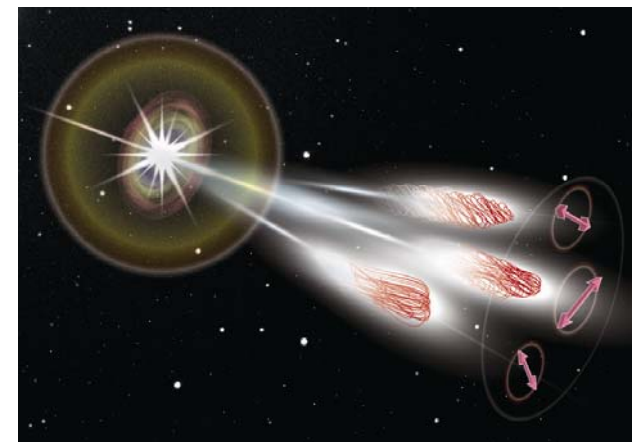
コンプトン散乱異方性を利用したガンマ線バースト偏光検出器 直径17cm、4kg、5W



1例で、偏光度は $27 \pm 11\%$ (有意性 3σ)

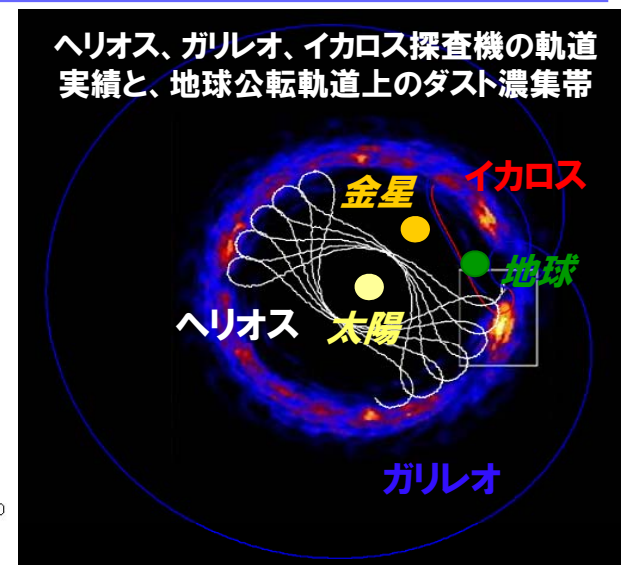
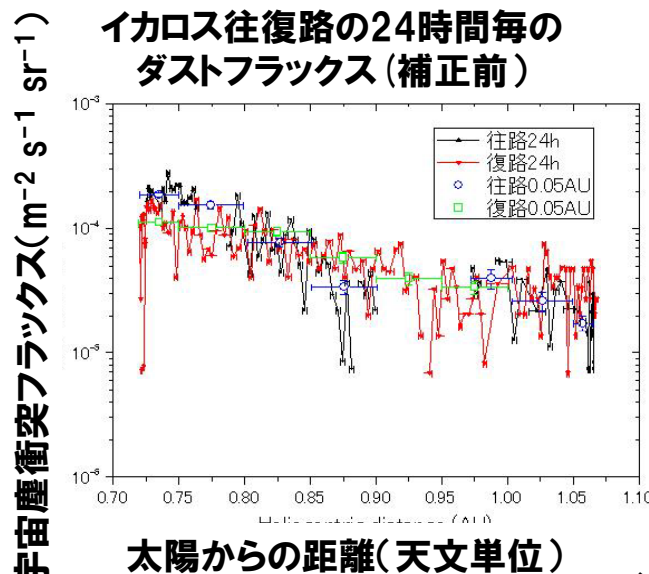
結論

- (4) GRB放射は強磁場中のシンクロトン放射だろう。ジェットは複数あるらしい。



GRBは強磁場を持った複数のジェットからなる

付録2.3 ALADDIN(大面積宇宙塵検出器)の成果

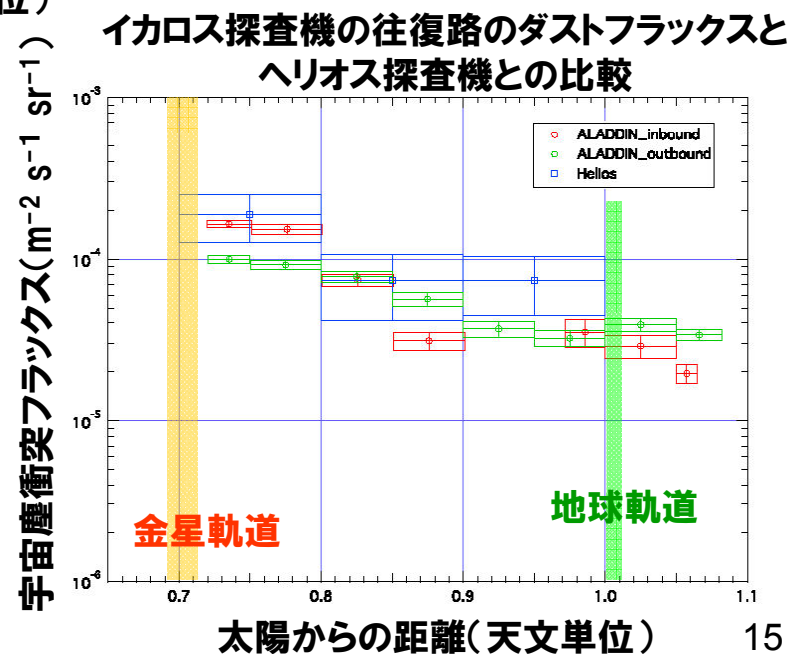


(1)国産初、世界最大面積の宇宙塵検出器の実証

国産初の宇宙塵検出器であり、探査史上最大の検出面積($0.54 m^2$)。2010年6月～2011年10月の17カ月、地球軌道～金星軌道間で約2800個のダストの超高速衝突を検出した。

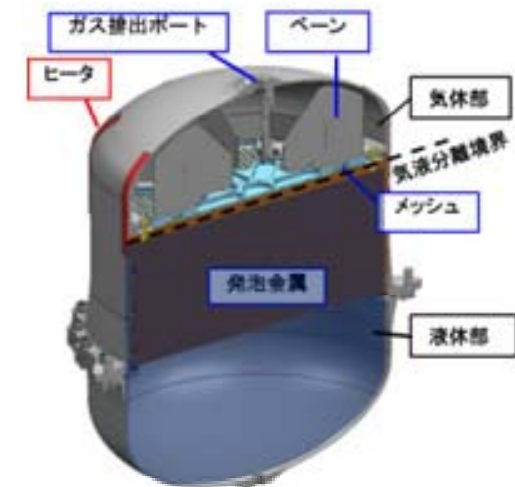
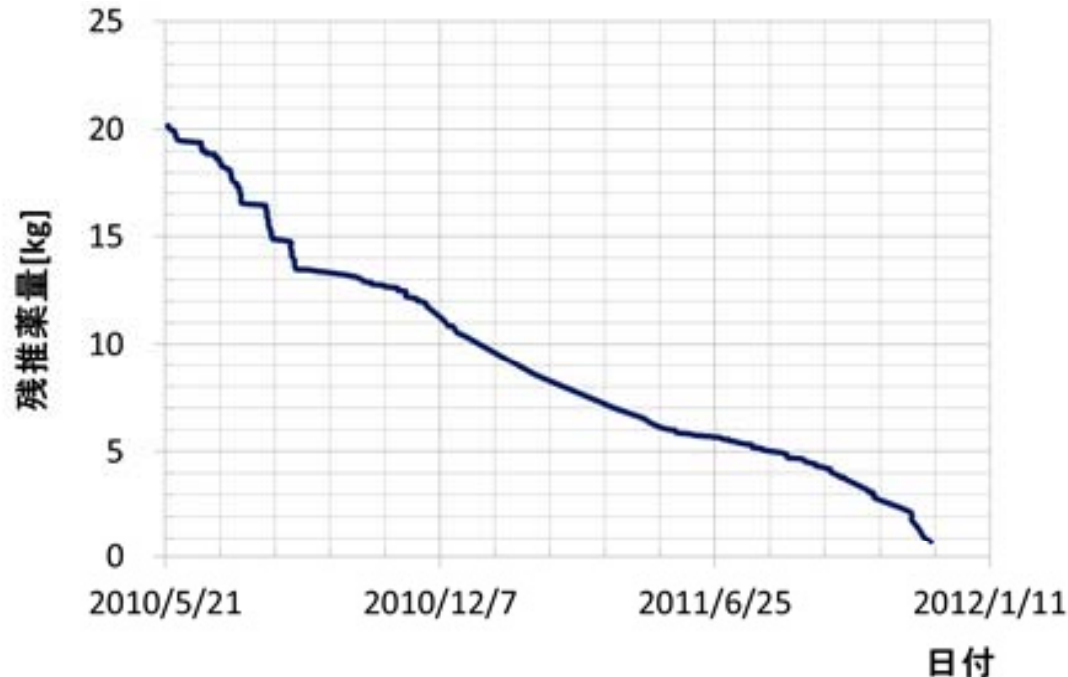
(2)太陽系内宇宙塵分布の日心距離依存性の研究

地球から金星近傍までの領域で、太陽に近づくと連れて、ほぼ1ケタ連続的に上昇する宇宙塵の分布構造をかつてない時間分解能で明らかにした。

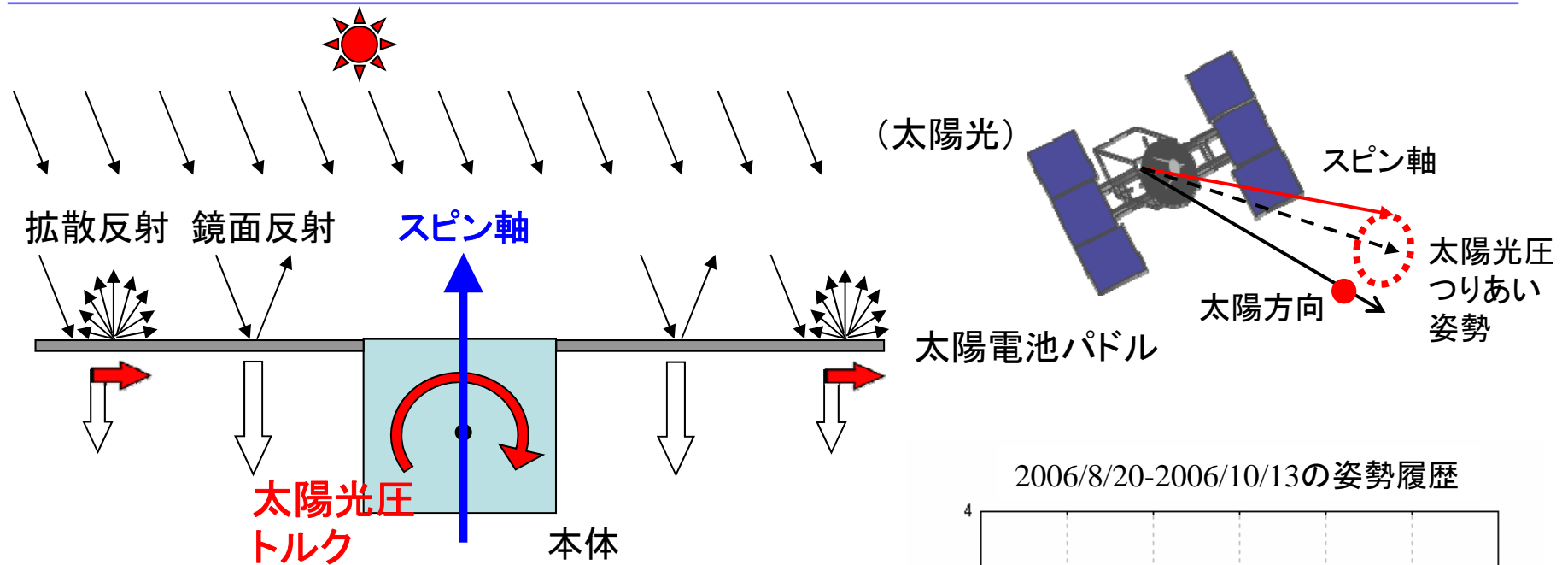


付録2. 4 新規開発機器の性能評価

- ・IKAROSでは、推進系として新たに開発した**気液平衡スラスタ**を採用している。
(液化ガスを液体状態で貯蔵し、気化したガスのみを噴射する推進系。
不燃性・無毒の推進剤を採用できるため、小型宇宙機用推進系として有望。)
- ・気液平衡スラスタでは、推進剤の気液分離が非常に重要な課題である。
IKAROSではこれを実現するためにタンクに発泡金属を入れる工夫を施した。
- ・2011年12月に推進剤の枯渇を確認し、これまでの噴射履歴から推力、比推力について評価を行った結果、ほぼ理論通りの性能が発揮できたことを確認し、上記タンクの気液分離機能についても実証された。



付録3. はやぶさの姿勢運動



- ・はやぶさでは拡散反射による太陽光圧トルクによりスピン軸が太陽光圧中心まわりに**円運動**した。
→太陽光圧力中心が探査機質量中心と異なるためトルクが生じ**すりこぎ運動**（プリセッション）が発生した。
- ・リアクションホイール及び推進系故障のため、この姿勢運動を姿勢制御に積極的に利用した。

