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

〇船瀬龍, 矢野創, 森治, 津田雄一, ソーラーセイルWG

月・惑星探査プログラムグループ(JSPEC) 宇宙航空研究開発機構(JAXA)

発表内容

- 木星・トロヤ群小惑星探査ミッションの概要(矢野)
- ソーラー電力セイル技術の意義と位置づけ
- これまでのソーラー電力セイル研究開発の成果
- IKAROSによる世界初のソーラー電力セイル技術の実証
- 外惑星探査のための工学技術開発
- 今後の予定

2020年代に目指すべき理工学探査目標

<1: 深宇宙工学技術の確立>

はやぶさ運用で培った電気推進技術と、イカロス運用で培ったソーラーセイル 技術の融合により「ソーラー電力セイル探査機」を開発し、<u>原子力に依存しな</u> いで太陽系外惑星領域を探査する能力を獲得する。

<2: 国際木星圏総合探査への参画>

それを用いて<u>欧米露が2020年代の実現を目指している木星圏の国際総合</u> 探査構想に、我が国も独自の宇宙機で参画する。木星圏では独立プローブ を分離し、木星および衛星群のプラズマ環境の相互作用を観測する。

<3: 世界初の木星トロヤ群小惑星への到達と惑星系形成論> 母船は航行を続けて<u>木星トロヤ群領域への人類初の到達を試み</u>、同領域の 小天体が木星圏の原材料の残滓か、惑星移動後に捕獲された太陽系外縁 天体であるか、という<u>惑星系形成論の中核的課題の解明</u>に挑む。

<4: 宇宙科学分野横断的なクルージング観測>

クルージング時には、ガンマ線天体の位置同定、小惑星帯以遠での赤外線 観測による「ダストフリー天文学」の実現、日心距離に応じた宇宙塵分布の解 明など、高エネルギー天文学、赤外線天文学、太陽系科学にまたがる分野 横断的な観測プラットフォームの役割を担う。







ソーラー電力セイルを活用したサイエンスの検討: 黄道面脱出勉強会から現在まで11年間の系譜

2000~01年度 黄道面脱出ミッション勉強会(クルージング観測項目を自由に募った)

- →太陽極域観測、ガンマ線バースト観測、ダストフリー赤外天文学、太陽系ダスト計測
- 2002年度 「ソーラー電力セイル」WG発足(金星経由黄道面脱出、木星経由黄道面内双方)
 - →ガンマ線バースト観測、ダストフリー天文学、太陽系ダスト計測、小型木星極域オービタ、 小型木星大気プローブ、木星トロヤ群フライバイ観測
- 2005^{~06}年度 これらの科学提案を含めて、次期工学試験探査機計画に選定。 第25号科学衛星には落選。
- 2006年度~ NAOJ+ISAS木星トロヤ群小惑星勉強会開始
- 2007~08年度 小型セイル実証機プロジェクト(IKAROS)発足(内惑星領域クルージング観測を募った)
 - →理学委員会「小型セイル搭載理学観測機器シンポ」「小型セイル搭載理学観測機器評価小委員会」実施:ガンマ線バースト観測、太陽系ダスト計測を選抜
- 2007年度 ラプラス国際協力WG(後にEJSMに改組)発足
 →木星プラズマ圏同時観測、木星衛星観測(欧米探査機に添乗)
 ESA-Cosmic Vision Lクラスの第一次選抜にEJSM通過
- 2008年度 木星・トロヤ群探査WG準備チーム発足
- 2009年度 H-IIA打上げ想定ソーラー電力セイルのミッション強化検討
 - ・クルージング観測(ダストフリー赤外天文学、ダスト計測、ガンマ線など)
 - ・木星磁気圏オービター(JMO)
 - ・木星トロヤ群ランデブー観測
 - CIBER観測ロケットによる赤外線天文観測成功
- 2010年度 IKAROS打上・運用、フルサクセス達成
 - システム要求の整理・全体システムの再検討

科学観測運用案:赤外線天文、高エネルギー天文、 プラズマ物理、太陽系科学等の相乗り



⑦ トロヤ群小惑星ランデブー観測 →はやぶさ、(はやぶさ2)

クルージング(1):宇宙赤外線背景放射、黄道光の立体観測

科学目的①: 宇宙で最初に生まれた星からの光を赤外線宇宙背景放射として観測 科学目的②: 黄道光の立体的観測による太陽系ダスト分布の全貌を解明



観測方法:クルージング中の分光マッピング観測

- 黄道光の輝度とスペクトルの日心距離依存性
- 小惑星帯以遠にて黄道光(前景放射)に制限されない究極の宇宙背景放射観測



クルージング(2):太陽系ダスト分布の日心距離依存性の解明 ~メテオロイドの超高速衝突フラックスの連続計測~







木星磁気圏の科学:「木星系の仕組みを知る」





Simulation of Jupiter's magnetosphere Dsw = 0.01 nPa, IMF Bz = 0.105 nT, t = 3.5 hours





* エウロパ周回機(NASA)・ガニメデ周回機(ESA)との 同時観測で、「大きく時間変動 する、過酷な宇宙環境下に ある氷衛星の世界」というテーマが、圧倒的に充実する。 * 氷衛星世界への「宇宙生命学」からの興味の高まり →観測テーマ: (1) 回転プラズマ系の物理、(2) 磁気圏-⁵008</sub>衛星相互作用、(3) 高エネルギー粒子加速、(4) 変動する 宇宙環境に取り囲まれたガリレオ氷衛星

木星トロヤ群:未踏領域、D型、連星小惑星の科学~ 「木星系の形成条件・進化過程を知る」

[科学課題1]トロヤ群の起源の二つの学説

(1)古典的モデル

=「トロヤ群は木星系形成時の微惑星の残滓」

(2)ニースモデル

=「現在のトロヤ群は、ガス惑星大移動の過程で第一世代が拡散された後に捕獲された、EKBO天体」

[科学課題2] D/P型トロヤ群の構成物質と内部構造

(1) スノーラインを超えたているのに「水吸収」の分光特徴が見えない理由は?

(2) 1[~]2g/ccと低いバルク密度はどんな内部構造(集積プロセス、 原材料)によって実現されているか?









<可視多色測光カメラ+赤外分光カメラ> *天体サイズ =>バルク密度・平均空隙率 *表面多波長フィルタ/分光観測=>表面上の主要 鉱物・氷 *クレーターサイズ分布=>衝突フラックス@5AU =>1AU(月面)、メインベルトとの直接比較 =>クレーター形成物理・形状の違いを比較 =>地上観測による小惑星サイズ分布と比較 *表面物質物性=>反射率、多色測光 =>D型小惑星スペクトル型の典型を得る (*特徴地形=>表層進化、風化、構造・強度) (*自転時間、軸方向、歳差運動=>衝突進化、内部 情報)

太陽系探査諸分野と本計画の観測対象



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船.

ソーラーセイルのアイデアは100年程度前からあったが、極めて軽量かつ広い面積を保 持できる薄膜鏡が必要であり、まだ実現されていない、→IKAROSが世界で初めて実現

・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<u>薄膜太陽電池を貼り付けた電力セ</u> <u>イルによる発電</u>を組み合わせた日本オリジナルのコンセプトである. 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.



現在のミッション (小型ソーラー電力セイル実証機) 将来計画 (中型ソーラー電力セイル探査機)2

ソーラー電力セイル研究開発の意義・目的

- ・薄膜太陽電池により<u>木星圏でも十分な電力供給</u>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。
- ・<u>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</u>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、日本のみが実証経験あり、 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。
- →木星以遠に行く日本<u>独自の外惑星探査技術を日本が獲得する</u>.

<海外で検討されているソーラーセイル>



ブーム型 ソーラーセイル



インフレータブル型 ソーラーセイル

<宇宙太陽光発電システム>



ソーラー電力セイル技術の位置づけ



ソーラーセイル製作・展開実証実績







2003 大気球高高度落下試験 (D=4m)



2003-2004 スピンテーブル試験 (D=2.5m)

2004



2010 深宇宙飛行実証(IKAROS) (D=20m)



観測ロケット弾道飛行試験 (D=10m)





2006

大気球高高度吊下試験 (D=20m)





Deep Space Solar Power Sail Demonstrator

IKAROS

Sail Size: 14m x 14m S/C Weight: 307kg Orbit: Venus Transfer

Launch: May 21, 2010 Sail Deployment: June 9, 2010



ソーラーセイルの展開・展張





ソーラーセイルの展開・展張









数値シミュレーションモデルの構築







Days

ソーラーセイルの航法誘導



- •IKAROSは特定のターゲットに対する 誘導は行ってはいないが、仮想的な ターゲットへの誘導を模擬的に実施し てデータを収集している.
- •12/8の金星最接近時の金星B-Plane 上での通過点を、太陽光圧により制 御する実験を実施中.特定のB-Plane上の点を通過するべく、主とし てスピンレートを制御してセイル姿勢 履歴を制御している.
- •あかつきのVOI運用のため, IKAROS の運用が厳しく制限されていた. この ため軌道決定精度が十分確保できて いない現状だが, 誤差楕円は順調に (同心円的に)小さくなった. 今後引き 続き評価を継続する計画である.



金星B-PLANE上の誤差楕円



ソーラーセイルの航法誘導



金星最接近は、12/8 7:39UT. 最接近距離は、80800km.









$$\begin{aligned} \mathbf{E} \tilde{\mathbf{F}} \mathcal{W} \mathbf{D} \mathcal{F} \mathcal{V} \tilde{\mathbf{F}} \mathbf{-} \mathbf{F} \\ & & \\ \mathbf{A} \\ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \alpha \\ \delta \\ \Omega \end{bmatrix} = \frac{1}{AU^2} \begin{bmatrix} \tilde{A} & -\tilde{B} \\ \tilde{B} & \tilde{A} \\ & \tilde{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha - \alpha_s \\ \delta - \delta_s \\ 1 \end{bmatrix} \qquad \overbrace{\mathbf{A}} \mathbf{C} \\ \end{aligned}$$



IKAROS・はやぶさの成果を基盤とする 外惑星探査技術の開発・実証

	大型膜構造物の展開・展張	····· 	IKAROSで実施したものを拡張	セイル・リエント リ・柔軟構造物
中型計画の技術実証項目	薄膜太陽電池システム	•••••	IKAROSで実証したものを高効率化	電源一般·有人 基地技術
	低推力推進系による軌道操作	•••••	電気推進と光圧推進のハイブリッド航行	誘導航法技術
	高比推カイオンエンジン	····· >	はやぶさより数段高効率の推進機関の実現	宇宙推進一般
	耐高放射線環境機器	•••••	木星環境に耐える技術	宇宙環境
	低温2液推進機関	····· >	木星距離での電力削減	宇宙推進・宇宙シ ステムー般
	燃料電池統合型推進系	•••••	木星距離でピーク電力を確保する方策	電源一般·有人 基地技術
	惑星間フォーメーションフライト	•••••	高度な誘導航法技術の獲得	誘導航法技術
	超高速減速技術	•••••	高速大気突入技術	リエントリー般
	USO・△VLBI軌道決定・航法	·····>	遠距離 <mark>高精度軌道決定</mark> 技術	深宇宙航行技術
	Ka通信系/膜面上Phased Array	····· >	遠距離高速通信技術	宇宙通信一般

母船の技術課題

- 大面積柔軟構造物の展開・制御機構
 - 超大型膜面の安定展開方式の検討
- 薄膜太陽電池の<u>軽量化・高効率化</u>
 - 対質量比出力の向上
 - 連続製膜技術の獲得
 - 耐環境性向上·長寿命化技術
- 超高性能電気推進システム
 - 長寿命・高精度グリッドの製造
 - ランデブを考慮した推力、比推力のバランス検討
- 大面積膜構造の姿勢制御機構
 - 推進系に依存しない姿勢制御系検討
 - 各種観測要求を満たす高精度姿勢制御
- 低温推進系,推進系統合型燃料電池
- 観測機器







木星オービタの技術課題

- 木星環境での<u>耐放射線性</u>
 - サブシステム単位の耐放射線設計.
 - ゾーン単位・機器配置最適化による耐放射 線性管理.
- 5AUでの発電技術・<u>省電力技術</u>
 - 軽量太陽光発電(電力セイル技術ベース)
 - 低温推進系等のサブシステム単位の省電 力技術。
- 木星距離での高速通信技術
 - Ka帯送信機の検討.
- 木星軌道投入技術
 - JOI (Jupiter Orbit Insertion)の信頼性確
 保. (シーケンサ, OMEの信頼性技術)
 - 母船からの分離以降, JOIまでを低消費電 カで乗り切る方策.
- 木星<u>衛星ツアー軌道計画</u>
 - Ganymede, Calisto等の木星衛星を利用したフライバイ軌道計画(投入ΔV削減)
 - 木星圏での軌道決定技術.



木星衛星フライバイツアー計画例

今後の計画

- 2010年度~2011年度:WGでの研究開発
 - サイエンスミッション(トロヤ群ランデブ探査,クルージング観測)の詳細化
 - システム検討の詳細化
 - ペイロード重量のさらなる確保方策検討
 - 確実なサイエンスの成果出しが可能なシナリオ検討
 - 要素技術の研究開発
- 今後のスケジュール
 - WG活動:~2012(MDR実施)
 - プリプロジェクト活動:2012~2013
 - PM設計·製造, TTM/MTM: 2013~2015
 - FM製作:2016~2017
 - FM試験:2018~2019
 - <u>打ち上げ:2019~2020</u>
 - クルージング観測期間:2020~(メインベルト越え:2024~)
 - オービタ木星到着&観測軌道確立:2026~28
 - トロヤ群ランデブ:2030

(工学としての)まとめ

- 日本独自の外惑星探査技術を獲得すべく、2002年度より、 ソーラーセイルWGの下で、ソーラー電力セイルを用いた外 惑星探査ミッションについて検討してきた
- 地上実験、気球実験、観測ロケット実験等の実験を通じて、 ソーラー電力セイルの実現に必要な技術開発を行ってきた
- 2010年、小型ソーラー電力セイル実証機<u>IKAROS</u>を打ち上げ、惑星間を航行する<u>世界初のソーラーセイル</u>を実現し、ソーラー電力セイルの技術実証に成功した
- IKAROSとはやぶさの成果を踏まえ、2010年代後半を目標 にソーラー電力セイルを用いた木星・トロヤ群探査ミッション を実現させる計画であり、現在、各種工学技術の研究開発 を進めている
- その先の、太陽系/外惑星領域を自在に航行できる世界の 実現にむけて...



深宇宙探査の科学・技術の継承・発展

The 2000's

The 2010's



科学観測における国際協力・状況

<現在までの国際協力の実績>

(1)欧米露日間の国際木星総合探査構想(EJSM)での、同時観測計画の検討。

(2)日欧米間の木星トロヤ群探査構想の情報交換と科学的意義の検討会の開催。

現在の国際状況は以下。

* 2011年にNASAはNew Frontierクラスのミッションとして、木星磁気圏探査機JUNOを打上げる 予定。

* 2020年代を前提に、現在NASAが旗艦候補としてエウロバ周回機、ESAがCosmic Vision候補 としてガニメデ周回機を、検討中。日本も独自プローブを送ることで、これらとの木星磁気圏の同時 多点観測を想定。

* 木星トロヤ群探査は、日仏米が独立に技術的実現性を検討しているが、選抜されたミッション 案はまだない。ただし現在改訂中のNASA Decadal Surveyでもその意義は明確に記載されており、 学術界の関心は高まっている。

*「ダストフリー赤外線天文学」構想も日本の独創だが、近年NASAの外惑星探査機への相乗り 望遠鏡を提案する、海外の研究グループも現れてきた。

<国際共同の重要性>

 ・木星圏同時多点観測の実現には、欧米の木星圏観測計画と同時期に運用する必要がある。
 ・木星トロヤ群探査は、日欧米の研究者間で実現への期待が高まっているものの、各宇宙機関での単独ミッション提案の採択および実現時期は未知数であり、国際競争よりも、単独の科学チームを 構築する国際協力が提唱されている。

三つのWG・準備チームの連携タイムスケール

現在



*= EJSM同時観測の枠組みにおける日本独自の打上げと、日本独自の外 惑星領域探査(木星磁気圏オービタ、トロヤ群ランデブー)の実現可能性の検討