

第一回木星トロヤ群小惑星勉強会

# ソーラー電力セイルによる 木星トロヤ群探査構想

2007年1月22日

国立天文台三鷹キャンパス

矢野創、津田雄一、森治、中谷幸司、(ISAS/JAXA)、  
吉田二美(国立天文台)、ソーラ電力セイルWG

## Agenda

- \* ソーラー電力セイルとは
- \* 搭載科学機器候補
- \* M-V-7サブペイロード打上げ・運用とPVDF
- \* トロヤ群フライバイ

<これまでの経緯>

2000～01年度 黄道面脱出ミッション勉強会

2002年度 「ソーラー電力セイル」ワーキンググループ発足

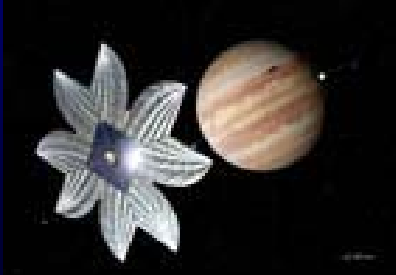
2003～06年度 気球、観測ロケット、サブペイロード実験

2005年度 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

## ソーラー電力セイルミッションとは

- \* 原子力電源を使わないで、日本独自の技術で「外惑星領域探査」を可能にするための工学試験ミッション(MUSES-D)案
- \* 大型薄膜太陽電池を使った電気推進エンジンと、太陽光圧を受けるソーラーセイルの融合型推進系
- \* 深宇宙をクルージングする間、様々な宇宙科学観測を実施
- \* 日本初の木星探査、世界初の木星トロヤ群小惑星探査
- \* 宇宙塵衝突検出と光学観測の同時比較:太陽系ダスト構造の解明
- \* ISAS工学委員会で選抜済み。しかし第25号衛星はAstro-Gに。
- \* 2013年以降の打上げを目指して、現在ミッション案の再定義中。



## ソーラーセイルで木星・トロヤ群へ

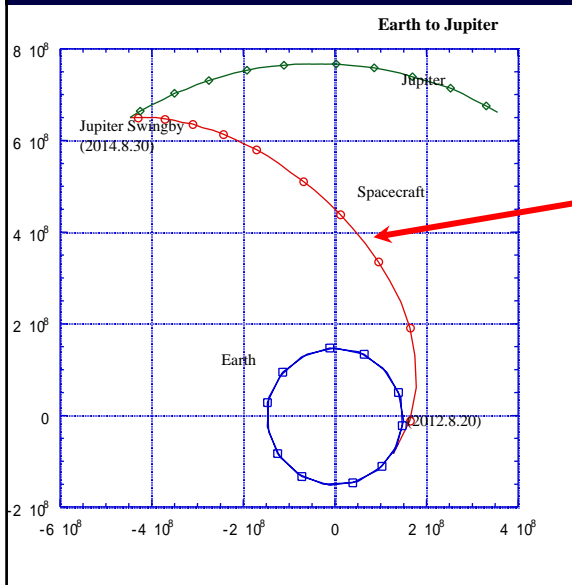
50mの太陽帆(セイル) + 高比推力イオンエンジンで木星およびトロヤ群をフライバイ探査



\* 探査機本体は慣性系固定, 膜面はローター部に接続, 遠心力により展張

\* 膜面には薄膜太陽電池, 木星オービターには膜面パドルを搭載

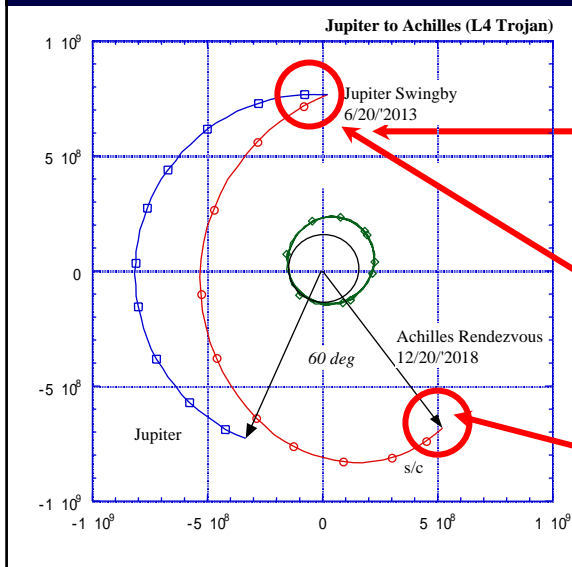
# 地球～木星：クルージングの最大活用



<クルージング計測>  
 日心距離：1.5AU  
 連続観測期間：4年  
 (うち1AUに2年)

- \* ガンマ線バースト検出
- \* 黄道光⇔宇宙背景放射
- \* ダストフラックス
- \* メインベルト小惑星  
フライバイ観測

# 木星～トロヤ群： 宇宙最古の光から太陽系未踏領域まで



<木星系>  
 \* 極域電磁気圏と  
オーロラの同時観測  
(小型極軌道オービタ)

<ダストフリー天文学>  
 \* 極低ノイズの宇宙  
背景放射測定

<木星トロヤ群>  
 \* D型小惑星の  
フライバイ観測

# 日本のソーラーセイル開発の歩み

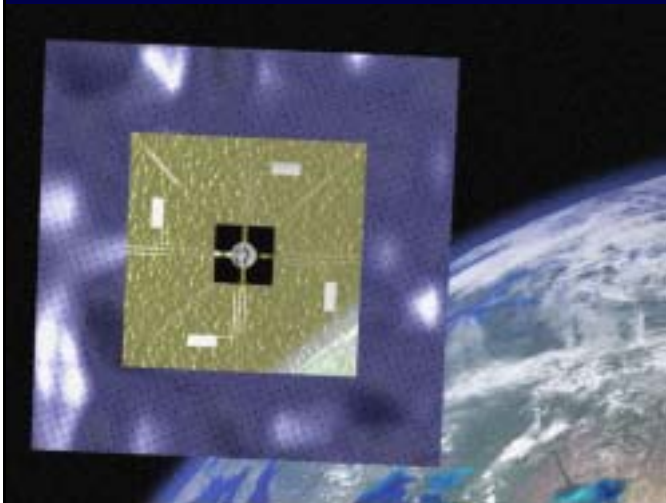


2003年8月、  
高度約36km  
でのセイル薄  
膜展開実験を  
載せた大気球  
B30-71号機  
の打上げ

2004年8月、  
高度約170km  
でセイル薄膜展  
開実験を載せた  
S-310-34号  
機の打上げ



## 2006年9月、M-V-7号機サブペイロード： ソーラー電力セイル実験小型衛星 (SSSAT)



- ・膜( 5m)を展開、  
展開状態を撮影
  - ・膜面太陽電池で電  
力を確保
  - ・膜面がある状態  
での姿勢制御
  - ・気液平衡コールドガ  
ススラストによる姿  
勢制御、軌道変更
  - ・ダストカウンタによ  
る軌道上のメテオロ  
イド&デブリブラック  
ス計測
- 打ち上げ：  
2006/9/23
- ミッション期間：  
3.20日間

# ソーラー電力セイルを用いた科学観測提案

- \* 深宇宙環境を生かした多彩な宇宙科学の共通プラットフォーム
- \* 「次の次」の天文学・惑星探査を拓くプリカーサー観測への挑戦

## (1) 高エネルギー天文学研究

ガンマ線バーストの偏光観測と IPN による方向決定

## (2) 赤外・サブミリ波天文学研究

黄道光を排除した宇宙赤外線背景放射の観測

## (3) 固体惑星科学研究

太陽系ダストの分布構造の日心距離依存性の解明

(A) 黄道光のクルージング光学観測

(B) メテオロイドフラックスのクルージング計測

メインベルト及び木星トロヤ群小惑星のフライバイ観測

## (4) 宇宙プラズマ研究

小型木星極軌道オービタを使った木星電磁気圏探査

## 現状での電力セイル搭載機器候補のまとめ

### (1) ガンマ線バーストの偏光観測と IPN による方向決定

= > ガンマ線バースト検出機: 1 kg

### (2) 黄道光を排除した宇宙赤外線背景放射の観測

### (3) 太陽系ダストの分布構造の日心距離依存性の解明

(A) 黄道光のクルージング光学観測

= > 赤外線分光器 + 放射冷却板: ~ 5 kg

(B) メテオロイドフラックスのクルージング計測

= > PVDF 薄膜ダスト検出器: 1 kg (一部セイル兼用)

### (4) 小型木星極軌道オービタを使った木星電磁気圏探査

= > 木星オービタ (~ 85kg ? TBD) 中、ペイロード ~ 4 kg

### (5) メインベルト及び木星トロヤ群小惑星のフライバイ観測

= > 光学カメラ: ONC-T1, T2, W: バス機器兼用

(望遠鏡オプションの場合は + ~ 5kg)

\* 観測機器合計: 7 - 12kg (探査機)、4kg (木星プロ - プ)

## セイル科学観測を取り巻く状況の進捗 (2007.01現在)

### <サイエンス・機器開発>

- \* 2011年にNASA木星極軌道オービターJUNO打上げ予定
- \* 日本の赤外線計測装置の米観測ロケット搭載試験近づく
- \* SSSATにPVDFダスト計測器を搭載(しかし通信不通)
- \* トロヤ群小惑星のサイズ分布等の地上観測が進展

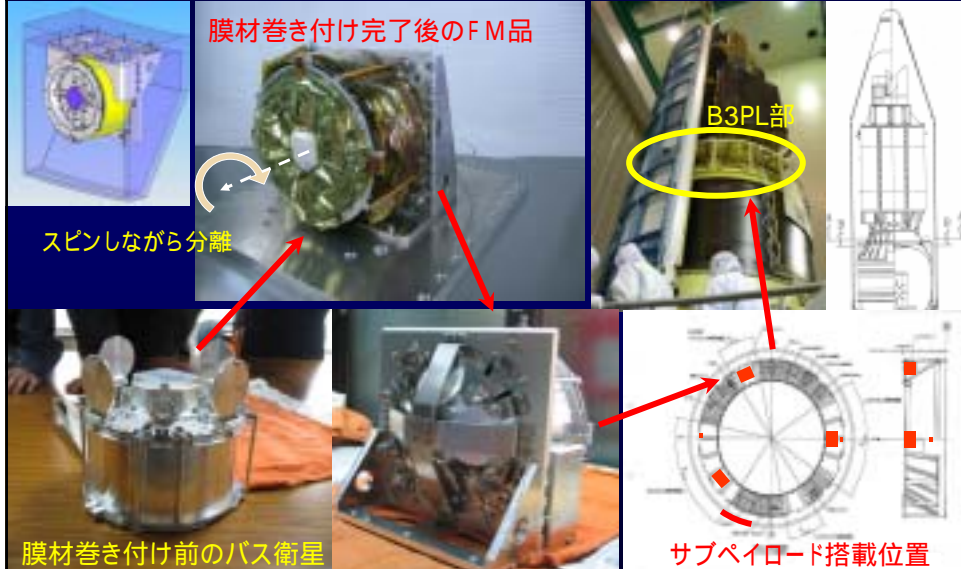
### <周辺状況>

- \* ISAS第25号科学衛星にVSOP-2 (Astro-G) が選抜  
(セイル打上げの遅れ)
- \* 次の打上げ機会は2013年以降? 軌道の再検討が必要。
- \* はやぶさ帰還運用、すざく・あかり・ひので定常運用、  
はやぶさ2号提案の内部・外部評価が修了

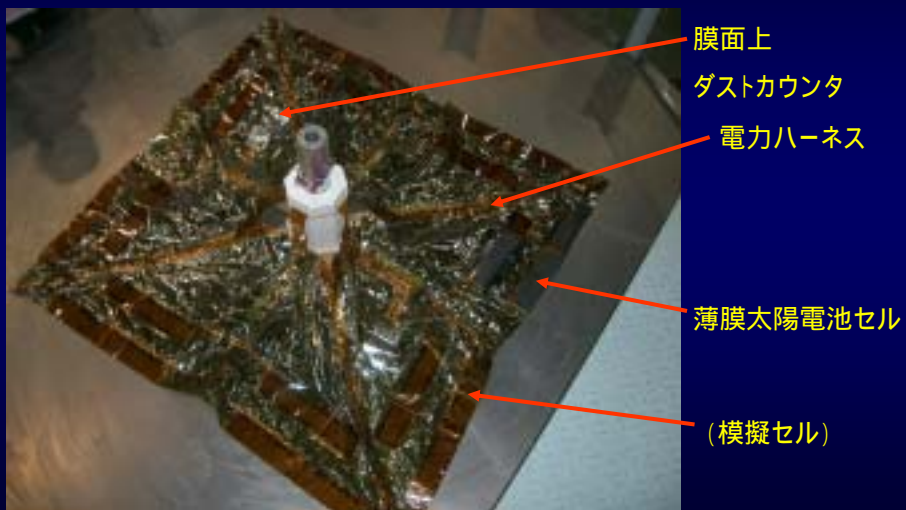
2006.09.23. M-V-7号機でSSSAT打上げ、  
「ひので」フライトに便乗



# SSSAT衛星外観と M-V#7B3PL継ぎ手部インターフェイス

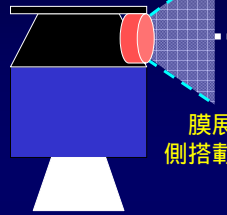


## 電力セイル展開実験 (スピンテーブル)



# SSSATミッションシーケンス

(1) M-V B3PL部に  
搭載して打ち上げ



膜展開状況はロケット  
側搭載カメラで撮影

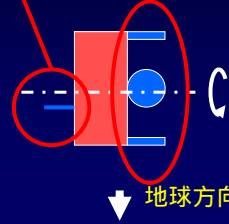
(2) スピンさせながら  
半径方向へ分離



(3) スピナップして、  
遠心力で膜展開



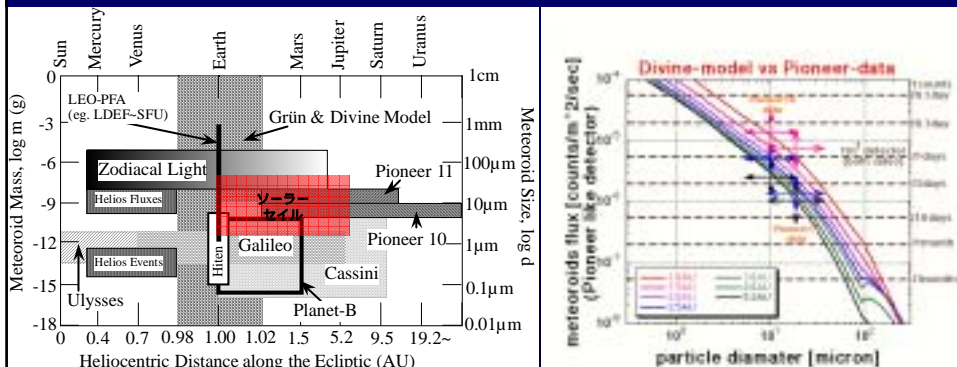
受信ANT 送信ANT



- (1) スロースピンさせながら，B3PLよりロケット半径方向へ分離
- (2) 分離後にスピナップ，セイル展開．展開挙動はB3PL側のカメラで撮影して，衛星へデータを送信．衛星DRへ溜め込む．
- (3) 第1可視にてB3PLカメラおよび衛星搭載カメラ，セイル展開挙動テレメトリのリプロを行う．
- (4) 以後，必要に応じてGPS軌道決定，姿勢変更制御を実施しつつ，セイルの挙動データ，温度データ，ダスト計測データ等を取得する．

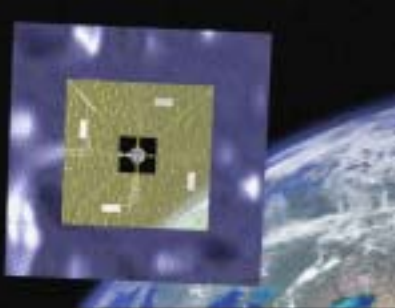
## 太陽系ダスト分布の日心距離依存性の説明： メテオロイドフラックスのクルージング計測

- \* セイル総面積の0.5%程度を薄膜PVDF (PolyVinylidene Fluoride) に置き換えると、数m<sup>2</sup>の曝露面積を持つ、大面積ダスト検出器が作れる。
- \* 従来の探査機よりも、二桁多いダスト衝突数で、フラックス計測の精度、時間・空間分解能を飛躍的に向上 => 日心距離による数密度変化やダストトレイルとの遭遇など、統計的議論が必要な課題を解決。

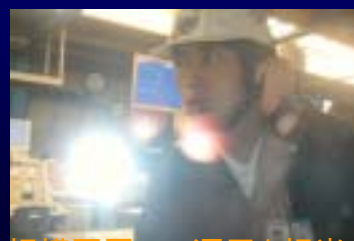


# PVDF+ハーネスのSSSAT膜材取り付け

- 反太陽面・AI蒸着面のみに設置
- 幅5mmの両面テープによる枠組み
- 70mm x 200mmの短冊状
- 9 $\mu$ m、20 $\mu$ m厚の二種類、2チャンネル(0.025 m<sup>2</sup>)
- 太陽面は7.5 $\mu$ mポリイミドが「バンパー」になるので、反太陽面が主要な曝露方向。



## M-V-7号機SSSAT分離・追跡成功： 相模原局⇔内之浦コントロール⇔海外局



\* 海外商用局(豪、アラスカ)との通信、相模原局での運用を担当

# SSSAT実験結果と今後の開発課題

\* 2006.10.31. JAXAプレスリリース>「SSSATはロケットから分離され、海外地上局にて発信電波が受信されましたが、何らかの理由によりSSSATからの信号が断続的にしか受信できませんでした。」

\* 成功基準の達成度:

(Minimum) 検出器付膜材の展開確認 → 成功? 部分的?

(Nominal) 検出器・回路の動作確認 = > 未確認

(Extra) 低軌道上のM&D衝突検出 = > 未確認

→ 喫緊のセイル実証試験への再搭載を希望。

\* 惑星間空間仕様へのアップグレード

(1) 検出最小サイズ~PVDF膜厚の再検討

(2) Cassini-PVDF式表面コーティングの検討

(3) ポリイミドとの接着方法の再検討(収縮・長期劣化・剥離)

(4) 検出器面積の拡大~分割・多チャンネル化

## メインベルトと木星トロヤ群小惑星の ソーラー電力セイル・フライバイ観測

\* 存在領域:

メインベルト= 火星~木星

トロヤ群= 木星公転軌道

前後60度(L4, L5点)

\* 全数見積もり(>1 km):

メインベルト=  $6.7 \times 10^5$

トロヤ群=  $1.6 \times 10^5$

(既発見数: L4 = 1048,  
L5 = 626 (2004年))

\* トロヤ群:

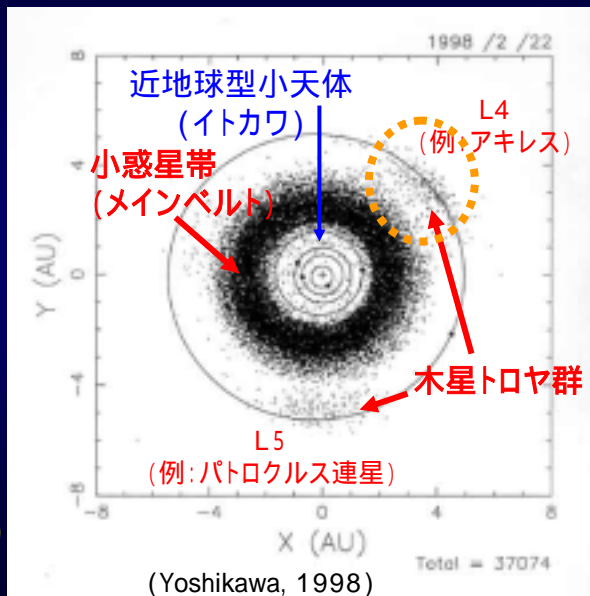
> 衝突起源の「族」、二重

小惑星あり: 衝突頻度は

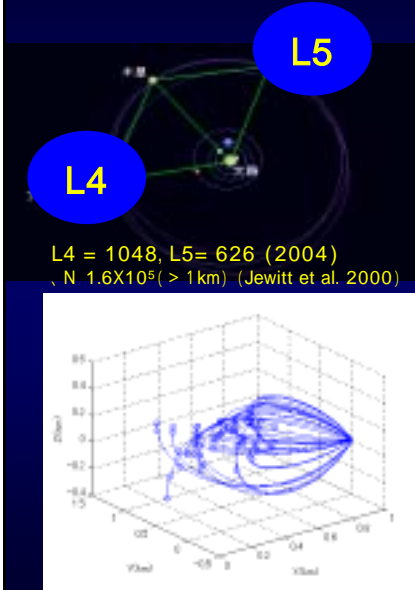
$MBA \times \sim 2$

> 幾何アルベド: 0.04 .09

> スペクトル型: D>P



# 初期軌道解析によるフライバイ解

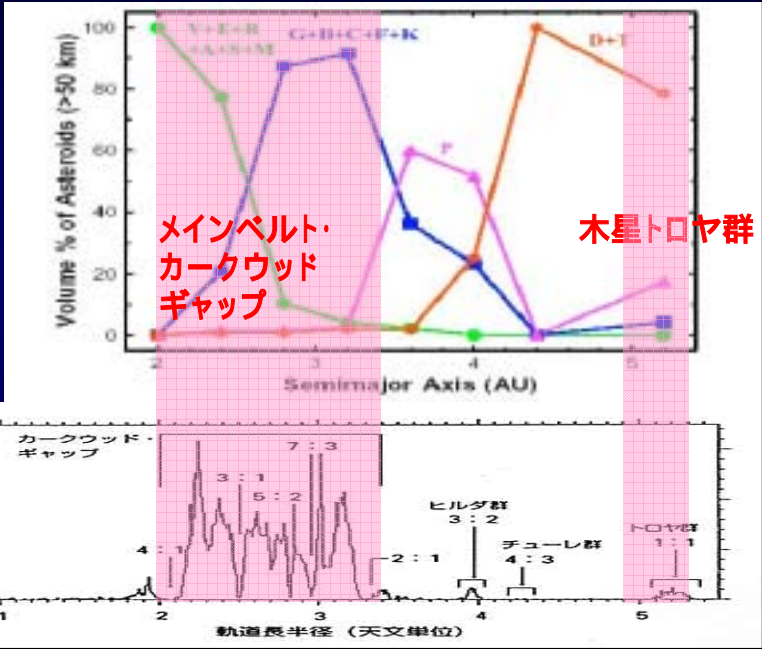


\* 遠方に集中し、最も始原的ながら、地球上でアナログ隕石が発見されておらず、サンプルリターンも困難な、謎の多い「D型小惑星」の宝庫である木星トロヤ群への史上初訪問。

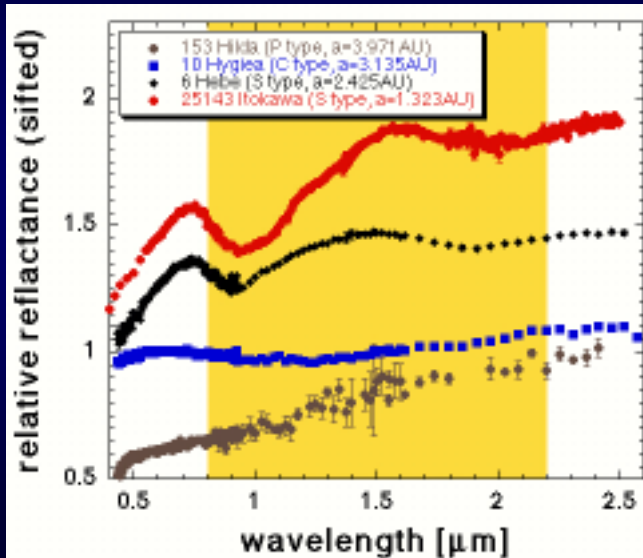
- \* 地球 => 木星: メインベルト X 1 以上
- \* 木星 => トロヤ: メインベルト x 1、トロヤ群 x 1 ~ 2
- \* トロヤ群アキレス (L4) は 120 km 超と、巨大でフライバイ観測に適す。  
=> 軌道解析では多数の探査対象ペアが成立。 V 選択の自由度あり。

# メインベルトと木星トロヤ群の日心距離

日心距離依存性のある特徴:  
スペクトル型存在比と共鳴軌道内存在数



# 日心距離に応じたメインベルト 小惑星スペクトル型の推移



太陽系内部

S

C

X, D, P

太陽系外部

原始太陽系星雲内  
での物質分布の傾  
向を反映

## トロヤ群小惑星の特長 (1)

\* 太陽・木星L4, L5点に集中(A= 5AU, 木星公転軌道上前後60度) :  
=> 重力ポテンシャルの「山」であり、様々な起源のintrudersが吹き込まったのではなく、木星と同時期に誕生したのではないか?

\* 既発見数: L4 = 1048, L5 = 626 (2004年初頭現在)

\* 全数見積もり:  $N(D > 1 \text{ km}) = 1.6 \times 10^5$  (Jewitt, et al, 2000)

(メインベルト:  $N(D > 1 \text{ km}) = 6.7 \times 10^5$  (SDSS, 2001))

=> 質量、数ともに小惑星帯と同規模。

\* サイズ分布:  $D < 1 \text{ km}$ : 不明

$D < 5 \text{ km}$ : 累積サイズ分布係数(CSD) = メインベルト並み

$D > 5 \text{ km}$ ,  $D > 70 \text{ km}$ あたりでCSDが変化

\* 衝突起源の「族」、二重小惑星(Patroclus)も確認された

=> 数が多いが空間密度が高く、衝突頻度はメインベルトの~2倍

=> 衝突進化履歴がメインベルトと異なる

## トロヤ群小惑星の特長(2)

\* 多色測光:  $0.35 < (V, R) < 0.6$  (Jewitt, et al., 2000)

\* 幾何アルベド:  $0.04 \sim 0.09$  (Fernandez, et al., 2003)

\* スペクトル型: D>P

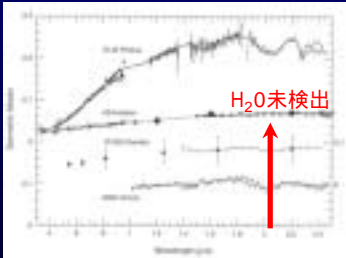
= > 彗星、EKBOs、C型小惑星、ガス惑星逆行衛星などとの関連

= > メインベルトよりも物質、物性が互いに似通っている

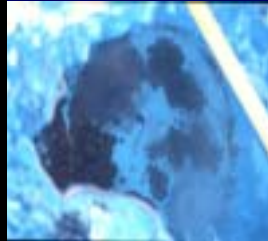
= > 木星内部の固体成分の組成比を反映した、始原物質では?

\* 地球に落下した隕石には、P,D型小惑星のアナログはほとんどない

= > 例外はTagish LakeとCM, CI様なMicrometeorites(脆い?)



(Barucci, et al. 2002)



(左) 土星外縁逆行衛星Phoebe (2004.06 Cassini撮像)

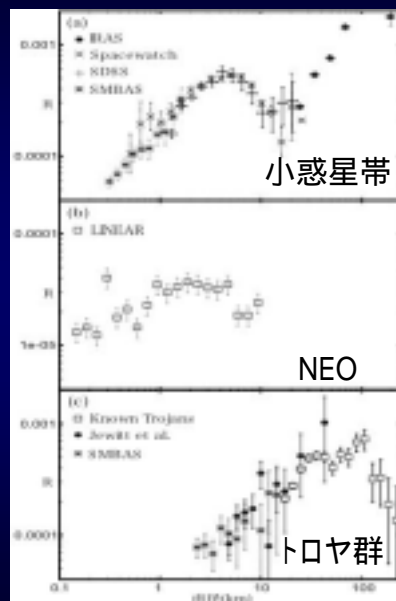
(右) 地上唯一のD型小惑星アナログ? : Tagish Lake隕石

## 木星トロヤ群地上観測の進展(1/2)

1. メインベルトと近地球小惑星とトロヤ群小惑星のサイズ分布は異なる。→天体の起源や物理的性質の違いを反映。

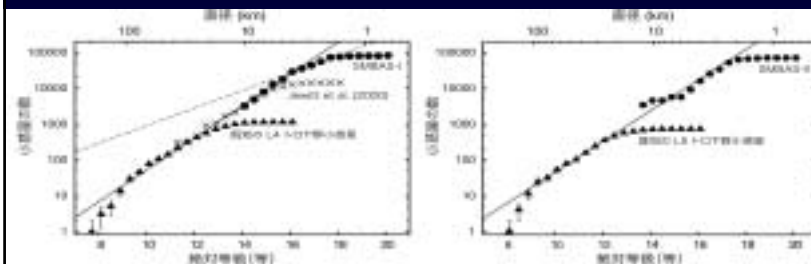
2. 内惑星のクレーターと木星衛星のクレーターのサイズ分布も異なる。→太陽系内側(地球付近、月)と外側(木星付近)では衝突天体の起源が異なる。

Rプロット: 一般にクレーターや小天体の個数がサイズの三乗におよそ反比例することが知られているので、クレーターサイズ頻度分布の統計を直径の三乗で規格化し、反比例する分布から詳細なずれを測定する手法)



(F. Yoshida, et al.)

## 木星トロヤ群地上観測の進展(2/2)



(F. Yoshida, et al.)

3. 外惑星領域の衝突天体の起源を知るには、木星が形成された時期から木星付近にあったであろうトロヤ群小惑星の表面クレーターを調べることが最適。(木星衛星は木星重力に引かれる微小天体の影響を色濃く受けている。)
4. 外惑星領域の天体は内惑星領域と違って氷・有機物を多く含む。内惑星表面で調べられたクレーター形成の物理はそのまま適用できない。クレーターサイズと衝突物のスケリング則は氷天体表面で決定される必要がある。
5. 補償光学系の発展により、連星トロヤ群小惑星が複数検出され始めた。同じスペクトル型の中でも、バルク密度で $1\text{g/cm}^3$ を切るものとC型～S型程度のもので、少なくとも二種類があることがわかってきた。

## 木星トロヤ群フライバイの観測項目(1)

- < 多色測光可視カメラ画像(可視～近紫外) >
- \* 天体サイズ = > バルク密度・平均空隙率
- \* 表面多波長フィルタ観測 = > 表面上の主要鉱物
- \* 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
  - = > 地上観測による現地小惑星サイズ分布と比較
- \* 特徴的な地質形状 = > 表層進化、風化、構造・強度
- \* 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
- \* 自転時間、軸方向、歳差運動 = > 衝突進化、内部情報

## 木星トロヤ群フライバイの観測項目(2) ：他機器の同時観測要求

< 大面積ダスト計測器 >

\* アウトバースト(彗星活動)、ダストバンド・ストリームの有無

< 可視・赤外望遠鏡 (pointingできれば) >

\* 天体表面上の水氷、有機物の有無

\* ダストバンド・ストリームの有無

= > Opposition位置では背景(EKBO起源)黄道光からトロヤ群起源ダストの輻射を検出できるか?

< 電波科学 >

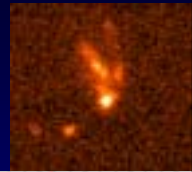
\* 軌道測距 = > 質量推定(画像からのサイズ測定と組み合わせ、バルク密度・平均空隙率を推定)

= > 内部に氷の存在?

以下、参考資料

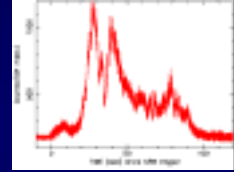
# (1) 線バーストの偏光観測と IPN による方向決定

提案者：村上敏夫、米徳大輔（金沢大学）、  
三原建弘（理研）、郡司修一（山形大）、河合誠之（東工大）



\* ガンマ線バーストは宇宙で最大の爆発現象で、  
初期宇宙を探る最良の武器ある。

\* 解明しなければならぬ最も重要なテーマの一つは、  
ガンマ線の放射機構の解明（シンクロトン放射か  
どうか？） => ガンマ線の偏光検出が鍵を握る

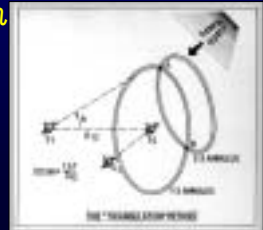


\* ソーラーセイル搭載のメリット：

## (1) バックグラウンド 線の低減 (2) IPN による GRB の方向決定

- ・ 地磁気放射線帯から離られる
- ・ 地球によるガンマ線散乱が無い
- ・ 雷や大気からの偽ガンマ線が無い

- ・ 複数の衛星で位置決定
- ・ 衛星間が離れるほど高精度に位置決定



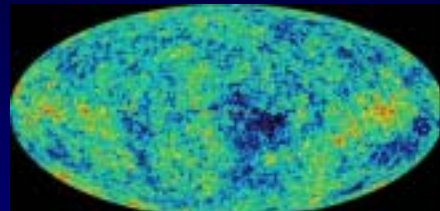
= 地球から離れることで、小型の検出器であっても  
精度と信頼性の高いガンマ線偏光観測が実現できる。

# (2) 赤外線宇宙背景放射の観測： 宇宙第一世代の星を捉える！

提案者：松浦周二、和田武彦、松本敏雄（ISAS/JAXA）

\* 宇宙背景放射：宇宙開闢以来の銀  
河系外天体の放射の重ね合わせ  
からなる、全天に広がった放射

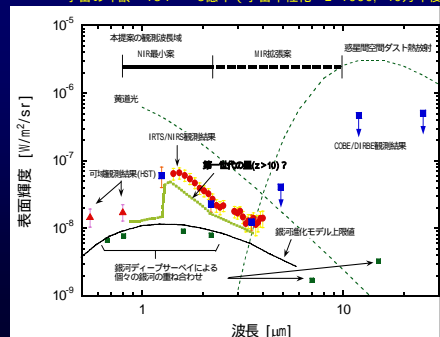
\* 宇宙第一世代の星の観測的研究：  
> スペクトル：ライマン 輝線やライマ  
ン端構造 = 星の放射時期と形成過程  
> ゆらぎ：銀河や大規模構造、空間ス  
ペクトル = 初期宇宙密度ゆらぎの成  
長シナリオ検証



WMAP：2.7K 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)  
宇宙の年齢 = 134 ± 3 億年 (宇宙中性化 = z=1000, 40 万年後)

\* ソーラーセイル搭載のメリット：黄道  
光の影響を排除した、世界初の赤  
外線宇宙背景放射の直接観測  
=> 宇宙論に大きなインパクト

(空の明るさの80%を占める黄道光成分  
は背景放射観測の最大の不定性。しかし  
4AUでは、小惑星帯起源の黄道光散乱が  
地球近傍の1%まで下がる。)



### (3) 太陽系ダスト分布の日心距離依存性の解明

#### (A) 黄道光のクルージング光学観測

提案者: 臼井文彦, 矢野創, 長谷川直, 松浦周二 (ISAS/JAXA), 中村良介 (産総研), 石黒正晃 (ソウル大学), 上野宗孝 (東京大), 大坪貴文 (国立天文台)

- \* 過去10年で、系外惑星系におけるダスト円盤 (系外黄道光) が相次いで発見
- \* 太陽系 = 人類がもっとも詳しくその構造と物質を調べられる「惑星系のテンプレート」
- \* ソーラーセイル搭載のメリット:
  - (1) 惑星間空間を移動しながら黄道光の輝度の差分を連続計測する: 日心距離に応じた局所的な輝度分布、つまり黄道光円盤の構造を解明
  - (2) 光学観測と微粒子衝突計測を同時に行う: 個体微粒子としてのダストの統計的個数密度と、散乱体としてのダストの光学的特性を、世界で初めて結びつける
- \* 「ダストフリー天文学」と同一機器・データを活用

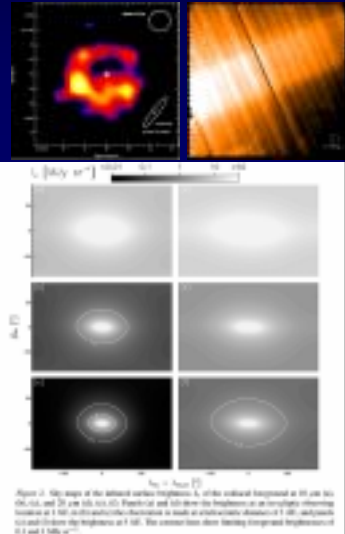


Figure 2. 40 steps of the zodiacal surface brightness. A, of the zodiacal light at 0.4 AU and B, at 19.2 AU. The color scale at the top shows the zodiacal surface brightness in units of  $10^{-16} \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ arcmin}^{-2}$ . The color scale at the bottom shows the zodiacal surface brightness in units of  $10^{-16} \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ arcmin}^{-2}$ . The color scale at the bottom shows the zodiacal surface brightness in units of  $10^{-16} \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ arcmin}^{-2}$ .

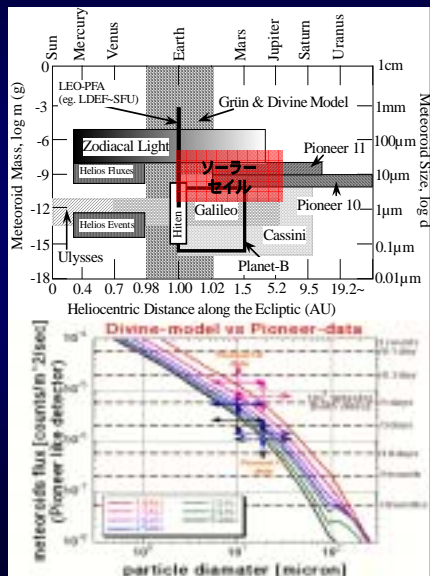
#### (B) メテオロイドフラックスのクルージング計測

提案者: 矢野創, 長谷川直, 奥平恭子 (ISAS/JAXA), 田中真 (東海大学), 岩井岳夫 (東大原子力研究総合センター)

- \* セイル総面積の0.5%程度を薄膜PVDF (PolyVinylidene Fluoride) に置き換えると、数 $\text{m}^2$ の有効曝露面積を持つ、巨大面積ダスト検出器が作れる。
- \* PVDFは宇宙実績の多い機器。最新は2004年のスターダスト探査機のヴィルト第2彗星フライバイ計測
- \* 従来の探査機よりも、二桁多いダスト衝突数で、フラックス計測の精度・時間・空間分解能を飛躍的に向上 => 日心距離による数密度変化やダストトレイルとの遭遇など、統計的議論が必要な課題を解決。

\*  $1\text{m}^2$ , 1年間の衝突ダスト数 (モデル)

	3 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$
1 AU	2880個	720個	120個
3 AU	1080個	240個	36個
5 AU	720個	180個	18個



## (4) 小型木星極軌道オービタを使った木星電磁圏探査

提案者： 笠羽康正、高島健、宇宙プラズマグループ (ISAS/JAXA) 他

\* 2010年代後半の立ち上げを目標とした、未解明の「内部・極域・電磁圏」の全貌を探る「木星大探査」の「パスファインダー」

\* 工学目標:

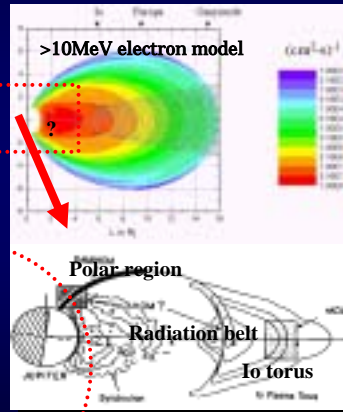
- > 日本独自の外惑星ミッション成立性の証明
- > 木星極軌道・低高度へ周回機を初投入

\* 理学目標:

> 木星本体を、「近傍」「極軌道」で全球的に観測、太陽系最強の磁気天体が引き起こす現象を初探査

- (1) 木星型「磁気圏-電離圏カップリング」の解明
- (2) 太陽系最強の「粒子加速装置」の解明

放射線帯の電子・イオン: modelでは、  
電子 10MeV以上で地球の数桁上  
Proton 100MeV以上で地球の一桁上



極方向から入り込み、  
強力な放射線帯を避け、  
かつAurora磁力線を切る