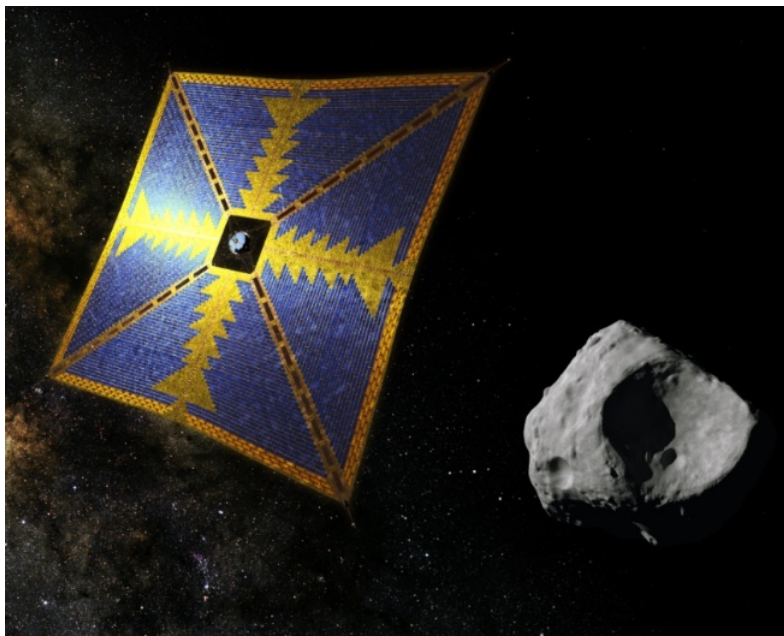


深宇宙技術実証ミッション の展望



森 治, 松本 純(JAXA)

宇宙科学・探査ミッションの実情

・日本と欧米の技術水準の格差

通信系技術(木星圏) はやぶさ2:2Kbps v.s. New Horizons:38Kbps

米国はCuriosityのSky Craneをリスクとせずに行なった。

日本はミッション数が少ない(宇宙科学ミッションは一品モノが多い)

・日本と欧米の資金規模の格差

中型計画でも300億円

Rosettaは3000億円, JWSTは1兆円

世界最先端の成果をあげるためには資金が不足している。



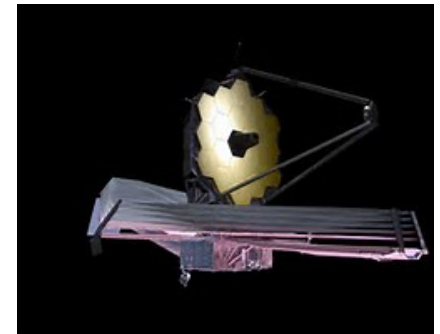
New Horizons



Curiosity



Rosetta



JWST

実験機の提案

技術水準と資金規模の格差を埋めるために**実験機**を提案したい。

- ・実験機に続いて本番機を投ずるという戦略(姉妹機とする)。
実験機と本番機の具体例としてはやぶさ1とはやぶさ2を想定。
実験機と本番機は別々にプロジェクト化する(国際共同の道もあり)。
- ・実験機であっても本番機で想定している理学観測を同様に実施する。
技術実証と理学観測の両方で評価されるべき。
- ・理学成果の保証は求めない(できない)。
未踏の地に行き探査すること自体が評価されるべき(NASAミッション)。
- ・繰り返しにより、不確定要素を取り除き、信頼性を高める。
ただし、最低限のミッション成果は確実に達成できるような仕掛けとする。

以上を踏まえ、

宇宙探査技術実証ミッションを束ねた

「宇宙探査ミッションを支える宇宙技術実証プログラム」

を日本学術会議が策定するマスタープランに提案し、

マスタープラン2014, 2017において重点大型研究に選定された。

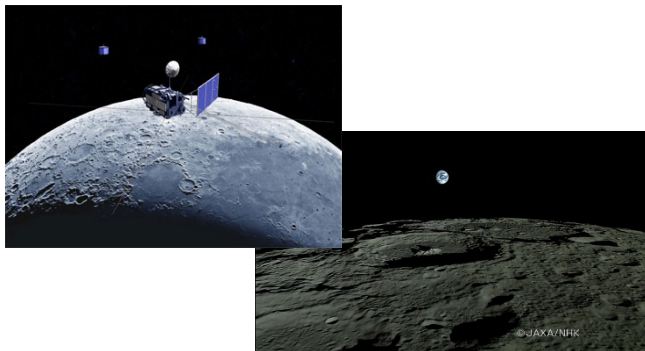
計画の概要: 4つの技術項目

人類の活動領域を拡大し、英知を高める宇宙科学に寄与する

→「太陽系の任意の天体に着陸して長期滞在を行い、地下試料を持ち帰る」

- ・今後の宇宙探査に必須の技術を宇宙実証により獲得する。
 - **重力天体突入・降下・着陸**, **表面長期滞在**, **外惑星領域往復**, **地下試料採取**
- ・貴重な飛翔機会を活用して、科学成果を追及する。

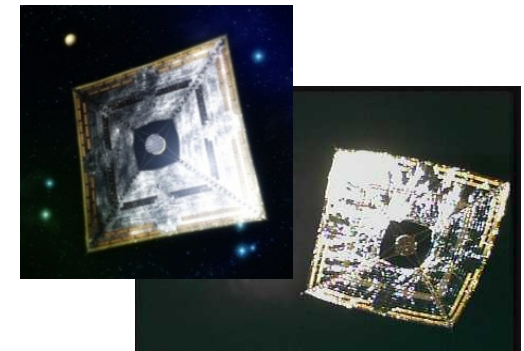
技術分野	すでに実証した技術項目	本計画で実証する技術項目
接近	重力天体周回(かぐや) 小天体降下・着陸(はやぶさ)	重力天体突入・降下・着陸
表面滞在	表面短期滞在(はやぶさ)	表面長期滞在
航行	イオンエンジンによる内惑星領域往復(はやぶさ) ソーラーセイルによる航行(IKAROS)	外惑星領域往復 (ソーラーセイル&イオンエンジン)
試料採取	表面試料採取(はやぶさ)	地下試料採取



かぐや



はやぶさ

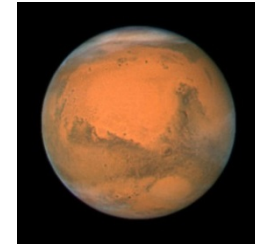


IKAROS

計画の概要: 4つのミッション

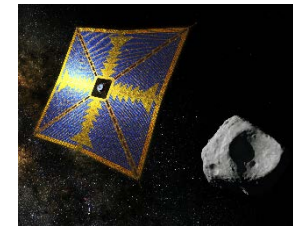
重力天体突入・降下・着陸 & 表面長期滞在の技術実証

- ⇒ { **月面長期滞在技術実証ミッション**
(環境の厳しい月面での長期間の表面滞在技術の実証)
- ⇒ { **火星探査技術実証ミッション**
(大気のある重力天体突入・降下・着陸技術の実証)

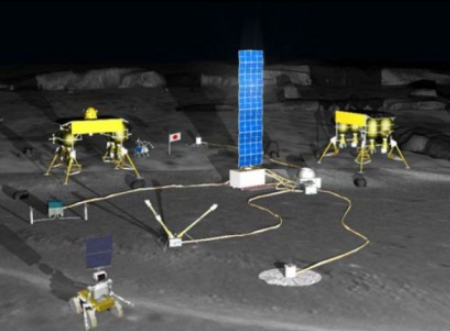


外惑星領域往復 & 地下試料採取の技術実証

- ⇒ { **木星トロヤ群小惑星探査技術実証ミッション**
(ソーラー電力セイルによる外惑星領域往復の実証)
- ⇒ { **土星衛星エンセラダス探査技術実証ミッション**
(氷衛星の内部海の試料採取・分析技術の実証)



4つの技術項目を4つのミッションによって実証・獲得する。
プログラムとして実施することでリスクを軽減し、効率的な開発が可能となる。
(もちろん、単独ミッションとしても十分意義はある)



重力天体突入・降下・着陸 &
長期表面探査技術実証

土星衛星エンセラダス
探査技術実証ミッション

木星トロヤ群小惑星
探査技術実証ミッション

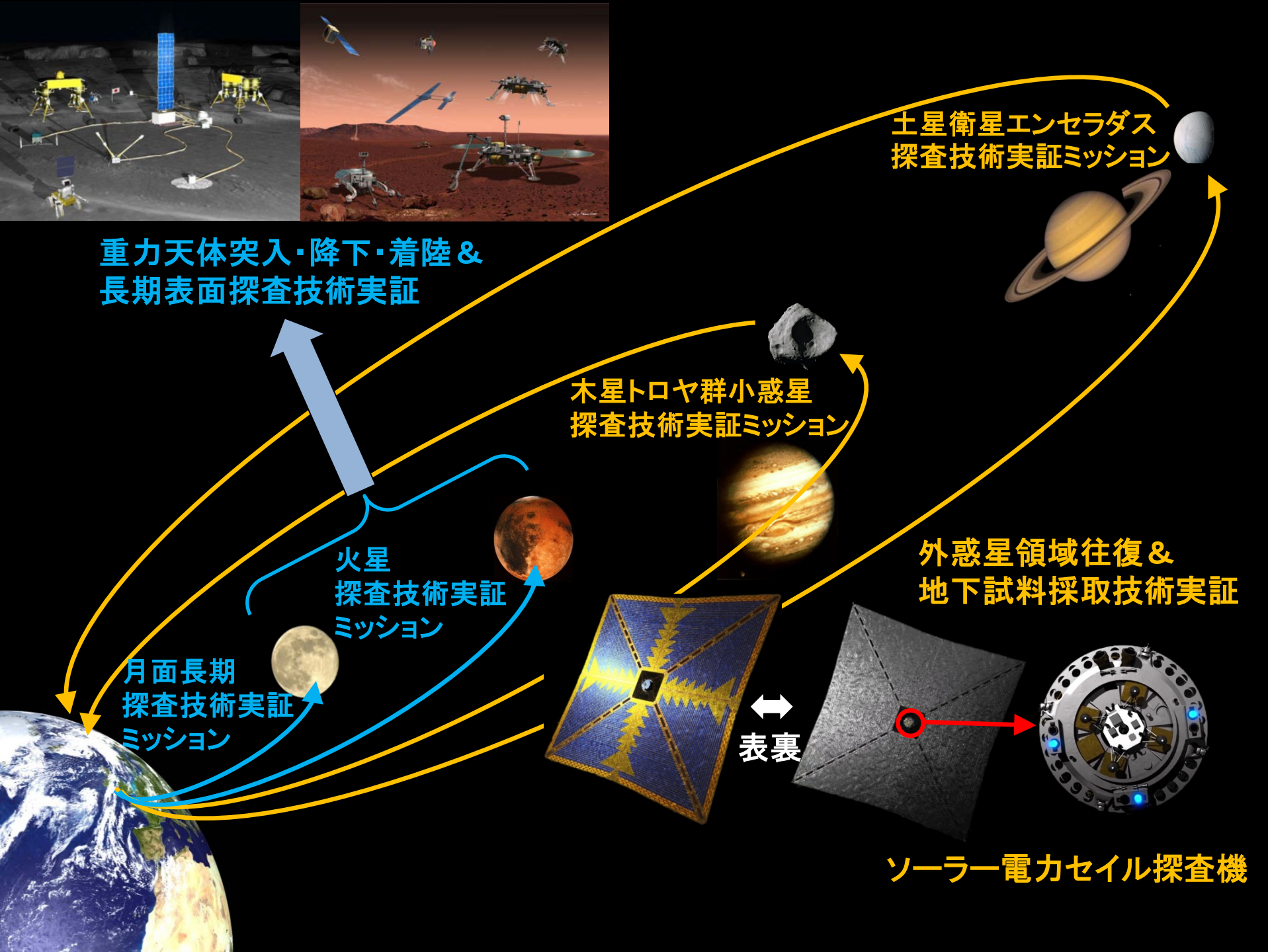
火星
探査技術実証
ミッション

月面長期
探査技術実証
ミッション

外惑星領域往復 &
地下試料採取技術実証

表裏

ソーラー電力セイル探査機



ソーラー電力セイル探査機

- スピン展開式の大型ソーラーセイル(IKAROSの10倍の2000m²)のほぼ全面に薄膜太陽電池を貼り付けることで超軽量発電システム(1kW/kg)を構成し、外惑星領域で大電力(5kW@5.2AU)を発電する。
 - 木星探査機JUNOの太陽電池パネル発電量(486W@5.2AU)の10倍以上。
薄膜太陽電池パネルを用いたとしても、フレームがあるとここまで大幅な軽量化・大面積化は達成できない。
- この大電力を用いて高比推力イオンエンジン(はやぶさの2倍の7000秒)を駆動し、外惑星領域で大きな ΔV を獲得する。
 - JUNOの化学推進による ΔV (1800m/s)をはるかに超える ΔV を行うが、その高い比推力によって燃料質量は極めて小さい。



ソーラー電力セイル探査機

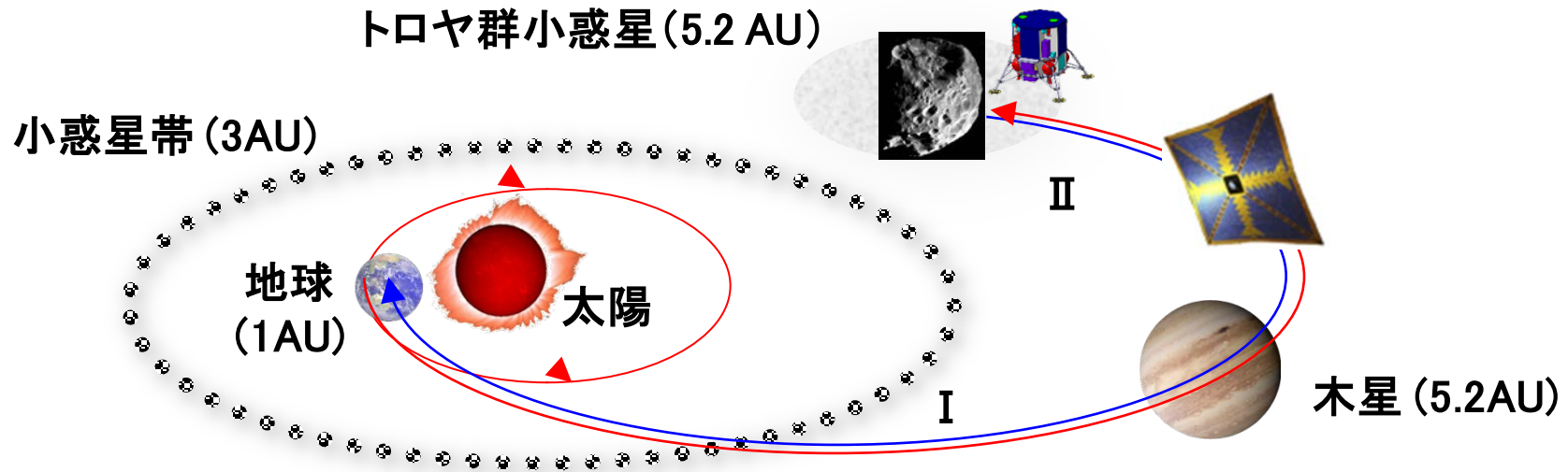


高比推力
イオンエンジン



JUNO

ソーラー電力セイルミッションシーケンス



<シーケンス>

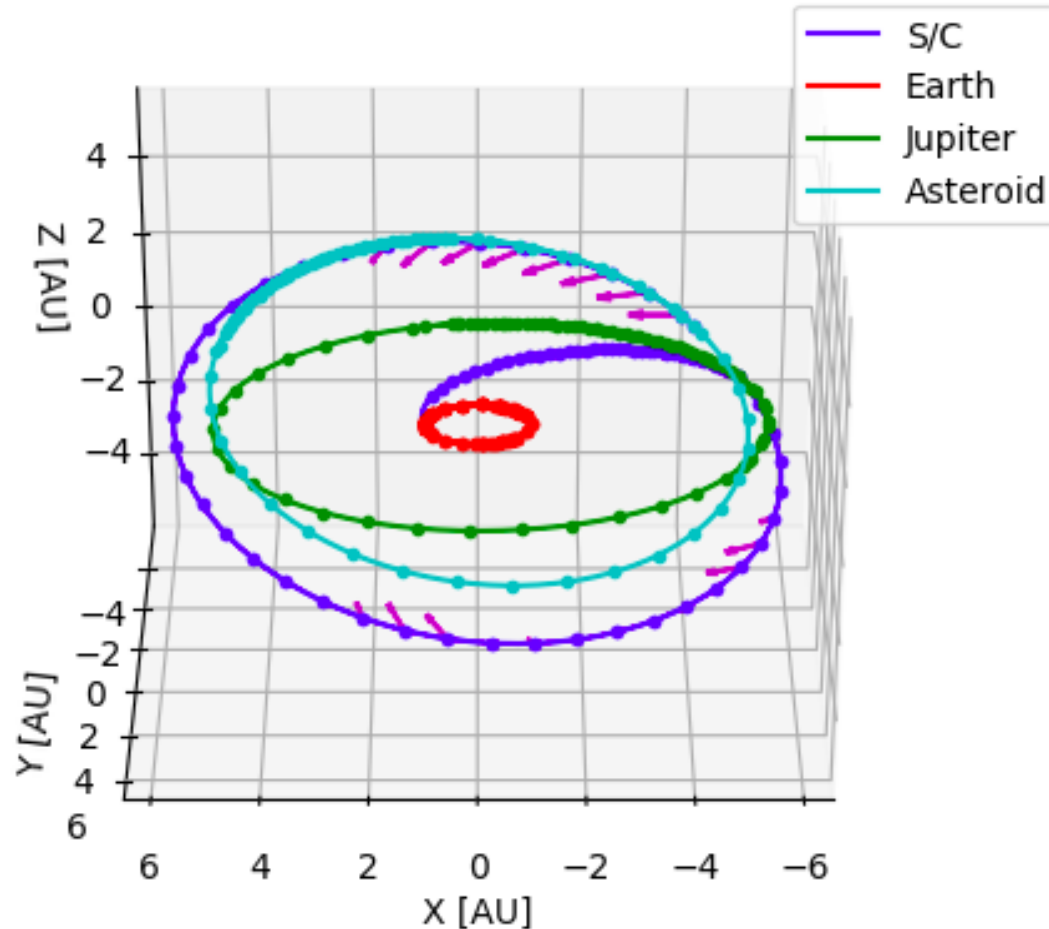
- 2026 打上げ
- 2027 地球スイングバイ
- 2030 木星スイングバイ
- 2039 トロヤ群小惑星到着
- 2040 着陸機による着陸観測・試料分析
- 2040 トロヤ群小惑星出発
- 2054 木星スイングバイ
- 2057 地球帰還

<科学観測>

- I. クルージングフェーズ
 - ・宇宙赤外線背景放射の掃天観測 (EXZIT)
 - ・太陽系ダスト分布のその場計測 (ALDN2)
 - ・ガンマ線バーストの偏光観測 (GAP2)
 - ・磁場観測 (MGF)
- II. ランデブーフーズ
 - ・トロヤ群小惑星の観測・試料分析

黄道面外ミッションへの適用

面外方向に2AUを達成できている → 惑星間望遠鏡の一つの条件を満足



ソーラー電力セイルミッション目的

1. 航行技術の実証

中型計画規模で、外惑星領域の着陸・往復に必要なペイロードを輸送するため、ソーラー電力セイル探査機を開発し、航行技術を実証する。

2. 探査技術の実証

トロヤ群小惑星にランデブーして、着陸機を着陸させ、表面および地下試料を採取し、その場分析・サンプルリターンを行う、というミッションシーケンスを実現することで、必須となる探査技術をまとめて実証する。

3. 科学観測

深宇宙空間のクルージング環境を利用した科学観測およびトロヤ群小惑星での科学観測を実施する。

- 外惑星領域での航行技術と探査技術を実証・獲得し、「より遠く、より自在に、より高度な」宇宙探査活動を実現する。
- 本計画は実験機という位置づけであり、これを踏まえた本番機で第一級の科学成果を狙う太陽系探査ミッションを実現し、日本が太陽系探査を先導する。

小惑星探査と外惑星領域探査

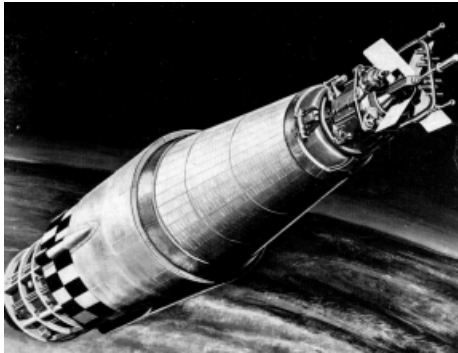
	小天体	彗星	木星圏	土星圏	天王星	海王星	冥王星 EKBO
フライバイ	●U,E,C	●J,U,E,R	●U ■U ■J:SPS-1	●U	●U	●U	●U:New Horizons
周回 ランデブー	●J,U,R ■U	●E	●U ■E/J:Juice ■U:EJSM	●U	■U		
着陸	●J,U ■E/G	●E/G:Philae	●U ■J:SPS-1	●E:Huygens	■U		
サンプル リターン	●J:Hayabusa ▲J:Hayabusa2, U:OSIRIS-Rex ■E,R	●U ■U →	■J:SPS-1	■U,J:SPS-2			
有人往復	■U:ARM						

● 実績
 ▲ 運用中
 ■ 開発・検討中

J = 日本; U = 米国; E = ESA; R = ロシア・旧ソ連; G = ドイツ; C = 中国

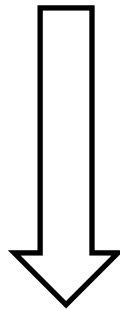
ソーラー電力セイルにより土星圏までのサンプルリターンが可能となる。

その先の推進機関



- 大型の惑星間輸送を担う主力推進機関は、原子力(原子力電池ではなく原子炉)を動力源とする、イオンエンジン等の電気推進エンジンを駆動する機関となると予想される。
- イオンエンジン等の性能は、電力供給の制約がはずれると、一気に高比推力化する。

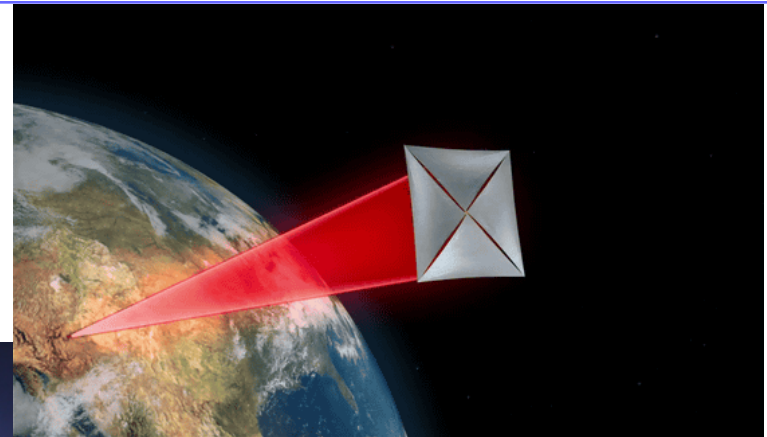
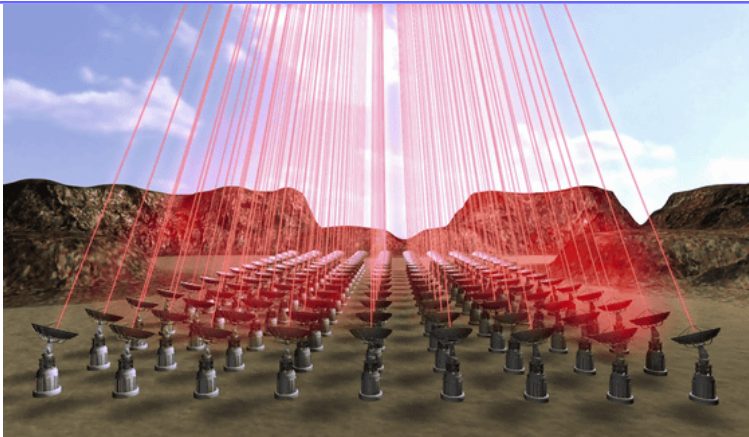
大電力・
高比推力化



電力源	推進機関	ミッション
原子力電池	化学推進	Voyager, Cassini
太陽電池	化学推進	Juno, Rosetta, MMX
太陽電池	電気推進	はやぶさ, はやぶさ2 ソーラー電力セイル
原子炉	電気推進	??

- 中小型の宇宙機にあっては、原子力の利用は重量的に非効率であり、太陽電池を動力源とする、電気推進機関が当面採用される。
- 純光子ソーラセイルは、ランデブー探査への応用が難しく、小型のフライバイ型の惑星探査や輸送に応用される。

スターショット計画



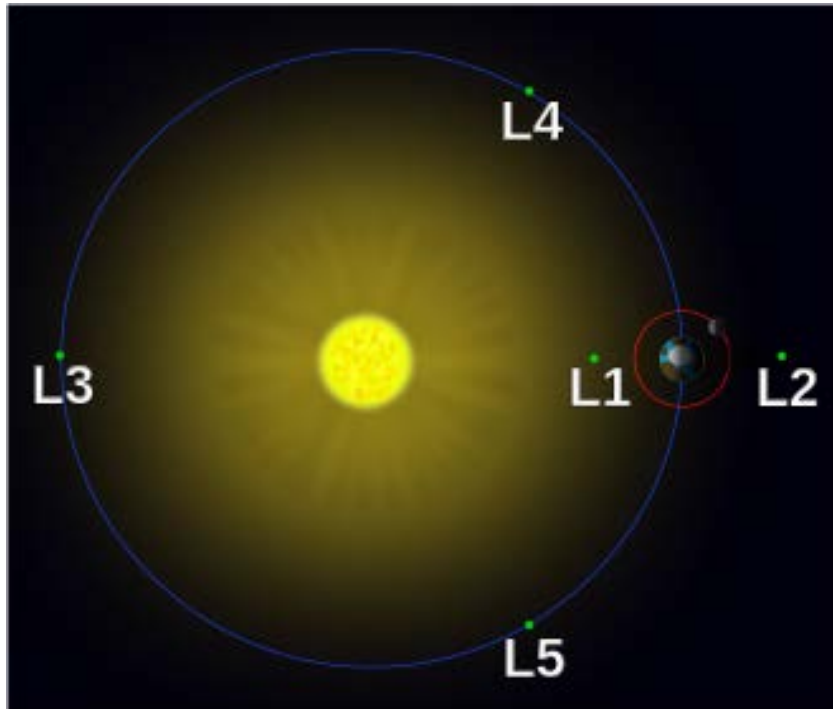
- コンピュータチップ(1g)にライトセイル(4m×4m)を取り付けレーザー光を当てることによって推進する.
- 光速の20%程度まで加速し, 4.37光年離れた場所にある恒星系のアルファ・ケンタウリに約20年で到達させる.
- 多数の打ち上げが可能で, 成功率は低くてもかまわない.
- 大富豪の資金援助, 高名な物理学者・数学者も賛同.

将来のラグランジュ点利用

ラグランジュ点は、将来の宇宙利用/探査のkeyとなる地点である。

例えば...

- 有人基地
- 無人探査向けの宇宙港
- 天文観測



[1] 地球-月 系のL1, L2

[2] 太陽-地球 系のL1, L2

は、地球との距離も近く、利用しやすい。

特に、太陽-地球系では、
太陽-地球-宇宙機の幾何学関係が
ほぼ固定されるため、(熱・通信など)
宇宙機の設計が有利になる。

将来のラグランジュ点利用

有人基地や、宇宙港の建造を想定する場合...

- 多目的であるべき
- 拡張性があるべきである.

[イメージ] LEGO



- 組み換えによる形状・目的変更
- 規格化による拡張性

可変構造宇宙機(トランスフォーマー)計画

将来のラグランジュ点利用を見据えて、
可変構造宇宙機(トランスフォーマー)を提案する.

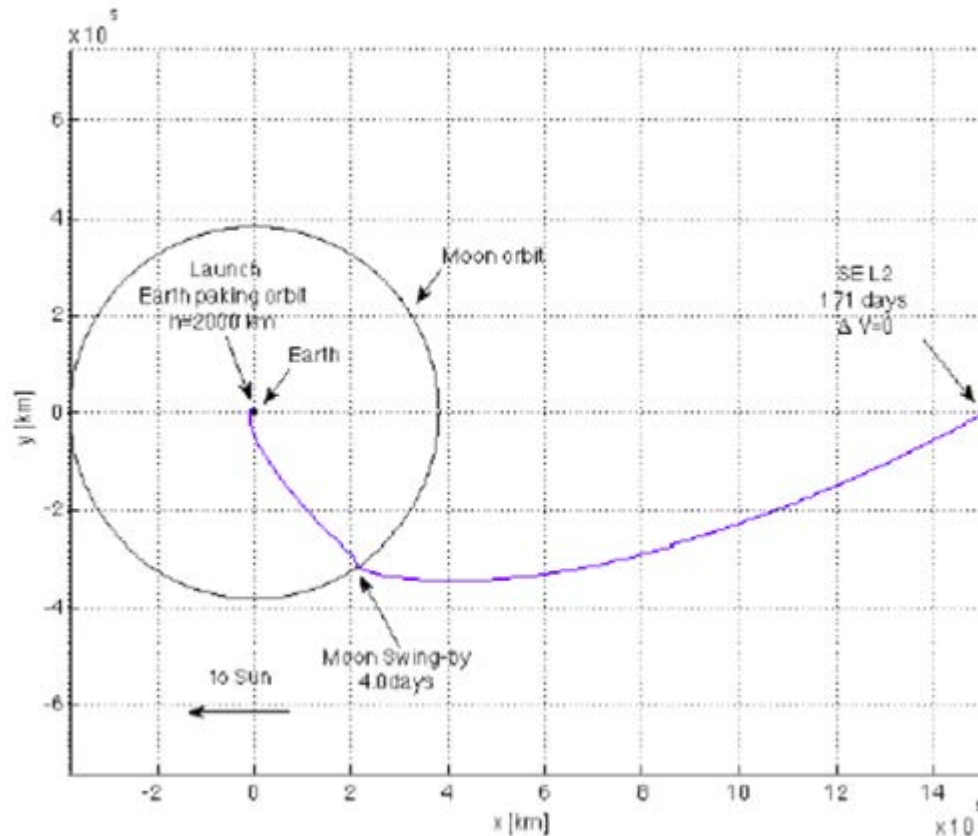
- イプシロンロケット打ち上げ(小型計画)
- SE-L2への投入
- 可変構造様式 → 小天体観測
- 拡張性 → カメラ分離・再ドッキング

イプシロンロケットによるSE-L2投入

本宇宙機は、(大雑把には)SE-L2へ投入する。

イプシロンロケットによる打ち上げ後、月swing-byを経て、SE-L2に到着。
不安定多様体を使用し、(理想的には) $\Delta V=0$ で軌道投入する。

kick-stageを併用した場合の**打ち上げ可能重量は約250kg**である。

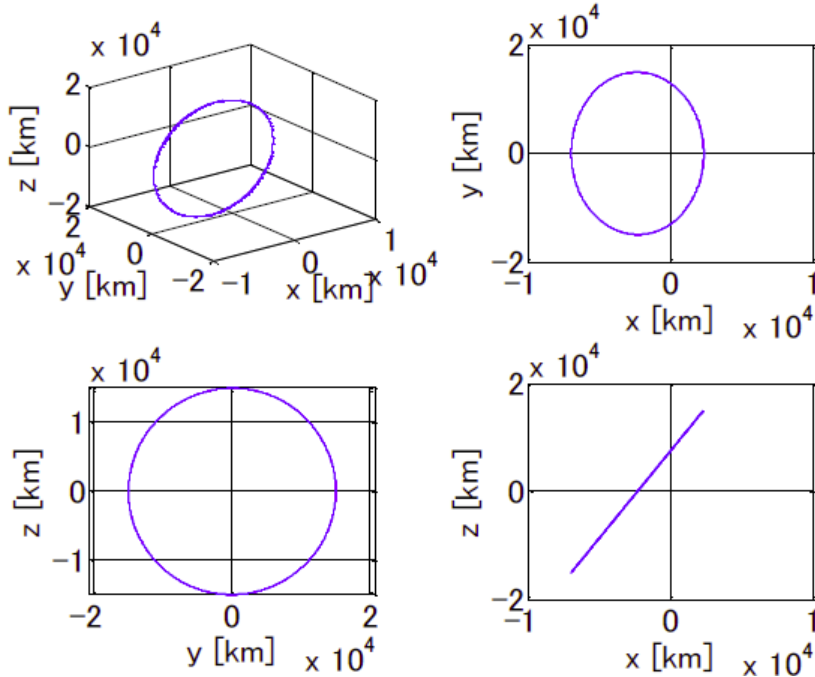


軌道維持

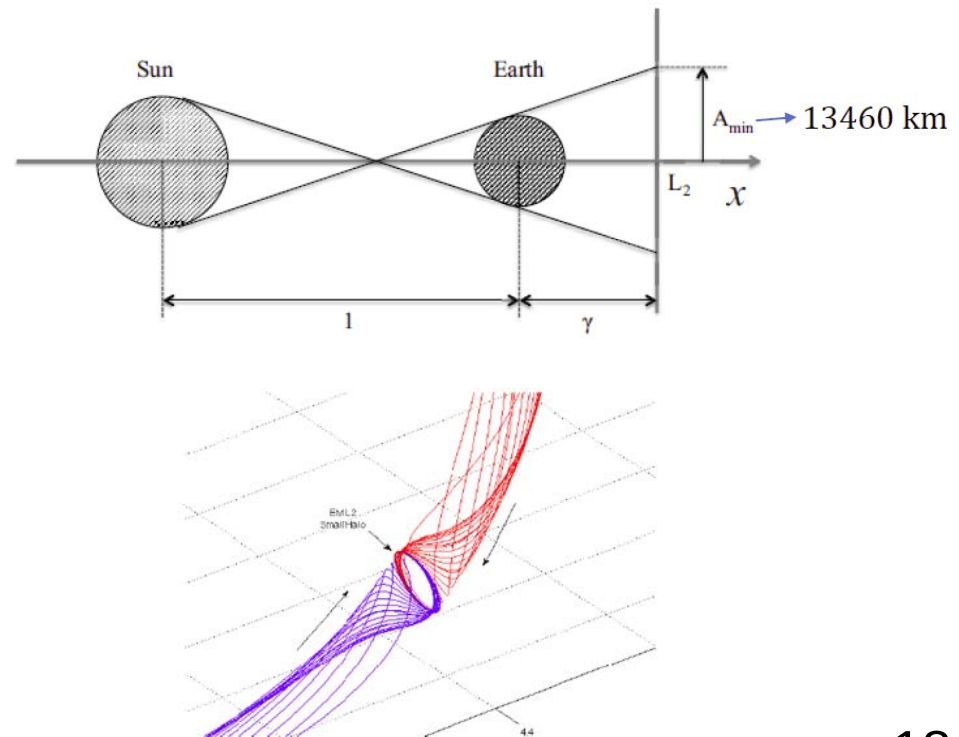
本宇宙機は、SE-L2を周回する、小円ハロー軌道 (artificial halo) へ投入する。

[小円ハロー軌道] 制御入力により、ハロー軌道を食の限界まで小さくしたもの。
制御入力として、太陽光圧を用いる (推進剤フリー)。

軌道例 (周期: 183日)



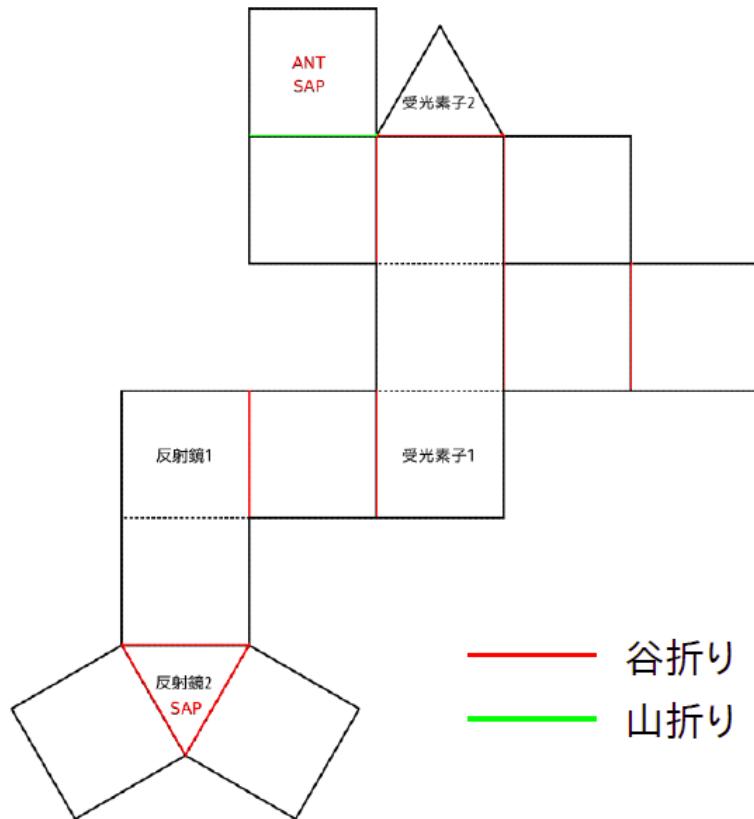
食を避ける限界



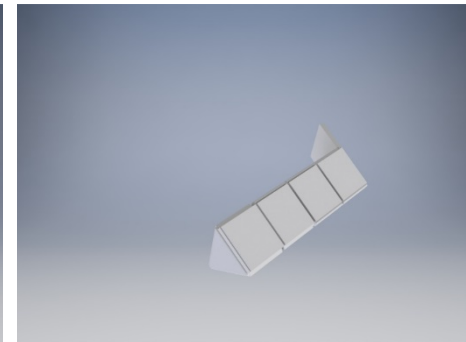
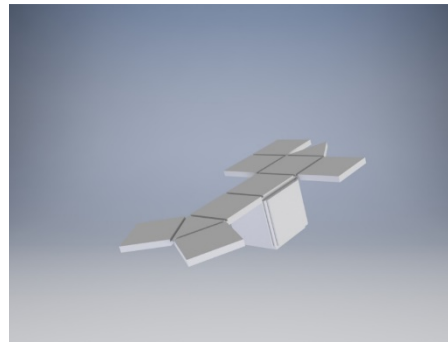
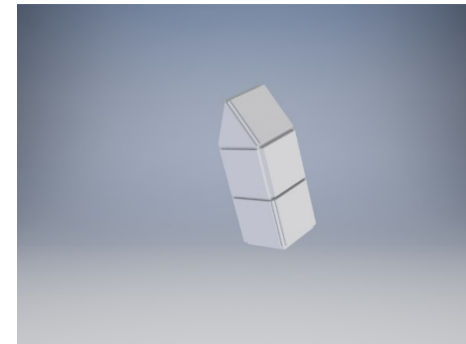
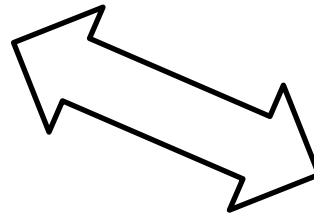
可変構造様式

宇宙機形態の一例を示す.

プレート1枚は, $1000 \times 1000 \times 100\text{mm}$, 10kg を想定. このプレートはモジュール化する.
プレート内部に各バス機器を埋め込む.



軌道上で
探査機形態を変更する

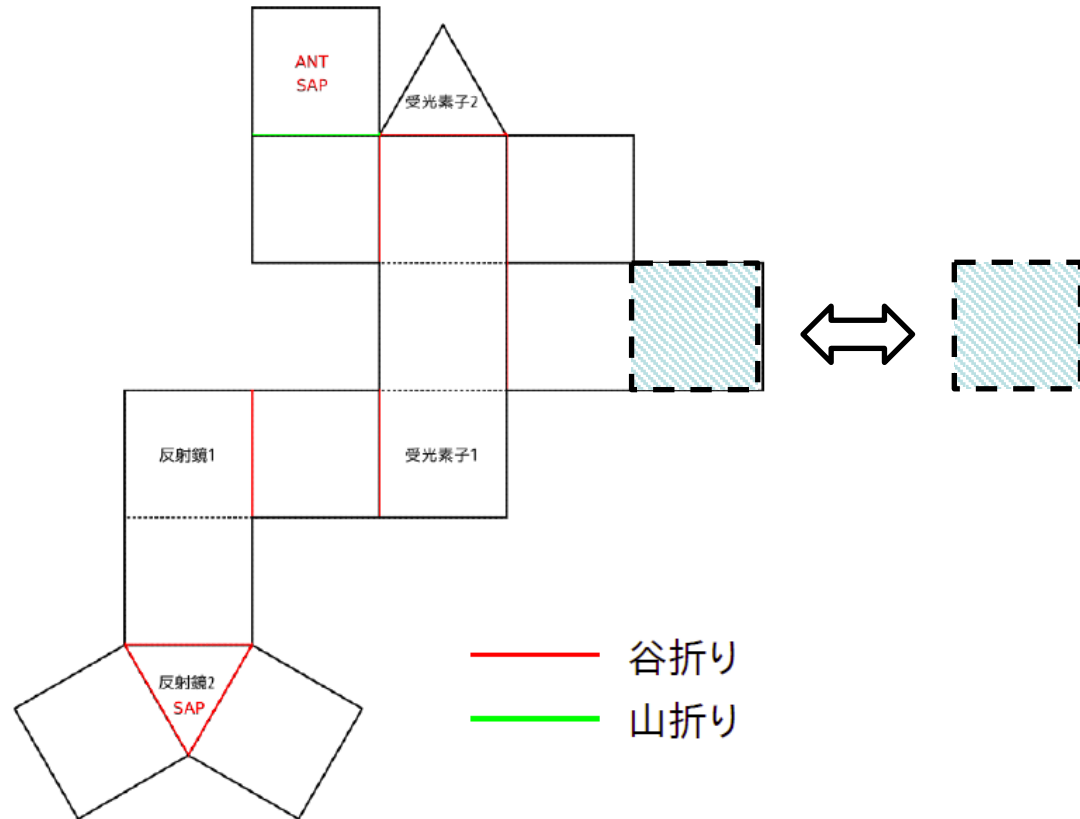


カメラ分離・再ドッキング

小型カメラモジュールを分離し、トランスフォーミングの様子を撮影する。
撮影終了後、再ドッキングを行う。

これは、

- トランスフォーミングの確認
- 軌道上での宇宙機組み立て実証を目的とする。



小天体観測

SE-L2での宇宙機運用の一例として、赤外望遠鏡による小天体観測を実施する。
これは、トランスフォーミングを活かしたものとしたい。
例えば、トランスフォーミングにより望遠鏡の視野を変更する。

中間赤外(10~20 μm)での観測。検出器は10K程度までactive冷却。他はpassive冷却。
この仕立てで、掃天観測をし、小惑星を発見する。
→スペースガードを念頭にカタログ作り

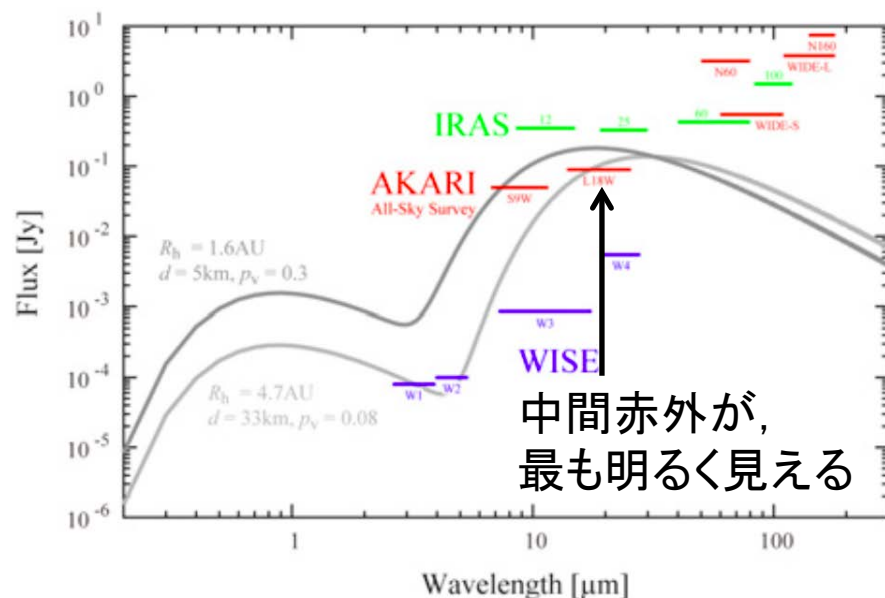
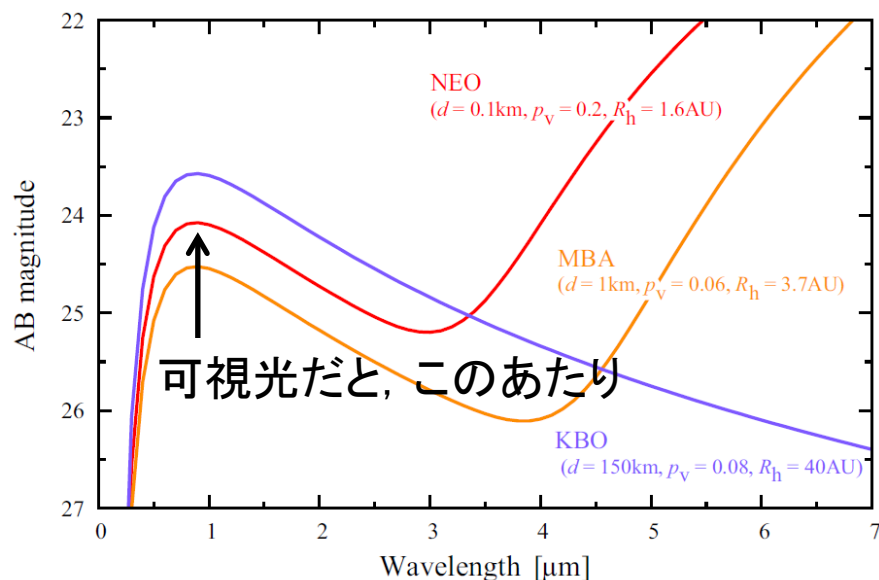


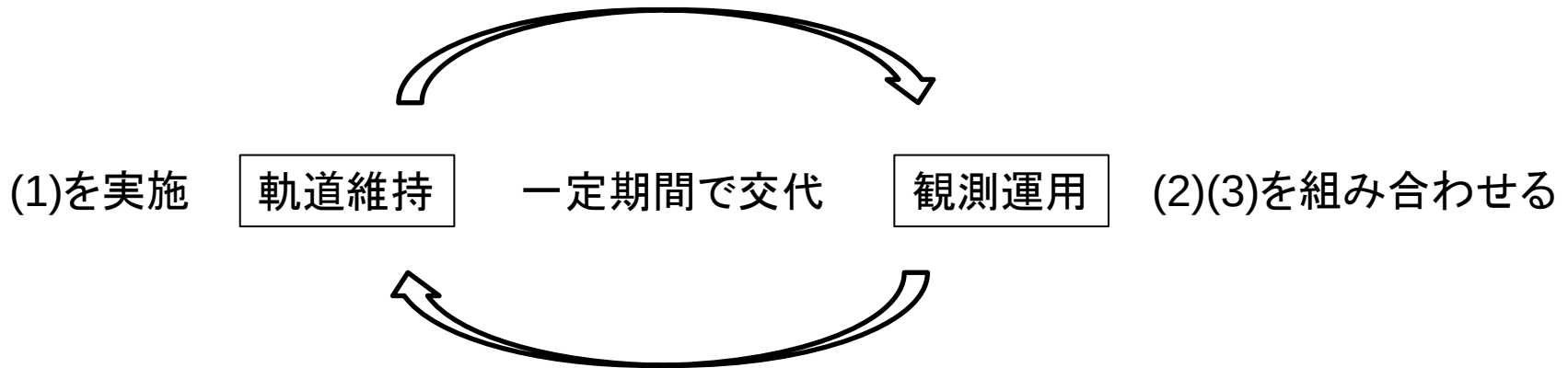
図 9: 典型的な太陽系小天体の明るさ

軌道・姿勢制御の方針

基本的な運用方針は以下の通り.

(1)	小円ハロー軌道維持	光圧により実施.
(2)	高精度姿勢制御(追尾含む)	光圧の制御は, プレートを動かすことで実現.
(3)	大姿勢変更	Non-holonomic turnで実現

RWやRCSは使用しない☆.



☆無擾乱化のため.

また, 将来に向けた, 多彩な拡張性を確保するため.

(宇宙機の最終形態がわからないと, RWの配置は難しい.)

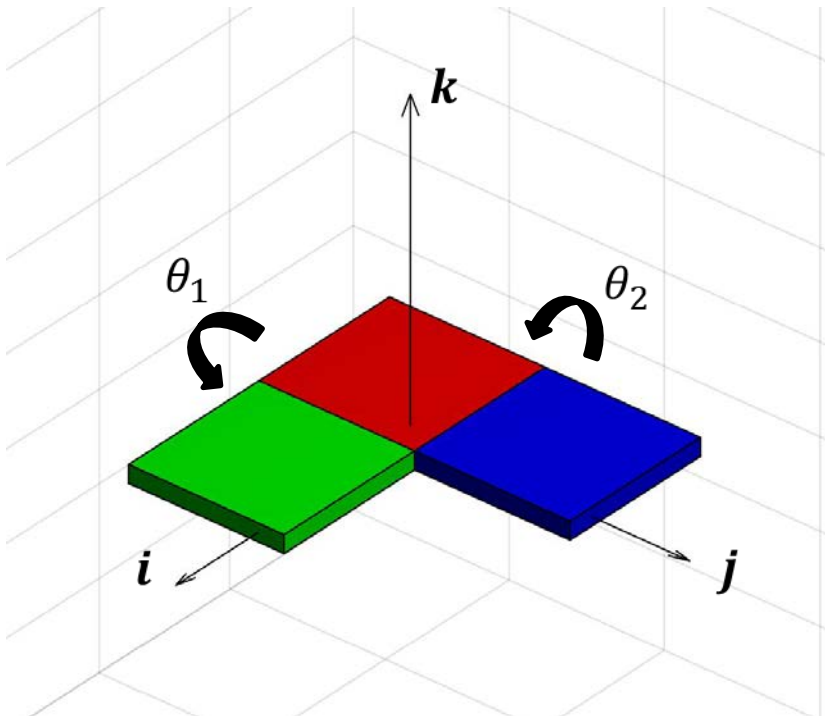
基本変形パターン

[Non-holonomic Turn]

大きな姿勢変更は、プレートを動かすことにより行う。

角運動量を持たないため、プレートを動かす順番で、最終的な姿勢を変えられる。

- 3枚のパネル(2ヒンジ)で構成された三次元モデルで検討。
- 簡単のため、一度につき1ヒンジにのみ入力(-90~90 deg)を加えることとした。
- また、姿勢変更と形態変更を同時に行うのではなく、形状を維持したまま姿勢変更のみ行う場合を考えた。



姿勢変更を生じる変形パターン

A1: $+\theta_1 \rightarrow +\theta_2 \rightarrow -\theta_1 \rightarrow -\theta_2$

A2: $+\theta_1 \rightarrow -\theta_2 \rightarrow -\theta_1 \rightarrow +\theta_2$

A3: $-\theta_1 \rightarrow +\theta_2 \rightarrow +\theta_1 \rightarrow -\theta_2$

A4: $-\theta_1 \rightarrow -\theta_2 \rightarrow +\theta_1 \rightarrow +\theta_2$

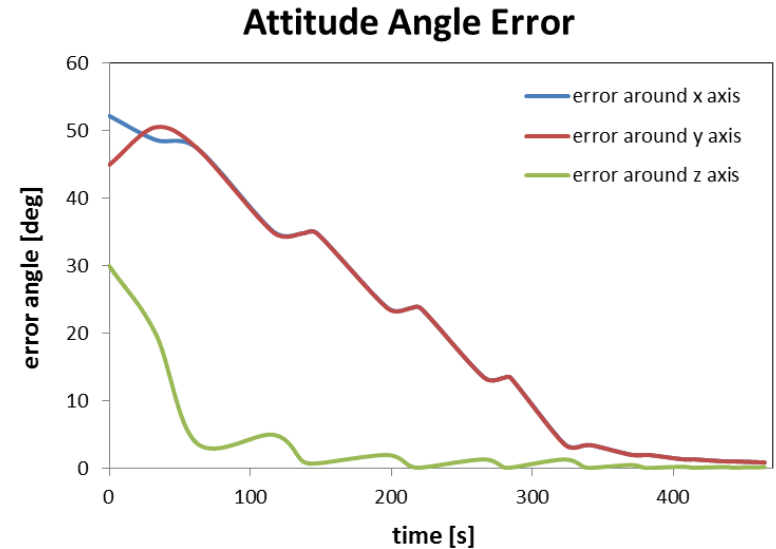
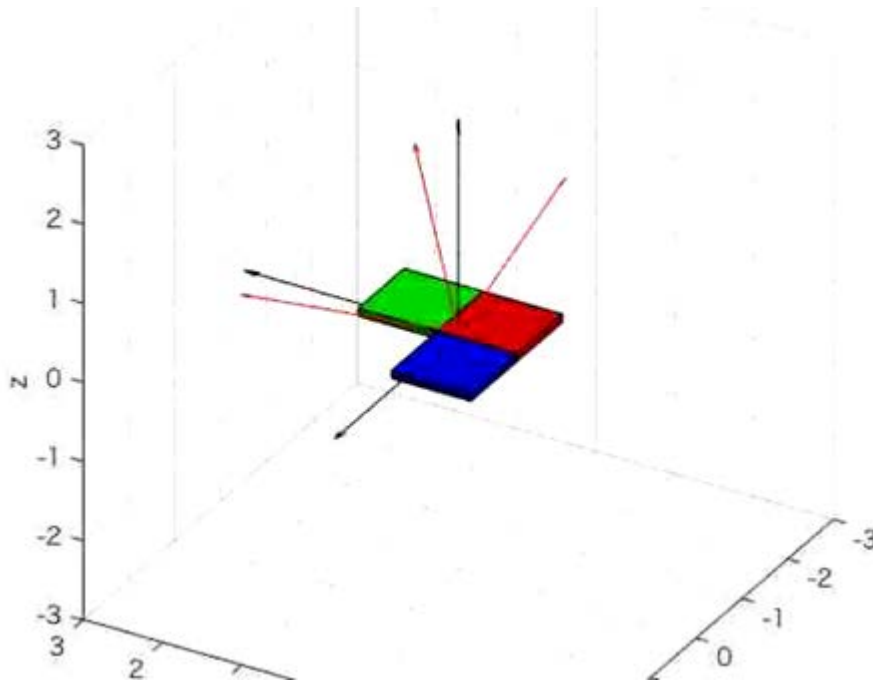
B1: $+\theta_2 \rightarrow +\theta_1 \rightarrow -\theta_2 \rightarrow -\theta_1$

B2: $+\theta_2 \rightarrow -\theta_1 \rightarrow -\theta_2 \rightarrow +\theta_1$

B3: $-\theta_2 \rightarrow +\theta_1 \rightarrow +\theta_2 \rightarrow -\theta_1$

B4: $-\theta_2 \rightarrow -\theta_1 \rightarrow +\theta_2 \rightarrow +\theta_1$

基本変形パターンを用いた姿勢制御



- 1枚 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$, 10 kg のパネルでシミュレーションを実施.
- ターゲット姿勢角はオイラー角でx軸周り 0deg , y軸周り -45deg , z軸周り -45deg .
- 描画を早くするためヒンジ角の角速度は $\pi/8\text{ [rad/s]}$ としている.
- 右上のグラフはヒンジ角とX'軸周りの回転角との関係.
- 許容誤差を 1 [deg] で実施. 24回の組み合わせ変形で収束した(48回の基本変形).

ミッションの組み立て方案

トランスフォーマーは、アストロダイナミクスを中心とする実験機である。
 (将来のSE-L2宇宙港構築に必要な技術をまとめて実証する)
今年度末を目途にワーキンググループとし、次の小型計画公募に提案する。
 (今年度のとりまとめは松本純さん。興味がある方はご連絡ください)

	工学	観測
大目的	可変機構を併用した高度なアストロダイナミクス技術の獲得 及び それを用いたスペースガード 並びに 掃天観測	
目標 / 意義	(E1) 可変機構技術の構築 及び 可変機構と高度なアストロダイナミクス技術を用いた推進剤フリー・無擾乱の宇宙機運用技術構築 (E2) 可変機構をモジュール化することによる宇宙機システムの汎用化	(S1) 地球接近小惑星の観測 (S2) 資源(resource)天体の観測
目的 / 目標	(E1.1) 力学系理論を用いた高度な軌道投入技術獲得 不安定多様体を用いたSEL2への低エネルギー遷移 (理想的には $\Delta V = 0$) を実施 要は: $\Delta V \sim 0$でのSEL2投入をする (E1.2) 可変構造を併用した宇宙機運用技術獲得 宇宙機形態を軌道上で変えることによる, 推進剤フリー・無擾乱姿勢制御を実施 また, 人工的な小円ハロー軌道の維持を太陽光圧を用いて(推進剤フリーで)実施 要は: 可変構造を用いたNon-holonomic turnによる姿勢変更を実施 可変構造と光圧を用いた無擾乱・高精度の軌道・姿勢維持を実施 (E1.3) 視野角可変の観測技術の構築 宇宙機形態を軌道上で変えることによる, 望遠鏡の視野角変更を実施 ----- (E2.1) 宇宙機システムの汎用化 モジュール入れ替えにより多彩なミッションへの応用が可能なシステムの実現 (E2.2) 分離ドッキング技術獲得 軌道上での分離・ドッキングを実施	TBD

まとめ

- ・宇宙科学・探査ミッションの実情を踏まえた実験機の意義
技術水準と資金規模の格差の解消, はやぶさとはやぶさ2の関係
- ・マスタープランに選定された「宇宙探査ミッションを支える宇宙技術実証プログラム」の紹介
4つの技術領域:
重力天体突入・降下・着陸, 表面長期滞在, 外惑星領域往復, 地下試料採取
4つの技術実証ミッション:
月面長期滞在・火星探査・木星トロヤ群探査・土星衛星エンセラダス探査
- ・ソーラー電力セイル探査機による外惑星領域探査計画の概要
航行技術と探査技術の実証
科学観測: トロヤ群サイエンスとクルージングサイエンス
- ・その先の推進機関の方向性
大型の場合は, 原子炉・電気推進へ, 中小型の場合は, 当面は太陽電池・電気推進
スターショット計画の紹介
- ・トランスフォーマーの概要
SE-L2への投入
可変構造様式 → 小天体観測
拡張性 → カメラ分離・再ドッキング