

第 48 回月・惑星シンポジウム パネルディスカッション ー将来の探査ミッション創出に向けてー

概要報告

宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 藤田和央

1. パネルディスカッション開催日・場所

開催日：2015 年 7 月 29 日（水） 10:25-12:15
場 所：宇宙科学研究所 研究管理棟 2 階会議場

2. パネルディスカッションの狙い

月惑星探査ミッション創出に携わる有識者をお招きして、今後想定される探査ミッションや探査ロードマップに関わるご意見を伺うとともに、今後の探査ロードマップ作成と合意形成をどのように進めるべきか、探査プログラム推進のために ISAS、他部門、大学に求められているものは何か、議論を行った。

3. パネリスト

橋本樹明 先生（JAXA/ISAS）
春山純一 先生（JAXA/ISAS）
宮本英昭 先生（東京大学）
今村剛 先生（JAXA/ISAS）
森治 先生（JAXA/ISAS）
鈴木宏二郎 先生（東京大学）
渡邊誠一郎 先生（名古屋大学）

4. 探査ミッションと想定する探査ロードマップについて

各パネリストより、想定（提案）するミッション、及びそのミッションを含む探査ロードマップの描像について、自由に意見を述べて頂いた。各パネリストの講演資料は添付の通りである。質疑応答の中では、以下のような議論が行われた（主要なもののみ抜粋）：

Q（会場）（橋本先生のご講演に対して）：探査を実現するための工学技術として、必修科目と選択科目があり、宇宙研外において選択科目を担当することもあってよい、という話があったが、探査に重要な技術開発を宇宙研以外に任せても平気だと考えるか？

A（橋本）：宇宙研が得意で実績のある部分は宇宙研で担当すべきと思うが、リソースも限定的な中では、他部門や大学が進んでいるところは任せるべきであると考えている。

Q（渡邊）（森先生のご講演に対して）：ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群ミッションは、ミッション期間が長いことが課題の一つと考えられるが、改善の余地はあるか？

A（森）：ベースとなる往復ミッションプランでは小惑星到達まで 15 年となっているが、往路のみであれば最短 10 年で到達可能であり、ESA のロゼッタと同等である。これは、ソーラー電力セイルを用いることでロゼッタよりも遠い天体を往復できる一方、片道に絞れば、ロゼッタよりも遠い天体に同じ時間で行けることを意味する。また、クルージングサイエンス

や工学実証については、往路の早い段階から成果が得られる。

Q（会場）（鈴木先生のご講演に対して）：探査技術を地球で実証する、とあったが、地球と惑星では環境が異なると思われるが、地球で実証したものが惑星でも利用できる、と考えて良いか？

A（鈴木）：すべてを完全に実証することは不可能であるが、重要な部分について実証は可能であり、これを超小型衛星によって低コストで効率良く行う、ということだ。シミュレーションなど数値解析を積極的に利用することで、実証できる内容も増えると期待できる。

Q（会場）（鈴木先生のご講演に対して）：大学として JAXA が提供するシステムを利用する際に不便を感じることは、ここはこのように改善してほしいと望むことはないか？

A（鈴木）：私はどちらかといえば、気球実験や観測ロケット実験など、積極的に利用させて頂いてきた立場なので、大きな不満を持っている訳ではない。むしろ、もっと大きなチャンスがあるかもしれないのにそれを利用できていないかもしれない、ということもあり、この点においては、大学ももっと情報を収集し勉強すべきであろうと考える。

Q（会場）（渡邊先生のご講演に対して）：着陸探査は 1 点であり、その意味において戦略やプログラム化が重要であるという考えは理解できる。一方で、海外のミッションで得られた膨大なデータもあるのに、これを利用して成果をあげようとする動きが鈍いと感じられる。巨額の費用を掛けて独自の探査を行う以前に、海外ミッションのデータを解析するなどの活動も必要なのではないか？

A（渡邊）：海外ミッションのデータを利用して成果を上げる活動が重要というのは、そのとおりである。それを行いつつ、しかしやはりこのデータが無ければ先に進めない、ということについては、戦略的に探査を行うということだ。

Q（会場）：月探査では SLIM 後、SELENE 後継機の検討と UZUME の検討があるようであるが、両方を並んで行うということは、日本の財政事情では困難だと思われる。この点をどう考えるか？

A（橋本）：月探査については、政策的な側面もあり、科学探査以外の要素も考えるべきであろう。この点においては、かならずしも同じ月探査だから一つに、というのではなく、SELENE 後継機は有人技術獲得のための政策ミッションとして、UZUME は遠い将来の人間が移住する際に必要な技術獲得のミッションとして、時間スケールでの住み分けもありえるのではないかと。

A（春山）：SELENE-2 がキャンセルされた現状では、JAXA としては正式な月構想はないのではないかと理解している。その中で UZUME を月構想の一つとして提案している。ISECG や JAXA の一部で議論している月構想は不十分ではないか。むしろ、月縦穴探査を日本独自案としてとりまとめ、ISECG へ提案するような方向で考えるのはどうか。

Q（渡邊）：意見集約を重視した場合、対象・手法をピンポイントに絞ったボトムアップの一提案を広げていくのは困難であり、むしろ大きな科学目標のフィロソフィーを掲げ、これに沿ってミッション案を練るほうがうまくいくのではないかと考える。ボトムアップでピンポイントを狙うミッションを競争的に選定して進めるか、大きなフィロソフィーを掲げてこれに沿ったミッションを合意形成しながら作り上げてゆくか、日本がどちらの進め方を選択するか議論が必要ではないか。

A（春山）：月惑星科学探査においては、フィロソフィーは、ミッション提案において科学が示すべきであろう。一方、月や火星の探査においては特に、人類が宇宙に出て行く、という流れの中でも考えるべきであろうと考える。月火星の縦穴探査では、人類が月へそして月を越えて宇宙へと出て行くことに貢献するという考え、フィロソフィーのもとに、計画を進め、科学成果を生み、また科学が貢献できることをしていこうとしている。

Q（会場）：海外から日本を見ると、過去の探査機もそうであるが、機動性が高いという印象

があったはずであり、また現在はイプシロンを有している。しかし今日の講演の中で、機動性に注目したご講演は鈴木先生だけであり、また工学においてであった。科学についても機動性に注目した議論を行うべきではないか？

A（渡邊）：そのとおりである。そのような観点から、現在、多くの検討がなされるようになってきたと理解している

Q（会場）：個別のミッションを語るのも良いが、皆が納得するミッション全部をやるといくらかかるのか？選別するか、合意を形成することが必要なのではないか？

A（橋本）：月探査に限れば、多くの人がやりたいことを全部やっても、2000 億くらいだろうか？ただ、国際協力を積極的に利用し、また政策的に実施するミッションへ参加する形態をとれば、コストは抑えられると考える。

A（春山）：すべての人を満足させる案はでてこないのではないか？合意を得るのは難しいのではないかと考える。最終的には議論の中から選定することになるだろう。その際に、フィロソフィーは日本の、というよりも、人類レベルのフィロソフィーを満足できるようなものが望ましい。また日本の産業界へのフィードバックも重要であろう。

A（宮本）：火星では国際的に、科学の力を使ってコストを下げる、という考え方が定着している。例えば Viking の時は、火星の土壌の硬さが不明だったため、着陸脚はどのような状況にも対応できるような仕様になっており、開発コストも膨大であった。しかし着陸の結果として、科学的な知見が得られ、現在、着陸脚の開発コストはほとんど無い。この考え方を発展させ、今後のミッションコストを低減してゆくことは可能であろうと考える。例えば現地調達によってコストを抑制するという考え方もあるだろう。科学と同時に工学的な観点からも、日本の独自性として、どこを攻めてコストを掛け、どこはコストを掛けないものとするか、明確な戦略が必要であろう。そうすることで、ミッションコストを抑制しながら大きな成果をあげることができる。

5. 探査ロードマップ作成と合意形成はどのように進めるべきか

各パネリストよりご意見を端的に頂き、その後会場を含めた質疑を行った。以下のような議論が行われた（主要なもののみ抜粋）：

（橋本）：誰がなにをやりたいか、によってロードマップは大きく変わるだろう。惑星無人探査を中心にするのであればそういうロードマップになるであろうし、有人技術の獲得を目指すのであればそれに沿ったものとなるであろう。従って、ある程度は経営的な指針が必要であり、これを前提とした議論が不可欠である。

（春山）：ある程度トップダウンであるのはやむを得ないかもしれないが、研究者のみならず、国民に、世界にも開かれた議論にすべきであろう。また、世界がこういっているからそれに沿ったものとする、というのではなく、日本が独自に考え、日本の独自性があるものを形成し、むしろ国際的な議論を日本がリードするようになるのが望ましい

（宮本）：基本的には科学、工学として突出しているものを日本独自の提案として考えるべきである。調整や絞り込みにおいては、かならずしも当事者間で行う必要はなく、有識者が議論する形が望ましいのではないかと推察する。注意しなければならないのは、政策的ミッションは別であるが、多くの人に人気がある、国民受けするから、という基準はかならずしも適切ではないかもしれない、ということである。この意味においても、多くの知見を有する有識者が議論するのが望ましいと考える。一件地味に見える案であっても、中身に優れ、アウトリーチを適切に行えば、最終的には多くの支持を得られると考える

（今村）：大目標があって、そこから演繹されたミッションを行うというよりも、やはり科学・工学の現場にいる我々がミッションを発信して、ロードマップを形成すべきであると考

える。合意形成においては、有識者間の議論というのは良い考えだ。ただし有識者の議論は、開かれたものとすべきである。

（森）：理工学的に尖ったミッションを日本独自にボトムアップ的に実施するという議論の一方で、それだけでは現在の周辺状況や周囲の期待に適切にこたえきれないため、ある程度はトップダウン的に決めることが必要という議論も理解できる。私はボトムアップとトップダウンの両立は可能であると考えている。重要なのは、両者をバランス良く行うことではないか。両者を両立して進める場合、進め方が非常に重要だと考える。ボトムアップ的な中型計画を提案している立場としては、急きょ政策的に導入されたトップダウン的な中型計画が、今後のボトムアップ的な進め方にどのような影響を与えるのか（同じ土俵で評価・選定されるのか、後年にシフトされるのか、など）見えないことに危惧を感じている。説明も頂いていないなかで、状況だけが進んでゆくことに不安を覚える。また、政策的に導入されたミッションへどのように携わるべきなのか、一旦手を休めて協力すべきなのか、判断できないでいる。中型ミッションを当初の予定通り選定して実施しようクレームを申し上げているのではない。説明がなく進められていることが不安だ、ということである。

（鈴木）：ロードマップを作成する人と実行する人では世代が異なるのではないだろうか？
そういう点では、若い人が引きつけられるロードマップとすることが重要である

（渡邊）：過去の進め方（＝多くの提案の中から次のミッションを選定する、という進め方）そのものでは、今後難しいと思われる。ボトムアップだけというのは困難であり、トップダウン的に戦略的なプログラム化が必要であろう。その中において、小型ミッション・小規模ミッションの頻度をあげることは重要である。要すれば、イプシロンロケットを利用して頻度をあげ、ボトムアップミッションも犠牲とすることなく実施することが重要である。その際、個々のボトムアップミッションが選んでもらう努力をすることは重要であるが、関係するコミュニティでの合意形成が重要であり、このミッションを実施したいという自己主張だけでなく、時には譲ることも必要ではないか

（会場）：惑星探査全体の目標に関わる議論はコミュニティの中でなされたのか？月、火星、その他惑星探査全体としての目標は何か？

（渡邊）：惑星科学会では RFI に対する回答の中で都度議論している。現在、大きなフィロソフィーとして提案しているのは前生命環境探査である

6. 探査プログラム推進のために ISAS, 他部門, 大学に求めること

各パネリストよりご意見を端的に頂き、その後会場を含めた質疑を行った。以下のような議論が行われた（主要なもののみ抜粋）：

（橋本）：ISAS, 大学だけでは難しいところもある。他部門も協力して進めるべきである。要素技術や、先鋭化されたものは大学にもある

（春山）：適材適所が重要である。宇宙研の役割（JAXA の中で、日本の中で）を適切に考えるのが必要で、すべてを宇宙研で行うことに固執する必要はないのではないか。人材交流も重要である。大学に求めるものとして、既存データの解析などもあるだろう。今やデータは沢山あり、むしろ過剰で利用し切れていないという話もある。大学は、それを利用し尽くし、その上で、こういうデータがなければならぬ、という切実な欲求をもって新しい探査を提案する、というのがよい。

(宮本)：大学の立場で言えば、データ解析は重要である。しかし実際にデータ解析を行う現場の意見としては、やはり微妙に目的に合わない場合が多く、独自の探査で取得したデータに勝るものはない。その意味において、独自のミッションを立てるというのは必須である。

(今村)：探査ミッションを実行するコミュニティでは、ややもすれば凝り固まったアイデアに陥ることが多い。大学には、独創的な考えを提案して頂きたい

(森)：コストを抑えるという観点から考えると、はやぶさとははやぶさ 2 の関係が参考になる。技術実証ミッションと理学ミッションでは打ち上げに資する技術レベルが異なる。実験機と本番機を組み合わせることで、リスクを軽減し、コストも抑制できる。このため、技術実証のベースとなる研究開発活動は重要であり、これを実現してきた WG の役割は今後も大きい。WG における大学の役割は重要である。

(鈴木)：大学が大きなミッションの主体となることは難しいかもしれないが、小型ミッションや超小型衛星を用いた技術実証を機動的に実行することは大学の得意とすることであり、このような活動を通じた技術実証は有効であろうと思われる。これを実現する機会を、より積極的に提供して頂きたい。その中で、キックモータであったり、深宇宙用の小型の通信機であったり、需要を示して頂ければ、それに積極的に取り込めるのではないか。大学は 1000 のアイデアを出す。100 は真剣に議論し、JAXA はそのうち有望な 10 について大学と共同で高い機動性をもって実施する、そういった流れができればよい

(渡邊)：注意しておきたいのは、関係者間で意識のずれがあるのではないかと、いうことだ。特に現在は、変革・変動の時期にある。JAXA が巨大化して、昔とは同じでいられない。ISAS が中心となり、ISAS だけで理工学ミッションを企画・実施していた時代とは異なる。大学との連携の新しい形を構築すべきであろう。資産は若い研究者、特に学生である。学生の育て方、スクリーニングが重要であろう。経験者が若手を育てスクリーニングを行うことで、日本の科学コミュニティの拡大と充実が図られる。例えば神戸大 CPS 等では、そのような活動を行っている。

(森)：誤解が無いように述べておきたいが、ボトムアップミッションとトップダウンミッションは共生できると考えている。ただ、十分な議論が必要だと言うこと、また両者を共生させる仕組みを作り上げて、両者が納得できるようにすることが必要だと考える

(会場)：プロジェクトや学術分野において成果を上げる人は、何事も積極的に行動し、情報を収集し、ステークホルダーへコンタクトを取りに行くものである。その対局として、座して権利を主張するものもあるが、権利を主張し不平不満を述べるだけでは状況は良くなるのではないかと、思う。JAXA を取り巻く状況が変化する現在、求められているのは、臨機応変に行動することではないだろうか

(会場)：惑星科学は、個々の対象に特化するのもよいが、系統的に学問を組み立ててゆくことが重要で、それによって興味が集まるし、人も集まると思う。この視点において、フィロソフィーという考え方は的を射ており、今後探査プログラムを考える上で、参考にして頂きたい

7. 閉会の挨拶

最後にモデレータより、パネルディスカッションを閉会するに辺り、挨拶を行った。本パネルディスカッションは、最近の探査プロジェクト、探査プログラムやロードマップの作成において、意思決定がどのように行われているのか議論が見えにくいという声に応えて、月惑星探査ミッション創出や深宇宙探査技術開発に携わって来られた有識者をパネリストとしてお招きして、開かれた議論を行い、今後の探査ロードマップ作成と合意形成が健全に進められる契機となるように企画したものである。いくつかの貴重なコメントは今後の活動の参考となるように、議論の概要を取りまとめ、広く公開することとしたい。今回の議論が、将来の太陽系探査プロジェクトや探査プログラムの作成において一助になれば幸いである。

以上

「工学」、あるいは「探査」 の視点から

宇宙科学研究所
宇宙機応用工学研究系

橋本樹明

国際宇宙探査における我が国の探査シナリオ

火星

月

地球
低軌道

人類の活動領域の拡大

火星衛星サンプルリターン※
(2020年代前半)

ピンポイント
着陸技術

重力天体
表面探査技術



★ 無人火星探査

- 火星の利用可能性調査
- 火星の科学探査

長期間
滞在・活動技術



★ 火星の本格的な利用

- 長期にわたる火星の科学探査
- 多種多様な主体による火星表面活動



小型月着陸実証機
(SLIM(仮称))
(2019年度)

着陸機
輸送技術



月南極探査(2020年代初頭)

- 月の利用可能性調査(水氷等)
- 月の科学探査



★ 月の本格的な利用

- 長期にわたる月の科学探査
- 火星探査を目指した宇宙技術実証
- 多種多様な主体による月面活動

宇宙開発利用の拡大

こうのとりの
(HTV)

HTV-X(仮称)

きぼう

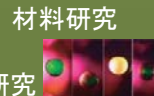
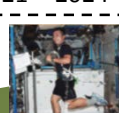
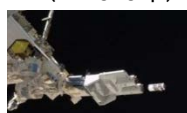
研究開発プラットフォームとしての幅広い利用
(~2020年)

物資補給技術

生命維持・
環境制御技術

民間企業を含めた多様な主体による低軌道利用

★国際動向等を踏まえて実施を検討JAXA/ISASにて検討中



宇宙旅行

創薬研究

材料研究

再生医療研究

エネルギー
技術

ロボティクス
技術

自動走行・
自動作業
技術

人工
知能

地上の
最先端技術

災害地用
ロボット

高効率再生
エネルギー

地上への
成果還元

新薬
創製

新機能材料
の創出

工学としては

選択科目A

主に科学探査に向けては、

インテリジェント化
超小型・軽量化

ソーラセイル
一体型推進系
ピンポイント着陸
非原子力越夜
分散協調ロボット
超小型探査機
エアロキャプチャ
火星航空機

必修科目

我が国として持っていなければならない技術。世界で何番目であっても、やらなければならない。

しかし質的に新しいことがなければ、(学問としての)工学研究とは言えない。

化学推進、イオンエンジン
着陸技術、離陸技術
EDL技術
表面移動技術
表面エネルギー技術

選択科目B

主に有人探査に向けては、

高信頼性、超大型化対応

大型(LNG)推進系
ホールスラスタ
有人支援SR(RDV)
超大型EDL技術
その場資源利用
原子力エネルギー

これまでのISASではあまり力を入れて来なかったが、この部分も重要な工学研究

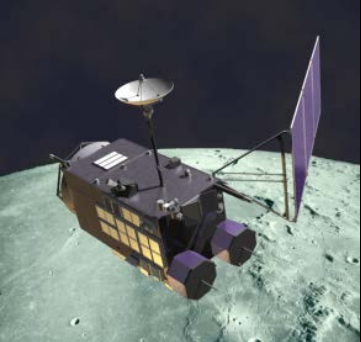
進め方(案)

- 必修科目は「工学ミッション」とは言えないので、ISAS外主導のミッションで技術実証をしていく。あるいは、選択科目Aのミッションを実施する中で、実力をつけていく。
- 一方で、月有人探査は目前に迫っている。日本がプレゼンスを示すには、選択科目Bについても積極的に取り組むことが必要。(ISASでやるかどうかは別として)
- 火星有人探査の課題は多く、世界的にも技術的・予算的な目処は立っていないと理解。我が国が火星着陸探査をやるのであれば、後追いで必修科目のみをやるのではなく、選択科目A(他国の1/10の規模で実施)あるいは選択科目B(有人探査への課題を世界に先駆けて解決)を選ぶべきではないか。

月火星の
人類史上初の縦孔・地下空洞探査
UZUME計画

～ポストSELENEを目指して～

宇宙航空研究開発機構(JAXA) 春山純一

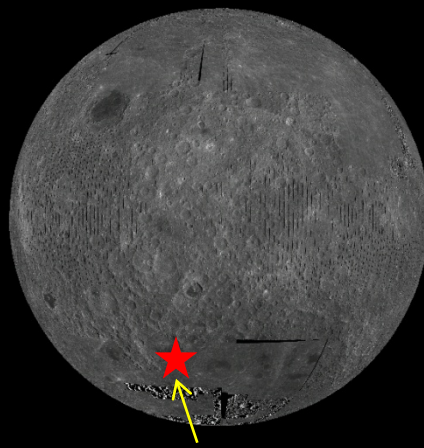


～SELENEによる月の縦孔の発見～

- SELENE(かぐや)は多くの発見を成し遂げたが、特に、世界の研究者達の多大な興味を引いたのが、直径、深さ共に数10 m規模という巨大な深い縦孔の史上初めての発見であった。

月の表

月の裏



マリウスヒルの縦孔

静の海の縦孔

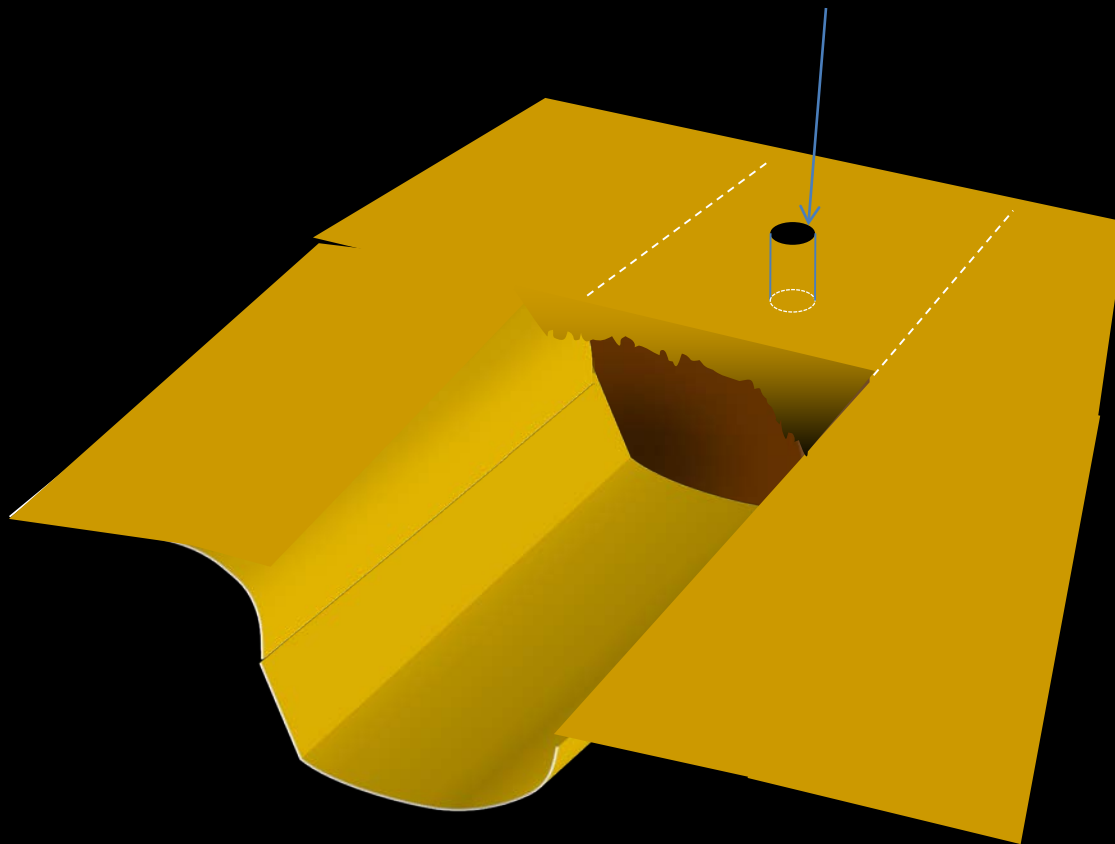
賢者の海の縦孔



Haruyama et al., GRL 2009

～SELENEによる月の縦孔の発見～

溶岩チューブのような地下空洞
の上に開いた孔を見つけた



～SELENEによる月の縦孔の発見～

静の海の縦孔
(深さ 107m)



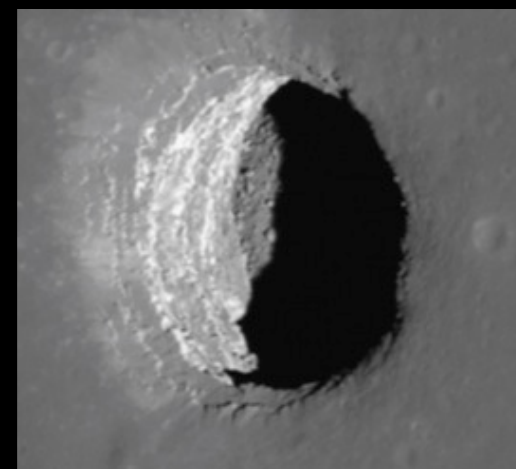
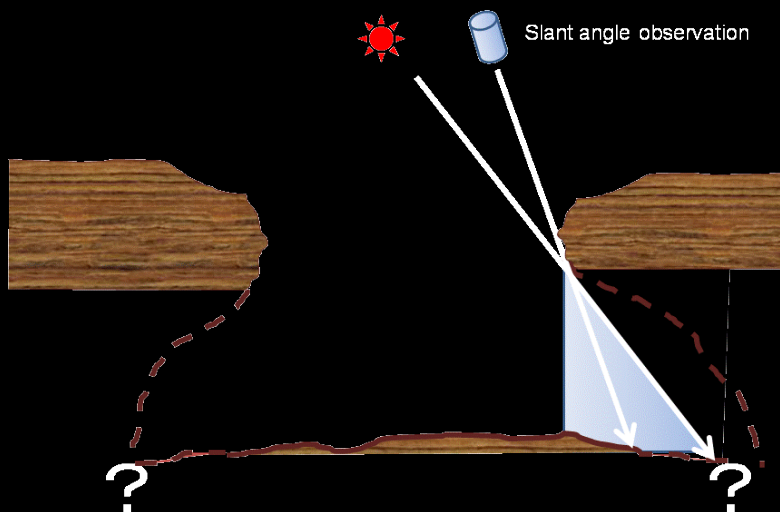
100m

米国探査機LROによる画像

©NASA/ASU

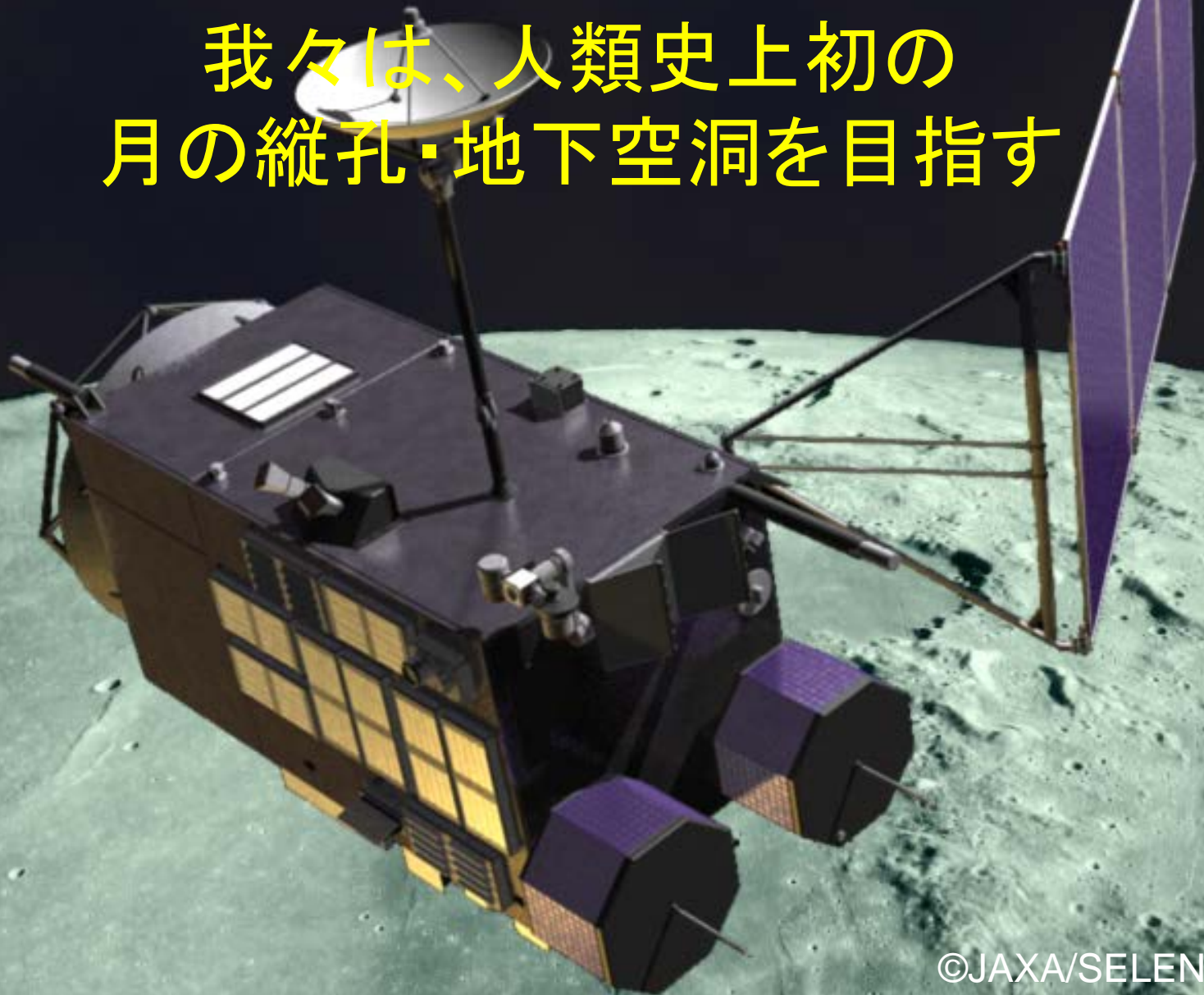
～SELENEによる月の縦孔の発見～

縦孔につながる**巨大な地下空洞**
は、更に、LROによる斜め撮像
で、より確実になった。



Robinson et al., 2012, PSS

SELENE成果を元に、ポストSELENEとして、
我々は、人類史上初の
月の縦孔・地下空洞を目指す



©JAXA/SELENE

This document is provided by JAXA.

ポストSELENEとしての 月の縦孔・地下空洞探査

SELENEが目指した課題

- ・月の利用可能性の調査
- ・月の起源と進化の謎を解き明かす

を引き継ぐ

ポストSELENEとしての 月の縦孔・地下空洞探査

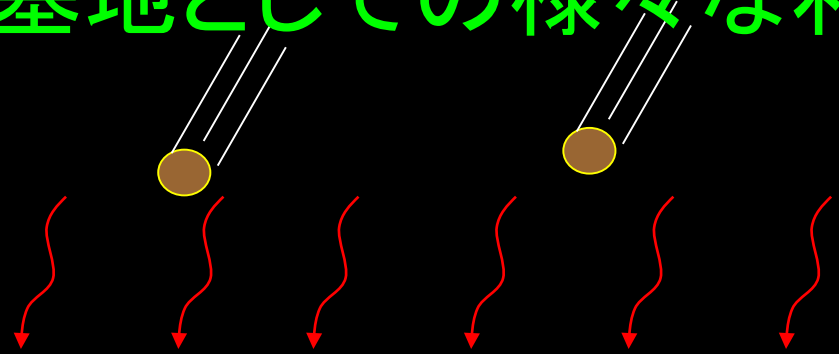
- ・月の利用可能性の調査

月の縦孔・地下空洞探査～ポストSELENE～

月の縦孔・地下空洞：基地としての様々な利点

● 天井の存在

放射線・紫外線・隕石衝突、
隕石衝突の際の飛散物から
機器や人が守られる



● 定常な温度

赤道域で、 -20°C 付近



● 広大な空間

数 10m の高さ 100mに及ぶ幅
数 km以上の長さのところも？

● 平滑で堅固な床面

● 高い密閉性

● 塵の無い空間

● 安定な光環境

月の縦孔・地下空洞探査～ポストSELENE～

月の縦孔・地下空洞：基地としての様々な利点を詳細に調査する

静の海の縦孔
(深さ 107m)

米国探査機LROによる画像

100m

©NASA/ASU

ポストSELENEとしての 月の縦孔・地下空洞探査

- ・月の起源と進化の謎を解き明かす

月の縦孔・地下空洞探査～ポストSELENE～

月の縦孔：様々な科学的的重要性

SELENE(LRO等)でわかってきたこと

(例) 様々な火成活動

(内部活動進化史を解き明かす手がかり)

長く続いていた全球規模の火成活動(Haruyama et al., 2009)

硅素リッチな火成活動(Jolliff et al., 2012)

火山に水(水酸基)? (Klima et al., 2013)

1億年前の若い溶岩流(Braden et al., 2013)

月の火成活動研究について新たな展開が始まっている。

月の縦孔・地下空洞探査～ポストSELENE～

月の縦孔：様々な科学的的重要性

SELENE(LRO等)でわかってきたこと

(例) 様々な火成活動

月の火成活動研究について新たな展開が始まっている。
それとともに、今後、更に、様々な天体で火成活動の研究が進む

火星：MROなど多くの探査機

水星：Messenger、BepiColombo

小天体：Dawn

木星・土星の衛星：Galileo、Cassini, JUNO, JUICE

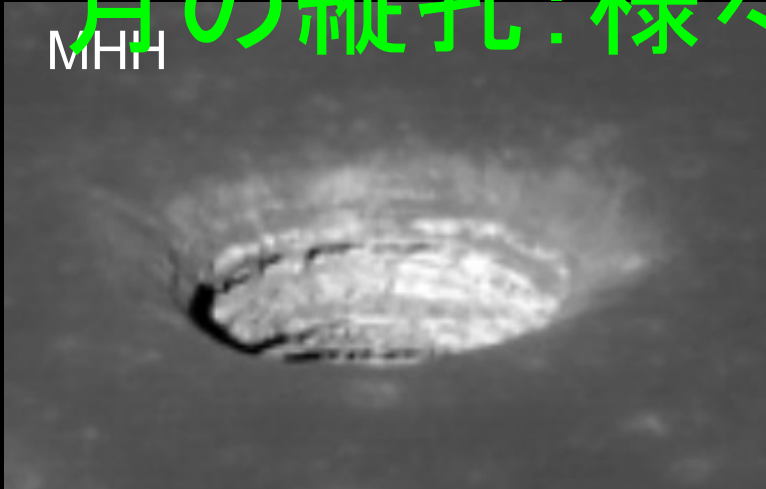
etc

月の火成活動を調べ、固体天体の進化に迫る

月の縦孔・地下空洞探査～ポストSELENE～

月の縦孔：様々な科学的的重要性

MHH

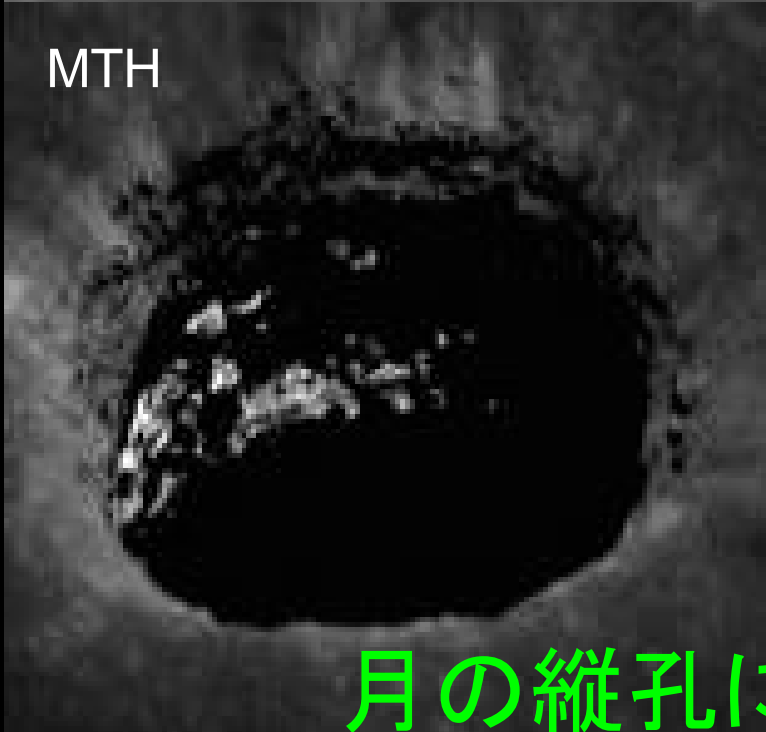


MHH

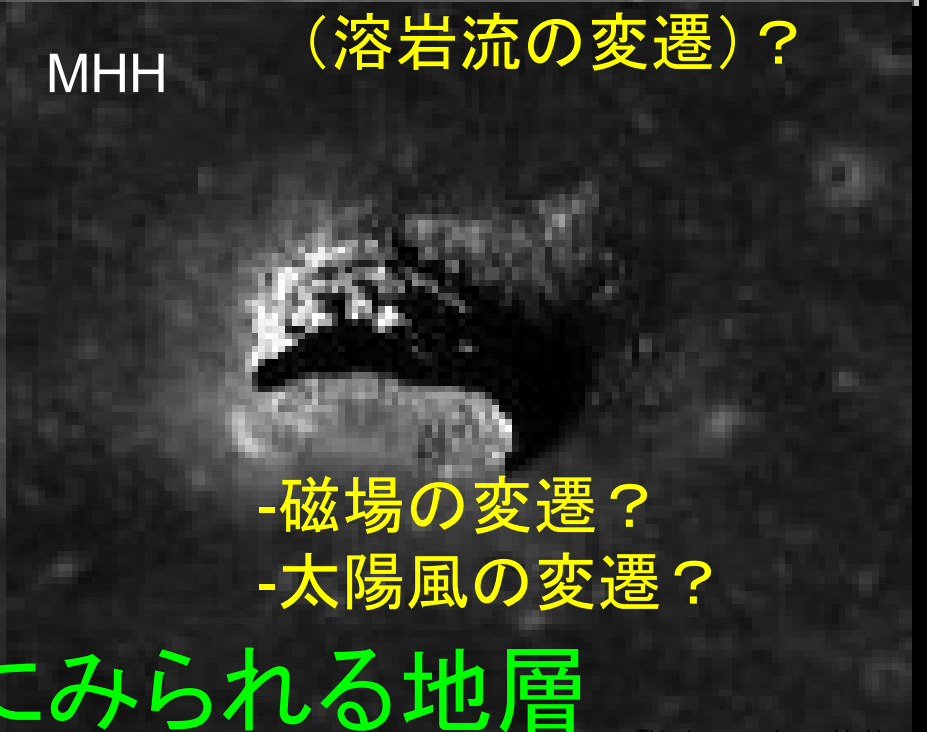


-溶岩層・レゴリス層
(溶岩流の変遷)?

MTH



MHH



-磁場の変遷?
-太陽風の変遷?

月の縦孔にみられる地層

月の縦孔・地下空洞探査～ポストSELENE～

月の縦孔：様々な科学的的重要性

地下空洞の中は、生まれたてのまま。
月固有の水やガスが岩の中に？

月の縦孔・地下空洞探査～ポストSELENE～

月の縦孔：様々な科学的的重要性

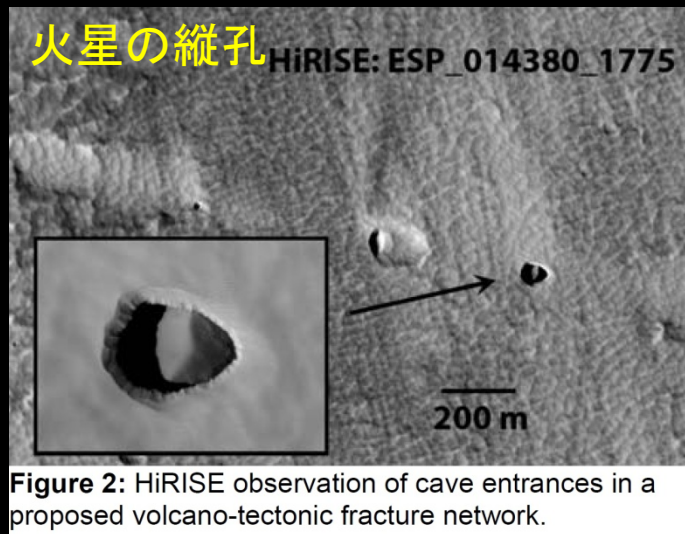
- 1) 新鮮な月の物質を得られる特異なところ
- 2) 静謐な環境で、月の内部構造の調査に最適



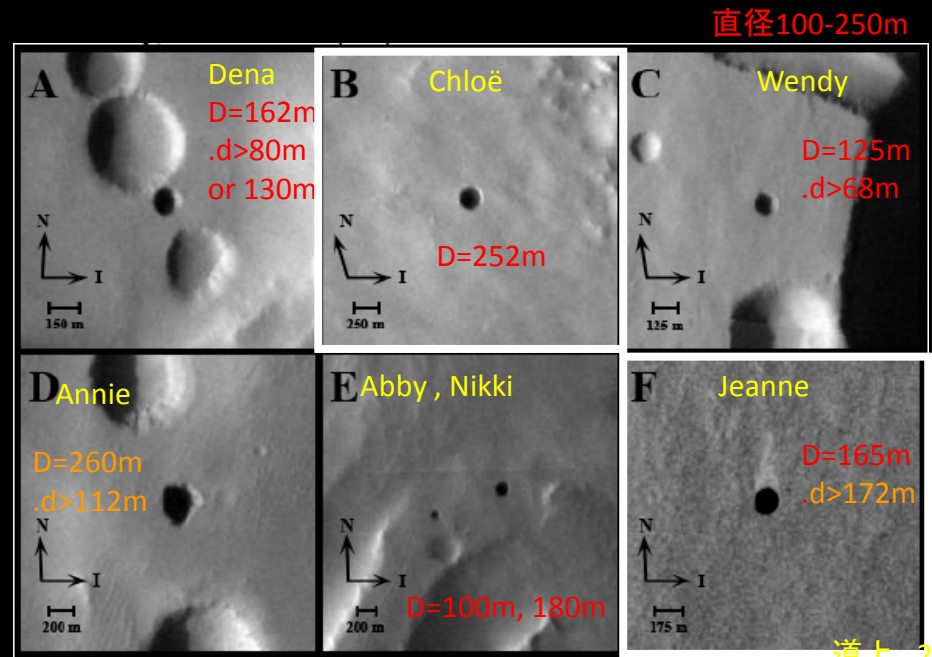
SELENEの科学成果を元に、
我々は、月の縦孔・地下空洞を目指す

月の縦孔・地下空洞探査～ポストSELENE～ 月を越えて

縦孔：火星にも同様の縦孔・地下空洞 火星の孔には生命がいる？



G. E. Cushing and T. N. Titus, 2010



道上 2010

G. E. Cushing et al., 2007

ポストSELENEとしての 月の縦孔・地下空洞探査

・理工学の連携

月の縦孔・地下空洞探査～ポストSELENE～ 理工学の連携：ロボット工学

- 垂直壁、不整地である孔の底を
（多肢型？）ロボットで探査

ロボット工学研究者と、協力を開始

- 人に成り代わって探査するロボット
（その場解析、サンプリング）
“遠隔走査型代理科学者”

SELENEとは

Selenological and Engineering Explorer
「月の理学と工学の探査」

この精神を受け継いで、
我々は、月の縦孔・地下空洞を目指す

月縦孔・地下空洞探査計画 (一部の人達で、ですが。。。)

ミッションコードネーム

UZUME

Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon Exploration
(古今未曾有の日本の月地下世界探査)

今後、Moonが、Marsにもなる。

アメノウズメは、
古事記では 天宇受賣命、
日本書紀では 天鈿女命、と表記する。(Wiki)
ウズメは、雨の岩戸に隠れた天照大神を、踊りに
よって誘い出した女神の名前、芸術の神さまとして
も崇められている。



★月惑星の縦孔・地下空洞探査UZUME計画



UZUME—**U**nprecedented **Z**ipangu **U**nderworld of the **M**oon (**M**ars) **E**xploration
(古今未曾有の日本の月(火星)地下世界探査)

日本人がSELENEで発見した月の縦孔を世界で初めて直接探査



2020年(目標)
UZUME-1号

初の月の縦孔・
地下空洞探査
(技術実証主体)

2025年(目標)
UZUME-2号

月の縦孔・地下空洞
からの試料回収
(実・理学ミッション)

2030年(目標)
UZUME-3号

初の火星の縦孔・
地下空洞探査
(実・理学ミッション)

理学ミッション

縦孔地下空洞地形
横孔の有無
「露頭」観察
地下空洞環境
(放射線、温度)

縦孔壁面、底面等の
「露頭」からの試料回収
鉱物分析
水の有無

縦孔・地下空洞地形
横孔の有無
地下水、生命の痕跡
の探索

工学ミッション
(探査ロボット技術)

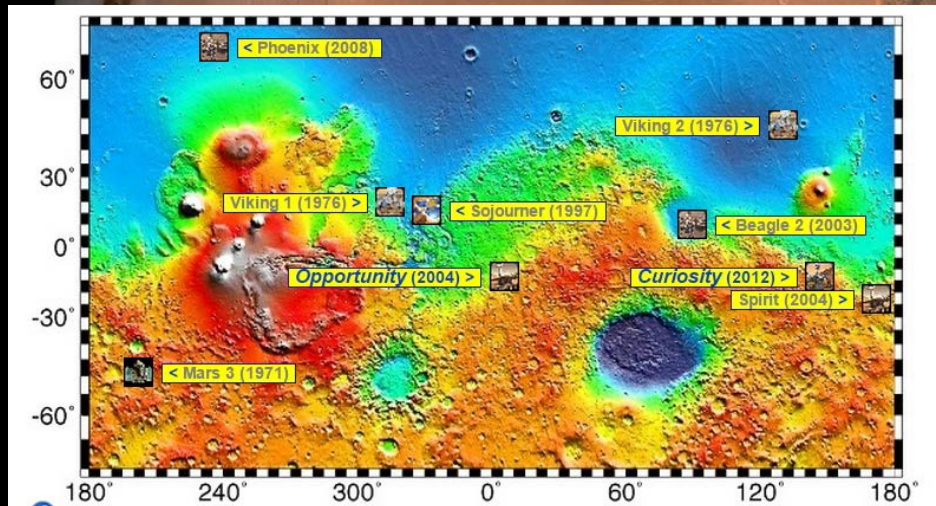
平面二足歩行
垂直降下
遠隔基礎作業
(捕獲等)

垂直降下／上昇
帰還／回収
試料採掘、打砕
観測装置による観測

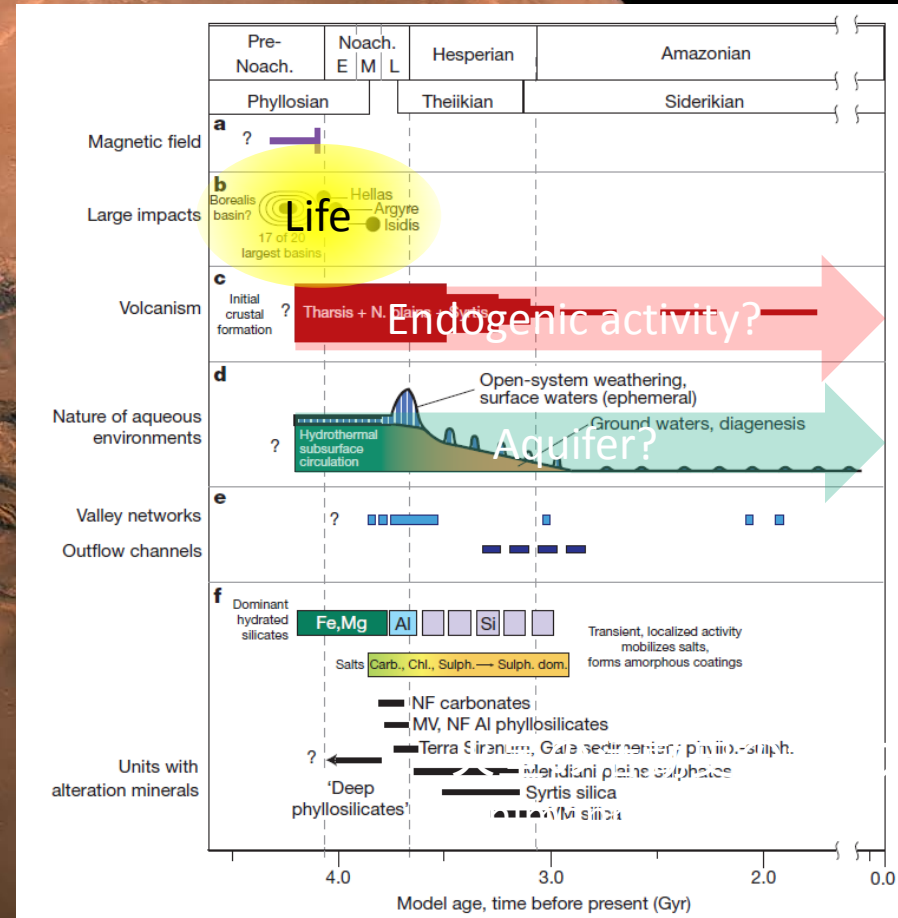
試料採掘、研磨
観測装置による観測、
分析

火星はやはり特別な天体

- 地球に近い
- さまざまな活動史
- 地球と類似した表層環境
- 過去の地球との直接対比



地球の陸地と同じ面積を持つ
過去7か所の着地点は似通っている



(Modified from Ehlmann et al 2011)

Global Exploration Roadmap



2013

2020

2030

International Space Station

General Research and Exploration
Preparatory Activities

Note: ISS partner agencies have agreed to use the ISS until at least 2020.

Commercial or Government Low-Earth Orbit Platforms and Missions

Robotic Missions to Discover and Prepare



Mars Sample
Return and
Precursor
Opportunities

Human Missions Beyond Low-Earth Orbit

Explore Near-Earth Asteroid

Multiple Locations
in the Lunar Vicinity

Extended Duration Crew
Missions

Humans to
Lunar Surface

Missions to
Deep Space and
Mars System

Sustainable
Human Missions
to Mars Surface

NASA/ESAにおける科学探査の動向

NASA

実施決定: InSight (launch 2016), OSIRIS-Rex (launch 2016), Mars 2020 (launch 2020), Europa Clipper (launch 2025) (MSL2,500億円、ExoMars Orbiter+EDM 800億円)

検討中:

Discovery Program (500億円) には現在、Phase-1プロポーザルが12個以上 (Mars Icebreaker Life, Moon, Venus atmosphere and surface explorer, IO Volcanic Observer, Phobos/Deimos mission, Telescopes, Main belt asteroids, Trojan asteroids, Near Earth objects, comets, Enceladus)

もうすぐ(12月?)数個になり、来年9月(?)に決定

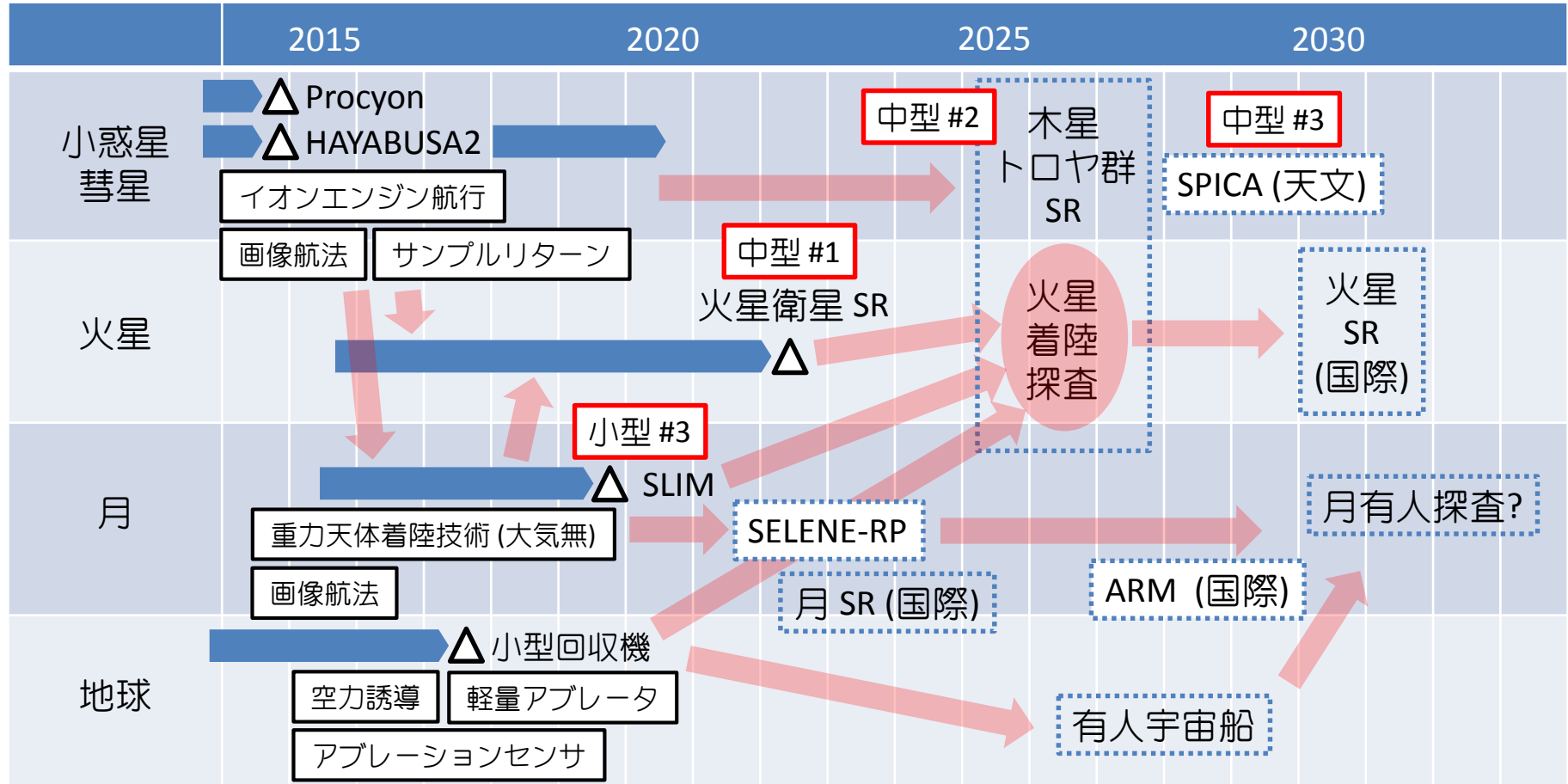
New Frontiers (1000億円) 来年末(?)に募集(?) 2013 Decadal Surveyによる推薦は、lunar South Pole-Aitken Basin Sample Return, Venus lander, Trojan tour and rendezvous, comet surface sample return, Saturn atmospheric entry probe.

その次の**New Frontiers 5** はIo Volcano Observer and Lunar Geophysical Network がDecadal surveyで示されている

ESA

実施決定: bepicolombo (launch 2016), Exomars (Mars orbiter and lander launch 2016, Mars rover launch 2018), and Juice (planned 2022 launch)

火星着陸探査WGのベースラインRMを一部修正したもの

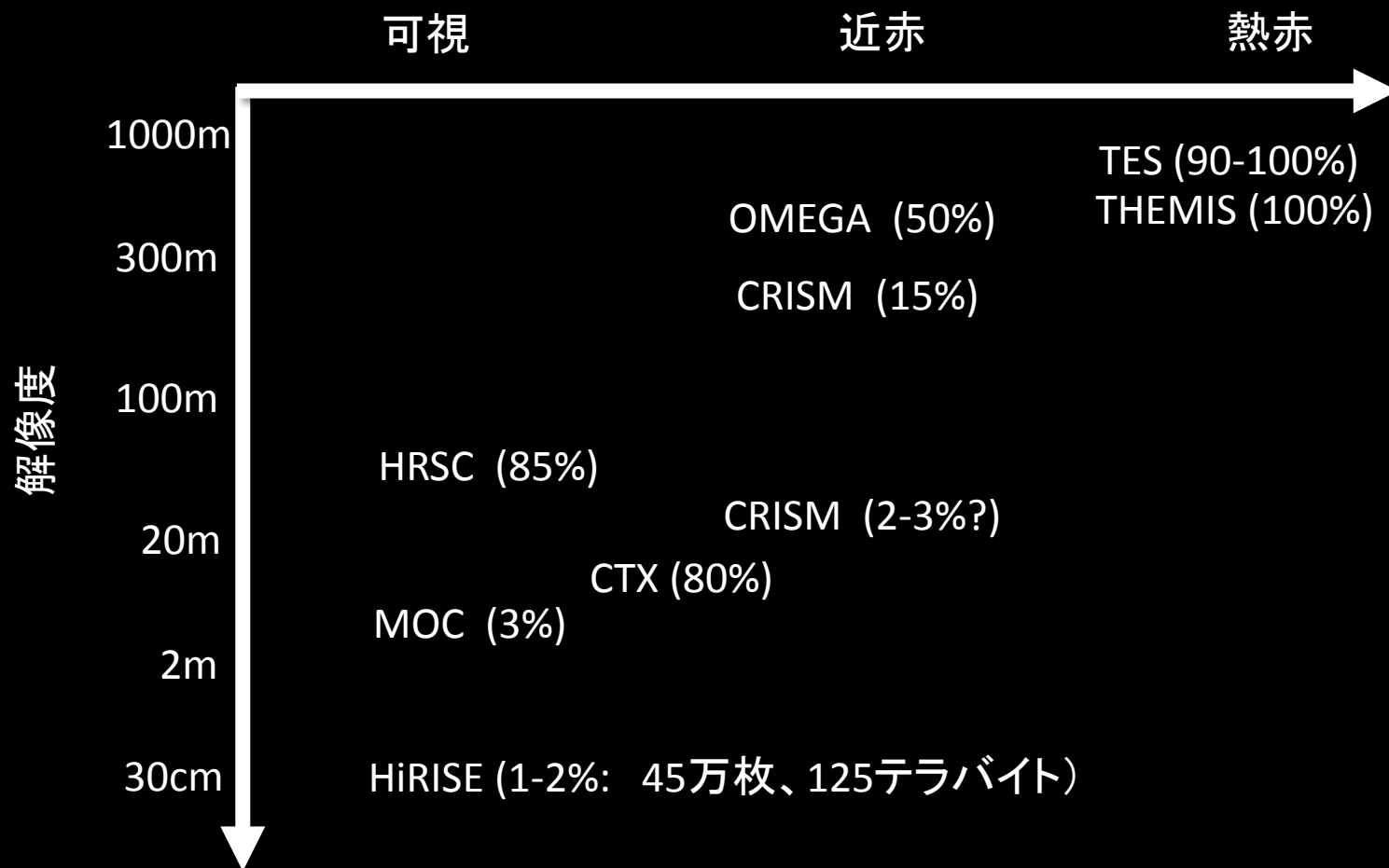


卓越したアイデアを核に

- 独自性のある測器とサイエンス
- 工学的ブレークスルー、ISRU

火星の「まだら」なデータセット

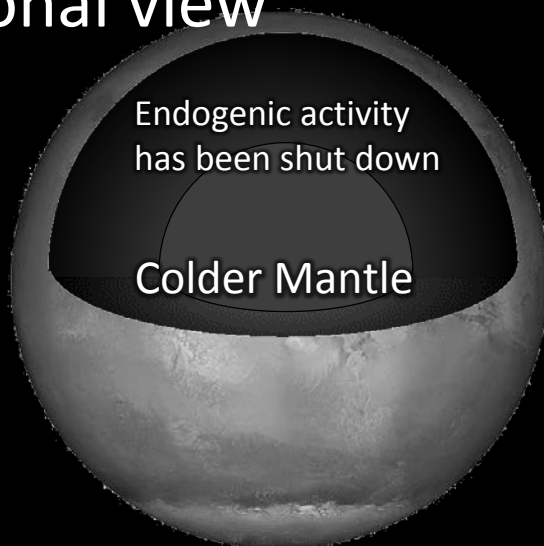
(誰かが興味をもって調べた場所はデータが多いが
そうでないと必ずしもデータが無い)



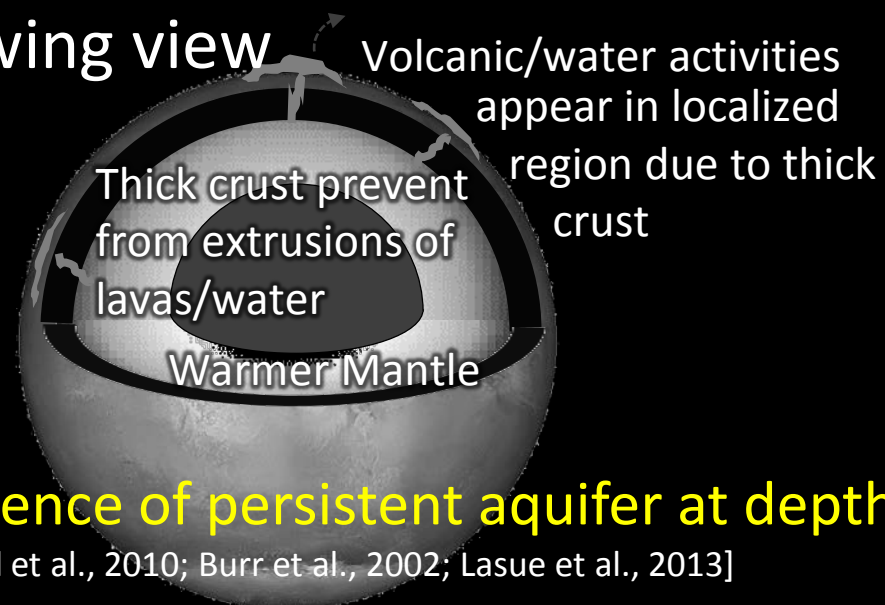
MELOS1で目指したのは、

- 火星が現在も活動的であることを証明する
- 火星に居るかもしれない生命を検出する

Traditional view



Growing view



Existence of persistent aquifer at depth

[Clifford et al., 2010; Burr et al., 2002; Lasue et al., 2013]

現在も活動的な場所
極域
地下

これらは探査されていない(計画もあまりない)
(技術的ハードルは高い)
PD/SRで火星軌道投入は実証でき、月で着陸
実証ができると挑戦的な戦略が考えやすくなる

独自開発装置： 生命探査顕微鏡（LDM）

火星に生命が誕生していたかも知れない(40億年前)

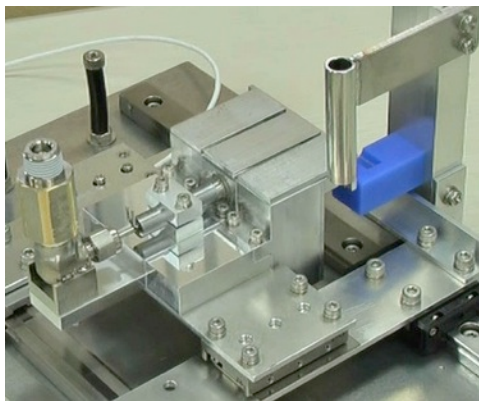
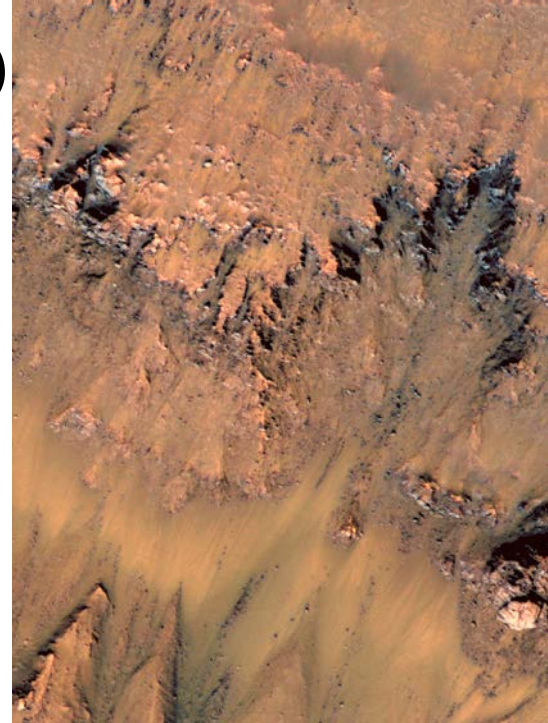
- 火星表層にはかつて大量の水が存在
- 温暖湿潤な気候がある程度長期間保たれていた
- 火山活動があった
- 強い磁場を保持していた
- 当時の地球と極めて似ていた

現在も微生物生存可能環境が保たれている

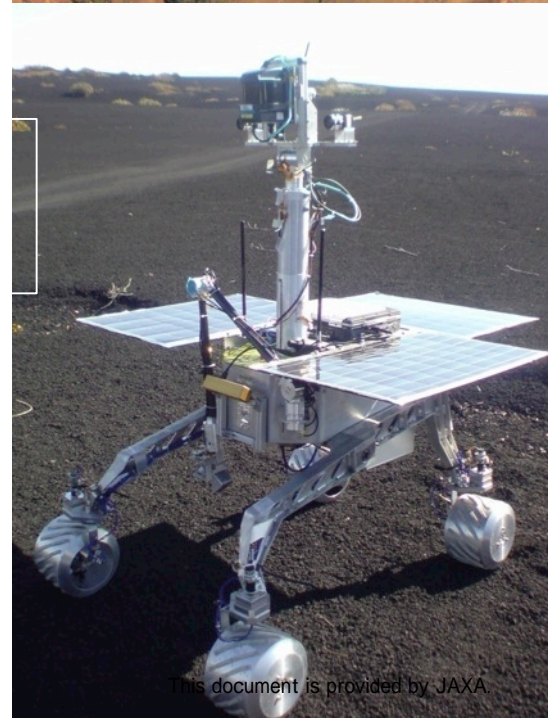
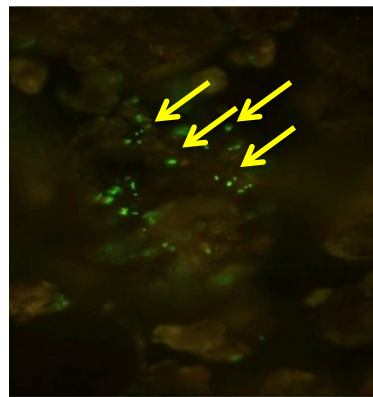
- 液体の水が流れた後と推定される場所が複数
- メタン(可能性)や酸化鉄、還元型硫黄(H_2S)などが存在
- 数cm表面下であれば生命は十分生存可能

Vikingの結果の見直し

- 1g土壤中に 10^7 個の細胞が検出できる程度
- 地球上微生物密度の低い地域(1g土壤中に 10^4 個細胞)



有機物、細胞、ダ
ストを探査する



NASA Mars2020は化石探し(顕微ラマン)

ESA: ExoMars は生物探しも

(Life Marker Chip: 生体関連分子ATP等を探す)

ESA: ExoMarsも顕微ラマン、
レーザーアブレーション質量分析

NASA/ESAは2026火星サンプルリターン？

日本独自の装置: 生命探査蛍光顕微鏡

バイキングの1000倍ほどの微生物検出感度
鉱物、有機物

(Cコンドライト中有機物検出可)、細胞検出
装置の質量の大幅削減進行中

巨大物体の素粒子透視法

フォトグラフィ

ミュオグラフィ

ニュートリノグラフィ

X線 **photography**



muography



neutrinography



m

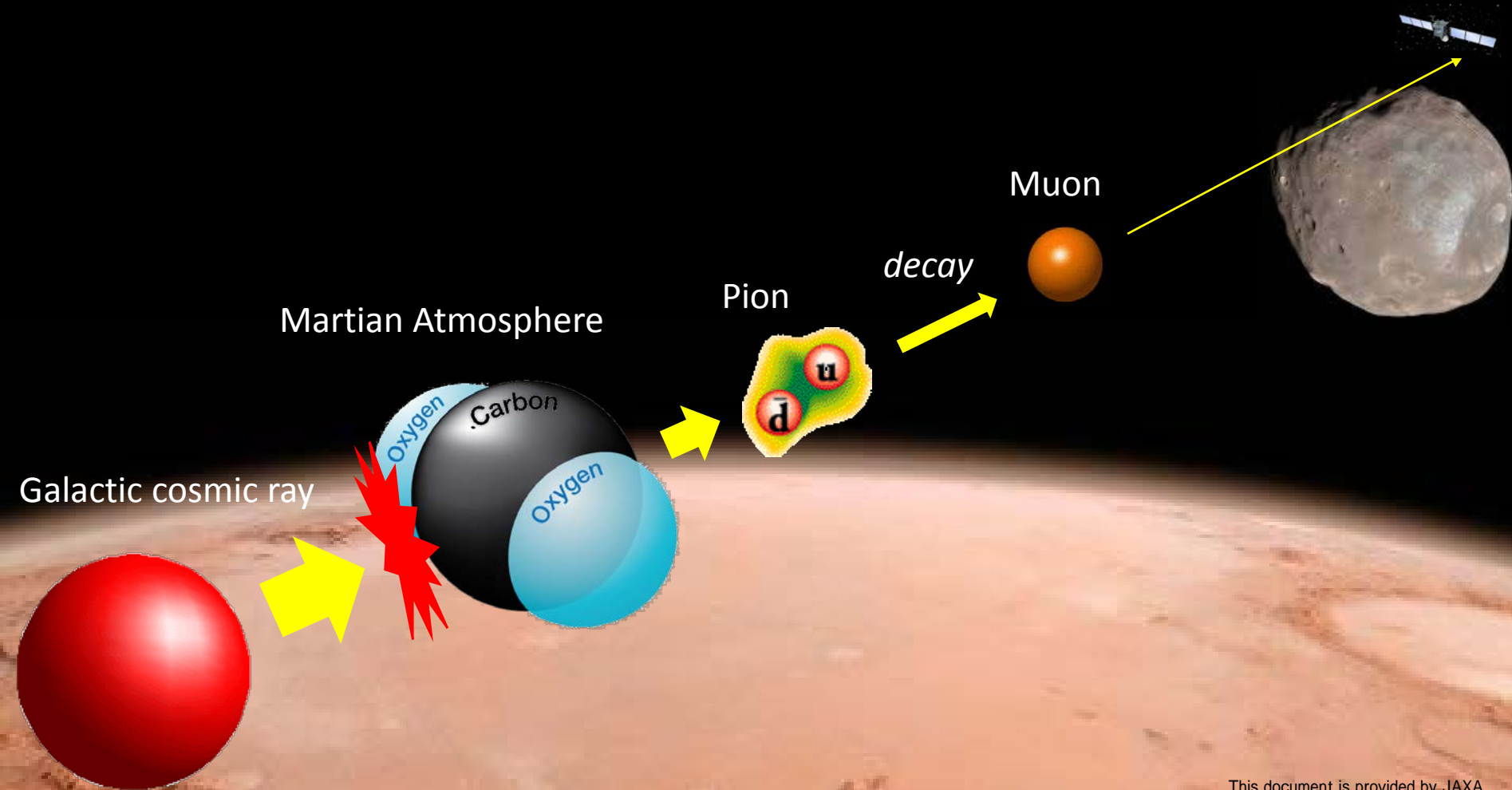
km

Mm

スケール

今日のトピック

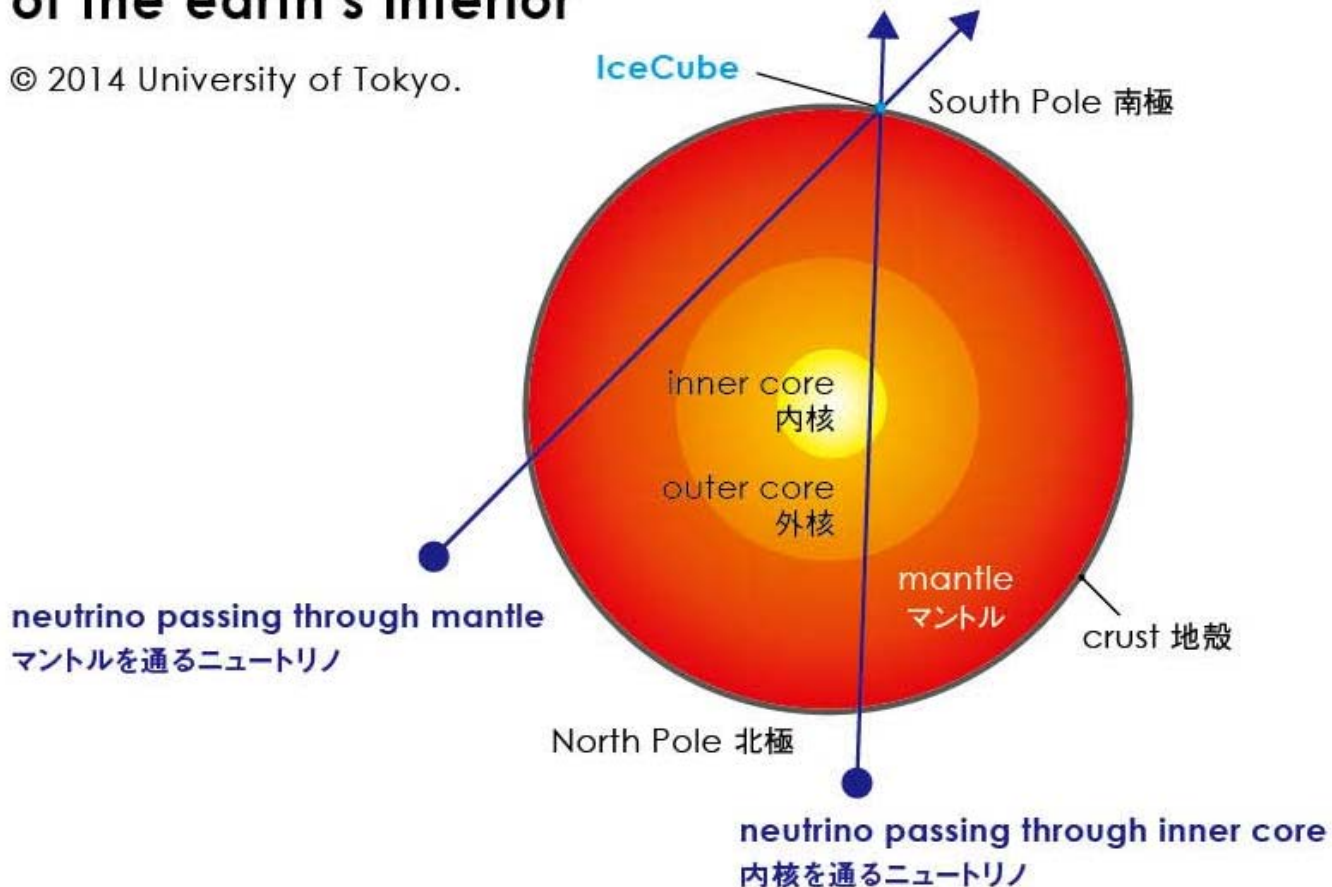
ミューオンによる火星衛星の内部構造探査



地球内部の透視法の原理

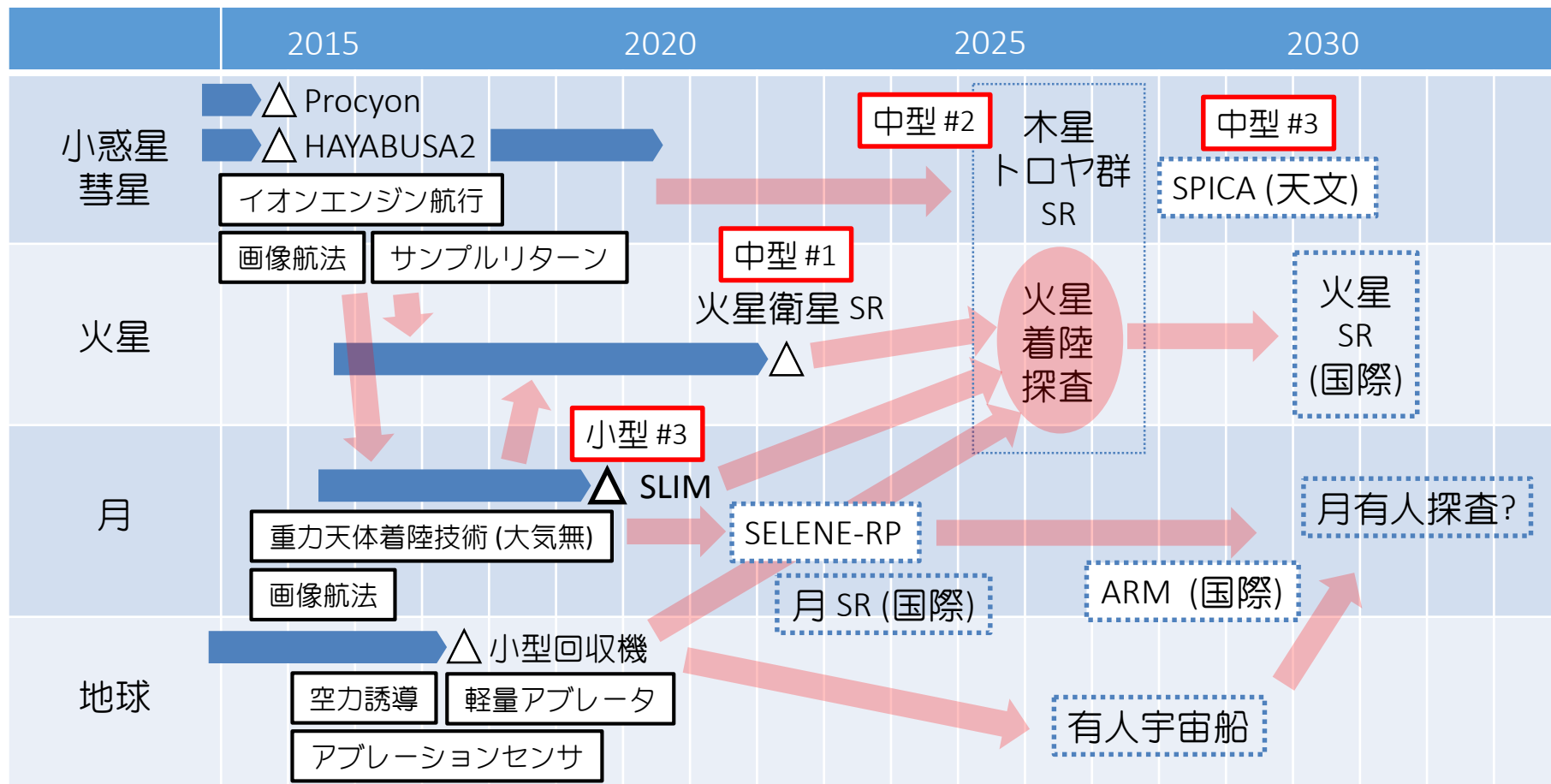
Principle behind visualization of the earth's interior

© 2014 University of Tokyo.



火星の場合はチェレンコフ光をフォトマルでとらえるのではなく、
アスカリアン電磁波をアンテナでとらえる

火星着陸探査WGのベースラインRMを一部修正したもの



卓越したアイデアを核に

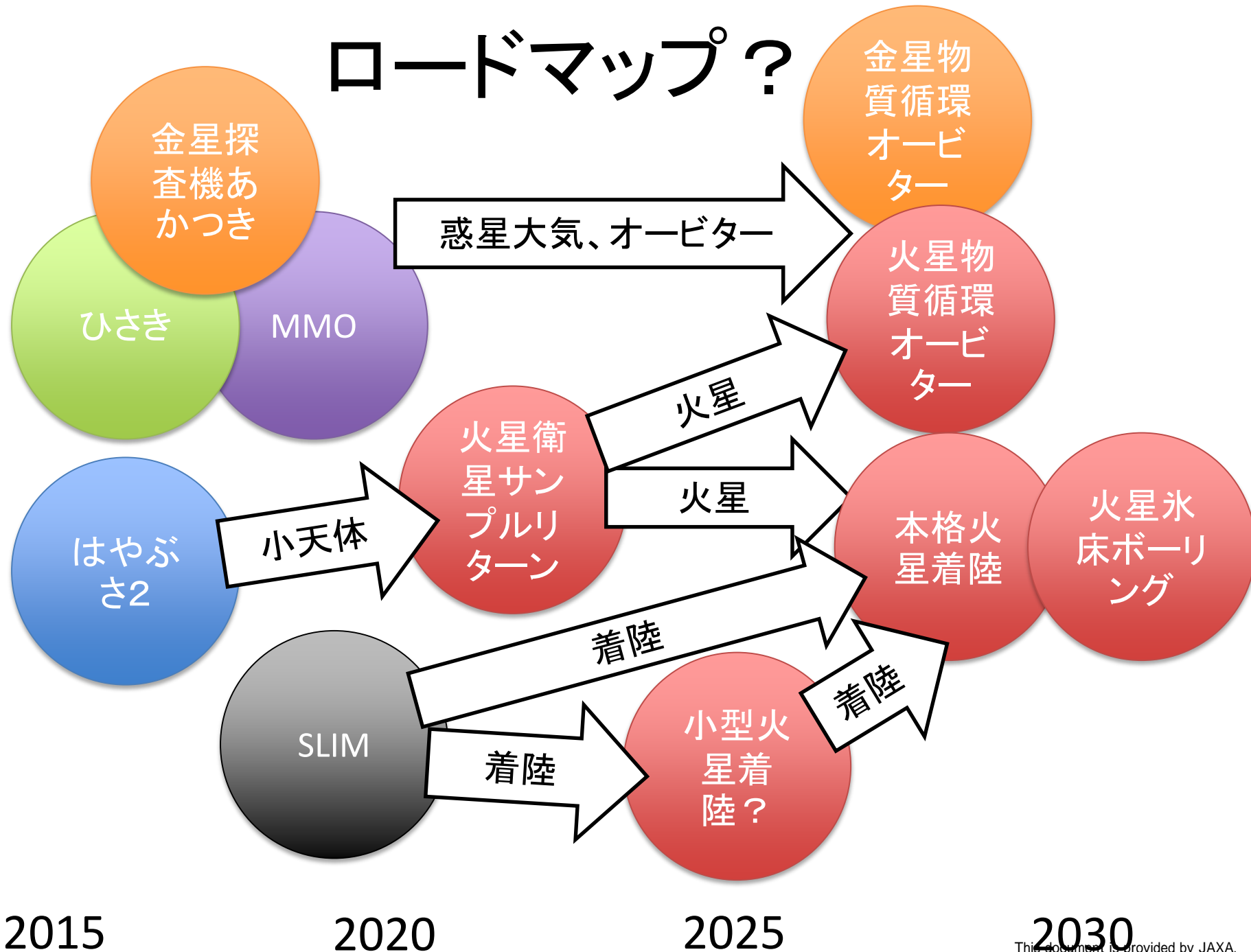
- 独自性のある機器とサイエンス
- 工学的ブレークスルー、ISRU

探査私案

ISAS 今村剛

- 太陽系探査＝SENSE OF WONDERの源
- 太陽系世界が日常的感覚を越えた成り立ちを持つこと、いま見えている太陽系天体の姿が地球での常識からは想像しがたいメカニズムで維持されていること・・・ の理解
- (個人的興味) 気候形成、habitabilityに直接関わる流体圏プロセスと地質学的時間で進行するプロセスの相互作用
- (たとえば) 金星・火星の気候形成、木星の深部循環、惑星ヘイズ化学、惑星流体力学、氷衛星の地下海

ロードマップ？

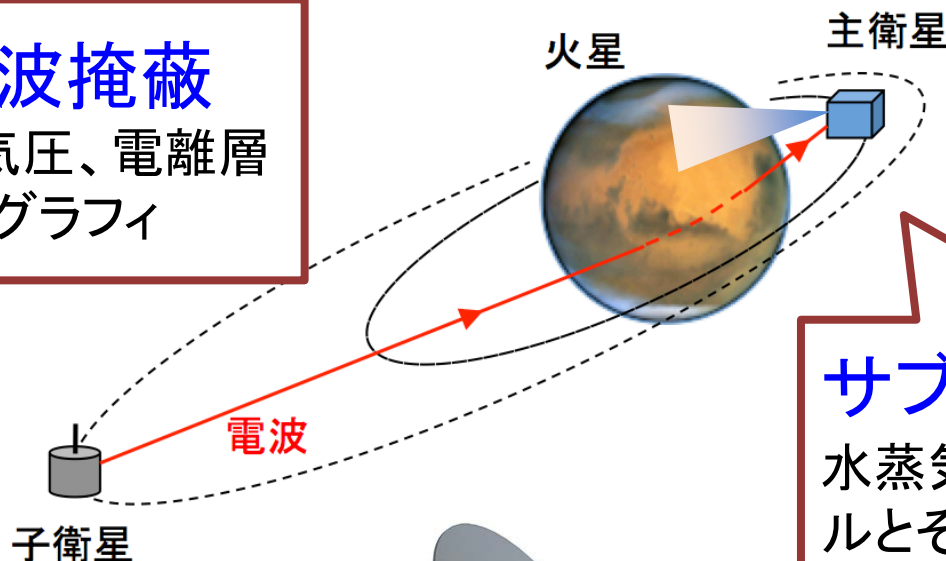


火星物質循環オービター探査

ダスト雲内部を透視する2種の電波科学ミッションを軸に、大気-地殻物質交換、水循環、ダスト循環、光化学、大気流出をとらえ、火星気候の変動と安定性を理解する

衛星間電波掩蔽

3次元気温、気圧、電離層
電子密度トモグラフィ



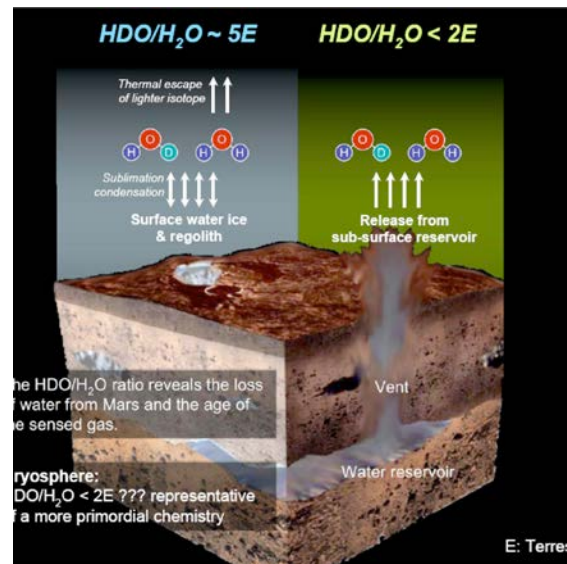
サブミリ波サウンダ

水蒸気、D/H比、各種ラジカルとその前駆体、気温、風速の3次元分布



JUICE搭載サブミリ波サウンダSWI
(Submillimetre Wave Instrument)

This document is provided by JAXA.

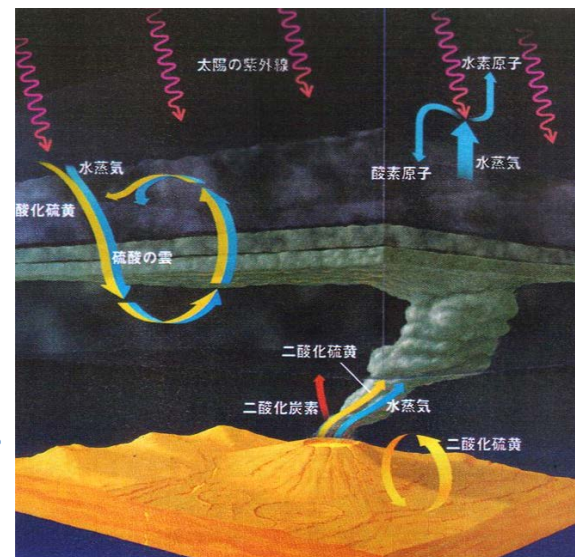
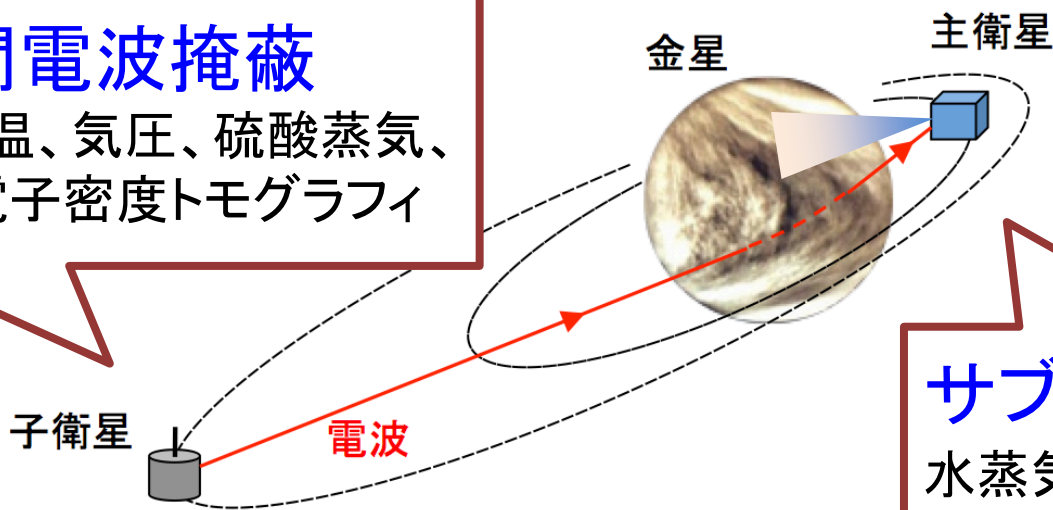


金星物質循環オービター探査

硫酸エアロゾル層内部を透視する2種の電波
科学ミッションを軸に、高アルベドをもたらすエ
アロゾル層の維持や大気散逸に関わる化学・
物質循環を解明する

衛星間電波掩蔽

3次元気温、気圧、硫酸蒸気、
電離層電子密度トモグラフィ



サブミリ波サウンダ

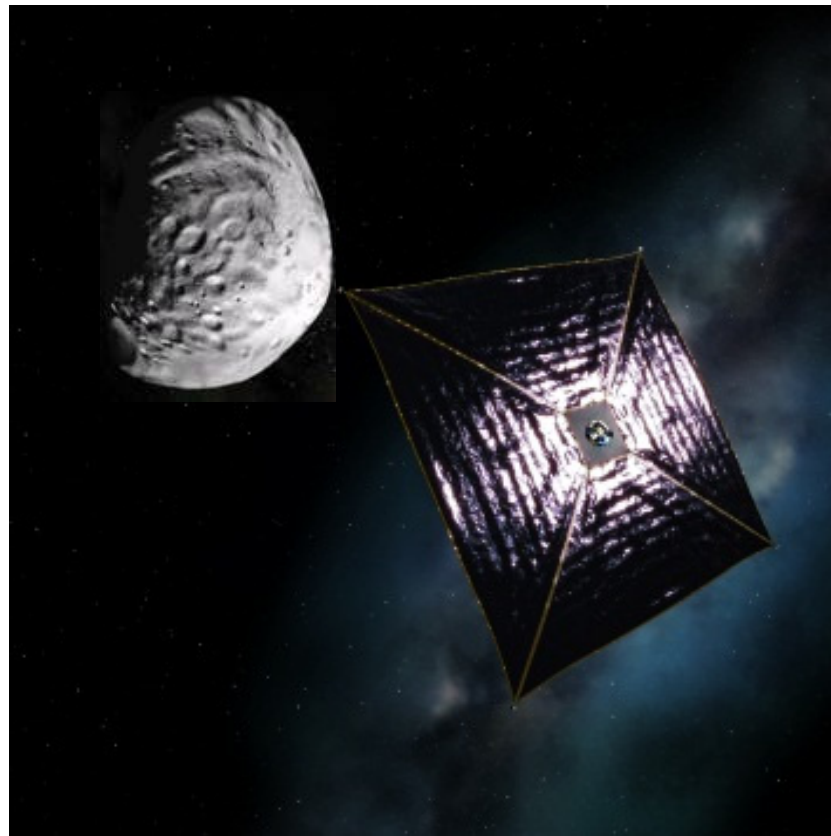
水蒸気、D/H比、各種ラジカ
ルとその前駆体、気温、風速
の3次元分布



JUICE搭載サブミリ波サウンダSWI
(Submillimetre Wave Instrument)

This document is provided by JAXA.

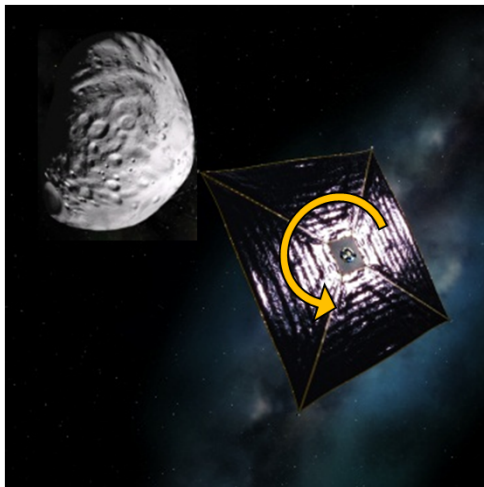
ソーラー電力セイル探査機による 外惑星領域探査の実証



宇宙科学研究所 森治

ソーラー電力セイル探査機

- スピン展開式(0.1rpm)大型ソーラーセイル(IKAROSの10倍以上の2500m²)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の太陽電池パネルの発電量(486W@5.2AU)の10倍以上である。仮にフレームのある薄膜太陽電池パネルを用いたとしても、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倍以上の7000秒)を駆動し、外惑星領域で大きな ΔV を獲得可能である。
→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。

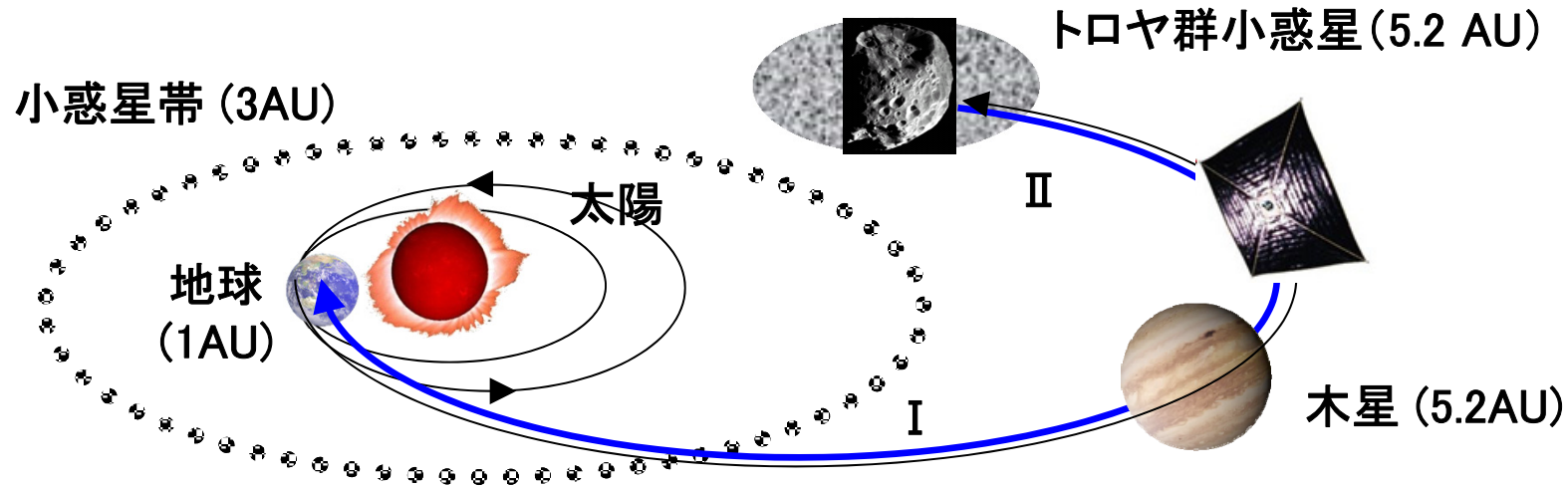


ソーラー電力セイル探査機



JUNO

ミッションシーケンス



<サイエンス>

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
- ・太陽系ダスト分布のその場計測
- ・ガンマ線バーストの偏光観測

II. ランデブーフーズ

- ・トロヤ群小惑星の観測
- ・トロヤ群小惑星の試料分析

<スケジュール例>

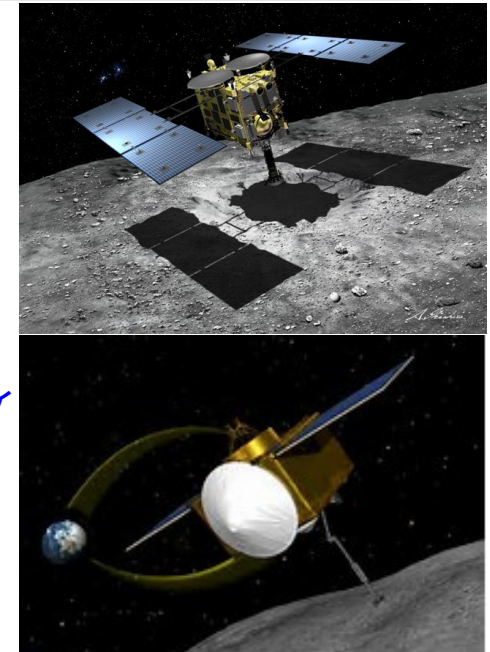
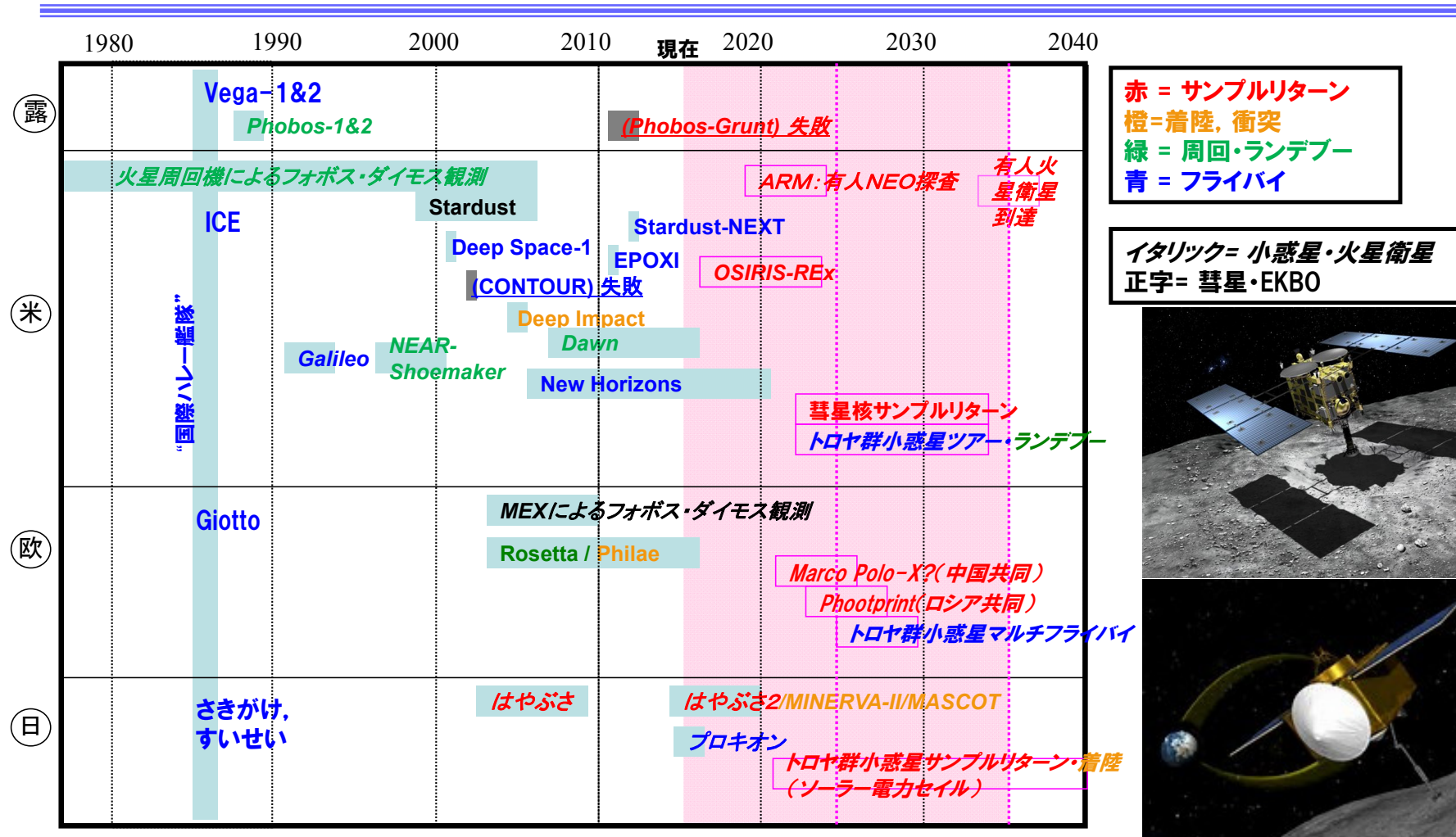
- ・2021年08月: 打上げ
- ・2023年06月: 地球スイングバイ
- ・2025年12月: 木星スイングバイ
- ・2036年07月: トロヤ群小惑星到着
子機の着陸・試料採取・その場分析
- ・2037年07月: トロヤ群小惑星出発
- ・2049年09月: 木星スイングバイ
- ・2052年07月: 地球帰還

※小惑星到着までの期間 往復の場合: 約15年, 往路のみの場合: 最短10年.
クルージングサイエンス, 工学実証の成果は往路の早い段階から得られる.

ミッションの主な特徴

- ①**世界初**の光子推進と電気推進のハイブリッド推進
- ②**世界最高**性能のイオンエンジン
- ③**世界初**の小惑星帯以遠での宇宙赤外線背景放射の観測
- ④**世界初**のトロヤ群小惑星の観測
- ⑤**世界初**のトロヤ群小惑星の試料分析
- ⑥**世界初の外惑星領域往復**
- ⑦**世界最高速度の地球帰還カプセル**

小天体探査の国際動向



海外でもはやぶさを踏まえて、地球近傍小惑星対するサンプルリターンミッションが行われるようになった。しかし、トロヤ群小惑星を含む小惑星帯以遠の小惑星に対して、今後20年以内に着陸機を投ずるためにはソーラー電力セイルが唯一の現実的ソリューションである。

日本の小天体探査の国際的優位性をはやぶさ2以降にも維持・発展できる。

太陽系天体毎の国際動向

	月	水星	金星	火星 圏	彗星	小惑星 (外惑星領域 除く)	木星 圏	土星 圏	天王 星	海王 星	冥王星、 EKBO
フライバイ	● U, R, J	● U	● R, U	● U, R	● J, U, E, R	● U, E, C ▲J:プロキオン	● U ■J	● U	●U	●U	▲U: New Horizons
周回・ランデブー	● U, R, J, E, C, I	●U ■E/J: BepiColombo	● R, U, E ▲J:あかつき	● U, R, E, I ■C, J	● E	●J, U, R	●U ■E/J: JUICE ■U (エウロパ)	●U	■U		▲運用中 ●実績 ■開発・検討中
着陸	● U, R, C ■I, J		●R ■U	●U ■E, J	●E/G (CG彗星)	●J, U ■E/G	●U ■J (トロヤ群小惑星)	●E (タイタン)	■U		
サンプルリターン	● U, R ■U, C, I, J			■U, E, R	●U ■U (彗星核表面)	●J:はやぶさ ▲J:はやぶさ2 ■U, E	■J (トロヤ群小惑星)	■J (エンケラドス)			
有人往復	●U ■C					■U:ARM	ソーラー電力セイル				

* 2015年時点の最先端＝黄色

* 今後20年の最先端＝橙色

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

ソーラー電力セイルを用いることで木星圏や土星圏でも着陸・往復が可能となる。実験機の次の本番機でもトロヤ群小惑星探査を前提とするが、土星衛星エンケラドスを目標天体とすることも可能であり、この場合も世界最先端の探査となる。

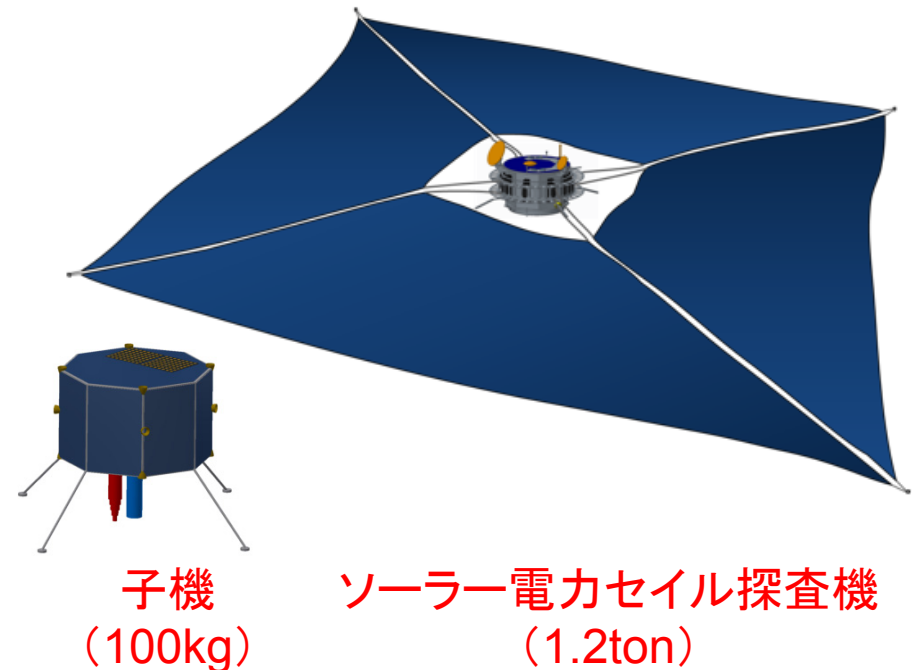
着陸探査

- 太陽電池パネルと化学推進系の組み合わせでは、軌道離心率の小さい小惑星に対しては小惑星帯以遠の着陸探査は困難である。
- 彗星探査機Rosettaは約3tonで100kgの着陸機Philaeをトロヤ群小惑星より近傍の彗星へ輸送した。
- ソーラー電力セイル探査機は約1.2tonで同じ100kgの子機をトロヤ群小惑星に輸送する(オプションとして往復も行う)。
- この差がソーラー電力セイルの優位性を示しており、これにより中型計画規模での外惑星領域の直接探査が可能となる。



ロゼッタ
(約3ton)

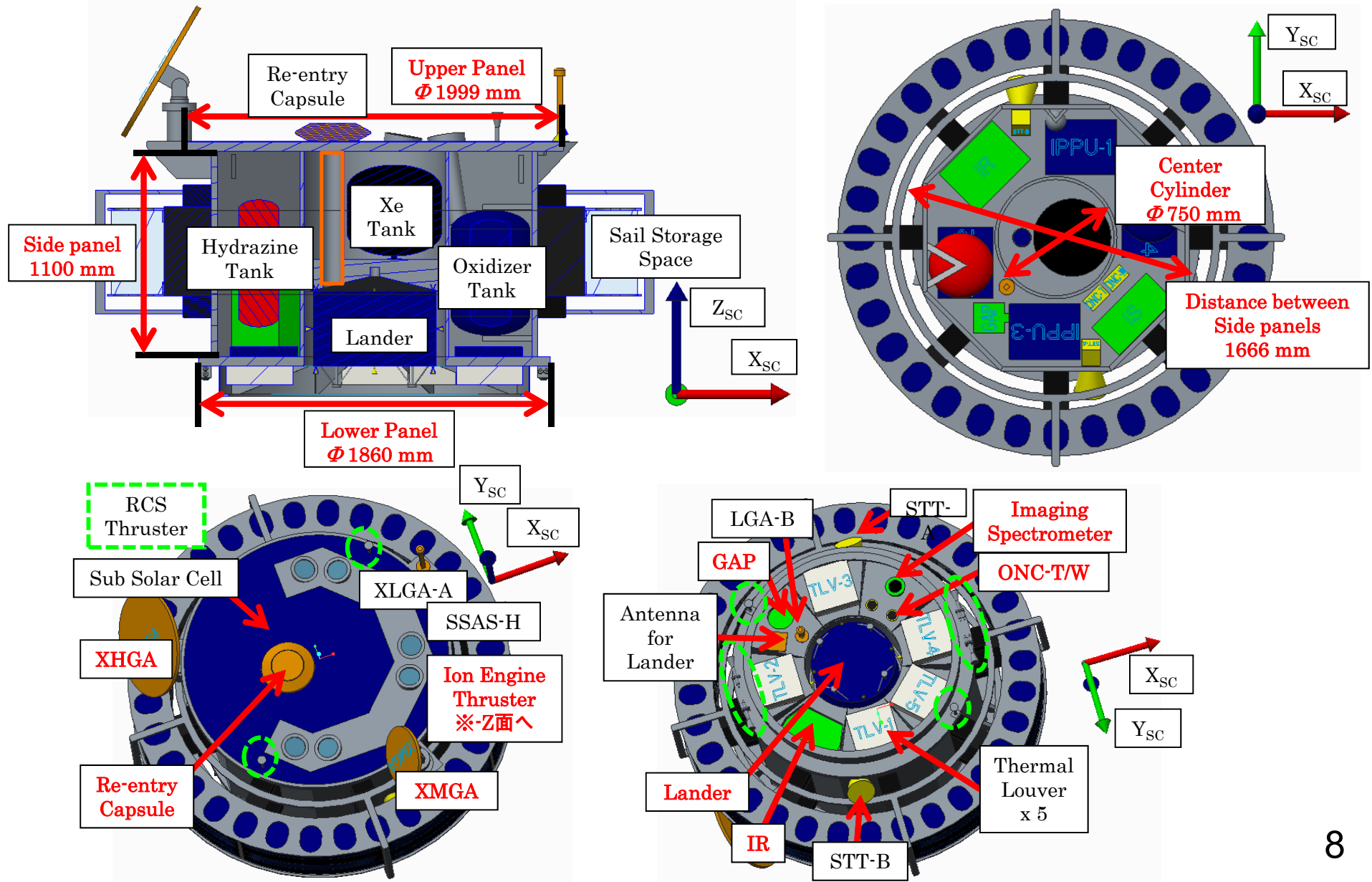
フィラエ
(100kg)



子機
(100kg)

ソーラー電力セイル探査機
(1.2ton)

探査機機器配置



試料採取・その場分析

試料採取

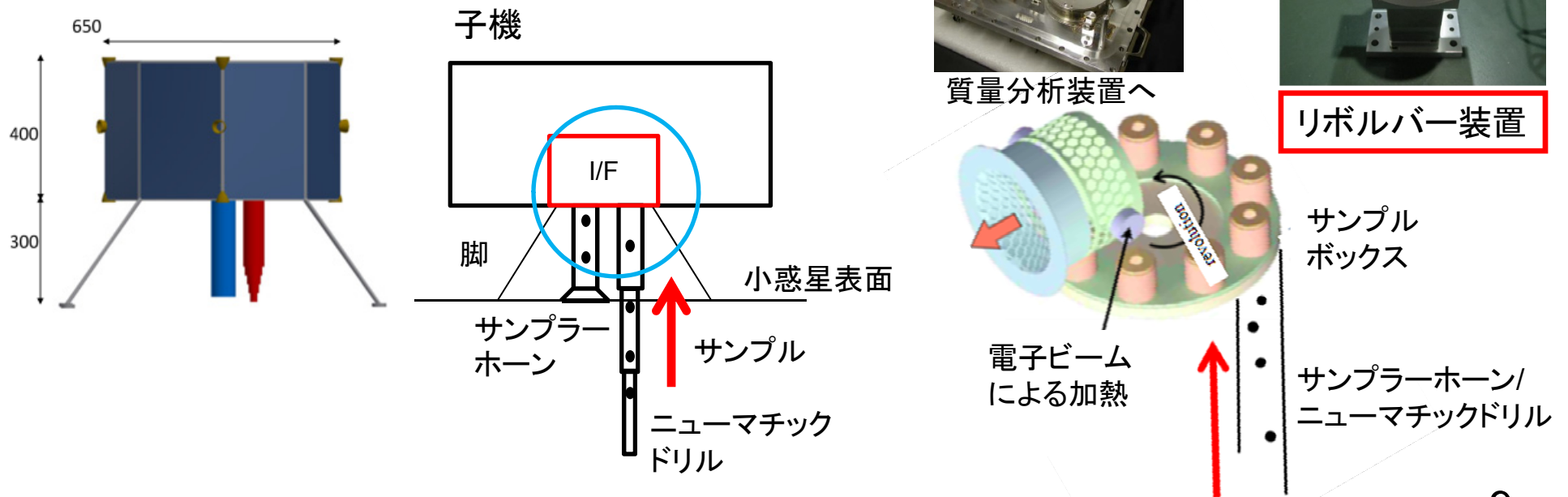
①表面試料

はやぶさと同様、弾丸を撃ち込んで試料を吹き飛ばし、リボルバー装置に引き込む。

②内部試料

ニューマチックドリルによって、ガス圧で小惑星表面を掘削した後、①を行う。

その場分析 マルチターン質量分析計を用いる。



長期計画の中での戦略的な位置づけ

探査機	打上げ	航行技術	着陸	サンプル採取	科学観測
はやぶさ	2003年	イオンエンジン	親機	表面	イトカワ(S型)
IKAROS	2010年	ソーラーセイル	—	—	クルージング観測
はやぶさ2	2014年	イオンエンジン	親機	表面 & 地下	1999 JU3(C型)
ソーラー電力 セイル探査機	2020年 代初頭	大型ソーラーセイル 高性能イオンエンジン	子機	表面 & 地下	トロヤ群小惑星(D型/P型) クルージング観測

ソーラー電力セイルは日本独自のアイデアであり、はやぶさ、IKAROSにおける技術実証を発展させることを前提にミッションを構成しているため、日本の技術的優位性が活かされる。ソーラー電力セイルにより将来の太陽系探査を日本が先導できる。

実験機の意義

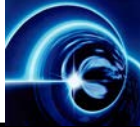
＜現状＞

- 世界標準の宇宙科学の成果出しには, Curiosity火星原子力ローバー, JWSTのように, 数千億円の投資が必要とされる時代を迎えている. 我が国では, 残念ながら同規模の投資をすることは難しい状況にある.
- はやぶさ, あかつき, はやぶさ2の技術では, 木星圏たる外惑星領域探査が実現できない. 外惑星領域では, 通信・熱などの技術的な問題が如実に現れる.

＜戦略＞

- 実験機と本番機を組み合わせる(姉妹機とする)ことでリスクを軽減する.
はやぶさ・はやぶさ2と同様の考え方で, 投資と技術格差の二重のハンディを補う.
圧倒的なイノベーションなので, 本番機の打上げまでに技術の陳腐化はなく,
国際共同の道も開ける(本番機が実現できなくても, 実験機の意義は喪失しない).
IKAROSは「技術要素実証機」という位置づけ.

※ 挑戦には実験機を経過させるフィロソフィーが必要であり,
実験機なくして世界初の成果を期待することはできない.



鈴木宏二郎： 空力屋(航空宇宙工学)、理工連携(東大新領域)、
柔軟構造体を利用した先進的大気圏突入飛翔体の研究開発WG

Q1) 想定(提案)するミッション、そのミッションを含む探査ロードマップの描像

以下が該当：

◆ロードマップの課題では

c.探査機,輸送システム等の宇宙工学技術の先導・革新

◆ロードマップの進め方では

2)(最初の約10年を)機動性の高い小型ミッションによる工学課題克服・技術獲得

4)成果の創出、人材育成、コミュニティの求心力

c)多様な機会を活用した小規模ミッションを高頻度かつ継続的に

5)関連コミュニティや関連大学等との連携を高め、推進体制構築

◆カテゴリーでは

小規模プロジェクト：多様な機会を最大に活用し成果創出

第 48 回月・惑星シンポジウム パネルディスカッション- 将来の探査ミッション創出に向けて -
2015 年 7 月 29 日 宇宙科学研究所



Q1)(つづき)

卓越性と多様性 => **特技**を持ち維持すること。

今のうちに

超小型(50kg以下, 3Uなど) + 地球周回(近傍) で練習(鍛錬)をする、特技を磨く

惑星探査で恐らく役立つと思われる空力技術:

- ・エアロキャプチャ、エアロブレーキ技術の取得
- ・超²小型大気圏突入着陸探査機技術(FSランダー)

Q2) 探査ロードマップ作成と合意形成: 皆が誇りをもって参加でき、楽しめるもの

Q3) 探査プログラム推進のために

(共通) 若い人を惹き付ける、世代を繋いでコミュニティを維持していく

(ISAS他) 深宇宙への“足がかり”の確保(GTO から 深宇宙へ(キックモーター))

超小型探査機のための通信インフラ

(大学等) 1000のアイデアを出し、100を真剣に検討し、10の超小型飛行実証

パネルディスカッション
ー将来の探査ミッション創出に向けてー
太陽系探査ミッションと想定する
探査ロードマップについて

渡邊 誠一郎
(名古屋大学)

太陽系探査の大目的

偵察の時代から本格調査の時代へ

- 太陽系探査科学には多様な天体/層と手法が共在
 - ロードマップ作成には全体を貫く大目的の設定が必要
 - 技術・機器ロードマップの重要性
- 前生命環境の進化【太陽系生命環境の持続】
 - 生命圏の誕生・持続に至る条件の解明
 - 環境(場・E)と物質(機能・循環)の理解が不可欠
 - 前生命環境における有機物ネットワークの把握
 - 初期太陽系での物質輸送過程の復原: 小惑星, 彗星, 火星衛星
 - 太陽系年代学の確立: 月, 火星, 水星(年代学探査)
 - 地下熱水化学反応系: 火星地下, 氷衛星, 小惑星
 - 表層光化学反応系: 火星表層, 金星, タイタン
- 日本の状況を踏まえ, キーとなる戦略的ミッションを!

+ 系外惑星
の多様性

ケレス, 冥王星
の活動性

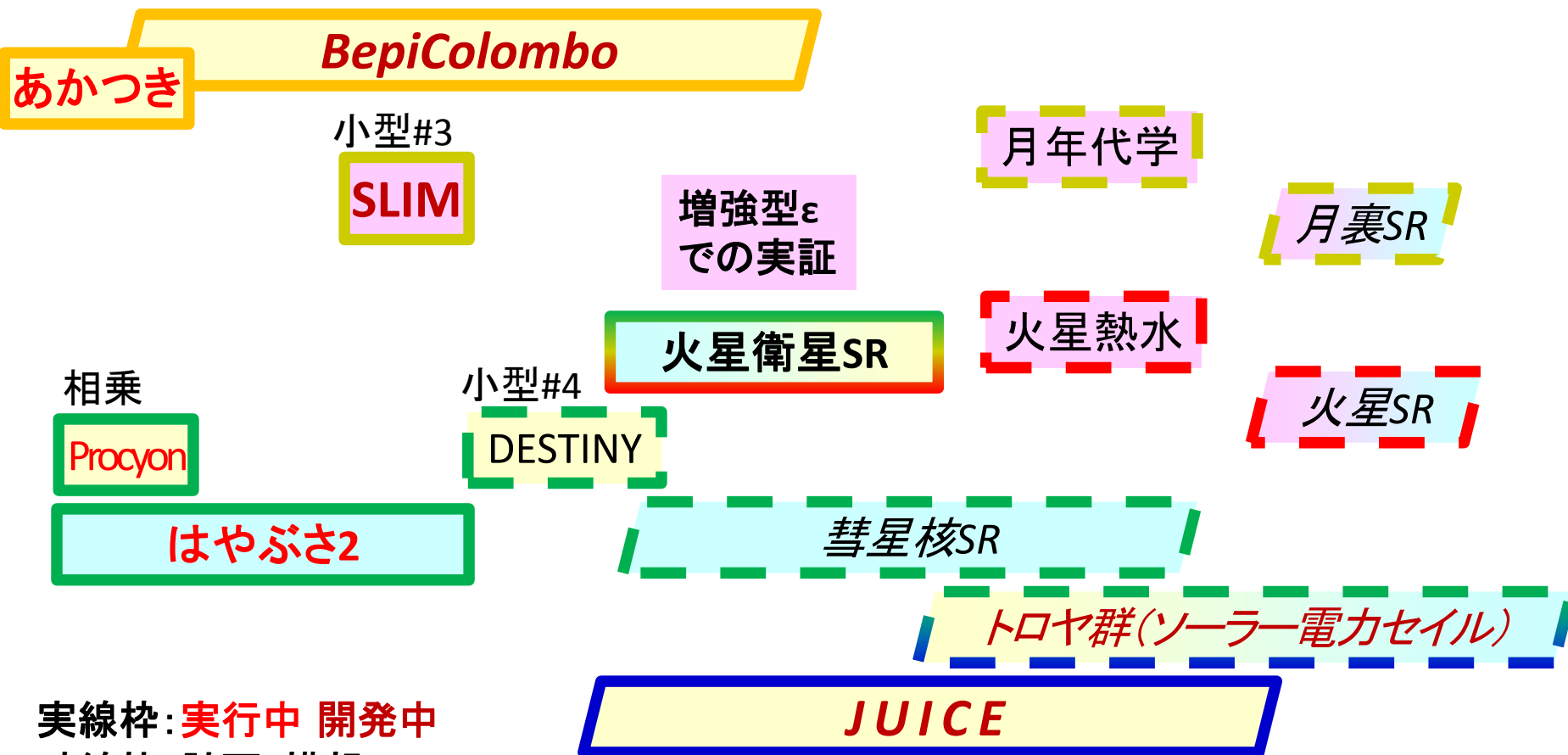
火星衛星サンプルリターン計画

- 3面性：捕獲小惑星，火星形成体験者，地球型惑星の衛星
- 小惑星探査としての魅力：比較的短時間で始原的試料を
 - D/T型表面反射スペクトル，対応する隕石が乏しい
 - 地球接近小惑星に対して，長寿命で太陽熱の変成が少ない
- 火星圏（地球に最も近い異世界）への有効な初手
 - 先行する欧米に対して後追いではない独自戦略
（着陸探査に必然な局所性の罫：科学的文脈→着陸点選定）
 - 衛星から本体へ：俯瞰＋物証（火星由来物質）
 - 火星表層進化の初期条件をおさえる
 - 衛星周辺環境・火星散逸大気，火星表層の日変化の観測
- 月の起源論：巨大衝突説の実証，比較衛星形成論
- つまり，小惑星・火星・月のいずれにもつながる天体
- はやぶさシリーズを継承し，衛星からのSRで謎を解明

太陽系探査ロードマップ(私案)

+ 系外惑星観測衛星

2015 2020 2025 2030 2035



実線枠: 実行中 開発中

破線枠: 計画・構想

内惑星

月

火星

小惑星

氷天体

周回

SR

着陸

国際協力

技術・機器ロードマップの重要性

- 天体・対象を超えた道筋
- 深宇宙航行・サンプルリターン技術:はやぶさシリーズ
 - 特に試料回収(サンプリング)技術の高度化
- 周回軌道投入・降下・着陸(EDL)技術:日本の弱点
- 表面走破(ローバ・ヘリ・ロボット)技術:伸ばせるか
- ペネトレータ(多点展開)・地下掘削技術:伸ばしたい
- 要素技術の抜本的軽量化・小型化
- 通信回線技術(探査機/地上, 機上データ処理)
- 熱設計の高度化
- 科学機器:何を育て, 何は海外に任せるか
 - 海外ミッション(公募)への搭載を目標に
 - 2号機問題:コスト/リスク削減 vs 新規要素への挑戦
- プログラム化とセットで長期戦略的投資が必要