

宇宙航空研究開発機構特別資料

JAXA Special Publication

(2016年) 第1回重力天体 (月、火星) 着陸探査シンポジウム (後刷り)
2016 Proceedings of Moon and Mars landing exploration symposium (I)

2017年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

<第1回重力天体（月、火星）着陸探査シンポジウムの後刷り発行にあたって>

今年2016年、小型高精度月着陸実験 Smart Lander for Investigating Moon (SLIM) のプロジェクト化が正式に決定いたしました。一方、JAXA/JSPEC が主導してきた SELENE-2 は2015年に正式にキャンセルされ、また JAXA/宇宙科学研究所工学委員会の下に設置されて検討が深められてきた「火星着陸探査技術実証 WG」も今年、一旦終了となりましたが、今年度からは新たに、宇宙理学委員会のもと、「着陸機による火星環境探査 RG」「月火星の地下空洞直接探査 RG」などが立ち上がり、活発な議論、詳細検討が始まっています。海外でも、月着陸、火星着陸を新たに目指す機運が増加してきている中、将来の重力天体（月、火星）着陸探査を議論しようということで、宇宙科学研究所より助成をいただき、本シンポジウムを開催することになりました。

惑星科学コミュニティは、はやぶさ1, 2号、SELENE（かぐや）と、観測機器開発・運用、データ処理・解析の実績を積み、次期月惑星探査に大きく踏み込もうとしています。そうした背景のもと、シンポジウムでは、惑星科学コミュニティからの重力天体着陸探査への期待が寄せられました。重力天体への着陸によって可能な探査は様々ですが、なかでも、惑星科学コミュニティが将来の惑星探査に期待する重要なターゲットの一つは「地下」圏です。ボーリングによって探査可能な浅部から、地震波探査が必要となる深部まで、多くの興味あるターゲットが、「地下」に存在します。今回のシンポジウムでは、そうした「地下」圏探査を目指す、火星環境探査、月火星地下空洞探査、そして主に地震波を使った探査について発表・議論されました。一方、月、火星への着陸という点では、長距離移動探査、有人探査なども、興味ある課題であり、そうした発表も、今回のシンポジウムでは取り上げました。

しかし、地下圏探査にしても、長距離移動探査にしても、更には有人探査にしても、新たな時代の惑星探査においては、様々な工学的な課題克服が必要です。したがって、これまでに以上に緊密な理工連携（山田隆弘教授によれば「得意分野を持つひとたちの連携」）が望まれます。そこで、今回のシンポジウムでは、惑星科学研究者の発表に加え、工学的な要素のご発表も多数いただくことになりました。

シンポジウムは、年末の慌ただしい中でありながら、JAXA 相模原キャンパスにおいても、企業からの10名近いご参加も含め、60名をゆうに越えました。また、神戸大学 CPS の協力を得て行った TV 会議接続により、10カ所からの接続がなされていました。重力天体着陸探査への期待と興味が非常に高いことが改めて理解されました。今回まだまだ発表、議論が足りないこともあり、引き続き第2回を年明けに予定しています。

世話人代表：臼井寛裕（東工大）、春山純一（JAXA）、

世 話 人：岩田隆浩（JAXA）、倉本圭（北大）、林祥介（神大）

共 催：JAXA 宇宙科学研究所、神戸 CPS、着陸機による火星環境探査リサーチグループ、月火星の地下空洞直接探査リサーチグループ

第1回重力天体(月、火星)着陸探査シンポジウム プログラム

日時:12月5日(月)

場所:宇宙科学研究所(JAXA 相模原キャンパス)A棟 2階会議場

9:50-

事務連絡・趣旨説明 世話人代表:春山純一(JAXA)、臼井寛裕(東工大)

10:00

“重力天体探査を議論する意義(仮題)” 藤本正樹(JAXA)

10:15

“探査工学からの期待” 山田隆弘(JAXA)

10:35

“宇宙工学委員会としての期待(仮題)” 永田晴紀(北海道大)

10:55

“アリゾナ大学-JAXA 小型探査ワークショップ報告” 大竹真紀子(JAXA)

11:10

“SLIMの現状:SLIMとSLIMの先に” 佐伯和人(大阪大)

11:25

“MMXの現状:MMXとMMXの先に” 倉本圭(北海道大)

11:40

“火星環境探査RG概要” 臼井寛裕(東工大)

12:00

“月火星地下空洞探査RG概要” 春山純一(JAXA)

—12:20—13:20(昼休み)—

13:20

“火星内部構造探査の目標と意義” 川村 太一(国立天文台)

13:40

“有人までして行きたい月着陸科学探査(仮題)” 大竹真紀子(JAXA)

14:00

“月有人活動を見すえた月着陸科学探査” 春山純一(JAXA)

14:20

“宇宙工学から-1:重力天体探査ミッションにおける移動ロボティクス” 石上玄也(慶応大)

14:40

“宇宙工学から-2:重力天体への着陸誘導技術(仮題)” 河野功(JAXA)

15:00

“宇宙工学から-3:ロボット工学の着陸探査への期待(仮題)” 大山英明(産総研)

15:20

“民間の着陸探査 民間月火星着陸での科学探査協力(仮題)” 袴田武史(iSPACE 社)

—15:40—15:55(休憩)—

15:55 パネルディスカッション

—重力天体(月火星)着陸探査に向けて—

パネル:倉本圭(座長)・橋爪光(大阪大)・亀田真吾(立教大)・出村裕英(会津大)

17:25 まとめ 臼井寛裕(東工大)、倉本圭(北海道大)



第一回 重力天体(月、火星)着陸探査シンポジウムの趣旨(世話人)

JAXA/JSPECが主導してきた「SELENE-2」の検討や、JAXA/宇宙科学研究所工学委員会の下に設置されて検討が深められてきた「火星着陸探査技術実証WG」は、それぞれ一旦終了となってしまいました。

しかし一方で、**SLIMプロジェクト化**がなり、工学による重力天体着陸探査技術の深化が一層期待される状況です。惑星科学コミュニティとしても、はやぶさ2、JUICE、MMXと探査参加への機会・意欲も増えています。

今年度から、宇宙理学委員会のもと、「**着陸機による火星環境探査RG**」、「**月火星の地下空洞直接探査RG**」などが立ち上がり、惑星科学コミュニティとしては改めて、活発な議論、詳細検討が始まっています。

加えて、海外でも、月着陸、火星着陸を目指す探査が増えて来ています。

そうした中、将来の重力天体(月、火星)着陸探査を議論しようということで、宇宙科学研究所より助成をいただき、本シンポジウムを開催することになりました。

特に今回は、惑星科学コミュニティの講演のみならず、工学的な観点からのご講演もいただくことにしております。**理工連携**というキーワードでもまた討議を皆様に期待しています。

第一回 重力天体(月、火星)着陸探査シンポジウムの趣旨(世話人)

●科学:日本の将来の太陽系探査における重力天体着陸の重要性:

何をやってきて、何が大事か、そしてどこに特色を出すのか?(オリジナルなサイエンス)

●探査:これまでの探査の取り組み。今後の取り組み:

何を成し遂げてきたか。どうしてできたのか?今後、何をしていくことができるか?理学・工学双方、何を期待するのか?

●大学、コミュニティ:

大学、コミュニティとして、何をやってきたか?何が求められるか?何ができるか?

何を意識すべきか？

藤本 正樹
(JAXA 宇宙研)

1

- (当初はいろいろと言われたが)MMXは世界からの興味も高く、惑星探査界における日本・ISASのvisibilityを高いものとしている
- さらに、MMXの先には火星着陸探査も見据えるのであろう
- そういう段階に来ていることを認識する必要がある

2

- HYBの実行時、その先にHYB2、MMXを見据えていたのだと、世界では理解されている
- それはということなのか
- つまり、ISASでの惑星探査は、工学が先導するものであり、それこそが強みである

3

- H-IIIによるLクラス探査は10年に一度。
- その合間は、イプシロンによって打ち上げられる計画を実行する
- そこで成果を出していくことは容易ではない

4

- その流れでのアリゾナWS
- そこでの(再)発見:
 - ISASの強み
 - ISASでの審査は正しいバランスにあるのか(そこから見えるISASの弱点)
 - 今後の展開の可能性

5

- これだけ「工学のお世話」になっている。
- であれば、いい加減に惑星側もしっかりしないといけないのではないか:特にハードウェア人材の育成プログラム。
- その立ち上げを、コンソーシアムの対応による実行できないか。

6

探査工学からの期待 (というか、提案)

第1回重力天体(月、火星)着陸探査シンポジウム
2016.12.05
山田隆弘

1

私の話の内容

- このシンポジウムのテーマは重力天体着陸であるが、私の話は、それも含め、太陽系探査全般をターゲットとする。
 - なぜならば、そのような議論が重要だからである。
- そして、日本の限られたリソース(予算、打ち上げ機会、人材)で太陽系探査を行うためには、**戦略**を持つ必要があることを訴え、**基本的な戦略を提案する**。

2

目標を定める

- 宇宙基本計画では、宇宙科学において「世界的な成果の創出や国際的な発言力の確保等を目指す」と定められている。
- 然るに、太陽系探査の分野における我が国の現状を見ると、とても現段階で「世界的な成果の創出や国際的な発言力の確保」が達成されているとは思えない。
- 従って、太陽系探査における我々の最終的な目標は、太陽系探査において「世界的な成果の創出と国際的な発言力の確保」とすべきである。
- さらに、我々の有するリソースと我々の過去の太陽系探査の歩みも考慮すると、目標の達成には少なくとも20年はかかると思われる。
 - ちなみに、20年前の我々は、MUSES-C(はやぶさ)の開発を始めたところである。
- すなわち、我々の目標は
 - 20年後(2036年)に世界的な成果の創出と国際的な発言力の確保が行えるミッションを実施すること**

3

打ち上げ機会はどれだけあるか

- 宇宙基本計画によると、2018年度から2027年度までの10年間(中期計画2期分)に以下が認められている。
 - 戦略的中型 3つ
 - 公募型小型 5つ
- その次の10年間については、何も決まっていないが、最初の10年と同じ数の計画が認められるとすると、2018年度から2037年度までの20年間(中期計画2期分)で
 - 戦略的中型 6つ
 - 公募型小型 10個
- さらに、以下を考慮すると、**20年間で太陽系探査ミッションは3つしかできない!**
 - 小型で本格的な太陽系探査は困難(技術実証はあり得る)
 - 中型では地球周りのミッションも必要

4

となると、どういう戦略が必要?

- 我々の目標は、20年後に世界的な成果を創出する太陽系探査ミッションを実施すること。
- 我々の制約条件は、20年間で中型による太陽系探査ミッションは3つしかできない。
 - ただし、小型による技術実証ミッションはあり得る。
- 上記をまとめると、**20年で3つのミッションをやって世界的な成果の創出と国際的な発言力の確保を達成する。**
- これは容易か?
 - 1つのミッションではそれほど新しいことは行えないことを考えると、うまくい戦略を使わない限り難しいと言わざるを得ない。
- となると、3つのミッションの全体像を初めから考えておく必要がある。すなわち、**3つのミッションを1つのシリーズとして計画する必要がある。**
 - 具体的には、3つのミッションをA、B、Cと名付けると、Aで開発した技術がBで利用でき、それをさらに発展させてCで利用できるようにする。

5

戦略の基本部分ができました

- 1つのシリーズとして3つのミッション(A、B、C)を計画する。
- Cでは、20年後に世界的な成果の創出と国際的な発言力の確保を達成する。
 - そのようなミッションは、おそらく国際共同で行うことになり、日本が全体を引っ張る役割を果たすべき。
- AとBは、それぞれ独自のミッションを持ちながらもCで必要となる技術の確立を目指す。

• ところで、A、B、Cとは何ですか?

6

まずはCを考えよう

- 20年後に世界的な成果の創出と国際的な発言力の確保を達成できるミッションとは？
- 候補は沢山ある。
 - 火星の地下水脈
 - 月の穴の底
 - 木製の氷衛星
 - 土星の氷衛星
- しかし、候補が多いと、1つのミッション当たりの人数が減ってしまう。
- ミッションをやるためには、ある程度の数の専門家が必要。
- 日本における太陽系探査の専門家の数を考えると、2つか3つの候補に絞るべきではないか？
- 私の提案1: Cミッションの候補を1年後に2つか3つに絞るための専門家グループを作ろう。
 - 候補を1つに絞るのは、その2~3年後か？

7

次はAとB

- AとBには、すでに候補がある
 - MMX
 - ソーラーセイル
- 小型ミッションとしては
 - SLIM
 - DESTINY+
- これらのミッションも、前述したように、Cに結びつくように計画すべき。
- 私の提案2: A->B->Cとうまく連続できるような技術開発ロードマップを作るための専門家グループを作ろう。

8

全体の流れ

- 技術開発: 理工学委員会のWG、研究系、技術組織が協力して行う。
- プロジェクト: プロジェクトチームが中心となり、研究系と技術組織が支援する。
- 小型は、ABCのどれかに直接役立つものを選定する。
- 重要なことは、技術開発を連続させること。

9

専門家グループ

- ここで二つの提案を行った。
 - Cミッションの候補を1年後に2つか3つに絞るための専門家グループを作ろう。
 - A->B->Cとうまく連続できるような技術開発ロードマップを作るための専門家グループを作ろう。
- しかし、日本における太陽系探査の専門家の数を考えると、二つのグループを作るほどの余裕はないので、一つのグループが良い。
- このグループは、日本の太陽系探査の戦略を考えるグループとして定義づけるべき。
- このグループを作るにあたっては、専門分野の均衡を図るのではなく、能力本意で人選を行うべきである。また、メンバーの半分以上はプロジェクト経験の豊富な人間を選ぶべき。
 - 専門分野が何であるかよりも能力があるかどうかの方が百倍は重要であるから。
 - プロジェクトをやってみないと分からないことは多いから。

10

まとめ

- 目標を定める
 - 20年後(2036年)に世界的な成果の創出と国際的な発言力の確保が行えるミッションを実施する
- 打ち上げ機会
 - 20年間で太陽系探査ミッションは3つしかできない
- 戦略の基本
 - 3つのミッション(A、B、C)を1つのシリーズとして計画する
 - Cは、20年後に世界的な成果の創出と国際的な発言力の確保を達成できるミッション
 - AとBは、それぞれ独自のミッションを持ちながらもCで必要となる技術の確立を目指す
- 専門家グループ
 - 日本の太陽系探査の戦略を考えるグループを作る
 - 人選は、分野の均衡ではなく、能力本意で行う
 - メンバーの半分以上はプロジェクト経験の豊富な人間を選ぶ

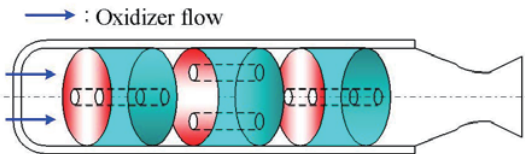
11

理工連携の裾野を広げるための課題

北海道大学大学院工学研究院 永田晴紀

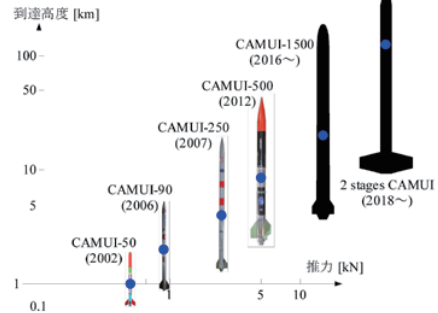
E-mail: nagata@eng.hokudai.ac.jp

CAMUI型ハイブリッドロケット



- ◆ 衝突噴流熱伝達の利用により、固体燃料のガス化を促進し、推力を増強。
- ◆ Cascaded Multistage Impinging-jet.

CAMUI型ハイブリッドロケットのラインナップ



小型ロケットを用いた宇宙工学研究

- 安全管理コストは機体の規模にあまり依存しないため、ロケットを小型化するほど割に合わなくなる。
- CAMUI型ではポリエチレンと液体酸素を推進剤とし、火薬類や危険物を使用しないため、安全管理コストの大幅な削減が可能。その結果、小さくしただけ安くなる。
- 安価な小型ロケットの需要は高く、JAXAが実施する基盤研究の中でもCAMUIロケットの需要が多くある。

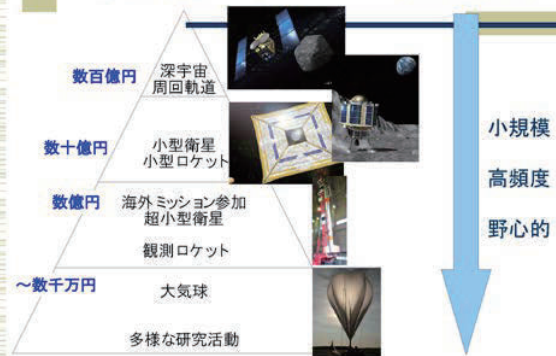
JAXA-北大、「複合サイクルエンジンのエジェクタモード飛行実験(JAXA所内研究)」(H20~H21)

JAXAプレスリリース「CAMUI型ハイブリッドロケットを利用したエジェクタ飛行実験結果について」(H21/3/16)
http://www.jaxa.jp/press/2009/03/20090316_camui.html

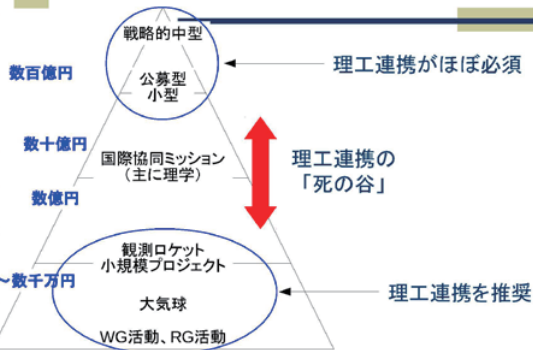
JAXA-北大、科研費基盤A「スペースプレーン技術の極超音速飛行実験システムの開発研究」(H25)

JAXA-九大-北大、「有翼型再使用宇宙往還機の開発(JAXA所内研究)」(H21~H24)

宇宙科学ミッションの階層構造



JAXA宇宙科学研究所の活動



年度	平成 27年度 (2015年度)	平成 28年度 (2016年度)	平成 29年度 (2017年度)	平成 30年度 (2018年度)	平成 31年度 (2019年度)	平成 32年度 (2020年度)	平成 33年度 (2021年度)	平成 34年度 (2022年度)	平成 35年度 (2023年度)	平成 36年度 (2024年度)	平成 37年度 以降	
25 宇宙科学探査	はやぶさ2の運用											
	X線天文衛星 (ASTRO-H) 開発											
	水星探査計画 (BepiColombo) [ESAが打ち上げ担当のプロジェクト]											
	水星探査計画 (BepiColombo) 運用											
	シオスベナス探査衛星 (ERG) 開発											
	シオスベナス探査衛星 (ERG) 運用											
	戦略的に実施する中型計画に基づく衛星(10年で3機)											
	水星探査計画(ESA)の調査研究											
	戦略的中型1											
	戦略的中型2											
	公募型小型計画に基づく衛星(2年に1回)											
	小規模月着陸探査機の開発											
	公募型小型2											
	公募型小型3											
	公募型小型4											
多様な小規模プロジェクトの豊富な実行、人材の育成												

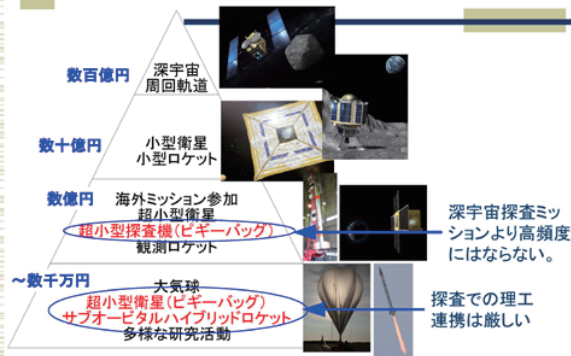
※本調査探査科学分野については、ボトムアップの探査だけでなく、プログラム化された探査も集める
※以上すべて文部科学省 「宇宙基本計画工程表」より抜粋

「工程表」実行のために必要な費用

戦略的中型	3機/10年	300億円/機	900億円/10年
公募型小型	5機/10年	100~150億円/機	625億円/10年
小規模プロ	10件/10年	10億円/件	100億円/10年
基盤経費		75億円/年	750億円/10年
合計			2375億円/10年 (235~240億円/年)

実情は200億円/年に満たない予算額。戦略的中型と公募型小型のロットを維持するために、その他の経費が圧迫されている。

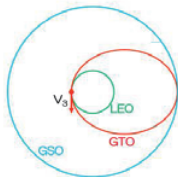
JAXA外での動き



GTOから惑星遷移軌道へ投入に必要な増速度 (ΔV)

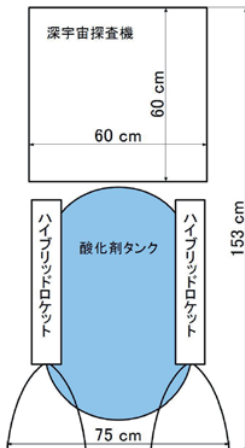
- 火星や金星の遷移軌道投入には1km/s強の増速度が必要。
- 現実には、もう少し大きなΔVが必要になるが、おそらく1.4~2km/sで十分。

目標惑星	必要な増速度
水星	3.10 km/s
金星	1.06 km/s
火星	1.15 km/s
木星	3.88 km/s
月	0.7 km/s



※LEOからGSOへの遷移軌道 (GTO) における近地点での値 (図中のV₂)

* 東京大学 杉田先生による検討結果



設計案 (ΔV = 1200 m/sの場合)

推力:	400 kgf (100 kgf × 4)
燃焼時間:	41 秒
推重比:	2.4(初期) → 3.7(燃え切り)
総重量:	166 kg
探査機	70 kg
推進剤	57.7 kg
	亜酸化窒素 50.4 kg
	ポリエチレン 7.2 kg
ドライ重量	38.4 kg (探査機含まず)
	酸化剤タンク 13.9 kg (容量125 L)
	燃焼室 4 kg (4本分)
	ノズル 5.8 kg (4個分)
	構造重量 2.5 kg
	補器類 5 kg
	予備重量 7.2 kg

宇宙理工学委員会での議論

いままで

- ・カテゴリA (10億~100億)
海外衛星, JEM暴露部, ピギー衛星, 観測ロケット, 大気球
- ・カテゴリB (1億~10億)
海外衛星, JEM暴露部, ピギー衛星, 観測ロケット, 大気球
- ・カテゴリC (0.5億~1億)
観測ロケット, 大気球, ISS, JEM暴露部, ピギー衛星

2016年2月理工学委員会で議論

今後の方針案

- ・戦略的海外協同計画(戦略的国際プロジェクト参加)
- ・小規模計画(多様な飛翔機会を用いたプロジェクト)

GTOピギーバック+ハイブリッドキックモータ = 高頻度・超小型深宇宙探査機

- ◆ 液体酸素 (cryogenic) → 亜酸化窒素 (storable)
- ◆ 技術課題
 - 亜酸化窒素での燃焼特性データ(燃焼速度等)
 - 亜酸化窒素供給系
 - 運用(点火シーケンス、姿勢制御。。。)
 - 高空燃焼試験(簡易型?省略?)
- ◆ 有利な点
 - 真空比推力
 - 重力損失、空力損失無し
 - 推重比が小さくても良い(CAMUI型じゃなくてもよい?)

ΔV = 1.2 km/s の場合

- ◆ ペイロード重量はプロキオンクラス(70 kg)
- ◆ 亜酸化窒素(N₂O) - ポリエチレン
- ◆ 有効比推力: 287秒(燃焼室とノズルで2%ずつの損失)
- ◆ 構造係数: 0.4
- ◆ 推力: 400 kgf (100 kgf モータを 4 本クラスタ運用)
- ◆ 酸化剤タンクは共用。分岐管を使用。
- ◆ 燃焼時間: 41秒
- ◆ 推重比: 2.4(初期) → 3.7(燃え切り)

まとめ

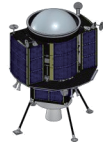
- ◆ 「宇宙基本計画工程表」の内容と予算とのギャップ
- ◆ 「理工連携」の「死の谷」をどう超えるか
- ◆ 超小型探査機のピギーバックスロットを増やしたい
- ◆ ピギーバック用ハイブリッドキックモータ
- ◆ 探査機と同重量のキックモータで火星到達が可能
- ◆ 皮切りとして月を目指したい
- ◆ 月フライバイの利用で、設計がもっと楽になる可能性



SLIMの現状: SLIMとSLIMの先に

公開可能版

佐伯和人(大阪大学・理)
SLIMプロジェクトチーム
SLIM-マルチバンドカメラチーム
2016年12月5日



SLIMとは?

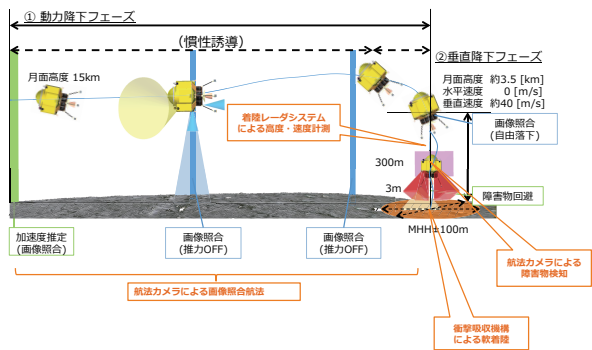
月面への高精度軟着陸の実証を通じて、将来の月惑星探査に貢献する
2016年4月にプロジェクト化され、2020年前半の打上を目指す

【2つの目的】

- ・ <目的A> 小型の探査機にて、月への高精度着陸技術の実証を目指す
 - 諸外国で行われてきている月着陸の精度はkmオーダー。これに対して、SLIMでは将来の科学探査・国際宇宙探査で必要とされる100mオーダーを目指す
- ・ <目的B> 従来と比較して、大幅に軽量の月惑星探査機システムを実現し、着陸後の月面活動の実証実験を含めて実施することで、月惑星探査の高頻度化に貢献する
 - 軽量化に伴うコスト低減を含めた低リソース化で、我が国における惑星探査の自立性を確保
 - 諸外国の月着陸機と比較して大幅な軽量化を目指す
例: 米国月着陸機「サーベイヤー」打上重量995kg vs SLIM打上重量 587kg

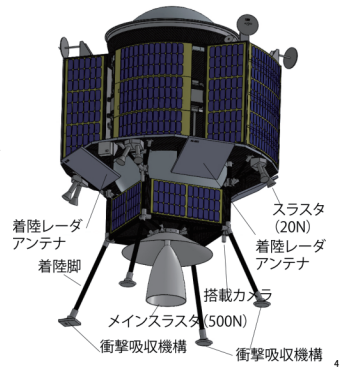


SLIMの着陸降下プロファイル



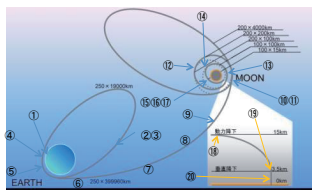
【"SLIM"探査機の概要】

- 打上質量に推進剤が占める割合が高く(約3/4)、その意味で、ロケットに近い。
- システム構成もこれを反映し、推進剤タンクを中心として、各機器が配置されたものが検討されている。
- ロケット結合リングが頭頂部側にあり、メインエンジンや着陸脚は、ロケット収納時にはロケット先端方向を向く。



【打上ロケット / 軌道計画の一例】

- イブシロンロケット(3段+キックステージ)にて、長楕円の地球周回軌道へ投入
- その後、SLIM自身の推進系により、遠地点高度上昇、月遷移軌道投入、月周回軌道投入を順次行っていく。
- 打上から月到着までの期間は、軌道設計に依るが、数ヶ月以下を想定している。



SLIM用マルチバンドカメラ(MBC)の目標

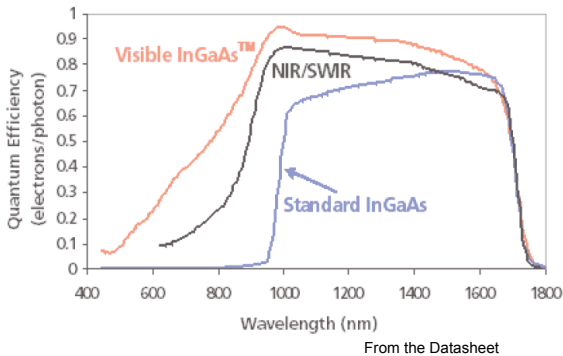
SLIMのピンポイント着陸技術を活かし、アポロ計画やルナ計画等の着陸探査が未だに実行されていない未知の地質地域に対して、着陸地点周辺の観測を行う。

LROC以上の空間解像度をもち、可視・近赤外マルチバンド分光が可能なカメラでの観測により、未知の地質地域の新情報を得る。


制約条件

- ・ 小型 (2.5kg 以内)
- ・ 室温以上でも動作可能
- ・ 鉱物種を判別する1ミクロン前後に感度のある VIS-NIRカメラ

撮像素子の量子化効率

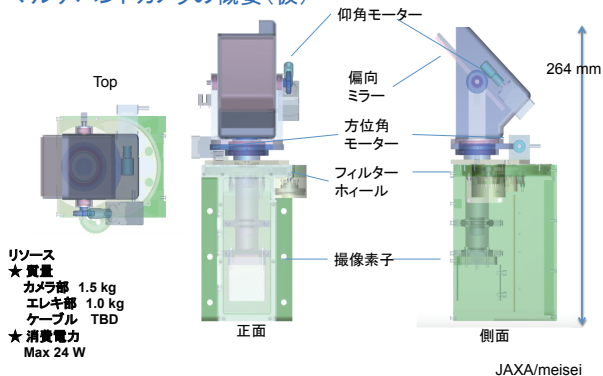


選定した撮像素子

型名	Sensors Unlimited SU640HS-Vis-1.7RT-OEM
形状 サイズ	 Width × Height × Depth : 41.5mm × 38.1mm × 41.4mm
ピクセルピッチ	25 μm
画素数	640 × 512 pixels
アクティブエリア	16.0mm × 12.8mm × 20.5mm diagonal
分光感度特性	Visible-InGaAs : 0.5 μm ~ 1.7 μm
量子効率	Visible-InGaAs : ≥ 35% (@0.6 μm) ≥ 65% (0.9 μm ~ 1.6 μm)
質量	90g
温度範囲	使用 : -40°C ~ +40°C 保存 : -54°C ~ +85°C

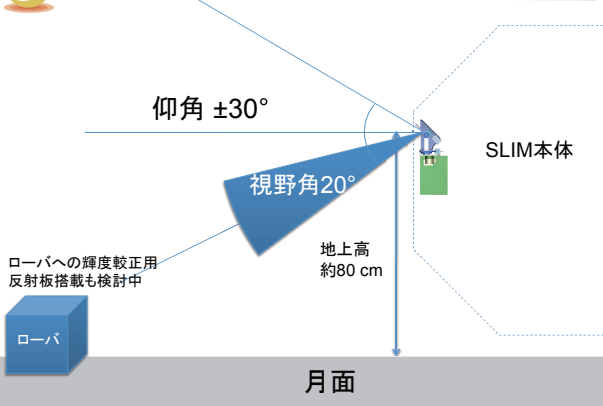
From the Datasheet 8

マルチバンドカメラの概要(仮)



機器仕様

- 観測視野・画角 20°
- チルト AZ ±80° EL ±30° (やや狭まる見込み)
- IFOV(F18) = 0.69 mrad = 0.04° 5 mでピクセル解像度0.34 cm
岩石組織の観察がポイント
- 観測バンドの波長特性
中心波長(TBD) 10バンド
750 nm (Conti.), 850 nm, 905 nm (Low-CaPx:Mg#90),
915 nm (Low-CaPx:Mg#70), 925 nm
(Low-CaPx:Mg#50相当), 980 nm (High-CaPx),
1050 nm (OI), 1100 nm, 1250 nm (PI), 1550 nm (Conti.)
波長分解能(バンドパスフィルタ半値幅): 20 - 40 nm程度
- SNR 100 (月面の暗い物質(DMD)を撮像した時に、
900 nm から1100 nmの範囲において達成すること(TBD))
- 量子化ビット数 : 12ビット



SLIMの意義 まとめ

【SLIMの工学】

重力天体への高精度着陸探査技術を習得。火星着陸探査への応用も期待
イプシロンロケットで月惑星探査を実現するのに必要な諸技術を習得
小型探査機を実現する技術は、将来、月面から帰還するシステムを考える
上でも重要

【SLIMのマルチバンドカメラ開発】

将来ローバなどにも搭載できる。固体天体全般に使用可能な
小さな地質判別カメラを獲得する

【SLIMの理学】

月マントルの化学組成に制約を与える
月(地球)の起源の手がかりに！

リモートセンシング時代の次に来る、シリーズ着陸地質探査時代の幕開け

MMXの現状とMMXの先に

倉本 圭 北海道大学/日本惑星科学会

- MMXの宇宙科学・探査工程表での位置づけ
 - 火星衛星探査計画(MMX)は、宇宙科学・探査の工程表上、「戦略的中型計画1号機」につながる研究と位置付けられ、2020年代前半の打上げを目指し検討が進められている
- 計画のアウトライン
 - 初の火星圏往還
 - 2024打ち上げを想定、ミッション期間約5年
 - その場観測とリターンサンプル(Phobos)分析により、火星衛星の起源を決定し、太陽系の揮発性物質輸送、火星の起源と進化に迫る
- 火星衛星の重要性
 - 衛星の起源を知ることで、従来の火星探査ではアプローチ困難な、火星の形成過程に迫ることができる
 - 衛星試料に火星から放出された物質が含まれていることも期待され、火星表層環境の進化が制約できる可能性がある
 - 赤道軌道を生かした火星大気観測から、大気成分(含むH₂O)の流出や表層リザーバ間の水輸送過程が制約できる
- 太陽系科学の目標・戦略における位置づけ
 - 太陽系における生命圏の誕生・持続にいたる条件・過程の解明を戦略的に進めるためのサブテーマを広くカバー。小惑星・月探査で培った優位性を活かし、生命保有可能環境を有する火星にアプローチ
- ミッション科学検討
 - 幅広い分野と機関から中堅・若手研究者を集め、ミッション経験者のサポートのもとで検討を進めた
- ミッション要求の骨子
 - 酸素同位体等の起源判別指標を十分な精度で分析できる試料の採取と地上分析
 - 独立な起源判別指標のその場観測
 - 衛星原物質・衛星進化解明のための、試料分析とその場観測
 - 火星圏進化史の制約とその素過程解明のための、試料分析とその場観測
- ミッション定義審査(MDR)
 - 2015年後半から2016年1月にかけて複数回実施
 - 審査結果:国際科学評価の結果、本提案が、研究分野の目的・戦略・工程表からでてきたものであることも考慮し、妥当である

• ミッションプロフィール

- 往路・復路とも化学推進系を採用する構成を中心に検討を進めている。軌道遷移期間は往路・復路とも1年弱。全ミッション期間は、フォボス近傍での観測・運用期間を考慮し、約3年と想定

• ミッション搭載機器の募集と選定

- 2015年11月中旬アナウンス 19機器の提案
- コスト、優先度、重量、技術的成熟度、運用要求、開発体制等を勘案、優先度識別を行いノミナル7、オプション4、非搭載8機器とした
- 全ミッション要求をカバー
- 一部機器の海外機関提供の可能性も考慮

• 搭載機器

- 10g以上の試料を得るためのサンプリング装置、リターンカプセル
- 採取地点の選定や産状記載を含めた衛星観測用の搭載機器
- 火星の大気循環や大気流出の観測も行う
- メーカー、海外機関を交えた検討が進行中

ノミナル搭載観測機器

- 望遠単色可視撮像カメラ
- 可視広角多色撮像カメラ
- 近赤外撮像分光カメラ
- 中性子線・ガンマ線分光計
- イオン質量分析器
- ダストカウンタ

オプション機器

- 小型分離カメラ
- レーザー誘起絶縁破壊分光
- サバイバルモジュール
- 重力偏差計

• MMX開発体制

- 整えつつある
- JAXA/ISASのプロジェクトチームと大学等コミュニティの研究者からなるサイエンスワーキングチーム(SWT)が連携して開発を推進
- SWT内にサイエンス面の検討の統括と意思決定に最終責任を持つサイエンスボード(SB)を設置
- ミッション要求作成チームメンバとノミナル機器開発チームの代表者を中心にSB初期メンバを構成している

• まとめ

- MMXは、火星衛星の起源の解明するとともに、火星の起源と進化に迫るユニークなミッション
- 太陽系科学分野の目的・戦略におけるサブテーマを広くカバーし、コミュニティのサポートを広く得ることのできる計画
- プリプロジェクト化に向けて推進体制の整備、システム、運用、ミッション搭載機器の諸検討が進行中
- 将来計画立案活動なども背景に、参入者が数、厚みとも増しつつあり、次の探査への展開性も意識して進めることが重要

火星環境探査RG概要

白井寛裕(東工大)

Keyword:
高度着陸・移動技術, 地下圏探査・掘削技術

第1回重力天体着陸探査シンポジウム 12/3/2016

従来の火星探査研究のハイライト

過去の液体表層水(海) & ダイナミックな表層環境進化

40億年前の火星のイメージ図

表層水量と表層の変質鉱物の時代変化

alteration minerals: clay, carbonate, sulfate/anhydrous

ocean depth [km]: 0, surface water

Water cycle: H_2O to space, H_2O, H_2 to surface, H_2O, O_2 to surface

第1回重力天体着陸探査シンポジウム 12/3/2016

従来の火星探査の問題点および将来探査戦略

地形学・表面分光探査が中心 ⇔ 火星の“真の姿”は地下にある

可視・赤外データによる地質区分
・ 探査深度 (<100 μm)

γ線データによる地質区分
・ 探査深度 (~20-50 cm)

Taylor et al. (2010)

第1回重力天体着陸探査シンポジウム 12/3/2016

広域に広がる火星地下水圏：レーダーサウンダー探査の例

北部低地の地下 (<100 m) に凍土層が存在？

南極・北極域の比誘電率マップの比較 (探査深度: 60-80 m)

凍土層を示した火星模式断面図

北極域では、等誘電率線と極冠氷(黒・紫)の分布図が異なる ⇒ 凍土層を示唆??

Usui et al. (2015), Mouginito et al. (2012)

第1回重力天体着陸探査シンポジウム 12/3/2016

“PRESENT” LIQUID WATER ON MARS

グローバルに存在する地下凍土層から季節性の流体が流出

RSLs occur globally in the equator region

第1回重力天体着陸探査シンポジウム 12/3/2016

我々の探査戦略：ハビタブルにつながる表層・地下環境変遷の探索

“真の”火星環境進化 = 表層・浅部地下の共進化過程

Atmospheric Evolution: Curiosity (mars rover), Curiosity (atm), Curiosity (soil)

Subsurface: Water in the Mantle, Impact glass, Explanishite and sulfur-water

Outcomes: Oxidized & arid surface/atm, Reduced & water-rich sub-surface

Usui et al. 2012, 2015, 2016; Kurokawa et al. 2014, 2018; Hallis et al. 2012; Mahaffy et al. 2015

第1回重力天体着陸探査シンポジウム 12/3/2016

将来探査計画で狙うべきターゲット

A: 太古の地下水圏

- 生命前駆環境探査

火星地下圏の進化を表した模式図

>4 Ga 3-4 Ga 3 Ga to present

Magma Ground water Ground ice Zone of clay formations

B: 現在の地下水圏

- 現存する生命の探査

NASAの探査対象: "Follow the Water"

Ehmann et al. (2010) 12/5/2016

A: 太古地下水圏探査の戦略・得られる科学成果

- 探査候補地域**
 - 炭酸塩岩帯露出地域 (e.g., Nilii Fossae)
 - 熱水活動地域 (e.g., Gusev crater)
- 得られる科学成果**
 - 地球では失われた生命前駆環境
- 技術開発要素**
 - 長距離移動技術
 - 地下探査・掘削技術
 - その場観測技術: 年代測定・軽元素同位体測定
 - サンプル回収技術 (国際MSRへ向けて)

Niles et al. (2013) 12/5/2016

B: 現存地下水圏探査の戦略・得られる科学成果

- 探査候補地域**
 - RSL地域 (e.g., パリスマリネス峡谷内部) クレーター縁に認められる液体水の痕跡 (HiRISE)
- 得られる科学成果**
 - 現存する地球外生命の探査
 - 岩石惑星地下圏の進化 (全く新たな視点)
- 技術開発要素**
 - 高傾斜地へのアクセス技術 (搬送・移動)
 - 掘削技術・生命信号の検出技術
 - その場観測技術: 環境 (RH, Eh, pH) 測定など

一般的に>30度の高傾斜地に分布

12/5/2016

RGの達成目標・活動内容 - 1

表層・地下探査に必要な科学測機群の成熟度を精査

- 化学探査パッケージ (LIBS+MS)**
 - 岩石化学組成同定 (代表: 亀田)
 - 同位体 (D/H比) 測定
 - K-Ar年代測定
- 地中探査パッケージ (muon + GPR)**
 - 岩石密度プロファイル測定 (代表: 宮本)
 - 滞水層・凍土層の検出
- 生命探査パッケージ (LDM) (代表: 山岸)**
 - 微小 (1μm) 有機物・細胞の検出
 - 装置の小型化

対比 海外測機群との
 互換性の相違
 フォーカス
 パッケージ

12/5/2016

RGの達成目標・活動内容 - 2

工学技術の開発状況との密なフィードバック体制の構築

- ローバー走破技術・掘削技術 (代表: 石上)**
 - 走行制御・自律移動 (工学RGにてフィールド実証済み)
 - サンプル採取・掘削技術 (各研究機関にて検討中)
- 輸送およびEDLシステム (代表: 藤田)**
 - ミッションスコープ候補ごとのシステム・アーキテクチャの検討
 - ミッションスコープ候補によらない共通基盤技術の検討
 - 揚力カプセルによる空力誘導, 超音速パラシュート, 自律的着陸航法誘導など

12/5/2016

結論

- 火星は生命前駆環境および惑星表層環境史を研究する上で理想的な天体である
- 火星の生命前駆環境および表層環境進化の本質は、地下圏に記録されている
- 日本 (火星着陸RG) が目指すべき次世代火星探査は、地下圏探査である
- 地下圏探査の対象は、太古 (>40億年) あるいは現在の地下水圏・地下生命圏である
- 地下圏探査では、「高度着陸技術・高傾斜地移動技術」、「地下探査・掘削技術」、「その場観測技術」の開発が必須である
- 地下圏探査の成功は、火星生命探査および国際MSR・有人探査計画における日本のプレゼンス向上へとつながる

12/5/2016

月火星縦孔地下空洞 直接探査RG～概要～

代表: 春山純一(JAXA)

・**ステアリング**: 理学/西堀俊幸、山本幸生、岩田隆浩、嶋田和人、(JAXA)
工学/河野功、大槻真嗣、桜井誠人(JAXA)

・**地質鉱物、火山、内部構造科学**: 佐伯和人(阪大)、諸田智克(名大)、長谷中利昭(熊大)、白尾元理(惑星地質研)、小松吾郎(伊ダヌンツオ大)、小林敬生(韓国地質資源研)、清水久芳(東大)、寺園淳也(会津大)、辻健(九州大)、道上達広(近畿大)

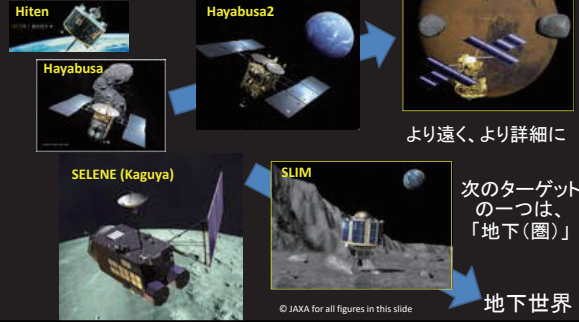
・**揮発性物質、電磁プラズマ放射線環境科学**: 橋爪光(阪大)、西野真木(名大)、三宅洋平(神大)、長谷部信行(早大)、小林進吾(放医研)、北村健太郎(徳山高専)

・**生命物質、環境利用科学**: 横堀伸一(東薬大)、小林憲正(横国大)、道川祐市(放医研)、新井真由美(未来館)

・**工学システム**: 古谷克司(豊田工大)、岩崎晃(東大)、岡田慧(東大)、大山英明(産総研)、有隅仁(産総研)、吉田和哉(東北大)、石上玄也(慶応大)

日本の月惑星探査

- 1) 彗星、月、小惑星(NEA)、惑星(金星)に到達。
- 2) 遠隔探査、サンプルリターンを経験を積む。
近く、高精度着陸(SLIM)を実証実現。
では、そのつぎは?より遠く?より詳細に?



地下(圏)

- 日本の惑星科学会の一つのターゲット -

生存圏

新鮮な物質が得られるところ

人類活動における優れたシェルター

それに、

月惑星の地下は、未知の要素が高い

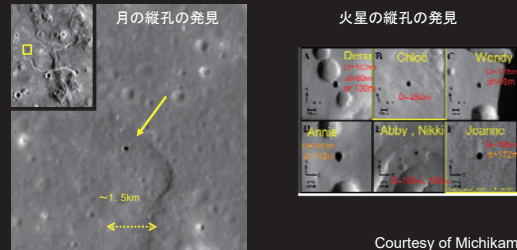
地下海

JUICE

地下空洞

UZUME

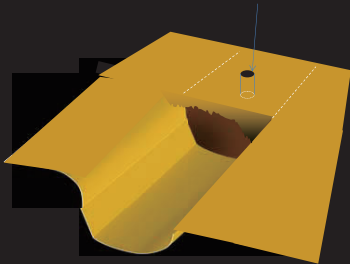
21世紀の月火星探査 ～月火星の縦孔の発見～



縦孔は、月火星の地下への入り口?

～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



月の縦孔探査の科学的意義

1) 月-地球系への物質供給を知ることができる特異な場所

天体の衝突は、月、そして地球の進化における、最大級の因子である。月は過去の衝突履歴を残す。

新鮮な溶岩の、縦孔露頭や、地下空洞内の調査で以下のことを知る:

- ・月-地球系への物質の供給(水等揮発性物質の存在)
- ・過去の太陽活動(捕獲太陽風物質調査)

2) 月の内部構造の調査に最適な場所

月のような大型衛星は、主惑星に強い潮汐力を働かせ、主惑星の進化、生命の発現に大きな影響を与えた可能性がある。潮汐力がどの時点でどのように働いたかは、月の内部構造、その形成初期から今日に至るまでの進化の過程を知る必要がある。

熱的に静謐な縦孔底や、地下空洞内で、以下のことを知る:

- ・核や、マントル構造(秤動・月震の(長期)観測)
- ・地下の放射線物質(温度、熱流量観測、直接サンプリング)
- ・溶融核発現の有無(残留磁気調査、直接サンプリング)
- ・月内部構造進化の理解に欠かせないPKT(放射線を多く含む)領域の調査
- ・PKT領域火成活動の時期・量・温度・物質の詳細(特にKREEP玄武岩、高チタン玄武岩)

縦孔情報

～月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？
- **高い密閉性**
- **塵の無い空間**
- **安定な光環境**

数10mの厚さの天井
～ 100m

縦孔・地下空洞

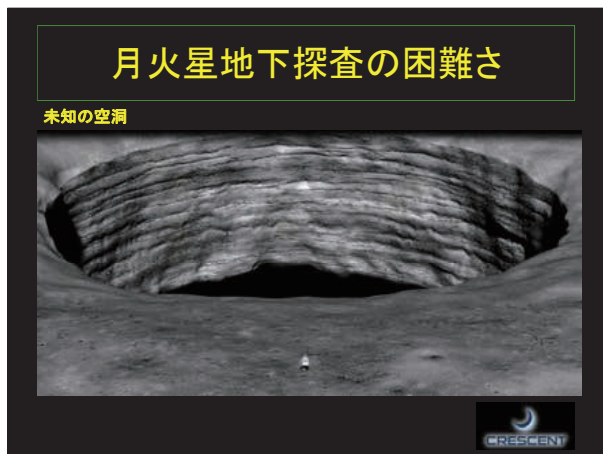
～月基地として最適～

	微小隕石	温度	放射線
表面	× 問題 数cmの遮蔽土壌が必要	× 問題 -150°C to 120°Cも変化する温度	× 問題(致命的) 4.2 Sv (1989年観測) 数m以上の遮蔽土壌が必要
極域	× 問題 数cmの遮蔽土壌が必要	× 問題 日照域でも極低温 日照域と日陰で100K以上も異なる。	× 問題(致命的) 4.2 Sv (1989年観測) 数m以上の遮蔽土壌が必要
縦孔 地下空洞	○ 安全	○ 快適 約0度で付近で一定	○ 安全 ほぼ完全遮蔽

月火星地下探査の困難さ

月の縦孔・空洞探査は、困難を極める？

是非、工学の研究者の方々と一緒に研究を進めていただきたい



月火星地下探査RG概要 まとめ

- ・月火星には、巨大な地下空洞が存在している。月地下空洞への入り口である縦孔が、日本の探査機SELENE(かぐや)で見発見された
- ・月火星の縦孔・地下空洞は、科学的にも、将来の利用の点でも重要。特に月は希少価値が高い
- ・月火星の地下空洞直接探査RGは、科学探査の観点からの探査戦略、ミッション要求、ミッション定義をまとめていこうとしている
- ・短中長期的、様々なタームで、先進的な探査技術が必要とされるので、是非理工連携のもと検討を進めていきたい。

月縦孔・地下空洞探査計画 (一部の人達で、ですが。。。)


プロジェクトコードネーム

うずめ (UZUME)

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

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。



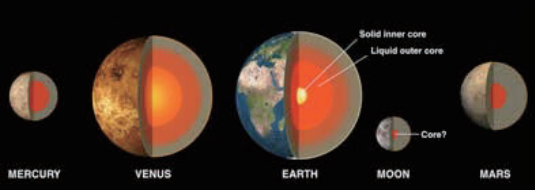
**火星内部構造探査の
目標と意義**
～主に地震学の観点から～

川村太一
国立天文台
RISE月惑星探査検討室

於 第一回重力天体(月、火星)
着陸探査シンポジウム
JAXA 相模原キャンパス

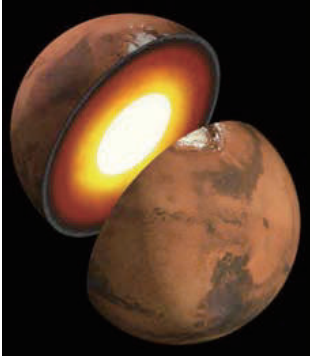
比較惑星学 固体惑星の内部構造

全体組成: マントル組成、核組成(内核、外核)
内部熱進化: 層構造(地殻-マントル-核)
地下温度構造: 流体層、低速度層、震源メカニズム



<http://insight.jpl.nasa.gov/home.cfm>

Why Mars?



- 比較的成形成初期の状態を保持していると考えられる。
- 大気、水の存在
- 月、地球の中間的なサイズ
- ▶ **月、地球とは異なる進化過程**
- 豊富な表層環境の観測

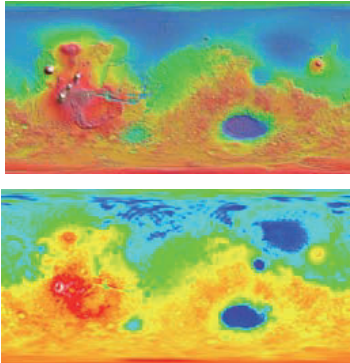
<http://insight.jpl.nasa.gov/home.cfm>

これまでの火星の内部構造探査

- 内部構造探査を主眼とした着陸探査は過去に成功例がない
 - NASA Viking 2 (1975)
 - NASA InSight (2016→2018)
- 内部構造の推定は主に軌道上の観測と地表の地球化学的探査をもとに行われてきた
 - 質量、平均密度、慣性能率
 - 重力探査(衛星軌道)
 - 地殻組成、火星隕石組成

火星の内部構造(地殻厚さ)

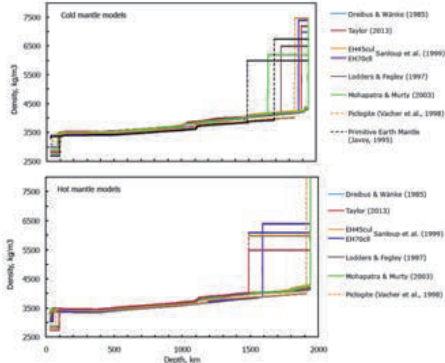
- 地形マップ
- レーザー高度計
- 地殻厚マップ
- 重力データ(衛星軌道)

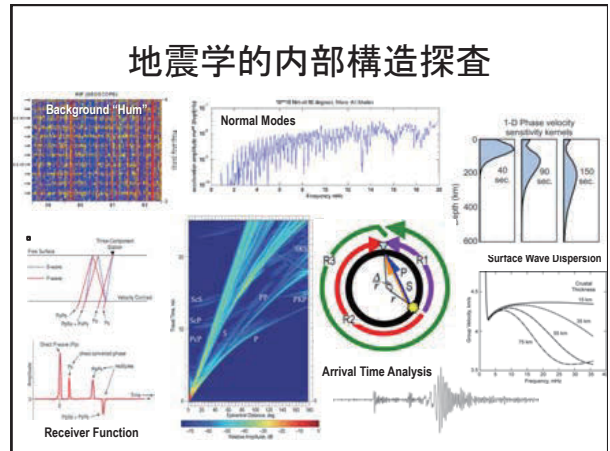
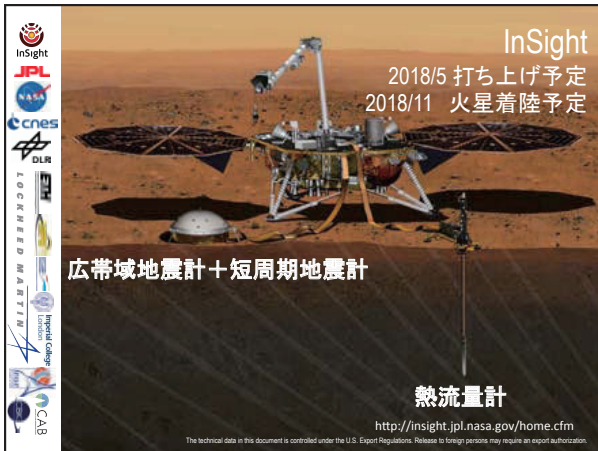


<http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA20277>

火星の内部構造(深部構造)

平均密度
慣性能率
内部物質を仮定





InSightが明らかにする火星の内部構造

Measurement	Current Uncertainty	InSight Capability	Improvement
Crustal thickness	65±35 km (inferred)	±5 km	7X
Crustal layering	no information	resolve 5-km layers	New
Mantle velocity	8±1 km/s (inferred)	±0.13 km/s	7.5X
Core liquid or solid	"likely" liquid	positive determination	New
Core radius	1700±300 km	±75 km	4X
Core density	6.4±1.0 gm/cc	±0.3 gm/cc	3X
Heat flow	30±25 mW/m ² (inferred)	±3 mW/m ²	8X
Seismic activity	factor of 100 (inferred)	factor of 10	10X
Seismic distribution	no information	locations ≤10 deg.	New

- ### 将来の火星内部構造探査
- 高地—低地で内部構造、熱的環境にどのような違いがあるか？
 - 火星内部(深部)に水酸基をはじめとする軽元素がどの程度含まれているか？その地域性は？
 - 実際にコアが溶けているか、溶けているとしたらそこから示唆されるコア組成、温度圧力環境は？

- ### 将来の火星内部構造探査
- 搭載機器
 - 地震計+加振源
 - 熱流量計
 - 磁力計(周回機との同時観測)
 - 設置方法
 - 地表+風除け、熱制御
 - 地下設置、孔内観測
 - 設置点
 - 多点ネットワークによる地震活動度調査
 - 低地+高地など性質の異なる2点での観測

- ### まとめ
- 火星内部構造は太陽系内の天体の形成、進化の多様性を知る上でマイルストーンとなるターゲットである。
 - 世界的なトレンドにおいてはリモートセンシングから着陸探査の実現に移っており、向こう2-3年で火星内部構造の描像が大きく変わる可能性がある。
 - 次期探査はネットワーク構築、多点観測がターゲットになると考えられる。そこで考えられる課題は着陸技術、観測機器の設置機構だと考えられる。

第一回 重量天体(月火星) 着陸探査シンポジウム

月有人活動を見すえた 月着陸科学探査

JAXA/宇宙研 太陽系科学研究系
春山 純一

月有人活動を見すえた 月着陸科学探査

- ①「地球形成を、月を通して読み解く」
～月のマグマオーシャンによる成層構造は成ったのか?～
- ②「月の火成活動のバリエーションを把握する」
～月独特の火山様式はあるのか?～
～月の火成活動に水の関与があるのか?～
- ③「月に、人類の宇宙への進出の橋頭堡を築く」
～月に、人類の宇宙への進出の橋頭堡を築くことができるのか? そこに科学はどう貢献するのか?～

①「地球形成を、月を通して読み解く」 ～月のマグマオーシャンによる成層構造は成ったのか?～

<背景>

- 月地殻は全溶融しての成層構造なのか?
- ・全溶融したい月地殻(?)
- ・ブランケット効果(松井-阿部理論)の検証
- ・計算機シミュレーションの制約条件
=>温室効果?
(サイズと構造だけでないファクタ?)
=>内部構造進化=>主量星との共進化モデルへの制約=>生命誕生への制約

<SELENE成果>

- ・斜長岩の発見、全球分布(Ohtake et al., 2009) (シリアルマグマテイズム?)
- ・大きな進展: PANとカンラン岩との接触分布が同一深さにあることが明らかに(Yamamoto et al., 2012)

<どこをどう調べるか?>

- ・SPデータ(Yamamoto et al., 2012)で見られ PAN+Olivine 分布領域で、層構造を、確認する。
- ※ 地震 探査で、層構造を確かめる=>広域探査、ネットワーク探査

●有人探査への貢献

- PAN(purest anorthosite)は、AIを多く有する
↓
(ISRU: in situ resource utility)
純粋なケイ素=>太陽電池
参加アルミ=>建材
沸石(Zeolite) =>イオン交換材料、触媒、吸着材料

②「月の火成活動のバリエーションを把握する」 ～月独特の火山様式はあるのか?～ ～月の火成活動に水の関与があるのか?～

<背景>

- 火山活動は、天体におけるエネルギー源。一方で環境破壊源。
- 月の火成活動の噴出物質、噴出期間、噴出量、噴出間隔等を規定するのは何か?
- 月の火成活動に揮発性物質(水など)はどうか寄与したのか?
(火山研究の最先進国日本が主導する)

<SELENE成果>

- ・海の年代把握=>若い時代(10億年程度)まで火山活動。周期的火山活動?
- + (LROC画像から、1億年から数千万年前?) (GRAIL重力データから、亀裂構造)
- ・縦孔発見 =>
(層構造を為す壁: 露頭として適する)
(地下空洞の確認: 新鮮な物質提供場所)

<どこをどう調べるか?>

- 1) 月の火山を巡り産状調査・元素分析、サンプル回収
- ・Silica richに加えThも異常に存在する火山: Compton-Belcovich
- ・Si-rich火山: Hansteenalfalfa, Gruithuisen-Gamma
- ・OHが存在(?) : Central hill of Bullialdus Crater
- ・月最大級盾状火山: Marius Hill, 大規模火山: Mons. Rumker (時系列サンプル採取) 1億年前以内(?)の火山活動
- ・Gruithuisen E-M region, Marius Hills, Mare Nubium, Ina, Hyginus, Sosigenes, Maskelyne 年代と元素組成。特に水。

★着陸してのサンプル(岩・砂)元素組成調査

②「月の火成活動のバリエーションを把握する」 ～月独特の火山様式はあるのか?～ ～月の火成活動に水の関与があるのか?～

2) 月の地下空洞を求めて

溶岩チューブ形成による遠距離溶岩運搬作用の存否を確認する。

①どこまで続いているのか?いつ、作られたのか?=>地下や周辺表面を広域物理探査。

②インフレーションを起こしたかどうか?ガスの寄与?空洞の形状把握。=>★着陸要
(静の海、マリウスヒル、賢者の海の縦孔 死の湖、豊の海のpit)

3) 層構造・フレッシュな溶岩提供。=>★着陸要

壁: 気泡の存否。(外部起源の水も?) (ダイナモ磁場の存否)

床/空洞内: Tなどの物質/温度粘性の遷移情報。捕獲岩の取得。ガス成分取得

4) 月の火成活動に、周期性があるのかを調べる。

ホットブリューム仮説の検証を目指す。
⇨重力増傾斜による亀裂構造(?)

・外郭亀裂(マントル物質?) @水の海など

・内郭亀裂(?)

20億年以上の噴出時期の様々な溶岩地域。特に、アリストルコス南東部、フラムステード、マリウス丘

噴れの海の周辺部

・内外郭と異なった亀裂? ツオルコフスキークレータ

モスクワの海

着陸(できればサンプルリターンして)の年代測定が要=>★着陸要

③「月に、人類の宇宙への進出の橋頭堡を築く」 月に、人類の宇宙への進出の橋頭堡を築くことができるのか? そこに科学はどう貢献するのか?

<背景>

3.11: 地球は、人類に必ずしも優しい環境を呈するものではない。数千万年に一度の破壊的な隕石衝突も、いつ起こるか分からない。月へ、宇宙へ、人類が出て行くことを軸にした月探査、惑星探査が求められる。

月は、放射線被曝・微小隕石・温度変化の問題から、人類が恒久基地を作るには問題があった。

<SELENE成果>

- ・極域
水: 月南極点のシャクルトンクレータに水は露出していない。
(LEND等から)あっても数10~数100ppm。(数%の水存在を言うLCROSSデータやMini-SARデータは要確認する研究者が多い。)
- 永久日照域: 無い。(SELENE高度計データから)
- そもそも1-2mの砂では放射線は有効遮蔽できないのでには恒久基地建設のハードルが高い
- ・縦孔、地下空洞
放射線被曝を免れるなど極めて利点が多い

<どこをどう調べるか?>

●人類の恒久的基地建設の可能性を科学的に調査する。

・縦孔/地下空洞

放射線遮蔽環境、隕石遮蔽、熱サイクル、岩盤厚、揮発性物質(水がたまっている可能性もある)

資源調査: IPKT 極域でチタン濃集がある地域の縦孔

科学観測基地

天文台として適する高側の縦孔 (将来の火星地下空洞内基地建設の準備)

・ミニ磁気圏(放射線遮蔽、ダスト挙動調査)

Reiner gamma, Descart anomaly, Mare Ingenii 等

●失われし水を探る。

・極域永久凍土(水の貯蔵と、空動プロセスの理解)

まずは、水の検知。D/Hの測定。水分子の移動検知。

LCROSSの水検知の追跡: Cabeus craterの永久凍

LEND観測からの水素濃集領域での水調査:

Haughton (Shoemaker and Faustini) craterの永久凍

物体衝突、エネルギー照射

=>質量分析器で、揮発性物質などを検知

(40K極低温環境での作業能力開発)

●長期のエネルギー確保。

・極域長期日照確保

月有人活動を見すえた 月着陸科学探査 まとめ

20世紀の米ソ月探査によって得られた大量のデータに加え、今世紀に入って、特にSELENE(かぐや)データによって成果・知見から、更に多くの研究課題が明らかになってきた

①「月の内部構造」

～月のマグマオーシャンによる成層構造は成ったのか？～

②「月の火成活動のパリエーションを把握する」

～月独特の火山様式はあるのか？～

～月の火成活動に水の関与はあるのか？～

その場解析、サンプリングなど、人が行くメリットは大きい。しかしコストも高つくだろう、無人/ロボット探査などとの連携が必要

一方で、人が月に進出することを今から考えていくべきで、拠点としての極・地下空洞・ミニ磁気圏下などの科学的な知識を蓄積していくことが必要

③「月に、人類の宇宙への進出の構想を築く」

～月に、人類の宇宙への進出の構想を築くことはできるのか？ そこに科学はどの貢献をするのか？～

月有人活動を見すえた 月着陸科学探査 まとめ

将来に向けて、是非、理工一体となって進めていくべき課題

1) 軟着陸(安全で精度良い着陸)

どこに降りたいか、どこが安全か⇨確実性(精度、環境)

2) 長期的な活動(越夜:特に極低温となる極域)

長期観測の必要性、温度などの環境⇨越夜システム

3) 広域探査(長駆できる移動体)

長距離移動その場観測の必要性・移動ルート

⇨移動距離、移動方法

4) 裏側探査

裏側観測の場所・観測期間・移動の要否⇨裏側リレーシステム

5) サンプルリターン

サンプルリターンの要否・帰還サンプルの保存状態⇨帰還技術

第1回重力天体(月、火星) 着陸探査シンポジウム
2016.12.5@ISAS

重力天体探査ミッションに おける移動ロボティクス

石上 玄也
(慶應大)

次期ローバへの戦略 | 理学と工学のジレンマ

ローバとは, 科学者の「足」: 行きたいところに行く, 科学者の
「手」: 触りたいものに触る, 科学者の「目」: 観たいものを観る
→ 科学者の探究心を実現するツール

従来型でも良いから
サイエンスを確実に
実行できるローバ

奇抜な型で特殊地形を
移動できる見た目にも
特異なローバ

Positive

- サイエンスミッションの確実な達成を狙う.
- 継続性がある技術が期待できる.

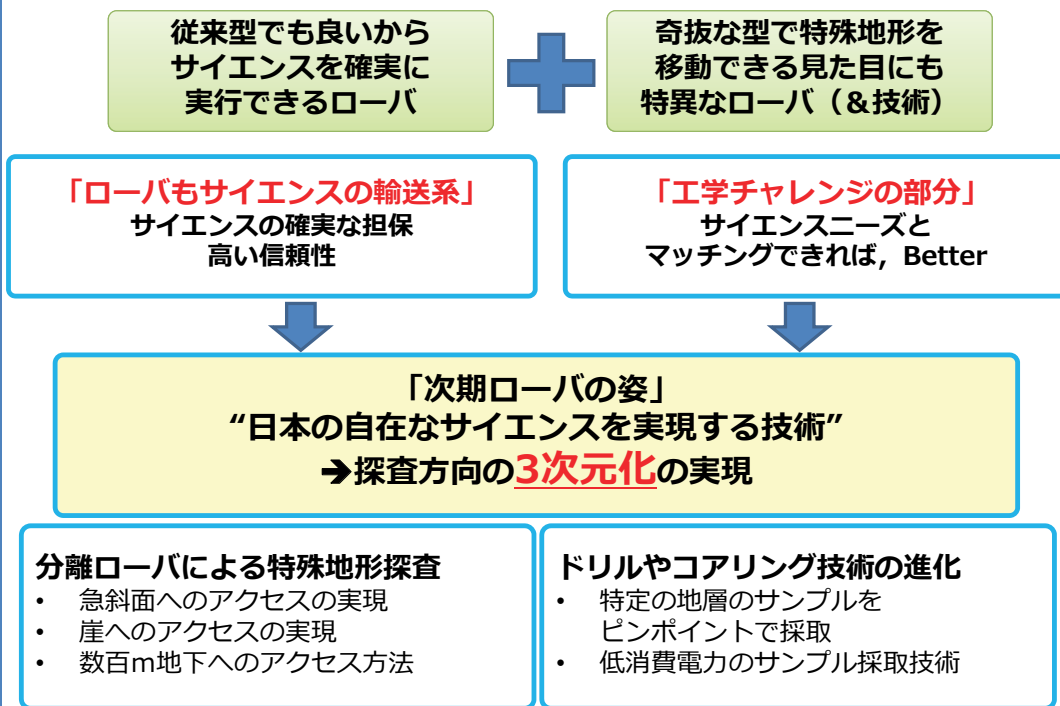
- 工学的な新規性が分かりやすい.
- 世界初をアピールしやすい.

Negative

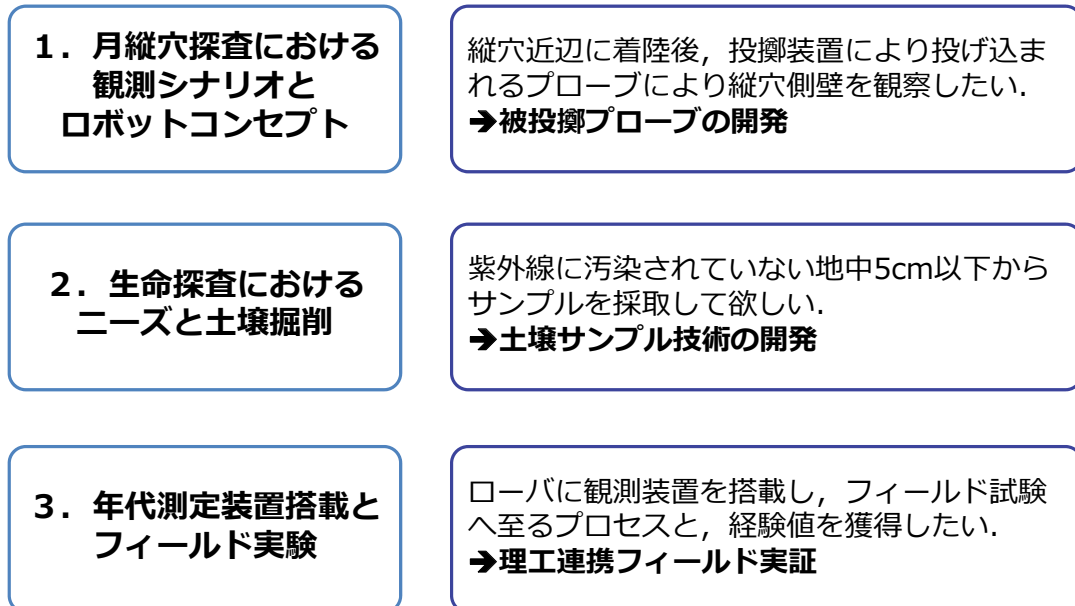
- 見た目が他国と同じ.
- 「今更ローバ感」は否めない.
- 「日本がやるべきなのか？」

- サイエンスミッションの成立が疑わしい.
- 継続性が不明である.
- ローバ自体の成立性が疑わしい.

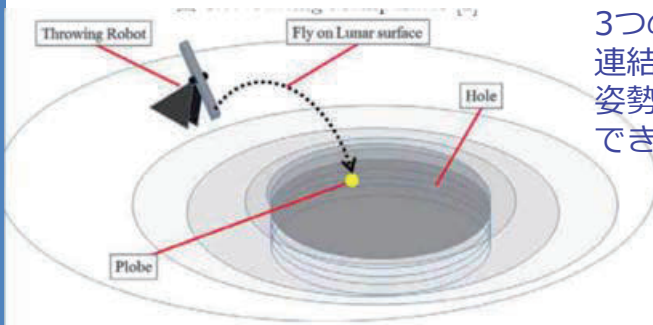
次期ローバへの戦略



理工連携の例



例1 : 球体型全方向観測ロボット



- 30cmの球殻とロボット本体が3つのオムニボールにより接触連結されているため、球殻の姿勢によらず、一定方向を観測できる。



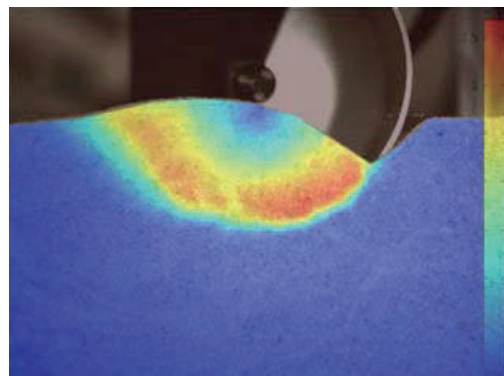
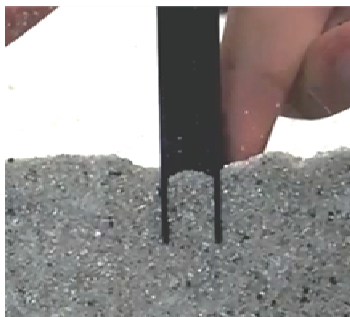
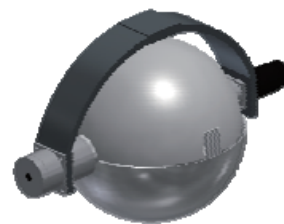
Genya Ishigami

重力天体着陸シンポジウム

5

例2 : 土壌サンプリング技術

- サンプリングツールの設計検討
- 接触力学モデルを用いた効率的なサンプリング戦略の検討とアーム制御
- 筒型サンプリング装置のコンセプト実証



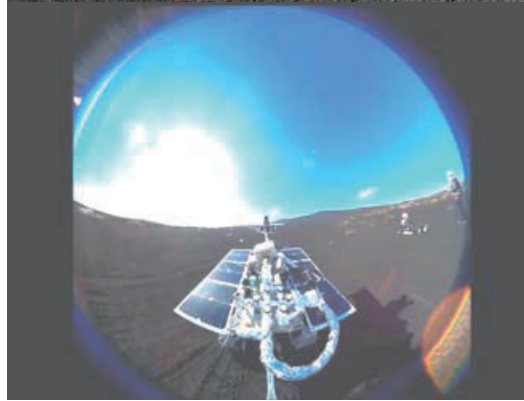
Genya Ishigami

重力天体着陸シンポジウム

6

例3：観測機器搭載&移動試験

- 機械的I/F
 - 2016年3月：搭載検討
 - 2016年9月：フィットチェック
 - 2016年11月：走行実験
- ローバ：慶應大
- 観測装置：立教大&東大



Genya Ishigami

重力天体着陸シンポジウム

7

現状のTRL | まとめに代えて

ローバシステム	サブシステム	TRL	FY2016 目標
従来型ローバ		3~4 (一部5)	地上試験継続 4~5を維持
小型掘削システム	ロボットアーム	3	地上試験継続
	ドリル・コアリング	2	コンセプト実証 (3)
	地層サンプリング	1	
	サンプル投入機構	1	
分離ローバ	移動機構	2	プレーヤの確保
	分離機構	1	
	サンプル採取投入機構	1	

- 現状では、TRLは決して高くないが、理工連携のもと、ニーズや要求値を抽出し、設計開発に生かしていく。
 - 例：探査すべき地層の深さは〇〇メートル
 - 例：探査すべき地域の傾斜は〇〇度
- もしくは、理学アイディアに火をつける工学シーズの創発を目指していく。

Genya Ishigami

重力天体着陸シンポジウム

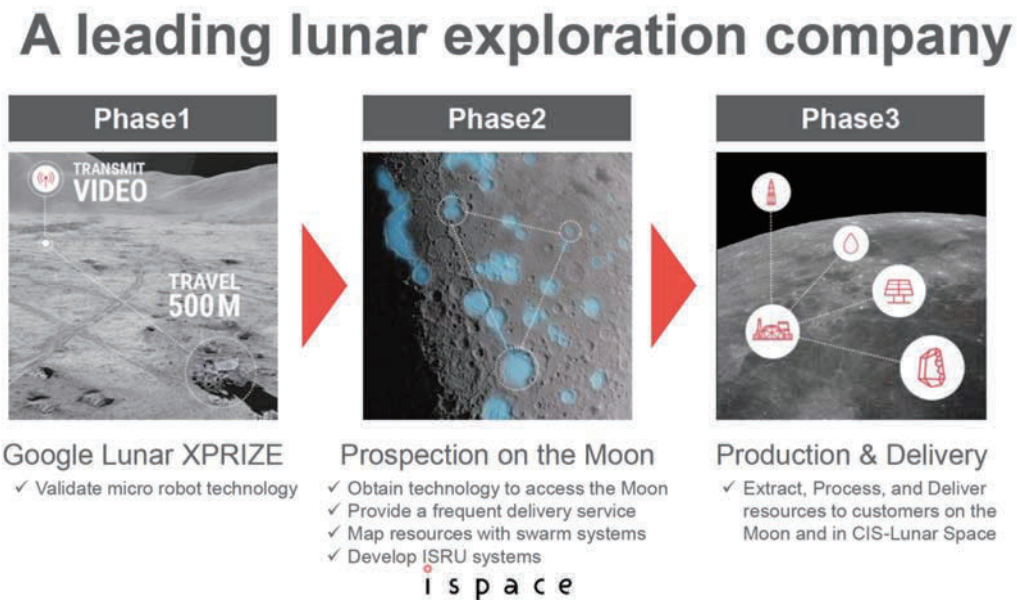
8

民間での月面探査 ～Cislunar 経済圏の創成を目指して～

袴田武史(株式会社 ispace 代表取締役)

ispace 社は、月面探査のための宇宙ロボット開発をするベンチャー企業である。「Expand our planet. Expand our future.」をビジョンに掲げ、人類が宇宙に生活圏を築く世界を創ることを目指している。そのビジョンの実現には、宇宙に経済圏を創ることが必要だと考えている。その経済圏を作り出す最初のステップが宇宙資源開発となる。

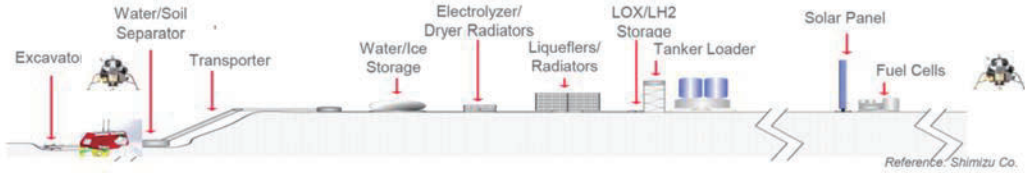
ispace 社は現在、民間での月面探査を競う Google Lunar XPRIZE に日本から唯一参加している HAKUTO を運営している。将来の月面での資源開発を目指した、最初のステップである。



6

将来的に月面での資源開発を実現するには、様々な企業が参加するエコシステムを構築する必要がある。

Creation of Ecosystem



Reference: Shimizu Co.

Transportation	Exploration	Development	Production	Delivery	Business	Customer
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Launchers ✓ Spacecraft ✓ Landers 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Rover ✓ Sensors ✓ Data analysis ✓ Communication 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Drill ✓ Robot ✓ ISRU 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Plant ✓ Storage ✓ Power 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Launchers ✓ Spacecraft 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Legal/Regulation ✓ Financing ✓ Trading ✓ Exchange 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fuel purchasing
<ul style="list-style-type: none"> ✓ SpaceX ✓ ULA ✓ Airbus ✓ Astrobotic ✓ Moon Express 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Astrobotic ✓ Scientists ✓ SES 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Construction tool companies ✓ Robot companies 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Construction companies ✓ Plant engineering companies 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ SpaceX ✓ ULA ✓ Airbus 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Government ✓ Lawyers ✓ Banks ✓ Trading companies 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Space Agency ✓ ULA ✓ Satellites ✓ Bigelow ✓ Players on moon ✓ Space solar plant

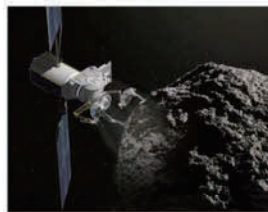
i s p a c e

近年、宇宙資源開発は、米国での宇宙資源の所有権が認められたことを契機に、世界で盛り上がりを見せつつある。国際的にも、ハーグ宇宙資源ガバナンスワーキンググループが発足し、宇宙資源開発の国際レジームについての議論が始まっている。

Space mining is hot in the world



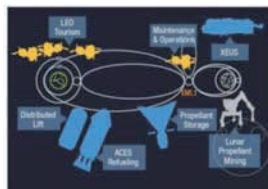
U.S. approved a bill to protect space resource property right in 2015



Space Mining Startups in U.S. have raised over \$50M



Plans to invest 200M€ to space resource industry



Established U.S. space company announced Cislunar 1000 vision

i s p a c e

日本でも、このような議論を開始し、宇宙資源開発業界でのリーダーシップを確保することが重要になってくる。

パネルディスカッション

パネラ 橋爪 光(阪大)、出村裕英(会津大)、亀田真吾(立大)、倉本 圭(北大・座長/文責)

・当初の論点設定

1. 日本の将来の太陽系探査における重力天体着陸の重要性はどこにあると考えるか
 - ・サイエンスの展開
 - ・新しい工学
 - ・活動領域の拡大
 - ・有人
2. それに向けて日本はどんな特色を打ち出すべきか(海外にない新規機器、オリジナルなサイエンスなど)
3. ミッション提案に向けた作業の協力体制をどう構築するべきか、
 - ・各パネラ・各人の周辺が貢献できること
 - ・コミュニティとして取り組むべきこと
 - ・理工連携
4. 大学とJAXAの協力体制をより良いものにするためにはどうしたらよいか？
 - ・協力の必要性
 - ・「大学の強み・弱み」、「現状の問題点」、「問題点解消のためのアイデア」

・実際の議論

- ・パネラだけでなく、理工さまざまな専門家の集った会場からも活発な議論があり、話題が自然に展開した

・実際の議論の主な論点

- ・各探査のシリーズとしての位置づけ方、位置付けることの有効性
 - ・独自性、計画の説得性の強化
 - ・機器開発、人材育成の目標設定
 - ・民間の宇宙開発やロボット等技術革新、有人深宇宙探査など最新動向をにらんだ構想の必要性
- ・理工連携の重要性
 - ・縦割り文化の弊害を除去すべき
 - ・良いミッションを生むには日常的な意思疎通の場を作ることが重要
- ・惑星探査機器開発力の強化
 - ・人材の発掘と養成が急務、その仕組みを作るには機関連携が重要
 - ・機器開発の各要素(企画、開発、試験等)の特徴を生かした、適所人材の勧誘
 - ・専門越境が重要

第1回 重力天体着陸探査シンポジウムの趣旨

• 科学：日本の将来の太陽系探査における重力天体着陸の重要性

- 何をやってきて、何が大事か、そしてどこに特色を出すのか？

• 探査：これまでの探査の取り組み。今後の取り組み

- 何を成し遂げてきたか。どうしてできたのか？今後、何をしていくことができるか？理学・工学双方、何を期待するのか？

• 大学、コミュニティ

- 大学、コミュニティとして、何をやってきたか？何が求められるか？何ができるか？

第1回 重力天体着陸探査シンポジウムのまとめ

科学：日本の将来の太陽系探査における重力天体着陸の重要性

- “結果的”に戦略的(HYB-HYB2-MMX)から、“意図的に”戦略的へ
- 国際的に評価されている“挑戦的な取り組み”を継続させるためには小型の有効活用

探査：これまでの探査の取り組み、今後の取り組み

- SLIM(着陸実証)・MMX(火星往還)→火星着陸・月火星空洞探査
- 有人は着陸探査の1つのゴール→ただし、ロボットしかいけない場所が存在する
- 移動・着陸・遠隔操作ロボティクスの紹介

大学、コミュニティ

- 各探査に関し、理工でバランスをとることが理工連携ではない
- 理工とも周辺分野の取り組みが必須(研究費・人材とも総量の増加は見込めない)

第2回シンポジウムは2月を予定

宇宙航空研究開発機構特別資料 JAXA-SP-16-014
JAXA Special Publication

(2016年)第1回重力天体(月、火星)着陸探査シンポジウム(後刷り)
2016 Proceedings of Moon and Mars landing exploration symposium (I)

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 平成29年3月17日
電子出版制作 松枝印刷株式会社

©2017 JAXA

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

