

宇宙資源の考え方と関連する探査ミッション

宮本英昭(東京大学・システム創成学専攻)

本日の内容は、おおよそ以下の要約になります

宮本英昭他・鉄学137億年の宇宙誌, 2009

宮本英昭他・宇宙資源: pie in the sky, 東京大学総合研究博物館, 2013

宮本英昭他, ヘラクレス計画の科学探査タスクフォース中間報告, 2019(JAXA/ISAS国際宇宙探査専門委員会)

宮本英昭・太陽系探査の現状と宇宙資源の考え方、環境資源工学、68, 3-9, 2021

Volker, Stoudemire, Miyamoto, Fisk, In-space manufacturing and resources, Wiley-VCH, 2022

サイエンスに関する部分は、春山純一さん(JAXA)、竝木 則行さん(天文台)、佐々木晶さん(大阪大学)、荒川政彦さん(神戸大学)、小河正基さん(東京大学)、栗谷豪さん(北海道大学)、玄田英典さん(東京工業大学)、小林桂さん(岡山大学)、小松吾郎さん(IRSPS)、佐伯和人さん(大阪大学)さん、寺田直樹さん(東北大学)、三河内岳さん(東京大学)、諸田智克さん(東京大学)、大竹真紀子さん(会津大)、鹿山雅裕さん(東大)、唐牛讓さん(JAXA)、熊本篤志さん(東北大)らとの議論に基づいています



太陽系がいかに形成され




惑星がどのように作られ

Image credit: NASA

その中で、月はどのような科学的位置づけにあるか



地球は生命を育む星と
なったか、を知る



どのような進化過程の違い
があったからこそ

春山純一さん (JAXA)、竝木 則行さん (天文台)、佐々木晶さん (大阪大学)、荒川政彦さん (神戸大学)、小河正基さん (東京大学)、栗谷豪さん (北海道大学)、玄田英典さん (東京工業大学)、小林桂さん (岡山大学)、小松吾郎さん (IRSPS)、佐伯和人さん (大阪大学)さん、寺田直樹さん (東北大学)、三河内岳さん (東京大学)、諸田智克さん (東京大学)、大竹真紀子さん (会津大)、鹿山雅裕さん (東大)、唐牛讓さん (JAXA)、熊本篤志さん (東北大)らとの議論に基づいています

<https://www.constantinealexander.net/climate-change/page/8/>

<http://comprendelanaturaleza.blogspot.com/2014/03/geosfera-dinamica.html>

太陽系形成の謎

太陽系形成の標準モデルの問題点（巨大ガス惑星の成長時間）が、ペブル集積モデルで説明されつつある。これは必然的に巨大衝突が生じる寡占成長モデルと必ずしも一致しない。火星は地質学的には高温起源であるが、微惑星集積時の重力エネルギー解放と成長速度との関係は、低温起源を示唆し、月はこれと逆の矛盾がある。月と火星を同時に調べるのが鍵。

Image credit: NASA

その中で、月はどのような科学的位置づけにあるか

月は地球と太陽系の形成・初期進化を読み解くロゼッタストーン

地球は内部進化、生命、テクトニック活動で情報が消失。火星はその活動度が総じて低い。月は早期に活動が沈静化。月は地球の形成過程と密接に関連。形成過程—マグマオーシャンによる内部進化までの記録を留める。

月の起源の謎

最新の太陽系形成論の枠組みの中で、巨大衝突による月の誕生という説を採る必要がある。特に高地地殻の示唆するマグマオーシャンの存在が支持する月の高温起源説と、重力探査や火山活動の示す低い熱収縮度の示す低温起源説の存在。後者は、太陽系形成論の寡占成長モデルと複数回の巨大衝突による地球形成、その破片の集積による月形成で説明可。表と裏の二分性と膠着物質の関係

内部進化メカニズムの謎

地球は大きなサイズのため素過程が絡み合い全容解明が困難で、金星も同様。月と火星はこの点で有利、特にホットスポット型火山の有無、火成活動とマントル湧昇流の相互フィードバックの有無という意味で、月と火星は大きく異なる。これを理解するには、マントル対流の強さや温度（深部起源水の含有量）、火成活動の規模・組成の時間変動の系統的理解が本質的。

春山純一さん（JAXA）、竝木 則行さん（天文台）、佐々木晶さん（大阪大学）、荒川政彦さん（神戸大学）、小河正基さん（東京大学）、栗谷豪さん（北海道大学）、玄田英典さん（東京工業大学）、小林桂さん（岡山大学）、小松吾郎さん（IRSPS）、佐伯和人さん（大阪大学）さん、寺田直樹さん（東北大学）、三河内岳さん（東京大学）、諸田智克さん（東京大学）、大竹真紀子さん（会津大）、鹿山雅裕さん（東大）、唐牛讓さん（JAXA）、熊本篤志さん（東北大）らとの議論に基づいています

<https://www.constantinalexander.net/climate-change/page/8/>

<http://comprendelanaturaleza.blogspot.com/2014/03/geosfera-dinamica.html>

小惑星から内・外惑星まで
プログラム化した探査が重要

形成・素材

環境

進化

生命

地球型惑星の系統的整理の端成分

月は最小の地球型惑星。「我々生命を育んだ地球とはどのようなものだったのか」という問いに答える特別な位置にある。

春山純一さん (JAXA)、竝木 則行さん (天文台)、佐々木晶さん (大阪大学)、荒川政彦さん (神戸大学)、小河正基さん (東京大学)、栗谷豪さん (北海道大学)、玄田英典さん (東京工業大学)、小林桂さん (岡山大学)、小松吾郎さん (IRSPS)、佐伯和人さん (大阪大学) さん、寺田直樹さん (東北大学)、三河内岳さん (東京大学)、諸田智克さん (東京大学)、大竹真紀子さん (会津大)、鹿山雅裕さん (東大)、唐牛讓さん (JAXA)、熊本篤志さん (東北大)らとの議論に基づいています

地殻構成物の多様性の把握

地殻・マントルのバルク組成、マグマ・オーシャン期の分別過程の解明、放射性年代測定に裏付けられた高地地殻の地質調査

揮発性物質と月環境

極域および高地の揮発性成分調査（組成、起源、年代的变化の把握）。太古の地球起源大気の影響、磁場情報の獲得、高エネルギー粒子・帯電・ダスト環境、電位変動と浮遊ダスト、磁気異常と静電バリア形成過程

火山活動の精査

高分解能で組成分布を理解・岩石学的スケールで高度分析。重なり合う火山噴出物、異なる年代の地域での火山岩岩石学的理解、火山地域の地下構造把握、詳細な火山地質学調査と比較惑星火山学

太陽系内衝突史の把握

太陽系衝突史の痕跡、岩石形成年代とインパクトメルト・ベースンの岩石学・地球化学的分析、太陽系クレーター年代学の基礎、隕石衝突史、若い溶岩流のクレーター年代とサンプル年代による年代学高精度化、40-38億年前の隕石衝突フラックスの連続性と太陽系初期ダイナミクス

月の内部進化の理解

金属鉄コアの組成、サイズ（地震探査による月深部構造探査）、熱流量、月、形成直後の内部熱・化学状態の推定、月の膨張収縮テクトニクスの解明、海の放射性年代測定、異なる年代における典型的岩石の系統的地球化学的情報

衝突・レゴリスプロセス

太陽系に普遍的に存在する地殻構成物質の破砕物（レゴリス）としての形態、挙動の把握。隕石ガーデニングによる成熟、微小隕石のフラックス、宇宙風化効果

地殻構成物の多様性の把握

地殻・マントルのバルク組成、マグマ・オーシャン期の分別過程の解明、放射性年代測定に裏付けられた高地地殻の地質調査

太陽系内衝突史の把握

太陽系衝突史の痕跡、岩石形成年代とインパクトメルト・ベースンの岩石学・地球化学的分析、太陽系クレーター年代学の基礎、隕石衝突史、若い溶岩流のクレーター年代とサンプル年代による年代学高精度化、40-38億年前の隕石衝突フラックスの連続性と太陽系初期ダイナミクス

揮発性物質と月環境

極域および高地の揮発性成分調査（組成、起源、年代的变化の把握）。太古の地球起源大気の影響、磁場情報の獲得、高エ

月の内部進化の理解

金属鉄コアの組成、サイズ（地震探査による）、熱流量、月、形成直後の内部熱・化学状態の推定、月の膨張収縮による放射性年代測定、異なる年代における典型的岩石の系統的地球化学的情報

こうした科学は重要な要素として残るはずだが、今後の月での活動の主演は必ずしも月科学だけでは無い

火山活動の精査

高分解能で組成分布を理解・岩石学的スケールで高度分析。重なり合う火山噴出物、異なる年代の地域での火山岩岩石学的理解、火山地域の地下構造把握、詳細な火山地質学調査と比較惑星火山学

衝突・レゴリスプロセス

太陽系に普遍的に存在する地殻構成物質の破砕物（レゴリス）としての形態、挙動の把握。隕石ガーデニングによる成熟、微小隕石のフラックス、宇宙風化効果

月探査・月開発の周辺状況

宇宙探査は予算と伝統的技術を持つ国家のみが実施という時代は去った

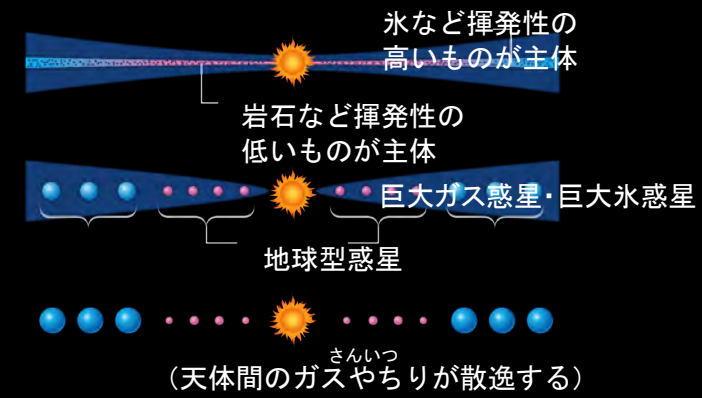
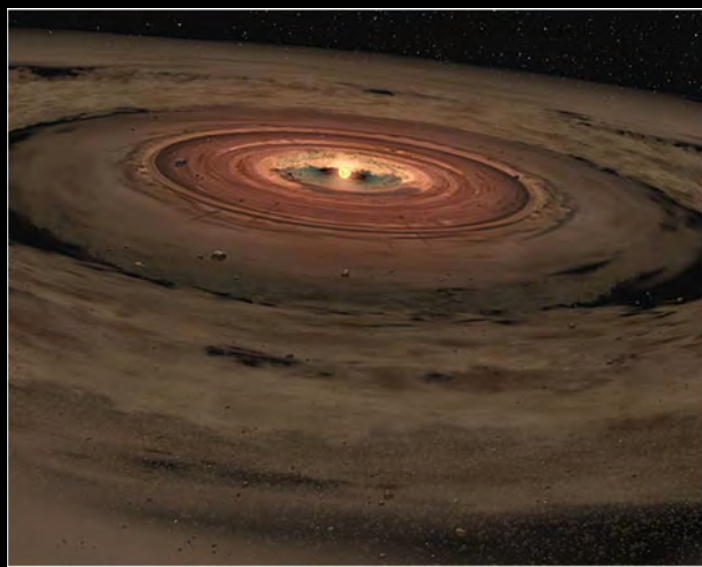
こうした科学は重要な要素として残るはずだが、今後の月での活動の主役は必ずしも月科学だけでは無い

いかに経済的価値を生み出すか
エネルギー・資源確保の活動が活発化
(15か国で進めるアルテミス計画には、資源利用が計画されている)

民間の活動は既に不可欠で、民間による月探査への期待がむしろ高まっている
(19か国、100以上の団体がシスルナ空間を目指している)

NASAは相次いで月探査を含む民間支援の方策を発表
(>10の探査ローバが検討)

科学探査の進展で、太陽系の中における地球が どのような天体か、かなり正確に把握された

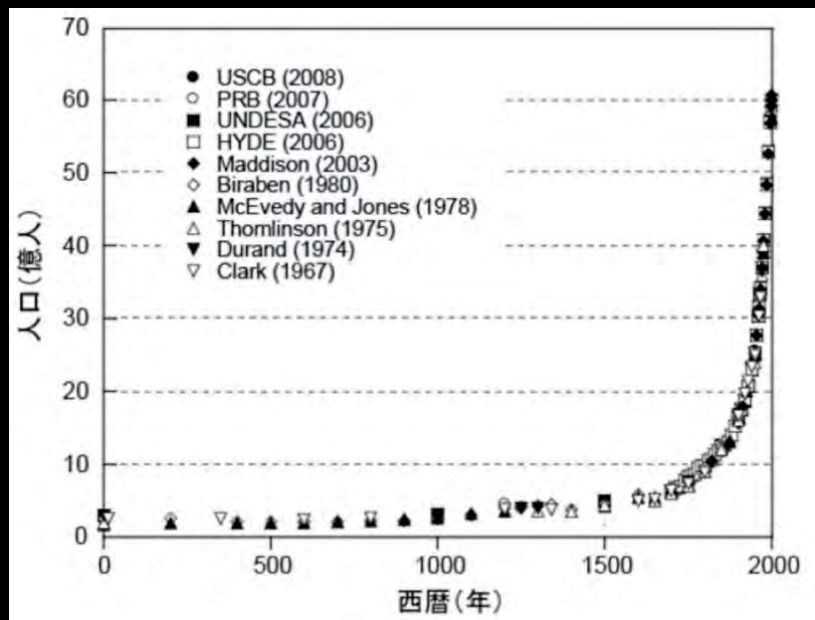


地球の表面（地殻）はO、Si、Al、Fe、Ca、Na、K、Mgでほぼ99%が構成されるが、太陽系全体は主にH、He、C、N、O、Ne、Mg、Si、S、Fe、Niでできている。地球上で希少なものが太陽系全体では豊富であることも、その逆もある。

地球は太陽系内で最大の鉱物種(5000種)がある。

その一方で地球での活動には制約があることも、次第に知られてきた

産業革命以降、人口は10倍に増加
地球で生まれた人間の総数の7%が
いまこの瞬間活動している



人類はすでに使いやすい資源は消費してしまった。
銅や鉛、亜鉛は原油の可採年数よりも短く、レアメタル
やニッケル、タングステン、モリブデンも枯渇

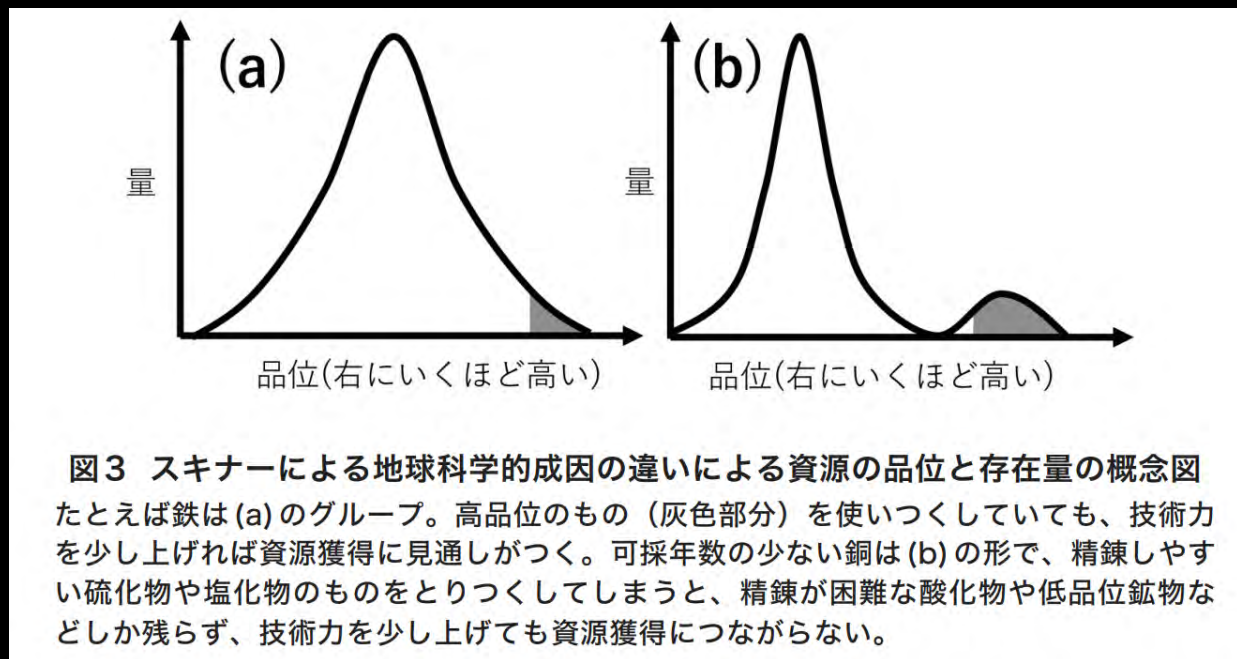


図3 スキナーによる地球科学的成因の違いによる資源の品位と存在量の概念図
たとえば鉄は(a)のグループ。高品位のもの(灰色部分)を使いつくしていても、技術力を少し上げれば資源獲得に見通しがつく。可採年数の少ない銅は(b)の形で、精錬しやすい硫化物や塩化物のものをとりつくしてしまうと、精錬が困難な酸化物や低品位鉱物などしか残らず、技術力を少し上げて資源獲得につながらない。

資源枯渇は環境負荷の増大を意味する(低品位鉱石からの資源抽出には大きなエネルギー、環境負荷が必要)

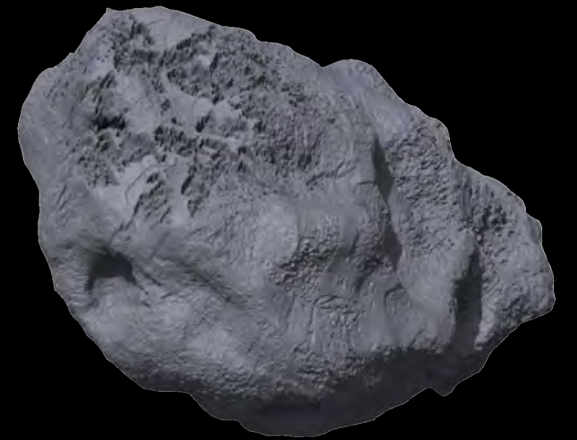
リサイクルも同様にエネルギーと環境問題とのバランスが必要となる

地球表層において利用できる資源量は有限であり、環境、エネルギー問題を根本から打破する高度な技術が誕生しない限り、大きな制約を抱えることになる(宮本・他、宇宙資源、2013より)



今後の宇宙利用を考える上で重要なポイントは：

1. 地球は岩石質天体で最大
2. 地球外天体は酸化的環境に無い
3. 揮発性成分は太陽系に大量にある



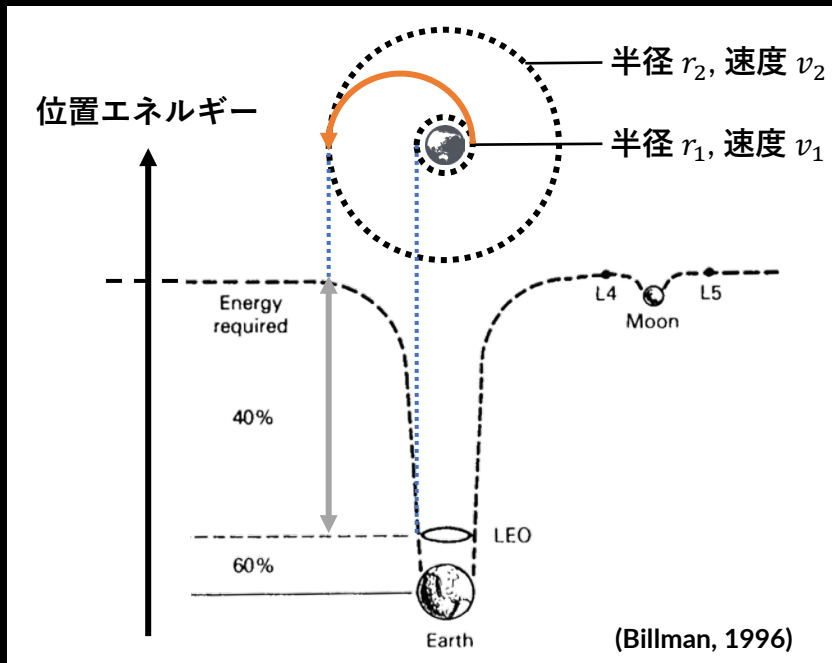
ポイント1：地球は岩石質天体で最大

そのため多種多様な鉱物に恵まれ、生命を宿すようになったのであるが

地球から離れるのが一番大変

デルタV [km/s] (=アクセスの良さ)による整理

位置エネルギーの増減のために必要な速度 (=運動エネルギー) の絶対変化量 = 行きやすさの指標

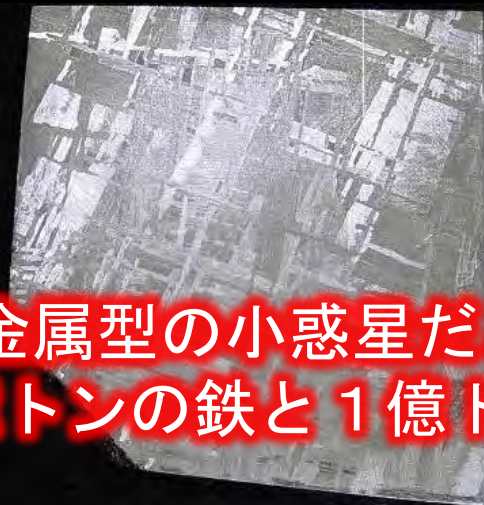


ポイント2：地球外天体は酸化的環境にない

鉄隕石



Gibeon 東大総合研究博物館



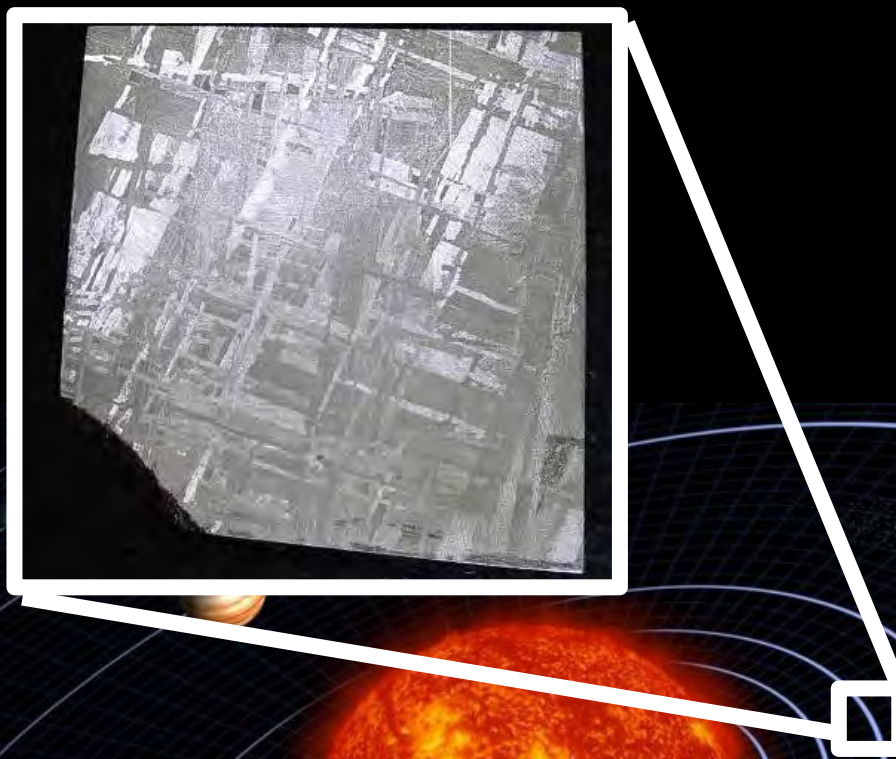
半径1.5kmの 金属型の小惑星だと
→200億トンの鉄と1億トンの白金族

地球でこれまで人類が生み出した
鉄や白金の総量に匹敵



この利用は産業革命にも匹敵する文明の大転換になるだろう

宇宙人がみた 地球人の不思議



ただし大規模に宇宙資源を地球で利用するのは、かなり先だろう

宇宙の資源は、まず宇宙での活動を支えるために使われる（「その場」利用）

これまでの宇宙開発：
幌馬車的（食料、生活用品、
燃料等全てを持参）



将来の宇宙開発：
西部開拓時代的（現地調達）



近未来の宇宙資源の利用形は、私が思うには
地球外物質による自律輸送と人工物の開発

その意味で、月と小惑星がカギとなる



ポイント3：揮発性成分は太陽系に大量にある

タイタンには地球上で確認されている天然ガスの総埋蔵量(1,300億トン)と同程度の炭化水素（メタンやエタン）の湖が、いくつも存在する

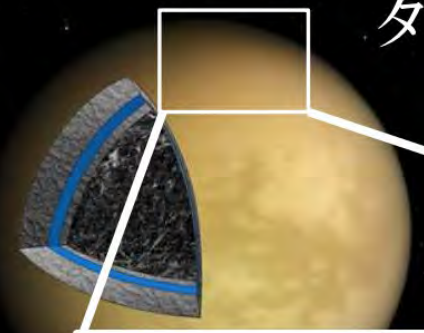
タイタンに存在するメタンハイドレートの総量は、地球の液体メタンの10万倍～100万倍と推定されており、人類が現在のペースで利用したとしても、使い切るまでに10億～100億年かかるという膨大な量となる。

土星の衛星タイタンの液体メタンは地球の100万倍！
人類が10億年かけても使い切れない

Credits: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute

Image Credit: NASA

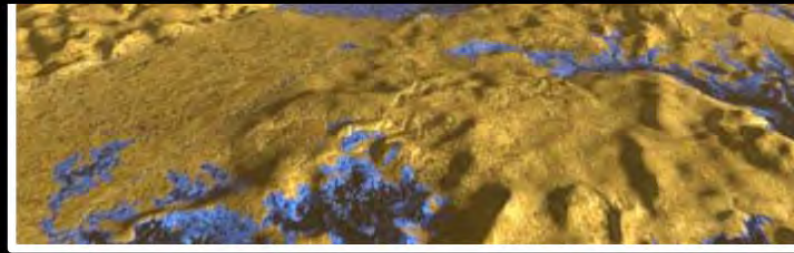
石油がなくなったら、土星の衛星
タイタンへ行けばよい



タイタンのリゲイア海：液体メタンの海
(地球の石油・ガスの埋蔵量の40倍以上存在)

LNGがタイタンにあったとしても、これを地球
に持ち帰ることは不可能
タイタンで酸化剤は無く、現地
で利用もできない

・・・というほど単純でない



**Dragonfly New Frontiers mission concept:
rotorcraft lander for in situ investigation of Titan's
prebiotic chemistry and habitability**

*Exploration and discovery on an ocean
world to determine how far chemistry has
progressed in environments providing
key ingredients for life*

- Rich, multidisciplinary science at each landing site, with **dozens of potential sites**
- Mission duration is not heavily constrained – MMRTG output degrades slowly

Aerial mobility provides access to Titan's diverse materials at a wide range of geologic settings **10s to 100s of kilometers** apart in **over 2 years of exploration**

An illustration of the Dragonfly rotorcraft lander. It is shown in flight with its rotors spinning, and also on the ground on Titan's surface. The background shows the hazy, orange-brown landscape of Titan with rolling hills and a small satellite in the sky.

小惑星の古典的な分類とミッションの関係

M-type (Metallic?)

- bright (albedo .10-.18)
- Ni and Fe rich?
- sources of iron meteorites?

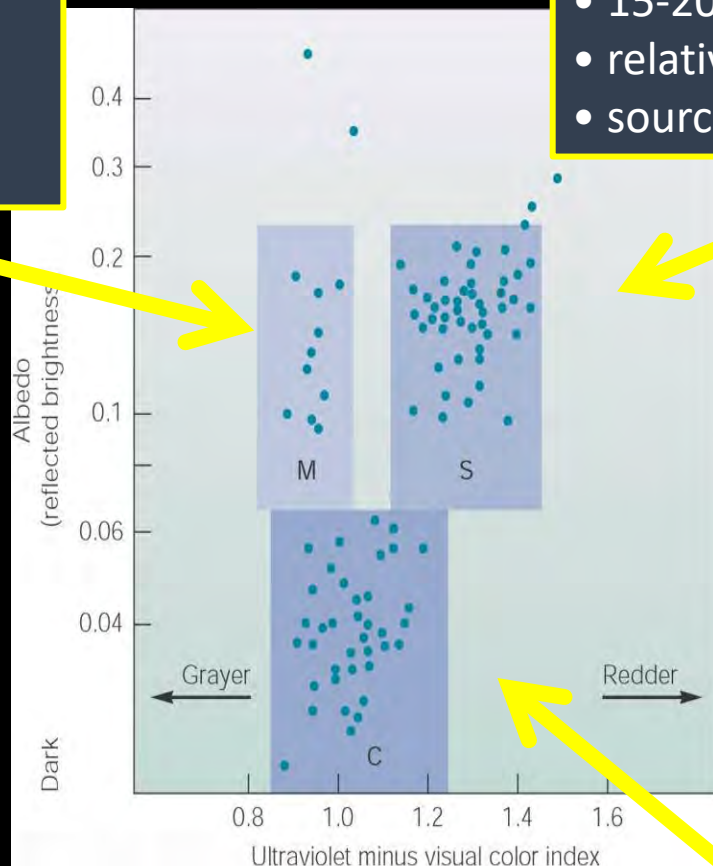
Wood and Kuiper (1963)
Chapman et al (1971)

Hayabusa-2 (JAPAN) →
OSIRIS-REx (US)

S-type (Stony)

- 15-20% population
- relatively bright (albedo .10-.22)
- sources of ordinary chondrites

Hayabusa (JAPAN) ↑



C-type (Carbonaceous)

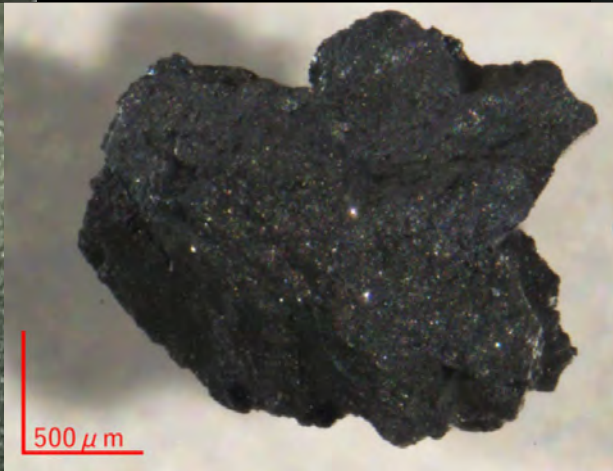
- > 75% population
- dark (albedo 0.03)
- sources of carbonaceous chondrite?

はやぶさ 2 が取得したサンプルは5.4g
水素が0.69-1.30wt%、炭素が2.79-5.39wt%(Nakamura et al., 2022)

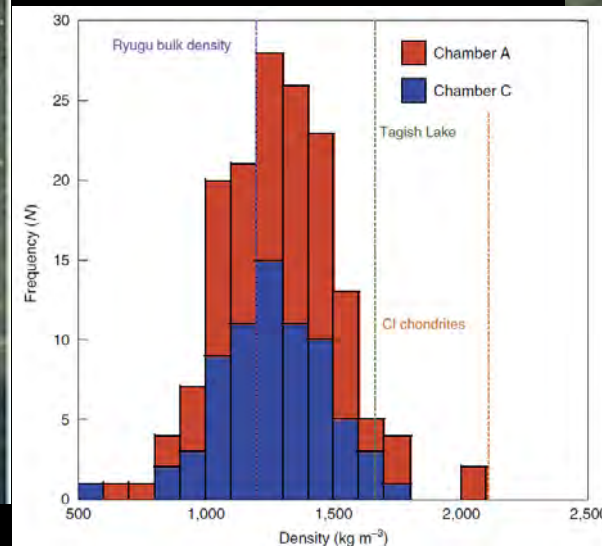


Room A (1st touch down) 3.2g

5mm



Bulk density $1,282 \pm 231 \text{ kg m}^{-3}$ [Yada+2021]
slightly larger than the observed bulk density of $1,190 \pm 20 \text{ kg m}^{-3}$
much lower than Tagish Lake or CI chondrite



Room C (2nd touch down) 2.0g

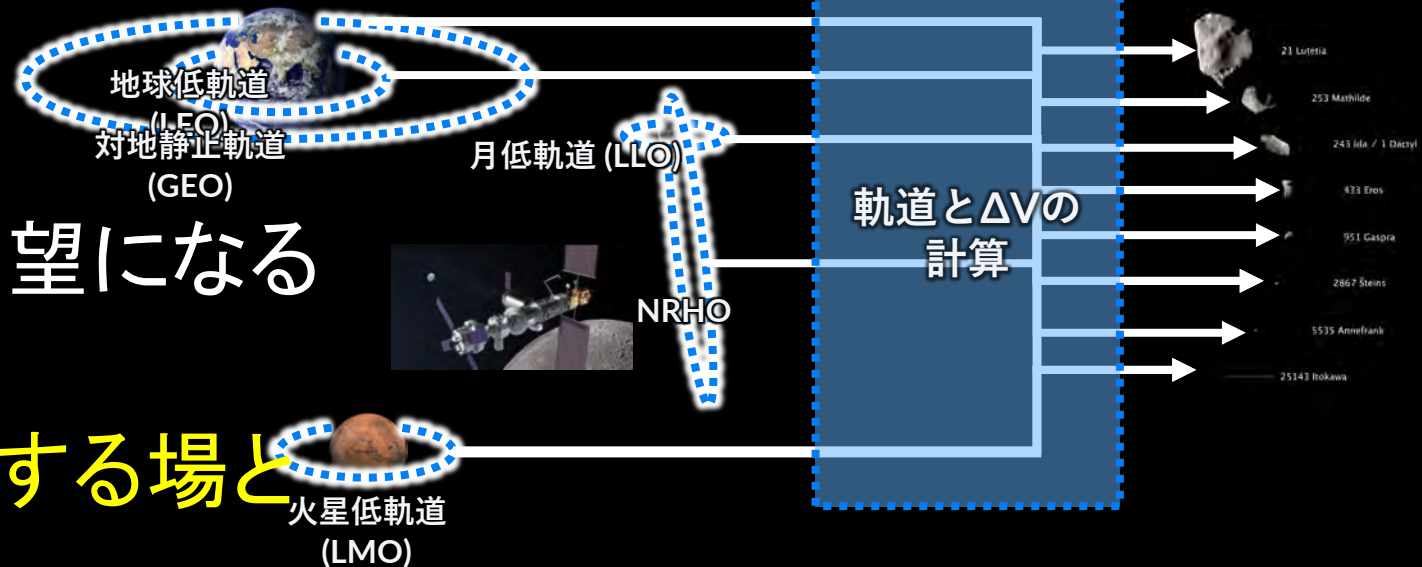
5mm

現在進行中の小惑星探査ミッション

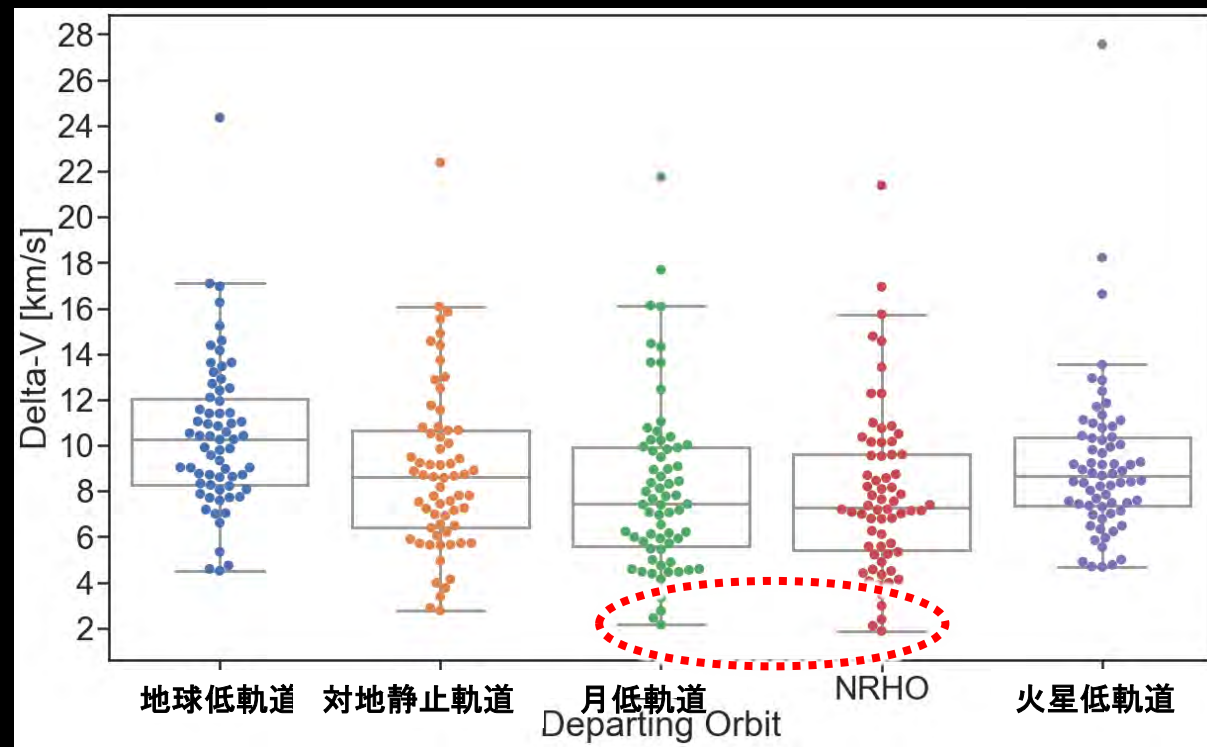
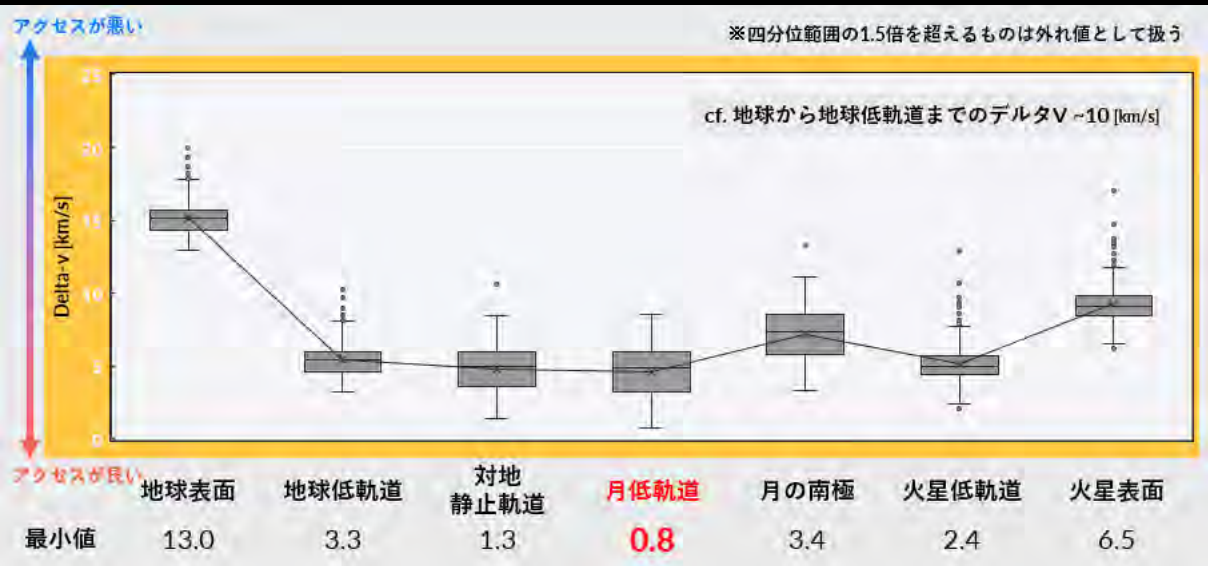
Launch	mission	country	Target body
-	Hayabusa#	JAPAN	1998KY26/2001CC21
-	OSIRIS-APEX	USA	Apophis
Oct. 2021	Lucy	USA	Jupiter's Trojan asteroids
Nov. 2021	DART (Double Asteroid Redirection Test)	USA	Dimorphos, Didymos
Aug. 2022	Psyche	USA	Psyche
2024	DESTINY ⁺	JAPAN	Phaethon
Oct. 2024	Hera	ESA	Dimorphos
2026	MMX	JAPAN	Phobos/Deimos
Mid 2020th	Tianwen-2 sample return	China	Kamo'oailewa
2028	MBR Explorer	UAE	10253Westerwald, 623 Chimaera, 13294 Rockox 2000 VA28, 1998 RC76 etc.

必ず無償で科学データが提供されるのだから、今後の宇宙資源開発はこうした最新の知見を効率よく取り入れることが重要
特にはやぶさシリーズで世界的優位性がある日本の科学者は多くの海外ミッションにも参加しており、こうした情報はそのまま小惑星資源の開発に利用できるはず

小惑星物質の大量利用は、 シスルナ空間の利用が最も有望になる



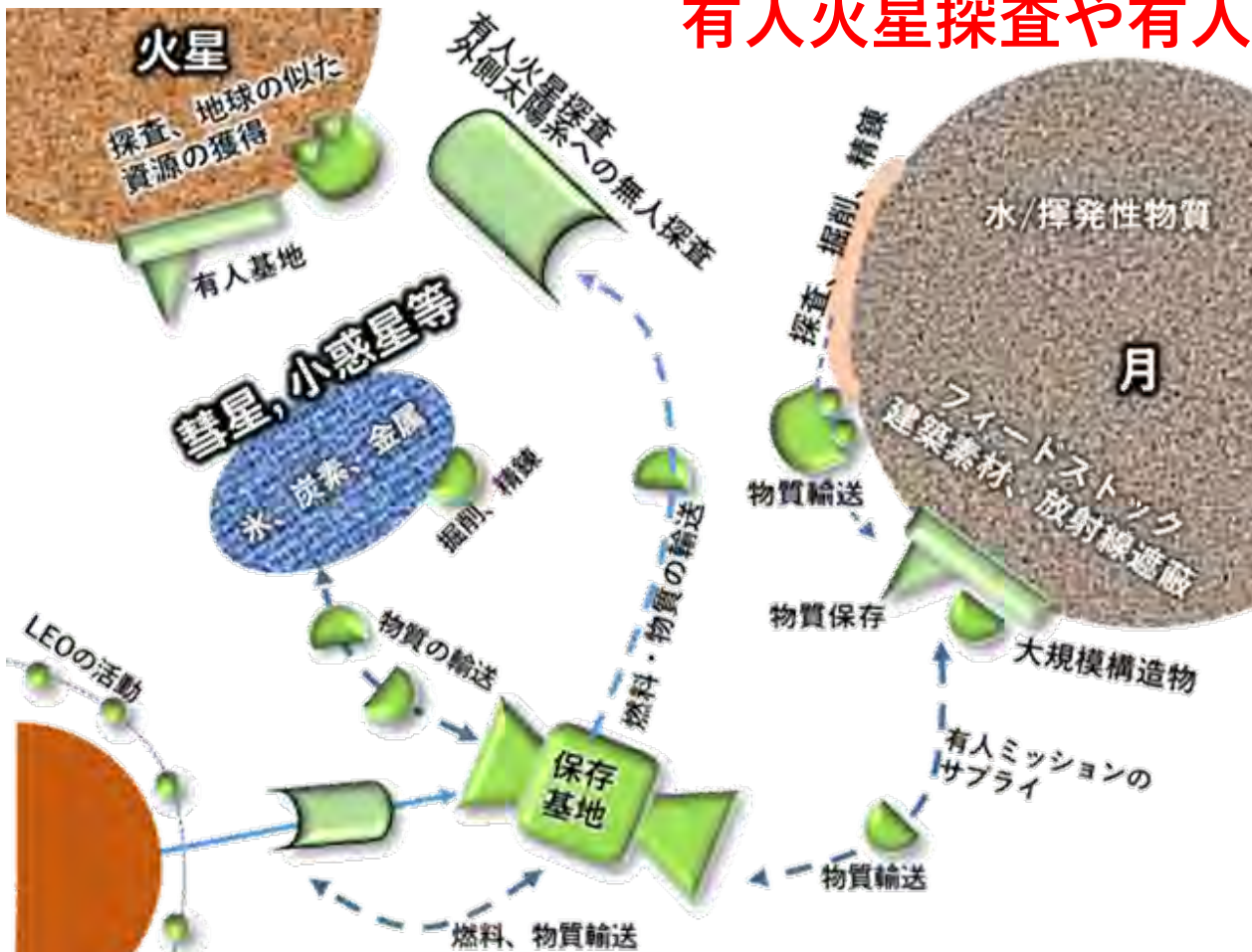
(持ち込み精錬／選鉱／加工する場として最適)



このように月の真価は月以外を見ると見えてくる

地球からの物質供給に依存しない経済圏が構築される Wiley から本を出版しました

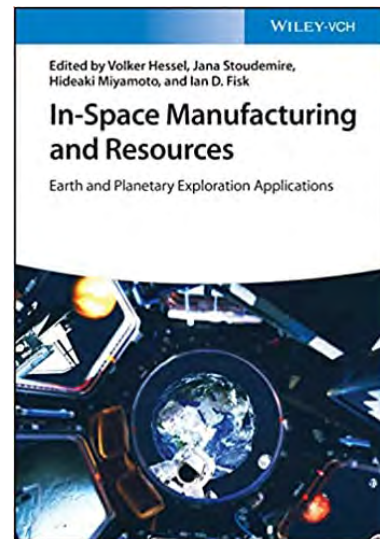
有人火星探査や有人基地建設より巨大な産業へ



宇宙資源を活用した未来像

Miyamoto (2022)

地球は巨大天体 = 脱出のエネルギー損失が非常に大きい



その際の資源とは、

- ・有用である
 - ・入手しやすい
 - ・利用しやすい
- ということ

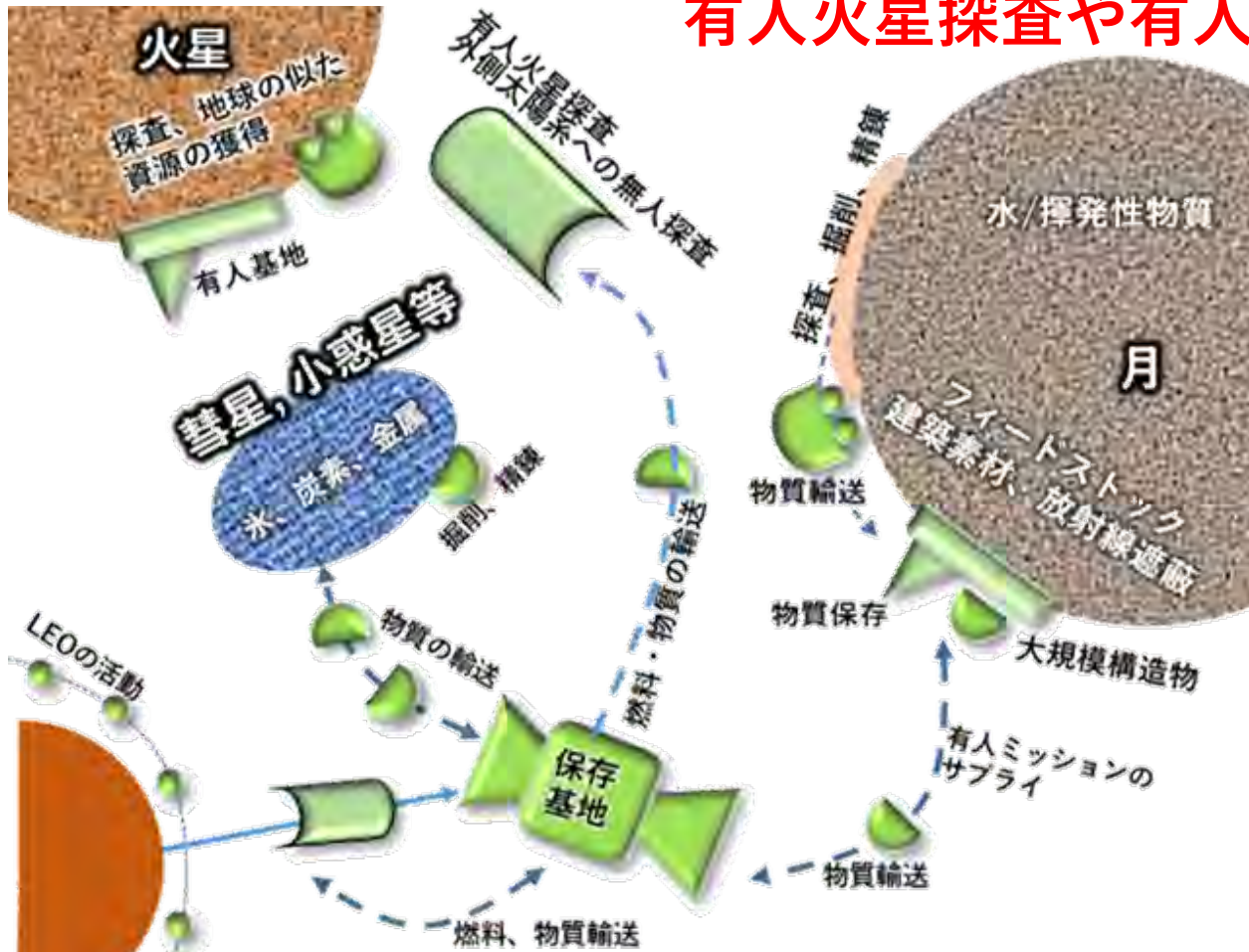


月、小惑星上の
表面で探す
しかない

月の真価は月以外を見ると見えてくる

地球からの物質供給に依存しない経済圏が構築される

有人火星探査や有人基地建設より巨大な産業へ



宇宙資源を活用した未来像

Miyamoto (2022)

月面の特徴

- 近い（時間、通信）→サイエンス、教育、広告にも重要
- 利用しやすい優れた環境がある
 - 広い土地がある→基地展開、広範囲利用が楽
 - 太陽光が豊富で、PV発電が可能
 - 熱環境
 - 重力がある→加工・製造、保存に有利
 - 地下の存在
 - 真空・静穏環境→科学観測、物質分離や高純度化に有利、酸化しない
 - 生物がない→保存、コンタミがない
- 大量の資源がある
 - 粉体が手に入る（レゴリス）→構造材、熱制御
 - 鉄,アルミ,カルシウム,シリコン,チタン,酸素は豊富
 - 硫黄,リン,炭素,窒素,(水素?) も存在

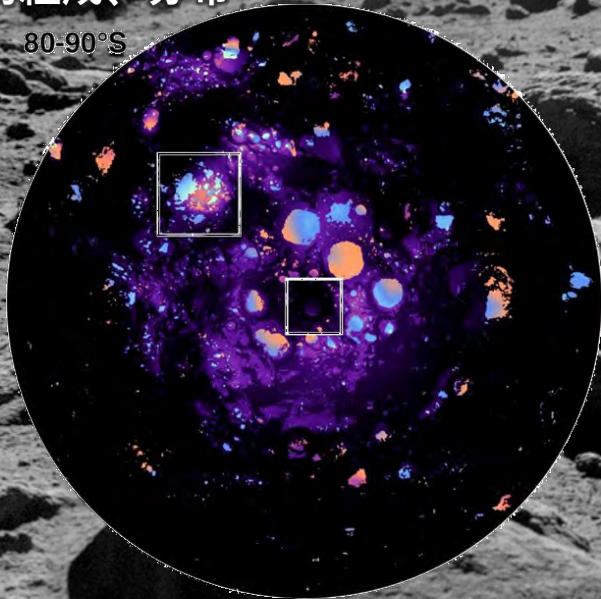
→月の本質的な利便性はフィードストックにあると思う

月開発に向けた新しい科学・工学の動き

月資源の可能性の把握

極域および火砕物のH、他の揮発性成分の存在度、存在形態、水平・深度分布、濃集過程、金属、地殻濃集元素の濃集度、形態、鉱物組成、分布

80-90°S



月環境の把握

放射線環境、表面の帯電状態、プラズマとの関連、太陽風の影響、微小隕石のフラックス、シールド、ダストの帯電、移動・付着、コヒージョン

月活動への準備

レゴリスサイエンス、掘削、採取、トレンチ、敷設、破碎、粉砕、機械特性変化、重力利用プロセッシング、人工物との相互作用、焼結、越夜の電力維持

エネルギー源として有力視されている「水資源」などを
広域探査できれば月探査や経済活動などの持続的な活動
に貢献することになる

→必ず新しいコミュニティが生まれる

今後、サイエンスと開発は同時に進む

資源開発の視点

フィードストックとして重要

- 安定した軌道、地球に近い固体天体である利点は揺るがない
- 有用地殻濃集元素への期待がある(Al、Ti、その他親鉄元素、REE、白金族など)
- 表面構成物の形態や鉱物組成、分布の正確な理解が必要
- 揮発性物質は燃料、溶媒、還元剤で重要、その形態・量の把握が必要

技術獲得の場として重要

- 表面レゴリスの特性把握は月面での移動や人工物の敷設、建築などインフラ整備、資源利用に必須
- 未獲得な必須技術が存在(表面ダスト粒子の挙動や人工物への付着、掘削や土砂採取、人工物との相互作用やスラストによる巻き上げ、越夜の電力維持など)

有人・無人探査で行うこと

サンプリング・地上分析の高度化
安定的に解析することが困難な揮発性成分は、適切なキュレーションが必須(アポロサンプルは、サンプル取得法やその後のハンドリングが必ずしも万全でなかった)

詳細な地質調査が必要

GRS, NS, GCMSでの検出は重要な意味を持つが、これより数段高い空間分解能で調査する必要がある

特定の広域マッピングが必要

特定元素の分布や地域性の確実な把握を、水平方向・鉛直方向共に行うべき

サイエンスの視点

大気の無い天体の表層環境の理解

- 太陽風や地球起源イオンの月面表層へのインプラネーション
- 太陽風相互作用の物理素過程、太陽擾乱に対する応答、表層物質の宇宙風化過程
- サンプル測定・月大気の質量分析で検出された揮発性成分、有機物のPPMレベルでの検出、地域性

鍵となる地質学的特徴の理解

- 地殻構成物の多様性の把握や火成活動の詳細調査確実な年代決定と各年代ごとの進化過程の解明
- 揮発性成分も含めた元素/鉱物濃集機構の解明、中低緯度から極への揮発性成分輸送
- 地質学的コンテクストの理解や複数地点におけるサンプリング

浅部～深部までの内部構造の理解

- コアサイズ、マントル構造、地殻構造とそれぞれの組成
- 地下浅部の詳細な構造、ダスト層の存在、ガーデニングなどレゴリス進化

現在実施中および計画中の(国家機関による)月探査計画

探査機	実施機関	実施(予定)時期	特徴
Tanuri (実施中)	KARI	2022	周回機に高感度カメラを搭載、永久陰領域の氷検出を目指す
Artemis Program (進行中)	NASA	2022, 2025, 2026 2027, 2028, 2029, 2031	月面での持続的な活動と経済圏構築の基盤作りを目指す 有人月周回(2号)と有人着陸(3号以降)を実施
SLIM (実施中)	JAXA	2023	小型月着陸実証機
Chang'E series (進行中)	CNSA	2024, 2026, 2028	着陸機によりサンプルリターン(6号機)、資源探査(7号機)、ISRU の実証(8号機)等を予定
VIPER	NASA	2024	極域の水氷の存在有無の高精度観測と掘削を実施 (資源ビジネスには、この成果の広域展開が必須)
PRIME-1	NASA	2024	掘削と質量分析で氷検出を目指し、この知見をVIPERへ活かす
Oryol	ロスコスモス	2025	有人月周回機
LUPEX	JAXA	2025	極域の水氷の存在有無の高精度観測と掘削を実施 (資源ビジネスには、この成果の広域展開が必須)
TSUKIMI	総務省	2026	テラヘルツ領域のパッシブ観測で輝度温度(と誘電率)を観測 (着陸機の高精度分析結果を月面全面へ展開)
Chandrayaan programme	ISRO	~2028	着陸機によるサンプルリターン計画(4号機)
Luna-Glob	ロスコスモス	2030年代	月周回及び着陸探査

必ず無償で科学データが提供されるのだから、今後の月開発はこうした最新の知見を効率よく取り入れることが重要
特にLUPEXやTSUKIMIなど日本のミッションの情報は遅延なく利用できるはず

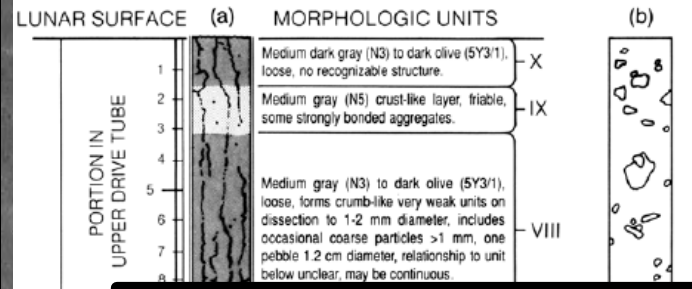
月表層のレゴリスは均質ではない

レゴリス進化は掘削混合（ガーデニング）と被覆（イジェクタ）の繰り返し
岩塊も数多く見つかる（ただしその起源はよくわからないケースが多い）

シャクルトンクレーターに無数にある岩塊

豊の海の新鮮なクレーター

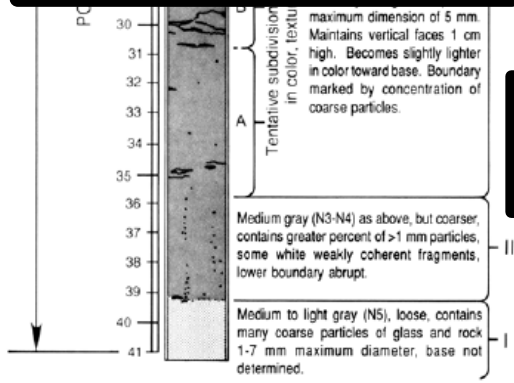
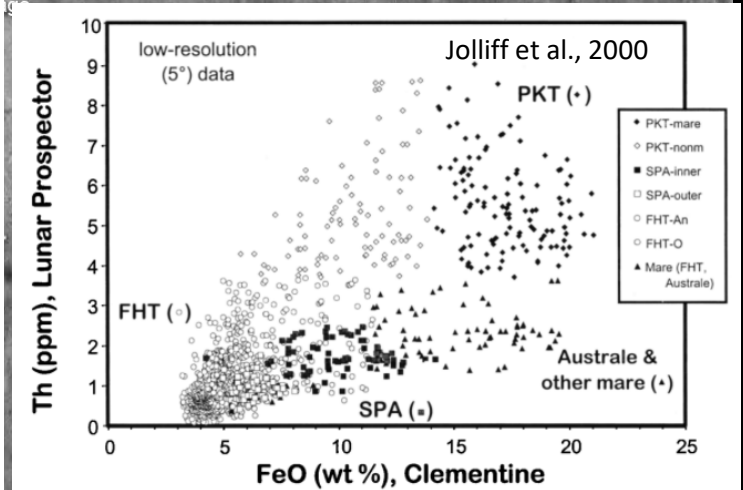
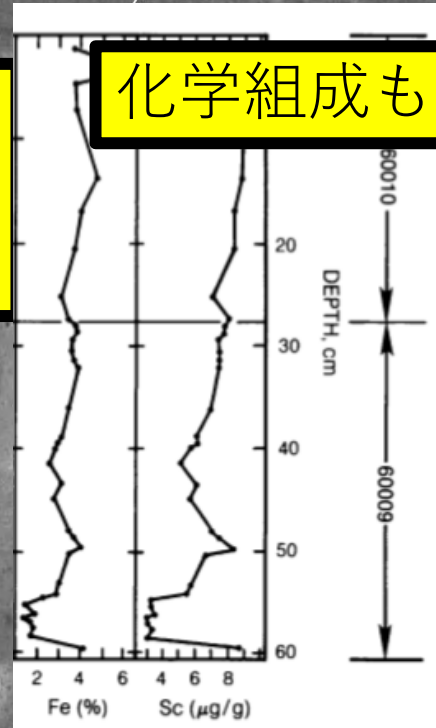
月表層のレゴリスは均質ではない 明瞭な水平・垂直構造を持つ



他地点でも典型的には、
3~4個/m程度の層序学的
ユニットが定義できる

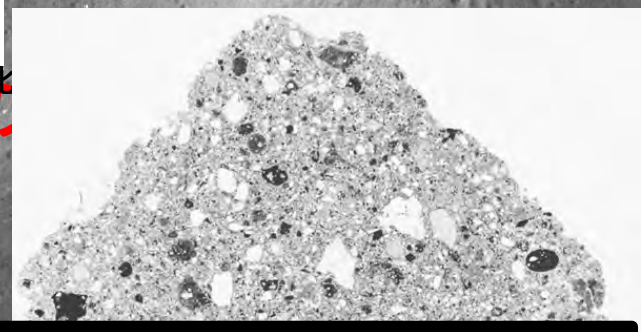
化学組成もユニットごとに変化

約60~600 μ mへ
粒子サイズ変化
(粒子サイズ・分布、
分級度もユニットご
とに変わる)



岩塊も多く
見つかった

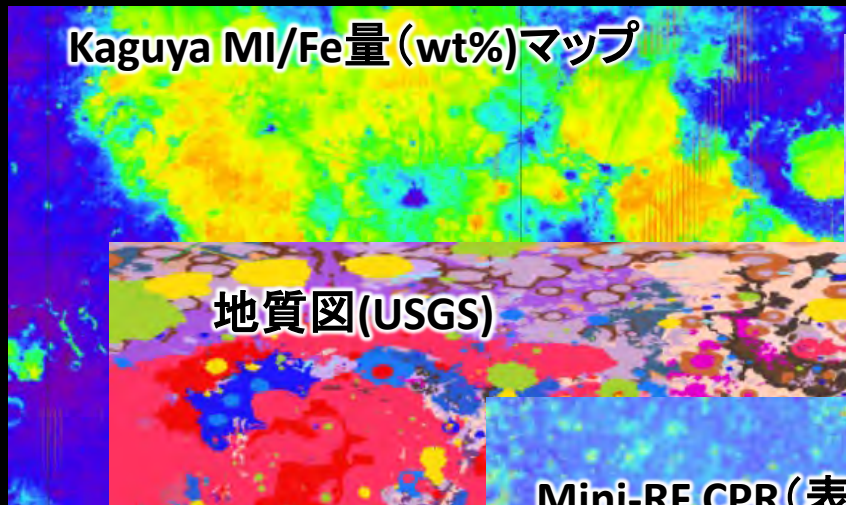
アポロ16号コアサンプルの組成変化
コアサンプルの
取得地点→ ●



岩石、鉱物、ガラスがガラス質のマトリックス中に
存在するような、複数の起源をもつ角礫岩の存在

資源開発には深さ30cmまでが鍵：①ごく表面は豊富な情報量

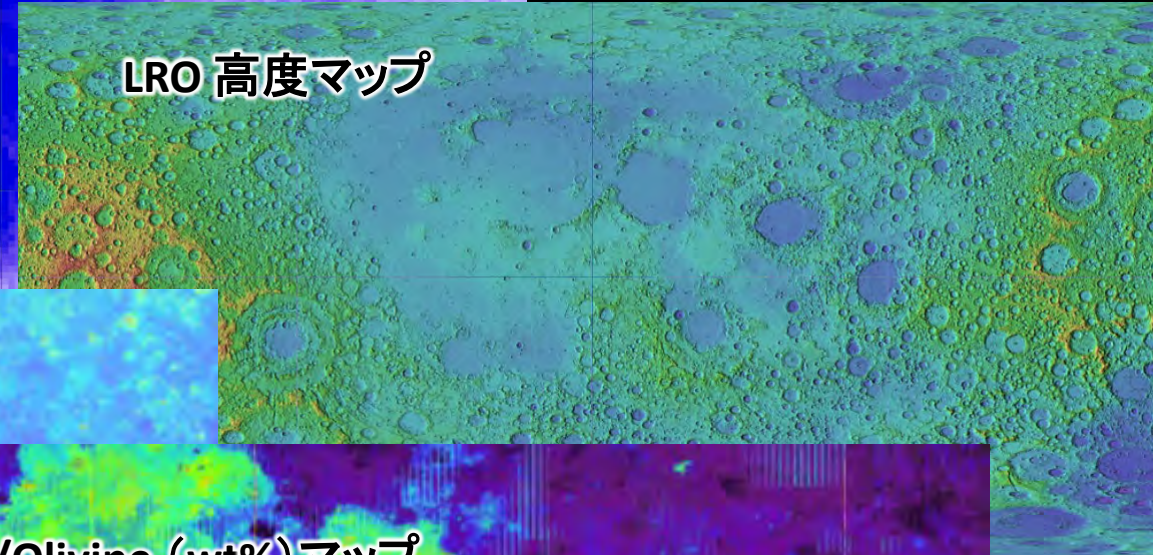
Kaguya MI/Fe量 (wt%) マップ



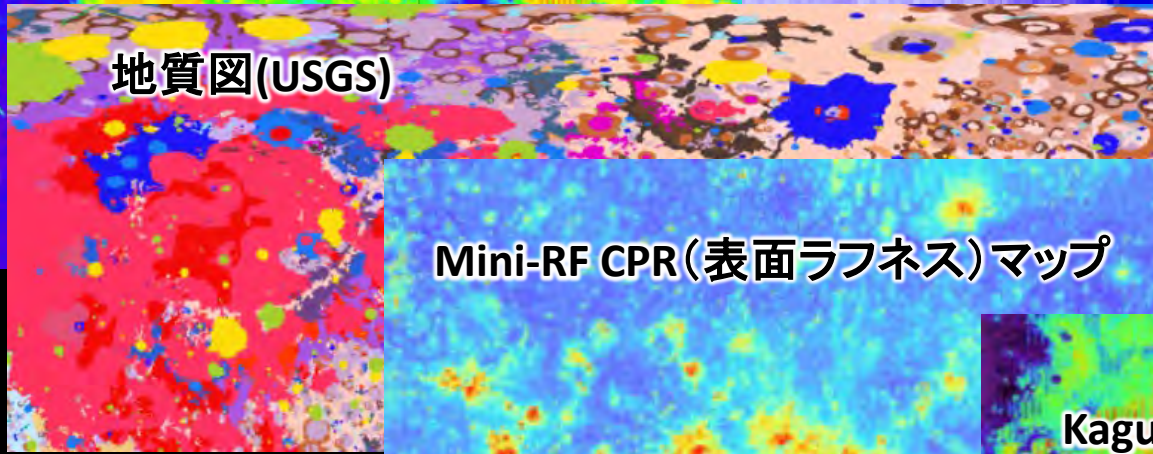
LP GRS/K マップ



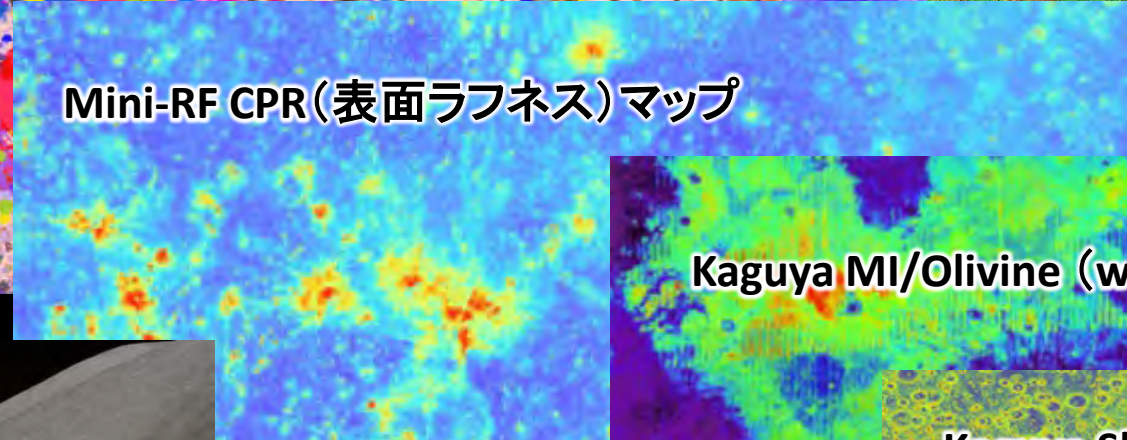
LRO 高度マップ



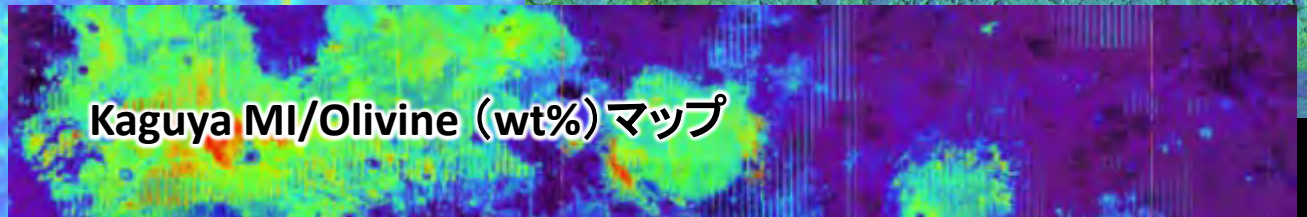
地質図(USGS)



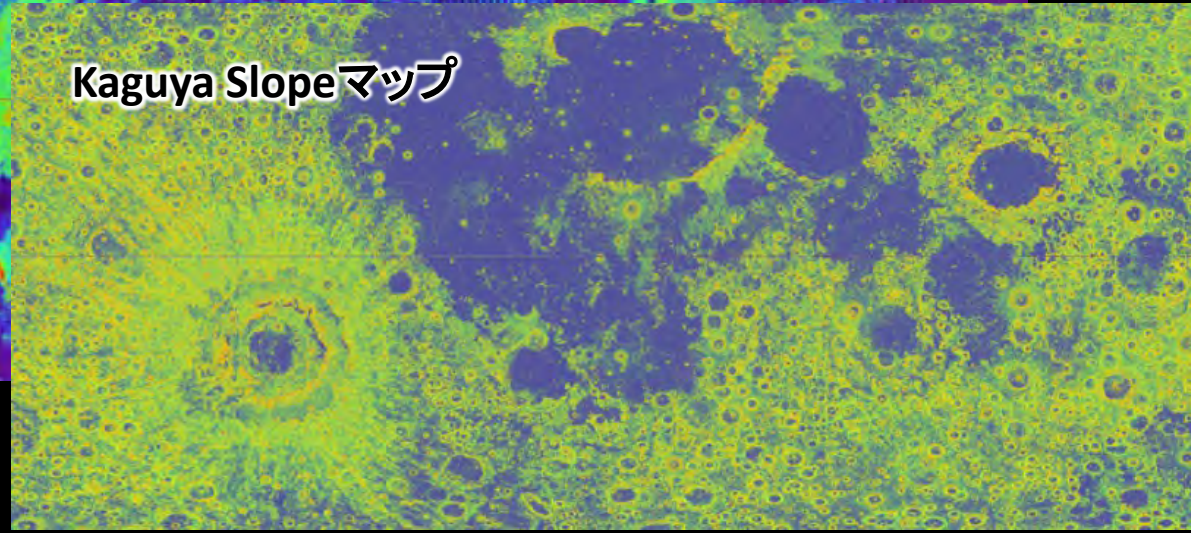
Mini-RF CPR (表面ラフネス) マップ



Kaguya MI/Olivine (wt%) マップ



Kaguya Slope マップ



表面から大量のサンプルが取得されている



Apollo 17/Image from NASA

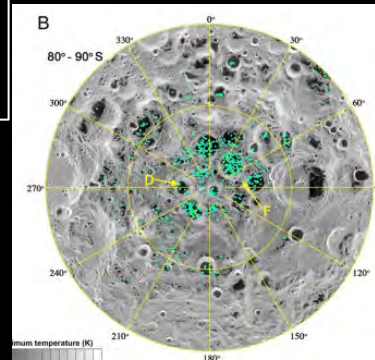
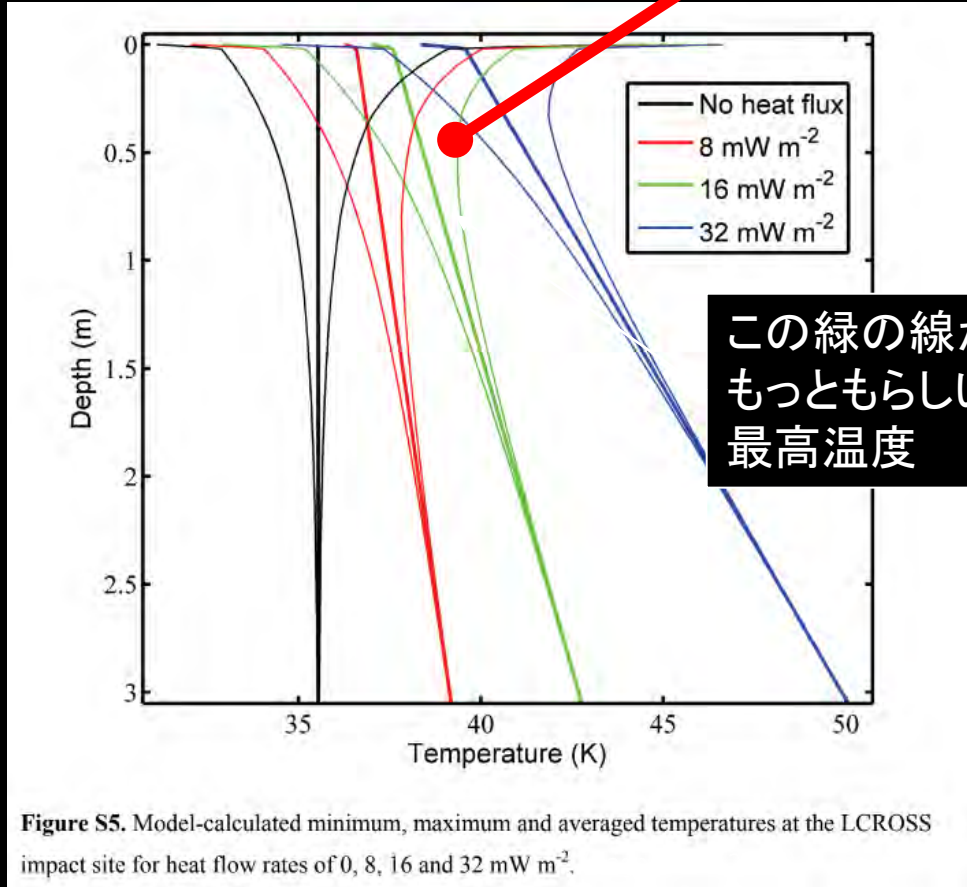
Image from NASA ARES

資源開発には深さ30cmまでが鍵：②有望資源の濃集

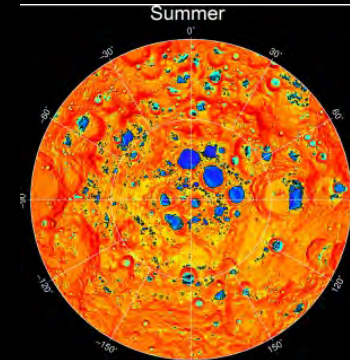
想定される地下の温度構造は、未確定である熱流量値に依存。もっともらしい値(=Apolloの計測)の16mW/m²を想定するならば地下30-50cm程度に最低値

氷の昇華温度は不明(レゴリス物性に依存)だが、大気圧10⁻⁷~10⁰Paを考えると、最大温度最低の場所が最も安定して存在できる領域と考えられる

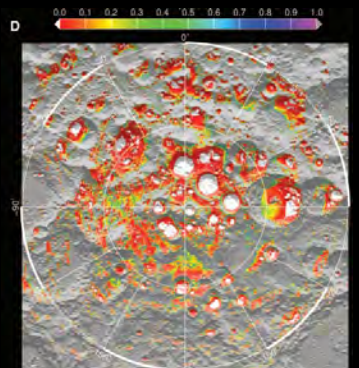
つまり、地下30cm程度が、月のいたるところでもっとも安定に揮発性成分が存在できる場所と考えられる



Liu et al., 2018による水氷領域(反射光によるNIRと他の観測を組み合わせたもの)



Williams et al., 2019による夏の最高温度。左と温度構造の類似は、最高温度が重要な制約条件であることを示す



1mの深度まで考えると、水氷が存在する領域は遥かに広がる
Paige et al. (2010)

期待される揮発性成分を探すなら、地下30cm程度をまず最初に見るべき

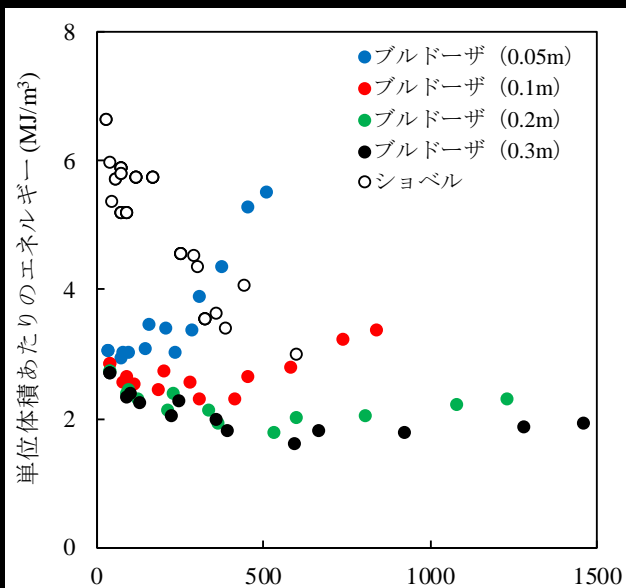
資源開発には深さ30cmまでが鍵：③アクセスの容易さ

30cmよりも深い部分の掘削・収集は、以浅よりも困難になる

Spread of digging depth for roughly the same drawbar pull on the moon

Model	Depth (m)	Required drawbar pull (N)
Gill	<0.05	239
McKyes and Swick and Perumpral	0.15	246
Viking	0.062	239
Balovnev	0.14	239

各手法ごとのアポロの有人ローバ程度の牽引力で1mの幅の掘削バケットで掘削可能な深度の見積もり (Wilkinson & DeGennaro, 2007)



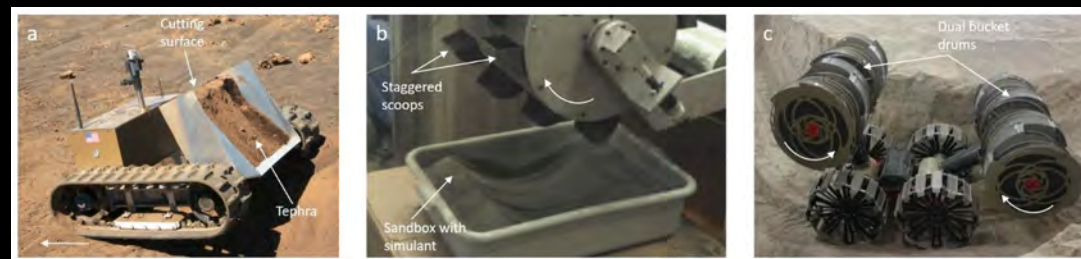
- 掘削深度が浅いと同一分量を用意するのに移動距離が長くなるので、エネルギー的に得ではない
- 掘削深度が深すぎても、資源量の確保が大変でエネルギー的に得をしない

Reported values of continuous excavators (partial systems).

Process	Excavation capability	Depth of single cut	Mass of excavation implement	Power requirements
Bucket wheel	50–150 kg/h	2.5–5 cm	20 kg ^a	<2 W ^b 0.12 W/kg ^c
Bucket drum	1550–2000 kg (continuous) 390–500 kg (batch)	0.32 cm ^d	5.5 kg ^e	3–13.8 W (unloaded) 4.5–36 W (loaded)
Flexible auger	50 kg/h ^f	Not applicable	–	–
Impeller	6–30 kg/h	–	–	~115–130 W

^a only bucket wheel and boom.
^b for turning bucket and excavating material at 150 kg/h.
^c specific power average without auger that is required to transport material further.
^d per cut; diameter of drum as theoretical limit for excavation depth.
^e only bucket drum.
^f with 2 cm auger diameter.

検討のある掘削機の掘削能力 (Just et al., 2020)



表面の切削が便利である可能性がある

資源開発には深さ30cmまでが鍵：④広域調査がなんとか可能

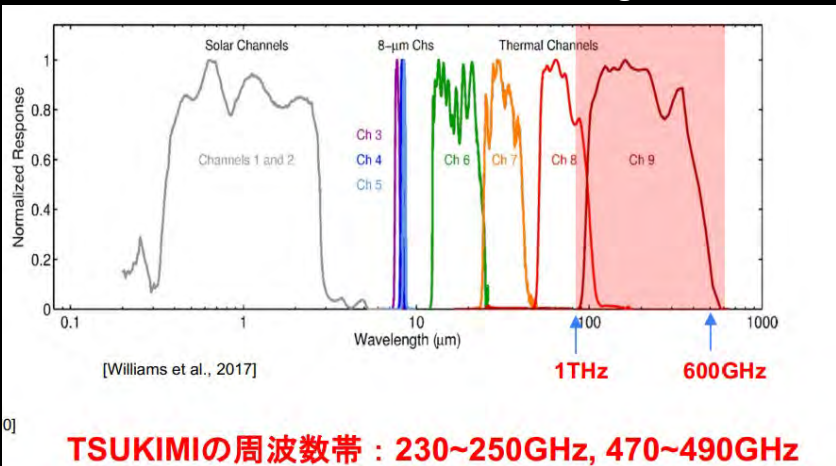
そもそもリモートである程度の深さまで簡便に得られる物性値は限られる(磁場、重力、ガンマ線、中性子線、熱慣性、誘電率など)。その中で30cm程度までの輝度温度／熱慣性や電波反射能は比較的測定しやすい

→ここから氷、金属の分布を把握する、というのがTSUKIMI計画

電波での可探深度(Chang'eの例);

- 3.0 GHz: 5.0 - 6.0 m
- 7.8 GHz : 2.0 m
- 19.35 GHz : 1.0 m
- 37.0 GHz : 0.5 m

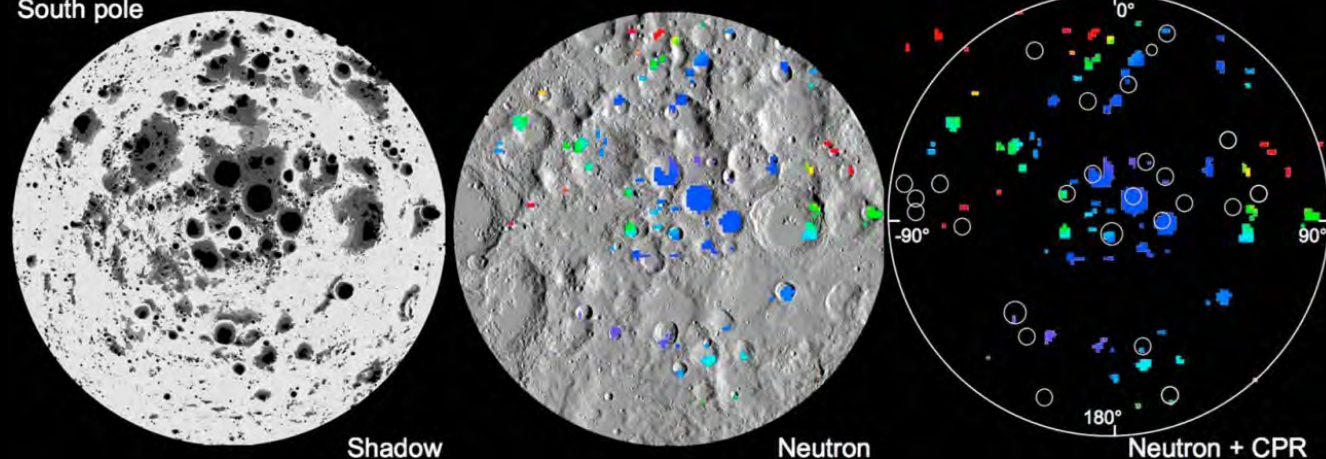
Yang et al., 2019, "Study of Chang'E-2 Microwave Radiometer Data in the Lunar Polar Region"



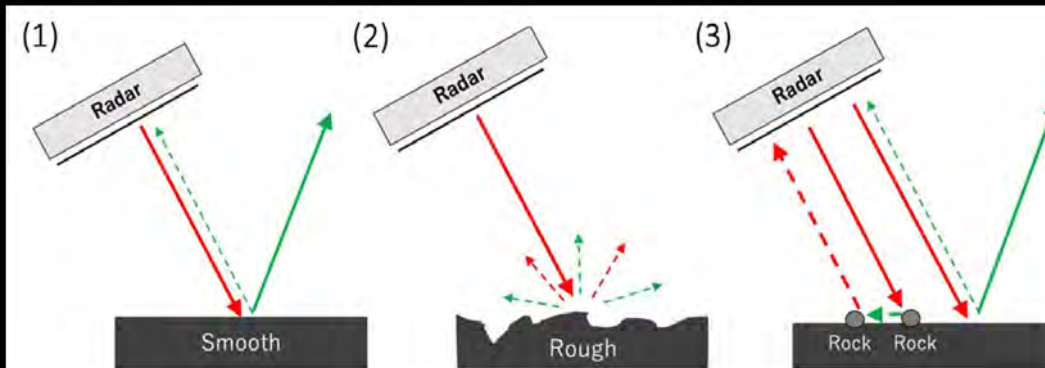
TSUKIMIの周波数帯：230~250GHz, 470~490GHz

Mini-RFによる観測

South pole



南極域における永久影、LENDによる高WEH濃度マップ、高CPRマップ [Spudis et al., 2013]



ただし解析は困難で表面状態の解釈に大きく依存する



こうして考えると、掘削による集中探査と、オービターによる
広域探査をうまく組み合わせて調査する必要がある

また人類に必要な分量はそれほど多くない
→効率的な高分解能の探査が必要になる



嵐の大洋
Apollo 12号着陸地点

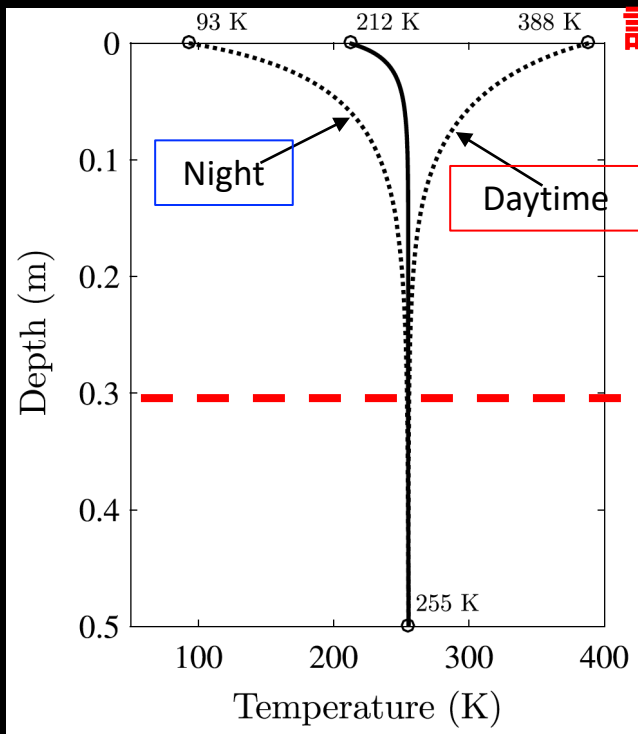


資源開発には深さ30cmまでが鍵：⑤小型計画でも探査可能

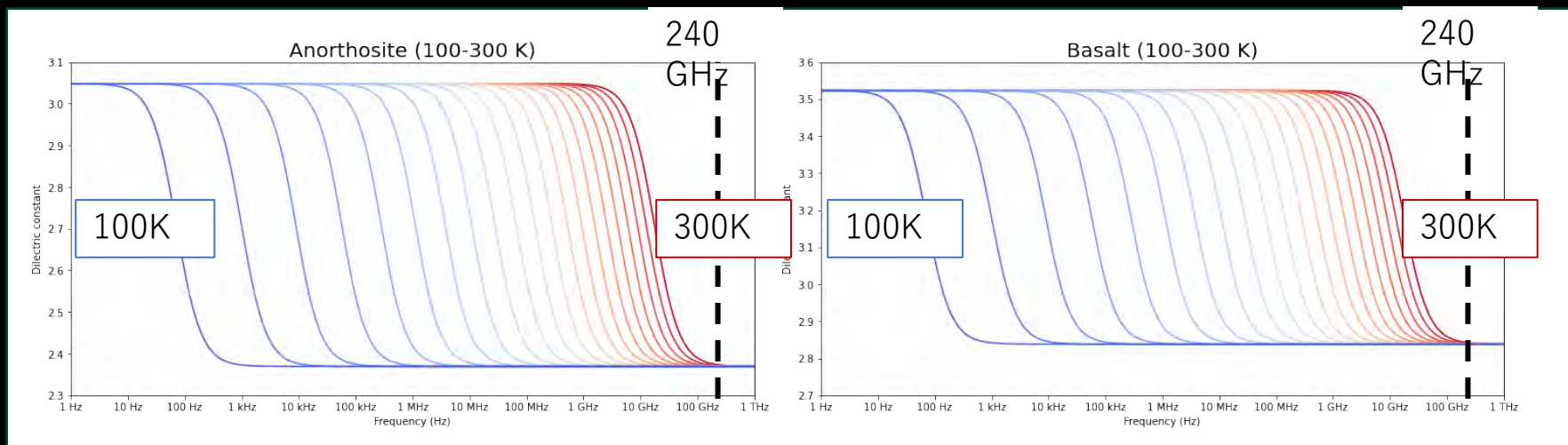
30cm程度までの誘電率は測定しやすい→利用時に重要な組成／かさ密度の情報

- ちょうど30cm程度到達する周波数帯での観測が良い(これより深くても浅くても、余計な情報が入る)
- 月面の誘電率で注意しなければならないのは、温度依存性
- テラヘルツ帯であればこの温度依存性が無い利点があるが、この波長域は未知な部分も多い

温度変化が大きすぎ、普通の電波では誘電率温度依存性が卓越してしまう



(Hayne et al., 2017)

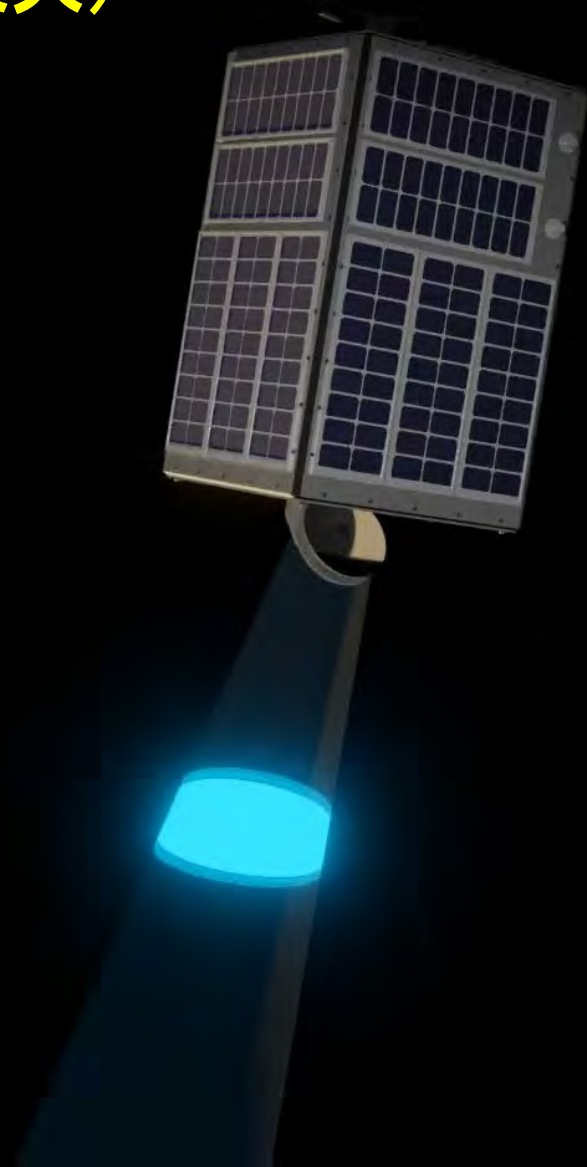


テラヘルツ帯では誘電率の温度依存性がおそらく無い(実験的に検証中)

テラヘルツ帯であれば余計な情報が入らないため、高精度の誘電率測定が可能になると期待できる

→ここから氷、金属の分布を把握する、というのがTSUKIMI計画

TSUKIMI計画(テラヘルツ帯での輝度温度マッピング)
計画全体のPI: 笠井康子(東工大/総務省)
サイエンスPI: 宮本英昭(東大)





LUPEXI計画（ローバによる
直接掘削・高精度分析）



2025年・26年に大きく進展するかもしれない

月極域探査機 LUPEX

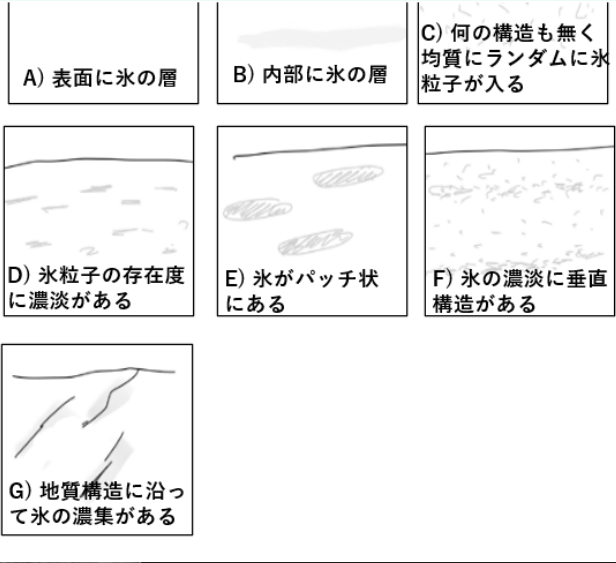
資源開発には深さ30cmまでが鍵：まとめ

水平方向には広域を平滑化し、一方で垂直方向には超高精度で「特定の深度まで」に限った組成・濃度情報がまず最重要である

水資源はさまざまな存在形態がありうるが探すなら最高到達温度が最低な地下30cmが良い

低濃度の氷でも、金属でも対応でき小型・柔軟な計測が必須

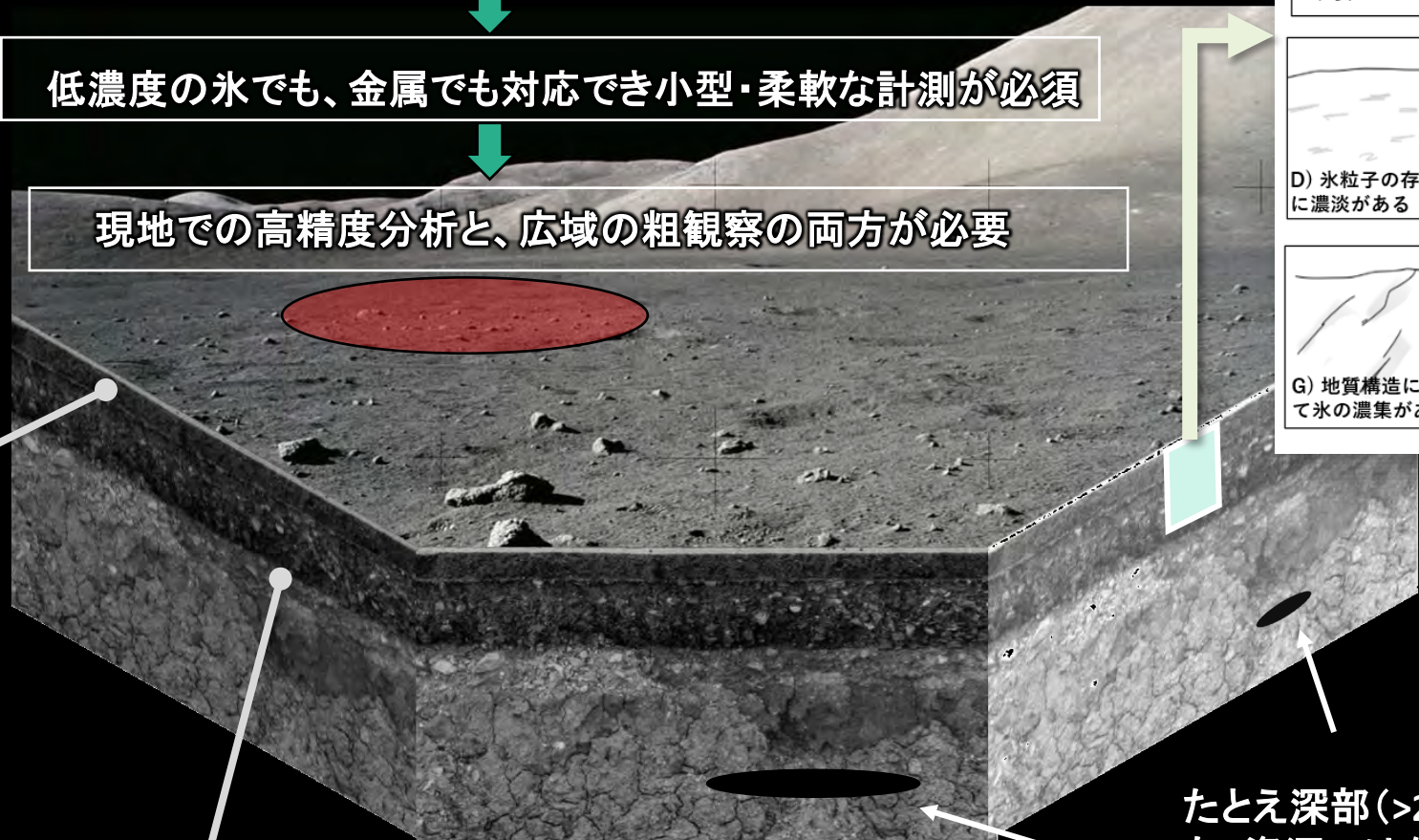
現地での高精度分析と、広域の粗観察の両方が必要



ごく浅い場所(30cm程度)に資源があれば、切削で済むため、極めて有望。

有用物の決定／発見と利用方法は開発・利用者と同時に考えなければわからない

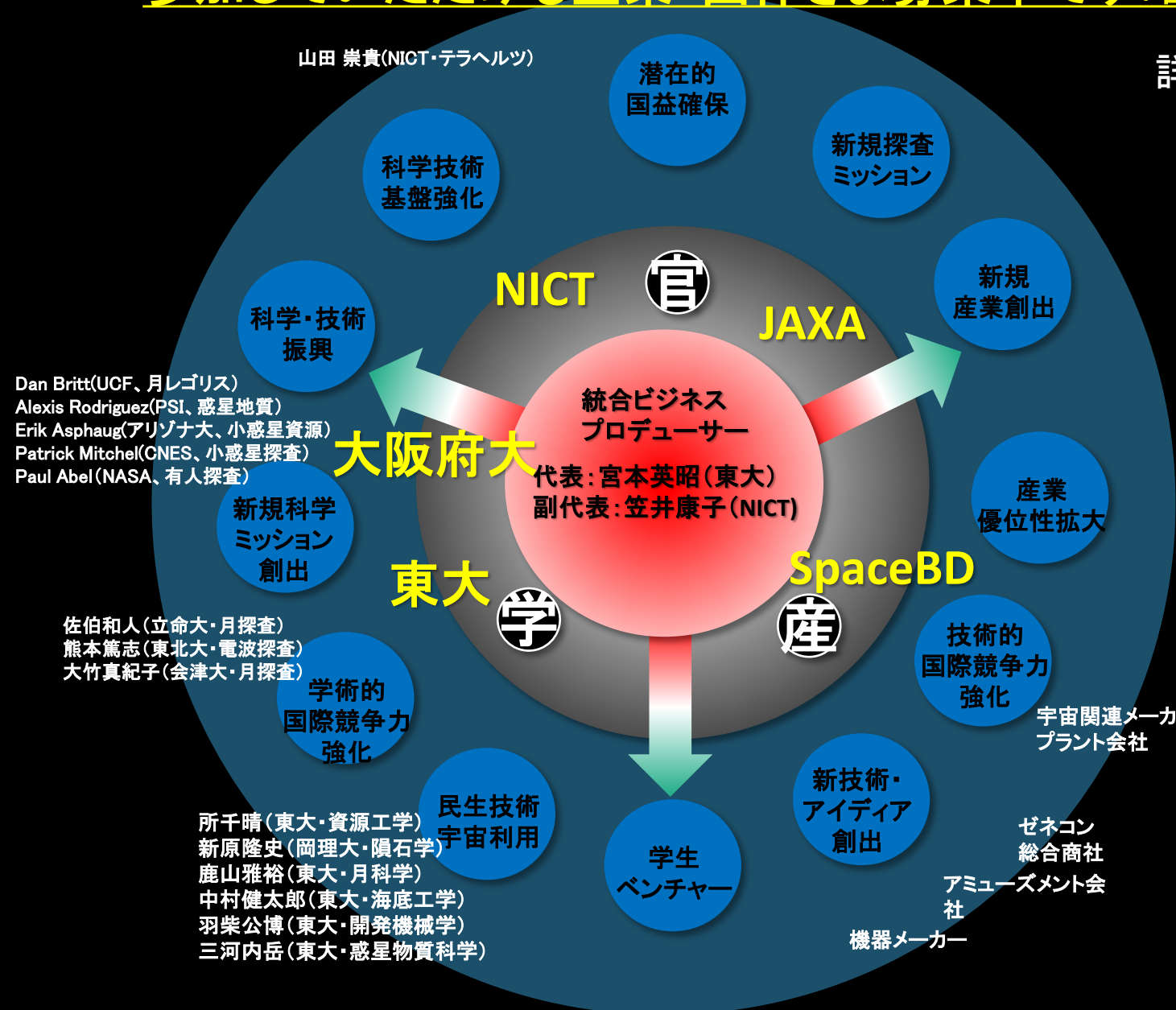
たとえ深部(>2m)に水があっても、資源ではないかもしれない(アポロで有人でも、レゴリスは固く掘れなかった)



TSUKIMI計画に関連した月科学・月資源工学推進コンソーシアムのご案内

参加していただける企業・団体さま募集中です：宮本(hm@sys.t.u-tokyo.ac.jp)までお問合せください

詳しくは <https://www.tsukimi.one/> へ

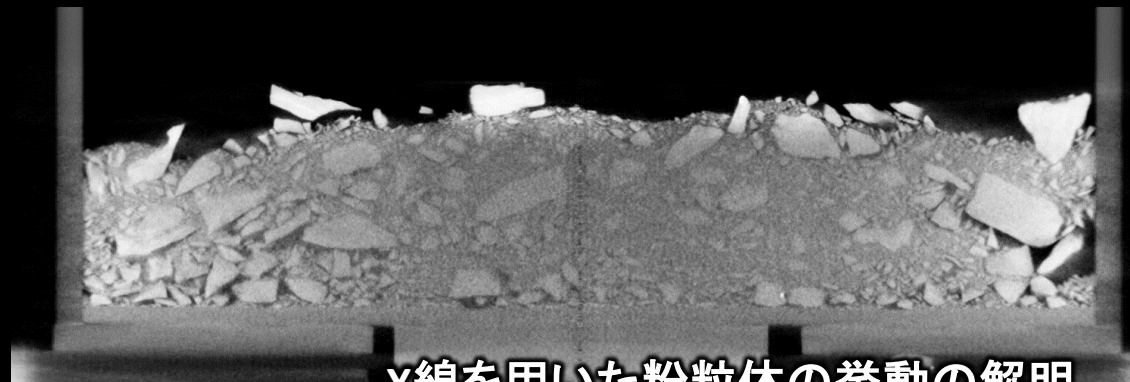


- 趣旨：情報共有とアイデア発掘から月の科学・月の資源工学を推進、大小さまざまな月ビジネス群の創出
- 参加資格：趣旨へ賛同した法人、個人。**無償です**
- 拠点：宇宙ミュージアムTeNQ内に設置(現在は東京大学内)
- 活動：定期会合の開催と情報交換

TSUKIMIの利用ををベースとして国際的な連携グループに変貌中

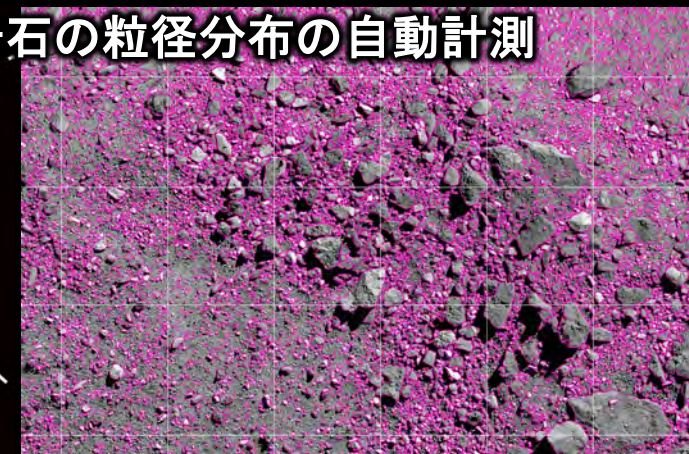
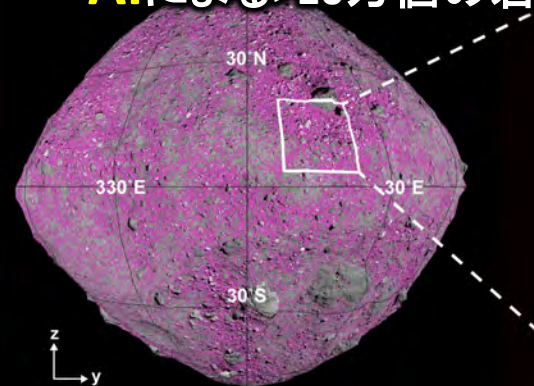
産学連携による粉体解析

S-Booster 2022
宇宙を活用したビジネス・アイデアコンテスト
最終選抜会 Final Round
S Boosterで審査員特別賞



X線を用いた粉粒体の挙動の解明
特許出願済み(特願2023-020433)

AIによる>10万個の岩石の粒径分布の自動計測



- ベルトコンベア上の岩石を約3秒間隔で計測
- 5万平米のドローン画像を10分ほどで自動解析

アデレード大学・東京ドームを結ぶ 国際月面ローバイイベント



東大・駒場祭での一般向けイベント



SPACE Media

HOME NEW CATEGORY RANKING

「TeNQリサーチセンター特別イベント『宇宙資源探査のこれから』」が2023年3月25日に開催

公開日: 2023年03月20日

月夜、火星の、宇宙の、これからの宇宙資源探査を盛り上げよう！

東京ドームシティ内にある宇宙テラリアム(TeNQリサーチセンター)では2023年3月25日、「TeNQリサーチセンター特別イベント『宇宙資源探査のこれから』」を開催されます。会場では、「TeNQリサーチセンター」内に広がる宇宙テラリアム「未来を創る空間」を満喫しながら、宇宙の魅力を伝えるイベントを開催いたします。また、会場では最新の宇宙資源探査の現状や今後の展望について、最新の宇宙資源探査計画についての特集イベントも開催いたします。

開催日時
2023年3月25日(土) 13:00~15:00

会場
東京ドームシティ内、宇宙テラリアム(TeNQリサーチセンター)

TeNQ 特別イベント

宇宙資源探査のこれから

2023.03.25 SAT 13:00

Part1 講演会 月資源探査計画TSUKIMIとは
Part2 ローバーを操作してみよう！
Part3 トークイベント DigitalBlast Cafe
宇宙ステーションを基にした資源探査の未来

会場: 東京ドーム、サイエンスシアター

Artemis III

コンソーシアム内での議論から、
アルテミス3への機器提案
(JAXA A3DI支援公募で唯一採択)

Lunar Dielectric Analyzer (LDA)

米国の民間企業による小惑星資源探査計画・ペイロードへ採択

Surface Dielectric Analyzer (SDA)

The first dielectric constant sensor on asteroids

Overview

We propose the Surface Dielectric Analyzer (SDA) to study the dielectric property (permittivity) of asteroid regolith. The permittivity is a function of the chemical composition and the packing density, which means that the SDA can estimate the chemical composition and the packing density, depending on the availability of other information. Any type of soil (from carbon- and volatile-rich comets to completely dry basaltic soils) can be a good target for the SDA because it is a simple and robust instrument which measures the permittivity using a resonator, a well-established method for estimating the permittivity of soils on Earth. Multiple measurements at different temperatures can be used to estimate the ice content if present. The small heater heats the surface soil and partially melts or releases volatiles that can be also monitored by the SDA.

Specifications at a Glance

Mass	350g
Size	8 cm x 11 cm x 4 cm
Power consumption	3W at measurement (without the heater)
Operating temperature	-70 ~ 80 °C
Data amount	20K-200K Byte

Science Objectives

1. Directly measure the permittivity of the regolith of a small body.
2. Estimate the chemical composition and the packing density of the regolith from the permittivity.
3. Determine the amount of volatiles from the time-dependent permittivity measurement.
4. Thermally "excavate" volatiles (including ice) and monitor the excavation by observing the changes in the permittivity.

Images of the current configuration



High Frontier

Mission ConOps for 'High Frontier'

sep 4, 2023 • 3 min read

Ascent

Ascent

TAG

Sun Line

Descent

Imaging

Asteroid
Diameter

1-10km from Target

Artemis III will build on the crewed Artemis II flight test adding new capabilities with the human landing system and advanced spacesuits to send the first humans to explore the lunar South Pole region.

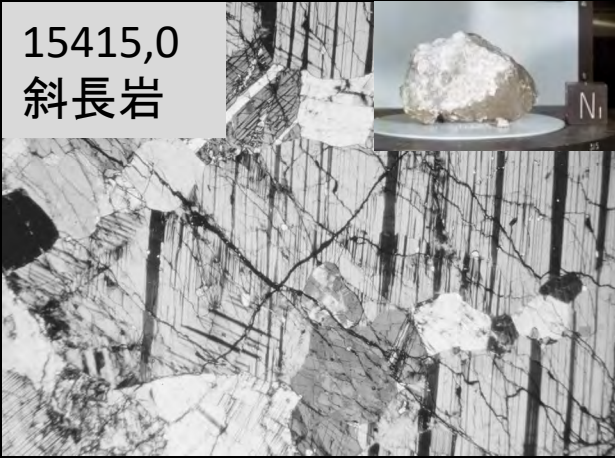
ACTIVE MISSION

Image from NASA.GOV

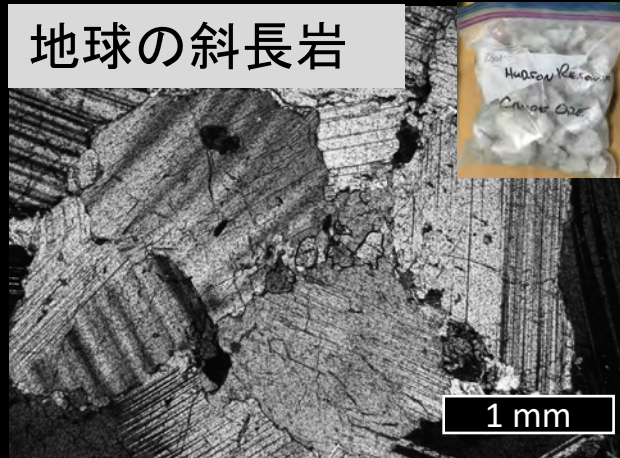
東京大学は宇宙資源の研究に関連し模擬土壌(シミュラント)を製造しています

リターンサンプルや隕石の岩石学的知見と地球岩石の特徴組織の理解が必要

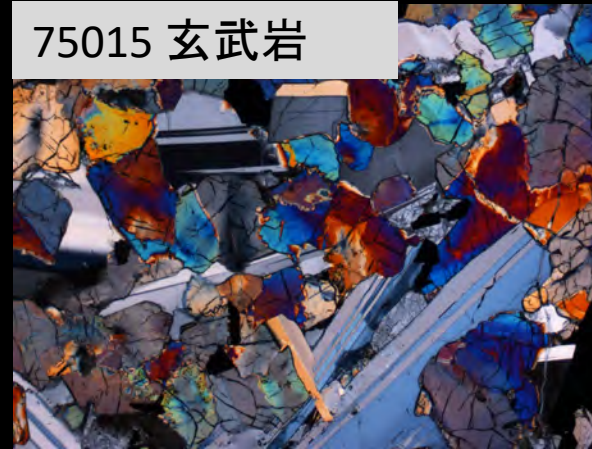
15415,0
斜長岩



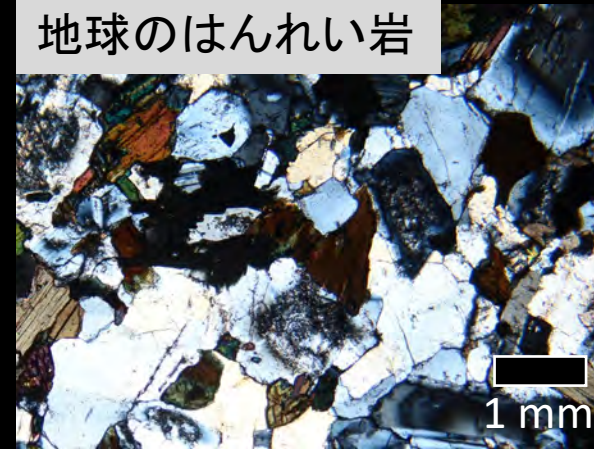
地球の斜長岩



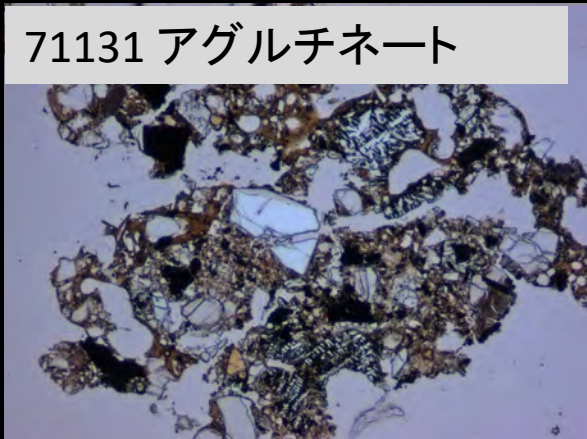
75015 玄武岩



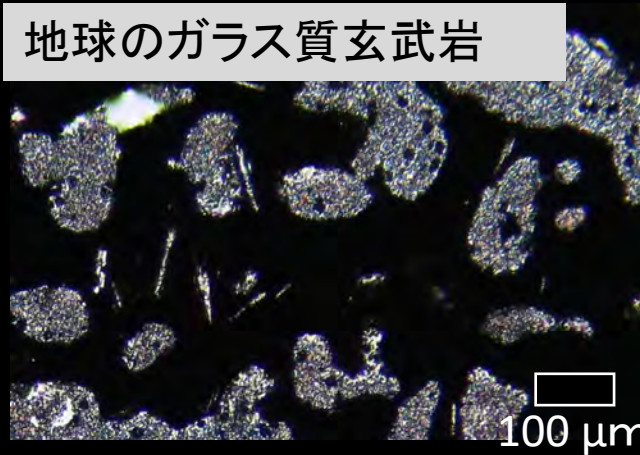
地球のはんれい岩



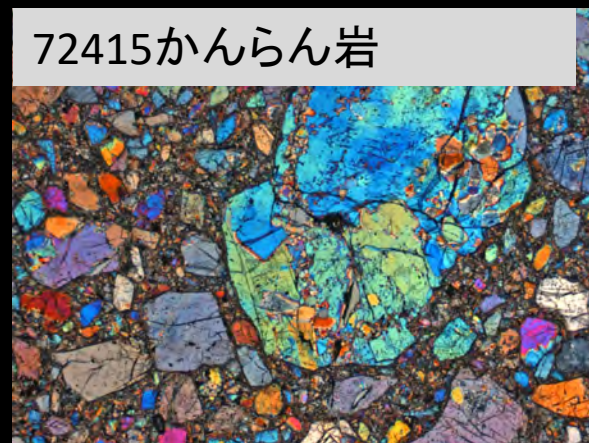
71131 アグルチネート



地球のガラス質玄武岩



72415 かんらん岩



地球のかんらん岩



ストレージと加工は郊外の実験場を利用

東大工学部
柿岡研究施設

濡れて困るもの、作業用具
等は、鉄道コンテナ(中古)
に保存



宿舎はシャワーが
使えるのが便利

道路横にトンバックがおけるので、人力での
上げ下げの必要が無い



塵やゴミの出る仕事、コンタミなく乾燥させたい
ときは、コンクリ土台を利用

精密なシミュラントに必要な細かい破碎・調合は学内実験室で実施

@本郷Campus・工学部システム創成学専攻＝旧資源工学科の資産を利用

大型装置(岩石工作室)

関連する技術職員3人で管理



岩石処理・保管室

技術職員1人で管理



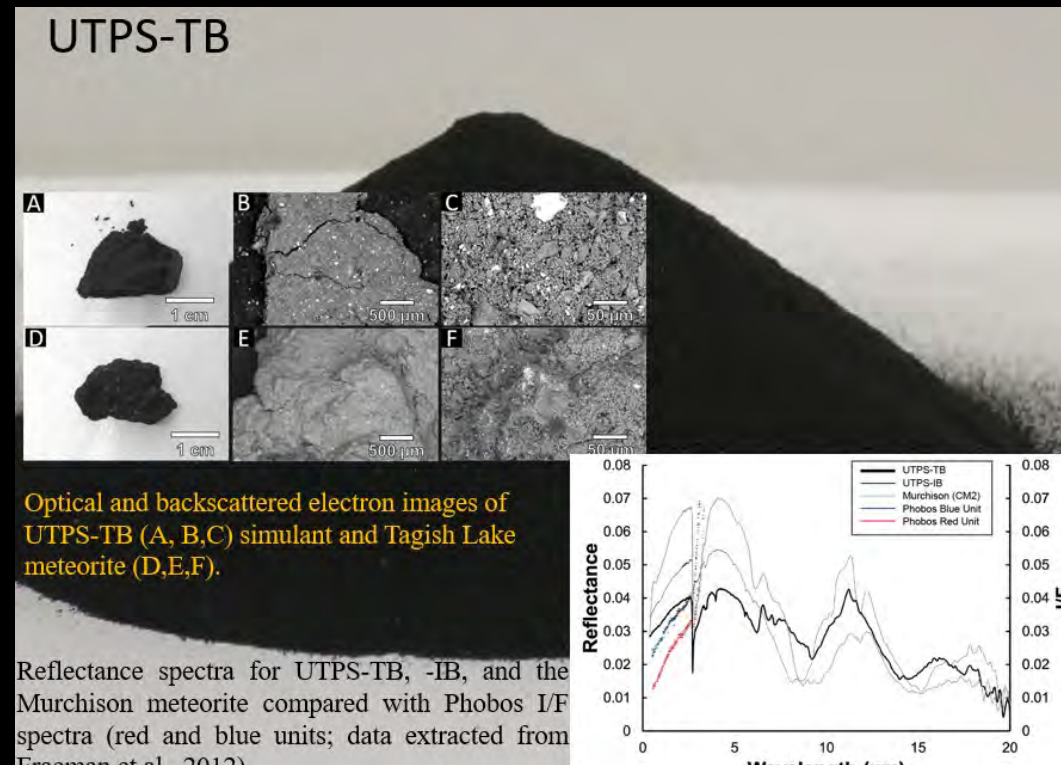
実験室

技術職員1人で管理



フォボスシミュラントはMMX、月シミュラントはLUPEXの探査チームで利用

MMX用のフォボスシミュラントは、精密版のほかにハンドリングが簡単で極安価な単純版を準備した。
DLR、CNES等でも広く使われている



Miyamoto et al., EPS, 2022; Miyamoto and Niihara, 2020他

まとめ

- 人類は資源枯渇と環境エネルギー問題により、長期的には必ず地球外物質の利用に行きくが、これはすぐには実現しない
- まずは地球外資源のその場利用と地球外経済圏の発展がカギ
- 小惑星資源の利用は科学的に合理的である
- 月は大規模なインフラの展開やストックパイルとして魅力的である
- 月・小惑星は多様なサイエンスの現場で急速に進歩している
- こうした科学探査で生まれる最先端の知見を遅延なく活用することは、合理的な月・小惑星開発の鍵(しかも日本に優位性がある)