

宇宙資源に関する最新動向について(東京大学・宮本英昭)

2025/7/15

資源は経済性の議論：需要により考え方が異なる

我が国は以下のどちらにも対応できる
文脈次第でどちらの側面も重要になる

国家的な判断を重視 (タイミング、国際性、科学)

国際的・政治的判断による大規模活動
(月面有人基地、火星有人活動)
大規模な科学的調査活動
(月面有人探査、火星探査、木星系・土星系探査)

需要の想定が大きくなる
全て地上から搬入より安価なら良く、
多少無理やりでよい→ISRUの文脈
制度的には比較的問題が少ない特徴

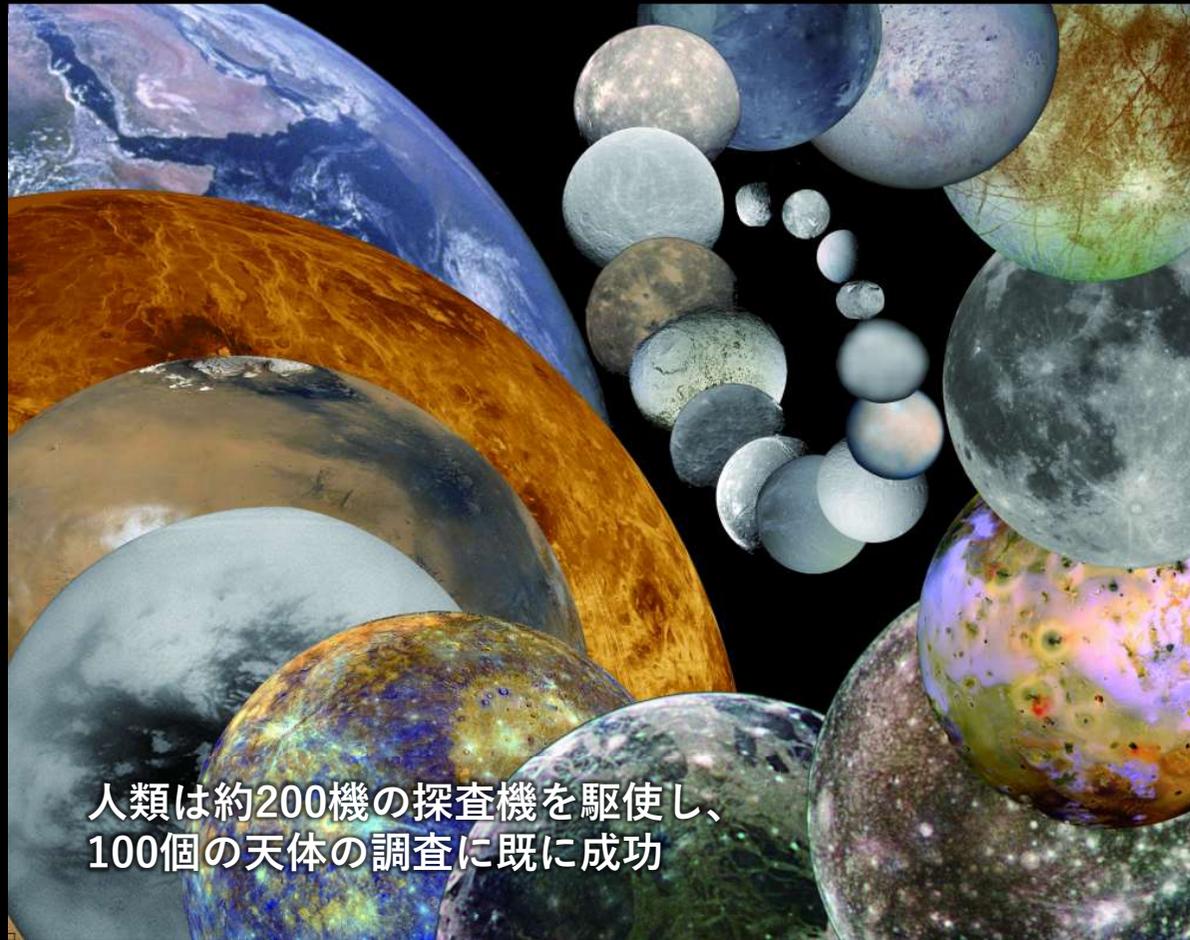
科学技術的合理性のみ (民間活動はこちら?)

安価で活動拡大に貢献するものが重視される
(商業的合理性、付加価値)
革新的イノベーションの芽はこちら
(インターネット、スマホ、AIと似ている)
需要は無く小規模の成功で需要発生
その後の改良・最適化で爆発的増加
偶発的発見、巧みな合理性発見が鍵
制度的には問題が多い

有用物をどう抽出し、どう利用するか、まで検討することで何を探査・収集すべきかわかる。その後、探査・収集・抽出・貯蔵・利用の検討を何度も回して初めて「何が資源と呼べるのか」が判明する



背景: 太陽系「全体」の物質分布は、かなり理解が進んだ



人類は約200機の探査機を駆使し、
100個の天体の調査に既に成功

地球の表面はO、Si、Al、Fe、Ca、Na、K、Mgでほぼ99%
太陽系全体は主にH、He、C、N、O、Ne、Mg、Si、S、Fe、Ni
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

より単純な系である小惑星には金属の塊も

月は熱しか無く重力で分離してしまうため、
地球の火山程度の鉱物種程度で形成されており、
地球で考えるような豊富な資源は存在しない

地球には太陽系で最大の鉱物種（5000種）
これは熱、水、生物による
次に多いのが火星（熱、水、生物？）

より極端な熱進化を経験した衛星には、
炭化水素の海や硫黄の山があることも

国家的な動向：特に米国のNASAの動きが重要

主な駆動源はアルテミス計画 (2017~ 10兆円規模、米国主導、締結国は>50か国)



月へ有人飛行を実施 A1/2022-A2/2025

この「資源利用」とは：

月探査と資源利用のデモ A3/2026 A4 2028

A5/2030 A6 2031 A7 2032

月面開発

トランプ政権ではA3までは確実にやるが、その先は不透明
(大統領のFY2026案では、Artemis III以降のGatewayへの予算配分を打ち切る方針であったが、議会では追加予算の確保が認められている)

こうして火星有人につなげるとしていた



商用の水・酸素・金属

- m 単位で資源調査
- 100 ~ 1000 t/年 の生産



生命維持・食料生産用物資

- 水、肥料、CO2他、育成支援
- 生産区画、処理システム
- 生命維持、有人活動の消耗品

建設、エネルギー原料生成

- 建設用原料 100-1000 t
- 10 ~ 100 トン金属、結合剤他
- 数mWのエネルギー生成と貯蔵
- リサイクル、再利用

輸送・貯蔵用の物資

- 30 ~ 60 t/機程度を月から輸送
- 数百トン/年 程度を月から輸送
- 100 トン/年 程度を火星輸送に

民間独自の大規模な活動もあるが見通しは不透明

SpaceX

人類の多惑星化をビジョンに掲げ100万人を火星移住させる計画を発表している



人類と貨物の月面への継続的な輸送を目指す着陸機MK1では最大3トンの貨物を輸送予定

ESAは別途、月関連の活動を計画



ESAも月の先に火星(有人/無人)を見据える

中国の月探査も活発で、有人を目指している

CLEP(Chinese Lunar Exploration Program; 中国探月工程) というプログラムの元で実施

実施済

Chang'e 3 (2007)



月面着陸に初めて成功
さらにローバーで動き回って
くまなく探査することに成功

Chang'e 4 (2019)



月の裏側の着陸に初めて成功

Chang'e 5 (2020)



帰還サンプル



表側から1.7 kgのサンプルを獲得
現地で180 ppmの水氷の含有を確認
サンプルにOH基やH₂Oの存在を確認
ガラス内にも水の存在を確認

Chang'e 6 (2024)



2mほど掘削し地下から
貴重なサンプルを採取

裏側から1.9 kgのサンプルを獲得
スコップとドリルを用いて表面と
地下からサンプルを獲得

予定

Chang'e 7 (2026)

南極域に着陸し、水氷の分布と
存在量を調査

Chang'e 8 (2028)

南極域で水資源の獲得や、月面基地
建設に向けた技術のテストを実施

ILRS (International Lunar Research Station)

12か国と共に月周回探査ステーション
および月面探査基地を建設

有人探査

月周回・月表面
両方から
探査を進める



ImageCredit: CNSA

2030頃から宇宙飛行士を2名ずつ
送り、活動領域を拡大

月に微量な量の水は存在



アポロのサンプル（ガラス）から、**数十PPMの水**を発見 (Saal et al 2008)

Credits: NASA/Daniel Rutter

SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy)

100-412 ppmの水の蒸気を月に確認(ただし地球からの観測) (Honniball et al., 2021)

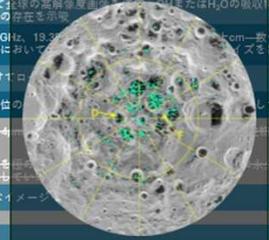
LCROSSによる直接衝突での結果は、**解釈が困難だが最大5wt%との見積りがある** (e.g., Colaprete et al., 2010)

だが資源になるほど大量に存在するか不明

関連する過去の重要な探査機器とその概要

計測器	空間解像度	深度	制約と特徴	実施時期	備考
Lunar Prospector Neutron Spectrometer	500 m	0-70 cm	水素元素のみを検出	1998-1999	熱中性子の観測を実施。地中における水素の含有量、ひいては水氷の存在可能性を示唆
LGROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite)	20-25 m	0-3 m	1点のみの計測	2009	月南極域に存在する Cabeus craterに衝突実験を行い、飛散した噴出物内に5 wt%程度の揮発性物質が存在することを示唆
Mini-RF (Miniature Radio Frequency)	15 m	0-10 cm	電磁波の内偏波計測のため、岩石粗度依存性を見ている可能性	2009-	S-bandとX-bandの合成開口レーダー(SAR)とCPR等のパラメータは月表面の地質情報
LAMP (Lyman-Alpha Mapping Project)	76.4 m	μm-mm	表面のみの計測	2009-	紫外イメージング分光器により月表面における高度マップを高精度(偏光永久影領域内の反射率を観測し水氷の存在可能性を推定)により作成
LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter)	240 m	μm-mm	表面のみの計測	2009-	月表面における高度マップを高精度(偏光永久影領域内の反射率を観測し水氷の存在可能性を推定)により作成
Diviner Lunar Radiometer Experiment	160x320 m	0-5 mm	表面のみの計測	2009-	abundanceや水氷の存在可能性を推定
LEND (Lunar Neutron Detector)	10 km	0-70 cm	計測器不調の可能性	2009-	水氷の存在可能性を推定
MP (Moon Mineralogy Mapper)	280 m	μm-mm	表面のみの計測	2009	捉えており高緯度地域などにおいて水氷の存在を示唆
Chang'E-2 MRM (Microwave Radiometer)	25 km (3 GHz), 17.5 km (7.8, 19.35, 37 GHz)	数cm-3.5 m	原理実証済み、計測ノイズが大きい可能性	2010-2014	マイクロ波放射を4周波数(3 GHz, 7.8 GHz, 19.35 GHz, 37 GHz)で観測し、月表面の温度分布を調査、特定アンテナにおいて
Hayabusa HAKUTO-R Mission	1 25μmで数100m移動	表面	降下中に高度推定を誤り着陸失敗	2022-2023	将来的な地球-月輸送サービス構築に向けて
Rashid Rover	1 25μmで数100m移動	表面	推進システム不具合でミッション中止	2022-2023	近赤外線レーザーや分光計を用いて月南極域の
Lunar Flashlight	400 m	μm-mm	推進システム不具合でミッション中止	2022-2023	近赤外線レーザーや分光計を用いて月南極域の
BIRCHES (Bioscience Resource Project)	FEV-10 km	μm-mm	打ち上げ後、通信途絶	2022-	高緯度地域における水氷の存在可能性を調査
LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite)	<500 m	0-70 cm	軌道投入に失敗	2022-	高緯度地域における水氷の存在可能性を調査
Korea Pathfinder Lunar Orbiter (KPLRO)	1.7 m	μm-mm	LPより南極観測に有利な軌道	2022-	LROC NACと比較して200倍以上高感度なイメージング
Chandrayaan-3 LIBS	1点+数十m	μm-mm	トナブルにより中止	2023	月南極域に、モックアップ終了
Chandrayaan-3 ChaSTE	1点+数十m	μm-mm	月南極域における着陸探査	2023-	月南極域における元素組成の測定

M3, LOLA, LAMP, Diviner から、**水色の領域に水が露出している**という説が提唱された (Li et al., 2018)



地表面に露出する氷探しは、もはや無意味？



2023年、KPLRO/Shadowcamによる永久影内の撮像が決定的 (「かぐや」で開発した手法が使われた)

しかし、もし大量にあったら有益で、その可能性はまだ無視できない

大量の成層構造を探すなら地下（地下浅部、特に30cmまでにあれば争奪戦に）

①30cmまでならある程度情報がある

②30cmまでに有望資源の濃集がありそう

日本の戦略：水も金属も感度のある誘電率で見る

Kaguya MI/Fe量 (wt%) マップ

LP GRS/K マップ

地質図(USGS)

表面から大量

Apollo 17 image from NASA

Model	Depth (t)
Gill	-0.05
McKeyes and Swick and Perumpral	0.15
Viking	0.062
Balovnev	0.14

各手法ごとのアポロの有人口の幅の掘削バケットで掘削可 (Wilkinson & DeGennaro, 2000)

アルテミス3-LDA

南極の着陸地点で精密な誘電率の経時観測と、サンプルで高精度分析



グラウンド・トゥルース



南極の着陸地点で掘削して水探索し、移動しながら誘電率調査(地中レーダ)

掘削深度が深すぎても、資源量の確保が大変で...

地下温度構造は未確定だが、最大温度最低の場所が最も存在できる領域

TSUKIMI 広域展開 リモセンで誘電率観測



どうしてもモデル依存になるので、地表面のグラウンドトゥルースを用いたキャリブレーションが必要

度が、揮発性成分... 定的に生存

地下まで考えると、存在しうる領域は遥かに広がるPage et al. (2010)

商業利用 競争力のある民間企業の存在は重要



γ線、中性子線、熱慣性、誘電率など。

③30cmまでならアクセスが容易

④30cmまでなら広域調査が可能

Shadow Neutron Neutron + CPR WEH

高WEH 濃度マップ、高CPRマップ (Spudis et al., 2013)

資源利用に関する諸外国の動向

有人基地建設



Image from NASA



Image from ESA

国威発揚や、夢の実現 有人火星移住



Image from SpaceX

合理的な宇宙利用は少し異なる

低重量環境、超高真空、極端な温度変化を積極的に利用するのがよい

構成物質、様態はさまざま



**次元の異なる全く新しい宇宙開発と
新たな産業創出があるはず**

天体の特性をうまく利用すれば、
無人で鉄線を作るロボスタな機械など

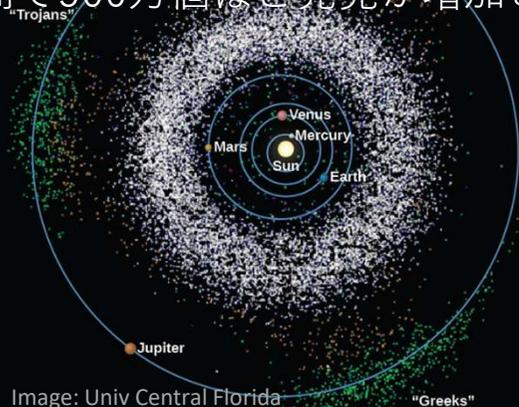


超高真空、豊富な太陽光エネルギーを
利用した、月面その場製鉄 宮本・他、2024

合理性のみ考えた資源ビジネスの将来：小惑星が有望（月もやはり有望だが省略）

100万個以上、確認済

今後5年間で500万個ほど発見が増加と予想

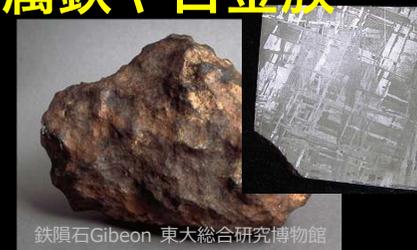


水など揮発性成分



Image: JAXA et al

金属鉄や白金族



鉄隕石Gibeon 東大総合研究博物館

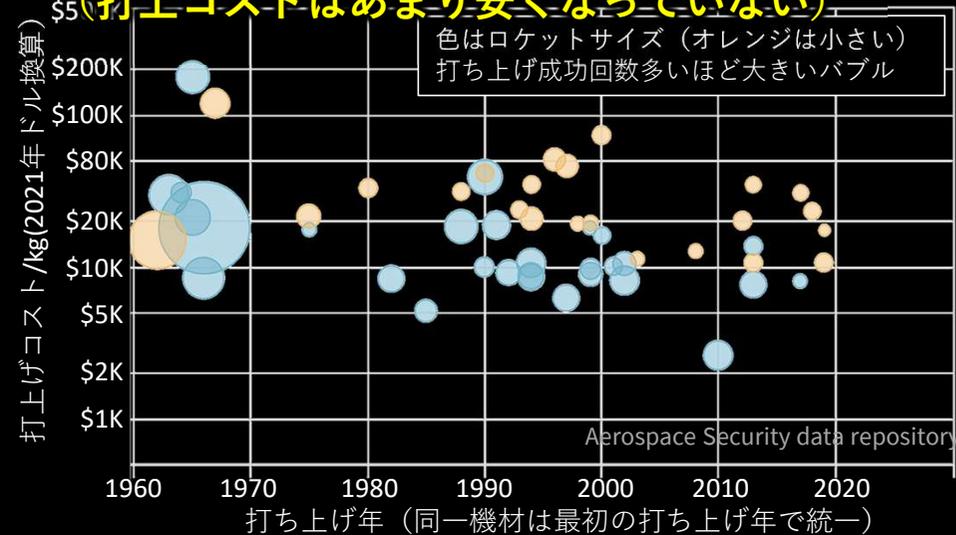
→宇宙機の推進剤に

→宇宙機の修理や自己増殖に

宇宙機が繰り返し使用可能になる

地球重力は強大で、打ち上げは大変

（打上コストはあまり安くなっていない）



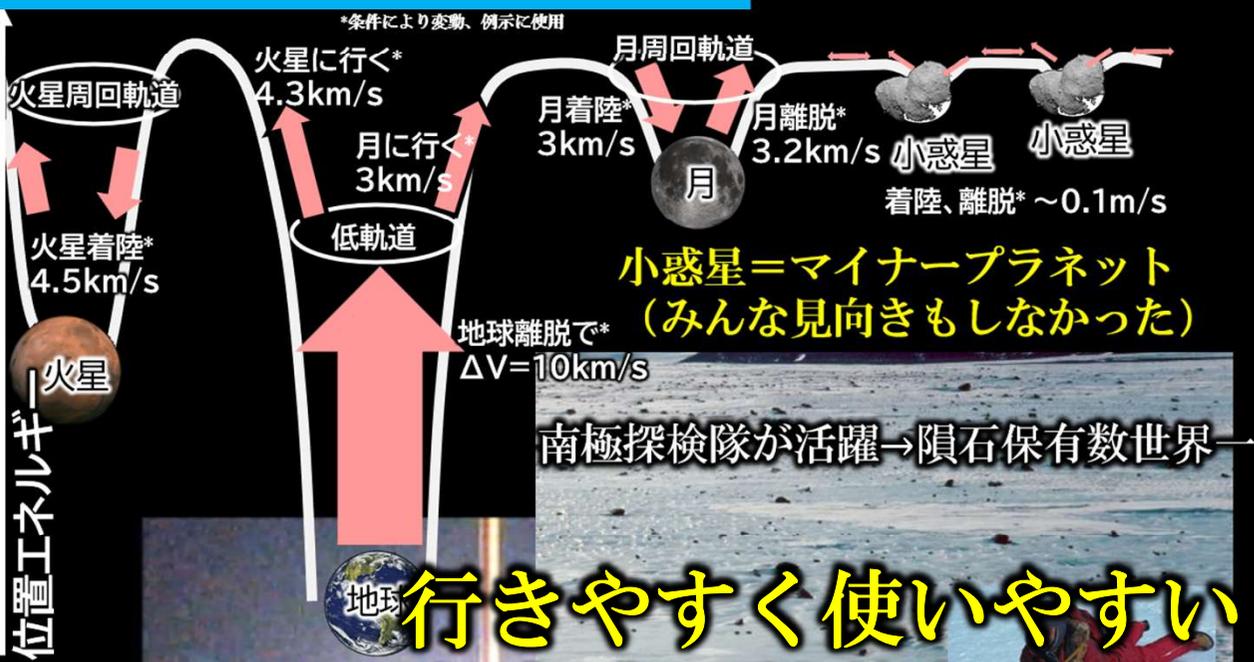
これまでの宇宙開発：
幌馬車的（食料、生活用品、
燃料等全てを持参）



将来の宇宙開発：
西部開拓時代的（現地調達）

地球重力との戦いを回避できる

重力は行きやすさの尺度



小惑星=マイナープラネット
(みんな見向きもしなかった)

南極探検隊が活躍→隕石保有数世界一

行きやすく使いやすい 小惑星の科学を切り拓いたのは日本

はやぶさ探査機は
隕石=小惑星の欠片であることを(*)
誰の目にも明らかに証明
長年の謎が解決し見通しがよくなった

(*)例外はある

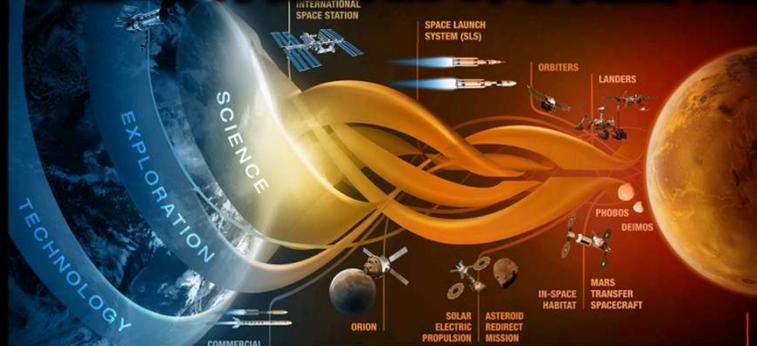


米国は本当は月より先に小惑星有人・資源利用をやりたかった

ARM-Asteroid Redirect Mission

(オバマ政権 が開始2013-2017年
しかし2017年トランプ政権が「月面重視」に転換)

JOURNEY TO MARS
「火星に行く手掛かりとして、地球近傍小惑星が鍵」



Asteroid Redirect Mission: Three Main Segments

IDENTIFY まずは地上から小惑星を調査

Ground and space-based assets detect and characterize potential target asteroids



REDIRECT

Solar electric propulsion (SEP) based spacecraft (OSIRIS-REx) redirects asteroid to cis-lunar space. **無人機で小惑星or土砂採取し移送**



EXPLORE

Crew launch on Orion spacecraft to rendezvous with redirected asteroid, studies and returns samples to Earth. **有人でISRU試験し、人類初の資源利用へ**



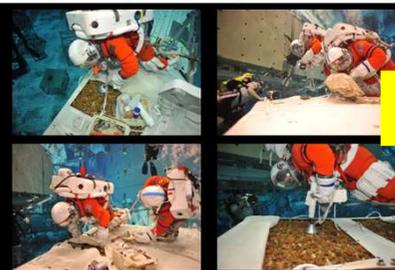
実際には粛々と続けている

観測手段	ARM当時の位置付け	2025年時点の達成状況
NASA NEO Observation Program	中核(Pan-STARRS等)	◎ 発展中
地上レーダー(Goldstone)	詳細特性評価に必須	○ 実施中・精度向上
地上IR/可視(IRTFほか)	分光分類・熱特性取得	◎ 多拠点で確立
Spitzer	赤外サイズ測定	◎ 終了(達成済)
NEOWISE	赤外NEO探索	◎ 継続観測中
LSST (Rubin Obs)	間接的に期待されていた	○ (2025本格稼働の予定)

小惑星資源には制度の問題があるが、同じようなことをやる地球防衛は制度の問題を回避しやすい(だがあまり防衛を主張しすぎると実利がなくなる)

小惑星用の訓練施設は...

Crew was able to perform several sampling tasks including worksite imaging, float sample collection, hammer chiseling and pneumatic chiseling.

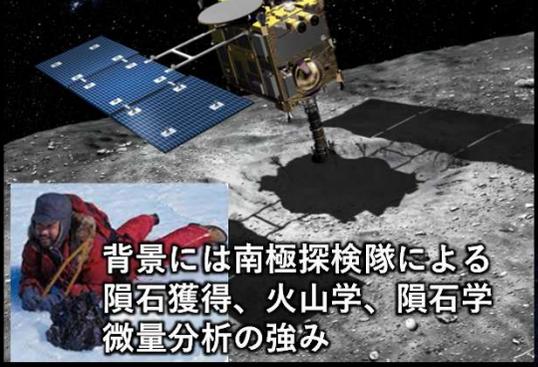


月用に訓練施設へと修正



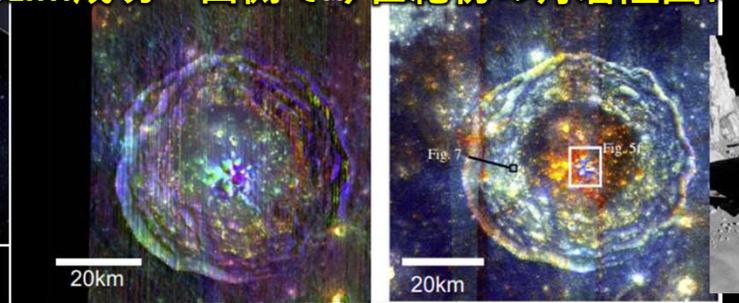
こうした現実的な資源利用には、我が国の強みが存分に生かせる

小惑星サンプルリターンは日本が切り拓いた
 固体天体表層探査で日本はトップを走り続けており
 他国の大型ミッションにも参加



背景には南極探検隊による
 隕石獲得、火山学、隕石学
 微量分析の強み

月科学も「かぐや」が活躍した
 (分光観測の最高解像度の地図は日本が作製)
 SLIM成功 = 西側で今世紀初の月着陸国に



Ohtake et al., 2013

実験棟「きぼう」のお陰で、低重力での
 粉体制御等の技術は、日本が先端的



日本は関連分野で先行しているように思う

民間宇宙開発会社

ispace Dymon

国内の民間
 企業の協力

Digitalblast

ロボット技術一般

高精度・高信頼度
 産業ロボット分野世界第1位、
 稼働率第2位
 基盤技術も先頭集団にある

大学発超小型衛星 / ベンチャー

豊富な大学発
 ベンチャー群

AXELSPACE Space quarters

近未来の宇宙資源利用の姿は、このようなものと想像

地球からの物質供給に依存しない
経済圏の構築が今後は重要となる

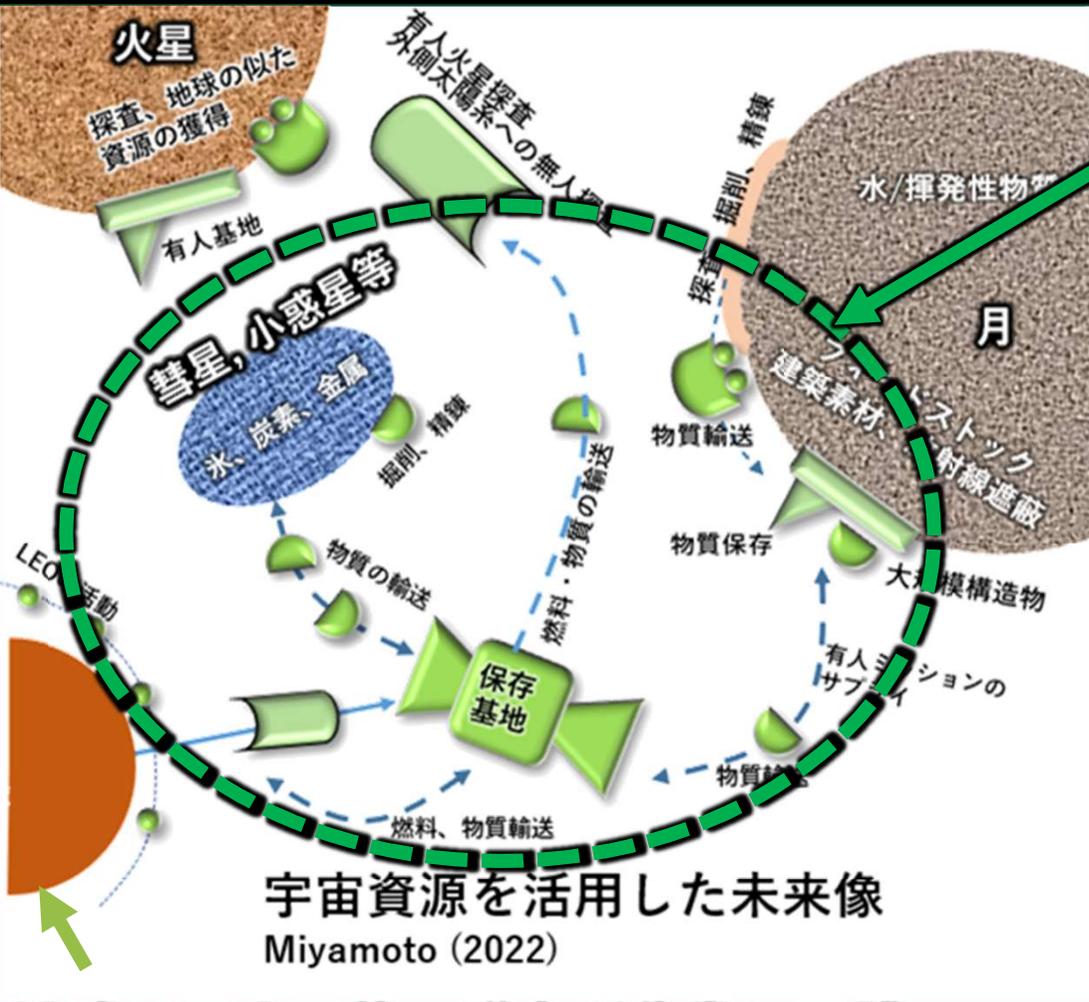
有人火星探査や有人月基地建設より
前に、巨大な産業になるのではないかと

ただし国際法と惑星保護の観点から
容易に制約されかねない

そのため

- ・ 国際協調の月有人・月開発への着実な協力
 - ・ 火星有人・科学への協力
- を含めた **国際的な議論の場でのビジビリティ**と
技術進展への貢献が重要

一方で独自性の高い日本の選択肢として、小天体開発、無人かつ合理的な長期的視点に立った宇宙資源開発を、検討するのが良いのでは？

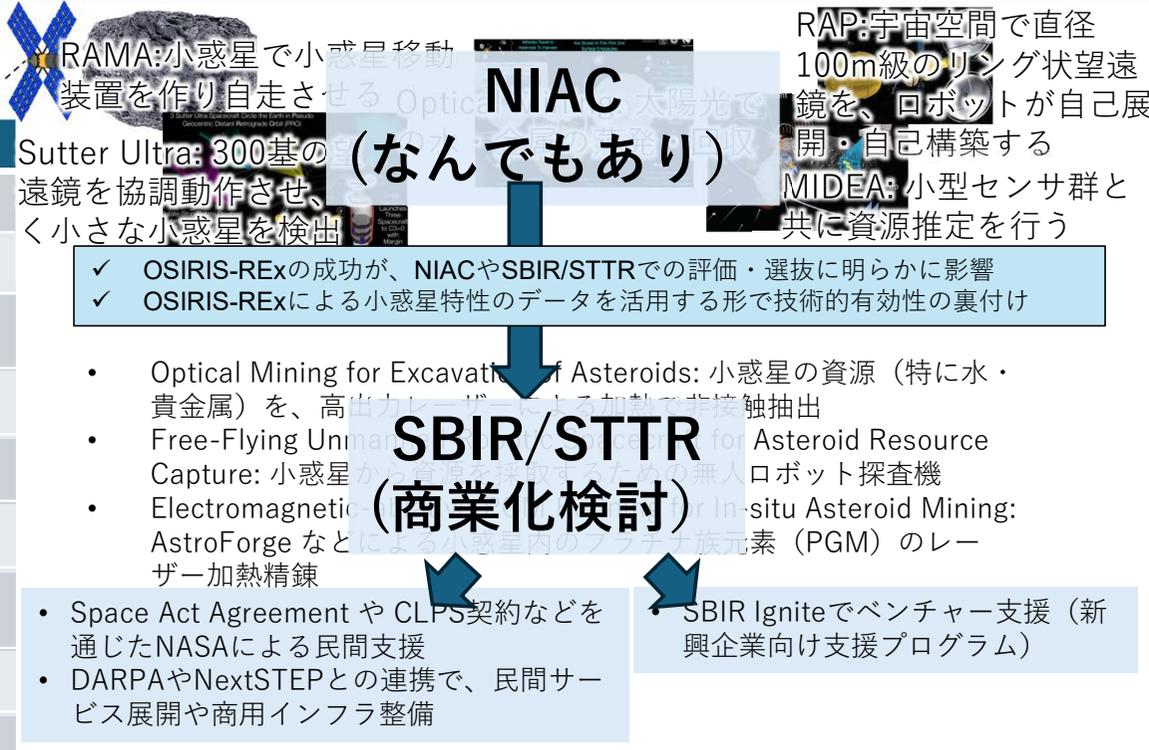


地球は巨大天体 = 脱出が非常に困難

科学探査は国家として継続的に推進すべき基本戦略。そこで得られる知見や技術の産業応用に向けたシーズ育成も並行し戦略的に進めるべきでは？

米国は柔軟かつ網羅的な支援制度が充実
(科学支援と同時並行で産業の芽を支援)

プログラム名	管轄	対象技術	特徴	月資源	小惑星
NASA PSD (Planetary Science Division)	NASA	科学のみ		○	○
NIAC (NASA Innovative Advanced Concepts: 先進概念研究)	NASA	概念検討	革新的、TRL1-2	○	○
SBIR/STTR (Small Business Innovation Research/Technology Transfer Research)	NASA	商業応用	スタートアップ、TRL3-6	○	○
CLPS	NASA	月面輸送	商用ランダー契約	○	
DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency)	DoD	標準化・製造	軍民融合技術	○	△
Tipping Point	NASA	技術実証	共同出資、TRL5-7	○	
NextSTEP (Next Space Technologies for Exploration Partnerships)	NASA	居住、ISRU	民間と共創	○	
LSII (Lunar Surface Innovation Initiative)	NASA	ISRU	月面探査支援	○	
Ignite (SBIRの一部)	NASA	高成長スタートアップ	商用SBIR	○	
LuSTR (Lunar Surface Technology Research)	NASA	大学用	教育・試作支援	○	
LDEP (Lunar Discovery and Exploration Program; SMDによる月ミッション支援)	NASA	ミッション	科学・資源調査	○	
DOE協定	DOE/NASA	電源、化学	核/化学技術	○	
PPDCO (Planetary Defense Coordination Office)	NASAPSD	地球防衛、関連科学技術	ミッション支援も含む		○



★科学と産業を橋渡しする“科学的知見のハブ”が必要

米国SSERVIとCLASSのモデルが参考になる

- ✓ SSERVIは、バーチャル研究所として国内外の大学・企業・NASAをゆるやかに接続
- ✓ CLASS (UCF) は、NASA探査ミッションと民間企業 (Astrobotic等) を巻き込み、科学・教育・政策・技術実装を統合