フロンティアビジネス研究会
資源利活用WG



2026/7/23
公開シンポジウム

「月面資源開発に向けた重点資源の選定と探査技術の検討」

資源利活用WGメンバー　（敬称略）

- **株式会社ispace（Group Leader）**
- **JX金属株式会社**
- **株式会社荏原製作所**
- **栗田工業株式会社**
- **黒須スペース＆サステナビリティ合同会社**
- **三菱重工業株式会社**
- **有人宇宙システム株式会社**
- **一般財団法人リモート・センシング技術センター**

※本発表は資源利活用WGとしての検討内容発表であり、WGメンバーの所属企業としての見解を示すものではありません。

資源利活用分科会方針/検討テーマ

【分科会方針・目標】
- 分科会名称を「水素利活用分科会」から「資源利活用分科会」に変更し、水素に限らず月面資源全般を対象とした検討を行う。
- アカデミア等の外部有識者からご意見をいただく場を設け、検討結果の正当性を高める。
- 検討結果に基づき、対象資源の探査方式と実現性について検討を進める。

【資源利活用分科会テーマ】
月面資源探査の最適化と商業化に向けた技術・ビジネス検討

月面における資源探査技術のマッピング

- 資源探査方法の洗い出し・深掘り
- 各資源における探査方法の比較
- 探査をするにあたって必要となる情報
- 対象資源探査に利用可能な探査センサーの調査

既存データを用いた探査ビジネス検討

- 既存データからの月面資源のリストアップ
- 月面資源の利活用先とその市場規模の検討
- 上記資源採掘の収益性の検討
- 資源探査によって得られたデータ販売検討

検討実績

2025年7月から全7回の分科会を開催し、月資源のリストアップと市場規模検討からターゲット資源の選定、探査方式・データ分析の検討まで、WGメンバー各社が調査・検討を分担し、段階的に議論を重ねてきた。

回	開催月	検討内容	担当会社
第１回	2025年7月	月資源の利活用先と市場規模検討①（月資源リストアップ・用途）	栗田工業
第２回	2025年9月	月資源の利活用先と市場規模検討②（各資源の需要者・市場規模）	ispace、荏原製作所
第３回	2025年11月	ターゲットにする月資源の選定	JX金属
第４回	2026年1月	選定資源探査に必要な情報の整理	ispace
第５回	2026年3月	対象資源の用途と精錬方法の整理	JX金属
第６回	2026年2月・5月	データ販売に関する検討	CSSB・三菱重工・栗田工業
第７回	2026年3月・４月	探査方式・データ分析方法の検討	RESTEC

第1回：各資源の主な用途、存在場所、形態、使用場所を整理

想定される資源	主な用途	具体的な使用/元素の例	存在場所
水（H_2O）	飲料水、酸素生成、推進剤、農業、放射線防護	地球軌道衛星の燃料補給、He-3/REE搬送燃料、火星探査、生命維持、農業、放射線遮蔽材	極地のレゴリス
He-3（ヘリウム3）	核融合燃料、冷媒、核兵器検知	量子コンピュータ冷却、核兵器検知、将来の核融合発電、中性子検出、MRI診断など	レゴリス
PGM（プラチナ族金属）	触媒、水素燃料電池、電子機器、宝飾品	自動車排気触媒、燃料電池、電子部品 元素例：Pt, Pd, Rh, Ru, Ir, Os	レゴリス
酸素（鉱物由来）	呼吸、燃料（酸化剤）	居住施設内の空気供給、推進剤の酸化剤	レゴリス
チタン	建材、構造材	月面基地建設、機材製造	レゴリス
鉄	建材、構造材	月面基地建設、機材製造	レゴリス
アルミニウム	建材、構造材	月面基地建設、機材製造	レゴリス
シリコン（Si）	ガラス、セラミック、電子部品	居住施設、電子機器(太陽電池パネル、半導体素子など)	レゴリス
REE（レアアース元素）	電子機器、磁石、防衛技術	国家安全保障、電子部品、バッテリー 元素例：La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Ba	レゴリス、KREEP
ウラン・トリウム	原子力発電	核分裂エネルギー源	KREEP
レゴリス（月面土壌）	建材、放射線遮蔽	3Dプリント建材、遮蔽材	月面表層
レゴリス（月面土壌）	植物栽培培地	実レゴリスでの栽培培地（模擬レゴリスでは育成妨害が発生しないため）	月面表層
硫黄（硫化鉱物）	建材、化学製品	コンクリート代替、化学反応材、バッテリーの材料(リチウム硫黄電池)	レゴリス
硫黄（H_2S）	建材、化学製品	コンクリート代替、化学反応材、バッテリーの材料(リチウム硫黄電池)	極地のレゴリス
カルシウム	建材、栄養素	居住施設、生命維持(栄養補給)、農業(土壌改良剤)	高地レゴリス
マグネシウム	建材、栄養素	居住施設、生命維持(栄養補給)、農業(土壌改良剤)	低地レゴリス
リン	栄養素	農業(土壌改良剤)	レゴリス、KREEP
メタン（CH_4）	推進剤、燃料	火星探査機の燃料など	極地のレゴリス
メタノール	燃料電池、燃料	ダイレクトメタノール燃料電池、月面活動用の燃料など	極地のレゴリス
アンモニア	肥料、燃料、水素キャリア	水素源としてエネルギー利用（触媒分解により水素に変換）、月面活動用の燃料（直接燃焼）	極地のレゴリス

第2回：月資源の市場規模を検討

- まずは**年代ごとの需要量**から考える。
- 背景情報：
  - ターゲット資源を地球から月へ輸送するのに原価でUSD１M/kgかかる（2026年現在）
  - 輸送費は以下変遷をたどる前提
    - 2030年～：USD 500k/kg
    - 2035年～：USD 250k/kg
    - 2040年～：USD 100k/kg

- 月面での価値
  ＝需要量ｘ地球からの輸送費　or
  ＝月面で採掘する為に必要な総コスト
  →前者＞後者となれば、月面で採掘する価値あり。
  →月面採掘の市場規模の判断基準は、
  「需要量ｘ地球から輸送費」となる。

- 地球での価値（単価）
  ＝地球上でのキロ単価　or
  ＝サンプルリターンキロ単価
  →前者>後者（■ランニングとして）
  となればサンプルリターンする価値あり。
  ＊サンプルリターンの輸送費の考え方：
  - 往路の輸送費：復路の輸送費＝１：２

  を前提として、往路の輸送費ｘ3/kg で検討

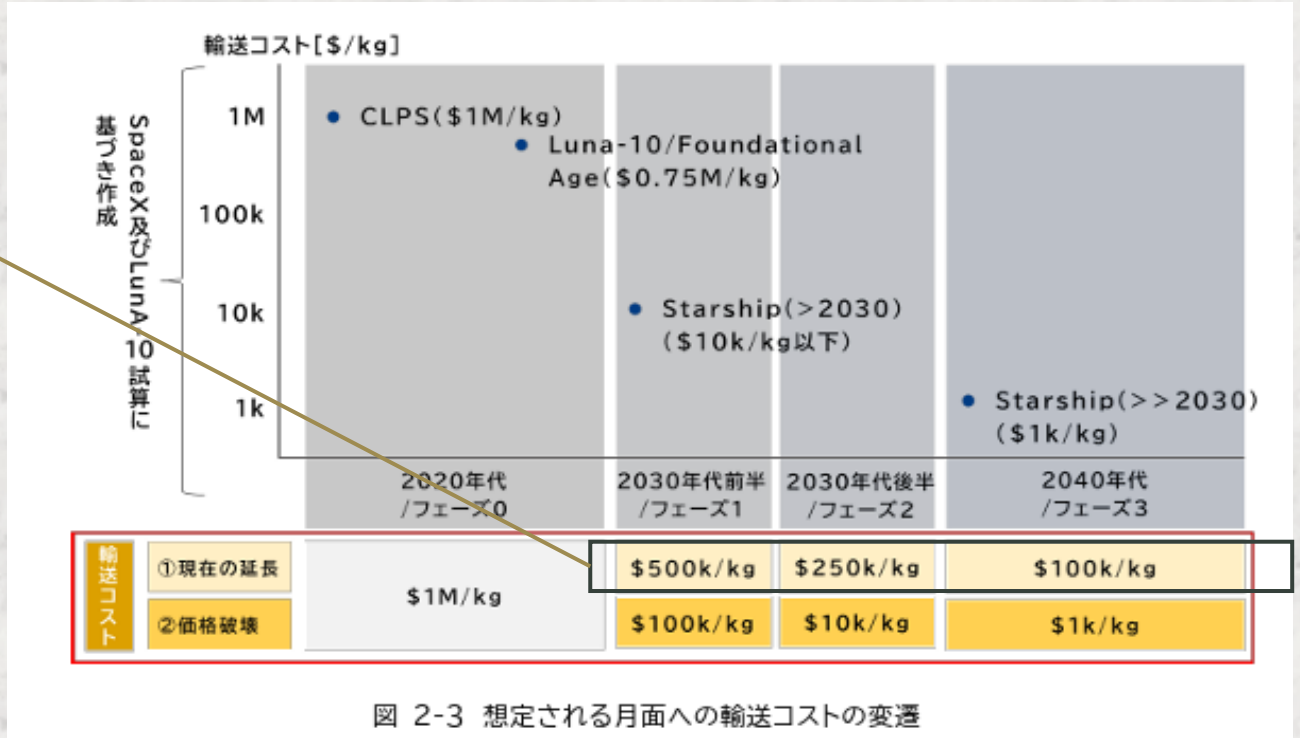


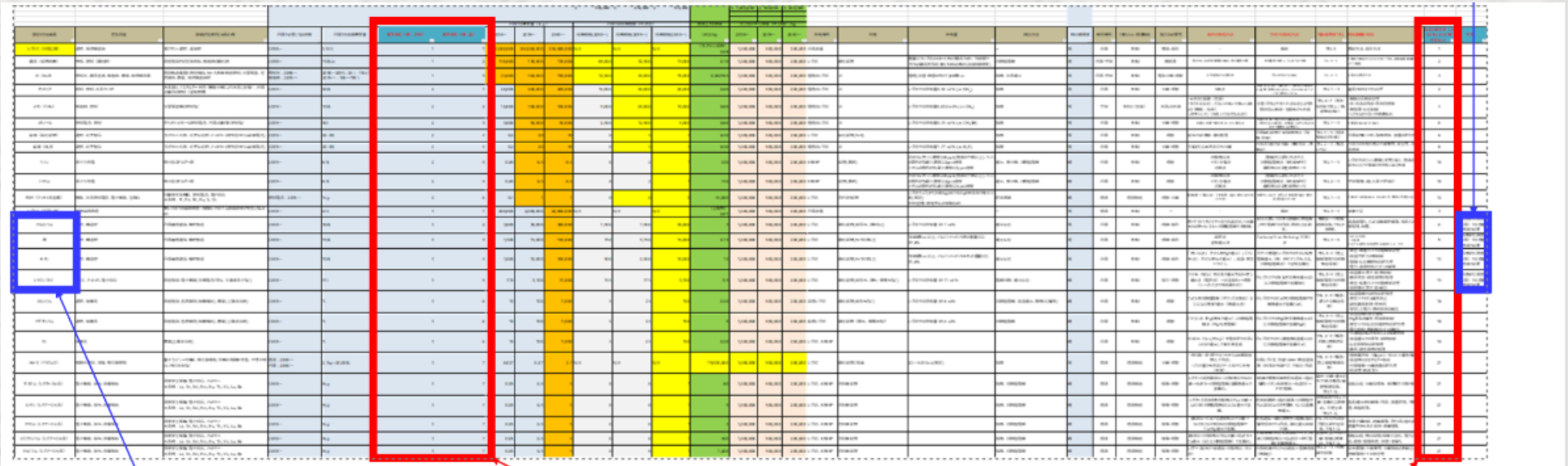
図 2-3 想定される月面への輸送コストの変遷

三菱総合研究所、一般財団法人日本宇宙フォーラム：経済産業省 令和5年度補正宇宙開発利用推進研究開発（月面におけるエネルギー関連技術開発（技術課題整理））報告書, 2025

■その他要検討：ランニングで考えるか？イニシャルコストをどう捉えるか？
例えば、鉄の支柱が月面で必要となった場合のコスト比較（地球から輸送or月面で製造）となった場合には、月面での製造コスト（設備の輸送および月面での採掘・精製）までを検討する必要あり。

第3回：ターゲットにする資源を選定

- 選定した資源：**アルミニウム、鉄、チタン、シリコン（Si）**
- 選定理由：必要量と必要時期に基づき、各資源の優先順位を定量的に評価。その結果、優先順位を三つに分類。これらの資源の中でも、各資源を現地で定常的に生産するためには装置材料が必要となると考え、上記金属資源を選定。**溶融塩電解を上記金属資源抽出に活用すると、陰極側で金属資源を得ることができる。**一方、**陽極側から酸素を副生成物として同時に生産できる。**
  - 上位：O_2や水、アンモニア、メタン、メタノール、**アルミニウム**、硫黄、**鉄**
  - 中位：ウラン、**チタン**、PGM（プラチナ族金属）、**シリコン**、カルシウム
  - 下位：レアアース元素（ネオジム、ランタン、テルビウム）、ヘリウム３

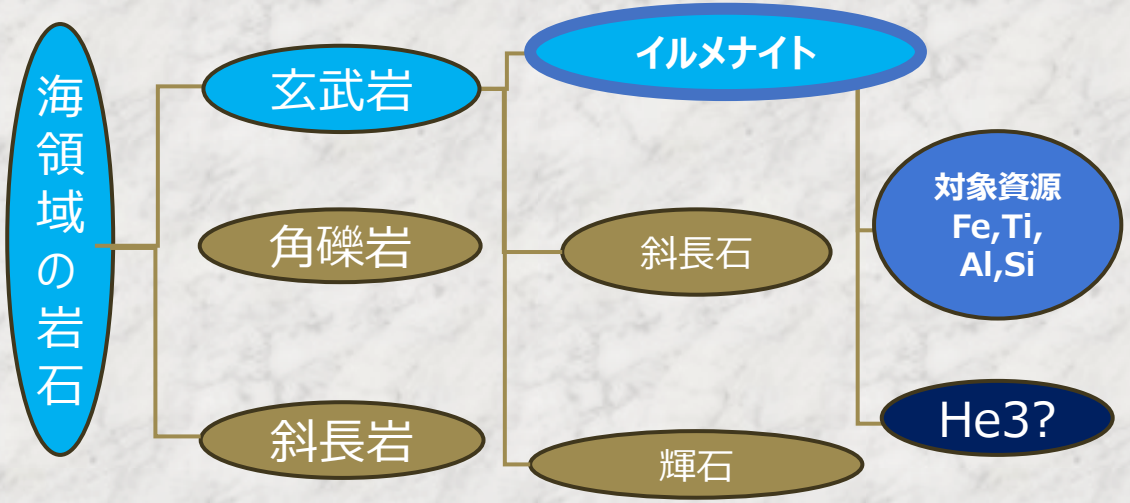


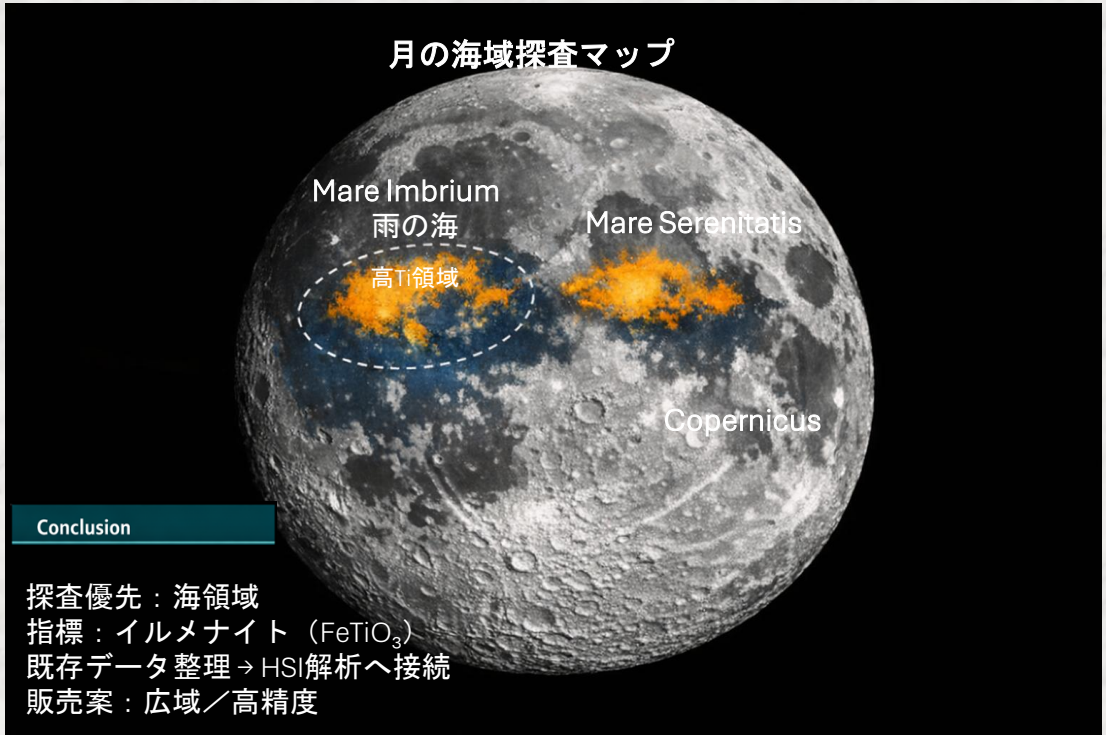
第4回：選定資源探査に必要な情報の整理

これまでの検討結果に対して、JAXA ISAS春山先生より以下のコメントをいただく。

1. 現在検討対象としているアルミニウム、鉄、チタン、シリコンについて、**月面では化合物として存在**すると想定される。
2. これらの化合物の**主な存在場所は、月の海領域**と想定される。
3. 月の起源を考慮すると、**海領域はマグマが噴出して表面を流れ、黒色の玄武岩層を形成した地域**であるため、これらの化合物はかぐややLROによるリモートセンシングデータなどの既存データを活用することで十分探査可能と考えられる。
4. ヘリウム3は太陽風由来の不活性ガスであり、月面表層に打ち込まれた状態で存在する。また、**ヘリウム3はチタンを多く含むイルメナイトに取り込まれやすいため、金属資源探査と併せて評価できる可能性がある。**

イルメナイトは対象資源である鉄・チタンに加え、酸化物として酸素を含み、さらにヘリウム3を取り込みやすいことから、本件検討では、イルメナイトを探査対象資源と選定した。





第5回：選対象資源の用途と精錬方法の整理

チタン鉄鉱（イルメナイト）の用途と精錬方法①

◎イルメナイト製錬法

1．チタンスラグ法　：高温で溶融し鉄を除去。酸化チタンの含有率を向上　⇒「大量生産向き」

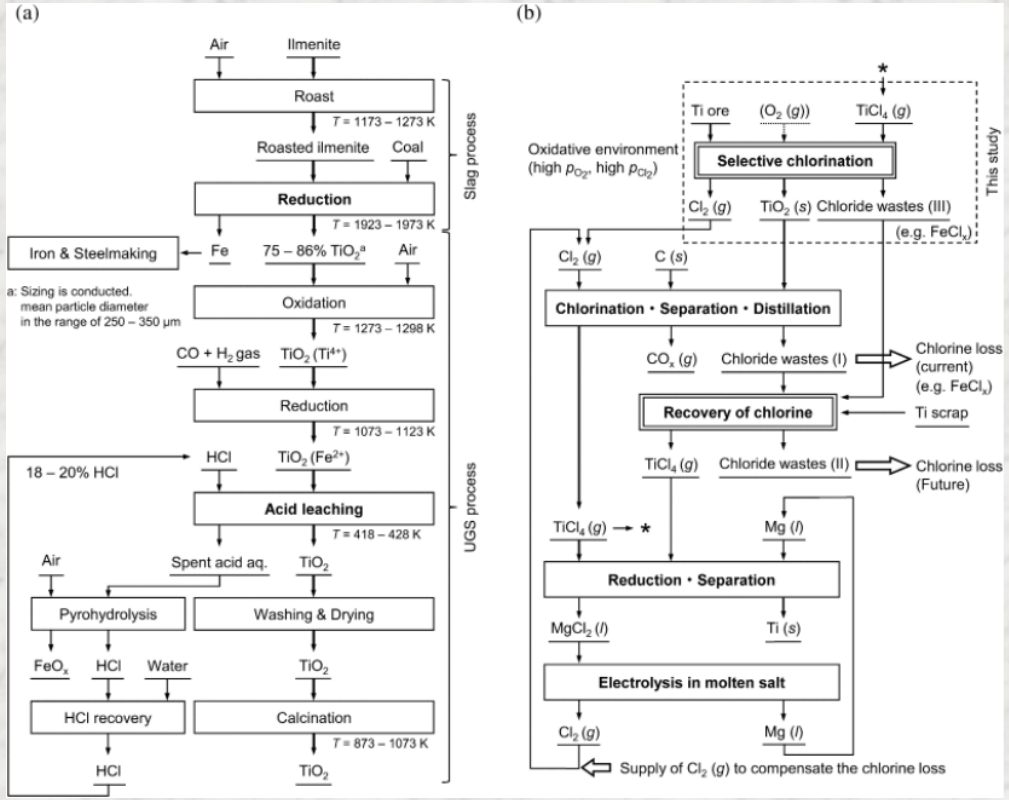
2．合成ルチル法　：化学反応で鉄を除去。高純度化。　⇒「ルチル相当品を製錬」

◎チタンスラグ法

還元剤としてカーボンを使用

TiFeO3　+C　à TiO2 + Fe（鉄鋼原料に利用）+ CO

イルメナイト還元で生成するCOは、製錬ガスとして使用され、最終的にはCO2として排出

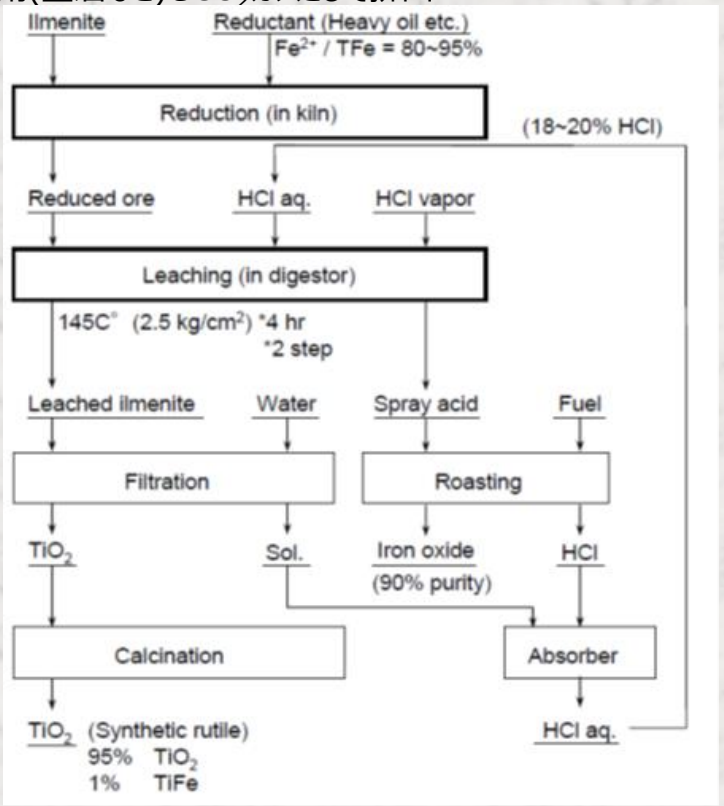


UGSプロセス(a)と岡部研Selective Chlorinationプロセス(b)

◎合成ルチル法

イルメナイト中FeをFeOまで還元焙焼後、塩酸を用いた加圧浸出により脱鉄を行う

還元剤(重油など)もCO2ガスとして排出



Benilite法フロー(TMS2006 Annual Meeting, Zheng & Okabe)

チタン鉄鉱（イルメナイト）の用途と精錬方法②

イルメナイト（$FeTiO_3$）を起点とした用途と将来拡張性

大分類	用途・テーマ	想定機能／提供価値	技術的根拠（物性）	TRL目安	将来拡張性
資源	TiO_2原料	白色顔料・塗料	Ti源	9	高純度化で高級顔料
資源	チタン金属原料	航空・医療材	塩化反応性	9	低炭素製錬
資源	$TiCl_4$製造	半導体用前駆体	塩化安定	9	高純度電子材
資源	Fe副産物回収	製鉄原料	還元分離可	9	循環型精製
エネルギー	水分解光触媒	水素生成	Eg≈2.7eV	4–6	可視光強化
エネルギー	CO_2還元触媒	炭素循環	Fe活性点	3–5	ドープ制御
環境	有機分解	水処理	光酸化反応	5–7	表面改質
電子	可視光センサー	低コスト光検出	半導体特性	3–5	薄膜化
電子	抵抗変化メモリ	低消費電力	酸素空孔制御	2–4	ReRAM代替
電子	酸化物トランジスタ	高耐熱電子	欠陥伝導	2–4	n/p制御
磁性	反強磁性素子	低発熱演算	AFM秩序	2–4	スピン制御
磁性	交換バイアス層	磁気安定化	Feスピン配列	3–5	固溶体設計
光学	光吸収層	可視吸収	d電子遷移	3–5	ナノ構造化
構造材	耐熱セラミック	高温耐性	酸化物安定	7–8	複合化
構造材	耐腐食材	酸耐性	化学安定	7–8	被覆用途
触媒	Fenton触媒	酸化反応促進	Fe活性	6–8	廃水処理
触媒	アンモニア反応補助	触媒担体	酸化物骨格	3–5	金属担持
電極	SOFC電極候補	混合伝導	欠陥制御	2–4	ドープ改質
宇宙	月面Ti資源	ISRU材料	Ti豊富	1–3	宇宙製錬
AI関連	低コスト光検出	データ増大対応	可視応答	2–4	大面積化
AI関連	低発熱演算材料	GPU発熱低減	AFM特性	1–3	スピン素子
カーボン対策	CO_2光還元	温暖化対策	表面Fe	2–4	光電融合
エネルギー	電極触媒担体	高安定担体	酸化物強度	5–7	ナノ担持
ナノ材料	ナノ粒子	表面積増大	バンド変化	3–6	量子効果
薄膜	応力誘起相制御	機能発現	構造転移	2–4	非平衡成長

【宇宙】

月面Ti資源（ISRU材料）【TRL 1–3】

- 宇宙産業における「基盤資源」
- チタン、鉄（金属部材、構造材）

将来拡張性 ⇒ 宇宙製錬、構造材、推進剤製造の起点

【構造材】

耐熱セラミック／耐腐食材【TRL 7–8】

- 月面建設向け即戦力
- 酸化物として真空・放射線・高温差に極めて安定
- 構造物被覆、高温炉・熱遮蔽

将来拡張性 ⇒ レゴリス複合材、月面インフラ拡張

【エネルギー】

水分解光触媒【TRL 4–6】

- 月面エネルギー循環の要素技術
- 水 → 水素・酸素分解、O_2生成

将来拡張性 ⇒ 酸素・燃料循環

第6回：データ販売に関する検討

取得データを商品として成立させる販売戦略の検討

① 各資源のターゲット顧客と提案価値

収益源	ターゲット顧客	価値提案
酸素販売	NASA/JAXA、民間ロケット企業	輸送コストの削減（ISRU）
金属資材	月面建設会社、インフラ開発業者	現地調達による工期短縮
副産物（3He等）	次世代エネルギー研究機関	地球上に存在しない希少資源の提供

バリューチェーンを上流にさかのぼると、
(A)探査、(B)投資判断、(C)採掘・生成・製品化、(D)販売・流通。**いわゆるデータは上記(A)探査領域に位置付けられ、直接顧客は主として(B)投資判断主体、もしくは(A)内の後工程＊を想定。**
＊地上の資源開発では、資源メジャーに先立ち、中小・ベンチャーがリスクを負担して調査を実施するケースが一般的。
(B)としては商社や事業コンソーシアムを想定しており、これらが直接的なデータ販売先となる可能性。

② 提供データ

分布マップ、埋蔵量推定などが主たるデータ領域である一方、**地上資源開発ではボーリング等による高精度データ取得が必要となる点を、月面イルメナイト事業においてどのように捉えるかが重要。**
→(A)探査および(B)投資判断が、複数階層・複数サイクルにわたり反復される全体バリューチェーン構造を想定。

③ 収益モデルと将来展開

バリューチェーンのどこまでをカバーするかによる論点整理が必要。（探査のみに留まるのか、商社的に販売・流通まで担うのか、あるいは垂直統合型としてプラント・運営まで包含するのか、といった事業スコープ設定。等）

単純なデータ提供モデルとしては、レポート販売、サブスクリプション、従量課金等が一般的。
一方、**開発計画・ミッションプランニングまで踏み込んだ付加価値提供の可能性や、コンソーシアムの組成・参画を通じた、最終販売に連動するライセンスフィー型収益モデルの可能性もあり。**

第7回：資探査方式・データ分析方法の検討

イルメナイト（チタン鉄鉱）の濃集地域の特定について

2025年3月に「Journal of Geophysical Research-Planets」掲載の論文

➔産総研,立命館大,会津大らにより、既存の衛星データによるイルメナイトの濃集地域の特定に成功

掲載誌：JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-PLANETS
論文タイトル：Global distribution and geological features of ilmenite-rich sites on the lunar surface
著者：Satoru Yamamoto, Moe Matsuoka, Hiroshi Nagaoka, Makiko Ohtake, and Ayame Ikeda
DOI：10.1029/2024JE008663

使用データ：SELENE(かぐや)のハイパースペクトルデータ（SP: Spectral Profiler）
地形カメラ（TC： Terrain Camera）
マルチバンドイメージャー（MI: Multiband Imager）

SPによる
データマイニング解析
→
月面のチタン鉄鉱の
濃集地域の特定
→
TC, MIによる
データ解析
→
チタン鉄鉱は
火砕堆積物中に広く分布

※火砕堆積物：火山活動によって噴出した微細なガラス粒や岩石片などからなる堆積物

All rights reserved RESTEC 2026

探索方式・データ分析内容

◎これまでの研究

UVの波長帯(A)の増減を見てチタン鉄鉱に富む玄武岩の分布推定

減少傾向（黒線）：チタン鉄鉱

増加傾向（赤線）：他の鉱物

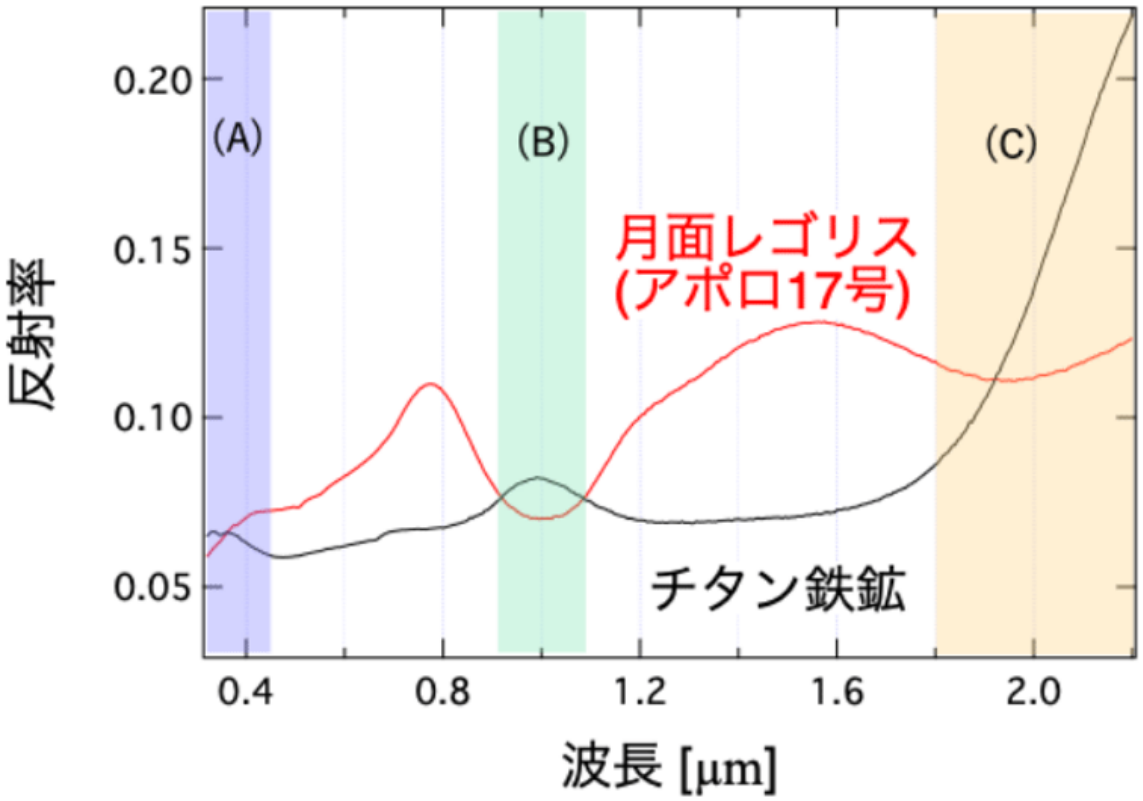
➔玄武岩以外では適応出来ず月面全体を把握出来ない

◎本研究

近赤外線の波長帯(B,C)では、典型的なレゴリスとは異なる特徴に着目しデータを抽出

(B)：チタン鉄鉱が上に凸、レゴリスは下に凸

(C)：レゴリスは下に凸、チタン鉄鉱は上昇傾向

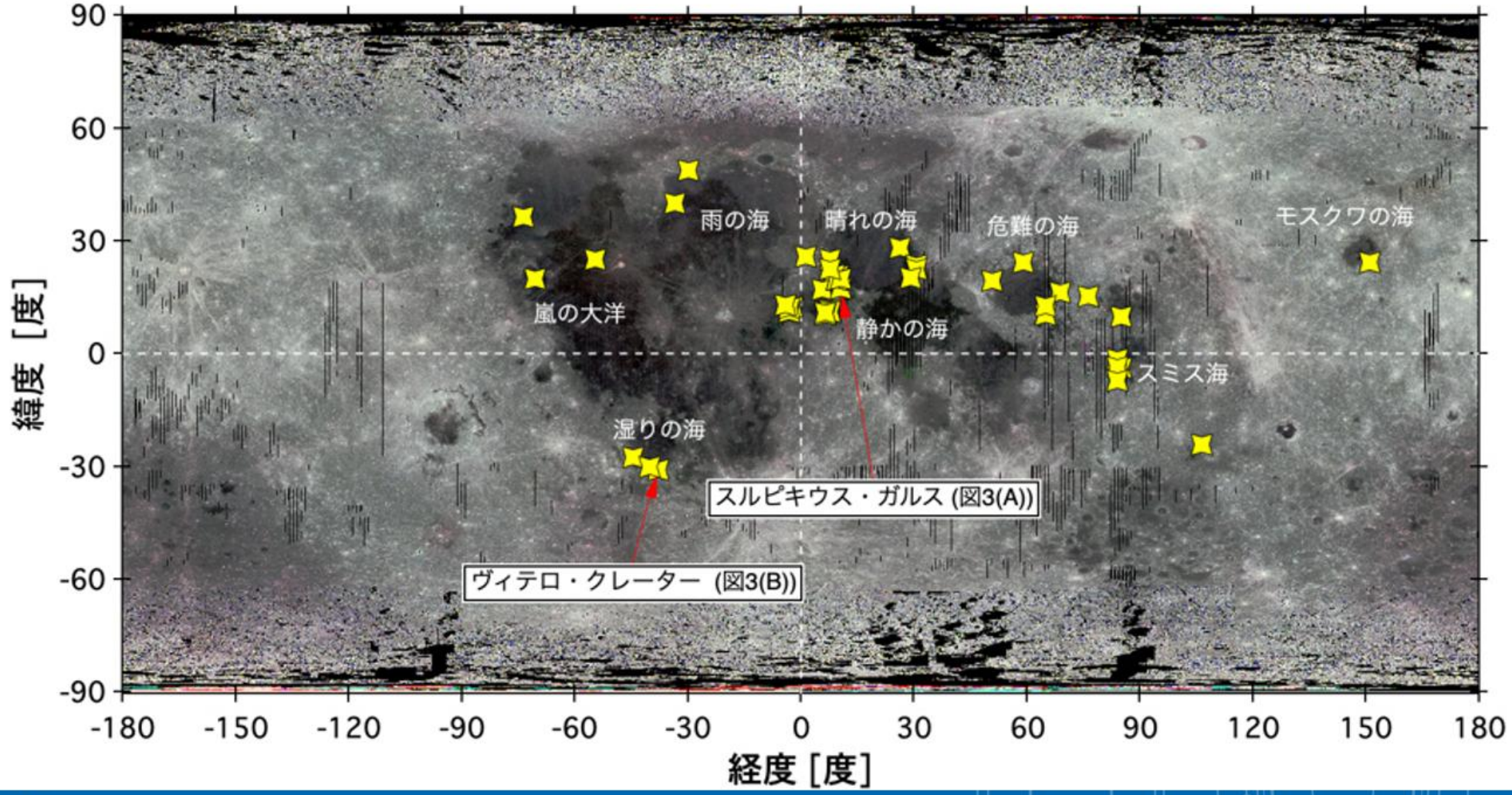


SPのデータマイニング
約7000万のデータから51地点のデータをピックアップ

All rights reserved RESTEC 2026

探索結果

チタン鉄鉱の濃集地域は、玄武岩の海ではなく、その周囲の火山活動で堆積した火砕堆積物領域であった



All rights reserved RESTEC 2026

SPによるデータマイニングで探索された地点周辺を更にTC, MIによる詳細な調査

SPのスペクトルの特徴をMIのマルチバンド帯に適応して全球を調査

A,B図中の赤点 ➔ チタン鉄鉱に富む物質の分布

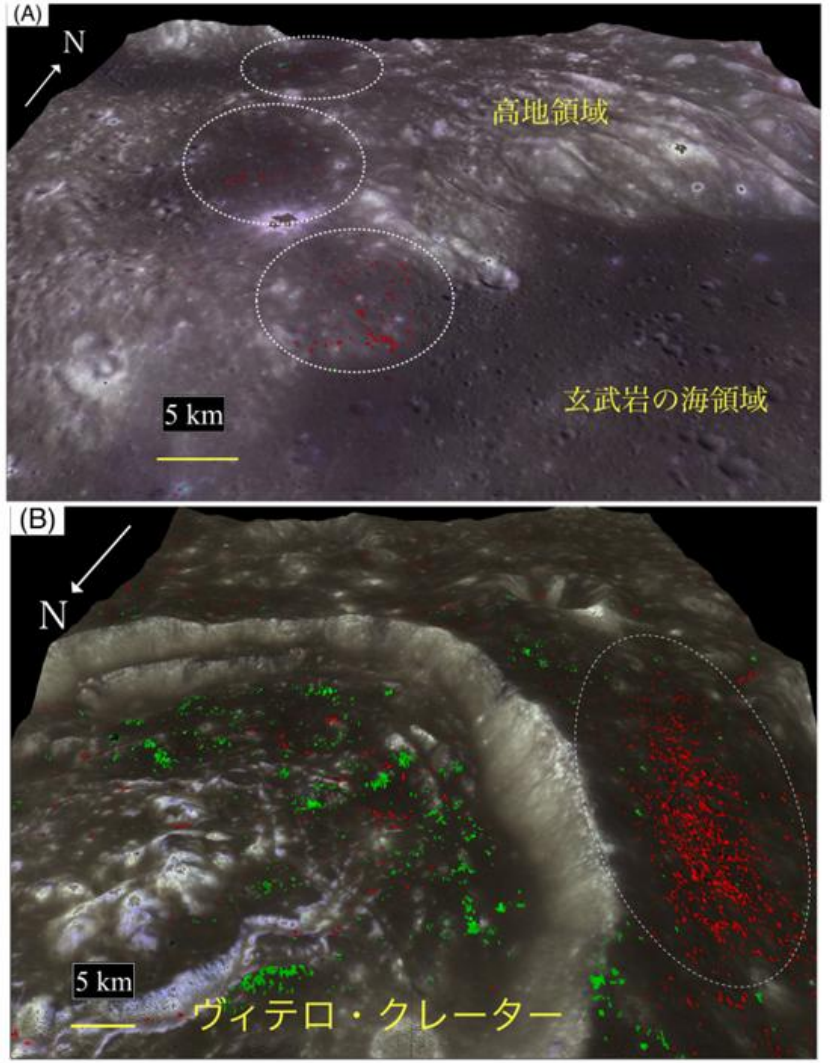
A) 玄武岩が分布する領域よりも少し盛り上がった月の高地と呼ばれる領域に堆積した火砕堆積物中に濃集

B) 天体の衝突で作られたヴィテロ・クレーターのすぐ外側に濃集

※図3(B)の緑色の部分が火山性ガラスが分布

【過去の研究】
酸化チタンに富むと考えられてきた玄武岩の海ではチタン鉄鉱の濃集を示すスペクトルの特徴が存在しない。
【理由】玄武岩中に多く含まれる輝石やカンラン石の影響や、火山性ガラスに入り込んだ要素により、チタン鉄鉱のスペクトル特徴を隠している可能性がある。
➔海の領域では上記の濃集地域よりもチタン鉄鉱の濃集が薄い。

(A)の埋蔵量：推定10^{14} kg（1,000億トン）細かい粒子で堆積



All rights reserved RESTEC 2026

イルメナイトの反射スペクトル情報

以下、産業技術総合研究所による研究内容の紹介で示された3種類のイルメナイトの反射スペクトル情報。
最初の２つは輝石や玄武岩との混在比率に対する反射スペクトルデータ。
３つ目は他成分との混在情報は不明のレゴリスとのスペクトル比較データ

イルメナイトについてスペクトル特性によって存在量を推定する場合、下記３枚に示された波長域では、**イルメナイトは非常に反射率が低いこと、900nm程度に反射率ピークがあること及びスペクトルによる反射率の変化が非常に小さいという特徴を意識した観測が必要になる。**

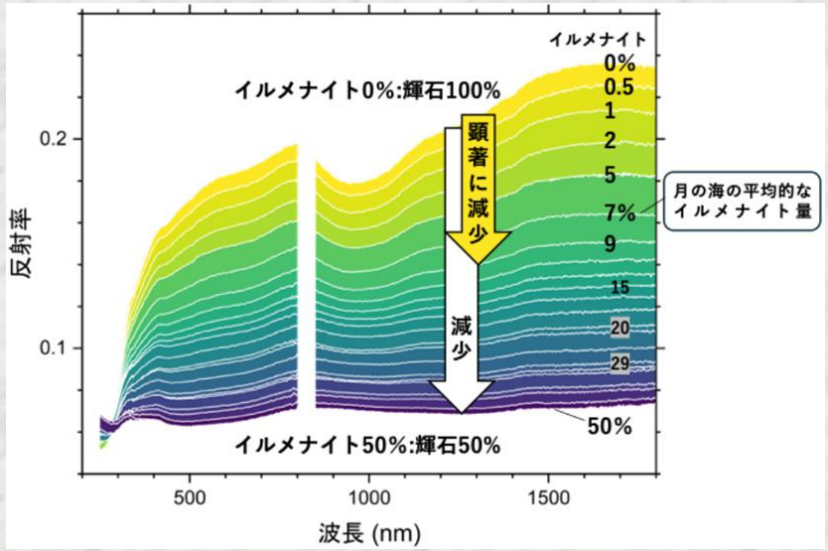


図1 輝石にイルメナイトを混合した時の反射スペクトルの変化。特にイルメナイトが少量（質量比が<9 %）のとき、反射率の減少が顕著であることがわかる。800 nmから850 nmの波長領域は分光計の検出器切り替えに起因する強度変動が見られるため、グラフから除外した。
https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2026/pr20260224_2/pr20260224_2.html

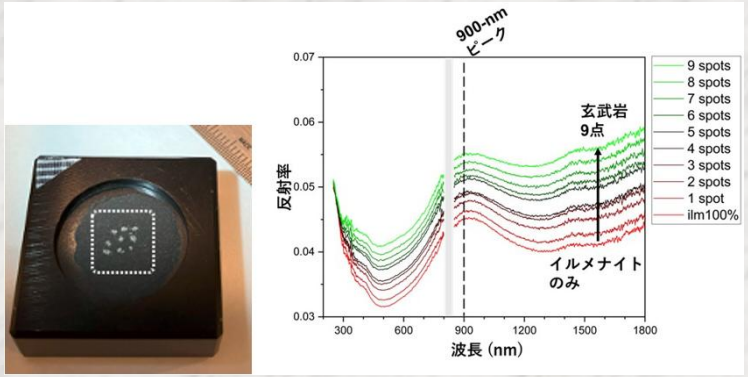


図2 マスキング実験の試料（左）：顕微鏡下で、イルメナイト粉末の上に玄武岩粉末（図中の白っぽい点、1 点の面積は0.6 mm2程度）を静置し、その都度反射スペクトルを取得した。黒い正方形のホルダ1辺が3 cm。反射スペクトル取得エリアは白点線で示した、ホルダ中央円形部分内1 cm角程度の領域内部。取得したスペクトル（右）：玄武岩の増加に伴って明るさや全体の形状が変化していくが、縦点線で示した900-nmピーク形状は判別が容易であることが分かる。
https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2025/pr20250317_2/pr20250317_2.html

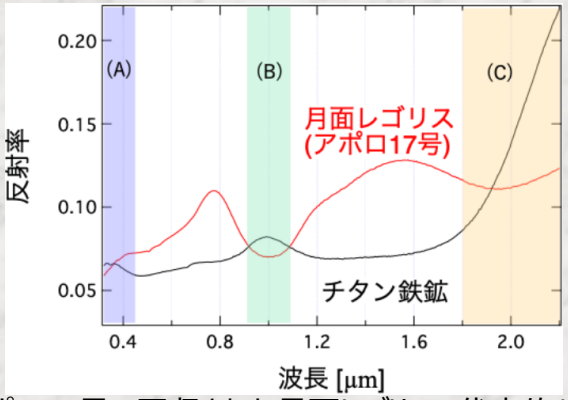


図3 アポロ17号で回収された月面レゴリスの代表的な反射スペクトル（赤線）とチタン鉄鉱の反射スペクトル（黒線）
(A)のUV波長から青色波長の領域ではチタン鉄鉱の反射率が少し上昇し、月面レゴリスでは減少する。また、(B)および(C)の波長帯において、チタン鉄鉱はスペクトルのピークまたは反射率の増加が見られるが、月面レゴリスでは逆に反射率が下がっている。スペクトルデータはRELAB Spectral Database（https://sites.brown.edu/relab/relab-spectral-database/）より。
https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2025/pr20250317_2/pr20250317_2.html

資源利活用分科会検討結果まとめ

検討の流れ	「水素利活用」から「資源利活用」へ対象を拡大し、資源のリストアップ → 市場規模の試算 → ターゲット資源の選定 → 探査・精錬方法 → データ販売までを一気通貫で検討した。
対象資源の選定	装置材料となるアルミニウム・鉄・チタン・シリコンを選定。Fe・Ti・酸素を含み、さらにヘリウム3も取り込まれている可能性のある、海領域の既存リモートセンシングデータで探査可能な**イルメナイト（$FeTiO_3$）を探査対象資源に決定**した。
ビジネスの方向性	分布マップや埋蔵量推定などの探査データを商品化。投資判断を担う商社・事業コンソーシアムを主な顧客に、レポート販売からライセンスフィー型まで多様な収益モデルの可能性を整理した。
探査方式の深堀り	イルメナイト濃集域の特定は、既に公開された論文により、スペクトル特性から存在量を推定できることが確認されている。反射率が極めて低く、900nm付近に反射ピークを示し、反射率の変化が小さい為、この特徴を的確に捉える観測が、イルメナイト探査の鍵となる事が分かった。

参考：その他の月面観測センサ

センサ	搭載ミッション	波長範囲	スペクトル仕様	空間仕様	主な用途
KAGUYA SP	KAGUYA (SELENE) 月周回機の Spectral Profiler (SP)	VIS: 0.52–0.96 μm NIR1: 0.9–1.7 μm NIR2: 1.7–2.6 μm	296**バンド** 6–8 nm**サンプリング**	562 × 400 m	月全球の**連続スペクトル**から**鉱物組成識別**を行うための主力分光器
KAGUYA MI	KAGUYA (SELENE) の Multiband Imager (MI)	VIS：0.415, 0.75, 0.9, 0.95, 1.001 μm NIR：1, 1.05, 1.25, 1.55 μm	9**バンド** （VIS 5 + NIR 4）	VIS: 20 m NIR: 62 m	**高空間分解能。鉱物・FeO・OMAT などの派生マップ**が作られている。
M3	Chandrayaan-1 搭載の Moon Mineralogy Mapper (M3)。NASA/JPL の月面 imaging spectrometer。	0.43–3.0 μm	10 nm **サンプリング** 260 spectral bands / 85 spectral bands	140 m / 70 m	月面の**高分解能鉱物マップ**を与えた代表的センサ。NASA JPL は「月の最初の鉱物図」を提供したと説明。
IIRS	Chandrayaan-2 搭載の Imaging Infrared Spectrometer (IIRS)	0.8–5.0 μm	**約256連続バンド、約20–25 nmサンプリング**	80 m, 20 km swath	ISRO は月面の鉱物・揮発性物質のマッピングが主要目的と説明。
VNIS	Chang'e-4 / Yutu-2 rover 搭載の Visible and Near-IR Imaging Spectrometer (VNIS)	VNIR: 0.45–0.95 μm SWIR: 0.9–2.4 μm	2.4–9.6 nm**サンプリング**	**近接観測** ローバー前方 45°**視野**、センサ高 0.69 m	**月面その場で鉱物組成を測る**のが最大の特徴。論文では、月裏側で高分解能スペクトル取得に成功と記載。