

月の宝探し： ハイパースペクトルリモートセンシング技術を 駆使した月の資源鉱物マッピング

山本 聡¹・松岡 萌¹・長岡 央²・大竹 真紀子^{3,4}・池田 あやめ¹

※本稿は、2025 年 3 月 17 日に行ったプレス発表 (https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2025/pr20250317_2/pr20250317_2.html) に加筆し、再編したものです。

1. はじめに

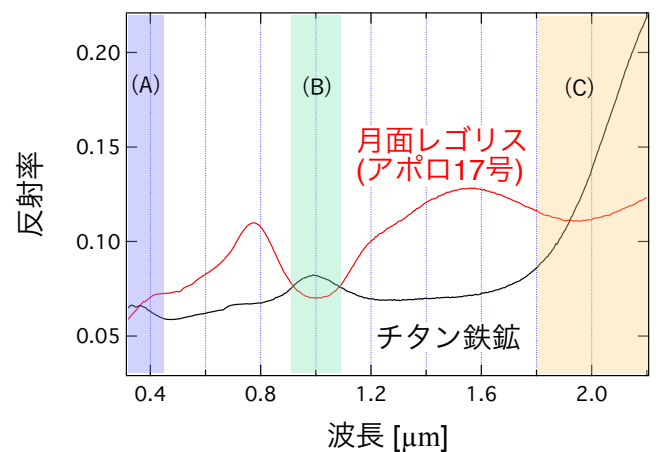
近年、月での産業利用・資源探査に向けた取り組みが加速しています。月面での水や酸素の採取技術や月面基地・輸送装置の設計・製造などに様々な民間企業が取り組む中、月面で調達可能な資源の重要性が高まっています。その代表的な資源がチタン鉄鉱（イルメナイト； FeTiO_3 ）です。チタン鉄鉱は、月面の玄武岩に含まれる黒色または褐色の鉱物で、鉄とチタンを主成分としています。玄武岩は月の内部で生成したマグマが地表面に噴出してできたものであり、玄武岩中のチタン鉄鉱を詳しく調べることは、月の内部組成や進化の理解に役立ちます（例えば、大竹ほか、2021）。さらに、チタン鉄鉱からは水や酸素、鉄、チタンが得られるため、月面基地建设などの有人活動に欠かせない重要資源とされています（例えば、Hawke *et al.*, 1990；Papike *et al.*, 1991）。したがって、月面のチタン鉄鉱の分布を明らかにすることは、月の科学と資源探査の両面で重要です。

この記事では、リモートセンシング技術を用いた月の資源鉱物マッピングの研究事例(Yamamoto *et al.*, 2025)として、月面におけるチタン鉄鉱の濃集地域を明らかにした研究成果のプレス発表(2025 年 3 月 17 日)を基に、加筆・再構成しています。

2. 月のチタン鉄鉱をどうやって探すのか？

月面のどこにチタン鉄鉱が濃集しているのかを知るには、リモートセンシングデータの活用が欠かせません。こうしたデータから月面の表層にある特定の鉱物を判別するには、それぞれの鉱物が持つ反射スペクトルの特徴を詳しく知る必要があります。反射スペクトルとは、対象物が

特定の波長の光をどの程度反射するかの割合（反射率）を、様々な波長にわたって示したものです。第 1 図は実験室で測定されたチタン鉄鉱の反射スペクトルを示したものです。チタン鉄鉱を含む酸化チタン系の鉱物は、紫外線（UV）から青色の波長にかけて、反射率が高くなるという特徴があります（第 1 図の (A) の波長帯）。一方、月の主要鉱物である輝石、カンラン石、斜長石は、同じ波長帯で反射率が低下することが知られています。この違いを利用して、これまでの月のリモートセンシング解析では、UV 波長の画像と可視光の画像の比を取ることで、酸化チタンに富む玄武岩の分布を推定してきました。しかし、この方法には限界があります。玄武岩以外の領域には適用できず、特に



第 1 図 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) 及び (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/> 閲覧日：2025 年 6 月 26 日) より。

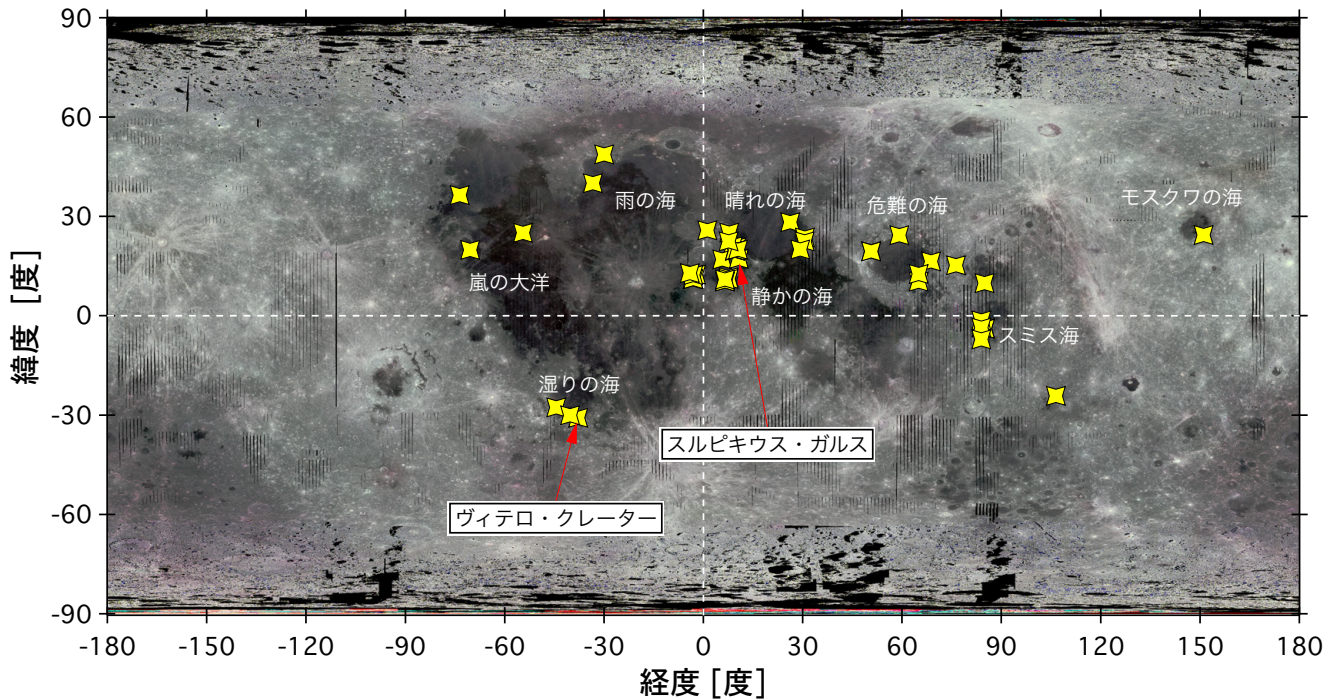
1 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門

2 立命館大学 宇宙地球探査研究センター（ESEC） 〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

3 岡山大学 惑星物質研究所 〒 682-0193 鳥取県東伯郡三朝町山田 827

4 会津大学 コンピュータ理工学部 〒 965-8580 福島県会津若松市一箕町鶴賀

キーワード：リモートセンシング、地質層序解析、月、イルメナイト、月の知的基盤整備、月基地建设



第2図 月全球のチタン鉄鉱濃集地域の分布図(黄色印)。縦破線は地球から見た月面中心の緯度線，横破線は月の赤道に相当。背景は月の明るさマップで，月の中央付近の黒いところは，玄武岩で覆われた「海」と呼ばれるところに相当。

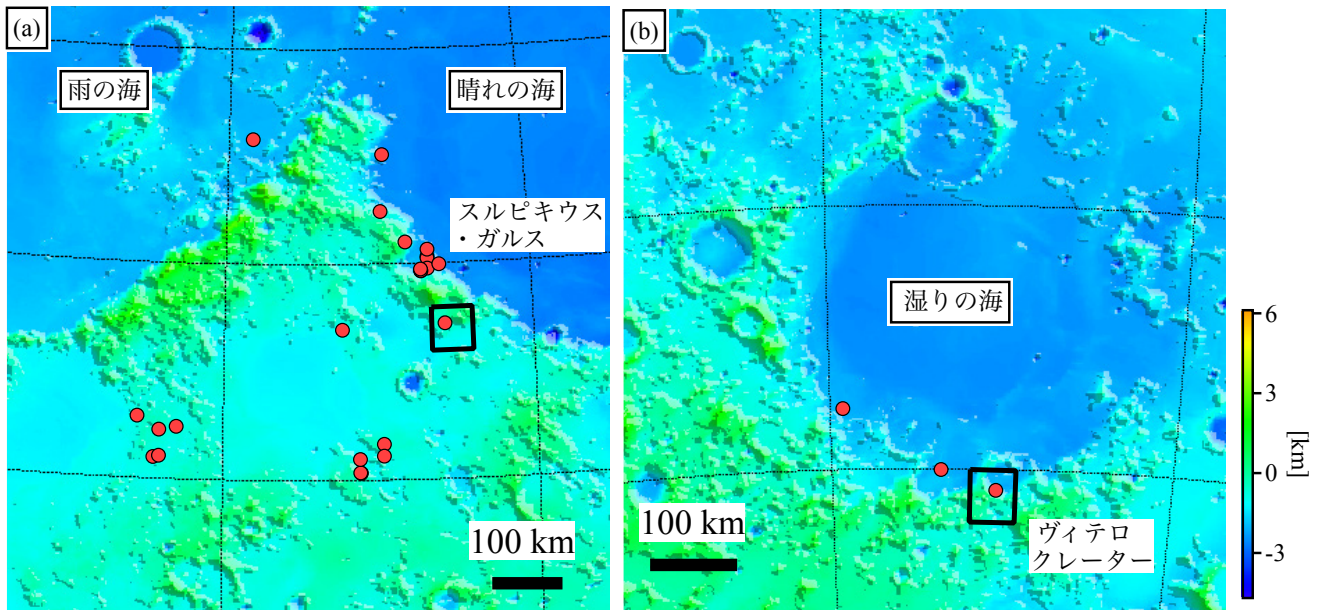
火山性ガラスが広がる領域では酸化チタンのUVの反射スペクトル特性が識別できなくなってしまうのです。そのため，月全体でチタン鉄鉱がどこに濃集しているのか，これまで十分に把握されていませんでした。

一方，チタン鉄鉱の近赤外線(波長0.8～2.5 μm付近)の反射スペクトルは，月の主要鉱物が混在した典型的なレゴリス(大気を持たない月や小惑星の表層で見られる，隕石衝突により形成された堆積物の総称)とは異なる特性を示すことが知られています。第1図では月面の代表的なレゴリスとチタン鉄鉱の反射スペクトルを比較しています。レゴリスのスペクトルは，波長1 μmと2 μm付近で反射率が低下し，下に凸の特徴を示します(第1図の(B)と(C)の波長帯)。これに対して，チタン鉄鉱は波長1 μmで反射率が増加し，上に凸の特徴を示します。さらに波長2 μmでも反射率が高くなります。このような反射率の増加を，以下では「スペクトルのピーク」と呼びます。このピークはレゴリス中にガラスや様々な鉱物が混在している場合でも，微弱な信号として検知できる可能性があります。

3. 「宝探し」：大量のスペクトルデータに対するデータマイニング

そこで私たちは，月探査機かぐや(SELENE)搭載の

Spectral Profiler(略称:SP)によって取得された，約7000万に及ぶ膨大なハイパースペクトルデータの中から，「スペクトルのピーク」を持つものだけを抽出するデータマイニングを行いました。ハイパースペクトルデータとは，数10～数100の連続した波長帯で取得された詳細な反射スペクトル情報を含むもので，複数の鉱物が混在する中でも微弱なスペクトルピークを識別できる精度を持っています(SPやSELENE搭載の他の光学センサの詳細については宇宙航空研究開発機構，2007を参照)。このデータマイニングの結果，月面上でスペクトルのピークを示す51地点を特定することができました(第2図)。これらの地点はほぼ全て月の表側に集中しており，裏側にはわずかしか存在しないことが分かりました。また，多くの地点が「海」や「嵐の大洋」と呼ばれる地形の周辺に位置しており，具体的には，雨の海，晴れの海，危難の海，スミスの海，モスクワの海，湿りの海及び嵐の大洋の北西部で見つかっています。第3図では，雨の海，晴れの海や湿りの海周辺の検出地点を拡大して示しています。これらのチタン鉄鉱が濃集する地域は，従来着目されていた玄武岩の「海」(第3図の青色の部分)ではなく，その周囲に広がる火山活動によって堆積した火砕堆積物領域に分布していることが分かりました。



第3図 (a) 雨の海と晴れの海周辺及び(b) 湿りの海周辺のチタン鉄鉱濃集地点(赤丸)。第4図で示しているスルピキウス・ガルスとヴィテロ・クレーターの位置を黒四角で囲んでいる。背景はかぐや(SELENE)による高度データ(Araki et al., 2009, 2013)。

4. リモートセンシングを使ったチタン鉄鉱濃集サイトの層序解析

さらに私たちは、チタン鉄鉱の濃集地域に対して、SELENE 搭載のマルチバンドカメラ(以下「MI」という)と地形カメラ(TC)の画像を用いた融合解析を行い、チタン鉄鉱の岩体や周辺の地質を詳細に調べました。MI は、波長 0.5 ~ 1.7 μm の範囲に対して 9 種類の異なる波長帯で反射スペクトルを取得する画像センサで、数 10 m の空間分解能で鉱物や岩石の分布を詳細に把握することができます。その結果、チタン鉄鉱に富む物質は、玄武岩が広がる領域よりもやや高いところに位置する「月の高地」と呼ばれる地域に堆積した火砕堆積物中(第4図(a))や、天体の衝突で形成された外縁部(第4図(b))などに濃集していることが分かりました。また火砕堆積物の周囲には火山性ガラスも多く分布しており、第4図(b)の緑色の部分が火山性ガラスの分布を示しています。

一方、過去の研究で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ピークが確認されませんでした。この理由として、玄武岩中に多く含まれる輝石やカンラン石が、チタン鉄鉱のスペクトルの特徴を覆い隠している可能性が考えられます。また、玄武岩中の酸化チタンは必ずしもチタン鉄鉱として存在するわけではなく、玄武岩中で他の鉱物に取り込まれている場合や、隕石衝突によって生成されたガラス状物質に含まれている可能性もあります。いずれにしても、玄武岩

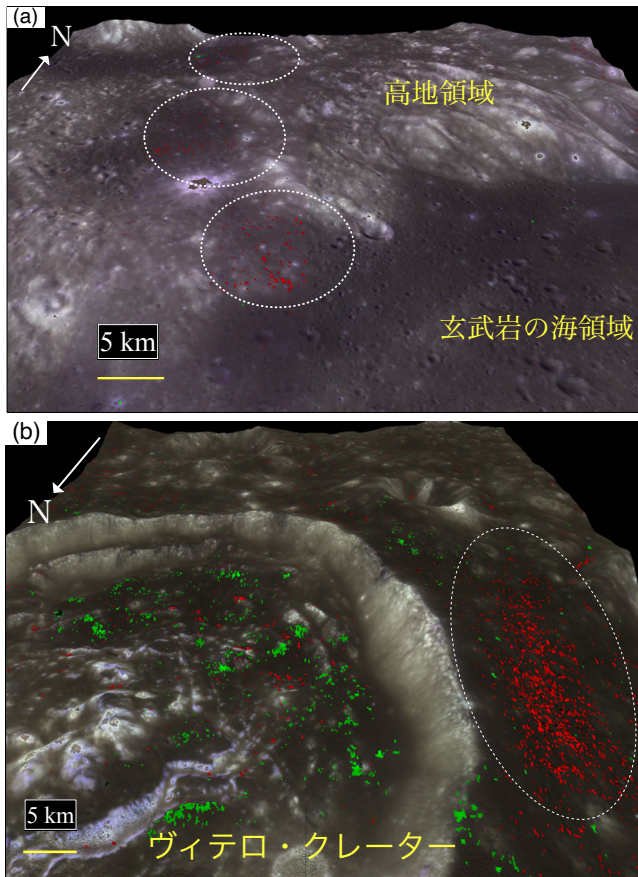
中のチタン鉄鉱の濃度が他の鉱物に比べて十分に高くないため、スペクトルのピークが現れなかったと考えられます。逆に言えば、今回見つかった 51 か所の火砕堆積物には、スペクトルのピークが明瞭に現れるほど、チタン鉄鉱が高濃度で存在している可能性が高いといえます。

5. 将来の月資源探査としての重要性

月の火砕堆積物は、マグマが噴出する過程で細かい粒子となり、月の表面に堆積したものと考えられています。玄武岩からチタン鉄鉱を取り出す場合と比べて、粒子の細かい火砕堆積物中のチタン鉄鉱は、より効率的に採取できる可能性が高いと考えられます(Hawke et al., 1990)。また、粒子が細かいほど、全体としての表面積が大きくなるため、水素を用いた還元処理を効率良く行えます。そのため、資源採掘及び精製の両面で玄武岩より有利です。

注目される埋蔵量ですが、第4図(a)の「スルピキウス・ガルス」と呼ばれる領域では、 10^{14} kg (1,000 億トン) 存在すると算出されました。この量は月の資源開発において十分過ぎるほどの量であると考えられます。したがって、今回見つけた火砕堆積物に含まれるチタン鉄鉱は、従来知られてきた酸化チタンに富む玄武岩よりも資源としての利用価値が高いと言えます。

月は今や科学の対象にとどまらず、産業利用や資源探査に向けた人類の活動領域になりつつあります。月面での有人活動に関連する技術開発に、国内外の民間企業が取り組



第4図 (a) 晴れの海の南西にあるスルピキウス・ガルス (Sulpicius Gallus) 及び (b) 湿りの海にあるヴィテロ・クレーター (Vittello crater) 周囲の火砕堆積物領域の鳥瞰図 (天底角 60 度)。チタン鉄鉱に富む場所を赤点, ガラスに富む場所を緑点で示した。白点線で囲まれた火砕堆積物が覆っている暗い場所に, 多くの赤い点が分布している。背景はマルチバンド画像で作成した合成カラー画像と, 地形カメラによる高度データを使用して作成。

みを始めている中で, 本研究の成果は, 資源鉱物に関する月の重要な地質情報を提供するものです。今後は, チタン鉄鉱濃集地域に対して高解像度画像や熱赤外データなど多様な地質情報を用いた融合解析を進め, チタン鉄鉱の化学組成, 純度 (濃度) や火砕堆積物の粒度など, 詳細な層序と組成分布を明らかにしていく予定です。これにより, 具体的な採掘候補地点の絞り込みに必要な月資源に係る知的基盤の整備を目指します。

文 献

Araki, H., Tazawa, S., Noda, H., Ishihara, Y., Goossens, S., Sasaki, S., Kawano, N., Kamiya, I., Otake, H., Oberst, J. and Shum, C. (2009) Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT laser altimetry. *Science*, **323**, 897–900. doi:10.1126/

science.1164146

Araki, H., Noda, H., Tazawa, S., Ishihara, Y., Goossens, S. and Sasaki, S. (2013) Lunar laser topography by LALT on board the KAGUYA lunar explorer – Operational history, new topographic data, peak height analysis of laser echo pulses. *Advances in Space Research*, **52**, 262–271. doi:10.1016/j.asr.2013.02.018

Hawke, B. R., Coombs, C. R. and Clark, B. (1990) Ilmenite-rich pyroclastic deposits: An ideal lunar resource. In Sharpton, V. L. and Ryder, G., eds., *Proceedings of the 20th Lunar and Planetary Science Conference*, 249–258.

大竹真紀子・長岡 央・本田親寿 (2021) 第3章 マグマオーシャン (初期地殻の形成を含む)。並木則行・諸田智克・西野真木・佐伯和人・小河正基・大竹真紀子編, 月サイエンスブック 第一部, 月サイエンスブック編集委員会, 53–91.

Papike, J., Taylor, L. and Simon, S. (1991) Lunar minerals. In Heiken, G. H., Vaniman, D. T. and French, B. M., eds., *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon*, Cambridge University Press, Cambridge, 121–181.

宇宙航空研究開発機構 (2007) 月周回衛星「かぐや (SELENE)」, 観測ミッション, LISM [地形カメラ (TC)・マルチバンドイメージャ (MI)・スペクトルプロファイラ (SP)]. https://www.selene.jaxa.jp/ja/equipment/tc_j.htm (閲覧日: 2025 年 6 月 26 日)

Yamamoto, S., Matsuoka M., Nagaoka H., Ohtake M. and Ikeda, A. (2025) Global distribution and geological features of ilmenite-rich sites on the lunar surface. *Journal of Geophysical Research: Planets*, **130**, e2024JE008663. doi:10.1029/2024JE008663

YAMAMOTO Satoru, MATSUOKA Moe, NAGAOKA Hiroshi, OHTAKE Makiko, IKEDA Ayame (2025) "Lunar Treasure Hunt" Mapping of lunar resources and minerals using hyperspectral remote sensing technology.

(受付: 2025 年 6 月 26 日)