

地質標本館 特別展

空間と波長で 広がる地質学

リモートセンシング

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター

 産総研
ともに挑む。つぎを創る。

 5月10日は
地質の日

 GEOLOGICAL MUSEUM
地質標本館





INDEX

はじめに 山本 聡 3

空間と波長 Introduction

- リモセンで広がる空間と波長 山本 聡・松岡 萌・池田あやめ .. 4
- 人間の目もリモセン／電子の目で広がる世界 山本 聡 5
- 人間の目には分からない情報をどう引き出すのか？ 山本 聡 6
- 私たちの視点を広げるリモセン 山本 聡 7

ミクロ スケールの世界

- 小さな鉱物が語る 松岡 萌 8
- X線や電子線で見ると 松岡 萌 9

人間 スケールの世界

- リモセンで見る植物の世界 山本 聡 10
- 野外調査とリモセンのタグ 山本 聡 11

地表-地形 スケールの世界

- 平面の画像から地面の起伏を捉える／鳥の目線で地域を見る！
..... 池田あやめ 12
- いろいろな波長で見ると 山本 聡 13
- マイクロ波で斜面の変動を見る！ 水落裕樹 14

地球 スケールの世界

- 異形の火山 山本 聡 15
- 近赤外線で見ると 山本 聡 16
- 地球のマントルを宇宙から観測 山本 聡 17

地球-月 スケールの世界

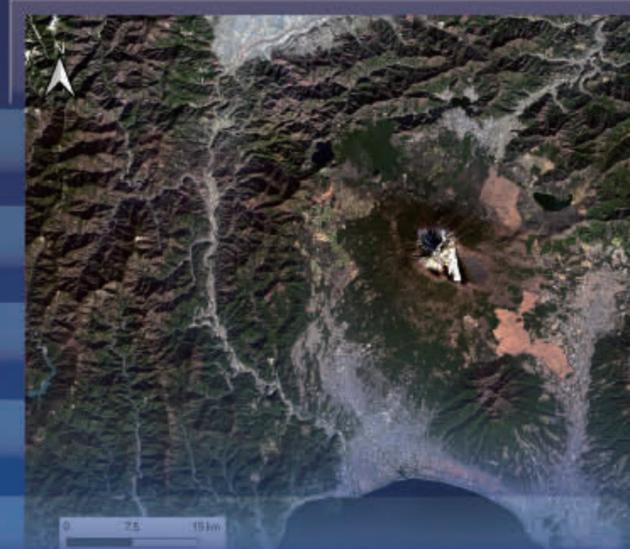
- 地球と月が織りなす世界 山本 聡 18
- 月面を多彩な光で見ると／反射スペクトルを使った月資源探査
..... 山本 聡 19
- 月面の細かな地形 池田あやめ 20

太陽系 スケールの世界

- 太陽系の多様な仲間たち 松岡 萌 21
- 小惑星と隕石の「神経衰弱」 松岡 萌 22
- 火星の空を舞う！ 山本 聡 23

引用文献など 24

地質情報研究部門 リモートセンシング研究グループ



はじめに

リモートセンシング（リモセン）は、観測対象に直接接触することなく、その反射や放射される電磁波などの信号を測定し、情報を得る技術です。

太陽の光が地表の物質にあたり、その反射した光を人工衛星のセンサが捉えることで、離れたところからさまざまな情報を得ることができます。

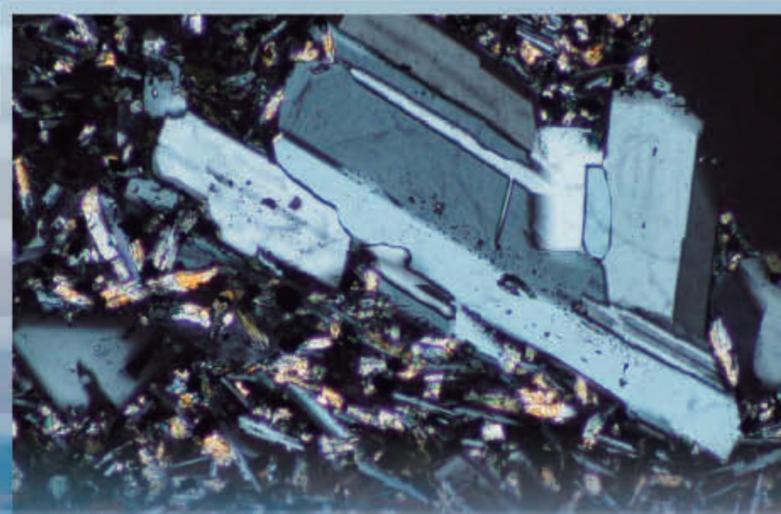
リモセンは、人間の視点を離れ、私たちの目では決して見えない世界を映し出す力を持っています。



顕微鏡を通せば岩石や鉱物の微細な特徴を捉え、ドローンや航空機からは私たちが普段見ている景色とは異なる地表の姿を捉えることができます。人工衛星は、地上からは知ることができない地球全体の姿を映し出し、さらに月や火星、小惑星といった地球外天体の地形や物質をも明らかにします。

また、リモセンは「空間」だけでなく「波長」の世界も広げます。私たちが普段見ている可視光だけでなく、X線・赤外線・電波といった多様な電磁波を使うことで、目では見えない物質の特徴を捉え、地質や環境の隠れた姿を明らかにしてくれるのです。

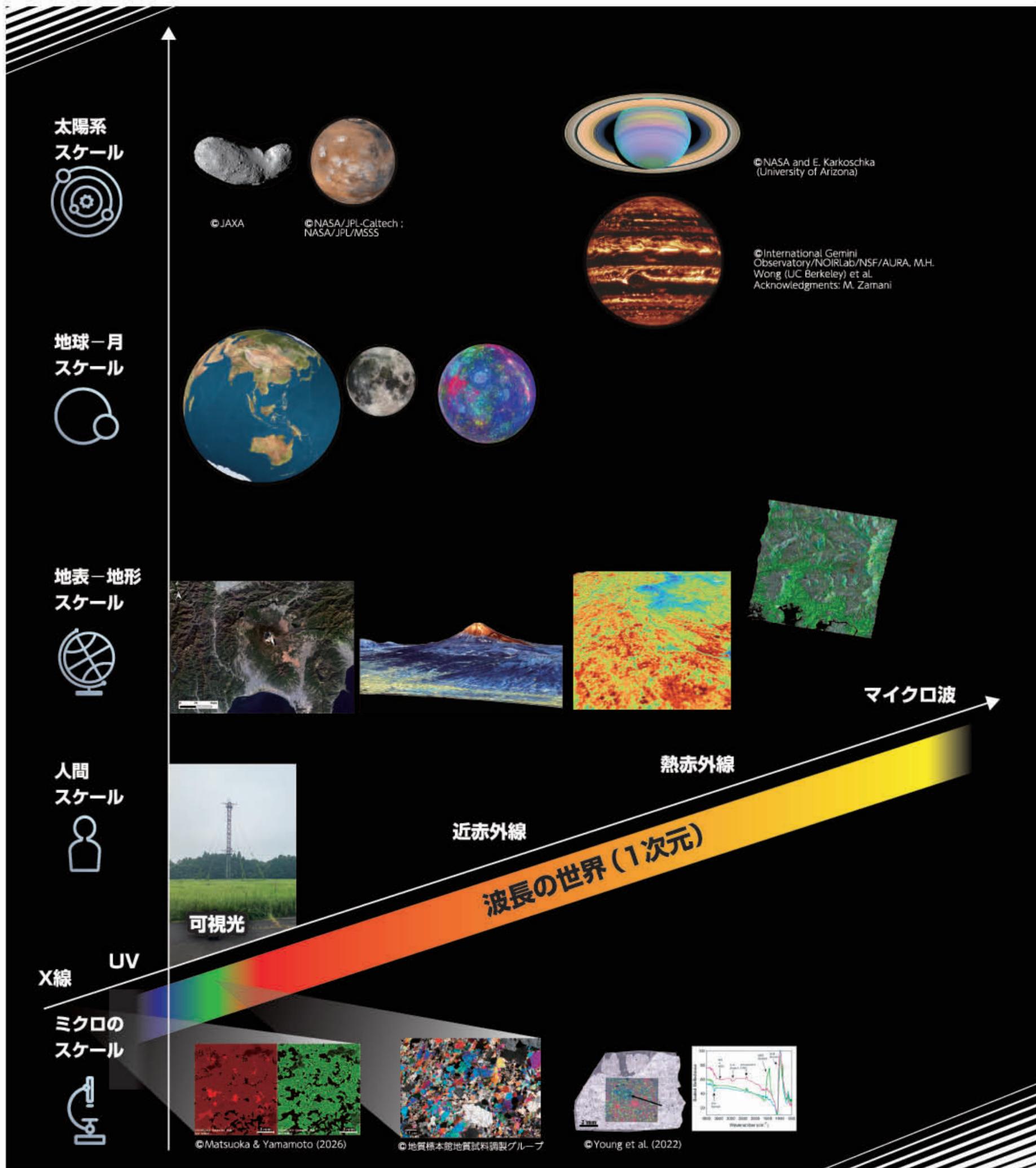
この展示では、ミクروسケールから太陽系スケールまで、さまざまな世界で使われるリモセンが、どのようにして地質学に新しい視点を与え、地球や惑星の成り立ちを理解する助けになっているのか、その魅力を紹介します。



リモセンで広がる空間と波長

皆さんが目で見える「地質」、実は限られたスケールでしか捉えられていません。リモセン（遠隔観測）は、その枠を大きく広げてくれる道具です。

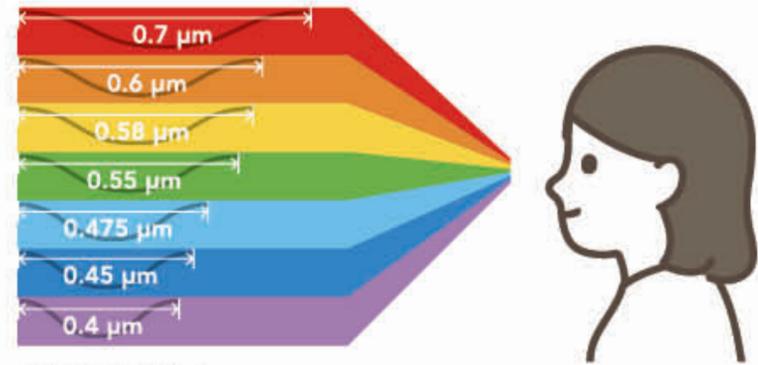
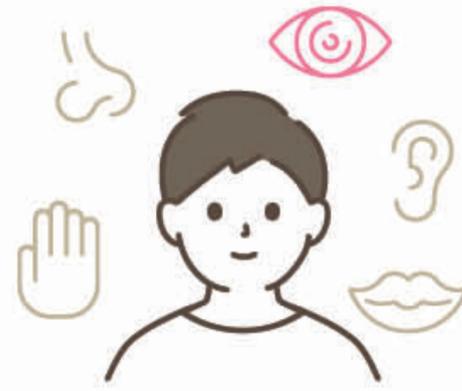
この展示では、空間と波長という2つの軸を通じて、リモセンが広げてくれる地質の世界をご紹介します。



人間の目もリモセン

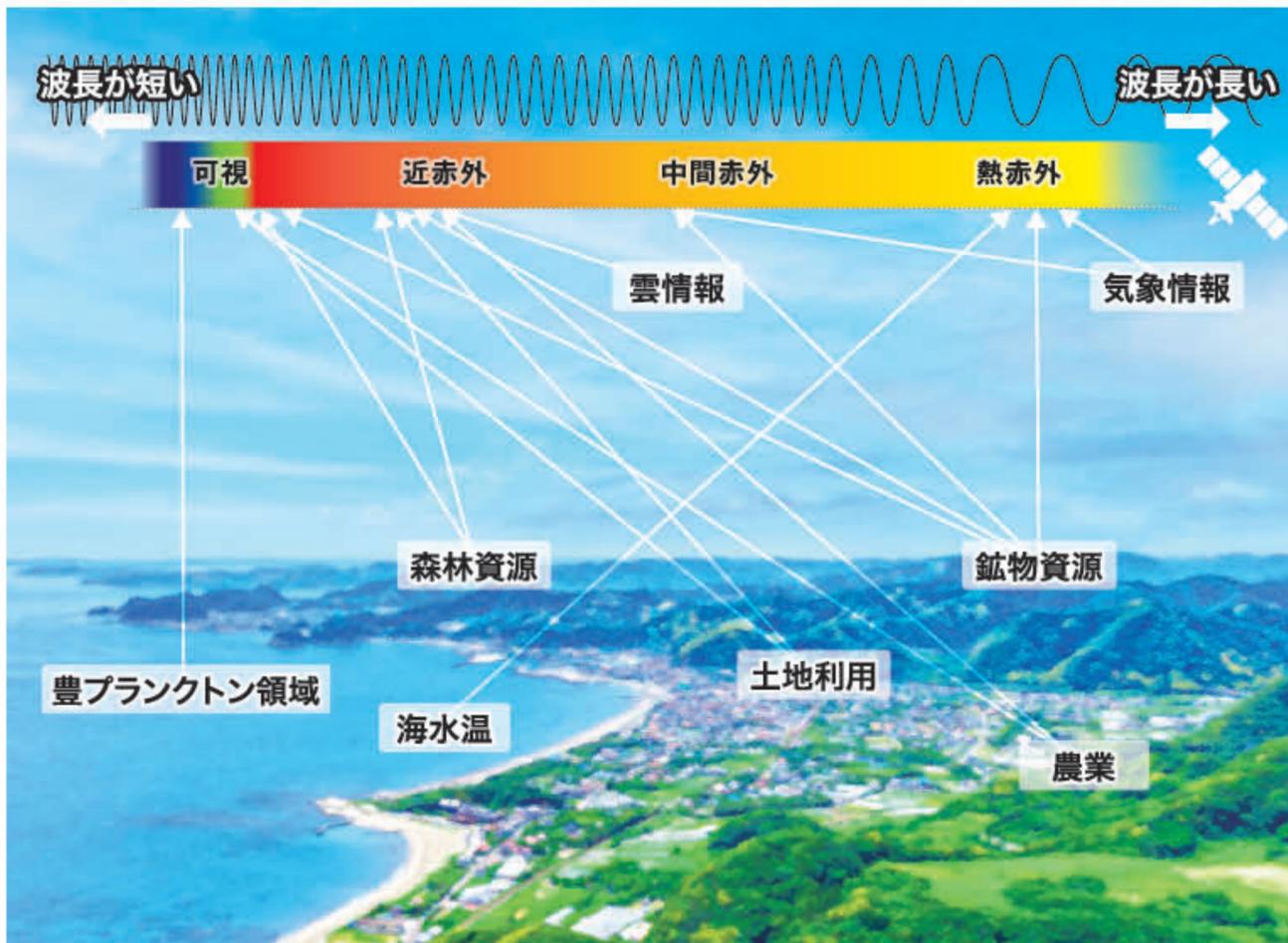
私たちの目は物体に当たって反射してきた光を受け取り、その色や明るさの違いから「岩石の色の違い」「青空」「緑の森」といった判断をしています。これは、反射された光をもとに対象を識別するリモセンと同じ仕組みです。

でも、人間の目が感知できるのは「可視光（およそ0.4～0.7マイクロメートル [μm] の波長）」に限られています。私たちには特徴のない白っぽく見える岩石でも、赤外線で観測するとまったく違う「色」の特徴を持っていることが分かります。



可視光の波長と色。

電子の目で広がる世界



さまざまな光の波長により、得られる情報も異なる。

光学センサは、人間の目では捉えられない光を観測することで、さまざまな情報を引き出すことができます。

例えば可視光から近赤外線の組み合わせを用いると、森林や植生の健康状態、土地利用の違い、砂漠や氷河の広がりなども可視化できます。

近赤外線からは、岩石に含まれる鉱物の種類や含水量、さらには熱水作用などで変化した痕跡まで知ることができます。

また、赤外線からは、温度が分かるだけでなく、岩石に含まれる鉱物の種類や元素の量が推定できるのです。

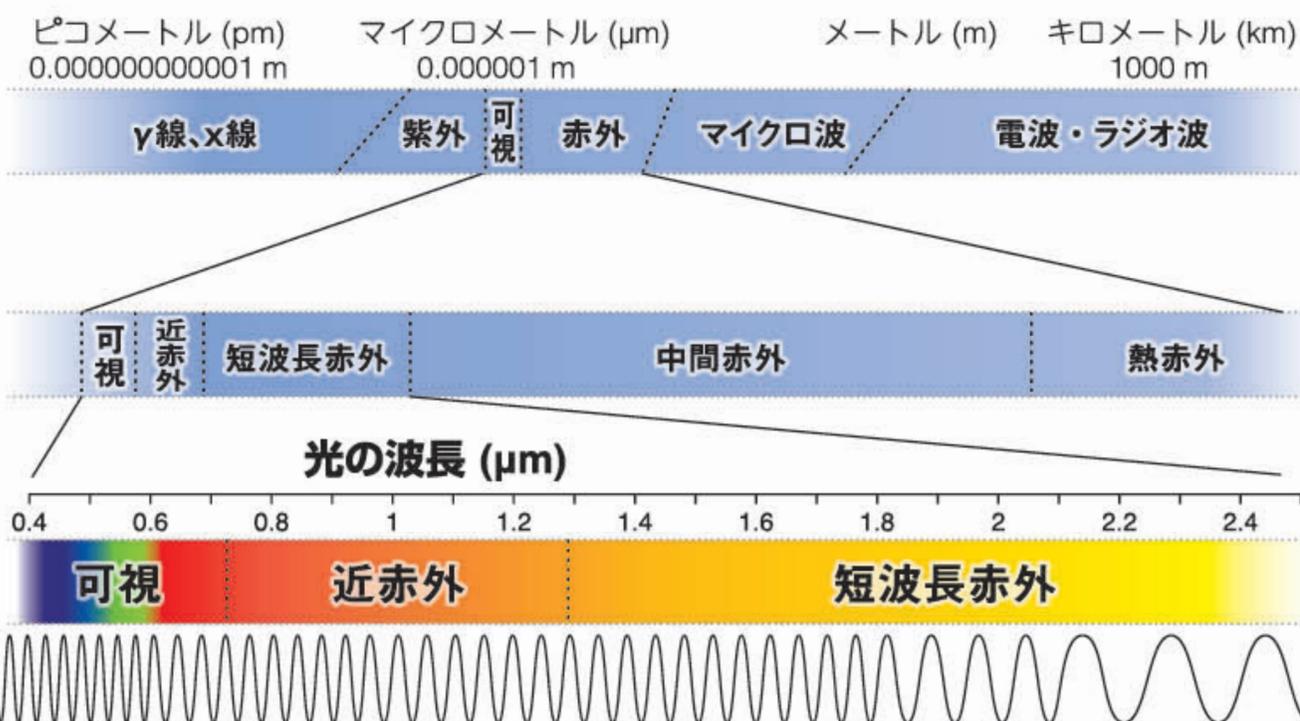
つまり光学センサは、人間の目では気づかない情報を「光の色や強さの変化」として読み取り、地球や地質、環境の多彩な姿を明らかにする強力な道具なのです。



0.76 μm 付近で見た手の画像。血液中に含まれる鉄(ヘモグロビン)の吸収により、血管が暗く映っている。

人間の目には分からない情報を どう引き出すのか？ - 光の反射率が教えてくれること

波長の種類



太陽の光には、目に見える色だけでなく、赤外線や紫外線など、さまざまな波長の光が含まれています。



私たちが目にする色は、物体がその光のうち“どの波長を反射するか”で決まります。赤く見える物体は赤の波長を強く反射し、緑色に見える物体は緑の波長を反射しているのです (図1)。

こうした反射の度合いを波長ごとに記録したものを「反射スペクトル」と呼びます。それぞれの物質は、光の波長ごとに反射の強さが異なる独自の反射スペクトルを持っています。

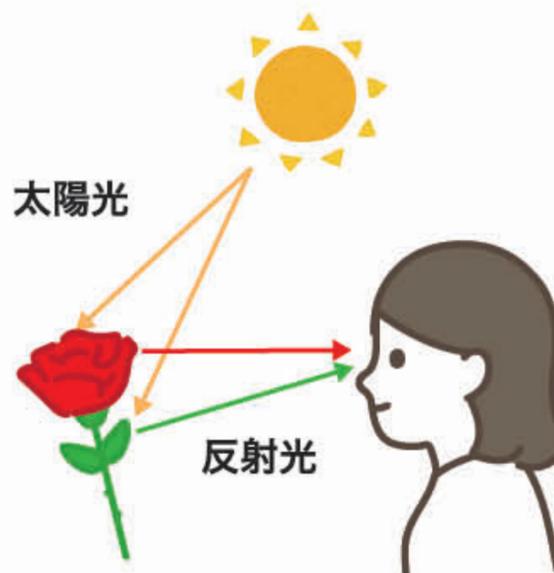


図1 波長ごとの反射と色。

図2は3種類の鉱物について実験室で取得された反射スペクトルの例です。グラフの形が波長ごとに上下に変動しているのには意味があります。例えば、1.4 マイクロメートルで、どの鉱物も反射率が急激に下がっているのは、水酸基 (OH) が存在することによって光がたくさん吸収されることによるものです。

つまり、この反射スペクトルの形を詳しく解析することで、人間の目では分からないさまざまな情報を引き出すのです。

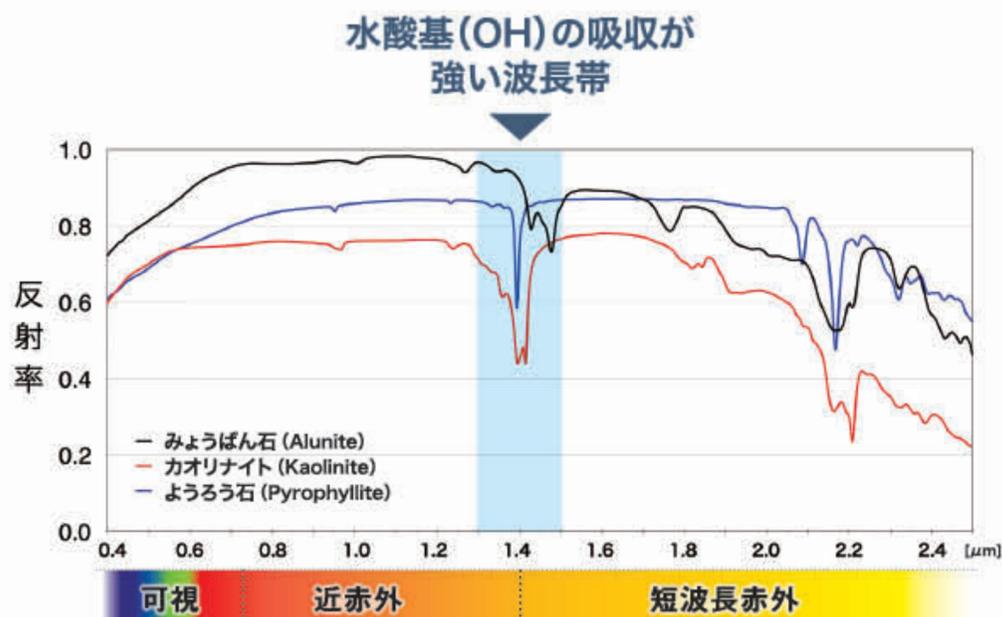


図2 3種の鉱物による反射スペクトル。

私たちの視点を広げるリモセン

リモセンで使われる「目」はさまざまなプラットフォームで使用されることで、ミクロの世界からマクロな世界まで、わたしたちの視点を広げてくれます。



▲ 顕微鏡

顕微鏡は、私たちの肉眼では決して見えない“微小な遠方の世界”を映し出す装置です。鉱物の結晶構造や岩石の細かな組織、さらには微生物の姿までを明らかにし、地質の理解を大きく広げてくれます。



▲ ドローンリモセン

最近では、ドローンを使った空撮が盛んになっています。その機動力を活かし、特に調べたい場所を集中的に観測するセンシング技術として、環境調査や資源探査など、さまざまな分野での活用が期待されています。



▲ タワーリモセン

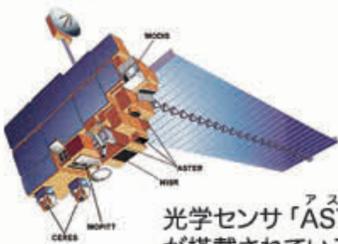
高い鉄塔の上に設置したカメラで同じ場所を継続して観測することも、リモセンのひとつです。この写真の例ではタワーの上に設置されたカメラを使って、植物がいつ芽吹き、花を咲かせ、枯れるのかといった「植物季節」を記録することで、自然のリズムを可視化し、環境の変化を把握しています。

▼ 航空機リモセン



航空機に搭載したセンサを使うリモセンでは、地表の広範囲を高解像度で観測できます。森林や都市、農地の状態を空から追跡し、地形や植生の詳細な情報を引き出すことができます。

▼ 地球観測・惑星探査



© NASA

光学センサ「ASTER」が搭載されている Terra衛星。

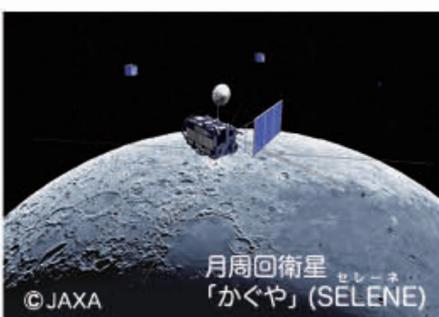
代表的なリモセンとして、地球観測衛星や惑星周回衛星による観測があります。地球の気象や環境の監視はもちろん、月や遠く離れた惑星天体の表面の鉱物分布や地形を捉えることもできるのです。



© NASA/JPL-Caltech/MSSS

▲ 地球外天体でのリモセン

火星や月の表面でもリモセンは活躍します。着陸機や探査ローバから得られる画像や分光分析装置を使って、岩石や鉱物の種類、地形の特徴を解析できます。まるで現地に行ったかのように、地球外天体で地質調査が行えるのです。



© JAXA

月周回衛星「かぐや」(SELENE)



© NASA

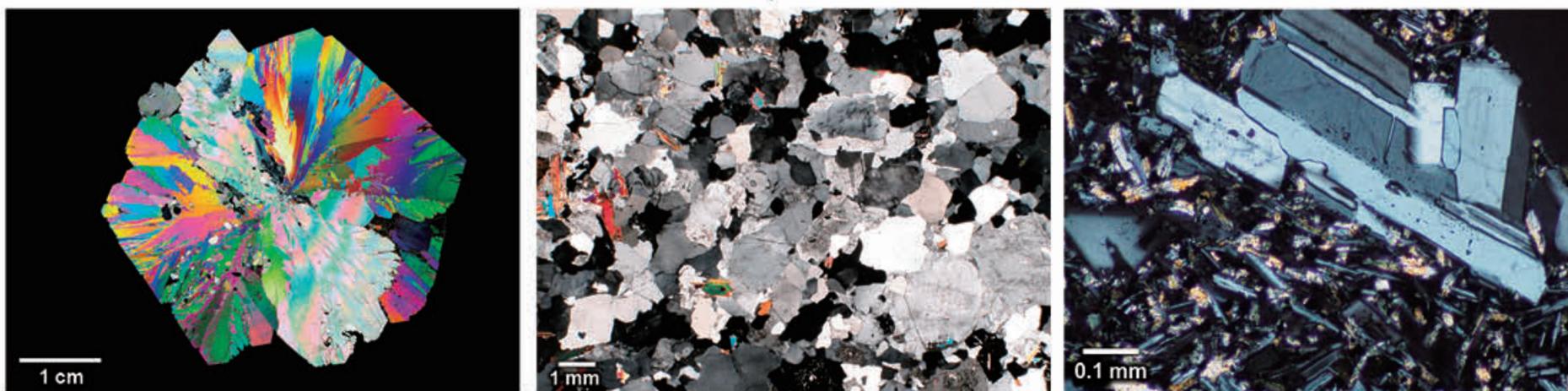
小さな鉱物が語る

人間の目では見分けがつかないほど小さなスケールの世界も、リモセンのフィールドのひとつと言えるでしょう。

波長を使い分けることによって、ミクロのスケールで岩石や鉱物の化学的な性質を詳しく明らかにし、岩石や鉱物ができた当時の環境を知ることができます。

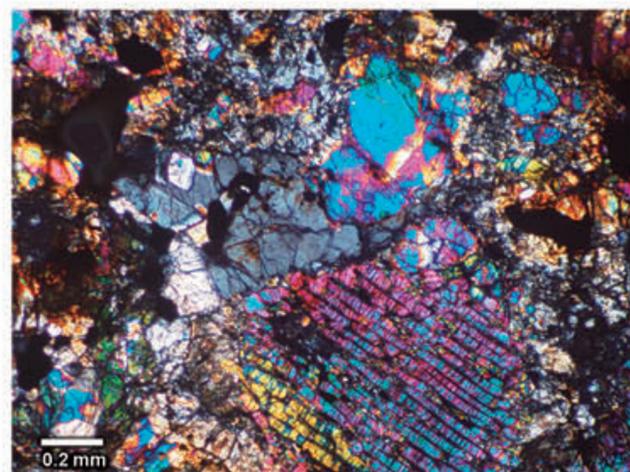
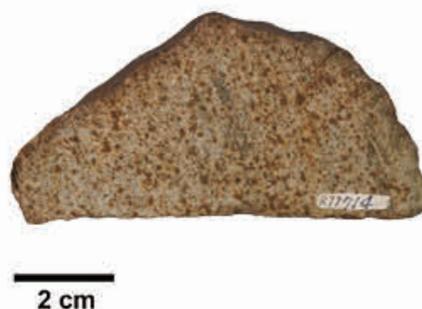
可視光線：^{へんこう}偏光顕微鏡による鉱物同定

映画館の3Dメガネと同じ仕組み（偏光）



岩石薄片の偏光顕微鏡画像。左：アラゴナイト，中央：^{かこうがん}花崗岩，右：^{げんみやがん}玄武岩。撮影：地質標本館 地質試料調製グループ

岩石薄片に可視光を当てることで、鉱物を見分けることができます。鉱物は、それぞれが特有の偏光（ある一定方向に振動する光）を持っています。岩石をととても薄く（約 0.03 mm）加工して可視光を当てることで、偏光の性質から岩石を形作っている鉱物を知ることができます。



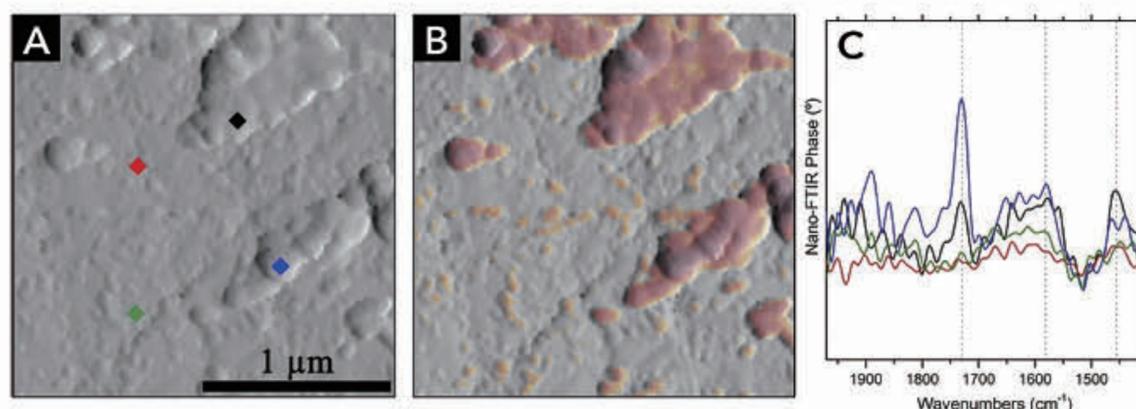
^{きつせ}隕石大島第2号 (GSJ R11714), 右：同隕石の薄片の偏光顕微鏡画像。撮影：地質標本館 地質試料調製グループ

赤外線：顕微分光による鉱物同定

岩石に赤外線を当てることで、ミクロな鉱物マップを描くことができます（右図：A、B）。

鉱物の種類に応じて「赤外スペクトル」の特徴が異なることを利用して（右図：C）、岩石断面を鉱物マップ化し、詳細な鉱物分布を非破壊で明らかにすることができます。

図では、数十～数百 nm サイズの有機物が炭素質隕石のマトリックス（基質）中に分布している様子が示されています。



隕石の微小スケールでの赤外マップ画像と赤外スペクトル。A：分析領域の凹凸を表す画像，B：Aと同じ領域について有機物の分析領域を着色して示した合成画像，C：Aで示された分析領域4点の赤外スペクトル。黒や青のダイヤで示された分析点（図A）では、赤外スペクトルに有機物に由来するピーク（例えば 1730 cm^{-1} の C=O バンド）が表れている（図C） Yesiltas et al. (2021) の図の左上ラベルを変更。

X線や電子線で見える

電子線：電子顕微鏡による組織観察

電磁波だけでなく、「電子」自体を利用することでさらにミクロな世界が浮かび上がります。

小惑星リュウグウの砂粒に電子線を当てることで、水が存在したことを示すさまざまな証拠が発見されました。1/100 mm (=10 μm) サイズと非常に小さい塩の結晶 (写真1) や、さまざまな形状の酸化鉄の一種 (写真2、3) が観察されました。これらは、昔リュウグウに液体の水 (塩水) があったことを示すものです。

このように、ミクロな鉱物を調べることによって、マクロな天体の過去の環境を復元することができるのです。

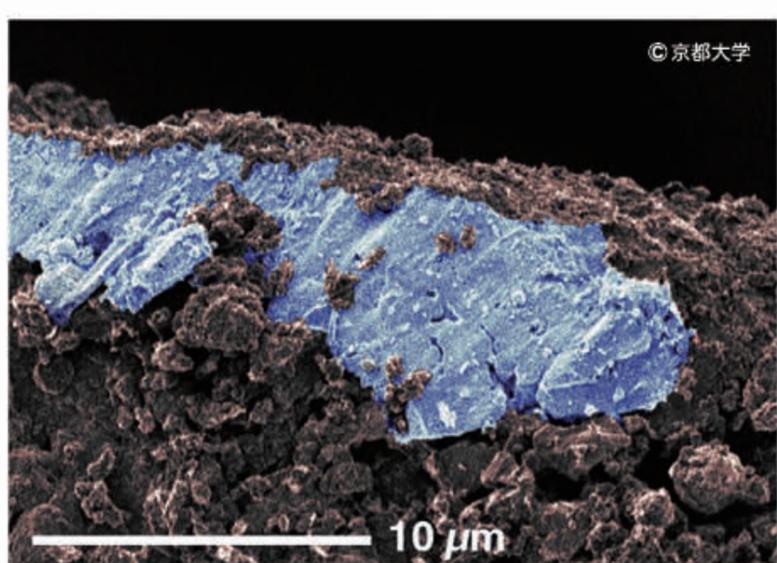


写真1 リュウグウの砂表面で見られたナトリウム炭酸塩脈 (青色) の擬似カラー電子顕微鏡画像. Matsumoto et al. (2024)

リュウグウの砂粒から発見された、いろいろなマグネタイト (磁鉄鉱)

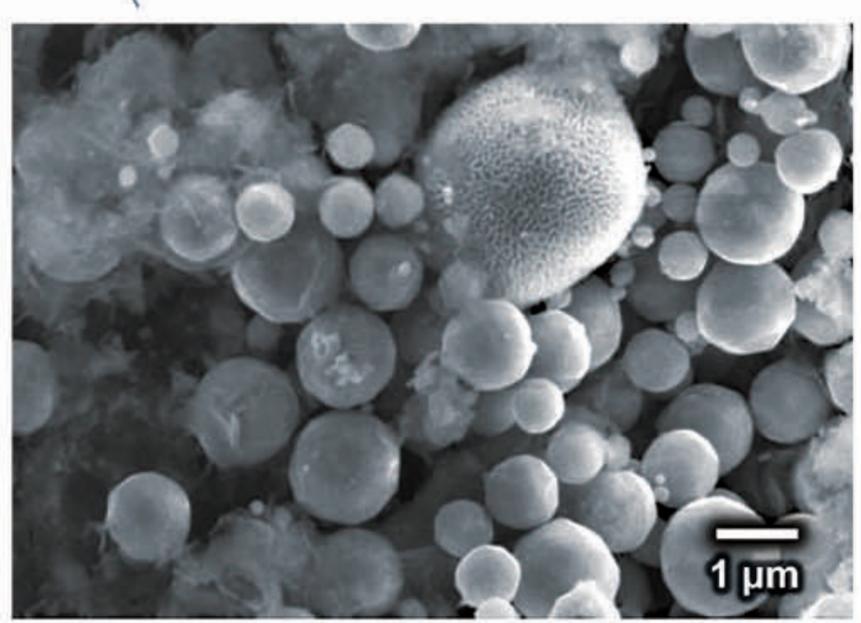


写真2 球状の粒々 (木莓状 = "framboidal" と呼ばれる) のマグネタイトがたくさん集まっている領域. Framboidal magnetiteは一部の隕石でも見つっている. Nakamura et al. (2022)より, 原図の一部を拡大.

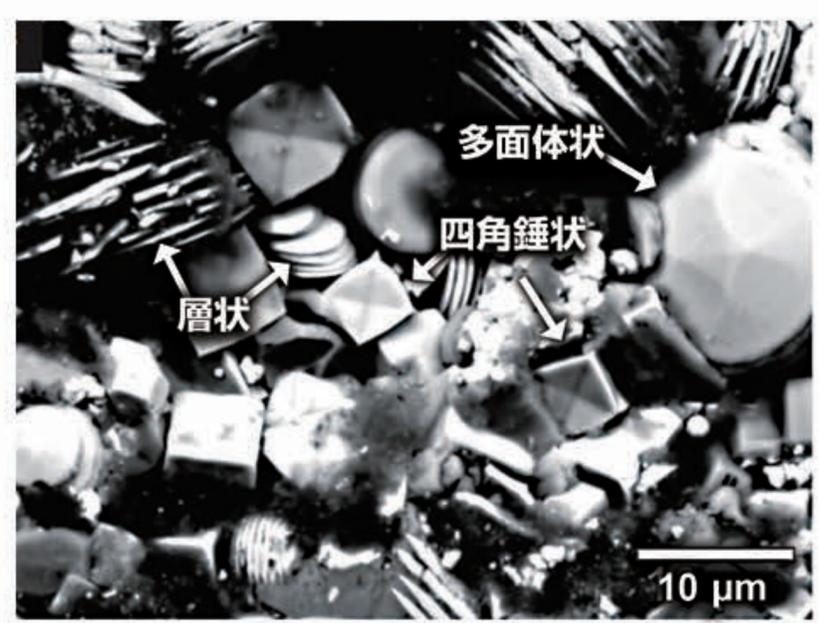


写真3 円盤が何枚も重なったような形状や、四角錐のような形状など、多様なマグネタイトが所狭しと並んでいる. Nakamura et al. (2022) より, 原図の一部を拡大およびテキストを追加.

X線：蛍光X線による元素分布同定

岩石片やその粉末にX線を当てることで、元素とその量 (存在度) を知ることができます (写真4)。試料にX線を当てて生じた蛍光X線のエネルギーを測定 (蛍光X線分析: XRF) すると、その発生源となった元素を特定できます。さらにそれらの蛍光X線の強さから、それぞれの元素濃度も調べることができます。

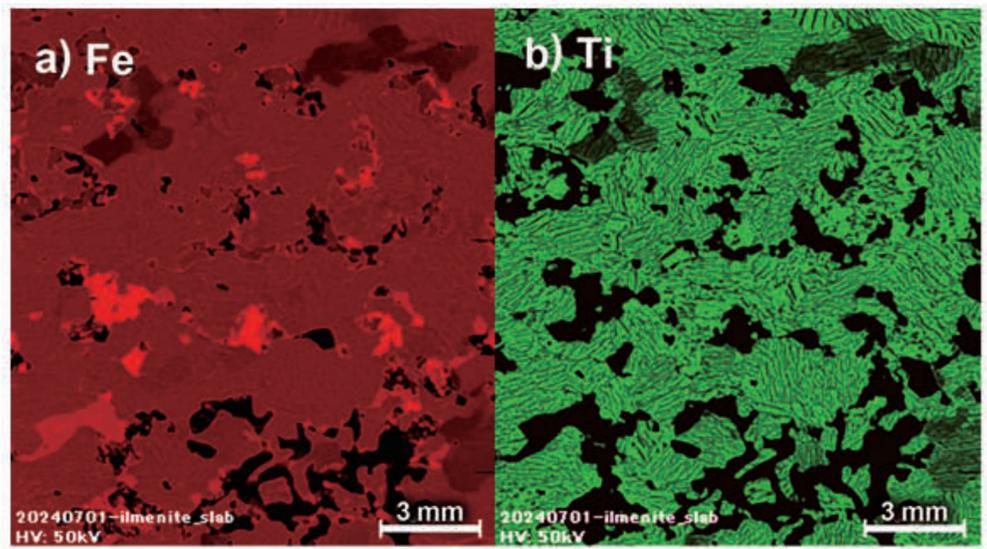
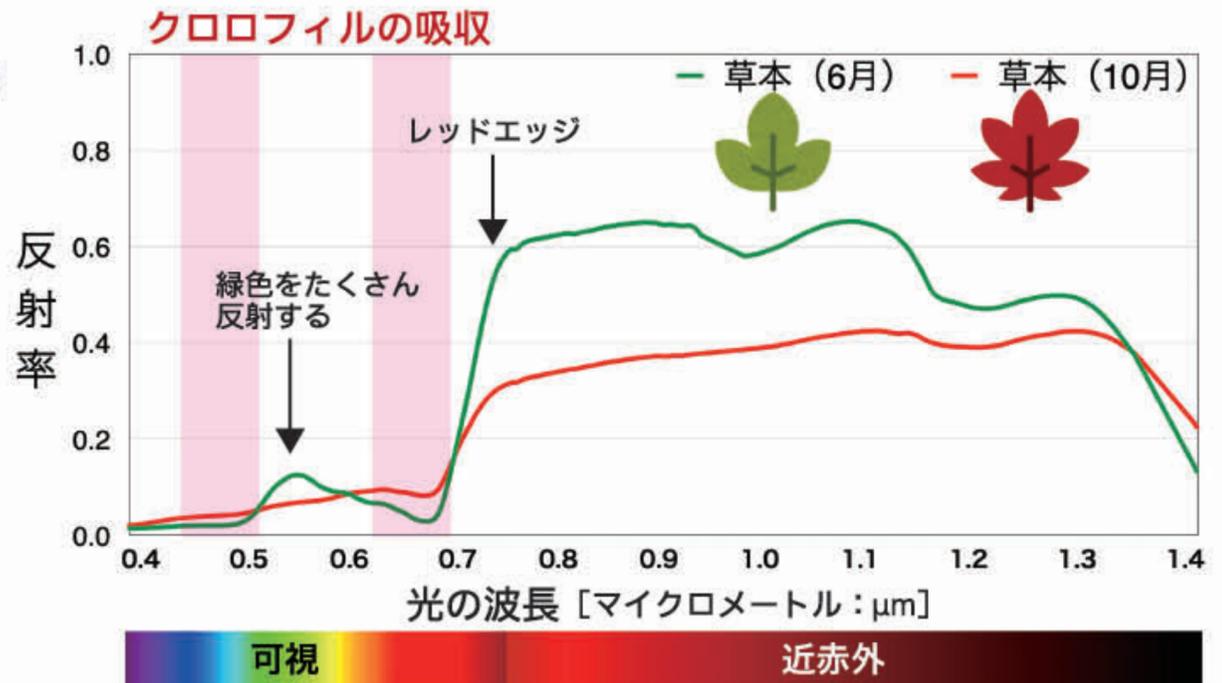


写真4 イルメナイト岩片のマイクロXRFによる元素マップ。赤色や緑色が濃いところほどそれぞれ鉄やチタンの量が多いことを示す。鉄は全域的に分布している。チタンも全域的に分布しているが、ラメラ構造を示している. Matsuoka and Yamamoto (2026).

リモセンで見る植物の世界



6月と10月の草本の反射スペクトル。薄いピンク帯は、クロロフィルによる光の吸収が強く生じる波長帯に相当する。

Q

紅葉すると
なぜ赤い?



A

植物の葉も、反射率が波長ごとに違います。

春～夏の葉は、クロロフィル（葉緑素）が太陽光の中の赤と青の光を吸収し、緑の光を反射するため、緑色に見えるのです。

秋になるとクロロフィルが分解され、代わりにアントシアニンなどの色素が現れ、赤や紫の光を反射することで紅葉が赤く見えるのです。

植物の“見える化”技術 NDVIとは

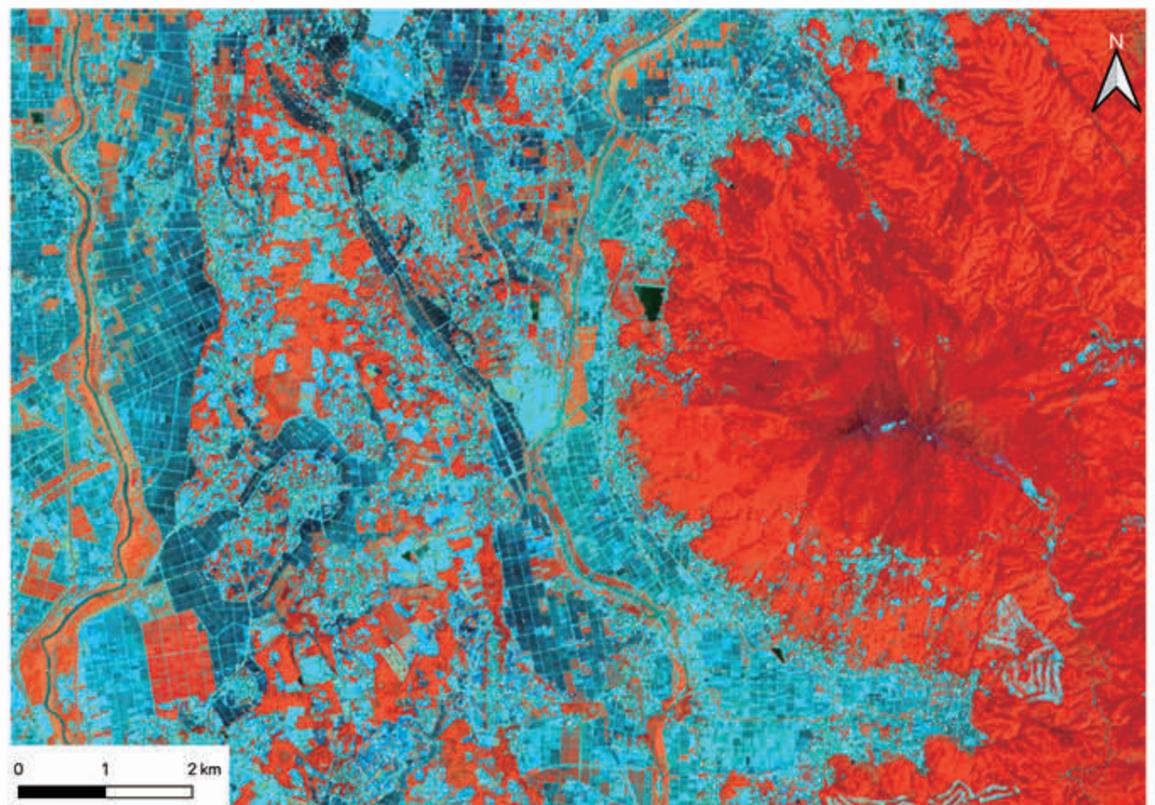
植物は赤色の光を吸収し、近赤外線を強く反射します。この特性の境界は「レッドエッジ」と呼ばれ、植物特有の分光的な特徴です。

この性質を利用して、近赤外線と赤色の反射率の差をとる NDVI(正規化植生指数)という指標を計算することで、植物の繁茂度や成長状態を可視化することができます。

右の図はその処理例です。NDVI の値を赤色の濃淡で表しています。これにより衛星から植生の分布や生育状態を把握することができます。

$$\text{NDVI}^* \text{の定義} = \frac{\text{近赤外線画像} - \text{赤色画像}}{\text{近赤外線画像} + \text{赤色画像}}$$

*NDVI: Normalized Difference Vegetation Index



筑波山周辺の衛星画像。NDVI指標を赤色の鮮明度で表現することにより植生領域の情報が得られる。2007年5月4日撮影。

野外調査とリモセンのタッグ

Q



遠くから観測する
リモセンは、
現地調査とは
違うもの？

A

そんなことはありません。

野外で持ち運びできる分光計を使うことで、人の目では見えない光の情報をその場で収集することができます。現地のリモセンデータを組み合わせることで、地質の理解をさらに深める力になります。

地質調査でのリモセン

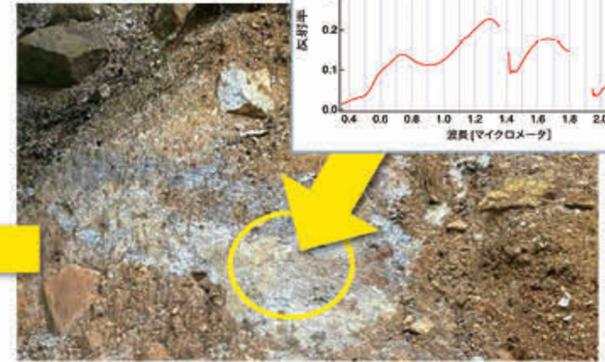
持ち運び可能な反射スペクトル測定ができる装置を使って、その場で現地の鉱物の種類や、化学組成を推定することができます。



持ち運び可能な分光測定装置 "FieldSpec".



熱水変質帯(福島県)での測定の様子。



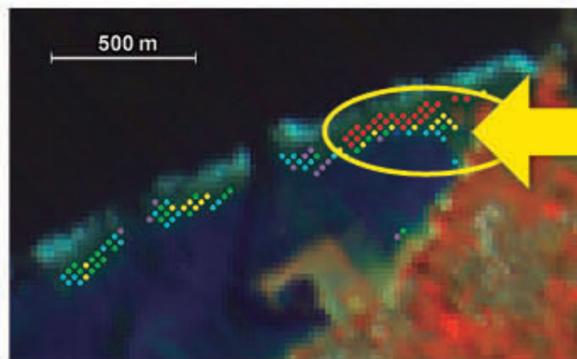
熱水変質作用を受けた露頭と、その反射スペクトル(反射率)の一例。

反射スペクトルの特性から、上写真の白い部分に、岩石が熱水作用により熱水変質してできた含水酸化鉄(ゲーサイト)が含まれていることが分かります。

沿岸水域の分光測定

衛星データを正しく解釈するには、現地での測定が欠かせません。

例えば、宇宙から植物プランクトンに含まれるクロロフィルαの濃度を測る技術開発では、現地で計測された反射スペクトルデータが基準となり、衛星データの正確な解釈につながります。



衛星画像からクロロフィルα濃度が高いと検知された場所。

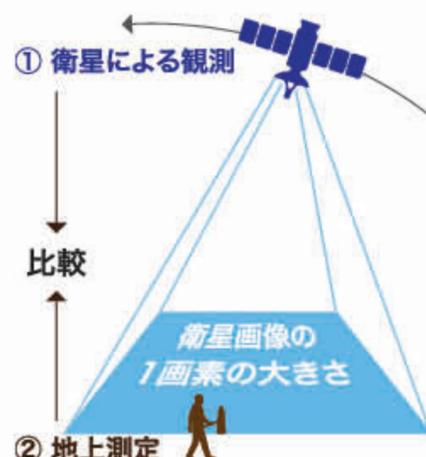


現地観測(沖縄)の様子。

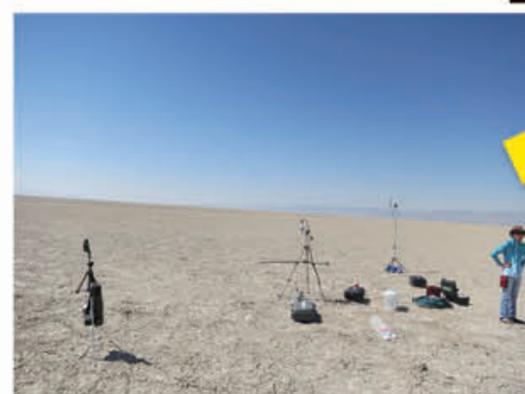
衛星データの品質管理への応用

衛星センサと同じ性能のセンサを使って、地上で衛星と同時に測定を行い、結果を比較します。これを地上「代替校正」と呼びます。

これにより、衛星データの性能評価が行えます。



地上代替校正の概念図。衛星観測と同じタイミングで現地観測を行う。



現地観測(ネバダ州)の様子。



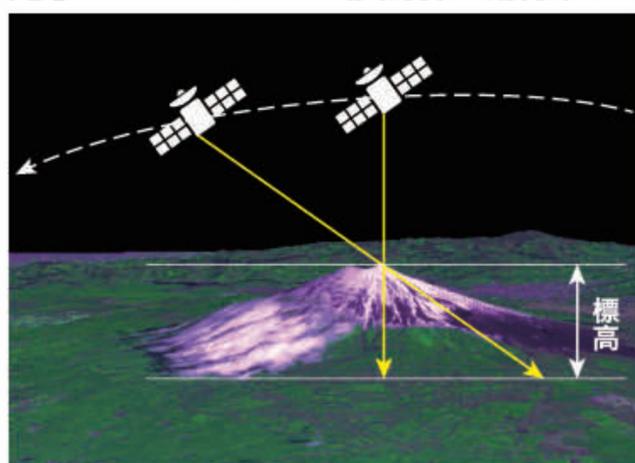
ネバダ州 Railroad Valleyの衛星画像。

平面の画像から地面の起伏を捉える

ドローンや衛星などで撮影した画像には、道路や建物などの特徴的な場所が異なる角度で写りこんでいます。この複数の画像を組み合わせると、平面の画像から立体的な起伏を抽出することができます。その高さの情報を数値として表したものが「数値標高モデル (DEM)」です。DEMを作成することで、立体的な地形図を得られるだけでなく、地すべり前後の地形変化を調べられるほか、河川の流域や浸水シミュレーションを行うことができます。

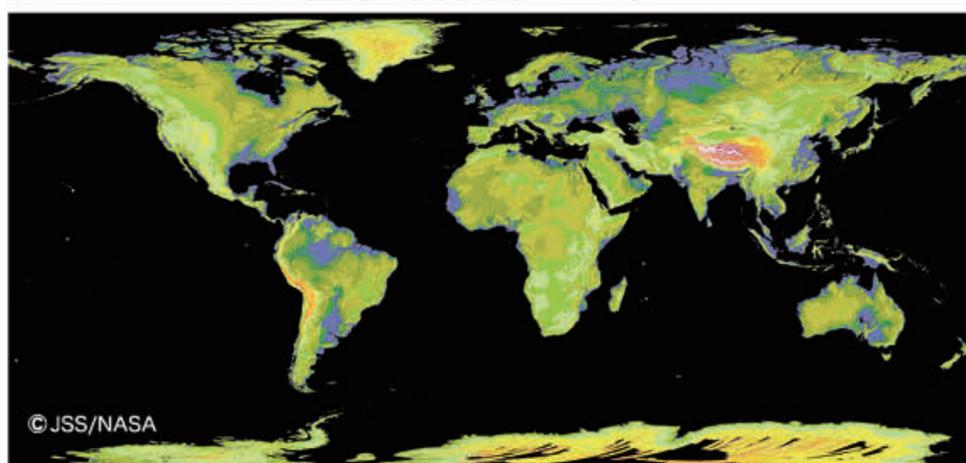
DEMは衛星や地上カメラでも作れますが、ドローンは地表近くを飛べるため、衛星よりも詳細で、地上カメラよりも広い範囲をカバーしたDEMを作成できるのが特徴です。

光学センサ^{アスター}ASTER (資源探査用将来型センサ)



ASTERの観測イメージ。

ASTER GDEM (全球3次元地形データ)



ASTERがカバーしている地球の全陸域の高精度のDEM=ASTER GDEM.

鳥の目線で地域を見る!

ドローンでは、地上から100 m程度上空からみた地表の様子を捉えることができます。搭載するカメラの種類を変えることで、さまざまな波長の情報を得ることができます。

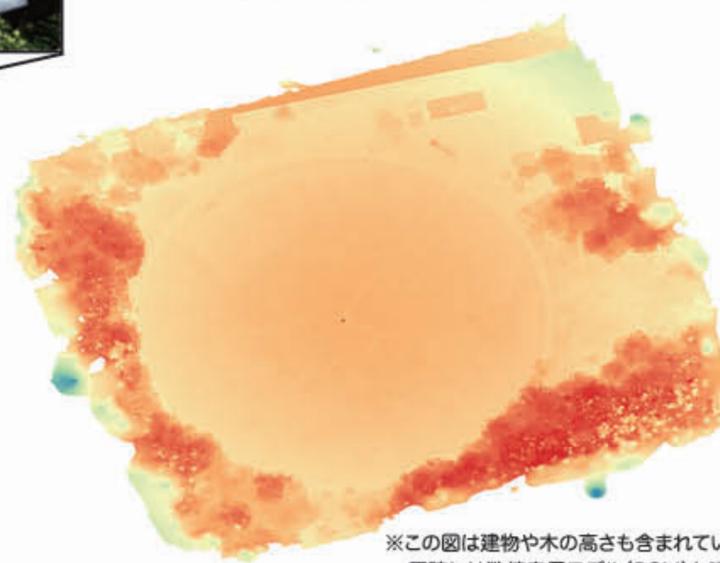
ドローンによる空撮画像

人や車を識別できます。



ドローンによるDEM

ドローンの空撮画像から作成した高さのデータは、建物や木の上面を含んだ「地表の形」を示しています。



※この図は建物や木の高さも含まれているため、正確には数値表層モデル(DSM)と呼ばれる。

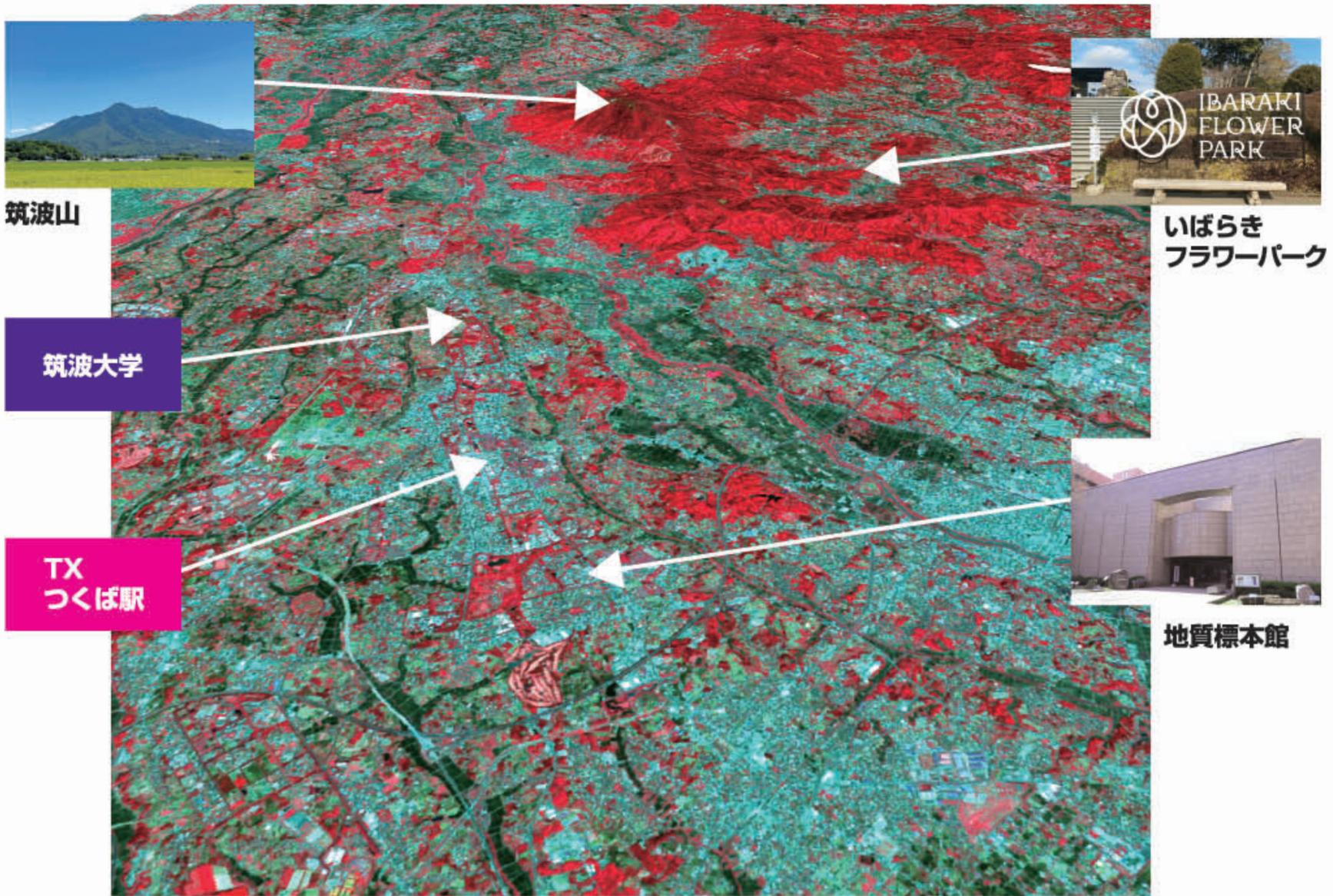
いろいろな波長で見ると

普段とは違う姿が見えてくる*

*2007年5月の姿

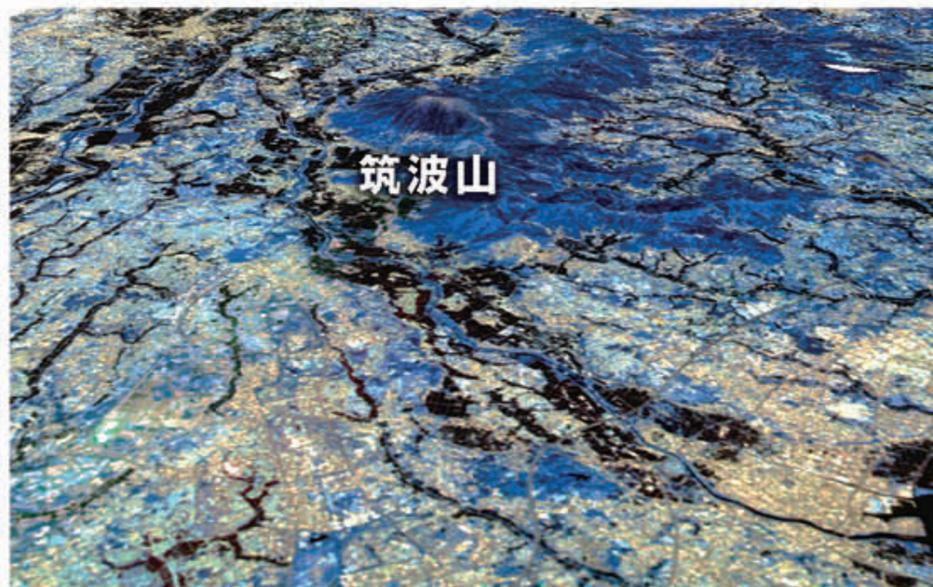
可視-近赤外線(VNIR)のつくば

ASTERのVNIRの世界では、植生が豊富なところは赤が強く、田や畑は水分や土壌の影響で、赤が弱くなる代わりに緑で強調されています。



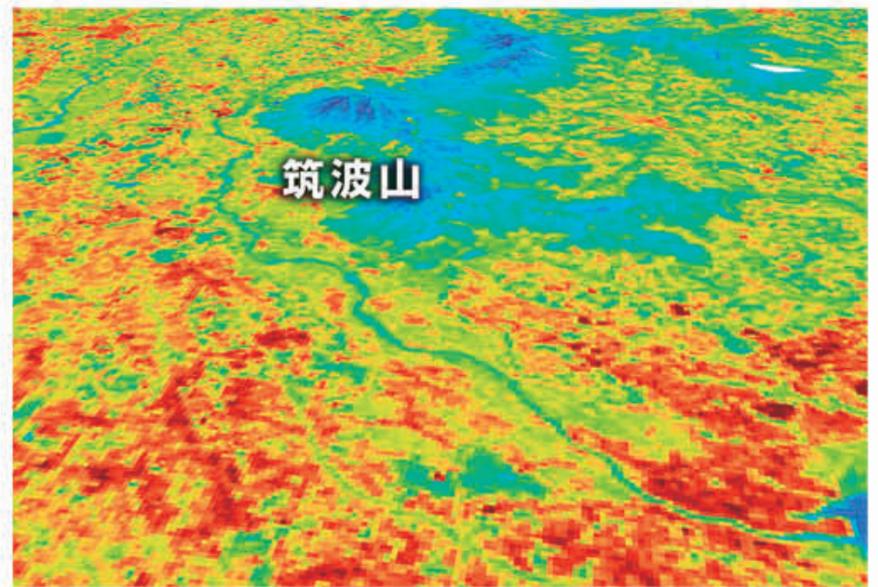
近赤外線(SWIR)のつくば

SWIRで見ると、近未来的な姿が浮かび上がります。詳細を見ると、対象物の違いで色が違ってきます。例えば、水を多く含むところは黒く見えます。



熱赤外線(TIR)のつくば

TIRで見ると、街は高い温度で赤くなっている部分が多く、筑波山の周囲は相対的に青く、低温であることがわかります。



マイクロ波で斜面の変動を見る!

同じ場所を異なる時期にマイクロ波で観測し、その波を干渉させると、地表のわずかな動きを捉えることができます。これをたくさんの時期にわたって解析する「時系列干渉 SAR」という技術では、長期的な変動傾向も明らかになります。その応用例のひとつが、斜面災害リスク地域の可視化です。

マイクロ波干渉の原理

図1は地表面の年平均の変動速度を示したものです。衛星の視線方向に沿って推定された値で、赤色（負の値）が北西方向への移動または沈降に相当します。

こうして得られた変動速度データに対して、現地調査や地質・地形情報と組み合わせることで、その地域特有の災害リスクをより詳しく理解できます。

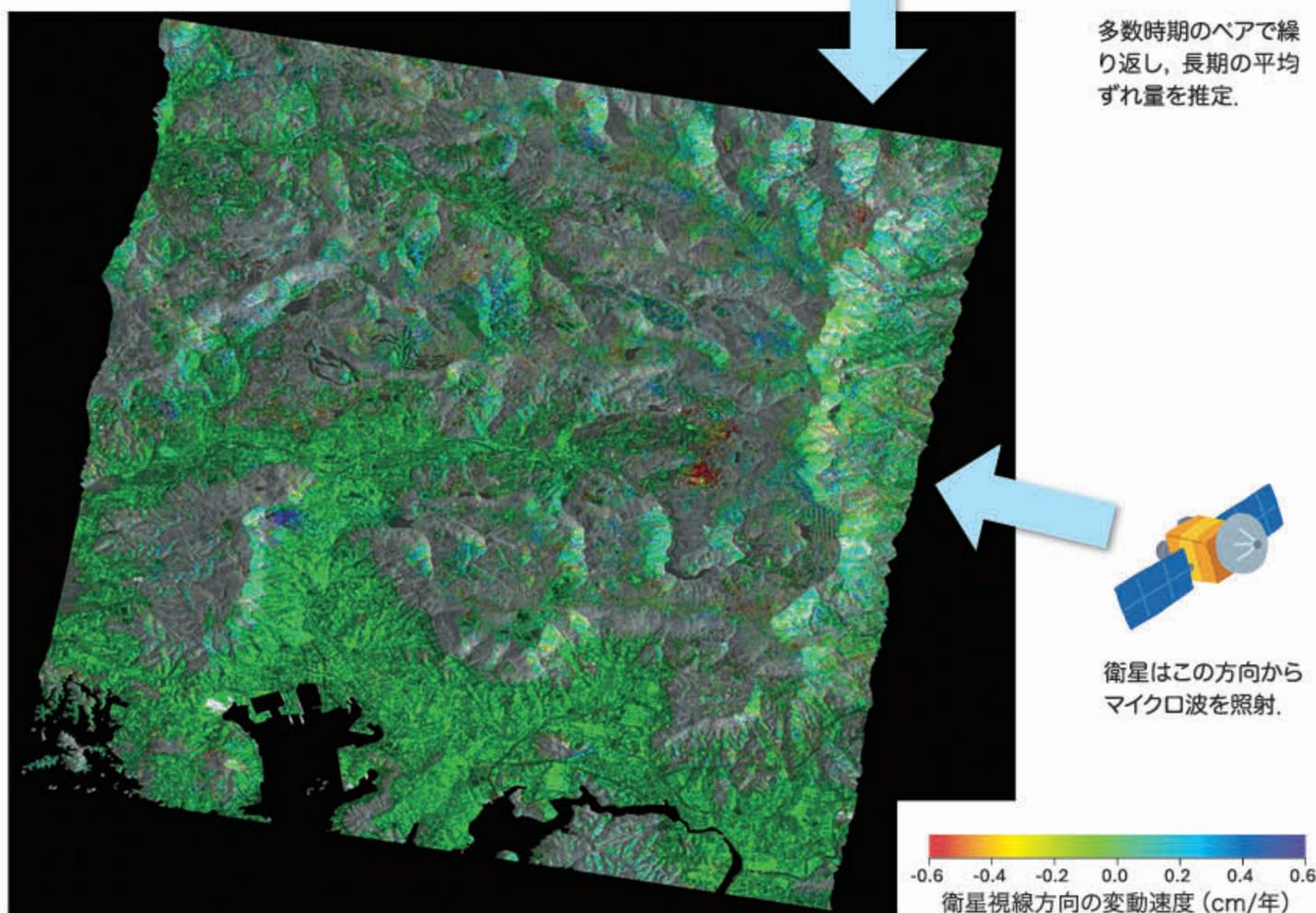
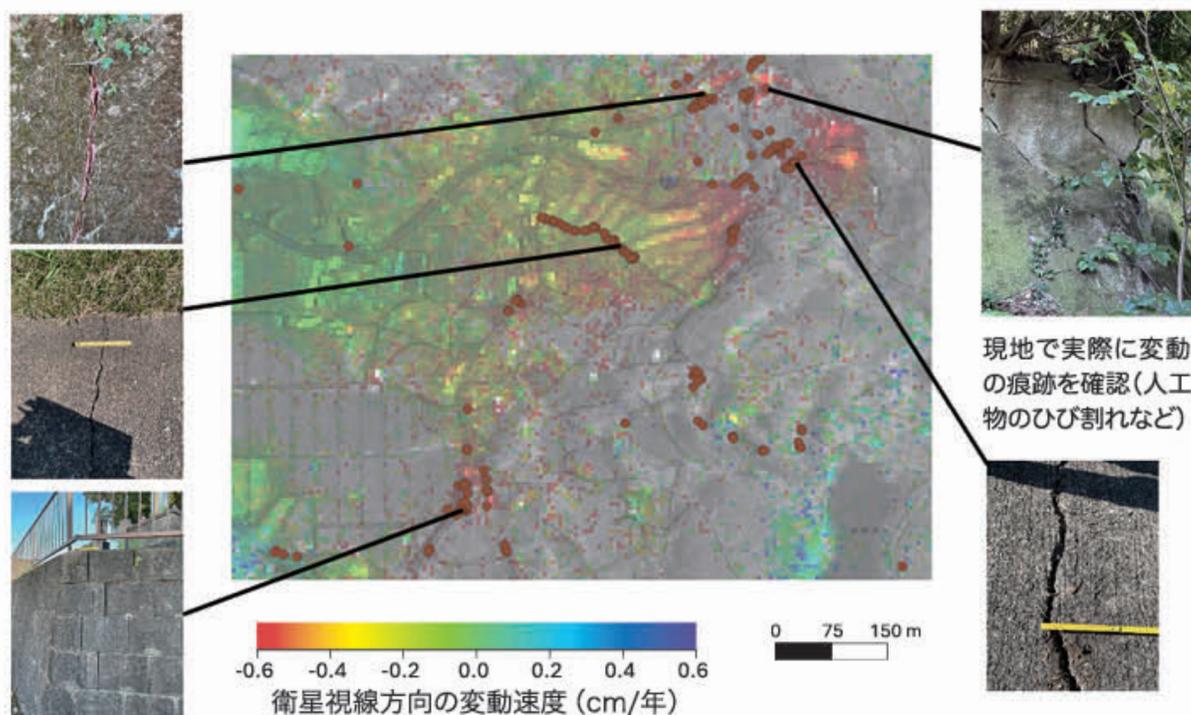


図1 地表面の変動速度と地形情報の組み合わせ。
(Mizuochi et al. 2024)



時系列干渉SARの概要

図2の黄色～赤色、または水色～青色のついた地域は長期変動が認められます。緑色は変動なし、灰色は地形などの影響により解析結果が得られなかったことを表します。茶色の点は現地調査地点（写真参照）です。背景図には国土地理院の地理院地図を表示しています。

図2 時系列干渉SARの結果と現地検証写真。
出典：産総研プレスリリース 2024年3月18日

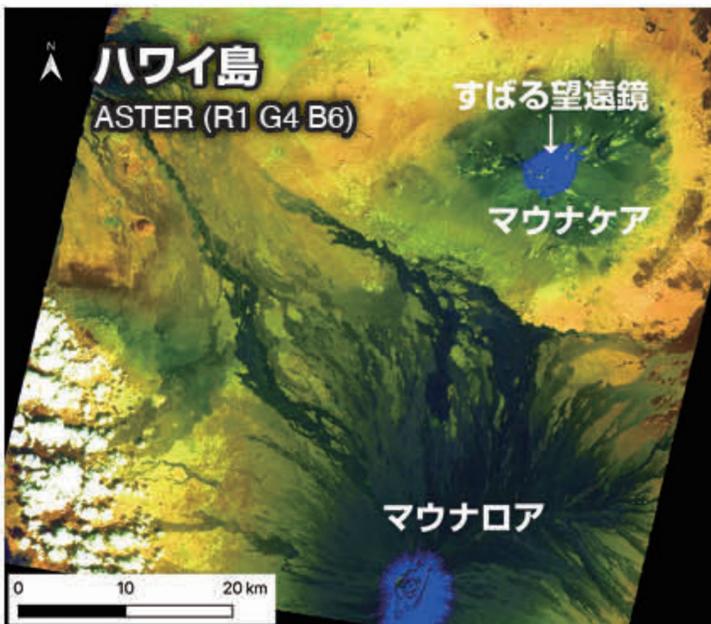
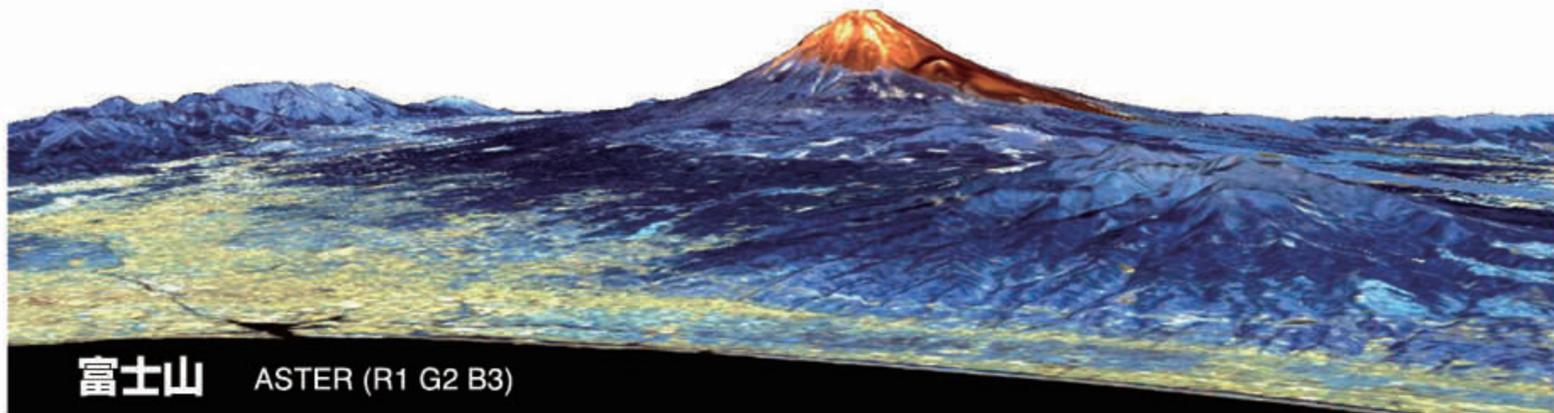
産総研プレスリリース

https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2024/pr20240318/pr20240318.html



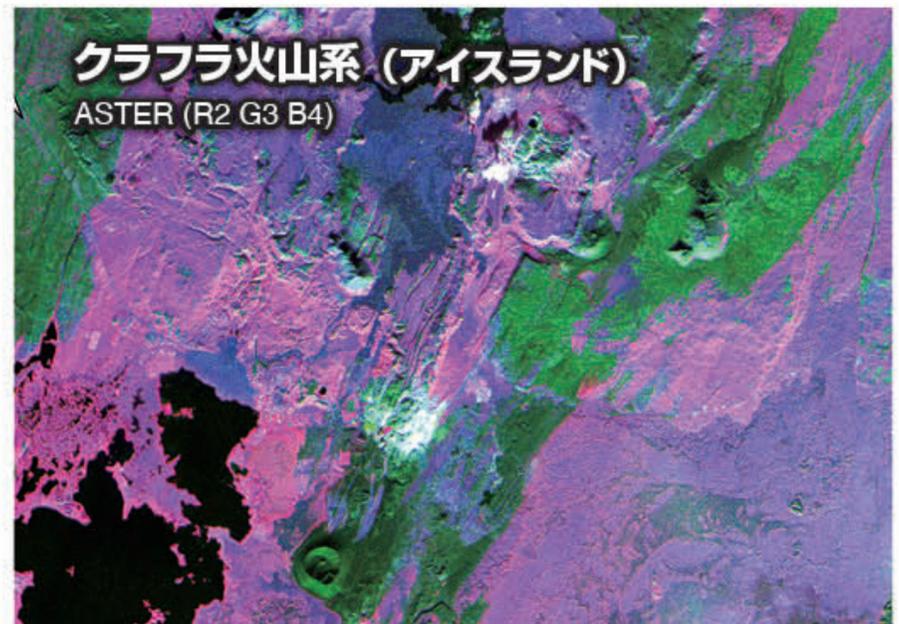
異形の火山

火山の姿も、波長を広げるとまったく違った表情を見せます。肉眼で見える形や色だけでなく、近赤外線では岩石露頭の鉱物組成や風化度、植生の有無の違いが見えるようになり、またマイクロ波では地表の凹凸や内部構造の影響が浮かび上がります。



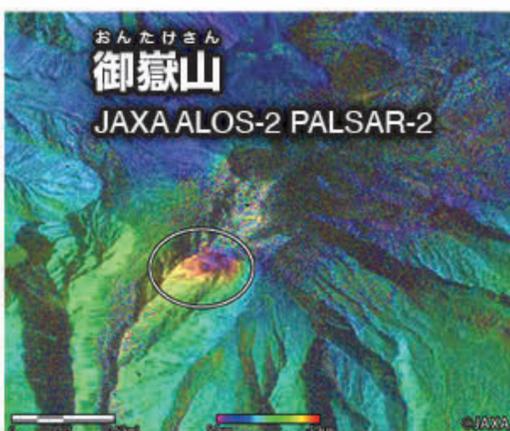
ハワイ島にあるマウナケア火山とマウナロア火山

濃い緑は玄武岩質溶岩が流れたところで、鉱物組成や風化度合いで濃さが違って見える。また、左下の白い雲に対して、山頂の積雪部分は青色で表現されており、近赤外線を使うと肉眼とは異なる「色」で区別されている。



アイスランド北部のクラフラ(Krafla)火山系

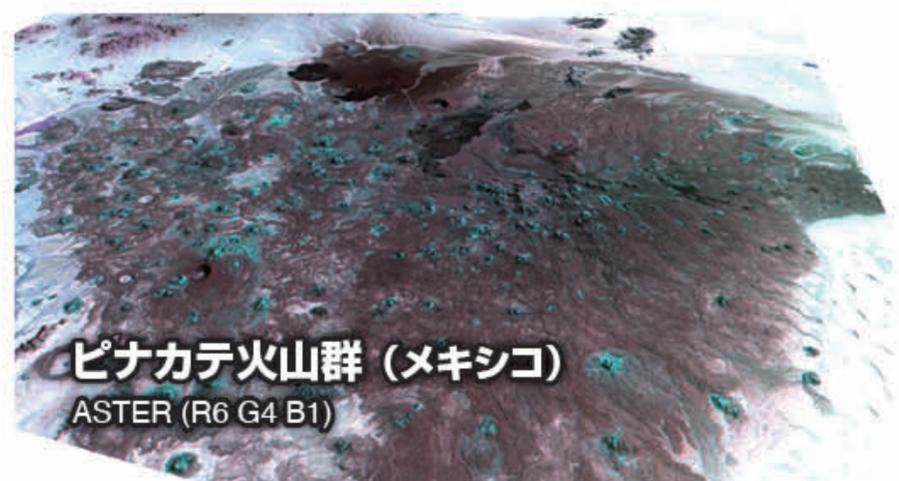
カルデラ・溶岩流・マール（爆裂火口）やスコリア丘を含む活発な火山群。一帯に点在する噴気孔や泥湯、また地熱地帯も、熱水変質は異なる「色」で区別されている。



マイクロ波で見る世界

2014年の御嶽山噴火についてマイクロ波を

使った解析の画像です。火山活動による地表の変動を捉えることにより、火山の変形や火山灰の分布などが詳細に観測されています。



メキシコ、ソノラ砂漠に広がるピナカテ火山群(Pinacate Volcanic Field)の鳥瞰図

約55x60 kmの火山帯の中に、多数のマール・タフリング・スコリア丘が、周囲とは異なる「色」として浮かび上がっている。

出典: JAXA EORC 2014年10月3日. https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/img_up/jdis_insar_ontake_20140929.htm

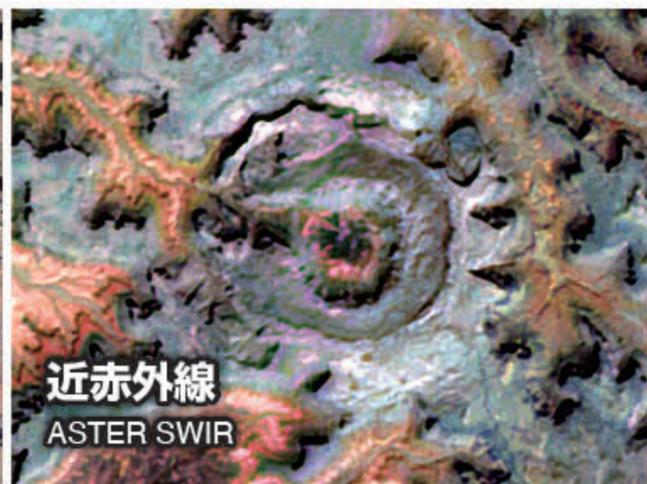
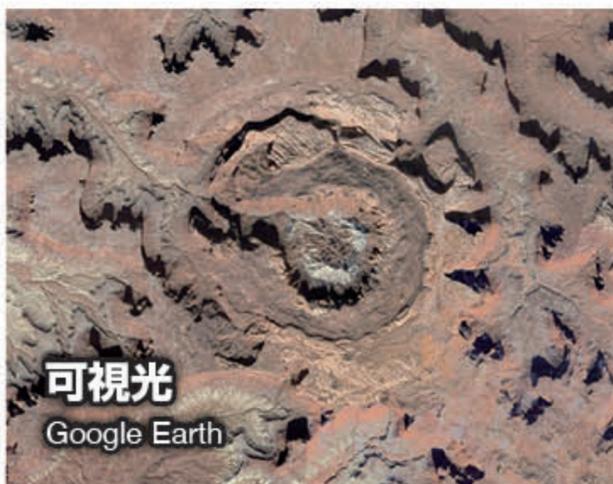
近赤外線で浮かび上がる 地球衝突クレーター

地球にも天体の衝突で作られたクレーターは多数存在します。でも複雑な地層で形成される地球のクレーターは、みなさんが見慣れている月のクレーターとはちょっと違います。近赤外線で見ると、地層の組成の違いで異なる色で表現され、一つの芸術作品のようです。

アップヒーバル・ドーム (Upheaval Dome, アメリカ)

直径はおよそ 10 km。約 1 億 7000 万年前に形成されたと考えられています。

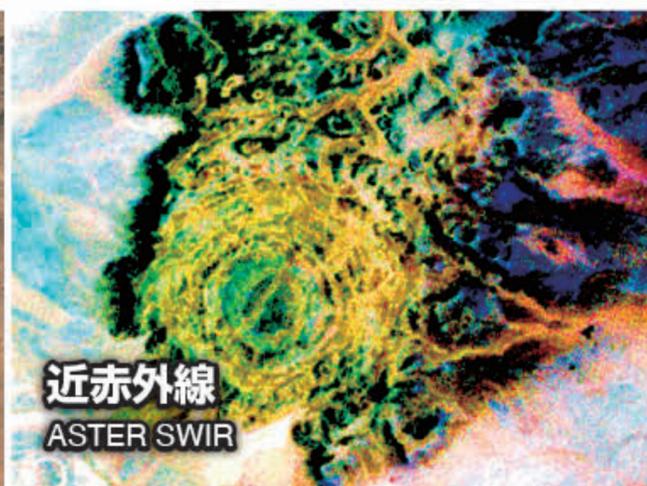
衛星の近赤外線で観測すると、環状の向斜・背斜構造が、地層中の鉱物組成や変質の違いによって、違った色として浮かび上がります。



ティン・ビダー (Tin Bider, アルジェリア)

直径はおよそ 6 km。約 7000 万年前に形成されたと考えられています。

砂岩、石灰岩、頁岩、石膏層などが混在する堆積岩の上に形成されたことから、環状構造がそれぞれ違った色で観測されています。



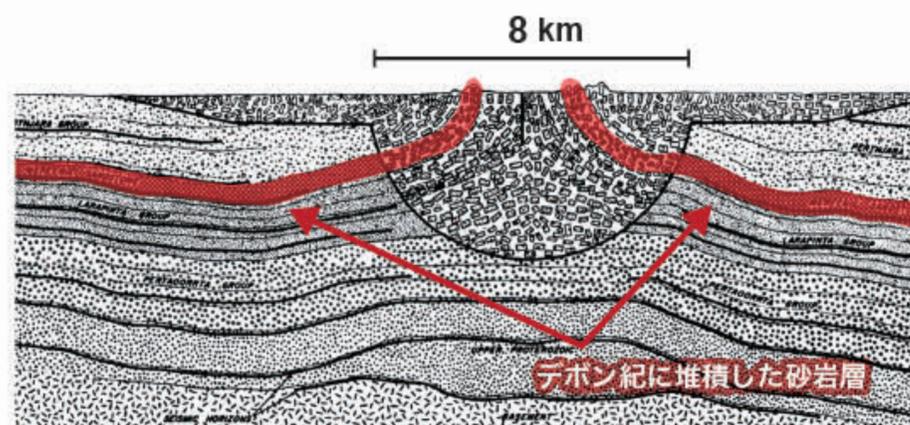
なぜ色が違う環状構造が見える?

ゴッセス・ブラフ

(Gosses Bluff, オーストラリア)



天体衝突クレーターは、形成後に地球の重力の影響で形状が変わります。この過程で、深い部分にあった古い地層が持ち上げられ、表層にリング状の構造として現れます。左のゴッセス・ブラフの例では、深部のデボン紀の砂岩層が持ち上げられ、周囲と異なった反射スペクトル特性として観測されています。

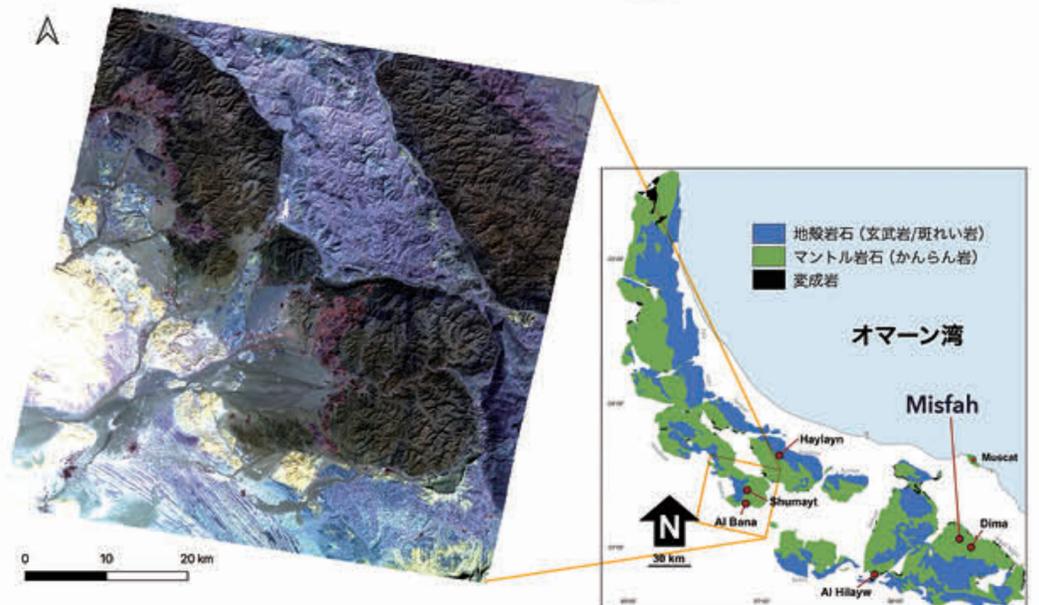


地震波探査による断面図(Milton et al. 1972)をデボン紀の層を赤色で強調。

地球のマントルを宇宙から観測

マントル物質は地球の深いところにあり通常は宇宙から見ることはできません。地球上には「オフィオライト」と呼ばれる特殊な岩体が分布する場所があり、そこではマントル物質が地表に露出しています。ここを近赤外線で見ると、地殻を構成する玄武岩や斑れい岩と、マントルを構成する岩石であるかんらん岩が層状に分布している様子を捉えることができます。

外から見える?



ASTERの近赤外線の画像。

オフィオライト分布図。Leong et al. (2023) の図1を日本語に改変。

オマーンオフィオライト

オマーンに代表されるオフィオライトでは、マントル岩石が大規模に露出しています。

右図は、中東のオマーンに分布するオフィオライトをASTERの近赤外線の画像で示したものです。赤っぽい領域がマントル由来のかんらん岩、茶色っぽい領域が地殻由来の玄武岩・斑れい岩を主とする部分です。

天然水素の発生源?

かんらん岩は水と反応して「蛇紋岩」^{じゃもんがん}に変質します。この過程で水素 (H_2) が生成されることが知られており、実際にオマーンでは地下から天然水素ガスが湧出していることが報告されています。

天然水素ガスは、燃焼しても二酸化炭素を排出せず、水だけを生じる「究極のグリーンエネルギー」です。地球の深部プロセスから得られるグリーンエネルギーとして、未来のエネルギー戦略に新しい可能性を示しています。

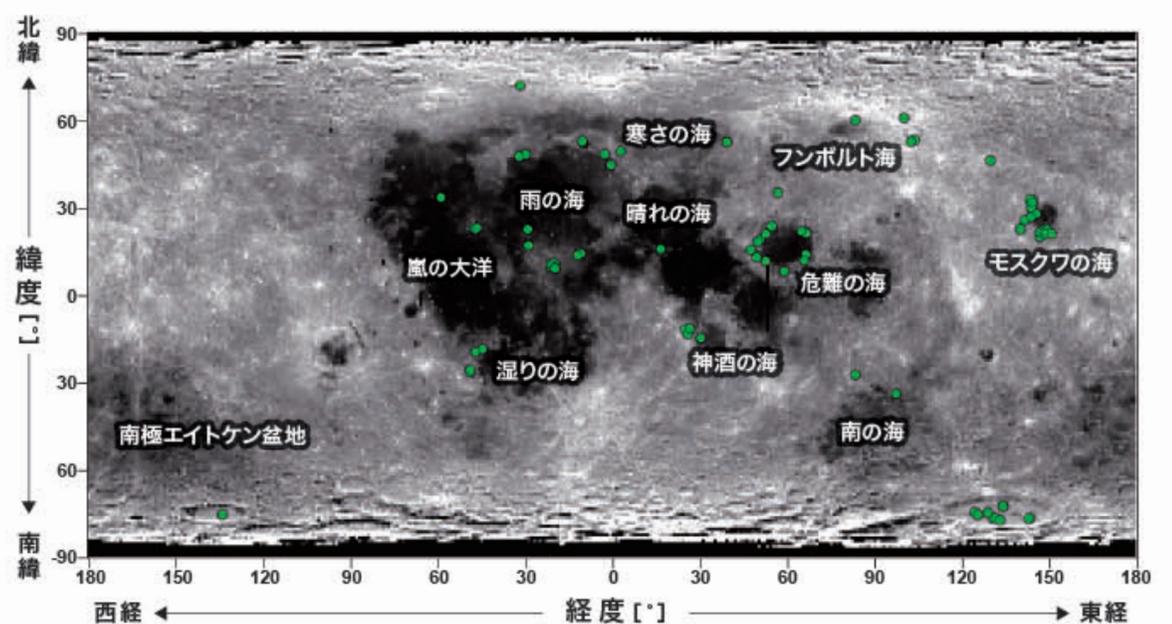


オマーンのみスファ (Misfah) では鉱泉中に多量の水素ガスの泡が観測されている。Leong et al. (2023) の図2aより転用。

月のマントルも宇宙から見える?

月のマントルも月面に露出していることが、日本の月探査衛星「かぐや」のリモセンデータを使った解析から明らかになっています。

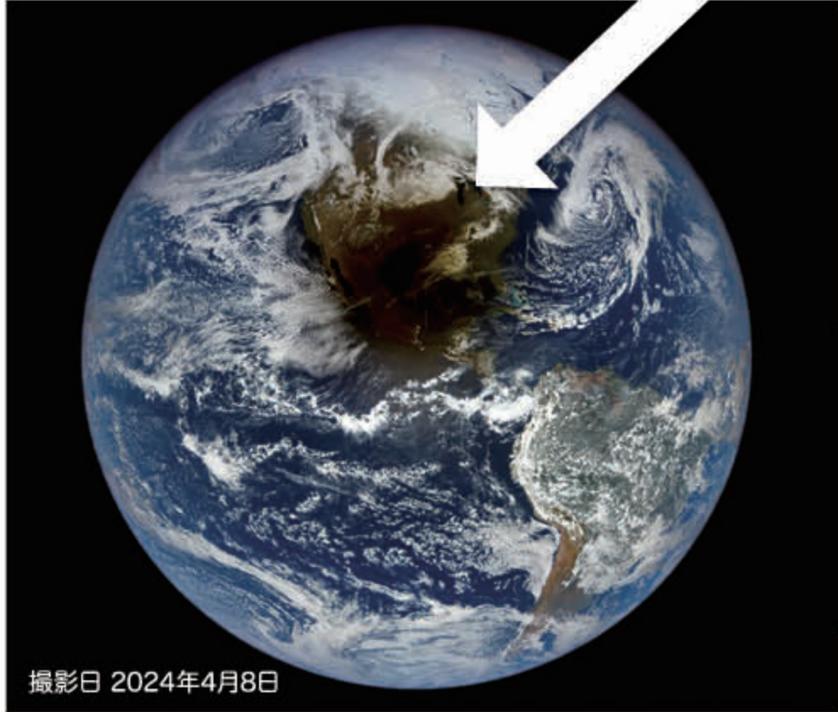
38億年以上前に巨大隕石の衝突で形成された衝突盆地（月の海と呼ばれる場所に相当）の周囲で見つかりました。このことから、衝突時に掘り起こされたマントル物質の痕跡であると考えられています。



月面上のかんらん岩が卓越する岩石(かんらん岩など)露頭の分布(緑色)。Yamamoto et al. (2010)。

地球と月が織りなす世界

宇宙から見た日食の影



撮影日 2024年4月8日

日食は、太陽・月・地球が一直線に並んだときに起こる、壮大な天体現象のひとつです。地上から見ると、月が太陽を隠し、一時的に夜のような暗闇に包み込まれます。

一方、図1は宇宙から日食を捉えたものです。北アメリカ大陸を覆う月の影が、放射状に広がる光と対比して不気味なコントラストを描き出しています。

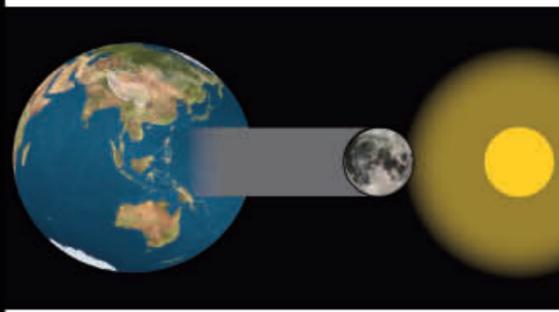


図1 宇宙から見た日食。
データ出典: DSCOVR > EPIC, NOAA-20 > VIIRS
コレクション: Earth from Afar

このように、地上から体験する日食と、宇宙から眺めた日食とは、同じ現象であっても全く異なる表情を見せてくれるのです。

月の裏側: DARK SIDE OF THE MOON

月は地球に対して常に同じ面を向けて公転しているため、私たちからは「うさぎの餅つき」の模様で知られる表側の姿しか見えません。

一方、図2は月が地球と観測衛星の間を通過した瞬間を捉えたもので、月の裏側が映し出されています。



月の裏側には表側に多く見られる「海」と呼ばれる暗い玄武岩の分布域がほとんどなく、斜長岩を主体とするレゴリス（微粒子）に覆われ、全体的に白っぽい姿をしています。



撮影日 2015年7月16日

図2 月が地球と観測衛星の間を通過した瞬間。
データ出典: DSCOVR > EPIC
コレクション: Earth from Afar

月から見た“地球の出”

図3は、月周回衛星「かぐや」(SELENE)のハイビジョンカメラが捉えた、月の地平線から地球が昇る瞬間(Earthrise)のスナップショットです。

私たちが普段月を見上げるのに対して、リモセンによって得られる光景は、逆に月から地球を眺める体験を与えてくれます。

現在進行中のアルテミス計画などにより、そう遠くない将来、人類が月で生活する時代が来たときは、この地球の出が、日常の風景になるのかもしれません。



図3 月の地平線から地球が昇る様子。

月面を多彩な光で見る

月周回衛星「かぐや」(SELENE)は、月を周回しながら月面の可視光から近赤外(0.5~2.6 μm)までの分光データを取得しました。これらのデータのうち人間の目が識別できる赤、青、緑の色に相当する波長を使って1°メッシュデータセットを作成すると、人間の目を見た時の月面に相当する画像(図1)が得られます。私たちの目で見ると、月面は色調の変化のないモノトーンの世界です。

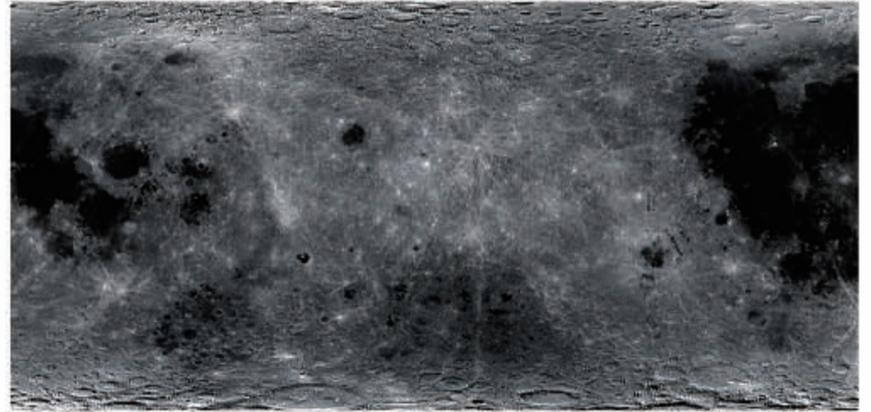


図1 人間の目を見たときに近い色で作成した月面マップ。波長0.512, 0.579, 0.651 μm のデータをRGBに割り当て。

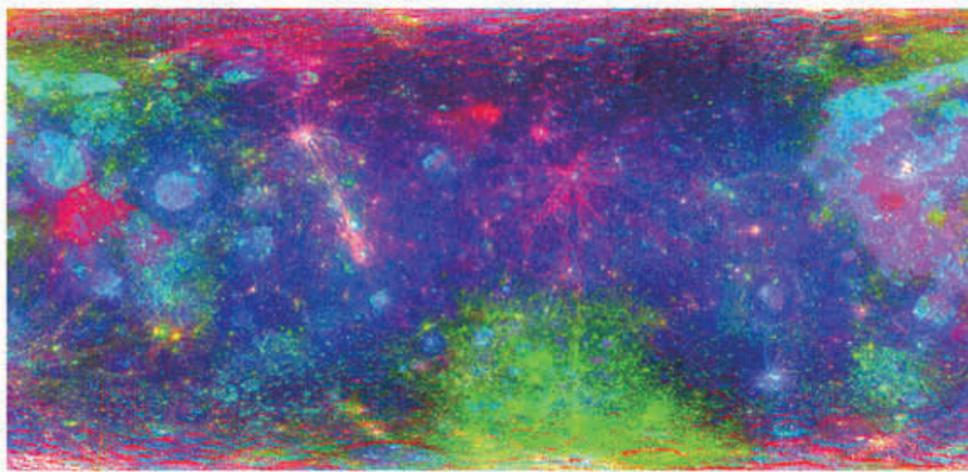


図2 PCA処理で作成した月面マップ。第2, 3, 4主成分をRGBに割り当て。

一方、得られた分光データを主成分分析(PCA)*という手法で処理し、スペクトルの特徴ごとに分類すると、図2のように非常にカラフルな画像が得られます。この画像は月面の鉱物分布などの違いを反映しており、私たちの目では気づけない月面の多様な姿を浮かび上がらせます。

*主成分分析(PCA): たくさんの波長データの中から、特徴的なパターンを見つけ出し、似た性質の部分をまとめる方法。これにより、目では分からない鉱物や地質の違いを色分けして見せることができる。

反射スペクトルを使った月資源探査

詳細な反射スペクトルデータの解析で、将来の月資源探査に役立つ重要な情報を得られます。

チタン鉄鉱濃集地域の発見!

図3は、上記の「かぐや」で取得された反射スペクトルデータをもとに、特定の鉱物だけを抽出する「データマイニング」(膨大なデータから目的の情報を取り出す手法)を行って見つかった、チタン鉄鉱が濃集している場所(■)を示しています。

解析の結果、チタン鉄鉱に富む物質は月の火砕堆積物中に広く分布し、その埋蔵量は1,000億トン以上と見積もられています。チタン鉄鉱は月の基地建設や水・酸素の供給源などへの利用が期待されており、月で調達可能な資源として注目を集める鉱物です。

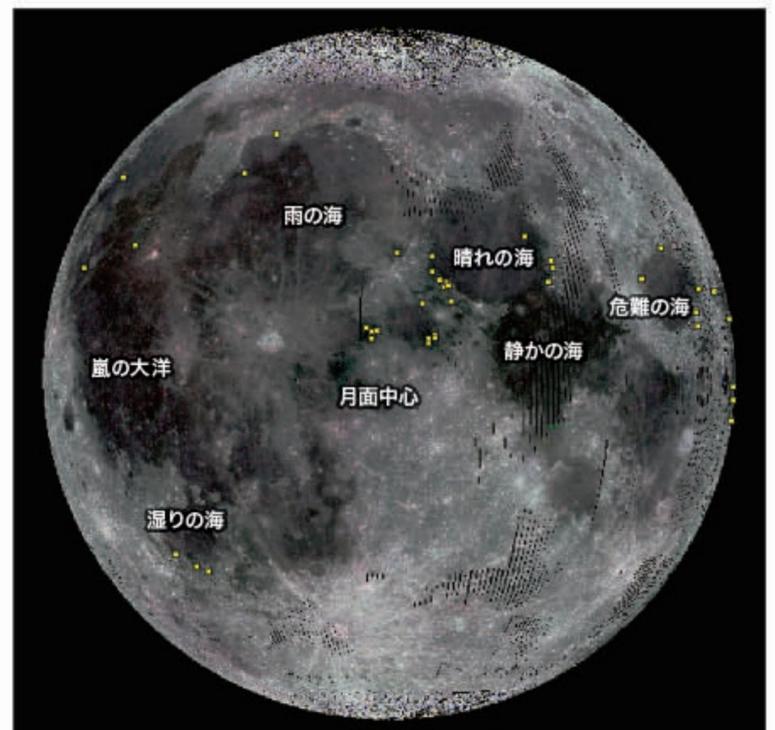
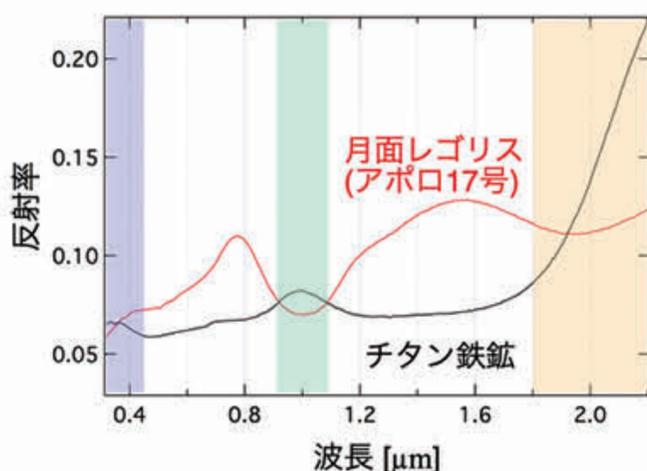


図3 月面のチタン鉄鉱に富む地域(黄色印)の分布図とチタン鉄鉱(右図)。チタン鉄鉱(イルメナイト)は、水や酸素、鉄、チタンなどを現地で取り出せる、重要資源のひとつと考えられている。



アポロ17号で回収された月面レゴリスの反射スペクトル(赤線)と、チタン鉄鉱の反射スペクトル(黒線)を比較したもの。このようなスペクトル形状の違いを読み取ることで、特定の鉱物を判別することができる。

産総研プレスリリース 2025年3月17日

産総研プレスリリース

https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2025/pr20250317_2/pr20250317_2.html

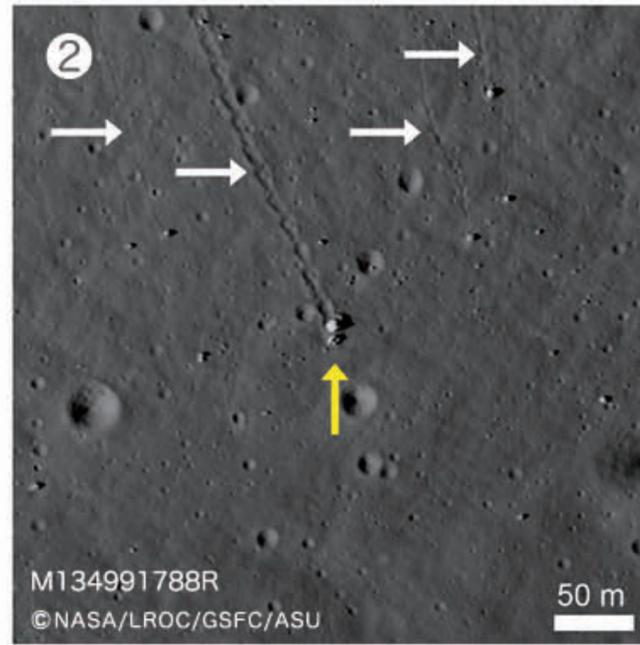


月面の細かな地形

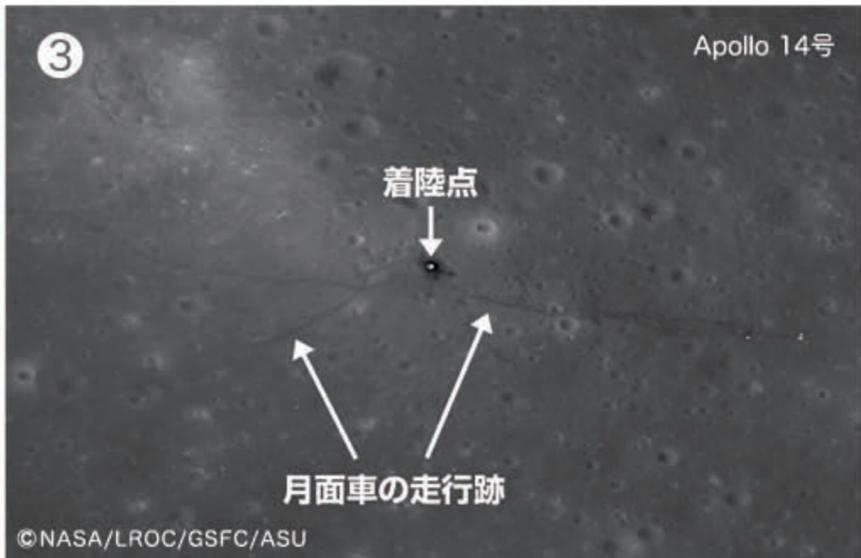
アポロ11号(1969)～17号(1972)では、宇宙飛行士による月面探査が行われました。リモセンを用いて、調査した大きな岩や月面車の走行跡、月に残された着陸船土台を見つけることができます。



1 アポロ17号での岩石サンプル採集の様子。大きな岩石は幅20 m程度であることが分かる。



2 月周回衛星LRO搭載カメラ(LROC)による高解像度画像での①付近の画像。画像上部が斜面の上方向。黄矢印が①の岩。この大きな岩が斜面を転がり落ちた様子が分かる。



3 アポロ14号の着陸地点周辺のLROC画像。月面車の走行跡が黒い線で広がっている。月には風や雨がな^かいため、50年前の轍も残っている。

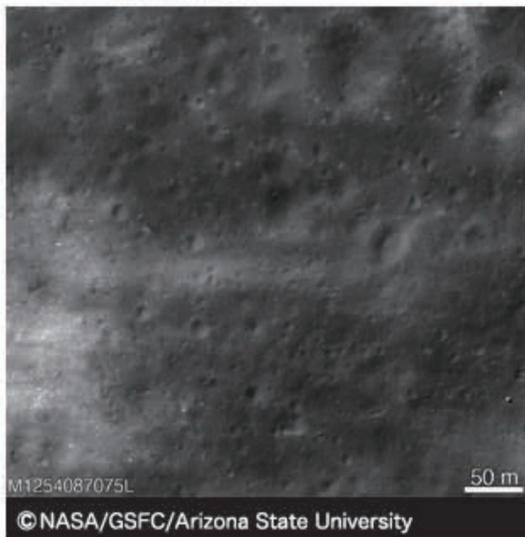
↑よく見ると、他にも大きな岩が転がり落ちた跡が斜面に残されている(白矢印)。このような落石の成因にはクレーターを作る隕石衝突や断層での地震(月なので月震という)などが考えられていた。落石の痕跡と断層の位置、クレーターの分布などから、落石の原因は隕石衝突の可能性が高いことが分かってきた。(Ikeda et al., 2022)

出典: Station 6 - Apollo 17 <https://lroc.im-ldi.com/images/759>
Apollo 14 Landing site <https://lroc.im-ldi.com/visit/exhibits/1/gallery/6>

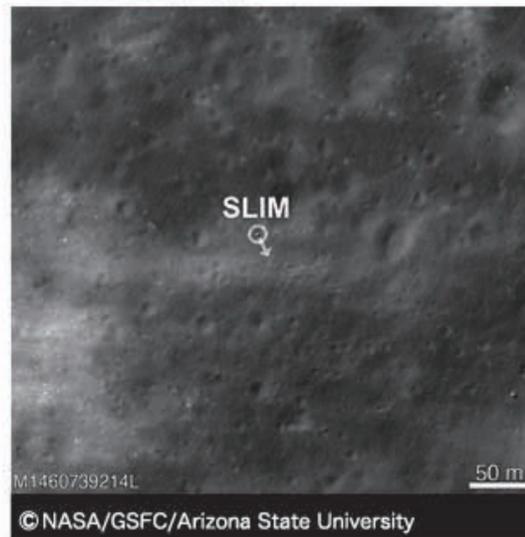
▼ 月面で探査機を発見!!

2つの時期で撮影した画像を比較し、日本の月面探査機 SLIM が着陸した様子を調べることができます。

SLIM着陸前



SLIM着陸後

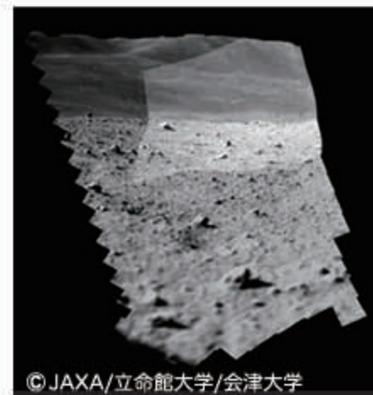


白矢印はSLIMに搭載されていたカメラの撮影方向。

▼ SLIMとは?

月面探査機SLIM (Smart Lander for Investigating Moon) は、2024年1月20日に日本初の月面着陸に成功しました。

そして、月の起源を調べる鍵となるマントル物質を「その場観測」で調べました。



© JAXA/立命館大学/会津大学

出典: JAXA SLIM landing

<https://lroc.im-ldi.com/images/1358>

太陽系の多様な仲間たち

人類は、まだ誰も月より遠くの天体での有人探査を実現できていません。しかしリモセンの技術を使うことで、その場にいるかのような映像が得られ、現地の細かい地形や岩石、大気の情報を得ることができます。

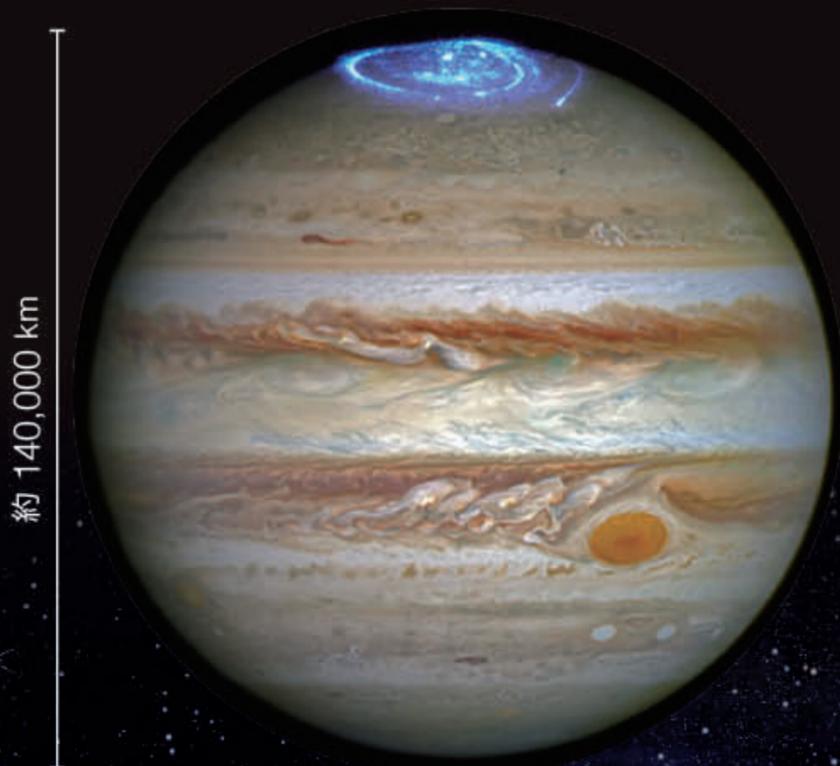
右の水星の画像は、水星表面の岩石の化学的・鉱物学的・物理的な差を強調したものです。メッセンジャー探査機によって取得されたさまざまな波長のデータを使っています。

形成年代が若い衝突クレーターから広がる放射状構造が、水色または白色で表示されています。中～濃青色の領域は、暗色で不透明な鉱物が豊富に含まれていると考えられています。黄褐色領域は流動性の高い溶岩の噴出によって形成された平原です。また、やや右上に位置する黄褐色の大きな円形構造は、カロリス盆地と呼ばれる巨大な衝突盆地です。

木星とそのオーロラ

太陽系最大の惑星である木星は、アンモニア氷でできた雲が表層を覆っています。

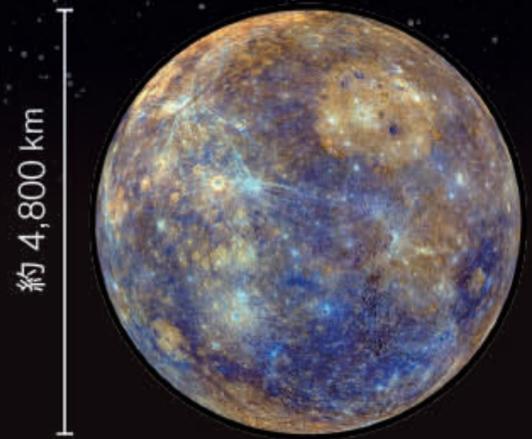
下の画像は、ハッブル望遠鏡が捉えた木星の紫外線と可視波長の画像を組み合わせたものです。地球ほどの大きさの嵐（大赤斑）に加えて、極域に鮮やかなオーロラが見られます。



©NASA, ESA, and J. Nichols (University of Leicester)

水星

©NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington



火星の月

火星はフォボスとダイモスという衛星を持っています。特にフォボスでは、反射スペクトルの特徴が異なる2種類の領域 (Red UnitとBlue Unit) が見られます。火星の月の形成進化のプロセスはいまだ謎に包まれていますが、衝突起源説と小惑星捕獲説が有力視されています。フォボスからのサンプルリターンがMMXミッションによって計画されており、探査機は2026年度に打ち上げ予定です。



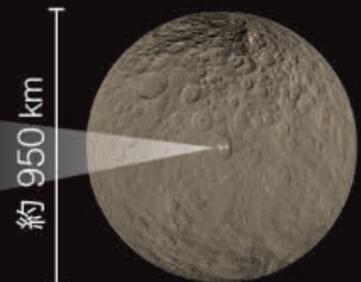
©DLR/FU Berlin/ESA

©NASA/JPL-Caltech/University of Arizona

準惑星セレス



©NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA/PSI



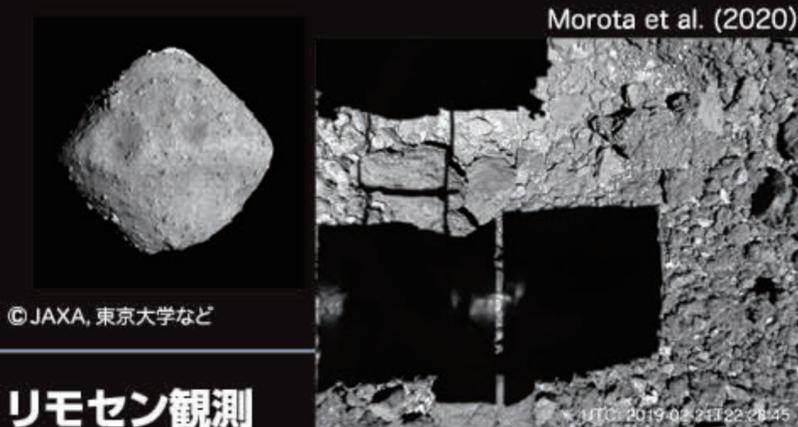
©NASA / JPL-Caltech / UCLA / MPS / DLR / IDA

セレスは、火星と木星の間を回っている天体のひとつで、「準惑星」と呼ばれるカテゴリーに分類されます。また、リモセン観測によって、炭素を多く含むタイプの「C型小惑星」に分類されています。さらに近年の赤外線観測からは、表面に氷や炭酸塩が存在している可能性が示されています。2015年からは、NASAのDawn探査機がセレス上空を周回しながらリモセン観測を行いました。上の画像に見られる明るい斑点は、塩の堆積物と考えられています。

小惑星と隕石の「神経衰弱」

隕石の反射スペクトルと小惑星の反射スペクトルとを見比べると、神経衰弱のようにして隕石とそのふるさとの小惑星を紐づけることができます。人間が直接行けなくても、天体観測と隕石分析を組み合わせることで太陽系の物質と歴史を調べることができるのです。

さらに近年では人工衛星を天体へ送って、リモセンで天体を詳しく調べる探査が活発化してきています。小惑星探査機「はやぶさ」や「はやぶさ2」のように、目標天体から表層の岩石や砂を回収して地球へ持ち帰ってくるサンプルリターン探査が実現したことで、太陽系リモセンと物質分析の融合が進んでいます。



リモセン観測

「はやぶさ2」がリュウグウ滞在時に、20 kmほど上空から観測して取得した反射スペクトルから、リュウグウは水や有機物に富む始原的小天体、特にCb型と呼ばれる小惑星であることが分かりました (Kitazato et al., 2019; Sugita et al., 2019)。

「はやぶさ2」は、さまざまなリモセン観測機器を搭載しています。このうち、可視カメラ ONC-Tと赤外センサ NIRS3の観測によって、リュウグウ本体の可視・近赤外域の反射スペクトルが得られました。また、実験室での測定によって、リュウグウから採取した試料の反射スペクトルも得られました。同じ天体（リュウグウ）を宇宙で見るか、実験室で見るかの違いだけなので、本来は同じ反射スペクトルが得られるはずですが。

しかし、実際には観測データと測定データは違っていました (図1)。一体どうしてなのでしょう?

再現実験とその反射スペクトル変化を詳しく調べてリュウグウデータを見直したところ、一番の原因は宇宙風化だったことが分かりました (図2)。21ページに登場した火星の衛星・フォボスのRed unit (赤領域)とBlue unit (青領域)も、宇宙風化度の違いによるものではないかという考えがあります。

サンプル分析

一方で、「はやぶさ2」がリュウグウから採取したリュウグウ粒子は、CIコンドライトという始原的な炭素質隕石によく似た物質であることが、分析によって明らかになりました (Yokoyama et al., 2022)。

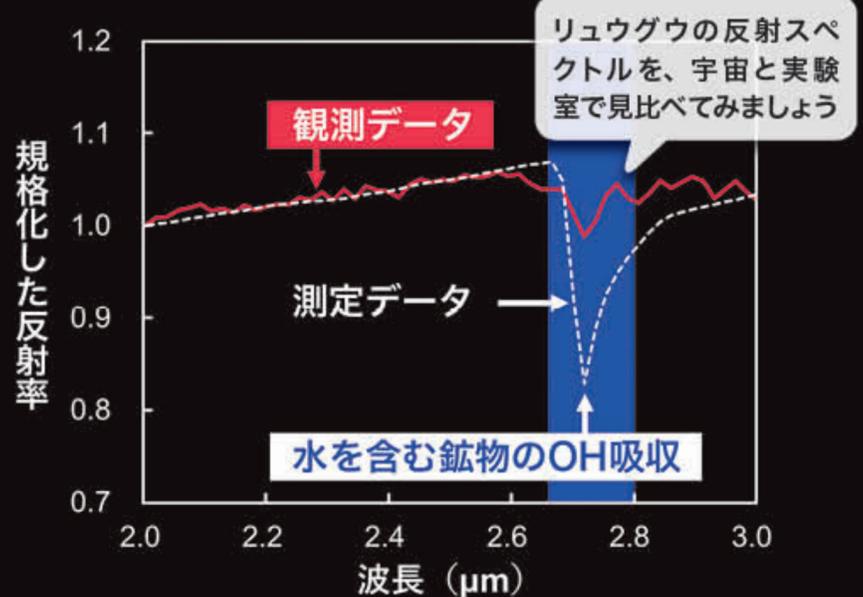
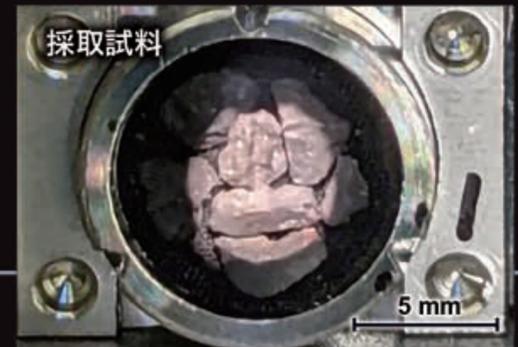


図1 明るさやスペクトルの傾きなどの特徴はほぼ同じだが、水を含む粘土鉱物(含水ケイ酸塩)の存在を示すOH吸収に2倍以上の深さの違いが見られた。

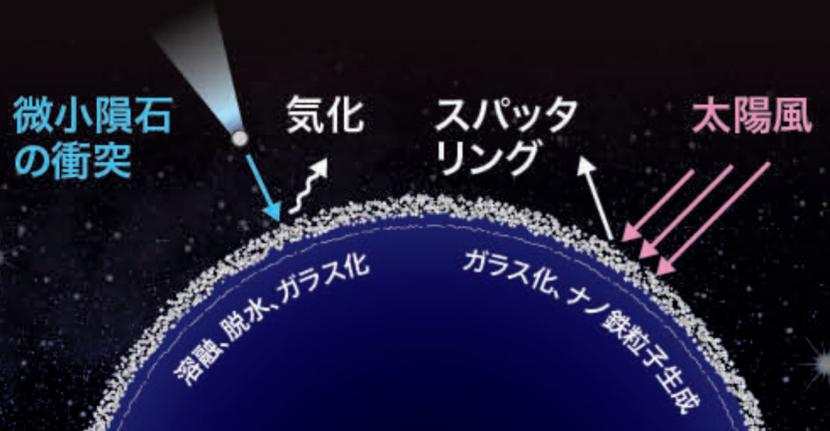


図2 宇宙風化の模式図。大気のない天体表面は宇宙線や宇宙塵に曝されて、表層の鉱物に変質する(宇宙風化作用)。このため、反射スペクトルも経年変化していく。

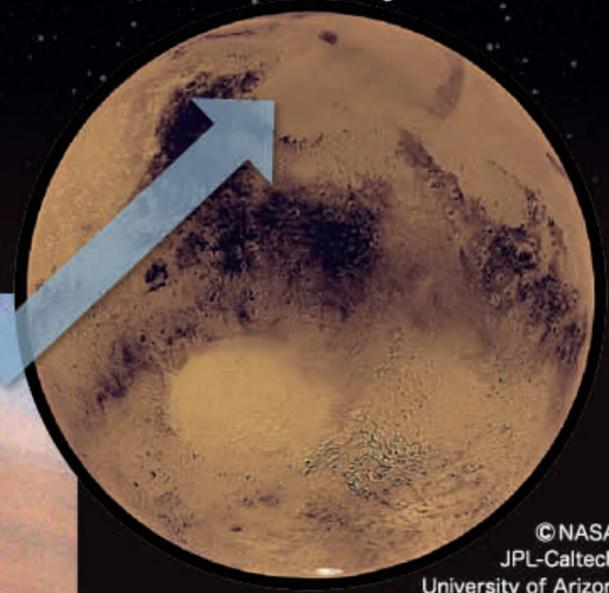
産総研プレスリリース

https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2023/pr20230927_2/pr20230927_2.html

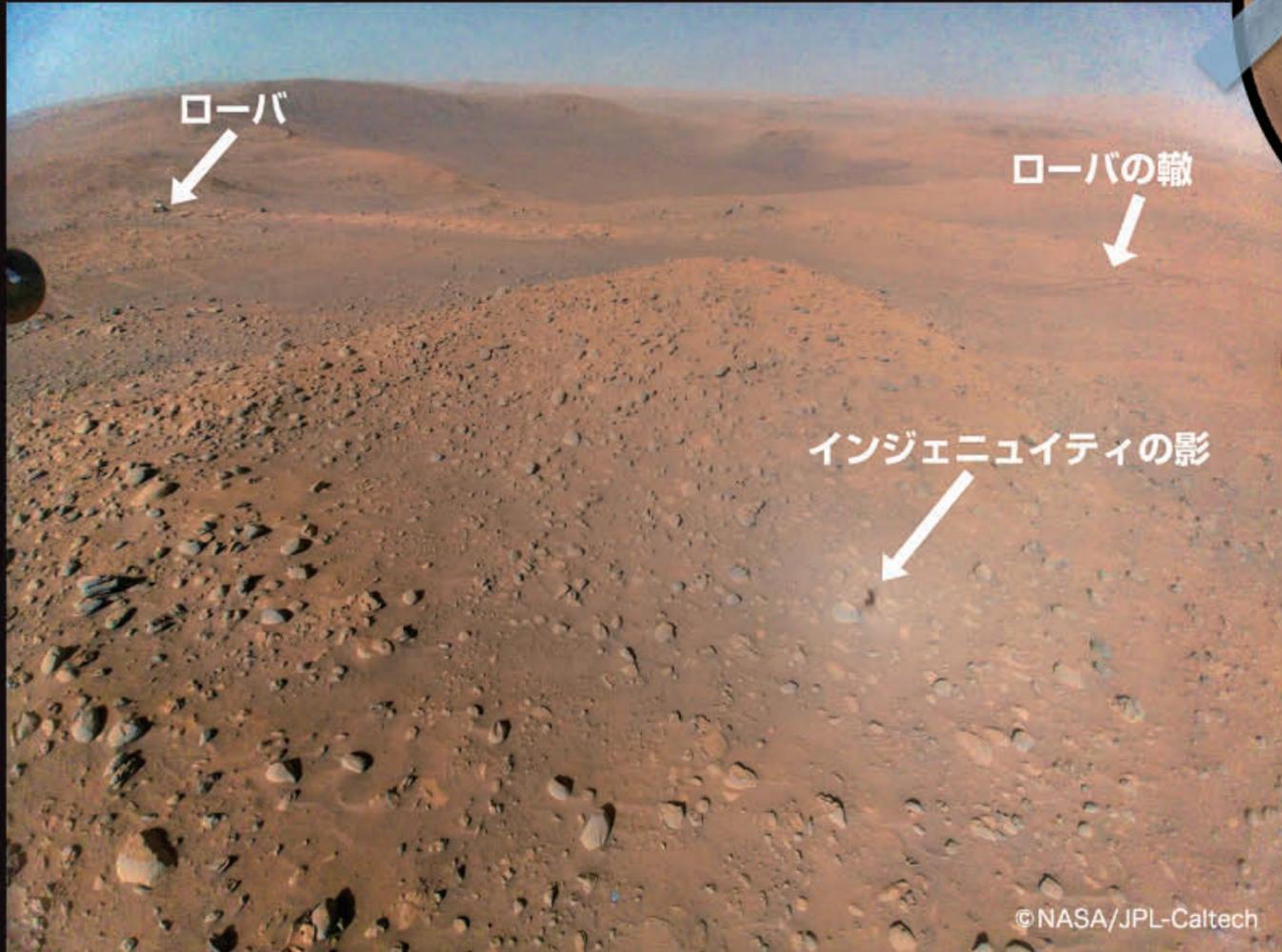


火星の空を舞う!

火星探査車「パーサビアランス」では、ローバによる地表探査に加え、火星ヘリコプター『インジェニユイティ (Ingenuity)』による空中観測も行われました。



©NASA/JPL-Caltech/University of Arizona



©NASA/JPL-Caltech

図1は、2023年4月22日にインジェニユイティが高度約12 mの上空から撮像した画像で、Belvaクレーターと呼ばれる地域の地層の様子を捉えています。

中央右寄りには、インジェニユイティ自身の影が映っているのが確認できます。そこから視点を左上の方向にずらすと、ローバの姿が見え、そこから右方向にローバが走行した際に残した轍も観測されます。

図1 Belvaクレーター付近の地層。

火星の青い夕焼け

火星の大気には細かい塵が漂っていることから、青い光は赤や黄色よりも遠くまで透過します。そのため、夕日が沈むときには大気が青く輝くという、地球の夕焼けとは逆の光景が見られます (図2)。このように、火星の現地でのリモセンにより、人類がまだ足を踏み入っていない火星での、未知の疑似体験をすることができます。



図2 火星の大気と光の波長。



キュリオシティローバから撮像した夕焼け。
©NASA/JPL-Caltech/MSSS/Texas A&M Univ.

[引用文献]

- Ikeda, A., Kumagai, H., Morota, T. (2022) Topographic degradation processes of lunar crater walls inferred from boulder falls. *JGR; Planets*, 127, e2021JE007176; doi: 10.1029/2021JE007176
- Kitazato, K., Milliken, R. E., Iwata, T., et al. (2019) The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy. *Science*, 364(6437), 272-275, doi: 10.1126/science.aav7432
- Leong, J. A., Nielsen, M., McQueen, N., et al. (2023) H₂ and CH₄ outgassing rates in the Samail ophiolite, Oman: Implications for low-temperature, continental serpentinization rates, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 347, 1-15. doi: 10.1016/j.gca.2023.02.008
- Matsuoka, M. and Yamamoto, S. (2026) In press. doi:10.3847/PSJ/ae3746
- Matsumoto, T., Noguchi, T., Miyake, A., et al. (2024) Sodium carbonates on Ryugu as evidence of highly saline water in the outer Solar System. *Nature Astronomy*, 8, 12, 1536-1543, doi: 10.1038/s41550-024-02418-1
- Milton, D. J., Barlow, B. C., Brett, R., et al. (1972) Gosses Bluff Impact Structure, Australia, *Science* 175, 1199-1207. doi:10.1126/science.175.4027.1199
- Mizuochi, H., Miyazaki, K., Abe, T., et al. (2024) Detection of long-term slope displacement using time-series DInSAR and geological factor analysis for susceptibility assessment of landslides in northwestern Kyushu Island, *Geomorphology*, 453, 109095, doi:10.1016/j.geomorph.2024.109095
- Morota, T., Sugita, S., Cho, Y., et al. (2020) Sample collection from asteroid (162173) Ryugu by Hayabusa2: Implications for surface evolution. *Science*, 368(6491), 654-659, doi: 10.1126/science.aaz6306
- Nakamura, T., Matsumoto, M., Amano, K., et al. (2022) Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples. *Science*, 379(6634), eabn8671, doi: 10.1126/science.abn8671
- Sugita, S., Honda, R., Morota, T., et al. (2019) The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes. *Science*, 364(6437), eaaw0422, doi: 10.1126/science.aaw0422
- Yamamoto, S., Nakamura, R., Matsunaga, T., et al. (2010) Possible mantle origin of olivine around lunar impact basins detected by SELENE. *Nature Geoscience*, 3, 533-536. doi: 10.1038/ngeo897
- Yesiltas, M., Glotch, T. D., Sava, B. (2021) Nano-FTIR spectroscopic identification of prebiotic carbonyl compounds in Dominion Range 08006 carbonaceous chondrite. *Scientific reports*, 11(1), 11656, doi: 10.1038/s41598-021-91200-8
- Yokoyama, T., Nagashima, K., Nakai, I., et al. (2022) Samples returned from the asteroid Ryugu are similar to Ivuna-type carbonaceous meteorites. *Science*, 379(6634), eabn7850, doi: 10.1126/science.abn7850
- Young, J. M., Glotch, T. D., Yesiltas, M., et al. (2022) Nano-FTIR Investigation of the CM Chondrite Allan Hills 83100. *JGR; Planets*, 127(5) e2021JE007166, doi: 10.1029/2021JE007166

[参照 Web サイト] 各URLは2026年2月4日に確認。

JAXA EORC 2014年10月3日, 「だいち2号」による御嶽山の観測結果について (インターフェロメトリによる観測)

https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/library/disaster/dis_insar_ontake_20140929_j.htm

JAXA プレスリリース 月周回衛星「かぐや(SELENE)」のハイビジョンカメラ(HDTV)による「満地球の出」撮影の成功について

https://www.jaxa.jp/press/2008/04/20080411_kaguya_j.html

NASA Earth Observatory <https://earthobservatory.nasa.gov/collection/1658/earth-from-afar>

産総研プレスリリース 2024年3月18日 https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2024/pr20240318/pr20240318.html

産総研プレスリリース 2023年9月27日 https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2023/pr20230927_2/pr20230927_2.html

産総研プレスリリース 2025年3月17日 https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2025/pr20250317_2/pr20250317_2.html

京都大学プレスリリース 小惑星リュウグウの砂つぶに発見された塩の結晶—太陽系の海洋天体とのつながりを知る新たな手がかり—

<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2024-11-21-1>

Station 6- Apollo 17 <https://lroc.im-ldi.com/images/759>

JAXA SLIM landing <https://lroc.im-ldi.com/images/1358>

小型月着陸実証機SLIM <https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/past/slim.html>

Apollo 14 Landing site <https://lroc.im-ldi.com/visit/exhibits/1/gallery/6>

Explaining Salt on Ceres <https://www.jsg.utexas.edu/news/2019/11/explaining-salt-on-ceres/>

[画像提供]

NASA、NOAA、米空軍、METI/ASTER、Japan Space Systems、JAXA、NHK、国立天文台、ジェット推進研究所、Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory、Carnegie Institution of Washington、ESA、DLR、FU Berlin、JPL-Caltech、University of Arizona、UCLA、MPS、IDA、東京大、高知大、立教大、名古屋大、千葉工大、明治大、会津大、産総研、京都大学、立命館大学、GSFC、Arizona State University、土田 聡 地質調査総合センター 地質情報研究部門、J. Nichols (University of Leicester)* *木星画像のクレジット中の一人、ALOS@EORCホームページ 画像ライブラリー jpn01.safelinks.protection.outlook.com

[執筆]

山本 聡 地質情報研究部門 リモートセンシング研究グループ

松岡 萌 地質情報研究部門 リモートセンシング研究グループ

池田あやめ 地質情報研究部門 リモートセンシング研究グループ

水落裕樹 地質情報研究部門 リモートセンシング研究グループ

[編集]

中澤 努 地質情報基盤センター

藤原智晴 地質情報基盤センター

[デザイン・レイアウト]

都井美穂 地質情報基盤センター

[発行]

2026年2月25日

[発行元]

国立研究開発法人産業技術総合研究所 地質調査総合センター
〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 中央事業所7群
<https://www.gsj.jp>

地質調査総合センター研究関連普及出版物 No. 293, G75225