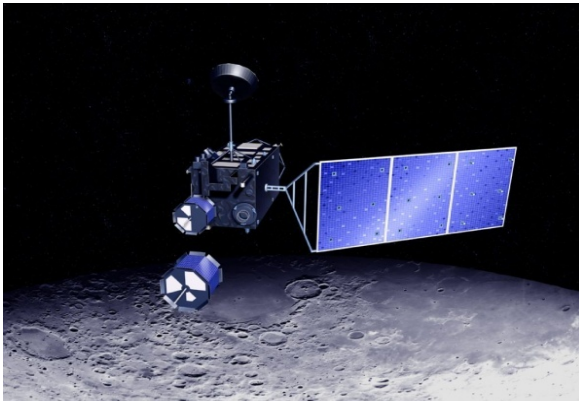


月周回衛星「かぐや (SELENE)」の 状況について



平成20年12月3日

宇宙航空研究開発機構

月惑星探査プログラムグループ

SELENE プロジェクトマネージャ 佐々木 進

SELENE サイエンス マネージャ 加藤 學

空へ踏み、宇宙を拓く

「かぐや」の状況

- (1) 平成20年10月31日 定常運用完了。11月1日から後期運用を実施している。元素分布についてのガンマ線分光計(GRS)の4ヶ月間停止分を含む観測機器による観測を実施中。
- (2) これまで取得した観測データに基づく初期的解析の結果、科学雑誌「サイエンス (Science)」、米国地球物理学会等へ投稿している。最新の受理あるいは出版済みの論文は次のとおり。
 - 1) サイエンス(11月7日(米国時間)オンライン版 掲載)
Long-lived Volcanism on the Lunar Farside Revealed by SELENE Terrain Camera
 - 2) 米国地球物理学会Geophysical Research Letters誌
 - Discovery on the lithology of lunar crater central peaks by SELENE Spectral Profiler
 - Illumination conditions at the lunar polar regions by KAGUYA (SELENE) laser altimeter
 - Solar wind proton reflection at the lunar surface: low energy ion measurement by MAP-PACE onboard SELENE (KAGUYA)
 - 3) 米国地球物理学会Radio Science誌
Pico-second Accuracy VLBI of the Two Subsatellites of SELENE (KAGUYA) using Multi-Frequency and Same Beam Methods (条件付き受理)

「かぐや」の状況

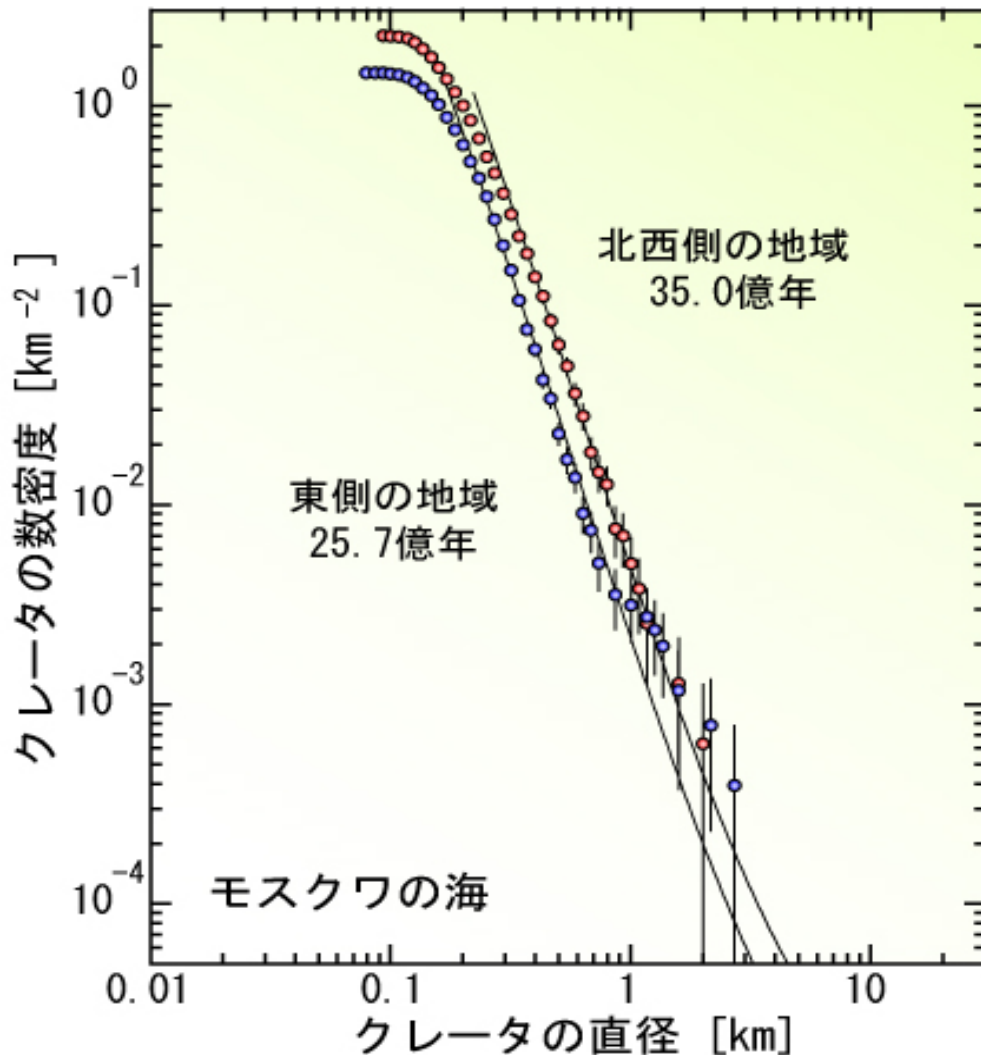
(3) 普及・啓発活動などについて

- ・平成20年11月11日国際月探査作業グループ(ILEWG:International Lunar Exploration Working Group)によるILEWGサイエンスアワードを「かぐや」サイエンスチームが受賞。これは、1年間の「かぐや」の観測運用で得られたデータから作成した重力場、地形図、高分解能の画像などの成果の公表に対するもの。
- ・Google/YOUTUBEを用いたHDTV映像などの配信開始(JAXA/SELENEプロジェクトチャンネル)を、NHKおよび観測機器チームと協力し、12月から開始予定。
<http://jp.youtube.com/>
- ・来年の世界天文年(IYA)にあわせて、これまでの観測データなどを用いたデジタルプラネタリウム対応のコンテンツ、成果DVDなどを準備中である。
- ・日本サウンドスケープ協会主催の「第5回 音の出る地図コンテスト」において、レーザ高度計の観測データを可聴化(高度データを音程になおしたもの)したMoon bellシステムがグランプリに選定された。

地形カメラによる月の裏側の海の年代推定

今回のクレーター個数密度計測結果

—モスクワの海—



- これまでの月の裏側の画像データでは、直径数100m程度のクレーターについては、正確な直径や個数密度を調べるのが、十分に出来なかった。

- しかし、より高分解能な「かぐや」の地形カメラによって、直径200～300m以上の小さなクレーターが正確に把握できるようになった。

- これまでの観測データから30数億年前に形成されたと考えられていたモスクワの海では、東側の地域(前のページの東領域)で、クレーターの個数密度が小さいことから、更に若く約25億年前に形成されたということが推定された。

Discoveries on the lithology of lunar crater central peaks

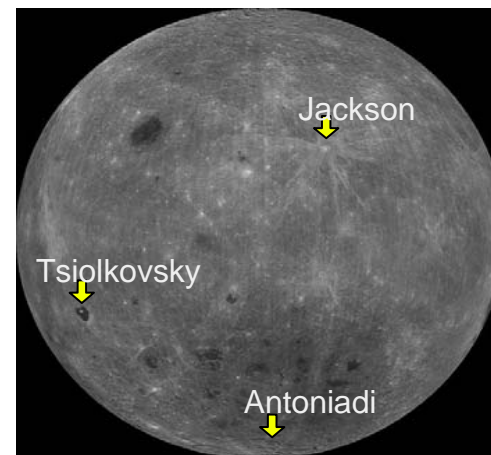
by SELENE Spectral Profiler

SELENE搭載スペクトルプロファイラによる月クレータ中央丘の 岩相に関する発見

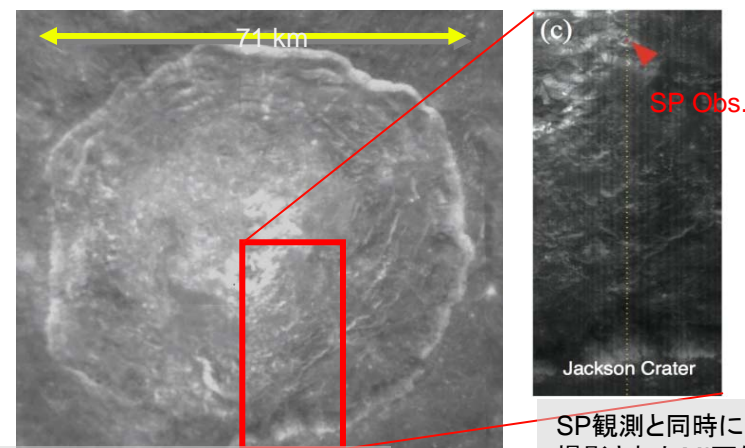


スペクトルプロファイラは月全球の可視近赤外連続反射スペクトルを取得する世界初の機器。この観測データにより、次の知見を得た。

- 今までに観測された中でもっとも明瞭な斜長石の分光特徴(1.29 μm 付近の吸収)を示す地域を、月裏側のJacksonクレータの中央丘において発見した。
- 月裏側のTsiolkovskyクレータの中央丘が、従来考えられていたかんらん石ではなく、輝石と斜長石という2種類の鉱物からなることを明らかにした。
- 月裏側の南極エイトケン盆地(SPA)にあるAntoniadiクレータの中央丘及ピークリング部に分布する輝石のMg数が50以上であり、SPAの原始地殻形成を考える上で重要な鉱物組成に関する情報を提示した。



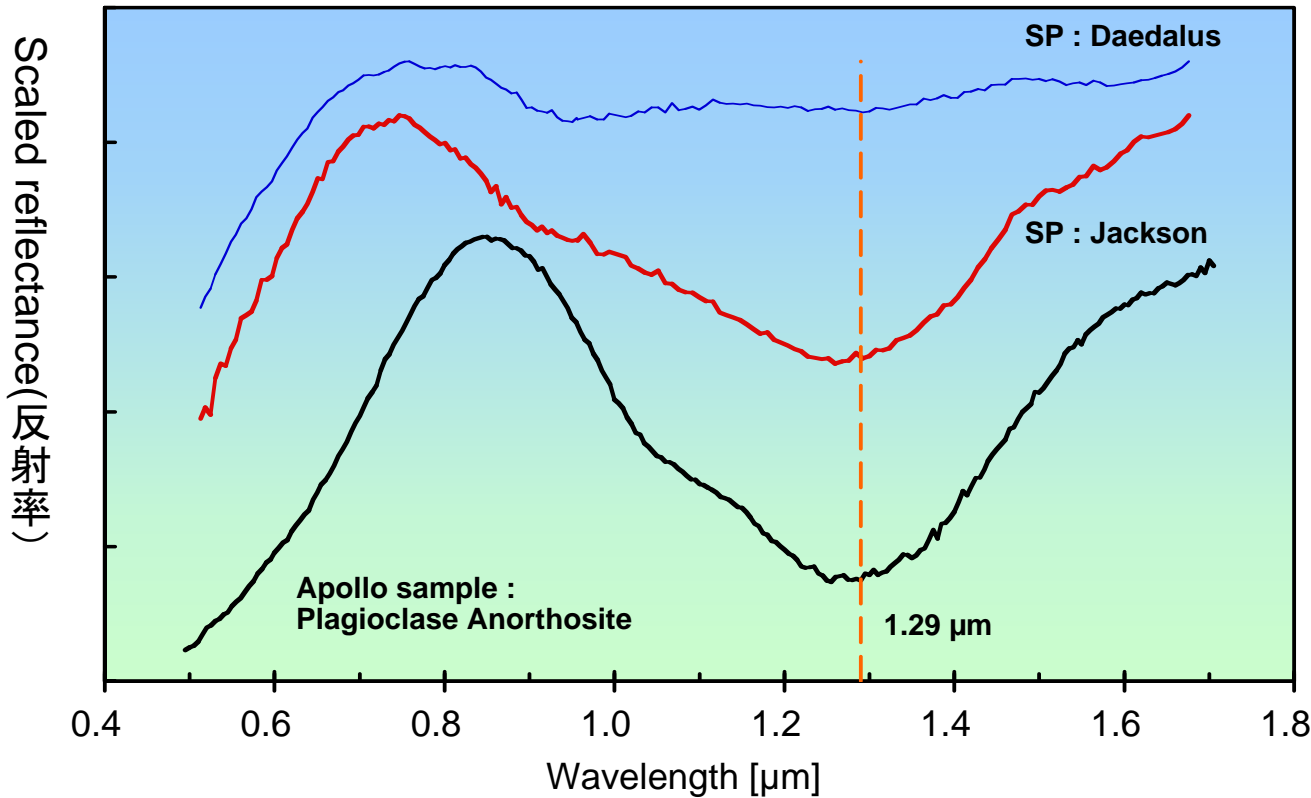
月裏側の米国クレメンタイン衛星 UV/Visカメラ画像



クレメンタインUV/Visカメラ (750 nm) 画像

SP観測と同時に撮影されたMI画像 (750nm)

非常に明瞭な斜長石の分光特徴を示すJacksonクレータの中央丘



図の説明:

横軸: 波長(単位: μm , $1 \mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$)
 縦軸: 宇宙風化の影響を軽減するため、接線除去処理を適用した後の月面反射率(目盛りは、0.05刻み)。

※見やすくするため、3つのグラフはオフセットを与え、上下にずらした。

データ:

青: Daedalusクレータの中央丘。

SPの観測結果。

1.2-1.3 μm に吸収を持たない斜長石の例。

赤: Jacksonクレータの中央丘。

SPの観測結果。

今回発見された1.2-1.3 μm に吸収を持つ斜長石。

黒: 斜長石に富む月サンプル。

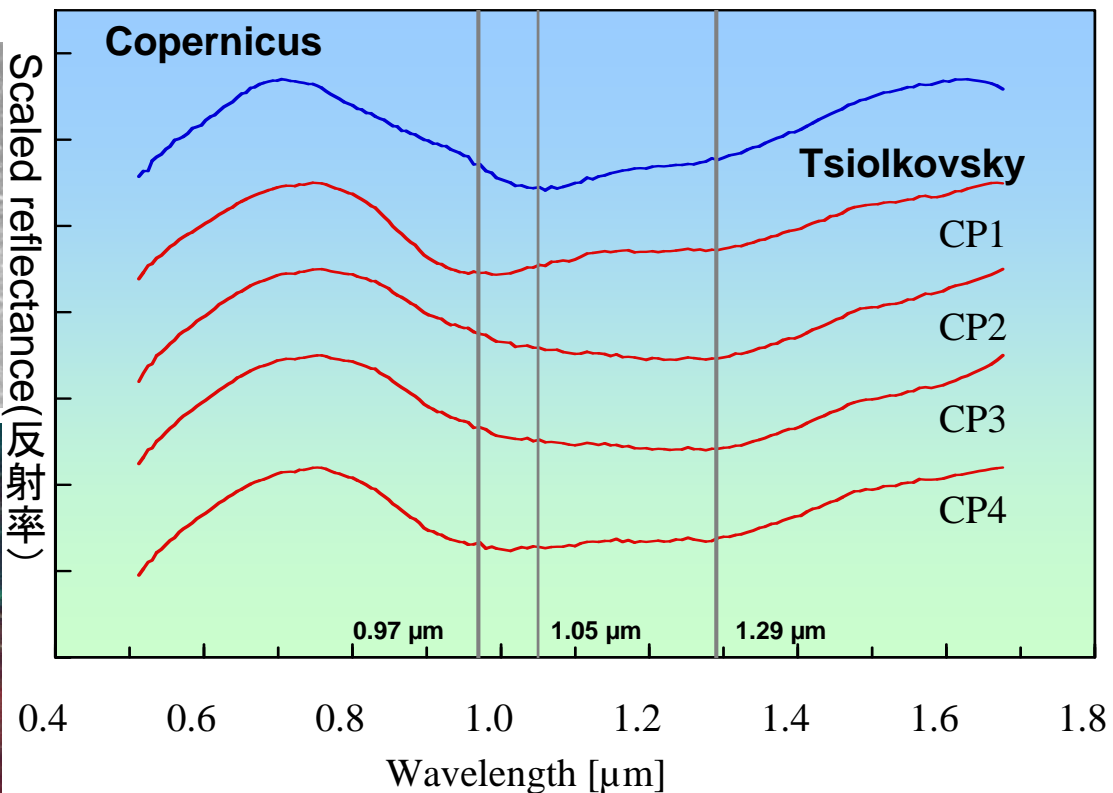
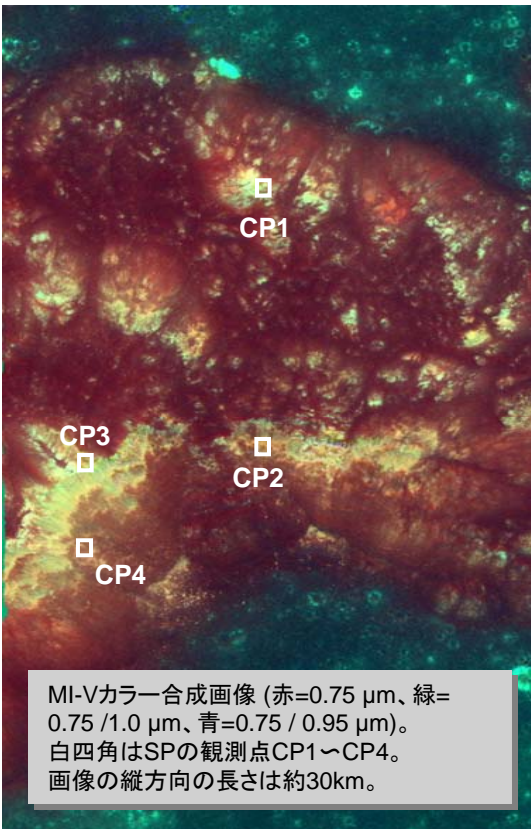
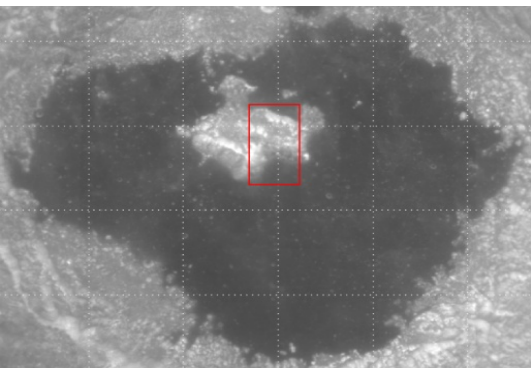
実験室における測定結果。

• 斜長石に富む月サンプルの反射スペクトルには1.2~1.3 μm 付近に斜長石中の鉄に起因する吸収(グラフの黒線)があるが、今までの月のリモートセンシング観測では、鉄量やアルベド等から斜長石が存在すると想定される場所(例: グラフの青線。月表側のDaedalusクレータの中央丘)にはそのような顕著な吸収は見つかっておらず、月地殻に関する謎の一つとされていた。

• SPの観測により月裏側にあるJacksonクレータの中央丘において、1.29 μm に非常に顕著な吸収を持つ地域(グラフの赤線)が発見された。この吸収は位置、形状とも斜長石に富むアポロの月サンプルに非常に良く対応しているため、中央丘表面に分布する斜長石によるものと考えられる。

• 今回の発見により、月表面に分布する斜長石には、1.2~1.3 μm に吸収を持つものと持たないものの2種類が存在することが明らかになった。一方この吸収の有無は、斜長石中の鉄量、クレータ形成時の圧力、宇宙風化等によって決まると考えられるため、今後この2種類の斜長石の分布を調べることにより、斜長石が晶出したマグマの組成や斜長石が月面に露出した時期、クレータを形成した隕石の衝突に関する知見が得られるものと期待される。

月裏側のTsiolkovsky中央丘の岩相の解明



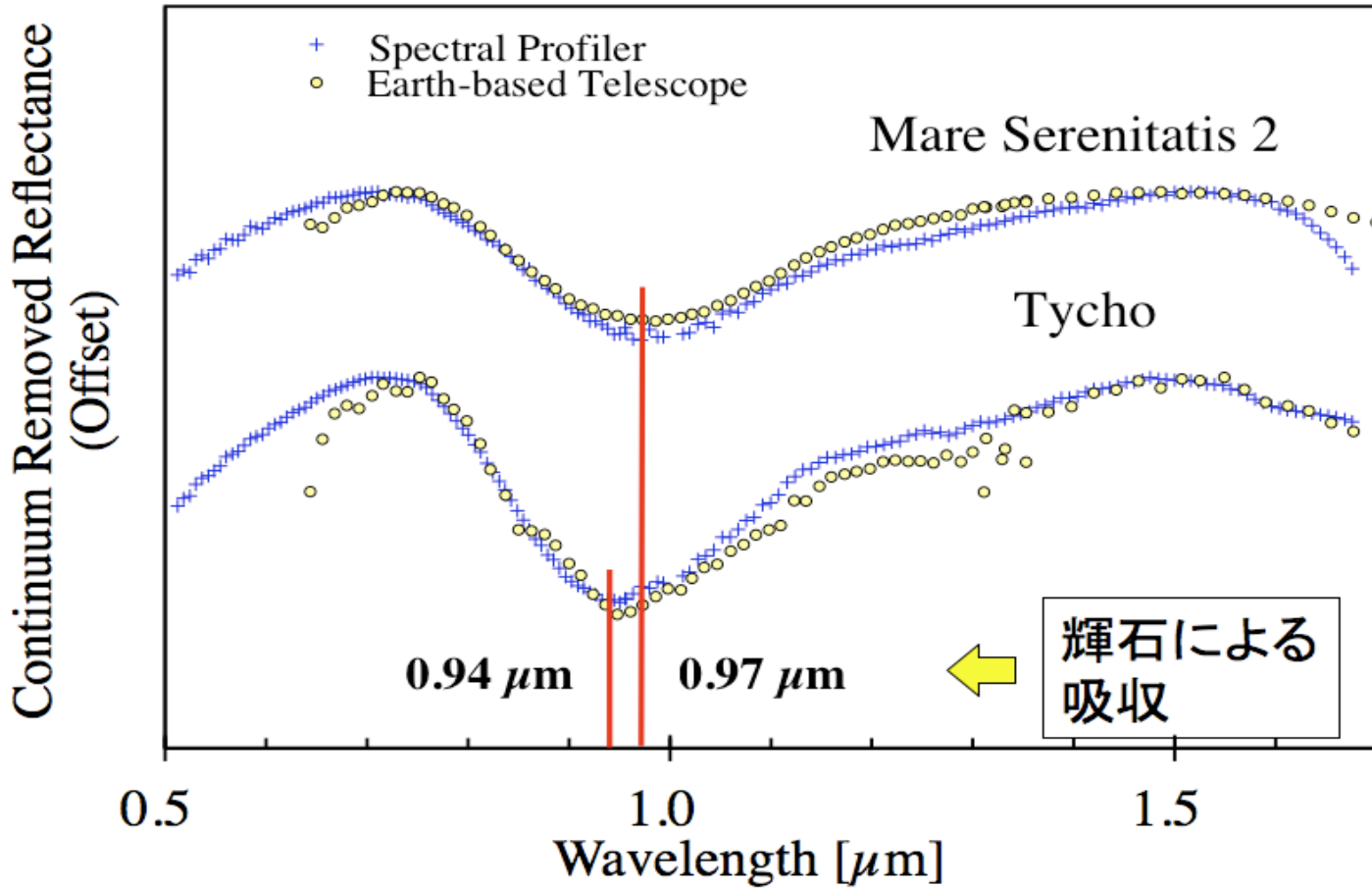
図の説明:
 横軸: 波長
 (単位: μm)
 縦軸: 宇宙風化の影響を軽減するため、接線除去処理を適用した後の月面反射率(目盛りは、0.1刻み)。
 ※見やすくするため、5つのグラフはオフセットを与え、上下にずらした。
 データ:
 SPの観測データ
 青: Copernicusクレータの中央丘。
 かんらん石を含む典型的な中央丘。
 赤: Tsiolkovskyクレータの中央丘。MI画像中で黄色の部分(4箇所)。

SPの観測結果:

- Copernicus: $1.05 \mu\text{m}$ に極小値を持つ典型的なかんらん石のスペクトルが見られた。
- Tsiolkovsky: 反射率が、 $0.9 \mu\text{m} > 0.95 \mu\text{m} > 1 \mu\text{m}$ (右下がり) となつてはいるが、 $1 \mu\text{m}$ より長波長側において、かんらん石の特徴である $1.05 \mu\text{m}$ に極小値を持つものではなく、 $0.97 \mu\text{m}$ と $1.29 \mu\text{m}$ に極小値が見られた。前者は輝石、後者は斜長石の吸収の中心波長に相当する。従つてこの地域には、かんらん石ではなく、斜長石と輝石の混合物が分布していると考えられる。
- これまでの研究で「かんらん石が露出している」とされたクレータにおいても、SPによる再調査が必要と考えられる。

MI-Vカラー合成画像(赤= $0.75 \mu\text{m}$ 、緑= $0.75 / 1.0 \mu\text{m}$ 、青= $0.75 / 0.95 \mu\text{m}$)。白四角はSPの観測点CP1~CP4。画像の縦方向の長さは約30km。

参考： スペクトルプロファイラによる輝石の吸収観測



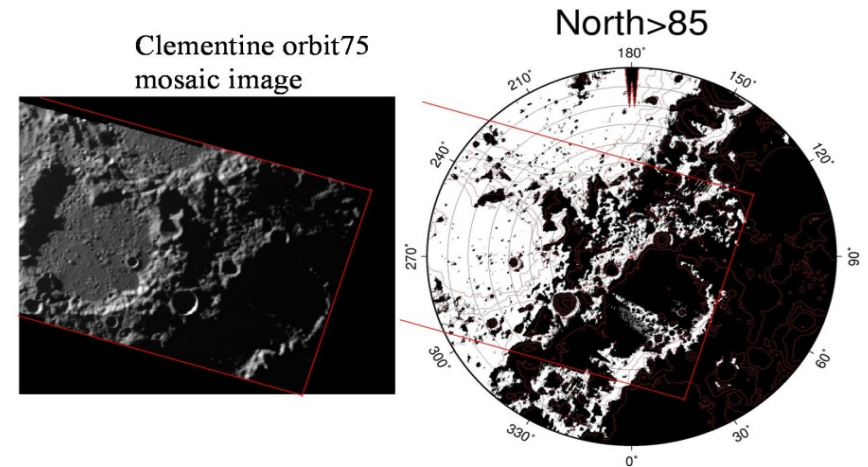
横軸: 波長 (単位: μm , $1 \mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$)
 縦軸: 宇宙風化の影響を軽減するため、接線除去処理を適用した後の月面反射率

スペクトルプロファイラによる輝石による吸収帯は、 0.94 、 $0.97 \mu\text{m}$ であり、地球からの観測結果と一致していることがわかる。Mare Serenitatis (晴れの海)、Tycho(ティコ)

米国地球物理学会 *Geophysical Research Letters*誌掲載論文
 “Illumination conditions at the lunar polar regions
 by KAGUYA(SELENE) laser altimeter”
 かぐやレーザ高度計による 月極域での日照条件

月の極域は太陽光がほぼ水平方向から入射するため、深いクレータの底などで1年中陽が当たらない領域(永久影)や、高い山などで陽が常に当たる場所(永久日照)があると考えられていたが、詳細な極域の地形データがこれまで存在しなかったため確かなことがいえなかった。かぐやのレーザ高度計がはじめて極の地形データを作成し、次の知見を得た。

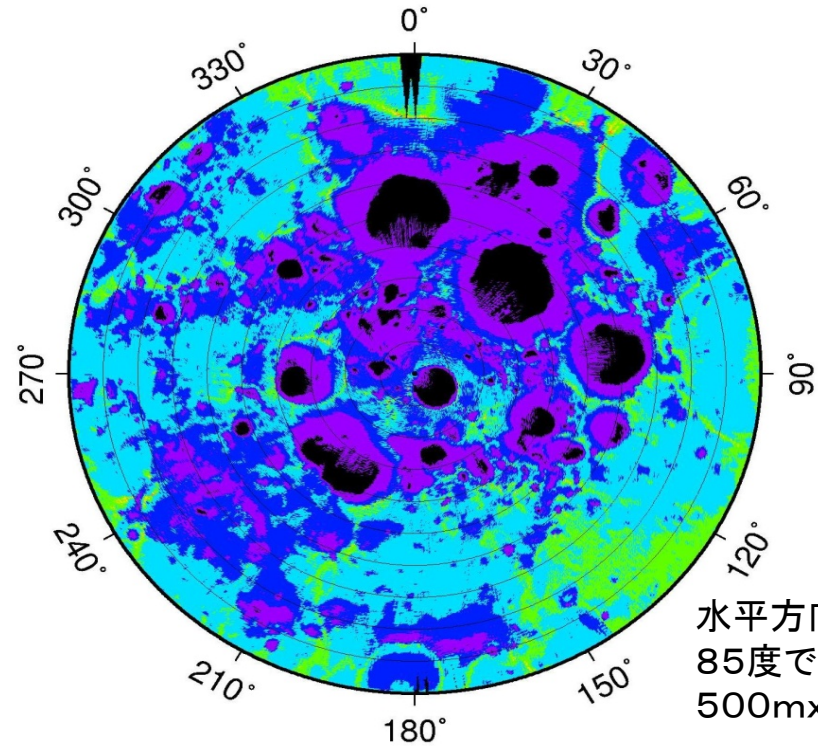
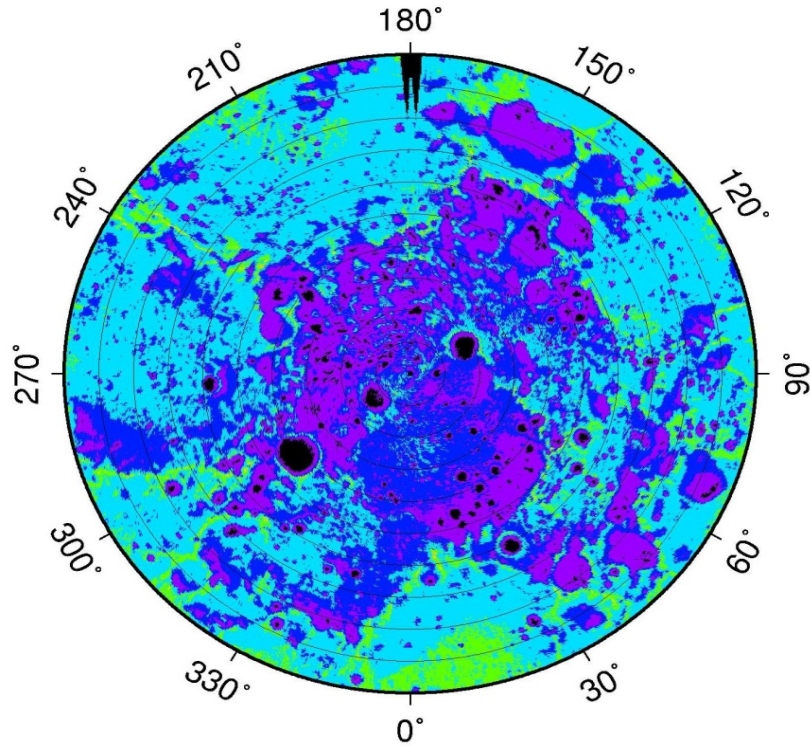
- 永久日照は存在しない。永久影が存在する。
- 最大の日照率は89%(北)、86%(南)。地球の一年のうち324日、314日分に相当。



Clementine衛星が作成した北極の画像(左)との比較を行い、地形モデルおよび日照率の計算方法がほぼ正しいことを確認した。その後、南北85度以北(以南)の領域で、今回得られた地形モデルを用いて約5年半(2000日)分の日照率の計算を実施した。

北極 North > 85

南極 South < -85



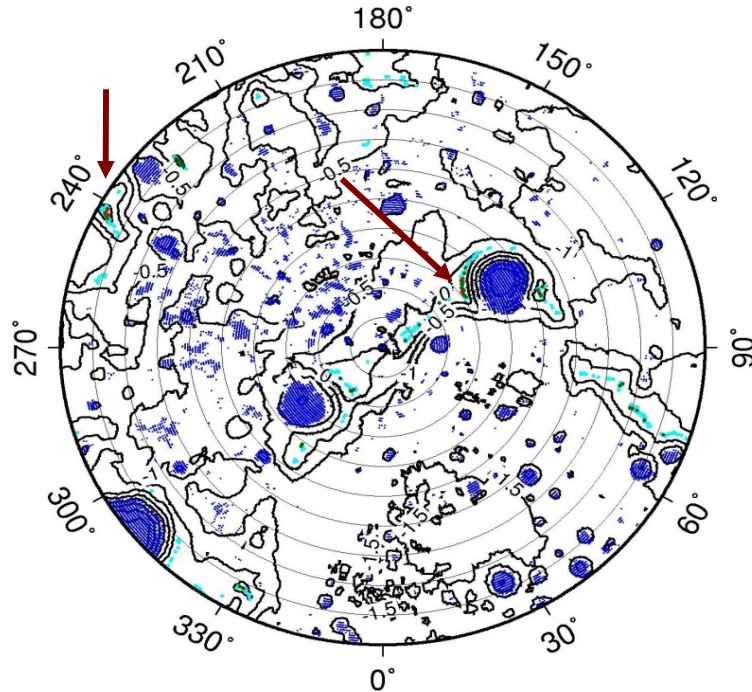
水平方向分解能は北緯
85度で1画素あたり約
500mx500m。



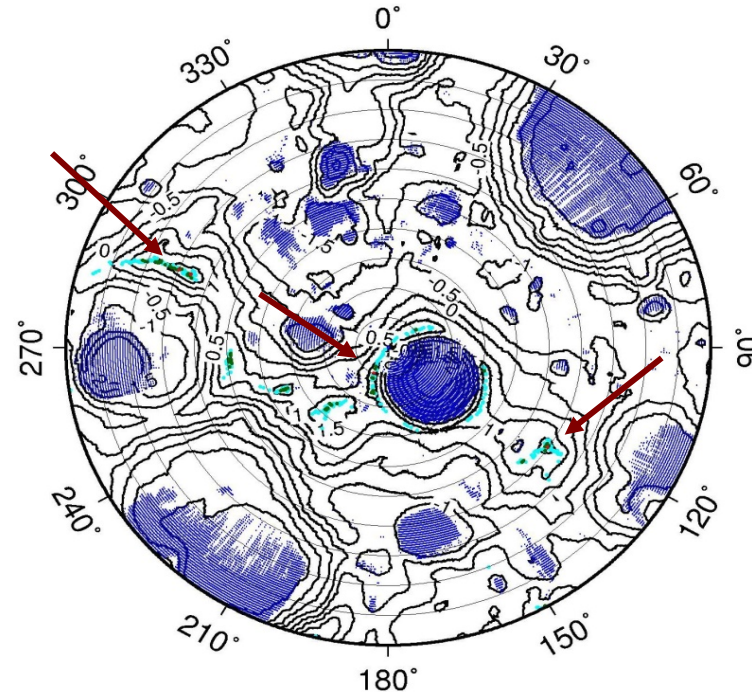
• 黒い部分が「永久影」領域、ただし2次散乱光は考慮していない。

88度以北(以南)拡大図

北極 North > 88



南極 South < -88



| | |
|--------|----|
| >80% | 赤 |
| 70-80% | 緑 |
| 60-70% | 水色 |
| 0% | 青 |

- 80%以上の領域はクレータ周縁(リム)の限られた部分のみに存在する(矢印)。

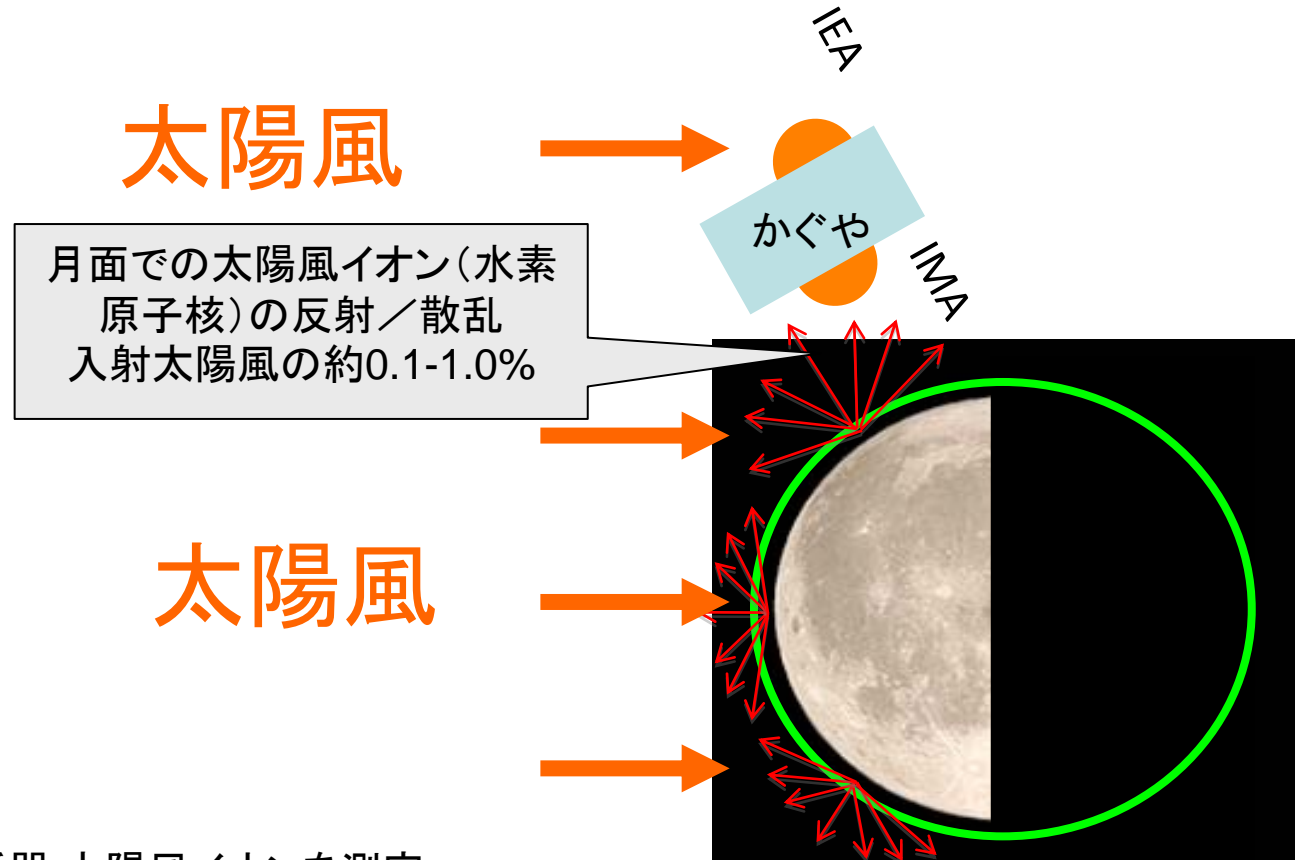
米国地球物理学会Geophysical Research Letters誌掲載論文

Solar wind proton reflection at the lunar surface: low energy ion measurement by MAP-PACE onboard SELENE (KAGUYA)

太陽風イオン(水素原子核(陽子))の月面反射

•月面に衝突した太陽風イオンのうち、0.1%~1%程度が(少しエネルギーを失って)反射/散乱されることをMAP-PACE(プラズマ観測装置)が発見した。

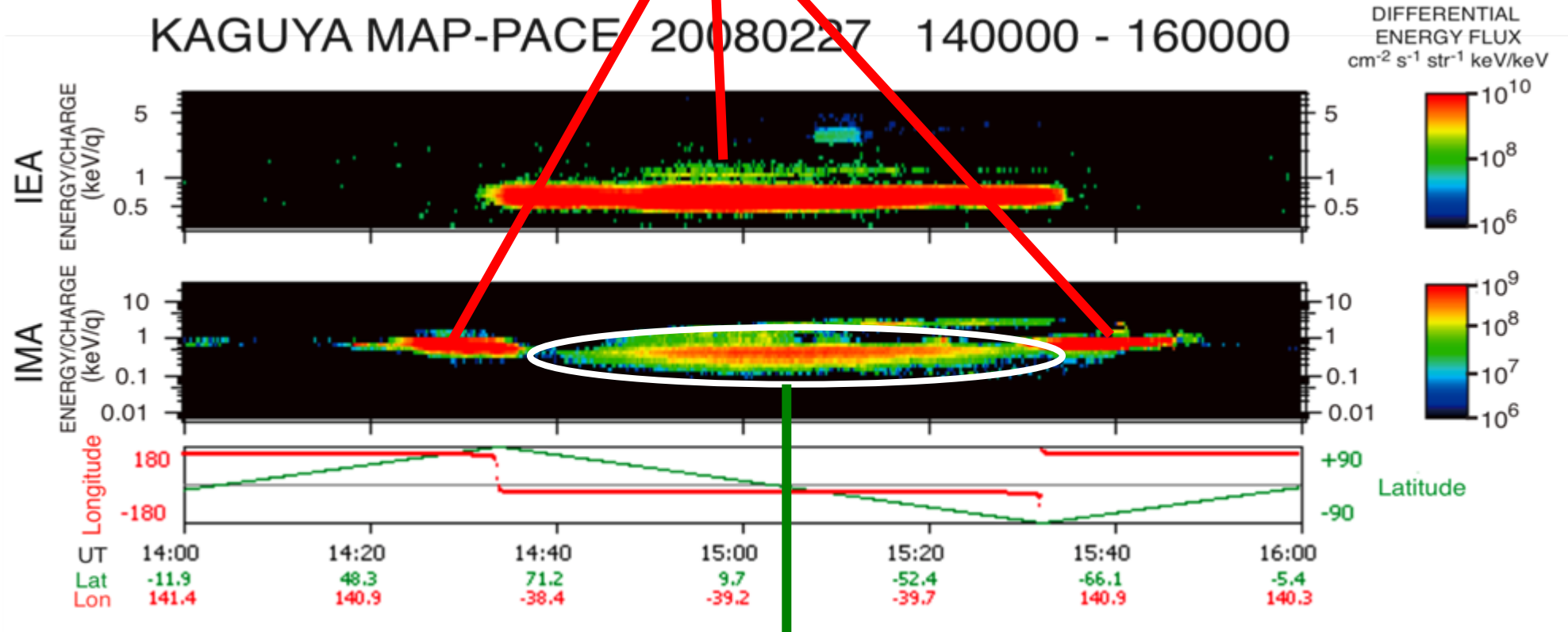
•月面で反射/散乱されて「かぐや」に戻ってくるイオンは太陽風中に含まれるヘリウム原子核は存在せず、殆どが陽子(水素原子核)であることも併せて明らかとなった。



※IEA(Ion Energy Analyzer)イオン分析器:太陽風イオンを測定

IMA(Ion Mass Analyzer)イオン質量分析器:月周辺のイオンを測定

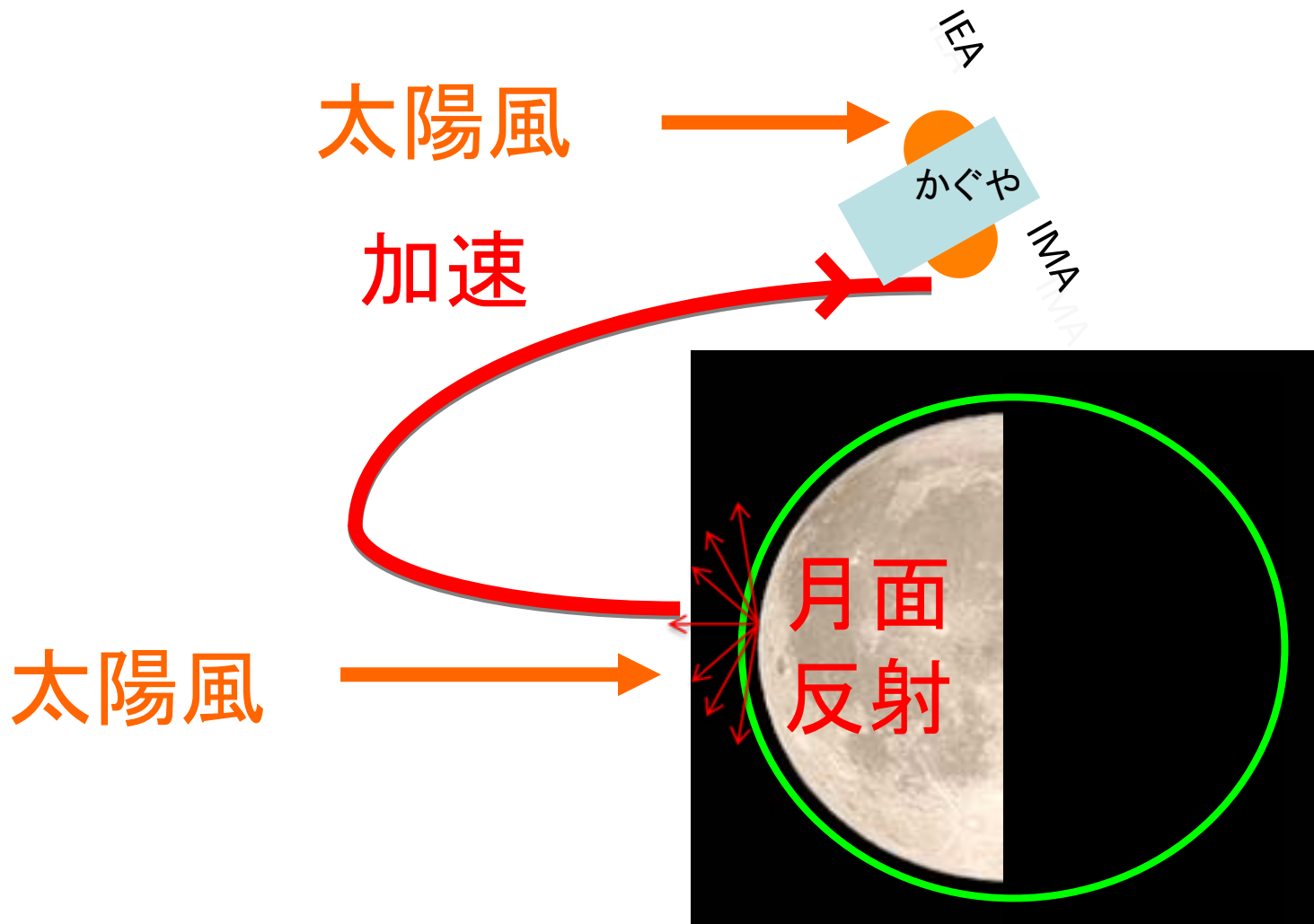
太陽風イオン



月面で反射／散乱された太陽風イオン(水素原子核)

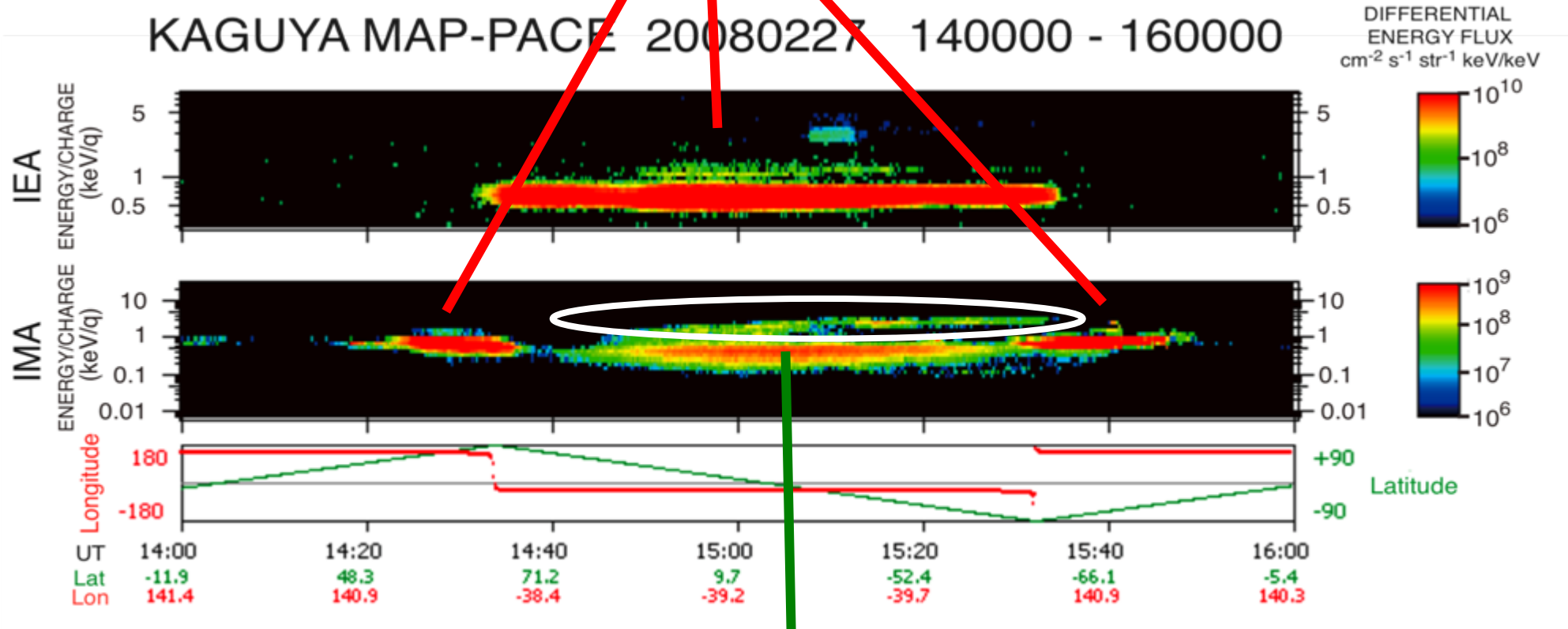
※Energy/Chargeはイオンの加速される割合(エネルギーを電荷量でわったもの)を示す。Differential Energy Fluxはイオンの量(エネルギーの流量)を意味し、赤くなるほど粒子の数が増え、飛んでくる粒子の持っているエネルギーの量が増えます。

月面反射イオン(水素原子核)の太陽風による加速



- 太陽風イオン(水素原子核)の月面反射／散乱と反射された太陽風イオン(水素原子核)の加速が初めて宇宙空間で観測された。
- このプロセスは、月に限らず、強い固有磁場と濃い大気をもたない天体周辺に共通に存在するはずのプロセスであり、天体周辺環境を理解する上で無視できない重要なプロセスである。

太陽風イオン



反射された太陽風イオン(水素原子核)の加速
(元のエネルギーの6倍程度にも加速される。)

補足

後期運用計画概要



| | | | | | |
|---------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 期間 | H20.11月1日～H21月3中旬 | | H21.3月中旬-4月下旬 | H21.5月 | ～H21.8月以前 |
| 軌道 | 100km運用 | | 低高度運用 | | 落下制御運用 |
| | 100km円軌道 | | 50km円軌道 | 20km(南極) × 100km(北極) | |
| 期待される成果 | 主目的 | ・ガンマ線分光計(GRS)による元素分布観測 (元素分布の所期のデータ収集) | ・月磁場観測装置(LMAG)、プラズマ観測装置(PACE)による月の磁場の3次元的分布及びミニ磁気圏に関するデータ取得。 | | ・月の表側の目標地域へ落下運用(落下キャンペーンの実施予定) |
| | オプション | ・GRS以外の観測機器については科学観測データの高度化、品質向上 ・南極の夏などこれまで観測されていなかった季節のデータが取得ができる。 | ・他の観測機器については、観測機器の温度、地上系の制約の範囲で観測 ・ハイビジョンカメラ(HDTV)による、より鮮明な月面の撮影 | ・他の観測機器については、観測機器の温度、地上系の制約の範囲で観測 ・北極の夏で表面地形、鉱物分布を取得。 | |

※1 リレー衛星(おきな)については、H21.2月に落下予定

観測機器の現状と今後の予定



| | | |
|----------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 元素 分布 | XRS | 初期チェックアウトにおいて、4枚のCCDを用いた観測時に計測ノイズが増加することが判明した。地上での再現試験結果等により、X線CCDの放射線ダメージにより、X線強度が高く観測されるケースが多く検出されたものと推定した。加えて、定常運用期間中太陽活動レベルの低い状態が継続し、必要なX線強度のデータが取得できなかった。このため、後期運用においても観測を継続し、所期データの取得を試みる。 |
| | GRS | 平成20年2月から観測データに異常が見られた不具合は、データ解析の結果、極低温となる高圧印加部位にコンタミが付着し、微小なリーク電流が生じたことで検出器出力信号にノイズが乗ったことが原因と推定した。調査過程で不具合は解消し、運用を再開した。観測データが異常となる事象による観測を中断した約4ヶ月を除き、定常運用期間を通して観測データを取得した。欠測期間を補完するため、後期運用で観測を継続している。 |
| 鉱物 分布 | MI | 定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行っている。 |
| | SP | 定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行っている。 |
| 地形 表層 | TC | 定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行っている。 |
| | LALT | 定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行っている。 |
| | LRS | 平成20年9月、観測モードに移行できない不具合が発生した。原因究明を継続しており、電子回路部のサウンダー基板に異常があることが判明している。電子回路部の不具合が発生して観測を停止するまでに所期の観測データを取得することができている。電子回路部の不具合については原因究明及び復旧のための作業を継続し、後期運用における追加観測データの取得を目指す。 |
| 重力 | RSAT | 定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行っている。 |
| | VRAD | 定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行っている。 |

観測機器の現状と今後の予定



| | | |
|----|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 環境 | LMAG | 定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行っている。 |
| | PACE | 定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行っている。 |
| | CPS | CPSについては不具合が発生した2つの検出器を除き所定期間の観測データを取得した。後期運用においては、不具合が発生したCPS（HID及びLPD-He）の観測データ取得を試みる。なお不具合の原因については、地上での再現試験の結果、+5V電源用レギュレータの故障により本来の電圧を発生していないことが原因と推定した。 |
| | RS | 定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行っている。 |
| | UPI | 定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行う。なお、20年6月、11月に2軸ある望遠鏡の駆動機構が異常となる事象が発生し、それ以降は2軸を固定して極紫外およびナトリウムを中心にした観測を実施している。 |
| 広報 | HDTV | 定常運用期間を通して、放射線損傷が少なかったため、計画以上の地球の出、入り、月の映像を取得できた。後期運用で追加の映像取得を行っている。 |

かぐや(SELENE)の観測ミッション

| 観測ミッション | 観測項目 | 観測内容 |
|----------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1 蛍光X線分光計(XRS) | 元素分布 | 太陽からのX線を受けて月面から放射される二次X線を観測し、月表面のAl, Si, Mg, Fe等の元素分布を調べる。 |
| 2 ガンマ線分光計(CRS) | | 月面から放射される γ 線を観測し、月表面の放射性元素(U, Th, K等)分布を調べる。 |
| 3 マルチバンドイメージャ(MI) | 鉱物分布 | 月面からの可視近赤外光を複数の波長で観測し、地質を調べる。 |
| 4 スペクトルプロファイラ(SP) | | 月面からの可視近赤外光における連続スペクトルを観測し、地質中に含まれる鉱物の組成等を調べる。 |
| 5 地形カメラ(TC) | 地形・ 表層構造 | 高分解能(10m)カメラ2台のステレオ撮像により、標高を含む地形データを取得する。 |
| 6 月レーダサウンダ(LRS) | | 月面に電波を発射し、その反射により月の表層構造(地下数km程度)を調べる。 |
| 7 レーザ高度計(LALT) | | 月面にレーザ光を発射し、その反射時間により、地形の起伏、高度を精密に測定する。 |
| 8 月磁場観測装置(LMAG) | 月面環境 | 月面および月周辺の磁気分布を観測する。 |
| 9 粒子線計測器(CPS) | | 月周辺における、宇宙線や太陽から放射される高エネルギー放射線、及び月面から放射される α 線を観測する。 |
| 10 プラズマ観測装置(PACE) | | 月周辺の太陽風の電子とイオン及び月面からの反射電子と二次イオンを測定する。 |
| 11 電波科学(RS) | | 衛星のリム通過時に衛星からの電波の位相変化を測定し、希薄な月電離層を検出する。 |
| 12 プラズマイメージャ(UPI) | 地球プラズマ環境 | 月軌道から地球の磁気圏及びプラズマ圏のダイナミクスを画像として観測する。 |
| 13 リレー衛星中継器8RSAT) | 月の重力分布 | 主衛星が月裏側を飛行中に地球局との4ウェイドップラ計測を行う。主衛星の軌道擾乱から月裏側の重力場データを取得する。 |
| 14 衛星電波源(VRAD) | | 2機の子衛星に搭載する電波源に対し地球局から相対VLBI観測を行い、両衛星の軌道を精密に計測する。これにより月重力場を精密に観測する。 |
| 15 高精細映像取得システム(HDTV) | 映像取得 | 月面上の「地球の出」等のハイビジョン撮影を行う。 |

論文著者一覽

1) Long-lived Volcanism on the Lunar Farside Revealed by SELENE Terrain Camera

春山純一、大竹真紀子、諸田智克、本田親寿、横田 康弘、安部 正真、松永 恒雄、小川 佳子、
宮本 英昭、岩崎 晃、佐伯 和人、山路 敦、浅田 智朗、出村 裕英、平田 成、寺菌 淳也、鳥居 雅也、C.M.
Pieters、J-L. Josset

2) Discovery on the lithology of lunar crater central peaks by SELENE Spectral Profiler

松永恒雄、大竹真紀子、春山純一、小川佳子、中村良介、横田康弘、諸田智克、本田親寿、
鳥居雅也、安部正真、二村徳宏、廣井孝弘、荒井朋子、佐伯和人、武田 弘、平田 成、児玉信介、杉原孝充
、出村裕英、浅田智朗、寺菌淳也、大嶽久志

3) Illumination conditions at the lunar polar regions by KAGUYA (SELENE) laser altimeter

野田 寛大、荒木 博志、S. Goossens、石原吉明、松本晃治、田澤誠一、河野宣之、佐々木晶

4) Solar wind proton reflection at the lunar surface: low energy ion measurement by MAP-PACE onboard SELENE (KAGUYA)

斎藤義文、横田勝一郎、田中孝明、浅村和史、西野真木、藤本正樹、綱川秀夫、渋谷秀敏、
松島政貴、清水久芳、高橋太、向井利典、寺沢敏夫