

かぐやマルチバンドイメージカメラを用いた アポロ17号サイト近隣地域の地質分析

神前喬（阪大），若松俊哉（東大），椿原裕樹（会津大），和田浩二（千葉工大）

1 はじめに

月の表側には、いわゆる海の玄武岩と呼ばれる溶岩流で覆われている地域が顕著に見られる。この溶岩流が噴出した年代・量・組成を明らかにすることは、月の内部進化を探る上で重要な鍵であり、月探査による詳細な分析が必要とされている。

日本の月周回探査衛星「かぐや (SELENE)」は、月表面および内部構造に対する高分解能データを提供するに至っている。本レポートでは、「かぐや」搭載のマルチバンドイメージカメラ (MI) によって取得されたデータを用いて、アポロ17号サイト近隣地域を地質分析した結果を報告する。対象地域は溶岩流で覆われており (図1)、かつ一見して様相の異なる3種類の溶岩流の境界が見られる興味深い地域である。我々は、この地域に見られる溶岩流の形成順序や構成物質 (吸収スペクトル) の違いを明らかにすることを試みた。また、溶岩流上に形成された衝突クレーターに着目して、クレーターの吸収スペクトルの特徴を抽出することや溶岩流の厚さを推定することを試みた。

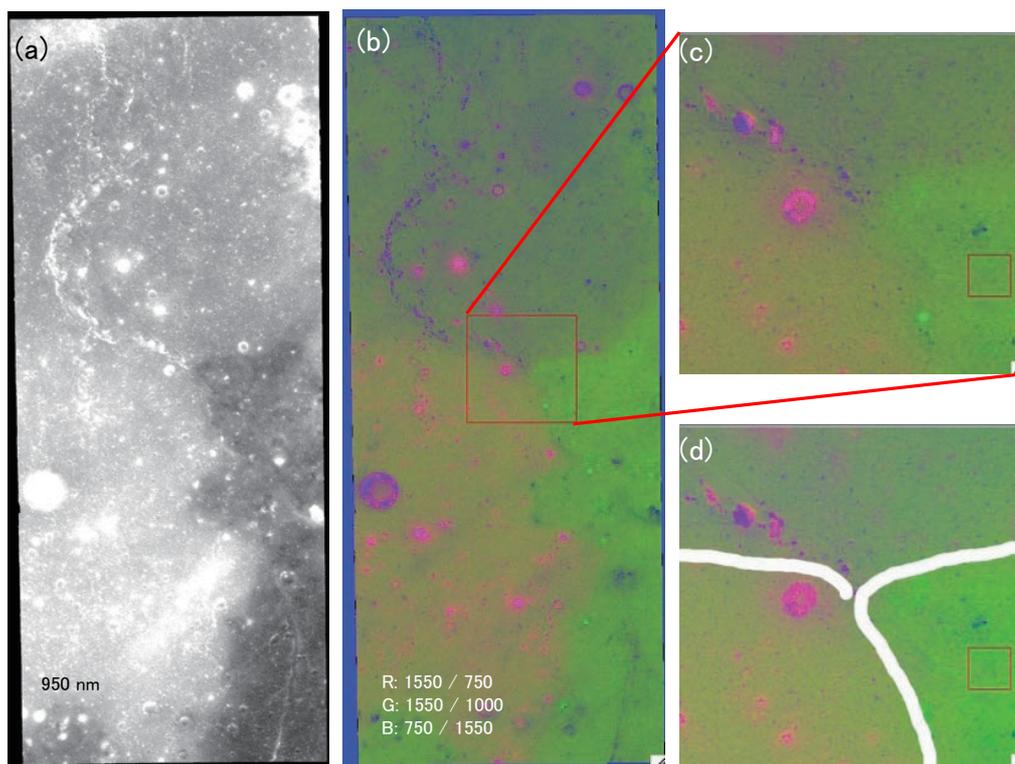


図1: 解析対象地域のかぐやMIモザイク画像。(a) 950 nmバンドの反射率の白黒画像。(b) 反射スペクトルの比カラー画像。赤: 1550 nm / 750 nm, 緑: 1550 nm / 1000 nm, 青: 750 nm / 1550 nm。(c) 本レポートの主解析地域である3種類の溶岩流が接している地域 (中心: 21°43'17.56" N, 28°53'17.87" E) と (d) その区分分けを示した図。

1.1 かぐやマルチバンドイメージカメラ (MI)

「かぐや」搭載マルチバンドイメージカメラ (MI) は、5 バンドの可視反射スペクトル (415, 750, 900, 950, 1000 nm) と 4 バンドの近赤外反射スペクトル (1000, 1050, 1250, 1550 nm) を空間解像度 20m (可視) および 62m (近赤外) で取得できる。かぐや以前の月探査衛星、例えばクレメンタインの UVVIS カメラでは、空間解像度は平均 200m、波長範囲も近赤外はカバーしていない。したがって、かぐや MI のデータによって月面像の刷新が期待され、徐々にその成果が顕になりつつある (例えば Ohtake et al. 2009)。

1.2 解析地域

アポロ 17 号サイトからは北西に 60 数 km 離れた北緯 20.5 度 ~ 22.5 度、東経 28.5 度 ~ 29.5 度の地域に注目し、MI データからその地域のモザイク画像を作成してスペクトルデータを解析した (図 1)。用いた画像解析ソフトは ENVI (バージョン 4.7) である。この領域のなかでも、北緯 21.7 度東経 29 度付近は反射率の違う 3 つの溶岩流が互いに接している地域であり、ここに焦点を当てて解析を行った (図 1c)。なお、アメリカ地質調査所発行の月地質図「USGS Geologic Atlas of the Moon」(Google Moon <http://www.google.com/moon/> から参照可能) によれば、当該地域は明るい溶岩流と暗い溶岩流の 2 種類が接する地域として記載されている (図 2)。

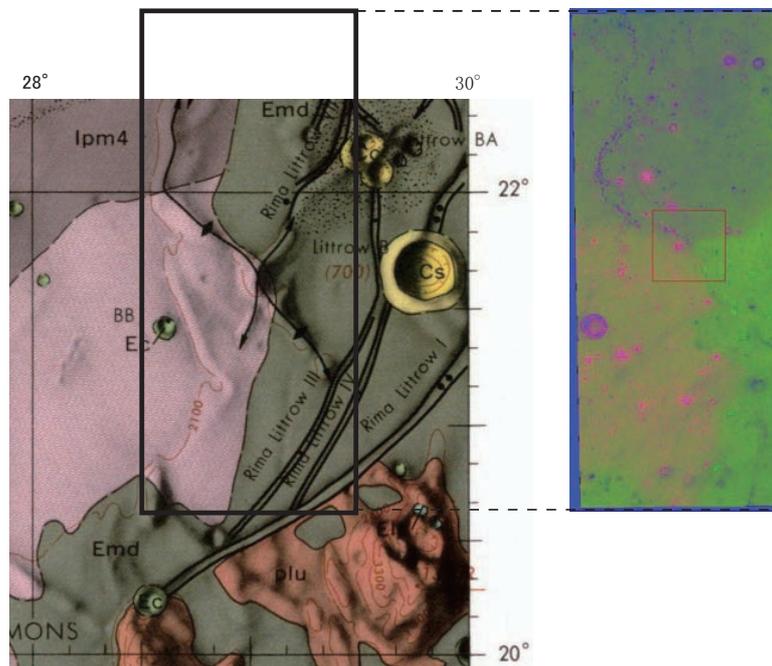


図 2: 解析対象地域の月地質図 (USGS 「Geologic Atlas of the Moon」 from Google Moon <http://www.google.com/moon/>) .

2 溶岩流の形成順序

溶岩流の形成順序（古さ）としては、宇宙風化度の測定が一つの目安を与える。宇宙風化とは、天体表面に露出して宇宙線等に暴露されることで、時間とともに反射スペクトルのうち短波長成分が小さくなって相対的に「赤化」することを言う（金属鉄の微粒子が形成されることが原因）。露出時間すなわち形成年代が古いほど宇宙風化度が増すため、これを用いて溶岩流の形成順序を推定することが可能である。

宇宙風化度の簡単な測定方法の一つは、反射スペクトルの長波長成分と短波長成分の比を計算することである。近赤外領域をカバーしていないクレメンタインのデータにおいては、750nm と 415nm のバンドの比 I_{750}/I_{415} を用いていた。この比が大きければ「赤化」が大きい、すなわち宇宙風化度が大きいとなる。我々は、かぐや MI では 1550nm までの領域をカバーしていることを考慮して、1550nm と 750nm のバンドの比 I_{1550}/I_{750} を用いて宇宙風化度を測ることを試みた。広い波長範囲を考慮することでより確かな「赤化」傾向を測ることができると考えられる。

本研究では、図 1c に示される対象地域の全画素における反射スペクトルデータを用いて、750nm と 1550nm の反射率 I_{750} と I_{1550} の 2 次元散布図を作成した（図 3）。この散布図上で傾き I_{1550}/I_{750} が大きいほど、赤化するすなわち宇宙風化が進んでいることを示している。図では点の分布密度に応じて着色されており、大きく 3 つのグループに分けられる。この 3 つのグループに対応する地域を地図上で赤、緑、青に塗り分けると図 4 のようになり、3 種類の溶岩流（南西領域、南東領域、北領域）に対応していることが分かる。散布図上での傾きを見ると、赤と緑の着色地域はほぼ同じ傾きをもち青の着色地域の傾きより大きい。すなわち、宇宙風化度で測る限り、赤の地域と緑の地域は同じくらい古く、青の地域は比較的新しいということになる。つまり、南西・南東領域の溶岩流が先に形成され、次いで

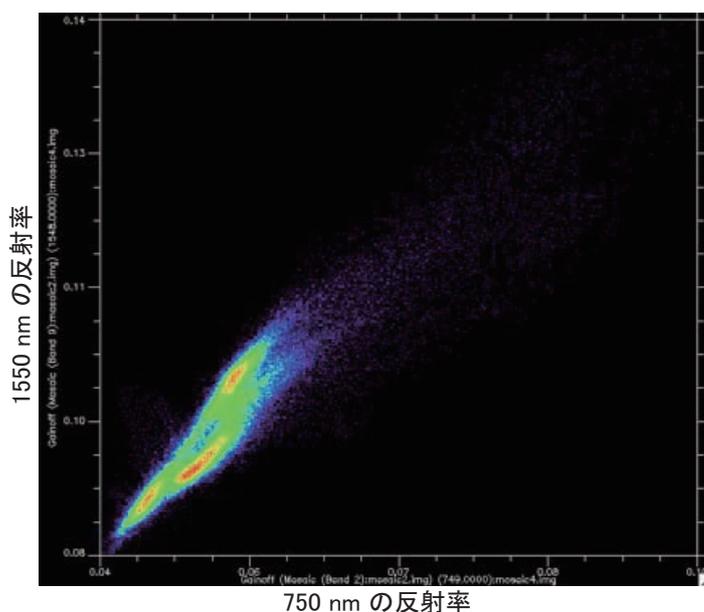


図 3: 解析対象地域（図 1c）における 750 nm と 1550 nm の反射率の 2 次元散布図。点の密集度合の増加に伴い青 緑 赤と着色してある。

北領域の溶岩流が形成されたと考えられる。

従来の月面地質図上では、当該地域の溶岩流は東西で分けられているが(図2)、我々の結果からは宇宙風化度すなわち形成順序としてはむしろ南北で分けられると考えられる。

しかしながら、アルベドで見た場合南東領域(緑着色地域)が暗いのは明らかである。したがって、東西の溶岩流の違いは形成年代ではなく構成物質の違いあるいはマグマ源の違いを表しているものと考えられる。

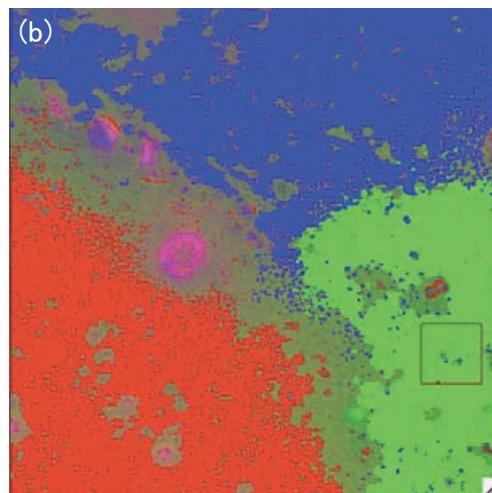
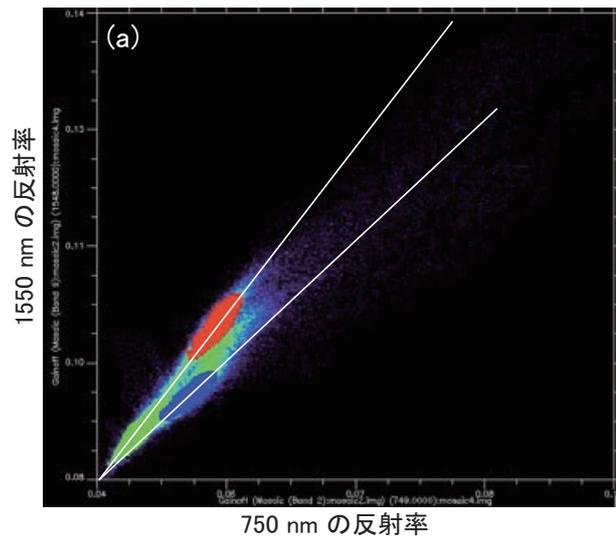


図4: 解析対象地域(図1c)における(a)750 nmと1550 nmの反射率の2次元散布図と(b)その散布図上のグループに対応して色分けされた地図。散布図上の赤、緑、青に対応する地点が地図上で塗り分けられている。また、散布図上の直線は、赤と緑のグループが同じ傾きの直線上に、青のグループがそれより小さな傾きの直線上に分布していることを示す。

3 溶岩流の構成物質

溶岩流の構成物質の違いを比較するためには、反射スペクトルから連続部 (continuum) を差し引いた吸収スペクトルを用いるのが適当である。連続部を差し引くことで宇宙風化の影響を軽減し、構成物質について議論することが可能となる。本研究では、750nm と 1550nm の反射率を結ぶ直線を連続スペクトルと仮定して吸収スペクトルを作成した。例えば、波長 λ nm における反射率が I_λ のとき、その波長における吸収率 q_λ は

$$q_\lambda = 1 - \frac{I_\lambda}{(I_{1550} - I_{750})(\lambda - 750)/(1550 - 750) + I_{750}} \quad (1)$$

と計算される。また、視覚的に「吸収」を表すべく上式を -1 倍したもので表示されることが多い。

前節で分けた 3 地域それぞれ任意の十数点における吸収スペクトルを図 5 に示す。ここでは吸収率に -1 掛けたもので表示してある。図の横軸の“Band Number”は 1 番から 5 番までが可視波長域カメラの 415 nm, 750 nm, 900 nm, 950 nm, 1000 nm に対応し、6 番から 9 番までが近赤外波長域カメラの 1000 nm, 1050 nm, 1250 nm, 1550 nm に対応する。3 地域において吸収の深い波長帯はどれもおよそ 950 ~ 1000 nm 付近にみられる。MI の波長範囲で特徴的な吸収スペクトルとしては、950nm の輝石の吸収、1050nm のかんらん石の吸収、1250nm の長石の吸収が挙げられることから、これらの地域では輝石のようなマフィックな鉱物に富むと推定される。このことは、月の「海」は玄武岩質溶岩であることと調和的である。

吸収帯には地域差はほとんど見られないが、吸収の深さには違いがみられる。すなわち、南西領域が最も吸収が深く、次いで北領域、そして南東領域の吸収が最も浅い。吸収の深さはその吸収を担う鉱物量に依存し、吸収が深いほどその鉱物が豊富に存在することを示唆する。したがって、南西領域はマフィック鉱物の割合が南東領域に比べて大きいと考えられる。ただし、構成粒子が大きいだとか宇宙風化度が小さいことでも吸収は深くなることが知られている。南西領域と南東領域は前節の結果から宇宙風化は同程度であることから、吸収の深さの差は、マフィックな鉱物の量によるものか構成粒子の大きさに起因しているものと考えられる。また、北領域は南西・南東領域に比べ宇宙風化が進んでいない領域であるにも関わらず吸収の深さは中程度であることから、これら 3 つの領域はマフィックな鉱物量が構成粒子サイズが異なっているものと考えられる。

4 クレーターに見える物質

衝突クレーターの形成によって表層が掘削されるため、衝突クレーターは地下構造に関する情報を提供し得る貴重な「窓」である。本節ではクレーターに見られる反射・吸収スペクトルについて発見された 2 つのことについて述べる。

まず 1 つ目は、図 6b, c に示されるクレーターにおける吸収スペクトルが、通常とは違い連続スペクトルを「超過」しているように観測されたことである (図 6d)。このことは連続スペクトルの定義に誤りがあることを示唆しているが、反射スペクトルの散布図 (図 6a) で見てもこのクレーター内部は特異なグループを形成する領域であり、連続スペクトルの定義だけの問題ではないことが分かる。このような特殊なスペクトルになる原因は良く分

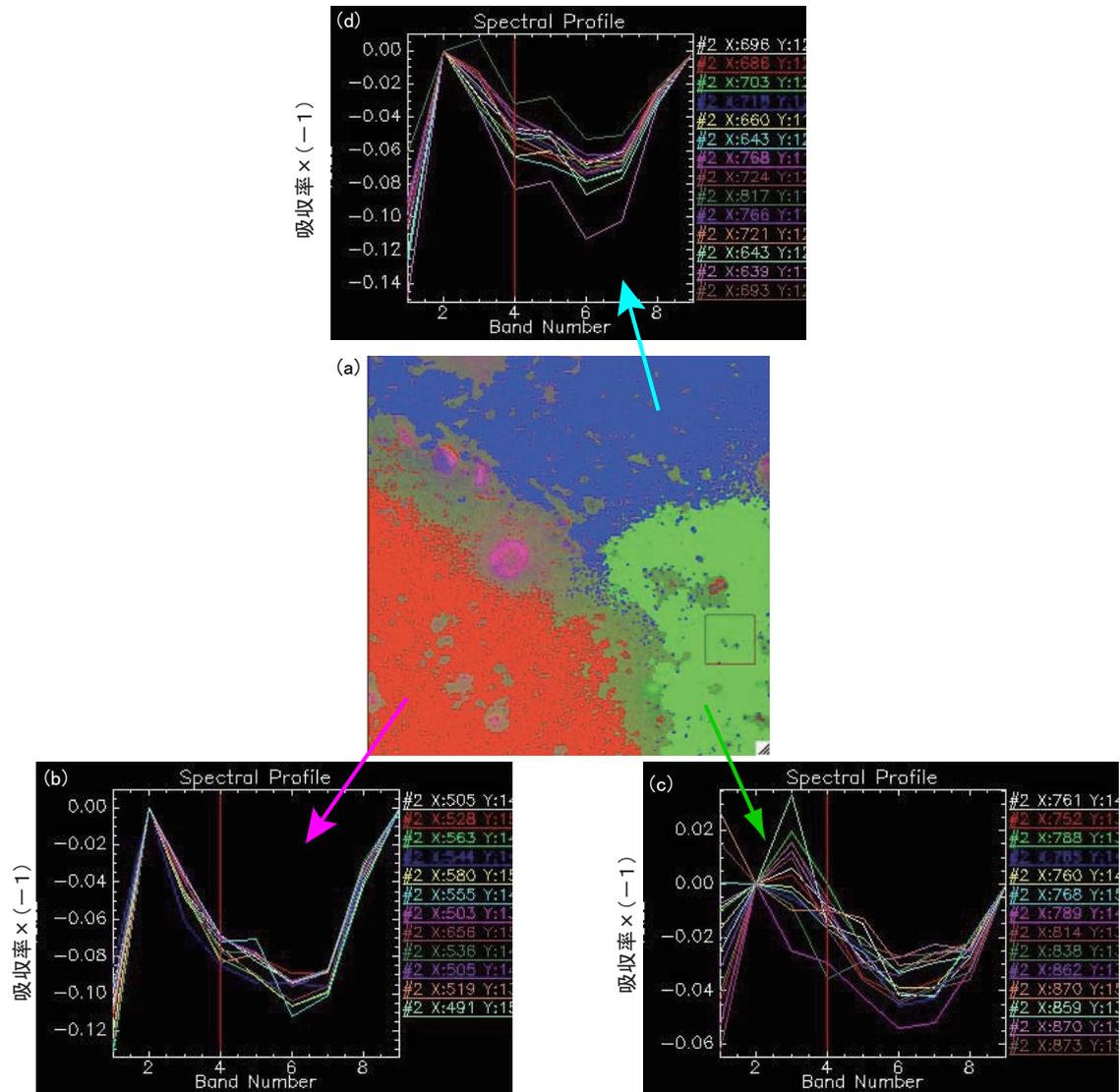


図 5: 解析対象地域における吸収スペクトル . (a) 図 4b と同じく , 反射スペクトルのグループで色分けした図 . (b) 南西領域 (赤) の任意の点における代表的な吸収スペクトル . 750nm と 1550nm の反射率を結ぶ直線を連続スペクトルと仮定して差し引いて作成したもの . 横軸の Band Number は 1 番から 5 番までが可視波長域カメラの 415 nm, 750 nm, 900 nm, 950 nm, 1000 nm に対応し , 6 番から 9 番までが近赤外波長域カメラの 1000 nm, 1050 nm, 1250 nm, 1550 nm に対応する . (c) 南東領域 (緑) の吸収スペクトル . (d) 北領域 (青) の吸収スペクトル .

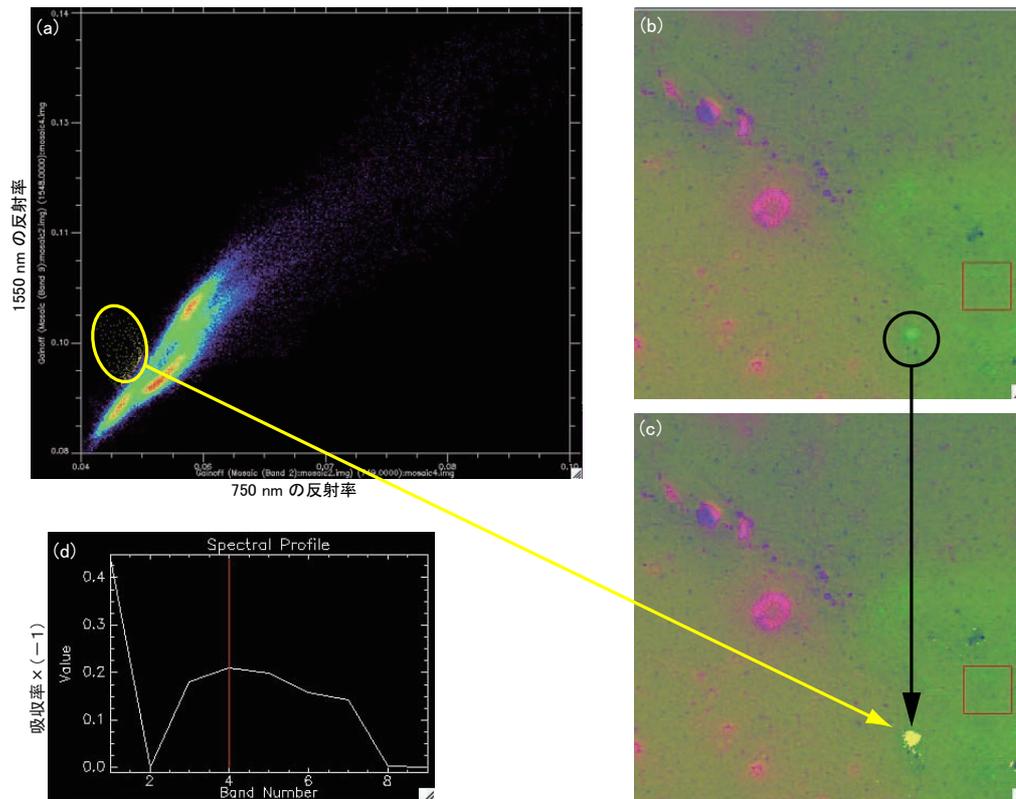


図 6: 特異な反射・吸収スペクトルを示すクレーター . (a) 反射スペクトルの 2 次元散布図上において他とは傾向が異なるグループを示す . (b) そのクレーターの地図上での位置 . (c) 散布図上の特殊グループの点に対応する場所を地図上で黄色に着色して示した . (d) 吸収スペクトル . 通常なら負の値になる .

かっていないが、例えば衝突によって形成された溶融物が固化した際に生じたガラスによるものかもしれない。発見されたクレーターは、反射・吸収スペクトルへの衝突の影響を考える上で重要なデータを提供するのみならず、衝突クレーターの形成機構解明にも貢献するものと期待される。

2 つ目は、クレーターの大きさによって吸収スペクトルに違いが見られたことである。これまで解析してきた領域のすぐ南の領域 (図 7) を対象に、950 nm と 1250 nm の吸収スペクトルに対して 2 次元散布図を描くと図 7c のようになった。散布図の左下付近に集中してプロットされている点群は地図上の溶岩流平原に対応している (さらに左下に「こぶ」のようにプロットされている点群は地図上の東側の溶岩流平原に対応する)。一方、散布図中心から右上にかけての点群すなわち深い吸収スペクトルを示す点群は、地図上ではクレーターに対応している (図 8)。クレーターに見えているものは、溶岩流平原が出来上がった後に時間をかけて掘削されて露出したものであるから、相対的に宇宙風化が進んでいないと考えられる。一般的に宇宙風化が進んでいなければ吸収スペクトルは深くなるため、クレーターにおいて比較的深い吸収スペクトルが観測されるのはそのためであろう。さらに、散布図のクレーターに対応する領域は 2 つのグループに分かれているように見える。この 2 つのグループのうち 950 nm の吸収 (縦軸) が浅いほうが地図上では大きなクレー

ター内部に対応し、もう一方のグループは比較的小さなグループに対応している．大きなクレーターにおいては掘削深度も大きいと考えられるため、より深部の構造が見えている可能性がある．したがって、2つのグループの違いは溶岩流の地下構造の深さによる違いを反映している可能性がある．また、この違いが、小さいクレーターは溶岩流を掘りぬけず、大きなクレーターは掘り抜いたことによるものだと仮定すると、クレーターの深さの違いから溶岩流のおおよその厚さが推定できる．図 8b に見えている最も大きなクレーターは直径 3km 程度であるから、掘削深度はその 10 分の 1 と仮定すると 300 m、また 2 番目に大きいクレーターの直径は 1.5km 程度であるから同様に掘削深度は 150 m と推定される．この 2 つのクレーターの大きさの中間に溶岩流を掘りぬけるかどうかの境目があると考えられると、この地域の溶岩流の厚さはおよそ 200 m 程度であると推定される．ただし、ここで見られているクレーターの吸収スペクトルの差は宇宙風化度の違いに起因することも考えられるため、溶岩流の厚さの議論には慎重を期すべきである．

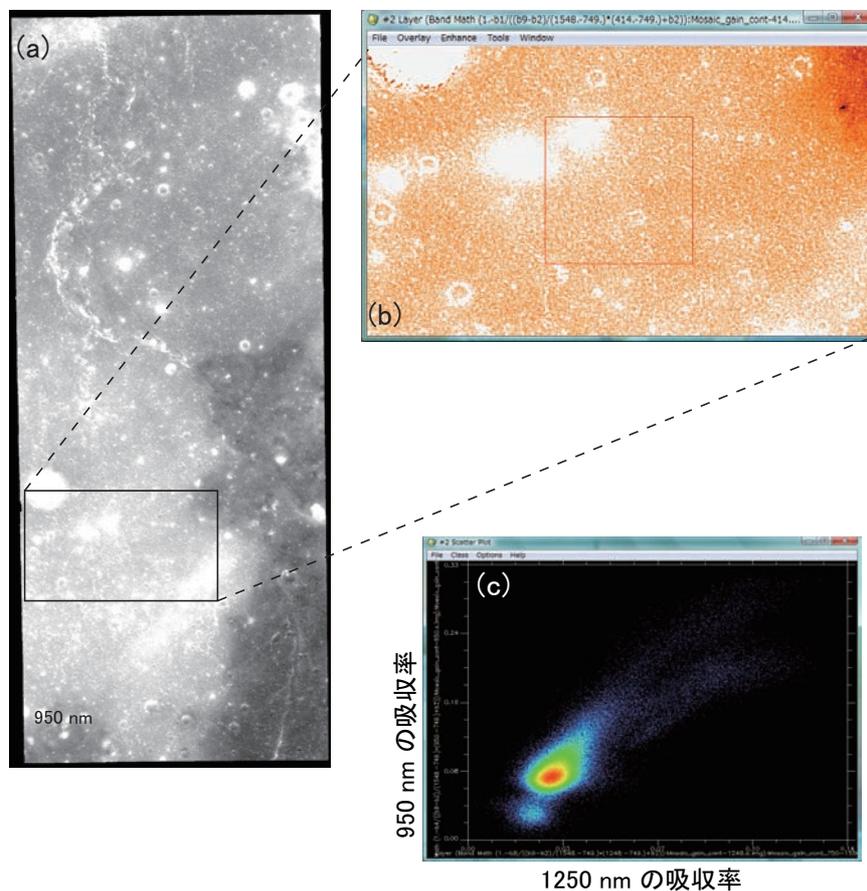


図 7: (a)950 nm バンドの反射率の白黒画像と (b) クレーター内部に注目して解析した対象地域図および (c) その地域における 1250 nm と 950 nm の吸収率の 2 次元散布図．

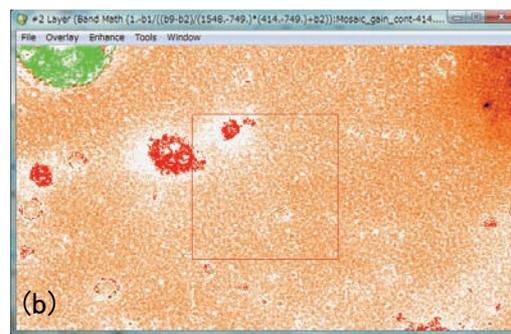
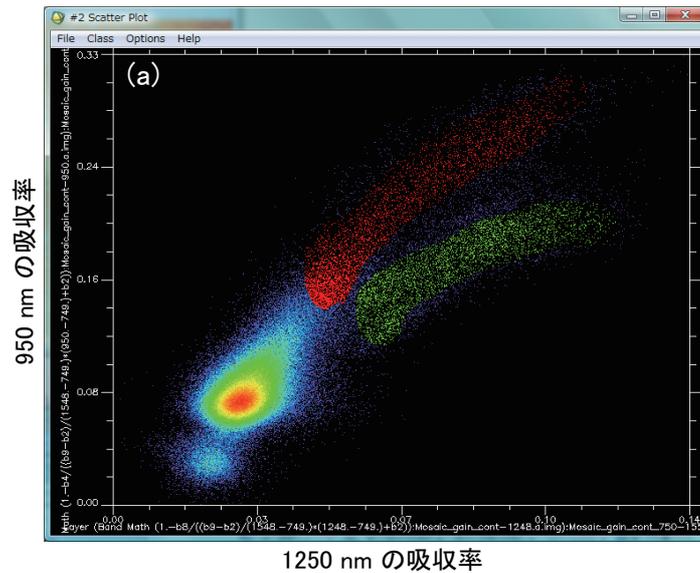


図 8: (a) 図 7c と同じ，1250 nm と 950 nm の吸収率の 2 次元散布図．吸収の深い 2 つのグループを赤と緑に着色してある．(b) 散布図上のグループに応じて色分けした地図．小さなクレーターが赤色に，左上隅の大きなクレーターが緑色に着されている．

5 まとめ

本レポートでは，月探査衛星かぐや搭載 MI のデータを用いて，アポロ 17 号サイト近隣地域の溶岩流領域およびクレーター内部に対して (1) 宇宙風化度 (2) 吸収スペクトルの解析を行った．宇宙風化度から，一見 3 種類の溶岩流が 2 つに大別されること，また同程度の宇宙風化度 (古さ) を示す溶岩流もその吸収スペクトルにおける吸収の深さに違いがあることが示された．このことは，同時期に隣接地域で異なる様相のマグマが噴出したことを示唆するものであり，月の内部構造の多様性ならびに月の進化過程の複雑さの一端がうかがわれて興味深い．

また，一部のクレーター内部にはガラス化を示唆するような特殊な吸収スペクトルを示すものが発見された．さらにクレーターの大きさによって異なる吸収スペクトルが見られることが示された．このようなクレーター内部に関する反射・吸収スペクトルについては，スペクトルへの衝突の影響やクレータ形成過程に示唆が得られることのみならず，月の地

下構造や溶岩流の厚さなどの推定に用いられる可能性があり，今後の研究が待たれるところである．

謝辞

本レポートは第3回月惑星探査データ解析実習会において取り組んだ実習課題に対する成果をまとめたものです．講師をしていただいた平田成，大竹真紀子の両氏には深く感謝いたします．また実習会の世話人・TAのみなさま，ならびにLOCを務めていただいた千葉工業大学のみなさまにも大変お世話になりました．改めて御礼申し上げます．

参考文献

Ohtake, M. et al. 2009, The global distribution of pure anorthosite on the Moon, *Nature* 461, 236-240.