

# 惑星探査データ解析実習会レポート

東大大学院 M1 伊藤清貴

かぐや MI のデータ解析を行った。調査区域を 3つの領域に分類し、その領域が接する地点での地質の違い・特徴について、スキャタープロットの分布の違いから評価を行った。

まず、調査区域を以下、図1の通り A、B、Cとする。

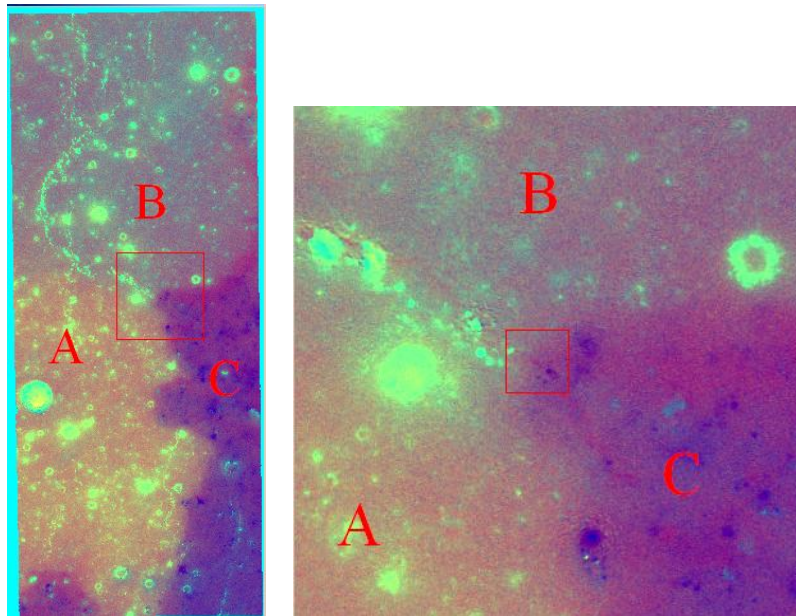


図1. 領域の定義

また、図1右の領域のスキャタープロットとその密度分布を図2に示す。スキャタープロットは横軸を  $415\text{nm}/750\text{nm}$ 、縦軸を  $750\text{nm}/950\text{nm}$  とし、上に行くほどマフィック鉱物を多く含み、右に行くほど宇宙風化の度合いが低いことを示している。

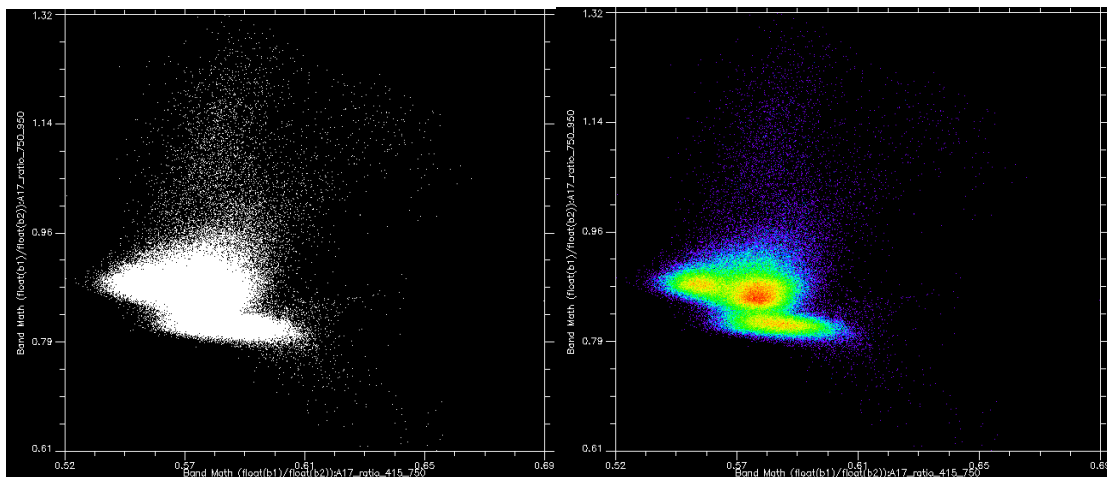


図2. スキャタープロットとその密度分布

図2で、3つの密度が高い領域が見られた。その密度の高い3つの部分の画像上での分布をみると以下、図3のようになった。

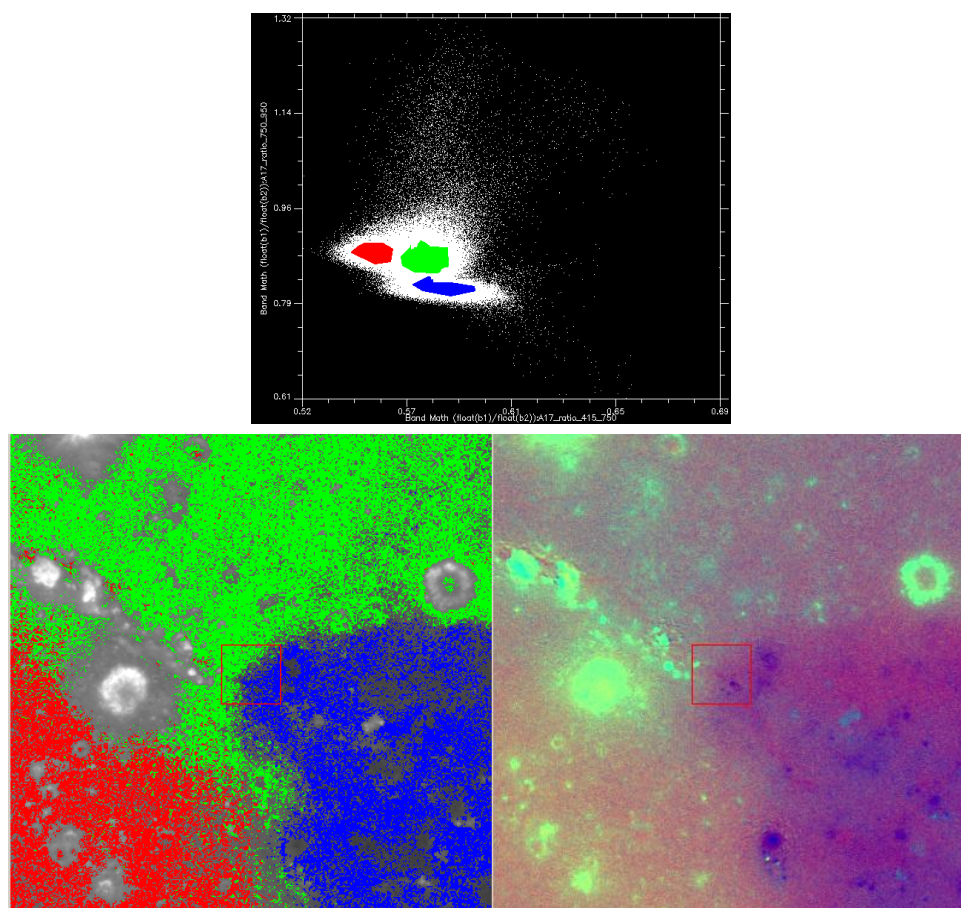


図3.スキャタープロットの画像上の分布

それぞれ、クレーターを除く部分で赤→A、緑→B、青→Cとなった。これらから、BはAよりも宇宙風化の度合いが小さく、Cは比較的Bより風化の度合いが小さいと考えられる。また、Cは、A,Bよりも含むマフィック鉱物の量が少ないことが分かった。

また、それぞれの地域の典型的なスキャタープロットの分布をみる。以下にその解析結果を示す。なお、それぞれスキャタープロットを取得する領域は、極力クレーターの少ない箇所を選んだ。下図のスキャタープロットの縦軸と横軸は、相対的な位置がわかりやすいように範囲を揃えてあり、その位置は上で示したものと矛盾しない。それぞれ核となる部分とその周りに尾となるような分布を持っている。核は平たい地域、尾はクレーター内部を示すようである。

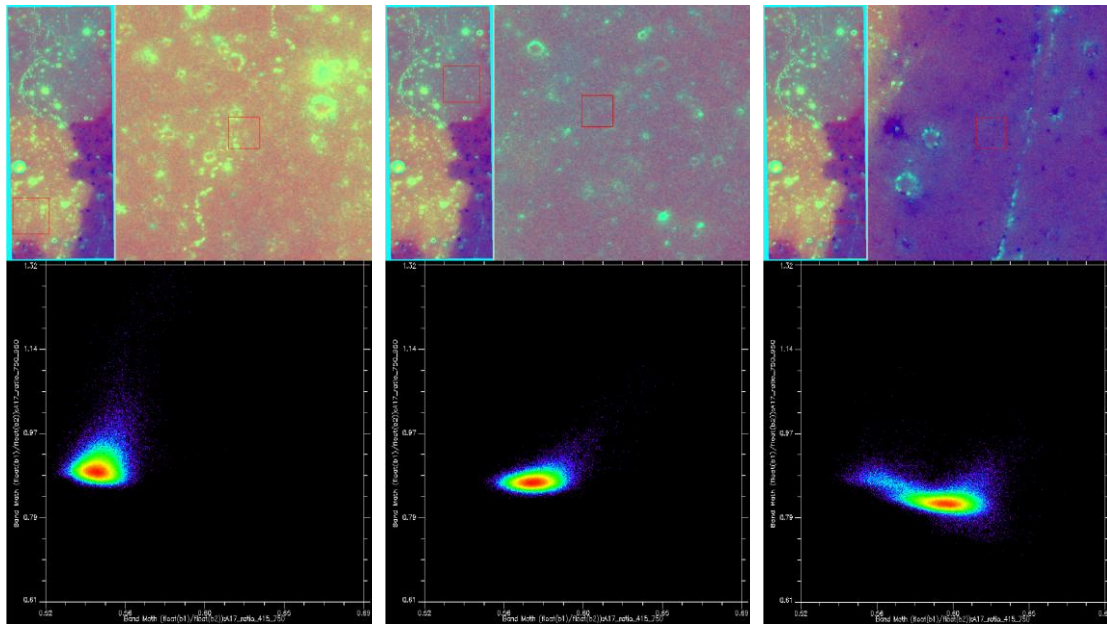


図4.左からA,B,Cの典型的なスカッタープロット

A：核は比較的縦方向の広がりを持つ。尾はほぼ真上方向に伸びている。

B：核は扁平、横の広がりAより大きい。尾は右端から斜め方向に伸び、Aよりも傾きは小さい。

C：核は扁平、縦の広がりBと同程度ながら横の広がり最も大きい。尾は右端を取り巻くように分布している。左上部に伸びる分布は、画像に見えているAの領域の値を拾っているものと考えられる。

スカッタープロットの分布の違いから対象地域の地質の違いを分析した。

対象地域を3つの領域に分け、宇宙風化の度合いとマフィック鉱物量の違いに注目し、以下の表の通りの結果を得た。

宇宙風化の度合い	$A > B \geq C$
マフィック鉱物量	$A = B > C$

# MI データに基づくスペクトルマップによる Apollo 17 号 landing site 付近の地質の解析

東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻 地球システム科学大講座 渡邊吉康

## 1. 表層物質の反射スペクトルから読み取れる情報

### 1. 1. 反射スペクトル

Lucey et al. [1998]によれば、月面の表層物質の反射スペクトルは、主として以下の要素で決定づけられる。

- ①  $\text{Fe}^{2+}$ の存在量：二価の鉄において、紫外線領域(UV)での許容遷移、および可視光 (VIS) 近赤外領域 (NIR) (1000nm あたり) での禁制遷移が見られる。 $\text{Fe}^{2+}$ の存在量が多いほど 1000nm 付近の吸収が深くなっていく。また、全体的に各々の波長での反射率は小さくなる。
- ② 宇宙風化作用の程度:太陽風の照射により  $\text{Fe}^{2+}$ が還元され、微細粒子の金属鉄が形成される。それにより、反射スペクトルのコントラストは弱くなっていく。(「赤化の」傾向)
- ③ ケイ酸塩鉱物中の Ti 含有量: Ti を含むケイ酸塩鉱物の進行に伴い、その Ti は微細粒子の衝突現象によってケイ酸塩のガラスにとりこまれる。その中に含まれている Fe との間で電子遷移が起こり、それにより、300~600nm あたりに吸収スペクトルが見られるようになる。Fe, Ti の含有量が多いほど、その吸収スペクトルが深くなっていく。それに伴い、反射率が低下し、赤化する。
- ④ 不透明鉱物の存在：月面上に存在する不透明鉱物の多くは、Ilmenite ( $\text{FeTiO}_3$ ) である。Fe を含むケイ酸塩鉱物中にこの不透明鉱物が混じっていると、反射率が低下し、またスペクトルのコントラストが弱くなっていく。

このスペクトルの情報をいくつか組み合わせることにより、月面表層の物質の分布や、その物質の宇宙風化度 (Maturity) をある程度見積もることが可能である。

### 1. 2. Scatter Plot

表層物質の存在度と風化度を定性的に見積もるのに、Scatter Plot を用いて議論することが多い。

たとえば、FeO の量は、750nm の反射率に対する 950nm, 750nm の反射率の比で表わされる。(図 1a) (以下、反射率を  $R_i$  ( $i$ =波長[nm]) と表す。) 750nm を横軸にとるのは、この波長帯が吸収スペクトルの影響を受けにくいからである。

宇宙風化が進行すると、全体的に吸収の深さが浅くなるため、 $R_{950}/R_{750}$  が大きくなる。また、全体的に反射率が低くなる。

FeO の量が多いほど、1000nm 付近の吸収スペクトルが深くなることが知られているため、 $R_{950}/R_{750}$  の絶

[テキストを入力してください]

対値が大きいくほど、FeOの量が多いと考えることができる。

また、TiO<sub>2</sub>の存在比の代替指標として、750nmの反射率に対する450nm、750nmの比が利用できることが、Lucey et al. (1998)他により指摘されている。TiO<sub>2</sub>の含有量が高いほど反射スペクトルの傾きR<sub>415</sub>/R<sub>750</sub>が大きくなり（水平に近づき）、反射率が低くなる。また、宇宙風化が進行することによりR<sub>415</sub>/R<sub>750</sub>が小さくなり、反射率が低下する。

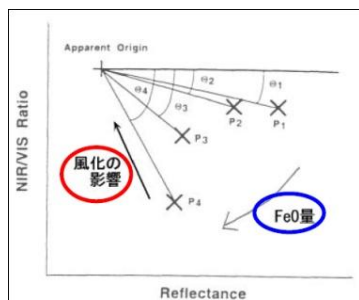


図 1a. R<sub>750</sub> と R<sub>950</sub>/R<sub>750</sub> の関係 (FeO)

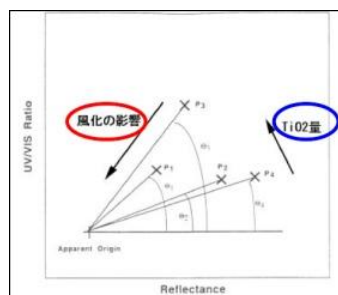


図 1b. R<sub>750</sub> と R<sub>415</sub>/R<sub>750</sub> の関係 (TiO<sub>2</sub>)

## 2. Apollo 17 号 landing site 付近の地質の解析

### 2. 1. 調査地域の Geological Settings

今回のデータ解析で用いたデータは、かぐやに搭載されている Multiband Imager によって得られたものを使用した。

今回調査した地域は、アポロ 17 号が着陸した場所の近く、20. 8° N~22. 6° N, 28. 5° E~29. 2° E, である。(図 2) アメリカ地質総合研究所のデータによれば、この場所は、反射率の高い溶岩流と反射率の低い溶岩流によって形成されたとのことである。

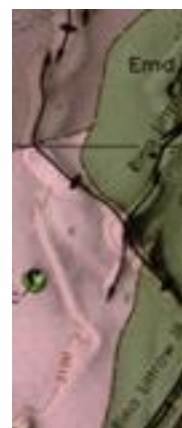


図 2. 調査地域の地質図

[テキストを入力してください]

## 2. 2. 宇宙風化度

調査地域を構成している鉱物の量比，そして宇宙風化度を見積もるために，以下のようにバンドを割り当てた。

$$R_{750}/R_{415}:R$$

$$R_{750}/R_{950}:G$$

$$R_{415}/R_{750}:B$$

950nm の波長帯は  $Fe^{2+}$  の吸収の影響を受けやすいため， $R_{750}/R_{950}$  は，mafic な鉱物量の指標となりうる。この値が大きいほど，mafic な鉱物の存在量が多い。

また， $R_{750}/R_{415}$  からは，宇宙風化度がわかる。 $R:R_{750}/R_{415}$ ， $B:R_{415}/R_{750}$  と割り振ったとき，赤いほど宇宙風化度が大きく，また，青いほど宇宙風化度が小さい。

上記のようにバンドを割り当てたとき，大きく分けて3つの地質ユニットに分類できることが分かった。(図3)

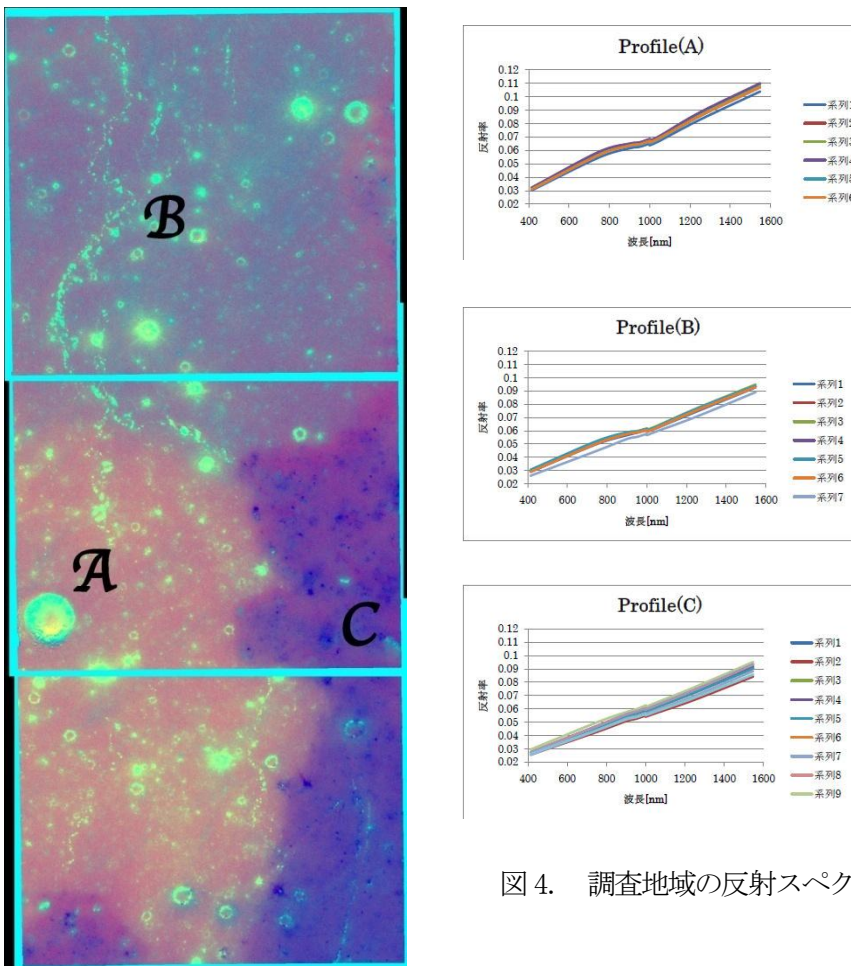


図4. 調査地域の反射スペクトル

図3. 調査地域のRGB画像

[テキストを入力してください]

図3,4を照らし合わせると,

- Unit Aは, 宇宙風化が進行しており, mafic
  - Unit Cは, 宇宙風化度はあまり進行しておらず. maficでない
  - Unit Bは, mafic であり, 宇宙風化度はUnit A,Unit Cの中間程度である.
- ということが言える.

宇宙風化度(Maturity)を太陽風の照射時間に置き換えて考えると, 形成年代の比較が可能と考えられる. すなわち, Unit Aは古い年代に形成され, その次にUnit B, そしてUnit Cが最も新しい時期に形成されたと考えることができる. これは, クレーターの数密度が大きいほど古い年代に形成されるというクレーター年代学の考えと照らし合わせると, 整合的な結果である.

(クレーターの数密度を定量的に調べていないため断定はできないが, 画像データから, クレーター数密度はUnit Aが最も多く, Unit Cが最も少ないと考えられる.)

### 2. 3. FeO, TiO<sub>2</sub>の存在量

Lindstrom et al. [1990], 他は, FeO, TiO<sub>2</sub>の重量比が, 月の岩石の起源を推定する有力なツールになりうることを, 化学実験によって示した.

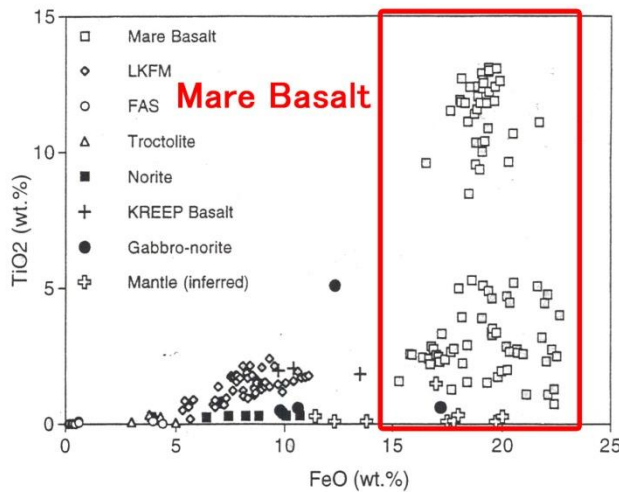


図5. FeO, TiO<sub>2</sub>の重量比と岩石の種類 (Lucey et al. [2000]を一部加筆)

今回の解析において, 岩石の種類を推定するため, Lucey et al. [2000]のアルゴリズムに基づいて, FeO, TiO<sub>2</sub>の重量比[wt%]を算出した. その経験式は以下のとおりである.

$$\text{TiO}_2[\text{wt}\%]=3.708 * (\theta_{\text{Ti}})^{5.979}, \theta_{\text{Ti}}=\arctan\{[(R_{415}/R_{750})-Y_{0\text{Ti}}]/[R_{750}-X_{0\text{Ti}}]\} \quad (1)$$

$$\text{FeO}[\text{wt}\%]= (17.427 * \theta_{\text{Fe}}) - 7.565, \theta_{\text{Fe}}=-\arctan\{[(R_{950}/R_{750})-Y_{0\text{Fe}}]/[R_{750}-X_{0\text{Fe}}]\} \quad (2)$$

[テキストを入力してください]

$Y_{\text{OFe}}, X_{\text{OFe}}, Y_{\text{OTi}}, X_{\text{OTi}}$  は、回帰直線の交点である。今回の演算では、Unit A, Unit B の回帰直線の交点、 $(X_{\text{OFe}}, Y_{\text{OFe}})=(0.035, 1.35), (X_{\text{OTi}}, Y_{\text{OTi}})=(0.027, 0.512)$  を用いた。

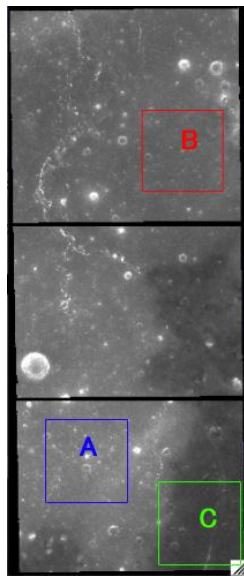
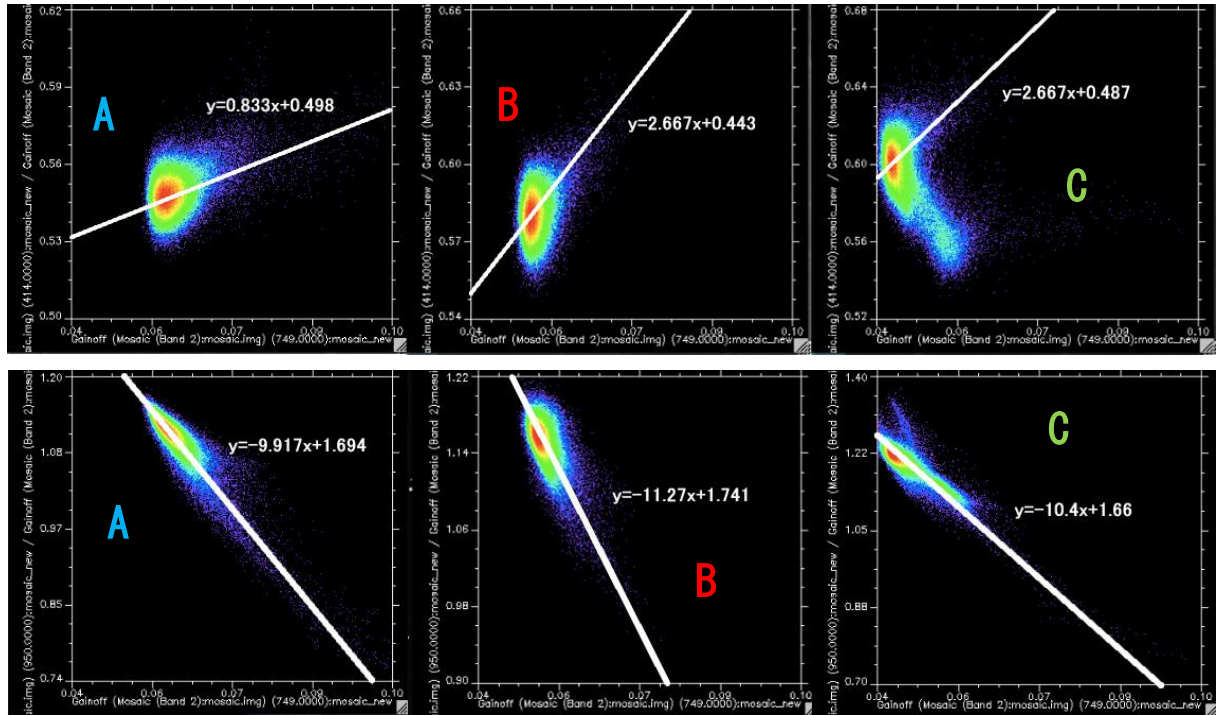


図6.  $\text{TiO}_2$  の Scatter Plot (上),  $\text{FeO}$  の Scatter Plot (中), サンプルング地域(下)

[テキストを入力してください]



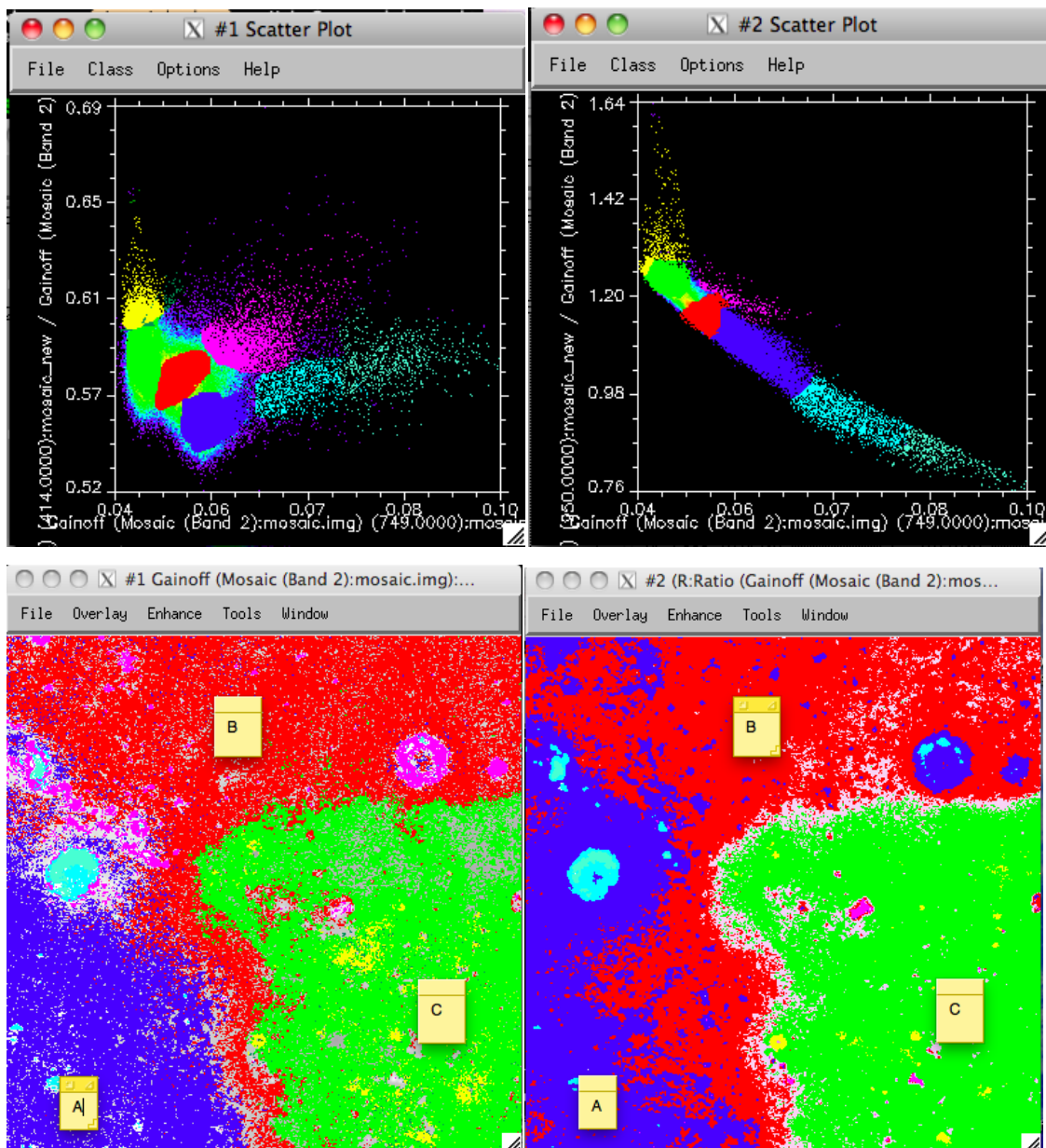


図7. 上：3領域の境界上の Scatter Plot. 左が  $\text{TiO}_2$ , 右が  $\text{FeO}$ .  
 下：上の Scatter Plot のカラーマッピング. 左が  $\text{TiO}_2$ , 右が  $\text{FeO}$ .

図1, 図7を照らし合わせて考えると, 次のようなことが言える.

- Unit A は宇宙風化の影響を最も受けており, Unit C は最も受けていない.
- クレーター内部は周辺よりも宇宙風化の影響を受けていない.
- $\text{TiO}_2$  の重量比は Unit A, Unit B, Unit C でははっきり分かれている.  $\text{FeO}$  の重量比も分かっているが,  $\text{TiO}_2$  ほどの差はない. (表1参照)

[テキストを入力してください]

以上の解析結果は以下の表のようにまとめられる.

地質 unit	FeO	TiO <sub>2</sub>	形成年代	mafic か?
Unit A	18.09[wt%] (少)	1.4[wt%] (少)	古い	最も mafic
Unit B	18.30[wt%] (中)	12.7[wt%] (中)	中程度	中程度
Unit C	18.79[wt%] (多)	27.1[wt%] (多)	新しい	最も mafic ではない

表 1. それぞれの地質 unit での FeO, TiO<sub>2</sub> の重量比, 形成年代, mafic な鉱物の存在比  
FeO, TiO<sub>2</sub> の重量比は, それぞれの unit での x, y の最頻値を用いて計算.

この結果のみで判断すると, Unit A, B, C は, 洪水玄武岩由来の鉱物で構成されており, 時代とともに洪水玄武岩の TiO<sub>2</sub> の存在比が増加していった (すなわち, mafic な鉱物の量が減少していった) と考えることができる.

### 3. Unit A の大きなクレーター, およびその周辺地域の Scatter Plot

Unit A に大きなクレーターが存在する. このクレーターの形成過程について考察するため, scatter plot を用いて調べた.

Scatter Plot を用いて解析した結果, クレーターの内部の反射率比に特徴的な分布が見られた.

クレーターの内部ほど, 宇宙風化度が大きいという結果が得られたが, これはクレーターの壁が地滑り運動によって底に流動したと考えれば, 説明可能と思われる.

また, 南北非対称の分布が見られたが, これを説明するようなモデルは思いつかなかった. (日射の当たりかた? 粒形分布の違い?)

[テキストを入力してください]

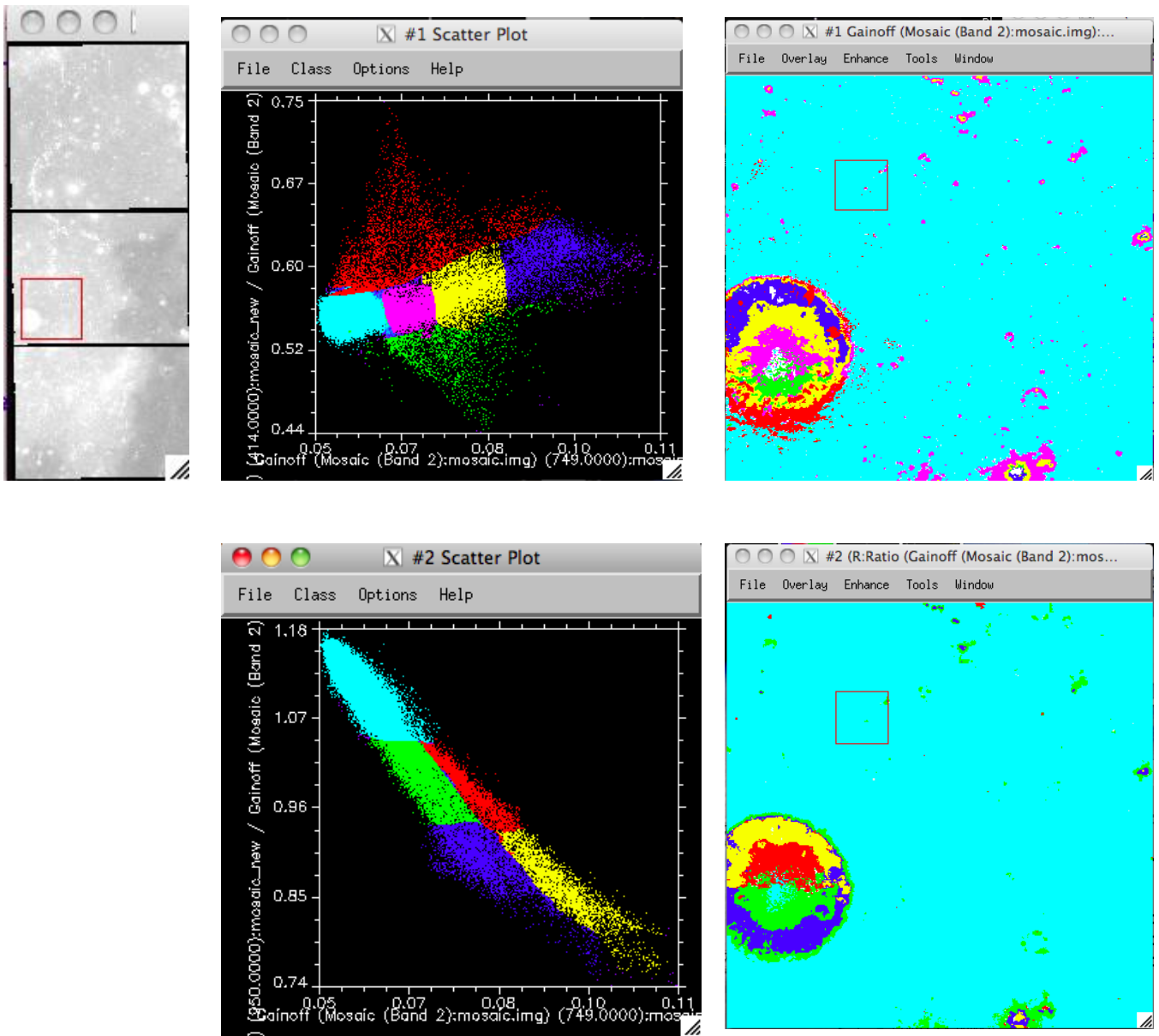


図8. Unit A の大きなクレーターの Scatter plot, およびカラーマッピング  
 上図: 調査地域 (左),  $\text{TiO}_2$  の Scatter Plot (中),  $\text{TiO}_2$  のカラーマップ (右)  
 下図:  $\text{FeO}$  の Scatter Plot (左),  $\text{FeO}$  のカラーマップ (右)

#### 参考論文

- Mapping the FeO and TiO<sub>2</sub> content of the lunar surface with multispectral imagery (Lucey et al. ,1998)
- Composition of South pole-Aitken (Lucey et al. ,1998)
- Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images (Lucey et al. ,2000)

[テキストを入力してください]

- はじめに

月探査衛星「かぐや」に搭載された可視赤外カメラ（マルチバンドイメージャー；MI）が得たマルチバンド撮像画像を用いてアポロ 17 号着陸サイト近傍の地質に関して調査を行った。MI が取得した、415、750、900、950、1000、1050、1250、1550 nm の 8 バンドの月面画像を用いて、調査対象地域を地質ユニットに分類し、それぞれの地質ユニットの特徴をここでは調べた。

- 調査対象地域と地質ユニットの区分

今回調査した地域を図 1 に示す。調査した領域は北緯 21.7 度、東経 28.8 度を中心とする領域であり、アポロ 17 号着陸サイトの北西にあたる。図 1 は、MI の撮像画像をモザイク処理したものであり、各バンドの比演算を行い 750 nm / 415 nm を赤色、750 nm / 950 nm を緑色、415 nm / 750 nm を青色に割り当てた疑似カラー画像である。この比演算の方法は、クレメンタインの紫外可視カメラ（UVVIS）での解析で用いられた方法であり、赤くなるほど宇宙風化の影響が強く、青くなるほど宇宙風化の影響が少ない傾向にある。また緑色は苦鉄質物質が多いことを示している。しかしながらこれらの色の割り当てはあくまで目安であって実際にはスペクトルを精査する必要がある。

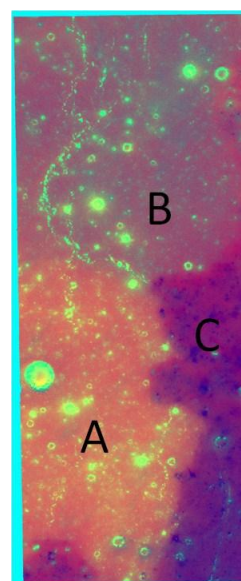


図 1 の領域では、疑似カラー画像により明瞭に 3 つの地質ユニットに区分することができる。そこで、それぞれを反時計回りに A 領域、B 領域、C 領域と名前をつけた（図 1）。A 領域は、オレンジ色を示し 3 つの領域の中で最も赤色が強く、宇宙風化の影響が強いことを示している。B 領域は、A 領域に比べて若干青色が強くなり、A 領域よりも宇宙風化の影響が小さいと言える。C 領域は全体的に紫色から青色をしており、3 つの領域の中でももっとも宇宙風化の影響が小さい。

- 反射率（750 nm）

図 2 に調査対象領域の 750 nm での撮像画像と、赤枠内の反射強度のヒストグラムを示した。ここで赤枠は A 領域、C 領域に跨って設定しており、反射強度ヒストグラムの 2 つのピークは、反射率の高い A 領域と反射率の低い C 領域に対応している。このような反射強度のヒストグラムを利用して各領域の平均反射率を求めたのが表 1 である。表 1 からは、A、B、C の順に反射率が低くなってゆき、また、それぞれの反射率は 5.5%、5.0%、4.5% 程度の違いで、A 領域に比べて C 領域では約 20%、反射率が小

さいことがわかる。

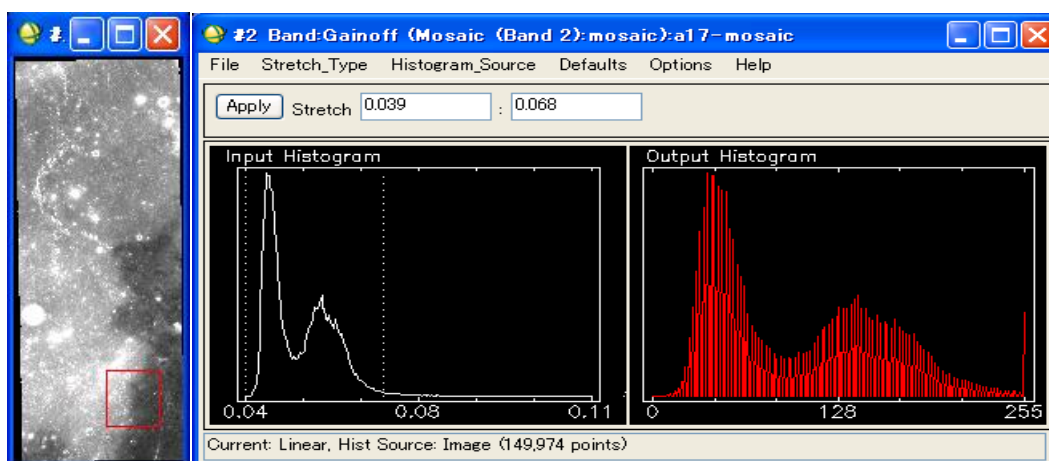


図2 調査領域の 750nm による撮像画像 (左)、赤枠内の反射強度ヒストグラム (中央)、またその反射強度ヒストグラムを拡大したもの (右)

表1 各ユニットの 750nm に対する平均反射率

	A	B	C
Reflectance (750 nm)	~5.5%	~5%	~4.5%

● 可視・赤外反射スペクトル

疑似カラー画像により A、B、C の各領域に分類したが、それぞれの平均的な地質ユニットが、実際にはどのような反射スペクトルを持つのかをここでは調べた。図3はそれぞれのユニットにおいて、平均的な地質を持つと考えられる場所を選びだし、可視・赤外反射スペクトルを求めた。図3では、750nm と 1500nm の反射率を1次直線で結び、それを連続部として差し引き、吸収スペクトルを見やすくしている。

A 領域では、他の二つの領域に比べて 1000nm の吸収が最も深くなり、次に B、C の順に浅くなってゆくことがわかる。1000nm 付近では、輝石、カンラン石が存在すると吸収が深くなることが知られているが、このことを考慮すると A 領域が最も苦鉄質に富むと推察される。また A 領域と B 領域の 1000nm 付近の吸収スペクトルの形状はほぼ同じ形状をしている。一方で C 領域は、A・B 領域とはスペクトル形状が若干ちがうように見え、900nm、1250nm での吸収の深さが A・B 領域とわずかに異なっている。A 領域、B 領域は比較的似通った鉱物組成、C 領域は他の 2 つの領域とは、異質なものでできているのかもしれない。

また注目すべきは、図1でみた宇宙風化度が高い（～赤色）領域ほど、1000nm付近の吸収が深くなっている。宇宙風化が進行すると一般的に1000nmの吸収が浅くなるといわれているので、領域Aは非常に苦鉄質に富む成分を含むということが推測できる。

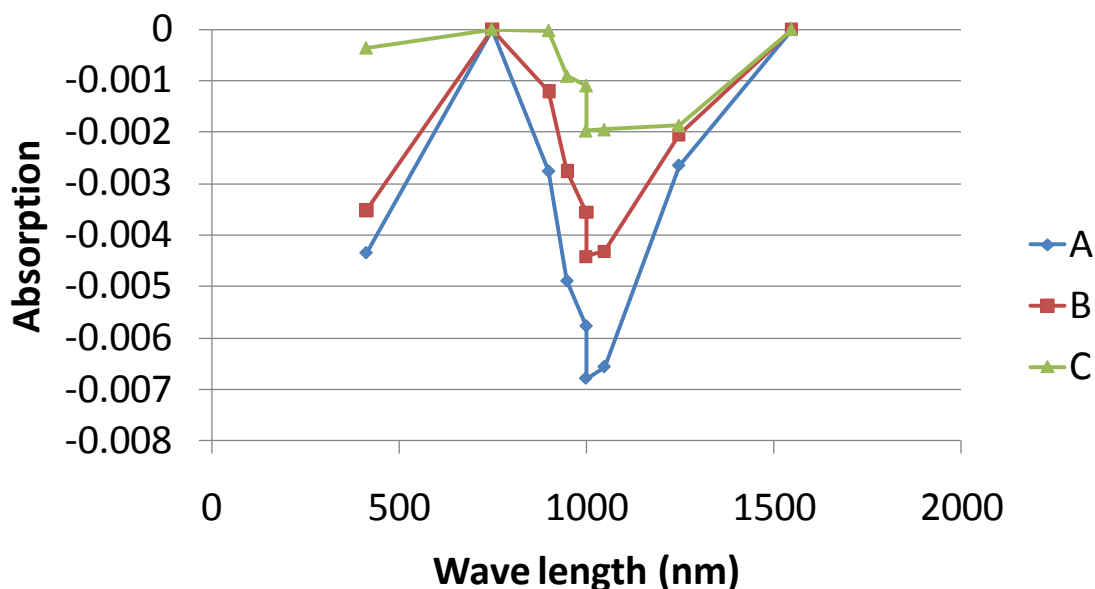
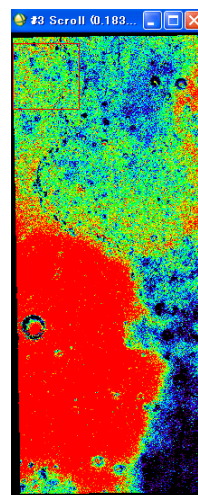


図3 MIで観測した連続部差し引き後の反射スペクトル。A領域、B領域、C領域それぞれの平均的な場所のスペクトルを示した。ここで連続部は750nm、1500nmを通る直線と仮定している。

- 風化度

図1の疑似カラー画像では、宇宙風化の度合いを赤色・青色に割り当てていたが、より宇宙風化の進行具合をはっきりみてとるために、750 nm / 450 nm の演算をした画像を図4に示す。図4からC領域、B領域、A領域の順に宇宙風化が進行していることがわかる。

A領域、C領域では比較的颜色が一様に塗られ斑がなく見えるが、B領域は青色から赤色のまだらを持っている。図中のB領域の中央部分は比較的宇宙風化の進行具合が低い、B領域の周縁部分、特に東側には宇宙風化がかなり進行した部分を見て取ることができる。



- まとめ

今回、調査したアポロ17号サイトの北西領域は、MIの比演算画像から三つの地質

ユニット (A, B, C) に分類することができた。それぞれの地質ユニットの反射率、可視・赤外反射スペクトル、風化度を調べたが、互いに明らかに異なる性質を持つことがわかった。A 領域は、風化度から推測すると最も古い一方で、苦鉄質成分の多い玄武岩からなると考えられる。反対に C 領域は比較的新しい地質であり、苦鉄質成分の割合は A 領域と比べて少ないようである。B 領域は A 領域と C 領域の中間的な性質を持つが、風化の進行具合を調査した結果、風化が進行している部分と未進行の部分が入り混じっているように見える。

# 第3回惑星探査データ解析実習会レポート

東京大学理学部地球惑星物理学科4年 藤田航

今回、私が実習会に参加してみて学んだことは、リモートセンシングの意義と月周回衛星かぐやのデータへのアクセス法、それに画像解析ソフト ENVI の使用法などです。

特に ENVI を用いたアポロ17号探査領域の画像解析は、今後の研究にとってよい刺激となりました。前知識のない私には内容は難しく、すべてを理解するまでには至りませんでした。数時間という枠組みの中で互いにアイデアを出し合い着々と準備を進めていく他の参加者の姿には感銘を受けました。同じデータを与えられ着眼点も皆ほとんど同じだったのに、発表会ではそれぞれのグループが個性を発揮していて、異なる論証をたどりそれぞれの結論に到達していたことには驚かされました。

ENVI そのものの操作については、複数のウインドウのそれぞれのメニュー項目から目的とする操作を実行しなければならないという点において、非常に難しく混乱しました。おそらくそれは鉱物やスペクトルに対する私自身の理解が浅いためだと思うので、こうした「道具」を使いこなせるようになるためにもその辺をもっと勉強していきたいと思います。

今回の経験を生かして、自分のこれからの研究に役立てていきたいと思いません。