

# 月探査画像解析ソフトの開発と活用

## Development and Application of a Lunar Image Analysis Software

佐伯和人<sup>1</sup>

### 1. 月面分光地質学の夜明け

月はほぼ灰色一色の世界である。月面の写真を見ても、そこに宇宙飛行士や地球が写っていないければ、カラー写真なのか白黒写真なのかを判別することは難しいであろう。しかし、その灰色のわずかな色の違いから岩石種類を見分ける研究が近年注目を集めている。月表面の色の違いから岩石種をみわける研究分野を著者は月面分光地質学と呼んでいる。この分野の火付け役となったのは月探査機クレメンタインの成果である。クレメンタインとはアメリカ合衆国が1994年に打ち上げた月探査機で、アメリカ国防総省、アメリカ航空宇宙局(NASA)、弾道研究所などが共同開発し、約2ヶ月にわたって月を回りながら主にカメラやレーザー高度計で月表面を探査した。本稿で取り上げるクレメンタインのUVVIS(紫外可視)カメラは、415nm, 750nm, 900nm, 950nm, 1000nmの5波長のバンドパスフィルターを通して月面全域を撮影した。この全球データのおかげで、人類はアポロ計画で得た知見を月全球の地質考察へと拡げることができるようになったのである。そしてアポロサンプルが必ずしも月全体を代表したものではないこともわかってきた。

ハワイ大学のLucey博士らのグループは1995年に950nm, 750nmのたった2バンドの画像から月表面のFeO含有量を推定する巧妙な方法を発表した[1]。また、同グループはその後415nm, 750nmの2バンドの画像から月表面のTiO<sub>2</sub>含有量を推定する方法も発表し、その後も定量精度のマイナーチェンジを繰り返している[2]。またブラウン大のPieters博士らのグループ

は反射スペクトルから含有鉱物の配合比を推定する研究を長年行い、1999年にTompkins & Pieters [3]はクレーター中央丘に露出している岩石種を判定した。クレーター中央丘は隕石衝突によるクレータ形成時に衝撃のリバウンドで形成されたと考えられており、直径40~180kmのクレータには深さ5~30kmの物質がせり出して来ていると考えられている[4]。クレーター中央丘は月地殻深部の物質を地質探査する好適地として、次期月探査の有力な着陸候補地となっている。

本稿は、無償配布しているWindows用の画像解析ソフトを使いながら、「月分光地質の最先端の巧妙な手法を学び、手法の問題点を明らかにし、新しい手法を考えるヒントをつかむ」作業の手引きになることを願って書かれた。

### 2. 月探査画像解析ソフトで何が できるか

本稿で紹介するソフトウェアは、月探査機クレメンタインのUVVIS(紫外可視)カメラ画像用の画像ビューワーおよび画像解析ソフトAkitaViewである。「インターネットにつながったWindowsマシンさえあれば、最先端の月地質学研究を自宅で行う事ができる!」というキャッチフレーズで本稿著者の佐伯が開発し、Webサイトで公開している。(http://rimrpost.rimr.akita-u.ac.jp/~ksaiki/luna.html)

AkitaViewは、クレメンタイン探査機UVVIS画像を処理して、擬似カラー画像や、ハワイ大グループの発明したFeO含有量マップ、TiO<sub>2</sub>含有量マップ、ブラウ

<sup>1</sup> 秋田大学工学資源学部附属素材資源システム研究施設

ン大グループの発明した岩相区分マップなどを自動生成する事ができる。彼らの論文を読む際に実際に画像処理をしながら読むと、論文に書ききれていない手法の長所や短所をしっかりと学ぶことができる。また、ユーザーが考えた様々なバンド間演算を試す事もできる。演算結果を8ビット階調でRGB各色に割り当てた24ビットフルカラーBMP画像として保存できるので、演算結果が8ビット階調でもよい研究には十分使える。UVVIS画像のデータ量は膨大であり、その演算方法も様々な組み合わせが考えられる。AkitaViewであたらしい岩相(他と違った色の特徴を持った地域)を見つけ出せる可能性も十分にある。AkitaViewは今後も最新の研究成果を反映した機能を盛り込んでいく予定である。

### 3. UVVIS 画像データの入手法

UVVISカメラは、415nm, 750nm, 900nm, 950nm, 1000nmの5波長を通すバンドパスフィルターを通して月面を撮影している。従って、5つのグレースケール画像が1セットで一つの地域の画像データを構成している。画像データはNASAのデータ公開サイトからダウンロードできる。

[http://www-pdsimage.jpl.nasa.gov/PDS/public/resources/cd\\_clementine.html](http://www-pdsimage.jpl.nasa.gov/PDS/public/resources/cd_clementine.html)

こちらのcl-4000番台のデータが目的のUVVISカメラのデータである。この4000番台のデータセットは、モザイク処理によって画像データが扱いやすいサイズに再区画されており、1ピクセルの大きさが100m x 100mとなるように調整されている。さらに輝度が、観測角0度、太陽入射角30度の時と同じになるように規格化されている(図1)。ただし、この規格化は地形を平面と仮定して行っているため、地面の傾きによる明るさの変化や影の影響の補正は行われていない。

ダウンロードサイトのCDマークをクリックすると、ディレクトリ一覧が表示される。なぜCDマークなのかというと、もともとCD媒体で配布されていたものである

からで、データもCD単位でグループ分けされている。必要な地域の画像をダウンロードするわけであるが、まず、どのCDに目的の地域の画像が入っているかを確認しなくてはならない。目的の地域を検索するためのマップは全てのCDに入っているの、まずは、cl\_4001を開いてみよう。中に、browseというディレクトリがあるので、これを開く。すると、locator.htmというファイルが見える。これを開くと、図2のような月のマップがでてくる。これがロケーターマップである。中央付近が月の表側で、両端が月の裏側となっている。黒線で囲まれた枠内は同じCDに収録されている範囲を示す。また、灰色線で囲まれた範囲はデータの1セット(5バンド分の5枚の画像)の範囲を表している。マウスカーソルでマップの一部をさすと、VolumeIDとQuadNameの項目に文字列が現れる。例えば、晴れの海の北部あたりを指すと、VolumeIDがCL\_4005、

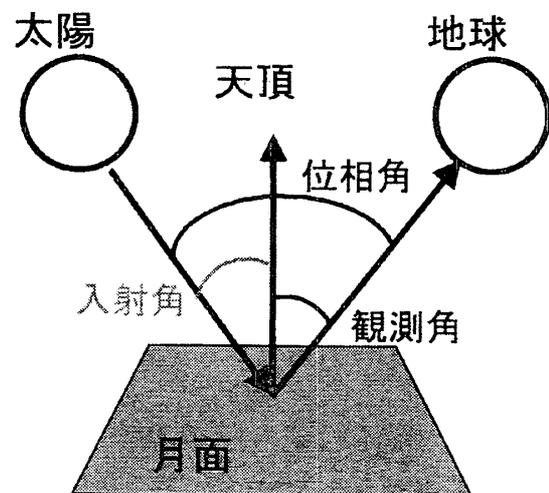


図1 入射角、観測角、位相角の関係

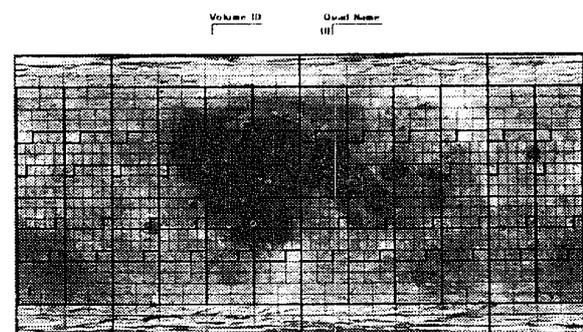


図2 目的の画像を探すためのロケーターマップ。クレメンタインの公開データに含まれている

QuadName が UI31N021 と表示される。これは、CL\_4005 という CD の ui31n021.img というデータが目的のファイルであることを示している。この情報をもとに、CD のリストのページにもどり、CL\_4005 という CD を選ぶ。出てくるディレクトリリストから data を開くと、ファイル一覧が出るので、その中から目的の ui31n021.img を選んでダウンロードすればよい。1セットの画像ファイルは、40M バイト前後もの容量があるので、ダウンロードは高速な回線(研究機関のネットや ADSL 等)を通して行う必要がある。

## 4. ハワイ大とブラウン大の解析手法を味わう

AkitaView のインストール方法や操作方法に関してはウェブサイトを見ていただくとして、本章では、その解析のアルゴリズムを中心に解説する。AkitaView を実行すると、図3のように操作ウインドウ(上)と表示ウインドウ(下)が開く。データ読み込み後に画像をマウス

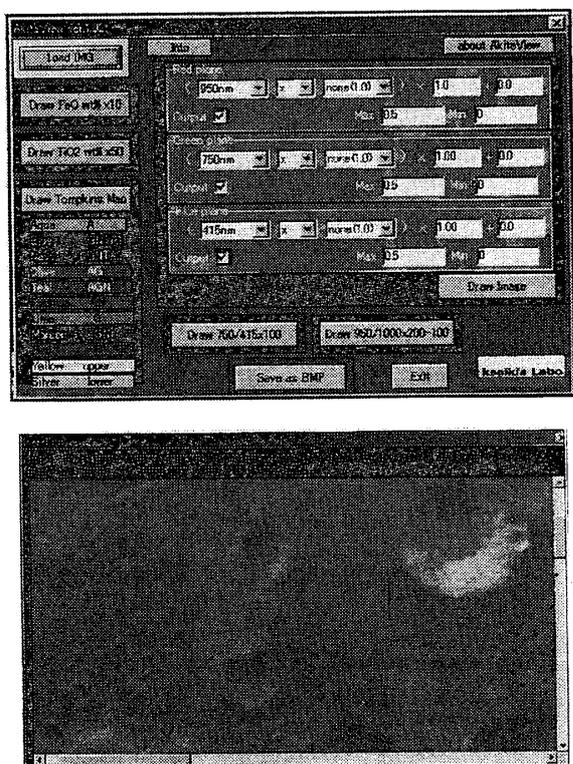


図3 AkitaView の操作画面(上)と表示画面(下)

でクリックすると、表示ウインドウの上にクリックしたポイントの X 座標、Y 座標、[R415] [R750] [R900] [R950] [R1000]:各バンドの反射率(数字は波長(nm))を表示する。各項目のデータは100%反射を1とした時の反射率で示されている。さらに[FeO] [TiO<sub>2</sub>]: FeO, TiO<sub>2</sub> の wt% (重量%) 値や、[key] [SC]: 岩相判別に利用する KeyRatio, SpectralCurvature というパラメータも表示するが、これらパラメータの意味は後述する。

AkitaView で生成したティコの擬似カラー画像と FeO 含有量マップを図4に示す。

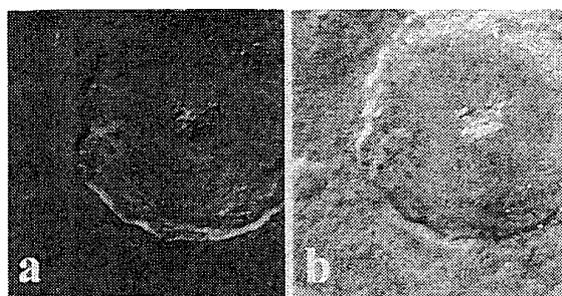


図4: AkitaView でつくった (a) ティコの擬似カラー画像(印刷の都合によりグレースケール表示)と、(b) FeO 含有量マップ。FeO 含有量が多いところほど明るくなっている。ティコの直径は約85km

### 4. 1 FeO マップ生成の仕組み

FeO 含有量推定は950nmと750nmの反射率画像のみから巧妙な解析手法で実現している。仕組みを説明するために図5を示す。ハワイ大のグループは図5のように縦軸に950nmの反射率割る750nmの反射率を、横軸に750nmの反射率をとって、複数の地域の分光データをプロットした。すると同じ地質ブロックに属するものすなわち同じFeO組成を持つと思われるものが、ある軸点を中心とした一直線上に並ぶ事に気がついた。また、FeO含有量が多いほど、プロットが軸点を中心に右に回転する事がわかった。では、直線状に広がるのは何故か?これは宇宙風化で色が変わったと考えられる。宇宙風化とは微小隕石の衝突や宇宙放射線の影響で岩石表面が変質する現象の事で、表面の色を赤黒く変える。同じ溶岩流がレゴリスとなった地域であっても、古くから堆積した表面は宇宙風化

を長期間受けるが、後の隕石衝突でできた小規模なクレータの底からは宇宙風化を受けていない新鮮なレゴリスが出てくる。そのような理由で、同じFeO含有量の地域でも、宇宙風化の程度のバリエーションが生まれるわけである。

図5の縦軸は色の指標で、横軸は明るさの指標であると読む事もできる。宇宙風化が進むといかなる組成の岩石も軸点に近づく、すなわちある極限の赤黒い色に近づく傾向があり、FeO含有量が増えるほど、青黒くなるというわけである。また、Fe<sup>2+</sup>は1000nm近くに吸収ピークがあるので、そのピークを捉えているとも言える。

アポロ計画やルナ無人探査計画により得られたサンプルによって化学組成が判明している数多くの地域をプロットした結果、もっとも都合の良い軸点を選択された。図5の例では、A16がFeO5wt%前後、A12がFeO20wt%前後のレゴリスである。図中の $\theta_{Fe}$ の角度(式1で計算)とFeOの含有量の間には、式(2)のような単純な関係がなりたつ事もわかった。

$$\theta_{Fe} = -\arctan \frac{\left(\frac{R_{950}}{R_{750}}\right) - 1.19}{R_{750} - 0.08} \quad (1)$$

$$\text{wt\%FeO} = 17.427 \times \theta_{Fe} - 7.565 \quad (2)$$

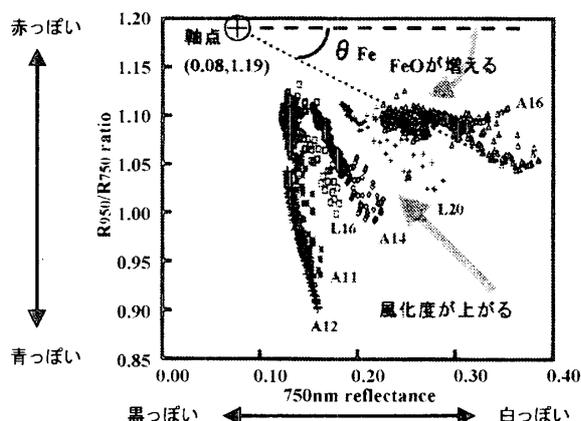


図5 FeO含有量を推定する手法の解説図。プロットされたデータはLuceyら(1998)の図の一部を引用したもの。Aはアポロ計画のサンプリングサイト、Lはルナ計画のサンプリングサイトを表す。例えばA17はアポロ17号サンプル採取場所。(実際のデータ処理では、着陸場所をさらに細分化してある)

$$\left(0 \leq \theta_{Fe} < \frac{\pi}{2}\right)$$

まぎらわしい宇宙風化による色の変化とFeO含有量による色の変化とを図5のようなプロットでうまく分離したところが、この手法の巧妙なところである。

なお、AkitaViewでは<Draw FeOwt% x 10>というボタンを押す事でFeOwt%値を10倍した輝度の画像を生成する。

#### 4.2 TiO<sub>2</sub>マップ生成の仕組み

TiO<sub>2</sub>含有量の推定方法もFeOマップと似ている。TiO<sub>2</sub>含有量マップは415nmと750nmの反射率画像を使う。今度は図6のように縦軸に415nmの反射率割る750nmの反射率を、横軸に750nmの反射率をとって複数の地点をプロットすると、同じTiO<sub>2</sub>組成を持つと思われるものが、またしてもある軸点を中心とした一直線上に並んだ。さらに、TiO<sub>2</sub>含有量が多いほど、プロットが軸点を中心に左に回転する事がわかった。直線状に広がるのは今回も宇宙風化が主たる原因である。ただ、FeO用のプロットにくらべて、TiO<sub>2</sub>用のプロットは宇宙風化の影響の分離が完全ではないようである。

縦軸は色の指標で、横軸は明るさの指標であると読むと、宇宙風化が進むほどある極限の赤黒い色に近づき、TiO<sub>2</sub>含有量が多いほど青黒くなると解釈できる。TiO<sub>2</sub>はそのほとんどがイルメナイト(FeTiO<sub>3</sub>)という黒く不透明な鉱物に入っている。そのため、イルメナイトを

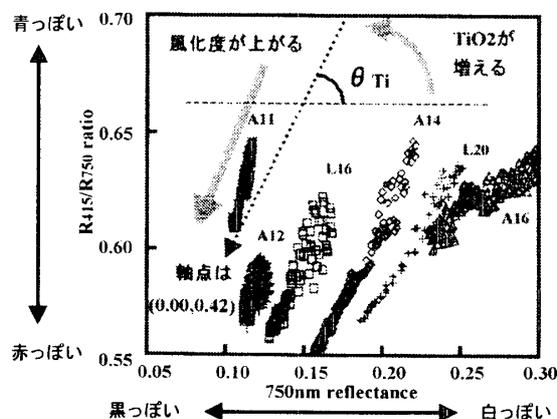


図6 TiO<sub>2</sub>含有量を推定する手法の解説図。プロットデータの引用元は図5と同じ

多く含むほど反射率が低く、スペクトルはフラットになる。従って、青っぽくなると言うよりは、もともと若干赤っぽい月の表面が、イルメナイトが入る事で赤味が抜けて灰色になるという言い方が、より正確であろう。

Tiはほとんどが海に分布しているため、高地はレゴリス A16あたりの角度(TiO<sub>2</sub>wt%にして1前後以下)に集中してプロットされる。一方海のTiO<sub>2</sub>量は1wt%前後から10wt%(A11のあたり)を超えるものまで多様である。 $\theta_{Ti}$ の角度(式3で計算)とTiO<sub>2</sub>の含有量の関係は、Ti含有量の多い分布域で少し角度が変わっただけで含有量が急激に増えるように式4のような関数になっている。

$$\theta_{Ti} = \arctan \frac{\left(\frac{R_{415}}{R_{750}}\right) - 0.42}{R_{750} - 0.00} \quad (3)$$

$$\text{wt\%TiO}_2 = 3.708 \times \theta_{Ti}^{5.979} \quad (4)$$

$$\left(0 \leq \theta_{Ti} < \frac{\pi}{2}\right)$$

ところで、図6では各レゴリスの分布の延長線が交差するところと軸点の座標とがずれているように見える。これは軸点の座標を新しい文献[2]から取り、データプロットは古い文献[5]から取ったからである。文献[5]の図にはたくさんのデータがプロットされており、分布が放射状になっている事を説明するのに便利である。文献[5]の時の軸点は(0.05, 0.45)であった。文献[2]のデータではクレメンタイン画像の輝度校正のパラメータに少し変更があり、またレゴリス試料採取地点とクレメンタイン画像ピクセルとの位置同定の解像度が上がっているため、プロット位置が少し変わる。もっとも、文献[2]に掲載されているわずかなデータプロットを見ても、(0.00, 0.42)で交差しているようには見えず、TiのトレンドはFeの風化トレンド程シンプルに表現できるわけではなさそうである。

AkitaViewでは<Draw TiO<sub>2</sub>wt% x 50>というボタンを押すとTiO<sub>2</sub>wt% 値を50倍した輝度で画像を生成する。

#### 4. 3 Tompkinsらの岩相区分の方法

輝石やカンラン石などのFe<sup>2+</sup>を含む苦鉄質鉱物は1000 nm付近に吸収ピークを持ち、ピーク波長は鉱物の種類や化学組成によってシフトする。この特性を用いて苦鉄質鉱物の種類を判別することができる。また、そのピークの深さから苦鉄質鉱物と斜長石との相対的な量比を推定することも可能である。このピーク位置と深さを定量化する尺度としてSpectral CurvatureとKey Ratioというパラメータを用い、それらを元に岩石種を判別したのが、彼女らの巧妙な方法である。

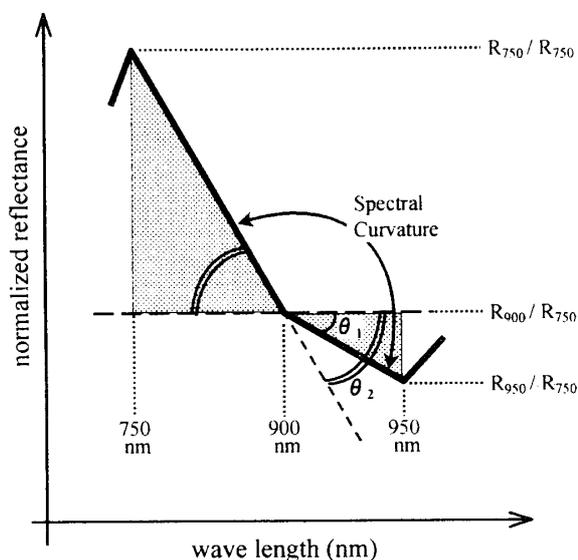


図7 Spectral Curvatureの定義を表す図

Spectral Curvature(以下SC)とは、図7の矢印で示される、分光反射スペクトルグラフにおけるR<sub>750</sub>(R<sub>750</sub>は750nmにおける反射率)、R<sub>900</sub>、R<sub>950</sub>の3点が成す角度のことであり、以下の式で求めることができる(角度の単位は「度」)。この式は[3]には出ておらず、Tompkins博士から直接教えていただいた。

$$\theta_1 = \arctan \frac{(R_{900} - R_{950})/R_{750}}{0.95 - 0.9}$$

$$\theta_2 = \arctan \frac{(R_{900} - R_{750})/R_{750}}{0.9 - 0.75}$$

$$SC = 180 - \theta_1 + \theta_2$$

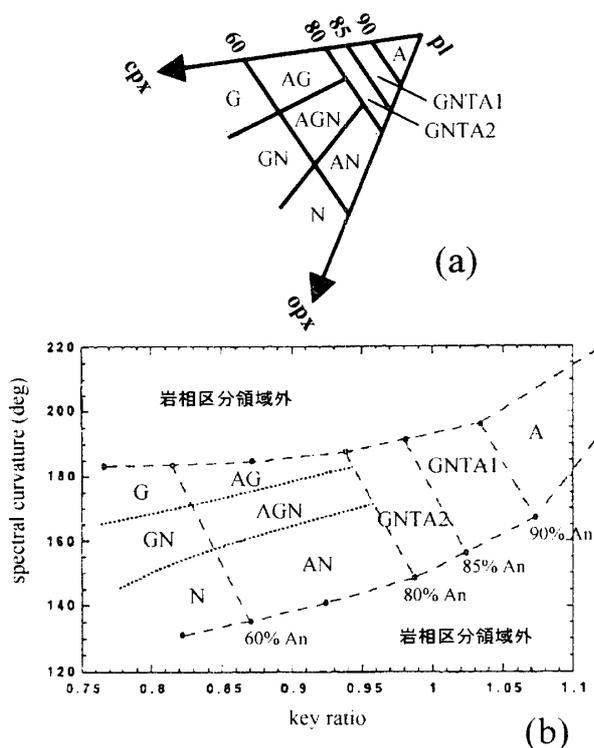


図8 (a) Tompkins & Pieters (1999) の鉱物組成比による岩相区分図。(b) 区分図 (a) を Spectral Curvature と Key Ratio 平面に投影した月表面の岩相判別図。AkitaView ではこの各岩相領域に固有の色を割り当て、UVVIS 画像を塗り分けることにより、岩相区分マップを生成する

$$\begin{pmatrix} -90 \leq \theta_1 < 90 \\ -90 \leq \theta_2 < 90 \end{pmatrix}$$

SCは吸収ピークの位置に関連し、単斜輝石(高Ca輝石)、斜方輝石(低Ca輝石)、カンラン石を区別する為の指標となる。

Key Ratio (以下 KR)とは、1000nm付近のFe<sup>2+</sup>の吸収ピーク深さの尺度であり、R<sub>900</sub>/R<sub>750</sub>、R<sub>950</sub>/R<sub>750</sub>、R<sub>1000</sub>/R<sub>750</sub>の内から最小のものを採用することで決定される。苦鉄質鉱物と斜長石との相対的な量比は、このピークの深さから推定される。即ちKRが小さいものほど吸収が深く、苦鉄質鉱物の割合が多いと解釈される。

[3]では、中央丘は風化がそれほど進んでいない深成岩であるという仮定に基づき、月高地岩石の分類用に提案された方法に因んで、斜長石(pl; plagioclase)、斜方輝石(opx; orthopyroxene)、単斜輝石(cpx; clinopyroxene)を端成分とする3成分系で、岩石をA

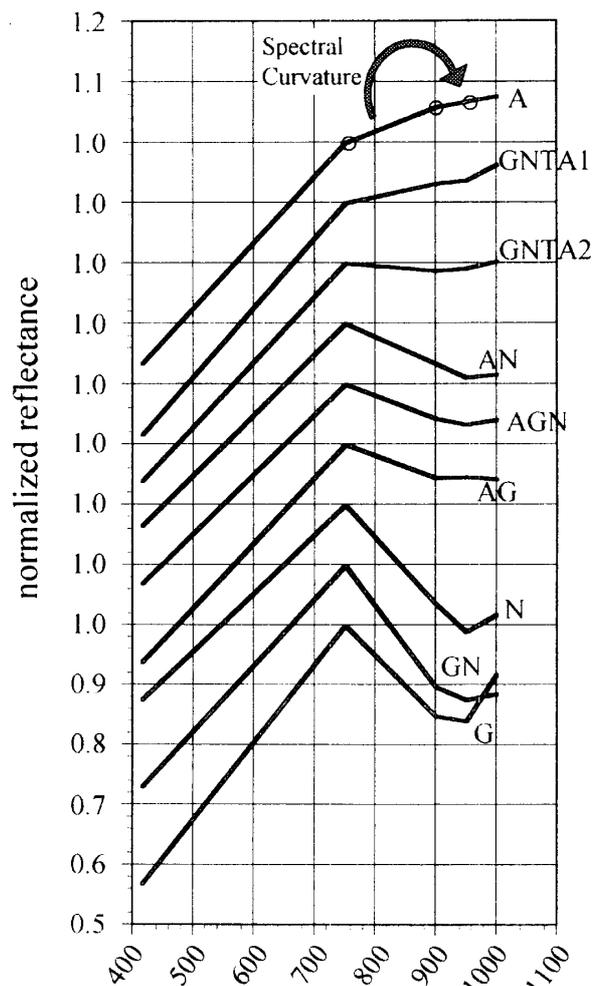


図9 9種の岩相のスペクトル形状の例。本図の縦横軸比は、各スペクトルに直接分度器を当てることで Spectral Curvature が測定できるように調整している

(斜長岩)、G(斑レイ岩)、T(トロクトライト)、N(ノーライト)などに分類している(図8a)。そして、SCを縦軸に、KRを横軸にとったプロットに、図8aの岩相区分図を投影して岩相を分類する(図8b)。

岩石分類の各項目についての説明は表1を参照していただきたい。なおTroctolite(トロクトライト)は、判定方法が他の9つの岩相と異なる為、AkitaViewの岩相区分マップには示されない。カンラン石が1000nm付近の吸収帯で見分けられる為には、全岩石中で30~50%を占めなければならない。この為、クレメンタインUVVISスペクトルでカンラン石と推定されるものは、トロクトライトまたはダナイトと考えられる。カンラン石の吸収ピークは1000nmを超えたところにあるので、[3]ではR<sub>950</sub>がR<sub>1000</sub>より大きいものをカンラン石含有岩

石の目安としている。しかし、それだけでは斜長岩と区別が付きにくいので、実際は色の明るさや周辺岩相も含めてカンラン石の存在を判定する必要がある。

図9は各岩相(Tを除く)の5バンドスペクトル形状の一例であり、それぞれのスペクトルに直接分度器を当ててSCが導けるよう、グラフの縦横軸比を調整したものである。

Tompkinsらの手法でAkitaViewが生成するマップは露出する岩石種類ごとに固有の色をつけて表現しているため、白黒原稿では表現できない。AkitaViewと同じサイトに、109個の中央丘クレータを対象とした“中央丘岩相区分マップカタログ”を公開してあるので、解析例はそちらを参照していただきたい。

#### 4.4 解析結果の読み方の注意

ハワイ大やブラウン大の手法は最先端の巧妙なものであるが、鵜呑みにするととんでもない勘違いをする。この章では解析結果がおかしくなる場合を解説する。

まず、図4のFeOwt%マップを見ると、クレータの形等、地形特徴がでていいる。これはおかしいと思った方は、するどい！地形にそって鉄が分布しているとはあまり考えられない。衛星画像解析は、表面物質の波長ごとの反射率の違い(すなわち色の違い)を利用して表面物質の性質を捕えようとする。反射率は変わらなくても、太陽の入射する角度や観測する方向によって、見かけの明るさは違って見えてしまう。クレメンタインのUVVISカメラの画像は、様々な補正計算をする事で、太陽が天頂から30度傾いた角度から月の表面を照らし、天頂方向から観測した時の明るさになるように画像を再計算して反射率画像をつくっている。その時、細かな地形の傾きは考慮されていないため、地形の傾きによるみかけの明るさの違いが、反射率の違いとして現れてしまっているわけである。全バンドの輝度を同じ割合で減じると、分光データプロットは図5を左に水平移動する。地形の影になっている部分はFeOが多いと誤判定されるわけである。TiO<sub>2</sub>マップも同様に影の影響を受ける。

一方、Tompkinsの岩相区分マップには地形がつくる影の影響がそれほどないように見える。FeOの式(1)、TiO<sub>2</sub>の式(3)、Tompkinsの式を見比べるとわかるが、Tompkinsの岩相区分の式は異なるバンドの比を使っている。ある地域に影ができていいる場合、入射光量が日向の10%になったとする。各波長の画像の比をとっていれば、各波長の減光の割合が同じだった場合、その影響はキャンセルされる。これがTompkinsの処理が地形影響を受けにくい理由である。

Tompkinsの岩相判別の留意点は、この判別法がもともとクレータ中央丘に露出しているであろう地殻深部の岩石を判別するためのものであるという事である。したがって深成岩のような名前がついているが、あくまで鉱物の構成比を表す目安だと考えるべきである。例えば海の玄武岩は、GNTAやAGなどに分類されてしまう。このような誤解の要因をはらんでいいるが、気をつけて使えば興味深い岩相を発見する強力な武器となり得る。

#### 4.5 さらに詳細な検討

AkitaViewはマウスでクリックした地点の反射率生データが数値として読めるので、さらに詳しい検討が可能である。著者らや卒論学生佐藤・高橋によって5バンドスペクトルと解析結果の比較を詳しく行ったところ[6]、さまざまな誤解釈の要因がわかってきた。

まず、Tompkinsの岩相区分では、風化度の高い玄武岩は主にGNTA1で表され、新鮮なものは、AGやAGNで表されることがわかった。すなわち、風化度が上がるほど、より斜長岩的に解釈されている。これは風化に伴いKeyRatioが増えてしまうのが主たる原因である。

また、先の章でTompkinsの岩相区分はFeO、TiO<sub>2</sub>マップに比べて日陰に強いということを述べたが、詳しく調べてみると、同じクレータ底でも日向と日陰で岩相が異なって判定されている例が多数見つかった。これらのクレータでは影が濃くなるにつれて、KRが減少し、より苦鉄質と判定されるようだ。このことは影は単

に全波長が一様に暗くなっているわけではなく、波長ごとに暗くなる割合が異なっている事を示唆している。

さらにガラスの存在の影響も調べてみた。クレータ形成の際に溶けた岩石が急冷してできたガラスが、クレータ周辺に降り積もっているところがある。これをダークリングと呼ぶ。ダークリング物質はその地域の表面を全溶融再固結させたものであるから、化学組成はほとんど変化していないはずである。にもかかわらず、ガラスの分布する地域ではKRが増加し、より斜長岩的な岩に分類されることがわかった。一方FeOマップでは逆により苦鉄質と判定される傾向がある。これらはガラスの存在によって、スペクトルが暗くなり、かつFe<sup>2+</sup>の吸収ピークがなまってくるのが原因である。

これまで見てきたように、岩石の色は、宇宙風化度、太陽光のあたり方、ガラスの存在、等で変化する。他にも変化の要因は岩石の表面状態の違いや、岩石組織(特に衝突角レキ岩のマトリックス)の影響や、想定外の鉱物組み合わせ、等、様々な要因が考えられる。分光地質学のデータを利用する場合はその解析アルゴリズムをよく理解し、解析結果の信頼度を正しく認識する事が大切である。

## 5. セレーネ計画、そして未来の惑星探査へむけて

分光地質学は地質に敏感である。そこにFeがあるというデータだけでなく、そのFeが輝石に入っているか、カンラン石に入っているか?といった事にまで踏み込んだ議論ができるため、惑星地殻の形成モデルを作る時の強力な基礎データとなる。2005年打ち上げ予定の国産大型月探査計画セレーネでは、マルチバンドイメージャー、スペクトルプロファイラーによる世界最高品質の分光データを大量に得ることができる。日本が月分光地質学の最先端に立つわけだ。

しかし、ここで注意せねばならないのは、クレメンタインの成果はリモートセンシング探査単独で得られた

ものではないという事である。精度のよい推定は、アポロ計画の大量のリターンサンプルがあってこそ可能となった。分光地質判定には本稿でみてきたように、判定結果をあいまいにする様々な要因がある。従って、蛍光X線分析や、放射線測定や、重力測定など、他の手法で得たデータから総合的に判定していく事が重要である。そして何よりも重要なのが物質の理解である。岩石試料は分光データの標準物質としての重要性以上に、その分析から得られる知見が「その地域にはこれこれの岩石があるはずである」という想定岩石を絞る事に威力を発揮する。分光地質解析は、原理的に想定岩石なくしては不可能である。今後、小惑星や、他の固体惑星、固体衛星の探査で分光地質学技術は重要な役割を担う事であろう。その時、世界の隕石保有国である日本の隕石研究者、そして火山王国であり鉱物資源の宝庫であった日本の地質学鉱物学研究者の研究の蓄積が探査に活かされる事を期待している。

## 6. 謝辞

AkitaViewを製作するにあたり、岩相解析方法の細部を教えてくださいましたStefanie Tompkins博士に感謝します。ソフトの動作チェックをしてくれた、高橋正幸さん、佐藤昌枝さんに感謝します。特に高橋さんはTompkinsの岩相区分をマトリクスデータに変換する作業をしてくれました。NASDAの月利用研究センターの皆さんには、解析法についての情報交換や資料の提供、機能についての助言をいただきました。ここに感謝します。本稿執筆にあたり、有意義な査読意見をいただきました出村裕英博士に感謝します。

本研究は、(財)日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行われました。

## 7. 参考文献

- [1] Lucey P. G., 1995: Science, Vol.268, 1150.  
 [2] Lucey P. G. and Blewett D. T., 2000: Journal of Geophysical Res., Vol. 105, No. E8, 20297.  
 [3] Tompkins S. and Pieters C. M., 1999: Meteoritics & Planetary Sci. 34, 25.  
 [4] Cintala M. J. and Grieve R. A. F., 1998: Meteoritics & Planetary Sci. 33, 889.  
 [5] Lucey P. G. et al., 1998: Journal of Geophysical Res., Vol. 103, No. E2, 3679.  
 [6] Tsuboi N. et al., 2003: 日本リモートセンシング学会誌, 投稿中

月面の主要鉱物		
plagioclase	斜長石 (略号 <b>pl</b> )	
orthopyroxene	斜方輝石 (Caの少ない輝石) (略号 <b>opx</b> )	
clinopyroxene	単斜輝石 (Caの多い輝石) (略号 <b>cpx</b> )	
olivine	カンラン石 (略号 <b>ol</b> )	
注) ol, cpx, opx など Fe, Mg に富む鉱物をマフィック (Mafic) 鉱物 (= 苦鉄質鉱物) と呼びます。		
月地殻の主要岩石		
Anorthosite	斜長岩 (アノーソサイト)	ほとんど <b>pl</b>
Gabbro	斑レイ岩 (ガブロ)	<b>pl + cpx</b>
Norite	ノーライト	<b>pl + opx</b>
Troctolite	トロクトライト	<b>pl + ol</b>
Tompkins らの岩相分類		
A (Anorthosite)	<b>Pl &gt; 90%</b>	
GNTA1 (Mafic+Anorthosite)	<b>Pl + Mafic (85% &lt; pl &lt; 90%)</b>	
GNTA2 (Mafic + Anorthosite)	<b>Pl + Mafic (80% &lt; pl &lt; 85%)</b>	
AN, AGN, AG (Anorthositic Norite, Anorthositic Gabbro, Anorthositic Gabbro)	<b>pl + Mafic (60% &lt; pl &lt; 80%)</b> Mafic 鉱物は左から, <b>opx</b> が多い, <b>opx+cpx</b> 同程度の量の混合, <b>cpx</b> が多い	
AT (Anorthositic Troctolite)	<b>pl + ol (60% &lt; pl &lt; 80%)</b>	
N, GN, G (Norite, Gabbro, Gabbro)	<b>pl + Mafic (pl &lt; 60%)</b> Mafic 鉱物は左から, <b>opx</b> が多い, <b>opx+cpx</b> 同程度の量の混合, <b>cpx</b> が多い	
注) %表示は体積比。ただし分光岩相判別の精度が%単位であるわけではない。		

表1 月の主要鉱物・岩石と Tompkins らの岩相区分