

望遠鏡月面分光観測システム構築

佐伯和人¹，平田成²，大嶽久志²，竹内圭一³

1. 月面分光観測ネットワーク構想

本研究は，月地質学の観測ネットワークの実現をめざして，アマチュア天文家でも月面分光地質図が作成できる手法を考案し，その手法を実現するソフトウェアツールを開発し，実際にアマチュア天文器材のみを使って作図を試みたものである。

1994年に打ち上げられたアメリカ合衆国の月探査衛星クレメンタインは，高空間分解能の月面分光画像を供給し，月分光地質図作製研究を活気づけている。日本では，2002年打ち上げ予定のLunar-A，2004年打ち上げ予定のSELENE，さらにその先の月探査計画も検討されており，2000年代は日本の月探査が世界をリードする事が期待される。分光地質学分野の月研究では，SELENEの搭載する理学カメラのデータは10年近く世界のトップデータとなるであろう。

一方，現在月探査計画に積極的に参加している日本の地質学・鉱物学者の数は，アメリカと比較すると桁違いに少ない。日本は世界一の隕石保有国なので，惑星物質の研究者の数は多いが，サンプルリターン計画でなくては関心をひかないのかもしれない。また，国内の多くの地質学者にとって，月は「他の分野の人が研究する対象」と認識されているようである。今後，月面の高空間・波長分解能撮像，ローバーによる探査等の計画が実現するにつれ，地質学者や鉱物学者の野外調査，現物観察のセンスがますます必要となる事が予想

される。しかし，このままでは日本がトップデータを保有していても，国内では活用しきれないという悲しい事態になりかねない。月は地質学の対象ではないというイメージは，アマチュア天文家の観測目的にも色濃く反映している。アマチュア天文家の興味は天体物理学，天体力学現象が主であり，月そのものに関しては地形学的興味の観測はあるものの，地質学分野の観測は皆無である。

近年のアマチュア天文器材の発達，特に冷却CCDカメラの普及によって，ハードウェア的には月面分光撮像を行い月地質学研究をする事は難しい事ではなくなった。また，月面分光観測は，彗星発見にも似て，アマチュアがプロに勝てる可能性のある興味深い観測対象であるとも言える。しかし，撮像された画像を分光地質図にするためには，特殊な処理が必要であり，アマチュアがクリアする事は困難である。

本研究は，月面分光画像を地質図にするためのソフトウェアを開発し，ウェブサイトで観測ノウハウとともに情報提供して，アマチュア天文家に地質学分野の観測を可能にする事を第一の目標としている。さらに，月面分光観測のすそ野を広げる事で，地質学・鉱物学分野の学生や研究者の月探査への参加や，惑星地質学をめざす学生の増大も期待している。

また，天文台や月探査衛星による観測では，演算を試すバンド組み合わせや，高空間分解能で調べる事ができる地域の数があまりに多いために，

1 秋田大学工学資源学部附属素材資源システム研究施設

2 宇宙開発事業団NASDA先端ミッション研究センター

3 秋田大学鉱山学部資源素材工学科

見落としも多くなる。アマチュア観測網から月地質学の上で興味深い地域が提案されてくる可能性も大きいと考えている。

2. 観測機器と観測方法

観測に必要な機器は、天体望遠鏡、冷却CCDカメラ、モータドライブ赤道儀、バンドパスフィルター、画像取込および画像処理用のパーソナルコンピュータである。

天体望遠鏡は小口径でもよいが、口径によって観測できる空間分解能に差が生じる(表1)。実際の分解能は大気の状態に大きく左右されるが、月面中央付近で2 km程度の分解能をもつ画像を撮影できるアマチュアは数多くいると期待される。本研究ではビクセン社の8 cm口径屈折式望遠鏡GP-ED80SMを使用し、直焦点法による撮影を行った。

表1 天体望遠鏡の口径と分解能

口径	分解能	月面での距離換算
5cm	2.3"	4.4 km
8cm	1.5"	2.9 km
15cm	0.8"	1.5 km
30cm	0.4"	0.77km

参考画素サイズ:

SELENE 可視マルチバンドイメージャー	20m
SELENE スペクトルプロファイラー	500m

撮像にはモノクロの冷却CCDカメラを使用する。カラーのカメラは素子にカラーフィルターが装着されているため、バンドパスフィルターを通すとフィルターの2重掛けとなり不適である。また、入射光量とデジタル輝度の変換がリニアになっているもの、もしくは変換曲線が自明なものである必要がある。従って、アンチブルーミング機構のないものが良い。同様の理由で、モノクロCCDカメラのアナログ信号を別会社のビデオデジタル

装置でデジタル化する事は、光量とデジタル輝度の変換がブラックボックス化してしまうので、不適である。天体望遠鏡用のモノクロ冷却CCDカメラの大部分は上記の問題をクリアしている。本研究では、ムトーエンタープライズ製のCV04II (40万画素)を使用した。

モータドライブ赤道儀は撮像中に月を追跡するために用いる。露光時間は可視域であれば1秒以下でも可能なので、撮像条件によっては自動追跡しなくても撮影はできる。本研究では、ビクセン社のモータドライブ赤道儀を、同社のスカイセンサー2000PCという制御装置で駆動した。

バンドパスフィルターは選択波長のみを透過するフィルターである。天体観測用に売られているものは、透過バンド幅が広く月面地質図製作には適さない。本研究では、ケンコー社製の420nm,750nmのフィルターと、アンドーバー社製の950nmのフィルターを使用した。使用したフィルターの特性を表2に示す。

表2 バンドパスフィルター性能表

フィルター名称	形状	最大透過波長	最大透過光量	半値幅
420nmケンコー製	5cm×5cm正方形	419.5nm	38.0%	10.9nm
750nmケンコー製	5cm×5cm正方形	753.5nm	38.2%	19.0nm
950nmAndover社製	5cm 直径 円形	950.8nm	50.6%	8.5nm

これらのフィルターはもともと天体観測用ではないため、天体望遠鏡に取り付けるアダプター等は販売されていない。本研究では、図1のフィルタースライダーを樹脂と金属筒で作製し、天体望遠鏡の接眼鏡筒部に取り付けられるようにした。月面分光観測が普及すれば、適当な性能のフィルターやフィルターターレットを製造してくれるメーカーの出現を期待できるかもしれない。

撮像は1999年9月26日、秋田市の秋田大キャンパス内で行われた。当日の月は輝面比0.99というほぼ満月に近い状態であった。観測は、大気の影響

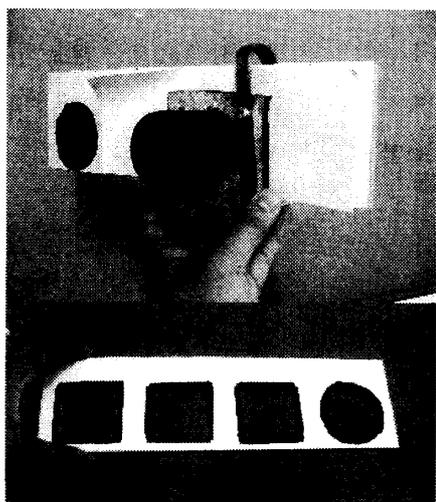


図1 バンドパスフィルター用スライダーと、フィルター、フィルターは左から420nm, 650nm, 750nm, 950nm.

響が少ない午後11時から翌午前2時までにわたって行われた。撮像データを表3に示す。

表3 撮像データ

バンド	撮像時刻	露光時間(s)	最大輝度	素子温度(°C)
420nm	東半球 23:32 (26 Sep.)	1.0	25081	1.0
	西半球 23:54 (26 Sep.)	1.0	26111	0.5
750nm	東半球 1:18 (27 Sep.)	0.1	18205	1.0
	西半球 1:08 (27 Sep.)	0.1	18995	1.0
950nm	東半球 1:36 (27 Sep.)	4.0	20902	0.5
	西半球 1:56 (27 Sep.)	4.0	21642	1.0

上記の装置で得られた月画像は、半径が380画素であった。冷却CCDカメラの素子は幅768画素、縦512画素であったので、月の西半球と東半球を分けて撮影した。

撮像された画像の処理には、Windows用の天体画像処理ソフト、アストロアーツ社のステライメージ2 (<http://www.astroarts.co.jp/>) を用いた。この天体観測用画像処理ソフトウェアは、複数画像の演算機能が優れており、演算前に、複数画像を回転と平行移動によって目で確認しながら位置あわせができる。複雑な輝度補正はこのソフトウェアだけでは不可能であるが、後述するツールを開発したため、本研究の画像処理はこのソフトウェアの

「画像演算機能」と「コンポジット機能」で処理可能となった。8bit画像に変換すれば、ScionImage (<http://www.scioncorp.com/>)等のフリーの画像処理ソフトも使用可能である。

3. 月面分光地図作製の手順と障壁

分光地図を作成する方法は、どのような地質特徴に注目するかという研究者の思想によって、バンドの選び方から演算方法まで無限にありうる。ここでは、クレメンタイン画像の処理で実績のあるLuceyら[1]の発案したFe含有量マップ、Ti含有量マップを作製する事にする。FeやTiは月の玄武岩質溶岩に多く含まれる元素で、月内部の進化過程を知る手がかりとなる。

バンド間演算以前に、まず画像の輝度を補正・較正する必要がある。この処理には、(1)ダークフィールド補正、(2)フラットフィールド補正、(3)バンド間の月位置の調整、(4)測光補正、(5)標準サイトによる反射率への変換、の5段階が必要である。そして最後に(6)バンド間演算を行い、目的の分光地図を得る。(1)は熱的に発生する暗電流ノイズを、(2)は受光面の埃や光学系の周辺減光、CCDのピクセルごとの感度ムラ等を取り除く処理である。いずれも冷却CCDカメラの通常の撮影手順に含まれているので、本稿では詳述しない。(3)は、各波長で撮像した画像の位置をあわせる作業である。バンドパスフィルターを取り替えている間に、モータードライブ赤道儀を使用しているにもかかわらず、微妙に月画像が動いてしまうので、そのズレを補正する。例えば420nm画像の位置に750nm画像をあわせたい場合は、ステライメージ2のコンポジット機能を利用して420nm画像に750nm画像を加算平均する処理をしながら、750nmの画像を回転、移動させ、びたりと重なるように調整する。そして、その時の回転量、移動

量を記録しておく。次に輝度0の画像を用意し、750nm画像を「コンポジット機能」の「加算演算」を使って合成する。その際、先ほど読み取っておいた回転量・移動量と同じだけ回転・移動させる。このような複雑な過程を踏むのは、ステライメージに画像を単独で移動する機能がないためである。輝度0の画像は、任意の画像から十分大きな数を「減算処理」すれば作成する事ができる。

(4)の測光補正は、Photometric Correctionと呼ばれるもので、物質表面からの反射光強度が入射光方向や観測方向によって変化する角度依存性を修正するものである。言い換えれば観測対象物の光学的な異方性を評価する作業である。この補正は、一般の画像処理ソフトでは不可能である。この処理を簡単にする事で、月面分光地質学のすそ野を拡大する事ができる。具体的には、観測者と被観測場所（月面）と光源（太陽）の位置関係に起因する輝度の変化をなくすために、被観測地点の太陽高度・位相角（太陽入射方向と観測方向がなす角）・観測者の方向を引数として、ある一定の条件で得られる輝度に変換する関数を使用する。この補正は、実際の探査衛星画像処理でも議論の多い研究対象となっており、未だに完全な補正法は確立していない。本研究で採用した方法は、クレメンタイン画像処理の標準的な手法となっているブラウン大学のPitersらの方法[2]を基本として行った。

ブラウン大学方式では、実験室での分光観測条件に合わせて、太陽入射角30度、観測角0度、位相角30度にデータを規格化する。変換するために輝度に乗算する係数 C_{photo} は以下で与えられる。

$$C_{photo}(i, e, \theta) = \frac{Fn(30) \times \cos 30 / (\cos 0 + \cos 30)}{Fn(\theta) \times \cos i / (\cos e + \cos i)}$$

i : 被観測地点への太陽光入射方向が天頂となす角（入射角）

e : 被観測地点と観測者を結ぶ直線が天頂となす角（観測角）

θ : 太陽—被観測地点—観測者がなす角度（位相角）

$Fn(\theta)$ は、方向性輝度値補正係数であり、位相角の違いによる観測輝度の変化をあらわす係数である。ブラウン大方式では、 $Fn(\theta)$ として以下の式を使用している。

$$Fn(\theta) = a_0 + a_1 \theta + a_2 \theta^2 + a_3 \theta^3 + a_4 \theta^4$$

$$a_0 = 0.988 \quad a_1 = -2.101E-2 \quad a_2 = 2.527E-4 \quad a_3 = -1.530E-6 \quad a_4 = 3.367E-9$$

この式は位相角10度以下では誤差が大きくなる事が知られている。満月付近の時期に行う撮像では位相角が0度近くになるので、位相角5度以下の方向性補正係数は、横田ら[3]のデータをもとに

$$Fn(\theta)/Fn(30) = -0.12\theta + 2.2$$

とした。

今回のバージョンの処理ソフトウェアでは、位

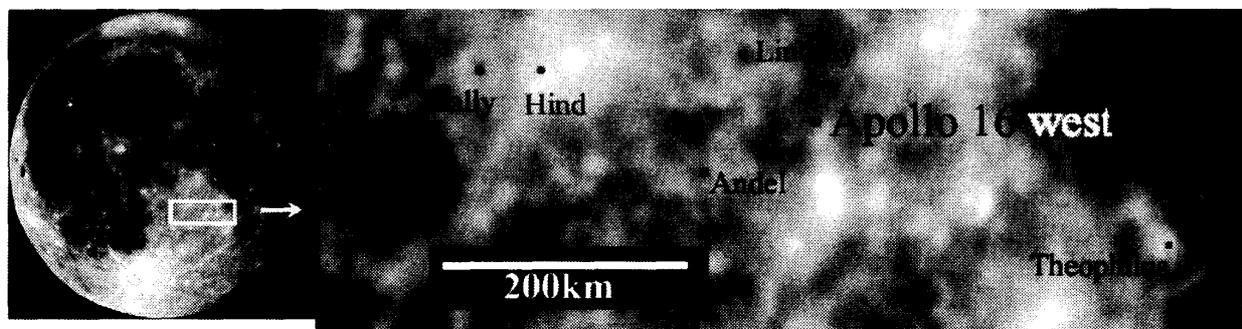


図2 較正サイトアポロ16号着陸場所西と、その周辺の主要クレーター。420nm画像を拡大した。本サイトは、高地組成の土壌が比較的平坦に降り積もった地域である。

相角は月全面で一定とみなしたので、上記の位相角成分は最終結果の画像には直接はあらわれない。しかし、入射角や観測角は、月の各場所で大きく異なる。従って、上記の係数 C_{photo} も、月画面の各ピクセルごとに異なる。この係数を簡単に掛けるために、本研究では、係数を画像化したフィルター画像をつくり、ステライメージの画像乗算処理を使って月画像にフィルター画像を掛ける事で補正を行う。このフィルターを生成するソフトウェアLunarFilter (LF.EXE)については、次章で詳述する。

フィルター画像を乗じる事により月画像の各ピクセルと太陽、観測者の位置関係によるムラを吸収したら、画像補正の仕上げとして、この画像の輝度を標準サイトを使ってブラウン大の標準反射率に変換する。較正サイトには「アポロ16号着陸場所西」という平原を使用した。較正サイトの緯度経度(8.8°S, 15.2°E)を元に、較正サイトを特定した。図2に較正サイトの位置を示す。特定には後述するLunarMap (LM.EXE)というツールを利用した。アポロ16号の較正サイトには、月土壤のサンプル62231と反射スペクトルがよく似た物質が分布していると想像されている。この月土壤の反射率は、415nm で11.47%、750nm で18.68%、950nm で20.41%である。各バンド画像の較正サイトの輝度が、この反射率になるようにデジタル輝度に適当な数値を掛ける。本研究では、撮像には420nmのフィルターを使ったが、半値幅以内の差なので影響は少ないとみなし、415nmバンドとして今後は処理をする。

最後にこの補正されたデータを演算して地質に関係のあるデータを抽出する。本研究ではFeの含有量とTiの含有量を示すマップをつくる事を試みた。方法はLuceyら[1]のそれであるが、Luceyらの用いた反射率データは半球反射率のもので、ブラウン大の二方向性反射率をもとに算出したもので

はないため、係数がそのままでは使えない。そこで、大嶽ら[4]がブラウン大方式の補正をしたデータをもとに、新たにアポロ試料の化学組成分析値とクレメンタイン画像の比較をし、補正係数を求めた。補正式は以下ようになる。

各バンドの画像を用いてTiO₂含有量 (wt%)を推定する式は、

$$\theta_{TiO_2} = \arctan\left(\frac{(R_{415}/R_{750}) - 0.539}{R_{750} - 0.119}\right)$$

$$TiO_2 \text{ wt\%} = 9.45 \times \theta_{TiO_2}^2 - 15.64 \times \theta_{TiO_2} + 7.04$$

R_n は波長 n (nm) での反射率を100%を1として計算。角度の単位はラジアンである。

($0 < \theta < \pi$ である事に注意)

同様にFeO含有量 (wt%)を推定する式は、

$$\theta_{FeO} = -\arctan\left(\frac{(R_{950}/R_{750}) - 1.493}{R_{750} - 0.000}\right)$$

$$FeO \text{ wt\%} = 55.55 \times \theta_{FeO} - 57.16$$

となる。

各バンドの反射率を上記の式で計算すると、FeマップTiマップが完成する。

以上のプロセスのうち、(1)-(4)までは、通常为天体画像処理であり、ステライメージ等の天体画像処理ソフトで簡単に処理する事ができる。しかし、(5)は大変困難である。障壁は、月画像の各画素の位置に相当する緯度経度をもとにした各画素ごとに異なる補正係数を掛ける作業の複雑さにある。そこで、補正係数を画像として提供する方法を考案した。

4. 月分光地質学用ソフトウェアツール

誰でも簡単に光源・被観測地点・観測者位置関係による輝度の差を補正できるようにするためのフィルターを生成するソフトを開発した。「LunarFilter

(LF.EXE)」がそれで、MS-DOS上、もしくはWindowsのDOS窓で動くソフトである。また、補正フィルターを月画像に正確に載せるためのテンプレートを生成するソフト「LunarMap (LM.EXE)」もあわせて用意した。

LunarFilterは月面の各々の場所で太陽・被観測地点・観測者の幾何学関係の変化による輝度の変化を吸収するフィルター係数を画像として提供するものである。この画像をステライメージ等の画像処理ソフトを用いて月画像に乗算すれば、月画像全面の測光補正が一度に終了する。LunarFilterを起動すると、以下の項目が質問される。

1) 月画像の半径の長さ (単位: 画素), 2) 観測日時の月の秤動量, 3) 輝面比, 4) 太陽の月面余経度と月面緯度。1)は撮像した画像を実際に測って求め、2)-4)は天文年鑑等で調べる。秤動とは月の緯度・経度方向の首振り運動の事で、月面の41%は地球の観測者から常に見えているが、18%の部分は時とともに見え隠れし、総合すれば月面の59%を観測する事ができる。観測角の計算や、地球から月のどの部分が見えているかを知るために必要な量である。輝面比は位相角を、太陽の月面余経度と月面緯度は太陽入射角を計算するのに使用する。以上を入力すると、フィルター画像をMTFフォーマットで生成する。なお、画像データ

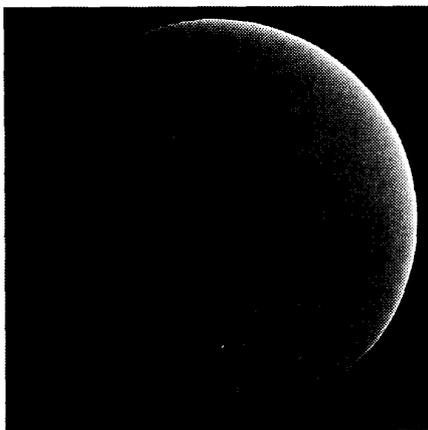


図3 Cphoto係数の1000倍の輝度値を持つ画素で構成された測光補正用演算フィルター画像。

は16ビット整数値なので、係数は1000倍された数字が入る。本研究の観測日の月に相当するフィルター画像を図3に示す。

生成したフィルターを月画像に重ねるにも工夫がある。このフィルターをどの向きに月画像に重ねるかを正確に知らねばならない。そこで月テンプレート生成ソフトLunarMap (LM.EXE)を使用する。起動前に、月マップにプロットしたい地点の緯度経度を入力したファイル「latlon.dat」をLM.EXEと同じディレクトリに作っておく。例は表4の通りである。

表4 latlon.datの作例

lat	lon	comment
-43.3	-11.2	Tycho
23.7	-47.4	Aristarchus
-12.0	2.6	Klein
-8.0	5.7	Hally
-7.9	7.4	Hind
-7.0	13.0	Lindsay
-10.4	12.4	Andel
-8.8	15.2	Apollo16west

明るいクレーター等、月画像とあわせるのに都合のいい地点や、較正サイトを探すのに便利なように較正サイトの緯度経度等を列挙しておく

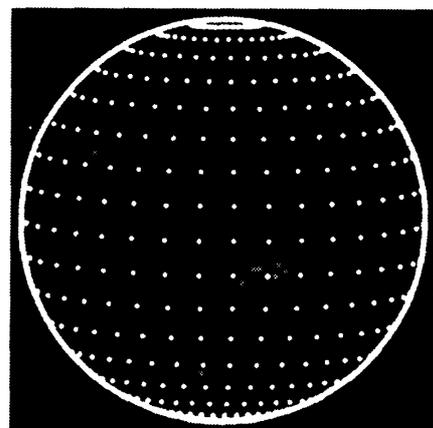


図4 月テンプレート画像。表4のデータをもとに生成されたもの。プロットされる点は、実際は1画素のサイズしかないが、それでは見えないので、本図は点のサイズを大きくしてある。

い。クレーターの緯度経度情報は文献[5]に詳しい。LMを起動すると、観測日時の秤動量を求められるので、入力すると、図4のようなテンプレート画像がMTFフォーマットで生成される。この画像には、月の輪郭と、10度ごとの緯度経度交点部分に輝度10000の点が入り、latlon.datで指定した緯度経度地点に輝度20000の点がプロットされるようになってきている。このテンプレート画像を、撮像した月画像に一致させるのに、どれだけ回転・平行移動しなくてはならなかったかを調べ、フィルター画像も全く同じように移動して月画像と乗算合成すれば補正が終了する。

測光補正が終わり、較正サイトにあたる画素が較正サイトの反射率と等しくなるように適当な係数を掛けて演算すれば、後はバンド間演算だけで、様々な分光地図を作り出す事ができる。四則計算の組み合わせだけのバンド間演算であれば、ステライメージやScionImageでも十分可能である。ただし、今回用いたLucyらの式にはarctan計算が含まれているため、この処理専用のソフトウェア「feti.exe」を作成した。これは、ブラウン大の反射率規格にあわせた415nm,750nm,950nmの画像のファイル名を入力すると、自動的にFeOwt%マップ「fe.mtf」とTiO₂wt%マップ「ti.mtf」を生成する。

5. 現システムの問題点と改善項目

得られた画像を図5にあげる。月の中心付近で、1画素の長さが約4.6 kmに相当する。Lucyらのクレメンタイン画像を処理したFe,TiマップはNASAのウェブサイトで見ることができる。(http://cass.jsc.nasa.gov/publications/slidesets/clem2nd.html) それと比較すると、月の中央部はクレメンタイン画像から作られたマップとよい一致を示す。海の中でも、FeやTi含有量が様々に変化している様子が詳細にわかる。しかし、月の周辺部に近づくと定量値が上昇していく、特に静かの海以東は、Fe,Ti含有量ともに急上昇し、もっとも定量値の悪い危機の海では2倍近い数字となっている。これは、測光補正がまだ不十分である事を示している。測光補正式は平面状の試料を様々な角度で計測する事を前提としている。月面の場合、太陽直下から離れると、単に入射角度が増加するだけでなく、月面の微小な凹凸によって影部分が増大する。そのために、縁辺部は補正值以上に暗くなっている事が、定量値を悪くする大きな原因であろうと考える。他にも、測光補正に波长依存性を含めたり、方向性輝度値補正係数の式を位相角だけでなく、入射・観測角も含めた式に拡張する事で大きく改善するかもしれない。いずれ

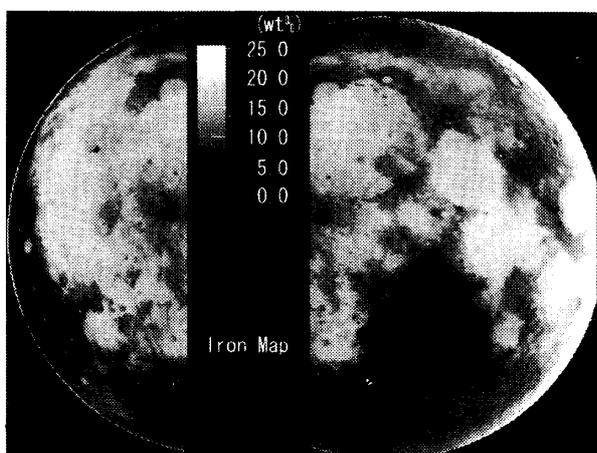


図5 (a) FeO含有量マップ

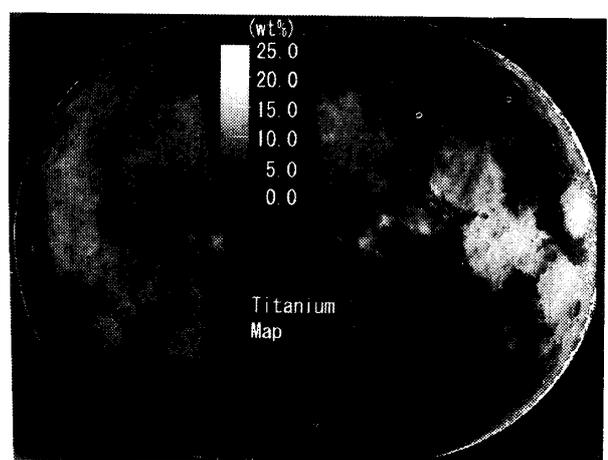


図5 (b) TiO₂含有量マップ

にせよ、クレメンタイン画像に比べて低倍率望遠鏡画像の方が、遥かに一画面内における補正パラメーターの変動が大きいので、さらなる研究が必要である。ところどころ、Fe,Tiの含有量が極端に多くなっている画素があるが、これは本当に多いのではなく、計算式の適応範囲外の反射率組み合わせになったためである。同様な原因で発生したと思われる点はLuceyらのTiマップにも見られる。

現状で定量精度を高めるためには、測光補正をかけた直後に画像の一部を切り出して、その画像内の地点を較正サイトとして利用して反射輝度への変換を行えばよい。そうする事で、地域地質の研究には十分な精度の画像が得られるであろう。しかし、手軽に全球の分光撮影ができるところが、天体望遠鏡観測のよいところなので、測光補正フィルターの性能向上をめざしたい。

また、現在の「LunaFilter」、「LunaMap」は、直径800画素の大きさまでの月画像にしか対応していない。これは、月を完全な球として計算しているため、これ以上の大きさでは位置精度が1画素より悪くなってしまふからである。また、前述の測光補正の問題が解決したとしても、月の縁辺部（緯度や経度にして、10度分くらい）のデータは、あまり信用できない。縁辺部では1画素内でも入射角や観測角が大きく変化している。しかし、その変化分を積分するようにはできていないからである。今後は、月の拡大撮影の際も十分な補正ができるよう、計算精度を上げていきたい。また、較正サイトはLunarMapで特定する事ができるが、月の秤動量の入力精度によっては、画素を誤認する可能性もある。フィルター画像が1画素ずれたとしても、結果はそれほど変わらないが、較正サイトの位置がずれると、場合によっては反射率が何割も変化してしまう。そこで、較正サイトの反射率情報と共に、較正サイトの望遠鏡画像をあわせて提供する事が重要と思われる。また、1画素

の較正サイトに頼らず、大きなクレータを構成する複数画素全体の輝度プロファイルで較正するなどの工夫も今後必要となろう。

6. 本構想の今後

本研究の真の目的は、研究のすそ野を広げる事にあるので、今後アマチュア天文家にどれだけの情報を提供できるかが、成功の鍵となる。また、我々よりも遥かに優れた機材と技術を持つ多数のアマチュア天文家の観測技術や観測データをいかに取り入れるかも重要である。本研究で作成した「LunarFilter」、「LunarMap」、「FeTi」等のソフトウェアや、較正サイトの情報、画像処理のノウハウ等は、<http://rimrpost.rimr.akita-u.ac.jp/~ksaiki/luna.html>にて公開し、補正・較正法や、画像演算法を漸次更新し、新たなツールを提供していく予定である。また、当サイトを月面分光観測に関心のあるアマチュア天文家の情報交換の場へと発展させたいと考えている。

今後、SELENE計画の進行により、新しい地質区分解析法、標準較正サイト、補正方法等が開発されていくであろう。その研究成果を可能な限り天体望遠鏡画像用補正フィルターや較正・解析技術に適用し、望遠鏡画像処理の精度を上げるだけでなく、探査データ処理のよい入門となるような態勢を整えたいと考えている。そうすれば、将来SELENEの分光データが公開された際に、天体望遠鏡による月分光地質学に親しんだ好奇心旺盛な学生や研究者の多くが、衛星データを利用した月地質学にステップアップしてくれるのではないかと期待している。また、アマチュア天文家からのユニークなデータにも期待している。月の地域地質を詳細に検討するには月は広大過ぎるし、バンド選択についても、地域地域での岩相細分化に最適なバンドは現在衛星に採用されているバンド組

み合わせ以外にも在りうる。アマチュアが月地質学に貢献できる可能性は高いのである。多くの目で多くの地域を多くのアイデアで観測する事が月地質学にとっては大切である。

7. 謝辞

株式会社アストローツには、ステライメージ2の画像処理アルゴリズムの情報をいただいた事を感謝します。また株式会社ムトーエンタープライズには、MTFファイルフォーマットの情報を提供いただいた事を感謝します。有意義な査読意見をいただきました出村裕英氏に感謝します。本研究を進めるにあたり、文部省科学研究費補助金（奨励研究A, 10740248, 佐伯和人）を使用しました。

参考文献

- [1] Lucey P.G. et al., 1998: J.Geophys.Res.,103, 3679-3699.
- [2] Piters,C.M.et al.,1995, Clementine Activities at Brown University.
<http://www.planetary.brown.edu/clementine/>
- [3] Yokota, Y. et al., 1998: 32nd COSPAR sci. assem..
- [4] Otake, H. and Hirata, N.,1999: Proc. ISAS Lunar Planet. Symp., 32, 25-28.
- [5] A.ルクール:月面ウォッチング, 地人書館, p235.