

論文題目

月面分光撮像システムの構築
および
画像解析による月面表層物質の組成分布調査

宮城教育大学教育学部生涯教育総合課程自然環境専攻

D0928 松下 真人

平成 14 年 02 月 08 日

Abstract

地球唯一の衛星である月は、地球上からの望遠鏡観測、軌道上からの観測、さらに旧ソ連の Luna 計画(1959~76) やアメリカの Apollo 計画(1967~72)における月面表層の岩石試料採取など、さまざまな方法での探査が行われてきた。近年では、1994 年の Clementine 探査機、1998 年の Lunar Prospector 探査機が打ち上げられ、月面表層環境が明らかになりつつある。

月の岩石は、高地の斜長岩と海の玄武岩に大別される。斜長岩は、カルシウムやアルミニウムに富む岩石である。一方、海の玄武岩はマグネシウムに富む輝石やカンラン石を含み、チタンの含有量により high-Ti 玄武岩 (TiO_2 含有量 9wt.%以上)、low-Ti 玄武岩 (同 1.5-9wt.%), very low-Ti 玄武岩 (同 1.5wt.%以下) に分類できる。

本研究では、月面表層の反射率の違いから海の組成分布を明らかにし、溶岩組成の違いと分布の相関を調査することを目的として、地上の望遠鏡と冷却 CCD カメラ、さらに 415, 750, 950 nmのそれぞれの波長帯を透過する 3つのバンドパスフィルターを用いて分光撮像を行った。それぞれの画像に対して、Apollo が持ちかえったサンプルの反射率と FeO および TiO_2 含有量との関係から、月面反射率と表層構成物質の組成との相関を用いて、月面表層の FeO ならびに TiO_2 の分布を推定し、Apollo が持ち帰った月面サンプルとの比較から月面全域についての FeO・ TiO_2 の含有量を定量化した。

《結果》

月面表側についての FeO および TiO_2 マップを作成し、雨の海・晴れの海の溶岩流を TiO_2 含有量の違いにより high-Ti 玄武岩 (TiO_2 : 9wt.%以上)、low-Ti 玄武岩 (TiO_2 : 1.5-9wt.%), very low-Ti 玄武岩 (TiO_2 : 1.5wt.%以下) に細分できた。

雨の海の FeO 含有量は 12~23wt.%で、 TiO_2 含有量は北部で 2~5wt.%であるが、FeO も 12~13wt.%と少ないため高地物質、中央北部で 6~9wt.%で主に low-Ti 玄武岩、西部で 12~15wt.%の high-Ti 玄武岩、南-中央-東部にかけて 9~10wt.% の high-Ti 玄武岩、北東部で 9wt.%程度の high-Ti 玄武岩、そして南東部で 6~7wt.%の low-Ti 玄武岩に分類できた。晴れの海は 15~23wt.%の FeO 含有量を示し、 TiO_2 は西部 10~12wt.%、東部で 9wt.%程度の high-Ti 玄武岩、中央部で 4~8wt.%の low-Ti 玄武岩に分類できた。その他の海についても同様の分類が可能である。

FeO 定量値については、Apollo11, 15, 17 着陸地点のサンプル分析結果と同等の結果を得た。 TiO_2 定量値は Apollo・Luna 着陸地点のサンプル分析結果との誤差が大きく、さらなる精度の向上が必要である。

目次

Abstract	1
第1章 はじめに	5
1.1 月の地形と地質	
1.2 溶岩流地形	
1.3 本研究のテーマ	
第2章 分光撮像システムの構築	11
2.1 天体望遠鏡の選択	
2.2 冷却 CCD カメラ	
2.2.1 量子効率	
2.2.2 分光感度	
2.2.3 CCD の冷却	
2.2.4 輝度特性	
2.3 バンドパス・フィルター	
2.4 撮像機器の接続	
第3章 CCD カメラによる撮像	23
3.1 ライトフレームの撮像	
3.2 ダークフレームの撮像	
3.3 フラットフィールドの撮像	
3.4 画像データの取得	
3.4.1 ライトフレーム画像の取得	
3.4.2 フラットフィールド画像の取得	
第4章 画像の補正処理	33
4.1 ダークフレーム補正	
4.2 フラットフィールド補正	
4.3 大気差補正	
4.4 輝度値補正(ヒストグラム・マッチング)	
4.5 幾何補正	
4.6 モザイク処理	
4.7 測光補正	
4.8 標準反射率への変換	

第 5 章	バンド間演算	57
5.1	FeO マップの作成	
5.2	TiO ₂ マップの作成	
第 6 章	結果および考察	65
6.1	Apollo11 着陸地点 (静かの海)	
6.2	Apollo12 着陸地点 (嵐の大洋)	
6.3	Apollo14 着陸地点	
6.4	Apollo15 着陸地点 (雨の海)	
6.5	Apollo17 着陸地点 (晴れの海)	
6.6	Luna16, 20, 24 着陸地点 (豊かの海, 危難の海)	
6.7	評価	
第 7 章	まとめ	73
7.1	結論	
7.2	今後の課題	

参考文献

謝辞

付録

第1章 はじめに

1.1 月の地形と地質

月は、赤道半径が **1738 km**、質量 7.352×10^{22} kgで、地球から平均 **38万4400 km**の距離を公転している地球唯一の衛星である。

月には、明るい高地と暗い海の **2**つの代表的な地質単位がある（図 **1.1**, **1.2**）。高地は地形的に海よりも高度が高く、隕石衝突によってできたクレーターが密集する、アルベド（反射能）の高い明るい地域である。高地はカルシウム、アルミニウムに富む斜長岩から構成されており、大部分は隕石の衝突により破碎混合された角礫岩の組織を示す。

これに対し、海は高地と比較して低く平坦で、アルベドが低く、クレーターの数も少ない。ほとんどの海は円形状で、月地殻が形成された直後、巨大天体が衝突し形成された盆地内に溶岩が流出して形成されたと考えられている。衝突の影響は月全面に及んだものと思われ、月高地の堆積物もこのような巨大な衝突クレーターの放出堆積物と考えられている。溶岩は鉄およびマグネシウムに富む粘性の低い玄武岩であるが、地域や噴出年代によりチタンの含有量の異なるいくつかの溶岩流が知られている。

月表層を形成するもっとも新しい地質単位はレゴリスとよばれる表土で、隕石鋳物の破碎片とガラスおよび溶結土とよばれるものからなる。真空に近い宇宙環境に直接さらされているため、宇宙線や太陽風の影響で風化が進んでいる。



図 1.1 月の海と高地【2001年11月02日撮像】

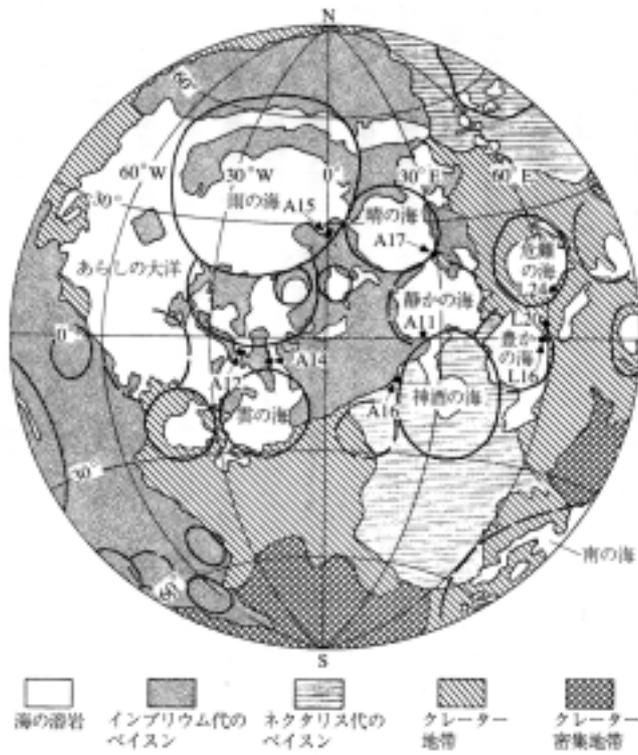


図 1.2 月面の地質区分【小森, 1995】

1.2 溶岩流地形

クレーターとともに重要な地形は海の溶岩流地形である。月の溶岩は非常に流動性に富み、その容積と流れの規模は非常に大きく、爆発性の火山地形を示さないという特徴がある。月の溶岩の流出形態とその堆積物は、地球上の玄武岩質溶岩流に類似している【武田, 1984】。

月の海の溶岩流は、大きな多重リングをもつ円形の盆地の部分や、多重リングの間のくぼみを満たすもの、不規則な形の低地に流出したもの、高地のわずかにくぼみやクレーターの底を満たしたものなどがある。月面探査、および月面サンプルの解析により月面上の各地域での溶岩流の広がりや厚さ、岩石タイプ、重なるの順序が決定されている(図 1.3)。

図 1.3 のように、**Apollo11** と **Apollo17** の玄武岩で代表されるタイプのチタンに富む初期の溶岩は、インブリア紀 (35~38 億年前) に表側の東部の広い地域に流出したと考えられている。中期のよりチタンに乏しい溶岩は、エラステネス紀 (10~35 億年前) の初期 (30~35 億年前) に月の広範な地域に流出し、最後に第 2 にチタンに富む溶岩は、25~30 億年前のエラステネス紀に雨の海と西部の海の一部に流出したと考えられている。地球のものとは比べて広大な溶岩流は、月の融解溶岩流の粘性の低さと噴出速度に関連した、流出口での高い流出圧力によるものと解釈されている【武田, 1984】。

1.3 本研究のテーマ

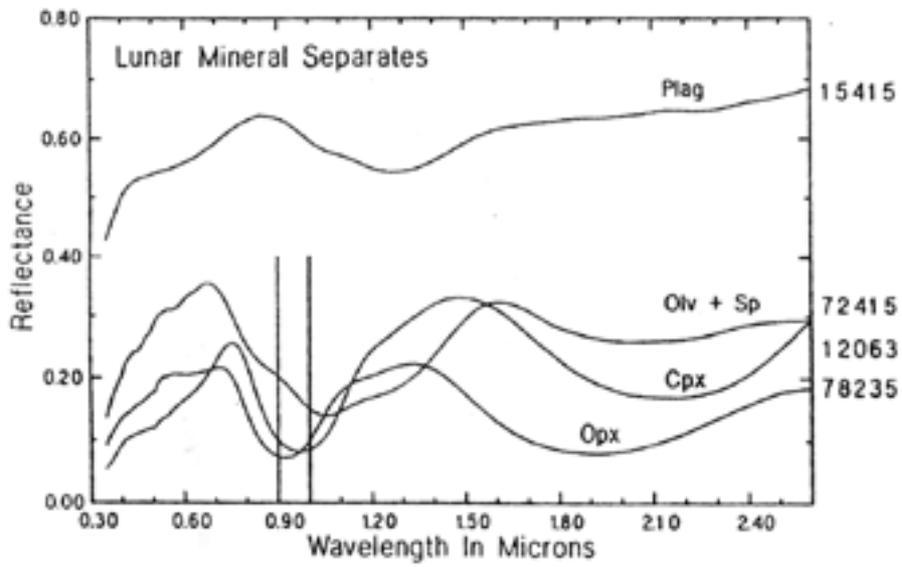
本研究では、地上からの月面分光観測により、海の玄武岩の組成調査を行い、組成ごとの海の分布を明らかにし、噴出溶岩の組成の違いと海の溶岩分布の相関を調査することを目的としている。

月の岩石は、高地の斜長岩と海の玄武岩に分類される。海の玄武岩は鉄・マグネシウムに富む輝石やカンラン石を含み、チタンの含有量により分類される。つまり、岩石中の $\text{TiO}_2 \cdot \text{FeO}$ の含有量を求めることができれば、これらの岩石の分布を知ることができる。

図 1.4 は月面サンプル中に含まれる鉱物の反射率で、**415 nm**、**950 nm**に反射率の低下がみられるが、これらは Ti^{4+} 、 Fe^{2+} のスペクトル吸収によるものである。このように、玄武岩に含まれる Ti^{4+} および Fe^{2+} は、**415 nm**、**950 nm**の波長付近にそれぞれ吸収帯をもつことが知られている。図 1.5 は月面サンプルの反射率である。**15401** は Apollo-15 が採取した FeO に富むサンプルで、**950 nm**付近に Fe^{2+} による反射率の低下がみられる。**950 nm**の反射率 (**R950**) と比較して **750 nm**での反射率 (**R750**) が高いため、**R750/R950** の値は大きくなる。また、**74001** は Apollo-17 が持ちかえった TiO_2 に富むサンプルで、**415 nm**の反射率 (**R415**) が低下している。しかし、**15401** と比較して **R750** も大きく低下していることから、**R415/R750** の値は、**15401** よりも **74001** で大きくなる【Heiken et al., 1991】。

これら、**415 nm**、**950 nm**の吸収帯に対応するバンドパスフィルターに加え、吸収帯のない **750 nm**のバンドパスフィルターの、合わせて **3** つのフィルターを用いて分光撮像を行う。撮像画像に補正・変換処理を施し、これらの画像を用いて、最終的な各波長における反射率 (**R415**、**R750**、**R950**) に、**R415/R750**、**R750/R950**、**R750/R415** の演算処理を行うと、**R415/R750** では Ti^{4+} に富むほど、**R750/R950** では Fe^{2+} に富むほど明るくなり、月面表層の TiO_2 および FeO の分布を推定することができる【Lucy et al., 1997】。さらに、Apollo が持ち帰った月面サンプル中の TiO_2 、 FeO の含有量と各波長帯における反射率との相関関係から、月面全域についての TiO_2 、 FeO 含有量を定量化することが可能である。

そこで本研究では、海の溶岩組成とその分布を明らかにするために、月面分光撮像を実施した。



Plag : 斜長石 (Plagioclase Feldspar)
 Oliv+Sp : スピネルを含むカンラン石 (Olivin with Spinel)
 Cpx : 単斜輝石 (Clinopyroxene)
 Opx : 斜方輝石 (Orthopyroxene)

図 1.4 月面サンプル中の鉱物の反射率【Pieters et al., 1993】

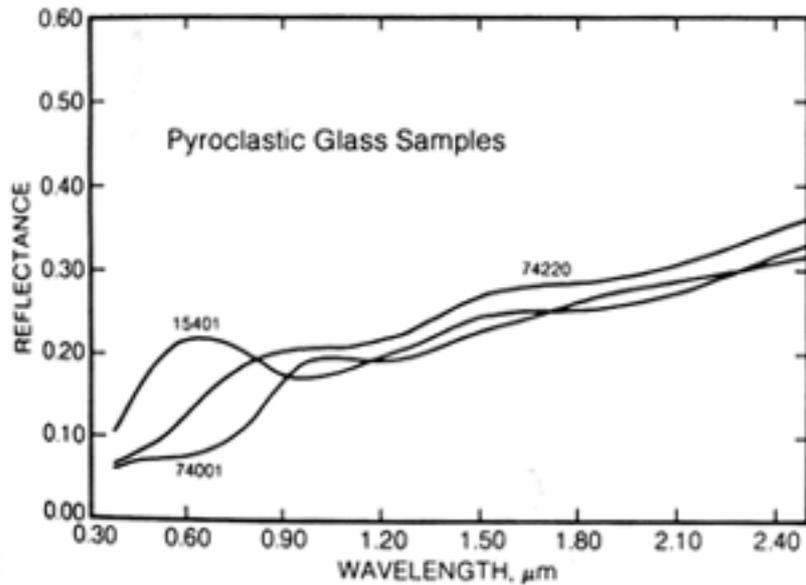


図 1.5 月面サンプルの反射率【Heiken, 1991】

第 2 章 分光撮像システムの構築

2.1 天体望遠鏡の選択

冷却 CCD カメラの受光面積はとても小さいため、広写野にわたり収差が補正された優秀な光学系を持つ望遠鏡でなくても、十分に使うことができる。視野中心、光軸付近の像が良好であれば、小さな CCD 受光面内で望遠鏡による収差は無視できる。また、望遠鏡の口径により観測できる空間分解能に差が生じる。

本研究では口径 102 mm, 焦点距離 820 mm の屈折望遠鏡 **Takahashi FS-102** を使用した。

2.2 冷却 CCD カメラ

CCD (Charge Coupled Device) は「電荷結合素子」と呼ばれ、多数の素子が並び、受けた光を電子に置き換え、その強度に比例した数の電子を蓄えることができる。一般的なホームビデオカメラにも CCD が使われており、例えば 1/2 インチサイズの CCD チップ (6.4×4.8 mm) の小さな受光面でも、40 万個ものピクセルに分割されている。

本研究で使用した冷却 CCD カメラは、**Santa Barbara Instrument Group (SBIG)** 社の 2 次元 CCD カメラ、**ST-7E** である。CCD カメラの仕様を以下に示す。

CCD チップ……………**Kodak 社 KAF-0401E**

CCD サイズ……………**6.885×4.59 mm**

ピクセル数……………**765×510pixels** (約 39 万画素)

ピクセルサイズ……………**9×9 μm**

Takahashi FS-102 に **ST-7E** を接続した場合、**CCD1** ピクセルあたり **2.3** 秒角 (月面中心付近の距離に換算して約 **4.4 km**) の分解能をもつことになる。

2.2.1 量子効率

CCD の感度を示すものに量子効率 (Quantum Efficiency) がある。量子効率とは、単位時間内に受光部に当たる光子の数 (N_p) と、それらの光子によって実際に反応を起こし、輝度情報のひとつとして変換され蓄えられる自由電子の数 (N_e) との割合である。例えば、1つの画素において、1秒間に光子が100個入射すると仮定する。これら100個の光子すべてが、光電効果によって100個の電子に変換され蓄積する場合は、量子効率を η として、

$$\begin{aligned}\eta &= N_e / N_p \\ &= 100/100 \\ &= 1.0\end{aligned}\quad (\text{式 2.1})$$

となる。

また、波長により光子エネルギーの強度が変化するので、量子効率 η は波長の関数である。光子1つのエネルギーを E 、波長を λ [nm]、光速度を $c=3 \times 10^8$ [m/s]、 $h=6.6 \times 10^{-34}$ [J·s] をプランク定数として、

$$E = hc/\lambda \quad [J] \quad (\text{式 2.2})$$

となるので、1秒間に N_p 個の光子が入射し、そのエネルギーを W [W (ワット)] とすると、

$$N_p = W/E = W \times (\lambda/hc) \quad [s^{-1}] \quad (\text{式 2.3})$$

となり、蓄積する電子による光電流を I 、1秒間に流れるキャリア数を N_c とすると、

$$I = eN_c \quad (\text{式 2.4})$$

の関係から、量子効率は、

$$\eta = N_c / N_p = 1240 \times [I / (W \cdot \lambda)] \quad (\text{式 2.5})$$

で表すことができる【福島, 1996】。

ST-7E の CCD チップである、KAF-0401E の量子効率を図 2.1 に示す。全波長中の最大量子効率は 600 nm 付近で、60% を超える。写真フィルムと比較して、感光乳剤の量子効率が 1% にも満たないことから【福島, 1996】、CCD は効率がよいと考えられる。



図2.1 KAF-0401Eの量子効率 [ST-7Eマニュアル]

2.2.2 分光感度

CCD チップは波長によって感度が異なる。この性質はスペクトル特性あるいは分光感度 (**Responsivity**) と呼ばれ、これを R とすると、量子効率の式において、ある波長における I を $[\mu\text{A}]$ 、 W を $[\mu\text{W}]$ の単位で表し、次のように定義されている。

$$R = I/W = \eta \cdot (\lambda/1240) \quad [\mu\text{A}/\mu\text{W}] \quad (\text{式 2.6})$$

式 2.6 および量子効率を用いて求めた **KAF-0401E** の分光感度を図 2.2 に示す。最大分光感度は赤色光波長域の **600~650 nm** 付近にある。さらに近赤外線領域の **1000 nm** を超える波長まで感度をもつ。その反面、短波長側の青色光に対する感度がやや悪い。

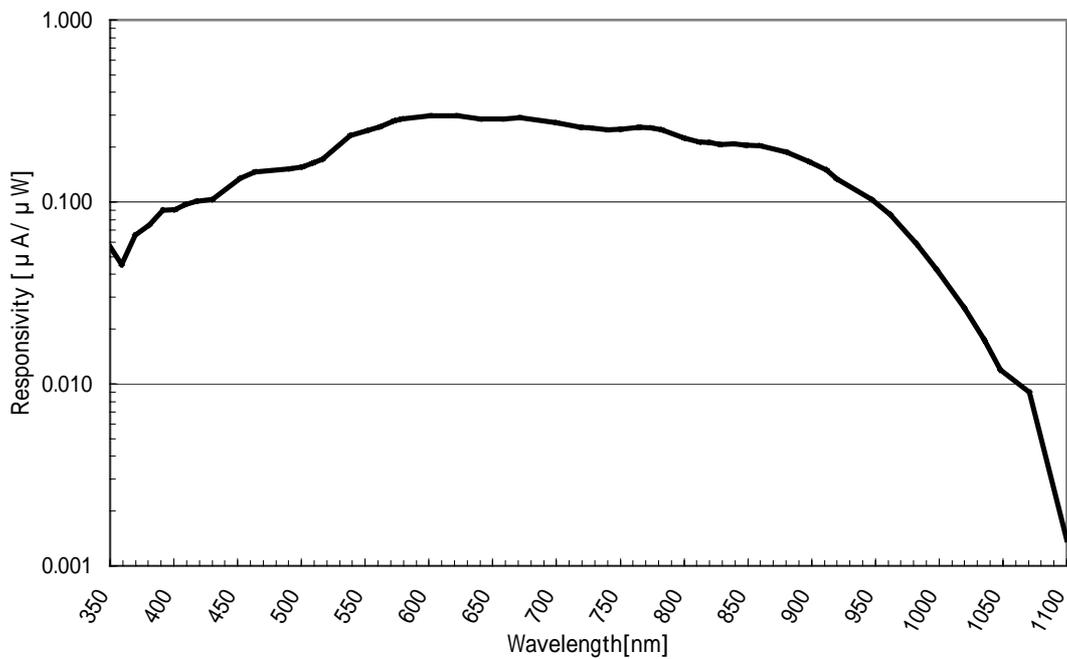


図2.2 KAF-0401Eの分光感度

2.2.3 CCDの冷却

CCDは光が当たらない状態でも、「暗電流」という熱的に発生する電流が生じ、素子ごとにレベルが違う電荷信号が出力され、取得画像の各画素にノイズとして現れる。この暗電流によるノイズを「暗電流ノイズ」といい、露出時間が長くなるほど暗電流ノイズは多く蓄積される。

しかし、CCDは冷却することにより暗電流が減る特性をもち、温度を8~10℃下げると暗電流は約半分になるといわれる【福島, 1996】。ただし、冷却してもノイズが完全になくなるわけではない。「読み出しノイズ」と呼ばれる、電荷転送中や電荷信号転送中の増幅、電子回路で発生した電氣的ノイズは残る。また、露出時間が0のときでも、バックグラウンドのレベルが0とならないように電氣的に出力値を上げる補正を行っている。これを「バイアス」と呼び、ST-7Eでは100 [A/D count] に設定されている。これらのノイズ成分を含めて、光が当たらなくても存在する輝度情報を「ダークノイズ」という。

ST-7Eのダークノイズの露出時間と冷却温度への依存性を調査するため、CCD受光面に光が入らないようにふたをしてダークノイズを測定した。冷却温度と露出時間によるダークノイズのレベル特性を図2.3に示す。横軸を露出時間、縦軸をダークノイズレベルの平均値とし、両対数グラフで表示している。図2.3から、CCDの冷却温度が低くなるほどダークノイズが減少しているのは明らかである。右端に1000秒露出時のダークノイズレベル [A/D count] を示したが、温度を15℃下げることによって、ダークノイズレベルは約1/4となっていることがわかる。また、どの温度においても、露出時間の0.11~2.00秒まではノイズレベルの変化がほとんどなく一定で、それよりも露出時間が増えると次第にノイズレベルが上昇している。さらに、露出2.00秒以下のデータから、冷却温度を下げるにつれてノイズレベルが100 [A/D count] に近づいていき、これがバイアスとなっていることを確認することができる。

ST-7Eの冷却方法はペルチェ素子(電流を流すことによって一方の面は温度が下がり、反対側は温度が上がるといった特性をもつ半導体)を用いた2段冷却構造で、外気温-30℃まで冷やすことができる。ペルチェ素子は冷やす反作用で熱が出るので、この熱をカメラの外部に逃がす必要がある。ST-7Eの背面には冷却ファンが、側面には放熱フィンがあり、熱を放出している。さらに、外部からビニールパイプを通じて冷却水を循環させ、安定した冷却が可能な水冷式を併用することもできる。

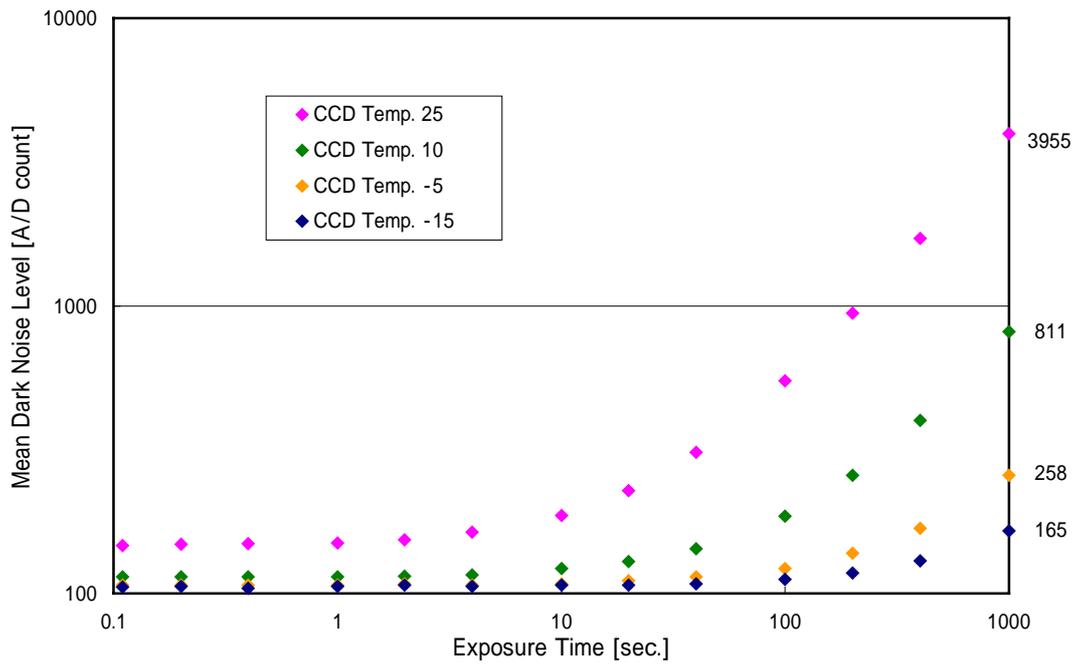


図2.3 ST-7Eの冷却温度と露出時間によるダークノイズのレベル特性

2.2.4 輝度特性

冷却 CCD カメラを用いて分光撮像を行う場合、露出時間（入射光量）と輝度値の関係を理解しておかなければならない。特に、入射光量と輝度値（A/D count 値）が線型である特性を「リニアリティー（線型性）」という。この特性は冷却 CCD カメラによって異なるため、使用するカメラの輝度特性をあらかじめ測定し、リニアリティーを把握する必要がある。

冷却温度を -15°C に設定した ST-7E を望遠鏡に接続し、ライトで照らしたスクリーンを撮像することで、輝度特性を測定した。結果を図 2.4 に示す。光量の多い場合 (a) と少ない場合 (b) について測定し、(a) では 0.11~1.50 秒、(b) では 0.11~30.00 秒の時間範囲で、y 切片（バイアス値）を 100 [A/D count] として近似直線を表示した。グラフから、どちらの場合も輝度値が 40000 [A/D count] を超えると線形性が保たれないことがわかる。このような部分は、精度の高い測光を目的とする本研究において誤差の原因となるため、実際の撮像の際には、最大輝度値が 40000 [A/D count] を超えないように露出時間を設定した。

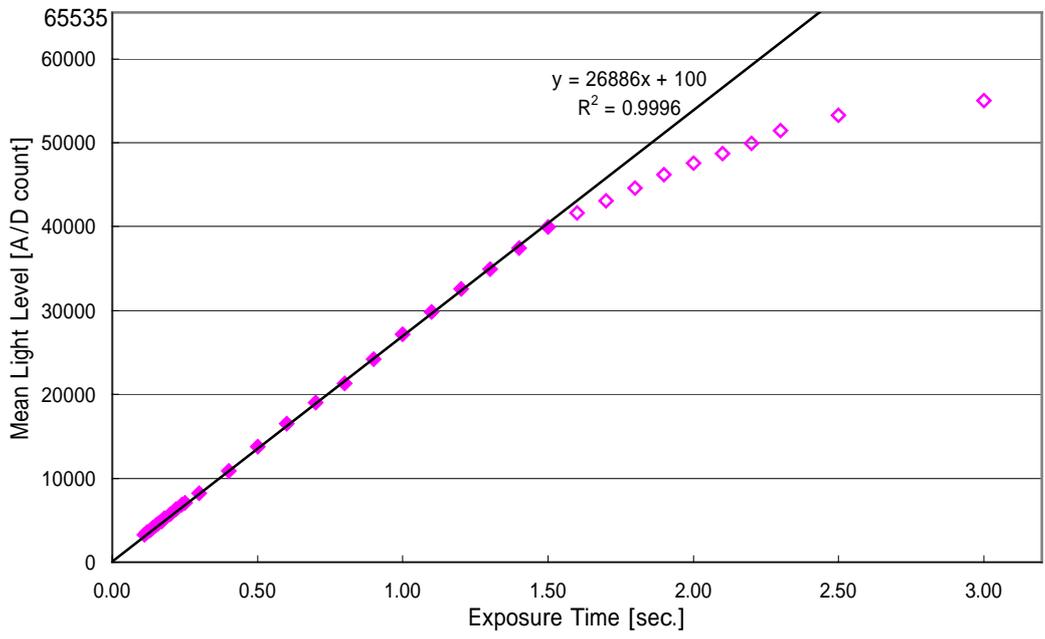


図2.4(a) 輝度特性: 光量が多い場合

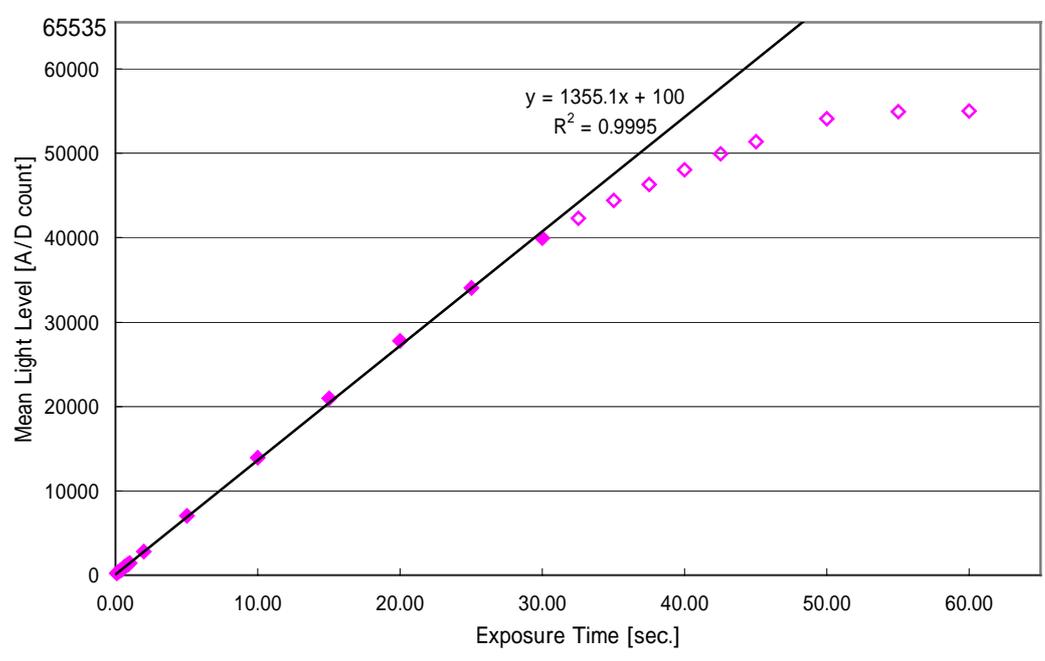


図2.4(b) 輝度特性: 光量が少ない場合

2.3 バンドパス・フィルター

本研究で使用したバンドパス・フィルターは、(株) Kenko 製の **BP-415**, **BP-750**, **BP-950** の 3 つのフィルターで、それぞれの中心波長の設計値は **415 nm**, **750 nm**, **950 nm** の波長帯である。

各フィルターの特性を表 2.1 に示す。バンドパス・フィルターは、数nmというごく狭い範囲の波長帯のみを透過するように作製されている。

また、Kenko のフィルター透過率のカタログ値と、確認のために本学千葉研究室所有のマルチ測光システム **MCPD-1000** (以下、**MCPD**) で測定した結果、および宇宙科学研究所所有の **UV-3150** を用いて測定した結果を図 2.5 に示す。実線は Kenko による測定値、破線は MCPD による測定値である。BP-750 については、Kenko の値よりも MCPD の値がわずかに小さい程度であるが、他の 2 つでは明らかに透過率の違いがみられる。BP-415 では、420 nm よりも短い波長で透過率が急激に低下している。BP-950 は、中心波長で透過率の低下がみられ、それよりも長い波長では 2~3 倍の透過率を示している。

これは、MCPD の特性によるものと思われる。フィルターを透過した光は、光ファイバーケーブルを通り MCPD によって測定されるが、光ファイバーは SiO₂ でできているため短波長側では光を吸収し、長波長側では赤外放射が引き起こされ、その影響を測定器がひろってしまったのだろう。

フィルター名	中心波長 (nm)	半値幅 (nm)	最大透過率 (%)
BP-415	414.3	10.4	45.4
BP-750	748.5	11.5	50.8
BP-950	949.5	6.0	84.0

表 2.1 バンドパス・フィルターの特性【(株) Kenko 測定】

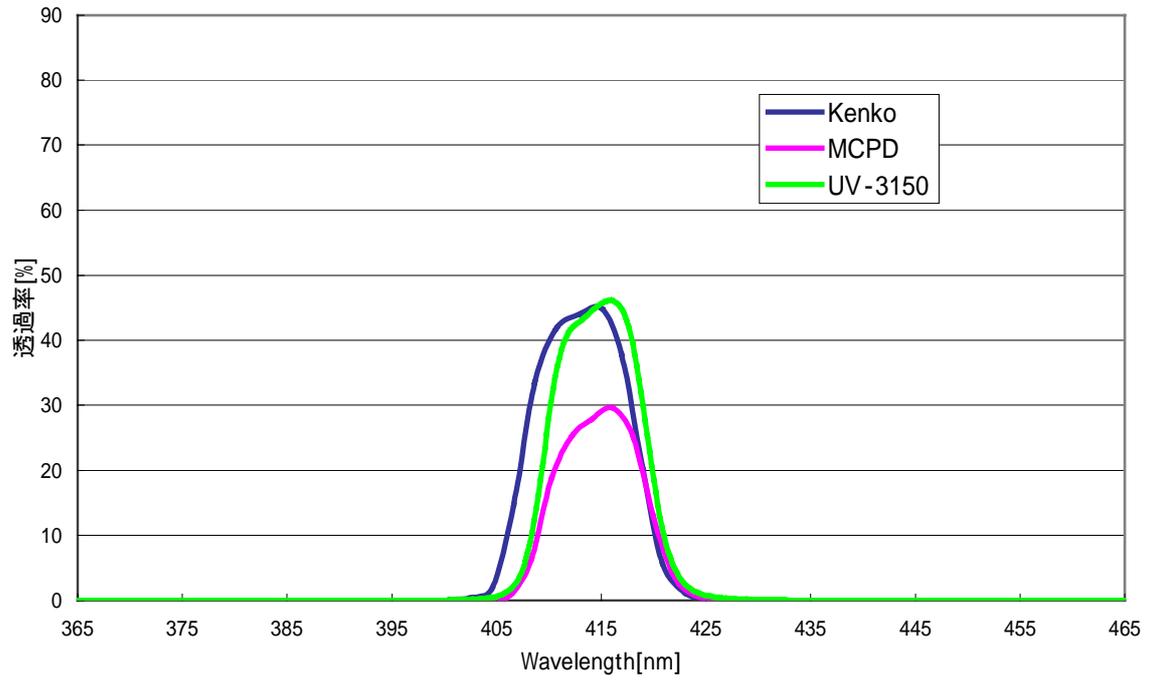


図2.5(a) BP-415の透過率

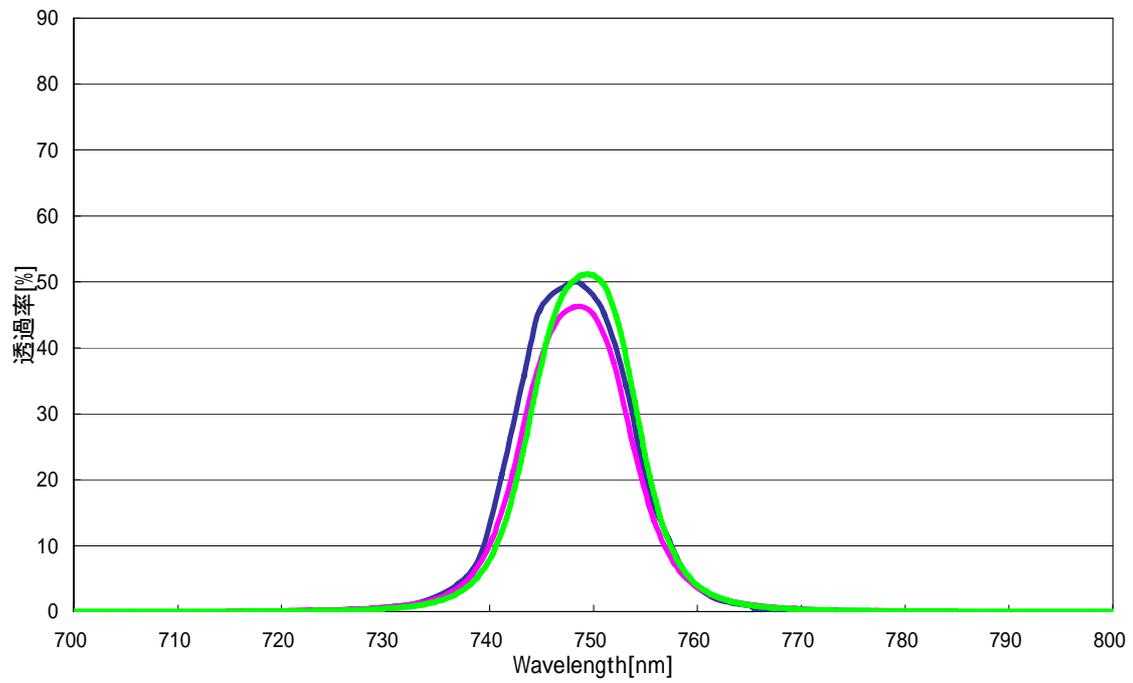


図2.5(b) BP-750の透過率

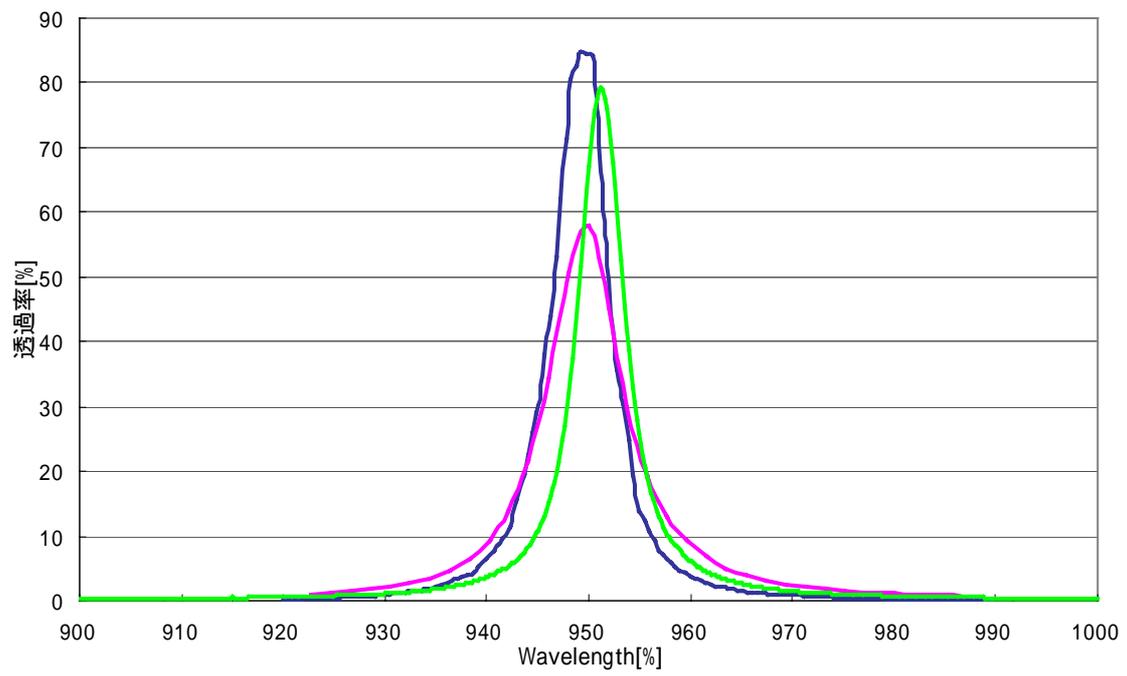


図2.5(c) BP-950の透過率

2.4 撮像機器の接続

本研究で使用した撮像システムは、望遠鏡、フィルターホイール、冷却 CCD カメラ、およびパソコンから構成されており、CCD カメラとパソコンはパラレル・ケーブルで接続している。フィルターホイールには BP-415, BP-750, BP-950 の各フィルターを挿入している。パソコンに搭載されている冷却 CCD カメラ制御ソフト「CCDOPS」【(株)マゼラン 国際光器】により CCD カメラを制御している。また、望遠鏡架台に **Takahashi EM-2s** 赤道儀を使用し恒星時追尾している。

これらの機器を接続し、図 2.6 に示す「月面分光撮像システム」を構築した。

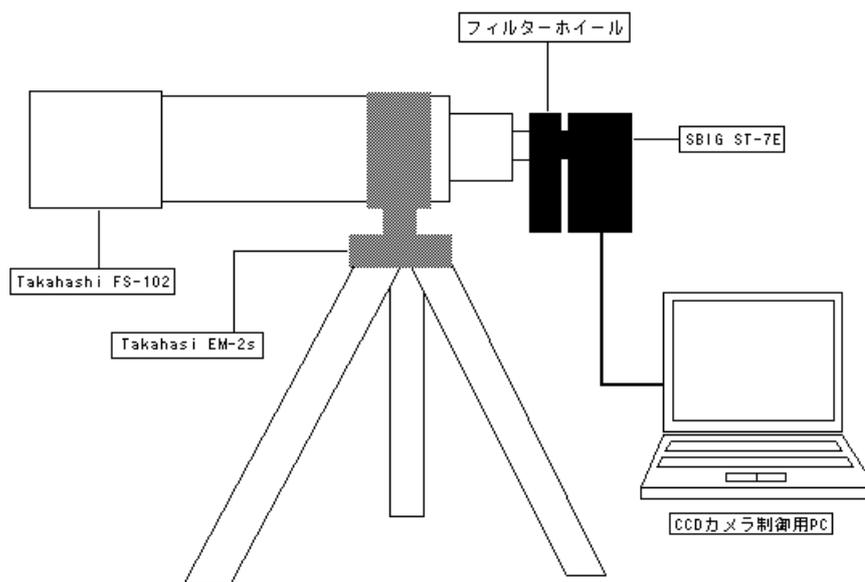


図 2.6 撮像機器の接続図

第3章 CCDカメラによる撮像

3.1 ライトフレームの撮像

天体を撮像した画像を「ライトフレーム」という。

月面を撮像する場合、一度に月全体の画像を得ることはできず、4~5枚の画像をモザイクすることになる。まず露出時間を決めなければならないが、高精度の測光を行いたい場合は、2.2.4で述べたように最大輝度値が飽和してはならず、CCDの輝度特性のリニアリティーを考慮して、最大輝度値は直線範囲内の40000 [A/D count] 以下に抑えるように露出時間を設定する。そこで、月面上でもっとも反射率の高い明るい地域であるティコクレーターを撮像して露出時間を決定し、全ての画像を同じ露出時間で撮像することにした。

3.2 ダークフレームの撮像

ダークノイズなどのノイズ成分だけを撮像した画像を「ダークフレーム」といい、ノイズ成分を補正して取り除くために重要である。ノイズ成分には、暗電流、バイアス、読み出しノイズが含まれており、暗電流は冷却温度と露出時間によって変動し、バイアスと読み出しノイズは冷却温度の違いにより変化する。そのため、ライトフレーム撮像時と同じ冷却温度、同じ露出時間で、CCDに全く光が当たらないようにして撮像しなければ、完全な補正を行うことはできない。ライトフレーム撮像の直前、あるいは直後に撮像するのが望ましい。本研究では、ST-7Eの制御ソフトである「CCDOPS」が、ライトフレーム撮像直前にダークフレームを撮像し、ダークフレームを引いた画像を自動的に出力する、ダークフレーム減算機能を備えているため、この機能を活用した。

3.3 フラットフィールドの撮像

CCD 各ピクセルの感度ムラを補正するための画像が「フラットフィールド」である。どのような CCD でも、各ピクセルの感度ムラがあり、フラットフィールドによる補正は、ダークフレームによる補正とともに必ず必要である。フラットフィールドは、ライトフレームを撮像したときと全く同じ状態（光学系、フォーカス位置、フィルターの有無、CCD の冷却温度が同じ状態）で、望遠鏡の筒先から均一な光を入射して撮像する。ただし、露出時間は同じである必要はない。最大輝度値が飽和せず、輝度特性の直線性が良好な範囲内であればよく、目安としてフルレベルの $1/3 \sim 1/2$ (20000~30000 [A/D count]) になるように露出時間を設定する。この画像には、感度ムラのほかに、光学系による周辺減光、フィルターに付着しているゴミの像、ゴースト、フレアなどの光量ムラの情報も含まれている。測光をする場合、ムラがあるということはピクセルごとに輝度値の増減があることになるので、そのままでは高精度の結果は得られない。フラットフィールド自体もダークノイズの補正が必要なので、同じ露出時間、同じ冷却温度でダークフレームを撮像しておき、フラットフィールド補正には、ノイズ補正済みのフラットフィールドを使用する。

フラットフィールドの撮像には、2つの方法がある。1つは望遠鏡の筒先にディフューザー（光拡散板）をのせ、均一な光源である空に向けて撮像する方法である。もう1つは、望遠鏡の先端から数 m 離れたところに OHP 用の白色スクリーンを設置し、表面が均一な輝度になるように 2ヶ所以上から照明して、そこに望遠鏡を向けて撮像する方法である。

本研究では、前者を採用し、半透明のゴミ袋を 3枚重ねたものをディフューザーとして撮像した。

3.4 画像データの取得

2001年11月02日(月齢16.7)に撮像した画像を以下に示す. すべての画像は, CCDカメラの冷却温度を-20.00℃に設定して撮像した, ダークフレーム減算後の画像である.

ライトフレーム画像は全て, 輝度0~40000 [A/D count] を8bit=256階調にレベル補正して表示している. フラットフィールド画像は, 輝度のムラがわかるように任意の値にレベル補正を行い, 256階調で表示している.

3.4.1 ライトフレーム画像の取得

BP-415を挿入し, 露出時間は1.50秒でティコクレーターを含む28.5×19分角の月面を撮像した際のヒストグラムを図3.1に示す. ヒストグラムから, 全ピクセル数の99%が38888 [A/D count] 以内にあり, 輝度特性のリニアリティの範囲内におさまっていることがわかる. 同様に, 他の2つのフィルターについても露出時間を決定した(表3.1). 表3.1に示す露出時間で撮像した各フィルターの月面画像を図3.2, 3.3, 3.4に示す.

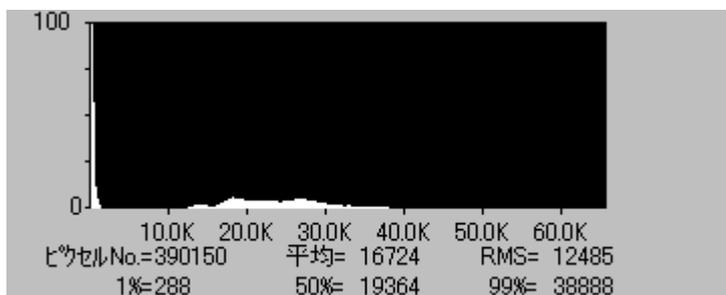


図 3.1 ティコクレーター撮像時のヒストグラム

	BP-415	BP-750	BP-950
露出時間 (sec)	1.50	0.20	2.00
最大輝度値 (A/D count)	38888	34919	30566
冷却温度 (°C)	-20		

表 3.1 2001年11月02日の撮像条件

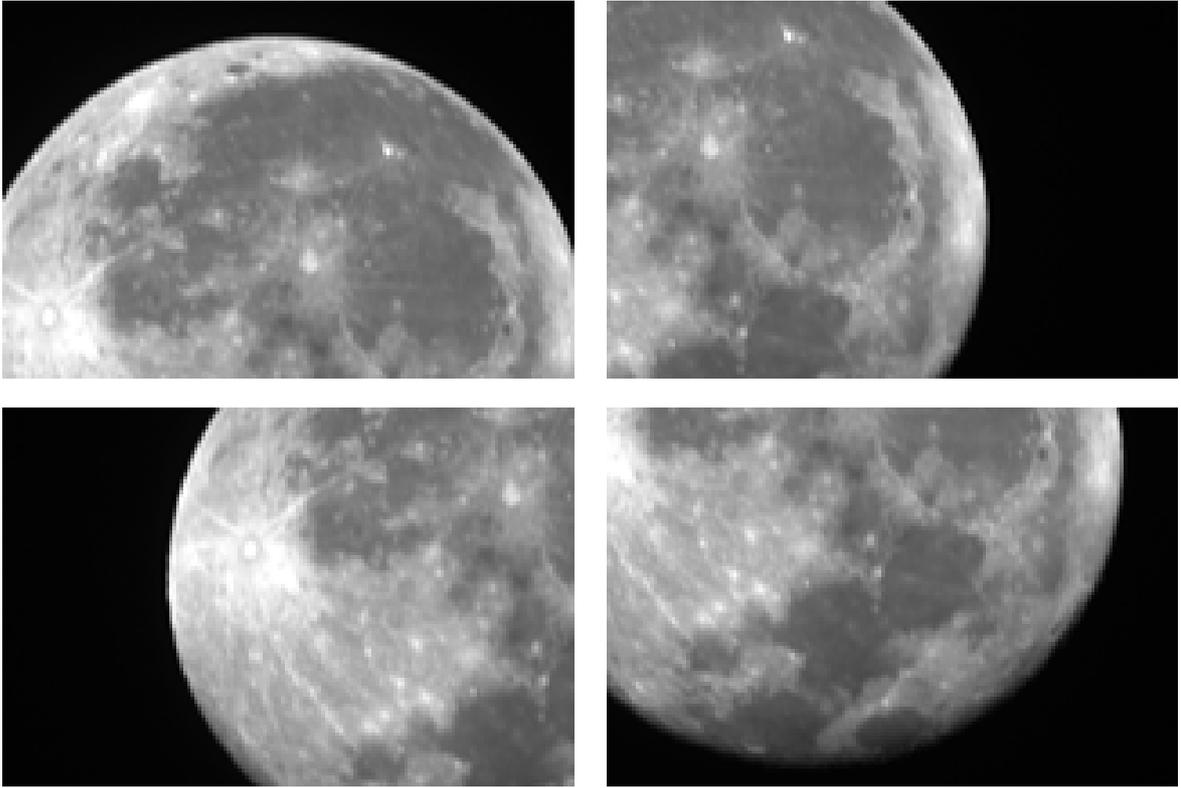


図 3.2 BP-415 のライトフレーム画像



図 3.3 BP-750 のライトフレーム画像



図 3.4 BP-950 のライトフレーム画像

3.4.2 フラットフィールド画像の取得

ライトフレーム撮像の翌日、2001年11月03日の朝に、ライトフレーム撮像時と全く同じ状態で、ディフューザーを取り付けた望遠鏡を天頂方向に向けて、それぞれのフィルターでフラットフィールドを撮像した。フラットフィールド画像(図 3.5, 3.7, 3.9)と、そのヒストグラム(図 3.6, 3.8, 3.10)を示す。

フラットフィールド画像の右上にみられる大きな影は、CCDチップ上のゴミによるもので、光が遮られたために極端に輝度値が低くなっている部分である。本研究で使用したシステムでは、画像の中央左上でもっとも輝度が高く、そこを中心として周辺減光のパターンもみられる。また、右下に円形のムラがあるが、これは明るい光が入射したとき、光学系のレンズ面、あるいはフィルター面で反射してできたゴーストである。

このフラットフィールド画像の評価に **Background** および **Range** を用いた。本研究では、ヒストグラムに表示される 1%値を **Background**、99%値 - 1%値を **Range** とし、

$$(Range/Background) \times 100 \quad [\%]$$

で評価を行った。CCDの感度差(感度ムラ)は理想的には数%以内であるが、ヒストグラムを見ると、30~50%ものムラがある。この原因として考えられるのは、光学系に屈折望遠鏡を使用したことがあげられる。屈折望遠鏡は周辺減光の割合が大きくなる特性をもち、今回撮像したフラットフィールドの画像中心部と画像右端では、BP-415で約25%、BP-750で約12%、BP-950で約16%の周辺減光がみられた。しかし、周辺減光だけで50%のムラにはならない。もっとも大きな影響を与えているのは、CCDチップ上のゴミである。ゴミの部分の輝度値は、画像の最大輝度値の1/2程度であるため、ヒストグラムにみるような大きなムラが発生してしまった。



図 3.5 BP-415 のフラットフィールド画像

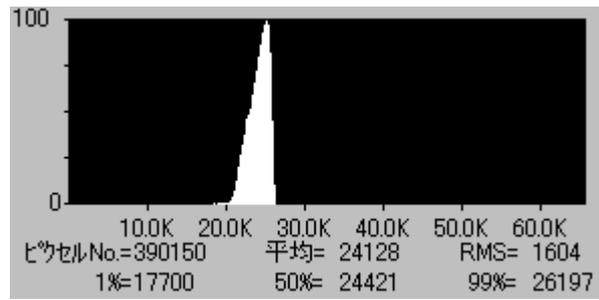


図 3.6 BP-415 フラットフィールド画像のヒストグラム



図 3.7 BP-750 のフラットフィールド画像

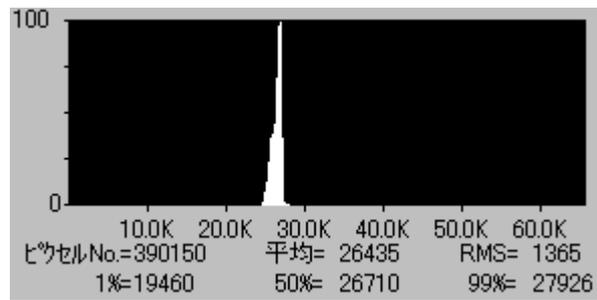


図 3.8 BP-750 フラットフィールド画像のヒストグラム



図 3.9 BP-950 のフラットフィールド画像

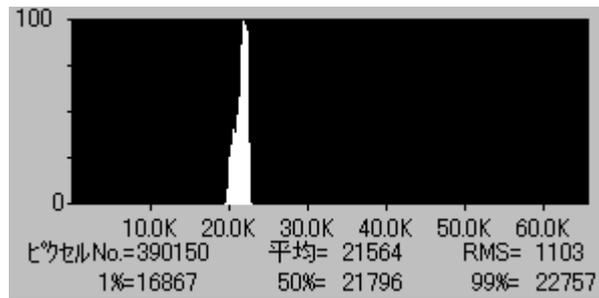


図 3.10 BP-950 フラットフィールド画像のヒストグラム

第4章 画像の補正処理

4.1 ダークフレーム補正

ライトフレームには撮像した天体の輝度情報に加え、ダークノイズが含まれている。ライトフレームからダークフレームを減算して、これらのノイズ成分を取り除く必要がある。

CCDOPS では輝度値を正の整数として扱うため、画像演算後の値が負になると **0 [A/D count]** に設定される。これを避けるため、バイアスとして **100 [A/D count]** の値が上乘せされているが、ダークフレームにも同じバイアスが存在している。そこで、ライトフレームからダークフレームを減算し負の値をとる場合、**0 [A/D count]** に変換されることを避けるために、CCDOPS のダークフレーム補正においては、全てのピクセル値に **100 [A/D count]** を加算してからダークフレームの減算処理を施している。すなわち、ダークフレーム補正画像を $G(x,y)$ 、ライトフレームを $I(x,y)$ 、ダークフレームを $D(x,y)$ とすると、以下の式で表される。

$$G(x,y) = [I(x,y) + 100] - D(x,y) \quad (\text{式 4.1})$$

このことは、同じ画像を単に減算処理すると、全てのピクセル値は **0 [A/D count]** になるが、CCDOPS を用いてダークフレーム補正を施すと全て **100 [A/D count]** となることから確認できる。

4.2 フラットフィールド補正

CCD 各ピクセルの感度ムラや光量ムラを補正するには、ライトフレーム画像とフラットフィールド画像の対応するピクセルの輝度値の比を求めなければならない。したがって、ライトフレーム画像をフラットフィールド画像で除算する。画像の輝度値データは整数なので、除算は値を実数に変換して計算し、後に整数に戻している。フラットフィールド補正画像を $E(x,y)$ 、ダークフレーム補正後のライトフレームを $G_I(x,y)$ 、ダークフレーム補正後のフラットフィールドを $G_F(x,y)$ とすると、

$$E(x,y) = K \cdot \frac{G_I(x,y) - 100}{G_F(x,y) - 100} \quad K : \text{定数} \quad (\text{式 4.2})$$

で表すことができる。ここで、定数 K は一般的に $G_F(x,y) - 100$ の全ピクセル平均輝度値を用いる。

図 4.1, 4.2, 4.3 にフラットフィールド補正前後の画像を示す（フラットフィールド画像は図 3.5, 3.7, 3.9）。それぞれの画像は、輝度 0~40000 [A/D count] を 8bit (256 階調) で表示している。補正前後でもっとも輝度変化が大きいのは画像の右上の部分で、フラットフィールド画像に写ったゴミの影響によって、輝度値が極端に増加してしまった。このような部分は元の輝度情報を失っているため、モザイク (4.6 参照) するときに取り除く必要がある。その他の地域ではフラットフィールド補正の効果を見ることは難しい。そこで、表 4.1 に BP-415 の画像にフラットフィールド補正を施した際の輝度値の変化を示す。この輝度値の変化から、定数 K を算出した。その結果、定数 K はフラットフィールド画像の平均値に近い値を示すが一致しない。現状では、フラットフィールド補正の過程を完全には把握できていない。

また、元の輝度値が極めて低い場合、誤差が大きくなるようだ。よって、輝度値は 40000 [A/D count] を超えない範囲でできるだけ大きくとることが望ましい。



フラットフィールド補正前



フラットフィールド補正後

図 4.1 BP-415 のフラットフィールド補正画像



フラットフィールド補正前

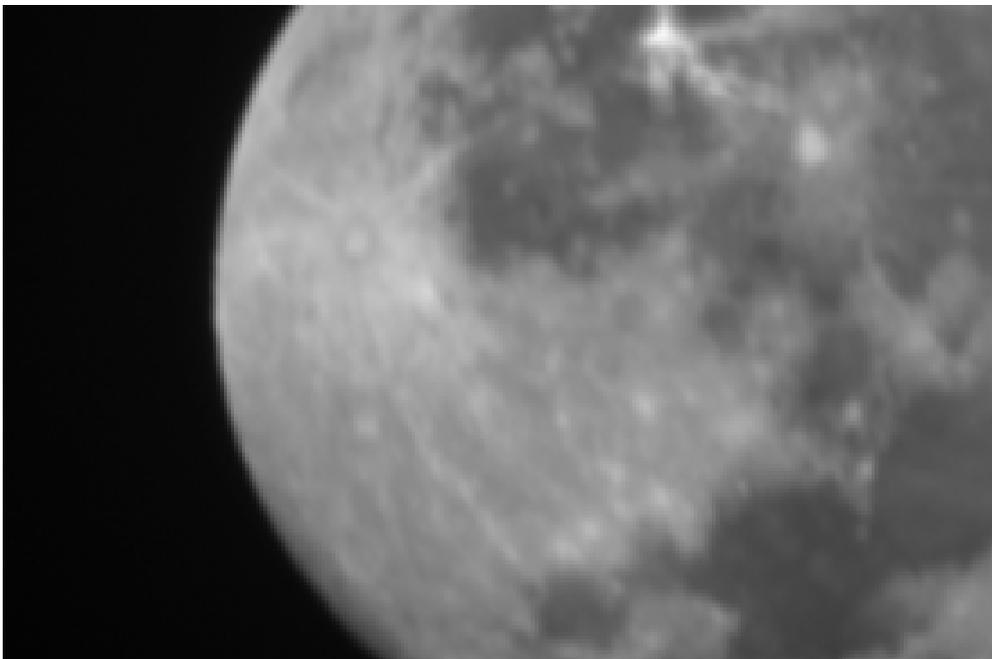


フラットフィールド補正後

図 4.2 BP-750 のフラットフィールド補正画像



フラットフィールド補正前



フラットフィールド補正後

図 4.3 BP-950 のフラットフィールド補正画像

座標 (x, y)	$G_I(x, y) - 100$	$G_F(x, y) - 100$	$E(x, y)$	$\overline{(G_F(x, y) - 100)}$	定数 K
150,100	578	25269	556	24128	24279.48
300,200	38642	25792	36144		24124.95
450,300	26220	24659	25654		24126.78
600,400	24991	23387	25781		24125.96

表 4.1 BP-415 画像におけるフラットフィールド補正効果

$\overline{(G_F(x, y) - 100)}$: フラットフィールド-100 の平均輝度値

4.3 大気差補正

撮像画像中の月以外の真宇宙（バックグラウンド）は、理想的には光量が **0** となるため、輝度値（バックグラウンド値）はバイアスのみの **100 [A/D count]** となる。しかし、実際にはダークノイズに加え、大気中での光の屈折や散乱、そして光害の影響により、バックグラウンド値は **100 [A/D count]** を超える。これらの大気の影響を大気差という。この大気差のため、月面からわずかに離れた夜空の部分でも **1000~4000 [A/D count]** の明るさがある。この大気差を減算し、バックグラウンド値を **0 [A/D count]** にするのが大気差補正である。

厳密には、大気差は地平線からの高度や、観測時の気温、湿度、観測波長に左右されるため、観測ごとに大気差を求めて補正しなければならない。しかし、本研究では、それぞれの画像で月面に最も近い夜空の輝度値をバックグラウンドとして近似し、その値を画像の全ピクセルから減算した。

4.4 輝度値補正（ヒストグラム・マッチング）

4.3 まで補正を施してきた画像の、隣り合う画像の重複する地域の輝度値は理想的には同等になるべきだが、時間経過にともなう月の高度変化による光量変化や、大気差補正の誤差などによって、重複する地域であっても輝度が一致しない。同じ地域で異なった輝度を示すということは、そのままの画像データでは正確な結果を得ることができないことを意味する。そこで、重複する地域の輝度値の比を求め、一方の画像に乗算し、輝度値を等しくする。この作業が輝度値補正（ヒストグラム・マッチング）である。

本研究で使用した画像では、**BP-415** で±8%、**BP-750** で-10~+4%、**BP-950** で±6%の範囲内の輝度変化がみられた。

4.5 幾何補正

撮像した画像データはそれぞれの座標系で表示されており、モザイクして一枚の月面画像を得るには、全ての画像を同一の座標系で表示させる必要がある。

一般的にある座標系上にある点 (x',y') を基準となる座標系の上に変換したときの座標 (x,y) を求める式は、

$$\begin{aligned}x &= (a1) + (a2)x' + (a3)y' \\ y &= (b1) + (b2)x' + (b3)y'\end{aligned}\tag{式 4.3}$$

で与えられる。係数 **a1**, **a2**, **a3** および **b1**, **b2**, **b3** を求めるために、少なくとも **3** 組の同一地点を示す座標を決定する必要がある。この変換により、画像の回転、拡大・縮小、平行移動を同時に補正することができる。

4.6 モザイク処理

4.5 まで補正処理を施した画像をモザイクし、一枚の月面画像を再現する。モザイクするときには、フラットフィールド補正の影響で明らかに輝度値の異なる部分、さらに画像の歪みを含む画像周辺部を用いないようにする必要がある。

モザイク処理後の画像を図 4.4, 4.5, 4.6 に示す。各画像は、輝度 **0~40000**[A/D count] を **256** 階調で表示している。**PB-415** の画像と **BP-950** の画像を比較すると、後者の画像の焦点が合っていないことがわかる。ライトフレームを撮像する前に焦点を合わせるが、フラットフィールド画像を取得するまで、このフォーカス位置を変えてはならない。しかし、バンドパスフィルターは非常に狭い波長帯しか透過しないため、また、フィルターの材質や厚さ、蒸着物質等の影響により、フィルターの屈折率も異なるため、その中心波長が変化するとフォーカス位置も変化する。本研究では、**BP-415** でフォーカス合わせをし、そのフォーカス位置で、各フィルターにおけるライトフレーム、およびフラットフィールドを撮像したため、長波長のフィルターによる撮像画像では、**CCD** 受光面に焦点を結像できなかつたと考えられる。**BP-750** にも同様のことがいえる。



図 4.4 BP-415 の月面分光モザイク画像



図 4.5 BP-750 の月面分光モザイク画像



図 4.6 BP-950 の月面分光モザイク画像

4.7 測光補正

図 4.7 で，月面のある地点を観測するとき，天頂と太陽の方向のなす角 i を入射角 (incident angle)，天頂と地球 (観測者) の方向のなす角 e を観測角 (emission angle)，太陽-月面-地球のなす角 α を位相角 (phase angle) とよぶ。

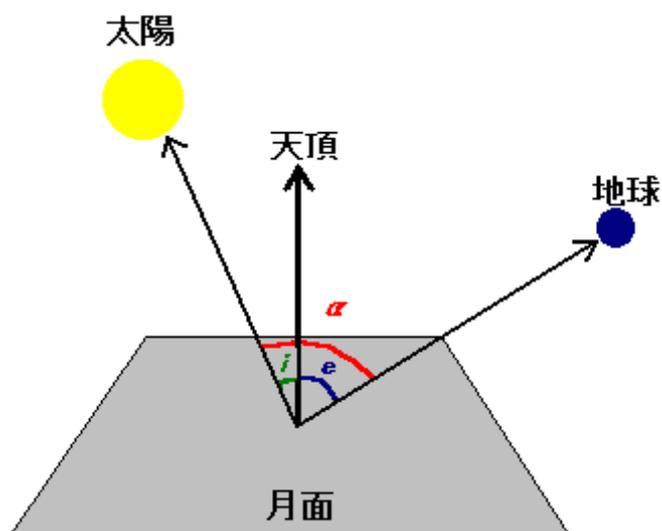


図 4.7 月面のある地点における入射角・観測角・位相角

測光補正は，物質表面からの反射光強度が光の入射方向や観測方向によって変化する角度依存性を補正するものである。例えば，満月の中央付近では，入射角 i と観測角 e は 0° であるが，縁辺部ではそれぞれ 90° となり，同じ反射率の表面においても観測される輝度は異なる。そのため，被観測地点 (月面) における入射角 i ，観測角 e ，位相角 α を統一して，同じ位相で反射率を議論するために行う補正である。

本研究では，**Clementine** 探査機の画像処理の標準的な手法となっている **Brown** 大学の方法【Piters et al., 1995】を基本として， $i=30^\circ$ ， $e=0^\circ$ ， $\alpha=30^\circ$ にデータを規格化する。規格化するため輝度に乗算する係数 $\text{factor}(i, e, \alpha)$ は以下の式で与えられる。

$$\text{factor}(i, e, \alpha) = \frac{\text{Fn}(30) \times \cos 30 / (\cos 0 + \cos 30)}{\text{Fn}(\alpha) \times \cos i / (\cos e + \cos i)} \quad (\text{式 4.4})$$

$\text{Fn}(\alpha)$ は方向性輝度値補正係数で，位相角の違いによる観測輝度の変化を表す係数である。**Brown** 大学では， $\text{Fn}(\alpha)$ として以下の式を使用している。

$$\begin{aligned} \text{Fn}(\alpha) &= a + a1 * \alpha + a2 * \alpha^2 + a3 * \alpha^3 + a4 * \alpha^4 \\ a &= 0.988 \quad a1 = -2.101E-4 \quad a2 = 2.527E-4 \quad (\text{式 4.5}) \\ a3 &= -1.530E-6 \quad a4 = 3.367E-9 \end{aligned}$$

撮像時の月齢，および太陽が真上にある地点の月面経緯度 (θ_s, ϕ_s) ，みかけの月面中心の経緯度 (θ_0, ϕ_0) ，位相角を表 4.2 に示す。

また，撮像時の月面における入射角の変化，および観測角の変化を表すフィルター画像を図 4.8, 4.9 に示す。なお，位相角は月面上で一定とみなすことができるので，画像は省略した。2001年11月02日における (θ_s, ϕ_s) は，経度については月面上における東に正，緯度については北に正をとり， $(-20.0, 1.22)$ [degree] で，入射角は太陽が真上から照らす地点で 0° ，そこから同心円状に大きくなる。観測角は，月のみかけの中心で 0° となり，同心円状に大きくなる。ただし，みかけの月面中心の経緯度は (θ_0, ϕ_0) は，秤動のため $(-4.6, 3.6)$ [degree] である。

式 4.4 において，観測角がそれぞれ $e=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ で入射角 i が $0^\circ \sim 90^\circ$ の間で変化するときの $\text{factor}(i, e, \alpha)$ を， $i=0^\circ$ で $e=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ のときの $\text{factor}(i, e, \alpha)$ で規格化したグラフを図 4.10 に示す。これは，位相角が等しいときの，各観測角における入射角の変化による輝度変化を表している。このグラフから， $e=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ では， i が大きくなるほど輝度は小さくなることがわかる。また， $e=90^\circ$ のときは， $i=90^\circ$ で輝度が著しく減少するが， $0^\circ \leq i < 90^\circ$ の範囲では輝度の変化はみられない。

図 4.11 に，観測角 $e=0^\circ$ ，位相角 $\alpha=15.57^\circ$ で入射角 i が $0^\circ \sim 90^\circ$ の間で変化するときの $\text{factor}(i, e, \alpha)$ のグラフを示す。 i が大きくなるほど $\text{factor}(i, e, \alpha)$ は指数関数的に増加していることがわかる。さらに，分光画像の輝度に乗算する係数 factor のフィルター画像を図 4.12 に示す。この日は月齢 16.7 日で，月の東側（画像右側）がわずかに欠けていた。そのため， factor 画像の右側が大きな値となっていることがわかる。

それぞれの月面分光画像に係数 factor を乗算し，測光補正を施した画像を図 4.13, 4.14, 4.15 に示す（元画像は図 4.4, 4.5, 4.6）。それぞれ，輝度 0~30000 [A/D count] を 256 階調で表示している。元画像と比較すると，月の西側が暗くなり，東側が明るくなる。また，欠けぎわの暗い部分も明るくなる。

月齢	16.7 日
(θ_s, ϕ_s)	$20.0^\circ \text{ W}, 1.22^\circ \text{ N}$
(θ_0, ϕ_0)	$4.6^\circ \text{ W}, 3.6^\circ \text{ N}$
位相角	15.57°

表 4.2 2001年11月02日の月面条件

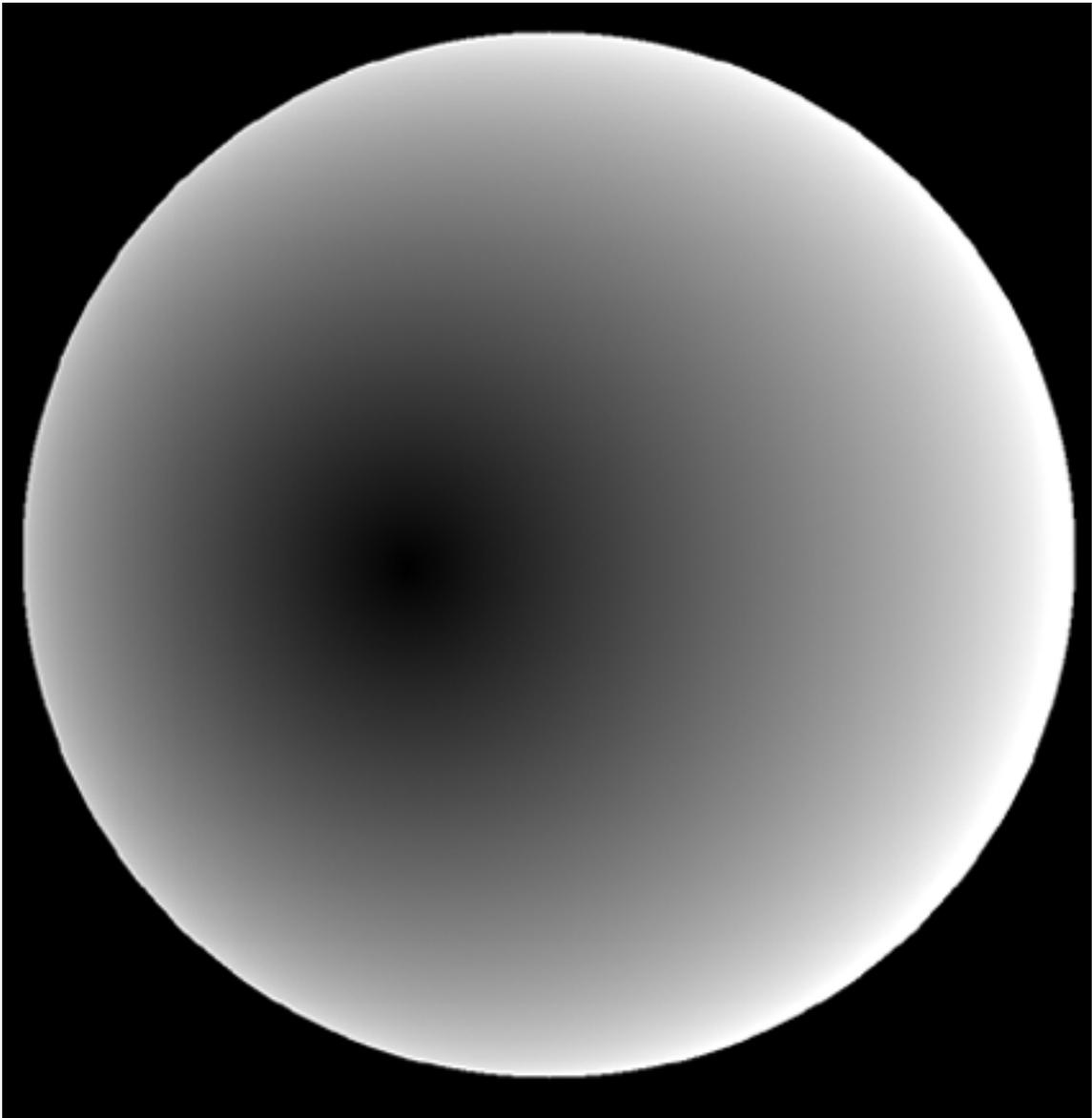


図 4.8 表 4.2 の条件下での月面における入射角の変化

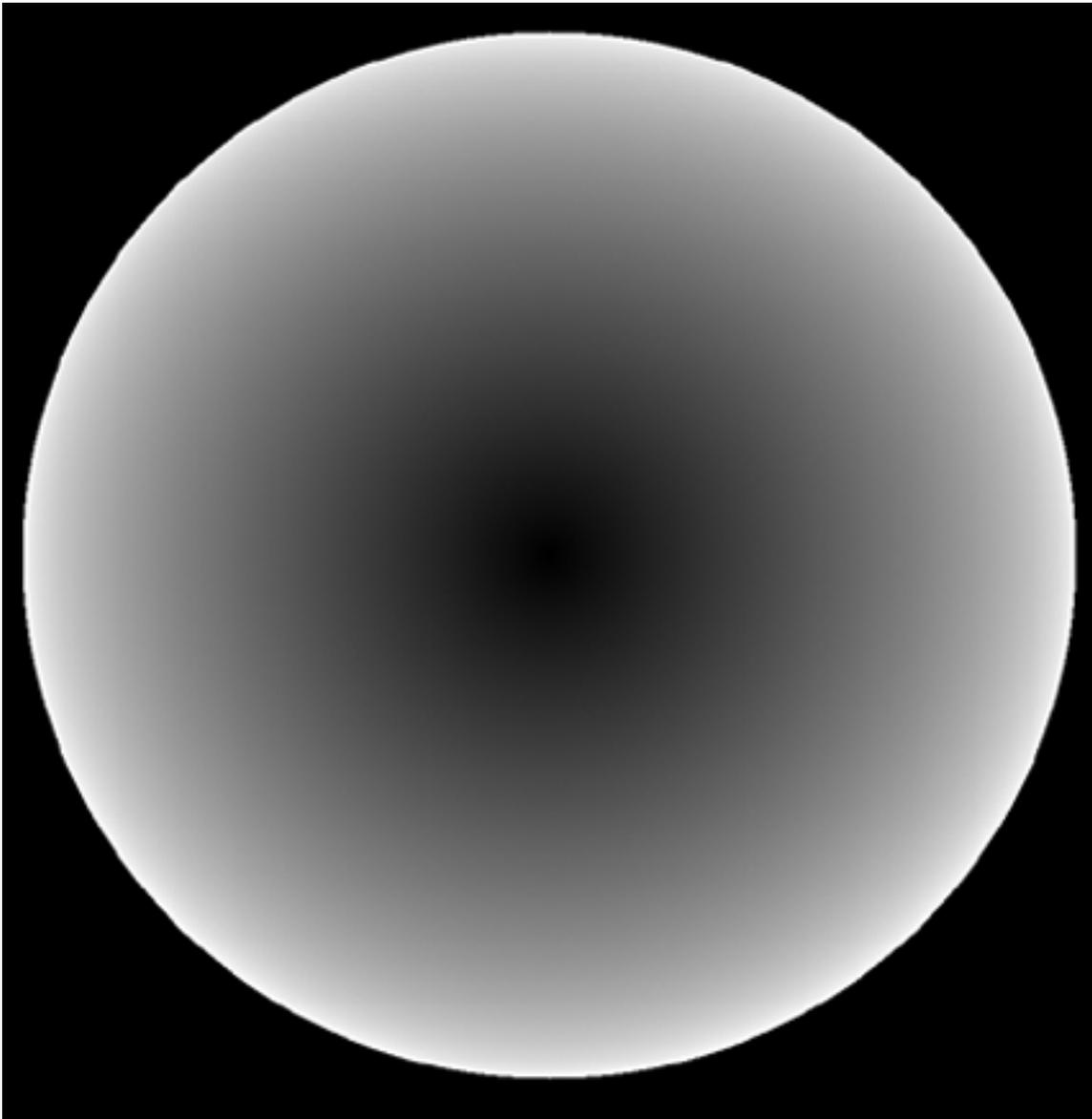


図 4.9 表 4.2 の条件下での月面における観測角の変化

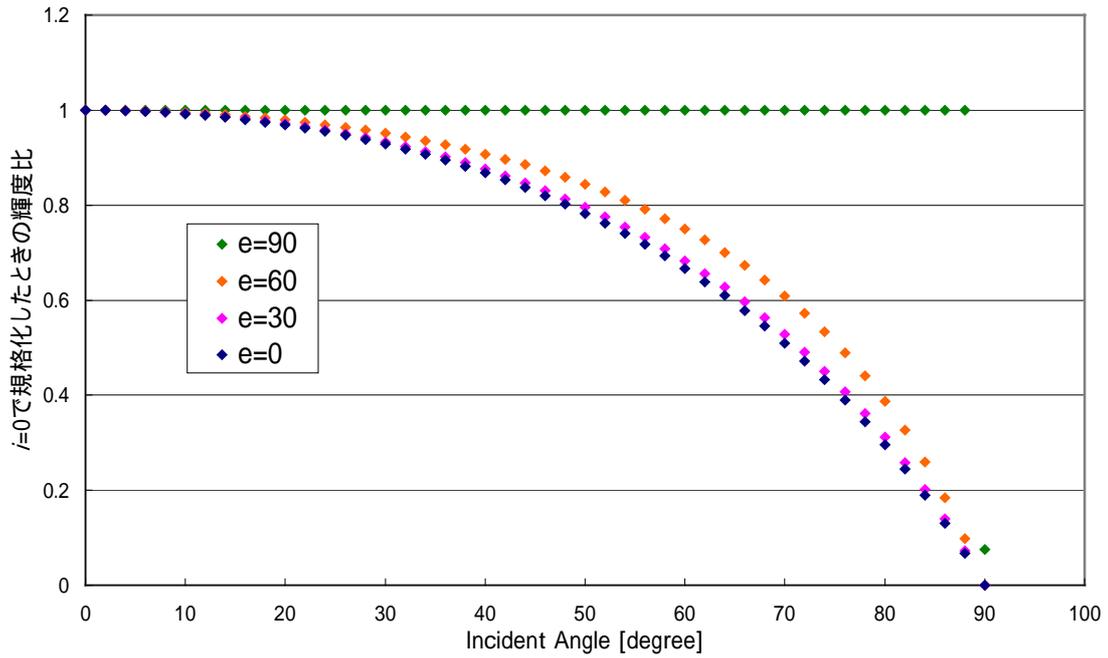


図4.10 入射角による輝度変化

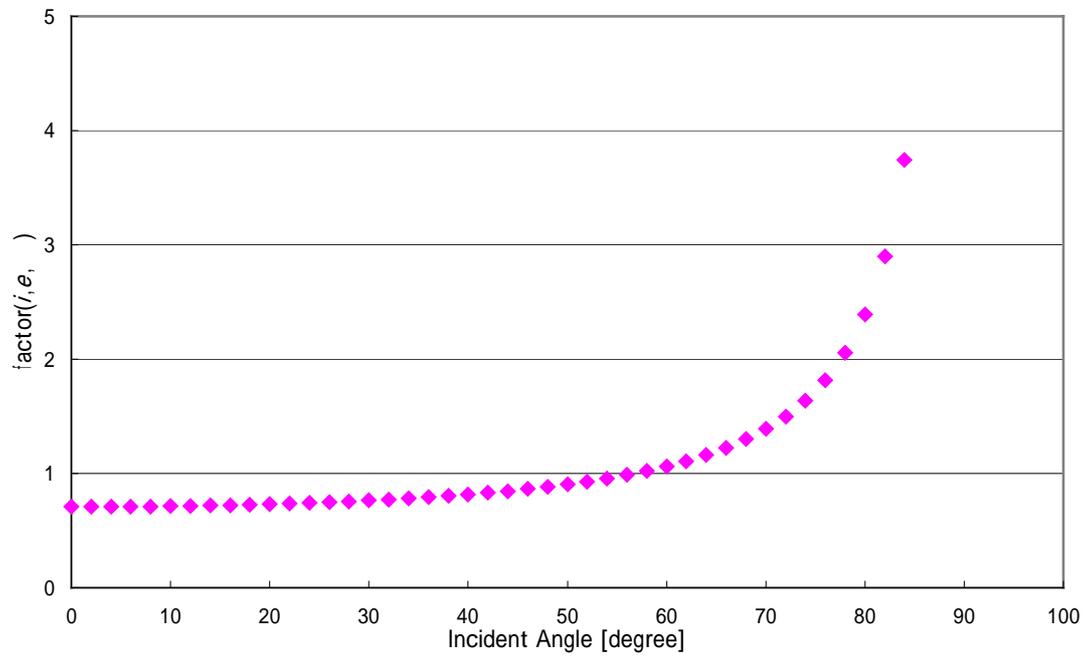


図4.11 入射角によるfactorの変化

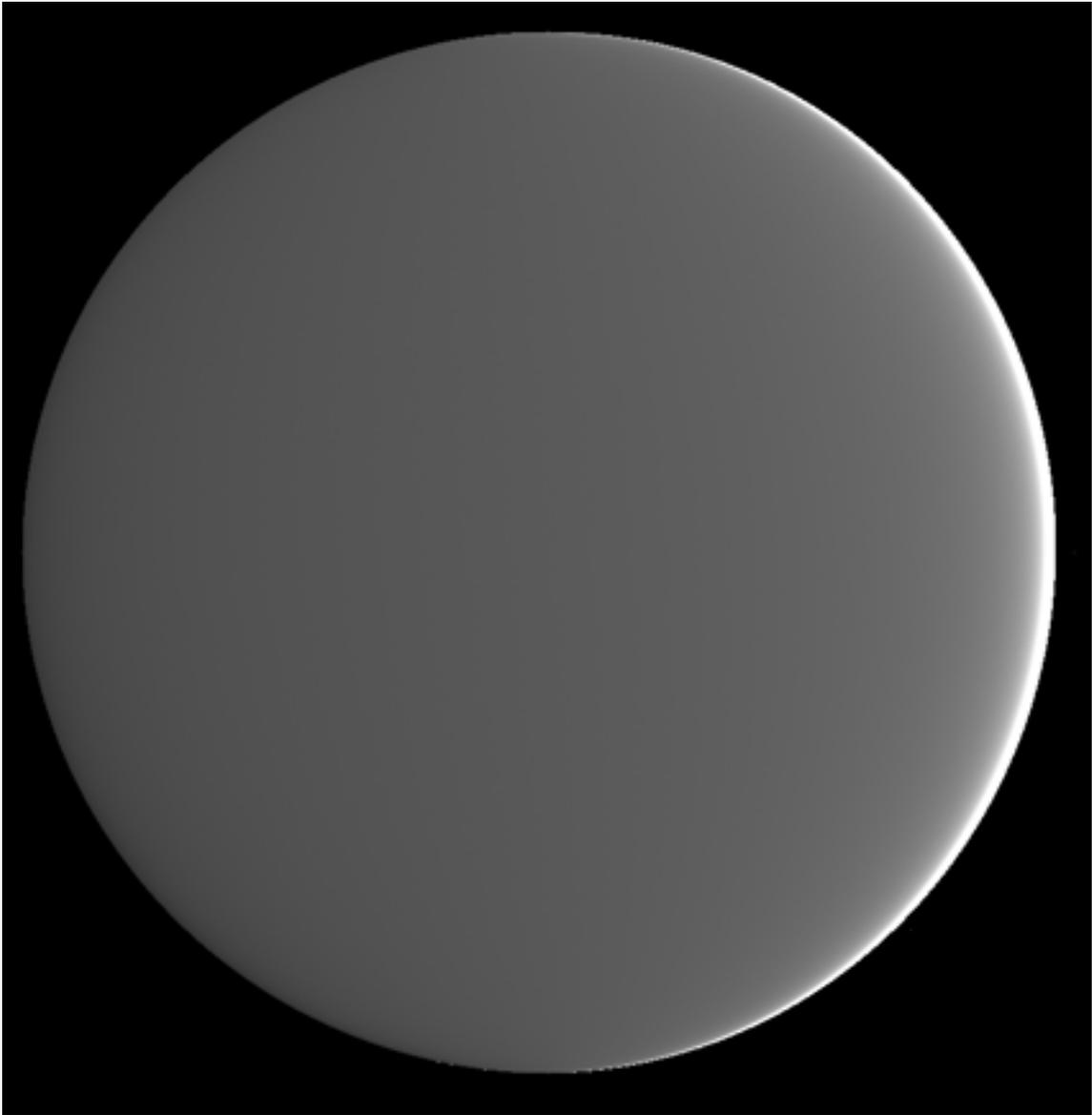


図 4.12 係数 factor のフィルター画像



図 4.13 BP-415 の測光補正画像



図 4.14 BP-750 の測光補正画像



図 4. 15 BP-950 の測光補正画像

4.8 標準反射率への変換

4.7 の補正を終えた画像の輝度を、Apollo16 号が採取した岩石試料 **62231** の反射率実測値から、標準反射率に変換する必要がある。**62231** の採取地点（較正サイト）は **15.2° E, 8.8° S** である。**62231** サンプルの $i=30$, $e=0$, $\alpha=30$ のときの反射率は、**415 nm** で **11.47%**, **750 nm** で **18.68%**, **950 nm** で **20.41%** である。各バンド画像の較正サイトの輝度に適当な数値を乗算し、上記の反射率となるように補正を施した。

標準反射率に変換した画像を図 **4.16, 4.17, 4.18** に示す。画像は反射率 **0~30%** を **256** 階調で表示している。



図 4. 16 BP-415 の反射率画像



図 4.17 BP-750 の反射率画像



図 4.18 BP-950 の反射率画像

第5章 バンド間演算

5.1 FeO マップの作成

本研究では, Lucey et al. (1998) の方法での FeO 含有量を示すマップの作成を試みた.

Lucey et al. (1995) は, Allen et al. (1993) が行った鉱物風化実験をもとに次のことを示した. ① 鉱物中の FeO 含有量が増えると, 950 nmでの反射率 (R950) と 750 nmでの反射率 (R750) の比 (R950/R750) は低下する. また, R750 も低下する. ② 岩石が風化すると R750 は低下するが, R950/R750 は大きくなる. ③ 風化が進行するにつれて, ほとんどの鉱物の R750・R950/R750 はある値 (optimized origin) に近づいていく. ①, ②, ③をグラフに表すと図 5.1 のようになる. 図 5.1 では, FeO 含有量が等しく風化の程度が異なる鉱物は同じ直線状にプロットされ, FeO 含有量が増えると直線の傾きが大きくなる. すなわち, 直線の傾きを求めると風化の影響を受けずに FeO 含有量を求めることができる. Lucey et al. (1995) は月岩石についてこのことを適用し, 岩石中の FeO 含有量がグラフ上では基準点 (optimized origin) を通る直線の傾き θ_{FeO} で表され, 風化作用による影響を除去できることを示した. さらに, 直線の傾き θ_{FeO} と岩石中の FeO 含有量との関係から FeO 絶対量を求めるための変換式を作成した【児玉・山口, 2000】.

Lucey et al. (1998) では, Clementine 探査機の画像データと Apollo 計画で採取した月岩石の化学組成データから, FeO 含有量を求める式の係数を導いた. しかし, Lucey et al. (1998) の用いた反射率データは半球反射率のもので, Brown 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用いることができない. そこで, 児玉・山口 (2000) は, Brown 大方式の補正を施したデータをもとに, 新たに Apollo 試料の化学組成分析値と Clementine の画像データを比較し, 補正係数を求めている.

Clementine 画像についての R750 と R950/R750 の関係を図 5.2 に示す. 図 5.2 では, 海の玄武岩はほぼ直線上に集まっており, 傾きの異なる複数の直線を得ることで, θ_{FeO} を求めるためのグラフ左上の基準点を決定でき, その座標を (0.04, 1.26) と決定している. この基準点をもとに, θ_{FeO} を求める式を次のように定義している.

$$\theta_{FeO} = -\tan^{-1}\left(\frac{R_{950}/R_{750} - 1.26}{R_{750} - 0.04}\right) \quad (\text{式 5.1})$$

次に、式 5.1 を用いて Apollo 計画のサンプル採取地点（位相角 30° 付近）での θ_{FeO} を求め、対応する実際の岩石分析結果の **FeO** 含有量との関係を調べている（図 5.3）。図 5.3 の **FeO parameter** は、 θ_{FeO} を示している。各点は直線上に集まり、最小二乗法で直線の式を求めることにより、以下に示す θ_{FeO} から **FeO** 含有量に変換する式を得ている【児玉・山口，2000】。

$$\text{FeO}(\text{wt.}\%) = 29.80 \times \theta_{\text{FeO}} - 19.95 \quad (\text{式 5.2})$$

各バンドの反射率を上記の式 5.1, 5.2 を用いて演算すると **FeO** 含有量マップが作成できる。作成した **FeO** マップを図 5.4 に示す。

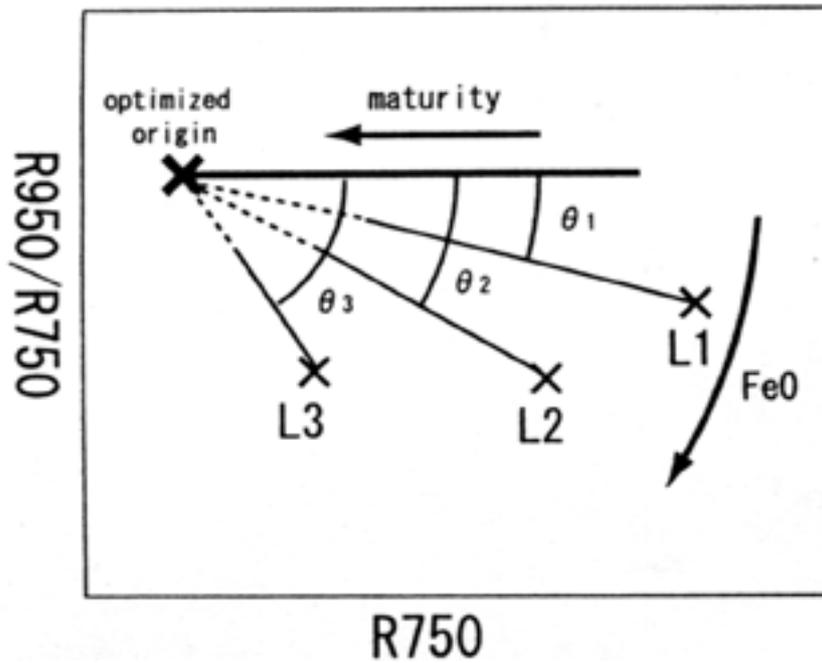


図 5.1 鉱物風化実験による R750 と R950/R750 の関係【児玉・山口, 2000】

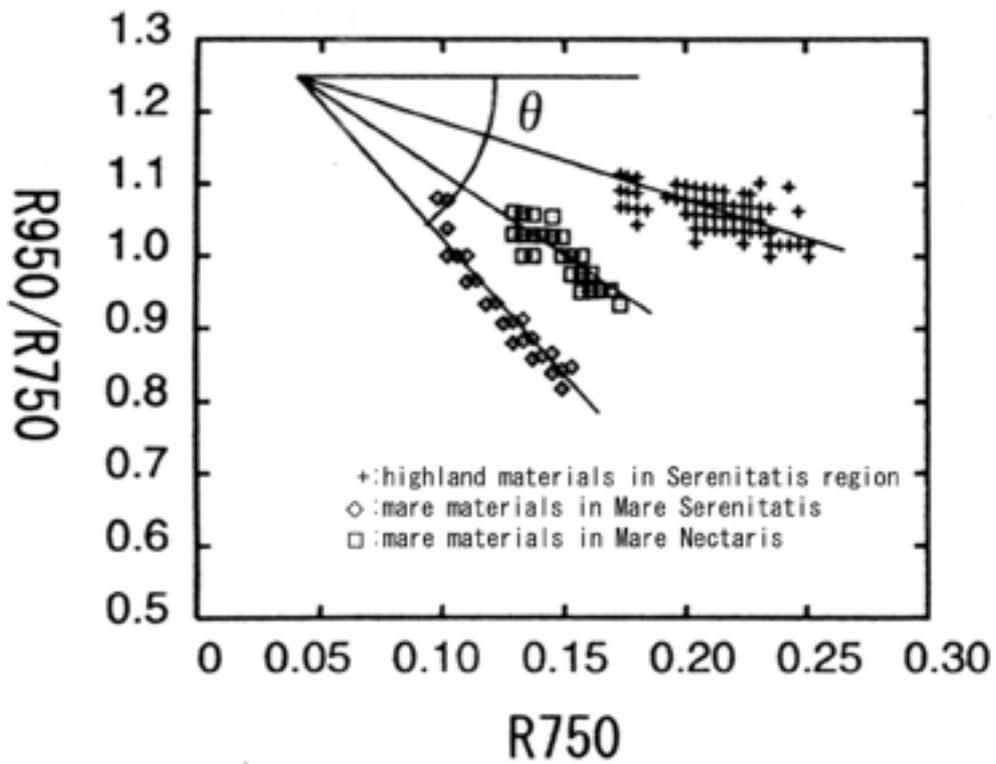


図 5.2 Clementine 画像についての R750 と R950/R750 の関係【児玉・山口, 2000】

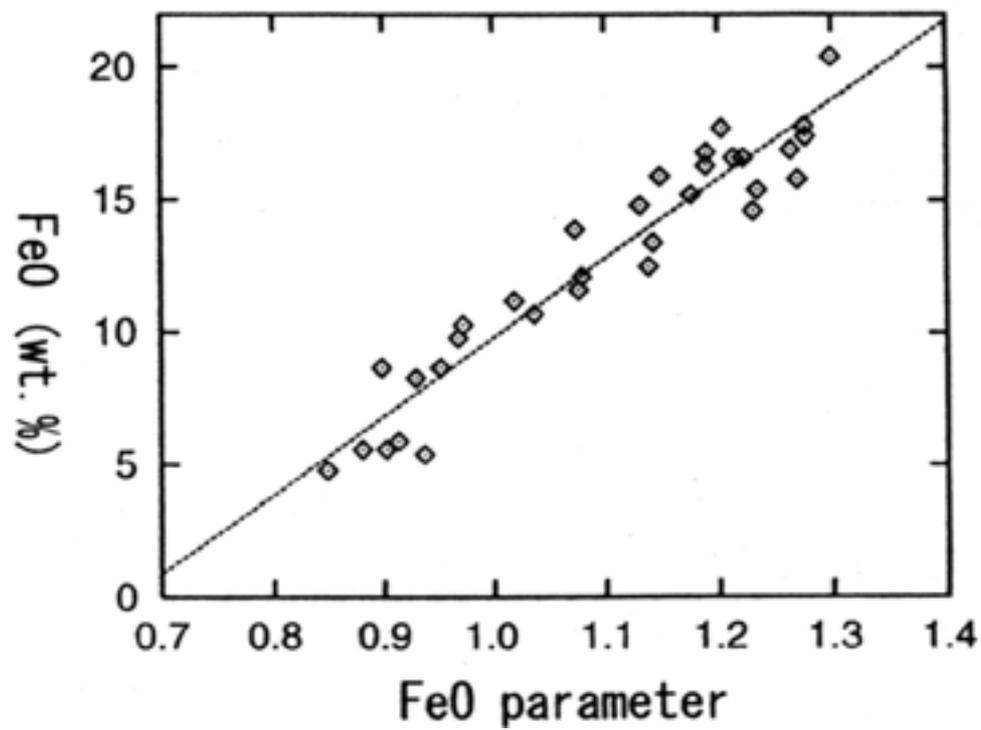


図 5.3 θ_{Fe0} と Fe0 含有量の関係【児玉・山口, 2000】

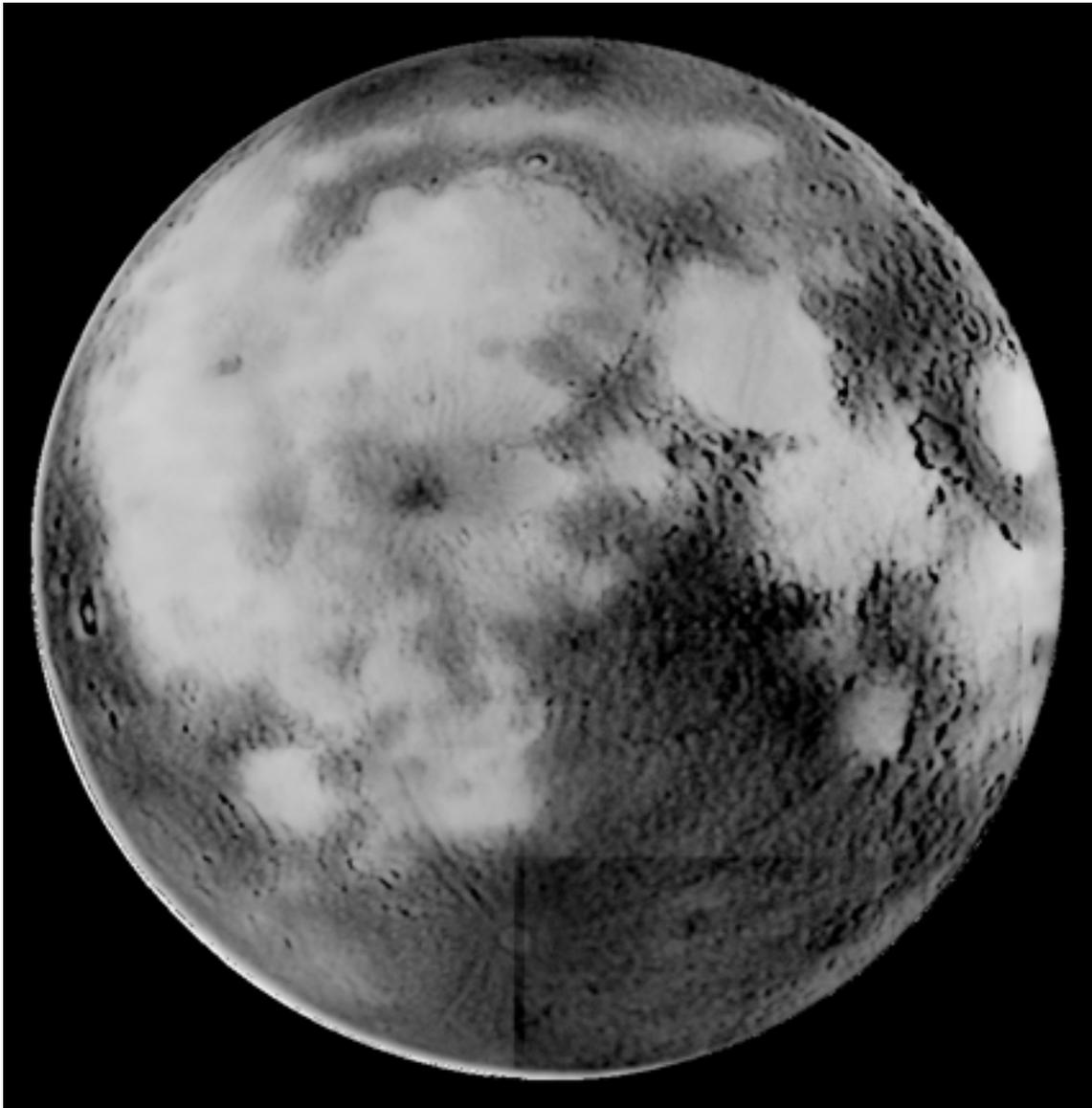


図 5.4 FeO 含有量マップ

5.2 TiO₂ マップの作成

TiO₂ 含有量も FeO と同様の方法を用いて求めることができる. Lucey et al. (1998) は, TiO₂ についても FeO と同様の方法で含有量を求める式を作成したが, 先に述べたように反射率の種類が異なるため, 児玉・山口 (2000) は新たに変換式の係数を決定している.

図 5.5 に Clementine 画像についての R750 と R415/R750 の関係を示す. 図 5.2 と同様に, 図 5.5 でも組成が同じ岩石は同じ直線上に集まり, TiO₂ 含有量は直線の傾きで表される. 図 5.5 では, 岩石の風化が進むとグラフ左下の基準点に集まるので, この点の座標を (0.05, 0.40) として θ_{TiO_2} を求めている. 以下に θ_{TiO_2} を求める式を示す.

$$\theta_{TiO_2} = \tan^{-1} \left(\frac{R_{415}/R_{750} - 0.40}{R_{750} - 0.05} \right) \quad (\text{式 5.3})$$

図 5.6 に, Clementine 画像データから得た Apollo 計画のサンプル採取地点 (位相角 30° 付近) での θ_{TiO_2} と, 対応する岩石の TiO₂ 含有量との関係を示す. 図 5.6 から, 以下に示す θ_{TiO_2} を TiO₂ の絶対量に変換する式を作成している【児玉・山口, 2000】.

$$TiO_2 [\text{wt.}\%] = 2.46 \times 10^{-5} \times \exp(9.21 \times \theta_{TiO_2}) \quad (\text{式 5.4})$$

各バンドの反射率を上記の式 5.3, 5.4 を用いて演算すると TiO₂ 含有量マップが作成できる. 作成した TiO₂ マップを図 5.7 に示す. FeO マップと同様に, 高地と比較して海の地域で TiO₂ 含有量が多いことがわかる. しかし, 同じ海の地域であっても TiO₂ 含有量が一様ではなく, 異なった組成の溶岩が存在している.

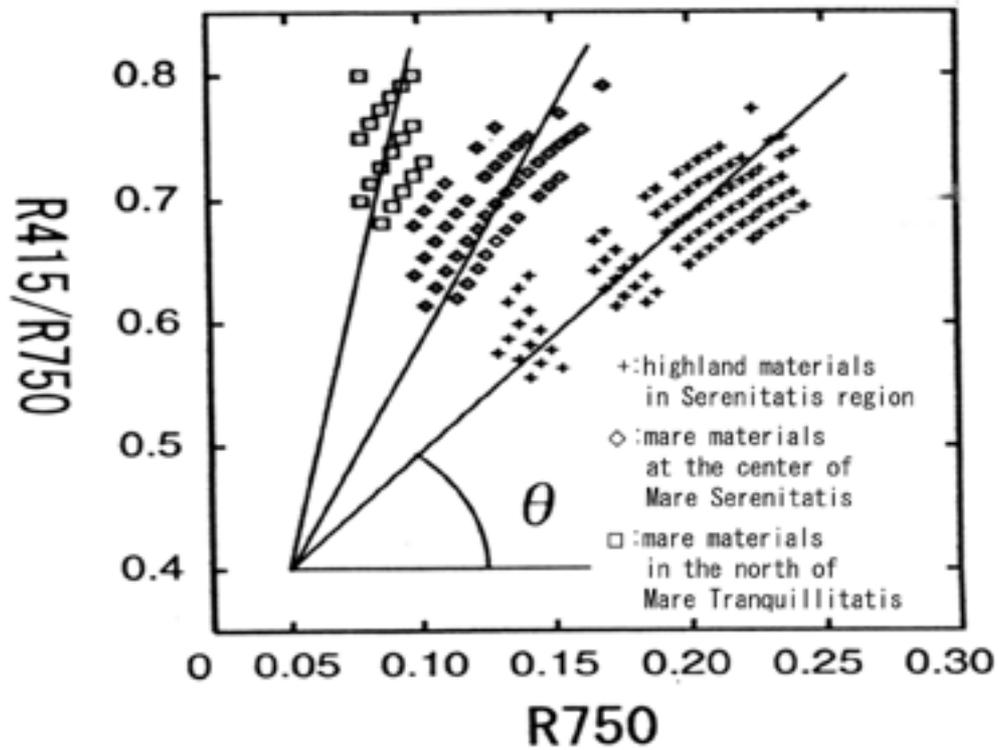


図 5.5 Clementine 画像についての R_{750} と R_{415}/R_{750} の関係【児玉・山口, 2000】

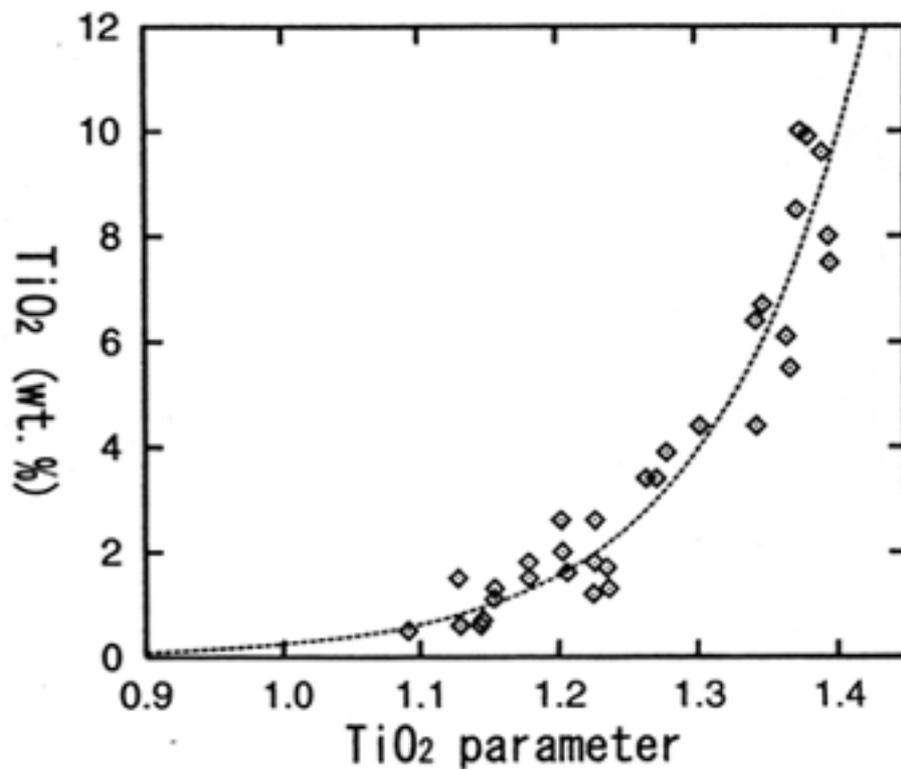


図 5.6 θ_{TiO_2} と TiO_2 含有量の関係【児玉・山口, 2000】

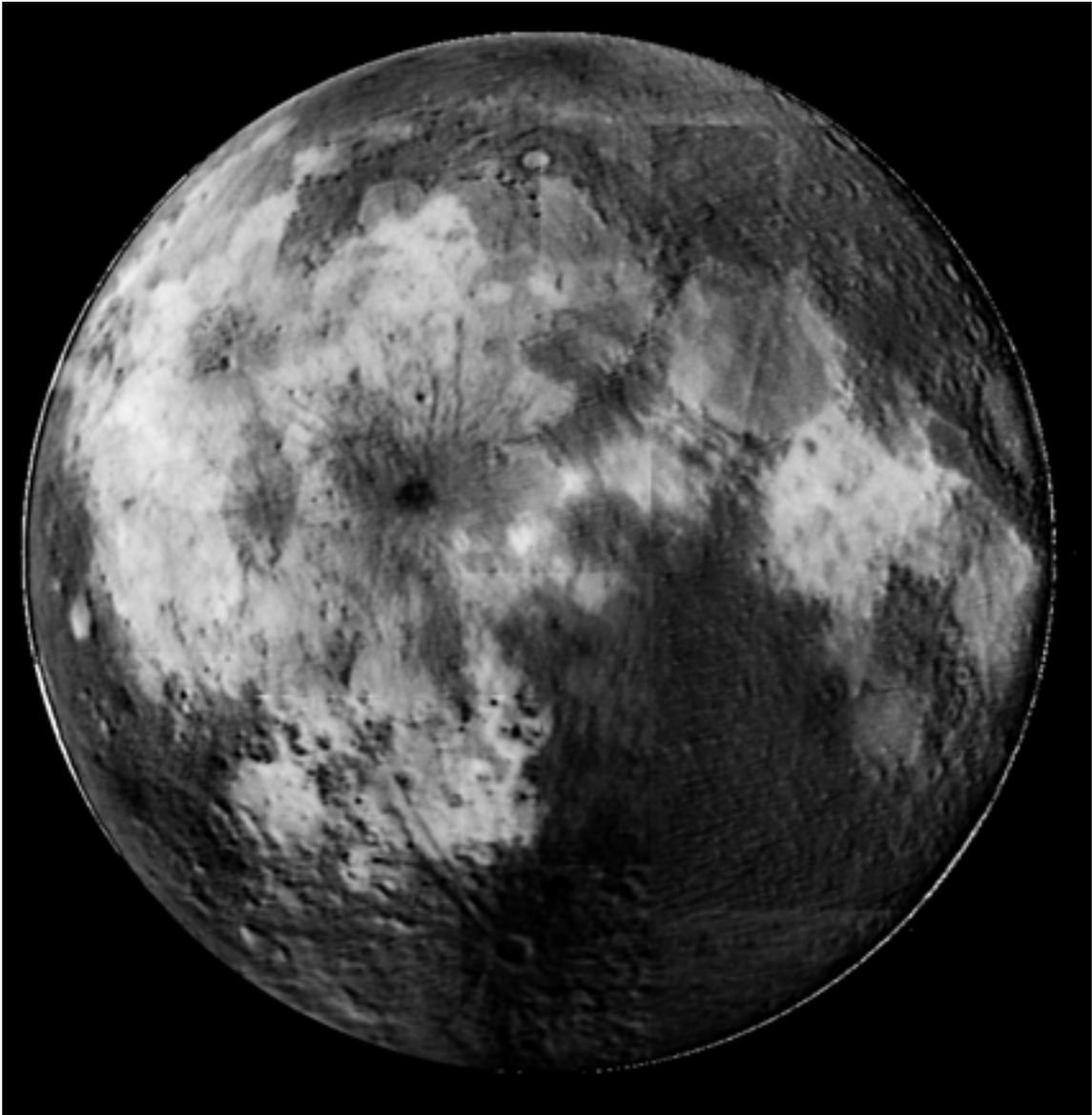


図 5.7 TiO₂含有量マップ

第 6 章 結果および考察

第 5 章で得た $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ 含有量マップにおける Apollo および Luna 着陸地点の組成と、同地点のサンプル分析結果を比較したところ、表 6.1 のような結果が得られた。表 6.1 において、観測値は本研究で作成した $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ マップから読み取った Apollo・Luna 着陸地点の $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ 含有量、サンプル分析値は Apollo・Luna の各サンプル分析結果による $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ 含有量である。含有量比は、(観測値)÷(サンプル分析値)の値で、この含有量比から本研究結果の評価を行う。サンプル分析値は表 6.2 に示す採取地点のサンプルを対象としている。

表 6.1 をもとに、横軸にサンプル分析値、縦軸に観測値をプロットした比較図を作成した(図 6.1, 6.2)。サンプル分析値と本研究での観測値が一致すれば直線上にプロットされる。図に示す A が Apollo, L が Luna を表している。FeO 含有量では, Apollo 11, 15, 17 でほぼ直線上にのっているが, その他の地点では直線から外れている。TiO₂ 含有量は, 全体的にサンプル分析値よりも 1~2wt.% 大きな値を示している。

では, 図 5.4, 5.7 をもとに月面のそれぞれの海による組成の違いを見ていく。

Landing Site	観測値		サンプル分析値		含有量比	
	FeO[wt.%]	TiO ₂ [wt.%]	FeO[wt.%]	TiO ₂ [wt.%]	FeO	TiO ₂
Apollo11 23.43E, 0.69N	16.0	8.4	15.8	7.5	1.01	1.12
Apollo12 23.39W, 3.20S	16.4	4.6	15.4	3.1	1.06	1.48
Apollo14 17.47W, 3.67S	12.8	3.7	10.4	1.7	1.23	2.18
Apollo15 3.65E, 26.10N	19.7	3.2	20.4	2.0	0.97	1.60
Apollo17 30.77E, 20.17N	17.1	10.2	16.6	8.5	1.03	1.20
Luna16 56.30E, 0.68S	18.8	5.0	16.7	3.3	1.13	1.52
Luna20 56.55E, 3.53N	11.2	1.6	7.5	0.5	1.49	3.20
Luna24 62.20E, 12.75N	22.5	1.8	19.6	1.0	1.15	1.80

表 6.1 Apollo および Luna サンプルとマップとの比較

Site	採取地点	サンプル NO.
Apollo11	average	10002, 10010, 10084
Apollo12	average	12001, 12070, 12030, 12032, 12033, 12037, 12023, 12041, 12042, 12044, 12060
Apollo14	average	14003, 14263, 14259, 14260, 14148, 14220, 14230, 14240, 14141
Apollo15	Hadley R	15531, 15601
Apollo17	Lunar Module	70011, 70181
Luna16	average	
Luna20	average	
Luna24	average	

表 6.2 Apollo・Luna サンプル採取地点とサンプル NO. 【Blewett et al., 1997】

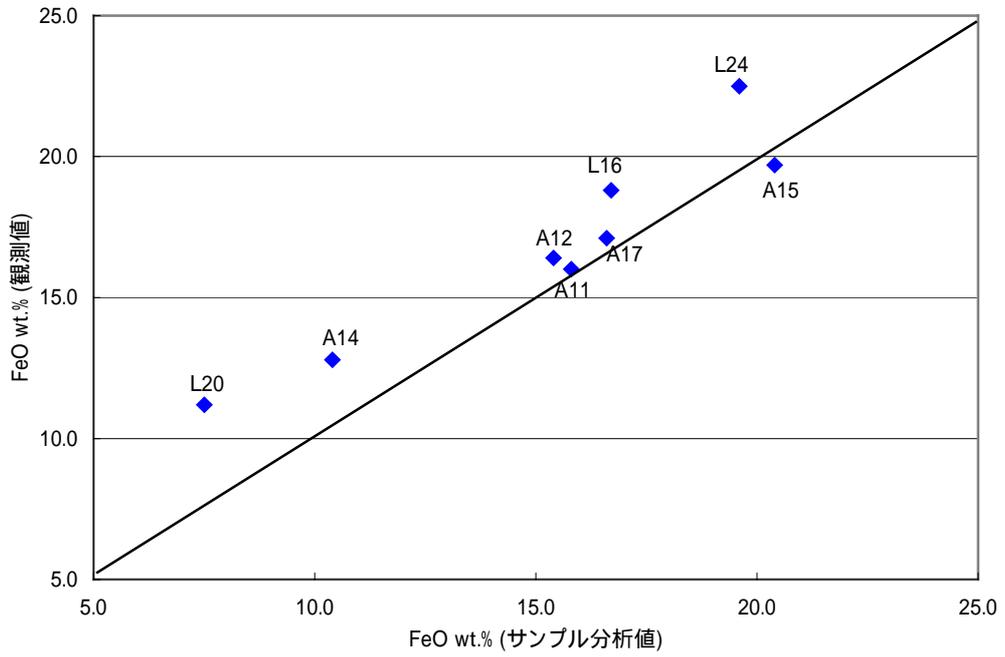


図 6.1 Apollo および Luna 着陸地点の FeO 含有量比較

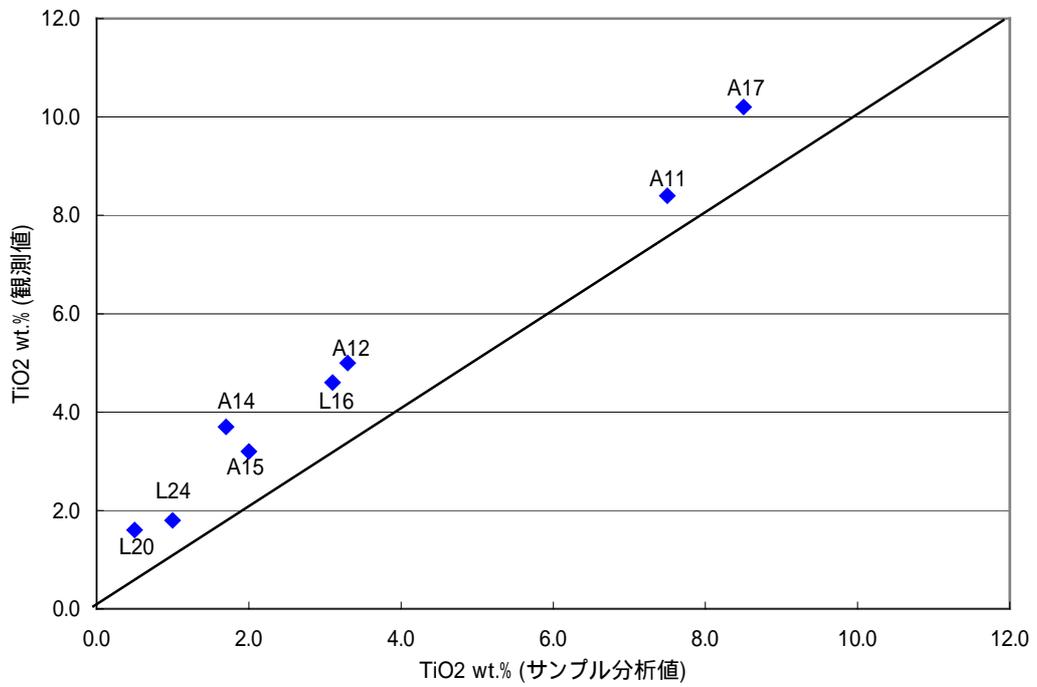


図 6.2 Apollo および Luna 着陸地点の TiO₂ 含有量比較

6.1 Apollo11 着陸地点（静かの海）

Apollo11 は 23.43° E, 0.69° N の「静かの海」南西部に着陸し、岩石試料を採取した。この場所は海の玄武岩溶岩の流出している地帯であるが、高地にあるティコなどの新しい明瞭な光条をもったクレーターからの放出物が横切っており、高地由来の斜長岩片もみつまっている【武田, 1984】。

静かの海の FeO は 15~24wt.%, TiO₂ は 7~14wt.% を示し、大部分は TiO₂ に富む玄武岩で構成される。着陸地点の FeO・TiO₂ 含有量はそれぞれ 16.0wt.%, 8.4wt.% を示し、実際に採取したサンプルの分析結果との含有量比は 1.01, 1.12 となり、FeO で 1%, TiO₂ で 12% の範囲で一致する結果を得た。

静かの海の溶岩のように TiO₂ に富む溶岩は、35~38 億年前のインブリア紀に流出したと考えられている（図 1.3）。

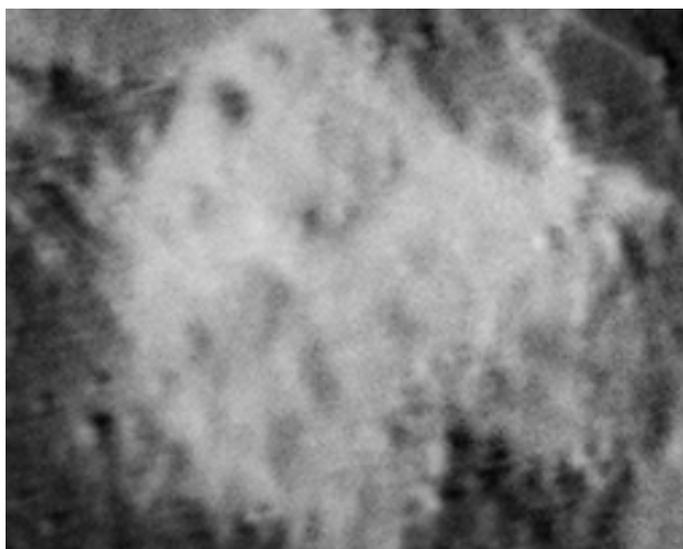


図 6.3 静かの海 (TiO₂ マップ)

6.2 Apollo12 着陸地点（嵐の大洋）

Apollo12 着陸地点 (23.39° W, 3.20° S) は、「嵐の大洋」の中、コペルニクス・クレーターから南へ 400 km の赤道上で、Apollo11 と同様、海の溶岩流の試料採取を目的としていた。Apollo12 着陸地点の海の玄武岩は、Apollo11 着陸地点に比べてチタンが少ないことが知られている。また、採取された試料からは放射性元素の多い花崗岩的な岩石や KREEP (K_2O , P_2O_5 , 希土類元素 (REE) に富む岩石) と呼ばれるタイプの岩石がみつまっている【武田, 1984】。

Apollo12 着陸地点では、 $FeO \cdot TiO_2$ は 16.4wt.%, 4.6wt.% を示し、Apollo11 着陸地点と比較して TiO_2 含有量が少ないことがわかる。また、サンプル分析値の 1.06 倍, 1.48 倍の含有量を示しており、定量値がやや悪いようである。

この原因として、測光補正が不十分であることがあげられる。本研究で用いた測光補正式は、入射角 10° 以下では誤差が大きくなることが知られている。太陽が真上から照らす地点の経緯度が 20.0° W, 1.22° N (表 4.2) で、Apollo12 着陸地点に近く、入射角は 6.9° となり十分な補正が施されなかったためにサンプル分析値よりも大きな値を示したと考えられる。

嵐の大洋は、15~24wt.% の FeO 含有量を示し、 TiO_2 は 4~16wt.% を示す。しかし、大部分は 10wt.% 以上の TiO_2 含有量であるため、嵐の大洋を構成する岩石は TiO_2 に富む玄武岩である。また、嵐の大洋の中部で TiO_2 がもっとも多く、次に南部、そして北部と、地域による TiO_2 含有量の違いが見られる。この傾向は、図 1.3 にみられるものと一致している。

6.3 Apollo14 着陸地点

Apollo14 は「雨の海」の南 1120 km にある月の中心に近いフラマウロ丘陵 (17.47° W, 3.67° S) に着陸した。月の層序学で基準となるフラマウロ層の試料を得ることが目的であった。フラマウロ層は「雨の海」が隕石の衝突によって形成されたときの放出物が堆積した層で、雨の海にどのような物質が存在していたかを知ることができると期待された。実際得られた試料は、角礫岩が非常に多いことが特徴であった【武田, 1984】。

この地点で採取されたサンプルの $FeO \cdot TiO_2$ 含有量は 10.4wt.%, 1.7 wt.% で、海の玄武岩と比較して FeO および TiO_2 とともに少ない。しかし、マップ上では 12.8 wt.%, 3.7 wt.% で海の部分と同等の含有量を示しており、含有量比は 1.23, 2.18 と非常に大きな値となった。この地点の入射角は 11.6° で、Apollo12 着陸地点と同様に十分に補正できなかったことが考えられる。しかし、より入射角の小さい Apollo 12 着陸地点での誤差のほうが小さいため、他の原因が考えられる。

6.4 Apollo15 着陸地点（雨の海）

Apollo15 着陸地点は「雨の海」をとりまくアペニン山脈のふもとで、Apollo 計画中最も北の地点である (3.65° E, 26.10° N). 深さ 300m のハドレー峡谷が切り開かれ、高地と海の両方の試料を採取するよう計画された. アペニン山脈にもっとも近いスプール・クレーター付近では、Apollo 計画最大の成果といわれる月地殻が形成されたときの初期の岩石、斜長岩 15415 が採取された【武田, 1984】

ハドレー峡谷で採取したサンプルの FeO・TiO₂ 含有量は 20.4wt.%, 2.0wt.% でチタンに乏しい海の玄武岩の組成を示す. マップ上の FeO 含有量は 19.7wt.% とほぼ一致する結果となったが、TiO₂ 含有量は 1.60 倍の値を示し、誤差が大きい.

雨の海の FeO 含有量は 12~23wt.% を示す. TiO₂ 含有量は北部で 2~5wt.%, 中央北部で 6~9wt.% と少なく、西部で 12~15wt.%, 南-中央-東部にかけて 9~10wt.%, 北東部で 9wt.% 程度、そして南東部で 6~7wt.% と、同じ海の地域であってもいくつかに細分できる. 北部・南東部は FeO 含有量も少ないため、高地物質と考えられる. 図 1.3 から北部・南東部は TiO₂ の少ない 30~35 億年前 (エラトステネス紀初期) に流出した溶岩、西部は TiO₂ の比較的多い 25~30 億年前に流出した溶岩と考えられている.

雨の海の南に位置するコペルニクス・クレーターは直径 93 km, 深さ 3760m である. このクレーターの中心部の FeO 含有量は 4wt.%, 周辺の放出物でも 10wt.% 程度で、海と比較して非常に少ない. また、TiO₂ 含有量は中心部で 1wt.% 未満、放出物が 4wt.% 前後と少ないため、クレーターの地下数kmは高地物質であると考えられる.

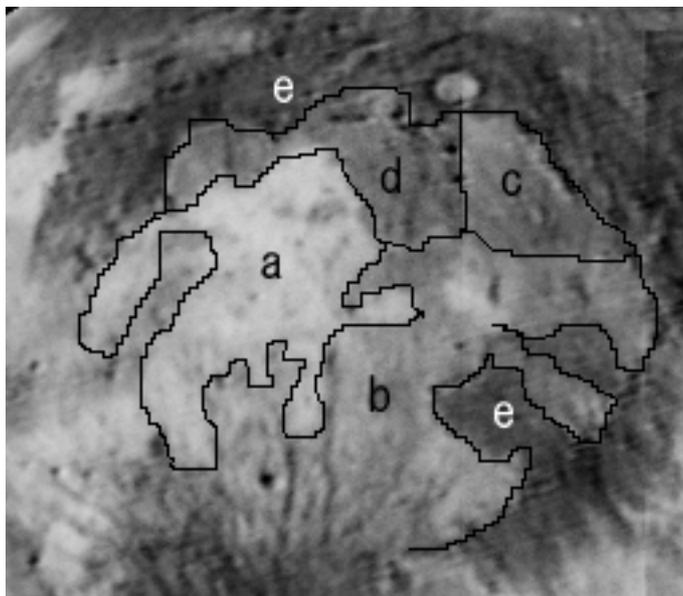


図 6.4 雨の海 (TiO₂ マップ)

a: high-Ti(12-15wt.%), b: high-Ti(9-12wt.%), c: high-Ti(9wt.%),
d: low-Ti(6-9wt.%), e: 高地物質

6.5 Apollo17 着陸地点（晴れの海）

Apollo17 は「晴れの海」の東縁にある南北を山に囲まれた平らな谷，タウラス・リトロウ地域（ 30.77° E, 20.17° N）に着陸した．この地域の試料は TiO_2 を 9~13% と多く含んでおり，Apollo11 の試料とともにチタンに富むことが知られている【武田，1984】．

晴れの海は 15~23wt.% の FeO 含有量を示す．西部および東部では TiO_2 に富み，西部で 10~12wt.%，東部で 9wt.% 程度を示す．中央部で比較的少なく 4~8wt.% を示す．西部の TiO_2 に富む玄武岩は 25~30 億年前のものと考えられている．また，静かの海と隣接する東部は，静かの海と同様の TiO_2 に富む溶岩で，35~38 億年前に流出したと考えられている（図 1.3）．Apollo17 着陸地点では 17.1wt.%，10.2wt.% の $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ 含有量を示しており，この地点は TiO_2 に富む玄武岩で構成される．また，サンプルの 1.03 倍，1.20 倍の含有量で，やはり， TiO_2 含有量の誤差がわずかに大きい．

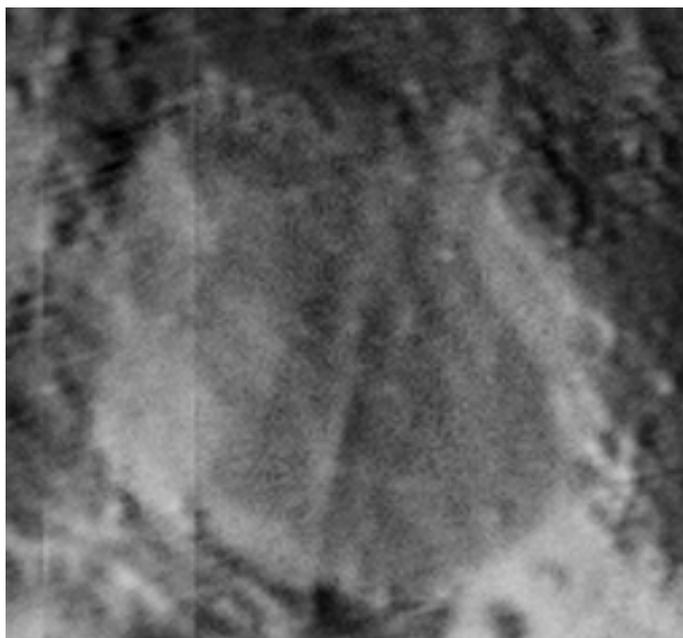


図 6.5 晴れの海 (TiO_2 マップ)

6.6 Luna16, 20, 24 着陸地点（豊かの海, 危難の海）

旧ソ連の Luna16, 20, 24 は月の東北周辺の Apollo では行くことのできなかつた地域の試料を持ちかえつた。Luna16, 20 は「豊かの海」北東部 (56.30° E, 0.68° S / 56.55° E, 3.53° N), Luna24 は「危難の海」南東部 (62.20° E, 12.75° N) にそれぞれ着陸した。Luna20 の試料には高地由来と思われるガラス玉が存在し、その組成から高地は斑レイ岩質斜長岩で構成されることがわかつた【武田, 1984】。

豊かの海は FeO が 15~24wt.%, TiO₂ は 4~11wt.% を示し、大部分は比較的 TiO₂ に乏しい玄武岩が存在しているようだ。Luna16 着陸地点での各含有量はサンプル分析値の 1.13 倍, 1.52 倍の定量値である。さらに、Luna20 においては 1.49 倍, 3.20 倍で定量値が悪いことがわかる。

危難の海は 18~23wt.%, 0.5~4wt.% の FeO・TiO₂ 含有量を示しており、TiO₂ に乏しい玄武岩で構成される。Luna24 の着陸地点では 22.5wt.%, 1.8wt.% の各含有量を示している。これらはサンプル分析値の 1.15 倍, 1.80 倍の定量値で、定量値がやや悪い。

これらの地域は、月の欠けぎわとなっている。測光補正式は平面状の試料を様々な角度で計測することを前提としているが、月面の場合、太陽直下から離れると、単に入射角が増加するだけでなく、月面の地形の凹凸によって影部分が増大する。そのため、縁辺部は補正值以上に暗くなり、定量値の悪化を招く結果となつたと考えられる。

6.7 評価

FeO・TiO₂ マップおよび表 6.1 から、Apollo12, 14 および Luna16, 20, 24 着陸地点のように入射角 i が極めて小さい地域、大きい地域では、マップの精度が低下することがわかる。これは、6.2 および 6.6 で述べたような原因からである。精度の低下が見られるのはおおよそ $i \leq 10^{\circ}$, $70^{\circ} \leq i$ の範囲内にある着陸地点である。 $10^{\circ} < i < 70^{\circ}$ の範囲内にある着陸地点の FeO における含有量比は最大 1.04 で、ほぼ一致する結果となつた。このことから、 $10^{\circ} < i < 70^{\circ}$ の範囲の FeO 含有量は+4%の誤差の範囲内にあると期待できる。

TiO₂ 含有量に関しては、 $10^{\circ} < i < 70^{\circ}$ の範囲であっても含有量比が 1.60 と大きな値を示す地点がある。このように誤差が大きくなるのは、TiO₂ 含有量が少ないときに顕著である。表 6.1 から(測定値)-(サンプル分析値)の差をとると、その差は含有量で +2.0wt.% の範囲内にあるため、測定の誤差をもたらす最大の原因は絶対量を求める関数との不適合であると考えられる。

さらなる精度の向上のため、本研究での取得画像から、FeO・TiO₂ 絶対量を求めるための変換式を新たに作成しなおす必要がある。

第7章 まとめ

7.1 結論

本研究で構築したシステムで得た画像を補正・演算した結果、**FeO・TiO₂** 含有量マップを作成できた。このマップを解析することにより、月面に分布する海の岩石を以下のように、**high-Ti** 玄武岩 (**TiO₂ : 9wt.%以上**)、**low-Ti** 玄武岩 (**TiO₂ : 1.5-9wt.%**)、**very low-Ti** 玄武岩 (**TiO₂ : 1.5wt.%以下**) に分類した。

Apollo11 が着陸した静かの海は、**FeO** が **15~24wt.%**、**TiO₂** が **7~14wt.%**で主に **high-Ti** 玄武岩で構成され、**FeO** で**+1%**、**TiO₂** で**+12%**の範囲で一致する結果を得た。また、静かの海に隣接する晴れの海 (**Apollo17** 着陸) では、**15~23wt.%**の **FeO** 含有量を示し、**TiO₂**は西部 **10~12wt.%**、東部で**9wt.%**程度の **high-Ti** 玄武岩、中央部で**4~8wt.%**の **low-Ti** 玄武岩を示す。晴れの海では **FeO** 含有量が**+3%**の範囲で一致するが、**TiO₂**では**+20%**と大きな値をとる。**Apollo11**、**17** が着陸した地域は、**35~38** 億年前のインブリア紀に流出した **TiO₂**に富む溶岩で構成されると考えられている。

雨の海 (**Apollo15** 着陸) の **FeO** 含有量は **12~23wt.%**を示す。**TiO₂** 含有量は北部で **2~5wt.%**であるが、**FeO** も **12~13wt.%**であるため高地物質、中央北部で **6~9wt.%**で主に **low-Ti** 玄武岩、西部で **12~15wt.%**の **high-Ti** 玄武岩、南-中央-東部にかけて **9~10wt.%**の **high-Ti** 玄武岩、北東部で **9wt.%**程度の **high-Ti** 玄武岩、そして南東部で **6~7wt.%**の **low-Ti** 玄武岩に分類できる。雨の海の南に位置するコペルニクス・クレーターは、その放出物の **FeO・TiO₂** 含有量が**~12wt.%**、**~4wt.%**と、海のそれらと比較して非常に少ないため、クレーターの地下数kmは高地物質であると推測できる。

Apollo12 着陸地点は **16.4wt.%**、**4.6wt.%**の **FeO・TiO₂** 含有量で、**low-Ti** 玄武岩を示し、静かの海や晴れの海と比較して **TiO₂**に乏しい地域である。この地点のサンプル分析値は**+6%**、**+48%**の含有量を示しており、誤差がやや大きい。嵐の大洋は、**15~24wt.%**の **FeO** 含有量を示し、**TiO₂**は **4~16wt.%**を示す。しかし、大部分は **10wt.%**以上であるため **high-Ti** 玄武岩に分類できる。また、地域により **TiO₂** 含有量が異なり、中部でもっとも多く、次に南部、そして北部と減少する傾向がある。

Apollo14 着陸地点は **12.8 wt.%**、**3.7 wt.%**の各含有量で**+23%**、**+118%**と非常に大きな値を示した。

豊かの海は **FeO** が **15~24wt.%**、**TiO₂**は **4~11wt.%**前後を示し、**low-Ti** 玄武岩、**high-Ti** 玄武岩の両方が存在している。**Luna16** 着陸地点での各含有量はサンプル分析値の**+13%**、**+52%**、**Luna20** においては**+49%**、**+220%**で定量値が悪い。さらに、危難の海

は **18~23wt.%**, **0.5~4wt.%** の **FeO · TiO₂** 含有量を示しており, **low-Ti** 玄武岩に分類できる. **Luna24** の着陸地点では **22.5wt.%**, **1.8wt.%** の各含有量となっている. これらはサンプル分析値の **+15%**, **+80%** の定量値で, **TiO₂** の定量値がやや悪い.

Apollo12, 14 着陸地点は, 入射角が **10°** 以下, あるいはそれに近く補正式の適用範囲外であるため, サンプル分析値よりも大きな値を示した. また, 測定値とサンプル分析値の差が含有量で **+2.0wt.%** であることから, 絶対量を求める関数との不適合が考えられる. さらに, **Luna16, 20, 24** 着陸地点は, 月の欠けぎわで, 太陽直下から離れると, 単に入射角が増加するだけでなく, 月面の地形の凹凸によって影部分が增大するため, 縁辺部は補正值以上に暗くなり, 定量値の悪化を招く結果となった.

7.2 今後の課題

TiO₂ 含有量の誤差が大きすぎるため, 撮像画像から新たに含有量変換式を作成することで, 精度の向上が期待できる. また, 月高度変化による各波長の光量変化を測定し, 補正処理することでモザイク時の輝度値補正が容易になるかもしれない. 今回は小口径の望遠鏡を用い, 月面全域の **FeO · TiO₂** 含有量マップを作成したが, 大口径望遠鏡の高解像度画像を用いて, より精度の高い詳細な含有量マップが作成できるだろう.

参考文献

小森長生 (1995) :

「新版地学教育講座⑫ 太陽系と惑星」

東海大学出版 p.80

武田 弘 (1984) :

「月の科学」

岩波書店 p.2,4-5,12-17,19-30,40,44,49

小沼・水谷 (1978) :

「岩波講座 地球科学 13 太陽系における地球」

岩波書店

Heiken et al. (1991) :

「Lunar Sourcebook, a user's guide to the moon」

Cambridge University Press p.211

Lucey et al. (1998) :

「Mapping the FeO and TiO₂ content of the lunar surface with multispectral
imagery」

Journal of Geophysical Research, Vol.103, No.E2

American Geophysical Union

Pieters et al. (1993) :

「Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition」

Cambridge University Press

福島英雄 (1996) :

「天文アマチュアのための冷却 CCD 入門」

誠文堂新光社 p.34,42-45,52-59,92-93,111-121,149-154

児玉・山口 (2000) :

「クレメンタイン UVVIS データによる月の海の地質解析」

日本リモートセンシング学会誌別刷, Vol.20, No.4, p.12-23

Blewett et al. (1997) :

「**Clementine images of the lunar sample-return stations:**

Refinement of FeO and TiO₂ mapping techniques」

Journal of Geophysical Research, Vol.102, No.E7

American Geophysical Union

佐伯和人 他 (2000) :

「望遠鏡月面分光観測システム構築」

日本惑星科学会誌, Vol.9, No.2, p.77-85

謝辞

本卒業研究を進めるにあたり、適切なお助言ならびに懇切丁寧なご指導をいただいた宮城教育大学教育学部理科教育（地学科）の高田淑子助教授に深く感謝いたします。

また、同大学地学科の森洋介教授、青木守弘教授、川村寿郎教授、菅原敏助手には、日頃からご支援いただいたことに深く感謝いたします。

さらに、研究活動全般を通して、夜間の観測などさまざまなご協力、ご援助をいただいた同研究室の中堤康友君、齋藤正晴君、千葉紀子さん、林美香さん、吉田和剛君に深く感謝いたします。

そして最後に、日頃から励まし、支えてくださった自然環境専攻、**取**知智美さん、福岡公平君、藤村久美子さん、望月貴君、ならびにその他関係者のみなさまに深く感謝いたします。

付録 A

画像解析マニュアル

1 CCDOPS	
フラットフィールド補正	<p>1) 〈ファイル〉メニューの〈開く〉から補正を施す画像を選択し，[開く]をクリックする。</p> <p>2) 〈ユーティリティ〉メニューの〈フラットフィールド処理〉からフラットフィールド画像を選択し，[開く]をクリックする。</p> <p>3) フラットフィールド補正後の画像が表示されるので，〈ファイル〉メニューの〈名前を付けて保存〉で，ファイル名を変えてから [保存] をクリックし補正後の画像を保存する。</p> <p>注：オリジナル画像を上書きしないようにする（バックアップをとっておく）。</p>
大気差補正	<p>1) 補正を施す画像を開く。〈ユーティリティ〉メニューの〈領域ウィンドウ〉で適当なサイズの領域を選択し，領域内に月面縁辺部と夜空がおさまるように移動する。</p> <p>2) 〈ユーティリティ〉メニューの〈領域ウィンドウ〉→〈サイズ指定〉で，領域内を切り抜く。</p> <p>3) 〈ユーティリティ〉メニューの〈拡大〉で，できるだけ拡大する。</p> <p>4) 〈表示〉メニューの〈十字カーソルを開く〉で十字カーソルを開き，月面にもっとも近い夜空の輝度値を読み取りバックグラウンド値として記録する。</p> <p>5) 〈ユーティリティ〉メニューの〈ピクセル間演算〉で「減算(-)」を選択し，オペランドにバックグラウンド値を入力して [OK] をクリックすると，補正後の画像が表示されるので，ファイル名を変えて保存する。</p> <p>注：この作業は後に述べる ENVI で行うこともできる。</p>
ファイルフォーマットの変換	<p>SBIG ST-7E を CCDOPS で制御し，撮像した画像は“ST7”という拡張子がつけられ，CCDOPS でしか開くことができない。他のアプリケーションソフトで画像を扱うためには“raw”ファイルに変換しなければならない。</p> <p>1) 〈ファイル〉メニューの〈開く〉からファイルフォーマットを変換する画像を選択し，[開く] をクリックする。</p> <p>2) 〈ファイル〉メニューの〈名前を付けて保存〉で，ファイル名を「xxx.ST7」から「xxx.raw」に変更する。</p> <p>3) ファイルの種類を「SBIG Uncompressed」として [保存] をクリックする。</p>

2 ENVI	
procsv サーバに 画像を送る	<p>ENVI での作業は、procsv サーバ上で行うため、使用する全ての画像をサーバに送らなければならない。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) FFFTP を開く。「procsv.miyakyo-u.ac.jp」を選択して [接続] する (ユーザー名 (学籍番号) とパスワードを入力)。 2) 転送元と転送先を指定し、バイナリモードでアップロードする。
画像処理ソフト ENVI を起動する	<p>あらかじめ、Windows 上で UNIX の X-Window アプリケーションを実行できる FUJITSU PC-X (http://software.fujitsu.com/jp/index.html) をダウンロードしておく。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 〈SOLARIS ログイン画面〉を起動し、ユーザー名 (学籍番号) とパスワードを入力する。 2) X-Window 上で右クリックし、〈プログラム〉 → 〈端末エミュレータ〉を開く。そこで以下のように入力すると ENVI が起動する。 [xxxxx procsv.miyakyo-u.ac.jp] envi
画像を開く	<ol style="list-style-type: none"> 1) 〈File〉メニューの〈Open Image File〉を選択する。 2) Filter を「* (アスタリスク)」のみにし、[Enter] キーを押す。 3) ディレクトリを指定し、開きたい画像を選択して [OK] をクリックすると Header Info ウィンドウ (ヘッダー入力画面) が表示されるので、図 A.1 のように指定し、[OK] を押す。 4) Available Bands List にファイルが追加されるので、開きたいファイルを選択し、[Load Band] をクリックする。 <p>注：新たに画像を開くときは「New Display」を選択する。</p>

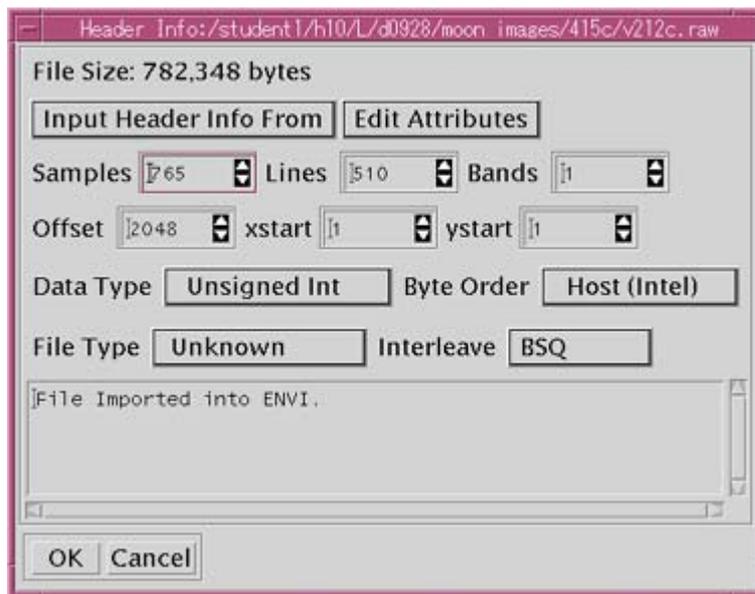


図 A.1 ヘッダー入力画面

<p>大気差補正</p>	<p>本研究では CCDOPS で大気差補正を行ったが、ENVI でも同様の補正を施すことができるので、その方法を紹介する。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 補正を施す画像を開き、Zoom ウィンドウに月面と夜空がおさまるように、Band ウィンドウ内の赤枠を移動する。 2) Zoom ウィンドウ左下の [+] ボタンをクリックして、適当な倍率に拡大する。 3) 〈Basic Tools〉 から 〈Cursor Location / Value〉 を表示し、月面にもっとも近い夜空の輝度値 (Data 値) を読み取りバックグラウンド値として記録する。 <p>次に、画像の各画素からバックグラウンド値を減算する。</p> <p>例) バックグラウンド値が 5000 の場合</p> <ol style="list-style-type: none"> 4) 〈Spectral Tools〉 から 〈Spectral Math〉 を開き、Enter an expression ボックスに演算式 <p style="text-align: center;"><i>s1-5000</i></p> と入力し [OK] を押す。 5) Variable / Spectra Pairings ウィンドウが表示されるので、Variables used in expression ボックスの「S1-[undefined]」を選択した後、[Map Variable to Input File] をクリックする。 6) Spectra Math Input File ウィンドウが表示されるので、Select Input File ボックスから補正したい画像を選択し、[OK] を押す。 7) Variables used in expression ボックスで S1 が定義されたのを確認したら、Enter Output Filename ボックスに新たにファイル名を入力して [OK] を押す。 <p>補正後の画像は新しいファイル名で保存され、Available Bands List に追加される。</p> <p>使用する全ての画像に同様の補正を施す。</p>
--------------	---

輝度値補正

ヒストグラム・
マッチング

1) モザイクする 2 枚の画像を開き、各画像の重複する地域を **Zoom** ウィンドウにおさめる。

*注：画像の周辺部は歪みが生じるので、中心部を用いるのが望ましい。
また、**Zoom** ウィンドウの倍率はできるだけ小さく、両画像で等しくする。*

2) **Band** ウィンドウの **Functions** から **Display Enhancements** → **Interactive Stretching** でヒストグラムを表示させたのち、**Histogram_Source** で「**Zoom**」をチェックし、両画像の **Zoom** ウィンドウのヒストグラムを表示する。

***Zoom** ウィンドウの導入地域が等しければ、ヒストグラムは図 A.2 のような相似形になる。*

3) ヒストグラムの頂点など、特徴のある点の輝度値を読み取り、両画像の輝度比を求める。

4) **Spectral Tools** → **Spectral Math** を用いて、一方の画像に輝度比を乗算し、両画像の輝度を統一する。

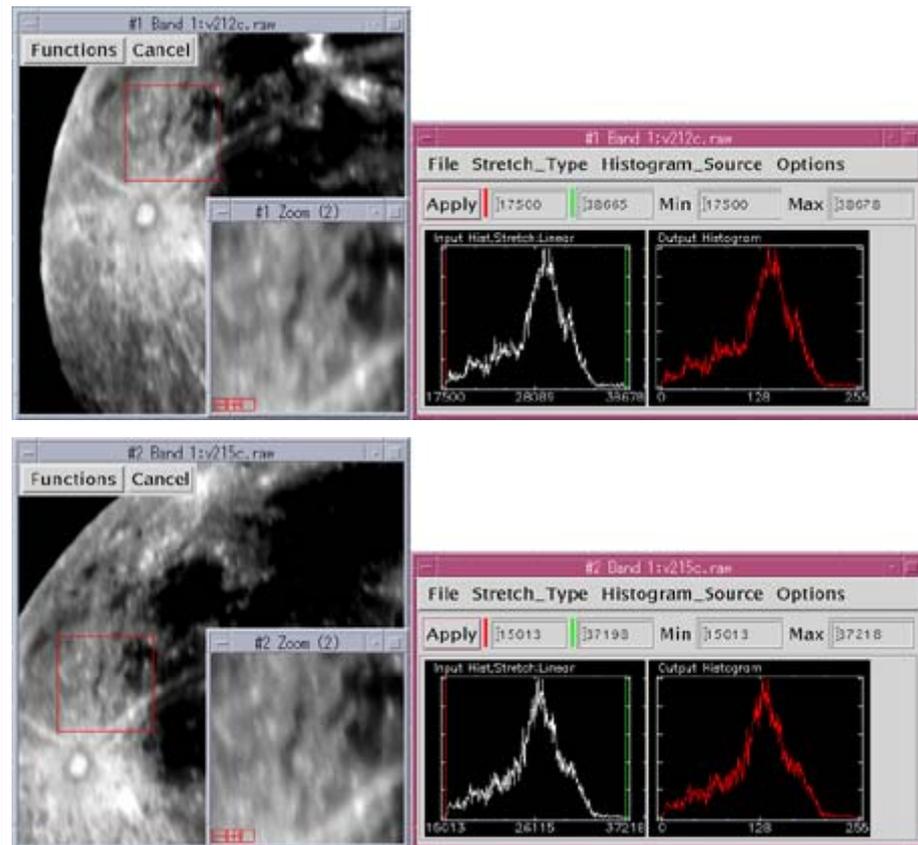


図 A.2 ヒストグラム・マッチング

幾何補正

一般的にある座標系の上にある点 (x',y') を、基準となる座標系の上に
変換したときの座標 (x,y) を求める式は、

$$x = (a1) + (a2)x' + (a3)y'$$

$$y = (b1) + (b2)x' + (b3)y'$$

で与えられる。係数 **a1, a2, a3** および **b1, b2, b3** を求めるために、**2**
枚の画像から **3** 組の **Ground Control Points (GCP)** を決定する。

本研究では、望遠鏡架台として赤道儀を用い、短時間で月面全域の
モザイク画像を得ることができたので、画像の回転、および拡大・縮
小はないものとして、平行移動のみの補正を行う。

1) モザイクする **2** 枚の画像を開き、**〈Register〉** から **〈Select Ground
Control Points〉** → **〈Image to Image〉** を選択する。

2) **Image to Image Registration** ウィンドウの **Base Image** ボックスで
は基準画像を、**Warp Image** ボックスで補正を施す画像を選択し **[OK]**
を押す。

3) **Ground Control Points Selection** ウィンドウが表示されたら、**2** 枚の
画像の特徴的な同一地点をクリックし、**Zoom** ウィンドウに表示する。

4) **Zoom** ウィンドウの十字線の交点を両画像の同一地点を示すピクセル
に合わせ **[Add Point]** を押し、**1** 組目の **GCP** を決定する。

5) 次に、十字線の交点を **x** 方向に **1** ピクセルずつ移動し **[Add Point]**
を押す。さらに、**y** 方向に **1** ピクセルずつ移動し **[Add Point]** を押し
て、**3** 組の **GCP** を決定できる (図 A.3)。

6) **GCP** を決定したら、**Ground Control Points Selection** ウィンドウの
〈Options〉 から **〈Warp Displayed Band...〉** を選択し、**Registration
Parameters** を次のように設定する。

Warp Method : *RST*

Resampling : *Nearest Neighbor*

Background : *0.000*

Enter Output Filename ボックスに新しいファイル名を入力し **[OK]**
を押す。

各フィルターについて、全ての画像に幾何補正を施す。

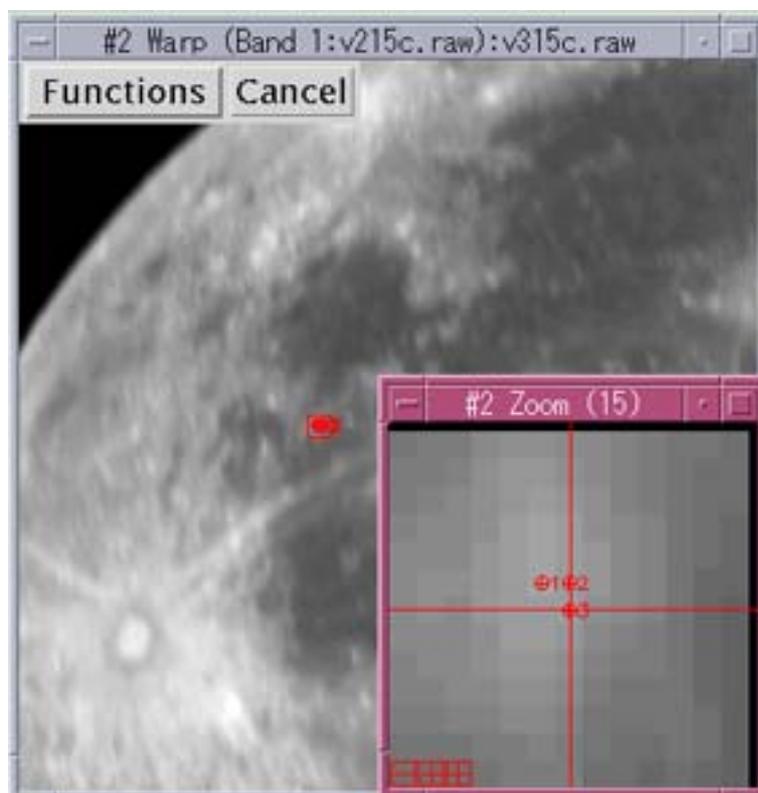
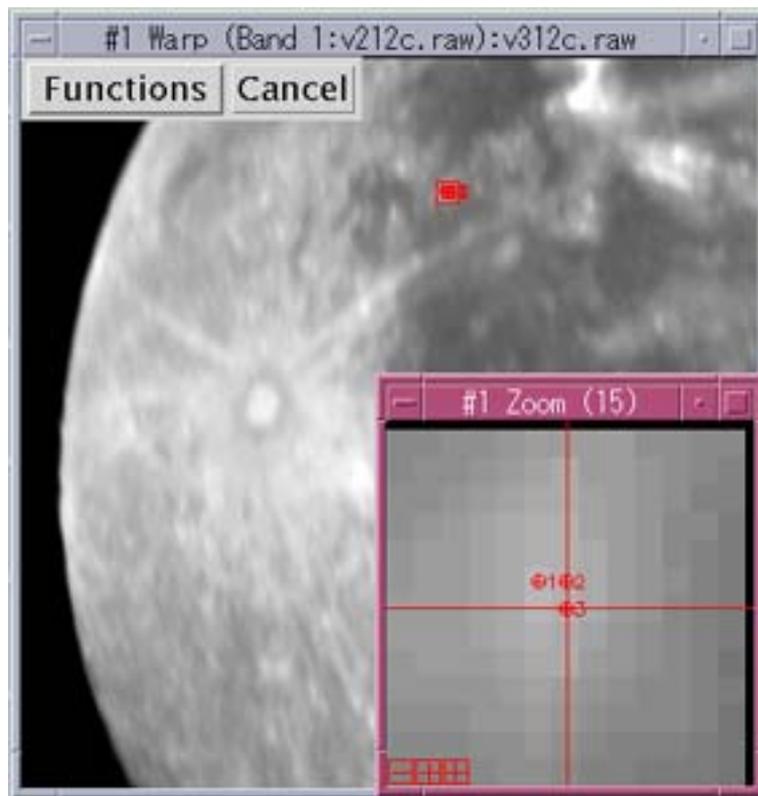


図 A.3 GCP の選択例 (上 : Base Image, 下 : Warp Image)

<p>モザイク処理</p>	<p>幾何補正を施した画像をモザイクし、1枚の月面画像を再現する。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 〈Register〉から〈Mosaic Images〉→〈Georeferenced Images〉を選択する。 2) Georeferenced Image Mosaicking ウィンドウの〈Import〉から〈Import file without feathering...〉を選択する。 3) Mosaic Input File ウィンドウの Select Input File ボックスでモザイクする画像を選択する。 4) [Spatial Subset] を押し Spatial Subset ウィンドウを表示させ [Subset by Image] を押す。 5) Subset Function ウィンドウの赤枠内にモザイクする部分をおさめ、[OK] を押す。 6) Spatial Subset ウィンドウに戻るので [OK] を押す。さらに Mosaic Input File ウィンドウに戻るので [OK] を押すと、Georeferenced Image Mosaicking ウィンドウに戻り、画像ファイルが追加される。 7) 2) ~6) を繰り返して、モザイクする画像ファイルを Georeferenced Image Mosaicking ウィンドウに表示する。 8) 全ての画像ファイルを表示したら、Georeferenced Image Mosaicking ウィンドウの〈File〉から〈Apply〉を選択する。 9) Mosaic Parameters ウィンドウが表示されるので、次のように設定する。 <p style="text-align: center;"> Output X Pixel Size : 1.000000 Output Y Pixel Size : 1.000000 Resampling : Nearest Neighbor </p> <p>Enter Output Filename ボックスに新しいファイル名を入力し [OK] を押す。</p> <p>各フィルターの画像に同様の操作を行い、月面画像を得る。</p>
---------------	--

付録 B

測光補正プログラムの作成

B.1 入射角，観測角，位相角を求める

入射角を i ，観測角を e ，位相角を α とする．

ある地点の月面経緯度を図 B.1 のように (θ_m, ϕ_m) とすると，その法線ベクトル \hat{R} は，

$$(\cos \phi_m \cos \theta_m, \cos \phi_m \sin \theta_m, \sin \phi_m)$$

太陽が真上にある地点の月面経緯度を (θ_s, ϕ_s) とすると，太陽の方向ベクトル \hat{S} は，

$$(\cos \phi_s \cos \theta_s, \cos \phi_s \sin \theta_s, \sin \phi_s)$$

みかけの月面中心を (θ_0, ϕ_0) とすると，地球の方向ベクトル \hat{E} は，

$$(\cos \phi_0 \cos \theta_0, \cos \phi_0 \sin \theta_0, \sin \phi_0)$$

となる．ここで，それぞれの内積をとると，

$$\begin{aligned} \hat{R} \cdot \hat{S} &= \cos i = \cos \phi_m \cos \theta_m \cos \phi_s \cos \theta_s + \cos \phi_m \sin \theta_m \cos \phi_s \sin \theta_s + \sin \phi_m \sin \phi_s \\ &= \cos \phi_m \cos \phi_s (\cos \theta_m \cos \theta_s + \sin \theta_m \sin \theta_s) + \sin \phi_m \sin \phi_s \end{aligned}$$

(式 B.1)

同様に，

$$\hat{R} \cdot \hat{E} = \cos e = \cos \phi_m \cos \phi_0 (\cos \theta_m \cos \theta_0 + \sin \theta_m \sin \theta_0) + \sin \phi_m \sin \phi_0 \quad (\text{式 B.2})$$

$$\hat{S} \cdot \hat{E} = \cos \alpha = \cos \phi_s \cos \phi_0 (\cos \theta_s \cos \theta_0 + \sin \theta_s \sin \theta_0) + \sin \phi_s \sin \phi_0 \quad (\text{式 B.3})$$

となる．したがって，

$$i = \cos^{-1} [\cos \phi_m \cos \phi_s (\cos \theta_m \cos \theta_s + \sin \theta_m \sin \theta_s) + \sin \phi_m \sin \phi_s] \quad (\text{式 B.4})$$

$$e = \cos^{-1} [\cos \phi_m \cos \phi_0 (\cos \theta_m \cos \theta_0 + \sin \theta_m \sin \theta_0) + \sin \phi_m \sin \phi_0] \quad (\text{式 B.5})$$

$$\alpha = \cos^{-1} [\cos \phi_s \cos \phi_0 (\cos \theta_s \cos \theta_0 + \sin \theta_s \sin \theta_0) + \sin \phi_s \sin \phi_0] \quad (\text{式 B.6})$$

(θ_s, ϕ_s) ， (θ_0, ϕ_0) は天文年鑑等で調べることができるが， (θ_m, ϕ_m) は，月面画像から読み取らなければならない．

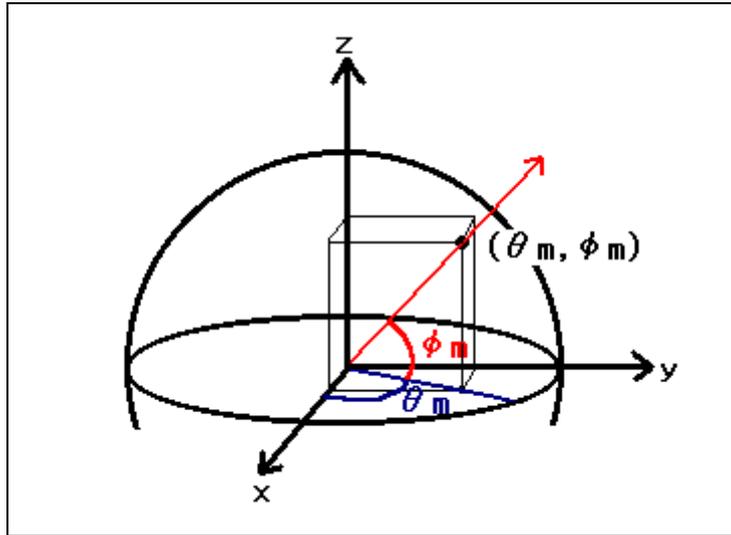


圖 B.1 月面經緯度

B.2 月面画像から月面経緯度を求める

月面画像は球である月を平面に投影したものと考えることができるので、月面経緯度を (θ, ϕ) として、月の東西方向を y , 南北方向を z とする y - z 平面に投影することを考える。

図 B.2 より、緯度 ϕ のときの z 座標は、

$$z = -r \sin \phi \quad (\text{式 B. 7})$$

赤道上の経度 θ のときの y 座標は、

$$y = r \sin \theta \quad (\text{式 B. 8})$$

であるが緯度が変わると y 座標も変わり、

$$y = r \sin \theta \cos \phi \quad (\text{式 B. 9})$$

となる。したがって、式 B.7 より、

$$\phi = \sin^{-1}(-z/r) \quad (\text{式 B. 10})$$

式 B.9 より、

$$\theta = \sin^{-1}(y/r \cos \phi) \quad (\text{式 B. 11})$$

となる。ここで、

$$\left. \begin{array}{l} \cos^2 \phi + \sin^2 \phi = 1, \\ \text{式B.7より,} \\ \sin^2 \phi = (z/r)^2 \\ \text{よって,} \\ \cos^2 \phi = 1 - (z/r)^2 \\ -90 \leq \phi \leq 90 \text{より} \cos \phi \geq 0 \\ \text{したがって} \\ \cos \phi = +\sqrt{1 - (z/r)^2} \end{array} \right\}$$

という条件から、

$$\begin{aligned} \theta &= \sin^{-1} \left[y/r \cdot \sqrt{1 - (z/r)^2} \right] \\ &= \sin^{-1} \left[y / (r^2 - z^2) \right] \end{aligned} \quad (\text{式 B. 12})$$

となる。しかし、画像の上が月の北を向いているとは限らないので、回転させる必要がある。 (Y_0, Z_0) を中心に (y, z) を反時計回りに t° 回転させた座標を (p, q) とすると、

$$\begin{cases} p = (y - Y_0) \cos t - (z - Z_0) \sin t + Y_0 \\ q = (y - Y_0) \sin t + (z - Z_0) \cos t + Z_0 \end{cases} \quad (\text{式 B. 13})$$

したがって,

$$\begin{cases} \phi = \sin^{-1}(-q/r) \\ \theta = \sin^{-1}\left(p/\sqrt{r^2 - z^2}\right) \end{cases} \quad (\text{式 B. 14})$$

となる. ここで (θ, ϕ) は, 月面画像の中心を $(0,0)$ [degree]としたときの月面経緯度であるが, みかけの中心 (θ_0, ϕ_0) は秤動のために真の中心からずれており, この分を平行移動させる必要がある. 平行移動後の月面経緯度を (θ_m, ϕ_m) とすると,

$$\begin{cases} \phi_m = \phi + \phi_0 = \sin^{-1}(-q/r) + \phi_0 \\ \theta_m = \theta + \theta_0 = \sin^{-1}\left(p/\sqrt{r^2 - z^2}\right) + \theta_0 \end{cases} \quad (\text{式 B. 15})$$

となり, 月面画像から経緯度が求まる.

式 B.4, B.5, B.6 に (θ_m, ϕ_m) , (θ_s, ϕ_s) , (θ_0, ϕ_0) を代入することで, 入射角 i , 観測角 e , 位相角 α が求まる. これらの値から, Clementine 探査機の画像処理の標準的な手法となっている Brown 大学の方法を基本として, $i=30^\circ$, $e=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$ にデータを規格化する.

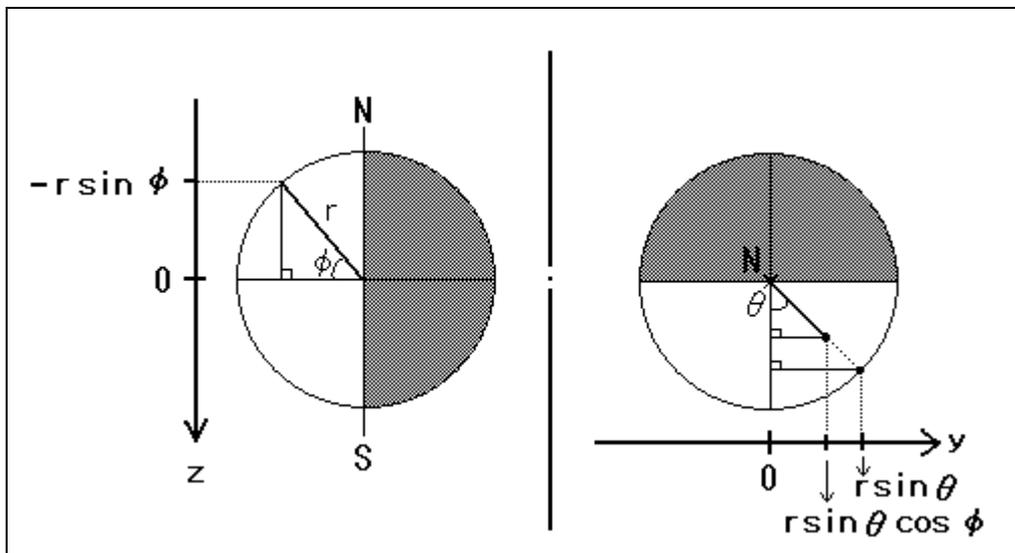


図 B.2 y-z 平面への投影

B.3 補正係数を求める

Brown 大学の方法を基本として、 $i=30^\circ$, $e=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$ にデータを規格化するために輝度に乗算する係数 $\mathbf{factor}(i, e, \alpha)$ は以下で与えられる.

$$\mathbf{factor}(i, e, \alpha) = \frac{Fn(30) \times \cos 30 / (\cos 0 + \cos 30)}{Fn(\alpha) \times \cos i / (\cos e + \cos i)} \quad (\text{式 B. 16})$$

$\mathbf{Fn}(\alpha)$ は, 方向性輝度地補正係数で, 位相角の違いによる観測輝度の変化をあらわす係数で, **Brown** 大学では, $\mathbf{Fn}(\alpha)$ として以下の式を使用している.

$$\begin{aligned} Fn(\alpha) &= a + a1 * \alpha + a2 * \alpha^2 + a3 * \alpha^3 + a4 * \alpha^4 \quad (\text{式 B. 17}) \\ \begin{cases} a = 0.998 & a1 = -2.101E - 2 & a2 = 2.527E - 4 \\ a3 = -1.530E - 3 & a4 = 3.367E - 9 \end{cases} \end{aligned}$$

B.4 プログラムの作成

<photo.csh ファイル>

```
#
foreach i (`cat orbit.d`)
    rm photomet
    touch photomet
    cc -lm -g -o photomet photometric.c
    photomet ./moon images'/moon/$i.raw ./$i.pht
    rm photomet
end
```

<orbit.d ファイル>

m415c	(415nm モザイク画像のファイル名)
m750c	(750nm モザイク画像のファイル名)
m950c	(950nm モザイク画像のファイル名)

<params.h ファイル>

#define Y_SIZE 869	(画像のピクセルサイズ(横))
#define Z_SIZE 841	(画像のピクセルサイズ(縦))
#define Ycenter 439	(月面の中心座標(横))
#define Zcenter 421	(月面の中心座標(縦))
#define Radius 406	(月面半径)
#define t -93.85	(月面の回転角)
#define Phi0 3.6	(見かけの月面中心の緯度)
#define Theta0 -4.6	(見かけの月面中心の経度)
#define Phi_s 1.2235	(太陽が真上にある地点の月面緯度)
#define Theta_s -20	(太陽が真上にある地点の月面経度)
#define a 0.998	
#define a1 -0.02101	
#define a2 2.527e-4	
#define a3 -1.530e-6	
#define a4 3.367e-9	
#define pi 57.29578	($180 \div \pi$ の値)

<photometric.c ファイル>

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include "params.h"

unsigned short image_in1[Z_SIZE][Y_SIZE];
unsigned short image_in2[Z_SIZE][Y_SIZE];

/*----- */
main (int argc, char *argv[ ] )
{
    char source1 [80];
    char source2 [80];

    strcpy(source1, *++argv);
    strcpy(source2, *++argv);

    image_read (image_in1, Y_SIZE, Z_SIZE, source1);
    photo (image_in1, image_in2 );
    image_write (image_in2, Y_SIZE, Z_SIZE, source2);
}

/*----- */
photo (raw1, raw2)

unsigned short raw1[Z_SIZE][Y_SIZE];
unsigned short raw2[Z_SIZE][Y_SIZE];

{
    int i, j, y, z, theta ;
    float radius, cp0, sp0, cps, sps, ct0, st0, cts, sts, factor ;
    float p, q, theta_m, phi_m, cpm, spm, ctm, stm ;
    float inc_angle, emt_angle, phase_angle ;
    float cia, cea, b, c, d, e;
    float Fnpa, Fn30 ;
```

```

float  factor2, factor0, factor1, pa ;

cp0 = cos (Phi0/pi);
sp0 = sin (Phi0/pi);
cps = cos (Phi_s/pi);
sps = sin (Phi_s/pi);
ct0 = cos (Theta0/pi);
st0 = sin (Theta0/pi);
cts = cos (Theta_s/pi);
sts = sin (Theta_s/pi);

for (j=0; j<Z_SIZE; j++)
    {
    for (i=0; i<Y_SIZE; i++)
        {
/*
for (j=0; j<Z_SIZE; j++)
    {
    for (i=Y_SIZE/2; i<Y_SIZE/2+1; i++)
        {
*/

        y = i-Ycenter;
        z = j-Zcenter;
        radius = pow (y, 2) + pow(z, 2);
        if (radius > Radius*Radius )  raw2[j][i] = 0;
        else
            {
                p=y*cos (t/pi) - z*sin (t/pi) ;
                q=y*sin (t/pi) + z*cos (t/pi) ;
                phi_m  = asin (-q/Radius) + Phi0/pi ;
                theta_m = asin (p/sqrt(Radius*Radius-q*q)) + Theta0/pi;

                cpm = cos (phi_m);
                spm = sin (phi_m);
                ctm = cos (theta_m);
                stm = sin (theta_m);

```

```

inc_angle = acos (cpm*cps*(ctm*cts+stm*sts)+spm*sps) ;
emt_angle = acos (cpm*cp0*(ctm*ct0+stm*st0)+spm*sp0) ;
phase_angle = acos (cps*cp0*(cts*ct0+sts*st0)+sps*sp0) ;
cia = cos (inc_angle) ;
cea = cos (emt_angle) ;
b = a1*(phase_angle*pi) ;
c = a2*pow((phase_angle*pi), 2) ;
d = a3*pow((phase_angle*pi), 3) ;
e = a4*pow((phase_angle*pi), 4) ;
pa = phase_angle*pi ;
c = a2*pow(pa, 2) ;
d = a3*pow(pa, 3) ;
e = a4*pow(pa, 4) ;
Fnpa = a + b + c + d + e ;
Fn30=a + a1*30+a2*pow(30, 2)+a3*pow(30, 3)+a4*pow(30, 4) ;
factor0 = (Fn30*cos(30./pi)/(cos(0./pi)+cos(30./pi))) ;
factor1 = (Fnpa*cia/(cea+cia)) ;
factor = factor0/factor1 ;
if (inc_angle >= 1.570796) factor = 0. ;
factor2 = factor * raw1[j][i] + 0.5 ;
    }
}
}

}

/*-----*/
/* read images from disk */
image_read (image,xsize,ysize,filename)

unsigned short *image;
int xsize;
int ysize;
char *filename;
{
int xsize2;
FILE *fp;

```

```

        if ((fp=fopen (filename, "r")) == NULL) {
            printf("file open error ¥n");
            exit(-1);
        }
        xsize2=xsize*2;
        fread (image, xsize2, ysize, fp);
        fclose(fp);
    }

/*----- */
/* write images from disk */
    image_write (image, xsize, ysize, filename)

    unsigned short *image;
    int xsize;
    int ysize;
    char *filename;
{
    int xsize2;
        FILE *fp;
        if ((fp=fopen (filename, "wb")) == NULL) {
            printf("file open error ¥n");
            exit(-1);
        }
        xsize2=xsize*2;
        fwrite (image, xsize2, ysize, fp);
        fclose(fp);
}

```