

論文題目

# 可視近赤外分光観測による 月面組成分布の調査

宮城教育大学生涯教育総合課程自然環境専攻

c9914 隅山 智子

平成 13 年 2 月 8 日

## 目次

### 要旨

第1章	はじめに	1
1 - 1	月の地形	
1 - 2	月の地質年代	
1 - 3	本研究のテーマについて	
第2章	観測システムの概要	3
2 - 1	観測に必要な機材	
2 - 2	観測機器の配置	
第3章	観測機器の特性	5
3 - 1	冷却 CCD カメラについて	
3 - 1 - 1	CCDとは	
3 - 1 - 2	冷却 CCD カメラのメリット	
3 - 1 - 3	冷却の必要性	
3 - 1 - 4	撮像画像の種類	
3 - 1 - 5	CCDの分光感度特性	
3 - 1 - 6	CCDの輝度特性テスト	
3 - 1 - 7	画像の周辺歪みテスト	
3 - 2	バンドパスフィルターの透過率	11
3 - 2 - 1	ケンコー製フィルター	
3 - 2 - 2	SBIG 製赤外カットフィルター	
3 - 3	フラットフィールドについて	16
3 - 3 - 1	フラットフィールドとは	
3 - 3 - 2	フラットフィールドの撮像テスト	
3 - 3 - 3	適切なフラット撮像法のまとめ	
3 - 3 - 4	フォーカス位置とフラットフィールド	
第4章	月面撮像テスト	36

4 - 1 冷却温度と撮像画像

4 - 2 解析データの取得

4 - 2 - 1 415nm の画像

4 - 2 - 2 750nm の画像

4 - 2 - 3 950nm の画像

第5章 画像の補正処理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4 2

5 - 1 フラットフィールド補正

5 - 2 放射量補正

5 - 3 幾何補正

5 - 4 輝度値補正

5 - 5 モザイク

第6章 結果および考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4 9

6 - 1 比演算処理

6 - 2 神酒の海，豊かの海

6 - 3 静かの海と晴れの海

6 - 4 雨の海

第7章 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6 1

引用文献

謝辞

付録1：月面観測マニュアル

付録2：画像解析マニュアル

## 要旨

月は今日まで、様々な方法で探査されてきた。地上からの望遠鏡観測に始まり、アポロ計画やルナ計画においては、多くの月面サンプルが持ち帰られ、今日では、多くの探査機による観測が行われている。本研究では、月面組成、特に  $Ti^{4+}$ ,  $Fe^{2+}$  の含有量調査を目的に、フィルターを装着した冷却 CCD カメラを用いて、415nm, 750nm, 950nm の 3 波長で月面分光撮像を行った。月面は、一回の撮像ではすべてを網羅できないので、13~14 枚の画像をモザイクし、全体像を得た。単波長画像では地形起伏による陰影が輝度値情報に含まれるが、比演算 (750nm/415nm, 750/950nm, 415nm/750nm) を行うことで、地形効果が抑えられ、組成によるスペクトルの違いが明らかになる。この手法では、415nm/750nm は Ti に富む地域ほど、750/950nm では、 $Fe^{2+}$  に富む地域ほど明るくなる。これは、 $Ti^{4+}$  による 750nm の反射率低下、950nm における  $Fe^{2+}$  の吸収帯によるものである。本研究では、神酒の海、豊かの海、アポロ 11 号、15 号、17 号の着陸地点である静かの海、晴れの海、雨の海を調査対象地域とした。

調査結果を以下に示す。

神酒の海・・・ $Fe^{2+}$  が乏しい。

豊かの海・・・ $Fe^{2+}$  が豊富。

静かの海・・・ $Fe^{2+}$ 、 $Ti^{4+}$  が豊富。

晴れの海・・・ $Fe^{2+}$  が豊富、 $Ti^{4+}$  に乏しい。

タウラス・リトロー溪谷・・・ $Ti^{4+}$ が豊富。

高地・・・ $Fe^{2+}$ 、 $Ti^{4+}$  に乏しい。

雨の海・・・ $Fe^{2+}$  が豊富、 $Ti^{4+}$  に乏しい。

静かの海、タウラス・リトロー溪谷、高地、雨の海については、アポロ 11 号、17 号、16 号、15 号が持ち帰った月面サンプルの組成と矛盾しない結果が出た。アマチュア用の冷却 CCD カメラによる地上観測でも、月面組成調査が出来たことは、本研究の大きな成果である。

## 第1章 はじめに

### 1 - 1 月の地形

月は、赤道半径 1738km、地球から約 38 万 4400 km の距離で公転している、地球唯一の衛星である。質量比（月/地球）は 0.012300 である。【藤井 1997】

月面は、アルベドが高くクレーターの多い高地と、アルベドが低くクレーターの少ない海に分類される。月が誕生した初期（約 46 億年前）には表面の数百 km は溶融して巨大なマグマの海が出来ていた。マグマの冷却につれ、様々な鉱物が結晶化していったが、軽くて白い斜長石の結晶は表面に浮かんで原始地殻を形成し、重くて黒っぽい輝石やかんらん石の結晶はマグマの海の底に沈んだ。月の高地はこのようにして出来たものであり、その後小天体が衝突して、現在、高地は多数のクレーターに覆われた地域となっている。

今から約 40 億年前に、月に隕石が衝突し、巨大な盆地が出来た。深さ数百 km の部分ではカリウム、ウラン等の放射性元素の崩壊熱が蓄積し、内部の輝石やかんらん石に富む岩石が再溶融した。このマグマが、盆地形成の衝撃で出来た割れ目を通じて地表に達し、盆地内部の低所を埋め、海を形成したと考えられている。

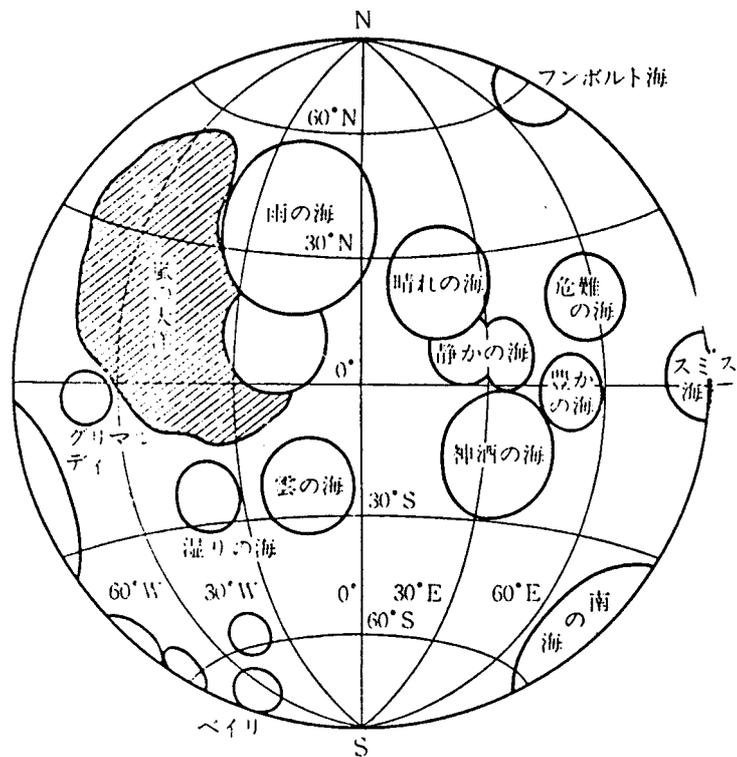
【NASDA 2000】現在の月の地形を、図 1-1 で示す。

### 1 - 2 月の地質年代

月の年代は、海が形成した時代によって区分され、その放出堆積物順序によって、新旧を区別している。約 39~35 億年前には、深さ 100~150km から Ti に富む溶岩が、約 37~31 億前には、深さ 150~200km から Ti に乏しい溶岩が噴出した【武田 1984】。この事実を利用すれば Ti の含有量から、月面の海を造った溶岩噴出年代と、溶岩深度を推定することが可能である。

### 1 - 3 本研究のテーマについて

本研究は、冷却 CCD カメラで撮像した分光画像から、月面の組成分布を知ることが目的である。また、扱う画像データは、人工衛星ではなく地上観測によるものであり、これらを、いかに精度よく解析できるかが、大きな課題となっている。



【図 1-1】 月面地形図 (地球から見た側)  
 [松井 (1996) 及び 武田 (1984) より一部修正]

## 第2章 観測システムの概要

### 2 - 1 観測に必要な機材

#### ・冷却 CCD カメラ

機種名：SBIG ST-6

CCD チップ名：TI TC241

ピクセル数：375×241

ピクセルサイズ：23×27 μm

赤外カットフィルター有り

#### ・シュミットカセグレン天体望遠鏡

機種名：Meade LX-200-20 (F10)

口径：203mm

焦点距離：2000mm

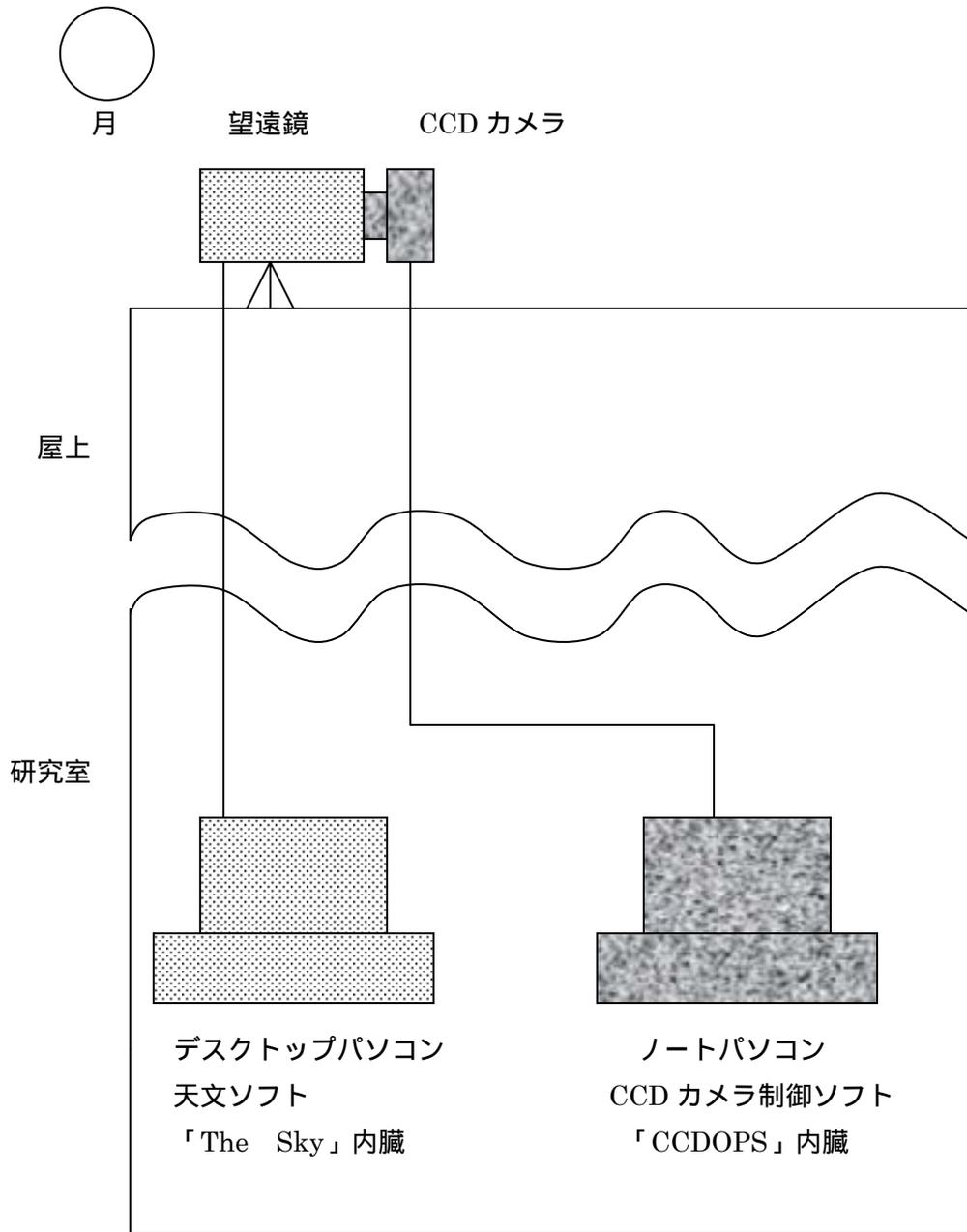
#### ・バンドパスフィルター

表2 - 1 フィルターの仕様。(株)kenko 測定

品名	中心波長	最大透過率	半値幅
BP-415	414.3nm	45.4%	10.4nm
BP-750	748.5nm	50.8%	11.5nm
BP-950	949.0nm	84.0%	6.0nm

## 2 - 2 観測機器の配置

配置の概略を図 2 - 1 に示した。



【図 2 - 1】 観測機器の配置図

望遠鏡、冷却 CCD カメラは屋上に設置し、研究室の 2 台のパソコンと、ケーブルで接続している。CCD の冷却、撮像および望遠鏡の視野移動などは、パソコンで遠隔操作をすることが出来る。

## 第3章 観測機器の特性

### 3 - 1 冷却 CCD カメラについて

#### 3 - 1 - 1 CCDとは？

CCDとは、Charge Coupled Deviceを略した名称で、日本語では「電荷結合素子」と呼ばれている。CCDは、無数の素子できており、入ってきた光を各素子内で電子に置き換えその電子を蓄積する。それらはデジタル変換され、各素子の濃淡の情報として、各画素値に変換され、コンピュータによって画像化される。

#### 3 - 1 - 2 冷却 CCD カメラのメリット（銀塩写真との比較）

光害のひどい都会でも撮れる。

露光時間が短くてよい。

その場で画像を確認できる。

デジタル画像で出力できる。【川口ら，2000】

#### 3 - 1 - 3 冷却の必要性

CCDは、光が全く当たっていない状態でも、暗電流という熱的に発生する電流が生じ、画素毎にレベルが違う電荷信号が出力される。このため画像にノイズが表れ、天体からの微弱な光と区別がつかなくなってしまう。冷却することでこのノイズを抑え、微弱な天体の光を浮き上がらせるのである。

#### 3 - 1 - 4 撮像画像の種類

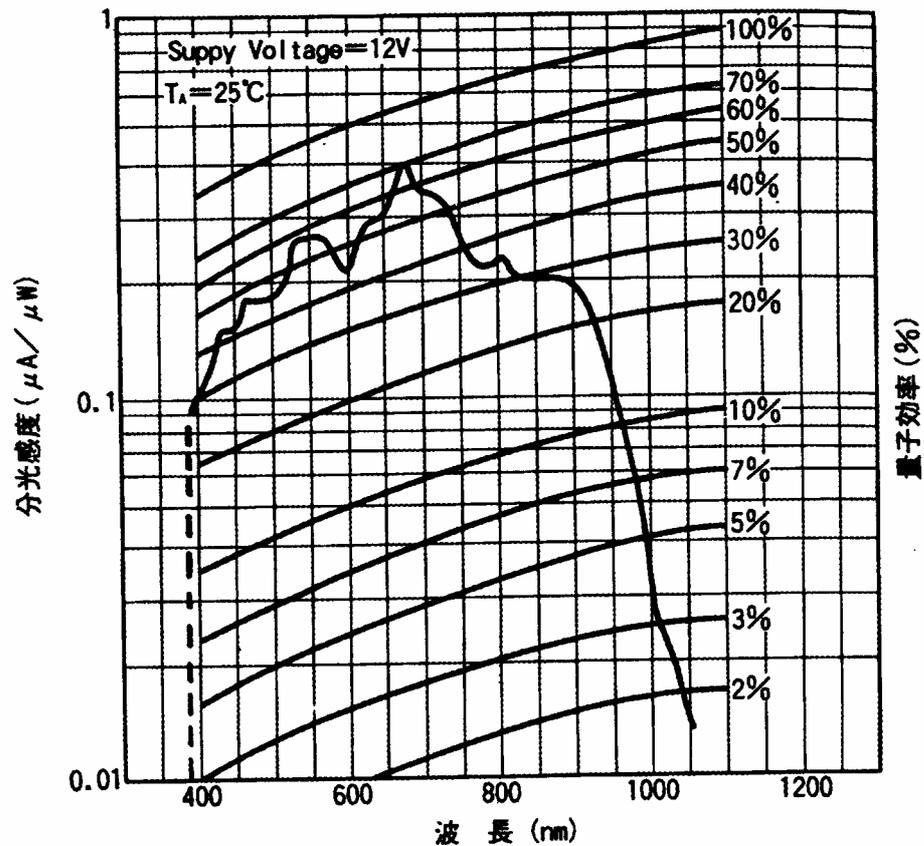
冷却 CCD カメラでの観測は、

1. ライトフレーム画像（撮像したそのままの画像。ノイズやムラを含む。）
2. ダークフレーム画像（CCDに光が当たらない状態にして暗電流によるノイズのみを撮像した画像）
3. フラットフィールド画像（CCD各画素の感度ムラや、レンズのゴミのボケた映像などを撮像した画像。）

これら3種類の画像をワンセットとして、初めて威力を発揮する。CCDOPSでは、ダークフレームの撮像および補正を自動的に行うことが出来る。フラットフィールドについては、3-3で詳しく述べる。

3 - 1 - 5 CCDの分光感度特性

CCDに使われているチップは、波長によって感度が異なる。図3 - 1に、本研究で使用しているTC241の感度特性を示した。最大感度が、波長600nm ~ 700nmの赤色波長域にあり、青色光、赤外光に対する感度は、比較的悪い。



【図 3-1】 CCDチップ (TC241) の分光感度特性[福島 (1996) より一部修正]  
 本研究で使用するフィルターの波長を同時に示した。750nm に比べ、  
 415nm, 950nm の感度は比較的悪い。

### 3 - 1 - 6 CCDの輝度特性テスト

冷却 CCD カメラは、露出時間と輝度レベルが比例する“リニアリティー特性”を持つ。しかし、リニアリティー特性が成り立つ範囲は限られており、実際に天体を撮像する時は、その範囲内の露出時間を設定しなければならない。そこで、ST-6の露出時間に対する輝度特性を調べるために、以下のテストを行った。

#### 【手順】

【図 3-2】のように、スクリーンに均一な光を当て、冷却温度、光学系は一定で、露出時間のみを変化させ、フラットフィールドを撮像する。さらに、光量が少ない時と、多い時、その中間の各条件について、同じように測定する。画像は 375 × 241 の画素で表示されるが、その中心である縦 128 ~ 130、横 185 ~ 18 番目の画素をピックアップし、計 9 ピクセル（画素）の輝度値の平均値を求めた。

#### 【結果】

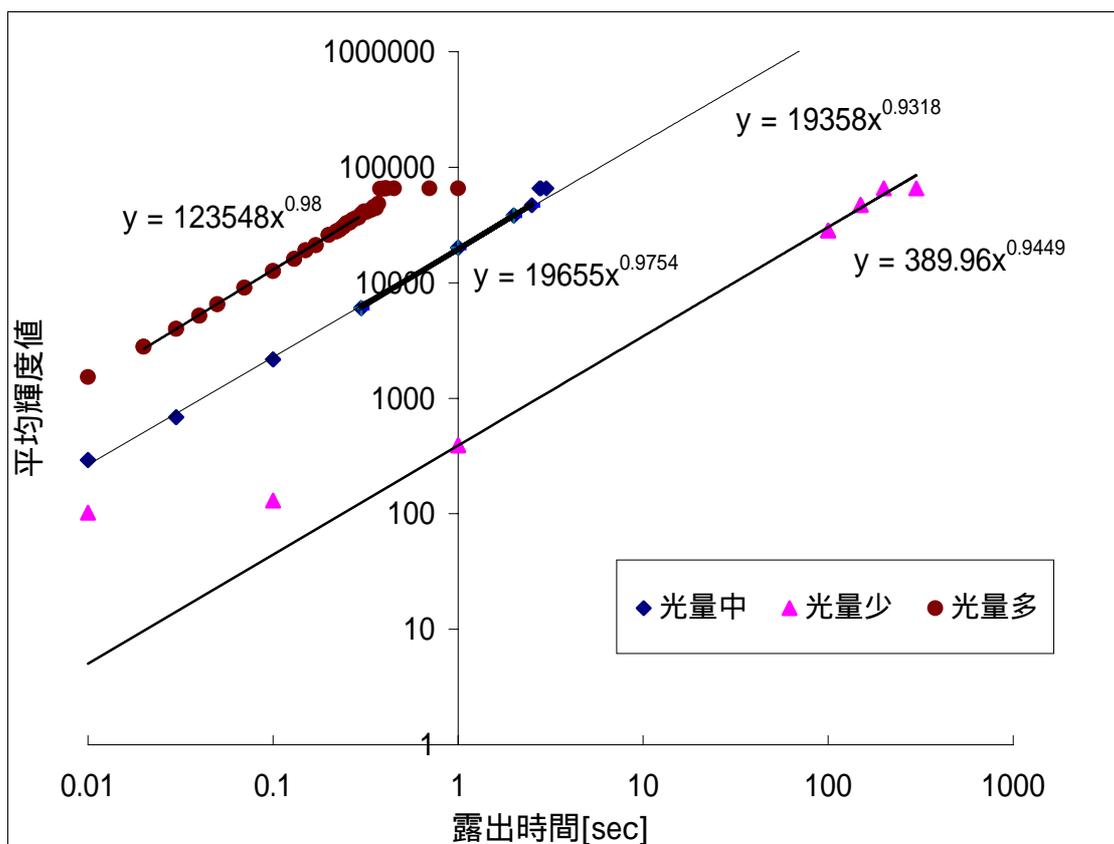
露出時間を横軸、平均輝度値を縦軸にとった両対数グラフを【図 3-3】に示す。月面観測では、撮像地域によっても異なるが、1.5 秒の露出で、20000 ~ 30000 の輝度値が得られる。よって、図 3 - 3 の“光量中”の特性に近いので、観測の際はこの特性のリニアリティーが成立する範囲で、露出時間を設定すればよい。表 3-1 に、“光量中”の特性を示す。次に、測定で指定する露出時間内で、どの程度線形関係が成り立っているかについて調べた。グラフの太字は、本研究で指定した露出時間でもある 0.30 ~ 2.00 秒の範囲で、近似直線を引いた結果である。この範囲では  $x$  の次数は 0.974 で、0.1 ~ 2.00 までについて近似した直線の  $x$  の次数 0.9318 よりも、線形に近いことが分かった。また、0.30 ~ 2.50 秒まで引いた近似直線の式は、 $y = 19655 x^{0.9874}$  であるので、輝度値 46771 までは、リニアリティー特性の範囲内といえる。



**【図 3-2】 フラットフィールド撮像の様子。**

白色スクリーン上の均一散乱光を撮る作業である。

(望遠鏡後部に付けられた、丸い装置が冷却CCDカメラである。)



【図3 - 3】 ST-6の輝度特性

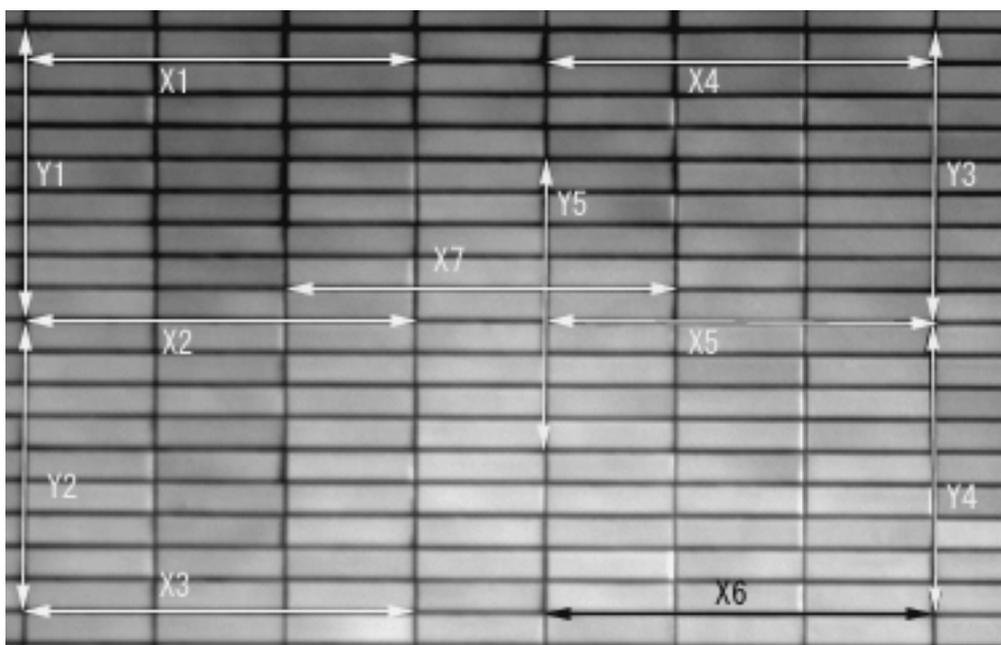
3段階の光量で、露出時間に対する輝度特性を調べた。“光量中”は、月面撮像の輝度特性に最も近かった。グラフの太字は、本研究で指定した露出時間でもある0.30～2.00秒の範囲で、近似直線を引いた結果である。

【表3 - 1】“光量中”の時の露出時間と平均輝度値の関係

露出時間(秒)	平均輝度値
0.01	292
0.03	683
0.1	2169
0.3	6027
1	20072
2	38135
2.5	46771
2.75	65535
2.8	65535
3	65535

### 3 - 1 - 7 画像の歪みテスト

画像の歪みの有無を調べるため、規則正しい格子模様（ビルのタイル）を撮像した。図 3 - 4 の様に、格子の周辺部及び中央部のピクセル数を調べた結果、周辺部、中央とも、レンズによる幾何歪みは無視できる範囲であることが分かった。



**【図 3 - 4】 ST-6 で撮像した、ビルの格子模様**

$X1 = 142, X2 = 141, X3 = 142, X4 = 142, X5 = 142, X6 = 142, X7 = 143$

$Y1 = 106, Y2 = 108, Y3 = 106, Y4 = 107, Y5 = 108$

数字の単位は[pixels]である。これらの誤差は、タイル貼りのばらつきを考慮すると、無視できる範囲である。

### 3 - 2 バンドパスフィルターの透過率

#### 3 - 2 - 1 ケンコー製フィルター

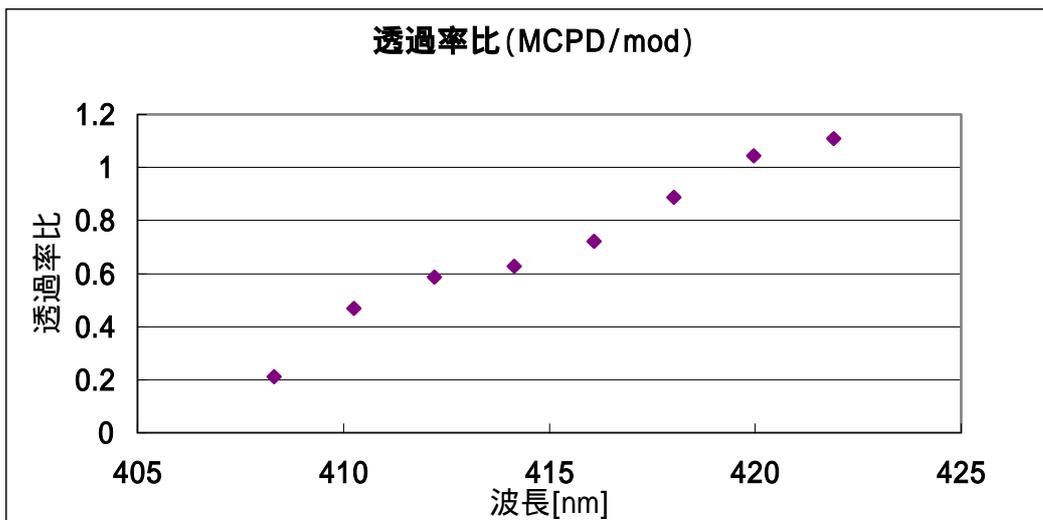
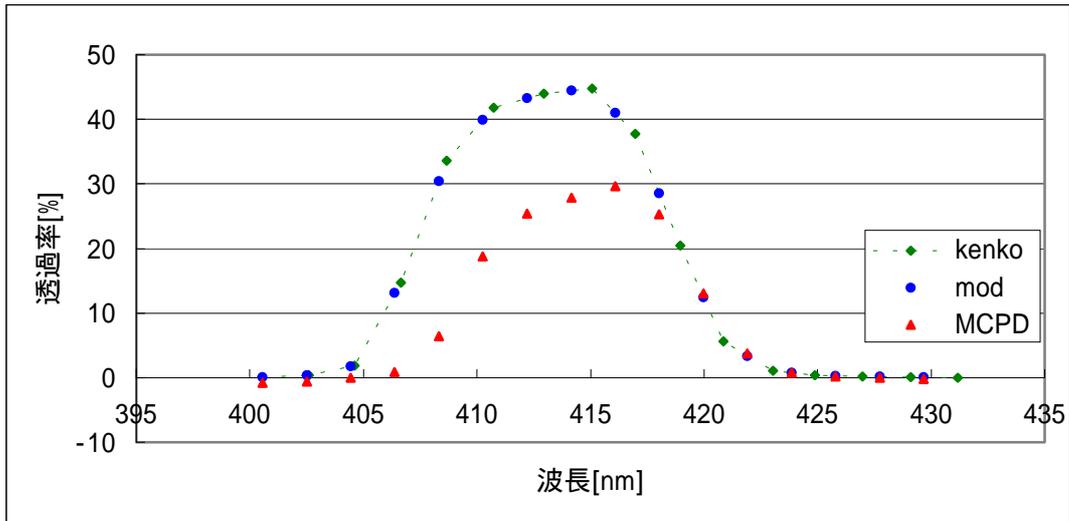
分光観測には、特定の波長のみを通すフィルターが必要である。その透過率特性グラフは、フィルターに添付されていたが、メーカーの測定結果と、本大学の測光システムによる結果が一致するか、テストを行った。測光に用いたのは、千葉研究室所有のマルチ測光システム MCPD-1000 である。これは、最高 1.8nm 単位の精度で、400nm ~ 1000nm 各波長の透過率を示す装置である。それぞれの測定結果を、図 3-5,6,7, に示した。

図の“kenko”は、(株)ケンコーの測定結果であり、BP-415,750 に関しては 1 nm 幅で、BP-950 は、0.5nm 幅で測定されている。“MCPD”は、同名の測光システムによる結果を、示したものである。“mod”は、kenko と MCPD の結果を比較するために、kenko の測定値を、MCPD と同じ 2nm 幅で、再プロットしたものである。

#### 【結果】

一致するかと思われた kenko と MCPD の測定結果に、いくつかの違いが見られた。図 3-5 より、BP-415 は、短波長域ほど透過率比が小さくなっており、最低比率は 0.2 まで落ちている事がわかる。400nm 付近は MCPD で感知できる波長の下限であり、測定透過率がマイナスになるなど、測定値が不安定になっている。そのため、kenko 測定値との大差が見られたと考えられる。この波長の透過光 BP - 750 の透過率比は、最大 1.15、最低 0.717 であり、他の波長と比べると、理想値 1 に近いといえる。この付近の波長は、MCPD の感度が最も高い。BP-950 では、透過率比が、最大 2.862 となり、kenko 測定値との差が大きかった。この波長域は、MCPD の感度の上限であり、測定値が不安定になったと考えられる。また、960nm 以上の波長域で MCPD の測定値が kenko の倍以上になっている。原因として、測定器からの赤外放射が、フィルターを透過した光以外にも検出されたことが考えられる。

Kenko、MCPD それぞれの特性が、以上のような測定値の差を生み出したと思われる。したがって、どちらの測定値が正しいかは一概には言えないが、我々の測定波長域が、MCPD の感度限界付近であることが多かったこと、また、kenko は、より細かい波長単位で測定された結果であることから、kenko 測定値の方が信頼できる可能性が高い

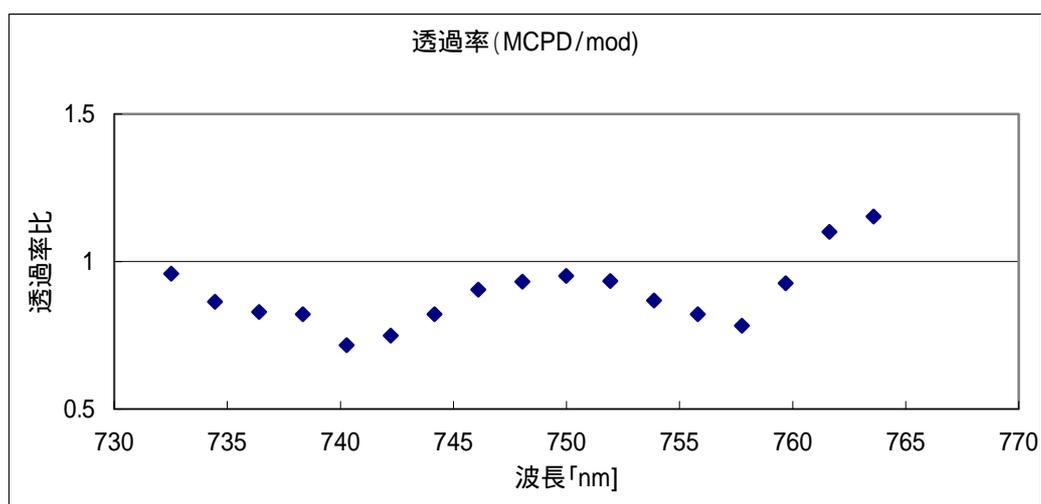
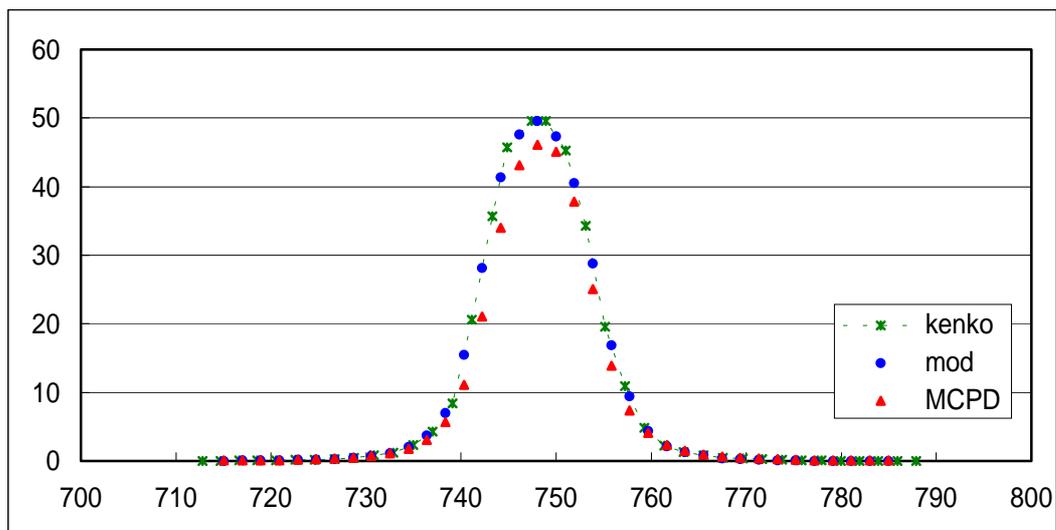


**【図 3-5-1】 kenko および MCPD による BP-415 の透過率 波長特性**

両者で、最大透過波長の値が異なっている。400nm 付近は、MCPD で測定できる波長の下限である。MCPD の両端では、マイナスの透過率値が出ている。

**【図 3-5-2】 透過率比 波長特性**

測定器による透過率の違いを、同じ波長で比較したものである。408nm の透過率比は、0.2 にまで下がっている。

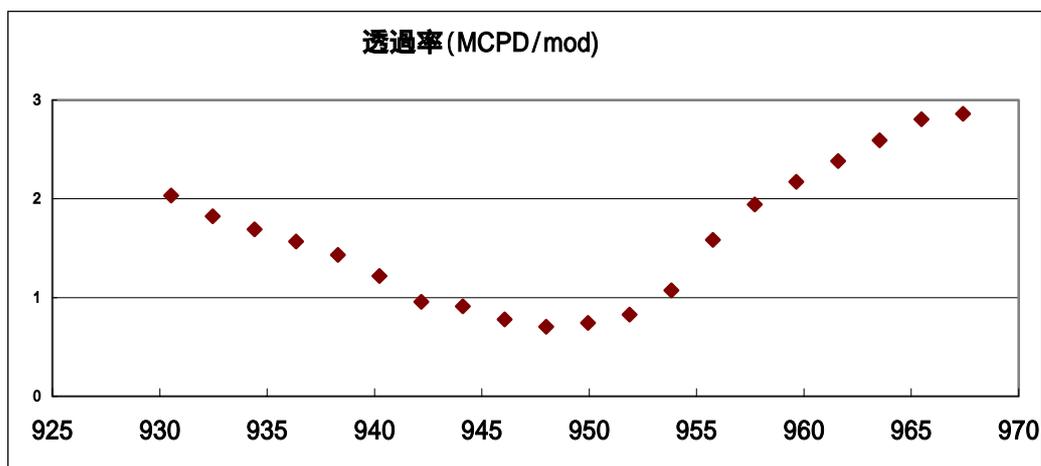
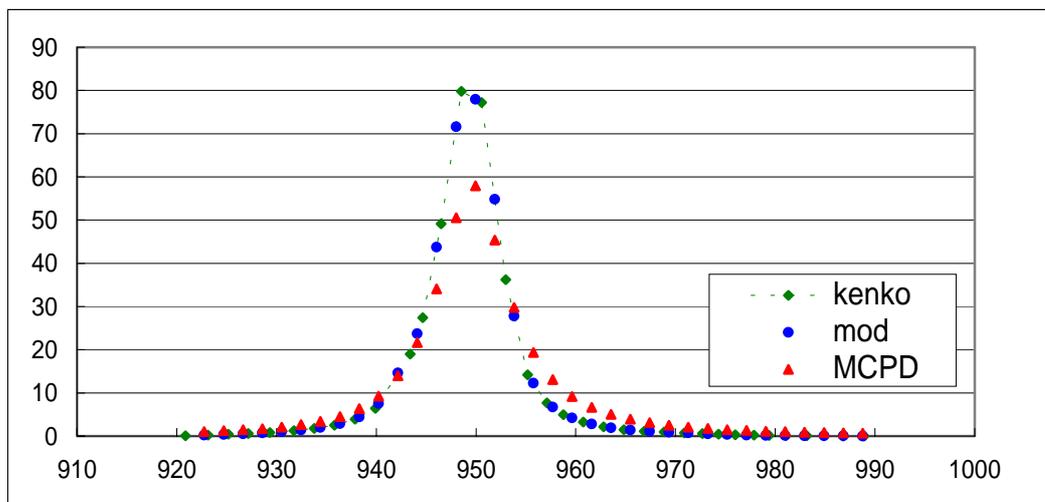


【図 3-6-1】 kenko および MCPD による BP-415 の透過率 波長特性

最大透過波長の値は異なるが、比較的近い。この地域は、MCPD の感度安定域でもある。

【図 3-6-2】 透過率比 波長特性

最大値 1.15、最低値は 0.71 であり、MCPD、mod 値は比較的値が近かったといえる。



**【図 3-7-1】 kenko および MCPD による BP-415 の透過率 波長特性**

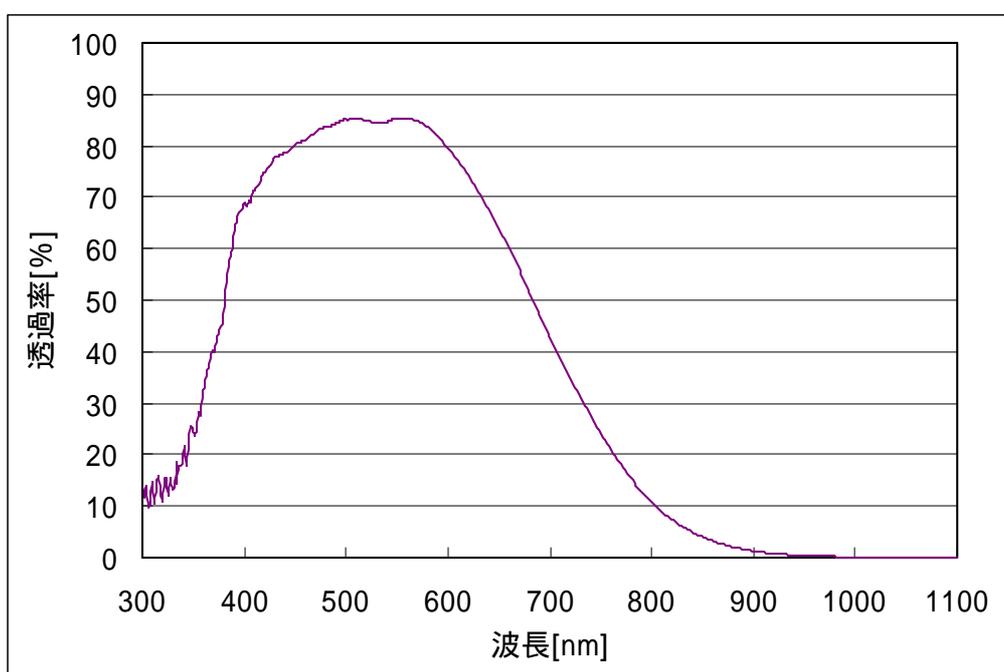
最大透過波長の値は異なっている。また、950nm 付近をのぞくと、MCPD の透過率が kenko のそれより上回っている。

**【図 3-7-2】 透過率比 波長特性**

透過率比は、ほぼ 1 以上であり、この波長域では、MCPD の測定値が高かった。MCPD による赤外放射が、測定器に感知された可能性がある。

### 3 - 2 - 2 SBIG 製赤外カットフィルター

ST-6 には、赤外域での色収差を抑える目的で、赤外カットフィルターが装着されており、このフィルターについても、MCPD による透過率測定を行った。図 3-8 から、900nm 以上の波長が遮断されていることが分かる。本来、このフィルターは、赤外域での色収差を抑えるために用いられるが、本研究のように 950nm の波長で分光観測する為には、赤外カットフィルターを外した方が、短い露出時間で光量が稼げることが分かった。



【図 3-8】 赤外カットフィルターの透過率特性

本研究で採用する 950nm の透過率は、0 % に近い。

### 3 - 3 フラットフィールドについて

#### 3 - 3 - 1 フラットフィールドとは

フラットフィールド画像とは、均一な散乱光を撮像した画像をいう。冷却 CCD カメラで撮像した画像には、CCD 各画素の感度ムラや、光学系による周辺減光、フィルターに付着したゴミなど、光量ムラなどの情報も含まれる。測光をする場合ムラがあると、画素ごとに、撮像対象の光量以外の情報が加えられるので、そのままでは、高精度な結果は得られない。このムラは、フラットフィールド画像で補正することで、軽減される。

図 3-9 から図 3-11 において、フラットフィールド補正過程を示す。

図 3-9 は、フラットフィールド補正をしていない画像である。感度ムラのため、中心部が明るくなっている。

図 3-10 は、フラットフィールド画像である。ドーナツ状のムラや、周辺減光が見られる。  
( Background、Range については、3-3-2 で述べる。)

図 3-11 は、図 3-9 を図 3-10 で、フラット補正した画像である。

画像ムラが解消されているが、ドーナツムラの位置が、逆に暗くなっている。図 3-10 の輝度値差は約 10%あり、大きな輝度差を持つフラット画像で補正をした為、輝度減少が起こったと考えられる。



【図 3-9】ライトフレーム画像

BP-415 装着。遠方の看板を撮像したもの。



【図 3-10】フラットフィールド画像

BP-415 使用。昼間の空を撮像したもの。

Background : 20835      Range : 2217      Range / Back : .0.1064



【図 3-11】フラットフィールド補正後画像

### 3 - 3 - 2 フラットフィールドの撮像テスト

フラットフィールド画像は、CCD や光学系によるムラ情報を得ることが目的なので、均一に散乱された光を撮像しなければならない。当初、フラットフィールドは、すべてスクリーンに照射した光を撮像していた。また、バンドパスフィルターの位置は3種類とも CCD カメラの蓋上部（図 3-15 参照）としていた。しかし、撮像した画像に大きなドーナツ状のムラが出る、感度ムラが大きすぎるなどの問題が発生してきたため、波長によって、適切なフラット撮像法は異なる事が考えられた。適切なフラット画像を得ることを目的とし、以下の項目について、使用する3種類のフィルターをすべて用い、フラット撮像テストを行った。（ただし、は、BP-750のみでテストを行った。）

#### フィルターの固定金具は、どのくらいの強度で締めればよいか。

中心部のみに感度が集中するのは、フィルター周辺部の固定金具が圧迫してフィルターを湾曲させ、凹レンズの役割をしている可能性がある。このテストでは、締め付け強度を変えることにより、フラット画像が改善されるかを調べた。

#### フィルターの装着位置は、どの場所が適切か。また、赤外カットフィルターは、装着すべきか。

フィルターと CCD チップ間で光の反射が起こり、ドーナツ像を作ったとも考えられる。このテストでは、フィルター位置を変えることにより、フラット画像が改善されるかを調べた。フィルター位置の変化については、図 3 - 15 で示した。

#### 最も均一な散乱光を得るためには、どのように光源を設置すればよいか。

フラットフィールドは、均一な散乱光を撮像することが理想であり、波長によって、適切な散乱をする光源は異なる可能性がある。このテストでは、光源を変えることで、フラット画像が改善されるかを調べた。

フラットフィールド画像の評価は、CCD 制御ソフト「CCDOPS」が打ち出す Background 及び Range 値を読み取ることで行った。CCDOPS マニュアルによると、Background より輝度レベルの低い画素は全て黒として、Background + Range 設定以上の画素はすべて白としてディスプレイされ、Range 幅上は全てグレースケールになる。CCDOPS 上で画像を開く際、Auto Contrast を選択すると、画素の 10% は Background より低く、画素の 1% は Background + Range より高くなるように、Background 及び Range 値が、設定される。

すなわち，これらの値は，画素のおおよその分布を知る目安となる。

本来，画素の感度ムラによる輝度値の差は微小なもので，Range 幅が極端に広すぎる場合，CCD の感度ムラ以外の要因を拾っていることになり，適切なフラットフィールド画像とはいえない。そこで我々は，フラットフィールド画像の評価に

Range 値 / Background 値

を用いている．なぜなら，露出時間が倍になると Background，Range 幅の値も倍になるため，Range 幅の値だけでは評価できないからである．すなわち，大きな Background 値に対してより小さな Range 幅を持つ画像が，適切なフラットフィールド画像となる。

フィルターの固定金具は、どのくらいの強度で締めればよいか。

光源は2個の白熱電球を使用した。スクリーンに、45度の角度で左右から照らして均一光をつくり、BP-750を装着したカメラで、フラット撮像を行った。(図3-2参照) フィルターの周辺は、きつく締めた状態、軽く緩めた状態、限界まで緩めた状態の3段階で固定した。フィルター位置は、蓋上部である。

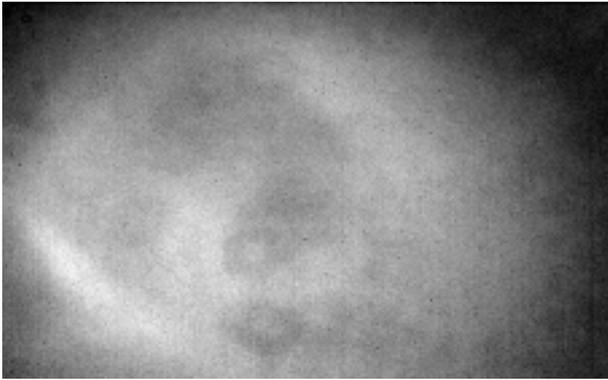
表3-2 締め付け強度によるフラット画像の違い

締め付け方	B	R	R/B	コメント(図番号)
きつく締めた状態	1366	264	0.193	渦巻状のムラがみられ、R/B値が高い(図3-12)
軽く緩めた状態	3025	475	0.157	R/Bは、最も小さいが、渦巻状のムラは消えていない。(図3-13)
限界まで緩めた状態	23964	4048	0.169	R/B値が大きい。また、フィルターが固定されず、不安定であった。(図3-14)

表3-2から、フィルターは適度に緩めたほうが、比較的フラットな画像が得られることが分かった。しかし、締め付け強度の変化による大きな改善は見られなかった。



【図 3-12】きつく締めた状態



【図 3-13】軽く緩めた状態



【図 3-14】限界まで緩めた状態

フィルターの装着位置は、どの場所が適当か。また、赤外カットフィルターは、装着すべきか。

図 3-15 で示したように、装着位置を蓋上部、フィルターホイールクリアー部、赤外カットフィルター部の3段階に設定し、それぞれフラットフィールドを撮像した。また、赤外カットフィルターを外した状態でも、同じように撮像を行った。

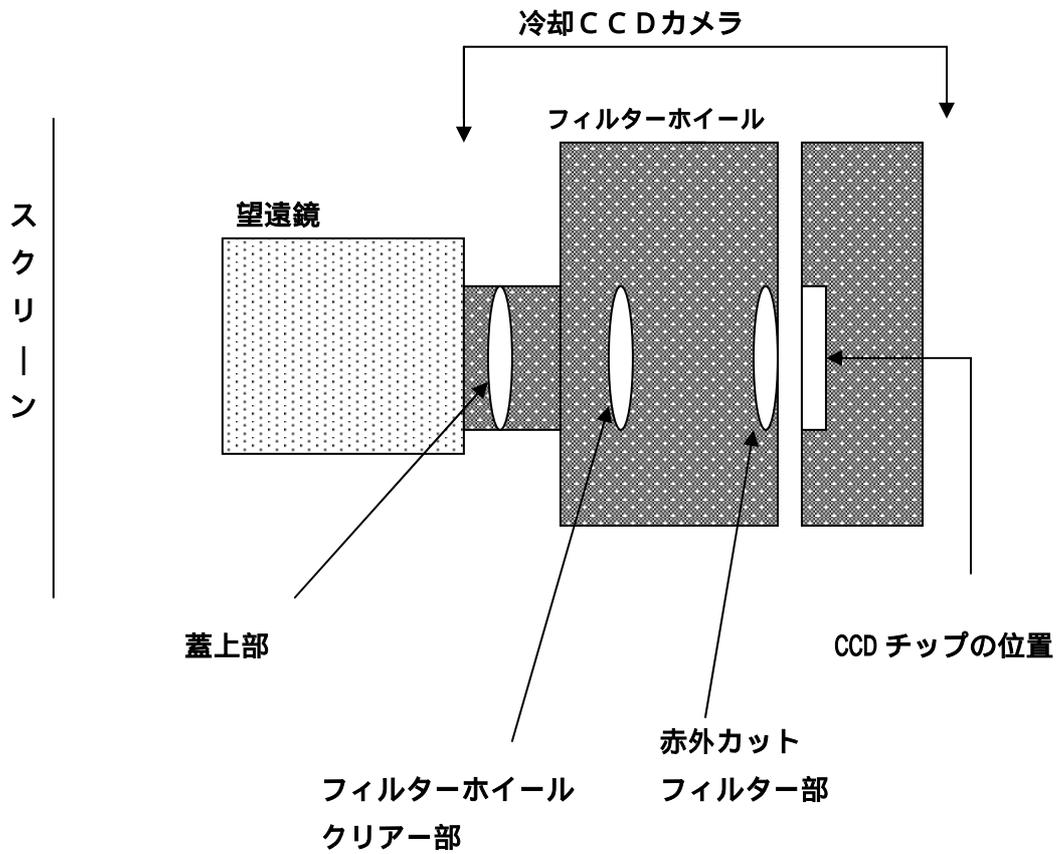
表 3-3,3-4,3-5 に示した R/B 値から判断すると、最も適切な撮像方法は、

BP-415 : 位置は蓋上部で赤外カットフィルターあり、

BP-750 : 位置はフィルターホイールクリアー部で赤外カットフィルター有り、

BP-950 : 赤外カットフィルターを外し、その位置に装着する。

ということが分かった。しかし、BP-750 に関しては、別の日に行った測定で、赤外カットフィルターに装着したほうが R/B 値が小さいという結果も出た。両者の違いは、使用スクリーンや、フィルターのチップに対する回転角度しか無い。このことから、BP-750 は、赤外カットフィルターの有無はどちらが良いか、判断をすることが、難しい。BP-750 のフラット画像の良し悪しは、赤外カットフィルターの有無ではなく、光源の均一性に起因している可能性がある。



【図 3-15】 フィルター位置テストの概略図

3種類の中で、もっとも適切な装着位置を求める。

表 3 - 3 BP - 415 のフィルター位置テスト結果

FW-C は、フィルターホイールクリアー部、IR-F は赤外カットフィルター部を表わす。

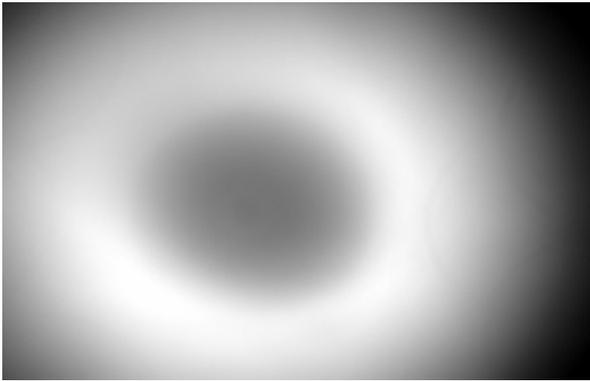
フィルター位置	赤外カットフィルター	B	R	R/B	コメント(図番号)
蓋上部	なし	30639	16332	0.5330	ドーナツ状のムラがあり、R/B値も高い(図 3-16)
蓋上部	あり	18563	5896	0.3176	最もR/B値が低く、最適な位置といえる。しかし、それでもフラット画像としては適切な値とはいえない。(図 3-17)
FW-C部	なし	14396	8705	0.6040	ドーナツムラは小さくなったが、R/B値は蓋上部より大きくなっている。(図 3-18)
FW-C部	あり	4829	5632	1.157	R/B値は最も高い。フィルター着脱の際のホイール回転のため、図 3-18 と比べると像が移動している。(図 3-19)
IR-F部	なし	8010	5825	0.7272	ドーナツムラが小さくなっているが、R/B値は高く、CCDチップと思われる四角形のパターンができています。(図 3-20)

表 3 - 4 BP 750 のフィルター位置テスト結果

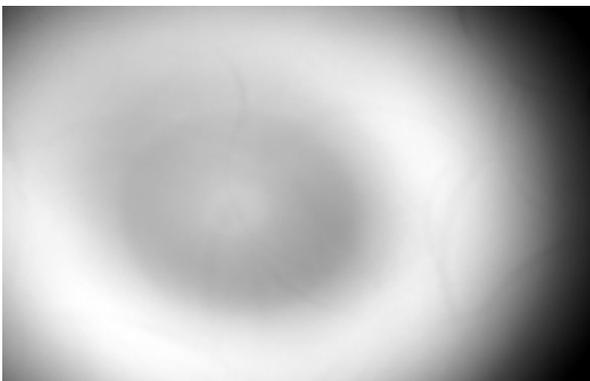
フィルタ-位置	赤外カ ットフ ィルタ-	B	R	R/B	コメント(図番号)
蓋上部	なし	14832	3203	0.2159	渦巻状のムラがあり、R/B 値は最も高かった。(図 3-21)
蓋上部	あり	16630	2340	0.1407	渦巻き上のムラがあるが、チップ上のゴミと思われる小さな黒いドーナツ像が、見えている。(図 3-22)
FW-C 部	なし	12629	1390	0.1101	渦巻状のムラが消え、R/B 値も改善されている。(図 3-23)
FW-C 部	あり	14092	844	0.05989	R/B 値がもっとも低く、最適な位置といえる。また、チップのゴミ像もよく見える。(図 3-24)
IR-F 部	なし	12451	774	0.06216	R/B 値が低く、こちらも適切な位置といえる。しかし、チップのゴミ像は、図 3 - に比べると少ない。 (図 3-25)

表3 - 5 BP 950 のフラットフィールドテスト結果

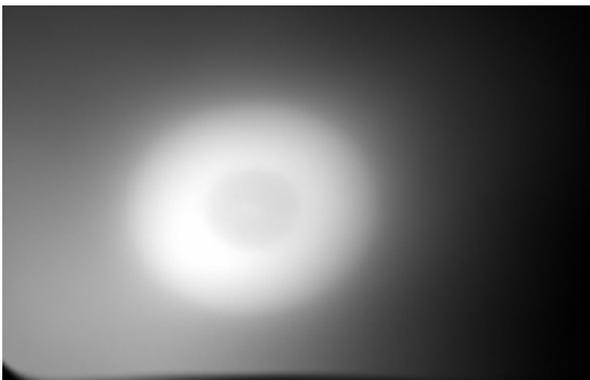
フィルタ -位置	赤外カット フィルタ	B	R	R/B	コメント(図番号)
蓋上部	なし	12376	4400	0.3555	渦巻状のムラが見られ、R/B 値は最も高い(図 3-26)
FW-C 部	なし	10217	1672	0.1636	ムラが小さくなり、R/B 値も改善されている。(図 3-27)
IR-F 部	なし	10566	1548	0.1465	ムラは更に小さくなり、R/B 値も最小である。チップ上のゴミもみられる。(図 3-28)



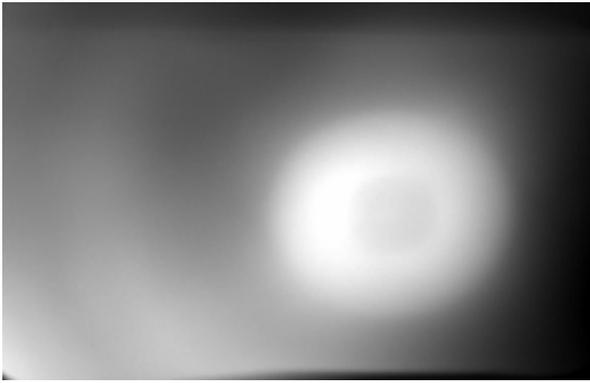
【図 3-16】 BP-415 のフラット画像  
赤外カットなし，蓋上部



【図 3-17】 BP-415 のフラット画像  
赤外カットあり，蓋上部



【図 3-18】 BP-415 のフラット画像  
赤外カットなし，ホイール部



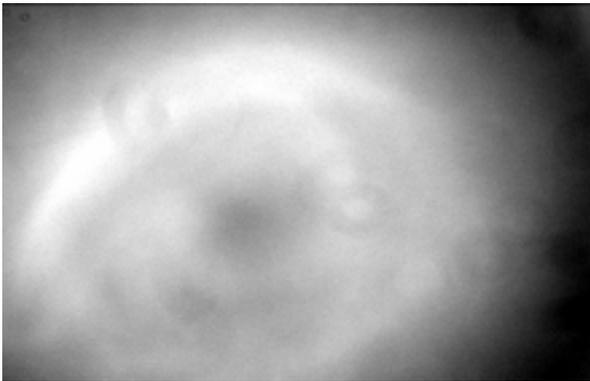
【図 3-19】 BP-415 のフラット画像  
赤外カットあり，ホイール部



【図 3-20】 BP-415 のフラット画像  
赤外カットなし，赤外カット部

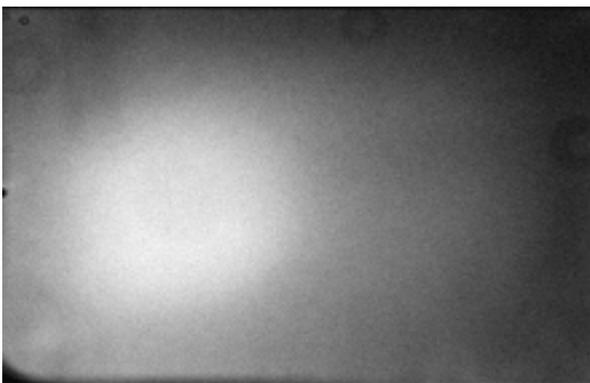


【図 3-21】 BP-750 のフラット画像  
赤外カットなし，蓋上部



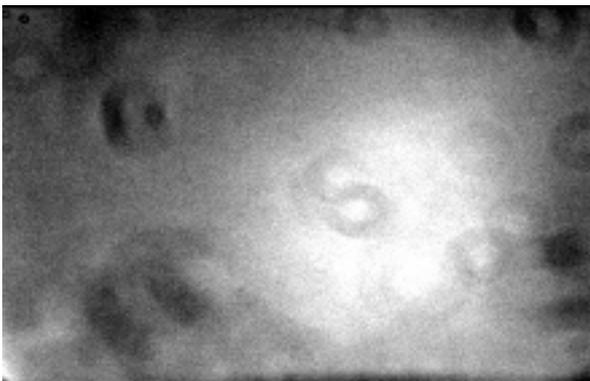
【図 3-22】 BP-750 のフラット画像

赤外カットあり，蓋上部



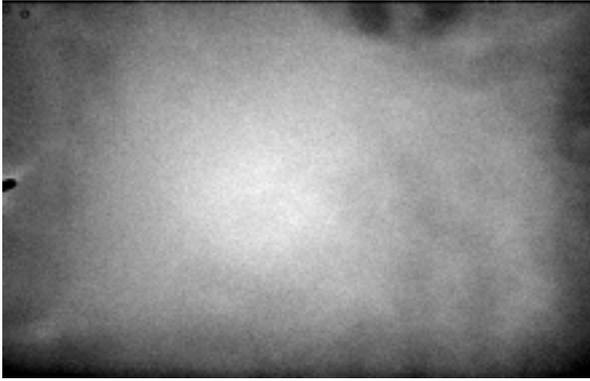
【図 3-23】 BP-750 のフラット画像

赤外カットなし，ホイール部



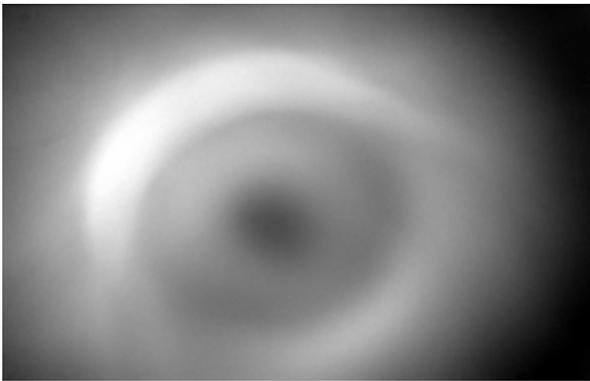
【図 3-24】 BP-750 のフラット画像

赤外カットあり，ホイール部



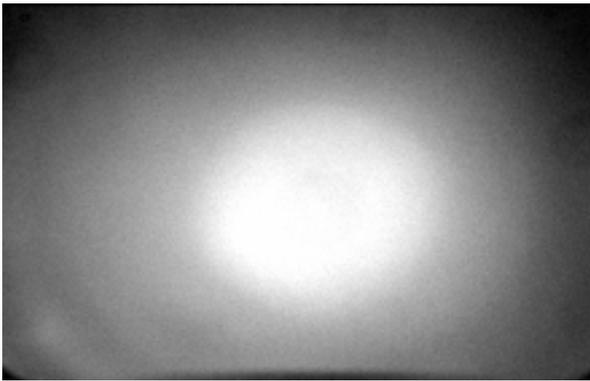
【図 3-25】 BP-750 のフラット画像

赤外カットなし，赤外カット部



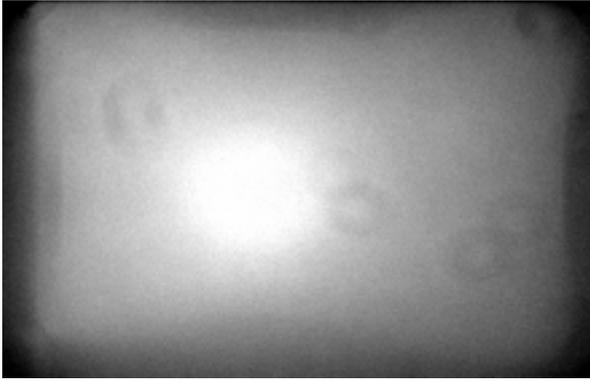
【図 3-26】 BP-950 のフラット画像

赤外カットなし，蓋上部



【図 3-27】 BP-950 のフラット画像

赤外カットなし，ホイール部



【図 3-28】 BP-950 のフラット画像

赤外カットなし，赤外カット部

最も均一な散乱光を得るためには、どのような光源を選べばよいか。

フラットフィールドの撮像方法には、スクリーンに白色光を照射したものをを用いるほか、天文薄明時に、空を撮る方法もある。また、限られた範囲しか透過しないバンドパスフィルターであれば、本来なら明るすぎる昼間の空でも、フラット撮像対象に選ぶことができる。そこで、各バンドごとに適切な光源の選び方があるか、テストを行ってみた。フィルターの位置は、実験2から得られた最適位置を採用している。

表 3-6 光源の違いによるフラット画像の変化

	B	R	B/R	コメント(図番号)
BP-415(スクリーン)	18563	5896	0.3176	R/B 値が高い (図 3-17)
BP-415(昼間の空)	20835	2217	0.1064	R/B 値は最も低く、最適な光源であると言える。(図 3-29)
BP-750(スクリーン)	14092	844	0.05989	R/B 値が最も低く、最適な位置といえる。(図 3-24)
BP-750(昼間の空)	32394	3907	0.126	R/B 値がスクリーンで撮像した場合より高い。(図 3-30)
BP-950(スクリーン)	10566	1548	0.1465	R/B 値は最も低いですが、他の波長のそれらより、やや高めとなっている。(図 3-28)
BP-950(昼間の空)	3159	897	0.2839	R/B 値が高い。(図 3-31)

### 3 - 3 - 3 適切なフラット撮像法のまとめ

この節で行ったテスト結果から、適切な撮像法が、表3 - 6のようにまとめられた。

表3 - 7 各フィルターの適切なフラット撮像法

	BP-415	BP-750	BP-950
フィルター位置	蓋上部	フィルターホイールクリアー部	赤外カットフィルター部
赤外カットフィルター	有り	有り	無し
撮像方法	昼間の雲あるいは空を撮像する。	電球で照明をした、白色スクリーンを撮像する。	電球で照明をした、白色スクリーンを撮像する。

### 3 - 4 フォーカス位置とフラットフィールド

BP-415 による撮像では、フラットフィールド、ライトフレームを撮像する時間帯が異なるため、双方のフォーカス位置が異なることがある。そこで、フォーカス位置の変化によって、フラットフィールド画像の輝度値に大きな変動があるか、テストを試みた。フォーカス位置を10段階変化させ、それぞれのフラットフィールドを撮った。図3-32にその一部の結果を示す。また、比較のために、各画像を処理ソフト ENVI 上で比演算を施した結果を図3-33、3-34に示す。画像に大きなズレがあれば、割り算後の画像にふたたびドーナツムラが現れるはずだが、それは見られなかった。フォーカス前後の画像が完全に一致している場合は輝度値はすべて1となるが、輝度値は、0.96から1.04の間で分布しており、プラスマイナス4%の誤差内で、フォーカス位置が異なっても、フラットフィールド画像には差はないと考えられる。



初期位置



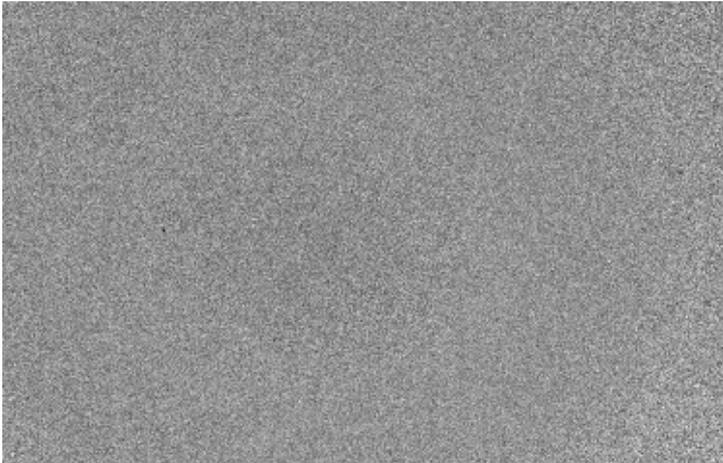
からフォーカスノブを反時計まわりに 360° 回転



からフォーカスノブを反時計まわりに 720° 回転

**【図 3-32】フォーカス位置の変化とフラットフィールド画像**

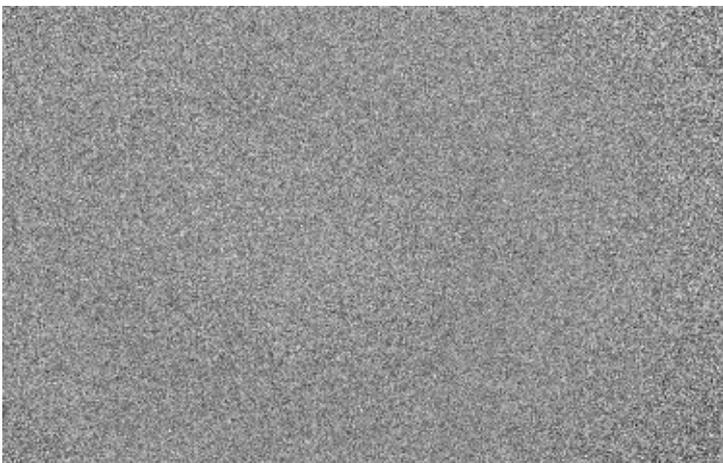
初期位置は である。 から反時計回りに一回転させて撮像したものを とし、さらに反時計回りに回転させた時の画像を とした。



【図 3-33】 の画像 / の画像

輝度分布 0.96 : 0.0%    0.99 : 51.49%    1.02 : 100%

この図は輝度値ヒストグラムにおいて、最低輝度値が 0.96、最高輝度値が 1.02 であり、全画素の 51.49% が、0.96 ~ 0.99 までの範囲に位置している。最も度数の高い輝度値は 0.99 であった。図 3-33 では、0.96 を黒、1.02 を白としたグレースケールで示した。



【図 3-34】 の画像 / の画像

輝度分布 0.99 : 0.0%    1.02 : 52.03%    1.04 : 100%

最も度数の高い輝度値は 1.02 であった。この図は 0.99 を黒、1.04 を白とした、グレースケールで示したものである。

## 第4章 月面撮像テスト

### 4 - 1 冷却温度と撮像画像

ST-6 は、外気温マイナス 40 まで冷却が可能であり、十分に冷却することで、美しい画像が得られる。この節では、冷却と非冷却の場合での違いを考察する。図 4-1 はカメラ温度 13 (非冷却時) の画像である。すべて同じ露出時間で撮像したにもかかわらず、一枚一枚の画像の明るさが異なっており、不自然なモザイク画像となった。これには次の要因が考えられる。

撮像の際、画像の最高輝度値が 3-1-5 で求めたリニアリティー特性の上限である 40000 前後を示す様に、露出時間を定めた。しかし、冷却が十分にされていなかったため、月光ではなく、カメラが発した熱による輝度値が、最高輝度値として読み取られた。このため、露出時間が不十分で暗い画像となったうえ、可視化のためにコントラストをつけたので、各画像の僅かな明るさの違いが強調されたのである。

次に、ST-6 を - 30 まで冷却した場合の撮像画像を図 4 - 2 に示す。明るい画像が得られたので、コントラストは付けなかった。各画像の明るさのバラツキが無いことが分かる。

### 4 - 2 解析データの取得

#### 4 - 2 - 1 415nm の撮像

415nm の撮像結果を図 4-3 に示す。415nm の光は、散乱による減衰を極力無くす為、月が高高度の時を狙う必要がある。しかし、高度が高い時、CCD カメラが経緯台に接触するため追尾することが出来ず、撮像時間が限られることが難点であった。

#### 4 - 2 - 2 750nm の撮像

750nm の撮像結果を図 4-4 に示す。この波長域は、CCD の感度が良く、比較的明瞭な画像が得られた。

#### 4 - 2 - 3 950nm の撮像

950nm の撮像結果を図 4-5 に示す。この波長域は大気散乱が少ないため、低高度での撮像が可能であった。しかし撮像時の湿度が高く、補正板に露が付着した。ドライヤーで送風することでこれを解消したが、露付着時とそうでない時の輝度差が大きく現れた。



415nm



750nm

【図 4-1】月面単色モザイク画像 (6月7日撮像)



415 nm



750nm

【図 4-2】月面単色モザイク画像 (10月7日撮像)



**【図 4-3】 月面単色モザイク画像（415nm）**

2000年12月14日撮像。（月齢18.1）

Photoshop 使用



**【図 4-4】 月面単色モザイク画像（750nm）**

2000年12月9日撮像。（月齢13.1）

ENVI使用



**【図 4-5】 月面単色モザイク画像（950nm）**

2000年12月9日撮像。（月齢13.1）

ENVI使用

## 第5章 画像の補正処理

### 5 - 1 フラットフィールド補正

CCD 各ピクセルの感度ムラや，光学系が原因で起こる光量ムラを補正するには，ライトフレーム画像をフラットフィールド画像で割り算すればよい【福島 1996】。

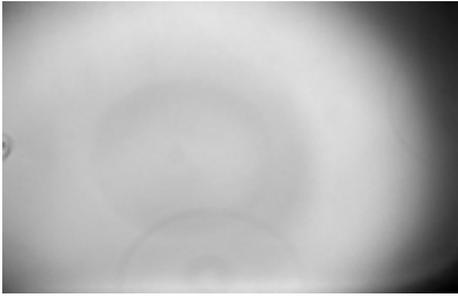
図 5-1,5-2,5-3 において，使用するフラット画像を示した。また，図 5-4,5-5,5-6 において，415，750，950nm 画像のフラット補正前後での比較を示した。

図 5-4,5,6 にはコントラストをつけたが，それでも，補正前後の違いを読み取ることは難しい。一見何も起こっていないようにも見えるが，各ピクセルの輝度値をチェックすると，補正により，僅かに輝度値が変化していることが分かる。表 5-1 は，図 5-5 の BP-750 ティコクレーター画像を CCDOPS でフラットフィールド処理した様子であり，座標の異なる幾つかのピクセルを測定したものである。

表から，この演算では，ライトフレーム輝度値を，フラットフレーム輝度値で割り算した値に，22730 前後の実数を掛け，その値を補正值としていることが読み取れる。この 22730 という値が，何を根拠に定められているかは不明である。フラットフィールドの輝度値分布は 1%：23152 50%：24512 99%：26080 となっている。これは，最低輝度値が 23152 で，全画素の 50%が 23152 から 24512 の輝度値を持ち，輝度値 26080 までに，画素の 99%が収まっていることを示している。このことから，ライト/フラット画像の輝度値に，フラット画像の輝度分布 0～1%に位置する値を用いているものと考えられる。

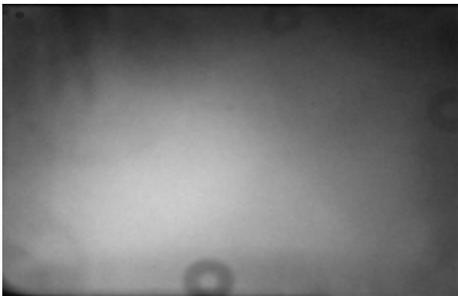
表 5-1 CCDOPS によるフラットフィールド演算処理

座標 X , Y	ライトフレーム(輝度値)	フラットフィールド(輝度値)	割り算した値	補正後(輝度値)	補正後/割り算値
147 , 157	28452	26126	1.08903008	24747	22723.89013
173 , 217	18759	24531	0.76470588	17383	22731.61538
363 , 15	22250	23231	0.95777194	21767	22726.70458
57 , 81	32066	24459	1.31101026	29797	22728.27365



【図 5-1】 BP-415 によるフラットフィールド画像  
昼間の空を撮像したもの

B : 19752    R : 2164    R / B : 0.1096



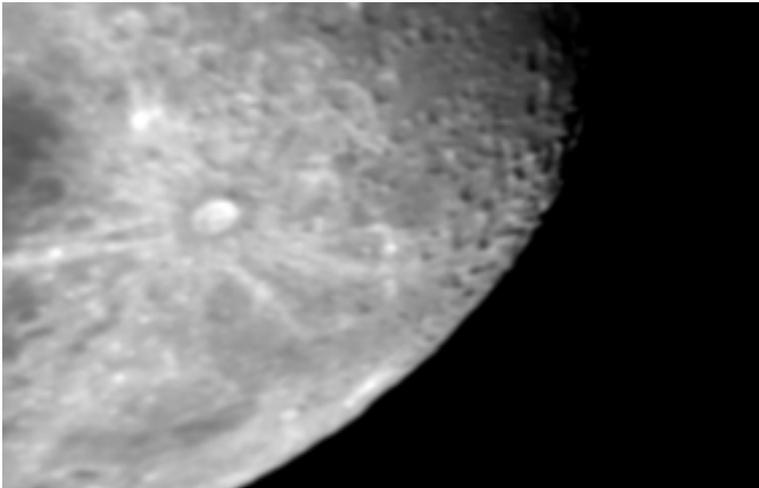
【図 5-2】 BP-750 によるフラットフィールド画像  
薄明の空を撮像したもの

B : 23505    R : 2552    R / B : 0.1089

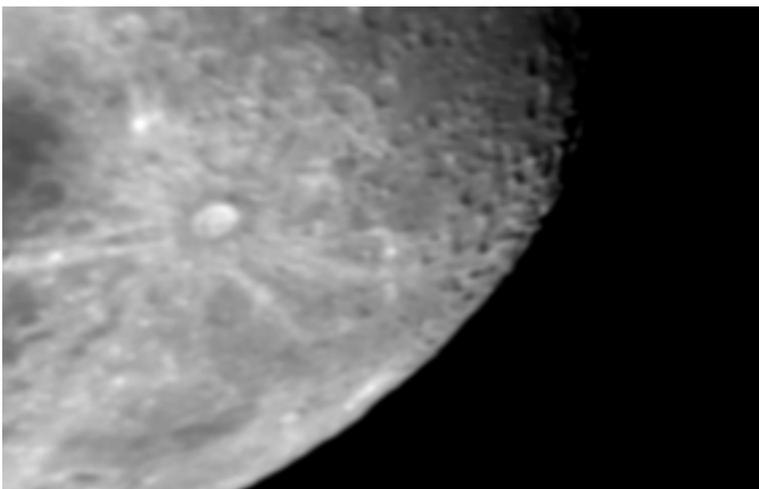


【図 5-3】 BP-950 によるフラットフィールド画像  
白色ボードを撮像したもの

B : 20185    R : 3115    R / B : 0.1543



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 5-4】 415nm 単色画像のフラット補正**

ティコクレーター（12月14日撮像）



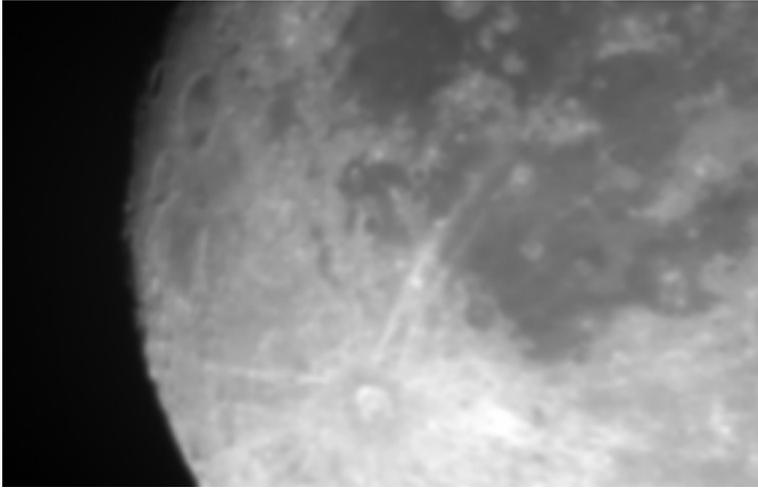
フラットフィールド補正前



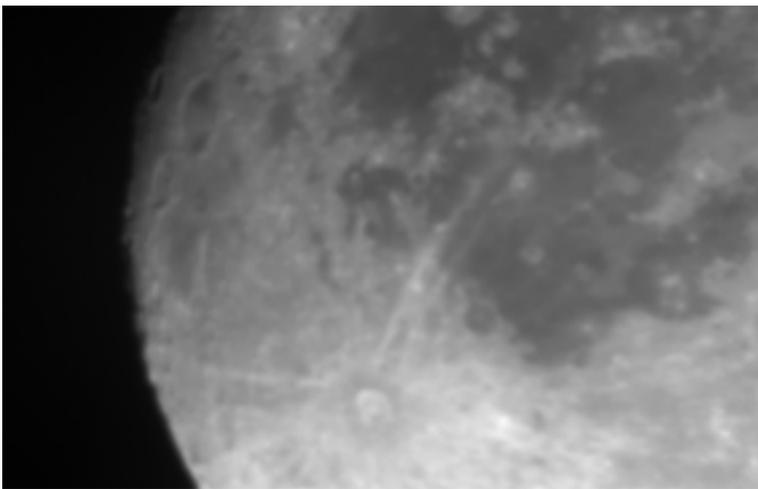
フラットフィールド補正後

**【図 5-5】 750nm 単色画像のフラット補正**

ティコクレーター（12月14日撮像）



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 5-6】 950nm 単色画像のフラット補正**

ティコクレーター（12月9日撮像）

## 5 - 2 放射量補正

バックグラウンド（夜空）の輝度値は、光害や大気の散乱などにより、ゼロでない。それらは、撮像時間や位置により大きく異なるので、正確な測光のために、モザイクをする画像のバックグラウンド値は、統一させる必要がある。本研究では、画像毎に調べたバックグラウンド値を減算し、すべて0に揃えた。

## 5 - 3 幾何補正

望遠鏡には、経緯台を用いているため、時間経過による月の回転を追尾する事が出来ず、異なる時間に撮像した月面画像は、それぞれに姿勢がずれてゆく。このため、隣接する画像が合わず、モザイクを行うことが困難となる。基準画像を設定し、他者はそれに合わせて幾何補正をしなければならない。本研究では、Image-to-Image補正法を用いた。

Image-to-Image 補正法とは、ある画像を、基準となる画像に投影し、座標の変換を行う方法である。式（1）を用いて、座標（ $x',y'$ ）を $(x,y)$ に変換する。

$$\begin{aligned}x' &= (a_0) + (a_1)x + (a_2)y \\ y' &= (b_0) + (b_1)x + (b_2)y\end{aligned} \quad \text{————— (1)}$$

係数（ $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ ）を求めるために、GCP（Ground Control Points）の選択が必要となる。GCPは、基準画像および補正すべき画像の双方に一致する基準点として選択する。そして、一つの画像に3点以上、なるべく広い範囲に満遍なく取る。図5-7に、GCPの選択例を示した。

n番目の補正すべき画像のGCP座標を $(x'_n, y'_n)$ 、基準画像のGCP座標を $(x_n, y_n)$ とする。1～nまで全ての $(x'_n, y'_n), (x_n, y_n)$ を式（1）に代入して、最小二乗法を使えば、最適な係数を計算することができる。

ただし、GCPは、RMSエラー値に注意して選ぶ必要がある。例えば、n個のGCPから、式（1）の係数が求められたとする。式（1）に、変換前の座標 $(x'_n, y'_n)$ を代入すると、変換後の座標 $(x, y)$ が求められるが、これが $(x_n, y_n)$ と一致することは稀であり、大抵はズレが生じる。このズレをRMSエラー値として

$$\text{RMS}_{\text{error}} = \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2} \quad \text{—————} \quad (2)$$

RMS エラー値は、各 GCP に与えられる。トータルエラーを最小限に抑えるために RMS の大きな GCP は、間引かねばならない。

このようにして、最終的に残った GCP から、再び式 (1) の係数をもとめ、変換式を完成させる。補正すべき画像のすべての座標を、この式に代入すると、座標変換され、基準画像への投影が完成する。

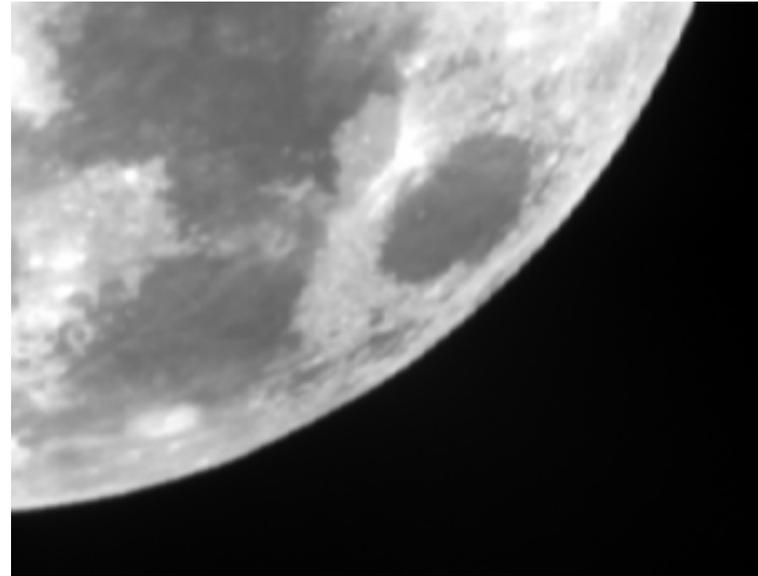
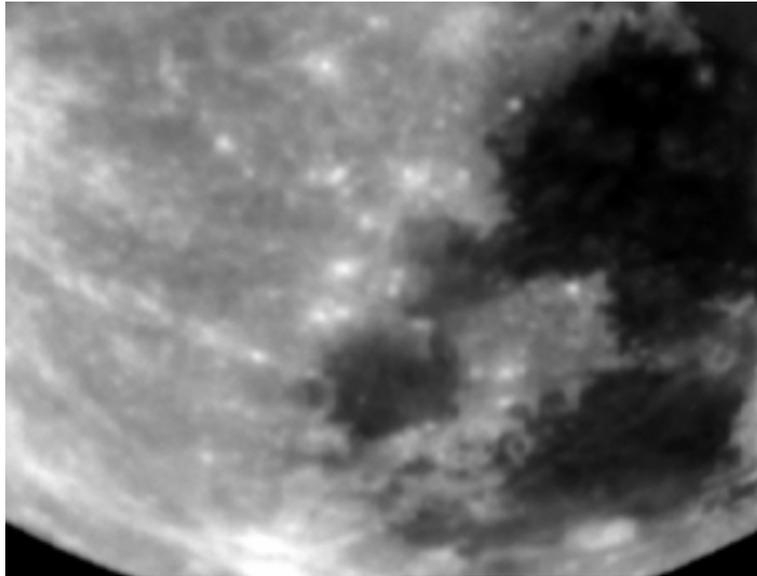
本研究では、図 5-7 のように、2 枚の画像の重複部から GCP を決定し、幾何補正を行った。基準画像に合わせて補正画像が回転した様子を、図に示した。

#### 5 - 4 輝度地補正

幾何補正で月の姿勢を揃えても、図 5-7 のように、画像の階調が異なると、モザイク画像が不自然となる。その上、輝度値が決め手となる分光観測では、階調差があると、正確なデータを得ることは出来ない。この階調差は、撮像時間によって、大気路程差、天候が異なることから生み出されるものである。しかし、重複した同じ地域のヒストグラムは、相似形をなしているので、高輝度値の画像と低輝度値の画像の輝度比を求め、低輝度値画像の変換定数とする。低輝度値画像の画素すべてに変換定数を乗算すると、両画像の同一地域内での、平均階調が一致し、モザイクが可能となる。

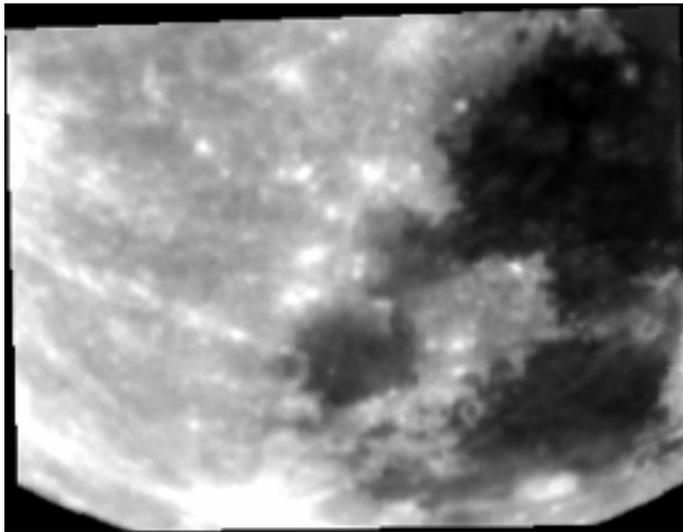
#### 5 - 5 モザイク

補正処理を施した画像をモザイクし、一枚の月面画像を完成させる。この際、画像の周辺部は、フラットフィールド補正により、輝度値が上がっているので、極力用いないようにする。モザイクで隣接する部分は、その輝度差が著しくならない様、両画像の中心付近を用いることが望ましい。モザイク後の画像を図 5-9 に示した。

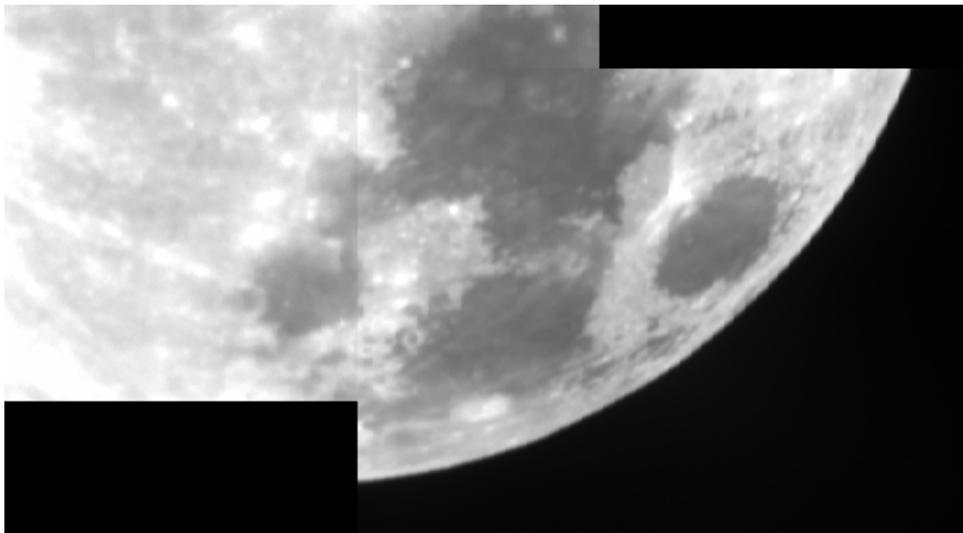


**【図 5-7】 GCP の選択例**

モザイクする画像の共通地域を選択し、GCP を与える。  
を基準画像、 を補正画像とする。



【図 5-8】 図 5-7- の幾何補正後画像



【図 5-9】 モザイク画像

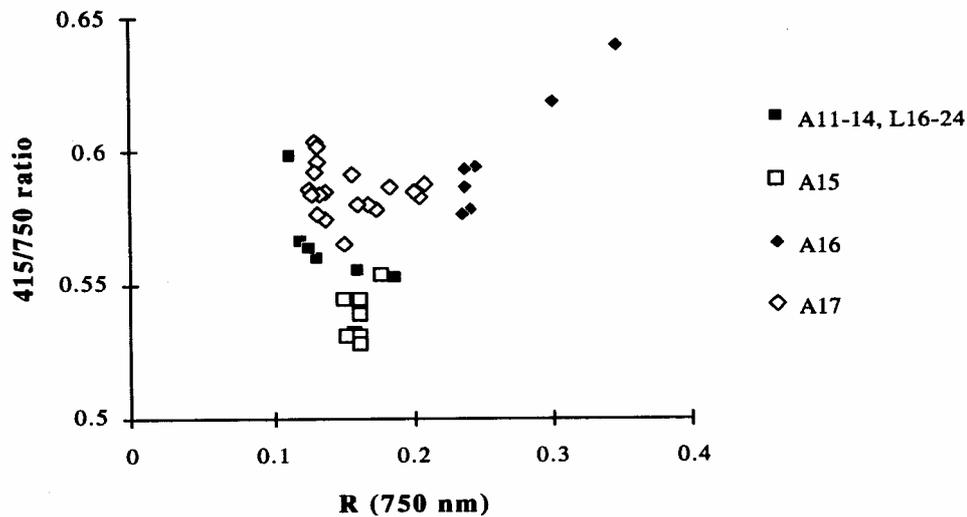
## 第6章 結果および考察

### 6 - 1 比演算処理

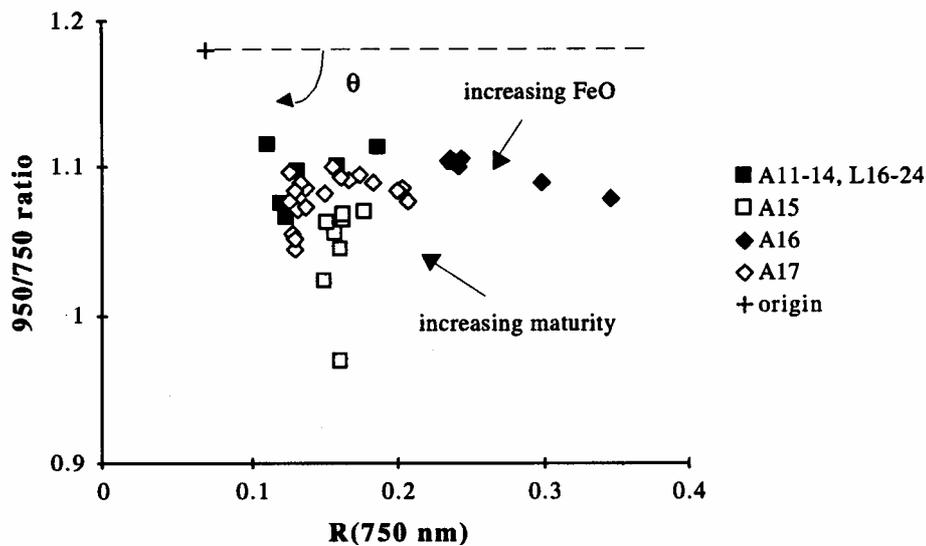
単バンド画像では、地形の起伏による輝度差情報が含まれるが、非演算処理（750nm / 415nm、750nm / 950nm、415nm / 750nm）を行うことで地形効果を抑え、組成や風化の度合いによるスペクトルの違いが明らかになる。アポロやルナが持ち帰った岩石サンプルを分析すると、FeO や  $\text{TiO}_2$  の含有量が分かる。また、その採取地点をクレメンタイン探査機で分光撮像し、図 6-1 , 図 6-2 のようにプロットしたところ、 $\text{TiO}_2$  に富む地域ほどグラフの左上に、FeO に富む地域ほど、左下にプロットされることが分かった。【Lucey et al 1997】

すなわち、750nm の反射率が同じ地点においても 750nm./415nm の輝度値が大きくなる程  $\text{TiO}_2$  に、750nm/950nm の輝度値が大きくなる程、FeO に富むといえる。このことは、図 6-3 に示した月面サンプルのスペクトル特性からも説明することが出来る。15401 は、アポロ 15 号が採取した FeO に富むサンプルである。950nm 付近に反射率の低下がみられるが、これは 2 価鉄の吸収によるものである。【Heiken et al.,1991】また、750nm での反射率が高いため、750nm / 950nm の値は大きくなる。74001 は、アポロ 17 号が持ち帰った Ti に富むサンプルである。415nm は、Ti による吸収のため、反射率が小さくなっている。しかし、15401 に比べ、750nm の反射率も大きく下がっていることから、415nm / 750nm の値は、15401 よりも 74001 の方が大きくなる。【Heiken et al.,1991】

本研究では、アポロの着陸地点を中心に、月面を幾つかの地域に分け、750nm / 415nm に赤、750nm / 950nm に緑、415nm / 750nm に青を割り当てた 3 色合成画像を作成した。これにより、地域ごとの色の違いから、月面組成の分布を見ることが出来る。Ti に富む地域では青、Fe に富む地域では緑～黄色、高地では赤色を呈することになる。さらに、過去に持ち帰られた月面サンプルにより、おおよその組成がすでに知られており、本研究での解析結果との比較が可能となる。

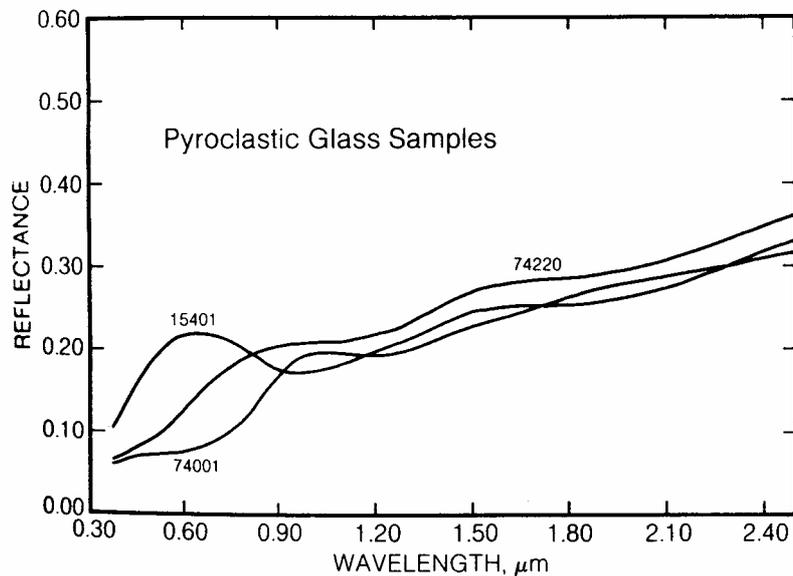


【図 6-1】月面サンプル採取地点の 415/750 比演算 - 反射率特性 (Lucy et al.1997 より)  
 アポロが持ち帰った月面サンプルに関して、縦軸に 415/750,横軸に 750nm の絶対反射率を示したもので、グラフの左上にプロットされる程、TiO<sub>2</sub> に富む。



【図 6-2】月面サンプル採取地点の 950/750 比演算 - 反射率特性 (Lucy et al.1997 より)  
 アポロが持ち帰った月面サンプルに関して、縦軸に 950/750,横軸に 750nm の絶対反射率を示したもので、

率を示したもので、グラフの左下にプロットされる程、FeO に富む。



【図 6-3】月面サンプルの、可視近赤外反射率特性 (Heiken 1991 より)  
15401 は、アポロ 15 号採取のサンプルである。950nm 付近でによるスペクトル吸収が見られる。74220 , 74001 は、アポロ 17 号のサンプルで、300 ~ 500nm に Ti によるスペクトル吸収がある。

## 6 - 2 神酒の海，豊かの海

月齢 13.1 における神酒の海、豊かの海を図 6-4 に 750nm，図 6-5 に 950nm の画像を示す。これらの画像から、スペクトル吸収による輝度差を読み取ることは困難だが、750nm の画像を 950nm の画像で割ると、豊かの海東部に輝度の強調が見られた。750nm/950nm の画像では、鉄が 950nm に吸収帯を持つため、鉄に富む地域は相対的に明るくなる。よって、豊かの海は、神酒の海に比べ、FeO に富むと考えられる。いっぽう、神酒の海は、豊かの海に比べて暗くなっており、比較的、FeO に乏しい地域であるといえる。

## 6 - 3 静かの海と晴れの海

アポロ 11 号は、静かの海 (23.49E,0.67N) に着陸した。これは月面軟着陸に成功した初の探査機でもある。また、アポロ計画最後の 17 号は、タウラス・リトロ地域 (31.76E,20.16N) に着陸し、月面サンプルを持ち帰った。[NASDA 2000] この節では、11 号、17 号の着陸地点でもある静かの海、晴れの海の組成について述べる。(海の位置関係は、図 1-1 を参照)

図 6-7~6-13 で 3 種類の比演算画像を、図 6-14 で、3 色モザイク画像を示す。図 6-13 において、比演算画像で、晴れの海、静かの海で明るさが異なることから、これらは組成の異なる海であるといえる。図 6-13 より、静か、晴れ 2 つの海は組成分布が異なることが分かる。静かの海は、青が強調されており、TiO<sub>2</sub> に富むことが分かる。また、Ti に富むという事実から、静かの海は晴れの海より前に噴出したと考えられる。

(1 - 2 月の地質年代 参照)。また、晴れの海南端の、タウラス・リトロ地域も青を呈しており、この地域も TiO<sub>2</sub> に富むと言える。

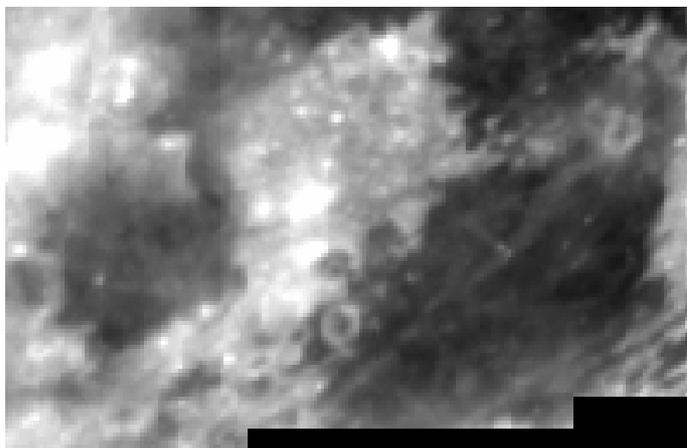
事実、アポロ 11 号、17 号が持ち帰った岩石には、TiO<sub>2</sub> が 9~13% という大きな割合で含まれていた。(危難の海玄武岩の TiO<sub>2</sub> 含有は、1% 前後である。)[武田 1984]

この事実は、図 6-13 から得られた解析結果と矛盾していない。晴れの海は、全体的に緑色~黄色を呈しており、鉄に富む地域といえる。また、静かの海ほどではないが、低緯度部は青みを帯びており、Ti を含むことが分かる。高地は赤色を示し、Fe, Ti とも含有量が少ないといえる。

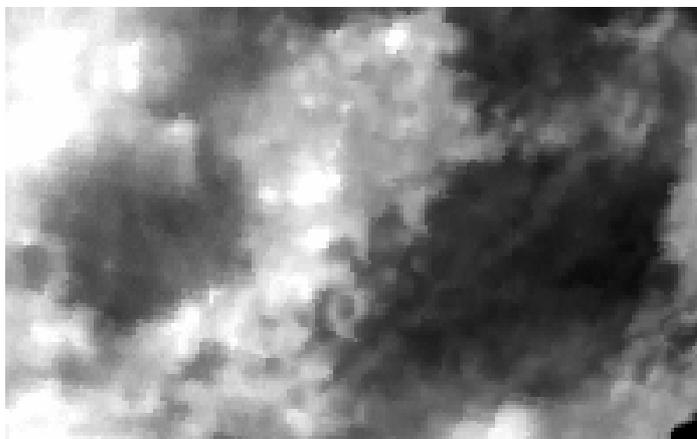
## 6 - 4 雨の海

雨の海内部のアペニン山脈のふもと (3.65W,26.10N) に着陸したのは、アポロ 15 号である。[武田 1984] 図 6-3 の 15401 のような Fe に富み、Ti に乏しいサンプルが持ち帰られた。図 6-19, 20 では雨の海中央で、明るさの違いが現れている。東部に比べ、西部の方が 415/750 が強調されていることから、東部は比較的 Ti に富む可能性がある。図 6-21 では、3 種類の明るさの違いがみられ、中央部が最も明るくなった。図

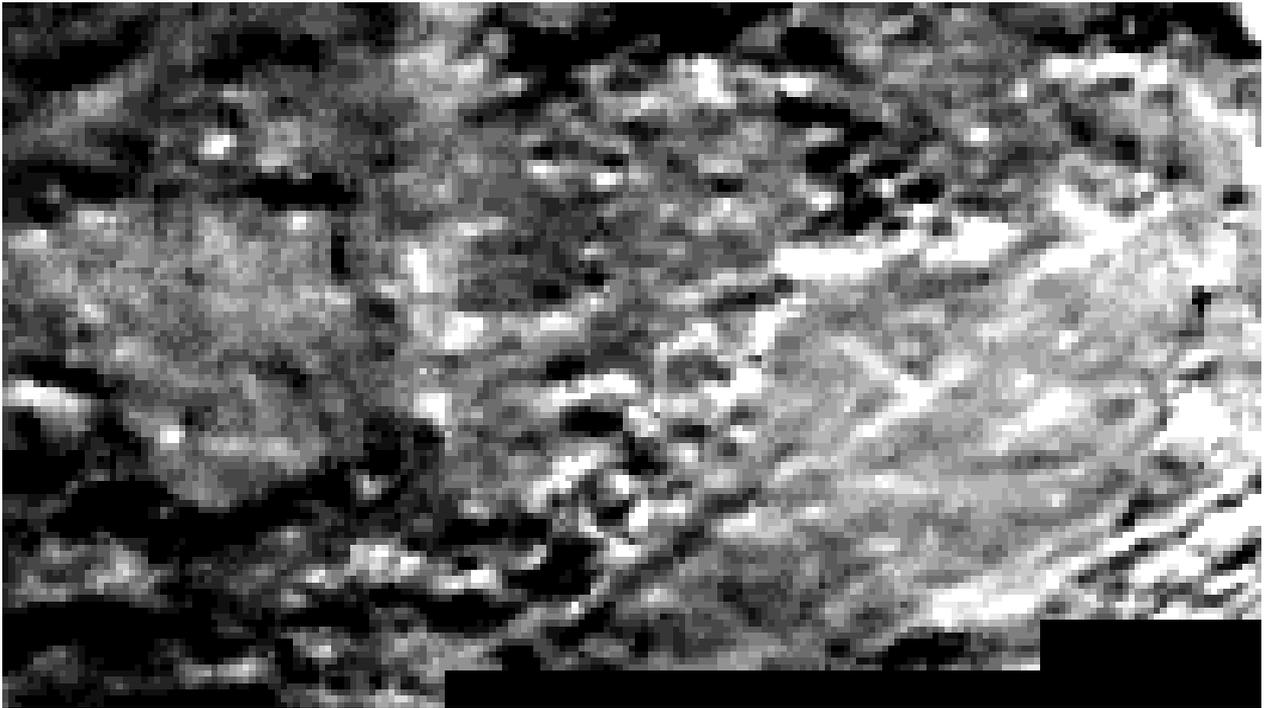
6-22 は3色画像であり、中央部は緑色から黄色が強調されており、Fe に富む地域といえる。また、青色を呈していないことから、Fe にくらべ、Ti に乏しいことが分かった。



**【図6 - 4】 月面単色モザイク画像（750nm）**  
神酒の海および豊かの海（12月9日撮像）



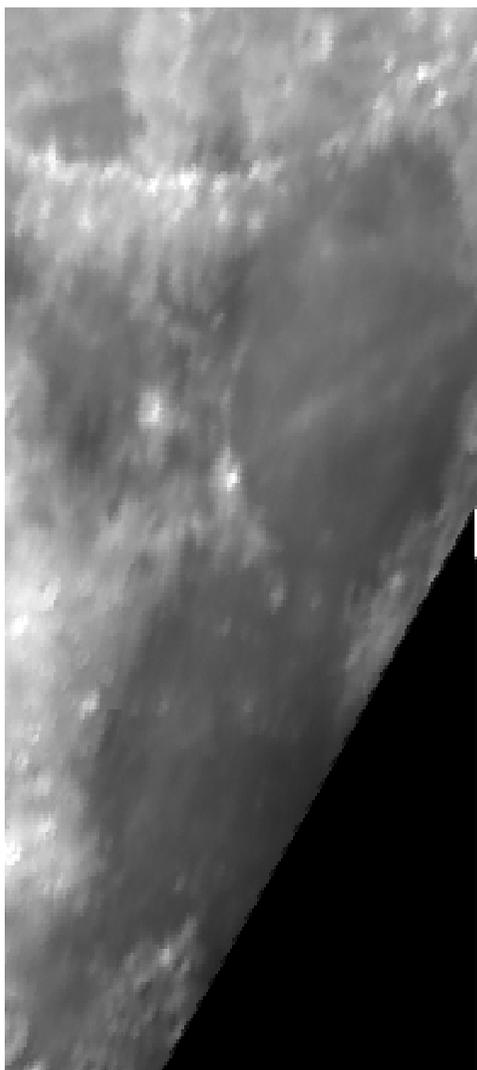
**【図6 - 5】 月面単色モザイク画像（950nm）**  
神酒の海および豊かの海（12月9日撮像）



**【図 6-6】 比演算画像 (750nm / 950nm)**

豊かの海東部で、輝度値が高くなっている。

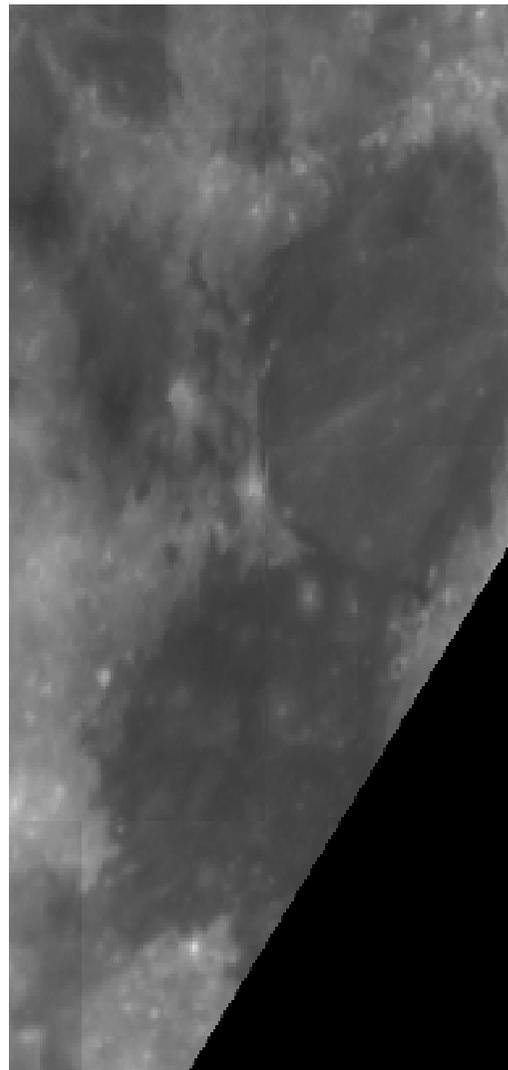
この地域は鉄に富むものと思われる。



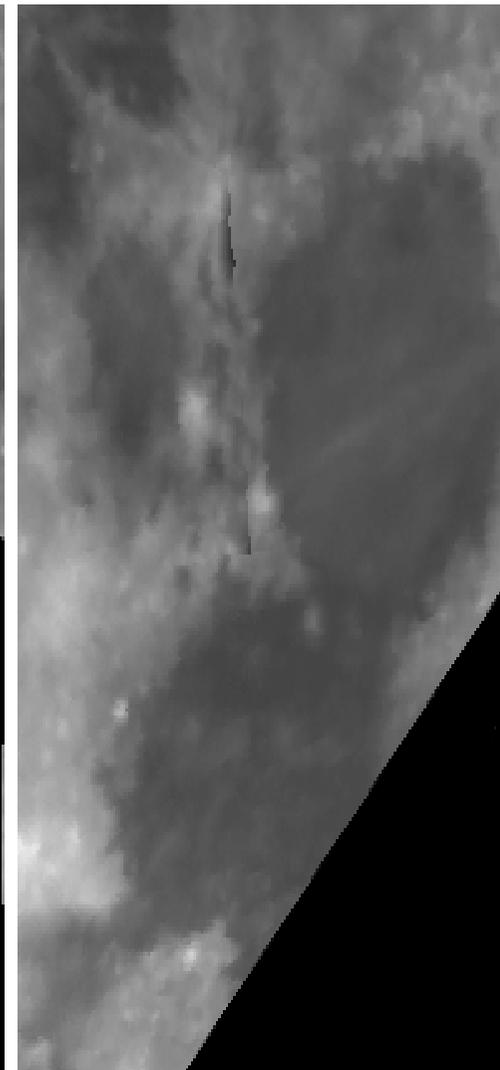
【图6 - 7】 415nm (12月14日)



【图6 - 8】 750nm (12月14日)



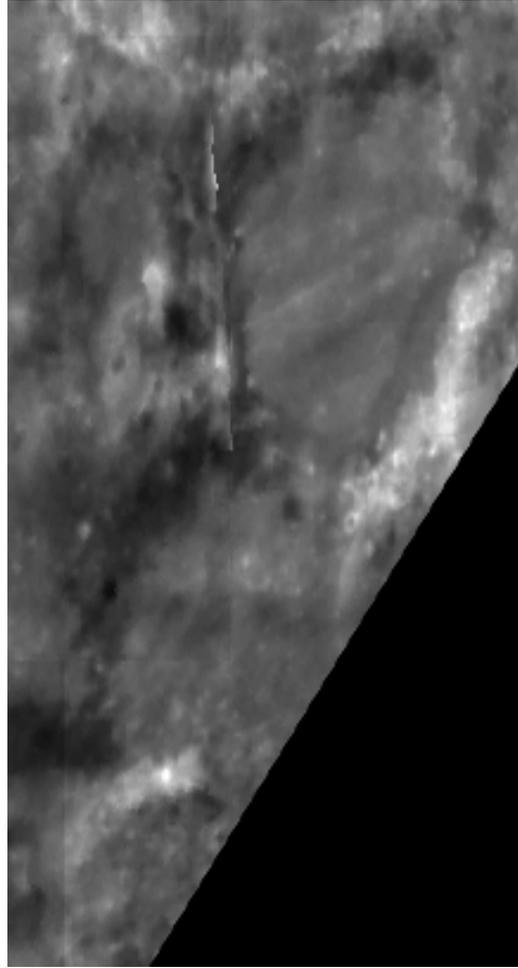
【图6 - 9】 750nm (12月9日)



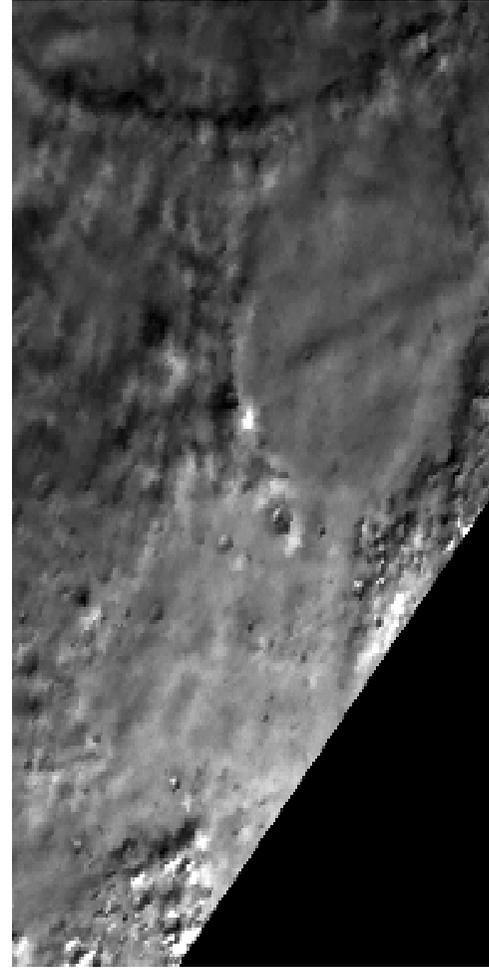
【图6 - 10】 950nm (12月9日)



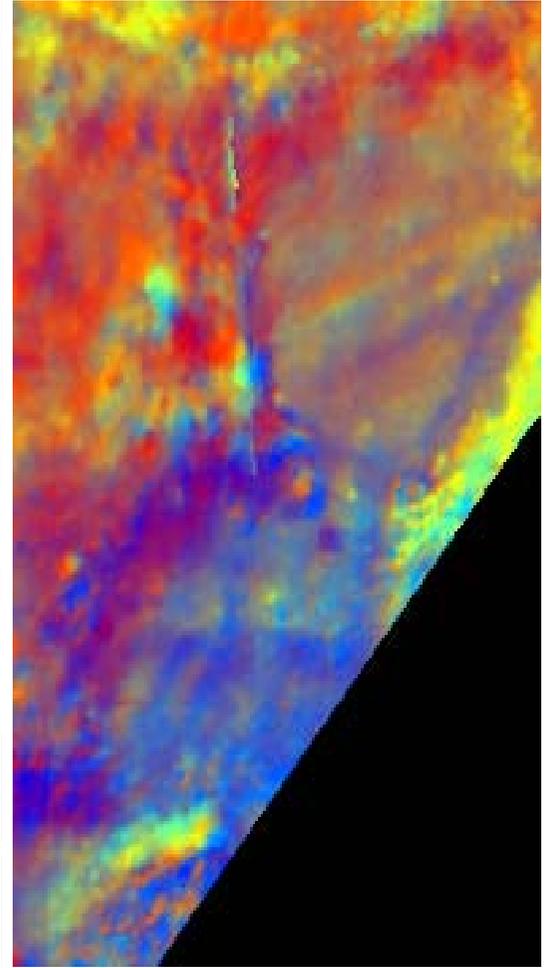
【図6 - 11】 750nm / 415nm (赤)



【図6 - 12】 750nm / 950nm (緑)



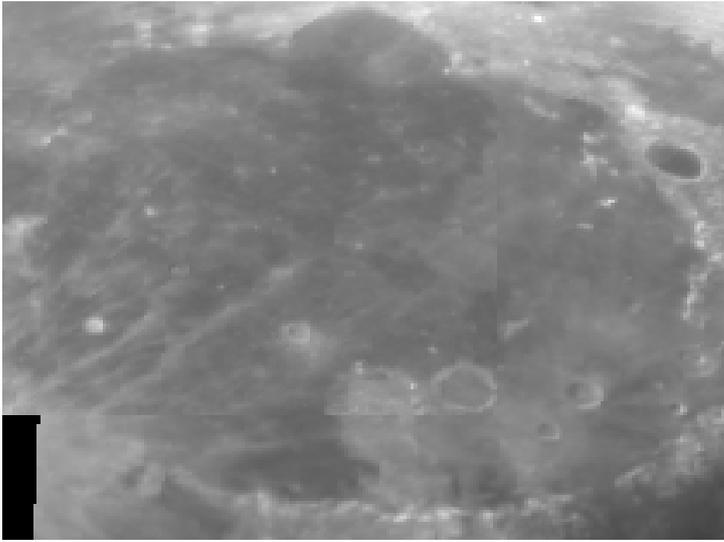
【図6 - 13】 415nm / 750nm (青)



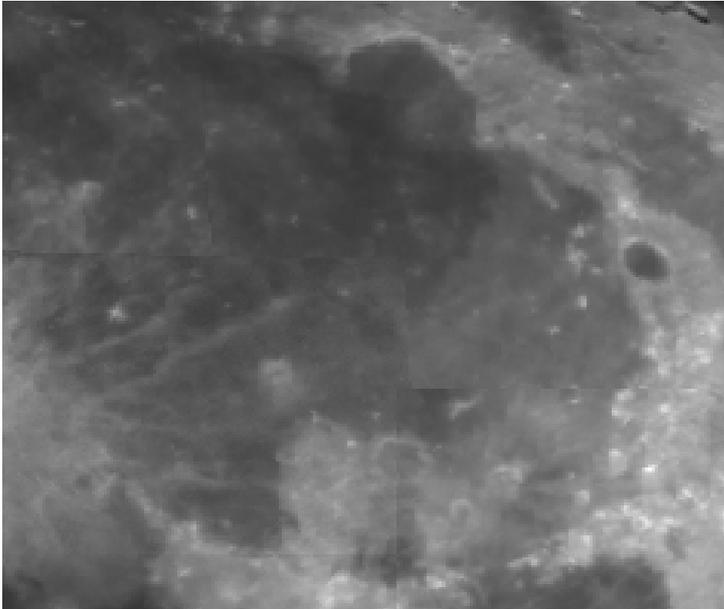
【図6 - 14】 3色モザイク画像



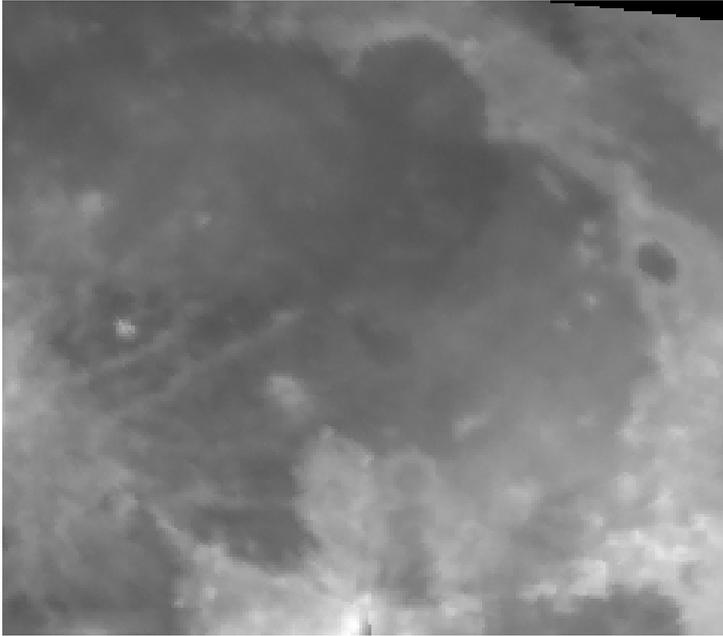
【图 6-15】415nm (12月14日)



【图 6-16】750nm (12月14日)

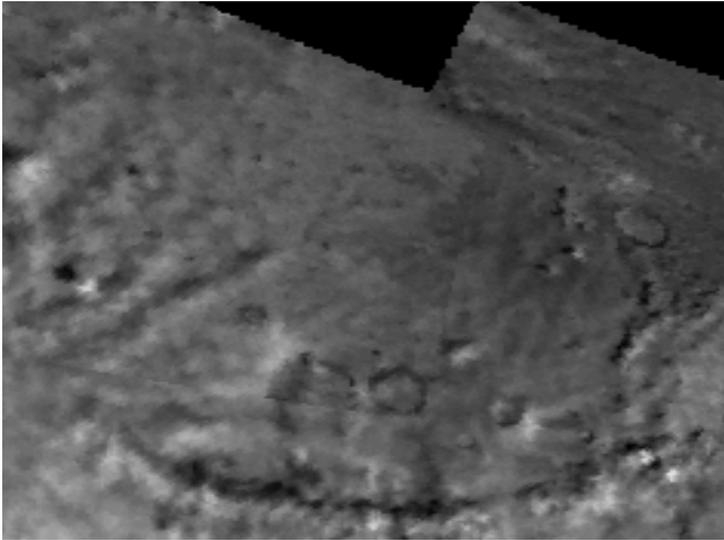


【图 6-17】750nm (12月9日)

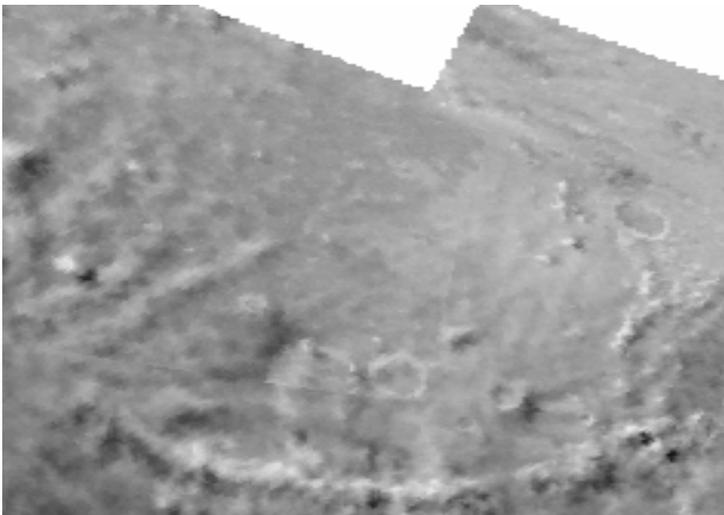


【図 6-18】 950nm (12月9日)

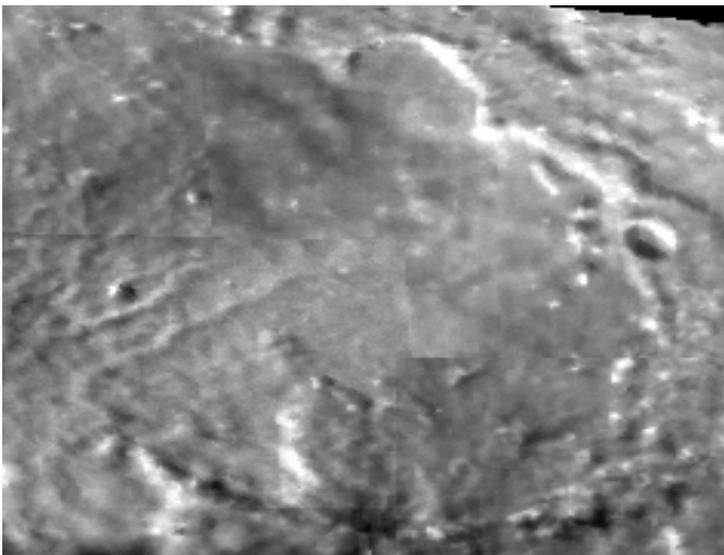
【図 6-15】 から 【図 6-18】 までは、すべて雨の海の単色画像である。



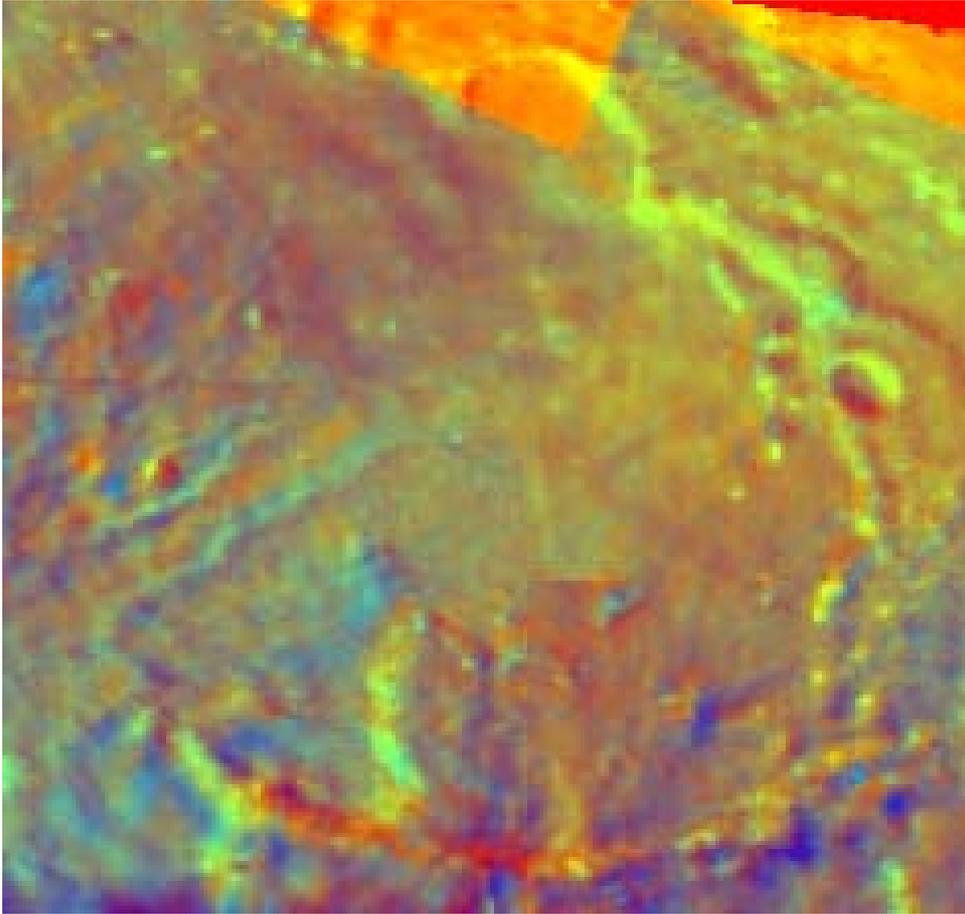
【图 6-19】 415nm / 750nm



【图 6-20】 750nm / 415nm



【图 6-21】 750nm / 950nm



【図 6-22】 3色モザイク画像  
雨の海中央において、緑色が強調されている。

## 第7章 まとめ

### 7 - 1 結論

冷却 CCD カメラで撮像した3種類の画像を比演算処理し、解析した結果、次のことが明らかになった。ただし、“乏しい”、“豊富”は1枚のモザイク画像に収められた海を相対的に比較した結果である。月面すべての海について述べたものではない。

神酒の海・・・ $\text{Fe}^{2+}$  が乏しい。

豊かの海・・・ $\text{Fe}^{2+}$  が豊富。

静かの海・・・ $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Ti}^{4+}$  が豊富。

晴れの海・・・ $\text{Fe}^{2+}$  が豊富、 $\text{Ti}^{4+}$ が乏しい。

タウラス・リトローク渓谷・・・ $\text{Ti}^{4+}$ が豊富。

高地・・・・・・ $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Ti}^{4+}$ に乏しい。

雨の海・・・・・・ $\text{Fe}^{2+}$ が豊富、 $\text{Ti}^{4+}$ に乏しい。

静かの海、タウラス・リトローク渓谷、高地、雨の海については、アポロ 11 号、17 号、16 号、15 号が持ち帰った月面サンプルの組成と矛盾しない結果が出た。

### 7 - 2 今後の課題

今回は、月面東部に限定して解析を行ったが、嵐の大洋、雲の海など、西部の海に関しても、同様に調査をすることができる。さらに、撮像視野を広くして月面全体の組成分布をみることや、逆に拡大撮像によって細部の組成を解明する手法も考えられる。ただし、視野が広い場合、解像度が落ちることが問題であろう。今回は行わなかったが、太陽、月、カメラの位置関係を統一させる為の位相角補正を施すことで、より精度の高い結果を得られる可能性がある。

## 引用文献

- NASDA (2000):「月探査情報ステーション - 月についての FAQ」  
<http://moon.nasda.go.jp/ja/qanda/faq/faq6/resource.html>
- 川口雅也編 (2000):「冷却 CCD カメラを始める」SKY WATCHER 4月号  
アストロアーツ, P4-13
- 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, p54-59,p99-102,p116-121,p151-154, p94
- 武田 弘 (1984):「月の科学」岩波書店, p 12, 24
- 近藤龍太郎 (1998):「Adobe Photoshop 5.0 for Windows テクニカル・ガイド」  
メディア・テック出版 p 202-206
- RESEARCH SYSTEMS (1999):「ENVI user's guide」 p186-197,p369p473,p591,
- 松井孝典 (1996):「惑星科学入門」, 講談社学術文庫 p14
- Grant H. Heiken (1991):「LUNAR sourcebook a user's guide to the moon」  
CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS ,p210
- P.G.Lucey et al.(1997):「MAGES OF THE LUNAR SAMPLE-RETURN STATIONS:  
IMPROVEMENTS TO THE TiO<sub>2</sub> MAPPING TECHNIQUE」Lunar and Planetary  
Science XXXVIII
- P.G.Lucey et al (1997):FEO MAPPING OF THE MOON:REFINEMENT USING  
IMAGES OF THE SAMPLE-RETURN STATIONS. Lunar and Planetary Science  
XXXVIII

## 謝辞

本卒業論文の研究を行うに当たり、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専攻（地学科）の高田淑子助教授に深く感謝いたします。宮城県教育研修センターの伊藤芳春先生は、冷却CCDカメラおよび望遠鏡をお貸しくださり、月面撮像に関して、数多くのアドバイスをくださいました。心より感謝申し上げます。

また、宮城教育大学物理科の千葉芳明教授には、撮像データに関して、多くのご助言をいただいたことに深く感謝申し上げます。

同室の松下真人君、中堤康友君には、徹夜の月面観測にご協力いただいたことに、深く感謝いたします。最後に、日頃から数多くの場面でお世話になりました、同室の須田敏典君、西川洋平君に感謝の意を表します。

## 付録 1

# 月面撮像マニュアル



<p><b>ST-6 の電源を入れる .</b></p>	<p>以上の作業が終了した後 , ST-6 , ノートパソコンの順序で電源を入れる .</p>
<p><b>CCDOPS の起動</b></p>	<p>MS-DOS プロンプトにおいて  C:\WINDOWS&gt;cd ccdops と入力すると、  CCDOPSディレクトリに入るの、  C:\CCDOPS&gt;CCDOPSと、入力する。  これでCCDOPSが開く。</p>
<p><b>望遠鏡の設定 (ツースター アラインメント)</b></p>	<p>「TELESCOPE」を選択し、「ENTER」を押す。  「SITE」を選択し、「ENTER」を押す。  観測地を選択する。仙台をしめす「SND」にカーソルを合わせ  チェックマークを入れる。選択が終了したら、「MODE」キー  を押して、最初の状態に戻しておく。  「TELESCOPE」メニューの中の「ALIGN」を選択する。  「ALTAZ」を選択し、「ENTER」キーを押す。  ワンスターかツースターか聞いてくるので、数字キーの“2”を押して、  ツースターを選択する。  水平出しを聞いてくるので、概略の水平を出す。  一番目の基準星を選択するように指示が出るので、「ENTER」キーを  押す。  基準星の一覧表示から、適当な基準星を「NEXT」「PREV」キーを使  用して選択し、「ENTER」を押す。  選択した基準星を視野中心に、N,S,E,W キーを使って導入する。この  時できる限り高倍率のアイピースを使用し、視野中心に星が来るよ  うにする。(この設定で、導入精度が決まる。)その後、「ENTER」を押  す。  2番目の基準星を選択するように指示が出るので、一番目と同様に、  選択、導入を行う。  アラインメントが正しく行われているかのテストを行うには、適当な  恒星を選択し、自動導入されているかを確認めればよい。「STAR」キ  ーを押し、「ENTER」と、目標天体に望遠鏡が向く。</p>

<p>望遠鏡の設定 (ツースター アライメント) の続き</p>	<p>注: 2つの基準星は、できうる限り離角の広いもの程、導入精度が上がる。 導入の時間間隔は、数分程度で終了できるようにする。</p> <p>基準星の近くの恒星は自動導入出来るが、 離れた星では出来ない場合、2つの基準星の離角が小さいことが、原因と考えられる。</p>
<p>フィルター及び ST-6 を望遠鏡に取り 付ける</p>	<p>ST-6 のビスの緩みが無いかを確認した後、 ケーブル接続部が上に来るように、 望遠鏡に取り付ける。</p> <p>このとき、バンドパスフィルターを、ST-6 の所定の位置に 装着しておく。(表 3-7 参照)</p>
<p>フォーカス合わせ</p>	<p>適度な一等星を視野に導入する。</p> <p>CCDOPS 上で、 「Camera」メニューから「Focus」を選択。</p> <p>「Exposure Time」で、露出時間の設定を行う。</p> <p>「Readout type」では、「Low noise」を選択する。 (この時ダークノイズが自動的に補正される。)</p> <p>「Auto contrast」は Yes にする。</p> <p>「Frame size」では、「Spot」を選ぶと、375×241 ピクセルの画像全体から 32×32 ピクセルの画像として、自動的に一番明るい輝度値を持つ 画素を中心に切り出し表示する。このモードでは、恒星がずれ、狭い 範囲枠から外れたとしても、いつも切り出し画像の中心に表示され る。「Full」モードに比べ、画像更新インターバルが短くて済む。</p> <p>「Update mode」を「Automatic」にして、Enter キーを押すと、撮像画像が表示される。</p> <p>望遠鏡のフォーカスノブを、わずかずつ動かし、</p>

	<p>星像をシャープにしてゆく。フォーカス合わせの途中でも撮像が行われているので、その後、数回更新される画像を見て、判断する。</p> <p>画面には、星像の最高輝度値が表示される。 これが最大となる時が、最良フォーカス位置である。</p> <p>注：シュミットカセグレン望遠鏡では、フォーカスノブを逆にまわすと、像が大きくなりすぎてしまう性質がある。 フォーカス最良位置を通り越してしまったなら、ノブを逆方向に2～3回転以上回して戻し、再び同じ回転方向で詰めてゆく。この方法では、最良位置を中心にして往復移動でフォーカス調整ができないので、非常に時間がかかる。</p> <p>対策として、調整ノブに目盛りを付け、逆方向に何回転戻したかを覚えておき、同じ回転数だけ回して、最良フォーカス位置を通り過ぎた目盛りの手前から詰めてゆくと、能率がよい。</p>
<p>屋上と研究室の リンク</p>	<p>ST-6 とノートパソコンをパラレルケーブルで望遠鏡とデスクトップパソコンをシリアルポートで繋ぎ、屋上の観測機材を研究室から遠隔操作出来るようにする。 (第2章 図 2-1 参照)</p>
<p>CCD カメラの 冷却</p>	<p>CCDOPS の「Camera」メニューの中の「Setup」コマンド内で、温度を設定する。「Set Point」に冷却温度を指定し、<math>\approx 30</math> まで冷却するが、露が付くので急激に冷やしてはいけない。 外気温マイナス 10 の設定から冷却を開始し、最初は 10 分間くらい放っておき、その後 5 分間隔で 5 ずつ、時間をかけながら冷却する。 ディスプレイ右下に表示されているパーセンテージが 100% に近いときは負荷がかかっているなので、無理の無い温度に設定しなおす。</p>

<p><b>望遠鏡同期</b></p>	<p>月面を視野導入する。The Sky の月面と視野が等しくなったら、「望遠鏡同期」をクリックする。これで同期が確立する。</p> <p><i>同期は時間経過に伴いずれてくるので、こまめに取り直すようにする。</i></p>
<p><b>月面の導入</b></p>	<p>「The Sky」において、マウスを月に合わせ、クリックする。 天体情報が出されるので、「視野導入」を選択する。</p>
<p><b>露出時間の決定</b></p>	<p>月面の中緯度地域の明るい高地を視野導入する。</p> <p>「Camera」メニューから「Focus」を選択し、 「Frame size」では、「Full」を選ぶ。 露出時間を適当に入力し、「Enter」を押す。</p> <p><b>最大輝度値が 40000 前後になり、<u>輝度値分布のヒストグラムで、0~40000 階調が有効に使われている事</u>が確認できるまで、露出時間を変化させ、を繰り返す。ヒストグラムは、「Display」モードの「Histogram」を選択すると、表示される。</b></p> <p>露出時間と輝度レベルは比例するので、撮像画像の最大輝度値をチェックすれば、適正露出時間を調べる事ができる。例えば、1 分間の露出で撮像した天体の最大輝度値が 10000 であったとすると、40000 まで上げるには、4 分間の露出時間が必要となる。</p> <p>高地で設定した露出時間は、今後変更させてはいけない。</p>
<p><b>撮像</b></p>	<p>「Camera」メニューから「Grab」を選択。 前段階で設定した露出時間になっている事を確認し、Enter を押す。撮像が開始される。</p>

	<p>Grab モードにおいては、</p> <p>Exposure time 設定した露出時間  Dark Frame Also  Image size Full  Auto display Yes  Auto contrast Yes  Background  Range  Exposure delay 0  Auto Grab Yes</p> <p>と、設定する。</p>
<p><b>画像の保存</b></p>	<p>「File」メニューから、「Save」を選択する。  「Set Path/ Filter」コマンドで、保存先を指定する。予め、保存ディレクトリを作っておくと良い。</p> <p>「File」メニューから、「Save」を選択する。  ファイル名は、使用フィルターや、撮像日が分かるようにつけると良い。</p> <p>例：6月15日にBP-950で月を撮像した場合  ファイル名 Mir0615</p> <p>10月7日にBP-415で月を撮像した場合  ファイル名 Fv1007</p> <p><u>露出時間，撮像時刻，冷却温度，ファイル名は後の解析で必要となるので，ノートに記録しておく。</u></p>

<b>フラットフィールド ド撮像</b>	<p>ライトフレーム画像を撮り終えたら、光学系を変化させる前にフラットフィールドを撮っておく。</p> <p>各バンドによって、適切な撮像方法が異なるので注意する。 (撮像方法については、表 3-7 を参照)</p> <p><b>注：フラットフィールドは、光学系さえ変えなければ、ライトフレーム撮像の合間に撮ってもよい。(天気待ちの時など)</b></p>
--------------------------	--

付録 2

## 画像解析マニュアル

1	CCDOPS 上での作業
フラットフィールド補正	<p>CCDOPS 上で、「FILE OPEN」をし、補正すべき画像を開く。次に、「Utility Flat Field」から、フラットフィールド画像を選択し、ENTER をクリックすると、フラットフィールド補正が実行される。</p>
ST6 フォーマットの解凍及び Raw ファイルの作成	<p>ST-6 で撮像した画像は ST 6 という拡張子がつけられ、圧縮されている。異なるアプリケーション上で画像を扱うためには、RAW ファイルに形式変換する必要がある。</p> <p>例：「moon.ST6」を「moon.RAW」に変える場合。</p> <p>CCDOPS において、「FILE OPEN」で、「moon.ST6」を選択する。次に、「FILE SAVE」を選択。</p> <p style="text-align: center;">Save Image File name moon.<u>raw</u></p> <p style="text-align: center;">Uncompressed</p> <p>とし、ENTER をクリックする。</p> <p>以上の作業で RAW ファイル形式となるが、ST6 ファイル（元の画像データ）も残しておく。</p>

<b>2   Adobe Photoshop 上での作業</b>	
RAW ファイルを開く	<p>CCDOPS で作成した RAW ファイルを , PhotoShop で開く。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 「ファイル」メニューから「開く」を選択する .</li> <li>2) ファイル名を入力し , 種類は「RAW」ファイルと指定する .</li> <li>3) 「汎用オプション」を次のように指定する . <ul style="list-style-type: none"> <li>幅 375 pixels</li> <li>高さ 241 pixels</li> <li>チャンネル数 1</li> <li>色数 16 ビット</li> <li>バイトデータの順序 IBM PC</li> <li>ヘッダ 2048 バイト</li> <li>保存時に維持 <input checked="" type="checkbox"/></li> </ul> </li> </ol> <p>「OK」をクリックすると画像がオープンされる .</p>
画像解像度変換	<p>CCD チップは , 縦横 <math>27 \times 23 \mu\text{m}</math> の長方形であるが , パソコンのディスプレイ上では , 縦横比 1:1 で表わされるため , 横の長さが , <math>27 / 23</math> に引き伸ばされてしまう。</p> <p>一枚の画像は , <math>375 \times 241</math> ピクセルであるから  縦の解像度を , <math>375 \times 23 / 27 = 319</math> ( pixel / inch ) に</p>

	<p>設定すれば、撮像したままの比に戻すことができる。</p> <p>「イメージ」メニューから「画像解像度」を選択し、次のように指定する。</p> <p style="text-align: center;">幅 319 pixels 高さ 241 pixels 画像解像度 144 pixels/inch 画像の再サンプル ニアレストネイバー法</p>
<p>(補足) 画像の自動処理</p>	<p>大量の画像に、同じ処理を施す場合、Photoshop の自動処理機能を使うと便利である。これは、アクションメニューに記録しておいた処理過程を、選択したファイル内の画像に実行させるものである。</p> <p>例：「Moon」というフォルダ内の画像40枚に、解像度の変換を施した後、「Moon2」というフォルダに保存する場合</p> <p>1) アクションの記録</p> <p>「ウインドウ      アクションを表示」 で、アクションを表示させる。右隅の      をクリックし、「新規アクション」を選択する。アクション名として、「画像解像度変換」と入力し、「記録」をクリックする。</p> <p>1枚の画像に、解像度変換作業を行う。 作業が終わったら      メニューの「記録中止」をクリックする。これでアクションが記録、保存される。</p> <p>2) 自動処理の実行</p> <p>「ファイル      自動処理      バッチ」を選択する。 自動処理のウインドウが表示されるので、 次のように入力する。</p> <p>セット      初期設定のアクション アクション名      画像解像度変換 実行前ソース名      「Moon」</p>

	<p>実行後    フォルダに保存    フォルダ名「Moon 2」</p> <p>「OK」をクリックすると、Moon フォルダ内の画像全てに解像度変換がなされる。</p>
--	--

<b>3 ENVI 上での作業</b>	
<p>画像を procsv サーバに送る。</p>	<p>ENVI での作業は、procsv サーバ上で行う。よって、使用する画像はすべてサーバに送らなければならない。この作業は、FTP エクスプローラ上で行う。</p> <p>FTP エクスプローラを開く。  画像は、バイナリモードで送るので、A、B アイコンのうち B を選択しておく。(A は、アスキーモードである。)</p> <p>画像の送り先を選択したあと、「Upload」をクリックする。(「Upload」は、上向き矢印のアイコンで示されている。)</p> <p>転送画像を選択し、「開く」をクリックすると、サーバに送られる。</p> <p>あらかじめ、procsv 上に画像を保存するディレクトリを作っておくと良い。</p>
<p>画像処理ソフト ENVI を開く</p>	<p>X ウィンドウを開き、procsv サーバのコマンドツール上で、次のように入力すると、ENVI が起動する。</p> <pre>学籍番号 procsv.miyakyo-u.ac.jp&gt; idl IDL&gt; envi</pre>
<p>画像を開く</p>	<p>ENVI メニューから、File      Open   Image を選択。ディレクトリを指定し、開きたい画像名をクリックする。RAW ファイルなので、ヘッダーを次のように指定する。</p> <p>Sample: 319</p>

	<p>Line: 241  Bands: 1  Offset: 2048  Xstart: 1  Ystart:1  Data type: Unsigned Int  Byte Order: Host(Intel)  File Type : External Unknown  Interleave:BSQ</p> <p>OK を押すと、Avairable Bnad List にファイルが入る。  開きたいファイルを選択し、Load Band をクリックすると、  画像がディスプレイ上に表示される。</p>
<p>放射量補正  (バックグラウンド  値の読み取り)</p> <p>(バックグラウンド</p>	<p>撮像画像の夜空の部分をズームボックスにおさめる。  ズームボックスは、四隅をクリックすると、自由にサイズが  変えられるので、適切な大きさにしておく。</p> <p>画像左隅の、Funcion プルダウンメニューから、</p> <p>Display enhancements Interactive Stretching</p> <p>を選択すると、画像のヒストグラムが表示される。  Histogram Source メニューにおいて、“Zoom ” をクリックし、  バックグラウンドのヒストグラムを描かせる。  ヒストグラム中で最も度数の大きい部分の輝度値を読み取り、  バックグラウンド値として記録しておく。</p> <p>次に、バックグラウンド減算作業に入る。  例えば、Mir120902 という名の画像のバックグラウンド値が</p>

減算)	<p>2000 であった場合、Mir120902 の全ての画素輝度値から 2000 だけ減算すればよい。</p> <p>メインメニュー spectral Tools Spectral Math でスペクトルマスのダイアログが出る。</p> <p>Enter an expression ボックスに、演算式、</p> <p style="text-align: center;">b1 - double(2000)</p> <p>を入力し、OK をクリックする。 ( b1 以外の文字でも構わない )</p> <p>Variable / Spectra Pairings ウィンドウが出るので、Map Variable to Input File をクリックし、Available Spectra List から、“ b1 ” に相当するファイル、Mir12092 を選択し、OK をクリックする。</p> <p>新たなファイル名を入力すると、演算後の画像がその名前で保存される。</p> <p>他の画像にもすべて、このような放射量補正を施す。</p>
-----	---

画像の幾何補正  
(GCPの決定)

複数の月面画像を、1枚にモザイクする作業であるが、通常、2枚の画像が、そのままつながる事は有りえない。基準画像を設定し、他者はそれに合わせて、幾何補正する必要がある。

モザイクする2枚の画像を開く

2枚の画像の重複部から、GCPを選択する。

ENVIメニューから、

Register      Select Ground Control Points  
Image to Image

とした後、基準画像と補正画像を決定する。

ズームボックスを参考にしながら、両者とも、同じ地域をおさめ、Add Point をクリックする。これで GCP が決定される。

同様に、他の GCP も決定してゆく。

*GCPの誤差は、RMS エラーボックスに数値として示される。  
GCP 選択の際は、必ず RMS エラー値をチェックし、  
エラーの著しい GCP は採用しないようにする。*

GCP を決定したら、

Options      Warp      Displayed      Band  
を選択し、次のように設定する。

(幾何補正の実行)

Warp Method      RST

Resampling      Nearest      Neighbor

Background      0

Enter      Output      File      Name      新ファイル名

OK をクリックすると、幾何補正を施した画像が、新たなファイル名で、保存される。

<p>ヒストグラム・ マッチング</p>	<p>モザイクに使用する 2 枚の画像をオープンする。</p> <p>両者において重複する地域を、各々ズームボックスに収める ( )。このとき、ズームボックスは、なるべく大きめに、また、両者ともども同じサイズにしておく。</p> <p><i>重複部が少ない場合は止むを得ないが、フラットフィールド補正による、周辺部輝度値の揺らぎを考えると、ズームボックスはそれぞれ、画像の中心に持ってゆくことが望ましい。</i></p> <p>Zoom モードでヒストグラムを表示させる。導入地域が等しければ、ヒストグラムは相似形になっている筈である。</p> <p>ヒストグラムの頂点など、特徴のある点を拡大表示し、両者の “ 相似比 ” を求める ( )。</p> <p><i>特徴点付近は、拡大し、慎重に値を読み取らねばならない。ヒストグラム中央の min. max ボックスの数値を適度に変えることで、特定範囲を拡大することが出来る。</i></p> <p>相似比を求めたら、放射量補正の際に述べた Spectral Math ツールを用いて、暗い方の画像に乗算する。これで、両者のヒストグラムが近似される。</p>
<p>モザイク</p>	<p>Register Mosaic Images Georeferenced Images を選択する。</p> <p>Inport Inport file without feathering ここで、モザイクしたときに下に来るべき画像を選択し、OK をクリックする。</p>

	<p>もう一度、Import      Import file without feathering とし、モザイクしたとき上に重なる画像を選択する。 このとき、 Spatial Subset      Subset by Image</p> <p>とすると、画像の表示変更ウインドウが出る。 画像の周辺を除いた部分を、赤枠内に収め、 OK をクリックする。</p> <p>モザイクする 2 つの画像を準備できたら、 File      Apply で、次のように設定する Output X pixel size :1.000000 Output Y pixel size :1.000000 Resampling : Nearest Neighbor Enter Output File Name : 新ファイル名 Background Value : 0</p> <p>これで、モザイクされた画像が、新ファイル名で保存される。</p>
非演算処理	<p>モザイクした 2 つの波長帯の画像を割り算する作業である。 非演算を行う両画像は、同じサイズで同じ地域を示していなければならぬ</p> <p>まず、非演算する画像の片方に幾何補正を施し、 両者とも同じ姿勢になるようにする。</p> <p>次に、 メインメニュー      Utilities      Resize Images</p>

とし、同じサイズで、同地域がおさまるように、  
適切に画像をトリミングする。

Transforms      Band Ratios      を選択すると、除算ウインドウ  
が表示されるので、

    Numerator ボックスに、分子に当たる画像ファイル名を、  
    Denominator ボックスに、分母に当たる画像ファイル名を  
入力し、OKをクリックする。

こうして出来た比演算画像から、月面組成を解析してゆく。