

論文題目

モスクワの海盆地域の
クレメンタインの月面分光画像解析
海盆形成発達史の解明

宮城教育大学教育学部学校教育教員養成課程理科教育専攻

c8287 堀 忍

平成 12 年 2 月 8 日

要旨

月には多数の大型衝突盆地が存在するが、その数分布は月の表側、裏側においてほぼ等しい。月の火山性地域である海の領域は月の表面積の 17% を占めるが、その約 95% 以上が月の表側に分布しており、月裏側の北半球では、モスクワの海 (Mare Moscovience) が唯一 10^4km^2 以上の面積を占める火成活動領域である。このような火成活動領域分布の 2 分性の由来は未解決であるが、表側では地殻が薄いためマグマの上昇を促進し、火成活動を誘発させるが、裏側の北半球では地殻が相対的に厚いため、マグマの上昇を抑えたということが示唆されている。

その地殻の厚い裏側の北半球で、モスクワの海を形成する火成活動を引き起こした要因を探ることは、月の過去の地殻構造や進化を紐解く上で重要である。そこで、モスクワの海の溶岩流出形態や、海盆形成発達史について明らかにすることが本研究の目的である。

本研究は、モスクワ海盆地域 (東経 143 - 155° 北緯 22 - 33°) を調査対象地域とし、クレメンタインの月面分光画像 (放射量 (ラジオメトリック) 補正, 位相角 (フォトメトリック) 補正, 幾何 (ジオメトリック) 補正, モザイク処理, 比演算処理を施した画像) 解析とルーナーオービターの写真判読, USGS 地質調査図と比較した結果、次のことが明らかになった。

- (1) モスクワの海の溶岩層は 4 地域に分類され、裏側北半球の高地においても、表側の典型的な火成活動と同様、マルチイベントの溶岩流出形態が存在したことを示唆している。
- (2) モスクワ盆地内の海と異なる物質は、モスクワ盆地形成時のクレータリングによる掘削堆積物、すなわち高地とは別の地下下部物質、もしくは後のリム崩壊による堆積物質である可能性がある。
- (3) Komarov クレーターは、北西部の海と南東部の海形成後のリム崩壊による堆積物質の 2 地域に分類される。
- (4) Komarov クレーターの不規則な割れ目の成因は、隣接するモスクワ盆地の火成活動と、クレーター底の物質が異なることの 2 つが重なったためと考えられる。
- (5) モスクワ海盆地域の地質区分図を【図 4 - 8】に示す。
- (6) モスクワ海盆の形成史を【表 6 - 1】に示す。

目次

第1章 はじめに	1
1.1 月の形成と環境	
1.1.1 月の起源	
1.1.2 月の高地と海	
1.1.3 月の2分性	
1.2 月の火山	
1.2.1 溶岩流の形態	
1.2.2 リッジ	
1.2.3 割れ目クレーター	
1.3 モスクワの海の領域に関する研究の概略	
1.4 本研究のテーマについて	
第2章 ルーナーオービターの月面写真	5
2.1 ルーナーオービターの月面写真判読	
第3章 クレメンタインの月面分光画像	6
3.1 クレメンタイン計画	
3.2 画像の補正並びに処理法	
3.2.1 放射量(ラジオメトリック)補正	
3.2.2 位相角(フォトメトリック)補正	
3.2.3 幾何(ジオメトリック)補正	
3.2.4 モザイク処理	
3.2.5 比演算処理	
第4章 補正及び処理結果	10
4.1 モスクワ海盆地地域の地質図	
4.2 モスクワ盆地内部	
4.3 Komarov クレーター	
第5章 議論	12
5.1 ルーナーオービターの月面写真との比較	
5.2 USGS 地質調査図との比較	
5.3 今後の課題	

第6章 結論	14
謝辭	15
引用文献	16
資料(表1-1~表6-1, 図1-1~図6-1)	17
付録(付録1~3)	46

第1章 はじめに

1.1 月の形成と環境

1.1.1 月の起源

月の起源についてはかねてから議論されており、大きく分けると下記の4つの仮説に分類することができる [水谷, 1984; Taylor, 1999] .

- 分裂説
月は地球の一部であり、地球の自転が加速されたために分離した説 .
- 捕獲説
月は地球と独立につくられた後に、地球に捕らえられた説 .
- 集積説
月は地球の近傍で、地球と同様に塵や微惑星から形成された説 .
- ジャイアントインパクト説
地球が、地球の約 0.15 倍（現在の火星より多少大きい）物体がかすめる衝撃を受け、衝撃により分裂されたその物体のマントル物質が月を形成した説 .

月は探査機による観測や月面の岩石サンプルの化学的分析などにより、地球に最も近い惑星として研究されている .

月全体の化学組成【表 1 - 1】は、化学分析により揮発性元素、金属元素（Fe, Ni）に乏しく、難揮発性元素（Al, Ca, Ti）に富むことが知られている . 月の歴史【表 1 - 2】においては、月物質の Rb-Sr 法の年代が 43 ~ 46 億年前であることと、表面に露出する斜長岩質の地殻の存在から、初期段階には、月の上部 100 ~ 300km はマグマ・オーシャン（厚いマグマの層）が存在したと考えられる . 地殻とマントルが分離した後、隕石の衝突によりクレーターが形成され、大型クレーターではアイソスタシーを保つために地下 100km 以深からマグマが噴出し、玄武岩質の月の海が形成された（31 ~ 39 億年前） . その後は大きな惑星形成活動もなく、大気がほとんど存在しないために侵食されずに残存している [武田, 1984] .

このような月と地球の化学組成の違いや、乾いた環境、初期段階にマグマ・オーシャンを備えるような、独特な化学的構造を説明できる点から、ジャイアントインパクト説が今日有力とされているが、実際にそのような衝突がありうるのか、問題が残る [Taylor, 1999] .

また、海は表側に集中し（裏側は少なく）、表側の地殻が薄くマグマが上昇しや

すい環境であるため(相対的に裏側の地殻は厚くマグマの上昇を抑制した)と Head (1976)は示唆しているが,この月の2分性の原因は解明されていない[白尾,1995]. 月の起源や形成,進化を考える上で,この2分性の問題を考えることは非常に重要である.

1.1.2 月の高地と海

月は地形及び地質的特徴から,クレーターが多く,アルベド(反射能)が高い高地と,クレーターが少なく,アルベドが低い海の2つの地域に分類できる.

高地はCa,Alに富む岩石で構成し,地質年代は38~46億年前,月形成時の地殻と考えられる.高地に多く存在するクレーターの形は,衝突物質の大きさ及び速度と,非衝突物質の物理的・化学的性質により異なる.直径15km以下のものは,その直径と深さの比が5:1のおわん型の底を持ち,円形の盛り上がった縁を有する構造は堆積物により覆われている.直径15km以上のものは,堅い地形との複雑な相互作用で底が相対的に平らで浅くなり,場合によってはクレーターの縁もテラス状,階段状のものになる.直径数百kmに達するものでは,多重リングを形成する.

月の海は,31~39億年前に地下深部から流出した溶岩流がクレーターの底を平に埋めたもので,多くは直径数百kmに及ぶ円形をしている.月の溶岩は,Fe,Mgに富む粘性の低い玄武岩であり,流動性が大きく,溶岩流地形に特徴的なリル,ドームなどが見られる[武田,1984].

この地形について詳しいことは1.2で述べる.

1.1.3 月の2分性

月には多数の大型衝突盆地が存在するが,その数分布は月の表側,裏側においてほぼ等しい.月の火山性地域である海の領域は月の表面積の17%を占めるが,その約95%以上が月の表側に分布しており,月裏側の北半球では,モスクワの海(Mare Moscovience)が唯一 10^4km^2 以上の面積を占める火成活動領域である【図1-1】.このような火成活動領域分布の2分性の由来は未解決であるが,火成活動地域と地殻の厚さに逆相関があると言われている.すなわち,表側では地殻が薄いためマグマの上昇を促進し,火成活動を誘発させるが,裏側の北半球では地殻が相対的に厚いため,マグマの上昇を抑えたということが示唆されている【図1-2A】【図1-2B】.

その地殻の厚い裏側の北半球で,モスクワの海を形成する火成活動を引き起こした要因,逆に,モスクワの海以外の火成活動を抑制した要因を探ることは,月の過去の地殻構造や進化を紐解く上で重要であり,本研究のテーマに関わってくる.

1.2 月の火山

海の溶岩の厚さは一般に円形の海の中央ほど厚く，調査された海では，雨の海の中央で厚さ 4km 以上，晴れの海，神酒の海，湿りの海，危機の海の中央では 1.5km 以上，これらの海の周辺部や嵐の大洋などでは 500m 程度のものが多い．溶岩流の地形的特徴は海の形成過程を考える上で重要であり，代表的なものとしてドーム，スコリア丘，リッジ，リル，ハ口，テラスなどがある [白尾,1995]．

これらの地形のうち，モスクワの海に見られるものについて以下に詳しく述べる．

1.2.1 溶岩流の形態

月の海の溶岩流は表側の海の研究から，その大部分が複数の火道から長い期間にわたり噴出した，厚さ 10m 以下の玄武岩質の溶岩流である．現在の形態から推定される種類を下記に記すが，裏側や過去には異なる火性活動が存在した可能性がある [白尾,1995]．

- 洪水玄武岩...噴出率の大きな厚い溶岩流．割れ目からの噴火であり，表面にリルは見られない．(スミス海，危機の海，晴れの海)
- 平原玄武岩...噴出率の小さな厚さ 10m 以下の溶岩流．複数のリフトゾーンに沿った中央火道からの噴火であり，表面にリルが見られる．(雨の海，嵐の大洋)

1.2.2 リッジ

リッジ【図 1 - 3】は，幅 1~20km，高さ数 m~数百 m (長さ数百 km にまで達するものもある) の地形をいい，円形の海では，海の縁に同心円状に分布することが多い．リッジは，低い幅広の部分と急傾斜の不規則な平面形をもつ部分 (リンクルリッジ) の 2 つに分けることができ，後者は前者の上に重なっていることが多い．リッジの成因は構造運動によるものである [白尾,1995]．

1.2.3 割れ目クレーター

割れ目のあるクレーター【図 1 - 4】の直径は，10km 以下から 200km 以上にわたり，月全体で約 200 個に上るその平均直径は 40km である．このクレーターは不規則な形をした海と高地の境に分布することが多く，割れ目の状態には，放射状，環状，多角形，不定形などの種類がある．

直径 100km 以上の大型クレーターには普通にみられる放射状割れ目の成因は、クレーターの形成後、アイソスタシーを保つためにクレーター底が短期間に上昇したためと考えられる。直径 15km 前後のクレーターでも放射状割れ目はあるが、これは後の火成活動によりクレーター底が持ち上げられたためと考えられる。

環状割れ目は、クレーター底の縁に沿って環状の溝があるタイプと、割れ目が同心円状のタイプがある。前者は溝の内部が溶岩で満たされ、クレーター底が地下に貫入したマグマに持ち上げられたためと考えられる。後者はクレーター底地下でのマグマの上昇と沈降運動の結果と推定される。

多角形割れ目と不定形割れ目は、クレーター底地下数カ所でのマグマの上昇やクレーター底の物質強度の不均一、放射状割れ目と環状割れ目をつくりだした運動の重複などによるためと考えられる [白尾, 1995]。

1.3 モスクワの海の領域に関する研究の概略

これまでの探査機の画像解析から、モスクワ盆地【図 1-5】【図 1-6】は外輪の直径が 445km、内輪（但し、崩壊部分があり半円形）の直径は 210km で、中心が東経 147° 北緯 26° に位置し、ネクタリアンに形成されたと推定されている [Wilhelms, D. E., 1987]。

また、月の地質分布を調査した USGS 地質調査図 [Stuart-Alexander, 1978] 【図 1-7】の解釈によると、インブリアンの玄武岩質溶岩が海盆の北東地域 図 1-7 の Im に広がり、南西部には、クレーター密度の高く衝突盆地形成から溶岩流出の間（インブリアン）に形成された岩石層 Ip が分布している。また、海盆の北東に位置する Titov クレーターはネクタリアンに形成され、その西部地域 INp は、インブリアンかネクタリアンに由来し、海盆の南西部の地域 Ip よりもクレーター密度が高い。但しこの地質図は、単バンドの反射率による画像解析によって作られたものである。

1.4 本研究のテーマについて

本研究では、クレメンタインの月面分光画像（放射量（ラジオメトリック）補正、位相角（フォトメトリック）補正、幾何（ジオメトリック）補正、モザイク処理、比演算処理を施した画像）解析とルーナーオービターの写真判読により、モスクワの海の溶岩流出形態や、海盆形成発達史について明らかにすることが目的である。また、USGS 地質調査図と比較し、この地域の地質について詳細に再検討する。

第2章 ルーナーオービターの月面写真

2.1 ルーナーオービターの月面写真判読

クレメンタインの月面分光画像を解析し、モスクワ海盆地域について比較し議論する上で、クレメンタイン以前の探査機のデータを改めて読み取る必要がある。本研究では、ルーナーオービターの高解像度写真【図1-5】を判読する。

モスクワ海盆は外輪と内輪をもつ2重リング構造をしているが、内輪の北東部はクレーター形成時、もしくはその後のリムの崩壊により不明瞭である。

内輪で囲まれたモスクワ盆地内部は、高地に比べてアルベドが低く、中でも海盆の北東部は最もアルベドが低い。アルベドのみで判断すると、盆地内部全体が海の可能性がある。また、海盆の北東部と西部には、過去に溶岩流が存在した証拠であるリンクルリッジが確認できる。

東経146°には南北に走って小規模なクレーターが数個あり、これらのクレーターは内部が溶岩で満たされている。海盆の南西部とTitovクレーターの西部は、クレーター密度が高く、高地とほとんど変わらないが、大部分は小さいクレーターである。

東経153°には不定形割れ目をもつKomarovクレーターがある。クレーター内部や割れ目は、モスクワ盆地内部同様アルベドが低く海の可能性がある。

以上のことを、モスクワ海盆地域を解析する上で、クレメンタインの月面分光画像と比較したい。

第3章 クレメンタインの月面分光画像

3.1 クレメンタイン計画

1994年、月探査機クレメンタインは、可視光線と近赤外線領域の波長で撮像した月面のデジタル画像を手に入れた。これにより、月の裏側と極地域を含めた地殻の全球の詳細な地質調査を可能にし、全球地形図が得られた。

クレメンタインに搭載された主な機器は、紫外・可視光線カメラ (UVVIS)、長波長赤外線カメラ (LWIR)、高解像度カメラ (HIRES)、近赤外線カメラ (NIR)、レーザー距離測定器 (LIDAR) である。本研究では UVVIS カメラの撮像した画像を用いるので、これについて詳しく述べる。

UVVIS カメラ【表 3-1】は、Thomson CCD 画像に焦点を合わせた反射屈折型望遠レンズと 5つのスペクトルバンドと1つの幅広いバンドのフィルターを持つ。CCD は、光電変換、データの蓄積を行う映像伝達装置である [Nozette et al., 1994]。

3.2 画像の補正並びに処理法

本研究では、モスクワ海盆地域 (東経 143 - 155° 北緯 22 - 33°) を調査対象地域とした。クレメンタインの画像データは CD-ROM (Mission to the Moon: Deep Space Program Science Experiment Clementine, DoD/NASA) で 88 枚あり、この中から本研究に用いる画像を選定する必要がある。まず、クレメンタインの画像検索の Web サイト [<http://clementine.cnes.fr/acces/acces.en.html>] で、UVVIS カメラが 415nm、750nm、950nm の波長で撮像した東経 143 - 155° 北緯 22 - 33° の地域の画像を検索した。検索条件に該当した画像は 7 軌道 722 枚 (但し、東経 151.12 ± 0.20 - 151.23 ± 0.15 ° の地域は探査機の軌道修正のために画像が存在しない) あり、この中から各画像の最大輝度値が 254 以下のものを選び、また、探査機の軌道修正中に撮像したと考えられる歪みが大きい軌道の画像を外し、6 軌道 204 枚の画像を用いることにした。なお、輝度値は 0 ~ 255 の 256 階調で表されており、反射率の高い地域のピクセルの輝度値が 255 以上の場合でも 255 で表されるために、最大輝度値が 254 以下のものを用いている。

次に、6 軌道 204 枚の画像を CD-ROM (CL_0024V1, 0056V1, 0057V1) から解凍した。リモートセンシングで得られたオリジナルの画像は、さまざまな要因から生じる歪みがあり、画像を解析するためには、これらの歪みを取り除く補正処理が必要である。以下に、この画像に施す放射量 (ラジオメトリック) 補正、位相角 (フォトメトリック) 補正、幾何 (ジオメトリック) 補正、モザイク処理、比演算処理を記す。また、補正に用いる変数 (画像の撮像条件、太陽とセンサーの位置、セン

サーの姿勢と画像の位置など)【表 3 - 2】【図 3 - 1】【図 3 - 2】【図 3 - 3】は各画像固有のものであり，204 枚の全ての画像に同様の補正処理を施した．

3 . 2 . 1 放射量 (ラジオメトリック) 補正

この補正は光学センサーの分光応答度を波長の関数として定量的に測定するものである．センサーは，感度の違いによる歪みを生じる．月面の反射率を得るためにはこれを補正する必要がある．Pieters et al. (1997) の補正法を使用し，撮像画像の放射量補正を実施した．その補正順を下記に示す．

Step 1 オフセット補正

フレーム全体に適用する付加補正であり，オフセット値とゲイン値を統一する．

Step 2 ダーク補正

DN 値 (デジタルナンバー) に関する付加補正である．センサーの出力にノイズが含まれると，検出できる DN 値が異なる．時間 (露光時間，記憶装置に転送する時間，記憶装置からの読み取り時間を含む) や温度変化によって生じるノイズは行ごとに異なり，これを同一条件にする．

Step 3 フレームトランスファ補正

記憶装置に信号転送中の付加シグナルの付加補正である．列ごとに異なり，明暗度と露光時間から見積もられる分の付加シグナルを取り除く．

Step 4 フラットフィールド補正

検出器の各素子の感度は一様ではないため，この差を取り除く補正である．

3 . 2 . 2 位相角 (フォトメトリック) 補正

この補正はピクセルごとに異なる光の入射角及び放射角，カメラの位相角などの歪みを取り除き，標準的な反射率に変換するものである．反射スペクトルは物質や波長により特徴が異なり，地表面の場合，それを構成する鉱物に起因する．そのため，正確な反射率を反映させることは物質を調べる上で重要であり，下記に前述の補正に続いて段階的に記す [Pieters et al., 1997] .

Step 5 フォトメトリック補正

画像ごとに異なる位相角を，標準的な 2 方向性反射率 (太陽光の入射角 30° ，太陽光の放射角 0° ，位相角 30°)【図 3 - 4】に補正する．真の位

相関数は表面の物質的・複合的性質，また波長による違いがある．
ここでは Lommel-Seeliger の近似式 [Hapke, 1993] を使用した．

Step 6 変換

補正された DN 値を 2 方向性反射率に変換する．クレメンタイン画像における放射量と，アポロ 16 号の月面資料採取地域のスペクトルデータを比較し，その割合を全地域に適応した．

3.2.3 幾何（ジオメトリック）補正

この補正は画像の地形や位置を決定する上で必要な，幾何学的な歪みを取り除くものである．幾何学的な歪みは，衛星の軌道，姿勢，月の曲率などに起因するものがあり，補正には撮像時における衛星の軌道姿勢値を用いている．

本研究では，放射量補正と位相角補正を施し格子上に射影した入力画像を，等緯度経度図法を用いて表す．等緯度経度図法とは，緯度角と経度角が等しく，直交し，月面上と地図上の角を対応させた図法である．この座標系のグリッドに対応する入力画像の点と値を求めて，出力画像に変換する [中野, 1995]．

画像は中心から離れるほど歪みが大きくなる．格子上に射影するにあたり，歪みの少ない中心に近い画像を用いるために，画像の端ではなく，隣接する画像の緯度や経度の中間値で切るようにした【図 3 - 5】．

3.2.4 モザイク処理

モスクワ海盆地域を全体的に捉えるために，放射量補正と位相角補正，幾何補正を施した画像を各波長で合成し，3 枚(415nm , 750nm , 950nm)の広域画像を作成する．

本研究で用いる画像の解像度は，6 軌道のうち 4 軌道 (O112 , 113 , 114 , 115) が 168m/pixel ，2 軌道 (O246 , 247) が 109m/pixel である．隣接した画像を合成するためには，各軌道で異なる解像度を等しくしなければならぬ．本研究では全ての画像の解像度を 170m/pixel ($6 \times 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{pixel}$) に補正した．解像度を補正した後，軌道ごとに画像を経度方向につなぎ，次に，その画像を緯度方向につないだ．しかし，O100 系と O200 系の緯度方向の合成では，幾何補正での計算値より数ピクセルのずれが生じたため，その分を緯度方向にスライドさせた．

このようにして作成した広域画像は，東経 143.25 - 153.65 ° 北緯 22.00 - 32.71 ° (但し，東経 151.90 - 151.40 ° は画像の存在しない地域であり，東経 143.25 - 145.02 ° 北緯 28.48 - 32.71 ° の画像は最大輝度値が 254 を越えるものを含むため

に取り除いている)の地域である。

3.2.5 比演算処理

単バンドの画像では地形の起伏が現れているが、陰影地域の地質を知るために、赤に 750nm/415nm、青に 415nm/750nm、緑に 750nm/950nm の輝度値の比演算を割り振り、地形の影響による反射率の違いを取り除いた 3 色合成画像を作成する。

3 色合成画像では、鉄を多く含む岩石層では緑色を呈することから、有色鉱物が多く含まれる玄武岩のような岩石で構成される表層は、緑-黄色を呈する。これは、スペクトルが 950nm 付近に 2 価鉄の吸収帯をもち、鉄の含有量が少ない岩石層に比べ相対的に反射率が小さく、緑色(750nm/950nm)が強調されるためである。また、風化が進むとスペクトルの赤化が起こるため、長波長域で反射率が高くなり、赤色(750nm/415nm)を呈する。逆に風化の度合いが小さいと青色(415nm/750nm)を呈する [Pieters et al., 1997]【図 3 - 6】。

第4章 補正及び処理結果

4.1 モスクワ海盆地の地質図

放射量補正，位相角補正，幾何補正とモザイク処理を施した 415nm，750nm，950nm の波長の画像をそれぞれ【図 4 - 1】【図 4 - 2】【図 4 - 3】に示す．また，赤に 750nm/415nm，青に 415nm/750nm，緑に 750nm/950nm の輝度値の比演算を割り振った画像をそれぞれ【図 4 - 4】【図 4 - 5】【図 4 - 6】に，これらの 3 色合成画像を【図 4 - 7】に示す．なお，【図 4 - 1】～【図 4 - 6】は色調を補正し，明暗を強調している．

4.2 モスクワ盆地内部

【図 4 - 7】から，モスクワ盆地内部はすべてが同じ海の物質ではなく，その色相の特徴から 6 地域【図 4 - 8】に分類される．

- 〔1〕 海盆の北東部：青緑色を帯びた地域
- 〔2〕 中心部：緑青色を帯びた地域
- 〔3〕 北部：橙色を帯びた地域
- 〔4〕 西部：黄色を帯びた地域
- 〔5〕 南西部：赤褐色を帯びた地域
- 〔6〕 Titov クレーター周辺部：赤褐色を帯びた地域

高地は赤色が強く風化の度合いが大きいことに比べ，地域〔1〕〔2〕〔3〕〔4〕は赤色より青色が強く風化の度合いが小さい．また，可視領域【図 4 - 2】を見ると，これらの地域は高地よりクレーター密度が非常に小さく，高地と異なる物質，つまり海の物質と考えられる．これらの地域についてさらに詳しく見ると，【図 4 - 5】から，地域〔1〕は最も明るく風化が進んでいない地域，地域〔3〕〔4〕は地域〔2〕より暗く風化が進んでいる地域と読み取れる．【図 4 - 6】からは，地域〔1〕は最も明るく鉄の含有量が多い地域，地域〔3〕は地域〔4〕より暗く鉄に乏しく，この 2 地域は異なる海の物質の可能性はある．しかし，風化の度合いが小さい地域では明るく，風化が進んでいる地域では暗くなるため，鉄の含有量の特定をしないと断定できない．

高地と同様に風化が進んでいる地域〔5〕〔6〕は，【図 4 - 6】から鉄の含有量にも乏しく，海の物質である可能性は極めて少ない．この地域の複数のクレーター内部は青緑を帯びているものもあるが，これは，後の流入溶岩によって埋められたもの

と考えられる。

4.3 Komarov クレーター

Komarov クレーターの直径は、【図 4 - 2】から計算（緯度経度方向のピクセル数を距離に変換した平均値）により求めると 74km である。このクレーターは、【図 4 - 7】の色相の特徴から 2 地域【図 4 - 8】に分類される。

〔A〕北西部：黄赤色を帯びた地域

〔B〕南東部：赤褐色を帯びた地域

Komarov クレーターは、【図 4 - 2】からもアルベドの低い地域〔A〕と高い地域〔B〕に分類される。また、地域〔A〕は平坦であり、地域〔B〕はクレーターが多数存在することから、地域〔A〕は海の物質であり、高地物質と同様に風化が進んでいる地域〔B〕はリムの崩壊による堆積物質と考えられる。また、このクレーターの不規則な割れ目は、後のモスクワ盆地の火成活動により、隣接する Komarov クレーターの底が持ち上げられたためと考える。

以上のことから、Komarov クレーターの不規則な割れ目の成因は、隣接するモスクワ盆地の火成活動と、クレーター底の物質が異なることの 2 つが重なったためと考えられる。

第5章 議論

5.1 ルーナーオービターの月面写真との比較

第2章（ルーナーオービターの月面写真判読）による見解と、クレメンタインの月面分光画像を比較する。

【図1-5】から、内輪で囲まれたモスクワ盆地内部は高地に比べアルベドが低く、盆地内部全体が海の可能性が考えられたが、【図4-7】から、地域〔5〕〔6〕は高地と同様に風化が進んでおり、海と異なる物質と考えられる。この2地域は、高地と同様にクレーター密度が高いことから、モスクワ盆地形成時やその後の隕石衝突によるクレーターをそのまま残存している。つまり、溶岩の噴出以前からこの地域を形成する堆積物質があり、標高が高いために溶岩に埋められなかったと考えられる。この物質は、アルベドの違いから高地物質と異なる可能性が高く、モスクワ盆地形成時のクレータリングによる掘削堆積物、すなわち高地とは別の地下下部物質、もしくは後のリム崩壊による堆積物質である可能性がある。また、この地域のクレーターは、後の流入溶岩によって埋められたと考えられる。

次に、【図1-5】からリンクルリッジが確認できる地域は、【図4-8】の地域〔1〕〔2〕にあたる。この2地域は、【図4-7】から、高地に比べて風化が進んでなく、鉄に富むことから海と考えられ、風化の進み具合から地域〔1〕が最も新しい火成活動地域である。【図1-5】から、地域〔1〕〔2〕〔3〕〔4〕の重なりは確認できなかったが、地域〔4〕の南部は、地域〔2〕の溶岩の貫入により小規模なクレーターを埋めている。また、地域〔4〕は地域〔2〕よりわずかに風化が進んでいることから、古い火成活動地域と考えられる。

【図1-5】から、Komarov クレーター内部はアルベドが低く海の可能性が考えられたが、【図4-7】から、地域〔A〕の海と地域〔B〕の風化の度合いが大きい地域とに分類できる。【図1-5】から、地域〔B〕は地域〔A〕に重なっていることから、地域〔B〕は海形成後にリムの崩壊による堆積した物質と考えられる。

5.2 USGS 地質調査図との比較

本研究で作成したモスクワ海盆地地域の地質分布図と、単バンドの反射率による画像解析によって作られた地質調査図を比較し、この地域の地質分布を再検討する。

【図1-7】で I_m と定義されているインプリアンの溶岩地域は、本研究では、風化度や鉄の含有量により地域〔1〕〔2〕〔3〕〔4〕の4地域に分類される。つまり、これまで1枚の溶岩層と考えられてきたモスクワの海は、4枚の溶岩層をもち、この4地域の違いは、溶岩流出の年代、溶岩組成の違い、あるいは、マグマソースの

違いを反映している可能性が高い。

次に，【図 1 - 7】で定義されている地域 INp はインブリアンかネクタリアンに由来し，Ip はインブリアンに由来する．この地域はそれぞれ地域〔6〕と地域〔5〕にあたるが，【図 4 - 7】による風化の違いや【図 1 - 5】の溶岩層の重なりからも，本研究ではこれらの層序は決定できない．

Komarov クレーター内部は，同心円状に中心から地域 Ifc ，地域 Nc の構造をしている．地域 Ifc はインブリアンに由来し，地域 Nc はネクタリアンに由来する，それぞれクレーター堆積物質と定義されている．しかし，【図 4 - 2】【図 4 - 7】から同心円状ではなく，北西部の海（地域〔A〕）と南東部の堆積物質（地域〔B〕）に分類される．

5.3 今後の課題

モスクワ盆地内部を，クレメンタイン月面分光画像を利用した3色合成画像により6地域に分類できたが，各物質を特定するに至っていない．分光画像から含有元素の量等の調査をすることにより，インブリアンの溶岩の違いや，アルベドの低い南西部地域についても解明できる可能性がある．

第 6 章 結論

クレメンタインの月面分光画像解析とルーナーオービターの写真判読， USGS 地質調査図と比較し，モスクワの海の地質，溶岩流出形態や，海盆形成発達史について詳細に調べた．その結果，次のことが明らかになった．

- (7) モスクワの海の溶岩層は 4 地域に分類され，裏側北半球の高地においても，表側の典型的な火成活動と同様，マルチイベントの溶岩流出形態が存在したことを示唆している．
- (8) モスクワ盆地内の海と異なる物質は，モスクワ盆地形成時のクレータリングによる掘削堆積物，すなわち高地とは別の地下下部物質，もしくは後のリム崩壊による堆積物質である可能性がある．
- (9) Komarov クレーターは，北西部の海と南東部の海形成後のリム崩壊による堆積物質の 2 地域に分類される．
- (10) Komarov クレーターの不規則な割れ目の成因は，隣接するモスクワ盆地の火成活動と，クレーター底の物質が異なることの 2 つが重なったためと考えられる．
- (11) モスクワ海盆地域の地質区分図を【図 4 - 8】に示す．
- (12) モスクワ海盆の形成史を【表 6 - 1】に示す．

以上が本研究の成果である．

謝辞

本卒業論文の研究を行うにあたり、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講座（地学科）の高田淑子助教授に深く感謝いたします。

また、同大学地学科の青木守弘教授、森洋介教授、川村寿朗助教授、菅原敏博士には、日頃から親切なご助言をいただいたことに深く感謝いたします。

最後に、研究並びに卒業論文の作成にあたり、様々なご援助をいただいた、同室である木村貴之君、石森譲君、須田敏典君、西川洋平君、隅山智子さん、そのほか関係者の皆様に謝意を表します。

引用文献

- Hapke, B. (1993): “ Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy ” ,
Cambridge University Press , p.199 .
- Mursky, G. (1996): The Moon . *In* “ Introduction to Planetary Volcanism ” ,
Prentice-Hall, Inc. , p.153, 159,160, 162,163,175 .
- Nozette, S. et al. (1994): The Clementine Mission to the Moon:Scientific
Overview . *Science* **266** , 1835-1839 .
- Pieters, C. M. et al. (1997): Brown University Image Calibrations For
Bidirectional Reflectance (current steps and algorithms) .
<http://www.planetary.brown.edu:80/clementine/imagecal.html>
- Stuart-Alexander, D. E. (1978): Geologic Map of The Central Far Side of The
Moon . U.S. Geological Survey .
- Taylor, S. R. (1999): The Moon . *In* “ Encyclopedia of The Solar System ” (Paul
R. Weissman and Lucy-Ann McFadden and Torrence V. Johnson, eds .) ,
Academic Press , p.253,259,270,273-275 .
- U.S. Geological Survey (1980): Shaded Relief Map of The Lunar Far Side .
- Wilhelms, D. E. (1987): The Geologic History of the Moon . U.S.G.S. Prof. Paper
No.1348. U.S. Geological Survey, Washington, D.C. , p.64,82,179,186 .
- 白尾元理 (1995): 月の火山学 . “ 惑星火山学入門 ” (藤井直之・白尾元理・小森長
生編) , 日本火山学会 , p.3-21 .
- 武田 弘 (1984): 月の地形と地質 . “ 月の科学 ” (久城育夫・武田 弘・水谷 仁
編) , 岩波書店 , p.1-30 .
- 中野 司 (1995): Clementine 画像の位置決め .
- 水谷 仁 (1984): 月の起源と進化 . “ 月の科学 ” (久城育夫・武田 弘・水谷 仁
編) , 岩波書店 , p.204-216 .
- (財) 資源・環境観測解析センター編 (1989): “ 資源探査のためのリモートセンシ
ング実用シリーズ 画像データの処理と解析 (1) ” , p.39-65 .
- (財) 資源・環境観測解析センター編 (1996): “ 新編リモートセンシング用語辞典 ” ,
pp.291 .
- 日本リモートセンシング研究会編 (1992): “ 図解リモートセンシング ” , p.180 .

資料

(表 1 - 1 ~ 表 6 - 1 , 図 1 - 1 ~ 図 4 - 8)

- 表 1 - 1 化学組成
- 表 1 - 2 月の年代史
- 表 3 - 1 UVVIS カメラの仕様
- 表 3 - 2 補正に用いる画像変数
- 表 6 - 1 モスクワ海盆の形成史
- 図 1 - 1 海の溶岩分布図
- 図 1 - 2A 月の内部構造図
- 図 1 - 2B 月の内部構造図
- 図 1 - 3 リッジ・ルーナーオービター-V-124M
- 図 1 - 4 割れ目クレーター・ルーナーオービター-V-124M
- 図 1 - 5 モスクワの海・ルーナーオービター-V-124M
- 図 1 - 6 USGS 地質陰影図
- 図 1 - 7 USGS 地質調査図
- 図 3 - 1 入射角と位相角と放射角の関係
- 図 3 - 2 センサーと月の位置関係
- 図 3 - 3 画像の 4 点の位置
- 図 3 - 4 標準的な 2 方向性反射率
- 図 3 - 5 格子上投影図
- 図 3 - 6 波長と反射率の関係
- 図 4 - 1 クレメンタイン単色モザイク画像 (415nm)
- 図 4 - 2 クレメンタイン単色モザイク画像 (750nm)
- 図 4 - 3 クレメンタイン単色モザイク画像 (950nm)
- 図 4 - 4 クレメンタイン単色モザイク画像 (赤 : 750nm/415nm)
- 図 4 - 5 クレメンタイン単色モザイク画像 (青 : 415nm/750nm)
- 図 4 - 6 クレメンタイン単色モザイク画像 (緑 : 750nm/950nm)
- 図 4 - 7 クレメンタイン 3 色モザイク画像
- 図 4 - 8 モスクワ海盆地域の地質区分図

表 1 - 1 化学組成 [Mursky, 1996 (Glass, 1982 引用) より一部抜粋]

酸化物 (wt%)	原始 太陽系	原始 地球	月	高地	低 Ti 玄武岩	高 Ti 玄武岩
SiO ₂	34.2	49.9	43.4	45.0	43.6	37.8
TiO ₂	0.11	0.16	0.3	0.56	2.60	13.0
Al ₂ O ₃	2.44	3.64	6.0	24.6	7.87	8.85
FeO	35.8	8.0	13.0	6.6	21.7	19.7
MgO	23.7	35.1	32.0	6.8	14.9	8.44
CaO	1.89	2.89	4.5	15.8	8.26	10.7
Na ₂ O	0.98	0.34	0.09	0.45	0.23	0.36
K ₂ O	0.10	0.02	0.01	0.03	0.05	0.05
	99.2	100.1	99.3	100	100.4	99.5

表 1 - 2 月の年代史 [Mursky, 1996 : Taylor, 1999 より一部修正]

相対年代 (億年前)	絶対年代 (億年前)	Events
コペルニアン (~ 10)	~ 20	地域的なガスの散逸 小さな火山活動 隕石衝突
エラトステニアン (10 ~ 31)		
	20 ~ 32	隕石衝突の減少 火山活動の収束
インブリアン (31 ~ 38.5)		
	32 ~ 39	表側の主要な海の玄武岩の流出 高地内部の火山活動
ネクタリアン (38.5 ~ 39.2)		
	39 ~ 43	堅い地殻の衝突盆地形成 マグマの火道形成
プレネクタリアン (39.2 ~)		
	43 ~ 44.5	初期地殻の多数のクレーター形成 内部マグマ活動の開始
	44.5 ~ 45	月の形成 斜長岩石に富む地殻形成
	45 ~ 46	ジャイアントインパクト

表 3 - 1 UVVIS カメラの仕様 [Nozette, 1994 より一部抜粋]

素子の配列	384 × 288
素子サイズ (μm)	23 × 23
レンズの口径 (mm)	46
焦点距離 (mm)	90
視野角 (deg)	5.6 × 4.2
フィルター (nm)	415 ± 20
	750 ± 5
	900 ± 15
	950 ± 15
	1000 ± 15
	400 - 950
積分時間 (ms)	0.2 - 773
ゲイン (e/bit)	150
	350
	1000
オフセット (bits)	5

表 3 - 2 補正に用いる画像変数

画像の撮像条件

GAIN	ゲイン
OFFSET	オフセット
EXPOSURE_DURATION	センサーの露光時間 (ms)
FOCAL_PLANE_TEMPERATURE	センサーの焦点温度 (K)

太陽とセンサーの位置

INCIDENCE_ANGLE	太陽光の入射角 (deg)
PHASE_ANGLE	位相角 (deg)
EMISSION_ANGLE	太陽光の放射角 (deg)

センサーの姿勢と画像の位置 [中野, 1995 より一部変更]

TARGET_CENTER_DISTANCE	センサーと月の中心間の 距離 (km), T
SLANT_DISTANCE	センサーとターゲットの中心間の 距離 (km), S
CENTER_LATITUDE	ターゲットの中心の緯度 (deg), C 点の緯度
CENTER_LONGITUDE	ターゲットの中心の経度 (deg), C 点の経度
SUB_SPACECRAFT_LATITUDE	センサーと月の中心を結ぶ月面の 緯度 (deg), P 点の緯度
SUB_SPACECRAFT_LONGITUDE	センサーと月の中心を結ぶ月面の 経度 (deg), P 点の経度
RETICLE_POINT_LATITUDE	画像の 4 隅の緯度, (L ₁ , L ₂ , L ₃ , L ₄)
RETICLE_POINT_LONGITUDE	画像の 4 隅の経度, (L ₁ , L ₂ , L ₃ , L ₄)

表 6 - 1 モスクワ海盆の形成史

相対年代 (億年前)	Events
コペルニアン (~ 10)	
エラトステニアン (10 ~ 31)	
インブリアン (31 ~ 38.5)	北東部の溶岩地域〔1〕 中心部の溶岩地域〔2〕 北部の溶岩地域〔3〕 西部の溶岩地域〔4〕 南西部地域〔5〕 Titov クレーター周辺部〔6〕 Titov クレーターの形成
ネクタリアン (38.5 ~ 39.2)	モスクワ盆地の形成
プレネクタリアン (39.2 ~)	

* 地域〔3〕と地域〔4〕, 地域〔5〕と地域〔6〕の層序は本研究ではつけられない。

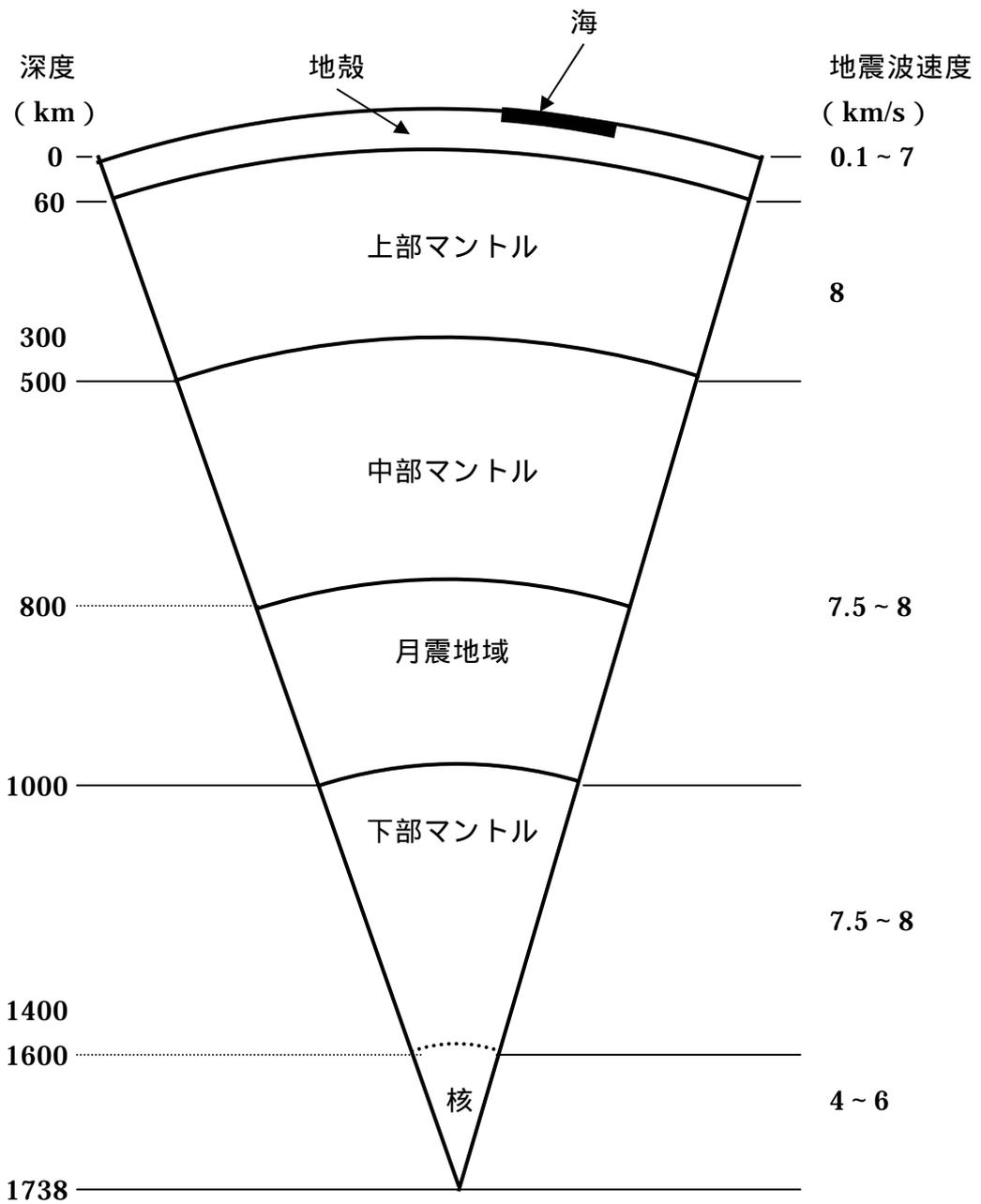
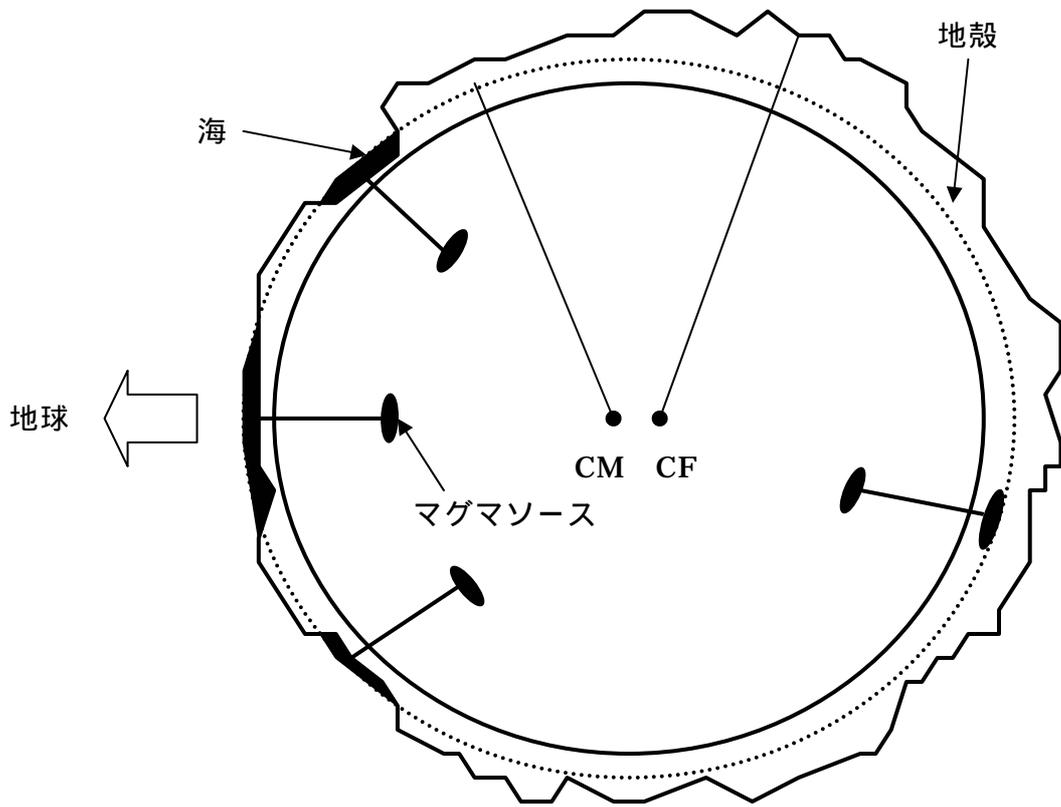


図 1 - 2A 月の内部構造図 [Mursky, 1996 (Glass, 1982 引用) より一部修正]



CM : 月の質量の中心
 CF : 月の形状の中心

図 1 - 2B 月の内部構造図 [Taylor, 1999 より一部修正]

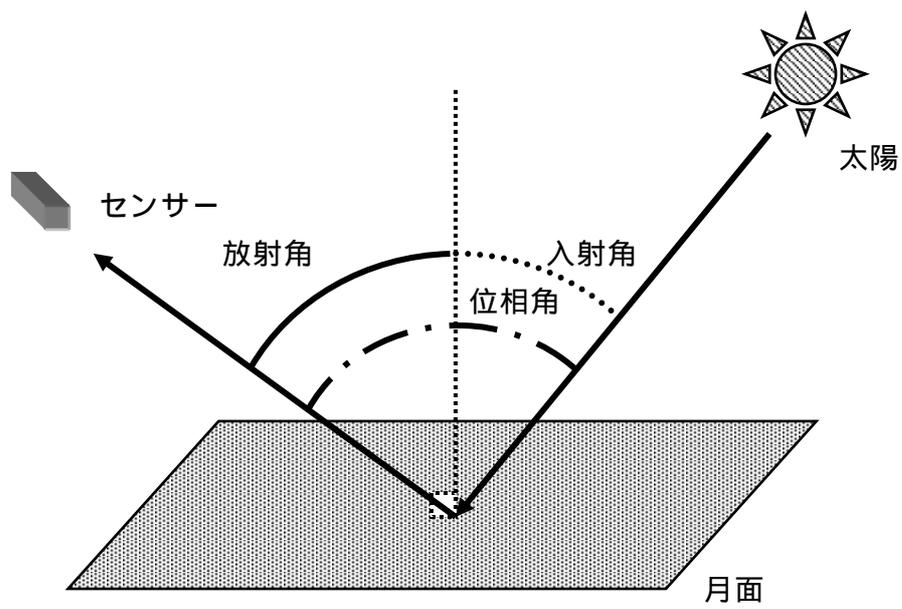


図 3 - 1 入射角と位相角と放射角の関係

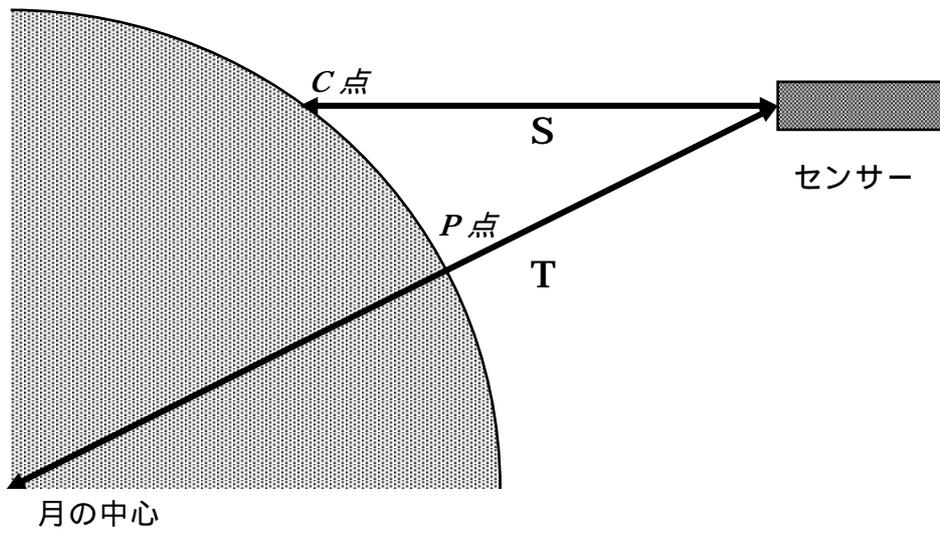


図 3 - 2 センサーと月の位置関係 [中野, 1995 より一部変更]

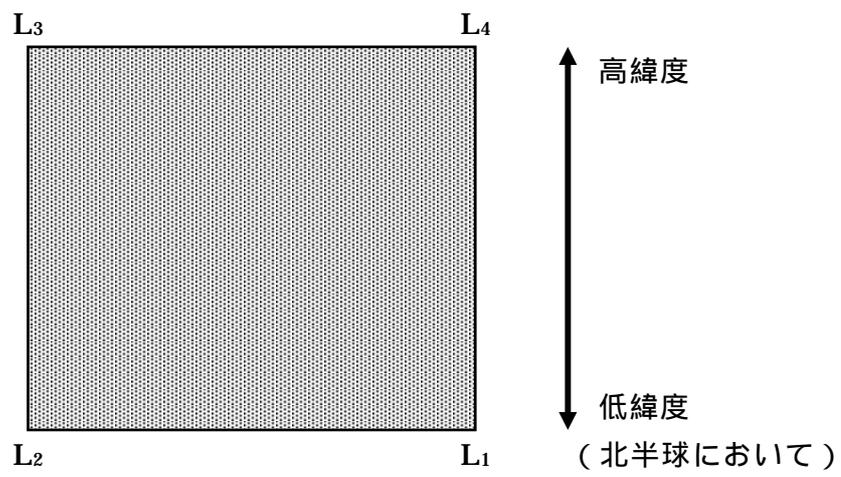


図 3 - 3 画像の 4 点の位置

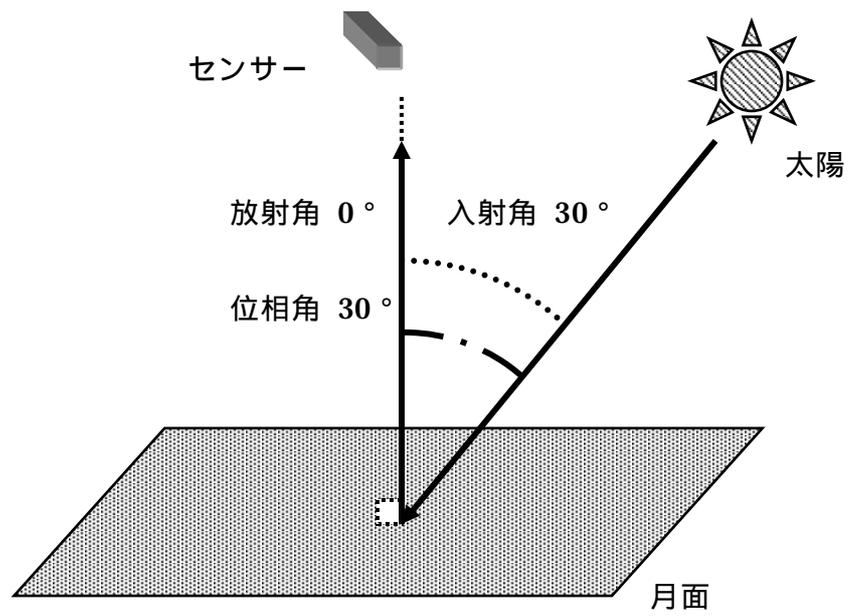
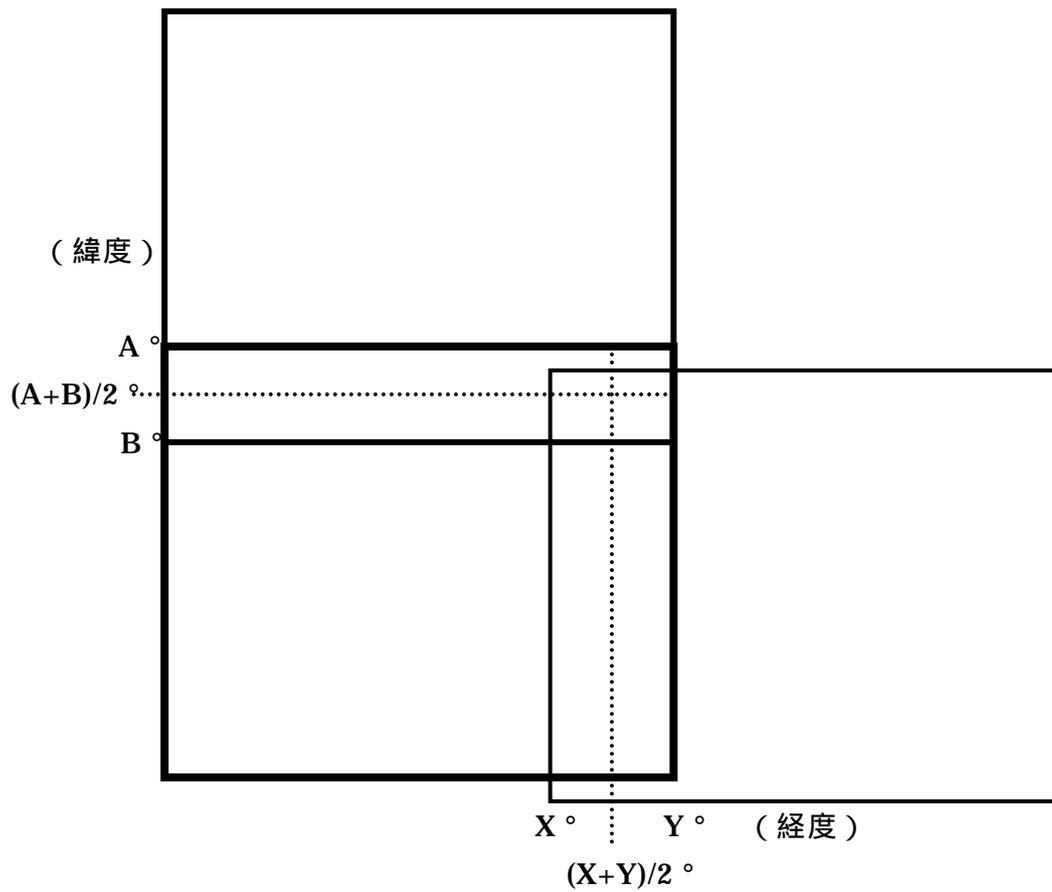


図 3 - 4 標準的な 2 方向性反射率



緯度方向は(A+B)/2 °
 経度方向は(X+Y)/2 ° で切る .

図 3 - 5 格子上投影図

付録

(付録 1 ~ 3)

付録 1 . 本研究に使用したクレメンタインの画像番号

O112	lua4411	lub4406	lud4399
	lua4442	lub4437	lud4430
	lua4473	lub4468	lud4461
	lua4504	lub4499	lud4492
	lua4535	lub4530	lud4523
	lua4566	lub4561	lud4554
	lua4597	lub4592	lud4585
	lua4628	lub4623	lud4616
	lua4659	lub4654	lud4647
	lua4690	lub4685	lud4678
O113	lua4212	lub4207	lud4200
	lua4243	lub4238	lud4231
	lua4274	lub4269	lud4262
	lua4305	lub4300	lud4293
	lua4336	lub4331	lud4324
	lua4367	lub4362	lud4355
	lua4398	lub4393	lud4386
	lua4429	lub4424	lud4417
	lua4460	lub4455	lud4448
	lua4491	lub4486	lud4479
	lua4522	lub4517	lud4510
O114	lua4434	lub4429	lud4422
	lua4465	lub4460	lud4453
	lua4496	lub4491	lud4484
	lua4527	lub4522	lud4515
	lua4558	lub4553	lud4546
	lua4589	lub4584	lud4577
	lua4620	lub4615	lud4608
	lua4651	lub4646	lud4639
	lua4682	lub4677	lud4670
	lua4713	lub4708	lud4701
	lua4744	lub4739	lud4732

O115	lua4304	lub4299	lud4292
	lua4335	lub4330	lud4323
	lua4366	lub4361	lud4354
	lua4397	lub4392	lud4385
	lua4428	lub4423	lud4416
	lua4459	lub4454	lud4447
O246	lua2874	lub2869	lud2862
	lua2905	lub2900	lud2893
	lua2936	lub2931	lud2924
	lua2967	lub2962	lud2955
	lua2998	lub2993	lud2986
	lua3029	lub3024	lud3017
	lua3060	lub3055	lud3048
	lua3091	lub3086	lud3079
	lua3122	lub3117	lud3110
	lua3153	lub3148	lud3141
	lua3184	lub3179	lud3172
	lua3215	lub3210	lud3203
	lua3246	lub3241	lud3234
	lua3277	lub3272	lud3265
	lua3308	lub3303	lud3296
	O247	lua3107	lub3102
lua3138		lub3133	lud3126
lua3169		lub3164	lud3157
lua3200		lub3195	lud3188
lua3231		lub3226	lud3219
lua3262		lub3257	lud3250
lua3293		lub3288	lud3281
lua3324		lub3319	lud3312
lua3355		lub3350	lud3343
lua3386		lub3381	lud3374
lua3417		lub3412	lud3405
lua3448		lub3443	lud3436
lua3479		lub3474	lud3467

lua3510

lub3505

lud3498

lua3541

lub3536

lud3529
