

論文内容の要旨

論文題目 可視・近赤外波長域における月面の光反射特性

氏名 横田 康弘

地上望遠鏡や探査機による月の分光観測データの解析は、月表層の鉱物組成や表面状態を推定する手段として重要である。データ解析の過程では観測の角度条件に応じて変化する反射光強度の補正が行われる。空間的に離れた2地点の観測は通常異なる角度条件で行われるため、この補正を正確に行えることが2地点間を定量的に比較する上で特に重要である。観測の角度条件は、入射角 i 、射出角 e 、位相角 α （太陽-月面-観測者のなす角度）の3つで特定される。従来のクレメンタイン画像解析においては、観測波長 λ での月面反射光強度観測値 $K_\lambda(i, e, \alpha)$ を表すモデル式は、以下のように設定されている。

$$K_\lambda(i, e, \alpha) = J_\lambda \cdot C_\lambda \cdot \frac{w_\lambda}{4\pi} \cdot X_L(i, e, \alpha) f_\lambda(\alpha) \quad (1)$$

ここで J_λ は太陽光強度、 C_λ は装置定数である。 w_λ は月表層構成粒子の平均的な1次散乱アルベドである。鉱物組成の推定には波長毎のアルベドの情報が最も有用である。 X_L は Lunar-Lambert 関数と呼ばれ、入射角、射出角の効果を表す。位相関数 $f_\lambda(\alpha)$ はその他の位相角の効果を表す式であり、平均的構成粒子の1次散乱の方向特性や、位相角が $5^\circ \sim 10^\circ$ 以下になると月面が急激に明るくなる Opposition Effect と呼ばれる効果などを含む。クレメンタインサイエンスチームが最終的に採用した校正手順(McEwen et al., 1998)においては、 $f_\lambda(\alpha)$ がバンドごとに与えられていた。しかし、位相関数は、地質タイプごとに異なる可能性がある。例えば、月の表面は「高地」と「海」に大別されるが、両者の光学的性質は異なっていると予想されるため、高地と海の位相関数の相違が問題である。

また、宇宙環境にさらされて生じる宇宙風化作用も光学的に重要である。しかし、これまで地質によって位相関数がどの程度異なるか十分確かめられてはおらず、特に位相角が約 10~15° 以下になるような地点での有効性には疑問が持たれていた。そこで本研究では以下を目的としてクレメンタイン探査機の画像の解析を行った。

- ・位相角 0~30° の範囲で、月の位相関数をもつ地質タイプ依存性、観測波長依存性を明らかにする。
- ・分光画像の精密な位相角補正方法を開発する。

過去の研究においては、Clementine 分光画像に適用可能とされる幾何学基準化モデルが三つ提案されている。本研究ではそれらをふまえて、観測幾何学(i, e, α)における画像輝度 K と反射率 (Bidirectional Reflectance) との関係性を記述するモデル式として次の式を採用した。

$$K_{\lambda}(i, e, \alpha) = J_{\lambda} \cdot C_{\lambda} \cdot R_{30, \lambda} \cdot D(i, e; \alpha) \cdot F_{\lambda}(\alpha) \quad (2)$$

ここで、 R_{30} とは基準の幾何学条件 ($30^{\circ}, 0^{\circ}, 30^{\circ}$) における Bidirectional Reflectance である。 $D(i, e, \alpha)$ は入射角、射出角の効果を表す関数である。過去の研究においては研究者ごとに i, e の補正関数として用いる式は異なっているが、 $D(\alpha, 0, \alpha) = 1$ となるように規格化さえ施せばどの補正関数を $D(\alpha, 0, \alpha)$ の原形として採用しても $F_{\lambda}(\alpha)$ の形を変えなくてすむという利点がある。本研究では、 $D(i, e, \alpha)$ として(1)式と同じ X_L を規格化して用いた。(2)式で $F_{\lambda}(\alpha)$ と書かれた関数が、本研究で扱う位相関数である。 $F_{\lambda}(30^{\circ}) = 1$ と規格化されている。

クレメンタイン探査機の UV-VIS カメラは、415~1000nm の観測波長帯、120~200m の空間分解能でほぼ全月面の分光撮像を行った。月面の一部は 2 回以上、異なる位相角で撮像された。こうした重複部を持つ画像ペアを用いると上式中の R_{30} と $F_{\lambda}(\alpha)$ を分離できる。すなわち、 $D(i, e, \alpha)$ が分かっている位相角 α の反射光強度 $K(i, e, \alpha)$ を位相角 30° で観測した反射光強度 $K(30^{\circ}, 0^{\circ}, 30^{\circ})$ で割れば $F_{\lambda}(\alpha)$ が得られる。

$$F_{\lambda}(\alpha) = \frac{K_{\lambda}(i, e, \alpha)}{D_{\lambda}(i, e; \alpha) K_{\lambda}(30^{\circ}, 0^{\circ}, 30^{\circ})} \quad (3)$$

様々な位相角 α でこのような複数回観測データを集めれば、連続した位相関数 $F_{\lambda}(\alpha)$ を知ることができる。ただし、多くのデータを集めるためには、Clementine の取得した CD-ROM 8 巻におよぶ膨大な生データから適切なものを選択できる解析システムが必要である。月面上の任意の座標点について、「観測回数」、「画像名」、「観測時の幾何学条件」、「観測された反射光強度」といった情報を網羅したデータベースが Clementine データから作成できれば、光散乱モデルの検討と地質解析を総合的に行う上で大きな利用価値がある。本研究ではこのようなデータベースの開発から行った。解析対象は三バンド(415、750、950nm)、月全周の緯度 $+30^{\circ} \text{ N} \sim -30^{\circ} \text{ N}$ の範囲で、使用した Clementine UV-VIS カメラ原画像は約 10 万枚に及ぶ。月面上を緯度経度 0.1° (約 3km 幅) 四方のグリッドに分割し、こ

のサイズを解析単位として反射光強度、観測角度の算出を行った。また、軌道情報だけから算出する各画素の緯度経度の精度は同一地点を特定する上で不十分なため、米国地質調査所が作成したモザイク地図上の特徴点を用いた位置補正も加えた。用いる画像は大量であるため、これらの処理は自動化した。作成したデータベースのサイズは 2.75 GB である。

従来、幾何学補正を施したあとに残る誤差として「ハードウェア補正の問題」と「位相関数の地域依存性」とがひとまとめにされてきた。本研究で開発したデータベースを用いることで、両者を分離して論じることが可能となった。まず、同一月面が同一位相角で撮像されている画像を異なる軌道間で比較することにより検出器感度の経年変化を見積もり、その補正式を提案した。補正を加えた結果、多バンド合成モザイク画像上の不自然な縞模様を減少させることに成功した。

位相関数と地質タイプとの関連を調べるには月面各地点の地質タイプを前もって分類する必要がある。観測位相角 30° 近傍の Clementine データ以外用いずに定量的な分類を行う方法として、Kohonen の自己組織化マップ (SOM: Self Organizing Maps) の手法を導入した。9 つに分類した結果と地質との対応付けには、USGS 地質区分図及びプロスペクタの元素存在度 (FeO, TiO₂, Th) データを利用した。

月反射光強度データベースから複数回観測データを抽出して(3)式によりアルベドの一次の寄与を取り除いた結果、スペクトル分類別の位相関数 $F(\alpha)$ が得られた。位相関数と観測波長との関係を調べた結果、いずれのスペクトルタイプについても「波長が短いほど小さい位相角での位相関数の値は大きくなる」ことが判明した。高地-海の比較では、三つのバンド全てで高地の位相曲線が海の位相曲線を明白に下回っていた。750nm バンドの例を図 1 に示す。950 nm バンドでは、位相角 6° で最大 7.6% までフィッティング曲線の差は広がった。この差は、位相角補正適用後の反射スペクトルを用いた組成推定にとって無視できない大きな違いである。宇宙風化の進んだ高地と未風化な高地との間で位相関数を比較からは、未風化な高地の位相関数の方が位相角 $5.0\sim 6.0^\circ$ 付近で約 2% 下回る可能性があるといえる。反射率と位相関数プロットとの相関関係があることも確認された。これは光散乱モデルの観点からは、一次散乱アルベド w_λ の変動が位相関数に与える影響として定性的に説明できる。

最後に、新たな位相角補正法として、スペクトルグループ別の位相関数を用いて反復的に補正を行う方法を開発した。このような方法で収束が成り立つのは、位相関数の分布幅が反射率絶対値の分布幅に比べれば小さいからである。新補正法適用後は、適用前に比べてバンド間比演算カラーモザイク上で地質境界をより明瞭に識別できるようになった。単バンド反射率の改善結果の一例を図 2 に示す。このような方法を用いることにより、月の全面の化学組成の推定が従来よりも正確に行えると考えられる。

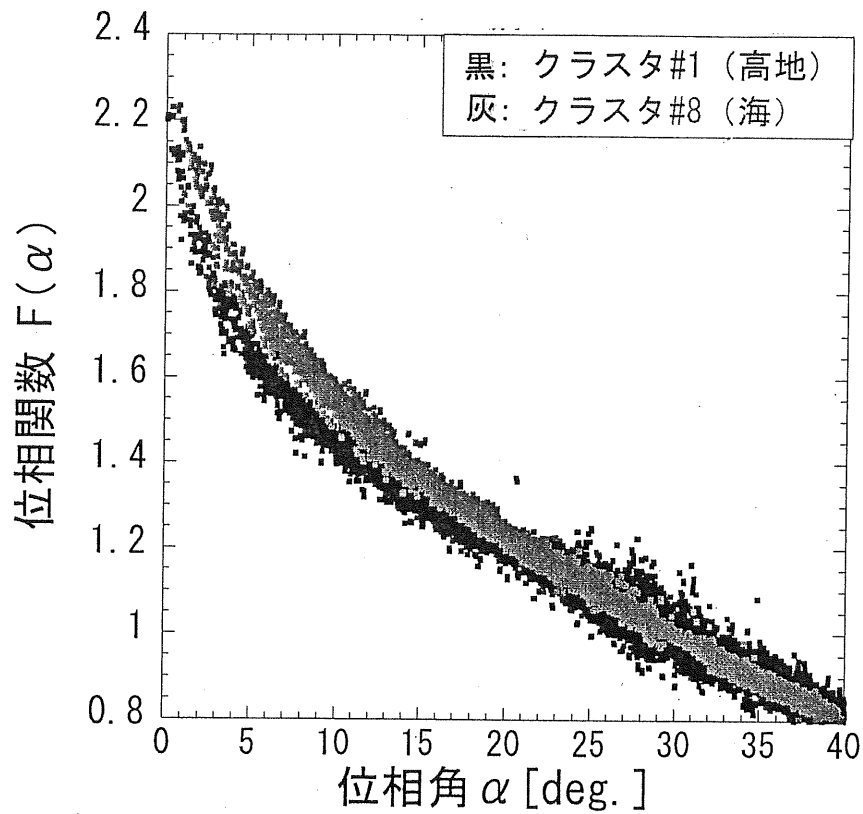


図1 位相関数の高地-海間比較。
 本研究での定義により、位相関数 $F(\alpha)$ は位相角 30° で規格化してある。
 クラスタ番号は自己組織化マップによる分類時に付けた番号である。

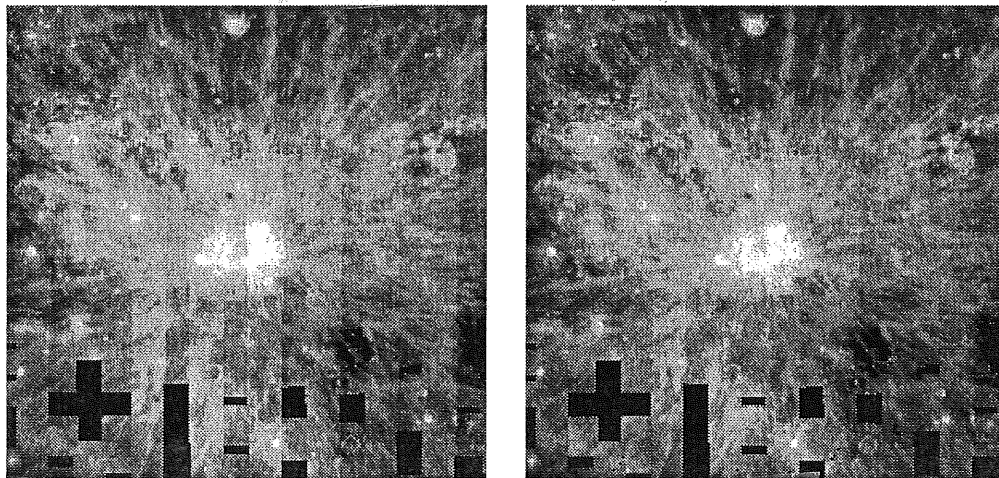


図2 コペルニクスクレーター (直径 90km) 周辺の 750nm 反射率モザイク画像。
 750nm 反射率に顕著な改善のみられた例である。左図が McEwen (1998) の
 位相関数のみを用いた場合。右図が検出器感度の補正と反復的な位相角
 補正法を適用した結果。