

論文内容の要旨

小惑星の多様な物理的特徴は、衝突・破壊イベントを経て作り出されたと考えられている。その中でも小惑星の表面組成、形状、自転周期や軸の向きは、衝突・破壊と密接な関係があり、これまで、主に地上望遠鏡を使った観測によって研究が進められてきた。表面組成については、可視波長あるいは赤外波長域の多色測光観測や分光観測で得られたスペクトル型による分類がなされている。形状や自転に関わる情報は、変光度を測定するライトカーブ観測から導かれてきたが、これらの研究は、小惑星の全体的な特徴を示すものであった。

小惑星表面のより詳細な特徴を得るためには、探査機や宇宙望遠鏡による直接撮像が最も有効である。このような観測によって、951 Gaspra, 243 Ida, 433 Eros, 4Vesta, 1Ceres は、場所によってカラーやアルベドが異なることが報告されている (Helfenstein *et al.*, 1993; Helfenstein *et al.*, 1996; Veveka *et al.*, 2000; Murchie *et al.*, 2002; Zellner *et al.*, 1997; Binzel *et al.*, 1997; Jian-Yang *et al.*, 2006)。一方、地上観測では、自転によって異なる表面が見えるときに分光観測や多色測光観測を行うことによって、局所的なカラー変化を検出している。例えば、同じ母天体から衝突によって分裂したと推測されている族のメンバーである 10 Hygiea、15 Eunomia、832 Karin に、カラーの特徴的な変化が発見されている (Moth'e-Diniz *et al.*, 2001; Nathues *et al.*, 2005; Yoshida *et al.*, 2004; Sasaki *et al.*, 2004)。この他にも過去の研究では、その強度や解釈の仕方に違いはあるが、小惑星表面に局所的なカラーの違いがあるという報告がある (Scober and Schroll, 1982; Moth'e-Diniz *et al.*, 2000; Sekiguchi *et al.*, 2002; Tupieva 2003; Lazzarin *et al.*, 2004; Hardersen *et al.*, 2005; Cellino *et al.*, 2005)。

多くの場合、地上観測で検出されるカラーの変化量は小さいので、少なくとも 1% 以下の高精度の観測が要求される。この精度を実現するには、これまでの手法では難点があった。例えば、これまでの多色測光観測では、一色ずつ撮像するのが普通であるのだが、この場合、自転に伴い観測する表面がずれてしまうため、正確なカラーの比較をするための補正が難しい。また、分光観測では同時性は保証されるのであるが、測光観測より長い積分時間を必要とするため観測間隔が荒くなり、光度変化から形状を同時に見積もることは困難である。

本研究ではこのような問題点を解決するために、多色同時測光観測を行った。形状と多色の情報を同時に測定できる観測を実施するのは、これまでほとんど例がない。観測には、国立天文台岡山天体物理観測所に配備された口径 50cm の反射望遠鏡を使用した。望遠鏡に搭載されている 3 色同時測光カメラでは、入射光はダイクロイックミラーで三方向に分けられ、それぞれ V($538 \pm 47\text{nm}$), Rc($654 \pm 66\text{nm}$), Ic($799 \pm 84\text{nm}$) のフィルタを通して 3 台の独立した CCD カメラに撮像される。この観測装置は、ガンマ線バーストの残光観測を目的とした MITSuME プロジェクトの一環で設置されたもので、2004 年 9 月から実運用

が始められたものである。筆者はこのプロジェクトの中で、3台のカメラを同時に制御するソフトウェア開発を担当した。小惑星の3色同時測光観測は、2004年10月から2005年5月までの期間で合計50夜行われ、16個の小惑星についてデータが得られた。

解析は、小惑星と同じフィールド内の恒星を測光し、それらの差を測定する相対測光の手法で行われた。相対測光は、標準測光星によって補正を行う絶対測光と比べ、天候変化の影響を受けにくく、密な観測が可能であるという利点がある。一方で、比較する星に太陽類似星を使うとは限らないため、小惑星の測光においては正確なカラーを得られないことがあるが、高度30度以上の観測では、本研究の結果に影響を及ぼさないことを確認している。50夜80,000枚の解析は、1枚ずつ手動では極めて効率が悪いため、より早く効率的に進めるために解析手法を改良した。例えば、小惑星が移動天体であることも踏まえ、あらかじめ測定する小惑星と恒星の位置座標を決め、その情報を元に測光を行うように工夫した。この解析法を導入した結果、従来に比べ数倍の速度で解析を進めることができた。

相対測光データを用いて周期解析を行うことで、16個の小惑星について3色のライトカーブを得た。測光精度は、少なくとも ± 0.01 等級を達成している。得られたライトカーブのカラー差($v-i$, $v-r$, $r-i$)の結果から、16個の小惑星のうち(125) Liberatrix, (152) Alata, (201) Penelope, (250) Bettina, (321) Florentina, (367) Amicita, (378) Holmia, (433) Eros, (512) Taurinensis, (585) Bilkis, (762) Pulcova, (797) Montana, (852) Wladilena の13個の小惑星に自転による光度変化とは別に、有意なカラー差の変化を検出した。少なくとも2夜分の再現性を確認しているため、検出されたカラー差は有意なものであると考える。一方、(65) Cybele, (216) Kleopatra, (517) Edith には明らかに変化がみられなかった。以上の結果をスペクトルタイプ別にまとめると、カラーの差が見られたものはS型小惑星が7個中7個、M型が4個中3個、P型が2個中0個、C型が2個中2個、スペクトル型が未知の小惑星が1個中1個であった。S型小惑星や、光度変化あるいはアルベドが大きい場合に局所的なカラー変化をもつ小惑星の検出率が高いことが分かった。

この局所的なカラー変化の原因として、組成の非一様性、レゴリスの粒径、宇宙風化の度合いの違い、表面の光学特性の違いなどが考えられる。このうち、小惑星表面の光学特性の違いは、形状に依存するだけで物性には依存しない。そこで一様な組成のレゴリスで覆われている小惑星表面を考え、散乱特性を記述する Hapke モデルを使ったシミュレーションを行った(Hapke 1993; Hapke 2002)。このシミュレーションから single scattering albedo が大きいほど、形状による散乱特性の変化の度合いが大きいことが分かった。ここでS型小惑星の single scattering albedo が、スペクトルスロープから予想されるように v より i の方が大きいとすれば、ライトカーブの極小では $v-i$ は相対的に青くなり、極大では赤くなる傾向になるはずである。この研究で得られたカラー差の出現傾向は、Eros を除いてこのシミュレーション結果とは異なるため、光学散乱特性だけでは説明できない。つまり、小惑星表面の物性が場所によって異なっている可能性が高いと思われる。さらに、S型やC型小惑星にはレゴリスの存在が示唆されているので、その粒径分布や宇宙風化作用の

度合いの違いによって、相対的なカラー差の変化を説明することも可能であろう。

本研究では 3 色のカラーフィルタを使った高精度の同時測光を行うことで、形状だけでは説明できない表面物性の非一様性をカラーの差として 13 つの小惑星に発見した。このことは、小惑星の起源や進化の研究にも影響を与えることになると思われる。

論文の審査結果の要旨

小惑星の反射スペクトルやカラーは、小惑星の表面物質に関する情報を得るために、小惑星の地上観測項目として重要なものであり、現在観測がもっとも盛んに行なわれている。この論文で取り上げられている小惑星表面上の場所による局所的なカラーの変化は、表面物質の性質の場所による変化を反映していると思われ、小惑星の表面物質の表面物質や構造の進化の研究にとって非常に有用である。小惑星は地上観測では点源としてしか観測できず、これを研究するためには、小惑星の自転に伴って、カラーが変化するかどうかを検出することが行なわれる。しかしながら、一般に自転に伴う色の変化の割合は少ないため、その検出は極めて困難である。

この論文で、申請者である黒田大介氏は、多色同時測光観測によって自転によるカラー変化の検出を行ない、その変化の原因を論じている。多色同時測光観測という手法は、分光観測に比べて明るさと自転による光度変化がわかりやすく、かつ一回の露出時間が短くて済む、という長所があるにもかかわらず、これまでに報告は1例しかなく、しかもデータ数が極めて少なく、カラー変化は未検出であった。これはいかに高精度観測が困難なものであるかを端的にしめしているといえる。黒田氏は国立天文台岡山天体物理観測所の口径50cm望遠鏡に設置されたガンマ線バースト残光・追跡観測プロジェクト *MITSuME* で使われる3色(V, R, I)同時測光カメラを使って観測を行った。彼は3色同時観測を行なうために、今回の目的に合致したソフトウェアを開発し、2004年10月から2005年5月までに約50夜の占有観測時間を確保し、16個の小惑星を観測した。得られたデータは3色合計で8万枚におよび、自転周期で重ね合わせることによって各色ごとのライトカーブを作成し、各色間の差を出してフィットカーブを作成、このずれに基づいて自転に伴うカラー変化の程度を調べた。この結果、13個の小惑星に有意なカラー変化を発見した。また、スペクトル型ごとのカラー変化は、S型小惑星に検出率が高いことが示された。さらに、得られたカラー差を説明するために、表面の粒子層が一様な組成・粒径をもつような3軸不等楕円体の光散乱特性の波長依存性を調べた。その結果、得られた特徴は、小惑星エロスを除き、大多数の小惑星と傾向が合致しないことが明らかになり、表面が一様な組成・粒径では説明できない非一様な性質を示唆することが明らかになった。本研究の特長として以下の点が挙げられる。

(1) 3色同時測光という手法が非常に目的に適った有効な方法であることが実証された。(2) 測光誤差0.01等級以下の高精度測光観測において、誤差の評価が最大のポイントとなるが、得られた結果は大量のデータの綿密な統計処理に基づいており、信頼度が高いこと。(3) カラー変化をもつ多くの小惑星を新しく検出したこと。またスペクトル型によるカラー変化の違いがあることが明らかになったこと。(4) モデルを用いた検証により、一様な物質・粒径で覆われた粒子層表面では説明できない場合が多いこ

とがわかったこと。

である。以上の諸点はいずれも新しいものであり、本申請論文は博士（理学）の学位論文としてふさわしいものであると判断した。