

特集「小惑星レゴリスの起源と進化」

小惑星のレゴリスは 地上観測で明らかになるか？

吉田二美^{1,3}, 中村士¹, 安部正真², 長谷川直²

地上からの小惑星観測は、様々な手法、広い波長領域で行われている。この稿では、小惑星のレゴリスを推定できそうな3つの観測について解説する。現時点では、小惑星の熱伝導度、偏光度の位相角との関係、多重散乱率と位相光度曲線の傾きの関係などから、小惑星表面のレゴリスの存在は推定できそうだが、定量的解釈には光散乱の理論・実験・探査によるデータとの補完が不可欠である。

1. はじめに

太陽系の起源を論ずる上で、太陽系小天体の存在は重要な関心事の一つである。現在の太陽系においてこれらの天体の多くは、火星と木星軌道の間と冥王星以遠に位置し、それぞれメインベルト、カイパーベルトと呼ばれている。

小天体はときには大惑星と、ときには小天体同士でワルツを踊り、その軌道を変化させる。もちろん優雅なダンスとはいわずに、互いに激しい衝突が起こることもある。相互衝突によって生み出された破片は新たな微小天体となる。微小天体は今まで、望遠鏡の限られた性能により、発見されることなく悠久の時間を過ごしてきた。ところが、最近のSpacewatch計画やLINEARプロジェクトなど、地球に衝突する可能性のある危険な小天体を監視するための、一連の地球近傍天体のサーベイ観測が、これらの微小天体を捕らえ、位置を測定し、軌道決定に成果を上げつつある。太陽系内すべての天体の詳細

な地図を作ることは、科学者の重要な役割の一つであろう。

そして、今、我々の関心はこれらの小天体がいっ生まれ、どんな物質でできているか、どういう経歴を経て現在に至るかということにも注がれる。これらの天体の起源は、太陽系形成初期に集積した無数の微惑星の衝突・合体の結果であるといわれる。

我々は小天体形成の歴史を推測することにより、その天体表面の姿をさまざまに想像してきた。例えば、約40億年前といわれる小天体形成以来、無数の微小隕石の頻繁な爆撃を受けてきた小天体の表面は、穿たれて凸凹になっていないだろうか。微小隕石のクレータリングの際に放出されたさまざまなサイズの放出物（レゴリス）は、重力により再び母天体の上へと降り積もるだろうか。もしくは母天体の重力を振りきるほどの脱出速度を得て宇宙空間へと投げ出されるのであろうか。同じくらいの大きさの天体同士の接触による衝撃は、表面に形成されたレゴリスのマントをすっかり剥がしてしまうかもしれない。天体そのものを破壊するほどの激しい衝突は、それまで秘められていた天体の内部を宇宙空間へとさらし、我々はその新鮮な表皮を新しいスペクトル型的小天体と認識するかもしれない。

この稿は小惑星表面のレゴリスの形成・進化に焦点を当てた議論から、小天体の起源、衝突進化、構成鉱物などを探ることを目的とした研究会の集録として、特に地上観測からわかる小惑星のレゴリスについて書いた。

1 国立天文台・光学赤外線天文学研究系

2 宇宙科学研究所・惑星研究系

3 神戸大学・自然科学研究科

まず、衝突の際のイジェクタ（放出物）の放出速度と小惑星の重力との比較から、直感的には大きな小惑星にはレゴリス層が発達し、微小小惑星にはレゴリスはないであろうと想像される。小惑星 Gaspra の探査以前におけるレゴリスの進化モデル等では、例えば、直径約 10km 以下の小惑星にはレゴリスはほとんどないと考えられて来た[1]。しかし、最近の衝突実験の結果は、C型小惑星など物質強度が十分に小さい小惑星では、イジェクタの放出速度も小さくなるので、直径 1km でもレゴリスが存在し得ることを示している。一方、S型小惑星では恐らく物質強度もかなりあって、直径が 1km より大きくてもレゴリスが欠乏しているかも知れない。小惑星のサイズとレゴリスの厚さの関係は、本特集の「小惑星レゴリスの衝突進化」の章で検討されている。

小惑星のサイズ（すなわち表面重力）によってレゴリスが出来るか否かの研究は、小惑星の組成と進化に関して大きな意味を持つ。理論や実験による研究に加えて、最終的には、レゴリスの有無は地上観測及び直接探査で確かめられなければならない。

以下の第2章では熱赤外の観測から推定できる小惑星の熱伝導度とレゴリスの関係を述べる。第3章では小惑星の反射光の偏光観測から得られるレゴリスの情報の現状を記す。第4章では可視域の測光観測から比較的アルベド（反射能）の高いS型小惑星のレゴリスの有無を観測的に確かめる方法を提案する。最後に第5章で地上観測から得られるデータの限界とレゴリス研究の今後の方向性を述べる。

2. 熱赤外觀測及びレーダー観測によるレゴリス観測

この章では中間・遠赤外線による小惑星の観測から、レゴリスの情報を求める方法について述べる。まずは中間・遠赤外線以小惑星を観測したとき、何がわかるかを明らかにしたい。小惑星の観測は、可

視域では小惑星の反射光を、中間・遠赤外線領域では小惑星が太陽光を吸収して発する熱輻射を観測することになる。反射光からは大きさとアルベドを独立して求めることは難しい。なぜなら、反射光の明るさは、観測される小惑星の大きさ（直径）とアルベドの関数で決定されるためである。小惑星のアルベドと大きさを独立して求める方法には掩蔽観測、レーダー観測、偏光観測（3章を参照）、多位相観測、スペックル干渉計観測、補償光学観測、宇宙望遠鏡観測、探査機直接撮像等がある。これらの観測方法はある程度の制約があり、それぞれの条件を満たす、限られた天体しか観測できない。それに対して、熱輻射観測は比較的観測制約が緩い。可視域での絶対等級の情報とあわせることで、小惑星のアルベドと大きさの情報を分離して求めることができる[2]。地上観測では、250個近くの小惑星のアルベドと大きさが熱輻射観測によって求められた。1983年に打ち上げられた赤外線天文衛星 IRAS は全天サーベイという利点を活かして地上の中間赤外線観測総数の約8倍にあたる約2000個の小惑星を観測した[3]。現在求められている小惑星の大きさとアルベドのほとんどは、このIRASの観測によって求められたものである。

熱輻射観測は前述のように、小惑星の大きさとアルベドを独立して求める際に用いられるが、さらに、多波長で熱輻射のスペクトルを観測すれば、小惑星表層の温度を推定できる。表層の温度は以下の熱伝導方程式と境界条件によって決まる。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \dots \dots \dots (2.1)$$

$$\frac{(1-A_b)S_s}{R_h^2} \mu_0 = \varepsilon \sigma T^4 - \kappa \frac{\partial T}{\partial z} \dots \dots \dots (2.2)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z \rightarrow \infty} = 0 \dots \dots \dots (2.3)$$

ρ は密度、 C_p は比熱、 T は温度、 t は時間、 κ は

熱伝導率, A_b はアルベド, S_s は太陽定数, μ_0 は太陽入射角の余弦, R_h は日心距離, そして ε は輻射率である, ここで,

$$z' = \frac{z}{l_s} \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

$$t' = \omega_r t \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

$$u = \frac{T}{T_{ss}} \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

とおくと, (2.1)-(2.3) 式は次のようにまとめることができる.

$$u^4 = \Theta \left(\frac{\partial u}{\partial z'} \right)_{(z=0)} + \mu_0 \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

ただし, ω_r は天体角速度で, l_s : 表皮厚さ (skin depth), T_{ss} : 太陽直下点温度, Θ : サーマルパラメータは (2.8)-(2.10) 式で与えられる.

$$l_s = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho C_p \omega_r}} \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

$$T_{ss} = \left\{ \frac{(1-A_b)S_s}{\varepsilon \sigma R_h^2} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

$$\Theta = \frac{\Gamma \omega_r^{1/2}}{\varepsilon \sigma T_{ss}^3} = \frac{\Gamma \omega_r^{1/2} R_h^{3/2}}{(1-A_b)^{3/4} \varepsilon^{1/4} \sigma^{1/4} S_s^{3/4}} \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

そして, Γ は

$$\Gamma = \sqrt{\kappa \rho C_p} \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

で与えられ, 熱慣性とも呼ばれる.

上記の式から小惑星表層の温度は Θ というパラメータによって決定されることになる. ある小惑星の大きさ・形状・自転軸・自転周期がわかっている場合, 未知数のパラメータは表層の熱慣性と温度のみである. よって, 熱輻射のスペクトル観測から表

層温度が求めれば, 小惑星表層の熱慣性を決定することができる.

同じような石質の小惑星の中でも, 表層の熱慣性が 2 桁異なると思われる小惑星が観測されている. (2.11) 式のとおり, 熱慣性は熱伝導度と比熱と密度の平方根である. 現在わかっている石質の小惑星の密度は $1000 \sim 4000 \text{ kg/m}^3$, 比熱は $400 \sim 600 \text{ J/kg/K}$ であり, 1 桁を超えるような差は見られない. 一方, 熱伝導度は粒子の状態によって $0.001 \sim 3 \text{ W/m/K}$ まで変化する. これが表層の熱慣性の値を左右する主要因であろう. さらに熱伝導度はレゴリスの粒径と関係がある. 粒径が小さいと熱伝導度が下がる傾向にある[4].

地球接近小惑星 (NEAs) はメインベルト小惑星と比べて表層温度の低い (すなわち熱慣性の大きい) 小惑星が多い. 観測されている NEAs はメインベルト小惑星と比べて小さいため, 小さい小惑星ほど細かい粒径のレゴリスが少ないために熱伝導度が大きくなり, 熱慣性が大きいのではないかと推測される[5]. また, IRAS のデータも, 小惑星のサイズが小さくなると, 表層温度の低い小惑星が増えることを支持している[6]. さらに, レーダー観測も, 小さい小惑星ほど円偏光率が大きく, レゴリス層が薄いこと, または, 波長レベルで表層が凸凹していることを示しており, 細かい粒径のレゴリスの欠如の間接的証拠を示唆する.

以上のように, 現在, 小さい小惑星には細かい粒径のレゴリスが欠乏しているという間接的な情報は得られている. ただし, 表層の温度は表層の粗さ (凸凹) にも依存する. さらに実際の粒子は単一の粒径のみで構成されているのではなくサイズ分布をもっている. これらのことから, 粒径と熱伝導度を定量的に結びつけることは難しい. ただし, 偏光観測により推定される粒径分布やレーダー観測による円偏光比とあわせることで, 定性的な議論は可能になるだろう.

3. 偏光-位相曲線とレゴリスの関係

この章では小惑星の可視域での偏光観測で得られる偏光度と位相角の関係から外挿されるレゴリスについて述べる。

1811年にAragoが月の光の偏光を発見後、太陽系内の天体表面での反射光は多かれ少なかれ偏光していることがわかった。太陽光は無偏光なので、天体表面からの反射光の偏光は、何らかのその天体表面の寄与によるものである。こうした観点から、偏光観測は天体表面の重要な情報を得る有用な手段として位置付けられてきた。特に大気のない小天体の反射光の偏光は、その天体表面の凸凹やレゴリスの存在、表面鉱物組成を反映するとされ、今までに百数十個の小惑星についての偏光観測データがある。

一般に小惑星は暗いため、観測できる小惑星に限られること、さらに、太陽-地球-小惑星の位置関係からメインベルトの小惑星は観測できる位相角の範囲が約 30° 以下に限定されるなど、地上観測には制限が多い。本章では、今までに地上偏光観測から得られた小惑星の偏光データから、小惑星表面のレゴリスについて何がわかるかをまとめた。

3.1 偏光観測から推定されるレゴリスの有無

地上からの小惑星の偏光観測から、位相角（太陽-小惑星-地球のなす角： α ）と偏光度には図1に示すような明確な関係があることがわかっている。ここで偏光度（ P ）は、反射光の散乱面（太陽-地球-小惑星を含む平面）に垂直な成分を I_{\perp} 、平行な成分を I_{\parallel} とすると、次式で定義される。

$$P = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}} \dots \dots (3.1)$$

P の値が正のときを正偏光、負のときを負偏光と呼ぶ。

図1によれば、小惑星の偏光度は、位相角が 0° のときはほぼ0であり、位相角 10° 付近で最大1~2%程度の負の直線偏光が見られる。偏光は位相角 20° 付近で0%となり、それより大きな位相角では正の値となり、直線的に増加し、位相角 100° 付近で最大（数~20%）に達する[7]。

偏光が負から正へと変わる偏光-位相曲線になる原因は、天体表面の凸凹か、もしくは物質内部に入った波が内部で数回反射することによる多重回反射のためであると理解されている。観測される反射光は多重回反射に、もしあるなら表面レゴリス粒子によるミー散乱や干渉効果に加わったものになる。スケールの違う領域で異なる物理過程が同時に起こり、かつそれぞれが影響しあうため、個々の状態を反映した一般論を構築するのは困難である。したがって、天体表面の物理・化学特性のうち、どの項目が反射光の偏光度に寄与しているのか、十分な説明

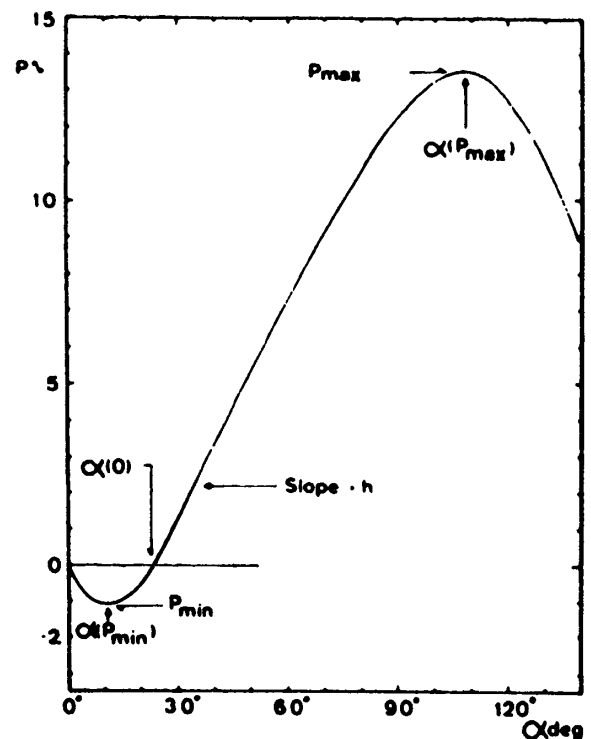


図1 偏光-位相曲線と典型的なパラメーター[7]
横軸：位相角，縦軸：偏光度。偏光度は位相角 α_0 で負偏光から正偏光へ変わり、 $\alpha_{(P_{\min})}$ で極小、 $\alpha_{(P_{\max})}$ で極大に達する。

は未だなされてはいない。そのため現在は、観測や実験の経験式から何らかのパラメーターを導き出し、観測される小惑星の偏光に解釈を加えようという流れにある。

図1の偏光-位相曲線における直線部分の傾き (h)、及び、負偏光の深さ (P_{\min}) と小惑星のアルベド (p_v) 間には次のような経験式が成り立つ[8] (ただし、(3.2) 式はアルベド p_v が0.05以下の暗い小惑星では成り立たない) :

$$\log p_v = -0.98 \log h - 1.73 \dots \dots \dots (3.2)$$

$$\log p_v = -1.22 \log P_{\min} - 0.92 \dots \dots \dots (3.3)$$

また、偏光-位相曲線の4つのパラメーター h , P_{\min} , 負偏光から正偏光に転じる位相角 (α_0), P_{\min} のときの位相角 ($\alpha_{(P_{\min})}$) は小惑星のスペクトル型とも関係する (表1)。すなわち、アルベドの小さい小惑星ほど負偏光極値が深く、正偏光極値も高い傾向がある (例えば、分光分類されたC, G, P型の小惑星)。これに対して、比較的アルベドの高いS, M, E型の小惑星の負偏光は浅く、正偏光は低い。実験室で調べられた月の石や地上の岩石の P_{\min} と α_0 は、 $P_{\min}=0.5\sim 1\%$, $\alpha_0=10\sim 15^\circ$ である。しかし、これらを粉状にしたサンプルでは、 $P_{\min}=0.7\sim 1.5\%$, $\alpha_0=20\sim 25^\circ$ と大きくなる。月を望遠鏡で観測し、31個の地点で測定した値[10]は、 $P_{\min}=0.62\sim 1.36\%$, $\alpha_0=19.4\sim 24.7^\circ$ であり、月の石の粉状サンプルの値に近い。実際月はアポロ飛行士が月面に残してき

た足跡を見れば明らかなように、細かなレゴリスで覆われている。一般に、地球や月、隕石の試料の粒径が小さくなるにつれて α_0 の値が大きくなる傾向が見られる。これまでの小惑星の偏光観測結果は、多くの小惑星の α_0 の値が 20° 付近にあることから、大部分の小惑星は粉状のレゴリスに覆われているだろうと推測される。さらに、前述の偏光度の負から正への逆転の要因を考慮すれば、考えられるレゴリス像は、小惑星表面の低重力下で緩やかに集積した微粒子という姿が想像される。また、もし、 α_0 の値が $\sim 10^\circ$ の小惑星が見つければ、その小惑星は岩盤が露出していると推測され、過去の衝突によりレゴリスが剥ぎ取られたか、比較的最近の衝突によって生じた破片そのものか、もしくは、非常に自転が速いため、レゴリスが安定して存在できない小惑星かもしれない。

3.2 レゴリスの粒径について

レゴリスの粒径については、偏光-位相曲線の正偏光の高さ P_{\max} とアルベド p_v の次の関係式の係数 b との関連が示されている[11] :

$$\log P_{\max} = a \log p_v + b \dots \dots \dots (3.4)$$

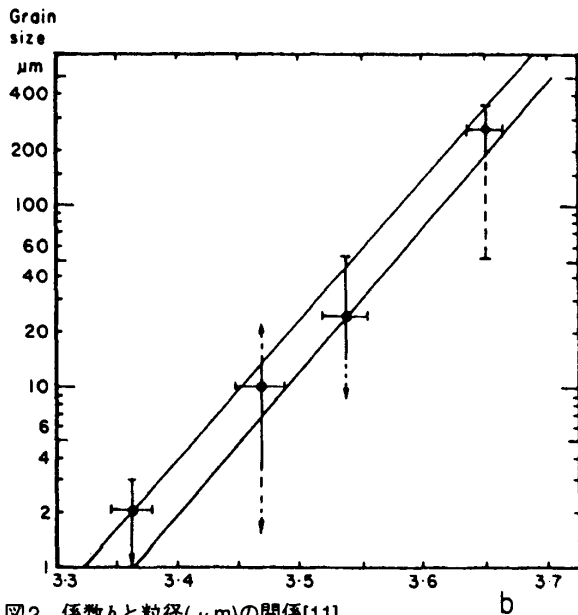
表2に月の石や地上の岩石の粉状サンプルで測定された係数 a , b の値を示す。この表の関係から、係数 b と粒径の間には図2のような、 b の値が大きくなるにつれて粒径も大きくなるという関係が明らかになる。

表1 偏光-位相曲線のスペクトル型別の4つのパラメーター[9]

Taxonomic type	α_0 (deg)	h (%/deg)	$\alpha_{(P_{\min})}$ (deg)	P_{\min} (%)
S	20.1	0.09	6.3	-0.77
M	23.5	0.09	7.7	-0.96
E	17.8	0.04	5.8	-0.30
C	20.5	0.28	9.4	-1.73
G (without Ceres)	21.7	0.30	10.9	-1.69
P	19.6	0.27	8.7	-1.47

表2 $\log P_{\max} = a \log p_r + b$ の係数 a , b の値(いくつかの粒子サイズとサンプルで測定された[11]).

	a	b
1-2 μm grain size	-1.50	3.36
terrestrial powders < 50 μm	-1.38	3.54
terrestrial powders ~ 200-340 μm	-1.34	3.65
lunar fines 10 μm dominant (1-several tens of μm)	-1.50	3.47

図2 係数 b と粒径 (μm) の関係[11]

しかしながら、 P_{\max} の値は、大きな位相角に達する NEAs を除いて、地上から観測することが難しいため、地上からは粒径を決めるための系統的な観測はできないであろう。

以上をまとめると、地上からの偏光観測では、小惑星表面のレゴリスの有無程度は α_0 の値から推測することができる。しかし、レゴリスの粒径やそのサイズ分布、または空隙率などは、光散乱実験での検証と大きな位相角が達成できる小惑星直接探査による調査が必要であろう。

4. 可視光測光による無レゴリス小惑星の観測

小惑星が小さければ小さい程、表面重力は小さくなるので、その小惑星にレゴリスがないことは、観

測的に確認できる可能性が高まる。よって、この章では、可視域の測光観測で、微小小惑星にレゴリスが欠乏していることを確認できるかどうかを検討してみた。

4.1 位相光度曲線と多重散乱

小惑星表面にレゴリスがあれば、それらの粒子の間で太陽光は多重散乱を起こし、その度合(多重散乱率)に応じて、位相光度曲線の傾きが異なることがかねてから議論されていた。ここで位相光度曲線とは、太陽位相角に対して小惑星の絶対等級 (H) をプロットしたものである(ここでいう絶対等級とは、観測される見かけの等級に対して、距離と位相角の違いによる明るさの変化と自転による変光の効果も補正した等級のことである)。多重散乱率 (Q) の違いによる位相光度曲線の計算例を図3と表3に示す[12]。 Q の数値が大きい程、多重散乱の寄与も大きい。この関係を数値的に示したのが表3である。ここで、Bowellらは位相光度曲線の傾き (β) を(4.1)式で定義する[12]。

$$\beta = \frac{H(20^\circ) - H(10^\circ)}{10} \dots\dots\dots (4.1)$$

ただし、表3のような関係が成り立つのは、S型などアルベドの大きい小惑星の場合だけである。アルベドが小さく反射光減衰の大きな小惑星においては、多重散乱成分が落とされ、位相光度曲線にはほとんど現れてこない。そのため、Bowellらは暗いC型小惑星では上記の Q と β の関係は成り立たないと

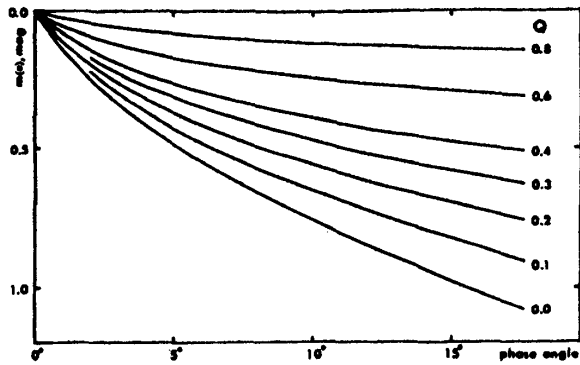


図3 多重散乱率 (Q) と位相光度曲線の関係[11]. 横軸:位相角, 縦軸:絶対等級. 多重散乱率が大きいほど, 位相光度曲線は緩やかな傾きになる. C型のようなアルベドの低い小惑星には適用できないことに注意.

述べている. したがって, 多重散乱率と位相光度曲線の関係を示した図3はレゴリスの欠乏度の指標として使うことができる. 例えばS型小惑星において, レゴリスが保持可能な大きな小惑星の平均的 β を求めておき, それよりも有意に大きな β の天体にはレゴリスが無いかもしれない, と判断できる.

ただし最近の研究によると, 多重散乱はレゴリスがなくても表面の粗さによって多かれ少なかれ起こる. したがって, 前段と逆に小さい β が得られても直ぐにレゴリスがあるとは結論できず, 今後の詳しい光散乱実験の結果が待たれる (この部分, 神戸大 中村昭子氏との議論による. 光散乱については, 本特集の「実験的手段による小惑星レゴリスの研究」の光散乱実験の章に詳しいので参照していただきたい).

以上から, S型小惑星で直径が1kmかそれ以下 (sub-km小惑星) のものをねらって位相光度曲線を観測すれば, β が大きくて多重散乱の寄与があまりない, つまりレゴリスが欠乏している小惑星が見つかる可能性はある.

4.2 地球接近小惑星 (NEAs) のレゴリス

小さい小惑星は暗いため, 距離が近くないと観測できない. メインベルト中の sub-km小惑星を観測

表3 多重散乱率 (Q) と位相光度曲線の傾き (β) の数値的關係[11]

Q	β (mag/deg)
0.00	0.042
0.05	0.037
0.10	0.033
0.15	0.029
0.20	0.026
0.30	0.020
0.40	0.016

するのは困難である. それに対して, NEAsは, 十分地球に接近したときは明るくなる. 大きさも半数以上が直径1km以下である (図4). 無レゴリス小惑星の発見のためにはNEAsをねらうのが適当であろう. NEAsの大部分はS型であるという事実もこの観測に都合がよい. 最近ではNEAsが非常に多数発見されているし, それらの地球衝突という関心から, 地球に異常接近する小惑星のリストが各所でインターネット公開されている. ある公開サイトのリスト [13]によれば, 0.2AU以下のNEAsの異常接近が年

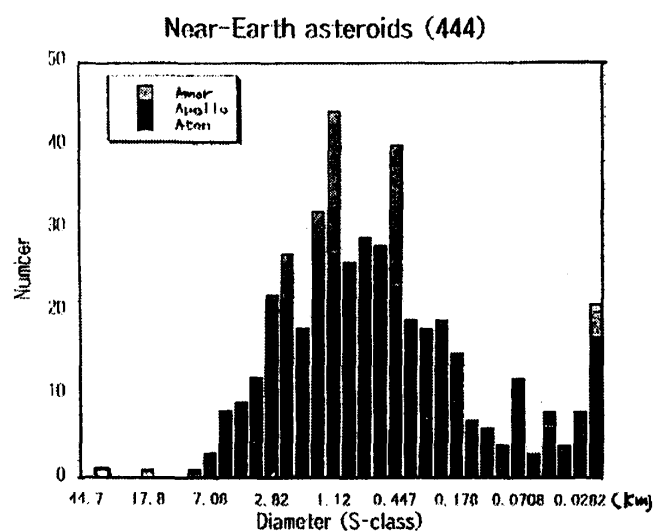


図4 地球接近小惑星の直径(km)分布. S型小惑星のアルベドを仮定して絶対等級を直径に換算した.

間数10回は起こっている。特に、NEAsの内、Amor型小惑星は、近日点が地球軌道のすぐ外側にあり、異常接近する時は衝に近い場合が多いはずで、位相角 $0^\circ \sim 30^\circ$ での位相光度曲線を観測するには好都合である。

位相光度曲線を求める際、最も重要なのは自転による変光を除去することである。言い換えると、変光曲線観測の副産物として位相光度曲線が求められると言ってもよいかも知れない。小惑星の自転周期の統計などから、かなり小さい小惑星まで、破片が重力集積した構造 (rubble-pile) をしていると想像されている。しかし、sub-km小惑星の場合、rubble-pileになっているとしても、レゴリスが欠乏していると言う意味では、直径数10kmの小惑星とは表面構造が異なるのではないだろうか。これに関連して、MUSES-C探査機による1km級小惑星の平均密度と表面状態の観測は大きな意味を持っている。

4.3 メインベルトのsub-km小惑星のレゴリス

4.2では、メインベルト中のsub-km小惑星が直接観測できないので、代わりにNEAsを観測することを提案した。それは、NEAsがメインベルトから供給され、地球軌道付近にもたらされることが今や定説だからである。しかし、メインベルト中のsub-km小惑星を直接に可視域測光観測して位相光度曲線を描けるなら、それはそれで大きな意義がありぜひ実行してみたい。

口径8mクラスの望遠鏡に広視野カメラを組み合わせると、直径数100mのメインベルト小惑星が多数 (1晩で1000個程度) 検出できる。従来の手法でこれら小惑星の個々の軌道を決定するのは不可能だが、多数の小惑星が得られることを積極的に利用して、それらの天球上の見かけの動きだけから、大局的な空間分布を統計処理によって求めることは可能である。特に、どの小惑星も離心率 $e=0$ という、一見常識では容認しがたいような仮定を置き、ある

種の補正をほどこすことによって、最初に仮定したサイズ分布をかなり良くシミュレーションで再現できることが示されている[14]。これはひとえに、多数を平均した量が利用できるおかげである。

小惑星のサイズ分布が再現できるという事は、日心距離の平均値も正しく求まることを意味するから、位相光度曲線を描くための絶対等級 H も平均値としては決められることになる。また、個々の小惑星の位相光度曲線では変光の効果を除くのが最重要であった。しかし、本節で提案するような統計的サーベイでは、個々の小惑星の変光を時間平均するのは非現実的であろう。今、ある狭い位相角の範囲に多数の小惑星が観測されたとする。すると、それらのうちあるものは変光の極大近くに、他のあるものは極小近くにあるだろう。よって、これら多数の小惑星の明るさをサンプル平均すれば、統計的に変光の効果は平均されると期待される。この操作をいくつかの位相角の観測に対して行えば、平均的な位相光度曲線が得られるはずである。

スペクトル型がC型かS型かのおおまかな区別は、(B:有効波長 $0.49 \mu\text{m}$, V: $0.55 \mu\text{m}$) か (V,R: $0.72 \mu\text{m}$) の2色観測からカラーを求めれば可能である。各小惑星のカラーからS型の小惑星だけを拾い出し、sub-km小惑星をメインベルトの内側、中央、外側でグループ分けし、平均としての位相光度曲線を描けば、NEAsのときと同様の議論ができる。こうして、sub-km小惑星の位相光度曲線の傾き β を、大きな小惑星の β と比較する道が開けるであろうと期待している。もちろん、ここで提案する方法は、個々の各小惑星の位相光度曲線を観測する場合に比べて、 β の決定精度は悪いが、他にメインベルトのsub-km小惑星の位相光度曲線を直接観測する手段がないことを考えれば、こうした統計的方法も意義をもち得る。

5. 最後に

本稿では、地上からの分光観測については具体的に触れなかったのが最後に簡単に付け加えておく。現在までのところ、小惑星表面の粒径と反射スペクトルの形（正確には全体の反射率と吸収バンドの深さ）には相関関係はあるように見える。現在行われている室内実験は、粒径をそろえた粉体の反射スペクトルを測定し、それを観測で得られる小惑星反射スペクトルと比較している。しかしながら、実際は小惑星のレゴリスの粒径はあるサイズ分布を持ち、等粒径媒体近似は不適當である。反射スペクトルの形に影響するのがどのサイズのレゴリス粒径なのかなど基本的な理解は、残念ながら未だ得られていない。

これまで述べてきたように、現時点では地上観測で、中間・遠赤外域での小惑星表面の熱伝導度の推定、可視域での偏光-位相曲線、変光曲線、及び位相光度曲線の取得、反射スペクトルの測定などが行われ、小惑星表面のレゴリスの有無は押さえられつつある。しかし、レゴリス層の厚さや粒径に関する定量的解釈をするのは困難である。

地上観測から得られる小惑星の情報は、軌道、アルベド、大きさ、スペクトル型、形、自転周期、自転軸の向きなどがあるが、これらの情報はすべて小惑星の全表面を平均化したものである。偏光の時間変動の測定から小惑星表面のアルベドの変化（おそらくは鉱物種の違いによる）を求める方法もあるが [15]、小惑星表面の局所的な鉱物種の違いなどは、やはり探査機による分解能の高い観測が欠かせない。また、地上観測で得られたデータに理論モデルを組み合わせて外挿される物理量からは、小惑星の表面物質とレゴリスの粒径・天体表面の凸凹を分離して求めるのは不可能である。これには探査機によるその場観測が望まれる。地上観測から明らかにできることと、探査機による計測可能項目について

は、探査機について触れた本特集「小惑星表面の科学と探査戦略」を参照していただきたい。

このように、現在地上観測で得られている知見から、真のレゴリスの姿を捉えるには、探査機によるその場観測と、光散乱の様々な実験的・理論的研究との補完が必要である。MUSES-C計画によるサンプルリターンで初めて得られる小惑星の表面物質に関する情報の意義は大きい。

参考文献

- [1] Housen, K. R. et al., 1979, In *Asteroids* (T. Gherels, ed), The University of Arizona Press, 601.
- [2] Lebofsky, A. L. and Spencer J. R., 1989, In *Asteroids II* (Binzel, R. P., Gehrels, T., and Matthews, M. S. eds.), The University of Arizona Press, 128.
- [3] Tedesco, E. F., (ed.), 1992, Tech. Rep. PL-TR-92-2049. Phillips Laboratory, Hanscom, AF Base, MA.
- [4] Presley, M. A., and Christensen, P. R., 1997, *J. Geophys. Res. (E)* **102**, 6551.
- [5] Harris, A. W., 1998, *Icarus* **131**, 291-301.
- [6] Hasegawa, S., 1998, Ph. D. Thesis, The University of Tokyo.
- [7] Gehrels, T., 1977, In *Comets-Asteroids-Meteorites*, 253, Univ. Toledo.
- [8] Lupishko, D.F. and Mohamed, R. A., 1996, *Icarus* **119**, 209.
- [9] Goidet, B. et al., 1992, 30th Liege international astrophysical colloquium, (Brahic, A., Gerard, J. C., and Surdej, J. eds.), 319.
- [10] Shkuratov, yu. G. et al., 1991, *Icarus* **95**, 283.
- [11] Geake, J. E. and Dollfus, A., 1986, *Mon. Not. R. astr. Soc.* **218**, 75.

[12] **Bowell, E. and Lumme, K., 1979, In Asteroids (T. Gherels, ed), The University of Arizona Press, 132.**

[13] **<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/CloseApp.html>.**

[14] **Yoshida, F. and Nakamura, T., 33rd Lunar & Planet. Symp., in press.**

[15] **Nakayama, H. et al., 2000, Icarus **146**, 220-231.**