



Laboratory Study of Laser-Scattered Light by Rough Surfaces

Kamei, Akihide

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2000-03-31

(Date of Publication)

2014-11-18

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲2078

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3173017>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1002078>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・（本籍）	かめ い あき ひで 亀 井 秋 秀	（大阪府）
博士の専攻分野の名称	博士（理学）	
学位記番号	博い第125号	
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当	
学位授与の日付	平成12年3月31日	
学位論文題目	Laboratory Study of Laser-Scattered Light by Rough Surfaces （レーザー光による不規則物体の散乱過程）	
審査委員	主査 教授 向 井 正 教授 乙 藤 洋一郎 教授 松 田 卓 也	助教授 中村（前川）昭子

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は小惑星などのように大気を持たない太陽系内小天体の不規則な形状の表面による散乱過程についてまとめたものである。小天体表面は隕石の衝突で表層が粉碎されて出来たレゴリス層と呼ばれる固体微粒子の層で覆われており、その太陽散乱光の強度や偏光度から表面の構造（粗さ、凸凹）や鉱物組成などの物理特性を推定することができる。そのため基礎研究として固体微粒子層や粗い板などを用いて模擬小天体表面を作成し、レーザー光を照射してその散乱光測定を行い、位相角、入射角、反射角による依存性や測定試料の光学定数や表面粗さ、粒子の大きさ、空隙率などの変化に伴って現れる反射光特性の変動について調べた。また、室内実験により得られたデータの解析に伴い、レゴリス表面による光散乱の数値シミュレーションとの比較検討から地上観測や探査データの解釈についての考察も行い、実験的・理論的な視野からの研究を行った。本研究は2002年に打ち上げが予定されている小惑星サンプルリターン計画 MUSES-C での可視カメラ（AMICA）やライダーを用いたその場観測の基礎データとして活用されると期待できる。

本論文は以下の構成からなる。

- 1 General Introduction
- 2 Experimental Procedures
 - 2.1 Instruments
 - 2.2 Performance
- 3 Photometric Measurements of Rough Surfaces Made of Alumina Plates and Particles
 - 3.1 Introduction
 - 3.2 Measurements
 - 3.3 Incident angle dependence of backscattered light
 - 3.4 Phase angle dependence of scattered light
 - 3.5 Summary and discussions

- 4 On the Asymmetry Parameter of Asteroid Photometric Data :
Bidirectional Reflectance of Powdered Samples at Large Phase Angles
 - 4.1 Introduction
 - 4.2 Experiments
 - 4.3 Hapke's bidirectional reflectance model
 - 4.4 Results and discussions
- 5 Estimation of Asteroid Surface Properties from Polarization-Phase Curve Parameters
 - 5.1 Introduction
 - 5.2 Polarization-phase curve parameters
 - 5.3 Relationship of polarization-phase curve parameters, albedo, and particle size
 - 5.4 Summary and discussions
- 6 General Conclusions

第1章ではこれまで行われてきた研究や近い将来行われるであろう探査計画についてふれ、この研究のテーマである不規則形状表面による光散乱特性を調べることの重要性について述べた。

第2章では室内実験の概要についてまとめた。測定試料に He-Ne レーザー光 (波長632.8nm) を照射し、その反射光を光電子増倍管で受光するのが基本的なシステムである。光源と測定器は各々試料台を中心に回転する独立したステージに取り付けられているアームに固定しており、入射角、反射角、位相角がそれぞれ任意に変化させることができる。また、アームを長くすることで低位相角での後方散乱光の測定も可能であることが特徴である。光源の前にチョッパーを取り付け暗室内のダークも測定し、それを測定試料に光が照射した時のシグナルから差し引くことで測定試料からの反射光の測定ができる。光電子増倍管の前に偏光板と波長板の取り付けが可能であり、偏光板を固定したまま波長板を回転させることで偏光度の測定も可能である。様々な測定機器のキャリブレーションより、この測定装置は強度や偏光度を測定することが可能な精度を持つことが分かった。測定強度のキャリブレーションとしては、反射能が既知である標準白色板を用いた。

第3章では測定試料としてアルミナ (Al_2O_3) の表面粗さの異なる板と粒径分布の異なる微粒子を用い、反射率の入射角依存性や位相角依存性について調べた結果についてまとめた。MUSES-C 計画の対象天体である1989MLの表面を想定し、板の表面上に微粒子を厚さ約100 μm で均一に分布させた小惑星表面モデルも再現し同様の測定を行った。まず、一定の低位相角 (1°) の下で、レーザー光の入射角を変えつつ反射率を測定した。板状の試料に比べ粒子層の試料のほうがよりランベルト的な反射特性を持つことが分かった。故に小惑星表面上にある程度の厚さのレゴリス層が存在すれば、反射特性は入射角にあまり依存しないことが予測できた。次に、垂直入射の下で、位相角を変えつつ反射率を測定した。板状の試料では鏡面反射成分が現れるが、表面粗さが大きくなるにつれてその効果は弱まった。粒子層の試料では低位相角で opposition effect と呼ばれる反射率の増大が見られた。板上に粒子層を敷き詰めた試料ではそれぞれの反射特性が共に現れ、特に低位相角では板の鏡面反射成分は減衰されるが、粒子層による opposition effect が加わることが確認できた。

第4章では異なる粒径分布を持つオリビン、グラファイト、アエンデ隕石、ガオ隕石の粒子層を用いて、反射率の位相角依存性について調べた結果についてまとめた。特に大きな位相角での散乱光強

度に着目し、異なる入射角で測定可能な位相角の範囲を変化させて測定した結果を、Hapke モデルに基づいて比較することで、パラメーターの物理的解釈の検討をした。広い範囲の位相角の測定の結果、全ての試料で高位相角では個々の粒子の前方散乱成分と思われる反射率の増大が見られた。狭い範囲の位相角で測定した結果から導出される asymmetry parameter は全ての試料において負の値を持つが、広い範囲の位相角で測定した結果からは、アエンデ隕石とガオ隕石の大きなサイズの粒子層を除いた試料で正の値が導出された。この結果、後方散乱を測定した低位相角データと前方散乱を測定した高位相角データの両方を扱う場合、粒子の位相関数として one-term Henyey-Greenstein phase function を用いることは不適當だということが確認できた。また、過去に行われた広い範囲の位相角で測定された探査データから導出される asymmetry parameter が正ではなく負の値を持つのは、天体表面がアエンデ隕石やガオ隕石のような物質でレゴリス粒子粒径が大きいということと説明できるかもしれないと予測した。

第5章では小惑星の偏光観測から表面状態の推定についてまとめた。小惑星探査計画 MUSE-C では、小惑星1989ML 近傍で可視カメラによる偏光観測が予定されているが、観測できる位相角の範囲や観測総数などが限られている。このような制限された偏光観測から、対象天体の表面状態を推定するのに有効な観測条件や項目について検討した。過去に行われた小惑星の地上観測や、他のグループによる室内実験や、我々の異なる粒径分布を持つオリビンやグラファイト粒子層を用いた偏光測定の結果から、従来考えられている偏光位相曲線から得られるパラメータ（極大偏光度、偏光位相曲線の勾配、極小偏光度、反転位相角）とアルベトの関係について再検討した結果、偏光位相曲線の勾配とアルベトの関係は粒子の粒径に依存性があることが分かった。また、極小偏光度と反転位相角のプロットから、小惑星タイプの決定や表面がレゴリス粒子に覆われているかそうでないかの区別ができる可能性があることが分かった。

論文審査の結果の要旨

月や小惑星のように大気を持たない太陽系小天体の表面は、固体微粒子の層（レゴリス層）で覆われている。地上観測や、飛翔体による近接測定では、これら始原天体の表面構造（粗さ、凸凹）や鉱物組織を推定するために、レゴリス層で散乱された光を観測する。得られた散乱光の強度や偏光度から、レゴリス層の構成粒子の大きさや光度定数（鉱物種）を演繹する。こうした解析の基本となるのが、各種の模擬レゴリス層の光散乱特性の室内実験である。本論文では、これらの光散乱測定の実施と、その結果の解析を詳細に報告している。

1章ではこれまでに行われてきた研究や近い将来行われるであろう探査計画についてまとめている。2章では、測定装置の概略が説明されている。本論文提出者が手作りで完成した測定装置は、波長が632.8nmのHe-Neレーザー光源と光電測光器から成り立っている。光源と測定器は、独立して動くアームに取り付けられており、アームの付け根部分に置かれた試料台に対して、入射角（試料面に対して鉛直方向と、入射光が成す角）、放射角（試料面に対して鉛直方向と、反射光が成す角）、位相角（光源-試料-測定器が成す角）を独立に選ぶことができる。また、アームを長くすることで小さな位相角での後方散乱光の測定も可能である。光電子増倍管の前に偏光板と波長板の取り付けが可能で、偏光測定ができる。測定強度のキャリブレーションとしては、反射能が既知の標準白色板を用いる。

3章では、アルミナを反射体試料とした反射強度測定実験の詳細と、その結果がまとめられている。

反射体として、表面の粗さ度（電子顕微鏡写真による定性的な評価）の異なる板状試料、粒径の異なるアルミナ細粒試料を用いている。ここでは、まず、一定の位相角（ほぼ後方散乱に近い値）の下で、試料面へのレーザー光の入射角を変えつつ、その反射光強度の変化が調べられた。板状の試料では、後方散乱強度は小さいが、厚さ約100ミクロンで均一に整えたレゴリス層になると、後方散乱強度が大きくなることが判った（opposition effect）。更に、位相角を変えつつ反射光強度の変化が調べられた。板状試料では、鏡反射の効果が現れるが、板表面の粗さ度が高まるにつれて、鏡反射効果は弱くなった。鏡反射特性は、レゴリス層ではほとんど消えてしまう。板の表面に粒子サンプルを敷き詰めると、板とレゴリス層の反射特性が共に現れたが、層厚の増加（ミリメートル程度）によって、板の反射特性は消滅した。

4章では、olivine, graphite, Allende meteorite の粒子層の反射率を、位相角を変えつつ測定した。特に大きな位相角での散乱光強度に着目し、測定結果を Hapke の bidirectional reflectance model に基づいて比較検討した。理論から予測される asymmetry parameters が、粒子の鉱物種やサイズによって、どのように変化するかを定量的に明らかにした。このことは、将来の小惑星表面の近接測定において、異なる位相角で得られた散乱光強度と、Hapke model との比較から、小惑星表面レゴリス粒子の諸特性を推定する指針を与える。

5章では、偏光測定について議論している。小惑星や月のように大気を伴わない太陽系小天体は、特徴的な偏光度の位相角依存性を示す。すなわち、位相角が0度で偏光度は0となるが、位相角が増加する際、偏光度は負の値（反射光の電気ベクトルが散乱面にたいして平行）で減少し、10度程度（極小位相角）で極値（極小偏光度）をとる。その後、増加に転じた偏光度は、位相角20度程度（反転位相角）で0となり、その後、位相角の増加と共に正の値で増加する（増加率を偏光度勾配という）。やがて位相角が100度から120度当たり（極大位相角）で、偏光度は極値（極大偏光度）をとる。偏光度の位相角曲線上のパラメーター（極小位相角、極小偏光度、反転位相角、極大位相角、極大偏光度）は、散乱体（または、反射面）の光学特性によって異なる。ここでは、様々な反射面を用いて、散乱光の偏光度を測定し、その位相角依存性から、上記のパラメーターを求めている。

2002年打ち上げ予定の宇宙科学研究所の MUSES-C 計画では、小惑星1989ML 近傍での可視カメラによる測光偏光観測が予定されている。飛翔体による観測では、位相角（太陽-小惑星-飛翔体の成す角）や、太陽光の入射角を自由に変えられない。こうした制限された偏光観測から、対象天体の表面状態を推定する方策についても、5章で検討されている。過去の小惑星の地上観測や、他のグループによる室内実験や、この章で行った偏光測定の結果から、従来考えられている偏光位相曲線のパラメーターとアルベド（光反射能）との関係が再検討された。また、偏光パラメータとレゴリス粒子のサイズとの関係についても新たな発見をしている。

本研究は、細粒層（レゴリス層）の光散乱特性を、独自に作成した測定装置によるデータを基に検討し、測定結果の理論的解析から、レゴリス層の物理特性を演繹する方法について、重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって、学位申請者・亀井秋秀は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。