

特集 「さあ、小惑星に行こう!—小惑星サンプルリターン計画」

ライダー

向井 正¹、荒木博志²、水野貴秀³

1. 概要

ライダー (LIDAR=Light Detection And Ranging) は、探査機から放射された波長 $1\mu\text{m}$ のレーザー・ビームが、小惑星表面で反射されたものを受信する装置である。MUSES-Cでは、ライダーに二つの機能を持たせている。ひとつは、刻時機能である。20kmから放射されたビーム(パルス幅20ナノ秒)は、小惑星表面のおよそ20m程度の拡がりを照らす。このスポットで反射された光は、およそ134マイクロ秒で戻ってくる。この回帰時間の測定から、探査機と小惑星との間の距離がわかる。時刻の測定精度が、距離の測定精度(後述の50kmで $\pm 10\text{m}$)を決める。NEAR (Near Earth Asteroid Rendezvous)の同種の高度計(NLR (NEAR Laser Rangefinder))は、50kmで $\pm 6\text{m}$ の精度を持っている。MUSES-Cのライダーは、刻時機能に加えて、受信光の強度を測定する機能も持っている。この機能はNLRには付いていない。まとめると、MUSES-Cのライダーでは、受信する反射光パルスの到着時刻と、到着光量を測定することができるのである。

ライダーの本来の目的は、探査機が小惑星に接近する際の高度計である。ライダーの機能を生かしたサイエンス課題として、(1)小惑星の重力場の計測がある。これによって、小惑星の質量を決定する。(2)更に、刻時機能を用いて小惑星の形状や表面凹凸を測定することができる。これとカメラ

による撮像とを結び付けて、小惑星の形状・表面構造の3次元分布が決まる。また、受信光量の測定から、(3)小惑星表面の光反射能(アルベド)を推定することができる。

この解説では、まずライダーのハードウェア機能を水野がまとめ、重力計測に係わるサイエンス課題について荒木が整理する。また、小惑星の形状、表面構造及びアルベド測定についての紹介を向井が担当する。

2. ライダーの機能

探査機は、小惑星からの距離が50km以下に入ると、ライダーによる距離測定と光学航法カメラを組み合わせた3次元計測によって、小惑星との相対位置を知る。ライダーは、レーザー光源より対象物体に向けて光パルスを照射し、対象物体からの反射パルスを受信するまでの時間を測定することによって、対象物体との距離を測定する1次レーダシステムである。当初、マイクロ波レーダによる距離測定についても検討を行った。その結果、(1)マイクロ波をレーダに用いた場合、ビーム広がり角を細く絞るために大口径アンテナが必要となることや、(2)ビーム径を十分に絞らない場合、受信電力は距離の4乗で減衰するため大電力を必要とすることが分かった。また、(3)目標とする小惑星に大気が存在しないので、光の大気による減衰は考慮しなくて良いことも判明した。これらの諸

¹神戸大学理学部地球惑星科学科、²国立天文台水沢観測センター、³宇宙科学研究所宇宙探査工学研究系

点から、レーザー光による距離測定が、マイクロ波レーダよりも重量及び電力の点で有利と判断した。

ライダーシステムのキーコンポーネントであるレーザー光源として、レーザー半導体励起のQスイッチ・Nd:YAGレーザー(波長1.064 μm)を使用している。一般的にYAGレーザーの励起はフラッシュランプで行うが、軽量化と低消費電力化をはかるため、YAG吸収スペクトルに合わせた波長のレーザー半導体による励起を採用した。

受信用光学系は、軽量化のためにカセグレンアンテナを採用した。ランデブーフーズでは、探査機は、小惑星からの熱輻射によって、熱的に厳しい環境におかれることが予想される。このため受信用光学系は、熱歪みが少ないこと、加工性が良く軽量であることを総合的に評価して、主副反射鏡基板及び反射鏡支持ビームの材料として多孔質SiCを採用した。反射光検知用光センサーとしては、Si-APD (Avalanche Photo Diode)を用いる。

MUSES-C搭載用ライダーは、送信光量と受信光量を計測する機能を有しており、小惑星表面の反射率を測定することが可能である。ライダーの基本構成を図1に、基本的な設計仕様を以下に示す。

測定可能距離	50m~50km
精度	$\pm 10\text{m}$ (@50km) $\pm 1\text{m}$ (@50m)
レーザー出力	5mJ
繰り返し周波数	1pps
主鏡口径	110mm
ビーム広がり角	1mrad
重量	2010g
消費電力	10W

レーザー反射光の測定の際に、障害となる太陽反射光による背景光量を見積もった。ランデブー時の太陽-ネレウス間距離(ほぼ1AU)での、小惑星表面上の太陽光強度は、波長1 μm において

7.0(J/s/10nm/m²)である。一方、距離50kmの探査機からの送信レーザー光の強度は、小惑星表面上で、受信パルス幅を300nsとした場合、8.5(J/s/m²)である。このため、数nm幅の帯域通過フィルタを使用して、バックグラウンド光のショットノイズによるS/Nの低下を最低限に押さえることが必要である。

ライダーの開発項目としては、レーザー半導体励起モジュールの小型化、励起分布の均一化等のレーザー・ヘッドの開発、及び高圧パルス回路の設計、集光用ミラー基板の軽量化、光センサーの開発があげられる。

3. ライダーを用いたサイエンス課題

3.1 小惑星の質量の測定

MUSES-C計画では、サンプル採集のために探査機がネレウスへ接近する際に、小惑星の質量を計測する。即ち、探査機本体を自由落下させて、探査機と小惑星の距離の時間変化を、ライダーを用いて精密に測定する。この測距データを用いて、小惑星の質量を求め、可視カメラの画像データから小惑星の形状(体積)を推定する。こうして、小惑星の密度を2桁以上の精度で推定することが検討されている。小惑星の質量および密度については、これまで小惑星同士の重力摂動を通して推定されたことはあるが、接近距離が十分小さくないために精度は非常に悪いものであった。近年探査機ガリレオが小惑星 アイダ(243 Ida) にフライバイした

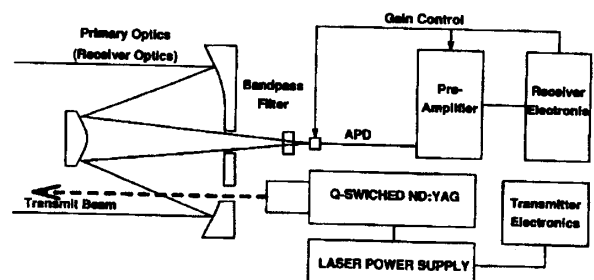


図1. ライダーの基本構成

際に衛星(後にダクティル(Dactyle)と名付けられた)を発見し、その衛星の軌道解析からアイダの密度を $2.2\text{g/cm}^3 \sim 2.9\text{g/cm}^3$ と推定している。しかし、これまでに小惑星の密度を2桁以上の精度で決定した例はない。密度の推定精度が1桁なのか2桁なのかの違いは大きい。1桁であれば小惑星の主構成物質が、氷か岩石か鉄かといった推定ができる程度である。ところが、2桁の精度での議論が可能になれば、ネレウス全体の平均的構成物質、または鉱物種の特定にも寄与することができる。さらにサンプルリターンの表層探査で推定される表面物質の鉱物種・密度と、重力計測で推定されたグローバルな密度の比較から、小惑星内部の空隙率や内部構造についての情報を得ることも期待できる。

(1) ネレウスへの自由落下

A. 一次元自由落下モデル

ネレウスは大きさがほぼ1kmの重力のごく小さな天体である。このため、探査機を周回軌道へ投入することは、工学的に困難であると考えられている[1]。そこで探査機をネレウスに自由落下させ、探査機とネレウス表面との距離の時間変化をライダーで測定して、ネレウスの質量を推定することが考えられた。具体的には、ネレウスの質量(密度)をパラメータとして含む探査機の自由落下運動モデルを解析する。ネレウスを直径1km、密度 ρ (標準値 2000kg/m^3)の一様球と仮定し、上空 x_0 (標準値

2.1km)から100mまで、探査機をネレウス重心に対して初速度 v_{x0} で、まっすぐ落下させるという一次元自由落下モデルを想定する。この際の探査機の運動状態を調べるために、共分散解析と予備的な解析シミュレーションを行った。上記の標準値は、1997年3月現在のミッションシナリオに基づいている。モデルパラメータは、 ρ , x_0 , v_{x0} の3つである(図2参照)。以下には、方法の概要、結果、及び考察を述べる。

B. 共分散解析

共分散解析とは、データの標準偏差と偏微分係数(モデルパラメータを微小量だけ変えたときに、観測値がどれくらい変わるのかを予測)を与えて、そこから求めるパラメータの推定精度を見積もるものである。問題が線形であれば、データの標準偏差を σ_0 、偏微分係数行列(ヤコビアン)を $G = \partial d / \partial p_i$ (p_i はパラメータ)とすると、パラメータの分散・共分散行列 $\text{cov}(p)$ は、 $\text{cov}(p) = \sigma_0^2 [G^T G]^{-1}$ と表され、各パラメータの推定精度は、 $\text{cov}(p)$ の対角成分の平方根として求めることができる[2]。

前節Aで想定した一次元自由落下モデルで、初速度 $v_{x0} = 0 \sim 100\text{cm/s}$ の場合について G を数値微分で求め、ネレウスの密度(ρ)、探査機の初期位置(x_0)、初速度(v_{x0})の推定精度を求めた(図3、図4の実線)。これによると、探査機を初速度25cm/s以下で落下させれば、密度誤差 $\pm 1\%$ を達成できる。同様に、40cm/s以下だと $\pm 2\%$ 、60cm/s以下で $\pm 5\%$ が達

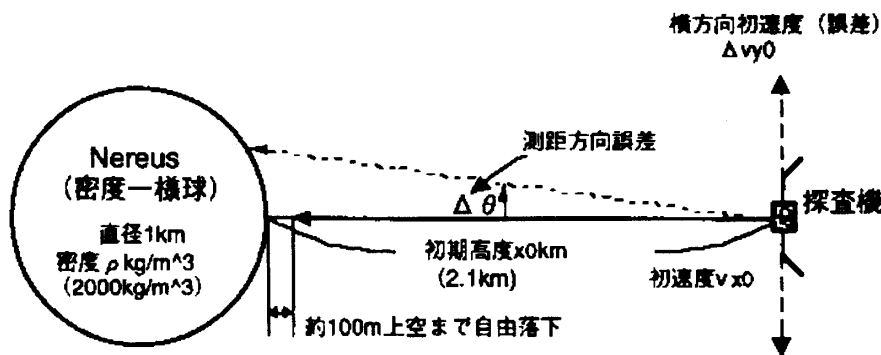


図2. ネレウス重力計測(自由落下法)の概念図。今回行ったシミュレーションでは、ネレウスは直径1km、密度 ρ kg/m³の一様球と仮定した。探査機の初期位置 x_0 は 2.1km、初速度 v_{x0} は重心方向である。

成できる。ここでは、ライダー計測誤差は $\sigma_0=10\text{m}$ の正規分布とし、落下の運動方程式の計算は4次ルンゲクッタ法(倍精度)を用いた。また、数値微分の分母は、 $dp=10^{-3}\text{kg/m}^3$ 、 $dx_0=10^{-2}\text{m}$ 、 $dv_{x0}=10^{-5}\text{m/s}$ とした。測距データは測距誤差との兼ね合いで、10秒間隔のサンプリングを仮定した。このため、初速が 0cm/s の場合で、データ数は1672、 100cm/s では196である。なお、計算プログラムは国立天文台の日置幸介氏から提供していただいた。

C. 解析シミュレーション

共分散解析は、非常に便利な道具であるが、モデルに考慮されていない計測誤差が、どのようにパラメータ推定に影響してくるかは分からない。そこで、今回の1次元落下モデルでは考慮されていない横方向初速度(v_{y0})と、測距方向誤差($\Delta\vartheta$)の質量推定への影響を、以下のようにして見積もった。まず v_{y0} 、 $\Delta\vartheta$ を考慮した疑似測距データ(n 個)を生成し、標準的な自由落下(A節)の測距データとの差を計算して誤差 $\Delta d = (\Delta d_1, \Delta d_2, \dots, \Delta d_n)$ を求める。標準的な自由落下のヤコビアン G と Δd を用い、各パラメータ(m 個)の最小2乗推定誤差 $\Delta p = (\Delta p_1, \Delta p_2,$

$\dots, \Delta p_m)$ を、 $\Delta p = [G^T G]^{-1} G^T \Delta d$ の関係式から求める[2]。このようにして求めた v_{y0} 、 $\Delta\vartheta$ に由来するネレウス密度推定誤差を、図3と図4に示した。これによると v_{y0} は 1cm/s 以下、 $\Delta\vartheta$ は1度以下(ただし初速度は 75cm/s 以下)ならば、密度誤差は $\pm 1\%$ 以内に押さえられることがわかった。

(2) 重力計測のまとめと今後の見通し

最新の自由落下シナリオと、一次元自由落下モデルをもとに、ネレウスの質量(密度)の推定精度について、検討結果を紹介した。ライダー測距精度を 10m と仮定すると、初速度 25cm/s 以下、横方向初速度 1cm/s 以下、測距方向誤差1度以下(ただし初速度は 75cm/s 以下)にすると、それぞれの誤差の影響による質量推定精度を $\pm 1\%$ 以下にすることができる。現在、自由落下計測は、ネレウスとのランデブーにいたる一連の流れの中で行うことが検討されている。このため、ミッション全体との整合性を保つため、 25cm/s 以上の初速度で落下させる可能性もある。この場合にも対処できるように、ライダー測距精度の更なる向上を検討しておく必要がある。

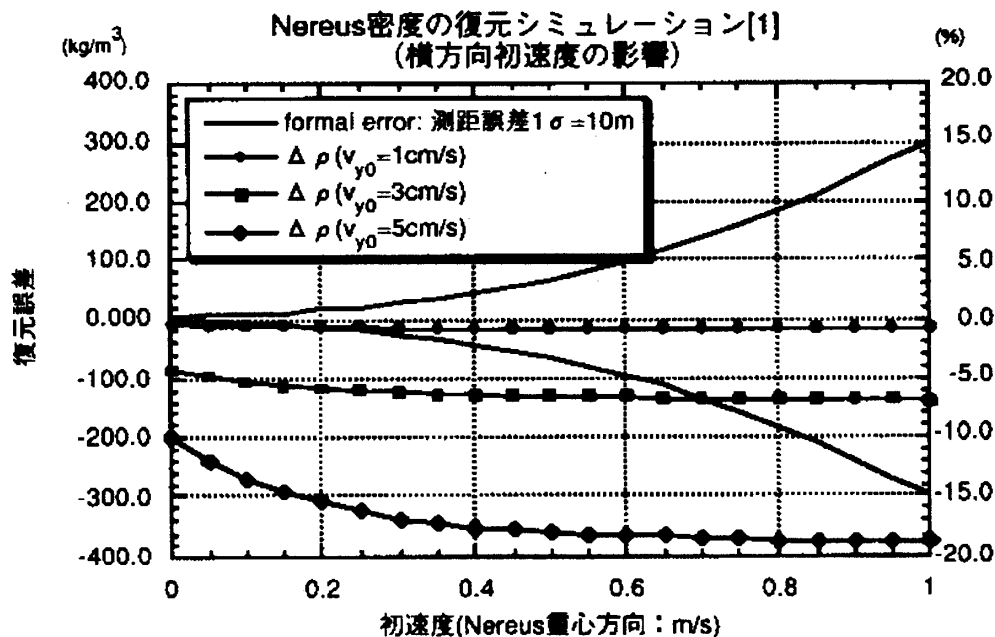


図3. ネレウスへの自由落下で期待される密度推定精度、及び横方向初速度の影響。条件はA節を参照。

実際のデータ解析では、GEODYN-II等の本格的軌道解析ソフトを用い、ネレウスの形状、自転、探査機自体の構造、太陽輻射圧等を考慮したモデルをもとに、探査機の初期位置、初速度の3次元推定、測距方向推定も同時に行われる。今回の横方向初速度、測距方向誤差の質量(密度)推定への影響は、データ解析の妥当性の目安であるが、将来の本格的解析に備え、他の様々な効果についても、検討を進めていきたいと考えている。

3.2 小惑星の形状・表面凹凸の測定

一方、小惑星表面の微小スケール(センチメートル程度以上)での鉱物組成の分布や、凹凸分布は、小惑星形成およびその後の進化の過程を反映する。また、これらに基づいてレゴリス層の存在が推定できれば、探査計画の主要課題であるサンプル採集作業に対して重要な情報を与える。

探査機は小惑星から20kmの距離でカメラとライダーを用いて、表面のマッピングをすることになっている。特に20kmでは探査機は小惑星の影響圏外にあり、長期間の滞在が可能となる。このマッピングフェーズを利用して、ライダーによる小惑

星の全面マッピングを行うと、小惑星の形状と、小惑星表面の凹凸分布が得られる。

小惑星との距離が20kmの時、小惑星表面に照射されるビームスポットは直径20mである。今、小惑星を直径が1kmのディスクと仮定する。ライダーのビーム方向を約3度振ってやると、このディスクの端から端までが走査できる。ビームスポットが半分重なるように移動させるとすると、およそ100点のスポットで1kmが覆われる。ライダーの繰り返し周波数は1pps(1秒当たり1パルス)なので、1秒当たり0.03度の割合でライダーの方向を動かせば良い。ビームが小惑星の縁からはずれると、反射光は戻ってこない。そこで、ビームが戻ってくるライダーの振れの角の範囲から、小惑星の差し渡し大きさが決められる。また、各ビームの受信までの時間から、小惑星表面のおよそ10mの領域の、平均凹凸が数mの高低差の誤差内で与えられる。

当初の計画では、ライダーやカメラは光学ジンバルに載る予定であった。ジンバルの可動速度を調整することによって、短時間でのマッピングが可能であった。また2次元ジンバルであれば、表面

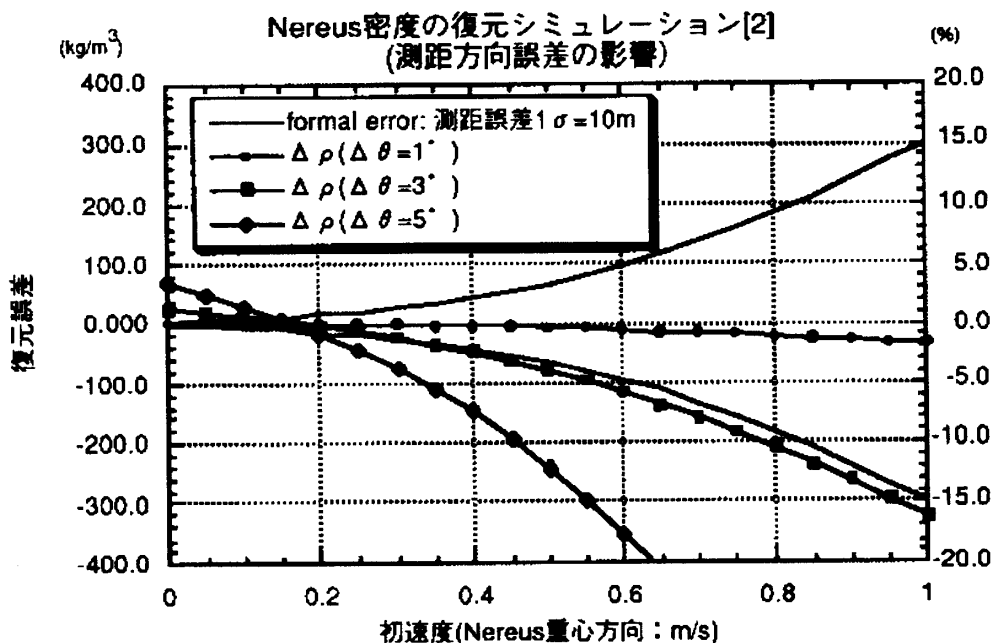


図4. ネレウスへの自由落下で期待される密度推定精度、及び測距方向誤差の影響。条件はA節を参照。

全域のマッピングを精度良く、しかも短時間で実現できた。しかし、探査機の質量削減のため、光学ジンバルは削られてしまった。ジンバルなしでマッピングを行うことは可能なのか？現在考えられている対策は、ジンバルの代わりに、探査機本体をホイールによって振動させることである。多くの小惑星の自転周期は10数時間と推定されているので、この探査機本体の振動によるライダーの一次元移動と、小惑星の自転運動を組み合わせると、小惑星の表面のマッピングが可能となる。この場合、探査機の位置(小惑星の自転軸に対する)によっては、全面を覆うマッピングは望めない。また、小惑星の自転周期に合わせた長時間にわたる測定が、探査機運用の面から可能かどうかの検討は、今後の課題である。

3.3 小惑星の表面反射能(アルベド)の測定

小惑星表面で反射された電磁波の強度から、散乱体物質の光学定数、散乱体の表面粗さ、形状等を演繹することができる。レーザー光の反射光強度の測定はNEAR計画では実施できないので、MUSES-C/ライダーが初の試みとなる。可視波長域では、小惑星表面の散乱特性が、可視カメラを用いて測定される。また、波長 $1\mu\text{m}$ から $2\mu\text{m}$ の領域では、近赤外線分光器によって反射スペクトルが得られる。このため、波長 $1\mu\text{m}$ 付近でのライダーによる情報は、可視カメラ/近赤外線分光器と相補的な役割を果たす。波長 $1\mu\text{m}$ 付近には、オリビンやパイロキシンによる吸収バンドがある。ライダーで得られるアルベドと、可視域/近赤外域での反射スペクトル測定との比較によって、小惑星表面に存在が予想されるシリケート鉱物のより詳細な同定と、局所的な分布状態の測定が可能となる。

おおざっぱに言って、表面の鉱物組成を反映した光学定数が、表面散乱光強度(反射能、アルベド)

を決める。一方、可視カメラによる偏光観測には、主に表面粗さが寄与している。また、アルベドの波長依存性は、表面鉱物組成の光学定数の波長依存性を反映すると思われる。一般に、小惑星表面には、複雑な散乱体が混在すると予想される。こうした不規則形状体による光散乱を理論的に調べるために、表面粗さを微小円柱体でモデル化し、その散乱特性を調べた(図5参照)。円柱の軸比(A)(柱長/面長)と、サイズパラメーター(S)(同体積の球の円周/波長)を変えつつ、散乱体の光反射能(アルベド)(散乱光強度/入射光強度)の変化を計算した。不規則形状体の散乱特性を導くために、離散双極子近似法(Discrete Dipole Approximation(DDA))を用いた(例えば[3])。もちろん、DDAを使えば、任意の形状体の場合についてその散乱特性を求めることができる。

光源-散乱体-受光系がなす角を位相角と呼ぶ。ライダー装置では、位相角はほぼ0度に固定される(後方反射)。そこで、位相角が0度の場合について、アルベドの値をモデル計算から求めた(図5)。ここでは、固い岩盤と、細かい砂粒層(レゴリス)が共存するような地域を想定し、両者の混在比を面積比としている。面積比は、不規則散乱/(不規則散乱+平面散乱(フレネル散乱))で定義する。この

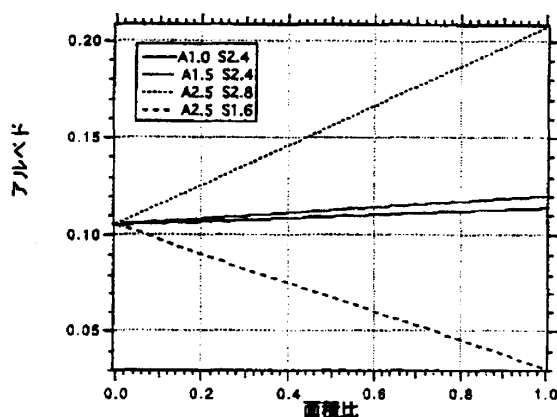


図5. オリビンでできた微小円柱(軸比A=柱長/面長、サイズパラメーターS=同体積の球の円周/波長)のアルベド。面積比は、微小円柱による散乱/(微小円柱による散乱+平面散乱)で定義。

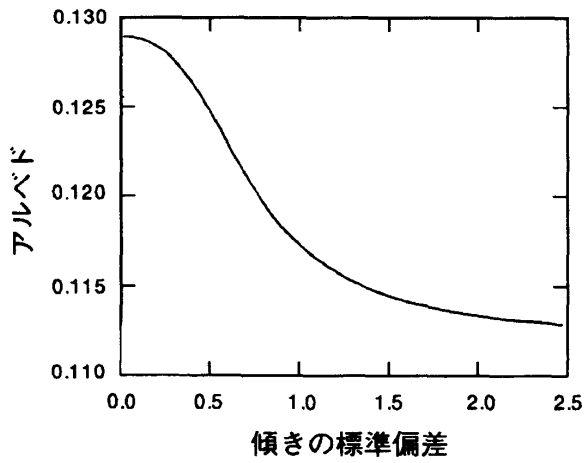


図6 表面粗さによるアルベドの変化。異なる勾配を持った微小平面の集合体として粗い表面を近似。勾配分布をガウス分布として、その標準偏差が増す程、より粗い面を示す。([4]を改変)

値が1の時は、完全ラフ散乱面で、0の時がフレネル散乱面(平板)に対応する。計算では、表面はシリケート鉱物で覆われた場合(S型小惑星)を想定している。図5から、表面が粗くなるにつれて、アルベドが変化する様子が分かる。

更に、基準面に対して、様々な勾配を持つ微小面の集合体として、粗い表面を定義した場合を取り上げる。ここでは、傾きの分布をガウス分布とし、その分布の標準偏差を粗さの程度を表わすパラメーターとする。レーザー照射面内に、ガウス分布が存在すると仮定した場合の計算結果を、図6に示す。個々の微小面はオリビンでできているとする。この図から、表面が粗いほど、アルベドが低下することが予測できる。これは、入射したビームが、粗い表面によってあらゆる方向に反射されるためであろう。これらの計算結果から、アルベドの粗

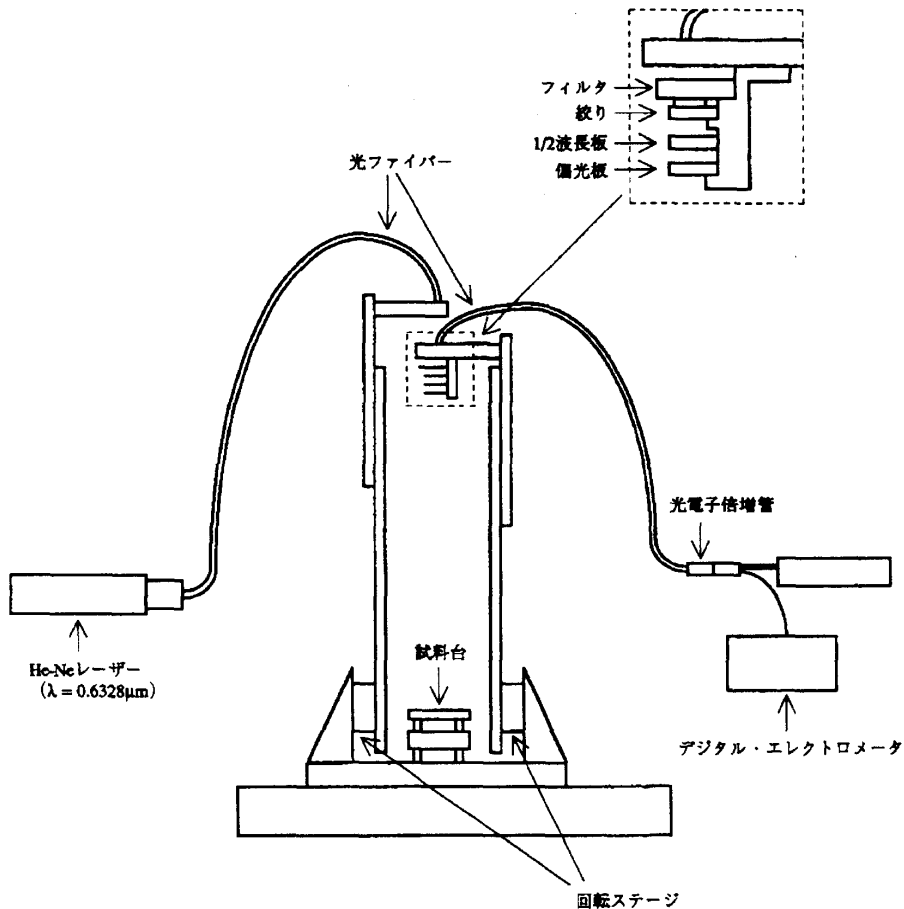


図7. レーザー光による粗い表面の散乱特性の測定装置。

さによる変化を知るためには、キャリブレーション(反射光強度の絶対値)精度は数%以上が必要と思われる。レーザの出力安定性(<10%)からみて、ラフ表面効果によるアルベドの変化を検出することは、現状では難しい。しかし、出力安定精度を高めることによって、有効な測定結果が期待できる。

一方、反射能測定の地上におけるキャリブレーション実験を、神戸大学で亀井が中心となって始めている。この実験では、ライダーによる位相角0度付近の反射能測定の基礎データと、可視カメラによる反射光強度と偏光度の位相角依存性を解析するため、室内において模擬小惑星表面を用いた光散乱測定を行っている(図7参照)。実験装置として、光源にHe-Neレーザー(波長0.6328 μ m)、受光系にフォトマルと偏光子を用いる。粗い表面(鉍物試料)上に固体微粒子を層状に分布させた模擬小惑星表面を作り、図7の試料台に置く。光源と受光部分のなす角(位相角)は、ライダー仕様の場合、できるだけ0度に近い角度で固定し、カメラ仕様の場合、大きく変えられるように設定する。図7の光源と受光部分を支える2本の支柱は、紙面の表裏に独立に移動することによって、位相角を変えることができる。この室内測定実験により、試料の光学定数や表面粗さ、位相角の変化に伴って現われる光散乱特性の変動を調べることができる。また、得られた結果と散乱の数値計算モデルとの比較検討も行っている。この室内測定は、MUSES-C/ライダー機器の制作精度や、ダイナミックレンジの設定に生かすだけでなく、不規則形状体の光散乱という基礎過程の研究にも役立つ。

ライダーは測距機能を持った工学機器として搭載されているが、上で見たように反射光の強度を測定する機能を追加したことによって、重要な科学機器の一つとなった。これを用いてサイエンスを行う道は、関心を持つすべての人達に開かれている。魅力に溢れた観測課題の提案を、期待して

いる。

参考文献

- [1] [MUSES-C計画概要]. 1996: 宇宙科学研究所. 142-146.
- [2] Menke, W., 1989: *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*, Revised Edition. 236-239.
- [3] Okamoto, H. et al. 1995: *Beitr. Phys. Atmosph.* **68**, 319, 1995
- [4] 白崎太郎, 1997: 後方散乱アルベドの反射表面特性による依存性, 神戸大・自然科学研究科, 修士論文