

特集「小惑星レゴリスの起源と進化」

「小惑星レゴリスの起源と進化」 特集企画にあたって

山本聡¹，矢野創²，藤原顕²

1. 本研究会企画の趣旨

この特集の枠組みは、筆者らを世話人として2000年4月26-27日に宇宙科学研究所で開催された「小惑星レゴリスの起源と進化・研究会」での議論をもとにしている。

「レゴリス (regolith)」とは、衝突破壊で生じた様々なサイズの放出物が、固体天体表面に再び積もって形成された堆積層のことである。アポロ宇宙飛行士が月面に残した有名なブーツの足跡も、極めて細かいレゴリスの「砂場」に立ったからできたのである(図1)。もっとも最近では、NEARシューメイカー探査機が小惑星エロス表面で発見した直径数mもの瓦礫 (Boulder) までレゴリスの一部と考える研究者もいるので、粒子のサイズは定義上の本質的



図1 月面に刻まれたアポロ宇宙飛行士の足跡。
画像提供：NASA.

な条件ではない(図2)。

小惑星表面に形成されるレゴリスについては、これまで地上観測、光散乱実験、衝突実験、物質科学的分析、そして惑星探査によるその場観測など、さまざまな手法の研究がそれぞれ独自に行われてきた。しかしながら、近地球型小惑星探査機MUSES-C計画(2005年に小惑星表面から試料物質を採集し、2007年に地球へ持ち帰る予定)では、その場で得られる測光・分光のグローバルマッピングや回収サンプルの分析結果を、従来の望遠鏡観測によるスペクトル型や地球上で採集された隕石や宇宙塵試料の分類などのデータベースとリンクさせながら、小惑星表面に関する統一した描像を創り出すことが求めら



図2 探査機NEARシューメイカーによって距離約50kmから撮影された、直径約5.3kmのクレーター底部の画像。斜面の地滑りと瓦礫 (ボールドー) が見られる。
画像提供：NASA/Johns Hopkins University APL.

1 北海道大学・低温科学研究所

2 文部省宇宙科学研究所・惑星研究系

れている。そのためには、まず各研究手法に携わる研究者がそれぞれの研究成果について解説し、互いに相補的な制約を与えることで、小惑星レゴリスの起源と現在の表面状態について共通認識を持つことが不可欠である。そこで、そうした研究者が一堂に集い、十分な時間を取って各個人のアイデアをぶつけ合う機会として、上述の研究会を開催した(表1)。

2. レゴリスの何を調べるのか？

研究会の冒頭では、まず「小惑星レゴリスで、何がどこまで分かるか?」、そして「それらが分かるためには、何をどこまで調べれば良いのか?」という二日間を通じた議論の芯となるべきテーマが提唱された。

小惑星研究とレゴリスの関わりを、ここでは便宜上以下の4つに分類してみた

- (a) 地上観測：小惑星を地上観測する時、レゴリスそのものを見ている。
- (b) 衝突進化：レゴリスは、小惑星表面における衝突進化過程を反映している。
- (c) 物質、散乱特性：レゴリスの物質特性および光散乱特性はどのようなものか。
- (d) 探査との関わり：惑星探査機による計測・試料採集の対象としてのレゴリス。

- (a) 地上観測：小惑星を地上観測する時、レゴリスそのものを見ている。

探査以前に小惑星の情報を得る第一の方法は、望

<p>初日 (4/26)</p>	<p><挨拶> 藤原顕 (宇宙研)</p> <p><地上観測> 吉田二美 (国立天文台・神戸大)：小惑星の光度/偏光時間曲線の観測 中村士 (国立天文台)：小惑星 S/C 比のサイズ依存性の観測 長谷川直 (宇宙研)：MBA の熱的遠隔観測 安部正真 (宇宙研)：MUSES-C 探査天体 1989ML の観測結果</p> <p><観測データの実験的解釈> 中村昭子, 亀井秋秀, 中山博喜 (神戸大)：光散乱実験 森口功一, 道上達広 (宇宙研)：Porous なターゲットへの衝突実験</p> <p>司会：矢野創 (宇宙研)</p>
<p>二日目 (4/27)</p>	<p><物質分析> 中村智樹 (九大), 野口高明 (茨城大)：レゴリス物質の組成 佐々木晶 (東大)：宇宙風化</p> <p><衝突・軌道進化> 道上達広 (宇宙研), 山本聡 (北大), 中澤暁 (NASDA)：小惑星のレゴリス衝突進化 長沢真樹子 (東工大)：天体力学的観点から</p> <p><探査> 秋山演亮 (東大)：小惑星形状分類に関する提案 矢野創, 藤原顕 (宇宙研)：探査サンプリングの技術的な提案や報告</p> <p><総合討論> 今後の小惑星レゴリス研究</p> <p>司会：山本聡 (北大)</p>

表1 2000年4月26-27日、宇宙研における「小惑星レゴリスの起源と進化」研究会プログラム

遠鏡による遠隔観測だろう。最近の観測から、わずか数kmサイズの小惑星、つまり表面重力がスペースシャトルの内部程度ほど弱い天体の表面にも、レゴリス層が形成されることが分かっている。つまり小惑星を点光源として見る地上観測の結果は、バルクとしての天体そのものの特性だけでなく、レゴリス表層の特性に大きく左右されている。では、レゴリスの有無・多少は、小惑星の観測データに具体的にどんな影響を及ぼすのだろうか？ それぞれの観測方法の特徴と、そこから得られる小惑星の情報との関わりはどうなっているのだろうか？ これらの問いに答えるために、可視の測光観測、分光観測、偏光観測、さらには赤外測光観測のそれぞれにおいて、小惑星表層に関してこれまで何が分かっている、どうすればさらに詳しいことがわかるのかを話し合った。

(b) 衝突進化：レゴリスは、小惑星表面における衝突進化過程を反映している。

次に、そもそもレゴリスはどのようにして形成され、その後どのように進化してきたのかを知る必要がある。小惑星の成長・進化過程において、衝突現象は重要な役割を果たしてきた。衝突によって生成および進化・変成するレゴリスは、まさに小惑星そのものの進化・変成の歴史を反映している。従って小惑星の構造、起源や年齢等を知る上で、レゴリスは有効な指標の一つとなりうる。例えば、レゴリス層の厚さや粒径分布、衝突変成の度合いが時間とともにどう進化するのかを明らかにできれば、現在の小惑星の姿から遡って、過去の衝突履歴を推測することができる。

ところで、軌道進化に伴う小惑星帯の総質量、ランダム速度（衝突における相対速度）の変化は、衝突頻度と衝突速度との関わりから、レゴリス層の衝突進化に影響すると考えられる。そこで、小惑星帯の総質量とランダム速度の変化が小惑星表面のレゴ

リス層の衝突進化にどのように影響するのかについても議論した。

(c) 物質、光散乱特性：レゴリスの物質特性および光散乱特性はどのようなものか。

地上観測や模擬室内実験からの類推よりも、直接「物質」を測定できれば、母天体の物性についてより多くのことが分かる。では、どうやってその「物質」を得るのだろうか？ 最も簡単な解としては、地球に降ってくる小惑星起源の隕石や宇宙塵を収集すれば良い。特に隕石中のカクレキ岩は、小惑星のレゴリス層が衝突によって石化されて固まったと考えられている。また南極氷床や成層圏、あるいは地球低軌道上の人工衛星で採集される宇宙塵試料の多くは、小惑星表面で起こる衝突破壊に起源を持つと考えられている。従って小惑星起源である隕石や宇宙塵から母天体情報を類推する上で、レゴリス層の進化の各段階とそれぞれの試料がどのように関連づけられるかを明らかにすることが重要となる。

また、実験室で測定された隕石試料の反射スペクトル測定を地上観測による小惑星の反射スペクトルと比較することによって、隕石とその母天体である小惑星の対応をつける努力も進められている。その際、宇宙塵の衝突などによる小惑星表面の「宇宙風化」が反射スペクトルに及ぼす影響について評価しておく必要がある。レゴリス層の特性と、光散乱特性の間には、どのような関係があるのだろうか？ また隕石に記録された宇宙風化の度合いから、母天体表面に関する何が分かるのか？あるいは地上観測や探査機によるその場計測の結果から、実際のレゴリスの粒径分布等を類推するにどうすればよいのか？ これらに答えを出す方法として、微粒子の光散乱計測実験やパルスレーザー・超高速微粒子衝突実験装置を使った宇宙風化の模擬実験が重要となる。

(d) 探査との関わり：惑星探査機による計測・試料採集の対象としてのレゴリス。

小惑星と類似した反射スペクトルを示す隕石の存在比と、地上観測から得られる反射スペクトル毎の小惑星の存在比が一致しないというパラドックスは、長く惑星科学者を悩ませてきた[1]。その根本的な原因は、個々の隕石の母天体が具体的にどの小惑星なのか、分かっていない点にある。そこで、もっと積極的に「小惑星物質」を得る方法が、探査機による計測であろう。ところで小惑星探査において、明らかにしたい科学目標によりその手法・計測機器が異なる（「小惑星レゴリスの科学と探査手法」の表1参照）。本研究会では特に表層レゴリスに関する探査について着目し、検討を行った。その場観測において、小惑星表層を覆うレゴリスのもつ特性は、表面形状や散乱特性などに影響を及ぼす。またMUSES-Cを始めとする現有の国内外の小惑星サンプルリターン案では、全く風化を受けていない裸の岩盤が露呈していない限り、レゴリス表層のサンプルを回収することになる。そこでレゴリス層の異なる深さに対する探査意義について議論を行った。また、サンプルリターンにおいて採集場所の選択、収率の高いサンプル機構の設計、そして回収試料の分析に必要な技術・装置の開発における現状と、次世代サンプルリターン技術についても議論を行った。

3. 本特集号企画の趣旨

本研究会の内容で行われた意見交換や議論が、各自の今後の研究に生かされるようになることが望ましい。ここでの発表や議論は研究会に出席できなかった人々にとっても、これまでの小惑星表面およびレゴリス研究の総括と今後の展望をはかるうえでの良い材料を与えるので、本誌に特集号として掲載させて頂くことになった。ただし、本特集は現在の小惑星レゴリスに関する知見の全てをカバーしてはい

ないことを、あらかじめご了解頂きたい。本特集号では、現状で明らかとなっている小惑星レゴリスについての研究結果を、それぞれの研究手法でくってから、共著という形でまとめて頂いた。また講演者以外の方からも執筆やご意見を頂いた。各論文の内容は過去の研究のレビューにとどまらず、現在の研究課題や参考文献も多数明示して頂き、読者が今後本テーマを研究する際のレファレンスとして役立てられるよう工夫した。研究の発展次第では2002年に予定されているMUSES-Cの打ち上げを待つ間にも、これらの内容を更新する新しい研究成果も多く出てくるだろう。本特集号が次なる研究テーマの設定の足がかりとして助けになれば幸いである。

なお、4月の研究会に参加した方の多くが、6月に代々木で行われたWPGM国際会議で開かれた小惑星表面と隕石に関する二つの特別セッションにも参加し、各々の学術成果を発表した。それらの多くは近いうちにEarth, Planets and Space誌上で組まれる特集号に掲載される予定である。こちらも本特集と併せてご愛読頂きたい。

謝辞

この企画を実現するに当たっては、大変多くの方にお世話になった。上記の講演者以外にも多くの方に参加頂き、積極的な議論を展開して頂いたことに、まず御礼を申し上げる。また研究会の実施に当たって会場を提供して頂いた宇宙科学研究所、本特集号の査読者各位、そして特集号掲載の機会を与えてくださった「遊星人」編集部に心より御礼を申し上げる。

参考文献

- [1] Trombka, J. I. et al., 2000, *Science*, 289, 2101-2105.