

木曾シュミット望遠鏡を用いた彗星ダストトレイルの可視光サーベイ観測 Optical survey of cometary dust trails with the Kiso Schmidt telescope

猿楽 祐樹^{1*}; 石黒 正晃²; 白井 文彦³; 上野 宗孝¹
SARUGAKU, Yuki^{1*}; ISHIGURO, Masateru²; USUI, Fumihiko³; UENO, Munetaka¹

¹宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ²ソウル大学物理天文学科, ³東京大学大学院理学系研究科天文学専攻
¹Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ²Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, ³Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo

The maximum size of dust particles contained in cometary nuclei is an important parameter to understand the formation and evolution of comets. Existing of cm-sized particles is confirmed by the EPXI mission when the spacecraft flew by Comet 103P/Hartley. In addition, the Rosetta spacecraft is beginning to take amazing images of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. Obviously, in situ observations with spacecrafts are powerful, however, it is impractical to send spacecrafts to a number of comets to search the size distribution of dust particles for each comet. Cometary dust trail is a good object to study this issue through remote observations. Dust trail is a structure extending along the orbit of the parent body, it is composed of dust particles large enough not to be blown off by the radiation pressure of the Sun. This structure was first discovered for eight short-period comets by the Infrared Astronomical Satellite in 1983. Then, Reach et al. reported that dust trails are a generic feature of short-period comets based on the observations with the Spitzer Space Telescope. Although their deep imaging was sufficient for detection, the field of view was not enough to examine the particle size accurately. In this study, we present wide-field images of dust trails taken with the Kiso Schmidt telescope, we estimate the size of dust particles composing them, and discuss similarity or difference among observed comets.

Keywords: comet, dust trail, interplanetary dust, meteor, ground-based observation

小惑星ベスタの衝効果に関する研究 Study of the opposition surge of Asteroid 4 Vesta

長谷川直^{2*}; 宮坂正大³; 時政典孝³; 十亀昭人⁴; 吉田二美⁵; 尾崎忍夫⁵; 安部正真¹;
石黒正晃⁶; 黒田大介⁵
HASEGAWA, Sunao^{2*}; MIYASAKA, Seidai³; TOKIMASA, Noritaka³; SOGAME, Akito⁴; YOSHIDA, Fumi⁵;
OZAKI, Shinobu⁵; ABE, Masanao¹; ISHIGURO, Masateru⁶; KURODA, Daisuke⁵

¹宇宙航空研究開発機構, ²東京都庁, ³佐用町総務課, ⁴東海大学, ⁵国立天文台, ⁶ソウル大学

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²Tokyo Metropolitan Government, ³Sayo Town Office, ⁴Tokai University, ⁵National Astronomical Observatory of Japan, ⁶Seoul National University

小惑星4ベスタは様々な観測が行われている小惑星で、最もよく調べられている小惑星と言っても過言ではないが、これまで、位相角1度以下の測光観測が行われておらず、衝効果の性質がよく分からなかった。そこで、我々はベスタの位相角が0.1度近くになる2006年の衝において、JAXA相模原キャンパスの屋上に仮設置された6.4cmの望遠鏡や、個人天文台である宮坂天文台の36cmの望遠鏡、西はりま天文台の60cmに同架させた7.6cm望遠鏡、ウズベキスタンのマイナダク天文台の60cm望遠鏡で測光観測を、また西はりま天文台にある200cm望遠鏡（なゆた望遠鏡）と国立天文台岡山天体物理観測所の188cm望遠鏡で分光観測を行った。

観測の結果、位相角1度未満で急激にあかるくなる衝効果が確認された。衝効果を起こすメカニズムは、モデルでの検証から、干渉性後方散乱がそのメカニズムであることがわかった。また、表層の密度をもとめることができ、極表層のバルク密度は900-1900 [kg m⁻³]であることがわかった。

キーワード: 小惑星, ベスタ, 衝効果

Keywords: asteroid, Vesta, opposition effect

天文衛星および地上望遠鏡による小惑星の含水鉱物探査 Exploring hydrated minerals on asteroids with ground-based observatories and space-borne telescope

臼井 文彦^{1*}; 長谷川 直²; 大坪 貴文¹
USUI, Fumihiko^{1*}; HASEGAWA, Sunao²; OOTSUBO, Takafumi¹

¹ 東京大学, ² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
¹The University of Tokyo, ²ISAS/JAXA

The knowledge of hydrated minerals among asteroids is important for understanding a wide range of solar system formation, evolutionary processes, and thermal history. Formation of hydrated minerals occurs in environments where anhydrous rock and water are together. The distribution of hydrated minerals in the main belt region is a clue to solve the questions of the homogeneity of the solar nebula, the existence of heat sources, and how much mixing of planetesimals occurred. The presence of hydrated minerals indicates that conditions in the past were more conducive to the presence of liquid water on small bodies.

Many asteroids are known to exhibit a broad absorption feature in the 3 micron band due to hydrated minerals, water ice, and organics. Spectral range between 2.5 and 2.85 micron contains a strong absorption band of typical hydrated minerals. However, this spectral range is largely obscured by the terrestrial atmosphere and we need space-borne telescopes to observe these features in detail. The Infrared Camera (IRC) onboard the AKARI infrared satellite has a spectroscopic capability in the near-infrared (between 2 and 5 micron) with a high sensitivity. We observed 70 asteroids with the IRC, carried out in its warm mission phase. From these observations, wide variety of the absorption feature of hydrated minerals on asteroids has been obtained. Especially, the peak region of the absorption around 2.7 and 2.8 micron has been clearly observed in asteroid spectra for the first time with AKARI. This distinctive spectral shape is considered as the evidence for hydrated minerals, and their detailed features vary among asteroids depending on the origin of the associated hydrated minerals.

In this talk, we report the observations of search for hydrated minerals on asteroids in the 3 micron band with AKARI/IRC and other ground-based observatories, and discuss the distribution of hydrated minerals in the main belt regions.

キーワード: 小惑星, 含水鉱物, 近赤外線分光観測
Keywords: asteroids, hydrated minerals, near-infrared spectroscopy

木星摂動による CERRA の潮汐断裂メカニズム、そのマントル片が地球に衝突する 月形成仮説 The tidal rupture mechanism of CERRA by Jupiter perturbation, Moon hypothesis that the mantle piece collides with Earth.

種子 彰^{1*}
TANEKO, Akira^{1*}

¹SEED SCIENCE Labo.
¹SEED SCIENCE Labo.

今までの月形成メカニズムの仮説では必然性が薄く。更に地球進化と現状を説明する一貫したストーリーも無かった。

1. 月形成の新しいメカニズム

1. マルチインパクト仮説: MI は、月と惑星地球進化への新仮説で、「地球の謎」への統一的な理解への答えです。

- (1). 「マルチインパクトによる月と深海洋底の起源仮説」は、マントル片の地球への新衝突メカニズムを提案した。
 - ・○原始惑星セラは、証明されていないチチウス・ボーデの法則の、小惑星帯位置に形成された。
 - ・○何故、原始惑星セラが破壊したのか? = 木星摂動による原始惑星 CERRA の軌道の偏平化と潮汐力による破断。
- (2). 「巨大惑星衝突仮説: GI(キャメロン etc.)」での解決できない困難な問題等を下記に示した。
 - ・×分化した火星サイズの原始惑星は、公転面上 斜め後方からの (幸運に依存する) 衝突による=不可能。
 - ・×マントル成分だけの月を形成する仮説で、地球の進化と現状を説明できない。 =月を形成するためだけの仮説

2. 月形成仮説の比較 検討 ***マルチインパクト仮説: MI **vs **ジャイアントインパクト仮説: GI ***

- (0). 衝突体の来歴>>分化惑星 CERRA の断裂メカニズムでマントル片 vs 分化火星サイズ原始惑星 (メカニズム無し)
- (1). 月形成時の衝突速度>>理論算出 マルチ衝突 MI(12.4km/s・36.5度) vs GI 巨大衝突 (~8km/s:最第・約 30度)
- (2). 衝突エネルギー比較>> MI(8.01×10^{30} J) vs GI(2.05×10^{31} J), MI の約 2.56 倍も巨大。
- (3). 衝突確率と時期・メカニズム>>高い・約 40 億年前・必然メカニズム vs 低い・約 46 億年前・偶然=不可能
- (4). 衝突時の地球の状況>>分化・固体・地殻の凝固及び半熔融内部 vs 熔融分化・マグマオーシャン コア
- (5). 地殻部分剥離・亀裂>>地殻部分剥離・マントル亀裂 (プレート境界) 発生 vs 剥離無・地殻が薄い・発生せず
- (6). 月の表・裏半球の差異>>剥離した地殻とマントルで説明可能 vs 別の解決策が必要
- (7). 月の形成位置 (地球半径: RE) $\cong 60 \cdot RE$ (about Moon 位置) vs $\cong 3 \cdot RE$ (ロッシュの限界位置)
- (8). 地球の深海洋底, プレート境界形成, 海陸分布 形成可能, 形成可能, 形成可能 vs 形成不能, 形成不能, 形成不能
地球の進化と現状を説明する事の全の項目で, マルチインパクト仮説がジャイアントインパクト仮説より優れている。

3. マルチインパクト仮説の効果 *****「地球の謎」への統一的な理解が可能である。*****

- (1). 何故、地球表面積の 70 %もの広さの深海底 (-5km) が形成されているのか? それは複数潮汐断裂片の衝突による。
- (2). 何故、地球のコア偏芯 (約 10%) が起きたか? 太平洋位置への CERRA 破片の衝突による地球マントルが欠損し、それを補完するアイススタシーが原因である。

<<結論>>この様に、本マルチインパクトによる月と地球進化の新起源仮説は、今後の統一的な理解と解釈に役立つ。
衝突相対速度 12.4km/s が得られた。本仮説は、ジャイアントインパクト仮説より地球の進化と現状を説明できる。

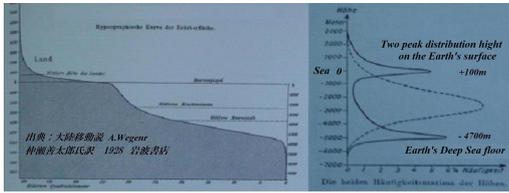
キーワード: 原始惑星セラの断裂メカニズム, 木星摂動によるセラ軌道の変遷, 潮汐力が原因でセラの断裂, マントル破片の地球衝突で月の形成, 2 ピークを示す頻度曲線, 衝突速度 12.4km/s, 36.5deg

Keywords: Rupture mechanism of CERRA, Transition of Cerra orbit by Jupiter perturbation, CERRA's rupture due to tidal forces, Moon is formed by the Mantle piece collision to the Earth, Frequency curve showing a two-peak, Velocity 12.4km/s, 36.5degree

PCG30-04

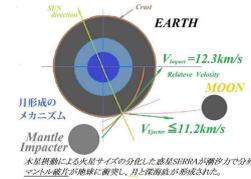
会場:A02

時間:5月26日 14:15-14:30



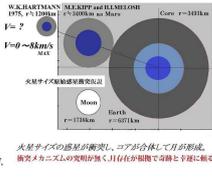
The Multi-Impact Hypothesis

[The Origin of The Moon and The Earth in Multi-Impact Hypothesis.]
 Akiro Inabe, 2014, Ang. -メルトインパクト仮説による月と地球の形成



The Giant Impact Hypothesis

[Satellite-sized planetesimals and lunar origin.] et al.
 Hartmann, W. K. and D. R. Davis 1975 Icarus, 24, 504-515.



「はやぶさ2」搭載中間赤外カメラ TIR : 軌道上初期チェックと今後の運用計画 Thermal Infrared Imager TIR on Hayabusa2: Initial Check and Future Operation Plan

岡田 達明^{1*}; 田中 智¹; 福原 哲哉²; 田口 真³; 今村 剛¹; 荒井 武彦¹; 千秋 博紀⁴; 出村 裕英⁵;
小川 佳子⁵; 北里 宏平⁵; 関口 朋彦⁶; 中村 良介⁷; 神山 徹⁷; 長谷川 直¹; 松永 恒雄⁸; 和田 武彦¹;
滝田 隼⁹; 坂谷 尚哉¹⁰; 堀川 大和¹⁰; ヘルバート ヨルン¹¹; ミュラー トマス¹²;
ハガーマン アクセル¹³

OKADA, Tatsuaki^{1*}; TANAKA, Satoshi¹; FUKUHARA, Tetsuya²; TAGUCHI, Makoto³; IMAMURA, Takeshi¹;
ARAI, Takehiko¹; SENSHU, Hiroki⁴; DEMURA, Hirohide⁵; OGAWA, Yoshiko⁵; KITAZATO, Kohei⁵;
SEKIGUCHI, Tomohiko⁶; NAKAMURA, Ryosuke⁷; KOUYAMA, Toru⁷; HASEGAWA, Sunao¹; MATSUNAGA, Tsuneo⁸;
WADA, Takehiko¹; TAKITA, Jun⁹; SAKATANI, Naoya¹⁰; HORIKAWA, Yamato¹⁰; HELBERT, Jorn¹¹;
MUELLER, Thomas¹²; HAGERMANN, Axel¹³

¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ² 北海道大学, ³ 立教大学, ⁴ 千葉工業大学, ⁵ 会津大学, ⁶ 北海道教育大学, ⁷ 産業技術総合研究所, ⁸ 国立環境研究所, ⁹ 東京大学, ¹⁰ 総合研究大学院大学, ¹¹ ドイツ航空宇宙センター, ¹² マックスプランク研究所地球外物理学研究所, ¹³ オープン大学

¹ ISAS/JAXA, ² Hokkaido University, ³ Rikkyo University, ⁴ Chiba Institute of Technology, ⁵ University of Aizu, ⁶ Hokkaido University of Education, ⁷ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ⁸ National Institute of Environmental Studies, ⁹ University of Tokyo, ¹⁰ Sokendai, ¹¹ German Aerospace Center, ¹² Max-Planck Institute for Extraterrestrial Physics, ¹³ The Open University

TIRは「はやぶさ2」搭載の熱赤外カメラであり、2次元アレイ型の非冷却ボロメータを検出器にもつ。その搭載目的は、小惑星 1999JU3 の表層の熱慣性などの熱物性の分布を調査することを通して、小惑星 1999JU3 の形成過程や進化過程のモデルに制約を課すことである。それからさらに小天体の普遍的な物性的性質として、小天体の進化過程、過去の原始太陽系における微惑星の振る舞いについて展開することにある。TIRの他の目的として、小惑星の熱環境や岩塊存在度などの表面状態を把握し、小惑星上でのサンプル採取地点の選定や、タッチダウン運用の安全性の確保に役立てることである。

惑星探査の中で、熱放射観測の歴史は長く、惑星表層状態が月面のような細粒状のレゴリス的であるかどうかの遠隔調査や、岩塊分布の状態を上空から評価して着陸に適する地点であるかどうか等の判定材料として使用されてきた。地球や月、火星の周回衛星からの熱放射マッピングカメラでは探査機の移動に伴って熱物性や熱放射率の波長依存性をマッピングする観測が行われた。小天体観測では、近赤外分光撮像によってえられる3~4 μm の熱放射成分の立ち上がりの特徴を捉える方法により、Tempel-1、Hartley-2の両彗星のフライバイ中の観測、小惑星 Vesta のランデヴー期間中の周回軌道からの観測などが実施された。この方法は、南中位置付近の高温領域においては精度の高い観測が可能である。

「はやぶさ2」ではTIRによる10 μm 帯の中間赤外波長域での撮像を行う。この手法では、高温となる南中付近に加えて、朝夕領域も(熱慣性がある程度大きい場合には夜間領域まで)撮像することができる。TIRの主な観測手法は、小惑星から地球方向(太陽方向から0~40°の角度)に距離約20kmの位置(Home Position)に探査機が待機した状態で、小惑星の自転に伴って数分間隔で連続的に撮像を行う方法である。それにより、小惑星全面の撮像を小惑星1自転で行うことができる。小惑星上の各地点が自転に伴って異なる太陽高度で日射を受け、温度が変化する様子を調べることができる。表層熱慣性は温度の変動幅と最高温度への到達時刻の南中時刻からのずれから決定することができる。

TIRは、2014年12月3日の「はやぶさ2」打上後、初期チェックを実施した。12/11に機能確認試験、12/17に性能確認試験のための運用を行った結果、打上前の地上試験と比較して特に問題が生じておらず健全なことが確認された。1月以後は月1回のペースで、機上較正のための運用を実施する計画である。TIRはその際、積極的な探査機姿勢制御は行わず、ほぼ反太陽方向の深宇宙を指向する。ボロメータの画素毎の値は大きくばらつくため、画素毎のオフセットを除去するためにシャッター開時と閉時の両画像を撮像し、両画像の差分画像を真の赤外画像として扱う。「はやぶさ2」の巡航中は、シャッター開閉時の撮像を長期間にわたって定期的実施し、経時変化の兆候を調べ、検出器の損傷や劣化、あるいはその補正方法について検討する。TIRの性能はそれ自身の温度制御に強く依存するため、探査機熱制御システムHCEによってTIRの光学系外筒部とTIRの取り付け面の温度を制御する。その温度制御の設定温度やON/OFF時間割合について最適条件を確認している。ヒータによる温度制御はTIR観測時には0.2°C程度のばらつきで抑制できており、その温度の微小変動による観測結果への影響を調査中である。TIRでは巡航中には上記のような月例定期運用のほか、小惑星に向かう途中の地球スイングバイ時には、地球や月の撮像を実施する予定であり、小惑星到着までに実天体による温

PCG30-05

会場:A02

時間:5月26日 14:30-14:45

度較正を行う予定である。太陽・地球・探査機の角度は 50° を超えるため、常時の観測は困難であるが、スイングバイ前の数日前から2日前頃に月を直径数画素、地球を10画素以上で捕らえることが可能であり、運用の詳細については今後決定する。

キーワード: はやぶさ2, 熱慣性, 熱物性, 中間赤外, 小惑星, サーモグラフ

Keywords: Hayabusa2, thermal inertia, thermo-physical property, mid-infrared, asteroid, thermograph

はやぶさ2熱赤外カメラを利用したアルベドと放射率の測定 Separation of effects of albedo and emissivity on the thermal evolution of asteroid by using TIR on board Hayabusa-2

千秋 博紀^{1*}; 滝田 隼²; 田中 智²; 岡田 達明²; はやぶさ2 TIR チーム¹
SENSHU, Hiroki^{1*}; TAKITA, Jun²; TANAKA, Satoshi²; OKADA, Tatsuaki²; HAYABUSA-2, Tir team¹

¹ 千葉工業大学惑星探査研究センター, ² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
¹ Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, ² ISAS, JAXA

Surface temperature of an air-less body is thought to be determined by balance of the energy received from the sun and the energy emitted as black body radiation. The energy received from the sun per unit area is calculated as a function of the solar distance, D , and the albedo of the body, A . The energy emitted as black body radiation per unit area is calculated as a function of the surface temperature, T_s , and emissivity, E . Thus it is said that the resulting surface temperature is simply calculated as a function of D and $(1-A)/E$. However this is only the case for a thermally non-conductive body.

For the case of time evolution of surface temperature is affected by thermal flux from/ to the underground. The effect can be observed as time-delay of peak temperature relative to sub-solar longitude. This indicates that a time-series observation of surface temperature allows the separation of effects of albedo and emissivity on the evolution.

In this presentation, we will show our strategy to estimate the albedo and the emissivity of the target asteroid of Hayabusa-2, 1999JU3, by using TIR (Thermal InfraRed) imager.

キーワード: はやぶさ2, 熱赤外カメラ, アルベド, 放射率
Keywords: Hayabusa-2, TIR, albedo, emissivity

はやぶさ2は小惑星表面の有機物分布を明らかにできるか：光散乱特性による有機物量と粒径の識別 Can Hayabusa-2 reveal the distribution of organics on asteroid surface?

北里 宏平^{1*}; 藤原 彩香¹; 中村 昭子²; 大竹 真紀子³; 安部 正真³
KITAZATO, Kohei^{1*}; FUJIWARA, Ayaka¹; NAKAMURA, Akiko²; OHTAKE, Makiko³; ABE, Masanao³

¹ 会津大学, ² 神戸大学, ³ 宇宙科学研究所
¹University of Aizu, ²Kobe University, ³JAXA/ISAS

小惑星探査「はやぶさ2」は世界初となるC型小惑星サンプルリターンを目指しており、そのサンプル採取及び地球帰還が成功した暁には、地上での詳細な分析から太陽系の初期進化や地球生命の起源に関する新たな知見が得られると期待されている。その科学的なアウトプットを最大化するためにはリモートセンシングで小惑星表面の含水鉱物や有機物の分布を明らかにすることが重要である。しかし、含水鉱物は探査機に搭載された近赤外分光計を使って調べられるものの、有機物の分布を調べる方法は現時点で確立されていない。唯一、炭素質隕石に含まれる総炭素量が可視域の絶対反射率と明瞭な負の相関を示すことから、絶対反射率を使って有機物量を推定するという考え方があるが、絶対反射率は表面物質の粒径や空隙率などにも依存するため、それだけでは必ずしも有機物量を計るよい指標になるとは限らない。そこで本研究では、絶対反射率と光散乱特性の情報を組み合わせることによって有機物量と表面状態を識別できるのではないかと考え、実際に小惑星表面を模擬する試料を使ってその検証実験を行った。試料はケイ酸塩鉱物と有機物の二成分とし、ケイ酸塩鉱物には幌満産のダナイト、有機物には天然の腐食物質であるフミン酸を使用した。粒径45-53 μm のレゴリス状のダナイト試料を基準として、フミン酸の混合量を増やした場合とダナイトの粒径を大きくした場合の光散乱特性の変化を比較した。光散乱特性の測定は会津大学で開発した可変角拡散反射光測定装置を用いて行い、位相角5-60度で反射光強度を測定した。測定の結果、有機物量が増える場合は反射率が低下して後方散乱が強くなるのに対し、粒径が大きくなる場合は反射率が低下して前方散乱が強くなることが示された。また、これらの傾向は理論モデルを使って再現できることもわかった。よって、有機物量と粒径だけが変化する単純な系では光散乱特性がそれぞれ異なる傾向を示すことから両者の識別は可能と考えられる。ただし、実際の小惑星表面では宇宙風化等の影響も関係しているであろうことから、今後それらを模擬する追加実験が必要である。

キーワード: はやぶさ2, 小惑星, 有機物, 光散乱特性
Keywords: Hayabusa-2, asteroids, organics, photometric properties

はやぶさ2搭載レーザー高度計による1999JU3のアルベド観測精度と科学成果 The accuracy of geometric albedo of the 1999JU3 estimated from observation by the LIDAR and the following results

山田 竜平^{1*}; 千秋 博紀²; 並木 則行¹; 吉田 二美¹; 阿部 新助³; 野田 寛大¹; 平田 成⁴; 平田 直之⁵;
石原 吉明⁶; 押上 祥子¹
YAMADA, Ryuhei^{1*}; SENSU, Hiroki²; NAMIKI, Noriyuki¹; YOSHIDA, Fumi¹; ABE, Shinsuke³;
NODA, Hiroto¹; HIRATA, Naru⁴; HIRATA, Naoyuki⁵; ISHIHARA, Yoshiaki⁶; OSHIGAMI, Shoko¹

¹ 国立天文台, ² 千葉工業大学, ³ 日本大学, ⁴ 会津大学, ⁵ 東京大学, ⁶ 宇宙航空研究開発機構

¹National Astronomical Observatory of Japan / RISE Project, ²Chiba Institute of Technology, ³Nihon University, ⁴The University of Aizu, ⁵University of Tokyo, ⁶Japan Aerospace Exploration Agency

2014年12月末小惑星探査機「はやぶさ2」が近地球型のC型小惑星「1999JU3」を目指して打ち上げられた。我々は、はやぶさ2に搭載されるレーザー高度計(LIDAR)を使用して、レーザー波長(1064nm)における1999JU3のアルベド分布を調べる事を計画している。はやぶさ2搭載用のLIDARには探査機-小惑星間の距離を測定する機能に加えて、レーザーパルスの送信光強度と受信光強度を測定する機能がついており、この強度データを用いて小惑星表面のジオメトリックアルベドを推定する事が可能である。

我々は、LIDARで得られる送信光、受信光のデータからどの程度の精度でC型小惑星のアルベド値を推定できるか評価を行った。本発表では、まず、打上げ前に実施した地上試験結果より決めたLIDARの機器特性と、その特性で得られた観測値から決まるアルベドの推定精度について報告する。これに加えて、実際の観測時には、小惑星表面の傾斜の大きさやラフネスの程度によって、LIDARが受けるレーザーパルスの強度が変化する。この小惑星の表面傾斜や、ラフネスがLIDARの観測値から求まるアルベドの推定値にどの程度影響を及ぼすか検討した結果についても述べる予定である。

我々は、LIDARの観測値から決められる1999JU3のアルベド分布と他機器の観測データを組み合わせて(1)1999JU3の岩石・鉱物タイプ、(2)水質変成度の高低、(3)宇宙風化、外来物質による表面変成についての情報を得る事を検討している。本発表ではLIDARを使用して決めたアルベド値から、どの程度これらの科学情報について言及できるか調査した結果についても報告する。

キーワード: 小惑星アルベド, C型小惑星, 1999JU3, はやぶさ2, レーザ高度計

Keywords: Albedo of asteroid, C-type asteroid, 1999JU3, Hayabusa-2, Laser altimeter

はやぶさ2レーザー距離計を利用したダスト観測 Dust detection by using laser altimeter on board Hayabusa-2

千秋 博紀^{1*}; 押上 祥子²; 小林 正規¹; 山田 竜平²; 並木 則行²; 水野 貴秀³;
はやぶさ2 LIDAR サイエンスチーム⁴
SENSHU, Hiroki^{1*}; OSHIGAMI, Shoko²; KOBAYASHI, Masanori¹; YAMADA, Ryuhei²; NAMIKI, Noriyuki²;
MIZUNO, Takahide³; HAYABUSA-2, Lidar science team⁴

¹ 千葉工業大学惑星探査研究センター, ² 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室, ³ 宇宙航空開発機構宇宙科学研究所, ⁴ はやぶさ2

¹Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, ²RISE Project Office, National Astronomical Observatory of Japan, ³ISAS, JAXA, ⁴Hayabusa-2

LIDAR (LIght Detection And Ranging) on board Hayabusa-2 is basically used to measure the distance between the satellite and the target asteroid, 1999JU3. This instrument can also measure the absolute reflectance at the wavelength of 1064nm by itself since it monitors the energies of the laser pulse and receiving signal. The accuracy of determining the reflectance is so far estimated no better than 25%, but it would become better through further calibration tests using a pre-flight model of the LIDAR.

Dust count mode is one of the operational modes of LIDAR on board Hayabusa-2 in which it detects faint scattered light from dust grains on the line of sight. The distribution of dust grains along the line of sight is determined from the time resolved energy profile of received light. We need the optical property of a dust grain and size distribution function of dust grains to obtain the true number density. The optical property of a dust grain is modeled by using Mie scattering model assuming that a diameter of dust is larger than the wavelength of laser and that the complex dielectric constant of a dust grain is same as typical value of dirty silicate cosmic dust analogue. The distribution function of dust grains above the surface of an asteroid can be modeled assuming photoelectric dust levitation, but we need to know the initial condition of dust at the surface to carry out the model. Dust observation by LIDAR on board Hayabusa-2 is the first-ever direct observation of the distribution of dust grains around an asteroid and would constrain the models on the origin and evolution of dust grains on and above the surface of an asteroid.

キーワード: はやぶさ2, LIDAR, ダスト

Keywords: Hayabusa-2, LIDAR, dust

HARMONICS2:はやぶさ2カメラ運用支援可視化ツール HARMONICS2 for camera operations on Hayabusa2 as a visualization tool

上野 航^{1*}; 平田 成²; 出村 裕英²
UENO, Wataru^{1*}; HIRATA, Naru²; DEMURA, Hirohide²

¹ 会津大学, ² 会津大学先端情報科学研究センター ARC-Space

¹ Univ. of Aizu, ² CAIST/ARC-Space, Univ. of Aizu

はやぶさカメラ運用支援可視化ツール HARMONICS (HAYabusa Remote MONItoring and Commanding System) は 2005 年に開発され、当時のカメラ運用の検討に使われた。はやぶさ2に向けて更新された HARMONICS2 をデモ紹介する。本ソフトウェアは、探査機の位置・姿勢情報、観測機器の指向情報、観測ターゲットの情報（小惑星形状モデルや極の天球座標、自転周期など）を入力して、観測器視野ならびに探査機と対象との位置関係を可視化する機能が中核である。ほかに模擬視野と実際の観測視野とを比較する機能もある。さらに、入力データに基づく模擬視野を GUI ないしキー入力に対話的に変更し、それに対応する SPICE カーネルを出力できる機能が追加された。以前のバージョンの GUI 部分は GTK を使用していたが、今回は Qt を導入して中身を大幅に刷新した。Windows/LINUX/MacOSX でのクロスプラットフォームで動作する。将来的には、カメラ以外の観測機器も扱えるようにしたり、シミュレーションだけではなく観測実績管理も GUI で行なえるなどの機能拡張を予定している。運用計画の予備的検討や光学航法検討、形状モデルの評価、科学観測機器データ解析での解釈に資するソフトウェアとして、ユーザからの要望を聞く機会とさせて頂ければ幸いである。

キーワード: はやぶさ2, 可視化, コンピュータグラフィクス, 探査, 小惑星, SPICE

Keywords: Hayabusa2, Visualization, CG, Exploration, asteroids, SPICE

はやぶさ2探査機による小惑星サンプル採取に関する研究 Study on asteroid sample collection for Hayabusa-2 spacecraft

岡本千里^{1*}; 兵頭拓真²; 百武徹²; 澤田弘崇³; 橘省吾⁴; 國中均³
OKAMOTO, Chisato^{1*}; HYODO, Takuma²; HYAKUTAKE, Toru²; SAWADA, Hiroataka³; TACHIBANA, Shogo⁴; KUNINAKA, Hitoshi³

¹ 神戸大学, ² 横浜国立大学, ³ 宇宙航空研究開発機構, ⁴ 北海道大学

¹Kobe University, ²Yokohama National University, ³Japan Aerospace Exploration Agency, ⁴Hokkaido University

はやぶさ2は、太陽系における生命材料物質の探求および進化の解明のため、始原天体であるC型小惑星1999JU3からのサンプルリターンを目指している。1999JU3の表面状態は未知であるため、サンプル採取手法として、様々な小惑星表面状態に対応できる弾丸射出方式による試料回収方法が考案された。過去の惑星探査機による現在までの観測から、小惑星表面は、粉体層であるレゴリス層で覆われていることが知られている。1999JU3においても、レゴリス層が小惑星表面に広く分布する可能性が高く、レゴリス層からのサンプル採取効率を調べることは重要となる。そこで本研究では、小惑星微小重力下でのレゴリスサンプル採取効率、さらにサンプル回収量推定を行うことを目的とする。

サンプル採取装置は火薬銃、サンプラーホーン、キャッチャーから構成される。火薬銃による弾丸衝突によるクレータリングで放出された小惑星サンプルは、サンプラーホーンの中を反射しながら上昇し、キャッチャーに収納される仕組みとなっている。そこで本研究では、レゴリス層を構成する岩石質の粒子を仮定し、この粒子挙動を実験的・数値解析的に調べた。採取効率およびサンプル採取量見積もりを行う手順として、はやぶさ2と同じ環境を模擬したサンプラーホーンを用いた弾丸射出実験を1G下において実施し、粒子挙動を実験的にその場観測する。その後、得られた実験データをもとに、小惑星微小重力下でのレゴリスからのサンプル採取量の推定を数値シミュレーションによって行うこととする。本研究により、小惑星微小重力下での採取時の小惑星サンプルの挙動を明らかにすることができた。

キーワード: はやぶさ2, 探査機, クレータリング, 小惑星

Keywords: Hayabusa2, spacecraft, cratering, asteroid

Novel analytical/transportation system of extraterrestrial materials: Are we ready for Hayabusa 2 returned sample?

Novel analytical/transportation system of extraterrestrial materials: Are we ready for Hayabusa 2 returned sample?

伊藤 元雄^{1*}; 富岡 尚敬¹; 上梶 真之²; 矢田 達²
ITO, Motoo^{1*}; TOMIOKA, Naotaka¹; UESUGI, Masayuki²; YADA, Toru²

¹ 海洋研究開発機構, ² 宇宙航空研究開発機構

¹Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ²Japan Aerospace Exploration Agency

The Hayabusa 2 is the exploration mission to the C-type asteroid 1999JU3. The spacecraft will arrive at the asteroid in 2018, and a minimum 1g of the piece of asteroid will be returned 2 years later (e.g., Tachibana et al., 2014). During the remote sensing investigation for 1.5 years at the asteroid, sample collection from the asteroid surface will perform for three different locations. The sample will be consisted of a mixture of anhydrous/hydrous minerals and organic materials. It is a key material providing critical evidence of evolution of the Solar System including planetesimals, and nature and origin of organic materials and life.

The Hayabusa 2 returned sample might be sensitive to terrestrial contamination during curation, transportation, preparation and analysis. Several reports mentioned that the Hayabusa sample contained carbon-rich particles, inorganic particles, metals and organic materials as terrestrial contaminants (e.g., Uesugi et al., 2014; Ito et al., 2014; Yabuta et al., 2014; Yada et al., 2014). Therefore, it requires to avoid contaminations to the Hayabusa 2 sample from any environmental conditions, to identify possible contaminants if any, and to prepare the proper curation and analytical flow/system in a few years. Uesugi et al. (2014) reported an optimized sample-handling system including transportation between institutes and the sequence of the analytical flow through the examination of Hayabusa category 3 organic materials and meteoritic samples as analogues of Hayabusa 2 returned sample.

JAXA Extraterrestrial Sample Curation Center is taking a lead to work on above problems of unexposed sample transportation, a coordinated analytical system including micro-Raman spectroscopy, FT-IR, XANES, ToF-SIMS, focused ion beam (FIB), transmission electron microscopy/scanning transmission electron microscopy (TEM/STEM) and NanoSIMS. This coordinated analysis is essential to acquire maximum information including abundances of major/trace elements and isotopes, characterization of organics, and petrographic textures from nanometer- to micrometer-scale samples. This technique has been applied to carbonaceous materials by Stardust cometary dust return mission (e.g., Sandford et al. 2006; Matrajt et al. 2008), and can be used for samples obtained by future missions such as Hayabusa 2 and Osiris-REX.

In this talk we will discuss about detailed analytical and comprehensive system for small samples, and future developments of curation, transportation and analysis under air-isolated and/or cryo condition.

キーワード: はやぶさ2, 地球外有機物, 微小領域測定システム

Keywords: Hayabusa 2, Extraterrestrial organics, Micro analysis

はやぶさ2 帰還試料の初期記載分析フローの検討 Construction of the initial description analysis flow for Hayabusa2 sample

中藤 亜衣子^{1*}; 安部 正真¹; 岡田 達明¹; 矢田 達¹; 上梶 真之¹; 唐牛 譲¹; 熊谷 和也¹
NAKATO, Aiko^{1*}; ABE, Masanao¹; OKADA, Tatsuaki¹; YADA, Toru¹; UESUGI, Masayuki¹;
KAROUJI, Yuzuru¹; KUMAGAI, Kazuya¹

¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

¹ Inst. Space Astronaut. Sci., Japan Aerosp. Explor. Agency, Japan

「はやぶさ2」は2014年12月に打ち上げに成功し、現在C型小惑星1999JU3へ向かっている。JAXAキュレーションチームでは、2020年の小惑星試料帰還をにらみ、2015年度中に新たなクリーンチャンバーの仕様検討にとりかかる予定である。本発表ではそれに先立って、「はやぶさ2」帰還試料の初期記載分析フロー案を紹介する。

初期記載分析フローとは、ほぼ全ての帰還試料が辿る分析フローである。基本的に、物理的非破壊かつ大気遮断の分析を前提として、キュレーションチームによって行われる。より詳細な記載を目的とした初期分析や、現在「はやぶさ」帰還試料に対して行われている国際公募(AO)は、「はやぶさ」の初期記載分析の情報をもとに試料申請・配布が行われている。「はやぶさ2」でも同様にキュレーションによる初期記載分析の後に、初期分析や国際AOが行われる予定である。つまり初期記載分析は全ての分析の最上流にあり、試料配分のための情報取得と共に、汚染やダメージを最大限防ぐことが求められている。

現在までに検討されている初期記載分析フローは以下の通りである。1. サンプルコンテナをJAXAキュレーション施設内のクリーンチャンバーに組み付ける。2. 地球帰還後から組付け迄に試料からサンプルコンテナ内に放出された揮発性成分の採取・分析を行う。3. サンプルコンテナの開封後、光学顕微鏡下で試料の大まかなサイズと量を把握する。4. 組織の判別のため、大きなものから優先的にX線CTを行う。5. 有機分析と無機分析に分けて記載分析を進める。無機分析は主にSEM/EDSによる岩石学・鉱物学観察と主要構成鉱物の同定、有機分析については専門家の協力を仰ぎ、分析手法の検討を進めている。6. 試料の約半数を初期分析や国際AOなど後の詳細分析のために分離し、残りは保管する。

現在キュレーションチームでは、様々な分野の研究者と協議し、初期記載分析フローの構築を進めている段階である。帰還試料から最大のサイエンスゲインを得るために、チャンバーの仕様検討と平行して、各分析手法のダメージ評価や汚染防止のための大気遮断容器の開発も必要となってくる。発表ではこのような今後の課題も含めて、最新版の分析フローを紹介する。

キーワード: はやぶさ2, キュレーション, 初期記載, 1999JU3, 炭素質コンドライト

Keywords: Hayabusa 2, curation, initial description analysis, 1999JU3, carbonaceous chondrite

はやぶさ2搭載分離カメラ(DCAM3)撮像対象物の輝度予測と撮像戦略 Imaging strategy of DCAM3 equipped on Hayabusa2 based on radiance prediction of imaging objects

和田 浩二^{1*}; 荒川 政彦²; 小川 和律³; 白井 慶³; 本田 理恵⁴; 石橋 高¹; 坂谷 尚哉⁵; 門野 敏彦⁶;
中澤 暁³; 早川 基³; 澤田 弘崇³

WADA, Koji^{1*}; ARAKAWA, Masahiko²; OGAWA, Kazunori³; SHIRAI, Kei³; HONDA, Rie⁴; ISHIBASHI, Ko¹;
SAKATANI, Naoya⁵; KADONO, Toshihiko⁶; NAKAZAWA, Satoru³; HAYAKAWA, Hajime³; SAWADA, Hirotaka³

¹ 千葉工業大学, ² 神戸大学, ³ 宇宙航空研究開発機構, ⁴ 高知大学, ⁵ 総合研究大学院大学, ⁶ 産業医科大学

¹Chiba Institute of Technology, ²Kobe University, ³Japan Aerospace Exploration Agency, ⁴Kochi University, ⁵The Graduate University for Advanced Studies, ⁶University of Occupational and Environmental Health

Hayabusa2, the next Japanese asteroid explorer successfully launched at 13:22:04 on December 3, 2014 from the Tanegashima Space Center toward a C-type asteroid 1999JU3, brings a deployable camera called DCAM3. Separated from the mother ship Hayabusa2, DCAM3 will observe an artificial impact on the surface of 1999JU3 performed using Small Carry-on Impactor (SCI) [1, 2]. DCAM3 has two camera systems: a monitoring camera (DCAM3-A) and a scientific camera (DCAM3-D). DCAM3-D possesses a high resolution (<1 m/pix at a distance of 1km) and wide angle (74 degrees) optical system for the following two objectives. First objective of DCAM3-D is to image an impact crater produced by SCI and fragments (i.e., ejecta) thrown out of the crater. Second objective is to image Small Carry-on Impactor (SCI) before explosion, which will float several hundred m above the surface of 1999JU3 and ≈ 1 km away from DCAM3. Imaging SCI enables us to estimate the location of SCI explosion and the impact direction that is an important parameter to interpret the artificial impact experiment. In addition, to estimate the position of DCAM3 itself, images of a part of 1999JU3 surface should be taken by DCAM3. DCAM3-D is, therefore, prepared for imaging three objects with different radiance in different positions: impact ejecta, floating SCI, and the surface of 1999JU3 including the crater cavity produced by SCI. In this presentation, we introduce how to predict the radiance of these three objects and the imaging strategy of DCAM3-D based on the prediction.

SCI is approximated by a cylinder of 15 cm \times ϕ 30 cm, smaller than the pixel resolution of DCAM3-D located at a distance of ≈ 1 km, but Beta cloth with a diffusive reflectance of ≈ 80 % is attached on the lateral surface of SCI. Assuming SCI surface is a uniform diffuse reflector (i.e., lambertian), we estimate the radiance of SCI and the signal to be detected with DCAM3-D. Since 1999JU3 is a C-type asteroid, its surface is dark with a geometric albedo ~ 0.05 . We estimate the radiance of the surface of 1999JU3, assuming Hapke model with Hapke parameters for 1999JU3 [3] as well as other C-type asteroids [4, 5] and comets [6, 7]. It is difficult to predict the radiance of ejecta because we have not yet known the surface condition producing ejecta and the size and the material property of grains consisting of ejecta from 1999JU3. On the other hand, a preliminary trial to generally construct a light scattering model of impact ejecta is in progress by means of Monte Carlo method [8]. We use such preliminary results to estimate the ejecta radiance.

These radiance predictions were checked by some experimental tests and reflected to the imaging strategy of DCAM3-D, namely to decide imaging parameters such as timing, exposure time, and gain setup. Consequently, we prepared three imaging modes specialized for each imaging object: SCI mode, ejecta mode, and 1999JU3 mode. These modes were adequately mixed in a sequence of 1 fps imaging to cope with every situation we can assume at around the time of SCI impact. Since we have no route to access the FPGA of DCAM3 in space, its imaging parameters had to be completely set up before launch. That is, we have already released the shutter of DCAM3. GOOD LUCK!

[1] Saiki, T. et al., 2013, Proc. Int. Symp. Space Tech. Sci., 29. [2] Arakawa, M. et al., 2014, Lunar Planet Sci. Conf., 44, Abstract #1904. [3] Ishiguro, M. et al., 2014, ApJ 792, 1, 74-82. [4] Helfenstein, P. & Veverka, J., 1989, in Asteroids II, 557-593. [5] Clark, B. E. et al., 1999, Icarus 140, 53-65. [6] Li, J.-Y. et al., 2007, Icarus 188, 195-211. [7] Li, J.-Y. et al., 2009, Icarus 204, 209-226. [8] P., Shalima et al., 2015, submitted to PSS.

キーワード: はやぶさ2, 小惑星, はやぶさ2, 観測機器

Keywords: asteroid, planetary exploration, Hayabusa2, scientific payload

日本の小天体探査の将来展望：火星衛星の魅力 A future perspective for Japanese explorations of small solar system bodies: The value of Martian moons

渡邊 誠一郎^{1*}; 橘 省吾²; 関根 康人³; 白井 寛裕⁴; プログラム的火星探査検討 グループ⁵
WATANABE, Sei-ichiro^{1*}; TACHIBANA, Shogo²; SEKINE, Yasuhito³; USUI, Tomohiro⁴;
PROGRAMATIC MARS EXPLORATION STUDY GROUP, Japan⁵

¹名古屋大学, ²北海道大学, ³東京大学, ⁴東京工業大学, ⁵JAXA/宇宙科学研究所

¹Nagoya University, ²Hokkaido University, ³The University of Tokyo, ⁴Tokyo Institute of Technology, ⁵JAXA/ISAS

背景：今後の太陽系探査の大目標は、前生命環境進化の解明に集約される。日本では、月着陸によるその場年代学・原始地殻探査や火星の前生命環境探査などの推進とともに、はやぶさシリーズで継承されたサンプルリターン（SR）技術を活用して、生命起源物質の進化と供給の観点から、小天体探査を進めることが重要である。イトカワ（S型小惑星）、1999 JU₃（C型小惑星）という地球接近小惑星（NEA）に続いて、より始原的天体からのSRとなると、メインベルトもしくはトロヤ群、彗星などが探査対象として想定される。しかし、これらの天体のSRミッションは日本の打上げ能力および電気推進技術から不可能では無いが、10年程度以上という長いミッション期間を要する。そこで、より短期間のミッションでSRが可能な小天体として、火星の衛星が注目される。また、火星探査後発国の日本にとって、大気/表面観測とも組み合わせられる火星衛星探査をその先の火星本体着陸探査と結びつけて構想していくことは、独自の探査プログラムを組み立てる上で戦略的価値がある。

火星衛星の魅力：火星衛星フォボス・ダイモスは、月を除いて、太陽系でただ2つの地球型惑星の衛星である。共に低アルベドの小型天体でD型/C型小惑星に類似した表面反射スペクトルをもつが、ほぼ火星赤道面内円軌道をとるという特徴がある。成因については、前者の特徴に整合的な始原的小惑星の捕獲（捕獲説）か、後者に調和的な火星周囲の破片円盤からの集積（円盤説、月の巨大衝突説に類似）かで論争が続いている。複数の探査機フライバイ観測はあるが、可視近赤外域で鉱物吸収がほとんど見られず、表面物質は未同定である。ランデブーや着陸などは行われていない。

もし、火星衛星が捕獲されたのだとすれば、単により始原的というだけではなく、火星の近日点よりも太陽に近づかないため、NEAに比べ太陽加熱の影響がより少ない試料を手にとると期待される。両衛星は密度が低いと、捕獲説が正しいなら、内部にH₂O氷を保持している可能性が高い。一方、円盤説の起源なら、揮発性元素の欠乏や内部空隙率の高さなど、その集積過程を明らかにする物証が得られる可能性が高い。比較衛星形成論の観点から、地球-一月系の起源と進化を探索する月科学/地球科学コミュニティとの連携の糸口もある。いずれにせよ、火星への生命起源物質供給という観点からきわめて興味深い天体といえる。

火星衛星SRミッション：そこでわれわれは、今後の国際情勢を勘案し、火星衛星のどちらかを選び、ランデブーによって表層環境や内部構造（帰還試料と組み合わせ岩石/氷質量比が同定可能）を調べる観測をした後に、着陸し、表面物質を採取して地球に持ち帰るSRミッションを提案する。この探査は、(1) 衛星の起源と歴史（捕獲説なら太陽系初期進化・生命前駆物質の情報、円盤説なら火星材料物質と集積・変成過程）と(2) 火星環境を支配する天体衝突史・大気散逸史の制約を目的とする。

回収試料の酸素同位体比などを火星隕石や将来得られるであろう火星本体のSR物質と比較することで、衛星起源論争に決着がつけられる。また、火星起源物質の年代分析や散逸大気の打ち込みによる元素の同位体測定についても、その場探査では実現できず、回収試料の分析が必須である。衛星は常に同一面を火星に向けているため、対火星表裏の比較や軌道方向に対する前後の比較ができるサンプリングが有効である。氷起源物質のD/H比測定から火星環境進化の初期値が決められる可能性もある。同時に軌道からの火星大気観測（日変化の理解）、地表の熱慣性変動観測等もオプションとして組み合わせる。本探査は、火星衛星を通じて、初期太陽系での物質の分布・移動から、原始惑星誕生過程、ハビタブルな表層環境変動までの長期間の前生命環境進化を実証的に明らかにすることを目指す。

高次元の国際協力ミッション：フォボスは国際的に見れば探査計画が複数あり注目度は高い。ロシア・欧州共同でのPhoebus計画がExoMars後継のSR探査候補として、NASA Discoveryミッションに提案予定のPADME計画がフライバイ探査としてある。日本が今から参入することの意義に疑問があるかも知れないが、火星には衛星が2つあることが別の展望をもたらしてくれる。ダイモスはフライバイ観測も少なく未知な点が多いため、例えば欧州がフォボスSRを日本がダイモスSRを行うといった高次元の協力関係を築くことで、2衛星の比較学を通じて、衛星の成因と火星圏環境進化の両目的に対してモデル制約力を飛躍的に高めることができる。また、火星衛星は将来の有人探査においても前哨基地として注目されており、そうした計画に対しても貴重な科学情報をもたらすと期待される。

キーワード: 小惑星, 惑星探査, サンプルリターン, フォボス, ダイモス, 前生命環境進化

Keywords: Asteroids, Planetary exploration, Sample return, Phobos, Deimos, Prebiotic environmental evolution

チェリアビンスクと仁保隕石シャワーによる炭素に富む粒子の形成 Formation of carbon-rich grains of the Chelyabinsk and Nio meteoritic showers.

三浦 保範^{1*}
MIURA, Yasunori^{1*}

¹ 山口、客員 (国内外大学)

¹ Yamaguchi, Visiting Univ.(In & Out)

1. 地球内外の炭素源について：炭素源は、地球外では恒星（炭素核融合）からダスト、そして多様な天体物（小惑星から惑星）に集積される。炭素の集積場所としては、地球外（恒星や天体内部）と地球内（深部・浅所地表）に大きく二分される。しかし、これらの中間過程では、地球外の炭素が隕石として運ばれるが、本件の隕石シャワー現象は、新しく炭素含有物が形成され、地球外起源物質の炭素源が地上で形成され地球岩石を含まない過程であり、新しい炭素物質源の地球外物質が地球上空で再溶融して形成される成果である [1-4]。

2. 仁保隕石シャワーの炭素含有物：山口市に落下した仁保 (Nio) 隕石は明治 30 年 (1897 年)8 月 8 日深夜 10 時半頃に九州方面から仁保 (Niho) 川に沿うように落下して、上空で爆発して隕石シャワーである [2, 4]。研究室の学生とともに落下地の仁保の田畑から多数の隕石小破片 (36 個) と球粒 (1,212 個) を回収し、その球粒の分布図からその集中場所が 4 カ所になっているので、仁保隕石は 4 ~ 5 個の大きめな隕石破片が形成している [5]。本件では、隕石シャワー時に大気中で燃焼して、炭素含有物が鉄の多い球粒に形成されている [4]。

3. ロシア隕石シャワーとその炭素含有物の例：ロシアのチェリアビンスク (Chelyabinsk) 隕石は、隕石シャワーとして 2013 年 2 月 15 日早朝 (3:22 UT) にチェリアビンスク市に落下目撃され、普通コンドライト (LL5) 分析され報告されているが、一部には破砕的に黒色部を含有している。上空で隕石シャワー燃焼 (火球) により、約四百個以上の破片が落下軌道に沿って回収されている [4-6]。本件では、炭素含有物のその場マイクロ分析 (FE-ASEM) として、3 個 (資料番号 CH-19, 20, 21; 落下地軌道上デブタッキーで JSA 採取) と 1 個 (現地の提供: CH-20 類似) の計 4 個を分析観察し隕石の燃焼物と確認した [4]。試料 CH-19 では、多くの隕石成分と炭素が混合し、鉄の化合物 (硫化物、炭化物) と炭素が極端に多い粒子などが形成され、多様な空隙 (ガス流出) 組織が見られ、激しく燃えて新しい炭素に富む粒子を形成している。試料 CH-20 では、元の隕石と燃焼した溶融層が残って炭化しているが、内部には黒色炭素部が少ない。試料 CH-21 では、本来の隕石組織と粒子がなく、炭素の多い珪素炭化に変化している。試料は、隕石成分が一般的に炭化したもの (CH-20 試料) から激しく混合して炭素化進行したもの (CH-19 試料) そして元の隕石物質が残らない破片 (試料 CH-21) まで多様な衝撃的变化を示す。本件では、地上の炭素粒子起源が単独の炭素含有物質 (宇宙塵、隕石落下地、人工物) 以外に、隕石シャワーで地上到達前に炭素粒子が隕石燃焼で形成されたことが新たに確認できた [4]。

4. まとめ： 本研究成果が、下記のようにまとめることができる [4]。

- 1) 地球内外での動的な衝撃波過程において、地表で炭素に富む粒子の形成が解明できる。
- 2) 地球大気中の隕石シャワー (日本・仁保隕石、ロシア・チェリアビンスク隕石) で地球岩石の混入なしで、炭素に富む粒子の大気中形成が電顕観察 FESEM で確認できた [4]。
- 3) 本件は、地球の炭素源には地球外炭素含有隕石の上空燃焼があることを新たに見出した [4]。
- 4) 衝撃波災害が、ロシア落下隕石災害 (身近な生活影響・物質変化) で新たに報告され、地球と宇宙の接点による物質破壊と変化の大切な情報を多面的に提供している。
- 5) 日本の小惑星探査はやぶさ 2 号などの宇宙での物質採取と変化について、天体表面に大気燃焼はなくても、人工的な衝撃波による燃焼で炭素含有物を二次的に形成成長して、正確な天体形成の情報評価に影響する懸念がある物質変化を有効的に示すと考えられる [4]。

参考文献:[1] Miura Y. (1996): Shock wave handbook (Springer Tokyo), 1073-1176.[2] Miura Y. and Uedo Y. (2001): LPI Contrib.No.1080 (LPSC32, LPI, USA),#2075.[3] Miura Y. (2012, 2014): 日本惑星科学会講演要旨集, p.1. [4] Miura Y.(2015): LPSC2015, #1666. [5] Planetary New, Chelyabinsk meteorite. LPI-USRA (2013).<http://www.lpi.usra.edu/>. [6] SBAG (2013): No. 1330.

キーワード: ロシア隕石シャワー, 仁保隕石シャワー, 炭素に富む粒子, 大気爆発, 地球外起源, SiC

Keywords: Russian meteorite shower, Niho meteorite shower, Carbon-rich grains, Air explosion, Extraterrestrial source, SiC

小天体表層での太陽風プロトンによる np-Fe 生成の可能性 The possibility of np-Fe production by solar wind protons on the airless body surfaces.

仲内 悠祐^{1*}; 松本 徹²; 安部 正真³; 土山 明²; 北里 宏平⁴; 鈴木 耕拓⁵
NAKAUCHI, Yusuke^{1*}; MATSUMOTO, Toru²; ABE, Masanao³; TSUCHIYAMA, Akira²; KITAZATO, Kohei⁴;
SUZUKI, Koutaku⁵

¹ 総合研究大学院大学, ² 京都大学, ³ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ⁴ 会津大学, ⁵ 若狭湾エネルギー研究センター
¹SOKENDAI(The Graduate University for Advanced Studies), ²Kyoto University, ³Institute of Space and Astronautical Science,
Japan Aerospace Exploration Agency, ⁴University of Aizu, ⁵Wakasa Wan Energy Research Center

In HAYABUSA2 mission, we must decide the sampling site using characterization of mineralogical and textural heterogeneities on the asteroid surface by remote sensing data. The reflectance spectra of asteroidal surface have information of mineral composition, but the surface spectra was changed by weathering effects which contain the micro-impacts and the implantation of solar wind ions and cosmic ions. The spectra of S-type asteroids show the reddening and darkening, on the other hand the C-type asteroids show the bluing and darkening [1].

A lot of experimental approaches tried to reproduce the weathering effects. Sasaki et al. (2001) found the nanophase iron particles within the amorphous vapour-desposited rims of laser-irradiated olivine grains using transmission electron microscopy (TEM) [2]. On the other hand, the simulation of implantation for endmembers of lunar and S-type using H⁺ ions at keV energy and MeV energy protons implantation show only small changes in visible and near infrared spectra [3, 4].

Then we simulate weathering effect for minerals that would be contained in C-type asteroid. We prepared three minerals, olivine, antigorite and saponite. The weathering simulation of solar wind protons was achieved using ion implantation device at the Wakasa Wan Energy Research Center (WERC). The total amount of implanted H₂⁺ with 10 keV was 10¹⁸ ions/cm². The reflectance spectra were measured by FTIR at WERC, and the TEM observation was at Kyoto University. In our simulation, vary with previous study, olivine irradiated H⁺ ions shows reddening and darkening like laser-irradiated olivine. On the other hand, another samples did not show large change. Here we report the TEM observations of H₂⁺ irradiated samples.

References: [1] Nesvorny, D., et al., (2005) *Icarus*, 173, 132-152. [2] Sasaki, S., et al., (2001) *Nature*, 410, 555-557. [3] Hapke, B., et al., (2001) *JGR*, 106, 10039-10073. [4] Yamada, M., et al., (1999) *EPS*, 51, 1255-1265.

キーワード: 宇宙風化, 小惑星, はやぶさ 2

Keywords: space weathering, asteroid, Hayabusa 2, np-Fe

砂標的への低速度衝突クレーター形成実験：重力依存性と真空度依存性 Experimental study on low velocity impact onto granular media: Dependence on gravity acceleration and ambient pressure

木内 真人^{1*}; 中村 昭子¹
KIUCHI, Masato^{1*}; NAKAMURA, Akiko¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Kobe University

小天体表面における重力加速度は微小であり、表面の衝突クレーターサイズが重力スケーリングまたは強度スケーリングのいずれに従うのかわかっておらず、またこれまでに得られたスケーリング則が適用できるのかも未知である。クレーターサイズ頻度分布から天体表面の進化の過程を推定するためには、クレーター直径の重力依存性を理解することが重要である。しかし、重力がクレーター形成に与える影響はこれまで詳細には確かめられていない。高速度衝突実験として模擬高重力下 (*Schmidt and Housen, 1987*)、模擬低重力下 (*Gault and Wedekind, 1977; Takagi et al., 2007*) での実験例があるが、それぞれ重力依存性について異なる結果が得られており、これらの結果の違いの原因については明らかになっていない。

我々は、標的を定荷重ばねで吊るしながら落下させることで標的にかかる重力加速度を模擬的に小さくする装置を開発し、重力加速度は 0.25-1 G の範囲で実験を行った。標的にはシリカサンド (粒径 $\sim 140 \mu\text{m}$) とガラスビーズ (粒径 $\sim 500 \mu\text{m}$) を用い、直径 8 mm のステンレス球弾丸を衝突速度 $1-4 \text{ m s}^{-1}$ の範囲で衝突させた。また、実験は 1 気圧下で行った。その結果、0.5-1 G の範囲でクレーター直径はシリカサンドでは重力加速度の -0.188 ± 0.008 乗に比例し、ガラスビーズでは 0.183 ± 0.007 乗に比例した。また、これらの重力依存性は先行研究の高速度衝突における結果 (*Schmidt and Housen, 1987; Gault and Wedekind, 1977*) と調和的であった (木内他、2014 年日本惑星科学会秋季講演会)。

我々は、新たに標的容器を自由落下させた状態で実験を行った。このとき標的にかかる重力加速度は 0.01 G であった。しかし、この場合、上記の重力依存性から予想されるクレーターサイズよりも小さいクレーターが形成された。粉体の固着力を理論式 (*Rumpf, 1970*) により見積もったところ、本実験条件では 0.01 G で形成されるクレーターサイズに対して固着力の影響が無視できなくなっていることがわかった。一方で、真空チャンバ内で同様の実験を行ったところ形成されるクレーターは大気圧下よりも大きくなった。0.01 G 下でクレーターが大きくなりきらなかった原因として、大気圧が結果に影響を与えている可能性もあることがわかった。

上記の大気圧の影響を評価するうえで、大気がクレーター形成に与える効果を詳しく知る必要がある。*Schultz (1992)* では $10^3 - 10^5 \text{ Pa}$ の範囲で真空度を変化させて粉体標的に対して衝突クレーター形成実験を行い (衝突速度 $\geq 1.5 \text{ km s}^{-1}$)、真空度が小さくなるにつれクレーター体積が大きくなるという結果を得ている。これまでの衝突実験の多くは $1-10^3 \text{ Pa}$ 程度の真空度で行われたものであり、これらの実験結果を実際の小天体表面のような超高真空下に対して適用できるかどうかは未知である。また、どのようなメカニズムで大気の影響を及ぼすかについては明らかではない。

我々は、真空度を $1-10^5 \text{ Pa}$ の範囲で変化させ、低速度域で衝突クレーター形成実験を行った。標的にシリカサンド (粒径 $\sim 140 \mu\text{m}$) を、弾丸に直径 8 mm のステンレス球を用い、衝突速度は 2.5 m s^{-1} で衝突させた。その結果、大気圧が小さくなるにつれクレーター直径は大きくなり、高速度域の先行研究と同様の傾向が見られた。この結果の要因として、標的粒子の運動に対する大気の抵抗の変化や標的内の内部摩擦の変化などが考えられる。クレーター直径は、標的粒子の内部摩擦角が小さいと大きくなるという傾向が報告されている。我々が大気圧を変えて安息角 (\sim 内部摩擦角にほぼ等しいと考えられる) を測定した予備的実験では、大気圧を減ざると安息角が小さくなる傾向が見られた。逆に超高真空下では内部摩擦角が 1 気圧下よりも増大するという実験結果も報告されている (*Perko et al., 2001*)。真空度による内部摩擦角の変化の原因は特定されていないが、大気圧の変化は、内部摩擦角の変化を介してクレーターサイズに影響を及ぼしている可能性が示唆される。今後これらの要因についてのさらなる調査と考察を行い、結果を報告する。

キーワード: 小惑星, 衝突クレーター, 室内実験, 微小重力, 真空度

Keywords: Asteroids, Impact craters, Laboratory experiments, Microgravity, Ambient pressure

粗粒媒質でのクレーター形成実験：イトカワ表面年代への応用 Cratering experiments on coarse-grained targets: application to the resurfacing age of a rubble-pile asteroid Itokawa

巽 瑛理^{1*}; 杉田 精司²
TATSUMI, Eri^{1*}; SUGITA, Seiji²

¹ 東京大学複雑理工学専攻, ² 東京大学地球惑星科学専攻

¹Dept. of Complexity Science and Engineering, Univ. of Tokyo, ²Dept. of Earth and Planetary Science, Univ. of Tokyo

背景と目的: はやぶさ探査によって得られた近接画像から、小惑星イトカワが衝突の痕跡である可能性が高い円形の窪地を有することが分かっている (Hirata et al., 2009). クレーター数密度からは、表面年代の推定が可能である. 小惑星表面の年代分布は小惑星力学的進化を理解するための非常に重要な制約条件となる. クレーター表面年代はクレーターサイズのスケージングに大きく影響を受けるため、正確な年代を得るには正確なクレータースケージング則が必要である. しかし、イトカワのようにボールドーに覆われた表面で点源近似が成り立つのか、また、重力則か材料強度則どちらを用いるのが適当であるのかといった多くの不確定要因を孕んでいる. Michel et al. (2009) では強度スケージング則を用いた年代推定により、75Myr-1Gyr という幅広い推定値を得ている. その一方で、はやぶさ探査で持ち帰られたサンプルから求められた放射年代も、宇宙線照射年代 < 10Myr (Nagao et al., 2011; Meier et al. 2014) から Ar 脱ガス年代の 1.26 ± 0.24 Gyr (Park et al., 2014) まで様々な値の年代が得られている. 小惑星イトカワのクレーター年代を正確に推定することは、これらの放射年代を力学的な現象と結びつけ整合的に解釈するためにも重要である. そこで、本研究ではボールドーで覆われた天体表面でのクレーターサイズが衝突条件に対してどのように変化するか実験的に検討し、更にラブルパイル天体と考えられているイトカワのクレーター年代推定を行った.

衝突実験: 東京大学の縦型 1 段式軽ガス銃を用いて低速度衝突実験 (70 - 200 m/s) を、ISAS の縦型 2 段式軽ガス銃を用いて高速度衝突実験 (1.5-5.3 km/s) を行った. インパクターはそれぞれ直径 10mm と 4.6mm のポリカ製弾丸である. 標的として、10mm 程度のパミスを模擬ボールドーとし、ガラスビーズ ($\sim 200 \mu\text{m}$) を模擬レゴリスとして用い、ボールドーのみの標的と基層がレゴリスでその上にボールドーがある標的条件について実験を行った. 実験で形成されたクレーターのリム直径を計測した.

実験結果: 弾丸の速度が大きく、 $E_k \gg Q_D^* m_t$ (E_k は衝突エネルギー、 Q_D^* はカタストロフィック破壊の閾値、 m_t は標的粒子質量) の場合には、砂の重力則 (Schmidt and Housen, 1987) に一致する. しかし、 $E_k \sim Q_D^* m_t$ の条件では、 $\pi_2 - \pi_R$ 平面上で傾きが大きく変わることが分かった. つまり、弾丸の衝突エネルギーが標的構成粒子の破壊エネルギーを上回ると重力則から乖離し衝突エネルギーに対してクレーター径は緩慢に成長する. しかし、エネルギーがある値を超えると急に砂の重力則に漸近する様子が窺える.

考察: 実験の結果は、ボールドーで構成される標的へのクレーター形成機構は衝突エネルギーと標的破壊エネルギーの大小関係によって次のように分類できることを示唆している. (1) $E_k < Q_D^* m_t$ のとき、運動量保存の場で決定される初期速度を持った重力則に従うクレーターリング (Guettler et al., 2012). (2) $E_k \geq Q_D^* m_t$ のとき、弾丸は表面の標的粒子を破壊し、破碎された標的破片が等方的に飛散することによって、標的媒質へ輸送される運動エネルギーが結果的に少なくなる. (3) $E_k \gg Q_D^* m_t$ のとき、弾丸は深くまで貫入するため、ある程度の深さで破碎された破片群は周囲の媒質に運動エネルギーを輸送することで、また掘削効率が上がり、重力則に漸近すると考えられる.

実験結果から、標的と同程度のサイズのボールドーで構成される標的に形成されるクレーター径はレゴリスや砂の重力則に近いが、弾丸の衝突エネルギーと標的の破壊エネルギーの大小関係によっては最大で 40% 程度形成効率が落ちることが分かった. これは実証的にアーマリング効果が確認できたと言える.

イトカワの内部が、その表面に見られるようなボールドーで構成されている場合には、クレーター径は重力則とアーマリング効果によって減効率された重力則の中間的な値となることを本研究の実験結果は示唆する. このクレーター径見積もりをイトカワ表面に観測された 100 m 以上のクレーター候補地形に対して適用し表面年代を求めると、0.4-8.4 Myr という値が得られる. この年代は宇宙線照射年代 (Nagao et al., 2011; Meier et al., 2014) やスペクトル分析による年代推定 (Koga et al., 2014) の 10Myr 以下と同程度である. これは、Nagao et al. (2011) によって提起されたレゴリスの宇宙空間への飛散による時々刻々の表面更新説と大きく矛盾するものではないが、宇宙線照射の数 mm の深さスケールに対して、クレーター年代は深さ 10m 程度の更新のタイムスケールを表すと考えられることから、これらの年代の一致は数 Myr 前にイトカワに全球的に表面を更新するイベント、例えば破壊と再集積といったイベントが起こった可能性を示唆している.

キーワード: 小惑星, イトカワ, 衝突実験, ラブルパイル, クレーター, 年代推定
Keywords: asteroid, Itokawa, impact experiment, rubble-pile, crater, age estimation

氷・石英砂混合標的に対する高速度クレーター形成実験 Hypervelocity cratering experiments on ice-silicate mixture targets

高野 翔太^{1*}; 荒川 政彦¹; 保井 みなみ¹; 長谷川 直²
TAKANO, Shota^{1*}; ARAKAWA, Masahiko¹; YASUI, Minami¹; HASEGAWA, Sunao²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 宇宙航空研究開発機構

¹ Graduate School of Science, Kobe University, ² Japan Aerospace Exploration Agency

はじめに: 氷衛星や小惑星ケレスの地殻は氷・岩石混合物からなると言われている。特に小惑星ケレスは、2015年3月にNASAの小惑星探査機Dawnにより初めて近接撮像が行われる予定である。ケレスは、小惑星帯のメインベルトにあるので、その氷地殻には、様々なタイプの小惑星が衝突してクレーターを作る。衝突クレーターのサイズや形状は、衝突物質や地殻の種類、さらに衝突速度や地殻の表層構造により大きく変化する。そこで、ケレス表面のクレーターを調査することにより、衝突した小惑星の種類やその頻度、または、ケレス地殻の岩石含有率や表層構造などに関する情報を得ることができる。このような調査を実現するには室内実験によって、氷・岩石粒子混合物表面に形成されるクレーターの特徴やその衝突体物質の影響を明らかにする必要がある。これまで純氷に対しては、広い速度範囲で数種類の弾丸を用いてクレーター形成実験が行われているが、氷・岩石混合物に対しては限られた条件でしか実験が行われてきていない。特にケレスは小惑星帯に位置するので、数km/sの高速度で衝突実験を行う必要がある。また、氷に対する岩石の割合も質量比0~50wt.%の範囲でしか実験されておらず、ケレスのような氷・岩石混合物からなる天体を模擬した実験としては不十分である。そこで本研究では、1km/sを超える速度領域で、密度とサイズの異なる数種類の弾丸を用いて、岩石含有率を系統的に変化させた氷・岩石混合試料へのクレーター形成実験を行ったので、以下に報告する。

実験方法: 実験は神戸大学の二段式水素ガス銃を用いて行った。ケレス氷地殻を模擬した氷・岩石混合試料は、粒径100 μ m、もしくは、500 μ mの石英砂と水を混ぜて円筒金属容器に入れた後、冷凍庫で凍らせて作製した。水分量は、20wt.%から2.5wt.%まで変化させており、20wt.%は砂粒子間をすべて水で満たしているが、それ以外は、石英粒子間に空隙を多く残したままになっている。従って、水分量が、20から2.5wt.%と減るにつれて、粒子間の空隙量は多くなり、氷により石英粒子間の結合力を維持している標的自体の強度もそれにつれて小さくなっている。弾丸には、直径2mm(アルミ、ジルコニア、チタン、銅、ステンレス)と直径1mm(アルミ、チタン、ステンレス)の8種類の金属球を用いた。これらの弾丸を速度1.5~7.0km/sで発射した。実験では、標的中の氷を融かさないうえに、標的をチャンバー内に設置した後、直ぐに断熱のため150~230Paまで減圧した。実験中の標的温度は、約-15℃であったと推定される。衝突時のイジェクタ放出の様子は、高速ビデオカメラで撮影した。また、回収した標的上に作られたクレーター形状は、ノギスとレーザー変位計で計測した。

実験結果: 形成されたクレーターは、水分率20wt.% (空隙率0%)の標的では衝突点付近にPitと呼ばれる円錐型の衝突痕領域を持ち、その周りにSpallと呼ばれる表面がはがれた様な領域を持っていた。一方、水分率12.5wt.%以下(空隙率12%以上)の標的ではSpall領域を持たなかった。高速ビデオカメラの動画から、PitとSpallの両領域から放出される破片の特徴を特定することができた。Pit領域からのイジェクタは、クレーター形成の初期に放出され、その形状は砂上に形成される逆円錐形のイジェクタカーテンと同様のものであった。また、Spall領域からのイジェクタは、クレーター形成の中期に塊となって不連続に放出された。さらに、Pit領域からは、クレーター形成の後期にピラー状の放出物が弾丸の衝突方向に連続的に放出される様子が観察できた。

Hiraokaらは、Spall直径の岩石含有率依存性を調べ、その結果、含有率50wt.%までは岩石含有率大きくなるにつれてSpall直径が小さくなることを報告している。一方、今回の実験では、岩石含有率80wt.% (水分量20wt.%)の実験を行ったが、そのSpall直径は、彼らの含有率50wt.%のSpall直径とほぼ一致し、50wt.%までの直径減少傾向が、80wt.%までは続かないことがわかった。今回の実験のPit直径は水分量20% (空隙率0%)から2.5wt.% (空隙率42%)の間で直線的な増加傾向が見られる。これは水分量20%から2.5wt.%の間で石英粒子間の空隙を埋める氷の量が減り、その結果、標的の力学的強度が連続的に小さくなるからだと考えられる。Pit深さHとPit直径dの比(H/d)は、水分量が20wt.% (空隙率0%)から2.5wt.% (空隙率42%)へと減少すると伴に小さくなった(空隙率は増加)。この比は、Burchellの純氷に対する実験結果やHiraokaたちの水分量100から50wt.%までの氷・岩石混合物(空隙率0%)に対する実験結果と比較すると明らかに小さな値となり、水分量の減少と伴にH/dも単純減少する傾向にあることがわかった。

キーワード: 氷天体, 衝突, 実験, 含水率, 強度支配域, クレーター形成

Keywords: icy body, impacts, experiment, water content, strength regime, cratering

衝突クレーター形成に伴うイジェクタ速度分布に関する実験的研究 Ejecta velocity distribution for impact crater formed on quartz sand: Effect of projectile density on crater scaling law

辻堂 さやか¹; 荒川 政彦^{1*}; 鈴木 絢子²; 保井 みなみ¹; 松榮 一真¹; 高野 翔太¹; 長谷川 直²
TSUJIDO, Sayaka¹; ARAKAWA, Masahiko^{1*}; SUZUKI, Ayako²; YASUI, Minami¹; MATSUE, Kazuma¹;
TAKANO, Shota¹; HASEGAWA, Sunao²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 宇宙航空研究開発機構 / 宇宙科学研究所

¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science

衝突クレーターの形成は、太陽系の形成、進化過程において普遍的な現象である。天体衝突による表層進化の研究を行う上で、衝突クレーターに関するスケール則が必要となる。スケール則を用いることで、実験室規模の実験結果を実際の天体規模のクレーター形成過程に適用することが可能となる。本研究では、スケール則に対する弾丸密度の影響を調べるため、 $1.1 - 11 \text{ g cm}^{-3}$ の異なる密度をもつ 8 種類の弾丸を用いて、衝突速度 $100 - 200 \text{ m s}^{-1}$ の低速度域における衝突クレーター形成実験と、衝突速度の影響を調べるためのポリカーボネイト弾丸を用いた $1.5 - 7 \text{ km s}^{-1}$ の高速度域における衝突クレーター形成実験を行った。

各弾丸、各衝突速度において得られたエジェクタ速度分布は、 π スケール則による式、 $v_0/\sqrt{gR}=k_2(x_0/R)^{-1/\mu}$ により整理できた。 v_0, g, R, x_0 はそれぞれ放出速度、重力加速度、クレーター半径、放出位置を表し、 k_2 および μ は主にターゲットによる定数である。 μ は弾丸密度に依存し、低密度弾丸における $0.31 - 0.43$ から高密度弾丸における $0.6 - 0.7$ まで、弾丸密度とともに大きくなることがわかった。また、高速度域において得られた速度分布から、衝突点近傍の $x_0 < 4a$ (a は弾丸半径) の範囲では点源近似が成り立たず、速度分布がベキ乗則に従わないことがわかった。

一方、クレーターサイズに関する π スケール則から、低速度域では μ が 0.55 と求まったが、この値は、同じ速度域において各弾丸に対してエジェクタ速度分布から求めた μ の平均値と近い。また、高速度域ではクレーターサイズの π スケール則から求まった μ は 0.44 であり、 μ には衝突速度依存性があると考えられる。

エジェクタ粒子の放出角度 (θ) は、衝突点付近では $30 - 48^\circ$ の間で大きくばらつくが、衝突点から離れるとばらつきは小さくなり、さらにその値は小さくなる。衝突速度が低速度では $x_0 > 0.6 R$ において、放出角度は $30 - 40^\circ$ と放出位置によらずほぼ一定となった。一方、衝突速度が高速度では $x_0 = 0.7 R$ を越えると放出角度が大きくなることがわかった。

エジェクタカーテンの角度は、エジェクタ速度分布と放出角度の両者によって決まる。今回の実験では、弾丸密度の増加とともに 43° から 63° まで大きくなることがわかった。

この実験で得られた結果を、クレーター形成時の掘削流を表した Z モデル (Maxwell, 1977) と比較すると、実験により得られた μ と θ との関係は Z モデルでは説明できないことがわかった。そこで点源が、ある深さ d を持つ場合のクレーター形成過程にも適用できる拡張 Z モデル (Croft, 1980) を用いて比較した所、すべての実験結果に対する μ 及び θ は適切な Z と d によって説明可能であることがわかった。さらに、点源深さを確認するために Quarter-space 実験により、クレーター形成時における実際の地下の掘削流を調べた。その結果、拡張 Z モデルから得られた流線と実験から調べた掘削流を比べると、流線の始点は必ずしも一点であるとは限らず、線滴に分布している可能性があることがわかった。

キーワード: 衝突過程, レゴリス, クレーター形成, 小惑星表面, イジェクタカーテン, スケール則

Keywords: Impact processes, Regoliths, Cratering, Asteroid surfaces, Ejecta curtain, Scaling Law