

機関番号：82101

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20740249

研究課題名 (和文) 太陽系始原天体でおこる衝突現象のその場観測手法を用いた実験的研究

研究課題名 (英文) An experimental study based on direct observations of impact cratering for impact phenomena on primordial bodies in the Solar System

研究代表者

山本 聡 (YAMAMOTO SATORU)

独立行政法人国立環境研究所・地球環境研究センター・NIES ポスドクフェロー

研究者番号：20396857

研究成果の概要 (和文)：レーザー光を用いた衝突クレーター形成過程の直接観測手法の開発を行い、それを用いて衝突掘削過程における標的物性効果および斜め衝突効果について調べた。衝突掘削形状の増加率は、衝突直後において時間に対してべき乗則に従うが、掘削後半段階ではべき乗則からずれることがわかった。また、その冪指数および冪乗からのずれ度合いにおいて物性効果が関与することを明らかにした。さらに斜め衝突の場合、衝突掘削領域の形状は衝突直後においては楕円形状になるが、掘削後半段階には円形構造に近づくことを明らかにした。最後にこれらの結果をもとに Maxwell Z モデルを用いて衝突クレーター掘削過程に対するスケールリング則の定式化を行った。

研究成果の概要 (英文)：I have developed the direct observation method with a laser to study the effects of target material properties and impact angles on the excavation processes of impact cratering. I found that the increase rate of the excavation cavity at early times follows a power-law relation, but the data at later times deviates from the power-law relation. I also found that the power-law exponent at early times and the degree of the deviation from the power-law at later times depend on the target material properties. In addition, the shape of the excavation cavity at oblique impacts is elongated at early times, but the shape at later times approaches to near circular. Based on Maxwell Z-model with these results, I have formulated a scaling model for the transient crater growth.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：惑星起源・進化, 衝突物理

1. 研究開始当初の背景

惑星や月での衝突クレーター形成に対する模擬実験や微惑星、彗星でおこる衝突を模擬した実験はこれまで数多く行われてい

た。一方、これらの実験結果を実際の天体衝突現象に応用するには、スケールリング則が重要となる。月面上のレゴリス層や微惑星・彗星を想定したスケールリング則では、これらの

天体が微小な塵の集合体であると考えられていることから、粉体標的に対するクレーター形成実験結果を基にして定式化されている。一方で、このようにして定式化されたスケーリング則は、粉体標的の種類によって結果が異なる。その為、これらのスケーリング則に対して標的物性効果を考慮する必要がある。しかし、標的物性効果がスケーリング則にどのように関与するのかはよく分かっていない。これを明らかにするにはクレーター形成過程の直接観測を行い、それに基づいて物性効果依存性について調べる必要がある。しかし、従来の衝突クレーターに関する実験では、クレーターの最終形状のみ解析するという手法が主であった為、クレーター形成過程における物性効果依存性については調べられていない。

また、実際の天体衝突のほとんどは斜め衝突であるが、現在用いられているスケーリング則では衝突角度依存性に対する研究が乏しいのが現状であった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、粉体に対する衝突実験においてレーザー光を照射し、その様子を高速ビデオカメラで撮像することにより、掘削および放出過程の直接観測手法の確立を行うことを目的としている。また、この手法を用いて様々な粉体標的に対して掘削過程の直接観測を行い、クレーター形成過程における標的物性効果および斜め衝突効果について調べることを目的とした。

3. 研究の方法

レーザー光を用いたクレーター形成過程の直接観測を行う為に、まず粉体標的（ガラスビーズや乾燥砂）に対してシート状レーザー光を標的にに対して垂直照射する。この状態で弾丸を標的に衝突させると、衝突によって形成される掘削領域が時間と共に拡がり、それに伴いレーザー光と標的の接線的位置が変化する。この様子を標的の斜め上部に設置された高速ビデオカメラを用いて撮像する（実験は暗転状態で行う）。この手法をもちいて、撮像されたレーザー形状から掘削領域の断面形状を推定することが可能となる。また、高速ビデオカメラを用いることで、各時間における掘削領域の形状が時間とともにどのように変化するかを知ることが可能となる（図1）。

この方法を用いて、様々な標的に対して実験を行い、掘削領域形状の時間発展が標的物性値（空隙率、内部摩擦角、音速等）に対してどのように変化するかを測定を行う。また衝突速度や弾丸の種類を変えてそれらの依存性も明らかにする。

次に、衝突角度依存性について調べるため

に、弾丸衝突角度が斜めの場合について衝突掘削領域の直接観測を行う。衝突掘削領域の3次元形状を測定する為に中心波長が異なる二種類のレーザーを、交互にかつ等間隔に並行照射した状態で衝突実験を行う（レーザーは複数本同時使用する）。

最後に、得られた実験結果をスケーリング則に対して応用するために、従来の衝突クレーターの理論研究で用いられてきた Maxwell Z モデル（クレーター形成過程の掘削流を流体近似で取り扱った解析モデル）を用いて定量的評価を行う。これにより掘削過程において標的物性効果がどのように関与するかについての物理素過程の定量的解釈を行う。

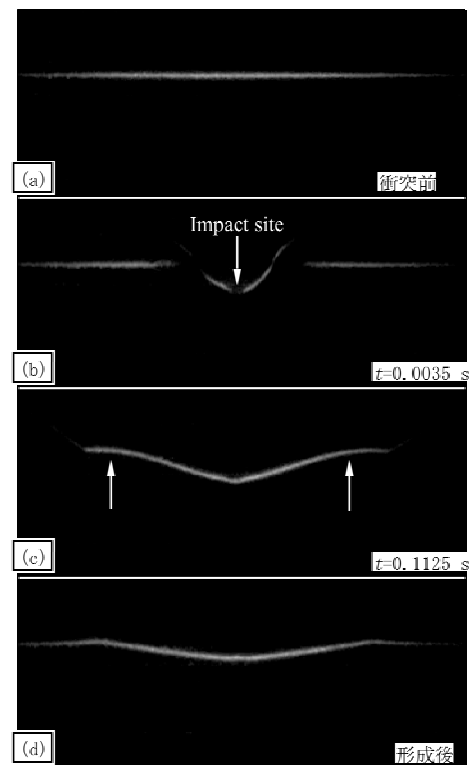


図 1: レーザーを用いた直接観測の様子。t は衝突からの時間。(c)の矢印はクレーターの縁を示す。

4. 研究成果

(1) 垂直衝突における掘削領域の時間発展について本レーザー光による方法を用いて測定を行った。本研究計画により開発した一段式簡易ガス銃（Φ6mm 弾丸加速装置）を用いて弾丸を 50-300 m/s に加速し、標的（粒径の異なるソーダライムガラスビーズおよびサイズを揃えた乾燥させた砂）に衝突させた。標的にはレーザー光が照射されているため、クレーター形成に伴ないレーザー光と標的・放出物の接線的位置が変化する（図1）。この様子を高速ビデオカメラを用いて撮像

し、放出物が標的外に放出される位置の時間変化の測定を行った。その結果、掘削領域の直径は衝突直後においては、時間に対してべき乗則に従って増加することがわかった。一方、クレーター形成の後半段階においてはべき乗則から外れ、直径増加率が指数関数的に減衰することを明らかにした(図2)。

また、ソーダ石灰ガラスビーズの平均粒径の違いによって標的物性値(空隙率、内部摩擦角、音速)が変化することを利用して、異なる粒径のガラスビーズを用いて、同測定を繰り返した結果、初期段階の冪指数の値および、後半段階のべきからのずれ(減衰率)は物性依存性を示すことがわかった(図3)。

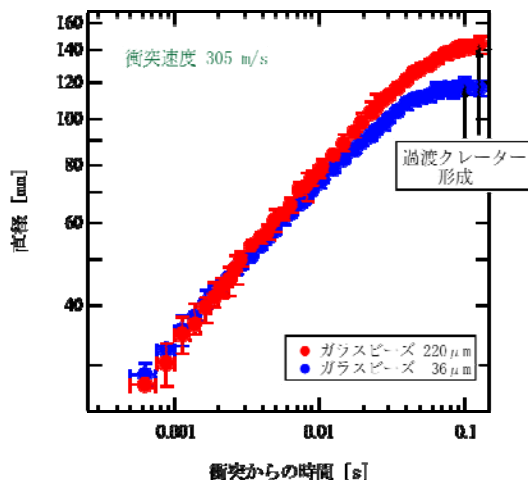


図2：掘削領域の直径と深さの時間発展。

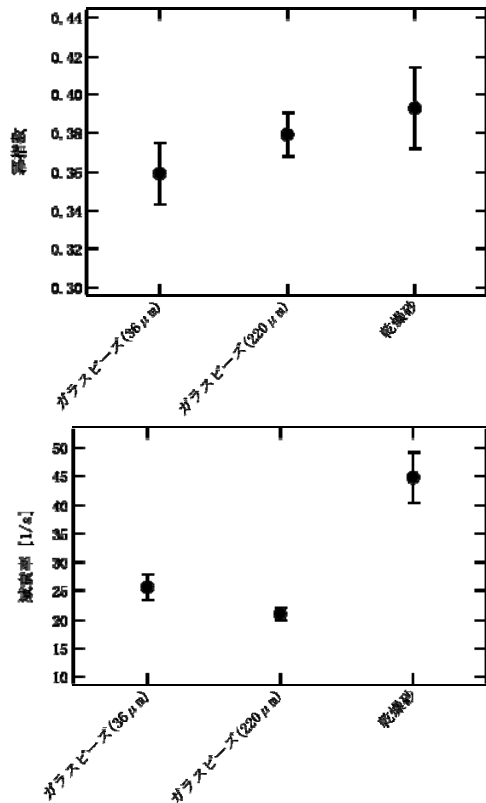


図3：冪指数と減衰率の物性との関係。

(2) 次に、このレーザー手法を用いてクレーター形成に伴う衝突放出物の速度分布について測定を行った。その結果、衝突点近傍での放出物の速度は衝突点からの直線距離に対してべき乗則に従い減衰することがわかった(図4)。一方クレーター形成の後半段階では、放出速度が急激に減衰することを明らかにした。また、標的物性値が異なる粉体標的(粒径の異なるソーダ石灰ガラスビーズ)を用いて同測定を繰り返した結果、距離に対する冪指数は物性依存性を示すことがわかった。

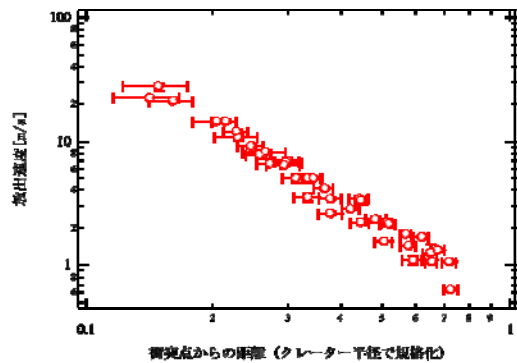


図4：放出速度と衝突点からの距離の関係。

(3) 次に、斜め衝突時のクレーター形成過程の直接観測を行うために、複数本のレーザーを用いた3次元形状直接観測法への拡張を行った。標的にはあらかじめ7本のレーザー光(赤色および緑色)が等間隔で照射されており、掘削領域が広がるにつれて照射レーザー光の形状が変化する。このレーザー光の時間変化を高速ビデオカメラを用いて撮像を行った(図5)。レーザー光の各時間における形状変化とスケール画像との比較および解析を行うことにより、実際の掘削領域の深さ推定を行った。この解析を、7本のレーザー光に対して行い、各時間における掘削領域の3次元形状について導出を行った。この種の解析を各時間の画像に対して行うことで、最終的に斜め衝突時における衝突掘削領域の形状に対する時間変化を明らかにした。その結果、衝突直後(数 m sec)の掘削領域の形状は衝突下流側に延びた楕円形状を示すが、時間と共に掘削領域が広がるにつれ、掘削形状は円形に近づくことがわかった。また、形状の円形度を各時間ごとに導出しその時間発展について調べたところ、衝突直後は円形度0.6-0.7程度にあるのに対して、過渡クレーター形成時には円形から一割程度しかずれていないことが明らかとなった(図6)。また、過渡クレーター形成後の崩壊過程では円形率は大きくは変化しなかった。以上のこ

とから、本研究のように衝突速度数百 m/s 程度の斜め衝突の場合であっても、形成されるクレーターの形状は円形を保つことが明らかとなった。天体上の衝突クレーターの画像解析において、クレーター形状のみでは衝突角度に制約条件を与えることが容易でないという事が明らかとなった。

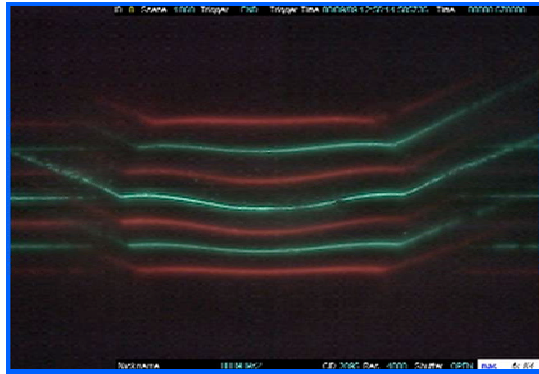


図5：レーザー測定法の3次元への拡張。弾丸は左から角度45度で中央の緑のレーザー光に沿って入射。

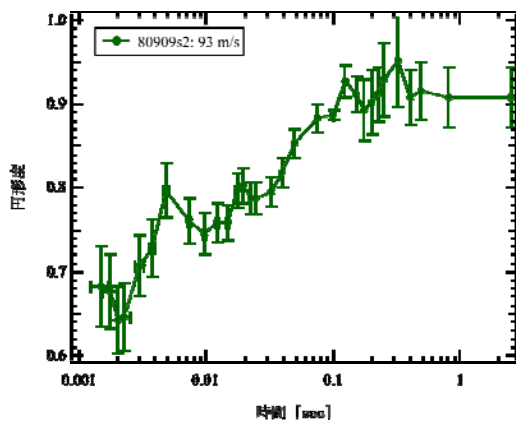


図6：円形度の時間発展。

(4) 最後に、これらの結果を基にして、Maxwell Z モデル（掘削流に対する流体近似モデル）において粒子速度場の強度が時間に対して指数関数的に減衰すると仮定し、放出物速度の時間発展式を導出し、本研究で得られたデータとの比較を行った。その結果、この新しいモデル式は、本実験で得られる様々な標的物性に対して、放出物速度の時間発展をよく再現することが分かった。また、上記 Maxwell Z モデルを基にして、掘削深さと放出堆積距離の関係について導出を行った（図7）。この掘削深さに対するモデル式の実際の天体クレーターへの応用として、月周回衛星 SELENE（かぐや）搭載の連続分光測定器スペクトルプロファイラによって得られた結果との比較を行った。月面衝突クレーター周

辺の堆積物の特定鉱物スペクトルの空間分布について、本研究で得られたモデル式を応用することで、特定スペクトルを持つ物質の掘削深さの推定を行い、特定スペクトル物質の衝突前の起源への推定を行った。またこれらの比較から、モデル式で用いられる変数の最適化を行い、最終的に、衝突クレーターに対する物性効果を考慮したスケリング式の定式化を行った。その結果を基にして、クレーター形成過程における標的物性効果の物理解釈を行い、天体スケールでの衝突クレーター形成過程における標的物性効果依存性について明らかにした。

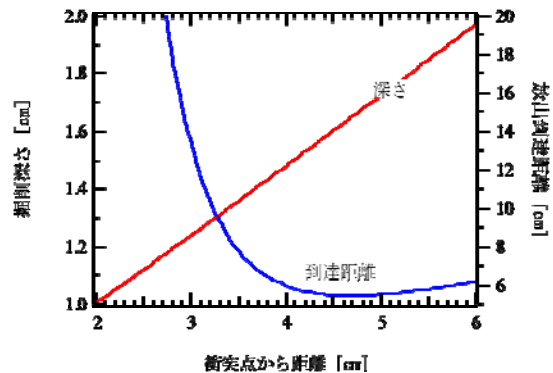


図7：掘削深さと放出堆積距離の関係（実験室スケールの場合）。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計3件）

- ① S. Yamamoto, R. Nakamura, T. Matsunaga, Y. Ogawa, Y. Ishihara, T. Morota, N. Hirata, M. Ohtake, T. Hiroi, Y. Yokota, J. Haruyama, Possible mantle origin of olivine around lunar impact basins detected by SELENE, Nature Geoscience, 査読有, Vol. 3, 2010, pp. 533-536.
- ② S. Yamamoto, H. Kobayashi, K. Wada, H. Kimura, M. Ishiguro, T. Matsui, Collisional Process on Comet 9/P Tempel 1: Mass Loss of its Dust and Ices by Impacts of Asteroidal Objects and its Collisional History, Earth Planets Space, 査読有, 2010, Vol. 62, pp. 5-11.
- ③ S. Yamamoto, O.S. Barnouin-Jha, T. Toriumi, S. Sugita, T. Matsui, An empirical model for transient crater growth in granular targets based on direct observations, Icarus, 査読有, Vol. 203, 2009, pp. 10-319.

〔学会発表〕（計8件）

- ① 山本聡, かぐや搭載スペクトルプロファ

イラが明らかにした月内部からのカンラン石表面分布とその起源, 日本惑星科学会, 2010年10月7日, 名古屋大学本山キャンパス野依記念学術交流館(愛知県).

- ② 山本聡, かぐや搭載スペクトルプロファイラによる月表面におけるオリビン全球分布, 日本地球惑星科学連合大会, 2010年5月25日, 幕張メッセ国際会議場(千葉県).
- ③ 山本聡, かぐや搭載スペクトルプロファイラによる月面全球オリビン探査, 第10回宇宙科学シンポジウム, 2010年1月7日, 宇宙科学研究所相模原キャンパス本館2階会議場(神奈川県).
- ④ 山本聡, 月周回衛星かぐや搭載スペクトルプロファイラで得られた大量分光データに対する特定スペクトル抽出ソフトの開発, 日本惑星科学会, 2009年9月28日, 東京大学本郷キャンパス工学部2号館講義室(東京都).
- ⑤ 山本聡, かぐや搭載スペクトルプロファイラを用いた大量分光データに対する鉱物自動判別ソフトの開発とその適用, 第42回月・惑星シンポジウム, 2009年8月6日, 宇宙科学研究所相模原キャンパス本館2階会議場(神奈川県).
- ⑥ 山本聡, Collisional and orbital history on Comet 9/P Tempel 1, 日本地球惑星科学連合大会, 2009年5月19日, 幕張メッセ国際会議場(千葉県).
- ⑦ 山本聡, クレーター形成過程のその場観測 2: 衝突角度依存性, 日本惑星科学会秋季講演会, 2008年11月02日, 九州大学箱崎キャンパス大講義室(福岡県).
- ⑧ 山本聡, Comet 9P/Tempel 1: Application of the Comet Standard Model to Observations of Its Dust, 5th Asia Oceania Geosciences Society, 2008年6月18日, Busan Exhibition & Conventional center, (韓国釜山).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 聡 (YAMAMOTO SATORU)
独立行政法人国立環境研究所・
地球環境研究センター・NIES ホ^oスト^oク^oフェ^oー
研究者番号: 20396857

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし