

分化天体からの鉄隕石放出条件の解明

○岡本千里¹, 荒川政彦², 長谷川直¹, 田端誠¹

¹宇宙航空研究開発機構, ²神戸大学大学院理学研究科

はじめに

天体の衝突現象は、惑星系形成を考える上で重要である。小惑星は、衝突により生じたその母天体の破片やその集合体である。月などの天体表面には多くのクレーターが存在するように、天体衝突は太陽系において普遍的な現象であると考えられる。

天体の衝突破壊現象を調べるために、現在まで太陽系で多く観測されている岩石質の小惑星の衝突現象について調べられてきた。岩石質小天体の中でも、天体の経験した熱履歴などにより天体の空隙率などの内部構造は異なる。そのため、現在まで、熱進化が進んだ密な岩石質小天体を模擬してガラスや玄武岩の衝突現象が調べられた [1,2]。また、熱進化があまり進んでいない始原的な小天体を考慮し、高空隙石膏やガラスビーズ焼結体などのポーラスな岩石質天体模擬物質への衝突実験、衝突破壊の数値シミュレーションなども行われた[3]。

一方、大型望遠鏡による地上観測から、小惑星は岩石質天体だけではなく、鉄成分を持つとされるM-type小惑星など多数の種類が見つかった。このような分光学的分類や地上で発見される鉄隕石などから、M-type小惑星は熱進化により分化した分化天体由来であると考えられている。分化天体とは、地球や火星のような金属コア-岩石マントル構造を持つ熱進化が進んだ天体である。小惑星では、分化天体として小惑星ベスタが挙げられ、内部に金属コアが存在する可能性が示唆されている。分化天体は、短寿命放射性核種の壊変熱により、内部から熱進化した結果、その内部構造は層構造など、複雑な内部構造を持つに至るとされる。近年、惑星系形成初期にこのような層構造天体は多数存在した可能性が示唆されている[4]。しかし、これまで分化天体の衝突破壊条件や、その破壊により形成されたマントルやコア物質の放出条件は系統的にはほとんど知られていない。これらの衝突破壊・破片の放出・再集積条件を調べることは、観測される小天体の多様性や、熱進化した小天体の衝突進化を知る上で重要である。そこで本研究では、層構造を持った分化天体模擬試料を作成し、その衝突破壊強度や破片速度などを調べた。

実験方法

分化天体を模擬した球形の層構造試料を用いて、衝突実験を行った。試料として、天体の金属コアを模擬し金属球を、また、岩石マントルを模擬してモルタルおよび石膏を使用し、金属コア-岩石マントルを持つ分化天体模擬試料を作成した。ここで使用した金属球（金属コア）の素材は高炭素クロム鋼鉄であった。鉄を主体とする金属は、低温脆性を起こすことが良く知られている。小惑星帯域は、200K以下の温度環境下にあるため、小惑星母天体の金属コアは低温脆性のため、容易に破壊して鉄隕石を生成する可能性がある。高炭素クロム鉄鋼は、常温でも脆性を示すため、低温下での金属コアの振る舞いを模擬するのに適している。この金属球単体の動的な衝突破壊強度は、先行研究により得られた低温下での鉄隕石の動的衝突破壊強度とよい一致を示した[5]。また、モルタルは岩石に近い動的衝突破壊強度を示すことが分かっており、懸濁液より硬化させるため、加工が容易という利点がある。また、石膏を用いた理由として、ガラスコア-石膏マントル試料を使用した Okamoto and Arakawa (2008)[6]の結果との比較を行うためである。

衝突条件によって、分化天体は、マントルおよび内部のコアの破壊度合いが異なると考えられる。そこで衝突条件として、単位質量あたりの運動エネルギー（エネルギー密度）を変化させた。また、エネルギー一定において、試料内部構造を変化させ、内部構造依存性を調べた。層構造試

料の内部構造として、コア質量比(R_{CM})を変化させた。コア質量比が増加するほど、金属コアサイズが大きく、熱進化が進んだ状態を模擬している。また、コア質量比が1の場合、金属球単体を示し、逆に0の場合、モルタル（もしくは石膏）球単体を示す。

衝突実験は、JAXA に設置された二段式軽ガス銃用い、真空下（ $\sim 10\text{Pa}$ ）で質量 $\sim 0.2\text{g}$ の球形のナイロン弾丸を速度4–7 km/s に加速して行った。衝突破壊過程は高速度カメラを用いてその場観察を行い、破片速度の計測を行った。撮影は、高速度カメラ HPV-1(Shimazu)および E-2(TMR)を用いて行い、衝突点付近の高速度の破片および衝突の反対点付近の低速度の破片速度を計測を行った（図1）。前者の撮影速度は1コマ $8\mu\text{s}$ – $32\mu\text{s}$ の範囲で、後者は 50 – $100\mu\text{s}$ の範囲で撮影を行った。

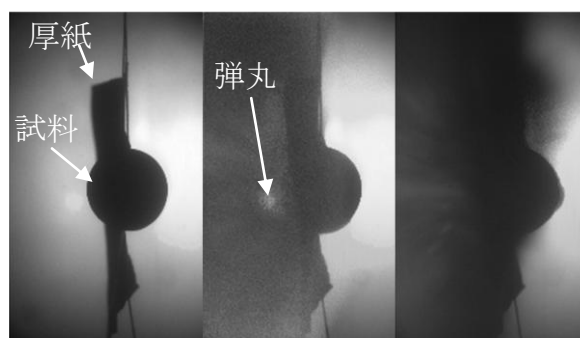


Fig.1 層構造試料の破壊過程：左写真は衝突前の試料を示す。衝突点近傍の高速度のエジェクタにより衝突破壊現象が観察できなくなることを防ぐため、試料上の衝突点から 90° の地点表面に厚紙を設置し、試料を覆っている。中央写真は、弾丸と試料の衝突直後の様子を示す。弾丸は左側から試料に衝突している。高速度のエジェクタが衝突点近傍から放出されていることが分かる。写真右はその後、衝撃波が試料を通過し、衝突破片が衝突点遠方からの飛散し始める様子を示している。

結果および考察

分化天体の衝突破壊条件を調べるために、金属球単体および金属コア–岩石マントルを持つ分化天体模擬試料を用いた衝突実験を行った。本研究で、金属球単体の動的な衝突破壊強度を調べたところ、先行研究により得られた低温下での鉄隕石の動的衝突破壊強度とよい一致を示した [5]。ここで、衝突破壊強度とは、最大破片質量がもとの総質量の $1/2$ になるために必要なエネルギー密度を示す [1]。実験で得られた金属球単体の衝突破壊強度は、 $7.0 \times 10^4 \text{J/kg}$ であった。これは、ガラスや玄武岩などと比較するとその衝突破壊強度はおよそ 100 倍大きい。また、石膏およびモルタルの破壊強度は、 $2.1 \times 10^3 \text{J/kg}$ 、 $1.8 \times 10^3 \text{J/kg}$ と同程度であった。モルタルおよび石膏と比較すると、金属球の破壊強度の方が 30 倍程度大きくなるのが分かる。

分化天体は、上記のような強度が異なる物質層を持ち、各物質間の物性の違いが衝突の結果に影響を及ぼすことが分かる。分化天体模擬試料では、与えられるエネルギー密度が一定の場合、その内部構造（コア質量比）によりマントルおよびコアの破壊度合いが大きく依存した。これは、コアとマントルへのエネルギー分配率がコア質量比に依存することによる。図2はコアへのエネルギー分配率とコア質量比の関係を示す。エネルギー分配率は、コアの破壊後の最大破片質量から、コアに与えられた運動エネルギーを見積もり、コアに分配された衝突エネルギーを求めている。ここでは金属コア–モルタルマントル試料、金属コア–石膏マントル試料の結果を示す。本結果より、衝突エネルギー一定の場合、コアサイズが大きくなるに従って試料全体におけるコアへのエネルギー分配量が増加することが分かる。コア質量比が小さい ($R_{CM} < 0.3$) とき、ほとんどコアが破壊されなかった。図2には、あわせて、Okamoto and Arakawa (2008)で調べられた石膏マントル–ガラスコア試料（微惑星熱進化の初期段階を想定した圧密焼結天体模擬試料）の結果も示す。この石膏マントル–ガラスコア試料に比べ、本実験で得られたモルタルマントル–金属コア試料の方が、同じコア質量比でもコアへのエネルギー分配率が 2-3 倍程度大きいことが分かる。一方、石膏マントル–金属コア試料の場合、石膏マントル–ガラスコア試料と非常に近いエネルギー

ギー分配率を示した。実験データを増やし、検証する必要があるが、エネルギー分配率は、マン
トル物質の違いを反映している可能性がある。

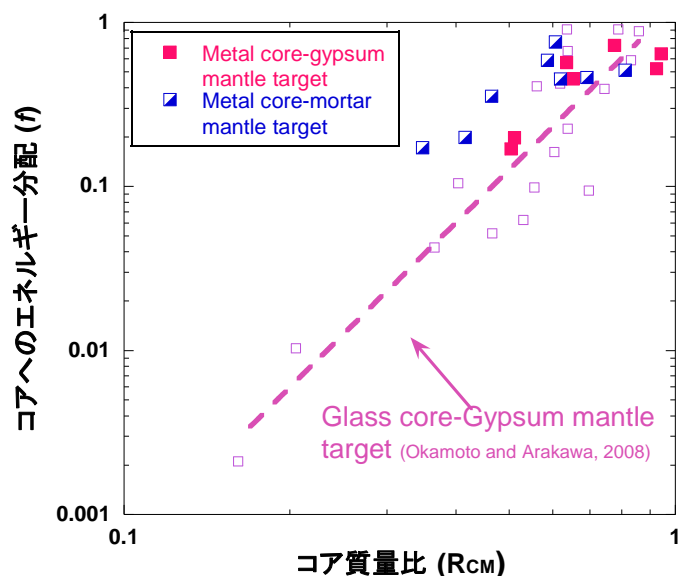


Fig. 2 エネルギー分配率と
コア質量比：コア質量比が1
のときは、金属球（もしくは
ガラス球）試料を示す。点線
は、Okamoto and Arakawa
(2008)により得られた石膏マ
ントルーガラスコア試料に
おけるガラスコアの破壊度
合いから見積もられたガラ
スコアへのエネルギー分配
率を示す。

衝突における石膏およびモルタルでのマンタル物性の違いを考慮するために、モルタルでの衝
撃波の減衰率を調べた（図3）。モルタルでの衝撃波減衰率は、マンタル層の厚みの2乗に反比
例して減衰する。一方、石膏中では、衝撃波は、およそマンタル層の厚みの～4乗に反比例して
減衰する。よって、石膏の場合、モルタルに比べ、コアに到達するまでに衝撃波がより減衰する
可能性がある。図2の石膏マンタルとモルタルマンタルの結果は、コア質量比が小さいほど顕著
である。コア質量比が小さい場合、マンタル層の厚みが弾丸サイズに比べ、厚くなる。よって、
衝撃波は、等圧核を超えると減衰が大きくなるため、マンタル層が厚いほど、マンタル層での衝
撃波減衰の効果が表れやすいと考えられる。一方、コア質量比が大きくなった場合、ほとんど衝
撃波減衰が見られず、マンタル物質の違いは観察しにくくなる可能性がある。

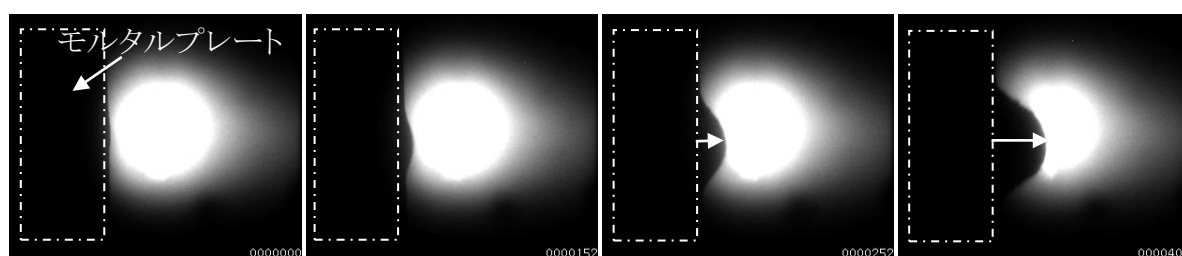


Fig. 3 モルタル中での衝撃波減衰率の計測：モルタルプレート（モルタルマンタル層を模擬）に、
写真左から弾丸を衝突させ、衝突の反対点から放出される破片速度を計測した。写真では、時間
経過とともに、放出される破片の位置が移動しているのが観察される。この速度とマンタル厚み
の関係を調べることで、衝撃波の減衰率を見積もった。

次に、分化天体の破片放出条件および再集積条件を調べるため、モルタル（石膏）マンタルー
金属コア試料の破片速度を計測した。破片速度の大部分が、天体脱出速度以上の場合、母天体は
破壊され、複数の破片が形成される一方、破片速度が、天体脱出速度以下の場合、破片同士が再
集積され、ラブルパイル天体が形成される。破片速度の代表値として、衝突の反対点での破片速

度(反対点破片速度)が先行研究でよく調べられた。その結果、反対点破片速度は、加えられたエネルギー密度に依存することが分かっている。本研究のマントル物質であるモルタルと石膏および金属球単体に関して、これらの破片速度を様々なエネルギー密度で計測した。その結果、同程度のエネルギー密度で比較した場合、モルタルの破片速度は、石膏の速度のおよそ2倍程度速いことが分かった。一方、金属球の破片速度は、モルタルに比べ、数倍程度遅かった。例えば、エネルギー密度が 7.0×10^4 J/kg の金属球の破片速度は 20 m/s 程度である一方、同様のエネルギー密度でのモルタルの破片速度は 80 m/s であった。一方、コアおよび岩石マントルにそれぞれ加えられるエネルギー-金属の大きさはそのコア質量比に依存するため、コアにエネルギーがより多く分配される場合、コア破片速度が大きくなり、マントル層の破片速度を超える可能性もある。

このようにコア・マントルの破片放出速度は、天体内部構造依存性を受けると考えられる。そこで、様々なコア質量比を持つモルタル（および石膏）マントル-金属コア試料における衝突の反対点破片速度を計測した(図4)。コア質量比が大きい場合($R_{CM} > 0.3$)、モルタルおよび石膏マントルともにコア質量比が1に近づくにつれ、破片速度が上昇していることが分かる。一方、コア質量比が小さい場合($R_{CM} < 0.3$)、破片速度はコア質量比にほとんど依存せず一定であった。これは、コア質量比が小さい時、コアは破壊されず、ほとんどマントル物質の破片速度に依存することを示している。今後、試料表面の破片速度だけではなく、内部の金属コアの破片速度を直接計測することで、マントルと金属コアの破片の相対速度を計測し、鉄隕石が放出する衝突条件を調べる。

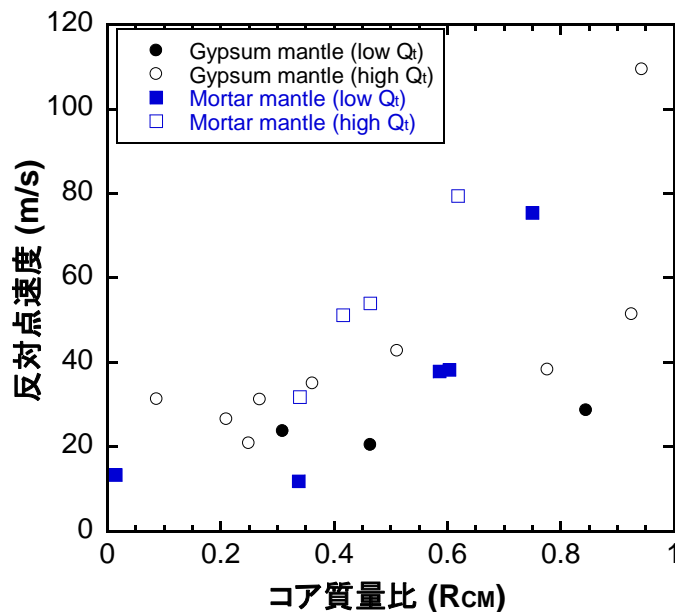


Fig. 4 様々なコア質量比における反対点破片速度：石膏マントル-金属コア試料およびモルタルマントル-金属コア試料における実験結果を示す。それぞれ加えられたエネルギー密度 [1×10^4 - 5×10^4 J/kg (low Q_t) および 5×10^4 - 2×10^5 J/kg (high Q_t)] ごとの値を示している。

[1] Fujiwara and Tsukamoto (1980) *Icarus*, 44, 142-153. [2] Asphaug et al., (1998) *Nature*, 393, 437-440. [3] Love et al. (1993) *Icarus*, 105, 216-224. [4] Bizzarro et al. (2005) *Astrophysical Journal*, 632, L41-L44. [5] Holsapple et al. (2002) in *Asteroids III* (Univ. of Arizona Press, Tucson), pp. 443-462. [6] Okamoto and Arakawa (2008) *Icarus*, 197, 627-637.