

分化隕石母天体の衝突破壊と進化

○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

固体天体はすべて、原始太陽系星雲において形成された岩石微惑星の衝突破壊・合体成長により形成されたと言われている。よって、地球や火星などの固体惑星の形成や進化過程を知るには、惑星形成過程における微惑星の衝突進化・再集積過程を理解する必要がある。このような天体の衝突現象を理解するため、現在まで、様々な衝突銃が用いられ、天体模擬試料に室内衝突実験が行なわれてきた。また、天体サイズの衝突現象にまで外挿するため、室内衝突実験の結果を初期値として、惑星衝突の数値シミュレーションも国内外で広く行われている。現在まで、室内衝突実験やシミュレーションでは、主に玄武岩などの均質な試料やそれからなる仮想天体を模擬した実験が行われてきた [e.g.,1,2].

また、大望遠鏡による観測、惑星探査機などにより、様々な小惑星の調査がなされてきた。小惑星は、微惑星が原始惑星へと成長する様々な段階を凍結した化石であるため、小惑星を調べることで、惑星形成過程を明らかにすることができると考えられている。それにより明らかにされた結果として、小惑星には様々な熱変成度を持つものが存在する。惑星形成過程において、天体は成長とともに熱進化により内部に層構造を形成する。このような層構造を持つ天体が衝突破壊の結果、様々な熱変成度を持った娘天体を形成した可能性が示唆されている。このため、天体衝突において、天体内部構造の及ぼす影響を考慮すべきである。しかし、層構造天体の衝突物理の複雑さから、そのような研究はまだ不十分であった。そこで系統的に試料内部構造を変化させ、層構造天体模擬試料の衝突破壊実験を行い、衝突破壊における天体の層構造依存性が近年、明らかにされている[3].

ここで、鉄隕石やM-type小惑星は、熱進化により分化した天体の金属コア由来であると考えられている。小惑星では、分化天体の生き残りとして小惑星ベスタが挙げられ、探査機ドーンにより詳細な調査が現在行われている。金属コア由来とされる鉄隕石などの、天体からの形成条件は、あまり知られていない。これら鉄隕石やM型小惑星の母天体となったと考えられる分化天体の衝突破壊・破片の放出・再集積条件を調べることは、小天体の多様性（岩石質から金属質の小天体）や、分化天体のように熱進化した小天体の衝突進化を知る上で重要となる。このような分化天体の衝突現象は、主に数値シミュレーションにより研究が進められてきており[4], 系統的な実験はあまり進んでいない。特に、分化天体とされるベスタや、その娘天体と考えられるVestoid, や鉄隕石の形成条件を調べることで、太陽系形成初期に多数存在した分化した天体の衝突進化やあまり解明されていない鉄隕石形成条件を明らかにできる可能性がある。そこで、本研究では、分化天体模擬試料を用いた衝突破壊実験を行い、分化天体模擬物質の内部構造を系統的に変化させて、衝突破壊・再集積条件に対する内部構造の影響を調べ、分化天体の衝突破壊・再集積条件を明らかにした。

実験手法

分化天体を模擬した金属コアー岩石マントルからなる2層構造球形試料を作成した。分化天体

として、小惑星ベスタのような内部まで冷却された天体を想定している。また、現象を複雑化しないよう、試料は2層構造とした。金属コアとしては金属球を使用し、岩石マントル素材としてはモルタルと石膏を使用した。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。ベスタが存在する小惑星帯域は、200K以下の温度環境下にあるため、その金属コアは低温脆性により、容易に破壊し金属コアから鉄隕石などを生成する可能性がある。本研究で使用した高炭素クロム鉄鋼は、常温でも脆性を示すことが分かっている。本研究は、比較的小さな試料に真空下での衝突実験を行うため、試料の温度コントロールが難しい。そこで、脆性の特性を持つ高炭素クロム鉄鋼は、低温脆性領域での小惑星の金属コアの振る舞いを模擬するのに適していると考えられた。そこで、事前にその動的破壊強度を調べたところ、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すことが分かった[5]。またマントルとして使用したモルタルは岩石に比較的近い動的衝突破壊強度を示すことが分かっている[6]。これは懸濁液より硬化させるため、加工が容易である。また、もう一つマントル材質として使用した石膏に関して、マントルとして石膏も用いることにより、マントル物性の違いによる衝突破壊結果への影響を調べた。高炭素クロム鋼鉄、モルタルおよび石膏のバルク密度はそれぞれ7800kg/m³、~1800kg/m³、~1200kg/m³、また高炭素クロム鋼鉄、モルタルおよび石膏の音速は、~4000m/s、~1800m/s、~1500m/sである。試料直径は25–65mm、内部の金属コアのサイズは10–30mm、試料重量は30–330gであった。

衝突実験は、JAXAに設置された二段式軽ガス銃を用い、真空下（~10Pa）で質量~0.2g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。その過程はハイスピードカメラを2台用いて現象のその場観察を行い、衝突点付近の高速の破片（撮影速度：1コマ8μs–32μs）および衝突の反対点付近の低速の破片速度（撮影速度：1コマ50–100μs）の計測を行った。ここで、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, Q ）を変化させた。これにより、様々な衝突条件下での現象を調べ、実験式を得ることとする。また、エネルギー密度一定において、試料内部構造を変化させ、衝突現象の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。様々なコア質量比(R_{CM})を持つ試料を用いた衝突破壊実験を行い、岩石をまとった金属コアの破壊強度や、マントルおよびコア由来の破片の放出速度などを計測することで、鉄隕石の放出条件や分化天体の衝突破壊現象について考察する。

結果・考察

分化天体の衝突破壊・再集積条件を調べるために、試料の衝突破壊強度・生成する破片の放出速度を明らかにする必要がある。また、分化天体の内部構造により、衝突破壊・再集積により得られる結果にどのような違いが生じるか、内部構造依存性を明らかにする必要がある。そこで、金属球単体・モルタル球・石膏球および内部構造を示すコア質量比を変化させた金属コア–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。実験で得られたコア物質である金属球単体の衝突破壊強度は、 7.0×10^4 J/kgである。また、マントル物質である石膏およびモルタルの破壊強度は、 2.1×10^3 J/kg、 1.8×10^3 J/kgであった。マントルの衝突破壊強度の方が弱く、コアの衝突破壊強度はマントルの~30倍の破壊強度である。ここで、衝突破壊強度とは、最大破片質量が元の試料総質量の1/2になるために必要なエネルギー密度を

示す[1]。このように分化した天体は、異なる強度の物質層からなるため、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予想された。

コアマントル試料では、コアとマントルへのエネルギー分配率により、衝突破壊結果が依存することが分かっている。このエネルギー分配率は、コア質量比に依存し、以下の式で記載することができる[3]。

$$f = aR_{CM}^{-b}$$

f : コアへのエネルギー分配率, コア質量比: R_{CM}

熱進化したコンドライト模擬物質（ガラスコアー石膏マントル試料）の場合、 $a=1$ 、 $b=3.3$ であることが分かっている。

ここで、本研究の分化天体模擬物質では、それぞれのコアの破壊度合いから見積もられたコアに分配されるエネルギー密度およびコア質量比から、石膏マントルの場合、 $a=1.0$ 、 $b=2.2$ 、モルタルマントルの場合、 $a=1.3$ 、 $b=1.9$ であった。この金属コアへのエネルギー分配率を用いて、破片速度を見積もることとする。

まず、モルタル（および石膏）マントルー金属コア試料の破片速度を計測した。天体の破片放出速度が天体脱出速度以上か以下かにより、天体放出破片が放出され、隕石となるか、再度天体に集積し、レゴリスもしくはラブルパイル天体になるか予測することができる。この予測は、微惑星の惑星への進化を考える上で、非常に重要となる。ここで、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[1]。

そこで、本研究のマントル物質であるモルタルと石膏およびコア物質である金属球単体に関して、これらの反対点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、3倍程度遅かった（図

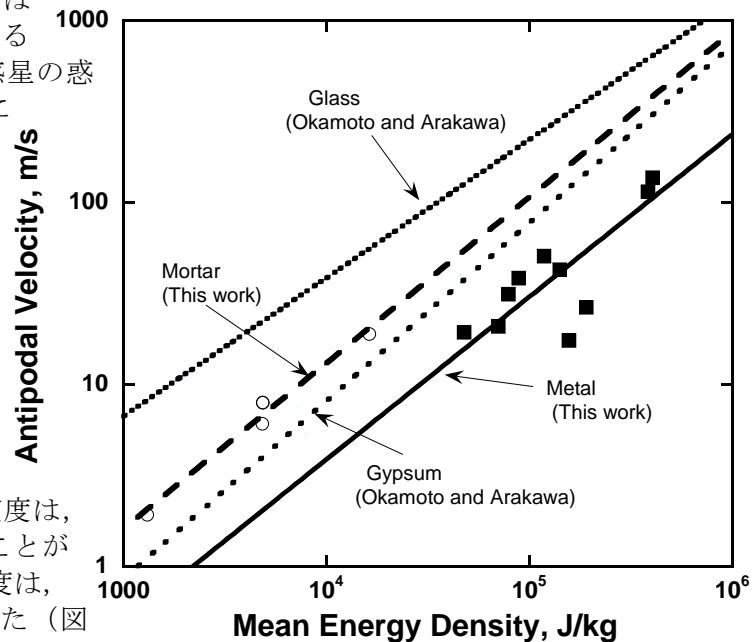


図1 反対点破片速度 vs. エネルギー密度

1)。一方、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

ー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。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った。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。本結果で得られた破片速度は分化天体模擬試料のマントルの破片速度を示している。この値は、モルタルおよび石膏の単体での破片速度とよい一

致を示した。コア質量比が小さい場合、分配されるエネルギーの大部分はマントルに配分されることになるため、コア質量比に関わらず、破片速度はマントル物質に依存すると考えられた。また、コア質量比が大きくなるにつれ、破片速度が急激に上昇するのは、マントルに分配されるエネルギーと関係があると考えられた。そこで、マントルへのエネルギー分配率およびコア質量比から、マントルの破片速度を見積もったところ、以下の式で書き表わせることが分かった(図2)。

$$V_{a,m} = cQ_m^b$$

$V_{a,m}$: マントルの反対点破片速度、
 Q_m : マントルに与えられるエネルギー密度

モルタルマントルの場合、 $a=0.89$ 、 $b=0.35$ 、石膏マントルの場合、 $a=0.82$ 、 $b=0.34$ であった。

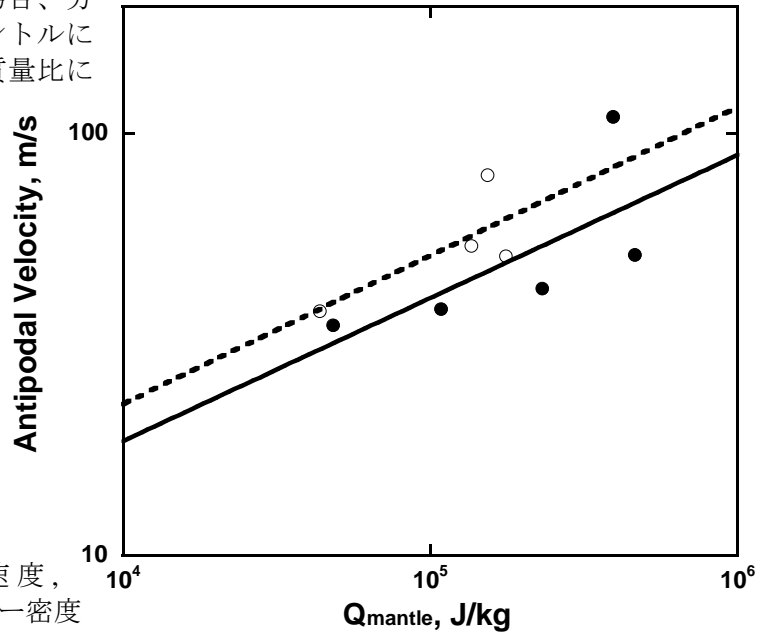


図2 反対点破片速度 vs. マントルに分配されるエネルギー密度

本値から、様々なコア質量を持つ分化天体での岩石マントルの反対点破片速度が分かる。一方、金属コアの反対点破片速度は、コア質量比および、コアに分配されるエネルギー密度および、金属球単体の破片速度より、予測することができる。試料破片速度の大部分 (~80%) は、反対点破片速度の2倍以内ということが藤原らの研究から明らかにされている。よって、金属コア・岩石マントルにおける反対点破片速度が天体脱出速度の2倍以内ならば、それぞれの破片は母天体に再集積される。結果として、分化天体として知られている小惑星ベスタ (直径~500km) にその質量の1000分の1のプロジェクトイルが衝突した場合、小惑星帯における天体衝突速度でも、十分に金属コアが破壊され、鉄隕石が放出できると考えられた。また、このような分化天体は、惑星形成初期に多数存在したため、鉄隕石の形成は可能であると考えられる。

参考文献

- [1] Fujiwara and Tsukamoto (1980) *Icarus*, 44, 142–153. [2] Asphaug et al. (1998) *Nature*, 393, 437–440. [3] Okamoto and Arakawa (2008) *Icarus*, 197, 627–637. [4] Watts et al. (1991) *Icarus* 93, 159–168. [5] Holsapple et al. (2002) in *Asteroids III* (Univ. of Arizona Press, Tucson), pp. 443–462. [6] Okamoto et al. (2010) *LPSC XLI*, Abstract #2679.