

機関番号：82645

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21840064

研究課題名（和文）分化天体の衝突破壊および鉄隕石の放出条件の解明

研究課題名（英文）Impact fragmentation and re-accumulation of iron meteorite parent bodies: Implication for energy fraction of iron core in collisional disruption.

研究代表者

岡本 千里 (Chisato Okamoto)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構 月・惑星探査プログラムグループ 宇宙航空研究員

研究者番号：30552004

研究成果の概要（和文）：本研究では、衝突銃を用いた高速衝突実験を行い、惑星形成過程を知る上で重要となる地球のような分化した天体（金属コア・岩石マントル天体）の衝突破壊条件について、実験的に明らかにした。具体的には、分化天体模擬試料の金属コアの破壊条件を試料の内部構造・衝突エネルギーで系統的に整理し、金属コアが破壊（鉄隕石が形成）するための天体の内部構造を明らかにすることで、天体におけるコアへのエネルギー分配量と内部構造の関係を定量的に調べた。本結果により、分化天体上で生じた衝突現象を推定できる可能性があり、微惑星が惑星へと熟進化する様々な段階で予測される天体内部構造から、熟進化過程を考慮した天体衝突進化過程を調べることが期待される。

研究成果の概要（英文）：The collisional processes of differentiated parent bodies in the solar nebula play an important role to clarify the origin of iron meteorites and M-type asteroids. We conducted impact experiments on metal core-rocky mantle targets simulating iron meteorite parent bodies in order to study the collisional disruption and the formation condition of differentiated meteorite such as irons. We investigated the impact fragmentation and re-accumulation of the core-mantle bodies with different core/target mass ratios. We estimated the energy density partitioned into the core and the mantle using the energy fraction to clarify the internal structure is a crucial parameter to control the collisional outcomes of the core-mantle bodies.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,020,000	306,000	1,326,000
2010年度	860,000	258,000	1,118,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,880,000	564,000	2,444,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：固体地球惑星物理学

キーワード：惑星起源・進化

1. 研究開始当初の背景

室内実験，大望遠鏡による観測，惑星探査機などにより，惑星形成過程が活発に研究されてきた．地球や火星などの固体天体はすべて，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．それゆえ天体間の衝突現象を理解する事は，惑星形成および進化を解明するために非常に重要な手がかりになる．現在まで，主に均質な内部構造を持つ仮想天体を模擬した室内衝突実験やシミュレーションが精力的に行われてきた．一方，天体内部構造を考慮した天体の衝突現象は，その衝突結果の複雑さから現在まであまり系統的な研究は進んでいない状況であった．しかし，地球に代表されるように，天体はその内部に層構造などをもち，均質ではない．よって，天体内部構造により，衝突の結果が依存することは，以前より予想されていた．

## 2. 研究の目的

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．このため，現実的には，天体衝突における天体内部構造の及ぼす影響を考慮すべきである．鉄隕石の存在からも示唆されるように，地球のように分化した天体(熱進化後期)に関しても，その金属コアをも破壊するような衝突現象を経験したと考えられる．しかし，均質な内部構造を持つ天体の衝突現象は調べられてきたが，分化天体のような層構造を持つ天体の衝突物理については，層構造境界により及ぼされる影響が複雑なことや，金属鉄の破壊の困難さから，天体内部構造を考慮した研究は不十分であった．そこで本研究では，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を明らかにする．

## 3. 研究の方法

分化天体の衝突破壊条件およびその金属コア由来の鉄隕石形成条件を明らかにするために，これらの母天体である分化天体を模擬した金属コア・岩石マントル構造を持つ球形試料の衝突破壊を行った．このとき，金属の衝突破壊強度は温度に依存するため，小惑星帯の低温温度領域を模擬できる試料を用意した．金属コアは高炭素クロム鉄鋼，岩石マントルにはモルタルまたは石膏を用いる．

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) の結果との比較を行うためである．一方，金属の破壊強度は温度に強く依存し，常温環境下では衝突破壊を引き起こすのは困難である．このため，系統的な衝突破壊実験はあまり行われてこなかった．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を計測したところ，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．そこで常温でも脆性破壊する鉄鋼を利用し，100—200K 近くまで試料温度を低下させた鉄隕石と同等の動的破壊強度を持つ試料を用意した．

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、これら金属コア、岩石マントルの質量比（コアサイズ、マントル厚み）を調整することで、試料内部構造を変化させ、様々なコア質量比( $R_{CM}$ )を持つ試料を作成し、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。コア質量比は、天体の熱進化度合いを示している。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。

衝突実験は、JAXA および名古屋大学に設置された二段式軽ガス銃を用い、衝突条件（衝突速度、試料質量）を変化させ、試料を破壊（クレーター形成や完全破壊）させた。衝突銃の弾丸の速度は最大 7km/s、弾丸質量は 0.2g であり、高い衝突エネルギーで実験を行うことができる。実験では、分化天体の衝突破壊・再集積条件を明らかにするために、金属コアの破壊強度における内部構造依存性や、マントルおよびコア由来の破片の放出速度などを計測した。このとき、衝突破壊様式および衝突破片の重心速度を計測した。破片の振る舞い、破片速度を計測するために、2台の高速度カメラを用い、衝突現象のその場観察を行った。実験は数 Pa 以下に維持された真空チャンバー内で行われ、衝突破片の放出速度を計測するために、撮影速度 1 コマ  $8\mu s - 200\mu s$  でその場観察を行った。

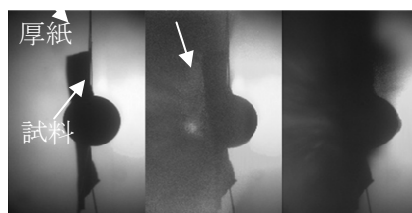


Fig. 1 層構造試料の破壊過程：写真左は衝突前の試料を示す。衝突点近傍の高速のジェットにより衝突破壊現象が観察できなくなることを防ぐため、試料上の衝突点から  $90^\circ$  の地点表面に厚紙を設置し、試料を覆っている。写真中央は、弾丸と試料の衝突直後の様子を示す。弾丸は左側から試料に衝突している。高速のジェットが衝突点近傍から放出されていることが分かる。写真右はその後、衝撃波が試料を通過し、衝突破片が衝突点遠方からの飛散し始める様子を示している。

#### 4. 研究成果

本研究では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。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（学会発表⑤で発表）。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。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。また、石膏およびモルタルの破壊強度は、 $2.1 \times 10^3 \text{ J/kg}$ 、 $1.8 \times 10^3 \text{ J/kg}$  とほぼ同程度であった。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 倍程度大きくなることが分かる。このように物性が大きく異なる金属コアと岩石マントルのサイズ、厚みにより、天体全体としての動的破壊強度は大きく変化すると考えられる。様々な内部構造（コア質量比）により、分化天体の破壊条件がどのように変化するかを本研究では初めて系統的に明らかにすることができた。以下、得られた実験結果を示す。

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( $f$ )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。ここでは金属コアーモルタルマントル試料、金属コアー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ーガラスコア試料（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。この石膏マントルー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ー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、石膏マントルー金属コア試料の場合、石膏マントルーガラスコア試料と非常に近いエネルギー分配率を示した。本結果より、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と考えられた。衝突における石膏およびモルタルでのマント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。モルタル中の衝撃波減衰率の計測するために、モルタルプレート（モルタルマントル層を模擬）を用いて、モルタルの粒子速度の計測を行った。これは、モルタルプレートの衝突の反対点から放出される破片速度の計測により得られ

る。この速度とマントル厚みの関係を調べることで、モルタル中を伝播する衝撃波の減衰率を見積もった。モルタルでの衝撃波減衰率は、その層の厚みの2乗に反比例して減衰する。一方、石膏中では、衝撃波は、およそマントル層の厚みの~4乗に反比例して減衰することが我々の行った先行研究から分かっている。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と考えられる。図2の石膏マントルとモルタルマントルの結果において観察される違いは、コア質量比が小さいほど顕著である。これは、マントル層の厚みが弾丸サイズに比べ、より厚くなることを意味し、衝撃圧力減衰の影響がコア質量比が小さいほど顕著になると言える。一方、コア質量比が大きくなった場合、マントルの厚みは薄くなるため、ほとんど衝撃波の減衰が見られず、マントル物質の違いは観察しにくくなると考えられる。本結果は研究発表②で発表された。

次に、分化天体の成長過程に大きく影響を及ぼす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）マント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。ラブルパイル天体は、惑星形成過程において多数形成されたと考えられ、はやぶさ探査機により観測された小惑星イトカワもラブルパイル天体であると考えられている。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コア物質である

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  $7.0 \times 10^4 \text{ J/kg}$  での金属球の破片速度は  $20 \text{ m/s}$  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  $80 \text{ m/s}$  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た。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3）。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。本結果をもとに、岩石マントルと金属コアの破片の相対速度が分かる。以上より、様々な内部構造を持つ分化天体において、その金属コアが破壊され、鉄隕石が放出する衝突条件を本研究結果から予測することが可能となった。

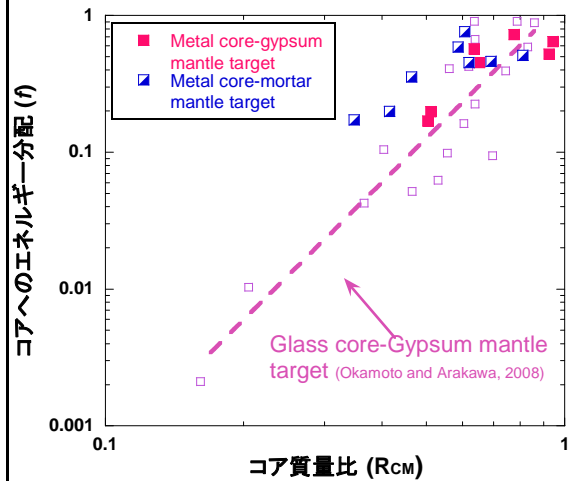


Fig. 2 エネルギー分配率とコア質量比：コア質量比が1のときは、金属球（もしくはガラス球）試料を示す。点線は、Okamoto and Arakawa (2008)により得られた石膏マントル—ガラスコア試料におけるガラスコアの破壊度合いから見積もられたガラスコアへのエネルギー分配率を示す。

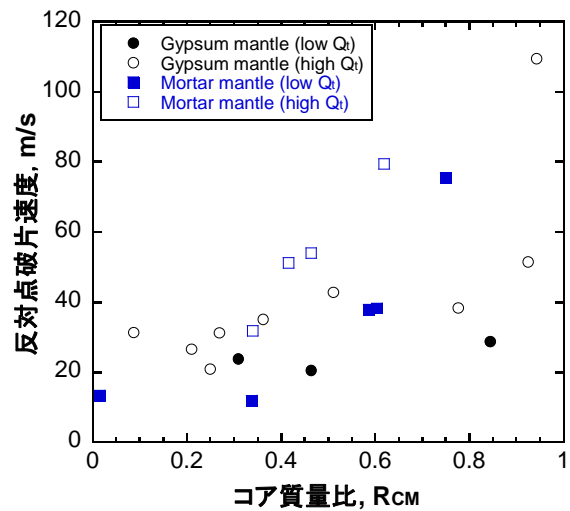


Fig. 3 様々なコア質量比における反対点破片速度：石膏マントル—金属コア試料およびモルタルマントル—金属コア試料における実験結果を示す。それぞれ加えられたエネルギー密度 [ $1 \times 10^4 - 5 \times 10^4 \text{ J/kg}$  (low  $Q_t$ ) および  $5 \times 10^4 - 2 \times 10^5 \text{ J/kg}$  (high  $Q_t$ )] ごとの値を示している。

## 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2件)

①C. Okamoto, M. Arakawa, S. Hasegawa  
Impact experiments of metal core-rocky mantle targets simulating collisional disruption of iron meteorite parent bodies.

Proceedings of 42<sup>st</sup> Lunar and Planetary Science Conference. 査読有 #2331, 2011

②C. Okamoto, M. Arakawa, S. Hasegawa  
Impact fragmentation of iron meteorite parent bodies: Implication for energy fraction of iron core in collisional disruption.

Proceedings of 41<sup>st</sup> Lunar and Planetary Science Conference. 査読有 #2679, 2010

[学会発表] (計7件)

①C. Okamoto, M. Arakawa, S. Hasegawa  
Impact experiments of metal core-rocky mantle targets simulating collisional disruption of iron meteorite parent bodies.  
42<sup>st</sup> Lunar and Planetary Science Conference

2011/03/09, Houston

②岡本千里, 荒川政彦, 長谷川直, 田端誠  
分化天体からの鉄隕石放出条件の解明  
スペースプラズマ研究会

2011/3/3, 相模原

③岡本千里, 荒川政彦, 長谷川直, 田端誠  
分化天体の衝突破壊条件と鉄隕石の放出  
「天体衝突現象の解明」研究会

2010/11/4, 札幌

④岡本千里, 荒川政彦, 長谷川直, 田端誠  
分化天体の衝突破壊および鉄隕石放出の解明

日本惑星科学会 2010 年秋季講演会

2010/10/8, 名古屋

⑤C. Okamoto, M. Arakawa, S. Hasegawa  
Impact fragmentation of iron meteorite parent bodies: Implication for energy fraction of iron core in collisional disruption.

41<sup>st</sup> Lunar and Planetary Science Conference

2010/03/02, Houston

⑥岡本千里, 荒川政彦, 長谷川直  
分化天体の衝突破壊条件の解明  
「天体衝突現象の解明」研究会

2009/11/11, 札幌

⑦岡本千里, 荒川政彦, 長谷川直  
分化天体からの鉄隕石放出の解明: 金属の低

温脆性が及ぼす影響

日本惑星科学会 2009 年秋季講演会

2009/09/30, 東京

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 千里 (Chisato Okamoto)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構 月・惑星探査プログラムグループ 宇宙航空研究員

研究者番号: 21840064