



Effects of Internal Structure of Porous Primitive Bodies on Their Impact Processes

Machii, Nagisa

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2012-03-25

(Date of Publication)

2013-06-26

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5587

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005587>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



太陽系には、空隙率の高い小天体があることが観測・探査結果からわかっている。これらの高空隙率小天体は多様な内部構造をもつことが推測される。例えば、衝突後の破片が再集積して大きな隙間をもつもの、天体内部の揮発性成分が蒸発し空孔を多く含むもの、微細な塵がゆっくりと合体成長して小さな空隙を多く含むもの等である。天体の強度は内部構造に依存していると考えられる。そして、天体の強度は衝突結果に大きな影響を与えることがわかっている。

本研究では、複数の構成要素からなる高空隙率天体に関して、「構成要素間の焼結によるバルク強度の変化と構成粒子サイズとバルクサイズの比(Relative Component Size, RCS)が標的破壊に要するエネルギー密度(最大破片質量が元の試料質量の半分になるのに必要なエネルギー密度、 Q^*s)に与える影響」と、「高空隙率微粒子集合体への弾丸衝突によるはね返り、潜り込みと微粒子集合体の強度の関係」について、それぞれ実験的研究を行った。前者の研究では複数の構成要素からなるカイパーベルト天体や土星衛星などの氷小天体の衝突破壊を模擬し、後者の研究ではコンドリュールとマトリックスの衝突・合体によるコンドライト母天体の形成を模擬している。

1章では、太陽系内での衝突が担う役割と小天体衝突の物理過程についての導入を行なっている。小天体の衝突破壊において重要なパラメタである Q^*s について詳しく述べ、また、衝突破壊とバルク強度、空隙率の関係、および衝突に関する基本的な方程式を紹介している。

2章では、焼結による強度変化と RCS が Q^*s に与える影響の研究について述べている。複数の構成要素からなる高空隙率天体の構成要素間の物理的な結合が焼結によって強くなった場合、天体全体の強度が増加することが考えられる。焼結とは、融点以下で隣合う粒子同士が結合する現象である。宇宙空間においても氷などの物質では場所によって焼結がおこると考えられる。

焼結による強度変化について、まず等大2粒子の焼結により調べた。実験に用いた試料は直径4.9 mmの表面の粗いガラスビーズと直径4.7 mmの表面が滑らかなガラスビーズである。570、600、630°Cで0.5から240時間まで32通りの継続時間で加熱した。焼結によって結合した部分すなわちネックの長さを実顕顕微鏡画像から測定した。焼結後の2粒子焼結体は引張強度と曲げ強度を測定した。粒子表面の粗さの違いはネック半径が0.4 mm以上では現れなかった。ネックを破壊するのに必要な引張力はネック半径が0.4 mm以上になると、ネック半径の2乗つまりネック断面積に比例した。ネックを破壊するのに必要な曲げ力はネック半径の3乗に比例した。また、曲げ力のほうが引張力より小さい力でネックを破壊できるが、ネック半径が大きくなると引張力と同程度になった。

これらの基礎実験をもとに、集合体の焼結による強度変化を調べた。実験に用いた試料は表面が滑らかな直径4.7 mmのガラスビーズである。集合体は1層が30粒からなる3層構

造に成形した。この試料を630°Cで8、20時間加熱し、2種類の強度の多粒子焼結体を作成した。圧裂引張試験により求めた8時間、20時間焼結体の引張強度はそれぞれ 3.53×10^5 Pa、 7.4×10^5 Paであった。破断面にかかる力を破壊されたネック数で割ると、1ネックを破壊するのに必要な引張力は2粒子焼結の結果と同程度であることを確認した。

この2種類の焼結体を用いて衝突破壊実験を行なった。実験に用いた弾丸は直径3 mmのガラス球、直径3 mm長さ6 mmのポリカーボネイト円柱である。神戸大に設置してある軽ガス銃を用いて衝突速度37-280 m/sで弾丸を標的に衝突させた。 Q^*s はそれぞれ4.7 J/kg、10.6 J/kgであり、引張強度が大きいほうが Q^*s が大きいことが示された。

次にRCSの違いが Q^*s に与える影響について調べた。先述の20時間焼結を行なった多粒子焼結体をtypeA、8時間焼結を行なった焼結体をtypeBと呼ぶことにする。これらのRCS値は0.19であるが、引張強度が同程度の先行研究に比べて Q^*s が一桁小さい。そこで、平均粒径0.73 mmのガラスビーズを用いて直径30 mm高さ12 mm、引張強度 2.9×10^5 Pa、RCS = 0.027の多粒子焼結体を作成し、typeCと呼ぶ。typeCの Q^*s は44.2 J/kgであり、RCSが 10^3 オーダーの先行研究の Q^*s に近い値を示すことがわかった。構成粒子数が少ないと衝突で発生した応力波を減衰させるネック数が少なく、応力波があまり減衰されないまま焼結体中を伝播し、かつ自由表面に存在する粒子が多く破壊後に簡単に放出される。そのためRCSが大きい焼結体のほうが Q^*s が小さく、壊れやすいと考えられる。本結果から、焼結した氷小天体でもRCSによって Q^*s が異なることが予想される。

3章では、衝突圧力と高空隙率物体の強度の関係の研究について述べている。地球に落下してくる隕石にコンドライトがある。コンドライトはコンドリュールと呼ばれるmmサイズの球形粒子とその間を埋めるマトリックスと呼ばれる細粒な鉱物片で構成されている。しかし、その形成過程については未だ解明されていない。これまでに行なわれている隕石分析からコンドリュールは高温環境下で形成し、一方でマトリックスは高温を経験していないということがわかっている。また、Allende隕石中のマトリックスはコンドリュールよりも揮発性元素を多く含むことも報告されている。コンドリュール形成モデル、すなわち、前駆体のダストを溶融させて短いタイムスケールで再固化させるモデルには中心星付近で溶融したダストがx-ウィンドによって再固化しながらメインベルト付近まで飛ばされるx-ウィンドモデル、ガス円盤内で電荷を帯びたダスト同士の衝突によって発生する雷による雷モデル、ガス円盤内でガスと微惑星の間で発生する衝撃波による衝撃波加熱モデルの3つの代表的なモデルがあるが、共通点としてどのモデルでもコンドリュールは円盤内の局所で形成されることが挙げられる。本研究ではコンドリュールとマトリックスが円盤内の別々の場所で形成した後合体したと仮定した。マトリックスサイズは標準的な太陽系形成論によるとCAI形成後1000年で少なくとも数cm以上である。コンドリュールがマトリックスに捕獲されるための貫入最小速度と最小マトリックスサイズを調べた。

実験に用いたマトリックス模擬試料は直径0.8 μ mの多分散シリカ微粒子である。衝突速度

に応じて3種類の加速装置を用いて衝突実験を行なった。

低速度(0.2-2 m/s)での衝突実験はドイツ・ブラウンシュバイク工科大学に設置してある内径20 cm、高さ約2 mの落下管を用いて行なった。コンドリュール模擬体(弾丸)として直径1、4.7 mmのガラスビーズ、マトリックス模擬体(標的)として空隙率50、75、90%の微粒子集合体を用いた。中間速度(2-5 m/s)での衝突実験はバネ銃を用いて、高速度(30-300 m/s)は神戸大学に設置してある軽ガス銃を用いて行なった。弾丸として直径3 mmのガラスビーズ、標的として空隙率75%の微粒子集合体を用いた。

シリカ微粒子の物理特性を調べるために静的圧縮試験も行なった。内径5、10、15、20 mmのステンレス容器にシリカ微粒子を入れて圧縮試験機で0.01 mm/sで最大試験力9.8 kNまで圧縮した。また、空隙率42、46%のペレット状のシリカ微粒子集合体に対して圧縮速度0.001 mm/sで圧縮試験を行い、圧縮強度を求めた。

衝突実験結果は貫入、はね返り、ほぼ付着の3種類が見られた。ほぼ付着とは弾丸が標的に衝突後120 ms以上変位が観察されない衝突のことと定義した。空隙率が大きいほど、衝突速度が速いほど貫入がおりやすいことが示された。

次に衝突圧力と高空隙率物体の強度の関係について考察を行なった。衝突発生圧力は標的密度、標的音速、衝突速度から求められる。高空隙率物体の音速は圧縮曲線の傾きを用いて空隙率50、75%の標的についてそれぞれ110、30 m/sであった。この結果を外挿して空隙率90%の標的の音速は10 m/sとした。これらの値を元に各実験での衝突発生圧力を得た。他方、シリカ微粒子の圧縮曲線と空隙率42、46%のシリカ微粒子集合体の圧縮強度を比較してみると、圧縮曲線上の空隙率42、46%のときの圧力の値が1桁以内で一致した。つまり、このシリカ微粒子の圧縮曲線から各空隙率でのシリカ微粒子集合体の圧縮強度を見積もることができる。この圧縮曲線で示される標的強度と実験結果の衝突発生圧力を比較すると、標的強度が衝突発生圧力よりも小さいときに貫入がおり、標的強度が衝突発生圧力よりも大きいときにははね返りがおこることがわかった。

貫入最小速度は空隙率50、75%の標的でそれぞれ46、3 m/sであった。原始太陽系円盤内で標的サイズを3 mmとして相対速度が46、3 m/sのときの標的サイズをガス円盤内のダストの相対速度のモデルから見積もるとそれぞれ90 cm、10 cmである。これらの標的サイズは本実験で観測された貫入深さ3 cm、数mmに対して十分大きく、弾丸を捕獲することが可能であることがわかった。

4章では、これら2つの研究についての結論を述べている。同じバルク強度を持つ天体でも内部構造の違い、例えばRCSによって Q^* が異なることがわかった。また、標的天体のバルク強度と衝突発生圧力の関係から衝突結果が貫入なのか跳ね返りなのかを予測できることがわかった。

氏名	町井 渚		
論文 題目	Effects of Internal Structure of Porous Primitive Bodies on Their Impact Processes (空隙を含む始原天体の内部構造が衝突過程に与える影響)		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	准教授	中村 昭子
	副 査	教授	乙藤 洋一郎
	副 査	教授	荒川 政彦
	副 査		
副 査			印
要 旨			
<p>本論文では、太陽系小天体に普遍的にみられる空隙を含む構造を模擬した固体物質の、衝突に対する応答についての実験的研究を報告している。</p> <p>空隙を含む小天体は、多様な内部構造をもつことが推測される。天体の強度は内部構造に依存していると考えられる。そして、天体の強度は衝突結果に大きな影響を与えることがわかっている。本研究では、複数の構成要素からなる天体に関して、</p> <p>1 構成要素間の焼結によるバルク強度、および、構成粒子サイズと天体サイズの比(Relative Component Size, RCS)が、標的破壊に要するエネルギー密度(最大破片質量が元の試料質量の半分になるのに必要なエネルギー密度、Q^*)に与える影響</p> <p>2 微粒子集合体への弾丸衝突によるはね返り、潜り込みと微粒子集合体の強度の関係</p> <p>について、それぞれ実験的研究を行っている。前者はカイパーベルト天体や土星衛星などの氷小天体の衝突破壊、後者はコンドリュールとマトリックスの衝突・合体によるコンドライト母天体の形成への応用が考えられている。</p> <p>第一章では、太陽系内での衝突が担う役割と小天体の衝突物理過程についての導入を行なっている。小天体の衝突破壊において重要なパラメタであるQ^*について定義と過去研究を紹介し、天体の衝突破壊とバルク強度や空隙率の関係、および衝突に関する基本的な方程式を説明している。</p> <p>第二章では、衝突破片強度Q^*と焼結体のバルク強度・RCSの関係について調べた実験手法と結果および考察をまとめている。</p> <p>焼結とは、融点以下で隣合う粒子同士が結合する現象である。宇宙空間においても氷などの物質では場所によって焼結がおこると考えられる。複数の構成要素からなる天体において、構成要素間の物理的な結合が焼結によって強くなった場合、天体全体の強度が増加することが考えられる。</p> <p>本研究では、焼結による強度変化について、まず、直径約5 mmの等大ガラスビーズ2粒子について調べられた。焼結条件を、加熱温度570、600、630℃の3通り、加熱時間0.5から240時間まで32通りと変化させて試料が作成された。各試料について、焼結によって結合した部分すなわちネックの長さの測定と引張強度と曲げ強度の測定が行われた。ネックを破壊するのに必要な引張力が、ネック半径が粒子表面粗さよりじゅうぶん大きくなるとネック半径の2乗つまりネック断面積に比例することが示された。一方、ネックを破壊するのに必要な曲げ力はネック半径の3乗に比例することが明らかにされた。さらに多粒子焼結体の圧裂引張強度を測定し、2粒子焼結体の引張強度と矛盾がないことが示された。</p> <p>ついで、空隙率が40%で、RCSと引張強度の異なる多粒子焼結体、Type A、B、Cを作成し衝突破壊実験を行った結果を報告している。従来の実験で用いられた空隙率40%程度の焼結体のRCSが10⁻³程度であるのに対し、Type AとType BのRCSが0.19、Type CのRCSが0.027である。直径3 mmのガラスビーズ球と直径3 mmで長さ6 mmのポリカーボネイト円柱の弾丸を、神戸大学の小型ガス銃を用いて37-280 m/sに加速して実験が行われ、同じRCSの場合は引張強度が大きいほうが</p>			

氏名 町井 浩

Q_0^* が大きいことが確認され、RCS が 0.19 の焼結体は、同程度の引張強度を持つ RCS が 0.027 や 10^{-3} 程度の焼結体に比べて一桁小さい Q_0^* を持つことが明らかにされた。この結果から、焼結した氷小天体が、内部構造の違いにより、同じ空隙率であっても異なる Q_0^* を持ちうることを新しく提示した。

第三章では、隕石母天体集積の初期段階の素過程に関して、微粒子集合体への弾丸衝突による跳ね返り、潜り込みの条件を明らかにする研究の実験手法と結果を報告している。

岩石質隕石の中で大きな割合を占めるのがコンドライトである。コンドライトはコンドリュールと呼ばれるミリメートルサイズの球形のガラス質の粒子とその間を埋めるマトリックスと呼ばれる細粒な鉱物片で構成されている。コンドリュールは高温環境下で形成し、一方でマトリックスは高温を経験していないということがわかっている。コンドリュール形成モデルには、中心星付近で溶融したダストが小惑星帯付近まで飛ばされながら再固化するモデル、ガス円盤内で電荷を帯びたダスト同士の衝突によって発生する雷によってダストが溶融し再固化するモデル、ガス円盤内でガスと微惑星の間で発生する衝撃波によってダストが溶融し再固化するモデルの3つの代表的なモデルがある。しかし、コンドリュールとマトリックスが円盤内のどこでどのように混じりあったかについては、これまでほとんど研究がなされていない。標準的な太陽系形成論によると、原始太陽系円盤が形成されてから 10^3 年で、ダストは少なくとも数センチメートル以上に成長するとされている。そこで、本研究ではコンドリュールとマトリックスとなるダスト集合体が円盤内の別々の場所で形成した後合体したと仮定し、コンドリュールがダスト集合体に捕獲されるための貫入最小速度と最小貫入深さを調べている。

実験に用いられたマトリックス物質模擬試料(標的)は直径 $0.8 \mu\text{m}$ の多分散シリカ微粒子を空隙率 50, 75, 90 % の集合体としたもので、コンドリュール模擬体(弾丸)は直径 1.47 mm のガラスビーズである。衝突速度に応じて3種類の加速装置を用いて衝突実験が行なわれた。低速度 (0.2, 2 m/s) 衝突実験はドイツ・ブラウンシュバイク工科大学の内径 20 cm, 高さ約 2 m の落下管を用いて行なわれた。中間速度 (2.5 m/s) での衝突実験はバネ銃を用いて、高速度 (30-300 m/s) は神戸大学の小型ガス銃を用いて行なわれた。その結果、弾丸の跳ね返り、付着、貫入の3種類が見られた。空隙率が大きいほど、衝突速度が速いほど貫入がおこりやすいことが示された。

この結果を元に、跳ね返りと貫入の境界が、衝突時に発生する圧力(密度と音速と衝突速度の積で表される)と微粒子集合体の圧縮強度との大小で決まると予想し、その妥当性を検討するため、微粒子集合体の圧縮強度と音速の測定が行われた。内径 5, 10, 15, 20 mm のステンレス容器にシリカ微粒子を封入し圧縮試験機で加圧することで、印加圧力と空隙率の関係、すなわち静的圧縮曲線が得られた。さらに、圧縮初期の、圧力と変位が線形に変化する弾性領域のデータを用いて、微粒子集合体の音速のデータも複数取得し、音速と空隙率の間の実験式を求めた。これらの結果を用いて、衝突発生圧力と、微粒子集合体の強度を比較し、標的強度が衝突発生圧力よりも小さいときに貫入がおこり、標的強度が衝突発生圧力よりも大きいとき跳ね返りがおこるという予想が妥当であることを明らかにした。

ついで、空隙率 50, 75 % の標的について本実験で得られた貫入最小速度、46, 3 m/s が、原始太陽系円盤内中のダストの運動についての数値モデルから、どのような大きさのダストとコンドリュール粒子との間で実現されるかについて過去の代表的なモデルを用いて、それぞれが 90 cm, 10 cm であることを確認している。これらの標的サイズは、コンドリュールの大きさや実験で測定された弾丸貫入深さに比べてじゅうぶん大きいため、コンドリュールを捕獲することが可能であると考えられた。

第四章では、ふたつの研究の結論が述べられている。すなわち、同じバルク強度を持つ天体でも内部構造の違い、例えば RCS によって Q_0^* が異なることがわかった。また、標的天体のバルク強度と衝突発生圧力の関係から衝突結果が貫入なのか跳ね返りなのかを予測できることがわかった。

本研究は、空隙を内部に多く含む小天体模擬試料について、空隙率だけでなく内部構造が衝突破壊強度を左右しうることを示し、弾丸の跳ね返りと潜り込みの境界条件を明らかにした実験的研究であり、空隙をもつ小天体の衝突過程について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の町井 浩は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。