

機関番号：14501  
 研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20540411  
 研究課題名 (和文) コンドリュール - マトリックス構造から探る微惑星集積過程への拘束条件  
 研究課題名 (英文) Constrains on the growth process of planetesimals deduced from chondrule and matrix mixture formation  
 研究代表者 中村 昭子 (NAKAMURA AKIKO)  
 神戸大学・大学院理学研究科・准教授  
 研究者番号：40260012

## 研究成果の概要 (和文)：

太陽系形成初期に存在したと考えられる塵微粒子集合体・焼結体の模擬物質を用意し、これに対して、コンドリュールを模擬するガラス粒子を弾丸として、0.1m/s～数 10m/s の様々な衝突速度で打ち込む実験を行った。その結果、衝突速度、塵微粒子集合体や焼結体の物性（空隙率と強度）と、衝突応答の様式（反発、貫入、破壊）のデータを得た。コンドリュール模擬粒子が塵微粒子集合体にもぐりこみうる条件はパラメタ空間で狭い範囲に限られていることが示唆された。

## 研究成果の概要 (英文)：

We performed impact experiments in order to give some constraints for the formation condition of chondrule - matrix mixture. Glass bead of 1 - 4.7 mm in diameter was shot into agglomerates of silica particles or sintered glass beads with velocity ranged from 0.1 to several tens m/s. The result indicated that the impact condition in which the projectile can intrude into the porous target is limited.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総 計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

## 研究分野：惑星科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球物理学

キーワード：コンドリュール，圧密，微惑星，マトリックス，貫入

## 1. 研究開始当初の背景

惑星系の形成過程においては、塵から微惑星へ至る過程は、微惑星が重力不安定性によっていっきに形成される、あるいは、塵同士の衝突により段々と成長して形成される、の2つのシナリオがある。しかし、いずれもそれぞれに困難があるため、惑星系形成における未解決な大きな研究課題である。従来の研究では、この過程では、衝突した塵が必ず付着する、といった単純化が行なわれている。ま

た塵や微惑星の構造も過度に単純化されている。最近、数値シミュレーションや室内実験により、構成粒子数の小さい塵集合体についての衝突過程が扱われはじめているが、研究例はまだ非常に少ない。

他方、始原的隕石は、一般に、コンドリュールと呼ばれるミリメートルサイズの球状粒子がマトリックスと呼ばれる細粒の基質の中に存在する構造を持つ。コンドリュールとマトリックスの境には、リムと呼ばれる構造

が見られることもある。リムの起源には以下の2説があり、議論は分かれている。すなわち、集積前の星雲中でできた星雲説とコンドリュールが母天体に取り込まれた後にできたという母天体説である。このように、始原的隕石は、そのミクロな構造に太陽系初期の微惑星集積過程に関わる情報を内包しているのにも関わらず、これまで、この構造の物理的起源についての研究はなされていない。申請者らは、空隙をもった小天体の衝突進化過程や、微惑星集積過程における天体の物性進化を明らかにする目的で、多孔性物質の衝突破壊過程を研究してきた。具体的には、ガラスビーズ、ガラスビーズ焼結体、石膏、軽石などの標的に対する、低速 (m/s) ~ 高速 (km/s) の衝突実験を行い、反発、圧密、クレーター形成、破壊の各様式が起こる条件の整理や、それぞれの素過程、クレーターサイズや破片サイズ・速度と衝突条件の間の定式化を目指し、一部の実験結果については、海外の研究者 (ニース天文台 P. Michel など) と共同して数値シミュレーションとの比較を行いつつ研究を進めている。この中で、より太陽系初期の衝突過程の解明に特化して、今年度より、シリカ微粒子集合体の圧密・焼結過程の研究にも着手している。

シリカ微粒子が塵集合体として成長していく物理素過程の実験的研究は、ブラウンシュバイク工科大学の J. Blum とその共同研究者らによって精力的になされてきているが、J. Blum と互いの研究に興味を持って議論もつ中で、本研究について着想するに至った。

## 2. 研究の目的

塵微粒子集合体・焼結体に対して、コンドリュール模擬粒子を 1m/s ~ 数 10m/s の様々な衝突速度で打ち込む実験を行うことにより、以下を具体的目的として研究を遂行する。

すなわち、衝突速度、塵微粒子集合体・焼結体の物性 (空隙率、強度) と、衝突応答の様式 (反発、圧密、クレーター形成、破壊) の定式化を行う。

## 3. 研究の方法

コンドリュール模擬粒子としての 1mm ガラス球を速度数 10m/s まで加速する装置を開発する。シリカ微粒子集合体・焼結体を作成し、これを標的として、コンドリュール模擬粒子を 1 ~ 数 10m/s の様々な衝突速度で打ち込む実験を行う。衝突速度・標的の物性値 (空隙率や圧密時の応力-変位の挙動など) と、標的の衝突応答を記載・整理し、隕石マトリックスとなる微粒子基質中にミリメートルサイズの球状粒子が埋め込まれるための、集積の速度条件・微粒子集合体の物性値のとりうる範囲を絞っていく。

## 4. 研究成果

### (1) 1mmガラス球の加速

口径3.2mmの小型ガス銃を用いて、ヘリウムガスで加速した直径3.2mmの球弾丸により一次標的に圧縮波をおこし、この波によって、一次標的後段に設置した直径1mmのコンドリュール模擬粒子を玉突き的に加速する手法を試みた。弾丸速度は、高速度カメラ画像から決定した。一次標的厚みと1mm弾丸の設置方法を変化させ試射を行ったところ、~160m/sの速度までの加速に成功した。しかしながら、1mm弾丸粒子の弾道を制御するのが困難であった。

そこで、小型ガス銃の銃口に孔のあいたキャップをかぶせ、1mm弾丸を先端につけた直径3mmのポリカーボネートの円柱型弾丸をこのキャップを用いて銃口直後で止め、1mm弾丸だけ撃ち出す方法を試みた。その結果、ほぼ銃身に平行な弾道で安定して1mm弾丸を速度~200m/sに加速し、1辺1mmの正方形内に衝突させることができた。

### (2) 粒子集合体・焼結体の物性の理解

塵集合体が空隙を失い強度を獲得していく過程として、圧密と焼結に着目して、サイズ0.1~数10 $\mu\text{m}$ の粒子からなる集合体についての2つの実験を行ってきた。シリカ粒子について、焼結体の強度がネック半径の2乗 (つまり断面積) ではなく約1乗に比例して大きくなることが示された。この原因を理解するために、直径5mmのガラス粒子を焼結させて、ネック半径と強度の関係を調べる実験を行った。

まず、図1のガラス粒子2個を、それぞれ温度と加熱時間を変えて焼結させ、サイズの異なるネックを成長させた。また、焼結後に引張強度を測定した。図2に示すように、ネックが短いときには引張強度がばらつくが、ネックが十分に大きくなると、ネック半径の2乗に比例することがわかった。ネック断面を顕微鏡観察すると、強度がばらつく焼結試料の方は断面がでこぼこであるのに対し、強度がネック半径の2乗に比例する焼結試料は断面が滑らかであった。したがって、シリカ微粒子焼結体の強度がネック長さの1乗に比例したことは、焼結が十分にすすんでおらずネック内部の物理的結合にむらがあったためと推察された。ネックを破壊するのに必要な曲げ力は引張力よりも小さいことが分かった。

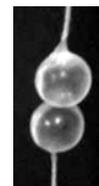


図1. 5mmビーズによる2粒子焼結体

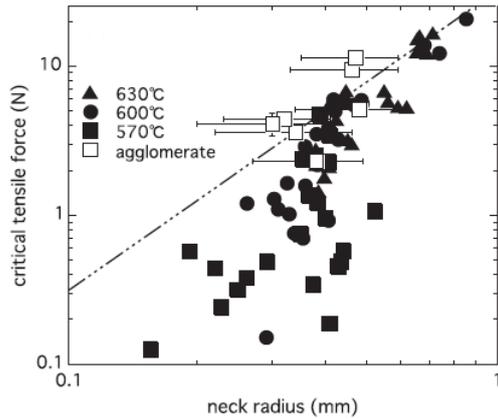


図2. ネック半径と、ネック破壊に必要な引張力。

### (3) 衝突実験

#### ① ガラスビーズ焼結体への衝突実験

ネック半径と強度の関係を調べたガラスビーズを用い、図3に示す、空隙率約40%のガラスビーズ焼結体を作成した。強度は2種類である。直径3mmのガラスビーズを弾丸として、神戸大学の小型ガス銃を用いて40~280 m/sに加速した。衝突速度を変えてガラスビーズ焼結体の破壊の程度を調べた結果が図4である。同じ引張強度、同じ空隙率であっても、構成粒子数が少ない試料のほうが、元の試料の半分の質量に壊れるのに要するエネルギー( $Q^*$ )が小さいことが明らかになった。



図3. ガラスビーズ焼結体

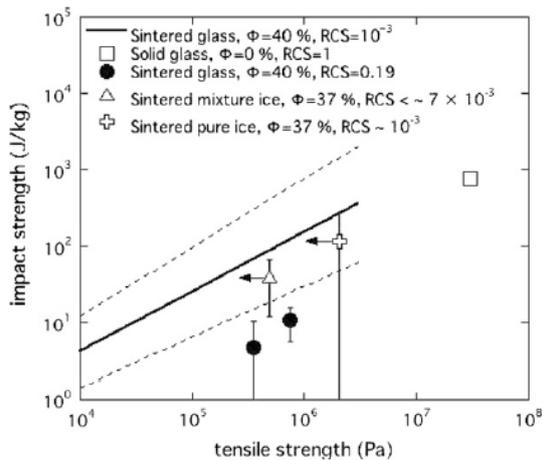


図4.  $Q^*$ と引張強度の関係。RCSは、構成粒子サイズと試料サイズの比。

#### ② シリカ微粒子集合体への貫入実験

ブラウンシュバイク工科大学Blum研究室の自由落下による微小重力観測装置により、超低速度での衝突実験を行った。中心直径が0.8  $\mu\text{m}$ のシリカ微粒子集合体で、空隙率が55, 73, 92%のものを用意した。弾丸としては直径1mmと5mmのガラス球を用いた。その結果、空隙率92%、衝突速度1m/sの衝突では弾丸の貫入が確認されたが、それ以外の条件では跳ね返りがおこった。一方、神戸大学の小型ガス銃を用いて加速し、空隙率75%のシリカ微粒子集合体に対して速度約10~160 m/sで打ち込んだ直径1mmのガラス球は、いずれも貫入したものの、衝突点近傍からは微粒子エジェクタが放出された。これら実験の結果から、微粒子集合体へ弾丸が貫入して内部で保持され、エジェクタが大量には放出されない衝突条件は、狭いパラメタ空間に限定されることが示唆された。

③ さらに、このような微粒子層への弾丸のめぐりこみの動力学を理解するため、弾丸が微粒子層内でどのように減速されるか調べる準静的・動的实验を行った。動的实验では、流体抵抗(弾丸速度2乗に比例する抵抗)とそれ以外の抵抗力を受けていることがわかった。

本研究により、直径1mmの単独弾丸を速度150m/s程度まで加速することができるようになった。同じバルク空隙率や強度が同じでも、集合体(焼結体)の構成粒子サイズ(総数)によって衝突への応答が異なることが新たに示された。さらに、微粒子集合体への弾丸貫入が可能な衝突条件は、狭い範囲に限られることが示唆された。今後、衝突速度、空隙率、強度、微粒子集合体の粒子数、を変化させて実験データを蓄積することで、弾丸捕獲可能条件が絞られる。

#### 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5件)

1. Niimi, R., Kadono, T., Arakawa, M., Yasui, M., Dohi, K., Nakamura, A. M., Iida, Y., and Tsuchiyama, A. In situ observation of penetration process in silica aerogel: deceleration mechanism of hard spherical projectiles. *Icarus* **211**, 986-992, 2011. (査読有)
2. Machii, N. and Nakamura, A. M., Experimental study on static and impact strength of sintered agglomerates. *Icarus* **211**, 885-893, 2011. (査読有)
3. Nakamura, A. M., Hiraoka, K., Yamashita, Y., and Machii, N. Collisional disruption experiments of porous targets. *Planet. Space Sci.*

57, 111-118, 2009. (査読有)

4. Jutzi, M., Michel, P., Hiraoka, K., Nakamura, A.M., and Benz, W. Numerical simulations of impacts involving porous bodies:II. Comparison with laboratory experiments. *Icarus* **201**, 802-813, 2009. (査読有)

5. Fujii, Y. and Nakamura, A. M. Compaction and fragmentation of porous gypsum targets from low-velocity impacts. *Icarus* **201**, 795-801, 2009. (査読有)

[学会発表] (計 11 件)

1. Machii, N., Nakamura, A. M., Beger, D., Guettler, C., and Blum, J. Drop experiments simulating a collision between chondrules and matrix under microgravity, AOGS2011, Taipei, 2011 年 8 月 10 日(発表予定).

2. Nakamura, A. M., Deceleration of low velocity impactor by regolith, Recent Progress in Physics of Dissipative Particles. - From fine powders to macroscopic behaviors of granular particles s -, 京都大学基礎物理学研究所, 2010 年 11 月 25 日.

3. 中村昭子, 瀬藤真人, レゴリス層への貫入実験, 日本惑星科学会秋季講演会, 名古屋大学, 2010 年 10 月 6 日.

4. Machii, N. and Nakamura A. M. Impact strength of sintered agglomerates. 43st ISAS Lunar and Planetary Symp., held August 4-6, 2010 at ISAS in Sagamihara.

5. Machii, N., Nakamura, A. M., and Fujii, Y., Impact disruption experiments of sintered glass beads aggregate consisting of millimeter-size particles. 41st Lunar and Planetary Science conference, held March 1-5, 2010 in The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1533, p. 2069.

6. 中村昭子, 粒子層への貫入則についての実験的試み, 低温研共同利用研究集会/科研費基盤 (A) 「惑星系円盤ダストの統合モデルの確立」, 天体の衝突物理の解明 (V), 北海道大学低温科学研究所, 札幌, 2009 年 11 月 11-13 日.

7. 町井渚, 中村昭子, ソーダライムガラスビーズ焼結体の物理的特性に関する測定・観察, 日本惑星学会秋季講演会, 東京大学, 2009 年 9 月 28-30 日.

8. Machii, N. and Nakamura, A. M. Experimental study on the bulk strength of sintered dust aggregate analog. Origins of Solar Systems, Gordon Research Conferences held July 5-10, 2009 in Mount Holyoke College, South Hadley, MA, U.S.A.

9. 町井渚, 中村昭子, シリカ微粒子集合体へのミリメートルサイズガラス粒子の衝突実験, 日本惑星科学会 2008 秋季講演会, 九州大学, 2008 年 11 月 2 日.

10. Machii, N. and Nakamura, A. M. Compaction experiments of silica aggregates. 41st ISAS Lunar and Planetary Symp. held August 6-8, 2008 at ISAS in Sagamihara.

11. Machii, N. and Nakamura, A. M. Measurement of porosity- pressure relation of silica micro particles and its application to impact compaction of dust aggregates, AOGS2008, Busan, Korea, 2008 年 6 月 18 日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 昭子 (NAKAMURA AKIKO)

神戸大学大学院理学研究科・准教授

研究者番号 : 40260012

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

Juergen Blum (ブラウンシュバイク工科大学, 教授)