

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21540434

研究課題名（和文） コンドリュール形成理論の新展開：宇宙塵との比較を用いて

研究課題名（英文） A New Development of Chondrule Formation Theory: Based on a Comparison with Cosmic Spherules

研究代表者

中本 泰史（NAKAMOTO TAI SHI）

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：60261757

研究成果の概要（和文）:

隕石中に見られるコンドリュールの成因は、未解明の問題である。本研究ではその成因に迫るため、類似の溶融シリケート小球である宇宙塵の形成過程の解明を試みた。まず、宇宙塵の形状と化学組成、結晶組織を測定・観察し、それらの間に一定の関係があることを見出した。そして、それらの間の関係は、宇宙塵小球の大気中の運動や加熱・冷却過程をもとに、定量的に理解できることを明らかにした。こうした宇宙塵に対する理解を基に、コンドリュールの成因に対する新たな研究の進展が期待できるだろう。

研究成果の概要（英文）:

Formation mechanism of chondrules, which are included in most of meteorites, has not been understood clearly. To elucidate the formation process, we approach to the formation process of cosmic spherules that are silicate small particles similar to chondrules. First, we measure the shape, chemical composition, and texture of each cosmic spherule. We find a clear correlation among them. Also, we find that the correlation can be understood quantitatively using a theory of the motion of the particle in the Earth atmosphere and the heating/cooling to the particle. Based on these understandings, we expect new studies on the formation mechanism of chondrules should be developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：惑星形成，隕石，コンドリュール，宇宙塵

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者はこれまで、コンドリュールの形成過程を衝撃波加熱モデルに基づいて理論的に調べてきた。そしてこのモデルが、コ

ンドリュール形成モデルとして有力であることを明らかにしてきた。実際、いくつかの独立な観測結果が衝撃波加熱コンドリュール形成モデルで説明できている。しかし、こ

のモデルの説得力がまだ十分ではなく、全ての研究者に受け入れられているわけではないことは事実である。そこで代表者は、宇宙塵形成が地球大気によるガス摩擦加熱現象であることに注目し、宇宙塵形成を衝撃波加熱モデルの検証試験として使えないかと考えた。宇宙塵の形成を再現することが出来れば、衝撃波加熱モデルの物理的側面の信頼性を高めることができる。また同時に、宇宙塵自身の形成過程についても理解を深めることができるだろうと考えた。

## 2. 研究の目的

本研究は、コンドリュールと宇宙塵の形成過程を想定し、固体粒子に対するガス摩擦加熱現象の詳細を明らかにすることを目的とする。特に、コンドリュールや宇宙塵の形状や分裂といった力学的効果が現れる面に注目し、コンドリュールと宇宙塵の形成過程の類似点や相違点を物理的側面から明らかにする。そしてそれらをもとに、信頼性が高い新しいコンドリュール形成理論を展開し、コンドリュール起源の研究を質的に大きく前進させることを目指す。

## 3. 研究の方法

宇宙塵の観察・測定と、数値計算や理論モデル化を行う。具体的には次の通り。

- (1) 南極氷中から採取された全溶融経験宇宙塵の形状と組成、結晶組織を測定する。
- (2) 大気中での宇宙塵への加熱、溶融・再固化を理論的にモデル化する。
- (3) 測定結果と理論モデルを比較し、モデルの検証を行う。それを通し、全溶融宇宙塵形成過程を理解する。
- (4) コンドリュール形成モデルに応用する。

## 4. 研究成果

研究の全体は、宇宙塵試料の測定と、その結果を解釈し、コンドリュール形成への応用を検討する理論の2部からなる。これらを組み合わせることにより、宇宙塵の形成に関する総合的な理解が得られた。

### (1) 宇宙塵試料の測定

日本の南極観測の一環として南極の氷中から、宇宙塵が採集された。そのうち、いったんは全溶融した形跡のある数百個を測定

試料として用いた。試料の直径はおよそ、 $100\mu\text{m} - 238\mu\text{m}$ である。

一個一個の宇宙塵試料の外形を測定した。その後、削って内部を露出させ、その断面を電子顕微鏡で観察した。また、EPMAを用いて元素組成を測定した。

測定の結果は、次のようにまとめられる。

### 形状

大きさや変形度（球からのずれ）には、概ね、正比例の関係がある。ただし、ほとんど球に近いようなものもある。

測定結果は、図1のようにまとめられる。ここで  $A$ ,  $B$ ,  $C$  は、試料を3軸楕円体としたときの長軸半径、中軸半径、短軸半径である。

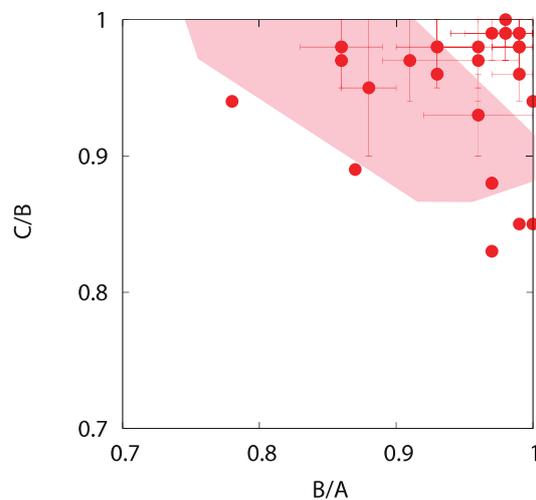


図1：宇宙塵試料の変形度。赤点が試料個々の測定値。 $B/A=C/B=1$  は、球に対応する。右隅から離れるほど、球からのズレが大きい。赤色塗り領域は、理論的予測値 A を示す。

このように、各資料はおおよそ 10%程度、球からずれているものがあることがわかった。

### 組成

宇宙塵は、かんらん石と輝石を主成分としている。主要元素である Fe, Mg, Si の比を図示すると、図2のようになった。宇宙塵の組成は、出発物質を隕石や彗星の塵とし、蒸発に応じて Fe や Si が減少したものとしておおよそ理解することができる。ただし緑点に対応する宇宙塵は、単なる蒸発ではその組成が説明できない。別の出発物質を考える必要がある。

### 組織

宇宙塵の内部には、結晶組織がある場合とない場合（全体がガラス状）がある。観察の

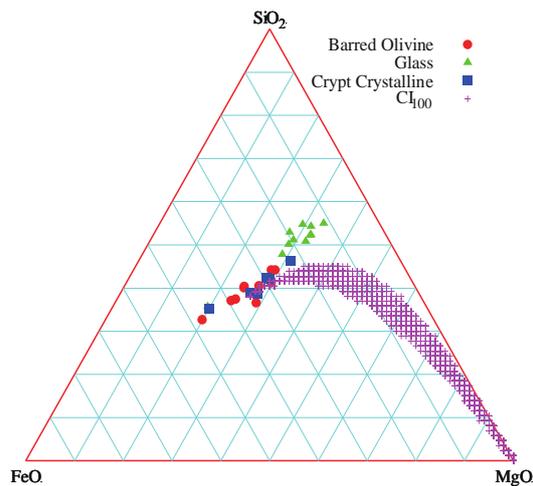


図 2：宇宙塵の主要組成。赤点と青点が本研究での測定値。緑点は文献値 (Taylor et al. 2000, MAPS 35, 651)。紫色の点群は、蒸発理論を用いた理論的予測値。

結果、組織と組成の間には明確な関係があり、かんらん石成分が多いものは結晶を含み、輝石成分が多いものはガラス状になっていることが分かった。

以上の測定・観察結果の間関係は、次のようにまとめられた。

かんらん石の多いものは、結晶になっている。

さらに、固化温度の高い組成を持つ宇宙塵ほど、球形からのずれが大きい。

過冷却状態になりやすい輝石が多い宇宙塵は、非結晶（ガラス質）になっている。

非結晶の宇宙塵の形状は、球形からのずれが小さい。

## (2) 理論モデルをもとにした解釈

以上の測定・観察結果は、宇宙塵形成に関する理論モデルをもとに理解することができる。まず、理論モデルでは次のような点を考慮した。

大気中の運動：地球重力に引かれながら、大気摩擦を受けて減速する。粒子の大きさと速度に応じたガス抵抗を考慮すると、大気中の減速運動を求めることができる。

ガス摩擦による加熱：大気との摩擦により、宇宙塵は加熱される。一方で、蒸発により熱が奪われる。また、放射によっても熱が奪われる。これらの結果として、時々刻々の温度および熔融状態を求めることができる。

固化温度：組成によって、固化温度が異なる。

る。一般に、かんらん石成分が多いほど固化温度が高い (Hewins R. H. and Radomsky P. M., *Meteoritics*, 25, 309, 1990年)。測定された組成をもとに個々の宇宙塵の固化温度を推定する。

変形：大気中を運動する粒子は大気からガス動圧を受ける。熔融中はこれにより、変形したり内部が流動したりする。ガス動圧に応じ、変形量を求めることができる。固化温度と組み合わせると、固化時の変形を求めることができる。

このようなモデルにより、前節にまとめられたような測定・観察は次のように理解することができることが分かった。

固化温度が高い組成を持つものほど、高いガス動圧を受けた状態で固化するため、変形が大きい。すなわち、かんらん石組成のものほど、変形が大きい結果となっている。

かんらん石は過冷却を起こしにくい、変形度と照らし合わせると、ほぼ、組成によって決まる固化温度で固化したことがわかる。

かんらん石組成のものは、固化温度で固化し、結晶組織を形成した。

過冷却を起こしやすい輝石成分が多いものは、固化温度を下回っても液体のままであった。その後、十分減速し（ガス動圧が低下し）、ガラス転移温度に至ってから急激に固化し、ガラス状となった。このため、変形も小さく、ほぼ球の形状をしている。

以上のように、測定結果はガス中を運動する固体粒子に対する理論モデルで、定量的にも理解することができる。すなわち、代表者らが以前からコンドリュール形成理論として構築してきた加熱モデルは、信頼できるものであることが実証された。

## (3) コンドリュール形成理論への応用

本研究により、コンドリュール形成理論として従来から構築されてきていた「衝撃波加熱コンドリュール形成理論」の根幹である「ガス摩擦による固体粒子加熱モデル」は、宇宙塵を用いることで、定量的にも信頼できる理論モデルであることを確かめることができた。今後はこの知見を元に、「衝撃波加

熱コンドリュール形成理論」がさらに発展させられることが期待される。具体的には、次のような点に取り組んでいくことが適当であろう。

溶融と変形の関係：ガス摩擦加熱が作用しているときは、同時にガス動圧も作用しているため、溶融体は変形する。過冷却を経ない場合は、その変形が固化したコンドリュールに継承される。これを調べて加熱時に動圧を受けていたことが確かめられれば、コンドリュールを加熱した加熱機構として、衝撃波加熱モデルは強い証拠を得ることになる。

組成と変形の関係：コンドリュールの中に、過冷却を起こしやすい輝石成分の多寡と変形の大小の関係を見出すことができれば、同じく、加熱機構としての衝撃波加熱モデルの可能性が高くなることになる。

#### 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3件)

Oka, A., Inoue, A. K., Nakamoto, T., and Honda, M. Effect of Photodesorption on Snow Line at the Surface of Optically Thick Circumstellar Disks Around Herbig Ae/Be Stars, *Astrophysical Journal*, 747, 138 - 149 (2012) 査読有, doi: 10.1088/0004-637X/747/2/138

Oka, A., Nakamoto, T., and Ida, S. Evolution of Snow Line in Optically Thick Protoplanetary Disks: Effects of Water Ice Opacity and Dust Grain Size, *Astrophysical Journal* 738, 141 - 151 (2011) 査読有, doi: 10.1088/0004-637X/738/2/141

Miura, H., Tanaka, K. K., Yamamoto, T., Nakamoto, T., Yamada, J., Tsukamoto, K., and Nozawa, J. Formation of Cosmic Crystals in Highly-Supersaturated Silicate Vapor Produced by Planetesimal Bow Shocks, *Astrophysical Journal* 719, 642 - 654 (2010) 査読有, doi: 10.1088/0004-637X/719/1/642

[学会発表](計17件)

Nakamoto, T., Doi, M., Nakamura, T., and Yamauchi, Y., A Correlation among Shape, Composition, and Texture of Cosmic Spherules, *European Geoscience Union Annual Meeting*, 2012年4月27日, ウィーン

土居政雄, 中本泰史, 中村智樹, 山内佑司, 宇宙塵の組成, 組織, 形状の関係とその起源, 日本天文学会秋季年会, 2011年9月19日, 鹿児島大学

Doi, M., Nakamoto, T., Nakamura, T., and Yamauchi, Y., Three-Dimensional Shapes of Cosmic Spherules: Deformation of Dust Particles Molten in the Earth Atmosphere, *Asia Oceania Geosciences Society Annual Meeting*, 2010年7月5日-9日, Hyderabad, India

[図書](計1件)

井田茂, 中本泰史, ソフトバンククリエイティブ, ここまでわかった新・太陽系, 2009年, 286頁

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

中本 泰史 (NAKAMOTO TAISHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 60261757

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: