

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340102

研究課題名(和文)コンドリュール形成過程の解明：形状・組成・組織の測定と理論計算によるアプローチ

研究課題名(英文) Study of Chondrule Formation Processes: An Approach Combining Theoretical Calculations and Measurements of Shape, Composition, and Texture of Chondrules

研究代表者

中本 泰史 (Nakamoto, Taishi)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：60261757

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：隕石内主要構成要素であるコンドリュールの成因を明らかにするため、アエンデ隕石内のコンドリュールの外形と内部組織を調べた。100個弱のコンドリュールを測定・観察し、内部構造をもとに推定したところ、全溶融していたと推定されるコンドリュールを15個見つけた。これらの大きさや変形度の関係を求め、ガス摩擦加熱によるコンドリュール形成を想定した理論から予測される大きさや変形度の関係と比較した。すると、両者は調和的であることがわかった。すなわち、アエンデ隕石内のコンドリュールは溶融時にガス動圧を受けていたことが示唆された。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the external shape and internal structure of chondrules contained in Allende meteorite, to reveal the chondrule formation mechanism. We measured about 100 chondrules and found 15 chondrules, which can be considered to be completely molten once. We compare the obtained relationship between the size and the shape of those chondrules with the theoretical relation that is obtained assuming the gas-frictional heating. Then, we have found that those two relations are consistent each other. This implies that the chondrules in Allende meteorite were exposed to the gas flow when they were molten.

研究分野：惑星科学

キーワード：コンドリュール 成因 形状 組成 組織 惑星系形成 原始惑星系円盤

1. 研究開始当初の背景

コンドリュールとは、コンドライト隕石の主要な構成要素で、大きさが 0.1mm から 1mm 程度でシリケート組成をもつ球形構造である。コンドリュールは、原始太陽系星雲中の固体微粒子が何らかの加熱を受けて溶融し、形成されたと考えられている。コンドリュール形成過程の理解は、惑星形成前の原始太陽系星雲の状態の解明につながる重要な研究課題である。

コンドリュール形成機構研究の焦点の一つは、前駆体の加熱機構である。一般に原始太陽系星雲は低温であり、シリケート組成の前駆体を溶かすような高温を生じる場所がほとんどないからである。本研究の開始当初、議論されていた主な機構は次の 3 つである。(1) 雷加熱モデル、(2) X-wind モデル、(3) 衝撃波加熱モデル。これら 3 つの機構のうち、(2)と(3)では加熱時に前駆体はガス流にさらされている。すなわち、ガス動圧の影響下でコンドリュールが形成されたことを示唆する。しかも、(2)と(3)ではガス流の動圧の強さが異なる。したがって、コンドリュール形成時のガス動圧の有無およびその圧力がわかれば、上記 3 つの形成機構を判別し得ることになる。

2. 研究の目的

本研究の主目的は、コンドリュール形成機構の解明に迫ることである。具体的には、コンドリュールの 3 次元形状、化学組成、結晶組織を測定・観察し、これら 3 つの間の相関の有無を明らかにする。これにより、コンドリュール形成時にガス動圧が作用していたかが判明する。ガス動圧の有無はコンドリュールの形成機構を明らかにする上で重要な因子であり、それが判明すると、考えられる形成機構が限定されることになる。本研

究は、コンドリュール形成機構の解明に向けた大きな一歩となるであろう。

3. 研究の方法

本研究は、次の 2 つの部分からなる。

(1)隕石中のコンドリュールの 3 次元形状、組成、組織を測定・観察する、(2) 測定結果を理論モデルと比較する。これらにより、コンドリュール形成場の物理状態の解読を試みる。

当初、コンドリュールの 3 次元形状測定のためには、隕石片を分解して隕石中からコンドリュールを取り出し、測定するとしていた。実際、本研究の前半ではこの方法を実施した。しかし、この方法は効率が悪い。一方、X 線 CT 装置を用いると、個々のコンドリュールの 3 次元形状の測定が隕石片中に埋もれたままでもできることがわかった。さらに X 線 CT の画像から、コンドリュール内部の組織構造もある程度わかる。したがって、本研究後半では、X 線 CT 装置を用いた測定・観察を用いた。

得られた測定結果を、研究代表者が構築した理論モデルと比較し、コンドリュール溶融時にガス動圧を受けていたかどうかの検討を行った。ただし、理論モデルは全溶融している液滴に対して適用できるものであるため、理論との比較は、全溶融していたと推定できるコンドリュール(内部組織がバードオリビンや放射状輝石、微結晶構造などを持っているもの)に限って行った。

4. 研究成果

本研究では、Allende 隕石内のコンドリュールを測定の対象とした。コンドリュールの外形形状を測定すると共に、内部の組織を観察した。100 個弱のコンドリュールを測定・観察し、内部構造をもとに推定したところ、全溶融していたと

推定されるコンドリュールを 15 個見つけた。これらの大きさと変形度の関係を、理論から予測される関係と比較した。すると、両者は調和的であることがわかった。すなわち、これらのコンドリュールは溶融時にガス動圧を受けていたことが示唆された。

これは、コンドリュールの成因解明にとってたいへん大きな示唆である。ただし、現在の試料数は 15 個とやや少ない。より信頼性の高い結論を得るには、今後、測定試料数をさらに増やすことが望ましい。また、研究目標としながら期間中に完了できなかったことは、コンドリュール内部の組成と外形との相関を見ることである。これは、溶融温度の推定と関連しており、コンドリュール形成機構解明のためにはやはり有意義な観点である。今後、この点の研究が実施されることが望ましい。

なお本研究は、従来の研究とは全く異なる視点でコンドリュールの成因に迫ろうというものであるが、こうした新しい視点での研究が有効であることが示された点も、意義深いと言えよう。

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 14 件)

(1) Ito, Y., Ikoma, M., Kawahara, H., Nagahara, H., Kawashima, Y., and Nakamoto, T.

Theoretical Emission Spectra of Atmosphere of Hot Rocky Super-Earths

2015, *Astrophysical Journal* **801**, article id. 144 (15pp.), 査読有り

DOI: 10.1088/0004-637X/801/2/144

(2) Yokoyama, T., Fukami, Y., Okui, W., Ito, N. and, Yamazaki, H.

Nucleosynthetic Strontium Isotope Anomalies in Carbonaceous Chondrites

2015, *Earth & Planetary Science Letters* **416**, 46 - 55, 査読有り

DOI:10.1016/j.epsl.2015.01.040

(3) Tanaka, R., Yokoyama, T., Kitagawa, H., Tesfaye, D.B., and Nakamura, E.

Evaluation of the applicability of acid leaching for the 238U-230Th internal isochron method

2015, *Chemical Geology* **396**, 255 - 264, 査読有り

DOI: 10.1016/j.chemgeo.2014.12.025

(4) Nagawasa, M., Tanaka, K. K., Tanaka, H., Nakamoto, T., Miura, H., and Yamamoto, T.

Revisiting Jovian-Resonance Induced Chondrule Formation

2014, *Astrophysical Journal* **794**, article id. L7 (5 pp.), 査読有り

DOI: 10.1088/2041-8205/794/1/L7

(5) K. Tsumura, K. Arimatsu, E. Egami, Y. Hayano, C. Honda, J. Kimura, K. Kuramoto, S. Matsuura, Y. Minowa, K. Nakajima, T. Nakamoto, M. Shirahata, J. Surace, Y. Takahashi, and T. Wada

Near-Infrared Brightness of the Galilean Satellites Eclipsed in Jovian Shadow: A New Technique to Investigate Jovian Upper Atmosphere

2014, *Astrophysical Journal* **789**, article id. 122 (6 pp.), 査読有り

DOI: 10.1088/0004-637X/789/2/122

(6) Kurokawa, H. and Nakamoto, T.

Mass-Loss Evolution of Close-In Exoplanets: Evaporation of Hot Jupiters and the Effect on Population

2014, *Astrophysical Journal* **783**, article id. 54 (11 pp.), 査読有り

DOI: 10.1088/0004-637X/783/1/54

(7) Nagai, Y. and Yokoyama, T.

Chemical Separation of Mo and W from Terrestrial and Extraterrestrial Samples via Anion Exchange Chromatography.

2014, *Analytical Chemistry* **86**, 4856 - 4863, 査読有り

DOI: 10.1021/ac404223t

(8) Uno, M., Iwamori, H., Nakamura, H., Yokoyama, T., Ishikawa, T., and Tanimizu, M.

Elemental transport upon hydration of basic schists during regional metamorphism: Geochemical evidence from the Sanbagawa metamorphic belt, Japan

2014, *Geochemical Journal* **48**, 29 - 49, 査読有り

DOI : 0.2343/geochemj.2.0283

(9) Fukami, Y. and Yokoyama, T.

Precise tellurium isotope analysis by

negative thermal ionization mass spectrometry (N-TIMS)

2014, *J. Anal. At. Spectrom.* **29**, 520 - 528, 査読有り

DOI : 10.1039/c3ja50317h

(10) Tanaka, K. K., Yamamoto, T., Tanaka, H., Miura, H., Nagasawa, M., and Nakamoto, T.

Evaporation of Icy Planetesimals Due to Bow Shocks

2013, *Astrophysical Journal* **764**, article id. 120 (11 pp.), 査読有り

DOI: 10.1088/0004-637X/764/2/120

(11) Feineman, M., Moriguti, T., Yokoyama, T., Terui, S., and Nakamura, E.

Sediment-enriched adakitic magmas from the Daisen volcanic field, Southwest Japan

2013, *Geochem. Geophys. Geosystem.* **14**, 3009 - 3031, 査読有り

DOI : 10.1002/ggge.20176

(12) Kurokawa, H. & Nakamoto, T.

Effects of Atmospheric Absorption of Incoming Radiation on Radiation Limit of the Troposphere

2012, *Journal of the Atmospheric Sciences* **69**, 403 - 413, 査読有り

DOI: 10.1175/JAS-D-11-0108.1

(13) 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

2012, *Astrophysical Journal* **747**, article id. 138 (12 pp.), 査読有り

DOI: 10.1088/0004-637X/747/2/138

(14) Moynier, F., Day, J.M.D., Okui, W., Yokoyama, T., Bouvier, A., Walker, R.J. and Podosek, F.A.

Planetary-scale strontium isotopic heterogeneity and the age of volatile depletion of early solar system materials

2012, *Astrophysical Journal* **758**, article id. 45 (7 pp.), 査読有り

DOI: 10.1088/0004-637X/758/1/45

[学会発表](計 17 件)

(1) Yokoyama, T., Yamazaki, H., Hasegawa, S.

Nucleosynthetic strontium isotope anomalies in carbonaceous chondrites

46th Lunar and Planetary Science Conference, 2015 年 3 月 16 日-20 日, The Woodland, Texas (米国)

(2) Fukai, R., Yokoyama, T., Kagami, S., Takahashi, H.

High precision neodymium isotopic analysis of chondrites with complete sample digestion

46th Lunar and Planetary Science Conference, 2015 年 3 月 16 日-20 日, The Woodland, Texas (米国)

(3) T. Nakamoto, K. Nakajima, K. Tsumura, K. Arimatsu, E. Egami, Y. Hayano, C. Honda, J. Kimura, K. Kuramoto, S. Matsuura, Y. Minowa, M. Shirahata, J. Surace, Y. Takahashi, and T. Wada

Bright Galilean Satellites in Jovian Shadow: Light Scattering by Jovian Upper Atmosphere

The 2014 German-Japan meeting on Exo-Planets and their formation, 2014 年 11 月 4-7 日, ハイデルベルグ (ドイツ)

(4) 中本泰史, 高橋栄一, 津田彩花, 西田圭佑, 奥井航, 横山哲也, 柳田泰宏, 奥村聡, 中村美千彦, 佐々木理

アエンデ隕石中コンドリュールの 3 次元外形と内部組織の分析

日本惑星科学会秋季講演会, 2014 年 9 月 24-26 日, 東北大学, 宮城県仙台市

(5) 横山哲也, 深海雄介, 永井友一朗, 中本泰史

太陽系内の熱プロセスと隕石の重元素同位体異常

2014 年度日本地球化学会年会, 2014 年 9 月 16 日-18 日, 富山大学, 富山県富山市

(6) Nakamoto, T., Takahashi, E., Tsuda, A., Nishida, K., Okui, W., Yokoyama, T., Yanagida, Y., Okumura, S., Nakamura, M., and Sasaki, O.

Three-Dimensional External Shape and Internal Structure of Chondrules in Allende CV3 Chondrite

Annual Meeting of Meteoritical Society, 2014 年 9 月 8-12 日, カサブランカ (モロッコ)

(7) Yokoyama, T., Fukami, Y., Nagai, Y., and Nakamoto, T.

Volatility control of isotope heterogeneity in the early solar system

45th Lunar and Planetary Science Conference, 2014 年 3 月 17 日-21 日, The Woodland, Texas (米国)

(8) Fukami, Y., Yokoyama, T., and Okui, W

Tellurium isotope anomaly in acid resistant fraction of Allende meteorite

45th Lunar and Planetary Science

Conference, 2014 年 3 月 17 日-21 日, The Woodland, Texas (米国)

(9) Okui, W., Yokoyama, T., Usui, T., Iwamori, H., and Uno, M.

Strontium stable isotope anomalies in Allende chondrules

45th Lunar and Planetary Science Conference, 2014 年 3 月 17 日-21 日, The Woodland, Texas (米国)

(10) 奥井航, 横山哲也, 中本泰史, 高橋栄一, 佐々木理, 中村美千彦, 奥村聡
始原的隕石と斑状コンドリュールのストロンチウム安定同位体異常に関する研究
日本惑星科学会秋季講演会, 2013 年 11 月 20-22 日, 石垣市民会館, 沖縄県石垣市

(11) Nakamoto, T.

Formation of Chondrules (招待講演)

The First Hundred Million Years of the Solar System, 2013 年 11 月 4-8 日, 台北(台湾)

(12) 津田彩花, 西田圭佑, 高橋栄一, 中本泰史, 横山哲也, 佐々木理, 鹿納晴尚, 柳田泰宏, 奥村聡, 中村美千彦

アエンデ隕石中のコンドリュールの 3 次元形状と内部組織の関係

日本地球惑星科学連合大会, 2013 年 5 月 19-24 日, 幕張メッセ, 千葉県千葉市

(13) 西田圭佑, 津田彩花, 高橋栄一, 中本泰史

微小球状資料の簡易 3 次元形状測定システムの開発: コンドリュールへの応用

日本地球惑星科学連合大会, 2013 年 5 月 19-24 日, 幕張メッセ, 千葉県千葉市

(14) 高橋栄一, 津田彩花, 西田圭佑, 佐々木理, 柳田泰宏, 奥村聡, 中村美千彦, 中本泰史

アエンデ隕石中のコンドリュールの内部組織

日本地球惑星科学連合大会, 2013 年 5 月 19-24 日, 幕張メッセ, 千葉県千葉市

(15) Okui, W. and Yokoyama, T.

Strontium stable isotopic anomalies in primitive meteorites and chondrules

44th Lunar and Planetary Science Conference, 2013 年 3 月 21 日, The Woodland, Texas (米国)

(16) Nakamoto, T.

Possible Inhomogeneity Inside of Asteroids

Asteroids, Comets, Meteors, 2012 年 5 月 17 日, 朱鷺メッセ, 新潟県新潟市

(17) Nakamoto, T., Doi, M., Nakamura, T., and Yamauchi, Y.

A Correlation among Shape, Composition, and Texture of Cosmic Spherules

European Geosciences Union, 2012 年 4 月 27 日, ウィーン(オーストリア)

〔 図書 〕 (計 1 件)

(1) 惑星形成の物理: 太陽系と系外惑星系の形成論入門

井田茂, 中本泰史著

共立出版, 2015 年, 全 130 ページ

〔 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:

出願年月日:

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・教授

研究者番号: 60261757

(2) 研究分担者

横山 哲也 (Yokoyama, Tetsuya)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

授

研究者番号: 00667028

(3) 連携研究者

()

研究者番号: