

令和元年6月11日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05266

研究課題名(和文) 衝撃波加熱コンドリュール形成モデルの追求：高濃度ダスト領域における弧状衝撃波

研究課題名(英文) Study of Shock Wave Heating Chondrule Formation Model: Bow-Shocks in Dust-Rich Regions

研究代表者

中本 泰史 (Nakamoto, Taishi)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：60261757

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、隕石中の主要構成要素であるコンドリュールが、原始太陽系星雲中を高速運動する微惑星が励起する弧状衝撃波によって加熱され、形成される可能性を探った。特に、コンドリュール前駆体のダスト粒子が、ダスト濃度が高い領域に存在する場合に注目した。数値シミュレーションを行って調べたところ、ダスト濃度が高い場合でも、観測から推定されているようなコンドリュール形成条件を、弧状衝撃波によって満たすことは難しそうであることがわかった。コンドリュールは、弧状衝撃波とは別の機構で形成された可能性が高いと思われる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンドリュールは隕石の主要構成要素であり、その形成過程は太陽系惑星の形成過程と密接に関連していると思われる。しかし、コンドリュールの形成過程も惑星の形成過程も、まだ謎である。したがって、コンドリュールの形成過程を明らかにすることは太陽系惑星の形成過程の解明にもつながると思われる。本研究では、残念ながらコンドリュール形成に関して前向きな理解を得るにはいたらなかった。しかしながら、有力視されていた一つの可能性を消すことができたという意味では、前進と捉えることができるだろう。引き続き、関連する研究を進めていくことが必要であると思われる。

研究成果の概要(英文)：We examined a possibility that chondrules, which are one of the main components of meteorites, are formed by bow shocks around fast moving planetesimals in the solar nebula. Especially, we explored cases where dust-to-gas mass ratio is high in the chondrule precursor region. According to our numerical simulations, we found that even in high dust-to-gas mass ratio cases, it seems difficult for bow shocks to meet the chondrule formation conditions inferred from meteorite observations. Thus, chondrules seem to be formed by mechanisms other than the bow shock.

研究分野：惑星系形成

キーワード：惑星形成・進化 コンドリュール

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽系を含め、宇宙には惑星系が多数存在していることが明らかになった。また、その惑星には多様な種類や存在形態があることがわかってきた。しかし、そうした惑星系が形成される過程については未知の点が多く、詳細は明らかになっていない。

太陽系の惑星形成過程にも、まだ謎が多い。一方、隕石中の構成要素の多くは、年代測定の結果などから、惑星とほぼ同時か少し前に形成されたと考えられている。したがって、そうした隕石構成要素の形成過程と太陽系惑星の形成過程との間には、密接な関連があると思われる。しかし、隕石構成要素の形成過程も多くの謎に包まれている。

隕石中の構成要素の中で最も主要なものは、コンドリュールである。コンドリュールの形成過程については、隕石試料の観察・分析結果や類似物に対する室内実験の結果などからある程度推定されている。すなわち、その初期温度、温度上昇率、最高温度、その後の冷却速度(1時間あたり 1000K 程度以下で冷却)、溶融コンドリュール周囲のシリケート蒸気圧、などがどうであったかがある程度明らかになっている。しかし、推定されている形成条件を完全に満たすような原始太陽系星雲内の現象は、まだ知られていない。いくつかの可能性が検討されているが、まだ、コンドリュール形成過程として特定されているものはない。高速に運動する微惑星周囲に生じる弧状衝撃波による加熱が有力な可能性の一つと考えられているが、推定されているコンドリュール形成の熱史には合わない点もあることが指摘されている。そのずれの原因の一つは、コンドリュール前駆体粒子群が加熱を受ける空間領域の光学的厚さが薄いことである。光学的厚さが厚い弧状衝撃波の場合に、その熱史がどうなるかはまだ明らかになっていない。

2. 研究の目的

本研究では、高速微惑星周囲に生じる弧状衝撃波によってコンドリュールが形成され得るか、推定されているコンドリュール形成熱史に合うかを、数値シミュレーションを用いて調べ、明らかにすることを目指す。特に、ダスト濃度の高い領域に弧状衝撃波が生じた場合を想定し、先行研究とは異なり、光学的に厚い領域に存在するコンドリュール前駆体が衝撃波で加熱される場合を調べる。具体的な目標は次の通りである。

- (1) 第一段階として、光学的に厚い弧状衝撃波の物理状態を明らかにする。
- (2) 光学的に厚い弧状衝撃波において、コンドリュールが形成され得るかを明らかにする。

3. 研究の方法

輻射エネルギー輸送の効果を考慮に入れた数値流体力学シミュレーションを行う。コンドリュールが形成される状況では温度が 1000K を超えるが、そのような場合には、輻射によるエネルギー輸送が温度を決める上で重要な役割を演じる。したがって、輻射の効果を性格に考慮することは重要である。また、光学的に厚い状況は、ダスト粒子の密度が高い場合に生じる。ダスト-ガス質量比が大きくなる場合であり、流体運動に対するダスト質量の効果も無視し得ない。したがって、ダストの質量を考慮に入れた流体運動を数値的に計算する。なお、簡単のためダストとガスは同じ運動をとする 1 流体近似を用いる。これらを別に扱うことは、必要に応じて考慮する。

音速を超える速度で高速運動する微惑星の周囲には、弧状衝撃波が生じる。これが、コンドリュール前駆体を加熱し、コンドリュールを作る可能性を検討する。弧状衝撃波は、微惑星の周囲に存在するが、微惑星の中心を通り流れの方向を向く軸の周りに、軸対称な流れとなる。この流れを扱うためには、少なくとも軸対称 2 次元の流れを扱う数値計算コードが必要である。

以上を踏まえ、本研究では次のようなステップに踏んで研究を進める。

- (1) 準備として、ダスト・ガスを 1 流体で近似しつつも、輻射の効果を取り込んだ 1 次元平行平板流体力学数値シミュレーションコードを開発し、各種テスト計算を行う。
- (2) 上記の経験を元に、同様の物理を含んだ 2 次元軸対称コードを開発する。
- (3) 各種条件を変えながら 2 次元軸対称輻射流体力学シミュレーションを実施する。
- (4) 流体中に存在するコンドリュール前駆体(ダスト粒子)が、コンドリュール形成に適切な条件を満たすかどうかを調べる。

4. 研究成果

数値計算コードの開発は順調に進んだ。すなわち、ダスト質量の効果を含みつつダストとガスを 1 流体として扱う近似の下で、輻射エネルギー輸送も考慮した 2 次元軸対称輻射流体力学シミュレーションコードは無事に開発できた。各種テストも行い、このコードの計算結果は、空間精度や時間精度なども含め、定量的に十分な精度を持っていることが確認できた。

このコードを用いて、ガス密度やダスト濃度、微惑星の速度や微惑星のサイズなどをさまざまに変えたシミュレーションを多数実施した。そして、その流れの中にあるコンドリュール前駆体(ダスト粒子)の温度変化を計算し、熱史を求めた。なお、典型的な場合として、ダストとガスの質量密度比は 1:1 とし、微惑星の半径は 100 km と 1000 km の場合を考えた。

微惑星の半径が 100 km の場合では、推定されているコンドリュール熱史に合致するような履歴を持つものは存在しなかった。計算されたダスト粒子の温度は、最高温度を経験した後、比較的急速に冷却する。これは、微惑星半径が 100 km の場合は弧状衝撃波の幾何学的厚みが

薄くなり、ダスト濃度が高くても光学的厚さが十分大きくなりたためである。

微惑星半径が 1000 km の場合には、冷却率が 1 時間あたり数千 K となった。微惑星周囲の弧状衝撃波が幾何学的に厚くなり、同時に光学的厚さが大きくなるのが効いているため、先の場合よりも冷却率が小さくなった。しかしながら、この場合でも冷却率が 1 時間あたり 1000 K を下回することはなかった。隕石の分析から推定されている冷却率 (1 時間あたり 1000 K) が正しいとすれば、それに合致する条件は、ダスト濃度が高くても、弧状衝撃波においては見出されないという結果が得られた。

ダスト濃度が高い領域における弧状衝撃波によるコンドリュール形成という可能性は、難しいという結論が得られた。この結論は残念とも言えるが、一つの可能性をつぶしたことにより、真の答えに向かうためのきっかけを得たと前向きに捉えることもできるだろう。コンドリュールは、弧状衝撃波とは別の機構で形成された可能性が高いと思われる。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- (1) Homma, K. A., Okuzumi, S., Nakamoto, T., & Ueda, Y., Rocky Planetesimal Formation Aided by Organics, *The Astrophysical Journal*, 査読有, vol. 877, 2019, id. 128
Doi: 10.3847/1538-4357/ab1de0
- (2) Nagasawa, M., Tanaka, K. K., Tanaka, H., Nomura, H., Nakamoto, T., & Miura, H., Shock-Generating Planetesimals Perturbed by a Giant Planet in a Gas Disk, *The Astrophysical Journal*, 査読有, vol. 871, 2019, id. 110
Doi: 10.3847/1538-4357/aaf795
- (3) Arakawa, S. & Nakamoto, T., Compound chondrule formation in optically thin shock waves, *The Astrophysical Journal*, 査読有, vol. 877, 2019, id., 84
Doi: 10.3847/1538-4357/ab1b3e
- (4) Arakawa, S., Tatsuuma, M., Sakatani, N., & Nakamoto, T., Thermal conductivity and coordination number of compressed dust aggregates, *Icarus*, 査読有, vol. 342, 2019, 8-14
Doi: 10.1016/j.icarus.2019.01.022
- (5) Homma, K. & Nakamoto, T., Collisional Growth of Icy Dust Aggregates in the Disk Formation Stage: Difficulties for Planetesimal Formation via Direct Collisional Growth outside the Snowline, *The Astrophysical Journal*, 査読有, vol. 868, 2018, id. 118
Doi: 10.3847/1538-4357/aae0fb
- (6) Arakawa, S., Tanaka, H., Kataoka, A., & Nakamoto, T., Thermal conductivity of porous aggregates, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, vol. 609, 2017, L7
Doi: 10.1051/0004-6361/201732182
- (7) Arakawa, S. & Nakamoto, T., Compound chondrule formation via collision of supercooled droplets, *Icarus*, 査読有, vol. 276, 2016, 102-106
Doi: 10.1016/j.icarus.2016.04.041
- (8) Arakawa, S. & Nakamoto, T., Rocky Planetesimal Formation via Fluffy Aggregates of Nanograins, *The Astrophysical Journal*, 査読有, vol. 832, 2016 L19
Doi: 10.3847/2041-8205/832/2/L19
- (9) Miura, H., Yamamoto, T., Nomura, H., Nakamoto, T., Tanaka, K. K., Tanaka, H., & Nagasawa, M., Comprehensive Study of Thermal Desorption of Grain-Surface Species by Accretion Shocks around Ptorostars, *The Astrophysical Journal*, 査読有, vol. 839, 2017, id.47
Doi: 10.3847/1538-4357/aa67df

[学会発表] (計 11 件)

- (1) Taishi Nakamoto and Akira Takeishi, A Model for Generation of Isotope Anomalies in the Inner Solar System by Inhomogeneous Molecular Cloud Core, *Meteorites workshop*, 2018
- (2) Sato, K. & Nakamoto, T., Chondrule Formation by Lightning in Dust-Rich Environments, *Americal Geophysical Union Fall Meeting*, 2018
- (3) Taishi Nakamoto and Akira Takeishi, Distribution of 54Cr Isotope Anomalies in Asteroid Belt, *Japan Geoscience Union Meeting*, 2017
- (4) 中本泰史, 惑星系形成 (招待講演), *天体形成論~過去・現在・未来~*, 2017
- (5) 本間謙二, 中本泰史, 原始惑星系円盤形成段階における氷ダストアグリゲイトの合体成長と内部密度進化, *日本地球惑星科学連合大会*, 2017
- (6) 中本泰史, 原始惑星系円盤初期進化 (招待講演), *ダスト形成から惑星の多様性へ: 宇宙の物質進化における物理と化学のカップリングシンポジウム*, 2017
- (7) Taishi Nakamoto and Akira Takeishi, Uniform Injection of 54Cr into Solar Nebula and Temporal Change of Isotopic Ratio in Meteorites, *Japan Geoscience Union Meeting*, 2016
- (8) Taishi Nakamoto and Akira Takeishi, Inhomogeneous molecular cloud core and isotope anomalies in meteorites, *Goldschmidt conference*, 2016

- (9) Nakamoto, T. & Takeishi, A., Isotopic Anomalies in Meteorites Generated from Initially Inhomogeneous Molecular Cloud Core, 47th Lunar and Planetary Science Conference, 2016
- (10) 勝田祐哉, 中本泰史, ダスト・ガス比の高い場合の1次元平行平板衝撃波シミュレーション~コンドリュール形成モデルへの応用に向けて~, 日本惑星科学会秋季講演会, 2015
- (11) 勝田祐哉, 中本泰史, ガス・ダスト混合流体の1次元平行平板衝撃波: 微惑星周りの弧状衝撃波によるコンドリュール形成シミュレーションに向けて, 日本地球惑星科学連合大会, 2015

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

○取得状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号(8桁):

(2) 研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。