

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2018～2022  
課題番号：18K03721  
研究課題名（和文）コンドリュール形成：新しい雷モデルの可能性

研究課題名（英文）Chondrule Formation: A New Lightning Model

**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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、原始太陽系星雲中にあるダスト層の重力不安定により微惑星が形成され、それに伴って雷が発生し、雷加熱を受けたダスト粒子からコンドリュールが形成される可能性を調べた。形成中の微惑星には周囲からダスト粒子が降着し続けるが、その際、サイズが異なるダスト粒子同士が衝突して正負に帯電し、十分強い電場が生成され、雷が生じ得ることが分かった。また、加熱を受けたダスト粒子の熱進化を調べ、ダスト粒子が溶融したのち適切な温度変化率で温度が下降することを明らかにした。このように、微惑星が形成される際に雷が起こり、コンドリュールも形成されるという新しいコンドリュール形成モデルを得ることができた。

**研究成果の学術的意義や社会的意義**

微惑星が形成される際に雷が起こり、コンドリュールも形成されるという新しいコンドリュール形成モデルを得ることができた。これは、微惑星形成とコンドリュール形成が密接に関連していることを示す点でも、新しい成果である。これは、微惑星形成とコンドリュール形成が密接に関連していることを示す点でも新しい成果であり、学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the possibility that planetesimal formation by gravitational instability of the dust layer in the solar nebula generates lightning and leads to the formation of chondrules. Dust particles continue to accrete on the forming planetesimal, and it is found that the dust particles of different sizes collide with each other and become charged, generating a strong enough electric field to produce lightning. The thermal evolution of the heated dust particles was also investigated, and it was found that the dust particles melt and then decrease in temperature at an appropriate rate of temperature change. Thus, we have obtained a new model of chondrule formation in which lightning occurs during the formation of planetesimals and chondrules are also formed.

研究分野：天文学・惑星科学

キーワード：コンドリュール 微惑星 雷

## 1. 研究開始当初の背景

### 背景 1：太陽系の形成

太陽系は、次の(1)から(3)の順に進行すると考えられている。本研究は、(2)の時期に関係する。

- (1) 星間ガスの重力収縮により原始太陽とそれを取り囲む原始太陽系星雲が形成。
- (2) 原始太陽系星雲中で固体微粒子の衝突・合体が進行。初期サイズ  $0.1\mu\text{m}$  の固体微粒子から大きなサイズ(mm から cm 程度)の粒子が形成。さらに、大きさ 10~100 km 程の微惑星が誕生。
- (3) 多数の微惑星が衝突・合体を繰り返して成長し、現在の惑星に至る。

### 背景 2：コンドリュール形成研究の意義

地上に落下する隕石の多くは、コンドリュールという直径 0.1-1 mm 程度の球粒を多量に含むコンドライト隕石である。コンドリュールはシリケート組成の前駆体ダストがいったん溶融し、表面張力で球形になった後、再固化して形成される。コンドリュール形成現象は、微惑星形成現象と共に原始太陽系星雲内で進行したと考えられている。したがって、コンドリュール形成過程を明らかにすることは太陽系形成初期段階(原始太陽系星雲ガス中でのダスト粒子の進化や微惑星形成など)を解明することにつながる重要な研究課題である。

### 背景 3：世界のコンドリュール形成理論研究の現状

コンドリュールの形成過程に関するモデルは、現在、雷モデルを含め 3 つほどある。どのモデルにも観察事実とよく合う面があると同時に、合わない面もあると見なされている。

しかし、雷モデルに対しては十分な定量性を持つ理論モデル研究が少なく、その詳細は不明である。いっぽう申請者には、従来は考慮されていなかった点や最近の新知見を取り込むと、雷モデルの短所と見られている点も理解が変わる可能性があるように思われた。

### 本研究の「問い」

上記を踏まえ本研究では、新しい雷モデルでコンドリュール形成が説明可能かどうかを問う。「新しい」とは、最近の新知見や従来は考慮されていなかった効果を取り込むことを指す(後述)。これにより、コンドリュール形成の新しい理解が得られる可能性を調べたい。

## 2. 研究の目的

本研究では新しい雷モデルを作り、コンドリュール形成の可否を明らかにすることを旨とする。そのために、より具体的には次の各点を目標とする。

(目標 1) 原始太陽系星雲内での雷の発生条件を求め、固体ダスト粒子(コンドリュール

- ル前駆体)への加熱現象が生じ得る環境を明らかにする。[新しい効果(=同組成・異サイズ粒子の衝突による帯電)を考慮に入れた雷モデル]
- (目標2) 雷に伴う加熱を受けたダスト粒子の温度変化を調べ、コンドリュールになり得るかどうかを明らかにする。[ダスト濃度の高い環境を新たに考慮するモデル]
- (目標3) 雷によるコンドリュール形成と、原始太陽系星雲中ダストの進化および微惑星形成の間であり得る関係を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### 何を調べるのか

雷によるコンドリュール形成現象は、次の各過程が連なることによって起こる：

(a) 固体微粒子の帯電，(b) 正負電荷の空間的分離，(c) 放電，(d) ダスト粒子の加熱。

本研究の「目標1」は(a)~(c)の過程に対応し、「目標2」は(d)に対応する。各々の過程を、従来にない知見や視点を加えて調べ、各目標に取り組む。さらにそれらの結果と原始太陽系星雲の進化やダストの進化、微惑星の形成などを総合的に考察し、「目標3」に迫る。

#### どのように、どこまで明らかにするのか

各過程の物理モデルを次のようにして作る。

(a) 固体微粒子の帯電過程：火山噴煙中の火山雷では、サイズが異なるシリケート成分微粒子同士の衝突が帯電に寄与しているようである。この効果(サイズの違いによる帯電)が最近の新知見であり、本研究で新たに取り込むものである。また、組成が異なる微粒子同士の衝突で発生する摩擦帯電("仕事関数"の違いによる帯電)も含め、原始太陽系星雲中におけるダスト粒子の帯電モデルを作る。

モデルを用い、ダスト粒子の各種物理量の関数として帯電量を求める。[数値計算]

(b) 正負電荷の空間的分離：正負に帯電した粒子群が分離されると電場が生じ、それが十分強くなると雷が発生する。原始太陽系星雲中では、ダスト粒子のサイズの違いによってガス運動とのズレの違いが生じ、分離が起こり得る。たとえば、乱流渦やストリーミング不安定、ダスト層の永年重力不安定などの現象でもサイズによる分離が起こる。これらによる電荷の空間分離を本研究で新たに評価し、雷発生の可能性を明らかにする。

(c) 放電：原始太陽系星雲中で放電が発生する条件を検討する。

(d) ダスト粒子の加熱：雷によって解放されたエネルギーがコンドリュール前駆体を加熱する様子を定量的に調べる。加熱過程には、気相中を流れた電流が作り出した高温プラズマによる加熱や、発せられた放射による加熱などがある。また、原始太陽系星雲中の雷はダスト濃度の高いところで発生すると考えられるが、その場合には周囲に存在している多数のダスト粒子が冷却過程に関与する。これにより高温状態が長く継続することが期待されるが、この効果が本研究で新たに考慮するものである。これらを全て考慮したコンドリュール前駆体の温度進化モデル

を作り，時間変化も含めて定量的に調べる。モデルには，放射も含めた流体力学過程（放射流体力学計算）と，ガス（プラズマ）とダスト粒子との相互作用（力学的および熱的）を含める。[数値計算]

研究初年度は(a)に取り組み，数値計算を行う。並行して(b)(c)も検討し，目標1の達成を目指す。2年目に(d)に取り組み，目標2の達成を目指す。3年目は目標1・2に関する結果を補完すると共に，目標3に関する研究を実施する。

#### 4．研究成果

本研究では，3つの小課題に分割して研究を進めてきた：(課題1) 原始太陽系星雲中での雷発生の環境を調べる，(課題2) 雷によって加熱を受けたダスト粒子の温度変化を調べ，コンドリュールが形成され得るかどうかを明らかにする，(課題3) 雷によるコンドリュール形成と原始太陽系星雲中ダストの進化および微惑星形成の関係を明らかにする，である。課題1に関しては，原始太陽系星雲中で固体微粒子（ダスト粒子）密度が高くなり，ダスト粒子同士が衝突し，それぞれが帯電する場合を考えた。課題3とも関連させ，具体的な状況としてダスト層の重力不安定によって微惑星が形成される場合を調べた。できたての微惑星にはまだ周囲からダスト粒子が降着し続けるが，その際，サイズが異なるダスト粒子群は受けるガス抵抗が異なるため運動に違いが生じ，衝突して正と負に帯電する。各粒子はその後も運動を続け，正と負の電荷が空間的に分かれ，電場が生成される。粒子群の動きを具体的に計算した結果，雷（絶縁破壊）が生じ得るほど強い電場が形成されることがわかった（学会発表）。次に課題2では，雷が発生して電流が流れ，それによって高温になったガスにより前駆体ダスト粒子が加熱される様子を数値シミュレーションによって調べた。その結果，ダスト粒子が加熱されて熔融し，適切な温度変化率（コンドリュールの分析から推定されている値）で温度が下降して再固化することがわかった。これについては，論文にまとめて学術誌に発表した。以上のように，ダスト層の重力不安定で微惑星が形成される現象に付随して雷が起こり，その結果としてコンドリュールも形成されるという従来にない新しいコンドリュール形成モデルを得ることができた。これは，微惑星形成とコンドリュール形成が密接に関連していることを示す点でも，新しい成果である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kaneko Hiroaki, Sato Kento, Ikeda Chihiro, Nakamoto Taishi	4. 巻 947
2. 論文標題 Cooling Rates of Chondrules after Lightning Discharge in Solid-rich Environments	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 15 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acb20e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kaneko Hiroaki, Arakawa Sota, Nakamoto Taishi	4. 巻 374
2. 論文標題 Dependence of the initial internal structure of chondrule rim on dust size distribution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114726 ~ 114726
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2021.114726	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Arakawa Sota, Kaneko Hiroaki, Nakamoto Taishi	4. 巻 927
2. 論文標題 Fine-grained Rim Formation via Kinetic Dust Aggregation in Shock Waves Around Evaporating Icy Planetesimals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 188 ~ 188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac5254	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Arakawa Sota, Takemoto Masaki, Nakamoto Taishi	4. 巻 2019
2. 論文標題 Geometrical structure and thermal conductivity of dust aggregates formed via ballistic cluster-cluster aggregation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 9300
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Homma Kazuaki A., Okuzumi Satoshi, Nakamoto Taishi, Ueda Yuta	4. 巻 877
2. 論文標題 Rocky Planetesimal Formation Aided by Organics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 128 ~ 128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab1de0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Arakawa Sota, Nakamoto Taishi	4. 巻 877
2. 論文標題 Compound Chondrule Formation in Optically Thin Shock Waves	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 84 ~ 84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab1b3e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Arakawa Sota, Tatsuuma Misako, Sakatani Naoya, Nakamoto Taishi	4. 巻 324
2. 論文標題 Thermal conductivity and coordination number of compressed dust aggregates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 8 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2019.01.022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nagasawa M., Tanaka K. K., Tanaka H., Nomura H., Nakamoto T., Miura H.	4. 巻 871
2. 論文標題 Shock-generating Planetesimals Perturbed by a Giant Planet in a Gas Disk	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 110 ~ 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaf795	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Arakawa Sota, Tatsuuma Misako, Sakatani Naoya, Nakamoto Taishi	4. 巻 324
2. 論文標題 Thermal conductivity and coordination number of compressed dust aggregates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 8~14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2019.01.022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 西澤諒, 中本泰史
2. 発表標題 微惑星形成時のダスト衝突帯電による雷発生
3. 学会等名 日本天文学会2023春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中本泰史, 池田千尋, 佐藤拳斗, 南敦貴, 森崇志, 菅原幸輝
2. 発表標題 微惑星形成時の雷の発生とコンドリュール生成の可能性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子寛明, 荒川創太, 中本泰史
2. 発表標題 Requirement of turbulent nebula and dust grains for grain size coarsening in chondrule rims
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中本泰史, 菅原幸輝, 南敦貴, 森崇志, 池田千尋, 佐藤拳斗
2. 発表標題 コンドリュール生成に寄与する雷の発生可能性
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒川創太, 金子寛明, 中本泰史
2. 発表標題 氷微惑星まわりの弧状衝撃波によるコンドリュール形成: 細粒リムの集積
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子寛明, 中本泰史
2. 発表標題 雷加熱によるコンドリュール形成; 分析・実験と整合的なモデルの探求
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中本泰史, 池田千尋, 佐藤拳斗, 南敦貴, 森崇志, 菅原幸輝
2. 発表標題 微惑星形成時の雷の発生とコンドリュール生成の可能性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 金子寛明, 荒川創太, 中本泰史
2. 発表標題 Requirement of turbulent nebula and dust grains for grain size coarsening in chondrule rims
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ダスト優位な領域を含めたストリーミング不安定の発生機構の物理的解釈
2. 発表標題 金子寛明, 中本泰史
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中本泰史, 竹石陽
2. 発表標題 不均質分子雲コアによる同位体異常生成：初期不均質と同位体異常の量的関係
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kento Sato and Taishi Nakamoto
2. 発表標題 Chondrule Formation by Lightning in Dust-Rich Environments
3. 学会等名 American Geophysical Union, Fall Meeting 2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------