

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400515

研究課題名(和文)炭素質コンドライトの最初期母天体プロセスの解明

研究課題名(英文)Early parent-body processes of carbonaceous chondrites

研究代表者

留岡 和重 (Tomeoka, Kazushige)

神戸大学・理学研究科・名誉教授

研究者番号：00201658

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)：炭素質コンドライト(C隕石)は、原始太陽系星雲の粒子が直接集積して形成されたと広く考えられている。しかし代表者らは、電子顕微鏡を用いて、幾つかのC隕石からそのようなプロセスでは説明できない岩石鉱物学的事実を見出した。特にあるC隕石の岩相を詳しく調べた結果、この隕石はその母天体内で前駆岩が細かく破碎され、その結果生成した岩片と微粒子が流動状態で運搬、混合され、集積することによって形成されたというモデルを提出した。もしこのモデルが一般的に成り立つとすると、今後C隕石の成因を根本的に見直す必要があるかもしれない。

研究成果の概要(英文)：Carbonaceous chondrites are widely thought to have formed primarily by direct accretion of solar nebular materials. However, our electron microscopy studies of several carbonaceous chondrites revealed mineralogical and petrographic evidence that cannot be explained by such a process. Based on detailed studies of one of the meteorites, we proposed a model for the development of the meteorite lithology through formation of clasts and fine grains by fragmentation of precursor rocks in the parent body, followed by transportation, mixing, and accumulation of those objects in a fluidized state. If this model can be applied to other meteorites in general, the origin and evolution of carbonaceous chondrites may need to be fundamentally reappraised in future.

研究分野：惑星物質科学

キーワード：炭素質コンドライト 水質変成 角礫岩化 コンドリユールリム 流動化 隕石母天体 熱変成 ネフェリン

1. 研究開始当初の背景

炭素質コンドライト(以下、C隕石)は主にコンドリュール(径0.2-1 mm)とそれらの間を埋める細粒のマトリックスからなり、コンドリュールの多くはその周りを殻のように覆う細粒のリムを持つ。これらの構成物はいずれも45.6億年前の原始太陽系星雲内で形成されたものであり、C隕石の組織は基本的にはこれらの物質が星雲から集積したままの状態を保持していると考えられてきた[引用文献1]。特にリムはコンドリュールが星雲中を浮遊していたときに周りの塵を表面に付着して形成されたものであり、その存在はC隕石の星雲集積説を裏付ける有力な証拠とされてきた。

しかし代表者らは、本研究計画申請の数年前に、モコイアというC隕石を電子顕微鏡を用いて調べた結果、上記の星雲集積説では説明できない証拠を見出した[2]。この隕石の層状ケイ酸塩に富むリムに囲まれたコンドリュールは、水質変成を受けて部分的に層状ケイ酸塩化しており、リムはコンドリュールの周縁部を交代変成している。しかし驚くべきことに、それらの周りのマトリックスにはそのような変成の痕跡は一切見られない。これらの観察結果に基づいて、我々は、コンドリュールとそれを囲む層状ケイ酸塩に富むリム(以下、コンドリュール/層状ケイ酸塩に富むリムと略記する)は、実は隕石母天体内のこの隕石があった場所とは異なる含水領域で形成された破碎岩片(クラスト)だというモデルを提出した[2]。このモデルでは、リムは原始星雲の塵の集積によって形成されたのではなく、含水領域に在った前駆岩相のマトリックスということになる。

実は代表者らは、[2]を発表する10年程前に既にピガラノC隕石から上記のモデルを示唆する結果を得ている[3]。また近年、タギッシュレイクC隕石のコンドリュール/リムの成因も同様なプロセスで矛盾なく説明できることを明らかにした[4]。すなわち、上記のコンドリュール/リムの母天体成因モデルは、実は多くのC隕石に当てはまる可能性が高くなってきたのである。

2. 研究の目的

(1) モコイア隕石のコンドリュール/層状ケイ酸塩に富むリム以外の構成物について、走査分析電子顕微鏡(SEM-EDS)、電子線プローブ分析装置(EPMA)による観察・分析を行い、この隕石全体が経た母天体プロセスとは如何なるものであったかを明らかにする。

(2) コンドリュールが明瞭なリムを持つ隕石は、形成履歴がモコイア隕石と似通っている可能性が高い。そのような特徴を持つ他のC隕石を、SEM-EDS、EPMAの他に透過分析電子顕微鏡(TEM/STEM-EDS)、シンクロトロン放射光X線回折装置(SR-XRD)を用い

て調べ、上述したコンドリュール/リムの母天体成因モデル[2]が成り立つかどうかを検証する。

(3) コンドリュール/リムの母天体成因モデルが適合する、あるいはその可能性のある全ての隕石が水質変成を受けている。それゆえ代表者は、それらの隕石の母天体プロセスの本質を知るためには、隕石の水質変成がどのような物理的・化学的条件で起こったかを明らかにすることが非常に重要だと考えている。その条件を定量的に解明することを目的に水質変成の再現実験を行う。

これらの観察・分析そして実験的研究を基に、岩石鉱物学的、化学的、物理学的に矛盾のないC隕石形成モデルの構築を目指す。

3. 研究の方法

(1) C隕石のSEM、EPMA、TEM/STEM、SR-XRDによる観察・分析

代表者らは、コンドリュールが明瞭なリムを持つC隕石を国立極地研究所、NASAから借り受け、また民間業者から購入し入手している。本研究ではこれらの隕石の薄片試料を中心に研究を進めて行く。まずSEM-EDS、EPMAを用いてこれらの隕石を、特にコンドリュールとリム、そしてリムとマトリックスの変成関係に注目して調べる。マトリックスとリムに関しては、さらに収束イオンビームを用いて超薄片を切り出し、TEM/STEM-EDSによって観察・分析を行う。また、適宜SR-XRDを用いてマトリックスとリムの微粒子の同定を行い、さらにリートベルト解析によって鉱物の存在度を調べる。得られた情報・データを基に、コンドリュール、リム、マトリックスの変成の有無、それら相互の成因的關係を探る。

(2) 水熱変成実験

水熱変成実験は、テフロン内装耐圧容器と精密恒温器を用いて、温度200°C、圧力~15気圧の条件で行う。これらの温度・圧力は、C隕石母天体として想定される最大の天体(直径~100 km)において到達し得る温度、圧力範囲内である。また、溶液のpHを様々な値に変えて行う。実験後、回収試料を粉末X線回折装置、SEM、TEM/STEM、EPMAを用いて調べる。

4. 研究成果

(1) モコイア隕石のオリビンに富むリムを持つコンドリュールの形成過程

代表者らは、モコイアC隕石の薄片試料中の径400 μm以上の全てのコンドリュールを囲むリムの内、73%は含水の層状ケイ酸塩に富み、27%は無水のオリビンに富むことを見出した[2]。コンドリュール/層状ケイ酸塩に富むリムの我々の研究結果[2]は、「1. 研究開始当初の背景」で述べた通りである。

我々は、さらにコンドリュール/オリビンに富むリムに焦点を当てて研究を行った。その結果、オリビンに富むリムもコンドリュール周縁部を交代変成していること、そしてコンドリュール/オリビンに富むリムは水質変成の後に熱変成を受けていることを明らかにした [5. 主な発表論文等の]。しかし、この場合もそれらの周りのマトリックスには変成の影響は及んでいないことがわかった。これらの結果から、我々は、コンドリュール/オリビンに富むリムは隕石母天体内の比較的熱変成程度の高い領域からもたらされたクラストであると結論した。

(2) C 隕石母天体内流動化モデルの構築

上述したように、[2] および [5. の] によって、モコイア隕石薄片上の径 400 μm 以上の全てのコンドリュール/リムは、様々な程度の水質変成あるいは/そして熱変成を受けたクラストであることが明らかになった。もしそれらのコンドリュールがこの隕石の全てのコンドリュールを代表しているとすると、このことは、モコイア隕石全体の岩相形成に関して非常に重要なことを提起している。それは、この隕石の岩相形成が原始星雲物質の直接集積でも、隕石母天体内の角礫岩化でも説明できないということである (議論の詳細については [5. の] を参照されたい)。これまでの結果と考察を総合して、我々は、モコイア隕石岩相は母天体内の、少なくとも 2 つの領域 (含水量の多い領域と含水量は少なくより高温の領域) で破碎され分離したコンドリュール/リムとマトリックス粒子が流動状態で運搬され、混合し、集積することによって形成された、というモデル (以下、母天体内流動化モデルと呼ぶ) を提出した [5. の]。このモデルは、これまで多くの隕石学者が支持して来た C 隕石の星雲集積説に疑問を呈するものである。もしこのモデルが他の多くの C 隕石でも成り立つとしたら、今後 C 隕石の成因を根本から見直すことが必要になってくると思われる。

(3) コンドリュール内におけるネフェリン/ソーダライト形成: マトリックス中のものとの成因的關係

この研究は、母天体内流動化モデルに整合的な結果を、コンドリュール/リムとは異なる観点から明らかにしたものである。

Na は水溶性、揮発性が高いことから、隕石の水質・熱変成履歴を解読する上でトレーサーとなる元素と考えられる。それゆえ代表者は、C 隕石の中に少量ではあるが含まれる Na に富むネフェリン ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)、ソーダライト ($\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$) にこれまで注目してきた。

ニンチャン C 隕石のマトリックスは Na, K, Al に異常に富むのに対し、コンドリュールはそれらの元素に乏しいことが知られている。代表者らは、ニンチャン隕石のマトリックスを SEM, TEM/STEM, EPMA および SR-XRD

を用いて調べた結果、細粒のネフェリンとソーダライトが異常に多く含まれていること、そしてマトリックスの Na, K, Al の大部分はそれらの鉱物粒子に由来していることを明らかにした [5]。

この結果を得て、我々はさらにニンチャン隕石のコンドリュール中のネフェリン/ソーダライトの SEM および TEM/STEM による観察を行った。その結果、コンドリュールのネフェリン/ソーダライトはメソスタシスの交代変成によって生成していること、さらにマトリックス中に含まれているものとほとんど同一の鉱物学的特徴を持つことを明らかにした [5. の]。これらの結果は、マトリックス中のネフェリン/ソーダライトは元々コンドリュールメソスタシスの変成によって生成し、その後コンドリュールの崩壊に伴ってマトリックスに分散したことを示唆している。そのプロセスは母天体内流動化モデル [5. の] と整合的であり、ニンチャン隕石の岩相形成においても母天体内における破碎と流動化が重要な役割を果たしたことを強く示唆している。

(4) ネフェリンの隕石母天体内における形成: 水熱変成実験による検証

ネフェリンは地球上では一般的に火成岩に含まれることから、火成作用を受けていない C 隕石母天体内で形成されることに懐疑的な見方も存在する。また、もしネフェリンが隕石母天体内で形成されないとしたら、(3) で述べた我々の結論は成り立たなくなる。

ネフェリンが隕石母天体内における水熱変成とそれに続く漸進的な熱変成によって生成し得るかを検証する目的で、隕石中のネフェリンの前駆物質であるゲーレナイトと斜長石の水熱および加熱実験、そして変成の反応速度論的解析を行った。その結果、ネフェリンは隕石母天体内において以下の 2 段階の変成を経て生成した可能性が高いことを明らかにした [5. の]。1. 低温下 ($<300^\circ\text{C}$) におけるゲーレナイトと斜長石の水熱変成による Na ゼオライトの生成、2. 高温下 ($300\text{--}700^\circ\text{C}$) における長時間の加熱による Na ゼオライトのネフェリンへの相転移。

これらの結果は、長年議論されてきた隕石中のネフェリンの成因の問題に説得力ある解答を与えるものであり、また上記 (3) の研究で得られた我々の結論を強く支持する。さらに、実験で得られたネフェリンの生成条件 (温度、圧力、時間、溶液 pH など) に関する定量的データは、今後 C 隕石の水熱変成、熱変成の解明に重要な制約を与えることが予想される。

引用文献:

- [1] A. J. Wood, *Icarus* 2, 152–180 (1963).
- [2] K. Tomeoka and I. Ohnishi, *Geochim. Cosmochim. Acta* 74, 4438–4453 (2010).
- [3] K. Tomeoka and I. Tanimura, *Geochim.*

Cosmochim. Acta 64, 1971–1988 (2000).
[4] A. Takayama and K. Tomeoka, Geochim. Cosmochim. Acta 98, 1–18 (2012).
[5] M. Matsumoto, K. Tomeoka, Y. Seto, A. Miyake and M. Sugita, Geochim. Cosmochim. Acta 126, 441–454 (2014).

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)

M. Kayama, N. Tomioka, E. Ohtani, Y. Seto, H. Nagaoka, J. Gotze, A. Miyake, S. Ozawa, T. Sekine, M. Miyahara, K. Tomeoka, M. Matsumoto, N. Shoda, N. Hirao, T. Kobayashi, Discovery of moganite in a lunar meteorite as a trace of H₂O ice in the Moon's regolith, **Science Advances**, 4 (5), eaar4378, DOI: 10.1126/sciadv.aar4378 (2018). 査読有

S. Ichimura, Y. Seto and K. Tomeoka, Nepheline formation in chondrite parent bodies: Verification through experiments, **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 210, 114–131 (2017). 査読有

M. Matsumoto, K. Tomeoka and Y. Seto, Nepheline and sodalite in chondrules of the Ningqiang carbonaceous chondrite: Implications for a genetic relationship with those in the matrix, **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 208, 220–233 (2017). 査読有

K. Tomeoka and I. Ohnishi, Redistribution of chondrules in a carbonaceous chondrite parent body: A model, **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 164, 543–555 (2015). 査読有

K. Tomeoka and I. Ohnishi, Olivine-rich rims surrounding chondrules in the Mokoia CV3 carbonaceous chondrite: Further evidence for parent-body processes, **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 137, 18–34 (2014). 査読有

[学会発表](計26件)

市村 隼, 瀬戸 雄介, 留岡 和重, コンドライト母天体内におけるネフェリン形成: 水熱・加熱実験による検証, 日本鉱物科学会, 金沢大学(石川県), 2016年9月24日.

庄田 直起, 留岡 和重, 瀬戸 雄介, 三宅 亮, モコイア CV3 隕石マトリックスの短冊状の Fe に富むオリピンの成因: TEM および SEM-EBSD による観察と解析, 日本鉱物科学会, 金沢大学(石川県), 2016年9月24日.

松本 恵, 留岡 和重, 瀬戸 雄介, 三宅 亮, 桐石 美帆, 梅原 まり子, 山本 由紀子, 浜根 大輔, NWA1232 CO3 隕石に含まれる水質変成の痕跡を示すクラスト, 日本地球惑星科

学連合大会, 幕張メッセ(千葉県), 2015年5月28日.

K. Tomeoka, I. Ohnishi, Redistribution of chondrules and matrix grains in the Mokoia chondrite parent body: A model, Meteoritical Society Meeting, Univ. of California, Berkeley, USA, July 31, 2015.

M. Matsumoto, K. Tomeoka, Y. Seto, A. Miyake, M. Kiriishi, M. Umehara, Y. Yamamoto, D. Nishio-Hamane, Hydrated, Unmetamorphosed clasts in the NWA 1232 CO3 carbonaceous chondrite, Meteoritical Society Meeting, Univ. of California, Berkeley, USA, July 28, 2015.

M. Sakai, K. Tomeoka, Y. Seto, A. Miyake, Pseudomorphs of chondrules and CAIs in dark clasts in the Allende CV3 chondrite, Meteoritical Society Meeting, Univ. of California, Berkeley, USA, July 31, 2015.

酒井 碧, 留岡 和重, 瀬戸 雄介, 三宅 亮, MAC88107 隕石の微細組織: この隕石は本当に星雲集積岩か, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ(千葉県), 2015年5月28日.

富永 裕貴, 留岡 和重, 瀬戸 雄介, Vigarano CV3 隕石のコンドリュールを囲むオリピンに富むリムの成因, 日本鉱物科学会, 熊本大学(熊本県), 2014年09月17日.

松本 恵, 留岡 和重, 瀬戸 雄介, 山本 由紀子, 梅原 まり子, 三宅 亮, 浜根 大輔, NWA1232 CO3 隕石中の熱変成度の異なる岩片を含む岩相, 日本地球惑星科学連合大会, パシフィコ横浜(神奈川県), 2014年5月2日.

6. 研究組織

(1)研究代表者

留岡 和重 (TOMEOKA, Kazushige)
神戸大学・大学院理学研究科・名誉教授
研究者番号: 00201658

(3)連携研究者

瀬戸 雄介 (SETO, Yusuke)
神戸大学・大学院理学研究科・講師
研究者番号: 10399818