

## 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25年 5月 1日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540488

研究課題名（和文）コンドライト形成過程の復元に関する鉱物科学的研究

研究課題名（英文）Mineralogical study on the formation process of chondrites

研究代表者

木村 眞 (KIMURA MAKOTO)

茨城大学・理学部・教授

研究者番号：20142226

研究成果の概要（和文）：コンドライトは太陽系初期の情報を担っている。本研究では特にこれらに関して主として以下の結果を得た。1) CM コンドライト中の不透明鉱物と熱史の関係。2) 衝撃作用を強く被った隕石の鉱物とその形成に制約条件を加えること。3) コンドルールの酸素同位体のリザーバーの多様性と進化を明らかにした。4) ハヤブサ試料が LL コンドライトに類似すること。5) 初めて隕石からエクロジヤイト的鉱物組合せの岩片を発見した。

研究成果の概要（英文）：Chondrites are important meteorite to clarify the early solar system. I obtained the following results: 1) Opaque minerals give constraints on the thermal history of CM chondrites. 2) Minerals in heavily shocked meteorites give constraints on the formation conditions. 3) Chondrules formed under various oxygen isotopic reservoirs. 4) The Hayabusa samples derived from LL chondritic body. 5) The eclogitic xenolith was first discovered from meteorites.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：隕石、コンドライト、難揮発性包有物、コンドルール、衝撃作用、熱変成作用

### 1. 研究開始当初の背景

コンドライトは太陽系元素存在度に近い組成を持つこと、形成年代などから、太陽系の始源物質と見なされ、原始太陽系における物質進化を明らかにできる物質と考えられている。

しかしながら、コンドライトには多種多様の種類（グループ）があること、種々の構成

物質からなること、多くが二次的過程（熱変成作用、変質作用、衝撃作用など）を受けていることなどから、形成過程の詳細については、国際的に議論が多くあるところである。そのため、形成史を復元するためには、個々の構成物質を高分解能で識別し、それぞれの形成過程を明らかにしていかななくてはならない。例えば、近年の二次イオン質量分析計

(SIMS) の使用により多くの年代データが得られてきている。しかし、その年代の意味することに関しては議論が多い。これは上記の二次的過程の検討が不十分であることにも起因している。詳細な岩石鉱物学的な記載情報が年代データを含めた、形成過程の復元作業には不可欠であると考えている。

そこで、本研究ではこれまでも行ってきた各種のコンドライトグループ試料とそれらを構成する物質に関わる詳細な岩石鉱物学的記載を行う。それらの記載学的データを踏まえた、同位体測定や微細組織の観察を行い、コンドライトあるいは太陽系始源物質の物質進化の詳細を定量的に明らかにしていこう、と考えている。

## 2. 研究の目的

(1) 難揮発性包有物の研究： 難揮発性包有物は年代学的には太陽系最古の物質である。本研究では難揮発性包有物の鉱物学的検討、酸素同位体測定、消滅核種による年代学的検討を行い、難揮発性包有物形成の時期、形成環境、形成過程を明らかにしていく。

(2) コンドルールの研究： コンドルールは多くのコンドライトの最も主要な構成物質であり、難揮発性包有物より1000万年以上遅れて生成した、と考えられている。しかし、その年代の意義、始原材料物質の形成過程、熔融過程、冷却過程などには問題が多く残っている。本研究では、このような問題を明らかにするために、岩石学的記載と酸素同位体、年代測定を同一試料で行う。特に重要な点は試料の選別である。始源的と見なされていたコンドライトも多くが母天体で熱変成作用を受けていることが明らかになっているからである。そこで申請者らは最も始源的と見なしうるコンドライト試料を慎重に選別し、そこに含まれるコンドルールの岩石学的、同位体的研究する。本研究期間中に複数の始源的コンドライト中のコンドルールの網羅的な岩石学的記載、酸素同位体測定、年代測定を行って、コンドルールの形成時期、形成過程を明らかにしていく。

(3) エンスタタイト・コンドライトの研究： エンスタタイト・コンドライトは極めて還元的环境下で形成された特異なコンドライトであるが、地球の始源物質と近い酸素同位体組成を持つ重要な太陽系始源物質である。この特異な形成環境を明らかにしていくために、申請者らは以前より詳細な岩石鉱物学的研究、同位体組成の検討を行ってきた。本研究期間中においては、これらの隕石の不透明鉱物中の微量元素測定を行う。それにより形成環境を復元する。

(4) 衝撃変成作用の研究： 本研究期間では、高圧鉱物の産状、組成の記載を行い、新たに

透過電子顕微鏡観察により微細組織の観察、珪酸塩ペロブスカイトの検討などを行う予定である。これにより、太陽系初期の衝撃作用の特徴を明らかにする。

## 3. 研究の方法

### (1) 難揮発性包有物の研究

難揮発性包有物は炭素質コンドライトのみならず、他のグループのコンドライトからも発見される。そこで本研究では各種のコンドライトから難揮発性包有物を探し、その岩石記載を本学のX線マイクロアナライザー等を用いて行う。特に変質作用を受けていない、始源的なものを探す。これは同位体分析の際に重要だからである。以上により、十分記載を行った試料から、必要に応じて、マイクロドリル、及び実体顕微鏡で微細試料を薄片から抽出する。それらの試料につき、酸素同位体測定、消滅核種測定を行う。

### (2) コンドルールの研究

コンドルールの始源的性質を研究するためには、二次的作用を受けていない試料が必要である。特にAl-Mg系や酸素の同位体分析においてはこれは必要不可欠である。熱変成作用などを最小限被った試料中のコンドルールにつき、系統的な岩石記載を行う。特にコンドルール内での結晶作用、残存鉱物の有無に着目する。

### (3) エンスタタイト・コンドライトの研究

エンスタタイト・コンドライトが極めて還元的环境下で生じたことを最も明瞭に示すものは不透明鉱物である。これらの鉱物の記載や分析を行う。

### (4) 衝撃変成作用の研究

岩石記載の十分に済んだ薄片からマイクロドリルで微細試料を抽出し、透過電子顕微鏡により微細組織を観察する。高圧鉱物は多くがサブミクロンのスケールで産するからである。

## 4. 研究成果

本研究期間中に以下の成果を得た。

(1) CM コンドライトの研究： 多くのCMコンドライト試料を国内外から収集し、そこに含まれる金属鉄や硫化鉄などの不透明鉱物の特徴と組成を記載した。金属鉄の組成分布と産状、及び硫化鉄の種類(トロイライト、ピロータイト、ペントランダイト)と産状が熱変成作用やCMコンドライトの分類を検討する上で、重要な手がかりになることを明らかにした。特にこれらの不透明鉱物の特徴は熱変成作用を受けたCMコンドライトの分類と形成過程の検討に重要であることが明らかになった。分類システムも提唱した。その

成果は論文として公表した。これらの成果を手がかりに、CMコンドライトの熱史のさらなる研究に着手している。

(2) 衝撃変成作用に関する研究： 隕石のほとんど全ての種類のもは母天体における衝撃変成作用を被っている。これは惑星あるいは微惑星の衝突現象に関する重要な過程である。これに関しては従来から研究をすすめてきたが、本研究期間中にこれまでの知見を総括した概説論文を発表した。また、東北大学大谷研究室との共同研究で、衝撃を強く受けた隕石を引き続き検討し、衝撃作用の鉱物学的特徴を明らかにした。特にカンラン石中の衝撃作用とラメラ形成過程を明らかにした。この結果は天体衝突現象の物理条件に制約を与えるものである。この結果は論文として公表した。さらに斜長石の高圧分解過程を観察し、それが非晶質化する過程、そこからヒスイ輝石が形成する過程を明らかにした。論文は既に受理され印刷中である。長年この問題は議論されてきたが、本研究はこの問題を解決するものと、と考えている。

(3) コンドルールの研究： コンドライト隕石の主要構成物質であるコンドルールをウィスコンシン大学の研究者たちと共同で研究した。試料には変成作用や変質作用が特に弱いものを用いた。それらに含まれるコンドルールの構成鉱物の酸素同位体組成を多様なコンドルールについて測定した。これによりコンドルールには2種類の酸素同位体リザーバーが存在したことが、均一な酸素同位体リザーバー中でコンドルールが生じたこと、多くの残存鉱物が含まれることが初めて明らかになった。特に酸素同位体の分布に関する新しい混合直線を提唱することができた。またこれらのコンドルールについて Al の同位体測定も行った。酸素同位体とは直接その変動に相互依存が無いことが明らかになった。これらの成果は原始太陽系における物質進化に関する重要な知見、となった。これらの結果は2つの論文として公表したが、すでに多数の引用対象となっている。本研究を踏まえて、さらにコンドルールの同位体的研究を続行中である。

(4) 小惑星イトカワ回収試料の研究： この重要な試料の研究グループの一員として鉱物分析などに関与した。イトカワ試料が特に LL コンドライトと深い関係のあることを明らかにした。特に変成度の高い LL コンドライトとの成因的關係が強く示唆された。また試料の表面を高分解能の電子顕微鏡で観察することにより、宇宙風化現象を明らかにした。これらの成果は2編の Science 論文を含めて論文として発表した。

(5) エンスタタイト・コンドライトの研究： エンスタタイト・コンドライトは特に還元的環境下で生じた特異なコンドライトである。

その中には特徴的な還元鉱物が多く含まれる。これらの隕石の研究に当たっては、これらの鉱物の特異性、複雑な岩石学的特徴が問題となっていた。Invited review として発表することを本研究期間中に依頼されたので、アメリカ人の共著者と共にこれらの隕石の岩石鉱物学的特徴、同位体の特徴、成因などをまとめて公表した。従来このような総説論文がまったく無かったので、多くの引用が国際的にされるようになった。

(6) エクロジャイト的鉱物組合せの岩片の研究： 隕石は小さな母天体に由来するものと考えられてきており、高圧鉱物は衝撃作用時にのみ見られる、とされてきた。しかし、本研究期間中に初めてエクロジャイト的鉱物組合せの岩片を CR コンドライトから発見した。オンファス輝石、パイロプ組成ザクロ石を含み、カンラン石、斜方輝石などからなるものであった。その鉱物学的特徴を詳細に記載し、鉱物の同定を精密に行った。また種々の地質圧力計を用いて、形成の温度圧力条件を求めた。3 GPa 程度の圧力が得られた。これは従来の知見に変更を迫るもので有り、隕石母天体は必ずしも小さくなくなったことを示唆するものである。この成果も論文として公表した。

## 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 16 件)

- ① Ushikubo T., Nakashima D., Kimura M., Tenner T. J., and Kita N. T., Contemporaneous formation of chondrules in distinct oxygen isotope reservoirs, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 109: 280-295., (2013), 査読有, DOI: 10.1016/j.gca.2013.01.045
- ② Makoto Kimura, Naoji Sugiura, Takashi Mikouchi, Takao Hirajima, Hajime Hiyagon, and Yoshie Takehana, Eclogitic clasts with omphacite and pyrope-rich garnet in the NWA 801 CR2 chondrite, *American Mineralogist* 98, 387-393, (2013), 査読有, DOI: 10.2138/am.2013.4192
- ③ Michael K. Weisberg, Makoto Kimura, The unequilibrated enstatite chondrites, *Chemie der Erde*, 72, 101-115, (2012), 査読有, DOI: 10.1016/j.chemer.2012.04.003
- ④ Takayuki Ushikubo, Makoto Kimura, Noriko T. Kita, and John W. Valley, Primordial oxygen isotope reservoirs of the solar nebula

- recorded in chondrules in Acfer 094 carbonaceous chondrite, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 90, 242-264, (2012), 査読有, DOI: 10.1016/j.gca.2012.05.010
- ⑤ 野口 高明, 木村 眞, 中村 智樹, 他 11 名, 顕微ラマン分光分析によるイトカワ塵試料の構成鉱物同定の試み, *分析化学*, 61, 299-310, (2012), 査読有, DOI: dx.doi.org/10.2116/bunsekikagaku.61.299
- ⑥ T. Noguchi, T. Nakamura, M. Kimura, 他 15 名, Incipient Space Weathering Observed on the Surface of Itokawa Dust Particles, *Science*, 333, 1121-1125, (2011), 査読有, DOI: 10.1126/science.1207794
- ⑦ Tomoki Nakamura, Takaaki Noguchi, Masahiko Tanaka, Michael E. Zolensky, Makoto Kimura, 他 11 名, Itokawa Dust Particles: A Direct Link Between S-Type Asteroids and Ordinary Chondrites, *Science*, 333, 1113-1116, (2011), 査読有, DOI: 10.1111/j.1945-5100.2011.tb01950.x
- ⑧ Masaaki Miyahara, Eiji Ohtani, Makoto Kimura, Shin Ozawa, Toshiro Nagase, Masahiko Nishijima and Kenji Hiraga, Evidence for multiple dynamic events and subsequent decompression stage recorded in a shock vein, *Earth and Planetary Science Letters*, 307, 361-368, (2011), 査読有, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2011.05.010
- ⑨ 木村 眞, 隕石に見られる衝突現象: 概説, *遊星人*, 20, 132-138, (2011), 査読有, URL: www.wakusei.jp/book/pp/Contents\_20.new.html
- ⑩ H. Hiyagon, A. Yamakawa, T. Ushikubo, Y. Lin, M. Kimura, Fractionation of rare earth elements in refractory inclusions from the Ningqiang meteorite: Origin of positive anomalies in Ce, Eu, and Yb, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 75, 3358-3384, (2011), 査読有, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.gca.2011.03.029
- ⑪ M. Kimura, J. N. Grossman, and M. K. Weisberg, Fe-Ni metal and sulfide minerals in CM chondrites: An indicator for thermal history, *Meteoritics & Planetary Science*, 46, 431-442, (2011), 査読有, DOI: 10.1111/j.1945-5100.2010.01164.x
- ⑫ Ohtani E., Ozawa S., Miyahara M., Ito Y., Mikouchi T., Kimura M., Arai T., Sato K., and Hiraga K., Coesite and stishovite in a shocked lunar meteorite, Asuka-881757, and impact events in lunar surface, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100: 14651-14654, (2010), 査読有, DOI: 10.1073/pnas.1009338108
- ⑬ Weisberg M. K. and Kimura M., Petrology and Raman spectroscopy of high pressure phases in the Gujba CB chondrite and the shock history of the CB parent body., *Meteoritics & Planetary Science* 45: 873-884., (2010), 査読有, DOI: 10.1111/j.1945-5100.2010.01058.x
- ⑭ Miyahara, M., Ohtani, E., Kimura, M., El Goresy, A., Ozawa, S., Nagase, T., Nishijima, M., and Hiraga, K., Coherent and subsequent incoherent ringwoodite growth in olivine of shocked L6 chondrites, *Earth and Planetary Science Letters*, 295, 321-327, (2010), 査読有, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2010.04.023

[学会発表] (計 40 件)

- ① M. Kimura, Minerals in meteorites: A review, Symp. 36th Antarct. Meteorite, NIPR, Tokyo, 2012. 11. 25
- ② 木村 眞, 杉浦直治, 三河内岳, 平島崇男, 比屋根肇, 竹鼻祥恵, CRコンドライト中のエクロジャイトのクラスト, 鉱物科学会, 京都大学, 2012. 9. 10
- ③ M. K. Weisberg, D. S. Ebel and M. Kimura, Petrology of chondrules and a diopside-rich inclusion in the MAC 88136 EL3 chondrite, 75th Meteoritical Society, 2012. 8. 4, オーストラリア
- ④ M. Kimura, J. A. Barrat, M. K. Weisberg, N. Imae, A. Yamaguchi, and H. Kojima, Ungrouped carbonaceous chondrite, Yamato 82094: Characteristic features and classification, 75th Meteoritical Society, 2012. 8. 3, オーストラリア
- ⑤ M. Kimura, T. Karube, M. K. Weisberg, T. Mikouchi, and T. Noguch, Opaque minerals in chondrites: indicators of formation conditions, 74th

- Meteoritical Society, Greenwich, 2011.8.9、イギリス
- ⑥ D. Nakashima, M. Kimura, K. Yamada, T. Noguchi, T. Ushikubo, and N. T. Kita, Study of chondrules in CH chondrites - III: Oxygen isotope ratios of silica-bearing, metal-bearing, and 16O-rich chondrules, 74th Meteoritical Society, Greenwich, 2011.8.4、イギリス
- ⑦ 木村 眞, 山口亮, 小島秀康, Asteroidal collision inferred from meteorites: A preliminary results on the systematic survey for NIPR collection, 日本地球惑星科学連合 2011年大会, 2011.5.26
- ⑧ T. Ushikubo, M. Kimura, N. T. Kita, and J. W. Valley, Primordial Oxygen Isotope Reservoirs Of The Solar Nebula Recorded In Chondrules From Acfer 094 Carbonaceous Chondrite, Lunar Planet. Sci. 42, 2011.3.15、アメリカ
- ⑨ 木村 眞, 隕石と衝撃現象: 序論, 衝突研究会、北海道大学, 2010.11.5
- ⑩ M. Kimura, K. Yamada, T. Shibata, T. Karube, A. Takaki, T. Noguchi, D. Nakashima, M. K. Weisberg, Study Of Chondrules In Ch Chondrites - I: Bulk Chemical Compositions Of Chondrules, 73rd Meteoritical Society, New York, 2010.7.30、アメリカ

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

木村 眞 (KIMURA MAKOTO)  
茨城大学・理学部・教授  
研究者番号: 20142226

### (2) 研究分担者

無し

### (3) 連携研究者

大谷 栄治 (OHTANI EIJI)  
東北大学大学院・理学系研究科・教授  
研究者番号: 60136306

宮原 正明 (MIYAHARA MASAOKI)  
東北大学大学院・理学系研究科・助教  
研究者番号: 90400241