

平成22年 3月31日現在

研究種目： 基盤研究 (C)

研究期間： 2007~2009

課題番号： 19540500

研究課題名 (和文) コンドライトの形成過程と形成年代に関する研究

研究課題名 (英文) Study on formation process and chronology 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貴重な隕石と考えられている。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) 難揮発性包有物と呼ばれる太陽系最初期の形成物質から新鉱物の報告及び形成環境の復元を行った。2) 金属鉄を検討し、低変成のコンドライトの分類、及び母天体内での熱履歴を明らかにした。3) 母天体同士の衝突作用の解明を超高圧鉱物に基づいて行った。実験的研究も行って、定量的に議論した。

研究成果の概要 (英文)： I obtained the following results; 1) I identified a new mineral from a refractory inclusion, and reconstructed the formation condition. 2) Based on the features of Fe-Ni metal, I discussed the classification and low grade metamorphism of primitive chondrites. 3) From high-pressure minerals and an experimental work, I quantitatively discussed the physical conditions for the parent body collision.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	2,400,000	720,000	3,120,000
20年度	700,000	210,000	910,000
21年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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、新鉱物、衝撃作用、超高圧鉱物

## 1. 研究開始当初の背景

コンドライトは種々の岩石学的構成物質 (コンドルール、難揮発性包有物、マトリックスなど) からなり、その形成過程は複雑で、まだ詳細は十分明らかにはなっていない。しかしながら、概ね次のような過程を経ていることが研究者の共通認識になっている。

- 1) 原始太陽系星雲内での鉱物粒子の凝縮、
- 2) 難揮発性包有物やコンドルールの形成、
- 3) 母天体 (小惑星) への包有物等の集積、
- 4) 母天体における熱変成作用、
- 5) 衝撃変成作用と母天体の破壊。

以上の過程に関してはコンドルールなどの構成物質を検討することにより、その詳

細が明らかになってきている。本研究代表者も従来からこの問題を検討してきた。しかしながら、コンドライト構成物質は多くが二次的過程（熱変成作用、変質作用、衝撃作用など）を複数回受けており、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。

一方、これらの過程が太陽系初期に起こったことは間違いないところであり、近年の二次イオン質量分析計（SIMS）の使用はコンドライト構成物質に関して多くの年代データを出してきた。しかしながら、その年代の意味することに関しては議論が多い。これは上述のような複雑な二次的過程をどのように評価するか、ということにかかわっている。詳細な岩石鉱物学的な記載情報のない年代データは意味が不明瞭にならざるを得ないと、考えている。

そこで、本研究ではタイムスケールをコンドライト構成物質から求めることを最終的な目標として、本研究代表者がこれまでも行ってきた詳細な岩石鉱物学的記載を引き続き行う。そして、これらのデータを基に国内外の多くの研究者と共同研究を行い、国際的にも問題の多いタイムスケールを検討するための基礎となる情報を詳細に集め、コンドライトの形成過程を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： 難揮発性包有物はコンドライトより年代的に古く、太陽系最古の物質であることが確立している。しかし、これら包有物がどのような過程を経てきたかについては、十分明らかではない。本研究ではこの点を詳細な岩石鉱物学的記載情報から検討する。

(2) コンドライトの研究： コンドライト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200万年程度、後で生成した可能性が指摘されている。しかし、その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、岩石学的記載と同位体測定を同一試料で行う。数種類のコンドライトの岩石薄片を作成し、コンドライトの特徴を初生的鉱物、二次的鉱物（ネフェリンなど）に関して記載する。それらのコンドライトに関して、同位体データを Wisconsin 大学の Kita, Ushikubo 博士と共に分析する。詳細に岩石記載の行われた、同一のコンドライトに関して、これらの同位体データを同時に求める研究は世界的にこれまであまり行われたことが無かった。

(3) 母天体の熱履歴の復元： 隕石母天体

の熱履歴の復元は従来は珪酸塩鉱物や酸化鉱物の組織、組成から行われてきた。最近、本研究代表者らは金属鉄が熱履歴に非常に敏感で、低変成度のコンドライトの分類や熱変成作用の定量的指標として有効であることを見いだした。本研究期間でもこの研究をさらに進め、特に金属鉄の相平衡、変態速度からコンドライトの熱履歴を検討する。それらのデータにより、各種コンドライト母天体の内部構造、熱的進化を広く明らかにできると期待している。

(4) 衝撃変成作用の研究： これまでにも本研究代表者は東北大学との共同研究により、衝撃変成作用を反映する高圧鉱物の記載分析を行い、太陽系初期の天体衝突現象を明らかにしてきた。一方、従来、衝撃高圧鉱物が報告されてこなかったある種の炭素質コンドライトからも最近、高圧鉱物を発見した。そこで本研究では、高圧鉱物の存在や衝撃作用が詳細に研究されていなかった、各種の隕石も新たに対象とする。これにより、太陽系初期の衝撃作用の全般的特徴を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 必要な試料の一部は本科学研究費で購入した。また、国立極地研究所、NASAなどの研究機関から貸与された試料も用いた。

(2) 試料の組織の精密観察には主として本学分析センターの走査型電子顕微鏡を用いた。

(3) 試料中の鉱物の定量分析には本学理学部の電子プローブマイクロアナライザーを用いた。必要な消耗品、保守のための経費は本科学研究費から支出した。

(4) 同位体分析、ラマン分光分析などに関しては他大学、研究機関の共同研究者に主として分析を依頼、あるいは共同で作業を行った。得られた結果は共同研究の成果として、平等な立場で発表した。

## 4. 研究成果

### (1) 難揮発性包有物の研究

研究代表者は過去に特異な鉱物組合せからなる難揮発性包有物を記載したことがあった (Kimura et al., 1993)。本研究期間に、この包有物を再度取り上げ、その中のある鉱物を詳細に記載、分析した。その結果、これが輝石の Al の仮想成分である Ca チェルマク成分である可能性が高くなった。これは長年にわたって広く知られていた輝石の最も重要な仮想成分であるが、これまで天然からの報告はなく、鉱物名は無かった。

この鉱物の同定を東京大学、東北大学の研究者と共同で行い、実験的に得られていた

Ca チェルマク成分と同一のものであることを確認したので、国際鉱物学会の新鉱物命名委員会に報告したところ、クシロアイトの名称が認められ、新鉱物と認知された。またその成果は下記の〔学会発表〕の③、④で発表した。③はフランスで行われた隕石学会での発表であるが、この学会後にパリのフランス自然史博物館でこの鉱物に関して招待講演を依頼されたので、②のように発表を行った。この仮想成分の重要性が広く認識されていたための依頼と考えている。

論文については下記の〔雑誌論文〕中の②で発表した。この雑誌は鉱物学に関する国際的に最も権威のある学術誌であるが、短時間で受理され、成果を公表することができた。

さらに国際鉱物学会のウェブサイトでのこの鉱物発見のニュースを見た産経新聞社の記者から取材依頼を受けた。その記事は下記の〔その他〕新聞掲載記事となった。

このように今回の発見は国内外で広く知られるようになった。今後はこの鉱物の形成過程、年代測定などの検討を行いたい、と考えている。またどのような種類の隕石から産するかの検討も行っていきたい。

〔雑誌論文〕中の⑥、⑧も難揮発性包有物に関する研究成果である。これはコランダムなどを含む希な包有物、あるいはカンラン石に富む包有物に関するもので、岩石記載と鉱物組合せ及び組成の熱力学的検討から、原始太陽系星雲における難揮発性包有物の凝縮過程を論じたものである。定量的な熱履歴が得られ、今後この方向が有効であることが明らかになったことがこの研究の主たる意義である。

## (2) コンドルールの研究

コンドルールに関しては研究は現在進行中であるが、本研究期間中には主として最も始源的とされるコンドライト中のコンドルールの岩石記載を行った。他のコンドライトで認められるような二次的変質鉱物は全く認められず、始源的特徴を保持していることが確認された。鉱物組成、コンドルールの全岩化学組成を測定した上で、Wisconsin 大学の Kita, Ushikubo 博士に試料を送付した。

同博士達はこの岩石記載に基づいて、酸素同位体及び短寿命放射性核種である  $^{26}\text{Al}$  ( $\text{Mg}$ ) の測定を行った。その結果、従来知られていた酸素の混合線とは異なる直線上にコンドルールがプロットされること、従来重い同位体に濃集するとされてきた石基ガラスやシリカ鉱物もカンラン石などの斑晶鉱物と同じ酸素同位体組成を示すことが明らかになった。後者は未変質試料ゆえに得られた結果であり、従来の見解を大きく変更するものとなった。また、残渣鉱物が多く含まれること、酸素同位体的にコンドルールは大き

く二分されることも明らかになった。これは従来広く知られていた結果とは異なる発見となった。

以上は従来のコンドルールの酸素同位体に関する分析結果を一新するものとなり、Ushikubo et al. (2010) などで学会発表すると共に、現在論文を投稿中である。

なおこれらのコンドルールの年代も測定したが、始源的なものであった。

以上の結果を受けて、さらに Wisconsin 大学の研究者達との酸素同位体と岩石記載を組み合わせた共同研究が進行中で、2010年の隕石学会で発表予定である。

一方、研究代表者は神戸大学の研究者と共同で CMコンドライト中のコンドルールも研究した。CMコンドライトは水質変成作用を受けている試料であるが、この作用に伴って、特に希土類元素がどのように挙動するかを調べた。その結果、これらの元素は変質作用に伴って、独特の分布を示すことが明らかとなり、〔雑誌論文〕の⑤で発表した。

## (3) 母天体の熱履歴の復元

金属鉄は珪酸塩鉱物に比べて産出は少ないが、拡散速度などははるかに早く、コンドライトの熱履歴を復元するためには有用な鉱物である。研究代表者はアメリカ地質調査所の Grossman 博士、ニューヨーク市立大学の Weisberg 教授と共同で普通コンドライト及び COコンドライト中の金属鉄を系統的に調べた。その結果、金属鉄の組成と組織が熱履歴に非常に敏感であり、低温で起こったと考えられるコンドライトの低度の変成作用や分類の定量的指標として有効であることを見いだした。この結果は〔雑誌論文〕の⑦で発表した。

なお、以上の検討結果は各種コンドライト母天体の内部構造、熱的進化を広く明らかにできるものと期待しており、現在は他の種類の隕石にも拡大し、研究を行っている。論文の準備も進めている。

## (4) 衝撃変成作用の研究

従来から隕石母天体（小惑星）同士の衝突に伴う、衝撃変成作用を反映する高圧鉱物の記載、分析を行ってきたが、さらにこの研究も各種隕石に拡大して進めた。

新たに検討した Lコンドライトに関しては、超高压鉱物から温度圧力条件を詳細に検討し、衝撃に伴う相転移の熱履歴を明らかにした。この結果は〔雑誌論文〕の④で公表した。

また、東北大学の研究者との共同研究では透過型電子顕微鏡による検討の結果、衝撃時にコンドライトの一部は熔融し、メルトからの結晶分化作用があり、これにより高圧鉱物の不均質な晶出があったことが確認され

た。従来は高压鉱物は固相転移により生じた、とされてきたものに対して、見解を改めさせるものとなった。この結果は〔雑誌論文〕の③で公表した。

普通コンドライト中の衝撃ペインには斜長石が転移して生じたヒスイ輝石の存在が知られていたが、共生することが反応式から予想されるシリカ鉱物が同定できないことが問題であった。この問題を解決するために九州大学の研究者と超高压実験を行い、シリカ鉱物の核形成、結晶成長がヒスイ輝石より高温では数段階遅いことが原因であることを明らかにした。この成果については〔雑誌論文〕の①で発表した。これは高压鉱物の形成反応を実験的に明らかにした、数少ない報告となり、公表後間もないが、引用依頼が来ている。

なお、中国科学院地質学地球物理学研究所からの招待講演の依頼があったが、その折に隕石における衝撃作用に関する総論を発表してきた〔学会発表〕の⑤。

現在は、以上の研究をさらに拡大し、火星隕石や月隕石における衝撃作用の検討も進行中である。

#### 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 8 件)

- ① T. Kubo, M. Kimura, T. Kato, M. Nishi, A. Tominaga, T. Kikegawa, K. Funakoshi, The effect of temperature on plagioclase breakdown in shocked meteorites, *Nature Geoscience*, 3, 41-45 (2010)、査読有
- ② M. Kimura, T. Mikouchi, A. Suzuki, M. Miyahara, E. Ohtani, and A. El Goresy, Kushiroite, CaAlAlSiO<sub>6</sub>: A new mineral of the pyroxene group from the ALH 85085 CH chondrite, and its genetic significance in refractory inclusions, *American Mineralogist*, 94, 1479-1482, (2009)、査読有
- ③ M. Miyahara, A. El Goresy, E. Ohtani, M. Kimura, S. Ozawa, T. Nagase, M. Nishijima, Fractional crystallization of olivine melt inclusion in shock-induced chondritic melt vein, *Physics Earth Planet. Interior*, 177, 116-121 (2009)、査読有
- ④ S. Ozawa, E. Ohtani, M. Miyahara, A. Suzuki, M. Kimura and Y. Ito, Transformation textures, mechanisms of formation of high-pressure minerals in shock melt veins of L6 chondrites, and

pressure-temperature conditions of the shock events, *Meteoritics & Planetary Science*, 44, 1771-1786 (2009)、査読有

- ⑤ M. Inoue, N. Nakamura and M. Kimura, Tetrad effects in REE abundance patterns of chondrules from CM meteorites: Implications for aqueous alteration on the CM parent asteroid, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 73, 5224-5239, (2009)、査読有
- ⑥ N. Sugiura, M. I. Petaev, M. Kimura, A. Miyazaki and H. Hiyagon, Nebular history of amoeboid olivine aggregates, *Meteoritics & Planetary Science*, 44, 559-572, (2009)、査読有
- ⑦ M. Kimura, J. N. Grossman, and M. K. Weisberg, Fe-Ni metal in primitive chondrites: Indicators of classification and metamorphic conditions for ordinary and CO chondrites, *Meteoritics & Planetary Science*, 43, 1161-1177, (2008)、査読有
- ⑧ Nakamura T.M., Sugiura N., Kimura M., Miyazaki A., Krot, A.N., Condensation and aggregation of solar corundum and corundum-hibonite grains, *Meteoritics & Planetary Science*, 42, 1249-1265, (2007)、査読有

〔学会発表〕(計 38 件)

- ① 木村 眞、軽部朋子、野口高明、CHコンドライトの形成過程: 不透明鉱物に基づく検討、日本鉱物科学会、北海道大学、札幌、2009.9.10
- ② M. Kimura, Kushiroite, CaAlAlSiO<sub>6</sub>: A new mineral of the pyroxene group from the ALH 85085 CH chondrite, and its genetic significance in refractory inclusions, フランス自然史博物館、フランス、パリ、招待講演、2009.7.21
- ③ M. Kimura, A. El Goresy, T. Mikouchi, A. Suzuki, M. Miyahara, and E. Ohtani, Kushiroite, CaAl<sub>2</sub>SiO<sub>6</sub>, a new mineral in carbonaceous chondrites: its formation conditions and genetic significance in Ca-Al-rich refractory inclusions, 72nd Meteoritical Society, Nancy, France, 2009.7.18
- ④ 木村 眞, El Goresy A., 三河内 岳, 鈴木 昭夫, 宮原 正明, 大谷 栄治、ALH85085 コンドライト中で発見された輝石グループの新鉱物、クシロアイト、CaAl<sub>2</sub>SiO<sub>6</sub>、日本地球惑星科学連合 2009 年大会、千葉幕張メッセ、2009.5.17
- ⑤ M. Kimura, High-Pressure Phases in Chondrites and Implications to Impact

Process in the Early Solar System, 中国科学院地質学地球物理学研究所、中国、北京、招待講演, 2008.11.1

- ⑥ M. Kimura, M. Miyahara, and T. Mikouchi, Cooling history of shock vein in chondrite, Workshop on Planetary collision and evolution of the solar system, 東北大学、仙台、招待講演、2008.10.27
- ⑦ 木村 眞、J. N. Grossman, M. K. Weisberg、CMコンドライトの熱履歴： Fe-Niメタルからの検討、日本鉱物科学会、秋田大学、秋田、2008.9.22
- ⑧ 木村 眞、橋省吾, Friedrich J., Wolf S.、鈴木昭夫、大谷栄治、高压鉱物を含む衝撃ペインの形成条件、日本地球惑星科学連合2008年大会、千葉幕張メッセ、2008.5.28
- ⑨ M. Kimura, H. Fukuda, T. Mikouchi, A. Suzuki, and E. Ohtani, Abundant (Mg, Fe)SiO<sub>3</sub> Glass In Shock Veins In An L6 Chondrite, NWA 4719, 70th Meteoritical Society, Tucson, Arizona, USA, 2007.8.17

[その他]

新聞掲載

産経新聞（朝刊） 平成21年4月20日  
（月）掲載  
科学欄「隕石から新鉱物発見」

## 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