

平成 29 年 4 月 10 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400510

研究課題名(和文) 隕石及び惑星物質の比較鉱物学

研究課題名(英文) Comparative mineralogy of meteorites and planetary materials

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

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。本研究では種々のコンドライトに関して主として以下の結果を得た。1) 隕石鉱物に関する総説の公表。2) 強い衝撃変成作用を被ったエンスタタイト・コンドライトから始めて高圧鉱物を報告した。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) ハヤブサ試料の岩石学的研究。5) エクロジヤイト的鉱物組合せの岩片を同位体及び微量元素組成分析し、熱履歴を検討した。6) 高度熱変成作用を被ったコンドライトの熱履歴と分類を検討した。

研究成果の概要(英文)：Chondrites are important meteorites to clarify the evolution of the early solar system. I obtained the following results; 1) Publication of review of meteorite minerals. 2) Discovery of high-pressure minerals from a heavily shocked enstatite chondrite. 3) Oxygen isotopic study of chondrules. 4) Petrological studies of the Hayabusa samples derived from an LL chondritic body. 5) Isotopic study of the eclogitic clast from a CR chondrite. 6) Petrological and chemical study of highly metamorphosed chondrites.

研究分野：隕石学

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

本研究で直接観察及び分析の対象とするものは隕石である。隕石は始源的隕石(コンドライト)と分化隕石に区分される。前者は太陽系元素存在度に近い組成を持つこと、形成年代が極めて古いことなどから、太陽系の始源物質と見なされ、原始太陽系における元素存在度や物質進化に関する情報を担っていると考えられている。後者は天体内部の火成活動の結果、分化過程を経て形成されたもので、天体の初期進化や内部構造に関する情報を提供するものである。これら二種類の隕石は共に、多種多様な種類があること、種々の構成物質からなること、二次的過程を経ていることが多いなどの点から、形成過程は複雑で、そ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。

これらの形成過程を明らかにするためには隕石を構成するさまざまな鉱物の特徴を正確、かつ精密に明らかにしていかなければならない。しかしながら、近年では隕石の研究にあたっては同位体などの分析が広く行われているのに対して、鉱物学的な研究は十分かつ精密に行われているとはいえない。そのため折角、精密な分析機器を駆使して年代や元素分析データ得ても、その意味することに関しては議論が絶えない結果になっていることが多い。

そこで、本研究では研究代表者がこれまでも行ってきた各種の隕石試料とそれらを構成する物質(難揮発性包有物やコンドラールなど)に関わる詳細な岩石鉱物学的記載を引き続き行う。それらの記載学的データを基に、同位体組成、微量元素組成データなどもあわせて隕石の物質進化の詳細を多角的に明らかにしていこう、と考えている。それを踏まえて、惑星物質全般の鉱物学的特徴を比較検討することにより固体惑星物質の形成過程及び環境を明らかにしていく。

## 2. 研究の目的

(1). エンスタタイト・コンドライトの研究: これらの隕石は金属中に Si が固溶するような極端な還元的环境下で形成された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、研究代表者らは以前より詳細な岩石鉱物学的研究を行ってきており、またこの種の隕石に関する総説も公表した。本研究では、この隕石中でも特に酸化還元雰囲気敏感な金属鉱物や硫化鉱物といった不透明鉱物を中心に研究を行う。それらの産状、組成、組合せを検討することにより酸化還元雰囲気や温度条件といった形成環境を明らかにする。

(2). 衝撃変成作用の研究: これまでも研究代表者は衝撃変成作用を反映する高圧

鉱物の記載、分析を行い、太陽系初期の天体同士の衝突現象を明らかにしてきた。これらの鉱物は地球のマントルなどの深部を構成している鉱物と予想されているものでもあり、また未知の相が含まれている可能性もある重要なものである。本研究期間でも、これらの高圧鉱物の産状、組成の研究を続行し、太陽系初期の天体に発生した衝撃作用の物理条件と高圧鉱物の形成過程と鉱物学的特徴を明らかにする。

### (3). 隕石の分類学

隕石にはさまざまな種類のものが含まれるが、最近研究代表者らは従来のどの種類にも属さないコンドライトを発見し、報告した。これは隕石の分類学に関する重要な知見であるばかりでなく、隕石の形成過程の再検討を提起するもの、と考えている。研究代表者は国立極地研究所の客員教員として、同研究所の膨大な隕石コレクションの分類作業を担っているが、既知のグループの中にも従来の知見以上に組織や構成物質、構成鉱物の多様性があることを見出した。これらの結果を踏まえて、多くの隕石試料を調査することにより、隕石の分類学を再検討したい、と考えている。

### (4). 隕石鉱物の比較検討

研究代表者は「隕石鉱物」という標題の総説論文を 1996 年に鉱物学雑誌に公表し、隕石形成の環境や分類、特徴を鉱物の比較により論じたが、隕石鉱物のその後のめざましい発見や鉱物学の進展を踏まえて、新たな総説を公表する予定でいる。

## 3. 研究の方法

### (1). 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な環境下で生じたことを最も明瞭に示すものは各種の不透明鉱物である。Ca、Mg、K、Na などの親石元素を主成分とする硫化鉱物、Si を多く含んだ金属鉄、各種のシリサイド、フォスファイドなどが含まれる。これらの中には地球では発見されていない特異なものも含まれる。本研究期間では購入したり借用したりして準備した新しい試料を用いて鉱物の産状の観察、組成分析を行う。それらのデータに基づいてエンスタタイト・コンドライトの酸化還元雰囲気や形成過程の詳細を検討する。

### (2). 衝撃変成作用の研究

研究代表者らは過去の科学研究費配分期間中にも隕石母天体に興った衝突作用に結果生じた、衝撃ペインを研究し、数々の高圧鉱物や多様な産状、鉱物学的特徴を報告してきた。本研究期間も従来と同様の分析及び観察手段により、この研究をさらにすすめる。

さらに、ペイン鉱物の観察と高圧合成実験の結果を比較検討して、衝撃変成作用の過程の詳細、特に圧力の上昇と下降のタイムスケール、を定量的に明らかにしたい、と考えている。

### (3) 隕石の分類学

研究代表者は国立極地研究所において客員教員として隕石の分類作業を遂行している。本研究期間においてもその作業をすすめ、膨大な試料の系統的分類を行う。さらに隕石グループ各々の組成や組織の多様性を分析、記載する予定である。この作業を行いながら、隕石の分類の再検討や多様性を明らかにする研究をすすめていく。

### (4) 隕石鉱物の比較検討

隕石鉱物に関する文献や研究代表者自身の分析に基づいて、データベースを新たに作成し、これに基づいて、隕石鉱物の多様性や特徴を記述する新たな総説を公表する。

## 4. 研究成果

本研究期間中に以下の成果を得た。

(1) 隕石鉱物に関する総説： 上記のように過去の総説とその後の隕石鉱物に関する研究の進展を踏まえて、最近までの論文を調査し、隕石鉱物のデータベースを新たに作成した。これに基づいて、隕石鉱物に関する総説を公表した。本論文では特に特徴的な鉱物を列挙し、その産状や化学組成上の特徴、及び形成過程を論述した。これは本研究代表者が日本鉱物科学会学会賞の受賞したことに関する受賞記念論文も兼ねている。

(2) 衝撃変成作用、及びエンスタタイト・コンドライトに関する研究： 天体同士の衝突現象により溶融ペインが生じ、またその中に高圧鉱物が発見されてきた。これはコンドライト、分化隕石の両方にまたがって、多くの種類のものに普遍的に見出されてきたものである。しかしながら、コンドライト中で唯一エンスタタイト・コンドライトからは未発見であった。エンスタタイト・コンドライトは特に還元的环境下で生じた特異なコンドライトであり、その中には特徴的な還元鉱物が多く含まれる。本期間中、衝撃を受けたエンスタタイト・コンドライトを研究し、始めてシリカ鉱物の高圧多形であるコーサイトを発見した。また同じ隕石に含まれる還元鉱物、特にMgが主成分の硫化鉱物や金属鉄、の詳細な観察と分析により、熱履歴も定量的に明らかになった。この発見はほぼ全ての種類の隕石に高圧鉱物が含まれることを明らかにしたもので、太陽系初期の段階での激しい天体衝突現象を強く示唆する知見となった。本研究は論文として公表した。

(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アメリカ合衆国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。とりわけKimura et al. (2014)で公表した従来知られていなかった特異な炭素質コンドライト中のコンドルールに着目した。これはその隕石の同位体組成が明らかになっていなかったこと、及び他の炭素質コンドライト中のコンドルールの同位体的特徴の比較に意義が認められたためである。この隕石に含まれるコンドルールの構成鉱物を詳細に記載した上で、それら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。これらの中にはインディアライトと呼ばれる隕石から始めて発見された鉱物を含むコンドルールも含まれていた。これらの分析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特定の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確認された。コンドルールの形成環境や原始太陽系における物質進化に関する重要な知見が得られた。これらの成果は論文として公表した。

(4) 小惑星イトカワ回収試料の研究： この重要な小天体からの回収試料の初期分析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従来のこの種類の隕石の岩石鉱物学的特徴との比較検討から明らかにした。また宇宙風化について詳細な観察及び分析を行った。またこれらの試料に含まれる特異な鉱物の記載を国内外の共同研究者と共にを行い、成果をScienceを含めた4編の論文として公表した。

(5) エクロジャイト的鉱物組合せの岩片の研究： 隕石は直径100 km程度の小さな母天体由来のもと考えられてきており、高圧鉱物は衝撃作用時にのみ生じる、とされてきた。またその圧力は20 Gp程度とされてきた。しかし、Kimura et al. (2013)は初めて高圧静水圧条件下で生じた可能性のある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、パイロブ組成ザクロ石を含み、カンラン石、斜方輝石、グラファイト、燐酸塩鉱物、硫化鉄などからなるものであった。これらの鉱物組合せ、鉱物組成から3Kb程度の高圧条件が推定され、これにより半径が1000 kmを超える比較的大きな母天体が示唆された。本研究期間中ではこの研究を同位体や微量元素組成の分析を中心に国内外の共同研究者と共に続行し、さらにこれらのデータを踏まえた元素の拡散過程、熱過程の復元及び解析を行った。その結果、Kimura et al. (2013)で示唆された大きな母天体が原始太陽系には存在したことが、及びそれが衝突破壊したことが確認された。これは原始太陽系初期には現在

の小惑星より大きな原始天体が存在することを示唆する重要な知見となった。この成果も論文として公表した。

(6) 高度熱変成作用を被ったコンドライトの研究: コンドライトには母天体で高度に熱変成作用を被ったものがあることが知られていた。これらはタイプ7と一括されていた。本研究期間中ではこれらのコンドライト試料を多数収集し、それらの岩石学的、及び元素組成分析をアメリカ合衆国の共同研究者と行うことにより、その熱履歴、始源物質などを検討した。隕石の分類学と言う立場でも検討を行った。この成果も論文として公表した。

(7) 角礫岩化隕石の研究: 隕石には母天体同士の衝突現象により角礫岩化したものが多く知られている。これらの中には異質岩片や特異な環境で生じたものも含まれる。本研究期間中には南極で近年採集された18kgの大きな角礫岩コンドライトを研究した。クラストと呼ばれる各構成物質の詳細な岩石鉱物学的特徴を記載した。さらに韓国の共同研究者と共にこの隕石の全岩希ガス組成も測定した。これらの結果から、クラスト毎の形成過程や条件を明らかにし、この隕石全体における角礫岩化作用の過程についても年代を含めて論じた。結果は国際隕石学会でベルギーや韓国の共同研究者と共に報告した。

## 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11件)

T. J. Tenner, M. Kimura, and N. T. Kita. Oxygen isotope characteristics of chondrules from the Yamato-82094 ungrouped carbonaceous chondrite: further evidence for common O-isotope environments sampled among carbonaceous chondrites, *Meteoritics & Planetary Science*, 52, 268-294, 2017, 査読有

Kimura M., Yamaguchi A. and Miyahara M. Shock-induced thermal history of an EH3 chondrite, Asuka 10164, *Meteoritics & Planetary Science*, 52, 24-35, 2017, 査読有

H. Hiyagon, N. Sugiura, N.T. Kita, M. Kimura, Y. Morishita, Y. Takehana. Origin of the eclogitic clasts with graphite-bearing and graphite-free lithologies in the Northwest Africa 801 (CR2) chondrite: Possible origin from a Moon-sized planetary body inferred from chemistry, oxygen isotopes and REE abundances, *Geochimica et Cosmochimica*

*Acta*, 186, 32-48, 2016, 査読有

木村 眞. 隕石中の鉱物: 序説, *岩石鉱物科学*, 44, 1-9, 2015, 査読有

Friedrich, J.M., Perrotta, G.C., and Kimura, M. Compositions, geochemistry, and shock histories of recrystallized LL chondrites, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 139, 83-97, 2014, 査読有

M. Kimura, J. A. Barrat, M. K. Weisberg, N. Imae, A. Yamaguchi, and H. Kojima. Petrology and bulk chemistry of Yamato-82094, a new type of carbonaceous chondrite, *Meteoritics & Planetary Science*, 49, 346-357, 2014, 査読有

Noguchi, T., Bridges, C.J., Hicks, J.L., Gurman, J.S., Kimura, M., Hashimoto, T., Konno, M., Bradley, P.J., Okazaki, R., Uesugi, M., Yada, T., Karouji, Y., Abe, M., Okada, T., Mitsunari, T., Nakamura, T., and Kagi, H. Mineralogy of four Itokawa particles collected from the first touchdown site, *Earth, Planets and Space*, 66, 66:124, 2014, 査読有

T. Noguchi, M. Kimura, T. Hashimoto, M. Konno, T. Nakamura, M. E. Zolensky, 他11名. Sylvite and halite on particles recovered from 25143 Itokawa: A preliminary report, *Meteoritics & Planetary Science*, 49, 1305-1314, 2014, 査読有

Yayoi N. MIURA, Keisuke NAGAO and Makoto KIMURA. Noble gases in individual chondrules of the Allende CV3 chondrite, *Meteoritics & Planetary Science*, 49, 1034-1056, 2014, 査読有

Nakamura T., Nakato A., Ishida H., Wakita S., Noguchi T., Zolensky Michael E., Tanaka M., Kimura M., 他14名. Mineral chemistry of MUSES-C Regio inferred from analysis of dust particles collected from the first- and second-touchdown sites on asteroid Itokawa, *Meteoritics & Planetary Science*, 49, 215-227, 2014, 査読有

Noguchi, T., Kimura, M., Hashimoto, T., 他20名 Space weathered rims found on the surfaces of the Itokawa dust particles, *Meteoritics & Planetary Science*, 49, 188-214, 2014, 査読有

[学会発表](計20件)

木村 眞, ワイスバーク M.K., 高木阿沙子, Almahata Sitta EL3 クラストの熱履歴, 鉱物科学会、金沢大学, 2016, 9、金沢

M. Kimura, A. Yamaguchi, K. Nagao, M. K. Haba, Ph. Chaey, V. Debaille, and L. Pittarello, LL CHONDRITIC BRECCIAS AND THEIR SIGNIFICANCE TO THE EVOLUTION OF LL PARENT BODIES, 79th Meteoritical Society, Berlin, 2016, 8、ベルリン(ドイツ)

Kimura M. and Yamaguchi A., An LL chondritic breccia, Asuka 12389, and the significance to the asteroidal evolution, Workshop on Planetary Science and Space Exploration, Tohoku University, 2016, 7、仙台

S. Kurauchi, M. Kimura, and W. Fujiya, Shock processes of the vein and host in an L6 chondrite, NWA 8612, Goldschmidt Conference, Yokohama, 2016, 6、横浜

R. Sato, M. Kimura, and W. Fujiya, A primitive chondrite, NWA 8613 chondrite, CV3.1-3.2, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2016, 5、千葉

木村 眞, 山口 亮, 角礫岩普通コンドライトの分類, 鉱物科学会、東京大学, 2015, 9、東京

M. K. Weisberg, D. S. Ebel, M. Kimura, METAL-RICH NODULES IN EL3 CHONDRITES AND ALMAHATA SITTA EL3 CLAST MS-177, 78th Meteoritical Society, Berkley, 2015, 7、バークレー (アメリカ)

Kimura M. and Yamaguchi A., Reconsideration on the classification of brecciated and highly metamorphosed chondrites, XII International Symposium on Antarctic Earth Science, 2015, 7、ゴア (インド)

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  
無し

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織  
(1)研究代表者