

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 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008 ～ 2011

課題番号：20340150

研究課題名（和文）炭素質コンドライトの高温下における衝撃履歴の解明

研究課題名（英文）Shock metamorphism of the carbonaceous chondrites at high temperatures

研究代表者

留岡 和重（TOMEOKA KAZUSHIGE）

神戸大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：00201658

研究成果の概要（和文）：高温に熱せられた始原的隕石に特有の衝撃溶融脈の電子顕微鏡、放射光 X 線回折による観察・解析により、溶融脈の鉱物学的詳細そしてその生成プロセスが明らかになってきた。また衝撃実験によって、隕石の高温下における衝撃加熱の影響は常温下における影響とは大きく異なることがわかってきた。さらに本研究遂行過程で、衝突による角礫岩化によって形成された組織に関する新たな発見があり、その研究にもとづいて隕石の母天体における組織形成に関する新たなモデルを提出した。

研究成果の概要（英文）：Our study by using electron microscopy and synchrotron radiation X-ray diffraction revealed detailed mineralogical characteristics of shock melts in some primitive meteorites shocked at high temperatures. Our shock experiments of a primitive meteorite showed that shock heating effects at high temperatures were very different from those at a room temperature. We also found chondrules surrounded by rims in some primitive meteorites resulted from shock-induced brecciation and proposed a new parent-body formation model of the meteorite textures.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
総計	6,600,000	1,980,000	8,580,000

研究分野：惑星物質科学

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：炭素質コンドライト、衝撃変成、熱変成、水質変成、角礫岩化、衝撃溶融、斜長石ガラス、コンドリュール・リム

1. 研究開始当初の背景

衝突現象は微惑星の物質進化を駆動した重要な物理過程であり、隕石の衝撃履歴の解明は惑星科学における最重要課題の一つである。微惑星は衝突・合体による成長過程で熱源を獲得すると考えられている。そうであれば、微惑星が熱源により高温に加熱された

状態における衝突は、微惑星の成長過程の一般的な現象であったと考えられる。

炭素質コンドライト（以下 C 隕石）が受けた衝撃の度合いを知るためには、これまで Stöffler et al. (1991) の「普通コンドライトの衝撃見積り」が広く用いられてきた。しかし、これは主に室温での衝撃実験結果をもとにしており、標的である隕石が高温であった場

合は考慮されていない。さらに、この見積りのもう一つの問題点は、非多孔質の普通コンドライトを対象としていることである。C隕石のように微粒子からなる多孔質物質を多く含む場合、その衝撃効果(特に加熱効果)は普通コンドライトとは大きく異なることが、これまでの衝撃実験によってわかっている(e.g. Tomeoka et al. 1999, 2003)。すなわち、Stöffler et al.の「衝撃見積り」は、常温下においてもC隕石にはそのまま適用できない可能性が大きい。

2. 研究の目的

本研究は、最も初期の微惑星を形成していたと思われるC隕石の衝撃履歴を、隕石の観察および衝撃実験を通して解明することを目的とする。本研究では以下のことを行う。

(1) 熱変成度、衝撃変成度の異なるCK3~6隕石を、走査型電子顕微鏡(SEM)、透過型電子顕微鏡(TEM)および電子線プローブマイクロアナライザー(EPMA)を用いて調べ、高温における衝撃の痕跡を探る。特にCK隕石に特有のオリビン、斜長石の溶融組織を重点的に調べ、それらの成因を解明する。

(2) 強い衝撃を受けたCV隕石のマトリックス中には、細かい衝撃溶融脈が存在していることが知られているが、その詳細は不明である。それら衝撃溶融脈の鉱物学的特徴を調べ、これまで我々が行ったC隕石の衝撃実験結果と対照しながら、C隕石の衝撃による物質変化の詳細を解明する。

(3) 高温下におけるC隕石の衝撃回収実験を行い、回収試料を詳細に観察・分析し、その衝撃効果を調べる。それによって衝撃効果と衝撃圧力の関係を明らかにし、高温下におけるC隕石の衝撃見積りを確立する。

(4) 衝突による角礫岩化は、C隕石の組織形成に重要な役割を果たしたと考えられている。C隕石に一般的に存在するクラストに注目し、角れき岩化作用と隕石の組織形成との関係を解明する。

3. 研究の方法

(1) C隕石の精密な組織観察・分析

CKおよびCV隕石の研磨薄片を、光学顕微鏡、SEM-EDS、EPMAで観察・分析する。化学分析は、マイクロビームによる局所分析のほかに、X線による二次元元素マッピングも併用して行う。特に溶融したオリビン、斜長石の非晶質化および化学結合の状態を探るため、カソードルミネッセンス法、ラマン

分光法も用いる。

その後、CK隕石のオリビン、斜長石の溶融物、およびCV隕石の衝撃溶融脈の特定部分を薄片試料から切り出し、イオン研磨法を用いて超薄片化し、TEM-EDSを用いて高倍率で観察・分析する。TEM用試料作製には、収束イオンビーム(FIB)法も適宜用いる。さらに、SPring-8の放射光X線回折を用いて、薄片試料の特定部分の、鉱物の同定、存在度の解析を行う。

(2) 衝撃回収実験

衝撃実験は、一段式火薬銃・衝撃波発生装置を用いて行う。標的試料加熱装置を用いてC隕石を600~800°Cに加熱し、10~35 GPaの範囲で数段階の異なる圧力の衝撃実験を行う。実験後、試料を回収し、電子顕微鏡、EPMAを用いて観察・分析する。特に細粒のマトリックスの衝撃による変成、および衝撃溶融脈の鉱物学的特徴に焦点を当てる。

4. 研究成果

(1) 強い熱・衝撃の影響を受けた炭素質コンドライト中の斜長石ガラス

2つの強い熱・衝撃の影響を受けたCK隕石(EET83311, LEW87009)から、特異な斜長石ガラスを発見した。斜長石ガラスは、これまで多くの隕石から報告されているが、その成因については不明な点が多い。特にそれが衝撃溶融を経て形成されたか、固体のまま形成されたかは論争が続いている。両隕石の斜長石ガラスを反射電子像、EPMA、ラマン分光法、カソードルミネッセンス法などの手法を用いて調べた。EET83311の斜長石はすべてガラス化していた。このようなCK隕石は過去に知られていない。一方、LEW87009の斜長石は一部がガラス化していた。組織的特徴は、これらの斜長石ガラスはいずれも衝撃加熱によって溶融した後、急冷されて形成されたことを示している。両隕石とも、斜長石ガラスの再結晶化が見られないことから、斜長石ガラスを形成した衝撃イベント終了後は、強い熱変成は起こっていないと考えられる。ラマンスペクトルの特徴から、EET83311の方がより高圧力でガラス化したと思われる。

(2) 炭素質コンドライト・マトリックスの微細な衝撃溶融脈

炭素質コンドライトは一般的に強い衝撃の影響を受けておらず、衝撃溶融脈についてはこれまで詳しい報告がない。エフレモフカCV隕石のマトリックス全体に、微細な(幅50 μm以下の)溶融脈が存在することを見出した。溶融脈は微小なカンラン石、Siに富む非晶質物質、球状の不透明鉱物(金属鉄、鉄

硫化物；径<3 μm）からなる。それら溶融脈を、TEM および放射光 X 線回折を用いて調べた。溶融脈中のカンラン石粒子は、マトリックス中のカンラン石粒子に比べると大きく、自形の形状を持つものが多く、Mg に富んでおり、転位密度は低い。これらの物質は、完全に溶けたマトリックス物質が急冷される過程で形成されたことは明らかである。今回の結果は、炭素質コンドライトのマトリックスにおいて、比較的弱い衝撃によって加熱溶融が起こり、Mg に富むカンラン石微粒子が形成されることを示している。さらに、隕石のマトリックスには、このような衝撃溶融起源のカンラン石粒子が一般的に存在し得ることを示している。

(3) 炭素質コンドライトの高温下における衝撃実験

アエンデ CV 炭素質コンドライトの、常温（20°C）および高温（650°C，800°C）における 10–30 GPa の圧力による衝撃実験を行い、回収試料の電子顕微鏡による観察・分析を行った。計画した全ての実験、回収試料の解析はまだ終わっていないが、以下の結果が得られつつある。常温では、37 GPa でマトリックスのごく一部に細い溶融脈が確認された。一方、650°C に加熱した試料の実験では、24 GPa でマトリックス中に溶融脈が生成し、30 GPa でマトリックスの大部分が溶融した。これらの結果は、650°C 以上での衝撃加熱効果は、常温におけるものとは大きく異なること、そして、Stöffler et al. (1991) の常温における衝撃見積もりとは大きく異なることを示している。

以上のように本研究で当初計画した課題について興味ある成果が得られており、今後ともその研究を継続し推進して行く。

一方、当該研究遂行の過程で、以下の (4)、(5) で述べるように、コンドリュールのリム形成、そして、角礫岩化によるクラスト形成に関する新たな発見があった。これらの発見はコンドライト形成の根幹に関わる重要な問題だと判断し、本研究期間の後半から急遽これらの研究にも大きな力を注ぐことになった。これまで、リムは原始星雲中で塵がコンドリュール表面に付着して形成されたというのが定説である。しかし我々は、ある隕石から、リムに囲まれたコンドリュールが隕石母天体で衝突による角礫岩化作用によって形成されたことを示す証拠を見だし、リムの母天体形成プロセスに関する新たなモデルを提出した（学術誌 *Geochimica et Cosmochimica Acta* に 2 論文を発表し、さらに新たな論文を投稿中）。この問題は、当該研究が目指した「炭素質コンドライトの衝撃履歴の解明」にも密接に関係しており、本研究

期間内に、当初予想していた以上に多くの重要な研究成果が得られたと考えている。

(4) コンドリュール・リムの隕石母天体プロセスによる成因モデル

コンドライト隕石中のコンドリュールの多くは、微粒子からなるリムに覆われている。リムはコンドリュールが原始星雲を漂っているとき、星雲中の塵をその表面に付着させて形成されたと広く考えられてきた。我々は、モコイア CV3 隕石のコンドリュールとリムを電子顕微鏡を用いて調べた結果、リムは隕石母天体上での衝突による角礫岩化によって形成されたという結論に至った。モコイア隕石中の全てのコンドリュール/リムは様々な程度の水質変成を受けているのに対し、それらの間を埋めるマトリックスは水質変成の痕跡を示さない。このことは、コンドリュール/リムは隕石母天体上のモコイア隕石が存在していた場所とは別の場所で水質変成を受け、その後、衝突による角礫岩化によって形成されたクラスト（岩片）であることを示唆している。すなわち、リムとは以前の場所にあったときには、コンドリュールの周りであったマトリックスだと思われる。

(5) CV 隕石の強い水質変成を受けたクラスト

C 隕石の主要なグループである CV の隕石は、大部分が無水鉱物からなることから、その母天体には水はほとんど存在しないと考えられていた。我々は、CV に属するモコイア隕石から 8 つのコンドリュール、1 つのアミーボイド・オリビン包有物、そして含水層状ケイ酸塩を主とするマトリックスからなるクラスト（岩片）を発見した。このクラスト内では、コンドリュールが強い水質変成を受け、含水鉱物に変成しマトリックス化している。このクラストの発見は、CV 母天体には多量の水が存在する領域があったこと、そしてそこでは大規模な水質変成と衝突による角礫岩化が起こっていたことを示している。そして、このクラストの存在は、モコイア隕石の含水化したコンドリュール/リム形成に関して、我々が最近提出した次のモデル（上記 (4)）を支持する証拠となる。すなわち、含水化したコンドリュール/リムは、実はホスト隕石が固化する以前に、母天体のホスト隕石があった領域とは別の水の多い領域で形成されたクラストである。

(6) CM 隕石のコンドリュール・リムの組織解析：隕石母天体における水質変成の証拠

CM 隕石は、母天体上で様々な程度の水質変成を受けている。しかし、CM 隕石のコンドリュールを覆うリムは、天体集積以前に原始星雲で水質変成を受けた可能性があることが近年議論されている（e.g., Ciesla et al.

2003; Science 299, 549)。我々は電子顕微鏡を用いて、CM 隕石の中で最も母天体中での水質変成の影響が少ないと考えられる QUE97990 隕石のコンドリュール・リムの観察・分析を行った。その結果、コンドリュールの周縁部に、鉄金属・鉄硫化物を含む湾状の窪みが多数存在することを見出した。それらの窪みは、コンドリュール中の金属・鉄硫化物からなるノジュールが水質変成を受けて形成されたと考えられる。組織解析から、窪みは金属・硫化物の溶解、元素の移動、再析出という一連の過程を経て形成されたと考えられ、それらの過程は水の存在下で起こったとするのが妥当であるという結論を得た。これらの結果から、QUE97990 隕石のコンドリュール・リムの水質変成は、隕石母天体集積後に起こったという解釈を提出した。

(7) 実験的に衝撃を与えた含水隕石と原始星雲円盤の赤外スペクトルの比較

様々な圧力 (10–49 GPa の範囲) で実験的に衝撃を与えた含水隕石試料の赤外スペクトルと、原始星雲円盤を持つ様々な若い星の天文学的に観測された赤外スペクトルとの詳細な比較を行った。衝撃を与えた含水隕石のスペクトルは、より進化したデブリ円盤のスペクトルと良い一致を示すことがわかった。調べた原始星は、高い圧力と低い圧力を受けた隕石のスペクトルに類似する2つのグループに分けられる。これらのグループの違いは、含水の層状ケイ酸塩の脱水およびケイ酸塩の非晶質化の程度の違いによって説明できる。原始星雲の非晶質物質およびガスは、星間物質由来と一般に考えられているが、我々の結果は、それらの主要な割合は微惑星衝突によって形成された可能性を示している。これらの結果にもとづいて、様々な成長段階にある原始星雲内における塵の物性および微小天体同士の衝突による塵形成プロセスの推定、そしてモデル化を行った。

(8) 熔融分化隕石であるエコンドライトと原始星雲円盤の赤外スペクトルの比較

大規模に熔融分化した石質隕石であるエコンドライトの赤外線スペクトルを測定し、天文学的に観測された様々な進化段階にある原始星雲円盤のダストの赤外スペクトルとの比較を行った。エコンドライトは始原性を残した始原的タイプと、大きく成長した天体を形成していたと思われる分化的タイプの2つに分けられる。始原的タイプと分化的タイプのエコンドライトのスペクトルを様々な割合で混合したものが、進化の初期段階にある原始惑星系円盤のスペクトルと良い一致を示すことがわかった。このことは、微惑星の熔融分化が星雲進化の初期段階で既に起こっていたことを示唆している。また、

最も分化程度の強い隕石のスペクトルと、より進化の進んだデブリ円盤のスペクトルが良い一致を示すことがわかった。このことは、デブリ円盤では大きく成長した微惑星の衝突によるダスト形成が盛んに起こっていたことを示唆している。

(9) 角礫岩化の痕跡を持つ CO 隕石

2つの異なる岩相が接合した極めて珍しい炭素質コンドライトである Northwest Africa (NWA) 1232 の研究を行った。両岩相の岩石鉱物学的特徴を調べた結果、両者ともに CO 隕石であること、そして、互いに熱変成度が異なるために異なる岩相を示すことがわかった。これまで、CO 隕石は角礫岩化をほとんど受けていないと考えられており、このような組織的特徴を持つ CO 隕石は知られていない。NWA1232 は、その母天体上での角礫岩化の際に、熱変成程度の異なる領域にあった岩片が接合し形成されたとされる。両岩相が同一母天体を形成していたとすると、今回の結果は、CO 隕石母天体が場所によって変成の程度が異なっていたこと、熱変成作用の後に角礫岩化作用が起こったことを示唆している。さらにこのことは、既に報告されている多くの変成程度の異なる CO3 隕石が、同一母天体を形成していた可能性が高いことを示唆している。

(10) Ningqiang 隕石の CAI の Na 交代変成作用：この隕石の特異な化学的特徴を生み出す要因

Ningqiang 隕石は難揮発性包有物 (CAI) に乏しく、既存のどのグループにも属さない特異な炭素質コンドライトとして知られている。これまで、Ningqiang 隕石の CAI に乏しい特徴は、この隕石が原始星雲から形成されたとき、何らかの要因によって難揮発性成分が取り去られたためだと考えられてきた。しかし、我々は、EPMA および電子顕微鏡による観察・分析によって、Ningqiang 隕石の CAI の多くは Na に富むネフェリンに交代され、細粒化し、マトリックスに分散していることを明らかにした。このことは、Ningqiang 母天体において水・熱の作用による大規模な Na 交代変成が起こったことを意味している。これらの結果から、Ningqiang 隕石の化学的・鉱物学的に異常な特徴は、隕石母天体における Na 交代変成が要因であるという新たなモデルを提出した。

(11) ヴィルト 2 彗星塵 (スターダスト探査機の回収試料) の主要構成物の化学的特徴：惑星間塵、隕石との関係

探査機スターダストが持ち帰ったヴィルト 2 彗星塵試料と惑星間塵およびコンドライト隕石の成因的関係を探る目的で、これらの

主要構成物であるカンラン石、輝石、Fe-Ni 硫化物の化学組成の特徴を比較した。彗星塵中のカンラン石、輝石の組成は、惑星間塵、隕石中のものに近いが、Fe/Mg 比がより広い範囲で変動している。このことは彗星における加熱の影響が、非常に少ないことを意味している。FeS と (FeNi)₉S₈ の間の中間的組成が存在しないことは、これらの硫化物が非晶質状態から焼きなまされて (anneal されて) できたのではないこと、すなわち加熱を受けていないことを示唆している。ヴィルト 2 彗星塵からは、まだ含水層状ケイ酸塩は見つかっていないが、カンラン石、輝石、Fe-Ni 硫化物の化学組成上の特徴からは、水質変成が起こった可能性は否定できない。

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 13 件)

- ① A. Morlok, C. Koike, K. Tomeoka, A. Mason, C. Lisse, M. Anand and M. Grady, Mid-infrared spectra of differentiated meteorites (achondrites): Comparison with astronomical observations of dust in protoplanetary and debris disks, *Icarus*, 207, 48–56 (2012). 査読有
- ② T. Sekine, C.M. Meng, W.J. Zhu and H.L. He, Direct evidence for decomposition of antigorite under shock loading, *Journal of Geophysical Research*, 117, B03212 (2012) doi:10.1029/2011JB008439. 査読有
- ③ K. Tomeoka and I. Ohnishi, A hydrated clast in the Mokoia CV3 carbonaceous chondrite: Evidence for intensive aqueous alteration in the CV parent body, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 6064–6079 (2011). 査読有
- ④ Y. Furukawa, T. Sekine, T. Kakegawa, and H. Nakazawa, Impact-induced phyllosilicate formation from olivine and water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 6461–6472 (2011). 査読有
- ⑤ K. Tomeoka and I. Ohnishi, Indicators of parent-body processes: Hydrated chondrules and fine-grained rims in the Mokoia CV3 carbonaceous chondrite, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 4438–4453 (2010). 査読有
- ⑥ A. Morlok, C. Koike, N. Tomioka, I. Mann and K. Tomeoka, Mid-infrared spectra of the shocked Murchison CM chondrite: Comparison with astronomical observations of dust in debris disks, *Icarus*, 207, 45–53 (2010). 査読有
- ⑦ M. Sugita, K. Tomeoka and Y. Seto, Sodium-metasomatism of Ca-Al-rich inclusions in the anomalous carbonaceous chondrite Ningqiang, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 107, 296–300 (2009). 査読有
- ⑧ M. Maeda, K. Tomeoka and Y. Seto, Early aqueous alteration process in the QUE97990 and Y791198 CM carbonaceous chondrites, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 106, 92–96 (2009). 査読有
- ⑨ Y. Furukawa, T. Sekine, M. Oba, T. Kakegawa, and H. Nakazawa, Abiotic syntheses of amino acids, fatty acids and amines under oceanic impact conditions of the early Earth. *Nature Geoscience*, 2, 62–66 (2009). 査読有
- ⑩ N. Hirata, K. Kurita, and T. Sekine, Simulation experiments for shocked primitive materials in the solar system. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 174, 227–241 (2009). 査読有
- ⑪ K. Tomeoka, N. Tomioka and I. Ohnishi, Silicate minerals and Si-O glass in Comet Wild 2 samples: Transmission electron microscopy, *Meteoritics & Planetary Science*, 43, 273–284 (2008). 査読有
- ⑫ M. E. Zolensky et al. (K. Tomeoka: 14th of 32 authors) Comparing Wild 2 particles to chondrites and IDPs. *Meteoritics & Planetary Science*, 43, 261–272 (2008). 査読有
- ⑬ M. Kiriishi and K. Tomeoka, Northwest Africa 1232—a CO3 carbonaceous chondrite with two lithologies, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 103, 161–165 (2008). 査読有

[学会発表] (計 6 件) (総計 28 件)

- ① 瀬戸雄介, 関川知里, 三宅亮, 留岡和重, エフレモフカ隕石中衝撃溶融脈の微細組織観察: 衝撃溶融による物質進化過程, 日本鉱物科学会, 茨城大学 (水戸), 2011 年 9 月 10 日.

② K. Tomeoka and I. Ohnishi, A hydrated clast in the Mokoia CV3 carbonaceous chondrite: Evidence for intensive aqueous alteration in the CV parent body, Meteoritical Society Meeting, London, UK, August 8, 2011.

③ 留岡和重, 大西市朗 CV3 隕石から見つかった強い水質変成を受けたクラスト: コンドライト形成を読み解く新たな鍵, 日本鉱物科学会, 島根大学 (松江), 2010 年 9 月 24 日.

④ 井上美幸, 瀬戸雄介, 留岡和重, 平島崇男, 下林典正, 野口直樹, 大井修吾, 小林記之, CK コンドライトの斜長石の鉱物学的特徴と熱・衝撃履歴との関連, 日本鉱物科学会, 島根大学 (松江), 2010 年 9 月 24 日.

⑤ 留岡和重, 大西市朗, モコイア CV3 隕石のコンドリュール・リム: 隕石母天体における形成モデル, 日本鉱物科学会, 北海道大学 (札幌), 2009 年 9 月 10 日.

⑥ K. Tomeoka and I. Ohnishi, Indicators of multiple parent-body processes: chondrules and fine-grained rims in the Mokoia CV3 chondrite, Meteoritical Society Meeting, Matsue, Japan, July 28, 2008.

[その他]

報道関連情報:

産経新聞 2009 年 4 月 14 日朝刊「大学発フロントランナー」で, 代表者のことが取り上げられた。記事のタイトル: 「電子顕微鏡で原始宇宙の姿を見る」。

ホームページ:

http://www.planet.sci.kobe-u.ac.jp/study/list/planet_m/tomeoka.html

[図書] (計 1 件)

① 留岡和重 (共同執筆), 項目: 「コンドライト」, 地球と宇宙の化学事典, 朝倉出版, 印刷中, 2012.

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・教授
研究者番号: 00201658

(2) 研究分担者

関根利守 (SEKINE TOSHIMORI)
広島大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 70343829
(H21→H23: 連携研究者)