



Aqueous alteration in CM chondrites: Implications for early processes and environments of the CM parent bodies

Maeda, Makoto

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2010-03-25

(Date of Publication)

2016-01-14

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4915

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004915>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏 名	前田 誠
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学 位 記 番 号	博い第 4915 号
学位授与の 要 件	学位規則第 5 条第 1 項該当
学位授与の 日 付	平成 22 年 3 月 25 日

【 学位論文題目 】

Aqueous alteration in CM chondrites: Implications for early processes and environments of the CM parent bodies (CM コンドライトの水質変成に関する研究：CM 母天体における水質変成の環境と初期過程の考察)

審 査 委 員

主 査	教 授	留岡	和重
	教 授	兵頭	政幸
	助 教	瀬戸	雄介

炭素質コンドライトは、我々が手にすることができる最も始原的な物質だと考えられており、初期太陽系進化過程を知る上で最も重要な試料である。太陽系形成初期には水と固体との相互作用(水質変成)が頻繁に起こっていたと考えられ、実際に多くの炭素質コンドライトにおいて水質変成の痕跡が確認されている。本研究は、炭素質コンドライトの中でも水質変成の痕跡を強く示すCMコンドライトを詳細に観察・分析することで、CMコンドライト(以下CM隕石)の経験した水質変成過程を明らかにしようとするものである。本論文は二部構成であり、一部(第一章～第四章)では水質変成の起こった場所について、二部(第五章～第七章)では水質変成の起こった環境に関して記している。

第一章では、序論として、CM隕石の水質変成に関する研究の背景と問題点について述べ、その上で本研究の目的を説明している。CM隕石は様々な程度の水質変成を経験すると同時に、様々な程度の角礫岩化(衝突による破碎・攪乱作用)を母天体上で経験している。このような過程を経た結果、CM隕石は異なる程度の水質変成を受けた物質が混在する複雑な組織を形成する。さらに、激しい水質変成を経験すると、初期に受けた水質変成の痕跡は上書きされてしまう。これらの要因のために、水質変成に関する研究が数多く行われているにも関わらず、水質変成がどこで、どのように進んだのかは未だ議論中である。そこで、本研究では、角礫岩化の影響が小さい複数のCM隕石を観察対象とした。Yamato791198隕石(以下Y791198)、QUE97990隕石はCMコンドライトの中で特に水質変成程度の低い隕石だと報告されている(Metzler et al., 1992, Rubin et al., 2007 ほか)。Rubin et al., (2007) は、隕石中の Fe-Ni metal(隕石中で特に変成されやすい鉱物)の含有量がより豊富であることからQUE97990隕石はY791198隕石よりもさらに変成程度が低いと報告した。しかし、彼らはQUE97990隕石がどこで水質変成を経験したのかについては考察しておらず、また両隕石の間にはFe-Ni metalの含有量以外にどのような違いが存在するのかも記載されていない。従って両隕石を比較しながら詳細に観察・分析することによって、水質変成の初期過程に関する新たな情報が得られる可能性が高い。このような背景から、角礫岩化の影響が小さいCM隕石、水質変成程度の低いCM隕石に着目しつつ、複数のCM隕石を詳細に観察・分析することで水質変成過程を明らかにすることを目的として本研究を行った。

第二章は、観察した隕石試料、観察方法および分析方法について述べている。

第三章は、7つのCM隕石(Murchison, Murray, Mighei, QUE97990, Y791198, Cold Bokkeveld, Nogoya)の詳細な記載結果について述べている。CM隕石はコンドリュール、コンドリュール・リム(以下リム)、マトリックスから構成されている。コンドリュールの斑晶に着目すると、Cold Bokkeveld, Nogoyaでは一部の斑晶が層状ケイ酸塩により交代されていることが明らかになった。さらに、両隕石のコンドリュール内には複数の仮像(元の結晶の形を維持したまま、別の鉱物ができたもの)が見つかった。このような変成の痕跡は他の隕石では見られなかった。コンドリュール・メソスタシスに着目すると、QUE97990にだけコンドリュールが液滴から直接凝縮した際の急冷組織(細粒なディオプサイドからなる)が見られた。コンドリュールの外形に着目すると、その表面に湾状の窪みが確認された。湾の外形や大きさはコンドリュールに含まれる不透明鉱物粒子と類似している。QUE97990で見られた湾状の窪みの中は内側より鉄に富む鉱物から形成されており、そのような鉄に富む鉱物は湾内部だけでなく湾周辺(リム)でも見られた。他の隕石では湾内にこのような構造は見られず、湾内とそれを取り囲むリムは同じ構成

物から形成されており、区別することができない。リム、マトリックスに着目すると、Cold Bokkeveld, Nogoya以外では、層状ケイ酸塩、無水ケイ酸塩、Fe硫化物、Fe-Ni金属粒子、など様々な鉱物が見られるが、Cold Bokkeveld, Nogoyaでは無水ケイ酸塩やFe-Ni金属粒子は見られず、またFe硫化物の含有量が他の隕石と比べて少ない。化学組成に着目すると、FeOの含有量がCold Bokkeveld, Nogoya隕石で特に低いことが明らかになった。

第四章では、三章の観察・分析結果をもとに、各隕石の水質変成程度の決定と水質変成の起こった場所について議論している。コンドリュールの斑晶の変成程度、リム、マトリックス内の金属粒子の含有量から、QUE97990 < Y791198 < Bokkeveld < Nogoyaの順で水質変成程度が高くなると判断した。QUE97990隕石のメソスタシスに見られた急冷組織は、熱・水による変成の影響の少ないType3に属する隕石からは報告例があるが、他のCM隕石から報告された例はない。CM隕石のコンドリュールにも急冷組織は元々存在したと考えられるが、水質変成により消失してしまったと考えられる。従って、QUE97990は、現在報告されているCM隕石の中で最も変成程度が低いと考えられる。コンドリュール表面の湾状構造は、その組織や形状から、コンドリュール表面に存在した不透明鉱物が水質変成によって層状ケイ酸塩に交代されることで形成された可能性が高い。湾内だけでなく、その周辺(リム)でも鉄に富む鉱物が存在したことから、コンドリュールがリムを獲得してから水質変成は起こったと考えられる。さらに、湾を形成するには、不透明鉱物を構成していた元素が溶解、移動、再沈殿という過程を経る必要があり、このような過程はコンドリュールとリムが流体に満たされている環境で起こりやすい。一方、各構成物から各隕石の水質変成程度を見積ると、その順序は完全に一致する。これは、コンドリュール、リム、マトリックスが集積後に同程度の水質変成を同時に経験したことを示唆する。このような結論は、湾状構造の観察結果と整合的である。これらの観察結果から、CM隕石は、比較的水質変成程度が低いと見なされている隕石であっても、各構成物が母天体に集積した後で水質変成を経験した可能性が高い。

第五章は水質変成の起こった環境についてのこれまでの研究の概要と、本研究の目的について述べている。これまでの研究では、水質変成時の環境は変成による二次鉱物の組み合わせを用いて推測されており、CM隕石は還元的な環境下で、CI隕石(代表的な含水炭素質コンドライトの一つ)は酸化的な環境下で、それぞれ水質変成を経験したと考えられている。ところが、学位申請者は3つのCM隕石中にこれまで報告されたことのない、CI隕石に類似した特徴を持つ岩片を複数見つけた。これらの岩片はCM隕石の水質変成時の環境を読み解く鍵となる可能性が高い。そこで、CM隕石がどのような環境で水質変成を経験したのかを明らかにするために、これらのクラストの詳細な観察・分析を行った。

第六章は、QUE97990, Murchison, Cold Bokkeveldで見つかった、CI隕石に似た特徴を持つ岩片の観察・分析結果を詳しく述べている。岩片は、Cold Bokkeveldで見つかったものを除くと、その多くがコンドリュール(クラストコンドリュール)とマトリックス(クラストマトリックス)から形成されている。母岩と違い、リムに囲まれているコンドリュールは存在しない。一部のクラストコンドリュールの斑晶は層状ケイ酸塩により交代されていたが、母岩のコンドリュールの斑晶は全く変成されていない。これらの観察結果は母岩と岩片で水質変成の程度が異なることを示している。クラストマトリックスは主に層状ケイ酸

氏名:前田 誠 NO. 3

塩とマグネタイトから構成されている。マグネタイトの多くはフンボイダル(木イチゴ状)組織を示す。クラストマトリックスの層状ケイ酸塩はサーペンティンとサポナイトの混合物のような化学組成を示す。TEM による観察を行うと少量ではあるがサポナイトの存在が確認された。さらに、母岩では豊富に見られたトチリナイトや鉄硫化物はほとんど見られなかった。これらのクラストマトリックスの特徴は 3 つの隕石のクラストで共通しており、クラストは同一の起源を持つと考えられる。一方、母岩では、マグネタイトは僅かにしか見られず、フンボイダル組織を示すものは全く見られない。さらに、TEM による観察を行ってもサポナイトは見られなかった。

第七章は第六章の記載を元に、CM 母天体がどのような環境下で水質変成を経験したのかを考察している。3 つの隕石から見つかったクラストは、どれもマグネタイトに富み(その多くはフンボイダル組織を示す)、サーペンティンとサポナイトから構成されている。これらの特徴は CM 隕石よりも、むしろ CI 隕石と類似している。従って、クラストは CI 隕石同様還元的な環境下で水質変成を受けたと考えられる。このようなクラストが 3 つの CM 隕石から 15 個見つかったことは、CM 母天体には部分的に酸化的な環境が存在したことを示している。これらの結果から、CM 母天体は場所によって水質変成程度が異なるだけでなく、酸化還元状態も異なるという非常に不均質なものであった可能性が高い。

氏名	前田 誠		
論文題目	Aqueous alteration in CM chondrites: Implications for early processes and environments of the CM parent bodies (CMコンドライトの水質変成に関する研究: CM母天体における水質変成の環境の初期過程の考察)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	留岡 和重
	副査	教授	兵頭 政幸
	副査	助教	瀬戸 雄介

要 旨

太陽系で最も原始的とされる炭素質コンドライト隕石は、さまざまな程度の水質変成を受けている。この水質変成は原始太陽系星雲から集積した天体が受ける最初の物質変化であり、その過程・条件を知ることが初期太陽系の物質進化を知るうえで非常に重要である。炭素質コンドライトの中でも CM タイプのものは強い水質変成を受けており、多量の含水鉱物を含む。本研究は CM 炭素質コンドライト (以下 CM 隕石) の詳細な岩石鉱物学的分析を行うことによって、それが受けた水質変成の場所・条件を明らかにすることを目的としている。本論文は 2 部によって構成されている。

第 1 部は 4 章 (1~4 章) からなる。

第 1 章は序論であり、CM 隕石の水質変成に関する過去の研究の概要と本研究の目的が述べられている。CM 隕石の水質変成は母天体上で起こったと広く考えられているが、天体集積以前に原始星雲で起こったという説もあり、未だにその議論は続いている (e.g., Metzler et al., 1992; Chizmadia and Brearley, 2008)。隕石の水質変成が起こった場所を明らかにすることは、原始星雲および隕石母天体の形成モデルに大きな制約を与えることになる。

水質変成程度が強いと、変成によって以前の情報は上書きされてしまう。それゆえ、水質変成が起こり始めたころの情報を得るためには、変成程度のできる限り低い隕石を調べるのが重要である。これまでの研究では、QUE97990, Y791198 の 2 つの隕石が CM タイプでは最も水質変成程度が低いとされている。本研究では、走査電子顕微鏡 (SEM-EDS) および電子線マイクロプローブアナライザー (EPMA) を用いて、これら 2 つを含む合計 7 つの CM 隕石 (QUE97990, Y791198, Murchison, Murray, Mighei, Cold Bokkeveld, Nogoya) の詳細な観察分析を行った。目的は、(1) これらの隕石の水質変成程度の違いを明らかにする、(2) 特に QUE97990, Y791198 両隕石に着目し、水質変成が起こり始めるころの情報を探る、そして (3) 初期の水質変成が起こった場所 (可能であればそれが星雲か、母天体か) を明らかにすることである。

第 2 章は、隕石試料、観察・分析方法について述べている。

第 3 章は 7 つの CM 隕石の観察・分析結果について述べている。角れき岩化の程度の高い Murchison, Murray, Mighei 隕石を除く 4 つの隕石について、コンドリュールの変成程度、リム、マトリックス内の金属粒子の含有量から、水質変成程度は QUE97990 < Y791198 < Bokkeveld < Nogoya の順で高くなると見積もられた。コンドリュール、リム、マトリックス各々の水質変成程度は全てこの順番で高くなることがわかった。

QUE97990 隕石のコンドリュール・メソスタシスから、微細な high-Ca 輝石からなる急冷組織が見つかった。これは、コンドリュールが高温から急冷されるときにできる組織であり、これまで CM 隕石から報告例はない。一方、他の 6 つの CM 隕石のコンドリュール・メソスタシスは大部分、均質なサーペンティンで交代されている。

各隕石のコンドリュールの表面には、特徴的な湾状の窪みが存在することがわかった。湾の外形や大きさはコンドリュールに含まれる鉄金属・鉄硫化物からなる不透明鉱物ノジュールと似ている。QUE97990 隕石のコンドリュールの湾状の窪みには、クロンステタイト (鉄に富むサーペンティン類似の鉱物) 、

氏名 前田 誠

トチリナイト（鉄・イオウを含む水酸化物）、Fe-Ni 金属が含まれており、クロンステッタイト、トチリナイトは湾内部だけでなく湾周辺のリムにも見られた。

第4章は議論である。4つのCM隕石で、コンドリユール、リム、マトリックス各構成物の変成程度の順序が一致しているということは、コンドリユール、リム、マトリックスが母天体に集積して現在ある組織を形成した後、同時に水質変成を受けたことを示唆している。

QUE97990 隕石のコンドリユール・メソスタシスのみに high-Ca 輝石からなる急冷組織が見られたことは、この隕石の水質変成程度が最も低いということと調和的である。このような組織は、もとは他のCM隕石にも存在したと思われるが、水質変成により消失してしまったのであろう。

CM隕石のコンドリユール表面の湾状構造は、不透明鉱物ノジュールが水質変成によって層状ケイ酸塩に交代されて形成されたと考えられる。QUE97990 隕石では、ノジュールを交代してできたと思われる鉄に富む物質が、湾内だけでなくその周辺のリムにも存在することは、水質変成が、コンドリユールがリムを獲得した後に起こったことを示唆している。このような組織は不透明鉱物の溶解、元素の移動、析出という一連の過程を経て形成されたと考えられ、その過程は隕石母天体上で流体（おそらく水）の存在下で起こったと考えるのが妥当であろう。

以上の結果から、CM隕石の大部分の含水鉱物を形成した水質変成は、隕石母天体集積後に起こった可能性が高いと結論される。

第2部は3章（5～7章）からなる。

第5章は序論であり、CM隕石の水質変成時の酸化還元条件に関するこれまでの研究の概要と本研究の目的が述べられている。過去の研究では、水質変成時の酸化還元度は生成鉱物の組み合わせによって推測されており、CM隕石は還元的な条件で、CI隕石は酸化的な条件で水質変成を受けたと考えられている。本研究では、3つのCM隕石（QUE97990, Murchison, Cold Bokkeveld）中にこれまで報告されたことのないCI隕石に似た岩片（クラスト）を合計16個発見した。これらのクラストとホストCM隕石との成因的関係を明らかにする目的で、クラストの詳細な岩石鉱物学的分析を行った。

第6章はクラストの観察・分析結果を述べている。3つのホスト隕石のクラストは、いずれもホスト隕石とは多くの点で異なる共通の鉱物学的特徴を持つことがわかった。クラストの多くはコンドリユールとマトリックスから形成されているが、ホスト隕石と違い、コンドリユールを囲むリムは存在しない。クラストのコンドリユールの斑晶は層状ケイ酸塩により交代されているが、ホスト隕石のコンドリユールの斑晶は変成されていない。クラストはフランボイダル状のマグネタイトを多く含んでいる。SEM-EDS分析およびTEM観察により、クラスト・マトリックスは主にサーペンティンと少量のサポナイトからなることがわかった。ホスト隕石に多量に含まれているトチリナイトや鉄硫化物はクラストにはほとんど見られなかった。

第7章は議論である。3つの隕石から見つかったクラストは、鉱物学的特徴がいずれもCI隕石のものと類似しており、酸化的条件下で水質変成を受けたことを意味している。このようなクラストが3つのCM隕石から多数見つかったことは、CM母天体には、部分的に酸化的な条件を持つ場所が存在したことを示唆している。これらの結果から、CM母天体は場所によって水質変成程度が異なるだけでなく、酸化還元程度も異なる不均質な天体であったと考えられる。

以上のように、論文提出者は7つのCM隕石を詳細に調べることによって、CM隕石の水質変成が隕石母天体で起こった可能性が高いことを示した。また、CM隕石とは異なる特異なクラストを多数発見し、それらがCI隕石類似の成因を持つことを明らかにした。これらの結果にもとづいて、CM母天体が、場所によって水質変成が異なるとともに酸化還元条件も異なる不均質な天体であったというモデルを提出した。

これらの成果は、コンドライト隕石の起源・進化に関して新しい重要な知見を含んでおり、価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の前田誠氏は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。