

平成 22 年 4 月 26 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19340169

研究課題名 (和文) 太陽系初期に起こった大規模衝突による物質進化

研究課題名 (英文) Material evolution caused by catastrophic celestial impacts at the early solar system

研究代表者

海老原 充 (EBIHAEA MITSURU)

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：10152000

研究成果の概要 (和文)：太陽系初期には微惑星どうしが衝突し、物質の組成を変化させながら成長し、やがて現在の惑星が誕生したと考えられている。本研究では小惑星 4Vesta 起源と考えられている HED 隕石を研究対象とし、その元素組成と鉱物組成をもとに、小惑星規模での衝突の実態を明らかにした。その結果、HED 隕石のうち、ユークライト隕石には鉄隕石や関徹隕石の衝突の履歴が明らかに認められ、また、ホワルダイト隕石ではコンドライト質隕石の寄与が少なくないことがわかった。

研究成果の概要 (英文)：At the early solar system, it is well acknowledged that many celestial bodies collided with each other, changing their material compositions and combining together. Present planets must have been formed through such processes. In this study, based on elemental and mineralogical compositions of HED meteorites which originated in an asteroid 4Vesta were targeted, the impact processes were investigated. As a result, it was found that eucrite meteorites (a group of HED meteorites) hold impact records caused by iron meteorites and/or stony iron meteorites and that howardite meteorites (another group of HED meteorites) contain chondritic materials.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	9,700,000	2,910,000	12,610,000
2008 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地球宇宙化学

キーワード：初期太陽系、大規模衝突、HED 隕石、ユークライト隕石、ホワルダイト隕石、白金族元素

1. 研究開始当初の背景

本研究は、太陽系初期に起こった大規模な衝突過程の実態を主として宇宙化学的立場か

ら明らかにしようとするものである。内惑星に位置する天体で、これまで大規模衝突に関して宇宙化学的な研究が体系的に行われてき

た天体は地球、月、火星に限られる。下の表は、これらの天体について、衝突現象を研究するための対象物質、大規模衝突を引き起こした衝突物についてまとめたものである。

表1 宇宙化学的大規模衝突現象が体系的に研究されてきた天体（小惑星は予察的）

天体	確かめる対象	推定衝突物	備考
地球	マントル捕獲岩	コンドライト(?)	late veneer
月(地球)	角礫岩	“古代隕石”, 分化隕石(?)	
火星	マントル(SNC隕石)	コンドライト(?)	late veneer(?)
小惑星	地殻, マントル(HED隕石)	(分化隕石?)	

地球、火星、月における衝突現象の宇宙化学的研究はほとんどすべてが白金族元素に代表される親鉄性元素の含有量、及び元素間の相対存在度を調べることにより行われている。地球や火星はその中心に金属核を持ち、その周りをケイ酸塩相（マントル）が取り囲んでいる。そのマントル物質中に存在する微量白金族元素はそれらの惑星の形成初期（恐らく核形成末期）に衝突した物質によってもたらされたものであり、そのような物質は後で加わった薄皮上のものということである。この late veneer と呼ばれる。この late veneer の実態についてはかつて漠然と CI コンドライト様物質であると考えられたこともあったが、その後の研究によってその存在も含めて明確な結論が得られておらず、地球形成・進化と関連して惑星科学上での大きな研究課題として残されている。地球に近い月については火成活動がかなり早い時期に終息したことから、月表面上にある角礫岩中に衝突物質の痕跡が残されていると期待されてきた。1970年代の E. Anders らの一連の研究では月の大規模衝突を起こした物質は現在のコンドライト隕石とは化学組成上異なるものと主張されたが、最近ではむしろ分化した隕石であるとする主張もある (Norman et al., 2002)。地球と月の成因関係、及び位置関係から考えて、衝突物質に大きな違いがあるとは考えられず、衝突物質の関連性という点においても今後の展開が待たれる。

本研究では上の表中斜体文字で示した小惑星を主な対象とし、そこでの大規模衝突過程を物質科学的立場から明らかにすることを目的とした。小惑星は内惑星外縁部に散らばる

小天体である。代表的な小惑星である 4Vesta は地球で回収される分化した隕石の代表である HED グループ隕石の母天体と考えられているが、ほとんどが衝突角礫岩である。我々のグループは最近、予察的な研究ではあるが、HED 隕石の代表ともいえるユークライト隕石に衝突した物質が分化した隕石であるとの結果を発表し (Okamoto et al., 2005), 非常に注目された。これは、これまで HED 隕石に対する衝突物質の情報がほとんどないことを反映するもので、本研究が国内外ともにこれまで誰も試みていない、極めて独創的な研究課題であることが示すものでもある。本研究で得られる成果は、内惑星における物質進化を議論する上で非常に重要な情報となることは間違いなく、早晩国外の研究者による研究も行われると予想されることから、早急に取りかかる必要があると考えられた。

2. 研究の目的

HED 隕石は現在 300 個以上存在し、分化した隕石の中ではもっとも個数の多い隕石グループである。最近の分光観測によると小惑星帯にはこのような分化した隕石物質が数多く存在することが確認されている。HED 隕石は分化した惑星のケイ酸塩を主体とする隕石で、太陽系形成初期に核-マントル-地殻の分離が起こり、その上部マントルから地殻部分に相当する物質と考えられる。従って、HED 隕石がマグマから結晶化したときには核に集まる親鉄性元素は極端に欠乏してははずであり、HED 隕石は母天体における金属核の分化後に起こった衝突現象の実態を親鉄性元素組成を通して読みとるための最適な試料といえる。親鉄性元素の中でも、ケイ酸塩と金属（鉄ニッケル合金）の間での分配係数が非常に小さい白金族元素はもっとも高感度なマーカー元素として機能する。そこで本研究では HED 隕石に含まれる白金族元素を中心とした微量親鉄性元素を精密に分析する。元素組成の測定と併せて、鉱物学的観察から、衝突の履歴を読みとり、元素組成の持つ意味を明確にする。かつて、Zorensky et al. (1996) は角礫岩中の外来起源成分を岩石学的に調べ、未分化な隕石の岩片を見いだした。しかしこの岩片は単に機械的に一緒になったに過ぎず、本研究で議論しようとする太陽系初期の惑星の進化に関連する事象に結び付けられるものではない。このような判断を適宜行いながら、真に太陽系初期における衝突事象について元素組成・鉱物組成からその特徴を明らかにする。対象とする物質としては HED 隕石を主体とするが、月試料、火星隕石についても同様の

観点から適宜研究を行う。

3. 研究の方法

上記、研究の目的に記載したとおり、本研究では太陽系初期における小惑星領域での大規模衝突に焦点をあて、衝突過程によって小惑星物質がどのような変化を受けたかについて、主に宇宙化学的側面から考察を行う。小惑星の代表的な試料として HED 隕石を取り上げ、この隕石グループを主体に具体的に以下のような実験課題を設定する。

(1) ユークライトの各分類に対応する代表的な試料を確保する。この分類として、玄武岩質ユークライト（非集積岩ユークライト）と集積岩ユークライトがあるが、玄武岩質ユークライトを平衡ユークリアと非平衡ユークライトにわけ、この3つのグループごとで、系統的な分析を行う。それ以外にも Yamaguchi et al. (2001) によって提案されているユークライトの分類を考慮した試料を確保し、各グループについての系統的な分析を行う。

(2) ダイオジェナイトに関して、同様の系統的な分析を行う。ダイオジェナイトではモノミクティックとポリミクティックなダイオジェナイトに分けて、系統的な分析を行う。

(3) 従来、ホルダイトはユークライトとダイオジェナイトからなる角礫岩と考えられてきたが、上記の通り、ユークライト、ダイオジェナイトともに細かく分類されている。化学組成の上から両者の組成を特定して、その混合割合を推定しようとする試みは以前から行われているが、データ精度が向上するとともに、分類が整備されてきたので、そうしたホルダイトの成因が非常に精度よく議論できるようになった。本研究では主として微量親鉄元素の元素組成からホルダイトの形成過程を考察するとともに、角礫化が起こったときに親鉄性元素がどのように挙動したかを明らかにする。

(4) HED 隕石に近い組成を持つ隕石としてメソシデライトのケイ酸塩クラストがある。HED 隕石との関連で、このメソシデライトについても系統的に分析する。メソシデライトは石鉄隕石なので、ケイ酸塩と鉄ニッケル合金の各フラクションに分けて分析を行う。

(5) HED 隕石に対する衝突物質を特定する目的で、鉄隕石の元素組成を系統的に調べる。これまで主に UCLA の Wasson を中心としたグループが放射化分析法を用いて鉄隕石の元素組成を系統的に調べてきた。本研究では定量する元素数を拡張して鉄隕石の元素組成上の特徴をより精緻に明らかにするため

の分析を行う。

以上の課題を行うために、具体的な実験手段として以下のような方法を用いた；

(1) 元素組成分析

同一隕石から、元素分析を行う試料と鉱物観察を行う試料を分ける。その際に、出来るだけ隣接するところからそれぞれの試料を採取する。

元素分析には中性子放射化分析 (NAA)、誘導結合プラズマ質量分析 (ICP-MS)、ICP 原子発光分光分析 (ICP-AES) の各手法を用いた。NAA としては即発 γ 線分析、機器中性子放射化分析を行い、主成分元素、副成分元素、微量元素を非破壊的に定量した。研究目的の欄で述べたとおり、本研究で最も注目するのは白金族元素である。ユークライト中の白金族元素含有量は非常に低いことが予想されたが、基本的に ICP-MS により定量した。極微量白金族元素の ICP-MS による分析についてはこれまで研究代表者の研究室で実績を上げている

(Shirai et al., 2003, ほか)。ICP-MS によって白金族元素に加えてランタノイド元素、トリウム、ウランも定量した (Shinotsuka and Ebihara, 1997)。ICP-MS には現有の装置を用いたが、ICP-AES のために ICP 発光分析装置を購入した。この ICP-AES によってリンをはじめとする副構成元素 (質量%で 1% を切る含有量の元素) の定量を行った。

(2) 岩石・鉱物記載

岩石・鉱物学的観察及び記載には、光学顕微鏡、走査電子顕微鏡 (SEM)、電子線走査 X 線分析装置 (EPMA) を用いた。SEM による鉱物相の観察により、溶融岩の存在の有無、その存在量の多寡、衝突の履歴等を読みとった。また、角礫岩の種類から、どのような地質学的なセッティングによって形成されたかを検討した。また、EPMA による鉱物の組成分析により、溶融岩の組成分析を行った。SEM や EPMA を用いると主成分、副成分元素の組成を求めることができ、化学分析データとの比較検討が出来る。また、SEM により得られる後方散乱電子像から、角礫岩の破碎マトリックス中に微量に存在する金属や硫化物の産状や共生関係を調べた。特にそうした不透明鉱物中のニッケルやコバルトの組成に注目した。こうした鉱物学的記載を十分行うことが、化学的データを正しく解釈する上で重要である。

4. 研究成果

本研究で得られた成果について、2つの具体例を述べる。

(1) ホワルダイト隕石にみられる衝突履歴

ホワルダイト隕石 13 試料とポリミクト隕石 4 試料を研究対象とした。これらのうち 1 試料を除いていずれも南極大陸から回収された試料で、国立極地研究所と米国 NASA に試料請求して、供与されたものである。分析値に偏りが生じないようにするために、1 グラム以上の試料をメノウ乳鉢で均一に粉碎した。まず、200mg 程度を用いて、即発γ線分析 (PGA) を行った。次いで、その一部を用いて、照射時間を違えて、機器中性子放射化分析 (INAA) を行った。これらの実験は日本原子力研究開発機構原子科学研究所 (東海村) の研究用原子炉を用いて行った。PGA と INAA によって、主要元素、微量元素併せて 30 を越える元素について定量値を求めることができた。本研究では親鉄元素存在度が重要な意味をもつが、上記の方法では限られた親鉄元素の分析値しか得られないので、誘導結合プラズマ質量分析 (ICP-MS) 法を用いて白金族元素 (Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) の定量をおこなった。このうち Rh については検量線法で、残りの 5 元素については同位体希釈質量分析法で定量した。ICP-MS 法を用いることにより、コンドライト隕石中の含有量の 1000 分の 1 のレベルの存在量を高い確度で定量することが出来た。

白金族元素を代表とする親鉄性元素は隕石試料中では金属相に濃集している。そこで、元素分析した 17 試料の隕石試料のうち、白金族元素含有量の高い試料について研磨薄片を作成し、金属相を中心に鉱物学的観察をおこなった。利用した機器は走査型電子顕微鏡 (SEM) と電子線走査微小分析装置 (EPMA) で、SEM で岩石学的観察を、EPMA で主に金属相の組成を調べた。

ポリミクトユークライトの白金族元素存在度は隕石によって大きく異なり、コンドライト的な組成を持つものから、揮発性の低い元素から高い元素に並べた、いわゆる白金族パターンにおいて W の時の形に似た組成を持つものまで、多様であった。この W 型のパターンは月のアポロ試料においても確認されており、明らかにコンドライトとは異なる組成を持つ外来物質が HED 母天体に衝突した証拠であると結論された。ホワルダイト隕石の中ではカポエタ隕石が CI コンドライトの 1/10 と異常に高い白金族元素存在度をもつことが明らかとなった。しかもその CI コンドライトで規格化した存在度がコンドライト的であることも明かとなった。これま

でカポエタ隕石には CM コンドライトの岩片が含まれることがよく知られているが、これらの白金族元素をすべて CM コンドライト由来とすることは出来ないことを酸素同位体組成のデータと組み合わせて明確に示した。白金族元素間の元素比をもとに、コンドライト組成の外来物質としてはオーディナリコンドライトが妥当であるとの結論を導いた。

SEM による観察の結果、いくつかの隕石の研磨片から金属相が検出され、EPMA によって元素組成を求めた。その結果、多くの金属相は鉄とニッケルの合金で、その組成はオーディナリコンドライト中のカマサイトと似ていることを明らかにした。更に、コンドライト中の金属とは全く違う組成の金属相も見いだされ、多様な物質の衝突の履歴が明らかとなった。金属相のなかには Ni をほとんど含まないものも見いだされ、珪酸塩中の鉄が衝突の際に還元され、金属鉄になったものと推察された。

最近、HED 隕石の Ar-Ar 年代を求めた論文が公表され、HED 隕石は 4 回の大きな衝突過程を経てきたことが明らかにされた。本研究で用いた隕石の元素組成とそれらの隕石の Ar-Ar 年代 (文献値) から、この 4 つの衝突過程に対応させて、HED 隕石の形成とその進化過程を時系列的に説明するモデルを提唱した。

(2) 玄武岩質隕石にみられる衝突履歴

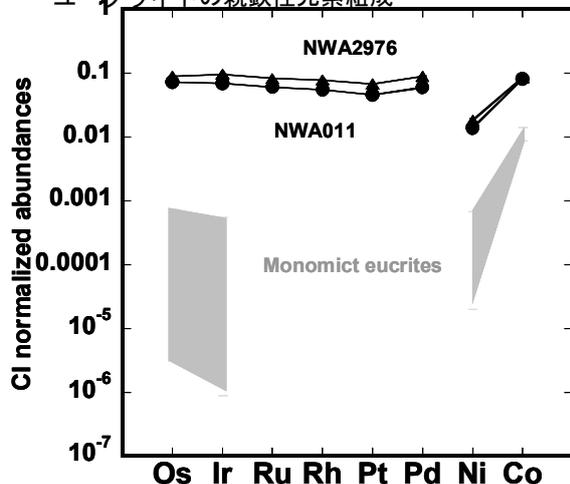
玄武岩質隕石 NWA011、NWA2976、ユークライト隕石 Camel Donga、NWA1109、の 4 試料に対して全岩化学組成を分析した。このうち、NWA011 と NWA2976 は玄武岩質な隕石で、お互いにペアであると考えられている。また、Camel Donga と NWA1109 はユークライト隕石で、前者はモノミクトユークライト、後者はポリミクトユークライトに分類される。

全岩の主要および微量元素組成は放射化分析法を用いた。白金族元素組成はニッケル硫黄 fire-assay 法を用いた同位体希釈誘導結合プラズマ質量分析法にて定量分析を行った。また、国立極地研究所において走査型電子顕微鏡 (SEM)、X線マイクロアナライザ (EPMA) を用いて組織の観察と鉱物中の元素の定性/定量分析を行った。

NWA011 は Ir、Ni 等の元素含有量から衝突物による親鉄性元素の混入を受けたことが示唆されている¹⁾。そこで、本研究で定量した NWA011、NWA2976 中の親鉄性元素組成を NWA011 と同様に小惑星地殻由来と考えられるユークライト隕石の値と比較した (図 1)。報告値¹⁾ 同様、NWA011 中の親鉄性元素含有量は火成活動では説明できない

ほど高く、外来成分の付加が示唆される。また、NWA011、NWA2976 中の親鉄性元素間では Ni の分別がみられたが、その他の元素は、CI コンドライト組成に対して顕著な分別が見られなかった (図 1)。

図 1. NWA011とNWA2976、およびモノミクトユークライトの親鉄性元素組成



SEM での観察および鉱物中の元素の定性分析により、親鉄性元素である Ni が濃集している鉱物は風化されていることがわかった (図 2)。この風化生成物には他の強親鉄性元素も濃集していると考えられる。また、風化生成物中の Ni が地球上での風化の影響で溶出した可能性が考えられるため、白金族元素組成のみを用いて衝突物の同定を試みた。同定には、NWA011 および NWA2976 中の白金族元素組成は衝突物のみ由来とした。NWA011 および NWA2976 と同じように白金族元素間で分別せず、かつ親鉄性元素を多く含む隕石としては、鉄隕石の一部とコンドライト隕石が挙げられる。図 3 はコンドライトグループと NWA011、NWA2976 の金族元素組成を比較したものであるが、コンドライト隕石は Pt/Pd と Ir/Pd 間でよい相関を示すものの、NWA011 および NWA2976 の値はこの相関関係からはずれる。このことから、これら 2 つの隕石の母天体コンドライト隕石以外の隕石物質が衝突し、その混入を受けたものと考えられる。

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 23 件)

① A. Yamaguchi, Y. Karouji, H. Takeda, L. Nyquist, D. Bogard, M. Ebihara, C.-Y. Shih, Y. Reese, D. Garrison, J. Park and G. McKay (2010)

The variety of lithophiles in the Yamato-86032 lunar meteorite: Implication for formation processes of the lunar crust. *Geochim. Cosmochim. Acta* (in press). (査読有り)

② A. Yamaguchi, A. A. Barrat, R. C. Greenwood, N. Shirai, C. Okamoto, T. Setoyanagi, M. Ebihara, I. A. Franchi and M. Bohn (2009) Crustal partial melting on Vesta: Evidence from highly metamorphosed eucrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 73, 7162-7182. (査読有り)

③ N. Shirai and M. Ebihara (2009) Chemical characteristics of ilherzolithic shergottites Yamato 000097 and the magmatism on Mars inferred from chemical compositions of shergottites. *Polar Sci.* 3, 117-133. (査読有り)

④ T. Tanaka, Y. Oura and M. Ebihara (2008) Determination of iridium and gold in rock samples by using pre-concentration neutron activation analysis. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 278, 319-322. (査読有り)

⑤ Y. Karouji and M. Ebihara (2008) Reliability of prompt gamma-ray analysis for the determination of Na and Mg in rock samples. *Anal. Sci.* 24, 659-663. (査読有り)

⑥ H. Minowa, M. Takeda and M. Ebihara (2007) Sequential determination of ultra-trace highly siderophile elements and rare earth elements by radiochemical neutron activation analysis: Application to pallasite meteorites. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 272, 321-325. (査読有り)

[学会発表] (計 55 件)

① B. S. Wee, A. Yamaguchi and M. Ebihara "Platinum group elements in howardites and polymict eucrites: Implications for impactors on the HED parent body". 41st Lunar and Planetary Science Conference. 2010.3,1-3,5 Houston, Texas (USA).

② J. Isa, A. Yamaguchi, K. Shinotsuka and M. Ebihara "Northwest Africa 1109 and Camel Donga: Metal-bearing brecciated eucrites". 40th Lunar and Planetary Science Conference. 2009.3, 23-3,27 Houston, Texas (USA).

③ J. Isa, A. Yamaguchi, K. Shinotsuka and M. Ebihara "Chemical composition of Northwest Africa 011 and Northwest Africa 2976". 71st annual meeting of the Meteoritical Society. 2008. 7,28-8,1 Matsue (Japan).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

海老原 充 (EBIHARA MITSURU)

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：10252000

(2) 研究分担者

大浦 泰嗣 (OURA YASUJI)

首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：90291567

山口 亮 (YAMAGUCHHI AKIRA)

国立極地研究所・助教

研究者番号：70321560