

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19540511

研究課題名 (和文) 微惑星や原始地殻における高温変成作用について

研究課題名 (英文) High temperature metamorphism on planetesimals and protoplanetary crust

研究代表者

山口 亮 (YAMAGUCHI AKIRA)

国立極地研究所・研究教育系・助教 研究者番号：70321560

研究成果の概要：

本研究では、HED 隕石や月隕石の岩石組織や全岩化学組成を詳細に検討し、小惑星ベスタや地球の月の原始地殻の形成過程を明らかにしようとした。また、ユレイライトの鉱物学的研究から推定した熱史と衝撃史をもとに、母天体である微惑星の発達過程を明らかにしようとした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科：地球惑星科学 細目：岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：エコンドライト、鉱物学、宇宙化学、微惑星

1. 研究開始当初の背景

太陽系誕生とほぼ同時に形成された微惑星や原始惑星は、その形成直後に加熱を受け変成作用、部分熔融や大規模熔融を経験した。地球の月やベスタなどは、母天体スケールのマグマ大洋に覆われていたとされる。このマグマ大洋が冷却固化することで、原始地殻が生まれた。

始源的エコンドライトやユレイライトの研究から、微惑星内部では熱変成作用中に衝突加熱イベントが起こるなど複雑な過程を経たことがわかっている。月やベスタの原始地殻も、その形成中に複数回の熱的イベント

を経験したことが高いことがわかりつつある。再結晶したユークライトや月のグラニュライトには角レキ岩であった痕跡を残すものもあり、これらが静的に加熱を受けただけでなく、熱変成作用中あるいは以前に衝撃などによる加熱を受けたためだと推測される。二次的加熱の証拠は、マフィック鉱物の微量元素のゾーニングやある種の鉱物（リン酸塩鉱物）の希土類元素組成として間接的にあらわれている場合もある。年代学的研究から、加熱イベントは母天体の形成初期に起こったと推定される。熱い原始地殻や微惑星の内部の進化過程は、衝撃変成・角レキ化・部分

あるいは全体的な熔融を含む複雑なものであったに違いない。このプロセスを詳細に研究することで原始地殻の進化過程が明らかにできることが期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、太陽系初期に高温で衝突などによる二次的加熱が微惑星や原始惑星の地殻の内部の物質進化過程にどのように影響を及ぼしたかということを明らかにすることである。そのために、後期の衝突破砕を受けていない結晶質の隕石、かつ、地下深部起源の原始地殻の岩石（地下深部起源のHED隕石や始原的エコンドライト）を研究対象とする。これらの隕石を、鉱物学的あるいは宇宙化学的手法を用いて研究する。そして、文献として出ている年代学的データやシミュレーションのデータと比較し、太陽系初期における微惑星や原始地殻の発達過程の一端を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、岩石鉱物学的研究とバルク化学分析を密接に関連づけて行った。

(1) 岩石鉱物学的研究

研磨薄片試料を透過および反射型光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡(SEM)、X線マイクロアナライザ(EPMA)、顕微ラマン分光計などを用いて、岩石組織や鉱物の微細構造の観察や鉱物や相の定性および定量分析を行った。これらのデータをもとに、変成温度や期間、衝撃変成の度合いなどを推定した。EPMAのマッピング機能を用いて、鉱物や相の分布状態やモード組成を算出し、鉱物の分布状態がどのように化学分析結果（下記）に影響するかを考察した。

(2) バルク化学分析

岩石鉱物学的にキャラクタライズされた隕石試料(ユークライト・月隕石)について、各種元素組成を定量した。分析手法として、即発γ線分析法、機器中性子放射化学分析法を用いて主要・微量元素の定量を行った。また、詳細な希土類元素の存在度を調べるために、誘導プラズマ質量分析法を用いた。ユークライト隕石に関しては部分熔融やマグマ汚染によってバルク希土類元素がどのように変化するかモデル計算を行い、分析データと比較した。

4. 研究成果

(1) ホワルダイト・ユークライト・ダイオジェナイトはHED隕石と総称され、小惑星ベスタ起源である。ユークライトは玄武岩、ダイオジェナイトは輝岩、ホワルダイトは、主にユークライトとダイオジェナイトからなるポリミクト角礫岩である。HED隕石の鉱物学や化学組成から、その岩石学的成因を明らかにしよ

うとした。

玄武岩質ユークライトは、その全岩化学組成から三つ化学グループ、Main Group-Nuevo Laredo (MG-NV)、Stannernトレンド(ST)、残渣ユークライト - に分けられる。MG-NVトレンドは、マグマ大洋の結晶分化から推定されるトレンドと一致する。しかし、STトレンドの成因は、このマグマ大洋モデルでは説明できなかった。本研究で、このトレンドは、高温変成作用により地殻下部が部分熔融を起こし、その熔融液が上昇中のマグマを汚染したためにできた可能性が高いことを示した。この結果は、論文にて報告した。本研究プロジェクトで、我々は新たな化学グループ(残渣ユークライト)を見いだした。熱史的なバルク組成の考察から、この残渣ユークライトは、熱変成作用中の部分熔融を経験し、熔融液が取り去られた可能性が高いことがわかった。つまり、残渣ユークライトは化学的にSTトレンドと対照的なものである。本研究によって、ユークライトの熱史と化学組成は、マグマ大洋モデルとその後の高温変成作用で説明できることを示した。この内容は現在国際誌に投稿中である。

(3) 数種のホワルダイト中には、Naに乏しくKに富む岩石片が見つかった。このような岩石片は、HED隕石単体としては見つかっていない。これは、ベスタの地殻の化学組成が多様であることを示す。また、希土類元素に富む岩石片は、マグマ大洋での結晶分化、あるいは、原始地殻での高温変成作用時に発生した部分熔融液(上記)そのものであると考えられる。これらの岩石片のキャラクタリゼーションは、現在も進行中である。

(4) ダイオジェナイトは、輝岩で、ベスタの下部地殻を構成していたとされる。輝石の組成やバルク組成から、このダイオジェナイトの母マグマは多様であることがわかった。数個のものは、軽希土類元素に対し重希土類元素に富み、その母マグマはマグマオーシャン中で集積したマフィック鉱物が再熔融して形成した可能性が高い。ユークライトからなる上部地殻だけではなく、下部地殻も再熔融など複雑な形成史を経ているのだろう。

(5) 月の高地(地殻)起源の斜長岩質角レキ岩(Y86032等)の岩石学的研究を行った。我々の以前の年代学的研究から、この角レキ岩の形成年代は38-42億年以前と推定される。この角レキ岩は、インコンパチブル元素(KREEP元素)に欠乏している。また、斜長石の組成は、Kに乏しい。これは、母マグマのがKREEPに汚染されていないことを示す。これは、この月隕石が表側のKREEPに富むテレーンから

離れた場所(裏側)由来であることを示す。さらに、この角レキ岩からNa含有量が高いにもかかわらず希土類元素含有量が極めて低い斜長岩を発見した。この斜長岩の組成は、一般的な月の斜長岩(Ferroan Anorthosite)の化学組成と異なる。これは、月の斜長岩の多様性を示す。この研究結果は、月の表側と裏側の地殻の構造が異なるというモデルを支持する。本研究結果は、現在、論文を国際誌に投稿中である。

(6)かんらん石に富むユレイライト隕石(NWA4928, A-881989)の鉱物学的研究を行った。これらのユレイライトは高温変成作用を受け、部分熔融を経験したと考えられる。本内容に関して一部成果の学会発表を行ったが、ユレイライトの研究は現在進行中である。

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5件)

1. Barrat J.A., Bohn M., Gillet Ph. and Yamaguchi A. (2008) Evidence for K-rich terrains and granites on Vesta from impact spherules. *Meteoritics & Planetary Science*, in press. 査読有.
2. Barrat J.A., Yamaguchi A., Greenwood R.C., Benoit M., Cotten J., Bohn M. and Franchi I.A. (2008) Geochemistry of diogenites: Still more diversity in their parental melts. *Meteoritics Planetary Science*, 43, 1759-1775. 査読有.
3. Arai T., Takeda H., Yamaguchi A. and Ohtake M. (2008) A new model for lunar crust: asymmetry in crustal composition and evolution. *Earth, Planets, Space* 60, 433-444. 査読有.
4. Barrat J.A., Yamaguchi A., Greenwood R.C., Bohn M., Cotten J., Benoit M. and Franchi (2007) The Stannern trend eucrites: Contamination of main group eucritic magmas by crustal contamination. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71, 4108-4124. 査読有.
5. Srinivasan G., Whitehouse M.J., Weber I. and Yamaguchi A. (2007) The crystallization age of eucrite zircon. *Science* 317, 345-347. 査読有.

[学会発表] (計24件)

1. Yamaguchi A., Takeda H., Barrat J.A. (2009) Petrology of ferran diogenites,

Yamato 75032 type, Aasuka 881839 and Dhofar 700. *Lunar and Planetary Science XXXX*, #1547. (March 23-27, The Woodlands, Texas).

2. Takeda H., Karouji Y., Ogawa Y., Yamaguchi A., Ohtake M., Arai T., Matsunaga T., Haruyama J. (2009) Iron contents of plagioclase in Dhofar 307 Lunar meteorite and surface materials of the farside large basins. *Lunar and Planetary Science XXXX*, #1565. (March 23-27, The Woodlands, Texas).
3. Yamaguchi A., Takeda H. and Barrat J.A. (2008) Variety within eucrites and implications for their classification. *Meteoritics & Planetary Science* 43, A192. (Workshop on Antarctic meteorites: Search, recovery, and classification, July 26-28, Matsue)
4. Takeda H. and Yamaguchi A. (2008) Contributions of Antarctic ureilites to reconstruction of their parent body and the formation processes with description of three ureilites from Antarctica. *Meteoritics & Planetary Science* 43, A190. (Workshop on Antarctic meteorites: Search, recovery, and classification, July 26-28, Matsue)
5. Barrat J.A., Bohn M., Gillet Ph. and Yamaguchi A. (2008) Impact glasses in howardites: K-rich lithologies and granites on 4Vesta. *Meteoritics & Planetary Science* 43, A21. (71st Annual Meeting of the Meteoritical Society, July 28-August1, Matsue).
6. Barrat J.A., Yamaguchi A., Greenwood R.C., Beniot M., Cotten J., Bohn M. and Franchi I.A. (2008) Still more diversity in the diogenite parental melts. *Meteoritics & Planetary Science* 43, A22. (71st Annual Meeting of the Meteoritical Society, July 28-August 1, Matsue).
7. Isa J., Shinotsuka K., Yamaguchi A. and Ebihara M. (2008) Chemical characteristics of Northwest Africa 011 and Northwest Africa 2976. *Meteoritics & Planetary Science* 43, A64. (71st Annual Meeting of the Meteoritical Society, July 28-August 1, Matsue).
8. Takeda H. and Yamaguchi A. (2008) Two olivine-rich ureilites among nine new Northwest Africa ureilites and their

- proposed origin. *Meteoritics & Planetary Science* 43, A152. (71st Annual Meeting of the Meteoritical Society, July 28–August 1, Matsue).
9. Yamaguchi A., Takeda H., Nyquist L. E., Bogard D. D., Karouji Y. and Ebihara M. (2008) Basaltic clasts in Y-86032 feldspathic lunar meteorite: Ancient volcanism far from the Procellarum KREEP terrane. *Lunar and Planetary Science XXXIX*, #1560. (March 10–14, League City).
 10. Takeda H., Arai T., Yamaguchi A., Otsuki M. and Ohtake M. (2008) Granulitic lithologies in Dhofar 307 lunar meteorite and magnesian, Th-poor terrane of the Northern farside crust. *Lunar and Planetary Science XXXIX*, #1574. (March 10–14, League City).
 11. Barrat J.A., Bohn M., Gillet Ph. and Yamaguchi A. (2008) Impact glasses in howardites: Evidences for K-rich lithologies of 4-Vesta. *Lunar and Planetary Science XXXIX*, #1589. (March 10–14, League City).
 12. Kurihara T., Mikouchi T., Yamaguchi A., Sekine T. (2008) Transmission electron microscopy of experimentally shocked San Carlos olivine. *Lunar and Planetary Science XXXIX*, #2505. (March 10–14, League City).
 13. 山口 亮, 武田 弘, J.A. Barrat (2008) 鉄に富むダイオジェナイトの岩石学的成因について. 日本鉱物科学会 2008 年年会 (秋田大学), (2008 年 9 月 20–22 日), p. 221.
 14. 栗原 大地, 三河内 岳, 猿渡 和子, 亀田 純, 山口 亮, 関根 利守, 宮本 正道 (2008) 茶色カンラン石を含む火星隕石の透過型電子顕微鏡観察. 日本鉱物科学会 2008 年年会 (秋田大学), (2008 年 9 月 20–22 日), p. 222.
 15. 山口 亮, J.A. Barrat, 海老原 充, 白井 直樹, 岡本 千里 (2008) ユークライト隕石母天体地殻の部分溶融について. 日本地球化学会第 55 回年会 (東京大学), (2008 年 9 月 17–19 日), p. 97.
 16. 田村 麻衣, 篠塚 一典, 海老原 充, 山口 亮 (2008) Tafassasset 隕石の主要元素及び微量元素組成. 日本地球化学会第 55 回年会 (東京大学), (2008 年 9 月 17–19 日), p. 95.
 17. 日高 義浩, 海老原 充, 山口 亮 (2008) 月隕石 Dhofar 1428 の化学組成. 日本地球化学会第 55 回年会 (東京大学), (2008 年 9 月 17–19 日), p. 102.
 18. Barrat J.A., Yamaguchi A., Greenwood R.C., Bohn M., Cotten J., Benoit M. and Franchi I.A. (2007) Are Stannern-trend eucrites ordinary eucrites contaminated by crustal partial melts? *Meteoritics & Planetary Science* 42, A17. (70th Annual Meteoritical Society Meeting, Tucson, August 13–17, Tucson)
 19. Arai T., Takeda H., Yamaguchi A. and Ohtake M. (2007) Lithology of lunar farside crust. *Meteoritics & Planetary Science* 42, A14. (70th Annual Meteoritical Society Meeting, Tucson, August 13–17, Tucson)
 20. Misawa K. and Yamaguchi A. (2007) U-Pb ages of NWA856 baddeleyite. *Meteoritics & Planetary Science* 42, A108 (70th Annual Meteoritical Society Meeting, Tucson, August 13–17, Tucson)
 21. Yamaguchi A., Barrat J.A., Shirai N., Okamoto C., Setoyanagi T. and Ebihara M. (2007) Highly metamorphosed eucrites, A-87272 and DaG945: Residues after crustal partial melting. *Meteoritics & Planetary Science* 42, A167. (70th Annual Meteoritical Society Meeting, Tucson, August 13–17)
 22. 山口 亮, J.A. Barrat, 白井 直樹, 海老原 充, 岡本 千里 (2007) ユークライト母天体地殻の熱変成作用と部分溶融について. 日本鉱物科学会 2007 年年会 (東京大学, 9 月 22–24 日), p. 87.
 23. 荒井 朋子, 武田 弘, 山口 亮, 大竹 真紀子 (2007) 月裏側地殻の岩石・鉱物学. 日本鉱物科学会 2007 年年会 (東京大学, 9 月 22–24 日), p. 86
 24. 武田 弘, 大槻 まゆみ, 石井 輝秋, 山口 亮, 井上 真治 (2007) 輝石 3 相の共存する北西アフリカ産ユレイライト. 日本鉱物科学会 2007 年年会 (東京大学, 9 月 22–24 日), p. 82
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
山口 亮 (YAMAGUCHI AKIRA)
国立極地研究所・研究教育系・助教
研究者番号: 70321560
 - (2) 連携研究者

海老原 充 (EBIHARA MITSURU)
首都大学東京・都市教養学部・教授
研究者番号：10152000