

微小重力小惑星における金属鉄・ケイ酸塩溶融液の分離機構解明

荒井朋子¹、武田弘²、村上敬司³

¹ 国立極地研究所、² 千葉工業大学、³ JAXA 宇宙環境利用センター

Segregation mechanism of metal and silicate liquids on the microgravity asteroids

Tomoko Arai¹, Hiroshi Takeda², and Keiji Murakami³

¹ Antarctic Meteorite Research Center, National Institute of Polar Research, 1-9-10 Kaga, Itabashi, Tokyo 173-8515, E-Mail: tomoko@nipr.ac.jp

² Research Institute, Chiba Institute of Technology, Tsudanuma, Narashino, Chiba

³ Space Environment Utilization Center, JAXA, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki

Abstract: IAB irons are one of a few types of iron meteorites that contain silicate inclusions. Caddo County IAB iron meteorite includes silicate inclusions rich in Na-rich plagioclase and diopside, which is classified as andesite. The andesitic material can be an early partial melt product of chondritic materials. This indicates inhomogeneous segregation of partial melt of andesitic silicate and Fe-Ni-S metal from chondritic source occurred even in a small planetesimal. This further implies that building block of terrestrial planets are not only chondritic materials, but also such inhomogeneously segregated partial melts from chondritic sources. Thus, the physical mechanism of metal segregation under microgravity, low pressure, and low oxygen fugacity needs to be understood, in order to decipher the abundances and partitioning behaviors of chemical compositions of the terrestrial planets. We plan to experimentally verify our model for the segregation mechanism of metal and silicate liquids on the microgravity planetesimal.

Key words: Microgravity, Asteroids, Planetismals, Origin of terrestrial planets, Core formation

1. はじめに

地球型惑星の起源と進化において「部分溶融とそれに伴う金属とケイ酸塩の分離」は、根本的かつ普遍的な現象である。太陽系固体惑星のうち、最も精力的に研究されている天体は、地球とその衛星の月である。月は地球への火星サイズの天体の衝突（ジャイアントインパクト）により生まれたと考えられているため、地球と月は、その起源及び進化の途中まで同じ天体であったと言える。地球科学及び惑星科学の分野では、地球-月系の起源と進化に関して活発な研究・議論が進められている。その中でも、地球の化学組成、特にケイ酸塩部分にあたる地殻・マンタルの親鉄元素組成がどのプロセスで決まったかという問題は、地球史を理解する上で第一級の命題であり、近年最も注目されている研究課題のひとつである [1]。従来は、地球の地殻・マンタルの親鉄元素組成は、地球規模で溶けたマグマ大洋がゆっくりと冷却する際、金属核とケイ酸塩部分（地殻・マンタル）が分離した過程を反映していると考えられてきた。しかし、近年、W-Hf の同位体年代から地球のコアが 3000 万年以内という非常に短期間で生成されたことが明らかになり [2, 3]、地球形成後よりも地球形

成前の前駆物質における物質分化過程（金属とケイ酸塩に分離など）が、地球の化学組成決定に支配的である可能性が高いと考えられるようになってきた。

太陽系形成初期の未分化な物質であるコンドライト隕石が様々な分化過程を経てできた「分化した隕石」は、太陽系最初期の小天体レベルで起こった分化過程を理解する上での重要な手がかりである (Fig. 1)。一方で、10 種類以上ある分化した隕石の各々は、想定される一連の分化プロセス（コンドライト→加熱による部分溶融→溶融液と未溶融の固相との分離および溶融に伴う金属液とケイ酸塩溶液との分離）のごく一部を保存しているに留まり、太陽系形成初期の分化過程の物理現象・元素の分別過程等の全体像はよくわかっていなかった。しかし、近年、我々は S 型小惑星起源と考えられる IAB タイプの鉄隕石 Caddo County のケイ酸塩含有物中に、上記の一連の分化過程を保存する部分を発見した [4, 5]。この Caddo County 鉄隕石試料に奇跡的に発見された「太陽系最初期の部分溶融物質」は、小天体での物質分化過程を解明するための最適な研究対象である。本論文では、この隕石試料の化学組成、鉱物組成、岩石組織分

析の結果に基づき、小天体上で発生した部分熔融液から金属熔融液とケイ酸塩熔融液が分離する機構を推定した。さらに、我々の提案する分離機構モデルを実証するための実験計画を紹介する。

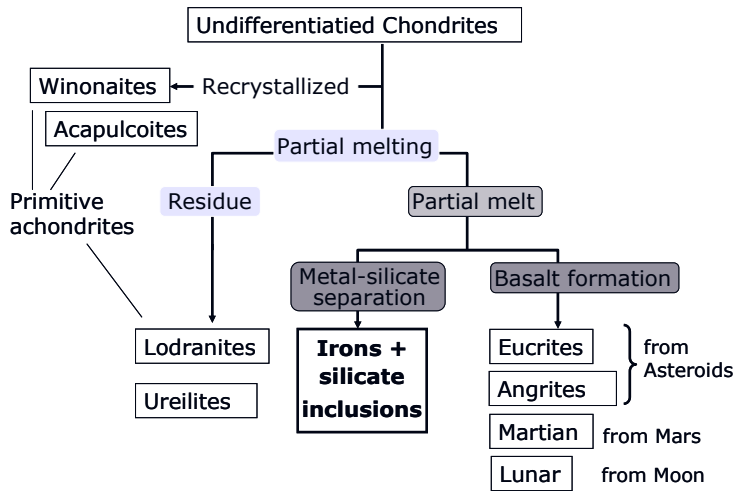


Fig.1 Planetary differentiation processes recorded in a variety of differentiated meteorites.

2. 結果と考察

鉄隕石とは主に金属鉄からなる隕石であるが、様々な割合でケイ酸塩包有物を含む。Ni や Ga などの親鉄元素濃度により、約 13 種類に分類される。IAB 鉄隕石は幅広い化学組成のケイ酸塩包有物を含むことで知られる。我々が入手した Caddo County IAB 鉄隕石試料中にも cm スケールで不均質に分布するケイ酸塩包有物が見られた (Fig. 2)。

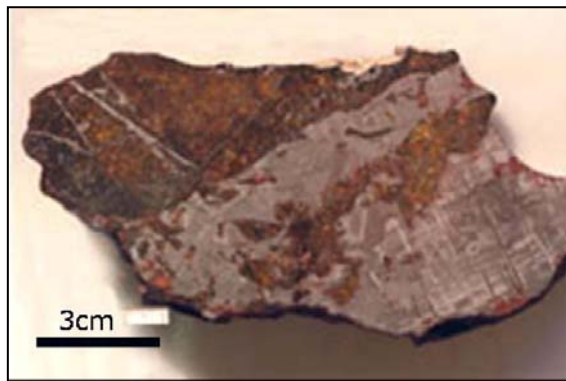


Fig. 2 Photograph of a rock chip of Caddo County IAB iron meteorite. Gray areas on the right are FeNi metal and reddish-brown portions on the left and within the metal are silicate inclusions.

我々は、Fig. 2 の岩石試料中で、ケイ酸塩包有物の存在度が高い部分について分析を行った。試料中には、太陽系の始原物質であるコンドライトが加熱を受け、地球型惑星へと分化（進化）してい

く過程における、ほぼ全てのステージを保存する箇所が含まれていた (Fig. 3)。

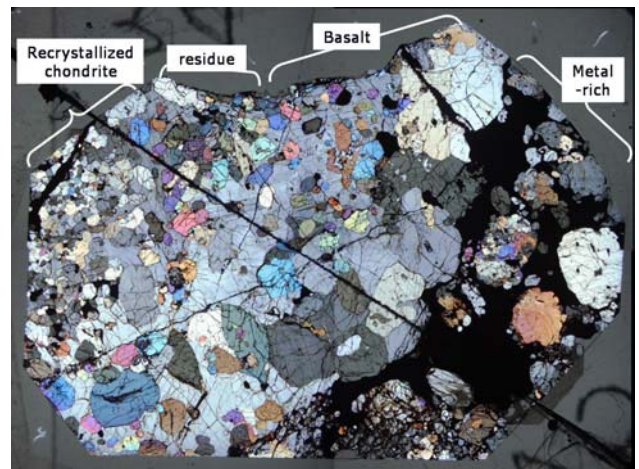


Fig. 3 Photomicrograph of silicate inclusion containing a variety of differentiation products in a polished thin section of Caddo County IAB iron meteorite (field of view: 2.5cm).

それらのステージとは以下に示す 4 つである。

(1) コンドライトがサブソリダスで加熱を受け、細粒に再結晶化した部分(Recrystallized chondrite), (2) カンラン石や斜方輝石からなる部分熔融の溶け残り部分(Residue), (3) 部分熔融により生じたケイ酸塩熔融液 (が結晶化した部分) (Basalt)と(4) 金属熔融液が分離・濃集する部分(metal-rich 部分)。Fig. 2 からわかるように、これらの分化の各過程が数センチの距離に共存する。ケイ酸塩熔融液が結晶化した部分は、金属鉄に富む部分とケイ酸塩部分との境界に分布しており、そこから数 cm 離れてコンドライトが再結晶したものや部分熔融残渣であるカンラン石や斜方輝石が存在する。これは、金属核とケイ酸塩マントルが重力により層状に分別した km サイズの比較的大きい天体ではなく、天体サイズも重力も小さく、大部分が始原的なコンドライト組成を持つ微小天体で、数センチスケールで局所的な部分熔融が起こり、それらの部分熔融液からケイ酸塩熔融液と金属熔融液とが分離を始めた状態を示したものに他ならない。

次に、鉍物組成と各鉍物の存在度から、部分熔融により生じたケイ酸塩熔融液部分の組成を求めた。各鉍物の組成はほぼ均質で、化学組成と存在度は、斜長石($Or_{30}Ab_{70}$, 58.9 vol.%)、ダイオプサイド($Wo_{45}En_{55}$, 27.7 vol.%)、カンラン石 $100 \times Mg/(Mg+Fe) = 97.3$, 8.1 vol.%、斜方輝石 ($Wo_{21}En_{79}$, 5.4 vol.%)であった。これらに基づき計算したケイ酸塩熔融液部分の化学組成は SiO_2 濃度が高く (59 wt%)、地球の岩石では高 Mg

安山岩に相当する。また、この組成を quartz-olivine-plagioclase の三成分系の相図上で見ると、共融点 P に近い組成であることがわかる (Fig. 4)。従って、この安山岩質ケイ酸溶融液はコンドライトからの初期 (低溶融点での) の部分溶融液であると考えられる。

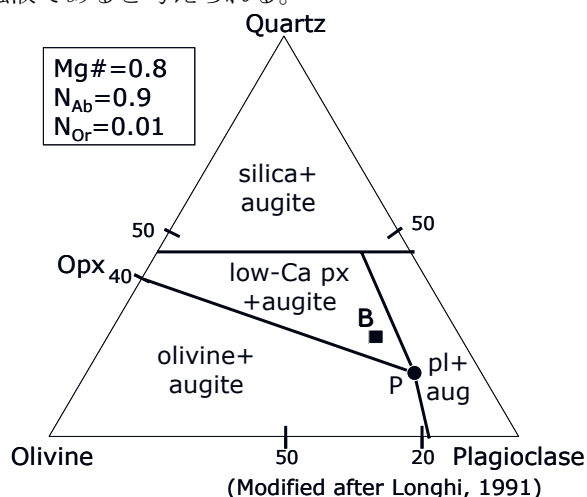


Fig. 4 A calculated bulk composition of silicate liquid by partial melting (solid square B) plotted in the quartz-olivine-plagioclase phase diagram. The peritectic point in the system is indicated with a solid circle P.

次に二次イオン質量分析器で分析した各鉱物の希土類元素濃度を Fig. 5 に示す。また、それらの濃度と鉱物モードから計算したケイ酸塩溶融液のバルク組成を Fig. 6 に示す。バルク組成の希土類元素存在度を CI コンドライトと比較すると、ほぼ平らなパターンを示し、濃度は CI コンドライトの約 5 倍である。この結果は、同様の安山岩質ケイ酸塩包有物の INAA によるバルク分析値ともほぼ一致した (Fig. 6)。

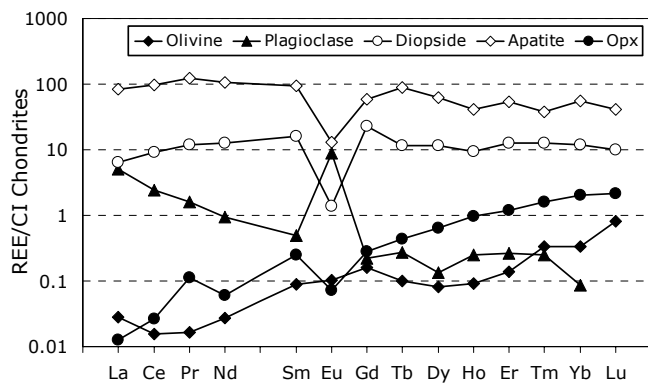


Fig. 5 Rare Earth Element (REE) composition of minerals in the silicate liquid (= basalt) of the Caddo County IAB iron meteorite.

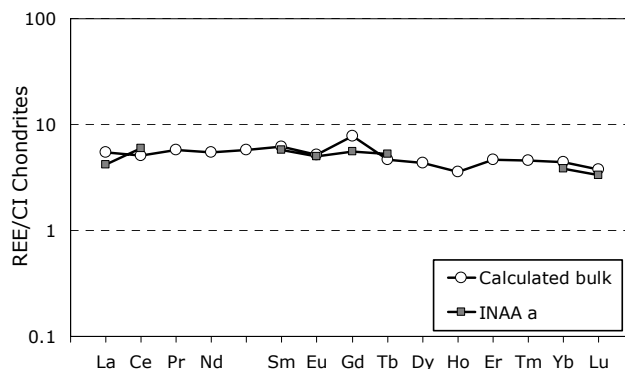


Fig. 6 Rare Earth Element (REE) composition of bulk silicate liquid (= basalt) calculated by modal abundance and the REE composition of each mineral in Fig. 5. INAA data for bulk silicate inclusion is also shown for comparison.

このようなバルク希土類元素パターン及び濃度データは、安山岩質ケイ酸塩包有物が核-マントル分離・形成が生じるような天体レベルでの大規模溶融による分化プロセスではなく、コンドライトからの局所的な部分溶融による金属とケイ酸塩の不均質 (=不完全) 分離過程が残された、太陽系最初期の極めて分化度の低い微惑星で形成されたことを示しており、前述の鉱物組成および主要元素バルク組成に基づく見解と一致する。

Caddo County 鉄隕石中に残されたケイ酸塩溶融液は、希土類元素濃度の観点ではコンドライトからそれほど分化が進んでいないことがわかった。しかし一方で、親鉄元素については、上記の金属とケイ酸塩の局所的な不均質分離過程においても、すでに元素分配がされている。ただし、ここでいう元素分配は低圧・微小重力・還元的という、微小惑星特有の条件下でなされていることに注意しなければならない。Caddo County IAB 鉄隕石の I-Xe 年代データからこの鉄隕石は約 45.6 億年前に溶融・分化を経験したことがわかっている [6]。つまり、このような局所的に分化した微小天体のかけらが地球の出発物質として取り込まれるには十分な時間がある (Fig. 7)。従って、このような小規模に分化した出発物質における金属-ケイ酸塩間の親鉄元素分配が、地球マントルにおける低い親鉄元素濃度の一因になっている可能性は高い。

3. 今後の研究計画

物質分化の発展途上にある微小天体における「ケイ酸塩と金属との分離」が地球型惑星の起源、進化に密接に関わるという考えは、ここ数年急激に注目されるようになったが、その分離機構の物理プロセスはまだ明らかになっておらず、議論の域を出ていない。現在、小天体における金属鉄

とケイ酸塩の分離機構については、低融点を持つ金属熔融液量と空隙率の割合及び小天体上での圧力勾配、浮力効果や小天体への隕石衝突で引き起

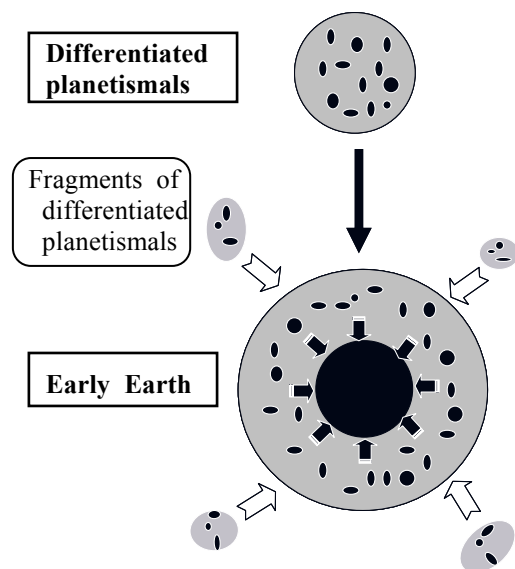


Fig. 7 A schematic showing early Earth being built up by fragments of differentiated planetismals

こされる剪断応力など、諸説が提唱されている [7, 8, 9]。一方、我々は、分離過程には金属熔融液とケイ酸塩熔融液が共存することが重要であり、二種の熔融液の表面張力の違いが引き金となり、微小重力下特有の現象であるマランゴニ対流が分離過程を促進する力になりうると考えている。そのためには、我々の仮説を実験及びシミュレーションにより実証する必要がある。Caddo County 鉄隕石に実存する、熔融した金属鉄とケイ酸塩部分の化学組成を用い、微小天体環境を想定した低圧力・低酸素分圧条件の下、それら二種の熔融液の表面張力を測定し、表面張力差が分離機構を促進するという我々のモデルを評価・解析する計画である。熱物性値測定にはJAXA所有の装置を借用する予定である。また、地上での実験・解析結果に基づき分離機構を予測し、微小重力環境を生かした宇宙での実験計画を立案したいと考えている。本研究により小天体上での金属—ケイ酸塩の分離プロセスが明らかになれば、太陽系形成史最初期の分化過程が解明され、地球型惑星を形作った出発物質の物理状態・化学組成が特定できる。さらに、その特定された出発物質と現在の地球の

化学組成(特に親鉄元素)から、地球の進化過程を追うことが可能になり、地球史に掛かる我々の理解が飛躍的に進み、地球科学及び惑星科学分野において画期的な成果がもたらされることが大いに期待できる。

参考文献

- [1] Newsom H. E.; Accretion and core formation in the Earth. *Origin of the Earth*, Oxford Univ. Press, 231-249 (1990).
- [2] Yiu Q., Jacobsen S. B., Yamashita J., Blichert-Toft J., Telouk P., and Albarede F.; A short timescale for terrestrial planets from Hf-W chronometry of meteorites, *Nature*, **418**, 949-952 (2002).
- [3] Klein J., Munker C. K., Mezger K. and Palme H.; Rapid accretion and early core formation on asteroids and the terrestrial planets from Hf-W chronometry, *Nature*, **418**, 952-955 (2002).
- [4] Takeda H., Bogard D. D., Mittlefehldt D. W., Garrison D. H.; Mineralogy, petrology, chemistry, and ^{39}Ar - ^{40}Ar and exposure ages of the Caddo County IAB iron: Evidence for early partial melt segregation of a gabbro area rich in plagioclase-diopside, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **64**, 1311-1327 (2000).
- [5] Arai T., Takeda H. and Kojima H.; Origin and evolution of terrestrial planets inferred from silicate inclusions in IAB iron meteorite, 日本地球化学会第52回年会講演要旨集、165-166 (2005).
- [6] Bogard D. D., Garrison D. H. and Takeda H.; Ar-Ar and I-Xe ages and the thermal history of IAB meteorites, *Meteoritics & Planetary Science*, **40**, 207-224 (2005).
- [7] Yoshino T., Walter M. J., Katsura T.; Core formation in planetesimal triggered by permeable flow, *Nature*, **422**, 154-157 (2003).
- [8] Yoshino T., Walter M. J., Katsura T.; Connectivity of molten Fe alloy in peridotite based on in situ electrical conductivity measurement: implications for core formation in terrestrial planets, *Earth and Planetary Science Letters*, **222**, 625-643 (2004).
- [9] Rushmer T., Petford N., Humayun M., and Campbell A. J.; Fe-liquid segregation in deforming planetesimal: Coupling coreforming compositions with transport phenomena, *Earth and Planetary Science Letter*, **239**, 185-202 (2005).