

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400514

研究課題名(和文)冥王代初期のメルト生成過程とhidden reservoirの生成条件の解明

研究課題名(英文)Revealing the process of melt generation and hidden reservoir formation in the Hadean Earth

研究代表者

小木曾 哲 (KOGISO, Tetsu)

京都大学・人間・環境学研究科・教授

研究者番号：60359172

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：地球の材料物質と現在の地球の間のNd同位体比の差を補完する「隠された」リザーバー(hidden reservoir)が持つべき主成分元素組成と密度を、同位体に基づいたモデル計算と高圧融解実験、状態方程式を用いたモデル計算によって求めた。その結果、hidden reservoirとなるべきメルトは、地球形成から3000万年以内に7GPa・1750℃で2%以下の融解度で生成される必要があることがわかった。このメルトは、鉄・チタンなどに富むコマチアイト質で、密度は始原的マントルよりも有意に小さいため、冥王代初期に地球表層に地殻を形成し、その後の巨大衝突によって地球から失われた可能性が高い。

研究成果の概要(英文)：The present Earth has a higher $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratio than most chondrites. Thus, if the Earth is assumed to have formed from chondrite, a complement low- $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ reservoir (hidden reservoir) is needed. We estimated the age and conditions to form the hidden reservoir based on Sm-Nd partitioning and melting phase relations. Our estimate indicates that the hidden reservoir should have formed within ~30 Myr from the Earth formation and at 7 GPa, 1750 °C. We then performed high pressure melting experiments on primitive peridotite to determine the major element composition of a melt that can be the hidden reservoir at this condition, and calculated its density. The results indicate that the melt is iron- and titanium-rich komatiite. The estimated density of the melt is lower than that of the primitive peridotite, suggesting that the melt would have ascended in the mantle to form crust in the Hadean and have been ejected from the Earth by the giant impact.

研究分野：実験岩石学

キーワード：岩石鉱物鉱床学 地球惑星内部構造 初期地球 地球化学 高圧実験 マグマ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球形成初期に地球内部でどのような化学的分化が起こったかを知ることは、地球の基本的な成層構造の形成過程、および、その後の地球の物質進化を解明する上で重要である。地球形成時には、マグマオーシャンの中で金属が分離して核となり、残ったケイ酸塩メルトが固結してマントルと地殻になったと考えられている。地球の平均組成がCIコンドライト的であるとする標準的なモデルに従えば、現在の地球の地殻とマントルを合わせた部分 (Bulk Silicate Earth: BSE) の親石元素の相対濃度および同位体比は、CIコンドライトと一致するはずである。しかし、現在のマントル・地殻物質の $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比がCIコンドライトよりも有意に高いという最近の発見は、CIコンドライトより低い $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比を持つリザーバーが地球のどこかに隠れて存在していなければいけないことを示している。

このような「隠され」たりリザーバー (hidden reservoir) の形成には、 ^{142}Nd の親核種である ^{146}Sm (半減期 6800 万年) が存在していた間、つまり地球形成から数億年以内の冥王代初期に、CIコンドライトよりも Sm/Nd の低い (=メルト成分に富む) 部分がマントル対流から分離し隔離される、というプロセス必要がある。hidden reservoir (あるいは元となったメルト) がマントル対流から孤立するかどうかを理解するには、hidden reservoir の密度を知ることが重要である。メルト (およびその固結物) の密度を決定づけるのは主成分元素組成である。しかし、従来の研究には、hidden reservoir の主成分元素組成についての実験的制約が十分でなかった。

2. 研究の目的

本研究では、冥王代初期マントルで起こり得たメルト生成過程の温度・圧力条件を、 ^{146}Sm - ^{142}Nd 系等の同位体地球化学的データを制約条件としたモデル計算によって推定する。そして、その条件で生成するメルトの主成分元素組成を、カンラン岩の高温高压融解実験から求める。得られた化学組成データをもとに、メルトおよびその固結物の密度を計算によって求め、初期地球で hidden reservoir が形成し得たかどうかを検証し、地球形成初期の化学的分化過程の理解に新知見を与えることを目指す。

3. 研究の方法

地球の材料物質と考えられているコンドライト隕石、および、現在のマントル由来岩石の $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ・ $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 同位体組成の既存データをもとに、コンドライトと現在のマントル (および BSE) との間の同位体組成の差を求めた。そして、得られた同位体組成の差を説明出来る微量元素組成 (特に Nd 同位体比を左右する Sm/Nd 比) と形成年代をモデル計

算によって決定した。計算にあたっては、初期地球のマントルがコンドライト組成の微量元素濃度を持つこと、そのマントルの一部が部分融解を起こして融け残った部分が現在の BSE 組成になると仮定した。そして、得られた微量元素組成を持つマントルが生成されるには、部分融解がどのような条件で起こるべきかを、カンラン岩の融解相平衡関係およびメルト-マントル鉱物間の微量元素分配関係に基づいて計算で決定した。

上記の計算で得られた温度・圧力条件で、始原的カンラン岩の高温融解実験を川井型マルチアンビル高压発生装置を用いて行った。この実験では、極低融解度のメルト組成を正確に決定するための手法である Modified Iterative Sandwich Experiment (MISE) 法 (Hirschmann and Dasgupta 2007, Contrib. Mineral. Petrol. 154, 635-645) を採用した。MISE 法は、カンラン岩と平衡に共存し得るメルトの組成をカンラン岩に加えたものを部分融解させて得られたメルトの化学組成を求めて、その化学組成のメルトをカンラン岩に加えたものを部分融解させて次のメルト組成を求める、という作業を繰り返すことで、最終的に真に平衡共存するメルト組成を決定するものである。

最後に、MISE 法による融解実験で得られたメルトの主成分元素組成から、Bottinga and Weil (1970, Am. J. Sci. 269, 169-182) の方法を用いて密度を計算した。また、始原的マントルの密度は、Burch-Murnaghan 状態方程式を用いた Matsukage et al. (2005, J. Geophys. Res. 110, B12305) の方法を用いて決定した。

4. 研究成果

コンドライトと BSE の Nd 同位体組成差を用いたモデル計算の結果、hidden reservoir となり得るメルトは、地球形成から 3000 万年以内に生成される必要があることが判明した (図 1)。

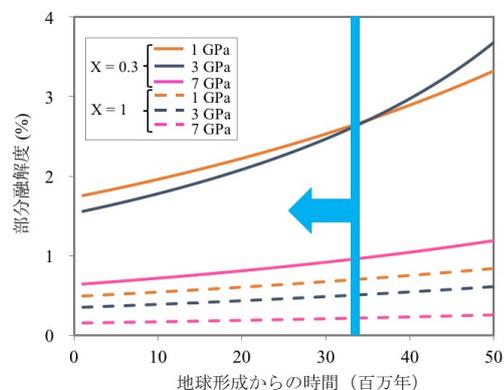


図 1 hidden reservoir となり得るメルトの生成のタイミングと温度・部分融解度の関係

また、そのメルトが生成するには、7 GPa の条件で部分融解度が2%以下となる必要があることが明らかになった(図1)。

7GPaで2%以下の部分融解度を達成するには、7GPaでのソリダス温度である1750°C付近での融解が必要である。この条件でのMISE法による高圧融解実験の結果、hidden reservoirとなり得るメルトはケイ素に乏しくマグネシウムに富むコマチアイト質の組成を持つことが明らかとなった。このコマチアイト質メルトは、天然に産する太古代のコマチアイトと比較すると、著しく鉄・チタン・アルカリ元素に富むことがわかった(図2)。

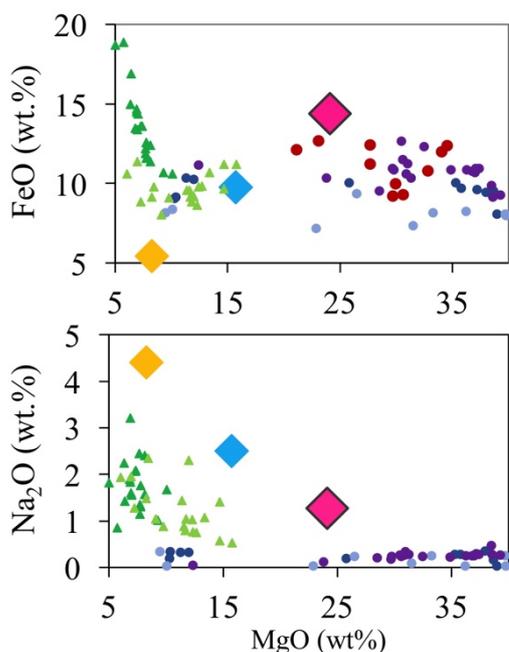


図2 MISE法による部分融解実験で得られた7 GPa・1750°Cで極低融解度で始原的カンラン岩から生成されたメルトの組成(赤いひし形)。比較のため、他の圧力で生成された極低融解度メルト(1GPa:黄色ひし形、3GPa:青いひし形)も示してある。小さい丸いシンボルが太古代のコマチアイト、小さい三角が太古代の玄武岩。

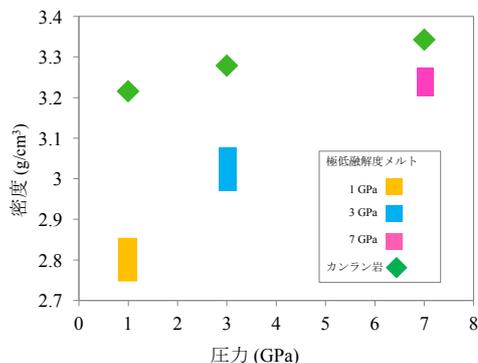


図3 極低融解度メルトとカンラン岩の密度

状態方程式を用いたモデル計算により得られたこれらの極低融解度メルトの密度とカンラン岩の密度とを比較すると(図3)、メルトの方が始原的カンラン岩よりも有意に密度が小さい。このことは、これらのメルトが初期地球で形成されれば、マントル中を上昇して地表に噴出し、地殻を形成することを示している。

これらの計算および実験結果が示すことは、地球形成から3000万年以内に、マントルのおよそ200km深で極低融解度の融解でメルトが生成されれば、それは地表に噴出して固結することで地殻となってマントル対流から分離・隔離され、hidden reservoirとなり得る、ということである。地球形成から3000万年以内、という年代は、月を形成したとされる巨大衝突(地球形成から約1億年後)よりも前であるため、上のような過程で形成された地殻は、巨大衝突によって地球外に飛散し、地球から失われることで、hidden reservoirとなった可能性が高い。

このモデルでは、初期地球のマントルで極低融解度の融解が起こる必要があるが、これは、たとえばKorenaga(2009, Geophys. J. Int. 179, 154-170)が提唱しているように、初期地球のマントル最上部に200km程度の厚いリソスフェアが存在していれば、十分に起こり得ることである。

本研究で採用した、コンドライトとBSEのNd同位体組成の差からhidden reservoirが持つべき主成分元素組成を推定するという方法論は、過去に例のない独自のものであり、それによって初めて、hidden reservoirの主成分元素組成および密度を推定することができた。このことは、初期地球に起こったはずの地球内部物質分化過程を定量的に理解することに大きな進歩をもたらすものである。

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1件)

① Kondo, N., Yoshino, T., Matsukage, K.N., Kogiso, T., Major element composition of an Early Enriched Reservoir: Constraints from $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ isotope systematics in the early Earth and high pressure melting experiments of a primitive peridotite. Progress in Earth and Planetary Science, 3:25
doi:10.1186/s40645-016-0099-0

[学会発表] (計6件)

① Kondo, N., Yoshino, T., Matsukage, K.N., Kogiso, T., Major element composition of Early Enriched Reservoir: constraints from $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ system and melting experiments of primitive

peridotite. 35th International Geological Congress. 2016年8月27日～9月4日、ケープタウン（南アフリカ共和国）

② Kondo, N., Yoshino, T., Matsukage, K. N., Kogiso, T., Major element composition of the missing reservoir and the early Earth differentiation. 25th Annual V.M. Goldschmidt Conference. 2015年8月16～21日、プラハ（チェコ共和国）

③ 近藤 望、芳野 極、松影 香子、吉田 健太、小木曾 哲、失われた貯蔵庫の主成分元素組成と初期地球の分化、日本地球惑星科学連合2015年大会、2015年5月24～28日、幕張メッセ（千葉県千葉市）

④ 近藤 望、芳野 極、松影 香子、吉田 健太、小木曾 哲、7GPaにおけるザクロ石カンラン岩ソリダスメルト組成と失われた貯蔵庫の主成分元素組成、2014年度日本地球化学会年会、2014年9月16～18日、富山大学（富山県富山市）

⑤ Kondo, N., Kogiso, T., Forming condition and major element composition of the hidden reservoir. 24th Annual V.M. Goldschmidt Conference. 2014年6月8～13日、サクラメント（アメリカ合衆国）

⑥ 近藤 望、小木曾 哲、『隠された貯蔵庫』の生成条件と主成分元素組成、日本地球惑星科学連合2014年大会、2014年4月28日～5月2日、パシフィコ横浜（神奈川県横浜市）

〔図書〕（計0件）
なし

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）
なし

○取得状況（計0件）
なし

〔その他〕
ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小木曾 哲 (KOGISO, Tetsu)
京都大学・大学院人間・環境学研究科・教授
研究者番号： 60359172

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし

(4) 研究協力者

近藤 望 (KONDO, Nozomi)
芳野 極 (YOSHINO, Takashi)
松影 香子 (MATSUKAGE, Kyoko)