

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 28 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23740382

研究課題名（和文） 初期生命進化のキープロセス「コマチアイト-水反応」の定量的解明

研究課題名（英文） Quantitative elucidation of “Komatiite-water interaction” as a key process of early life evolution

研究代表者

中村 謙太郎 (NAKAMURA KENTARO)

独立行政法人海洋研究開発機構・システム地球ラボ・研究員

研究者番号：40512083

研究成果の概要（和文）：本研究課題は、コマチアイトの広範な組成とその時代変化が蛇紋石化反応に与える影響を明らかにすることを目的として行われた。その結果、(1) 変質による水素の発生量は、MgO 含有量 20～25 wt% で明瞭に切り替わり、これ以上では 10mmol/kg オーダーの水素が生ずるのに対して、これ以下ではサブ mmol/kg オーダーの水素しか生じないこと、(2) コマチアイトの Al 組成は、自然に存在が知られているバーバートンタイプからゴルゴナタイプまでの範囲では、水素発生量に大きな影響を与えないこと、(3) カンラン岩は 300°C で水素発生量が最高値に達して、それより高温では水素発生量が急激に減少するのに対して、コマチアイトは 350°C で水素発生量が最高値に達し、400°C でもあまり下がらないことが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study was to elucidate the effect of wide compositional variation and its secular change on serpentinization reaction of komatiite during hydrothermal alteration. Based on thermodynamic model calculation with komatiite-water reaction experiment, the following results were obtained. (1) Generation of H₂ during serpentinization is drastically changed between 20 and 25 wt.% MgO in komatiite. (2) Variation of Al₂O₃ content from Barberton-type komatiite to Gorgona-type komatiite does not affect to amounts of H₂-generation during serpentinization. (3) Amounts of H₂ generated by serpentinization reaction reach a peak at ~350°C and are maintained at close to the peak level, at least, up to 400°C. This is significantly different from serpentinization of peridotite, which produce large amounts of H₂ at ~300°C but only small amounts of H₂ at higher temperatures (especially >350°C).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：コマチアイト・水-岩石反応・初期生命進化・水熱実験

1. 研究開始当初の背景

「海底熱水環境が地球における生命の誕生・進化の場であった」とする仮説は、地質学および生物学の各分野から得られている知見を整合的に説明できる魅力的な仮説の 1 つとして、古くから多くの研究者に支持されてきた（例えば、Baross and Hoffman, 1985; Pace, 1991）。しかし、この仮説は未だ抽象的な概念の域を超えるものではなく、その具体

的な「場の環境」や「物理・化学・生物学的諸過程」については、現世の海嶺熱水活動が漠然とイメージされているに過ぎない。しかし近年、「持続的なエネルギー代謝に基づいた生態系の成立可能性」という全く新しい視点から初期生態系を再検討した結果、酸素発生型光合成による分子状酸素蓄積以前(約 23 億年以前)の地球環境において、持続可能な生態系を形成するに足るエネルギー代謝反応

は「水素酸化二酸化炭素還元メタン生成」のみで見出された。そして、初期地球においてこのようなメタン生成微生物に支えられた生態系「ハイパースライム」が成立し得る場として「高濃度の水素を含む熱水を供給し得る、コマチアイトを基盤とした海底熱水系」が重要であることが指摘されている(Takai et al., 2006; 高井ほか, 2007)。

コマチアイトは主に 25 億年以前の地球において活発に活動した火山岩であり、高い Mg 含有量を特徴とする (Arndt, 2008)。一般的には「カンラン岩質な噴出岩」と定義されているため、しばしば組成的にカンラン岩と同一なものに見なされることがあるが、実際にはコマチアイトはカンラン岩から玄武岩にまたがる幅広い組成バリエーションを持った岩石であり、その組成はカンラン岩とは大きく異なっている (Arndt, 2008)。また、時代によって系統的に組成が変化することが知られており、例えば 35 億年前 (バーバートンタイプ)、27 億年 (ムンロタイプ)、0.9 億年前 (ゴルゴナタイプ) と時代が若くなるに従って、Mg に対する Al の含有量が増加する傾向も良く知られている (Arndt, 2008)。このことは、「コマチアイトー水反応」の生成物である熱水の組成もまた、時代と共に変わっていった可能性がある事を示唆している。したがって、このコマチアイト組成と熱水組成との関係を定量的に解明することで、はじめて初期生命の生息場である初期地球海底熱水環境と、そのコマチアイト組成の変化に対応した時代変遷を系統的に理解することが可能となると言える。

2. 研究の目的

上述のように、「海底熱水環境が地球における生命の誕生・進化の場であった」とする仮説は、様々な分野から得られた知見を統合的に説明できる魅力的な仮説の一つとして多くの研究者から支持されている。近年、地球最初の生態系とその初期進化の過程を解明する鍵が、初期地球の海底熱水系における「コマチアイトー水反応」にある可能性が見出されたことによって、地球史の初期だけに活動したこの岩石に大きな注目が集まるようになった。コマチアイトは時代によって系統的に組成が変化することから、「コマチアイトー水反応」におけるコマチアイト組成と熱水組成の関係を定量的に理解することができれば、初期生態系活動場の化学環境とその時代変遷を具体的に知ることができる。

そこで本研究では、「熱力学シミュレーション」と「水熱実験」を組み合わせた新たな手法により、(1)「コマチアイトー水反応」における元素挙動を解明し、(2) 初期地球海底熱水噴出場の化学環境とその時代変遷を復元することを目的として研究を行った。

3. 研究の方法

本研究では、以下の 3 つの研究項目を実施した。

- (1) 熱力学シミュレーションによる「コマチアイトー水反応」の網羅的解析
- (2) シミュレーション解析により明らかとなった重要相変化点の水熱実験による解析
- (3) これらの結果を用いたコマチアイト組成の時代変化に伴う熱水組成変遷の定量的復元

熱力学シミュレーションは、水ー岩石反応の解析に有効な「Reaction-Path model」

(Helgeson, 1979) を用いて、コマチアイトの組成バリエーションをすべて網羅するように行った。なお、予察的な研究からコマチアイト組成と熱水の水素濃度の関係を支配するのは (1) Si 含有量の違いによる「蛇紋石ーブルース石ー滑石」の相平衡関係変化と (2) Al 含有量の違いによる「蛇紋石ー緑泥石」の相平衡関係変化であることが明らかとなっていた。そこで本研究では、熱水組成に大きな影響を与える上記の相変化が起こる物理・化学条件 (温度・圧力・岩石組成・熱水組成) を、熱力学シミュレーションによる網羅的な解析によって絞り込むことに重点を置いた。このような水ー岩石反応の網羅的な解析を、水熱実験のみによって行うことは、膨大な時間と手間がかかってしまうために現実的ではないが、本研究では熱力学シミュレーションを効果的に用いることで、これらの水ー岩石反応の解析を効率的に行うことが可能となった。

水熱実験は、熱力学シミュレーションにおいて見出される「重要な相変化の起こる条件」に的を絞って行い、相転移の温度・圧力・組成条件を決定した。これによって、水熱実験の手間を最小限に抑えながら、シミュレーション単体では成し得ない高い精度と確度でコマチアイト組成と熱水組成の関係を明らかにすることができる。実験には、ディクソン型オートクレーブを用いた。この実験装置は、純金製の反応容器と純チタン製のクロージャーを用いることにより、海水を用いた高温・高圧の実験系においても金属の腐食による妨害なしに水ー岩石反応の解析が可能である。すべてのコマチアイト試料は二次的な変成作用によって構成鉱物が変わってしまっているため、雰囲気をコントロールした溶解炉で一度コマチアイト試料を融かした後、急冷することによってコマチアイトガラス復元方法 (Yoshizaki et al., 2009) を用いて新鮮なコマチアイトガラス試料を作成し、これを実験に供した。

コマチアイトの組成は、時代とともに変化

していったことが知られている。本研究で注目したのは、玄武岩からカンラン岩の範囲に跨るコマチアイトの広い Mg 組成と、とともに変化するコマチアイトの Mg 含有量に対する Al 含有量の上昇である。これらの Mg 含有量の減少と Al 含有量の上昇という条件は、「コマチアイト-水反応」における「蛇紋石化反応」から「緑泥石化反応」への相変化を誘発するため、その時点で水素発生量が劇的に減少する可能性が考えられる。熱水の化学組成（特に水素濃度）とその熱水生態系を支える化学合成微生物のエネルギー代謝の間には、化学的関係性があることがわかっている (Takai and Nakamura, 2010) ことから、その変化がどこで起きるのかを明らかにすることは非常に重要であり、初期地球における海底熱水組成の時代変遷が当時の海底熱水生態系のエネルギー代謝様式にどのような影響を与えたかについての有力な手がかりを与えてくれる可能性がある。

4. 研究成果

本研究によって、以下のことが明らかとなった。

- (1) 変質による H₂ の発生量は、MgO 含有量 20~25 wt% で明瞭に切り替わることが明らかとなった。これ以上の MgO 含有量を持つコマチアイトは、熱水中に 10mmol/kg オーダーの水素を生ずるのに対して、これ以下のコマチアイトもしくは玄武岩質コマチアイトではサブ mmol/kg オーダーの水素しか生じない。このことから、変質という観点から見たコマチアイトと玄武岩の境界は、岩石学上の定義である MgO=18wt% よりやや Mg に富んだ 20-25wt% にあると言うことができ、岩石学的にコマチアイトと分類されていても水素を大量に発生しない場所も存在したことを示唆する。また、太古代から原生代に良く見られる Mg にやや乏しいコマチアイト（玄武岩質コマチアイト）は、変質による水素発生にはまったく関与しなかった可能性が高い。
- (2) コマチアイトの Al 組成は、バーバートンタイプからゴルゴナタイプまでの範囲では、水素発生量に大きな影響を与えないことがわかった。これは当初の予測とはやや異なっていた。このことから、時代によるコマチアイトの Al 組成変化が、変質による水素の発生量には顕著な影響を及ぼさなかった可能性が高いと考えられる。ただし、ゴルゴナタイプよりわずかに Al に富んだコマチアイトでは、蛇紋石化よりも緑泥石化が卓越し、水素発生量が明瞭に低くなることもわかった。したがって、水素発生の多寡を

決める Al 組成の閾値は、ほぼゴルゴナタイプのトレンド上に存在していると考えることが出来る。

- (3) カンラン岩は 300°C で水素発生量が最高値に達して、それより高温では水素発生量が急激に減少することが知られている (McCollom and Bach, 2009)。これは、SiO₂(aq) の活動度が低いカンラン岩-水系においては、300°C を超えるとカンラン石が安定となって蛇紋石化を起こすためのカンラン石の分解が進まなくなるためである。これに対して、コマチアイトは 300°C を超えても水素発生量が減らず、350°C で水素発生量が最高値に達した後も、400°C まで水素発生量がほとんど下がらないことがわかった。これは、コマチアイト-水系において、カンラン岩-水系と異なり SiO₂(aq) の活動度が高温でも高く維持され続けるために、300°C をはるかに超えてもカンラン石が不安定にならないためであると考えられる。一般的に、海底熱水系の水-岩石反応場の温度は約 400°C まで上がると考えられていることから (German and Von Damm, 2003)、変質による水素の発生には現世のカンラン岩型熱水系よりも、初期地球のコマチアイト型熱水系の方が有利だった可能性がある。このことが、熱水系に生息する化学合成微生物の活動にも影響を与えていたかもしれない。

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 2 件)

- ① Kato, S., Shibuya, T., Nakamura, K., Suzuki, K., Rejishkumar, V. J., and Yamagishi, A. (2013): Elemental dissolution experiments of basaltic rocks with ultra-pure water at 340°C and 40 MPa in a newly developed flow-type hydrothermal apparatus. *Geochemical Journal*, **47**, 89-92. (査読有)
- ② 中村謙太郎 (2012): 海底熱水系における水-岩石反応の地球化学. *地球化学*, **46**, 1-33. (査読有)

[学会発表] (計 5 件)

- ① Shibuya, T., Yoshizaki, M., Suzuki, K., Shimizu, K., Nakamura, K., Omori, S., Takai, K., and Maruyama, S.: Experimental study on H₂ generation during serpentinization of komatiite. American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, 6 December 2012.

- ② 吉崎もと子・渋谷岳造・鈴木勝彦・清水健二・中村謙太郎・大森聡一・高井研・丸山茂徳：コマチアイトの熱水変質実験による水素発生過程の解明；日本地球化学会（九州大学，2012. 9. 12）
- ③ 吉崎もと子・渋谷岳造・鈴木勝彦・清水健二・中村謙太郎・大森聡一・高井研・丸山茂徳：コマチアイトの熱水変質実験による水素発生過程の解明；日本地球化学会（北海道大学，2011. 9. 14）
- ④ 中村謙太郎・高井 研・加藤泰浩：太古代海底熱水変質作用の地球化学－当時の大気－海洋環境への示唆－；日本地球惑星科学連合（幕張メッセ国際会議場，2011 5. 24）
- ⑤ 吉崎もと子・渋谷岳造・鈴木勝彦・清水健二・中村謙太郎・大森聡一・高井 研・丸山茂徳：コマチアイトの熱水変質実験による水素発生；日本地球惑星科学連合（幕張メッセ国際会議場，2011. 5. 24）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 謙太郎 (NAKAMURA KENTARO)
独立行政法人海洋研究開発機構・
システム地球ラボ・研究員
研究者番号：40512083

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし