

初期地球進化解読

Decoding of the early earth's evolution

課題番号：26220713

小宮 剛 (TSUYOSHI KOMIYA)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授



研究の概要

地球は約45億年の長い歴史をもつ、複雑多様に進化した惑星である。しかし、その最初の5億年を直接記録する地質体や岩石は現存しない。本研究の目的は、その昏冥の時代の固体地球と表層環境の進化をあえて物質学的研究にこだわり読み解く。黎明期の進化がその後を決定付けたことを考えると本研究は地球型惑星の進化の解明に重要な貢献をすることが期待される。

研究分野：地球科学、地質学

キーワード：地球史、地球化学、固体地球、地球生物学

1. 研究開始当初の背景

地球誕生から現存する最古の地質体の年代までの時代は冥王代と呼ばれ、地球に地質体や岩石が残されていない未知の時代とされる。そして、この時代に微惑星の衝突による地球形成、ジャイアントインパクト、核形成や後期隕石重爆撃など、その後の地球史を特徴付ける多くのイベントが起きたとされるが、それらの証拠の多くは隕石や他天体の研究、数値計算に基づき、地球自身から得られたものではない。最近、私たちのラブラドル・サグレック岩体やアカスタ片麻岩体の地質調査によって、太古代初期の地質体にそれより古い岩石が包有岩などとして残されていることがわかってきた。また、高精度同位体分析法の急速な進歩によって、冥王代のうちに親元素が消滅した、娘元素の同位体分析が可能となってきた。本研究では地質学、鉱物学や同位体地球化学の手法を統合して、初期地球進化を物質学的に解読する。

2. 研究の目的

表1は初期地球における主要な10の問題をまとめたものである。その中で、最初の生命や核の形成時期、金属鉄の分離深度といった問題は物質学的には解明できない問題である。本研究では、物質学的に解を得ることができる残りの8つの問題について、新しい知見を得ることを目的に、研究に着手した。

表1：初期地球における10の問題

▲	地球の材料物質
②	マグマオーシャンによる分化と層構造の形成
③	初期マントル対流と層構造の崩壊
④	核の形成時期と金属鉄の分離深度：核内の軽元素や放射性元素の種類と量
⑤	強親鉄性元素存在度：後期重爆撃とその後のマントルの均質化
⑥	マントル熱史と組成や酸化還元の変化
⑦	プレートテクトニクス開始時期の下限と大陸成長
⑧	海洋出現時期の下限とその組成の経年変化。宇宙からの水の添加と宇宙への逃散
⑨	最初の生命の出現とその特徴
⑩	初期生命の特徴とその多様性、生態系
×	原理的に物質学的研究では解けない問題
△	一部可。
○	実証、推定可能の問題

3. 研究の方法

初期地球における10大問題の解明に向け、地質学、岩石・鉱物学と地球化学をシームレスに融合し、以下の7つの手順で研究計画を進める。①初期地球の重要地質体（西グリーンランド、アカスタ、ヌブアギツク、ラブラドル、南ア、北中国、ジャックヒルズ礫岩など）の重点調査に基づくプレートテクトニクスの証拠の探索と試料採取。②採取した岩石試料の顕微鏡観察と微量元素組成を基に、初生情報を残すベスト試料の選別。③ベスト試料の $\mu^{142}\text{Nd}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ や白金族元素濃度から初期地球のマントル進化を推定。特に消滅核種 ($\mu^{142}\text{Nd}$) を用いた冥王代の物質分化の定量化の新規開発。④冥王代の隕石衝突ジルコンの年代分布から後期隕石重爆撃を実証。冥王代ジルコンの包有物の分析から冥王代の固体地球と海洋進化解読。⑤最古の堆積岩（縞状鉄鉱層や炭酸塩岩）の微量元素組成から初期地球の熱水・海水組成を推定。⑥太古代の超塩基性岩や塩基性岩をホストとする海洋底変成作用の研究から熱水組成を推定し、初期生命の生息環境を復元。⑦最古の炭質物の同位体組成や微量元素組成から生命の最古の証拠を探索し、その生命種を同定。

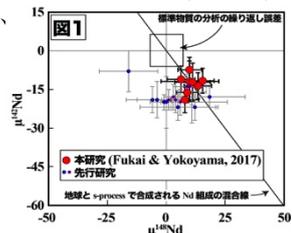
4. これまでの成果

本研究は①初期地球進化解読に向けた地球化学的手法の開発と地球史試料への実用化、②地球史試料の物質学的研究に基づく初期地球進化解読の二つの柱からなる。

①地球化学的手法の開発と実用化

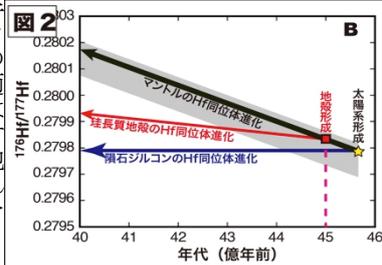
a) ^{146}Sm - ^{142}Nd 同位体系の分析手法の開発

消滅核種 ^{146}Sm を親に持つ ^{142}Nd 同位体の分析は、国内はもとより、世界的にも数カ所ではしか実用化されていない極めて困難な分析である。本研究ではそれを国内で初めて実用化した。さらに、従来の分析に比べて、高精度かつ高確度の



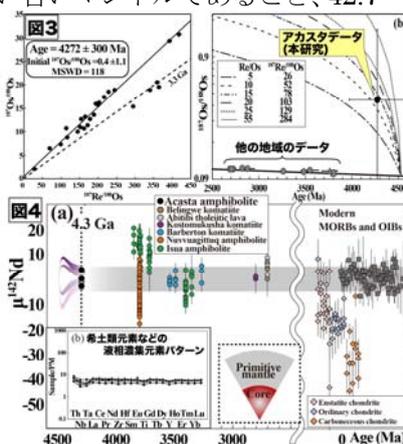
分析を可能にした(図1)。

⑤ジルコン U-Pb 年代と Hf 同位体の同時分析
飯塚らが世界に先駆けて開発したジルコンの U-Pb 年代と Hf 同位体の同時分析の手法を改良し、その手法をユークライト隕石中のジルコンに適用し、地球で45億年前に珪長質地殻が形成されたことを示した(図2)。



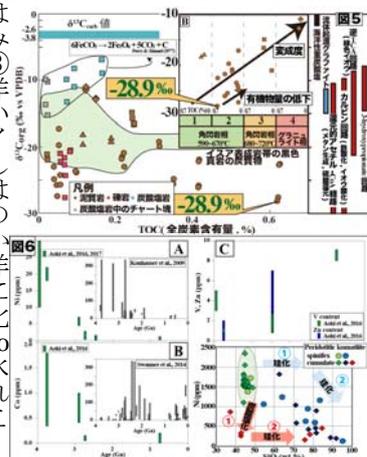
②物質学的研究に基づく初期地球進化解読

①アカスタ片麻岩中の苦鉄質岩の地球化学
その苦鉄質岩から 42.7 億年前の Re-Os アイソクロン年代、非常に高い Os 初期値 (図3)、コンドライト的な希土類元素や液相濃集元素パターン、Nb と Ta の負異常、¹⁴²Nd に異常が見られないといった結果が得られた(図4)。その結果、核形成時に Nb や Ta が金属鉄に分別され、マントルは相補的にそれらに枯渇したこと、Re に比べて Os の方がより核に濃集するため、後期隕石重爆撃前のマントルは非常に高い Os 同位体値を持っていたこと、この苦鉄質岩のソースマントルは後期隕石重爆撃の影響を受けていない古いマントルであること、42.7 億年前には地球形成時のマグマの一次シアンによる大規模均質化されたこと、地球の材料物質は ¹⁴²Nd においてコンドライト質ではないことが新たに分かった。



⑥初期地球表層環境解読と最古生命の痕跡

①最古の堆積岩から低 δ¹³C 値を持つ炭質物の発見(図5)、②初期太古代の縞状鉄鉱層は Ni, Co, V に富み Zn と U に乏しい、③海洋底コマチアイト中の Ni や Co は通常の変成作用では動かさず、珪化・炭酸塩化によって顕著に熱水に溶出される、といった結果が得られた(図6)。その結果、①最古の生命の痕跡、②初期太古代の海洋は Ni, Co, V に富み Zn, U に枯渇、③初期太古代海洋に Ni や Co が多いのは、コマチアイトが多く存在していたからではなく、海洋中の CO₂ 濃度が高かったために、海洋底変成作用時に炭酸塩化や珪化が起き、Ni や Co が地殻から熱水を経たためと分かった。



5. 今後の計画

イスアやヌブアギツク地域の地質調査を行う。イスア地域は私たちが約 20 年前に最初に、最古の付加体やプレートテクトニクスの証拠を見つけた地質体である。しかし、初期太古代にプレートテクトニクスが起きていたかは、初期地球の研究において、今なおホットな問題で議論が収束しない。本研究で、そのプレートテクトニクスの証拠を補強する。また、近年の研究によって、より初生的な構造を残す炭酸塩岩などが発見されているので、それらを採取し、初期太古代の表層環境解読をする。本研究によって、ラブラドルや北中国など、続々と最古の苦鉄質岩が見つかった。それらの ¹⁴²Nd などを分析し、本研究で得られつつある固体地球の初期進化解読を補強し、確固としたものにする。本研究によって、最古の生命の証拠が得られた。今後、N, Fe, S 同位体や微量元素分布からその生命種の特定を目指す。また、冥王代ジルコン中のアパタイトなどの包有物から Sr 同位体などのマントル進化や水素同位体に基づき水の起源を解明する。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- ①受賞等
Island Arc Award 2016 (日本地質学会)
- ②発表論文等
査読付き国際学術誌 (本研究に直接関連するもののみ) : 51 件
国際学会 (招待講演も含む。ただし、不定期の国際シンポジウムや国際ワークショップは除く) : 8 件
査読付き国内学術誌、国内学会や不定期の国際シンポジウムや国際ワークショップは多数あるため割愛

以下にその代表的な論文を紹介する

- [1] Kagami, S. & Yokoyama, T., 2016, Chemical separation of Nd from geological samples for chronological studies using ¹⁴⁶Sm-¹⁴²Nd and ¹⁴⁷Sm-¹⁴³Nd systematics. *Analytica Chimica Acta* 937, 151-159.
- [2] Komiya, T., Yamamoto, S., Aoki, S., Sawaki, Y., Ishikawa, A., Tashiro, T., Koshida, K., Shimojo, M., Aoki, K. & Collerson, K.D., 2015, Geology of the Eoarchean, >3.95 Ga, Nulliak supracrustal rocks in the Saglek Block, northern Labrador, Canada: The oldest geological evidence for plate tectonics. *Tectonophysics* 662, 40-66.
- [3] Koshida, K., Ishikawa, A., Iwamori, H. & Komiya, T., 2016, Petrology and geochemistry of mafic rocks in the Acasta Gneiss Complex: Implications for the oldest mafic rocks and their origin. *Precambrian Research* 283, 190-207.
- [4] Shimojo, M., Yamamoto, S., Sakata, S., Yokoyama, T.D., Maki, K., Sawaki, Y., Ishikawa, A., Aoki, K., Aoki, S., Koshida, K., Tashiro, T., Hirata, T., Collerson, K.D. & Komiya, T., 2016, Occurrence and geochronology of the Eoarchean, ~3.9 Ga, Iqaluk Gneiss in the Saglek Block, northern Labrador, Canada: Evidence for the oldest supracrustal rocks in the world. *Precambrian Research* 278, 218-243.
- [5] Izuka, T., Yamaguchi, T., Hibiya, Y. & Amelin, Y., 2015, Meteorite zircon constraints on the bulk Lu-Hf isotope composition and early differentiation of the Earth. *PNAS, USA*, 112, 5331-5336.

ホームページ等

<http://ea.c.u-tokyo.ac.jp/earth/Members/komiyaya.html>