

令和元年6月17日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220713

研究課題名（和文）初期地球進化解読

研究課題名（英文）Decoding of the early earth's evolution

研究代表者

小宮 剛 (KOMIYA, Tsuyoshi)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：30361786

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 151,800,000円

研究成果の概要（和文）：地球進化を考える上で、冥王代の地球を理解することは非常に重要であるが、地球には40.3億年前以前の地質記録が残されておらず、難しいとされてきた。そこで、本研究では ^{146}Sm - ^{142}Nd 同位体体系の分析法の開発、初期大古代地質体の地質精査と岩石試料の化学組成や同位体分析を通じ、初期地球進化を解読した。その結果、42.7億年前の苦鉄質岩や39.5億年前の堆積岩や溶岩といった最古岩石、39.5億年前の堆積岩中の地球最古の生命の証拠、39.5億年前のプレートテクトニクスおよび大規模初期分化とその後の均質化の証拠を発見した。これらの発見は従来の記録を大幅に塗り替え、地球の黎明期進化の重要な知見を与える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の地球では磁場や火山活動があり、非常に多種多様な生命が生息する。こうした地球がどのように誕生し、進化してきたのかを知ることは人類共通の命題であろう。本研究はその後の地球史を決定づけた初期地球の進化を解読することで、この問題に取り組んだ。その結果、これまで国内では分析することのできなかつた ^{146}Sm - ^{142}Nd 分析法の確立、地球最古の岩石や生命およびプレートテクトニクスの証拠や初期大規模分化と比較的早期の均質化の新知見の発見といった多くの成果を得ることができた。これらの成果は国内のみならず海外の新聞やNHKなどのメディアにも取り上げられ、日本のみならず世界全体の教養知の涵養に貢献した。

研究成果の概要（英文）：It is very important to understand the Hadean Earth for decoding the history of the earth. However, it is difficult to directly study the Hadean Earth because geologic record over 4.03 billion years before is not preserved yet. Thus, we tried to decode the evolution of the early Earth through establishment of an analytical method of ^{146}Sm - ^{142}Nd isotope system, geological investigation of the Early Archean geologic terrains, and chemical and isotopic analysis of the Early Archean rock samples. We found the oldest rocks of 4.27 Ga mafic rocks and 3.95 Ga supracrustal rocks, evidence for the plate tectonics and organism from the 3.95 Ga Nulliak supracrustal belt, and the large-scale early differentiation and later homogenization. All of them are new discoveries, and give a significant insight into early earth evolution.

研究分野：地質学

キーワード：初期地球 冥王代 初期大古代 消滅核種同位体進化解読 初期地球表層環境進化 生命必須元素 最古の岩石 最古の生命の痕跡

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

地球は約 45.6 億年前に微惑星衝突、マグマオーシャン、核形成やジャイアントインパクトなどを経て誕生したとされる。しかし、現存する最古の地質体や岩石はアカスタ片麻岩体の 40.3 億年前の花崗岩質片麻岩とされるため、地球誕生後最初の約 5 億年間の歴史は地質記録として残されていない。そのため、この時代は冥王代とよばれ、地球史における未開の時代とされてきた。これまでの冥王代研究では、地球史に関する直接的な証拠を与える地質記録が残されていないため、主に月の岩石や隕石などの他の天体の化学組成や数値計算によって、間接的にこの時代の地球進化が読み解かれてきた。しかし、それらの研究では、一般的な解を得ることはできても、真に地球で起きたことや地球に特異なイベントを理解することはできない。特に、地球マントルの初期分化の規模や時期、後期隕石重爆撃、プレートテクトニクスの開始時期、初期地球の大陸成長、最古の生命及び初期地球の表層環境といった地質・生命現象は地球の初期進化を紐解く上で最も重要な制約条件を与えるが、それらはいまだ明らかにされていない。そこで、こうした初期地球のイベントを直接的な方法で解読することが、今強く切望されている。

2. 研究の目的

地球は多種多様な生命が躍動する生命溢れる惑星であり、磁気圏、大気、海洋、地殻、マントルおよび核など極めて多岐に分化した活動的な惑星である。このような地球・生命進化の歴史を解読する上で、その出発点となる初期地球進化を紐解くことは極めて重要である。しかし、上述のように、地球に残された地質記録は 40.3 億年前までで、それ以前の記録はほぼ失われている。そのため、従来の初期地球史の解読は主に隕石や月の岩石学や地球化学的研究と数値計算をもとにされてきた。本研究は、地球に岩石試料や地質体が残されていない冥王代～初期太古代の初期分化を初期太古代に残された極めて稀少な地球史試料を地質学、鉱物学、地球化学、地球生物学の研究に基づき解読するものである。

3. 研究の方法

地質記録の乏しい初期地球を物質学的研究に基づき研究するため、従来の研究にはない独創的な研究手法を組み合わせる。一つ目は、アカスタ片麻岩体、カナダ・ラブラドル・ヌリアック表成岩帯、西グリーンランド南部・イスア表成岩帯、カナダ・北ケベック・ヌブアギツク表成岩帯といった初期大古代の地質体を地質精査し、それぞれの地質構造、出現する岩石の化学組成や年代を調べ、冥王代や初期大古代の情報を引き出す。二つ目は 1.03 億年の半減期を持つ ^{146}Sm - ^{142}Nd 系などの消滅核種同位体系を用いた方法である。一般に、古い地質体の岩石は形成時のイベントのみならず、その後の変成作用、テクトニックなイベント（大陸分裂や衝突など）、火成作用などを被り、その際に元素移動や同位体比の改変の影響を受け、初生的な情報を失う場合が多い。一方、この消滅核種同位体系を用いた研究では、冥王代のうちに親核種の ^{146}Sm が消滅してしまうため、その後のイベントによって、Sm/Nd 比が変化しても $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比には影響しない。そのため、冥王代のイベントの情報を選択に引き出すことができる。ただし、この化学分析法は、いまだ国内では確立されていないので、その分析法を確立するところから始める必要がある。

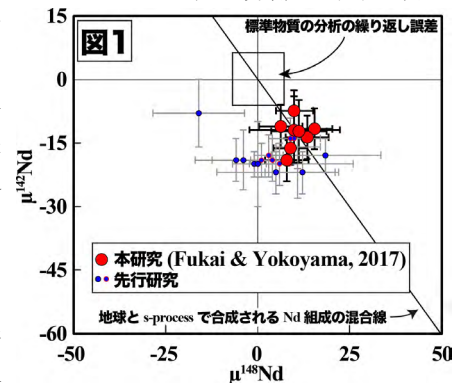
4. 研究成果

本研究の成果は、① ^{146}Sm - ^{142}Nd 系とジルコンの Lu-Hf 系の二つの同位体系の分析法の開発、②地質学的・地球年代学的手法による初期太古代物質の探索、③初期大古代の地質構造から推定される初期地球でのプレートテクトニクスおよび④初期大古代試料の化学組成や同位体組成に基づく初期地球のマントルや表層環境、生命の進化の解読の三つからなる。

①分析法の開発と地球史試料や隕石試料への応用について

初期地球試料の $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 同位体分析に向けて、分析技術の開発を行った。まず、岩石から Nd を化学分離する方法を抜本的に見直した。Nd を TIMS で同位体分析する際には、同重体干渉を起こす Ce および Sm を完全に除去する必要がある。中でも Ce と Nd の相互分離は非常に難しく、従来は α -HIBA を用いるイオン交換法や、溶媒抽出法が適用されてきたが、Nd の回収率が低くなる (< 80%) などの問題があった。そこで、 KBrO_3 を用いて試料溶液中の Ce を 3 価から 4 価に酸化し、それを Eichrom 社の LN Resin に通すことで、3 価の Nd との相互分離を行う化学分離技術を新たに開発した。この技術により $\text{Ce}/\text{Nd} < 1.2 \times 10^{-5}$ 、Nd 回収率 > 92% を実現し、初期地球試料の超高精度 Nd 同位体分析に適用可能な分離法を立ち上げた。この研究成果を著名な国際誌、Analytica Chimica Acta に発表した (Kagami and Yokoyama, 2016)。

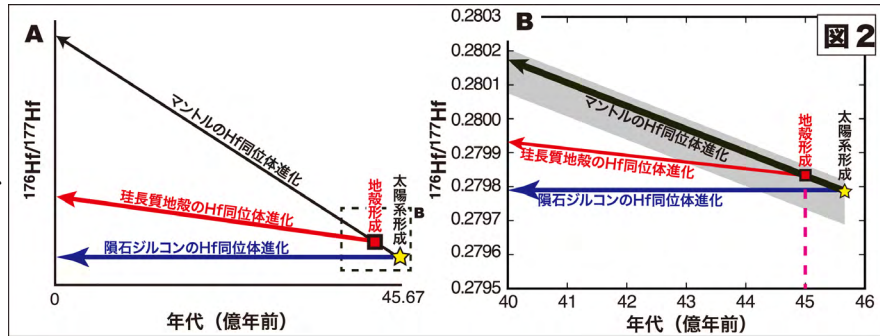
次に、TIMS を用いた超高精度 Nd 同位体分析法の技術開発を行った。従来、Nd 同位体比は 1 つの cup configuration により長時間測定する static 法や、複数の static 法を組み合わせる multi-static 法により測定されてきた。しかし、これらの方法は検出器である Faraday cup が長期の使用により劣化すると、測定される Nd 同位体比がシフトするという問題があった。そこで、検出器の劣化をほぼキャンセル可能な方法である dynamic 法の開発を行った。その結果、長期間の測定において static 法では



$^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比が 100 ppm 以上の変動を見せるのに対し、dynamic 法では ± 5 ppm の繰り返し再現性で測定することができた。これは世界最高レベルの分析精度であり、上述した Nd の化学分離法と合わせ、初期地球試料の超高精度 Nd 同位体分析をルーチンで測定可能な技術を立ち上げることに成功した。この研究成果を著名な国際誌、International Journal of Mass Spectrometry に発表した (Fukai et al., 2017)。そして、先行研究では非常にばらつきが大きく、地球の ^{142}Nd 同位体が s-process によるのか判定ができなかったが、本研究の高精度・高確度分析の結果、s-process のトレンド上にあることを示すことができた (図 1)。本研究で開発した ^{142}Nd 同位体分析を最古の地球の岩石試料に適用した (後述)。

ジルコンの Hf 同位体と U-Pb 年代の同時分析を確立し、それを隕石へ応用するなどして、初期地球の分化 (マグマオーシャン) の時期と地球最古の珪長質地殻の形成について言及した (Iizuka et al., PNAS 2015)。Hf は質量数 174, 176, 177, 178, 179, 180 の 6 つの安定同位体をもち、 ^{176}Hf の存在量は ^{176}Lu の放射壊変 (半減期 357 億年) により太陽系史を通して増加してきた。一般に、岩石中の現在の ^{176}Hf 存在度 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$) は、その岩石の Lu/Hf と形成された時間を反映する。例えば、石英や長石鉱物に富む珪長質な岩石から成る地殻は低い Lu/Hf をもつため、その $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ の成長は地殻の起源物質であるマントルに比べ遅くなる (図 2A)。したがって、古い珪長質地殻ほど、現在の $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ は低い。この性質を利用し、地殻物質中の現在の Hf 同位体組成から、地殻形成年代を推定することができる。しかし、Hf 同位体組成から地球の最古地殻の形成年代を精確に決定するには、太陽系形成時の $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ を知る必要があった。

そこで我々は、小惑星ベスタから飛来したユークライト隕石に含まれるジルコン鉱物に着目した。小惑星ベスタの形成は、太陽系形成直後であることが知られている。また、ジルコンは非常に低い Lu/Hf をもつため、その結晶化時の $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ を保持できる (図 2B)。したがって、ユークライト隕石中のジルコンには太陽系初期の $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ が記録されているはずである。そこで我々は、ユークライト隕石中ジルコンの高精度 Hf 同位体分析を世界で初めて行うことにより、太陽系初期の $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ を決定した。その結果、地球最古の珪長質地殻が 45 億年前に形成されたこと、つまり、その当時にはマグマオーシャンが冷え固まっていたことを明らかにした。



② 初期太古代物質の探索

本研究では、38 億年前の以前の岩石が産するとされるアカスタ片麻岩体、カナダ・ラブラドル・ヌリアック表成岩帯、西グリーンランド南部・イスア表成岩帯、カナダ・北ケベック・ヌブアギツク表成岩帯および北中国アンシャン地域の東山岩体の地質調査を行った (図 3)。特に、アカスタ片麻岩体、サグレック岩体とアンシャンにおいて、従来より古い岩石を発見した。

図 3: 38 億年前以前の地質体の場所とその地域の最古岩石の形成年代

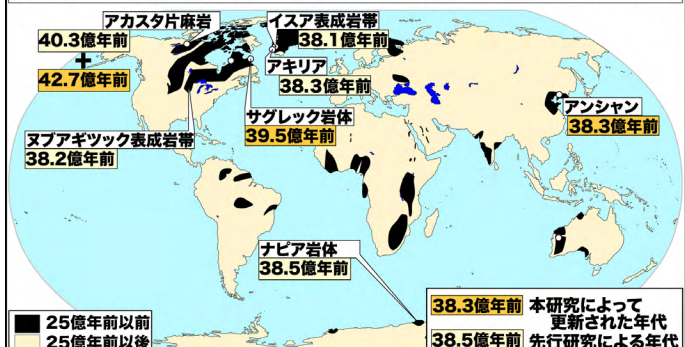
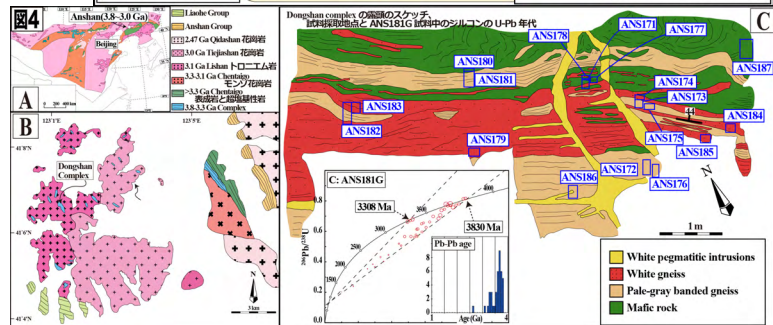


図 4 は北中国アンシャン地域の Dongshan (東山) 岩体の岩相スケッチである。出現する地質構造解析の結果、緑色で塗色した苦鉄質岩が最も古く、次に肌色で示した花崗岩質片麻岩が古い。花崗岩質片麻岩 (ANS181) 中のジルコンの U-Pb 年代測定の結果、この岩石の火成年代として、38.3 億年前の形成年代が得られた。苦鉄質岩はこれより古いことから、38.3 億年前以前に生じたと考えられる。この年代は、現在アジア地域で最も古い岩石形成年代である。



③ 初期大古代の地質構造から推定される初期地球でのプレートテクトニクス

図 5 は本研究で作成したイスア地域の最新の地質図である。従来の地質図に比べて、チャートの分布と泥質岩や黒色頁岩の分布がより詳細になった。特に、縞状鉄鉱層の下位に黒色頁岩が産することが新たに分かった。これまでイスア表成岩帯の縞状鉄鉱層は玄武岩の上に累重するため

アルゴマ型であるとされてきた。今回の地質調査の結果は、従来の見解とは異なりスペリオル型であることを示唆する。一般に、スペリオルタイプの縞状鉄鉱層や黒色頁岩は堆積時の海水の化学組成を記録しているため、それらの化学組成は当時の表層環境を推定するのに役立つであろう。Komiyama et al. (1999)ではチャートの分布からイヌア表成岩帯がデュープレックス構造をなしており、そのデュープレックス構造と海洋プレート層序の存在から、プレートテクトニクスが38億年前にすでに機能していたことを示唆した。これは最古のプレートテクトニクスの証拠とされる。その後の研究で、チャートの分布に対して異なる考えを示す研究もあったが(例: Nutman & Friend 2009)、本研究の結果はKomiyama et al. 1999を補強する。

図6はラブラドル・ヌリアック表成岩帯の地質図である。従来の研究では約37億年前の地質体とされていたが、本研究によって約39億年前の地質体であることが明らかになった。加えて、泥質堆積岩と苦鉄質溶岩の分布から、本地域もデュープレックス構造をなすことがわかった。その産状は、プレートテクトニクスは39億年前にすでに機能していたことを示唆する。

図7はアカスタ片麻岩体に産する苦鉄質岩の

図5: イヌア表成岩帯の地質図

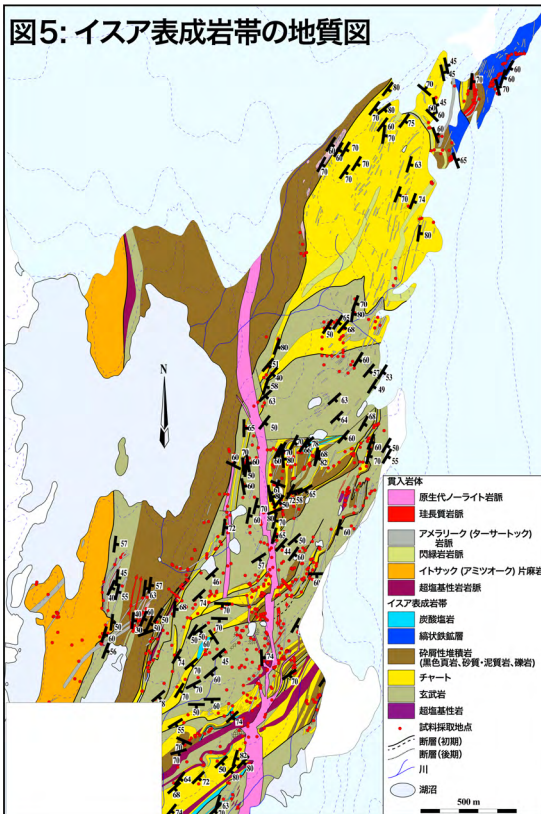
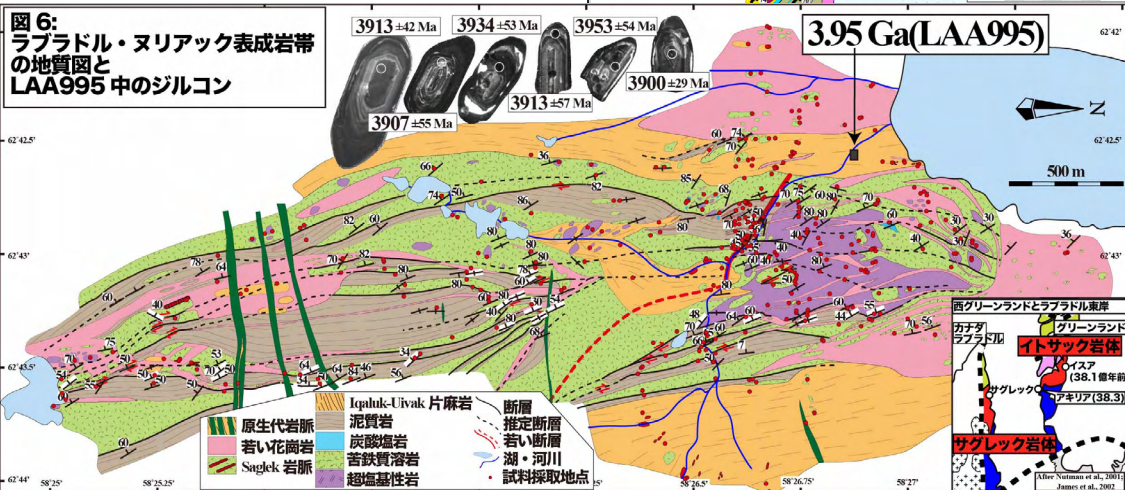


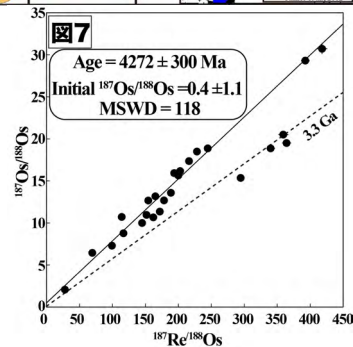
図6: ラブラドル・ヌリアック表成岩帯の地質図とLAA995中のジルコン



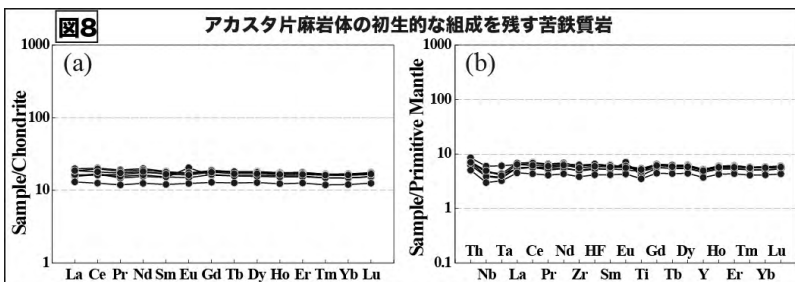
Re-Os アイソクロンである。これまでの私たちの地質学的研究によって(例: Iizuka et al., 2007)、この苦鉄質岩は40.3億年前の年代を持つ花崗岩質片麻岩より古いことが示唆されていたが、数値年代が得られていなかった。本研究によって、この苦鉄質岩が42.7億年前の年代を持つことが明らかにされた。これは冥王代の年代であり、現存する最古の年代となる。

④初期大古代試料の化学組成や同位体組成に基づく初期地球のマントルや表層環境、生命の進化の解説

図8はアカスタ片麻岩体の苦鉄質岩の希土類元素と微量元素のパターンである。苦鉄質岩はフラットな希土類元素パターンとNbやTaに枯渇した特徴を持つことから、そのソースマントルは核形成時にNbとTaの分別を受け、その後混合し、未分化な組成を持ったと考えられる(Koshida et al., 2016)。また、この苦鉄質岩は初期太古代の苦鉄質岩に比べて、極めて高いOs同位体の初期値を持つ(図9)。



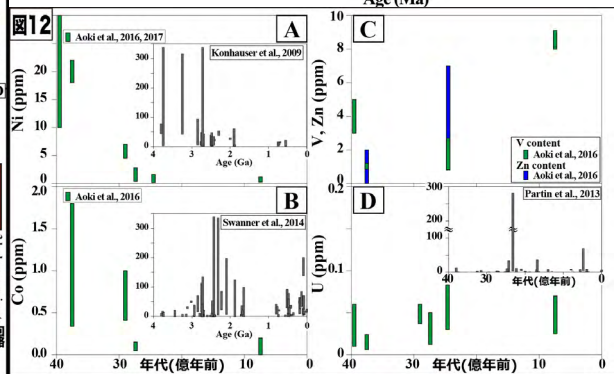
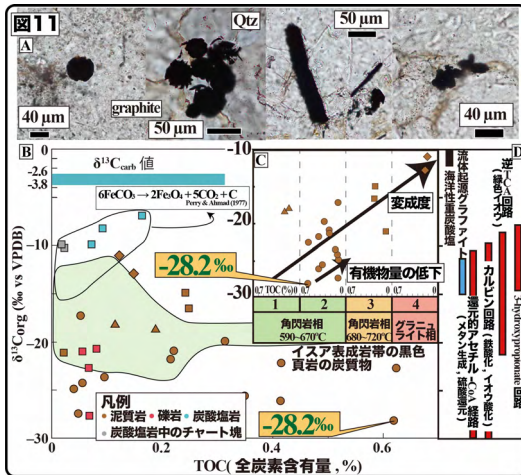
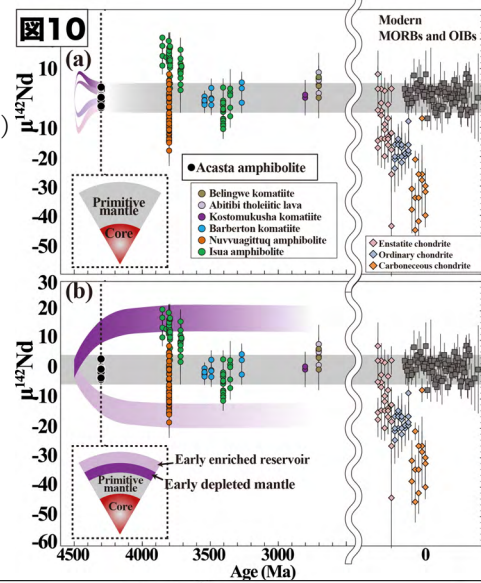
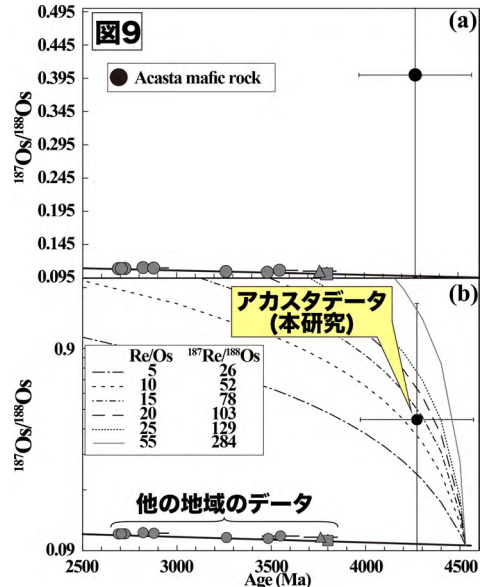
このことは、核形成時のReとOsの大規模な分別が起きたことと、後期隕石重爆撃による混合を受けていないことを示唆する。つまり、後期隕石重爆撃以前に形成されたことを示す。また、苦鉄質岩は¹⁴²Ndの異常を持った



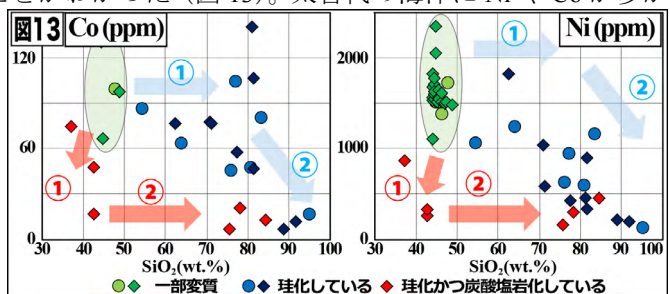
ない。この苦鉄質岩の希土類元素パターンがフラットで、未分化マンタルの特徴を持つことと合わせると、この苦鉄質岩が 42.7 億年前には再均質化されたマンタルか (図 10a)、大規模な分化を免れたマンタルから生じたことを示唆する (図 10b)。そして、いずれの結果も、地球の原材料物質は ^{142}Nd 値において炭素質コンドライトとは異なるものであったことを示す。

カナダ・ラブラドルヌリアック表成岩に産する地球最古(>39.5 億年前)の堆積岩 (泥質岩、礫岩、炭酸塩岩) から数十~数百ミクロンの大きさの棒状、不定形や球状の炭質物を発見した。(図 11A)。それらの有機炭素同位体値は-28.2~-6.9‰、伴う炭酸塩岩の無機炭素同位体値は-3.8~-2.6‰であった。また、泥質岩の有機炭素同位体値は TOC 量と負の相関、変成度とは正の相関が見られた (図 11B, C)。炭酸塩岩の無機炭素同位体値は一般に後の変質によって低くなることから、当時の海洋中の炭酸イオンの $\delta^{13}\text{C}$ 値は最低でも-2.6‰であったと考えられる。また、有機炭素同位体同位体比が TOC とは負の相関 (図 11B)、変成度とは正の相関が見られることから (図 11C)、変成作用時の有機物の分解によって、軽い同位体 (^{12}C) が選択的に失われたと考えられる。その場合、炭質物の炭素同位体比の初生値は-28.2‰以下であったと考えられる。海洋の無機炭酸イオンと有機炭素の炭素同位体値の差の絶対値 (炭素同位体分別係数) が 25.6‰以上となることから、その有機炭素は還元のアセチル-CoA 経路やカルビン回路等の代謝経路を経て生じたと考えられる (図 11D)。これまで 38.1 億年前の堆積岩中の炭質物が最古の生命の証拠とされてきたので、それを 1 億年以上更新する。

ヌリアック表成岩類やイスア表成岩帯の縞状鉄鉱層や炭酸塩岩の遷移元素濃度 (Ni, Co, V, Zn, U) から海洋のそれらの元素の経年変化を推定した。初期太古代の海洋は Ni, Co, V に富み、Zn や U に枯渇していたが、約 30 億年前から Ni と Co は減少し、Zn と U は増加したことがわかった (図 12)。先行研究では Ni は大酸化イベント (25~22 億年前) に減少し、Co は大酸化イベント頃に急激に増加した



(各図中の経年変化図)。その原因として、先行研究では碎屑性物質などの影響を過小評価していたことが挙げられ、各元素の濃度を高めに見積もっていたためと考えられる。また、太古代の海洋底玄武岩やコマチアイトの化学組成から、熱水変質による炭酸塩化や珪化時の元素移動を推定した。その結果、Ni や Co は通常の変成作用ではあまり移動せず、炭酸塩化や珪化に伴い、大規模に移動し、海洋地殻から流出することがわかった (図 13)。太古代の海洋に Ni や Co が多かった理由として、この海洋底の玄武岩やコマチアイトの熱水変質に伴う元素流出が考えられる。ところで、炭酸塩化や珪化は太古代の大気・海洋中の CO_2 濃度が高かったために起こったとされるので、太古代海洋の高 Ni・Co 濃度の原因も、先行研究が提案した太古代にコマチアイトが存在したからではなく、大気・海洋中の CO_2 濃度が高かったからであることを示唆する。



5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 121 件)

- [1] Tashiro, T., Ishida, A., Hori, M., Igisu, M., Koike, M., Méjean, P., Takahata, N., Sano, Y. & Komiya, T., 2017, Early trace of life from 3.95 Ga sedimentary rocks in Labrador, Canada. *Nature*, 549, 516-518.
- [2] Fukai, R. & Yokoyama, T., 2017, Neodymium isotope heterogeneity of ordinary and carbonaceous chondrites and the origin of non-chondritic ^{142}Nd compositions in the Earth. *EPSL*, 474, 206-214.
- [3] Kagami, S. & Yokoyama, T., 2016, Chemical separation of Nd from geological samples for chronological studies using ^{146}Sm - ^{142}Nd and ^{147}Sm - ^{143}Nd systematics. *Analytica Chimica Acta*, 937, 151-159.
- [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] 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.
- [6] Yokoyama, T. & Walker, R.J., 2016, Nucleosynthetic isotope variation of siderophile and chalcophile elements in the Solar System. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 81, Highly siderophile and strongly chalcophile elements in high temperature geochemistry and cosmochemistry, 107-160.
- [7] 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.
- [8] Iizuka, T., Yamaguchi, T., Hibiya, Y. & Amelin, Y., 2015, Meteorite zircon constraints on the bulk Lu-Hf isotope composition and early differentiation of the Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112, 5331-5336.

[学会発表] (計 292 件)

- [1] Yokoyama, T., Fukai, R., Tsujimoto, T. 2017, Origin of R-Process Nuclides in the Solar System: Astronomical and Meteoritical Perspectives, Goldschmidt Conference, Paris, France, 2017/8/17.
- [2] Komiya, T., Aoki, S., Koshida, K., Tashiro, T., Yamamoto, S., Ishikawa, A., Ishida, A., Hori, M., Igisu, M. & Sano, Y., 2016 The Nulliak Supracrustal Rocks, Labrador, Canada: Their occurrence, age, and the oldest evidence for life. The 26th V.M. Goldschmidt Conference, Pacifico Yokohama (Yokohama, Kanagawa Prefecture, JAPAN), 2016/6/26-7/1.

[図書] (計 5 件)

- [1] Komiya, T., 2018. Precambrian Geochemistry, In: White, W.M. (Ed.), *Encyclopedia of Geochemistry: A Comprehensive Reference Source on the Chemistry of the Earth* (Encyclopedia of Earth Sciences Series). Springer, pp. 1258-1265.
- [2] Han, J., Zhang, X. & Komiya, T., 2016. Integrated Evolution of Cnidarians and Oceanic Geochemistry Before and During the Cambrian Explosion, In: Goffredo, S. & Dubinsky, Z. (Eds.), *The Cnidaria, Past, Present and Future: The world of Medusa and her sisters*. Springer International Publishing, Cham, pp. 15-29.

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：横山 哲也

ローマ字氏名：(YOKOYAMA, Tetsuya)

所属研究機関名：東京工業大学

部局名：理学院

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：00467028

研究分担者氏名：片山 郁夫

ローマ字氏名：(KATAYAMA, Ikuo)

所属研究機関名：広島大学

部局名：理学研究科

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：10448235

研究分担者氏名：飯塚 毅

ローマ字氏名：(IIZUKA, Tsuyoshi)

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院理学系研究科

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：70614569

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。