

令和元年6月18日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2014～2018

課題番号：26106005

研究課題名（和文）ポスト冥王代

研究課題名（英文）post-Hadean

研究代表者

磯崎 行雄（Isozaki, Yukio）

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：90144914

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 131,500,000円

研究成果の概要（和文）：ジルコン選別専用装置AZSを開発し、多数のジルコンU-Pb年代測定の結果、200粒以上の冥王代ジルコンを獲得した。月のジルコンとの比較から、太陽近傍で共通に起きたABEL爆撃事件を支持する物証を得た。ジルコン中に炭素など生命必須元素を検出し、43.7億年前の地球表層に生命発生条件があったことを示した。マントル不均質性をトモグラフィ解析によって可視化し、マントル中部および底部に残存する冥王代地殻らしき塊を検出した。冥王代で頻繁だった地球外物質流入の定量的見積もり方法として未確立だったヘリウム同位体比測定の有効性を、2.5億年前の深海相の地層を使って確認し、新たな検査手法として提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太古代岩石の研究から、生命はすでに冥王代に誕生していたとされるが、冥王代岩石は未発見で、主に惑星形成理論や隕石/月の石など地球外試料のみに基づいて、冥王代の地球表層および生命の起源が議論されてきた。本研究でジルコン選別専用装置の開発と大量のジルコンU-Pb年代測定を行なった結果、43.7億年前に表層地殻の大更新を起こす事件、おそらくABEL爆撃がおきた最初の物証が得られた。また、その時点で炭素などの生命誕生を可能にする元素が地表に用意されていたことが判明した。日本の研究で、生命の起源について地球最古物質から初めて冥王代表層環境の情報を得て、人類共通の興味である生命の起源解明に貢献した。

研究成果の概要（英文）：More than 200 grains of Hadean zircons (the Earth's oldest material) were captured by a newly made machine, Automatic Zircon Separator, and by U-Pb dating. By comparing these with lunar rocks, we obtained the first solid evidence for the ABEL bombardment that occurred in the near-Sun domain of the early Solar System. We could detect also bio-essential elements, such as carbon, in zircons, which suggest the readiness of the Earth's surface to beget life already at 4.37 Ga or earlier. The high-resolution visualization of 3D heterogeneity of mantle became possible by seismic tomography analysis. Possible remnants of hadean crust were detected in the bottom of mantle. A sharp signal of extraterrestrial material flux was detected from 250 Ma deep-sea strata, and this first enables the same from the material of the Hadean, during which more frequent flux is assumed in the early Solar System.

研究分野：地質学

キーワード：冥王代 最古地殻 ジルコン 年代測定 地球外フラックス ヘリウム-3

1. 研究開始当初の背景

冥王代地球の物質的証拠は、高精度、高分解能年代分析装置の開発によって、冥王代ジルコン（44-40億年前）として、21世紀になって初めて発見された（Wilde et al., 2002）が、その産出は極めて限定されている。それに対して、磯崎を含む日本の地球史研究グループは、42億年前の花崗岩質岩片（Iizuka et al., 2005）や約40億年前の地質体（Collerson, 2004; 下條ほか, 2013）から冥王代の岩石や付加体の一部から冥王代の岩石を次々と発見・記載しつつある。

一方で、マグマオーシャン直後の地球表層には原始大陸はなかったと考えられていたが、月には45億年前のアノソサイトとKREEP玄武岩が実在する。冥王代地球にも同様の原初大陸が存在し、それは構造浸食によって消失したと考えられるが、直接的証拠は未だ知られていない。我々は予察的検討により、アノソサイトとKREEP玄武岩が生命を胚胎する母岩であり、誕生場を提供したと考えている。生命誕生場の実態解明には、まず以下の事柄を明らかにする必要がある。すなわち、1) 冥王代初期（45億年前）のジルコンの入手、2) マントル内に原初大陸の残骸の把握、3) 生命が誕生した冥王代末期の大気・海洋の量・組成の決定、4) 生命の出現年代、および、5) 冥王代地球表層とそのモダンアナログとして東アフリカ、リフトバレーとの総合的比較である。

2. 研究の目的

冥王代の原初大陸陸地の存否確認を最大の目的とする。1) 冥王代最古ジルコンの確保：地球最古物質は太古代岩石中の鉱物ジルコンのみであり、冥王代大陸陸地の存否の検証には大量のジルコンの確保が不可欠である。高精度・高分解能ジルコン選別装置の開発によって、43-44億年前ジルコンの大量確保を目指す。2) 原初大陸の消失時期の特定と残骸の検出：月や火星の表面に残存するが、地球では未発見の冥王代の大陸地殻は二次的に消失したが、その残骸の存在を現在の地球マントル深部において最新の地震学的手法で同定する。3) 冥王代生命誕生場の現世アナログ：地球生命誕生場の実態解明のために、現世地表における生命誕生場の類似環境を東アフリカ地溝帯の湖沼群に求め、その化学的多様性とその原因を探索する。

3. 研究の方法

1) 冥王代ジルコン選別装置を独自に開発し、世界各地の太古代岩石試料から多数の冥王代粒子を選別する。それらの放射性年代測定を迅速に測定する手法を開発する。また微量化学組成を高精度かつ分析する。2) 入手が困難であった中国からの地震データを集中解析し、従来よりも数桁詳細なトモグラフィー像を得ることで、特に下部マントル内の不均質度を高精度で視覚化する。3) ケニアのリフトバレーにおいて第四紀層の層序および堆積環境の復元を行い、特殊な成分の火山噴出と環境／生態系変化の関連を探る。

4. 研究成果

冥王代ジルコンに特化した選別装置（automatic zircon separator; AZS）を新規に開発した。それを用いて、従来3粒しか発見されていなかった地球最古（43億年前以前）のジルコンを10粒、そして冥王代（40億年前以前）ジルコンを総数200粒以上確保した（Isozaki et al., 2018; 堤ほか, 2018）。

さらに冥王代ジルコン中の固体包有物としてリン灰石や炭質物を同定し（Yamamoto et al., in prep.）、それらの中にPやCなどの生命必須元素、およびハロゲン元素の存在をラマン分光計で検出した。さらに流体包有物も発見された。それらの存在は、生命誕生の必須条件が43億年前の地球表層で満たされていたことが判明した。約200個に及ぶ多数のジルコンの年代分布と月岩石のジルコン年代を比較し、共に43.7億年前という明瞭な年代値の上限を持つことを見出した（Isozaki et al., 2018）。これはその当時既に別の天体として存在した地球と月が共通の太陽系内イベントを経験したことの証拠である。これはA01班が提案するABEL仮説を支持する有力な証拠とみなされる。

月のマントル・トモグラフィー解析から、表層近くの一部およびマントル内に発熱部分が存在することを指摘した。これは放射性元素に富むアノソサイト／KREEP玄武岩からなる初期地殻の残存部とみなされる（Steinberger et al., 2015; 趙ほか, 2018）。同様の不均質性が地球マントル深部で確認されつつあり、消えた冥王代地殻の同定が技術的に可能となってきた。従来は、地震波のデータが不足する領域が広がったが、中国からの未公開最新データを用いて、アジア直下マントルについての最新の地震波トモグラフィー像を得たこと（Zhao et al., 2017）が重要だった。

リフトバレーの第四紀湖沼成層中で高放射能火山岩と珪藻の奇形の出現に関連がある可能性が示された（鈴木ほか, 2019 in press）。

日本産の約2.5億年前の遠洋深海層チャート／泥岩中のヘリウム同位体比測定を行い、明瞭に地球外起源を示す高い同位体比を世界で初めて検出した（Onoue et al., 2019; 高畑ほか, 2019 in press）。その検出はこれまでの最古例であり、この化学指標がより古い時代の地層／岩石の解析にも極めて有効であることを示した。冥王代では、より頻繁にかつ大量にもたらされたと推定される地球外物質検出の道を開いた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計51件）全て査読あり（うち国際誌44編；国内誌7編）

- ▲1. Sawada, H., Mugandani, E., Sato, T., Sawaki, Y., Sakata, S., Isozaki, Y., Maruyama, S. 2019 in press. Zircon geochronology of the Paleoproterozoic Magondi Supergroup in Zimbabwe: Age constraints to the Lomagundi-Jatuli event. *Terra Nova* in press (submitted on Nov. 8, 2018; accepted on Apr. 30, 2019) doi: 10.1111/ter.12407
- ▲2. Sawada, H., Iizuka, T., Tsutsumi, Y., Isozaki, Y., 2019 in press. Detrital zircon evidence for Archean crustal development and plate tectonics from the Murmac Bay Group in the Rae Craton. *Geochemical Journal* 53, in press (submitted on June 23, 2018; accepted on Dec. 01, 2018) doi: 10.2343/geochemj.2.0554
- ▲*3. Isozaki, Y., 2019. End-Paleozoic mass extinction: hierarchy of causes and a new cosmoclimatological perspective for the largest crisis. In Yamagishi, A., Kakegwa, T., Usui, T. eds. *Astrobiology*, 273-301, Springer.
- ▲4. Gou, T., *Zhao, D., Huang, Z., Wang, L., 2019. Aseismic deep slab and mantle flow beneath Alaska: Insight from anisotropic tomography. *J. Geophys. Res.* **124**, 1700-1724.
- ▲5. Onoue, T., Takahata, T., Miura, M., Sato, H., Ishikawa, A., Sanjo, Y., Isozaki, Y., 2019. Extreme flux of extraterrestrial ³He across the Permo-Triassic boundary. *Progress in Earth and Planetary Science* 6:18. doi:10.1186/s40645-019-0267-0PEPS-D-19-00002.1
- ▲6. 高畑直人・尾上哲治・佐野有司・磯崎行雄, 2019 印刷中. 古生代末（2.5億年前）大量絶滅層準の高いヘリウム同位体記録：冥王代以来の地球史を通じた地球外物質流入同定方法の探索. 地学雑誌128.
- ▲7. 鈴木寿志・谷口拓海・鶴山京吾・石田志朗, 2019 印刷中. ケニアの大地溝帯に分布する新生代後期の珪藻土層：高放射線環境における生物進化. 地学雑誌 128.
- ▲*8. Isozaki, Y., Yamamoto, S., Sakata, S., Obayashi, H., Hirata, T., O-bori, K., Maebayashi, T., Takeshima, S., Ebisuzaki, T., Maruyama, S., 2018. High-reliability zircon separation for hunting the oldest material on Earth: an automatic zircon separator with image-processing/microtweezers-manipulating system and double-step dating. *Geoscience Frontiers* **9**, 1073-1083. doi: 10.1016/j.gsf.2017.04.010
- ▲9. Sawada, H., Isozaki, Y., Sakata, S., Hirata, T., Maruyama, S., 2018. Secular change in lifetime of granitic crust and the continental growth: a new view from detrital zircon ages of sandstones. *Geoscience Frontiers* **9**, 1099-1115. doi: 10.1016/j.gsf.2016.11.010
- ▲10. 沢田 輝・磯崎行雄・丸山茂徳, 2018. 地球史を通じた大陸の成長パターンとその変遷. 地学雑誌, 127, 705-721. doi:10.5026/jgeography.127.705
- ▲*11. 趙 大鵬・丸山茂徳・磯崎行雄, 2018. 月のトモグラフィと初期地球. 地学雑誌 127, 619-629. doi:10.5026/jgeography.127.619.
- *12. 堤 之恭・沢田 輝・磯崎行雄, 2018. 冥王代ジルコンの探索：年代分析過程の迅速化. 地学雑誌, 127, 723-734 doi: 10.5026/jgeography.127.723
- ▲13. Chen, C., *D. Zhao, Y. Tian, S. Wu, A. Hasegawa, J. Lei, J. Park, I. Kang (2017) Mantle transition zone, stagnant slab and intraplate volcanism in Northeast Asia. *Geophys. J. Int.* **209**, 68-85.
- ▲*14. Zhao, D., Isozaki, Y., Maruyama, S., 2017. Seismic imaging of the Asian orogens and subduction zones. *Journal of Asian Earth Sciences* **145**, 349-357. doi: 10.1016/j.jseas.2017.06.016
- *15. Tsutsumi, Y., Isozaki, Y. and Terabayashi, M. (2017) The most continent-sided occurrence of the Phanerozoic subduction-related orogens in SW Japan: zircon U-Pb dating of the Mizoguchi gneiss on the western foothill of Mt. Daisen volcano in Tottori. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145, 530-541.
16. Tashiro, T., Ishida, A., Hori, M., Igisu, M., Koike, M., Méjean, P., Takahata, N., Sanjo, Y. and Komiya, T. (2017), Early trace of life from 3.95 Ga sedimentary rocks in Labrador, Canada. *Nature*, 549, 516-518, doi:10.1038/nature24019
17. Koike, M., Sugiura, N., Takahata, N., Ishida, A. and Sanjo, Y. (2017), U-Pb and Hf-W dating of young zircon in mesosiderite Asuka 882023. *Geophysical Research Letters*, 44, doi: 10.1002/2016GL071609
- ▲18. Liu, X., *D. Zhao (2016) Seismic velocity azimuthal anisotropy of the Japan subduction zone: Constraints from P and S wave traveltimes. *J. Geophys. Res.* **121**, 5086-5115. [AGU Research Spotlight]
- ▲19. Wei, W., D. Zhao, J. Xu, B. Zhou, Y. Shi (2016) Depth variations of P-wave azimuthal anisotropy beneath Mainland China. *Scientific Reports* **6**, 29614, doi:10.1038/srep29614.
- ▲*20. Zhao, D., S. Yu, X. Liu (2016) Seismic anisotropy tomography: New insight into subduction dynamics. *Gondwana Res.* **33**, 24-43.
- *21. Onoue, T., Sato, H., Yamashita, D., Ikehara, M., Yasukawa, K., Fujinaga, K., Kato, Y., Matsuoka, A., Bolide impact triggered the Late Triassic extinction event in equatorial Panthalassa. *Scientific Reports*, 6, 29609, doi:10.1038/srep29609, 2016.
22. Azuma, S., Yamamoto, S., Ichikawa, H. and Maruyama, S. Why primordial continents were recycled to the deep: Role of subduction erosion. (2016) *Geoscience Frontiers* **8**, 337-346.
- *23. Zhao, D. (2015) *Multiscale Seismic Tomography*. Springer, 304 pp. [Book]
24. Huang, Z., D. Zhao, L. Wang (2015) P-wave tomography and anisotropy beneath Southeast Asia: Insight into mantle dynamics. *J. Geophys. Res.* **120**, 5154-5174.
25. Steinberger, B., D. Zhao, S. Werner (2015) Interior structure of the Moon: Constraints from seismic tomography, gravity and topography. *Phys. Earth Planet. Inter.* **245**, 26-39.
- *26. Isozaki, Y., Poldvere, A., Bauert, H., Nakahata, H., Aoki, K., Sakata, S., Hirata, T., 2014. Provenance shift in Cambrian mid-Baltica: detrital zircon chronology of Ediacaran-Cambrian sandstones in Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences* **63**, 251-256.
- *27. 尾上哲治, 2014, 日本にあった巨大隕石衝突の記録. *パリティ*, **29**, 51-54.

〔学会発表〕（計55件）（うち国際学会20件；国内学会35件）

〔図書〕（計 3件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）なし

○取得状況（計 件）なし

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

趙 大鵬

Zhao Dapping

東北大学

理学研究科

教授

研究者番号：70304665

堤 之恭

Tsutsumi Yukiyasu

国立科学博物館

地学研究部

研究主幹

研究者番号：00370990

尾上哲治

Onose Tetsuji

九州大学

理学研究科

教授

研究者番号：60404472

鈴木寿志

Suzuki Hisashi

大谷大学

文学部

教授

研究者番号：60302288

高畑直人

Takahata Naoto

東京大学

大気海洋研究所

助教

研究者番号：90345059

山本伸次

Yamamoto Shinji

横浜国立大学

環境情報研究科

准教授

研究者番号：30467013

(2) 研究協力者

佐野有司

Sano Yuji

※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。