

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2014～2017

課題番号：26257212

研究課題名 (和文) 顕生代初めの爆発的動物多様化の研究

研究課題名 (英文) Study on the explosive diversification of animals of the early Phenerozoic

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) 30,600,000 円

研究成果の概要 (和文)：エストニア国、中国南部雲南省およびモンゴルにおいて下部古生界の野外地質調査を行い、採集した大量の岩石試料の化学分析の結果、以下の新知見が得られた。1)カンブリア系最下部層からこれまでで最大 (約30 cm長) の左右相称動物化石を多数発見し、大型動物の出現がカンブリア紀最初期に起きたことを初めて実証した。2)新規に5つの化石帯を識別しカンブリア紀最初期の動物進化が急速であったことを示した。3) オルドビス紀末とペルム紀中期末に起きた絶滅は、共に複数のグローバル現象 (特に寒冷化) を伴ったことから、絶滅原因/過程が共通であったことを初めて指摘した。成果は国際誌に30編の英文論文として公表された。

研究成果の概要 (英文)：By intense field research in Estonia, S. China, and Mongolia, we collected numerous rock samples and analyzed their geochemical aspects. The following new results were obtained. 1) We discovered the largest (30 cm-long) bilaterian animal fossils from the lowermost Cambrian to prove the early appearance of large animals. 2) Five new fossil zones of SSF (small shelly fossil) were proposed to bring much higher resolution in analysis of extremely rapid animal diversification. 3) The end-Ordovician and end-Guadalupian (Mid. Permian) mass extinctions shared plural similarities in global phenomena, in particular global cooling, suggesting the common cause and processes of the two extinctions. These results were published in 30 articles in international refereed journals.

研究分野：地質学

キーワード：顕生代 進化 多様化 カンブリア紀 オルドビス紀 絶滅 表層環境

## 1. 研究開始当初の背景

46億年に及ぶ地球史の中で多様な動物の繁栄が急激に始まった。「カンブリア紀の爆発的進化 (Cambrian explosion)」として広く知られ、進化学上の大事件として重要視されてきたが、その原因とプロセスはまだ十分明らかにされていない。最近の研究によって、以下の様な重要な知見が得られた。すなわち 1) 化石試料の充実：南中国での目覚ましい化石コレクションの追加、特に小型有殻化石 (SSF) と澄江動物群中の最古脊椎動物を含む多様な動物化石の初出層準の特定 (e. g., Steiner et al., 2007; Shu, 2008; Shu, Isozaki et al., 2014 in press)、2) 最新の放射性年代測定手法による諸々の地質学的事件の高精度年代決定 (e. g., Sawaki, Komiya et al., 2010; Okada, Komiya et al., 2014 in press)、3) 火山灰層をもたない地層に関する同位体層序対比 (e. g., Zhu et al., 2007; Ishikawa, Komiya et al., 2008; Jiang et al., 2011)、4) 有機高分子 (バイオマーカー) 抽出によるバクテリア活動の解明 (e. g., Logan et al., 1997; Love et al., 2009; Yamada, Komiya et al., 2014 in press)、5) 現世生物のゲノム解析から導かれる系統樹の確立 (e. g., Carroll, 2008; Dunn et al., 2008; Erwin et al., 2011) などである。

最近の研究を総括すると、急速な動物多様化は必ずしもカンブリア紀初期だけではなく、むしろ次のオルドビス紀に本格的な多様化が起きたこと、またカンブリア紀に複数回の生物絶滅が起きたことなどが明らかにされた (e. g., Servais et al., 2010; Harper et al., 2013; Zhu et al., 2007; van Loy et al., 2011)。その結果、「爆発的進化」の実態は、エディアカラ紀末の各種動物門の出現、カンブリア紀での新規動物出現と絶滅の繰り返し、そしてオルドビス紀での本格的な多様化という一連のイベントとして理解されるようになった (Shu, Isozaki et al., 2014 のレビュー参照)。しかし、これらを統一的に説明した解釈は、まだ提案されていない。原生代後期に起きたマントル内での変化や外宇宙での変動は、複数回の絶滅の原因と対応する可能性がある。代表申請者らは、最近のカンブリア系下部の調査から、初期の小型有殻動物が大陸内リフト帯にできた特異な内湾環境で急速に多様化したことを突き止め (Sato, Isozaki et al., 2014)、動物の多様化が個体数増加を保證する栄養塩の大量供給の元で起きたことを示した。

## 2. 研究の目的

動物が初めて地球表層で多様化した大きな進化イベント、すなわち約5億4千万年前の「カンブリア紀の爆発的進化」に焦点を当て、その変化の実態、当時の表層環境変化とその原因の解明を目指す。北欧、南中国及び北米東部に分布するカンブリア紀-オルドビス紀の連続的な地層について、これまでの研

究実績に加えて、さらに野外調査と試料採取を行ない、高精度放射性年代測定、各種同位体比測定、そして古地磁気測定を行なう。長期間に及ぶ爆発的進化の全体像を網羅的に示すとともに、地球表層環境変化と生物進化との関係について、従来とは全く異なる理解の枠組みの提示を目指す。

## 3. 研究の方法

本計画は4年次に及び、野外調査および室内分析から構成される。申請代表者を中心に北欧南部エストニア、南中国雲南省において本格的な野外調査と試料採取を1-3年次に行なう。また補足的観察および試料採取のためモンゴルでの地質調査を行なう。分担者及び連携研究者たちは、採取した試料を放射性年代、各種同位体比そして古地磁気の測定に供する。それらのデータの総合化から、固体地球内部で起きた地球磁場変化と様々な表層環境変化および動物の多様化/絶滅との関係を解明する。

## 4. 研究成果

平成26年度から28年度にかけて、エストニア国および中国南部雲南省において下部古生界の野外地質調査を行い、また採集した大量の岩石地層試料について、主に東京大学において様々な分析を行った。

エストニア国では、主に北海岸沿いの Saka, Kunda, Bao, および Pakri セクションに露出するカンブリア系およびオルドビス系について、連続試料の採取を行った。調査には研究代表者の磯崎と同研究室の複数の大学院生 (島塚、中畑、飛田) の他に、海外の連携研究者であるのエストニア地質調査所の H. Bauert 博士、カリフォルニア工科大学の J.L. Kirschvink 教授が参加した。採取した大量の岩石試料は速やかに日本に船便で輸送した。また雲南省北部老林地域および東部澄江地域などに分布する複数のセクションにおいてカンブリア系下部の野外地質調査と試料採取を行った。調査には研究代表者と同研究室の複数の大学院生 (河野、長谷川) の他に、海外の連携研究者である中国西北大学の張興亮教授および同博物館研究員の劉偉博士が参加した。採取した大量の岩石試料は速やかに日本に船便で輸送した。

日本に送られた岩石地層試料は微量元素組成や炭素同位体比の分析に供された。また一部試料については連携研究者のカリフォルニア工科大学、J.L. Kirschvink 教授の研究室において古地磁気測定を行った。

平成29年度には夏期にモンゴル国北部フグスブル湖周辺地域において、カンブリア系下部を対象とした野外地質調査と岩石試料採取を行った。調査には代表者の磯崎および大学院生3名 (河野、沢田、飛田) に加えて、同国の U. Bold 博士ほか3名の学部学生、米国ハーバード大学の F.

Macdonald 教授および 2 名の大学院生、ケンブリッジ大学の研究員 R. Anderson 博士が参加した。特に下部カンブリア系の連続層について大量の地層/岩石試料を採取した。またそれらの試料を速やかに日本に輸送して、東京大学において微化石の抽出と化学組成の分析を行った。また比較研究のため、日本の古生代地層についての短期の野外調査と岩石試料採取を北上山地と舞鶴地域で各々 1 回ずつ行った。

これらの調査/研究の結果、以下の重要な成果が得られた。1) 南中国雲南省で新たにカンブリア系下部の地層からとしては史上最大 (約 30cm) の軟体部からなる動物化石を多数発見した。従来は同時代層からは 1cm 程度のものしか得られていなかった。その成果は中国の共同研究者たちとともに国内外の学会で報告され、最終的には英国の *Scientific Reports* 誌に論文が掲載された (Zhang, Isozaki et al., 2017)。この内容は論文発表直後の 11 月上旬に国内の 30 紙 (毎日、産経新聞など) で報道された。2) カンブリア紀最前期の SSF (微化石) 層序を再検討し、従来大まかに二分されていた区間内に新たに 5 つの化石帯を設定した (河野ほか, 準備中)。これはカンブリア紀の爆発的進化の中でも最初期の動物多様化事件を初めて高解像度で解析することを可能にした。3) オルドビス紀の動物多様化のピーク時に起きた特異な地磁気の逆転パターン (Moyero 逆帯磁期) の終焉を認定した (Grappone, Isozaki et al., 2017)。4) オルドビス紀末とペルム紀末の絶滅事件 (特に第一段階の G-L 境界事件) とを比較し、両絶滅期に複数の類似したグローバル環境が起きたことを見出し、特にグローバル寒冷期に絶滅が起きたにもかかわらず、両時期の待機二酸化炭素分圧が一桁違っていたことを初めて指摘した (Isozaki & Servais, 2018)。検討中のデボン紀後期の絶滅事件を含めて、古生代で起きた 3 回の絶滅事件が共通の要因と過程を持つことが明らかになりつつある (Isozaki, 2018 in press)。5) エストニアの古生代砂岩の年代決定から、バルチカ (北歐) 地塊における浅海堆積盆地の変遷を明らかにした (Isozaki et al., 2014; Bauert, Isozaki et al., 2014; Poldvere, Isozaki et al., 2014)。6) 日本とロシア沿海州の古生代砂岩の研究から古生代日本が南中国地塊の連続であったことが判明し、化石動物群が近縁であることの根拠をえた (Isozaki et al., 2014, 2017)。

上記の成果について、4 年間で 37 編の論文 (うち英文国際学術誌は 30 編) に公表した。また国内の学会で 35 件、国際会議で 25 件の学会発表を行った。

##### 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] (英文 30 件; 和文 7 件  
計 37 件) (査読の有無)

- 1 Sawada, H., Isozaki, Y., Sakata, S., Hirata, T., Maruyama, S., 2018 in press. Secular change in lifetime of granitic crust and the continental growth: a new view from detrital zircon ages of sandstones. *Geoscience Frontiers*. (有)
- 2 Isozaki, Y. + 9 others, 2018 in press. 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* (有)
- 3 Kani, T., Isozaki, Y., Hayashi, R., Zakharov, Y.D., Popov, A., 2018. Middle Permian (Capitanian) seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  minimum coincided with disappearance of tropical biota and reef collapse in NE Japan and Primorye (Far East Russia). *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, **499**, 13-21. (有)
- 4 Isozaki, Y., Servais, T., 2018. The Hirnantian (Late Ordovician) and end-Guadalupian (Middle Permian) mass extinction events compared. *Lethaia*, **51**, 173-186. (有)
- 5 Zhang, X.L., Liu, W., Isozaki, Y., Sato, T., 2017. Centimeter-wide worm body fossils from the lowest Cambrian of South China. *Scientific Reports* **7**, 1-11. (有)
- 6 Grappone, J.M., Chaffee, T., Isozaki, Y., Bauert, H., Kirschvink, J.L., 2017. Investigating the life and death of the Early Paleozoic Moyero geomagnetic superchron: Middle Ordovician paleomagnetism from Estonia. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* **485**, 673-686. (有)
- 7 Isozaki, Y. + 5 others, 2017. Greater South China extended to the Khanka block: detrital zircon geochronology of the middle-upper Paleozoic sandstones of the Sergeevka belt, Far East Russia. *Journal of Asian Earth*

- Sciences 145, 565-575. (有)
- 8 Tsutsumi, Y., **Isozaki, Y.**, 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. *Jour. Asian Earth Sci.* **145**, 530-541. (有)
- 9 Zhao, D.P., **Isozaki, Y.**, Maruyama, S., 2017. Seismic imaging of the Asian orogens and subduction zones. *Journal of Asian Earth Sciences* **145**, 349-357. (有)
- 10 Chung, S.L. Wu, F.Y., Liou, J.G., **Isozaki, Y.**, 2017. Asian orogeny and continental tectonics from geochemical perspectives. *Journal of Asian Earth Sciences* **145**, 297. (有)
- 11 Saitoh, M., Ueno, Y., Kawamura, T., **Isozaki, Y.**, Yao, J.X., Ji, Z.S., Yoshida, N., 2017. Quadruple sulfur isotope records at the end-Guadalupian (Permian) at Chaotian, Sichuan, China: Implications for a role of bioturbation in the sedimentary sulfur cycle in the past. *Journal of Asian Earth Sciences* **135**, 70-79. (有)
- 12 Saitoh, M., Ueno, Y., **Isozaki, Y.** + 6 others, 2015. Authigenic carbonate precipitation at the end-Guadalupian (Middle Permian) in South China: an implication for the carbon sink in the past anoxic oceans. *Progress in Earth Planetary Sciences* **2**, 41 (p. 1-19). (有)
- 13 Sato, T., Sawaki, Y., Asanuma, H., Fujisaki, W., Okada, Y., Maruyama, S., **Isozaki, Y.**, Shozugawa, K., Matsuo, M., Windley, B.F., 2015. Redox condition of the late Neoproterozoic pelagic deep ocean: 57Fe Mössbauer analyses of pelagic mudstones in the Ediacaran accretionary complex, Wales, UK. *Tectonophysics* **622**, 472-480. (有)
- 14 **Isozaki, Y.** + 5 others, 2015. Cambrian plutonism in Northeast Japan and its significance for the earliest arc-trench system of proto-Japan: new U-Pb zircon ages of the oldest granitoids in the Kitakami and Ou Mountains. *Journal of Asian Earth Sciences* **108**, 136-149. (有)
- 15 Kirschvink, J.L., **Isozaki, Y.**, and 4 others, 2015. Challenging the sensitivity limits of paleomagnetism: magnetostratigraphy of weakly-magnetized Guadalupian-Lopingian (Permian) black limestone from Kyushu, Japan. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* **418**, 75-89. (有)
- 16 Aoki, K., **Isozaki, Y.**, Sakata, S., Hirata, T., 2015. Mid-Paleozoic arc granitoids in SW Japan with Neoproterozoic xenocrysts from South China: new zircon U-Pb ages by LA-ICPMS. *Jour. Asian Earth Sci.* **97**, 125-135. (有)
- 17 Saitoh, M., Ueno, Y., **Isozaki, Y.** + 8 others., 2014. Isotopic evidence for water-column denitrification and sulfate reduction preceding the end-Guadalupian (Permian) extinction. *Global Planetary Change* **123**, 110-120. (有)
- 18 **Isozaki, Y.** + 6 others, 2014. Provenance shift in Cambrian mid-Baltica: detrital zircon chronology of Ediacaran- Cambrian sandstones in Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences* **63**, 251-256. (有)
- 19 Saitoh, M., Ueno, Y., Nishizawa, M., **Isozaki, Y.**, Takai, K., Yao, J.X., Ji, Z.S., 2014. Nitrogen isotope chemostratigraphy across the Permian- Triassic boundary at Chaotian, Sichuan, S. China. *Jour. Asian Earth Sciences* **93**, 113-128. (有)
- 20 **Isozaki, Y.**, Kase, T., 2014. The occurrence of a large gastropod "*Pleurotomaria yokoyamai* Hayasaka from the Capitanian (Permian) Iwaizaki limestone in NE Japan. *Paleontological Research* **18**, 250-257. (有)
- 21 **Isozaki, Y.**, 2014. Memories of pre-Jurassic lost oceans: how to retrieve them from extant

- lands. *Geoscience Canada* **41**, 283-312. (有)
- 22 Fujisaki, W., **Isozaki, Y.**, Sakata, S., Maki, K., Hirata, T., Maruyama, S., 2014. Age spectra of detrital zircon of the Jurassic clastic rocks of the Mino-Tanba AC belt: constraints to the provenance of the mid-Mesozoic trench along East Asia. *Journal of Asian Earth Sciences* **88**, 62-73. (有)
- 23 Poldvere, A., **Isozaki, Y.**, Bauert, H., Aoki, K., Sakata, S., Hirata, T., 2014. Provenance of the Lower-Middle Paleozoic of Estonia in central Baltica: a possible link to Avalonia. *GFF* **136**, 214-217. (有)
- 24 **Isozaki, Y.**, Aoki, K., Sakata, S., Hirata, T., 2014. The eastern extension of Paleozoic South China in NE Japan evidenced by detrital zircon U-Pb ages. *GFF* **136**, 116-119. (有)
- 25 Bauert, H., **Isozaki, Y.**, Holmer, L.E., Aoki, K., Sakata, S., Hirata, T., 2014. New U-Pb zircon ages of the Sandbian (Upper Ordovician) "Big K-bentonite" in Baltoscandia (Estonia and Sweden) by LA-ICPMS. *GFF* **136**, 30-33. (有)
- 26 Sato, T., **Isozaki, Y.**, Hitachi, T., Shu, D.G., 2014. A unique condition of the earliest diversification of SSF in Chengjiang, South China: the phosphorite deposition in a restricted basin at Hongjiachong. *Gondwana Research* **25**, 1139-1152. (有)
- 27 Shu, D.G., **Isozaki, Y.**, Zhang, X.L., Han, J., Maruyama, S., 2014. Birth and early evolution of metazoans. *Gondwana Research* **25**, 884-895. (有)
- 28 **Isozaki, Y.**, Shu, D.G., Maruyama, S., Santosh, M., 2014. Beyond the Cambrian Explosion: From galaxy to genome". *Gondwana Research* **25**, 881-883. (有)
- 29 Aoki, K., **Isozaki, Y.**, Kofukuda, D., Sato, T., Yamamoto, A., Maki, K., Sakata, S., Hirata, T., 2014. Provenance diversification within an arc-trench system induced by the batholith development: the Cretaceous Japan case. *Terra Nova* **28**, 139-149. (有)
- 30 Kofukuda, D., **Isozaki, Y.**, Igo, H., 2014. A remarkable sea-level drop across the Guadalupian-Lopingian (Permian) boundary in low-latitude mid-Panthalassa: Irreversible changes recorded in accreted paleo-atoll limestones in Akasaka and Ishiyama, Japan. *Journal of Asian Earth Sciences* **82**, 47-65. (有)
- 31 堤 之恭・磯崎行雄・可児智美・中畑浩基, 2018. 九州中部天草・御船地域の白亜系砂岩と碎屑性ジルコン U-Pb 年代: 白亜紀日本の前弧盆地碎屑岩とその後背地. *地学雑誌* 127, 21-51. (有)
- 32 長谷川 遼・安井敏夫・堤 之恭・磯崎行雄, 2017. 古生代日本弧における前弧地殻の変遷: 高知県中西部黒瀬川帯の古生代中期花崗岩類・砂岩のジルコン U-Pb 年代. *地学雑誌* 126, 617-640. (有)
- 33 中畑浩基・磯崎行雄・堤 之恭, 2016. 四国西部の3種の浅海成白亜系の碎屑性ジルコン年代スペクトル: 白亜紀日本の前弧と背弧砂岩の識別. *地学雑誌* **125**, 717-745.
- 34 中畑浩基・磯崎行雄・堤 之恭・岩本直哉, 2016. 関東南部の浅海成白亜系の碎屑性ジルコン年代スペクトル: 後背地表層地殻の更新にともなう前弧域砂岩組成変化. *地学雑誌* **125**, 353-380. (有)
- 35 中畑浩基・磯崎行雄・小坂和夫・坂田修平・平田岳史, 2015. 関東山地北縁・上部白亜系跡倉層・栃谷層の碎屑性ジルコン年代 - 飛騨帯と中央構造線南縁との弧横断方向の関連 -. *地学雑誌* 124, 633-656. (有)
- 36 磯崎行雄・小福田大輔, 2015. 超海洋中央部海山頂部での絶滅の記録: ジュラ紀の日本に付加したペルム系赤坂石灰岩 (岐阜県大垣市). *地学雑誌* 124, 地学ニュース N1-N9. (有)

37 磯崎行雄・加瀬友喜, 2015. 東北日本, ペルム系中部統キャピタニアン階岩井崎石灰岩からの大型巻貝 “*Pleurotomaria yokoyamai* HAYASAKA の産出. 化石, 97, 6-7. (有)

[学会発表] (計 50 件以上)  
省略

[図書] (計 5 件)

- 1 **Isozaki, Y.**, 2018 in press. Mass extinction: hierarchy of causes and a new cosmoclimatological perspective for the largest crisis. In Yamagishi, A., Kakegawa, T., eds. *Astrobiology*, Springer.
- 2 丸山茂徳・磯崎行雄・大森聡一, 2015. 地球生命史から宇宙生物学の体系化へ. 海部宣男・星元紀・丸山茂徳 (編) : 宇宙生命論. 68-84, 東大出版会.
- 3 磯崎行雄, 2014. 大量絶滅と進化: 生命と地球と宇宙との関わり. 小久保栄一郎・嶺重 (編) 宇宙と生命の起源 2. 岩波ジュニア新書 no. 777, 201-220.
- 4 磯崎行雄 (監修) 2014. 大量絶滅. 地球 4 6 億年の旅 20, 32p. 朝日出版.
- 5 磯崎行雄 (監修) 2014. 超大陸パンゲア. 地球 4 6 億年の旅 19, 32p. 朝日出版.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 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

### (2) 研究分担者

石川 晃 (Ishikawa, Akira)  
東京大学・大学院総合文化研究科・助教  
研究者番号: 20524507

河合 研志 (Kawai, Kenji)  
東京大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 2043200

(3) 連携研究者  
なし

(4) 研究協力者

Dr. H. Bauert (Geological Survey of Estonia)

Dr. A. Poldvere (Geological Survey of Estonia)

Prof. 張 興亮 (西北大学, 中国)

Prof. J.L. Kirschvink (CalTech, USA)