

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25247084

研究課題名(和文) 生物の進化・絶滅・回復と酸素環境・気候変動の関係の解明

研究課題名(英文) Relationship between evolution-extinction-recovery and redox-climate changes

研究代表者

海保 邦夫 (Kaiho, Kunio)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00143082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,200,000円

研究成果の概要(和文)：約40億年前の浅海成堆積岩から生物起源の有機分子を初めて検出した。地球表面の酸素は26億年前から増加し始め、22億年前に極大を示した。6-5億年前の多細胞動物の初期進化と呼応した酸素増加を捉えた。ペルム紀末の大量絶滅時に土壌流出、表層水中の酸素と生物必須元素の不足が起きたことを明らかにした。白亜紀/古第三紀境界で、小惑星衝突起源の成層圏のすすにより、陸では中高緯度の気温低下と低緯度の降水量減少、海では水温低下と光合成帯縮小を起こした。これらの気候変動により、恐竜等の大量絶滅が起きたことを初めて示した。

研究成果の概要(英文)：Organic molecules derived from the earliest life have been detected from the oldest shallow-sea sedimentary rocks from Labrador, Canada, the age of which is >3.95 Ga. Local oxic conditions at 2.7 Ga, and subsequently global oxidation at 2.6-2.2 Ga. Oceanic redox changes played a crucial role in driving the evolution and extinction of early animals during 635-520 Ma. The low oxygen surface water accompanied by the shortage of bioessential elements and massive soil, mud, and nutrient intrusion in the oceans contributed to the main extinction at the end of the Permian. At the Cretaceous/Paleogene boundary, the stratospheric aerosol caused sufficiently colder climates at the mid-high latitudes and draught at low latitudes on land and surface water cooling with limited cessation of photosynthesis in oceans for several years, which caused the mass extinction.

研究分野：古生物学, 地球化学

キーワード：大量絶滅 大進化 酸素 すず バイオマーカー 古気候 大気海洋 エアロゾル

1. 研究開始当初の背景

申請者らは、平成24年度終了の科学研究費補助金の研究により、多細胞動物群の台頭期であるエディアカラ紀から多細胞動物群の爆発的進化期であるカンブリア紀初期に渡る海洋溶存酸素環境をバイオマーカーのプリスタン/ファイタン比により、storm wave base より浅い水深と深い水深に分けて求めた。それらの層位分布から海洋溶存酸素レベルをI~IVの4段階表示した(Iは両方の水深で無酸素、IIは両方の水深が有酸素と無酸素を繰り返す、IIIは浅い方が有酸素、IVは両方の水深で有酸素)。レベルIIはエディアカラ動物群出現以前と生息期の前期と絶滅期、レベルIIIはエディアカラ動物群の生息期の後期(大型化期)、レベルIVはカンブリア動物群の出現期に相当することを見出した。

新原生代の中・後期(キオゲニア紀-エディアカラ紀)には、スターチアン、マリノアン、ガスキアスの3度の氷期がある。うち、スターチアン氷期とマリノアン氷期は低緯度域に漂礫岩があり、全球凍結かそれに近い極寒の地球であった。これら氷期と後の温暖期と多細胞動物の進化との関係は、わかっていない。

鉄の全量に対する還元的な鉄の量の割合によって、酸化還元状態を復元する試みが成されている(Canfield et al., 2007; Wang et al., 2012; Johnston et al., 2012)が、研究者により異なる傾向が出ている(McFadden et al., 2008; Narbonne and Aitken, 1990)。この指標は後の酸化還元の影響を受けやすいのだが、バイオマーカーは、安定な形になったもの(生の有機分子が安定な形になった化石)である。

申請者は、長年に渡り、大量絶滅と溶存酸素の研究をしてきた(ISI被引用回数約1300回)。申請者らは、バイオマーカーのプリスタン/ファイタン比、イソレニエラ

タン、アリルイソプレノイド、ジベンゾチオフェンにより古生代末のペルム紀最後期の大量絶滅前後の水深別溶存酸素環境変動を明らかにし、還元深層水の表層水への流入が、浅海生物の大量絶滅の原因とした(Kaiho et al., 2012)。

また、古生代末のペルム紀最後期の大量絶滅時には、極端な気温水温上昇が想定されているが、証拠に乏しい。地球気候変動と進化・大量絶滅との関係はよくわかっていない。

後期デボン紀の大量絶滅は、他の大量絶滅と違い数段階の絶滅で構成され、陸上植物の草から樹木への進化期に起きている。そのうち最大の絶滅が起きたフラスニアン-ファメニアン期(F-F)境界(ベルギー、中国)とデボン紀-石炭紀境界(ベトナム)について、土壌流出と有機物燃焼と浅海の溶存酸素低下の証拠をバイオマーカーからつかんだ。

2. 研究の目的

(1)古原生代-新原生代初期(2500 Ma-850 Ma)の真核生物の進化期、(2)キオゲニア紀-カンブリア紀初期(850 Ma-520 Ma)の多細胞生物の大進化期、(3)後期デボン紀の大量絶滅期、(4)ペルム紀最後期の史上最大の大量絶滅およびその後の回復期について、生物の激変と水深別溶存酸素環境と地球気候変動との関係を明らかにする。

3. 研究の方法

F-F境界とデボン紀-石炭紀境界の試料採取をフランスの模式層序(GSSP)で行う。南アフリカで新始生界と古原生界の試料採取を行う。ベルギーでデボン系の試料採取を行う。

バイオマーカー分析により、起源生物を特定し、また、海洋の溶存酸素環境を水深別に求める。申請のGC-MS-MSを用いて

酸素環境指標と生態系変化の解析を行う (図 1)。XRF 分析により、堆積岩中の Ga/Rb と K_2O/Al_2O_3 の値から気候変動を読み解く。

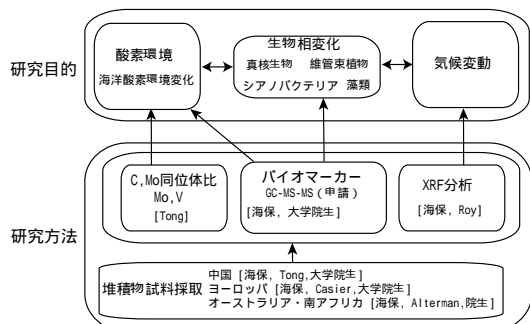


図1. 研究体制、役割、研究方法、研究目的

4. 研究成果

地球生命環境史上の6大事件を研究し下記の成果を得た。

[事件1] 地球最古の生物の証拠は始生代始めの38億年前の有機炭素同位体比と生物の痕跡であるが、申請者はさらに古い39億5000万年以上前の浅海成堆積岩から生物起源の有機分子を初めて検出した。これらの有機分子は分岐アルカンとスクアランが異常に多いことと、炭素数が奇数の分岐アルカンとn-アルカンが異常に少ないという点で35億年前以降には見られない組成を示す(図2)。スクアランは非生物的に作り出すことは困難である。真正細菌、古細菌、真核生物の共通祖先と考えられる。

[事件2] 大気中に酸素が蓄積し始めたのは、古原生代初期の全球凍結後の約23億年前頃と考えられているが、申請者の堆積有機分子分析の結果は、27億年前にはローカルに酸化環境が存在し、26億年前に酸素が存在し、22億年前に極大を示した(図2)。全球凍結後に高温湿潤化が認められた。

[事件3] 2度目の大気酸素の増加期に相当する。申請者の堆積有機分子分析の結果により、エディアカラ紀-カンブリア紀初期の多細胞動物の進化と呼応して、3段階でより深い海へ酸素が入って行く様子を捉えた(図3)。

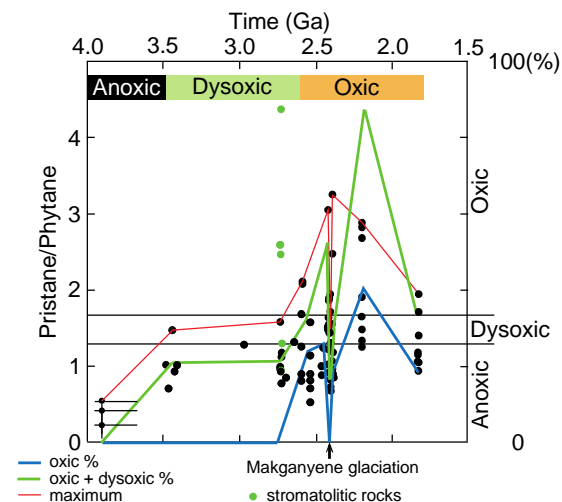


図2 35-15億年前の地球表面の酸化還元状態

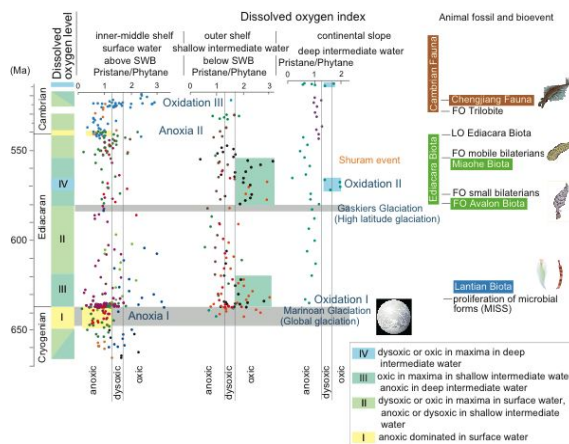


図3 海の水深別溶解酸素指標、酸化事件と初期動物進化の対応

[事件4] その後、陸の生態系進化が起きた。デボン紀中期に大気酸素量が極小になり、石炭紀後期に極大になった。デボン紀後期とデボン紀-石炭紀境界の大量絶滅時の陸上維管束植物の植生崩壊と土壌流出を捉えた。

[事件5] ペルム紀最後期-三畳紀初期の水深別海洋酸素構造変化を明らかにした(図4)。表層水中の酸素と生物必須元素の不足と大量土壌流出がペルム紀末大量絶滅時に起きたことを捉えた。

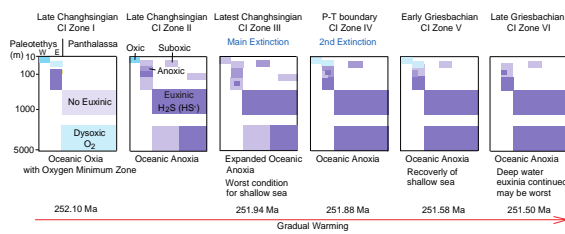


図4 ペルム紀末大量絶滅前後の海洋酸化還元構造

[事件6] 白亜紀-古第三紀境界の恐竜の絶滅は小惑星の衝突が原因であるが、硫酸エアロゾル説が否定されたため、そのプロセスが不明になった。有機分子と大気海洋モデル計算により、衝突クレーター内の有機物が燃焼し、そのすずが成層圏にエアロゾルを形成し、太陽光を吸収して、中高緯度の気温低下と低緯度の降水量減少を起こし、恐竜が絶滅しワニが生き残ったことを初めて示した(図5)。一方、海では、表層水温減少と光合成帯の縮小により、アンモナイトなどの絶滅が説明できた。

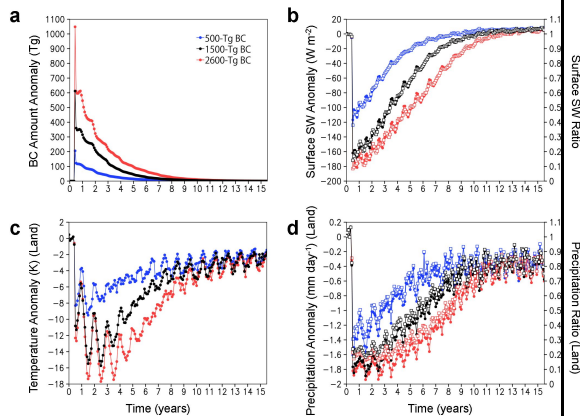


図5 白亜紀/古第三紀境界の小惑星衝突起源すずエアロゾルによる気候変動

まとめ

39億5000万年以上前の浅海成堆積岩から生物起源の有機分子を初めて検出した。40-35億年前は無酸素環境で、27億年前はローカル酸化環境、25億年前にグローバル酸化環境、24-23億年前に酸素量の極大を示した。エディアカラ紀-カンブリア紀初期

の多細胞動物の進化と呼応した酸素増加を捉えた。

史上最大のペルム紀末の大量絶滅の海における主因は土壌流出、表層水中の酸素と生物必須元素の不足である。白亜紀/古第三紀境界の小惑星衝突による成層圏すずエアロゾルが太陽光を吸収し、陸では中高緯度の気温低下と低緯度の降水量減少、海では、表層水温減少と光合成帯縮小を起こし、恐竜やアンモナイトなどの大量絶滅が起きた。

(ISI被引用回数合計約2100回; 全被引用回数合計約2700回)

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18件)

1. Saito, R., Kaiho, K., Oba, M., Tong, J., b, Chen, Z-Q, Takahashi, S., Chen, J., Li, T., Biswas, R.K., Secular changes in environmental stresses and eukaryotes during the Early Triassic to the early Middle Triassic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 451, 35-45 (2016). 査読あり
2. Saito, R., Kaiho, K., Oba, M., et al. Predominance of archaea-derived hydrocarbons in an Early Triassic microbialite. *Organic Geochemistry* 85, 66-75 (2015). 査読あり
3. Takahashi, S., Yamasaki, S., Ogawa, K., Kimura, K., Kaiho, K., et al. Redox conditions in the end-Early Triassic Panthalassa. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 432, 15-28 (2015). 査読あり
4. Kaiho, K., Reply to the comment on Kaiho et al., "A forest fire and soil erosion event during the Late Devonian mass extinction"

- [Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 392 (2013): 272-280]
Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 417, 573-575 (2015).
査読あり
5. Chen, Z.Q., Yang, H., Luo, M., Benton, M.J., Kaiho, K., et al., Complete biotic and sedimentary records of the Permian-Triassic transition from Meishan section, South China: Ecologically assessing mass extinction and its aftermath. *Earth-Science Reviews* 149, 63–103 (2015). 査読あり
 6. Komatsu, T., Kato, S., Hirata, K., Takashima R., Ogata, Y. et al. (15名、14番目), Devonian-Carboniferous transition containing a Hangenberg Black Shale equivalent in the Pho Han Formation on Cat Ba Island, northeastern Vietnam. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 404, 30-43 (2014). 査読あり
 7. Takahashi, S., Yamasaki, S., Ogawa, Y., Kimura, K., Kaiho, K., Yoshida, T., Tsuchiya, N., Bioessential element-depleted ocean following the euxinic maximum of the end-Permian mass extinction. *Ear. Planet. Sci. Let.* 393, 94-104 (2014). 査読あり
 8. Saito, R., Oba, M., Kaiho, K., Schaeffer, P., Adam, P., Takahashi, S., Nara-Watanabe, F., Chen, Z.Q., Tong, J., Tsuchiya, N., Extreme euxinia just prior to the Middle Triassic biotic recovery from the latest Permian mass extinction, *Organic Geochemistry* 73, 113-122 (2014). 査読あり
 9. Mizukami, T., Kaiho, K., Oba, M., A spike of woody plant biomarkers in the deep-sea iridium layer at the Cretaceous/Paleogene boundary. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 412, 241-248 (2014). 査読あり
 10. Nishikane, Y., Kaiho, K., Henderson, C.M., Takahashi, S., Suzuki, N., Guadalupian-Lopingian conodont and carbon isotope stratigraphies of a deep chert sequence in Japan. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 403, 16-29 (2014). 査読あり
 11. Kaiho, K., Yatsu, S., Oba, M., Gorjan, P., Casier, J.-G., Ikeda, M., A forest fire and soil erosion event during the Late Devonian mass extinction. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 392, 272-280 (2013). 査読あり
 12. Saito, R., Oba, M., Kaiho, K., Maruo, C., Fujibayashi, M., Chen, J., Chen, Z.Q., Tong, J., Ether lipids from the Lower and Middle Triassic at Qingyan, Guizhou Province, Southern China, *Organic Geochemistry* 58, 27-42 (2013). 査読あり
 13. Lan, Z-W., Chen, Z-Q., Lia, X-H., Kaiho, K., Microbially induced sedimentary structures from the Mesoproterozoic Huangqikou Formation, Helan Mountain region, northern China. *Precambrian Research* 233, 73–92 (2013). 査読あり

14. Kaiho, K., Koga, S., Impacts of a massive release of methane and hydrogen sulfide on oxygen and ozone during the late Permian mass extinction. *Glob. Planet. Change*, 107, 91–101 (2013). 査読あり
15. Kaiho, K., Katabuchi, M., Oba, M., Lamolda, M., Repeated anoxia-extinction episodes progressing from slope to shelf during the latest Cenomanian. *Gondwana Res.* 25, 1357–1368 (2013). 査読あり
16. Takahashi S., Kaiho, K., Hori, R. S., Gorjan, P., Watanabe T., Yamakita, S., Aita, Y., Takemura, A., Spörl, K. B., Kakegawa, T., Oba, M., Sulfur isotope profiles in the pelagic Panthalassic deep sea during the Permian-Triassic. *Glob. Planet. Change*, 105, 68-78 (2013). 査読あり
17. Saito, R., Kaiho, K., Oba, M., Takahashi, S., Chen, Z-Q., Tong, J., A terrestrial vegetation turnover in the middle of the Early Triassic., *Glob. Planet. Change*. 105, 152-159 (2013). 査読あり

[学会発表](計43件)

1. Kunio Kaiho, Ryosuke Saito, Tsuyoshi Komiya, Wladyslaw Altermann, Martin Van Kranendonk, Big Bang of life: unique composition of organic molecules at >3.95 Ga. 日本地球惑星科学連合大会、2016年5月24日、幕張メッセ
2. 海保邦夫・片山悠貴・川瀬智大・Wladyslaw Altermann・Martin Van Kranendonk・小宮剛・齊藤諒介、35-

- 34億年前と27-22億年前の地球表層の酸素増加。日本地球惑星科学連合大会、2016年5月25日、幕張メッセ
3. 海保邦夫・齊藤諒介・伊藤幸佑・宮地崇至・Li Tian・佐野弘好・Zhiqiang Shi・高橋聡・Jinnan Tong・Lei Liang・大庭雅寛・Fumiko W. Nara, Noriyoshi Tsuchiya・Zhong-Qiang Chen、ペルム紀末大量絶滅時の表層水溶存酸素と生物必須元素の枯渇と大量土壌流入。日本地球惑星科学連合大会、2016年5月26日、幕張メッセ
 4. 海保邦夫・大島長・足立恭将・足立光司・水上拓也・藤林 恵・齊藤諒介、グローバルすずエアロゾルによる低緯度干ばつと寒冷化が起こした白亜紀-古第三紀境界大量絶滅。日本地球惑星科学連合大会、2016年5月25日、幕張メッセ
 5. Kunio Kaiho, Takashi Miyaji, Kosuke Ito, Takuya Mizukami, Ryosuke Saito, Masahiro Oba, Li Tian, Jinnan Tong, Zhiqiang Shi, Abrupt surface-water reducing during the end-Permian mass extinction and combustion of oil by the end-Cretaceous asteroid impact. GSA annual meeting, Vancouver, Canada, 20 Oct 2014.
 6. Kaiho, K., Shizuya, A., Yamada, K. Oba, M., Kikuchi, M., Senba, N., Chen, Z-Q., Tong, J. Oceanic oxidation mechanisms spanning the snowball earth and early animal diversification. GSA annual meeting, Vancouver, Canada, 19 Oct 2014.

6. 研究組織

(1)研究代表者

海保 邦夫 (KAIHO KUNIO)
 東北大学・大学院理学研究科・教授
 研究者番号：00143082