

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18340128

研究課題名（和文）原生代初期における大規模地球システム変動の高時間解像度復元とシステム解析

研究課題名（英文）Reconstruction and system analyses of the global events of the Earth during the Paleoproterozoic

研究代表者

田近 英一 (TAJIKI, Eiichi)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号：70251410

研究成果の概要：

約 25 億～20 億年前に生じた全球凍結イベントと酸素濃度上昇の関係を明らかにするため、カナダ、米国、フィンランドにおいて地質調査及び岩石試料採取を実施し、様々な化学分析を行った。その結果、同時代の地層対比の可能性が示された。またいずれの地域においても氷河性堆積物直上に炭素同位体比の負異常がみられることを発見した。このことから、氷河期直後にメタンハイドレートの大規模分解 温暖化 大陸風化 光合成細菌の爆発的繁殖 酸素濃度の上昇、という可能性が示唆される。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2007年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	8,200,000	2,460,000	10,660,000

研究分野：地球惑星システム進化学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地球史，地球システム，地質学，地球化学

## 1. 研究開始当初の背景

原生代初期（25 億 - 20 億年前）には、地球史上最大規模の環境変動が生じた。この時期には複数回の大氷河期が繰り返しており、少なくとも 1 回は赤道域まで氷に覆われる全球凍結イベントであったと考えられている。一方、同時期は、大気中の酸素濃度が急激に

上昇して地球表層の酸化還元環境が大きく変化したことで知られている。

南アフリカ共和国における先行研究によって、全球凍結イベントと酸素濃度上昇との間の密接な関係が示唆されている。しかし、ほかの地域においてはそのような証拠は知られておらず、両者の関係についてさらなる

研究が必要とされている。

原生代初期における地球環境変動の研究は、これまで南アフリカ共和国の他、北米や北欧に分布する氷河性堆積物を中心に行われてきた。しかし、それら各地域間の地層対比や、氷河堆積物と酸素濃度上昇との関連を有機的に結びつける研究はほとんど行われてこなかった。

このように、研究開始当初においては、氷河期と酸素濃度の上昇がどのように関係していたのか、この時代にどのような汎地球的環境変動が生じたのか、といった地球システム変動の大局的理解には至っていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究は、カナダ、米国、フィンランド共和国の三地域にそれぞれ分布するヒューロニアン累層群、マーケットレンジ累層群、カレリア累層群について地質調査及び岩石試料採取を実施し、放射性同位体を用いた絶対年代測定、炭素や硫黄の同位体比や微量元素存在度の測定等を用いた各地域間の地層対比を行うことによって、原生代初期の気候変動と酸素濃度上昇の因果関係及び地球環境システム変動の解明を目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、カナダ、米国、フィンランドにおいて地質調査及び露頭からの岩石試料採取を行い、可能な場合には掘削試料からも岩石試料採取を行った。

岩石試料の絶対年代測定には、有機物に富む堆積物や硫化物に濃集する Re(レニウム)の放射壊変を利用した Re-Os(オスミウム)法を用いた。また、炭酸塩岩の堆積年代測定には、Pb(鉛)-Pb法を用いた。また、地層対比のために有機炭素の炭素同位体比測定も行った。

一方、酸素濃度を制約する地球化学的指標

としては、硫黄同位体比の質量非依存性分別効果、Os 同位体比、Mn 濃集等を用いた。

## 4. 研究成果

本研究によって得られた絶対年代および有機炭素の炭素同位体比変動パターンから推測される、世界各地域における氷河性堆積物の対応関係を図1にまとめる。

カナダのヒューロニアン累層群ゴードンレイク層と米国のマーケットレンジ累層群コナ・ドロマイト層の地層対比を Pb-Pb 法を用いて試みた結果、誤差の範囲で同じ年代を得た。この年代は、南アフリカ共和国のトランスバル累層群マクガニン氷河期(全球凍結イベントと考えられている)の年代とも、誤差の範囲で一致する。

さらに、ヒューロニアン累層群ゴウガンダ層及びピロレイン層(カナダ)において、大きな有機炭素同位体の負異常(40~55‰)を発見した。これと同様の炭素同位体比の負異常がマーケットレンジ累層群メスナード層(米国)、カレリア累層群コリ層(フィンランド)においても存在することも発見した。

以上の結果から、これら世界4地域の氷河性堆積物が同時期のものであり、したがってこれらは当時生じた全球凍結イベント時のものである可能性が高いことが示唆される。

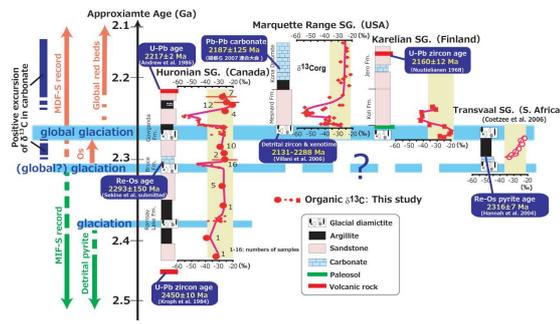


図1: ヒューロニアン累層群(カナダ)、マーケットレンジ累層群(米国)、カレリア累層群(フィンランド共和国)及びトランスバル累層群(南アフリカ共和国)における絶対年代と有機炭素同位体変動パターン

また、ヒューロニアン累層群ブルース層直上の岩石試料を Re-Os 法によって年代決定した結果、この氷河期が約 23 億年前のものであることが判明した。このことは、ブルース層がトランスバール累層群タイムボールヒル層の氷河性堆積物に対応していることを示唆し、原生代初期におけるゴウガンダ氷河期のみならず、ブルース氷河期も、汎世界的な氷河期であった可能性が高まった。

一方、硫化物に含まれる硫黄同位体の質量非依存性分別効果及び堆積物中の Os 同位体比変動を調べた結果、ヒューロニアン累層群において、最下部のマチネンダ層から、第二の氷河期であるブルース層の直前までは、酸素濃度が  $10^{-6}$  atm 以下程度であるのに対し、ブルース氷河期直後に酸素濃度が、 $10^{-5}$  atm 程度まで急上昇したことが明らかになった (図 2)。

酸素濃度は、いったん上昇したらそのまま高い値を維持するというのが、従来の描像であった。しかしながら、ヒューロニアン累層群中部のサーベント層の硫黄同位体を詳細に調べた結果、サーベント層で酸素濃度は、再び  $10^{-6}$  atm 以下まで落ち込んでいることが示唆された。このことは、原生代初期の氷河期サイクルにともなって、酸素濃度も大きく増減した可能性を示唆するものである。

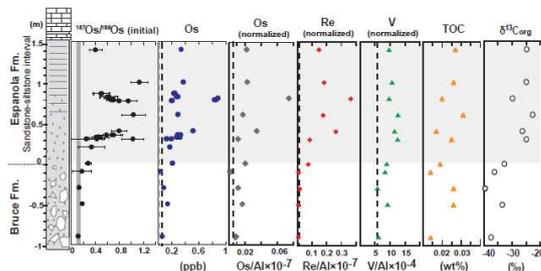


図 2：ブルース氷河期直後の堆積物中の Os 同位体及び Os, Re, V 濃度の変動。ブルース層とエスパノーラ層の境界で、大陸起源である高い  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  比を持つ Os が酸化され、海洋に供給され始めたことが示唆される。

ヒューロニアン累層群上部のゴウガンダ層では、オンタリオ州のコバルト地域及びエスパノーラ地域において、顕著なマンガン及び鉄の濃集が認められた。したがって、ゴウガンダ氷河期 (全球凍結) 直後には、酸素濃度が再び急上昇しマンガンの酸化的沈澱が広域的に生じた可能性が示唆される。このことは、トランスバール累層群におけるマンガンの濃集層に関する先行研究とも調和的であり、原生代初期における最後の大氷河期直後に、酸素濃度は高いレベルに上昇した可能性を示唆する。

このような、大氷河期直後の酸素濃度上昇は、氷河期からの気候回復過程が酸素放出の引き金になった可能性を示唆する。

そこで、退氷期にどのようなプロセスが生じたのかを解明するため、氷河期前後の有機炭素の炭素同位体比を分析した。その結果、前述のように、大氷河期直後には炭素同位体比の大きな負異常 (-40 ~ -55‰) が汎世界的に生じたことが明らかになった。このことは、氷河期において大量に蓄積されたメタンハイドレートが氷河期直後の温暖化に伴い大規模に分解した、という可能性を示唆する。

炭素同位体比の負異常の大きさから、それを引き起こすのに必要なメタンハイドレートの総量は現在の地球表層のメタンハイドレート存在量の 1 - 10 倍にも相当すること、それによる温室効果は地表温度を 3~8 上昇させるほどのものであること、などが明らかになった。まさに地球史上最大級のメタン放出イベントといえる。このことから、放出されたメタンや二酸化炭素の温室効果により大陸風化が促進され、海洋への栄養塩供給が増大する。この結果、光合成細菌の大繁殖が生じ、酸素の大放出につながった、という可能性が強く示唆される。

## 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10件)

1. Sekine, Y., Suzuki, K., Senda, R., Tajika, E., Tada, R., Goto, K., Yamamoto, S., Ohkouchi, N., Ogawa, N.O. (2009) Osmium evidence for relationship between atmospheric oxygenation and paleoproterozoic glaciation, *Geochim. Cosmochim. Acta, Suppl.* (in press). 査読無し
2. Bassez, M. P., Takano, Y., and Ohkouchi, N. (2009) Organic analysis of peridotite rocks from Ashadze and Logatchev hydrothermal sites. *International Journal of Molecular Sciences* (in press). 査読有り
3. Takano, Y., Chikaraishi, Y., Ogawa, N. O., Kitazato, H., and Ohkouchi, N. (2009) Diastereomerization and cation exchange for the precise determination of nitrogen isotopic composition of alanine enantiomers. *Analytical Chemistry*, 81, 394-399. 査読有り
4. Chikaraishi, Y., Kashiya, Y., Ogawa, N. O., Kitazato, H., Satoh, M., Nomoto, S., and Ohkouchi, N. (2008) A compound-specific isotope method for measuring the stable nitrogen isotopic composition of tetrapyrroles. *Organic Geochemistry*, 39, 510-520. 査読有り
5. Ohkouchi, N., Nakajima, Y., Ogawa, N. O., Suga, H., Chikaraishi, Y., Sakai, S., and Kitazato, H. (2008) Carbon isotopic composition of tetrapyrrole nucleus in chloropigments from a saline meromictic lake: A mechanistic view for interpreting isotopic signature of alkyl porphyrins in geological samples. *Organic Geochemistry*, 39, 521-531. 査読有り
6. Tajika, E. (2008) Theoretical constraints on early Earth's environment, *Viva Origino*, 36, 55-60. 査読有り
7. Tajika, E. (2008) Snowball planets as a possible type of water-rich terrestrial planets in the extrasolar planetary system, *Astrophysical Journal Letters* 680, L53-L56. 査読有り
8. 田近英一 (2007) 酸素濃度の増大とスノーボールアース・イベント, *日本気象学会誌・天気*, Vol. 54, No.5, 407-414. 査読

無し

9. 田近英一 (2007) 全球凍結と生物進化, *地学雑誌*, 116(1), 79-94. 査読有り
10. Tajika, E. (2007) Long-term stability of climate and global glaciations throughout the evolution of the Earth, *Earth, Planets, and Space* 59, 293-299. 査読有り

参考情報:

1. Sekine, Y., Suzuki, K., Senda, R., Tajika, E., Tada, R., Goto, K., Yamamoto, S., Ohkouchi, N., Ogawa, N. O. (2009) Osmium evidence for correlation between the rise of oxygen and Paleoproterozoic glaciation (submitted). 査読中
2. Sekine, Y., Tajika, E., Ohkouchi, N., Ogawa, N. O., Goto, K., Tada, R., Yamamoto, S., Kirschvink, J. L. (2009) The Paleoproterozoic glacial aftermath: Large methane release during the Great Oxidation Event (submitted). 査読中
3. Sekine, Y., Tajika, E., Hirai, T., Kirschvink, J.L., Tada, R., Goto, K., Isozaki, Y., Yamamoto, S., Tachibana, S. (2009) Manganese enrichment in the Gowganda Formation of the Paleoproterozoic Huronian Supergroup: An extensive release of O<sub>2</sub> into the atmosphere and oceans (in preparation).

[学会発表](計19件)

1. 関根康人, 大河内直彦, 小川奈々子, 田近英一, 多田隆治, 後藤和久, 山本信治 (2009) 原生代初期における有機炭素同位体比変動: 大酸化イベントにおける炭素循環と気候環境変動への示唆, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会 (2009.5.16-21, 千葉).
2. 関根康人, 田近英一, 鈴木勝彦, 仙田量子, 大河内直彦, 小川奈々子, 多田隆治, 後藤和久, 山本信治 (2009) 原生代初期ヒューロニアン氷河期と大酸化イベントの因果関係, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会 (2009.5.16-21, 千葉).
3. Tajika, E. (2008) Snowball Planets: A Possible Type of Water-Rich Terrestrial Planet in Extrasolar Planetary Systems, *America Geophysical Union 2008 Fall Meeting* (2009.12.15-19, San Francisco).
4. 関根康人, 鈴木勝彦, 仙田量子, 田近英一, 多田隆治, 後藤和久, 山本信治, 大河内直彦, 小川奈々子 (2008) カナダ・原生代初期ヒューロニアン累層群における

- 氷河性堆積物層のオスミウム同位体変動:酸素増大イベントと気候変動の因果関係に与える示唆, 日本地球化学会年会 (2008.9.17-21, 東京).
5. 山田直樹, 橘省吾, 上野雄一郎, 鶴岡昂, 中川麻悠子, 吉田尚弘, 田近英一 (2008) 原生代初期堆積層 (ヒューロニアン累層群) 中の硫化物に見られる非質量依存型硫黄同位体分別, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会 (2008.5.25-30, 千葉).
  6. Sekine, Y., Suzuki, K., Senda, R., Tajika, E., Tada, R., Goto, K., Kanai, K., and Yamamoto, S. (2008) Osmium isotope anomalies at the end of the Paleoproterozoic Huronian glaciation: the rise of atmospheric oxygen and snowball earth, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会 (2008.5.25-30, 千葉).
  7. 田近英一 (2008) 地球史を通じた炭素循環と気候進化, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会 (2008.5.25-30, 千葉).
  8. 田近英一 (2008) ハビタブルプラネットの条件と進化, 生命の起原および進化学会第 33 回学術講演会 (2008.3.16, 東京薬科大).
  9. Sekine, Y., Tajika, E., Ohkouchi, N., Ogawa, N.O., Goto, K., Tada, R., Kanai, K., and Yamamoto, S. (2007) Large negative excursion of organic carbon isotope in the aftermath of the Paleoproterozoic glaciation in North America: methane hydrate destabilization, climate recovery, and the Great Oxidation Event, American Geophysical Union Fall Meeting (2007.12.10-14, San Francisco).
  10. Sekine, Y. (2007) Methane hydrate destabilization in the aftermath of the Paleoproterozoic Snowball Earth: an extreme greenhouse condition and a trigger for the Great Oxidation Event. The 21st Century Center of Excellence International Symposium (2007.12.3-4., Tokyo).
  11. Kanai, K., Hirai, T., Tajika, E., Tada, R., Sekine, Y., Goto, K., Yamamoto, S. (2007) Concentration of iron and manganese just after the Paleoproterozoic glaciations, Geological Society of America Annual Meeting 2007 (2007.10.28-31, Denver).
  12. 田近英一 (2007) 地球環境の進化と変動, 日本気象学会 2007 年秋季大会 (2007.10.14-16, 北海道大学).
  13. 田近英一 (2007) 惑星環境と生命の共進化, 日本宇宙生物科学学会第 21 回大会 (2007.9.27-28, お茶の水女子大学).
  14. 金井健, 平井建丸, 多田隆治, 田近英一, 関根康人, 後藤和久, 山本信治 (2007) ヒューロニアン累層群ゴウガンダ層における鉄・マンガン濃集 - 原生代初期の酸素濃度増大と全球凍結のシグナル - , 日本地球惑星科学連合 2007 年大会 (2007.5.19-24, 千葉).
  15. Sekine, Y., E. Tajika, M. Tanimizu, N. Ohkouchi, N. O. Ogawa, R. Tada, K. Goto, S. Nakai, K. Kanai, S. Yamamoto (2007) Pb and C isotopes in Paleoproterozoic carbonates in North America: Implications for the correlation with a snowball Earth at 2.2Ga, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会 (2007.5.19-24, 千葉).
  16. 橘省吾, 木村壮, 鈴木勝彦, 田近英一, 多田隆治, 磯崎行雄, 後藤和久, 山本信治 (2007) 太古代中期の硫化物に見られる硫黄の非質量依存型同位体分別, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会 (2007.5.19-24, 千葉).
  17. Kimura, S., K. Suzuki, S. Tachibana, E. Tajika, R. Tada, Y. Isozaki, K. Goto, S. Yamamoto (2007) Re-Os age of pyrite conglomerates from Livingstone Creek Formation in the Huronian Supergroup, Ontario, Canada, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会 (2007.5.19-24, 千葉).
  18. 田近英一 (2007) 惑星環境進化と生命, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会 (2007.5.19-24, 千葉).
  19. 木村壮, 鈴木勝彦, 橘省吾, 田近英一, 多田隆治, 磯崎行雄, 後藤和久, 山本信治, 平井建丸 (2006) Re-Os age for pyrite grains with MIF signal in the Huronian Supergroup, Canada, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会 (2006.5.14-18, 千葉).
- 参考情報:
1. 関根康人 (2009) 白金族元素オスミウムの地球表層環境での挙動と大酸化イベント, 第 10 回名阪神衝突研究会 (2009 年 6 月 6 日, 大阪, 発表予定).
  2. Sekine, Y., Suzuki, K., Senda, R., Tajika, E., Tada, R., Goto, K., Yamamoto, S., Ohkouchi, N., Ogawa, N.O. (2009) Osmium evidence for relationship between atmospheric oxygenation and Paleoproterozoic glaciation, Goldschmidt Conference (2009.6.21-26, Davos, 発表予定).
  3. Sekine, Y. (2009) Relationship between the rise of atmospheric oxygen and ancient climatic disaster, Japanese-German Frontiers of Science Symposium (日独先端科学(JGFoS)シンポ

ジウム) (2009.10.30 - 11.1., Tokyo, Japan, 発表予定).

〔図書〕(計4件)

1. 田近英一 (2009) DOJIN 選書「地球環境46億年の大変動史」, 化学同人, 228pp.
2. 田近英一 (2009) 新潮選書「凍った地球」, 新潮社, 196pp.
3. 田近英一 (2008) 地球と生命の共進化～スノーボールアースイベント, 「ACADEMIC GROOVE 東京大学アカデミック・グループ」(東京大学創立130周年記念出版物), p.96-99, 東京大学編, 東京大学出版会, 123pp.
4. 田近英一 (2007) 第13章 全球凍結イベントと地球環境の安定性, 「惑星地球の進化」(松本良, 浦辺徹郎, 田近英一), p.206-219, 放送大学教育振興会, 254pp.

〔その他〕

アウトリーチ活動等:

1. 田近英一 (2009) 全地球凍結イベント～地球環境の特異な変動現象～, 東京大学公開講座「特異」(2009.4.25, 東京大学).
2. 田近英一 (2009) 全地球凍結, 地球維新塾 (2009.4.23, 東京).
3. 田近英一 (2009) 地球の歴史と生命を考える, かわさき市民アカデミー「生命科学の多様な世界」ワークショップ (2009.4.21, 川崎市).
4. 田近英一 (2009) 地球環境の変遷と生命の絶滅と進化, かわさき市民アカデミー講座「いのちの科学」(2009.4.21, 川崎市).
5. 田近英一 (2009) ここに注目: 全球凍結, NHK ラジオ第一「私も一言! 夕方ニュース」(2009.4.22).
6. 田近英一 (2008) 過去の地球環境変動を探る～現在の地球は温暖なのか寒冷なのか?～, 三省堂サイエンスカフェ (2008.11.29, 三省堂書店).
7. 田近英一 (2008) 全地球凍結～地球史と生命進化の謎～, 第14回東京大学理学部公開講演会 (2008.11.1, 東京大学).
8. 田近英一 (2008) 地球を“惑星”として理解する, 東京大学教養学部進学情報センターシンポジウム (2008.4.25, 東京大学).
9. 田近英一 (2007) 理学のキーワード第8回「スノーボールアース」, 東京大学大学院理学系研究科・理学部ニュース, Vol.39, No.2 p.13.
10. 田近英一 (2007) スノーボールアースと生命の進化, 生命の科学・遺伝, Vol.61, No.6, 48-53.

11. 田近英一 (2007) スノーボールアース, 日本科学未来館・地下展・一般講演会 (2007.10.6, 日本科学未来館).
12. 田近英一 (2006) スノーボールアース - 地球と生命の共進化 -, 慶應義塾高等学校SSH講演会 (2006.11.20, 慶應義塾高等学校).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田近 英一 (TAJIKI, Eiichi)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号: 70251410

### (2) 研究分担者

多田 隆治 (TADA, Ryuji)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号: 30143366  
橘 省吾 (TACHIBANA, Shogo)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号: 50361564

### (3) 連携研究者

関根 康人 (SEKINE, Yasuhito)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教  
研究者番号: 60431897

後藤 和久 (GOTO, Kazuhisa)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 10376543

大河内 直彦 (Ohkouchi, Naohiko)  
(独)海洋研究開発機構・海洋・極限環境生物圏研究領域・海洋環境・生物圏変遷過程研究プログラム・プログラムディレクター  
研究者番号: 00281832

鈴木 勝彦 (SUZUKI, Katsuhiko)  
(独)海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・主任研究員  
研究者番号: 70251329

浜野 洋三 (HAMANO, Yozo)  
(独)海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・地球内部ダイナミクス基盤研究プログラム・プログラムディレクター  
研究者番号: 90011709

永原 裕子 (NAGAHARA, Hiroko)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号: 80172550

### (4) 研究協力者

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: 90144714

村上 隆 (MURAKAMI, Takashi)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号: 00253295