

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 21 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23403014

研究課題名(和文)新原生代の気候激変と動物進化を関連付けるDOXAM仮説の検証

研究課題名(英文)Examination of DOXAM hypothesis that links Neoproterozoic animal evolution with climate changes

研究代表者

狩野 彰宏(Kano, Akihiro)

九州大学・比較社会文化研究科(研究院)・教授

研究者番号：60231263

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,100,000円

研究成果の概要(和文)：新原生代に起こった多細胞動物の進化と気候激変を関連づけるために、中国・ブラジル・スペインでエディアカラ系の堆積岩を調査し、岩石・化石試料を採集した。その結果、貴州省において未記載の海綿骨片化石を、ブラジル国バーイア州では骨片を持たない海綿動物と思われる化石を発見した。後者に共産する直径4mmほどの球形構造はおそらく海綿動物の卵であると考えられる。炭素同位体層序の結果は、これらの海綿動物化石がエディアカラ紀前期のものであることを示す。この時期の地球表層は酸素に乏しく、海水には大量の有機物が懸濁していた。海綿動物はこの海洋条件に適応するため、固着性の濾過栄養動物として進化したと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Ediacaran sedimentary sequences in China, Brazil, and Spain were examined in order to understand the linkage between the Neoproterozoic animal evolution and drastic climate changes. We newly found sponge spicules from Guizhou province in China, and sponge-like fossils of digitate forms from central Bahia in Brazil. The latter is associated with spheroidal structures of ~4 mm in diameter, which was likely eggs of the digitate fossils. Chemostratigraphy based on inorganic carbon isotope indicates that these fossils were early Ediacaran when the ocean and atmosphere were poor in oxygen. Because the degradation of organic matter was somehow limited, a huge amount of organic matter were suspended in the anoxic oceanic water column. Sponges evolved as the first multicellular animals for adapting these oceanographic conditions. Their sessile and filter feeding habitats were the consequences of this scenario.

研究分野：地質学

キーワード：動物進化 新原生代 安定同位体 海綿動物 炭素循環

### 1. 研究開始当初の背景

新原生代後期(7.3~5.4億年前)は全球凍結に象徴される様な地球環境激変期であり、一方では多細胞動物の進化を含む生物圏革新期でもある。極度の寒冷化が繰り返し起こっていた時代に動物が多様化したことは、地球史最大のミステリーの1つであり、十分な説明が提示されていない。そこで、後氷期の層状化した海水中での「エサ」の増加により多細胞動物が進化したとする「DOXAM 仮説」を提案した(Kano et al., 2011)。この新説は多細胞動物の進化を気候の激変と関連付けて説明するという点で革新的であり、最も原始的な多細胞動物の2つのグループ(海綿・棘胞動物)が濾過栄養であることと整合的である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、中国・ブラジルなどに分布する新原生代後期の地層を調べ、DOXAM 仮説を検証することである。

仮説検証の鍵は古海洋構造の復元と海綿・棘胞動物の認定の2つであり、そのためには1) 丹念な堆積岩の層序学的検討、2) 各種安定同位体比を含む環境指標の分析、3) 化石構造の分類学的検討などが必要である。特に、全球凍結後の層状化した海洋で起こりうる大量の有機物溜まりのとバイオマーカーにより認定可能である。本研究では「研究内容」で記載する方法で、2つ「鍵」の層位的分布を寒冷化と関連づけて提示することを目指す。

また、研究代表者は2010年のブラジルでの予察的調査で、海綿動物が形成したと思われる礁状堆積物を見いだした。これは最初の動物礁かもしれない。この堆積物の成因・層位的位置付けも本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

新原生代の保存良好な堆積岩が露出する中国、湖南省・貴州省、およびブラジル国バイア州において地質調査を行い、岩相柱状図を作成するとともに、合計約1500個の岩石試料を採集した(狩野と高島が担当)。研究対象となった地層(Doushantuo 層および Salitre 層)は同位体分析に有用な炭酸塩成分に富むという利点を持っている。

採集した全ての岩石から岩石薄片を作成し、岩相および続成組織の観察を行った(主に狩野が行い、高島が補助した)。また、岩石試料の変質が少ない部分から粉末試料を作成し、1) 炭酸塩成分の炭素・酸素同位体比(狩野が九州大学で測定)、2) 有機物成分の炭素・窒素同位体比(長谷川が金沢大学で測定)、3) 炭酸塩成分のストロンチウム同位体比(狩野が高知コアセンターで測定)などを測定した。

また、鏡下において化石構造が観察された試料については、様々な追加観察と分析を行った。特に、珪化・リン酸塩化などの鉱物交代が起こっている化石試料については、化石

を含む部分を希釈ギ酸で処理し、個体抽出を試みた。抽出された化石試料は走査型電子顕微鏡で観察するとともに、EDSを用いて元素の分布についても検討した。

### 4. 研究成果

平成23年度以降の4年間に得られた重要な成果は以下の通りである。これらのうち、(1)は Kunimitsu et al. (2011) で、(4)は Furuyama et al. (2013) で公表している。他の成果についても、現在公表論文を準備中である。

(1) 中国湖南省の Yangjiaping セクションでは、エディアカラ系(635-541 Ma)の層序対比や古海洋環境の再検討のために、堆積相の観察や地球化学的分析を行った。本セクションの海洋条件は、マリノアン氷期(635 Ma)前後の穏やかで還元的な環境から、その後の高エネルギーの浅海へと変化した。551Ma以降に堆積した、Dengying 層上部に見られるティーピー構造は、ラグーンや蒸発環境を示すかもしれない。岩相変化と化学層序から個別に導いたエディアカラ系の層序は整合的であり、厚い Doushantuo 層と薄い Dengying 層が特徴的であった。対比の目安になる無機炭素同位体比( $\square^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ )の負の異常は、最下部 Doushantuo 層のキャップカーボネート、上部 Doushantuo 層、PC/C 境界の3つの層準で記録された。しかし、三峡地域や他の南中国地域で記録される Doushantuo 層メンバーII/III 境界での負の異常は無い。このことは、堆積場がウーイドを含むグレインストーンが厚く発達するような、極浅海だったことと関連していると思われる。中部 Doushantuo メンバーIII から Doushantuo/Dengying 境界に記録された2つめの負の異常は、湧昇流の影響を示す可能性が高い。また、この層準の頂部には極端に低い $\square^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  値が記録されており、ハイドレートの分解に関連したメタン起源の炭素の流入を示す。Yangjiaping セクションの炭素同位体比は全体的に高く、炭酸塩と有機物の値が平行(coupling)して変化するという特徴があった。生産性がとても高く、非常に浅かった堆積場では、薄い水柱中で海水がよく混合されていたと考えられる。一方、Dengying 層の有機・無機同位体比は明らかな非平行的変化を示し、DOC リザーバーの分解を示す。

(2) 一方、湖南省 Wangchang セクションや貴州省 Wenghui セクションに露出する Doushantuo 層の深海相では異なる化学層序のトレンドが得られた。2つのセクションに見られる豊富なフランボイダル黄鉄鉱や有機物は、還元的な堆積環境を示す。同様に、炭酸塩成分中の高いマンガン含有量と低い炭素同位体比は、マリノアン氷期後の還元的な深層水の特徴である。このような条件下で、

DOC リザーバーは揚子地塊のスロープから海盆環境で発達した。有機・無機炭素同位体比の非平行は、Doushantuo 層の下部から中部層準にかけて続き、DOC リザーバーの発達と分解を示す。上部 Doushantuo 層に入ると、炭素同位体比の非平行は弱まり、マンガン濃度が減少することから、海水の垂直循環が復活し、深い環境においても海水が混合されたと考えられる。

(3) 南中国地域における従来の報告結果を考慮すると、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  値は Doushantuo 層のキャップカーボネートを除いて、異なる深度で異なる変動パターンを示すことが見えてくる。マリノアン氷期直後の海洋は層状化しており、還元的で、DOC リザーバーが大きく発達した。DOC リザーバーは一時的に、そして部分的に Doushantuo メンバーII/III 境界で分解したが、深海は依然として還元的であった。唯一の例外は本研究で示された Yangjiaping セクションの記録であり、 $\square^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  と  $\square^{13}\text{C}_{\text{org}}$  値の平行的変化は DOC リザーバーの影響を受けることのない浅い環境を反映していると思われる。あるいは、周辺との海水の交換が制限され、独立した炭素サイクルが起こりうる、浅いラグーンのような環境だったのかもしれない。海洋循環の復活は Doushantuo メンバーIII の上部で起こった。このことは、浅海相の  $\square^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  値の減少傾向や深度勾配の縮小に現れ、南中国全域での平行的変化を導いた。これにより示される海洋の酸化的条件は、堆積深度に関係なく、Dengying 層の堆積期間を通して持続するようになる。

(4) 本研究の重要な成果として、湖南省 Fengtan セクションおよび貴州省 Wenghui セクションからの化石の発見が挙げられる。2つの化石はいずれもガスキエス氷期以前に堆積した地層から産出し、還元的な条件下で保存された。Fengtan セクションの化石はアクリターク（おそらく藻類の胞子囊殻）がアパタイトにより交代されたものである。このアパタイト化は有名な Weng'an セクションで見られる動物胚の保存プロセスと類似していると考えられる。一方、Wenghui セクションの化石は骨針を持つ海綿動物であり、骨針はシリカと黄鉄鉱により交代されている。浅海域からの運搬も考えられるが、骨片凝集体に著しい破損の痕跡は見られない。Wenghui の海綿動物がこの場所で生息していたならば、初期の海綿動物は酸素の乏しい環境に適応し、おそらく DOC リザーバーを糧としていたと考えられる。マリノアン氷期後の海洋層状化が海綿動物の進化に働いた可能性も指摘される。

(5) ブラジル国バイア州中部に分布するウナ層群・Salitre 層の炭酸塩岩は総厚 1000m 以上も続く厚い炭酸塩主体の新原生代の堆

積物であるが、その年代的帰属は不明であった。本研究では Salitre 層分布域の詳細な調査を行い、下位の氷河性礫岩に重なるキャップカーボネートを初めて認定した。さらに、Salitre 層の Sr 同位体比は本層がエディアカラ系であることを示した。すなわち、礫岩は 635Ma のマリノアン氷期に帰属する可能性が高い。Salitre 層炭酸塩岩はストロマトライトの様な極浅海域で堆積したのから、スランプ構造を伴う深海性のもまであり、全体を通じて 3 組のメガシークエンスが示されている。本地域で採集した炭酸塩岩の炭素同位体比を測定したところ、下位層準の 0‰ 付近のグループと上位層準の +8‰ 付近のグループに分けられる。ここでは、ガスキエス氷期や Shuram エクスカーションに対比される顕著な  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  値の負の異常は確認されなかった。層厚 1000m 以上の Salitre 層はエディアカラ紀初期に急速に堆積したものである。

(6) Salitres 層の第 3 メガシークエンスの層状石灰岩に発達する「スロンボライト」は密集した直径約 5mm の指状構造で構成され、全体として厚さ数 m、幅 20m 超のレンズを形成する。指状構造の多くは破断されているが、いくつかの場所では層理面と平行であり、ほぼ一方に配列している。従って、シアノバクテリアのような走向性を持つ微生物によって作られた構造ではない。また、古生代の石灰質マイクロブに特徴的な微細構造も持たない。指状構造内部に認められる直径 100 $\mu\text{m}$  のペロイド状組織は、海綿動物の腐敗時に生じる炭酸塩沈殿物と類似する。これら特徴に加えて、スロンボライト周辺に認められる直径 4 mm 程度の小球体は、有性生殖による“卵”、もしくは無性生殖による“芽球”である可能性がある。小球体には幼生への発生段階を暗示する構造も認められた。

スロンボライト周辺の炭酸塩岩は高い有機物含有量 (0.2~1.0%) を持ち、一部スランプ褶曲を示している。浅海環境を示す堆積構造 (ストロマトライト・フラットペブルなど) を欠くことから、波浪の影響が及ばず、光が届かない水深で堆積したものである。極めて高い無機炭素同位体比 (+8~+9‰)、全球凍結後の海洋に特徴的な高い生物生産性と埋没有機物量を支持する。より重要なのは、指状組織内の有機炭素が、層状石灰岩の有機炭素よりも同位体比が 1~2‰ 高い傾向を示す事である。これは、食物連鎖の段階進行に応じた  $^{13}\text{C}$  の濃集を示唆しているのであれば、この結果は「指状組織 = 濾過栄養動物」という復元を強く支持する証拠になる。

(7) より古いキオゲニア紀から報告された“海綿動物化石”の帰属には議論がある。やはり、明確な骨針を持つ海綿動物化石はエディアカラ紀に出現する。骨針を持たないサリトレ層の指状組織は、より原始的な海綿動物だっ

たのかもしれない。骨片が補食圧に対する適応構造であるならば、大型の補食動物が出現していない時代では、海綿動物は骨片を持つ必然性は無い。

全球凍結以降の地球表層環境や海洋構造は多くの要因に支配されて進化したと考えられる(図 1A)。エディアカラ紀初期の層状化した海洋の有機物溜まりで、動物が多細胞化したという DOXAM 仮説は、今後も検討する余地があるだろう。

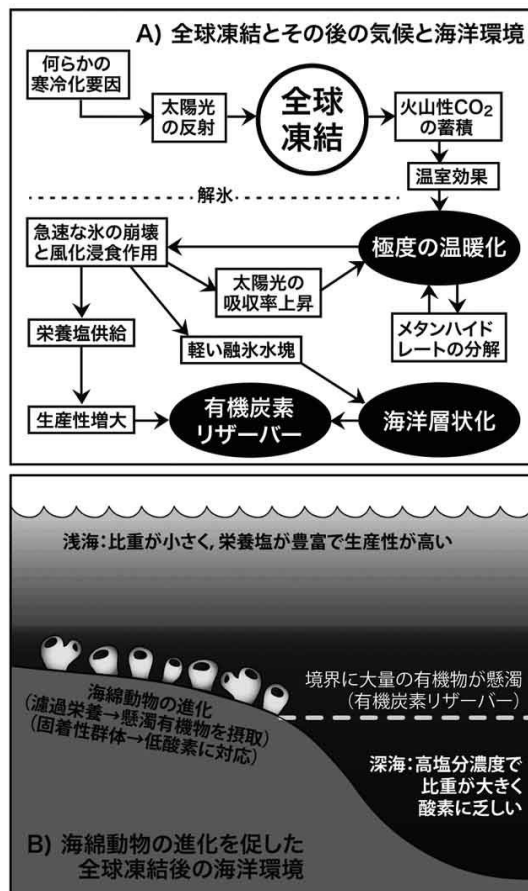


図 1. (A) 全球凍結およびその後の気候と海洋環境。(B) 海綿動物の進化を誘発した全球凍結後の海洋環境 (DOXAM 仮説; Kano et al. 2011)

## 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 6 件)

狩野彰宏・古山精史朗 (2015) エディアカラ紀の環境激変と動物進化: 地球史統合科学の成果. 地球科学, 69, 175-183.

Furuyama, S., Kano, A., Kumimitsu, Y., Osanai, Y., Adachi, T., Liu, X., Wang, W. (2013) Ediacaran mineralized microfossils from the basal facies of the Doushantuo Formation in northwestern Hunan Province, South

China. Paleontological Research, 17, 241-250.

Kakizaki, Y., Ishikawa, T., Nagaishi, K., Tanimizu, M., Hasegawa, T., Kano, A. (2012) Strontium isotopic ages of the Torinosu-type limestones (latest Jurassic to earliest Cretaceous, Japan): implication for biocalcification event in northwestern Palaeo-Pacific. Journal of Asian Earth Sciences 46, 140-1493

狩野彰宏 (2012) 初期動物の段階的進化と殻の獲得. 遺伝, 66, 509-513.

Kunimitsu, Y., Setsuda, Y., Furuyama, S., Weng, W. and Kano, A. (2011) Ediacaran paleoceanography from lithological and geochemical studies in northwestern Hunan Province, China. Precambrian Research, 191, 194-208

Kano, A., Kunimitsu, Y., Takashima, C., Shiraishi, F., Wang, W. (2011) The evolution of animal multicellularity stimulated by dissolved organic carbon in early Ediacaran ocean: DOXAM hypothesis. Island Arc, 20, 280-293.

[学会発表](計 24 件)

狩野彰宏 (2014) ブラジル国バーイア州中央部に発達する“エディアカラ系スロンボライト”の海綿動物的特徴. 日本地質学会(鹿児島大学)

狩野彰宏 (2014) エディアカラ紀の異様な炭素循環と多細胞動物の進化. 地学団体研究会総会(佐賀大学)

古山精史朗・國光陽子・狩野彰宏 (2014) 中国南部のエディアカラ系炭酸塩岩に見られる天水続成の証拠とガスキエス氷期での陸上露出. 地球惑星科学連合大会(パシフィコ横浜)

古山精史朗・狩野彰宏 (2014) 湖南省北西部 Yangjiaping セクションのエディアカラ系 Doushantuo 層における無機炭素同位体変動の原因と古環境. 地質学会西日本支部(佐賀大学)

狩野彰宏・古山精史朗・杜偉, 貴州省北東のエディアカラ系から産出した海綿様化石. 日本古生物学会(兵庫県立博物館)

Kano, A., Okumura, T., Shiraishi, F., Takashima, C., Matsuda, N. (2013) Neoproterozoic thrombolite and spherical structures from Brazil: An image of the oldest multicellular animal. International Biogeoscience Conference 2013 (Nagoya)

古山精史朗・狩野彰宏・杜佛・王約 (2013) 貴州省北東部 Wenghui 地域における Ediacara 系 Doushantuo 層の化学層序

- と古海洋学的研究．日本地質学会（東北大学）
- 奥村知世・古山精史朗・狩野彰宏(2013)中国北東部江蘇省に分布する新原生代徐淮層群 Zhaowei 層に見られるストロマトライト組織と糸状体微化石．日本地質学会（東北大学）
- 狩野彰宏・森大器・藤田ひかる・曾根知実・古山精史朗・奥村知世・柿崎喜宏(2013)サリトレ層炭酸塩岩（新原生代，ブラジル）の有機・無機炭素同位体比から見た炭素循環と組織形成．日本地質学会（東北大学）
- 奥村知世・古山精史朗・狩野彰宏(2013)中国江蘇省に分布する新原生代徐淮層群の珪化したストロマトライト中の糸状体微化石．日本古生物学会（熊本大学）
- 狩野彰宏・奥村知世・高島千鶴・白石史人(2013)サリトレ層炭酸塩岩（新原生代，ブラジル）の指状組織と小球体：最古の動物のイメージ．日本古生物学会（熊本大学）
- 古山精史朗・狩野彰宏(2013)貴州省北東部における Ediacara 系 Doushantuo 層の岩相と炭素同位体層序．日本古生物学会（熊本大学）
- 古山精史朗・狩野彰宏(2013)貴州省中央部における Ediacara 系の岩相と生物相．地球惑星連合大会（幕張メッセ）
- 狩野彰宏・古山精史朗・奥村知世・曾根知実・高島千鶴・白石史人(2013)ブラジル・バイーア州の新原生代スロンボライトと球体構造：最古の多細胞動物として想定されるイメージ．地球惑星連合大会（幕張メッセ）
- 古山精史朗・狩野彰宏(2013)貴州省中央部における Ediacara 系の岩相と生物相．地質学会西日本支部（島根大学）
- 古山精史朗・國光陽子・王偉・狩野彰宏(2013)エディアカラ系 Doushantuo 層海盆相からの微化石とその層序マーカーとしての意義．日本古生物学会（横浜国立大学）
- 狩野彰宏・古山精史朗・高島千鶴・白石史人(2012)ブラジル・バイーア州の新原生代スロンボライトの年代と生物活動．日本地質学会（大阪府立大）
- Kano, A. (2012) An evolutionary story of Porifera: linkage between the most drastic climate change and the animal multicellularity. JGU (Chiba)
- 古山精史朗・國光陽子・王偉・狩野彰宏(2012)中国湖南省エディアカラ系 Doushantuo 層から産出した有殻微化石．地球惑星科学関連合同学会（幕張メッセ）
- 狩野彰宏・高島千鶴・白石史人(2012)ブラジル・バイーア州のキオゲニアン炭酸塩岩中のスロンボライトと有殻生物．地球惑星科学関連合同学会（幕張メッセ）
- 21 狩野彰宏・古山精史朗・國光陽子・王偉(2011) 全球凍結による海綿動物と有殻微生物の進化．日本古生物学会（金沢大学）
- 22 古山精史朗・國光陽子・王偉・狩野彰宏(2011)中国湖南省エディアカラ系 Doushantuo 層から産出した Vase-shaped microfossils．日本古生物学会（金沢大学）
- 23 狩野彰宏(2011)全球凍結による動物多細胞化の誘発．地球惑星科学関連合同学会（招待：幕張メッセ）
- 24 古山精史朗・狩野彰宏・國光陽子(2011)湖南省北西部に分布するエディアカラ系堆積岩の化学層序的考察．地球惑星科学関連合同学会（幕張メッセ）
- 〔図書〕(計 0 件)
- 〔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  
<http://www.scs.kyushu-u.ac.jp/earth/kan/o/prec.html>
6. 研究組織
- (1)研究代表者  
狩野 彰宏 (KANO, Akihiro)  
九州大学・大学院比較社会文化研究院・教授  
研究者番号：60231263
- (2)研究分担者  
長谷川 卓 (HASEGAWA, Takashi)  
金沢大学・自然システム学系・教授  
研究者番号：50272943
- 高島 千鶴 (TAKASHIMA, Chiduru)  
佐賀大学・文化教育学部・准教授  
研究者番号：10568348