

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400495

研究課題名(和文) 後期オルドビス紀の古環境変遷：オルドビス紀 - シルル紀境界で何が起きたのか？

研究課題名(英文) Paleoenvironmental change during the Late Ordovician and Early Silurian time

研究代表者

上松 佐知子 (AGEMATSU, Sachiko)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：50466661

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では古生物学的、堆積学および地球化学的手法を用いてオルドビス紀末の古環境を復元し、この時期の生物大量絶滅事変を引き起こした環境変動について考察を行った。同時代末には急激な寒冷化が起きたことが知られているが、本研究地域でも堆積学的研究および炭素同位体比分析によって、寒冷化とこれに伴う海退イベントが確認できた。また硫黄と炭素同位体の比率から、環境の回復には比較的長い時間が掛かり、前期シルル紀を通じて気候は温暖期と寒冷期を繰り返しながら徐々に温暖化していったことが明らかになった。この環境変遷は堆積学および微古生物学的観点からも支持される。

研究成果の概要(英文)：This study reconstructs an environmental change during the latest Ordovician to earliest Silurian time, when a mass extinction occurred, based on the paleontological, sedimentological, and geochemical analyses. The end-Ordovician global cooling is widely accepted as being the cause of the extinction. The sedimentological study and the carbon isotopic analysis show that this study area also went through a cooling and regression events in the Late Ordovician. The carbon/sulfur ratio reveals that recovery of the environment took a relatively long time and that the climate was gradually getting warm with a cyclic alternation of warm and cool periods throughout the Early Silurian. The sedimentological and micropaleontological data also support this conclusion.

研究分野：微古生物学

キーワード：生層序 炭素同位体 硫黄同位体 古環境

1. 研究開始当初の背景

オルドビス紀 - シルル紀境界 (Ordovician /Silurian boundary、OSB) では顕生代で 2 番目に大きな規模の生物大量絶滅事件が起きたことが知られている。この絶滅事件には大規模な大陸氷床の発達に影響したと考えられているが、そのような環境変動を引き起こしたメカニズムについてはほとんど解明されていない。古環境変遷を考察するために不可欠な地球化学的研究を進める必要がある。

これまでに研究代表者・分担者らは、マレーシア国北部に分布する石灰岩および頁岩からなる地層の微化石層序の検討を行い、本地域に OSB が存在することを明らかにした。また白亜紀 - 古第三紀境界の地球化学的研究において、主に硫黄同位体を用いた環境変動の解明に成功していることから、これらの知識と経験を OSB での研究に生かすことができる。

2. 研究の目的

本研究では、「オルドビス紀末に大陸氷床の発達を引き起こす気温低下が何故起きたのか」という観点から、この時代の古環境変遷過程を明らかにすることを目的とする。具体的には以下の 3 点である。

- (1) 上部オルドビス系 ~ 最下部シルル系について、詳細な微化石生層序を確立する。
- (2) 炭素、酸素、硫黄、窒素同位体比および有機炭素量、微量元素等の測定を行い、その変動について明らかにする。
- (3) 最終的に、化石群集の変動、岩相解析、および地球化学的データを総合して、後期オルドビス紀から最前記シルル紀における古環境変動を解明する。

3. 研究の方法

上記(1)~(3)の目的それぞれについて、以下のような手法で研究を進める。

- (1) 碎屑岩層の生層序を確立するにあたり、化石の産出が乏しいことが問題であるが、コノドント、筆石、放散虫を用いた複合的な生層序を検討することによってこれを解消す

る。コノドントに関しては酸処理法のみに関らず、岩石表面を観察する方法で化石の抽出を目指す。

(2) 地球化学的検討では、以下の点に重点を置いて考察を行う。 ^{18}O 値から水温の上下変化を明らかにし、寒冷化の時期を特定する。

^{13}C 値および全有機炭素量からは当時の海洋における生物生産量の増減を考察できる。

^{34}S から、火山噴火あるいは隕石衝突によって大気中に増加する硫酸エアロゾルの有無を考察し、海洋の酸化還元状況を分析する。

^{15}N 値および微量元素より、極超新星爆発の X 線バーストによって生じる可能性のある硝酸酸性雨の有無を考察する。微量元素分析では、特定の層におけるこれら元素の異常濃集も確認する。

(3) 上記の結果を総合して、考察を行う。

4. 研究成果

研究対象としたのは、マレーシア国ペリス州北部のタイ・マレーシア国境付近およびマラッカ海峡北部に位置するマレーシア国ランカウィ諸島ラングン島である。本島北西部の黒色堆積岩類からなる海岸を主要な露頭として集中的に調査を行い、合計 4 セクションの詳細な柱状図を作成した(図 1)。セクション 1 は層厚 240 cm で、筆石化石を含む黒色泥岩と珪質な細粒~中粒砂岩の互層からなる。セクション 2 は厚さ 1,340 cm の黒色泥岩ならびに珪質細粒砂岩を構成要素とする。セクション 3 と 4 はそれぞれ層厚 178 cm と 272 cm を示し、前者は珪質細粒砂岩、後者は黒色泥岩を主体とする。これらのセクションは互いに小規模な断層を介して接するが、層厚傾斜はほぼ同一であることから、ずれは比較的小さく、下位よりセクション 1、2、3、4 の順にほとんど連続的に累重すると考えられる。総層厚は 19 m である。これらの碎屑岩層は下位のオルドビス系石灰岩および上位のシルル系石灰岩とそれぞれ断層で接する。調査セクションから合計約 140 個の岩石試料を採取した。またセクション最下部と最上部(それぞれセクション 1 下部とセクション 4 上部)において筆石化石を採取した。



図1. 調査セクションの露頭写真

採取試料を用いて生層序学的、堆積岩石学および地球化学的検討を行ったところ、以下の結果が得られた。

(1) 岩相および微化石群集

調査セクションは主に黒色の泥岩あるいは細粒砂岩から構成される。薄片観察によると、これらの碎屑岩はシルトおよび極細粒砂サイズの石英粒子と有機物と思われる黒色物質からなり、葉理の発達する部分と多量の微化石を含む部分が繰り返す。また厚さ数 mm の黄鉄鉱粒の密集層が頻繁に挟まれる。調査セクション最下部（セクション1下部）には層厚約 60 cm の砂岩および礫岩層が狭在する。

本研究ではフッ酸を用いた岩石試料の処理を行ったが、微化石を単体で抽出することはできなかった。一方薄片観察では多数の微化石が確認できた。これらのほとんどは微小な球状化石で、厚さ数 mm から 1 cm 程度の密集層を繰り返し形成する。化石密集層中にはコノドント、放散虫および有孔虫化石が少数含まれるが、大部分を占める球状の化石は直径が 100~200 μm のものが多く、表面に突起が確認できる場合があることから、おそらくアクリタークであると考えられる。これらの化石はほぼすべてが微晶質石英で置換され、球体の内部がカルセドニーに置き換わっているものや黄鉄鉱が晶出しているものも見られる。

(2) 大型化石と生層序学的検討

本研究では複数層準から筆石化石を採取した。筆石化石は特にセクション最下部と最上部から多産するが、多層準にもまばらながら含まれる。本研究ではこれ以外に大型化石を採取することができなかったものの、当該地域のこれまでの研究によると、本セクションからは腕足類および三葉虫化石が産出している。以上の大型化石の生層序学的検討に基づくと、セクション最下部は最上部オルドビス系の *persculptus* 筆石帯に、最上部は最下部シルル系の *atavus~sedgwickii* 筆石帯に対比される。また OSB はセクション1最上部（セクション基底部より上位約 200 cm）付近に存在すると考えられる。

(3) 地球化学的分析

調査セクションから採取した約 140 個の岩石サンプルについて、以下の検討を行った。本研究では黒色碎屑岩セクションにおいて当初の予定よりも細かいサンプリングを行ったため、これらの碎屑岩形成時の古環境推定に的を絞って分析を行った。OSB の古環境学的研究では特に炭素同位体比変動の解析が盛んに行われているが、本研究では複数の同位体データ変動を用いることで、より詳細な海洋古環境変動の理解を試みた。まず炭素同位体比 ($^{13}\text{C}_{\text{organic}}$ (‰)) はセクション最下部の粗粒碎屑岩部分で顕著な正の突出を示す。このような ^{13}C の正異常は OSB における気候寒冷化を示す特徴として世界的に広く認識されているものである。

さらに炭素および硫黄の同位体分析を行った結果、調査セクション下部（セクション1と2）において炭素/硫黄比(重量%/重量%)が1以下から30の間で周期的に変動することが明らかになった。このC/S比は先に述べた ^{13}C 正異常に伴って最小値となる。これより上位の地層ではC/S比は振動し、極大値はほぼ30程度で一定であるが、極小値は振動が続くにつれて徐々に大きくなっていくことが明らかになった。

以上の結果に基づき、最後期オルドビス紀から最前期シルル紀の海洋古環境の復元を試みた。

後期オルドビス紀 Katian

本地域はシブマスブロックと呼ばれる小大陸上に位置し、古生代には大陸棚性浅海域が広がっていた。この一帯にはオルドビス紀を通じて頭足類、腕足類、三葉虫、貝形虫等を豊富に含む石灰岩が堆積していたが、コノ

ドントの生層序学的考察から、Katian の中期あるいは後期までにこれらの生物群集は消滅し、石灰岩の堆積が停止したと考えられる。Hirnantian の初めには Gondwana 大陸上に大陸氷河が出現していることから、この環境変化はオルドビス紀末の急激な寒冷化によって引き起こされたと考えられる。これはオルドビス紀末の大量絶滅事変に相当すると考えられ、本地域における最も大きな絶滅は Katian から Hirnantian の間に発生したことになる。

後期オルドビス紀 Hirnantian

調査セクション下部（セクション 1）は Hirnantian の後期 *persculptus* 筆石帯に相当する。これまでに報告されている腕足類および三葉虫化石は寒冷系の Hirnantian 動物群を代表する属であり、寒冷な気候がオルドビス紀末まで継続していたことが伺える。これは上述の炭素同位体比の正異常とも整合的である。またセクション 1 の粗粒碎屑岩は海水準の低下に伴って形成されたと考えられることから、氷河期の中に氷期・間氷期が繰り返していたこと、この粗粒碎屑岩は最終氷期における低海水準期の堆積物であることが推測される。

前期シルル紀 Llandovery

筆石層序に基づくセクション 2 から 4 は下部シルル系 Llandovery に対比される。これらの黒色泥岩層を特徴づける炭素/硫黄比の規則的な変動は、生物生産量の増加と減少の繰り返しを意味し、すなわち温暖気候と寒冷気候が繰り返して出現していたことが示唆される。炭素/硫黄比変動の最低値の緩やかな上昇は環境が徐々に温暖化していったことを示しており、オルドビス紀末の氷河期からの回復が読み取れる。

現在の地球は氷河期の最中にあり、気候を支配する様々な環境要因が周期的に変動していることが知られている。本研究結果から、約 4 億 5000 万年前の氷河期にも同様の周期的な気候変動があったことが明らかになった。

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〕(計 10 件)

Yuya Izumino, Teruyuki Maruoka, Kazuo

Nakashima, Effect of oxidation state on Bi mineral speciation in oxidized and reduced granitoids from the Uetsu region, NE Japan, *Mineralium Deposita*, 査読有, vol. 51, 2016, p. 603-618.

Tomo Shibata, Teruyuki Maruoka, Takuya Echigo, Inferring origin of mercury inclusions in quartz by multifractal analysis, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 査読有, 2015, vol. 22, p. 47-52.

Takanori Kagoshima, Yuji Sano, Naoto Takahata, Teruyuki Maruoka, Tobias P. Fischer, Keiko Hattori, Sulphur geodynamic cycle, *Scientific Reports*, 査読有, 2015, p. 1-6.

丸岡 照幸, 同位体質量分析計を用いた環境変動解析, *Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan*, 査読有, vol. 62, 2014, p. 49-60.

丸岡 照幸, 白亜紀末の大量絶滅イベントを引き起こした環境変動 地球化学からの制約, *日本生態学会誌*, 査読有, 64 巻, 2014, p. 63-75.

Sachiko Agematsu, Hiroyoshi Sano, Katsuo Sashida, Natural assemblages of *Hindeodus conodonts* from a Permian-Triassic boundary sequence, *Japan, Palaeontology*, 査読有, vol. 57, 2014, p. 1277-1289.

Kosuke T. Goto, Yasuhito Sekine, Katsuhiko Suzuki, Eiichi Tajika, Ryoko Senda, Tatsuo Nozaki, Ryuji Tada, Kazuhisa Goto, Shinji Yamamoto, Teruyuki Maruoka, Naohiko Ohkouchi, Nanako O. Ogawa, Redox conditions in the atmosphere and shallow-marine environments during the first Huronian deglaciation: Insights from Os isotopes and redox-sensitive elements, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, Vol. 376, 2013, p. 145-154, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.06.018>

Manavi Jadhava, Ernst Zinner, Sachiko Amari, Teruyuki Maruoka, Kuljeet K. Marhas, Roberto Gallino, Multi-element isotopic analyses of presolar graphite grains from Orgueil, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 査読有, Vol. 113, 2013, p. 193-224, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2013>.

01.018

Sachiko Agematsu, Katsuo Sashida,
Apsorn Sardud, A new Middle Ordovician
conodont fauna from the Thong Pha Phum
area of western Thailand,
Paleontological Research, 査読有, vol.
17, 2013, p. 179-188.
Takaaki Itai, Teruyuki Maruoka, Minoru
Kusakabe, Kenji Uesugi, Muneki Mitamura,
Use of soil color meter for aqueous iron
and ammonium measurements, Soil Science
and Plant Nutrition, 査読有, vol. 59,
2013, p. 450-454, DOI:
10.1080/00380768.2013.772887

[学会発表](計 10 件)

丸岡 照幸, 同位体質量分析を用いた環
境変動解析に関する研究, 質量分析総合
討論会, 2013 年 9 月, つくば国際会議場
(茨城県つくば市)

丸岡 照幸, 生物大量絶滅を引き起こし
た環境変動: 地球化学からの制約, 日本
地質学会第 120 年学術大会, 2013 年 9 月,
東北大学(宮城県仙台市)

丸岡 照幸, 連続フロー型同位体質量分
析装置による固体試料の酸素同位体比分
析, 日本質量分析学会同位体比部会研究
会, 2013 年 12 月 4 日, 鴨川荘(広島県竹
原市)

丸岡 照幸, 上松佐知子, 指田 勝男, 生
物大量絶滅津に関わる環境変動の解析:
軽元素安定同位体比分析によるアプロ
ーチ, 質量分析総合討論会, 2014 年 5 月,
ホテル阪急エキスポパーク(大阪府吹田
市)

上松佐知子, 指田勝男, 前期三疊紀コノ
ドントの古生態, 日本地質学会第 121 年
学術大会, 2014 年 9 月, 鹿児島大学(鹿
児島県鹿児島市)

上松佐知子, 丸岡照幸, Mat Niza, 指田
勝男, オルドビス紀 - シルル紀境界にお
ける環境変動 岩相変化に関する予察的
報告, 日本古生物学会第 164 回例会,
2015 年 1 月, 豊橋市自然博物館(愛知県
豊橋市)

指田勝男, 上松佐知子, Mat Niza, マレ
ーシア・ランカウイ諸島ラングーン島の
下部デボン系(Timah Tasoh 層)から産
するテナキュライト, 日本古生物学会
第 164 回例会, 2015 年 1 月, 豊橋市自然
博物館(愛知県豊橋市)

丸岡照幸, 磯崎行雄, 硫黄・炭素同位体

組成で推定するペルム紀中 - 後期境界に
おける海洋環境変遷, 日本地球惑星科学
連合 2015 年大会, 2015 年 5 月, パシフ
ィコ横浜(神奈川県横浜市)

上松佐知子, 上杉健太郎, 佐野弘好, 指
田勝男, X 線イメージングを用いたコノ
ドント自然集合体の器官復元, 日本古生
物学会第 165 回例会, 2016 年 1 月, 京都
大学(京都府京都市)

Teruyuki Maruoka, Sachiko Agematsu,
Katsuo Sashida, Mat Niza, A study of
sulfur and carbon isotopes for
understanding environmental changes
in the Ordovician-Silurian extinction
event, 日本地球惑星科学連合 2016 年大
会, 2016 年 5 月, 幕張メッセ(千葉県千
葉市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上松佐知子 (AGEMATSU, Sachiko)
筑波大学・生命環境系・准教授
研究者番号: 50466661

(2) 研究分担者

丸岡 照幸 (MARUOKA, Teruyuki)
筑波大学・生命環境系・准教授
研究者番号: 80400646

指田 勝男 (SASHIDA, Katsuo)
筑波大学・生命環境系・教授
研究者番号: 60134201