

## 山口県下関市の下部ジュラ系豊浦層群西中山層から産出する生痕化石 *Phycosiphon* の層位変化

北嶋京祐<sup>1)</sup>, 泉 賢太郎<sup>2)</sup>, 大越健嗣<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 東邦大学理学部生命圏環境科学科 〒274-8510 千葉県船橋市三山 2-2-1

<sup>2)</sup> 千葉大学教育学部理科教育講座地学分野 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33

### Stratigraphic variation of the trace fossil *Phycosiphon* from the Lower Jurassic Nishinakayama Formation, Toyora Group, Yamaguchi Prefecture, Japan

Kyosuke KITABATAKE<sup>1)</sup>, Kentaro IZUMI<sup>2)</sup>, Kenji OKOSHI<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Environmental Science, Faculty of Science, Toho University, 2-2-1 Miyama, Funabashi-shi, Chiba 274-8510, Japan

<sup>2)</sup> Faculty & Graduate School of Education, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-Ku, Chiba-shi, Chiba 263-8522, Japan

**Abstract:** Paleontological researches on the early Toarcian (Early Jurassic) oceanic anoxic event (T-OAE) have mostly focused on body fossils including marine microfossils. However, marine trace fossils, which are important for understanding the paleoecology of trace-making soft-bodied marine benthos, have relatively less been investigated. Therefore, in this study, stratigraphic variation of the trace fossil *Phycosiphon* from the Lower Jurassic shallow-marine Nishinakayama Formation of Toyora Group, (Shimonoseki City, Yamaguchi Prefecture, southwest Japan) was investigated. The negative excursion of carbon isotope in organic carbon, which is the diagnostic feature of the T-OAE, has been documented in this formation. As a result of our observations, the abundance of *Phycosiphon* from the T-OAE interval seems to be lower than that from the pre and post T-OAE interval. Furthermore, smaller *Phycosiphon* seems to be more common in the T-OAE interval. However, because our observations are preliminary and qualitative, more detailed analysis is strongly required to quantitatively evaluate the benthic responses to the T-OAE.

**キーワード:** 生痕化石, *Phycosiphon*, トアルシアン期, 海洋無酸素事変, 豊浦層群, 西中山層

**Key words:** Trace fossil, *Phycosiphon*, Toarcian, Oceanic Anoxic Event, Toyora Group, Nishinakayama Formation

#### はじめに

ジュラ紀前期のトアルシアン期前期 (約1億8300万年前) には有機物に富んだ黒色頁岩が汎世界的に堆積したことが知られており (図1A), 海洋無酸素事変 (Toarcian Oceanic Anoxic Event; T-OAE) として認識され

ている (Jenkyes, 1988). また, トアルシアン期の黒色頁岩中には炭素同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) の顕著な負異常が記録されており (Kemp *et al.*, 2005; Hesselbo *et al.*, 2007; Al-Suwaidi *et al.*, 2010; Izumi *et al.*, 2012; Them *et al.*, 2017), 炭素循環が大規模に攪乱されたことを示している. さらに, T-OAE に関連した様々な気候変動は, 当時の海洋生物に対して甚大な被害を及ぼしたことが報告されている (Morten & Twitchett, 2009; Casewell & Coe, 2013; Danise *et al.*, 2013).

一方で, T-OAE に関する研究の問題点として, まず地理的な偏りが挙げられる. T-OAE の研究はヨーロッパ諸国で盛んであり (McArthur *et al.*, 2000; Kemp *et al.*, 2005; Hesselbo *et al.*, 2007), 他国では研究数が比較的少ない. 言い換えると, 当時の古地理 (図 1A) を考慮した場合, トアルシアン期のテチス海域における古環境変動については研究データが揃っているが, パンサラッサ海域のデータは相対的に不足しているということである. また, 古生物学的研究の問題点としては, アンモナイト・二枚貝・腕足動物・海洋プランクトン微化石といった体化石を対象とした研究が多いものの, 生痕化石に関する研究データが極めて少ないことである. 海洋生態系に対する T-OAE の影響を総合的に考察するためには, 体化石として保存されにくい軟組織のみから構成された生物についての知見も不可欠である. このような軟組織性の動物が行動した痕跡は生痕化石として地層中に保存されることから (Seilacher, 1967; Seike, 2009), トアルシアン期の生痕化石の研究が非常に重要である.

以上のことから, 本研究では山口県下関市に分布する下部ジュラ系海成層である豊浦層群西中山層から産出した生痕化石を対象とする. 西中山層の堆積盆は, ジュラ紀前期当時にはパンサラッサ海の北西浅海域に位置していたことが報告されている (Izumi *et al.*, in press).

また, 西中山層からは小型堆積物食性ベントスの生痕化石である *Phycosiphon* が普遍的に産出することが報告されている (河村, 2010; Izumi *et al.*, 2012, 2018a; Izumi, 2014). 本研究では, 下関市豊田町の桜口谷セクションにおいて野外調査と岩石試料の採取を行い, 西中山層における *Phycosiphon* の産状について予察的に観察し, その層序変化を検討することを目的とする.

## 地質概説

本研究では, 下関市豊田町に分布するジュラ紀前期 (プリンスバッキアン期後期からトアルシアン期前期) の浅海層である豊浦層群西中山層を対象としている (図 1B, C). 具体的には, 西中山層の露頭が比較的よく分布している「桜口谷セクション (Sakuraguchi-dani section)」を調査地に選択した (図 1D).

豊浦層群は田部盆地を北西から南東方向に走る田部断層によって南北に分割されているが (小林, 1936; 図 1D), その北部地域は軟体動物化石や生痕化石を比較的多く産出することで知られている (棚部ほか, 1982; Nakada & Matsuoka, 2011; Izumi, 2014). 豊浦層群に関する研究は, 井上 (1896) による地質情報やアンモノイド化石の産出報告, Yokoyama (1904) によるアンモノイドの記載に始まり, 矢部 (1920), Kobayashi (1926) らを筆頭に多くの岩相層序学的研究が行われた. さらに松本・小野 (1947), Hirano (1971) らによって生層序学的研究がなされてきた. これらの研究結果より, 豊浦層群は下位から東長野層, 西中山層, 歌野層に区分されている. 特に西中山層については, 産出する化石群集より, 比較的平穏な内湾部に位置した浅海層であることが示されている (棚部ほか, 1982). また, 西中山層からはアンモナイト化石が多産することから, 化石帯区分が確立している. 伝統的には, Hirano (1973b) に基づく化石帯区分が用いられており, 下位から *Fontanelliceras fontanellense* 帯, *Protogrammoceras nipponicum* 帯, *Dactylioceras helianthoides* 帯の 3 帯が定められている. しかし近年, Nakada & Matsuoka (2011) によって化石帯区分が改定され, 下位から *Canavaria japonica* 帯, *Paltarpites paltus* 帯, *Dactylioceras helianthoides* 帯, *Harpoceras inouyei* 帯の 4 帯が定められた. 西中山層は下位の東長野層を整合に被覆しており, 岩相は泥岩を主体とする (河村, 2010). 桜口谷におい

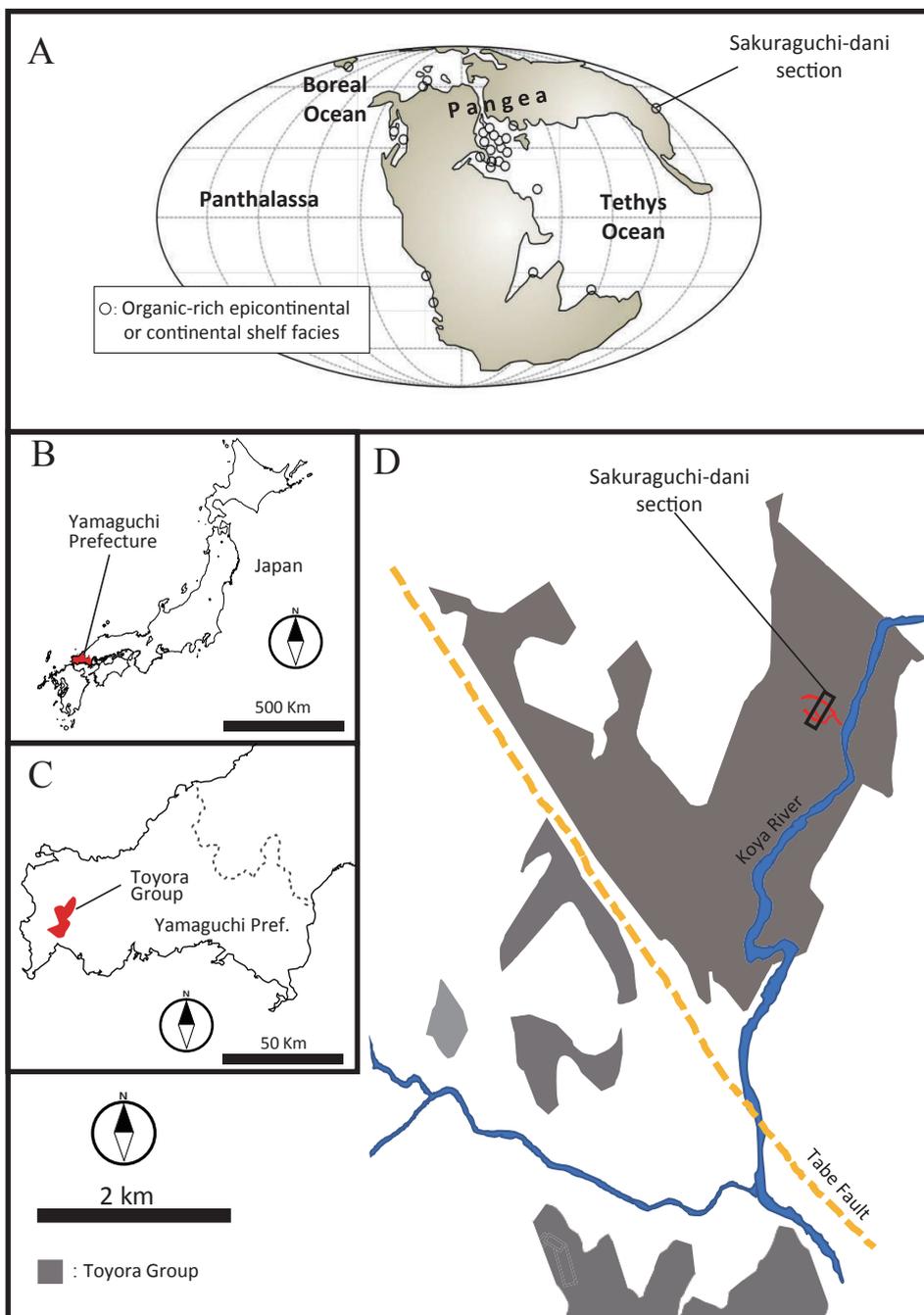


図 1. (A) ジュラ紀前期の大陸配置図 (Cohen *et al.*, 2004 を改変). (B) 山口県の位置を示す日本地図. (C) 豊浦層群の分布域. (D) 豊浦層群北部地域の模式図及び、桜口谷セクションの位置 (中田, 2014 を改変)  
 Figures 1. (A) Palaeogeographic map showing continental arrangement in the early Jurassic period (redrawn from Cohen *et al.*, 2004). (B) Inset map of Japan showing location of study area (Sakuraguchi-dani section). (C) The distribution of the Toyora Group. (D) Schematic diagram of the north part of the Toyora Group and the location of Sakuraguchi-dani section (redrawn from Nakada, 2014).

てはシルト質～粘土質の黒色泥岩が広く分布し、中部層においては砂岩薄層を狭在する（棚部ほか, 1982; Nakada & Matsuoka, 2011; Izumi *et al.*, 2012）。下部～中部層の一部と上部層においては生痕化石 *Phycosiphon* による生物擾乱が卓越しており、中部～上部層の一部にかけては平行葉理が卓越している（Hirano, 1971; Nakada & Matsuoka, 2011; Izumi *et al.*, 2012）。平行葉理を示す層準では材化石や炭化した植物片、最大径が 1 mm 程度のフランボイダル黄鉄鉱が見られるなど特徴的な岩相が見られる（中田, 2014）。また、桜口谷セクションでは地球化学的研究より、炭素同位体比の変動が明らかになっている（Izumi, *et al.*, 2012; Kemp & Izumi, 2014; Izumi *et al.*, 2018a, b）。炭素同位体比の負異常は T-OAE を特徴づける最も重要な証拠であり（Kemp *et al.*, 2005; Hesselbo *et al.*, 2007; Al-Suwaidi *et al.*, 2010; Them *et al.*, 2017）、桜口谷セクション中部層において負異常が確認されている（Izumi *et al.*, 2018a, b; 図 2）。

一方、桜口谷セクションの下部層及び上部層は炭素同位体比の変動パターンと岩相の特徴から、それぞれ T-OAE 期前後の定常期であると考えられている。

## 研究手法

本研究では、桜口谷セクションにおいて野外調査を実施した。野外では、西中山層における *Phycosiphon* の産状の層序変化を評価するため、複数層準から泥岩サンプルを採取した（図 2）。

採取した泥岩サンプルは、*Phycosiphon* の有無を確認するために、まず岩石カッターを用いて層理面に対して垂直方向に切断した。特定の層準から *Phycosiphon* の産出が確認できた場合は、*Phycosiphon* の全体的な形状を観察するため、含 *Phycosiphon* 層準において層理面と平行方向に切断した。その際、*Phycosiphon* の産出頻度は層準によって変動する可能性があるため、肉眼観察で最も多く *Phycosiphon* が確認された層準を選択した。

層理面と水平方向に切断した含 *Phycosiphon* 泥岩サンプルは、グラインダーとガラス板を用いて研磨した。研磨作業は粒度の異なる 5 段階の研磨粉（#400, #800, #1000, #2000, #3000）を用意し、グラインダーでは #400, #800 を使用し、ガラス板では #1000, #2000, #3000 の研磨粉を使用した。

研磨作業完了後は、層理面上（切断面）に分布する *Phycosiphon* の肉眼観察を行った。

## 結果

### *Phycosiphon* の記載

桜口谷セクションから産出した生痕化石 *Phycosiphon* は平均径が約 1 mm 程度である。泥岩サンプルの垂直断面を観察すると、その形状は主に層理面方向に沿って細長くなっているものが多い。しかし、上下方向（＝層理面と垂直方向）に細長くなっているものや円形に折り曲がっているものも観察される。また、泥岩サンプルの水平断面を観察すると、垂直断面で見られた形状に比べて複雑に入り組んだ構造が見られ、より多様な形状が観察される。水平断面を観察することで、単一層理面における *Phycosiphon* の形状や全体的な産状を観察することができる。

### *Phycosiphon* の層序変化

桜口谷セクションの複数の層準（図 2）から産出した *Phycosiphon* の層序変化を検討するために、泥岩サンプルの水平断面のスキャン画像を取得した（図 3）。

図 3A は T-OAE 前の定常期層準から産出したものであり、*Phycosiphon* が層理面の広範囲に一樣に分布している。更に、比較的大型（直径約 1 mm 以上）の *Phycosiphon* が多く存在していることも確認できる。

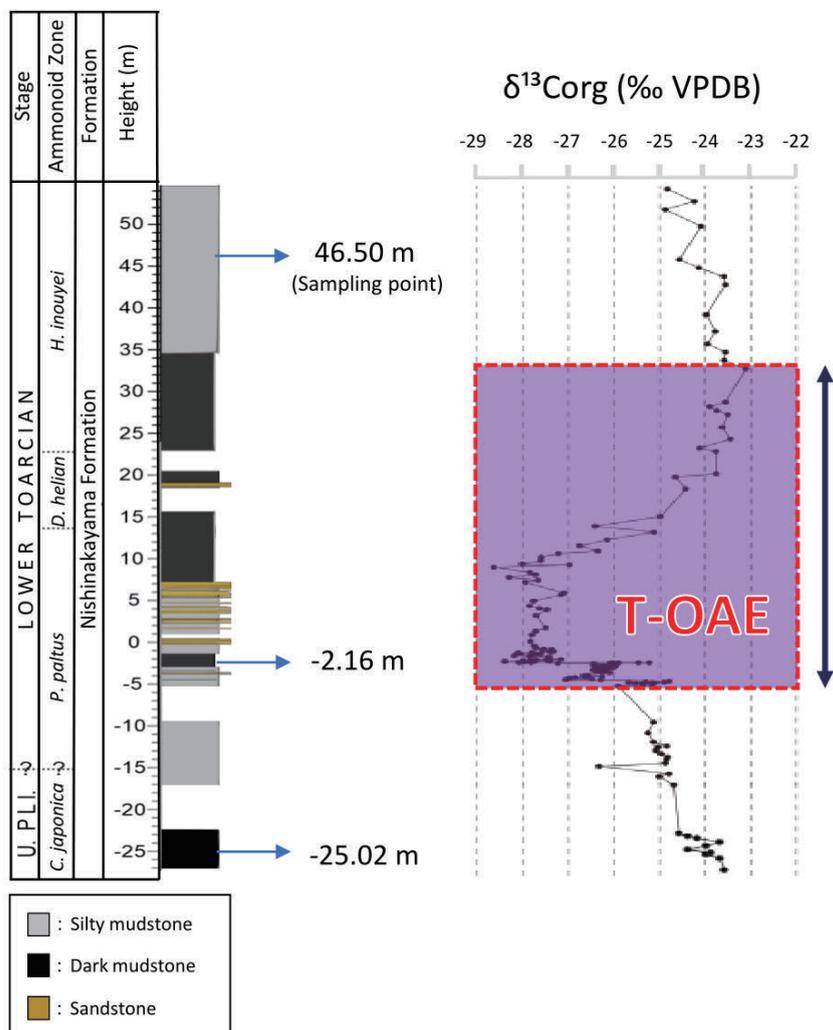


図2. 桜口谷セクションの層序と、サンプル採取層準。(柱状図は Izumi *et al.* (2018a) を改変。炭素同位体比のデータは Izumi *et al.* (2018a, b) より引用。) Figure 2. Lithological log and carbon-isotope stratigraphy of the Sakuraguchi-dani section with the sample horizon highlighted. (Lithological log is modified from Izumi *et al.* (2018a), and carbon-isotope data are from Izumi *et al.* (2018a, b)).

図3BはT-OAE期の層準から産出したものであり、定常期層準(図3A)と比較すると層理面上の *Phycosiphon* の産出頻度が明らかに減少している様子が肉眼観察からも認識できる。また、*Phycosiphon* のサイズも非常に小型(直径約0.5mm程度)のものが多くなっている。

図3CはT-OAE後の定常期層準から産出したものであり、T-OAE期前の定常期層準(図3A)と比較すると、*Phycosiphon* の産出量はいささか少ないものの、T-OAE期層準(図3B)と比較すると産出量が多い。また、サイズについても、図3Aのサンプルと同様に比較的大型(直径約1mm以上)の *Phycosiphon* が多くなっている(図3D)。

### 考 察

本研究による予察的な観察により、桜口谷セクションにおける *Phycosiphon* の産出頻度とサイズに層序変

化があることが確認された。層理面上における *Phycosiphon* の産出量は、生痕形成生物の行動量や生息密度を反映していると考えられる。本研究で検討したサンプル数が少ないため、得られた結果を一概に考察することは困難であるが、T-OAE 期層準から採取された泥岩サンプル中の *Phycosiphon* の産出量とその前後の層準に比べて少ないことから、T-OAE 期には桜口谷セクションの堆積盆に生息していた生痕形成生物の行動量が低下していた可能性、または、それらの生息数が減少していた可能性を示唆していると考えられる。さらに、T-OAE 期層準より産出した *Phycosiphon* の径はその前後層準より産出した *Phycosiphon* に比べて小型のものが多い。このことから、T-OAE 期は比較的大型の生痕形成生物が衰退し、より小型の生痕形成生物のみが生息可能な環境であったことが一つの可能性として推察される。

以上のことから、桜口谷セクションにおける T-OAE 期層準とその前後層準では、*Phycosiphon* の産出頻度やサイズが変化していることが確認された。しかし、一般的に、生痕形成生物である小型のベントスは行動範囲が比較的狭く、必要とする資源量が少ないため、環境変動の影響を受けにくいと考えられている(高橋, 2014 など)。加えて、本研究で観察した層準は極めて限定的であるため、桜口谷セクションの *Phycosiphon* の普遍的な層序変化を反映していない可能性も考えられる。

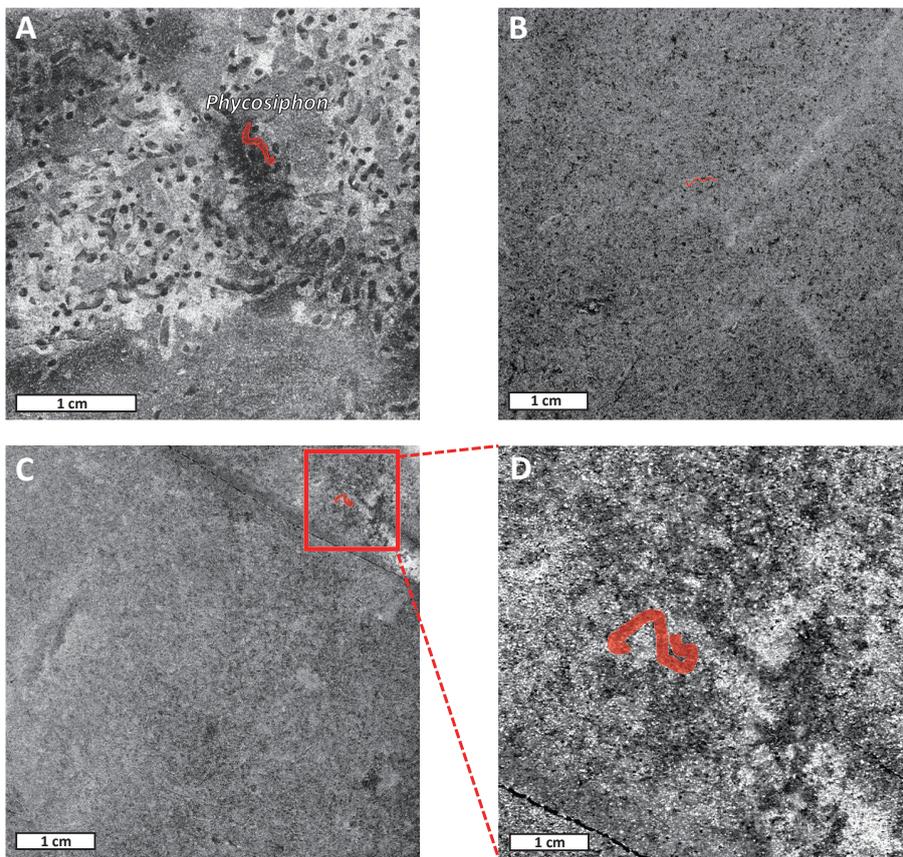


図 3. (A) T-OAE 期前の定常期層準 (-25.02 m) における、層理面上での *Phycosiphon* の分布。(B) T-OAE 期層準 (-2.16 m) における、層理面上での *Phycosiphon* の分布。(C) T-OAE 期後の定常期層準 (46.50 m) における、層理面上での *Phycosiphon* の分布。(D) 図 3-C 内における *Phycosiphon* の拡大図。

Figures 3. (A) Distribution of *Phycosiphon* on the bedding plane of the pre-T-OAE interval (-25.02 m in section height). (B) Distribution of *Phycosiphon* on the bedding plane of the T-OAE interval (-2.16 m in section height). (C) Distribution of *Phycosiphon* on the bedding plane of the post-T-OAE interval (46.50 m in section height). (D) Magnified view of *Phycosiphon* in the Figures 3-C.

したがって、今後の研究では、可能な限り多くの層準からサンプルを採取し、高時間解像度で解析を行うこと、そして、*Phycosiphon* の産出頻度やサイズを定量的な手法を用いて解析を行うことが必要となる。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、豊田ホテルの里ミュージアムの川野敬介博士には、調査地である桜口谷セクションの調査許可申請において便宜を図っていただいた。また、東邦大学理学部生命圏環境科学科の梶山健悟氏には現生の多毛類の生態について多くの助言をいただいた。以上の方々に厚く御礼を申し上げます。

本研究に際しては、共著者の一人(泉)は、藤原ナチュラルヒストリー振興財団とアサヒグループ学術振興財団より受領した研究助成金を使用した。併せてここで感謝申し上げます。

## 引用文献

- Al-Suwaidi, A. H., Angelozzi, G. N., Baudin, F., Damborenea, S. E., Hesselbo, S. P., Jenkyns, H. C. (2010) First record of the Early Toarcian oceanic anoxic event from the southern hemisphere, Neuquen basin Argentina. *Journal of the Geological Society*, **167**: 633-636.
- Casewell, B. A., Coe, A. L. (2013) Primary productivity controls on opportunistic bivalves during Early Jurassic oceanic deoxygenation. *Geology*, **41**: 1163-1166.
- Cohen, A. S., Coe, A. L., Harding, S. M., Schwark, L. (2004) Osmium isotope evidence for the regulation of atmospheric CO<sub>2</sub> by continental weathering. *Geology*, **32**: 157-160.
- Danise, S., Twitchett, R. J., Little, C. T. S., Clémence, M. E. (2013) The impact of global warming and anoxia on marine benthic community dynamics: an example from the Toarcian (Early Jurassic). *PLoS One*, **8**: e56255.
- Hirano, H. (1971) Biostratigraphic study of the Jurassic Toyora Group, Pt. 1. *Memoirs. Faculty. Science, Kyushu Univ., Ser. D*, **21**:38-128.
- Hesselbo, S. P., Jenkyns, H. C., Duarte, L. V., Oliveira, L. C. V. (2007) Carbon-isotope record of the Early Jurassic (Toarcian) Oceanic Anoxic Event from fossil wood and marine carbonate (Lusitanian Basin, Portugal). *Earth and Planetary Science Letters*, **253**: 455-470.
- Izumi, K. (2014) Utility of geochemical analysis of trace fossils: Case studies using *Phycosiphon incertum* from the Lower Jurassic shallow-marine (Higashinagano Formation, southwest Japan) and Pliocene deep-marine deposits (Shiramazu Formation, central Japan). *Ichnos*, **21**: 62-72.
- Izumi, K., Miyaji, T., Tanabe, K. (2012) Early Toarcian (Early Jurassic) oceanic anoxic event recorded in the shelf deposits in the northwestern Panthalassa: Evidence from the Nishinakayama Formation in the Toyora area, west Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **315-316**: 100-108.
- Izumi, K., Kemp, D. B., Itamiya, S., Inui, M. (2018a) Sedimentary evidence for enhanced hydrological cycling in response to rapid carbon release during the early Toarcian oceanic anoxic event. *Earth and Planetary Science Letters*, **481**: 162-170.
- Izumi, K., Endo, K., Kemp, D. B., Inui, M. (2018b) Oceanic redox conditions through the late Pliensbachian to early Toarcian on the northwestern Panthalassa margin: Insight from pyrite and geochemical data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **493**: 1-10.
- Izumi, K., Suzuki, K., Kemp, D. B., Iizuka, T. (in press) Palaeogeographic and tectonic setting of the Lower Jurassic (Pliensbachian-Torcion) Nishinakayama Formation, Toyora Group, SW Japan. *Geological Journal*, xxx: xxx-xxx.
- 石浜佐栄子 (2007) ジュラ紀前期の海洋無酸素事変の研究に関する進展と動向. *Bulletin of Kanagawa Prefectural*

- Museum Natural Science*, **36**: 1-16.
- 井上禎之助 (1896) 長門南部の中生層に就いて. *Journal of the Geological Society, Japan*, **3**: 341-364.
- Jenkyns, H. C., Clayton, C. J., Clayton, (1986) Black Shales and carbon isotopes in pelagic sediments from Tethyan Lower Jurassic. *Sedimentology*, **33**: 87-106.
- Jenkyns, H. C., (1988) The early Toarcian (Jurassic) anoxic event: stratigraphic, sedimentary, and geochemical evidence. *American Journal of Science*, **288**: 101-151.
- Kobayashi, T. (1926) Note on the Mesozoic Formation in Province Nagato, Chugoku, Japan. *Journal of the Geological Society, Japan*, **33**: 1-14.
- Kemp, D. B., Coe, A. L., Cohen, A. S., Schwark, L. (2005) Astronomical pacing of methane release in the Early Jurassic period. *Nature*, **437**: 396
- 河村博之 (2010) 山口県, 田部盆地南部のジュラ系豊浦層群の層序の再検討. 地質学雑誌, **116**: 27-44
- Kemp, D. B., Izumi, K. (2014) Multiproxy geochemical analysis of a Panthalassic Margin record of the early Toarcian oceanic anoxic event (Toyora area, Japan). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **414**: 332-341.
- 松本達郎・小野 瑛 (1947) 豊浦層群の化石層序学的研究 - 特に菊石化石について - 九州大学紀要, **2**(1): 20-31.
- McArthur, J. M., Donovan, D. T., Thirlwall, M. F., Fouke, B. W., & Matthey, D., (2000) Strontium isotope profile of the early Toarcian (Jurassic) oceanic anoxic event, the duration of ammonite biozones, and belemnite palaeotemperatures. *Earth and Planetary Science Letters*, **179**: 269-285.
- Morten, S. D., Twitchett, R. J. (2009) Fluctuations in the body size of marine invertebrates through the Pliensbachian-Toarcian extinction event. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **248**: 29-38.
- Nakada, K., Matsuoka, A. (2011) International correlation of the Pliensbachian/Toarcian (Lower Jurassic) ammonoid biostratigraphy of the Nishinakayama Formation in the Toyora Group, southwest Japan. *Newsletter on Stratigraphy*, **44**(2): 89-111.
- 中田健太郎 (2014) 下関市菊川町西中山地区に分布する豊浦層群西中山層におけるアンモノイド生層序. *Bulletin of Firefly Museum of Toyota town*, **6**: 9-17.
- Raup, D. M., & Sepkoski, J. J. Jr., (1982) Mass extinction in the marine fossil record. *Science*, **215**: 1501-1503.
- Seilacher, A. (1967) Fossils behavior. *Scientific American*, **217**: 72-80.
- Seike, K. (2009) Influence of morphodynamics on the distributions of the opheliid polychaete euzonus sp. and its feeding burrows on a sandy beach: Paleoecological and paleoenvironmental implications for the trace fossil *Macaronichmus segregatis*. *Palaios*, **24**: 799-808.
- 棚部一成・稲積章生・大塚康雄・勝田 毅・玉浜 薫 (1982) 下部ジュラ系豊浦層群西中山層の岩相・生相と化学的組成. 愛媛大紀要自然科学Dシリーズ, **9**: 47-62.
- 高橋昭紀 (2014). 白亜紀末の大量絶滅事変における動物群の絶滅の選択性. 日本生態学会誌, **64**: 47-53.
- 矢部長克 (1920) 豊前企救半島の所謂中生層に就いて. 地学雑誌, **32**: 1-8.
- Yokoyama, M. (1904) Jurassic ammonites from Echzen and Nagato. *Jour. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*, **19**, art., **20**: 1-17.