

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610148

研究課題名(和文)最古動物胚・幼生化石の高解像度三次元解析法の確立と後生動物初期進化

研究課題名(英文)High-resolution micro-CT analysis of the oldest animal embryo and larva fossils: Implications for the early evolution of Metazoa

研究代表者

小宮 剛 (KOMIYA, Tsuyoshi)

東京大学・総合文化研究科・准教授

研究者番号：30361786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：従来の外観の形態に基づく古生物学研究では、動物卵や胚などの単純な構造や現生生物に見られない形態をもつ生物の起源を調べることは極めて困難である。本研究では、化石の生物種同定や器官の進化を探るために化石の三次元構造や化学組成を解析する手法の確立とエディアカラ紀～カンブリア紀初期の最古の後生動物化石への適用を試みた。現生サンゴの動物卵や胚の微量元素分析では、いくつかの元素に生物組織と対応した特徴的な分布が見られた。また、100～500ミクロン程度の球状微化石の三次元構造を撮像する技術を確立し、それを地球最古のエディアカラ紀の動物胚やカンブリア紀初期の微小硬骨格化石に適用した。

研究成果の概要(英文)：It is difficult to investigate the origins of fossils whose structures are very simple or have no modern equivalents based on their morphology. We try to establish chemopaleontology and micro-CT analyses of small globular fossils to identify the oldest, Ediacaran and early Cambrian, egg and embryo fossils, and investigate evolution of tissues.

We obtained trace element mapping of extant cnidarian eggs and embryos to find unique signatures of the distribution and abundances of the trace elements over the eggs and embryos, and compare them with the Ediacaran globular microfossils and identify their phylum. We conducted synchrotron and conventional X-ray Micro-CT analyses of the oldest cnidarian polyp fossils to observe the internal structures. We found clear some original tissue structures in the three dimensional images.

研究分野：地質学、古生物学

キーワード：放射光X線Micro-CT 学 エディアカラ紀 動物胚 カンブリア紀 カンブリア爆発 後生動物化石 微小硬骨格動物化石 化学古生物

## 1. 研究開始当初の背景

従来の化石研究は主に外観の形態に基づきされてきた。しかし、この手法だけでは二つの面で限界がある。一つ目は、球状など単純な形態や共通に見られる形態をもつ化石や現生種に対比する生物が存在しない場合、その生物種を特定するのは原理的に難しいことが挙げられる。二つ目は、緻密で化石内部が透けない場合は、内部に残された生物組織を観察できないことである。本研究で、ターゲットにしている後生動物出現期からカンブリア爆発時までの後生動物進化の黎明期はまさにこれらの問題に直面しており新しい古生物学的研究手法の創成を必要としている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、従来の外観の形態観察だけでは分からない化石の生物学的特徴を化学組成や同位体組成を用いて同定する新しい研究手法を開発することである。一つ目は、放射光 X 線 micro-CT などを用いて、非破壊で微化石の内部構造も含めた 3 次元構造を撮像する技術の開発である。二つ目は、現生の動物卵や胚化石の微量元素マッピングを行い、生物特有の微量元素分布を明らかにすることや生物種特有の微量元素濃度や分布を見出すことである。そして、それらの方法を原生代後期からカンブリア紀初期の化石に応用し、後生動物出現期の生物種の同定や特異的な生物学的特徴を調べ、生命進化を解明することである。

## 3. 研究の方法

(1) 現生のサンゴの卵と動物胚の LA-ICP-MS による高精度・高分解能微量元素マッピング。(2) エディアカラ紀の最古の動物卵や胚化石の高精度・高分解能微量元素マッピング。(3) 初期カンブリア紀寛川溝層の最古刺胞動物微化石の卵、胚、幼生化石の放射光 X 線 Micro-CT 分析。(4) 初期カンブリア紀寛川溝層の最古節足動物様化石の X 線 Micro-CT 分析。(5) エディアカラ紀の微小、動物胚化石の放射光 X 線 Micro-CT 分析。

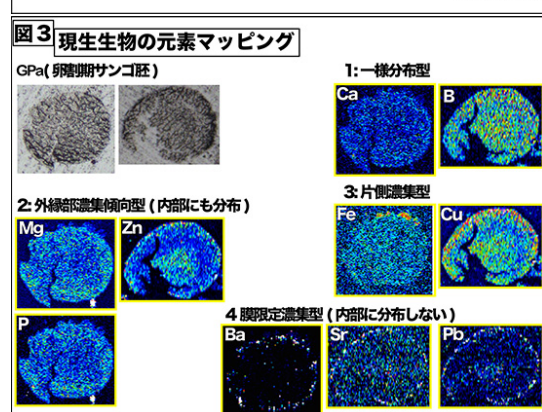
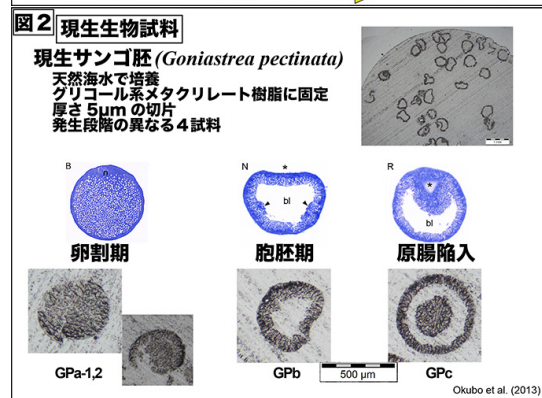
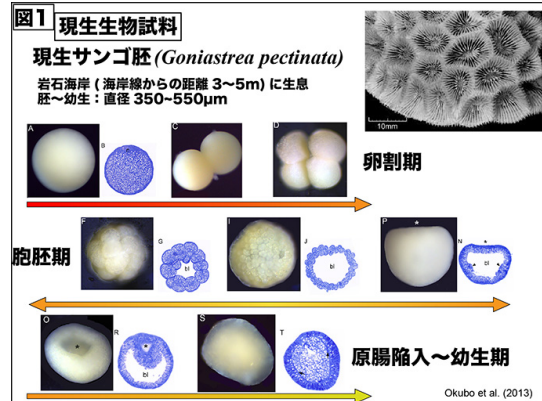
## 4. 研究成果

(1) 現生のサンゴの卵と動物胚の LA-ICP-MS による高精度・高分解能微量元素マッピング。

マリノアン全球凍結 (約 6.35 億年前) 以前のオマーンの高層動物のバイオマーカーが最古の後生動物の証拠とされた時期もあったが、そのバイオマーカーが海綿動物に限らないことが指摘されたため、現在、最古の後生動物の証拠は南中国の陡山沱累層のエディアカラ紀の地層に産する動物卵や胚化石である。しかし、卵・胚化石は球状や球果上の構造をしており、その形状だけ

では動物種を特定するのは難しい。さらに、その外観の形状から、細菌の集合体であるとの指摘さえあるくらいである。外観形態の観察を補う新手法が必要となっている。

そこで、後生動物に特徴的な元素分布を見出すために、現生サンゴの卵といくつかのステージの胚化石の微量元素マッピングを行った (図 1 と 2)。

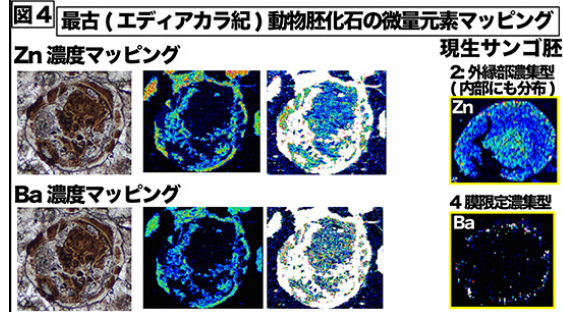


その結果、後生動物の卵や胚特有の元素分布が得られた。これまでの研究によって、藻類や高等植物は細胞壁や膜に B が濃集するということが言われてきた。しかし、サンゴにはそのような濃集が見られなかった。また、Mg, Zn や P は、内部にも分布するが、外縁部に濃集する特徴を持つ。特に、Zn は中心にも濃集する。Fe や Cu は外縁部の片側に濃集する。これは動物極にミトコンドリアが濃集することで説明される。また、Cu は Zn と同様に中央にも濃集している。



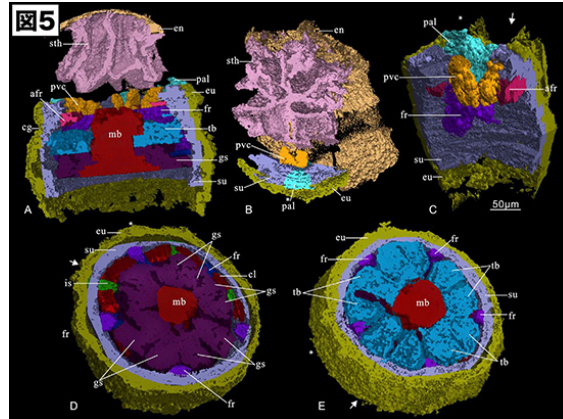
Ba, Sr, Pb は外縁部だけに濃集する。こういった元素分布は非生物的には生じ得ないので、生物由来であることの証拠やさらには後生動物と原核生物やさらには藻類との判別に有用であると思われる。

**(2) エディアカラ紀の最古の動物卵や胚化石の高精度・高分解能微量元素マッピング。**



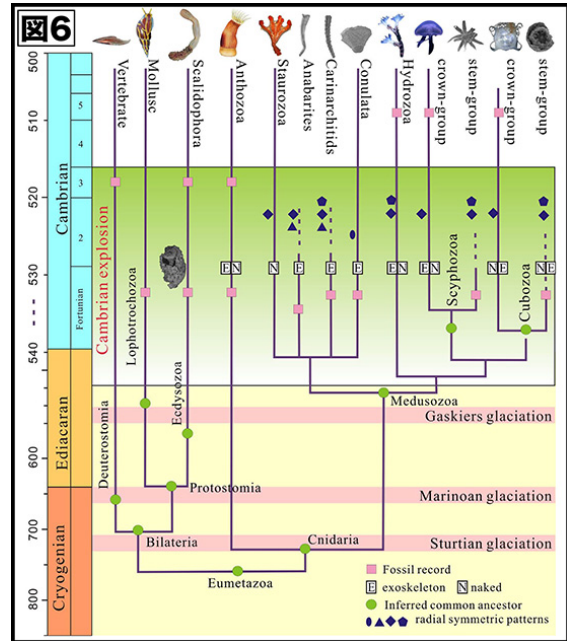
本研究で確立した炭質物の微量元素マッピングをエディアカラ紀の最古の動物胚化石とされる炭質物に適用した(図4)。その炭質物はリン酸塩や炭酸塩中に存在しており、続成過程時にリン酸塩や炭酸塩に覆われたとされる。リン酸塩や炭酸塩は炭質物よりも Zn, Ba, 遷移元素など本研究で分析した多くの元素に富む。そのため、リン酸塩や炭酸塩に調整してしまうと炭質物中の元素分布を見ることはできない(図4左側中央)。しかし、炭質物に調整すると、リン酸塩や炭酸塩によって断片化されているにもかかわらず、その明瞭な元素分布を得ることができ、例えば Zn や Ba では外縁部の濃集パターンを得られる。さらに、Zn では中央部の濃集も観察できる(図4左側右)。この結果は、この炭質物が後生動物由来であることを示す。

**(3) 初期カンブリア紀寛川溝層の最古刺胞動物微化石の卵、胚、幼生化石の放射光 X線 Micro-CT 分析。**

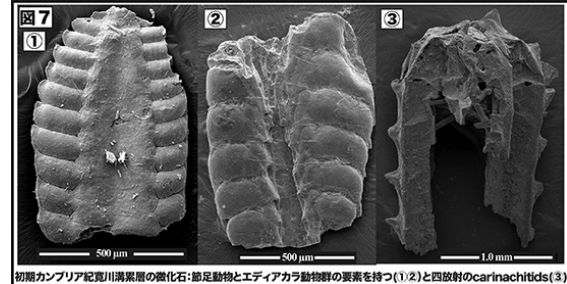


本研究では、最古の刺胞動物の卵や胚化石である初期カンブリア紀の寛川溝層の微化石、約250標本の三次元構造をSpring-8の放射光 X線 Micro-CT や東北大学の通常型 Micro-CT を用いて撮像した。寛川溝層に

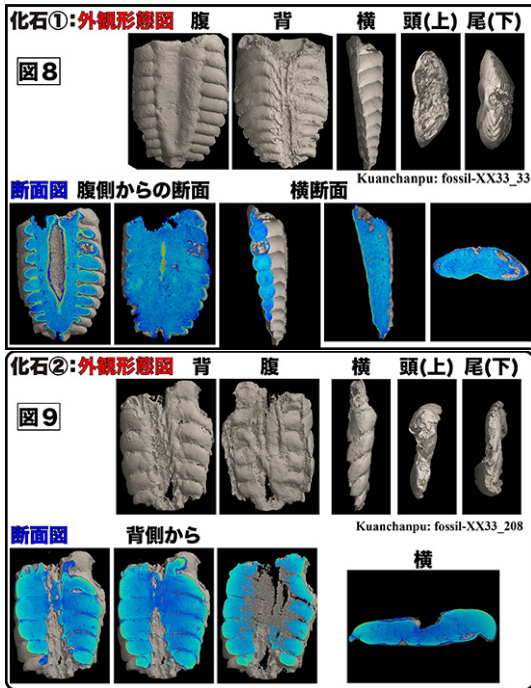
は五数性の構造を持つ刺胞動物微化石が産し、それが放射性相称と左右相称の間をつなぐミッシングリンクか、刺胞動物のステムグループかについて、今なお議論が続いている。そこで、本研究では五数性と四数性両方の微化石の分析を行った。その結果、四数性と五数性の両方において、一部の微化石に生物の器官に由来する内部構造が、極めて良好に残されていることがわかった(図5)。そして、それらは現生の刺胞動物で見られる器官と一致することから、四数性も五数性も共に刺胞動物であり、カンブリア紀の刺胞動物には四数性や五数性のみならず三数性の構造などが混在することがわかった。そして、それらをまとめて、刺胞動物の初期進化の系統樹を作成した(図6)。



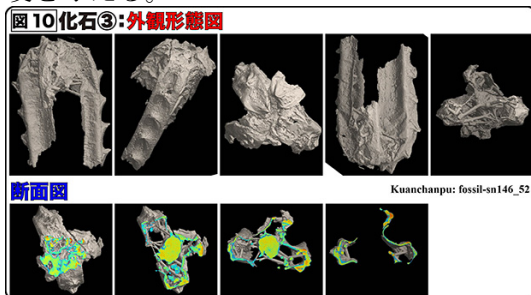
**(4) 初期カンブリア紀寛川溝層の最古節足動物様化石の X線 Micro-CT 分析。**



本研究によって、初めて節足動物様の化石を初期カンブリア紀の寛川溝層群から発見した(図7①②)。また、四放射状の carinachitids 化石を発見した(図7③)。carinachitids は一般に三放射や五放射が多いので、四放射性は極めて稀少である。これらの化石の Micro-CT 像を東北大学で撮像した(図8~10)。



節足動物様化石は、外観上はひれ状の構造を両側に持ち、中央は頭部から尾部まで一体的な構造を持つ。ただし、詳しく観察すると、中央の一体様の部分も節状になっており、節足動物的な体節構造を持つことがわかる。このように一見左右相称の構造を持つように見えるのだが、これらの化石の場合、節足動物とは異なり、この体節構造は中央で途切れており、左右で極めて微小ながらも繰り返している。この点はエディアカラ動物に類似する。これらの内部構造観察の結果、そのひれ状構造は中央部とはつながっているが、左右で貫通してはおらず、エディアカラ動物に特徴的な中空状の構造を持たないことがわかった。また、類似した構造が繰り返す、節足動物的構造が見られた。以上の結果から、この化石はエディアカラ動物と節足動物門のアノマロカリスグループの中間に位置するものと思われ、エディアカラ動物群の系統的位置関係や節足動物の初期進化を解釈する上で重要な示唆を与える。



**(5) エディアカラ紀の微小、動物胚化石の放射光 X 線 Micro-CT 分析。**

南中国甕安地域は、世界最古の動物卵や胚化石が産する地域として知られる。一方で、最近、海綿動物を示唆する化石が我々

のグループなどから報告されたが (Du et al., 2015; Yin et al., 2015, PNAS)、甕安地域からは長らく成体化石が発見されていなかった。現時点でも、この動物卵や胚化石と関連する成体化石は見つかっていない。そこで、その動物卵や胚化石の生物種を特定するために、X 線 Micro-CT による三次元像解析がされてきたが、未だに、動物卵や胚化石の生物種の特定には至っていない。これまでの研究は、普遍的に産する 400  $\mu\text{m}$  程度の球状化石を対象に行われてきた。本研究では、現生の節足動物で多く見られる 100  $\mu\text{m}$  程度の球状化石を探索し、その三次元像解析を試みた。化石サイズが 4 分の 1 になると、体積は 64 分の 1 になる。そのため、従来の分解能 (数  $\mu\text{m}$  程度) では化石観察に十分な解像度が得られない。そこで、本研究では、分解能を向上させ (1  $\mu\text{m}$  以下)、微小・動物胚化石の三次元像を撮像した。その分解能は、現在の世界最高水準である。

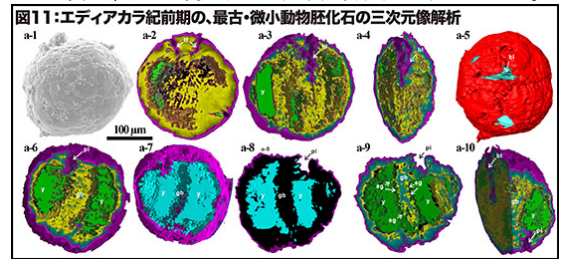


図 11 は最古の微小・動物胚化石の三次元像である。直径 100  $\mu\text{m}$  程度ではあるが、鮮明な内部構造を得ることができた。内部は三つの部分からなり、その中央の構造には微細ながらヒダ状の構造も見てとれる。その三つの構造について、中央が貫通した左右相称動物の原腸陥入段階を示すのか、節足動物の胚帯構造なのかについては、不確実性が残るが、初めて左右相称動物と考えられる胚化石を同定することができた。

**(6) まとめ**

本研究によって、小さなものでは、100  $\mu\text{m}$  程度のものまで、詳細な内部構造を観察し得る解像度で三次元像を撮像する技術を確認した。この研究手法はエディアカラ紀～カンブリア紀の微化石のみならず様々な微化石に応用可能であろう。その三次元像解析の結果、カンブリア紀の刺胞動物の幼生化石では、詳細な器官観察を行うことができた。また、エディアカラ紀の胚化石に適用した結果、左右相称動物と思われる内部構造を持つ胚化石を発見した。最古の節足動物の胚化石の可能性がある。

現生のサンゴの卵や胚の微量元素マッピングの結果、後生動物の卵や胚特有の元素分布を得ることができた。また、分析法をそのエディアカラ紀の炭質物に適用した結果、Zn や Ba などに後生動物胚特有の元素分布が見られた。



## 5. 主な発表論文等

(研究代表者と研究分担者には下線)

〔雑誌論文〕(計 18 件)

国際誌(査読有): 18 件

- [1] Sato, H., Tahata, M., Sawaki, Y., Maruyama, S., Yoshida, N., Shu, D., Han, J., Li, Y. & Komiya, T., A high-resolution chemostratigraphy of post-Marinoan Cap Carbonate using drill core samples in the Three Gorges area, South China. *Geoscience Frontiers* in press (2016).
- [2] Han, J., Li, G., Kubota, Shin, Ou, Q., Toshino, S., Wang, X., Yang, X., Uesugi, K., Hoshino, M., Sasaki, O., Kano, H., Sato, T. & Komiya, T., Internal microanatomy and zoological affinity of the early Cambrian *Olivoides*. *Acta Geologica Sinica (English edition)* 90, 801-840 (2016).
- [3] Han, J., Kubota, S., Li, G., Ou, Q., Wang, X., Yao, X., Li, Y., Uesugi, K., Hoshino, M., Sasaki, O., Kano, H., Sato, T. & Komiya, T., Divergent evolution of medusozoan symmetric patterns: Evidence from the microanatomy of Cambrian tetramerous cubozoans from South China. *Gondwana Research* 31, 150-163 (2016).
- [4] Du, W., Wang, X.L., Komiya, T., Zhao, R. & Wang, Y., Dendroid multicellular thallophytes preserved in a Neoproterozoic black phosphorite in southern China. *Alcheringa: An Australasian Journal of Palaeontology* in press (2016).
- [5] Wang, Y., Du, W., Komiya, T., Wang, X.L. & Wang, Y., Macroorganism paleoecosystems during the middle-late Ediacaran Period in the Yangtze Block, South China. *Paleontological Research* 19, 237-250 (2015).
- [6] Tahata, M., Sawaki, Y., Ueno, Y., Nishizawa, M., Yoshida, N., Ebisuzaki, T., Komiya, T. & Maruyama, S., Three-step modernization of the ocean: Modeling of carbon cycles and the revolution of ecological systems in the Ediacaran/Cambrian periods. *Geoscience Frontiers* 6, 121-136 (2015).
- [7] Kendall, B., Komiya, T., Lyons, T.W., Bates, S.M., Gordon, G.W., Romaniello, S.J., Jiang, G., Creaser, R.A., Xiao, S., McFadden, K., Sawaki, Y., Tahata, M., Shu, D., Han, J., Li, Y., Chu, X. & Anbar, A.D., Uranium and molybdenum isotope evidence for an episode of widespread ocean oxygenation during the late Ediacaran Period. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 156, 173-193 (2015).
- [8] Du, W., Wang, X.L. & Komiya, T., Potential Ediacaran sponge gemmules from the Yangtze Gorges area in South China. *Gondwana Research* 28, 1246-1254 (2015).
- [9] Yamada, K., Ueno, Y., Yamada, K., Komiya, T., Han, J., Shu, D., Yoshida, N. & Maruyama, S., Molecular fossils extracted from the Early Cambrian section in the Three Gorges area, South China. *Gondwana Research* 25, 1108-1119 (2014).
- [10] Shimura, T., Kon, Y., Sawaki, Y., Hirata, T., Han, J., Shu, D. & Komiya, T., In-situ analyses of phosphorus contents of carbonate minerals: Reconstruction of phosphorus contents of seawater from the Ediacaran to early Cambrian. *Gondwana Research* 25, 1090-1107 (2014).
- [11] Sawaki, Y., Tahata, M., Ohno, T., Komiya, T., Hirata, T., Maruyama, S., Han, J. & Shu, D., The anomalous Ca cycle in the Ediacaran ocean: Evidence from Ca isotopes preserved in carbonates in the Three Gorges area, South China. *Gondwana Research* 25, 1070-1089 (2014).
- [12] Sano, Y., Toyoshima, K., Ishida, A., Shirai, K., Takahata, N., Sato, T. & Komiya, T., Ion microprobe U-Pb dating and Sr isotope measurement of a protoconodont. *Journal of Asian Earth Sciences* 92, 10-17 (2014).
- [13] Okada, Y., Sawaki, Y., Komiya, T., Hirata, T., Takahata, N., Sano, Y., Han, J. & Maruyama, S., New chronological constraints for Cryogenian to Cambrian rocks in the Three Gorges, Weng'an and Chengjiang areas, South China. *Gondwana Research* 25, 1027-1044 (2014).
- [14] Kikumoto, R., Tahata, M., Nishizawa, M., Sawaki, Y., Maruyama, S., Shu, D., Han, J., Komiya, T., Takai, K. & Ueno, Y., Nitrogen isotope chemostratigraphy of the Ediacaran and Early Cambrian platform sequence at Three Gorges, South China. *Gondwana Research* 25, 1057-1069 (2014).
- [15] Ishikawa, T., Ueno, Y., Shu, D., Li, Y., Han, J., Guo, J., Yoshida, N., Maruyama, S. & Komiya, T., The  $\delta^{13}\text{C}$  excursions spanning the Cambrian explosion to the Canglangpuian mass extinction in the Three Gorges area, South China. *Gondwana Research* 25, 1045-1056 (2014).
- [16] Igisu, M., Komiya, T., Kawashima, M., Nakashima, S., Ueno, Y., Han, J., Shu, D., Li, Y., Guo, J., Maruyama, S. & Takai, K., FTIR microspectroscopy of Ediacaran phosphatized microfossils from the Doushantuo Formation, Weng'an, South China. *Gondwana Research* 25, 1120-1138 (2014).
- [17] Duan, Y., Han, J., Fu, D., Zhang, X., Yang, X., Komiya, T. & Shu, D., Reproductive strategy of the bradoriid arthropod *Kunmingella douvillei* from the Lower Cambrian Chengjiang Lagerstätte, South China. *Gondwana Research* 25, 983-990 (2014).
- [18] Han, J., Kubota, S., Li, G., Yao, X., Yang, X., Shu, D., Li, Y., Kinoshita, S., Sasaki, O., Komiya, T. & Yan, G., Early Cambrian Pentamerous Cubozoan Embryos from South China. *PLoS One* 8, e70741 (2013).

〔学会発表〕(計 11 件)

- [1] Komiya, T., Nishizawa, M. & Tsuchiya, Y., Nitrogen isotope chemostratigraphy from the Ediacaran to early Cambrian in South China. Japan Earth and Planetary Science Join Meeting 2015, Makuhari Messe (Japan, Chiba, Makuhari), 26/May/2015 (2015).
- [2] Kaiho, K., Shizuya, A., Yamada, K., Oba, M., Chen, Z.-q., Tong, J., Komiya, T., Tian, L., Gorjan, P. & Takahashi, S., Three oceanic oxidation events coincided with diversification of early animals after the Snowball Earth. Japan Earth and Planetary

- Science Join Meeting 2015, Makuhari Messe (Japan, Chiba, Makuhari), 25/May/2015 (2015).
- [3] Tsuchiya, Y., Tahata, M., Nishizawa, M., Sawaki, Y., Sato, T. & Komiya, T., Nitrogen isotope chemostratigraphy of the Early Cambrian platform sequence at Three Gorges, South China. Japan Geoscience Union Meeting 2014, Pacifico Yokohama, (Japan, Kanagawa, Yokohama), 30/April/2014, (2014).
- [4] Tahata, M., Ebisuzaki, T., Sawaki, Y., Nishizawa, M., Yoshida, N., Ueno, Y., Komiya, T. & Maruyama, S., Glaciation carbon cycle in Neopaleozoic and Phanerozoic by numerical carbon cycle box model to fix carbon isotope ratio. Japan Geoscience Union Meeting 2014, Pacifico Yokohama, (Japan, Kanagawa, Yokohama), 30/April/2014, (2014).
- [5] Komiya, T., The close correlation between environmental change and evolution of metazoans: Genome duplication and rapid adaptation. Japan Geoscience Union Meeting 2014, Pacifico Yokohama, (Japan, Kanagawa, Yokohama), 2/May/2014, (2014).
- [6] Kaiho, K., Shizuya, A., Oba, M., Yamada, K., Kikuchi, M., Senba, N., Chen, Z.-q., Tong, J., Takahashi, S., Tian, L. & Komiya, T., Oceanic oxidation mechanisms spanning the Snowball Earth and early animal diversification. Japan Geoscience Union Meeting 2014, Pacifico Yokohama, (Japan, Kanagawa, Yokohama), Japan, 30/April/2014, (2014).
- [7] Du, W., Wang, X. & Komiya, T., Dendroid multicellular thallophytes preserved in a Neoproterozoic black phosphorite in southern China. Japan Geoscience Union Meeting, Pacifico Yokohama, (Japan, Kanagawa, Yokohama), 30th/April/2014, (2014).
- [8] Tahata, M., Sawaki, Y., Ueno, Y., Komiya, T., Yoshida, N., Nishizawa, M. & Ebisuzaki, T., Numerical modeling to evaluate carbon cycle changes in the Ediacaran for identifying the cause of the Shuram excursion. Japan Geoscience Union Meeting 2013, Makuhari Messe (Japan, Chiba, Makuhari), 24/May/2013, (2013).
- [9] Sawaki, Y., Komiya, T. & Maruyama, S., Intensive continental weathering rate in the Lower Cambrian: evidenced from Sr isotope ratios preserved in the strata at the Three Gorges area. Japan Geoscience Union Meeting 2013, Makuhari, Chiba, Japan, 19/May/2013, (2013).
- [10] Komiya, T., Nakao, T., Uesugi, K. & Han, J., Synchrotron X-ray micro-CT analyses of the early Cambrian microfossils: Decoding of the early evolution of Metazoa. Japan Geoscience Union Meeting 2013, Makuhari Messe (Japan, Chiba, Makuhari), 19/May/2013, (2013).
- [11] Komiya, T., Transition from phosphate to nitrate-rich seawater in the Ediacaran: Implication for diversification of mobile metazoans. Japan Geoscience Union Meeting 2013, Makuhari Messe (Japan, Chiba, Makuhari), 24/May/2013, (2013).

#### 〔その他〕

ホームページ等

<http://ea.c.u-tokyo.ac.jp/earth/Members/komiya.html>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

小宮 剛 (KOMIYA, Tsuyoshi)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：30361786