

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：13101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630047

研究課題名(和文) 絶滅生物のバイオメカニクス 未知なる形の機能性を探る

研究課題名(英文) Biomechanics of extinct organisms; exploring ancient functionalities

研究代表者

椎野 勇太 (Shiino, Yuta)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：60635134

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)：絶滅した生物には、特定の機能に特化して進化し、逆にそのせいで絶滅した「失われた機能デザイン」の例が多い。そこで本研究は、現代にはない新たな機能性の着想を目指して、すでに絶滅した翼形態型腕足動物の殻形態を用いて流体力学的研究を行った。流水実験および流体解析の結果、激動な浅海環境に適応を遂げた翼形態種パキシルテラは、流体力学的に不安定な姿勢を取りつつも、きわめて安定した渦様の濾過摂食水流を形成できることがわかった。このような“受動的渦流発生体”は、殻まわりの水流に応じて適切に殻を開閉し、ロバストな機能性を生み出していたことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In contrast to the modern organisms, many fossil organisms have a strange form that evokes the unknown morphological functionality. Of these, spiriferide brachiopods are characterized by having the wing appearance, and those shell form have a role to generate spiral feeding flows inside. Using the model of spiriferides, flow experiments and computational fluid dynamics simulations were demonstrated to understand how the shell forms have been functional and optimised under selected flow conditions. The hydrodynamic approaches revealed that the original life posture of Pachycyrtella, one of spiriferide genera, was the most instable against the ambient flows, while was the most functional to generate stable spiral flows inside the shell. Changes of shell opening degree may enhance the functionality of such a “passive vortex generator”, thereby resulting in a robust adaptation to an agitated flow condition.

研究分野：層位・古生物学

キーワード：生物物理 流体工学 流体 層位・古生物学 進化形態学

### 1. 研究開始当初の背景

諸生命現象から科学技術へのきっかけを模索するバイオエンジニアリングは、主に現在の生物を対象とした研究である (Vogel, 2003 など)。しかし、生物学的に見た現代の生物は、様々な生体生理特性を1つの体に収めるようデザインされた機能複合体であり、生物設計を直接科学技術に応用する場合には「複合体」ならでは複雑さに由来する問題が多い。一方、5億4000万年間の生命史を辿ると、不思議な形の古代生物には、ある特定の機能にのみ特化して進化し、そのせいで逆に絶滅したと考えられる形が存在する。例えば、古生代の海で大繁栄した二枚貝様の腕足動物は、殻の形態によって周囲の流水を自動的に殻の内側へと引き込む形態機能を持っていた。そして、流入した水から微小な有機物を濾過して採餌を行う濾過機能体であった (Shiino and Kuwazuru, 2010)。これまでに申請者は、環境に強く依存した適応を見せる絶滅腕足動物スピリファー類を題材に、殻形態の機能性を定量的に評価する方法を考案し、シンプルな「形態-機能」の関係を表す新しいアイデアを模索してきた。

### 2. 研究の目的

本研究は、絶滅生物の不思議な形に新しい技術的な着想を求める萌芽研究として、腕足動物が殻形態に備えた自動的な水流形成機能と、形態的な多様度との関係をバイオメカニクスの視点から理解する。特に、殻の内側で螺旋状の渦流を受動的に形成する翼形態型腕足動物を題材として、形態解析およびモデルを用いた流水実験・数値流体解析を行う。一連の結果をもとに、渦流形成に関する形態機能がどのように最適化されていたのか明らかにし、周囲の流れを生物自身のエネルギー摂取へと巧みに利用する機能形態学的な適応システムの解明を目指す。

### 3. 研究の方法

翼様の形態が異なる絶滅腕足動物を題材に、殻モデルを用いた流水実験と流体解析を行った。殻形態モデルを使った流水実験では、絶滅腕足動物パキシルテラが、どのくらい強い流れの中で生息できたのか検討を行った。本種は、固着せず、殻の持つ物理的な安定性のみで波の影響が強い浅海に適応していたと考えられている。この実験によって、非活発な腕足動物が、浅海域への適応放散を遂げたメカニズムを明らかにできる。

殻形態モデルの開閉量や姿勢を改変した流水実験を行い、どのような受動的濾過水流が形成されるのか検討した。さらに、実験で用いた殻形態モデルを解析モデルとして流体解析を行い、殻の内側で発生する渦様旋回流の挙動と速度、殻開口部に生じる圧力差を算出した。定量データから得られる渦様旋回流の様相と圧力差を比較し、各流水環境下における最適な形態機能性を推定した。

### 4. 研究成果

#### (1) 流水実験

実際の化石記録では、パキシルテラは側方開口部を底面に対し垂直にして生息していた (Angiolini et al., 2003)。ところが、流水実験の結果、実際の化石から読み解ける生息姿勢は、流体力学的に最も不安定であることがわかった。

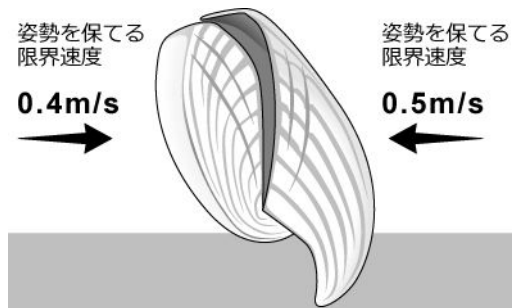


図1. 生息姿勢の物理的安定性。結果は Shiino and Angiolini (2014)から。

受動的に形成される濾過水流を可視化した結果、最も物理的に安定な腹殻および背殻を底面に寝かせた姿勢のモデルは、殻まわりの流向によって不安定な濾過水流となった。一方、物理的に不安定な実際の生息姿勢は、殻まわりの流向や流速に関わらず、安定した渦様旋回流を形成できた。パキシルテラを含む翼形の腕足動物は、殻の内側に備えた螺旋状の濾過器官を使って、同調する渦様旋回流から効率的に濾過摂食していたと考えられている (Shiino et al., 2009)。本種も同様のメカニズムを破綻させないように、物理的な不安定な姿勢をあえて採用していた可能性が示唆される。また、開閉具合の異なるモデルを用いた実験した結果、流れの速い環境下では殻の開度を狭くすることで渦流をより安定に制御できたことを示唆する。

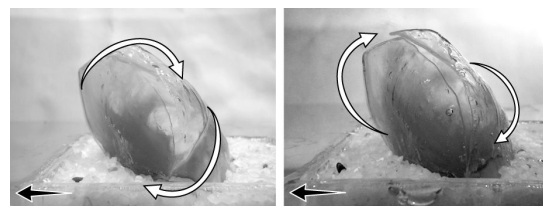


図2. 狭角開度 (左) と広狭角開度 (右) のモデルにおける渦様旋回流。写真は流速 0.15m/s の実験。結果は Shiino and Angiolini (2014)から。

#### (2) 数値流体解析

流体解析でパキシルテラの殻まわりに生じる流れを可視化した結果、流水実験の結果と調和する螺旋状の渦流を殻の内側で形成できる適応形態であることが解明された。また、開口部が上流側に傾くと渦様旋回流は徐々に力強くなり、80°以上傾くと旋回流の形は大きく崩れた。下流側に傾けた場合、渦様旋回流は徐々に微弱になった。実験で見出されたように、殻の開度によっても殻内側で生

じる流速は異なった。一般的には殻を開かせると、殻の中で起こる渦様旋回流は速くなった。しかし、ある開閉度（およそ開閉角  $8^\circ$ ）あたりで、渦様旋回流は安定しなくなり、非定常の乱れた流れとなってしまった。レイノルズ数が 5000 以下の環境では  $8 \sim 10^\circ$ 、5000 以上の環境では開閉角  $5^\circ$  程度の開閉角で、最適な渦様旋回流を形成できた。本研究で行った動物自身の適応環境を再現した層流—乱流遷移域だけでなく、今後は層流環境や乱流環境について形態の最適性も検討する必要があるだろう。

### (3) 形態解析

パキシルテラの殻形態は、殻の開閉量を調節することによって最適な殻内流体を形成できると考えられる。それでは、殻まわりの流れをどのように感知し、殻の開閉量へとフィードバックできたのだろうか？自動的に形成される渦流は、殻開口部の圧力差による殻内側への流入に起因する。現存する腕足動物をみると、開口部をつくる殻の縁辺部に沿って、物理刺激を受容する剛毛が配列している。つまり、この剛毛が受ける水流を物理刺激として感知し、開閉を司る筋肉収縮へとフィードバックさせていた可能性が導かれる。殻の内面に残された筋肉痕を観察すると、パキシルテラの開殻筋肉は太く、高速流体環境下でも精密な開閉を制御できたことを示唆する。

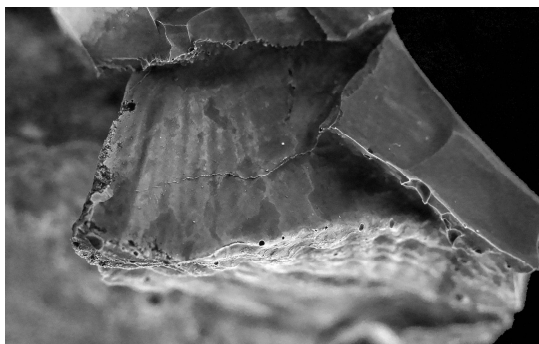


図3．開殻筋の痕跡と考えられる構造．筋繊維の束のように見える．

### <引用文献>

- Vogel, S., Princeton University Press, *Comparative Biomechanics*. 2003, 580p.
- Shiino, Y. and Kuwazuru, O., Functional adaptation of spiriferide brachiopod morphology. *Journal of Evolutionary Biology*, vol. 23, 2010, pp. 1547-1557.
- Angiolini, L., Balini M., Garzanti, E., Nicora, A. and Tintori, A., Gondwanan deglaciation and opening of Neotethys: the Al Khlata and Saiwan Formations of Interior Oman. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 196, 2003, pp. 99-123.
- Shiino, Y., Kuwazuru, O. and Yoshikawa, N., Computational fluid dynamics simulations on

a Devonian spiriferid *Paraspirifer bownockeri* (Brachiopoda): Generating mechanism of passive feeding flows. *Journal of Theoretical Biology*, 2009, vol. 259, pp. 132-141.

### 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)

Shiino, Y. and Suzuki, Y., A rectifying effect by internal structures for passive feeding flows in a concavo-convex productide brachiopod. *Paleontological Research*, vol. 19, 2015, pp. 283-287.

DOI:10.2517/2015PR011

Shiino, Y., Suzuki, Y., Harper, D.A.T., Mori, H. and Bergström, J., Late Ordovician *Holorhynchus* succession in the Siljan district, Sweden: facies, faunas and a latest Katian event. *GFF*, vol. 137, 2015, pp. 25-35.

DOI:10.1080/11035897.2014.945619

椎野勇太・桑水流理・鈴木雄太郎・増田智洋, 三葉虫ハイポディクラノタスの遊泳性能と古生態. 日本機械学会第27回バイオエンジニアリング講演会(2015.1.9-10)講演論文集, **14-67号**, 2015, pp. 365-366.

Seike, K., Shiino, Y. and Suzuki, Y., *Crinicomaminus giberti* isp. nov.: Tubular trace fossil armored with crinoid stem plates from the Upper Permian Kamiyasse Formation, Northeastern Japan. *Spanish Journal of Paleontology*, vol. 29, 2014, pp. 45-50.

Shiino, Y., Kuwazuru, O., Suzuki, Y., Ono, S. and Masuda, C., Pelagic or benthic? Mode of life of the remopleurid trilobite *Hypodicranotus striatulus*. *Bulletin of Geosciences*, vol. 89, 2014, pp. 207-218.

Shiino, Y. and Angiolini, L., Hydrodynamic advantages in the free-living spiriferinide brachiopod *Pachycyrtella omanensis*: functional insight into adaptation to high energy flow environment. *Lethaia*, vol. 47, 2014, pp. 216-228.

DOI:10.1111/let.12052

[学会発表](計14件)

椎野勇太．機能解析が紐解く腕足動物の適応戦略と大進化メカニズム．日本古生物学会2016年例会シンポジウム「機能形態学から進化形態学へ」, 京都大学, 京都, 2016年1月29-31日.

大友翔平・阿部貴洋・大森康智・鈴木雄太郎・椎野勇太・桑水流理．高速遊泳性三葉虫 *Hypodicranotus striatulus* の hypostome: なぜ進化的鍵革新形質になり損ねたのか．日本古生物学会2016年例会, 京都大学, 京都, 2016年1月29-31日.

椎野勇太・徳田悠希, 化石に残された表在生物への理解に向けて．日本古生物学会

2015 年年会 ,産業技術総合研究所 ,つくば ,  
2015 年 6 月 26-28 日 .

椎野 勇太・鈴木雄太郎・デビッド ハーバ  
ー , 進化の袋小路 : 腕足動物シゾクラニア  
の体づくりと個生態 . 日本古生物学会 2015  
年例会 , 豊橋市自然史博物館 , 豊橋 , 2015  
年 1 月 30-2 月 1 日 .

椎野 勇太・桑水流理・鈴木雄太郎・増田智  
洋 , 三葉虫ハイポディクラノタスの遊泳性  
能と古生態 . 日本機械学会第 27 回バイオ  
エンジニアリング講演会 , 朱鷺メッセ , 新  
潟 , 2015 年 1 月 10-11 日 .

椎野 勇太・ルキア アンジョリーニ , 統合  
的な生体生理システム解明への展望 : 翼形  
態型腕足動物を例に . 日本古生物学会 2014  
年年会 , 九州大学 , 博多 , 2014 年 6 月 27-29  
日 .

椎野 勇太・鈴木雄太郎・森英樹 , 滑らかな  
殻を持つ大型腕足動物ホロリンカスー示  
準化石となることへの意義を探る . 日本古  
生物学会 2014 年例会 , 兵庫県立人と自然  
の博物館 , 兵庫 , 2014 年 1 月 24-26 日 .

椎野 勇太・鈴木雄太郎・小林文夫 , 南部北  
上山地中部ペルム系の地史 : 大規模造構運  
動がもたらした生命への飴と鞭 . 日本地質  
学会第 120 年学術大会 , 東北大学 , 仙台 ,  
2013 年 9 月 14-16 日 .

増田智洋・鈴木雄太郎・大野悟志・椎野 勇  
太 , 遊泳性三葉虫 *Remopleurides* 複眼 : 転  
輪羅針儀機能発現か ? 日本古生物学会  
2013 年年会 , 熊本大学 , 熊本 , 2013 年 6  
月 28-30 日 .

椎野 勇太・ルキア アンジョリーニ , 動か  
ざるもののジレンマ—翼形態種パキシル  
テラの流体適応 . 日本古生物学会 2013 年  
年会 , 熊本大学 , 熊本 , 2013 年 6 月 28-30  
日 .

Shiino, Y. and Tokuda, Y., How does flow  
recruit epizoans onto brachiopod shells? The  
7th International Brachiopod Congress,  
Nanjing Institute of Geology and  
Palaeontology, Nanjing, China (May 22-25,  
2015).

Shiino, Y. and Angiolini, L., Die hard under  
high energy flow conditions: a case of shell  
functionality in the spiriferinide brachiopod  
*Pachycyrtella*. The 7th International  
Brachiopod Congress, Nanjing Institute of  
Geology and Palaeontology, Nanjing, China  
(May 22-25, 2015).

Shiino, Y., Middle Permian  
tectono-sedimentary history with biotic  
reaction of the Southern Kitakami Terrane,  
northeast Japan. The 2nd International  
Symposium on Earth History of Asia, Niigata  
University, Niigata, Japan (October  
31-November 3, 2014).

Angiolini, L. and Shiino, Y., Hydrodynamic  
advantages in the free-living spiriferinide  
brachiopod *Pachycyrtella omanensis*:

Functional insight into adaptation to high  
energy flow environment. XIII Giornate Di  
Paleontologia, Università degli Studi di  
Perugia, Perugia, Italy (May 23-25, 2013).

[ 図書 ] ( 計 1 件 )

椎野 勇太 , 東海大学出版会 , 凹凸形の殻に  
隠された謎 腕足動物の化石探訪 . 2013 ,  
268p .

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

椎野 勇太 ( SHIINO, Yuta )

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号 : 6 0 6 3 5 1 3 4