

令和元年6月8日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05045

研究課題名(和文) 捕食行動をもとにした流体力学的な計算から放散虫骨格の多様性を明らかにする試み

研究課題名(英文) Consideration of Diversity of Radiolarians Based on Prey Processes Using Fluid Dynamics

研究代表者

吉野 隆 (Yoshino, Takashi)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：60269496

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)：放散虫の形態の多様性を「多様な捕食行動を最適化するプロセスの結果」という作業仮説のもとに、捕食行動時に発生する流体(海水)からの抵抗に最適な形状を計算することを主目的として、研究を行った。数式で表すことができる単純な外形をもつ放散虫数理モデルを作り、その捕食行動時に発生する流体抵抗の大きさの推定に成功した。実際の放散虫画像をもとにした数値シミュレーションから、放散虫骨格の外形と流体力学的な特性の関係を明らかにした。つぎに、複雑な形状をもつ放散虫骨格における流体力学的な特性を明らかにすることを試みたが、幾何学的な形状の特性を得るにとどまった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放散虫の形状に対する数理科学的なアプローチは少ないため、本研究課題で取り組んだ流体力学と幾何学を用いた研究は、定量的な研究を可能にする点と今後の研究の枠組みを広げる点で意義がある。また、これまでは参入者が少なかった放散虫の生態観察の必要性を示す意味での意義もあったと考えている。この取組によって得られた結果は、興味の対象がこれまでとは異なるため、放散虫に注目していなかった人々に放散虫研究の意義を伝えることに繋がる。

研究成果の概要(英文)：We proposed a mathematical model to estimate a drag force of a pseudopodium of radiolarians during the prey process. We succeeded in the numerical simulation of the model and the estimation of the drag force. Applying this method to a real specimen, we obtained some fluid mechanical natures of the radiolarian skeleton shape. We tried to extend the model to another genus, however, we obtained only geometrical features of the genus.

研究分野：形の科学

キーワード：形の科学 数理プランクトン学 放散虫 流体力学 幾何学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

放散虫の骨格形態が多様性を示すことは広く知られている。放散虫や有孔虫といった海洋プランクトンの骨格の多様性は地球史を編むために欠かせないものになっている。現在の海洋プランクトン化石の研究は放散虫骨格の多様性とその地球科学における意義を広く知らしめている。しかし、骨格の多様性を利用する研究者は多いものの、その多様性の原因までを掘り下げようとする研究者の数は少ない。その理由には、その形態があまりにも多様であるために形態を記述するだけで研究が終了してしまうことや、多くの研究者が放散虫化石を「地球史を編むためのツール」として用いるだけであることが挙げられる。

骨格構造の多様性の原因を決定することは地球史を編纂する根拠を示すことになるために重要な問題である。しかし、このような視点から放散虫の骨格構造について取り組んだ研究は少ない。現在はどのようにして掘り下げれば良いのかという方法論すらない状態であった。その要因として考えられるのは以下の2点であった。

- 放散虫骨格の形態が多岐にわたっているために、それらを統一的に考える作業仮説がない。
- 放散虫の生態は、明らかになりつつあるとは言え不明な点が多い。

### 2. 研究の目的

本研究では、放散虫の形態の多様性を「多様な捕食行動を最適化するプロセスの結果」という作業仮説のもとに、捕食行動時に発生する流体（海水）からの抵抗に最適な形状を計算することを主目的とする。それらのために、以下のような目標を設定した。

数式で表すことができる単純な外形をもつ放散虫数理モデルを作り、その捕食行動において最適な形状を決定する。

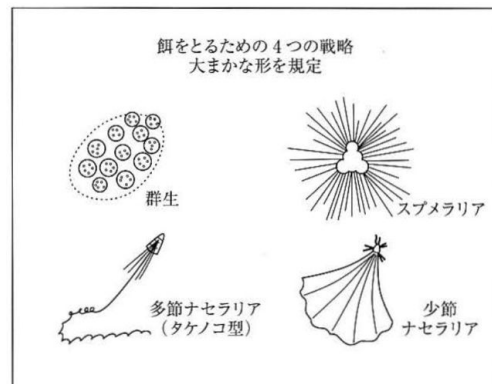
実際の放散虫画像をもとにした数値シミュレーションから、進化における外形の変化と流体力学的な特性の関係を明らかにする。

複雑な形状をもつ放散虫骨格における流体力学的な特性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

軸対称性がある放散虫の骨格について、捕食時において骨格にはたらく流体力の計算、および、流体力を最小にする形状の決定を行う。下に示した図は、これまで開発してきた計算手法によって捕食鼓動の際に発生する流れ場を計算したものである。最も単純な形状である回転楕円体形状において、多節ナセラリア（放散虫の一種）の捕食行動の数理モデルを構築し最適なアスペクト比を求める計算を行った。平成28年度はこの計算をより実際の放散虫に近い形状に対して行い、多節ナセラリアにおける形状の多様性の原因を解明する。

平成29年度は、対称性が低い多節ナセラリアについて、平成28年度に導入した手法を適用する。また、他の捕食行動についても検討を開始する。主な4種類の捕食行動を右図に示す。多節ナセラリア以外の3種類の捕食行動や捕食行動以外の生態について検討する。それぞれについて生態に伴う運動を数理モデルで表現し、その後、運動時において骨格にはたらく流体力の計算、および、流体力を最小にする形状の決定を行う。



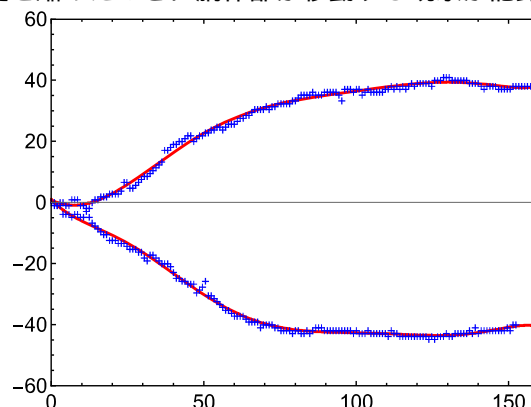
### 4. 研究成果

「2. 研究の目的」に記した3つの目標のうち、 と については達成することができた。

については、研究の途中で終了してしまった。以下にそれらについて説明する。

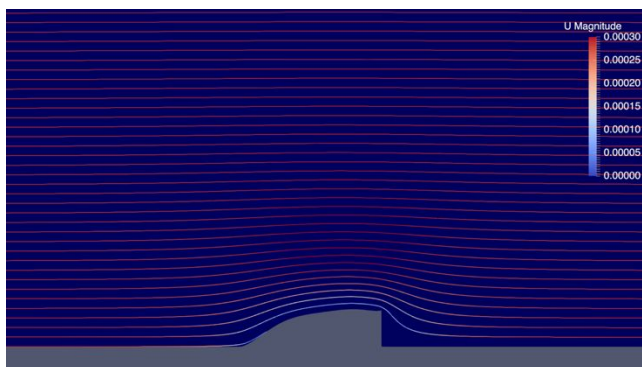
本研究課題で対象にした *E. hexastichum* はほぼ軸対称な形状をしており、対称軸の位置にある仮足を伸縮させることで捕食を行っていると考えられている。使用した動画データには、仮足の先端が容器の壁に固定されてしまい、仮足を縮めたときに胴体部が移動する現象が記録されている。このデータを用いて、以下の手続きを行った。A. 固定点からの距離と動画のコマ数から仮足を縮めたときの速度を見積もる。B. 静止画像から個体の形状を抽出する。C. 流速がAで求めた速度であるような一様流のなかにBで求めた形状の障害物を設置したときに障害物にはたらく粘性抵抗（抗力）を数値計算により求める。このようにして求められた抗力の大きさは仮足を縮めたときの引張力の大きさに等しくなる。

について：頂刺と仮足を除く骨格部分の全長から、楕円形の長軸の長さ推定できる。この楕円形が深さ方向に傾いた円形断面の投影であ

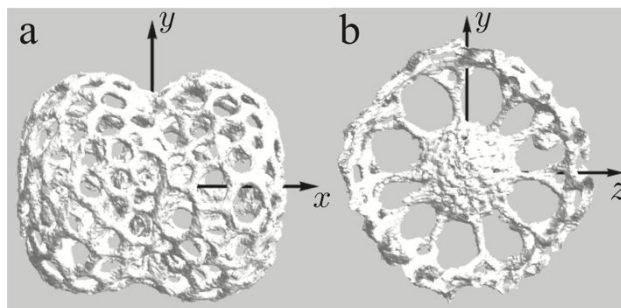


るとみなす．短軸の長さから個体の深さ方向の傾きを見積もり，3次元空間における移動距離を導出した．この値を移動時間で割ることによって，平均速度を推定した．レイノルズ数から，低レイノルズ数流れであることがわかる．低レイノルズ数流れにおいては，一定の力で引かれた物体は短い時間で終端速度に達することが知られている．この性質を以下の解析でも用いている．静止画像をもとに個体の形状を7次式で近似し，静止画像の背景を除いたのちに Morphological Binarize と呼ばれる二値化を行い，最も外側にある点の座標を抽出した．得られた図を上に表示した．

について：仮足の引張力を計算するために，ビデオデータから読み取った速度を流速とする一様流のなかに軸対称の障害物を置き，障害物にはたらく抗力をコンピュータ・シミュレーションにより求めた．計算には OpenFOAM を用いた．得られた近似式を分割して折れ線近似してメッシュを生成した．メッシュ形状は計算結果に影響する．そのため，円形断面すなわち球の周りの流れのシミュレーションを行い，理論値と計算値がほぼ一致することを確認したあとで，今回の計算を実行した．非定常の粘性流を計算するソルバを用いて，初期状態から定常状態に達する過程において抗力の変化を求めた．低レイノルズ数流れであるため，抗力は指数関数的に減衰し一定値に近づく．ある程度減衰が終了したところで，定常状態における抗力の大きさを推定した．得られた結果を図に表示した．



について：更に複雑な形状を持つ放散虫として，*Didymocyrtis* 属に注目して，幾何学的な形状の抽出を試み成功したが，捕食行動をシミュレートするプログラムの作成には至っていない．この属については進化系列が判明しているため，その系列に従って幾何学的な特徴の変遷を調べた．その結果，この属の外層殻の形状は2つの無次元数によって特徴づけられることがわかった．この無次元数を用いて進化系列を追うと，一方の無次元数については増加傾向があり，もう一方の無次元数については途中で増加傾向から減少傾向に切り替わることが判明した．その理由を探るべく，捕食時の流体抵抗の推定を試みているが，現在まで成功していない．また，現在生息している1個体 *D. tetrathalamus* についてのマイクロX線CTによる3Dデータについての検討も行った．適切な処理を行って得られたイメージを図に表示した．この3Dイメージを球面に投影して，孔の配置を幾何学的に調べた．その結果，孔の個数が判明したほかに孔の配置が様ではないことが判明した．捕食行動のモデル化の際に，仮足の配置をモデル化する上で重要な意味を持っている．



## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計2件)

Takashi YOSHINO, Analysis of Turing Patterns on a Spherical Surface Using Polyhedron Approximation, *Forma* 32, 1-6, 2017年4月 (査読あり)

吉野隆, Turing-Richards Model (放散虫形態形成の数値モデル) の検証, *大阪微化石研究会誌*, 特別号 16, 1-8, 2016年10月 (査読あり)

### 〔学会発表〕(計7件)

Takashi Yoshino, Atsushi Matsuoka and Naoko Kishimoto, Geometrical Properties of a Skeletal Structure of Radiolarian *Didymocyrtis tetrathalamus* (Haeckel), *Stereology, Spatial Statistics and Stochastic Geometry* 2018年6月25日

Takashi Yoshino et al., Origami Representation of the Cortical Shell Structures of radiolarian *Pantanelium*, 第15回国際放散虫研究集会 2017年10月23日

Takashi Yoshino et al., Retraction Force of Axial Projection of Multi-segmented Nassellarian *Eucyrtidium hexastichum* (Haeckel), 第15回国際放散虫研究集会 2017年10月24日

吉野隆, 放散虫のまわりの流れ計算を通じてわかってきた問題, 新潟大学形の科学センターシンポジウム 2017年9月2日

吉野隆, 放散虫 *Eucyrtidium hexastichum* (Haeckel) の仮足の引張力, 第 83 回形の科学シンポジウム 2017 年 6 月 10 日

Takashi Yoshino, AXISYMMETRIC FLOW AROUND A HYPERSPHERE IN A 4-DIMENSIONAL SPACE, SymmAdelaide 2016 2016 年 12 月 1 日

吉野隆, 軸対称性形状をもつ放散虫まわりの軸対称流れ, 新潟大学コア・ステーション 形の科学研究センター シンポジウム 2016 年 9 月 3 日

〔図書〕(計 1 件)

窪田佳寛・吉野隆・望月修, きづく! つながる! 機械工学, 朝倉書店, 2018 年 2 月 (p.25-33, p.55-63, p.134-142)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年:  
国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号 (8 桁):

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。