

研究報告書

「有殻原生生物骨格の力学特性解明とモジュラー構造物への展開」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成21年10月～平成25年3月

研究者: 岸本 直子

1. 研究のねらい

宇宙構造物は、重力や空気力から解放され、地上の構造物に比べて機能や力学的合理性に重点をおいた自由なデザインが可能となる。支持点のない宇宙空間では、幾何学的対称性など力学的平衡を保つ形状が望まれるとともに、軽量化やモジュール化、自律性なども要求される。空気力に対しては高真空な環境を再現できる試験装置が存在するが、空間的・時間的に十分な無重力環境を再現できる試験装置は存在しないため、どのような構造物システムが無重量環境下で最適かを実際に確かめることは非常に難しい。

一方、水中で浮遊して生息する生物である有殻原生生物は、浮力によって重力から解放され、単純なユニットの繰り返しによる幾何学的対称性の高い多様な形態が認められる。また、膜や繊維といった張力部材と骨格などの圧縮部材のバランスによって軽量化を達成し、5億年以上にわたって環境変化に適応しながら進化し続けている。

本研究では、このような有殻原生生物骨格のかたちや機能を調べることで、どのような構造物が無重力環境下で最適なのかを明らかにして、宇宙構造物の設計に応用することを目指してきた。特に有殻原生生物骨格の多様かつ複雑で美しいかたちが、成長過程でどのように形成されるのかを数理モデル化することで、実際の3次元骨格形態を定量的に評価するとともに、有限要素法によって力学的合理性を示して、人工構造物の設計につながる設計原理を探索することを目的とした。

2. 研究成果

(1) 概要

宇宙構造物は、重力や空気力から解放され、地上の構造物に比べて機能や力学的合理性に重点をおいた自由なデザインが可能になる。また、軽量化や自律性などとともに、空間的に限られた宇宙機での運搬や軌道上組立に適したモジュール化が要求される。一方、水中で浮遊して生息する有殻原生生物は、浮力によって疑似的に微小重力下にあるとともに、単純なユニットの繰り返しによる幾何学的対称性の高い多様な形態をもっており、5億年以上にわたって環境変化に適応しながら進化し続けている。本研究は、このような有殻原生生物骨格のかたちや機能を調べることで、どのような構造物が微小重力下の軽量自律構造物として最適かを明らかにして、宇宙構造物の設計に応用することを目指した。研究期間内に得られた成果は、以下の4点である。A) 有殻原生生物のうち有孔虫と放散虫骨格の化石ならびに現生種の3次元形態をマイクロCTで取得できるようになった。B) 有孔虫と放散虫のいくつかの種類について、骨格形態の数理モデルを提案した。C) マイクロCTを使って取得した実際の3次元形態や機能を数理モデルに基づいて定量的に評価した。D) マイクロCTを使って取得した実際の3次元形態を使って有限要素解析を実施し、力学的特性を明らかにした。

(2) 詳細

研究テーマ A「マイクロ CT を使った有殻原生生物骨格の 3 次元形態取得」

有殻原生生物には石灰質の殻をもつ有孔虫(動物プランクトン)と円石藻(植物プランクトン)、主に珪酸質の殻をもつ放散虫(動物プランクトン)と珪藻(植物プランクトン)の4種類があり、それぞれ多様な形態を示している。ここで取り上げた有孔虫と放散虫は、100 μm ~数 mm の大きさを持ち、微化石として岩石中に残ったものは示準化石や示相化石として重視される。骨格の形態の変遷や分布、殻の機能を詳細に分析するためには、これらの骨格の 3 次元形態が必要であるが、これらの骨格の直径や厚みは数 μm 以下、サブミクロンオーダーの部分もあり、約 5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ の解像度しかない従来の汎用マイクロ X 線 CT では観測できない。そこで、電子顕微鏡に取り付けるタイプのマイクロ CT を導入し、骨格の 3 次元形態取得に取り組んだ。サンプルのマウント方法を考案し、金属ホルダの形状を工夫するなどして、最終的に最高解像度 0.3 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ で 3 次元形態を取得することに成功した。図1に全長約 200 μm の放散虫骨格の X 線透過像と 410 枚の透過像から再構成した断層図を示す。非破壊で内部構造を含む 3 次元構造が取得できていることがわかる。

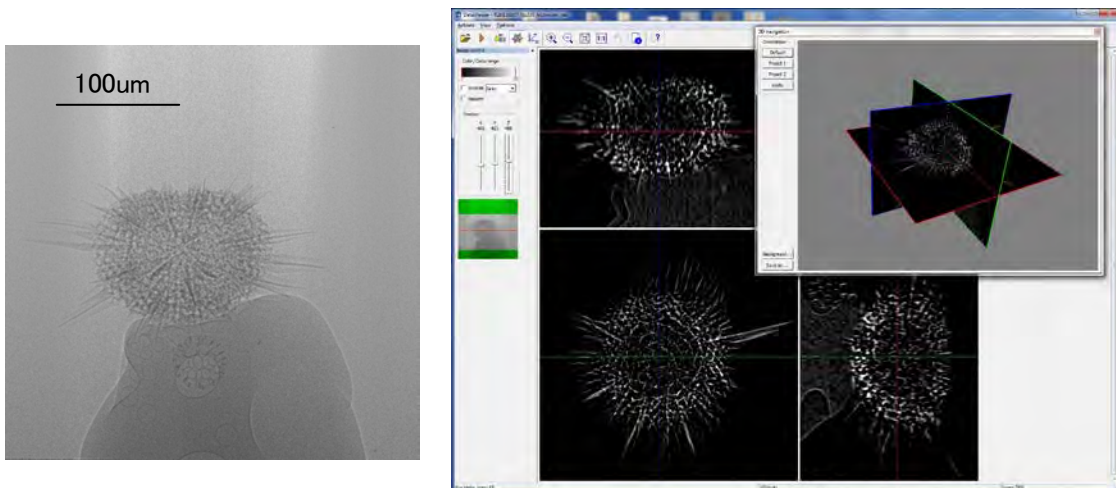


図1 放散虫 *Spumellaria* の X 線透過像(左)と再構成像(右)(解像度:0.33 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)

研究テーマ B「有殻原生生物骨格形態の数理モデルの提案」

有殻原生生物骨格の形態について深く理解するために、骨格形態の数理モデル化に取り組んだ。まず、有孔虫は基本的に球形のチェンバー(室)を追加して成長するため、どのようなチェンバー球をどこに追加するかを規定することで、有孔虫の形態数理モデルを構築した。この手法で原生有孔虫のほとんどすべての形態をモデル化し、形態を数値パラメータ化して表現できることを確認した(文献1)。この数値パラメータは次項(3)での実際の形態の評価に用いた。

有孔虫に比べて放散虫には非常に多様な形態があるため、個別のケースについて数理モデル化に取り組んだ。代表的な2種について説明する。まず、球形放散虫について、球面上にランダムに配置した点群を基にした Voronoi 分割を初期値として、フレームの総量と包絡域体積を目的関数とする最適化をおこない、実際の放散虫骨格とよく似た形態を創出することができた(文献2)。次に図2(左)に示す中生代の *Pantanelium* 属は、形態のバリエーションが多く、電

子顕微鏡写真による分類が非常に複雑になってしまっている。そこで、成長や変形の影響を受けにくいと考えられる幾何学的特徴である殻孔の形と数に着目し、マイクロCTで得られた3次元情報を基に製作した石膏製実体模型(図2(中))や平面グラフ(図2(右))を使って分析を進めている(文献3)。



図2 放射虫 *Pantanellium* 属の電子顕微鏡写真(左), 石膏製実体模型(中), 平面グラフ(右)

研究テーマ C「数理モデルに基づいた実際の形態と機能の評価」

これまで形態の数理モデル化にはさまざまなアプローチがあったが、実際の形態と比較してその妥当性を評価する手法は、実際の詳細な3次元形態がわからないことから極めて限定的であった。本研究では、研究テーマAに示したようにマイクロCTを使って個々の詳細な3次元形態が取得できるので、そのデータを使って数理モデルの検証を行った。対象として使ったのは、連結球モデルで示される有孔虫で、実際の3次元形状から近似連結球モデルを導出し、提案した数理モデルの妥当性を評価した。図3に実際の3次元形態の3次元CGと、導出した近似連結球モデルを示す。

実際の形態から得られた近似連結球モデルを使って「かたち」に関する定量的分析をおこなった。これは、近似連結球モデルが形態の数値化であることを利用した分析であり、熱帯から亜熱帯の海洋表層に生息する浮遊性有孔虫である *Globigerinoides ruber* の形態比較を行った。*G. ruber* には一部にピンク色の色素(カロチノイド)が沈着している *G. ruber*(Pink)と色素沈着のない *G. ruber*(White)の2種があり、色以外の形態はよく似ている。現生のPinkの生息域は非常に限られており(大西洋夏期の熱帯域)、他の地域の海底コア試料から産出した場合は、示準化石として用いられる。近年の遺伝子時計の手法による解析では、pinkはwhiteから約630万年前に分岐したことがわかっている。地層中で年代をさかのぼるとピンク色は退色してしまうため、この2つが形態のみから区別できないか、近似連結球モデルで得られた数値パラメータを比較することで評価した。

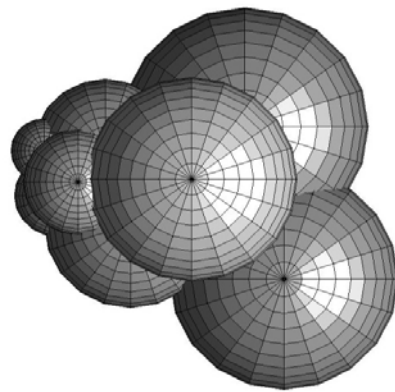


図3 Globinoides ruber(Pink)の実際の骨格の3次元CG(左)と近似連結球モデル(右)

研究テーマD「実際の3次元形態情報を使った力学解析」

研究テーマAで取得した3次元形態情報から、直接ボクセル有限要素モデルを作成して、構造力学解析を実施することができる。図4に、放散虫 *Diymocyrtis tetrathalamus*(Haeckel)の実際の形態情報から作成した3次元CG(左)とボクセル有限要素解析ソフト「Voxelcom」を使ってボクセル有限要素モデルを作成して実施した解析の結果を示す。境界条件は、自由—自由で水圧を模擬した荷重を負荷している。カラーバーは、Mises 応力を示しているが、特に応力集中している箇所がない理想的な形態であることがわかる。

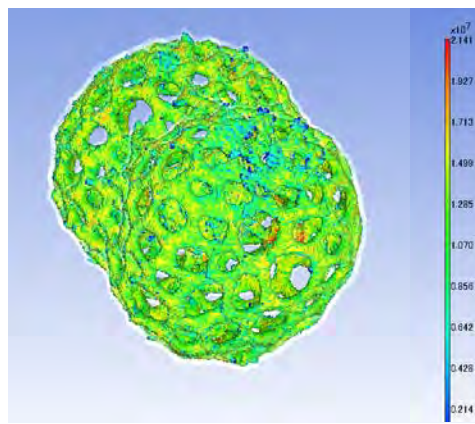
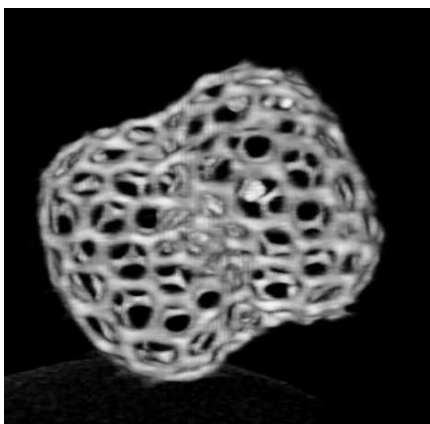


図4 放散虫 *Diymocyrtis tetrathalamus*(Haeckel)の3次元CG(左)と有限要素解析結果(右)

3. 今後の展開

本研究では、電子顕微鏡に取り付けるタイプのマイクロX線CTを導入しました。仕様では、据え置き型のマイクロX線CTを超えるサブミクロンオーダー(0.3 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)の解像度が実現できる装置でしたが、据え置き型に比べて、マニュアル操作の部分が多く、サンプルのマウント方法開発や撮影条件の調整などにほとんどの研究期間を費やしてしまいました。しかし、その結果、価格的には5倍以上の据え置き型CTを超える解像度とコントラストで放散虫や有孔虫の骨格を安定して撮影することが可能となりました。この分野の研究は、電子顕微鏡での2次元画像による分類や分析に基づいており、非破壊による内部構造の解明や3次元情報による分類や分析は新たな手法を提供しつつあると思います。例えば、有孔虫では、従来のCTでは撮影が困難であったサブミ

クローンサイズの棘やチェンバー内側のカルサイト層の撮影に成功しており、現在どのように評価していくか有孔虫研究者と検討中です。

また私自身が構造工学を専門とすることから、マイクロ CT を使って 3 次元形態さえ得られてしまえば、ボクセル有限要素を使った有限要素法による構造解析や、流体/構造連成問題を強連成のまま解くことができるマルチフィジックス有限要素解析を使って、有殻原生生物骨内の応力・ひずみ分布や流れとの相互作用を明らかにすることができます。今後骨格の 3 次元形態のデータは次々と蓄積していくので、5 億年の進化の過程の中で骨格形態の力学的合理性がどう追及されていったのか解明してく予定です。

有殻原生生物には、(1) で述べたように骨格材料(珪酸質と石灰質)、動物/植物プランクトンの組み合わせで、4 つの大きなグループがあります。本研究でとりあげた放射虫(珪酸質)や有孔虫(石灰質)は、いずれも動物プランクトンです。残りの植物プランクトングループ、珪藻(珪酸質)と円石藻(石灰質)は、サイズが 10 分の 1 以下となり、現有のマイクロ CT の解像度では撮影できません。4 つのグループは、進化の過程で環境変動や食物連鎖に適応してそれぞれ相互作用しながら形態や機能、分布域を変化させてきたと思われます。今後、動物プランクトン骨格のデータを蓄積しながら、是非さらなる高解像度の装置を入手して残る植物プランクトングループの 3 次元骨格形態を撮影し、大きな進化の流れを解明していきたいと考えています。

このように、宇宙構造物の設計まではなかなか到達しませんが、生物のかたちの不思議さと設計の巧妙さが少しでも解明できたら、人工物システムへの応用もできると考えています。

4. 自己評価

5 億年以上にわたって環境変動に適応し進化し続けてきた有殻原生生物骨格のかたちと機能を分析することで、微小重量環境下での最適構造物のかたちを探索するという目的の下に研究を進めてきました。結局、マイクロ CT を使いこなすことに研究期間のほとんどを費やしてしまい、なかなかその先に進むことができませんでした。しかし、一旦詳細な 3 次元形態が得られてしまえば、ボクセル有限要素解析やマルチフィジックス有限要素解析などのツールを使って、応力/ひずみ分布などの力学特性や周囲の流体との相互作用などを解析することは比較的容易ですので、今後、次々と得られる成果から人工構造物の設計へとつなげていく所存です。ただし、得られた画像は、従来の CT では得られなかった高解像度かつ高コントラストな 3 次元情報であり、古生物学や生物学においても意味のあるデータであると考えています。こちらは古生物学者や生物学者と共同で研究を始めていますので、一定の成果はあったと評価しています。また、殻の厚みや個体差などを含む実際の 3 次元形態を数理モデルを使って定量的に評価する手法は、従来の形態解析にない包括的な手法であり、進化過程における形態の変遷や空間的な分布を定量的に示すのに有効であると考えています。

5. 研究総括の見解

重力や空気抵抗から解放される宇宙構造物の設計には、幾何学的対称性やモジュール化、自立性等が要請される。本研究では水中で浮力によって重力から解放される環境下で 5 億年以上も進化してきた有殻原生生物の構造特性や力学特性の解明を行って得られる知見を宇宙構造物の設計に応用するという、非常にユニークな発想にもとづく課題に挑戦した。従来は 2 次元情報しかなかった有殻原生生物の構造研究の分野に、新しくマイクロ CT により 3 次元高解像度画

像を取得する手法を開発して、この分野で注目を集めたことは評価できる。さらに得られた 3 次元情報から力学解析を行い、有殻原生生物の構造が応力集中のない合理的な構造になっていることを理論的に突き止めた点は優れている。宇宙構造物の設計指針を得るまでには至らなかったが、3 次元形態を数理モデルを使って定量的に評価する手法の基盤ができたので、当初目標に向けた更なる発展を期待したい。

6. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

- | |
|--|
| 1. Yoshino, T., Matsuoka, A., Kurihara, T., Ishida, N., Kishimoto, N., Kimoto, K., Matsuura, S., Application of Voronoi tessellation of spherical surface to geometrical models of skeleton forms of spherical radiolarian, Forma, 2012, Vol. 27, 45-53. |
| 2. Matsuoka, A., Yoshino, T., Kishimoto, N., Ishida, N., Kurihara, T., Kimoto, K., Matsuura, S., Exact Number of pore frames and their configuration in the Mesozoic radiolarian Pantanellium: An application of X-ray micro-CT and layered manufacturing technology to micropaleontology, Marine Micropaleontology, 2012, Vol.88-89, 36-40. |
| 3. Yoshino, T., Kimoto, K., Kishimoto, N., Matsuoka, A., Kurihara, T., Ishida, N., Matsuura, S., A simple model for chamber arrangement of planktic foraminifera, Forma, 2009, Vol. 24, 87-92. |
| |
| |

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 0 件

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

岸本直子, 松岡篤, 吉野隆, 石田直人, 栗原敏之, 5章 微化石研究の最前線 5. 5宇宙プランクトン, 微化石の世界—プランクトン化石と過去の地球環境の多様性—, 国立科学博物館叢書, 2012.

Kishimoto, N., Ishida, N., Kurihara, T., Kimoto, K., Matsuoka, A., Yoshino, T., Matsuura, S., Acquisition of three dimensional shape of Radiolaria using micro X-ray computer tomography, 13th International Conference on Fossil and Recent Radiolarians, 2012.March, Cadiz, Spain.

Kishimoto N., Three dimensional structure of Radiolarian skeleton in terms of optimal structural design and beyond, Mini-symposium Future Direction of Biological and Paleontological Radiolarian Studies between Japan and France, 2011, Dec., Okinawa.

岸本直子, プラントンのかたちと機能~宇宙工学者からのアプローチ~(招待講演), 微古生物学リファレンスセンター(MRC)研究集会 2011, 2011, March, 仙台

岸本直子, 宇宙プランクトン活動の経緯と成果について(招待講演), 日本地質学会第 119 回学術大会, 2012, Sept., 大阪.