

科学研究費補助金研究成果報告書

平成24年 4月 17日現在

機関番号：34428

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21200053

研究課題名（和文）

マルチスケールデザイン学の構築：有殻原生生物の進化解明から宇宙構造物の設計まで

研究課題名（英文） Multi-scale approach for structural design: from evolution of marine plankton with shell to design of space structures

研究代表者

岸本 直子 (KISHIMOTO NAOKO)

摂南大学・理工学部・講師

研究者番号：60450714

研究成果の概要（和文）：

本研究では、有殻原生生物骨格形態の幾何学的・力学的特性を抽出し、無重力下での最適構造を探索してきた。本研究期間で得られた成果は、以下の3点である。1) ほとんどすべての有孔虫と放射虫骨格の化石ならびに原生種の3次元形状計測が可能となった。2) 有孔虫について、チェンバーの付加成長による数理モデルを構築し、実際の3次元形状からモデルのパラメータ同定を実施し、沈降速度の推定と検証をおこなった。3) 放射虫について、3次元形状データに基づく石膏製拡大模型の詳細な観察から、いくつかの幾何学特性を明らかにし、有限要素モデルを使った解析を実施した。

研究成果の概要（英文）：

We proposed investigation of geometrical and mechanical properties of Foraminifera and Radiolarian skeletons in order to clarify what is an optimal structure under micro gravity condition. Results are summarized in the following three points: 1) Using micro X-ray computer tomography, we can obtain three dimensional information with sufficient resolution of both fossils and recent Foraminifera and Radiolarian skeleton. 2) We propose mathematical models of chamber arrangement of Foraminifera, and evaluate the proposed model in contrast with three dimensional information obtained by micro X-ray CT. 3) The observation of enlarged plaster models based on three dimensional information provides some geometrical characteristics of Radiolarian skeletons. Also we carried out FEM analysis using voxel finite element models.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2010年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2011年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

研究分野：工学，数物系科学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学，地球惑星科学・層位・古生物学

キーワード：有殻原生生物，シミュレーション，進化，マルチスケールデザイン，宇宙構造物

1. 研究開始当初の背景

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。とくに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が、一方軽量化や収納可能であること、自律性なども要求される。空気力に関しては、十分に高真空な環境を再現できる試験設備が存在するが、空間的・時間的に十分な無重力環境を再現できる試験設備はないため、どのような構造物が無重力環境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ている。

本研究の代表者、分担者ならびに連携研究者も参加している放散虫採集ツアーを通じて、上述の宇宙構造物と有殻原生生物という全く異なるサイズ、環境下での構造物の形態が、ユニットの繰り返し構造（モジュール型構造物）であることや、高い幾何学的対称性をもつことなど酷似していたことが、本研究の対する強い動機であった。これらに共通する設計原理を探索することで、スケールや環境変動に対してロバストあるいは適応的な構造物を創出できるほか、有殻原生生物の進化に対しても数理的・力学的な解釈を加えることができると考えた。

2. 研究の目的

研究期間内に明らかにしようとした点は以下の3点である。

(1) 有殻原生生物の骨格の数理的・力学的特性の解明：有殻原生生物の3次元形状データを用いて、骨格の数理モデルを構築するとともに有限要素法によって応力・ひずみ分布などの力学特性を明らかにする。

(2) 力学的に合理的なモジュール型構造物の数理モデルの構築：有殻原生生物の生態や進化過程、および構造解析による力学特性から、合理的なモジュール型構造物のモジュール形態と結合・拡張規則を抽出し、数理モデル化する。

(3) 有殻原生生物の時間的・空間的分布の解釈とモジュール型宇宙構造物の設計：有殻原生生物の時間的・空間的分布について数理モデルと力学特性を用いて合理的に解釈することを試みると同時に宇宙構造物の設計を試みる。

3. 研究の方法

本研究は、力学的な考察に基づく有殻原生生物の形態の設計原理の解明と、導出された設計原理に基づく宇宙構造物の創出を目指して、工学的アプローチ、理学的アプローチを並行して進め、融合領域で評価する計画であった。以下にそれぞれの内容を示す。

(1) 工学的アプローチ

①有殻原生生物骨格の力学特性の解析
マイクロCTを使った骨格の3次元情報から、ボクセル有限要素モデルを構築し、自由-自由境界条件で構造解析をおこなってひずみや応力分布を求める。

②パターン生成および構造最適化アルゴリズム構築とソフトウェア開発
SEM画像やマイクロCTを使った3次元情報から、パラメータを変化させることで異なる種類の骨格形態が表現できる数理モデルを構築する。

③モジュール型構造物の構造トポロジー創出

(2) 理学的アプローチ

①放散虫および有孔虫の採集と飼育観察
放散虫や有孔虫を採集・飼育して生態を観察し、形態形成や機能の解明を進める。

②形態の3次元データ取得
マイクロCTを使って骨格形態の3次元形状データを取得し、データベースを構築する。

③可視化モデル製作
得られた3次元形状データから、石膏製拡大模型を製作し、模型を詳細に観察・分析してその幾何学特性を明らかにする。

(3) 融合領域

①数理モデルやアルゴリズムの評価
構築したモデルを数学的に評価するだけでなく生態や機能から評価する。

②有殻原生生物の時間的・空間的分布の解釈と評価
幾何学的特性や力学的特性を使って、進化過程や生息域などが解釈できないか検討する。

③モジュール型宇宙構造物の設計と評価
構築した数理モデルを人工構造物の設計に応用する。

4. 研究成果

(1) 有孔虫および放散虫骨格の3次元データ取得
申請当初の予定では、有殻原生生物骨格の3次元データは、既に公開されているデータ（東北大 e-ForamStock）を利用し、機会があれば追加する予定であったが、研究代表者が

別途申請していた研究費（JST さきがけ）が採択され、マイクロ X 線 CT を購入・利用することが可能となった。この装置を使って、既に公開されているデータよりも解像度の高い 3 次元データを取得することが可能となり、独自にデータを蓄積しつつある。図 1 右図に取得したデータを元にした CG を示す。いずれも代表的な浮遊性有孔虫である *Globigerinoides ruber* の CG であるが、左図は公開されているデータを元にしたもの、右図は我々が取得したデータを元にしたものである。解像度が向上していることがわかる。

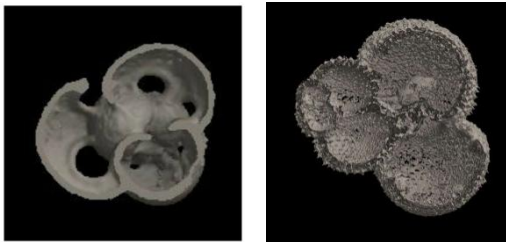


図 1 *G.ruber* 骨格 CG

解像度の向上により、これまで撮影が困難であった放散虫骨格の 3 次元データも取得可能となった。図 2 左図に代表的な放散虫である *Didymocyrtis tetrathalamus* (Haeckel) の CG を示す。

(2) 有孔虫および放散虫骨格の拡大石膏モデル製作

有孔虫や放散虫の 3 次元形状をより正確に理解するために、本研究費で購入した 3 次元プリンタを用いて石膏製拡大模型を製作した。当初は、公開されている東北大の 3 次元データを利用していましたが、現在は、解像度の高い取得 3 次元データを利用している。図 2 右図に前項で挙げた *Didymocyrtis tetrathalamus* (Haeckel) の石膏製拡大模型を示す。このような石膏製拡大模型を使うことで、従来電子顕微鏡写真ではわからなかった、あるいは CG を使っても理解しづらい殻孔の形状や数などの理解が画期的に進んだ。また、これらの石膏模型を利用すれば普通は目に見えないプランクトンを手に取ることができるので、各種の博物館などの常設展示や企画展示に提供してきた。

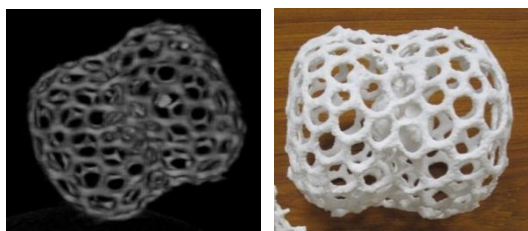


図 2 放散虫 CG と石膏拡大模型

(3) 有孔虫骨格のモデル化と機能

① 有孔虫チェンバーの連結球モデル

有孔虫は球形のチェンバーを追加していくことで成長するため、どのようなチェンバー球をどこに追加するかを規定してやることで、有孔虫の形態数理モデルを構築した。さらに、有孔虫の分類で大きな役割を果たす口孔 (aperture) の位置も取り込み、現生有孔虫のすべての形態をほぼモデル化することができた (図 3)。

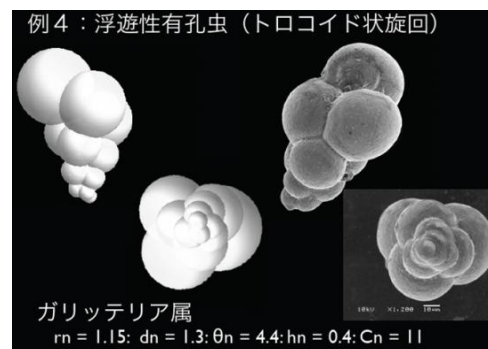


図 3 有孔虫の数理モデル

② 3 次元データによる連結球モデルのパラメータ同定

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極めて限定的であった。本研究では、取得した個々の有孔虫の 3 次元形状から直接近似連結球を導出し、①で提案した数理モデルのパラメータ妥当性を検証している。図 4 右図に *Globigerinoides ruber* の計測データから導出した近似連結球を示す。得られた近似連結球から①で提案した数理モデルでのパラメータがほぼ合っていることが確認できている。また、マイクロ CT で取得したデータをもとにしているため、殻の厚みを考慮することが可能となった。

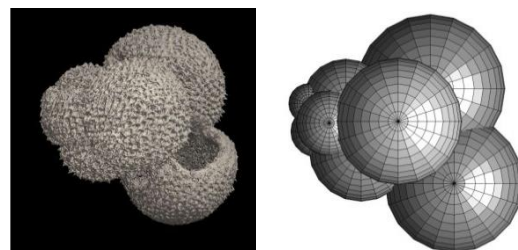


図 4 実物の CG と近似連結球モデル

③沈降速度推定と実測による検証

有孔虫は、底生から浮遊性まで生息深度がある程度決まっている。そこで、有孔虫における骨格形態と機能の関係を調べるために、沈降速度に着目し、骨格の3次元データから炭酸カルシウムの密度などを使って沈降速度を推定した(図5)。形態によって沈降速度が変わること、浮遊性に比べて底生は沈降速度が大きいことを確認した。推定方法の妥当性は、実際に計測した個体を使った沈降実験で評価し、推定値がよく合っていることを確認した。

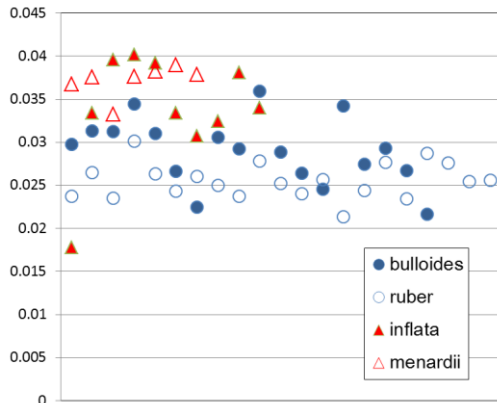


図5 有孔虫殻の推定沈降速度

(4)放散虫骨格のモデル化と機能

①球面 Vertex Dynamics モデル

有孔虫に比べると、放散虫には非常に多様な形態があるため、それぞれのケースについて数理モデル化に取り組んだ。まず、球面上の放散虫(図6右図)に関して、球面上のランダムに配置された点群を基にした Voronoi 分割を初期値として、フレームの総量と包絡する凸胞の体積とを目的関数とする最適化を行い、実際の放散虫骨格とよく似た形態を創出することでできた。図6左図に数理モデルをもとにしたCGを示す。

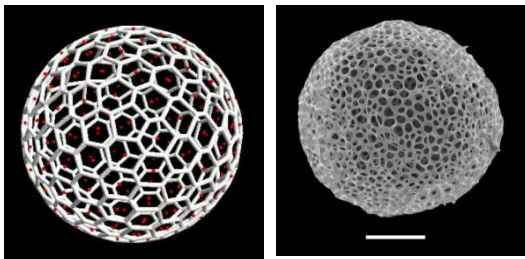


図6 球形放散虫モデル

②Pantaneoniumの多面体モデル

(2)で述べたように、石膏製拡大模型を使えば、CGを使っても理解しづらい殻孔の配列や数などを手に取って確認することができる。中生代の *Pantaneonium* は、形態のバリエーションが多く、電子顕微鏡写真を使った分類が非常に複雑になってしまっている。そこで、我々は、成長や変形があっても影響を受けにくい幾何学的特徴である殻孔に着目し、とくにその形態と数を調べている。現在データを蓄積しているところであるが、こうした3次元的な形状を平面グラフ(図7)を用いて2次元的に表現する手法や、多面体理論を用いた評価方法などを提案している。また、マイクロCTを用いた3次元情報を使えば、非破壊で内部の形態が明らかとなるので、外殻と内殻との関係をたどることができる。現在、取得したデータを用いて事例を増やして、検証している。

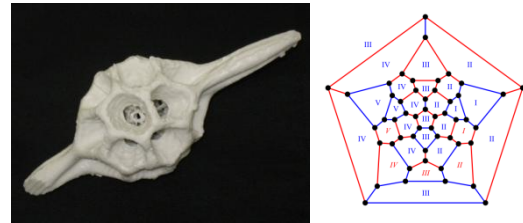


図7 *Pantaneonium*の模型と平面グラフ

③Mifirusus属のフレームモデルと力学特性

中生代 *Mifirusus* 属の外殻は、時代とともにパターンが変遷していくことが知られている。このパターンを簡単な格子でモデル化し、構造力学解析によって、それぞれのパターンの特性を明らかにした。ただし、この結果は図の電子顕微鏡写真を見て構成したモデルを使って得られたもので、実際の骨格の厚みや内部構造が反映されていない。現在、マイクロCTを用いて3次元構造を取得中であり、得られた結果を使って同様の構造力学解析を実施する予定である。

④Didymocyrtis tetrathalamus(Haeckel)骨格の構造解析

③で構造力学解析を実施したのは、電子顕微鏡写真に基づくモデルであったが、マイクロCTで取得した3次元データ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2に示した *Didymocyrtis tetrathalamus* の3次元データを基に本研究費で購入したボクセル有限要素解析ソフト「Voxelcom」を用いてボクセル有限要素モデルを構成し、自由-自由境界で水圧を模擬した解析を実施した。その結果、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明らかとなった。

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5件)

- ① 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*, 査読有, 88-89, 2012, pp.36-40.
- ② 木元克典, 浮遊性有孔虫の骨格の化学が示す環境シグナル, *日本プランクトン学会報*, 査読無, 58, 2011, pp.65-73.
- ③ Ishida, N., An exotic body of the Middle Jurassic Torinosu-type limestone in the Hikawa Formation, southeastern Kanto Mountain, Japan, *福井県立恐竜博物館紀要*, 査読有, 10, 2011, pp.103-112.
- ④ Yoshino, T., Kimoto, K., Kishimoto, N., Matsuoka, A., Kurihara, T., Ishida, N., Matsuura, S., "A simple mathematical model for chamber arrangement of planktic foraminifera," *Forma*, 査読有, Vol.24, No.3, 2009, pp.87-92.
- ⑤ 吉野隆, 石田直人, 岸本直子, 松岡篤, 栗原敏之, 木元克典, 松浦執, 放散虫 *Mirifusus* 属 (海洋プランクトン) の進化と骨組み構造の力学的最適化—骨格形状遷移の構造力学的検証—, *応用力学論文集*, 査読有, Vol.12, 2009, pp.35-42.

[学会発表] (計43件)

- ① Kishimoto, N., Ishida, N., Kurihara, T., Kimoto, K., Matsuoka, A., Yoshino, T., Matsuura, S., Acquisition of three dimensional shape of radiolarian using Micro X-ray computer tomography, 13th Conference on Fossil and Recent Radiolarians, 2012 March 26, Cadiz, Spain.
- ② Yoshino, T., Matsuoka, A., Kurihara, T., Ishida, N., Kishimoto, N., Kimoto, K., Matsuura, S., Geometrical models of skeleton forms of spherical Radiolaria, 13th Conference on Fossil and Recent Radiolarians, 2012 March 26, Cadiz, Spain.
- ③ 且黒在, 黒川雄大, スケーラブルなアンテナ反射鏡面構造の構成法とその軽量化設計に関する研究, 第20回スペース・エンジン

アリング・コンファレンス SEC'11, 2012年1月27日, 宮城.

- ④ 岸本直子, 石田直人, 木元克典, 栗原敏之, 松岡篤, 吉野隆, 松浦執, マイクロCTによる放散虫および有孔虫の3次元構造取得と石膏製実体模型作成, 日本古生物学会第161回例会, 2012年1月21日, 群馬.
- ⑤ 松岡篤, 吉野隆, 栗原敏之, 石田直人, 木元克典, 岸本直子, 松浦執, 中生代 *Pantanellium* の内層殻にみられる殻孔枠の配列と形態形成, 日本古生物学会第161回例会, 2012年1月21日, 群馬.
- ⑥ 岸本直子, 石田直人, 松岡篤, 栗原敏之, 吉野隆, 木元克典, 放散虫骨格の3次元構造と力学特性, 第24回日本機械学会バイオエンジニアリング講演会, 2012年1月8日, 大阪.
- ⑦ 岸本直子, マイクロCTでみた放散虫骨格の3次元構造, 2011年放散虫研究集会松山大会, 2011年10月31日, 愛媛.
- ⑧ 吉野隆, 放散虫の骨格構造と多面体幾何学, 2011年放散虫研究集会松山大会, 2011年10月31日, 愛媛.
- ⑨ 亀井宏貴, 藤井恭兵, 岸本直子, 沈降速度からみた有孔虫骨格の形態について, 日本宇宙生物科学会第25回大会, 2011年9月30日, 神奈川.
- ⑩ 松岡篤, 吉野隆, 栗原敏之, 石田直人, 木元克典, 岸本直子, 松浦執, 中生代放散虫 *Pantanellium* の骨格構造と形態形成, 形の科学会第71回シンポジウム, 2011年6月17日, 千葉.
- ⑪ 吉野隆, 岸本直子, 松岡篤, 栗原敏之, 石田直人, 木元克典, 松浦執, 球面上の Vertex Dynamics, 形の科学会第71回シンポジウム, 2011年6月17日, 千葉.
- ⑫ 木元克典, 太平洋外洋域に産出した2列状旋回浮遊性有孔虫とその意義, MRC2011 in Sendai, 2011年3月5日, 宮城.
- ⑬ 岸本直子, プランクトンのかたちと機能—宇宙工学者からのアプローチ, MRC2011 in Sendai, 2011年3月4日, 宮城.
- ⑭ 岸本直子, 木元克典, 岩下智洋, 石膏模型でみる有孔虫のさまざまなかたち, 第70回形の科学シンポジウム, 2010年11月20日, 兵庫.
- ⑮ 松岡篤, 吉野隆, 岸本直子, 木元克典, 栗原敏之, 石田直人, 松浦執, 中生代 *Pantanellium* の形態形質とその分類学的評価, 第70回形の科学シンポジウム, 2010年11月20日, 兵庫.
- ⑯ 吉野隆, 岸本直子, 松岡篤, 栗原敏之, 石田直人, 木元克典, 松浦執, 球面上の Vertex Dynamics モデル, 第69回形の科学シンポジウム, 2010年6月26日, 東京.
- ⑰ 岸本直子, 吉野隆, 石田直人, 木元克典, 栗原敏之, 松岡篤, 松浦執, 放散虫 *Mirifusus*

属の殻形態から着想した3次元フレーム構造の力学特性, 第69回形の科学シンポジウム, 2010年6月25日, 東京.

⑮松岡篤, 吉野隆, 岸本直子, 木元克典, 栗原敏之, 石田直人, 松浦執, 中生代Pantaneliumの外層殻にみられる27個の殻孔の配列, 第69回形の科学シンポジウム, 2010年6月25日, 東京.

⑯岸本直子, 木元克典, 吉野隆, 沈降速度からみた有孔虫骨格の形態について, 第23回日本機械学会バイオエンジニアリング講演会, 2010年1月9日, 熊本.

⑰木元克典, 浮遊性有孔虫の幾何モデリング: 口孔(Aperture)の実装と分類学的考察, 第68回形の科学シンポジウム, 2009年11月23日, 栃木.

⑱吉野隆, 放散虫Mirifusus属の進化における骨組形状遷移, 第68回形の科学シンポジウム, 2009年11月23日, 栃木.

⑲岸本直子, 海洋性プランクトンの形態から学ぶモジュール型宇宙構造物, 第68回形の科学シンポジウム, 2009年11月23日, 栃木.

⑳Yoshino, T., Mathematical and mechanical aspects of radiolarian skeletons, 12th meeting of the international association of radiolarian paleontologists, 2009 Sept. 14-17, Nanjing, China.

㉑吉野隆, 放散虫Mirifusus属(海洋プランクトン)の進化と骨組構造の力学的最適化, 第12回応用力学シンポジウム, 2009年9月1日, 福岡.

[図書] (計1件)

木元克典, 松岡篤, 吉野隆, 岸本直子, 他, 5.5 微化石研究の最前線 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年刊行予定.

[その他]

アウトリーチ活動情報

展示協力(石膏製模型提供)

①三菱みなとみらい科学館常設展

②新潟大学理学部サイエンスミュージアム

③神奈川県生命の星・地球博物館「日本列島20億年その生い立ちを知る」

④国立科学博物館企画展「深海探査と微化石の世界—HMS チャレンジャーからちきゅうまで」

⑤岩国市立ミクロ生物館, 特別展示

⑥愛媛大学ミュージアム企画展「微化石展」

ホームページ情報

<http://plankton.random-walk.org>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岸本 直子 (KISHIMOTO NAOKO)

摂南大学・理工学部・講師

研究者番号: 60450714

(2) 研究分担者

吉野 隆 (YOSHINO TAKASHI)

東洋大学・理工学部・准教授

研究者番号: 60269496

木元 克典 (KIMOTO KATSUNORI)

海洋研究開発機構・地球環境変動領域・

技術研究主任

研究者番号: 40359162

栗原 敏之 (KURIHARA TOSHIYUKI)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号: 10447617

石田 直人 (ISHIDA NAOTO)

新潟大学・産学地域連携機構・

博士インターンシップ研究員

研究者番号: 20534746

(3) 連携研究者

松岡 篤 (MATSUOKA ATSUSHI)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 00183947

松浦 執 (MATSUURA SHU)

東京学芸大学・自然科学系・教授

研究者番号: 70238955

目黒 在 (MEGURO AKIRA)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号: 70513539

名取 通弘 (NATORI MICHIMIRO)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 00013722

小川 泰 (OGAWA TORU)

筑波大学・名誉教授

研究者番号: 10025364