

文部科学省科学研究費助成事業 学術変革領域研究(A)  
「ジオラマ環境で覚醒する原生知能を定式化する細胞行動力学」



10億年前の原生的知能から新領域を見出す  
ジオラマ行動力学



ジオラマ行動力学

Ethological Dynamics in Diorama Environments

## 研究領域の 目的と背景

本領域では、細胞レベルで発現する巧みな環境・状況適応能力(ここではこれを原生知能と呼ぶ)を探索し、その能力を力学モデルで書き下すことを目的としています。そのための方法論として、「ジオラマ行動学」と「環境連成力学」を確立し、それを基盤とした新規学術領域「ジオラマ行動力学」の創出を目指します。これにより、原生知能の仕組みが明らかになることが期待されます。また、微生物行動の予測と制御の技術が進み、パノラマ環境(自然環境)で展開する健康問題や環境問題の克服に資する知見を提供することも期待できます。

微細藻類による環境赤潮と精子による生殖、卓越した新規細胞行動の探索の3つに焦点を絞り、ジオラマ行動力学の有効性を検証してまいります。

## 領域の概要

知能とは、なるべく広く捉えれば「環境への適応能力」ともいえ、これに従えば単細胞の原生生物(真核単細胞生物)とて原生的な知能を有していると言えます。むしろ数億年にわたる進化の洗練によって、複雑な野外環境でこそ巧みな原生知能を発揮しています。この行動能力は、多細胞生物における単細胞性行動(受精時の精子運動、体内環境での細胞運動など)へと引き継がれていると思われる。

本領域では、単細胞生物が潜在的に有している根源的な環境適応能力を「原生知能」と呼び、その潜在能力を覚醒させるために構築した人工環境を「ジオラマ環境」と名付けています。ジオラマ環境は、例えば、棲息環境の複雑さを模したり、知能テストのために設計されたりするものです。わかりやすい一例が、アメーバ状の粘菌が、ジオラマ環境としての迷路において、最短経路を見出す能力を発揮することです。

このような細胞レベルで発現する原生知能のからくりは、しばしば細胞運動と環境の連成した動力学方程式により定式化できるため、本領域では、このような環境連成力学を徹底的に推し進めることによって、原生知能のアルゴリズム(ヒューリスティクス)の解明に取り組んでまいります。

(\*ジオラマ行動力学:ジオラマ環境を設計して原生知能を覚醒させ、その仕組みを運動方程式で記述する学術)



# 総括班メンバー

## 生物流体力学の学理 active soft matterの学理



京都大学  
数理解析研究所  
石本 健太 准教授



東北大学 大学院  
環工学研究科  
石川 拓司 教授



広島大学 大学院  
統合生命科学研究所  
飯間 信 教授

## 環境赤潮の 学際研究



水産技術研究所  
主任研究員  
柴加田 知幸

## 精子運動の 細胞生物学



筑波大学  
生命環境系  
柴 小菊 助教

## 細胞計測・操作技術の 日進月歩



東北大学 大学院  
医工学研究科  
菊地 謙次 准教授



東京農工大学  
工学系研究科  
篠原 恭介 准教授

## 計画研究

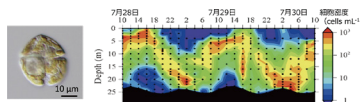
計画班は8人の研究代表者からなり、ジオラマ構築→行動計測→行動理解→アルゴリズム検証の4つのステップを連携して遂行します。計画班では主に精子と微細藻類、バクテリア、繊毛虫、粘菌などの生物種を研究対象とします。

## ジオラマ行動班 (A01-1)

研究課題名

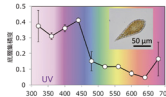
### ジオラマ・パノラマ環境下における 有害赤潮藻の集積アルゴリズムの解明

海洋において微細藻の大増殖と集積によって形成される赤潮は、水産業などに多大な悪影響を及ぼします。本研究では、赤潮被害軽減に必要となる精緻な発生予測技術の開発に向けて、現在ブラックボックスとなっている赤潮藻の集積過程について、生物学的要因と物理的要因の両面からアプローチし、解明します。室内における赤潮藻の培養実験により、運動パラメータ(移動速度など)と生理パラメータ(光合成活性など)から成る日周鉛直移動アルゴリズムを構築します。また、海洋物理モデルに日周鉛直移動アルゴリズムを組み込んだ赤潮動態モデルを構築します。さらに、大量に蓄積されたあるいは新たに取得する実環境データを用いて、赤潮動態モデルを検証します。

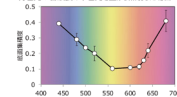


実験槽中(八代海)で赤潮原因藻類毛藻(Karenia mikimotoi (写真))は規則正しい日周鉛直移動を示し、昼間光合成に駆動する光強度の深度圏に集積する。

単色光を上から照射した場合



青色光 + 各波長の単色光を上から照射した場合



赤潮原因種(アトランタ) Chattonella antiquaは青色光から逃げるが、緑→橙色の光が混じると、その逃避行動が消失する。この行動の生理生化学的意義は不明。

[メンバー] 柴加田 知幸 水産研究・教育機構水産技術研究所 主任研究員

[分担者] 西山 佳孝 埼玉大学大学院理工学研究科 教授

鬼塚 剛 水産研究・教育機構水産技術研究所 グループ長

吉川 裕 京都大学大学院理学研究科 准教授

湯浅 光貴 水産研究・教育機構水産技術研究所 任期付研究員

青木 一弘 水産研究・教育機構水産技術研究所 主任研究員

北辻 さほ 水産研究・教育機構水産技術研究所 主任研究員

杉松 宏一 水産研究・教育機構水産技術研究所 主任研究員

内山 郁夫 基礎物研究所 准教授

## ジオラマ行動班 (A01-2)

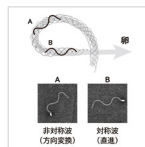
研究課題名

### ジオラマ環境下における精子走化性の 応答計測とメカニズムの解明

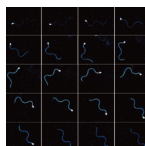
精子は、さまざまな外的環境因子に対して、走化性、走流性、走温性など多様な応答を示し、受精という最終目標に到達する卓越した原生知能を有する単細胞です。本研究では、精子走化性応答に着目し、誘引物質濃度勾配存在下における精子の運動、遊泳方向変換をもたらす鞭毛波形変化、シングル受容を測定し、応答メカニズムを解析します。実際の受精環境を模倣したジオラマ環境下での精子応答を計測、解析することで、これまで見出すことのできなかった卓越した精子の行動力、運動能力、適応力の理解を目指します。



ホヤ精子の鞭毛毛



頭に向かって方向変換するときのホヤ精子鞭毛波形



ホヤ精子鞭毛内カルシウムイメージング(細胞内カルシウム濃度を反映している蛍光輝度を擬似カラー表示している)



サンゴが集積しているときの精子

[メンバー] 柴 小菊 筑波大学生命環境系・下田臨海実験センター 助教

[分担者] 稲葉 一男 筑波大学 生命環境系・下田臨海実験センター 教授

守田 昌哉 琉球大学熱帯生物圏研究センター 准教授

吉田 学 東京大学大学院理学系研究科附属臨海実験所 准教授

## ジオラマ製作班 (A02-1)

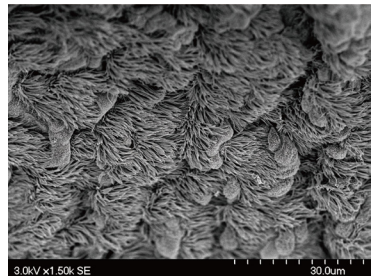
### 研究課題名

哺乳類の気道繊毛細胞がジオラマ環境変動に  
応答する際の原生知能の解明

本研究では、外部環境の変化に直面している哺乳類気道上皮組織・精子・微細藻類の環境に応じた細胞の変化を明らかにします。

- (1) 哺乳類気道繊毛細胞の環境に応じた変化と運動の分子基盤の解析
- (2) 精子と微細藻類の環境に応じた運動変化の原理、および運動の分子基盤の解析

精子に関する実験では、A01-2班の柴、B01-1班の石川と連携します。微細藻類に関する実験では、B01-1班の石川とB02-1班の中垣と連携します。領域全体におけるジオラマ環境の製作と細胞内構造の観察の支援を行います。



マウス気道上皮組織に存在する運動繊毛

[メンバー] 篠原 恭介 東京農工大学大学院工学部生命工学専攻 准教授

[分担者] 武田 洋平 帯広畜産大学 グローバルアグリロメティン研究センター 助教

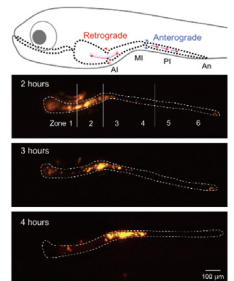
## ジオラマ製作班 (A02-2)

### 研究課題名

ジオラマ環境における濃密微生物の  
in vivo4D-X線トモグラフィー可視化法の開発

本研究では、変動著しい実環境における原生生物の細胞レベルの行動を「ありのまま」に観察する可視化法の開発を行います。生体内の情報乱すことなく「ありのまま」高時間分解能で微生物の運動情報を取得することができれば、微生物懸濁液流動の力学的理解につながります。観察手法によって環境情報(温度、密度、濃度など)や生体情報(代謝、吸収、分解、運動、遺伝情報など)へ影響を与えることなく、より精緻された観察条件(正確度、分解能や再現性)を得るために観察条件の拘束考慮に入れた解析や分析が必要です。原生生物の能力を覚醒するジオラマ環境を構築し、細胞群の運動や局在分布を最新の計測技術を用いることで細胞懸濁液中における微生物流動メカニズムの解明を目指します。

精子に関する実験では、A01班の柴、B01-1班の石川と連携します。微細藻類に関する実験では、A01班の柴加田とB01-1班の石川と連携します。領域内の他班のジオラマ環境の製作や可視化手法について構築し、微生物流動メカニズム検証のための実験系と解析手法の構築を行います。領域全体におけるジオラマ環境の製作サポートを担います。



再顔とともに腸後方へ輸送される腸内細菌叢分布の in vivo ライブイメージング

[メンバー] 菊地 謙次 東北大学大学院工学研究科 准教授

[分担者] 中村 修一 東北大学大学院工学研究科 准教授 宮川 泰明 弘前大学大学院理工学研究科 助教

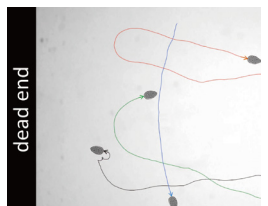
## 徹底力学化班 (B01-1)

### 研究課題名

環境連成力学を基盤とした微生物行動シミュレータの開発

本研究では、環境連成問題を徹底的に力学化して原生知能のアルゴリズムを読み解きます。始めに、保存則を学理とした支配方程式を連立して解くことで、ジオラマ環境とパノラマ環境の物理量を詳細に求めます。次に、細胞応答の数理モデル化を行い、個々の細胞の行動を計算します。最後に、細胞集団の行動を計算し、それによる環境変化を求めることで、「微生物行動シミュレータ」を開発します。開発したシミュレータを用い、精子の行動アルゴリズムや微細藻類の行動アルゴリズム、腸内細菌の行動アルゴリズム、繊毛虫の行動アルゴリズムなど、さまざまな行動アルゴリズムを解明します。

精子に関する実験では、A01班の柴と連携します。微細藻類に関する実験では、分担者の上野およびA01班の柴加田と連携します。繊毛虫に関する実験では、分担者の西上と連携します。領域内の他班の実験やモデル化を反映したシミュレータを構築し、環境連成シミュレーションを行うことで、アルゴリズム検証とジオラマ実験へのフィードバックを行います。領域全体における徹底力学化のインフラ的役割を担います。



[メンバー] 石川 拓司 東北大学大学院医学工学研究科 教授

[分担者] 上野 裕則 愛知教育大学教育学部 准教授 西上 幸範 北海道大学電子科学研究所 助教

## 徹底力学化班 (B01-2)

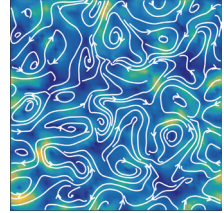
### 研究課題名

### 微細藻の形態形成と生殖・生態・進化に関する環境連成力学モデルの構築

単細胞にとつての力学的な周囲環境は「流体」であり、様々な流れが周囲に存在します。特にこれらの環境適応能力を理解し活用するためには、流体力学の正確な理解が必要となります。さらに、実際の微生物はそのnmスケールの細胞小構造が、個体スケールの流体现象や運動に影響を与える一方で、赤潮のような数kmにも及ぶ微生物の多様で複雑な分布ダイナミクスを引き起こしています。また、時間的にも細胞の環境適応能力は、世代を超えて引き継がれています。このように、原生生物の行動力学は本質的に時空間マルチスケールの力学現象であり、本研究では微細藻を中心にマルチスケールのジオラマ環境を記述する数理モデルの構築を目指します。

具体的には、細胞形状及び細胞殻微細構造のパターン形成の数理モデル、細胞の形状と流体中の輸送機能に関する実験、微細藻の生殖に関わる力学現象の数理モデル、乱流等の環境中の生態と形態・運動の進化の理論の名課題に取り組みます。

班内で連携をとりつつ、領域内では様々な細胞のジオラマ行動の「力学化」を支える理論・解析手法を提供し、アルゴリズム検証とジオラマ実験へのフィードバックを行います。このように領域全体における徹底力学化のインフラ的役割を担います。



精子集団の作り出す  
流れのシミュレーション

【メンバー】 石本 健太 京都大学数理解析研究所 准教授

【分担者】 佐藤 晋也 福井県立大学海洋生物資源学部 教授 小布施 祈織 岡山大学学術研究院環境生命科学学域 准教授

## アルゴリズム評価班 (B02-1)

### 研究課題名

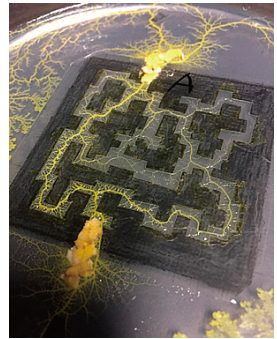
### 織毛虫・アメーバの集団的空間探索と 空間活用のアルゴリズムの解明

2つのテーマを3つの作業ステップ(実験、力学解析、アルゴリズム分析)で実施します。

- (1) 多彩な空間構造に適応したコロニーと輸送網の共発展パターン:  
粘菌と人社会の比較
- (2) 織毛虫・微細藻類の集団遊泳による効率的な三次元空間探索:  
生物対流から空間形状適応的な個体分布動態へ

【メンバー】 中垣 俊之 北海道大学電子科学研究所 教授

【分担者】 佐藤 勝彦 北海道大学電子科学研究所 准教授  
田中 良巳 横浜国立大学大学院環境情報研究院 教授  
棟朝 雅晴 北海道大学情報基盤センター 教授  
國田 樹 琉球大学工学部 准教授



迷路の短い経路に沿って管状の体を  
形成する変形菌モジホコリの変形体

## アルゴリズム評価班 (B02-2)

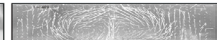
### 研究課題名

### 微生物の行動および環境とのクロストークアルゴリズムの解明

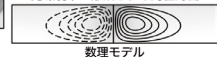
原生知能を定式化するためには、原生生物の個体及び集団が様々なジオラマ環境において覚醒する「能力」を数理科学の言葉で記述する必要があります。そのためには実験データや数値シミュレーションにより得られた情報から本質を抽出する作業が必要となります。本課題では様々な環境下におかれた微細藻類が好適環境を探索する運動を調べます。データ解析やモデル実験系を専門とする研究分担者や研究協力者と協力し、ジオラマ環境下での適応的運動をモデル化します。そうして、そのモデルの数理解析や実験による検証を通して原生知能の定式化を行います。更に他の班と連携し、得られた結果を精子や海生藻類の運動と比較することで、生殖や環境赤潮での問題解決につなげることを目指します。



ミドリムシ



光環境下で形成される局在対流



数理モデル



好適環境の探索運動

【メンバー】 飯間 信 広島大学大学院統合生命科学研究所 教授

【分担者】 山口 崇幸 滋賀大学データサイエンス・AIイノベーション研究推進センター 助教

【協力者】 末松 信彦 明治大学総合数理学部 教授



領域代表

## 中垣 俊之

北海道大学電子科学研究所 教授

【専門分野】

物理エングロジー、原生生物学、  
数理生物学、生物物理学

この度、幸いにも本領域推進の貴重な機会をいただくことができ、領域関係者一同大変嬉しく思っております。と共に、大きな責任を真摯に受け留めており、身の引き締まる思いであります。

私たちは、微生物、と言っても主に真核単細胞生物（原生生物）の運動や行動に関心を向けてまいりました。原生生物は、進化的には、動物や植物、カビやキノコなどの多細胞生物への入り口にあたり、広範な遺伝的多様性をもたらしています。そのため、運動形態も多様化しており、またそれに応じた行動様式も様々です。こんな生き物を長らく見つめてきて、この細胞たちは日々野外では一体何をしているのだらうと、ずっと不思議に思ってきました。

ふと思えば、多くの動物だって、例えば受精するとき（生活環で最も重要かつ劇的なイベント）にはたった一つの細胞（精子）となって、卵子を求めて動いていきます。あたかも単細胞性の生き物に戻ったかのようです。他方、野外にはまだ調べられていない原生生物がたくさん潜んでいて、自分自身の行動様式で自分自身の生を営んでいることでしょう。

真核生物が、この世に現れて10億年ともそれ以上ともいわれており、その長い地質年代を通じて、細胞行動の様式は、よくよく磨き上げられているのではないかと思います。おそらく、目まぐるしく移り変わる野外環境で、思いもかけないやり方で、巧みな適応行動をしているのではないかと思います。まずは、どんな適応能力を秘めているのか、探索したいと思います。そのために私たちは「ジオラマ行動学」という方法論を明示的に掲げました。

さて、これらの適応行動の仕組みとは、どんなものでしょうか？細胞は、遺伝子やタンパク質などの分子運動や

化学反応に基づいて、能動的にエネルギーを作り出して運動できます。細胞マシーナリーの研究は目覚ましいものがあります。細胞は、足場の性質に合わせて推進力を得て、例えば入り組んだ形の障害にぶつかりながら、また化学物質や温度、光などに応答しながら動いたり止まったりします。物質が集まって運動することで、細胞自体の運動が成り立っています。

と思えば、物質の運動法則で細胞運動の様式も書き下せるのではないかと思いたくなります。多分、原理的にはその通りだと思いますが、分子の運動レベルから書き上げて計算するには、なかなかどうして骨が折れることと思います。一方で、少々現象論的ですが巨視的な運動方程式でもって捉えることもまた有効です。私たちは、前者にも注目しながら主に後者の立場で細胞運動の力学モデルを作ろうと思います。理論や計算の手法を駆使して徹底的に推し進めたいと思っています。

ひとたび、細胞行動の力学モデルができた暁には、その運動様式を別の視点で捉え直してみたいと思います。すなわち、ある環境下で、より良い（例えば、生存戦略として適応度の高い）適応行動を生み出すためのアルゴリズムとして評価します。原生生物などの単細胞性生物の行動に現れるものなので「原生知能のアルゴリズム（ヒューリスティクス）」と私たちは呼ぶことにしました。

本領域を特徴付けるキーワードは、複雑環境（ジオラマ環境）、細胞行動、力学モデル化、原生知能アルゴリズムなどです。ひとりで全てをカバーするのはなかなか難しいものですが、自分の得意な分野に足場を固めつつ関連研究者と積極的な共同研究を展開するのが有効です。計画班では、全体概念、行動実験、計測技術、数理モデリング、計算技術、などを領域内で共用化もしくは支援できるようにしております。想像しますに、本領域に関連する研究をなさっている方々は、いろいろ異なる分野に分散しておられるのではないのでしょうか。これを一つの機会と捉えて、ご自身の研究の展開を図るとともに、それをもってしてジオラマ行動力学の確立に向かって共に歩んでいけたらと願っております。

多くの方々のご支援、ご協力を賜りますようどうぞよろしくお願い申し上げます。

お問い合わせ

「ジオラマ行動力学」事務局

[contact@diorama-ethology.jp](mailto:contact@diorama-ethology.jp)

<https://diorama-ethology.jp>