

領域略称名：ジオラマ行動力学
領域番号：21A402

令和6年度
科学研究費助成事業「学術変革領域研究（A）」
に係る中間評価報告書

「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」

領域設定期間
令和3年度～令和7年度

令和6年6月

領域代表者 北海道大学・電子科学研究所・教授・中垣 俊之

目 次

研究組織

1	総括班・総括班以外の計画研究	2
2	総括班・総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者	3
3	公募研究	7

研究領域全体に係る事項

4	研究領域の目的及び概要	11
5	審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	13
6	研究の進展状況及び主な成果	15
7	研究発表の状況	31
8	研究組織の連携体制	36
9	若手研究者の育成に係る取組状況	37
10	アウトリーチ活動に係る取組状況	38
11	研究費の使用状況・計画	39
12	今後の研究領域の推進方策	40
13	総括班評価者による評価	42

研究組織（令和6年6月末現在。ただし完了又は廃止した研究課題は完了・廃止時現在。）

1 総括班及び総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数[2]
X00 総	21H05303 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	中垣 俊之	北海道大学・電子科学研究所・教授	8
A01-1 計	21H05305 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	紫加田 知幸	国立研究開発法人水産研究・教育機構・水産技術研究所(長崎)・主任研究員	11
A01-2 計	21H05304 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	柴 小菊	筑波大学・生命環境系・助教	4
A02-1 計	21H05307 哺乳類の気道繊毛細胞がジオラマ環境変動に应答する際の原生知能の解明	篠原 恭介	東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授	2
A02-2 計	21H05306 ジオラマ環境における濃密微生物のin vivo4D-X線トモグラフィー法の開発	菊地 謙次	東北大学・工学研究科・准教授	3
B01-1 計	21H05308 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	石川 拓司	東北大学・医工学研究科・教授	3
B01-2 計	21H05309 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	石本 健太	京都大学・数理解析研究所・准教授	3
B02-1 計	21H05310 繊毛虫・アメーバの集団的空間探査と空間活用のアルゴリズムの解明	中垣 俊之	北海道大学・電子科学研究所・教授	6
B02-2 計	21H05311 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	飯間 信	広島大学・統合生命科学研究科（理）・教授	2
総括班及び総括班以外の計画研究 計 9 件（廃止を含む）				

[1] 総：総括班、計：総括班以外の計画研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

2 総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：X00

研究課題名：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

代表/ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	中垣 俊之	北海道大学・電子科学研究 所・教授	統括・広報・国際交流支援
分担	石川 拓司	東北大学・医工学研究 科・教授	統括補助・広報・国際活動支援
分担	紫加田 知幸	国立研究開発法人水産研 究・教育機構・水産技術 研究所(長崎)・主任研究員	若手異分野融合支援・生物試料共有化
分担	柴 小菊	筑波大学・生命環境系・ 助教	倫理・法令遵守・生物試料共有化・実験技術支援
分担	篠原 恭介	東京農工大学・工学 (系)研究科(研究 院)・准教授	実験技術支援・生物試料共有化
分担	菊地 謙次	東北大学・工学研究科・ 准教授	実験技術支援・生物試料共有化・国際集会
分担	石本 健太	京都大学・数理解析研究 所・准教授	若手異分野融合支援・国際交流支援
分担	飯間 信	広島大学・統合生命科学 研究科(理)・教授	領域自己評価・国際交流支援
合計 8 名			

研究項目：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

代表/ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	紫加田 知幸	国立研究開発法人水産研 究・教育機構・水産技術 研究所(長崎)・主任研究員	室内実験、現場観測、総括
分担	湯浅 光貴	国立研究開発法人水産研 究・教育機構・水産技術 研究所(長崎)・任期付研究員	室内実験、現場観測
分担	吉川 裕	京都大学・理学研究科・教 授	シミュレーション、現場観測
分担	西山 佳孝	埼玉大学・大学院理工学研 究科・教授	室内実験
分担	北辻 さほ	国立研究開発法人水産研 究・教育機構・水産技術 研究所(長崎)・主任研究員	現場観測、室内実験

分担	鬼塚 剛	国立研究開発法人水産研究・教育機構・水産技術研究所(廿日市)・グループ長	シミュレーション
分担	青木 一弘	国立研究開発法人水産研究・教育機構・水産技術研究所(横浜)・主任研究員	実環境データ解析、シミュレーション
分担	杉松 宏一	国立研究開発法人水産研究・教育機構・水産技術研究所(長崎)・主任研究員	現場観測、実環境データ解析
分担	内山 郁夫	基礎生物学研究所・ゲノム情報研究室・准教授	バイオインフォマテクス解析
分担	山口 創一	九州大学・大学院総合理工学研究院・助教	実環境データ解析、シミュレーション
分担	矢野 諒子	国立研究開発法人水産研究・教育機構・水産技術研究所(長崎)・任期付研究員	室内実験、現場観測
合計 11 名			

研究項目：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

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	柴 小菊	筑波大学・生命環境系・助教	研究の実施、統括、ホヤ、サンゴ精子走化性、運動性の計測、解析
分担	稲葉 一男	筑波大学・生命環境系・教授	精子運動、鞭毛繊毛運動にかかる分子生物学的解析
分担	守田 昌哉	琉球大学・熱帯生物圏研究センター・准教授	サンゴ、魚類精子の運動制御および受精機構の解析
分担	吉田 学	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授	ホヤ精子誘引物質受容分子機構の解析
合計 4 名			

研究項目：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

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	篠原 恭介	東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授	研究統括
分担	武田 洋平	帯広畜産大学・グローバルアグロメディシン研究センター・准教授	新型コロナウイルスの感染実験の実施
合計 2 名			

研究項目：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線トモグラフィー法の開発**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	菊地 謙次	東北大学・工学研究科・准教授	ジオラマ環境製作
分担	中村 修一	東北大学・工学研究科・准教授	濃厚微生物研究の実施
分担	宮川 泰明	弘前大学・理工学研究科・助教	GPU画像解析
合計 3 名			

研究項目：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**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	石川 拓司	東北大学・工学研究科・教授	微底力学化の推進
分担	上野 裕則	愛知教育大学・教育学部・准教授	細胞実験課題の実施
分担	西上 幸範	北海道大学・電子科学研究科・准教授	ジオラマ実験課題の実施
合計 3 名			

研究項目：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**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	石本 健太	京都大学・数理解析研究所・准教授	研究統括・理論
分担	小布施 祈織	岡山大学・環境生命科学科・准教授	理論
分担	佐藤 晋也	福井県立大学・海洋生物資源学部・教授	実験
合計 3 名			

研究項目：B02-1**研究課題名：繊毛虫・アメーバの集団的空間探査と空間活用のアルゴリズムの解明**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	中垣 俊之	北海道大学・電子科学研究 所・教授	研究の構想・実施・取りまとめ
分担	棟朝 雅晴	北海道大学・情報基盤セ ンター・教授	アルゴリズムの抽出と分析・評価ならびに応用
分担	國田 樹	琉球大学・工学部・准教 授	繊毛虫とアメーバのジオラマ行動実験と数値シミュレ ーション・アルゴリズム分析
分担	田中 良巳	金沢学院大学・経済情報 学部・教授	アメーバ行動の実験ならびに力学解析と数理モデリン グ・アルゴリズム分析
分担	佐藤 勝彦	富山大学・学術研究部理 学系・特命教授	繊毛虫の行動力学の定式化と数理解析、ならびにアル ゴリズム分析
分担	堀 学	山口大学・大学院創成科 学研究科・教授	繊毛虫の行動に関わる膜電位動態の細胞生物学的解析
合計 6 名			

研究項目：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**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	飯間 信	広島大学・統合生命科学 研究科（理）・教授	実験および数理モデルの解析
分担	山口 崇幸	滋賀大学・データサイエン ス学部・講師	数理モデル構築・解析
合計 2 名			

3 公募研究

研究 項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	22H05668 ジオラマ環境を用いたサンゴ共生藻と宿主との共生クロストークアルゴリズムの理解	令和4年度 ～ 令和5年度	丸山 真一朗	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授	1
A01 公	22H05669 ジオラマ環境における菌糸体ネットワークの知的行動アルゴリズムの解明	令和4年度 ～ 令和5年度	深澤 遊	東北大学・農学研究科・准教授	1
A01 公	22H05670 ジオラマ環境下における有殻アメーバの被殻構築行動解析	令和4年度 ～ 令和5年度	野村 真未	山形大学・理学部・助教	1
A01 公	22H05674 ジオラマ環境で検証する藻類光走性の意義と鍵遺伝子の機能	令和4年度 ～ 令和5年度	若林 憲一	京都産業大学・生命科学部・教授	1
A01 公	22H05689 鉛直環境における遊泳微細藻類の行動学	令和4年度 ～ 令和5年度	鹿毛 あずさ	学習院大学・理学部・助教	1
A01 公	22H05684 生物由来材料と数値モデルから探るジオラマ3次元地形との相互作用による細胞知能	令和4年度 ～ 令和5年度	杉原 圭	九州大学・医学研究院・助教	1
A01 公	22H05693 粘菌輸送管ネットワークによるジオラマ環境学習形式の探求	令和4年度 ～ 令和5年度	高松 敦子	早稲田大学・理工学術院・教授	1
A01 公	22H05678 遊泳微生物集団が見せるジオラマ環境への自律応答現象の測定と機構解明	令和4年度 ～ 令和5年度	市川 正敏	京都大学・理学研究科・講師	1
A01 公	22H05677 花器官ジオラマ環境の理解による花粉管細胞の制御アルゴリズムの解明	令和4年度 ～ 令和5年度	武内 秀憲	名古屋大学・トランスフォーマティブ生命分子研究所・特任助教	1
A01 公	22H05692 緑藻精子の集団-独立体制転換に伴う運動変化の基盤解明	令和4年度 ～ 令和5年度	豊岡 博子	法政大学・生命科学部・助手	1
A01 公	22H05700 トキソプラズマにおける寄生環境適応能力の細胞生物学的解析	令和4年度 ～ 令和5年度	永宗 喜三郎	国立感染症研究所・寄生動物部・室長	1
A01 公	22H05691 繊毛がもつ原生知能としてのサイズ認知機構の解明	令和4年度 ～ 令和5年度	野田 直紀	日本大学・医学部・助教	1
A01 公	22H05681 海洋ゴミによる水生プランクトン走光性逆転の神経基盤と生態系へのインパクト	令和4年度 ～ 令和5年度	広橋 教貴	島根大学・学術研究院農生命科学系・教授	1

A01 公	22H05690 環境因子によって覚醒する単細胞生物の温度に対する行動の研究	令和4年度 ～ 令和5年度	吉村 建二郎	芝浦工業大学・システム理工学部・教授	1
A02 公	22H05685 ソフトロボット培地	令和4年度 ～ 令和5年度	津守 不二夫	九州大学・工学研究院・教授	1
A02 公	22H05698 ジオラマ環境下での自由遊泳下ゾウリムシ膜電位の光学計測で解析する原生知能	令和4年度 ～ 令和5年度	富永 貴志	徳島文理大学・神経科学研究所・教授	1
A02 公	22H05697 熱水噴出孔のジオラマ再現と極限環境微生物の生存戦略ストラテジー	令和4年度 ～ 令和5年度	西山 雅祥	近畿大学・理工学部・准教授	1
B01 公	22H05683 機械モデルと細胞観察でひもとくストレスファイバ回転の力学	令和4年度 ～ 令和5年度	岩楯 好昭	山口大学・大学院創成科学研究科（理学部）・教授	1
B01 公	22H05675 数値モデル生成アルゴリズムの提案による生物の行動様式の様多様性と普遍性の探求	令和4年度 ～ 令和5年度	上田 肇一	富山大学・学術研究部理学系・教授	1
B01 公	22H05673 機械学習によるネグレリアグレルリの走化性および走触性応答の同時推定	令和4年度 ～ 令和5年度	上道 雅仁	東京大学・大学院総合文化研究科・特任研究員	1
B02 公	22H05686 人の主観評価に基づくグラフで表現される架空粘菌の知的な振舞い生成	令和4年度 ～ 令和5年度	大西 圭	九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授	1
A01 公	24H01491 環境因子によって覚醒する単細胞生物の走熱性の分子機構の研究	令和6年度 ～ 令和7年度	吉村 建二郎	芝浦工業大学・システム理工学部・教授	1
A01 公	24H01460 ジオラマ環境で解き明かす"重たい"プランクトンが浮く理由	令和6年度 ～ 令和7年度	高木 悠花	千葉大学・大学院理学研究院・助教	1
A01 公	24H01459 ジオラマ環境下で覚醒する有殻アメーバの被殻構築行動の柔軟性	令和6年度 ～ 令和7年度	野村 真未	山形大学・理学部・助教	1
A01 公	24H01469 海生酵母の原生知能探究	令和6年度 ～ 令和7年度	五島 剛太	名古屋大学・理学研究科・教授	1
A01 公	24H01499 ジオラマ環境を利用した植物根毛のもつ頑健な細胞極性維持機構の理解	令和6年度 ～ 令和7年度	四方 明格	基礎生物学研究所・植物環境応答研究部門・助教	1
A01 公	24H01494 輸送管ネットワークによる粘菌の学習機構の統一的理解	令和6年度 ～ 令和7年度	高松 敦子	早稲田大学・理工学術院・教授	1

A01 公	24H01457 What defines network efficiency? – Chemotactic adaptation to optimize nutrient access	令和6年度 ～ 令和7年度	バイヤー マルセル・パスカル	北海道大学・高等教育推進機構・助教	1
A01 公	24H01481 脳スライスをジオラマ環境として用いたオリゴデンドロサイト前駆細胞の原生知能の解析	令和6年度 ～ 令和7年度	石原 康宏	広島大学・統合生命科学研究所（総）・教授	1
A01 公	24H01484 ジオラマ3次元地形との相互作用による多細胞生物の細胞行動力学	令和6年度 ～ 令和7年度	杉原 圭	九州大学・医学研究院・助教	1
A01 公	24H01471 花粉管細胞の挙動アルゴリズムを規定するしくみの理解と再構築	令和6年度 ～ 令和7年度	武内 秀憲	名古屋大学・トランスフォーマティブ生命分子研究所・特任助教	1
A01 公	24H01470 ジオラマ環境によって発揮される植物細胞の伸長機構の探求と機構解明	令和6年度 ～ 令和7年度	佐藤 良勝	名古屋大学・トランスフォーマティブ生命分子研究所・特任准教授	1
A01 公	24H01488 泳ぎながら形を作る：高速変形ジオラマ環境における細胞の器官構築運動の解析	令和6年度 ～ 令和7年度	加藤 壮一郎	熊本大学・発生医学研究所・助教	1
A01 公	24H01495 緑藻クラミドモナスの走化性に基づく集団行動のジオラマ環境下での検証	令和6年度 ～ 令和7年度	若林 憲一	京都産業大学・生命科学部・教授	1
A01 公	24H01482 精子貯蔵管ジオラマ環境における精子の運動パターンの解明	令和6年度 ～ 令和7年度	松崎 芽衣	広島大学・統合生命科学研究所（生）・助教	1
A01 公	24H01462 ジオラマ環境を用いた光共生クロストークアルゴリズムの理解と普遍化	令和6年度 ～ 令和7年度	丸山 真一郎	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授	1
A02 公	24H01497 オールオプティカル・バーチャルジオラマから探るゾウリムシの原生知能	令和6年度 ～ 令和7年度	富永 貴志	徳島文理大学・神経科学研究所・教授	1
A02 公	24H01480 マイクロウォールプレートを用いた局所ジオラマ環境操作と微生物集団運動の解析	令和6年度 ～ 令和7年度	小嶋 勝	大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授	1
A02 公	24H01472 回転ひずみ場を生じる動的ジオラマ環境で細胞原生知能を覚醒させる	令和6年度 ～ 令和7年度	松本 健郎	名古屋大学・工学研究科・教授	1
B01 公	24H01483 アメーバ細胞内で回転するストレスファイバのステアリング動力学	令和6年度 ～ 令和7年度	岩楯 好昭	山口大学・大学院創成科学研究科・教授	1

B01 公	24H01458 流体力学に立脚した精子走性計算力学モデルの構築	令和6年度 ～ 令和7年度	大森 俊宏	東北大学・工学研究科・助教	1
B01 公	24H01467 単細胞生物における学習及び意思決定機構の創発原理の探究	令和6年度 ～ 令和7年度	上田 肇一	富山大学・学術研究部理学系・教授	1
B01 公	24H01466 単細胞集団の知能形成に対する統計力学理論の応用	令和6年度 ～ 令和7年度	吉森 明	新潟大学・自然科学系・教授	1
B01 公	24H01485 ジオラマ環境下での細胞の這走運動のメカノケミカルモデル	令和6年度 ～ 令和7年度	多羅間 充輔	九州大学・理学研究院・助教	1
B01 公	24H01464 環境変化に対するアメーバ運動と変形戦略のデータ駆動型研究	令和6年度 ～ 令和7年度	上道 雅仁	東京大学・大学院総合文化研究科・特任研究員	1
B02 公	24H01465 原生知能のための最適性理論の構築と応用	令和6年度 ～ 令和7年度	小林 徹也	東京大学・生産技術研究所・教授	1
B02 公	24H01473 数理地理モデリングによる都市形成『実験』環境の開発	令和6年度 ～ 令和7年度	青木 高明	滋賀大学・データサイエンス学系・准教授	1
公募研究 計 47 件 (廃止を含む)					

[1] 公：公募研究

[2] 公募研究は研究代表者が1名で実施

研究領域全体に係る事項

4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させる」ものであるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

【研究目的と全体構想】

「生命の知的なるものとは何か？」という問いは、技術革新のたびに問い直されてきた古くて新しい問題である。今般では深層学習やチャットGPTなどのAI技術の革新によって知の本性や未来の社会像が問い直されている。知性や知能という概念は、固定したものではなく時代や社会状況とともに変容するものである。本領域では、進化や行動生態学の観点から、生命知とは、「複雑な野外環境でも生き残れる行動能力」に端を発するという説に依拠している。その意味において、単一細胞性の原生生物の行動能力は究極の原型であることから、それを原生知能と呼んで概念化することを目指している。この原生知能の検証が、本領域の中心課題である。

そのために、二つの方法論を採用した。1つ目は、原生知能を覚醒させるための人工環境をデザインすることであり、このような実験環境をジオラマ環境と呼んで標語化している。ジオラマ環境の具体例は、棲息環境の複雑さを取捨選択して模倣したものや、あるいは試験問題・知能テストの類である。2つ目の方法は、原生知能を知能創発アルゴリズムとして理解するために、細胞レベルの行動力学方程式を定式化することである。これは、具体的には細胞運動と環境との連成した動力学方程式の形をとり、往々にして細胞の短期的かつ局所的な刺激応答ルールをモデル化したものである。モデル方程式の時間発展そのものがアルゴリズムに相当すると見なすので、従来のアルゴリズムの概念からは逸脱する部分も大きい。誤解のないように従来のアルゴリズムと区別して原生アルゴリズムと呼ぶことにする。

具体的な実証課題を三つ掲げている。1つ目は赤潮の動態、2つ目は精子のらせん遊泳である。赤潮は空間的に大きく時間的にも長いスケールであり、精子の遊泳は反対に小さくて速い現象である。この両極端のスケールを扱うことで方法論の整備をする。赤潮は栽培漁業や海洋環境維持の観点から社会的な意義が大きい。一方、精子は、原生生物から多細胞生物へと引き継がれた原生知能を有していると期待され、原生知能の探究がヒトの理解にも深く関わっていることを示す象徴的な例である。受精現象は、栽培漁業や医療にも関わるため、産業との関連も大きい。以上2つの課題は、主として計画班が協力して取り組んでいる課題である。3つ目の課題は、多様な細胞の多様な状況における多様な行動の探索であり、計画班はもとより公募班の多様性によって押し進める課題である。これは、新規原生知能の探索である。以上3つの実証課題を通じて、原生知能の包括概念化を目指す。

研究の目的と背景



実環境
複雑で変動著しい状況

- 生活空間のマイクロ形状
- 複合的で非一様な要因
- 目まぐるしい変動
- 生存競争



真核生物の始祖
原生生物(protists)

- 遊泳空間の記憶
- 遊泳モード切替
- 集団空間探索 など
- 走性の変异性
- 空間形状認知
- 巧みな行動能力

10億年に渡る進化の洗練

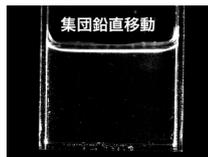
- 困難な状況の克服
- ベターな行動, 妥協

→ 生命の環境適応能力の基本を最も素朴な形式で具備

目的 天与の情報機械初号機
原生知能と原生アルゴリズム
世界初の系統的概念化
細胞の行動力学方程式化

計画班・公募班による実証課題の取組

計画班 実証1 赤潮
巨大集団移動体の生成
→ 集団生成と移動性能など



集団鉛直移動

~so many cells
~100 km
~1 year

計画班 実証2 精子遊泳
多細胞生物の単細胞ステージ
→ 攪乱ロバストな標的到達能など



ウニ精子



ホヤ精子
カルシウムイメージング

1 cell
~1 μm
~1 ms

方法論と技術の確立と洗練

← 最大 → 最小

全スケール俯瞰の座標軸

公募班

機毛打の膜電位制御
アメーバ微細構造・最適探餌
条件付学習・3D形状認知
走性の逆転と多様性・共生
アメーバ運動の力学・寄生
精子のジオラマ環境・群生
花粉管・根毛のラセン成長 etc

実証3 新展開
構造物構築能・学習・予測・多様性・共生・繁殖・社会性
→ 新規原生知能の探索

計画班

腸内濃密微生物集団動態
気道繊毛の病原菌排出
粘菌ネットワーク
繊毛虫の空間センシング
精子運動の柔軟性
微細藻類の集団空間探索
藻類の形状と運動の進化

【学術的背景と学術変革性】

原生知能をジオラマ環境で覚醒させ、その知能アルゴリズムを行動力学方程式の定式化を通じて読み解くという領域の研究内容は、一見とっぴに思われるかもしれないが、原生生物の粘菌モジホコリが関東圏の鉄道網と同様な輸送システムを構築する能力とその原生アルゴリズムの発見や、細胞性粘菌キイロタマホコリの子実体形成における集団らせん運動とそれと同様な回転ラセン波動がヒト心臓の心室細動でも共通してみられることなど、原生知能のエビデンスがいくつも示されてきた。

本領域のユニークさは、一般には高等生物の専売特許のように捉えられがちな生命知なるものを、根本的に捉え直すために180度発想を転換して、生物の基本要素である細胞の普遍性から読み解く点にある。それが、絵空事ではなく、十分な可能性を有していることが、科学的な意義である。原生知能のアルゴリズムを読み解く点においては、当領域の研究活動は、世界の研究を先導しているといつてよからう。その一方で未来の情報技術を模索する一手法として海外での研究者数・論文数が増加していることから、社会へのインパクトも少なからずあると言えよう。より広い学術的な視点から言えば、本領域は、知の再定義を迫るような成果を生み出してきており、人間観や自然観を変革する可能性を秘めている。この点は、研究期間終了後にじわじわと浸透する社会的かつ文化的な長期的変革であるから、その緩慢さゆえに見過ごされがちであるが、その貢献度は重要であると考えている。

【領域終了後に期待される成果】

- ・ **ジオラマ行動力学の確立**：原生知能の事例を集めて整理することにより、ジオラマ行動力学を確立する。それにより細胞行動の多様性と能力に対する新しい見方を提供することが期待される。
- ・ **赤潮藻類の行動説明**：赤潮藻類の集積性行動と日周鉛直移動を定式化し、その仕組みを掘り下げることで、赤潮の予測精度の向上へとつながることが期待される。
- ・ **精子の卵到達行動の説明**：いくつかの生物種の精子の環境依存的な遊泳行動を定式化することにより、精子が実環境の攪乱に対してどのように反応して卵子に到達するかが明らかになる。生態系維持、栽培漁業などへの波及効果も期待される。
- ・ **新規原生知能事例の発見**：単細胞生物をはじめ多細胞生物における、仮足運動性細胞、あるいは繊毛・鞭毛運動性細胞に見られる、環境依存的な形作り、動き作りの性能と仕組みの理解により、未知の原生知能アルゴリズムを獲得することが期待される。

【領域を特徴付けるキーワード】

原生知能：単細胞生物が潜在的に有している根源的な環境適応・状況対応能力。細胞レベルで現れる環境・状況依存的な運動能力。環境や状況の複雑さに注目する。

ジオラマ環境：原生知能の潜在能力を覚醒させるために構築した人工環境。ジオラマ環境に対比させて、野外の自然環境をパノラマ環境と呼ぶこともある。

細胞行動力学：細胞の運動や行動を、おかれた環境との相互作用も取り入れた運動方程式により定式化すること。定式化された方程式を細胞行動方程式と呼ぶ。

原生アルゴリズム：細胞行動力学により得られた細胞行動方程式を、細胞による問題の解法として評価すること、またはその評価により得られた解法。

ジオラマ行動力学：ジオラマ環境を設計して原生知能の仕組み（原生アルゴリズム）を細胞行動方程式で記述する学術。

5 審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

所見での指摘事項1：単細胞生物に関しては、事前検討によりジオラマ環境製作の糸口はつかんでおり、その環境での観測を通じて、環境と個体との相互作用を考慮した力学系モデルである環境連成力学を用いた解析を行うことにより、本質的なアルゴリズムの抽出が期待される。

回答：領域全体で掲げる3つの実証課題のうち、(1)精子の運動については、A01-2柴班を中心に、A02-2菊地班の測定技術とB01-2石本班の理論解析の支援を受けて三次元空間遊泳軌跡の測定に成功し、背景流れ場や濃度場・精子間の協力や競争・卵子の複数性・遊泳空間形状の複雑性などの攪乱要因を導入するところまでできた。と同時に、ラセン型巡回遊泳の卵子到達機構についてB01/02の四班により徹底力学化・アルゴリズム化も論文執筆段階までできた。また、(2)A01-1紫加田班が中心となる赤潮についても、A02-2班の装置製作技術とB01-1班のシミュレーション技術との協働により、ジオラマ実験槽での比較的規模の大きい乱流攪乱実験を実施中である。注目するジオラマ環境要因は、波浪による攪拌・粘液の分泌・自己集合性等である。

(3)新規原生知能の探索では、繊毛の集団運動による流れの制御という共通観点から、A02-01篠原班のマウス気道繊毛の粒子排出とB02-1中垣班の繊毛虫ラッパムシの採餌渦・狭隘空間探索に関するジオラマ環境実験をすすめており、B01/02の四班により力学モデル化・アルゴリズム化の検討にも取り組んだ。この他にも、計画班と公募班から新規原生知能の例が提案されており、今後の研究によりジオラマ環境製作と環境連成力学を展開して原生知能アルゴリズムの抽出までこぎつけるために、月例総括班会議をより充実させ、研究テーマ別領域内研究交流会の頻度を上げる。

所見での指摘事項2：特に理論系グループである三つの研究組織が競合することなく異なるアプローチをとっており、領域目標の実現にシナジー効果が期待される。

回答：所見の通り、三つの理論系グループは工学的手法（石川班）、数学的手法（石本班）、物理的手法（飯間班）で特徴付けられており、領域内において以下の役割を担っている。B01-1石川班は、一般的に幅広く理論が適用できる精緻な連続体シミュレーション技術を有しており領域全体の力学モデル化を底上げする。B01-2石本班は、力学モデルの数理解析に長けており石川班との密な議論により現象の力学的な本質（数理的機構）を抽出する。この2班が車の両輪となり、B02-2飯間班が、物理学・数理モデリング・情報科学を広い視野で俯瞰しアルゴリズムの抽出へと舵をとる。B02-1中垣班は、飯間班と協働して進化計算やヒューリスティクスの観点からアルゴリズムの抽出を促進する。シナジー効果を高めるために、関係者全体の打ち合わせを毎月継続している。

所見で求められた事項3：領域の目的や得られた成果の意義、特に学術変革性について社会に広く知らせるアウトリーチ活動も期待する。

回答：小中学生・高校生向け1日体験学習や出前講義など数名～30名程度の少人数クラスを対面で21回実施した。コロナ後の対面クラスとあって、コンテンツの質向上に取り組んだこともあり、参加者の熱意も高く効果的であった。サイエンスアゴラ（科学技術振興機構JST主催）に令和4年度と5年度に出展し、500名超の来訪者に当領域の研究内容を紹介した。来訪者から感想やコメントをもらい対話型のプログラム（説明者9名ほどで来訪者に個別対応）とした。

社会により広く届けるためにマスメディアを介した活動にも注力した。NHK Eテレ サイエンスZERO「単細胞の"知性"に迫る 謎多き粘菌の世界」に領域代表が出演して本研究領域を紹介したことを始め、領域全体として他にも、NHK BSプレミアム ヒューマニエンス～HUMANIENCE～40億年のたくらみ「"ミクロの毛"細胞を指揮する司令塔」、NHK BS1世界のドキュメンタリー「粘菌 脳のない天才」で研究内容・概念を紹介した。個別の研究内容については、特にA01-1班が中心になって推し進めている赤潮研究において、北海道で例を見ない赤潮被害が起きたことを受けて急遽調査・研究したことが朝日新聞に、また八代海での赤潮被害の研究が西日本新聞にて報道された。

領域全体では、精子、繊毛虫、アメーバなどの個別の研究が、新聞（20件）・webサイト（11件）・一般向け雑誌等（5件）などで紹介された。専門家向けには、公開シンポジウムと国際会議を合計3回ハイブリッド方式で、学会との共催セッションを6回開催した。

留意事項の指摘事項1：研究項目A02の in vivo 4D-X線トモグラフィー法の開発については、ジオラマ製作組織としての意義を明確にし、腸内環境がジオラマ環境と位置づけられるように研究内容・研究計画を再検討した上で実施することが望まれる。

回答：指摘を重く受け止め、ジオラマ環境の製作対象を、腸内環境に限らず、赤潮藻類や精子などの濃密集団の測定全般に拡張した。腸内細菌の研究では、マイクロフルイディクス技術を用いて腸内の微細なひだや腸壁の運動を模擬したジオラマ環境を製作し、複雑な管路内の細菌の分布や挙動を高時間・空間分解能で計測する技術を開発している。B01-1石川班とも連携し、腸内細菌がひだとひだの間の狭い場所に集まるアルゴリズムを調査している。赤潮藻類の研究では、A01-1紫加田班と連携し、海洋乱流を模擬する1メートル程度のジオラマ水槽を製作した。容器内の流れ場と赤潮藻の挙動を計測し、日周鉛直運動に海洋乱流が及ぼす影響を調べている。精子の研究では、A01-2柴班と連携し、精子の3次元挙動および鞭毛打の3次元波形を計測する技術を開発している。この技術は既に成果を上げ始め、2022年12月に筑波大学下田臨海実験センターで開催された研究会において、柴班から研究報告があった。また、さらなる濃密細胞懸濁液の計測を目指し、マイクロCTを用いた基礎実験をすすめるなどして今年度に運用開始となる次世代放射光施設（仙台）での計測に備えている。

留意事項の指摘事項2：領域の成果を普遍的なものとする上では、ジオラマ行動組織・製作組織で得られた経験を基に「適切なジオラマ環境を設定する方法の開発」に取り組むことが不可欠である。

回答：適切なジオラマ環境を設定する方法を開発するためには、原生物と日々触れ合っている実験研究者と、理論研究者の交流が不可欠である。我々は毎月1回（第3木曜日午後5～9時）幹事会（総括班会議）を開催して頻りに議論した。この月例幹事会は、原則オンライン形式で開催し、ほぼ半年に1回の割合で対面開催した。そこでの議論を核にして、領域全体会議や研究交流会などを通じて、ジオラマ環境を有効に設定する方法を検討した。また、2022年12月には精子研究の交流会を、2023年1月には数理勉強会を実施し、学生も含めた若手研究者とも共有した。こうした取り組みを通して、適切なジオラマ環境を設定する基本方針を整えてきた。

参考意見の指摘事項1：研究機関の前半は、間口を広げずに、事前質問の回答でリストアップされていた候補に専念し、単細胞生物が示す創発的知能を、観測・分析を通じてアルゴリズム化し、原生知能を実証することを通じて、原生知能の概念を確実にすべきであるとの意見があった。

回答：原生知能の概念を確実にするために、より客観性の高い包括概念化を目指して、総括班評価者（人工知能、比較認知神経科学、非線形数学、流体解析、海洋流体力学、原生生物学、細胞生物学、進化生態学などの専門家9名のうち毎回3名程度参加）も交えて概念化討論会を3回実施した。その内容を整理して報告書（1号22頁、2号45頁、3号44頁）にまとめニューズレターとして全領域メンバーで共有した。以上の取り組みにより、原生知能の概念化を推し進めている。

参考意見の指摘事項2：原生物の知能を数理モデル化することは非常に有意義であるが、人間社会とのアナロジーはたまたま非線形システムとして類似するだけとの疑念もあり、単純なアナロジーから社会科学への応用を図ろうとする公募研究には慎重に判断すべきであるとの意見が複数あった。

回答：公募班の説明会においては、単純なアナロジーから社会科学への応用を図ることを煽らないように充分配慮した。そのため、採択された公募研究にはそのような課題は見られていない。一方で、熟慮の末に、慎重かつ大胆に数理地理学への応用展開を図る提案が、後期公募班で採択されており、計画班との密な連携を築いて極力オープンな議論を展開したいと考えている。

6 研究の進展状況及び主な成果

(1) 及び (2) について、計画研究及びそれと連携している公募研究ごとに、具体的かつ簡潔に記述すること。(一つの計画研究及び連携する公募研究で2頁以内)

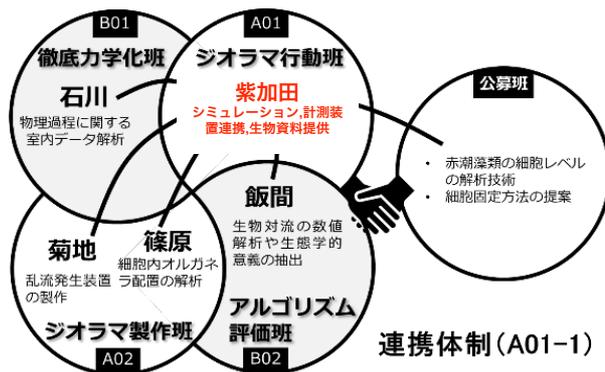
(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか

(2) 各計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果について、(計画研究・連携する公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。)

【計画班A01-1】ジオラマ・パノラマ環境下における有害赤潮藻類の集積アルゴリズムの解明

(1) 研究計画と進展状況

本研究は、領域実証課題1に関する赤潮藻類の研究を担当する。赤潮の現場でのフィールド計測や実験室でのジオラマ環境実験を駆使して、生物学的・行動学的な性質を解明する。さらに得られた生物学的知見を海洋流のシミュレーションに取り込んで赤潮藻類の動態を理論的に解析する。最終的には、有害赤潮藻の集団運動、特に赤潮被害軽減策につながる日周鉛直往復移動について、その行動アルゴリズムの解明をめざす。



【課題1】赤潮藻類の日周鉛直移動の生物・物理要因の抽出

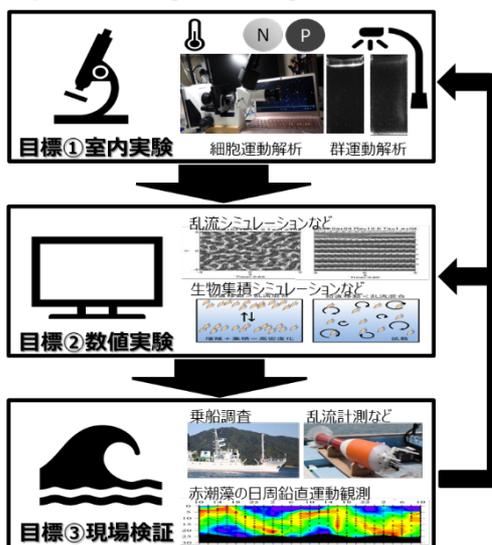
有害赤潮の原因となるラフィド藻 *Chattonella marina complex* と渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* を主たる対象生物に設定し、それらの培養株を用いて様々な環境条件下で日周鉛直移動を観察しながら種々の環境因子と生理因子を計測した。その結果、環境要因として細胞密度、栄養塩、光強度を、また生理的要因として光合成活性およびその関連遺伝子の発現量を抽出できた。その過程において、公募班(鹿毛)と連携して個々の細胞の運動を観察して集団運動との関連を調べた。また、その他の班と連携して、物理要因の室内解析を進めている。さらに、令和3年秋に北海道において過去最大の漁業被害をもたらした渦鞭毛藻類 *Karenia selliformis* についても、現地海水から採取した試料の培養に成功し、鉛直移動に影響する要因を解析することに成功した。

【課題2】有害赤潮藻の動態のシミュレーション

沿岸域の海洋物理過程を表現する数値モデル Large Eddy Simulation(LES) に課題1で得られた日周鉛直移動要因などを組み込んで有害赤潮藻の動態をシミュレーションしている。これまでに、実環境で観測された有害赤潮藻の水平・鉛直集積をシミュレーションした。さらに、別の海洋物理モデル Unstructured Coastal model with High-resolution Information(UCHI) を用いて、赤潮藻の鉛直移動や定位深度が、赤潮の拡大に与える影響を解析した。

【課題3】赤潮の発生現場におけるフィールド計測と課題1、2へのフィードバック：課題1の新たな実験デザインの構築および課題2のモデル改良を目的として、既存のあるいは新たに取得する現場データを解析して、鉛直移動に影響し得る要因を抽出する。これまでに、過去の九州沿岸の実環境データを解析して得られた成果を課題1、2にフィードバックすることによって、赤潮藻の集積をシミュレーションで再現しつつある。また、赤潮発生海域における海洋乱流などの物理パラメータも計測した。

計画概要 (A01-1)



(2) 計画研究の成果と関連する公募研究で得られた成果

【課題1】 課題3の解析により、*K. mikimotoi* は、昼間100 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度の光が到達する深度まで上昇して定位する傾向があることを見出した。そこで、実験室で太陽光シュミレーター装置を用いて、昼間、上方から異なる強度の白色光を照射して鉛直移動を観察した。その結果、125 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上で光強度依存的に下降速度が上昇すること、それ以下の光強度では上方遊泳することが分かった (R6日本水産学会シンポジウム[B01-1班と共同主催]口頭発表；論文投稿準備中)。

鉛直移動を阻害する要因である乱流と鉛直移動の関係を定式化するために、計画班A02-1およびB01-1と連携して、室内で乱流混合の強度を変えて鉛直移動を観察できるシステムを開発した。また、公募班(豊岡)と共同で *Chattonella* 細胞の固定試料の作製に成功した。現在、計画班A02-2の技術支援による透過型電子顕微鏡観察により、鉛直移動と細胞内オルガネラの配置に基づく細胞重心の関係を解析している。さらに、計画班B02-2の技術(ミドリムシの生物対流研究で開発した独自技術)を援用して、昼間の水面集積時に生じる *Chattonella* および *K. mikimotoi* の生物対流について、定量的な解析を進めている。

【課題2】 LESに、夏季の環境条件(水温成層と海上風)を与え、文献値をもとに遊泳速度の異なる3種の赤潮藻(*Chattonella*、*K. mikimotoi*、*Cochlodinium polykrikoides*)を模した仮想粒子の挙動を解析した。風が強くなると鉛直集積度が低下するとともに、自泳速度のみから推定される分布深度との差が大きくなること(図2)、海洋表層の物理過程と鉛直遊泳のバランスで起こる水平集積は遊泳速度が大きいほど形成されやすいことなどが見出され、赤潮藻の集積には風速と遊泳速度が多分に影響することを確認した(Onitsuka & Yoshikawa 2023, 国際会議ICHA2023での講演；論文投稿準備中)。次に、*K. mikimotoi* を対象として、LESに夏季の環境条件、仮想粒子の自己遮蔽、課題1で得られた光強度依存的な昼間の上方遊泳パターンを導入したところ、実環境で観測された本種の亜表層での鉛直集積が再現された。

【課題3】 八代海の過去の自動昇降式多項目水質計や流速計のデータを整理し、*K. mikimotoi* が栄養塩枯渇時に鉛直移動を停止し、低深度層に偏在する可能性を見出した。同時期・同水深帯に風による強流発生もみられたため、鉛直移動停止が赤潮発生域拡大に寄与する可能性も示唆された(Aoki et al. 2023)。その他、*Chattonella* が上昇時と下降時で移動速度が異なることなど、赤潮藻の集積過程を説明するうえで重要な情報を得た。さらに、鉛直移動や集積に多大な影響を及ぼし得る乱流の実環境における情報を得るために、八代海の姫戸沖ブイに超音波流速計を設置して海流変動を計測し、散逸率データを約1ヶ月間に渡って得ることに成功した。

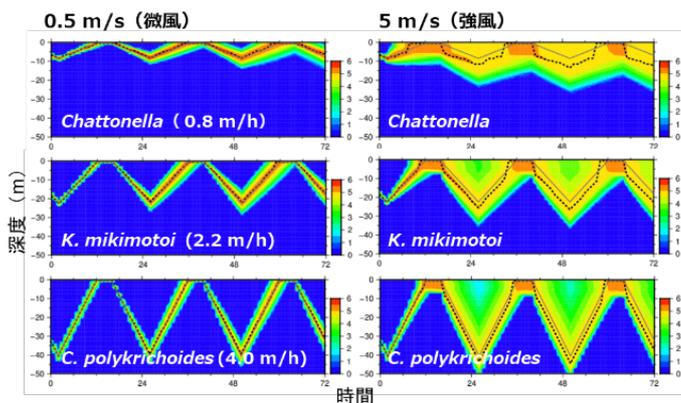


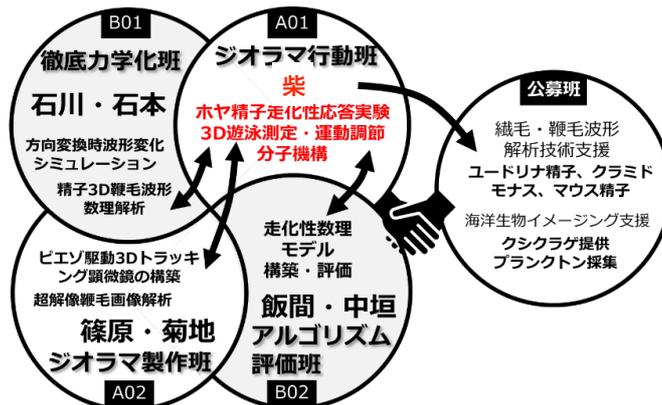
図2：鉛直移動のLESシミュレーション

【計画班A01-2】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

(1) 研究計画と進展状況

本研究では、精子走化性応答に着目し、計画班代表者がこれまでに構築してきた精子運動可視化システムを最大限に活用し、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し鞭毛波形変化、シグナル受容を測定し、応答メカニズムの解析を行っている。異分野である領域内の他班の協力を得ることで精子走化性応答を定量化し、自然環境での受精を理解するためのアルゴリズム構築につなげる。実際の受精環境を模擬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ている。領域設定期間内に以下の研究を計画しており、現時点まで概ね順調に進捗している。



1) 精子走化性応答時の分子機構の解明およびパラメータの抽出

主な担当：A01ジオラマ行動班（柴・稲葉・吉田・守田）+ B01徹底力学化班（石川・石本）

走化性応答時のホヤ精子の遊泳軌跡変化と細胞内カルシウム濃度変化を同時に解析することでホヤ精子が誘引物質を感知してから鞭毛運動を変化させ方向変換を引き起こす全過程を追うことが可能である。分子機構の詳細を調べるために、分担者・稲葉と共に走化性シグナル伝達機構に関係する分子の局在、機能解析を進めた。分担者・吉田らによる遺伝子破壊ホヤシステムの作製、解析を進めており、走化性応答に重要な分子を欠失したホヤ精子の遊泳、鞭毛波形、カルシウム応答のデータも取得予定である。分担者・守田らはサンゴ精子鞭毛運動制御機構の研究を行った。これらの実験系で得られたデータをB01徹底力学化班に提供し、精子走化性応答のシミュレーションを進めている。

2) ジオラマ受精環境下における精子走化性応答の計測

主な担当：A01ジオラマ行動班（柴・守田）+ A02ジオラマ制作班（菊地・篠原）

精子遊泳環境は、水流や障害物、他種の生物、精子の遊泳などの影響を大きく受けている。A02ジオラマ制作班の協力のもと、単純な実験系では再現できない自然環境に近いジオラマ環境下での精子応答を計測することで、先行研究では検出不可であった精子の適応力の理解を目指している。3次元精子遊泳トラッキングシステムを構築し、これまで観察が困難であった3次元空間における精子遊泳をとらえることが可能になった。また得られた画像データを効率的に解析するための計測、画像解析技術の提供を受け、精子走化性アルゴリズム構築につながるデータ作成を進めている。この計測システムを受精環境、精子形態、遊泳速度の異なる異種にも適用し種間の比較を今後行う。

3) パノラマ環境下での精子の適応能力の検証

主な担当：A01ジオラマ行動班（柴・稲葉・守田・吉田）+ B02アルゴリズム評価班（中垣・飯間）

ジオラマ受精環境下における精子走化性応答の知見を基盤とし、自然（＝パノラマ）環境下において精子の適応能力がどのように発揮されるのかを検証するため、B02アルゴリズム評価班とともに精子走化性のアルゴリズム構築に取り組んでいる。アルゴリズム検証のため1) 2) で得られた実験データの提供を行った。適切なアルゴリズムが構築され次第、より自然環境に近い実験やフィールドでの野外実験を今度予定している。

4) 精子や単細胞生物の遊泳・繊毛運動調節メカニズムの解明および技術支援

主な担当：A01ジオラマ行動班（柴・稲葉・吉田・守田）+ 公募班

精子走化性応答を基軸とし、ジオラマ行動力学を多様な分野、現象に応用するため、ホヤ精子以外の精子や単細胞生物の運動・刺激応答にも着目し研究を包括的に進めている。計画班メンバーが有するイメージング技術や臨海実験施設の利点を活かした材料、フィールドの提供および海洋生物を用いた生化学、生理、分子生物学的実験などの支援を公募班に対して幅広く実施した。

(2) 計画研究の成果と関連する公募研究で得られた成果

1) ホヤ精子走化性応答時の鞭毛運動調節における分子機構の解明

計画班ではこれまでにホヤ精子走化性応答時の誘引物質受容から鞭毛運動調節までのシグナリングに関与する因子の局在や機能の解析を行い、カルシウムイオンチャンネルやcAMP合成酵素などの因子が果たす役割について報告を行った (J Exp Zoo Part B 2022, Int J Mol Sci 2022, 2023, Front Cell Dev Biol 2023, Biomolecules 2023)。また精子運動に関与するイオンチャンネル遺伝子破壊ホヤが精子走化性を失うことを報告した (Front Cell Dev Bio. 2023)。ホヤと同様に走化性を示すサンゴ精子の鞭毛運動制御に関する研究について成果を報告した (J Mol Evol 2024*)。走化性時のカルシウムイオンやcAMPなどの細胞内シグナル変化と鞭毛波形制御に関して、**B01徹底力学化班 (石川)** とともにシミュレーションを行うことにより、効率的に方向変換するための波形制御メカニズムを明らかにした (学会発表済、投稿論文準備中)。

2) ピエゾ駆動3次元精子遊泳トラッキングシステム構築およびデータ取得

A02ジオラマ制作班 (菊地) の協力を受けピエゾ駆動の3次元精子遊泳トラッキングシステムを構築し、走化性時のホヤ精子の3次元的方向変換をとらえることに成功した。**B01徹底力学化班 (石本)** の協力を受け、精子らせん遊泳の解析を行い二次元遊泳との違いを定量化した (学会発表済、投稿論文準備中)。

3) ホヤ精子走化性数理モデルの構築

B02アルゴリズム評価班 (飯間・中垣) により構築、提案されたホヤ精子走化性数理モデル、旋回遊泳モデルの検証に向けて議論や実験データの提供を行った。ホヤ精子走化性数理モデルに関しては実験データを再現するようなシミュレーションが実現した (学会発表済、投稿論文準備中)。

4) 他種精子や単細胞生物の遊泳・繊毛運動調節メカニズムの解明および技術支援

公募班に対して、繊毛・鞭毛波形解析技術支援、海洋生物イメージング支援を行い、ジオラマ行動力学による原生知能の探索に貢献した。緑藻ユードリナ集団型および独立型精子の運動変化 (豊岡、今秋学会発表予定)、クラミドモナス繊毛同期性 (若林、学会発表済、投稿論文準備中)、カプトクラゲ平衡器官の繊毛束上の運動 (野田)、マウス・ウニ精子の高圧応答 (西山) を明らかにするため、顕微鏡イメージング、波形解析支援を行った。浮遊性有孔虫の採集 (野村)、カプトクラゲ提供 (野田) などの材料支援を行った。

計画班・公募班の連携を深めるため、生殖細胞をテーマにした研究会や若手勉強会を開催した。公募班 (豊岡、武内、岩楯) による講演を依頼し共同研究につながる機会を提供した。第61回日本生物物理学会年会において領域共催シンポジウム「The survival strategies of unicellular organisms on a microscale ; 微小環境で行動する単細胞生物の生存戦略」を公募班の野村・鹿毛と共にオーガナイズした。

計画班では、魚類精子、褐藻配偶子の運動制御、走化性に関する研究、巻貝異型精子の形成過程、サンゴの配偶子種認識、種分化と繁殖形質の関係に関する研究について成果を報告した (Aquaculture 2022, Commun Biol 2022, J Phycol 2023, Front Cell Dev Biol 2022, 2023, Mol Phylogenet Evol 2024*)。繊毛の多様性に関してクシクラゲ櫛板繊毛構築に関する研究成果を報告した (Curr Biol, 2022*)。

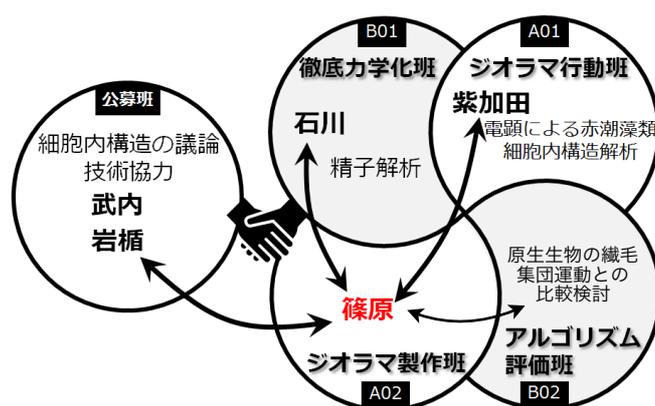
連携している公募班の研究成果として、吉村、若林はクラミドモナス鞭毛の機械受容 (iScience, 2022*) についての研究、岩楯は傷修復に関わる魚類上皮細胞の集団移動メカニズム (PNAS, 2022*) についての研究成果を報告している。

*プレスリリースを行った成果報告

【計画班A02-1】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

(1) 研究計画と進展状況

繊毛が集まって協調運動をする例は、原生物ゾウリムシの体表繊毛からヒト体内の気道繊毛まで、広範な生物種に共通する基本的な生命現象である。本計画班は、比較的良く研究されている原生物繊毛虫のメタクロナル繊毛打運動の対極にある、高等動物哺乳類の気道繊毛の集団運動について、その分子機構を中心に解明する。領域全体では、種々原生物の繊毛集団運動が研究対象になっているため、それらとの比較対象データを提供することで、高等動物へも引き継がれている繊毛集団運動の原生知能解明に資する。その表裏として、高等動物固有の特性も浮き彫りになると期待できる。



1-1) 新型コロナウイルスと哺乳類気道繊毛運動の関係性の解明

生理学の教科書では鼻腔と気道に存在する繊毛は粘液を駆動し病原体を体外へ排出すると記述されている。新型コロナウイルスは気道と鼻腔の繊毛細胞に感染し増殖する事が複数のグループから報告されているが、繊毛運動とそれが発生する粘液流れが新型コロナウイルス感染症においてどのように影響するかについては研究グループ間で意見が分かれている。そこで、領域設定期間内に気道繊毛運動は新型コロナウイルス感染症において善玉なのか悪玉なのかを明らかにする。

中間評価実施時までには実験系の構築を完了する事を目標としていた。すなわち、新型コロナウイルス受容体であるヒトACE2遺伝子 (hACE2) を発現しかつ気道繊毛運動が不全となる変異アリルを持つ遺伝子改変マウスの作製、気液界面におけるマウス気道組織のex vivo培養系の作製、ウイルス感染系の作製 (感染実験は分担者である帯広畜産大学武田洋平博士のもとで実施)、の3つの完了を目標としていた。現時点で以上3つの実験系項目を全て完了しており、繊毛運動が正常な野生型マウス気道では繊毛運動が異常な変異マウスと比べて新型コロナウイルスに感染しにくい、という予備的な実験結果を得る段階にまで来ている。

1-2) 気道繊毛細胞が細胞外環境を制御する原理の解明1 -細胞外のイオン環境の制御-

気道上皮組織は組織表面を粘液の層が覆っている。粘液の層の物理化学的性質は気道上皮細胞内外のクロライドイオンやナトリウムイオンのバランスによって制御されると考えられているが、これらのイオンチャネルおよび輸送体が細胞表層へ輸送される仕組みの全容は明らかになっていない。本研究[1-2]では、領域設定期間内にクロライドイオンチャネルの気道上皮細胞表層への輸送に必要な因子Xの詳しい機能を明らかにする。遺伝子改変マウスを基軸とした解析により中間評価までに因子Xがクロライドイオンチャネルの輸送を制御する詳しい仕組みの解明を目標としていた。今の時点で、この仕組みと輸送モデルを支持する電気生理学データ・免疫組織学データ・生理学データ (蛍光プローブによるイオンの細胞内外の出入りの計測) が取得でき論文をまとめる段階に到達している。

1-3) 気道繊毛細胞が細胞外環境を制御する原理の解明2 -繊毛膜の独立性の制御-

気道繊毛細胞は1つの細胞につき約200本の繊毛を持っており、各繊毛が独立した構造を持ち運動する事で粘液流れを発生させている。近年、繊毛膜は細胞内の他の膜とは脂質組成が異なる事が報告されておりこの独自の組成が繊毛膜と繊毛構造の独立性を担保していると考えられているが、繊毛膜の脂質組成を精密に制御する仕組みについては不明な点も多い。本研究[1-3]では領域設定期間内に因子Xが繊毛膜に含まれる脂質Yの量を制御する仕組みについて解明する。中間評価までに因子Xが脂質Yの繊毛内部への輸送を制御する詳しい仕組みの解明を目標としていた。今の時点で、この仕組みと輸送モデルを支持する質量分析 (LC-MS) データ・免疫組織学データ・電子顕微鏡データ・薬理学実験データが取得でき論文をまとめる段階に到達している。

1-4) 気道繊毛細胞が細胞内環境を修復する原理の解明

気道繊毛細胞の基部構造である基底小体の周辺には細胞骨格のネットワークが存在する。その中でアクチン繊維は、繊毛形成に必須な構造である基底小体が細胞膜にドッキングする際に必要であると考えられている。繊毛運動は毎秒30回程度の高速の細胞運動であり力学的なストレスが細胞内部表層のアクチ

ン繊維にかかる事が想像されるが、力学的ストレスに対し細胞がどのように対抗するのかについては不明である。そこで、領域設定期間内に繊毛細胞が自身の運動により受けるストレスとそれを解決する分子機構を明らかにする。

グループで同定したアクチン関連因子Zを欠損した遺伝子改変マウスでは野生型マウスと異なり繊毛細胞内部のアクチン繊維構造が自身の繊毛運動依存的に壊れる事を見出した。中間評価までに因子Zがアクチン繊維を保護する詳しい仕組みについて分子レベルから細胞・個体レベルにまで階層を貫く形で全容を明らかにする事を目標とした。現時点では、細胞・個体レベル現象の十分な理解に到達している。具体的には気道繊毛運動が細胞内部のアクチン繊維構造に力学的負荷をかけアクチンの束を壊し、因子Zがその修復を担うという現象について、免疫組織学・ライブイメージング・電子顕微鏡・薬理学実験から十分な証拠のデータを得ている。

(2) 計画研究の成果と関連する公募研究で得られた成果

2-1) 新型コロナウイルスと哺乳類気道繊毛の相互作用の解明

気道の繊毛運動が新型コロナウイルスの細胞への感染を防ぐ事を示す知見が得られた。今後、電子顕微鏡解析など他の実験データを追加する事で多角的に検討し外部成果発表を実施する。また、計画研究A02-2の枠組みで新型コロナウイルスの基本的な性質を明らかにし6報の論文として発表した(7. 研究発表の状況を参照)。

2-2) 気道繊毛細胞が細胞外環境を制御する原理の解明1；細胞外のイオン環境の制御

因子Xがクロライドイオンチャネルの輸送を制御する詳しい仕組みと輸送モデルを支持する電気生理学データ・免疫組織学データ・生理学データ(蛍光プローブによるイオンの細胞内外の出入りの計測)が取得できている。現在、論文を執筆中である。

2-3) 気道繊毛細胞が細胞外環境を制御する原理の解明2：繊毛膜の独立性の制御

因子Xが脂質Yの繊毛内部への輸送を制御する詳しい仕組みと輸送モデルを支持するデータが取得できている。現在、論文を執筆中である。

2-4) 気道繊毛細胞が細胞内環境を修復する原理の解明

因子Zがアクチン繊維を保護する詳しい仕組みを明らかにする事を目標とした。現時点では、気道繊毛運動が細胞内部のアクチン繊維構造に力学的負荷をかけアクチンの束を壊す、および因子Zがそれを修復する事を免疫組織学・ライブイメージング・電子顕微鏡・薬理学実験から明らかにする十分なデータを得ている。今後分子レベルの理解を深めるために、in vitro系による実験を実施し論文をまとめる。

【計画班A02-2】 ジオラマ環境における濃密微生物のinvivo 4D-X線トモグラフィー法の開発

(1) 研究計画と進展状況

1) 研究計画A02-2の領域設定期間における目標

パノラマ環境における原生生物の運動ライブイメージングや生理反応について、ジオラマ環境内における濃密細胞懸濁液中における計測手法の開発を目標としている。また、原生生物が活動する実際のパノラマ環境における原生生物の運動や、原生生物の活動に影響を与える周囲の流体の計測を行い、ジオラマ環境を設計し製作する。さらに、ジオラマ環境での実験計測手法の開発も目指している。

2) 中間評価までにおける進捗報告

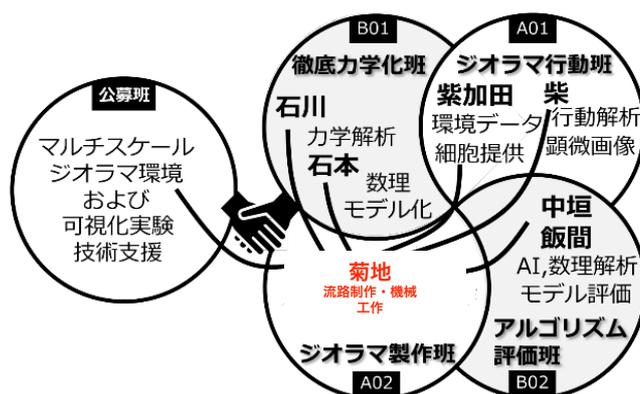
実現象におけるありのままの生物挙動や周囲の流体を計測するために、共焦点レーザー光学系また微分干渉光学系を用いた4D計測実験装置の開発を行ってきた。また、東北大学次世代放射光ナノテラスにおける濃密細胞懸濁液の流動計測に向け、国内最大の放射光施設SPRING-8にてフィージビリティ実験計測を実施し、高時空間分解での構造解析結果を得ている。

(2) 計画研究の成果と関連する公募研究で得られた成果

1) 研究計画での研究成果

細菌叢が濃密に分布するゼブラフィッシュ稚魚腸内の緑蛍光タンパク発現大腸菌の遊泳挙動及び局在分布の計測に成功し、研究計画B01-1石川班と力学・化学的挙動解析による大腸菌遊泳挙動メカニズムについて報告している (Yang, et. al., Communication Physics, 2024, Yang, et. al., BMC Biology, 2024)。

本計画班A02-2は、ジオラマ実験装置の製作をし、また微生物および流体挙動の4D可視化計測の技術提供により、他班と右図のような連携を構築してきた。計画班A01-1およびB01-2とは高速4次元鞭毛打ホログラフィック計測装置、微生物4次元画像スキャニングトラッキング解析システムの開発をすすめ、また計画班A01-1、A01-2およびB01-1とは海洋乱流ジオラマ水槽、およびスナップショット型3次元微生物トラッキング解析システムの開発を進めている。



2) 公募班との連携

公募班 (杉原) マイクロ流体デバイスを用いたジオラマ環境製作による新規細胞動態計測法の開発

物理的な空間勾配を認識し局在する血管周皮細胞の地形応答メカニズムの解明を目的として共同研究を行い、血管分岐形状を模擬したジオラマ環境をマイクロ流体デバイスの作製技術を応用して作製した。生体内で生じている地形応答性がジオラマ環境においても実現されており、血管周皮細胞における地形応答性の力学機構が解明されてきた。この成果は、国内会議4件で公表された。

公募班 (上道) 共焦点高速スキャンニングによる細胞動態計測

誘引物質により接触部を這う原生生物であるネグレリアグルベリの走化性メカニズムの定式化を目的として、実験計測における条件抽出や挙動解析について議論を行い、本計画班A02-2で構築してきた実験装置を活用し、観察実験について準備を進めている。

公募班 (野田) 重力応答生物の光学顕微鏡観察における実験相談

束なった繊毛と重力応答細胞を有する有櫛動物クシクラゲの平衡器官における感覚情報処理メカニズムの解明を目的として、実験条件および平衡石細胞の挙動観察手法について議論を行った。

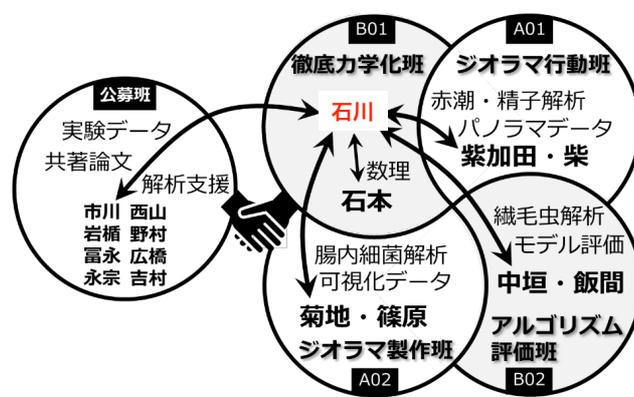
【計画班B01-1】環境連成力学を基盤とした微生物行動シミュレータの開発

(1) 研究計画と進展状況

領域設定期間内では、細胞集団と物理環境の連成問題を大規模に高精度で解く「微生物行動シミュレータ」を開発することを目的としている。また、領域内の他班からの要望に応じてさまざまな現象の徹底力学化を行い、領域内の力学モデリングのインフラ的役割も担う。中間評価時においては、微生物行動シミュレータの基盤を構築し、いくつかの具体的な事例で行動シミュレーションを実施する予定であった。

これまでに、微生物行動シミュレータの基盤として、境界要素法と潤滑理論を融合させたLT-BEM法や (Ishikawa, J. Comp. Phys., 2022)、繊毛軸系の計算力学モデル (Omori, et al., Phys. Rev. E, 2022)、境界積分方程式を用いた物質輸送解析手法 (Kogure et al., J. Fluid Mech., 2023) などを開発した。また、具体的な行動シミュレーションとして、クラミドモナスの走流性 (Omori, et al., J. Fluid Mech., 2021) や、酵母の発酵過程 (Srivastava, et al., Soft Matter, 2021)、せん断流れ中の腸内細菌の振る舞い (Yang, et al., Commu. Phys., 2023)、ゼブラフィッシュ腸内の細菌の振る舞い (Yang, et al., BMC Biology, 2024) の解析に成功している。

当初の予定通りに研究は進んでおり、他班との連携も予定通りに進行している。右図に示すように、同じB01班の石本准教授と数理で連携し、微生物の行動シミュレータの核となる「行動力学方程式」の定義を導出した。A02班の菊地准教授と赤潮藻用の実験装置の製作を連携し、完成した装置を長崎県五島 (A01班) に持ち込んで共同研究を実施している。A01班の柴博士とは精子の走化性モデルで共同研究を行っている。A02班の篠原准教授と精子の走流性モデルで共同研究を行っている。B02班の中垣教授とラップムシの行動アルゴリズムの共同研究を実施している。B02班の飯間教授と精子の走化性の数理モデルで連携している。また、公募班8名との連携も進めている。



(2) 計画研究の成果と関連する公募研究で得られた成果

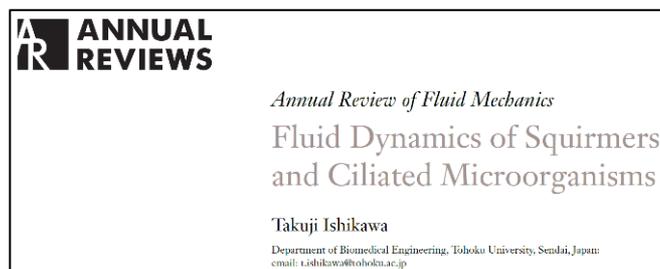
1) 繊毛が力を感じ取るメカニズムを解明するため、繊毛変形と繊毛流れを徹底力学化し、数値シミュレーションを実施した。体の左右非対称性が繊毛カーペットの運動量輸送で決まることを解明した。

研究成果はScience誌に掲載され (右図)、NHK NEWS WEBやYahoo Japanニュース、Newsweek日本版、朝日新聞デジタルなどにも掲載されて大きな反響を呼んだ (Kato et al., Science, 2023)。



2) バイオメカニクス分野の伝統誌Journal of Biomechanics誌から招待を受け、微生物バイオメカニクスの50年史を2編のレビュー論文としてまとめた (Ishikawa & Pedley, J. Biomech., 2023a, b)。

3) 流体力学分野で最高峰のAnnual Review of Fluid Mechanics誌 (右図: IF = 27.7) から招待され、微生物遊泳のレビュー論文を発表 (右図) している (Ishikawa, Annu. Rev. Fluid Mech. 2024)。



4) 襟鞭毛虫の群体が光を受けると鞭毛を内向きにし、光が消えると鞭毛を外向きにする行動を数値シミュレーションで調べた。その結果、内向き鞭毛は摂食行動に有利である一方、遊泳行動には不向きであった。一方で、外向き鞭毛は摂食に不向きであった

が、遊泳には有利であった。光環境に応答して行動を変化させることを解明したこの成果は、物理学で最高峰の**Physical Review Letters**誌に掲載された (Fung et al., **Phys. Rev. Lett.**, 2023)。

5) A02班の菊地准教授との共同成果：クラミドモナスが流れに逆らって泳ぐ性質（走流性）を示すことを発見した。実験と理論、数値シミュレーションを融合し、そのメカニズムが遊泳の非定常性からくることを明らかにした (Omori, et al., **J. Fluid Mech.** 2021)。

6) A02班の菊地准教授との共同成果：酵母の発酵過程の輸送現象を定量的に調べた。培養容器内にプラスチックごみを模擬した物体を混入させると、ブラジルナッツ効果が現れることを発見した。この成果は**Soft Matter**誌の背表紙を飾り、プレスリリースされた (Srivastava, et al., **Soft Matter**, 2021)。

7) B02班の中垣教授との共同成果：アメーバ運動を精度良く計測できる光学系を構築し、細胞膜の流動を計測することで、壁面上を前進するアメーバの力学モデルを構築した (Taniguchi et al., **Biol. Open**, 2023)。

8) B02班の中垣教授との共同成果：ラップムシが固着する際の周囲壁面の幾何学的な影響を調べた。その結果、ラップムシが狭い場所を有意に選択して固着していることを発見した (Echigoya et al., **Front. Cell Dev. Biol.**, 2022)。

9) B02班の中垣教授との共同成果：ジオラマ行動力学に関するレビュー論文を執筆した (Nishigami et al., **J. Phys. Soc. Jap.**, 2023)。

10) 公募班の市川博士との共同成果：界面近傍におけるせん毛虫の行動に関するレビュー論文を執筆した (Ohmura et al., **Biophys. Physicobiol.**, 2022)。共同研究も継続中である。

11) 公募班の野村博士との共同成果：ポーリネラの殻の配置に関する論文を執筆した (Nomura et al., **Front. Cell Dev. Biol.**, 2023)。共同研究も継続中である。この成果により野村博士は、第6回物質・デバイス共同研究賞を受賞 (B02-1班中垣教授、B01-1班西上准教授との共同受賞)。

12) 公募班の岩楯教授との共同成果：魚類表皮細胞の運動機構の研究を行い、その成果をアーカイブに掲載した (Okimura et al., bioRxiv, 2024)。共同研究も継続中である。

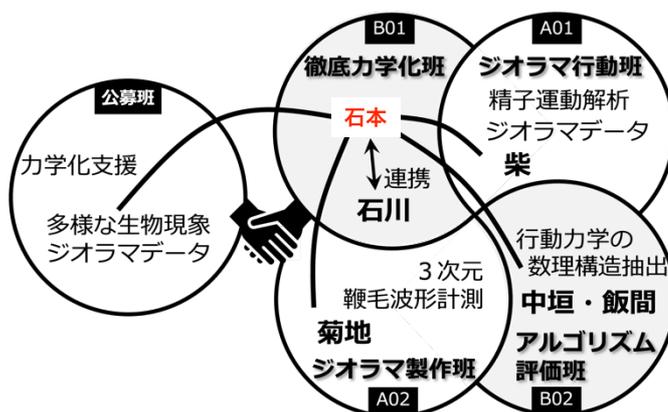
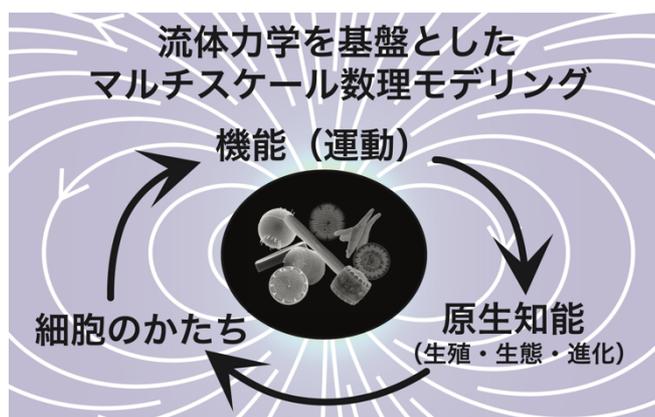
13) 公募班の永宗教授との共同成果：原生生物学事典 (朝倉書店) に寄稿した。

14) その他：公募班の冨永教授とはゾウリムシの行動と膜電位に関する研究を進めており、2日間研究室を訪問した。西山教授とは高圧下のバクテリアの行動を共同研究している。広橋教授とは卵管内の精子の挙動の議論し、オンライン会議を3回行った。吉村教授とは微生物の走性に関するレビュー論を共同執筆中である。

【計画班B01-2】微細藻の携帯形成と生殖・生態・進化に関する環境連成力学モデルの構築

(1) 研究計画と進展状況

1) 原生生物の行動力学は、細胞の「かたち」と周囲の「ながれ」の連成による時空間マルチスケールの力学現象であり、本研究領域の主題であるジオラマ環境を適切に設計・評価するためには、現象を記述するための力学に基づいた数理モデルが必要である。中でも、本提案領域「ジオラマ行動学」の主たる対象生物種である微細藻を中心に「かたち」と「ながれ」の連成力学を基盤とした、細胞行動の力学的数理モデリングの手法の開発を行っている。さらに、これらの数理モデリング手法を用いて、生殖・生態・進化のダイナミクスを記述することを目指す。



【計画研究】

期間全体での目標：マルチスケールの数理モデリングの手法を構築し、それをジオラマデータに適用することで、生物行動の力学モデルを構築し、生物行動のアルゴリズム評価を可能にする。

中間評価までの目標：数理モデル手法を計画班で集中的に扱う精子と微細藻類のジオラマデータに適用できるように理論を整備する。

中間評価までの現状：順調であり、想定以上の成果がでている。物質の運動性を記述する奇弾性の理論的枠組みを構築し、精子の鞭毛データの奇弾性の定量化に成功した。また、流体形状を表す流体力学的形状理論を整備し、クラミドモナスの走流性に適用することで、そのメカニズムの数理構造にまで到達することができた。また、ジオラマ行動力学そのものの理論的定式化に向けて研究を進めている。

【公募研究】

期間全体での目標：開発した数理モデル手法を公募班の研究対象とする種々のジオラマデータに適用することで、生物行動の力学モデルを構築し、生物行動のアルゴリズム評価を可能にする。

中間評価までの目標：公募班の研究対象とする種々のジオラマデータの性質を理解し、数理モデル手法をジオラマデータに適用できるように理論を整備する。

中間評価までの現状：順調である。クラミドモナスの自転運動の力学モデルについて共同研究を進め、共同研究として学会発表を行うなど、一定の成果が得られている。

(2) 計画研究の成果と関連する公募研究で得られた成果

【計画研究】

計画班代表の石本は、物質の運動性を記述する奇弾性の理論を構築し、その成果[Ishimoto et al. Phys Rev E, 2022]は日本流体力学会注目研究2022に選出された。さらに、その理論を用いて精子鞭毛の奇弾性をデータから定量化することに成功した[Ishimoto et al. PRX Life, 2023]。この結果は、New Scientist誌(次ページ右図)で紹介されるなど、世界中の40を超えるメディアで報じられた。また、アメリカ物理学会March Meeting 2024の招待講演に選ばれた。さらに、流体方程式に立脚した形状概念の理論を押し進め、総説論文[Ishimoto, J Phys Soc Jpn, 2023]にまとめた。クラミドモナス走流性に関する論文[Walker, Ishimoto et al, J Fluid Mech, 2022]では、形状理論に多重尺度解析を適

用することで、実験・数値計算結果で見出された生物現象が、時間保存量の破れに起因していることをつきとめた（ジオラマ製作班A02-2菊地班、徹底力学化班B01-1石川班との連携による成果）。また、3次元精子鞭毛計測と鞭毛波形解析（ジオラマ計測班A01-2柴班、ジオラマ製作班A02-2菊地班との連携による成果）やジオラマ行動力学そのものの定式化（徹底力学化班B01-1石川班との連携による成果）も進めている。さらに、生物の力学的な環境応答と行動を記述する数理モデルの構築[Ishimoto et al. preprint, 2024]（アルゴリズム評価班 B02-1 中垣班との連携による成果）や、集団スケールの挙動である生物対流現象に現れる解の局在構造と双安定性に関して、その力学系の大域構造を解明する [Hiruta & Ishimoto, preprint, 2024]（アルゴリズム評価班 B02-1 飯間班との連携による成果）ことに成功している。また、微生物遊泳の流体力学に関する総括的なモノグラフを執筆した（石本健太「微生物流体力学」サイエンス社、2022）。

分担者の佐藤は、単細胞藻類の珪藻の形態形成メカニズムの解明を進め、独自の実験系を確立することで、形態形成に関する複数の遺伝子を見出すことに成功した。それらをまとめた2編の論文[Mugikura et al. J. Phycol. 2022; Mugikura et al. J. Phycol., 2024]は米国藻類学会誌Journal of Phycologyのカバーに選出され、2024年8月の米国ゴードン会議（バイオミネラリゼーション）に招待されている。また、近年北アメリカから本邦に侵入し、各地の河川で大増殖し生態系を破壊している外来種であるミズワクチビルケイソウの生態を、特にその共存細菌との相互作用に注目して解析を進めた。この結果をまとめた論文[麦倉ら、DIATOM、2022]は日本珪藻学会誌DIATOMのカバーに選出され、新聞各紙で報道された。

分担者の小布施は、大小様々なパターン形成に現れる非線形相互作用について、理論と数値計算による解析を進めている。小スケールのパターンとして、単細胞藻類の珪藻の樹木状の形態形成パターンを再現する反応拡散系の数理モデルの構築に成功した。大スケールのパターンとしては、回転球面2次元流に現れる帯状流の形成に着目し、パターン形成の起源となる三波非線形相互作用の非局所エネルギー輸送機構を解明した。この成果により、英ケンブリッジ大学ニュートン研究所国際会議への招待講演に選ばれた。

【公募研究】

- ・クラミドモナスの自転運動の力学モデルについて共同研究を進めている（公募班 鹿毛氏と連携）
- ・生物の形態形成とその行動に関する数理ワークショップを開催した（公募班 上田氏と連携）
- ・生物の形態形成とその行動に関する数理ワークショップを開催した（公募班 野村氏と連携）
- ・機械学習を用いた行動力学方程式のデータ駆動型モデリングについて議論を進めている（公募班 上道氏と連携）
- ・領域国際会議に係るサテライト研究会を開催し、ゾウリムシやユープロテスの行動の力学モデルに関して議論を進めている（公募班 市川氏と連携）

NewScientist Sign in Enter search keywords

News Features Newsletters Podcasts Video Comment Culture Crosswords | This week's magazine
Health Space **Physics** Technology Environment Mind Humans Life Mathematics Chemistry Earth Society

Physics
Sperm caught breaking Newton's third law of motion

Some biological cells swim freely in a way that apparently breaks one of Newton's laws of motion – but only if they have strange elastic properties

By Karmela Padavic-Callaghan
20 October 2023

f x in



Human sperm cells are law-breakers
Spermatogenesis

Human sperm cells and some microorganisms swim by deforming their bodies in a way that breaks Newton's third law of motion – and we're closer to understanding how they do it. The findings could eventually inspire researchers to develop tiny robots that also violate this law as they swim.

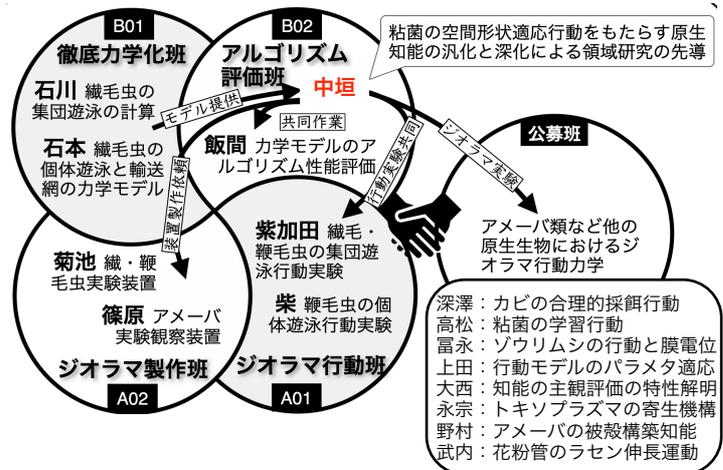
Famously, Newton's third law can be summed up in the phrase "for every action, there is an equal and opposite reaction". This means that as you push against a wall, the wall pushes back on you.

【計画班B02-1】 繊毛虫・アメーバの集団的空間探査と空間活用のアルゴリズムの解明

(1) 研究計画と進展状況

生物のなす知能情報処理は、単細胞生物に端を発する天与の情報処理手法として情報技術にヒントを与えるいわば宝の山である。真核単細胞生物、いわゆる原生生物に見られる行動知の探究は、その根源を問うものである。

原生生物には神経系がなく、細胞を構成する物質の力学法則がそのまま環境応答のアルゴリズムに直結している。原生生物は、置かれた環境がいかにややこしくて、かつ同時に目まぐるしくても、局所的かつ短期的な応答を繰り返すだけであり、問題の困難さという概念は持ち得ない。このような逐次改善方式は、つまるところ力学方程式の差分法に類似したものでありながら、実は予想以上に「上手く」はたらくことがわかってきた。



本研究では、ほふく性アメーバの集団交通ネットワークと遊泳性繊毛虫の集団移動に焦点を当て、どちらも空間の幾何学的形状に適応的であることから、空間の探査と活用性能について、原生知能のアルゴリズムを定式化し、工学的に利用可能な形まで具体化することを目指す。これは、「生命の知的なるもの」の根源に向かう学術変革的研究である。

本領域「ジオリマ行動力学」の着想を育んだ先行事例の一つが、原生生物粘菌による迷路解きと交通網設計の研究である。この象徴的な研究を推し進めることにより、領域全体の研究を先導することが本計画班の重要な役割の一つである。三つの具体的なテーマ、【課題1】ほふく性アメーバ粘菌の空間形状依存的行動をもたらし原生知能の解明、【課題2】遊泳性の繊毛・鞭毛細胞、精子の空間形状依存的行動の原生知能の解明、【課題3】公募班等との共同による新規原生知能の探索、に取り組んできた。

これまでの研究進捗：中間評価まで、概ね当初の予定通りに進捗しており、また領域内の共同研究も予定通りに順調に進んでいる。具体的な進捗具合については、以下の節で、研究テーマごとに述べる。

(2) 計画研究の成果と関連する公募研究で得られた成果

課題1：人間社会の街と交通網の共発展現象を、粘菌の集団運動をベースとしたモデルによって地形要因の影響を定量的に評価できた。この成果は、Scientific Reports誌にて公表され、朝日新聞全国版などで広く報道された。ここで開発した計算モデルは、イタリアのみならずどの国と地域にも適用可能であり、国土・都市計画シミュレータとして工学的に活用可能であり、今後の普及が期待できる。研究期間終了までには、他の地域への適用を増やして、本シミュレータの有効性をさらに検証して、その有効性を多方面に向かってアピールする。Aokiら, Scientific Reports, 12:10093, pp.1-12 (2022) (公募班上田、公募班青木と共同)

課題2：繊毛虫ソライロラップムシ個体が、特定の狭隘空間形状を選別する能力を発見し、その特性を解明した (Frontiers in Cell Dev Biol)。その仕組みとして、壁への接触と体表の流速場が重要であることを突き止めた。最終的には、この空間形状認知行動をモデル化して、俯瞰的な視覚によらない遊泳空間形状把握の原生知能アルゴリズムを抽出したい。Frontiers in Cell and Developmental Biology,10:1021469 (2022) (B01-1班と共同)

微細藻類クラミドモナスの光走性の符号逆転現象に注目して、その誘導環境要因を発見するとともに符号逆転の分子機構を解明し、3次元空間でのらせん遊泳に基づく光走性モデルを定式化した。モデルの解析から、光線に対して一定角度でらせん遊泳する定常解を発見し、この定常解の軌道が、実際のクラミドモナスのらせん遊泳軌道と整合的であった。驚くべきことに、この原生知能は、ヒトのフライボールキャッチのアルゴリズムと類似していた。最終的には、原生生物や精子などに広く共通するらせん遊泳のもつアルゴリズム特性を解明する。(公募班若林、公募班吉村、A01-2, B02-2と共同)

課題3：公募班若林と公募班吉村らとクラミドモナスの光走性の符号逆転現象を特徴づけた。公募班岩

館・公募班津守と、アメーバ運動などの蠕動的這行運動の力学機構について、特に接地面との力学相互作用に注目して、その前進・後退機構を解明した。Biology Open, bio059671 (2022) (B01-1班と共同)、Bioinspiration & Biomimetics, 17(2), 026005 (2022)

課題4 共用化技術開発：領域全体での技術共用化に資する簡易式双眼立体顕微鏡やフィールド顕微鏡を開発した。また、領域全体への新規原生生物試料提供に資する多種（90種類以上）原生生物の維持培養方法を確立した。これらの技術は、本計画研究の推進はもとより、領域内他班の研究推進にも活用された。Optics Express, 30(2), 2424-2437(2022) (B01-1班と共同)

【計画班B02-2】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

(1) 研究計画と進展状況

本研究では微細藻類の個体運動および集団運動を対象に、**原生知能アルゴリズムが抽出できる最小の系を設定して定式化を行い、他班および公募班と連携してアルゴリズムの検証を行うこと**を目標とする。現時点までの成果は以下の通りである。A.ミドリムシ個体の非一様光環境への応答を調べた。B.ミドリムシ集団運動に関して、**非一様光環境により局在生物対流の制御に成功した**。B.微生物を力学あるいは確率モデルで記述したときに、運動を特徴付ける量を提案した。C. 徹底力学化により数式化された原生知能アルゴリズムの解析法に関する研究を行った。D. **精子走化性のアルゴリズムについてA01-2班との連携研究が進行中**である。今後、本計画班での研究および他班との連携により、微生物あるいは運動細胞の運動に関する原生知能アルゴリズムの典型例が抽出可能と見通している。

(2) 計画研究の成果と関連する公募研究で得られた成果

A. ミドリムシの個体運動についての研究成果

ミドリムシには光受容体が一つ存在し、光刺激に応じて運動する走性（光線方向に並行あるいは反並行な方向へ運動する走光性のほか、光強度の空間勾配に応答する性質など）が知られている。こうした応答特性やそれを実現する原生知能アルゴリズムを明らかにするために以下の研究を行っている。

a. ミドリムシを一様あるいは非一様な光環境に置いたときの長期的な個体運動を解析し、2乗平均距離(MSD)の挙動が異なることを明らかとした[K. Muku et al. (2023) Front. Cell Dev. Biol. 11:1133028]。

b. a. における個体運動をある種のActive Brownian Particle (ABP) および複数の確率モデルで記述可能であることを示した。

a.は比較的長時間(~120s)までの光応答の特性を調べたもので、10s程度の時間までは軌道はほぼ弾道的であったが、それ以上の時間ではより拡散的に近い挙動であった。一様および非一様環境での差は主に1sのオーダーでみられた。その挙動と非一様環境における運動特性の関係を調べるために、一様であるが強度の異なる環境におけるミドリムシ運動を調べたところ、ある特定の光強度において平均速度が減少することが分かった。 b. においては、個体運動を複数の階層における数理モデルで解析し、光環境への応答がどう発現するのかを調べている。このほか、ミドリムシ個体の光環境と運動を取り込んだ数理モデルを構築・解析し、走光性や光勾配への応答に成功している。

B. ミドリムシの集団運動についての研究成果

ミドリムシの懸濁液を光環境下に置くと生物対流と呼ばれる巨視的パターンを示す。その特性を調べることは、集団運動による好適環境の探索アルゴリズムの理解に重要である。様々なジオラマ環境における集団運動の特性を調べるため以下の研究を行っている。

a. ミドリムシ集団が一様な光環境に置かれたとき、これまで擬2次元環境でのみ報告されていた局在対流構造が、水平に広がった3次元環境でも存在することを発見し、同時に時空間的に非一様光環境により制御出来ることを示した[図1; H. Yamashita et al. (2023) Front. Ecol. Evol.11:1133028]。こうした構造は水深や濃度に依存して構造の詳細が変わる。

b. ミドリムシ集団が示す生物対流パターンに対して時間周期的な光環境を与えることで、対流セルパターンが複雑な遷移挙動を示すことを明らかとした[N.J.Suematsu et al.(2023) Front. Cell Dev. Biol. 11:1134002]。

a.により、局在対流がより広い範囲の条件の下で発生し、その制御が可能となった。また局在対流の詳細な構造の条件依存性が明らかになった。b.においては空間的には一様であるが時間周期的な光刺激が多様な生物対流パターンを生むことを報告したものであり、Aで実施した個体運動の解析で取り込んでいる光刺激への応答特性との関係が



図1 B-aの研究が流体力学会の注目研究in2022に選出され、学会誌「ながれ」表紙に採用(2022年12月)

示唆される。最近、生物対流のモデル方程式に関する研究に着手した。光応答について様々な場合を想定し、対流の局在性などの要素に着目して適切なモデルとその特性を2次元および3次元の数値計算で明らかにすることを目指している。

C. 数理科学的手法・人工モデルによる研究

微生物を力学モデルで記述したとき、その行動は力学系における軌道で表される。こうした視点の元で原生知能の特性として考えられる「判断」や、原生生物が環境を制御する基本的な仕組みを解明するため、以下a.bの研究を行った。また運動粒子と走化性の関係を人工系で再現するためc.を行った。

- a. 微生物を力学モデルにより記述したときの挙動を力学系における軌道と見なし、その軌道がサドル近傍で複数方向に分岐する場合の方向制御のアルゴリズムについての研究を行った。
- b. 生物運動に特徴的な周期運動に対して、その位相応答に着目し、特に大規模な系においてその位相応答を効率的に計算できるアルゴリズムを開発し、様々な条件を満たす制御の実例を示した[M. lima (2024) Phys. Rev. E 109, 045102]。
- c. 鉄イオン溶液中にフェナントロリンを含む円盤を入れた系が、人工的にバクテリアの走化性と同じアルゴリズムで走化性を示すことを示した [Y.Hamano (2023) Sci. Rep. 13:8173]。

a.の研究では、不安定多様体が複数ある場合、安定多様体が具体的に与えられない場合には十分精度の良い軌道制御は難しいことが判明した。一方でD-aで行っている精子走化性のモデルで、走化性源が複数ある場合、鞍点に相当する点が生まれることから、この制御アルゴリズムが活用可能かどうかは引き続き検討する予定である。b. に関しては位相縮約理論という一般的な枠組みにおける制御の研究である。論文における研究対象は原生生物ではないものの、今後数理科学的な原生知能の記述を行う際に活用可能となる可能性があると思込まれる。c. はrun-and-tumbleを利用したバクテリアの走化性アルゴリズムを初めて化学系で実装したもので、将来の原生知能アルゴリズムの実装に役立つ研究成果である。

D. 他計画班および公募班との連携

本研究に伴って開発した実験装置やモデル構築のノウハウを他班の知見と融合し、連携を進めている。

- a. A01-2班で行っている精子走化性に対し、その挙動を再現できる最小限の数理モデルを提案し、共同研究を実施している。

このほかA01-1班で行っている赤潮研究に関連して、赤潮藻の走光性を特徴付けるためのため、本班で構築した時空間光環境制御システムを用いた実験を行う計画が進行中である。公募班の市川正敏講師(京大理)とは、微生物の壁面応答に関して議論を行い、A内のモデル構築に役立っている。また本計画班代表者が主催する研究集会でも講演頂くなど緊密な議論を行っている。また公募班の上田肇一教授(富山大理)とは、生物の行動様式の多様性を表す数理モデル構築に関して議論を行い、その内容はC-aに活かされ、またD-aの共同研究における数理モデルの解析にも活かされようとしている。

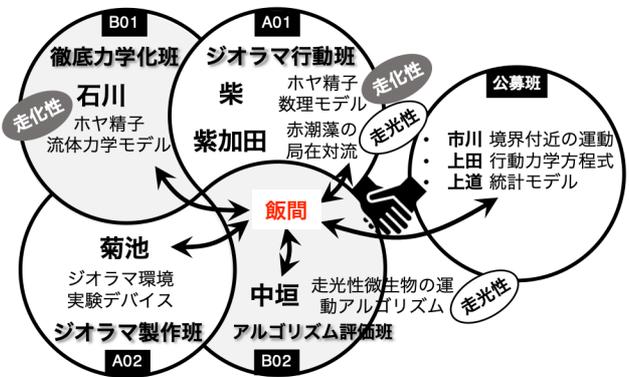


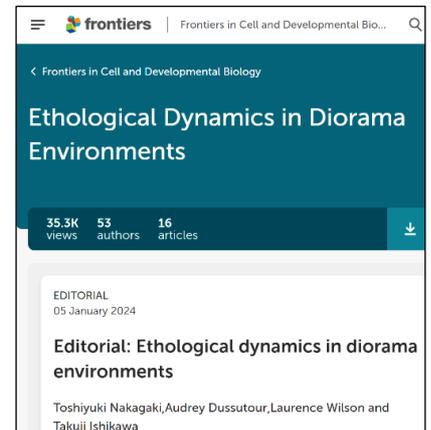
図2 研究領域内での連携体制

7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、主催シンポジウム等の状況。令和6年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

領域特集号の出版

1. 中垣教授（B02班）と石川教授（B01班）らが編集を務めた特集号「Ethological Dynamics in Diorama Environments」が、Frontiers in Cell and Developmental Biology誌とFrontiers in Ecology and Evolution誌の2誌合同で出版された（右図）。トピックスの新規性から異例の2誌合同となった。公募班や計画班のメンバーから15編の論文が掲載された。
2. 石本准教授（B01班）と飯間教授（B02班）が編集を務めた特集号「Advances in the Physics of Biofluid Locomotion」が日本物理学会英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) から出版された。石川教授（B01班）や中垣教授（B02班）のレビュー論文も含め、10編の論文が掲載された。



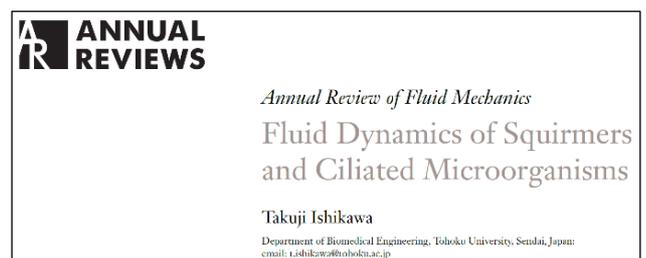
書籍の出版

1. 中垣教授（B02班）の研究内容を紹介する一般書「考える粘菌 生物の知の根源を探る」（ヤマケイ文庫、山と溪谷社）が出版された（右図）。
2. 領域メンバー7名が編集者および執筆者となった「原生生物学事典」（朝倉書店）が出版された
3. 石本准教授（B01班）の訳書「流体力学超入門」（岩波科学ライブラリー）が出版された。
4. 石本准教授（B01班）の著書「微生物流体力学：生き物の動き・形・流れを探る」（サイエンス社）が出版された。



レビュー論文

1. 石川教授（B01班）の微生物遊泳に関するレビュー論文「Fluid dynamics of squirmers and ciliated microorganisms」が、Annual Review of Fluid Mechanics誌に掲載された（右図）。
2. 中垣教授（B02班）らのジオラマ行動力学に関するレビュー論文「Cellular Ethological Dynamics in Diorama Environments」が、Journal of the Physical Society of Japan誌に掲載された。
3. 石川教授（B01班）らが、遊泳性微生物の行動に関するバイオメカニクスの研究史を俯瞰しながら現状の位置づけと将来の発展性を論じたレビュー論文「50-year History and Perspective on Biomechanics of Swimming Microorganisms: Part I and II」2編をJournal of Biomechanics誌に発表した。



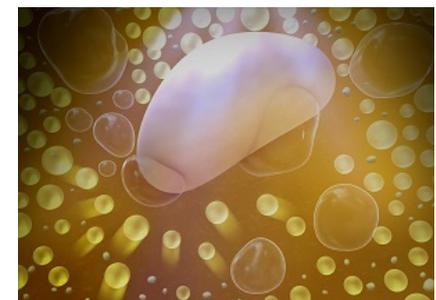
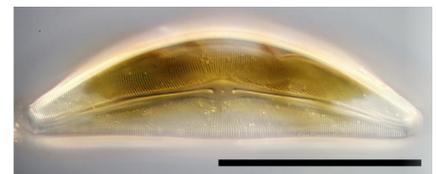
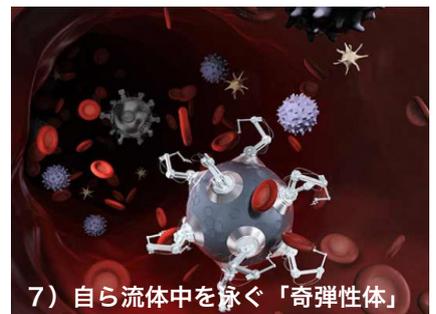
研究成果のプレスリリース

1. 石川教授（B01班）らは、繊毛が力を感じ取るメカニズムを解明するため、繊毛変形と繊毛流れを徹底力学化し、数値シミュレーションを実施した。体の左右非対称性が繊毛カーペットの運動量輸送で決まることを解明した研究成果

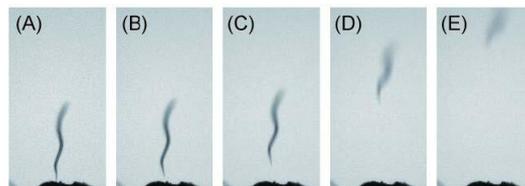


はScience誌に掲載され（前ページ最下図）、NHK NEWS WEBやYahooJapanニュース、Newsweek日本版、朝日新聞デジタルなどにも掲載されて大きな反響を呼んだ。

2. 中垣教授（B02班）らの研究成果がScientific Reports誌に掲載され、「人類の都市文明の立地と発展に粘菌からヒント — 現実の地形にあわせた、街と道の千年紀シミュレーション —」と題してプレスリリースされた。朝日新聞 朝刊に「イタリアの都市発展 粘菌の「賢さ」で検証」と紹介された（右図）。
3. 菊地准教授（A02班）らの研究成果がJournal of the Royal Society Interface誌に掲載され、「土壌中の休眠微生物・ウイルスが表出するメカニズム解明に期待」と題してプレスリリースされた。
4. 深澤博士（公募班）らの研究成果がFungal Ecology誌に掲載され、「雨後のキノコの電気的な会話を測定 菌糸のネットワークによるシグナル伝達の可能性を野外で初確認」と題してプレスリリースされた（右図）。
5. 深澤博士（公募班）らの研究成果がPNAS Nexus誌に掲載され、「菌糸ネットワークは地方分権 ～局所刺激に対する地方限定のシグナル応答を解明～」と題してプレスリリースされた。
6. 柴博士（A01班）らの研究成果がBMC Zoology誌に掲載され、「水中を泳ぐクマムシ精子のハイスピード撮影に成功—最強生物クマムシの繁殖を支えるメカニズム解明に向けて—」と題してプレスリリースされた。
7. 石本准教授（B01班）らの研究成果がPhysical Review E誌に掲載され、「自ら流体中を泳ぐ「奇弾性体」の発見—生き物らしい自律的なマイクロマシンの仕組み—」と題してプレスリリースされた（右図）。
8. 柴博士（A01班）らの研究成果がCurrent Biology誌に掲載され、「クシクラゲの泳ぎを支える櫛板の二段構造を解明」と題してプレスリリースされた。
9. 佐藤晋也教授（B01班）らの研究成果がDiatom誌に掲載され、「近年日本に侵入し分布を広げている外来種 ミズワタクチビルケイソウが近畿地方で初めて 安曇川でみつけられました」と題してプレスリリースされた（右図）。読売新聞オンラインや朝日新聞デジタル、毎日新聞、滋賀県広報、NHK NEWS WEBなどに取り上げられ、大きな反響を呼んだ。
10. 西山教授（A01班）らの研究成果がPlant Journal誌に掲載され、「光合成を“強く”することに成功 —光合成の強光耐性を高める手法を開発—」と題してプレスリリースされた。
11. 丸山准教授（公募班）らの研究成果がeLife誌に掲載され、「サンゴ共生藻が栄養を放出する新経路を発見 細胞壁が支える持続可能な共生炭素循環のしくみ」と題してプレスリリースされた（右図）。
12. 菊地准教授（A02班）らの研究成果がScientific Reports誌に掲載され、「腸の活発な運動で促進される糖質吸収の可視化に成功～肥満や糖尿病、腸内細菌に関する栄養吸収メカニズムの解明に期待～」と題してプレスリリースされた（右図）。
13. 佐藤勝彦准教授（B02班）らの研究成果がCurrent Biology誌に掲載され、「線虫は静電気力を利用して空中を飛ぶ～小さな虫は帯電している昆虫や鳥に飛び乗り、世界中に広がりうることを発



見～」と題してプレスリリースされた（下図）。Yahoo! ニュースや読売新聞朝刊、日本経済新聞、日刊工業新聞、北陸中日新聞夕刊、山梨日日新聞朝刊などに取り上げられ、大きな反響を呼んだ。



13) 環境電場を利用した線虫のジャンプ

主催シンポジウム

1. 国際ワークショップの主催「One-day Workshop on Cellular-level ethological dynamics towards "proto-intelligence"」29 Oct, 2022, Kyoto, Japan (右図)
2. 第55回 日本原生生物学会大会（法政大学）にて、活性化委員会企画シンポジウム（公開）「原生生物のジオラマ行動力学」を共催した。
3. 第61回日本生物物理学会年会（名古屋国際会議場）において、シンポジウム「The survival strategies of unicellular organisms on a microscale；微小環境で行動する単細胞生物の生存戦略」を共催した。



主な査読付き雑誌論文（計画班 全124編）

1. *Takuji Ishikawa (2024), *Annual Review of Fluid Mechanics*, 56, 119-145. (IF=27.7)
2. Napaumpaiporn, P., T. Ogawa, K. Sonoike, and *Y. Nishiyama (2024), *Plant Journal*, 117, 1165-1178. (IF=7.2)
3. Furukawa M, b S. Kitanobo, S. Ohki, M.M. Teramoto, N. Hanahara, and *M. Morita (2024), *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 195, 108063.
4. Suka, A., T. Shikata, K. Yuasa, Y. Tomaru, P. Napaumpaiporn, R. Tanaka, and *Y. Nishiyama (2024), *Algal Research*, 79, 103495.
5. *Yang, J., T. Isaka, K. Kikuchi, K. Numayama-Tsuruta, and T. Ishikawa (2024), *BMC Biology*, 22, 76.
6. Takeuchi Y, S. Sato, C. Nagasato, T. Motomura, S. Okuda, M. Kasahara, F. Takahashi, and *S. Yoshikawa (2024), *Scientific Reports*, 14, 3387.
7. *Zhong, R., E. Zhang, and M. Munetomo (2024), <https://doi.org/10.1007/s11227-024-05909-0>, *Journal of Supercomputing*.
8. *Zhong, R., J. Yu, C. Zhang, and M. Munetomo (2024), *Neural computing and applications*, 36, 6721-6740.
9. *Zhong, R., J. Yu, C. Zhang, and M. Munetomo (2024), *Alexandria Engineering Journal*, 87, 148-163
10. *Dalwadi, M.P., C. Moreau, E. A. Gaffney, K. Ishimoto, and B. J. Walker (2024), *Journal of Fluid Mechanics*, 979, A1.
11. *Dalwadi, M.P., C. Moreau, E. A. Gaffney, B. J. Walker, and K. Ishimoto (2024), *Journal of Fluid Mechanics*, 979, A2.
12. Songserm, R., Y. Nishiyama, and *N. Sanevas (2024), *Scientifica*, 2024, 1898624.
13. *Kato T. A., *T. Omori, K. Mizuno, X. Sai, K. Minegishi, Y. Ikawa, H. Nishimura, T. Itabashi, E. Kajikawa, S Hiver, A. H., Iwane, T. Ishikawa, Y. Okada, T. Nishizaka, *H. Hamada (2023), *Science*, 379, 66-71. (IF=56.9)
14. *Hazraty-Kari S, M. Morita, P. Tavakoli-Kolour, T. Nakamura, and *S. Harii (2023), *Science of The Total Environment*, 863, 161227. (IF=9.8)
15. Chiba, T., E. Okumura, Y. Nishigami, T. Nakagaki, *T. Sugi, and *K. Sato (2023), *Current Biology*, 33, 1-10. (IF=9.2)
16. *Lloyd Fung, *Adam Konkol, *Takuji Ishikawa, *Ben T. Larson, *Thibaut Brunet, *Raymond E. Goldstein (2023), *Physical Review Letters*, 131, 168401. (IF=8.6)
17. Shikata, T., S. Kitatsuji, and K. Yuasa (2023), *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 11, 1134227.
18. Toriu, M., M. Horie, Y. Kumaki, T. Yoneyama, S. Kore-eda, S. Mitsuyama, K. Yoshida, T. Hisabori, and *Y. Nishiyama (2023), *Biochemical Journal*, 480, 307-318.
19. Kijima, T., D. Kurokawa, Y. Sasakura, M. Ogasawara, S. Aratake, K. Yoshida, and *M. Yoshida (2023), *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 11, 1136537.
20. *Shiba K., and *K. Inaba (2023), *Biomolecules*, 13, 1594.
21. *Morita M, S. Kitanobo, S. Ohki, K. Shiba, and K. Inaba (2023), *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 11, 1171495.
22. *Hazraty-Kari S, M. Morita, P. Tavakoli-Kolour, and *S. Harii (2023), *Marine Pollution Bulletin*, 192 115060-115060.

23. *Tavakoli-Kolour P, F. Sinniger, M. Morita, S. Hazraty-Kari, T. Nakamura, and *S. Harii (2023), *Marine Pollution Bulletin*, 197 115792
24. Sensui N, Y. Itoh, N. Okura, K. Shiba, S.A. Baba, K. Inaba, and *M. Yoshida(2023), *International Journal of Molecular Sciences*, 24, 2666.
25. Tavakoli-Kolour P, F. Sinniger, M. Morita, and *S. Harii (2023), *Marine Pollution Bulletin*, 188, 114698.
26. *Yang, J., K. Kikuchi, and T. Ishikawa (2023), *Communications Physics*, 6, 354.
27. Ban H, S. Sato, S. Yoshikawa, K. Yamada, Y. Nakamura, M. Ichinomiya, N. Sato, R. Blanc-Mathieu, H. Endo, *A. Kuwata and *H. Ogata (2023), *Communications Biology*, 6, 697.
28. *Ishimoto K., E. A. Gaffney, and D. J. Smith (2023), *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 11, 1123446.
29. *Ishimoto, K., C. Moreau, and K. Yasuda (2023), *PRX Life*, 1, 023002.
30. Hamano, Y., K. Ikeda, K. Odagiri, and *N.J. Suematsu (2023), *Scientific Reports*, 13, 8173.
31. *Suematsu, N.J., H. Yamashita and M. Iima (2023), *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 11, 1134002.
32. Muku K., H. Yamashita, T. Kamikubo, N. J. Suematsu, and *M. Iima (2023), *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 11, 1133028.
33. *Maruyama, T., M. Yamaguchi, A. Tame, T. Toyofuku, H. Chibana, and M. Yoshida (2023), *Cytologia*, 88: 321-329.
34. Tavakoli-Kolour P, F. Sinniger, M. Morita, T. Nakamura, and *Harii S (2023), *Frontiers in Marine Science* 10.
35. *Hayakawa E, C. Guzman, O. Horiguchi, C. Kawano, A. Shiraishi, K. Mohri, M.F. Lin, R. Nakamura, R. Nakamura, E. Kawai, S. Komoto, K. Jokura, K. Shiba, S. Shigenobu, H. Satake, K. Inaba, and *H. Watanabe (2022), *Nature Ecology & Evolution*, 6: 1438-1448. (IF=16.8)
36. Jokura K, Y. Sato, K. Shiba, and *K. Inaba (2022), *Current Biology*, 32, 5144-5152.e6. (IF=9.2)
37. *Ushijima Y., and Y. Yoshikawa (2022), *Scientific Reports*, 12, 9899.
38. Perez L, *J.F. Asturiano, M. Yoshida, and V. Gallego (2022), *Aquaculture*, 554, 738146.
39. *Ishikawa T. (2022), *Biophysical Journal*, 121, 2487-2489.
40. *Shiba K., and *K. Inaba (2022), *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 1648.
41. Kitanobo S., S. Toshino, and *M. Morita (2022), *Scientific reports*, 12, 5026.
42. *Kitanobo S., K. Iwao, H. Fukami, *N. Isomura, and *M. Morita (2022), *Scientific reports*, 12, 5356.
43. Shibata D, M. Morita, Y. Sato, K. Shiba, S. Kitanobo, R. Yokoya, and *K. Inaba (2022), *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 10, 905748.
44. *Matsunaka T, S. Nagao, M. Inoue, R. Mundo, S. Tanaka, N. Tang, M.A., Yoshida, M. Nishizaki, M. Morita, T. Takikawa, N. Suzuki, S. Ogiso, and K. Hayakawa (2022), *Marine Pollution Bulletin*, 180, 113749.
45. *Hazraty-Kari S, P. Tavakoli-Kolour, S. Kitanobo, T. Nakamura, and *M. Morita (2022), *Communications Biology*, 5, 1371.
46. Suzuki, Y., *K. Kikuchi, K. Numayama-Tsuruta, and T. Ishikawa (2022), *Scientific Reports*, 12, 15310.
47. Echigoya, S., K. Sato, O. Kishida, T. Nakagaki, and *Y. Nishigami (2022), *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 10, 1021469.
48. Yasuda, K., K. Ishimoto, A. Kobayashi, L.-S. Lin, I. Sou, Y. Hosaka and *S. Komura (2022), *The Journal of Chemical Physics*, 157, 095101.
49. *Walker, B. J., K. Ishimoto, E. A. Gaffney and C. Moreau (2022), *Journal of Fluid Mechanics*, 942, A1.
50. *Walker, B.J., K. Ishimoto, C. Moreau, E. A. Gaffney and M. P. Dalwadi (2022), *Journal of Fluid Mechanics*, 944, R2.
51. *Ishimoto, K., C. Moreau and K. Yasuda (2022), *Physical Review E*, 105, 064603.
52. *Aoki, T., N. Fujiwara, M. Fricker, and T. Nakagaki (2022), *Scientific Reports*, 12, 10093.
53. Echigoya, S., K. Sato, O. Kishida, T. Nakagaki, and *Y. Nishigami (2022), *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 10, 1021469.
54. *Okuda S, and *K. Sato (2022), *Biophysical Journal*, 28: S0006-3495(22)00317-4.
55. Xu, Y., N. Takayama, Y. Komatsu, N. Takahara, H. Kitahata, M. Iima and *S. Nakata (2021), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 635, 128087.
56. Omori T., K. Kikuchi, M. Schmitz, M. Pavlovic, C.-H. Chuang, and *T. Ishikawa (2021), *Journal of Fluid Mechanics*, 930, A30.
57. Sugiura K., K. Shiba, K. Inaba and *M. Matsumoto (2021), *BMC Zoology*, Vol.7 (1), 8.
58. Srivastava A., *K. Kikuchi, and *T. Ishikawa (2021), *Soft Matter*, 17, 10428-10436 (Back Cover).

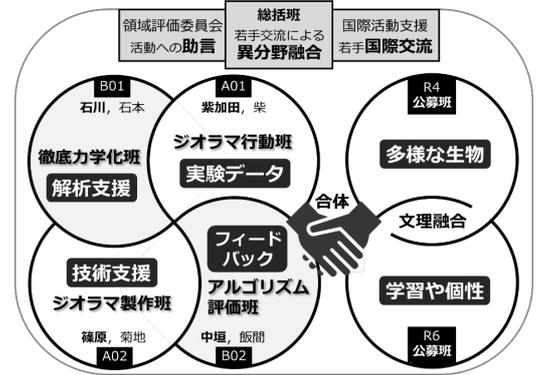
主な査読付き雑誌論文 (公募班 全63編)

1. *Asaba, T., L. Peng, T. Ono, S. Akutagawa, I. Tanaka, H. Murayama, S. Suetsugu, A. Razpopov, Y. Kasahara, T. Terashima, Y. Kohsaka, T. Shibauchi, M. Ichikawa, R. Valenti, S. Sasa, and *Y. Matsuda (2023), *Science Advances*, 9, eabq5561. (IF=13.6)
2. Susaki D, R. Izumi, T. Oi, H. Takeuchi, J.M., Shin, N Sugi, T. Kinoshita, T. Higashiyama, T. Kawashima, and *D. Maruyama (2023), *Plant Cell*, 35, 1222-1240. (IF=12.0)
3. *Thoma V, S. Sakai, K. Nagata, Y. Ishii, S. Maruyama, A. Abe, S. Kondo, M. Kawata, S. Hamada, R. Deguchi, and *H. Tanimoto (2023), *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 120, e2221493120. (IF=11.1)
4. Akiyama, K., S. Ozawa, Y. Takahashi, K. Yoshida, T. Suzuki, K. Kondo, * K. Wakabayashi, and *T. Hisabori (2023), *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 120, e2218187120. (IF=11.1)
5. Ishii Y, H. Ishii, T. Kuroha, R. Yokoyama, R. Deguchi, K. Nishitani, J. Minagawa, M. Kawata, S. Takahashi, and *S. Maruyama (2023), *eLife*, 12, e80628. (IF=7.7)
6. Uwamichi, M., Y. Miura, A. Kamiya, D. Imoto, and *S. Sawai (2023), *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 11, 1274127.
7. Yuichi Utsumi, Y., M. Taketoshi, M. Miwa, Y. Tominaga, and *T. Tominaga (2023), *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 17, 1217368.
8. Nelson, G., A. Strain, A. Isu, A. Rahnema, K. Wakabayashi, A. T. Melvin, and *N. Kato (2023), *Scientific Reports*, 13, 10781.
9. Oshima, D., M. Yoshida, K. Saga, N. Ito, M. Tsuji, A. Isu, N. Watanabe, K. Wakabayashi, and *K. Yoshimura (2023), *iScience*, 26, 107926.
10. Machida, A., K. Kondo, K. Wakabayashi, K. Tanaka, and *T. Hisabori (2023), *Plant and Cell Physiology*, 64, 1590-1600.
11. Itani, A., S. Masuo, R. Yamamoto, T. Serizawa, Y. Fukasawa, N. Takaya, M. Toyota, S. Betsuyaku, and *N. Takeshita (2023), *PNAS Nexus*, 2, pgad012.
12. Kato S, O. Misumi, S. Maruyama, H. Nozaki, Y. Tsujimoto-Inui, M. Takusagawa, S. Suzuki, K. Kuwata, S. Noda, N. Ito, Y. Okabe, T. Sakumoto, F. Yagisawa, T. M. Matsunaga, Y. Matsubayashi, H. Yamaguchi, M. Kawachi, H. Kuroiwa, *T. Kuroiwa, and *S. Matsunaga (2023), *Communications Biology*, 6, 89.
13. Kondo, K., R. Yoshimi, E.G., Apdila, K. Wakabayashi, *K. Awai, and *T. Hisabori (2023), *Scientific Reports*, 13, 259.
14. *Nomura, M., K. Ohta, Y. Nishigami, T. Nakayama, K. Nakamura, K. Tadakuma, and J. Galipon (2023), *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 11, 1232685.
15. Yoneoka, E. and *T. Takamatsu (2023), *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 11, 1249165.
16. Sasaki, T., H. Saito, Y. Furukawa, T. Tominaga, S. Kitajima, J. Kanno, and *K. Tanemura (2023), *The Journal of Toxicological Sciences*, Vol.48, 211-219.
17. Fukuda, T., T. Tominaga, Y. Tominaga, H. Kanayama, N. Kato, and *H. Yoshimura (2023), *Neuroscience Research*, Vol.191,28-37.
18. Susaki D, R. Izumi, T. Oi, H. Takeuchi, J.M., Shin, N Sugi, T. Kinoshita, T. Higashiyama, T. Kawashima, and *D. Maruyama (2023), *Plant Cell*, Vol. 35, 1222-1240.
19. *Mullane, K.K., M. Nishiyama, T. Kurihara, and D.H. Bartlett (2023), *Frontiers in Marine Science*, Vol.10, 1181062.
20. Fujikawa, R., C. Okimura, S. Kozawa, K. Ikeda, N. Inagaki, Y. Iwadate, and *Y. Sakumura (2023), *Biophysical Journal*, Vol.122, 4542-4554.
21. *Kurotaki, D., K. Kikuchi, K. Cui, W. Kawase, K. Saeki, J. Fukumoto, A. Nishiyama, K. Nagamune, K. Zhao, *K. Ozato, *P.P. Rocha, and *T. Tamura (2022), *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 119, e2207009119. (IF=11.1)
22. *Ishihara, Y., T. Honda, N. Ishihara, K. Namba, M. Taketoshi, Y. Tominaga, M. Tsuji, C. F. A. Vogel, T. Yamazaki, K. Itoh, and T. Tominaga (2022), *Journal of Neuroinflammation*, 19, 195. (IF=9.3)
23. *Fukasawa, Y. and *K. Kaga (2022), *Journal of Fungi*, 8, 517.
24. Sekiguchi, T., K. Yoshida, K. Wakabayashi, and *T. Hisabori (2022), *Journal of Biological Chemistry*, 298, 102541.
25. Suda, S., T. Suda, T. Ohmura, and M. Ichikawa (2022), *Physical Review E*, 106, 034610.

8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

(1) 研究の役割に基づく連携の概要：（右図）領域内では、A01のジオラマ行動班が主に精子と赤潮藻の実験データを取得し、それを他班に提供している。また、さまざまな生物試料を他班に提供する役割も担っている。A02のジオラマ製作班は、実験室でジオラマ環境を実現するための装置作りを支援している。これまでに微小流体流路や乱流発生装置、4次元計測系の製作などを支援している。B01の徹底力学化班は、実験現象を力学法則に基づいて数理モデル化し、解析的・数値的に解析する手法を提供している。B02のアルゴリズム評価班は、実験や解析で得られた微生物行動の背後に潜むアルゴリズムを評価し、検証する役割を担っている。



公募班は、計画班で焦点を当てている精子や赤潮藻以外の、さまざまな微生物の新規行動を探索する役割を担っている。粘菌やせん毛虫、ケイソウ、キノコ、花粉管など、計画班ではカバーしきれない広い領域に展開する役割を担っている。全ての班の間の連携状況を以下の連携表に示す。

	計画班							公募班																						
	紫加田	柴	篠原	菊地	石川	石本	中垣	飯間	丸山	深澤	野村	上道	若林	上田	武内	市川	広橋	岩楯	杉原	津守	大西	鹿毛	吉村	野田	豊岡	高松	西山	富永	永宗	
計	紫加田	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	柴	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	篠原	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	菊地	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	石川	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	石本	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	中垣	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	飯間	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

■ 共著論文 ■ 共同研究 ■ 技術提供 ■ 訪問・招聘 ■ 技術相談

(2) 計画班連携ネットワークの公募班への拡大：3つの実証課題のうちの一つが、精子の運動（特にラセン遊泳性に注目）と赤潮藻類の集団運動であり、計画班はこの共通テーマに連携して取り組んでおり、毎月1回のペースで全計画班代表が参加するオンライン会議を実施している。ここから生まれるアイデアや技術などが、各公募班と共有されることによって連携ネットワークの土台をなしている。三つの実証課題が、多様な細胞行動の新規探索なので、領域内の多様な研究対象を包括するような多様性の観点が醸成されることによって領域全体が弾力的に結びついている。

(3) 技術共用化促進による連携活動の起動：領域内の連携を促進するため、各班の得意とする技術を共用化することにも注力してきた。提供できる共用化技術をリストアップして領域ホームページに常時掲示して、領域会議ごとに周知してきた。申請書では技術の提供を支援する専任スタッフを雇用する予定であったが、申請予算額の減額とコロナ情勢に鑑みて方針を変更し、学生リサーチアシスタントや博士研究員のエフォートを一部活用してすすめている。

(4) 連携ネットワークの成果と課題：計画班内での共著論文や、計画班と公募班の共著論文が複数出版されており、既に領域内共同研究の成果が上がっている。特筆すべきは計画班内の共同研究の活発さである。精子を中心とした研究と、赤潮藻を中心とした研究、新規行動探索を中心とした研究の全てにおいて共同研究が実施されており、計画班が結束して領域の目的を達成すべく活動している。また、全ての公募班と何らかの連携が取れており、共同研究や技術提供、技術相談などが行われている。一方で、公募班との連携は、2年の期間内に潜在的な連携可能性を十分に育てられなかった部分もあり、今後の課題と捉えている。この経験を活かして、次期公募班との連携には改善の手立てを講じたい。

(5) データマネージメントプラン：領域幹事会議事録など運営資料や共有性の高い研究データなどは領域DropBoxを設けてアクセス制限付きで共有している。将来的には、国立情報学研究所(NII)の学術情報基盤事業GakuninRDMサービスの有効活用を目指しており、これまで計画班で本サービスを試験的に運用している。

9 若手研究者の育成に係る取組状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、本研究領域が育成に取り組んだ「若手研究者」の定義を始めに示すこと。

若手研究者の定義：年齢にかかわらず研究者としてのキャリアからみた「若手」として、大学院生、博士研究員、助教とした。または、准教授や教授であっても年齢30代の研究者は若手とした。

(1) 異分野研究交流の機会の提供とシニアメンバーによるその場でのメンターリング：年2回の領域会議では毎回、計画班と公募班の全研究グループがダイジェスト口頭発表を行い、誰が何をしているかを領域関係者全員に周知し、その後に若手を含めた全グループのポスター発表の機会を設けた。そこでは、シニアメンバーが、若手のポスター発表を積極的に訪れるように促した。本領域には9名の総括班評価者がおり、その多くが名誉教授であり本領域関連分野での経験は豊富である。そのような最高のお手本が、積極的に若手のポスター発表を丁寧に聞いてくれたことは若手にとって貴重な機会となっている。

(2) 異分野若手勉強会：年1回のペースでこれまで3回、実験と理論の両サイドに目をむけた勉強会を泊まりがけ（1泊2日）で開催した。

(3) 概念化討論会：領域の研究内容を包括的に捉える概念形成を目指した討論会を3回開催した。テーマを決めて話題提供をしたのち、1～3時間程度のパネル討論会を実施した。若手からも様々な発言を引き出した。討論会の内容は、ニュースレターとして回覧した（1号22頁、2号45頁、3号44頁）また、文理の垣根をこえた対談も若手研究者を交えて2回実施した。対談相手は、知に関わる倫理学や哲学の専門家をであり、その内容も、ニュースレター（1号17頁、2号20頁）としてまとめ領域内で共有した。

(4) 海外派遣・海外招聘・国内留学プログラム：コロナ下で海外渡航の難しい中、それでも1ヶ月間の若手海外派遣（D3学生）を実施した。この若手研究者は、学位取得後、助教となった。また、別の若手研究者（助教）が、海外の若手研究員を1ヶ月ほど招聘して国際共同研究を開始するのを支援した。また、3ヶ月の国内留学（B02-1のD2学生がB01-1へ）を実施した。

(5) アウトリーチの協働：大学の来るべき経営指針としてエンゲージドメント経営が文科省によって掲げられていることをうけて、アウトリーチ活動への関心を高める企画を若手研究者主体で実施した。JST主催のサイエンスアゴラに2回（R4,5年度）若手中心の企画運営で出展できた。

(6) 他の学術変革領域研究との合同研究会の開催：3領域交流会（ジオラマ行動力学、からだ工務店、データ科学）を2回、京都大学と富山大学で開催した。これは、どの領域も「生命科学と数物科学の協働」という共通項を含んでいるための交流であり、3領域の若手研究者を中心に企画・開催した。また、計測方法に関して相補的な領域「散乱透視学」とも、共同研究会を若手中心に企画・開催した。

以上の取り組みの中で、計画班での博士学位取得数4件、外国人若手研究者の受け入れ等4件、博士研究員・助教・講師・准教授・教授への着任や昇進数9件であった。



若手勉強会



ニュースレター



サイエンスアゴラ



3学術変革領域交流会

10 アウトリーチ活動に係る取組状況

研究領域全体を通じ、一般向けのアウトリーチ活動に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

ステークホルダーの多様さを意識しながら、様々な広報メディアを積極的に活用して、以下のような取り組みを実施した。

(1) 小中高校生向けの出張講義や講演会、体験教室や研究室公開：出前講義・ラボ体験受け入れ16件、JSTさくらサイエンスプログラムによる外国人学生受入2件、高校生等向け公開実習講座3件、ラボ公開3件

(2) 科学イベントの出展・講演・監修協力：JST主催サイエンスアゴラ「単細胞」なんて言わせない！ 原生生物、驚異の生存戦略」2件、JAAS日本科学振興協会主催文科省等後援「会いに行ける科学者フェス」、日本科学未来館でのイグノーベル賞公式イベント、英国サイエンスショー) や一般市民向け講座(市民公開講座など5件、市民講演2件)、一般向け書籍(「考える粘菌～生物の知の根源を探る～」、「流体力学超入門(翻訳)」、「原生生物学事典」

(3) WEBサイトでの動画やニュース：水産技術研究所HPに「赤潮プランクトンの生理生態」動画を作成して掲載、共共拠点協議会 知の拠点シリーズタイアップ動画「すぐにわかるジオラマ行動力学」と「すぐにわかる流体力学～微生物の世界～」、パソナ研究職Website、日立対談1、NTTデータエンジニアリングシステムズ情報雑誌「人とシステム」対談記事、夢ナビ講義、リケラボ、他6) ならびにSNSでの情報発信(x、facebook)



親子向け科学講座



サイエンスアゴラ

(4) 新聞や雑誌による報道等：プレスリリース14、新聞記事20

(5) テレビ番組の出演や監修：NHK Eテレ サイエンスゼロ「単細胞の”知性”に迫る 謎多き粘菌の世界」と「期待の次世代エネルギー!“藻類オイル”最前線」、NHK World Japan国際放映「The Superpowers of Alime Molds」、NHK BSプレミアム ヒューマニエンス「“ミクロの毛”細胞を指揮する司令塔」、NHK BSプレミアム 世界ドキュ選「脳のない天才」、NHKEテレ「生きもの・ドアップ! 超ミクロハンタ～命を支える「毛」の秘密～」



さくらサイエンスPG

(6) その他の多様なメディア：一般文化ミニコミ誌アレのインタビュー記事、月刊思想誌ユリイカの記事、起業・新技術イベントDeeptech Hello Tomorrow Asia Pacific SUMMIT Singaporeでの注目技術講演と討論、スイス高校生の研究紹介動画のインタビュー、北海道エスコンフィールド(プロ野球場)併設ミュージアムでの年間展示、東京大学出版会月刊誌UPでジオラマ行動力学の連載など



2023 Hello Tomorrow Asia Pacific SUMMIT

以上の情報は、**領域ホームページ** (<https://diorama-ethology.jp/>) の新着情報欄に適時掲載している。**新着ニュース掲載総数は164件**に及んでいる。個別の情報の詳細は、HPに掲載されているので誰でもいつでも閲覧可能である。またこの領域ホームページは、**国立国会図書館のデジタルアーカイブ事業**とのタイアップにより、**領域の研究期間終了後も幾久しく閲覧可能**となることが決まっている(領域研究期間終了時に将来的な公開のあり方について最終確認をする予定である)。

11 研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

(1) 総括班研究課題の活動状況

- ・毎月の領域幹事会における研究進捗の議論をより実効的にするために、年に2回程度、実験室やフィールドの現場に集合して打ち合わせを行い、そのための旅費と会議費を支弁した。
- ・機器共用化促進のため簡易立体観察システムを導入し、高価な機器は退官教授の廃棄予定物品を移設費用のみ支弁することで導入した。8つの計画班の提供する共用技術の維持と運用費用を支弁した。これら機器共用を通じて、領域内の連携研究が活発化した。
- ・領域全体会議、若手研究会、共催シンポジウム、概念化討論会、他の学変領域との若手主体交流会などの会議開催にかかる会場費や旅費、共催費を支弁した。これにより、領域メンバの意見交換や情報収集が大いに促進された。
- ・若手支援の国内外派遣・招聘プログラムを実施した。3件のみなので今後回数を増やしたい。
- ・充実したホームページを作成するために、頻繁に情報更新するための費用を支出した。アウトリーチの活動費は、若手の参加を促すための旅費も含めて支弁した。
- ・事務局機能を北大と東北大に分散させて、よりスムーズかつ不測の事態にも対応できる体制を整えて、領域の運営を支えた。その事務局員の人件費と、事務作業支援費用等を支出した。

(2) 総括班支出項目の内訳概略

- ・**機器や技術の共用化促進のための物品**：領域内で開発した簡易立体視顕微鏡システム（実体顕微鏡、高速カメラ、記録解析計算機など）を領域全体で使用できる計測機器として二台制作（280万円）した。ある教授の退官に伴い廃棄されるレオメータ顕微鏡（約1500万円相当）を移設・修理費用110万円のみ支弁して払い受け共用機器として活用した。その他、8つの計画班が提供する共用機器・技術の運用・維持に580万円（生物試料の維持培養や計算機サーバーの維持管理などを含む）。アウトリーチ用物品（中古顕微鏡2台、スマホ顕微鏡消耗品、生物試料飼育など140万円）。事務局消耗品など（100万円）。
- ・**旅費**：領域会議、若手勉強会、共催シンポジウムなど（1100万円）。若手の短期国内留学・海外留学や若手による海外共同研究者招聘（270万円）。アウトリーチ旅費（160万円）。
- ・**人件費**：北大と東北大の領域事務局員（760万円）、アウトリーチ・会議用臨時補助員（50万円）。
- ・**その他**：ホームページ作製（研究紹介短編動画作成）・維持・管理（250万円）、アウトリーチ用（260万円）、論文特集号掲載費支援（560万円）、会議会場費・会議共催費など（220万円）。

	合計(3年分)	物品費	旅費	人件費	その他費用
総括班	52,471,836	12,169,894	15,277,950	8,121,088	16,902,904

(3) 計画班による購入設備の共用化概略

A02-1班が購入した共焦点レーザー顕微鏡FV3000（4000万円）と、既有設備の透過型電子顕微鏡TEM・走査型電子顕微鏡SEM・PDMS製マイクロ流体デバイス・高速原子間力顕微鏡・ライブイメージング・免疫染色について、プロトコルを共有化しており、A01-1班の赤潮研究に活用中である。B01-1班が大型計算設備の維持費用（100万円）を計上しており、A01-2班の精子の研究等で活用中である。A01-2班が購入した対物レンズピエゾ駆動システム（290万円）は、A02-2班とB01-2班との共同研究に活用している他、MEMS共焦点ユニット（1080万円）は、公募班（野田）のクシクラゲ平衡石運搬機構に関する共同研究に活用している。

12 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させることを先導する」観点から、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、今後実施する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

【領域の運営】

1) 月例領域幹事会（総括班会議）の継続によるきめ細やかな運営

毎月の領域幹事会（全計画班代表者の出席）が領域運営の要になっており、これまできわめて有効であったので、引き続き継続して開催する。これまで通り夕方5時から1時間半ほど運営上の議題を話し合ったのち、夕食を取りながら午後9時ごろまでゆったりと研究の議論を展開する。基本はオンラインで開催し、年に二回程度対面開催の予定である。これまでに築きあげた幹事会メンバー間の信頼関係を土台にして、より研究テーマの核心にせまられるように連携の質を高めたい。

2) 領域全体会議と若手勉強会・概念化討論会による連携促進

領域全体会議のスタイルはこれまで通りとする。毎回全員の発表とし、あわせて若手中心のポスターセッションを開催し、若手ポスターにシニアメンバーが積極的に訪れるように促す。これまで1日半の日程で開催してきたが、2日間に伸ばすことも考えたい。若手勉強会も好評なので年1ないし2回のペースで引き続き開催する。概念化討論会と文系対談もシリーズ化して継続する予定であり、若手の参加をより促す。

3) 公募班との連携促進のための総括班サイトビジット

これまで領域代表をはじめ総括班メンバーが個別に公募班メンバーを訪れて研究交流をしてきた。その甲斐あって、公募班メンバーに領域の活動状況を説明したり、共同研究を周旋することができた。その一方で、公募研究期間の2年のうちには潜在的な連携可能性を十分に育てられなかった事例もあった。これを改善するために、なるべく複数の総括班メンバーでサイトビジットをして、より複層的に連携可能性を引き出せるように努めたい。

4) 多様なステークホルダーを意識した多様な媒体を活用したアウトリーチ活動の充実

アウトリーチ活動については、採択時のコメントで言及されたことを励みにして多面的な活動を模索しながら実践してきた。その甲斐あって、テレビや新聞のようなマスメディアの活用も少なからずできてきた。今後も、前期で得られた報道関係者との人脈も活かしてさらに注力していきたい。特に国際広報の成果をより高めるような方策を模索する。一方で、身近な小中高生や市民に向けた比較的小規模の体験型イベントは、長い目でみれば本国の学術の底上げにとって意義深いことであるから地道に回数を積み上げる予定である。

5) 国際化活動の強化

国際活動はコロナ化もあり、これまで抑制的であったが、2023年度から活発化してきた。後半では、国際活動に注力する予定である。海外での共同研究会やシンポジウムの開催、若手の海外派遣、若手研究者の海外研究者招聘の支援も実施したい。積極的に国際会議に参加して、本領域の研究概念を発表する機会を増やす予定である。特に、領域代表や副代表らを中心にしてより活発に領域概念を世に問う必要がある。

6) 論文、総説、教科書、単行本などの出版物による学術変革活動の継続的積み上げ

学術的な成果として、これまで論文の特集号や包括的な総説などを国際雑誌に公表してきた。学問的な貢献として、学部学生から大学院生向けの教科書を出版する予定である。英語の教科書やモノグラフも考えてみたい。

(5) データマネージメントプラン：データマネージメントプランのより有効な運用を引き続き模索する。これまでは、領域幹事会議事録（22回分とその会議資料）など運営資料や、共有性の高い研究データなどは、領域DropBoxを構築して、段階的なアクセス制限のもとで共有している。将来的には、国立情報学研究所(NII)の学術情報基盤事業GakuninRDMサービスの有効活用を目指しており、現在までに計画班で試験的な運用をしてきている。引き続きGakuninRDMサービスの内容を調べて活用方法を検討していきたい。

【研究の方向性】

1) 精子をはじめとした遊泳性原生生物などのらせん遊泳のジオラマ行動力学の確立

研究内容としては、第2実証課題であるホヤ精子の卵到達行動について、とくにらせん遊泳性に注目してその原生知能アルゴリズムをまとめ上げる。現時点で、実験とモデルの連携が進んでおり概ね出来上がりつつあるので、多くの遊泳性細胞がらせん軌道を描くことから、らせん遊泳一般の原生知能まで到達できれば、その広範な一般性から学術変革性が高まると思われる。そのためには、多様な遊泳性原生生物と精子の行動を、より複雑度を上げたジオラマ環境で実験することが有効である。

2) 赤潮藻類などの原生生物集団の協調遊泳のジオラマ行動力学の確立

第1実証課題である赤潮藻類の集団運動については、困難なフィールド観察と実験室でのジオラマ行動実験の技術が高まってきたので、それらから得られたデータの解析やそれに基づいた新規実験や力学モデリングが今後加速されるだろう。また、これまで実験室で行ってきた別生物種の生物対流との関連づけができるようになるので、徹底力学化が鍵となるだろう。そのための徹底力学化班とアルゴリズム評価班の連携強化が必要である。

3) 多様な原生生物の多様な原生知能の新規探索

第3実証課題である多様な原生知能の新規探索については、遊泳性細胞の空間形状認知能力がはっきりとしてきたので、より一般的な能力として探索範囲を広げたい。またジオラマ環境の複雑度を上げることも必要である。分子的には繊毛のもつ運動性と感知性の二面性に注目して読み解いていきたい。いわば、繊毛虫の流体力学的空間探索・認知能力とでも言いうる原生知能アルゴリズムである。

4) アメーバ運動における多彩な仮足の能力の探索

第3実証課題では、仮足のもつ潜在的な高度な能力が次第に解明されてきたので、アメーバ運動性の細胞全般を広範に概観しながら、さまざまな仮足の能力を解明したい。具体的には、有殻アメーバの被殻形成能力、有孔虫の採餌行動、粘菌の学習行動などが挙げられる。いずれの場合も、不整地度の高いジオラマ環境での実験が有効である。アメーバ運動の徹底力学化も現在進行中なので、植物の花粉管や根毛、カビの菌糸などの成長も細胞変形の一例として同様のモデルによる包括的な理解を推し進めたい。とくに、仮足も花粉管も菌糸も、往々にしてらせん軌道を描きながら伸長するので、繊毛によるらせん遊泳との比較も興味深い観点である。

13 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

総括班評価者組織の概要：本領域の学際性に合わせて10名の総括班評価者を選任して委嘱した。年2回の領域会議をはじめ、若手研究会や概念化討論会にも参加してもらい、助言を仰いでいる。領域ホームページの情報は、領域内部限定情報も含めて閲覧していただいている。今回は6名の評価コメントを掲載する。

- ・伊関 峰生 東邦大学教授（光植物生理学）
- ・佐竹 暁子 九州大学教授（数理生態学）
- ・中島 秀之 札幌市立大学長（知能情報学）
- ・松野 健 九州大学名誉教授（海洋物理学）
- ・山田 道夫 京都大学名誉教授/東京大学名誉教授（数理科学）
- ・渡辺 茂 慶應大学名誉教授（比較認知心理学）
- ・神谷 律 東京大学名誉教授（細胞生物学）
- ・津田 一郎 北海道大学名誉教授（数理脳科学）
- ・西浦 廉政 北海道大学名誉教授（非線形数学）
- ・望月 修 東洋大学名誉教授（生物流体力学）

【神谷 律 東京大学名誉教授（細胞生物学）】 本研究領域は、各種単細胞生物の生息環境に対応した適切な実験室内環境（ジオラマ）を構築し、その場における彼らの行動解析から原始的「知性」（アルゴリズム）を読み取るようとするものである。「知性」は数十億年生き続けてきた単細胞生物の進化の産物であり、ヒトの想像を超える内容を持つ可能性があるが、それを追求しようとする学問領域はこれまでほとんど存在しなかった。そのような問題意識で領域を立ち上げたこと自体、画期的である。

領域代表者の意図とは異なるかもしれないが、生物学畑の者には、本領域がめざすことこそ生物学の真髄のように思われる。これまで生物学では、生物らしさが端的に表現された個体・細胞の行動については単なる現象の記述に留まることが多かった。行動アルゴリズムを追求する方針には、生物に正面から対峙して理解しようという姿勢がある。これが刺激となって、新しい観点からの生物学研究が生まれることも期待できる。

本領域において生物学側は、数物系研究者からの研究結果や提案を、一定程度数学と物理の言葉で理解することが必要である。しかし残念ながら、数物系の議論は必ずしも容易ではなく、意味が正しく把握できないことも多い。本領域のまとまりのためには、生物系と数物系間の障壁を下げる何等かの方策が必要であるとも感じる。たとえば、数式を使わない研究発表が奨励されれば、研究者間の交流と理解がさらに深まるのではないだろうか。

【津田 一郎 北海道大学名誉教授（数理脳科学）】 本研究のオリジナリティーは、哺乳動物やヒトの脳によって実現されている知能とは異なる知能が細胞レベルの行動様式の中に進化してきたことを検証することである。この知能を原生知能と呼び、複雑なジオラマ環境とのインタラクションによって創発されたものであることを示し、その機構を解明することで人間観及び自然観を変革し近未来の新たな人類社会の創出に寄与することを目的としている。

中間評価までにすでにジオラマ環境の創出、赤潮藻類の行動解明、精子の卵到達運動、コロナウィルス感染も踏まえた繊毛運動や鞭毛運動など具体的な細胞レベルでの行動知能が環境といかにカップルして成立してきたかが明らかにされてきている。理論も工学系、数理系、物理系がうまくかみ合い、多くの成果が上がっている。さらに理論系で得た知見を新たに計測された系へと展開し、ジオラマ行動力学の確立に確実に向かっている。

中垣代表のリーダーシップのもと総括班がよく機能し、計画班と公募班の研究が互いに補完し合いつつ共鳴している。アウトリーチ活動も活発であり本領域の価値を世界に向けて発信する力強さには目を見張るものがある。若手研究者育成にも工夫が凝らされていて後半戦に向けてさらに活動を活発化させてほしい。加えて、審査結果の所見で指摘された事項に関しても真摯に向き合い誠実に対応している。

【佐竹 暁子 九州大学教授（数理生態学）】 複雑な野外環境における生存を可能にする単細胞生物の行動能力を明らかにすることを目標に、主に赤潮の動態と精子のらせん遊泳について成果を挙げている。特に、赤潮藻類の集積性やリズム的な鉛直方向への移動性行動を実験、モデリング、そして野外観測を結びつけたアプローチによって定式化し、赤潮発生予測を高精度で実現する枠組みを確立していることは高く評価できる。また、リズム的な鉛直方向への移動性を生み出す体内時計による制御メカニズムや、光環境の変動と同調した光合成機能の発揮という適応的意義についても解明の糸口を見出していることは大変興味深い成果である。今後は、論文成果としての発表とともに、誰もが本枠組みを使用で

きるようなインターフェースを公開されることが望まれる。若手の会やアウトリーチも積極的に開催し、次世代育成および社会への成果還元を十分に行っており、本領域の推進によって学術の裾野が一層広がることを期待される。

【松野 健 九州大学名誉教授（海洋物理学）】 有害赤潮プランクトンの日周鉛直移動がA01-1班の大きなテーマになっているが、群としてのプランクトンの挙動を理解するにあたって、他の計画班や公募研究でも言及されているように、プランクトンの群れの中での同期や相互作用を鉛直移動モデルにどう取り込むのが課題になると思われる。個体レベルでの応答あるいは知能とは別に、個体間の相互作用によって生まれる、群としての応答・知能を考えることで、赤潮等、環境に生物群集がどう応答するのか、という問題にアプローチできると思われる。個体間の間隔は、赤潮と言われる濃度の時、例えば10000個/mlとして体長が50 μ mとすると、その10倍くらいの距離に1個体程度の密度であり、人間なら隣の個体まで10~20mという間隔になるので、このくらいの密度で群集心理や相互作用が働くのかどうか、少なくとも鞭毛の動きの影響はなさそうであるが、群として個体とは別の挙動が生まれるかどうかは興味深い問題である。乱流のスケールは乱流が強い場合でもミリメートルスケールと考えられるので、この比較的疎な間隔に乱流による擾乱がどのように働くのか、プランクトンの個体に対しては乱流のスケールは大きすぎるが、群に対しては乱流も有意に働く可能性があるので、群としてのプランクトンの挙動と乱流との関りが一つの鍵となる。

赤潮のような自然の中での現象と、実験室の顕微鏡の中での現象では、それを理解するためのアプローチも全く異なっている中で、公募研究も含めて異なる研究グループで相互に関連するプロセスや考え方が垣間見られるのが非常に興味深く感じられた。個々の研究パーツとしては大きな進展が見られているように感じる。個々の研究が進展している中で、今後、それぞれの研究間の相互作用を通じて、こういうプロジェクトでこそ生まれる異分野間の相乗効果によって、生物世界に対する新しい理解が生まれることが期待される。

【伊関 峰生 東邦大学教授（光植物生理学）】 本領域は、「原生知能」を単細胞生物が潜在的に持つ根源的な環境適応能力と定義し、その解明を目指すものである。その方策として、種々の細胞レベルで発現する原生知能を広く探索し、それらを力学的モデルにより定式化することを掲げており、ジオラマ行動班、ジオラマ製作班、徹底力学化班、アルゴリズム評価班の4班から構成される計画研究においては特に精子の行動と赤潮藻類の集団行動に焦点を当ててジオラマ環境の構築と行動の定式化が着実に進められている。また、公募研究では広く様々な生物において原生知能の概念を適用できる例がピックアップされ、計画班との良い協力関係の下に研究が推進されている。本領域では年2回の領域全体会議のほか、各研究班の班会議、交流会、勉強会等が頻回に開催され、若手研究者も含めて活発な議論が行われており、領域の方向性に関する共通理解の醸成が図られている。このことは各研究班間の強固な連携となって表れており、公募研究も含めて密接な研究協力のネットワークが形成され、共同研究の成果も上がっている。このように実質的な連携関係を実現しているのは本領域の特徴的な強みであり、これを継続・発展させることでさらなる画期的成果が産み出されることを期待する。

【西浦 廉政 北海道大学名誉教授（非線形数学）】 「（原生）知能とは何か」というチャレンジングな問いを改めて俎上に乗せた試みである。生命体が持つ知能あるいは知性というものについて一般的な合意はなく、立場、方法論によって、ある限定された状況下での行動（思考）様式をそのように呼ぶということになるであろう。その意味で精子から粘菌まで多彩な生物種毎の「述語」的記述を包括的に述べながら、かつヒトという種に限定されない知能というものを浮かび上がらせようという原点回帰の壮大な試みである。5年弱という短い期間にこの疑問を完璧に明らかにすることは至難の技であり、従って、どのように考えていけば良いか、その方向が明示的に示されることだけでも他分野への影響は大きいであろう。

とりわけその概念化を目指すというときに、それが多様な環境下での実験、それを記述する様々な数理モデル、そしてそこから抽出されるアルゴリズムなどの複合体を述語的レベルから如何に統一的概念まで止揚できるのか、現時点ではまだはっきりしていない。極端な例を挙げれば、「DNAから見る知能」というアプローチもありうるわけである。再生化医療の発展を見れば、多機能性を取り戻すその機構は極めて複雑であり、環境に適応する原点がそこにあると言っても良いだろう。現代は「演繹」的方法より「帰納」的手法が大きな流れとなり、支配的となりつつあるが、最終的には帰納だけでは不十分であると考えている。この不十分さを補うところに知能というものが顔を出すと思われる。本学変は一見、多彩なものを見つつ、帰納的方法論を適用しようとしているが、最終的な飛躍に何が不可欠であるかを予感させるものがあり、そのヒントを最終段階までに打ち出してもらいたい。