

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01812

研究課題名（和文）動く細胞における情報コーディング様式の包括的解析

研究課題名（英文）Information coding in migrating cells

研究代表者

澤井 哲（Sawai, Satoshi）

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：20500367

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：免疫系の培養細胞の運動を、細胞の運動を決定する細胞内分子活性の蛍光による可視化と、微小な空間における環境制御を実現するデバイスを用いて解析することにより、細胞の移動方向の決定の仕組みについてその詳細を調べました。その結果、シグナルの時間的変動が読み取られ細胞の前側が形成される反応と、シグナルの持続性が読み取られることで、細胞の後端を維持される反応が存在し、これらが組み合わさって働くことの重要性が示されました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

免疫細胞などの速い細胞は、複雑な環境下で目的の細胞や組織に正確に到達することが知られています。細胞外にあるたよりとなるシグナル濃度の空間勾配、その時間変化、履歴、ノイズ成分などによって運動が変調されるため、これらの情報が適切に読み取られることが、こうした細胞のナビゲーションに不可欠と考えられます。今回の成果は、細胞のこうした巧みな性質を明らかにするもので、組織内の免疫監査の操作や、再生における細胞運動制御などの基礎となることが期待されます。

研究成果の概要（英文）：By employing microfluidics device and live-cell imaging of intracellular signaling molecules, we studied how the migratory direction of the neutrophil-like HL60 cells are governed by signal fluctuation and persistence. The results indicate distinct pathways responsible for the leading edge protrusion and contraction and that they are differentially guided by the temporal information embedded in the extracellular cues.

研究分野：生物物理学

キーワード：細胞運動 走化性 免疫細胞 マイクロ流体デバイス

1. 研究開始当初の背景

刺激と応答の関係を数理的に、定量的にとらえることは、細胞がどのように入力を情報処理し、いかなる原理に基づいて出力を生成しているかを理解することに寄与する。特に、細胞が移動する方向を決める仕組みは、現象の重要性はもとより、信号処理アルゴリズムの側面から細胞機能を捉えるために恰好の題材を提供している。例えば、リンパ細胞では誘引分子の濃度差が細胞両端で 0.4%ほどあれば、正の走性を示す。これは信号の検出についての物理限界を一見すると越えている。また、組織内の免疫細胞は動きと停止をリズム的に繰り返し、誘引分子濃度の空間勾配だけでなく、時間変化によって運動が変調される。これらの特性は、複雑な環境下で目的の細胞や組織に正確に到達することに深く結びついていると考えられるが、その詳細はほとんどわかっていない。

申請者らのこれまでの研究から、細胞運動のモデル生物・細胞性粘菌については、特定の時間スケールで、濃度上昇時の入力のみを選択的に伝える整流作用が明らかになった。また、本研究に至った最近の研究(挑戦的萌芽研究(H27-28))では、免疫細胞(好中球)にも同様の応答特性の可能性が示唆された。この他にも、定性的な比較にとどまってはいるが、刺激の履歴による極性維持、刺激分子濃度に依存したランダム運動の共通性がある。進化的にかけ離れた真核生物の系統で、これらの共通性は見かけ上の類似ではなく、情報処理に関わる何らかの分子動態・ロジックから生じている可能性があるが、その実態が不明であった。

2. 研究の目的

免疫細胞などの速い細胞の動きは、誘引分子濃度の空間勾配だけでなく、その時間変化、履歴、ノイズ成分などによって運動が変調される。これらの特性は、複雑な環境下で目的の細胞や組織に正確に到達することに深く結びついていると考えられるが、外部刺激のいかなる成分が読み取られ、運動のどの成分に変換されているか、その詳細はほとんどわかっていない。免疫細胞を中心とした生細胞イメージング測定を、マイクロ流体デバイスを用いた動的な刺激制御と組み合わせおこない、測定結果の数理的動態解析を通じて、方向検知機構、履歴による極性のメモリー効果、刺激物質濃度に依存したランダム運動の制御という、3つの主要素に着目し、外部刺激の情報コーディング様式を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、マイクロ流体デバイスを用いた動的な刺激制御と、免疫細胞を中心とした生細胞イメージング測定を組み合わせた解析を行い、測定結果の数理的動態解析を通じて、外部刺激の情報コーディングの主要素を明らかにする。細胞膜の伸展部分「先導端」の形成を担うシグナル因子 Cdc42, Rac, Ras, Rap, PI3K 活性を蛍光プローブで測定し、また F-アクチンを Lifeact で同時可視化する。膜受容体の占有率の時間的な差、積分量、絶対値などが、先導端シグナル、アクチンフィラメント、細胞形態にいかに変換されるかを解析し、動く細胞の時間情報処理特性の理解に向け、数理モデル解析へとフィードバックさせて理解を進める。粘菌の細胞外 cAMP への走化性では、先導端形成を担う低分子 G タンパク Ras の活性化動態と、細胞レベルの振る舞い

が、フィードフォワード型の反応ネットワークによる微分検出によって無矛盾に説明されており、同様の分子動態が免疫細胞で成立しているか検証する。一方で、細胞の運動性はこうした方向検知機構に加えて、刺激の履歴による極性のメモリー効果、刺激物質濃度に依存したランダム運動の制御という、主に3つ要素が組み合わさっている。これらの入出力関係を定量的に明らかにし、細胞運動が外部刺激のどのような情報を抜き出し統合的に処理されているかを理解する。

4. 研究成果

ヒト好中球様の培養細胞HL60 について、誘引分子としてfMLP（細菌が産生するペプチド）への、細胞運動の特徴、ならびに細胞運動を制御する細胞内シグナルの活性変化を、蛍光プローブを用いて可視化測定した。本研究で必要となる定量的解析で要求される試行回数のためには、安定発現株が必要であるが、血球系細胞は遺伝子導入が困難なことで知られ、HL60細胞では一般的にリポフェクションやレンチウイルスによるトランジェントな発現を用いるのが一般的であり、実験の回数と手間の面で定量的解析を困難としていた。そこで、利用するプラスミドとしてEpstein-Barrウイルスの複数基点をもつpEB-Multi、ならびにpiggyBACトランスポゾンを用いたpiggyBAC系を新たに導入した。さらに、エレクトロポレーションを複数回連続にわたっておこない、かつ詳細な条件設定を可能とする市販の装置を用い、条件出しをおこなった。その結果、これまでにない再現性と簡易さでHL60の安定発現株の作成が可能となった。この手法を用いて、Cdc42, Ras, Racの各種FRETプローブ、PI3キナーゼ活性化をAkt/PKBのPHドメインと蛍光タンパク質GFP, RFPとの融合タンパク質を発現するHL60細胞の安定発現株をそれぞれ作出した。これらの細胞株を用いて、シグナル因子の活性化動態を定量的に解析した。勾配の時間的变化、反転操作には、低い天井高の観察領域流路を天井高のソースチャンバーで挟んだ、二層のマイクロ流路を用いた。申請者らがこれまで培った精密な圧力制御によって変動させる勾配刺激のもと、先端形成の生細胞イメージングをおこない、応答特性を特徴付け、同時に、細胞形状の定量化をおこなった。

以上の結果、Cdc42の活性化はfMLPの一樣濃度上昇にたいして、適応的な応答を示すこと、比較的变化のはやい進行波刺激にたいしては、同様の応答が見られるのに対し、より遅い進行波に対しては、明確な応答がみられないことが明らかになった。さらに光遺伝学的にCdc42活性を異所的に誘導すると、刺激とは独立に先端形成がみられるため、勾配への方向転換においては、Cdc42依存的な時間濃度変化に依拠するものと、より遅い時定数のCdc42活性の変動に依存しないものがあることが示唆された。Cdc42とPI3キナーゼ活性化動態について、進行波刺激にたいして、これらの阻害剤による影響、さらにROCKの阻害剤についての解析をおこない、波背面におけるターニング応答における細胞前端調節におけるCdc42の適応的応答と、後端収縮調節の役割を切り分けて理解した。また、さらにこれらの異なる誘引物質への応答を、LTB4にたいして解析した。その結果、fMLPのステップ入力にたいするCdc42活性の緩和の時定数が両者で違うのにたいし、進行波刺激の背面への応答は、片方の刺激でより遅い進行波で生じていた。これらの結果から、好中球様HL60細胞の遊走方向の決定には、比較的速い時定数における時間変化応答性と、より長い時定数の極性依存性の応答が組み合わさっており、受容体下流でこれらにたいして選択的に応答するシグナル経路が明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Taihei Fujimori, Akihiko Nakajima, Nao Shimada and Satoshi Sawai	4. 巻 116(10)
2. 論文標題 Tissue self-organization based on collective cell migration by contact activation of locomotion and chemotaxis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America	6. 最初と最後の頁 4291-4296
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1073/pnas.1815063116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kamino Keita Kondo Yohei Nakajima Akihiko Honda-Kitahara Mai Kaneko Kunihiko Sawai Satoshi	4. 巻 114
2. 論文標題 Fold-change detection and scale invariance of cell-cell signaling in social amoeba	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America	6. 最初と最後の頁 E4149-E4157
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1073/pnas.1702181114	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計58件（うち招待講演 20件/うち国際学会 9件）

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 Contact activation of locomotion - a defining mode of collective cell migration in amoebozoan morphogenesis
3. 学会等名 遺伝子発現制御研究室セミナー
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 Collective migration in the parallel world
3. 学会等名 Discussion Meeting on Conflict and Cooperation in Cellular Populations (CCCP 2020)（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 Crawling morphology and collective migration in amoeboid cells
3. 学会等名 アクティブマター研究会2020 企画講演「Crawling motion」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 Mathematical model-based analysis of morphodynamic spectrum of fast migrating cells
3. 学会等名 第42回日本分子生物学会年会シンポジウム 「計測、数理、制御の三位一体による生命動態の解明」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 A physico-chemical modeling and data-driven approach to cell morphology dynamics
3. 学会等名 金沢大学NanoELSI 公開セミナー(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 Cell segregation by contact directed migration
3. 学会等名 Joint UBI-NanoLSI workshop "TRENDS IN MOLECULAR BIOPHYSICS OF LIVING CELLS"(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 はいまわる細胞の形態表現空間とデータ駆動解析
3. 学会等名 2019年度日本数理生物学会年会 企画シンポジウム「データに基づく細胞・組織生物学」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 Morphodynamic feature space of migrating cells
3. 学会等名 第57回日本生物物理学会 年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 階層をつなぐ視点からダイナミクスを考える。
3. 学会等名 第31回高遠・分子細胞生物学シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本田 玄
2. 発表標題 細胞性粘菌アメーバの移動形態における可塑性の解析
3. 学会等名 第31回高遠・分子細胞生物学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 Deciphering morphology landscape of fast migrating cells by dynamical systems modeling and machine learning
3. 学会等名 2019 A3 Workshop on Mathematical Life Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本田 玄
2. 発表標題 Analysis of plasticity in amoeboid morphology toward the comprehensive understanding of cell migration
3. 学会等名 2019 A3 Workshop on Mathematical Life Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 島田奈央
2. 発表標題 光遺伝学的操作による低分子量 GTPase の機能解析
3. 学会等名 第9回日本細胞性粘菌学会例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋村秀典
2. 発表標題 形態形成・組織運動に関わる細胞型依存的な運動形態を生み出す分子動態の解析
3. 学会等名 第9回日本細胞性粘菌学会例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本田 玄
2. 発表標題 アメーバ細胞の移動形態における可塑性の解析
3. 学会等名 第9回日本細胞性粘菌学会例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田元彦
2. 発表標題 Decision making of migratory direction of neutrophil-like HL60 cells in dynamical chemoattractant gradient
3. 学会等名 第57回日本生物物理学会 年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井元大輔
2. 発表標題 Morphodynamic feature space of migrating cells
3. 学会等名 第57回日本生物物理学会 年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島昭彦
2. 発表標題 Cell size-dependent polarity dynamics in cells and tissues
3. 学会等名 Annual meeting of Japanese Society of Developmental Biologists
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本田 玄
2. 発表標題 Microtopographical guidance of feeding cups in Dictyostelium discoideum
3. 学会等名 2nd Joint Symposium between MBI-UBI (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島昭彦
2. 発表標題 細胞遊走動態からみる細胞・組織秩序の創発原理
3. 学会等名 定量研シンポジウム「生命科学の若手フロンティア」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島昭彦
2. 発表標題 Integration of cell polarity and direction sensing in chemotactic migration of immune cells
3. 学会等名 Interface between Immunology & Quantitative Biology
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島昭彦
2. 発表標題 細胞性粘菌から理解する遊走性細胞組織の知覚と行動原理
3. 学会等名 第57回つくば藻類・プロティストフォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 接触誘導型の追従運動と走化性の2つの集団運動による自己組織化
3. 学会等名 第41回日本分子生物学会年会ワークショップ「生物における自発的秩序形成」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 反応拡散とフェイズフィールドから理解する細胞変形と集団ダイナミクス
3. 学会等名 第56回日本生物物理学会年会シンポジウム「いきた形の新規生成に挑む、理論モルフォダイナミクス " Theoretical morphodynamics - towards understanding emerging shapes of life"」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 細胞性粘菌にみるアメーバ界の多細胞性
3. 学会等名 東京大学大学院農学生命科学研究科 微生物潜在機能探索(発酵研究所)寄付講座 最終報告会および記念講演会「関わりあう微生物」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 やわらかさと複雑さから考える生物普遍性
3. 学会等名 日本哲学会第77回大会 学協会シンポジウム「生命とは何か？」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taihei Fujimori, Akihiko Nakajima, Nao Shimada, Satoshi Sawai
2. 発表標題 Contact activation of locomotion and chemotaxis dictate cell segregation in Dictyostelium
3. 学会等名 ASCB EMBO 2018 meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中島昭彦、石田元彦、藤森大平、澤井 哲
2. 発表標題 Cell-size dependent polarity dynamics revealed by high-throughput imaging and machine learning analysis
3. 学会等名 第56回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daisuke Imoto, Nen Saito, Satoshi Sawai
2. 発表標題 Phase-field modeling of complex cell deformation and multi-cellular motion
3. 学会等名 第56回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本田玄
2. 発表標題 Exploring the basic law that determines the shape of fast moving cells
3. 学会等名 第56回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 島田奈央、藤城美奈、澤井 哲
2. 発表標題 Optgenetic analysis of small GTPases in cell migration
3. 学会等名 日本細胞性粘菌学会第8回例会山口大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中島昭彦、水沼周子、藤森大平、石田元彦、澤井哲
2. 発表標題 細胞サイズ依存的な細胞極性動態
3. 学会等名 日本細胞性粘菌学会第8回例会山口大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本田玄、澤井 哲
2. 発表標題 強い基質接着条件で現れる扇形移動形態の解析
3. 学会等名 日本細胞性粘菌学会第8回例会山口大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中島昭彦、石田元彦、松本朱加、澤井 哲
2. 発表標題 A cell-size dependent polarity mechanism revealed by high-throughput imaging analysis of migrating cells
3. 学会等名 第70回細胞生物学会・第51回発生生物学会 合同年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 A machine learning and dynamical modeling approach to morphology landscape of migrating cells
3. 学会等名 1st International symposium on Interdisciplinary Approaches to Integrative Understanding of Biological Signaling Networks (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島昭彦
2. 発表標題 Search strategy in fast-migrating cells: direction sensing, memory, and polarity
3. 学会等名 Reinforcement Learning & Biological Intelligence: Learning from biology (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本田玄
2. 発表標題 強い基質接着条件で現れる細胞性粘菌の扇形移動形態の解析
3. 学会等名 定量生物の会第9回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田元彦
2. 発表標題 変動する誘引分子濃度勾配に対する好中球様HL60細胞の走化性の定量的解析
3. 学会等名 定量生物の会第9回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井元大輔、斉藤稔、澤井 哲
2. 発表標題 深層学習による細胞運動の形状解析
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Sawai
2. 発表標題 Spatio-temporal constraints on cellular sensing: what it means for universal biology
3. 学会等名 International Symposium of the origin of life ? synergy among the RNA : protein and lipid worlds (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Daisuke Imoto, Nen Saito, Satoshi Sawai
2. 発表標題 Phase-field Simulations of Multi-cellular Rotational Motion (ポスター賞受賞)
3. 学会等名 International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Gen Honda, Akihiko Nakajima, Satoshi Sawai
2. 発表標題 Imaging analysis of actin waves and cell polarity on microstructured surfaces
3. 学会等名 International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 細胞性粘菌の細胞ダイナミクス：振動、波、走化性
3. 学会等名 明治大学先端数理科学インスティテュート(MIMS)現象数理学拠点共同集会「時空間ダイナミクス～生命現象における時間変化を伴う空間秩序～」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 反応拡散とフェイズフィールドから読み解く細胞の変形ダイナミクス
3. 学会等名 第11回物性科学領域横断研究会(領域合同研究会)(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中島昭彦
2. 発表標題 走化性細胞遊走の時空間情報処理特性
3. 学会等名 2017年度応用数学会 数理医学サブシンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤森大平
2. 発表標題 細胞性粘菌における集団的細胞運動の一細胞レベル動態解析
3. 学会等名 第69回日本細胞生物学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石田元彦
2. 発表標題 Chemotactic analysis of neutrophil-like HL60 cells based on cells persistent polarity and immediate responsiveness to chemoattractant
3. 学会等名 第55回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 本田玄、中島昭彦、澤井哲
2. 発表標題 Actin waves and cell polarity regulated by substrate geometry
3. 学会等名 第55回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 入江陽一
2. 発表標題 Small GTPase F-actin and cell morphology dynamics in migrating cells under well-defined noisy chemoattractant gradients
3. 学会等名 第55回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井元大輔、斉藤稔、澤井哲
2. 発表標題 フェーズフィールド法による細胞性粘菌の形と運動のシミュレーション
3. 学会等名 第7回日本細胞性粘菌学会例会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤森大平
2. 発表標題 Contact followingとは何か？集団運動と細胞選別における役割
3. 学会等名 第7回日本細胞性粘菌学会例会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 入江陽一
2. 発表標題 cAMP勾配反転に伴う向き直り様式と低分子量GTPase動態の濃度変化依存性
3. 学会等名 第7回日本細胞性粘菌学会例会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 動く細胞の情報処理特性の理解に向けて
3. 学会等名 自然科学研究機構新分野創成センターシンポジウム「分野横断・分野融合研究による生命創成を探究する新しい科学の創成」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 澤井 哲
2. 発表標題 フェイズフィールドから読み解く細胞変形ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会・新学術領域ゆらぎと構造の協奏共催シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井元大輔、斉藤稔、澤井哲
2. 発表標題 細胞性粘菌の集団運動を表現するフェーズフィールドモデルの構築に向けて
3. 学会等名 軽井沢グラフと解析研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井元大輔、斉藤稔、澤井哲
2. 発表標題 フェーズフィールド法シミュレーションによる細胞のはいまわり運動
3. 学会等名 第7回日本生物物理学会関東支部会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本田玄、中島昭彦、澤井哲
2. 発表標題 基質表面の三次元形状によって方向づけられるアクチン波の伝播と細胞移動の生細胞画像解析
3. 学会等名 第7回日本生物物理学会関東支部会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 入江陽一
2. 発表標題 細胞性粘菌アメーバのcAMP勾配反転に対する細胞極性の制御
3. 学会等名 第7回日本生物物理学会関東支部会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 澤井 哲 藤森大平	4. 発行年 2019年
2. 出版社 羊土社	5. 総ページ数 4
3. 書名 「集団運動による自己組織的パターン形成」実験医学37(13)	

1. 著者名 神野圭太、近藤洋平、澤井哲	4. 発行年 2018年
2. 出版社 一般社団法人日本生物物理学会	5. 総ページ数 3
3. 書名 スケール不変な細胞間シグナリング (生物物理誌 58(6))	

1. 著者名 澤井 哲、中島昭彦	4. 発行年 2018年
2. 出版社 株式会社化学同人	5. 総ページ数 15
3. 書名 這いまわる細胞の走化性に関する定量生物学 (定量生物学 - 生命現象を定量的に理解するために - (小林徹也 編) 第6章)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	片桐 晃子 (Katagiri Koko) (00322157)	北里大学・理学部・教授 (32607)	