

平成 30 年 5 月 18 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2017

課題番号：25710022

研究課題名(和文) 生細胞イメージングに基づく情報の流れの推定

研究課題名(英文) Live cell imaging-based estimation of information processing

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) 19,500,000円

研究成果の概要(和文)：細胞は、細胞外刺激の時系列に埋め込まれている様々な情報を、いくつものシグナル経路を利用して選択的に処理していると考えられる。複雑かつ時々刻々と変化する環境情報から、細胞がいかに臨機応変な情報処理をおこなっているかの理解を目的として、細胞性粘菌の細胞運動についての、細胞内シグナル因子の局在や活性を、高精度の時空間系列データを取得し、加えて、微小流路観察系を用いた誘因物質濃度の時空間的制御によって、様々な入力刺激にたいする、応答パターンを特徴づけた。その結果、シグナル伝達経路の上流と下流の間に関係に、倍変化応答、適応性、時間応答についてのフィルター特性などが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The project aimed at analyzing and understanding how extracellular signals of various spatio-temporal complexes are encoded at the level of signal transduction pathways. We employed Dictyostelium cell migration as a test case to quantitatively measure, based on live-cell confocal fluorescence imaging, the relationship between the spatio-temporal profiles of extracellular ligand versus several of the major signaling components that are important in determining their migratory behaviors. We found several key important properties such as fold-change dependency, adaptation, rectification in the input-output relations.

研究分野：細胞生物物理学

キーワード：シグナル伝達 細胞運動 細胞性粘菌 定量的解析

## 1. 研究開始当初の背景

細胞が受け取る外部シグナルは、2 値的なデジタル信号ではなくて、様々な情報を含んだアナログ信号である。そのような複雑かつ時々刻々と変化する環境情報から、状況に合わせた適切な応答を出力する臨機応変な情報処理メカニズムを細胞は有していると考えられる。外部刺激と細胞のシグナル伝達経路は 1 刺激 1 伝達経路といった線形の関係がなく、刺激の時系列に埋め込まれている様々な情報を、いくつもの経路を利用して選択的に処理していることが明らかになりつつある。しかしながら、並列的な経路をもつ細胞内シグナル伝達のデータ取得方法や、汎用的かつ客観的なデータ解析手法が確立しているとは言い難く、細胞の並列的情報処理メカニズムの多くが謎に包まれている。

## 2. 研究の目的

時々刻々と変化する複雑な環境情報に対して臨機応変な出力を生み出す細胞の情報処理特性を明らかにする。真核細胞の走化性シグナル伝達を例にとり、微細加工流路による外部入力制御と 1 細胞イメージングから高精度の時空間系列データを取得する。得られたデータに対して情報理論的、統計的解析をおこない、走化性誘因物質濃度のどのような側面(濃度差、周波数、平均値、ゆらぎなど)が、どの伝達経路に選択的に埋め込まれているのかを特徴付ける。生化学反応ネットワークの汎用的なデータ取得方法と情報処理の効率や冗長性、情報の流れを特徴づける普遍的解析手法の構築を目指す。

## 3. 研究の方法

1 細胞のライブイメージングによりシグナル伝達の各経路についての高精度の時空間系列データを取得する。そのために、微小流路観察系を用い、誘因物質濃度を高い精度で時空間的に制御し、様々な入力刺激を実現した。具体的には、微小流路にバッファと cAMP 溶液を二股チャンネルからそれぞれ送液して層流を形成し、拡散によって 2 層流の境界に cAMP 濃度勾配を作成する。同時に、共焦点蛍光顕微鏡下におけるタイムラプス測定によって、伝達経路の上流と下流にあたる因子の局在や活性の変動を、高い時間空間分解能で同時追跡する。このために、これまで我々が解析してきた経路についての可視化プローブに加えて、新規のプローブも作成する。得られたデータに対して、シグナルの相関を数値化し、走化性運動制御の理解、また未知のシグナル経路の推定に役立てる。

## 4. 研究成果

活性型 Ras に選択的に結合するヒトの Raf-1

タンパク質の Ras 結合ドメイン(RBD)に赤色蛍光タンパク質 RFP を融合させたもの、ならびに、アクチン結合ペプチドに GFP を融合させた RFP-Raf-1RBD の両方を共発現させた細胞を作成した。また、Ras と下流のアクチン重合を同時測定するために、これまで利用してきた LimE Δ コイルにかわり、酵母のアクチン結合部位由来の LifeAct 蛍光プローブの導入をおこなった。加えて、Rac 活性のプローブとして PakBCRIB-GFP ドメイン、PIP3 のプローブとして PH ドメイン-GFP、Scar/WAVE 複合体の活性化のプローブとして HSPC300-GFP を採用し、これらと蛍光タンパクを有効したものとして lifeact-RFP を同時発現する細胞を作成した。また、3 波長以上の同時測定を可能にするため、青色蛍光分子 ATTO425 を cAMP 溶液と混合し、細胞外 cAMP 濃度の指標とする手法の開発、近赤外側に蛍光波長をもつ蛍光タンパク、およびそれを可視化するための光学系の導入をおこなった。

細胞外 cAMP の濃度を時間と空間で自在に変更できる微小流路をもちいて制御し、RBD-FP の可視化から、Ras の一過的な活性化(膜局在)を測定した。その結果、細胞外 cAMP の絶対濃度にたいして、Ras の活性化のピーク値が変化すること、またマイクロモル濃度領域では、適応後の Ras 活性が元のレベルにまで戻らず、細胞外 cAMP の絶対濃度に依存する形で上昇することがわかった。この不完全な適応の度合いと細胞外 cAMP との関係解析したところ、シグモイド的な入出力関係を示し、かつその EC50 は、数 μM と、cAMP レセプターのリン酸化が示す入出力関係に近い関係をもっていた。また Ras の下流にある PI3 キナーゼ活性を、PIP3 に選択性の高い PH ドメインと蛍光タンパクによって可視化し、これと cAMP 濃度変化、下流の細胞質 cAMP 濃度変化を FRET で同時測定した。その結果、これらの経路は細胞外 cAMP の相対濃度にたいして同様の一過的応答をしめすことがわかった。また、この倍変化型の応答特性は、細胞外 cAMP を周期的な進行波刺激として与えた際にもみられ、細胞性粘菌の集合時の cAMP 波の頑強性と関係していることが強く示唆された。

また、細胞運動については、細胞外 cAMP 濃度、活性型 Ras と F-actin、もしくは活性型 Rac と F-actin の時空間変動を 3 波長で経時的に共焦点顕微鏡によって測定し、その詳細を定量的に解析した。その結果、ある一定の条件においては、細胞の運動やアクチンとの運動は Ras 活性よりも Rac の方が強いことが明らかになった。勾配反転地の相対濃度変化と応答との関係をより定量的に解析した。その結果、平均的に濃度が上昇している場合と、濃度が減少している場合で、応答の特徴にバイアスがかかっていることが明らかになった。また、空間的に一様な cAMP の時間変動への Rac の応答を測定した結果、これまでに当方が報告している Ras の応答とは、適

応性と濃度依存性について異なる特性をもっていることが明らかになった。さらにチャンパーの天井高を工夫することで、Rac の上流の Scar/WAVE 複合体の活性化をHSPC300-GFP の局在によって可視化し、これがF-actin の生成のタイミングの場所と極めて高い相関を示していることが明らかになった。こうした解析から細胞運動の多因子要因をいかに紐解くかについて、多くの手がかりが得られていおり、体系的な解析への今後発展が期待される。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① K. Kamino, Y. Kondo, A. Nakajima, M. Honda-Kitahara, K. Kaneko, S. Sawai, “Fold-change detection and scale-invariance of cell-cell signaling in social amoeba” *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 114(21): E4149-E4157. (2017) 査読有, DOI: 10.1073/pnas.1702181114
- ② A. Nakajima, M. Ishida, T. Fujimori, Y. Wakamoto, S. Sawai, “The Microfluidic lighthouse: an omnidirectional gradient generator” *Lab Chip* 16, 4382-4394. (2016) 査読有, DOI: 10.1039/C6LC00898D
- ③ S. Kuwana, H. Senoo, S. Sawai, M. Fukuzawa, “A novel, lineage-primed prestalk cell subtype involved in the morphogenesis of *D. discoideum*” *Dev. Biol.* 416(2), 286-299. (2016) 査読有, DOI: 10.1016/j.ydbio.2016.06.032
- ④ F. Fukujin, A. Nakajima, N. Shimada and S. Sawai, “Self-organization of chemoattractant waves in *Dictyostelium* depends on F-actin and cell-substrate adhesion” *J. Roy. Soc. Interface* 13(119), 20160233. (2016) 査読有, DOI: 10.1098/rsif.2016.0233
- ⑤ A. Nakajima, S. Ishihara, D. Imoto S. Sawai, “Rectified directional sensing in long-range cell migration” *Nat. Commun.* 5, 5367. (2014) 査読有, DOI: 10.1038/ncomms6367
- ⑥ K. Fujimoto and S. Sawai, “A Design Principle of Group-level Decision Making in Cell Populations” *PLoS Comput. Biol.* 9(6): e1003110. (2013) 査読有, DOI: 10.1371/journal.pcbi.1003110
- ⑦ J. A. Brzostowski, S. Sawai, O. Rozov, X. Liao, D. Imoto, C. A. Parent and A. R. Kimmel

“Phosphorylation of chemoattractant receptors regulates chemotaxis, actin re-organization, and signal-relay” *J. Cell Sci.* 126, 4614-4626. (2013) 査読有, DOI: 10.1242/jcs.122952

[学会発表] (計 50 件)

- ① 澤井 哲, 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, 「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」2018 年 3 月 22 日. 招待講演 (場所)
- ② 澤井 哲, 自然科学研究機構新分野創成センター合同シンポジウム『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』, 「動く細胞の情報処理特性の理解に向けて」2018 年 3 月 15 日. 招待講演 (自然科学研究機構生理学研究所)
- ③ 入江陽一, 第 7 回日本生物物理学会関東支部会, 「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」2018 年 3 月 14 日. 口頭発表 (東京大学駒場キャンパス)
- ④ 本田玄, 中島昭彦, 澤井 哲, 第 7 回日本生物物理学会関東支部会, 「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」2018 年 3 月 14 日. 口頭発表 (東京大学駒場キャンパス)
- ⑤ 井元大輔, 斉藤稔, 澤井 哲, 第 7 回日本生物物理学会関東支部会, 「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」2018 年 3 月 14 日. 口頭発表 (東京大学駒場キャンパス)
- ⑥ 藤森大平, 新学術領域ゆらぎと構造の協奏若手研究会『統計物理とその周辺』, “cell sorting during *Dictyostelium* development” 2018 年 3 月 2 日. 口頭発表 (東京大学本郷キャンパス)
- ⑦ 本田玄, 中島昭彦, 澤井 哲, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium, “Imaging analysis of action waves and cell polarity on microstructured surfaces” 2017 年 11 月 20-22 日. ポスター発表 (仙台国際センター)
- ⑧ 澤井 哲, 第 11 回物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会), 「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」2017 年 11 月 17 日. 招待講演 (東京大学 物性研究所)
- ⑨ 入江陽一, 第 7 回日本細胞性粘菌学会例会, 「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」

2017年10月21-22日. ポスター発表(立命館大学びわこ・くさつキャンパス)

- ⑩井元大輔, 齊藤稔, 澤井 哲, 第7回日本細胞性粘菌学会例会, 「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」 2017年10月20-21日. 口頭発表・ポスター発表(立命館大学びわこ・くさつキャンパス)
- ⑪入江陽一, 第55回日本生物物理学会年会, “Small GTPase, F-actin and cell morphology dynamics in migrating cells under well-defined noisy chemoattractant gradients” 2017年9月19-21日. ポスター発表(熊本大学黒髪北地区)
- ⑫中島昭彦, 2017年度応用数理学会 数理医学サブシンポジウム, 「走化性細胞遊走の時空間情報処理特性」 2017年9月8日. 招待講演(武蔵野大学有明キャンパス)
- ⑬本田玄, 中島昭彦, 澤井 哲, 新学術領域『ゆらぎと構造の協奏』第4回領域研究会, “Actin waves and cell polarity on microridges” 2017年6月23-24日. ポスター発表(東京大学本郷キャンパス)
- ⑭澤井 哲, 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～』, 「細胞性粘菌の細胞ダイナミクス: 振動、波、走化性」 2017年6月3日. 招待講演(明治大学中野キャンパス)
- ⑮澤井 哲, International Symposium of the origin of life – synergy among the RNA, protein and lipid worlds, “Spatio-temporal constraints on cellular sensing: what it means for universal biology” 2017年5月30日. 招待講演(Graduate School of Mathematical Sciences, Tokyo Univ., Tokyo, Japan)
- ⑯澤井 哲, JST ERATO 野村集団微生物制御プロジェクト第4回 ERATO 学術セミナー, 「細胞性粘菌にみる微生物の集団性・振動、波、走化性」 2017年2月6日. 招待講演(筑波大学 総合研究棟)
- ⑰澤井 哲, 第39回日本分子生物学会年会シンポジウム「シグナル伝達における時間情報のコーディングシステム」, 「走化性における適応応答依存的な時間情報コーディング(2AS15-5)」 2016年12月1日. 招待講演(パシフィコ横浜)
- ⑱澤井 哲, 第54回日本生物物理学会 シンポジウム, 「マイクロ流体デバイスを用いた細胞性粘菌の集団的細胞運動の解析」

2016年11月25日. 招待講演(つくば国際会議場)

- ⑲澤井 哲, RIMS 共同研究 研究集会『ミクロな振る舞いと集団的パターン形成に係る階層的構造の解明』, “Microfluidic analysis of collective cell migration in Dictyostelium.” 2016年9月12日. 招待講演(数理解析研究所)
- ⑳Satoshi Sawai, The 26th IUPAP International conference on Statistical Physics (STATPhys26), “Microfluidic analysis of collective cell migration during contact-following in Dictyostelium” 2016年7月21日. 招待講演(Palais des Palais des Congres, Lyon, France)
- ㉑澤井 哲, 第2回関東非線形非平衡バイオソフトマターセミナー, 「細胞の巧みさと非平衡系のパターン形成」 2016年7月2日. 招待講演(明治大学 駿河台キャンパス)
- ㉒澤井 哲, 第68回日本細胞生物学会年会 ミニシンポジウム, “Microfluidic analysis of persistence and reorientation of cell migration during contact-following in Dictyostelium” 2016年6月16日. 招待講演(京都テルサ)
- ㉓澤井 哲, 生命動態システム科学四拠点・CREST・PRESTO・QBic 合同シンポジウム『生命動態の分子メカニズムと数理』, “Dynamics of contact following in Dictyostelium”, 2016年3月25-26日. ポスター発表(シェラトンホテル広島)
- ㉔Akihiko Nakajima, 4th Annual Winter Q-Bio Meeting, “Delineating temporal and spatial aspects of directional sensing in migrating cells” 2016年2月17日. 口頭発表(Oahu – Sheraton Waikiki, Hawaii)
- ㉕Taihei Fujimori, 4th Annual Winter Q-Bio Meeting, “Quantitative analysis of contact following in Dictyostelium cells”, 2016年2月14-20日. ポスター発表(Oahu – Sheraton Waikiki, Hawaii)
- ㉖澤井 哲, 基生研研究会『物理学は生物現象の謎を解けるか』, 「細胞性粘菌にみる形態形成の溯源的性質 – 接触追従と回転運動」, 2016年1月6日. 招待講演(基礎生物学研究所)
- ㉗中村 允, 第38回日本分子生物学会年会・第88回日本生化学大会合同大会(BMB2015), 「細胞性粘菌のアクチン波にともなう膜変形と BAR ドメインタンパクの局在」, 2015年12月3日. 口頭発表及

びポスター発表 (神戸ポートアイランド)

- ⑳ 澤井 哲, 第 38 回日本分子生物学会年会・第 88 回日本生化学大会合同大会 (BMB2015), 「細胞の集団的運動を理解するための構成的・定量的アプローチ」, 2015 年 12 月 2 日. 招待講演 (神戸ポートアイランド)
- ㉑ Akihiko Nakajima, 16<sup>th</sup> International Conference on Systems Biology (ICSB2015), “Dissecting temporal and spatial information for direction sensing in migrating cells”, 2015 年 11 月 24 日. 招待講演 (Biopolis, Singapore)
- ⑳ 藤森 大平, QBIC2015 “High-Dimensional data for the design principles of life”, “Leading edge dynamics during collective migration of Dictyostelium cells”, 2015 年 8 月 26 日. 口頭発表 (理化学研究所生命システム研究センター)
- ㉓ 澤井 哲, International Symposium on Synergy of Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015 (SFS2015), “Chemotaxis and Contact-Mediated Ordering of Directionality in Aggregating Cells”, 2015 年 8 月 23 日. 招待講演 (京都大学芝蘭会館)
- ㉔ Satoshi Sawai, Focus Meeting of the Kyoto Winter School for Statistical Mechanics: From Non-equilibrium Fluctuations to Active Matter, “Collective movement of amoeboid cells driven by attachment-dependent ordering of directionality” 2015 年 2 月 16 日. 招待講演 (京都大学 益川ホール)
- ㉕ Satoshi Sawai, The 59th Annual Biophysical Society Meeting Symposium “Emergent Properties and Collective Behaviors of Complex Systems”, “Integration of space and time information in long-range cell migration” 2015 年 2 月 8 日. 招待講演 (Baltimore Convention Center, Baltimore MD, USA)
- ㉖ 澤井 哲, 国際高等研究所 研究プロジェクト『分子基盤に基づく生体機能への揺らぎとダイナミックネットワークの解明 2014 年度第 1 回研究会』, 「細胞運動にみる興奮性の時空間ダイナミクス」 2014 年 12 月 14 日. 招待講演 (国際高等研究所)
- ㉗ 澤井 哲, 第 24 回非線形反応と協同現象研究会, 「整流作用と細胞集合の協同性」 2014 年 12 月 6 日. 招待講演 (東京電機大学 東京千住キャンパス)
- ㉘ Satoshi Sawai, Mechano-Biology Institute-Japan Joint Symposium on

“Mechanobiology of Development and Multicellular Dynamics”, “Collective migration and rectified directional sensing.” 2014 年 12 月 4 日. 招待講演 (National University of Singapore, Singapore)

- ㉙ Satoshi Sawai, 4th Symposium on Artificial Life and Biomimetic Functional Materials, “Integration of temporal and spatial information in eukaryotic gradient sensing”, 2014 年 11 月 28 日. 招待講演 (東京大学 駒場 I キャンパス)
- ㉚ 澤井 哲, バイオイメージング学会第 23 回学術集会 シンポジウム 1『生命・イメージング・データベース』, 「階層をつなぐ細胞ダイナミクス」 2014 年 9 月 4 日. 招待講演 (大阪大学 銀杏会館)
- ㉛ 澤井 哲, 日本物理学会科学セミナー『非平衡の世界 —凝縮系から地震、経済、生命まで』, 「生物の非平衡構造と時空間ダイナミクス」 2014 年 8 月 7 日. 招待講演 (東京大学 駒場 I キャンパス 数理科学研究科)
- ㉜ 澤井 哲, 京都大学 時空間情報イメージング拠点 平成 26 年度生命動態システム科学ジョイントコース『発生・細胞生物学・システム生物学コース』セミナー, “Cellular Sensing of Space and Time” 2014 年 4 月 25 日. 招待講演 (京都大学 医学部記念講堂)
- ㉝ 福神史仁, 澤井 哲, 定量生物の会第 6 回年会, 「細胞集団の cAMP 応答におけるアクチン重合の役割」, 2013 年 11 月 22-24 日. ポスター発表 (大阪大学吹田キャンパス)
- ㉞ 福神史仁、澤井 哲, 日本生物物理学会第 51 回年会, “Roles of actin polymerization in the collective cAMP oscillations” 2013 年 10 月 28 日 ポスター発表 (国立京都国際会館)
- ㉟ 澤井 哲, 理研細胞システムコロキウム, 「細胞機能と自己組織化現象」 2013 年 11 月 08 日. 招待講演 (理化学研究所和光キャンパス)
- ㊱ 澤井 哲, 第 36 回分子生物学会年会ワークショップ, 『生命における自己組織化のメカニズム』, 「細胞性粘菌の運動と細胞間シグナリングにおける自己組織化の役割」 2013 年 12 月 06 日. 招待講演 (神戸ポートアイランド)
- ㊲ 澤井 哲, 大阪大学蛋白質研究所セミナー『細胞が集団になって初めて発現する機能』, 「細胞の運動性と走化性誘引場の自己組織化」 2013 年 11 月 28 日. 招待講演 (大

阪大学吹田キャンパス)

- ④澤井 哲, 時間生物学会サテライトシンポジウム『生物リズム現象の数理フロンティア』, 「走化性の場とリズム」2013年11月11日. 招待講演 (近畿大学東大阪キャンパス)
- ④澤井 哲, 細胞を創る研究会 6.0, 「アメーバ状の膜変形に関わる自己組織化ダイナミクス」2013年11月15日. 招待講演 (慶応大学鶴岡キャンパス)
- ④Satoshi Sawai, Edward C. Cox Symposium, “Singularity in space and time in single-cell and multicellular dynamics” 2013年10月19日. 口頭発表 (Princeton University)
- ④Satoshi Sawai, International Workshop From Soft Matter to Protocell, “Analysis and manipulation of self-organizing lipid signaling” 2013年09月18日. 招待講演 (東北大学片平キャンパス)
- ⑤Akihiko Nakajima and Satoshi Sawai, The 61st NIBB conference Cellular community in mammalian embryogenesis, “How cells get together with right tempo and orientation -an example from social amoeba” 2013年07月10日. 招待講演 (岡崎コンファレンスセンター)

[図書] (計6件)

- ①石原秀至 澤井 哲「細胞内反応場のゆらぎと細胞運動」物理科学雑誌パリティ『特集 ゆらぎと構造からみる非平衡の世界』32(11)p.22-25. 丸善出版 (2017)
- ②澤井 哲「時空間的なシグナルの検出とは何か —這いまわる細胞の走化性を例に」実験医学増刊『生命科学で使えるはじめての数理モデルとシミュレーション』35(5) (鈴木 貴、久保田浩行 編) p.195-199. 羊土社 (2017)
- ③中島昭彦 石原秀至 澤井 哲「動く細胞が読み取る時間と空間：走化性のパラドクスと整流作用」生物物理学会誌 56(2) p.98-101. 生物物理学会 (2016) (カバーイラスト)
- ④ Akihiko Nakajima & Satoshi Sawai “Dissecting Spatial and Temporal Sensing in Dictyostelium Chemotaxis Using a Wave Gradient Generator in Chemotaxis: Methods and Protocols 2nd Ed. (ed. Dale Hereld, Tian Jin) Methods in Molecular Biology 1407, 107-122. Springer (2016)

⑤Koichi Fujimoto & Satoshi Sawai “Collective decision-making and oscillatory behaviors in cell populations” in Engineering of Chemical Complexity (A. Mikhailov & G. Ertl ed.) p.279-297. World Scientific (2013)

⑥澤井 哲 石原秀至 中島昭彦 「興奮系の自己組織化現象からみる細胞動態」実験医学 31(8) p. 1217-1223. 羊土社 (2013)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称：流体流制御装置及び流体流制御方法  
発明者：澤井 哲、中島昭彦  
権利者：国立大学法人 東京大学  
種類：特許  
番号：特許願 2016-087745  
出願年月日：2016年4月26日  
国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

<http://sawailab.c.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 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