

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：63801

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05529

研究課題名（和文）物理計測と理論モデル構築によるクロマチンポテンシャルの理解

研究課題名（英文）Quantification of physical parameters and construction of theoretical models to understand Chromatin Potential

研究代表者

木村 暁（Kimura, Akatsuki）

国立遺伝学研究所・遺伝メカニズム研究系・教授

研究者番号：10365447

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 90,500,000円

研究成果の概要（和文）：本計画研究では、転写のされやすさの潜在性に関与すると思われる核内でのクロマチンの運動性について、細胞核の大きさの関数として定式化することに成功した(Phys Rev Lett, 2022)。この「クロマチン運動方程式」と名付けた方程式はポリマー物理学に基づくものであり、生きた細胞内でのクロマチンの挙動を物理学的に説明できることを示した重要な成果である。本成果は、研究代表者である木村暁らによる物理計測と、分担者である坂上による理論モデル構築を、相互にフィードバックさせながら共同研究を進めたことにより初めて達成が可能になったものであり、領域を組織した意義を示すものでもある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義は、生きた細胞内でのクロマチンの運動をポリマー物理学の理論で定式化できたことにある。これにより、本研究に用いた線虫初期胚以外の細胞核におけるクロマチンの運動性を予測することが可能となる。今後、この方程式の普遍性を検討し、方程式に従わないクロマチンの運動について集中的に解析することにより運動制御のさらなる理解につながる。また、この方程式を基盤として、クロマチンポテンシャルの他の性質をクロマチンの状態の関数として定式化することにつながることを期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this project, we focused on the mobility of chromatin, which is expected to influence the potential activity of chromatin. We succeeded in formulating the motility of chromatin in the nucleus as a function of the size of the cell nucleus (Phys Rev Lett, 2022). This equation is based on polymer physics. This is an important achievement demonstrating that the behavior of chromatin in living cells can be explained with a polymer physics theory. This result was made possible by a close collaboration with mutual feedback between the physical measurements by the Kimura group, and the construction of the physics theory by the Sakaue group.

研究分野：細胞生物学

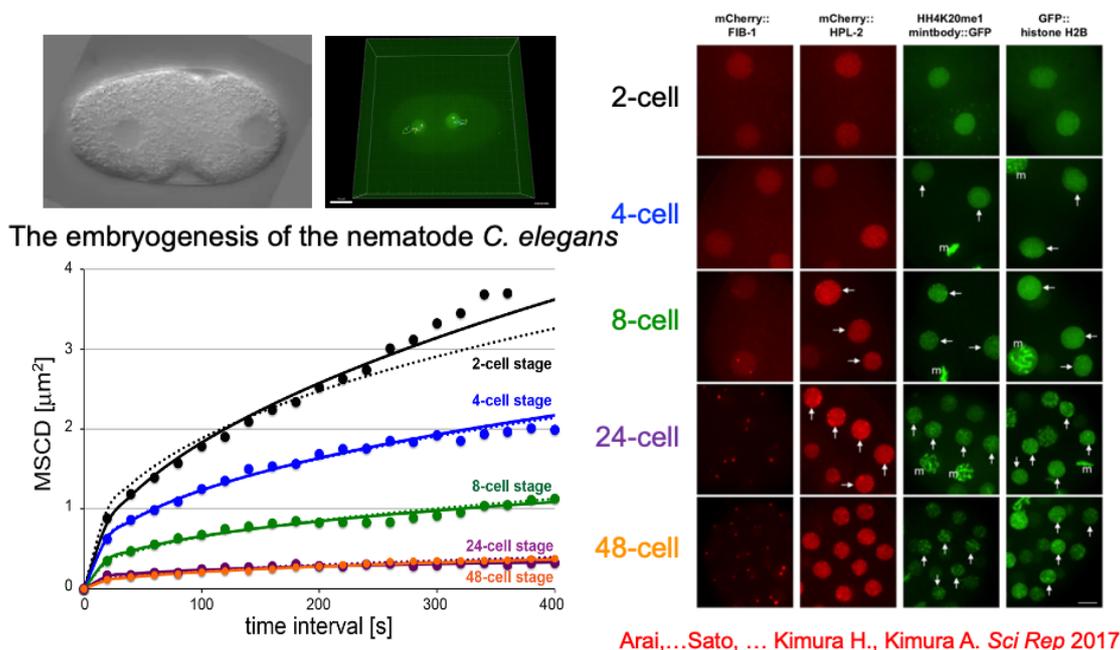
キーワード：細胞核 クロマチン構造 ポリマー物理学 線虫 発生

1. 研究開始当初の背景

本新学術領域では、転写のされやすさの潜在性を規定するクロマチンポテンシャルを計測し、モデル化することを目標の一つとして設定していた。その具体的な内容として、転写のされやすさの潜在性を、クロマチンの状態の関数として定式化することが掲げられていた。

本計画研究では定式化の対象として、クロマチンの運動に着目した。クロマチンは細胞核内でダイナミックに運動している。報告者らは研究開始前の段階で、クロマチンの運動の度合いが初期胚発生に伴って低下することを見出していた(Arai et al. *Sci Rep*, 2017) (図1)。この運動の低下は、胚性遺伝子の転写活性化や、ヘテロクロマチンや核小体などの転写に関連する核内ドメインの形成と並行して起きることから、転写を制御する新たな要因であることが疑われる。クロマチンの運動が転写をどのように制御するかはわかっていない。その理解のためにも、クロマチンの運動を定式化し、物理学的に理解することが重要と考えた。

図1：線虫の初期胚発生に伴って、クロマチンの運動性が低下する。このクロマチンの運動性の低下は、ヘテロクロマチンや核小体などの転写に関連する核内ドメインの形成と並行して起きる。



2. 研究の目的

本研究の目的は、線虫の胚発生に伴うクロマチンの運動性の低下のメカニズムを、物理学的視点から明らかにすることである。胚発生に伴い、クロマチンを収納する細胞核のサイズが低下することから、クロマチンの運動と核サイズの実験的に、定量的に明らかにすることを第一の目的とした。その上で、クロマチンをポリマー物理学の観点からモデル化し、核サイズとの関係を定式化することを目指した。

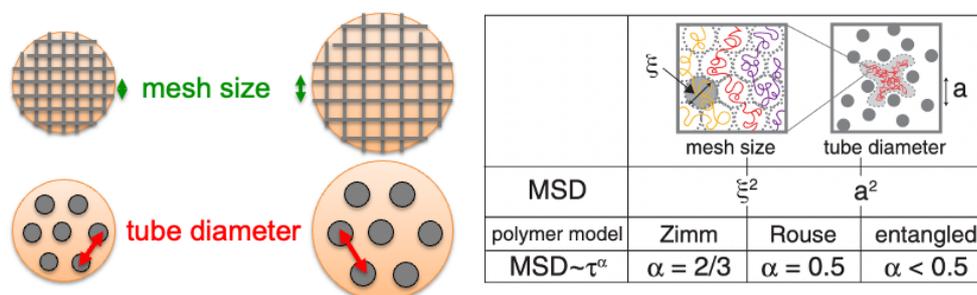
3. 研究の方法

クロマチンの運動は、大腸菌の *lacO* 遺伝子の DNA 配列を染色体に挿入した線虫において、*lacO* 配列に結合する大腸菌 LacI タンパク質に緑色蛍光タンパク質 GFP を融合させたタンパク質を発現させ、染色体上で蛍光を発する輝点を追跡することによって、可視化・定量化した。細胞核のサイズとクロマチンの運動の関係性を実験的に明らかにするために、胚発生に伴って生じる多様なサイズを持つ核の中での運動を計測した。さらに、*ima-3*, *ani-2*, *C27D9.1* 遺伝子を RNA 干渉法によりノックダウンすることにより、同じ発生ステージでも核を大きく、あるいは

小さくすることによって発生ステージに依存しない核サイズの操作を行った。クロマチンの動きを定量化する際には、核自体の動きの影響を排除する必要がある。本研究では、激しく動く核内でのクロマチンの動きを(核の動きの影響を排除して)定量化する新手法を開発して、用いた。なお、クロマチンの動きを定量的に示す指標としては MSD (Mean Square Displacement、平均二乗変位)を用いた。

クロマチンの動きを物理学的に理解するにあたっては、ポリマー物理学の方法論を用いた。局所的なクロマチンの運動の範囲は、核の大きさに比べて小さかったので、核の大きさには直接的には制限されないことがわかった。一方、ポリマー物理学によれば、(準希薄溶液中の)ポリマーの運動性は、ポリマーが作る網目(mesh)や、ポリマーの絡まりによってできる仮想的なチューブ(tube)のサイズによって規定されることがわかっている(図2)。このことから、生細胞のクロマチンにおいても網目やチューブのサイズを物差しとして理解できるのではないかと着想し、理論構築を行った。

図2：ポリマーが作る網目サイズ(mesh size)とチューブ径(tube diameter)のイメージ(左)。核(オレンジの円)が小さくなると、クロマチンが作るポリマー(灰色)の網目の間隔も小さくなる。また、クロマチンの絡まりによって、大きなポリマーの塊が通り抜けられない仮想的なチューブが生じてポリマーの動きを制限する。これらの影響で、ポリマー物理学では、運動の大きさが網目サイズより超えるかどうか、チューブ径を超えるかどうかで、動き(MSD)の時間間隔(τ)に対する指数 α が変わることが知られている(右)。



4. 研究成果

本計画研究では、転写のされやすさの潜在性に関与すると思われる核内でのクロマチンの運動性について、細胞核の大きさの関数として定式化することに成功した(Yesbolatova, Arai, *Sakaue, *Kimura A, *Phys Rev Lett*, 2022)。すなわち、さまざまな発生ステージで異なるクロマチンの運動性が、網目サイズ(mesh size)で規格化することにより、統一的な方程式で記述できることを発見した(図3)。この「クロマチン運動方程式」と名付けた方程式はポリマー物理学に基づくものであり、生きた細胞内でのクロマチンの挙動を物理学的に説明できることを示した重要な成果である。本成果は、研究代表者である木村暁らによる物理計測と、分担者である坂上による理論モデル構築を、相互にフィードバックさせながら共同研究を進めたことにより初めて達成が可能になったものであり、領域を組織した意義を示すものでもある。

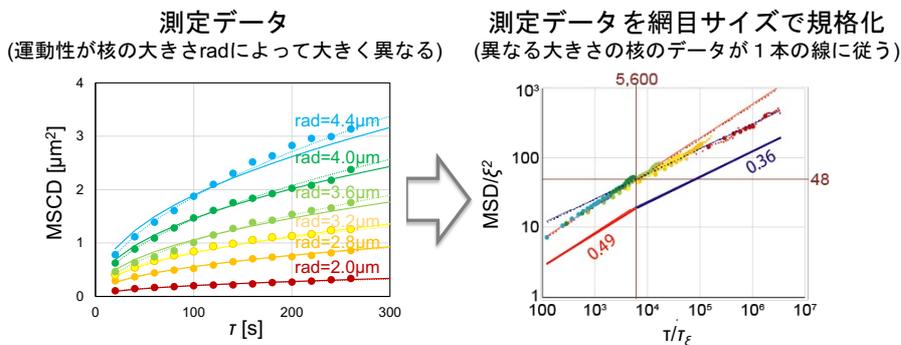
本成果に関しては和英両方において総説論文を執筆し、広報に努めた(*Sakaue & *Kimura A, *Results Probl Cell Differ*, 2022; 坂上、正木、木村暁、*月刊細胞* 2020; 坂上、市原、木村暁、*生体の科学* 2023)。その後、本研究で提唱した「核内でのクロマチンのメッシュサイズ(網目の大きさ)」を実験と理論を組み合わせ推定することにも成功している(木村暁と坂上の共同研究、投稿準備中)。前述の新しい解析手法の理論的基盤についても研究を進めた(坂上ら、投稿準備中)。本研究を発展させることにより、クロマチンポテンシャルをクロマチンの状態の関数として定式化することにつながると期待できる。現在も、木村宏計画研究との共同で、クロマチン運動を表す方程式に、定量化した転写の活性を加える研究を進めている。

このほか、本計画研究では木村暁が実験計測と物理シミュレーションを用いて、クロマチンの細胞内ダイナミクスを説明する理論モデルの構築を進めた(Kondo & *Kimura A, *Mol Biol Cell*, 2019; Medina, Iemura, Kimura A, *Tanaka, *Biomed Res* 2021; Fujita, Kimura A, *Yamashita, *EMBO Rep*, 2023)。このような実験と理論を統合した細胞ダイナミクスの理解についての教科書を和文(木村暁、工学社、2019)および英文(Kimura A. Springer Nature Singapore, 2022)でそれぞれ単著で刊行し、関連分野の研究と教育に尽力した。

また坂上は、DNA二重螺旋の階層構造に着目し、塩基対スケールでの多様な力学物性と、メソスケールモデルでのDNA物性を特徴づける持続長との定量的な関係を理論的に明らかにした(Fosado, Landuzzi, *Sakaue, *Soft Matter* 2021; Segers, Voorspoels, Sakaue, *Carlson, *J. Chem. Phys.* 2022; Fosado, Landuzzi, *Sakaue, *Phys. Rev. Lett.* 2023)。その他、国際的共同研究にて、酵素活性によるクロマチンのアクティブポリマーモデルの構築、解析を行なった(Put,

Sakaue, *Vanderzande, *Phys. Rev. E* 2019)。トポイソメラーゼの酵素活性をとりいれたメソスケールモデルのシミュレーションによる解析からトポイソメラーゼ誘起のマイクロ相分離構造を見出した(Das, Sakaue, Shivashankar, Prost, * Hiraiwa, *Elife* 2022)。山本公募班との領域内共同研究では、loop extrusion のダイナミクスを取り入れたクロマチンダイナミクスのモデルの構築を行い、その理論的な解析を行なった(*Yamamoto, Sakaue, Schiessel, *Eruophys. Lett.* 2019; *Yamamoto, Sakaue, Schiessel, *Nucleic Acids Res.* 2021)。

図3 : 主な成果 : さまざまな発生ステージで測定したクロマチンの運動性は核サイズによって異なる (左上)。しかし、それぞれの核サイズで見積もった mesh size (ξ)と対応する時間(τ_ξ)で規格化すると、異なる大きさの核の結果が一つの線に集約されることがわかった (右上)。このことは、クロマチンの動き(MSD)が核の大きさ(R)の関数として、定式化されることを示している(下)。



$$MSD(\tau, R) = \left(\frac{k_1^2}{k_2^\alpha} \right) \tau^\alpha R^{6-9\alpha} \quad \alpha = \begin{cases} 0.49 & (\tau/\tau_\xi \leq 5,600) \\ 0.36 & (5,600 \leq \tau/\tau_\xi) \end{cases}$$

k_1 はクロマチンの硬さや凝縮度を反映したパラメータ、 k_2 は核質の粘性を反映したパラメータ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計27件（うち査読付論文 26件 / うち国際共著 11件 / うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Sakaue Takahiro, Kimura Akatsuki	4. 巻 70
2. 論文標題 Scaling Relationship in Chromatin as a Polymer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Results Probl Cell Differ	6. 最初と最後の頁 263 ~ 277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-06573-6_8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujita Ikumi, Kimura Akatsuki, Yamashita Akira	4. 巻 24
2. 論文標題 A force balance model for a cell size dependent meiotic nuclear oscillation in fission yeast	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 EMBO reports	6. 最初と最後の頁 e55770
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15252/embr.202255770	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 Torisawa Takayuki, Kimura Akatsuki	4. 巻 12
2. 論文標題 Sequential accumulation of dynein and its regulatory proteins at the spindle region in the <i>Caenorhabditis elegans</i> embryo	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 11740
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-15042-8	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 Seirin-Lee Sungrim, Yamamoto Kazunori, Kimura Akatsuki	4. 巻 149
2. 論文標題 The extra-embryonic space and the local contour are crucial geometric constraints regulating cell arrangement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Development	6. 最初と最後の頁 dev200401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1242/dev.200401	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 Yesbolatova Aiya K., Arai Ritsuko, Sakaue Takahiro, Kimura Akatsuki	4. 巻 128
2. 論文標題 Formulation of Chromatin Mobility as a Function of Nuclear Size during <i>C. elegans</i> Embryogenesis Using Polymer Physics Theories	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 178101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.178101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Gutierrez Fosado Yair Augusto, Landuzzi Fabio, Sakaue Takahiro	4. 巻 130
2. 論文標題 Coarse Graining DNA: Symmetry, Nonlocal Elasticity, and Persistence Length	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 58402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.058402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Das Rakesh, Sakaue Takahiro, Shivashankar GV, Prost Jacques, Hiraiwa Tetsuya	4. 巻 11
2. 論文標題 How enzymatic activity is involved in chromatin organization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 eLife	6. 最初と最後の頁 e79901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7554/eLife.79901	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 該当する

1. 著者名 Segers Midas, Voorspoels Aderik, Sakaue Takahiro, Carlon Enrico	4. 巻 156
2. 論文標題 Mechanical properties of nucleic acids and the non-local twistable wormlike chain model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 234105 ~ 234105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0089166	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 CAMPOS MEDINA Manuel Alejandro、 IEMURA Kenji、 KIMURA Akatsuki、 TANAKA Kozo	4. 巻 42
2. 論文標題 A mathematical model of kinetochore-microtubule attachment regulated by Aurora A activity gradient describes chromosome oscillation and correction of erroneous attachments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biomedical Research	6. 最初と最後の頁 203 ~ 219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2220/biomedres.42.203	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 Yamamoto Tetsuya、 Sakaue Takahiro、 Schiessel Helmut	4. 巻 49
2. 論文標題 Slow chromatin dynamics enhances promoter accessibility to transcriptional condensates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nucleic Acids Research	6. 最初と最後の頁 5017 ~ 5027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/nar/gkab275	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 該当する

1. 著者名 Hayase Yumino、 Aonuma Hitoshi、 Takahara Satoshi、 Sakaue Takahiro、 Kaneko Shun'ichi、 Nakanishi Hiizu	4. 巻 104
2. 論文標題 Fold analysis of crumpled sheets using microcomputed tomography	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 25005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.104.025005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakaue Takahiro、 Michieletto Davide	4. 巻 -
2. 論文標題 Entanglement in Solution of Non-concatenated Rings	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Topological Polymer Chemistry	6. 最初と最後の頁 355 ~ 363
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-16-6807-4_22	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kimura Kenji, Kimura Akatsuki	4. 巻 31
2. 論文標題 Cytoplasmic streaming drifts the polarity cue and enables posteriorization of theCaenorhabditis eleganszygote at the side opposite of sperm entry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Molecular Biology of the Cell	6. 最初と最後の頁 1765 ~ 1773
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1091/mbc.E20-01-0058	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 Landuzzi Fabio, Nakamura Takenobu, Michieletto Davide, Sakaue Takahiro	4. 巻 2
2. 論文標題 Persistence homology of entangled rings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33529
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033529	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 該当する

1. 著者名 Gutierrez Fosado Yair Augusto, Landuzzi Fabio, Sakaue Takahiro	4. 巻 17
2. 論文標題 Twist dynamics and buckling instability of ring DNA: the effect of groove asymmetry and anisotropic bending	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 1530 ~ 1537
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0SM01812K	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Michieletto Davide, Sakaue Takahiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Dynamical Entanglement and Cooperative Dynamics in Entangled Solutions of Ring and Linear Polymers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Macro Letters	6. 最初と最後の頁 129 ~ 134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmacrolett.0c00551	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Torisawa Takayuki、Kimura Akatsuki	4. 巻 8
2. 論文標題 The Generation of Dynein Networks by Multi-Layered Regulation and Their Implication in Cell Division	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Cell and Developmental Biology	6. 最初と最後の頁 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fcell.2020.00022	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 Ito Yuma、Kimura Akatsuki	4. 巻 12
2. 論文標題 Session 1SEA: physics of chromatin dynamics at the 57th Biophysical Society of Japan meeting	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biophysical Reviews	6. 最初と最後の頁 265 ~ 266
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12551-020-00642-3	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 Yamamoto Tetsuya、Sakaue Takahiro、Schiessel Helmut	4. 巻 127
2. 論文標題 Loop extrusion drives very different dynamics for Rouse chains in bulk solutions and at interfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EPL (Europhysics Letters)	6. 最初と最後の頁 38002 ~ 38002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1209/0295-5075/127/38002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Caraglio Michele、Sakaue Takahiro、Carlon Enrico	4. 巻 22
2. 論文標題 Transition path times in asymmetric barriers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 3512 ~ 3519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9CP05659A	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakao-Kusune Sachi、Sakaue Takahiro、Nishimori Hiraku、Nakanishi Hiizu	4. 巻 101
2. 論文標題 Stabilization of a straight longitudinal dune under bimodal wind with large directional variation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 12903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.101.012903	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kondo Tomo、Kimura Akatsuki	4. 巻 30
2. 論文標題 Choice between 1- and 2-furrow cytokinesis in Caenorhabditis elegans embryos with tripolar spindles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Molecular Biology of the Cell	6. 最初と最後の頁 mbc.E19~01-0075
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1091/mbc.E19-01-0075	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 Carlton E.、Orland H.、Sakaue T.、Vanderzande C.	4. 巻 122
2. 論文標題 Effect of Memory and Active Forces on Transition Path Time Distributions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 11186~11194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b06379	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sakaue Takahiro	4. 巻 14
2. 論文標題 Topological free volume and quasi-glassy dynamics in the melt of ring polymers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 7507~7515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8SM00968F	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 Sakaue Takahiro	4. 巻 134
2. 論文標題 Statistical physics of ring polymers based on topological volume concept	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Reactive and Functional Polymers	6. 最初と最後の頁 150 ~ 155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.reactfunctpolym.2018.11.017	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 Saito Takuya, Sakaue Takahiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Inferring Active Noise Characteristics from the Paired Observations of Anomalous Diffusion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Polymers	6. 最初と最後の頁 2 ~ 2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/polym11010002	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 Put Stefanie, Sakaue Takahiro, Vanderzande Carlo	4. 巻 99
2. 論文標題 Active dynamics and spatially coherent motion in chromosomes subject to enzymatic force dipoles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 32421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.99.032421	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 17件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Akatsuki Kimura
2. 発表標題 Quantification and formulation of the effect of nuclear size on the mobility of chromatin in the <i>C. elegans</i> embryo.
3. 学会等名 The 30th Hot Spring Harbor International Symposium on Chromatin Potential in Development and Differentiation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiro Sakaue
2. 発表標題 Compressing a confined DNA: from nano-channel to nano-cavity.
3. 学会等名 CECAM workshop "Nanopore Translocation and Nanochannel confined Biopolymers: bridging theory and experiments" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiro Sakaue
2. 発表標題 Chromatin dynamics in C-elegans embryo: polymer physics approach.
3. 学会等名 Frontiers in theoretical Biophysics. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kimura A.
2. 発表標題 Theoretical reconstitution of the nuclear size dependency of chromatin motion quantified in the Caenorhabditis elegans embryo.
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of the Molecular Biology Society of Japan (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂上貴洋
2. 発表標題 Chromatin mobility controlled by chromatin concentration
3. 学会等名 第58回日本生物物理学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂上貴洋
2. 発表標題 パーシスタントホモロジーを用いた環状高分子濃厚溶液の解析
3. 学会等名 TDA-MI workshop 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sakaue T
2. 発表標題 Chromatin mobility controlled by chromatin concentration
3. 学会等名 2nd workshop on stochasticity and fluctuations in small systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂上貴洋
2. 発表標題 パーシスタントホモロジーを用いた環状高分子濃厚溶液の解析 2
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kimura A
2. 発表標題 Measurement of physical forces that position the nucleus at the cell center in <i>C. elegans</i> .
3. 学会等名 Chromosome Dynamics 2019: An international symposium on chromatin and chromosome stability (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村暁
2. 発表標題 細胞の構造計算と力学測定：線虫 <i>C. elegans</i> 胚における細胞核配置
3. 学会等名 「細胞を創る」研究会12.0 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kimura A
2. 発表標題 Architectonics of the cell, as a crossroad of physics and genetics.
3. 学会等名 The 57th Annual Meeting of the Biophysical Society Japan (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村暁
2. 発表標題 「力」に着目して分子の集団が細胞内の核配置を制御する仕組みを紐解く
3. 学会等名 第92回日本生化学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂上貴洋
2. 発表標題 クロマチンの高次構造とダイナミクス 高分子物理の視点から
3. 学会等名 第19回日本蛋白質科学会年会、第71回日本細胞生物学会大会 合同年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂上貴洋
2. 発表標題 Structure and dynamics of chromatin: perspective from polymer physics
3. 学会等名 The 57th Annual Meeting of the Biophysical Society Japan (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kimura A
2. 発表標題 Microtubule-dependent positioning of the nucleus in the C. elegans embryo
3. 学会等名 EMBO/EMBL Symposia: Microtubules: From Atoms to Complex Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村暁
2. 発表標題 遠心顕微鏡で細胞核を動かし、力を定量する
3. 学会等名 定量生物学の会第9回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sakaue T
2. 発表標題 Some Topics on Dynamics of Chromosomal Loci
3. 学会等名 The Arctic Biophysics Meeting on Epigenetics and Chromosome Dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sakaue T
2. 発表標題 Statistical Physics of Topologically Constrained Polymers
3. 学会等名 Polymer meets Topology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂上貴洋
2. 発表標題 環状高分子鎖濃厚系におけるトポロジーの効果
3. 学会等名 高分子学会講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村暁
2. 発表標題 二光子スピニングディスク顕微鏡を用いた線虫胚発生の低退色・低毒性イメージングの可能性
3. 学会等名 多次元生細胞イメージング研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Akatsuki Kimura	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer Nature Singapore	5. 総ページ数 144
3. 書名 Quantitative Biology - A Practical Introduction. Learning Materials in Biosciences	

1. 著者名 木村 暁	4. 発行年 2019年
2. 出版社 工学社	5. 総ページ数 127
3. 書名 細胞建築学入門	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>物理計測と理論モデル構築によるクロマチンポテンシャルの理解 http://www.nibb.ac.jp/potentia/member/kimuraa.html 国立遺伝学研究所細胞建築（木村）研究室 https://www.nig.ac.jp/nig/ja/research/organization-top/laboratories/kimura 青山学院大学理工学部物理科学科坂上研究室 http://www.agnes.aoyama.ac.jp/phys-math/sakaue/ 遺伝子の運動を支配する物理法則 - 細胞内の染色体の動きを表す数式を発見 - https://www.nig.ac.jp/nig/images/research_highlights/PR20220427.pdf</p>

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	坂上 貴洋 (SAKAUE TAKAHIRO) (30512959)	青山学院大学・理工学部・教授 (32601)	

	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
研究協力者	正木 紀隆 (MASAKI NORITAKA)	国立遺伝学研究所・遺伝メカニズム研究系・博士研究員 (63801)	
研究協力者	市原 沙也 (ICHIHARA SAYA)	国立遺伝学研究所・遺伝メカニズム研究系・博士研究員 (63801)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	イエスボラトヴァ アイヤ (YESBOLATOVA AIYA)	総合研究大学院大学・生命科学研究所・大学院生 (12702)	
研究協力者	木村 健二 (KIMURA KENJI)	国立遺伝学研究所・遺伝メカニズム研究系・特任助教 (63801)	
研究協力者	ランドゥジ ファビオ (LANDUZZI FABIO)	青山学院大学・理工学部・博士研究員 (32601)	
研究協力者	グティエレス フォサド ヤイール オーグスト (GUTIERREZ-FOSAD YAIR AUGUSTO)	青山学院大学・理工学部・博士研究員 (32601)	
研究協力者	乗添 祐樹 (NORIZOE YUKI)	青山学院大学・理工学部・プロジェクト助教 (32601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ベルギー	KU Leuven			
英国	University of Edinburgh			
ベルギー	KU Leuven			
米国	Marine Biological Laboratory			
ドイツ	Bayreuth University			