

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05250

研究課題名(和文)細胞のレオロジーが示す普遍性の理論的探索

研究課題名(英文)Theoretical study on the universal behaviors in cell rheology

研究代表者

好村 滋行(Komura, Shigeyuki)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号：90234715

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロレオロジーという新しい実験手法の開発とともに、細胞のレオロジーに関する知見が、世界的に大きく広がりつつある。本研究では、細胞のレオロジーが示す普遍性を理解するために、不均一系や非平衡系にも適用できるマイクロレオロジーの基礎理論を、ソフトマター物理学や非平衡物理学に立脚して構築した。それと同時に、生体膜を含む細胞系に適した新しいMRの手法を確立した。具体的には、(1)生体膜MRの基礎理論の確立、(2)多成分媒質中のアクティブMRの定式化、(3)MRによる非熱的ゆらぎの検出法の考案、の三つの研究成果を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：With the development of the new experimental technique called microrheology, many knowledges concerning cell rheology have been accumulating all over the world in the last decade. In this research project, with the aim to understand the universal behaviors in cell rheology within soft matter physics and nonequilibrium physics, we have developed fundamental theories for microrheology that is applicable to inhomogeneous and nonequilibrium systems. Furthermore, we have established a new microrheology method that is suitable for investigating mechanical responses in cells coated with biomembranes. In particular, we have established the followings: (i) basic theory for membrane microrheology, (ii) active microrheology in multi-component media, and (iii) detection of non-thermal fluctuations by using microrheology methods.

研究分野：ソフトマター物理

キーワード：マイクロレオロジー ソフトマター 細胞 異常拡散 揺動散逸定理 マイクロマシン マイクロスイマー ブラウン・ラチェット

1. 研究開始当初の背景

Mason らによるマイクロレオロジーという新しい実験手法の開発とともに、2000 年以降、細胞のレオロジー（物質の流動や変形を扱う学問）に関する知見が、世界的に大きく広がりつつあった。マイクロレオロジー（以下 MR と略す）とは、コロイド粒子などの微粒子のブラウン運動や、外力に対する応答を検出することによって、極めて微量の媒質の粘弾性を調べる手法である。細胞一個を対象とする MR の蓄積の結果、細胞は極めて多種多様であるにも関わらず、そのレオロジー的性質はある種の普遍性を示すという、驚くべき実験事実が Crocker ら (PNAS, 2007) によって報告された。それによると、細胞の弾性率はある周波数領域で冪的な周波数依存性をもち、特徴的な冪指数が見出された。しかし、なぜ細胞がそのような普遍性を示すかについては、まだ理論的に解明されていなかった。その大きな理由の一つは、細胞のような不均一かつ非平衡な系における MR の基礎理論が確立していなかったからである。実際のところ、細胞のレオロジーの普遍性を解明することは、ソフトマター物理学や非平衡物理学の本質的な問題と密接に関連している。

研究開始当初の MR では、「一般化された Stokes-Einstein の関係式 (GSER)」が成り立つことを前提としていた。それには二つの仮定が含まれており、一つは Stokes の抵抗法則の粘弾性体への非自明な拡張 (Stokes 要素)、もう一つは熱平衡状態における揺動散逸定理 (Einstein 要素) である。物質が均一かつ等方的であり、さらに熱平衡状態であれば、多くの場合で GSER が満たされることが知られていた。逆に内部構造を有する不均一系では Stokes 要素が、また平衡から遠く離れた非平衡系では Einstein 要素がそれぞれ破れるため、一般に GSER は成立しない。したがって、細胞のような不均一かつ非平衡な系において GSER が破れることは容易に想像でき、いくつかの実験でも確認されていた。また研究開始当時にも、正常細胞、癌細胞、死んだ細胞における力のゆらぎを MR で測定すると、それぞれのパワースペクトルが異なることが Guo ら (Cell, 2014) によって報告されていた。これは、細胞の MR が生命と物質の境界を調べるのに適していることのみならず、将来的には医療応用にも使われる可能性を示唆していた。

2. 研究の目的

上記のような学術的背景により、細胞における GSER の破れを定量的に理解するためには、GSER を超える MR の理論的枠組が必要である。そこで本研究では、細胞のレオロジーが示す普遍性の理解を最終目標として、不均一系や非平衡系にも適用できるマイクロレオロジーの基礎理論を、ソフトマター物

理学や非平衡物理学に立脚して確立することを目的とした。それと同時に、生体膜を含む細胞系に適した新しい MR の手法を確立することも目標とした。具体的には、(1) 生体膜 MR の基礎理論の確立、(2) 多成分媒質中のアクティブ MR の定式化、(3) MR による非熱的ゆらぎの検出法の考案、の三つの研究課題に取り組む。最終的にはこれらの研究成果を統合して、MR の新しい基礎理論を提唱することを目的とした。

(1) 生体膜 MR の基礎理論の確立

細胞における生体膜 MR の基礎を確立するために、生体膜の形状をより一般化して、例えば球面状の場合や、平面や球面からの変形を考慮したときの、流体力学的相互作用の計算を行う。また、高分子ゲルに対しては、いわゆる「二流体モデル」を適用して、高分子ネットワークの弾性と溶媒の粘性が、ともに生体膜のダイナミクスと結合したモデルを解析する。

(2) 多成分媒質中のアクティブ MR の定式化

我々のこれまでの理論を拡張して、二成分流体の粘性率が組成に依存する場合や、一方または両方の媒質成分が粘弾性体である場合に、粒子に働く抵抗力を求める予定である。また、我々のこれまでの理論では、粒子に一定の外力が作用する場合を考察したが、本研究では一定の周波数で振動する外力に対する粒子の応答関数も計算する。

(3) MR による非熱的ゆらぎの検出法の確立

(1) や (2) の課題で得られた結果を、さらに細胞内部のような非平衡系にも適用すべく、これまでの GSER の拡張を精密に検討し、細胞内部の非熱的ゆらぎを検出するための基礎理論を整備する予定である。可能であれば、これまでに見つかっていない非平衡統計力学における関係式を、MR に適用することも検討する。

これらの具体的な研究課題に取り組むことにより、最終的には実験で見つかっている細胞のレオロジーが示す普遍性の物理的起源を解明する。また、多くの細胞で観察されている異常拡散 (平均二乗変位が時間に比例しない拡散) についても、MR の観点によって統一的な理解が得られることが期待される。

3. 研究の方法

非平衡な系では一般に Einstein 要素が破れ、またソフトマターのような内部構造をもつ系では Stokes 要素が成立しない。後者の破れの要因はいくつかあるが、例えば粒子表面と媒質間に相互作用が働くと、粒子表面での境界条件は単純なノンスリップ条件ではなくなってしまう。また、高分子ゲルの網目サイズのように、媒質中に特徴的な長さが存在する場合、それと粒子サイズの大小関係に

よって、粒子の運動は大きく変化する。それ以外でも、媒質が液晶のように異方性をもつ場合、媒質の慣性が無視できない場合、媒質が浸透的に圧縮可能な場合などでも Stokes 要素が破れる。

生体膜 MR に関して、最初の拡張として、球状の細胞質とそれを包む球面状の生体膜を考える。我々は Henle らの理論を用いて、極座標系で生体膜および細胞質の流体力学方程式を書き下す。球面調和関数を用いてこれらの方程式を解くことにより、曲率をもつ生体膜の周波数に依存する易動度テンソルを導出する。次に流体力学的遮蔽長と生体膜の曲率半径の大小関係を考察し、二つの極限における漸近的な表式を求める。さらに、生体膜上の二点間の相関拡散について検討する。この問題では、球面に沿った二点間の距離という第三の長さスケールが導入されるため、それらの大小関係に応じた厳密な場合分けが必要となる。

一方、生体膜の形状変化の効果については、Levine ら (PRE, 2002) の論文を参考にして進める。ここでは、膜面の面外への変位を考慮した流体力学方程式を構築して、二点相関関数を導出する。さらに、これまでは高分子ゲルの複素弾性率が単純な冪関数に従うと仮定していた。その点を改善するために、高分子ゲル (細胞質) の振る舞いをより適切に記述する「二流体モデル」を採用する。我々は高分子ゲルと生体膜が接触している状況を考え、二点の変位の相関関数を導出する。

多成分媒質中の MR に関しては、二成分流体で振動している剛体球に働く抵抗力を導出する。我々は以前に、相分離のダイナミクスを記述する「モデル H」を用いて、Stokes の抵抗法則に対する、剛体球表面と溶媒間の相互作用の効果を検討した。そこでは、剛体球に一定の力が働くとしたが、新しい計算では一定の周波数で振動する外力が働く場合に、これまでと類似の計算を行なう。そこで得られた抵抗力を Einstein 要素 (揺動散逸定理) に代入し、さらに逆ラプラス変換することによって、二成分流体中の剛体球の MSD を導出する。最終的な MSD の結果が、相互作用の強さや相関長にどのように依存するかを詳細に検討する。また、これまでは二成分流体の粘性率が組成に依存しないと仮定していたが、最も簡単な拡張として、粘性率が組成に対して線形的に依存すると近似して、一定および振動する外力のもとで剛体球に働く抵抗を計算する。

非熱的な応力のゆらぎについては、Lau らの論文 (PRE, 2009) に従って、生体膜 MR における揺動散逸定理の拡張を行なう。

4. 研究成果

(1) 生体膜のブラウン運動

我々はアクティブなタンパク質を含む生体膜を考えて、特に生体膜の周囲の媒質が粘

弾性体である場合に、膜断片のゆらぎ (平均二乗変位) の解析を行った。我々のモデルにおいて、タンパク質は膜内を側方拡散して、さらに局所的に膜の曲率を誘起すると仮定した。その結果、拡張された Einstein の関係式として、膜断片の平均二乗変位を導出した。周囲の粘弾性体の弾性率が周波数に対して冪的に依存する場合、膜断片はその冪指数を反映した異常拡散を示すことがわかった。

この異常拡散は熱ゆらぎの効果として生じるが、我々はさらにタンパク質が媒質に対してアクティブな非平衡力を及ぼす場合についても同様の計算を行った。その結果、拡張された Einstein の関係式は修正を受けて、タンパク質の力双極子エネルギーに依存する実効的温度を用いて表されることがわかった。この関係式を用いると、生体膜のゆらぎから細胞質のレオロジー的性質を知ることができるため、我々はこれを「生体膜マイクロレオロジー」と呼んでいる。さらに生体膜と細胞骨格の相互作用を念頭に置いて、アクティブな壁と相互作用する生体膜のブラウン運動について解析を進めた。具体的には壁でアクティブな速度が誘起される場合、生体膜の平均二乗変位は通常拡散のように時間に比例することを示した。

(2) 非平衡環境下における生体膜のゆらぎ

生体膜と細胞骨格の相互作用のように、生体膜の外部環境における非熱的なゆらぎによって誘起される膜の非平衡ゆらぎについて考察した。具体的には、ランダムな速度を発生するアクティブな壁と相互作用する生体膜のブラウン運動の解析を行った。ポテンシャルで束縛された膜の流体力学方程式を解くことにより膜の変位の運動方程式を導出し、膜断片の平均二乗変位を計算した。壁が静的な場合、すなわち熱ゆらぎしか存在しない場合、平均二乗変位は時間の $2/3$ 乗と $1/3$ 乗で増加する領域が見られる。一方、壁がランダムな速度を発生する場合、平均二乗変位が時間に比例する時間領域が存在することがわかった。これは膜のブラウン運動としては異常な振る舞いである。さらにアクティブな壁が特徴的な時間スケールを有する場合、平均二乗変位が時間に比例する領域がさらに拡大することもわかった。我々の結果は、赤血球膜の非平衡ゆらぎを測定した最近の実験結果とも一致している。

(3) 脂質二重膜ベシクルの緩和ダイナミクス

圧縮性のある脂質二重膜の緩和ダイナミクスの詳細な解析を行い、特にベシクル内外の粘性率の非対称性の効果を調べた。自由エネルギーの解析の結果、脂質密度と膜曲率の幾何学的な結合により、長波長と中間的波長で起こる二種類の不安定性が存在することがわかった。二重膜ベシクルのダイナミクスについては、オンサーガーの変分原理に基づ

いた厳密な定式化を行った。我々は球面調和関数表示を用いて、三つの連動する緩和率を解析的に求め、複数のモード交差現象が生じることを確認した。特にベシクルの内側の粘性率が外側と比べて大きくなると、曲げモードとスリップモードのクロスオーバーが短波長側に大きくシフトすることがわかった。我々は得られた結果を用いて、脂質二重膜ベシクルのゆらぎのパワースペクトルを計算し、さらに非熱的なゆらぎが働く場合のスペクトルの変化を検討した。

(4) 粘弾性体中のアクティブな力双極子による異常拡散

アクティブな力双極子を有する粘弾性体中のブラウン運動について検討した。粘弾性体は二流体モデルで記述し、タンパク質を模倣したアクティブな力双極子の相関は特徴的な緩和時間をもつとした。プローブ粒子の平均二乗変位を計算した結果、熱ゆらぎのみ存在する場合、平均二乗変位は時間の0乗から1乗の間で変化することを求めた。一方、アクティブな力双極子によって、平均二乗変位は時間の0乗から2乗の間の全ての異常拡散が起こることを導いた。我々の結果は、近年の細胞中の異常拡散の振る舞いを適切に説明しており、生きている細胞と死んだ細胞では異常拡散のメカニズムが異なることが明らかになった。

(5) 粘弾性体中のマイクロマシンの遊泳

水のようなさらさらとした粘性流体中ではなく、ソフトマターのようなねばねばとした粘弾性体中を遊泳するマイクロマシンの動作機構について理論的に考察した。具体的には、アクティブ・マイクロレオロジーで使われている基本式を三つ玉スイマーに適用することで、スイマーの遊泳速度とソフトマターの複素粘性率を結びつける関係式を導出した。この関係式によると、スイマーが粘弾性体中を遊泳する場合、必ずしも「ホタテ貝の定理」が成り立たないことが示された。

得られた遊泳速度について、媒質が水のような粘性流体である極限を考えると、Golestanianらによって得られた以前の関係式に帰着する。そのため、このたび三つ玉スイマーで得られた表式は、ソフトマター中のスイマーの運動に関する「一般化されたホタテ貝の定理」を示唆する結果になっている。すなわち、三つ玉スイマーがソフトマター中を遊泳するには二通りの可能性があり、一方は形状変形の時間反転対称性を破ることであり、他方はスイマーの構造対称性を破ることである。前者の機構はソフトマターの複素粘性率の実部(粘性率)を、後者の機構はその虚部(弾性率)をそれぞれ反映するため、両方の機構を独立に測定することにより、媒質としてのソフトマターの粘弾性的性質が明らかになる。このように、スイマーの平均遊泳速度からソフトマターのレオロジー的

性質がわかるため、本論文で提唱された測定手法は「スイマー・マイクロレオロジー」と命名された。

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22件)

1. Kento Yasuda, Ryuichi Okamoto, Shigeyuki Komura, and Jean-Baptiste Fournier, Dynamics of a bilayer membrane with membrane-solvent partial slip boundary conditions, *Soft Materials*, in press. 査読有

2. Yui Ota, Yuto Hosaka, Kento Yasuda, and Shigeyuki Komura, Three-disk microswimmer in a supported fluid membrane, *Phys. Rev. E* 97, 052612 (7pp) (2018). 査読有

<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.052612>

3. T. V. Sachin Krishnan, Kento Yasuda, Ryuichi Okamoto, and Shigeyuki Komura, Thermal and active fluctuations of a compressible bilayer vesicle, *J. Phys.: Condens. Matter* 30, 175101/1-9 (2018). 査読有

<http://dx.doi.org/10.1088/1361-648X/aab6c7>

4. Swaminath Bharadwaj, P. B. Sunil Kumar, Shigeyuki Komura, and Abhijit P. Deshpande, Kosmotropic effect leads to LCST decrease in thermoresponsive polymer solutions, *Journal of Chemical Physics* 148, 084903 (2018). 査読有

<http://dx.doi.org/10.1063/1.5012838>

5. Takuma Hoshino, Shigeyuki Komura, and David Andelman, Permeation through a lamellar stack of lipid mixtures, *EPL* 120, 18004 (4pp) (2017). 査読有

<http://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/120/18004>

6. Yuto Hosaka, Kento Yasuda, Isamu Sou, Ryuichi Okamoto, and Shigeyuki Komura, Thermally driven elastic micromachines, *Journal of the Physical Society of Japan* 86, 113801/1-4 (2017). 査読有

<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.113801>

7. Isamu Sou, Ryuichi Okamoto, Shigeyuki Komura, and Jean Wolff, Coexistences of lamellar phases in ternary surfactant

solutions, *Soft Materials* 15, 272-281 (2017). 査読有

<http://dx.doi.org/10.1080/1539445X.2017.1354024>

8. Kento Yasuda, Yuto Hosaka, Mizuki Kuroda, Ryuichi Okamoto, and Shigeyuki Komura, Elastic three-sphere microswimmer in a viscous fluid, *Journal of the Physical Society of Japan* 86, 093801/1-4 (2017). 査読有

<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.093801>

9. Ryuichi Okamoto, Shigeyuki Komura, and Jean-Baptiste Fournier, Dynamics of a bilayer membrane coupled to a two-dimensional cytoskeleton: Scale transfers of membrane deformations, *Physical Review E* 96, 012416/1-10 (2017). 査読有

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.96.012416>

10. Yuto Hosaka, Kento Yasuda, Ryuichi Okamoto, Shigeyuki Komura, Lateral diffusion induced by active proteins in a biomembrane, *Physical Review E* 95, 052407/1-10 (2017).

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.95.052407>

11. Kento Yasuda, Ryuichi Okamoto, and Shigeyuki Komura, Swimmer-microrheology, *Journal of the Physical Society of Japan* 86, 043801/1-4 (2017). 査読有

<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.043801>

12. Kento Yasuda, Ryuichi Okamoto, and Shigeyuki Komura, Anomalous diffusion in viscoelastic media with active force dipoles, *Physical Review E* 95, 032417/1-14 (2017). 査読有

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.95.032417>

13. Swaminath Bharadwaj, Palakurissi B. Sunil Kumar, Shigeyuki Komura, Abhijit P. Deshpande, Spherically symmetric solvent is sufficient to explain lower critical solution temperature in polymer solutions, *Macromolecular Theory and Simulations* 26, 1600073/1-11 (2017). 査読有

<http://dx.doi.org/10.1002/mats.201600073>

14. Kento Yasuda, Ryuichi Okamoto, Shigeyuki Komura, and Alexander S. Mikhailov, Localization and diffusion of

tracer particles in viscoelastic media with active force dipoles, *EPL* 117, 38001/1-7 (2017). 査読有

<http://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/117/38001>

15. T. V. Sachin Krishnan, Ryuichi Okamoto, and Shigeyuki Komura, Relaxation dynamics of a compressible bilayer vesicle containing highly viscous fluid, *Physical Review E* 94, 062414/1-14 (2016). 査読有

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.94.062414>

16. Jean Wolff, Shigeyuki Komura, and David Andelman, Budding transition of asymmetric two-component lipid domains, *Physical Review E* 94, 032406/1-8 (2016). 査読有

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.94.032406>

17. Kento Yasuda, Shigeyuki Komura, and Ryuichi Okamoto, Dynamics of a membrane interacting with an active wall, *Physical Review E* 93, 052407/1-12 (2016). 査読有

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.93.052407>

18. Ryuichi Okamoto, Naofumi Shimokawa, and Shigeyuki Komura, Nano-domain formation in charged membranes: Beyond the Debye-Huckel approximation, *EPL* 114, 28002/1-6 (2016). 査読有

<http://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/114/28002>

19. Ryuichi Okamoto, Yuichi Kanemori, Shigeyuki Komura, and Jean-Baptiste Fournier, Relaxation dynamics of two-component fluid bilayer membranes, *The European Physical Journal E* 39, 52/1-21 (2016). 査読有

<http://dx.doi.org/10.1140/epje/i2016-16052-3>

20. Naofumi Shimokawa, Hiroki Himeno, Tsutomu Hamada, Masahiro Takagi, Shigeyuki Komura, and David Andelman, Phase diagrams and ordering in charged membranes: Binary mixtures of charged and neutral lipids, *The Journal of Physical Chemistry B* 120, 6358-6367 (2016). 査読有

<http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b03102>

21. Takuma Hoshino, Shigeyuki Komura, and David Andelman, Correlated lateral phase separations in stacks of lipid membranes,

Journal of Chemical Physics 143, 243124/1-9 (2015). 査読有
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4934984>

22. Shigeyuki Komura, Kento Yasuda, and Ryuichi Okamoto, Dynamics of two-component membranes surrounded by viscoelastic media, Journal of Physics: Condensed Matter 27, 432001/1-7 (2015). 査読有
<http://dx.doi.org/doi:10.1088/0953-8984/27/43/432001>

〔学会発表〕(計14件)

1. 好村滋行, 安田健人, 岡本隆一
スイマー・マイクロレオロジー
日本物理学会(千葉県・野田市)
2018年3月23日

2. 黒田瑞季, 安田健人, 保阪悠人, 岡本隆一, 好村滋行
二つの三つ玉スイマーの協同運動
日本物理学会(千葉県・野田市)
2018年3月23日

3. 安田健人, 保阪悠人, 曹勇, 好村滋行, 岡本隆一
熱的に駆動される弾性的なマイクロマシン
日本物理学会(千葉県・野田市)
2018年3月23日

4. 保阪悠人, 好村滋行, Alexander S. Mikhailov
分子マシンのアクティブダイマーモデル
日本物理学会(千葉県・野田市)
2018年3月23日

5. 星野拓馬, 好村滋行, 陳宣毅, 吳國安
皮膚ガンのパターン形成における流体力学的効果
日本物理学会(千葉県・野田市)
2018年3月25日

6. 梅村侑生, 星野拓馬, 好村滋行
小腸絨毛の形態形成のダイナミクス
日本物理学会(千葉県・野田市)
2018年3月25日

7. 山下晃史, 星野拓馬, 好村滋行
基板上的生体組織の広がりダイナミクス
日本物理学会(千葉県・野田市)
2018年3月25日

8. 曹勇, 保阪悠人, 安田健人, 好村滋行
異なる温度を持つ三つ球マイクロマシンの確率流解析
日本物理学会(千葉県・野田市)
2018年3月25日

9. Shigeyuki Komura,
Swimmer-microrheology,
Association in Solution IV (Jul. 31 - Aug. 4, 2017), St. John's, Canada.

10. Shigeyuki Komura,
Anomalous diffusion in active cells,
International Workshop on Hydrodynamic Flows in/of Cells (Nov. 24-25, 2016), Tokyo, Japan.

11. Shigeyuki Komura,
Anomalous diffusion in active cells,
Interdisciplinary Applications of Nonlinear Science (Nov. 3-6, 2016), Kagoshima, Japan.

12. Shigeyuki Komura,
Anomalous diffusion in active cells,
BioSoft Frontiers: Physics of Soft and Biological Matter (Sep. 18-21, 2016), Rehovot & Tel Aviv, Israel.

13. Shigeyuki Komura,
Relaxation dynamics of binary lipid bilayers,
International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015 (SFS2015) (Aug. 20-23, 2015), Kyoto, Japan.

14. Shigeyuki Komura,
Dynamics of multi-component membranes,
Controlled structural formation of soft matter (Aug. 3-28, 2015), Beijing, China.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.comp.tmu.ac.jp/shigekomura/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

好村 滋行(KOMURA Shigeyuki)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号: 90234715

(2)研究分担者

岡本 隆一(OKAMOTO Ryuichi)

岡山大学・異分野基礎科学研究所・特任講師

研究者番号: 10636385