

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21244061

研究課題名（和文） マイクロマニピュレーションによる非平衡基礎論の展開

研究課題名（英文）

Exploring Fundamental Theory of Non-equilibrium Systems using Micro-manipulation

研究代表者

佐野 雅己（SANO MASAKI）

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：40150263

研究成果の概要（和文）：

最近の非平衡統計力学の成果である、情報熱力学の新しい関係式の検証に成功した。具体的には、コロイド粒子を用いて、観測によって得た情報量を元にフィードバック制御を行うことで、獲得した情報量を自由エネルギーに変換する実験を行い、マクスウェルの悪魔の定量的な実験を実現した。また、粒子の非対称性を導入したヤヌス粒子を製作し、光照射によって微粒子が固有の向きを持って自己推進することを初めて確認し、流体力学の理論と良く一致することを実証した。

研究成果の概要（英文）：

We succeeded to demonstrate the first realization of a Szilard-type Maxwell's demon. We performed a nonequilibrium feedback manipulation of a Brownian particle based on information about its location achieves information-energy conversion. Moreover, a new nonequilibrium equality concerning the feedback control has been shown to hold. Furthermore, we realized self-propelling Janus particles by defocused laser irradiation. We found that the motion is caused by self-thermophoresis: i.e. migration due to a local temperature gradient induced by laser heating at the metal coated side of the Janus particle.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	13,700,000	4,110,000	17,810,000
2010 年度	11,600,000	3,480,000	15,080,000
2011 年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
年度			
年度			
総計	31,000,000	9,300,000	40,300,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：数理物理・物性基礎論

キーワード：非平衡熱統計力学、情報熱力学、マイクロマニピュレーション

1. 研究開始当初の背景

平衡熱統計力学が確立しているのに比して、エネルギーや物質の流れが不断に存在する非平衡系の熱統計力学は発展途上にある。

近年、非平衡状態に関するゆらぎの定理や Jarzynski 等式などの新しい非平衡関係式の発見とそれらの実験的検証があい次ぎ、実験

と理論が両輪で非平衡の物理学を切り拓くことができる新たな段階が訪れている。新たな展開は2つの面で顕著である。その一つは、マイクロマニピュレーション法を用いた非平衡統計力学の展開であり、さらには統計力学と情報・外部操作の関連を明らかにすることが急務となっており、早急に取り組む必要がある。他の一つは、非平衡状態を利用してマイクロスケールで運動するシステムの構成を通して非平衡の学理とその応用を図るアクティブマターと呼ばれる研究領域の展開である。このように、ミクロ系の観測・制御と熱力学が交錯する領域は、今後益々重要となる分野であり、この新たな研究分野で精密な実験を基盤として、非平衡の基礎論との連携を深めながら研究を開始、展開することが急務であった。

2. 研究の目的

以下の項目を達成することを目標とした。

(1) マイクロマニピュレーションを用いた非平衡関係式の検証とマクスウェルの悪魔の実現

(2) 新しい分子マニピュレーション法を用いた非平衡定常状態の統計力学理論の検証。

(3) 動的非平衡状態における微小粒子と流体力学効果の解明とナノスケールの自走粒子やナノモーターの実現。

(1)に関して、マクスウェルの悪魔は過去様々の場面で物理学者の興味を引いてきたが、現代の種々のマイクロマニピュレーション技術を持ってすれば実現可能な領域に入ってきている。理想的には観測に必要な仕事は当該システムのエネルギーに比べていくらかでも小さくできると仮定すると、シラードエンジンなどの思考実験はコロイド粒子のマイクロマニピュレーションで実現可能であり、情報量を含んだ新しい非平衡関係式の検証を目指す。

(2)に関しては、我々が発見した非平衡を利用

した新しい分子マニピュレーション法の理論的基礎付けを非平衡基礎論の立場から行うことである。(3)に関しては、非平衡を利用した微小な自走粒子系の開発とその学理を展開することが目的である。

3. 研究の方法

(1)に関しては、ブラウン運動する微小なポリスチレン粒子を用いて、高速度カメラで位置を観測し、局所電場または光ピンセットでフィードバック制御することで、情報から仕事を取り出せることを実証する。

(2)に関しては、局所レーザー照射により、局所的な温度勾配を形成し、コロイド粒子の熱拡散効果を精密に測定することで理論との比較を行う。

(3)に関しては、微粒子に非対称性を導入したヤヌス粒子を作成し、種々の方法で局所勾配を生成し、一様な外場から方向性を持つ運動に至るエネルギー変換の機構を明らかにする。

4. 研究成果

(1)に関しては、最初に局所回転電場によるフィードバック制御を用い、同時に観測によって得た情報量と獲得した自由エネルギーを精密に計算することにより、世界で初めてシラード型のマクスウェルの悪魔のデモンストレーションに成功した。この成果は、有力学術誌に掲載されたほか、多くのメディアによって取り上げられた。また、その後、光トラップを用いたフィードバック制御も実現し、情報とエネルギーの変換効率のパラメータ依存性などを定量的に測定することに成功した。

(2)に関しては、実効的なソレ係数の粒子サイズ依存性と粒子の周りの枯渇層の大きさや流体力学効果などの定量的比較から、**Diffusiophoresis** による流体効果を原因とする非平衡の枯渇効果であるとの結論を得た。

(3)に関しては、片半球が金、片半球がポリスチレンのヤヌス粒子を作成して実験を行った。比較的一様なレーザー光を照射することで、金コートした半球側が光を吸収し、 μ メートルスケールで粒子の周囲に局所的な温度勾配が形成され、コロイドの表面力由来のソレ効果によりヤヌス粒子が自己推進することを見いだした。また、2粒子が作るカイラルの構造を用い、光照射により回転する回転子の生成に成功した。測定された温度場や周囲の速度場は、理論的な解析とよく一致することが明らかとなった。この成果は、アメリカ物理学会でハイライト紹介された。

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 10 件)

- (1) Y. Matsuo and M. Sano, Geometrical model of a self-propelled broken interface, *J. Phys. A: Math. Theor.* 44, 285101 (2011).
- (2) S. Ito and M. Sano: Effects of error on fluctuations under feedback control, *Phys. Rev. E*, 84, 021123 (2011).
- (3) H. Ebata and M. Sano, Self-Replicating Holes in a Vertically Vibrated Dense Suspension: *Phys. Rev. Lett.*, 107, 088301 (2011).
- (4) K. Kawaguchi and M. Sano: Free energy transduction in autonomous systems, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 80, 083003 (2011).
- (5) 佐野雅己: “高分子による非平衡状態の枯渇効果”、*高分子*, 59, 490-491 (2010).
- (6) H. Delanoe-Ayari, J-P. Rieu, and M. Sano: 4D Traction Force Microscopy Reveals Asymmetric Cortical Forces in Migrating Dictyostelium Cells, *Phys. Rev. Lett.*, 105, 248103 (2010).
- (7) H-R. Jiang, N. Yoshinaga, M. Sano: Active Motion of Janus Particle by Self-thermophoresis in Defocused Laser Beam, *Phys. Rev. Lett.* 105, 268302 (2010). (selected for an Editor's Suggestion and highlighted with a Viewpoint in *Physics of APS*.)
- (8) S. Toyabe, T. Sagawa, M. Ueda, E. Muneyuki, and M. Sano: Experimental demonstration of information-to-energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality, *Nature Physics*, 6, 988 (2010).
- (9) T. Hiraiwa, M. Y. Matsuo, T. Ohkuma, T. Ohta, and M. Sano: Dynamics of a deformable self-propelled domain, *Europhys. Lett.* 91, 20001 (2010).
- (10) H-R. Jiang, H. Wada, N. Yoshinaga, and M. Sano: Manipulation of Colloids by Nonequilibrium

Depletion Force in Temperature Gradient,

Physical Review Letters, **102**, 208301 (2009).

[学会発表] (計 42 件)

- (1) 平山雄大, 佐野雅己: 光ピンセットを用いた一般化 Jarzynski 等式の検証実験, 日本物理学会 2013 年年次大会, 2013 年 3 月 26-29 日, 広島大学.
- (2) Y. Hirayama and M. Sano: Extracting Work from an Isothermal Cycle: Experimental Verification of the Generalized Jarzynski Equality, The University of Tokyo - Korea University The 2nd Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 28 - Mar. 3, 2013, Seoul, Korea.
- (3) 伊藤創祐, 佐野雅己: 緩和と情報による冷却限界, 情報統計力学の最前線 —情報と揺らぎの制御の物理学を目指して—, 2012 年 3 月 21-23 日, 京都大学.
- (4) M. Sano, Dynamics and Interaction of Colloids in Driven and Active States, Phase Transition Dynamics in Soft Matter: Bridging Microscale and Mesoscale, Feb. 20-22. 2012, Kyoto.
- (5) M. Sano, Fluctuation and Information in Small Non-equilibrium Systems, GCOE Symposium, Links among Hierarchies, Kyoto University, Feb. 13-15. 2012, Kyoto.
- (6) 伊藤創祐, 佐野雅己: フィードバックによる冷却と有限時間の情報熱力学, 物理と情報の階層構造 —情報を接点とした諸階層の制御と創発—, 2012 年 1 月 5-7 日, 京都大学.
- (7) 鈴木量, 佐野雅己: 自己駆動粒子の集団挙動の実験的理解, 第 10 回関東ソフトマター研究会, 2011 年 11 月 12 日, 東京大学.
- (8) 中山洋平, 佐野雅己: 高分子の吸着によって引き起こされるコロイド粒子輸送係数の変化, 第 10 回関東ソフトマター研究会, 2011 年 11 月 12 日, 東京大学.
- (9) M. Sano, Information Energy Conversion in Autonomous and Non-autonomous Systems, Regional Bio-Soft Matter Workshop: Non-equilibrium Statistical Physics in Bio-Soft Systems, Oct. 27-29, 2011, National Taiwan University, Taipei.
- (10) M. Sano, Active Colloids: from external to self-control of colloidal transport, 1st Scientific Symposium on Hot Nanoparticles and Nanostructures, Leipzig University, Oct. 10-11, 2011, Leipzig, Germany.
- (11) M. Sano, Active Colloids: from external to self-control of colloidal transport Seminar at Institute for Physical Chemistry, Heidelberg University, Sept. 23, 2011, Heidelberg, Germany.
- (12) 伊藤創祐, 佐野雅己: フィードバック制

御された Langevin 系での有効温度の下限と情報量の関係式, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 21-24 日, 富山大学.

(13) 川口喬吾, 佐野雅己: 自律的な自由エネルギー伝達の効率, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 21-24 日, 富山大学.

(14) 中山洋平, 佐野雅己: 高分子溶液中でのコロイド粒子の Soret 効果, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 21-24 日, 富山大学.

(15) M. Sano, Cell migration: Stress measurement and modeling, Seminar in Max-Planck Institute for Physics of Complex Systems, Sept. 21, 2011, Dresden, Germany.

(16) M. Sano, Individual and collective dynamics of self-propelling micro-swimmers, International Workshop Collective Dynamics and Pattern Formation in Active Matter Systems, Sept. 12-16, 2011, Dresden, Germany.

(17) 鈴木量, 江宏仁, 佐野雅己: 自己駆動する非対称粒子の相互作用と集団挙動, 基研研究会 非平衡系の物理 - ミクロとマクロの架け橋 -, 2011 年 8 月 18-20 日, 京都大学.

(18) 伊藤創祐, 佐野雅己: フィードバック制御された Langevin 系での有効温度の下限と情報量, 基研研究会 非平衡系の物理 - ミクロとマクロの架け橋 -, 2011 年 8 月 18-20 日, 京都大学.

(19) 川口喬吾, 佐野雅己: 相互情報量の物理モデル的理解, 基研研究会 非平衡系の物理 - ミクロとマクロの架け橋 -, 2011 年 8 月 18-20 日, 京都大学.

(20) 中山洋平, 佐野雅己: コロイド粒子溶液系における非平衡輸送, 基研研究会 非平衡系の物理 - ミクロとマクロの架け橋 -, 2011 年 8 月 18-20 日, 京都大学.

(21) 中山洋平, 佐野雅己: 高分子濃度勾配中でのコロイドの運動, 日本物理学会 第 66 回年次大会(新潟大学) 2011 年 3 月 25-28 日[震災のため中止].

(22) 伊藤創祐, 佐野雅己: フィードバック制御下での揺動散逸定理の破れと有効温度に対する制限, 日本物理学会 第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 25-28 日[震災のため中止].

(23) M. Sano: Information and fluctuation in small worlds: From active soft matter to cell mechanics, 1st Korea University - The University of Tokyo Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 21-23, 2011, Tokyo, Japan.

(24) 佐野雅己: コロイド粒子系を用いた非平衡実験と非平衡関係式, 特定領域研究「ソフトマター物理」第 5 回領域研究会, 2011 年 1 月 6-8 日. 東京大学一条ホール, 東京.

(25) 佐野雅己: 予測と制御を含む情報処理と物理法則, 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, 2010 年 12 月 20 日, 東北大学, 仙台.

(26) 鈴木量, 佐野雅己: 「自己駆動粒子の集団挙動」、2010 年 12 月 11 日、第 9 回 関東ソフトマター研究会、お茶の水女子大学

(27) 鈴木量, 佐野雅己: 自己駆動する非対称粒子の運動と相互作用, 基研研究会「非平衡系の物理学: 非平衡ゆらぎと集団挙動」、京都大学, 2010 年 11 月 18~20 日.

(28) 伊藤創祐, 佐野雅己: フィードバック制御下の Harada-Sasa 等式とその制限, 基研研究会「非平衡系の物理 - 非平衡ゆらぎと集団挙動」、京都大学, 2010 年 11 月 18~20 日.

(29) 川口喬吾, 佐野雅己: Information Transmission in Autonomic Systems, 基研研究会『非平衡系の物理 - 非平衡ゆらぎと集団挙動』(京都大学基礎物理学研究所) 2010 年 11 月 18-20 日.

(30) M. Sano: Micromanipulation of Colloids and Biological Cells based on Nanoscale Hydrodynamic Effects, The Seventh International Conference on Flow Dynamics (ICFD2010), Nov. 1-3, 2010, Sendai, Japan.

(31) 鈴木量, 江宏仁, 佐野雅己: 自己駆動する非対称粒子の相互作用及び協同現象, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学), 2010 年 9 月 23-26 日.

(32) M. Sano: Cell locomotion: experiments and modeling, International Workshop “Emerging Topics in Nonlinear Science”, Sept. 12 - 18, 2010, Schloss Goldrain, Italy.

(33) M. Sano: Tunable Thermophoresis of Colloids using Nonequilibrium Depletion Effect, Asia Pacific Center for Theoretical Physics (APCTP) Workshop on Chemi-Thermo-EM Phoresis in Complex Fluids, Aug. 25-28, 2010, Pohang, Korea.

(34) M. Sano: Non-equilibrium transport of colloidal soft matter: from anomalous transport to self-propelled dynamics, International Symposium on Nonequilibrium Softmatter 2010, Aug. 17-20, 2010, Nara, Japan.

(35) 佐野雅己: 「非平衡系に法則はあるか: ソフトマターと微小非平衡系」、東京大学グローバル COE 「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」先端融合物理ワークショップ: 「物質科学と生命科学における非平衡法則を求めて」、2010 年 3 月 30 日、東京大学

(36) H-R. Jiang, M. Sano: Self-propelled Colloidal Particles; 日本物理学会 2010 年春季大会シンポジウム (岡山大学) 2010 年 3 月 20-23 日.

(37) M. Sano, M. Matsuo, Y. Maeda and H-R. Jiang, Deformable self-propelling microsystems in physics and biology, Pattern Formation in Chemistry and Biophysics, Feb. 25, 2010, Goslar-Hahnenklee, Germany.

(38) 佐野雅己: ソーレ効果と非平衡枯渇力、

古典および量子ダイナミクス・非平衡統計力学に関するワークショップ、2010年2月14日、東京大学

(39) M. Sano, S. Toyabe, H-R. Jiang, H. Wada, N. Yoshinaga, Out-Of-Equilibrium Small Systems and Micromanipulation, the 1st POSTECH International Workshop on Physics of Self-organization in Bio/Nano Systems, Jan. 29, 2010, Pohang, Korea.

(40) M. Sano, Swimming and crawling of self-propelling deformable objects, Breaking Barriers from Physics to Biology, Jan. 9, 2010, Bangalore, India.

(41) M. Sano, H.R. Jiang, H. Wada, and N. Yoshinaga, Understanding Cross coupling effect of Thermophoresis in Colloid Polymer Mixtures, International workshop on dynamic cross-effect in softly condensed matter, Nov. 5, 2009, Tokyo, Japan.

(42) H-R. Jiang, M. Sano: Self-propelled particles, Workshop on Active Matter - Physics of Biokinetics, 24-25 July 2009, Tokyo, Japan.

〔図書〕 (計 1 件)

(1) M. Sano, M. Y. Matsuo, and T. Ohta, Dynamics of deformable self-propelled particles: relation with cell migration,

"Series in Soft Condensed Matter - Vol. 4 NON-EQUILIBRIUM SOFT MATTER PHYSICS", edited by S. Komura and T. Ohta, Chapter 7 (pp.365- pp.415), World Scientific (2012).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐野 雅己 (SANO MASAKI)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：40150263

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

鳥谷部 祥一 (TOYABE SHOICHI)

中央大学・理工学部・助教

研究者番号：40453675