

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：12611

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24244066

研究課題名(和文) 印象派の精神に基づく濡れ現象の研究の展開

研究課題名(英文) Development of studies on wetting phenomena with the spirit of impressionism

研究代表者

奥村 剛 (Okumura, Ko)

お茶の水女子大学・基幹研究院・教授

研究者番号：80271500

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,600,000円

研究成果の概要(和文)：ソフトマターの先駆的研究でノーベル物理学賞を受賞した故de Gennes教授は、詳細を無視する独特の手法により、様々な問題からシンプルな物理的本質を鮮やかにえぐりだした。この手法は、絵画の印象派主義を模して物理学の印象派とも称される。本研究はこの手法の広い有用性を示すために濡れ現象の研究を展開し、多くの研究協力者と共に多角的研究を行った。特に、フナ虫の脚でも活用されるテクスチャー表面への液体の浸透現象や、砂時計のような粉粒体のいくつかの系等について研究し、周辺異分野・製品開発現場の研究者にも有益なシンプルで直感的な理解を提供した。その成果の一部は国内・国際特許の出願にも繋がった。

研究成果の概要(英文)：Professor de Gennes, who received Nobel Prize in Physics for his pioneering research in Soft Matter, extracted simple physical essences from various problems by a unique method. This method, in which many details are ignored, is compared to Impressionism in painting and is called the impressionist spirit in physics. In this research, in order to show the wide utility of this method, we developed studies on wetting phenomena and conducted various researches with the aid of many researchers and students. In particular, we studied the penetration dynamics of liquid into textured surfaces, also observed on the legs of an animal, and several systems of granular materials, and so forth. Our results provide simple and intuitive understandings, which can be useful for researchers in industry or in related fields. Part of the results also led to the application of domestic and international patents.

研究分野：ソフトマター物理学

キーワード：ソフトマター物理学 スケーリング法則 印象派物理学 濡れ 表面張力 テクスチャー表面 粉粒体

1. 研究開始当初の背景

ソフトマターの先駆的研究でノーベル物理学賞を受賞した故 de Gennes 教授は、枝葉末節に目をつぶる独特の手法により、様々なテーマの研究を行い、シンプルな物理的本質を鮮やかにえくりだした。そして、この研究手法を絵画における印象派主義にたとえ、物理学における印象派の精神を提唱した。このような精神の象徴ともいえるスケーリング法則は、物理の世界では広く認められていた。そして、特に、高速カメラの発展によって可能になった滴の融合現象の動力学などの研究によって、流体力学の分野で有力な方法として認められてきていた。

本研究代表者は、本研究のベースとなった基盤 B 採択課題において濡れ現象や破壊などの研究を多角的に展開してきた。例えば、擬 2 次元の系に着目し、閉じ込められた空間でのバブルや滴の動力学について印象派の精神で研究を展開したり、テクスチャー表面の濡れ現象にも同様の精神で研究を行ったりしてきていた。また、物質の強靱性や物質の破壊現象に着目した研究でも、クモの巣のシンプルなモデルを提唱して、クモの巣の力学的合理性を示すなどしてきていた。

2. 研究の目的

本研究は、印象派物理学の精神が物理学のいろいろな問題に役立つことを例で示すこと大きな目的とする。そこで、これまでに行ってきた濡れと破壊の研究を、濡れ現象に重きを置いて展開し、さらに、粉粒体やフォームへの研究にも着手することとした。3. で述べる本手法で示される結果は、周辺分野の研究者にも理解がしやすく、工業や企業の開発現場等でも役に立ちそうなシンプルで本質を突いた理解と法則をもたらし可能性が

3. 研究の方法

同じ研究グループで実験・理論を同時進行することで効果的に研究を進めた。具体的には、実験を重ねることにより、スケーリング則の存在を探り、実験的な結果を頼りに、理論を作り、その理論に従って、さらに実験を重ね、発見を確かなものとしていった。時間をかけて、実験と理論を何度も行き来しつつ研究を進めることで、明確なスケーリング法則と、シンプルな物理的な理解が得られるというのがこの手法の特徴である。また、色々な系で、この手法が有用であることを示すために、18 名の研究協力者の助力を得て、女性研究者の育成に貢献するとともに、新しい実験系の開拓も積極的に進めつつ多角的に研究を進めた。

4. 研究成果

(1) 概要

主な研究成果は、テクスチャー表面の濡れと、擬 2 次元セルでのバブルの研究を展開した粉

粒体の研究において得られた。また、ベースとなった基盤 B でも展開してきた破壊の実験研究を応用して切り紙の力学応答の研究も始めた。一連の研究のいくつかをベースとして国内特許を 2 件申請し、それらが JST の支援に採択されたおかげで、それぞれ PCT 出願を行うこととなった。このことは、本研究におけるアプローチが実際に工業や企業の実験現場でも役に立つ可能性が現実味を帯びてきたことを示している。

(2) テクスチャー表面の濡れの研究

本研究代表者は、マイクロスケールの柱が規則的に並んだテクスチャー表面における液体の浸透現象を研究し、2007 年に論文を発表している (Europhys. Lett. 79 (2007) 56005)。この研究では浸透高さが経過時間の $1/2$ 乗にスケールすることを示した。この研究では電子線リソグラフィーを使ったシャープな柱頭をもつピラーからなる表面を用いたが、本研究においては、柱が低く、柱の頭も丸みを帯びているものを使った。その結果、経過時間の $1/3$ 乗に比例する新しいスケーリング法則を得て、Phys. Rev. E にて Rapid Communication として発表された。

最近、生物学者が中心となって、フナ虫の脚にある精緻なブレードからなるテクスチャー表面が、吸水に利用されていることを発見した (Horiguchi H et. al, The Biological Bulletin 213, 2007)。この研究に触発され、フナ虫の脚における浸透法則を調べたところ浸透高さが経過時間の 1 乗に比例すること、つまり上昇速度が一定であることを発見した。浸透現象においては、通常は、経過とともに上昇速度は遅くなるため、かなり特異なスケーリング則といえる。さらに、フナ虫の脚を模してブレード状の人工のテクスチャー表面を用いて浸透法則を調べたところ、1 乗則は再現できなかったが、実験結果が、これまでの理論をハイブリッド化したシンプルなモデルでよく説明できることが分かった。これらの成果は PlosOne 誌にて発表され、国内特許出願、さらに、PCT 出願まで行った。

(3) 粉粒体の研究

本代表者は、擬 2 次元においてバブルに働く粘性抵抗法則の研究を行ってきた (Soft Matter, 7, 5648 (2011))。さらに、この研究を展開し、擬 2 次元粉粒体層にある障害物に働く引きずり抵抗の研究を行い引きずり速度の 2 乗に比例する抵抗力を見出してきていた (Europhys. Lett. 92, 44003 (2010))。この実験系は、擬二次元の粉体系でよくつかわれるディスクではなく、球を粉体として用い、セルにふたをすることで、先行研究では研究できなかった高速の引きずり力の一定速度下での測定を可能にした。本研究では、この先行研究における、粉体の充填率を変えて実験を行った。その結果、抵抗

法則がジャミング転移に向かって発散することを見出し、その指数がほぼ正確に、充填率のジャミング転移点からのずれの $-1/2$ 乘以スケールすることを見いだした。さらに、シンプルな考えからこの指数を説明する理論も提唱した。この結果は、Phys. Rev. Lett. 誌に発表された。

前述で述べた擬2次元バブルの研究を展開し、擬2次元のセルで漏斗を作り、砂時計を作ると粉粒体においても明確なバブリングが起こることを発見した。先行研究(Phys. Rev. Lett. 71, 1363 (1993))でも、バブリングは知られてはいたが、これほど明確なバブリングは、はじめて見出された。さらに、セルを厚くしていくと、空洞を形成するようにして砂が落ちていき、砂時計として機能しなくなることも発見した。これらの発見を説明する現象論も提唱した。この結果は、Sci. Rep. 誌に発表した。

前述の研究を展開し、擬2次元のセルに砂を詰めた層に空気の流路を形成する実験に取り組んだ。その結果、その流路が、川の蛇行現象のように蛇行するレジームを発見した。この現象がいくつかの砂の種類について普遍的にあらわれることを相図として示した。さらに、この不安定化現象を記述するミニマムモデルを作り、相図の境界線を説明するなどした。この結果は、Sci. Rep. 誌に発表した。

(4) その他

上述以外の研究も多角的に進めた。滴の系における電場効果、その自己相似動力学、バブルの破裂、液滴の受ける粘性抵抗、振動による液滴の接触状態の変化、粉粒体におけるブラジルナッツ効果に加え、破壊関連の研究等も行い、国内外の学会等で積極的に発表した。また、招待レビュー論文の執筆や、ムース・フォームに関する翻訳書も出版した。

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16件)

Yuki Yoshimura, Yui Yagisawa, and Ko Okumura, Meandering instability of air flow in a granular bed: self-similarity and fluid-solid duality, Sci. Rep. 6, 38457 (2016); doi:10.1038/srep38457.

Yui Yagisawa, Hui Zee Then, Ko Okumura, Stationary bubble formation and cavity collapse in wedge-shaped hoppers, Sci. Rep. 6, 25065
DOI: 10.1038/srep25065 (2016).

Ko Okumura, Simple views on different problems in physics: from drag friction to tough biological materials, Phil. Mag. 96, 828-841 (2016)
DOI: 10.1080/14786435.2015.1095366

Ko OKUMURA, Simple views on the strength and toughness of bio-composites consisting of soft and hard elements, MRS Bulletin, 40 [04] (2015) 333-339 (invited Review): DOI: 10.1557/mrs.2015.66

Marie TANI, Daisuke ISHII, Shuto ITO, Takahiko HARIYAMA, Masatsugu SHIMOMURA, and Ko OKUMURA, Capillary rise on legs of a small animal and on artificially textured surfaces mimicking them, PlosOne 9 (2014)
DOI: 10.1371/journal.pone.0096813.

Yuka TAKEHARA and Ko OKUMURA, High-velocity drag friction in granular media near the jamming point, Phys. Rev. Lett. 112 (2014)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.148001.

Noriko OBARA and Ko OKUMURA, Imbibition of a textured surface decorated by short pillars with rounded edges, Phys. Rev. E Rapid Communication, 86, 020601(2012).
DOI: 10.1103/PhysRevE.86.020601.

[学会発表](計125件)

招待講演(計36件)

Ko Okumura
Simple models and scaling arguments for understanding miscellaneous problems in soft matter physics
JSPS A3 Workshop on soft matter
TOKYO ELECTRON House of Creativity, Sendai, Japan, January 18-20, 2017

Ko Okumura
Scaling views on mechanical properties of porous materials from polymer foams to kirigami sheet materials
The 15th European Mechanics of Materials Conference (EMMC15)
September 7-9, 2016, Brussels, Belgium.

Ko Okumura
Jamming, bubbling and cavity collapse in granular materials
Avalanches, plasticity, and nonlinear response in nonequilibrium solids
Kyoto March 7th - 9th, 2016

Ko Okumura

Wetting and toughness of fine and composite structures in biological materials

Symposium: Future of biomimetics learning from natural history

The 53rd Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Kanazawa Univ., September 13-15, Japan

Ko Okumura

Simple Views on the Dynamics of Fluids in Confined space and the Fracture of Soft Polymer Foams

NIMS Conference 2014 - A Strong Future from Soft Materials

Tsukuba International Congress Center, July 1 - 3, 2014.

Ko Okumura

Simple views on the dynamics of fluids in confined space

Workshop on Cross Correlation & Transport Phenomena in Soft Matter, Waseda University, Jan 27-28, 2014

Ko Okumura

MEMS technology meets scaling laws for biology

Symposium: Beyond Biophysics!: Up-and-coming biophysical science achieved by physical, chemical and micromechanical control of a cell-sized space

The 52rd Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan

Sapporo Convention Center, September 25-27, 2014

Ko Okumura

Scaling laws for wetting: dynamics of wicking, liquid drops and bubbles

2nd Soft-interfaces Mini-symposium 2013 (SIMS2013)

-Physical Chemistry and Characterization of Soft-interfaces-

March 13 (Wed)-15(Fri); Fukuoka, Japan

Ko Okumura

Simple views on drops, bubbles and spider webs

The 5th Series of WPI-AIMR Joint Seminar WPI-AIMR, Tohoku Univ, June 29, 2012

Ko Okumura

Simple views on the mechanical adaptability of spider webs and the rupture dynamics of polymer thin films

2012 Conference on Deformation, Yield and Fracture in Polymers

Rolduc Abbey in Kerkrade, NL, April 1-5,

2012

〔図書〕(計1件)

奥村 剛監訳、梶谷忠志、武居淳、竹内一将、山口哲生 共訳、ムースの物理学：構造とダイナミクス (I. Canta, S. Cohen-Addad, F. Elias, F. Graner, R. Höhler, O. Pitois, F. Rouyer, A. Sant-Jalmes 著) 336 頁、吉岡書店 (2016 年)

〔産業財産権〕

出願状況 (計4件)

名称：シート材の弾性調整方法、フォースセンサ、及びシート材

発明者：奥村剛、磯部翠、武居淳

権利者：同上

種類：特許

番号：PCT/JP2017/015343

出願年月日：2017年4月14日

国内外の別：国外 (PCT)

名称：シート材の弾性調整方法、フォースセンサ、及びシート材

発明者：奥村剛、磯部翠、武居淳

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2016-082472

出願年月日：2016年4月15日

国内外の別：国内

名称：ブレード複合型開放流路装置およびその接合体

発明者：石井大佑、針山孝彦、下村政嗣、奥村剛、谷茉莉

権利者：同上

種類：特許

番号：PCT/JP 2015/62233

出願年月日：2015年4月22日

国内外の別：国外 (PCT)

名称：ブレード複合型開放流路装置およびその接合体

発明者：石井大佑、針山孝彦、下村政嗣、奥村剛、谷茉莉

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2014-089650

出願年月日：2014年4月23日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.phys.ocha.ac.jp/okumuralab/h16/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥村 剛 (OKUMURA, Ko)

お茶の水女子大学・基幹研究院・教授
研究者番号：80271500

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし

(4)研究協力者
江里綾子 (ERI, Ayako)
横田万里亜 (YOKOTA, Maria)
小原 紀子 (OBARA, Noriko)
竹原由佳 (TAKEHARA, Yuka)
谷茉莉 (TANI, Marie)
関口輝世 (SEKIGUCHI, Teruyo)
木元菜月 (KIMOTO, Natsuki)
鹿島由紀 (KASHIMA, Yuki)
田中奈々 (TANAKA, Nana)
山岸由紀 (YAMAGISHI, Yuki)
村野真由子 (MURANO, Mayuko)
八木澤唯 (YAGISAWA, Yui)
吉村幸希 (YOSHIMURA, Yuki)
矢橋美慧 (YAHASHI, Misato)
磯部 翠 (ISOBE, Midori)
小川 未真 (OGAWA, Mima)
テン フィジー (THEN, Hui Zee)
中里葉奈 (NAKAZATO, Hana)