

平成 29 年 4 月 24 日現在

機関番号：82626

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2012～2016

課題番号：24120003

研究課題名(和文)生物規範界面デザイン

研究課題名(英文)Biomimetic Designs of Interfaces

研究代表者

大園 拓哉(Ohzono, Takuya)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・機能化学研究部門・研究グループ長

研究者番号：40344030

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 108,400,000円

研究成果の概要(和文)：工学部材界面の特性に関係する、生物における摩擦や抵抗の制御機構、付着機構等を「構造」、「動き」、「制御」の観点で科学的な理解を試みるとともに、そこから抽出した機能要素を基に、新しい工学的な機能材料デザインの提案を試みた。その結果、ウバウオの吸着特性、マダラシミの凹凸表面の摩擦特性、フジツボ幼生の吸着特性などが明らかとなり、表面の凹凸構造や化学特性と機能の相関が理解され、その応用例として摩擦力を大きく変化できる可変凹凸表面デザインを提示した。

研究成果の概要(英文)：In this program, our team tried to understand frictional and adhesion properties in the biological systems, which are closely related to the surface properties of common engineering materials, and, based upon the functional elements extracted from the biological examples, tried to propose new designs of functional materials. As results, strong adhesion mechanism of suction pad of cling-fish in water, the effects of the scales with unevenness-period groove structures of firebrat on the frictional properties, and extremely low adhesive interaction between tentacles of live Cypris larva and polyelectrolyte brush surface in sea water determined by scanning probe microscopy are mainly clarified in terms of the relationship between the functions and the surface topography/chemistry. Based upon the results, a design for shape-tunable undulated surfaces with highly variable friction was newly proposed.

研究分野：ソフトマター、トライボロジー

キーワード：トライボロジー 微細構造形成 ゲル 付着生物 高分子薄膜

### 1. 研究開始当初の背景

生物は進化と適応の過程において、「人間の技術」とは異なる「生物の技術」とも言うべき技術体系を構築し、様々な構造とそれらに伴う機能を獲得した。とりわけ細胞内部や表面に形成される数百 nm ~ 数ミクロンの「サブセルラー・サイズ構造」は特徴的な機能を有し、その形成過程と機能発現機構は、工学的に設計・製造したものとは異なる規範（パラダイム）に基づいている。この「生物多様性」に学び「人間の叡智」を組み合わせることで、環境政策・技術経営の観点から「持続可能性社会」実現に資する技術体系を創出することが求められていた。そこで、自然史学、生物学、農学、材料科学、機械工学等の学際連携によって生物多様性と生物プロセスに学ぶ材料・デバイスの設計・製造を通して「バイオミメティクス・データベース」を構築し、生物学と工学に通じた人材を育成するために本新学術領域研究が開始された。その中でも、当班は、生物規範界面デザインとして、生物界面の「動き」(接着・滑り)に及ぼす「サブセルラー・サイズ効果」を規範とし、防汚・抵抗の制御技術の開発を担当するために組織された。

### 2. 研究の目的

生物規範界面デザインとして、特に、界面の「動き」(接着・滑り)に関係する生物機能(生物の摩擦抵抗制御機構、付着機構等)を「構造」、「動き」、「制御」の観点から模倣し、抽出した要素を基に、工学的な機能材料デザインを提案することが目的であった。ここでは、生物も多用する自己組織化や自己集合を含む階層構造形成プロセス・動的機能を用いることで、「エネルギー消費の少ない生産工程」、「効率的なエネルギー利用」、「汎用元素の利用」に支えられた「持続可能社会」の実現にも寄与することを目指した。その具体的な材料設計例として、摩擦制御表面材料、防汚・抗菌制御塗料などのデザインの提示があった。当班と他の B01 班とは、共通の上位概念の創出のために情報共有や連携を行い、さらに A01 班からは生物の動きと微細構造の情報を得るとともに、物理化学的手法により解明された機能や具体成果をフィードバックすることで、バイオミメティクス・データベースの作成のみならず生物機能の理解にも寄与することを目指した。

### 3. 研究の方法

本研究では、変形能を有する生物の界面凹凸形状や、その液体に濡れた(ウェット)界面に特に着目し、そのトライボロジー機能と構造・変形の関連を調べ、工学応用が可能な、できるだけ一般的な設計概念や設計手法を抽出することを目指した。そのために、人工構成的アプローチとして自己組織化を利用した人工的に作製できる界面形状を、例えばサメ肌や指紋などの生物の柔らかい凹凸構

造のモデル系とみなし、人工的なトライボロジー界面を構成することで進めた。ここでは、その構造作製技術や界面の分子レベルでの改質技術を確立しながら、その構造・変形・トライボロジー特性の相関も調査することとした。同時に、生物調査的アプローチとして、実際の自然界、特に生物表面における(変形能を有する)凹凸構造の観察やその機能(摩擦や付着等のトライボロジー機能)の測定を行い、その結果を上記の人工構成的アプローチの結果と比較し、生物系が有する機能発現メカニズムの解明を目指した。これらの研究成果を通じて、生物の技術を工学応用に適用できる一般的な学理の導出を試みた。またその結果を社会ニーズの実現の観点から応用し、機能的な界面材料の開発を目指した。この人工機能界面を実現するために、領域全体からのフィードバック(データベースからの機能抽出や社会ニーズの取り込み)を受けながら、以下の5つの各要素技術の発展・融合を進めることとした。

- (1) トライボロジーを主とする生物表面の物理学的解析手法の確立
- (2) 可変微細凹凸構造のトライボロジー特性の研究
- (3) 高分子被覆微細凹凸構造のトライボロジー特性の研究
- (4) 微細凹凸構造界面による海洋付着生物防汚の研究
- (5) 上記の組み合わせによる新機能提案・新技術開発

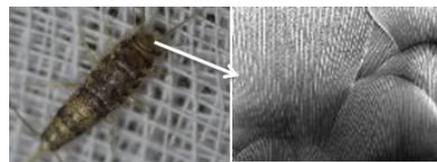
### 4. 研究成果

- (1) 生物表面機能の調査解明(主要例を記載)

水中で良好な吸着特性を示すウバウオの吸盤機能を理解するために、国立科学博物館の篠原 G (A 班) と共に、表面での六角形の表面パターンの吸着に及ぼす影響を系統的に検討した。その結果、吸着面間にある溝の存在によって、吸着面からの水の速やかな排出が実現されることを見出し、速やかな吸着状態が実現されることが分かり、さらに詳細な構造デザインによって吸着の時間特性を制御できる表面材料開発への基盤を得た。



土や木内部等の狭い空間で活動するマダラシミの体表に存在する

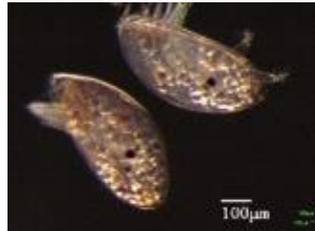


不規則な鱗片の構造の摩擦特性を理解するために、体表の場所ごとに構造を評価するとともに、サイズの異なる摩擦子で摩擦力も評

価した。その結果、マダラシミ頭部周辺における鱗片表面の溝周期がばらついていることを、長谷山チーム(A班)と共に情報科学的に証明するとともに、この鱗片ごとの溝周期のばらつきは、特定サイズの凹凸に体全体の鱗片がトラップされないように、摩擦特性を調整していることが示唆された。この結果から不均一性に着目した摩擦制御表面のための構造デザインの知見が得られた。

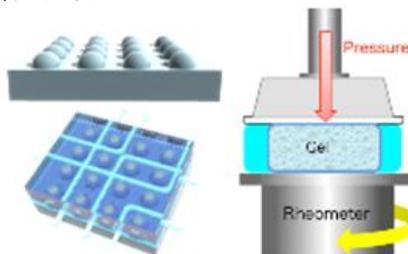
海中での防汚機能表面開発のための基盤として、フジツボのキブリス幼生の付着

特性を表面特性の異なる表面で調査した。走査プローブ顕微鏡の探針にキブリス幼生を生きのまま固定化し、

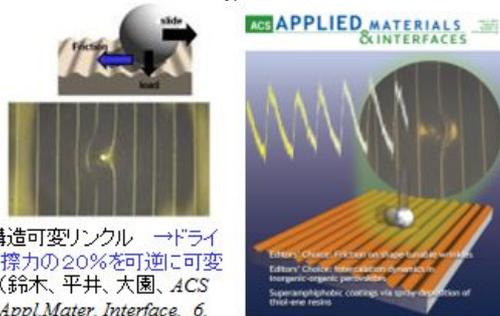


それと、防汚機能が期待できる高分子被膜表面との付着特性を、時間的な要因も含めて評価できる方法を新規に確立し、調査した。その結果、幼生の探索行動中における凝着力の測定に初めて成功するとともに、幼生変態後、加齢とともに凝着力が増大することも分かり、フジツボの付着の防止に向けた材料デザインに有益な新規の基盤的知見が得られた。

### (2) 凹凸のモデル系による摩擦制御のための表面デザイン



微細表面パターンでPVAハイドロゲルのウェット摩擦制御 → 構造の重要性を再確認 (関連:黒川、グン等, *Soft Matter* 10, 3192-3199 (2014) 等)

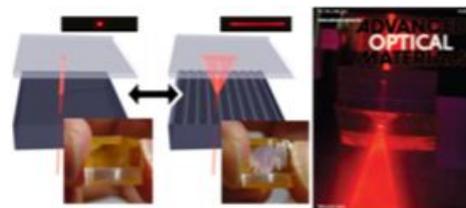


構造可変リンクル → ドライ摩擦力の20%を可逆に可変 (鈴木、平井、大園, *ACS Appl. Mater. Interface*, 6, 10121, (2014).) Editor's choice (free open access)

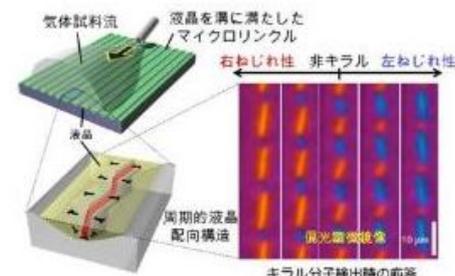
やわらかい弾性体やそのウェットマテリアルの表面において、変形可能な微細構造の作製とその表面の化学修飾法の探索を行った。その変形能を有する微細構造には、力学的座屈によって自発形成するリンクル(溝)構造や、柔らかいハイドロゲル上に施した微

細構造、およびその化学修飾表面を利用してきた。特にリンクル構造は、一定の周期を有するサイン波状の凹凸構造であり、多様な生物が有している様々な表面凹凸構造の最も抽象化したモデル構造の一つである。さらに柔らかい弾性基板を利用していることにより、従来の硬い構造とは異なり大きく変形できることや、印可された応力ひずみに応じて溝の向きや深さが可逆に変わる動的な制御性があるため、その作製手法の確立と、トライボロジー特性(ウェット、ドライ環境での摩擦試験)とその構造・変形の関係性に注目して調査した。その結果、上図のようなハイドロゲル上でのウェット摩擦における凹凸構造の影響や、リンクル上でのドライ摩擦を凹凸によって20%~90%可変出来る事、摩擦力振動現象と構造変形の相関等が明らかとなった。平行して、これらの構造に対する表面化学修飾法も確立した。また摩擦刺激に対して強化されたリンクル構造の作製技術も確立した。総合的に、柔らかく変形できる凹凸構造と摩擦特性の相関について工学応用に有用な基盤を確立し、新たな摩擦可変材料を提案した。

### (3) 派生的成果



可変リンクルを用いた可逆的に調節できる光拡散板の作製 (国内特許出願、大園、鈴木等, *Adv. Opt. Mater.* 1, 34-35 (2013) 等)



液晶を用いた気体分子のキラリティの簡便な検出法の開発(気体試料を吹き付けるだけで分子の機能を左右する利き手を可視化;生物臭覚センシング過程に類似性) (国内特許出願、大園等, *Nature Commun.* 5, 3735 (2014), 産総研プレスリリース 2014/5/1)

生物の多機能性を考えると、この凹凸構造の関係しうる機能は非常に多くあると予想できた。しかし、本観点は、本領域に参画するメンバーの多様なバックグラウンドを擦り合わせたシナジー効果により至ったものであり、領域研究開始前には予想できなかった効果として重要な成果である。その観点に基づいた具体的成果として、上図のようにリンクル構造の可変性を利用した光拡散制御機能(ネオンテトラという魚の構造変化によ

る構造色制御に学ぶ)や、リンクルの溝に構造化された液晶による気体状キラル分子の高感度検出(臭覚系の粘膜構造による気体分子捕集能に学ぶ)等の派生的新規機能材料やシステムの創出に至った。

#### 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 31 件)

1. 室崎喬之、野方靖行、微細構造表面におけるフジツボ幼生の付着前行動、日本マリンエンジニアリング学会誌, 52, 1,14-18 (2017)
2. 遠藤健斗、Wong Yue Him、野方靖行、小黒-岡野美枝子、岡野桂樹、フジツボのキブリス幼生と幼生セメントの生物学-アカフジツボの最近の研究から-、日本マリンエンジニアリング学会誌,52,1,19-24(2017)
3. Kosuke Suzuki, Takuya Ohzono, Wrinkles on a textile-embedded elastomer surface with highly variable friction, *Soft Matter*, 12, 6176-6183(2016) 10.1039/c6sm00728g
4. 柳直樹、平井悠司、下澤樞夫、下村政嗣、ハニカムフィルムを用いた水中での酸素供給デバイスの開発、表面科学, 37, 7, 299-303 (2016)
5. 奥田直人、平井悠司、下村政嗣、原子間力顕微鏡を用いたマダラシミ鱗片表面の摩擦力測定、表面科学, 37,8,369-373(2016)
6. 下村政嗣、平井悠司、奥田直人、町田龍一郎、野村周平、大原昌宏、長谷山美紀、生物表面の摩擦 - 自己組織化によるバイオミメティクス, トライボロジスト, 61, 4,215-221 (2016)
7. 柳直樹、平井悠司、下澤樞夫、下村政嗣、ハニカムフィルムを用いた水中での酸素供給デバイスの開発、表面科学, 37,7,299-303(2016)
8. 平井悠司、下村政嗣、キリアツメゴミムシダマシから着想を得た大気からの水回収技術、表面技術, 3,127-131(2017)
9. 鈴木航祐、大園拓哉、不均一な形状を有するリンクル上における摩擦、高分子論文集,73, 6, 514-519(2016) 10.1295/koron.2016-0030
10. 大園拓哉、鈴木航祐、形状可変なリンクルで変わる摩擦、日本接着学会誌, 52, 1,22-27(2016)
11. 小林元康、生物模倣によるトライボロジー技術、機能材料 5, 7,34-38(2015)
12. Julius Adam V. Lopez, Sultan S. Al-Lihaibi, Walied M. Alarif, Ahmed Abdel-Lateff, Yasuyuki Nogata, Kenji Washio, Masaaki Morikawa, and Tatsufumi Okino, Wewakazole B, a Cytotoxic Cyanobactin from the Cyanobacterium *Moorea producens* Collected in the Red Sea, *Journal of Natural Products*,79,1(2016) 10.1021/acs.jnatprod.6b00051
13. 室崎喬之、ハイドロゲル上におけるフジツボの付着と成長、日本接着学会誌,52,2,38-43(2016)
14. Chanchal Kumar Roy, Honglei Guo, Tao Lin Sun, Abu Bin Ihsan, Takayuki Kurokawa, Masakazu Takahata, Takayuki Nonoyama, Tasuku Nakajima, Jian-Ping Gong, Self-Adjustable Adhesion of Polyampholyte Hydrogels, *Advanced Materials*, 27,45,7344-7348 (2015) 10.1002/adma.201504059
15. 黒川孝幸、ムハンマド アナムル ハック、龔劍萍、皮膚を規範とした革新的機能材料・ラメラ構造を有するハイドロゲルの構造色と強靱性、工業材料,63,8,64-68(2015)
16. 大園拓哉、鈴木航祐、形状可変な柔らかいしわの上での液体と摩擦、トライボロジスト, 60,3,190-197(2015)
17. 野方靖行、吉村えり奈、佐藤加奈、加戸隆介、岡野桂樹、新規外来フジツボ *Perforatus perforatus* の日本への侵入確認およびリアルタイム PCR 法を用いた検出方法について、*Sessile Organisms*, 32, 1,1-6(2015) 10.4282/sosj.32.1
18. 平井悠司、鈴木厚、海道昌孝、下村政嗣、有機-無機ハイブリッド微細構造化膜のバイオミメティック・トライボロジー、化学工業社, 66,4,29-34(2015)
19. Kosuke Suzuki, Yuji Hirai, Masatsugu Shimomura, Takuya Ohzono, Tunable Friction Through Microwrinkle Formation on a Reinforced Rubber Surface, *Tribology Letters*,60,24, 1-6(2015) 10.1007/s11249-015-0600-8

20. 小林元康、魚の体表に学ぶ防汚性：高分子電解質ブラシによるアプローチの動向、PEN, 5, 8, 24-28(2014)
21. Kosuke Suzuki, Yuji Hirai, and Takuya Ohzono、Oscillating Friction on Shape-Tunable Wrinkles、ACS Applied Materials & Interfaces, 6, 10121-10131(2014) 10.1021/am5010738
22. Takuya Ohzono, Takahiro Yamamoto & Jun-ichi Fukuda、A liquid crystalline chirality balance for vapours、Nature Communications, 5, 3735-3735(2014) 10.1038/ncomms4735
23. Takuya Ohzono, Yuji Hirai, Kosuke Suzuki, Masatsugu Shimomura and Nariya Uchida、Reinforced shape-tunable microwrinkles formed on a porous-film-embedded elastomer surface、Soft Matter, 10, 7165-7169(2014) 10.1039/C4SM00942H
24. 大園拓哉、可変な微小なシワの溝における毛細管現象の制御、表面技術, 64, 34-37(2013)
25. 平井悠司、藪浩、海道昌孝、鈴木厚、下村政嗣、生物に学ぶ表面微細構造とトライボロジーの関係、表面技術, 64, 38-41(2013)
26. Takuya Ohzono, Kosuke Suzuki, Tomohiko Yamaguchi, Nobuko Fukuda、Tunable Optical Diffuser Based on Deformable Wrinkles、Advanced Optical Materials, 1, 5, 374-380(2013) 10.1002/adom.201300128
27. 大園拓哉、空気抵抗低減用のサメ肌模倣リブレット表面構造の“耐久性”が実際の旅客機の翼で試されている - バイオミメティクス研究開発の長期動向を垣間見る -、PEN Public Engagement with Nanobased NEWSLETTER, 4, 2, 34-35 (2013)
28. 大園拓哉、鈴木航佑、山口智彦、福田伸子、可変リンクルによる光透過-拡散のスイッチング、高分子論文集, 70, 5, 179-184(2013) 10.1295/koron.70.179
29. 平井悠司、藪浩、海道昌孝、鈴木厚、下村政嗣、自己組織化を利用した銀メッキマイクロディンプル表面の作製と摩擦挙動、高分子論文集, 70, 5, 193-198(2013) 10.1295/koron.70.193
30. Shintaro Yashima, Natsuko Takase, Takayuki Kurokawa, Jian Ping Gong、Friction of Hydrogels with Controlled Surface Roughness on Solid Flat Substrates、Soft Matter, 10, 3192-3199 (2014) 10.1039/c3sm52883a
31. 黒川孝幸、ムハンマド アナムル ハック、龔劍萍、ラメラ構造二重膜を有するハイドロゲルの光学および力学的特性、高分子論文集, 70, 7, 309-316(2013) 10.1295/koron.70.309
- 〔学会発表〕(計 97 件) 以下代表例のみ
- 大園拓哉、可変なシワによる摩擦機能の拡張、一般社団法人日本ゴム協会関東支部 アドバンテックセミナー 2017, 日本, 東京(2017.02.23)
- 室崎喬之、野方靖行、平井悠司、下村政嗣、フジツボが教える防汚表面材料、第 67 回コロイドおよび界面化学討論会, 日本, 旭川市(2016.09.23)
- 野方靖行、付着生物による諸問題と防汚技術開発の重要性、地球環境科学研究院講演会, 日本, 札幌(2016.08.19)
- 平井悠司、自己組織化微細構造とバイオミメティクス、2016 年度日本海水学会第 67 回会研究技術発表会\_シンポジウム「北海道における海洋資源の利活用とその周辺領域研究」, 日本, 登別(2016.06.10)
- 〔図書〕(計 15 件) 以下代表例のみ
- 平井悠司、下村政嗣、多孔質フィルム/膜の製造技術、第 3 章 自己組織化ハニカムフィルムのバイオミメティクス応用 77-89 (2016)
- 室崎喬之、トコトンやさしいバイオミメティクスの本、第 2 章 20 節 環境に優しい防汚塗料「海の生物の表面から学ぶ」 50-51 (2016)
- 室崎喬之、生物の形や能力を利用する学問 バイオミメティクス、第 3 章 コラム 3 フジツボに対する抗付着ハイドロゲル 82-83 (2016)
- 黒川孝幸、トコトンやさしいバイオミメティクスの本、生物の構造とメカニズムに学ぶ滑らかに動く関節の構造 100-101(2016)
- 小林元康、高原淳、高分子トライボロジーの制御と応用、第 15 章 ポリマーブラシによる制御 148-156(2015)

大園拓哉、生物模倣技術と新材料・新製品への応用、7章 生物模倣による材料の特性改質、機能性付与 558-556(2014)

〔産業財産権〕

出願状況(計4件)

名称: 物体保持部材  
発明者: 大園拓哉、寺岡啓  
権利者: 産業技術総合研究所  
種類: 特許  
番号: 特願 2017-024057  
出願年月日: 平成29年2月13日  
国内外の別: 国内

名称: 摩擦係数可変シート体及び摩擦係数可変装置  
発明者: 大園拓哉、鈴木航佑  
権利者: 産業技術総合研究所  
種類: 特許  
番号: 特願 2016-80448  
出願年月日: 平成28年4月13日  
国内外の別: 国内

名称: キラリティ測定方法及びキラリティ測定装置  
発明者: 大園拓哉、山本貴広、福田順一  
権利者: 産業技術総合研究所  
種類: 特許  
番号: 特願 2013-161373  
出願年月日: 平成25年8月2日  
国内外の別: 国内

名称: 光拡散状態を可逆的に変更可能な光拡散可変装置  
発明者: 大園拓哉  
権利者: 産業技術総合研究所  
種類: 特許  
番号: 特願 2013-023033  
出願年月日: 平成25年2月8日  
国内外の別: 国内

取得状況(計1件)

名称: 光拡散状態を可逆的に変更可能な光拡散可変装置  
発明者: 大園拓哉  
権利者: 産業技術総合研究所  
種類: 特許  
番号: 第 6032675 号  
取得年月日: 平成28年11月8日  
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/new\\_research/2016/nr20160624/nr20160624.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/2016/nr20160624/nr20160624.html)

6. 研究組織

(1)研究代表者

大園 拓哉 (OHZONO, Takuya)  
産業技術総合研究所・機能化学研究部門・研究グループ長  
研究者番号: 40344030

(2)研究分担者

平井 悠司 (HIRAI, Yuji)  
千歳科学技術大学・理工学部・専任講師  
研究者番号: 30598272

黒川 孝幸 (KUROKAWA, Takayuki)  
北海道大学・先端生命科学科・准教授  
研究者番号: 40451439

小林 元康 (KOBAYASHI, Motoyasu)  
工学院大学・先進工学部・教授  
研究者番号: 50323176

野方 靖行 (NOGATA, Yasuyuki)  
一般財団法人電力中央研究所・環境科学研究所・主任研究員  
研究者番号: 10371535  
(平成26年度より研究分担者)

(3)連携研究者

室崎 喬之 (MUROSAKI, Takayuki)  
旭川医科大学・医学部・助教  
研究者番号: 40551693

グン チェンピン (Gong, Jian-Ping)  
北海道大学・先端生命科学科・教授  
研究者番号: 20250417

吉田 亮 (YOSHIDA, Ryo)  
東京大学・工学部・教授  
研究者番号: 80256495

北畑 裕之 (KITAHATA, Hiroyuki)  
千葉大学・理学部・准教授  
研究者番号: 20378532

(4)研究協力者

鈴木 航佑 (SUZUKI, Kosuke)  
海道 昌孝 (KAIDO, Masataka)  
山口 智彦 (YAMAGUCHI, Tomohiko)