

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：82108

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：24120005

研究課題名（和文）生物規範階層ダイナミクス

研究課題名（英文）Dynamics of biomimetic hierarchical structure

研究代表者

細田 奈麻絵（Hosoda, Naoe）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・グループリーダー

研究者番号：50280954

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 126,300,000円

研究成果の概要（和文）：生物のサブセルラー・サイズ構造の階層性は、防汚（ナメクジや蓮の葉）、自己治癒（葉の表面）、可逆的接着性（昆虫の脚裏）など多様な機能を発現している。本研究では、生物物理・材料/表面科学の視点からそのしくみを解明し、革新的な材料開発を目指した。中間評価以降は、特にエレクトロニクス実装への応用が可能な基盤技術（可逆的接合、セルフアライメント技術、防汚/防錆性付与、自己治癒による長寿命化、放熱特性の向上など）を重点項目として位置付け研究を展開した。これにより、人工材料にない優れた多層膜皮膜の開発、全く新しい発想による泡を利用したセルフアライメント、可逆的な接着機構の実現などほぼ計画通り達成できた。

研究成果の概要（英文）：The hierarchy of the sub cellular size structure of the creature develops various functions such as self-healing (surface of the leaves), the reversible adhesion (attachment device of the insect), self-alignment and antifouling (the surface of a slug and the lotus leaves). This study finds out about the mechanism of each function from the point of view of biophysics, the materials science or surface science and aimed at the innovative materials development. We achieved successfully a development of the superior multilayer films coating which conventional artificial materials did not have self-healing, antifouling, and development of the self-alignment which used the bubble by an idea new at all, the realization of a reversible adhesive mechanism approximately as scheduled.

研究分野：バイオミメティクス

キーワード：バイオミメティクス 接着 剥離 昆虫 防汚 自己治癒 エレクトロニクス実装 セルフアライメント

1. 研究開始当初の背景

携帯電話などのモバイルは多機能性、小型・軽量・高速/大量データ処理などの要求により、高密度実装や搭載部品の小型化・高効率化・温度上昇問題の解決・長寿命化が求められている。

エレクトロノクス実装では長高密度配線(狭ピッチ化)が要求されているが、従来のはんだ接合では20-30 μm 程度、拡散接合などにおいても10 μm が熱膨張ミスマッチの観点から限界とされている。このため接合温度の低温化が研究され、常温接合技術が開発されてきた。しかし、この手法では接触面を原子レベルで平滑化したり、高真空中のビーム衝撃などで表面処理をしたりする必要があるので、プロセス複雑性や製造コストの問題がある。実用化のためにはより容易な接合手法の開発が求められている。

一方、自然界には接着・接合が常温で行われている。例えばヤモリや昆虫が様々な表面上を垂直にも歩行できるのは、接着・剥離を迅速に繰り返す仕組みによる。近年ヤモリの接着性剛毛の仕組みについて詳しく調査され、独特な形状により有効弾性係数を4桁減少させ、柔軟な接触を実現し、接触面の分割と微細化により、実質接触面積を増加させるのに成功していることなどが分かってきた。また、生物体表面のサブセラー・サイズ構造は、ぬれ性の制御や常にフレッシュな分泌液を持続的に徐放することで、防汚、抗菌機能及び自己修復機能をもたらす長寿命化に貢献している。これらの生物の機能は、上述した技術開発の問題に解決のアイデアを提供するものである。

2. 研究の目的

本研究は生物のサブセラー・サイズ構造の階層性に起因する動的特性を生物物理・材料/表面科学の視点から解明し、生物の多様な機能(昆虫の足の可逆的接着性、ナメクジや蓮の葉のセルフクリーニング、魚類体表の自己治癒等)を規範として、革新的な実装プロセスの確立を目指す。特に、エレクトロノクス実装への応用が可能な基盤技術(可逆的接合、セルフアライメント技術、防汚/防錆性付与や自己治癒による長寿命化、放熱特性の向上など)を開発する。

3. 研究の方法

「バイオミメティクスはどのように開発すべきか?」という生物規範工学の根本から考え、生物をモデルにしたものづくりの方法論から取り組んだ。最終的にはバイオミメティクスの国際標準化にも積極的に取り組み発行(ISO18457)に至った。

本研究では、バイオミメティック開発プロセスとして次のAとBの2種類の手順で研究開発を実施した。A)生物学的な発見が新技術に発展する「バイオロジープッシュ」では1)生物に関する分析、2)アナロジー、3)原理

の抽出、4)要素技術開発、5)発明の順に開発を進め、B)工学的問題の解決策を生物を求める「テクノロジープル」では1)既存技術の問題の抽出、2)アナロジー、3)原理の抽出、4)要素技術開発、5)発明の順に開発を進めた。

4. 研究成果

A:バイオロジープッシュ

昆虫が「泡」を利用して水中を歩けることを発見-クリーンな水中接着への応用-

(1) 生物学的な分析

昆虫の脚の接着性に優れた付節については発生学的な形成過程を細胞レベルで観察し、細胞骨格であるアクチンの成長過程が明らかになった。接着のメカニズムの解明では、気質表面の化学的・形状的影響について具体的に明らかにした。行動解析では、ハムシが気泡を利用して水中を歩行できることを世界で初めて発見した。これらの生物学的研究は、泡を利用した水中でのセルフアライメント技術の発明へと繋がった。

(2) アナロジー

昆虫の泡を利用した水中接着では親水性表面では弱く疎水性表面では強い特徴や、泡の接着部分の水を水底から追い出し、接着性の高い剛毛を直接水底に接触させることができる特徴がある。技術移転を考えた場合、泡の接着性の強弱を利用したセルフアライメントや水中での傷のその場修理などが挙げられる。

(3) 原理の抽出

「泡を利用した水中接着機構」を作製し、泡の接着力をぬれ性の異なる表面で比較した。親水性表面では接着力が低く疎水性の表面では大きいことを確認した。接着原理を確認するため、モデルを立て(センサーが検出する力=毛管力(ラプラス圧+表面張力)+浮力+試料の重さ)、実験結果と比較した結果、良い一致が見られた。また、泡の安定性は、剛毛の密度・長さ、化学的性質の影響を受ける。ここでは、複数の毛状構造を設計し、試作した。(a)直径10 μm で長さ40 μm 、ピッチ20 μm 、(b)直径25 μm で長さ100 μm 、ピッチ50 μm 、(c)直径60 μm で長さ2.4mm、ピッチ1.5mm、(d)直径50 μm で長さ100 μm 、ピッチ150 μm 。試作した毛状構造の最先端部分にテントウムシのオスに見られる形状を加工したところ、高い強度を発現する可逆的な接着が可能となった。

(4) 要素技術開発

昆虫の剛毛に相当する毛状構造は微細かつアスペクト比が高いため、いくつかの方法で試作した。1)エッチングを利用した直接加工、2)エッチングによる鋳型の穴加工、2)レーザーを利用し鋳型を加工、鋳型を用いて毛の構造を作り、基板に貼り付けるが、この時の貼り付けは接着または、紫外線で表面改質したのち貼り合わせる方法を開発した。

セルフアライメント基板については、水中でチップが回転しても機能するように回転対称の配線を設計し試作した。

(5) 発明

ハムシが気泡を利用して水中を歩行できることを世界で初めて発見した。水中での気泡と剛毛の役割を明らかにし、特に疎水性表面状では陸上と同じように歩行でき、親水性表面上での水中歩行は低下することを明らかにした。これらの生物学的研究は、泡を利用した水中接着技術の発明へと繋がった。(Proc. Roy. Soci. B, 2012年)



図1 左は泡を利用して水中を歩行するハムシ。右はハムシの足を模倣し泡で接着している水中の模型のブルドーザー。

昆虫の水中歩行を模倣したセルフアライメント

昆虫の泡を利用した水中接着が親水性と疎水性表面で接着強度が異なるという特徴を利用し、小さなチップのセルフアライメント手法を開発した。チップサイズは 3.6mmx3.6mm を用い泡保持用の毛状構造を加工した。チップは疎水性の位置で接着され、その後、加振器で振動を加えることで期待する位置にセルフアライメントすることが確認できた。

B:テクノロジーブル

製品の長寿命化のため防汚及び自己修復機能の実現のため、ナメクジ、鱗、植物をモデルに開発を行った。以下、研究成果の概要を示す。

(1) メロンの補修機能を模倣した自己修復ハイブリッド皮膜の開発

層状構造を有する透明ハイブリッド膜の層間に防錆材である TTA を高濃度で挿入することにより、1) ダメージを受けた箇所の自己補修/修復、2) 表面機能が低下した場合、最表面層の剥離、除去による表面機能の回復、3) 層間に導入されたトリルトリアゾール分子による長期にわたる防錆機能維持を実現した。(ACS Appl. Mater. Interfaces, 2013年)

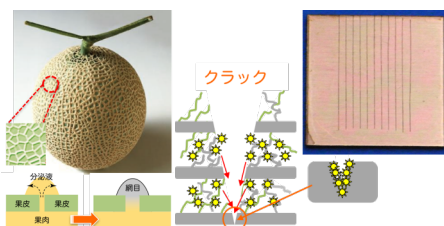


図2 左はメロンの成長時に発生するクラックと分泌液による補修のしくみ。右はメロンの補修のしくみを模倣した自己修復機能を持つ TTA ハイブリッド皮膜。

(2) 生物の分泌機能を模倣したはつ液材料：

SLUG の開発

ナメクジの分泌機能を模倣した自己分泌型機能材料を開発し、導入する液体を任意に選択することで、防汚性のみならず、着氷防止、付着防止、超撥水性、撥液性などの表面機能を付与できることが明らかとなった。

(J. Mater. Chem. A, 3, 2015年)



図3 左は粘性の分泌液により表面を清浄に保つナメクジ(犠牲的な表面清浄化)。右はナメクジの分泌機能を模倣したはつ液材料。

(3) 自己修復機能を有する高機能～透明防曇皮膜の開発～

魚類体表に倣った自己修復型多機能防曇皮膜(ポリビニルピロリドン/混合土複合膜)を開発した。開発した皮膜は高い透明性、防曇性、自己修復性を示しただけでなく、超親水性、抗菌性、水中超はつ油性といった多機能性を示した。

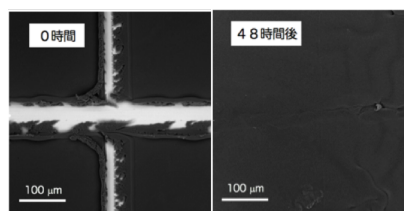


図4 左は皮膜に傷を付与した表面。高湿度下(80%以上)で24時間放置後、皮膜の傷が回復した(右)。

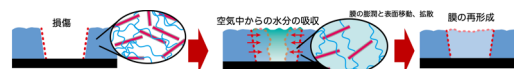


図5 推定される皮膜の自己修復メカニズム

(4) 珪藻殻への水蒸気吸着による伝熱特性の向上

極限環境にも生息する珪藻の有機成分の除去方法(熱処理、酸処理)の選定により微細特性と水蒸気吸着特性が変化することを明らかにした。珪藻核に水蒸気を保持させることで放熱特性が向上し、水蒸気吸着量と放熱特性に関係があることを見出した。

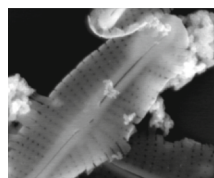


図6 珪藻核

この結果は、人工的に微細孔を形成し、水蒸気を吸収させることで放熱特性を制御で

きることを示している。

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 57 件)

① C. Urata, G. J. Dunderdale, M. W. England and A. Hozumi, “Self-Lubricating Organogels (SLUGs) with Exceptional Syneresis-Induced Anti-Sticking Properties Against Viscous Emulsions and Ices” *J. Mater. Chem. A*, (査読有り) 3, (2015), 12626-12630.

② B. Masheder, C. Urata and A. Hozumi, “Transparent and Hard Zirconia-Based Hybrid Coatings with Excellent Dynamic/Thermoresponsive Oleophobicity, Thermal Durability, and Hydrolytic Stability”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, (査読有り) 5, (2013), 7899-7905.

③ N. Hosoda, S. N. Gorb, “Underwater Locomotion in a Terrestrial Beetle: Combination of Surface De-wetting and Capillary Forces”, *Proc. Roy. Soci. B*, (査読有り) 279 (2012), 4236-4242

[学会発表]

招待／依頼講演 (国内: 計 78 件、国際: 計 32 件)

① Chihiro Urata, Matt W. England, Tomoya Sato, Atsushi Hozumi (基調講演), “Bio-Inspired Smart Surfaces Showing Anti-X Properties”, The 3rd International Conference on Bioinspired and Biobased Chemistry & Materials 2016 年 10 月 17 日 Nice, France

② N. Hosoda (基調講演), “Development of biomimetic underwater adhesion learning from a beetle”, Joint international symposium on “Nature-inspired Technology”, University of Hokkaido, Sapporo, Japan (2014 年 2 月 13 日)

[図書] (計 16 件)

① N. Hosoda, “The mechanisms of organisms as eco-materials design tools”, J. Kauffman, K.-M. Lee (eds), *Handbook of Sustainable Engineering*, Springer, (2013), 1249-1261

[産業財産権]

○出願状況 (計 7 件)

名称: 表面改質方法及び表面改質材料
発明者: G. J. Dunderdale, 穂積篤, 浦田千

尋

権利者: 独立行政法人産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 特願 2014-91865

出願年月日: 2014 年 04 月 25 日

国内外の別: 国内

[その他]

①ホームページ,

<http://biomimetics.es.hokudai.ac.jp/>

③ 報道関連情報 (計 46 件)

細田奈麻絵, “Beetles walk underwater”, *Nature*, 488, 7411 (2012 年 8 月 16 日)

④ 受賞 (計 10 件)

佐藤知哉, Matt W. England, 穂積篤, “魚類の体表に倣った自己修復型多機能防曇皮膜の開発”、大阪科学技術センター (OSTEC) 第 5 回ネイチャー・インダストリー・アワード 特別賞 (2016 年 11 月 30 日)

⑤ アウトリーチ (計 17 件)

細田奈麻絵, 高梨琢磨, 椿玲未, 不動寺浩, 下村政嗣, 齋藤彰, 劉浩, 針山孝彦, 石井大祐, 平井悠司, 田中博人 “バイオミメティクス- 生物はナノテクノロジーのアイデアの宝庫”, *サイエンスアゴラ*, 日本科学未来館 (2013 年 11 月 9-10 日)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

細田 奈麻絵 (HOSODA Naoe)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・グループリーダー

研究者番号: **50280954**

(2) 研究分担者

重藤 暁津 (SHIGETOU Akitsu)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・主任研究員

研究者番号: **70469758**

(3) 研究分担者

穂積 篤 (HOZUMI Atsushi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・構造材料研究部門・研究グループ長

研究者番号: **40357950**

(4) 研究分担者

浦田 千尋 (URATA Chihiro)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・構造材料研究部門・研究員

研究者番号: **40612180**

(5) 研究分担者

前田 浩孝 (MAEDA Hirotaka)

名古屋工業大学・工学系研究科・准教授

研究者番号: **20431538**

(6) 研究分担者

松尾保孝 (MATSUO Yasutaka)

北海道大学・電子科学研究所・准教授

研究者番号: **90374652**