

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K06252

研究課題名(和文) 体表ナノ構造は水中で接着力・摩擦力を低減するか？：生物模倣材料を用いた検証

研究課題名(英文) Do nano-structures on body surface reduce adhesion and friction in aquatic regime?

研究代表者

広瀬 裕一 (Euichi, Hirose)

琉球大学・理学部・教授

研究者番号：30241772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ニップルアレイは高さ100 nm前後の突起のアレイ構造で、様々な動物の体表に認められる多機能構造である。本研究ではニップルアレイの模倣材料であるモスマイトを用いて、微小粒子に対する表面吸着力・接着力が水中および大気中で低減することを明らかにした。さらに、ナノファブリケーションした高さ120, 200, 400 nmの褶曲構造に対して、ホヤ幼生が120 nm構造に対して負の選択性を示す傾向が示された。また、ウミウシ32種の体表粘液の屈折率と吸収スペクトルを計測し、粘液層が光反射を低減することを示唆した。体表ナノ構造や粘液層は微粒子や生物の付着防除、光反射低減に役立っていると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

様々な動物の体表に認められるニップルアレイが水中においても表面吸着力・接着力を低減することから、「汚れにくい表面」を本構造が構成している可能性が示された。泥の粒子などが分散する水中ではこの防汚機能は適応的であると期待される。また、異なるサイズの褶曲構造に対するホヤ幼生の選択性アッセイから、体表ナノ構造において100 nm前後というサイズに機能的な意味があることが示唆されている。生物模倣材料の社会的利用を検討する基礎情報となるだろう。加えて、体表粘液が動物体表に光学的機能を付加している可能性を示し、ナノ構造は粘液層の支持構造としても機能しているかも知れない。

研究成果の概要(英文)：Nipple arrays are array structures of protrusions approximately 100 nm high and are multifunctional structures found on the body surfaces of various animals. In the present study, the surface adsorption and adhesion to microparticles were found to be reduced in water and air using MOSMITETM, a material that mimics nipple arrays. Furthermore, for nano-fabricated fold structures 120, 200, and 400 nm in height, ascidian larvae showed a tendency to show negative selectivity for 120 nm structures. The refractive index and absorption spectra of the body surface mucus of 32 nudibranch species were measured, suggesting that the mucus layer reduced light reflection. Body surface nanostructures and mucus layers may help prevent adhesion of particulates and organisms and reduce light reflection.

研究分野：動物形態学

キーワード：ナノ構造 水棲生物 表面物性 ナノファブリケーション バイオミメティクス

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高さ 100 nm 前後の乳頭状突起のアレイ構造であるニップルアレイは水陸を問わず様々な動物の体表に認められ、それぞれの環境で機能を持つ多機能構造であると考えられている。大気中では光反射の低減や防汚機能が知られているが、水中においても光反射の低減をはじめ泡の付着や細胞の伸展、汚損生物の付着を低減することが明らかにされている。水圏で適応進化した動物の体表ナノ構造を液中で有用な多機能性表面の利用に展開することも期待される。

2. 研究の目的

水中における表面ナノ構造の物性計測を通して、水棲動物におけるナノ構造の機能を明らかにする。本研究では、ニップルアレイによる表面吸着力の変化を水中で実測し、大気中と同様に水中においても防汚機能が認められるかを明らかにする。同様に、表面摩擦力を計測し、ニップルアレイが「滑りやすい表面」を構成するか検討する。また、機能の構造サイズ依存性についてホヤ幼生の付着基質選択アッセイにより検証する。さらに、体表に付与される構造として体表粘液に注目し、粘液の光学特性からの機能を推定するこれらの知見を基礎として「体表ナノ構造は何のために存在するのか？なぜ多様な動物で高さ 100 nm 前後のニップルアレイが収斂的に進化したのか？」を考察する。

3. 研究の方法

(1) 表面接着力の計測：ニップルアレイの生物模倣材料である三菱ケミカル社の MOSMITE™ および同素材の平滑基盤を利用して、大気中および水中で原子間力顕微鏡による吸着力・接着力の計測を行う。プローブには水中に分散する泥の微粒子を想定し直径 4 μm の SiO_2 球を用いる。

(2) 摩擦力の計測：MOSMITE™ および同素材の平滑基盤を利用して、大気中および水中で摩擦力を計測する。基質面に対する垂直抗力を計測しながら摩擦力を計測するため、二軸微小力センサを利用した摩擦力計測システムを開発する。パラメーターとしてプローブサイズ、垂直抗力、基質の牽引速度について比較を行う。

(3) 構造サイズと機能：二光束干渉を利用してサイズの異なる 3 タイプ (高さ-周期:120–600, 200–1000, 400–2000 nm) の周期的褶曲構造を作製し、ホヤ (*Phallusia philippinensis*) 幼生を用いた付着基質の選択アッセイを行い、同素材の平滑面を加えた 4 タイプの基質間でホヤ幼生による選択性を評価する。

(4) 体表粘液の光学特性：様々なウミウシから体表粘液を採取し、屈折率および紫外～可視の領域で吸収スペクトルを計測する。

4. 研究成果

(1) 表面接着力の計測

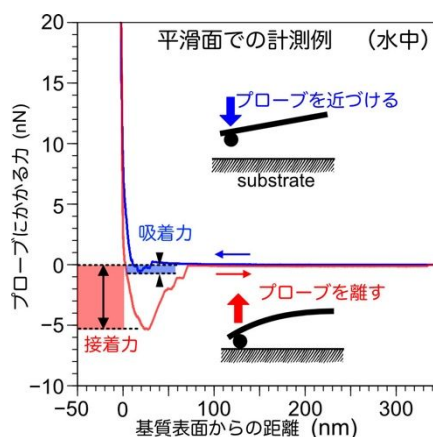
水中における計測では、プローブを基質表面に接近させた際に基質表面にプローブが引っ張られる力 (吸着力) と、基質に接したプローブを引き離す際に基質表面がプローブを引っ張る力 (接着力) が計測された (右図)。大気中でも接着力は計測されたが、吸着力はノイズの問題もあり不明瞭であった。

それぞれの力の関係は

吸着力 (水中) < 接着力 (水中) << 接着力 (大気中)

となったが、この吸着力でも水中における粒子の総体重量から推定される力の一千倍程度に相当するため、表面への微粒子の吸着・接着では大きな影響を持つと考えられる。

水中においても大気中においても、ニップルアレイ上の吸着力・接着力は平滑面の 1/4~1/5 に低減されており、大気中においても水中においても防汚効果が期待できることが明らかになってきた。大気中ではニップルアレイによる接着低減については先行研究があるが (Peisker & Gorb, 2010)、水中計測は先例がなく Uesugi et al. (2022) として論文発表を行なっている。

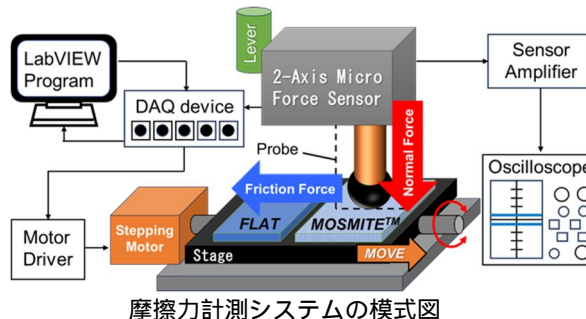


(2) 摩擦力の計測

二軸微小力センサを利用した摩擦力計測システムを開発し、静止摩擦力および動摩擦力の計

測を進めている。

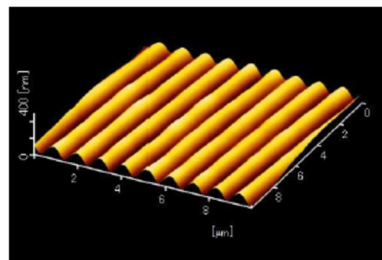
大気中ではニップルアレイによる摩擦力の低減効果が確認され、ニップルアレイが体表に「滑りやすい表面」を構成し self-cleaning 機能を付与することが示唆された。これは、前項の接着力低減と合わせて、ニップルアレイの防汚機能を支持している。また、動摩擦力計測時に生じるスティックスリップ現象（滑りと固着が交互に生じる間欠運動）がニップルアレイ上で抑制されていることも明らかとなった。



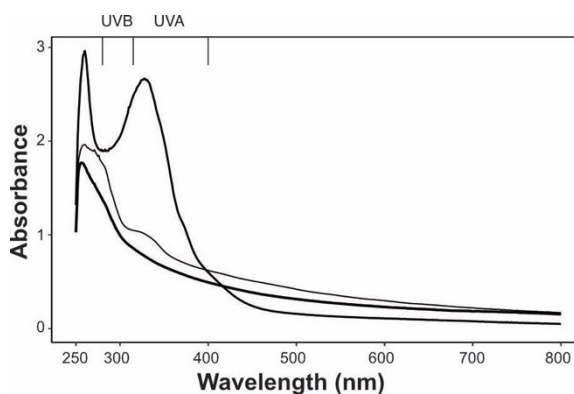
摩擦力計測システムの模式図

水中では摩擦力が低下し、ニップルアレイと平滑面での摩擦力の差が不明瞭である。これは、水中環境においてはニップルアレイの有無が表面の「滑りやすさ」にあまり効果がない可能性を示す。この場合、摩擦力の低下による「滑りやすい表面」は陸上生活を行う動物において獲得された機能であるのかも知れない。後生動物の祖先は水圏で生活していたと考えられるので、二次的に獲得された機能であると考えられるかも知れない。いずれにしても、慎重に解析を進めながら考察を行う必要がある。

(3) 構造サイズと機能：ホヤ幼生が付着基質としてニップルアレイよりも平滑面を選択することから、ナノ構造によって生物汚損が低減される可能性が示されている (Hirose & Sensui, 2019)。二光束干渉を利用したナノファブリケーションにより、右図のような周期的褶曲構造を作製した。褶曲構造は高さや周期の異なる3タイプで、これに同素材の平滑面を加えた4タイプの表面構造間で、ホヤ幼生による付着基質としての選択性を比較した。基質間で面積あたりの幼生付着数や割合に有意な差は認められなかったが、Manlyの資源選択指数を比較したところ 高さ120 - 周期600 nmの構造が他の構造よりも有意に選択されなかった ($P < 0.01$)。また、幼生の選択性評価では平滑面に対してのみ正の選択性が、120-600 nmの構造のみ負の選択性が示された。構造サイズによって選択性が異なることから、ホヤ幼生がナノ構造のサイズの差異を何らかの方法で認識できていると考えられる。幼生が表面ナノ構造を直接計測できるのかは不明であるが、表面構造の違いに伴う物性の違いを認識して基質を選択している可能性も考えられる。負の選択性が高さ120 nmの構造で認められたことは、多くの動物でニップルアレイの高さが100 nm前後であることと矛盾しない。多様な動物で高さ100 nm前後のニップルアレイが収斂的に進化したのは、このような機能的制限によるものであることが示唆される。



(4) 粘液の光学特性：ウミウシ32種の体表粘液の屈折率と吸収スペクトルを計測した。いずれの種においても屈折率は海水と近似していて、ほとんどの場合で屈折率はわずかに海水よりも高かった。このことから、海水中で光は粘液層の表面でほとんど反射しないと考えられる。多くのウミウシは鮮やかな体色を持ち、体色に適応的な機能があると考えられている。体表を粘液層がコートすることで体色を明瞭に表現すると期待される。吸収スペクトルでは体表粘液は可視領域において光をほとんど吸収していない (= 透明) ことから、粘液層は体色を損なっていないことが示されている。一部の種では粘液に紫外線吸収のピークが認められることから (右図)、粘液層が紫外線防御にも機能していると考えられる。沖縄で周年採集できるチドリミドリガイでは紫外線吸収ピークの有無が個体によって異なるため、紫外線吸収物質が餌由来である可能性も示唆される。体表に微絨毛を密生する動物では、微絨毛が粘液層の支持構造にもなっていることから、粘液層をあわせて体表構造と捉える必要があるかも知れない。粘液の光学特性を多数の種で報告が事例がないことから、Takano & Hirose (2024)として論文報告を行なっている。



< 引用文献 > (*は本研究によるものを示す)

Hirose, E., & N. Sensui, 2019. Does a nano-scale nipple array (moth-eye structure) suppress the

settlement of ascidian larvae? *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 99: 1393–1397.

Peisker, H., & S. N. Gorb, 2010. Always on the bright side of life: anti-adhesive properties of insect ommatidia grating. *Journal of Experimental Biology* 213: 3457–3462.

* Takano, R., & E. Hirose, 2024. Optical properties of body mucus secreted from the coral reef sea slugs: Measurement of refractive indices and relative absorption spectra. *Zoological Studies* 63: 2.

* Uesugi, K., K. Nagayama, & E. Hirose, 2022. Keeping a clean surface under water: Nanoscale nipple array decreases surface adsorption and adhesion forces. *Journal of Marine Science and Engineering* 10: 81.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Uesugi Kaoru, Nagayama Kazuaki, Hirose Euichi	4. 巻 10
2. 論文標題 Keeping a Clean Surface under Water: Nanoscale Nipple Array Decreases Surface Adsorption and Adhesion Forces	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 81 ~ 81
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/jmse10010081	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takano R, Hirose E	4. 巻 63
2. 論文標題 Optical properties of body mucus secreted from the coral reef sea slugs: Measurement of refractive indices and relative absorption spectra	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Zoological Studies	6. 最初と最後の頁 2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.6620/ZS.2024.63-02	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 4件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 上杉薫, 長山和亮, 広瀬裕一
2. 発表標題 ホヤの持つニップルアレイ構造の機能解明を目的とした接着力評価
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Uesugi, K
2. 発表標題 Force measurement for elucidating functions of surface micro-structures of living things
3. 学会等名 Panel Symposium "Biomimetics: Learn from Nature", The 38th International Conference of Photopolymer Science and Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Uesugi K, Nagayama K, Hirose E
2. 発表標題 Nipple array reduces adhesion force in the water: Evaluation of functional nano-scale structures of ascidians surface
3. 学会等名 The 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirose, E
2. 発表標題 Nipple array of tunic cuticle: a review of the multifunctional nanostructure under water
3. 学会等名 11th International Tunicate Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 広瀬裕一
2. 発表標題 海の動物における体表ニップルアレイ構造の多機能性と進化
3. 学会等名 高分子学会バイオメティクス研究会 22-3 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 広瀬裕一
2. 発表標題 海の動物における体表ニップルアレイ構造の多機能性と進化
3. 学会等名 高分子学会バイオメティクス研究会 22-3 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 広瀬裕一
2. 発表標題 体表面のニップルアレイ構造：機能の探索と仮説的進化過程
3. 学会等名 シンポジウム「非細胞素材」による形態形成のメカニズム 第46回日本分子生物学会年会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大内椋太，広瀬裕一，長山和亮，上杉薫
2. 発表標題 2軸微小力センサ搭載摩擦力測定システムによる生物体表を模倣したナノ構造の摩擦力評価
3. 学会等名 日本機械学会第34回バイオフロンティア講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大内椋太，広瀬裕一，長山和亮，上杉薫
2. 発表標題 生物の持つ表面ナノ構造による防汚機能の解明を目的とした摩擦力評価
3. 学会等名 関東学生会第 63 回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大内椋太，広瀬裕一，長山和亮，上杉薫
2. 発表標題 生物表面のナノ構造による液中での防汚機能メカニズム解明を目的とした摩擦力評価
3. 学会等名 日本機械学会第36回バイオフロンティア講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 泉水奏, 酒井大輔, 広瀬裕一
2. 発表標題 ホヤ幼生は表面ナノ構造のサイズを区別して付着基質を選択できるか?
3. 学会等名 日本動物学会九州支部第76回大会 (四学会合同大会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	酒井 大輔 (Sakai Daisuke) (10534232)	北見工業大学・工学部・准教授 (10106)	
研究分担者	上杉 薫 (Uesugi Kaoru) (20737027)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・助教 (12101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------