



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on New Adhesion and Friction Based on Stress Dispersion Effects of Surface Microstructure of Organisms [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	辻岡, 一眞
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第16369号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/94930
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	TSUJIOKA_Kazuma_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（理学） 氏名 辻岡 一眞

学 位 論 文 題 名

Study on New Adhesion and Friction Based on Stress Dispersion Effects of Surface Microstructure of Organisms

（生物表面微細構造の応力分散効果に基づく新たな接着・摩擦に関する研究）

本研究では、生物の表面微細構造を情報源として自然環境と人間社会の発展と調和につながる研究を行った。研究の流れは、生物の表面微細構造の発見・機能評価、シミュレーション等による原理解明、高機能材料への応用である。機能評価により長い進化の末に洗練された生物の技術を容易に得ることができる。原理解明は技術体系にギャップが有り直接使いつらかった生物の構造技術を人間社会に適用しやすくする。さらに人間の知識と組み合わせれば人間の問題解決のための優れた材料の作製が可能となる。加えて、本研究では環境負荷の少ない生産方法など、生物の優れた持続可能性をも学ぶ。最後に、得られた原理や機能を他の生物と比較することで、生物や生態系が持つ情報の重要性を明らかにする。このような生物を情報源とする研究は人間社会の持続可能性を高めるため重要であり、情報化社会の今、生態系の持つ情報の有用性を示すことは積極的な環境保護を促進する可能性があると考えた。本論文では上記の観点を考慮し、表面微細構造のもつ構造力学特性が接触力に与える影響について調査した。構造が材料強度に影響を与える研究は数多くあるが、生物表面微細構造、特に摩擦や接着などの接触力に関する報告は少ない。そこで我々は高い接着機能と微細構造を持つことが報告されているが微細構造機能と原理が不明なウバウオと、我々が新しく階層微細構造を発見したオオヒラタシデムシに関して研究を進めた。第1章では上記のような研究全体の背景、第2章ではウバウオ、第3章にはオオヒラタシデムシについての研究内容について記載し、第4章には総論を取り入れた。

第2章では、ウバウオ吸盤の毛状構造と粘液から新たな接着機構を明らかにし、微粒子を用いた機能性模倣接着材料への応用を行った。ウバウオは通常では困難な水中の粗い面での素早く、強力な接着が可能であり、吸盤には粘液と毛状構造を有しているがその機能は不明瞭であった。そこで我々は接着分野の基本原則である柔らかさ（接触面積増加）と硬さ（剥離抵抗）の両立に着目し、人工材料では時間や熱などのエネルギーが必要なこれらの両立を、ウバウオは柔らかい粘液と硬い毛状構造で達成していると考えた。実験の結果、硬い毛状構造が柔らかい PDMS で覆われたウバウオ模倣材料の接着力は PDMS によって生成され、毛状構造が PDMS の接着力を強化することが明らかになった。これは粘液と同じ流動性の高いグリースを用いても同様であった。シミュレーションによる解析から、ナノフィラメントへの応力分散が剥離に関わる接着界面への応力集中を防いでいる事がわかった。これらは毛状構造と PDMS のパラメーターを変化させた結果からも裏付けられた。作製した模倣構造は水中や紙やすりのような粗い面でも高い接着力を維持し、繰り返し使用することが可能であった。また、PDMS 表面に微細構造を転写することでカエルのような排水機能が付与され接着時間短縮ができた。応用として、解明した原理をもとに毛状構造よりも簡便に作製可能な微粒子を用いて高性能接着材料を作製した。これらは、ウバウオのように水中の粗い表面でも毛状構造を用いた模倣構造と同等以上の接着強度を持ち、繰り返し接着することができた。毛状構造

と同様に微粒子が硬さを担っていることが計算により明らかとなったが、フォースカーブにおける傾きは変化したため、微粒子の場合は硬さのうちコンプライアンスが変化したのに対し、毛状構造の場合はコンプライアンスが変化しなかった可能性が高い。ヤモリや甲虫、蜘蛛など他の生物における毛状構造の機能は接着力の生成であると言われており、水中に生息するウバウオやアワビにおいても同様に議論がされてきた。しかしながら水中での接着力生成は接着分野の知見から疑問視されるものであり、毛状構造による接着に重要なスパチュラをウバウオは欠いていることからその機能は不明瞭だった。タコやイソギンチャクなど毛状構造と粘液を持つ生物は他にもいるため、本研究は生物における毛状構造の新機能を示す可能性がある。また原理解明によってウバウオとは異なる構造を持つ微粒子であっても、同様の原理で優れた機能を実現できた。これは、PDMS の水中接着性という化学的な材料特性を損なうことなく構造で強化することで実現したため広い応用範囲を持ち、今後の機能性接着材料の研究開発に大きく貢献できる可能性がある

第3章では、構造力学、摩擦、生物学分野の知見を組み合わせ、オオヒラタシデムシの階層構造の摩擦低減機能を明らかにした。我々はオオヒラタシデムシがドーム構造にシワ構造がのった階層的な構造を持つことを初めて明らかにした。この構造機能は不明瞭だったが、落葉の下など摩擦が発生しやすい環境にしていることから摩擦機能が予想された。実際にヤスリで微細構造を除去した場合、微細構造のある表面に対して摩擦が増加した。その後、模倣構造を作製し摩擦測定を行ったところ、階層構造は、構造のない表面に対してしわ構造やMLAs(ドーム)のみの構造よりも摩擦を低減した。他の研究によれば今回のような乾燥摩擦において重要なのは真実接触面積であり、微細構造によってこれが減ったため摩擦が減少したとされている。しかしながら、摩擦の基本原則であるアモン・トンクローンの法則からすれば、微細構造によって接触面積が減っても荷重に比例して微細構造が変形するため真実接触面積、すなわち摩擦力は変わらないはずであった。これらは他の研究では詳細に議論されていなかったが、我々は形状によって応力集中の度合いが変わるため変形に影響を与えるという構造力学分野の知見を取り入れることで微細構造による摩擦低減を説明した。シミュレーションにより、階層構造はドームとシワの両方に対する有効な階層的荷重分散によって、接触点が大幅に減少しているにもかかわらず変形と真実接触面積の増加が抑えられ単層構造よりも摩擦を低減することが証明された。階層構造を持つ生物はヤモリやトビムシなど数多く存在するが摩擦低減は詳細に研究されていなかった。また、構造力学分野では変形抑制効果を有する表面が数多く報告されているため、荷重分散効果による摩擦低減と階層構造の有効性に関する知見は多くの生物の微細構造機能の解明につながるだけでなく、人間社会における余分な摩擦を低減するために有用である。次に、オオヒラタシデムシの階層表面微細構造を、人間が日常的に使用する弾性変形材料に適用した。その結果、階層構造は単層構造よりも大きな摩擦低減効果を示した。これは、最上部のしわ構造が滑り方向に変形し、ヒステリシスと掘り起こし摩擦を抑制しながら接触面積を大幅に減少させたためであることが測定と計算から明らかとなった。模倣構造は繰り返し摺動性、スティックアンドスリップ防止など多くの機能を有していた。本研究の環境問題に対する利点は潤滑剤を使用せずに摩擦を低減できるだけでなく、生物と同じく低環境負荷でかつスケールアップが容易な自己組織化によって微細構造を作製できることでもある。

本研究は、生物の構造や生態系の知見を明らかにし、それを人類の技術と融合することで高機能かつ多機能な材料の開発を可能とした。本研究は、エコミメティクスや蟲観学を取り入れた新たなアプローチとして、人類の持続可能性の向上に寄与するものである。