



ハエの脚裏を参考に、繰り返し着脱可能な接着構造を低コストで実現

～生きたサナギの成長を観察して「作り方」も模倣 リサイクルが容易となる環境調和技术として期待～

配布日時：2020年6月11日14時

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

概要

1. NIMS は北海道教育大学および浜松医科大学との共同で、「接着と分離を繰り返せる接着構造」を単純・低コストで製作できる新しい製造プロセスの開発に成功しました。ハエの脚裏にあるへら状接着性剛毛の構造を参考に、作り方もハエの「生きたサナギの中での成長」を観察して模倣することで実現しました。シンプルな製造方法で、しかも繰り返し使用できる接着構造は、持続可能社会における環境調和型の技術としての普及が期待されます。
2. 従来は「強力な接着」により丈夫な製品が作られていましたが、循環型社会では「強力な接着」がリサイクル時の分解・分別を妨げる問題が生じます。このため分解や繰り返し使用に配慮した設計が求められ、「接着と分離を繰り返せる新しい接合構造」の開発が進められています。バイオミメティクス（生物模倣技術）の分野では、このような接着構造を持つ生物の「形」を模倣して高機能の接着構造が開発されています。しかしながら、複雑な構造を製作するために MEMS（半導体製品製造技術）などを用いるため、高い生産コストが課題となっていました。
3. そこで本研究グループは、生物が接着構造（例えば、昆虫の脚裏）を少ないエネルギー消費で、しかも室温で形成していることに着目し、生物の「形」だけでなく、新たに生物自身の「作り方」を模倣する独創的な手法を開発しました。今回、接着と分離を繰り返せる接着構造として注目したのは「ハエ型」（脚裏のへら状接着性剛毛）です。キイロシヨウジョウバエのサナギの中での形成過程を、免疫組織化学染色及び細胞骨格性アクチンを蛍光標識することで観察した結果、へら状の脚裏接着性剛毛は、①剛毛形成細胞の伸長と細胞骨格性アクチン繊維により「へら状の骨組みを形成」した後、②クチクラの分泌により「固化」して形成するという、単純な形成プロセスであることを解明しました。この形成プロセスをもとに、①ナイロン繊維の引き上げ（へら構造の形成）と②固化という2ステップのみの単純な製作プロセスを設計し、ハエ型と同等の接着構造を室温で製作することに成功しました。作成した接着構造は、昆虫の脱着機構（用語解説1）と同様に、力をかける方向により強い接着力を示したり、簡単に分離させたりできる脱着効果を確認しました。わずか1本で、52.8gのシリコンウエハを持ち上げることができました（756本（9cm²）で60kgの人間がぶら下がれます）。
4. 「接着と分離を繰り返せる接着構造」は、産業用ロボットのアームに取り付けて滑りやすい製品の新しい保持方法にしたり、屋外用ロボットの脚部として虫のように垂直の壁を登れるようにしたり、新たな応用環境を拡大できる可能性があります。開発した製造プロセスにより生産コスト・製造エネルギーの低減が図れるため、持続可能社会を実現するための環境低負荷技術としての普及が期待されます。
5. 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点の細田奈麻絵グループリーダーが接着機構の開発を担当し、北海道教育大学木村賢一教授・南竜之介特任研究員（現在は：国立長寿医療研究センター）と浜松医科大学針山孝彦特命研究教授・山濱由美教務員らがサナギの接着構造形成プロセスの解明を担当しました。本研究は NIMS シーズ育成研究及び科研費新学術領域（No.24120004）の一環として行われました。本研究成果は、Communications Biology 誌の2020年5月29日にオンラインで掲載されました。

1. 研究の背景

従来は「強力な接着」により丈夫な製品を作ることを目指していましたが、循環型社会ではリサイクル時に強力な接着が製品の分解・分別を妨げることが問題になります。このため製造時から分解や繰り返し使用を考慮した設計が求められるようになり、その実現のために「接着と分離を繰り返せる新しい接合構造」の開発が進められています。

生物には「接着と分離に優れた接着構造」が見られます。歩行における足裏の機能に注目すると、鏡面でも滑らない接着機能や、壁や天井裏でも落ちない接着機能を有しており、歩行動作では接着だけでなく足を離す動作（分離）も繰り返す機能があります。これまでにバイオミメティクス（生物模倣技術）分野で生物の「形」を模倣して繰り返し接着構造が開発されています。しかしながら、製作には半導体製品製造に用いられる MEMS 技術を利用するなど複雑で高い生産コストが課題でした。

我々は、生物の接着機構（例えば、昆虫の脚裏接着構造）が、「少ないエネルギー消費」で、しかも「室温」で形成されることに着目しました。これまでの生物の「形」だけでなく、新たに生物自身の「作り方」を模倣する手法は独創的です。生きたサナギの中での成長が観察できる技術を用いて形成プロセスの解明と、その応用による人工的な製造プロセスの設計に挑戦することとしました。

2. 研究内容と成果

ハエやハムシなどの昆虫は、色々な表面を垂直にも逆さまにも歩くことができます。これらの昆虫の脚裏には接着に優れた毛が生えており、これを迅速にくっつけたり剥がしたりして歩いています。この仕組みは、繰り返し接着の開発のモデルとして注目されています。毛の形は色々ありますが、我々はシンプルな形状の「ハエ型」（脚裏のへら状接着性剛毛）の接着構造に着目しました（図1）。



図1 (a)キイロショウジョウバエの脚先（赤丸部分）。(b)脚先の拡大（電子顕微鏡写真）。水色（赤丸部分）が「ハエ型」（脚裏のへら状接着性剛毛）の接着構造。

変態過程のサナギの中で脚裏のへら状接着性剛毛が形成される様子は、キイロショウジョウバエを免疫組織化学染色及び細胞骨格性アクチンを蛍光標識することで観察しました。図2に示すように、サナギの中で(a)では見られなかった毛が、(b)で発生、(c)で成長、(d)で完成するまでの形成過程が観察できました。脚裏のへら状接着性剛毛は、人間の髪の毛のように「伸びる」のではなく、細胞の先端が固定され、細胞が内側に引き伸ばされるように伸びて形成されていました。

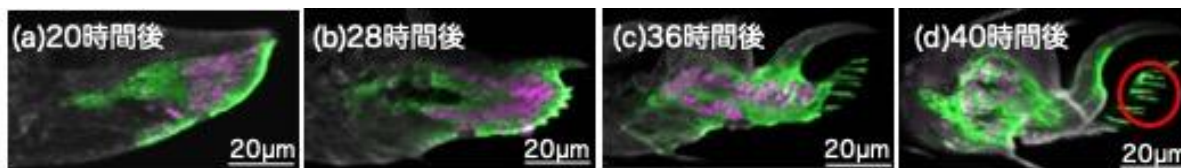


図2 キイロショウジョウバエのサナギ中で、脚裏のへら状接着性剛毛の形成プロセスを観察。緑色は剛毛形成細胞における細胞性アクチン繊維、マゼンタは剛毛形成細胞の核、灰色は前附節細胞。時間は蛹化後の経過時間。(a)毛の発生前。(b)毛の発生。(c)毛の成長。(d)毛の完成。

図3は、「ハエ型」(脚裏のへら状接着性剛毛)の接着構造の形成メカニズムを模式的に示したものです。観察結果をもとに、次の2ステップによる単純な形成プロセスでできることを解明しました。
 ステップ1： 剛毛形成細胞の伸長と細胞骨格性アクチン繊維により「へら状の骨組みを形成」。
 ステップ2： クチクラの分泌により「固化」。これで形成プロセスが完了。

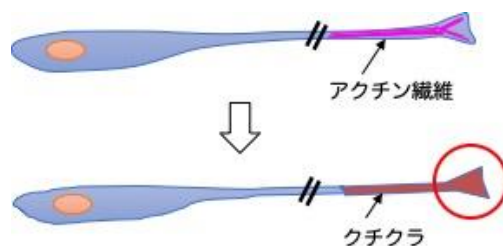


図3 「ハエ型」(脚裏のへら状接着性剛毛)の接着構造の形成メカニズム(模式図)。
 (a)剛毛形成細胞が伸長し、細胞骨格性アクチン繊維により「へら状」の骨組みを形成する。
 (b)クチクラの分泌により「固化」して形成が完了する。この単純な2ステップにより形成できる。

観察により解明した単純な2ステップによる「形成プロセス」をもとに、人工的な接着構造の製作プロセスを設計しました。これまでのバイオミメティクス(生物模倣技術)は生物の「形」を模倣しましたが、新たに生物自身の「作り方」を模倣する手法は独創的な手法です。図4に示すように、①ナイロン繊維の引き上げ(へら構造の形成)と②固化の「2ステップ」のみで製作することができます。実際にこの製作プロセスを用いて、室温での製作に成功しました(図5)。

この接着構造は、昆虫と同様に(用語解説1)、接着面に対して剪断方向に強い接着力を示し、垂直方向には弱い力で簡単に分離できる機能を持つことが確認できました(脱着効果)。開発した単純なプロセスにより低コスト化が可能となります。

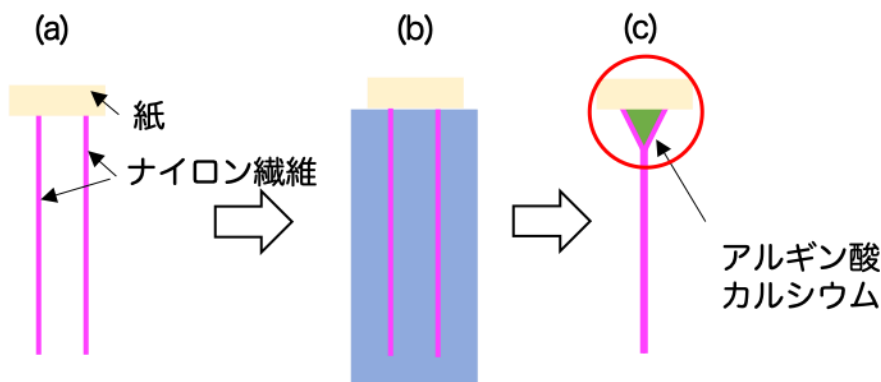


図4 「ハエ型」(脚裏のへら状接着性剛毛)の接着構造の人工的な製作プロセスの概略図。
 (a)骨組みをナイロン繊維で作成する。(b)片方を固定したナイロン繊維を樹脂に浸し、引き上げるとへら状の形に自己組織化する。(c)その後、固化して完了する。

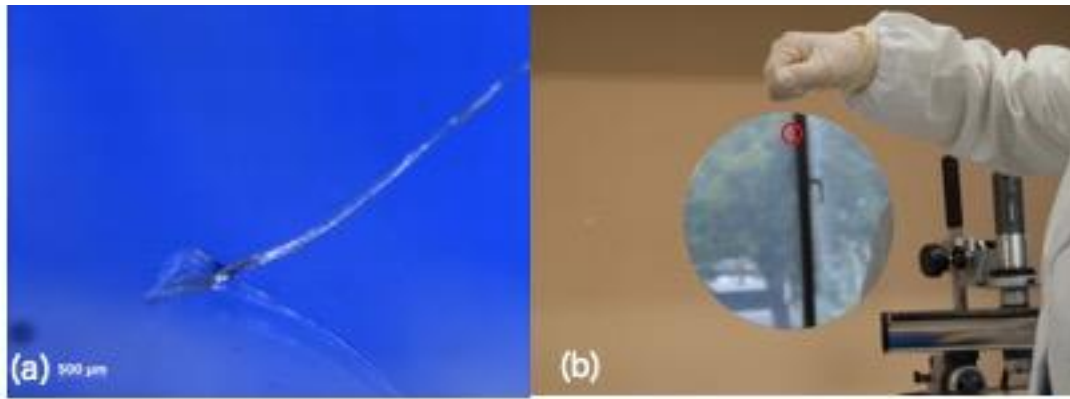


図5 人工的に製作した「ハエ型」(脚裏のへら状接着性剛毛)の接着構造。(a) ガラス板に接着させた様子。(b) 一本のみでシリコンウエハー(52.8g, 直径 20.3cm)を持ち上げる。赤丸は接着部。

3. 今後の展開

本研究で開発した「接着と分離を繰り返せる接着構造」は、新たな応用環境を拡大できる可能性があります。産業用ロボットのアームに装着すれば、滑りやすい製品や持ちにくい製品でも組み立て時に保持させることができます(脱着機能の応用)。また、屋外用ロボット(災害対応ロボットやドローンなど)の脚部に装着することにより、虫のように垂直の壁を登らせるなど今までは困難だった場所での移動や固定が可能になります。

昆虫の脚裏は、接着と剥離を迅速に繰り返すことができ、様々な表面を歩行することができるので、このような機能をロボットの脚部に応用すると昆虫のように3次元に歩いて移動することを実現できます。今後、多様な環境での使用を可能とするための開発を推進する計画です。社会実装にあたり、開発した製造プロセスを用いることで生産コスト・製造エネルギーの低減が図れるので、持続可能社会を実現するための環境低負荷技術としての普及が期待されます。

掲載論文

題目: Framework with cytoskeletal actin filaments forming insect footpad hairs inspires biomimetic adhesive device design

著者: Ken-ichi Kimura, Ryunosuke Minami, Yumi Yamahama, Takahiko Hariyama, Naoe Hosoda

雑誌: Communications Biology

掲載日時: 5月29日

DOI: <https://doi.org/10.1038/s42003-020-0995-0>

用語解説

- (1) 昆虫の脱着機構: ハエやハムシなど脚裏に毛状接着構造のある昆虫は、引っ張る方向で着脱の制御をしています。被着表面に対して平行に引っ張ると強く接着し、垂直に引っ張ると簡単に分離できます。昆虫はこのような接着力の異方性(引っ張る方向によって異なる性質)を利用して脱着を繰り返し歩行しています。開発した「ハエ型」(脚裏のへら状接着性剛毛)の接着構造もこれと同様に接着力に異方性があることが確認できました。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 表面接着科学グループ
グループリーダー 細田奈麻絵(ほそだなおえ)

E-mail: Hosoda.Naoe@nims.go.jp

TEL: 029-860-4529

(報道・広報に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp