

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ヤモリ足裏構造にインスピレーションされた可逆接合に関する研究
Title(English)	Study on the reversible adhesion inspired from gecko foot hairs
著者(和文)	関口悠
Authors(English)	Yu Sekiguchi
出典(和文)	日本接着学会誌
Citation(English)	Journal of the Adhesion society of Japan
発行日 / Pub. date	2019, 2
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

〈総合論文〉

ヤモリ足裏構造にインスピレーションされた可逆接合に関する研究

関口 悠*

要旨

接着に関連したバイオミメティクス（生体模倣技術）の中でも、ヤモリの足裏に見られる接着性には可逆接合という特徴がある。ヤモリは分子間力を巧みに利用して、自らの体重を支えるのに十分な凝着力を獲得することに成功したが、凝着している足を簡単に剥がせるからこそ歩いたり走ったりすることができる。この剥がし易さのメカニズムを理解することは、ヤモリ型の可逆接合を実現する上で重要である。本論文では、ヤモリ足裏に見られる凝着現象の脱離メカニズムに着目した。足裏構造を簡易化した凝着モデルを用いて凝着力の方向依存性について解析的に検討することで、構造上の特徴により異方性が発現していることを明らかにした。更に、ヤモリ足裏構造にインスピレーションされた凝着デバイスを作製し、凝着異方性を実験的に検証するとともに、応用を想定したマニピュレーションシステムの検討を行った。

*東京工業大学 科学技術創成研究院 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 〒226-8503

1. はじめに

ヤモリや昆虫などの足に突起のない壁を移動できるという特殊能力があることは古くから人間の興味を引き、一世紀ほど前の論文にも‘gecko’や‘adhesive’をいうキーワードが登場している¹⁾。更に、電子顕微鏡の登場による微細毛構造の詳しい観察^{2~4)}や、微細加工技術の応用による微細毛 1 本の凝着力測定⁵⁾など技術の進歩とともに徐々に明らかにされてきたヤモリ足裏の秘密は、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)を活用した生体模倣デバイスによって再現されようとしている^{6~12)}。

生物の優れた機能に学び、模倣し、新技術として活用することをバイオミメティクス（生体模倣技術）と呼ぶ。ヤモリやその他生物の接着・凝着現象においてもバイオミメティクスが 21 世紀になってから活発化している。バイオミメティクスで特に重要となるのが抽象化のプロセスであると言われている¹³⁾。生物の構造は、複数の目的を同時に達成するために複雑な構造となっていることが多い。従って、求める性能を獲得するためには複雑な構造の中から重要となる構造を発掘するセンスが鍵となる。ヤモリ足裏の接着性についても、体重を支えるための強力な凝着力・移動するための可逆接合性・汚れても凝着力を回復するセルフクリーニング機能など様々な特徴を持っている。

本報では、ヤモリ凝着現象の可逆性を実現していると考えられている凝着力の方向依存性に着目し、足裏の微細毛構造を単純な凝着モデルへと置き換えることで解析的な検討を行った。更に、構造を似せたデバイスを作成し、実験による凝着異方性の検証および応用へ向けた検討を行った。

2. ヤモリにインスピレーションされた凝着モデルによる解析

ヤモリの足裏はマイクロスケールの構造体であるセタとナノスケールの構造体であるスパチュラの階層構造になっている。各構造が凝着力変化へ及ぼす影響を議論するために、それぞれの構造を単純化した解析モデルが構築された（図 1）。スパチュラはその名の通りヘラ状構造となっており側面が凝着をしているため、徐々に凝着部分が剥がれると仮定し、エネルギー平衡条件から解析を行った。一方で、セタは剛毛が斜めに生えた構造となっており先端凝着部が着脱するため、先端凝着部の応力がある閾値に達すると剥がれると仮定し、先端凝着部の応力分布から解析を行った。

2. 1 スパチュラのモデル化

ヘラ状の構造体側面が凝着するスパチュラ（図 1d）の単純化として、固定端が角度 θ で傾いている片持ちはり平面基板表面に凝着するモデルを考える（図 1f, 1g）。構造体が基板に近づくと側面が凝着し、離れると脱離する。固定端から基板表面までの距離が与えられると、構造体の変形に伴う弾性エネルギーは凝着面積の関数として求まる。そして凝着仕事と弾性エネルギーの関係から平衡状態での凝着面積が定まる。このモデルでは、固定端に負荷される外力の向きによって構造体のうち凝着していない部分の変形が変わる。

固定端の傾き方向に外力が負荷される場合(図 1f), 構造体の非凝着部は長さ方向の引張によって変形するので, テープの引き剥がし理論を用いて剥離時の力が求まる¹⁴⁾。この方向に外力が負荷されると, 剥離中は外力が一定となる。外力のなす仕事, 伸びによる弾性エネルギー, 表面界面のエネルギー変化を考慮することで, 外力の垂直方向成分は,

$$F_{\text{Peel}} \sin \theta = \frac{4EI\Gamma^2 \sin \theta}{\left(\sqrt{(1-\cos \theta)^2 + \frac{\Gamma^2 H^2}{3L^2}} + 1 - \cos \theta\right)L^2} \quad (1)$$

となる¹⁵⁾。ただし, $E, H, L, W, I = WH^3/12$ はそれぞれ構造体のヤング率, 厚さ, 長さ, 幅, 断面二次モーメント, $\Gamma = \sqrt{6\Delta\gamma L^2/EH^3}$ は凝着仕事 $\Delta\gamma$ に関連する無次元化パラメータである。固定端の外力負荷方向が基板に垂直な場合(図 1g), 構造体の非凝着部は曲げによって変形するので, はり理論を用いて変形を記述することで剥離時の力が求まる^{16, 17)}。この方向に外力が負荷される場合, 剥離に伴い力に変化する。剥離プロセス中の外力の最大値は, 剥離開始時の非凝着部長さ l_0 と Γ および θ の条件により場合分けできる。 $\tan \theta < \Gamma l_0/L$ では剥離開始時に最大となり

$$F_{\text{Beam}} = \frac{2EI(2l_0\Gamma - L \tan \theta)}{Ll_0^2}, \quad (2)$$

$\Gamma l_0/L < \tan \theta < \Gamma$ では剥離途中に最大となり

$$F_{\text{Beam}} = \frac{2EI\Gamma^2}{L^2 \tan \theta}, \quad (3)$$

$\Gamma < \tan \theta$ では剥離終了時(構造体が脱離する瞬間)に最大となり

$$F_{\text{Beam}} = \frac{2EI(2\Gamma - \tan \theta)}{L^2} \quad (4)$$

となる¹⁷⁾。

これら 2 方向に外力が負荷された場合に固定端に働く最大垂直力を θ の関数として図 2 に示す。ただし, 各パラメータはスパチュラの値^{18, 19)}を参考に $E = 2 \text{ GPa}$, $W = L = 200 \text{ nm}$, $H = 5 \text{ nm}$ とし, 凝着仕事 $\Delta\gamma \approx 0.01 \text{ J/m}^2$ であることから $\Gamma = 3.0$ とした。この結果から, 広範な θ において基板垂直方向に外力を加えるよりも構造体の傾きに合わせて外力を加えるほうが剥離時の最大垂直力を増加させる。すなわち, 外力の方向によって剥がれ易さに変化する。ここでは, 外力が 2 方向に負荷された場合の剥離現象に対するモデルを解析したが, 任意の角度に対する剥離をモデル化できれば理想的である。後者のモデルを拡張することで, 外力が垂直方向から少し傾いた場合において外力の方向が最大垂直力に及ぼす影響も議論されている^{20, 21)}。この拡張モデルでも, 外力の向きと最大垂直力の関係において同じ傾向が示された。以上より, スパチュラのようなへら状構造体の凝着現象では外力の方向が脱離のし易さにおいて重要であることが明らかとなった。

2. 2 セタのモデル化

先端凝着部が着脱する構造となっているセタ(図 1c)の単純化として, 傾斜はり構造のモ

デルを考える (図 1e)。固定端 (上端) において外力が任意の方向に負荷されると、先端凝着部 (下端) では凝着し続けるためにモーメントが生じる。先端凝着部の垂直応力の分布は外力の向きによって図 3 に示すように変化する。脱離は応力の最大値がある値を超えたときに起きるため、先端凝着部の応力分布、つまり先端凝着部に生じるモーメントが脱離条件を決める上で重要な役割を果たす。はり理論を用いて変形を記述すると上端の回転が抑制されている場合、先端凝着部に働くモーメントは

$$M_C = (F_t \sin \theta - F_n \cos \theta) \frac{\cosh(pL)-1}{p \sinh(pL)} \quad (5)$$

と与えられる²²⁾。ただし、 $p = \sqrt{(F_t \cos \theta + F_n \sin \theta)/EI}$ である。先端凝着部でのモーメントによる垂直応力 σ_m が線形に分布すると仮定すると端部で最大となり、その最大値は

$$\sigma_{m,\max} = \frac{6|M_C|}{WT^2} \quad (6)$$

と与えられる。先端凝着部にはモーメント以外にも、上端に負荷された外力による垂直応力 σ_n とせん断応力 τ が働く。破断を生じさせる応力の閾値を σ_{ad} とし、2次元応力状態における主応力との比較より脱離の判断を行うと、脱離の判断基準は垂直応力の和 $\sigma_n + \sigma_{m,\max}$ とせん断応力 τ を用いて

$$\sigma_{ad} > \frac{\sigma_n + \sigma_{m,\max}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_n + \sigma_{m,\max}}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (7)$$

と与えられ、実験値と良い一致を示すことが確認された²³⁾。

セタの寸法を参考にしたパラメータを用い、脱離条件を計算した結果を図 4 に示す。先端凝着部の面積を $100 \mu\text{m}^2$ 、傾斜角度を 30 度、長さとのアスペクト比を 10 、垂直応力の応力集中係数を $\alpha = 1.5$ 、応力の閾値を $\sigma_{ad} = 0.1 \text{ MPa}$ とし、ヤング率が 1 GPa と 1 MPa の場合を図示している。線で囲われた内側の範囲が凝着していられる条件である。構造体のヤング率が低く、大きく変形する構造であるほど凝着していられる条件が拡大することが分かる。これは先端凝着部のモーメントが低く抑えられるためである。

3. ヤモリにインスピレーションされた凝着デバイスの試作

構造を単純化したモデルを用いてヤモリ足裏の凝着現象を解析することで、非常にシンプルな構造であっても外力の向きを変えることで着脱できる可能性が示された。その一方で、ヤモリに関する生体模倣については、力学解析によるメカニズム解明よりも模倣デバイスによるメカニズム再現のほうがはるかに速いスピードで進んできた。多くの模倣デバイスの進化を追うと、より複雑な形状を追い求めている傾向が見て取れる¹¹⁾。ヤモリの足裏構造を見れば非常に複雑な形状をしており、その模倣となれば複雑化は避けて通れない。しかしながら、凝着異方性という観点のみで言えば解析で示された通りシンプルな構造により実現可能である。足裏の構造は様々なメカニズムを複合的に獲得するために複雑になっている。1つ1つの構造がそれぞれ何の役割を果たしているか明らかにすることで、目的を達

成するために有効な構造を複雑な形状の中から識別することが可能になる。各構造に対する理解を深めることは、生物の模倣による機能獲得にとどまらず、生物をヒントにさらに優れた機能を追求することへとつながる。

スパチュラのように斜めに生えた構造体の側面が凝着するデバイスの試作では、ミハイルらにより θ 方向と垂直方向に外力を加えた引き剥がしにおいて、約 5 倍の力変化が起きることが報告された²⁴⁾。また、筆者らはセタのように斜めに生えた構造体の先端が凝着するデバイスを用いた凝着力測定実験により、脱離時の力が外力の向きによって変化することを確認めるとともに、構造体の先端形状に工夫を加えることで（図 5）、先端形状が凝着力へ及ぼす影響を明らかにした²⁵⁾。この構造の場合、外力の負荷方向 $\phi = \tan^{-1}(F_n/F_t)$ が構造の傾斜角度 θ に一致するときに脱離時の力が最大となる。また先端形状の違いにより外力の角度依存性に変化が生じることが実験的に示された（図 6）。これらの検討により、強い力での凝着と弱い力での脱離が外力の負荷方向により切り替え可能であることが実験的に確認された。

4. マニピュレーションへの応用に関する検討

ヤモリは凝着異方性による着脱を移動手段に利用した。また、このメカニズムにインスピレーションされたシンプルな構造の凝着デバイスでも凝着異方性を獲得することに成功した。一方で、このような接手法は特定の方向に弱いいため、様々な方向から外力が負荷される条件下での使用には適さない。また近年では剥がせる両面テープなども登場しており差別化は難しい。製造プロセスの難易度の高さや価格面でのハードルもあり、ヤモリ型の凝着技術は普及には程遠いのが現実である。従って、ヤモリを中心とした凝着現象の生体模倣技術を活用するためには、用途の開拓もメカニズムの解明や模倣デバイスの開発と同時に求められる。そこで本報では、ヤモリ模倣型凝着デバイスの応用例として可逆接合性を生かすことができる平板マニピュレーションへの応用を新たに検討した。一般的な物体操作手法であるロボットハンドが苦手とする突起のない平板の物体操作（マニピュレーション）には真空チャックが広く利用されるが、負圧を供給できない閉鎖空間などでは利用できない。分子間力によって面を把持できる凝着デバイスの特徴を利用することで、今まで利用されてこなかった場面でのマニピュレーションが期待される。

マニピュレーションでは確実な着脱、即ち確実な凝着力の制御が求められる。まず始めに、駆動プロセスに関して検討した結果、水平移動と垂直移動の同時駆動では力の働き方にばらつきが大きく、リアルタイムに外力を監視しながら制御しなければ確実な着脱は難しいことが分かった。一方で、2 方向の移動を別々に行う方式では各方向の移動量によっておおよその外力が予測できるため、外力を監視せずに着脱を行えることが明らかとなった。図 7 に示す 2 軸ロードセルと 2 軸電動ステージを用いて、平板へのアプローチ（下方向）、水平移動、平板からの後退（上方向）という 3 ステップの変位制御により着脱を行った際に、凝着デバイスに働く最大垂直力を図 8 に示す。水平方向の移動は水平力を、垂直方向の移動

は垂直力を主に変化させる。従って、水平方向の駆動距離が長いほど水平力が大きい状態となり、最大垂直力を減少させる。また、左右ともにある距離以上の水平移動で上方向への移動の前に脱離が起きることが分かった。一方で、接触後の圧力については押し込み力が 1N を超す場合、最大垂直力が若干減少する傾向にあるが、これは押しつけ過ぎにより構造体の一部が剥がれたためと考えられる。図 9 に凝着デバイスを左右対称に配置し、スライドガラスをマニピュレートする様子を示す。上下運動でガラスを持ち上げ (Pick)、上下運動の間に水平駆動を加えることで配置 (Place) を行った。水平方向の駆動距離は図 8 の実験結果で最大垂直力がゼロとなる 150 μ m 以上とした。配置プロセスにおいて、水平駆動の向きが逆になると剥がれ方が異なることが図 10 の拡大写真 5 番の違いより分かる。すなわち、図 3a と図 3c の脱離の違いが観察された。マニピュレータには 2 つのデバイスを取り付けられており、最大約 4N の把持性能を備えている。質量わずか 4.7g のガラスを持ち上げるには十分な性能であるが、逆に配置するためには最大性能の 1/100 以下まで把持力を確実に減少させる必要がある。今回用いた凝着デバイスには、1 つのデバイスにつき 18 個の微小構造体を配置しており、そのうちの 1 つでも凝着した状態では配置することが出来ない。繰り返し実験を行う中で、図 3a の剥がれ方よりも図 3c の剥がれ方のほうが、今回行った条件下では脱離成功率が高いことが分かった。図 3a の剥がれ方では剥がれたのちに一部が再凝着するケースが観察されており、これが脱離成功率を下げている主要因であると考えられる。しかしながら、今回の実験では駆動プロセスの最適化は行っておらず図 3a の方法でも成功率改善の余地は十分にあると考える。一方で、図 3c の剥がれ方では今回実験した条件でもほぼ 100% に使い成功率を記録した。以上の検討より、構造の特徴を利用した異方性凝着デバイスはマニピュレーションへの応用可能性を十分に秘めていることが示された。

5. おわりに

本報では、ヤモリの足裏に見られる凝着現象に対して力学的観点からメカニズムの解析を行った。また、得られた知見をもとに脱離時の力が外力の負荷方向によって変化する凝着デバイスの試作を行い、その応用可能性について検討した。この 20 年余りでヤモリの凝着現象に関する研究はかなり進展した。その一方で、他の生体模倣技術に比べると製品化へ結びついた事例は非常に少ないように思われる。これは‘接着’という現象の扱い難さにも関係するのかもしれない。しかしながら、ニーズが高まったときに研究を進めたのでは後手を踏むことになる。基礎技術の更なる確立を図りながら、幅広い応用先の検討を行うことが今後の課題である。

謝辞

本研究は東京工業大学理工学研究科国際開発工学専攻および東京工業大学科学技術創成研究院にて行われた研究の成果である。研究にあたってご指導いただいた高橋邦夫先生・齋藤滋規先生・佐藤千明先生（東工大）に厚く御礼申し上げます。また本研究は、JSPS 科学研

究費補助金の特別研究員奨励費（12J07674）、研究活動スタート支援（25889020）、若手研究（B）（15K17933）、若手研究（18K13656）による支援を受けて実施されました。

文献

- 1) S. L. Hora, *J. Asiatic Soc. Bengal*, **19**, 137-145 (1923).
- 2) P. F. A. Maderson. *Nature*, **203**, 780-781 (1964).
- 3) R. Ruibal, V. Ernst, *J. Morphol.*, **117**, 271-294 (1965).
- 4) P. Russell, *J. Zool. Lond.*, **176**, 437-476 (1975).
- 5) K. Autumn, Y. A. Liang, S. T. Hsieh, W. Zesch, W. P. Chen, T. W. Kenny, R. Fearing, R. J. Full, *Nature*, **405**, 681-685 (2000).
- 6) A. K. Geim, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, K. S. Novoselov, A. A. Zhukov, S. Y. Shapoval, *Nature Mater.*, **2**, 461-463 (2003).
- 7) B. Aksak, M. P. Purphy, M. Sitti, *Langmuir*, **23**, 3322-3332 (2007).
- 8) D. Santos, M. Spenko, A. Parness, S. Kim, M. Cutkosky, *J. Adhesion Sci. Technol.*, **21**, 1317-1341 (2007).
- 9) Y. Maeno, Y. Nakayama, *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 012103 (2009).
- 10) H. E. Jeong, J. K. Lee, H. N. Kim, S. H. Moon, K. Y. Suh, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **106**, 5639-5644 (2009).
- 11) M. K. Kwak, C. Pang, H. E. Jeong, H. N. Kim, H. Yoon, H. S. Jung, K. Y. Suh, *Adv. Funct. Mater.*, **21**, 3606-3616 (2011).
- 12) K. Jin, J. C. Cremaldi, J. S. Erickson, Y. Tian, J. N. Israelachvili, N. S. Pesika, *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 574-579 (2014).
- 13) N. Hosoda, *J. Adhesion Soc. Jpn.*, **51**, 479-483 (2015). (細田奈麻絵, 日本接着学会誌)
- 14) B. Chen, P. D. Wu, H. Gao, *Proc. R. Soc. A*, **464**, 1639-1652 (2008).
- 15) K. Kendall, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **8**, 1449-1452 (1975).
- 16) Y. Sekiguchi, P. Hemthavy, S. Saito, K. Takahashi, *J. Adhesion Sci. Technol.*, **26**, 2615-2626 (2012).
- 17) Y. Sekiguchi, P. Hemthavy, S. Saito, K. Takahashi, *Int. J. Adhesion Adhesives*, **49**, 1-6 (2014).
- 18) H. Gao, X. Wang, H. Yao, S. Gorb, E. Arzt, *Mech. Mater.*, **37**, 275-285 (2005).
- 19) Z. L. Peng, S. H. Chen, A. K. Soh, *Int. J. Solids Struct.*, **47**, 1952-1960 (2010).
- 20) 関口悠.「固体間凝着力制御による把持と脱離」国立大学法人 東京工業大学, 2013.3, 博士後期課程学位論文
- 21) 今井裕太, 若林一貴, ヘムタビー・パソムポーン, 高橋邦夫, 第23回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文集, 387-390 (2017).
- 22) Y. Sekiguchi, S. Saito, K. Takahashi, C. Sato, *Int. J. Adhesion Adhesives*, **62**, 55-62

(2015).

23) Y. Sekiguchi, K. Takahashi, C. Sato, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **48**, 475301 (2015).

24) サリュコフ・ミハイル, 井口洋二, ヘムタビー・パソムポーン, 齋藤滋規, 高橋邦夫, 第 24 回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文集, 261-264 (2018).

25) Y. Sekiguchi, C. Sato, *Appl. Adhesion Sci.*, **5**, 8 (2017).

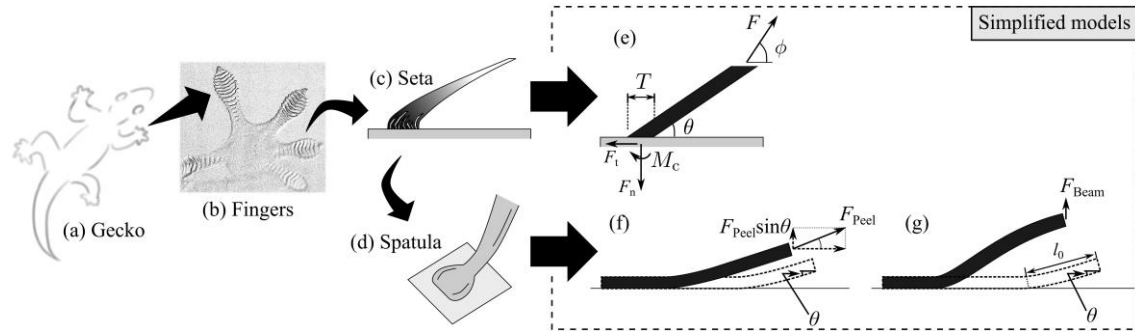


Fig. 1 Schematic flow of gecko's foot modeling.

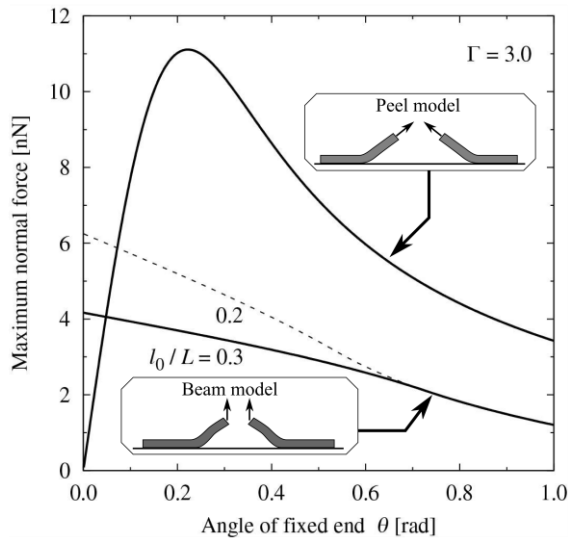


Fig. 2 Relation between maximum normal force and angle of the fixed end of spatula-like structure with different loading conditions.

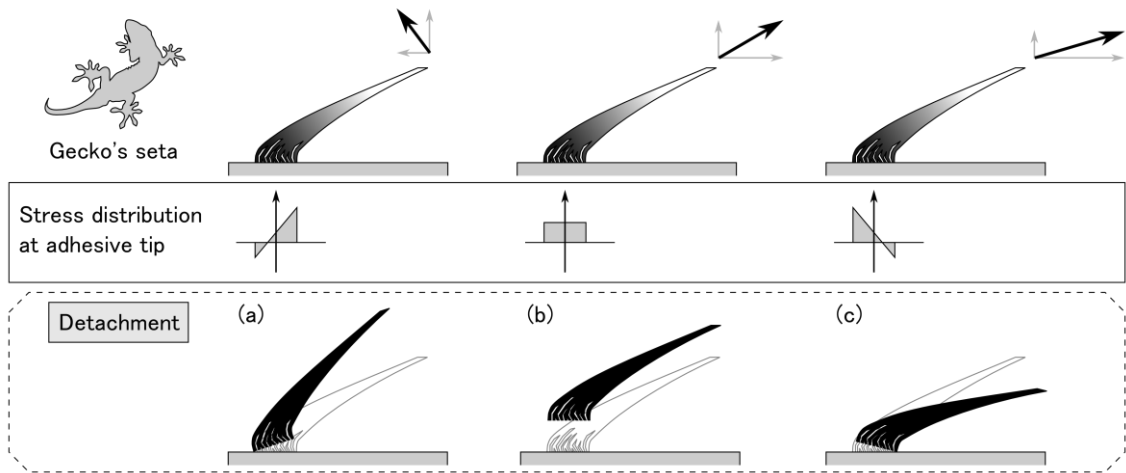


Fig.3 Stress distribution and detachment of seta with different loading angle.

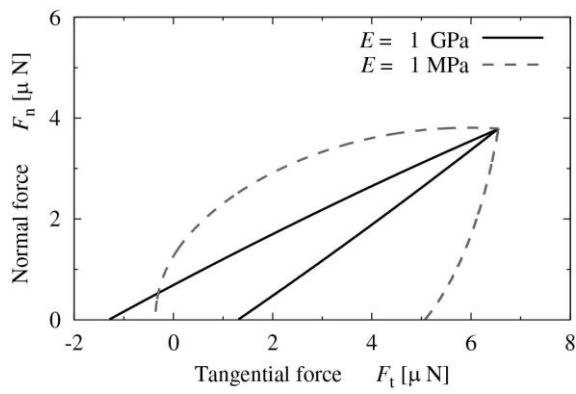


Fig. 4 Relation between normal and tangential forces at detachment of seta-like structure in the case of different Young's modulus.

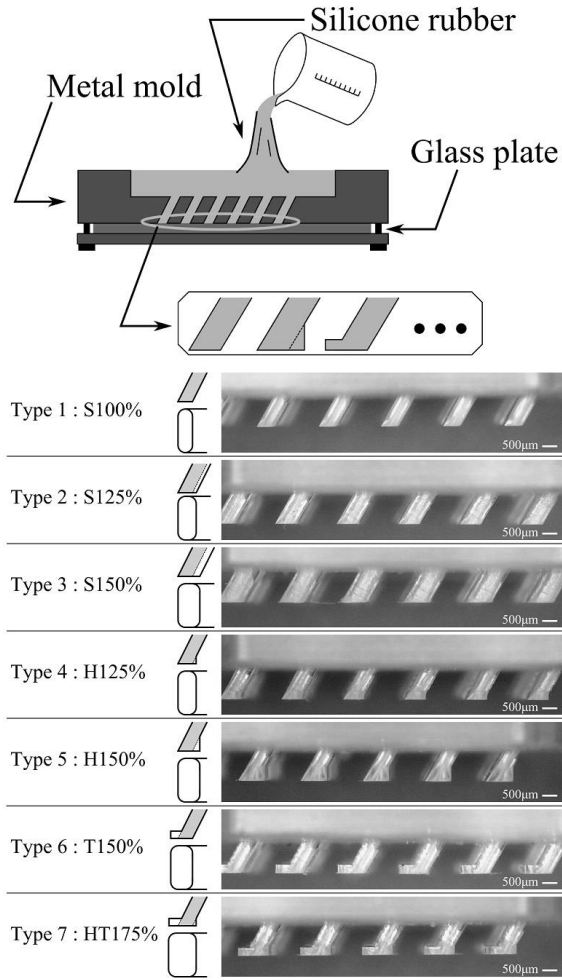


Fig. 5 Gecko inspired adhesive devices with different tip structures²⁵⁾.

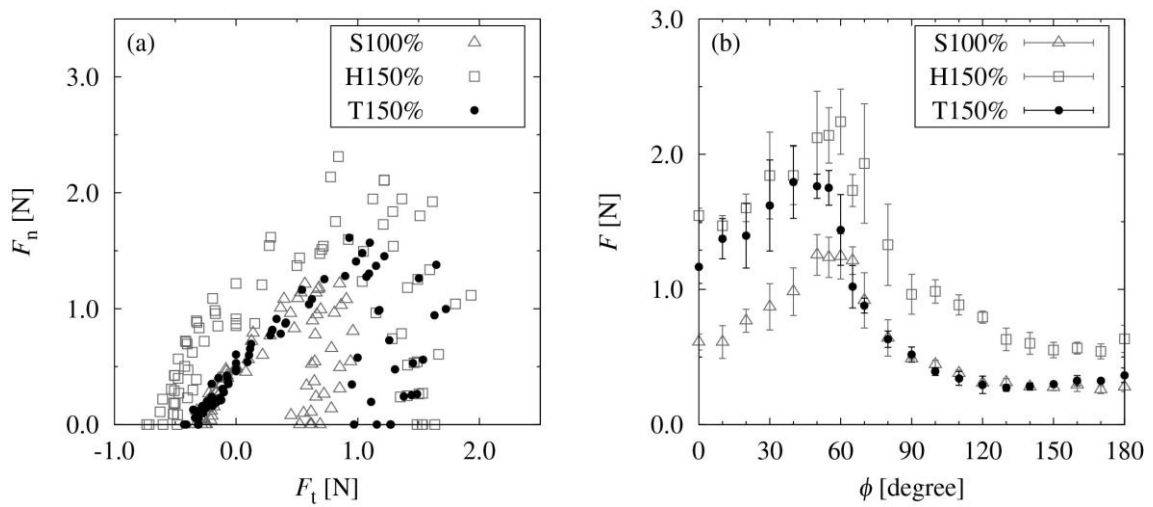


Fig. 6 Experimental results of adhesive strength of adhesive devices for (a) normal and tangential force relation and (b) force and loading angle relation.

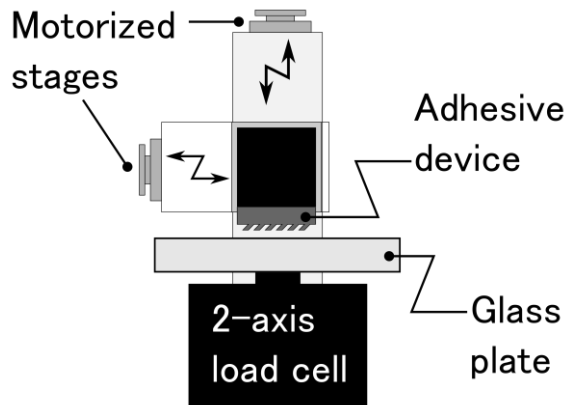


Fig. 7 Schematic illustration of adhesive strength measurement system.

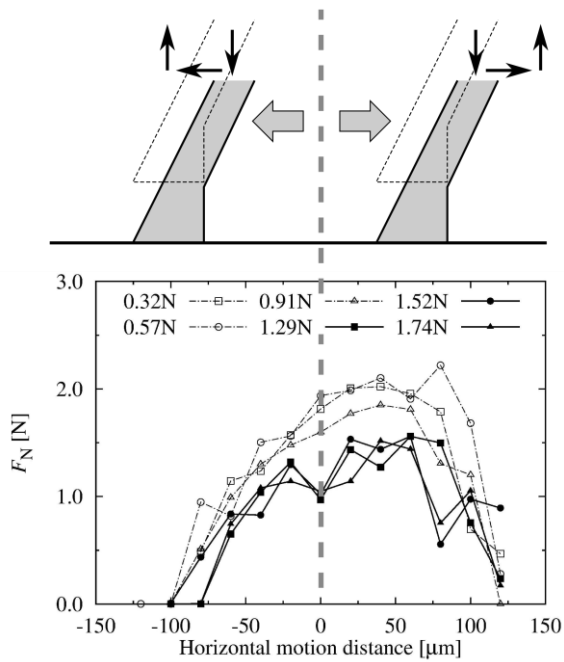


Fig. 8 Experimental results of normal force at the detachment with 3 step motion [1. Approaching 2.Horizontal (left or right) 3. Receding] changing horizontal motion distance.

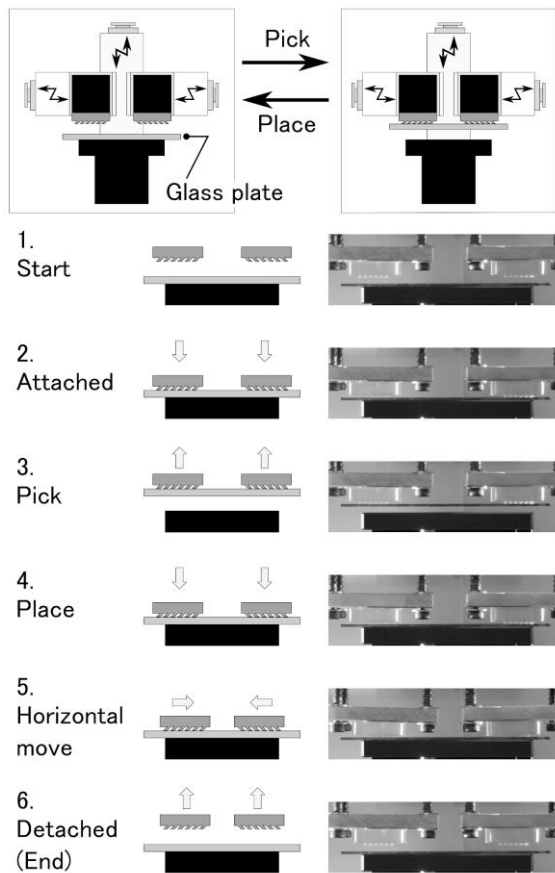


Fig. 9 Pictures of glass plate pick-and-place using adhesive devices.

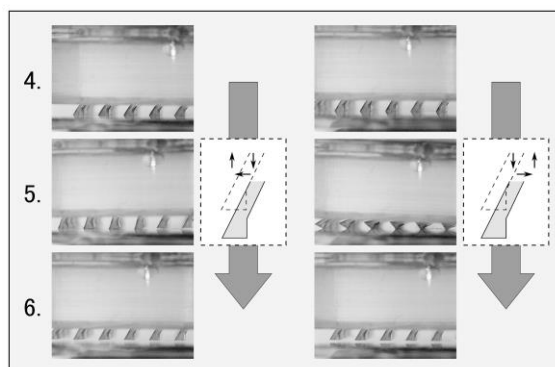


Fig. 10 Enlarged pictures of glass plate pick-and-place for the steps 4, 5, and 6 in Fig. 9.

<Comprehensive Paper>

Study on the reversible adhesion inspired from Gecko foot hairs

Yu SEKIGUCHI*

*Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology
4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama 226-8503, Japan

Abstract

There are several natural systems related to adhesion and adhesives in the field of biomimetics. Focusing on gecko adhesion, one of its remarkable features is reversibility of the adhesion. Although geckos adhere to a wall using molecular interaction, they cannot walk or run without detaching their foot easily from the surface. Understanding the mechanism of easy detachment is important to achieve gecko-like reversible adhesion. In this paper, detachment mechanism of gecko adhesion is investigated. Using simplified adhesion model of geckos' foot hairs, directional dependency of adhesion force at detachment is theoretically derived. Then, it is clarified that anisotropy of adhesion force is generated by the hair structure. Additionally, gecko-inspired adhesive devices are created and the anisotropy is experimentally verified. Finally, manipulation system using the adhesive device is proposed and pick-and-place of a glass plate is succeeded.

Key words: Bio-inspired, Gecko adhesion, Anisotropic bonding, Reversible adhesion, Adhesion model