T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報 Article / Book Information

論題(和文)	や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)	
Authors(English)	Yu Sekiguchi
 出典(和文)	
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

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が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、

$$F_{\text{Peel}}\sin\theta = \frac{4EI\Gamma^2\sin\theta}{\left(\sqrt{(1-\cos\theta)^2 + \frac{\Gamma^2H^2}{3L^2} + 1 - \cos\theta}\right)L^2}$$
(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,剥離に伴い力が変化する。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F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

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

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

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

 $\Gamma < \tan \theta$ 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 GPa, W = L = 200 nm, H = 5 nm とし、凝着仕事が $\Delta \gamma \approx 0.01$ J/m²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が変 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ヘラ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

$M_{\rm C} = (F_{\rm t} \sin \theta - F_{\rm n} \cos \theta) \frac{\cosh(pL) - 1}{p \sinh(pL)}$ (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

 $\sigma_{\rm m,max} = \frac{6|M_{\rm C}|}{WT^2} \ (6)$

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

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

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 μm², 傾斜角度を 30 度,長さと幅のアスペクト比を 10,垂直応力の応 力集中係数をα = 1.5,応力の閾値をσ_{ad} = 0.1 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 らによりの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 確かめるとともに、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*φ* = tan⁻¹(*F*_n/*F*_t)が構造の 傾斜角度の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、このような接合手法は特定の方向に弱いため、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 150μm 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 spatulalike 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 wards: Bio-inspired, Gecko adhesion, Anisotropic bonding, Reversible adhesion, Adhesion model