

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560875

研究課題名(和文)生物にみられるナノヘア構造による把持・脱離機構を応用した厳密な可逆接合

研究課題名(英文)Exact Reversibility of Joint for grip-and-release mechanism based on gecko' foot hair structure

研究代表者

高橋 邦夫 (TAKAHASHI, Kunio)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：70226827

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：粗さのある壁面や天井を機敏に歩くヤモリの指先のヘア構造をモデルに、梁構造および固体内凝着現象による把持・脱離メカニズムの可能性について、検討を行った。  
一定角度の傾斜を与えた一本の梁が物体表面を把持(凝着)する力を理論と実験によって検討し、それを並べて作る梁集合体構造による把持・脱離領域を実験的に検討した。また、先端に向かって高さが変化している梁を集合体構造にすることで、一定高さの梁よりも、表面粗さによる凝着力低下を抑えられることが理論的に明らかになった。

研究成果の概要(英文)：A feasibility of grip-and-release mechanism of a beam structure under the presence of adhesion has been studied. This study is inspired by the functional foot hairs of gecko which enable them to walk quickly on walls and ceilings with surface roughness.  
The gripping (adhesion) force of a single beam, when a constantly inclined angle is given, is theoretically and experimentally investigated. By integrating the single beams, a one-directional multi-beam structure has been fabricated in order to investigate the release (fracture) criterion experimentally. The study has also clarified theoretically that the multi-beam structure using tapered beams can absorb higher surface roughness, compared to that of uniform beams.

研究分野：材料工学

キーワード：凝着 可逆接合 把持機構 生物模倣

1. 研究開始当初の背景

ヤモリや昆虫の足にあるナノヘア構造は古くから知られていたが、そのヘアの力測定結果が Nature 誌に紹介されて以降、ヘア構造の模倣物が相次いで発表され、模倣物を利用した壁登りロボットも登場した。しかし、これらの模倣物は脱離メカニズムを考慮していないために粘着テープと同じ機能しか有しなかった。よって、これら模倣物の最適設計のためには把持(凝着)だけでなく、脱離メカニズムも考慮することが重要である。このヒントを与えてくれるのはヤモリのヘア構造である。ヤモリは長い進化の過程で導き出したヘア構造は物体の表面粗さを吸収し、強い凝着力を得ると同時に、容易な脱離も可能にしていることが観察される。従って、把持・脱離を繰り返すシステムを考える上で重要なポイントである。一方で、研究代表者が精密な実験と理論の両面から取り組んできた固体間凝着現象による熱力学的に厳密に可逆な接合プロセスを用いれば、ヤモリのヘア構造をモデルにした把持・脱離メカニズム解明への大きな一歩を踏み出せる可能性があることに気付いた。一旦メカニズムを解明できれば、生物のヘア構造を構成するタンパク質を他の材質に置き換えることが可能となり、より幅広く把持・脱離機構を設計することができる。更に、把持・脱離プロセスを導入することにより循環型プロセスが確立されれば、省エネルギー、省資源化の資源循環社会の実現に大きく貢献できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ヤモリのヘア構造をモデルにした梁構造による把持・脱離機構の凝着および脱離メカニズムを理論的かつ実験的な両面から解明することにある。具体的には、一本の梁状弾性体の側面が物体表面を凝着・脱離するメカニズムの理論を構築し実験によって検証する。更に、弾性梁凝着理論を改良し、先端に向かって高さの変化するテーパ梁を扱えるようにし、梁の形状やその集合体が凝着力に及ぼす影響を明らかにする。最終的には、把持・脱離プロセスの導入を目指しその設計指針を確立することにある。

3. 研究の方法

- (1) 傾斜梁状弾性凝着体による把持力の理論構築と実験的評価  
一定角度の傾斜を与えた一本の梁状弾性凝着体を、上下に動かした際に発生する力を理論および実験によって検討した。
- (2) 梁集合体による把持・脱離機構の試作と評価  
複数本の Ti-Ni 系超弾性系を一系列に並べ熱圧着し、梁先端を斜めにカットすることにより梁集合体を試作し、実験的に評価した。
- (3) 梁の形状が把持力に及ぼす影響の理論的構築  
先端に向かって高さの変化する一本のテー

パ梁をモデルに、梁の形状が把持力に及ぼす影響を理論的に構築した。さらに、複数本のテーパ梁から構成される一系列(単層)の梁集合体が粗さのある表面への凝着に及ぼす影響を解析した。

4. 研究成果

(1) 傾斜梁状弾性凝着体による把持力の理論構築と実験的評価

図1に一定角度の傾斜を与えた梁状弾性体の凝着プロセスを示す。梁の根本(固定端)を上下に動かすことにより梁先端部の底面が物体の表面を凝着(把持)・脱離させる。傾斜角度および梁の長さに対して高さが比較的小さく微小変形時における力と変位との関係(フォースカーブ)を解析した。

図2に解析結果を示す。梁先端の接触状況から凝着、脱離までの一連の様子が一望できる。即ち、押し込みにより点  $P_1$  で梁先端が対象面に接触し、梁に働く力が線型的に増加する。点  $P_2$  で凝着面が形成されると力が減少後反転し点  $A_3$  に落ち着く。さらに、梁の押し込みまたは引き剥がしに反応して力が  $A_3$ - $A_4$ - $A_5$  の曲線に従って変化する。点  $A_5$  において、梁の非凝着部の長さが元の長さに戻り、梁が脱離する。凝着面が形成されている間の最大の力を凝着(把持)力と定義している。この把持力は、(単位面積当たりの凝着面を破壊するのに必要な)凝着仕事および梁の形状と弾性率に由来する「凝着パラメーター」に依存していることが分かる。

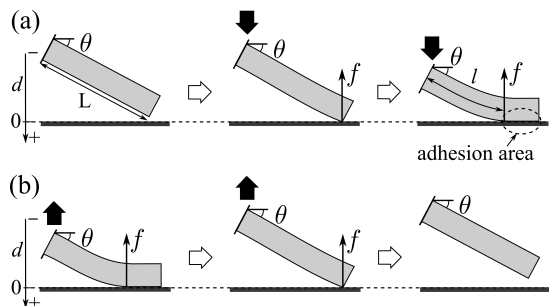


図1：一定角度の傾斜を与えた梁状弾性体の凝着および脱離プロセス。(a)押し込みプロセス。(b)引き剥がしプロセス。

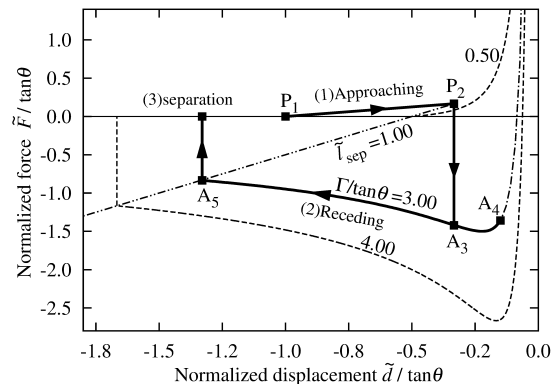


図2：無次元化されたフォースカーブの解析結果。凝着パラメーター  $\Gamma / \tan \theta = 3.0$  の例。

上述の理論解析を踏まえ、弾性梁の把持・脱離の振る舞いを調べるために実験を施した。図1に示す押し込み・引き剥がし過程を実験手順とした。図3に示す実験装置で、ゲル材で作った梁とガラスとのフォースカーブを計測した。計測されたフォースカーブを図4と図5に示す。

図4からは押し込みの過程において力が梁の押し込み量（変位）に従って増加している様子が観察される。図5では、梁が押し込まれた状態から徐々に引き剥がされ完全に脱離するまでの様子を示している。引き剥がし開始の直後では力が変位と共に線型的に減少し、この際、凝着面の長さが殆ど変化していないことが観察される。梁はその後、ほぼ理論の予測経路を辿り把持機能を発揮しているといえる。しかし、脱離の際は理論と実験系との条件不一致により互いに相違な振る舞いを示し、脱離条件のより詳細な検討が必要であることが実験結果から推察される。

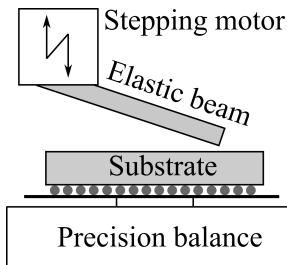


図3：フォースカーブを計測するための実験装置の概要。

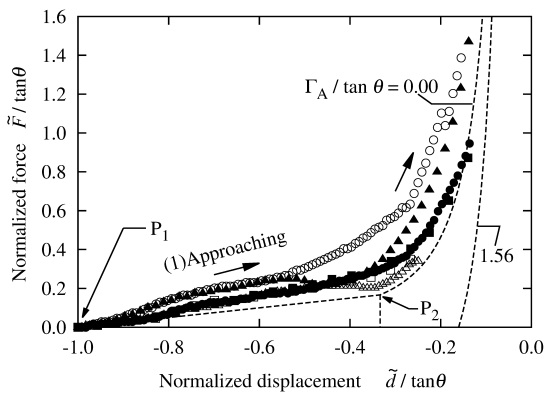


図4：ゲル材の梁を複数のスピードで押し込む際のフォースカーブの計測結果。  
 $v_1$  は  $1 \mu\text{m/s}$ ,  $v_2$  は  $2 \mu\text{m/s}$ ,  $v_3$  は  $5 \mu\text{m/s}$  である。

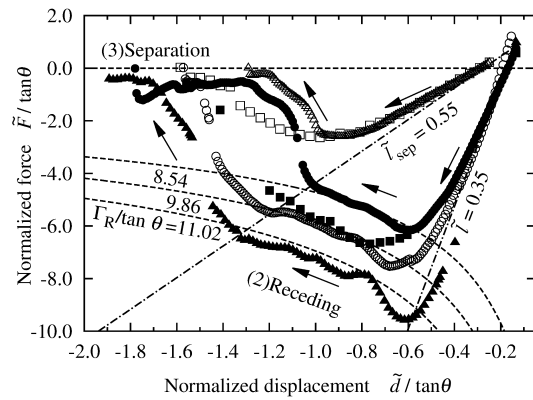


図5：ゲル材の梁を複数のスピードで引き剥がしの際のフォースカーブの計測結果。  
 $v_1$  は  $1 \mu\text{m/s}$ ,  $v_2$  は  $2 \mu\text{m/s}$ ,  $v_3$  は  $5 \mu\text{m/s}$  である。

### (2) 梁集合体による把持・脱離機構の試作と評価

把持・脱離機構として梁集合体の振る舞いを調べるために、直径  $100 \mu\text{m}$  の Ti-Ni 系超弾性系を 10 本並べて、図6(a)に示すように単層の梁集合体を試作した。集合体と厚み  $0.5\text{mm}$  のウレタンシートとの把持・脱離の振る舞いを実験的に調べた。

梁集合体の傾斜角は各々の梁先端を斜め ( $45^\circ$ ) にカットすることにした。梁集合体をウレタンシートに凝着（把持）させた後、集合体の固定端（上端）において、凝着面に対し水平力と垂直力を同時に計測することで把持・脱離の振る舞いを調べることができる。図6(b)に示すように、水平力と垂直力を計測するために、傾斜台（substrate）の傾斜角度を変えることで工夫した。

図7に傾斜台の傾斜角に対する最大凝着力（把持力）の計測結果を示す。モーメント効果が最も少ない集合体傾斜方向の凝着力が最も大きく観察される。図8に水平力と垂直力の計測による梁集合体の把持・脱離の様子を示す。実線と破線はそれぞれ（凝着面を破壊する）クリティカル応力が  $100\text{kPa}$  と  $10\text{kPa}$  の時に対応するプロットである。それぞれの線の内側は把持領域、それ以外は脱離領域を表している。今回の計測結果からは、梁集合体のコンプライアンス（柔らかさ）効果および脱離クライテリオンが十分に観察されず、把持・脱離の定性的な振る舞いの観察に留まった。

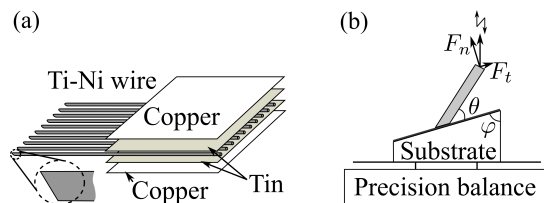


図6：(a)Ti-Ni 系超弾性系を並べて試作した梁集合体の概念図。(b)試作した梁集合体のフォースカーブ計測装置の概念図。

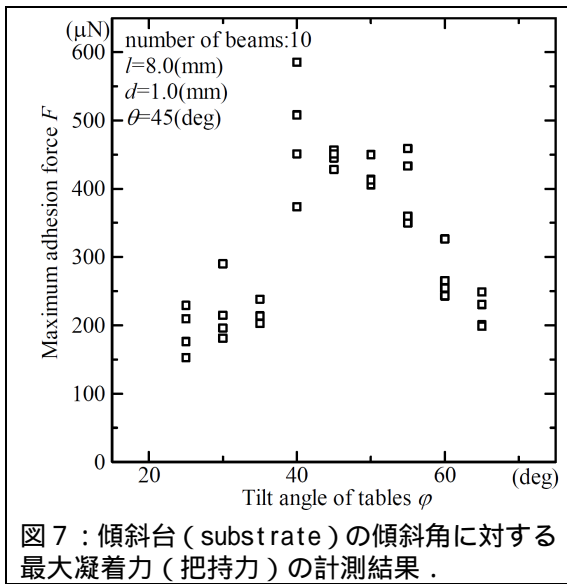


図7：傾斜台 (substrate) の傾斜角に対する最大凝着力 (把持力) の計測結果。

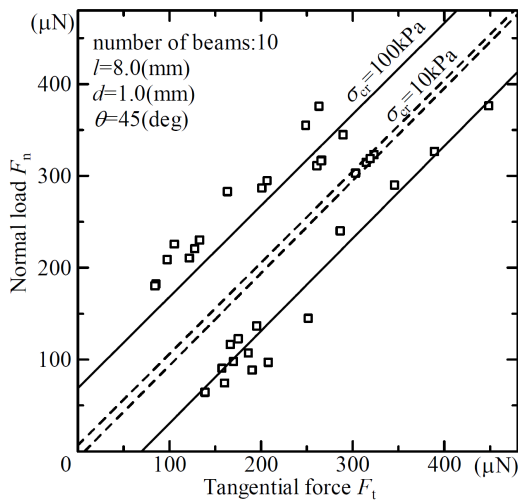


図8：梁集合体の固定端に作用する水平力と垂直力の計測結果。

### (3) 梁の形状が把持力に及ぼす影響の理論的構築

さらに、先端に向かって高さの変化するテーパ梁の形状が把持力にどのような影響を及ぼすのかを理論的に調べた。対象とする梁の形状を図9に示す。梁の高さが先端に向かって変化する割合を表すパラメータ  $n$  を導入した。 $n=0$  は高さ一定の梁を表し、 $n=1$  は高さが先端に向かって直線的に変化する梁を表している。解析に当たり梁の条件は前述の(1)項と同様であり、梁の凝着・脱離プロセスは図1の通りである。

図10に一本のテーパ梁のフォースカーブの解析結果を示す。高さ一定の梁よりもテーパ梁による凝着力は弱いことが判明した。また、高さの変化割合が大きくなるに連れて凝着力の減少割合も大きくなることを示された。

一定高さの梁と比べて一本のみのテーパ梁の把持力は弱いものの、先端が細くなる構造は表面粗さによる把持力の低下を抑えられると予測される。図11に示すように、正

弦波状の表面を仮定し、それに対してテーパ梁で構成する単層の梁集合体がどのように表面粗さを吸収するのかを調べた。図12に解析結果を示す。粗さの無いもしくは小さい表面に対しては高さ一定の梁集合体の方が大きな凝着力を発揮している。しかし、比較的大きな粗さの表面に対してはテーパ梁集合体の方が表面粗さを吸収できることが判明した。

これらの結果から、梁構造が把持・脱離機構の実現に十分な可能性を秘めていると考えられる。しかし、一定高さの梁よりも先端に向かって細くなる構造の方が大きな把持力を発揮できるかどうかは表面粗さの程度に依存する。今後は、把持する粗さも考慮した梁形状や角度の設計が必要であり、脱離(破壊)クライテリアを解明する厳密なモデルが必要となる。これらの研究が工業的生産プロセスへの応用に対する設計指針となり、工業技術の向上に大きく貢献できると期待される。

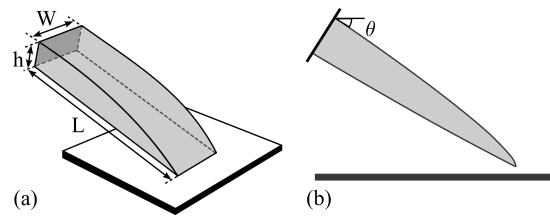


図9：(a)先端に向かって高さの変化するテーパ梁の概念図。(b)梁の側面図。

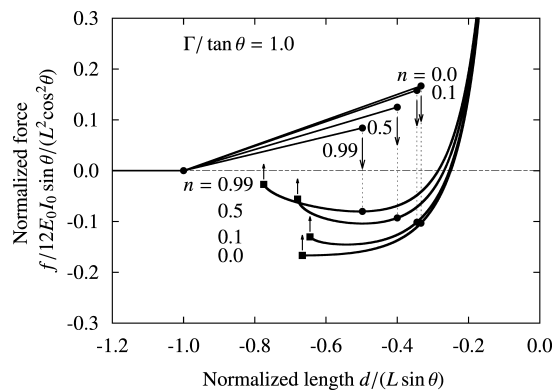


図10：一本のテーパ梁のフォースカーブの解析結果。

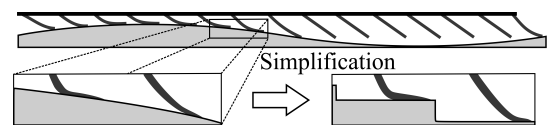


図11：単層テーパ梁集合体が正弦波状の表面を把持する様子の概念図。

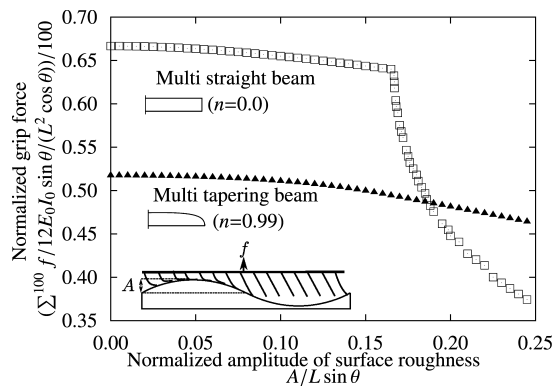


図 1 2 : 単層のテーパ梁集合体による正弦波の表面粗さを凝着する様子の解析結果 .

## 5 . 主な発表論文等

( 研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線 )

[ 雑誌論文 ] ( 計 1 件 )

Yu SEKIGUCHI, Pasomphone HEMTHAVY, Shigeki SAITO, Kunio TAKAHASHI, “ Experiments of the adhesion behavior between an elastic beam and a substrate ”, International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 49, pp. 1-6, 2014.

[ 学会発表 ] ( 計 3 件 )

Kazuhito EMURA, Pasomphone HEMTHAVY, Shigeki SAITO, Kunio TAKAHASHI, “ Criterion of detachment for grip-and-release devices with slanted multi-beam structure using Ti-Ni wire ”, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 61, 2014, doi:10.1088/1757-899X/61/1/012041.

Pasomphone HEMTHAVY, Takehiko YAZAKI, Boqing WANG, Yu SEKIGUCHI, Kunio TAKAHASHI, “ Effect of shape of elastic beam hair on its adhesion with wavy surfaces ”, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 61, 2014, doi:10.1088/1757-899X/61/1/012043.

奈良泰彦, 関口悠, HEMTHAVY Pasomphone, 高橋邦夫, 齋藤滋規, “ 大変形を考慮した弾性梁と剛体間の凝着 ”, 2014 年度精密工学会春季大会講演論文集, pp. 735-736, 2014.

( 会場 : 東京大学 , 東京 )

## 6 . 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 邦夫 (TAKAHASHI KUNIO)  
東京工業大学・理工学研究科・教授  
研究者番号 : 70226827

(2) 研究分担者

齋藤 滋規 (SAITO SHIGEKI)  
東京工業大学・理工学研究科・准教授  
研究者番号 : 30313349

ヘムタビー パソムポーン (HEMTHAVY PASOMPHONE)

東京工業大学・理工学研究科・助教  
研究者番号 : 00401539