

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 17 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06458

研究課題名(和文)生物のナノヘア構造に学ぶ把持・脱離機構の破壊クライテリオン

研究課題名(英文)Criterion of an inspired device for gripping and releasing

研究代表者

高橋 邦夫 (TAKAHASHI, Kunio)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：70226827

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：粗さのある壁面や天井を機敏に移動するヤモリや虫などの指先の毛の梁構造による把持メカニズムを検討した。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・脱離デバイスを複数の方法で試作した。櫛状構造を積層して作製することで、微小傾斜梁の集合体構造を作成できることを示し、その性能について検証した。

研究成果の概要(英文)：A grip-and-release mechanism of a beam structure has been investigated, which is used by geckos, insects, etc... to make a quick step on walls and ceilings with surface roughness. The beam is modeled as an elastic beam which has a root angle. The adhesion gripping force is theoretically investigate and compared with experiments. The grip-and-release devices with the multi-beam structure are made in the several ways. One of the ways is the stack of the comb structure. The device with small size of the beam can be successfully made and its performance is investigated as the grip-and-release device.

研究分野：工学

キーワード：凝着 可逆接合 メカニズム 生物模倣 梁構造 集合体

1. 研究開始当初の背景

ヤモリや昆虫等の生物は、長い進化の過程によって足の表面に長さ 100 μm オーダーのセタとその先端に凡そ 300nm オーダーのスパチュラと呼ばれる 2 階層の微細毛を約 50 万本持つことになった。ヤモリはその微細毛構造を使い凹凸面を把持(接合)し、壁面や天井を機敏に動く動作を可能にしている。ヤモリの微細毛の先端にあるスパチュラはその名の通りへらの形をしており、側面が対象面に凝着していることが電子顕微鏡観察によって明らかになっている。これまでの理論モデルの研究の中で申請者らはヤモリの微細毛構造を微小変形の弾性凝着梁に近似し、凝着面における摩擦力やせん断変形が生じない条件でフォースカーブ(凝着力と変位の関係)の解析解より把持・脱離メカニズムを定量的に説明できた。把持・脱離メカニズムを定量的に説明するためには梁のせん断変形や凝着面における摩擦の考慮が必要であることは先行研究により示唆されている。

一方、凝着・脱離デバイスの製作に関しては、これまでいくつかの研究グループはヤモリの微細毛構造を模倣した凝着デバイスを試作してきた。これらの試作品は高い把持力はあるものの脱離が容易に出来ないという問題点も確認されている。また、現状のヤモリ模倣物はその多くがインプリント手法等により高分子の高ポアソン比と高靱性を利用して長時間の引張によって幾何拘束を超えた成形をしている。そのため、微細毛構造の破断・材料の限定等様々な制限が生まれ、凝着・脱離デバイスとしての性能が十分に発揮できていない。

従って、把持・脱離メカニズムを定量的に解明する厳密な凝着モデルとそれに基づいたデバイス開発手法の研究は工業的生産プロセスへの適用に対する設計指針となると共に工業技術の向上に大きく貢献できることに気づき本研究課題の着想に至った。

2. 研究の目的

熱力学的に厳密に可逆な接合プロセスへ役立てるため、ヤモリや虫等、自然界の生物が用いる多毛構造による把持と脱離機構を物理的に解明することを目的とする。具体的には、毛構造を側面凝着の弾性片持ち梁にモデル化し、凝着面における摩擦力が把持力に及ぼす影響を理論と実験の両面より検討を行う。なお、多毛構造の作成手法を提案し、試作と評価によりヤモリの多毛構造の機能を他の材料や条件への適応を検討する。

3. 研究の方法

(1) 毛構造のモデル化

毛構造を弾性片持ちはりに近似し、その側面が対象に凝着する弾性凝着モデルを用いた。凝着面には摩擦に起因するせん断力が作用することとし、把持力に対する影響を理論的に検討した。梁モデルの軸方向の伸びとせん

断変形を考慮しヒステリシス(エネルギー散逸)の影響を検討した。

(2) 櫛構造の積層による多毛構造作成法の提案

エッチング法により金属板に櫛構造を作成し、それをガラス板で挟んだ鋳型を真空容器中に設置し、PDMS を流し込むことで櫛構造を作る方法を提案した。さらに、作成した櫛構造を梁の軸方向に沿って一定の間隔で一枚ずつずらして積層することで、所望の取り付け角度で多毛構造体を設計できることを示した。

(3) 多毛構造の試作と性能評価

提案方法および PDMS を用いて、長さ 1 mm、幅 300 μm 、厚み 100 μm オーダーの櫛構造を作成し、それらを積層して 20 度の傾斜角度を持つ多毛構造体を作り、実験によって把持および脱離の性能評価を行った。

4. 研究成果

(1) 毛構造のモデル化

図 1 に、弾性片持ち梁のモデルと凝着過程の概要を示す。斜めに固定された梁を対象面に対して押し付けることで対象を凝着(把持)させた後、梁を引き上げることによって対象を脱離させる。

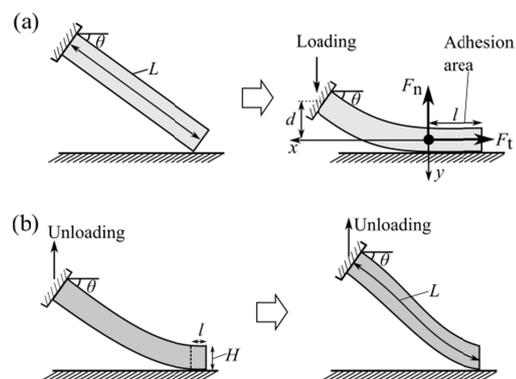


図 1: 弾性片持ち梁の解析モデルと凝着過程の概要。(a) 梁の押し込みによる凝着過程、(b) 梁の引上げによる脱離過程。

本研究課題のモデルは従来のものと異なり、凝着面は摩擦に起因するせん断力が作用するとして理論解析を行った。この近似モデルは梁の傾斜角が 30 度程度までであればよい近似になることを明らかにしている。それ以上の角度の場合は大変形を考慮した梁の変形モデルを用いる必要があるが、それを用いると解析解が得られなくなるので、まずは解析解が得られるモデルを用いることとした。梁一本に対する(無次元化された)フォースカーブの一例を図 2 に示す。梁の軸方向の伸縮を考慮しない場合を model 1、梁の軸方向の伸縮を考慮した場合を model 2、断面形状の変形を考慮した場合を model 3 として表している。

梁を伸ばす方向 ($\bar{F}_t > 0$) に引き上げる場合

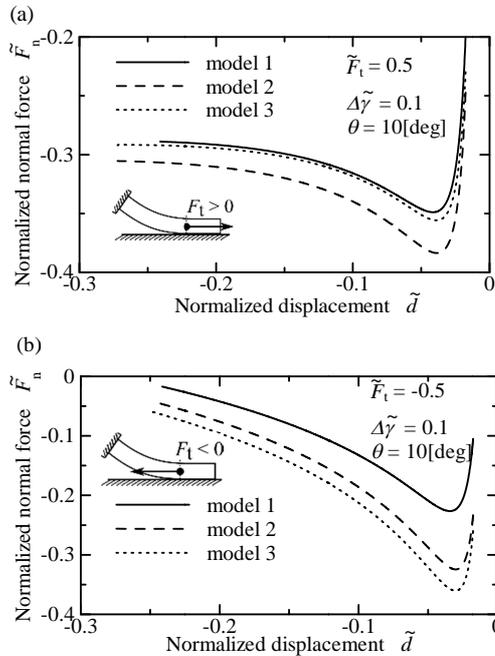


図2：梁一本当たりの、無次元化されたフォースカーブの解析結果．梁の全長に対する厚みは $\tilde{H} = H/L = 0.3$ ，ポアソン比は $\nu = 0.5$ としている．(a) $\tilde{F}_t = 0.5$ ，(b) $\tilde{F}_t = -0.5$

(図2(a)参照)と比べて、縮める方向($\tilde{F}_t < 0$)に引き上げる場合(図2(b)参照)は対象面を把持する最大凝着力が大きくなっていることが観察された．これは梁モデルの把持力がせん断力に依存することを意味している．本研究課題で提案した理論モデルを検証するため、梁の軸方向の変形を考慮しない従来のモデルと高分子ゲルを用いて水平力・垂直力を梁に与えた際の凝着力を計測した結果と比較して検証を行った(図3参照)．対象平面に対して平行な水平力が把持力に影響を及ぼすことは、理論解析と実験結果により確認でき、本研究課題で提案した理論モデルで実験結果の傾向を定性的に予測できることが示された．しかし、定量的な予測には至っていなかった．

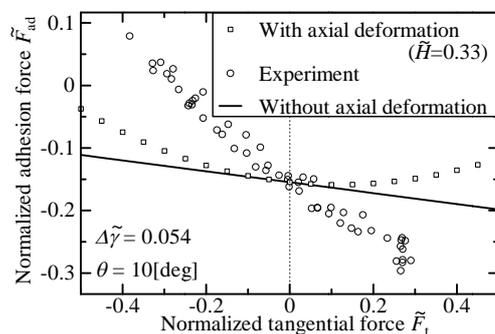


図3：本研究課題の提案モデルと既存モデルおよび実験結果の比較．

一方、接触線の最大値に比例するエネルギーが凝着プロセスを通して散逸されている(ヒ

ステリシス)可能性が示唆され、散逸エネルギーの分配に関して検討を行い理論モデルの改良を行った．その結果、梁モデルの軸方向の伸びと梁のせん断変形を考慮したモデルだけでは、実験結果と理論との差を定量的に説明するには至らず、大変形の影響を考慮する必要があることは課題として得られた．

(2) 櫛構造の積層による多毛構造作成法の提案

図4に、本課題研究で提案した櫛構造の積層による多毛構造の作成手法の流れを示している．初めに、金属板にエッチングで櫛構造を作成しそれをガラス板で挟んだ鋳型を真空容器中に設置し、PDMSを流し込むことで、櫛構造を作る．その後、65 程度で櫛構造を数時間加熱して硬化させる．次に、梁に所望の傾斜角度(取り付け角度)を持たせるために予め用意した階段状の治具を使い、櫛構造を一枚ずつずらして積層し、再び PDMS で梁の固定端同士を固めることで多毛構造を作成する．

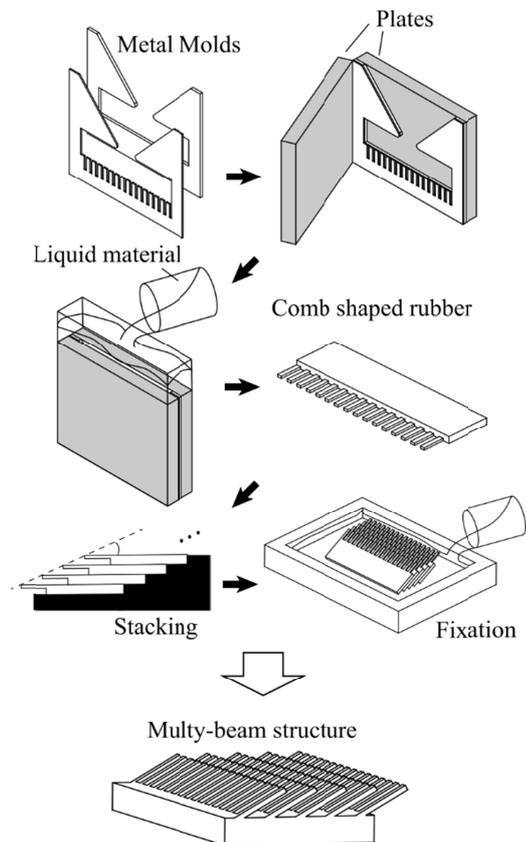


図4：櫛構造の積層による多毛構造の作成手法の流れ

(3) 多毛構造の試作と性能評価

図5に、実際に試作した PDMS 多毛構造の全容および梁の部分拡大した光学顕微鏡の写真を示す．面積 1 cm^2 あたりに凡そ 200 本の密度で梁を配列させることができた．更に、図6に示す実験装置を用いて多毛構造の性能を評価した．計測装置の都合により、

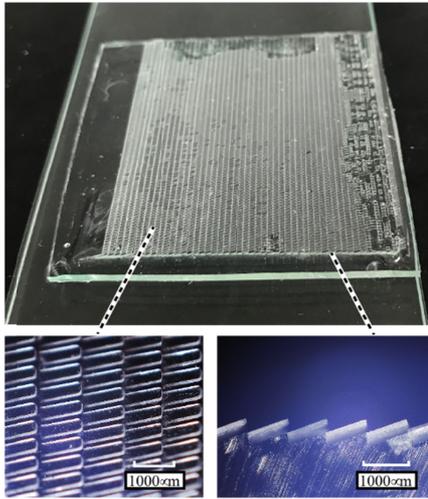


図5：提案手法で作成したPDMS多毛構造の全容，および光学顕微鏡による梁部分の拡大写真．長さ1mm，幅300 μm ，厚み100 μm の各々の梁は取り付け角度 $\theta = 20^\circ$ および約250 μm の間隔で並んでいる．

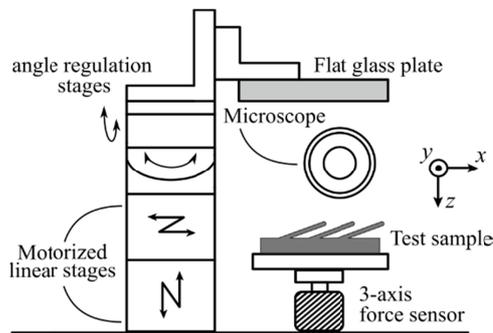


図6：多毛構造の性能を評価する実験装置の概要．

多毛構造を下部の台に固定された3軸力センサーに取り付け，把持対象であるガラス板を可動部に取り付けて自動ステージで動かすことにした．把持対象のガラス板を多毛構造に対して垂直に押し付けた後，斜め方向に引き上げ，その間の水平力と垂直力を同時に計測した．引き上げ角は，梁を伸ばす方向から縮める方向まで変化させて実験を行った．計測した水平力と垂直力の関係およびデジタル顕微鏡を使って観察した梁の状態を図7に示す．図7(a)では多毛構造に対して対象ガラス板を垂直に押し付けた（点線の矢印方向）後，梁を伸ばす方向に対象ガラス板を引き上げ（実線の矢印方向），その間，把持力となる最大凝着力（ $-F_n$ ）が大きく観測されている．図7(b)では対象ガラス板を垂直に引き上げる場合の結果を示している．図7(a)と比べて発生した把持力は比較的小さいことが確認される．一方，図7(c)に示すように，梁を縮める方向に対象ガラス板を引き上げた場合，多毛構造はほぼ把持できずに座屈の後対象ガラス板から脱離することが観察できる．

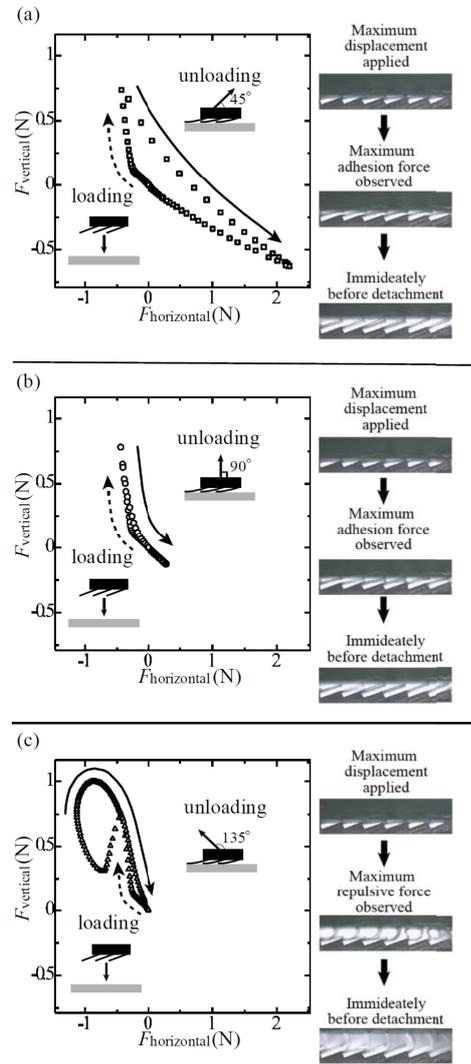


図7：多毛構造の評価実験で計測された水平力と垂直力の関係．

これらの結果から，提案した櫛構造の積層による多毛構造の作成手法は把持・脱離デバイスの製作法として実現可能性を秘めていることが示された．今後は，理論モデルの改良に関して解析解こそ得られないが梁の大変形も考慮に入れ，把持・脱離メカニズムの定量的解明を遂行し熱力学的に厳密に可逆な接合プロセスへの応用を目指す．自然界の生物が利用する多毛構造はタンパク質からできているが，物理的な解明により他の材質や条件等へ置き換えることができれば熱力学的に厳密に可逆な接合プロセスへ役に立てることに大きく貢献できるものと考えられる．

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 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

今井 裕太, 若林 一貴, ヘムタビー パソムポーン, 高橋 邦夫, “水平力を考慮した梁側面凝着モデル”, 23rd Symposium on “Microjoining and Assembly Technology in Electronics”, pp. 387-390, 2017.

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, “くし状構造の積層による側面接触型弾性梁集合体の試作”, 24rd Symposium on “Microjoining and Assembly Technology in Electronics”, pp. 261-264, 2018.

(3) 連携研究者 ()

研究者番号:

(4) 研究協力者 ()

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 邦夫 (TAKAHASHI KUNIO)
東京工業大学, 環境・社会理工学院, 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, 環境・社会理工学院, 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, 環境・社会理工学院, 助教
研究者番号: 00401539