

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889020

研究課題名(和文)生物の微細毛構造に学ぶ凝着接合型把持・脱離デバイスの開発

研究課題名(英文)Development of bio-inspired adhesive attachment-and-detachment devices

## 研究代表者

関口 悠 (SEKIGUCHI, YU)

東京工業大学・精密工学研究所・助教

研究者番号：00712423

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、粗さのある表面に自在に凝着でき、素早く着脱できるヤモリの微細毛構造に着目し、その凝着メカニズムと脱離メカニズムを理論・実験の両面から理解を深めるとともに、把持脱離デバイスへのメカニズムの応用を行った。具体的には、梁近似モデルを用いた解析および実験によって剛毛の側面が凝着する際の凝着力解析および脱離メカニズムの解析が行われ、水平方向と垂直方向の力制御により用意な着脱が行われていることが示された。また、把持・脱離検証実験によりその実現可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：In this research, adhesion and detachment mechanisms of geckos' foot hairs, which have a great ability of attachment and detachment to rough surfaces, have been investigated analytically and experimentally. Additionally, the applicability of the mechanisms to adhesive grip-and-release devices has been discussed. The hairs are assumed to be inclined beams, side surface of which adheres to the surface of a rigid, and the adhesion force and detachment process were analyzed. It was investigated that the control of normal and tangential forces was important for the detachment process. Attachment and detachment of the inclined adhesive beams were experimentally verified.

研究分野：工学

キーワード：凝着現象 生体模倣 接着接合

1. 研究開始当初の背景

足裏に生える微細な毛により壁や天井を自在に移動するヤモリの優れた能力は、可逆的な接合やロボットの移動手段としての利用へ応用が期待されている。ヤモリの足裏には、セタ (seta) と呼ばれる長さ約 100 $\mu\text{m}$  の微細毛が数十万本も生えており、更にその先端はヘラ状のスパチュラ (spatula) と呼ばれる無数の毛に分かれている。先端に向かうにつれ微細化する階層構造によって、物体表面の様々なサイズの表面粗さに対応し、接触面積を増やしている。接触面積の増加は分子間力 (ファンデルワールス力) の増加に直結しており、微小階層構造によって自身の体を支えるのに十分な把持力を得ることが可能になっているが理解されるようになってきた。物体間の接触により凝着力を得るためには、表面粗さに対応して濡れ広がる必要があるため、ある程度の柔らかさが必要であると一般的に考えられてきた。しかしながら、ヤモリは $\beta$ ケラチンという人間の爪とほぼ同じ成分の剛毛にも関わらず、凝着力を得ることに成功している。これは、斜めに生える微細毛構造とすることで、見かけの剛性を下げていることも重要な要因の一つであると考えられている。

いくつかのグループは、微細構造を模倣した凝着デバイスの試作により凝着力が増加することを確認している。しかし、これらのデバイスは凝着するけれども剥がれにくいという欠点も明らかとなった。ヤモリは、構造の工夫により強く凝着するだけでなく、素早く剥がす機能も備え持つことで、移動手段として凝着力を利用している。ヤモリの微細毛構造において、凝着した毛が脱離するメカニズムの理解と応用がマニピュレーション技術やロボットハンドへの応用のために重要である。

2. 研究の目的

本研究課題は、弾性梁構造体の凝着・脱離メカニズムを理論的・実験的に明らかにすることを目的とする。また凝着デバイスへの脱離メカニズムの応用により、凝着するのみでなく、繰返し着脱を行える把持・脱離デバイスの開発を行う。

3. 研究の方法

(1) 脱離メカニズムの解明

ヤモリ手足先端の剛毛であるスパチュラは毛の側面が凝着をすることが知られている。研究代表者らはスパチュラによる凝着現象解明のために、弾性片持梁構造体の側面が凝着する梁側面凝着モデルを用い凝着現象の解析を行ってきた。本研究では、より現実に即した条件に適應できるように梁側面凝着モデルを改良・発展させる。

(2) 脱離手法の検討

ヤモリは剥がされないように強くくっつく

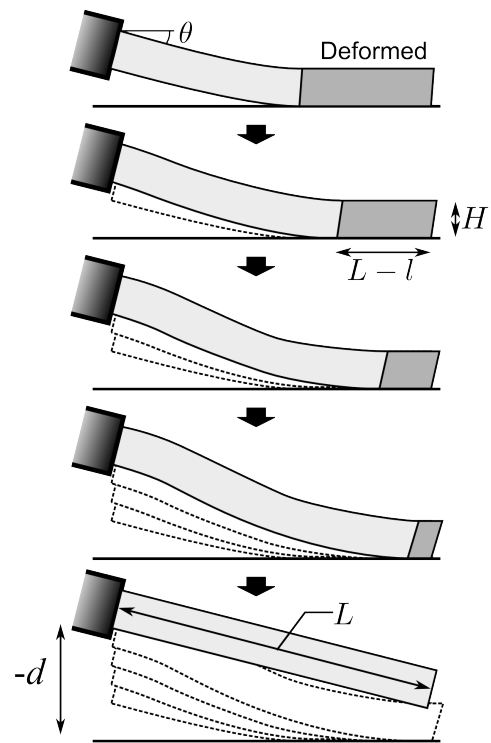


Fig.1 Schematic illustration of inclined adhesion beam model

場合や、素早く移動する場合など、シチュエーションにより足の動きを駆使し、凝着力をコントロールすることで柔軟に対応している。凝着デバイスにおいても、その着脱プロセスにおける動作が重要になると考えられる。脱離に適した駆動プロセスを確立するため、脱離手法が凝着力へ及ぼす影響を検討する。

(3) 凝着デバイスによる着脱

脱離メカニズムの解明、脱離手法の検討を元に、凝着デバイスによるマニピュレーションの可能性を検討する。

4. 研究成果

凝着現象における凝着時の界面形成、脱離時の表面形成は系全体のエネルギーバランスにより決まる。剛毛を弾性梁と近似すると、弾性梁に蓄積される弾性エネルギーと表

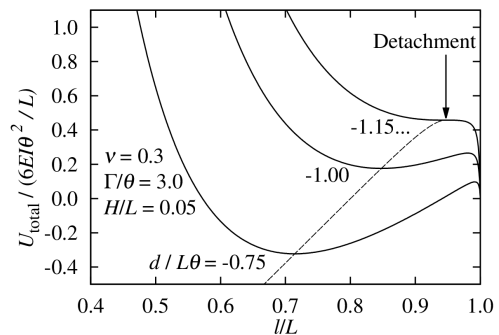


Fig.2 Total energy of the system versus adhesion length.

面・界面エネルギーにより議論できる．しかしながら，界面近傍での非可逆的な散逸により界面が剥がれて表面を形成する際には，界面形成時に比べ 100 倍ほど界面・表面エネルギー差が大きくなるという凝着ヒステリシス現象が知られている．また，弾性梁へと近似された剛毛の変形においても，オイラー梁に用いられる曲げ変形のみならずせん断変形も存在する．それらの影響を考慮した弾性梁側面凝着モデルを構築した（図 1）．図 2 に脱離プロセスにおける系全体のエネルギー変化を示す．極値点が存在する間は安定的に凝着面を形成するが，極値点の消滅により脱離が起こることが示されている．図 3 には脱離プロセス中に弾性梁に働く力を示す．梁の引き上げによって力の絶対値は大きくなり，最大点を超えると減少する．この最大値が凝着力となる．図 3 には梁の厚さが異なる場合の結果を示している．脱離直前に厚さによる影響が見られるものの，凝着力への影響は殆ど無いことが明らかにされた．また，凝着力測定実験（図 4）により，ヒステリシスなどの影響を考慮することで梁側面凝着モデルが実際の現象によく一致することを確認した．

系全体のエネルギーバランスを考慮することで，弾性梁近似モデルを用いた凝着現象の説明が成された．

次にこのモデルを用い，脱離プロセスにおける梁の動きが凝着力へ及ぼす影響を議論した．ヤモリは指の動きによる巧みな毛の傾きの制御と足全体の押し引きによる水平運動を組み合わせていると考えられている．具体的な駆動プロセスとして，梁の回転と水平運動を議論した．回転運動により凝着力を変化させる場合，押し込み量が非常に重要であることが明らかとなった．しかしながら，梁側面のほとんどが凝着するほど押し込まれた場合のみ回転により凝着力の変化が見込まれるが，それを可能にする凝着デバイスの設計は非現実的であるため，梁側面が凝着するのみの単一構造凝着デバイスでは回転による凝着力制御は難しいことが明らかとなった．水平運動が加わった場合，梁にはさらなるモーメントが加えられ，凝着力が変化する．この影響を考慮し，水平力を加える事による凝着力変化を示したのが図 5 である．水平方向に力を加えていくことで凝着力が変化することが明らかにされた．

この結果を基に，ラージモデルを用いた凝着型着脱デバイスの検討を行った（図 6）．梁 2 本を用い，上下運動により把持を，上下運動に加え水平運動を行うことで脱離を行えることが確認された．弾性体としては弾性率約 0.3MPa，傾斜角度 7 度，長さ 20mm，幅 10mm，厚さ 2mm のシリコンゴムを用いた．より大きな凝着力を得るためには，梁の微細化・集積化が求められる．提案手法による着脱の可能性は示されたが，凝着力はヤモリのものに比べ遠く及ばない．今後の課題として，凝着

力を増加させる微細構造物における着脱メカニズムの検証，脱離プロセスの確立が望まれる．近似モデルによる解析とラージモデルによる検証を元に，微細化・集積化された凝着デバイスにおいても脱離しやすい構造を探索することで，マニピュレーション技術に貢献するものとする．

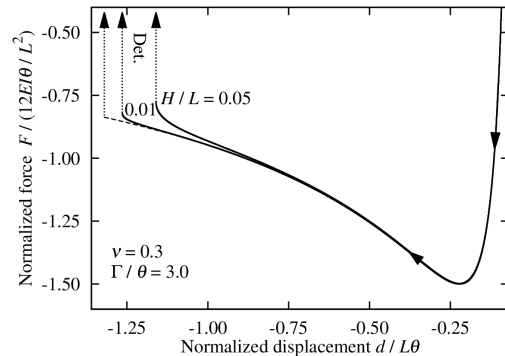


Fig. 3 Normal force acting to the elastic beam versus displacement.

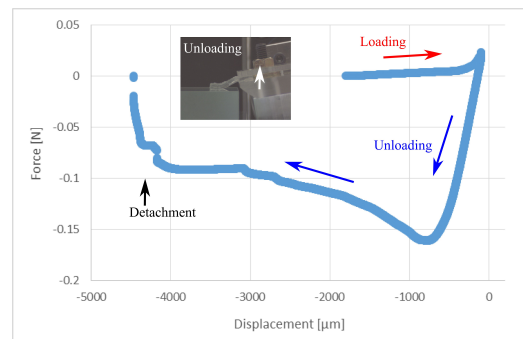


Fig. 4 Experimental results of loading and unloading processes.

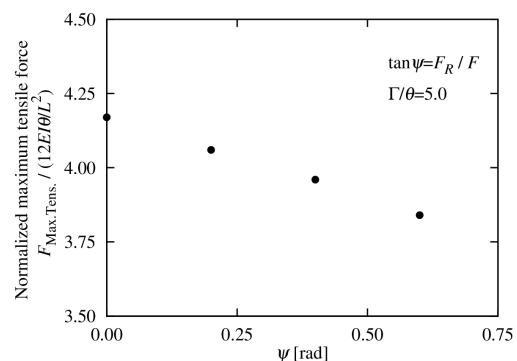


Fig. 5 Adhesion force change with increasing tangential force.

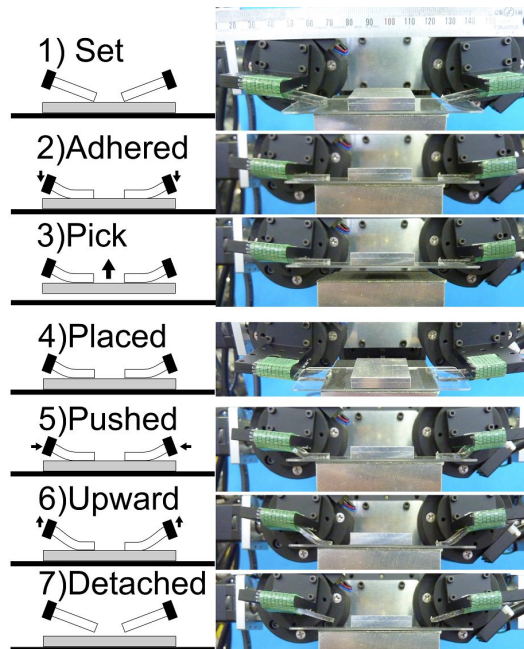


Fig. 6 Prototype manipulation system using inclined beams.

## 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)

[学会発表](計 3件)

Y. Sekiguchi, P. Henthavy, S. Saito, K. Takahashi, C. Sato, Detachment of an adhesive inclined elastic beam, 5th World Congress on Adhesion and Related Phenomena (WCARP-V), 2014年9月7日-11日, 奈良県新公会堂(奈良県奈良市)

Yu Sekiguchi, Shigeki Saito, Kunio Takahashi, Chiaki Sato, Discussion on possibility of adhesion force control using adhesional elastic beam, 10th European Adhesion Conference (EURADH2014), 2014年4月22日-25日, アリカンテ(スペイン)

Yu Sekiguchi, Adhesion in attachment and detachment of inclined elastic beam, 37th Annual Meeting of the adhesion Society, 2014年2月23日-26日, サンディエゴ(米国)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

関口 悠 (SEKIGUCHI YU)

東京工業大学・精密工学研究所・助教

研究者番号：00712423