

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360102

研究課題名（和文） ヤモリに学ぶ静電誘導ファイバー植毛による凝着・離脱デバイス

研究課題名（英文） Gecko-inspired electrostatic chuck consisting of polymeric electrostatic inductive fibers

研究代表者

齋藤 滋規 (SAITO SHIGEKI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：30313349

研究成果の概要（和文）：

本研究では、曲面や粗さのある壁や天井に自由に凝着し、移動することが可能なヤモリの指先の微細構造に着想を得て、静電誘導ファイバーによる凝着・離脱デバイス（ファイバー型静電チャック）の開発を行った。具体的には、コンプライアンス（柔らかさ）を持ち先端に静電気を発生することのできる静電誘導ファイバーを開発し、それを集積することにより曲面の曲率や表面の粗さを吸収して凝着・離脱が容易にできる新たな静電チャックの（潜在的な）有用性と実現可能性を理論・実験の両面から示した。

研究成果の概要（英文）：

In this research, an ESC that can handle curved/rough surface is developed. An ESC consisting of compliant electrostatic inductive fibers which transform according to the profile of surface has been proposed for such use. The fundamental idea of comes from the inspiration based on gecko which can quickly adhere and move on walls or ceilings having curved/rough surface; it is well-known that the tip of such surprising capability is due to the hierarchical fiber micro/nano-structure on the finger-tips. The potential and feasibility of the fiber ESC proposed are shown by prototyping electrostatic inductive fibers and new type of ESC consisting of the fibers that can work for curved or rough surface through both experimental and theoretical approaches.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2011年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2012年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			0
年度			0
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：マイクロ・ナノメカトロニクス 生産技術, 生体模倣

1. 研究開始当初の背景

ヤモリが自由に壁を“なぜ”登れるのかについては長い間解明されていなかった。近年の研究によって、ヤモリはその足の表面にセタ (seta) と呼ばれる 50 万本の長さ約 $100\mu\text{m}$ 程度の微細な毛を持ち、各セタの先端にスパチュラ (spatula) と呼ばれる先端がヘラ状 (先端径約 100nm 程度) になった細かい毛を持っていること、その先端のファンデルワールス力が凝着力として支配的であることが理解されるようになってきた (図 1 参照)。いくつかの研究グループはヤモリなどの生体を模倣した凝着デバイスとしてのマイクロ/ナノレベル構造物の試作を行った。しかし、これらの試作品は研究者らの期待通りには機能せず、凝着はすれども剥がしにくいなどの欠点も明らかになった。これに対して申請者らの研究グループは、「壁を自由に移動できるヤモリという生物の凝着機構にとって重要な要素は対象の表面粗さに適応し、凝着面の密着性を確保するためのコンプライアンスであること」を明らかにしてきた (図 1 参照)。さらに申請者らは、ヤモリの指先に見られる「強い凝着力を確保しながら離脱の容易な機構」の機能を解明するため、人間が壁に登るための寸法スケールにおいて、ファンデルワールス力の代わりに永久磁石を用いた凝着・離脱デバイスを試作し、その有効性を実験的に検証した。今後、誘電体を含めたあらゆる対象に対して有効な凝着・離脱デバイスの開発が重要だという認識と実現可能性の観点から (ファンデルワールス力より有効距離が長い) 静電を用いたヤモリ型静電凝着・離脱デバイスの開発を目指すという着想に至った。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、ヤモリの指先における

微細構造にヒントを得て、操作者が自由自在に対象物 (導体および誘電体) を凝着 (把持)・離脱することを可能にする凝着・離脱デバイスを創製することにある。具体的には、導電性の芯を持つ高分子繊維 (静電誘導ファイバー) をヤモリの指先に存在するセタ (seta) と呼ばれる微細毛と同じ形態で植毛し、静電力を効率良く作用させる。最終目的は、デバイス開発に止まらず、「工業部品のグリップレスのハンドリング技術」に適用可能なように汎用的なデバイス設計指針を確立することにある。

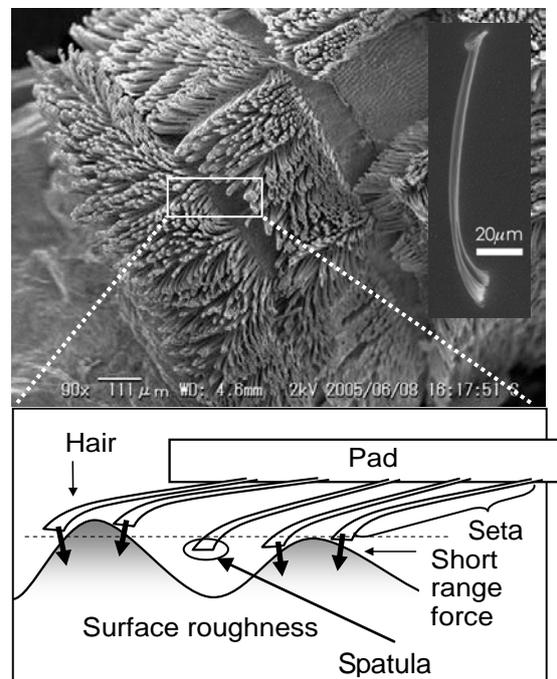


図 1: ヤモリの指先の構造が対象物の表面粗さに対して機能する様子。(上)ヤモリ指先の表面拡大写真。(下)セタの曲げ方向へのコンプライアンス(柔らかさ)が数 $10\mu\text{m}$ オーダの表面粗さを吸収し、効果的に凝着力を発生させる様子。離脱の際は、各セタがピーリングモードにより凝着界面破壊を起こすように力を加える。コンプライアンスの無い表面同士だと真実接触面積を稼げず、凝着力を大きくとれない。(上右)セタの拡大画像。先端部の微細毛群がスパチュラ(先端径 100nm 程度)。

3. 研究の方法

(1) 静電誘導ファイバーの試作・評価

高分子工学では一般的な溶融紡糸によって、導電性芯のまわりに、絶縁層としての外鞘をもつ静電誘導ファイバーの試作を行い、単体で繊維先端に発生する静電力に関する評価を行った。

(2) ファイバー型静電チャック（結束型）の試作・評価

（一つの導電性芯を持つ）単極型の静電誘導ファイバーを結束し、斜めに先端をカットすることによる結束型ファイバー型静電チャックを試作し、その性能評価を行った。

(3) ファイバー型静電チャック（単層型）の試作・評価

（一つの導電性芯を持つ）単極型の静電誘導ファイバーを単層状に10本並べた単層型ファイバー型静電チャックを試作し、その性能評価を行った。

4. 研究成果

(1) 静電誘導ファイバーの試作・評価

図2に溶融紡糸法によって試作した単極型静電誘導ファイバーを示す。芯部には、ポリプロピレンと炭素繊維の混合物、外鞘部にはポリスチレンを用いた。直径 $100\mu\text{m}$ 以下の直径の高分子繊維中に黒色の導電性部分が存在していることが確認される。電気抵抗計測や微小力計測の結果、導電性、曲げ剛性が確認された。

(2) ファイバー型静電チャック（結束型）の試作・評価

図3に試作したファイバー型静電チャック（結束型）の側面図(a)および断面図(b)を示す。直径 $70\mu\text{m}$ の静電誘導ファイバーを約200本束ね、先端を斜めに切断することにより実現している。

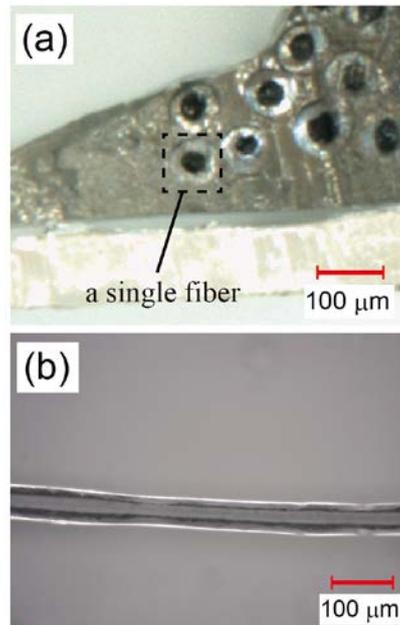


図2:(a)静電誘導ファイバーの断面図(樹脂に包埋した試料を切断して観察). (b)静電誘導ファイバーの側面図. 導電部の直径は半分の $35\mu\text{m}$ で、この繊維の抵抗率は $7.47\times 10^{-3}[\Omega\text{m}]$ 、曲げ剛性は $9.7\times 10^{-8}[\text{Nm}^2]$ であった。

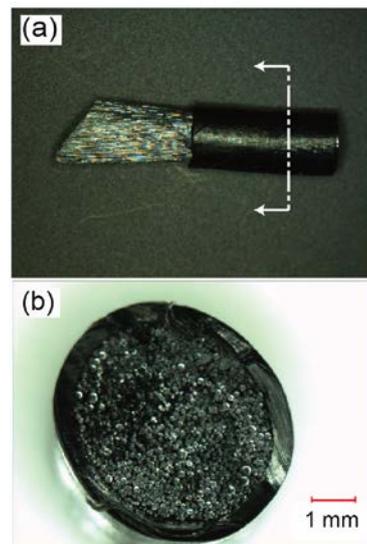


図3:(a)ファイバー型静電チャック(束束型)の側面図. (b)ファイバー型静電チャック(束束型)の断面図

この試作機によるフォースカーブ計測の手順を図4に示す。電圧を印加させながら、ファイバー型静電チャック（束束型）の変位を変え、電子天秤によって力を計測することによってフォースカーブを得ている。計測されたフォースカーブを図5に示す。

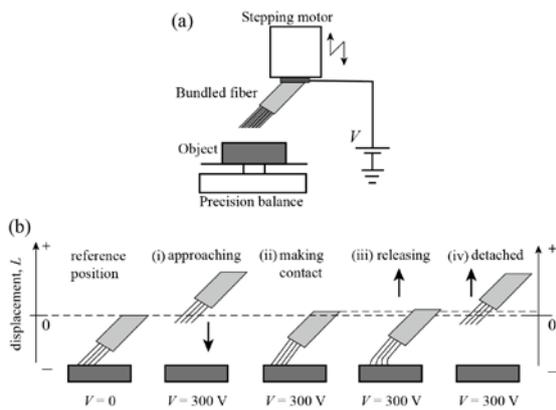


図4:(a) フォースカーブ計測のための実験機器の概要. (b) ファイバー型静電チャック(結束型)によるフォース計測の手順

図5(a)からは静電力が遠隔力として働いている様子が観察される. 図5(b)では(i)で遠隔力として働いた後, (ii)でファイバー先端が対象表面に接触し, その後, 引き剥がす方向に動かしても計測される引力が増大している様子が理解される. これはファイバーの束が曲げ方向の剛性に依存した柔らかさを示していると言える.

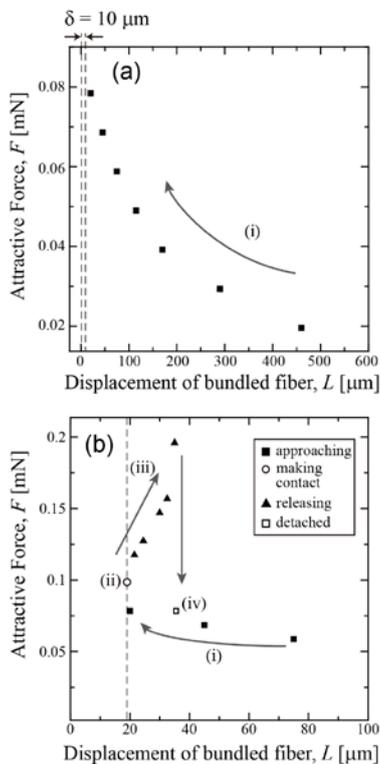


図5:(a)500 μm 遠方からのフォースカーブ. (b) 50 μm 付近からのフォースカーブ.

(3)ファイバー型静電チャック(単層型)の試作・評価
さらに, 詳細に静電誘導ファイバーの振舞を調べるために, 図6に示すようにファイバー型静電チャック(単層型)を試作し, 正弦波状の断面形状を持つ表面に対して, どのように単層型が振舞うかを調べた.

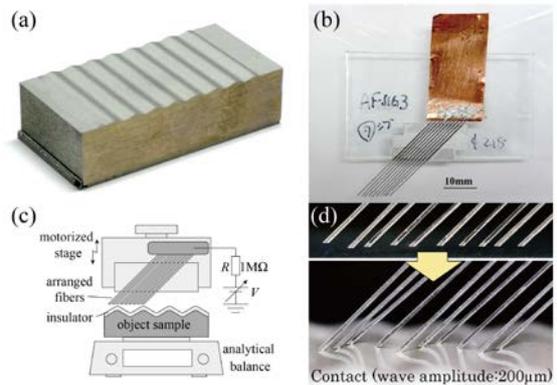


図6:(a)表面凹凸に対するヤモリ型静電チャックの効果を調べるための試料例. (b)「ヤモリ型静電チャック」単層型試作機全体. (c)フォースカーブ(カー変位計測系). (d)ファイバー先端が表面凹凸を吸収する様子.

図7にフォースカーブ計測による単層型の力学的振舞の観察の様子を示す. 図7(a)は単層型を対象物より離れたところから徐々に接近させ, 凝着させた後, 引っ張りを行い, 離脱するまでの「往復」の様子を示している. 静電力が遠隔力として作用していることやヒステリシスが生じている様子が観察される. 図7(b)は離脱時にファイバーの先端がどのようなになっているのかを力の履歴とともに示したものである. これにより, ファイバー一本一本の離脱が計測される力の変化に対応していることがわかる. また, 図7(c)は図6(a)で示した対象物の表面形状のうち, 振幅を変化させた場合に最大の凝着力がどのように変化するかを示している. この結果は, ファイバーの曲げ剛性由来のコンプライアンス(柔らかさ)によって, 発生可能な静電力が曲面によって, 低下するのを防ぐ効果があることを示している.

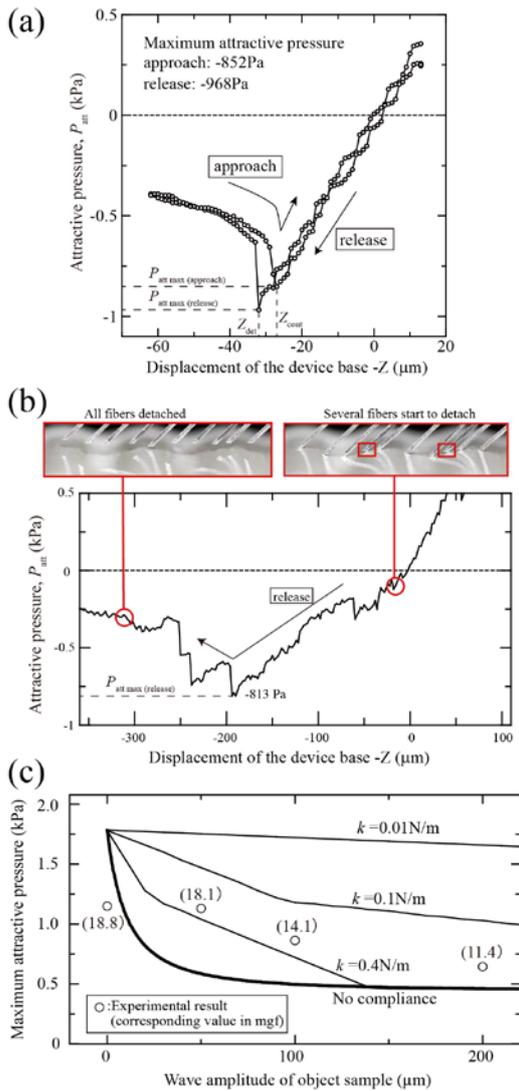


図7: (a)単層型のフォースカーブ(往復) (b)離脱時のフォースカーブと先端の接触の様子との関係. (c)正弦波状のプロファイルに対して, 振幅が最大凝着力に及ぼす影響.

図8ではアルミ箔によってつくられた長さ10mm, 直径2mmのパイプに対して, ピック・アンド・プレースを実施した例を連続写真にて示している. この作業においては, 上下左右の位置制御に関して, あまり高い精度を必要しないことが分かった. 例えば, 接近・凝着の際は, ファイバーが曲がることで, 対象物を破壊せず密着を確保することが可能であり, 離脱の際は電圧印加を終了するだけで, 対象物が単層型の先端から離れた.

これらの結果から, ファイバー型静電チャ

ックの潜在的可能性および実現可能性を示すことができた結論付けられる. 今後はファイバーの集積化を高度化する(例えば単層型をモジュールとして積層するなど)ことにより, ファイバー先端電極の密度を高め, 発生力を向上させることや, (現在, チルト角により簡易的に実現している)離脱をし易い構造を探索することによって, 微小物製造技術に大きく貢献するものと考えられる.

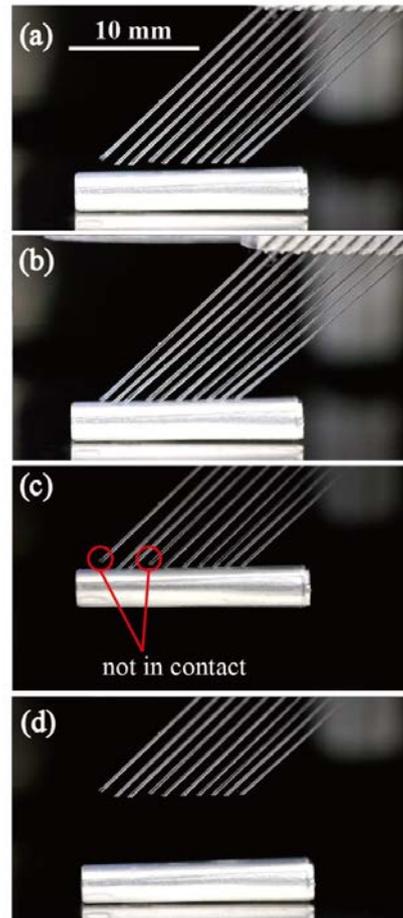


図8: ヤモリ型静電チャック試作機(単層型)によるアルミ箔製パイプのピックアップ(およびプレース)実験[I,J]. (a)接近(電圧オン, 右上はアルミ箔製パイプの概形寸法), (b)接触(ファイバーの柔らかさで対象を破壊せず接触・凝着), (c)ピックアップ(凝着把持), (d)電圧オフによるプレース(離脱). 先端印加電圧は600V. ファイバー直径は約250 μm . (a)から(d)における一連の物体操作は安定しており再現性が高い. 最大発生圧力は1.2kPa.

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) (査読有)

- ① Shigeki SAITO, Fumiaki SODA, Radon DHELKA, Kunio TAKAHASHI, Wataru TAKARADA, Takeshi KIKUTANI, "Compliant electrostatic chuck based on hairy microstructure", Smart Materials and Structures, Vol.22, pp.015019(1-6), 2013.
(doi:10.1088/0964-1726/22/1/015019)

[学会発表] (計4件)

- ① 前蘭圭佑, 高橋邦夫, 齋藤滋規, "双極型静電誘導ファイバーにおける電極断面形状の発生力への影響", 2012年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, Vol.2012S, pp.701-702, 2012.
(会場: 首都大学東京, 東京)
- ② Kenji SAWAI, Wataru TAKARADA, Takeshi KIKUTANI, Kunio TAKAHASHI, Shigeki SAITO, "Electrostatic chuck consisting of electrostatic inductive polymer fibers for handling of curved surface", Abstract in Material Research Society 2011 Fall Meeting, V17.41, 2011.
(会場: Hynes Convention Center, Boston, MA, USA)
- ③ 澤井賢司, 宝田亘, 鞠谷雄士, 高橋邦夫, 齋藤滋規, "静電誘導ファイバー集積構造による曲面对応静電チャックの開発", 2011年度精密工学会春季大会論文集, Vol.2011S, pp.877-878, 2011.
(会場: 東洋大学, 東京)
- ④ 早田史明, 宝田亘, 鞠谷雄士, 齋藤滋規, "静電誘導ファイバーによる物体吸着機構の開発", 2010年度精密工学会春季大会論文集, Vol.2010S, pp.627-628, 2010.
(会場: 埼玉大学, 埼玉)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋藤 滋規 (SAITO SHIGEKI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 30313349

(2) 研究分担者

鞠谷 雄士 (KIKUTANI TAKESHI)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号: 70153046

高橋 邦夫 (KUNIO TAKAHASHI)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 70226827