

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289056

研究課題名(和文) 静電誘導ファイバー高度集積化によるヤモリ型静電チャック創製と物体操作技術への展開

研究課題名(英文) Gecko-inspired Electrostatic Chuck by Assembling Electrostatic-Induced Fibers for Developing an Innovative Manipulation Technology

研究代表者

齋藤 滋規 (SAITO, SHIGEKI)

東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授

研究者番号：30313349

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、ヤモリ指先の微細構造にヒントを得て、静電力により対象物を自在に凝着(把持)・離脱可能にする「ヤモリ型静電チャック」を創成し、従来、取り扱い困難だった対象物をハンドリング(物体操作)可能にする技術(デバイスおよび制御方法)を実現することにある。具体的には、静電力発生のための電極を先端に備えた微細毛の集合体を高度に集積し、ヤモリ指先のセタ微細毛にヒントを得た構造により、対象物の表面形状に沿って柔軟に密着し、静電力をより有効に働かせるデバイスを実現すること、さらにそれを用いた「強い凝着」と「容易な離脱」を両立可能にする技術体系を確立することである。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop a "gecko-inspired electrostatic chuck" that can attach, hold, and detach objects by electrostatic force, which is technologically synthesized by micro-structures inspired by geckos' fingertips. The main focus is on the development of device and the establishment of control methodology that can enable reliable and precise manipulation of target objects that are hard to be manipulated in the conventional way. The pillars like gecko's micro-level structure, which is called "seta", are fabricated in good alignment as layered modules where the electrostatic force are generated on the tips of pillars. The layered modules are stacked precisely in order to secure large effective area for electrostatic force. The goal is to establish the new technology that can enable strong adhesion and easy detachment simultaneously due to the effective electrostatic force using the bio-inspired structure that can follow the profile of the object surface.

研究分野：微細作業工学

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 マイクロロボティクス

1. 研究開始当初の背景

電子情報機器等の小型化に伴い、ミリメートル以下の微小物体や薄板形状(あるいは箔形状)などの壊れやすい部品のハンドリング(物体操作)技術革新が製造現場で望まれている。グリッパやピンセットなどの機構を用いず、エンドエフェクタ(効果器)先端に対象物を無傷で凝着(把持)・離脱させる「グレッパレスハンドリング」実現のためには、壁や天井に容易に凝着・離脱するヤモリ指先の構造・機能がヒントになる。しかし、ヤモリの凝着は有効に作用する距離が極めて短いファンデルワールス力を用い、大きな力を得るのにナノレベルの表面粗さを吸収する必要がある。このため、「各セタ先端にスパチュラと呼ばれる先端がヘラ状になったナノスケールの超微細毛を持つ」といった階層的な微細構造を必要とする。それ故、人工的に同様な構造を実現することは本質的に困難であり、少なくとも現時点では実現されていない。

そこで、申請者らは、発想を転換し、ファンデルワールス力ではなく静電力を力の原理とする「ヤモリ型静電チャック」を創製する着想に至った。これは、有効作用距離がより長い静電力を用いることによって、「セタに相当する微細毛」を集積させた構造のみでヤモリの手足が持つ凝着(把持)・離脱性能の特性を引き出すデバイスである。これまで、申請者らは(溶融紡糸による)静電誘導ファイバーおよび「ヤモリ型静電チャック」(結束型および単層型)の試作と評価を行い、理論・実験両面から、その有効性を確認してきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ヤモリ指先の微細構造にヒントを得て、静電力により対象物を自在に凝着(把持)・離脱可能にする「ヤモリ型静電チャック」を創製し、従来、取り扱いが困難だった対象物をハンドリング(物体操作)可能にする技術を実現することにある。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)を高度に集積化し、ヤモリ指先のセタ微細毛にヒントを得た構造により、対象の表面形状に沿って柔軟に密着し、静電力をより有効に働かせるデバイスを実現すること。さらに、それを用いた「強い凝着」と「容易な離脱」を両立可能にする技術体系を確立する指針を与えることである。

3. 研究の方法

プロトタイプ開発と性能評価を基本の研究方法として下記の方向性にて研究を遂行した。

「ヤモリ型静電チャック」積層化によるデバイスの大面積化

アルミ箔製の直径 2mm、長さ 14mm 程度の微小パイプをピックアップ(およびプレス)

することに成功している単層型「ヤモリ型静電チャック」を基本のユニットとして、先端における静電力の発生効率を改良したユニットを実現する。さらに、当該ユニットを積層化することによって「ヤモリ型静電チャック」の大面積化を実現するモジュールを開発する。

双極型静電誘導ファイバーモジュールの開発

操作対象となる物体の材料を導体に限らず、誘電体も取扱い可能にするため双極型静電誘導ファイバーモジュールの開発を行う。ファイバー本体は、単層型と同様に溶融紡糸による方法を採用。これまでの申請者らによる(ミリメートルスケールの)ラージモデルを用いた予備的検討(実験および有限要素法による解析)から、双極型ファイバー先端に発生する静電力は、対となる正極と負極の距離を短くすることにより、向上させることが可能であることが示されている。

静電誘導ファイバー細線化・先端部改質

「静電誘導ファイバー先端における電極密度」は「ファイバーが弾性変形する際の最大変位」との非常に深い関係がある。基本的には、先端電極面積を大きく保ちながら、繊維本体直径を細線化していくことが望ましい。

4. 研究成果

研究期間全体にわたり、多彩な観点からプロトタイプの開発と性能評価を行ってきた。取り扱う対象物が導体、半導体、誘電体のいずれかであるかによって、適切な微細毛柔軟静電チャックとして単層型デバイスと双極型デバイスの二つのタイプに分けられる。さらに、溶融紡糸、ウェットエッチング、半導体リソグラフィ、3次元造形法など製造方法により、幾つものプロトタイプが提案されている。以下、本稿でそれぞれのプロトタイプについて、概要を示し、製造法別の特徴を比較する(雑誌論文4)参照)。

4.1 単層型デバイス

単層型デバイスは、各微細毛先端に同じ電圧が印加されるように設計されたタイプである。力の発生原理は、電圧印加時に、微細毛先端と被把持対象物表面の両端にコンデンサーが形成されたと見なされる場合の電極基板間に発生する引力に相当する。製作方法により、溶融紡糸による静電誘導ファイバーを用いるものと、ウェットエッチングにより微細毛構造を「削り出す」ものに分けられる。溶融紡糸によるタイプとしては、結束型のものと配列型のものをプロトタイプとして発表済みである。

4.1.1 溶融紡糸によるプロトタイプ

溶融紡糸によって製作された静電誘導ファイバーを結束あるいは配列することによ

り微細毛構造を作り出す。静電誘導ファイバーは、外鞘がポリスチレン（PS）、内芯がポリプロピレン（PP）に気相成長カーボンファイバー（VGCF）を配合した材料からなり、非常に曲げ方向の弾性変形能が高く、中心の導電性が高い（共同研究者と開発した）特殊なファイバーである。

図1は溶融紡糸による静電誘導ファイバー（直径 $250\mu\text{m}$ ）を10本、一列に配列することにより製作されたものである。プロトタイプを用いたフォースカーブ計測により、対象物の表面形状と発生静電力の関係を実験により検証することが可能となり、表面柔軟性が表面に凹凸のある物体に対して、効果的に静電力を作用させるために非常に重要であることが示された。図1(a)-(d)では、半径2mm、長さ14mm、質量18.8mgのアルミ箔製のパイプ部品を対象として、把持・離脱実験を行った様子を示している。各写真は、(a)接近、(b)接触、(c)把持、(d)離脱（電圧印加終了）の一連の動作の様子を示している。

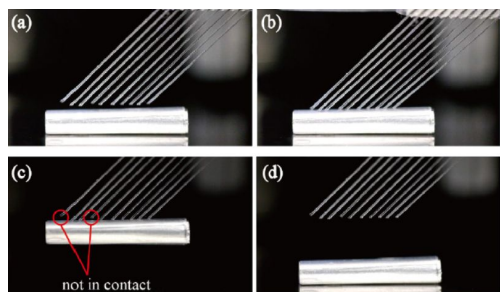


図1 溶融紡糸による配列型のプロトタイプ

実験を通じて、壊れやすいアルミ箔製のパイプ部品を把持する場合、接触した際に生じる過剰な圧力をファイバーの曲げ方向の弾性変形により吸収し、部品を破壊することなく把持することが可能になることが示された。また、電圧印加終了時に、自重による離脱が可能である程度に残留電荷の影響が少ないことが確認された。

フォースカーブ計測により確認された最大静電力は、600V印加時、 0.18mN 、微細毛幅 $250\mu\text{m}$ 、間隔 $750\mu\text{m}$ を考慮に入れた単位面積辺りの力単位面積辺りの力に換算して 0.07kPa であった。

4.1.2 ウェットエッチングによるプロトタイプ

ウェットエッチングによって、金属薄板を加工することによって微細毛構造を作り出す。この方法によって、厚さ $50\mu\text{m}$ のステンレス鋼（SUS304）をもとに同時に多数本の微細毛を等間隔に実現することが可能である。

図2はエッチングによって微細毛を（各微細毛の幅 $100\mu\text{m}$ 、間隔 $250\mu\text{m}$ にて）50本同時に実現したものである。斜め45度に角度を持たせることで各微細毛の曲げ方向の弾性変形によって先端接触時の柔軟性を確保す

ることが可能になる。

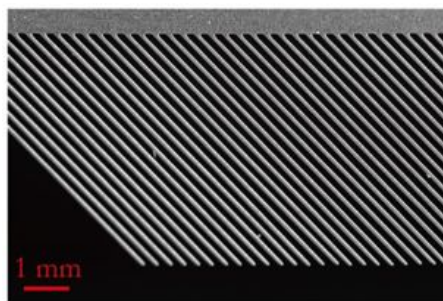


図2 ウェットエッチングによる単極型のプロトタイプ

フォースカーブ計測により確認された最大静電力は、600V印加時、 0.34mN 、微細毛幅 $100\mu\text{m}$ 、間隔 $250\mu\text{m}$ を考慮に入れた単位面積辺りの力に換算して 0.4kPa であった。

4.2 双極型デバイス

双極型デバイスは、各微細毛の先端に正極、負極がペアになるように電極を備え、両極間を絶縁した状態で、電圧を印加することによって静電力を発生するように設計されたタイプである。

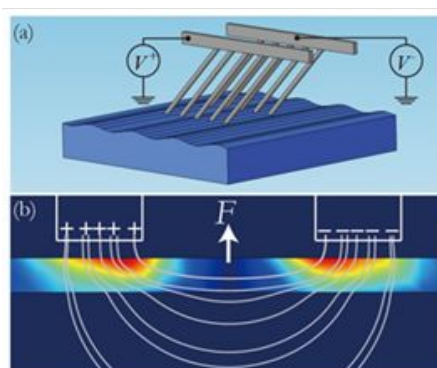


図3 双極型デバイスの静電力発生の様子（有限要素法による解析）

図3で示されるように、双極型デバイスの場合、被把持対象物に作用する静電力は、正極・負極両端間に電圧を印加することによる電界に由来する勾配力である。単極型デバイスと異なり、誘電体を被把持対象物とすることが可能であるが、その場合、実電荷誘導を前提としないので、最大発生静電力は限定的なものとなる。

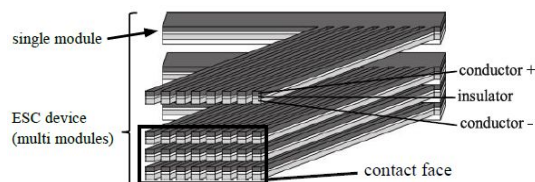


図4 双極型デバイス大面積化のコンセプト

柔軟静電チャックの双極型デバイスを大面積化する方法は現時点で確立されていないが、図4に示すように、双極型デバイス

モジュールを積層することよりの大面積化を図る。各モジュールは、電極層-絶縁層-電極層の三層一体構造を成しており、各モジュール間に絶縁層を挿入しながら、積層することが想定されている。

4.2.1 ウェットエッチングによるプロトタイプ

ウェットエッチングによる双極型のプロトタイプは図5に示されるように、単極型のプロトタイプを組み合わせることで実現された。

図6はこのプロトタイプを用いて薄い紙を対象とした把持・離脱実験を行った様子を示している。(a)はプリント用紙、(b)はティッシュペーパーを対象とした連続写真であり、対象物に損傷を与えることなく把持し、電圧印終了後に離脱が成功していることが確認できる。(時系列は左から右・順に「接近」「接触」「把持」「離脱(電圧印加終了)」)

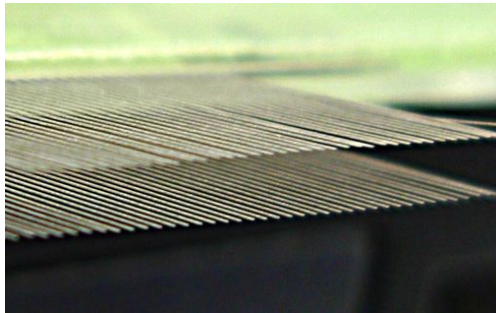


図5 ウェットエッチングによる双極型のプロトタイプ

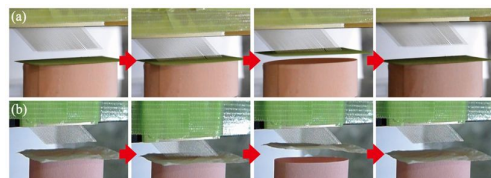


図6 ウェットエッチングによる双極型のプロトタイプによる把持・離脱実験

フォースカーブ計測により確認された最大静電力は、 $\pm 600V$ 印加時、 $0.58mN$ 、微細毛幅 $100\mu m$ 、間隔 $250\mu m$ を考慮に入れた単位面積辺りの力に換算して $0.3kPa$ であった。(ただし、微細毛間隔 $250\mu m$ のモジュール間ギャップ $1mm$ を有効面積に入れた場合は、さらに小さく $0.03kPa$ 程度となった。)

4.2.2 半導体リソグラフィによるプロトタイプ

半導体リソグラフィによるプロトタイプを図7に示す。ウェットエッチングによる双極型プロトタイプは正極・負極間の絶縁層を薄くしたまま、確実な絶縁を確保することが困難であったが、その欠点を補い、双極型デバイスの大面積化への展望を開くものとなる。

母材として SOI (Silicon on insulator) 基板を用いることで、電極層 (Si) - 絶縁層 (SiO_2) - 電極層 (Si) の三層を一体モジュール

で造形する。厚さはそれぞれ、 $60\mu m$ 、 $3\mu m$ 、 $435\mu m$ である。電極層 (Si) はドライエッチングである DRIE (Deep reactive-ion etching) を用い、絶縁層 (SiO_2) はウェットエッチングを用いて造形を行った。微細毛先端の形状は平坦で面積 $200\mu m \times 498\mu m$ 、長さ $8mm$ 、取り付け角が 45 度である。梁本数は 12 本で $300\mu m$ の間隔で配列されている。

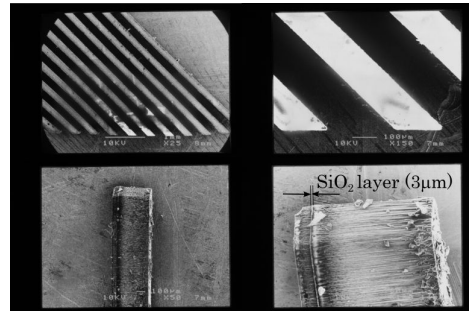


図7 リソグラフィによるプロトタイプ

フォースカーブ計測により確認された最大静電力は、 $\pm 150V$ 印加時、 $0.21mN$ 、微細毛幅 $200\mu m$ 、間隔 $300\mu m$ 、モジュール厚さ $498\mu m$ を考慮に入れた単位面積辺りの力に換算して $0.07kPa$ であった。

4.2.3 3次元造形によるプロトタイプ

3次元造形によるプロトタイプは、一つのモジュールを3次元造形によりプロトタイプしたものでシート状誘電体(上段: PP フィルム, 中段: ティッシュペーパー, 下段: プリント用紙)を対象として、把持・離脱実験を行った例を図8に示す(時系列は左から右・順に「接近」「接触」「把持」「離脱(電圧印加終了)」)。

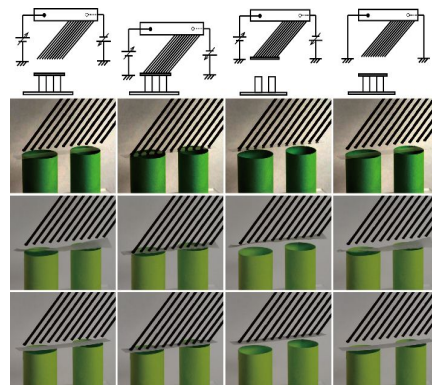


図8 3次元造形(3Dプリンティング)によるプロトタイプによる把持・離脱実験

加熱変形による追加工を用いて先端を平坦化したデバイスに関して、フォースカーブ計測により確認された最大静電力は、 $\pm 600V$ 印加時、 $24.5mN$ であった。微細毛幅 $1.2mm$ 、間隔 $3.6mm$ 、モジュール厚さ $1.6mm$ を考慮に入れた単位面積辺りの力に換算して $0.3kPa$ 程度の値であった。これは、有限要素法によって、勾配力として静電力を計算した結果より大きいものであることが判明している。

以上より、本研究課題において、数多くのプロトタイプの開発と性能評価を通して、当初の目的である「強い凝着」と「容易な離脱」を両立可能にする技術の確立に一定の指針を与えたと言える。今後は、さらに、具体的な対象物に特化した社会実装を目指すとともに、静電吸着原理におけるブレークスルーを目指しながら研究を継続させることが期待されている。

(注意)文中の図は、下記「主な発表論文等」より引用。引用の詳細は「雑誌論文4)」を参照のこと。

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 4 件)

1) Shigeki Saito, Fumiaki Soda, Radon Dhelika, Kunio Takahashi, Wataru Takarada and Takeshi Kikutani: Compliant electrostatic chuck based on hairy microstructure. Smart Mater. Struct. **22** (2013) 015019 (査読有)

2) Radon Dhelika, Kenji Sawai, Kunio Takahashi, Wataru Takarada, Takeshi Kikutani and Shigeki Saito: Electrostatic chuck consisting of polymeric electrostatic inductive fibers for handling of objects with rough surfaces. Smart Mater. Struct. **22** (2013) 095010 (査読有)

3) Radon Dhelika, Pasomphone Hemthavy, Kunio Takahashi and Shigeki Saito: Compliant bipolar electrostatic gripper with micropillar electrodes array for manipulation at macroscale. Smart Mater. Struct. **25** (2016) 055037 (査読有)

4) 齋藤滋規: 微細毛構造による表面柔軟性を持つ静電チャック, 静電気学会誌, **41** (2017)134 (査読有, 依頼寄稿)

〔学会発表〕(計 5 件)

1) 川村一輝, ヘムタビー パゾムポーン, 宝田巨, 鞠谷雄士, 高橋邦夫, 齋藤滋規: 双極型静電誘導ファイバーの配列に際して電極形状が静電力に与える効果, 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, p. 737, 精密工学会 (2014) (2014 年 3 月 18 日, 東京大学)

2) 田尻 陽亮, ヘムタビー パゾムポーン, 高橋 邦夫, 齋藤 滋規: フォトリソグラフィ技術を用いた微細毛構造による双極型静電チャックの開発. 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p. 505, 精密工学会 (2016) (2016 年 3 月 15 日, 東京理科大学)

3) 河野 健人, ヘムタビー パゾムポーン,

高橋 邦夫, 齋藤 滋規: 3D プリンターを用いた微細毛構造を持つ双極型静電チャックモジュールの開発. 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p. 507, 精密工学会 (2016) (2016 年 3 月 15 日, 東京理科大学)

4) 河野 健人, ヘムタビー パゾムポーン, 高橋 邦夫, 齋藤 滋規: 微細毛構造を持つ双極型静電チャックの吸着部平滑化による把持性能向上. 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p. 745, 精密工学会 (2017) (2017 年 3 月 13 日, 慶應義塾大学)

5) 崔 勝萬, 河野 健人, ヘムタビー パゾムポーン, 高橋 邦夫, 齋藤 滋規: リソグラフィ技術を用いた梁集合体を有する双極型静電チャックモジュールの開発. 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p. 861, 精密工学会 (2017) (2017 年 3 月 13 日, 慶應義塾大学)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: 双極型静電チャックモジュールおよびその製造方法

発明者: 齋藤滋規, 河野健人, 田尻陽亮, 高橋邦夫, デリカ ラドン

権利者: 国立大学法人東京工業大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-038109

出願年月日: 2016/02/29

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋藤 滋規 (SAITO Shigeki)

東京工業大学・環境・社会理工学院・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・物質理工学院・教授

研究者番号: 70153046

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