

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04297

研究課題名(和文) 微細毛構造由来の表面柔軟性を持つ静電吸着デバイスによる製造技術の革新

研究課題名(英文) Innovation in manufacturing technology using electrostatic adsorption devices with surface flexibility derived from fine hair structure

研究代表者

齋藤 滋規 (Shigeki, Saito)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：30313349

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ヤモリ指先の微細毛構造にヒントを得て、静電力により対象物を自在に吸着(把持)・離脱可能にする「微細毛静電吸着デバイス」を創製した。これにより、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した。具体的には、導電性の芯を持つ微細毛静電吸着モジュールを積層したデバイスを実現し、産業化への視野も入れた大量生産可能なモジュール製作方法を提案し、従来ハンドリング困難だった(壊れ易い微小部品、金属箔、紙、プラスチックフィルム、布などの)対象を柔軟に把持・離脱するための、「確実な吸着」と「容易な離脱」の両立を可能にする物体操作技術体系を確立するための基礎を築いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「微細毛静電吸着デバイス」は、これまでの申請者らの研究成果蓄積をベースにしており、次世代のフレキシブルエレクトロニクスを含めた多くの分野での自動化生産技術の基盤をなりうる潜在的な可能性を持っている。研究成果を社会に実装することにより、次世代情報化社会の基盤構築に大きく貢献することが可能である。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have created a "micro-electrostatic electrostatic chuck device" that can attract /grasp and detach an object by electrostatic force, inspired by the micro-hair structure of the gecko fingertip. As a result, we have developed a technology that enables handling/manipulating of objects that was difficult in the past. Specifically, we have synthesized a large-area device that is fabricated by stacking electrostatic chuck modules with fine hairs having a conductive core, and proposed a mass-production method that can be reliable with a view to industrialization. The proposed technology of manipulation system that can easily grasp and release an object such as fragile minute parts, metal foil, paper, plastic film, cloth, and others could become the fundamental key technology of for the future dexterous manipulation.

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

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、高性能フレキシブル有機エレクトロニクスデバイスの需要の高まりを受け、プラスチックフィルムのような薄く柔軟な媒体(ウェブ)等をハンドリングする技術に期待が寄せられている。例えば、リチウムイオン二次電池用コンデンサ、燃料電池車用セルスタック、薄膜センサ、OLED ディスプレイ、医療用人工生体膜など、エネルギー分野から医療、IT 関連までその応用範囲は多岐に渡る。紙やシート、あるいはフィルムといった柔軟媒体ハンドリング技術における日本のレベルは世界的にも最も高いが、新しい製造アプリケーションに対する(「抓んで引っ張る」あるいは「擦って滑らせる」など)従来技術の限界も数多く指摘されるようになってきた。また、完全無人化製造工程確立の需要も高まっており、ポリマーフィルムの酸素透過性能向上と相まって、クラス 1 以下のクリーンルームで使用可能な高信頼ハンドリング技術が求められている。負圧の使用が難しいこのような環境で、特に、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吸着(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ことが理解されるようになってきた。

この分野にブレークスルーを与えるのは(ヤモリ指先にヒントを得た)微細毛構造による表面柔軟性による静電吸着デバイスである。これは、損傷の無い微小物ハンドリングを実現し、信頼性の高い箔状導体/誘電体ハンドリング(金属箔、プラスチック、紙、布)を可能にする。ヤモリの指先構造を模倣した(静電力ではなく)ファンデルワールス力を利用した弾性体吸着デバイスなどは、これまでに数多く試作されており、特定の用途によっては実用レベルになっているが、吸着後の離脱が容易ではなく、完全無人化製造工程の確立のためには、印加電圧の制御とデバイス姿勢のわずかに制御により、安定した吸着(把持)・離脱が可能となる微細毛静電吸着デバイスの更なる開発が不可欠である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ヤモリ指先の微細毛構造にヒントを得て、静電力により対象物を自在に吸着(把持)・離脱可能にする「微細毛静電吸着デバイス」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(ヤモリ指先のセタ微細毛にヒントを得た)微細毛静電吸着モジュールを積層したデバイスを実現し、産業化への視野も入れた大量生産可能なモジュール製作方法を提案し、従来ハンドリング困難だった(壊れ易い微小部品、金属箔、紙、プラスチックフィルム、布などの)対象を柔軟に把持・離脱するための、「確実な吸着」と「容易な離脱」の両立を可能にする物体操作技術体系を確立することである。

3. 研究の方法

微細毛静電吸着モジュール設計・製作・評価

第一段階では、申請者がこれまでに開発してきた微細毛静電吸着モジュールを絶縁層を挟んで複層化することによって、基本モジュールを実現する。絶縁層形成のためには、リソグラフィ技術、ウォータージェット等高度切断技術、3D プリンティング技術など複数の方法を検討していく。第二段階では、基本モジュールの形状寸法の最適化を行う。微細毛の長さ、幅、厚さ、弾性ヒンジの寸法などは、基本モジュールを積層化した際に必要な剛性(=変位/単位面積当たりの力(圧力))に基づいて最適化することが必要である。これまでの申請者の知見をもとに、いくつかのデザインの方向性を打ち出し、試作と評価を繰り返して、これらの諸元の決定を行う。第三段階では、基本モジュールの外周にも絶縁層を形成し、積層化可能なモジュールを実現する。

モジュール積層化による大面積化

基本モジュールの先端が並ぶことによって、「大きな面」が形成される。各先端は双極電極が埋め込まれており、正負の電圧を印加することにより、先端に勾配力による静電引力を発生させることが可能になる。(双極電極を同極として使用すると導体や半導体用として使用することができる。)性能評価はフォースカーブ計測を基本とするが、ビデオマイクロスコープによる観察も同時に行い、残留電荷等の影響についても慎重に検討を行う。

微細毛静電吸着デバイス物体操作技術の開発

デバイスの静電吸着のための有効面積が大きくなると、印加電圧を停止させた際の、残留電荷の影響を考慮しなければならない。(半導体ウエハを取り扱う従来型の静電チャックなどもこの残留電荷の問題に対しては根本的な解決方法を持っていない。)そこで、ロボットアーム先端に取り付けられた微細毛静電吸着デバイスの物体離脱のための操作技術を提案する。これは、一旦静電吸着した対象物を離脱しようとする際に、残留電荷が存在し、印加電圧を停止しても、離脱が完了しない場合でも、デバイスの姿勢角を適切に制御し、特定の微細毛に応力が集中するようにすることで、離脱が可能になると考えられる。実際には、対象物全体に均等に与圧を加えた状態で、姿勢角を制御し、対象物が動かない状態で、特定の微細毛の離脱を図る必要があり、デバイス姿勢角 θ を含めたロボットアームの最適軌道を解明する。

4. 研究成果

微細毛静電吸着モジュール設計・製作・評価

基本モジュールの製作方法として、リソグラフィー技術、ウォータージェット等の高精度切断技術、3D プリンティング技術、あるいはこれらのうち複数の技術を組み合わせを用いる方法を提案し、有効性を確認した(崔 2017, 河野 2017, Wakabayashi 2017, Choi 2017, 児玉 2018, 林 2019, 齊藤 2018, 凌 2020)。

図 1 に 3D プリンティング技術による微細毛の条件検討の例を示す。図 2 の計測系を用いてモジュール評価のためのフォースカーブ計測を行った。自動ステージによって変位を与え、電圧印加時にモジュール先端に発生する静電力を電子天秤によって定量する。図 3 は対象物をガラスとした例を示している。

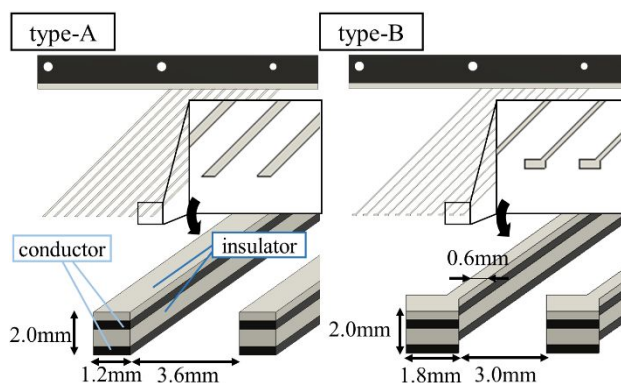


図 1: 単純梁形状 (type-A) とヤモリ型形状 (type-B) との比較

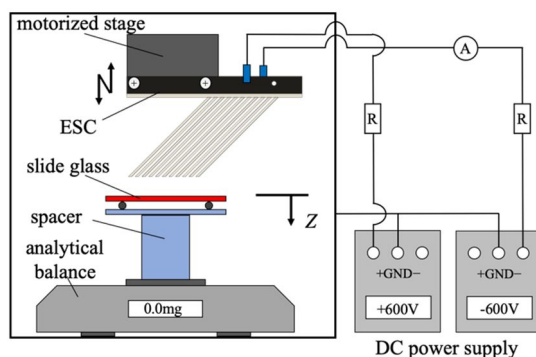


図 2: モジュール性能評価のためのフォースカーブ計測

図 3 (左) に示すフォースカーブは微細毛の形状に応じた静電吸着性能の差を表している。±600V の電圧印加時にモジュール変位と発生力の関係を示すこのグラフからは、type-A に比べて、type-B がより高いコンプライアンスを発現し、最大発生力も大きいことを示している。これはヤモリのセタ形状に近い方がより安定に静電力を發揮できることを示している。図 3 (右) はモジュールを対象物に接触させ押し込み、再び $Z=0\text{mm}$ で先端を対象物に接した状態から $Z=-0.5\text{mm}$ に引き上げた状態を示す。type-A では梁先端の全てが離脱しており、そのときの発生力が 124mgf (最大発生静電力の 4 分の 1 程度) であるのに対して、type-B では約 50% の梁先端が接触を保持しており、発生力も 329mgf (最大発生静電力の 3 分の 1 程度) 確保されている。

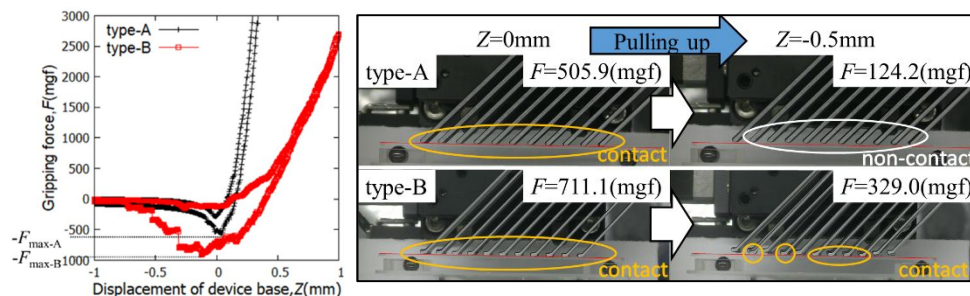


図 3: (左) フォースカーブによる性能比較。(右) 引き上げ時の接触安定比較。

図4はモジュール製作方法について検討を行った例の概念図である。導電体-誘電体-導電体の3層の複合材料をウォータージェット等の切断技術によってモジュールの基本を製作し、先端を平滑加工することでモジュールを製作することで大量生産を可能して、大面積化を容易にする技術を提供することが可能になった。

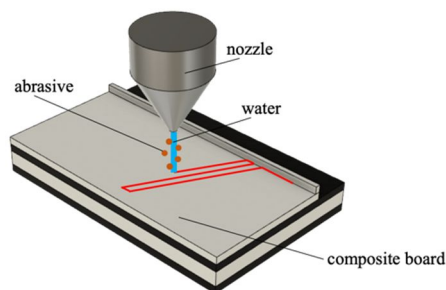


図4：ウォータージェット技術によるモジュールの製作の様子

モジュール積層化による大面積化

基本モジュールを積層することにより微細毛静電吸着デバイスの大面積化を行い、板ガラスを対象とした実験により、設計上の性能を発揮することを確認した(林 2019, 凌 2020)。

図5にモジュール積層化による大面積化の方法の例を示す。各モジュールを導電体-誘電体-導電体-誘電体の4層で製作し、スペーサーを用いて間隔を確保し積層することで梁先端が等間隔で配列され、先端が大きな平面を構成するように構築される。

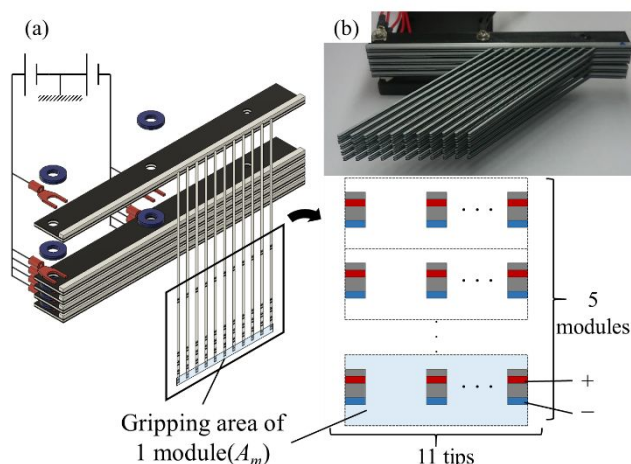


図5：モジュール積層化による大面積化の様子

図6(左)に微細毛柔軟静電吸着モジュール5層によるデバイスの試作例を示す。図6(右)に厚さ0.1mmのプラスチックフィルム(材料：ポリプロピレン)(15mm×50mm)を吸着して持ち上げている様子を示す(矢印の先がフィルム位置となっている)。

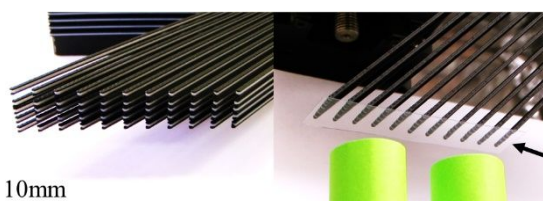


図6：(左)微細毛柔軟静電吸着モジュール5層によるデバイスの試作例。(右)ガラス対象物の持ち上げ。

微細毛静電吸着デバイス物体操作技術の開発

微細毛静電吸着デバイス使用時に、電圧印加時に梁先端と対象物との間の接触界面に電荷が残留した場合でも確実な対象物の離脱を可能にするために、物体操作技術としての軌道制御方

法を開発した(工藤 2018, KUDO 2018)。

図7に微細毛静電吸着デバイスによって静電力により対象物を把持した後、(印加電圧オフ時の残留電荷を想定し)電圧(=±600V)を印加したまま、デバイスの傾斜角によって確実な物体離脱を試行した例を示す。図7(上)モジュールを傾斜させて容易な離脱を可能にするコンセプトを示している。傾斜角によってある特定の梁先端の応力を高めることによって効率的な離脱が可能になる。図7(下)は傾斜角度が0度、4度の場合の離脱の様子を示している(矢印は、紙試料の位置を示す)。0度の場合には対象物がデバイスに付着したまま持ち上げられている。一方、4度の場合には対象物は基板上にのこり、デバイスから離脱されていることがわかる。

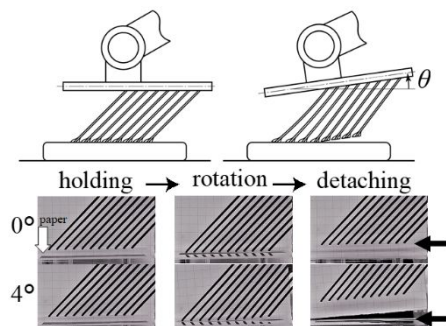


図7: 傾斜角の印加電圧オフ時の残留電荷を想定し)電圧を印加したまま、デバイスの傾斜角によって確実な物体離脱を試行した例

図8に傾斜角度が0度と4度の場合のフォースカーブの比較を示す。図8(左)は傾斜角度が0度の場合のフォースカーブを示しており、デバイス引き上げ時にマイナス値として静電力が観察される。図8(右)は4度の場合のフォースカーブを示しており、同じ印加電圧にも関わらず、明確なマイナス値がない。これは、微細毛静電吸着デバイスにおいて対象物を離脱する際に、残留電荷の影響が大きい場合でも、適切な離脱軌道を選択すれば、確実な離脱が可能であることを示している。

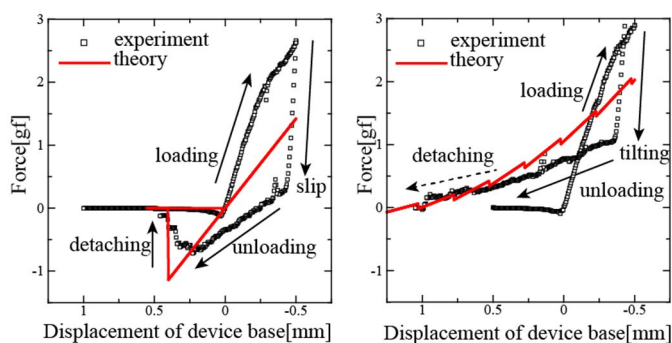


図8: 傾斜角度が0度と4度の場合のフォースカーブの比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hemthavy Pasomphone, Kudo Kenta, Kawano Kento, Takahashi Kunio, Saito Shigeki	4. 巻 2
2. 論文標題 Compliant bipolar electrostatic gripper using 3D-printed-layered elastic probes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering Research Express	6. 最初と最後の頁 015013 ~ 015013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/2631-8695/ab67ed	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Saito Shigeki, Kawamura Kazuteru, Dhelika Radon, Hemthavy Pasomphone, Takahashi Kunio, Takarada Wataru, Kikutani Takeshi	4. 巻 28
2. 論文標題 Force evaluation of electrostatic gripper with arrayed fibers consisting of parallel and coaxial electrodes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Smart Materials and Structures	6. 最初と最後の頁 095018 ~ 095018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab3243	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Seungman Choi Kazuki Wakabayashi, Kunio Takahashi and Shigeki Saito	4. 巻 Vol. 28 No. 12
2. 論文標題 Development of a bipolar electrostatic chuck module with a beam-array assembly using the multiple etching process	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Micromechanics and Microengineering	6. 最初と最後の頁 125011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1361-6439/aae8ca	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 齊藤滋規	4. 巻 Vol. 41, No.3
2. 論文標題 微細毛構造による表面柔軟性を持つ静電チャック	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 静電気学会誌	6. 最初と最後の頁 pp. 134-138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 工藤健太, 田岡祐樹, ヘムタビーパソムポーン, 高橋邦夫, 齋藤滋規
2. 発表標題 微小円筒操作のための双極型静電吸着ツールの開発
3. 学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 凌智寛, 田岡祐樹, ヘムタビーパソムポーン, 高橋邦夫, 齋藤滋規
2. 発表標題 複合材のウォータージェット加工による微細毛静電チャックの製造手法の開発
3. 学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Terumichi Hayashi, Yuki Taoka, Pasomphone Hemthavy, Kunio Takahashi, Shigeki Saito
2. 発表標題 Development of a Compliant Bipolar Electrostatic Chuck Having 3D-Printed Elastically-Deformable Beams for Handling Large Film
3. 学会等名 2019 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林輝道, HEMTHAVY PASOMPHONE, 高橋邦夫, 齋藤滋規.
2. 発表標題 集合梁構造により表面柔軟性を有する双極型静電吸着デバイスの大面積化
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenta KUDO, Shigeki SAITO
2. 発表標題 A 3D-Printed-Layered Module of Compliant Electrostatic Gripper Consisting of Elastically Deformable Bipolar Micro-probes for Manipulation of Thin Film/Textile Objects
3. 学会等名 2018 Materials Research Society Fall meeting (MRS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤滋規
2. 発表標題 微細毛構造を用いた静電チャック
3. 学会等名 第42回静電気学会全国大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 児玉理央, 若林一貴, HEMTHAVY PASOMPHONE, 高橋邦夫, 齋藤滋規
2. 発表標題 表面に凹凸形状を有する誘電体の把持・離脱を目的とした微細毛構造を持つ双極型静電吸着装置の配列密度に関する実験的検討
3. 学会等名 2018年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 工藤健太, 若林一貴, HEMTHAVY PASOMPHONE, 高橋邦夫, 齋藤滋規
2. 発表標題 集合梁構造を持つ双極型静電吸着装置による対象物離脱のための手先軌道の実験的検討
3. 学会等名 2018年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Seungman Choi, Kazuki Wakabayashi, Shigeki SAITO
2. 発表標題 Development of Bipolar Electrostatic Chuck Module Having Array of Beam Assembly Using Lithography Technique
3. 学会等名 2017 Materials Research Society Fall meeting (MRS 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazuki Wakabayashi, Kento Kawano, KUNIO TAKAHASHI, Shigeki SAITO
2. 発表標題 A 3D-printed-Layered Module of Compliant Electrostatic Gripper Consisting of Elastically Deformable Bipolar Micro-Probes,
3. 学会等名 2017 Materials Research Society Fall meeting (MRS 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 河野 健人, ヘムタビー パゾムポーン, 高橋 邦夫, 齋藤 滋規
2. 発表標題 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
3. 学会等名 2017年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 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
3. 学会等名 2017年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高橋 邦夫 (Takahashi Kunio) (70226827)	東京工業大学・環境・社会理工学院・教授 (12608)	
研究分担者	鞠谷 雄士 (Kikutani Takeshi) (70153046)	東京工業大学・物質理工学院・教授 (12608)	
研究分担者	山本 貴富喜 (Yamamoto Takatoki) (20322688)	東京工業大学・工学院・准教授 (12608)	