

## 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24年3月31日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360066

研究課題名（和文） ERゲル保持機構を利用した半導体製造工程におけるウェハの真空中高速搬送技術の開発

研究課題名（英文） Development of High-speed Transportation Technology of Wafer in Vacuum Process applying the ERG Chuck

研究代表者

青山 藤詞郎 (AOYAMA TOJIRO)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：70129302

研究成果の概要（和文）：電気で粘着性が変化する ER ゲル(Electro-rheological Gel,ERG) を真空中で使用可能なウェハ固定装置へ応用し、半導体製造プロセスの高速・高精度化を試みた。真空対応型 ER ゲルの開発に成功し、真空プロセスにおけるウェハの高速搬送を実現する電気粘着保持機構に応用展開した。Si ウェハ高速搬送実験の結果、開発した電気粘着保持機構を備えたエンドエフェクタは、着脱の電氣的応答性も高く、0.5G の搬送加速度でもウェハの位置ずれを生じることなく搬送できることを確認した。

研究成果の概要（英文）： The developed “Electro-rheological gel” has the unique ability to change the surface adhesive property according to an applied electric filed. In this research, the ERG is applied to the chucking device of wafer available for vacuum process and we have aimed at the enhancement of the efficiency in semiconductor process by using the ERG chucking device. The electro-adhesive chuck (EA Chuck) which enables fast-control of the fixing force by an applied voltage is successfully developed and attached to the end-effector of the wafer transfer robot. From the experimental results of wafer transfer test in vacuum condition, it is clear that the accumulated position error can be extremely suppressed by less-than 0.1mm at maximum transfer acceleration of 0.5G.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2010年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2011年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
年度			
年度			
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・生産工学・加工学

キーワード：精密位置決め・加工計測・半導体製造

## 1. 研究開始当初の背景

従来から国内外において、電場や磁場に応答して特性が変化する ER 流体（電気粘性流体）や MR 流体（磁気粘性流体）などの機能性流体に関する研究が基礎・応用の両面で活発に行われている。また、最近ではこれらの流体をゲル化した機能性ゲルが開発され、その研究が研究代表者らを含めて積極的に行われている。特に、ER ゲルは研究代表者らにより世界で初めて開発された機能性ゲルで、これに関する研究成果報告を 2004 年に北京で開催された機能性流体に関する国際会議 9th International Conference of ERMR2004 で行ったのが最初であり、研究代表者らが先駆的に研究を行っている。しかし、真空という特殊環境下において機能性ゲルの基礎特性を解析した例はなく、また真空環境下における応用研究も行われていない。その理由は、これまでの機能性ゲルの開発およびその応用研究は、従来の機能性流体の延長線上にあったためである。ゲル構造を有する機能性エラストマを固体材料として捉えれば、真空環境下のデバイス応用というのは、有効な適用分野の一つと考えられる。

研究代表者らによるこれまでの研究で、ER ゲルの基礎特性が解析され、固定力発生（電気粘着効果、Electro-adhesive effect, 以後 EA 効果）のメカニズムが誘電分極した ER 粒子の微小移動によるゲル表面の構造変化に基づく粘着現象に起因することが明らかにされた。また ER ゲルに電界を印加するための電極構造として、従来の平行平板電極構造に代わり、絶縁基板上に陽極と陰極を交互に配置した片側電極構造を適用することで、電極に対向する材料は導電体に加えて絶縁体でも EA 効果が得られることが確認されている。EA 効果が粘着現象に基づくことから、真空中でも ER ゲルの固定力発生が期待でき、更に片側電極を適用すれば半導体材料も固定できることから、シリコンウェハの真空搬送用固定装置への応用可能性が期待できる。

大気圧での保持装置には真空チャックが広く利用されているが、真空中では使用することができない。また、ハイエンドな搬送ロボットには、静電チャックを利用する場合もあるが、帯電による残留保持力の問題や高電界による基板上の素子への影響の問題が残る。そのため、これらを解決できる画期的な真空中の保持装置の開発が半導体製造分野で求められている。電気粘着効果を示す ER ゲルは、上記の問題を解決できる固定装置へ応用できる可能性があり、これが開発されれば半導体製造プロセスの生産効率を飛躍的に向上できると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、半導体製造工程におけるシリコンウェハの真空中高速搬送を実現するために、ER ゲルを応用した真空搬送用ウェハ固定デバイスを開発することを目的としている。ER ゲルを半導体製造工程で使用可能な固定デバイスに応用するには、単純に ER ゲルが真空中においても大気圧中と同様の性能を示せばよい訳ではない。例えば、300°Cを超える高温環境でのプロセスに耐えなくてはならないことや、ウェハ基板や製造プロセスに悪影響を及ぼすガスの放出が許されないことなど厳しい条件がある。そこで、高真空かつ高温環境下における ER ゲルの基礎特性を明らかにする。また真空中での使用において ER ゲルの性能上の問題を明確にして、真空対応型 ER ゲルの開発を行う。これらの研究成果に基づき、真空対応型 ER ゲルを用いた固定素子を試作し、これを適用したシリコンウェハ搬送試験を行い、その性能を評価する。

## 3. 研究の方法

本研究は大別して3つのフェーズから構成される。第1フェーズでは、真空対応型 ER ゲルの試作を行いその基礎特性を解析する。図1に示す環境温度を調整可能な真空チャンバ内でせん断方向及び垂直方向の固定力を測定可能な試験装置を試作し、高真空かつ高温環境下における ER ゲルの基礎特性を明らかにする。固定力測定方法の概略図を図2に示す。また、真空中においても安定した性能を有し、悪影響を及ぼすガス放出のない真空対応型 ER ゲルの開発を行う。具体的には、粒子配列を制御してゲル化する製造技術の確立、放出ガスを低減するために熱処理・真空脱法処理プロセスの適用を試みた。得られた研究成果に基づき、第2フェーズでは、真空対応型 ER ゲルを用いた固定デバイスの開発を行った。半導体材料の固定に適した片側

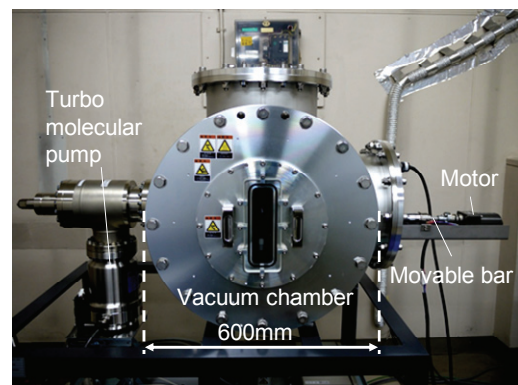


図1 真空中での基礎特性解析装置

電極形状の設計法を確立し、それに基づき固定素子の開発及びその性能評価を行う。更に第3フェーズでは、電気粘着保持機構を有したエンドエフェクタを製作して、これを適用したウェハ搬送ロボットを用いて真空中のシリコンウェハ搬送実験を行い、その性能を評価した。

#### 4. 研究成果

##### 4.1. 真空中におけるERゲルの基礎特性

電極幅 1mm、電極間隔 1mm の片側電極に、0.3mm のERゲルを貼り付けた電気粘着保持要素を製作した。図3に電気粘着保持要素を示す。片側電極に電圧を印加するにあたり、電源構成はバイポーラ型を用いた。固定対象をSiウェハとして、この電気粘着保持要素を用いて、ERゲルの真空環境下における固定性能を詳細に調べた。大気圧と真空環境下、常温と高温の組み合わせ条件で、せん断方向および垂直方向の発生固定力を測定した。ここで真空環境とは  $10^{-3}$ Pa 以下とする。

図4に23°C(常温)の環境温度で、大気圧および真空環境での電極間電位差とせん断方向発生固定力の関係を示す。真空環境でも印加電界に応じて固定力が発生することが確認できる。ただし、真空環境下での各電極間電位差における発生固定力は、大気圧下のそれより若干低下することがわかる。

図5に環境温度を50°C、100°C、150°Cと変化させて、真空環境下で電極間電位差と発生固定力の関係を調べた結果を示す。大気圧下では環境温度が高くなるにつれ、電気粘着保持機構の性能が低下する。一方、真空環境では、環境温度による著しい性能劣化が生じない。この実験結果から、ERゲルは真空環境に適した材料と考えることができる。

なお、垂直方向に関しても同様の傾向を示すことを確認している。

##### 4.2 真空対応型ERゲルの開発

ERゲルは高分子材料から構成されており、真空中での放出ガスによるウェハおよび環境への汚染が考えられる。そこで、低真空環境 ( $10^{-1}$ Pa) でERゲルを加熱する脱ガス処理の効果を検討した。具体的には、処理時間と放出ガスの関係を定量的に評価し、汚染を抑制する。脱ガス処理の条件は、以下の通りとした。

- (1) 脱ガス処理温度は120°C一定とする。
- (2) 脱ガス時間：0.5h, 2.0h, 4.0hの3条件とする。

サンプルを真空チャンバに設置し、ガス分子量を計測可能な装置(Q-mass)を用いて、各処理を施したERゲルから放出されるガス成分の測定を行った。図6に測定方法の概略

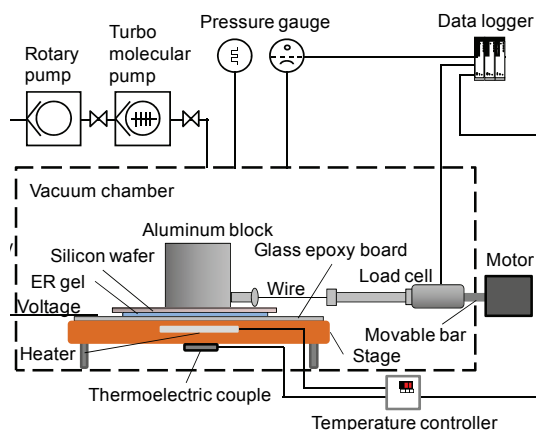
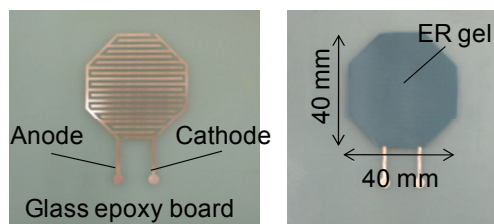


図2 固定力測定方法



One-sided electrodes ERG fixture element  
図3 電気粘着保持要素

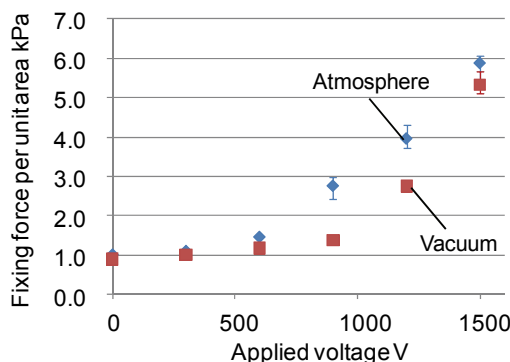


図4 真空環境下におけるERゲルのせん断方向発生固定力

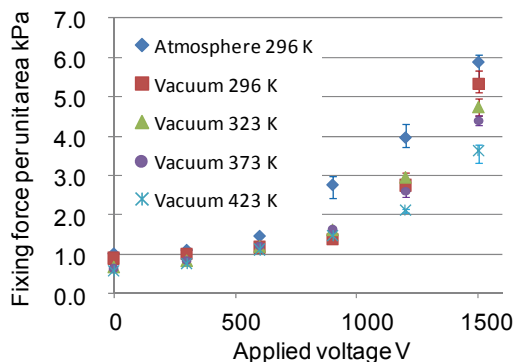


図5 真空・環境温度とERゲルのせん断発生固定力の関係

を示す。測定環境温度として、常温、80℃、120℃における残留ガスを調べた。各処理を施した ER ゲルにおける残留ガスの測定結果（測定環境温度 80℃）を図 7 に示す。常温における残留ガスの測定においては、どの処理を施した ER ゲルも真空プロセスで使用可能なフッ素系ゴムと同程度であることがわかり、残留ガスによる汚染の影響はほとんどないことがわかった。

80℃では、脱ガス処理時間が 0.5h の ER ゲルにおいては、分子量 90 付近まで、脱ガス処理時間が 2.0h の ER ゲルにおいては分子量 60 付近までピークが検出されている。4.0h 処理した ER ゲルは分子量 40 付近までの残留ガス成分しか検出されず、フッ素系ゴムと同程度の結果であった。

120℃における測定では、脱ガス処理時間が 4.0h 処理した ER ゲルにおいても、分子量 75 付近までの残留ガス成分が検出されており、現段階では 100℃を超える環境下での使用は難しい。

以上より、脱ガス処理 4.0h を施すことで、真空環境で 80℃まで使用可能な真空対応型 ER ゲルが開発できることがわかった。

#### 4.3 電気粘着保持機構の開発

量産機への搭載を考慮して設計試作した直径 300mm ウェハ用のエンドエフェクタの外観を図 8 に示す。エンドエフェクタ基部はアルミナで製作した。電気粘着保持部はエンドエフェクタ基部表面の 3 箇所に直接楕円型の電極を形成し、その電極上に ER ゲルを幅 11mm、厚さ 0.4mm で成膜して作製した。楕円電極の形状（電極の幅と間隔）はシミュレーションによる電場解析とテストサンプルによる摩擦力の実測により最適な形状を決定した。

各電気粘着保持部へ電圧を印加する配線は、エンドエフェクタ基部の裏面に直接形成されている。裏面に配線することにより、ウェハと配線の不要な接触を避けることができるので、断線の可能性が低減している。

#### 4.4 真空中ウェハ搬送試験による評価

まず始めに電気粘着要素をステンレス製のダミーエンドエフェクタに搭載し、これを用いて旋回動作による Si ウェハの搬送試験を行った際の搬送加速度と位置ずれ量の関係を図 9 に示す。比較のために、電気粘着保持要素と同寸法のアルミナ基板を取り付け、同様の評価を行った。アルミナ基板のみのハンドにおいて、ウェハ搬送加速度 0.15G で、慣性力により 0.5mm 以上の位置ずれが生じることがわかる。一方、電気粘着保持機構を用いた場合、電圧を印加しない場合アルミナハンドと同様の傾向を示すが、1kV を印加して電気粘着効果を発生させることで、ウェハ搬

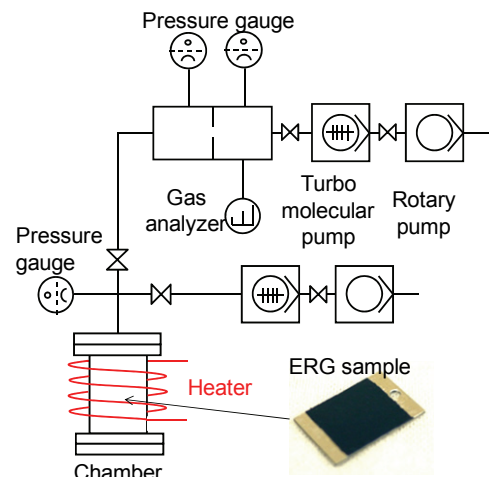
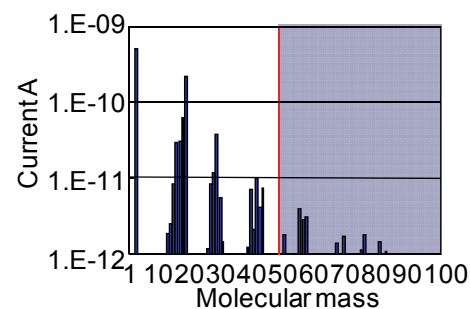
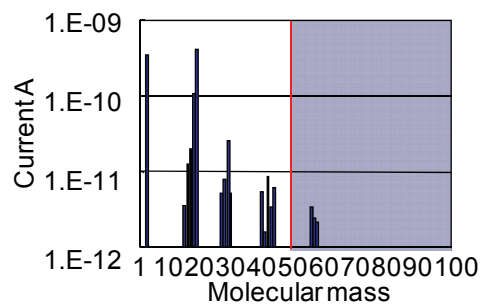


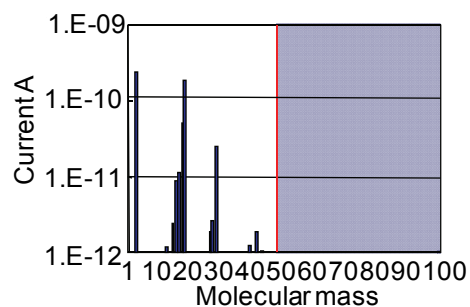
図 6 放出ガス測定方法



(a) 0.5 h



(b) 2.0 h



(c) 4.0 h

図 7 残留ガス測定結果

送加速度が 0.4G で搬送しても、位置ずれ量は 0.1mm 以下であることがわかった。また、電気粘着保持機構を搭載したハンドを用いて、6 万回の回転動作によるウェハ搬送試験



を行った。6万回の動作においても位置ずれはほとんどなく、0.1mm以下に抑えられていることがわかった。

次に、量産機搭載型のエンドエフェクタを真空搬送ロボットに取り付けて真空中での搬送試験を行なった。ERゲルへの印加電圧は極間で1kV、ロボットの最大搬送加速度は0.5Gで試験を行なった。試験では直径300mmのウェハを使用した。計測中のチャンバの圧力は $\sim 2 \times 10^{-3}$ Paである。搬送試験で得られた180度の1往復動作毎のウェハずれ量を図10と図11に示す。図10は電気粘着保持部に1kVを印加して旋回動作を行なった場合の、図11は電圧を印加しない(0V)で旋回動作を行なった場合のずれ量を表している。1kV印加して旋回動作させた場合はウェハのズレが発生しない(図10に示す測定でのずれ量の平均値は0.020mm)。一方、電圧を印加しない場合では、0.1mmを大きく超え0.2mm程度のずれが頻発している。図11中でずれ量が0.05mm程度で安定している部分(丸で示した部分)があるが、これは、エンドエフェクタの外周部にある縁(ウェハが大きくずれるのを防止する目的で取り付けられている)にウェハのエッジが当たっていることを表している。また、下向き矢印(↓)のところ、エンドエフェクタ上のウェハの位置を所定の位置に修正している。

以上より、開発した電気粘着保持機構を備えたエンドエフェクタはウェハを位置ずれなく高速かつ安定して搬送できることが確認され、革新的なウェハ搬送用固定装置として実用可能性も高いことが明らかになった。

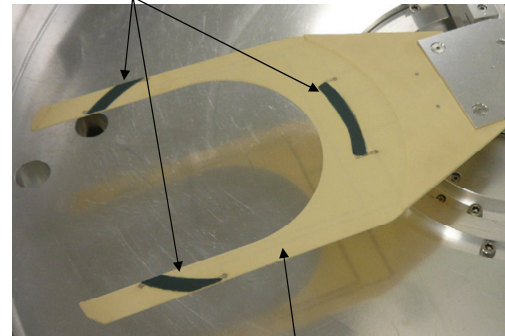
## 5. 主な発表論文等

(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6件)

- ① Y. Shida, Y.Kakinuma, T. Aoyama, H. Minami, H. Anzai, Basic Performance Evaluation of ER gel in vacuum Condition, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 査読有, Vol. 22, No.15, (2011) 1699-1706
- ② Y. Urakami, T. Aoyama, H. Anzai, Y. Kakinuma, Development of Tactile Display Device using ERG Multiple-Disk Clutch, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 査読有, Vol. 22, No.15, (2011) 1693-1698.
- ③ 内藤洋介, 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 安齊秀伸: 材料パラメータの異なるERゲルの性能評価, 日本機学会誌 C2 編, 査読有, Vol.77, No.782, (2011)308-318

## Electro-adhesive chuck (EAC)



Alumina end-effector

図8 電気粘着保持機構を持つエンドエフェクタ

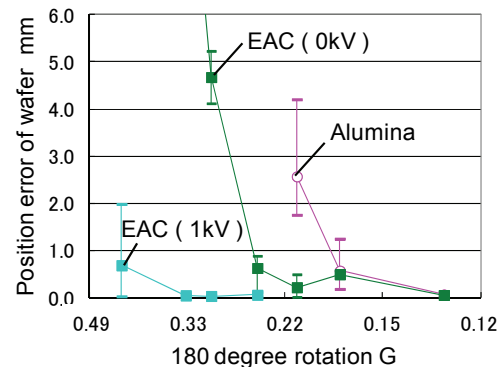


図9 ウェハ搬送加速度と位置ずれ量

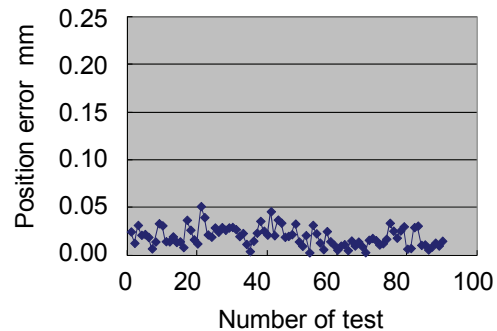


図10 電気粘着保持により搬送した際の発生位置ずれ量

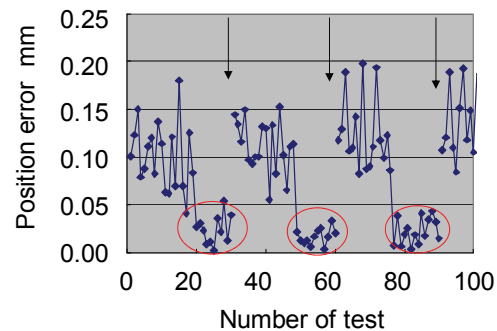


図11 電気粘着保持しない場合の発生位置ずれ量

- ④ Y. Shida, T. Aoyama, H. Minami, H. Anzai,

Y. Kakinuma: Basic Performance analysis of ER Gel in Vacuum, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Electrorheological (ER) Fluids and Magnetorheological (MR) Suspensions, 査読有, (2010) 81-87

- ⑤ Y. Naito, T. Aoyama, H. Anazai, Y. Kakinuma: Theoretical Analysis on Electro-adhesive Effect of ER Gel, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Electrorheological (ER) Fluids and Magnetorheological (MR) Suspensions, 査読有, (2010) 429-435
- ⑥ 柿沼康弘, 青山藤詞郎: 解説 電気粘性 (ER)ゲルの開発とその応用, トライボロジスト, 査読無, Vol. 54, No. 10, (2009) 677-682

〔学会発表〕(計 10 件)

- ① 志田佳彦他, 真空中でのウェハ高速搬送を実現する電気粘着チャックの開発, 2011 年度精密工学会春季大会学術講演会, 東京, 2011 年 3 月 15 日
- ② 内藤洋介他, ER ゲルにおける電気粘着効果の実験的解析, 日本フルードパワーシステム学会平成 22 年秋季フルードパワーシステム講演会, 別府, 2010 年 11 月 3 日
- ③ 青山藤詞郎, ER ゲルの開発と精密デバイスへの応用, 日本フルードパワーシステム学会平成 22 年度秋季フルードパワーシステム講演会, 別府, 11 月 3 日 (2010)
- ④ Y. Shida, et al., Basic Performance analysis of ER Gel in Vacuum, The 12<sup>th</sup> International Conference on Electrorheological (ER) Fluids and Magnetorheological (MR) Suspensions, Philadelphia, USA, 16<sup>th</sup> Aug., 2010
- ⑤ Y. Naito, et al., Theoretical Analysis on Electro-adhesive Effect of ER Gel, The 12<sup>th</sup> International Conference on Electrorheological (ER) Fluids and Magnetorheological (MR) Suspensions, Philadelphia, USA, 16<sup>th</sup> Aug., 2010
- ⑥ H. Tanaka et al., Torque Sensor-less Tactile Control of Electro-rheological Passive Actuators, the 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC'11), Nagaoka, Japan, 23<sup>rd</sup> Mar., 2010
- ⑦ 柿沼康弘, 電気で粘着性が変化する新素材 “ER ゲル” とその応用デバイス, 日本フルードパワーシステム学会 機能性流体を核としたフルードパワーシステムの融合化に関する研究委員会, 東京, 2010 年 3 月 10 日
- ⑧ H. Tanaka et al., Design of Multiple-disk Brake Applying Electro-adhesive Sheet, The

Sixth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, 4<sup>th</sup> Nov., 2009

- ⑨ 柿沼康弘他: ERゲルにおける電気粘着効果発生メカニズムの理論的解析, 日本機械学会 2009 年度年次大会, 岩手, 2009 年 9 月 17 日
- ⑩ 柿沼康弘他, 真空プロセスのための電気粘着保持機構の開発, 2009 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 神戸, 2009 年 9 月 11 日

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 受動アクチュエータ制御システム  
発明者: 柿沼康弘, 青山藤詞郎 他 2 名  
権利者: 慶應義塾大学  
種類: 特許  
番号: 特開 2011-164741  
出願年月日: 平成 22 年 2 月 5 日  
国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

青山 藤詞郎 (AOYAMA TOJIRO)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号: 70129302

### (2) 研究分担者

柿沼 康弘 (KAKINUMA YASUHIRO)  
慶應義塾大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 70407146

### (3) 連携研究者

該当なし