

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24246029

研究課題名(和文)電気粘着効果を発現する機能性表面の開発と極限環境保持機構への応用

研究課題名(英文) Development of functional surface with electro-adhesive effect and the application to fixture element in vacuum and high-temperature environment

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,300,000円

研究成果の概要(和文)：半導体製造プロセスにおける真空・高温環境下のウェハ保持のための高速着脱可能な固定機構の実現を目的として、微細構造を応用した電気粘着表面の開発を試みた。三次元マイクロメッシュ構造にエラストマを含浸させることで、電界印加に応じて規則的な粘着スポットが生じ、対象物を固定可能な電気粘着表面(EAS)の開発に成功した。片側電極構造を適用したEASは、Siウェハを電気粘着効果により保持することが可能で、高真空環境下でも機能することを明らかにした。また、高温環境下で印加電場に応じた保持力が高まることが実験的に示され、真空・高温プロセスのウェハ保持機構として応用可能性が高いことを確認した。

研究成果の概要(英文)：For a fixture device of wafer in semiconductor process under vacuum and high-temperature condition, we worked on development of a functional electro-adhesive surface with micro texture in this study. By impregnating three dimensional micro-mesh structure with an adhesive elastomer, an electro-adhesive surface (EAS) regularly generating numerous adhesive spots on the surface according to applied electric field was successfully developed. From the experiment, it is clear that EAS with one-sided patterned electrodes is able to fix a Si wafer with electro-adhesive effect and works in high-vacuum environment. In addition, the performance of EAS is enhanced at high temperature up to 150 degree Celsius. These results represents high applicability of EAS to a fixture device in high-vacuum and high-temperature process.

研究分野：生産工学

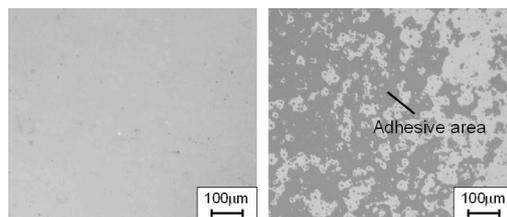
キーワード：機能性表面 機能性材料 トライボロジー

1. 研究開始当初の背景

機械要素の基盤技術の発展により、半導体製造プロセスや超精密加工における加工精度は数ナノレベルに達するとともに、タクトタイム短縮に対する要求が一層高まってきている。半導体製造プロセスの、特に真空搬送プロセスにおいて、タクトタイムが短縮できない要因は、保持機構にある。高真空環境を維持しなければならないことから、摺り合わせによるダストが発生する機械式クランプは使えず、エンドエフェクタ部の摩擦のみでウェハを保持している。これにより、ウェハとエンドエフェクタ間の静止摩擦力を越えない範囲に搬送加減速度は制限されてしまう。ハイエンドの装置には静電チャックが使用される場合もあるが、電圧除去をしても残留電荷による固定力が残り、デチャックに5~10秒を要するといった問題が残る。そのため、機械式クランプ、静電チャックに代わる新しい保持原理・保持機構の開発が望まれている。これまでに国内外でER流体・MR流体などの機能性流体/材料を用いた保持機構に関する研究がなされている (Kamarth et. al., Int. J.Rapid Manuf.(2009), US Patent: US 2010/0286688 A1(2010)) が、真空中や高温環境といった極限環境に対応できるものはない。

研究代表者はこのような背景のもと、開発した機能性エラストマ「電気粘着ゲル (Electro-adhesive gel, 以後 EA ゲル)」を応用した新しい保持機構の開発研究を進めてきた (科研費基盤研究 B, 平成 21~23 年度)。研究代表者らが開発した EA ゲルは、シリコンオイルに誘電微粒子を分散させゲル化することで製造することができ、微粒子がシリコンゲルより微少に突出した表面構造をとる。これに電界を印加すると、シリコンゲルが電気力を受けて隆起して粘着性のあるゲルが支配的な面へと変化する。この現象を応用した電気粘着保持機構は、高真空環境下で従来の2倍の搬送加速度を実現でき、静電チャックに比べて1/10の電界強度しか必要とせず、着脱時の応答性は50ミリ秒以下で、革新的な保持機構としての可能性を示した (Tanaka et al., JAMDSM(2008))。

一方、材料の観点からすると、EAゲルはシリコンゲルに誘電微粒子を分散させた構造であり、表面の粒子分布も不均一であることから完成面の各領域で性能が大きくばらつくといった問題がある (図1)。ナノ・マイクロ加工技術を駆使して、その表面構造体を機械的に作り出せれば、電気粘着保持機構として



(a) 無電場時 (b) 電場印加時  
図1 EAゲルの電気粘着効果 (EA効果)

の性能安定性を飛躍的に高めることができると予想した。更には、粘着性を制御できる新たな機能性表面の実現は、様々な工学分野にインパクトを与え、例えばロボット関節の摩擦制御表面や可変減衰表面などに応用展開されることが期待できる。

2. 研究の目的

半導体製造プロセスにおける真空中のウェハ保持や超精密加工における工作物保持のための高速着脱可能な無歪み・無荷重固定機構の実現を目的として、電気粘着機能表面 (Electro-adhesive Surface, 以後 EAS) の開発を行う。エラストマを含浸させた凸形状を有する3次元微細構造体として、これに電界を印加し、凸部で生じる電気勾配力によりエラストマを微小駆動させ、電氣的に粘着効果を産み出すことのできる機能表面構造を提案する。構造と表面形状が電気粘着効果 (EA効果) に与える影響を明らかにし、これに基づき微細構造体による安定した EAS を開発する。EAS を応用することで、押しつけ力や吸引力といった能動的な力を作用させることなくウェハを高速搬送するための保持機構を開発する。

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。

(1) 表面構造と EA 効果の関係性評価と微細表面構造による EAS の開発

微細なメッシュ構造にゲルを充填することにより、EA効果を示す機能性表面が開発可能であることが示唆された。そこで、微細構造体と EA 効果の関係性を実験と有限要素法による電場分布解析から明らかにし、構造の最適化を検討する。その結果に基づき、ナノマイクロ加工技術を駆使して、EAS を試作・開発する。原子間力顕微鏡を用いて表面構造を評価し、EA効果が生じる表面構造を明らかにする。

(2) 高真空・高温における電気粘着表面の保持性能評価と高性能化

真空中での EA 現象を捉えるための観察装置を製作し、真空環境下での EA 現象を調べる。次に、微細構造による EAS に対して  $10^{-5}$  Pa の高真空環境かつ高温環境下において、印加電界と保持力の関係を基本とした特性評価を行う。

(3) 真空プロセスの保持機構としての性能評価と極限環境に対応可能な電気粘着保持機構の実現

真空中での半導体や絶縁体の対象基板を保持するためには、片面に陽極と陰極を配置した片側電極構造を用いる必要がある。片側電極構造を用いてシリコンウェハ基板を保持する場合の最適電極パターンを検討する。次に、片側電極パターンを適用した EAS を用いて、真空中での基板搬送に必要な基礎的評価を実施する。具体的には、高真空ならびに高温環

境下での EAS の評価を実施する。この結果に基づき、開発した電気粘着保持機構の実用可能性を検討する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 表面構造と EA 効果の関係性評価と微細表面構造による EAS の開発

本研究では、個体差を低減し、安定した EA 効果を示す表面を実現するために、ER 粒子の代わりに三次元微細構造を用いた EAS を提案した(図 2)。具体的には、MEMS 技術を活用し、平坦度に優れた規則性のある三次元微細構造を高精度に製作することで、個体差が極めて小さい EAS の製造法の開発を試みた。複数の微細支柱を四角錐型に組み合わせることで構成した三次元微細構造に対して、シリコンゲルを充填し、支柱頂点をゲル表面より突出させた構造とする。このような三次元構造を採用することで、充填したシリコンゲルは構造体にしっかり保持され、剥離することがない。

提案した EAS は多重裏面露光法で骨格である微細メッシュ構造を形成した後、厚みを調整してゲルを充填することで製造した。実際に製造した微細メッシュ構造と、これにゲルを充填して製造した EAS を図 3 に示す。形成された基板を下部電極板とし、EAS 上に上部移動電極板を乗せ、電極間に電位差を与えることで、移動電極と EAS の界面で EA 効果が発生することを確認した(図 4)。

EAS の基礎的特性を評価するため、電気粘着効果による固定力を調べた。図 5 に滑り方向の固定力測定装置を示す。EAS 基板をベースに設置し、その上にガラス電極板を乗せる。X ステージに設置したロードセルとガラス電極基板をナイロン製の糸で連結する。EAS に電場印加した後、X 軸ステージを一定速度で動作させることで、EAS 上のガラス電極板をスライドさせ、その際に生ずる固定力を測定した。図 6 に印加電場と EAS の単位面積あたりに発生する固定力の関係を示す。シリコンゲルを充填していないマイクロメッシュでは、印加電場に応じた固定力変化が生じないのに対し、EAS は印加電場に比例して EA 効果が高まり固定力が増加することがわかる。

次に微細構造の影響を評価するため、表 1 に示すようにマイクロメッシュの支柱直径および支柱間のピッチをそれぞれ変化させた EAS を準備した。図 7 にマイクロメッシュ支柱直径及びピッチが異なる試料における固定力と電場強度の関係を示す。固定力は直径が大きく、支柱ピッチが狭いほど固定力が増加する傾向がある。電場解析により EAS 表面に生じる平均電場強度を調べた結果、表 1 の範囲において、支柱直径 20  $\mu\text{m}$ 、ピッチ 46.2  $\mu\text{m}$  として設計した EAS が最も高い値をとることがわかった。また、電場印加時の粘着領域の比較ならびに SPM による表面形状の違いを調べたところ、支柱直径 20  $\mu\text{m}$ 、ピッチ 46.2  $\mu\text{m}$  の EAS は、表面形状が連続的に変化して

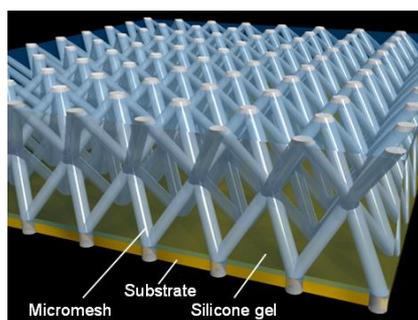
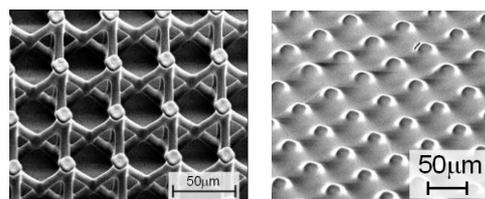


図 2 提案した電気粘着表面 (EAS)



(a) 微細メッシュ構造 (b) EAS

図 3 表面構造

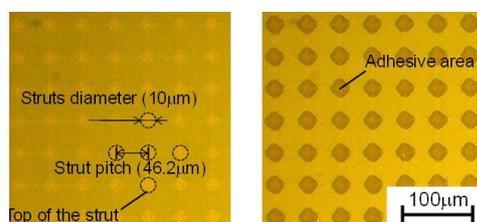


図 4 EAS における電気粘着現象

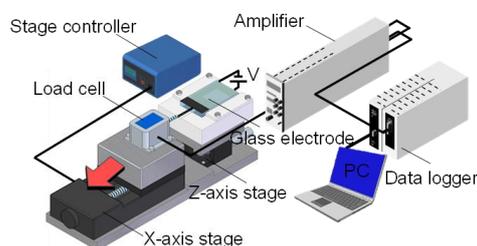


図 5 固定力測定装置の構成

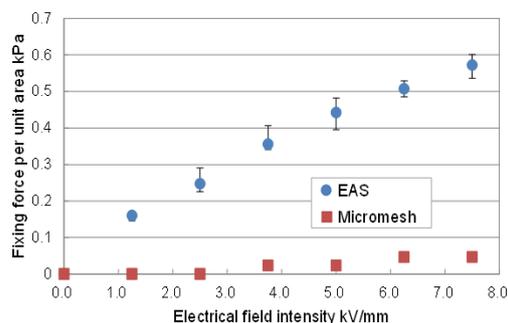


図 6 印加電場と固定力の関係

表 1 微細メッシュ構造の製造パラメータ

Structure material	SU-8 2100
Struts diameter $\mu\text{m}$	10, 20
Pitch between struts $\mu\text{m}$	23.1, 46.2
Structure angle degree	60
Thickness of EAS $\mu\text{m}$	80

おり(図 8)、単位面積あたりの粘着領域が広

いことがわかった (図 9)。以上より、真空環境下での性能特性評価実験では、支柱直径 20  $\mu\text{m}$ 、ピッチ 46.2  $\mu\text{m}$  の EAS を採用した。

### (2) 高真空・高温における電気粘着表面の保持性能評価と高性能化

ウェハ保持機構への応用するためには、真空下において EA 効果が発現しなければならない。そこで減圧下における粘着現象を調べるための観察ユニット (図 10) を製作した。観察ユニット内は密閉されており、ITO 膜が塗布されたガラス電極窓を通して、装置外に設置した顕微鏡を用いて EAS とガラス電極の界面を観察できる。観察ユニット内で、EAS を銅板とガラス電極窓で挟み、銅板の高さを下部のスプリングにより調整する。電極間電位差は、導入端子を介してユニット外部に設置した電源から与えることができる。ユニット内の圧力を  $5.33 \times 10^3 \text{ Pa}$  として、減圧下の電気粘着現象を観察した。

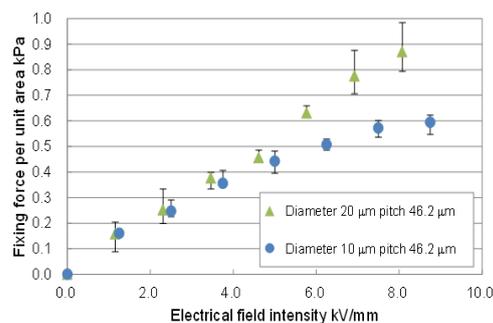
図 11 に EAS に 3 kV/mm を印加する前後の表面を示す。減圧下においても電場を印加することで EA 効果による粘着が生じることを確認した。この結果から、EAS は高真空下においても固定力を発揮する可能性が示唆された。そこで、図 12 に示す真空特性装置を用いて、高真空下での EA 効果により固定力を測定した。真空環境は  $4.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}$  とする。

図 13 に室温 21  $^{\circ}\text{C}$  の環境温度条件における大気圧および真空環境下での電場強度と固定力の関係を調べた結果を示す。測定は、大気圧と真空下でそれぞれ 3 回行った。真空環境においても、大気圧と同様、電場に応じて固定力が増加することがわかる。一方で、真空環境の固定力は大気圧の固定力より弱まることがわかった。

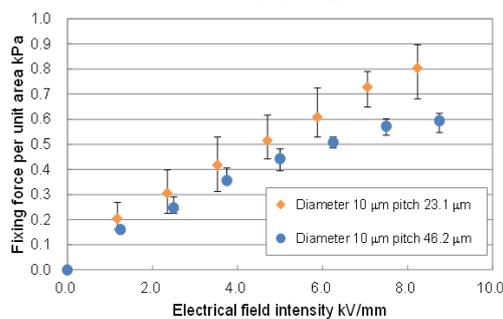
次に高真空環境下で、環境温度を変化させた時の EAS の性能を評価した。図 14 に真空下において、環境温度を常温 21  $^{\circ}\text{C}$  (294 K)、50  $^{\circ}\text{C}$  (323 K)、100  $^{\circ}\text{C}$  (373 K)、150  $^{\circ}\text{C}$  (423 K) と変化させた際の電場強度と固定力の関係を示す。環境温度の上昇に伴い固定力が増加することがわかる。これは従来の EA ゲルとは異なる傾向で、開発した EAS は高温下で用いる基板保持機構として高い優位性があると言える。

### (3) 真空プロセスの保持機構としての性能評価と極限環境に対応可能な電気粘着保持機構の実現

半導体基板を保持するためには、電極構造として、絶縁基板上に陽極と陰極を交互に配置した片側電極を適用する必要がある。片側電極では電極の幅や間隔に応じて得られる電場分布が大きく異なる。そこで、片側電極の最適パターン形状を電場解析により決定した。電極は櫛歯形状として電極幅と間隔は同サイズとして検討した。電極幅および間隔を、0.1 mm から 0.5 mm の範囲で 0.1 mm 刻みに変化させた場合の電場分布を解析し、ウェハと



(a) 支柱直径の違い



(b) ピッチの違い

図 7 異なる支柱直径とピッチを持つ EAS の印加電場と固定力の関係

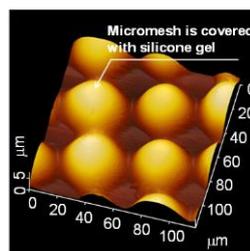


図 8 EAS (支柱径 20  $\mu\text{m}$ 、ピッチ 46.2  $\mu\text{m}$ ) の表面構造

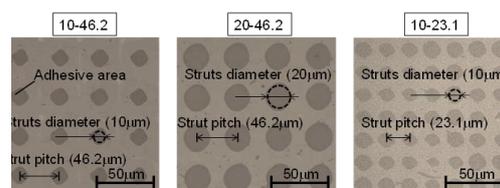


図 9 粘着領域の違い

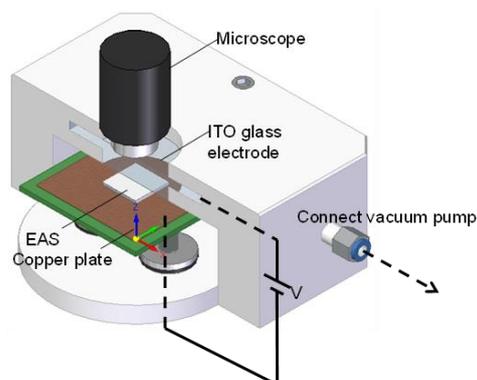


図 10 減圧下における EA 現象観察ユニット

EAS 界面の平均電場強度を算出した。0.1mm から 0.5mm の範囲では、電極幅と間隔を小さくすることで電場強度は高まることを明らか

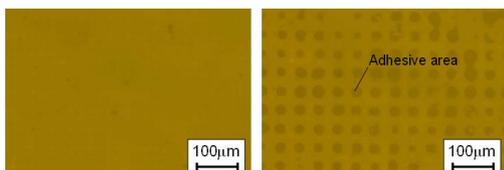


図 11 減圧下での EAS の電気粘着現象

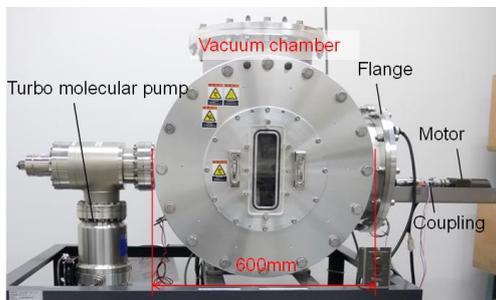


図 12 真空環境下における特性評価装置

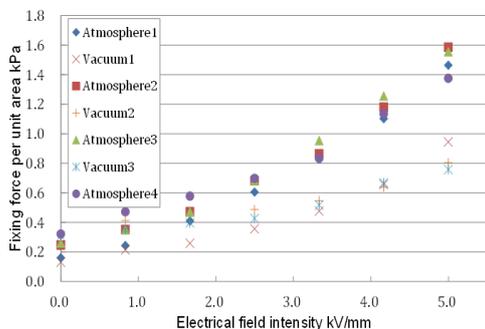


図 13 高真空下での印加電場と固定力の関係

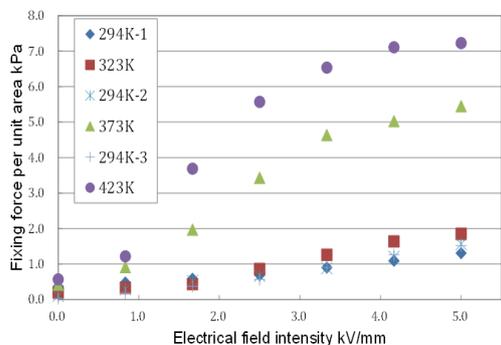


図 14 高真空下・高温下での印加電場と固定力の関係

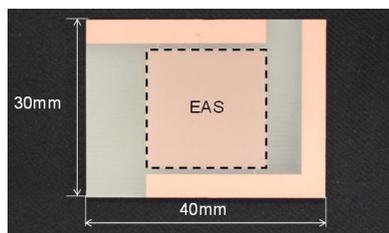


図 15 片側電極構造を適用した EAS の外観

にした。電場解析の結果に基づき、電極幅・電極間隔 0.1 mm を最適な電極サイズとして片側電極型 EAS を作製した (図 15)。

図 5 に示した固定力評価装置を用いて、常温・大気圧下で片側電極型 EAS における印加電場とすべり方向固定力の関係の評価した。

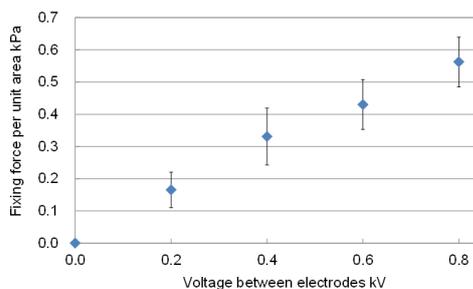


図 16 片側電極 EAS における印加電場と固定力の関係

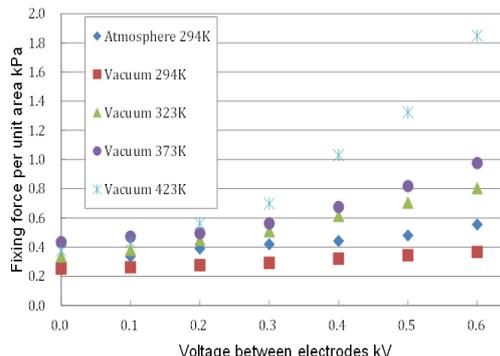


図 17 高真空・高温下での片側電極 EAS における印加電場と固定力の関係

結果を図 16 に示す。対向電極を用いた場合に比べ、固定力は低下するが、印加電場に応じて単位面積あたりの固定力が増加することがわかった。

片側電極型 EAS のウェハ固定機構への実用可能性を評価すべく、真空チャンバを用いて真空下において環境温度を常温 21 °C(294 K)、50 °C(323 K)、100 °C(373 K)、150 °C(423 K)と変化させた時の固定力と電極間電位差の関係を調べた。真空チャンバ内のステージに片側電極型 EAS を固定し、EAS の上に固定対象であるシリコンウェハをセットした。固定力測定結果を図 17 に示す。常温における大気圧下と真空下の固定力を比較すると、対向電極を用いた場合と同様、大気圧下では真空下よりも高い固定力が生じることがわかる。一方で真空下であっても、温度が上がるにつれて印加電場に応じて生じる固定力が増加することを確認した。要求されるウェハ搬送加速度は約 0.5 G で、安定して搬送するためには 0.8 kPa 程度の単位面積あたりの固定力が必要とされる。したがって、実験の結果より、600V の電極間電位差を与えた場合、真空下における 50 °C、100 °C、150 °C の温度環境ではこの数値をクリアした。

以上より、開発した EAS は、真空かつ高温環境下において従来の EAG と比べて高い優位性を示し、真空プロセスにおけるウェハ保持機構として応用可能性は高い。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① S. Yamada, R. Koike, S. Arano, Y. Kakinuma, T. Aoyama, Basic Study on Electro-Adhesive Surface Applying 3-Dimensional Micro Structures, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol. 10, 2016, 48-54. doi:10.20965/ijat.2016.p0048
- ② 山田宗一郎, 青山藤詞郎, 柿沼康弘, 三次元微細構造を用いた電気粘着表面の開発, 精密工学会誌, 査読有, 81 巻 3 号, 2015, 264-269.

〔学会発表〕(計11件)

- ① 山田宗一郎, 新野慎太郎, 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 真空保持機構への応用に向けた電気粘着表面の開発と性能評価, 日本機械学会第7回マイクロナノ工学シンポジウム, 2015年10月30日, 朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)
- ② 橋本和加子, 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 安齊秀伸, 桜井宏治, ER効果を応用した可変弾性エラストマの開発, 日本機械学会第7回マイクロナノ工学シンポジウム, 2015年10月29日, 朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)
- ③ 橋本和加子, 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 安齊秀伸, 桜井宏治, 微細パターンを持つ電極によるER粒子の鎖状構造制御に関する研究, 平成27年春季フルードパワーシステム講演会, 2015年5月28日, 機械振興会館(東京都・港区)
- ④ 新野慎太郎, 青山藤詞郎, 柿沼康弘, マイクロメッシュ構造を用いた電気粘着シートの開発と性能評価, 第22回精密工学会卒業研究発表講演会, 2015年3月18日, 東洋大学(東京都・文京区)
- ⑤ Y. Shimizu, K. Matsuzawa, Y. Kakinuma, T. Aoyama, M. Yoshino, Application of the Electro-adhesive Rubber to the Paper Handling System, 15<sup>th</sup> International Conference on Precision Engineering, July 23<sup>rd</sup>-25<sup>th</sup>, 2014, 日航ホテル(石川県・金沢市)
- ⑥ 大野豪也, 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 安齊秀伸, 桜井宏治, 電気粘着ゲルの可変熱伝導デバイスへの応用に関する基礎研究, 平成26年度春季フルードパワーシステム講演会, 2014年5月29日, 機械振興会館(東京都・港区)
- ⑦ 山田宗一郎, 柿沼康弘, 三次元微細構造を用いた電気粘着表面の高性能化, 第21回精密工学会卒業研究発表講演会, 2014年3月18日, 東京大学(東京都・文京区)
- ⑧ K. Matsuzawa, Y. Shimizu, Y. Kakinuma, T. Aoyama, M. Yoshino, J. Aoto, Basic Study on the Application of a New Electro-adhesive Rubber for Paper Handling Devices, The 7<sup>th</sup> International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21<sup>st</sup> Century, Nov. 7<sup>th</sup>-8<sup>th</sup>,

2013, 大観荘(宮城県・仙台市) (**Best Paper Award**)

- ⑨ K. Konishi, T. Aoyama, H. Anzai, K. Sakurai, Development of a Structure with Variable Thermal Conductivity using an Electro-Adhesive Gel, The 7<sup>th</sup> International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21<sup>st</sup> Century, Nov. 7<sup>th</sup>-8<sup>th</sup>, 2013, 大観荘(宮城県・仙台市)
- ⑩ 小西邦人, 青山藤詞郎, 安齊秀伸, 桜井宏治, 可変熱伝導特性を有する電気粘着ゲルの開発, 2013年度精密工学会春季大会, 2013年3月13日-3月15日, 東京工業大学(東京都・目黒区)
- ⑪ H. Iwashina, H. Anzai, Y. Kakinuma, Basic Research on the Seismic Damper Applying Electro-Adhesive Gel, 13<sup>th</sup> International Conference on Electro-rheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, July 2<sup>nd</sup>-6<sup>th</sup>, 2012, Ankara (Turkey)

〔図書〕(計1件)

- ① 柿沼康弘他, ゲルの安定化と機能性付与・次世代への応用, 技術情報協会, 552 ページ(内3ページ)(2013)

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 電気粘着素子及びその製造方法  
発明者: 柿沼康弘, 久保貴生  
権利者: 学校法人慶應義塾  
種類: 特許  
番号: 特許願 2012-123607  
出願年月日: 平成24年5月30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