スマートアクチュエータ材料成膜と微細加工の MEMS への応用

峯 田 貴^a^a 山形大学 大学院理工学研究科 (〒 992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16)

Film Deposition and Micro-machining of Smart Actuator Materials for MEMS Applications

Takashi MINETA^a^a Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University(4-3-16 Jounan, Yonezawa-shi, Yamagata 992-8510)**Keywords** : Shape Memory Alloy, Magneto-Strictive Alloy, Film Deposition, Micro-Machining, MEMS

1. はじめに

本格的な MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術が登場してから 30 年近くが経ち、加速度、角速度(ジャイロ)、磁気、熱などの各種マイクロセンサや、インクジェットヘッド、DLP プロジェクタ素子などの各種マイクロアクチュエータとして、幅広い応用分野において実用化され、身近な生活にも浸透してきている¹⁾。MEMS 形成技術は半導体形成プロセスの応用からスタートし、Si 基板自体を立体貫通加工するバルクマイクロマシニングと、Si 化合物等の薄膜を積層形成して下部の犠牲層を除去する表面マイクロマシニングを中心に進歩してきた²⁾。さらに高い機能大きなメカニカルな動作などを発揮するためには、機能性材料の付加が必要であり、Si テクノロジーを基盤とした MEMS へ、様々な材料の薄膜形成と微細加工技術を融合されてきており、今後もその傾向は続いていく。センサ薄膜、アクチュエータ薄膜、バイオケミカル薄膜等々、それぞれの分野における詳細な専門書や解説論文が出版されており、詳細はそちらを参照されたい³⁾。

本稿では、マイクロアクチュエータへの応用を指向した機能性材料である形状記憶合金と磁歪合金にフォーカスし、MEMS デバイスへの応用について薄膜形成と微細加工プロセスの観点から紹介する。

2. 形状記憶合金厚膜形成と MEMS デバイスへの応用

2. 1 SMA 厚膜形成

形状記憶合金(Shape memory alloy : SMA)の原理やマイクロアクチュエータへの応用についても、専門書が出版されており、詳細はそちらを参照されたい^{3),4)}。SMA アクチュエータが発揮できる単位体積あたりのエネルギー密度(発生力×変位/体積)は 10^7 J/m^3 オーダーに達し、熱型、静電型、圧電型などの種々のマイクロアクチュエータ技術と比べて桁違いに大きい⁵⁾。多くの合金で形状記憶特性が見出され、生体適合性のある NbTi 系合金なども開発されているが⁶⁾、大きなエネルギー密度を活かして工業的に実用化されているのは、ほとんどが TiNi 系合金である。

1990 年頃からスパッタ法を中心とした SMA の薄膜形成の技術開発が進み^{7)~13)}、スパッタ法で形成した厚さ $1 \sim 2 \mu\text{m}$ の TiNi 形状記憶合金薄膜では、形状回復応力と回復歪とも実用的なバルク材料のレベルに達している¹²⁾。TiNi 系 SMA では、1% 以下の僅かな組成の違いでも変態温度が大きく影響されるため、精密な組成制御が重要である。合金ターゲットを用いたスパッタ成膜では、Ti と Ni のスパッタ速度差によりターゲットとは異なる組成の膜が形成され⁸⁾、長期の使用中にターゲット表面の組成も変動していく。安定した組成を得るためには、Ti, Ni 等の構成元素毎に分割したターゲットを用いる成膜法が有効である^{5),13)}。スパッタ成膜では、高エネルギーの粒子が飛来して堆積して非晶質の膜になりやすく、成膜後に結晶化のための高温熱処理を要する場合が多い。

筆者らは数十 μm クラスの厚膜形成を目指し、図 1 に示す成膜装置を用いた特殊なフラッシュ蒸着法による SMA 成膜法を開発してきた^{14)~16)}。通常のフラッシュ蒸着では、粉末状の蒸着源が用いられるが、SMA 粉末は入手が容易ではな

図 1 SMA 厚膜形成用フラッシュ真空蒸着の概要

いたため、TiNi 系合金ワイヤを数 mm 長のペレット状にして蒸着源として用いている。装置の上部の回転式ホルダーからペレットを 1 個ずつ蒸着チャンパー内の加熱ポートに投下して蒸発を開始するが、例えば TiNiCu 3 元合金ペレットを用いた場合は、蒸気圧の違いに応じて Cu, Ni, および Ti が時間差を伴って蒸発し、特に蒸発開始直後には大きく蒸気の組成が変動する。膜厚方向での組成の変動を防いで所望の膜組成を得るために、蒸発し始めてから所定の時間経過後に蒸着用シャッターを開いて基板への成膜を開始し、所定の成膜時間後にシャッターを閉じて成膜を停止して、蒸着した SMA 薄膜の組成を制御している。1 ペレットあたり成膜されるのは 200 nm 程度の膜厚であるが、多数のペレットを投下して繰り返し積層成膜して厚膜化していく。Cu を 7 at.% 添加した合金ペレットを用いても、膜中に取り込まれる Cu は 0.5 at.% 程度になり、TiNi 2 元系合金に近い形状記憶特性となるが、微量の Cu 添加効果によって積層成膜過程での粒成長が抑制されるため、30 μm を超える厚膜を形成しても、薄い膜厚の場合と同様に緻密な結晶組織をもち、柔軟で良好な厚膜を得ることができる¹⁵⁾。

2. 2 SMA の微細エッチング

TiNi 系 SMA は、化学的に非常に安定な難エッチング材料であるが、フッ化水素酸と硝酸の混酸でエッチングが可能である。筆者らが 3 元系の Ti-44at%Ni-6at%Cu を用いて行った研究例では、 HNO_3 濃度が低いと Cu リッチの析出物が生成してエッチングを阻害するが、HF に対して HNO_3 の比率を高くすることで良好にエッチング可能である¹⁷⁾。また、 SiCl_4 を用いた反応性イオンエッチング (RIE) の研究例もあるが¹¹⁾、10 nm/min 程度のきわめて遅いエッチング速度である。また、ポリインド膜パターンを用いて SMA スパッタ薄膜のリフトオフパターンニングも可能である¹¹⁾。

筆者らは、電解エッチングによる微細パターンニング手法を開発し、実用レベルの技術として確立してきた。フォトリジストマスクパターンを形成し、ステンレス鋼板の陰極と対向させて電解液中で両極間に電圧を印加する手法である¹⁸⁾。水溶液系の電解液を用いた場合は、溶解に加えて陽極酸化による被膜形成も同時に生じて極端に荒れた加工面になりやすいが、様々な種類の電解液を検討し、LiCl を溶質に用いた

メタノールやエタノール溶媒を用い、良好なエッチングが可能であることを見出した^{19), 20)}。

図 2 は、定電圧印加による電解エッチングによって TiNi 合金を微細溝加工した際におけるエッチング深さ、アンダーカット幅、およびエッチファクタ (エッチング深さ / アンダーカット幅) の推移である²¹⁾。エッチファクタ 1.5 ~ 2.0 の深いエッチングが可能であり、電解研磨効果により鏡面に近い平滑なエッチング面が得られる利点があるが、エッチングの進行に伴って加工面の形状と表面積が変化し、また、加工溝内への溶出物の滞留の影響によりエッチング深さは頭打ちになっていき、エッチファクタも変動していく。また、開口幅が広いと面荒れが生じやすく、また、パターンエッジ部に電解電流が集中して W 字型の加工断面形状になりやすいなどの特徴があり²¹⁾、精密なエッチング形状を得るためには、これらの特性をあらかじめ実験的に把握しておく必要がある。TiNiCu 合金の場合でも Cu の影響は極めて小さく、上記の TiNi とほぼ同様の特性で電解エッチングできる¹⁷⁾。また、貫通加工の際には電解電流のバランスが維持できずに不均一になりやすいため、導電性の Cu や Ni 等の下地層を設けておき、下地層の途中まで貫通加工した後で下地層を選択的に除去するような工夫が必要である^{21), 22)}。

図 3 は外径 1 mm の TiNiCu 合金チューブからエッチングにより形成した能動カテーテル用屈曲アクチュエータである¹⁷⁾。円筒リソグラフィ法によって SMA チューブの側面にレジストパターンを形成し、円筒状の対向電極を用いた電解エッチングによって超微細ばね型アクチュエータ形状に加工した後 (ハーフエッチング)、チューブ内面からフッ化水素酸 / 硝酸でエッチングして貫通加工したものである (肉厚 30 ~ 40 μm)。また、SMA チューブ内面に無電解めっきで Cu 導電層を設けてから電解エッチングで貫通加工して同様の SMA チューブ型アクチュエータを形成した例もあるが、細径チューブ内への均一な導電層形成は容易ではない²³⁾。このように筆者らが開発してきた微細加工プロセスを適用して、平板状の基板のみならず、細径の円筒面の微細加工も可能になってきたが、超弾性特性の TiNi 系合金チューブに比べ、

図 2 TiNi 合金の電解エッチング特性
(1M LiCl/エタノール電解液, 印加電圧 8V)

図 3 能動カテーテル用 TiNiCu 合金チューブ型アクチュエータの電解エッチングによる微細加工
(a) 電解エッチングによる円筒面の微細加工
(b) 内面化学エッチングによる貫通後

形状記憶特性をもつ細径の SMA チューブは入手が難しい。筆者らは SMA チューブの自作をめざし、Cu のコアパイプ上へ SMA 厚膜を回転フラッシュ蒸着し、同様の形状をもつ能動カテーテル屈曲用アクチュエータ形成も試みたが²⁴⁾、回転成膜で厚膜化した場合は、結晶成長の様相が平板上の成膜とは異なり、所望の形状回復温度や柔軟性をもつ SMA 円筒素材を得ることが鍵である。

2. 3 SMA 厚膜の MEMS デバイスへの応用

薄膜形成した SMA を用い、これまでマイクロ流体バルブ、マイクログリッパなど、発生力と変位を要するデバイスへの応用を目指した研究が数多く実施されてきた⁴⁾。

筆者らは、SMA フラッシュ蒸着厚膜(10 ~ 30 μm 厚)を用いて、血管クリップ型拍動センサ^{25)~27)}、生体膜ハンドリング用のマイクログリッパなど²⁸⁾、把持型マイクロデバイスの開発に取り組んでいる。TiNiCu 合金薄膜をフラッシュ蒸着によって Cu 基板上に成膜し、基板ごと平面の状態では形状記憶処理を行い、絶縁膜(感光性ポリイミド)、Pt 薄膜配線パターンの形成後に、電解エッチングによってクリップ形状等に加工する。Cu 基板を溶解して SMA デバイスを独立させ、フレキシブルプリント配線を接合する。

図 4 (a) は作製した拍動センサである。皮膚移植手術などの際に移植して吻合した外径 1 mm 程度の微細血管にワンタッチで取り付けて、拍動を計測して血栓生成による血流阻害のモニタを目的として開発したデバイスである。血管の把持と開放動作を 1 回のみ行う使い捨て使用を想定しており、使用時にピンセット等でアウターアームを「くの字」にたわませてクリップを解放状態にしておき、アームの根元部を Pt 薄膜ヒーターの局所加熱によって形状回復させて微細血管を把持する。インナーアーム部に設けた Pt 薄膜型ひずみセンサにより、外径 1 mm の血管径の拍動による変化を 10 μm 以下の分解能で検出できる高感度の拍動センサである。手術直後の血栓生成の高リスク時期(2 日程度)の経過後に、アウターアーム部の中間点を加熱して平坦状に形状回復させて血管を開放し、皮膚外へ抜き去る構想である。形状回復温度が約 60 $^{\circ}\text{C}$ の SMA 膜を用いており、大気中での把持および開放では 2s 程度で動作完了するが、皮膚下を想定して疑似生体組織内へ埋め込んだ場合には数 10s を要し²⁷⁾、その間

の生体組織への熱ダメージの影響が懸念され、安全性をクリアして実用化していくためには形状回復温度の抑制が課題である。

図 4 (b) は先端部をさらに小型化し、同様の形成プロセスを用いて作製した可逆動作型のマイクログリッパ素子である²⁸⁾。フラッシュ蒸着で成膜した 30 μm 厚の SMA を用い、膜の内部応力による初期たわみと平坦状への形状回復により、加熱駆動の ON / OFF に応じて繰り返し開閉動作が可能である。再生医療分野におけるシャーレ内での生体シートをハンドリングする応用を目指したデバイスであるが、小型化に伴い熱伝導による非加熱部の誤動作が大きくなり、現在、変形しない異種材料の箔材と組み合わせたデバイスを開発中である。また、生体膜への熱ダメージを最小に抑えるためには、やはり形状回復温度を抑制した SMA 厚膜の安定した形成法が必要となる。

図 5 は SMA フラッシュ蒸着膜で作製した触覚ディスプレイ用のマイクロアクチュエータアレイである²⁹⁾。XY 面内に配置したマイクロピンアレイをアクチュエータによって上下動し、触れている手指等の皮膚へ点字のような文字パターン

図 5 SMA 厚膜型触覚ディスプレイ素子

図 4 SMA 厚膜型マイクログリッパデバイス

- (a) 血管クリップ型拍動センサ
(b) 可逆駆動型マイクログリッパ

や触感を感じさせて情報伝達する素子である。圧力駆動型、圧電アクチュエータ型、SMA コイルアクチュエータ型などの種々の触覚ディスプレイが開発されているが、皮膚下の触覚受容器へ十分な刺激を与える変位(振幅)と発生力を生み出すためには、大型のアクチュエータ機構が必要となり、数 cm を超える厚さをもつ大型の機器となる。組立式のメカでは狭ピッチでアレイ状に配列することが難しく、また、作製コストも高いものとなり、用途が著しく制限される。基板上へ成膜した SMA を用いるプレーナ素子構造の MEMS 型触覚ディスプレイも、アイデアとしては提案されていたが³⁰⁾、実際のデバイスを実現するためにも SMA 膜形成と微細加工プロセスが鍵となっていた。

図 5 に示す触覚ディスプレイ素子は、前述のグリッパデバイスと同様の形成プロセスを基盤とし、 5×5 の SMA アクチュエータを 1 mm ピッチで配列したプレーナ構造の MEMS 型デバイスである。Cu 基板上へ SMA 膜(10 μm)を形成し、絶縁層と Pt 薄膜ヒーター配線層の形成後に、電解エッチングで SMA をジグザグばね型アクチュエータ形状に加工した。最後に SMA パターン越しに Cu 基板をエッチングし、サイドエッチングを利用して SMA アクチュエータ部の裏側を精密に中空化している。指先の触二点閾値の最小値である 1 mm のピッチで³¹⁾、精密なアレイ状アクチュエータの形成が可能になった。

SMA を繰り返し上下動作させるためには SMA の形状回復効果による変形と押し合うバイアスばねが必要であり、筆者らは、硬質エポキシ系の厚膜レジスト(化薬ケム, SU8)を用いて、バイアスばね層、マイクロピン、およびカバー層をリソグラフィにより一括形成する手法を開発し、上記の SMA 厚膜アクチュエータ層と接合して、厚さ約 2 mm の MEMS チップ状デバイス(5×5 マイクロピンアレイ, 1 mm ピッチ)を実現した³²⁾。高い駆動周波数では SMA アクチュエータの熱応答が遅いために動作振幅が低下するが、人体の皮膚下の触覚受容器であるマイスナー小体が高感度をもつとされる 15 ~ 30 Hz の駆動では、十分に検知可能な振幅と発生力を実現することができ³²⁾、超薄型の触覚ディスプレイ素子として今後の用途拡大を期待している。

3. 磁歪合金薄膜形成と MEMS デバイスへの応用

磁歪材料は、磁束印加により磁区の配列が揃うように変化することにより歪み(磁歪)を発生する。磁束に沿って伸長する正の磁歪と、純 Ni のように収縮する負の磁歪の場合がある。磁束印加による変形をアクチュエータへ応用したり、逆に外部から応力を加えて磁区の配列変化によって磁気的特性が変わる逆磁歪効果を用い、振動を磁束発生に変換する振動センサや振動発電デバイス等にも用いられている³³⁾。また、磁歪合金で圧電材料(チタン酸ジルコン鉛: PZT 等)をサンドイッチ構造にし、磁歪による伸びを圧電材料の起電力として出力する Magneto-electric (ME) センサが開発され^{34)~36)}、MEMS 構造の Si 感知レバーへ PZT 圧電薄膜と磁歪薄膜を積層し、高感度磁気センサを目指した取り組みも行われている^{37), 38)}。

大きな磁歪を発現する材料として $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_{20}$ (Terfenol-D)³⁶⁾、 $\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{20}$ ³³⁾、 FeCo ³⁹⁾、 FePd ^{34)~35), 38)} などの多くの種類が知ら

れており、スパッタ成膜を中心にした薄膜形成と各種磁気デバイスへの応用も進んでいる。最適組成の探索のために、組成が面内分布を生じるように基板上へ磁歪膜を形成して膜の特性を一括計測するコンビナトリアル法も試みられており、基板内にアレイ状に複数配列した MEMS カンチレバー等も評価手法として用いられる⁴¹⁾。

筆者らは、FePd 合金薄膜を用いたデバイス開発を試みている。バルク材料では、磁束によって双晶構造が歪む磁性形状記憶特性により数 1000 ppm の変形も可能であり、また、シンプルな磁歪発現のみでも数 10 ppm オーダーの歪みの発生が可能である。図 6 に示すように、フォトリソパターン上へスパッタ成膜し、リフトオフにより良好な微細パターンニングが可能である⁴²⁾。また、塩化第二鉄溶液で比較的容易にエッチングも可能であるが、レジストマスクとの親和性に配慮しないと大きなサイドエッチングが生じやすい⁴²⁾。

バルク材料では $\text{Fe}_{70}\text{Pd}_{30}$ の組成において最も高い磁歪を発現することが知られているが、薄膜の場合には結晶配向性や膜応力の状態の影響も受け、必ずしも適正条件は一定ではない。筆者らの研究例では、無加熱スパッタ成膜した場合には、 $\text{Fe}_{60}\text{Pd}_{40}$ 膜で 60 ppm (0.25 Te 印加) の大きな磁歪が得られ、膜厚 1 ~ 2 μm のときに最も大きい磁歪であった⁴³⁾。また、成膜後に 400 $^{\circ}\text{C}$ 、30 min 程度のアニール処理することで、磁歪をさらに約 3 倍増大できることも見出している⁴⁴⁾。

図 7 は、 $\text{Fe}_{60}\text{Pd}_{40}$ (2 μm) / PZT (0.7 μm) / Si (10 μm) を積層した MEMS カンチレバー型の ME センサのプロトタイプである³⁸⁾。PZT 膜の上下面には Pt/Ti 電極膜パターンも形成してある。カンチレバーを共振駆動し、磁歪によって生じる共振変化により磁場をセンシングする。また、共振振動子を両端支持型のブリッジ構造とし、磁歪膜を積層した別のブリッジにより共振ブリッジを大きく変形させる試みもなされている³⁸⁾。Si 上へ薄膜積層した MEMS デバイス構造であり、熱歪みの影響による温度ドリフトが極めて大きいという欠点はあるが、地磁気レベルの磁気センシングは可能であり、磁歪特性の向上とデバイス構造の最適化を図ることにより、さらに感度向上の余地がある。

磁歪膜を用いたアクチュエータは、通電を必要とせずに、外部からの磁場印加で変形できるため、絶縁対策やリード線を引き回すことなく液中での使用が容易であることも大きな利点である。マイクロ流路内に磁歪膜 / Si 積層型の原子間

図 6 $\text{Fe}_{70}\text{Pd}_{30}$ 磁歪合金スパッタ膜のリフトオフによるパターンニング

図7 磁歪膜/圧電膜を積層した MEMS カンチレバー型 ME センサ

図8 磁歪膜により切替操作するデュアル AFM カンチレバー

力顕微(AFM)カンチレバーを作り込んで、外部から交流磁場を印加して液中で共振させるデバイスなどの応用がある⁴⁵⁾。筆者らは図8に示すように、磁歪膜を積層したデュアル AFM カンチレバー開発に取り組んでいる^{46), 47)}。直交して配置した各カンチレバー先端にはサブ μm ギャップで近接させたナノ探針を Si 自己整合エッチングによって形成しており、印加する磁場の方向を変えて、たわませるカンチレバーを切り替えて、各カンチレバーの異なる機能を使い分けるデバイスである。一方のカンチレバーを磁場印加によってたわませて試料表面から離し、磁場と直交する方のカンチレバーを AFM プローブとして用いる構造にすることで、印加磁場の変動の影響をほぼ受けない安定した操作が可能になる⁴⁷⁾。デュアル AFM カンチレバーを用いることにより、例えば、片方でナノスクラッチ等の表面操作を行い、他方でその場での高解像観察などが可能になる。筆者らは近年、片方のカンチレバーを中空構造にして液体をデリバリする機能を付加するデバイス開発にも取り組んでいる⁴⁸⁾。

4. おわりに

異なる機能をオンチップで集積化して高機能化、多機能化

していくのが MEMS 技術の大きな特徴である。紙面の都合で本稿では形状記憶合金および磁歪合金のみ取り上げたが、多種多様の薄膜形成、表面処理、超微細パターニングを基盤とした MEMS への応用が進んでおり、今後もさらに幅広く様々なスマート材料の MEMS への融合が進められると期待しており、筆者らも多様化した実用デバイスへつながっていく技術開発に貢献していきたいと考えている。

(Received May 15, 2017)

文 献

- 1) 江刺正喜; 電気学会論文誌E, **134**, 1 (2014).
- 2) 江刺正喜; はじめてのMEMS (森北出版, 2011).
- 3) 例えば, R. Ghodssi, P. Lin (eds.); MEMS materials and Process Handbook (Springer, 2011).
- 4) M. Kohl; Shape Memory Microactuator (Springer, 2004).
- 5) P. Krulvitch, A. P. Lee, P. B. Ramsey, J. C. Trevino, J. Hamilton, M. A. Northrup; *J. Microelectromechanical Systems*, **5**, 270 (1996).
- 6) E. Takahashi, T. Sakurai, S. Watanabe, N. Masahashi, S. Hanada; *Materials Transactions*, **43**, 2978 (2002).
- 7) J. A. Walker, K. J. Gabriel; *Sensors and Actuators*, **A21-A23**, 243 (1990).
- 8) J. D. Busch, A. D. Johnson; *J. Appl. Phys.*, **68**, 6224 (1990).
- 9) A. Ishida, M. Miyazaki; *Thin Films*, **228**, 210 (1993).
- 10) S. Miyazaki, A. Ishida; *Materials Sci. and Eng. A*, 273 (1999).
- 11) 中村滋男, 中村洋介, 安宅学, 藤田博之; 電気学会論文誌E, **118-E**, 27 (1997).
- 12) 宮崎修一; 応用物理, **69**, 38 (2000).
- 13) 石田 章, 澤口孝宏, 佐藤守夫; 金属, **74**, 33 (2004).
- 14) E. Makino, M. Uenoyama, T. Shibata; *Sensors and Actuators A*, **71**, 187 (1998).
- 15) T. Mineta, K. Kasai, Y. Sasaki, E. Makino, T. Kawashima, T. Shibata; *Microelectron Eng.*, **86**, 1274 (2009).
- 16) 鎌田隆宏, 峯田 貴; 第5回マイクロナノ工学シンポジウム, 71 (2013).
- 17) T. Mineta, T. Deguchi, E. Makino, T. Kawashima, T. Shibata; *Sensors and Actuators A*, **165**, 392 (2011).
- 18) 牧野英司, 柴田隆行, D. M. Allen; 表面技術, **49**, 887 (1998).
- 19) 峯田 貴; 表面技術, **54**, 145 (2003).
- 20) T. Mineta; *J. Micromech. and Microeng.*, **14**, 76 (2004).
- 21) T. Mineta, E. Makino; *J. Micromech. Microeng.*, **20**, 125012 (2010).
- 22) T. Mineta, T. Mitsui, Y. Watanabe, S. Kobayashi, Y. Haga, M. Esashi; *Sensors and Actuators A*, **88**, 112 (2000).
- 23) 峯田 貴, 芳賀洋一, 江刺正喜; 電気学会E部門誌, **123**, 158 (2003).
- 24) T. Mineta, M. Abe, H. Kubo, E. Makino, T. Shibata; *Proc. of Asia-Pacific Conf. on Transducers and Micro-Nano Technol. (APCOT 2004)*, **3-1**, 322 (2004).
- 25) T. Sugawara, K. Hirota, M. Watanabe, T. Mineta, E. Makino, S. Toh, T. Shibata; *Sensors and Actuators A*, **130-131**, 461 (2006).
- 26) T. Mineta, N. Kida, S. Nomura, E. Makino, T. Sugawara, S. Toh, T. Shibata; *Sensors and Actuators A*, **143-1**, 14 (2008).
- 27) M. Ozaki, N. Kida, T. Mineta, E. Makino, S. Toh, T. Kawashima, T. Shibata; *Tech. Dig. of the 14th Int. Conf. on Solid State Sensors, Actuators and Microsys. (Transducers'09)*, 1770 (2009).
- 28) 佐藤 諒, 鎌田隆宏, 峯田 貴; 電気学会論文誌E, **136**, 454 (2016).
- 29) H. Yanatori, T. Mineta, S. Takeuchi, K. Abe; IEEE-NEMS 2016,

- B1L-A-3 (2016)
- 30) 吉川 弥, 篠部晃生, 菅野公二, 土屋智由, 石田 章, 田畑 修; 電気学会論文誌E, **128**, 151 (2008).
- 31) S. J. Bolanowski Jr., G. A. Gescheider, R. T. Verrillo, C. M. Checkosky, J. Account; *Soc. Am.*, Nov; **84**, 1680 (1988).
- 32) 梁取 大, 阿部 喜, 小野泰弘, 峯田 貴; 第33回センサマイクロマシンと応用システムシンポジウム, 25am2-LN-209 (2016).
- 33) 上野敏幸; 精密工学会誌, **79**, 305 (2013).
- 34) Y. Sado, C. Saito, Y. Furuya, Y. Kishi, Z. Yajima, T. Okazaki; *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50**, 113001 (2011).
- 35) 斉藤 崇, 浜島美央, 斉藤千尋, 中村元一, 岡崎禎子, 古屋泰文, 室英夫; 電気学会論文誌E, **132**, 183 (2012).
- 36) J. Ryu, A.V. Carazo, K. Uchino, H. Kim; *Jpn. J. Apply. Phys.*, **40**, 4948 (2001).
- 37) P. Zhao, R. Suchoski, M. Wuttig, I. Takeuchi; *Applied Physics Letters*, **94**, 243507 (2009).
- 38) 岡田尚樹, 笹渕貴史, 小池邦博, 峯田 貴; 第33回センサマイクロマシンと応用システムシンポジウム, 25am2-PS-041, (2016).
- 39) 木村奈津子, 久保田健, 古屋泰文; 日本金属学会誌, **79**, 441 (2015).
- 40) T. Kubota, T. Okazaki, Y. Furuya; *J. Mag. Mater.*, 239 (2002).
- 41) I. Takeuchi, O. O. Famodu, J. C. Read, M. A. Aronova, K.-S. Chang, C. Craciunescu, S. E. Lofland, M. Wuttig, F. C. Wellstood, L. Knauss, A. Orozco; *Nature Materials*, **2**, 180 (2003).
- 42) 峯田 貴, 川島健太, 西方孝志, 牧野英司, 三上是右, 岡崎禎子, 古屋泰文; 表面技術協会第125回講演大会要旨集, 229 (2012).
- 43) 西方孝志, 峯田 貴, 田口涼雅, 川島健太; 第5回マイクロナノ工学シンポジウム, 73 (2013).
- 44) 笹渕貴史, 岡田尚樹, 佐藤 翼, 小池邦博, 峯田 貴; 電気学会論文誌E, **136**, 408 (2016).
- 45) O. Ducloux, J. W. Park, N. Tiercelin, P. Pernod, V. Preobrazhensky, M. Hamon, Y. Sakai, H. Fujita; Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (Transducers'09), 1019 (2009).
- 46) K. Kawashima, E. Makino, T. Mineta; Trans. Electronics and Communications in Jpn. **98**, 30 (2015).
- 47) T. Mineta, K. Kawashima, R. Taguchi; Microelectronic Eng. **168**, 45 (2017).
- 48) Y. Miura, J. -S. Hong, K. Mishina, T. Shibata, T. Mineta; Asia-Pacific Conf. of Transducers and Micro-Nano Technol. (APCOT 2016), 233 (2016).
- ~~~~~