

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 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：34416
 研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22310083
 研究課題名（和文） 超高感度多軸MEMS加速度・磁気センサの開発とそれらのセラミック基板上への集積
 研究課題名（英文） Development of ultra high-sensitive and multi-axis accelerometer and magnetic sensor, and those integration on a ceramic substrate
 研究代表者
 青柳 誠司（ AOYAGI SEIJI ）
 関西大学・システム理工学部・教授
 研究者番号：30202493

研究成果の概要（和文）：MEMS 技術の援用により，セラミック基板上に 3 軸方向の加速度および磁場を高感度に検出可能なセンサを作製するための要素技術開発を実施した．加速度センサについては，1 軸方向にのみ振動するバネ機構を提案し，シミュレーションと実デバイスの性能評価により有用性を実証した．また，エレクトレットを用いた自己発電機構を有する慣性力センサの開発に成功した．磁気センサについては，巨大磁気抵抗（GMR）効果およびトンネル型磁気抵抗（TMR）効果素子の作製に必要な強磁性体薄膜（Co および NiMoFe）をセラミック基板上に形成し，その有効性を確認した．また，磁場の 3 軸検出に必要な磁気収束板を MEMS 技術の援用により作製することにも成功した．

研究成果の概要（英文）：Manufacture methods of high-sensitive accelerometer and magnetic sensor on a ceramic substrate were developed using MEMS technology, which separately detect component of three-axis direction. A large vibration system along one-axis direction for accelerometer was successfully developed. Then, a self-powered sensor detecting inertia force using an electret and a ceramic plate of high-permittivity was successfully developed and characterized. For the development of high-sensitive magnetic sensor, it is proven that films of Co and NiMoFe deposited on a ceramic substrate have surely ferromagnetism characteristics required as a gigantic magneto-resistive (GMR) and/or Tunneling magneto-resistive (TMR) element. Finally, magnetism convergence plates for three-dimensional detection of magnetic field, which is fabricated by only MEMS technology, i.e., without manually handling procedures, was successfully developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	11,300,000	3,390,000	14,690,000
2011 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2012 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 マイクロ・ナノデバイス

キーワード：マイクロセンサー

1. 研究開始当初の背景

研究開始段階において，MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) の研究が活発に行われているものの，産業界での商用化例は，限定的な範囲に留まっていた．この原因として，MEMS

デバイスはその構造上可動部を持つためにハンドリングが困難であり，組立や検査のコストが製品単価の大部分を占めていることが挙げられる．また，MEMS 技術を用いて加速度センサ，磁気方位センサが開発され，商用機器に搭

載されはじめていたが、センサ感度については改善の余地があった。例えば傾斜・回転角度センサについては、小型でかつ分解能 0.01° といった高分解能を有するセンサは実用化されていなかった。一方、磁気センサについては、巨大磁気抵抗 (GMR) 効果やトンネル型磁気抵抗 (TMR) 効果を原理とした非常に高感度なセンサが実用化されていたが、これらは全て高価な半導体基板上で作製されており、製造コストの低減は困難であった。また、磁気抵抗素子は基本的に基板に垂直な方向の磁場を検出することができないという問題点も有していた。

このような背景から、我々は本研究の開始前から、図 1 に示すような複合センサを提案してきた。本デバイスには、加速度センサや磁気方位センサ等のセンサ群、それらの信号を処理するための回路がセラミックパッケージ上に集積されている。しかも、これらは個別に作製されたものをセラミック基板上に移動して固定するのではなく、全てセラミック板上に直接形成される。また、各センサは 3 軸方向の成分を独立に、かつ高感度に検出可能であるとする。

また、我々はコンセプトを提案するだけでなく、セラミック基板上に製造可能な加速度センサや磁気センサの開発も実施してきた。その成果の一つとして、基板表面に対向するように配置したくし歯型の電極と、バネに付加した高誘電率のセラミック板を用いた加速度センサが挙げられる。このセンサは一般的な静電容量型加速度センサと異なり、基板に固定された電極間に生じるフリンジ電界と振動する高誘電率板との相互作用で加速度を検出するため、プルーイン現象が発生しないという利点を有する。この加速度検出原理を用いた、3 軸方向の加速度を検出可能なセンサの原理図を図 2 に示す。このセンサにおいては、各軸方向にのみ振動するバネが高誘電体のマスを保持しており、3 つのセンサが x , y , z 軸方向の加速度をそれぞれ独立して検出することが可能である。ただし、本研究開始時点で開発に成功していたのは z 軸方向に振動するバネ機構のみであり、 x または y 軸方向にのみ振動するバネ機構は開発できていなかった。

磁気センサについては、従来我々の研究において磁気抵抗 (MR) 効果を利用した 2 軸方向の磁場を検出可能な磁気センサを開発し、さらにこれに鉛直方向の磁界を歪ませて水平方向成分を生じさせることが可能な磁気収束板を付加することで、3 軸方向の磁界同時に検出することにも成功した。ただし、その感度は地磁気の検出には不十分であったため、上記原理をより高感度な検出手法である GMR や TMR に応用することが求められていた。また、従来研究においては磁気収束板の作製およびその MR 型磁気センサへの貼り付けを手作業にて行っていたため、これを MEMS 技術の援用により作製することで手作業部分を排除することも求められていた。

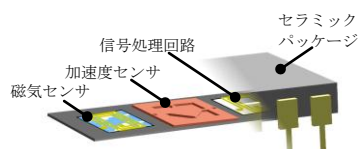


図 1 提案するセラミックパッケージに直接形成されたセンサおよび信号処理回路の概略図

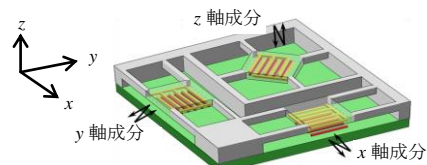


図 2 各軸方向の加速度を検出する 1 軸加速度センサを組み合わせた 3 軸加速度センサの概略図

2. 研究の目的

本研究では、図 1 に示すような、小型で安価、かつ 3 軸方向の加速度および磁気方位を計測可能なセンサを最終目標として、その要素技術を開発することを目的とする。具体的な目標は以下の通りである。

- (1) 基板に水平な 1 軸方向にのみ振動するバネ・マス振動機構の開発。
- (2) TMR, GMR 素子のセラミック基板上への形成およびそれらによる磁気方位の検出。
- (3) MEMS 技術を用いた、量産性の高い小型磁気収束の形成法の開発、およびこれを用いた基板に垂直な地磁気の検出。
- (4) 図 1 に示すコンセプトに合致した、高付加価値なセンサの開発。具体的にはセラミック基板上に形成可能で、自己発電機能を有する加速度センサの開発

3. 研究の方法

(1) 水平方向軸を独立に検出可能な MEMS 加速度センサの開発

図 3 に、本研究で新たに提案する 1 軸方向のみに振動可能なバネ・マス系の概略図を示す。この振動系は 2 種類のバネを有する。1 種類目のバネ (バネ①) はミアンダ構造をとり、 x 軸方向に高い柔軟性を有するが、 y 軸方向の柔軟性も比較的高い。この問題点を補うのがバネ②の役割である。バネ②は直線的な両持ち梁構造を取っているが、非常に細く、これ単体ではマスを保持できない。ただし、バネ②は x 軸方向には高い柔軟性を有するが、 y 軸方向への柔軟性は非常に低い。このため、バネ①単体では y 軸方向へも振動しようとするマスの振動方向を x 軸方向へ限定することが可能である。本研究では、このバネ・マス振動系をシミュレーションと実験の双方から検証した。

シミュレーションには、有限要素法 (FEM) ソフトウェア COMSOL Multiphysics を使用した。なお、振動系を構成するマス、ばね、両持ち梁の材質は全てエポキシ樹脂であると仮定した。

次に、実際に提案する振動系を作製し、その振動特性を高速カメラを利用して直接観察した。振動系を構成するバネとマスは、1枚の感光性フィルムを用いてフォトリソグラフィ法により一括で形成した。作製した振動系の特性は、試料を圧電式の振動試験機でx軸（主軸）方向に振動させながら、高速カメラ（ナックイメージテクノロジー社製、MEMRECAM fx-K5）で観察することにより評価した。なお、撮影時のサンプリングレートは1,000 frame/sとした。

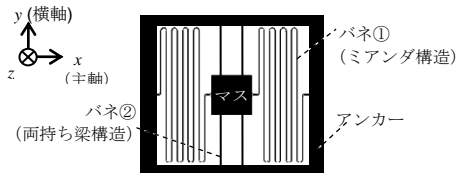


図3 主軸(x軸)方向にのみ振動するバネ・マス振動系の概形

(2) TMR・GMR 素子を用いた磁気センサのセラミック基板上への集積

GMR 素子は、非磁性金属層と2層の強磁性層で挟んだ構造をとる。一方、TMR 素子は2層の強磁性層の間に厚さ数 nm の絶縁膜が挟まれた構造をとる。ここで、GMR、TMR 素子双方に共通する性質として、上下の強磁性体層の磁化方向が平行の場合は素子の電気抵抗が低くなり、反平行の場合は逆に抵抗が増大する。この性質のため、TMR、GMR 素子を磁気センサとして用いる場合、片方の強磁性層は外部磁場に応じて敏感に磁化方向が変化するように、高い透磁率と小さい保持力を併せ持つ必要がある。逆に、もう一方の強磁性体層は外部磁場に対して磁化方向が変化しないように、大きな保持力を有する必要がある。したがって、セラミック基板上に GMR、TMR 素子を作製するならば、まずはセラミック基板上にこれらの性質を有する強磁性体膜を形成することが必要になる。

本研究においては、低保磁力、高透磁率材料としてスーパーマロイ (NiMoFe 合金)、高保磁力材料として Co、非磁性金属材料として Cu、トンネル絶縁膜材料として Al_2O_3 をそれぞれ選択し、直流 (DC) マグネトロンスパッタ法によりアルミナ基板上に各薄膜を堆積した。使用したスパッタ装置の到達真空度は 2.0×10^{-7} Torr、ガス種は Ar、印加電流は 0.2A とした。各磁性体薄膜の磁化-磁場特性は、本課題にて購入した Vibrating-Sample Magnetometer (VSM) 装置を使用して測定した。また、薄膜の厚さをエリプソメータにより測定し、膜厚と磁化特性の関係から、TMR、GMR 素子への有用性を評価した。各薄膜の磁化特性を評価後、GMR、TMR 素子の作製を実施した。本研究では、電極および TMR、GMR 素子層の形成方法としてレジストパターン

を用いたリフトオフ法を採用した。デバイス作製後は地磁気中で試料を回転させながら素子抵抗を測定することにより、磁気方位角の検出を試みた。

(3) MEMS 作製技術を用いた磁気収束板の形成とこれを用いた MR センサの3軸化

従来手法において手動にて設置していた磁気収束板を、MEMS 加工技術を利用して作製した。パーマロイのナノ粒子が混入した樹脂構造に置き換える。この磁気収束板の作成手順を図4に示す。パーマロイのナノ粒子としては竹中金箔工業社の製品（組成比 Fe:Ni=50:50、平均粒径 100 nm、）を用いた。また、樹脂材料としてはポリジメチルシロキサン (PDMS) とエポキシ接着剤を選択した。本実験では、まず採用した樹脂の加工適正の評価を行った。次に、作製された磁気収束板の磁化-磁場特性を評価することにより、磁気収束板としての性能を評価した。磁化-磁場特性の評価には、前述の VMS 装置を用いた。最後に、実際に2軸の MR 磁気センサ上に磁気収束板を形成し、これにより3軸の磁気を検出可能であるかを評価した。

(4) 自己発電機構を有する加速度センサの開発

提案する加速度センサの概略図を図5に示す。このセンサは、従来の静電容量型の加速度センサと同様に、上下方向に配置された平行平板電極がコンデンサを形成している。ただし、従来のセンサとことなる点として、下部電極側にはエレクトレットと呼ばれる、電荷を半永久的に保持する構造が付加されている。一方、上部電極は高誘電体材料であるチタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) の薄板が付加されている。また、上部電極および PZT 板はバネ構造により支持されている。外部から加速度が印加されると、このバネ機構により上部電極が振動し、電極間距離の変化により電極間の静電容量 C が変化する。ここで、エレクトレットの存在により、コンデンサ間の電位 V は一定に保たれるので、コンデンサに蓄積された電荷 Q が $dQ/dt = V \cdot (dC/dt)$ の式に従って変化し、これにより加速度に応じた電流が流れる。したがって、この電流を抵抗で電圧変換した信号を検出することにより、加速度を評価することが可能となる。本研究では実際に加速度センサを作製し、外部から振動を与えたときの出力を測定することで、提案するセンサ原理の実証を実施した。

4. 研究成果

(1) 水平方向軸を独立に検出可能な MEMS 加速度センサの開発

図6にシミュレーション結果を示す。図3におけるバネ②が付加されていない振動系

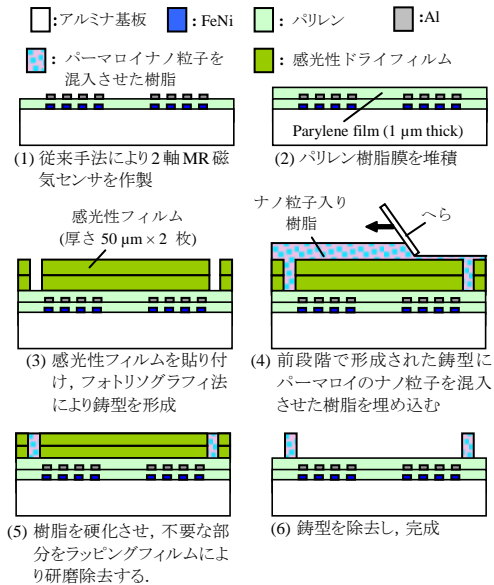


図4 提案する磁気収束板の作製手順

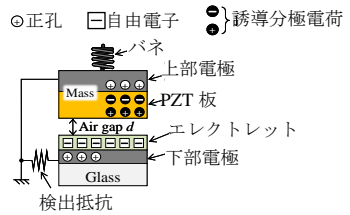


図5 提案する自己給電機能を有する加速度センサの検出原理

に y 軸方向の加速度を 1 g 印加した場合、y 軸方向に約 50 μm の振幅で振動する。一方、幅 2 μm のバネ②を付加した場合、この振動振幅を 0.1 μm 以下まで抑制できた。これより、提案手法の有用性が証明されたといえる。

次に、作製したバネ・マス振動系の試験結果について述べる。本研究ではバネ②（両持ち梁構造）の幅をパラメータとして、複数種類の試料の作製を試みたが、幅が 10 μm より細かい試料については、その形成に失敗した。

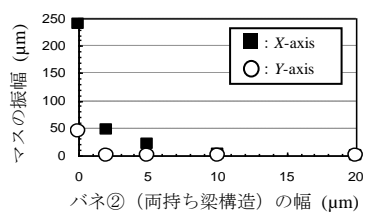


図6 FEM シミュレーションにより求められた梁の幅とマスの振動振幅の関係

これは、本研究で使用したリソグラフィ装置の分解能の不足が原因であると考えられる。幅が 10 μm 以上の両持ち梁については形成に成功したが、これらの試料については、外部から振動を与えてもマスが振動する様子は観察されなかった。そこで、参考実験としてバネ①のみを有した振動系を作製し、振動実験を行った、その結果、x 軸方向への加振に

対してマスが振動する様子が観察された。印加した振動の周波数とマスの振幅の関係を図 7(a)に示す。この結果より、振動系の共振周波数は約 60 Hz であることが分かる。図 7(b)は、共振状態にある振動系において、マスが最も変位している瞬間を高速カメラで捉えたものである。共振時におけるマスの最大変位は 260 μm (= 325 μm/g) となったが、これは同一条件下におけるシミュレーション結果 (240 μm/g) に近い値となった。

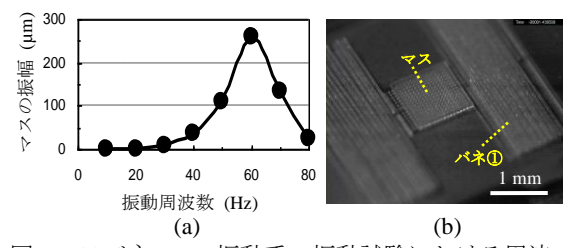


図7 (a)バネ・マス振動系の振動試験における周波数とマスの振幅の関係、(b) 高速カメラで捉えた共振状態で振動中のバネ・マス振動系の様子。

(2) TMR・GMR 素子を用いた磁気センサのセラミック基板上への集積

スパッタ法により堆積した Co 膜について磁化磁場特性測定を実施した。図 8(a)に磁化磁場特性結果から得られる保磁力 H_c と膜厚の関係を示す。この結果より、測定範囲内では Co 薄膜の H_c は膜厚に対して 1 次関数的に増加することが分かる。GMR, TMR の作製時に必要となる膜厚 10 nm の Co 膜については、その薄さから正確な H_c を評価することができなかったが、図 8(a)内の外挿線から約 18 Oe であると見積もられる。次に、FeNiMo 膜についても磁化磁場測定を実施した。図 8(b)に磁化磁場特性から計算される比透磁率 μ_r と膜厚の関係を示す。この結果より、目標膜厚 10 nm における μ_r は約 8,500 であると評価される。また、FeNiMo 膜 μ_r は測定範囲中では膜厚よらずほぼ一定であるといえる。これらの値はバルクの FeNiMo の μ_r (約 1,000,000) と比べて非常に小さいため、Co の透磁率と比較して十分大きいため、TMR, GMR 素子の形成には有用であると判断される。

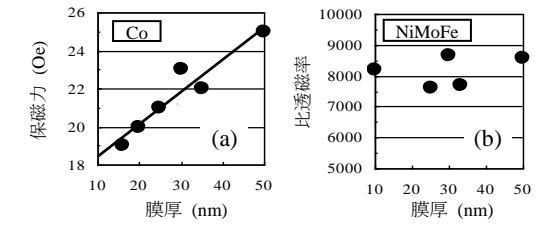


図8 (a)Co 薄膜の膜厚と保磁力の関係、および (b) FeNiMo 薄膜の膜厚と比透磁率の関係

図 9 に作製した磁気センサ、およびその中の GMR 素子の拡大像を示す。また、この磁

気センサによる磁気方位角の測定結果を図10に示す。この図に示すように、回転角度に対してセンサの抵抗値は変化しているが、180°回転させた時点での抵抗値が、左右にそれぞれ回転させた場合で一致しなかった。したがって、作製したデバイスは磁気方位センサとして動作していないと考えられる。なお、回転角度に対して抵抗値が変化したのは、デバイスと抵抗計を接続する配線が、回転に応じて振れたことが原因であると推測される。

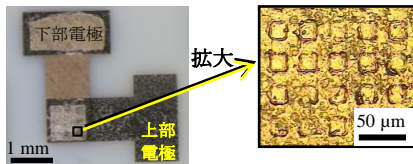


図9 GMR素子を用いてセラミック基板上に作製した磁気センサの上面写真およびそのGMR素子周辺の拡大図

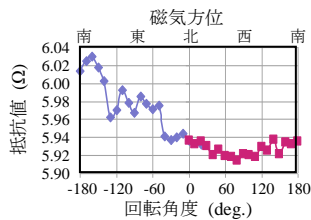


図10 GMR型磁気センサの磁気方位検出試験結果

(3) MEMS 作製技術を用いた磁気収束板の形成とこれを用いたMRセンサの3軸化

パーマロイのナノ粒子を混入させた樹脂で形成した磁気収束板について、その作製結果を図11に示す。PDMSを使用して作製した場合、基板表面から磁気収束板が剥離してしまったが(図(a)), エポキシ接着剤を用いた場合は十分な強度で基板に密着させることに成功した(図(b))。次に、作製した磁気収束板の磁化磁場特性を図12に示す。また、この磁化磁場特性より、磁気収束板の μ_r は約9.5とであると見積もられた。これはバルクのパーマロイの μ_r (6,000~100,000)と比較すると非常に小さい値である。図11にMR型磁気センサ上に形成した磁気収束板の写真を示す。このMR素子を地磁気中で回転させ、MR素子の抵抗変化を計測したが、基板に垂直な方向に地磁気を導入した場合は、その変化を検出することができなかった。これは、やはり作製した磁気収束板の μ_r が小さいことが原因であると推測される。そこで、今後の研究においては、透磁率の高い磁気収束板の形成法を確立することを目指す予定である。

(4) 自己発電機構を有する加速度センサの開発

図13(a)に作製した自己発電機構を有する加

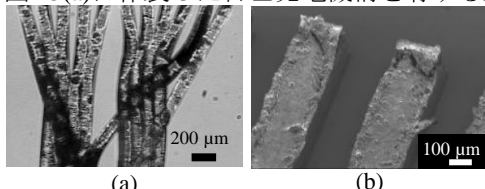


図11 パーマロイ粒子と (a) PDMS または (b) エポキシ樹脂を混合して作製した磁気収束板の電子顕微鏡像。

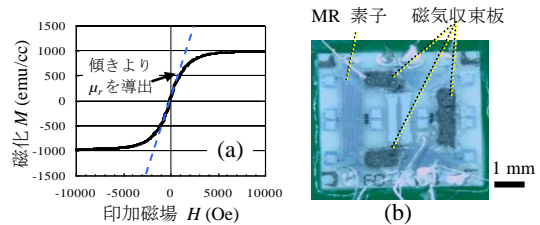


図12 (a) 作製した磁気収束板の磁化磁場特性、および (b) MR素子上に形成した磁気収束板

速度センサの写真を示す。このセンサを振幅0.2 mmで振動させたところ、センサ出力は図13(b)に示すような振動周波数 f に対する依存性を示した。この出力電圧 V_{out} を印加した振動の速度成分($A\omega$)、および加加速度(ジャーク)成分($A\omega^3$)で割ったところ、図14に示すようになった。ここで、 A 、 ω 、 ω_n はそれぞれ振動の振幅、角速度、固有角速度である。このグラフが示すように $\omega \gg \omega_n$ では $V_{out}/A\omega$ が一定に、 $\omega \ll \omega_n$ では $V_{out}/A\omega^3$ が一定になる。これは、センサの出力が $\omega \gg \omega_n$ では速度に比例し、 $\omega \ll \omega_n$ では加加速度に比例することを意味している。したがって、このセンサは印加される振動の周波数により、速度センサもしくは加加速度センサとして動作することが分かる。また、振動の周波数が既知の場合、計算により加速度を求めることも可能である。

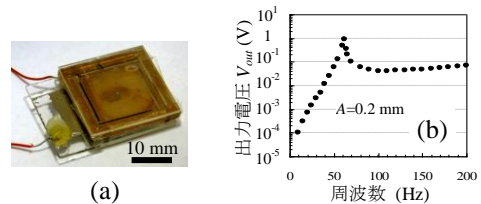


図13 (a) 作製した自己発電機構を有する加速度センサ (b) センサ出力の振動周波数依存性

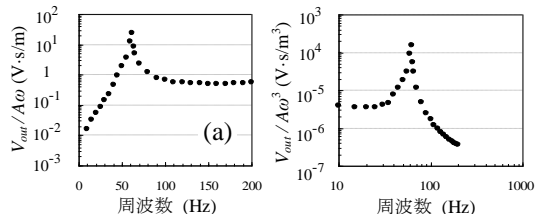


図14 (a) $V_{out}/A\omega$ および (b) $V_{out}/A\omega^3$ の振動周波数依存性

5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計7件)

- ① S. Shingubara (7 番目), 他 6 名, “Control of crystal orientation and diameter of Si nanowires using anodic aluminum oxide template,” Jpn. J. Appl. Phys, 査読有, accepted for publication in 2013.
- ② S. Shingubara (7 番目), 他 6 名, “Temperature dependence of resistance of conductive filament formed by dielectric breakdown,” Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, accepted for publication in 2013.
- ③ S. Shingubara (3 番目), “Electric Conduction Mechanism of Resistive Switching Memory using Anodic Porous Alumina,” ECS. Transactions, 査読有, 50, 49-54, (2013).
- ④ S. Aoyagi, M. Suzuki, T. Takahashi, 他 6 名, “Micro-Accelerometer and Magneto-resistive (MR) Sensor Directly Fabricated on a Ceramic Substrate,” Science and Technology Reports of Kansai University, 査読有, No.54, 7-22, (2012).
- ⑤ S. Aoyagi, “Fabrication of micro accelerometer and magnetoresistive sensor directly on a ceramic substrate,” Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, 査読有, Vol.3, No.2, doi:10.1088/2043-6262/3/2/025004, (2012).
- ⑥ Y. Shiotani, K. Shimomura, T. Shimizu, and S. Shingubara, “Large Magnetoresistance Switching Phenomena in Nanoconduction Path Formed with Dielectric Breakdown of SiO₂ Multilayered with Ferromagnetic Film”, Jpn. J Appl. Phys., 査読有, 50 (2011) 06GG15-20.
- ⑦ T. Shimizu, K. Aoki, Y. Tanaka, T. Terui, and S. Shingubara, “Preparation of Ultrahigh-Density Magnetic Nanowire Arrays beyond 1 Terabit/Inch² on Si Substrate Using Anodic Aluminum Oxide Template,” Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, 50, 06GE01-04, (2011).

[学会発表] (計 5 件)

- ① M. Suzuki, T. Takahashi, S. Aoyagi, “Self Powered Inertia Sensor Based on Vibration Energy Harvester Using Electret and Ferroelectric Plate,” The 17th Internat. Conf. Solid-State Sensors Actuators and Microsystems (Transducers 2013), 2013.6.16-20, Barcelona, Spain (accepted).
- ② 鈴木昌人, 今井正太, 高橋智一, 青柳誠司, “エレクトレットを用いた無給電加速度センサー概念とセラミック基板上への作製,” 日本機械学会第 4 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2012.10.22-24, 北九州.
- ③ S. Aoyagi, “Micro Accelerometer and Magneto-resistive (MR) Sensor Directly Fabricated on a Ceramic Substrate,” IWNA 2011, 2011.11.10-12, Vung-Tau, Vietnam.
- ④ S. Aoyagi, M. Suzuki, T. Takahashi (6 番目), 他 5 人, “Accelerometer Using MOSFET with Movable Gate Electrode: Electroplating Thick Nickel Proof Mass on Flexible Parylene Beam

for Enhancing Sensitivity,” The 16th Internat. Conf. Solid-State Sensors Actuators and Microsystems (Transducers 2011), 2011.6.5-9, Beijing, China.

- ⑤ M. Suzuki, T. Takahashi (7 番目), S. Aoyagi (10 番目), 他 7 人, “Fabrication of Highly Dielectric Nano-BATiO₃/Epoxy-Resin Composite Plate Having Trenches by Mold Casting and Its Application to Capacitive Energy Harvesting,” The 16th Internat. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2011), 2011.6.5-9, Beijing, China.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 無給電センサ及びこれを用いた無線センサネットワーク

発明者: 青柳誠司, 高橋智一, 鈴木昌人

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 2012-007064

出願年月日: 2013.1.17

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www2.ipcku.kansai-u.ac.jp/~t100051>

6. 研究組織

(1)研究代表者

青柳 誠司 (AOYAGI SEIJI)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号: 30202493

(2)研究分担者

新宮原 正三 (SHINGUBARA SHOSOU)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号: 10231367

鈴木 昌人 (SUZUKI MASATO)

関西大学・システム理工学部・助教

研究者番号: 70467786

高橋 智一 (TAKAHASHI TOMOKAZU)

関西大学・システム理工学部・助教

研究者番号: 20581648