

機関番号：13901

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360157

研究課題名 (和文) 磁壁位置変調によるスピントネル磁気センサの高感度化

研究課題名 (英文) High Sensitivity Spin-tunneling Magnetic Sensor Using Oscillatory Domain Wall Displacement

## 研究代表者

岩田 聡 (IWATA SATOSHI)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号:60151742

研究成果の概要 (和文) : 巨大磁気抵抗効果とスピントネル効果を利用し, 外部磁界により磁壁移動を検出する磁気センサの開発を行った。磁壁の移動を妨げる磁壁抗磁力の影響を低減するためにスピバルブ型磁気センサ素子の自由層の磁壁位置を交流磁界で振動的に変化させる検出方式を考案し, 磁気抵抗素子と交流磁界を加えるための導体線からなるセンサデバイスを開発した。その結果, 従来の磁化回転方式に比べて磁界感度を大幅に改善することができた。

研究成果の概要 (英文) : Magnetic sensors with wall displacement type have been developed by using giant magnetoresistance or spin tunneling effects. In order to reduce the influence of wall coercivity, which disturbs wall moving arising from an applied magnetic field, a new detection method in which the magnetic wall position was oscillatory modulated by alternative magnetic field was invented and the sensor devices composed by a magnetoresistive element and a conductor line for applying alternating field were developed. Consequently, the sensitivity for magnetic field was significantly improved compared to the conventional magnetic sensor with magnetization rotation mode.

## 交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2009年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：ナノマグネティックス

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：磁気センサ, 巨大磁気抵抗効果, スピントネル効果, 磁壁移動

## 1. 研究開始当初の背景

磁気センサは, モータの軸の角度, アクチュエータの位置, 地磁気による方位の検出など非常に幅広い用途があり, 近年は, 生体からの磁気, すなわち心臓や脳からの微弱な磁界の検出も盛んに試みられている。また, 酸化鉄などの磁性微粒子に化学修飾することで特定の生体分子を吸着させ, この磁性微粒子が発する微弱な磁気を検出することで, 生体分子の濃度など測定しようとするセンサ素子の開発も行われている。磁気センサには, フラックスゲートセンサ, 磁気インピーダン

スセンサなど, 磁性体を利用したもの, GaAsなどの半導体を利用したホール素子, 超伝導の SQUID などがあるが, それぞれに一長一短がある。フラックスゲートと磁気インピーダンスは, 素子サイズの微小化に限界があり, SQUID には超伝導の臨界温度以下への冷却, ホール素子には微小磁界に対する感度の限界という問題点がある。一方, 巨大磁気抵抗効果 (giant magnetoresistance:GMR) とスピントネル効果 (spin tunneling magnetoresistance:TMR) は, これまで, ハードディスクの読み出しヘッドや磁気ランダ

ムアクセスメモリへの応用に注目が集まり、磁気センサとしての応用については、十分な検討が行われてこなかった。また、磁界感度についても、どこまで微小磁界の検出が可能か、さらに、検出感度を改善するための素子構造やセンサ回路の開発という点でも、研究例が多いとは言えなかった。このような背景のもと、本研究では、磁気抵抗素子を利用した磁気センサの高感度化に取り組んだ。

## 2. 研究の目的

本研究では、新しい検出方式を導入することにより、磁気抵抗素子の磁界感度の向上を図った。磁気抵抗素子は、図1に示すように基本的に4つの層で構成されている。反強磁性層と磁化固定層は、交換結合により一方向に飽和させられているのに対し、磁化自由層の磁化状態が外部磁界によって変化すると、磁化固定層との磁化方向の相対的な角度が変化して電気抵抗が変化する。この抵抗変化をセンサ回路で出力電圧に変換することで磁界を検出する。したがって、磁化自由層の磁化状態をより低い外部磁界によって変化しやすくすれば、磁界感度を上げることができる。磁化自由層の磁化状態を変化させる方法としては、磁化ベクトルを膜面内で回転させる方式と、磁化自由層内に生じる磁壁を移動させる方式があり、従来は、ハードディスクの読み出しヘッドをはじめもっぱら磁化回転方式が利用されてきた。しかし、外部磁界に対する磁化状態の変化は、磁化回転より、磁壁移動の方がより急峻であり、磁気センサの高感度化には好ましい。ところが、磁壁はいったん動き始めれば、微小な磁界の増減に敏感に反応するものの、静止した磁壁を動かすためには、一定の大きさの磁界（これを磁壁抗磁力という）を加える必要があり、磁壁移動を利用した高感度センサは、実現できなかった。本研究では、磁壁を交流磁界で常に振動的に運動させた状態を作り、微小な外部磁界に対する磁壁の応答性を高めることで、磁界感度の向上を図る方式を考案した。また、

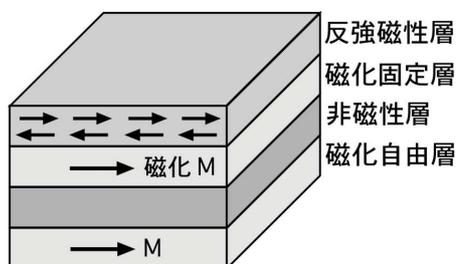


図1. スピンバルブ構造の磁気抵抗素子

交流磁界を外部からのコイルによって加えると素子サイズが大きくなってしまいますので、磁気抵抗素子と交流磁界を加えるための電

流ラインを一体化した素子を開発するとともに、その素子を駆動するためセンサ回路を試作し、そのセンサ特性を系統的に調べることを目的とした。

## 3. 研究の方法

センサ素子としては、まず次に示すGMR構造を作製した。Si基板上にTa (5nm)/(Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>)<sub>92</sub>B<sub>8</sub>(10nm)/Cu (2.2nm)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(3nm)/MnIr (10 nm)/Ta (5 nm)をスパッタ成膜後にフォトリソグラフィにより、図2に示す形状に加工した。磁界の検出は、幅30 μm、長さ200 μmのGMR細線の部分で行う。この細線の上に絶縁層としてAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜を200 nmスパッタ成膜後、図に示す形状のAl導体(厚さ250 nm)をフォトリソグラフィで形成した。作製した素子の顕微鏡写真を図3に示す。GMR素子の磁気異方性は、成膜中の静磁界によって、図の左右方向に誘導されている。いま、Al導体に電流を流すと、アンペール則によって磁界が発生し、GMR細線部には、左右方向、すなわち磁気異方

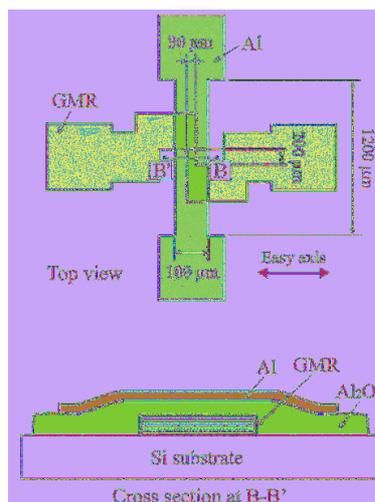


図2. GMR磁気センサ素子の構造

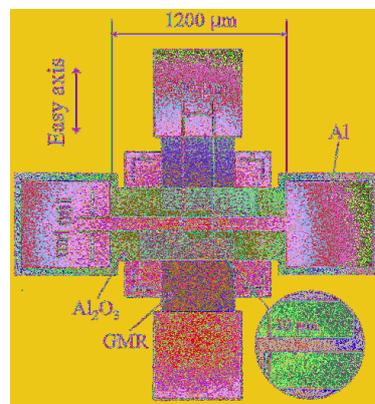


図3. GMR磁気センサの光学顕微鏡写真

性の方向に磁界が加わる。GMR細線には、細線の長さ方向に垂直に磁気異方性が付けられているので、磁化自由層には、図4(a)に示すような磁区構造が生じていると考えられる。このような磁区構造をもつ磁化自由層に、Al導体に交流電流を流すことで、交流磁界を加える。その交流磁界の振幅が磁壁抗磁力より大きければ、図4(a)に示すように磁壁位置は、交流磁界とともに振動的に変化する。このとき外部磁界 $H_{ex}$ が加わると、磁壁振動の中心位置が図4(b)のように少しずれるので、右向きに磁化した磁区と左向きの磁区の面積のバランスが崩れてGMR素子の抵抗が変化する。

この抵抗変化を検出するために図5に示す回路を作製した。GMR素子はブリッジ回路に組み込まれ、3つの抵抗 $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ でほぼバランスが取られている。ブリッジ回路の出力は、計装アンプで増幅された後、信号に含まれているAl導体による交流磁界成分をバンドパスフィルタで取り除いて出力電圧が得られる。

上に述べた素子は、GMRによるものであるが、 $20 \times 60 \mu\text{m}^2$ のTMR素子を利用した同様の構造のセンサ素子も作製し、センサ特性を評

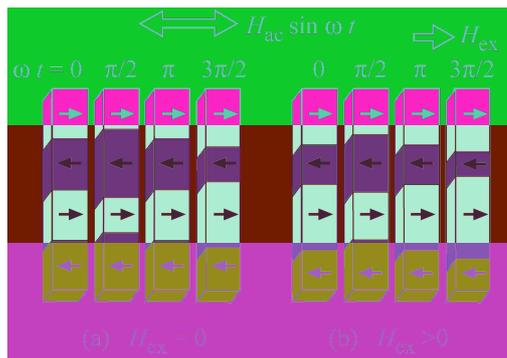


図4. 磁化自由層の磁区構造とその磁壁位置の交流磁界による振動的運動

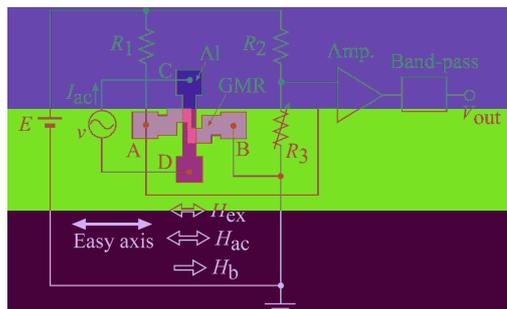


図5. 磁気センサ素子とセンサ回路の構成 画した。

#### 4. 研究成果

まずGMR素子の磁化自由層の磁区構造がどのようなになっているかをKerr顕微鏡を用いて

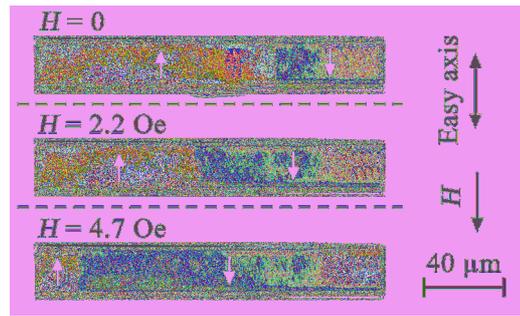


図6. 磁化自由層の磁区像

確認した。図6は、自由層のCoFeB層単層の膜を細線に加工した試料の磁区像を示しているが、容易軸方向に外部磁界を加えることで、磁壁が移動する様子を観察することができる。このような磁区構造をもつGMR細線に交流磁界を加えると、磁壁位置が振動的に変化して、ブリッジ回路に信号が生じる。図7は、140 kHzの交流電流をAl導体に流したときの計装アンプの出力波形を示している。GMR素子の部分に加わる交流磁界の振幅が2.12 Oeの場合には、信号の振幅が一定でなく、磁壁位置の変化が規則的でないことを示している。一方、交流磁界を2.5 Oeに増やすと信号の振幅は一定となり、磁壁が一定振幅で運動していることが分かる。

図8は、外部磁界(検出磁界) $H_{ex}$ として、1 kHz、0.13 Oe(実効値)を素子に加えたときの出力

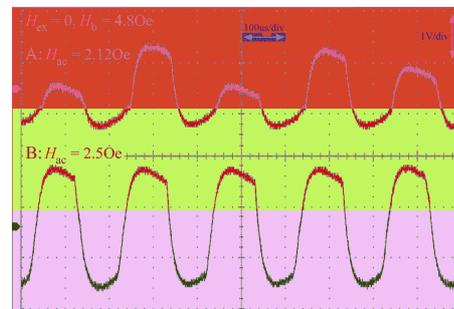


図7. 計装アンプの出力波形

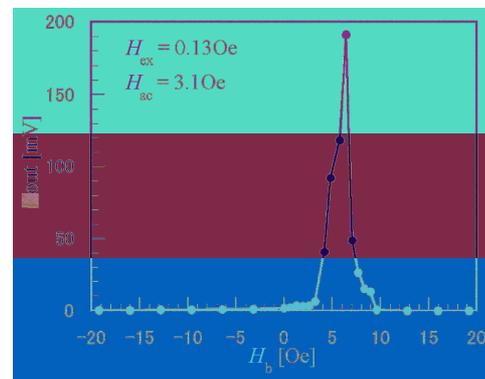


図8. 出力電圧 $V_{out}$ のバイアス磁界 $H_b$ 依

電圧と磁化容易軸方向のバイアス磁界 $H_b$ の関係を示している。 $H_b=6.5\text{ Oe}$ 付近でのみ大きな出力電圧が得られているのは、図6に示した磁区構造は、適切なバイアス磁界のもとで実現していることを示している。すなわち、GMR細線中に磁壁が存在するときに出力が得られることを示しており、当初の目論見どおりの動作により出力が得られていることが分かる。

図9は、外部磁界 $H_{ex}$ と出力 $V_{out}$ の関係を示している。交流磁界が $0.93\text{ Oe}$ と小さいときには、 $H_{ex}=2.0\text{ Oe}$ 付近まで出力が得られていないが、これは交流磁界が小さすぎて、磁壁が振動的に運動していないためと考えられ。一方、交流磁界を $3.1\text{ Oe}$ に増すと、ほぼ $H_{ex}$ に対して、線形な出力が得られており、この関係は、 $0.21\text{ mOe}$ という微小磁界まで保たれている。すなわち、磁壁位置振動方式を用いることで、低磁界の磁界感度が大幅に改善されることが実証された。

次にTMR素子とGMR素子の特性の比較を行った。図10は、作製したGMR素子とTMR素子の磁気抵抗特性を示しているが、GMR素子の磁気抵

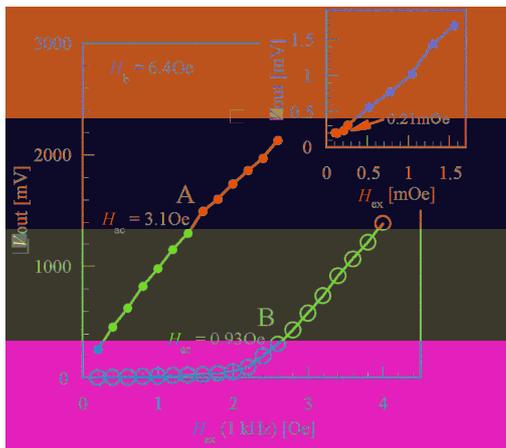


図9. 出力電圧 $V_{out}$ の外部磁界 $H_{ex}$ 依存性

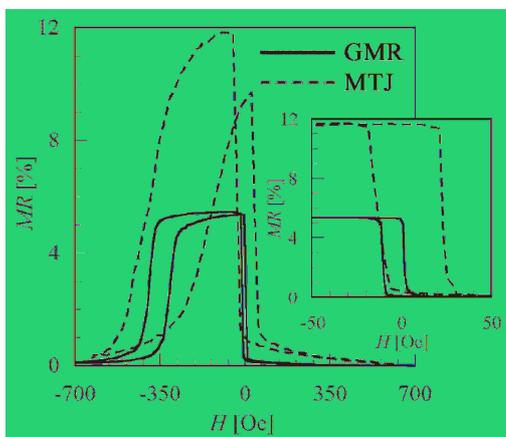


図10. TMR及びGMR素子の磁気抵抗特性

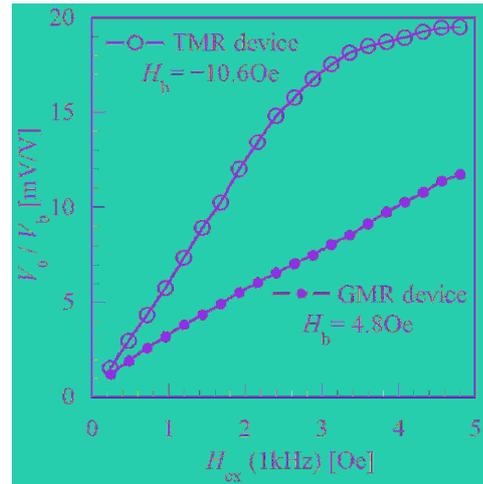


図11. TMR及びGMR素子の出力電圧 $V_{out}$ と外部磁界 $H_{ex}$ の関係

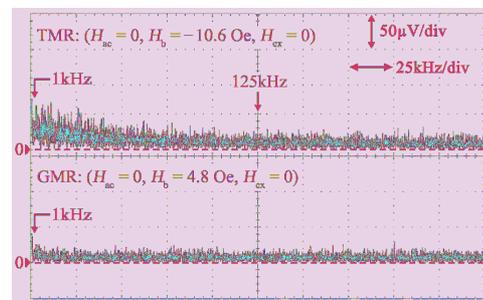


図12. TMR素子及びGMR素子の出力電圧の周波数スペクトル

抗変化率が約5.5%であるのに対し、TMR素子の場合には、約12%と約2倍大きい。これらの素子を用いた磁気センサの $V_{out}-H_{ex}$ 特性を図11に示す。トンネル接合の耐圧が低いため、素子に加える電圧が両者で異っている。このため、図11の縦軸の出力電圧は、素子の端子電圧で規格化されている。GMRに比べ、TMRの場合には、約2倍の出力電圧が得られており、これはTMR素子の磁気抵抗変化率が約2倍大きいことに対応している。TMRの場合、現在では、より大きい磁気抵抗変化を示す素子が報告されているので、さらに大きな磁界感度が得られる可能性がある。しかし、 $H_{ex}=0$ の場合について出力電圧の周波数スペクトルを観察すると、図12に示すように、特に低周波領域でノイズが大きい。これは、トンネル接合を流れる電流密度の不均一性に起因するものと考えられ、接合界面の平坦性を改善することで、ノイズの低減が期待される。

以上、GMRおよびTMR効果を利用した磁壁位置振動型の磁気センサの開発を行い、この方式を用いることによる磁界感度の大幅な向上を確認した。TMR素子はGMRに比べて出力が大きいのにに対してノイズも大きい、ト

ンネル接合の品質の向上によって改善される可能性がある。また、素子の磁化自由層の中に生じる磁壁の数を制御するなど、磁区構造をより精密に制御することで低ノイズ化が期待される。今後、これらの課題に取り組むことで、磁壁振動方式のより一層のセンサ特性の性能向上を目指す。

#### 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 17 件)

- ① G. A. Wang, Y. Masuda, T. Kato, S. Iwata: Study of the Domain Structure in Domain-wall Displacing type Field Sensor, J. Appl. Phys., 査読有, vol. 109, no. 7, 07E523-1-3 (2011).
- ② H. Kato, T. Kobayashi, T. Kato, S. Tsunashima, and S. Iwata: Local exchange anisotropy of microstructured CoFe / MnIr (001) bilayers, J. Phys.: Conference Series, 査読有, vol. 200, no. 7, 072052-1-4 (2010).
- ③ 中島将太, 荒井俊介, 加藤剛志, 岩田聡, 網島滋: 磁壁移動方式によるGMR磁気センサの高感度化, J. Magn. Soc. Jpn., 査読有, vol. 34, no. 2, pp. 115-118 (2010).
- ④ G. Wang, S. Nakashima, S. Arai, T. Kato, S. Iwata: High Sensitivity GMR Magnetic Sensor Using Oscillatory Domain Wall Displacement, J. Appl. Phys., 査読有, vol. 107, no. 9, pp. 09E709-1-3 (2010).
- ⑤ T. Kato, D. Oshima, Y. Yamauchi, S. Iwata, S. Tsunashima: Fabrication of L12-CrPt3 alloy films using rapid thermal annealing for planar bit patterned media, IEEE Trans. Magn., 査読有, vol. 46, no. 6, pp. 1671-1674 (2010).
- ⑥ 小澤智裕, 加藤剛志, 岩田聡, 網島滋: GdFeCoフリー層を用いたCPP-GMR素子におけるスピン注入磁化反転と層間結合, 電気学会論文誌A, 査読有, vol. 130, no. 7, pp. 631-635 (2010).
- ⑦ G. A. Wang, Y. Masuda, T. Kato, S. Iwata: Design and performance of domain wall displacing-type field sensors using a magnetic tunnel junction and a giant magnetoresistive device, J. Phys. D: Appl. Phys., 査読有, vol. 43, 455001-1-5 (2010).

- ⑧ T. Kato, S. Iwata, Y. Yamauchi: Modification of magnetic properties and structure of Kr<sup>+</sup> ion-irradiated CrPt3 films for planar bit patterned media, J. Appl. Phys., 査読有, vol. 106, no. 5, 053908-1-4 (2009).
- ⑨ R. Ikeda, M. Kagami, T. Kato, S. Iwata, and S. Tsunashima: Perpendicular anisotropy and microstructure of MBE-grown FePt-Ag and FePt-MgO granular films, J. Magn. Soc. Jpn., 査読有, vol. 33, No. 6-2, pp. 493-497 (2009).
- ⑩ Y. Maeda, Y. Suzuki, Y. Sakashita, S. Iwata, T. Kato, S. Tsunashima, H. Toyoda, H. Sugai: Effect of Sputtering Deposition Process on Magnetic Properties in Magnetic Multilayers, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, vol. 47, No. 10, pp. 7879-7885 (2008).

[学会発表] (計 22 件)

- ① G. Wang, S. Arai, T. Kato, S. Iwata: Low drift DC field sensor using modulation of magnetization direction in GMR device, IEEE International Magnetics Conference 2011, Taipei, Taiwan (2011年4月27日)
- ② G. A. Wang, Y. Masuda, T. Kato, S. Iwata: Study of the Domain Structure in Domain-wall Displacing type Field Sensor, 55th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Hyatt Regency Hotel (Atlanta, USA) (2010年11月15日)
- ③ G. A. Wang, S. Nakashima, S. Arai, T. Kato, S. Iwata: Development of a domain-wall displacing type GMR sensor, 第34回日本磁気学会学術講演会, つくば国際会議場, 茨城, (2010年9月5日)
- ④ 増田圭治, 王国安, 加藤剛志, 岩田聡: 磁壁移動方式TMR磁気センサーにおけるフリー層の磁区構造, 平成22年度電気関係学会東海支部連合大会, 中部大, 愛知, (2010年8月30日)
- ⑤ G. A. Wang, S. Nakashima, S. Arai, T. Kato, S. Iwata: Nanotesla field detection using domain-wall displacing type GMR sensor, The 2nd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, 仙台国際センター (宮城), (2010年7月13日)
- ⑥ G. Wang, S. Nakashima, S. Arai, T. Kato, S. Iwata: High Sensitivity GMR Magnetic Sensor Using Oscillatory Domain Wall Displacement, 11th Joint

MMM-Intermag Conference, Washington, DC, USA, (2010年1月22日)

- ⑦ 中島将太, 荒井俊介, 加藤剛志, 岩田聡, 綱島滋: 磁壁振動方式によるGMR磁気センサーの高感度化, 電気学会マグネティックス研究会, サンヒルズ三河湾, 愛知 (2009年12月2日)
- ⑧ 中島将太, 荒井俊介, 加藤剛志, 岩田聡, 綱島滋: 磁壁振動によるGMR磁気センサーの高感度化, 第33回日本磁気学会学術講演会, 長崎大, 長崎 (2009年9月15日)
- ⑨ 奥田奨, 三島健司, 加藤剛志, 岩田聡, 綱島滋: マグネトロンスパッタによるMgO薄膜におけるの結晶配向性の基板位置依存性, 第33回日本磁気学会学術講演会, 長崎大, 長崎 (2009年9月12日)
- ⑩ 小澤智裕, 加藤剛志, 綱島滋, 岩田聡: GdFeCoフリー層を用いたGMR素子におけるスピン注入磁化反転と層間結合, 第33回日本磁気学会学術講演会, 長崎大, 長崎 (2009年9月12日)
- ⑪ 荒井俊介, 中島将太, 加藤剛志, 岩田聡, 綱島滋: GMR素子を用いた高感度磁気センサーの開発, 平成21年度電気関係学会東海支部連合大会, 愛知工業大, 愛知 (2009年9月10日)

[その他]

ホームページ等

<http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/iwatalab/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩田 聡 (IWATA SATOSHI)  
名古屋大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 60151742

### (2) 研究分担者

加藤 剛志 (KATO TAKESHI)  
名古屋大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 50303665  
綱島 滋 (TSUNASHIMA SHIGERU)  
名古屋大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 80023323

### (3) 連携研究者 なし