

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360153

研究課題名(和文) スピン及び磁壁位置変調による磁気抵抗センサの高機能化

研究課題名(英文) GMR magnetic sensor using field modulation of magnetization direction and magnetic wall position

研究代表者

岩田 聡 (Iwata, Satoshi)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授

研究者番号：60151742

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,500,000円、(間接経費) 4,650,000円

研究成果の概要(和文)： 巨大磁気抵抗効果を示すスピバルブ膜を利用した3種類の磁気センサの開発を行った。磁化方位変調型の磁気センサでは、磁化自由層の磁化方位をAl導線の作る交流磁界で振動させるとともに、GMR素子の出力と交流磁界の電圧波形を乗算器で掛け合わせることで、約4mOeの検出感度が得られた。磁壁位置変調方式のセンサに関しては、磁性細線に切り欠きを設けることで、磁壁位置を固定することに成功した。歪みセンサでは、磁歪の逆効果による磁気異方性の変化を、磁化自由層の磁化方位を交流磁界で振動的に変化させたときの振幅の変化として検出することに成功した。 $\pm 5 \times 10^{-4}$ の歪みに対して、ほぼリニアな出力が得られた。

研究成果の概要(英文)： Three kinds of spin valve type magnetic sensors using giant magnetoresistance effect were developed. In case of the sensor with magnetization direction modulating method, the direction of a free layer was oscillatory modulated by ac magnetic field  $H_{ac}$  produced by a current flowing through an Al conductor. Low noise output was obtained by multiplying the GMR signal and  $H_{ac}$  signal using a multiplier IC. The sensitivity of the sensor was about 4 mOe. In case of the sensor with wall position modulating method, magnetic walls were pinned by forming notches along the line shape of the GMR element. In case of GMR strain sensor, the variation of amplitude of oscillatory modulation of the free layer by applying ac magnetic field can be detected through the variation of magnetic anisotropy of the free layer due to magnetostrictive effect. The linear output with the strain was obtained in strain range of  $5 \times 10^{-4}$ .

研究分野：工学

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 スピバルブ構造 磁歪現象 歪みセンサ 磁化方位変調方式 磁壁位置変調方式

科学研究費助成事業 研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

磁気抵抗効果を利用した磁気センサは、位置センサ、角度センサ、方位センサなど幅広く用いられており、特に巨大磁気抵抗効果(GMR 効果)を利用したセンサは、高い感度を示すことから、バイオセンサへの応用などさまざまな研究開発が世界的に推進されている。しかし、自動車のエンジンルーム内での使用においては、100 を越える領域までの温度特性の平坦化が求められるが、磁気抵抗素子の電気抵抗を増幅器を利用して検出するような単純な構成のセンサ回路でこの要求を満たすことは困難である。また、微小磁界から高い磁界までのリニアリティ、磁界だけでなく歪みや応力などの物理量のセンシング、ガスや有機物の検出など、さまざまな展開が期待されるが、そのためには、磁気抵抗素子を構成する各磁性層の磁性材料の開発、検出方式の検討、センサ回路の設計などを総合的に検討する必要がある。しかし、これまでは、それぞれが個別に物性物理、電子工学などの研究者によって行われてきたため、磁性材料の開発からセンサ回路まで統合的に研究された例は非常に少ない。本研究では、磁性材料から検出方式・センサ回路まで、総合的に検討することで磁気抵抗センサの新しい機能の開発を目指した。

2. 研究の目的

GMR効果を利用した磁気抵抗素子は、金属の多層構造で構成されているので、その電気抵抗は、温度上昇とともに高くなるとともに、磁気抵抗効果自体も、磁性体内部のスピン偏極率などが温度とともに低下するので、減少する。また、磁気抵抗素子をブリッジ回路の1つの素子として使用した場合、ブリッジ回路を構成する4つの抵抗のバランスが温度上昇とともに崩れるため、温度特性の平坦化は容易ではない。もちろん、磁気抵抗効果の大きさも温度とともに変化するので、単純に素子の抵抗を検出回路を用いた場合、温度係数の低減は困難である。さらに、直流磁界の検出ではセンサ回路の直流レベルのドリフトの影響を除くことは難しい。本研究では、スピンバルブ膜の磁化自由層の磁化方位を外部からの磁界で強制的に振動的に変化させるとともに、フィードバック構成を採用することで、直流レベルのドリフトを低減するとともに、温度係数の大幅な改善を目指した。また、高価でサイズも大きいロックイン・アンプなどを使用しないコンパクトなセンサ回路の実現も目標とした。

さらに微小な磁界を検出可能な方式として、取り組んできた磁壁位置変調方式については、

磁壁の両端を固定して、センサ特性を安定化させる素子構造を開発することを目指した。磁壁位置変調方式では、高いセンサ出力が得られるが、磁壁は、自然発生的に生ずるので、センサ特性の再現性に問題がある。これを解決するために、常に同じ位置に磁壁が発生する構造を実現する。

最後に、触覚センサとして応用可能な歪みセンサの開発も目的の1つとした。磁性材料には、特定の方向に磁化したとき、磁化方向にその形状が伸びる磁歪現象があり、逆に磁性材料を変形させると、その磁気異方性が変化する磁歪の逆効果が知られている。本研究では、曲げることができる厚さ 0.15mm のカバーガラス上に GMR センサを形成することで、ガラス基板を曲げたときの磁気異方性的変化を GMR の素子抵抗の変化として検出する歪みセンサの実現を目指した。

3. 研究の方法

まず、磁化方位変調方式のセンサ素子の構造を示す。酸化膜付きの Si 基板上に Ta(5nm)/CoFeB(10nm)/Cu(2.2nm)/CoFe(3nm)/MnIr(10nm)/Ta(2nm) のスピンバルブ構造の GMR 膜を8元マグネトロンスパッタ装置で成膜した。この膜上にフォトリジストを塗布し、マスクアライナで露光、ECRエッチングを行うことで、図1(a)に示すような幅30 $\mu$ mのGMR素子を作成した。次にGMR素子の上に絶縁層を介してAl導体ラインを形成するために、フォトリジストのリフトオフにより、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>絶縁層とAl導体層を図1(b)のように形成した。

この素子を図2に示す回路に組み込み、センサ特性を評価した。GMR素子は、ブリッジ回路の1素子として組み込み、ブリッジの出力は、計装アンプで500倍に増幅した。このとき、Al導

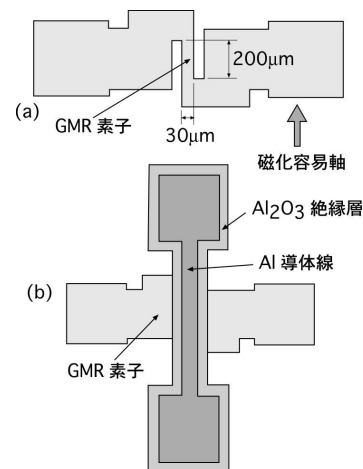


図 1. 作製した GMR 磁気センサの構造

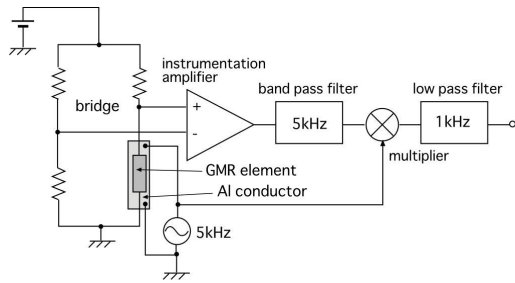


図 2. 磁化方位変調方式のセンサ回路

体線には、5kHzの電流が流され、GMR素子には、数0eの交流磁界 $H_{ac}$ が加えられるので、スピンバルブ膜の磁化自由層の磁化方位は、5kHzで振動することになる。磁化固定層と磁化自由層は、平行に設定しているので、GMR出力は、2倍周期の10kHzとなるが、図2の左右の方向に外部磁界 $H_{ex}$ を加えると、磁化自由層の磁化方位のみが傾くので、GMR出力に5kHz成分が生じる。この5kHz成分の強度は、 $H_{ex}$ に比例するので、5kHz成分の強度をセンサ回路で次のように検出する。計装アンプの出力を5kHzのバンドパスフィルターを通した後、5kHzの電圧波形と乗算器で掛け合わせると、出力の直流成分が $H_{ex}$ に比例することになる。実験では、外部磁界 $H_{ex}$ として、直流だけでなく100Hzまでの交流磁界の検出も試みた。

磁壁位置変調方式に関しては、GMR細線に切れ込みを入れた場合の磁区構造を磁気Kerr顕微鏡で観察することで、細線の構造と磁区構造の関係を調べた。

歪みセンサについては、CoFeBより磁歪定数の大きい材料としてFeSiBを自由層に用いたTa(5nm)/FeSiB(10nm)/CoFeB(1nm)/Cu(2.2nm)/CoFe(3nm)/MnIr(10nm)/Ta(2nm)構造のGMR膜をカバーガラスやPET基板などに作製した。このGMR膜は、幅100 $\mu$ m、長さ1200 $\mu$ mの細線にフォトリソグラフィにより加工し、図3に示すように片持ちに基板を固定して、他端に力を加えることで基板を变形させた。図4は、マイクロメータのヘッドを用いて基板に外力を加えた装置の写真である。この場合も、GMR素子をブリッジ回路に組み込み、計装アンプ

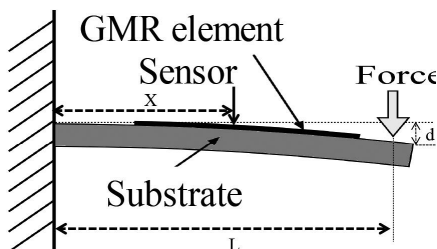


図 3. 歪みセンサの特性評価の方法

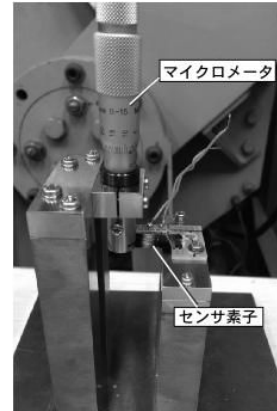


図 4. 歪みを加えるための装置の写真

で500倍に増幅した信号をシンクロスコープ等で観察した。

#### 4. 研究成果

図5は、磁化方位変調方式の計装アンプの出力の波形を示している。外部磁界 $H_{ex}=0$ の場合には、出力には、 $H_{ac}$ の2倍周期の10kHzの信号が現れているが、 $H_{ex}=1$  0eの場合には、10kHzに信号に5kHzの信号が重畳しており、理論的に予想した通りの波形が得られている。また、 $H_{ex}=1$  0eと-1 0eの波形を比較すると、5kHzの信号の位相が180°ずれていることが分かる。したがって、位相を含めて検出可能な図2の回路を利用することで、 $H_{ex}$ の極性も判別できる。図6は、 $H_{ex}$ に対するセンサ回路の出力を示しており、 $\pm 30$ m0eの範囲でほぼニアな出力が得られている。また、30m0eの外部磁界に対して、

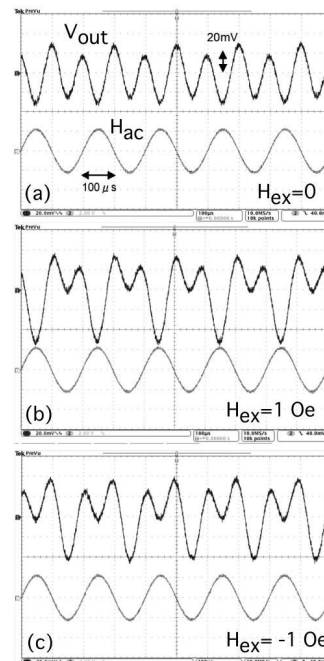


図 5. 計装アンプの出力波形

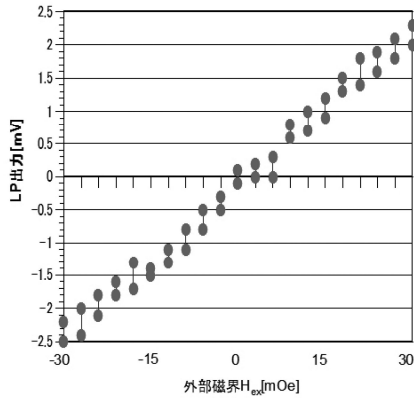


図6. センサ出力と外部磁界の関係

約2mVの出力が得られており、検出可能な感度としては、数mOeであることが分かる。 $H_{ex}$ を20Hzの交流としたときの出力のスペクトルにおいては、4mOeの $H_{ex}$ の信号成分が明瞭に観察されており、ミリOeオーダーの感度があることを示している。我々は、当初、ワンチップの乗算器の代わりにロックインアンプを用いて実験を行ったが、その場合は、ロックインアンプの時間定数を100msec以上にする必要があったため、10Hz以上の信号の検出は、困難であった。ここで開発した回路は、まだノイズが大きく改良の余地があるが、100Hz程度の交流磁界の検出が可能であることから、生体磁気などの計測への応用が期待される。

図7は、幅30  $\mu\text{m}$ に加工したCoFeB(10nm)薄膜の磁区像を示している。細線に切り欠きがない場合には、磁壁が生ずる位置は定まらず、磁区幅もばらばらついている。3  $\mu\text{m}$ 程度の切り欠きを作った場合には、磁壁の位置は、切り欠き部分にピン止めされたり、されなかったりであるが、切り欠きの深さを10  $\mu\text{m}$ にすると、磁壁が切り欠き部分に固定されていることが分かる。

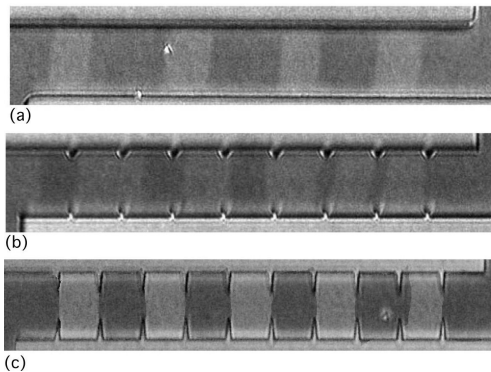


図7. CoFeB 薄膜の細線の磁区像

最後に歪みセンサの結果を示す。歪みセンサの場合には、磁化容易軸の垂直方向に30 Oe程度のバイアス磁界を加えて、磁化自由層の磁化方位を固定層に対して90°回転させる。この状態で、磁化容易軸方向に交流磁界を加えると、磁化自由層の磁化方位は、交流磁界 $H_{ac}$ の周波数で振動的に変化する。このとき、GMR素子に歪みを加えると、磁歪の逆効果により、磁化自由層の磁気異方性が変化して、磁化自由層の磁化方位の振動振幅が変化する。図8は、1kHzの $H_{ac}$ とGMR出力 $V_{out}$ の波形を示している。また、図9は、交流磁界 $H_{ac}$ をパラメータとして、GMR出力 $V_{out}$ の歪みの対する特性を示している。正負の歪みに対して、 $\pm 5 \times 10^{-4}$ の範囲でほぼニアな出力が得られていることが分かる。歪みセンサとしては、かなり高い感度が得られているが、FeSiBの磁歪定数から期待される値よりは、1桁ほど出力が低い。これは、10nm厚のFeSiBの磁歪定数が、厚膜の値より低下しているためと考えられる。今後は、薄膜化後もより大きな磁歪を示す自由層材料の開発が必要である。

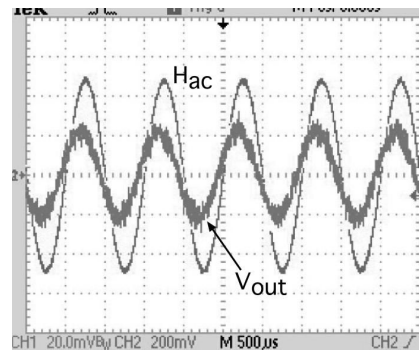


図8. 歪みセンサの出力波形  $V_{out}$

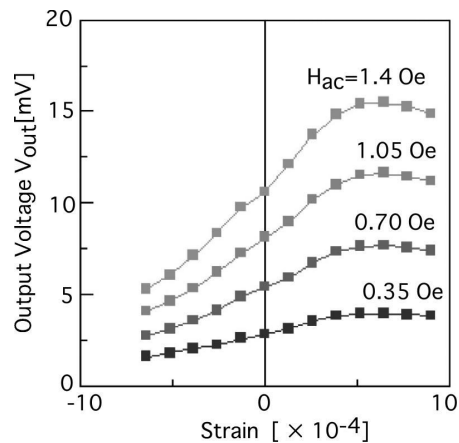


図9. センサ出力  $V_{out}$  と歪みの関係

5 . 主な発表論文等  
〔雑誌論文〕(計 11 件)

- (1) G. A. Wang, Y. Masuda, T. Kato, S. Iwata : Influence of the free-layer domain structure on domain-wall displacing type field sensors, *J. Appl. Phys.*, vol. 109, no. 7, 07E523-1-3 (2011). 査読有
- (2) E. Suharyadi, D. Oshima, T. Kato, S. Iwata : Switching Field Distribution of Planar Patterned CrPt3 Nanodots Fabricated by Ion Irradiation, *J. Appl. Phys.*, vol. 109, no. 7, 07B771-1-3 (2011). 査読有
- (3) T. Kato, Y. Matsumoto, S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, N. Nishizawa, S. Iwata : Time resolved magnetization dynamics and damping constant of sputtered Co/Ni multilayers, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 10, pp. 3036-3039 (2011). 査読有
- (4) D. Oshima, E. Suharyadi, T. Kato, S. Iwata : Observation of bit boundary in ion irradiation planer patterned CrPt3 using dark-field transmission electron microscope, *J. Magn. Magn. Mat.*, vol. 324, pp. 1617-1621 (2012). 査読有
- (5) G. A. Wang, S. Arai, T. Kato, and S. Iwata : Low-drift giant magnetoresistive field sensor using modulation of free-layer magnetization direction, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 44, no. 23, 235003-1-5 (2011). 査読有
- (6) Q. Xu, R. Kanbara, T. Kato, S. Iwata, and S. Tsunashima : Control of Magnetic Properties of MnBiCu Thin Films by Kr+ Ion Irradiation, *J. Appl. Phys.*, vol. 111, 07B906-1-3 (2012). 査読有
- (7) T. Kato, Y. Matsumoto, S. Okamoto, N. Kikuchi, S. Iwata, O. Kitakami, S. Tsunashima : Perpendicular anisotropy and Gilbert damping in sputtered Co/Pd multilayers, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 3288-3291 (2012). 査読有
- (8) B.Dai, T.Kato, S.Iwata and S.Tsunashima : Spin transfer torque switching of amorphous GdFeCo with perpendicular magnetic anisotropy for thermally assisted magnetic memories, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 3223-3226 (2012). 査読有
- (9) Q. Xu , R. Kanbara , T. Kato , S. Iwata, and S. Tsunashima : Bit patterned structure fabricated by Kr+ ion irradiation onto MnBiCu films, *IEEE*

*Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 3406-3409 (2012). 査読有

(10) B. Dai, T. Kato, S. Iwata, S. Tsunashima : Pulse width and temperature dependences of critical current density of spin transfer torque switching amorphous GdFeCo for thermally assisted MRAM, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 7, pp. 4359-4362 (2013). 査読有

(11) D. Oshima, T. Kato, S. Iwata, S. Tsunashima : Control of magnetic properties of MnGa films by Kr+ ion irradiation for application to bit patterned media, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 7, pp. 3608-3611 (2013). 査読有

〔学会発表〕(計 16 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 Magnetism Conference 2011, Taipei, Taiwan*, ET-03 (2011年4月26日).

(2) Q. Xu, R. Kanbara, T. Kato, S. Iwata, and S. Tsunashima : Control of Magnetic Properties of MnBiCu Thin Films by Kr+ Ion Irradiation, *The 56th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Scottsdale, Arizona, USA*, DQ-03 (2011年11月1日).

(3) G. A. Wang, K. Tashiro, T. Kato, S. Iwata : Reduction of the DC drifts in modulation type GMR field sensor, 第35回日本磁気学会学術講演会, 朱鷺メッセ(新潟コンベンションセンター), 新潟, 27aD-4, p. 44 (2011年9月27日).

(4) 岩田聡, 王国安, 加藤剛志 : GMR及びTMR素子を利用した磁気センサの高感度化(招待, シンポジウム講演), 電気学会全国大会, 広島工業大学, 2-S2-4, 第2分冊, S2(13)-(16) (2012年3月21日).

(5) 岩田聡, 王国安, 加藤剛志 : 磁気抵抗素子を利用した磁気センサの高性能化(招待講演)日本磁気学会 第45回ナノマグネティクス専門研究会, 中央大, 東京, (2012年3月2日).

(6) B.Dai, T.Kato, S.Iwata and S.Tsunashima : Spin transfer torque switching of amorphous GdFeCo with perpendicular magnetic anisotropy for thermally assisted magnetic memories, *IEEE International Magnetism Conference 2012, Vancouver Convention Center, Canada*, BT-12 (2012年05月07日).

(7) T. Kato, Y. Matsumoto, S. Okamoto, N. Kikuchi, S. Iwata, O. Kitakami : Magnetization dynamics in magnetic multilayers with perpendicular anisotropy (Invited), Collaborative Conference on Materials Research 2012, Seoul Palace Hotel, South Korea, (2012年6月26日).

(8) H. Ito, H. Kim, T. Kato, S. Iwata : Magnetic strain sensor using GMR devices, International Conference of the Asian Union of Magnetism Societies 2012, Nara, Japan, 2pPS-96, p. 133 (2012年10月2日).

(9) D. Oshima, T. Kato, S. Iwata, S. Tsunashima : Control of magnetic properties of MnGa films by Kr<sup>+</sup> ion irradiation for application to bit patterned media, 12th Joint MMM/Intermag Conference, Chicago, USA, (2013年1月14日).

(10) T. Kato, D. Oshima, M. Tanimoto, Q. Xu, S. Iwata, S. Tsunashima : Planar bit patterned media fabricated by ion beam irradiation (Invited), 2012 Energy Materials Nanotechnology Fall Meeting, Las Vegas, USA, A20 (2012年11月30日)

(11) 田代健二, 加藤剛志, 岩田聡 : 磁気抵抗効果を利用したマイクロ磁気センサーの開発, 平成24年度電気関係学会東海支部連合大会, 豊橋技科大, 愛知, H2-8 (2012年9月24日).

(12) T. Kato, D. Oshima, M. Tanimoto, S. Iwata, S. Tsunashima : Patterning of magnetic films by ion irradiation for ultra high density data storage (Invited), 2nd International Congress on Advanced Materials, Zhenjiang, China, (2013年6月16日).

(13) T. Kato, D. Oshima, M. Tanimoto, S. Iwata, S. Tsunashima : Ion beam irradiation for the fabrication of planer bit patterned media (Invited), Collaborative Conference on Materials Research, Jeju island, South Korea, (2013年6月24日).

(14) K. Adachi, T. Kato, S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, S. Iwata : Perpendicular anisotropy and Gilbert damping constant of Co/Pt multilayers, Magnetism and Optics Research International Symposium 2013, Saitama, Japan, Tu-P-20, pp. 62-63 (2013年12月2日).

(15) 徳岡良浩, 瀬戸陽介, 池田遼太, 加藤剛志, 岩田聡 : MBE成長したAg添加FePt, FePd膜の構造と磁気特性, 第37回日本磁気学会学術講演会, 北海道大学工学部, 北海道, 5aA-7 (2013年9月3日).

(16) 伊藤弘晃, 金虎, 加藤剛志, 岩田聡 : GMR素子を用いた歪みセンサ, 第37回日本磁気学会学術講演会, 北海道大学工学部, 北海道, 5pF-5 (2013年9月3日).

[ 図書 ] (計 0 件)

[ 産業財産権 ]

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

[ 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・エコトピア科学研究所・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

(3) 連携研究者

なし