

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24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20310073

研究課題名（和文）

スピントルク駆動ナノデバイスによる高性能マイクロ磁気センサの開発

研究課題名（英文）

Development of high performance micro magnetic sensor based on spin torque driving nano device

研究代表者

内山 剛 (UCHIYAMA TSUYOSHI)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00203555

研究成果の概要（和文）：パルス電流駆動のスピンドYNAMICKを利用したマイクロ磁気センサ（磁気インピーダンスセンサ）について有効なノイズ低減技術を確立し、常温で動作する磁気センサとして 1pT (10^{-12} T)の磁界検出分解能が得られることを実証した。また、ナノ磁性体に対するマイクロ波通電により磁気渦を回転させた共鳴実験において、スピントルクによる磁気渦の共鳴周波数の制御メカニズムを解析し、その共鳴周波数が印加磁界により鋭敏に変化することを示した。

研究成果の概要（英文）：We established noise reduction technology for a micro magnetic sensor (magneto-impedance sensor) utilizing spin dynamics in case of pulse current excitation. It is shown that noise level of the magneto-impedance sensor is smaller than $1\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$ at room temperature. It is investigated that resonance frequency of magnetic wall with rotating magnetic vortices is controlled by spin transfer torque. It is shown that resonance frequency of the rotating vortices sensitive depends on applied magnetic fields.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2009年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2010年度	3,200,000	960,000	4,160,000
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：電子工学分野

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：マイクロ磁気センサ、ナノ磁性体、スピンドYNAMICKS、スピントルク

1. 研究開始当初の背景

ナノ磁性体における磁壁の制御方法について通電電流によるスピントルクを利用した方法が新しく報告され、マイクロ磁気デバイスを高性能化するための可能性が示唆されている。たとえば、ナノ磁性細線中の磁壁をスピントルクで駆動した場合の磁壁共鳴現象にともなう誘導出力電圧を利用することにより、超低消費電力で高感度な磁気センサデバイスの開発が期待できる。また、電流駆動によるスピンドYNAMICKSを利用した

マイクロ磁気センサにおいて、その高感度化のための低ノイズ化技術が求められている。さらに、国内外で、高感度マイクロ磁気センサデバイスの医学・生物学への応用が検討されている。

2. 研究の目的

電流駆動によるスピンドYNAMICKSを利用した磁気インピーダンスセンサとスピントルクによるナノ磁性体磁壁制御技術の融合によるセンサデバイスの高性能化を目的

として研究を行う。具体的な研究項目は以下のようである。

- (1) パルス通電による高感度マイクロ磁気センサ（磁気インピーダンスセンサ）の開発と特性評価
- (2) スピントルクによる磁壁共鳴現象の制御とセンサデバイスへの応用
- (3) 薄膜プロセスによる集積型マイクロ磁気センサヘッドの開発
- (4) 超高感度マイクロ磁気センサの応用

3. 研究の方法

以下のそれぞれの項目について研究の方法を個別に記述する。

- (1) パルス通電による高感度マイクロ磁気センサ（磁気インピーダンスセンサ）の開発と特性評価

CMOSIC を利用した信号処理電子回路を作成し、実用的な磁気センサデバイスとして磁界検出感度を調べる。マイクロ磁性線に通電するパルス電流の繰り返し周波数および、パルス幅を変化させ、検出電圧およびノイズとの関係を明らかにする。また、回路ノイズを低減する電子回路の構成についても検討する。

- (2) スピントルクによる磁壁共鳴現象の制御とセンサデバイスへの応用

数 μm 程度の微小磁性体中の磁壁の共鳴現象を磁気渦中心の運動とともに検出できるかどうか調べる。直流電流により渦中心の位置を制御できるかどうか確認する。交換相互作用によるポテンシャルエネルギーによって共鳴周波数ならびにスペクトル線幅が変化することが予想され、この効果からスピントルクの大きさを評価する。また、磁界による共鳴周波数の変化を計測する。

- (3) 薄膜プロセスによる集積型マイクロ磁気センサヘッドの開発

多層プロセスを検討する。磁性材料としてはパーマロイを用いる。配線用の金のエッチング等の技術を含めて全工程を詳細に検討する。

- (4) 超高感度マイクロ磁気センサの応用
- マイクロ磁気センサを利用した微小磁界計測技術を医療診断などの医学的な応用へ発展させるため、細胞組織の活動磁気などの計測を検討する。

4. 研究成果

- (1) パルス通電による高感度マイクロ磁気センサ（磁気インピーダンスセンサ）の開発と特性評価

マイクロ磁性線の表面層のスピンドYNAMICKS を利用することが超高感度磁気センサ

の構成に有効であることを示す成果が得られた。すなわち、磁気センサのノイズ低減技術を確立し、常温で動作するマイクロ磁気センサとして $1\text{ pT}(10^{-12}\text{ pT})$ 磁界検出分解能が得られることを実証した。詳細を以下に述べる。

まず、CMOSIC による実用的なセンサ回路として、 $30\ \mu$ 径の磁性細線に通電した際に生ずる誘導起電圧のピーク値をコイルとアナログスイッチを利用し検出する信号処理回路を試作した (Fig. 1)

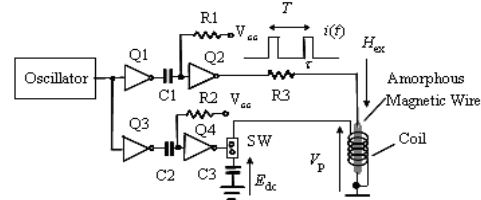


Fig. 1 センサ信号処理基本回路

この試作信号処理回路を用いた実験により磁界検出感度および検出分解能の検討を行った。Fig. 2 はこの回路を利用した磁界検出特性であり、約 $7 \times 10^4 (\text{V/T})$ という高感度

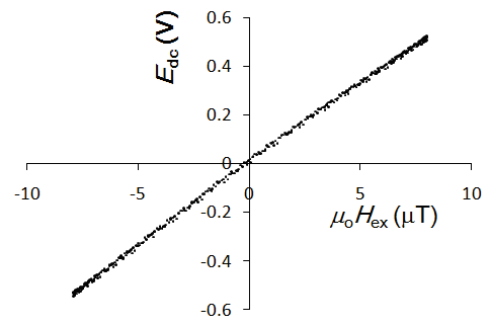


Fig. 2 磁界検出特性

で線形性の良い特性が得られた。また Fig. 3 は、磁性細線への通電パルス条件をほぼ最適化した場合の、試作マイクロ磁気センサのノイズスペクトルの測定結果であり、 $1\text{ pT/Hz}^{1/2}$ という低レベルのノイズフロアが示されている。パルス通電より生ずる磁界は表皮効果により磁性細線の表層部に生ずる。なおこのパルス通電時の表皮深さは、試算によれば $1\ \mu\text{m}$ 以下であり、磁性体ナノ領域のスピンドYNAMICKS を利用していると考えられることができる。

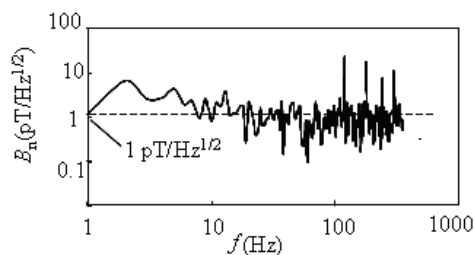


Fig. 3 ノイズスペクトルの測定結果

(2) スピントルク駆動による磁壁共鳴現象の解析とセンサデバイスへの応用
 マイクロ磁性体にマイクロ波を通電し、ナノ磁性体における磁気共鳴現象を調べた。その実験系を Fig. 4 に示す。

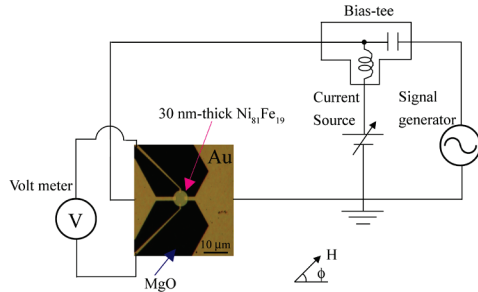


Fig. 4 マイクロ波通電による微小磁性体中の磁気共鳴現象の測定概念図

Fig. 5 はマイクロ波通電による磁壁共鳴現象が、ホール電圧の測定に反映されることを示す結果である。ここでは、主に磁気渦の共鳴を検出している。ホール電圧の周波数依存性では、共鳴周波数のところでピークを示していることが Fig. 5(a) からわかる。次に直流電流をマイクロ波に重畳して印加すると、磁気渦の共鳴位置を Fig. 5(a) に示すように操作できることが分かった。共鳴周波数、共鳴時のホール電圧振幅ならびに共鳴線幅の直流電流依存性を Fig. 5(b)、(c) と (d) に示す。直流電流によって、磁気渦が円盤内で移動し、共鳴周波数が変化していることを示唆している。さらに、ホール電圧振幅は磁気渦中心の旋回半径に関係しており、直流電流によって旋回半径も変化していることがわかる。線幅は磁気モーメントの緩和・減衰に関係があり、材料に特有である。しかし、スピントルク

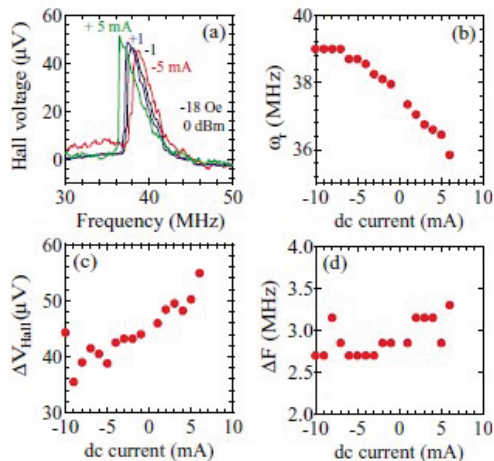


Fig. 5(a) ホール電圧のマイクロ波周波数依存性、(b) 共鳴周波数、(c) 共鳴周波数におけるホール電圧、(d) 線幅の直流電流依存性。

クの寄与があると、ダンピングと拮抗するようにスピントルクが作用することから、この結果は、スピントルクの寄与があることを示している。

上述のように、スピントルクならびに電流による磁場による磁壁制御技術として、直流電流によって渦中心の旋回位置ならびに旋回半径を操作できることを明らかにした。これらの実験結果から、直流電流によって、検出感度や検出周波数を操作できるセンサデバイスが実現できることを示した。

(3) 薄膜プロセスによる集積型マイクロ磁気センサヘッドの開発

本研究で試作開発した集積型 MI マイクロセンサヘッドの写真を Fig. 6 に示す。

薄膜プロセスで試作した集積型 MI センサヘッド

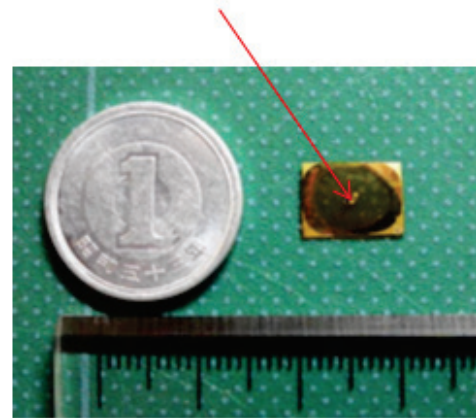


Fig. 6 集積型 MI マイクロセンサヘッド

(4) 超高感度マイクロ磁気センサの応用
 モルモットから摘出した平滑筋の細胞組織を測定試料とした。試作した超高感度マイクロ磁気センサと細胞外電極により、平滑筋組織の自発的な電気活動にもとづく活動電位と活動磁気の同時測定を行った結果、両者が正確に同期していることを確認した。超高感度マイクロ磁気センサを用いた磁気計測法による医療診断応用への可能性を示した。

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 18 件)

- ① 牧 鉄兵、内山 剛「超高感度 MI センサを用いた脳波検出技術の信頼性の検討」The Papers of Technical Meeting on Magnetism, IEE Japan, Mag10-115, 49-54(2010), 査読無。
- ② 内山 剛、磯部 公彦「パルス励磁アモルファスワイヤ磁気インピーダンスセ

- ンサ高感度化の検討」The Papers of Technical Meeting on Magnetism, IEE Japan, Mag-10-111, 29-32(2010), 査読無.
- ③ T.Uchiyama, A.Yamaguchi, Y.Utsumi, “Noise Characterization of Coil Detection Type Magnetic Field Sensor Utilizing Pulse Excitation Amorphous Wire Magneto-Impedance Element”, Journal of the Magnetism Society of Japan, 34, 533-536(2010), DOI: 10.3379/msjmag.1006R009, 査読有.
- ④ 山口明啓, 元井桂一, 宮島英紀, 内山剛, 内海裕一「プレーナーホール整流効果を用いた人工磁性体の非線形応答の検出」Journal of the Magnetism Society of Japan, 34, 2, 73-77(2010), DOI: 10.3379/msjmag.1003R001, 査読有.
- ⑤ K. Mohri, Y. Nakayama, T.Uchiyama, Y. Mohri, Yu. Mohri, Y. Inden” Sensing of Human Micro-vibration Transmitted Along Solid Using Pico-Tesla Magneto-impedance Sensor (pT-MI Sensor)” PIERS ONLINE, 6 2, 161-164(2010), 査読有.
- ⑥ A. Yamaguchi, K. Motoi, H. Miyajima, T. Sato and Y. Nakatani, “Non-linear Vortex Motion Induced by the Simultaneous Application of rf and dc Currents in a Micron-sized Fe₁₉Ni₈₁ Disk”, IEEE Transaction on Magnetism 46, 1994-1997 (2010), DOI: 10.1109/TMAG.2010.2040372, 査読有.
- ⑦ 山口明啓, 元井桂一, 宮島英紀, 内山剛, 内海裕一, “プレーナーホール整流効果を用いた人工磁性体の非線形応答の検出”, 日本磁気学会誌 34, 73-77 (2010), 査読有.
- ⑧ A. Yamaguchi, K. Motoi, H. Miyajima, A. Hirohata, T. Yamaoka, T.Uchiyama, Y.Utsumi, “Current manipulation of a vortex confined in a micron-sized Fe₁₉Ni₈₁ disk” Appl. Phys. Lett. 95, 122506(3pages) (2009), DOI: 10.1063/1.3236693, 査読有.
- ⑨ 梶田泰一, 荒田純平, 林雄一郎, 内山剛, 本田裕之, 森健策, 水野正明, 若林俊彦, 藤本英雄, 吉田純「残存腫瘍に対する磁気センサを用いた新しい腫瘍検出技術の開発 (第一報): マグネタイトカチオニックリポソーム投与の最適化と安全性」生体医工学, 47, 1, 99-104, (2009), 査読有.
- ⑩ T.Uchiyama, S. Nakayama “Non Contact Cell Physiological Measurement Using Magneto-Impedance Sensor” The Papers of Technical Meeting on Magnetism, IEE Japan, Mag-09-93, 37-40(2009), 査読無.
- ⑪ 内山剛, 中山晋介「磁気インピーダンスセンサによる生体細胞磁気計測」日本磁気学会 164 回研究会資料, 11-18(2009), 査読無.
- ⑫ K. Mohri, F. B. Humphrey, L. V. Panina, Y. Honkura, T.Uchiyama, M. Hirami, “Advances of Amorphous wire Magnetism in 27 Years” Phys. Stat. Solid A 206, 4, 601-607(2009), DOI:10.1002/pssa.200881252, 査読有.
- ⑬ T.Uchiyama, S. Nakayama, K. Mohri, K. Bushida, “Biomagnetic field detection using very high sensitivity magneto-impedance sensors for medical applications” Phys. Stat. Solid A, 4, 639-643(2009), DOI:10.1002/pssa.200881251, 査読有.
- ⑭ T.Uchiyama, Y. Nakamura, “PWM type magneto impedance sensor based on CMOS circuit with amorphous wire head” The Papers of Technical Meeting on Magnetism, IEE Japan, Mag-08-111, 15-18 (2008), 査読無.
- ⑮ S. Tajima, S. Shibata, T.Uchiyama “Non-contact bio-signal detection method using magneto-impedance sensor for detection of driver drowsiness level” The Papers of Technical Meeting on Magnetism, IEE Japan, Mag-08-112, 19-21, (2008), 査読無.
- ⑯ Y. Nakamura, T.Uchiyama, C. M. Cai, K. Mohri, “PWM Type Amorphous Wire CMOS IC Magneto-Impedance Sensor Having High Temperature Stability” IEEE Trans. Magn. 44, 11(2), 3981-3984(2008), <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04667648>, 査読有.
- ⑰ A. Yamaguchi, K. Motoi, A. Hirohata, N. Higashio, H. Miyajima, “DC electrical response and impedance change induced by a microwave signal in a patterned ferromagnetic wire”, Proc. SPIE 7036, 703607 (2008), DOI: 10.1117/12.798309, 査読有.
- ⑱ A. Yamaguchi, K. Motoi, A. Hirohata, H. Miyajima, Y. Miyashita and Y. Sanada, “Broadband ferromagnetic resonance of Ni₈₁Fe₁₉ wires using a rectifying effect”, Physical Review

B 78, 104401(11pages) (2008), DOI:
10.1103/PhysRevB.78.104401, 査読
有.

[学会発表] (計43件)

- ① 牧 鉄兵、内山 剛「超高感度 MI センサを用いた脳波検出技術の信頼性の検討」、電気学会マグネティックス研究会、ホテルアルカディア長野、長野県、2010/09/21-22.
- ② 内山 剛、磯部 公彦「パルス励磁アモルファスワイヤ磁気インピーダンスセンサ高感度化の検討」、電気学会マグネティックス研究会、ホテルアルカディア長野、長野県、2010/09/21-22.
- ③ 内山 剛、大宮 祥吾、後藤 宏明「道路横設置型ハンディモバイル磁気式トラフィックカウンタの開発」、第34回日本磁気学会、つくば国際会議場、茨城県、2010/09/4-7.
- ④ 磯部 公彦、内山 剛「パルス励磁磁気インピーダンス素子を用いたコイル検出型磁界センサ高感度化の検討」、第34回日本磁気学会、つくば国際会議場、茨城県、2010/09/4-7.
- ⑤ S. Nakayama, K. Sawamura, K. Mohri, T. Uchiyama “Use of Pulse-driven Pico-Tesla Magnetoimpedance Sensor to Detect Cardiac Magnetic Activity on the Surface of the Human Chest” PIERS2010, Cambridge, USA, 2010/06/5-8 .
- ⑥ T. Uchiyama, K. Mohri, S. Nakayama, “Human bio-magnetic field measurement using pico-tesla sensitivity amorphous wire magneto-impedance sensor”, EMSA, Bodrum, Turkey, 2010/06/4-7, Invited.
- ⑦ M. Goto, H. Hata, A. Yamaguchi, Y. Nakatani, T. Yamaoka and Y. Nozaki, “Electrical detection of vortex states in a ferromagnetic disk through the rectifying effect”, 55th Annual Conference Magnetism & Magnetic Materials ; American Institute of Physics & The IEEE Magnetic Society ; Atlanta, Georgia, USA, 2010/11/17.
- ⑧ H. Hata, M. Goto, A. Yamaguchi and Y. Nozaki, “Resonance modes of a pair of magnetic vortices in micronscale $Fe_{19}Ni_{81}$ ellipsoid”, 55th Annual Conference Magnetism & Magnetic Materials ; American Institute of Physics & The IEEE Magnetic Society ; Atlanta, Georgia, USA, 2010/11/17.
- ⑨ A. Yamaguchi, K. Motoi, H. Miyajima, T. Uchiyama and Y. Utsumi, “Detection and modulation of high-order spin waves using rectifying effect”, 2010 IEEE 7th International Symposium on Metallic Multilayers ; IEEE ; The Doubletree Hotel & Executive Meeting Center in Berkeley CA, USA, 2010/09/22.
- ⑩ Y. Kasatani, A. Yamaguchi, and H. Miyajima, “Broadband ferromagnetic resonance of iron wires using rectifying effect”, 2010 IEEE 7th International Symposium on Metallic Multilayers ; IEEE ; The Doubletree Hotel & Executive Meeting Center in Berkeley CA, USA, 2010/09/22.
- ⑪ A. Yamaguchi, K. Motoi, H. Miyajima, T. Sato and Y. Nakatani, “Non-linear vortex motion induced by simultaneous application of rf and dc current in a micron-sized $Fe_{19}Ni_{81}$ disk”, 11th Joint MMM-Intermag conference, Washington, DC, USA, 2010/01/22.
- ⑫ A. Yamaguchi, H. Hata, H. Miyajima, T. Sato, Y. Nakatani, A. Hirohata, T. Yamaoka, T. Uchiyama and Y. Utsumi, “Self-homodyne detection of Multi-vortex motion induced by rf current in micron-sized $Fe_{19}Ni_{81}$ ellipse dots”, 11th Joint MMM-Intermag conference, Washington, DC, USA, 2010/01/21.
- ⑬ 内山 剛、中山 晋介「細胞レベル電気生理現象の磁気インピーダンスセンサによる非接触検出の検討」、電気学会マグネティックス研究会、自動車会館、東京、2009/09/25.
- ⑭ 山口明啓、元井桂一、宮島英紀、内山剛、内海裕一「異常ホール整流効果を用いたナノ磁性体のスピンドイナミクス検出」、第33回日本磁気学会学術講演会、長崎大学、長崎県、2009/09/12-15.
- ⑮ 内山 剛、山口 明啓、内海 裕一「パルス励磁アモルファスワイヤ磁気インピーダンスセンサのノイズ特性評価」、第33回日本磁気学会学術講演会、長崎大学、長崎県、2009/09/12-15.
- ⑯ T. Uchiyama, S. Nakayama ” Pico-Tesla Sensitivity Amorphous Wire Magneto-Impedance Sensor and Its Application for Bio-magnetic Measurement” PIERS, Moscow, Russia , 2009/8/18-21, Invited.
- ⑰ Akinobu Yamaguchi, Keiichi Motoi,

Atsufumi Hirohata and Hideki Miyajima, "Detection of Quantized Spin-Wave Excitation by Anomalous Hall voltage Rectification in Nano-Magnets", International Conference on Magnetism, Karlsruhe, Germany, 2009/07/28.

- ⑱ A. Yamaguchi, K. Motoi, A. Hirohata and H. Miyajima, "ANOMALOUS HALL VOLTAGE RECTIFICATION EFFECT INDUCED BY SPIN-WAVE EXCITATION", 20th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, Freie Universität Berlin, Berlin, Germany, 2009/07/22.
- ⑲ 山口 明啓、元井 桂一、宮島 英紀、内山 剛、内海 裕一、"電流ならびに磁場による磁気渦共鳴の制御"、日本物理学会 2009 年秋季大会、(社)日本物理学会、熊本大学 黒髪キャンパス、熊本県、2009/09/27.
- ⑳ 内山 剛、中村好宏「CMOS 回路とアモルファスワイヤによる PWM 形磁気インピーダンスセンサ」、電気学会マグネティックス研究会、電気学会本部、市ヶ谷、東京、2008/10/2-3.
- ㉑ 内山 剛、中山晋介、毛利佳年雄「ピコテスラ磁気インピーダンスセンサによる生体細胞磁気計測」、第 32 回日本磁気学会学術講演会、東北学院大学、多賀城、宮城県、2008/09/12-15.
- ㉒ Y. Nakamura, T. Uchiyama, C. M. Cai, K. Mohri, "PWM Type Amorphous Wire CMOS IC Magneto-Impedance Sensor Having High Temperature Stability" Intermag, Madrid, Spain, 2008/5/4-8.
- ㉓ T. Uchiyama, S. Nakayama, K. Mohri, K. Bushida "Biomagnetic field detection using very high sensitivity magneto-impedance sensors for medical applications", IWMW 2008, Bilbao, Spain, 2008/05/9-10, Invited.
- ㉔ A. Yamaguchi, K. Motoi, H. Miyajima and Y. Nakatani, "Field dependence of rectification of radio frequency current in a single layered ferromagnetic wire", 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Hilton Austin, Austin, Texas, USA, 2008/11/13.
- ㉕ A. Yamaguchi, K. Motoi, A. Hirohata, N. Higashio and H. Miyajima, "DC electrical response and impedance change induced by a microwave signal in a patterned ferromagnetic wire", SPIE, San diego, USA, 2008/08/10.
- ㉖ 山口 明啓、東尾 奈々、元井 桂一、宮

島 英紀、"強磁性細線の高周波インピーダンス測定"、日本磁気学会 第 32 回学術講演会 日本磁気学会、東北学院大学、多賀城、宮城県、2008/09/15.

[図書] (計 1 件)

- ① 田所嘉昭、穂積直裕、内山 剛、斎藤 務、三浦 純、岩波保則、中内茂樹「新インターユニバーシティ 電気・電子計測」、オーム社、43-74、(平成 20 年 9 月 15 日)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：生体細胞組織磁気信号検出方法
発明者：中山晋介、内山 剛
権利者：名古屋大学
種類：特許
番号：特願 2008-133642
出願年月日：平成 20 年 11 月 8 日
国内外の別：国外 (PCT)

○取得状況 (計 1 件)

名称：細胞組織磁気信号検出装置
発明者：中山晋介、内山 剛、毛利佳年雄
権利者：名古屋大学
種類：特許
番号：特許第 4665105 号
取得年月日：平成 23 年 1 月 21 日
国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/uchi-yamalab/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内山 剛 (UCHIYAMA TSUYOSHI)
名古屋大学・工学研究科・准教授
研究者番号：00203555

(2) 研究分担者

山口 明啓 (YAMAGUCHI AKINOBU)
慶應義塾大学・理工学部・助教
研究者番号：70423035
内海 裕一 (UTSUMI YUICHI)
兵庫県立大学・附属研究所・准教授
研究者番号：80326928

(3) 連携研究者なし