

## 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 20 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360163

 研究課題名（和文）マイクロ駆動機構を持つ針状磁気抵抗効果プローブによる  
低侵襲・非破壊計測の開発

 研究課題名（英文）Development of low-invasive/non-destructive measurements by using  
needle-type magnetic resistance probe with micro driving mechanism

研究代表者

山田 外史（YAMADA SOTOSHI）

金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授

研究者番号：80019786

研究成果の概要（和文）：

本研究は、新規の針形状の磁気センサプローブを設計製作し、そのマイクロ駆動機構を検討した。また、低侵襲な生体内磁気計測、非破壊検査等の応用を目的に研究を遂行し、下記のような成果を得た。

- (1) 針状GMRセンサの特性向上ならびに小型構成の実現
- (2) 針形状プローブのマイクロ駆動機構を製作し、特性の計測
- (3) 低侵襲な生体内磁気検査と電子工学分野での応用開発
  - (a) 磁氣的免疫学的検査法、(b) 金属の狭空間中の非破壊検査、(c) プリント基板上の電流検出

研究成果の概要（英文）：The work presents inimitable shaped needle type probe with spin-valve giant magnetoresistance(SV-GMR) elements and also develops the micro-drive mechanism by using magnetostrictive device. The device has the low-invasive magnetic measurement, then that gives opportunity to apply the probe in biological (*in vivo*) experiments, and in non-destructive evaluation. We have the achievements as follows,

- (1) Improvement of sensing characteristics and micro structure of the probe.
- (2) Micro-linear driving mechanism for needle type probe and its characteristics
- (3) Low-invasive measuring system in bio-fields and non-destructive testing in electronics field
  - (a) Hyperthermia therapy and immunoassay experiments, (b) eddy-current inspection in narrow space, (c) current sensor for printed circuit board.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2011年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2012年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：バイオマグネティックス

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：マイクロセンサ、マイクロ駆動、針状プローブ、磁気抵抗効果素子、磁気計測、低侵襲、免疫学的検査法、非破壊検査

## 1. 研究開始当初の背景

巨大磁気抵抗効果素子 (Giant Magneto Resistance: 以降GMR) は、大容量記憶装置 (ハードデスク) の記録読出ヘッドの素子として急速に発展し (ヘッド用としては今日トンネル型MRが主流である)、磁気記憶装置の発展に多大なる貢献をした。このGMR素子を磁気センサとして記憶装置以外への利用に注目した。GMR素子は、ホール素子、磁気インピーダンス素子などの小形磁気センサと比べ、超小形 (かつ薄い)、感度、温度特性を総合して優れた面がある。しかし、飽和特性、非線形性がある、また計測範囲が狭いなどの欠点がある。しかし、工業分野では方位・力学センサとして車載搭載用機器などへの研究開発がある。一方、超小形・高感度に注目して、バイオ分野におけるナノ磁性ビーズの検出素子として研究され、サブ $\mu\text{m}$ サイズの磁性ビーズの検出を可能にした。

申請者は、工学分野において高精度化を目指す非破壊検査での磁界検出素子としてGMRセンサに注目した。GMR素子の超小形、高感度、対環境性に焦点をあて、金属製品の微細傷の検出を目標としたマイクロわず電流探傷技術 ( $\mu$ -ECT技術)、電子工業における非破壊検査機器への応用研究を行い、GMR素子のセンサ応用として更なる展開の可能性を確信した。

## 2. 研究の目的

上記の背景と経緯から、GMRセンサを針先につけた極細針形状プローブとすることにより、低侵襲性、非破壊をキーワードとした非破壊検査、生体検査分野への展開を構想した。針状磁気センサを生体内の信号源の極近傍または測定対象の中に挿入することにより、高感度に信号原近傍の磁界信号を検出する計測器、また、微細な溝中にプローブを挿入することによりキズ検査をする非破壊検査機器が可能である。この針状センサを計測装置として確立させるため、さらにプローブの駆動機構を付けたプローブを検討した。GMRセンサを針先に組み込んだ極細針形状プローブを製作し、低侵襲性、非破壊をキーワードとした非破壊検査、生体検査分野への展開を目的に具体的には下記の研究項目を実施した。

- (1) 針形状の磁気センサプローブの製作と特性の計測
- (2) 磁歪アクチュエータによるマイクロ駆動機構の研究
- (3) 医療技術ならびに医療計測への応用研究
- (4) 非破壊検査への応用研究

## 3. 研究の方法

- (1) 針形状GMRセンサの特性・機能の向上を目指

した研究開発 (論文③, ⑨)

申請者の研究背景とその結果からの研究進展に基づき、極細針形状の巨大磁気抵抗効果センサプローブの機械的構造、ならびに磁気計測の特性を進化させた一辺  $400\ \mu\text{m}$  角、長さ  $30\ \text{mm}$  のプローブを製作した。

図1は、本研究の目的に合わせて考案されたGMRセンサ素子である。センサはスピンバルブ形GMR素子とし、感度向上ならびにヒステリシス特性の抑制を考慮して  $9 \times 75\ \mu\text{m}$  の短冊を4個直列にしたミアンダ形状の構成を基本とした。センサの感度方向は短冊エレメントに

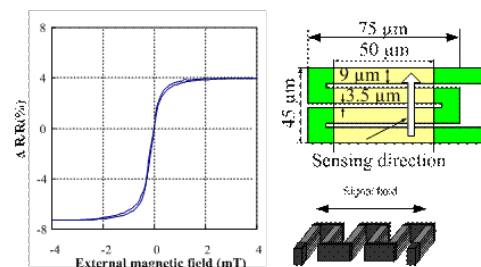


図1 GMRセンサエレメントの構成

対して直行方向とすることが実験的に最適であった。

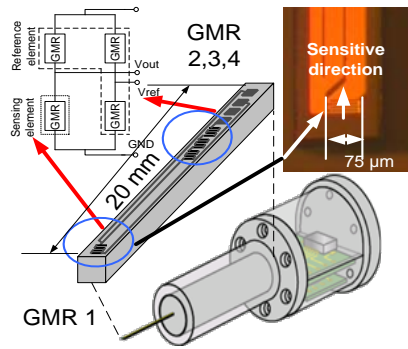
GMRセンサエレメントをファインセラミック針の上に構成したものが極細針形状プローブである。図2(a)は、増幅器等をプローブヘッドに格納できるようにしたプローブ構造である。一方、図2(b)は、全体構成をできるだけ小型、軽量化を目指したものであり全重量  $M = 3.0\ \text{g}$  である。また、針の方向に対して磁界センシング方向を図2(a)では並行方向であり、一方図2(b)では直交方向となっている。センシング方向は、計測する磁界方向と針の挿入状況に合わせて選択する。磁界の計測特性には両者の特性は同じである。

## (2) 超磁歪アクチュエータによる針状プローブのマイクロ駆動機構の研究

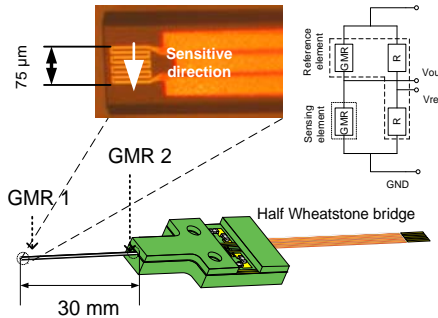
微細な磁気センサには適切な位置にプローブを駆動かつ保持する機構が必須である。この駆動機構に磁歪材 (Galfenol) を用いたマイクロロニアアクチュエータを開発した。このマイクロ駆動機構の針状センサの位置決めに適した簡単構造な構造である。

磁歪素子を用いたロニアアクチュエータは、図3の構造を持つ単純な構成である。摩擦材のロッドを磁歪による伸縮により可動子 (ムーバ) を前後方向に稼働できる。この駆動原理はスムーズインパクトドライブ機構と呼ばれ、図4に示すようにノコギリ波電流を印加することにより、ロッドと可動子の摩擦現象により可動子を前進、後退できる。

磁歪アクチュエータに針状センサを取り付



(a) 針状磁気プローブ(アンプボックス付)



(b) 小形針状磁気プローブ

図2 針状磁気プローブの構成

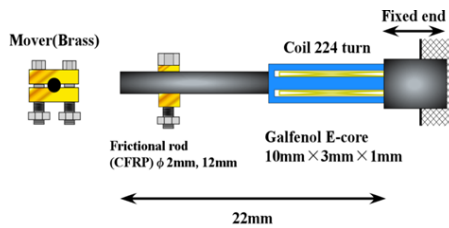


図3 リニア磁歪アクチュエータ

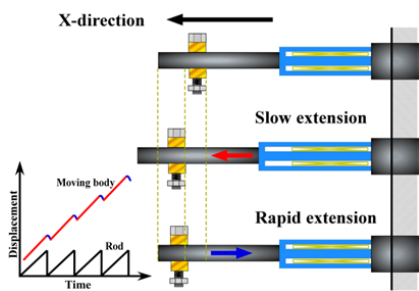


図4 スムーズインパクトドライブによる駆動

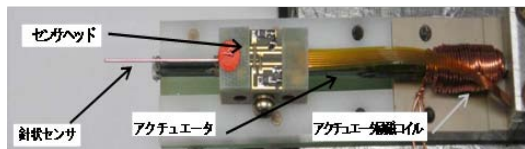


図5 針状センサと磁歪アクチュエータ

けた写真を図5に示す。針状センサの駆動用としてのアクチュエータは、一定な質量の駆動対象であり、かつセンサの位置設定に対して元位置

- 前進 - 位置設定 - (計測) - 後退 - 元位置の単純な動作が可能であること、また磁気測定

の用途からは1-2%以内の精度を目指した。

(3) 医療技術ならびに医療計測への応用研究

医療応用分野では、誘導加温癌温熱療法

の要素技術として確立した針状プローブによる体内での磁性微粒子の濃度の計測ならびに磁気による免疫学的検査法への応用を検討した。

誘導加温癌温熱療法の磁性微粒子の濃度の計測は図6に示すように磁性粒子を含む体積

(たとえば、磁性微粒子を注入した癌組織)内に針状磁気プローブを刺すことにより体積内の磁界を直接計測することで計測が可能である。磁性流体の重量濃度 $D_w$ と均一外部磁界下( $B_0$ )における体積内の磁界( $B_1$ )との関係は理論的に下記の式で与えられる。

$$\delta = \frac{B_1 - B_0}{B_0} = \frac{(1-N)C_d D_w}{\gamma_f} \quad (1)$$

ここで、 $\gamma_f$ 、 $C_d$ は磁性微粒子の比重ならびに実験定数である。実験的には、重量濃度 $D_w$ が0.1~数%の計測には、磁界変化率 $\delta$ は0.001-0.01の計測が必要である。

磁性微粒子を用いた免疫学的検査法は、抗原抗体反応により抗原(細菌やウイルス)に磁性微粒子を結合させ、磁気の交流磁化特性を計測することにより抗原の存在を検出するものである。交流磁化特性において、重要なパラメータは交流磁化過程における磁性微粒子の緩和現象である。緩和過程には、ブラウン緩和ならびにネール緩和があり、これらにより決定される緩和時間 $\tau$ により磁化の遅れ、また磁化損失を生ずる。緩和時間は、図7は、モデル抗原であるポリマービーズに抗原抗体反応で磁性微

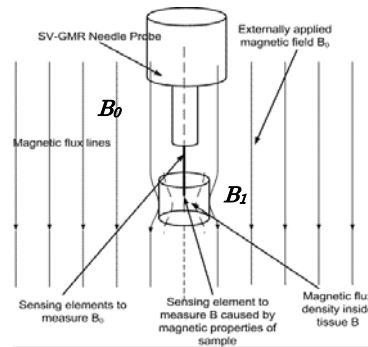


図6 磁性微粒子の濃度の計測系

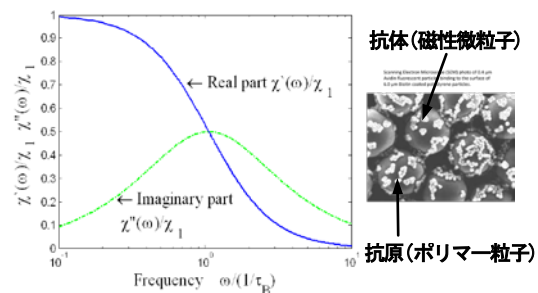


図7 磁気的免疫学的検査法における磁化特性

粒子を結合させた試料の交流磁化特性（複素磁化率 $\chi'$ ,  $\chi''$ ）の特性である。この特性は、抗原の大きさにより依存し、大きな抗原に対しては周波数が低い方に変化する。針状磁気センサは、試料内の磁気を計測することで磁化特性を計測し、抗原の存在や量が計測できる。

(4) 非破壊検査（うず電流探傷）への応用

電磁的非破壊検査への応用では、提案の磁気センサと駆動装置によりリベット溝などの深い狭い内部のうず電流探傷技術で可能にする新しい技術を検討した。図8に示すように提案する渦電流探傷の利点は、検出部を傷に接近させることができ信号の効果的な検出が可能であることである。穴内の探傷原理は、図9に示す。このように、針先に設置したセンサを計測対象に極接近できることにより、プリント基板の配線の小電流を検出することも可能である。

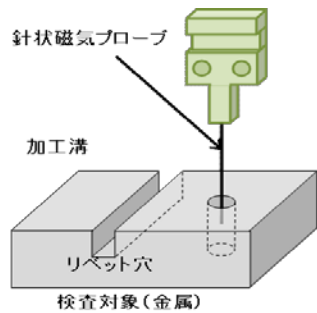


図8 狭空間内(溝、穴)のうず電流探傷システム

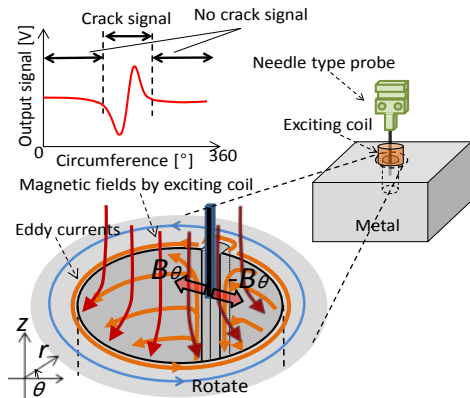


図9 穴内のうず電流探傷の原理

4. 研究成果

(1) 針状GMRセンサの特性向上ならびに構成の検討(論文③, ⑥)

本研究関連の共有特許を持つTDK(株)と共同研究を行い、高感度とアクチュエータでの駆動のため軽量化を達成した。特性においては、高感度化を目指して、旧タイプと比較して $11 \mu\text{V}/\mu\text{T}$ から $260 \mu\text{V}/\mu\text{T}$ の性能向上が実現した。また、免疫学的検査法などにおける周波数特性の測定では、感度ならびに位相特性が平坦であることが必要であり図10に示すような結果を

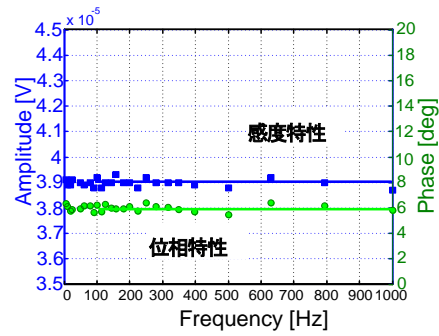


図10 GMRセンサの周波数特性

得た。

(2) 針状プローブのマイクロ駆動機構の検討(論文④)

針状プローブを搭載するリニア駆動の超

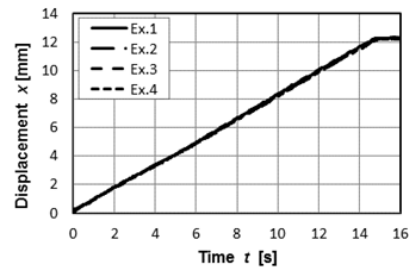


図11 アクチュエータの変位駆動 (周波数  $f=400\text{Hz}$ )

小形の磁歪アクチュエータを製作し、特性を計測している。図11に示すようにスムーズインパクト駆動によるステップ動作を確認した。パルス数に対する位置の精度は、約1.0%以内となった。

(3) 磁気的免疫学的検査法の検討(論文①)

研究では、液層での免疫学的検査法への応用を目指して、プラスチックポリマーを抗原のモデルとし、磁気微粒子の付着による周波数特性を計測した。図12に示すように $1 \mu\text{m}$  -  $10 \mu\text{m}$ のポリマー粒子の違いを検出できた。すなわち、大きなポリマー粒子に対して、周波数特性が周波数の低い方に移動している。

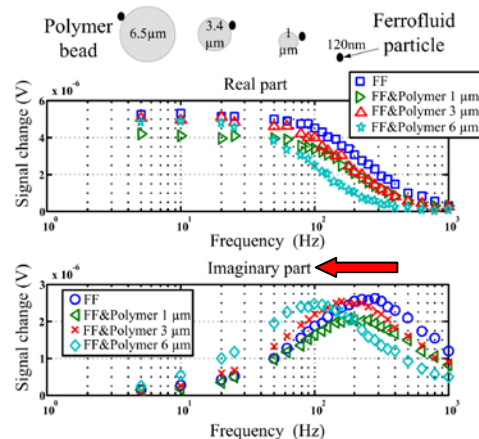


図12 ポリマーのサイズによる磁化率の周波数特性

(4) 金属の狭空間中の非破壊検査(論文③, ⑤)

金属試験体の溝や穴中のキズを検出するための針状非破壊検査プローブを作成し、高感度でmmメータサイズの溝中のキズ検出を可能であることを検証した。検査対象は、図9に示すように直径6 mmの深穴で表面から15 mmに人口傷が配置されている。図13に示すように表面でのセンサの走査では検出できないが内部にセンサを挿入することにより明確な信号が得られた。

この他、電子分野への針形状磁気プローブの応用として、高密度プリント基板上の配線電流の値の計測について行った。100  $\mu\text{m}$  幅の配線の電流の値を他の配線からのクロストークを10 %以内、100  $\mu\text{A}$ -1 mA まで計測が可能であった。(論文③, ⑨)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

- ① 金森周矢, H. ホアン, 上野敏幸, 山田外史, 針形状磁気プローブを用いた狭い空間内の微小キズに対するうず電流探傷, 日本磁気学会論文誌, 査読有, 37, 1, 2013, 8-11.
- ② Tuskada T., Fushida S., Harada S., et al, Low-dose Paclitaxel Modulates Tumor Fibrosis in Gastric Cancer, International Journal of Oncology, 査読有, 42, 4, 2013, 1167-1174.
- ③ Yamada, S., Haraszczuk, R., Kakikawa, M., Hoang, H., Micron Size GMR Magnetic Sensor with Needle Structure, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 査読有, 31A, 2012, 997-1004.
- ④ 上野敏幸, 坂本龍介, 山田外史, 磁歪材料を用いた3軸球面モータの特性評価, 日本AEM学会誌, 査読有, 20, 1, 2012, 181-186.
- ⑤ Haraszczuk, R., Kakikawa, M., Ueno, T., Yamada, S., Nadi, M., Spectroscopic Susceptibility Measurements of Magnetic Markers by SV-GMR Needle Probe, Journal of the Magnetism Society of Japan, 査読有, 35, 2, 2011, 157-162.
- ⑥ Haraszczuk, R., Yamada, S., Kakikawa, M., Gooneratne, C.P., Estimation of Magnetic Properties of Tissue with Magnetic Fluid by SV-GMR Needle Type Probe, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, 19, 3, 2011, 106-109.
- ⑦ Haraszczuk, R., Yamada, S., Kakikawa, M., Ueno, T., Monitoring Minute changes of Magnetic Markers' Susceptibility by SV-GMR Needle-Type Probe, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, 47, 19, 2011, 2584-2597.

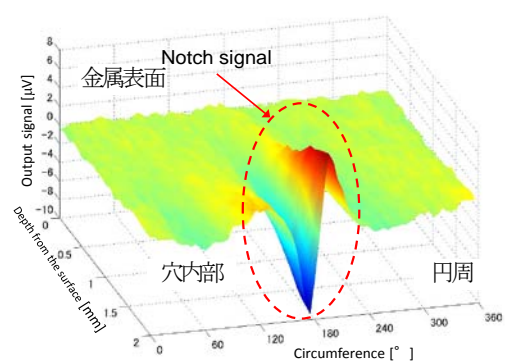


図13 金属穴内のキズ探傷結果

- ⑧ Gooneratne, C.P., Kakikawa, M., Ueno, T., Yamada, S., Measurement of Minute Changes in Magnetic Flux Density by Means of a Novel GMR Needle Probe for Application in Hyperthermia Therapy, Journal of the Magnetism Society of Japan, 査読有, 34, 2, 2010, 119-122.
- ⑨ Hoang, H., Haraszczuk, R., Kakikawa, M., Ueno, T., Yamada, S., High Spatial Resolution Measurement of Low Magnetic Fields by Needle-Type GMR Sensor, Journal of the Magnetism Society of Japan 34, 査読有, 4, 2010, 529-532.

[学会発表] (計19件)

- ① 金森周矢, 山田外史, 上野敏幸, 針状磁気プローブを用いた円筒穴内のうず電流探傷法, 平成25年度電気学会全国大会, 2013年3月22日, 名古屋大学(愛知県).
- ② 堀田恭平, 山田外史, 上野敏幸, 針状磁気プローブによる金属溝内の渦電流探傷, 平成24年度電気学会全国大会, 2013年3月21日, 広島工業大学(広島県).
- ③ Thu Thu Win M., Yamamoto Y., Harada S., et al, Optimizing a liquid culture system for monitoring lifespan by diet manipulations in Caenorhabditis elegans, 日本生化学会大会, 2012年12月16日, 福岡国際会議場(福岡県).
- ④ 辰尾広平, 山田外史, 針状磁気プローブを用いた磁性流体の濃度計測における測定誤差の評価, 平成24年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2012年9月1日, 富山大学(富山県).
- ⑤ Hoang, H., Kakikawa, M., Yamada, S., High Spatial Resolution Non-contact Measurement of Small Current Signal by Needle-Type GMR Probe, Asia Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics 2012, 2012年7月26日, Ho Chi Minh City(Vietnam),
- ⑥ Haraszczuk, R., Yamada, S., Kakikawa, M., Ueno, T., Homogenous magnetic markers immunoassay measurements by Half Bridge SV-GMR Needle Probe, The 56th Magnetism and Magnetic Materials Conference, 2011.11.1, Phoenix (USA).
- ⑦ 山中亮史, 山田外史, 多重励磁によるうず

- 電流探傷法を用いたプリント基板探傷に関する研究, 平成23年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2011年9月17日, 福井大学(福井県).
- ⑧ 堀田恭平, 山田外史, 針状磁気プローブを用いた金属表面及び狭空間の微小傷に対する非破壊検査, 平成23年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2011年9月17日, 福井大学(福井県).
- ⑨ Yamada, S., Haraszczuk, R., Kakikawa, M., Hoang, H., Micron Size GMR Magnetic Sensor with Needle Structure, 2011 Review of Progress in Quantitative NDE, 2011.7.18, Univ. of Vermont(USA).
- ⑩ 細田康彦, 山田外史, 上野敏幸, 磁歪材料を用いたオープンループ型位置決め機構の基礎的検討, 第23回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2011年5月18日, 愛知県産業労働センター(愛知県).
- ⑪ Haraszczuk, R.G., Yamada, S., Ueno, T., Monitoring minute changes of magnetic markers susceptibility by SV-GMR needle, 2011 International Magnetic Conference, 2011.4.26, Taipei(Taiwan).
- ⑫ 山田外史, 細田康彦, 上野敏幸, 磁歪材料を用いた小型微小位置決め機構の特性, 電気学会マグネティックス研究会資, MAG-11-011, 2011年3月23日, 仙台(宮城県).
- ⑬ Haraszczuk R., 柿川真紀子, 上野敏幸, 山田外史, Immunoassay Magnetic Markers Examination by SV-GMR Needle Type Probe, 平成23年度電気学会全国大会, 2011年3月16日(震災のため発表は中止), 大阪大学(大阪府).
- ⑭ Haraszczuk, R., Yamada, S., Kakikawa, M., Ueno, T., Spectroscopy Measurement of Magnetic Fluid by a GMR Needle Probe, 第33回日本磁気学会学術講演会, 2010年9月5日, 筑波大学(茨城県).
- ⑮ Hoang, H., 池畑芳雄, 山田外史, 針状磁気プローブによるプリント基板配線における非接触で電気信号検出に関する研究, 平成22年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2010年9月11日, 福井高専(福井県)..
- ⑯ 井波孝仁, 山中亮史, 山田外史, 池畑芳雄, うず電流探傷技術を用いたプリント基板の種々の方向の配線の探傷試験, 平成22年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2010年9月11日, 福井高専(福井県).
- ⑰ Haraszczuk, R., Yamada, S., Kakikawa, M., Gooneratne, C.P., Estimation of Magnetic Properties of Tissue with Magnetic Fluid by SV-GMR Needle Type Probe, Asia Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics 2010, 2010, 7.29, Kuala Lumpur, (Malaysia).
- ⑱ 山田外史, 磁気センサによる電流プローブとその応用-GMRセンサの応用-, 第18回磁気応用技術シンポジウム, 2010年7月23日, 東京ビックサイト(東京都).
- ⑲ Yamada, S., Gooneratne, C.P., Kakikawa, M., Wakiwaka, H., Low-Invasive Detection of Magnetic Particles inside Human Body, The Fourth Japan-US Symposium on Emerging NDE Capabilities for a Safer World, 2010.6.9, Hawaii(USA)..
- [図書](計3件)
- ① Reig, Candid, et al. (共著, Yamada, S.), Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors, Springer, 2013, 298.
- ② 磁気応用による医療・医用へのシーズ技術調査専門委員会編(山田外史(編集委員長), 共著, 柿川真紀子), 磁気の医療応用研究の動向, 電気学会, 1260号, 2012, 1-39.
- ③ 日本磁気学会編(共著, 山田外史), 磁気イメージングハンドブック, 共立出版, 2010, 321-344.
- [その他]  
ホームページ等  
金沢大学環日本海域環境研究センター生体機能計測研究部門,  
<http://magcap.w3.kanazawa-u.ac.jp>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
山田 外史 (YAMADA SOTOSHI)  
金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授  
研究者番号: 80019786
- (2) 研究分担者  
上野 敏幸 (UENO TOSHIYUKI)  
金沢大学・電子情報学系・准教授  
研究者番号: 30338256  
柿川 真紀子 (KAKIKAWA MAKIKO)  
金沢大学・環日本海域環境研究センター・助教  
研究者番号: 10359713  
原田 真市 (HARADA SHINICHI)  
金沢大学・医学(系)研究科・助教  
研究者番号: 90272955
- (3) 連携研究者  
脇若 弘之 (WAKIWAKA HIROYUKI)  
信州大学・工学部・教授  
研究者番号: 50240461  
田代 晋久 (TASHIRO KUNIHISA)  
信州大学・工学部・准教授  
研究者番号: 50325487