

平成 21 年 5 月 22 日現在

研究種目：若手研究 (A)
 研究期間：2006 ～ 2008
 課題番号：18686027
 研究課題名 (和文) 単一ナノ磁性粒子の超高速スイッチングの直接計測とその制御手法の開発
 研究課題名 (英文) Direct observation of ultra-fast switching behavior of a single nanomagnet and development of a new switching technology.
 研究代表者
 岡本 聡 (OKAMOTO SATOSHI)
 東北大学 多元物質科学研究所・准教授
 研究者番号：10292278

研究成果の概要：本研究では単一ナノ磁性粒子の超高速ならびに高感度な磁気計測技術の開発および、超高速かつ低磁場反転技術の開発を行うことを目的として研究を行った。大振幅高速パルス磁場印加システムならびに単一磁性粒子の残留磁化状態の超高感度逐次計測システムの構築を行い、それを用いて垂直磁気異方性を有する Co/Pt 多層膜の単一ナノ磁性粒子を用いた磁化反転実験を進めた。その結果、単一ナノ磁性体におけるスイッチング過程をナノ秒スケールで実験的に明らかにすることに成功した。またマイクロ波を用いた新規スイッチング技術についての検討を行い、その優位性を確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2007 年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2008 年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
年度			
年度			
総計	21,000,000	6,300,000	27,300,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：磁気記録，高速スイッチング，パルス磁場，微細加工，パターン媒体，マイクロ波アシスト記録

1. 研究開始当初の背景

ハードディスクドライブ (HDD) は、大容量ストレージデバイスの主力として、年々高まる市場のニーズに応えるべく大幅な記録密度の増大を達成し続けている。この記録密度の増大は、主に記録媒体中を構成する磁性微粒子のサイズを小さくすると同時に、1 ビット中に占める磁性粒子の数を少なくすることで成し遂げられている。例えば、現行の

約5倍である1テラビット/平方インチ以上の超高密度状態を想定すると、僅か数個の粒子で1ビットが構成されることになる。このような状況では、個々の磁性粒子のスイッチング挙動が媒体全体の記録特性を決定付けることになる。一方、パターンドメディアや Magnetic-RAM (以下, MRAM) などの新規磁気デバイスでは、微細加工を用いて作製した単一磁性体そのものが記録セルをして用

いられることになる。ナノ領域においては、ナノ構造に起因した特異な磁化状態が現れる可能性も指摘されているが、従来の多数粒子による平均情報の検出では、このような状態を評価することは困難であった。従って、単一磁性体のスイッチング挙動を直接評価することが不可欠との考えの下、異常 Hall 効果による単一ナノ粒子のスイッチング検出を進めてきた。本手法は非常に簡便な素子構成ながら、極めて高い検出感度を有しており、これまでに最小 60 ナノメートル径の単一ナノ粒子のスイッチング検出が実現できている。

一方、実際の磁気記録や MRAM などにおいては、高密度化を目的とした構成粒子サイズの低減だけでなく、将来的にはギガビット/秒にも達する高速データ転送も同時に求められており、そのためにはナノ秒オーダーでのスイッチングが必要となる。この領域はスピンのラーマー周波数に近い為、磁性粒子の反転に要する磁場が急激に増大することが知られており、高速スイッチング実現の大きな障害となっている。この問題の解決のため、プリセッションスイッチング等の新規スイッチング手法も提案されているが、特殊な条件を除いて、実用的な材料での実験は皆無であった。これらの実験が困難であった原因は、ナノ秒スケールにおけるスイッチング過程を評価・計測する技術自体が無かったことに起因する。そのため、より基本的な課題であるナノ秒スケールにおけるスイッチング過程の挙動すら明らかになっていないのが現状であった。

2. 研究の目的

本研究では、これまでに我々が進めてきた単一ナノ磁性体の超高感度計測技術をさらに発展させ、さらに独自開発した高圧パルス発生器を巧みに組み合わせることにより、単一ナノ磁性粒子の超高速ならびに高感度な磁気計測技術の開発を行った。さらに本結果をもとにナノ磁性体のスイッチング過程を時間スケールで詳細に解明することができた。また、具体的な実験には至らなかったが、マイクロ波を用いた新規スイッチング手法の提案ならびにその有効な実施方法についての理論計算を行った。

3. 研究の方法

(1) 単一ナノ磁性体のナノ秒スケールにおけるスイッチング挙動

異常 Hall 効果を用いた単一ナノ磁性体の高感度計測手法を図 1 に示す。微細加工によってパターンニングされたナノ磁性体を十字型の金属電極膜(主に Pt)を被せた非常に簡単な構造であるが、 10^{-14} emu/cc 以下と実に SQUID の 10^7 倍の感度を実現している。この素

子を基本構成として、ナノ秒スケールのスイッチング過程の計測を目的として、大振幅パルス磁場の印加を試みた。図 2 に示すようなマイクロコイルを素子に組みこんだ場合、本研究で対象とするメモリ材料のスイッチングに必要な数 kOe 程度のパルス磁場を発生するためには、簡単な試算により数 100 V の高

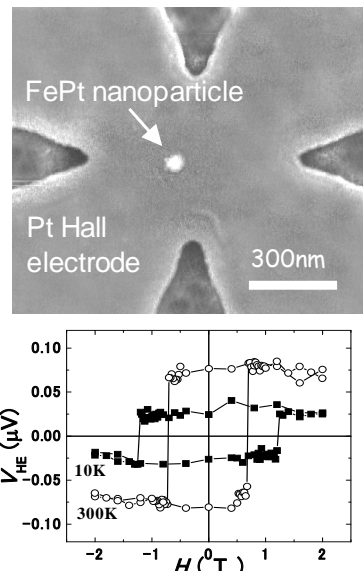


図 1 異常ホール効果を用いた単一ナノ磁性体計測素子とその磁化曲線の一例

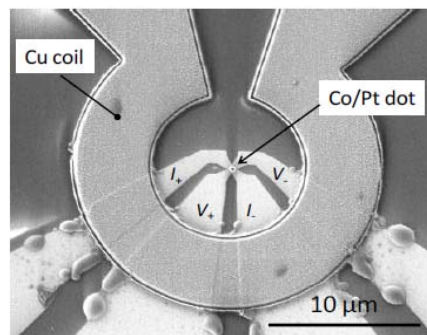


図 2 マイクロコイルと組み合わせた異常ホール効果を用いた単一ナノ磁性体計測素子の SEM 像

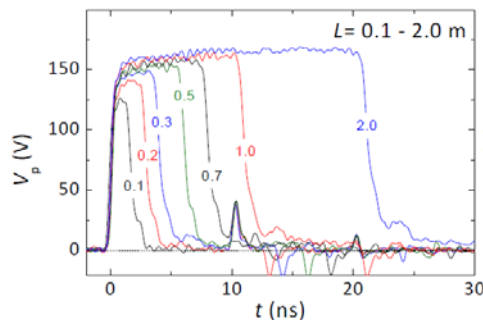


図 3 自作パルス発生器の出力

電圧パルスが必要となることが分かる。しかし、このような高電圧で、かつナノ秒オーダーのパルスを発生可能な市販機器は無い。我々は、過去の文献調査から、高周波ケーブルをキャパシターとして用いる手法に着目し、そのシステムを自作した。各部品の最適化を進めた結果、図3に示すように最大振幅170 V、立上がり0.4 ns以下の大振幅パルス発生器の作製に成功した。このパルス長は充電ケーブルの長さで調整可能であり、サブナノ秒から数10 nsまで変化可能である。このパルスを図2のマイクロコイルに印加することで、最大2.7 kOeのパルス磁場生成が可能となった。本手法を用いて、様々なパルス条件下でのスイッチング実験を行い、そのナノ秒スケールにおける挙動の解明を行った。

(2) マイクロ波を用いた新規スイッチング手法の開発

既に述べたように現状の磁気記録は原理的な記録限界に近づきつつあり、そのために様々な新規記録手法が提案されている。我々はマイクロ波を用いた記録手法を考案し、現時点では、実験には至っていないが、シミュレーションにより、その原理ならびに有効な実施手法について検討を行った。

4. 研究成果

(1) 単一ナノ磁性体のナノ秒スケールにおけるスイッチング挙動

図4にCo/Pt多層膜ナノドットを用いて計測した異常ホール曲線を示す。静磁場下での測定(図4上図)では非常に角型性がよく、反転核生成型と呼ばれるスイッチング挙動を取っていることが分かる。これにパルス磁場を印加しながら測定した結果が図4の下図である。明らかに静磁場より低い磁場でスイッチングが起こっており、パルス磁場によるスイッチングが明瞭に確認される。このときに、パルス長に対するスイッチングの様子を詳細に調べた結果を図5に示す。外部磁場ゼロの下で、パルス振幅を徐々に変化させた場合の異常ホール信号強度をプロットしてある。パルス長が10.8 nsの場合は、1回のパルス磁場印加によりほぼ飽和に達しているが、パルス長が1.8 nsの場合には、未飽和の状態となっている。このことはナノ磁性体において、パルス磁場による反転核の生成ならびに逆磁区への成長、さらに逆磁区の伝搬というプロセスにてスイッチングが進行していることを明瞭に示すものである。様々なパルス長に対する実験とその解析の結果、反転核生成に必要な磁場はナノ秒スケールにおいて1.3 kOeであり、生成時間は1.8 ns以下であることが明らかとなった。一方、磁壁伝搬はパルス磁場振幅に大きく依存するが、概ね数10 msのスピードで進行していることを明らか

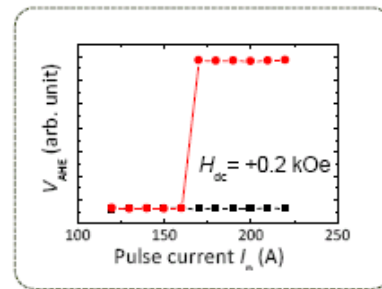
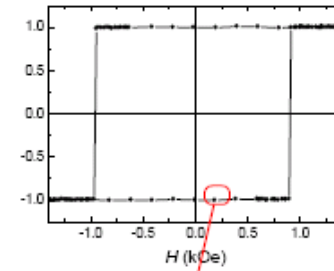


図4 直径300 nmの単一Co/Pt多層膜ドットの磁化曲線(上段). パルス印加によるスイッチングの確認(下段)

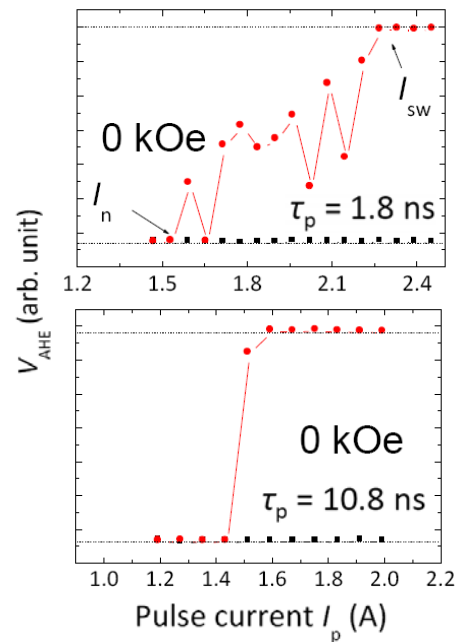


図5 ゼロ磁場下におけるパルス振幅に対するスイッチング挙動の変化. パルス長1.8 ns(上段), 10.8 ns(下段).

かにした。

(2) マイクロ波を用いた新規スイッチング手法の開発

ランダウーリフシッツーギルバート方程式に基づき、直流磁場とマイクロ波磁場を同

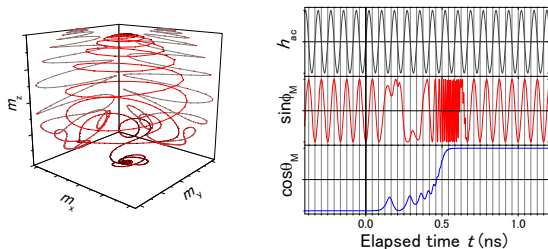


図6 異方性磁界 20 kOe のシングルスピ
ン粒子を仮定し、1 kOe のマイクロ波磁場振
幅、14 kOe の静磁場下でのスイッチング挙
動。ゼロ磁場下におけるパルス振幅に対す
るスイッチング挙動の変化。スピンの歳差
運動軌跡 (左図) ならびに各成分の時間変
化 (右図)。

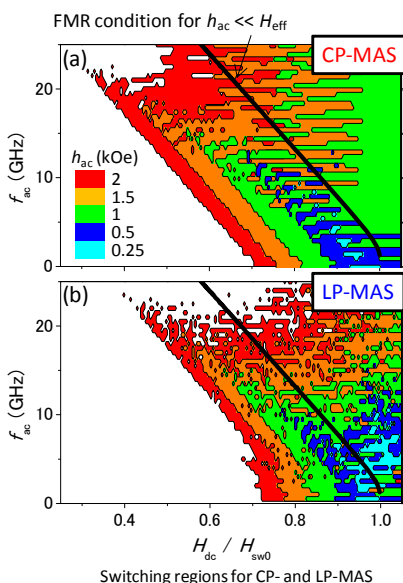


図7 異方性磁界 20 kOe のシングルスピ
ン粒子を仮定し、静磁場ならびにマイクロ波
周波数を関数とするスイッチング条件のマ
ッピング。各色はスケールパー記載のマイ
クロ波磁場振幅に対応。円偏光 (上図) なら
びに直線偏光 (下図)。

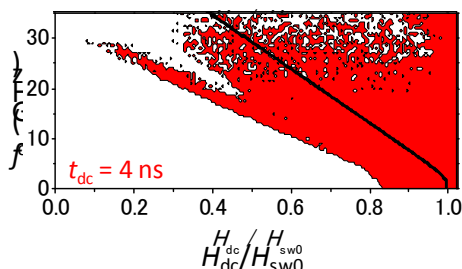


図8 適当な変調振幅ならびに変調周期
をとった場合のスイッチング領域のマ
ッピング。

時に印加した場合のスイッチング挙動につ

いて計算を行った。図6にマイクロ波磁場振
幅 1 kOe を磁化困難軸方向に印加した場合の
スイッチング過程の計算結果を示す。大きな
歳差運動が励起された結果、スイッチングに
至っている様子が確認できる。図7には静磁
場とマイクロ波周波数をそれぞれ横軸、縦軸
にとった場合のスイッチング条件のマッピ
ング結果を示す。円偏光マイクロ波と直線偏
光マイクロ波の比較も併せて行っている。静
磁場のみの場合に比べて大幅にスイッチ
ング磁場が減少している様子が分かり、特にマ
イクロ波磁場が 1 kOe 以上で顕著である。円
偏光と直線偏光の場合を比較すると、円偏光
の方がスイッチング確率も高く、またスイッ
チング領域も広がっている。つまりスイッ
チングの観点だけでみれば、円偏光を用いる
方が有利である。一方、本技術のハードディ
スクへの応用を考えた場合、円偏光磁場を用
いた場合は、磁化の向きに応じて用いる円偏
光の極性を切り替えなければならない。マイ
クロ波磁場の発生手法にも依るが、ハードディ
スクの記録周波数、つまりギガヘルツに近
い時間スケールで極性切換えを行うのは技
術的に極めて困難と予想される。

次に、本技術のスイッチング効率を更に高
めることを可能とすることを目的として、マ
イクロ波の周波数変調方式について検討を
行った。変調振幅ならびに変調周期を適当に
調整すると、スイッチング磁場の大幅な低減
を実現できることを確認した。図8にその一
例を示す。

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 11 件)

- ① N. Kikuchi, S. Okamoto, and O. Kitakami, "Generation of nanosecond magnetic pulse field for switching experiments on a single Co/Pt nanodot, J. Appl. Phys. **105**, pp. 07D506-1-3 (2009), 査読有。
- ② A. Ito, N. Kikuchi, S. Okamoto, O. Kitakami, "Magnetization switching experiments on sub-micron Co/Pt multilayer dot using a pulse field generator with nanoseconds duration", IEEE Trans. Magn. **44**, pp. 3446-3449 (2008), 査読有。
- ③ S. Okamoto, N. Kikuchi, T. Kato, O. Kitakami, K. Mitsuzuka, T. Shimatsu, H. Muraoka, H. Aoi, J. C. Lodder, "Magnetization behavior of nanomagnets for patterned media application" J. Magn. Mater.

- 320, pp. 2874-2879 (2008), 査読有.
- ④ T. Shimatsu, N. Asakura, Y. Inaba, K. Kudo, A. Sato, H. Muraoka, H. Aoi, S. Okamoto, O. Kitakami, "Thermal stability and switching field of hard/soft-stacked perpendicular media", *J. Magn. Magn. Mater.* **320**, pp. 3088-3091 (2008), 査読有.
- ⑤ S. Okamoto, N. Kikuchi, and O. Kitakami, "Frequency modulation effect on microwave assisted magnetization switching", *Appl. Phys. Lett.* **93**, pp. 142501-1-3, (2008), 査読有.
- ⑥ S. Okamoto, N. Kikuchi, and O. Kitakami, "Magnetization switching behavior with microwave assistance", *Appl. Phys. Lett.* **93**, pp. 102506-1-3, (2008), 査読有.
- ⑦ N. Kikuchi, S. Okamoto, and O. Kitakami, "The critical size between single domain and multidomain in L1₀-FePt particles, *J. Appl. Phys.* **103**, pp. 07D511-1-3, (2008), 査読有.
- ⑧ N. Kikuchi, T. Kato, S. Okamoto, O. Kitakami, N. Tezuka, and S. Sugimoto, "Magnetization reversal process and bistability of Co/Pt multilayer dot", *J. Appl. Phys.* **103**, pp. 07C510-1-3, (2008), 査読有.
- ⑨ S. Okamoto, T. Kato, N. Kikuchi, O. Kitakami, N. Tezuka, and S. Sugimoto, "Energy barrier and reversal mechanism in Co/Pt multilayer nanodot", *J. Appl. Phys.* **103**, pp. 07C501-1-3, (2008), 査読有.
- ⑩ S. Okamoto, O. Kitakami, "Epitaxially grown L1₀-FePt/(C, SiO₂, and Al₂O₃) granular films", *J. Magn. Magn. Mater.* **310**, pp. 2367-2368, (2007), 査読有.
- ⑪ S. Okamoto, O. Kitakami, and Y. Shimada, "Additive effect of ALN and MgO on FePt nanoparticle assembly", *Materials Trans.* **47**, pp. 43-46, (2006), 査読有.

[学会発表] (計 19 件)

- ① N. Kikuchi, S. Okamoto, O. Kitakami, "Generation of nanosecond magnetic pulse field for switching experiments on a single Co/Pt nanodot", *53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2008)*, America, Austin, (2008.11.10).
- ② S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami "Frequency modulation effect on microwave assisted magnetization

switching", *53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2008)*, America, Austin, (2008.11.10).

- ③ H. Sato, T. Shimatsu, H. Kataoka, H. Aoi, O. Kitakami, S. Okamoto, "Fabrication of L1₁ type (Co-Ni)-Pt ordered alloy films by sputter deposition for bit-patterned media, *53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2008)*, America, Austin, (2008.11.10).
- ④ O. Kitakami, S. Okamoto, N. Kikuchi, T. Shimatsu, K. Mitsuzuka, H. Aoi, "Magnetic behavior of single nanostructured magnet", *International Conference on Advanced Structural and Functional Materials Design 2008*, Osaka, (2008.11.10)
- ⑤ O. Kitakami, S. Okamoto, N. Kikuchi, T. Shimatsu, H. Aoi, "Study on nanostructured magnets for bit patterned media", *International Disk Forum 2008*, Japan, Tokyo, (2008.7.22).
- ⑥ S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami "Microwave assisted magnetization reversal and its thermal activation", *International Magnetism Conference*, Spain, Madrid, (2008.5.4).
- ⑦ N. Kikuchi, A. Ito, S. Okamoto, O. Kitakami, "Magnetization switching experiments on submicron Co/Pt multilayer dot with pulse field generator with nanosecond duration", *International Magnetism Conference*, Spain, Madrid, (2008.5.4).
- ⑧ N. Kikuchi, S. Okamoto, O. Kitakami "The boundary between single and multi-domain for L1₀-FePt nanoparticles", *52nd MMM Conference*, USA, Tampa, (2007.11.7).
- ⑨ N. Kikuchi, T. Kato, S. Okamoto, O. Kitakami, N. Tezuka, S. Sugimoto, "Magnetization reversal process and single domain stability of Co/Pt multilayer dot", *52nd MMM Conference*, USA, Tampa, (2007.11.7).
- ⑩ T. Shimatsu, A. Sato, N. Asakura, O. Kitakami, S. Okamoto, H. Muraoka, H. Aoi, "Magnetic properties of Hard/Soft stacked perpendicular media with various soft layer thickness", *52nd MMM Conference*, USA, Tampa, (2007.11.7).
- ⑪ H. Sato, T. Shimatsu, Y. Okazaki, O. Kitakami, S. Okamoto, H. Muraoka, H.

Aoi, "Fabrication of L1₁ type Co-Pt ordered alloy films by sputter deposition, *52nd MMM Conference*, USA, Tampa, (2007.11.7).

- ⑫ S. Okamoto, T. Kato, N. Kikuchi, O. Kitakami, N. Tezuka, S. Sugimoto, "Energy barrier and reversal mechanism in Co/Pt multilayer nanodot", *52nd MMM Conference*, USA, Tampa, (2007.11.7)
- ⑬ S. Okamoto, A. Ito, N. Kikuchi, O. Kitakami, "Magnetization reversal of Co/Pt nanodot by applying pulse field", *8th Perpendicular Magnetic Recording Conference*, Japan, Tokyo, (2007.10.15).
- ⑭ N. Kikuchi, S. Okamoto, T. Kato, O. Kitakami, "Magnetization behavior and reversal process of Co/Pt multilayer nanodot", *8th Perpendicular Magnetic Recording Conference*, Japan, Tokyo, (2007.10.15)
- ⑮ S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, and T. Shimatsu, "Magnetization behavior of nanomagnets for patterned media application", *8th Perpendicular Magnetic Recording Conference*, Japan, Tokyo, (2007.10.15).
- ⑯ S. Okamoto, and O. Kitakami, "Epitaxially grown L1₀-FePt/ (C, SiO₂, and Al₂O₃) granular films", *ICM 2006*, Japan, Kyoto, (2006.8.20).
- ⑰ N. Kikuchi, S. Okamoto, O. Kitakami, "Magnetic properties of assembled nanoparticle films of L1₀-FePt", *ICM 2006*, Japan, Kyoto, (2006.8.20).
- ⑱ Y. K. Takahashi, K. Hono, S. Okamoto, O. Kitakami, "Interfacially Disordered FePt hard/soft Stacked Structures", *The Intermag 2006 Conference*, USA, San Diego, (2006.5.8)
- ⑲ T. Shimatsu, Y. Okazaki, H. Sato, O. Kitakami, S. Okamoto, H. Aoi, H. Muraoka, Y. Nakamura, "Large uniaxial Magnetic Anisotropy in Co_{100-x}Pt_x/Ru Disordered Perpendicular Films", *The Intermag 2006 Conference*, USA, San Diego, (2006.5.8).

○出願状況 (計 4 件)

- ① 名称：磁性薄膜とその作製方法および同薄膜を用いたデバイス

発明者：島津 武仁, 佐藤英夫, 北上 修、岡本 聡、青井 基, 片岡弘康
権利者：東北大学, 富士電機
種類：特許
番号：特願 2008-310965
出願年月日：2008 年 12 月 5 日
国内外の別：国内

- ② 名称：磁性薄膜とその作製方法および同薄膜を用いたデバイス
発明者：島津 武仁, 佐藤英夫, 北上 修、岡本 聡、青井 基, 片岡弘康
権利者：東北大学, 富士電機
種類：特許
番号：特願 2008-193156
出願年月日：2008 年 7 月 28 日
国内外の別：国内
- ③ 名称：磁気記録方法
発明者：岡本 聡、北上 修、菊池 伸明、島津 武仁, 青井 基
権利者：東北大学
種類：特許
番号：特願 2008-159822
出願年月日：2008 年 6 月 19 日
国内外の別：国内

- ④ 名称：磁気記録方法
発明者：岡本 聡、北上 修、菊池 伸明、島津 武仁
権利者：東北大学
種類：特許
番号：特願 2007-247358
出願年月日：2007 年 9 月 25 日
国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

<http://nanomagnet.tagen.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 聡 (OKAMOTO SATOSHI)

東北大学・多元物質科学研究所・准教授
研究者番号：10292278

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

北上 修 (KITAKAMI OSAMU)

東北大学・多元物質科学研究所・教授
研究者番号：70250834

菊池 伸明 (KIKUCHI NOBUAKI)

東北大学・多元物質科学研究所・助教
研究者番号：80436170