

科学研究費補助金研究成果報告書

平成24年 6月 9日現在

機関番号：11501
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560611
 研究課題名（和文） 高周波共鳴を利用した高速記録磁気メモリーのためのスピンドイナミクス
 の研究
 研究課題名（英文） Spin dynamics investigation of magnetic memory device materials
 by ferromagnetic resonance analysis
 研究代表者
 稲葉 信幸（INABA NOBUYUKI）
 山形大学・大学院理工学研究科・教授
 研究者番号：50396587

研究成果の概要（和文）：

磁性材料の磁化反転速度と密接に関係がある緩和定数（ダンピング定数 α ）を知るために、各種磁性材料の単結晶薄膜を作成し、強磁性共鳴法を用いて α の測定を行った。hcp 結晶構造のCo、Co合金ではc軸方向で α が最小となる結晶方向依存性を示したのに対し、fcc 結晶構造のCo、Ni-Fe などでは α は結晶方向に依存せず一定値を示した。磁性層間相互作用の試料では相互作用の増加とともに α が増大した。

研究成果の概要（英文）：

We investigated damping constants α of Co, Ni, Fe, and these based alloy single crystal thin films by employing ferromagnetic resonance analysis. α of Co and Co-based alloy specimens with hcp crystal structure had the minimum value with applying the external field parallel to c axis of the specimen. The α values of Co and Ni-Fe specimens with fcc crystal structure had constant values, and did not depend on the crystal direction of the specimens.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・金属物性

キーワード：ダンピング定数、強磁性共鳴、磁化反転速度、磁気記録、単結晶薄膜

1. 研究開始当初の背景

磁気メモリ（ハードディスクなど）では、大容量化・小型化のニーズを背景に記録密度の高密度化が急速に進められており、数年後には現状よりも1桁大きい1平方インチあたり1テラビット(1Tbit/inch²=1000Gbit/inch²)の記録密度に達すると推定されている。このような多量のデータを記録・保存するためには、

高密度記録化とともに記録再生速度の高速化が重要な課題となっている。

現状の垂直磁気記録は、信号に合わせて磁気ヘッド（一種の電磁石）の励磁方向を変化させ、ディスク上の磁気記録膜の磁化方向（N極とS極の方向）を反転させてビットを書き込む磁界記録である。高速記録を実現するためには、信号周波数に追従して磁化方向を反

転させる必要があり、下記の記録速度を決める主因について、磁化反転現象のダイナミクスを知ることが重要である。

磁性体の磁化反転現象は、磁気モーメントが歳差運動を行いながら、反転する現象である。この速度を決定しているのが、ダンピング定数 α である。 α が小さいほど、歳差運動をしながら徐々に反転を起こすこととなり、時間を要することとなる。このダンピング定数を測定すれば、磁化反転の状況を知ることが可能となる。

ダンピング定数測定法として、強磁性共鳴法(FMR)がある。この測定方法は、測定対象とする磁性薄膜の FMR 吸収曲線を測定し、吸収ピークの半値幅から α を求めることが可能である。

2. 研究の目的

ハードディスクの記録速度を決める要因として、

- ・ 記録膜の磁化反転速度
- ・ 記録用磁気ヘッドの励磁方向を変える速さ(すなわち、ヘッドコアの磁化反転速度)
- ・ 補助磁性層を持つ記録膜の磁化反転速度
- ・ 読み出し用巨大磁気抵抗効果ヘッドの記録ビットからの磁場応答特性

などがある。このうち、前者の2項目は磁性材料の固有のダンピング定数が密接に関係しており、後者の2項目については磁気相互作用下における磁化反転現象を調べる必要がある。FMR 吸収曲線から α を求める方法では、試料薄膜の結晶配向分散、結晶性、結晶粒界、組成の不均一製などの外的要因によっても FMR 吸収ピークの半値幅が増加することから、物質固有のダンピング定数を求めるためには単結晶薄膜試料を用いる必要がある。

本研究では、単結晶薄膜試料を作成し、強磁性共鳴測定を行うことにより、結晶構造および組成の観点から物質固有のダンピング定数を求める。また、磁性膜間に相互作用が働く試料を作成し、相互作用とダンピング定数の関係を調べる。

3. 研究の方法

ヘテロエピタキシャル成長を利用して、MgO、GaAs 単結晶基板上に RF マグネトロンスパッタリング法などの成膜法を用いて単結晶薄膜試料を作成した。試料の組成は、ベースとなる組成のターゲット上に置く添加元素チップの数、配置で制御した。作成した膜の組成はエネルギー分散 X 線分光法で、結晶配向は X 線回折法を用いて決定した。

作成した試料の静磁気特性は、試料振動型磁束計を用いて評価した。各試料の動的磁気特性は、35GHz 帯(Q-バンド)のマイクロ波を使用した強磁性共鳴装置を用い、印加磁

界角度を変化させて FMR 吸収曲線の測定を行った。

4. 研究成果

(1) Co, Ni, Fe のダンピング定数

代表的な強磁性金属である Fe, Co, Ni について、単結晶薄膜を作成し、結晶構造の観点からダンピング定数を調べた。

Co は六方稠密構造(hcp)あるいは面心立方格子(fcc)結晶構造が安定相であり、体心立方格子(bcc)結晶構造が準安定相である。

hcp-Co は c 軸方向を磁化容易軸とする一軸結晶磁気異方性を有していることから、反磁場の影響を抑えて FMR 測定を行うためには、c 軸を膜面内に配向させた単結晶薄膜を作成する必要がある。そこで、MgO(110)基板上に Cr 下地膜を介して Co をヘテロエピタキシャル成長させることにより、

MgO(110)//Cr(211)//Co(10.0)

の配向関係をもち、MgO[001]//Co[0001]のように Co の c 軸が膜面内方向に配向した単結晶試料を作成した。図1に示すように、磁化容易軸方向と磁化困難軸方向の磁化曲線を示す。磁化容易軸方向ではほぼ角形比1の磁化曲線を示し、飽和磁化 M_s は $M_s=1400$ emu/cm³であった。一方、磁化困難軸方向の磁化曲線では9.5 kOe程度の飽和磁場を必要としており、結晶磁気異方性は $K_{11}=3.7 \times 10^6$ erg/cm³、 $K_{12}=1.7 \times 10^6$ erg/cm³と見積もられた。

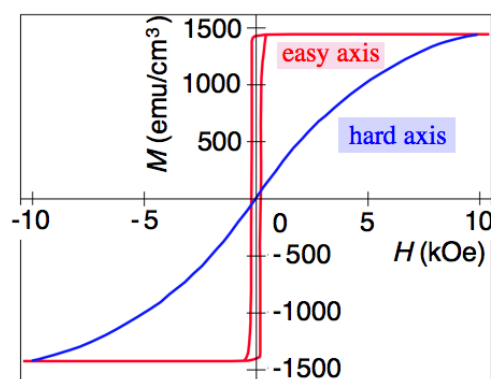


図1 hcp-Co 単結晶薄膜の磁化曲線

この試料の膜面内方向で、印加磁界方向を変化させて FMR 測定を実施したところ、各印加方向で共鳴吸収曲線が観察された。共鳴磁場 H_r および共鳴曲線の線幅 ΔH と印加磁界角度との関係を図2に示す。 H_r は磁化容易軸方向($\phi=0, 180$ deg)近傍では $H_r \sim 4$ kOeの最小値を、磁化困難軸方向($\phi=90, 270$ deg)で $H_r \sim 13$ kOeの最大値をとる2回対称の変化を示した。また、 ΔH も H_r と同様に、磁化容易軸近傍で $\Delta H \sim 600$ Oeの最小値を、磁化困難軸方向で $\Delta H \sim 1200$ Oeの最大値を示す2回対称の角度依存性を示した。各印加磁場方向において飽和磁場に比べて共鳴磁場が大きいことか

ら $\alpha = \gamma \Delta H / 4\pi f$ の関係式を用いてダンピング定数 α を見積もると、磁化容易軸方向で $\alpha \sim 0.03$ 、磁化困難軸方向で $\alpha \sim 0.09$ を示し、磁化容易軸方向である c 軸方向に比べて磁化困難軸方向である c 面内方向では α が 3 倍に増大することがわかった。hcp 結晶構造を有する試料の場合、 c 軸方向で α を最小とする結晶方向依存性があることを示唆している。

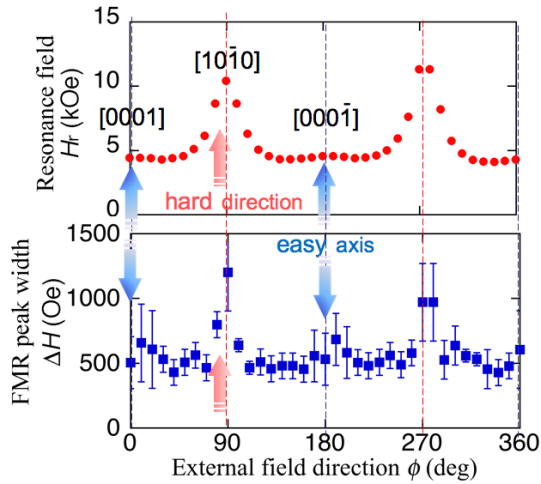


図2 hcp-Co 単結晶薄膜の FMR 共鳴磁場 H_r と共鳴線幅 ΔH の印加磁場角度依存性

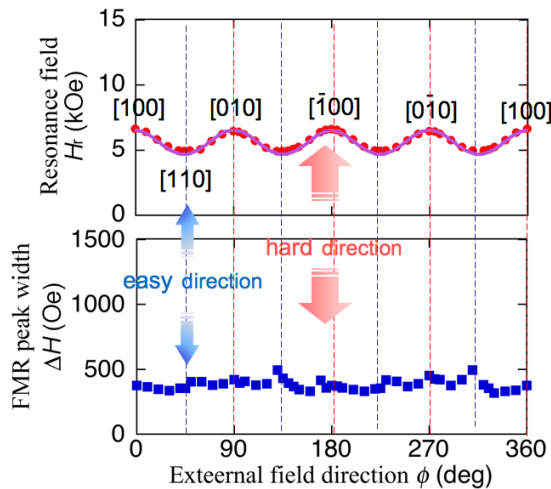


図3 fcc-Co 単結晶薄膜の FMR 共鳴磁場 H_r と共鳴線幅 ΔH の印加磁場角度依存性

MgO(001) 単結晶基板上に Co 薄膜をヘテロエピタキシャル成長させることにより、

MgO(001) [100]//Co(001) [100] の配向関係で fcc-Co(001) 単結晶薄膜を作成した。膜面内で印加磁場方向を変化させ FMR 測定を行ったところ、図3に示すように、 H_r は、 $\langle 110 \rangle$ 軸方向で最小値を、 $\langle 100 \rangle$ 軸方向で最大値をとり、 $\langle 110 \rangle$ 軸を磁化容易軸、 $\langle 100 \rangle$ 軸を磁化困難方向とする 4 回対称の変化を示した。これに対して、 ΔH は角度によらずほ

ぼ一定値 (400 Oe) を示し、ダンピング定数は $a \sim 0.03$ と見積もられた。この結果は、 α は結晶方向に依存しないことを示唆している。fcc 結晶構造をもつ代表的な強磁性体である Ni(001) 単結晶薄膜についても、同様の実験を行ったところ、 α は印加磁場方向に依存せず一定の値を示した。fcc 結晶構造を持つ強磁性体では、 α が結晶方向に依存せず一定値をとると考えられる。

GaAs(110) 単結晶基板上に Co 薄膜をヘテロエピタキシャル成長させることにより、

GaAs(110) [001]//Co(110) [001] の配向関係で bcc-Co(110) 単結晶薄膜を準備した。膜面内での磁化曲線測定から、bcc-Co は $\langle 001 \rangle$ 軸方向が磁化容易軸であり、 $\langle 111 \rangle$ 軸方向が磁化困難軸であった。膜面内で印加磁場方向を変化させ FMR 測定を行ったところ、図4に示すように、 H_r は磁化容易軸である $\langle 001 \rangle$ 軸方向で最小値を、磁化困難軸である $\langle 111 \rangle$ 軸方向で最大値をとる 2 回対称の変化を示した。 ΔH も H_r と同様に、 $\langle 001 \rangle$ 軸方向で最小値を、 $\langle 111 \rangle$ 軸方向で最大値をとる 2 回対称の変化を示し、ダンピング定数は 0.03 ~ 0.1 の範囲で変化した。一方、bcc 結晶構造を持つ代表的な強磁性体である Fe では、 a が結晶方向に依存せず一定値を示し、bcc-Co と異なる傾向を示した。

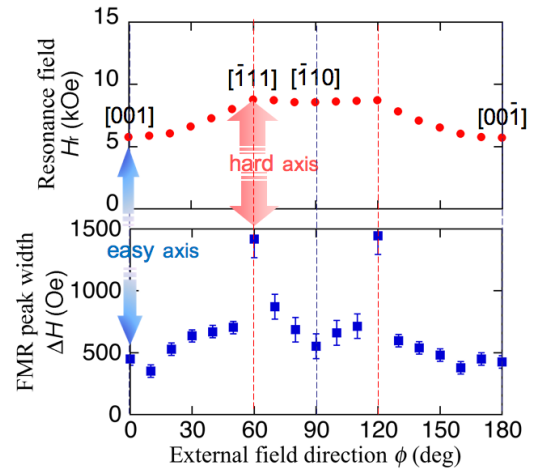


図4 bcc-Co 単結晶薄膜の FMR 共鳴磁場 H_r と共鳴線幅 ΔH の印加磁場角度依存性

(2) 合金のダンピング定数

デバイスでは、単体の強磁性金属を用いるよりも、添加元素により合金として用いることが多いことから、強磁性合金金属の単結晶薄膜試料を準備し、ダンピング定数の測定を行った。

ハードディスク用記録膜材料として用いられる hcp 結晶構造の Co-Cr-Pt 合金について、(1)に記載した hcp-Co 単結晶薄膜試料と同様に、MgO(110) 単結晶基板上に Cr 合金薄

膜を介して $\text{Co}_{73}\text{Cr}_{15}\text{Pt}_{12}$ 、 $\text{Co}_{68}\text{Cr}_{20}\text{Pt}_{12}$ 薄膜をヘテロエピタキシャル成長させた hcp(10.0) 配向の Co-Cr-Pt 単結晶薄膜試料を準備した。磁化曲線の測定から、各試料とも c 軸方向が磁化容易軸とする一軸磁気異方性を示した。膜面内で FMR 測定を行ったところ、Co 単結晶薄膜試料の場合と同様に、Co-Cr-Pt 単結晶試料でも c 軸方向で ΔH が最小をとり、c 面内方向で最大値をとる 2 回対称の印加磁場角度依存性を示した。また、 $\text{Co}_{73}\text{Cr}_{15}\text{Pt}_{12}$ に比べて $\text{Co}_{68}\text{Cr}_{20}\text{Pt}_{12}$ の ΔH は 10% ほど大き値をとり、Cr 添加量が増加したことにより ΔH が増大したと考えられる。この結果は、Cr 添加量を増やすことにより α が増加することを示唆している。

Fe-Co 合金は、Fe と Co の組成比を変化させると Fe 単体よりも大きな磁化をもつ材料が実現できることから、磁気デバイスで頻繁に活用されている。そこで、組成の異なる Fe-Co 単結晶薄膜を準備し、組成の観点から結晶方向に対する α の変化を調べた。bcc 結晶構造を有する $\text{Fe}_x\text{Co}_{100-x}$ ($x > 50$) について、

$\text{MgO}(001) [110] // \text{Fe-Co}(001) [100]$ の配向関係を利用して、 $\text{MgO}(001)$ 単結晶基板上に RF マグネトロンスパッタリング法を用いてヘテロエピタキシャル成長させ Fe-Co 単結晶薄膜試料を準備した。各試料について膜面内で FMR 測定を行ったところ、 $\text{Fe}_{90}\text{Co}_{10}$ 、 $\text{Fe}_{80}\text{Co}_{20}$ では、 $\langle 100 \rangle$ 軸方向で H_T が最大値を、 $\langle 110 \rangle$ 軸方向で最小値をとる 4 回対称の変化を示したのに対し、 $\text{Fe}_{70}\text{Co}_{30}$ 、 $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{40}$ 、 $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ の試料では逆に $\langle 100 \rangle$ 軸方向で H_T が最小値を、 $\langle 110 \rangle$ 軸方向で最大値をとる 4 回対称の変化を示した。この結果は、 $x \geq 80$ の $\text{Fe}_x\text{Co}_{100-x}$ 試料では $\langle 110 \rangle$ 軸方向が磁化容易軸であるのに対して、 $x \leq 70$ の試料では $\langle 100 \rangle$ 軸方向が磁化容易軸を取り、 $70 < x < 80$ の組成で、Fe-Co の磁化容易軸が変化することを示唆している。これに対して、全ての試料において、 ΔH は $\langle 100 \rangle$ 軸方向で最大値、 $\langle 110 \rangle$ 軸方向で最小値を取る 4 回対称の角度依存性を示し、この傾向は組成に依存しなかった。 ΔH の角度依存性、すなわち、 α の角度変化は、結晶磁気異方性に依存するのではなく、結晶方向に依存していることを示唆していると考えられる。各組成に対する α を ΔH から算出すると、 $x \geq 80$ の試料では組成に依存せずほぼ一定の $\alpha \sim 0.01$ を示したのに対し、 $x \leq 70$ の試料では x の減少にともなって α は増加し $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ では $\alpha \sim 0.05$ を示した。

(3) 磁性膜間の相互作用が α に及ぼす効果

Co/Ru 人工格子膜では Ru を介して Co 層間に交換相互作用が働いており、Ru の膜厚を変化させると Co 層間の結合が強磁性的な結合と反強磁性的な結合を交互にくりかえし、それに伴って磁気抵抗が周期的に変化するこ

とが知られている。 $[\text{Co}(1.9\text{nm})/\text{Ru}(t)]_{20}$ 試料 ($t=0.4\sim 2.4\text{nm}$) では $t=0.6\text{nm}$ 、 1.6nm で Co 層間が反強磁性的な結合をとり抵抗変化率が極大をとった。この試料について Ru 膜厚に対する FMR 吸収曲線の ΔH の変化を調べたところ、抵抗の変化率が極大となる膜厚のときに ΔH が極大値をとる周期的変化を示した。

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 7 件)

- ① Y. Takahashi, H. Ikeya, N. Inaba, F. Kirino, M. Ohtake, and M. Futamoto, "Q-band Ferromagnetic Resonance Study of Fe Thin Films on GaAs(001) Deposited by RF Magnetron Sputtering", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.47, 2011, pp.4682-4585. 査読有り
doi: 10.1109/TMAG.2011.2158847
- ② H. Ikeya, Y. Takahashi, N. Inaba, F. Kirino, M. Ohtake and M. Futamoto, "Magnetic Properties of Fe(001) Thin Films on GaAs(001) Deposited by RF Magnetron Sputtering", Journal of Physics: Conference Series 266, 2011, pp.012116-1~5. 査読有り
doi: 10.1088/1742-6596/266/1/012116
- ③ 和田祐也, 池谷浩和, 高橋 豊, 稲葉信幸, 桐野文良, 大竹 充, 二本正昭, "RF マグネトロンスパッタリング法により GaAs(001) 基板上に作製した Fe(001) 薄膜の磁気特性評価", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.110, MR2010-50, 2010, pp.59-63. 査読無し
- ④ K. Kobayashi, N. Inaba, N. Fujita, Y. Sudo, T. Tanaka, M. Ohtake, M. Futamoto, and F. Kirino, "Damping Constants for Permalloy Single Crystal Thin Films", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.45 2009, pp. 2541-2544. 査読有り
doi: 10.1109/TMAG.2009.2018862
- ⑤ 小林康介, 須藤陽介, 藤田倫仁, 大竹 充, 稲葉信幸, 二本正昭, 桐野文良, "Ni-Fe 単結晶および Fe 単結晶薄膜のダンピング定数", 査読無し
電子情報通信学会技術研究報告, vol.108 MR2008-66, 2009, pp.25-30.
- ⑥ N. Fujita, N. Inaba, F. Kirino, S. Igarashi, K. Koike, and H. Kato, "Damping Constant of Co/Pt Multilayer Thin Film Media", 査読有り
Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.320, 2008, pp.3019-3022.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.08.012>,
⑦ N. Inaba, N. Fujita, M. Ohtake, F. Kirino, and M. Futamoto,
“Damping constants of Co-Ni thin films with hcp and fcc crystal structures”, 査読無し
Proceedings of Joint International Conference Materials for Electrical Engineering, 2008, pp.168-171.

[学会発表] (計 32 件)

- ① M. Sakamoto, H. Ohashi, M. Ohtake, M. Futamoto and N. Inaba,
“Ferromagnetic Resonance Line Widths of Metastable Co Single Crystal Thin Films”,
56th Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2011), October 31, 2011, Scottsdale, USA.
- ② 大橋栄久, 鈴木彩奈, Nur Hanani Md Salim, 稲葉信幸
「Fe-Co 系反強磁性結合 SUL の層間結合と強磁性共鳴線幅の関係」
第 35 回日本磁気学会学術講演会, 2011 年 9 月 29 日, 朱鷺メッセ (新潟市)..
- ③ M. Sakamoto, H. Ohashi, N. Inaba, M. Ohtake, M. Futamoto and F. Kirino,
“Angular Dependence of Damping Constant for hcp and fcc Crystal Structural Co Single Crystal Thin Films”.
The 2011 International Magnetism Conference (INTERMAG 2011), April 27, 2011, Taipei, Taiwan.
- ④ 坂本雅人, 藤田倫仁, 木村隼人, 稲葉信幸
「マイクロ波周波数に対する Co/Ru 多層膜の強磁性共鳴線幅の変化」
2010 年秋季第 71 回応用物理学会学術講演会, 2010 年 9 月 14 日, 長崎大学 (長崎市).
- ⑤ N. Fujita, N. Inaba, H. Kirino, K. Koike, and H. Kato,
“FMR Peak Widths of Ferromagnetically / Antiferromagnetically Coupled Co/Ru Superlattice Thin Films”,
Joint European Magnetic Symposia (JEMS2010), August 27, 2010, Krakow, Poland.
- ⑥ 藤田倫仁, 小高達昭, 木村隼人, 稲葉信幸 高橋 豊,
「Co/Ru 多層膜の強磁性共鳴吸収線幅の Ru 層膜厚依存性」
平成 21 電気学会基礎・材料・共通部門大会, 2009 年 9 月 11 日, 静岡大学 (浜松市).
- ⑦ K. Kobayashi, N. Inaba, Y. Sudo, T. Seko, M. Ohtake, M. Futamoto, F. Kirino, and Y. Takahashi,
“Crystal Direction Dependence of Damping Constants for Fe(001) and FeCo(001) Single Crystal Thin Films on MgO(001) Single

Crystal Substrates”,
International Conference on Magnetism (ICM2009), July 30, 2009, Karlsruhe, Germany.

- ⑧ 小林康介, 須藤陽介, 藤田倫仁, 大竹 充, 稲葉信幸, 二本正昭, 桐野文良,
「Ni-Fe 単結晶および Fe 単結晶薄膜のダンピング定数」
電子情報通信学会磁気記録・情報ストレージ研究会, 2009 年 3 月 6 日, 名古屋大学 (名古屋市).
- ⑨ K. Kobayashi, Y. Sudo, N. Fujita, M. Ohtake, N. Inaba, and M. Futamoto,
“Damping Constants for Permalloy Single Crystal Thin Films”,
Asian Magnetism Conference 2008 (AMC 2008), December 11, 2008, Busan, Korea.
- ⑩ 須藤陽介, 小林康介, 藤田倫仁, 大竹 充, 稲葉信幸, 二本正昭,
「FeCo 単結晶薄膜の強磁性共鳴吸収線幅と印加磁界角度との関係」
第 32 回日本磁気学会学術講演会, 2008 年 9 月 12 日, 東北学院大学 (多賀城市).

[その他]
ホームページ等
<http://inaba.yz.yamagata-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

稲葉 信幸 (INABA NOBUYUKI)
山形大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：50396587

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

高橋 豊 (TAKAHASHI YUTAKA)
山形大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：00260456