

令和元年6月12日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06313

研究課題名(和文) エネルギーアシスト磁気記録方式に適した高性能信号処理方式の研究

研究課題名(英文) A Study of High Performance Signal Processing Schemes Adapted for Energy Assist Magnetic Recording Systems

研究代表者

齋藤 秀俊 (SAITO, Hidetoshi)

工学院大学・先進工学部・教授

研究者番号：60274338

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：【ヘッド・媒体分野】熱アシスト磁気記録(HAMR)とビットパターン媒体(BPM)を組合せた記録(HDMR)方式と、マイクロ波アシスト磁気記録(MAMR)方式について、高記録密度化の検討を行った。その結果、HDMRは約5.9Tb/in<sup>2</sup>の記録が可能であることを明らかとした。MAMRはヘッド・媒体間の相互作用を低減し、面内方向の磁界を強くする発振素子の検討を必要とすることを明らかとした。

【信号処理分野】HAMRとBPMを用いる記録方式(BPMR)を対象に信号処理方式の検討を行った。その結果、HAMR方式では粒径分散と誤り率の関係等を明らかにし、BPMR方式では二次元記録符号を新規提案し評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大容量磁気ディスク装置のための新しいエネルギーアシスト磁気記録方式について、高記録密度化の可能性を検討した。本研究を通して、主にエネルギーアシスト磁気記録方式の有力な候補として、ビットパターン媒体を用いた磁気記録方式、熱アシスト磁気記録方式、熱アシスト磁気記録とビットパターン媒体を組合せた記録方式、マイクロ波アシスト磁気記録方式の各方式を検討することで、各方式の実現性と得失の一部を明らかとしている。

研究成果の概要(英文)：[Head and media] We investigated heated dot magnetic recording (HDMR) and microwave assisted magnetic recording (MAMR) methods to achieve high recording density. As a result, we found that the areal recording density about 5.9 Tb/in<sup>2</sup> is achievable for HDMR. In this study, we show that MAMR needs a spin-torque oscillator (STO) to decrease static magnetic field from medium to the STO and increase in-plane magnetic field.

[Signal processing] We investigated high signal processing schemes for heat assisted magnetic recording (HAMR) and bit patterned media recording (BPMR) systems to achieve high recording density. As a result, we clear relations between grain size distributions for recording media and the bit error rate performances using a HAMR system with the areal recording density about 2.5 Tb/in<sup>2</sup>. Furthermore, we propose new two-dimensional recording codes for a BPMR system with the areal recording density about 4.0 Tb/in<sup>2</sup> and show the block error rate performances of these codes.

研究分野：電気電子工学

キーワード：磁気ディスク装置 熱アシスト磁気記録方式 マイクロ波アシスト磁気記録方式 マイクロマグネティックシミュレーション 二次元磁気記録方式 ビットパターン媒体 二次元パーシャルレスポンス方式 二次元記録符号

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

次世代の高記録密度磁気ディスク装置の有力な記録方式の候補として、エネルギーアシスト磁気記録方式が着目されている。現在、この記録方式に対しては、記録ヘッドや記録媒体となるディスクの研究・開発が主である。このため、これらの記録方式に適した実用的な信号処理方式の導入は、今後の大きな検討課題の一つである。

### 2. 研究の目的

本研究は、エネルギーアシスト記録の実用化に向けた信号処理の課題に取り組むことを目的とする。ここで、エネルギーアシスト磁気記録として、熱アシスト磁気記録 (HAMR)、マイクロ波アシスト磁気記録 (MAMR)、ビットパターン媒体を用いる磁気記録 (BPMR)、さらに HAMR とビットパターン媒体 (BPM) を組合せた HDMR (Heated-Dot Magnetic Recording) を対象とする。

### 3. 研究の方法

#### 【ヘッド・媒体分野】

#### (1) シミュレーションの手法

本研究では、HDMR の記録計算、及び MAMR のスピントルク発振素子 (STO) の計算及び記録計算にはマイクロマグネティクスシミュレーションを、HDMR の光吸収及び熱分布の計算には市販のプログラム COMSOL Multiphasic (引用文献 ) を用いた。

#### (2) シミュレーションモデル

HDMR のシミュレーションでは、図 1 に示す基本モデルを用いた。BPM の ECC (Exchange Coupled Composite) 媒体の場合、上層と下層を同じ膜厚 (4 nm) とし、HDMR におけるヘッド磁界は引用文献 のデータを用いた。COMSOL で用いた近接場光発生素子及び媒体基本モデルを図 2 に示す。また MAMR では、図 3 の基本モデルを用いた。一部、STO のみのモデルでシミュレーションを行っているが、媒体は全て ECC 媒体を用いた。

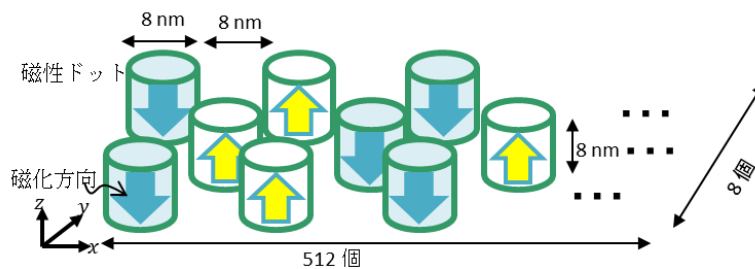


図1 HDMR用BPMのシミュレーション基本モデル

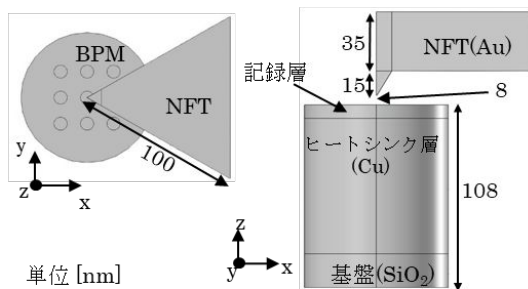


図2 近接場光発生素子とBPMの基本モデル

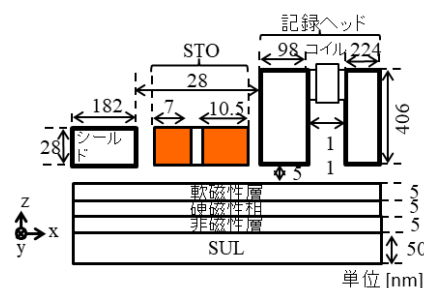


図3 MAMR用記録ヘッド・媒体のシミュレーション基本モデル

#### 【信号処理分野】

#### (1) シミュレーションの手法

本研究では、面記録密度  $2.5\text{Tb}/\text{in}^2$  を達成するため、HAMR における媒体モデルと記録条件については、引用文献 を用いた。また、面記録密度  $4.0\text{Tb}/\text{in}^2$  を達成するための BPMR における媒体モデルについては、引用文献 を用いた。

#### (2) シミュレーションモデル

HAMR のシミュレーションでは、図 4 に示すブロック図に示すシミュレーションモデルを用いた。また、BPMR のシミュレーションでは図 5 に示すブロック図に示すシミュレーションモデルを用いた。両者のモデルでは、パーシャルレスポンス信号処理による再生等化をしている。

### 引用文献

COMSOL Multiphysics®; Modeling Software, <https://www.comsol.jp/>.

K. Yamakawa, *et. al.*, ICAUMS2012, 4pPS-117 (2012).

赤城文子他, 信学技報, 磁気記録, vol.110, no.112, MR2010-17, pp.29-36, 2010年7月.

T. Wu, *et. al.*, IEEE Tran. Magn., vol.50, no.1, Jan. 2014.

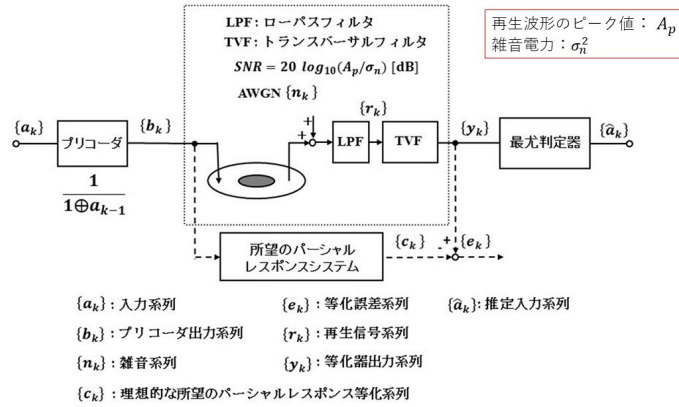


図4 HAMR方式に対する記録・再生系モデル

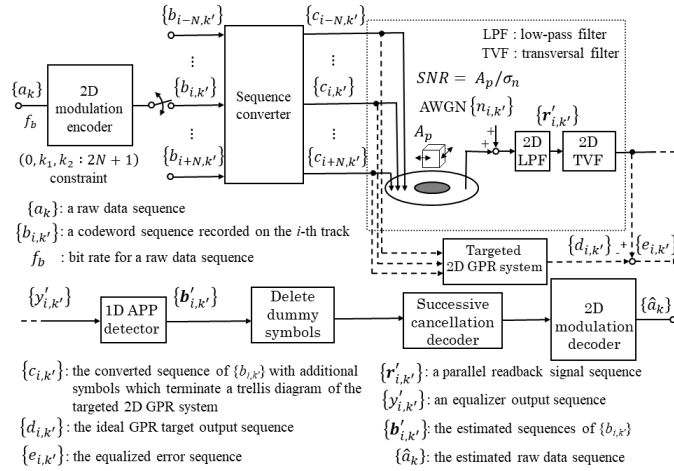


図5 BPMR方式に対する記録・再生系モデル

#### 4. 研究成果

##### 【ヘッド・媒体分野】

##### (1) 熱アシスト磁気記録とビットパターン媒体を組合せた記録方式

近接場発光発生素子の解析モデルを作成し、光吸収分布及び温度分布の検討を行った。隣接ドットの温度はヘッド・BPM間のスペーシング増大とともに上昇することが明らかになった。従って、図7に示すように、ヘッド・BPM間のスペーシングは7 nm以下にすべきことが明らかになった。また、ドット径のばらつきを平均8 nmのガウス分布と仮定し、変動係数と面記録密度との関係を検討した。その結果、図8に示すように変動係数が8%以下の時、面記録密度は最大約5.9 Tb/in<sup>2</sup>達成可能であることがわかった。

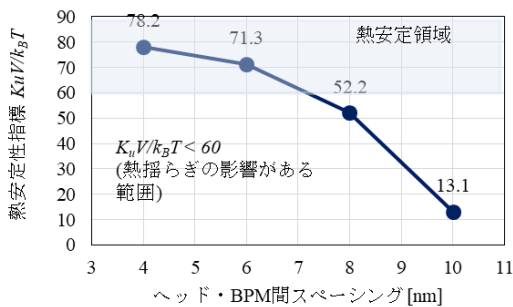


図6 熱安定性指標とヘッド・BPM間スペーシングとの関係

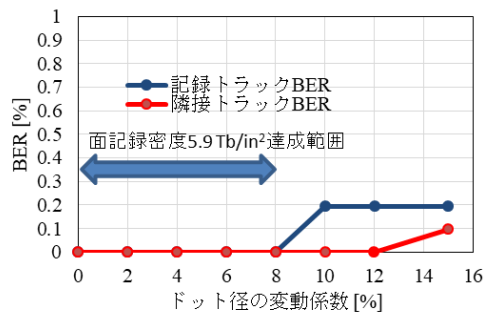


図7 ビットエラーレート (BER) とドット径の変動係数との関係

##### (2) マイクロ波アシスト磁気記録方式

低注入電流密度 (1 × 10<sup>12</sup> A/m<sup>2</sup> 以下)、高周波磁界 (20 GHz 以上) を実現するために、磁界発生層 (Field Generation Layer: FGL) を挟んでスピン注入層を2層設ける構造のSTOの検討を行った。その結果、透過のスピンを発生させるスピン注入層を低磁気異方性磁界 (1.0 kA/m) にして、膜厚を薄くする (1.25 nm) ことにより、図8に示すように、注入電流密度は 1 × 10<sup>12</sup> A/m<sup>2</sup> 以下で最大発振磁界 (クロストラック方向成分) を得ることができ、周波数は 30 GHz 以上を実現できた。ただし、この検討では、FGLの異方性定数を 5 × 10<sup>3</sup> J/m<sup>3</sup> とした。また、MAMRの再生波形計算プログラムを作成して、信号対雑音電力比 (SNR) と記録磁化パターンとの関係を明らかにした。また、再生波形から SNR を求めるための最低フラックス反転数を検討し、48 フラックス以上であれば十分な SNR が得られることがわかった。

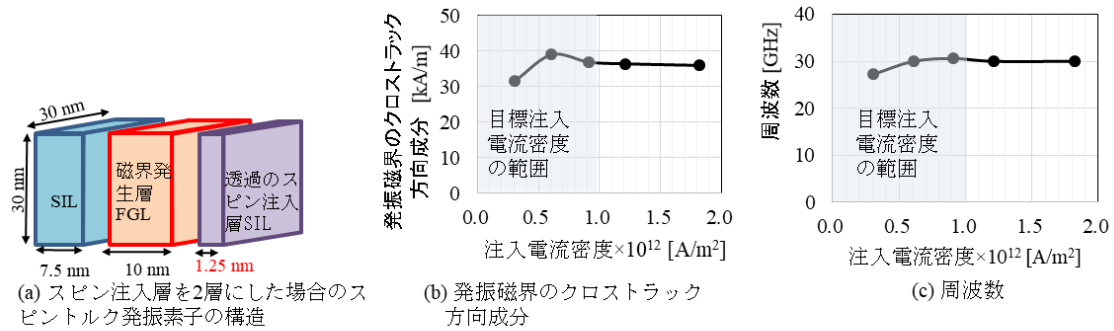


図8 発振磁界のクロストラック方向成分と周波数の注入電流密度依存性

### (3) 結論

HDMR と MAMR を比較すると、現段階では、HDMR の方が高記録密度を達成できることが明らかになった。MAMR については、ヘッド・媒体間の相互作用を低減でき、更に面内方向の磁界を強めることができる STO の構造の検討が今後の大きな課題といえる。HDMR については、ドット径を小さくすることによる面記録密度の限界を明らかにすることが次の課題である。

### 【信号処理分野】

#### (1) 熱アシスト磁気記録方式

信号処理として、パーシャルレスポス (PR) 方式と呼ばれる再生等化方式を用いる時、各方式の等化誤差が最小平均二乗誤差 (MMSE) となるものを選択している。ただし、一般化パーシャルレスポス (GPR) 方式は、そのインパルス応答特性を  $G(D) = \sum_{l=0}^{L-1} g_l D^l$  とする時、 $\sum_{l=0}^{L-1} |g_l| = c$  (定数) とする。各方式の等化誤差の MMSE は、PR2 (PR(1,2,1)), PR3, PR4, GPR ( $L=3$ ) 方式の順に、それぞれ  $8.076 \times 10^{-7}$ ,  $1.583 \times 10^{-5}$ ,  $3.023 \times 10^{-5}$ ,  $9.931 \times 10^{-8}$  となった。また、PR2 方式を用いてランダムなデータを記録再生し、再生等化後の等化器出力系列に対して、最尤復号した結果を図 9 に示す。図 9 の結果から、粒径分散の小さいもの、つまり雑音が少ないものほど、より優れたビット誤り率特性を示すことがわかった。

#### (2) ビットパターン媒体を用いる磁気記録方式

二次元記録符号と記録エラーを検出及び訂正できる誤り訂正符号を検討した。その結果、計算機探索により、ほぼ実用的な符号化率 14/16 の二次元記録符号を具体的に構成し、符号化・復号化における論理式を用いる構成を明らかにした。次に、この構成した二次元記録符号と組合せる誤り訂正符号として、比較的低計算量の符号化・復号化法を持ち、かつ通信路容量に漸近する性能を有するポーラ符号について、符号長、符号化率などを変えたものを幾つか検討した。その結果、データを記録するトラック数を 2~4 とするマルチトラック記録による二次元磁気記録を実現する信号処理方式を新たに検討し、計算機シミュレーションにより、そのブロック誤り率特性を明らかにした (図 10)。

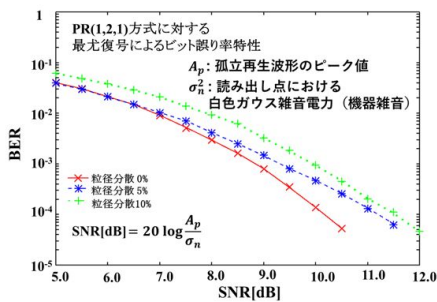


図9 HAMR方式における粒径分散ごとのビット誤り率特性

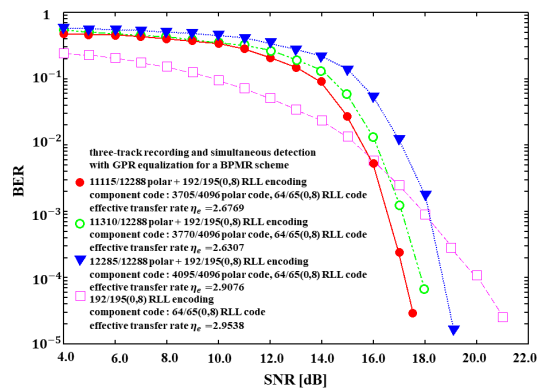


図10 BPMR方式に対する各種ポーラ符号を用いた時の誤り率特性

### (3) 結論

HAMR 方式と BPMR 方式を主対象に、信号処理方式を検討した。現段階では、離散媒体である BPM を用いる方が二次元磁気記録方式を実現し易いため、BPMR 方式に対する信号処理方式の検討を先行して進めた。また、HAMR 方式については、一次元磁気記録方式に限定しているが、記録媒体の粒径分散の影響が誤り率特性にどの程度の影響を及ぼすかを明らかとすることで、今後の HDMR 方式の実現性を考慮する場合に、本研究で得られた記録媒体の粒径分散の大きさを基に、高記録密度を達成できる HDMR 方式を新たに考案することが可能になったと言える。このため、HDMR 方式については、面記録密度の限界を明らかにした上で、それに適した信号処理方式を別途考案する必要がある。

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 5 件)

A. Kase, F. Akagi, K. Yoshida, Effects of head-field and AC-field on magnetization reversal for microwave assisted magnetic recording, AIP Advances 8, 056505, 2018, 10.1063/1.5005078.

H. Saito, Concatenated coding schemes for high areal density bit-patterned media magnetic recording, IEEE Trans. Magn., 54, 2, Feb. 2018, 10.1109/TMAG.2017.2746339.

H. Saito, Polar channel coding schemes for two-dimensional magnetic recording systems, IEEE Trans. Magn., 53, 11, Feb. 2017, 10.1109/TMAG.2017.2705579.

H. Saito, Multi-track joint decoding schemes using two-dimensional run-length limited codes for bit-patterned media magnetic recording, IEICE Trans. Fundamentals, E99-A, 12, pp.2248-2255, Dec. 2016, 10.1587/transfun.E99.A.2248.

古賀理樹, 赤城文子, 吉田和悦, マイクロ波アシスト磁気記録におけるスピントルク磁界の FGL 印加領域の検討, 電子情報通信学会論文誌 C, J99-C, 10, pp.476-482, 2016 年 10 月.

### 〔学会発表〕(計 28 件)

#### 【国際学会発表】

H. Saito, Two-dimensional magnetic recording systems with CRC-concatenated polar channel coding schemes, 12th International ITG Conference on Systems, Communications and Coding (SCC 2019), S5-4, pp.1-6, Feb.13, 2019.

M. Arai, F. Akagi, S. Yamaguchi, K. Yoshida, Improving performance of transposition algorithm of 3-D data array for parallelization using message passing interface, CANDAR2018, Nov.29, 2018.

H. Saito, Two-dimensional signal processing systems using CRC polar coding and list decoding for bit-patterned magnetic recording, The 2018 IEEE International Magnetics Conference (Intermag 2018), HV-02, Apr.27, 2018.

M. Arai, F. Akagi, S. Yamaguchi, K. Yoshida, Performance improvement of calculation of static magnetic field of micromagnetic simulator using supercomputer FX10, HPC Asia 2018, Jan.29, 2018.

A. Kase, F. Akagi, K. Yoshida, Effects of head-field and AC-field on magnetization reversal for microwave assisted magnetic recording, 2017 MMM Conference BQ-07, Nov.9, 2017.

S. Uesugi, H. Saito, F. Akagi, A study on partial response equalization systems for heat assisted magnetic recording, The 16th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-16), P109, Nov.2, 2017.

H. Saito, Two-dimensional magnetic recording schemes using channel polarization, The 28th Magnetic Recording Conference (TMRC 2017), BP-05, pp.103-104, Aug. 2, 2017.

H. Saito, Two-dimensional signal processing schemes for high areal density bit-patterned media magnetic recording based on channel polarization, The 2017 IEEE International Magnetics Conference (Intermag Europe 2017), DE-06, Apr.26, 2017.

H. Saito, Multi-track recording systems using non-binary error correction coding schemes for bit-patterned magnetic recording, 11th International ITG Conference on Systems, Communications and Coding (SCC 2017), P2-9, pp.1-6, Feb.27, 2017.

S. Uesugi, H. Saito, F. Akagi, High areal density digital magnetic recording schemes based on heat assisted magnetic recording, The 15th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-15), Nov.10, 2016.

H. Saito, Two-dimensional modulation codes using polar coding techniques, The 27th Magnetic Recording Conference (TMRC 2016), G5, pp.83-84, Aug.19, 2016.

H. Saito, A study of new two-dimensional signal processing schemes for bit patterned magnetic recording, The 15th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-15), Nov.10, 2016.

#### 【国内学会発表】

松島直史, 赤城文子, 熱アシスト磁気記録において高記録密度化達成のための媒体のドット間空隙とドット径のばらつきを検討, 2019 年信学会総合大会, C7-4, 2019 年 3 月 22 日.

栗田佳典, 赤城文子, 吉田和悦, MAMR において記録媒体から STO への静磁界が記録に与える影響, 2019 年信学会総合大会, C7-2, 2019 年 3 月 22 日.

吾妻滉太, 赤城文子, Near field transducer for heat assisted magnetic recording, COMSOL CONFERENCE2018, 2018 年 12 月 8 日.

栗田佳典, 崔宰榮, 加瀬愛菜, 赤城文子, 吉田和悦, 負の磁気異方性をもつ FGL とデュアル SIL 構造が注入電流密度に与える低減効果, DISKCON2018, 2018 年 6 月 21 日.

崔宰榮, 加瀬愛菜, 赤城文子, 吉田和悦, マイクロ波アシスト磁気記録方式において FGL の負の磁気異方性定数が発振磁界に与える影響, 2018 年信学会総合大会, C-7-2, 2018 年 3 月

21日.

加瀬愛菜, 赤城文子, 吉田和悦, MAMRにおけるSTOのダンピング定数とアシスト効果の関係, 2018年信学会総合大会, C-7-1, 2018年3月21日.

H. Saito, Error-correction coding for two-dimensional magnetic recording using bit-patterned media, The 40th Symposium on Information Theory and its Applications (SITA2017), 3.1.4, Nov. 29, 2017.

新井真大, 赤城文子, 吉田和悦, スーパーコンピュータFX10を用いたマイクロマグネティックシミュレータの高速化, 第41回日本磁気学会学術講演会, 22pC-5, 2017年9月22日

加瀬愛菜, 上村朋子, 赤城文子, 吉田和悦, デュアルSIL構造をもつSTOの注入電流密度低減効果, 国際ディスクフォーラム2017年, 2017年9月1日.

加瀬愛菜, 上村朋子, 赤城文子, 吉田和悦, デュアルSIL構造をもつSTOにおいて注入電流密度低減のためのSILの飽和磁化及び膜厚, 信学会, 磁気記録・情報ストレージ研究会, MR2017-7, 2017年6月9日.

加瀬愛菜, 上村朋子, 赤城文子, 吉田和悦, デュアルSIL構造をもつSTOにおいて注入電流密度低減のためのSILの飽和磁化及び膜厚, 信学会総合大会, C-7-6, 2017年3月22日.

金留裕介, 赤城文子, ECCビットパターン媒体を用いた熱アシスト磁気記録方式におけるヘッド磁界強度低減の検討, 2017年信学会総合大会, C-7-5, 2017年3月22日.

上杉将, 斎藤秀俊, 赤城文子, 熱アシスト磁気記録におけるパーシャルレスポンス信号処理方式の検討, 信学会総合大会, C-7-2, 2017年3月22日.

H. Saito, A study of designing modulation codes for two-dimensional magnetic recording using channel polarization, The 39th Symposium on Information Theory and its Applications (SITA2016), 2.1.3, Dec. 14, 2016.

加瀬愛菜, 赤城文子, 吉田和悦, マイクロ波アシスト磁気記録におけるスピン注入層に印加されるスピントルク磁界が発振磁界に及ぼす影響, 第3回工学院大学先進工学部イノベーションフォーラム (IFAEE 2016), 2016年11月1日.

上杉将, 斎藤秀俊, 赤城文子, 熱アシスト磁気記録に対するデジタル信号処理方式の一検討, 2016年信学会ソサイエティ大会, C-7-5, 2016年9月21日.

〔図書〕

なし

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

[https://er-web.sc.kogakuin.ac.jp/Profiles/6/0000545/profile.html?lang=ja&meeting\\_achievement](https://er-web.sc.kogakuin.ac.jp/Profiles/6/0000545/profile.html?lang=ja&meeting_achievement)

[https://er-web.sc.kogakuin.ac.jp/Profiles/11/0001063/profile.html?lang=ja&meeting\\_achievement](https://er-web.sc.kogakuin.ac.jp/Profiles/11/0001063/profile.html?lang=ja&meeting_achievement)

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 赤城 文子

ローマ字氏名: AKAGI, fumiko

所属研究機関名: 工学院大学

部局名: 先進工学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 30726724

### (2) 研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。