

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560457

研究課題名(和文)狭トラックHDDにおけるクロストーク対応信号処理方式

研究課題名(英文)Signal processing for crosstalk in narrow track HDD

研究代表者

岡本 好弘 (OKAMOTO, Yoshihiro)

愛媛大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20224082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：HDDの狭トラック化のために瓦磁気記録が採用されようとしている。この方式では、再生ヘッド感度が隣接トラックに及ぶクロストークとともに、先行トラックに次のトラックを重ね書きするため記録時にもトラック間干渉が発生する。これらの現象を確認するため、計算機内でグラニューラ記録媒体に記録ヘッドで記録し、MRヘッドで再生する記録再生シミュレータを構築した。そして、磁性粒子レベルで信号、雑音成分を可視化するとともに信号処理方式への影響を明らかにした。また、二次元ニューロキャンセラやノンバイナリ低密度パリティ検査符号による繰返し復号などのクロストーク対応信号処理の性能を明らかにしている。

研究成果の概要(英文)：Shingled magnetic recording is being applied to achieve narrow-track recording in HDD. In the system, Intertrack interference arises due to overwriting the following track on the leading track at recording as well as cross-talk due to the sensitivity of reader extending into the adjacent tracks. To observe the phenomena, we made a R/W simulator which records data sequence on a granular media made in computer by write head and obtain the waveform from the media by read head. Signal and noise components are visualized for magnetic grains, and the influence to signal processing is clarified. In addition the performance of signal processing systems such as two-dimensional neuro-canceller and iterative decoding using non-binary low-density parity-check code is clarified.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク

キーワード：情報ストレージ HDD 高密度化 SMR 信号処理 ITI

### 1. 研究開始当初の背景

情報ストレージ装置の中核を担うハードディスク装置 (HDD) は 500Gbps (1 平方インチあたり 500G ビットの情報を記録) の面記録密度を達成していたが、爆発的に生み出される情報を記録するには更に記録容量を増大させる必要があり、高密度化の要求に応えるために、瓦磁気記録 (SMR: shingled magnetic recording) 方式、熱アシスト磁気記録 (TAMR: thermal assisted magnetic recording) 方式マイクロ波アシスト磁気記録 (MAMR: microwave assist magnetic recording) 方式と言った新たな記録方式やビットパターン媒体 (BPM: bit patterned media) の導入が期待されていた。一方、再生方式については、磁気抵抗効果 (MR: magneto-resistive) ヘッドは高感度化されるものの、再生感度内に複数のトラックが存在し、所望のトラックからの再生信号に隣接トラックからのクロストークが混入した再生波形しか得られない状況が想定されていた。また、T (テラ) bpsi (ビット/平方インチ) オーダーの記録密度という条件下で、スピンド・テスト等の実機ベースで信号処理方式の性能評価を行うことは、そのようなレベルのヘッド・媒体が存在しておらず、入手することはできない状況であり、今後、更なる高密度化が進展した状況で波形等化、繰返し復号などの信号処理方式の性能評価を行うためには、ヘッド、媒体の特性を含めた実機に近い記録・再生シミュレータの開発が急務であった。

### 2. 研究の目的

(1) 記録密度向上のために狭トラック化が進み、隣接するトラックからのクロストークが性能劣化の要因となる HDD のために、隣接トラックからのクロストークに対応できる信号処理方式を考案する。そのために、現有のスピンド・テストによる記録再生実験から得られる再生波形の解析結果を反映させた記録・再生モデルを考案して計算機上にシミュレータを構築する。

(2) 記録・再生シミュレータと実機の両面から性能評価実験を行い、クロストークに対応できる良好な信号処理方式を見出すことを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 記録媒体の記録層として非磁性粒界を有するグラニューラ媒体を離散 Voronoi 図により幾何学的に再現する。ここで、磁性粒子だけでなく非磁性粒界を擬似的に表現する。記録過程では、磁性粒子が重心で受ける記録ヘッド磁界、他の磁性粒子からの粒子間静磁気相互作用磁界、周辺の粒子との粒子間交換相互作用磁界の総和と磁性粒子の飽和磁界によって磁性粒子の磁化方向が決定される勾配モデルとし、セルフコンシステント計算により磁化反転の生起を繰返し確認する。再生過

程では、再生ヘッドからの出力は相反定理に基づいて離散グラニューラ媒体上の磁化分布と再生ヘッドの感度関数を畳み込むことで再生波形を得る。このモデルを計算機上に展開して信号処理方式の検討に必要な再生波形を比較的短時間で得られる記録・再生シミュレータを構築する。

(2) 記録・再生シミュレータを用いた記録再生実験によって得られた磁化パターン及び再生波形を用いて SMR における諸特性を明らかにする。

(3) 波形等化器として二次元等化器の導入、クロストークキャンセラやバイナリ及びノンバイナリの低密度パリティ検査 (LDPC: low density parity check) 符号を用いた繰返し復号などの信号処理方式の適用について検討する。

### 4. 研究成果

(1) 記録媒体の記録層として、非磁性粒界を有するグラニューラ媒体を離散 Voronoi モデルに基づいて再現し、図 1 に示す。母点を Poisson disk sampling に従って配置し、逐次添加法を用いて離散 Voronoi 図を作成して Lloyd の緩和法により媒体の粒径分散を制御して作成した。図中の黒色、白色の部分は、

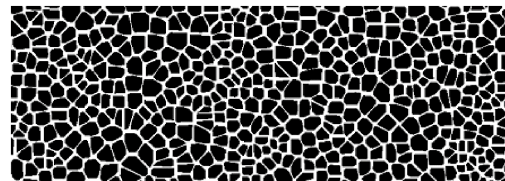


図 1 離散グラニューラ媒体

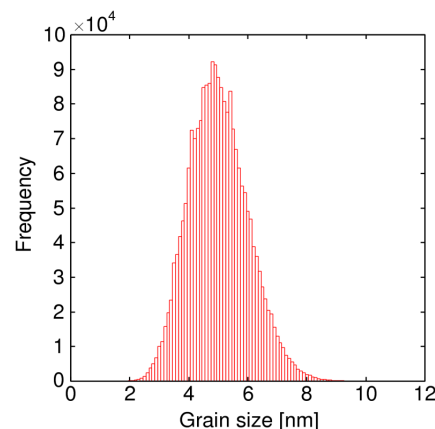


図 2 粒径分布

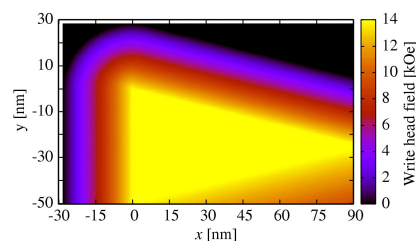


図 3 記録ヘッド磁界強度

磁性粒子、非磁性粒界をそれぞれ表しており、磁性粒子が非磁性粒界で分離されたグラニューラ媒体であることがわかる。図2に、この媒体の粒径頻度分布を示す。図より平均粒径5 nm、粒径分散20%で1.4~11.4 nmにほぼ正

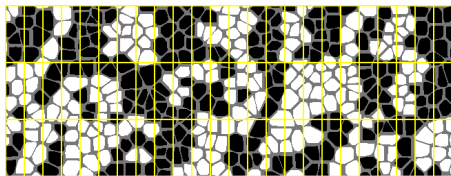


図4 記録磁化パターン

規分布しているのがわかる。

図3に記録ヘッド磁界強度を示す。SMRには、主磁極幅が50 nmの二等辺三角形の主磁極を持ち、その片側及びトレーリング側にシールドを持つ記録ヘッドを用いている。主磁極直下で、磁界強度が最大で、主磁極端からの距離と共に減衰することがわかる。

図4にSMRの記録磁化パターンを示す。図において、黒、白色の磁性粒子はそれぞれ、“1”、“0”の方向に磁化されており、黄色線で囲んだ1ビットセル領域のすべての粒子が同一方向を向いていないことがわかる。次に図5に示す再生ヘッドで所望のトラックを走査する。すなわち、図6に示す感度関数と図4の媒体磁化との畳込みによって再生波形が求まる。

(2)図4に示したSMR方式の記録磁化パターンにおいて、各磁性粒子を信号成分と雑音成分に分類し、雑音成分については発生起因ごとに細分化して図7に示している。ここで、(a)は信号成分、(b)~(e)はそれぞれ、先行トラックの残留雑音、所望トラックの磁化転移変動雑音、次のトラックからの記録滲み雑音、クロストーク雑音を示している。(b)~(d)の雑音は信号成分と逆方

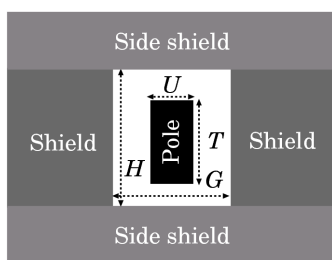


図5 再生ヘッドの構造

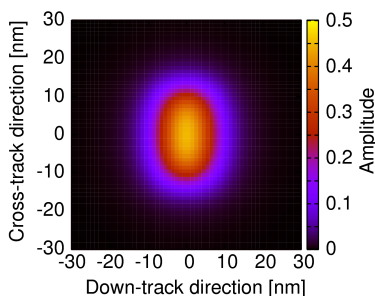
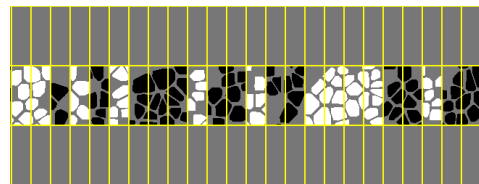
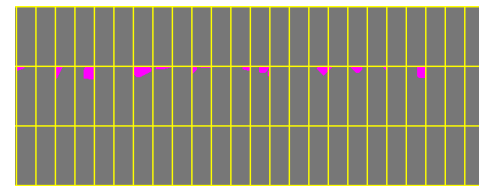


図6 再生ヘッドの感度関数

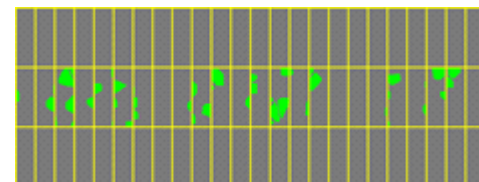
向に磁化されているため、信号成分を減衰させる方向に作用する。中でも、磁化転移変動雑音が他の雑音に比べて大きいことからビット誤り率は主に(c)の雑音によって決まることとなる。一方、(e)のクロストーク雑音は図6の感度関数の広がりによって再生波形に混入する。しかし、所望のト



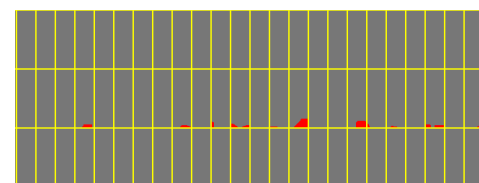
(a) 信号成分



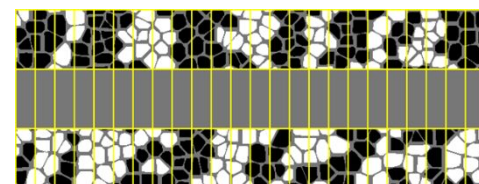
(b) 先行トラックの残留



(c) 磁化転移変動



(d) 記録滲み



(e) 隣接トラックのクロストーク

図7 信号と雑音成分

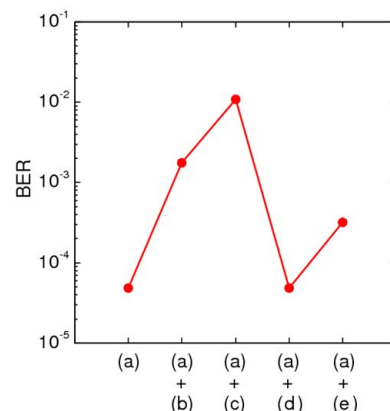


図8 BERへの雑音の影響

トラックに書かれた信号と相関がないため、信号成分を減衰させるとは限らない。

図 8 にビット誤り率(BER)への各雑音の影響を示す。(a)の信号成分に対する誤り率はそれぞれの雑音成分が加わることによって劣化する。先に述べたように、磁化転移変動による影響が最も大きいことがわかる。また、先行トラックの残留雑音の影響はクロストーク雑音の影響よりも大きいことがわかる。

(3)図 9 に主要な誤りパターンを示す。図には中央のビットが誤る頻度を示している。パターン#1, 2, 4 は注目しているビットの左右に異なるビット

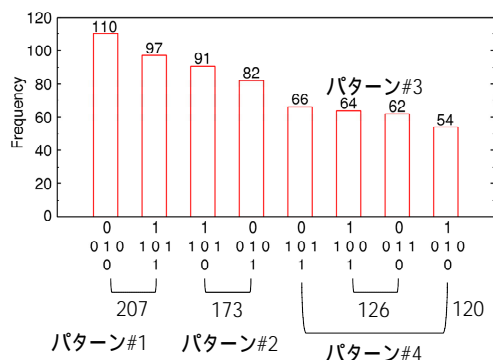


図 9 誤りパターン

が記録されており、磁化転移変動雑音によって誤ったと考えられる。中でも、パターン#1 では、上下にも異なるビットが記録されるため、残留雑音、記録滲み、クロストーク雑音も影響した可能性がある。パターン#2 では上側に異なるビットが記録されたことによる残留雑音の影響、#4 では下側に異なるビットが記録されたことによる記録滲みによる影響が加わったと考えられる。一方、パターン#3 では左側に異なるビットが記録されたことによる磁化転移変動雑音に加えて上下に異なるビットが記録されたことによる残留雑音、記録滲み、クロストーク雑音に加わったと考えられる。

これらの雑音は、所望のトラックの信号と隣接トラックの信号に依存して発生することから、これらの雑音の影響について自己回帰モデルを用いて推定する最尤復号を適用して誤り率の改善を試みた。しかし、クロストーク雑音が磁化転移変動雑音の推定を乱すことになり、大きな改善は得られなかった。

(4)誤り訂正能力向上のためにノンバイナリ低密度パリティ検査(LDPC)符号の適用を検討した。図 10 に誤り率特性を示す。バイナリ低密度パリティ検査符号を適用した場合には誤りなしの状態に到達しない。しかし、ノンバイナリ低密度パリティ検査符号を適用して繰返し復号を行うことで誤りなしとすることが可能となる。中でも、復号器における演算は増大するものの、シンボル単位で信頼度を計算して復号することで約 3.5dB の雑音余裕が生まれることがわかる。

(5)先行トラックの復号系列に基づいて三層階層型パーセプトロンで構成される判定帰還型ニューロトラック間干渉相殺器(ITIC)を(1)の記録・再生シミュレータに適用して性能評価を行っ

た。図 11 に誤り率特性を示す。図には従来のITIC, 二次元FIRフィルタ, ニューロITICの特性を合わせて示している。図から、ニューロITICは他の方式に比べて良好な誤り率特性を達成することがわかる。

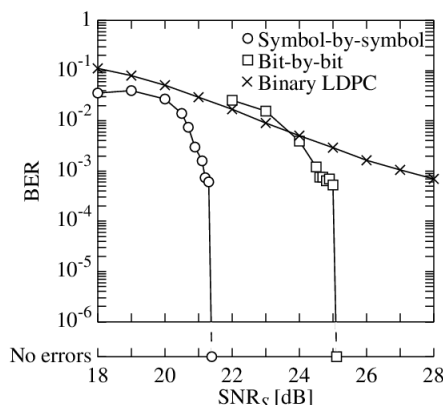


図 10 ノンバイナリ LDPC 符号による繰返し復号の誤り率特性

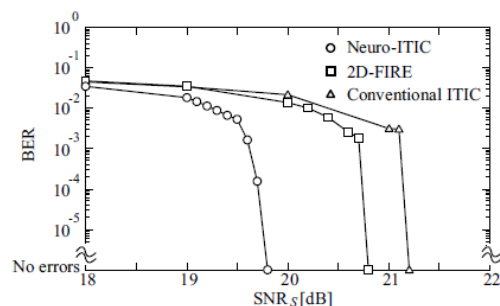


図 11 ニューロキャンセラの誤り率特性

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 9 件)

H. Nobuhara, Y. Okamoto, M. Yamashita, Y. Nakamura, H. Osawa, H. Muraoka, Influence of writing and reading intertrack interferences in terms of BAR in shingled magnetic recording, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 115, 2014, 17B729-1-17B729-3.

DOI: 0021-8979/2014/115(17)/17B729/3/M. Yamashita, Y. Okamoto, Y. Nakamura, H. Osawa, S. J. Greaves, H. Muraoka, Performance evaluation of neuro-ITI canceller using a modified writing process for TDMR, IEICE Transactions on Electronics, 査読有, Vol. E96-C, 2013, 1504-1507.

DOI: 10.1587/transele.E96.C.1504

Y. Nakamura, Y. Okamoto, H. Osawa, H. Aoi, H. Muraoka, Performance evaluation of non-binary LDPC coding and iterative decoding system for BPM R/W channel with write-errors, IEICE Transactions on Electronics, 査読有, Vol. E96-C, 2013, 1497-1503.



DOI: 10.1587/transele.E96.C.1497  
H. Nobuhara, Y. Okamoto, Y. Nakamura,  
K. Takada, M. Yamashita, H. Osawa, H.  
Muraoka, Influence of writing ITI  
effects in shingled magnetic recording,  
IEEE Transactions on Magnetics, 査読有,  
Vol. 49, 2013, 3814-3817  
DOI: 10.1109/TMAG.2013.2242439  
M. Yamashita, Y. Okamoto, Y. Nakamura,  
H. Osawa, H. Muraoka, Performance  
evaluation of neuro ITI canceller for  
two-dimensional magnetic recording by  
shingled magnetic recording, IEEE  
Transactions on Magnetics, 査読有, Vol.  
49, 2013, 3810-3813  
DOI: 10.1109/TMAG.2013.2242437  
Y. Nakamura, J. Ueda, Y. Okamoto, H.  
Osawa, H. Muraoka, Nonbinary LDPC  
coding system with symbol-by-symbol  
turbo equalizer for shingled magnetic  
recording, 査読有, IEEE Transactions  
on Magnetics, Vol. 49, 2013, 3791-3794  
DOI: 10.1109/TMAG.2013.2245863  
Y. Nakamura, Y. Okamoto, H. Osawa, H.  
Aoi, H. Muraoka, Nonbinary LDPC coding  
and iterative decoding system with 2-D  
equalizer for TDMR R/W channel using  
discrete Voronoi model, 査読有, Vol. 49,  
2013, 662-667  
DOI: 10.1109/TMAG.2012.2220532  
Y. Nakamura, Y. Bandai, Y. Okamoto, H.  
Osawa, H. Aoi, H. Muraoka, Turbo  
equalization effect for non-binary LDPC  
code in BPM R/W channel, IEEE  
Transactions on Magnetics, 査読有, Vol.  
48, 2012, 4602-4605  
DOI: 10.1109/TMAG.2012.2194989  
M. Yamashita, Y. Okamoto, Y. Nakamura,  
H. Osawa, K. Miura, S. Greaves, H. Aoi,  
Y. Kanai, H. Muraoka, Modeling of  
writing process for two-dimensional  
magnetic recording and performance  
evaluation of two-dimensional neural  
network equalizer, IEEE Transactions on  
Magnetics, 査読有, Vol.48, 2012,  
4586-4589  
DOI: 10.1109/TMAG.2012.2194988

[学会発表](計 20 件)

Y. Nakamura, N. Fujimoto, Y. Okamoto,  
H. Osawa, H. Muraoka, Evaluation of  
multiple reader location for TDMR R/W  
channel, IEEE International Magnetics  
Conference, Dresden, Germany, May  
2014.  
H. Nobuhara, Y. Okamoto, M. Yamashita,  
Y. Nakamura, H. Osawa, H. Muraoka,  
Evaluation of multiple reader location  
for TDMR R/W channel, IEEE  
International Magnetics Conference,

Dresden, Germany, May 2014.  
延原寛史, 岡本好弘, 仲村泰明, 大沢  
寿, 村岡裕明, シングル磁気記録におけ  
る ITI の影響に関する一検討, 2014 年電  
子情報通信学会 総合大会, 新潟市, Mar.  
2014.  
藤本直樹, 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好  
弘, 村岡裕明, シングル磁気記録におけ  
る ITI の影響低減に関する一検討, 2014  
年電子情報通信学会 総合大会, 新潟市,  
Mar. 2014.  
高田一樹, 岡本好弘, 延原寛史, 仲村泰  
明, 大沢 寿, 村岡裕明, シングル磁気  
記録における NLTS と記録補償の一検討,  
電子情報通信学会磁気記録・情報ストレ  
ージ研究会, 松山市, Dec. 2013.  
H. Nobuhara, Y. Okamoto, M. Yamashita,  
Y. Nakamura, H. Osawa, H. Muraoka,  
Influence of writing and reading ITI's  
in terms of BAR in shingled magnetic  
recording, 58th Annual Magnetism and  
Magnetic Materials (MMM) Conference,  
Denver, USA, Nov. 2013.  
仲村泰明, 柳田道太, 大沢 寿, 岡本好  
弘, 村岡裕明, LDPC 符号化・繰り返し復  
号化方式における誤り伝搬抑制の一検討,  
電子情報通信学会 磁気記録・情報ストレ  
ージ研究会, 仙台市, June, 2013.  
藤本直樹, 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好  
弘, 村岡裕明, シングル磁気記録におけ  
る ITI の影響低減に関する一検討, 平成  
25 年度電気関係学会四国支部連合大会,  
徳島市, Sept. 2013.  
延原寛史, 岡本好弘, 仲村泰明, 山下正  
人, 大沢 寿, 村岡裕明, シングル磁気  
記録による再生波形の劣化に関する一検  
討, 平成 25 年度電気関係学会四国支部  
連合大会, 徳島市, Sept. 2013.  
延原寛史, 岡本好弘, 仲村泰明, 山下正  
人, 大沢 寿, 村岡裕明, シングル磁気  
記録における記録系列に依存した記録  
ITI および再生 ITI の影響に関する一検  
討, 2013 年電子情報通信学会総合大会,  
岐阜市, Mar. 2013.  
山下正人, 仲村泰明, 岡本好弘, 大沢  
寿, サイモン・グリーブス, 村岡裕明,  
二次元磁気記録のための  
Stoner-Wohlfarth 反転機構に基づく記録  
過程のモデル化とニューロ ITI キャンセ  
ラに関する一検討, 2013 年電子情報通信  
学会総合大会, 岐阜市, Mar. 2013.  
H. Nobuhara, Y. Okamoto, Y. Nakamura,  
K. Takada, M. Yamashita, H. Osawa, H.  
Muraoka, Influence of writing ITI  
effects in shingled magnetic recording,  
IEEE The 12th Joint MMM/Intermag  
Conference, Chicago, Illinois, USA,  
Jan. 2013.  
Y. Nakamura, J. Ueda, Y. Okamoto, H.  
Osawa, H. Aoi, H. Muraoka, Non-binary

LDPC coding system with symbol-by-symbol turbo equalization for shingled magnetic recording, IEEE The 12th Joint MMM/Intermag Conference, Chicago, Illinois, USA, Jan. 2013.  
M. Yamashita, Y. Okamoto, Y. Nakamura, H. Osawa, H. Muraoka, Performance evaluation of neuro ITI canceller for two-dimensional magnetic recording by shingled magnetic recording, IEEE The 12th Joint MMM/Intermag Conference, Chicago, Illinois, USA, Jan. 2013.  
Y. Nakamura, Y. Okamoto, H. Osawa, H. Aoi, H. Muraoka, Write-margin evaluation of LDPC coding and iterative decoding system in BPM R/W channel with write-errors, 2012 International Symposium on Information Theory and its Applications, Honolulu, Hawaii, USA, Oct. 2012.  
山下正人, 仲村泰明, 岡本好弘, 大沢寿, 村岡裕明, シングル磁気記録のためのニューロ ITI キャンセラの一検討, 2012年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 富山市, Sept. 2012.  
上田 純, 仲村泰明, 岡本好弘, 大沢寿, 青井 基, 村岡裕明, シングル磁気記録のための二次元等化器を備えた Non-binary LDPC 符号化方式に関する一検討, 2012年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 富山市, Sept. 2012.  
延原寛史, 岡本好弘, 仲村泰明, 山下正人, 大沢 寿, 村岡裕明, シングル磁気記録における隣接トラックとの相関に関する一検討, 2012年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 富山市, Sept. 2012.  
Y. Nakamura, Y. Okamoto, H. Osawa, H. Aoi, H. Muraoka, Write-margin improvement of non-binary LDPC coding and iterative decoding system in BPM R/W channel with write-errors, IEEE Global Communications Conference, Anaheim, CA, USA, Dec. 2012.  
Y. Nakamura, Y. Okamoto, H. Osawa, H. Aoi, H. Muraoka, Non-binary LDPC coding and iterative decoding system with two-dimensional equalizer for TDMR R/W channel using discrete Voronoi model, The Magnetic Recording Conference, San Jose, CA, USA, Aug. 2012.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

岡本 好弘 (OKAMOTO Yoshihiro)  
愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号 : 20224082

### (2)研究分担者

仲村 泰明 (NAKAMURA Yasuaki)  
愛媛大学・大学院理工学研究科・講師  
研究者番号 : 50380259