

SMRにおける面記録密度とリーダサイズに対するBARの一検討

仲村 泰明[†] 西川まどか[†] 大沢 寿[†] 岡本 好弘[†] 金井 靖^{††}

村岡 裕明^{†††}

[†] 愛媛大学大学院 理工学研究科 〒790-8577 愛媛県松山市文京町3

^{††} 新潟工科大学 情報電子工学科 〒945-1195 新潟県柏崎市藤橋1719

^{†††} 東北大学 電気通信研究所 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1

E-mail: †{nakamura,nishikawa,osawa,okamoto}@rec.ee.ehime-u.ac.jp, ††kanai@iee.niit.ac.jp,
†††muraoka@riec.tohoku.ac.jp

あらまし ハードディスク装置 (HDD : hard disk drive) の高記録密度化を実現する方式として、シングル磁気記録 (SMR : shingled magnetic recording) が採用されている。本稿では、グラニューラ媒体モデルを用いた SMR シミュレーションにおいて、面記録密度に適したリーダサイズとビットアスペクト比 (BAR : bit aspect ratio) について、LDPC (low-density parity-check) 符号化・繰返し復号化方式を適用した記録再生系でビット誤り率 (BER : bit error rate) を求めて評価している。その結果、面記録密度が低い場合にはサイズの大きなリーダを用いることで良好な特性となり、面記録密度が高い場合にはサイズの小さなリーダを用いることで良好な特性となることが明らかとなった。また、4 Tbit/in² の面記録密度の場合、100%リーダを用いた場合、誤り無く復号できる BAR は 2.5 のみであったが、70%リーダを用いることが可能であれば、BAR が 1.0 ~ 2.5 において誤り無く復号できることが明らかとなった。

キーワード SMR, BAR, リーダサイズ

A study on BAR for areal density and reader size in SMR system

Yasuaki NAKAMURA[†], Madoka NISHIKAWA[†], Hisashi OSAWA[†], Yoshihiro OKAMOTO[†],

Yasushi KANAI^{††}, and Hiroaki MURAOKA^{†††}

[†] Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, 3 Bunkyo-cho, Matsuyama, 790-8577 Japan

^{††} Department of Information and Electronics Engineering, Niigata Institute of Technology, 1719 Fujihashi, Kashiwazaki, 945-1195 Japan

^{†††} Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, 980-8577 Japan

E-mail: †{nakamura,nishikawa,osawa,okamoto}@rec.ee.ehime-u.ac.jp, ††kanai@iee.niit.ac.jp,
†††muraoka@riec.tohoku.ac.jp

Abstract Shingled magnetic recording (SMR) is employed to realize higher recording densities in hard disk drive (HDD). In this paper, we evaluate the appropriate combination of bit aspect ratio (BAR) and reader size for the intended recording densities by obtaining the bit error rate (BER) of the low-density parity check (LDPC) coding and iterative decoding system using the granular medium model. The results show that good decoding performances are achieved by a large size reader in low recording density and a small size reader in high recording density. Furthermore, it is clarified that 100% reader achieves no errors at only BAR = 2.5 in 4 Tbit/in², and 70% reader achieves for BAR = 1.0 ~ 2.5.

Key words SMR, BAR, Reader size

1. はじめに

ハードディスク装置 (HDD : hard disk drive) の高密度化を実現するためにシングル磁気記録 (SMR : shingled magnetic recording) [1] が採用されている。SMR では、トラックを部分的に重書きすることで、既存記録ヘッドによる狭トラック化を可能としている。しかし、トラック中に、記録ヘッドコーナの磁界により記録した部分が残るため、トラックの片側エッジ周辺の磁化遷移が湾曲し、低ビットアスペクト比 (BAR : bit aspect ratio) ではビット領域への影響が大きい [2]。また、再生素子 (リーダ) のサイズによってトラック間干渉 (ITI : intertrack interference) や波形干渉 (ISI : intersymbol interference) の影響も異なる。

本稿では、計算機シミュレーションにより、面記録密度に適したリーダサイズと BAR について、LDPC (low-density parity-check) 符号化・繰返し復号化方式 [3] のビット誤り率 (BER : bit-error rate) を求めて評価する。

2. 記録再生系モデル

図 1 に、離散 Voronoi 図 [4] に基づいてモデル化した媒体モデル [5] により、構成したグラニューラ媒体の表面を示す。図中の黒色および白色の領域はそれぞれ、記録系列 “1” および “0” の方向に磁化された磁性粒子を表し、灰色の領域は非磁性粒界を表している。ここで、磁性粒子の平均粒径、平均粒径で規格化した粒径分散および平均非磁性粒界幅をそれぞれ 5 nm, 20%, 1 nm としている。また、垂直二層膜構造の媒体を想定し、記録ヘッドと記録層間の磁気スペーシング、記録層厚および中間層厚をそれぞれ、4 nm, 10 nm, 1 nm としている。

図 2 に、ABS (air-bearing surface) 面から見た記録ヘッド形状を示す。図のように記録ヘッドは、底辺 $T_{ww} = 50$ nm, 底角 $\theta_b = 75$ deg の二等辺三角形の主磁極となっており、トレーリングシールドと片側のサイドシールドからなる。本検討では、両シールドと主磁極間のギャップを 10 nm としている。図 3 に、有限要素法 (FEM : finite element method) により求めた記録ヘッド磁界 [6] を示す。図中の三角形は主磁極を示し、サイドシールド側の主磁極コーナの磁界が湾曲していることがわかる。

図 4 に、離散グラニューラ媒体にランダム系列を SMR した場合の磁化パターンを示す。但し、記録再生系における面記録密度を 4 Tbit/in^2 と想定してビット長 $l_c = 7.3$ nm, トラックピッチ $l_{tp} = 22.1$ nm としており、記録ヘッドは図の左から右へ、上から下へ移動して SMR している。また、図 3 と同様に、三角形は主磁極を示しており、最後に記録されるトラックの幅は主磁極幅とほぼ等しくなる。

本稿では、 $2.0 \sim 4.0 \text{ Tbit/in}^2$ までの面記録密度に対して、BAR を $1.0 \sim 4.0$ として検討する。

再生過程では、図 5 に示すフルシールド構造の MR (magneto-resistive) ヘッドを用いる。ここで、 4 Tbit/in^2 の面記録密度を想定した SMR 方式で用いる再生ヘッド [7] の構造を 100% リーダとし、再生素子の幅および厚みをそれぞれ $T = 17$ nm, $U = 2$ nm, シールドおよびサイドシールド間のギャップをそれぞれ

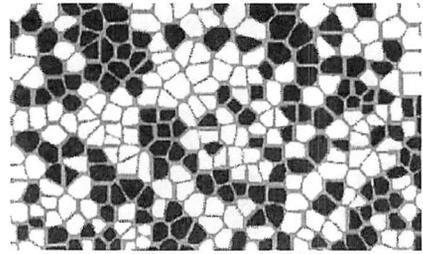


図 1 離散グラニューラ媒体

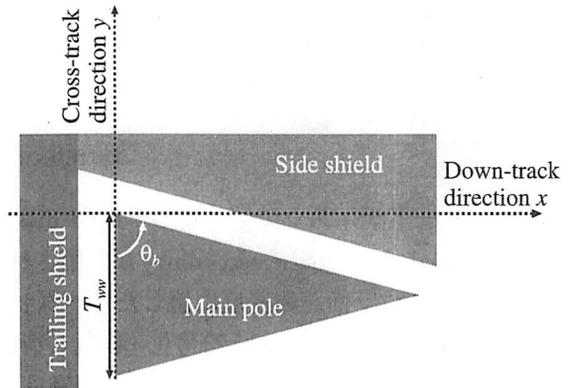


図 2 ABS 面から見た記録ヘッド形状

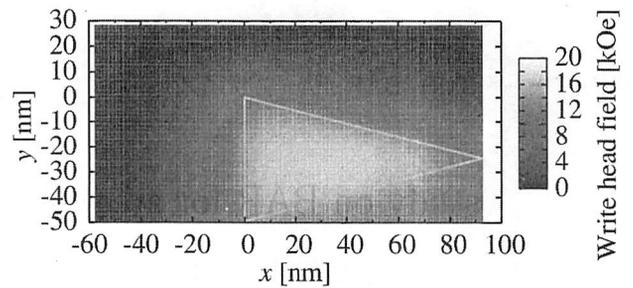


図 3 記録磁界

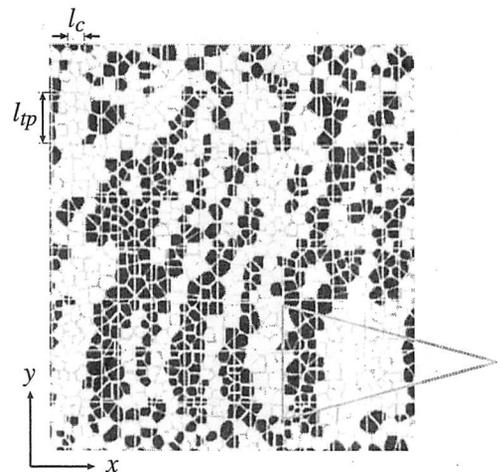


図 4 SMR の磁化パターン

$G = 22$ nm, $H = 30$ nm として、有限要素法により求めた再生感度を図 6 に示す。図のように、再生感度は中央部の感度が高く、リーダの構造と同じようにクロストラック方向に広い分布となっている。

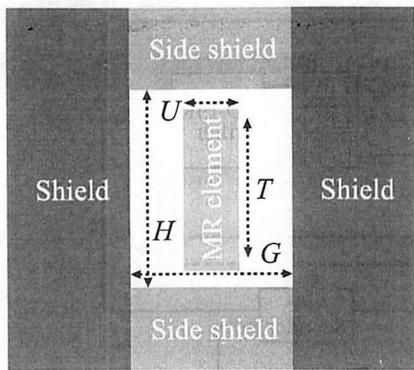


図5 リーダの構造

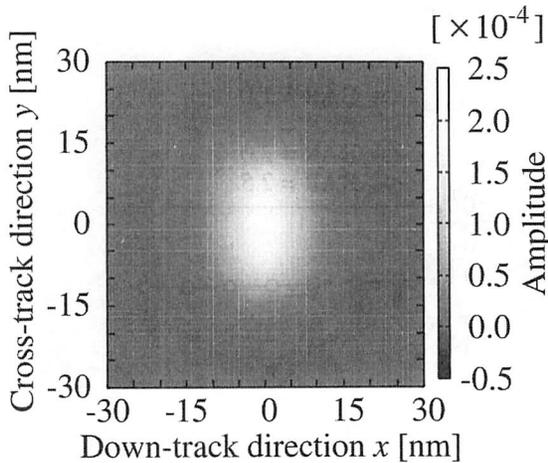


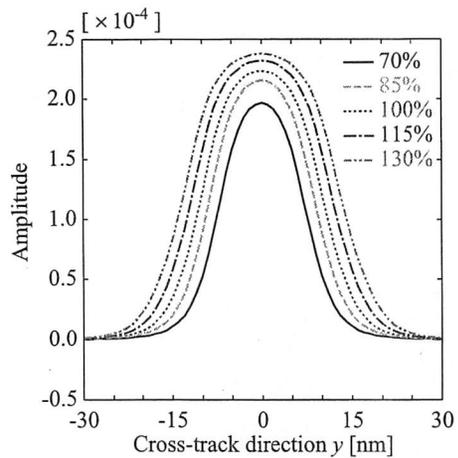
図6 再生感度

表1 リーダサイズ

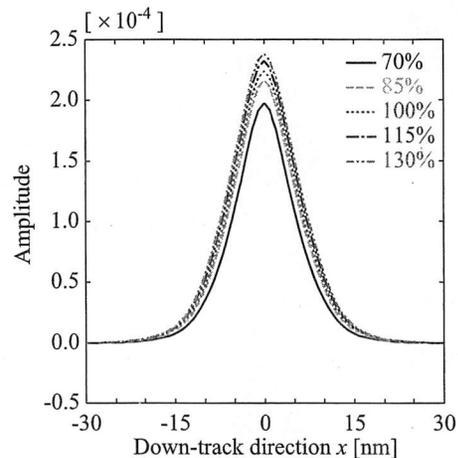
Reader size [%]	H [nm]	G [nm]	T [nm]	U [nm]
70	21.00	22.00	11.90	2.00
85	25.50	22.00	14.45	2.00
100	30.00	22.00	17.00	2.00
115	34.50	22.00	19.55	2.00
130	39.00	22.00	22.10	2.00

表1に、本稿で用いるリーダサイズの一覧を示す。クロストラック方向の感度を調節するためにリーダサイズに従い、クロストラック方向の H と T を変え、ダウントラック方向の G と U は変えない。図7(a), (b)に、クロストラック方向 ($x = 0.00$ nm) およびダウントラック方向 ($y = 0.00$ nm) の再生感度を示す。図中の実線、破線、点線、一点鎖線および二点鎖線はそれぞれ、70, 85, 100, 115, 130%リーダの再生感度を示している。図7(a)より、リーダサイズを小さくするとクロストラック方向の再生感度の到達範囲が狭くなり、ITIの影響が小さくなるが、同時に再生感度が全体的に低下し、再生振幅が小さくなる。一方、リーダサイズを大きくすると再生感度の到達範囲が広がり、再生感度の大きさが全体的に大きくなるのがわかる。また、図7(b)より、ダウントラック方向のサイズは維持しているにも関わらず、リーダサイズが小さくなるのに伴って再生感度が小さくなるのがわかる。

図8に、性能評価に用いるLDPC(low-density parity-check)



(a) クロストラック方向 ($x = 0.00$ nm)



(b) ダウントラック方向 ($y = 0.00$ nm)

図7 再生振幅

符号化・繰返し復号化方式の記録再生系ブロック図[3]を示す。入力データ系列は、128/130(0, 16/8)ラン長制約(RLL: run-length-limited)符号器と行重み30, 列重み3の正則LDPC符号器により記録系列に変換され、グラニューラ媒体上に記録ヘッドにより記録され、表1に示したリーダサイズの再生素子を3個連ねたアレイヘッドにより、復号対象トラックとその両隣のトラックが再生される。本稿では、それぞれの再生素子は、それぞれのトラック中央を走査すると仮定している。ここで、読出し点におけるシステム雑音のSN比(signal-to-noise ratio)を、 $SNR_S = 20 \log_{10}(A/\sigma_S)$ [dB]で定義する。但し、 A は $l_{tp} = 22.1$ nmのトラックにおいて100%リーダで再生した孤立反転の飽和レベル、 σ_S は $l_c = 7.3$ nmのビット長におけるチャネルビットレート $f_c = 1/l_c$ の帯域におけるAWGN(additive white Gaussian noise)からなるシステム雑音の実効値である。再生されたそれぞれの波形にはシステム雑音に加わり、 f_c で規格化された規格化遮断周波数 $x_h = 0.4$ のLPF(low-pass filter)と、再生素子当たりのタップ数 $N_t = 15$ の2次元FIR(TD-FIR: two-dimensional finite impulse response)フィルタにより、記録ヘッドからTD-FIRフィルタ出力までがPR1(partial response class-I)特性[8]となるように波形等化する。次いで、APP(a posteriori probability)復号器によりPRチャネルに

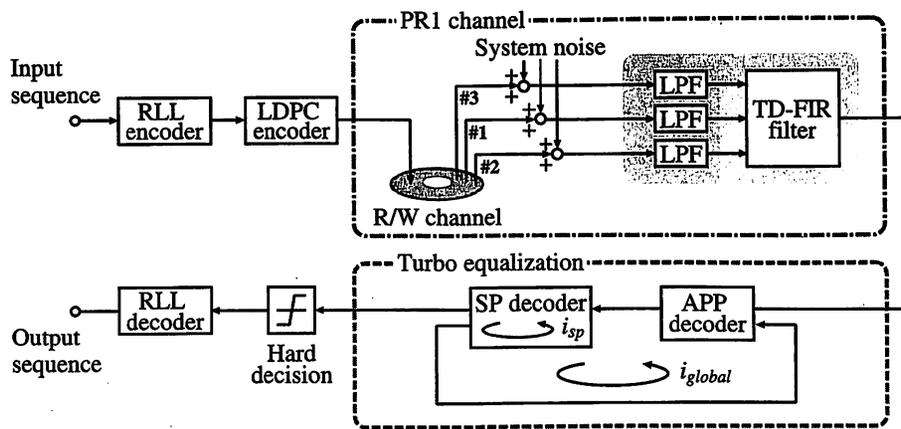


図 8 LDPC 符号化・繰返し復号化方式の

対する事後確率復号が行われ、SP(sum-product) 復号により LDPC 符号の制約を用いて 10 回の繰返し復号が行われる。また、APP 復号器と SP 復号器間における繰返し復号であるターボ等化も 10 回行い、硬判定器と RLL 復号器を通り出力される。最終的に出力データと入力データを比較して、BER を求めて評価する。また、誤り訂正 (繰返し復号) 前の APP 復号器出力を硬判定し、記録系列と比較したチャンネル誤り率 (CER : channel error rate) も用いて評価する。

3. 性能評価

図 9 に、面記録密度 4Tbit/in^2 において 100%リーダで再生した場合の BER 特性を示す。図の縦、横軸は、それぞれ BER, SNR_S を示している。図中の○, △, □, ▽, ◇, ●および▲印は、それぞれ BAR が 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 の場合の特性を示している。図より、繰返し復号を行うことで、BAR が 2.5 の場合において $\text{SNR}_S = 20\text{ dB}$ で誤りなく復号されていることがわかる。しかし、BAR = 1.0 の場合は、トラックピッチが更に狭くなるため ITI の影響が大きく $\text{SNR}_S = 30\text{ dB}$ においても BER が飽和している。また、BAR = 4.0 の場合も $\text{SNR}_S = 30\text{ dB}$ においてほとんど BER の改善が見られない。これは、ITI の影響は小さくなっているものの、ビット長が短過ぎるため ISI の影響が大きく、パーシャルイレージャが発生したためと予想される。

次に、図 10 に、記録密度に適した最適リーダサイズと BAR の関係を示す。図の縦、横軸はそれぞれ、BAR とその BAR に対して最適なリーダサイズを示している。ここで、最適リーダサイズは $\text{SNR}_S = 20\text{ dB}$ のとき、CER が最小となるリーダサイズである。図中の○, △, □, ▽, ◇印は、面記録密度が 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 Tbit/in^2 の場合をそれぞれ示している。図より、面記録密度が 2.0 および 2.5 Tbit/in^2 でかつ BAR が 2.0 より高い場合には 100%リーダよりサイズの大きなリーダを用いてもトラック幅が広いいため ITI の影響が小さく、また大きなリーダを用いることで再生振幅が大きくなるため、良好な特性となる。しかし、面記録密度が 3.0 Tbit/in^2 より高く、BAR が 3.5 より低い場合には、ITI の影響を受けにくいサイズの小さなリーダを用いることで良好な特性が得られることがわかる。

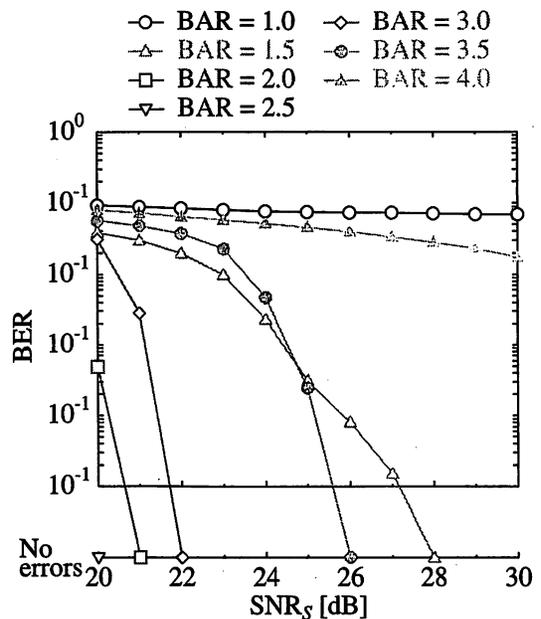


図 9 BER 特性 (4 Tbit/in^2 , 100%リーダ)

図 11 に、 $\text{SNR}_S = 20\text{ dB}$ における面記録密度が 4.0 Tbit/in^2 の場合の BER 特性を示す。図の○, △, □, ▽, ◇印は、それぞれの 70, 85, 100, 115, 130%のリーダサイズを示している。図より、100%リーダでは誤り無く復号できる BAR が 2.5 の場合のみであったが、100%リーダより小さな 70%, 80%リーダを用いることで ITI の影響が小さくなり、BAR が 1.5 や 2.0 の場合にも誤り無く復号できていることがわかる。しかし、BAR が 1.0 のように小さくなり過ぎると ITI の影響が大きくなり過ぎるため、特性が劣化したと考えられる。

4. むすび

本稿では、計算機シミュレーションにより、面記録密度に適したリーダサイズと BAR について、LDPC 符号化・繰返し復号化方式の BER を求めて評価した。その結果、面記録密度が 2.0 および 2.5 Tbit/in^2 でかつ BAR が 2.0 より高い場合、100%リーダよりサイズの大きなリーダを用いることで良好な特性となり、面記録密度が 3.0 Tbit/in^2 より高く、BAR が 3.5 より低い場

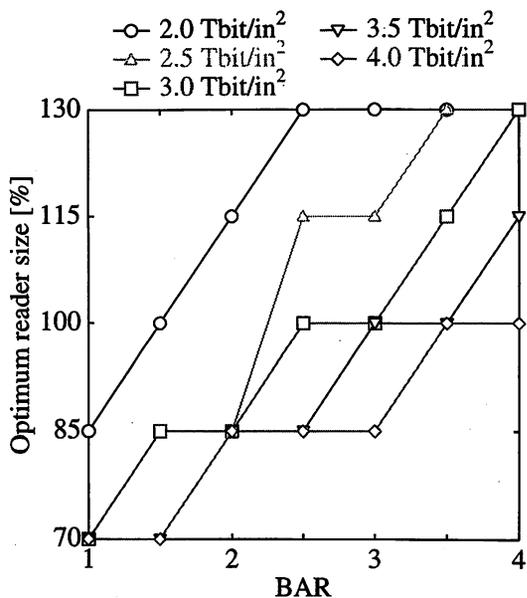


図 10 記録密度に適した最適リーダサイズと BAR の関係

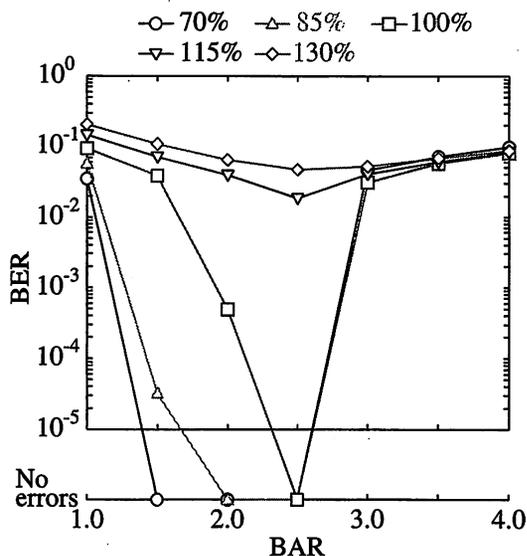


図 11 BER 特性 (4 Tbit/in²)

合は、ITI の影響を受けにくいサイズの小さなリーダを用いることで良好な特性が得られていることが明らかとなった。また、面記録密度が 4.0 Tbit/in² の場合には、100%リーダよりサイズの小さな 70%、85%リーダを用いることで、誤り無く復号できる BAR の範囲が広がることが明らかとなった。

謝辞 本研究の一部は、情報ストレージ研究推進機構 (ASRC) の助成のもとに行われたものであることを付記し、謝意を表します。

文 献

- [1] R. Wood, M. Williams, A. Kavcic, and J. Miles, "The feasibility of magnetic recording at 10 terabits per square inch on conventional media," *IEEE Trans. Magn.*, vol.45, no.2, pp.917-923, Feb. 2009.
- [2] 仲村 泰明, 西川 まどか, 大沢 寿, 岡本 好弘, 金井 靖, 村岡 裕明, "記録状態とリーダサイズに適した面記録密度," *信学ソ大*, C-7-2, Sept. 2017.
- [3] R. Suzuto, Y. Nakamura, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Kanai,

and H. Muraoka, "Effect of reader sensitivity rotation in TDMR with head skew," *IEEE Trans. Magn.*, vol.52, no.7, 3001604, July 2016.

- [4] 澗田 孝康, 中村 博文, 森 邦彦, 村島 定行, "母点を一つずつ追加することにより効率良く 2 次元離散ポロノイ図を作成する方法," *信学論 (A)*, vol.J85-A, no.5, pp.571-583, May 2002.
- [5] M. Yamashita, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Nakamura, Y. Suzuki, K. Miura, and H. Muraoka, "Read/write channel modeling and two-dimensional neural network equalization for two-dimensional magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol.47, no.10, pp.3558-3561, Oct. 2011.
- [6] Y. Kanai, Y. Jinbo, T. Tsukamoto, S. Greaves, K. Yoshida, and H. Muraoka, "Finite-element and micromagnetic modeling of write heads for shingled recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol.46, no.3, pp.715-721, Mar. 2010.
- [7] Y. Nakamura, N. Fujimoto, Y. Okamoto, H. Osawa, and H. Muraoka, "Evaluation of multiple reader location for TDMR R/W channel," *IEEE Trans. Magn.*, vol.50, no.11, 3002104, Nov. 2014.
- [8] E. R. Kretzmer, "Generalization of a technique for binary data communication," *IEEE Trans. Commun. Technol.*, vol.14, no.1, pp.67-68, Feb. 1966.