

## 二次元磁気記録のための簡易な媒体モデルに関する研究

加藤 智隆<sup>†</sup> 鎌部 浩<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 岐阜大学大学院工学研究科応用情報学専攻

〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1

E-mail: †{Tomotaka.Kato,kamabe}@kmb.info.gifu-u.ac.jp

**あらまし** 二次元磁気記録 (TDMR) は、現行の方式を上回る記録密度を達成可能な技術の一つである符号化と信号処理は、TDMR の重要な課題である。信号処理の研究には媒体モデルが不可欠であるが、よく使用されるポロノイモデルは多くの計算時間を必要とする。そこで本研究では、簡易なモデルとポロノイモデルとを比較する。また、計算機実験の結果をもとにモデルを調整し、二つのモデルが誤り率の意味で、よく似た特性を示すようにする。

**キーワード** 磁気記録, TDMR, ポロノイモデル

### Simple Channel Models for TDMR

Tomotaka KATO<sup>†</sup> and Hiroshi KAMABE<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering, Gifu University

Yanagido 1-1, Gifu, Gifu, 501-1193 Japan

E-mail: †{Tomotaka.Kato,kamabe}@kmb.info.gifu-u.ac.jp

**Abstract** Two-Dimensional Magnetic Recording (TDMR) is one of architectures that can achieve the recording density higher than that of current magnetic recording technology. Coding techniques and signal processing methods are important parts of TDMR. Channel models for TDMR are also important because channels of TDMR must be very different from channels implemented by other magnetic recording architectures. The Voronoi model is a good model for medium of TDMR but it is very time-consuming. Thus, we try to propose simple channel models which have similar properties on error rate.

**Key words** Magnetic recoding, TDMR, Voronoi model

#### 1. はじめに

ハードディスクの記録密度は年々増加してきたが、その増加は現在の技術では  $2Tb/in^2$  で限界を迎えると予測されている [9]。そこで、さらなる記録密度の向上を持続するため新しい記録方式の研究が行なわれている。そのような方式の一つとして、二次元磁気記録 (Two-Dimensional Magnetic Recording, TDMR) がある [1]。この方式によると  $10Tb/in^2$  の記録密度が達成できると期待されている。熱アシスト磁気記録やビットパターンメディアなどの他の次世代磁気記録技術が、新しい記録媒体を必要とするのに対し、TDMR の利点は従来の媒体をそのまま使用できるという点にある。一方で、TDMR は新しい二次元信号処理アルゴリズムを必要とする。

本稿では、TDMR の二次元信号処理のための媒体モデルに焦点を当てる。既存の媒体モデルとしては、離散グレ

インモデルや二元誤り消失モデルなどがある。これらの中でポロノイモデルは他のモデルと比べて正確な結果が得られる一方で、計算時間が長いことが問題である。そこで本研究は、ポロノイモデルと同じ結果を与えるような簡易モデルを提案し、計算機実験の計算時間を短縮することを目的とする。

本稿では、2 節で TDMR について述べ、3 節でポロノイモデルの概要を示す。4 節では簡易モデルについて述べ、5 節で計算機実験の内容と結果を示し、6 節でまとめる。

#### 2. TDMR

##### 2.1 概要

従来の方式では (従来の方式の記録密度では) 複数のグレインに 1 ビットを書き込んでいたが、TDMR が達成しようとしている記録密度は、1 ビットを 1 グレインに書き込むことを意味する。この記録密度を達成するために、二

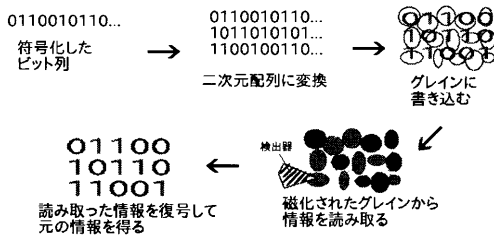


Fig. 1: TDMR の原理

次元符号化および二次元的な信号検出を必要とする。Fig.1 は、15 ビットを 15 個のグレインに書き込んだ後にそこから情報を読み取るという流れを表している。これが実現できると、1 ビットを 1 グレインに書き込める。

TDMR は、チャンネルビット 1 つあたりのグレイン数が少ないため、書き込みや読み取りの際に以下に述べるような理由で、エラーが不可避免的に生じてしまう。

Fig.2 は、記録媒体の表面の様子を概念的に表した図であり、図中の楕円はグレインを意味している。正方格子はチャンネルビットを意味し、左側と上側に付した英数字はグレインの座標を指定するための記号である例えば、正方格子における 1 行 1 列目の格子の座標は 1a である。

ここで、2 ビット分の領域にまたがるようなグレイン (2b および 2c) に注目する。このグレインは、たとえ右半分 (2c) に 1 という情報を記録したとしても、左半分 (2b) に 0 を記録すると、結果的には 0 しか記録されない。つまり最初書き込んだ情報が消失してしまうことになる。また、3b ヘデータビットを書き込もうとした場合は、グレインが存在しないためデータを書き込めない。

### 3. ボロノイモデル (媒体の数理モデル)

#### 3.1 概要

ボロノイモデルとは、ボロノイダイアグラムのボロノイセル (Fig.3 右の点線) を、グレインと見なすというモデルである [4]。

ボロノイダイアグラムは以下のようにして構成する。

- i 正方格子 (Fig.3 左) を用意する。
- ii 各正方形の中心●をランダムに移動し、×印 (Fig.3

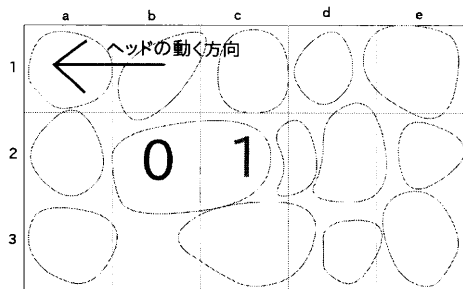


Fig. 2: グレインの様子 [6]

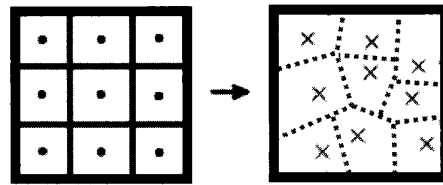


Fig. 3: ボロノイモデル

右)を得る。●の移動距離は、 $x$  軸方向と  $y$  軸方向のそれぞれについて、正規分布  $N(0.0, \sigma_0^2)$  を持つとする。

- iii ×印の領域をそれぞれ設定。各領域内に含まれる全ての点が ×印に最も近くなるようにする。

#### 3.2 信号の検出

媒体上に記録されたデータは、以下の二次元読取感度関数 (2-D read sensitivity function) [3] によって検出される。

$$h(b, t) = \exp\left(\frac{-1.34898^2(b^2 + t^2)}{2(T_{50}/T)^2}\right) \quad (1)$$

パルス半値幅  $T_{50}$  はビットセルの一边の長さ  $T$  と等しいとし、検出座標  $(b, t)$  は  $T$  で正規化する。このとき、出力  $y_{i,j}$  はこう書ける [5]。

$$y_{i,j} = \sum_{(k,l) \in \mathcal{N}_{i,j}} x_{k,l} h_{i-k, j-l}^{(i,j)} + n_{i,j} \quad (2)$$

ここで  $x_{i,j} \in \{+1, -1\}$  は入力データ配列であり、集合  $\mathcal{N}_{i,j}$  は、簡易モデルでの定義と同様に、第  $(i, j)$  ビットおよびその隣接ビットの相対的位置を表す。  $\delta_b, \delta_t$  はダウントラック方向およびクロストラック方向についてのランダムポジションジッタ、  $n_{i,j}$  は加法性ノイズを示すが、本稿ではこれらについては無視する。すなわち、上式は次のように書きかえられる。

$$y_{i,j} = \sum_{(k,l) \in \mathcal{N}_{i,j}} x_{k,l} h_{i-k, j-l}^{(i,j)} \quad (3)$$

感度関数  $h(b, t)$  は、  $(k, l) = (0, 0)$  の場合、つまり検出器が第  $(i, j)$  ビットそのものを読み取るとき、  $h(0, 0) = \exp(0) = 1.0$  と最大値を示す。

### 4. 簡易モデル

TDMR の信号処理のための計算機実験を簡単にする単純なモデルを取り上げる。このモデルでは、Fig.4 のように  $3 \times 3$  の部分に注目する。中心のビットに隣接ビットが干渉し、その度合いはランダムに変わると仮定する。符号化データの二次元配列の  $i$  行  $j$  列目にあたる要素を  $x_{i,j} \in \{+1, -1\}$  とすると、出力  $y_{i,j}$  は次のように書けると仮定する [7]。

$$y_{i,j} = \sum_{(k,l) \in \mathcal{N}_{i,j}} x_{i-k, j-l} r_{k,l} \quad (4)$$

ここで  $\mathcal{N}_{i,j} \in \{-1, 0, 1\}, \{-1, 0, 1\}$  は  $x_{i,j}$  のインデック

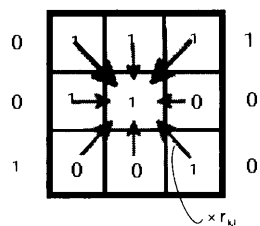


Fig. 4: 簡易モデル

スと隣接部分のそれとの差とする。  $r_{k,l}^{(i,j)}$  は  $x_{i,j}$  に干渉する係数 (正規乱数) の集合とし、係数格子と呼ぶこととする。これは正規分布  $N(\mu_s, \sigma_s^2)$  を持つ。

本稿では上記の係数格子から成る簡易モデルを使用し、計算機上で実験する。なお、今回の計算機実験では媒体から情報を検出する過程を重視しているため、書き込みエラーについては無視した。

係数格子  $r_{k,l}^{(i,j)}$  を適切に設定するための作業として、ポロノイモデルから得られる出力の分析を行なう。具体的には、係数の分布を信号出力から調べた上で、その平均と分散を求める。そうして得られた平均と分散をもとに、簡易モデルの改善を図る。

### 5. 計算機実験

#### 5.1 使用する符号

データはリードソロモン符号で符号化した。実用的なリードソロモン符号は符号長を  $n = 2^m - 1$  とすることが多いことから [10]、本稿では  $m = 8, n = 255$  の符号を使用する。ただし、以下に述べるように、一つの記号は複数のトラックに渡って記録するようにする。また、リードソロモンの復号は行わない。誤り確率は、読み出した出力を硬判定して得られた記号列から算出している。符号化された系列は、ランダムな系列とは異なるので、データ系列ではなく符号化された系列に対してこのような誤り確率を計算する意味はあるものと考がえられる。

リードソロモン符号は  $\mathbb{F}_{2^m}$  の元を体  $\mathbb{F}_2$  上の  $m$  次元ベクトル  $\mathbf{a} = \{\alpha_i \in \mathbb{F}_2 | i = m-1, \dots, 0\}$  と表現した後、拡大体  $\mathbb{F}_{2^m}$  に関して  $\mathbf{a}_j (j = 0, \dots, n-1)$  と表し、001010...111 のような直線状のビット列として通常は書き込む。これを TDMR に応用する場合、ビット列を平面状に書き込む必要がある。そこで本稿では  $\mathbf{a}_j$  を行ベクトルではなく列ベクトルと見なし、それを並べていく。  $\alpha_i$  を一つのシンボルとすると、以下のように配置することになる。

$$\begin{matrix} a_{m-1,0} & a_{m-1,1} & \cdots & a_{m-1,n-1} \\ a_{m-2,0} & a_{m-2,1} & \cdots & a_{m-2,n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{0,0} & a_{0,1} & \cdots & a_{0,n-1} \end{matrix}$$

#### 5.2 分析の方法

係数格子  $r_{k,l}^{(i,j)}$  の構築に使用する正規乱数の平均  $\mu_s$  と

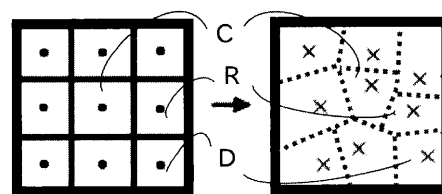


Fig. 5: ポロノイセルの対応関係

分散  $\sigma_s^2$  をポロノイモデルでの計算機実験によって求める。上下左右の各方向からの影響は、それぞれ等価であると仮定する。斜め 4 方向についてもそれぞれ同等であるものとする。

#### 5.3 セル R からセル C への影響

まず、あるポロノイセル C の右に位置する別のセル R がセル C に与える影響を求める。●から x への移動距離の分散  $\sigma_v^2 = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$  について計算機上で実験した。

その結果、Fig.6 のように正規分布に近い分布が得られた。ここで、横軸は基準となる出力に対するセル R の出力比、縦軸は横軸の値を示す頻度である。4 本のグラフは、それぞれ異なる  $\sigma_v^2$  に対応している。

#### 5.4 セル D からセル C への影響

続いて、セル C から見て右下にあたるセル D の影響も分析し、Fig.7 のような分布が得られた。横軸は先ほど同様、基準の出力に対するセル D の出力比であり、縦軸は横軸の値が現れる頻度を示す。

ここで Fig.6 と Fig.7 に関して  $\sigma_v^2$  を横軸として平均値をとると Fig.8 のようになった。セル D からセル C からの影響は約 0.15 で一定、セル R からの影響についてはおよそ 0.35 で一定となっているのがわかる。

同様に、Fig.6 と Fig.7 に示す分布の分散は Fig.9 のとおりである。こちらは  $\sigma_v^2$  に対して比例している。同様の特性は  $\sigma_c^2$  についても求めてある。

#### 5.5 簡易モデルのパラメータの設定

右のセル R と右下のセル D が、中心のセル C に与える影響、セル C からの出力をもとに、簡易モデルの係数格子  $r_{k,l}^{(i,j)}$  を生成する。  $r_{k,l}^{(i,j)}$  の要素は、  $k, l$  の値によって次のように場合分けされる。ここで各要素はそれぞれ独立であ

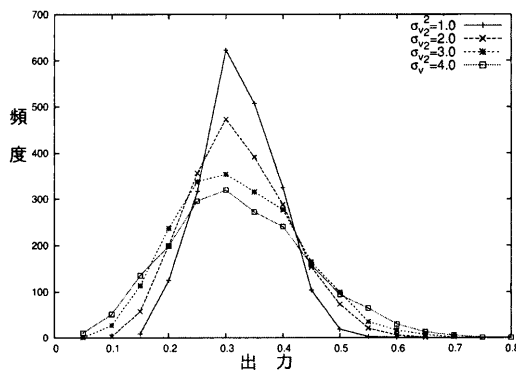


Fig. 6: セル R がセル C に与える影響

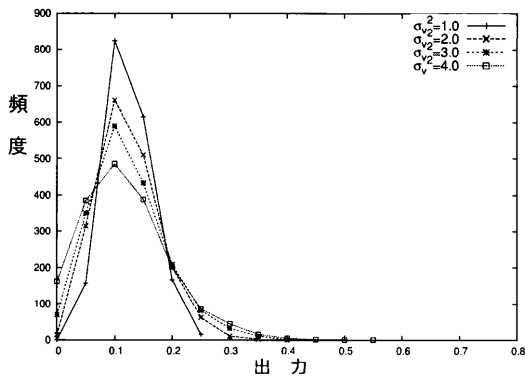


Fig. 7: セル D がセル C に与える影響

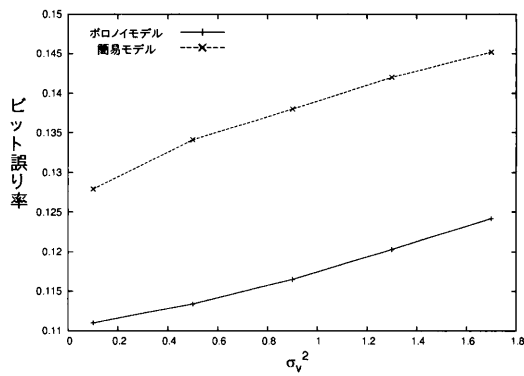


Fig. 10: 簡易モデルとボロノイモデル

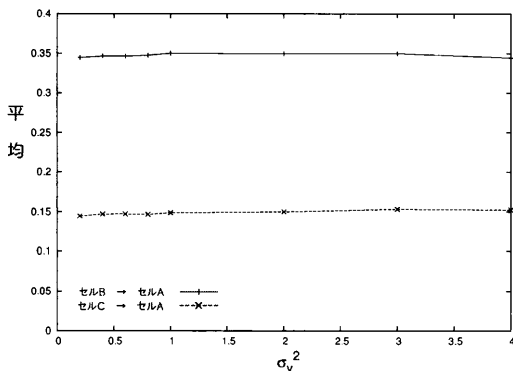


Fig. 8: 分布の平均値

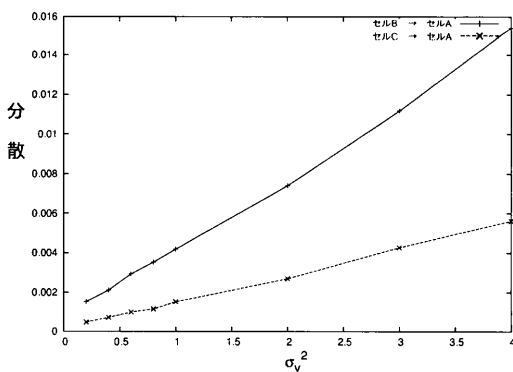


Fig. 9: 分布の分散

り、相関はないものとする (付録 A を参照).

- $(k, l) = \{(\pm 1, 0), (0, \pm 1)\}$ , すなわち格子の中心から見て上下左右の係数は正規分布  $N(\mu_R, \sigma_R^2)$  を持つ.
- $(k, l) = \{(\pm 1, \pm 1), (\mp 1, \pm 1)\}$ , すなわち斜め方向の係数は  $N(\mu_D, \sigma_D^2)$  を持つ.
- $(k, l) = (0, 0)$ , すなわち中心の係数は  $N(\mu_C, \sigma_C^2)$  を持つ.

### 5.6 ボロノイモデルとの比較

Fig.10 簡易モデルとボロノイモデルによる計算機実験結果を表す. グラフの縦軸はビット誤り率, 横軸については先のグラフと同様, ボロノイモデルのパラメータ  $\sigma_v^2$  である.

2つのグラフの間には最大で 0.021 ほどの開きがある. これを小さくするために簡易モデルの調整を行なった. 手

順は以下のとおりである:

- 係数格子の中心とそれ以外について, 平均値の比を 3 : 7 に設定する (付録 B).
- $\{\sigma_R^2, \sigma_D^2, \sigma_C^2\}$  を  $\sigma_v^2 = 0.1$  におけるセル R とセル D が中心セルに与える影響およびセル C からの出力の分散とする ( $\sigma_v^2 = 0.1$  に固定しない場合について, 付録 C に述べている).
- $\sigma_v^2$  に対して簡易モデルの誤り率がボロノイモデルの誤り率と同じになるように, 簡易モデルの分散を定める.

$$\sigma_R^2 = c\sigma_R^2 \tag{5}$$

$$\sigma_D^2 = c\sigma_D^2 \tag{6}$$

$$\sigma_C^2 = c\sigma_C^2 \tag{7}$$

こうした調整を行なった後のグラフを Fig.11 に示す. Fig.12 が  $c$  のグラフである.  $\sigma_v^2$  に対して, およそ線形の関係にあるのがわかる.

## 6. まとめ

本稿では, あるセルに対する隣接セルの影響をボロノイモデルによって調べ, その結果をもとに簡易モデルのパラメータを決定した. そして, 読み出した信号を硬判定したビット列の誤り率の差が小さくなるように, 分散を変換する係数を求めた.

簡易モデルの計算機実験の実行時間は, 100 回繰り返したときの平均で比較したところ, ボロノイモデルの 0.24% であった. 誤り率に関しては, ボロノイモデルと同じ結果を, 簡易モデルを使用して極めて短時間で得ることがわかった. ただし, 本稿では原理に基いてボロノイダイアグラムを生成しているため, 必要以上に時間がかかっているとも考えられる. 今後はボロノイダイアグラムを生成するための高速アルゴリズムを用いた場合との比較が必要である. ただし, 高速アルゴリズムを用いたとしても, ボロノイダイアグラムを用いた計算機実験では, 読み出し信号の計算に計算時間がかかり, また多くのメモリを必要とする. これらの点に関しては簡易モデルの優位性は

変わらないと考えられる。

一方で、簡易モデルでは隣接するグレインからの影響を示す係数が、物理的な意味をほとんど持っていないため、誤り率以外の何かをモデル化できていない可能性がある。今後はそうした可能性について検討する必要がある。

**謝辞** 本研究の一部は情報ストレージ研究推進機構 (SRC) の援助のもとに行ないました。ここに謝意を表します。

文 献

[1] R. Wood, M. Williams, A. Kavcic, and J. Miles, "The feasibility of magnetic recording at  $10Tb/in^2$  on conventional media", IEEE Trans. Magn., vol. 45, pp. 917 - 923, Feb. 2009.  
 [2] R. Wood, "The feasibility of magnetic recording at 1 terabit per square inch", IEEE Trans. Magn., vol. 36, pp. 36 - 42, Jan. 2000.  
 [3] M. Mallery, A. Torabi, and M. Benaki, "One terabit per square inch perpendicular recording conceptual design", IEEE Trans. Magn., vol. 38, no. 4, pp. 1719 - 1724, Jul. 2002.  
 [4] A.R.Krishnan, B. Vasic, R. Radhakrishnan, A. Kavcic, W.Ryan, and F. Erden, "Two-Dimensional Magnetic Recording: Read Channel Modeling and Detection", IEEE Trans. Magn., vol. 45, no.10, pp. 3830 - 3836, Oct. 2009.  
 [5] E. Hwang, R. Negi, and V. Kumar, "Signal Processing for Near  $10Tbit/in^2$  Density in Two-Dimensional Magnetic Recording (TDMR)", IEEE Trans. Magn., vol. 46, no. 6, pp. 1813 - 1816, Jun. 2010  
 [6] H. Kamabe, "Error Probabilities of 1 D Models for TDMR", InterMag 2009, BP-10, Sacramento, CA,

USA, 2009.

[7] H. Kamabe, "Coding scheme for ITI and ISI of Shingled Writing," InterMag2011, EU-01, Taipei, Taiwan, 2011.  
 [8] Z.J. Liu, B.J. Chen, H.T. Wang, and S.H. Zhang, "A Simulation Model for Two Dimensional Recording on Continuous Granular Media", IEEE Trans. Magn., vol. 46, NO. 6, pp. 2379 - 2382, Jun. 2010  
 [9] 日本経済新聞電子版, <http://www.nikkei.com/paper/article/g=9695999693819595E0E0E2E3908DE0EAE2EAE0E2E3E386989FE2E2E2;b=20110829>  
 [10] 植松友彦, "代数系と符号理論", pp. 117 - 129, オーム社, 2010  
 [11] 白木善尚 編, "情報理論", pp. 195 - 197, オーム社, 2008

付 録

A 隣接するセルの影響の相関

本文中では、ポロノイモデルにおいてセル R から C, セル D から C への影響を個別に調べた。しかしながら物理的な意味から考えると、これらの影響の間には相関があることが予想される。これを計算したのが Fig.A・1 である。

この図から、ポロノイセルの中心点の移動の分散がどのような値であっても、相関係数はさほど大きくないことがわかる。従って、本文中の実験で仮定したように、異なる方向からの影響は独立であると仮定してよいと思われる。

B 中心と周辺の平均の比の定め方

5.6 節で簡易モデルの調整を行なう際、中心のセル C の自分への影響を示す係数の平均と、周囲からやってくる影響を表す変数の和の平均は、Fig.A・2 を参考にして以下のようにして決めた。

まず  $\sigma_v^2 = 0.1$  を固定する。そのときの  $\sigma_R^2, \sigma_D^2, \sigma_C^2$  は、すでにわかっている。また、それらの平均値もわかっている。A を中心セルの影響の平均値, B を周辺のセルからの影響の平均値の和, とする。これが

$$A : B = r : (1 - r)$$

となるように、A もしくは B を正規化する。その平均を使用して、モデルを実行する。Fig.A・2 は、このときの r と、誤り確率とのグラフである。水平の線が、ポロノイダイアグラムを利用したときの、 $\sigma_s^2 = 0.21$  のときの誤り確率である。

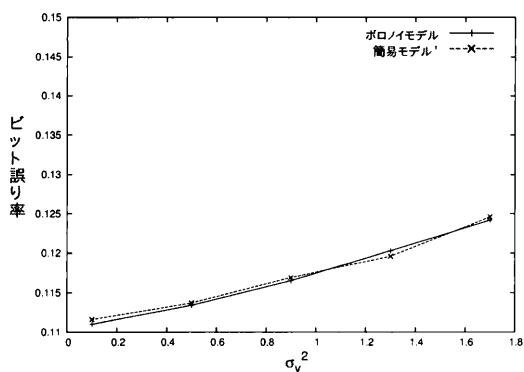


Fig. 11: 調整後のグラフ

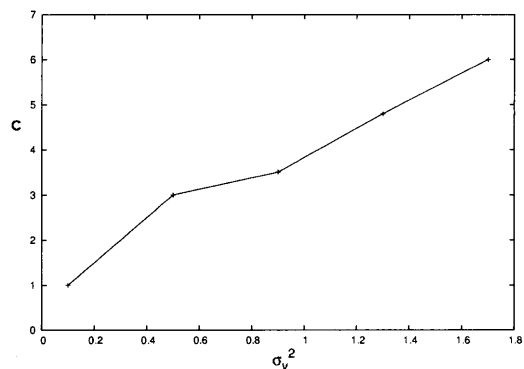


Fig. 12: c のグラフ

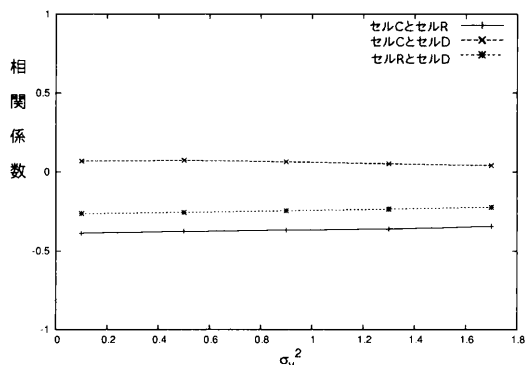


Fig. A・1: 相関係数

これら二つの線が交差するところでもって、中心のセルと周辺のセルの割り合いを決めた。ここでは近似して  $r = 0.3$  とした。

**C  $\sigma_v^2$  によって係数の分散を変化させる場合**

5.6 節で簡易モデルを調整するとき、 $\{\sigma_R^2, \sigma_D^2, \sigma_C^2\}$  は  $\sigma_v^2 = 0.1$  のポロノイモデルから得られる値に固定した。ここでは 0.1 以外の値についても簡易モデルのパラメータとして利用し、このときのモデルを簡易モデル A として計算機実験を行なった。そして、誤り確率が合うように、さらに以下の二つのモデルを考えた。

- モデル A: Fig.9 ( $\sigma_C^2$  についても同様の結果を得ている) から、 $\{\sigma_R^2(\sigma_v^2), \sigma_D^2(\sigma_v^2), \sigma_C^2(\sigma_v^2)\}$  と考えて分散を設定して計算機実験を行う。
- モデル B: モデル A において、中心のセルの自分自身への影響の平均値と周辺からの影響の和の平均値の比を 3:7 にする。
- モデル C: モデル B において、分散の値をすべて 0.75 倍する。

以上の 3 つの簡易モデルとポロノイモデルとを比較した結果を Fig.A.3 に示す。これから、モデル C がポロノイモデルと近いことが分かる。

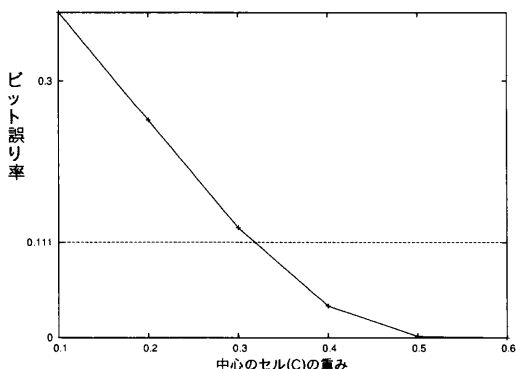


Fig. A.2: 中心の重みと誤り率

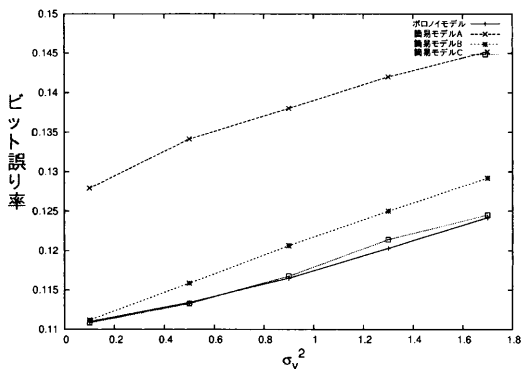


Fig. A.3: 各モデルの誤り率