

情報処理センター  
研 究 報 告

The Bulletin of the Information Processing Center

第 26 号

(2005.3)

岡山理科大学

Okayama University of Science

岡山市理大町 1 - 1

Tel (086) 252-3012 (直)

# 目 次

## 1. 酸化スズ結晶表面上に吸着した水分子のダイナミクス

理学部	高 原 周 一	
	佐 伯 和 志	----- 1
	橘 高 茂 治	

## 2. 自己組織化ニューラルネットワークの並列分散特性

情報工学科	成 久 洋 之	
呉工業高校専門学校電気情報工学科		----- 3
	井 上 浩 孝	

## 3. 非凸2次計画問題における一定の誤差内に納まる近似解法

工学部電子工学科	福 島 義 人	----- 15
情報処理センター	岩 崎 彰 典	

## 4. パラメータと非線形関数の統計量～古地磁気方位データの平均～

情報処理センター	畠 山 唯 達	----- 21
----------	---------	----------

## 5. インターネットを利用した広域高大連携教育

大学院総合情報研究科情報科学専攻・情報処理センター		
	大 西 荘 一	
大学院総合情報研究科情報科学専攻		
	榊 原 道 夫	----- 31
	秋 山 雄 亮	
	青 嶋 智	
情報処理センター	田 坂 仁 昭	



# 酸化スズ結晶表面上に吸着した水分子のダイナミクス

(岡山理科大学理学部) 高原周一, 佐伯和志, 橋高茂治

## 1. はじめに

我々はこれまで,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SrF}_2$  および  $\text{ZnO}$  の結晶表面に吸着した水分子の運動性について, 中性子準弾性散乱測定により調べてきた[1, 2]. これらの系の水吸着等温線は, 均一な単分子吸着層の形成に対応する1つのステップをもつ. 最近我々は,  $\text{SnO}_2$  結晶表面への水の吸着等温線を測定し, **Figure 1** に示されるように2~3個のステップを観測した. これは, 多分子層が一層ごとに形成されることに対応し, 興味深い. 今回はこの系の水分子の運動性について, 中性子準弾性散乱測定により調べた.

## 2. 実験

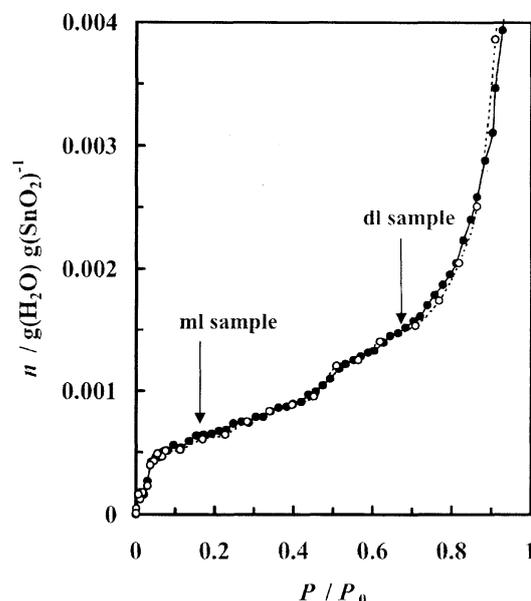
$\text{SnO}_2$  結晶としては, 濃硝酸で金属スズを酸化して生成した沈殿を蒸留水で洗浄したものを用いた. 水分子の運動性の吸着量依存性を調べるため, 乾燥 (dry), 単分子層 (ml), 2分子層 (dl), 3分子層 (tl) の4試料を用意した. 中性子散乱測定は高エネルギー加速器研究機構の LAM-80ET ( $\lambda=6.53$  Å) を用い, 273 - 323 K の温度範囲で行った.

## 3. 結果・考察

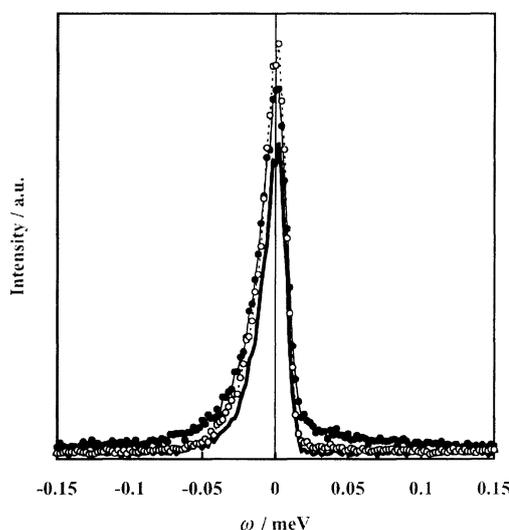
**Figure 2** に, 298 Kにおける dry, ml, dl試料の中性子散乱スペクトルを示す. dry試料のスペクトルは装置関数にほぼ等しかった. ml試料では, スペクトルに準弾性散乱の裾が観測されたが, その強度は弱く, ほとんどの水分子は中性子散乱のタイムスケールでは拡散運動していないことがわかった. 一方, dl試料では大きな準弾性散乱の裾が見られ, ml試料に比べて水分子は動きやすいことがわかる. また, dl試料のスペクトルの最大値はml試料のそれに比べて小さくなっている. これは, ml試料中の水分子より, dl試料中で表面に直接吸着している水分子の方が動きやすいことを示す結果である. このようなことが起こるのは, 多分子吸着層部分との相互作用で単分子吸着層部分の構造が破壊されたためと考えられる.

dl および tl 試料の中性子散乱スペクトルを定量的に解析するために, まず dry 試料のスペクトルを差し引いて水分子からの寄与のみを取り出した. このスペクトル  $I(Q, \omega)$  を以下の式を用いてフィッティングした.

$$I(Q, \omega) = \left[ A \left\{ C_0 \delta(\omega) + (1 - C_0) \frac{1}{\pi} \frac{\Gamma}{\omega^2 + \Gamma^2} \right\} + B \right] \otimes I_R(Q, \omega) \quad (1)$$



**Figure 1.** Adsorption (○) and desorption (●) isotherms of water on  $\text{SnO}_2$  at 298 K.



**Figure 2.** QENS spectra of the dried (solid line), monolayer (○) and double-layer (●) samples of  $\text{SnO}_2$  at 298 K and at  $Q = 1.43 \text{ \AA}^{-1}$ .

ここで、 $Q$  は中性子の運動量変化、 $\omega$  はエネルギー変化である。 $\alpha(\omega)$  はデルタ関数、 $\Gamma$  は準弾性成分の半値半幅、 $I_R(Q, \omega)$  はバナジウム金属円筒で測定した装置関数、 $\otimes$  は  $\omega$  での畳み込みを表す。 $A$  はピーク強度、 $C_0$  は全強度に対する弾性成分の割合、 $B$  はバックグラウンドである。弾性成分は表面近傍に束縛された水分子からの寄与、準弾性成分はそれ以外の水分子からの寄与であると解釈できる。フィッティングに使用したコンピュータは岡山理科大学情報処理センターに設置されているワークステーション IBM59H, 用いたプログラムは KIWI [3] である。Figure 3 に tl 試料についてのフィッティング結果を示す。

Figure 4 に上記のフィッティングによって決定された  $C_0$  の温度依存性を示す。図中の点線は、各試料の ml 部分が弾性成分を与えた場合の  $C_0$  の値を示している。フィッティングによって得られた  $C_0$  の値は、dl および tl 試料ともに点線で示された値より小さかった。これより、ml 部分の水分子の一部は、その運動性が高くなり、準弾性散乱に寄与していることが定量的にも示された。

Figure 5 に上記のフィッティングによって決定された  $\Gamma$  の逆数から出した緩和時間  $\tau$  の温度依存性を示す。比較のために  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SrF}_2$ ,  $\text{ZnO}$  結晶表面の単分子吸着水 [1, 2], およびバルク水 [4] のデータも示してある。この図より、 $\text{SnO}_2$  の dl および tl 試料中の ml 部分以外の水分子は、バルク液体中の水分子に比べて動きにくい、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SrF}_2$ ,  $\text{ZnO}$  の ml 試料中の水分子に比べると動きやすいことがわかる。ただし、 $\text{SnO}_2$  の ml 試料中の水分子は、ほぼ弾性散乱を与えているので、少なくとも  $\text{SrF}_2$ ,  $\text{ZnO}$  の ml 試料中の水分子に比べると動きにくい。このことは、 $\text{SnO}_2$  の単分子吸着水が何らかの秩序構造を持っていることを示唆している。

## 参考文献

- 1 Y. Kuroda et al., *J. Phys. Chem. B*, **103** (1999) 11064.
- 2 S. Takahara et al., *J. Phys. Chem. B*, **106** (2002) 5689.
- 3 A fit program for quasi-elastic data analysis, "KIWI ver.1.01" made by N. Fanjat
- 4 J. Teixeira et al. *J. Phys. Rev. A*, **31** (1985) 1913.

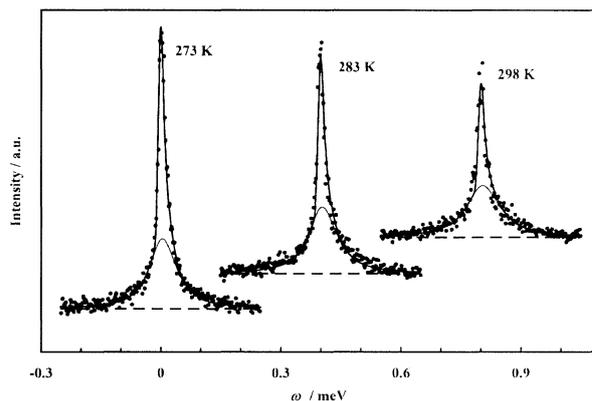


Figure 3. QENS spectra of tl sample at 298 K and at  $Q = 1.43 \text{ \AA}^{-1}$ . Closed circles indicate the experimental data. Thick, thin and broken lines are for the total fit, the quasi-elastic component and the background, respectively.

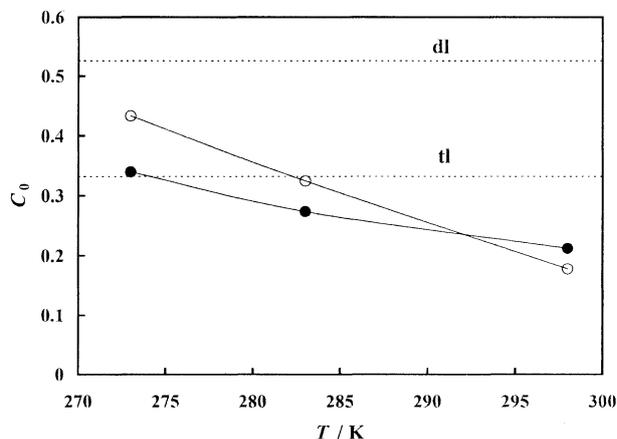


Figure 4. Temperature-dependence of ratio of elastic component  $C_0$  for dl (○) and tl (●) samples.

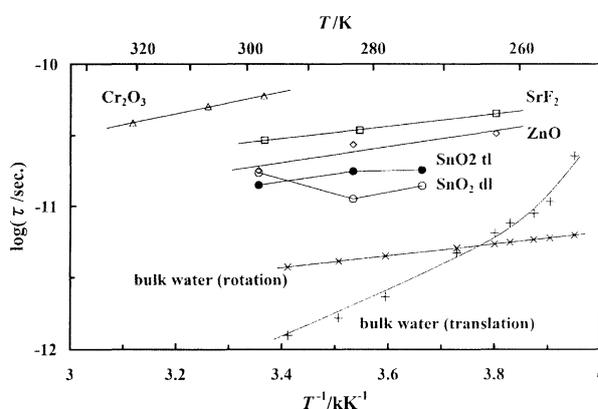


Figure 5. Arrhenius plot of relaxation times  $\tau$  of water molecules.

# 自己組織化ニューラルネットワークの並列分散特性

成久洋之\*, 井上浩孝\*\*

\*岡山理科大学 情報工学科

\*\*呉工業高校専門学校 電気情報工学科

## 目次

1	はじめに	4
2	自己組織化ニューラル木立	5
2.1	自己生成ニューラル木オンライン枝刈り法	5
2.2	自己組織化ニューラル木立の最適化	6
2.3	二次元ニクラス問題に対する具体例	8
3	並列分散処理	8
4	実験結果	9
5	まとめ	13

## あらまし

本論文では、MIMD型の並列計算機における分類問題に対する自己組織化ニューラル木立 (self-organizing neural groves: SONGs) の解の改善能力と並列効率について検討する。自己生成ニューラルネットワーク (Self-generating neural networks: SGNNs) はもともと与えられた訓練データから自己生成ニューラル木 (self-generating neural tree: SGNT) を自動的に構築することによって分類またはクラスタリングを行うために提案された。SONGは与えられた訓練データの提示順をランダムに入れ替えることによってそれぞれ独立に生成された複数のSGNTsから構成され、SONGの出力は全てのSGNTsの出力の平均として与えられる。我々はMIMD型の並列計算機の各プロセッサに各SGNTを配置する。実験結果より、全ての問題に対して使用するプロセッサ数が増えるにつれて、分類精度が向上されることが明らかとなった。

## キーワード

自己組織化, 枝刈り, 並列計算, 汎化能力改善

# 1 はじめに

ニューラルネットワークはパターン分類、クラスタリング、予測や認識のような知的情報処理の分野で幅広く利用されている。一般に、それらのニューラルネットワークはネットワークの構造といくらかのパラメータを研究者各自が決定しなければならない。試行錯誤を繰り返して特定のアプリケーションに最適なネットワークの構造を選ぶことは、非常に煩わしい作業である。ネットワーク構造の設計に関して、次のものを決定しないとイケない、(i) ネットワークの層数、(ii) 各層におけるニューロン数、(iii) 各層を結ぶ結合荷重の初期値。学習の際、訓練データを何度も提示して与えられたネットワークの結合荷重は少しずつ所定の期待出力が得られるように修正される。したがって、各ネットワークで正しい構造を決定することが学習においてもっとも重要な要素であり、ニューラルネットワークの設計においてもっとも難しい問題である。

上記のような煩わしくかつ難しい状況を避けるため、自己生成ニューラルネットワーク (Self-generating neural networks: SGNNs) はネットワーク設計の単純さのために注目されている [1]。SGNNsはKohonenの自己組織化マップ (Self-Organizing Maps: SOMs) [2] の拡張であり競合学習を用いた自己生成ニューラル木 (self-generating neural tree: SGNT) として実装される。

文献 [3] で提案されたSGNTアルゴリズムは、与えられた訓練データから直接ニューラル木を自動的に生成する。今までの我々のSGNTアルゴリズムの性能分析に関する研究より [4]、我々はSGNTアルゴリズムの主要な特性はその計算時間の高速さにあるが、バックプロパゲーション法を用いた従来の階層型ニューラルネットワークと比較して、その精度は劣るということがわかった。

SGNNsの汎化能力を改善するため、我々は分類問題に対してアンサンブル自己生成ニューラルネットワーク (ensemble self-generating neural networks: ESGNNs) を提案した [5]。ESGNNsはSGNNsにアンサンブル平均法 [6] を適用したものであり、SGNTアルゴリズムの高速学習特性を有効に利用したものである。ESGNNsは構造の異なる様々なSGNTsを用いることにより精度は改善されるけれども、計算時間と記憶容量はSGNTsの数が増加するのに比例して増加する。したがって、我々は計算時間と記憶容量を削減するためのESGNNsの構造に対する新しい枝刈り法を提案し、このモデルを自己組織化ニューラル木立 (self-organizing neural grove: SONG) と名付けた [7]。

アンサンブル学習は多くの人工知能とニューラルネットワークの研究者達によって研究されている。Breiman は CART [8] の精度を改善するためのバギング予測器を提案し、文献 [9] で分類と回帰の問題に対して CART と他の手法におけるバギング特性を検討した。アンサンブル学習は分散を減らす技法であるため、ニューラルネットワークや木構造モデルなどの高い分散がある手法に対して良く動作することが知られている。

本論文では、我々は MIMD 型の並列計算機における分類問題に対する SONG の解の改善能力と並列効率について検討する。我々は UCI 機械学習リポジトリの 10 のベンチマーク問題に対して本手法を適用する。

## 2 自己組織化ニューラル木立

本節では、どのように冗長な葉を刈り取るかについて述べる。はじめに、SGNT の学習におけるオンライン枝刈り法について説明する。次に、SONG を構築する際の最適化手法について記述する。最後に、簡単な二次元の二クラス分類問題に対する本手法の具体例を示す。

### 2.1 自己生成ニューラル木のオンライン枝刈り法

SGNT は SOM に基づき、競合学習を行う。SGNT は与えられた訓練データから直接自動的に人手を介さずに構築することができる。SGNT アルゴリズムを記述する前に、いくつかの表記法を以下に示す。

- 入力データベクトル:  $e_i \in \mathbb{R}^m$ .
- SGNT 内の根、葉、および節点:  $n_j$ .
- $n_j$  の重みベクトル:  $w_j \in \mathbb{R}^m$ .
- $n_j$  以下の葉の数:  $c_j$ .
- 距離測度:  $d(e_i, w_j)$ .
- SGNT 内で  $e_i$  に対して勝者となる葉:  $n_{win}$ .

SGNT アルゴリズムは階層型クラスタリングアルゴリズムである。擬似 C 言語の SGNT アルゴリズムを以下に示す。

*Algorithm (SGNT Generation)*

Input:

A set of training examples  $E = \{e_i\}$ ,  
 $i = 1, \dots, N$ .

A distance measure  $d(e_i, w_j)$ .

Program Code:

```
copy(n_1, e_1);  
for (i = 2, j = 2; i <= N; i++) {  
    n_win = choose(e_i, n_1);  
    if (leaf(n_win)) {
```

表 1: SGNT アルゴリズムにおける副手続き

Sub procedure	Specification
$copy(n_j, e_i/w_{win})$	Create $n_j$ , copy $e_i/w_{win}$ as $w_j$ in $n_j$ .
$choose(e_i, n_1)$	Decide $n_{win}$ for $e_i$ .
$leaf(n_{win})$	Check $n_{win}$ whether $n_{win}$ is a leaf.
$connect(n_j, n_{win})$	Connect $n_j$ as a child leaf of $n_{win}$ .
$prune(n_{win})$	Prune leaves if they have the same class.

```

    copy(n_j, w_win);
    connect(n_j, n_win);
    j++;
}
copy(n_j, e_i);
connect(n_j, n_win);
j++;
prune(n_win);
}

```

Output:

Constructed SGNT by E.

SGNT アルゴリズムにおいて、いくつかの副手続きが使用されている。TABLE 1 に SGNT アルゴリズムで使用されている副手続きとその仕様を示す。

副手続き  $choose(e_i, n_1)$  において、勝者となる葉  $n_{win}$  を決定するために、競合学習を用いる。もしも  $n_j$  が SGNT 内の子孫として  $n_{win}$  を持つならば、 $n_j$  の重み  $w_{jk}$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) は次のように更新される:

$$w_{jk} \leftarrow w_{jk} + \frac{1}{c_j} \cdot (e_{ik} - w_{jk}), \quad 1 \leq k \leq m. \quad (1)$$

全てのデータが葉として SGNT の中に挿入された後、葉は出力としてそれぞれクラスラベルを持ち、重みはそのノード以下に含まれる全ての葉の平均を保持することになる。SGNT の全体のネットワークがその位相構造によって与えられた訓練データの特徴空間を反映している。SGNT の構築法と性能に関する詳細は、この文献を参照されたし [3]。ここで、SGNT の構造の最適化を効率的に行うため、我々はもともとの SGNT アルゴリズム [3] の距離測度に基づいて葉の数を抑制するためのしきい値を取り去っている。この距離測度に基づく手法では、記憶容量と分類精度にトレードオフの関係がある。この問題を回避するため、我々はクラスラベルに基づくオンライン枝刈り法を副手続き  $prune(n_{win})$  内に実装した。もし勝者となった葉のもつクラスラベルと与えられた訓練データの持つクラスラベルが同じならば、その勝者となった葉を刈り取り、その親の重みをそれらのクラスラベルと置き換えることでオンラインで枝刈りを行う。

## 2.2 自己組織化ニューラル木立の最適化

The SGNT has the capability of high speed processing. However, the accuracy of the SGNT is inferior to the conventional approaches, such as nearest neighbor, because the SGNT has no guarantee to reach the nearest leaf for unknown data. Hence, we construct

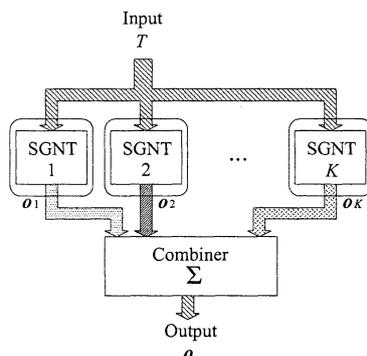


Figure 1: The SONG which is constructed from  $K$  SGNTs. The test dataset  $T$  is entered each SGNT, the output  $o_i$  is computed as the output of the winner leaf for the input data, and the SONG's output is decided by voting outputs of  $K$  SGNTs

```

1 begin   initialize  $j =$  the height of the SGNT
2 do for each subtree's leaves in the height  $j$ 
3   if the ratio of the most class  $\geq \alpha$ ,
4   then merge all leaves to parent node
5   if all subtrees are traversed in the height  $j$ ,
6   then  $j \leftarrow j - 1$ 
7 until  $j = 0$ 
8 end.

```

Figure 2: The merge phase

the SONG by taking the majority of plural SGNT's outputs to improve the accuracy (Figure 1).

Although the accuracy of the SONG is superior or comparable to the accuracy of conventional approaches, the computational cost increases in proportion to the increase in the number of SGNTs in the SONG. In particular, the huge memory requirement prevents the use of the SONG for large datasets even with latest computers.

In order to improve the classification accuracy, we propose an optimization method of the SONG for classification. This method has two parts, the merge phase and the evaluation phase. The merge phase is performed as a pruning algorithm to reduce dense leaves (Figure 2). This phase uses the class information and a threshold value  $\alpha$  to decide which subtree's leaves to prune or not. For leaves that have the same parent node, if the proportion of the most common class is greater than or equal to the threshold value  $\alpha$ , then these leaves are pruned and the parent node is given the most common class.

The optimum threshold values  $\alpha$  of the given problems are different from each other. The evaluation phase is performed to choose the best threshold value by introducing 10-fold cross validation (Figure 3).

```

1 begin initialize  $\alpha = 0.5$ 
2   do for each  $\alpha$ 
3     evaluate the merge phase with 10-fold CV
4     if the best classification accuracy is obtained,
5     then record the  $\alpha$  as the optimal value
6      $\alpha \leftarrow \alpha + 0.05$ 
7   until  $\alpha = 1$ 
8 end.

```

図 3: The evaluation phase

## 2.3 二次元二クラス問題に対する具体例

We show an example of the pruning method for the SONG in Figure 4. This is a two-dimensional classification problem with two equal circular Gaussian distributions that have an overlap. The shaded plane is the decision region of class 0 and the other plane is the decision region of class 1 by the SGNT. The dotted line is the ideal decision boundary. The number of training samples is 200 (class0: 100, class1: 100) (Figure 4(a)).

The unpruned SGNT is given in Figure 4(b). In this case, 200 leaves and 120 nodes are automatically generated by the SGNT algorithm. In this unpruned SGNT, the height is 7 and the number of units is 320. In this, we define the unit to count the sum of the root, nodes, and leaves of the SGNT. The root is the node which is of height 0. The unit is used as a measure of the memory requirement in the next section. Figure 4(c) shows the pruned SGNT after the optimization stage in  $\alpha = 1$ . In this case, 159 leaves and 107 nodes are pruned away and 48 units remain. The decision boundary is the same as the unpruned SGNT. Figure 4(d) shows the pruned SGNT after the optimization stage in  $\alpha = 0.6$ . In this case, 182 leaves and 115 nodes are pruned away and only 21 units remain. Moreover, the decision boundary is improved more than the unpruned SGNT because this case can reduce the effect of the overlapping class by pruning the SGNT.

## 3 並列分散処理

Because each expert of the SONG can train and test independently, the SONG has a possibility of the parallel computation at the training process and the testing process. Hence, we allocate each of experts to each of processors on the MIMD computer. The procedure of the parallelization of the SONG is presented as follows:

- Step1:** In a master processor, read the training set  $D$  and the test set  $T$  in the disk.
- Step2:** In the master processor, broadcast  $D$  and  $T$  for all  $K - 1$  slave processors.
- Step3:** In all processors, generate the SGNT from  $D$ , then test the SGNT using  $T$ , and compute the  $\mathbf{o}_k$  independently.
- Step4:** In all processors, each output  $\mathbf{o}_k$  for  $T$  is collected in the master processor by all to one communication.
- Step5:** In the master processor, compute  $\mathbf{o}$  by voting and write to the disk.

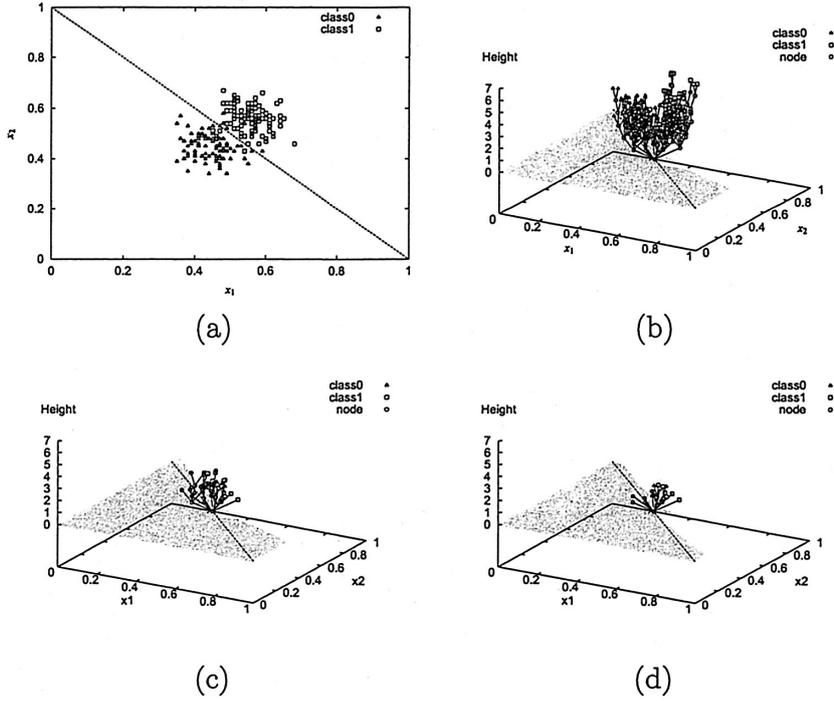


図 4: An example of the SONG's pruning algorithm, (a) a two dimensional classification problem with two equal circular Gaussian distribution, (b) the structure of the unpruned SGNT, (c) the structure of the pruned SGNT ( $\alpha = 1$ ), and (d) the structure of the pruned SGNT ( $\alpha = 0.6$ ). The shaded plane is the decision region of class 0 by the SGNT and the dotted line shows the ideal decision boundary

Because the number of the communications between the master processor and each slave processor is only two times (Step2 and Step4), the parallel efficiency is approximately expected the linear speedup (See Figure 5). In our case, all computations are performed on the Intel Paragon (Paragon XP/S15). This is a distributed memory multicomputer, and the architecture is multiple instruction multiple data (MIMD). The Paragon we use has 296 processors. Each processor is Intel i860XP (50MHz). The network topology of the Paragon is adopted the two-dimensional mesh.

## 4 実験結果

We allocate a SGNT to each of processors on the Paragon, and compute 100 trials for each single/ensemble model. The number of processors (SGNTs)  $K$  for the ensemble averaging is changed from 1 to 201 (1,3,5,7,9,15,25,51,101,151 and 201), and the threshold value  $\alpha$  is 1 for each SONG. In order to reduce the redundant execution, we repeated 100 trials from Step3 to Step5 in prior section continuously.

In order to investigate the parallel performance of the SONG, we select three typical classification problems which are given as benchmark problems in UCI repository [10]. Next, we describe the brief explanation of these problems.

**breast-cancer-wisconsin** : this problem is a binary classification task for classify a tumor as either benign or malignant based on cell descriptions gathered by a microscopic examination. Input attributes are :

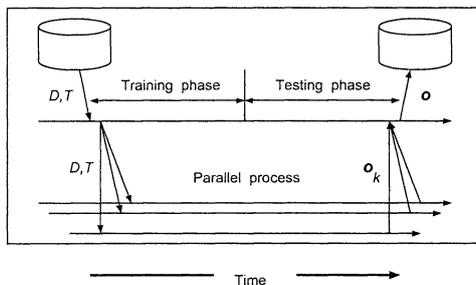


图 5: Parallelization of the SONG. Horizontal lines are the processors on MIMD parallel computer

- the clump thickness,
- the uniformity of cell size,
- cell shape,
- the amount of magical adhesion,
- the frequency of bare nuclei, etc.

This problem has 9 attributes, 699 examples. Each attribute consists of continuous real value.

**ionosphere** : this problem is a binary classification task for a radar as either good or bad based on the complex electromagnetic signals. The targets were free electrons in the ionosphere. “Good” radar returns are those showing evidence of some type of structure in the ionosphere. “Bad” returns are those that do not; their signals pass through the ionosphere. This problem has 34 attributes, 351 examples. Each attribute consists of continuous real value.

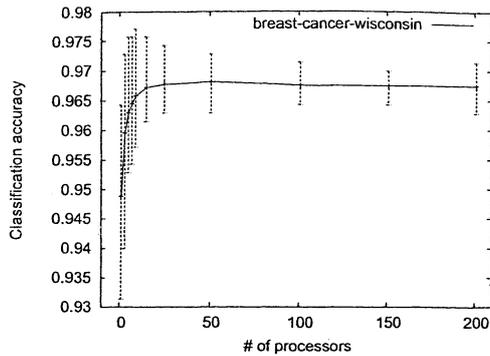
**letter-recognition** : The objective is to identify each of a large number of black-and-white rectangular pixel displays as one of the 26 capital letters in the English alphabet. The character images were based on 20 different fonts and each letter within these 20 fonts was randomly distorted to produce a file of 20,000 unique stimuli. Each stimulus was converted into 16 primitive numerical attributes (statistical moments and edge counts) which were then scaled to fit into a range of integer values from 0 through 15.

In this paper, we use below defined classification accuracy.

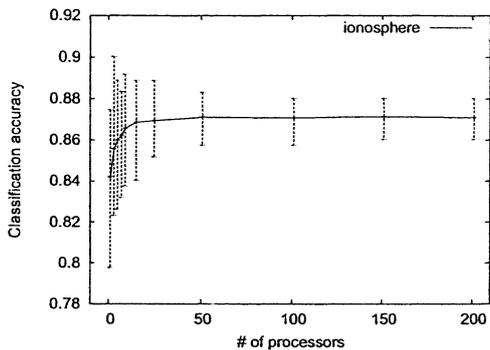
$$\text{classification accuracy} = \frac{\text{number of correct}}{\text{number of test data}} . \quad (2)$$

We evaluate the classification accuracy using 10-fold cross-validation [11] for above problems.

Figure 6, Figure 7, and Figure 8 show the influence of the number of processors on classification accuracy for breast-cancer-wisconsin, ionosphere and letter-recognition problems respectively. Classification rates are improved by computing the ensemble averaging of various SGNTs for all problems. Here, each misclassification rate shows the average of 100 trials and its error-bar. It is shown that the classification accuracies are improved by computing the ensemble averaging of various SGNTs for all problems. Especially, the



⊗ 6: Influence of the number of processors on classification accuracy for breast-cancer-wisconsin



⊗ 7: Influence of the number of processors on misclassification accuracy for ionosphere

minimum classification accuracies are largely improved for all problems. The improvement ability is obtained from small  $K$  most effectively. The classification accuracy of larger than 51 SGNTs is convergence for all problems. From these results, it seems to be decided the number of SGNTs  $K \leq 51$ .

Figure 9, Figure 10, and Figure 11 shows the relation between the number of processors and the execution times for breast-cancer-wisconsin, ionosphere, and letter-recognition problems respectively. The execution times are gradually saturated as the number of processors increase. As the scale of the dataset grows, the proportion of the communication time, i.e. the difference of the total time and the training time + the testing time, for the total time is decrease. This means that this method have an approximately linear speedup for large scale datasets.

Consequently, a parallel distributed computing using SONG can obtain more higher classification accuracy than the single SGNT by allocating each of SGNTs to each of processors, go on maintaining the high speed processing property of the single SGNT.

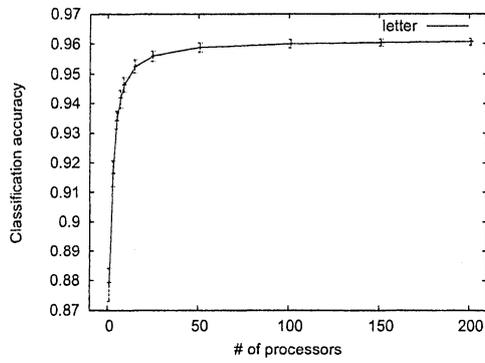


Figure 8: Influence of the number of processors on misclassification accuracy for letter-recognition

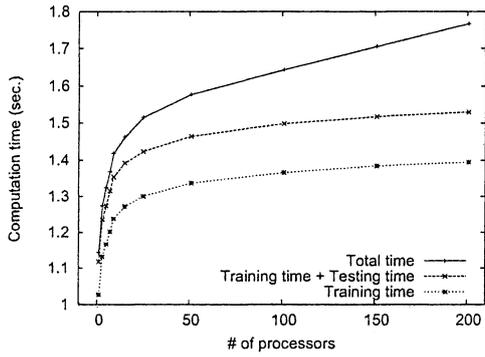


Figure 9: Relation between the number of processors and execution time (seconds) for breast-cancer-wisconsin

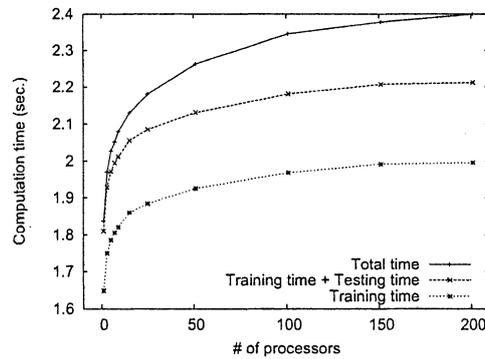


Figure 10: Relation between the number of processors and execution time (seconds) for ionosphere

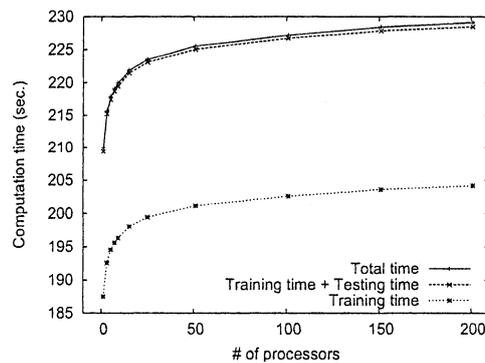


Figure 11: Relation between the number of processors and execution time (seconds) for letter-recognition

## 5 まとめ

本論文では、我々は MIMD 並列計算機上で分類に対するより効率的な実装が得られるための SONG の並列分散計算を検討した。実験結果より次のことが明らかとなった。

- SONG による並列分散計算は MIMD 型計算機上の各プロセッサに割り当てた構造の異なる SGNT を用いることで解の精度が改善できる。
- SONG による並列分散計算は MIMD 型計算機上の各プロセッサに各 SGNT を配置することで高い並列効果を得ることが出来る。

将来、大規模データマイニングに対する SONG の追加学習に関する研究を行う予定である。

## 参考文献

- [1] W. X. Wen, V. Pang, and A. Jennings, Self-generating vs. self-organizing, what's different? in P. K. Simpson (Ed), *Neural Network Theory, Technology, and Application*, IEEE Technology Update Series (Piscataway: IEEE Technical Activities Board, 1996) 210-214.
- [2] T. Kohonen, *Self-Organizing Maps* (Berlin: Springer-Verlag, 1995).
- [3] W. X. Wen, A. Jennings, and H. Liu, Learning a neural tree, *Proc. the International Joint Conference on Neural Networks*, Beijing, China, 1992, vol. 2, 751-756.
- [4] H. Inoue and H. Narihisa, Efficiency of Self-Generating Neural Networks Applied to Pattern Recognition, *Int. J. of Mathematical and Computer Modeling*, 38(11-13), 2003, 1225-1232.
- [5] H. Inoue and H. Narihisa, Improving generalization ability of self-generating neural networks through ensemble averaging, in T. Terano, H. Liu, and A. L P Chen (Ed), *Knowledge Discovery and Data Mining: Current Issues and New Applications*, (Berlin: Springer-Verlag, LNAI 1805, 2000) 177-180.
- [6] S. Haykin, *Neural Networks: A comprehensive foundation*, 2nd edn. (Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1999).
- [7] H. Inoue and H. Narihisa, Self-organizing neural grove: Efficient multiple classifier system using pruned self-generating neural trees, *Proc. The 8th International Conference on Parallel Problem Solving From Nature*, Birmingham, UK, 2004, pp.1113-1122..
- [8] H. Inoue, M. Tsuda, and H. Narihisa, Parallel and distributed performance of self-organizing neural grove: *Proc. The 16th IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing And Systems (PDCS 2004)*, Cambridge, USA, 2004, pp.878-883



# 非凸2次計画問題における一定の誤差内に納まる近似解法

福島 義人 岡山理科大学 工学部 電子工学科  
岩崎 彰典 岡山理科大学 情報処理センター

## 1 はじめに

一般的に非凸な問題を解くことは非常に難しく、特定の問題や、一定の条件の下での解法はいくつか提案されている。ここでは、2次計画問題における2次形式の行列が非正定値であり、クロスタームの項が十分に小さい場合、最適解の目的関数から一定の誤差に収まる解を求めることができる解法を示す。

## 2 問題の定式化

本論文では次式のような非凸2次計画問題を扱う。

$$\max f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

$$s.t. \quad g(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N c_{mi} x_i \leq b_m \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

$$\mathbf{x} \in S \subset \mathcal{R} \quad (3)$$

但し、行列 $\mathbf{A} \equiv [a_{ij}] (i, j = 1, 2, \dots, N)$ は対称行列で非正定値行列とする。 $S$ は探索空間である。目的関数は非凸であり、厳密に解くことは非常に難しい。行列 $\mathbf{A}$ が対角行列であれば、問題は次のような変数分離型である。

$$\max f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N f_i(x_i) = \sum_{i=1}^N a_{ii} x_i^2 \quad (4)$$

$$s.t. \quad g_m(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N c_{mi} x_i \leq b_m \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

$$x_i \in S_i \subset \mathcal{R} \quad (6)$$

ここで探索空間を十分小さな格子間隔で離散化する。

$$S_i \ni w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{ik}, \dots, w_{iK} \quad (7)$$

とすれば、次のような非線形ナップザック問題へ変換される。

$$\max f(k) = \sum_{i=1}^N a_{ii} w_{ik}^2 \quad (8)$$

$$s.t. \quad g_m(k) = \sum_{i=1}^N c_{mi} w_{ik} \leq b_m \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

$$w_{ik} \in S_i \quad k = 1, 2, \dots, K \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

非線形ナップザック問題を組合せ最適化の技法で、効率よく厳密に解く解法を仲川らが開発してきた。離散化された2次計画問題を厳密解法を用いて解くときに問題の凸性は必要ない。従って非凸2次計画問題は変数分離型であれば、厳密解法によって、格子間隔の誤差内で厳密に解くことができる。そこで本論文では、変数分離型でない非凸2次計画問題を変数分離型に近似する変換を行って解くことを試みる。

### 3 クロスタームの変数分離への近似

クロスタームをある定数ベクトル $\mathbf{x}^*$ で次のように線形近似を行う。

$$\begin{aligned} x_i x_j &\simeq (x_i^* - \Delta x_i)(x_j^* - \Delta x_j) \\ &= x_i^* x_j^* - x_i^* \Delta x_j - \Delta x_i x_j^* + \Delta x_i \Delta x_j \end{aligned} \quad (11)$$

ここで2次の微少項を無視すれば、

$$\begin{aligned} x_i x_j &\simeq x_i^* x_j^* - \Delta x_i - x_j - \Delta x_j x_i \\ &= x_i^* x_j^* - (x_j^* - x_j) x_i^* - (x_i^* - x_i) x_j^* \\ &= x_i^* x_j^* - x_i^* x_j^* + x_j x_i^* - x_i^* x_j^* - x_i x_j^* \\ &= x_j^* x_i - x_i^* x_j^* + x_i^* x_j \end{aligned} \quad (12)$$

このように変数分離型に近似できる。これを(1)式に代入すれば、

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^N a_{ii} x_i^2 + \sum_{i \neq j}^N a_{ij} (x_j^* x_i - x_i^* x_j^* + x_i^* x_j) \\ &= \sum_{i=1}^N \left\{ a_{ii} x_i^2 + \left( \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij} x_j^* \right) x_i + \left( \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij} x_j^* \right) x_i - \left( \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij} x_j^* \right) x_i^* \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

と変数分離型になる。

離散化の格子間隔を $\mathbf{x}^*$ の近似以下に十分小さくしておけば次のことが言える。ある $\mathbf{x}^*$ を決め、変数分離型に変換した問題を厳密に解いた解が $\mathbf{x}^*$ に一致すれば $\mathbf{x}^*$ は局所解である。なぜなら、 $\mathbf{x}^*$ の近傍では正しく目的関数を表しているから、 $\mathbf{x}^*$ が局所解でなければ、その近傍にさらに大きな目的関数を持つ点があり、厳密解によればその点が解となるからである。すなわち本手法によって解が収束すれば、その解は局所解である。行列 $\mathbf{A}$ が正定値であれば、目的関数は凸であるので局所解が厳密解にである。

近似前と近似後の目的関数の誤差 $\delta$ は次のように与えられる

$$\delta = 2 \left| \sum_{i=1, i \neq j}^N \sum_{j=1, i \neq j}^N a_{ij} (x_i x_j - x_j^* x_i - x_i^* x_j + x_i^* x_j^*) \right| \quad (14)$$

$x_i, x_j$ の最大値を $\bar{x}_i, \bar{x}_j$ とすれば、最大の誤差 $\delta_{\max}$ は

$$\delta_{\max} = 2 \sum_{i=1, i \neq j}^N \sum_{j=1, i \neq j}^N a_{ij} \bar{x}_i \bar{x}_j \quad (15)$$

を超えない。

厳密解と局所解の目的関数の差が $\delta_{\max}$ 以上であり、本手法により解が収束すればその解は厳密解である。一般には厳密解と局所解の目的関数の差を予め知ることは困難であるが、得られた解は厳密解に対し $\delta_{\max}$ 以内の近似であるといえる。ここでは行列 $\mathbf{A}$ の非対角要素が小さい問題に対し本手法の有効性を調べる。

### 4 計算機実験

まず標準型として次の非凸な2次関数を考える。

$$f = [x \ y] \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (16)$$

この関数は原点を除けば凸な関数である。これに平行移動と回転を加えるため、それぞれ  $a$ ,  $\alpha$  の 2 つのパラメータを与え、

$$f = [x - a \quad y - a] \begin{bmatrix} -1 & \alpha \\ \alpha & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - a \\ y - a \end{bmatrix} = -(x - \alpha)^2 + 2a(x - \alpha)(y - \alpha) + (y - \alpha)^2 \quad (17)$$

とする。この関数を図 1 に示す。矢印は目的関数値の増加方向を示す。

制約条件は

$$cx + dx \leq b \quad (18)$$

とする。 $b$  を変化させることによって最適解の位置が変化する。変数の変域内の任意の点で変数分離型（直交 2 次曲線）への近似を行い、その場合でも最適解が局所解よりも十分に大きな関数値をもてば、最適解へ収束することが期待できる。

制約条件の  $b$  を変化させて行った計算機実験の結果を図 2, 図 3 に示す。直線 A・B と直線 C・D の間の領域は局所解へ収束したり、収束しなかった領域である。収束した場合はそれが局所解であっても、最適解の関数値との誤差は式で示される数値以下である。図 2 に比べ、 $\alpha$  を小さくした図 3 の結果は、局所解へ収束したり、収束しない領域が小さくなっている。

## 5 まとめ

非凸な 2 次計画問題において、かなり限られた条件の下ではあるが、ある一定の誤差内で解くことができることを示した。残念ながら、最適解と局所解の目的関数値を予め知ることはできないから、本手法で得た解が真の最適解であることを保証することはできない。しかし、CPLEX 等の市販のソフトウェアでは、非凸な 2 次計画問題を扱うことすらできない。本手法で求まる解の情報をもとに周辺の解空間を調べ、真の最適解、もしくは十分に良い保証がある近似解を求めることができることが期待される。

## 参考文献

- [1] 今野浩, 大域的最適化法の現状: 低ランク非凸型最小化問題を中心に, 情報処理, Vol.36, No.11, pp.1062-1069 (1995).

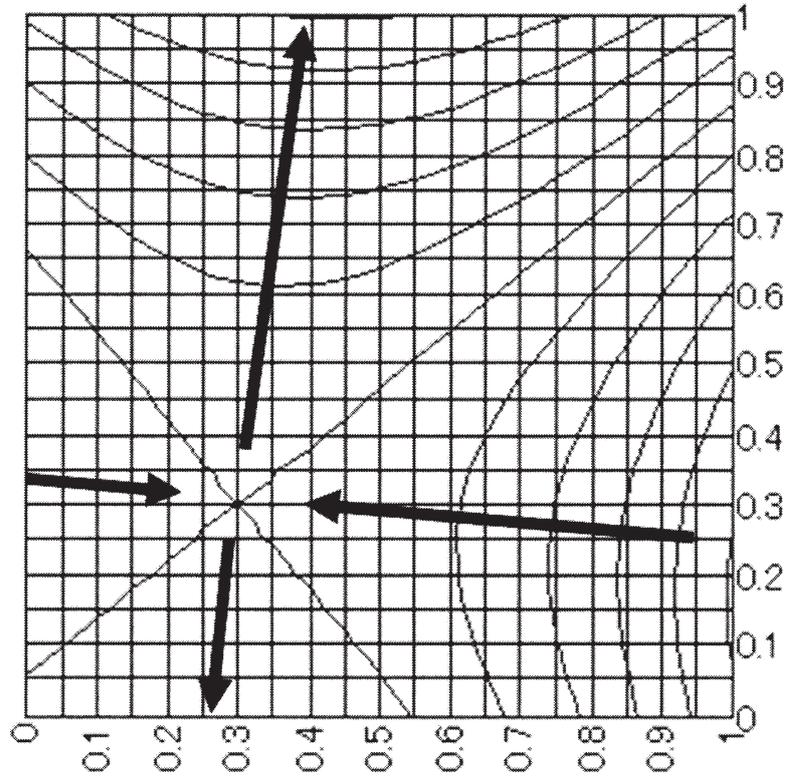


图 1 :  $f = -(x - \alpha)^2 + 2a(x - \alpha)(y - \alpha) + (y - \alpha)^2$

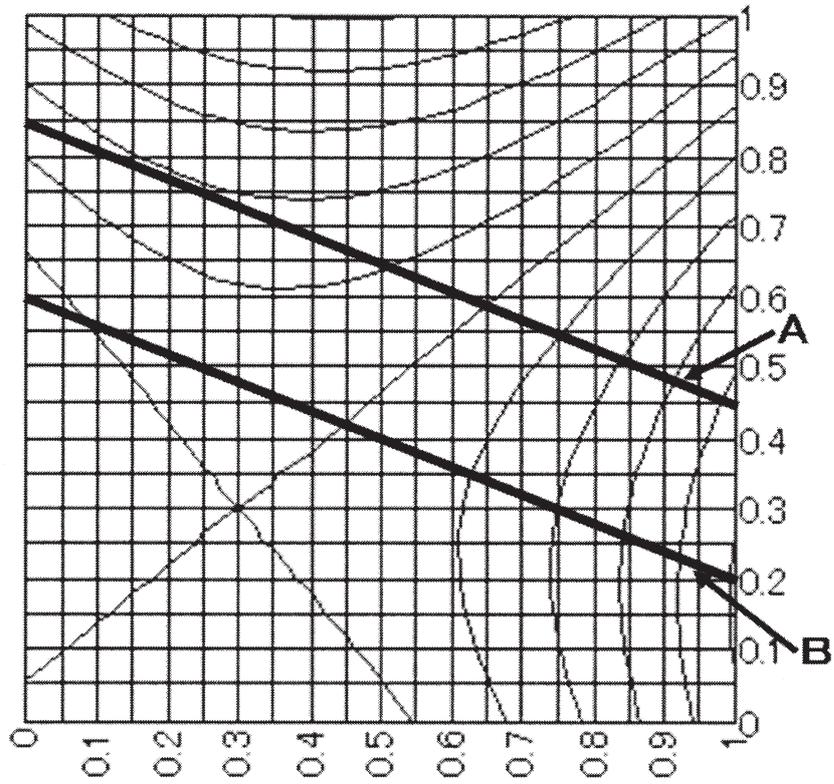


图 2 :  $f = -(x - \alpha)^2 + 2a(x - \alpha)(y - \alpha) + (y - \alpha)^2$  ( $\alpha, a$ ) = (0.3, 0.2)

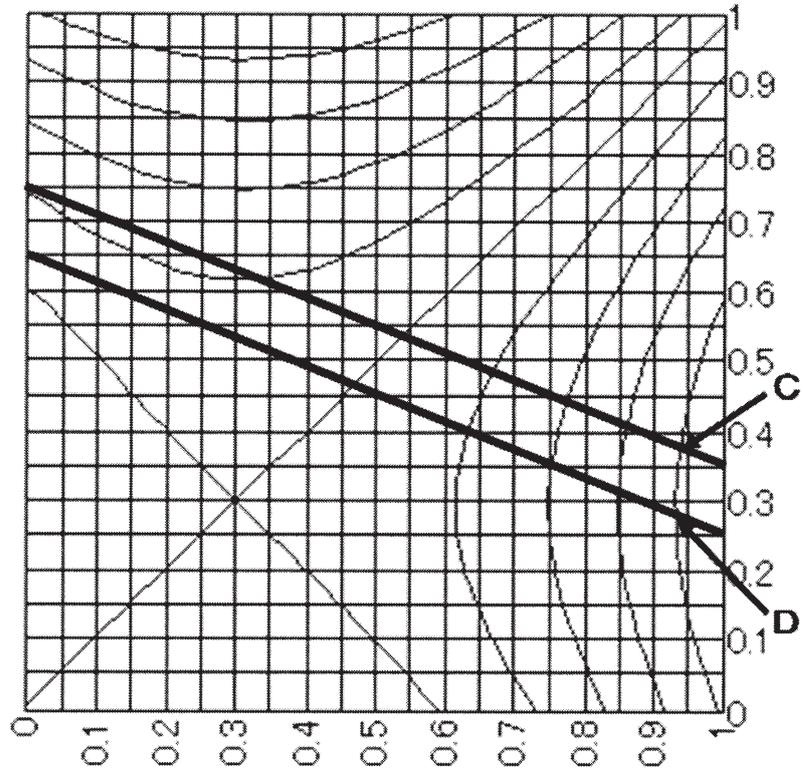


图 3 :  $f = (x - \alpha)^2 + 2a(x - \alpha)(y - \alpha) + (y - \alpha)^2$  ( $\alpha, a$ ) = (0.3, 0.02)

# パラメータと非線形関数の統計量 ～古地磁気方位データの平均～

Statistics values of parameters and non-linear functions  
— mean of paleomagnetic direction data —

畠山 唯達

(岡山理科大学情報処理センター)

Tadahiro Hatakeyama

(Information Processing Center, Okayama University of Science, Okayama 700-0005, Japan)

## Abstract

There is a disagreement between the statistics values (mean, variance, ...) of a nonlinear function and its fluctuating parameters. As an example of the mismatch we show here a problem in the averaged paleomagnetic direction and the mean of the Gauss coefficients representing the field characteristics. It is thought that the mean inclination is corresponding to the paleolatitude often used for the plate tectonics, paleoclimatology, study on the hot spots, and so on. The usual application of the paleomagnetic direction dataset to those studies through the mean inclination is not exactly correct because the GAD hypothesis which is implicitly assumed in those procedures is wrong and the nonlinear effect above mentioned is not so small as to be ignored. We also indicate a simple formulation for the correction of the paleolatitude. It shows a good estimation of the true paleolatitude from the mean inclination.

## 1 はじめに: 非線形な観測値の統計量

自然界では、観測される量がその本質的なパラメータ群の非線形な関数である現象が多い。そして、観測値はあらゆる場面で統計的に扱われ、いろいろな考察に使用されている。パラメータとその結果である自然現象がある分布を持っていれば、現象の平均をとることで何か特徴的な事象を抜き出すことができるし、しばしば、そこから逆問題的手法を用いて、元となるパラメータ群の統計量を求めることも行われている。しかし、ことはそう単純ではない。パラメータの統計量から求められる現象の値は、必ずしも現象の統計量とは一致しないのだ。

たとえば、たくさんおはじきをいろいろな強さでへ投げて、どこまで転がったか観測してみる。投げ出す角度や方向を固定しても、投げた後、放物線を描いて落ちていく間に受ける空気抵抗や、地面で跳ねたりする影響で、最終的に到達する場所は初速の線形的な関数にならない。たとえこの関数を知っていたとしても、到達した

場所の平均から初速の平均を直接割り出すことはできないのだ。

次にこの事実を一般化してみよう。観測値を  $A$  (ここでは、 $A$  はスカラー=1つの観測とする)、パラメータ群を1階テンソル  $\mathbf{m} = \{m_1, m_2, \dots, m_j, \dots\}$  で表す。観測値は、

$$A = f(\mathbf{m}) \quad (1)$$

のような物理法則に従っているものとする。(1)を変動するパラメータ  $\mathbf{m}$  の平均  $\boldsymbol{\mu}$  (重心) の周りでテイラー展開してみると、

$$A = A_0 + \sum_j A_j \Delta m_j + \frac{1}{2} \sum_{j,k} A_{jk} \Delta m_j \Delta m_k + \frac{1}{3!} \sum_{j,k,l} A_{jkl} \Delta m_j \Delta m_k \Delta m_l + \dots \quad (2)$$

のようになる。ここで、 $A_0 = f(\boldsymbol{\mu})$  はパラメータ平均  $\boldsymbol{\mu}$  による観測値、 $\Delta m_j (j = 1, 2, \dots)$  はパラメータ  $\mathbf{m}$  の  $\boldsymbol{\mu}$  からのずれ  $\Delta \mathbf{m} = \mathbf{m} - \boldsymbol{\mu}$  の  $j$  成分、 $A_j, A_{jk}, A_{jkl} \dots$  は(1)をパラメータ  $m_j, m_k, \dots$  で微分した導関数

$$A_j = \frac{\partial f(\mathbf{m})}{\partial m_j}, \quad A_{jk} = \frac{\partial^2 f(\mathbf{m})}{\partial m_j \partial m_k}, \quad A_{jkl} = \frac{\partial^3 f(\mathbf{m})}{\partial m_j \partial m_k \partial m_l}, \dots \quad (3)$$

を表す。(2)の両辺の期待値と分散は、

$$E[A] = A_0 + \sum_j A_j E[\Delta m_j] + \frac{1}{2} \sum_{j,k} A_{jk} E[\Delta m_j \Delta m_k] + \frac{1}{3!} \sum_{j,k,l} A_{jkl} E[\Delta m_j \Delta m_k \Delta m_l] + \dots, \quad (4)$$

$$V[A] = E[A^2] - (E[A])^2 = \sum_{j,k} A_j A_k E[\Delta m_j \Delta m_k] + \frac{1}{3} \sum_{j,k,l,n} A_j A_{klm} E[\Delta m_j \Delta m_k \Delta m_l \Delta m_n] + \dots \quad (5)$$

のようになる。(4)の左辺は観測値  $A$  を平均したもの(観測平均)を表している一方、パラメータの平均  $\boldsymbol{\mu}$  で与え

られる観測値の平均は右辺第一項の  $A_0 = f(\boldsymbol{\mu})$  で、これが本来知りたい「真の平均」である。右辺第二項以降があるため、後述する (6) 式のような釣り合いはとれていない。今は平均パラメータの周りで展開しているので、(4) の第二項の  $E[\Delta m_j]$  は 0 であるが、第三項以降は通常 0 にはならない。これらは平均より高次の統計量に起因していて、たとえば、第三項の  $E[\Delta m_j \Delta m_k]$  はパラメータの共分散  $\text{Cov}[\Delta m_j, \Delta m_k]$  である。つまり、この第三項以降の大きさが大きいほど、観測平均  $E[A]$  と物理パラメータの平均から導かれる観測値  $f(\boldsymbol{\mu})$  の差が大きくなるため、観測平均から物理パラメータの平均を導こうとすると困難になる。この影響は事象によってケースバイケースで、ちゃんと見積もらなければならない。

ちなみに、もし式 (1) が線形関数であれば、2 階以上の導関数は 0 なので、

$$E[A] = A_0 = f(\boldsymbol{\mu}) \quad (6)$$

$$V[A] = \sum_{j,k} A_j A_k \text{Cov}[\Delta m_j, \Delta m_k] \quad (7)$$

となって、

$$\text{観測値の平均} \iff \text{物理パラメータの平均}$$

$$\text{観測値の平均} \iff \text{物理パラメータの分散}$$

という対応付けが可能になり (Kono *et al.*, 2000; Hatakeyama and Kono, 2001)、物理パラメータの統計量を求める問題は単純な逆問題に帰着する。

## 2 パラメータに線形な観測量と非線形な観測量の例: ガウス係数と地磁気データ

本節以降では、観測される「パラメータの非線形関数」の平均が「パラメータの平均」から推測される真の平均とは異なっている例として、古地磁気方位データを考えてみよう。古地磁気学では、この方位データの平均があたかも変動する地球磁場の時間平均であるかのように扱われてきた。しかし、最近になってそれが誤りであること、(4) のような非線形効果の影響は厳密な議論を必要とするときにも無視できるほど小さくないことがわかってきた。古地磁気学によってデータを採取することの方法や意味については、畠山 (2004) をご覧頂きたい。

地球磁場は地球のコア (地表より 2900km 以深) で生成され、地表や上空で観測される。通常、コアの外部にあるマントルや地殻、大気などはコアに比べて電気伝導度がきわめて低いため、絶縁体と見なしてよい。そのことによって、コア-マントル境界 (CMB) よりも外側では地球磁場ベクトルは 1 つのスカラーポテンシャルで表

すことができる。地球中心を原点、回転軸の北極方向を  $+z$  軸とする球座標系で地磁気ポテンシャル  $W(r, \theta, \phi)$  は

$$W(r, \theta, \phi) = a \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\ell} \left(\frac{a}{r}\right)^{\ell+1} \{g_{\ell}^m \cos m\phi + h_{\ell}^m \sin m\phi\} P_{\ell}^m(\cos \theta) \quad (8)$$

と球面調和関数展開された形式で表される。ここで  $a$  は地球の半径、 $P_{\ell}^m(x)$  は Schmidt 式に正規化された Legendre 陪多項式である (Merrill *et al.*, 1997)。 $W(r, \theta, \phi)$  は  $g_{\ell}^m, h_{\ell}^m$  という地球磁場の形と大きさの特徴づけるパラメータの線形関数になっている。 $g_{\ell}^m, h_{\ell}^m$  をガウス係数と呼ぶ。磁気単極子が存在しないことから、 $\ell = 1, 2, \dots, m = 0, 1, \dots, \ell$  である。地球電磁気学では慣例として、球面調和関数の位数 (order) を  $-\ell \leq m \leq \ell$  と数えずに正負で係数の文字  $g, h$  を分ける。よって、軸対称成分  $m = 0$  に対して  $h_{\ell}^0$  は存在しない。

地表のある地点 ( $r = a, \theta, \phi$ ) で観測される磁場の、地表ローカル座標系での水平北向き、水平東向き、および鉛直下向き (地球中心方向) の成分 ( $X, Y, Z$ ) は、ポテンシャル  $W$  の空間微分として、

$$\begin{aligned} X &= -\left(\frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial \theta}\right)_{r=a} = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\ell} \frac{dP_{\ell}^m(\cos \theta)}{d\theta} \begin{pmatrix} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} g_{\ell}^m \\ h_{\ell}^m \end{pmatrix} \\ Y &= \left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial W}{\partial \phi}\right)_{r=a} = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\ell} \frac{m P_{\ell}^m(\cos \theta)}{\sin \theta} \begin{pmatrix} \sin m\phi \\ -\cos m\phi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} g_{\ell}^m \\ h_{\ell}^m \end{pmatrix} \\ Z &= -\left(\frac{\partial W}{\partial r}\right)_{r=a} = -\sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\ell} (\ell+1) P_{\ell}^m(\cos \theta) \begin{pmatrix} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} g_{\ell}^m \\ h_{\ell}^m \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

と表されるが、これらもガウス係数の線形な観測量である。

現在の地球磁場からは、地表の各地点で機械的に  $X, Y, Z$  を測定し、ガウス係数を算出することが可能である。しかし、畠山 (2004) にもあるように、岩石に残された残留磁化を測定して、古い地球磁場を復元する学問である古地磁気学では、古地磁気の強度を測定することが技術的・試料的にとっても難しい。そのため実際に岩石の残留磁化を測定して得られる観測データの大部分は  $X, Y, Z$  ではなく、強度成分のない方位成分である。方位とは、各方向余弦

$$x = \frac{X}{F}, \quad y = \frac{Y}{F}, \quad z = \frac{Z}{F} \quad (10)$$

や、伏角 ( $I$ ) と偏角 ( $D$ )

$$I = \sin^{-1}\left(\frac{Z}{F}\right), \quad D = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (11)$$

と呼ばれる方位角などを指す。ここで  $F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$  は磁場強度である。磁場強度とは言うものの、実際には磁束密度の方を使用するので、単位はもっぱらマイクロテスラ [ $\mu\text{T}$ ]、ナノテスラ [ $\text{nT}$ ]、或いはガンマ (=ナノテ

スラ)を用いる。ガウス係数の単位も [ $\mu\text{T}$ ] または [ $\text{nT}$ ] になる。

当然これらの量はモデルパラメータ  $m = \{m_1, m_2, \dots, m_j, \dots\} = \{g_1^0, g_1^1, h_1^1, g_2^0, g_2^1, \dots\}$  に対して非線形であるので、前節のような事態が起きてしまう可能性がある。ただし、それが実際にどれくらい影響があるかは見積もって見ないとわからない。影響が小さければ、測定誤差の中に入ってしまい事実上無視して構わない。

### 3 古地磁気方位とその平均

古地磁気学的手法で得られる過去の地磁気方位データはとても重要な観測量である。古く Wegener (1912) によって提唱され彼の死後一度は途絶えた大陸移動説が、1950年代に復活し後にプレートテクトニクスとして成熟していく仮定で、大変重要な証拠の1つとして古地磁気方位データが採用された。また、その後も地球表層のテクトニクスに関する研究や、古気候などの研究で利用され続けている。昔の地磁気ベクトルから当時の大陸などの相対的な位置や緯度(これを**古緯度**と呼ぶ)を知ることができるからだ。

古い岩石がその当時の地球磁場を正しく記録していて、それが真北つまり回転極方向を向いていると仮定すると、岩石の持つ古地磁気方位からその当時の北極の位置がわかる(これを**仮想地磁気極: Virtual Geomagnetic Pole = VGP**という)。実際には北極自身は動いておらず回転軸はマントルに固定していると考えられるので、動いたのは岩石、すなわちその岩石が乗っている地塊(大陸)の方である。地塊から見た時代ごとのVGPの移りゆくさまを**極移動曲線 (Apparent Polar Wander Path = APWP)**という。そこから、当時の地塊がどのように北極(北磁極)に対して相対運動したかがだいたいわかる。

これを利用して、古い大陸配置の復元などを行っているのである。また、もっとずっと狭い(ローカルな)範囲でも、VGPや古緯度(岩石が磁化した当時の磁気緯度)を利用してテクトニクスや古気候(当時の気温や植生、緯度の関係など)の研究を行う。とくに、古緯度 $\lambda$ と地磁気伏角 $I$ は次のような関係を持つ。

$$2 \tan I = \tan \lambda \quad (12)$$

しかし、たとえ初生的な(後で変質していない)古地磁気データを得ることができたとしても、古地磁気方位からを式(12)を用いて応用することはそんなに簡単ではない。なぜなら、地球磁場は絶えず変動していて常に磁石が真北を向いているわけではないからである。

地球磁場変動は非常に複雑で、いろいろな時間スケールの変動がある。殆どは地球磁場を生成しているコア内

部の電磁流体力学的な活動に起因する変動である。そのうち最も大胆な地球磁場変動は磁極自身の逆転である。逆転はとても急激に起こっていて(開始から終了まで1万年以下)、その間隔は数十万年である。逆転していない期間のうち、現在と同じように地球中心の巨大な棒磁石のS極が北を向いている(地表で磁針のN極が北を指す)時を**正磁極期**、その反対の時期を**逆磁極期**と呼ぶ。

逆転がない正磁極期、逆磁極期には安定な極性があり磁極の南北ははっきりしているものの、地球磁場自身は細かくかつ急激に変動している。そこで、正磁極期もしくは逆磁極期の数十万年分以上の地層や溶岩から古地磁気データを集めて、それを平均する。これは変動分をキャンセルした「平均的な地球磁場の方向」を示すと考えられてきた。そしてその平均方位からVGPや古緯度を計算し、テクトニクスなどの研究に利用しているのだ。とくに古緯度については、式(12)の代わりに

$$2 \tan \bar{I} = \tan \lambda \quad (13)$$

を用いていると考えればよい( $\bar{I}$ は平均伏角、平均の求め方は後の図3)。

しかし、(13)式を使うためには、2つの重大な前提条件を満たしていなければならない(畠山, 渋谷, 2005)。1つは、平均的な地球磁場を地球中心に位置する棒磁石で説明でき、かつ北磁極が北極と一致することである。これを**地心軸双極子 (Geocentric Axial Dipole: GAD) 仮説**という。もう1つの条件は、すでに1,2節で触れている通り、(10), (11)のようなガウス係数に関する非線形関数について、(4)の影響(これを**Nonlinear Effect due to Fluctuating Field: NEFF**と呼ぶ)が無視できるほど小さいことである。

## 4 「古地磁気平均方位→古緯度」の妥当性

### 4.1 GAD 仮説の破れ

逆転していない期間の**時間平均地球磁場 (Time-Averaged Field = TAF)**をGAD(ガウス係数で表すと $g_1^0$ 成分のみの磁場)と見なして良いかどうかは昔から議論になってきた。Wilson (1970, 1971) はプレート運動よりも短い期間(だが、変動を相殺できるほどの長さの地質時間)に噴出した溶岩などから様々な古地磁気平均方位データを集めて緯度ごとに並べた結果、(13)式のグラフよりも北側にシフトしていることを示した(図1a)。Wilsonはこの現象TAFがGADではなく、地球中心から少し北側へずれた双極子(offset dipole)で説明した(図1b)。この磁場を球面調和関数で表すと、ガウス係数の $g_1^0$

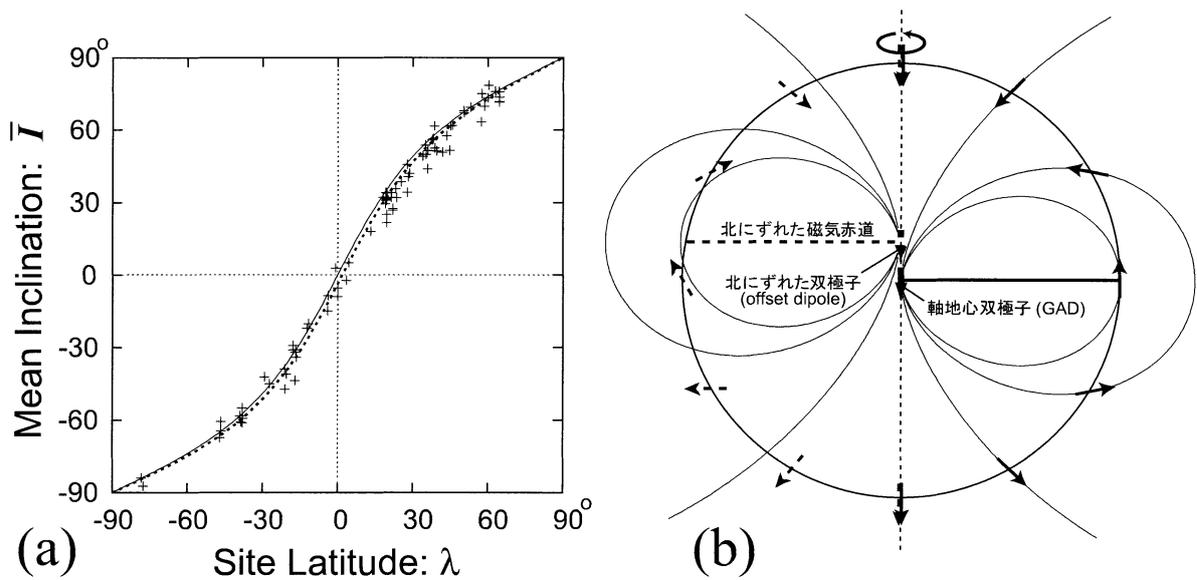


図 1: (a) 緯度ごとに集められた過去 500 万年間の正磁極期における古地磁気平均伏角 ( $\bar{I}$ )。データは、Johnson and Constable (1996) による。実線は GAD による各緯度での伏角 (12)、破線は実データを北へずれた双極子 ( $\approx$  GAD + GAQ) でフィットしたもの。(b) 地球を地軸を含む面で輪切りした磁力線の様子。右半分は地心軸双極子 (GAD) によるもの。左半分は地心よりも北へずれた双極子 (offset dipole) によるもの。(a), (b) ともに畠山, 渋谷 (2005) より。

(GAD) に加えて、若干の  $g_2^0$  (地心軸四重極子: **Geocentric Axial Quadrupole = GAQ**) 成分を含むものとほぼ等価である。その後も、他の軸対称成分についての研究 (e.g. McElhinny *et al.*, 1996) や非軸対称成分を含む TAF の研究 (e.g. Gubbins and Kelly, 1993; Kelly and Gubbins, 1997; Johnson and Constable, 1995, 1997; Hatakeyama and Kono, 2002) などもある。現在では、これらの研究から TAF は、

$$\text{TAF} = \text{GAD} + \text{GAQ} + \text{その他の成分} \quad (14)$$

と見なせ、その他の軸対称・非軸対称成分は GAD, GAQ と比べて小さいと考えられている (畠山, 渋谷, 2005)。

では、TAF に占める  $\text{GAQ} = g_2^0$  の影響はどれくらいであろうか? これまでの様々な研究から、 $\text{GAQ}/\text{GAD} = |g_2^0|/|g_1^0|$  の大きさは 5% 程度で、 $g_2^0$  と  $g_1^0$  は同符号 (正磁極期はともに負) であることが知られている。その値から計算される、経度方向を平均した緯度ごとの伏角異常 ( $\Delta I = \bar{I}_{\text{obs}} - I_{\text{GAD}}$ ) は、緯度に依存せずほぼ負になり、赤道で最大約  $-4$  度になる (図 2 の (i))。これは無視できない大きさである。

## 4.2 NEFF

観測値の非線形性と変動に伴って平均方位に現れる見かけの効果 (Kono Effect) は Kono (1997), Kono *et al.* (2000) によって理論的に存在を予言され、Hatakeyama

and Kono (2001) で実用的な定式化がなされた。

NEFF が具体的にどれくらいあるのかは、変動のスナップショットである現在の地球磁場を見ているだけではわからない。Hatakeyama and Kono (2002) は、NEFF を考慮したインバージョン解析を行い、過去 5 百万年間の古地磁気データから正磁極期・逆磁極期の TAF と変動の分散 (古地磁気永年変化: **Paleosecular Variation = PSV**) を求めた。その結果、NEFF の平均伏角への寄与は、「見かけの伏角異常 ( $\Delta I_{\text{NEFF}}$ ) が南半球で正、北半球で負という南北反対称な形」になり、「その大きさは緯度が  $\pm 20$  度付近で最大 1.5 度ほど」であることがわかった (図 2)。

NEFF は理論的には式 (4) で示したようなものであるが、定性的に考えると図 3 のようになる。観測点における地磁気ベクトルは、永年変化でさまざまな方向・強度に変化する。この平均を取るときに、図 3a のように強度を考えて (ガウス係数と線形な) 平均を取る場合と、図 3b のように、単位球面上に投影した方位の平均を取る場合では、平均ベクトルの方向が異なる。古地磁気方位は通常後者の方法で平均化される。

場所 (観測点) によらず一般的に、地球磁場ベクトルは伏角が深いときの方が長い傾向にあるようだ。これは現在の地球磁場 (図 4) を見てもそう読みとれる。その結果、強度を含む地球磁場変化の真の平均に比べて、方位成分だけから計算した見かけの平均は伏角が浅くなる (絶対値が小さくなる) と考えられる (図 2 の (B))。

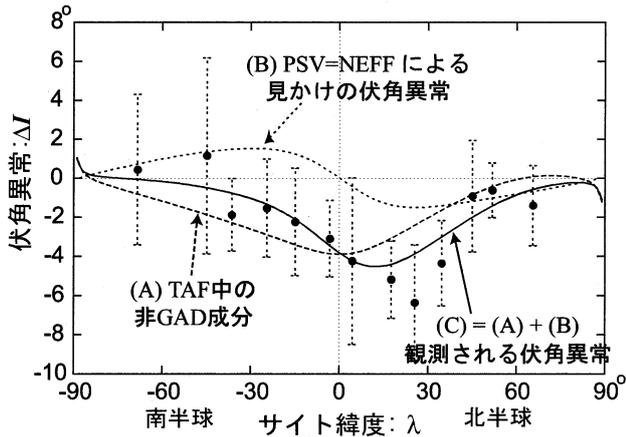


図 2: 各緯度バンドごとの古地磁気データにおける平均伏角の GAD が作る伏角からのずれ (伏角異常) と、Hatakeyama and Kono (2002) の TAF+PSV 統合モデルによる、TAF 中の非 GAD 成分による伏角異常 (太い破線) および NEFF による見かけの伏角異常 (細い点線)。その合計が実線になり、データをそれなりに説明できている。エラーバーつきの点は McElhinny *et al.*(1996) が解析した古地磁気データセット。

NEFF はあくまで古地磁気方位データを平均する時に現れる「見かけの効果」であって、もし、仮に全てのデータが強度を持っていれば、このようなことは無く、各点でのベクトル (強度つき) の平均を取れば、それは平均磁場ベクトルとして表して良くなる (6)。残念なことに、実際には古地磁気強度データは方位データと比べて圧倒的に数が少なく、またその質もずっと悪いので、うまく利用できないのである (Tanaka *et al.* 1995; Kono *et al.*, 2000; Selkin and Tauxe, 2000; Perrin and Schenep, 2004)。

## 5 伏角と古緯度から非線形性の影響を補正する

以上のように、単純に GAD 仮説を利用して平均方位から古緯度を求める従来の方法は、平均磁場が GAD だけでないこと、および、平均化に伴う非線形効果が無視できないことの両面から、正しくないことがわかる。

そこで以下、本研究では上で示した「平均伏角と古緯度を対応付けるための (13) 式からの平均伏角のずれ」を簡単に補正することを試みる。ただし、実際のデータは用いないでモデル計算にとどめる。

作業の手順は以下の通りである。まず、既存の TAF, PSV モデルから各緯度における (A) TAF 中の非 GAD 成分が作り出す伏角異常 ( $\Delta I_{nonGAD}$ ) と (B) NEFF が作り出す見かけの伏角異常 ( $\Delta I_{NEFF}$ ) を含んだ伏角の観測平均

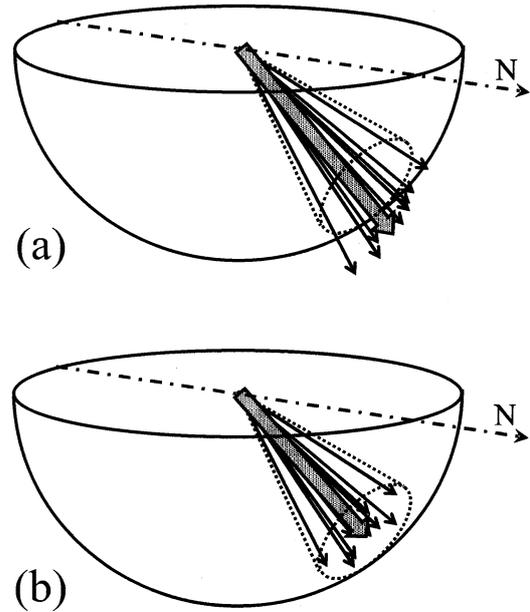


図 3: 古地磁気学で平均方向を取る方法。(a) は強度を含むデータを得ているとき。全てのベクトルの線形和を取るの、強度が強い方位の傾向があれば、そちらの方に偏る。この平均はガウス係数の平均を反映した「真の平均」である。(b) は強度を含まないデータで平均を取る時。Fisher(1953) の手法に従い、各单位ベクトルの和を計算する。単位球面上にベクトルを投影した分布の中心に平均方位が位置する。

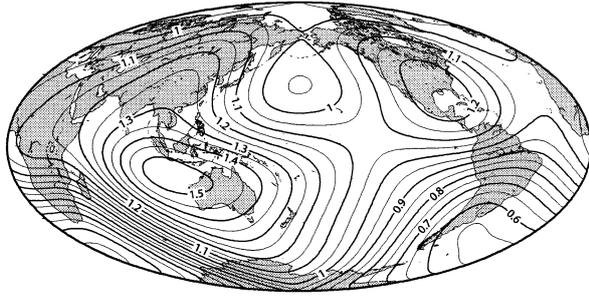
( $\bar{I}$ ) をモンテカルロ法シミュレーションを用いて数値的に算出し、GAD 仮説を信じて (13) 式より「読み違えた古緯度 ( $\lambda'$ )」を計算する。

一方、(A), (B) に関して GAD 場の周りで近似式を作り、この式を用いて古緯度のミスフィット ( $\lambda' - \lambda$ ) を求める。

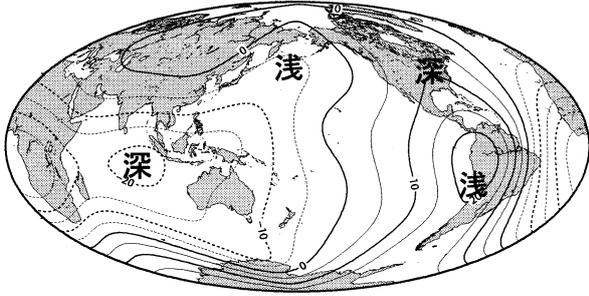
$\Delta I$  および  $\lambda'$  について、数値的な計算結果と近似式による結果を比較して、近似式の妥当性を検証する。また、この式を用いて「観測される平均伏角」から「伏角の補正值」を計算する式を導出し、実際に補正して  $\lambda$  を復元できるかを確かめる。

計算に使用したモデルは、Hatakeyama and Kono (2002) の TAF-PSV 統合モデルのうち、緯度のみ依存する軸対称な成分についてのみの TAF および PSV モデルで以下のようなものである。

- (A) **TAF(平均):** TAF の非 GAD 成分は  $GAQ(g_2^0)$  のみを考えた。他の非軸対称成分を含む非 GAD 成分は、GAD, GAQ に比べてずっと小さいので省いた。
- (B) **PSV(変動):** NEFF の原因となる変動は以下のような 2 成分に分解する。



(a)  $r_F = F / F_{GAD}$



(b)  $\Delta I = I - I_{GAD}$

図 4: 現在の地球磁場 (時間変化のスナップショット) の様子。(a) 全磁力/GAD 磁力:  $r_F = F / F_{GAD}$  この値が大きいところほど、非 GAD 成分の磁場の影響で地磁気の強度が増して、1 より小さい場所では逆に小さくなっている。(b) GAD 伏角からのずれ:  $\Delta I = I - I_{GAD}$ 。一般に北半球では  $I > 0$  (下向き磁場ベクトル)、南半球では  $I < 0$  (上向き磁場ベクトル) になる。北半球では  $\Delta I > 0$  で GAD 磁場よりも伏角 (の絶対値) が深く、 $\Delta I < 0$  で浅くなる。南半球では逆になる。伏角の絶対値の様子はそれぞれ「深」のマークが示す場所と (a) の  $r_F > 1$  の目玉が重なり、「浅」のマークが示す場所と (a) の  $r_F < 1$  の目玉が重なっている。つまり、現在の磁場は、図 3(a) が示すような「磁場がその場所の GAD が作る磁場よりも強いときの方が伏角の絶対値が大きく (深く) なる」ことを示していると言える。IGRF 10th model (IGRF 2005) <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html> を利用。

### (B1) 均質成分

Constable and Parker (1988) で導入されたガウス係数の変動への仮定 — (i) 各ガウス係数は独立に変動していて (相関がない)、(ii) それぞれの変動の分布は正規分布になる — を踏襲する。また、変動の分散  $\sigma_{\ell,m}$  は変動のエネルギーがコア表面で白色ノイズになるよう、

$$\sigma_{\ell,m}^2 = \frac{r_c^{2\ell}}{(\ell+1)(2\ell+1)} \alpha^2 \quad (15)$$

の式で与える。ここで、 $r_c$  はコアと地球の半径比 (約 0.547) である。 $\alpha$  は PSV の振幅を表し、Hatakeyama and Kono (2002) によると、過去 5 百万年間の正磁極期で  $\alpha = 13.0[\mu T]$  である。

### (B2) 特定成分

ただし、 $\sigma_{2,1}$  は他の  $\ell = 2$  成分 ( $\sigma_{2,0}, \sigma_{2,2}$ ) に比べて大きい (Kono and Tanaka, 1995; Hulot and Gallet, 1996; Constable and Johnson, 1999)。Hatakeyama and Kono (2002) の過去 5 百万年分の PSV モデルの場合、(15) 式での  $\ell = 2$  の値  $\sigma_2 / |g_1^0| = 3.3\%$  に対して、 $\sigma_{2,1} / |g_1^0| = 12.7\%$  となる。

仮定 (i), (ii) について古地磁気データを用いて検証するのは難しいが、最近の数値ダイナモシミュレーションの結果では、いくつかの成分をのぞいておおよそ成り立っていると推測される (Kono and Roberts, 2002; Hulot and Bouligand, 2005)。それ以外にも、Hatakeyama and Kono (2002) の PSV では「比較的小さな  $g_1^0$  の変動」が指摘されているが、この成分は GAD 平均場の周りで展開できず、また、結果的に伏角異常に及ぼす影響が小さいので省く。

以下、5.1 で  $\Delta I_{GAQ}$ 、5.2 で  $\Delta I_{NEFF}$  について近似式を求め、数値計算による結果と比較する。

## 5.1 TAF 中の GAQ による伏角異常

地球磁場が GAD だけでなく少量の GAQ を含む場合、各緯度で観測される伏角  $I$  は

$$\begin{aligned} I &= \tan^{-1} \left( \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{Z}{X} \right) \\ &= \tan^{-1} \left( \frac{2 \sin \lambda \cdot g_1^0 + \frac{3}{2} (3 \sin^2 \lambda - 1) \cdot g_2^0}{\cos \lambda \cdot g_1^0 + 3 \sin \cos \lambda \cdot g_2^0} \right) \quad (16) \end{aligned}$$

と書けるが、これと  $I_{GAD}$  との差について  $g_2^0/g_1^0$  の 1 次までの展開式で表すと、

$$\Delta \bar{I}_{GAQ} \approx -\frac{3 \cos \lambda (2 - \cos^2 \lambda)}{2(4 - 3 \cos^2 \lambda)} \cdot \frac{g_2^0}{g_1^0} \quad (17)$$

となる。これをプロットすると (図 5) のようになる。Hatakeyama and Kono (2002) で導き出された正磁極期の  $g_2^0/g_1^0 = 4.3\%$  という値では、この 2 つの曲線はほぼ重なって (17) の近似式は良いことがわかる。

## 5.2 NEFF による見かけの伏角異常

使用する PSV モデルの 2 種類の要素 (B1), (B2) について NEFF によって発生する伏角のずれの近似式を求め、 $\Delta I_{NEFF} = \Delta I_{NEFF1} + \Delta I_{NEFF2}$  と考える。PSV について上で述べたような (i), (ii) の仮定があるとき、 $E[\Delta m_j \Delta m_k] = \delta_{jk} \sigma_j^2$  なので式 (4) は、

$$\bar{I} = I_0 + \frac{1}{2} \sum_j I_{jj} \sigma_j^2 + \dots, \quad (18)$$

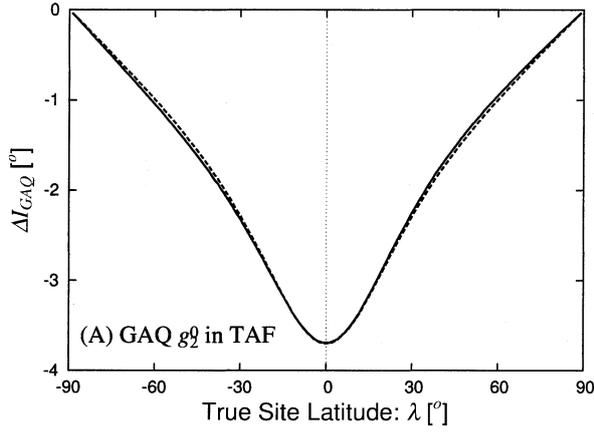


図 5: 平均場中の地心軸四重極子 (GAQ) 磁場による伏角異常 ( $\Delta I_{GAQ}$ )。横軸は観測緯度 ( $\lambda$ )。実線はモンテカルロ法による数値計算結果、波線は  $g_2^0/g_1^0$  の 1 次までの近似式による計算結果。

となる。伏角の平均を単純平均 ( $\sum I_i/N$ ) でなく、4.2 節で述べたような単位ベクトルの平均で計算する場合、分散の 1 次の項に出てくる導関数  $I_{jj}$  は、

$$I_{jj} = \frac{XX_j + YY_j + ZZ_j}{F^4 (X^2 + Y^2)^{1/2}} \left[ Z (XX_j + YY_j) - (X^2 + Y^2) Z_j \right] \quad (19)$$

と表すことができる (Hatakeyama and Kono, 2001)。ただし、 $X_j, Y_j, Z_j$  は式 (9) の  $X, Y, Z$  それぞれの  $j$  番目のガウス係数に関する偏微分係数である。

### 均質成分

(B1) に起因する NEFF による平均伏角のずれは、平均場=GAD の周りで PSV(15) を (18) の分散の 1 次 ( $\sigma_j^2$ ) 項まで展開すると、

$$\Delta I_{NEFF1} \approx -C_{Hom} \left( \frac{\alpha}{g_1^0} \right)^2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k!}{3^{k-1}(k-1)!} \sin 2k\lambda \quad (20)$$

という無限級数で表すことができる。ただし、 $C_{Hom}$  は定数で、 $C_{Hom} \approx 0.0436[\text{rad}] \approx 2.5[\text{度}]$  である。残念ながらこの無限級数は収束が速くないので、ある程度の次数まで展開する必要がある。モンテカルロ法による数値計算と、上式による  $\Delta I_{NEFF1}$  は図 6a になる。

### 不均質成分

(B2) に起因する NEFF での伏角のずれも同様に TAF=GAD の周りで ( $\sigma_j^2$ ) まで展開し、 $\sigma_{2,1}/|g_1^0|$  の 1 次まで取ると、

$$\Delta I_{NEFF2} \approx -3 \sin \lambda \cos \lambda \frac{(1 + \sin^2 \lambda)(1 + 4 \sin^2 \lambda)}{(1 + 3 \sin^2 \lambda)^2} \cdot \frac{\sigma_{2,1}}{|g_1^0|} \quad (21)$$

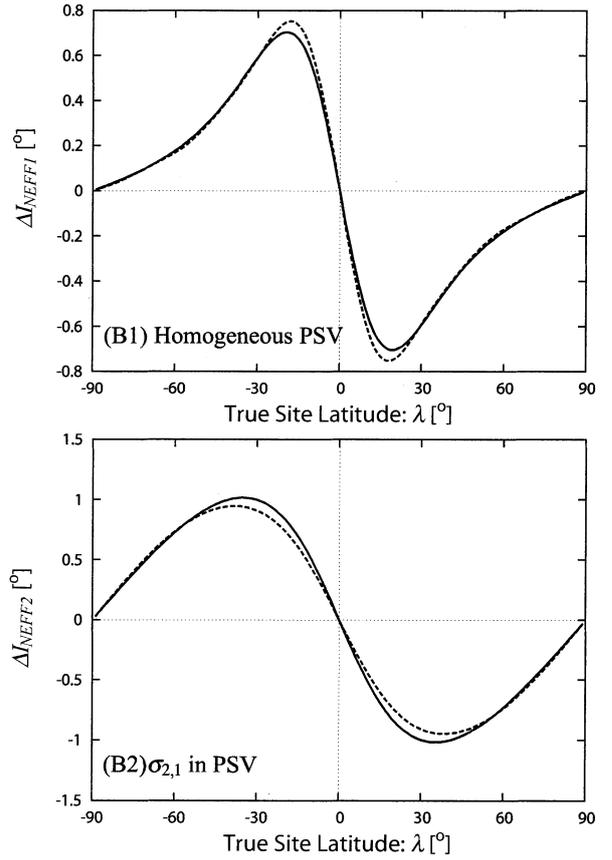


図 6: NEFF による見かけの伏角異常  $\Delta I_{NEFF}$ 。上が (B1) の均質 PSV に起因する見かけの伏角異常のずれ ( $\Delta I_{NEFF1}$ )、下が (B1) の ( $\ell = 2, m = 1$ ) 成分の変動に起因する見かけの伏角異常のずれ ( $\Delta I_{NEFF2}$ )。実線、点線は図 5 と同じ。

となる。モンテカルロ法による数値計算と、上式による  $\Delta I_{NEFF2}$  の様子は図 6b になる。

式 (17), (20), および (21) によって導かれた計算した  $\Delta I_{GAQ}, \Delta I_{NEFF1}, \Delta I_{NEFF2}$  の近似値の合計

$$\bar{I}_{obs} = I_{GAD}(\lambda) + \Delta I_{GAQ}(\lambda) + \Delta I_{NEFF}(\lambda) \quad (22)$$

とモンテカルロ法による数値的な  $\Delta I$  の比較が図 7 である。勿論、各項が線形的に加算できるとは限らず、モンテカルロ法による数値計算では相互作用を含んでいるが、結果を見る限りその影響はさほど大きくなく、単純な足し算をして構わないだろう。

### 5.3 GAD を仮定した古緯度からの補正

非 GAD 成分の平均場や変動に起因する NEFF によって発生する平均伏角の異常 ( $\Delta I$ ) があるため、GAD 仮説を信じて単純に古緯度  $\lambda$  を

$$\lambda' = \tan^{-1}(0.5 \tan \bar{I}_{obs}) \quad (23)$$

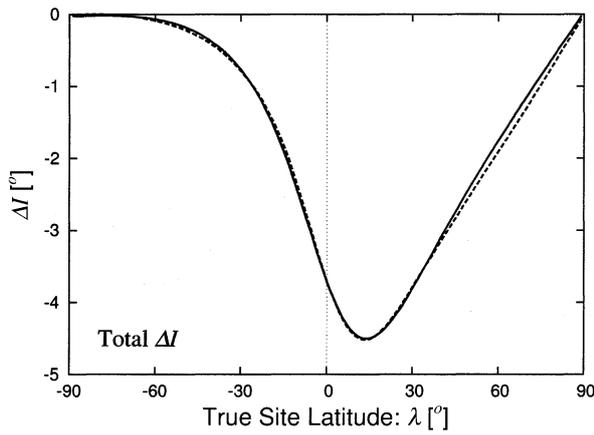


図 7: 図 5, 6 における  $\Delta I_{GAQ}$ ,  $\Delta I_{NEFF1}$ ,  $\Delta I_{NEFF2}$  の和。実線はモンテカルロ法による数値計算解。これにはそれぞれの相互作用も全て含んでいる。破線は各項の単純和。

で求めると、真の古緯度  $\lambda$  とは違うものになってしまう。Hatakeyama and Kono (2002) の TAF-PSV モデルから数値的に、 $\lambda'$  を  $\lambda$  に補正する値を緯度ごとに求めると、図 8 のような曲線になる。古緯度の読み間違いは北半球中緯度域 — つまり最も大陸が密集していて最も古地磁気学の研究が盛んな地域 — で 3 度強、古緯度を低く見積もっているわけだ。

この図を利用して見かけの古緯度から真の古緯度を補正することができる。しかしここでは、5.1 および 5.2 で得られた近似式 (17), (20), (21) を利用して、解析的に補正式を求めてみよう。

真の古緯度を示す伏角  $I_{GAD}$  は (22) より、

$$I_{GAD}(\lambda) = \bar{I}_{obs} - \Delta I_{GAQ}(\lambda) - \Delta I_{NEFF}(\lambda) \quad (24)$$

とすれば求めることができる。しかし、右辺の  $\Delta I_{GAQ}$  と  $\Delta I_{NEFF}$  はいずれも真の古緯度  $\lambda$  の関数で、測定値である見かけの古緯度に関連した量は第一項だけで、この方程式は解析的に解くことができない。そこで  $\lambda$  と  $\lambda'$  が近いことを利用して、

$$I_{GAD}(\lambda) = \bar{I}_{obs} - (\Delta I_{GAQ}(\lambda') + \Delta I_{NEFF}(\lambda')) \quad (25)$$

と置き換えて、ここから  $\lambda$  を求めることにする (古地磁気屋は単純ななるべく単純な公式でない、このような解析結果を実際には利用してくれないのだ!) その結果、図 8 の曲線になり、古緯度の読み間違いが補正できていることがわかった。

## 6 まとめ

変動するパラメータについて非線形な関数の統計量 (平均, 分散, ...) は、パラメータの統計量と 1 対 1 対応し

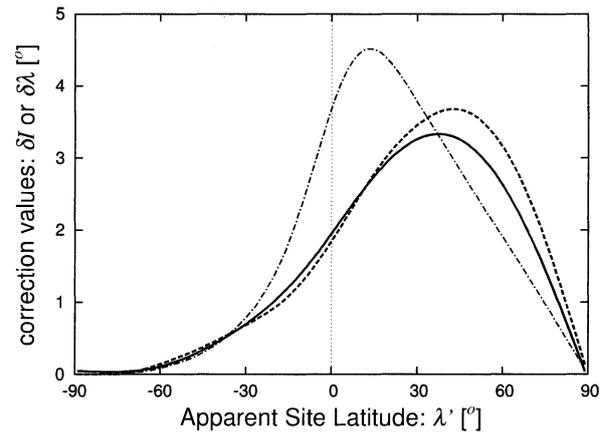


図 8: 実線と破線: GAD 仮説から計算した見かけの古緯度 ( $\lambda'$ ) と真の古緯度 ( $\lambda$ ) との差 ( $=\lambda - \lambda'$ )。つまり、この値を見かけの古緯度に加えれば、真の古緯度になる。実線は、モンテカルロ法による数値計算の結果。破線は、(25) を使用した解析値。一点鎖線: GAD 仮説に当てはめた場合の伏角の補正值 = (25) 右辺の第二項 =  $-(\Delta I_{GAQ}(\lambda') + \Delta I_{NEFF}(\lambda'))$ 。この値を平均緯度  $\bar{I}_{obs}$  に加えてそこから (12) を用いて  $\lambda$  を求めると破線になる。

ない。このことに関する具体的な例として、古地磁気方位データの平均伏角を紹介した。従来、古地磁気平均伏角は GAD 仮説を通して古緯度と対応づけられてきたが、仮説自身の疑問に加えて非線形効果 (NEFF) の影響も受けるため、データの平均を取って (12) を用い古緯度を求めるだけでは、図 8 のように、北半球の中緯度で約 3 度浅く読みとってしまうことがわかった。南半球では非 GAD な TAF (GAQ が占める) による伏角異常と NEFF による平均伏角の読み間違いが相殺するため、北半球と比べるとあまり影響がないようだ。

その古緯度の読み取り誤差について、平均地球磁場中の非 GAD 成分のおよび地磁気変動のモデルが与えられているときに、補正を行うために低次の展開までの解析関数を導出して、補正を行いそれが妥当なものであることがわかった。

最後に、本研究で指摘した古地磁気平均方位への影響はどのような時に考慮しなければいけないのかをはっきりさせておきたい。「古緯度」などを使った地塊やプレートの絶対座標を求めたり、古地磁気データを基に精密な True Polar Wander を取り扱う場合は考慮する必要がある。しかし、隣接する地塊間の相対運動やローカルテクトニクスに古地磁気データを用いる場合はほとんど影響しないと考えてよい。なぜなら、隣接する地塊など、緯度が近いものの比較では影響がある程度相殺するからである。

非 GAD な TAF の影響や NEFF を考慮して、古地磁気データのテクトニクス等への応用をより正確にするた

めに、我々はもっと地磁気の変動の様子を知る必要があるのである。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたって、東京工業大学の河野長名誉教授、熊本大学理学部の渋谷秀敏教授、岡山理科大学総合情報学部の横山由紀子助教授に動機付けを頂いた。また、本研究は科学研究費補助金(課題番号: 16740258)の補助を受けて行われた。深く感謝いたします。

## References

- Constable, C. G. and R. L. Parker, Statistics of the geomagnetic secular variation for the past 5 m.y., *J. Geophys. Res.*, **93**, 11569–11581, 1988
- Constable, C. G. and C. L. Johnson, Anisotropic paleosecular variation models: implications for geomagnetic field observables, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **115**, 35–51, 1999
- Fisher, R. A., Dispersion on a sphere, *Proc. R. Soc. Lond.*, **A217**, 295–305, 1953
- Gubbins, D. and P. Kelly, Persistent patterns in the geomagnetic field over the past 2.5 Myr, *Nature*, **365**, 829–832, 1993
- 畠山唯達, 分布が疎で誤差の大きなデータから情報を読みとる～古地磁気方位データ～, 岡山理科大学情報処理センター研究報告, **25**, 3–11, 2004
- Hatakeyama, T. and M. Kono, Shift of the mean magnetic field values: Effect of scatter due to secular variation and errors, *Earth Planets Space*, **53**, 31–44, 2001
- Hatakeyama, T. and M. Kono, Geomagnetic field model for the last 5 My: time-averaged field and secular variation, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **134**, 181–215, 2002
- 畠山唯達, 渋谷秀敏, 地球磁場の形と変動—平均地球磁場と古地磁気永年変化—, 地学雑誌, **114**, 201–211, 2005a
- Hulot, G. and C. Bouligand, Statistical palaeomagnetic field modelling and symmetry considerations, *Geophys. J. Int.*, **161**, 591–602 doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02612.x, 2005
- Hulot, G. and Y. Gallet, On the interpretation of virtual geomagnetic pole (VGP) scatter curves, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **95**, 37–53, 1996.
- Johnson, C. L. and C. G. Constable, The time-averaged geomagnetic field as recorded by lava flows over the past 5 Myr, *Geophys. J. Int.*, **122**, 488–519, 1995
- Johnson, C. L. and C. G. Constable, Paleosecular variation recorded by lava flows over the last 5 Myr, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **354**, 89–141, 1996
- Johnson, C. L. and C. G. Constable, The time-averaged geomagnetic field: global and regional biases for 0–5 Ma, *Geophys. J. Int.*, **131**, 643–666, 1997
- Kelly, P. and D. Gubbins, The geomagnetic field over the past 5 Myr, *Geophys. J. Int.*, **128**, 315–330, 1997
- Kono, M., Paleosecular variation in field directions due to randomly varying Gauss coefficients, *J. Geomag. Geoelectr.*, **49**, 615–631, 1997
- Kono, M. and H. Tanaka, Mapping the Gauss coefficients to the pole and the models of paleosecular variation, *J. Geomag. Geoelectr.*, **47**, 115–130, 1995
- Kono, M., Tanaka, H. and H. Tsunakawa, Spherical harmonic analysis of paleomagnetic data: the case of linear mapping, *J. Geophys. Res.*, **105**, 5817–5833, 2000
- Kono, M. and P. H. Roberts, Recent Geodynamo simulations and observations of the geomagnetic field, *Rev. Geophys.*, **40**, 1013, doi:10.1029/2000RG000102, 2002
- McElhinny, M. W., McFadden, P. L. and R. T. Merrill, The time-averaged paleomagnetic field 0–5 Ma, *J. Geophys. Res.*, **101**, 25007–25027, 1996
- Merrill R. T., McElhinny M. W. and P. L. McFadden, *The Magnetic Field of the Earth*, 529pp, Academic Press, San Diego, 1996
- Perrin M. and E. Schenëpp, IAGA paleointensity database: distribution and quality of the data set, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **147**, 255–267, 2004
- Selkin P. A. and L. Tauxe, Long-term variation in paleointensity, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **358**, 1065–1088, 2000
- Tanaka, H., Kono, M. and H. Uchimura, Some global features of palaeointensity in geological time, *Geophys. J. Int.*, **120**, 97–102, 1995
- Wegener, A.L. Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, Umgearbeitete Aufgabe, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1912
- Wilson, R. L., Permanent aspects of the Earth's non-dipole magnetic field over upper tertiary times, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **19**, 417–437, 1970
- Wilson, R. L., Dipole offset – The time average palaeomagnetic field over the past 25 million years, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **22**, 491–504, 1971



# インターネットを利用した広域高大連携教育

大西 荘一\* \*\* 榊原道夫\* 秋山雄亮\* 青嶋 智\* 田坂仁昭\*\*

\* 岡山理科大学大学院 総合情報研究科 情報科学専攻 \*\* 岡山理科大学 情報処理センター

## 1. 概要

岡山理科大学のネットワークは岡山情報ハイウェイ、OCN、SINETで外部に接続している。岡山理科大学では、これらの外部接続を活用して平成14年度より、単位認定を伴うインターネットを利用した遠隔授業による高大連携教育を行っている[1][2][3][4]。

本連携教育を行うにあたり、本学と岡山県教育委員会との連携に関する協定に基づき、各高校と本学との間で協定書を作成し調印をしている。

平成14年度は県立鴨方高校と1対1接続による遠隔授業を行った。平成15年度からは鴨方高校に加え、県立落合高校、県立倉敷天城高校、県立瀬戸高校、県立玉野光南高校、私立岡山学芸館高校、私立美作高校の岡山県下県立5校と私立2校の7高校と1対多接続による遠隔授業を行っている。図1に岡山県内の連携高校と所在地について概略図を示す。インターネットを利用した遠隔授業により、岡山全県がまるで1つの教室空間のようになっている。

また、平成16年度から山口県防府市三田尻学園誠英高校、平成17年度から岡山理科大付属高校、大阪市の私立北陽高校、平成17年度後期から京都府立東舞鶴高校と連携高校が岡山県外へと広がっている。図2に岡山県外の高校の所在地について概略図を示す。

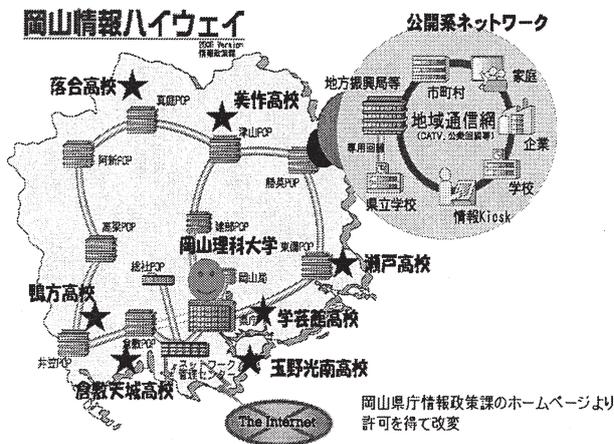


図1. 岡山県内の高校



図2. 岡山県外の高校

## 2. 接続テスト

岡山県立高校の場合は岡山情報ハイウェイにより本学と直結しているためネットワーク接続について不安はなく厳密な接続テストは不要である。しかし、県内の私立高校や県外の高校と接続する場合はインターネットのルートが不明なため連携協定を結ぶ前に厳密な接続テストが必要である。筆者らが行っているテストのチェックリストを表1に示す。

山口県防府市の私立誠英高校、大阪市の私立北陽高校、京都府舞鶴市の府立東舞鶴高校と本チェックリストに基づいて接続テストを行い3校とも結果は良好であった。

表1. 接続テスト チェックリスト

基本項目

チェック内容	チェック	目標値
CentraOne にログインできるか？		できる
CentraOne が起動し、イベントに参加できるか？		できる

理科大→高校

チェック内容	チェック	目標値
<音声>		
音質： 認識は可能か？(不可能な場合, 理由)		可能
雑音： バックグラウンドノイズはあるか？(ある場合, 程度)		ない
音量： 十分, やや十分, 不十分		十分
遅延： 理大側で1+2は と発声し, 答えが返ってくるまでの時間を計測する.		2秒以内
その他, 音声について		
<動画像>		
画質： 識別は可能か？(不可能な場合, 理由, 程度)		可能
画質： 十分か？(十分, やや十分, 不十分)		やや十分
画像切り替え時間： 理科大から接続先へ画像の切り替えにかかる時間(秒)		2秒以内
画像のサイズ変更： 変更は可能か？		可能
毎秒コマ数： どのくらいか？(コマ/秒)		2コマ以上
転送時間： 理科大のカメラで手を映し, 1秒ごとに指を1本づつ折る. 接続先の画面で指折を観察する. 指が折れたら理科大へ通告し, その遅延時間を計測する.		2秒以内
動画像と音声のズレ： 指を折りながら1, 2と発声し接続先で画像と音声のズレ時間を計測する.		1秒以内
その他, 動画像について		
<その他>		
スライドの表示・切り替え： 正常か？		正常
スライドと音声の同期： スライド切り替えと音声のズレ時間？		1秒以内
アプリケーション共有機能： 正常か？		正常
ブラウザを共有した場合の表示の遅延時間： 何秒？		3秒以内
CentraOne の挙手, 拍手機能： 正常か？		正常
理科大→接続先間のルート (tracert) 情報を取得できたか？		取得できる

### 3. 学内支援体制

企画課は連携協定書の作成及び岡山県教育委員会との連絡窓口業務, 教務課は高校生の科目等履修登録の管理及び成績処理, 情報処理センターは遠隔授業用サーバ及びネットワークの管理など, 各部署は横の連絡をとりあいながら高大連携教育を支援している。

### 4. 連携科目と成績評価

平成15年度より高校に新しく必修科目「情報」が開設されたことにより, 本学においても高校から大学への情報教育の連続性を急ぎ検討する必要性が生じている。前期は「インターネット入門」, 後期は「アルゴリズム入門」を実施している。これらの科目は本学総合情報学部情



表2. 授業アンケート

A	教員の話し方は明瞭でしたか.
B	黒板の文字や図形は適当な大きさでしたか.
C	授業の進度は適当でしたか.
D	教員は学生の理解力を配慮していると思いますか.
E	教員は熱心に教えてくれたと思いますか.
F	総合的にみて、この授業を履修してよかったですか.

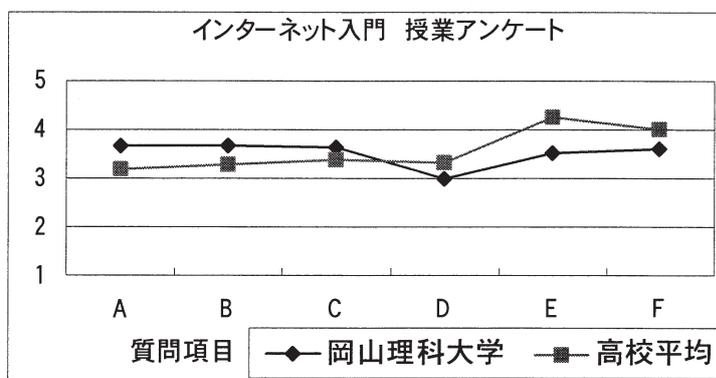


図5. 平成15年度前期授業アンケート 5 (よい) 3 (普通) 1 (悪い)

## 7. 本取組の特色

本取組の特色は次の4点が挙げられる.

### ① 距離及びスケジュールの違いに影響されない広域連携

ブロードバンドインターネットの環境があれば世界中どこでも広範囲に連携することができる. 通常の授業は同期双方向・ライブ型を使用して行っているが, 大学と高等学校のスケジュールの不一致によりライブ型で受講できない場合, 非同期双方向・いつでも型を使用して学習を行っている. 同期双方向・ライブ型と非同期双方向・いつでも型を併用したシステムにより, 教育効果の高い広域連携が可能になっている. 地域や社会人を対象とする生涯学習との連携へ拡張することも困難ではない.

### ② 独自開発LMS (Learning Management System)「MOMOTARO」による効果的な遠隔授業 [6], [7], [8]

高大連携が発展するにつれて連携高等学校の拡大, 受講者の増加による管理の複雑化, 講義後のフォロー不足などの問題が発生することが予想される. これらの問題の解決のために, またインターネットを利用した遠隔授業をより効果的に実施するためにLMSを独自に開発している.

図6は筆者らが取り組んでいる同期双方向・非同期双方向併用型のインターネット遠隔授業システムの構成図である. 本LMSは次の3つの機能からなっている.

- ・ 管理・運営機能: 遠隔授業全体を管理及び運営  
出席管理, 受講登録 (受講者IDの自動割付), アンケートの収集及び管理, レポートの収集及び管理, セキュリティ管理 (講師, 高校教員, 受講生, ゲストの4段階), ログイン・ログアウト管理, 等
- ・ 非同期双方向・いつでも型管理機能: 24時間いつでも受講可能なVOD教材の管理  
VOD教材の管理及び配信, アクセスログの管理, 等
- ・ 授業サポート機能: 同期双方向・非同期双方向授業の補助  
小テストの作成支援及びリアルタイム回答集計・グラフ化機能, Q&A作成支援及び提示機能, 等
- ・ コミュニティ機能: 講師, 受講生のコミュニケーション機能 (チャット, 掲示板)

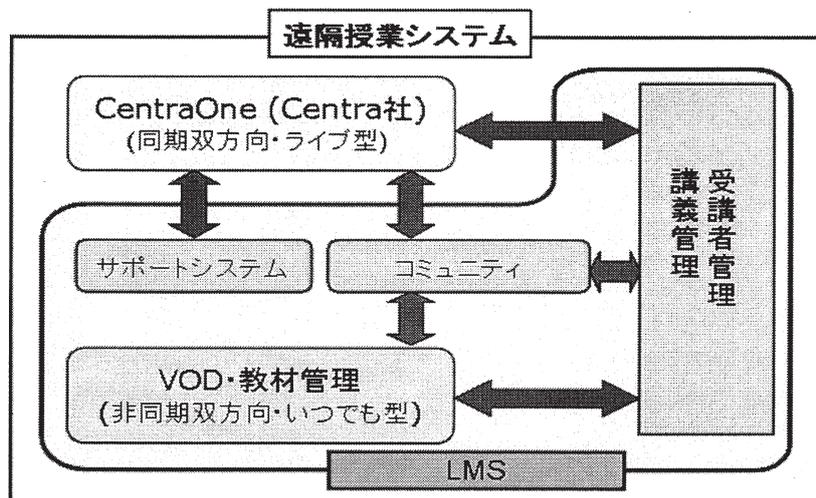


図 6. インターネット遠隔授業システム構成図

### ③ 在籍する高校と本学の両方の単位取得

高校生は科目等履修生として登録され、所定の成績をとれば単位が認定され、本学入学後に本人の希望により単位が取得できる。高校によっては高校の増加単位としても認定される。

### ④ 大学生及び高校生の両者に大きな教育効果

大学生と高校生を意識して講義することにより、高校生には少しハイレベルな啓発教育、大学生にはより丁寧な導入教育が行える。また、高校生と大学生が同じ条件で評価されることにより、両者に良い意味で競争原理が働き、学習意欲が増加する。

### アンケート分析による授業内容の有効性

各授業終了後、毎回授業内容についてアンケートをとっている。受講者の直感的難易度について図 7, 図 8 に示す。5 段階評価で数値が高いほど難しい。前期では大学生の難易度平均が 2.9, 高校生の難易度平均が 3.3 となった。また、後期では大学生の難易度平均が 3.1, 高校生の難易度平均が 3.5 となった。前期、後期ともに高校生の方が大学生よりも多少難しく感じているようではあるが、極端な差はなく適当なレベルであったと考えられる。また授業分野によって、高校生と大学生の難易度差が異なる。このデータを詳細に分析すれば、高校と大学の教育内容の特徴を把握でき、高校から大学への教育のよりスムーズな移行が可能になるとと思われる。

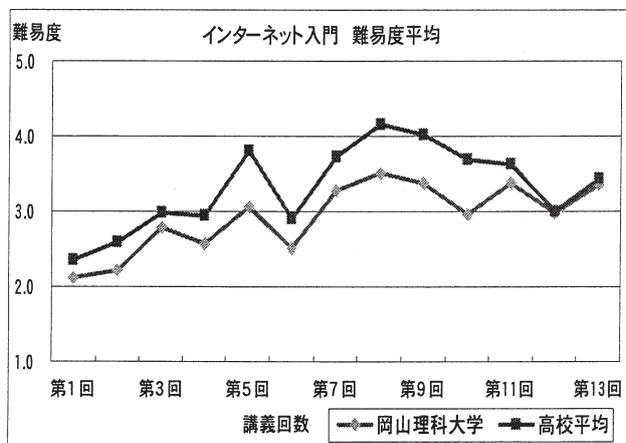


図 7. 平成 15 年度前期 難易度平均

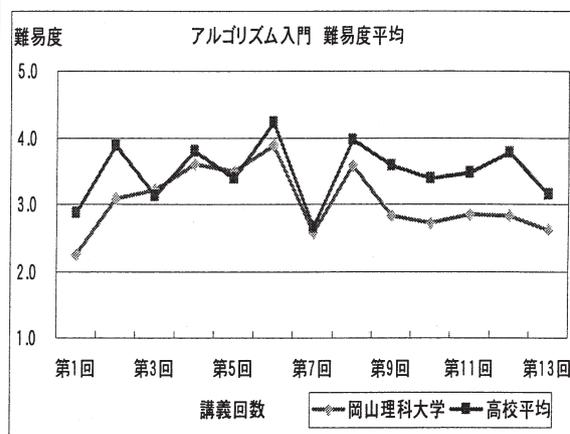


図 8. 平成 15 年度後期 難易度平均

アンケートにおける大学生、高校生の感想の例を以下に示す。

### 大学生の授業に対する感想

- ・高校と大学が連携して遠隔講義が受けられるのはすごいと思った。音声と映像で場所が離れていても同時に講義が受けられるのはこれからの教育方法が変わっていくのではないかと考えた。家にも講義が受けられる日がくるのではないかと考えた。
- ・私は情報科学科に在ながら、全然コンピュータのことがわかってないので、この講義で母校の在校生と一緒にがんばって勉強していこうと思いました。
- ・高校生と一緒に勉強しているようで楽しかった。なかなかこんな授業を受けることはできないので、貴重な体験をすることができたと思います。

### 高校生の授業に対する感想

- ・今回の講義で今、大学でどんな授業をしているかが身をもって分かり、さらに大学の授業に興味を持ちました。今度は実際に大学にいて講義を受けたいと思いました。
- ・話が早くて付いていけなかった・・・。だけど、今まで知らなかったインターネットの事が分かった。図などで説明してあったから分かりやすかったし、とても勉強になった。
- ・今日はインターネット利用ということで、様々な使い方があることが分かりました。共同作業など、手話の話など、とても興味深かったです。また今日はインターネットを通じて質問に答えたり、講義に参加している実感があって楽しかったです。
- ・今回の講義で情報の共有、コミュニケーション、コラボレーションなどインターネットでできることをあらためて考えることができました。とくにコラボレーションと言われる共同作業のような利用方法は知りませんでした。講義の説明を聞いて、あれはそういったものだったのかと思い当たることもありました。しっかりした整った環境がインターネットの普及を後押しし、自分の知らない世界に向けて簡単に情報を発信できることに便利さを感じつつ、逆にその便利さに不安も覚える今日ですが、この講義を通じてまた新たなインターネットの魅力を発見することができそうです。

これらの感想より、遠隔授業そのものがIT技術に対する関心と興味をもたせ、学習の動機付けに有効であることが分かる。また、高校生は少しハイレベルな授業内容に学習意欲が増したようである。コンピュータについての知識が不足している大学生に対しては導入教育として有効である。高校生は実際の大学の講義を遠隔授業で体験することによって、さらに大学に関心をもち進学意欲が高揚するであろう。

表3に平成14年度、15年度、16年度、17年度前期における高校及び本学学生の受講者数と単位の認定者数を示す。

**表3. 受講登録者数（単位認定者数）**

受講生	H14年 前期 名	H15年 前期 名	H15年 後期 名	H16年 前期 名	H16年 後期 名	H17年 前期 名
本学	23(17)	45(29)	23(18)	32(30)	16(14)	35(30)
高校	16(8)	74(30)	39(26)	59(38)	30(20)	58(30)

## 8. 今後について

### 高大連携の広域化と連携科目の増加

今後インターネットのブロードバンド化にともない、全国の高校、海外にある日本人学校や一般市民を対象とした生涯学習など、連携の広域化を進めていくことを考えている。

広域化にともなう授業に対する要望の多様化に対応するために、本学に加え倉敷芸術科学大学、吉備国際大学、九州保健福祉大学、千葉科学大学の4大学と連携し、各大学の特色を生かした豊富な遠隔授業科目の展開を考えている。

それを推進するための新たな組織の設置を検討する。

### 高大連携に向けたコンテンツの充実と教材開発手法の確立

現在、非同期双方向・いつでも型で学習するためのコンテンツはPowerPoint データを pdf ファイル化したものと VOD コンテンツである。さらに効果的な教育を目指し、FLASH 技術などを利用した有効な教材を開発する開発手法を検討している。

### 謝辞

本取り組みの推進にあたり、連携高校、岡山理科大学関係者、NTT 西・岡山支店関係者のご協力を得ましたことに感謝いたします。また、岡山県情報ハイウェイ、岡山市地域情報水道を利用しており、これらの設置者である岡山県、岡山市に感謝いたします。

### 参考文献

- [1] 大西荘一, 榊原道夫, 市田義明, 堂田周治郎, 山本英二, 惣臺聖治  
「インターネット利用遠隔授業による高大連携教育」  
岡山理科大学情報処理センター研究報告第 23 号, pp.15-20, 2002 年 3 月
- [2] 橋井幸子, 鶴将幸, 村山真一, 榊原道夫, 大西荘一, 市田義明, 堂田周治郎, 惣臺聖治  
「インターネット利用遠隔授業による高大連携教育」  
日本教育工学会第 19 回全国大会論文集, pp.911-912, 2003 年 10 月
- [3] 大西荘一, 榊原道夫, 橋井幸子, 鶴将幸, 村山真一, 市田義明, 堂田周治郎, 惣臺聖治  
「インターネット利用遠隔授業による 7 高校との高大連携教育」  
岡山理科大学情報処理センター研究報告第 24 号, pp.11-17, 2003 年 3 月
- [4] 大西荘一, 「インターネット遠隔授業による高大連携教育」私学経営 Vol.346, pp.23-30, 2003 年
- [5] 青嶋智, 秋山雄亮, 大西荘一, 榊原道夫  
「インターネット利用による高大連携の仕組みと評価」  
日本教育情報学会第 21 回年会論文集 pp.142-145, 2005 年 8 月
- [6] 村山真一, 持田龍也, 橋井幸子, 鶴将幸, 秋山雄亮, 藤本貴壽, 大西荘一, 榊原道夫  
「インターネット利用遠隔授業における Web システムの開発」  
情報処理学会第 66 回全国大会論文集 pp.4-395-396, 2004 年 3 月
- [7] 秋山雄亮, 鶴将幸, 村山真一, 青嶋智, 大西荘一, 榊原道夫  
「独立した複数組織の連携教育用 Web システム」  
情報処理学会第 67 回全国大会論文集 pp.4-447-448, 2005 年 3 月
- [8] 秋山雄亮, 青嶋智, 大西荘一, 榊原道夫  
「広域遠隔授業における Web システムの開発」  
日本教育情報学会第 21 回年会論文集 pp.236-239, 2005 年 8 月

