

情報処理センター  
研 究 報 告

The Bulletin of the Information Processing Center

第 29 号

(2008.3)

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. 高速数値計算のための分散処理への対応について			
	情報科学科	河野敏行	1
2. 「出席登録・課題提出・オンライン試験システムの構築」			
	情報処理センター	岩崎彰典	11
3. e-Learning における JavaScript Web アプリケーションの活用について			
	情報科学科	榊原道夫	15
	応用物理学科	デビット・ニール	
	電気電子システム学科	石田美佐子	
4. EM アルゴリズムの並列処理可能な加速法について			
	情報科学科	榊原道夫	19
	社会情報学科	黒田正博	
5. オイラーの級数による $\pi$ の計算について			
	情報科学科	榊原道夫	23
6. サイバーキャンパスにおける学習履歴データ活用のためのビューア「KIBIDANGO」の開発			
	情報科学専攻	大西荘一	27
		荒川智昭	
	加計教育コンソーシアム	西崎書彦	
7. Google Earth を利用した地磁気・古地磁気・岩石磁気データの可視化			
	情報処理センター	畠山唯達	31



## 高速数値計算のための分散処理への対応について

総合情報学部情報科学科

河野敏行

### 1. 課題概要

センター実習室の複数のPCを利用して線形計算を各PCに分散処理をすることによって、大規模な問題を高速に解くことを目標として実験に取り組んだ[1]。現在、コンピュータの高速化が進み、より複雑な問題を取り扱うことが可能となり、より問題が複雑になるに従い、その解析には多くの時間が掛かり、1台の計算機では解くことが困難となっている。昨年度は、その環境を構築するためにJavaScriptとPHPを利用したサーバと複数PCをクライアントとして分散処理するシステムを試作した。数値実験としては3重対角行列に対する反復解法を行った。今年度は、効率良く計算するための線形問題の分割方法について議論する。この分割の仕方によって分散計算による解の精度が大きく変化することがわかった。さらに、数値解析的に反復計算を加速する前処理を分散処理に適用した。

### 2. 反復解法について

自然現象などを表す微分方程式を解く際に得られる次式で示されるような線型方程式を解くことは全体の解析において多くの時間が費やされることが知られている。

$$Ax = b$$

ここで、 $A$ は $n \times n$ 行列、 $x$ は $n$ 次の未知ベクトル、 $b$ は $n$ 次の既知ベクトルである。この係数行列 $A$ は疎といわれる零要素の多い行列が得られる。このような問題を解くには計算の効率などから反復解法が使われている。反復解法として我々は定常反復法の代表としてGauss-Seidel法を用いることとする。数値実験では行列の要素を特定した3重対角行列および5重対角行列のテスト行列を扱うこととする。ベクトル $b$ は真の解 $x^* = (1, 1, \dots, 1)^T$ と設定して、 $b = Ax^*$ を計算することで与える。初期近似ベクトルは $x^{(0)} = (0, 0, \dots, 0)^T$ と設定する。今回のテスト問題も前回の研究と同様に以下に示すような行列 $A$ を扱うこととする。すなわち対角成分をすべて1.0、上下に1ないし2つの要素を持つ3重または5重対角行列とする。ここで、 $p, q, r, s$ は任意に設定することとする。3重対角行列の場合は $q = s = 0$ となる。数値実験において扱う係数行列は理論上取り扱いを容易にするために、 $p, q, r, s$ を非正とし、 $|p| + |q| + |r| + |s| < 1$ となるように設定することとする。すなわち、係数行列 $A$ が狭義優対角なZ行列となるようにする。

$$A = \begin{bmatrix} 1.0 & p & q & 0 & \cdots & 0 \\ r & 1.0 & p & q & \ddots & \vdots \\ s & r & 1 & p & \ddots & 0 \\ 0 & s & r & 1 & \ddots & q \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & p \\ 0 & \cdots & 0 & s & r & 1 \end{bmatrix}$$

次に反復解法の加速として前処理を用いるが、我々はこれまでに次のように元の線型方程式に正則行列  $P$  を前処理行列として左から乗算した式を前処理化線型方程式として定義し、この方程式に対して通常の変換反復法を適用することとする。

$$PAx = Pb$$

前処理行列  $P$  としては係数行列  $A$  の要素を用い容易に得られる行列とする。1991 年に A.D.Gunawardena らによって  $P = I + S$  という前処理が提案された[2]。ここで、 $S$  は

$A = (a_{ij})$  に対して

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -a_{12} & 0 & 0 \\ & & \ddots & 0 \\ & & & -a_{n-1n} \\ 0 & & & 0 \end{bmatrix}$$

とあらわされる、すなわち係数行列の対角のひとつ右の要素にマイナスを乗じた要素で示される。このような前処理を用いた前処理付反復法は、与えられた係数行列が疎である場合は、前処理化係数行列の導出とそのためにも生じる非零要素の増大という問題が生じる。その問題の回避として、前処理化アルゴリズムを提案した[3]。  $P = I + S$  を用いた前処理付 Gauss-Seidel 反復アルゴリズムをアルゴリズム 1 に示す。

アルゴリズム 1

```

Do k = 0, maxiterate
  Do i = 1, n
    
$$r_i^{(k+1)} = (b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} x_j^{(k+1)} - \sum_{j=i}^n a_{ij} x_j^{(k)}) / a_{ii} - x_i^{(k)}$$

    
$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \omega \left( r_i^{(k+1)} - \frac{a_{i,i+1}}{a_{ii}} r_{i+1}^{(k)} \right)$$

  enddo
  if x accurate enough then iteration quit
enddo

```

ここで、 $k$  は反復回数を示し、最大反復回数 `maxiterate` 回まで繰り返す、または、近似解  $x$  が解に近づき収束条件を満たした場合は反復を終了する。そしてベクトル  $r$  の各行の要素は1回の反復で得られる残差ベクトルの要素であるが、最後の  $n$  行目に対しては、 $r_{n+1}$  は存在しないため 0 とする。そして、その残差ベクトルに前処理要素  $s_{ii+1} = -a_{ii+1}$  (ただし、対角要素が 1.0 でない場合を考慮し、 $a_{ii}$  で除算している。しかしながら、今回のように対角要素をすべて 1 と設定した場合は必要ない) を乗じて加えることで、前処理効果を与えている。そして  $\omega$  は SOR 法のパラメータである。実験では、 $\omega = 1$  の場合の Gauss-Seidel 法のみを利用する。このアルゴリズムを分散処理に利用して、反復回数を減少させることとする。分散処理への対応については 4 節で説明する。

まずは、Gauss-Seidel 反復法を分散処理する場合の問題の解決について議論する。

### 3. Gauss-Seidel 反復法の分散処理への対応

Gauss-Seidel 反復法を分散処理への対応について考える。Gauss-Seidel 法は、 $k$  行目の計算に 1 から  $k-1$  行目の計算で得られた最新データを使う計算手法であるが、分散をした場合は正しく最新データを使うことはできなくなる。そのためにいくつかの工夫を行う必要がある。今回は、行列を分割した際に生じる誤差を小さくするために行列の重複を行うことについて議論する。

まず、PC クラスタによる分散処理を行うために係数行列  $A$  を PC クラスタの数によって行を分ける。各 PC クラスタの有効となる行列の次数は分散する PC クラスタの数で割ることとし、端数は最後の PC クラスタへの負担とすることとする。すなわち、行列の次数が 100 に対して PC クラスタの数が 3 台である場合は、最初の 2 台は 33 行分で、最後の 1 台は 34 行分を扱うこととする。一般に、分散処理に対しては Jacobi 反復法が適しているといわれている。なぜなら、計算は各行で分断されており、1 行ごとの更新データを 1 回の反復の中で利用することが要らないからである。しかしながら、数値的な計算速度としては Gauss-Seidel 法の方が優れている。利用するためにはいくつかの工夫が必要となる。ここで、分散の仕方について議論を行うが、正確な計算結果を得るためには、いくつかの重複度をもって計算することが必要となる。ここでいう重複度とは、たとえば、次数 100 に対して、1 番目の PC クラスタは 1-33 行目を計算として担当するが、34 行目のデータを追加して持つ場合、重複度 1 と定義する。このようにした場合、2 番目の PC クラスタは 34-66 行ではなく、33-67 行を計算することとする。そして、全体の近似解ベクトルに対しては、34-66 の値を用いることとする。表 1 に PC クラスタを 3 台とし、次数 100 に対して重複度を変化させた場合の計算する行の総和の変化を示した。そして、図 1 にその計算結果を示す。扱った行列の要素は  $p = -0.4, q = 0, r = -0.3, s = 0$  として設定した(問題 A)。横軸には計算された反復回数が見られ、縦軸には反復ごとの残差ノルムを対数で示した。

表 1 分散 3 において次数 100 の問題に対して重複度による計算行の違い

PC		重複度			
		1	6	10	15
PC クラスタ 1	開始行	1	1	1	1
	終了行	34	39	43	48
PC クラスタ 2	開始行	33	28	24	19
	終了行	67	72	76	81
PC クラスタ 3	開始行	66	61	57	52
	終了行	100	100	100	100
計算する行の総和		104	124	140	160

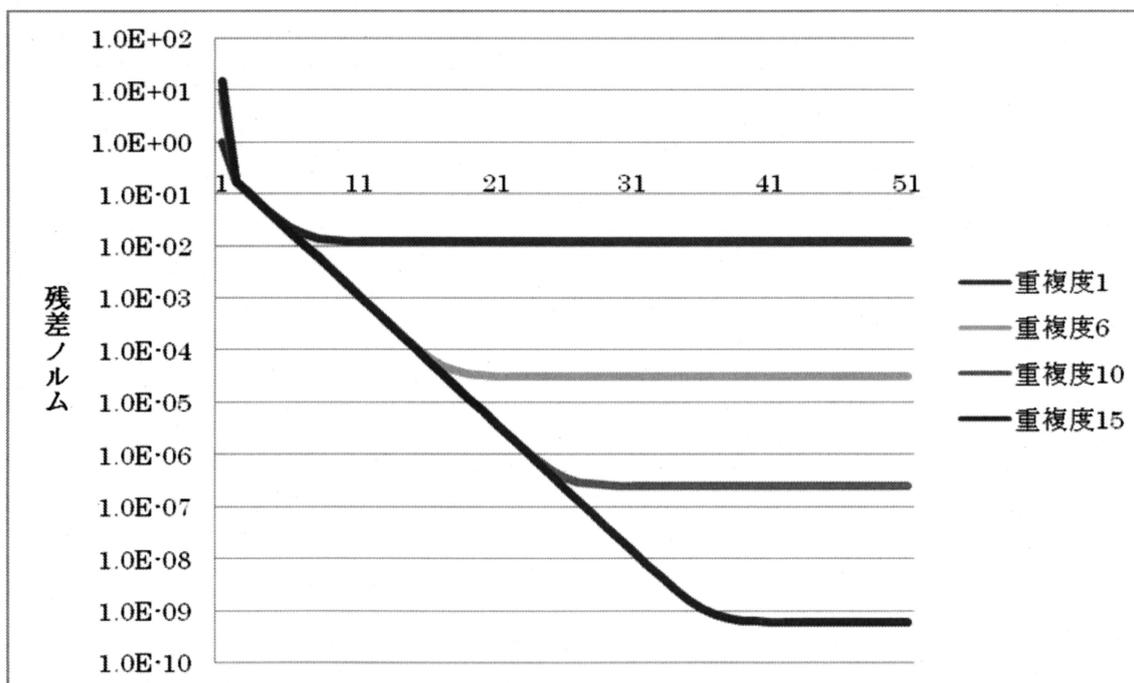


図 1 分散 3 において次数 100 の 3 重対角行列に対して重複度による収束状況の違い

具体的に表 1 での残差ノルムは各反復回における近似解  $x^{(k)}$  を用いて  $\frac{\|b - Ax^{(k)}\|_2}{\|b\|_2}$  で示し

ている。図 1 から分かるように重複度が増えるごとに得られる解の精度が変化している。そして収束の速さは同じである。すなわち、必要な解の精度を得るために必要な反復回数は変わらないことが分かる。重複度が 5 以下の場合は重複度 1 の場合と同様な結果が得ら

れ、解の精度は反復を繰り返したとしても2桁の精度しか変わらない。これは係数行列をPCクラスタに強制的に分割することによって分割された近辺で誤差が生じていることが計算結果を見ることでわかる。重複度が6以上であれば、4桁程度の精度の解が得られるという結果が得られた。次に、図2に次数300の場合の計算結果を示す。行列の3重対角をなす各要素は問題Aである。

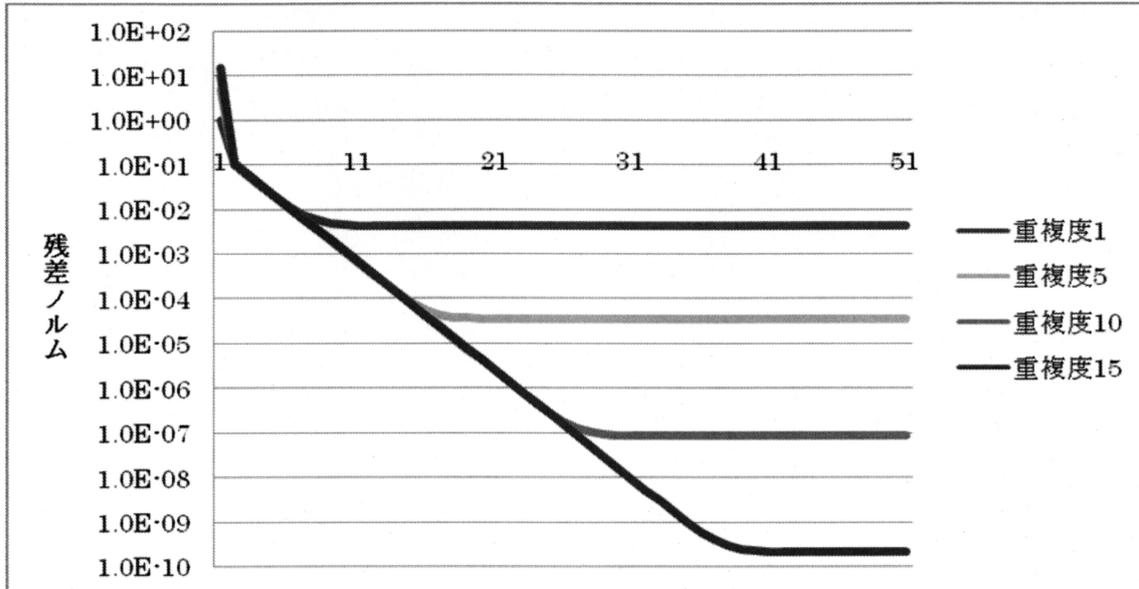


図2 分散3において次数300の3重対角行列に対して重複度による収束状況の違い

図2から分かるように次数が300の場合も重複度による変化は次数が100のときと同様な結果が得られた。

次に重複度を一定にして、次数による変化について調べる。重複度を10として、次数を100, 300, 500, 1000とした結果を図3に示す。図3から分かるように、次数が増加すると解の精度が多少上がっていることが分かる。これは、次数の増加に反して、PCクラスタの数は3と一定であり、行列の分割によって精度を下げている個所は比較的になくなるため、この現象が起こると思われる。PCクラスタの数が増加した場合は精度を下げる要因が増えることになるが、少ない次数の問題に対してPCクラスタを増やす必要はないため、この問題は大きな影響とならないであろう。しかしながら、少ない重複度で、精度を上げるための工夫も考えられるが、今後の課題とする。

次に要素を増やし、5重対角行列に対する重複度の変化について議論する。

5重対角にした場合は3重対角の場合よりも問題が複雑となり、より多くの反復回数が必要となる。5重対角行列の要素を $p = -0.2, q = -0.3, r = -0.1, s = -0.2$ とした場合(問題B)の重複度の違いによる計算結果を図4に示す。

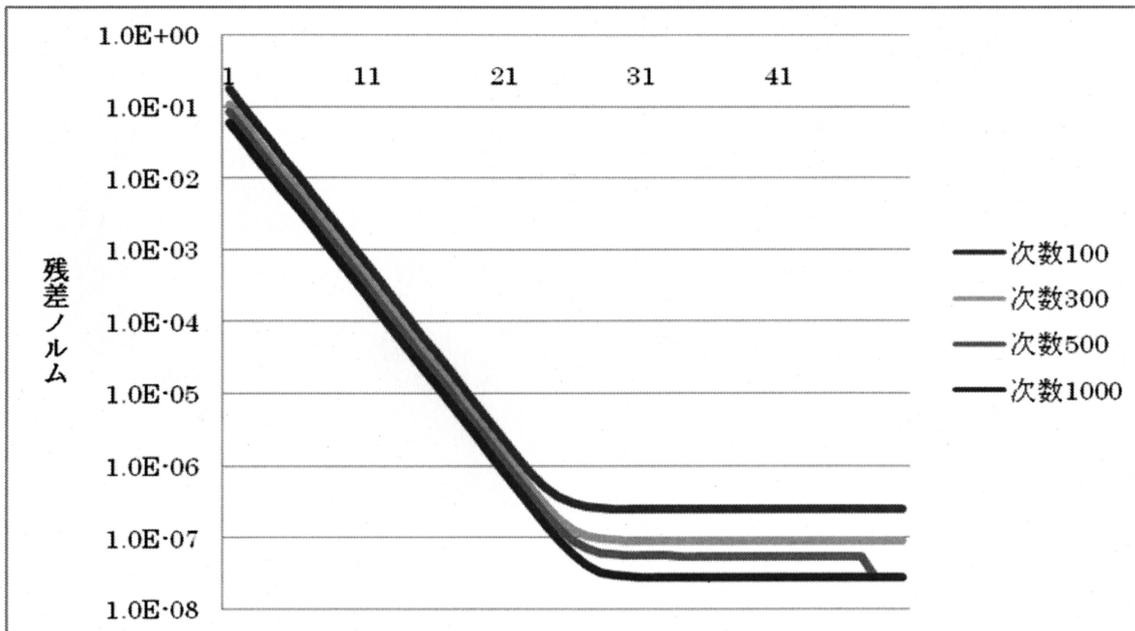


図3 分散3において次数 100,300,500,1000 の3重対角行列に対する収束状況の違い

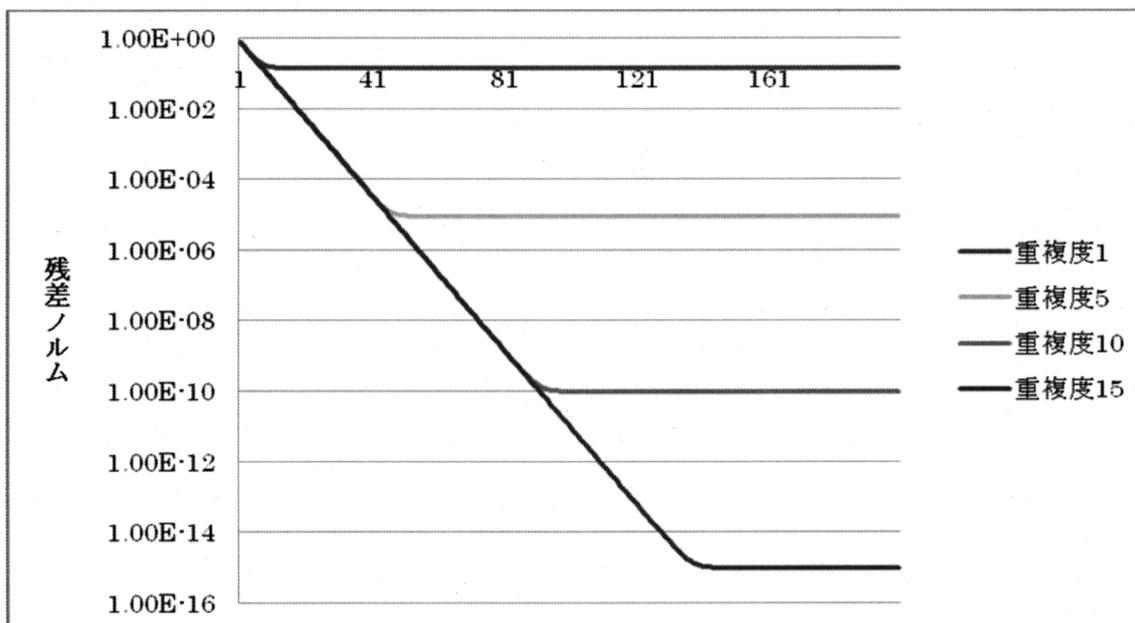


図4 分散3において次数 300 の5重対角行列に対して重複度による収束状況の違い

図4では、解の精度を得るために反復回数を200として計算した。重複度によって、3重対角と同様の結果が得られた。

次に前処理の分散化について議論する。

#### 4. 前処理の分散処理への対応

先の 1000 次の問題 A に対して 1 CPU で処理をした場合の結果を図 5 に示す. 前処理を施した場合, 計算回数が小となることはこれまでの研究でわかっている[1,3].

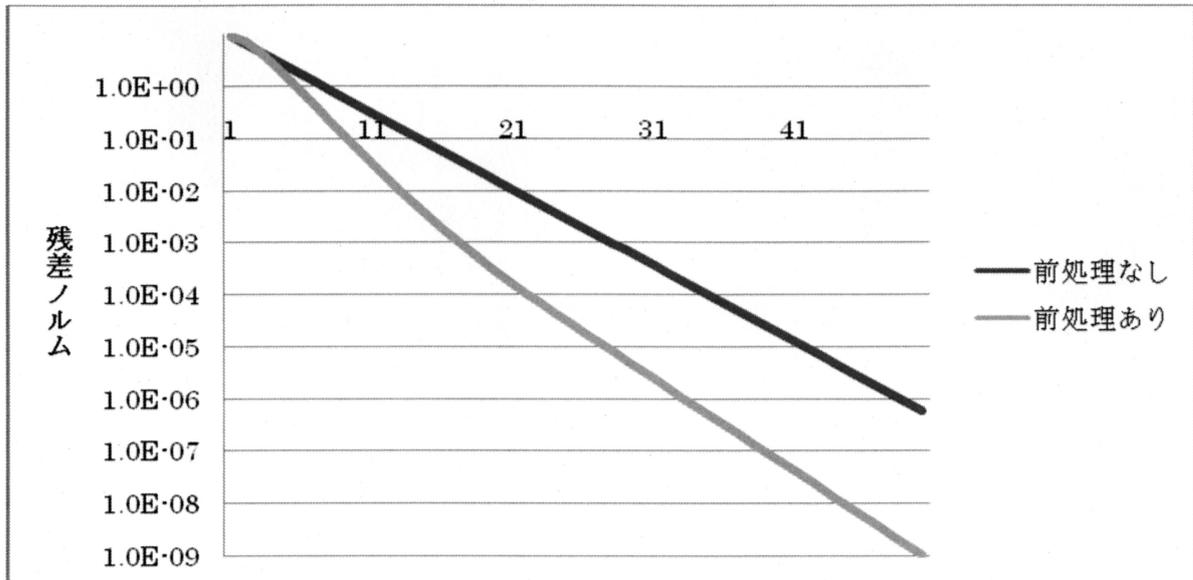


図 5 分散なしの次数 1000 に対する前処理効果

次に, 前処理アルゴリズムを分散に対応したものをアルゴリズム 2 に示す. アルゴリズム 1 とほぼ同様に定義することができる.

アルゴリズム 2

```

Do k = 0, maxiterate
(各クライアントで分割 ここから)
  Do i = 1, last row of eachPC

$$r_i^{(k+1)} = (b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij}x_j^{(k+1)} - \sum_{j=i}^n a_{ij}x_j^{(k)})/a_{ii} - x_i^{(k)}$$

(最後の行以外)  $x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \omega \left( r_i^{(k+1)} - \frac{a_{ii+1}}{a_{ii}} r_{i+1}^{(k)} \right)$ 
(最後の行のみ)  $x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \omega r_i^{(k+1)}$ 
  enddo
(分割ここまで)
if x accurate enough then iteration quit
enddo

```

アルゴリズム 2 において, 前処理の効果は行列の分割された最後の行に適用されないことが分かる. PC クライアントを 3 台にした場合の計算結果を図 6 に示す. 次数は 1000 の問題 A に対して重複度は 10 としている.

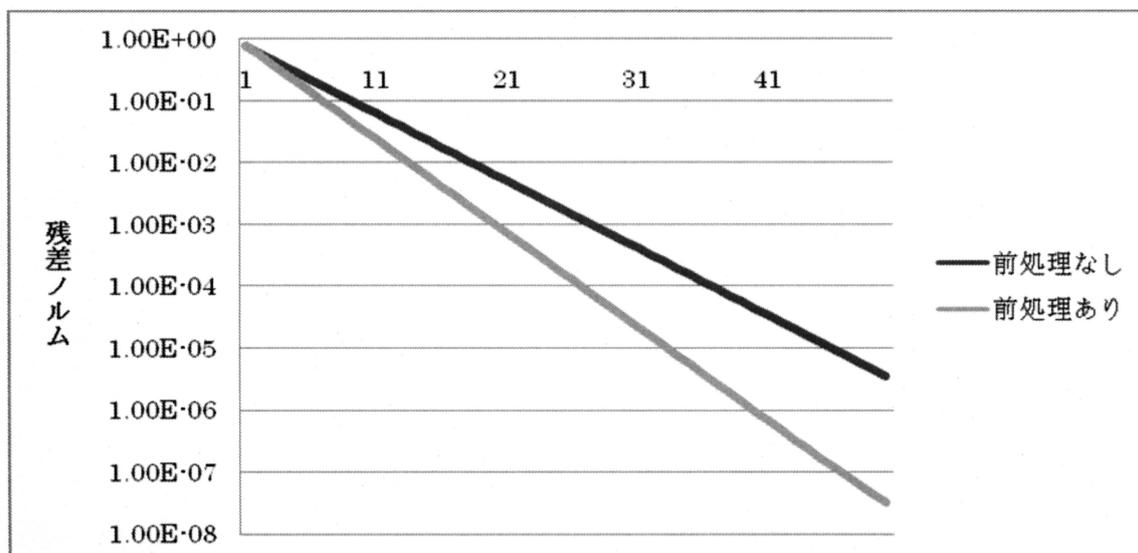


図 6 分散 3 における次数 1000 に対する前処理効果の比較 (重複度 10)

図 6 から分かるように前処理の効果によって必要な解の精度を得るための反復回数が減少していることが分かる. 分散なしの場合と同様に分散を行った場合に対しても前処理の効果が得られた.

## 5. 考察

今回の実験において, 昨年度作成した分散計算環境[1]を利用して, 数値計算を行う際に生じる分散の処理の仕方, 前処理の分散について研究を行った. 分散の処理の仕方としては, 線型方程式を分割する際に生じる誤差を減少させるために, 重複する部分を増加させることで対応でき, 解の精度を上げることが分かった. この実験の結果, 重複度 10 程度あれば, 必要な解の精度が得られるであろうと思われる. 次数が増えることによって, この重複度による計算量の増加の割合は減少し, 計算の負担になるとは限らないと思われる. 前処理の効果は各 PC クライアントの最後の行にだけ効果が得られないが, 1 クライアントの時と同様に効果が得られた. さらにいろいろな前処理法を用いることが考えられる.

今後の課題として重複度を増やさずに, 補正式を用いることについて改良することが残されている. そして, 昨年度作成したシステムを利用し, 実際に計算を行うことが課題であり, 計算問題としてより具体的な問題を扱うことが今後の課題である.

## 参考文献

- [1] 河野敏行, 高速数値計算の実験, 岡山理科大学情報処理センター研究報告, 第 28 号 (2007)1-6
- [2] A.D.Gunawardena, S.K.Jain and L.Snyder, Modified Iterative Methods for Consistent Linear Systems, *Linear algebra Appl.*, 154-156(1991)123-143.
- [3] 河野敏行, 適応型前処理付反復法について, 日本応用数理学会論文誌, 15,3(2005)235-243.
- [4] 小国力訳, J.J.Dongarra, I.S.Duff, D.C.Sorensen, H.A. van der Vorst, コンピュータによる連立一次方程式の解法, 丸善株式会社,1993.



2008 年度情報処理センター研究員報告  
「出席登録・課題提出・オンライン試験システムの構築」  
情報処理センター  
岩崎彰典

## 1. システム構築の背景

従来、本学には課題提出システムがあり私も利用していたが、いくつかの問題点があったため、同様のシステムの構築を試みた。以下に本学の課題提出システムを使用した経験による問題点を重要と感じる順に列挙する。

- A) 学生がファイル名に全角や空白を使用した場合、教員側ではファイルを開くことができないことがあった。課題の提出の場合は次の講義で指摘することができるが、定期試験の場合は致命的でそのファイルに関しては0点にせざるを得なかった。
- B) 学生がファイルを送信したところ、サーバー側で拒否されるケースがあった。(ファイル中に特殊文字が含まれ、サーバーの何らかのフィルタリングによって拒否されたのではないかと推測している。)
- C) 出席登録は学生用 Web メールで行っていたが、複数回送信する学生などがいて、正しい出席か遅刻か、あるいは代返かを判断するのはかなり困難であった。

そこで、学生が提出したファイルを教員のサーバーに保存するとともに、電子メールにも添付し、提出後すぐにメールにて確認できるシステムを作成した。以後、順次機能を拡張し現在に至っている。次に現システムの機能を説明する。

## 2. 学生からみたシステムの機能

- A) 受講登録。
- B) 出席登録及び学生用 Web メールを通じて学生自身による登録・出席ポイントの確認。
- C) 課題提出と本人による確認。
- D) オンライン試験（ミニテスト、中間テストや定期試験）。選択式、記述式が可能。
- E) 講義資料や必要な情報へのリンク。

## 3. 教員側で行うことができるシステムの機能

- A) 学生が行ったアクセスをログする機能。
- B) 学生がアクセスした内容を、教員へメールで送信する機能。
- C) 学生の出席日と出席・遅刻を記録する機能。
- D) 学生 Web メールを通じ出席回数を学生自身に確認させる機能。
- E) オンライン試験として選択・記述式ができ、選択問題はサーバーで自動採点し成績データベースへ記録し、記述式はサーバーへ保存する機能。

### 3. 各機能の説明

受講登録は通常紙で提出している代わりを行うものである。学生は学生用 Web アドレスと氏名とを記入する。

教員は、それをもとに出席・遅刻・欠席、オンライン試験の結果、課題の採点を記録するデータベースを作成する。以降、出席、遅刻、オンライン試験の結果は全て学生用 Web アドレスで管理する。

学生が出席登録を行うと、登録時間によって出席、遅刻、出席はしたがあまりに遅くて出席とは見なせないケースをデータベースに記録する。なお、私は出席ポイント制を採用し、出席ポイントを学生へメールし、自分の出席率がリアルタイムに把握できるようにしている。課題提出も確認のメールを学生宛に送信される。さらに、一方的にメールを送りつけられることをいやがるケースも想定し、確認のメールを送信するか否かは学生が選べるようにしている。

選択問題のオンライン試験は、アクセス毎に複数の問題から教員が決めた問題数がランダムな順に問題が表示される。これは、実習室で定期試験を行い隣同士が近く、カンニング防止のためである。定期試験までは勉強のため、全問題を提示している。選択肢の数に制限はない。記述式の問題にも対応できるようにしているが、2008年度前期での使用実績はない

### 4. 2008年度前期で使用して感じた利点

出席状況を教員がリアルタイムで把握できる。登録されたデータベースは実習室からも見ることができる。但し、後述するようにこれは大きなセキュリティホールでもある。

出席確認にタイムラグがない。紙に書かせる、番号の読上げではなく、学生は制限時間内に登録をしなければならない。これは IT を利用する大きな利点である。また、送信元 IP アドレスによって代返もある程度防止できると考えている。この機能は電子メールによって出席確認をしていた頃、TA がそれらしき行為を見つけ報告してくれたために付け加えた機能である。2008年度前期では自宅から出席登録をした事例があった。

学生の場合、ファイル名を正しく書けないケースがある。これは定期試験では致命的で

ある。本システムでは学生番号とファイル名のリストを提示し本人が確認してから退出させそのような事故を防いでいる。しかし、厳密には個人情報保護法に抵触する可能性がある。

## 5. 本システムの欠点（セキュリティと個人情報）

### ・ セキュリティの問題

現状は、ほとんどセキュリティがかかっていない状況である。例えば、本学以外からもアクセスが可能である。理由は、オンラインでの演習・テストなど個別のプログラムの実験をしていたころ、家からテスト勉強をしている事例があったからである。学外からのアクセスを禁止することは、自宅学習時間も単位認定要件に含まれているし、学生サービスを低下させることでもある。HTTPS への移行及びアクセスパスワード設定等の処置を急ぎ、学外からのアクセスは保障すべきであろう。

出席・成績のデータベースなどは、学生に見えないように注意はしているが、教卓の送出スイッチの切り替え忘れなどの人為的ミスは防ぐことはできない。また、ブラウザからは URL が分かっただけで学生も閲覧可能になってしまう。出席状況がリアルタイムで把握できる利点はあるが教卓からのみ閲覧可能にするなどの、個別のファイルによってセキュリティに対する細かい設定が必要である。

### ・ 個人情報の問題

個人情報保護法を厳密に運用すれば、学生番号と本人の情報がセットになったものを公開することはできない。全ての学生が正しく入力を行えば問題はないのであるが、数人はたいてい間違いを起こす。成績管理は、学生用 Web メールアドレスで行っているので、受講登録は学生用 Web メールアドレスのみを登録させればよいのであるが、それだけでは教員はどこが間違っているのかを判断することができない。正しく登録できているかどうかを本人のみが確認できればよいのであるが、それを行うためには正しく登録ができていることが前提となる。このため、学生用 Web メールアドレスと姓名列のリストを提示し、本人に確認させざるを得ない。現在、口頭で「今から学生番号と名前の一覧を見せますが、見られたくない人がいれば見せません。」と確認をとっている。一旦、学生用 Web メールアドレスが登録されれば、出席ポイント等の個人情報はそこへ送信されるため個人情報は守られる。

定期試験では本人によるファイル名等の確認はさらに重要である。講義期間中、繰り返し教えるのであるが、定期試験においてもファイル名の間違いが無かったことはない。本来、学生用 Web メールアドレスやファイル名が正しくない等による学生の不利益は、学生本人の責任に帰すべきであるが、そのような間違いをすれば、社会で通用しないことを教えることも情報リテラシーの基本と考える。

## 6. これからの改善点とまとめ

セキュリティに関してはテクニカルな問題であるので順次整備を行っていく。

個人情報に関して当分は本人の了解のもとにリストを提示せざるを得ないであろう。また、教員側の操作ミスに関しては、次年度、教員用モニタがデュアルモニタとなるため教員確認事項を学生用モニタに映すことなく確認できる予定である。

学生にとって最悪の事態は、作成した課題レポート・答案を上書き保存することなく送信してしまうことである。また、私の出したメールに対し、Subject:欄はなく、本文にも学生番号・氏名もない返信が帰ってきたことがある。これらは情報リテラシー以前の問題であろうか。

商用の Web サイトでは入力欄に厳しいフィルタをかけてあり誤りがあれば訂正が求められる。実際、本システムでも学生 Web メールに関しフィルタをかけていて、「正しいメールアドレスを覚えていないと試験は受けられない。」と、講義中何回も繰り返しているのだが、実際は定期試験で「あなたのメールアドレスは登録されていないか、間違っています。」という表示になり、解答を送信できない学生が必ず数名いる。現実社会において、これは「パスワード」を忘れたのと同様であるのだが、担当教員にとってみれば非常に対処に苦慮するケースである。

携帯メール等の情報機器が普通のものとなり、OS はますますユーザーフレンドリーとなり、現状はコンピューターやネットの基本を理解することなく情報機器を扱える方向へ向かっている。情報リテラシーで教える内容も検討する必要があるだろう。

## e-Learning における JavaScript Web アプリケーションの活用について

総合情報学部・情報科学科 榊原道夫 sakaki@mis.ous.ac.jp

理学部・応用物理学科 デビット・ニール

工学部・電気電子システム 石田美佐子

### 1. はじめに

e-Learning は近年重要な教育媒体の 1 つとして多くの関心を広く持たれるようになった。e-Learning の特徴は、C1) いつでも C2) どこでも インターネットに接続することのできる環境でノートパソコンさえあれば、学習コースをこなすことができることである。e-Learning のコンテンツは文字、画像、音声、動画の組み合わせにより構成されている。その他、科学関連の講義であるならば、学習用のプログラムが利用できると学習の多面性を伸ばすことができる。e-Learning のコンテンツはブラウザにより閲覧することになる。ブラウザには JavaScript エンジンが搭載されているため、Web コンテンツにプログラムにより駆動するコンテンツが埋め込める。JavaScript の利用はコンピュータの性能が日々向上するなかで、その利用形態も変わってきている。当初は簡単な動的 Web ページの実現に利用され、処理速度が遅かったため、それ以上の目的で利用することはまれであったと思われる。しかし今日、JavaScript は通常のプログラミング言語で構成されるようなツール群と同様なツールの提案がなされている。そこで、我々はサーバサイドと連携をもつ高度な JavaScript 利用 Web による e-Learning のコンテンツの提供についていくつかの提案を行う。

### 2. 利用する JavaScript 技術

#### 2.1 JavaScript ツール

JavaScript ツールは、その用途に応じて種々存在する。Web デザインのためのものとしては

- ◆ jQuery (JavaScript)
- ◆ Yui (JavaScript) Yahoo! により開発されたライブラリー
- ◆ Canvas (JavaScript)
- ◆ smartGWT (Java)

などが、存在する。これらのライブラリーを用いることにより、ブラウザで表示できる Windows アプリケーションを開発することが可能となる。e-Learning において重要な要素にコンテンツを提示するシステムと、学習全般の資料を管理するユーザインターフェイスである。Yui はコンテナー、タブ、データグリッド、グラフィックス等多様なツールを持つライブラリーである。しかしながら、Yui のグラフィックスは印刷が面倒であるため、Canvas との複合的利用が望まれる。Yui のなかでコンテンツの機能的な

表示に有用な要素は **Layout** ライブラリである。その中に図 1 に示す **menu\_layout** は動的なコンテンツの表示とナビゲーションに適している。図 1 に示された **Web** ページには、上端に配置されたメニューバー、中央部分にコンテンツの表示部分、左部にコンテンツメニュー、右部には補注、ノートなどを配置することができる。また、練習問題用の **Web** ページもこのレイアウトを用いることにより作成できる。コンテンツは外部ファイルとして管理することにより、コンテンツの開発の手間を省くことができる。

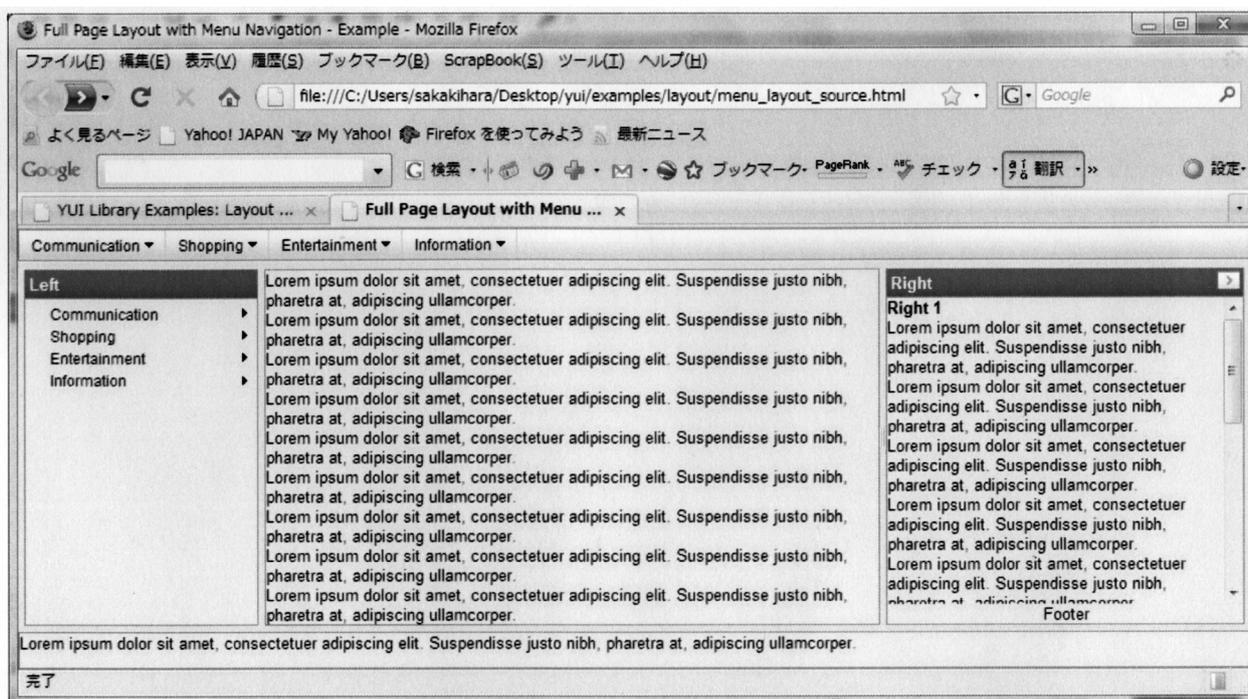


図 1 : menu\_layout の例

smartGWT は **Java** クラスによる実現のためのものであるため、ここでは取り上げない。

## 2.2 SVG について

SVG は **Web** ブラウザー上において文字、図、アニメーションを実現する上で重要な技術である。以前は SVG の表示に対応したブラウザがまれであったため、現在 SVG によるコンテンツは皆無に近い。しかし、**Firefox**、**Chrome** 等のブラウザが徐々に SVG をひよじできるような機能を搭載してきたため今後の利用については展望が出てきた。SVG の重要な特徴の一つが図の拡大に対して画質が均一にできる点である。このことは、図を多用するコンテンツで有用である。

SVG の編集は現在 **HTML** の編集環境より遅れている。**Adobe** の **Illustrator** を使い SVG コンテンツを作成する方法が最も編集の作業効率が上がる方法である。ファイルタイプとしては **SVG1.1** で保存すると **Firefox**、**Chrome** で表示することができる。図 1 はその 1 例である。**Chrome** による表示である。このようなコンテンツは、科学関連のコンテンツだけではなく、英語の学習を支援するコンテンツにも利用することができる。

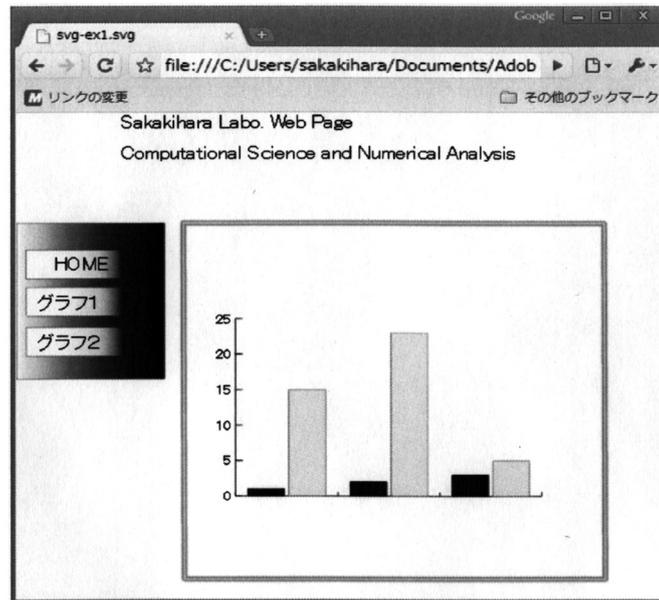


図 2 : SVG によるコンテンツ作成の例

### 2.3 JavaScript Web ブック

榊原研究室では、JavaScript でコントロールするブック様の Web ページツールを開発した。このツールと前小節で紹介したツールを複合させることにより、より機能的な Web コンテンツを作成することが期待できる。特に Web で本、ノートに対応するものが必要であるが

### 3. コンテンツの作成のプロセスについて

これらのユーザインターフェースの充実化により、サーバ側のコンテンツ管理も再考する必要がある。

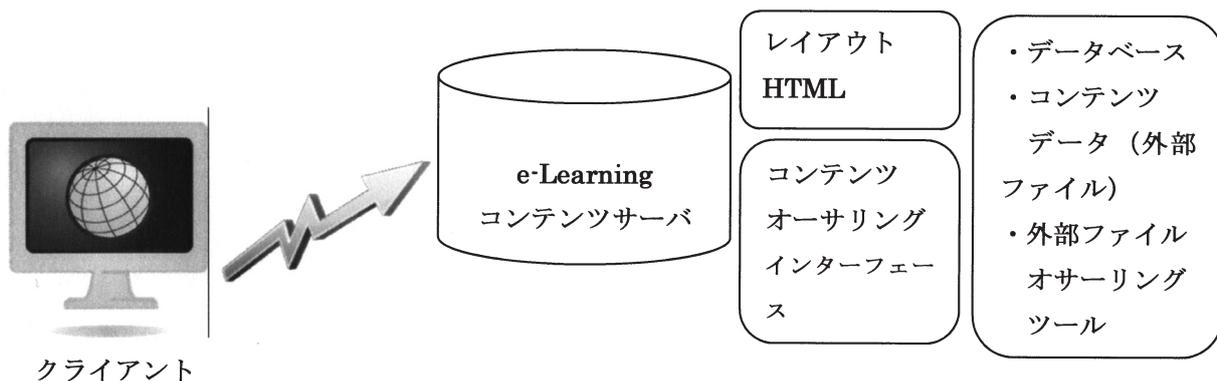


図 3 : コンテンツの閲覧、作成システムの概念図

図 3 はその一例である。サーバ側には、レイアウト用の HTML ファイル、コンテンツを Web を用いて作成できる機能、コンテンツを管理するための機能等が必要である。コンテンツはレイアウトとは分離し内容だけのデータファイルとして管理するようにする。

SVG によるコンテンツの場合、レイアウトからコンテンツデータに至るまですべてを SVG で構成する

方がよいと思われる。そのため、外部ファイルオーサリングツールの代わりに SVG のオーサリングツールが必要となる。フリーのソフトで e-Learning のコンテンツに適したものは現在見当たらないため、オーサリングツールの開発が今後の課題の 1 つである。

#### 4. まとめ

1 年間の研究 e-Learning に適したコンテンツ表示の方法を考察した。本報告において、JavaScript を用いた、クライアント側のコンテンツ表示について考察した。その結果、

- 1) Yui のようなフリーのライブラリーによりレイアウトを設計する
- 2) コンテンツはレイアウトにデータを埋め込む形式でサーバで管理する
- 3) コンテンツの作成・編集はデータの作成・編集として行う
- 4) データ編集のツールをサーバサイドで用意しコンテンツの管理を行う

とう方式を提案した。今後はこれらのそれぞれの要素を実現することが研究の目標となる。

## EMアルゴリズムの並列処理可能な加速法について

総合情報学部・情報科学科 榊原道夫 sakaki@mis.ous.ac.jp

総合情報学部・社会情報学科 黒田正博

### 1. はじめに

EMアルゴリズムの加速に関する研究を我々はここ数年行っている。第1の成果として Vector  $\varepsilon$  法を用いるアルゴリズムを提案した。このアルゴリズムは内積を含み並列処理には種々な工夫が必要となる。EMアルゴリズム自体は、個々の変数に対する独立な処理より構成されている。そのため、EMアルゴリズムの変数に対する処理の独立性を保存することができる加速法の工夫を考察することは、有益な考察である。このような観点から、本報告ではいくつかの加速法の提案を行う。

### 2. 一変数関数の不動点方程式の加速

まず、一変数の不動点方程式：

$$(1) \quad x = f(x)$$

について考える。(1) から得られる反復式

$$(2) \quad x_k = f(x_{k-1})$$

が集積点  $x^*$  を持つと仮定する。数列  $\{x_k\}$  が  $x^*$  に一次以下のスピードで収束する場合、1つの有効な加速法は Aitken  $\delta^2$  加速：

$$(3) \quad \bar{x}_k = \frac{x_k x_{k+2} - x_k}{x_{k+2} - 2x_{k+1} + x_k}$$

である。(3) 方程式

$$(4) \quad x - f(x) = F(x) = 0$$

に対して、セカント法を適用することにより得られる加速法である。この事実をから加速法の定式化を考えると (3) 以外の加速法を提案することができる。

### 3. 提案する加速法

セカント法は方程式の反復解法の一つである。その他多く解法が知られているその中で我々は、

Newton-Secant 法 :

[3 次の場合]

$$(5) \quad y_k = x_{k-1} - \frac{F(x_{k-1})}{F'(x_{k-1})}, \quad x_k = x_{k-1} - \frac{F(x_{k-1})}{F'(x_{k-1})} + \frac{(y_k - x_{k-1})F(y_k)}{F(y_k) - F(x_k)}$$

[4 次の場合]

$$(6) \quad y_k = x_{k-1} - \frac{F(x_{k-1})}{F'(x_{k-1})}, \quad x_k = x_{k-1} - \frac{F(x_{k-1})}{F'(x_{k-1})} + \frac{(y_k - x_{k-1})F(y_k)}{2F(y_k) - F(x_{k-1})}$$

に注目した。(5)、(6) で新たに必要とされる関数値は  $F(y_k)$  のみである。特に (6) は4次であるため、加速法の候補として有力となる。さて、(6) を

$$(7) \quad y_k - x_{k-1} = -\frac{F(x_{k-1})}{F'(x_{k-1})} = N(x_{k-1}) \quad x_k = y_k + \frac{N(x_{k-1})F(y_k)}{2F(y_k) - F(x_k)}$$

と書き換えておく。(7) には方程式中の関数に対する導関数が含まれているためこのままでは、数列の加速法にならない。そこで、

$$(8) \quad N(x_{k-1}) \rightarrow D(x_{k-1}) = -\frac{(x_{k-1} - x_{k-2})}{F(x_{k-1}) - F(x_{k-2})} F(x_{k-1})$$

とう置き換えを行う。この置き換えにより

$$(9) \quad y_k - x_{k-1} = D(x_{k-1}) \quad z_k = y_k + \frac{D(x_{k-1})F(y_k)}{2F(y_k) - F(x_k)}$$

を得る。(9) はもはや微分を含まないため、与えられた不動点方程式と反復より得られた数列から加速された値が計算できる。(9) を我々は **Double Secant(DS)**法と呼んでいる。

さて、方程式が不動点方程式から得られていることを考えるとき、微分係数を **Secant** 係数で置き換える他にもう一つのアプローチが存在する。 $F(x) = x - f(x)$  であるから  $F'(x) = 1 - f'(x)$  である。導関数中の第2項だけに **Secant** 法を用いると

$$(10) \quad y_k - x_{k-1} = E(x_{k-1}) = \left(1 - \frac{f(x_{k-1}) - f(x_{k-2})}{x_{k-1} - x_{k-2}}\right)^{-1} F(x_{k-1}) \quad w_k = y_k + \frac{E(x_{k-1})F(y_k)}{2F(y_k) - F(x_k)}$$

を得る。ここで、

$$(11) \quad \left(1 - \frac{f(x_{k-1}) - f(x_{k-2})}{x_{k-1} - x_{k-2}}\right)^{-1} F(x_{k-1}) = \frac{x_{k-1} - x_{k-2}}{x_{k-1} - x_{k-2} - (f(x_{k-1}) - f(x_{k-2}))} (x_{k-1} - f(x_{k-1})) \\ = \frac{(x_{k-1} - x_{k-2})(x_{k-1} - x_k)}{-x_k + 2x_{k-1} - x_{k-2}}$$

を得る。

#### 4. 簡単な数値例による確認

加速の効果を確認するために簡単な数値実験の結果を示す。

反復式は

$$(12) \quad x_k = \sqrt{x_{k-1}}$$

で、その集積点は0, 1である。1に収束する初期値を与えた場合の数値例を表1に示す。

表1

反復数	$x_k$ の絶対誤差	$y_k$ の絶対誤差	$z_k$ の絶対誤差
<b>k=3</b>	<b>0.0230518752</b>	<b>0.0000643762</b>	<b>8.950E10<sup>-7</sup></b>
<b>k=5</b>	<b>0.0057138105</b>	<b>0.0000040491</b>	<b>1.433E10<sup>-8</sup></b>
<b>k=7</b>	<b>0.0014254020</b>	<b>2.534E10<sup>-7</sup></b>	<b>2.253E10<sup>-10</sup></b>

加速法(9)を用いることにより加速がされていることが判る。

#### 5. 多変数方程式系への適用

EMアルゴリズムを用いる対象の尤度関数には複数の未知パラメータが存在する。そのような場合3節で提案した加速法は以下のように用いることができる。

不動点方程式系：

$$(13) \quad x^i = f_i(x^1, x^2, \dots, x^d) \quad i = 1, \dots, d$$

に対して、反復

$$(14) \quad x^i_k = f_i(x^1_{k-1}, x^2_{k-1}, \dots, x^d_{k-1}) \quad i = 1, \dots, d$$

を考える。この方程式系を1変数の方程式系

$$(15) \quad \phi^i_k = g_i(\phi^i_{k-1}) \quad i = 1, \dots, d$$

に変数変換

$$(16) \quad (\phi^1, \phi^2, \dots, \phi^d) = \left( x^1, \frac{x^2}{1-x^1}, \dots, \frac{x^{d-1}}{1-\sum_{j=1}^{d-2} x^j} \right)$$

を用いる場合<sup>1)</sup>、(14)のそれぞれの方程式に対して一変数と考えると適用する<sup>2)</sup>方法が考えられる。

## 6. まとめ

本報告において、我々は並列処理可能なEMアルゴリズムの加速法を提案した。これらの方法はEMアルゴリズムの計算過程の並行性を崩すことなく適用ができる。また、数値例でみたように、十分な加速結果が期待できる。ここで提案した方法の理論的な分析はまだこれからの問題として残っている。

## 参考文献

- 1) *Kuroda, M., Sakakihara, M. and Geng, Z.* (2009). Acceleration of EM and ECM algorithms using Aitken $\delta^2$  method for log-linear models with partially classified data, *Statistics and Probability Letters*, in press.
- 2) *Sakakihara, M. and Kuroda, M.* (2009), Convergence of the componentwise Aitken  $\delta^2$  acceleration of EM algorithm, Proceedings of COMPSTAT2009 in porto.

## オイラーの級数による $\pi$ の計算について

岡山理科大学総合情報学部 榊原道夫

### 1. はじめに

$\pi$  の値を求めるための級数の一つとして、オイラーの級数

$$(1) \quad \frac{\pi^2}{6} = \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu^2}, \quad \frac{\pi^4}{90} = \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu^4}, \quad \frac{\pi^8}{9450} = \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu^8}$$

が知られている。これらの一般化は

$$(2) \quad (-1)^{k-1} \frac{(2\pi)^{2k}}{2(2k)!} B_{2k} = \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu^{2k}}, \quad (k=1,2,\dots)$$

として与えられる。ここで、 $B_{2k}$  は Bernoulli 数である。これらはオイラーにより与えられた結

果である [1]。級数  $\frac{\pi^2}{6} = \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu^2}$  により  $\pi$  と小数点以下 7 桁まで求めるのに 1000 万項までの計算

が要求される。このように収束の制度が悪いために実際  $\pi$  の計算に用いられていない。しかし、 $k$  を大きくとるとにより収束の精度を改善することができる。本報告では Maple11 を用い収束の精度について調べた結果を示す。

### 2. 計算法と数値結果

式 (2) より

$$(3) \quad \pi^{2k} = (-1)^{k-1} \frac{2(2k)!}{2^{2k} B_{2k}} \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu^{2k}}$$

を得る。ここで、 $2k = 2^n$  として、

$$(4) \quad \pi_{2^n}^{2^n} = (-1)^{2^{n-1}-1} \frac{2(2^n)!}{2^{2^n} B_{2^n}} \sum_{\nu=1}^M \frac{1}{\nu^{2^n}}$$

により  $\pi$  の近似値を計算する。 $\pi$  を (4) の右辺の値より計算するのに  $n$  回 2 乗根を計算する。

$M = 100$  の場合の結果を表 1 に示す。

表 1 :

$2k$	$\pi$ と一致する桁数 (項数 : 100)	$\pi$ と一致する桁数 (項数 : 1000)	$\pi$ と一致する桁数 (項数 : 1000)
8	15 桁	22 桁	29 桁
16	31 桁	46 桁	61 桁
32	64 桁	95 桁	126 桁
64	129 桁	192 桁	255 桁

図1は  $2k = 64, 256, 1024, 4096$  のそれぞれの場合について、 $\pi$ と一致する桁数 (129, 514, 2054, 8212) をプロットしたものである。横軸はべきの数であり縦軸は $\pi$ と一致した桁数である。 $M = 100$ とした。

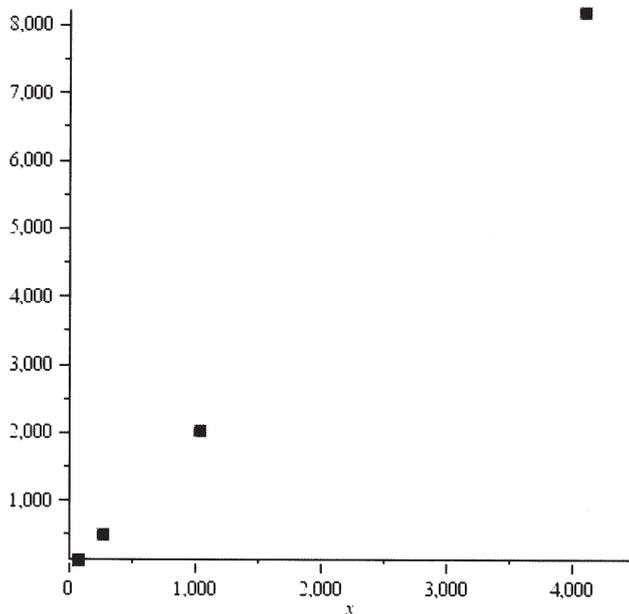


図 1

図2は項数の増加に対する近似値の一致桁数をプロットしたものである。横軸はべきの桁数である。+は  $2k = 64$ , □は  $2k = 256$  の場合についてのデータである。

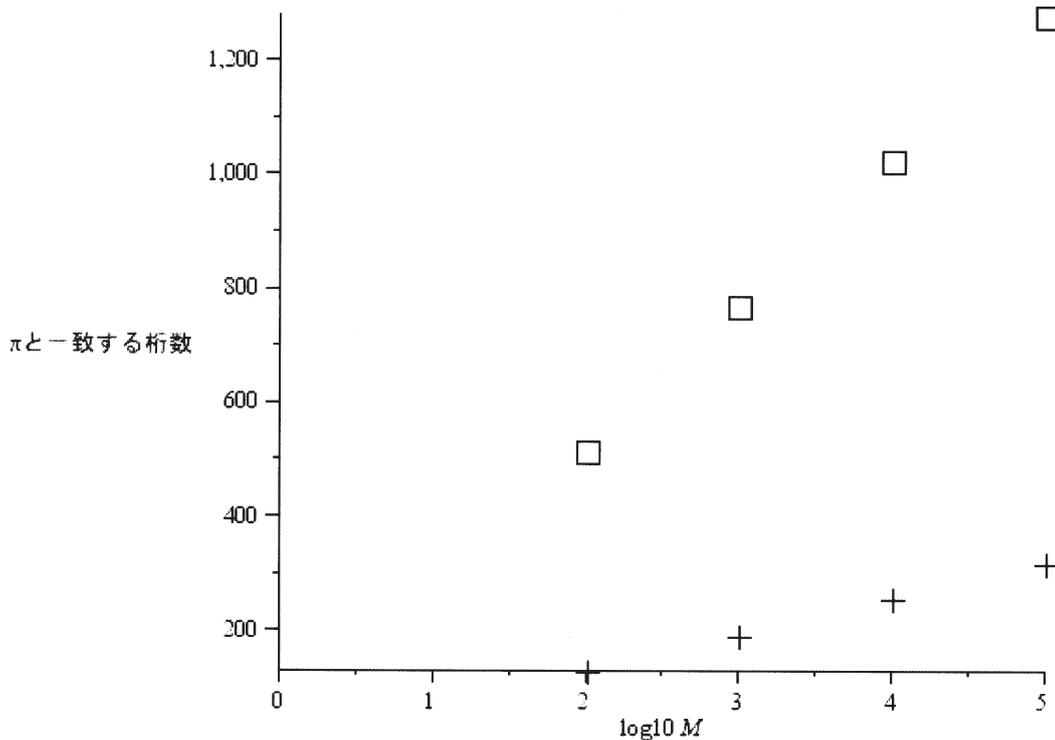


図 2

図 1 のデータ点はおおよそ直線 :

$$(5) \quad T = 2.0052t + 0.6672$$

上にある. また図 2 で, □ のデータは

$$(6) \quad T = 255s + 4$$

の直線状にある.

### 3. 計算量の分析

級数の項数を上げて, 要求された桁数を計算するのに必要なべき数を式 (5) で項数は (6) で求めることができる. (5) および (6) より, 1 億桁の  $\pi$  を計算するのに必要なべき数および項数はそれぞれ, 約  $5 \times 10^7$  ( $< 2^{23}$ ), 約  $7 \times 10^{392156}$  である. また, それぞれの計算式に含まれる乗算数は約  $5 \times 10^9$ , 約  $49 \times 10^{392156}$  である.

$\pi$  の計算法として 1984 年に 1000 万桁まで計算するのに用いられた平方根アルゴリズム :

$$(7) \quad \alpha_{n+1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\alpha_n} + \frac{1}{\sqrt{\alpha_n}} \right), \quad \beta_{n+1} = \sqrt{\alpha_n} \frac{\beta_n + 1}{\beta_n + \alpha_n}, \quad \pi_{n+1} = \pi_n \beta_{n+1} \frac{1 + \alpha_{n+1}}{1 + \beta_{n+1}},$$

ここで, 初期値は  $\alpha_0 = \sqrt{2}$ ;  $\beta_0 = 0$ ;  $\pi_0 = 2 + \sqrt{2}$  である, が知られている. この反復による  $\pi$  の近似に対する誤差評価は

$$(8) \quad |\pi - \pi_n| \leq 10^{-2n}, \quad n \geq 1,$$

である.

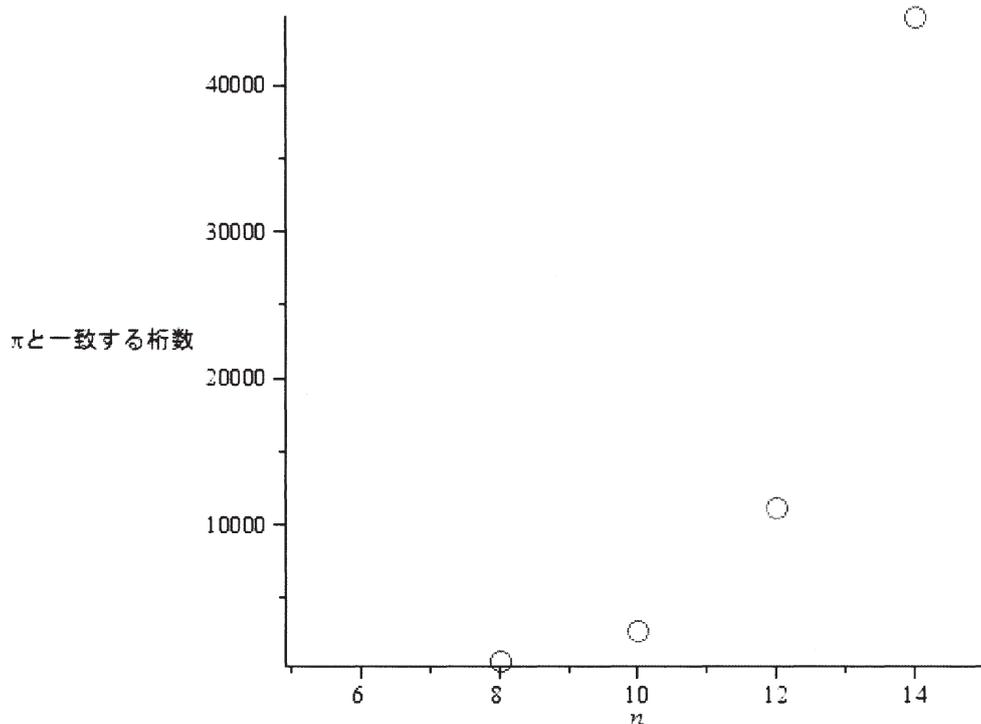


図 3

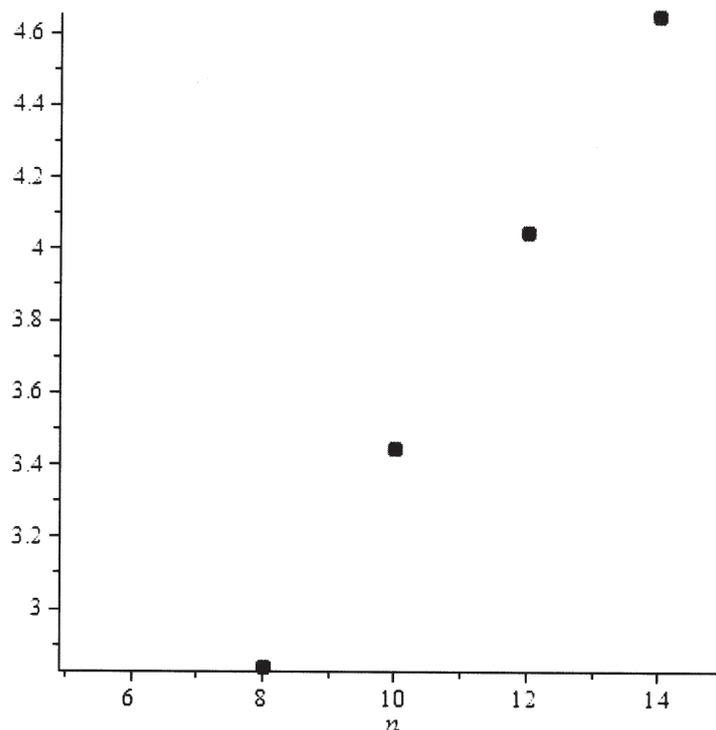


図 4

図 4 は図 3 の縦軸の対数を縦軸としたグラフである。このグラフより

$$(9) \quad \log_{10} T = 0.3016n + 0.4279$$

となるため

$$(10) \quad T = 10^{0.3016n + 0.4279}$$

を得る。1 億桁一致する結果を得るためには、26 回の反復が必要になる。このことより計算式(4)を用いた場合との類似性が観測された。

#### 4. まとめ

本報告で  $\pi$  の値を計算する方法として一般化されたオイラーの級数を用いる場合について数値実験より研究した。近年、 $\pi$  の値の多数の桁を与える方法として用いられている平方根アルゴリズムと比較し類似点のある計算法として、打ち切り級数の項数を 100 とした場合について考察した。平方根法で 1 億桁を計算するのに必要とする反復回数は 26 となるが、その逆数の計算をあわせ 52 回である。それに対してオイラーの級数を利用した場合、23 回の平方根の評価ですむ。1 億桁の多倍長浮動小数点演算では平方根の評価が計算時間に占める割合が多くなると予想される。また打ち切り級数の値は有理数であるため、評価は多倍長整数演算で行える。この点と並列可能であるある点が式(4)による  $\pi$  の計算利点となる。

#### 参考文献

- [1] H・D・エビングハウス その他、「数 上」, シュプリングー・フェアラー東京, 1988.

# サイバーキャンパスにおける学習履歴データ活用のための ビューア「KIBIDANGO」の開発

大西 荘一\* 荒川 智昭\* 西崎 書彦\*\*

\* 岡山理科大学大学院 総合情報研究科 情報科学専攻 \*\* 加計教育コンソーシアム

## 1. はじめに

平成14年度より、加計グループでは単位認定を伴うインターネットを利用した遠隔授業を実施している。平成17年度より高大連携、大大連携の取り組みをより組織的に行なっていくため、新しい教育の取り組みとして広域遠隔授業「サイバーキャンパス」を開始した。平成19年度の受講生の人数は科目換算（1人1科目受講）で5000名を超えており、平成20年度においても受講生は増加の傾向にある。これらの受講生の学習を管理するシステムは、本学で独自開発したLMS「MOMOTARO」である。筆者らは「MOMOTARO」をサイバーキャンパスで実運用しながら改良を継続している。図1は加計サイバーキャンパスのイメージ、図2はトップページである[1]。

今回、LMS「MOMOTARO」が取得した受講生の学習履歴データを講師のFDのデータとして活用しやすいように、ビジュアル化するツールを開発し、MOMOTAROにちなんでKIBIDANGOと名付けた。その概要を報告する。



図1. 加計サイバーキャンパスのイメージ



図2. サイバーキャンパスのトップページ

## 2. LMS「MOMOTARO」の概要

主な機能は、VOD・教材コンテンツの配信、受講生管理、科目管理、出欠管理、課題提出機能、テスト出題・採点機能、アンケート集計機能、お知らせ機能、講師や受講生間とのコミュニケーション機能（掲示板・チャット・メール）、LMS全体の管理機能、等がある[2]。図3はLMS「MOMOTARO」の学習管理モデルである。LMSにアクセスする組織及び人は、管理者権限のシステム管理者・運用管理者、科目・受講生指導権限の講師、組織内受講生管理権限の組織責任者（例えば、高校教員）、受講生権限の高校生・大学生・通信生・社会人である。これらは、DFDの手法で言えばエンティティであり、「MOMOTARO」はプロセスになる。プロセスとエンティティ間の実線はオンライン、破線はオフラインを意味する。データの部分は種類が多いので、ここでは機能を示した。受講生の社会人（生涯学習）の部分は現時点では構想段階であり、まだ実装されていない。教務システムと「MOMOTARO」の接続はセキュリティを考慮して今のところオフラインにしている。教務システムの

履修登録データはCDを媒体にして、「MOMOTARO」システムに入力される。

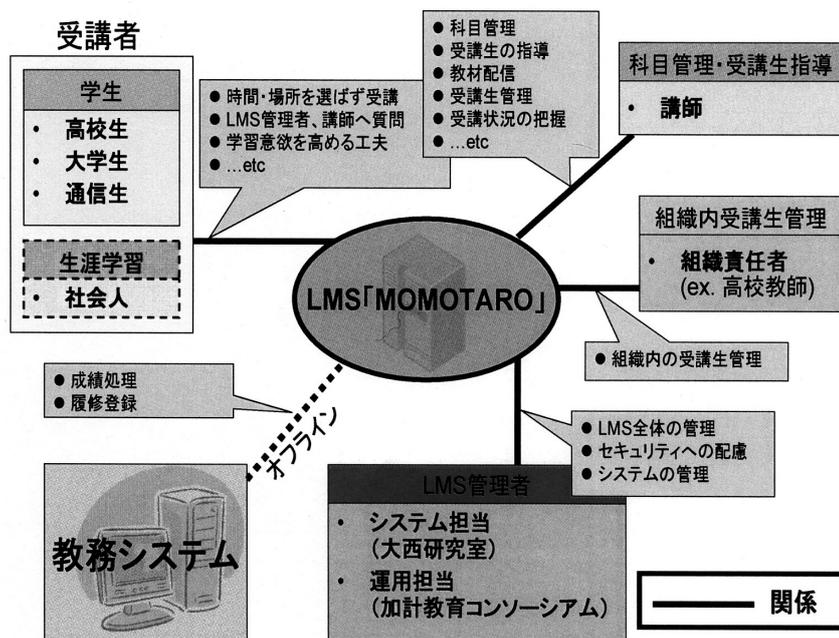


図3. LMS「MOMOTARO」の学習管理モデル

### 3. 学習履歴データの活用

#### 3.1 学習履歴データ

学習履歴データとは、受講生が履修した科目名、出席状況、レポートなど課題提出状況、試験の点数、学習行動パターン等、学習状況を示す全てのデータが学習履歴データである。受講中の受講生に対する指導、授業内容や授業方法の適否の判断、授業の改善等にこれらのデータが利用できる。また、授業終了後も受講生からの成績に関する問い合わせに対応する必要がある。特に成績に直接関連する学習履歴データは一定期間保存される必要がある。本学において学習履歴データは学内規定により一定の期間保存しなければならない事が定められている。サイバーキャンパスにおいてLMSの機能を通じて蓄積される学習履歴データも同様にこの規定に沿って、保存されなければならない。今回、LMS「MOMOTARO」に新たに学習履歴データを外部記憶媒体に保存する機能を付加した。学習履歴データの保存の形式として、表計算ソフト(Excelなど)に読み込み、尚且つ他のプログラムでの活用も見込めるCSV(カンマ区切り)形式での出力とした。

さらに、保存した学習履歴データを活用し易いようにデータをグラフ化し表示するビューアを開発した。LMS「MOMOTARO」の学習履歴データの活用については、北川・大西の先行研究がある[3]。

#### 3.2 LMS「MOMOTARO」の学習履歴データ

サイバーキャンパスにおける学習履歴データには次のデータがある。

- ・各種アクセスログ
- ・出席確認データ
- ・出席カード(アンケート)データ
- ・提出物データ
- ・質問と回答
- ・MOMOTAROから送信されたメールのログ

##### ① アクセスログの種類

- システムログ：MOMOTAROにログインしたログ
- 科目アクセスログ：科目にアクセスしたログ
- 教材アクセスログ：教材にアクセスしたログ

## ② アクセスログの内容

- ・受講生名      ・学生番号      ・所属学校名      ・所属学部      ・所属学科
- ・ログイン時刻（年月日時分秒）      ・ログアウト時刻（年月日時分秒）      ・IPアドレス

## 4. ビューア

### 4.1 ビューアの開発方針

学習履歴データはCSVファイルで保存される。このままでは、講師は利用しにくいいため、ビジュアルに分かりやすい形で閲覧できるビューアを開発した。ビューアの開発方針は、

- ①受講期間終了後において各講師が学習履歴データを保持し、必要に応じて利用できること
  - ②学習履歴データから受講生の動向をビジュアル化し、各自のFDに活用しやすくすること
- である。この方針に従い、次のことを留意しHTML+JavaScriptで開発を行った。

- ・OSに依存しない
- ・ブラウザ（Firefox）上で動作する
- ・オフラインで動作する

### 4.2 ビューアの機能

ビューアの基本機能は、学習履歴データの表示とアクセスログの集計グラフ化である。

#### (1) 表示可能な学習履歴データ

- ・シラバス情報
- ・受講生データ（氏名、所属、連絡先等）
- ・出欠情報一覧
- ・提出レポート一覧
- ・講義で使用した教材
- ・お知らせデータ
- ・送信メールデータ
- ・講義内容に関する質問／回答データ
- ・チャットデータ
- ・科目アクセスログデータ
- ・教材アクセスログデータ

#### (2) 集計グラフ

- ・科目アクセスログの集計
- ・教材アクセスログの集計
- ・出席カード、レポートの提出日時の集計
- ・出席カード（アンケート）の集計

科目アクセスログの集計グラフでは、「全受講生」、「受講生個人別」、「受講生の所属別」のそれぞれに「月別の日毎集計」、「日別の時間毎集計」が科目別に表示できる。これにより、受講生の学習行動が分析可能になると考えている。教材アクセスログの集計では、科目アクセスログで行える集計に加えて、更に教材の種類（VOD教材、講義資料、URL）別の集計グラフ表示ができる。これにより、各教材の利用頻度の分析が可能になると考えている。図4は日毎の科目アクセスロググラフの例、図5は日毎の教材アクセスロググラフでVODと教材のアクセス頻度を比較した例である。図6は所属別の出席カード未提出（欠席）回数の比率グラフと出席カード内のアンケートである講義難易度の比率グラフである。これらのデータと試験の成績を関連付けることにより、授業内容や授業方法の改善の指針が得られるのではないかと考える。

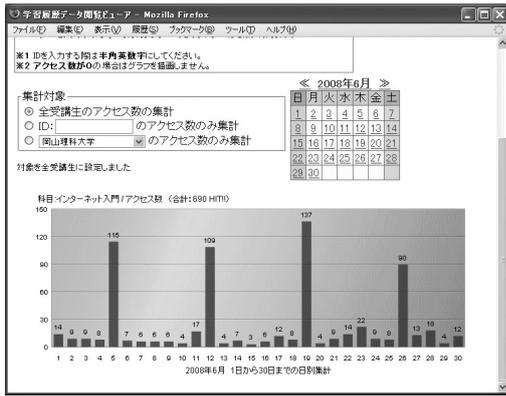


図4. 科目アクセスログ

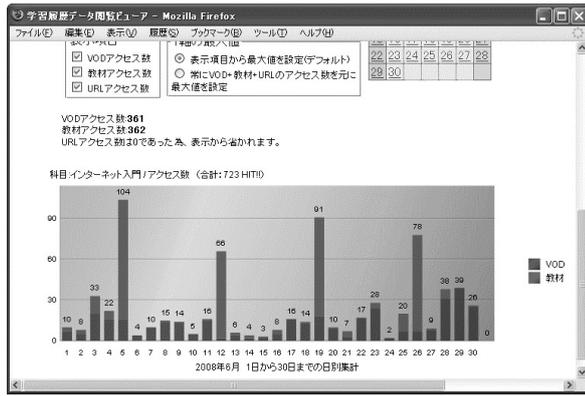


図5. 教材アクセスログ

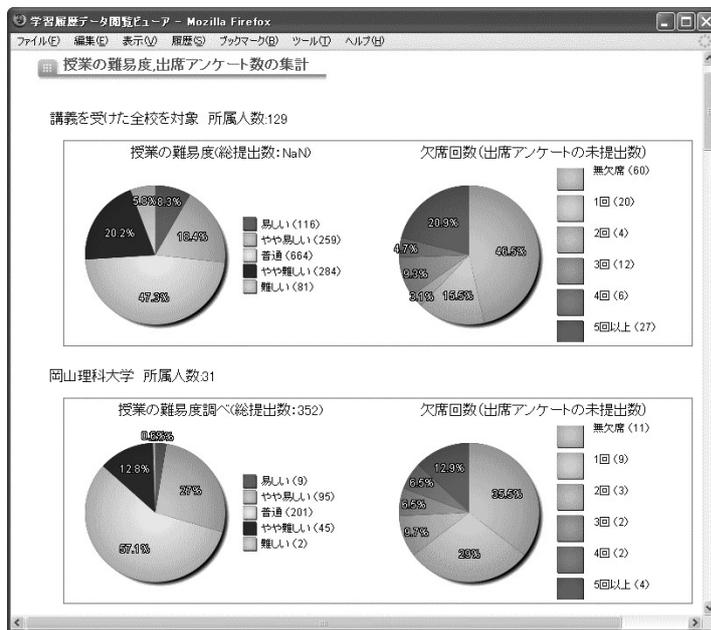


図6. 出席カード提出数, 授業の難易度の集計

### 4.3 学習履歴データとビューアの配布

学習履歴データとビューアを講師ごとにメディア (CDやDVD) にまとめ、希望する講師に配布することを考えている。

### 5. おわりに

e-Learning における教育の質保証において LMS の機能充実だけではなく、e-Learning ならではの学習履歴データを講師へ目に見える形でフィードバックすることも重要であると考え、これにより受講生の学習動向を講師自身も把握する事ができ、今後のFDがより効果的に行えるのではないかと考える。

### 参考文献

[1]サイバーキャンパス <http://cyber.kake-group.jp/>  
 [2] 大西, 他7名 「LMS MOMOTARO における教育の質保証」  
 情報処理センター研究報告 Vol.28 pp.39-45 2008, 3  
 [3]北川, 大西, 「対面講義と e-Learning(LMS+VOD)とを併用した講義形式の実践と分析」,  
 日本教育情報学会論文誌 22 卷 3 号, pp.57-66 2007.1

# Google Earth を利用した 地磁気・古地磁気・岩石磁気データの可視化 Visualization of geomagnetism, paleomagnetism and rock magnetism data with Google Earth

\* 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,

Ridai-cho, Okayama 700-0005, Japan

## 1 はじめに

地球磁場 (地磁気) に関する学問分野では 3 次元ベクトルを取り扱う。もちろん、地磁気自身が 3 次元のベクトル量であるが、それ以外に岩石がそれを記録している古地磁気も 3 次元ベクトルだし、岩石磁気的なパラメータは本質的には 3 次元テンソルであるので (多くの場合 1 つのスカラー量として扱っているが)、異方性などが存在すればベクトルやテンソルを用いて表されるようになる。

古来からベクトルを紙面で取り扱うために、2 次元平面へのさまざまな投影法が考えられ、改良使用されてきた。たとえば、古地磁気における段階消磁曲線 (段階的に磁化成分を消しながら繰り返し測定し、主要な磁化成分を決定する) の表現法は、空間内の 2 平面への投影を同時に記述するいわゆる Zijderveld diagram (ザイダーフェルドダイアグラム<sup>[1]</sup>) や単位球面上での議論としての大円法<sup>[2]</sup> などがよく用いられる。また、強度がよくわからない方位データを集めたものは、単位球面上にプロットしたものを、等面積投影やステレオグラフ投影<sup>[3]</sup> して表現することが多い。

これらの投影法では、描く人間は勿論、それを読んで解読する人間も想像力を働かせて 3 次元に起こして考えないといけないので、それなりに熟練を要するものである。通常用いられる Zijderveld diagram では、「南北-上下」平面と「南北-東西」平面への投影をするため、偏角が南北から離れている場合伏角 (I) を読み取ることが難しい。同様にステレオ投影などでは円の縁 (伏角  $\sim 0$ ) 付近の分布が大きくゆがむ。これらの事象はとくに、古地磁気学をはじめたばかりの学生には大きな負担となっているようだ。

一方で、コンピュータの発達により、3 次元を 3 次元っぽく表す VR などの技術が発達し、それを地球科学へ持ち込む事例<sup>[4]</sup> が増えた。しかし、当初それらの技術は非常に高価で、ハード要件が厳しいうえ取り扱いが難しく、一部の研究者が自分の研究のために使用したりビデオを撮影するために使ったりする程度で、一般へ普及しているとは言いがたいものであった。

しかし、ここ数年、さまざまな安価な 3 次元可視化ツールが登場し、普及の兆しを見せ始めている。中でも、Google Earth<sup>[5]</sup> は地表やそこから上方の空間をさまざまなスケールから眺めることができ、基本的に無料であるので、GIS 関係のツールとして爆発的な広がりを見せている。勿論、地球科学の分野でこれを使わない手はなく、いろいろな応用が出てきている<sup>[6]</sup>。この Google Earth の特徴は、

- 無料版と有料版 (Plus, Pro, Enterprise) があるが、基本的な性能は無料版でも十分高い。

---

\* hatake@center.ous.ac.jp

- 地表画像（衛星・空中写真）と道路・境界などの地図情報が基本
- 地形の起伏を表示できる（DEM）
- それ以外にさまざまな情報を付け加えて表示することができる
- 地球の回転、ズームアップが自由
- 時間情報を取り扱うことができる
- 宇宙なども扱える（Google Sky）
- マルチプラットフォーム (Windows, MacOS X, Linux およびこれらをエミュレートできる環境で使用可)
- ネットワークに接続していることで、データをリアルタイムにアップデートできる

などである。Google Earth がさまざまな研究分野で用いられるようになった最大の原因は、上記4番目のものである。ユーザー自身はかなり自由に Google Earth の描く地球上に物体や画像を配置することができる。配置などの命令は、XML (extended Markup language) の一種である KML(Keyhole Markup Language) を用いて記述する。KML 自身の文法(リファレンス)は Google のサイト<sup>[7]</sup>で公開されているし、同時にチュートリアルも公開されている。現在の KML のバージョンは 2.1 である。

勿論、現在のバージョン(2008年3月現在で4.2)の Google Earth にもいくつかの制約があり、そのために地球科学で用いるのが難しいものもある。その制約のうちもっとも重大なものは、

- 地球の内部を表すことができない。地表を透明化できない。
- 視点を上空約 10Re(地球半径) までしか引くことができない。

の3つである。

本稿では、上記の特徴や制約を踏まえたうえで、Google Earth を用いて地磁気の表現法を考え、それらを紹介する。本稿で紹介する Google Earth KML ファイルの対象と目的は

- 地磁気・古地磁気研究者 … 発想や着想の助けに
- 学生や他分野の地球科学研究者 … 地磁気の理解の助けに
- 小中高生、一般市民 … 啓蒙、アウトリーチ、および教育現場で

の3つであるが、いずれも非常に細分化した現在の(地球)科学においてとくに要求される事柄だと考えられる。

すべての KML ファイルは、

<http://peach.center.ous.ac.jp/ge/> で 2007 年 4 月より公開しているので、大いに利用された。また、本稿と同様の研究は他にもあり<sup>[8][9][10]</sup>、それらもサイトで公開されている。本稿で紹介する KML ファイルの特徴は、

- 磁力線を積極的に記述すること
- 古地磁気、岩石磁気で用いられる単位球を地球で表現している
- データをリアルタイムにサイトからダウンロードする (<sup>[10]</sup>の一部も)

である。それぞれのサイトが特徴を持っているので合わせて使用されたい。

## 2 手法と使用法

### 2.1 地磁気の表現法

地磁気のベクトルや地表の各点などにおける成分の計算は、以下のような球面調和関数による展開式から計算した。地球内部起源の磁場は、地磁気ポテンシャル  $W$

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

によって表される。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<sup>[1]</sup>。地磁気を生成している外核より外側の位置  $(r, \theta, \phi)$  におけるポテンシャル  $W(r, \theta, \phi)$  は  $g_{\ell}^m, h_{\ell}^m$  という地球磁場の形と大きさを特徴づけるパラメータの線形関数になっている。この  $g_{\ell}^m, h_{\ell}^m$  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、経度  $\phi = 0$  で  $g$  が腹、 $h$  が節になる成分と見分けている。よって、軸対称成分  $m = 0$  に対して  $h_{\ell}^0$  は存在しない。

地球が真球であれば地表 ( $r = a$ ) の各観測点で観測される地磁気の 3 成分、 $X$ (北向き成分)、 $Y$ (東向き成分)、 $Z$ (鉛直下向き成分)、は

$$X = -\left(\frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial \theta}\right)_{r=a}, Y = \left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial W}{\partial \phi}\right)_{r=a}, Z = -\left(\frac{\partial W}{\partial r}\right)_{r=a} \quad (2)$$

となり、 $F$ (全磁力=ベクトルの長さ)、 $I$ (伏角=方位ベクトルの水平面から下への角度)、 $D$ (偏角=北から東向きの角度)、は、

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad I = \sin^{-1}\left(\frac{Z}{F}\right), \quad D = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (3)$$

と表される。

### 2.2 磁力線の計算

地表の「根っこ」各点から磁場の 3 成分を逐次計算して、それを流線として積分し、磁力線を出力した。空間積分は 10 ないし 20km ごとにし、地表付近はその間隔で、上空ではその 10 倍の間隔で表示している (データ量の制限のため)。本来、磁力線は磁束密度の大きさに比例するべきだが、ここではわかりやすい可視化と現実的な磁力線の本数の配置のため、そうはしていない。

### 2.3 地表における磁気成分の計算

地表の任意の地点で計算される地磁気各成分は、以下のような方法で等高線マップにした。まず、地球上の 1 度間隔の格子点における要素の値を直接計算し (地球は球として扱う)、GMT<sup>[12]</sup> の `pscontour` などを用いて等高線地図にする。これを GIF, PNG, または JPEG 形式の画像ファイルにして、テキストチャとして Google Earth に貼り付けている。これだとコンターの線自身も画像になってしまうので、複数のコンターを重ねたいときは、等高線以外の部分を透明化する。画像の変換には ImageMagick<sup>[13]</sup> の各ツールを使用した。

特にカラーマップで分布を表す場合 (Fig. 4 の地表に貼り付けたようなもの) はテキストチャを KML で表現して書き込む方法<sup>[8]</sup>もあり、地表のどこでもきれいに表現できるが、Google Earth の描画速度とメモリの都合でそうはしなかった。

## 2.4 使用法

各 KML ファイルは以下のような方法で Google Earth に読み込ませ、使用することができる。

1. <http://earth.google.com/>  
より Google Earth をインストールする (勿論インストール済みであれば不要な工程)。
2. <http://peach.center.ous.ac.jp/ge/>  
にアクセスし、使用したいファイルをダウンロード (保存) する。
3. Google Earth を立ち上げる。
4. Google Earth のメニューの「ファイル」→「開く」からダウンロードした KML ファイル (拡張子は .kml もしくは .kmz) を選択して開く。
5. KML ファイルが読み込まれる。左の「場所」の「保留」欄に今開いた KML が現れる。もし標準でチェックが入っていれば表示されるし、入ってなければ必要なものだけチェックを入れて表示させる。
6. 好きなように地球を回したり、拡大縮小したりできる。
7. 時間発展のあるものは、画面上部に時間を変化させるバーが出るので、再生ボタンを押し、再生させる。左側にある時計をクリックすると再生速度を変更することができる。
8. 表示中の KML のツリーを「保留」より「お気に入り」へ移動すると、次回起動時にも自動的に選択できるようになる。また、「保留」に入れたままでも、Google Earth 終了時に「お気に入り」へ追加するかを確認される。

## 3 公開 KML ファイル

ここでは、現在までに開発・公開している KML ファイルを紹介する。

### 3.1 磁力線

#### 3.1.1 現在の地球磁場



図 1: 現在の地球磁場 (IGRF 2005 分点モデル)。現在の地球磁場の北磁極はカナダにあるため、この図では、左下側に磁力線が集中している様子が見て取れる。注意：画像がつぶれてしまっている件については文章後の「注意」を参照のこと

**Fig. 1** は現在の地球磁場を表す磁力線である。標準地球磁場 (IGRF: International Geomagnetic Reference Field) モデル<sup>[14]</sup> の 2005 年地球磁場係数を用いて計算した。磁力線は整数本を効率よく配置するのが困難なので、北半球の経度方向に 30 度、緯度方向に 10 度おきの地表地点から出るものを記録した。これをまわしてみるだけでも、磁力線の非軸対象性などが観察できて面白い。

### 3.1.2 地球磁場の変動: 1900~2005

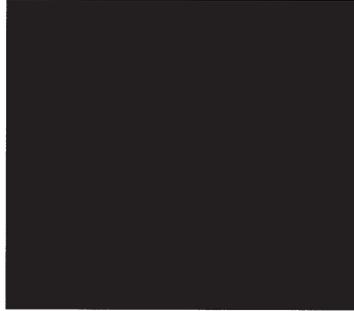


図 2: 過去約 100 年分の磁場変動 (IGRF 10th, 1900-2005)。画面上部に現れる Time Progress Bar を操ると時間変化の様子がアニメーションで表現される。

**Fig. 2** は **Fig. 1** と同様の磁力線を、西暦 1900 年~2005 年まで 5 年おきに表示したものである。Google Earth Interface の時間アニメーション機能を使うと、磁力線が変化の様子がよくわかる。100 年程度なので、中低緯度付近ではほとんど磁場の変動は分からないが、高緯度域の変化の観察には向いているかもしれない。

## 3.2 観測点における磁場の各成分

### 3.2.1 地球磁場の変動: 1900~2005



図 3: 過去約 100 年分の磁場変動 (IGRF 10th, 1900-2005) における、地表での磁場方位成分。この図では、伏角 ( $I$ ) と偏角 ( $D$ ) を同時に表示している。

**Fig. 3** は地表における地磁気的各成分のコンターマップとその時間変化である。「各成分」とは、地磁気によく使われる  $X$ (北向き成分),  $Y$ (東向き成分),  $Z$ (鉛直下向き成分),  $I$ (伏角=水平面から下への角度),  $D$ (偏角=北から東向きの角度),  $F$ (全磁力=ベクトルの長さ) などのほか、 $F_{g_1^0}/F$ (全磁力のうち、軸対象双極子  $g_1^0$  の寄与分) なども表示できる。

この KML は Fig. 2 のものと同様、時間変化を追うため読み込むデータの量が多い。そこで、2種類の KML ファイルを用意しパフォーマンスを比較した。1つは前項までと同様、データを予めダウンロードして KML ファイルに取り込んだもので、もう1つは表示したいデータのコンターを表す画像ファイルをリアルタイムにダウンロードしたものである。後者の場合結果として KML ファイルのサイズは非常に小さくなった。

また、それぞれのコンター図では等高線以外の部分を透明化しているため、複数の成分のプロットを同時に見ることができる。また、Fig. 2 の磁力線と同時にプロットすることも可能である。

### 3.3 球面プロット

本来 Google Earth は地球上にデータをプロットするために開発されたものであるが、ここでは別の使い方を提案してみよう。それは地球を単なる「球」として見て、単位球面上にプロットされるデータを描画してみようということだ。古地磁気・岩石磁気は強度のない方位を扱うことが多く、単位球面上へプロットしたものを2次元投影することも多い。そのために、ここで考えるような Google Earth の使い方も1つ適当ではないかと考えられる。

Fig. 4 は考古地磁気データ (I&D) をプロットした例である。日本における過去 2000 年間の磁場方位の変動<sup>[15]</sup> を単位球面上に投影した。古地磁気学的手法を使用する場合、古地磁気の強度を直接測定する方法はあるものの、方法自身が煩雑であるほか、試料の種類や状態に大きく依存するため、実際に方位とともに強度が測定される試料はごく僅かである。そのため方位だけで地磁気永年変化を論ずることも多い。



図 4: 方位データを表す I-D ダイアグラムを球面上にプロットしたもの。線は 2000 年分の磁場方位の変化を示し、ピンの位置は Time Progress Bar の時刻の方位 (円は平均値の 95% 信頼限界を表す)。中心の太線 (モノクロでは見えないかも知れない) が  $D=0$  で、上方に行くにつれ  $I$  が深くなる。このプロット上では Fisher 統計的な誤差は真円となる。等面積投影などの 2 次元投影法では誤差円が楕円様になるが、学生がよく混乱しがちな問題である。

## 4 まとめ

まだまだ完成品ではないが、Google Earth を用いて、磁場や古地磁気・岩石磁気データの 3D 可視化への端緒をつけることができた。3D 化したことで、より直感的に見えない磁場を感じることができないか、とくに、教育面では大きな効果があると考えている。

本稿では Google Earth で扱うための KML ファイルの作成は手動であった。将来的には、係数やデータをユーザーが与えて自動的に生成するような中間ツールを作ること、よりいっそうユーザーフレンドリーなものになるだろう。このような試みはすでに Java アプレットを使用して試みられている<sup>[8]</sup>。これらのグループの成果と共同作業することも考えている。

今後、筆者が改良・変更・追加をしたいと考えている主な点は以下のとおりである。

- 新たなデータを追加する。
  - 外部地球磁場を組み込んだ磁力線
  - 過去 400 年分の地磁気変動モデル<sup>[16]</sup>
  - 過去 7000 年分の地磁気変動モデル<sup>[17]</sup>
  - 逆転途中の地球磁場モデル、たとえば<sup>[18]</sup>
  - その他
- 仮想地磁気極 (VGP) の表現、できれば I-D とセットにして。
- 磁力線の本数を磁束密度 (磁場の強さ) になるべく沿ったものにする。
- スケーラブルな磁力線の導入。ズームするとその地域の磁力線が表示されたりする。

## 謝辞

海洋研究開発機構の山岸保子氏、および日本の古地磁気コミュニティの諸氏から多くの意見や要望、助言をいただいた。感謝いたします。Google Earth を提供してくださっている Google 社にも感謝を申し上げます。

## 注意

画像使用に関して Google 社許諾を取るのが間に合わなかったため、本稿の画像を黒く塗りつぶしました。詳細はホームページ (<http://peach.center.ous.ac.jp/ge/>) をご覧ください。

## References and Notes

- [1] Zijdeveld, J. D. A., A. C. demagnetization of rocks: analysis of results. In Collinson, D. W., Creer, K. M. and Runcorn, S. K., eds., *Methods in palaeomagnetism*, Elsevier, Amsterdam, 254-286, 1967.
- [2] Dunlop D. J., On the use of Zijdeveld vector diagrams in multicomponent paleomagnetic studies, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **20**, 12-24, 1979.
- [3] 小玉一人, 古地磁気学, 東京大学出版会, 1999, p155 に詳しい
- [4] Kageyama A., T. Miyagoshi, T. Sato, Formation of current coils in geodynamo simulations, *Nature*, **454**, 1106-1109, doi:10.1038/nature07227, 2008.
- [5] Google Earth  
<http://earth.google.com/>
- [6] 地球科学への Google Earth の導入事例は、USGS(米国地質調査所) による”Latest Earthquakes: Feeds & Data”  
<http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/catalogs/>  
などが有名。日本でもデジタル台風  
<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/kml/>  
や [8](地震波トモグラフィ、地球化学 DB との連携) など。

- [7] KML in Google Earth  
<http://code.google.com/apis/kml/>
- [8] Nagao H., Y. Yamagishi, S. Tsuboi, T. Hatakeyama, H. Yanaka, Visualization of geomagnetic field models on Google Earth — Development of KML generator towards simultaneous interpretation of interdisciplinary geoscience data —, *Earth Planet Space*, 2008 (submitted).  
 Pacific 21, サイトは  
<http://www.jamstec.go.jp/pacific21/>
- [9] Historical main field change and declination in NOAA  
<http://geomag.org/info/declination.html>
- [10] Dagik (Daily Geospace data in KML) in Kyoto University  
<http://www-step.kugi.kyoto-u.ac.jp/dagik/>
- [11] Merrill R. T., McElhinny M. W. and P. L. McFadden, *The Magnetic Field of the Earth*, 529pp, Academic Press, San Diego, 1996
- [12] Generic Mapping Tools  
<http://gmt.soest.hawaii.edu/>
- [13] Image Magick  
<http://www.imagemagick.org/>
- [14] Maus S., Macmillan S., Chernova T., Choi S., Dater D., Golovkov V., Lesur V., Lowes F., Luhr H., Mai W., McLean S., Olsen N., Rother M., Sabaka T., Thomson A., Zvereva T. and International Association of Geomagnetism, Aeronomy (IAGA), Division V, Working Group VMOD, The 10th generation international geomagnetic reference field *Phys. Earth Planet. Inter.*, **151**, 320–322, 2005.  
 IGRF の展開係数データは  
<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/>  
 などからダウンロードできる。
- [15] Shibuya H., Geomagnetic secular variation in Southwest Japan for the past 2,000 years by means of archaeomagnetism, M.E. thesis, Faculty of Engineering Science, Osaka University, pp. 54, 1980.
- [16] Jackson A, Jonkers A. R. T. and M. Walker, Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **358**, 957–990, 2000.
- [17] Korte M. and C. G. Constable, Continuous geomagnetic field models for the past 7 millennia: 2. CALS7K., *Geochem., Geophys., Geosys.*, **6**, Q02H16:doi:10.1029/2004GC000801, 2005.
- [18] Leonhardt R. and K. Fabian, Paleomagnetic reconstruction of the global geomagnetic field evolution during the Matuyama/Brunhes transition: Iterative Bayesian inversion and independent verification, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **253**, 172–195, 2007.