

東北大学
サイバーサイエンスセンター

大規模科学計算システム広報

SENAC

Vol.46 No.3 2013-7



Supercomputing System
Cyberscience Center
Tohoku University
www.ss.isc.tohoku.ac.jp

大規模科学計算システム関連案内

<大規模科学計算システム関連業務は、サイバーサイエンスセンター本館内の情報部情報基盤課が担当しています。>

<http://www.ss.isc.tohoku.ac.jp/>

階	係・室名	電話番号(内線)* e-mail	主なサービス内容	サービス時間
				平 日
一階	共同利用支援係 (受付)	022-795-6153 (6153) FAX:022-795-6099 uketuke@isc.tohoku.ac.jp	センター業務全般に関する受付窓口	8:30～17:15
	利用相談室	022-795-6153 (6153) sodan05@isc.tohoku.ac.jp 相談員不在時 022-795-3406 (3406)	計算機利用全般に関する相談 大判プリンタ、利用者端末等の利用	8:30～17:15 8:30～21:00
	利用者談話室	(3444)	各センター広報の閲覧	8:30～21:00
	展示室(分散コンピュータ博物館)		歴代の大型計算機等の展示	9:00～17:00
三階	総務係	022-795-3407 (3407) syomu@isc.tohoku.ac.jp	総務に関すること	8:30～17:15
	会計係	022-795-3405 (3405) kaikei@isc.tohoku.ac.jp	会計に関すること、負担金の請求に関すること	8:30～17:15
	共同研究支援係	022-795-6252 (6252) rs-sec@isc.tohoku.ac.jp	共同研究、計算機システムに関すること	8:30～17:15
	共同利用支援係	022-795-3406 (3406) 022-795-6251 (6251) uketuke@isc.tohoku.ac.jp	利用手続き、利用相談、講習会、ライブラリ、アプリケーションに関すること	8:30～17:15
	ネットワーク係	022-795-6253 (6253) net-sec@isc.tohoku.ac.jp	ネットワークに関すること	8:30～17:15
四階	研究開発部	022-795-6095 (6095)		
五階	端末機室	(3445)	PC 端末機(X 端末)	

* () 内は東北大学内ののみの内線電話番号です。青葉山・川内地区以外からは頭に 92 を加えます。

————— 本誌の名前「SENAC」の由来 —————

昭和 33 年に東北地区の最初の電子計算機として、東北大学電気通信研究所において完成されたパラメtron式計算機の名前で SENAC-1 (SENdai Automatic Computer-1) からとて命名された。

[共同研究成果]

月と火星の全球地震波伝播シミュレーション

豊国源知¹・竹中博士²・趙大鵬¹・石原吉明³

¹ 東北大学大学院 理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

² 岡山大学大学院 自然科学研究科 地球生命物質科学専攻

³ 産業技術総合研究所情報技術研究部門ジオインフォマティクス研究グループ

我々は東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータシステム SX-9 を利用し、全地球を対象とした地震波伝播シミュレーションのプログラム開発を行ってきた。本稿ではこの手法について概略を紹介した後、平成 24 年度の共同研究課題として月と火星の全球地震波伝播をシミュレーションした成果を報告する。両天体ではかつて地震観測が行われたものの、旧式の機器やノイズの影響で、天体深部の地震波伝播には不明な点が多い。現在国内外で地震観測に基づいた両天体の内部構造探査が計画されており、機器の開発や観測点の選定について、地震波伝播シミュレーションが与える指針に期待が寄せられている。

1. はじめに

自然界で発生する地震は、複雑なメカニズムを持った震源から励起され、複雑で不均質な地球の中を通り抜けて、ようやく地震計で観測される。よって観測で得られた地震波形は複雑な形をしている。地震波伝播は基本的には弾性体力学で記述されるので、現実に近い複雑な震源・構造モデルについて弾性波の支配方程式を解くことができれば、複雑な波形も再現可能である。しかしモデルが複雑になるほど計算は困難になるので、現在は方程式をコンピュータで数値的に解く、数値解法が標準的に用いられている。

波形計算は震源・構造モデルを既知として、そのときどのような波形が観測されるのかを予測する方法であるため、モデルと波形との因果関係が一目瞭然となる。これを逆に利用すると、観測波形と、数値計算で得られた理論波形とを比較して、その残差が小さくなるようにモデルを修正していくことで、震源や地下構造を推定することができる(=波形インバージョン)。地球科学の究極の目標の一つは、我々が直接見ることができない地下構造を詳細に明らかにすることであり、コンピュータを使った波形計算はそのための武器となる。

数値計算と一口で言っても、様々な手法が存在する。手法の分類の上で重要な点に、「何次元の媒質について、何次元の波を計算するか?」というものがある。現実の地震波と同じように、3 次元の地球モデル中を伝播する 3 次元の波をフルに計算する方法は「3 次元モデリング」と呼ばれる。これは最も現実に近い理論波形が得られるが、莫大な計算機資源(メモリと計算時間)を必要とする。これに対して、地下の 2 次元断面のみに着目して、その面内を伝わる 2 次元の波だけを計算する手法は「2 次元モデリング」である。この手法は計算資源が少なくてすむ一方、3 次元の波面の幾何学的な広がりを正しく考慮できないせいで、観測波形と直接比較ができないデメリットが生じる[1]。

以上のような両者のデメリットを克服すべく提案されたのが、本稿で用いる「軸対称 2.5 次元モデリング」である。これは震源を通る鉛直軸の周りに軸対称な構造を仮定することで、3 次元的な空間の広がりの効果を 2 次元断面に落とし込んだのち、その断面内において、面内運動 2 成分と、面外運動 1 成分の、3 次元の波動伝播を計算する方法で、「波動場 3 次元、構造 2 次元」という意味で「2.5 次元」と呼称される。この手法は構造断面のみについて計算を行うことで計算資源は 2 次元モデリング並みに節約でき、同時に 3 次元の地震波伝播を正しく取り扱える。現在は計算機性能の進歩により、10 年ほど前までは不可能だった大規模計算がどんどん実現しているが、それでも 3 次元モデリングでは 1 回の計算がやっとであり、その 1 万~10 万分の 1 で計算

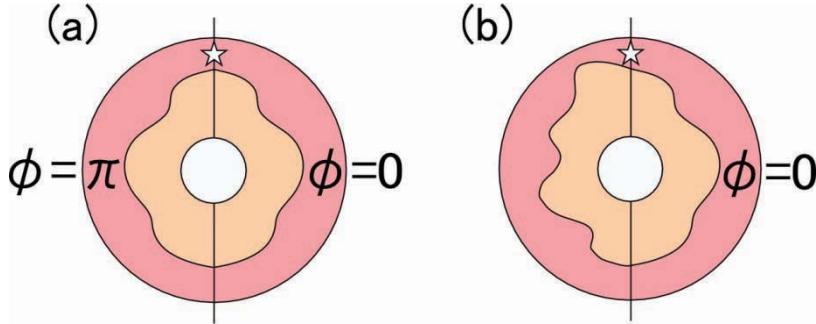


図 1：通常の球座標領域 (a) と準球座標領域 (b) [9].

が行える 2.5 次元モデリングは、依然として魅力的な手法である。

数値計算手法の分類でもう一つ重要な点に、離散化手法の違いがある。複雑な不均質媒質を入力した計算では、計算の対象とする全空間・時間領域を離散化して解く場合がほとんどであるが、離散化手法の違いによって差分法、有限要素法、擬スペクトル法、など様々に分類される。このうち差分法は、支配方程式に現れる偏微分を差分で近似する解法であり、コーディングが容易で地震波のシミュレーションで普遍的に使われているので、我々のプログラムでも差分法による離散化を採用している。

2. 地球の地震波伝播シミュレーション

地球以外の天体の地震について述べる前に、本節では手法の紹介を兼ねて、これまでに我々が行ってきた全地球地震波伝播シミュレーションの概略を述べたい。

我々はこれまで、全地球をターゲットとした地震波シミュレーションのために、軸対称 2.5 次元モデリングを用いた波形計算プログラムの開発を行ってきた。このプログラムでは、震源と地球中心を結ぶ軸を z 軸とした球座標系 (r, θ, ϕ) を定義して、 ϕ 方向に構造モデルの軸対称性を導入したうえで、その 2 次元断面 ($r\text{-}\theta$ 断面) について弾性波の支配方程式を解く。差分法と 2.5 次元モデリングを組み合わせた全地球地震波シミュレーションは、90 年代半ばから最近まで間断なく利用されているものの[2-8]、軸対称の仮定のせいで、軸を挟んで非対称な現実的な構造を扱えない問題が存在した。震源についても、先行研究では核爆発のような軸対称なメカニズムを持つ震源だけが用いられ、断層運動のような非対称な震源は取り扱わていなかった。加えて、球座標系を用いた解法では、球の中心 ($r = 0$) が方程式の特異点となるため、これを回避する方法が必要になる。先行研究の中には地震波動場を音響場で近似して、地球中心を含めて計算を行ったものがあるが[6]、P 波と S 波をまとめて計算した例はない。このように計算の効率性とは引き換えに、従来の軸対称 2.5 次元モデリングには改良すべき点も多く存在した。

我々は通常の球座標領域と座標軸の取り方を変えた新しい座標領域「準球座標領域」を定義することで、従来の手法の枠組みで任意の非対称構造を取り扱うことに成功した[9]。通常の球座標領域 ($0 < r < \infty, 0 \leq \theta \leq \pi, -\pi \leq \phi \leq \pi$) を用いると、球の大円に沿った構造断面は $\phi = 0$ と $\phi = \pi$ にある 2 枚の半円板で表される。このため任意の構造モデルを $\phi = 0$ の面に入力すると、軸対称性によって $\phi = \pi$ の面における構造は $\phi = 0$ のものと対称にならざるを得なかった(図 1a)。これに対して準球座標領域 ($0 < r < \infty, -\pi \leq \theta \leq \pi, -\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$) では、球の大円に沿った構造断面は $\phi = 0$ における円板 1 枚のみで表され、この面には任意の不均質構造モデルが入力できる(図 1b)。座標軸の取り方を変えるだけなので、従来の軸対称モデリングの効率の良さはそのまま、非対称な構造モデルが取り扱える。このように現在のプログラムは軸対称性の仮定によるデメリットからは解放されているので、以降では「軸対称」という単語を用いることを避け、本手法を「球座標系 2.5 次元差分法」と呼ぶこととする。

また任意の非対称震源を 5 種類の震源要素に分解して解く手法により、断層から励起される地震波のシミュレーションも可能になった[10]。さらに、計算精度を高める媒質パラメータの導入

[11]，震源メカニズムを考慮した線形補完による球中心の特異点問題の回避，および媒質の物性が完全な弾性体からずれていることにより生じる地震波の減衰現象（＝非弾性減衰）の導入[12]も行い，現在のプログラムでは極めて現実に近い地震波伝播をシミュレーションできる。

球座標系を使った地震波伝播シミュレーションでは，球座標系における弾性波の支配方程式

$$\begin{aligned}
 \rho \frac{\partial v_r}{\partial t} &= f_r + \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \sigma_{r\phi}}{\partial \phi} + \frac{1}{r} (2\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\phi\phi}) + \frac{1}{r} \sigma_{r\theta} \cot \theta \\
 \rho \frac{\partial v_\theta}{\partial t} &= f_\theta + \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \sigma_{\theta\phi}}{\partial \phi} + \frac{3}{r} \sigma_{r\theta} + \frac{1}{r} (\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\phi\phi}) \cot \theta \\
 \rho \frac{\partial v_\phi}{\partial t} &= f_\phi + \frac{\partial \sigma_{r\phi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\phi}}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \sigma_{\phi\phi}}{\partial \phi} + \frac{3}{r} \sigma_{r\phi} + \frac{2}{r} \sigma_{\theta\phi} \cot \theta \\
 \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\lambda}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + \frac{2\lambda}{r} v_r + \frac{\lambda}{r} v_\theta \cot \theta - \dot{M}_{rr} \\
 \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial t} &= \lambda \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\lambda + 2\mu}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\lambda}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + \frac{2(\lambda + \mu)}{r} v_r + \frac{\lambda}{r} v_\theta \cot \theta - \dot{M}_{\theta\theta} \\
 \frac{\partial \sigma_{\phi\phi}}{\partial t} &= \lambda \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\lambda + 2\mu}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + \frac{2(\lambda + \mu)}{r} v_r + \frac{\lambda + 2\mu}{r} v_\theta \cot \theta - \dot{M}_{\phi\phi} \\
 \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial t} &= \mu \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{1}{r} v_\theta \right) - \dot{M}_{r\theta} \\
 \frac{\partial \sigma_{\theta\phi}}{\partial t} &= \frac{\mu}{r} \left(\frac{\partial v_\phi}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \phi} - v_\phi \cot \theta \right) - \dot{M}_{\theta\phi} \\
 \frac{\partial \sigma_{r\phi}}{\partial t} &= \mu \left(\frac{\partial v_\phi}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} - \frac{1}{r} v_\phi \right) - \dot{M}_{r\phi}
 \end{aligned}$$

を解く。ここで t は時間， ρ は密度， λ と μ はラメ定数， v_i , f_i , σ_{ij} , M_{ij} はそれぞれ粒子速度，体積力，応力テンソル，モーメントテンソルの成分である ($i, j \in \{r, \theta, \phi\}$)。この方程式を差分法で解く際に用いる格子配置の模式図を図 2 に示す。液体を含む媒質でも安定に計算できるよう，粒子速度と応力の別々の格子に配置される「スタガード格子」を採用した。また球座標系では球の中心へ近づくほど θ 方向の格子間隔が狭くなってしまうので，格子サイズが異なる複数の格子を r 方向に接続し，中心から表面までほぼ一定の格子間隔に保つようにしている[12]。

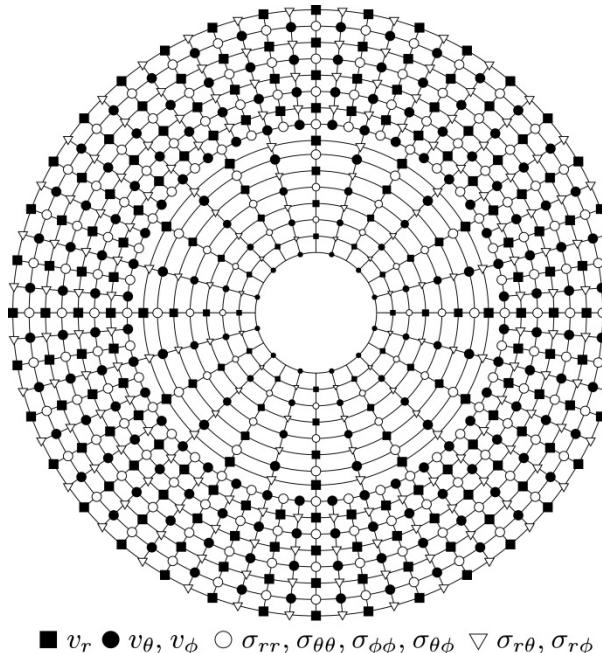


図 2：計算で用いた差分格子の模式図。黒が粒子速度，白が応力の格子を表す。

図 3 は 2009 年 11 月 9 日にフィジーで発生した地震 ($Mw 7.3$ ，震源の深さ 604 km) について，3 つの観測点で記録された観測波形と，球座標系 2.5 次元差分法による理論波形とを比較した結果である。これは減衰構造を含む球対称地球モデル PREM[13] を入力した長周期地震波（震源時間関数のパルス幅 30 s）の計算結果であるが，震源からの方位・距離が異なる 3 観測点すべてで，上下動・南北動・東西動の 3 成分の波形がよく一致していることがわかる。このように本手法を用いると，少ない計算機資源で，精度が良く，実際の観測波形と直接比較可能な理論波形を得ることができる[14]。

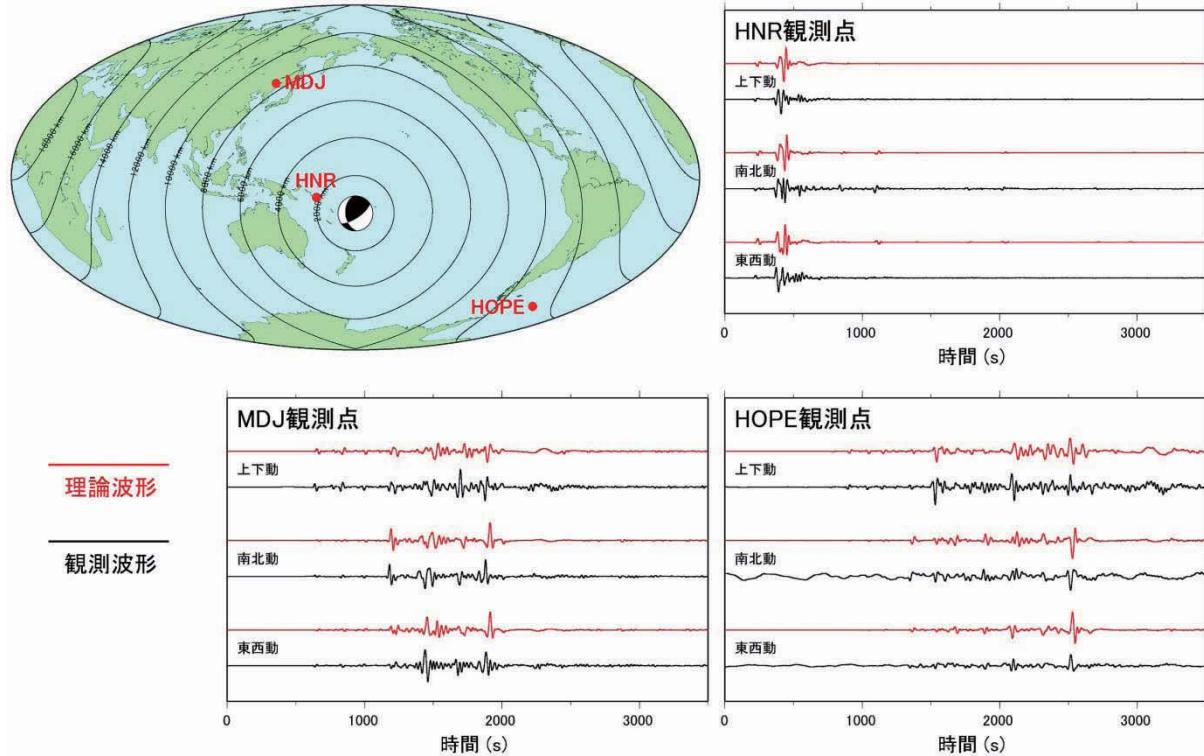


図 3：球座標系 2.5 次元差分法による地球の理論地震波形（赤線）と観測波形（黒線）の比較 [14]. 3 観測点それぞれで上下動・南北動・東西動の 3 成分を比較. 震源の位置・メカニズムと観測点位置は左上の地図に示した. すべての波形に 1/30 Hz のローパスフィルターを適用.

3. 月と火星の地震波伝播シミュレーション

本節では平成 24 年度の共同研究の課題として行った、球座標系 2.5 次元差分法による月と火星の地震波伝播シミュレーションの成果について述べる。

月は地球以外で唯一、信頼のおける地震観測が行われた天体であり、アポロ計画で設置された 4 点の地震計によって、1969 年から足かけ 9 年で 12558 個の月の地震（月震）が記録されている。これらのイベントは、発生場所や発生要因の違いで 5 種類に大別されている[15]。このうち最も同定数が多い「深発月震」は、月半径の半分程度という非常に深いところで発生する $M 1 \sim 2$ 程度の月震で、7245 個のイベントが同定されている[16]。これらはほぼ決まった場所で繰り返し起きていることから、地球や太陽の潮汐力で月が変形する際に、断層が動いて発生する月震と考えられている[17]。一方「浅発月震」は、月面付近の比較的浅い場所で発生する $M 3 \sim 4$ 程度の月震で、同定数が 28 個と少ないため詳細は不明であるが、断層運動によるテクトニックな地震と考えられている[18]。これらの月震の P 波・ S 波の走時データからは、様々な 1 次元月内部構造モデルが構築されている[19-21]。また最近では、地震波トモグラフィによって月マントルの 3 次元地震波速度構造モデルも構築されている[22-24]。しかし当時の地震計は周波数帯域が限られていたことや、月の地震の卓越周波数が地震計の周波数帯域と合っていなかったこと等の理由から、観測波形は月面付近での強い散乱の影響を受けたものしかなく、月内部の実体波伝播の詳細は依然として不明である。

一方火星では、バイキング 2 号によって 1976 年に 5 か月間地震観測がなされたものの、火星表面の風が強いノイズ源となり、自然地震と思われるイベントを 1 つ観測したのみであった[25]。ただ近年は火星表面の高解像度画像解析によって、最近動いたと思われる断層地形が多数発見されており[26]、火震の震源メカニズムや地震活動度の推定も行われている[27]。また火星隕石の組成や慣性モーメント・重力分布などの間接的な情報を用いて構築された内部構造モデルも存在する[28]。

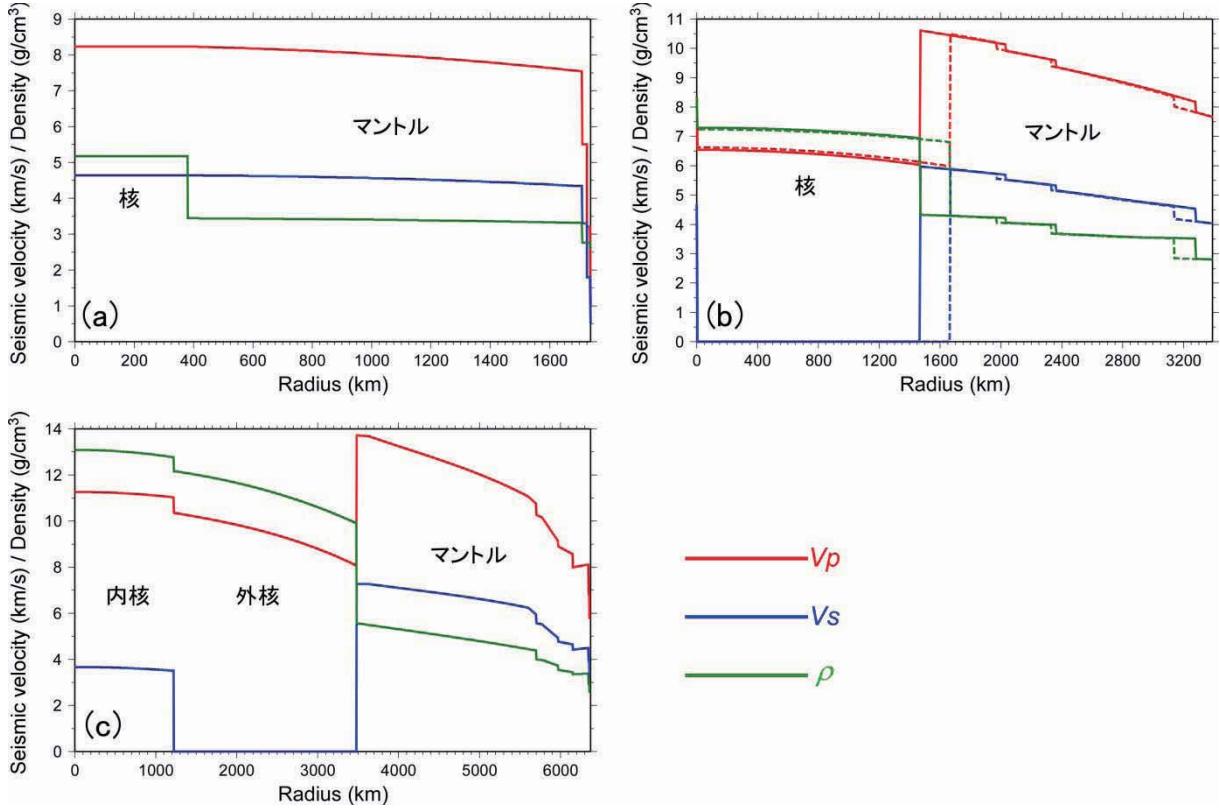


図 4：本稿の計算で用いた (a) 月[21]・(b) 火星[28]・(c) 地球[13]の 1 次元内部構造モデル。赤線、青線、緑線はそれぞれ P 波速度、 S 波速度、密度を表す。火星のモデルは、モデル A (実線) と B (点線) の 2 種類が存在する。

現在、月や火星の次期地震探査計画が各国で進められており、それぞれの天体の波動場の特徴を踏まえた地震計の開発が急務である。また観測可能な実体波のフェーズを特定し、効率的に観測点を配置することも望まれる。アポロ計画やバイキング 2 号による観測データを補完し、天体深部までの地震波伝播の様子を把握するには、シミュレーションが最適である。今回は我々が開発を行ってきた球座標系 2.5 次元差分法のプログラムに、既存の月と火星の内部構造モデルと簡単な震源モデルを入力して、両天体の地震波伝播シミュレーションを行った。本稿の計算で用いた月・火星・地球の 1 次元構造モデルは図 4 に示している。月のモデルは文献[21]によるが、核の地震波速度は与えられていないので、マントル最下部の速度を延長して作成した。また火星のモデルは、隕石組成と慣性モーメントの実測値をそれぞれ最も良く説明できる 2 種類のモデル(モデル A と B)が存在する[28]。

3.1 月の地震波伝播シミュレーション

今回は、(1) 深発月震と浅発月震による地震波形の違い、および (2) 月の 1 次元内部構造モデルと 3 次元トモグラフィモデルによる地震波形の違い、を調べるためにシミュレーションを実行した。計算は $0 \text{ km} \leq r \leq 1738 \text{ km}$ (月面), $-\pi \leq \theta \leq \pi$ の範囲を、約 320 万点の空間格子点に分割して行った。空間格子間隔は約 2 km である。時間刻みは 0.0125 s とし、パルス幅 15 s の波を震源に入力して、鉛直ずれ型震源について励起後 1250 s まで計算した。震源は深発月震の場合 $r = 738 \text{ km}$ (深さ 1000 km), $\theta = 0^\circ$ 、浅発月震の場合 $r = 1638 \text{ km}$ (深さ 100 km), $\theta = 0^\circ$ に置いた。

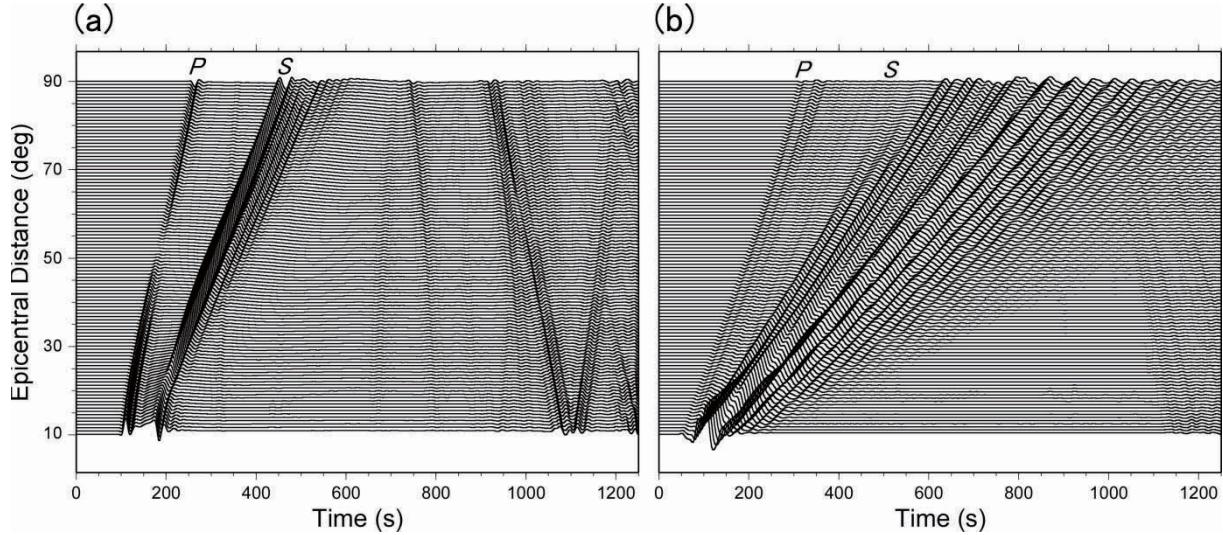


図 5 : 深発月震 (a) と浅発月震 (b) の理論地震波形. 震央距離約 1°おきに波形を縦に並べて表示した. 各パネルの上部に P 波と S 波の到着を示している. すべての波形に 1/15 Hz のローパスフィルターを適用.

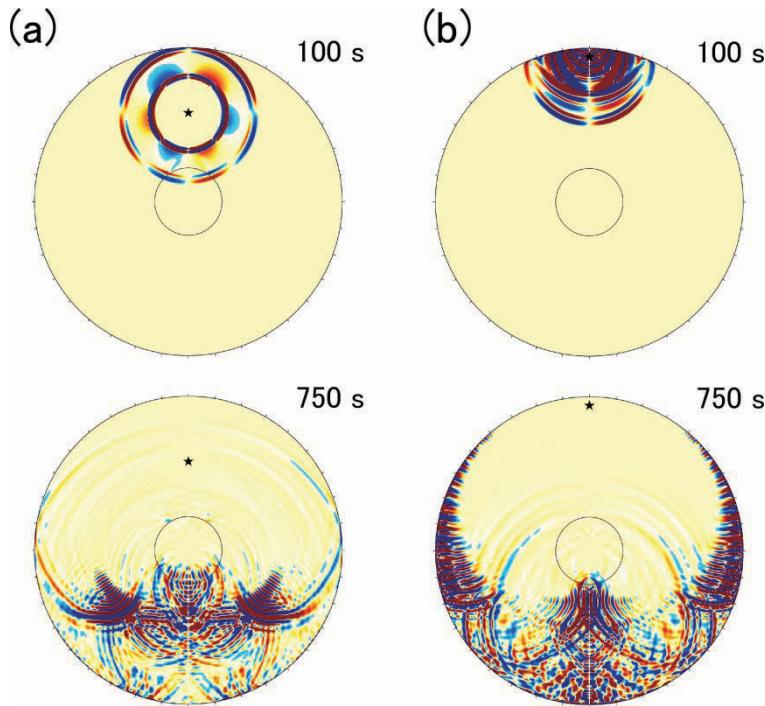


図 6 : 深発月震 (a) と浅発月震 (b) の月断面における地震波伝播のスナップショット. 励起後 100 s と 750 s での粒子速度の r 成分の振幅を示している. 赤色は正, 青色は負の振幅を表す. 震源は星印.

まず (1) の結果を示す. 図 5 は, 1 次元内部構造モデルを用いて計算した深発月震と浅発月震の理論波形である. 仮想的な観測点を, 震央距離 10°から 90°まで約 1°おきに等間隔で月面上に配置し, 縦軸方向に並べている. 深発月震の場合は P 波と S 波の立ち上がりが明瞭で, 波形もコンパクトにまとまっているのに対して, 浅発月震の場合は立ち上がりが不明瞭で, 波がなかなか減衰しないために後続波が非常に長時間続いていることがわかる. 月の地殻は地震波速度が著しく小さいため, 震源が浅いほど地殻内部に波がトラップされ, 多重反射を繰り返した結果, 長時間の振動が生じたと考えられる. このときの月断面における地震波伝播のスナップショットは図 6 に示した. 浅発月震では, 月面付近で生じた S 波の特徴的な多重反射が, 月深部まで伝播していく様子が見て取れる. アポロ月震計による波形は 0.1~10 Hz の短周期帯での観測であるが,

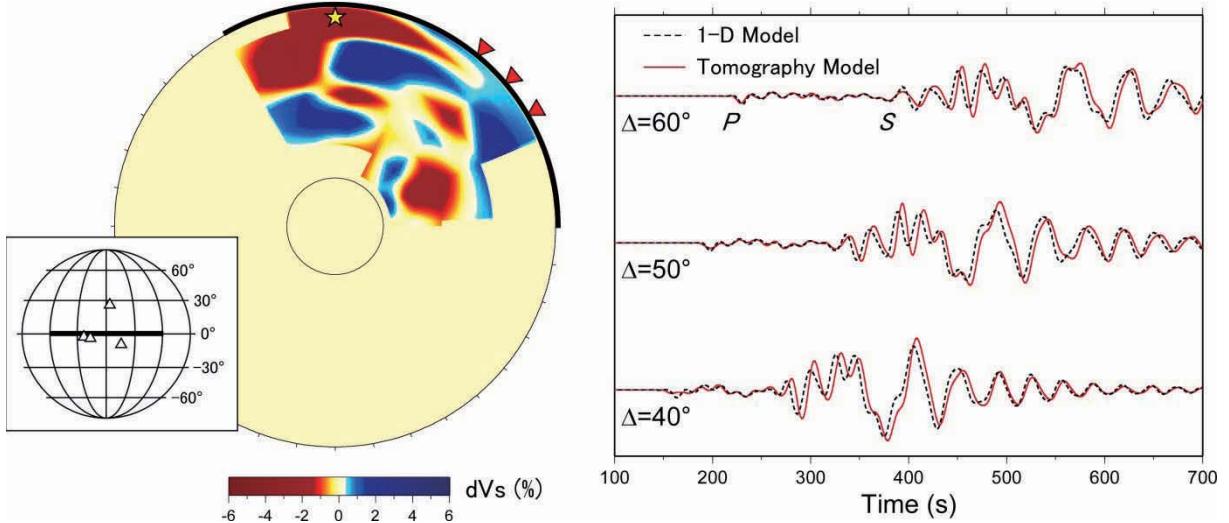


図 7: 左: 計算に用いたトモグラフィモデルの断面[23]. 例として S 波速度構造断面を示した. 青色が高速度, 赤色が低速度領域. 太線部分の月面における位置は左下のパネルに表示. 震源は星印, 観測点は逆三角形, アポロ月震計の位置は正三角形. 右: トモグラフィモデル(赤線)と 1 次元モデル(黒点線)による浅発月震の理論波形. 左図に示した 3 観測点での波形を表示.

今回の浅発地震の計算結果と同様な波形の特徴が見られる. 短周期の場合は, 月面付近での地震波の散乱の影響が強くなり, さらに長時間の振動が生じるが, 周期 15 s という長周期でも類似した特徴が再現できたことは興味深く, 本シミュレーションは観測がなされていない長周期側の月震の特徴を補うものと期待できる.

次に (2) の結果を示す. 図 7 は, 今回計算に用いたトモグラフィモデルの例, および 1 次元モデルとトモグラフィモデルによる浅発月震の波形比較である. トモグラフィモデルは月の赤道に沿った断面を採用した[23]. 図 7 では例として S 波速度構造断面のみを示している. 観測波形は震央距離 40°, 50°, 60° の 3 点で表示した. 震源近傍に S 波速度が低い領域があるため, トモグラフィモデルによる S 波初動は総じて遅れて到着しているが, 観測点直下の S 波速度が高いせいで, 多重反射を繰り返した後続波は位相が戻っていく様子が見て取れる. このように細かな違いは見られるが, 今回は長周期で計算したので波形の特徴が大きく変わることはなかった. トモグラフィモデルによる短周期理論波形の合成は, 今後の MPI 並列計算で優先して取り組みたいと考えている.

3.2 火星の地震波伝播シミュレーション

現在提唱されている火星の 1 次元内部構造モデルには, 図 4 に示したモデル A と B の 2 種類がある. また火星表面の重力データと地形から, 物性が均一な地殻とマントルの 2 層構造を仮定してモホ面分布が推定できる. 今回のシミュレーションでは, (1) モデル A と B による地震波形の違い, および (2) 不均一モホ面形状を考慮した場合の地震波伝播の変化, を調べることをターゲットとした. 計算は $0 \text{ km} \leq r \leq 3390 \text{ km}$ (火星表面), $-\pi \leq \theta \leq \pi$ の範囲を, 約 544 万点の空間格子点に分割して行った. 空間格子間隔は約 2 km である. 時間刻みは 0.025 s とし, パルス幅 30 s の波を震源に入力して, 鉛直ずれ型震源について励起後 5000 s まで計算した. 震源は $r = 3360 \text{ km}$ (深さ 30 km), $\theta = 0^\circ$ に置いた. 図 8 に今回作成したモホ面形状モデルと, 計算に使用した断面の位置を示している. モホ面形状モデルを用いた計算では, モデル A の地殻部分を不均一地殻厚で置き換えて実行した. 火星表面の地形解析から最も地震活動度が高いと推定されている地域に震源を置き, 地殻が最も薄くなるヘラス平原を通る断面を選んだ.

図 9 に 2 種類の 1 次元構造モデルと, 不均一モホ面形状モデルによる火星断面における地震波

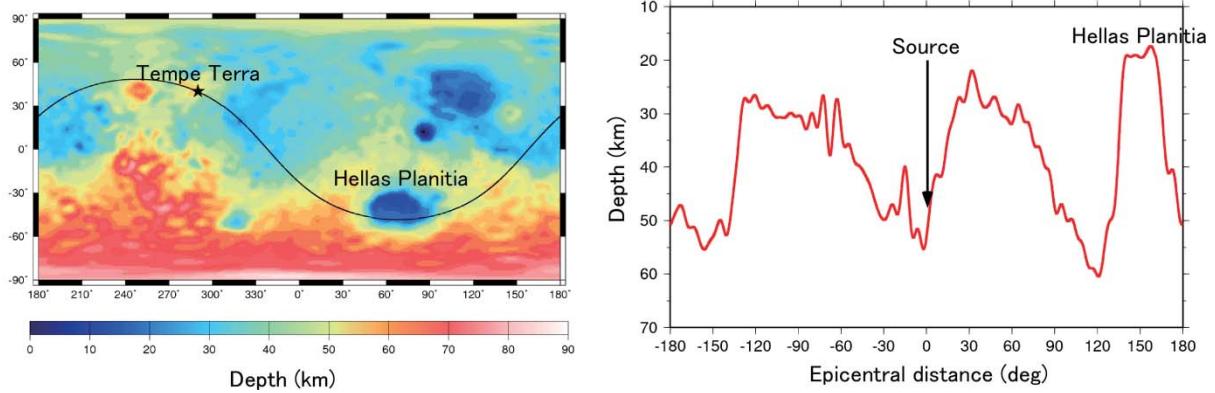


図 8 : 左 : 今回作成したモホ面形状分布. 黒線は計算に使用した断面と火星表面との交線を示す. 星印が震源. 右 : 計算に使用した断面に沿ったモホ面の深さ変化.

伝播のスナップショットを示す. 今回は周期 30 s という長周期の波を入力しているため, 励起後 1200 s では大きな違いは見られないが, マントルが薄いモデル B では, 核-マントル境界からの反射波がモデル A よりも早く到着している様子がわかる. 2400 s では火星表面に沿って震源の反対側まで表面波が伝播している. モデル A では長距離に亘って振幅が強い領域が続くのに対し, モデル B では比較的コンパクトにまとまっているのは, モデル A に比べてモデル B の地殻が 3 倍厚いせいで, 多重反射が起きにくくなつたためと思われる. またモホ面形状を入れた計算では, 細かな地形の影響は顕著に見られないものの, 励起後 2400 s ではモデル A と比較して明らかに表面波の集中が起きている. これらの計算をさらに短周期まで実行すれば, どのような波のフェーズに内部構造の違いが強く影響するか調べることができ, 少ない観測点で内部構造を調べる際の指針を与えることができると考えられる.

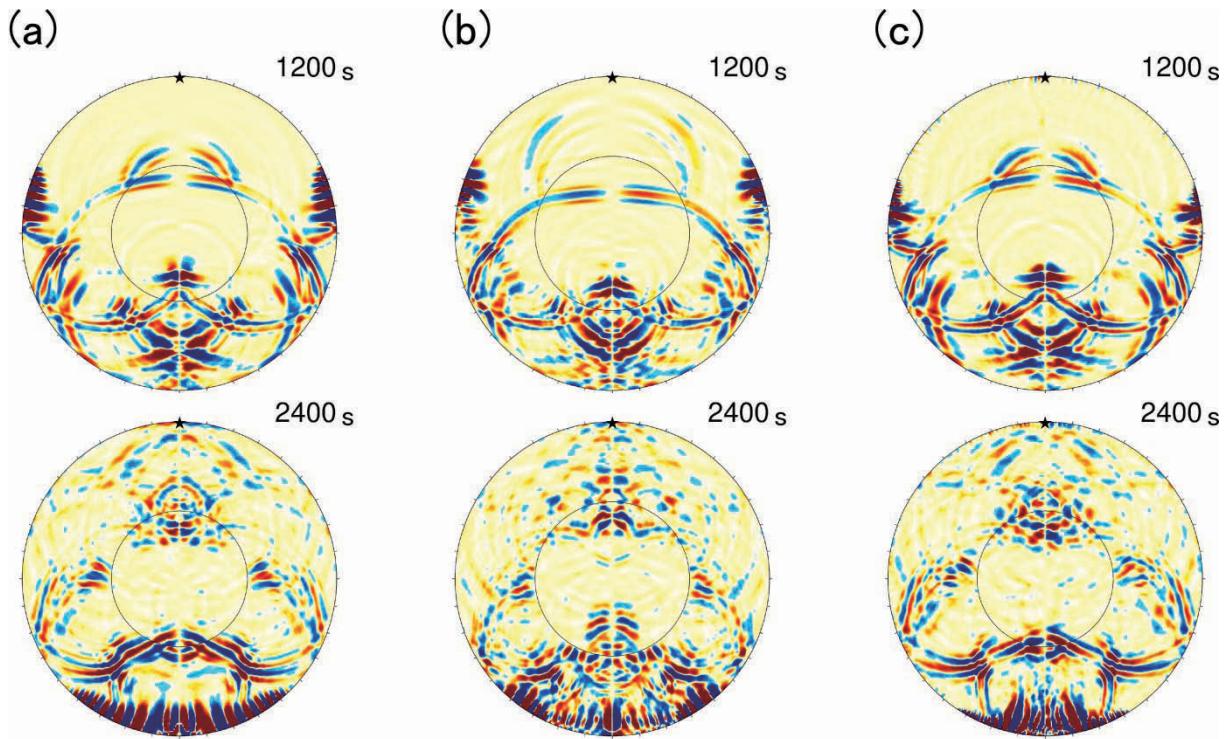


図 9 : (a) モデル A, (b) モデル B, および (c) 不均一地殻厚モデルを用いて計算した火星断面における地震波伝播のスナップショット. 励起後 1200 s と 2400 s での粒子速度の r 成分の振幅を示す. 赤色は正, 青色は負の振幅を表す. 震源は星印.

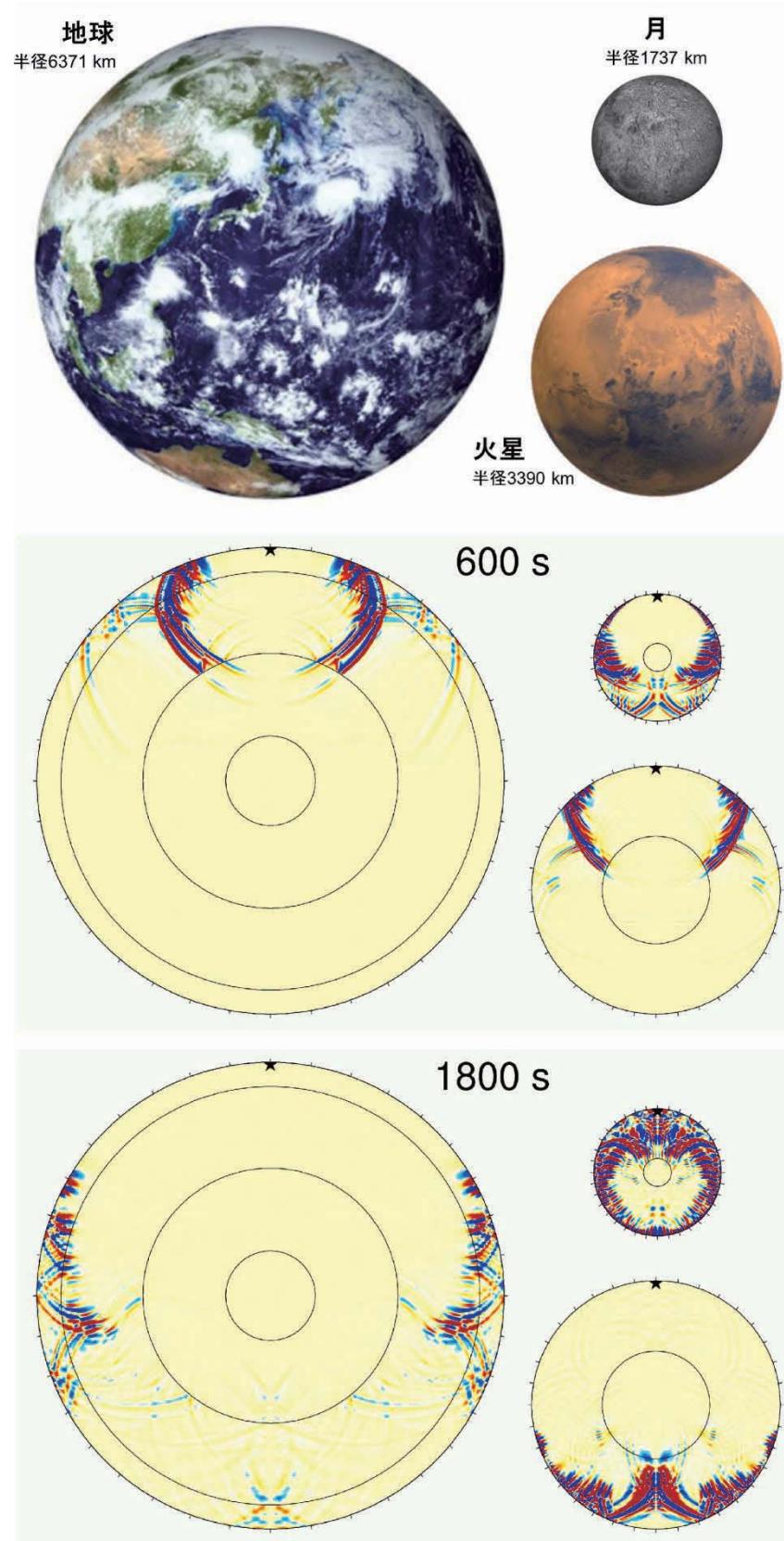


図 10：月・火星・地球の地震波伝播の比較。深さ 30 km に横ずれ型震源を置いて計算。震源で励起される波のパルス幅は 30 s。励起後 600 s と 1800 s での粒子速度の r 成分のスナップショットを示した。赤色は正、青色は負の振幅を表す。震源は星印。

3.3 月・火星・地球の地震波伝播比較

最後に月・火星・地球の地震波伝播の違いがわかりやすいよう、3天体の同じ深さに、同じメカニズムの震源を入れてシミュレーションした結果を紹介する。震源は深さ30kmに置き、メカニズムはピュアな横ずれ型とした。また震源から励起される波のパルス幅も30sで統一した。構造モデルはすべて1次元である。火星の構造はモデルAを採用した。この計算の格子数やメモリ等は次節の表1を参照されたい。

図10は3天体の断面における、励起後600sと1800sの地震波伝播のスナップショットである。天体の大きさによる地震波伝播の違いを見やすくするために、3天体は同じ縮尺で描いている。火星は地球の約1/2、月は1/4の大きさしかないので、月では励起後600sで既に震源の反対側まで波が到着している。また月の地殻における多重反射によって、波がいつまでも震源付近に留まっている様子がわかる。1800sでは、火星でも大振幅の波が震源の反対に到着しているのに対し、地球では振幅の小さいP波が到着したばかりである。また月では中心付近まで大振幅の波が伝播している。地震波は伝播距離が長くなるほど減衰していくので、地球に比べて小さい月や火星では、地震波が大振幅を保って天体の裏側まで伝播する。したがって地震の規模が同じ場合は、月や火星の方が観測可能な地域が広いと言える。

4. SX-9の利用

本稿第3節で紹介したシミュレーションは、すべて東北大学サイバーサイエンスセンターのベクトル型SX-9（日本電気株式会社（以下NEC）製）を用いて実行した。計算機の利用にあたっては、サイバーサイエンスセンターとNECの共同研究でプログラムの性能分析を行い、その結果に基づいてチューニングを施した。ソースコードはFortran90で記述しており、行数は約18000である。NECにおいて手動によるループ展開やベクトル化指示行の挿入、演算やファイル出力の細かな最適化等のチューニングを施した結果、1CPU実行で約60倍の計算速度向上に成功した。また自動並列化による性能測定（コンパイルオプション“-R2 -f3 -Ep -pi -Pauto -Wf,-pvct1 fullmsg”）の結果、8CPUで4.4倍、16CPUで5.8倍の速度向上を見た。

本稿第3.3節の3天体のシミュレーションは、ジョブクラスp8で8CPUを用いた自動並列演算で実行した。コンパイルオプションは上記の性能測定の時と同一である。3天体それぞれの計算におけるメモリ・実行時間・MFLOPS値は表1に示した。

表1：第3.3節の計算諸元

	パルス幅(s)	空間格子数	時間格子数	メモリ(GB)	実行時間(s)	MFLOPS値
月	30	3201546	400000	2.304	18785	7780
火星	30	5442720	200000	3.520	22290	5642
地球	30	10835200	200000	10.176	12632	20446

5. まとめ

本稿では平成24年度の共同研究の成果として、月と火星の地震波伝播シミュレーションの成果を報告した。SX-9のジョブクラスp8による自動並列演算で、月では周期15s、火星では周期30sまでの地震波伝播計算が実現できた。地球内部の地震波伝播についての我々の理解は、観測と理論の相補的な進歩によって発展してきた歴史がある。月と火星はいずれも内部構造モデルと震源に関する情報が与えられており、今までに理論波形計算で波動伝搬に関する理解を深める段階に入っている。本共同研究の成果は、その端緒を開くものである。

なお今回は15s、30sといった長周期の地震波伝播をシミュレーションした。さらに現実的なシミュレーションを行うためには、周期1sを目標に、できるだけ短周期に近づけていく必要がある。しかし周期を1/2にすると、r方向とθ方向の空間格子間隔、および時間格子間隔をすべて

1/2にしなければならないので、メモリは4倍、計算時間は8倍必要となる。従って短周期のシミュレーションではプログラムのMPI化が必須である。現在は本共同研究によってプログラムのMPI化も終わり、周期8 sでの火星の地震波伝播シミュレーションが成功している。MPIを用いたシミュレーションについては、また別の機会に紹介することにしたい。

謝辞

本稿の研究成果は、東北大大学サイバーサイエンスセンターと日本電気株式会社のスタッフの方々のご助力で成し得たものである。サイバーサイエンスセンターの小林広明センター長、江川隆輔准教授、小松一彦助教、大泉健治氏、山下毅氏には、本共同研究の機会をお与えいただいた上、プログラム開発やシステム利用について様々なご助言・ご助力をいただいた。日本電気株式会社の撫佐昭裕博士、浅見暁氏、渡部修氏、その他のスタッフの方々は、プログラムのチューニングとMPI化を実施して下さり、2012年4月11日、7月4日、10月10日、2013年4月3日、および6月14日の5回にわたって開かれた報告会でご報告下さった。またEメールによる質問にも常に懇切丁寧なご回答を下さった。独立行政法人防災科学技術研究所の稻津大祐博士には、SX-9の利用をお勧めいただき、システム利用についてもあらゆる相談に乗っていただいた。記して感謝する。

参考文献

- [1] 竹中博士, 不整形地盤における波動伝播の数値計算法, *地震第2輯*, **46**, 191-205, 1993.
- [2] Igel, H., Weber, M., SH-wave propagation in the whole mantle using high-order finite differences, *Geophys. Res. Lett.*, **22**(6), 731–734, 1995.
- [3] Igel, H., Weber, M., P-SV wave propagation in the Earth's mantle using finite differences: application to heterogeneous lowermost mantle structure, *Geophys. Res. Lett.*, **23**(5), 415-418, 1996.
- [4] Chaljub, E., Tarantola, A., Sensitivity of SS precursors to topography on the upper-mantle 660-km discontinuity, *Geophys. Res. Lett.*, **24**(21), 2613–2616, 1997.
- [5] Igel, H., Gudmundsson, O., Frequency-dependent effects on travel times and waveforms of long-period S and SS waves, *Phys. Earth Planet. Int.*, **104**(1–3), 229–246, 1997.
- [6] Thomas, Ch., Igel, H., Weber, M., Scherbaum, F., Acoustic simulation of P-wave propagation in a heterogeneous spherical earth: numerical method and application to precursor waves to PKP, *Geophys. J. Int.*, **141**(2), 307–320, <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-246x.2000.00079.x>, 2000.
- [7] Thorne, M.S., Lay, T., Garnero, E.J., Jahnke, G., Igel, H., Seismic imaging of the laterally varying D00region beneath the cocos plate, *Geophys. J. Int.*, **170**(2), 635–648, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03279.x>, 2007.
- [8] Jahnke, G., Thorne, M.S., Cochard, A., Igel, H., Global SH-wave propagation using a parallel axisymmetric spherical finite-difference scheme: application to whole mantle scattering, *Geophys. J. Int.*, **173**(3), 815–826, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03744.x>, 2008.
- [9] Toyokuni, G., Takenaka, H., Wang, Y., Kennett, B.L.N., Quasi-spherical approach for seismic wave modeling in a 2-D slice of a global Earth model with lateral heterogeneity, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L09305, <http://dx.doi.org/10.1029/2004GL022180>, 2005.
- [10] Toyokuni, G., Takenaka, H., FDM computation of seismic wavefield for an axisymmetric earth with a moment tensor point source, *Earth Planets Space*, **58**(8), e29–e32, 2006.

- [11] Toyokuni, G., Takenaka, H., ACE—A FORTRAN subroutine for analytical computation of effective grid parameters for finite-difference seismic waveform modeling with standard Earth models, *Comput. Geosci.*, **35**(3), 635–643, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2008.05.005>., 2009.
- [12] Toyokuni, G., Takenaka, H., Accurate and efficient modeling of global seismic wave propagation for an attenuative Earth model including the center, *Phys. Earth Planet. Int.*, **200**–**201**, 45–55, 2012.
- [13] Dziewonski, A.M., Anderson, D.L., Preliminary reference Earth model, *Phys. Earth Planet. Int.*, **25**(4), 297–356, 1981.
- [14] Toyokuni, G., Takenaka, H., Kanao, M., Wiens, D., Nyblade, A., Comparison of global synthetic seismograms calculated by the spherical 2.5-D finite-difference method with observed long-period waveforms including data from intra-Antarctic region, *Polar Sci.*, **6**, 155–164, <http://dx.doi.org/10.1016/j.polar.2012.06.001>, 2012.
- [15] Nakamura, Y., Latham, G. V., Dorman, H. J., Apollo Lunar Seismic Experiment—Final summary, *J. Geophys. Res.*, **87**(S01), A117–A123, doi:10.1029/JB087iS01p0A117, 1982.
- [16] Nakamura, Y., New identification of deep moonquakes in the Apollo lunar seismic data, *Phys. Earth Planet. Int.*, **139**, 197–205, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2003.07.017>, 2003.
- [17] Koyama, J., Nakamura, Y., Focal mechanism of deep moonquakes, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 11th*, **3**, 1855–1865, 1980.
- [18] Nakamura, Y., Latham, G. V., Dorman, H. J., Ibrahim, A.-B. K., Koyama, J., Horvath, P., Shallow moonquakes - Depth, distribution and implications as to the present state of the lunar interior, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 10th*, **3**, 2299–2309, 1979.
- [19] Nakamura, Y., Seismic velocity structure of the lunar mantle, *J. Geophys. Res.*, **88**(B1), 677–686, doi:10.1029/JB088iB01p00677, 1983.
- [20] Weber, R. C., Lin, P.-Y., Garnero, E. J., Williams, Q., Lognonné, P., Seismic detection of the lunar core, *Science*, **331**(6015), 309–312, doi:10.1126/science.1199375, 2011.
- [21] Garcia, R. F., Gagnepain-Beyneix, J., Chevrot, S., Lognonné, P., Very preliminary reference Moon model, *Phys. Earth Planet. Int.*, **188**(1-2), 96–113, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2011.06.015>, 2011.
- [22] Zhao, D., Lei, J., Liu, L., Seismic tomography of the Moon, *Chinese Sci. Bull.*, **53**(24), 3897–3907, <http://dx.doi.org/10.1007/s11434-008-0484-1>, 2008.
- [23] 田中窓香, 月震と月の内部構造に関する総合的研究, 東北大大学院理学研究科地球物理学専攻修士論文, pp. 98, 2012.
- [24] Zhao, D., Arai, T., Liu, L., Ohtani, E., Seismic tomography and geochemical evidence for lunar mantle heterogeneity: Comparing with Earth, *Global and Planetary Change*, **90**, 29–36, 2012.
- [25] Anderson, D. L., Miller, W. F., Latham, G. V., Nakamura, Y., Toksöz, M. N., Dainty, A. M., Duennebier, F. K., Lazarewicz, A. R., Kovach, R. L., Knight, T. C. D., Seismology on Mars, *J. Geophys. Res.*, **82**(28), 4524–4546, doi:10.1029/JS082i028p04524, 1977.
- [26] Ferrill, D. A., Wyrick, D. Y., Morris, A. P., Sims, D. W., Franklin, N. M., Dilational fault slip and pit chain formation on Mars, *GSA Today*, **14**(10), 4–12, 2004.
- [27] Knapmeyer, M., Oberst, J., Hauber, E., Wählisch, M., Deuchler, C., Wagner, R., Working models for spatial distribution and level of Mars' seismicity, *J. Geophys. Res.*, **111**, E11006, doi:10.1029/2006JE002708, 2006.
- [28] Sohl, F., Spohn, T., The interior structure of Mars: Implications from SNC meteorites, *J. Geophys. Res.*, **102**(E1), 1613–1635, 1997.

[共同研究成果]

DC-RF ハイブリッド熱プラズマ流の非定常3次元数値シミュレーション

茂田 正哉

東北大学大学院工学研究科機械システムデザイン工学専攻

本稿では、熱流動場と誘導電磁場の相互作用を考慮した DC-RF ハイブリッド熱プラズマ流の非定常3次元数値シミュレーションについて述べる。また熱プラズマと低温流体が共存する3次元的な熱流動場やコヒーレント構造（渦構造）といった本シミュレーションにより得られた新たな知見を紹介する。

1. 緒言

DC-RF ハイブリッド熱プラズマ流とは、大気圧下において直流 (Direct current; DC) 放電による非移行式アークプラズマジェットと高周波 (Radio frequency; RF) 放電による誘導結合プラズマを組み合わせた高エンタルピーのプラズマ流^[1]である。この放電形式によって生成・維持されるプラズマ熱流動の工学的応用への期待は大きく、これまでナノ粒子の大量創製プロセス^{[1][2][3]}やマイクロ粒子群の高速球状化プロセス^[4]などに利用されてきた。しかしながら、熱プラズマ流は 10,000 K を超える高温と強い発光を伴う流体であるため、実験計測は難しく、大小様々なスケールの渦によって構成されているその熱流動場に関する知見は各種プロセスの効率的な制御のために必要不可欠であるにも関わらず、依然として乏しいのが現状である^[5]。それ故に数値シミュレーションによる現象解明に期待が寄せられているものの、熱プラズマ流の数値計算は収束解を得るためにしばしば多大なる労力を必要とするため（次節参照）、特にハイブリッド熱プラズマ流については定常状態および軸対称2次元を仮定したものが数例^{[1][2][6]}報告されているのみであった。

そこで本研究では、ハイブリッドプラズマトーチ内における熱プラズマと低温流体が共存する流動場および3次元的なコヒーレント構造の動的挙動を明らかにすることで熱プラズマの流動現象に関する新たな知見を得ることを目的として、熱流動場と誘導電磁場の相互作用を考慮した DC-RF ハイブリッド熱プラズマ流の非定常3次元数値シミュレーションを試みた^[7]。

2. 計算方法

通常の生成・維持条件において、熱プラズマ流の圧力は大気圧と同程度である。ガス種にアルゴンを用いるとすればプラズマを含む流体全域にわたって局所熱平衡が成り立ち、また光学的に薄いと仮定できる。さらに変位電流も無視することができる。このとき質

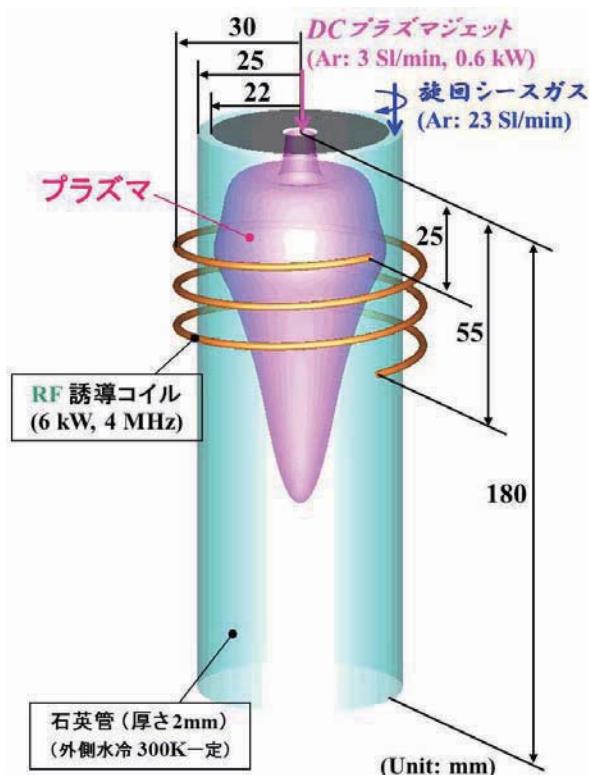


図1 DC-RF ハイブリッド熱プラズマトーチ

量・運動量・エネルギーに関する保存方程式、および誘導電磁場に対する Maxwell の方程式が支配方程式となる。本研究では、流動現象のダイナミクスを捉えるために Large Eddy Simulation (LES) に基づいて数値計算を試みるが、その際 10,000 K を超える高温のプラズマ領域と 300 K の低温ガス流が相互作用しながら同時に存在する流動場を取り扱わなければならない。両者の間には粘性・熱伝導率・定圧比熱・導電率といった物性値に大きな差があり、計算領域の中に局所的に低 Reynolds 数領域と高 Reynolds 数領域が共存することになる。すなわち乱流的な領域と層流的な領域を同時に計算する必要がある。そこで本計算ではサブグリッドスケールにおいてコヒーレント構造モデル^[8]を用いた。

さらに熱プラズマ流の数値計算においては、上述の物性値変化のみならず、約 45 倍に及ぶ密度変化を考慮しなければならない。その一方で、流れ場におけるマッハ数は 0.003~0.045 の範囲にあるため、圧縮性流体解析用の計算スキームを用いてしまうと工学的に有意な時間スケールでの流体運動を捉えるためには膨大な計算時間を要することになる。すなわち現実的なアプローチとして、熱プラズマ流を「大きな密度変化を伴う非圧縮性流体」として取り扱うことになるが、このとき数値計算は非常に不安定となる。そのため支配方程式の対流項を 1 次精度上流差分法によって離散化し、その数値粘性効果を利用して少しでも計算を安定化して行うことが多い。しかしながら、数値粘性には同時に渦を潰してしまう効果もあるため、熱プラズマと低温流体が共存する流動場の渦構造を明らかにするという本研究の目的に反してしまう。そこで今回は渦の捕捉に有効な中心差分法の適用を試みるが、この方法は物性値変化も密度変化もない流体解析においてすら計算を不安定にすることがよく知られている。そのためか熱プラズマ流の数値計算において中心差分法を用いたという報告はない。そこで本研究では、渦を捕捉するために 2 次精度中心差分法を適用しながら、計算の破綻を防ぐために 1 次精度上流差分法を 10% 分混ぜるという手法を用いて対流項の離散化を行った。また拡散項や生成項の離散化には通常の 2 次精度中心差分法を用いた。時間微分項には 2 次精度 Adams-Bashforth 法を適用した。全ての計算点において質量・運動量・エネルギーの保存性を満足させるため、計算領域は有限体積法により 2,051,033 個のコントロールボリュームに分割され、誘導電磁場とカップリングしながら PISO 法^[9]を用いて熱流動場の計算を行った。

3. 計算条件

図 1 に DC-RF ハイブリッド熱プラズマトーチの概略図を示す。内径 50 mm のトーチの上部に壁面に沿って設けられた幅 3 mm のスリットから 300 K のアルゴンガスがシースガスとして旋回成分を持って注入される。またトーチ上部中心の内径 8 mm のノズルから 12,000 K の DC プラズマジェットが 3 Sl/min で供給される。RF 誘導コイルは半径 30 mm、長さ 30 mm、ピッチ間隔 10 mm のらせん形状をしている。DC 放電および RF 放電に対する投入電力はそれぞれ 0.6 kW および 6.0 kW とし、RF 印加周波数は 4 MHz とした。時間ステップ幅を 0.5 ms とし、初期条件 (time = 0) として軸対称 2 次元の場を計算領域全体に与えた。計算には東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX-9 を用いた。

4. 計算結果

図 2 に本計算によって得られた熱流動場の代表的な瞬間像を示す。7,500 K および 10,000 K の等温度面や流速で色付けられた流線から、プラズマトーチ内は複雑で 3 次元的な熱流動場となつており、しばしば仮定される軸対称 2 次元の場とは程遠いものとなっていることがわかる。高温のプラズマ領域には、らせん状の流線が示す再循環流が見られることが多い。これは導電率の高いプラズマ領域に Lorentz 力が発生し、流体運動を駆動するためである。またその再循環流はト

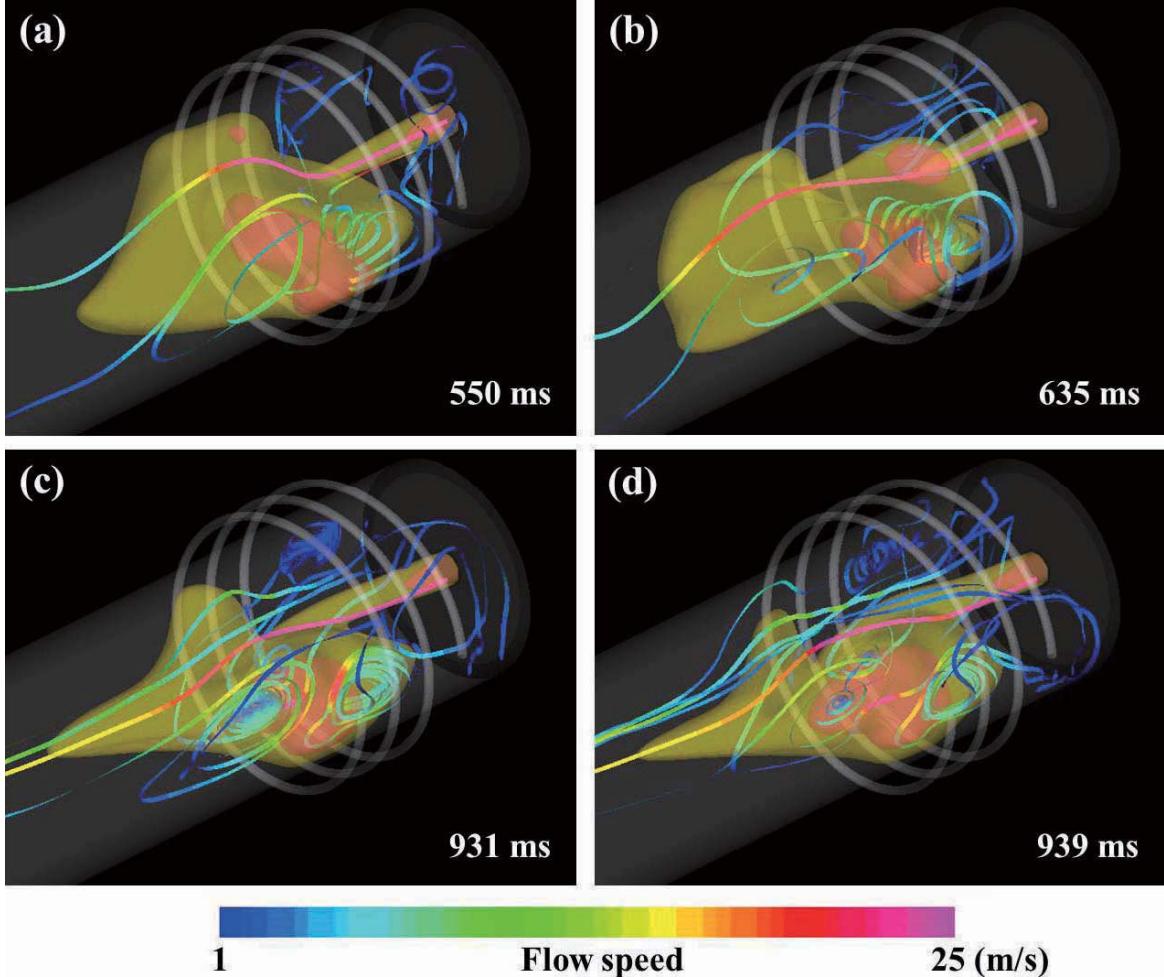


図2 トーチ内の熱流動場(7,500K および 10,000K の等温度面と流速で色付けされた流線)

トーチ上部から注入される低温のシースガス流にも影響を与えるため、結果としてトーチ内の熱流動場に片寄りが生じ、直進性の高い DC プラズマジェットも蛇行する。また低温領域における流速は小さく、一方で高温のプラズマ領域における流速は主に大きい。これは低温の気体がプラズマ化して高温になる際に、熱膨張によって体積が増加するためである。

図 3 に速度勾配テンソルの第二不変量 $Q = 3$ の等価面によって定義される渦構造を示す。ここで Q は代表速度 10 m/s とトーチ内径によって無次元化されている。高温領域における渦構造は大きく、その一方で低温領域では多数の小さな渦が発生している。高温領域における渦は主にプラズマに働く Lorentz 力に起因するものであると考えられる。また高温領域は粘性が高いため、低温領域に生じるような小さな渦は存在できない。小規模もしくは中規模の渦群は 4,000 K 以下の領域に見られるが、これはプラズマ流と低温のガス流との界面付近で生じる流体力学的な不安定性によって発生したものと考えられる。またトーチ上壁付近でも低温の小さな渦群が生じ、プラズマジェット周辺に存在する渦構造に引き込まれて合体する様子も計算されている。

5. 結言

熱流動場と誘導電磁場の相互作用を考慮した DC-RF ハイブリッド熱プラズマ流の非定常 3 次元数値シミュレーションを試み、熱プラズマと低温流体が共存する 3 次元的な熱流動場およびコヒーレント構造を明らかにすることに成功した。詳細は文献[7]を参照されたい。

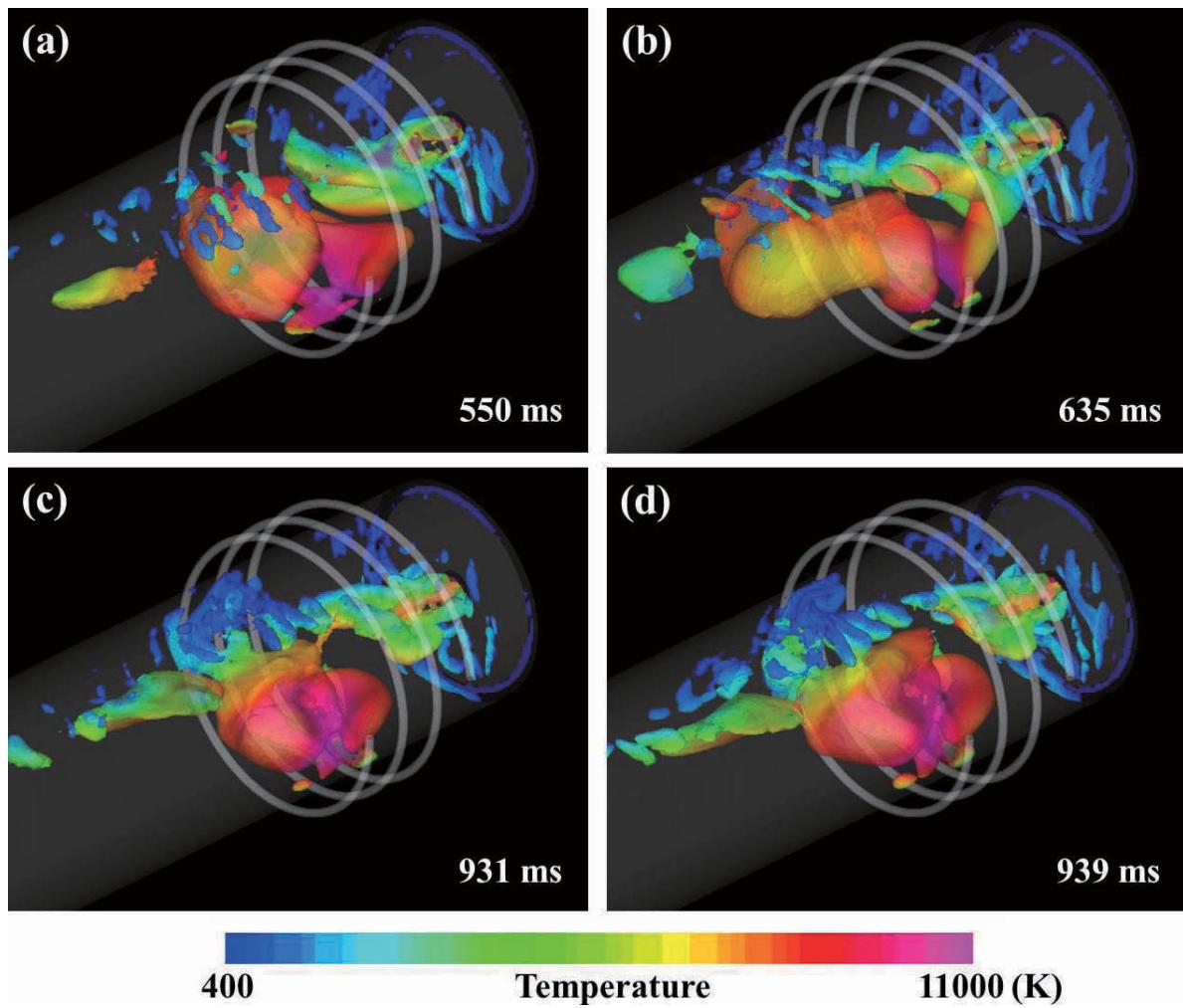


図3 速度勾配テンソルの第二不変量により定義された渦構造

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができ、計算コードの高速化にあたっては同センター関係各位よりご協力をいただきました。また渦構造に関する有益な助言をくださいました東北大学大学院工学研究科の福西祐教授と伊澤精一郎准教授に感謝の意を表します。なお、本研究は学術研究助成基金助成金（基盤研究(C): 23560182）によって行われたものであることをここに記します。

参考文献

- [1] Yoshida T., Tani T., Nishimura H., and Akashi K., “Characterization of a hybrid plasma and its application to a chemical synthesis”, J. Appl. Phys., Vol. 54 (1983), pp. 640-646.
- [2] Shigeta, M. and Nishiyama, H., “Numerical Analysis of Metallic Nanoparticle Synthesis using RF Inductively Coupled Plasma Flows”, Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol. 127 (2005), pp. 1222-1230.
- [3] Shigeta, M. and Murphy, A.B., “Thermal plasmas for nanofabrication”, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 44, No. 17 (2011), pp. 174025 (16 pages).
- [4] Takana, H., Jang, J., Igawa, J., Nakajima, T., Solonenko, O.P., and Nishiyama, H., “Improvement of In-Flight Alumina Spheroidization Process Using a Small Power Argon

- DC-RF Hybrid Plasma Flow System by Helium Mixture”, J. Thermal Spray Tech., Vol. 20, No. 3 (2011), pp. 432-439.
- [5] Kawajiri, K., Sato, T., and Nishiyama, H., “Experimental analysis of a DC-RF hybrid plasma flow”, Surface Coatings Tech., Vol. 171 (2003), pp. 134-139.
- [6] Seo, J.H., Park, J.M., and Hong, S.H, “Influence of DC arc jets on flow fields analyzed by an integrated numerical model for a DC-RF hybrid plasma”, Plasma Sources Sci. Technol., Vol. 17 (2008), pp. 025011 (10 pages).
- [7] Shigeta, M., “Three-dimensional flow dynamics of an argon RF plasma with DC jet assistance: a numerical study”, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 1 (2013), pp. 015401 (12 pages).
- [8] Kobayashi, H., “Large eddy simulation of magnetohydrodynamic turbulent channel flows with local subgrid-scale model based on coherent structures”, Phys. Fluid, Vol. 18 (2006), pp. 045107 (11 pages)
- [9] Issa, R.I., “Silution of Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting”, J. Computational Phys., Vol. 62 (1985), pp. 40-65.

[研究成果]

超大規模数値計算に基づく核融合炉先進ブランケットデザイン条件における高精度 MHD 热伝達データベースの構築

山本 義暢¹ 功刀 資彰²

¹ 山梨大学大学院医学工学総合研究部機械システム工学専攻

² 京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻

1. はじめに

核融合炉次世代ブランケット冷却材（及び増殖材）の有力候補の一つである FLiBe 溶融塩(LiF と BeF の混合溶融塩)は、1) 化学的安定性, 2) 磁気流体力学的 (MHD, Magneto-Hydro-Dynamics) 壓力損失の劇的低減, 3) 冷却材のみならず増殖材及び中性子増倍材といった多機能性を有している反面, 腐食, 伝熱劣化の問題点が指摘されている[1,2].

この FLiBe 溶融塩はプラントル数 25 程度の高プラントル数流体（プラントル数：運動量拡散と熱拡散の比, プラントル数 25 の場合, 熱拡散は運動量拡散の 1/25 であることを示す）であるため, その伝熱特性は乱流熱伝達に強く依存する. しかしその高プラントル流体における MHD 乱流熱伝達の知見は非常に少ない. 原因としては, 非定常性・3 次元性を有する強非線形・散逸力学現象であり, 理論的取り扱いは困難であること, さらに実験的手法においても磁場下を対象とするため, 電子機器を用いた高精度計測機器が適用できること, また不透明流体であるためレーザ等の光学測定や可視化が困難であることが挙げられる[3].

そこで本研究では, 近年目覚しい進展を遂げつつある計算科学的手法に着目し, 磁性効果・乱流効果・熱輸送効果を高精度に予測可能な直接数値計算手法 (DNS, Direct Numerical Simulation) の開発及びその精度の検証を実行するとともに, 実際の核融合炉デザイン条件 : 高ハルトマン数 (磁性効果), 高レイノルズ数 (乱流効果), 高プラントル数 (熱拡散効果), に適用し, 高精度 DNS データベースの構築を目指すものである.

本報においては, まずブランケットデザイン条件下[2]での DNS データベース構築に必要な計算機資源の見積を示す. そしてその結果に基づき, 文部科学省学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点の一環として実施した, 超並列計算機システム(1000 並列以上)を対象とした MHD 乱流場の直接数値計算手法開発について報告する.

2. 直接数値計算手法の概要とデータベース構築に必要な計算機資源

2.1 計算体系

図 1-(1)に核融合炉ブランケットにおける冷却流路の概念図を示す. また図 1-(2)は, ブランケット冷却流路を簡略化した計算体系である. ここに座標系は主流方向を x 軸, 壁垂直方向を y 軸, スパン方向を z 軸とした. 流れ場は, 主流方向に一定の圧力勾配($F=u_{\tau}^2/h$, u_{τ} : 壁面摩擦速度, h : チャンネル半値幅)により駆動される平行平板間流れである. 加熱条件としては, 上壁加熱の温度差一定条件 ($\Delta\theta=\theta_{\text{top}}-\theta_{\text{bottom}}=\text{一定}$, θ_{top} : 上壁温度, θ_{bottom} : 下壁温度)とし, 上・下壁温はそれぞれ一定である. また温度場はパッシブスカラーとした. 磁場は, 低温壁側(下壁側)から上壁に向かって一定磁束密度(B_y)で一様に印加した.

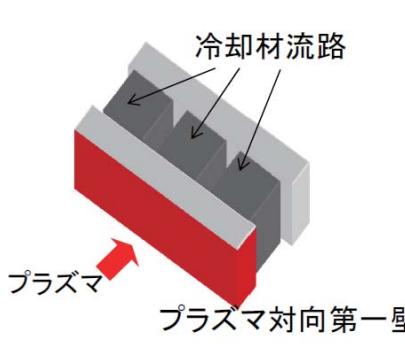


図 1-(1) プランケット冷却流路

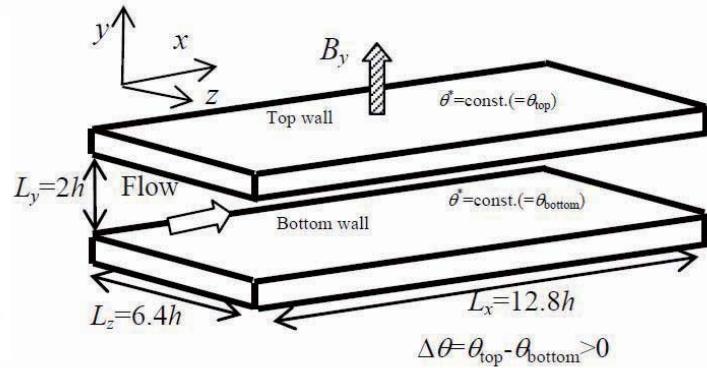


図 1-(2) プランケット冷却流路を簡略化した計算体系

2.2 基礎方程式

基礎方程式は、次式 (1) - (4) に示す、非圧縮性流体における、連続式 (2) 及び低磁気レイノルズ数の仮定に基づく電位ポテンシャル[4]を用いた Navier-Stokes 式 (3)、電位ポテンシャルのボアソン方程式 (3) 及びエネルギー方程式 (4) である。

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial t} + \frac{\partial u_i^* u_j^*}{\partial x_j} = F \delta_{il} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{p^*}{\rho} \right) + \nu \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\sigma}{\rho} \varepsilon_{ijk} \left(-\frac{\partial \phi^*}{\partial x_j} + \varepsilon_{jlm} u_l^* B_m \right) B_k, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \phi^*}{\partial x_i \partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon_{ijk} u_j^* B_k), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial t} + \frac{\partial \theta^* u_j^*}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial x_j \partial x_j}. \quad (4)$$

ここに、 $u_i (= u, v, w (i=1,2,3))$ は 主流 ($x, i=1$), 壁垂直 ($y, i=2$), スパン ($z, i=3$) 方向への速度、 t : 時間, p : 圧力, ϕ : 電位ポテンシャル, θ : 温度である。また上付き添え字*は瞬間値であることを示す。さらに δ_{ij} , ε_{ijk} ($i,j,k = 1,2,3$) はクロネッカーのデルタ, エディントンのイプシロンであり、繰り返し添え字は縮約規約に従うものとする。

2.3 離散化手法

本研究では、超並列計算機システム上の高精度 MHD 乱流場の直接数値計算手法として、擬スペクトル法及び高次精度中心差分法に基づく計算手法を検討した。

(1) 擬スペクトル法[5,6]

空間の離散化は、主流及びスパン方向にフーリエ・スペクトル法、壁垂直方向に 2 次精度の中心差分を用いた。時間進行は対流項及び磁場項に 3 次精度の Runge-Kutta 法、粘性(拡散)項に Crank-Nicolson 法、圧力勾配項に Euler 陰解法を用いた。また主流及びスパン方向のエイリアジング誤差は位相シフト法により、これを除去した。格子系は、鉛直方向速度成分($u_2=v$)の定義をその他の物理量から半格子分ずらしたスタガード格子[7]を使用した。

(2)高次精度差分法

差分法の場合においては、スタガード格子において、運動エネルギーを離散的に保存する 6 次及び 12 次精度の高次精度中心差分法[8]を適用した。なお壁垂直方向については 2 次精度中心差分法を用いている。時間進行は、Fractional step 法を適用し、圧力項に Euler 陰解法、その他の項に 3 次精度 Runge-Kutta 法を用いた。圧力ポアソン解法には、高速フーリエ変換と 3 重対角行列解法 (Tri-diagonal Matrix Algorithm, TDMA) による直接解法によりこれを解いた。

今回、高次精度中心差分法の適用を検討した背景としては、計算精度の面からは、スペクトル法が優位であることに疑いはないが、次世代ベクトル並列計算機においては、メモリバンド幅の減少に加え、ノード間通信幅の減少も予測される。従って、フルバイセクションバンド幅によりその演算性能が依存する高速フーリエ変換部分が主要計算部分となるスペクトル法においては、演算効率の低下が懸念されることにある。

2.4 境界条件

境界条件は全物理量に対し、主流及びスパン方向に周期境界条件とし、壁面で速度場に no-slip 条件、電位ポテンシャルは絶縁壁を仮定し、勾配 0、温度は一定とした。またスパン方向の平均電流は 0 とした。

2.5 プランケットデザイン条件

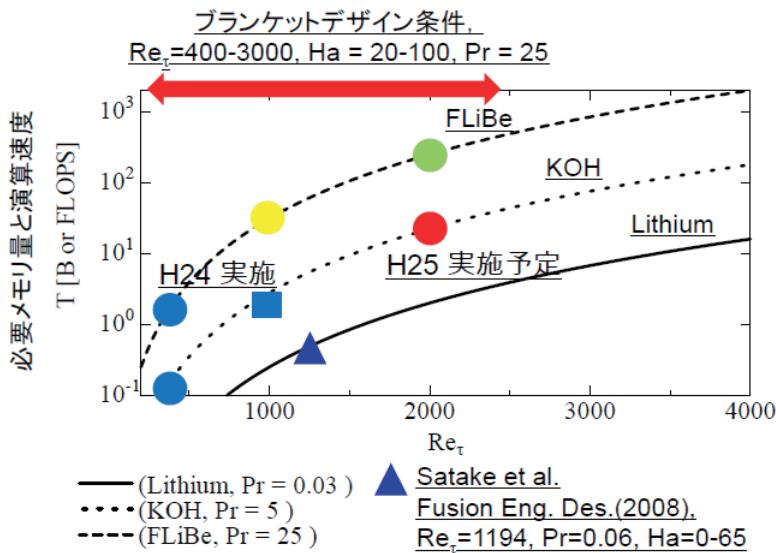


図 2 核融合炉デザイン条件下での DNS データベース構築に要する計算機資源

図 2 に FLiBe 溶融塩を用いた場合における、乱流レイノルズ数と計算資源との関係を示す。プランケットデザイン条件[9]においては、乱流レイノルズ数 ($Re_\tau = u_\tau h/v$, u_τ : 壁面度摩擦速度) は 400 – 3000 程度、チャンネル幅($2h$)に基づくハルトマン数 ($Ha=B_y 2h(\sigma/\rho v)^{1/2}$, σ : 電気伝導度, ρ : 密度) は 20 – 100 程度である(厳密にはレイノルズ数に依存する)。

また図 2 の縦軸は必要メモリ量[TB](あるいは 1 ケースあたりの計算時間を 1 ヶ月程度とした場合の必要実効演算速度 [TFLOPS])である。FLiBe 溶融塩の場合、デザイン条件下限付近の、 $Re_\tau=400$, $Pr=25$, $Ha=20$ 程度の場合に 1TB, 1TFLOPS 程度の計算機資源を要することを示している。

る。

平成 24 年度までに、文部科学省学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点の協力を得て、東北大学サイバーサイエンスセンターとの共同研究結果により、FLiBe を想定した、 $Re_\tau = 400$, $Pr = 25$, $Ha = 0, 20, 28$ のケース（図 2 の●）及び模擬流体の KOH[3]を想定した $Re_\tau = 1000$, $Pr = 5$, $Ha = 0, 28, 48$ のケース（図 2 の■）の DNS データベース構築に成功している。また平成 25 年度は、 $Re_\tau = 2000$, $Pr = 5$, $Ha = 0, 48, 96$ のケース（図 2 の○）における DNS データベース構築に取り組む予定である。これらの DNS データベースの構築により、デザイン条件下での速度場における MHD 乱流変調に関するスケーリング解析及び乱流モデル開発に必要な知見が得られるものと考えている。

しかしその一方で、熱輸送に関しては、高レイノルズ数条件下 ($Re_\tau = 1000, 2000$) においては、計算機資源の制約により、模擬流体の KOH ($Pr = 5$ 程度) に限られており、FLiBe 溶融塩を対象とした $Pr = 25$ 程度（図 2 の●）に拡張するには、実行演算速度で 10-100 TFLOPS 程度が必要となる。これに対処するには、次世代ベクトル並列計算機あるいは、スーパーコンピュータ京クラスの計算機が必要であり、これらの計算機システムへの DNS 手法の最適化が不可欠である。

3. 並列化の概要

ベクトル並列計算機上での並列化手法は、スペクトル法及び高次精度差分法とともに、前報[10]とほぼ同様である。以下にその概要をまとめる。

3.1 領域分割とノード間通信

本 DNS コードでは y 方向への 1 次元領域分割とノード間通信方法として MPI(Massage Passing Interface)を用いている。主要通信部分は、 y 方向への差分用ステンシルに関する shift 通信及び図 3 に示すように、 y 方向の TDMA 部分に伴う、 y 軸から z 軸への分割軸変更によるデータ転置の alltoall 通信である。alltoall 通信においては、グローバルメモリ (GM) 上でのリモートメモリアクセス(RMA)機能を利用した MPI_PUT による one-side 通信[11]を使用している。さらに alltoall 通信において特定ノード(及び CPU)に通信が集中することによる通信のコンフリクトを防ぐために、図 4 のようなノード間通信のスケジューリング[12]をあわせて実装している。

また前報からの改良点としては、ノード間通信のスケジューリングを差分用ステンシルに関する shift 通信部分にも適用した。

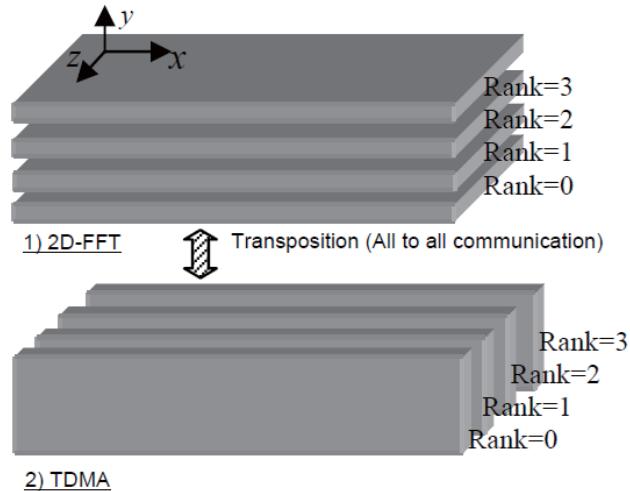


図 3 1 次元領域分割方法とデータ転置(4 並列の場合)

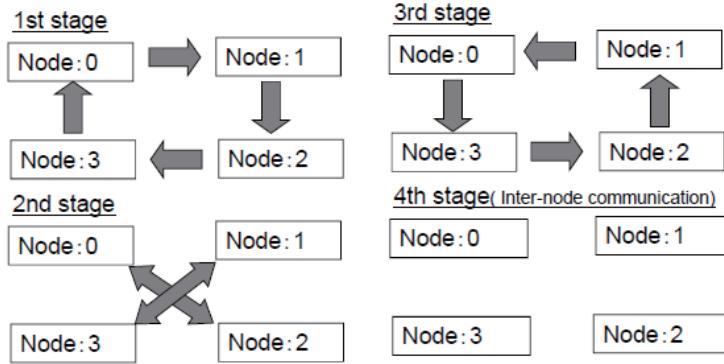


図 4 ノード間通信のスケジューリング(4 ノードの場合)

4. 高次精度差分法におけるベクトルチューニング

今回適用した高次精度差分法においては、運動エネルギーの保存性を確保するために 1 点あたりのステンシルは、6 次精度の場合 11 点、12 次精度の場合に 23 点を要する。これに対処するために、本研究ではリスト配列を適用した。さらに 12 次精度差分法の場合は、対流項等の計算を複数ループに分割し、中間配列を共有することにより、省メモリ化を行った。

その結果、必要メモリ量は、6 次精度及び 12 次精度の両手法において、2 次精度の場合と同程度であり、スペクトル法と比較した場合は、半分以下に抑制することができた。また高次精度差分法の演算量は、12 次精度の場合、こちらもスペクトル法の約半分程度であった。

一方、高次精度差分法の演算部分のベクトル化率は 99.7% 程度を確保しているものの、リスト配列の使用によりバンクコンフリクトが頻出し、大幅な性能劣化をもたらした。

そこでこれに対処するために、配列領域内においては、リスト配列を廃止し、単純な差分式に修正した。リスト配列が必要となる周期境界部分においては、expand 指示行、unroll 指示行でループ展開を行い、高速化を図った。図 5 にこのプログラム例を示す。

```

1529: |+---->      do k=nz_s, nz_e
1530: ||V--->      do j=1, ny
1531: |||      !cdir expand=6
1532: ||||*--->      do i=1, 6
                    (省略) ← リスト配列を使用
1563: |+V*--->      enddo ; enddo ; enddo

1567: |+---->      do k=nz_s, nz_e
1568: ||+---->      do j=1, ny
1569: |||V--->      do i=7, nx-5 ← 配列外参照が発生しないように
1571: ||||      dudx=( coef1_x6*u(i+5, j , k )
1572: ||||      & +coef1_x5*u(i+4, j , k )
1573: ||||      & +coef1_x4*u(i+3, j , k )
1574: ||||      & +coef1_x3*u(i+2, j , k )
1575: ||||      & +coef1_x2*u(i+1, j , k )
1576: ||||      & +coef1_x1*u(i , j , k )
1577: ||||      & -coef1_x1*u(i-1, j , k )
1578: ||||      & -coef1_x2*u(i-2, j , k )
1579: ||||      & -coef1_x3*u(i-3, j , k )
1580: ||||      & -coef1_x4*u(i-4, j , k ) ← リストベクトルを廃止

```

```

1581: ||||| & -coef1_x5*u(i-5,j_,k_)|
1582: ||||| & -coef1_x6*u(i-6,j_,k_)|
1584: ||||| dvdy=( coef1_y6*v(i_,jp5(j),k_)
1585: ||||| & +coef1_y5*v(i_,jp4(j),k_)
1586: ||||| & +coef1_y4*v(i_,jp3(j),k_)
1587: ||||| & +coef1_y3*v(i_,jp2(j),k_)
1588: ||||| & +coef1_y2*v(i_,jp1(j),k_)
1589: ||||| & +coef1_y1*v(i_,j_,k_)
1590: ||||| & -coef1_y1*v(i_,jm1(j),k_)
1591: ||||| & -coef1_y2*v(i_,jm2(j),k_)
1592: ||||| & -coef1_y3*v(i_,jm3(j),k_)
1593: ||||| & -coef1_y4*v(i_,jm4(j),k_)
1594: ||||| & -coef1_y5*v(i_,jm5(j),k_)
1595: ||||| & -coef1_y6*v(i_,jm6(j),k_) )
1597: ||||| dwdz=( w(i,j,k)-w(i,j,k-1) )/dz(k)
1598: ||||| div(i,j,k)=( dudx+dvdy+dwdz )/dt1
1600: ||++V--- enddo ; enddo ; enddo

1604: |+----> do k=nz_s,nz_e
1605: ||V---> do j=1,ny
1606: ||| !cdir unroll=5
1607: |||*---> do i=nx-4,nx
1638: |+V*--- (省略) ← リスト配列を使用
                    enddo ; enddo ; enddo

```

図 5 高次精度差分法におけるベクトルチューニング例

5. SX-9 上での性能評価

今回、改良した DNS コードを SX-9 に適用し、その性能を検討した。その際東北大大学サイバーサイエンスセンターの協力を得て、16 ノード/256 並列の環境で実行することができた。以下にその結果を報告する。

表 1 SX-9/256CPU での演算性能

	計算機	格子数 (x,y,z)	実効演算速度 [TFLOPS]	実行効率 [%]
スペクトル法	SX-9/256	2000, 2032, 1920	6.5	24.81
			7.7	29.53
Iwamoto et al.[13]	ES/ 2048	2304, 1025, 2048	5.5	33.57
Ishihara et al.[14]	ES2/512	2048, 1536, 2048	6.0	11.54

表 1 に $Re_\tau = 2000$ の計算条件下で、SX-9/256CPU を用いた場合の演算性能を示す。スペクトル法において 6.5 TFLOPS、12 次精度差分法において 7.7 TFLOPS の実行演算速度が得られており、12 次精度中心差分法の場合の実行効率は理論性能の約 30%に達している。これまでに報告されているベクトル並列計算機におけるチャンネル乱流場の DNS の演算速度は、初代地球シミュレータ

(ES)2048 並列上での 5.5 TFLOPS[13], そして 2 代目地球シミュレータ(ES2)512 並列上での 6.0 TFLOPS[14]があるが, 今回の演算速度は, スペクトル法, 12 次精度中心差分法とともにこれらを上回っている(但し、地球シミュレータでの計算結果は、壁垂直方向の離散化手法等が異なっているため単純な比較はできないことに注意する必要がある).

6. 地球シミュレータ上での性能評価

東北大学サイバーサイエンスセンターの計算機システムにおいては, 最大並列数が 256 であり, 目標である 10-100 TFLOPS の実行演算速度を得るために不可欠な 1000 並列を超える環境での性能評価は不可能である. そこで海洋研究開発機構の地球シミュレータ(ES2)上において, スペクトル法による DNS コードを適用しその性能評価を行った. なお ES2 の CPU は, 東北大学と同じ SX-9 (CPU あたり, 102.3 GFLOPS) が用いられているものの, ノード内 8 CPU (メモリ 125GB), またノード間接続は, 東北大学のシステムが单段クロスバ構成なのに対し, ES2 は 2 段の Fat-Tree 構成となっている.

図 6 にスペクトル法における DNS コードの ES2 及び SX-9 上での演算速度を示す. 図中の original は, 3 章で述べた並列化手法において, shift 通信部分にノード間スケジューリングを用いない場合であり, new の方は, このスケジューリングを適用したケースを意味する.

東北大学サイバーサイエンスセンターの SX-9/256 並列上では, shift 通信部分のスケジューリングの影響はさほど目立たないものの, ES2 の 768 並列及び 1024 並列時においては大きな改善が見られた. 具体的には, ES2/1024 並列時に実行演算速度 21TFLOPS, 実行効率 20.1%の演算性能が得られている.

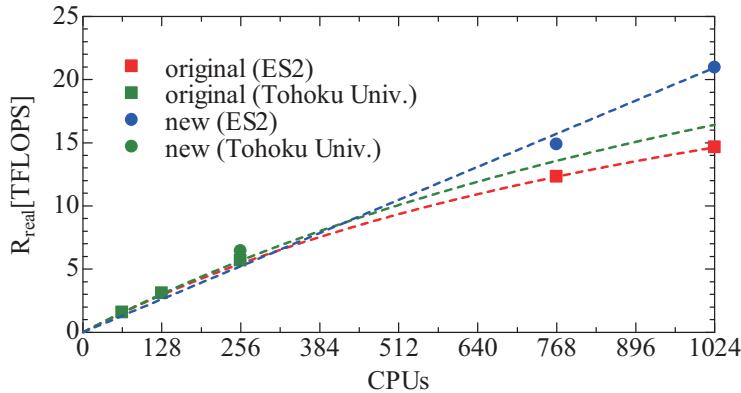


図 6 開発コードの性能評価(実効演算速度)

7. 高次精度差分法の計算精度の検討

最後に 6 次及び 12 次精度差分法を用いて, 高レイノルズ数乱流場の DNS を実行し, その精度についてスペクトル法との比較を行った. 計算条件は, 高レイノルズ数乱流場特有の大規模構造の出現が確認されている乱流レイノルズ数 1000 の場合を対象とした. 格子数は, (x,y,z) 方向にそれぞれ, $(720, 512, 720)$ とした. この場合の格子分解能はスペクトル法における DNS において最低必要分解能である, $\Delta x^+ = 18$, $\Delta z^+ = 9$ 程度となる(上付き添え字+は摩擦速度と動粘性係数により規格化した値であることを示す). また比較のために, 及び 2 次精度中心差分法を用いた計算も行つ

た。

図 7 に平均速度及び乱流強度の比較を示す。2 次精度中心差分法 (2nd FDM) の場合は、格子解像度不足の影響による平均速度の減少が見られるが、6 次精度 (6th FDM) 及び 12 次精度 (12th FDM) の場合は、スペクトル法の結果と良好に一致する。また乱流強度の比較においても、2nd FDM の場合は、乱れの過小評価が見られるが、6th FDM 及び 12th FDM の場合は、スペクトル法の結果と定量的に一致する。

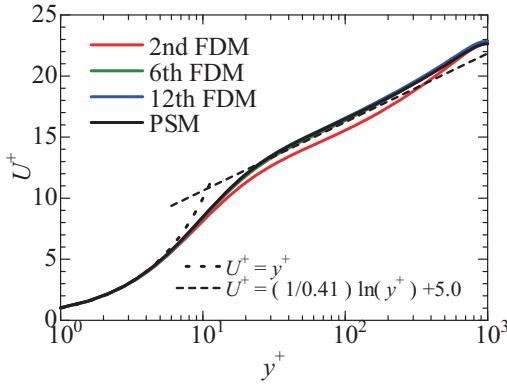


図 7-1 平均速度分布の比較

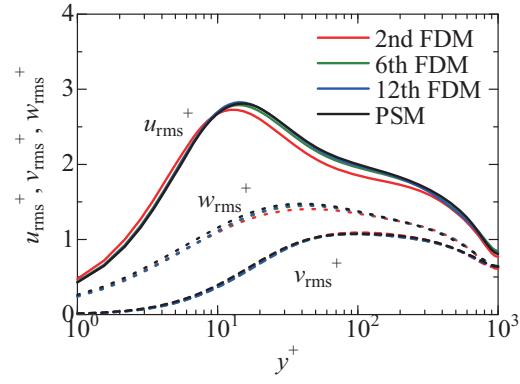


図 7-2 亂流強度分布の比較

図 7 高次精度差分法の精度検証

図 8 に主流方向変動速度の主流方向スペクトルに波数をかけたスペクトル(Pre-multiplied spectrum, PMS)のコンタを示す。ここに縦軸は、波長、横軸は、壁垂直方向高さを示し、両対数でプロットされている。実験的手法においては、この主流方向変動速度の主流方向スペクトルにおいて、大規模構造の影響を議論することが多く、この物理量の再現性は、非常に重要である。いずれのケースにおいても、壁近傍の低波長部分($y^+=15, \lambda_x^+=1000$ 程度)の乱れのピーク部分はよく一致している。しかし、 $y^+ > 100, \lambda_x^+=10000$ 程度の大規模構造の領域においては、2nd FDM の場合は、スペクトル法の結果とのずれが確認できる。6th FDM の場合においては、 $k_x E_{uu}/u_\tau = 0.6$ (外側から 3 本目)のラインが若干ずれているものの分布型はよく一致している。一方、12th FDM の場合においては、全ラインにおいて、スペクトル法のケースと定量的な一致が確認できる。

また 12 次精度中心差分法とスペクトル法とのコスト比較においては、SX-9/32 並列を使用した場合、1 タイムステップの時間積分に要する時間が、1/3、メモリ量が 1/2 程度となっており、大規模構造を対象とした高レイノルズ数乱流場の DNS 解析において、高次精度差分法(特に 12 次精度中心差分法)の優位性が確認できた。

8. おわりに

平成 24 年度文部科学省学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点の一環として、超並列計算機システム(1000 並列以上)を対象とした MHD 乱流場の直接数値計算手法開発を実施した。

その結果、地球シミュレータ/1024 並列時に、ベクトル化率 99.8%，実行効率 20%，実行演算速度 21 TFLIOPS を達成した。

さらにノード間通信コストの削減を目的として、高次精度差分法による直接数値計算手法の開

発を併せて実施した。その結果、SX-9/256 並列時に、ベクトル化率 99.6% 実行演算効 30%，実行演算速度 7.7 TFLOPS を達成した。高次精度差分法の場合は、スペクトル法と比較し、平均量及び乱流統計量さらには、大規模構造の再現性を確保した上で、演算速度で 3 倍、メモリコストを半分に圧縮することが可能となった。

以上により、1000 並列を超える環境で、世界最速規模の高効率演算が可能となり、本手法による核融合炉プランケットデザイン条件下の熱輸送特性の理解が大幅に進展することが期待できる。

平成 25 年度は本開発コードを用いて、核融合炉プランケットデザイン条件を網羅したレイノルズ数、ハルトマン数における DNS データベースを構築し、MHD 乱流変調に関する総合的まとめ及び乱流モデルの評価を行う予定である。

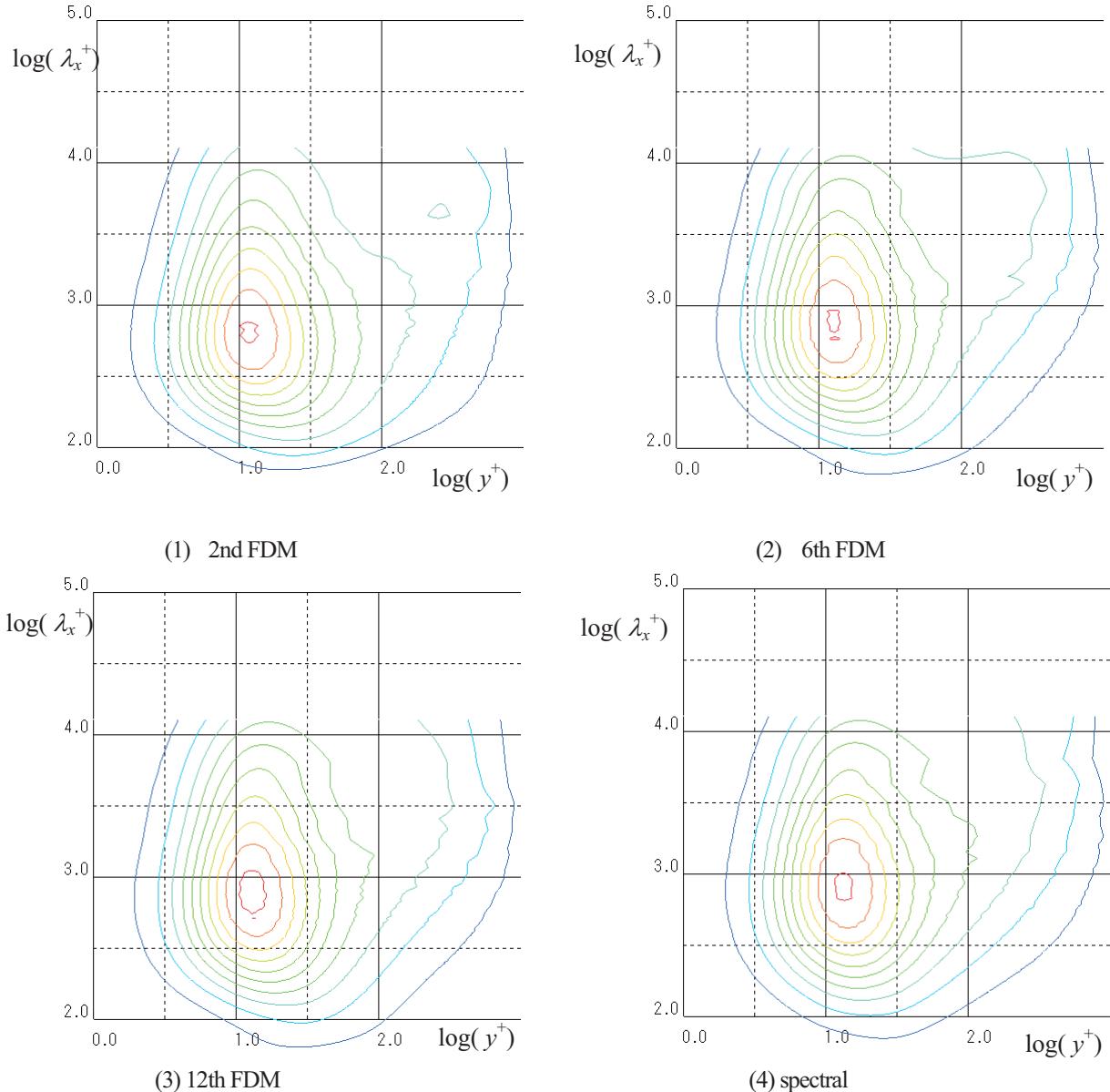


図8 PMS のコンタ， $k_x E_{uu} / u_\tau = 0.2$ (blue), 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0(red)

謝辞

本計算のベクトルチューニング・高速化・およびその性能評価において、東北大学サイバーサイエンスセンター関係各位に有益なご指導とご協力をいただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- [1] A. Sagara, O. Motojima, K. Watanabe, S. Imagawa, H. Yamanishi, O. Mitarai, T. Sato, H. Chikaraishi and FFHR Group, Blanket and Divertor Design for Force Free Helical Reactor (FFHR), Fusion Engineering and Design, 29 III, 51(1995).
- [2] C. Wong, S. Malang, M. Sawan, I. Sviatoslavsky, E. Mogahed, S. Smolentsev, S. Majumdar, B. Merrill, R. Mattas, M. Friend, J. Bolin, and S. Sharafat, Molten salt self-cooled solid first wall and blanket design based on advanced ferritic steel, Fusion Eng. Des. 72, 245(2004).
- [3] J. Takeuchi, S. Stake, N B. Morley, T. Kunugi, T. Yokomine, M. Abdou, Experimental study of MHD effects on turbulent flow of Flibe simulant fluid in circular pipe, Fusion Eng. Des. 83 (2008) 1082.
- [4] Y. Simomura, "Large eddy simulation of magnetohydrodynamic turbulent channel flows under a uniform magnetic field", Phys. Fluids A 3, 3098(1991).
- [5] Y. Yamamoto and T. Kunugi, Discussion on heat transfer correlation in turbulent channel flow imposed wall-normal magnetic field, Fusion Engineering and Design 86 (2011) 2886.
- [6] Y. Yamamoto and T. Kunugi, Direct numerical simulation of a high-Froude number turbulent open-channel flow, Physics of Fluids(2011), Vol.23, 12510810.
- [7] S. Satake, T. Kunugi, K. Takase, and Y. Ose, Direct numerical simulation of turbulent flow under a uniform magnetic field for large-scale structures at high Reynolds number, Phys. Fluids 18, 125106(2006).
- [8] Y. Morinishi, T. Lund, O. Vasilyev, and P. J. Moin, Fully conservative higher order finite difference schemes for incompressible flow J. Computational Physics 143(1998) 90.
- [9] S. Smolentsev, 核融合ブランケットにおける MHD 乱流および自然対流, J. Plasma Fusion Res. Vol.85, No.8 (2009), pp.556-557.
- [10] Y. Yamamoto and T. Kunugi, Direct Numerical Simulation of MHD Turbulent Flows with High-Pr Heat Transfer, Progress in Nuclear Science and Technology 2 (2011), 550.
- [11] 大泉健治, 江川隆輔, 伊藤英一, 岡部公起, 小林広明, スーパーコンピュータシステム SX-9 の紹介と性能評価, SENAC, Vol. 42-1, (2009).
- [12] 小林広明, 滝沢寛之, 小久保達信, 岡部公起, 伊藤英一, 小林義昭, 浅見暁, 小林一夫, 後藤記一, 片海健亮, 深田大輔, HPC チャレンジでの SX システムの性能評価, SENAC Vol.38 No.1, (2005-1).
- [13] K. Iwamoto, N. Kasagi, and Y. Suzuki, Direct numerical simulation of turbulent channel flow at $Re_\tau = 2320$, Proc. 6th Symp. Smart Control of Turbulence, Tokyo, March 6-9, 2005.
- [14] 石原卓, 岩本薰, 田村哲郎, 川口靖夫, 乱流の世界最大規模直接数値計算とモデリングによる応用計算, 平成 24 年度 地球シミュレータ利用報告会発表資料 (2013) , <http://www.jamstec.go.jp/esc/projects/fy2012/23-ishihara.html>

[資料]

高機能数値計算・可視化機能ソフト

MATLAB の基本的な使い方

秋田県立大学 陳 国躍

東北大学情報部情報基盤課 共同利用支援係

概要

MATLAB は、高機能な数値計算機能と多彩な可視化機能を備えた技術計算ソフトウェアです。科学的、工学的分野の様々な数値計算(特に行列演算)、データ解析、シミュレーション、およびビジュアライゼーションのための統合環境を提供しています。また、MATLAB は高性能な数値計算機能を持つばかりでなく、多彩な可視化機能を備えており、計算結果を簡単にグラフに表示することができます。

今回は、MATLAB の基本的な使い方を紹介します。

キーワード：高機能な数値計算、行列演算、可視化機能、グラフ処理

1 はじめに

MATLAB は、専門のプログラマやコンピュータに詳しい人だけではなく、一般の利用者にも高次の機能が簡単に使えるように作られています。このため、次にあげるような特徴をもっています。

- MATLAB という名称が “matrix laboratory” の略称というだけあって、特に、行列とベクトルの計算は、数学的な記述に近い表現で簡単に演算できます。このため、Fortran、Basic、C といった言語でプログラムを記述するのに要する時間と比べ、MATLAB は非常に少ない時間で多くの問題を解くことが可能となります。特に、大規模な行列計算は、MATLAB が本来得意とするところです。
- 数値実験の結果を 2 次元および 3 次元図面で簡単に表示できると同時に、ファイル出力や印刷出力ができます。ファイル出力した図面を文書編集清書プログラム TeX の入力とすることができます。
- 対話型の実行により、モデルの変数やパラメータを種々変更して数値実験ができます。
- 使い方については、必要な時点での案内情報を画面に出すことによって、極力手引書に頼らずにすむよう help コマンドによるオンラインマニュアルが完備しています。
- ツールボックスと呼ばれる特定分野の解法を集めたジユールを組み込むことにより、容易に機能拡張を行うことができ、専門的な利用にも柔軟に対応できます。

MATLAB はコアモジュールの MATLAB を中心として、ブロックダイアグラムシミュレータの Simulink、および Toolbox と呼ばれるアプリケーションモジュールから構成されています。本センターでは次の Toolbox を使用できます。

- * Communications System Toolbox : 通信システムの設計、解析
- * Control System Toolbox : 線形制御システムの設計、解析
- * Curve Fitting Toolbox : 数式近似ツール
- * DSP System Toolbox : 信号処理システムの設計とシミュレーション
- * Fixed-Point Toolbox : 固定小数点データタイプと演算機能を提供
- * Fuzzy Logic Toolbox : ファジー理論に基づくシステムの設計、解析
- * Image Processing Toolbox : 画像処理、解析、可視化およびアルゴリズム開発のためのグラフィカル ツール
- * MATLAB Coder : MATLAB コードからスタンドアロンの C コードと C++ コードを生成
- * MATLAB Compiler : MATLAB アプリケーションを実行ファイル、共有ライブラリとして生成
- * Model Predictive Control Toolbox : 予測制御システムの設計、解析
- * Neural Network Toolbox : ニューラルネットワーク理論を用いた複雑非線形事象のモデリング
- * Optimization Toolbox : 標準的および大規模な最適化に広く使用されるアルゴリズムを提供
- * Partial Differential Equation Toolbox : 偏微分方程式の解法ツール
- * Robust Control Toolbox : ロバスト性の評価、解析
- * Signal Processing Toolbox : アナログおよびデジタル信号処理 (DSP) のアルゴリズムを提供
- * Simulink Coder : Simulink ダイアグラム、および MATLAB 関数から C コードと C++ コードを生成
- * Simulink Control Design : Simulink でモデル化された制御システムの設計と解析
- * Simulink Design Optimization : Simulink でモデル化された制御システムの数値最適化
- * Simulink Fixed Point : Simulink プロダクトファミリで固定小数点機能が利用可能
- * Simulink Verification and Validation : Simulink でモデル化された制御システムの確認、検証およびテスト
- * Statistics Toolbox : データの整理、解析、およびモデリングのためのアルゴリズムとツールを提供
- * Symbolic Math Toolbox : 数式処理と可変精度演算を行うためのツールを提供
- * System Identification Toolbox : 測定された入出力データから動的システムの数学モデルを構築
- * Wavelet Toolbox : ウエーブレット変換を用いた画像処理、解析、可視化ツール

今回、MATLAB の入門として、その基本的な利用法と使用例を幾つか紹介します。Simulink と Toolbox については、次の機会に紹介することにいたします。

2 MATLAB を使うために

2.1 基本的な環境設定

MATLAB は、サイバーサイエンスセンターの gen という名の並列コンピュータにインストールされています。ここでは、利用者の方が、自分の使用しているワークステーションあるいは X 端末から gen へリモートログインして利用することを想定して話を進めます。具体的な例を下に示します。ssh コマンドの X11Forwarding 機能を有効にして、gen に接続します。

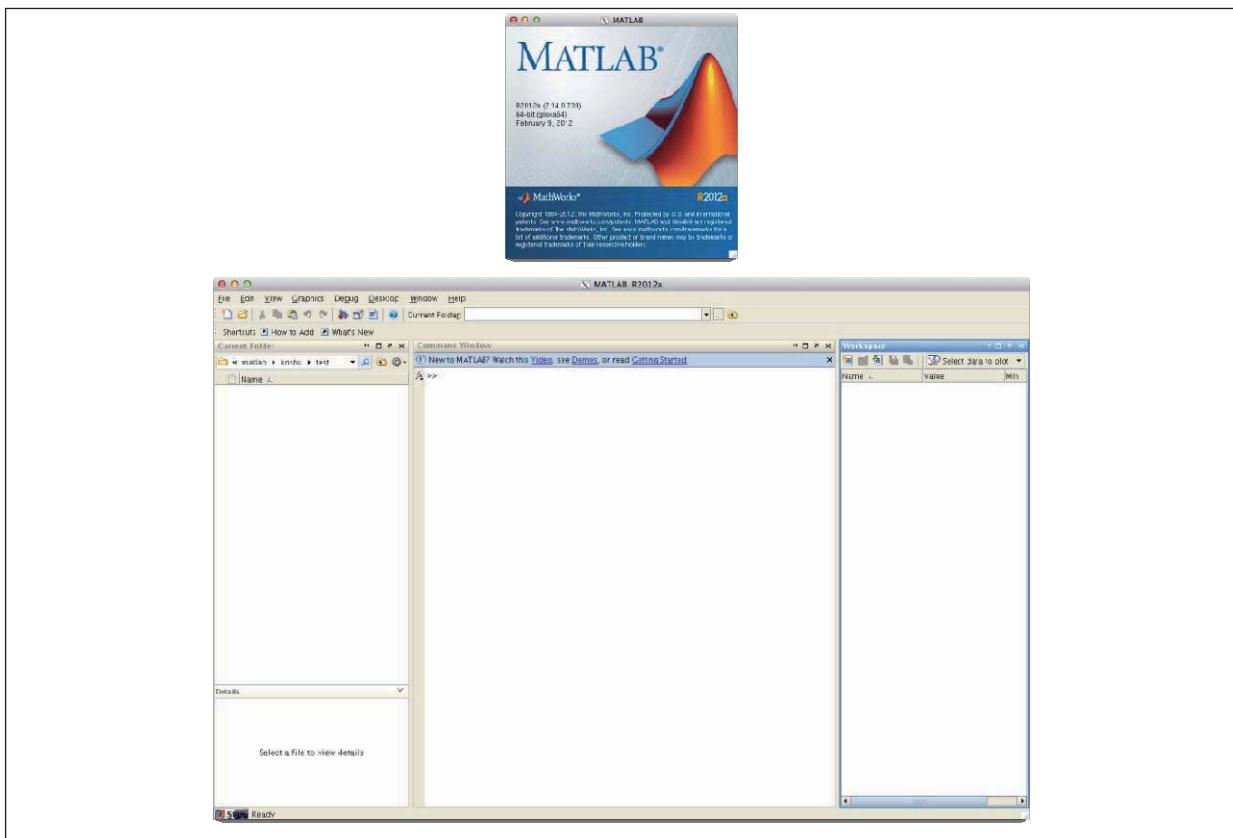
```
% ssh -X 利用者番号@gen.isc.tohoku.ac.jp <R>          注：遠隔ホスト gen へ接続
The authenticity of host 'gen.isc.tohoku.ac.jp (xx.xx.xx.xx)' can't be established. RSA key fingerprint is
fd:c2:9a:11:xx:xx:xx:xx:xx:xx:xx:cd:53:9f.
Are you sure you want to continue connecting (yes/no)? yes      注：初回接続時ののみの問合せ
Warning: Permanently added 'gen.isc.tohoku.ac.jp,xx.xx.xx.xx' (RSA) to the list of known hosts.

利用者番号@gen.isc.tohoku.ac.jp's password: パスワード      注：パスワードを入力
Last login: Mon Apr 1 09:26:11 2012 from yyyy.yyy.tohoku.ac.jp 4月 1日 13:29:59 JST 2012
[利用者番号@gen ~]$
```

注：**<R>**はリターン(改行)の意味で、以下でも同じ意味を表します

2.2 MATLAB の起動と終了

MATLAB の起動には、matlab というコマンドを使用します。スプラッシュ画面の表示の後、GUI ウィンドウが表示されます。



スプラッシュ画面が表示されない場合は、ローカル端末で X 環境が使用できることと、ssh コマンドを再確認するようにしてください。ここで、>>は MATLAB の入力促進記号(プロンプト)です。例えば、MATLAB を終了したい場合には、quit あるいは exit を入力すれば終了します。このような quit や exitなどを、コマンドといいます。

3 数値計算

3.1 基本演算

数値計算の場合は、MATLAB 上でそのまま入力して簡単に演算できます。利用可能な演算子と関数を付録に記します。以下では、式(1) (2)を利用して、計算方法を示します。

$$\frac{5(3+4)}{2} \quad (1)$$

```
>> 5*(3+4)/2      <R>
ans =
    17.5000
>> x = 3,     y = 2,     z = 1.5    <R>
X =
    3
y =
    2
Z =
    1.5000
>> (x^2+y^5)/sin(z)  <R>
ans =
    41.1030
```

$$\frac{(x^2 + y^5)}{\sin(z)} \quad (\text{初期値 } x = 3, y = 2, z = 1.5) \quad (2)$$

3.2 ベクトル・行列の演算

ベクトル・行列の演算が、数学的な記述に近い形で行えるのが、MATLAB の大きな特徴の一つです。そこで、以下では、式(3)に示す行列演算を、MATLAB 上で実現する方法について紹介します。

$$AX = B \quad \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 5 & 1.2 & 3.4 \\ 1.5 & 4 & 5.1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.1 \\ 4 \\ 5.8 \end{pmatrix} \quad (3)$$

以下に示すように、MATLABは行列の左除算(\ : バックスラッシュ)を提供しています。Aが正方形ならば、解XはA\B(方法2)で求めたものとinv(A)*B(方法1)で求めたものとほぼ同じですが計算方法は異なります。Aがn行n列でBがn個の列ベクトルかn個の列行列ならば、X = A\Bは方程式AX = Bをガウス消去で計算した解になります。Aのスケーリングが悪かったり、特異点に近かったりすると警告メッセージが表示されます。

Aがm行n列(m≠n)でBがm個の列ベクトルかm個の列行列ならば、X = A\Bは未知数の数と方程式の数が一致しない方程式AX = Bの最小二乗的な解になります。Aのランクkはピボットを行ったQR分解から求められます。解Xは、k個のゼロでない成分を持ちます。k < nであれば、X = A\Bは通常、最小残差ノルム $\|AX - B\|$ による最小二乗解であるpinv(A)*Bと同じ解にはなりません。

```

>> C=[6.1 4 5.8]      <R>          注 : ベクトルの入力 (方法 1)
C =
  6.1000      4.0000      5.8000
>> B = C'           <R>          注 : ' は転置の演算子
B =
  6.1000
  4.0000
  5.8000
>> B2 = [ 6.1      <R>
4                  <R>
5.8]              <R>          注 : ベクトルの入力 (方法 2)
B2 =
  6.1000
  4.0000
  5.8000
>> A=[1 3 2; 5 1.2 3.4; 1.5 4 5.1]    注 : 行列の入力 (方法 1)
A =
  1.0000      3.0000      2.0000
  5.0000      1.2000      3.4000
  1.5000      4.0000      5.1000
>> A1=[1 3 2; 5 1.2 3.4; 1.5 4 5.1]    注 : 行列の入力 (方法 1)
                                              注 : 文の終わりに ; を入れるとその値は画面に現れない
>> A2=[1 3 2    <R>
5 1.2 3.4     <R>
1.5 4 5.1]    <R>          注 : 行列の入力 (方法 2)
A2 =
  1.0000      3.0000      2.0000
  5.0000      1.2000      3.4000
  1.5000      4.0000      5.1000
>> eig(A)       <R>          注 : 行列 A の固有値
ans =
  9.0284
 -2.9432
  1.2148

>> X = inv(A)*B <R>          注 : ベクトル X の解(方法 1)
X =          (この方法は、通常良い方法ではありませんので、ご注意！)
  0.9166
  2.4089
 -1.0217
>> X = A \ B     <R>          注 : ベクトル X の解 (方法 2)
X =
  0.9166
  2.4089
 -1.0217
>> max(X)        <R>          注 : ベクトル X の要素の最大値
ans =
  2.4089
>> mean(X)       <R>          注 : ベクトル X の要素の平均値
ans =
  0.7679
>> n=length(X)   <R>          注 : ベクトル X の要素の長さ
n =
  3
>> x2 = X(2)     <R>          注 : ベクトル X の 2 番目の要素
x2 =
  2.4089

```

3.3 複素数

MATLABでは、複素数をすべての演算や関数において使用することができます。虚数表現としては、 i と j のどちらも許容されます。一方、 i や j を実変数として利用することも可能です。どちらで利用しているのかは、表現方法やそれまでの流れなどからMATLABが自動的に解釈しますので、それらを混同しないように注意する必要があります。

以下では、MATLAB上で複素数演算の例を式(4)(5)を用いて示します。

$$Z1 = 3 + 4i \quad Z2 = 1 - 7i \quad (4)$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} + i \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 3 & -2 \\ -4 & 8 \end{pmatrix} + i \begin{pmatrix} 7 & -3 \\ 1 & -2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

```
>> z1 = 3+4*i
z1 =
    3.0000 + 4.0000i
>> z2 = 1-7*j
z2 =
    1.0000 - 7.0000i
>> z1+z2
ans =
    4.0000 - 3.0000i
>> z1*z2
ans =
    31.0000 - 17.0000i
>> z1 / z2
ans =
    -0.5000 + 0.5000i

>> A = [ 1 2 ; 3 4 ] + i*[ 5 6 ; 7 8 ]
注 : 複素数行列の入力(方法 1)
A =
    1.0000 + 5.0000i  2.0000 + 6.0000i
    3.0000 + 7.0000i  4.0000 + 8.0000i
>> B = [ 3+7i  -2-3i ;  -4+1j  8-2j ]
注 : 複素数行列の入力(方法 1)
B =
    3.0000 + 7.0000i  -2.0000 - 3.0000i
    -4.0000 + 1.0000i  8.0000 - 2.0000i
>> eig(A*B)
注 : 複素数行列 A*B の固有値
ans =
    -0.7101 - 4.5909i
    17.7101 + 37.5909i
>> real(eig(A*B))
注 : 固有値の実数部
ans =
    -0.7101
    17.7101
>> imag(eig(A*B))
注 : 固有値の虚数部
ans =
    -4.5909
    37.5909
>> abs(eig(A*B))
注 : 固有値の絶対値
ans =
    4.6455
    41.5539
```

4 ファイルとデータの入出力

MATLABでは、`save`と`load`というコマンドによって、MATLABで使用していたときの変数をディスク上に書き込んだり、読み込んだりすることができます。以下では、`load`コマンドによりファイルから MATLAB上へASCIIデータを読み込む方法を説明します。いま、データファイルは`sam1.dat`, `sam2.dat`, `sam3.dat`とします。

1) `sam1.dat`というファイルの内容(次のデータが一行に書かれていることに注意) :

0.0 0.3 0.95 -0.4 0.4 0.2 -0.3 0.0 0.3 0.0 -0.2 0.1 0.0 0.0 0.0 0.0

2) `sam2.dat`というファイルの内容(次のデータが7行に書かれていることに注意) :

0
3
9
5
-4
2
-3

3) `sam3.dat`というファイルの内容(5行3列のデータです) :

1.1 1.2 1.3
2.1 2.2 2.3
3.1 3.2 3.3
4.1 4.2 4.2
5.1 5.2 5.3

以上3つのデータファイルについて、MATLAB上へコマンド`load`によりASCIIデータを読み込んだ結果を次頁に示します。

また、MATLABでもC言語のように、`fread`と`fscanf`コマンドにより、ファイルからバイナリデータや書式付きデータを読み込むことができます。逆に、ファイルへバイナリデータや書式付きデータを書き込む場合には、`fwrite`と`fscanf`コマンドを用います。詳しい使用法については、マニュアルを参照してください。

```

>> load sam1.dat
>> sam1
sam1 =
    Columns 1 through 7
        0    0.3000    0.9500   -0.4000    0.4000    0.2000   -0.3000
    Columns 8 through 14
        0    0.3000         0   -0.2000    0.1000         0         0
    Columns 15 through 16
        0         0
>>load sam2.dat
>>sam2
sam2 =
    0
    3
    9
    5
   -4
    2
   -3
    0
>> load sam3.dat
>> sam3
sam3 =
    1.1000    1.2000    1.3000
    2.1000    2.2000    2.3000
    3.1000    3.2000    3.3000
    4.1000    4.2000    4.3000
    5.1000    5.2000    5.3000

```

5 スクリプトファイル

MATLAB上で、制御コマンドを一行一行入力するのは、かなり面倒な作業です。そこで、シェルスクリプトやバッチファイルのように、予め実行したいコマンド群をまとめてファイルに書いておき、まとめて実行させることができます。環境変数MATLABPATHで指定されたディレクトリに、.mという拡張子を持つファイルを作成すると、そのファイルはMATLABのスクリプトファイルとみなされます。

sample.m というファイルの内容が以下のようであるとします。

```

load sam1.dat
sam1
load sam2.dat
sam2
load sam3.dat
sam3

```

MATLAB上では “>>sample <R>” と入力すると、前節に示したものと同じ結果になります。

6 グラフィックス表示機能

6.1 簡単なグラフィックスの表示

MATLAB は、数値計算の他にも、データの可視化に関して優れた機能を持っています。座標系などを指定しない場合は、自動的に見易い範囲で表示してくれます。もちろん、表示方法を個人の好みにより細かく指定することも可能です。

以下では、母音 /a/ のデータ（サンプリング周波数 16kHz, 60ms）を speech.dat というデータファイルを使って、時間波形とその周波数特性（スペクトル）を描く例を示します。

```
>> load speech.dat
>> plot(speech)
>> close
>> freq = 20*log10(abs(fft(speech)))
>> plot(freq(1:length(speech)/2))
```

plot, close, log10, abs, fft, length などコマンドの機能については、参考書あるいはオンラインマニュアルを参照してください。

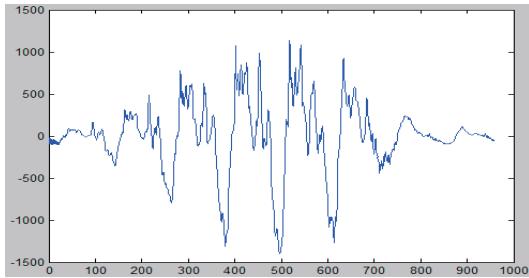


図 1：母音/a/の音声データの時間波形

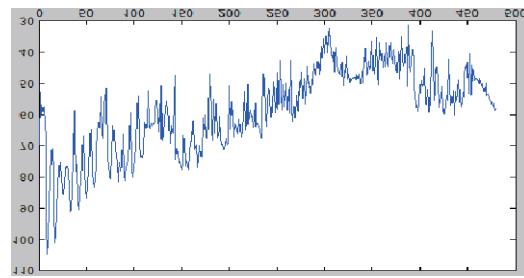


図 2：母音/a/の音声データの周波数特性

次の例は、図 2 に示したような周波数特性を、図 3 に示したように AR モデルにより、その周波数特性の包絡線を計算して表示させたものです。（なお、コマンド lpc と freqz は System Identification Toolbox の機能です）。このような仕事も大変簡単にできてしまうことがお分かりいただけるでしょう。

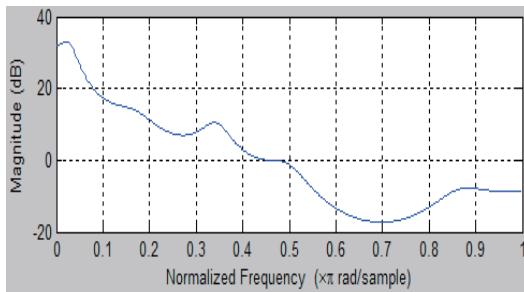


図 3：図 2 に示した周波数特性の包絡線

```
load speech.dat
a = lpc(speech, 12);
freqz(1, a);
```

6.2 カラーグラフィックス

MATLAB では、カラーグラフィックスの表示も容易に行えます。plot(x,y,'linetype')は、ベクトル x を x 軸、ベクトル y を y 軸とした曲線を'linetype'で指定されたタイプの線種でプロットします。X を省

略場合には、y のインデックスが x 軸に対応することになります。'linetype'は、線のタイプと色（表 1）を指定します。'linetype'を省略した場合、自動的に青色の実線を使用します。同じ図面上で異なるラインタイプと同じ色を指定することもできます。図 4 にその例を示します。

表 1 : ラインのタイプと色

シンボル	ラインタイプ	シンボル	ラインタイプ	シンボル	色
-	実線	.	点	b	青
:	点線	o	円	g	緑
--	鎖線	x	x 印	r	赤
---	破線	+	プラス記号	c	シアン
(none)	線なし	*	星印	m	マゼンタ
		s	正方形	y	黄
		d	ダイアモンド	w	白
		v	三角形（上向き）	k	黒
		^	三角形（下向き）		
		<	三角形（左向き）		
		>	三角形（右向き）		
		p	五角形		
		h	六角形		

6.3 グラフィックスの出力

作成した図面を出力するには、print というコマンドを使用します。 利用者が自分のところにあるプリンタから出力する場合には、以下に示すオプションを利用して、一度ポストスクリプトファイルなどへ出力し、そのファイルを自分のところに sftp で送ることになります。

```
print [ -option ] filename
      option:   dps: 白黒 ps ファイル          dpssc: カラー ps ファイル
                deps: 白黒 eps ファイル          depssc: カラー eps ファイル
```

これ以外のデバイスも指定可能ですので、マニュアルを参照してください。

6.4 3 次元グラフィックス

この説は、MATLAB に組み込まれている peaks という特殊な多峰型関数を用いて、3 次元グラフィックスの作成を説明します。Peaks 関数は、x と y の関数で、次の形をしています。

$$f(x, y) = 3(1-x)^2 e^{-x^2-(y+1)^2} - 10\left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5\right)e^{-x^2-y^2} - \frac{1}{3}e^{-(x+1)^2-y^2} \quad (6)$$

MATLAB で peaks(n) を実行すると、n × n の正方行列が得られます。引数の n を省くと、標準値 49 が採用されます。

以下は、 $Z=\text{peaks}(7)$ の結果です。この行列の各要素は、 x および y を -3 から 3 まで変化させた場合の値になります。列方向が x 、行方向が y の変化に対応します。

```
>> z = peaks(7)
z =

```

0.0001	0.0034	-0.0299	-0.2450	-0.1100	-0.0043	0.0000
0.0007	0.0468	-0.5921	-4.7596	-2.1024	-0.0616	0.0004
-0.0088	-0.1301	1.8559	-0.7239	-0.2729	0.4996	0.0130
-0.0365	-1.3327	-1.6523	0.9810	2.9369	1.4122	0.0331
-0.0137	-0.4808	0.2289	3.6886	2.4338	0.5805	0.0125
0.0000	0.0797	2.0967	5.8591	2.2099	0.1328	0.0013
0.0000	0.0053	0.1099	0.2999	0.1107	0.0057	0.0000

図 5～図 6 に、3 次元のカラーグラフィックスの例を示します。また。図 5 に示す 3 次元グラフィックスは、図 7～図 11 に示すような様々な方法によって等高線表示をすることも可能です。

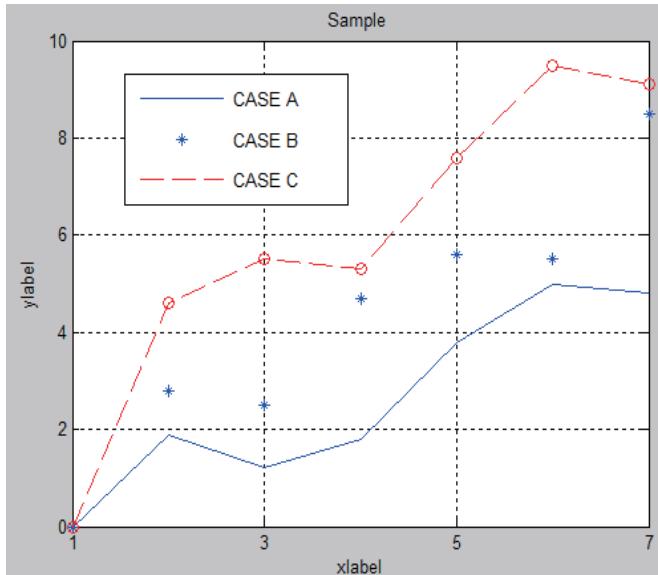


図 4

```
c1=[0.0 1.9 1.2 1.8 3.8 5.0 4.8];
c2=[0.0 2.8 2.5 4.7 5.6 5.5 8.5];
c3=[0.0 4.6 5.5 5.3 7.6 9.5 9.1];
plot(c1)
hold on
plot(c2, 'b*')
plot(c3, 'r--')
plot(c3, 'ro')
hold off
axis([1 7 0 10])
set(gca,'XTick',[1:2:7])
set(gca,'YTick',[0:2:10])
xlabel('xlabel');
ylabel('ylabel');
title('Sample ');
grid
h=legend('CASE A','CASE B','CASE C');
set(h,'Position',[0.2,0.65,0.3,0.22]);
axes(h)
print -depsc fig4
```

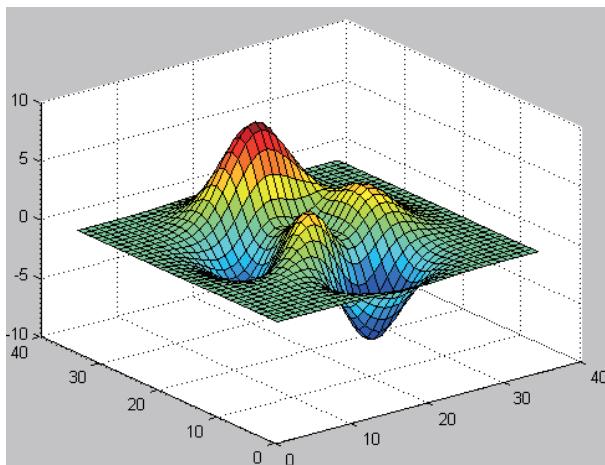


図 5

```
surf(peaks(35))
print -depsc fig5
```

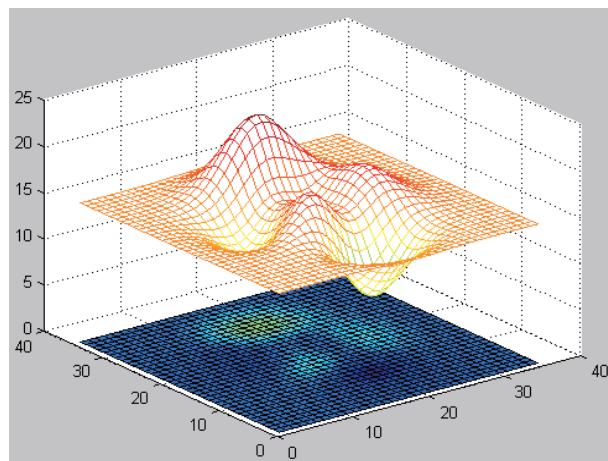


図 6

```
mesh(peaks(35)+15)
hold
pcolor(peaks(35))
hold off
print -depsc fig6
```

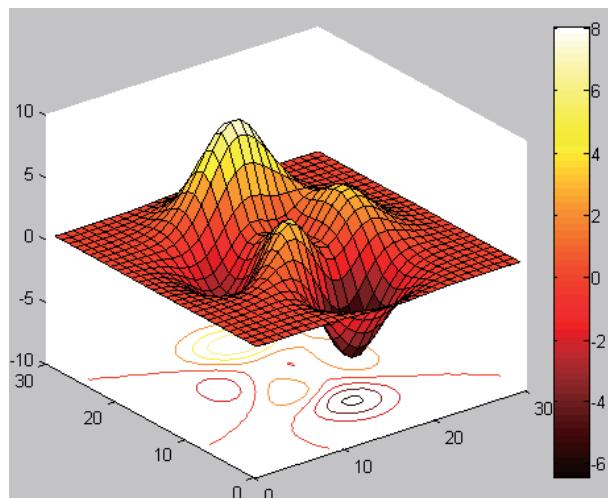


図 7

```
surf(peaks(30))
colormap(hot)
colorbar('vert')
grid
print -depsc fig7
```

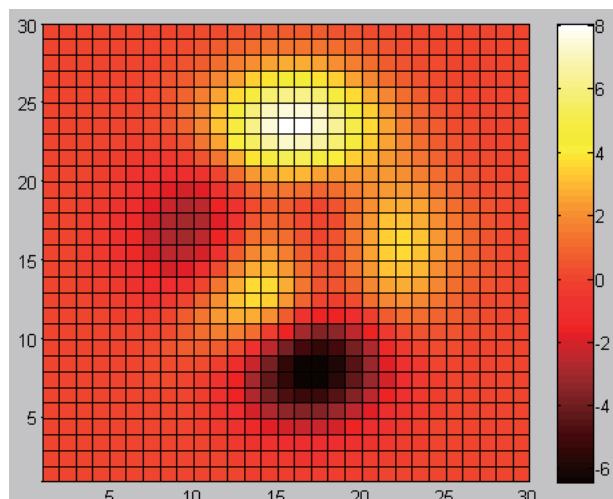


図 8

```
pcolor(peaks(30))
colormap(hot)
colorbar('vert')
print -depsc fig8
```

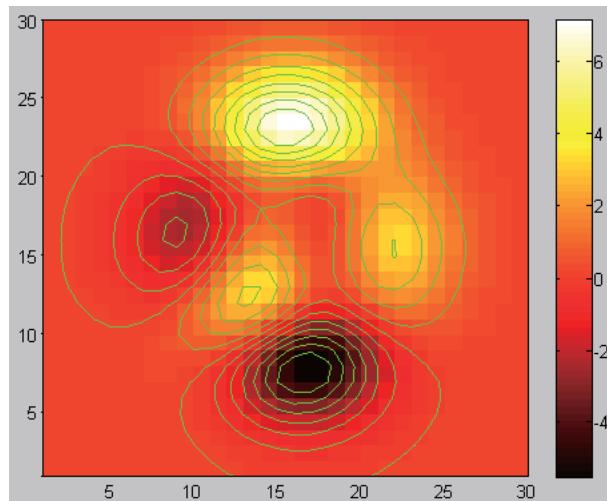


図 9

```
pcolor(peaks(30))
colormap(hot)
shading flat
hold on
contour(peaks(30),15,'g')
hold off
colorbar('vert')
print -depsc fig9
```

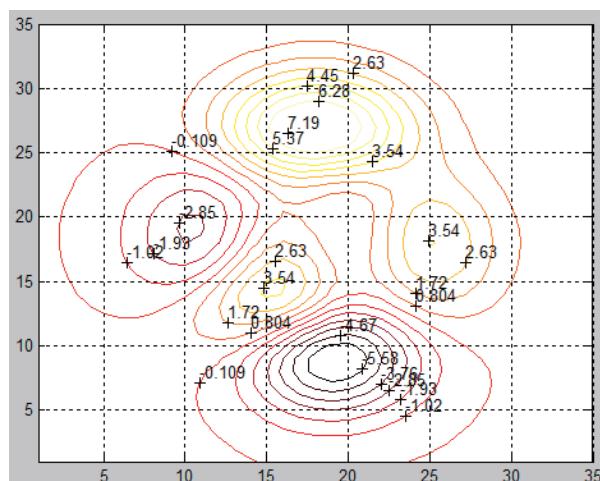


図 10

```
b=contour(peaks(35),15);
clabel(b)
grid
print -depsc fig10
```

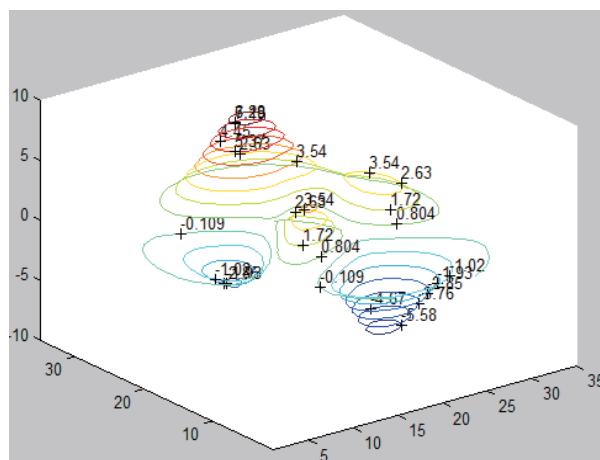


図 11

```
b=contour3(peaks(35),15);
clabel(b)
grid
print -depsc fig11
```

6.5 視点

3次元グラフィックスの表示において重要な、視点の角度の調節には `view` というコマンドを用います。
`view(Azimuth,Elevation)` コマンドは、水平方向と垂直方向の回転角を図 1 2 に示すように指定することにより、視点の角度を調節します。

例えば、図 13 は `speaks` コマンドにより得られた行列を異なる 4 つの視点から表示したものです。

```
view(-37.5,30) view(-7,80)
```

```
view(-90,0) view(-7,-10)
```

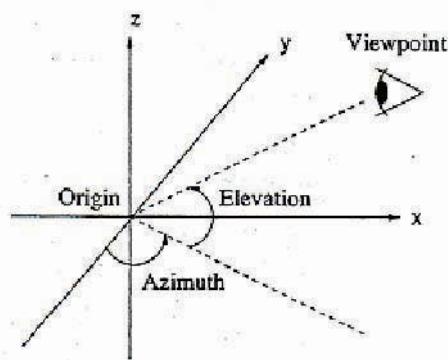


図 1 2 : 3 次元プロットの視点角度の設定

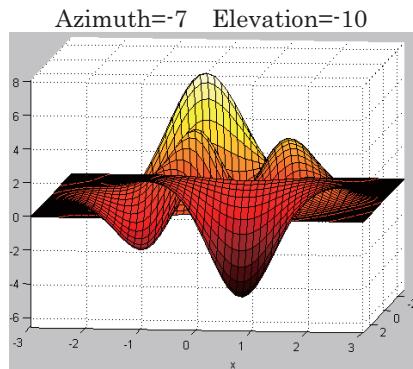
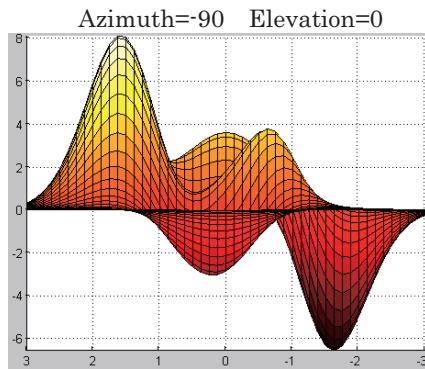
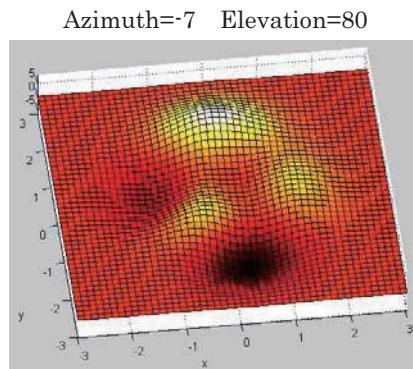
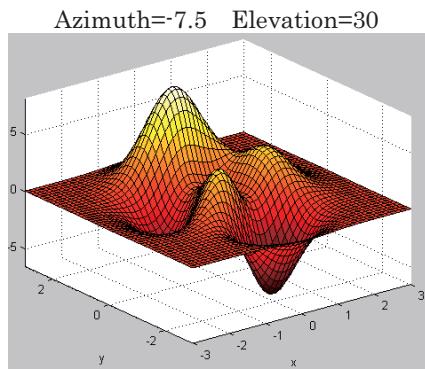


図 1 3 : `peaks` 関数による 3 次元グラフィックスを異なる 4 つの視点から表示した例

7 まとめ

本稿では、高性能な数値計算機能と多彩な可視化機能を備えた技術計算ソフト MATLAB の入門として、その特徴、数値計算の指示方法、グラフィックスの作成方法などを紹介しました。今回紹介したものは、MATLAB の利用法のほんの一部分にすぎません。是非一度、実際に自分で利用して、その豊富な機能と高い生産性を体験していただきたいと思います。なお、マニュアルがサイバーサイエンスセンター 1 階のプログラム相談室に設置しておりますので、使い方ももっと詳しく知りたい方はそちらをご覧ください。

参考文献

- [1] MATLAB による制御理論の基礎：野波健蔵，東京電機大学出版局
- [2] MATLAB による制御のためのシステム同定：足立修一，東京電機大学出版局
- [3] だれでもわかる MATLAB : 池原雅章，培風館
- [4] はやわかり MATLAB 第 2 版 : 芦野隆一, 共立出版
- [5] 最新 MATLAB ハンドブック第 3 版 : 小林一行, 秀和システム
- [6] MATLAB グラフィックス集 : 小国 力, 朝倉書店
- [7] MATLAB と利用の実際 : 小国 力, サイエンス社
- [8] MATLAB の総合応用 : 高谷邦夫, 森北出版
- [9] 最新使える ! MATLAB : 青山貴伸, 講談社
- [10] 使える ! MATLAB/Simulink プログラミング : 青山貴伸, 講談社
- [11] MATLAB による画像&映像信号処理 : 村松正吾, CQ 出版
- [12] <http://www.mathworks.co.jp>

[利用相談室便り]

利用相談について

今年度も5月よりサイバーサイエンスセンター本館利用相談室、弘前大学、秋田大学、山形大学で利用相談を行っています。日程等詳細は次頁をご覧ください。相談内容によってはメーカ等に問い合わせる場合や、時間を要する場合もありますが、利用者の問題解決にむけて努めております。直接面談のほかに、メールや電話での相談も受けておりますのでお気軽にご相談ください。

- ・プログラムを高速化するにはどうしたらいいの？
- ・プログラムを並列化してもっと速く計算したい！
- ・スペコンでプログラムを動かしても速さがPCと変わらないんだけど、どうして？
- ・研究室のコンピュータではメモリが足りない！
- ・研究室の電気代高騰で困っている。
- ・コンピュータの管理は面倒。研究に専念したい。
- ・サービスしているアプリケーションを研究室から利用するにはどうすればいいの？

このような、スーパーコンピュータ利用に関する疑問や問題をお持ちの方、これから利用してみたいとお考えの方、一度相談してみてはいかがでしょうか。

また、サイバーサイエンスセンター本館相談室には、各種マニュアル、書籍も多数揃えています。相談室での閲覧、貸し出し（一部の書籍、マニュアルを除く）も可能ですので是非ご活用ください。

《サイバーサイエンスセンター本館利用相談室》

Tel. 022-795-6153 相談用メールアドレス sodan05@isc.tohoku.ac.jp



サイバーサイエンスセンター本館



本館利用相談室

平成 25 年度利用相談日程と主な担当分野（サイバーサイエンスセンター本館）

曜日・時間		テクニカルアシスタント	主な担当分野
月	2 - 4 時	佐々木大輔 (情報基盤課共同研究支援係)	・スーパーコンピュータ ・並列コンピュータ ・Fortran
火	2 - 4 時	山下 肇 (情報基盤課共同利用支援係)	・アプリケーション全般 ・高速化 (ベクトル化、並列化)
水	3 - 5 時	山崎 馨 (理学研究科)	・アプリケーション (Gaussian) ・並列コンピュータ
木	3 - 5 時	坂本 修一 (電気通信研究所)	・アプリケーション (MATLAB) ・C/C++
金	2 - 4 時	小松 一彦 (サイバーサイエンスセンター) 森谷 友映 (情報基盤課共同研究支援係)	・スーパーコンピュータ ・並列コンピュータ ・Fortran C/C++

*上記以外の時間帯に面談・電話での相談を希望の方は、1階窓口（共同利用支援係）まで相談内容をお申し出ください。センター内担当者に取り次ぎます。

平成 25 年度利用相談日程と担当分野（他機関）

大学名	相談場所・日時	テクニカルアシスタント	相談分野
弘前大学	理工学部 1 号館 322 号室 在室中随時	佐藤 裕之	スーパーコンピュータ, 端末ログイン, ファイル, Fortran, ベクトル化, ASL
弘前大学	理工学部 2 号館 0404 室 月曜 16:00-18:00	宮本 量	端末ログイン, ファイル, Fortran, C/C++, Gaussian
秋田大学	工学資源学部 1 号館 337 室 木曜 14:00-16:00	田中 元志	スーパーコンピュータ, 端末・ログイン, ファイル, ジョブ操作, Fortran, C/C++, MATLAB, 利用申請, メール
山形大学	学術情報基盤センター (小白川キャンパス) 金曜 10:00-12:00	板垣 幸由	端末・ログイン, ファイル, メール, ウィルス対策ソフト, サーバ証明書
	工学部 7 号館 237 号室 火曜 14:30-16:30	高野 勝美	端末・ログイン, ファイル, Fortran, MATLAB
	工学部学術情報基盤 センター 在室中随時	鈴木 勝人	端末・ログイン, Fortran, TOPIC/インターネット(組織間接続), メール, ウィルス対策ソフト

(共同利用支援係)

テクニカルアシスタント自己紹介

《サイバーサイエンスセンター本館相談室》

山崎 馨 (やまざき かおる)

東北大学 大学院理学研究科化学専攻 博士課程前期

理学研究科化学専攻博士課程後期 2 年の山崎馨と申します。水曜日の 15 時から 17 時を担当しています。昨年度に引き続き、利用相談員として Gaussian 等の量子化学計算パッケージを使った理論計算を中心に皆様の研究のお手伝いをさせていただきます。

物理的・化学的に意味のある量子化学計算を実行して研究に活かすためには、次の 3 点に注意する必要があります。

(1) どの様な物理量を計算するのか、またそれはなぜか。

研究の背景も含めて異分野の門外漢に容易に理解できる説明が行えること。

(2) 適正な計算手法を選択する。使用できる計算リソースの能力の範囲内で、可能な限り正確かつ短時間で目的の物理量を計算できる手法を選ぶ。

(3) 以上の 2 点を達成するために、研究の背景も含めた十分な文献探索と予備計算を行う。

私は、テクニカルアシスタントとして、この様な計算の準備と計算手法の選択からインプットファイルの作成、そして計算結果の解釈のこつにいたるまで、量子化学計算において突き当たる問題のトータルサポートを one-stop で実現していきたいと考えております。1 年間よろしくお願ひいたします。

坂本 修一 (さかもと しゅういち)

東北大学 電気通信研究所 准教授

木曜日を担当している電気通信研究所准教授の坂本です。長いものでサイバーサイエンスセンターの利用相談員は今年度で12年目になりました。

私は、人間の聴覚情報処理過程の解明及び工学応用を念頭に、様々な環境での音・音声の聞こえを調べ、その知見に根ざした音響通信システムの開発を進めています。そのためには多くの知覚心理実験を行って結果の統計解析が必要となるため、サイバーサイエンスセンターで提供しているSASを始めとする統計解析パッケージを利用しています。また、刺激作成などでMATLABもよく利用しています。

ネットワークやスーパーコンピュータに関する知識はほとんどありませんが、Windows端末の使い方や、SAS、MATLABなどのアプリケーションの使い方で、みなさんのお役に立てることがあるかと思っています。お気軽に声をかけていただけたら幸いです。

小松 一彦 (こまつ かずひこ)

東北大学サイバーサイエンスセンタースーパーコンピュータ研究部 助教

昨年度に引き続き、サイバーサイエンスセンター利用者相談室で利用相談員を担当させていただることになりました。金曜日 14~16 時の担当で、担当分野はスーパーコンピュータ (SX-9)、並列コンピュータ (Express 5800) の利用方法全般、およびアプリケーションの高速化全般になります。

計算機アーキテクチャ・大規模並列計算を専門として研究に従事しており、様々な大規模計算環境におけるアプリケーションの最適化を通じて、次世代大規模計算機の要素技術を研究しております。利用相談では、特に、大規模計算機の計算機アーキテクチャやネットワークシステム構成などを考慮したアプリケーションの最適化・高速化に関して、微力ながらみなさまのお力になればと思います。どうぞよろしくお願ひいたします。

山下 翔 (やました たけし)

東北大学 情報部情報基盤課共同利用支援係 技術専門職員

担当時間は火曜日 14~16 時で、担当分野は高速化 (ベクトル化、並列化)、およびアプリケーションの利用に関することです。MATLAB、Marc/Mentat、Patran については操作方法のご相談もお受けできますので、お気軽に利用相談室までお越し下さい。

最近では研究室のワークステーションクラスのマシンでも、マルチコア CPU と大規模メモリを使用して数値計算を行えるようになってきました。8 コア × 4CPU、最大メモリ 512GB という製品もあるようです。当センターでサービスを行っている SX-9 は、MPI を使用すれば最大 64CPU と 4TB (4,096GB) という広大なメモリ容量を使用することが出来ます。しかしながら、ベクトルマシンである SX-9 の性能を最大限に引き出すためには、プログラムコードのチューニングが必須となります。研究室のマシンで動かしているプログラムコードをそのまま SX-9 でコンパイル & 実行しても、SX-9 の性能が発揮されることはまれです。研究室のマシンで開発されたコードを SX-9 で実行し、「スペコンって言っても、案外遅いなあ。」という経験がある方は、ぜひコードの高速化についてご相談下さい。

佐々木 大輔 (ささき だいすけ)

東北大学 情報部情報基盤課共同研究支援係 技術一般職員

平成 23 年度に東北大学の技術職員として採用され、本年度で 3 年目となりました佐々木と申します。担当は毎週月曜日 14~16 時となっております。

センターでは主にスーパーコンピュータの運用と関連するサービスに関する仕事に従事しております。また、最近では高速化支援活動を通して利用者の方のプログラムのチューニングも行っております。センターにはベクトル型のスーパーコンピュータがあり、プログラムをベクトル向けてチューニングすることで高いパフォーマンスを得ることができます。センターでも利用法、チューニング技法等講習会を行っておりますので、そちらもご活用していただければと思います。スーパーコンピュータに触れるようになって 2 年ほどたちましたが、知識不足なところも多々あるかと思います。そのため、質問に対して十分にお答えすることができない場合もあると思いま

ですが、皆様の質問、相談内容にお答えできるよう努めています。今後とも、よろしくお願いいいたします。

森谷 友映（もりや ともあき）

東北大学情報部情報基盤課共同研究支援係 技術一般職員

平成24年度から東北大学の技術職員として採用され、昨年度に引き続き、サイバーサイエンスセンター利用者相談室で金曜日(14~16時)の利用相談員を担当させて頂くことになりました、森谷と申します。現在の主な業務として、スーパーコンピュータ(SX-9)、並列コンピュータ(Express 5800)の環境整備やプログラムのチューニング作業に従事しています。特に、スーパーコンピュータに関する分野は技術の進歩が早いので、その変化に対応できる基礎知識・能力の向上に取り組み、質の高いサービスを提供できるよう心がけています。

サイバーサイエンスセンターでは、A0サイズ対応の大判カラープリンタの利用、各言語のプログラミング本、各種マニュアル、資料の閲覧も可能です。また、科学的、工学的分野に特化した様々なアプリケーションソフトの提供もしております、利用相談などを通じて、是非有効活用して、研究に役立てて欲しいと思っております。

利用相談員として、まだまだ未熟な部分もあり、ご迷惑もお掛けするかと思いますが、少しでもみなさまのお力になればと思っています。よろしくお願いいいたします。

《弘前大学・秋田大学・山形大学》

佐藤 裕之（さとう ひろゆき）

弘前大学 大学院理工学研究科 准教授

センターには大変長くお世話になっています。ソフトウェアを含めた計算資源は、より高性能になるとともに机上にすべてを揃えるには高価になりすぎてきてもおり、共同利用施設の存在をありがたく感じています。相談の内容や件数は、計算機の力の変化とともに変わってきていると感じていますが、広い意味での計算機への接続とデータのやりとりに関する内容は、さまざまな分野や立場の方々から、常に質問される事柄の一つであるようです。ネットワークの資源が普及するにつれて、接続の方法が多様にもなり、またセキュリティとの兼ね合いで複雑にもなってゆくのを感じるのは、面白くもありますが面倒なものもあります。遠隔地からの利用に、物理的な距離は感じなくなってきたものの、ネットワークの安全という質の異なる壁を越えるのには、まだまだ距離を感じことがあります。正しい情報を手に入れること、相談相手を見つけることが、楽をするための秘訣です。微力ですがお役にたちたいと思っています。どうぞご利用下さい。

宮本 量 (みやもと りょう)

弘前大学 大学院理工学研究科 准教授

専門は量子化学であって、コンピュータとはもっぱらユーザーとしての付き合いです。大学院生の時にスペクトルのシミュレーションをするのに自作のプログラムを作製したのが、大型計算機との付き合いはじめでした。現在ではセンターの計算機は Unix 環境になっており、操作性やプログラム作成環境は汎用化されて充実していると感じます。さらに最近の計算機は並列化も著しいのですが、とてもその能力を生かすに至っていません。また、分子科学の分野では超有名な Gaussian というプログラムパッケージで、分子の電子状態の計算をも行っています。東北大には最新のバージョンが導入されており、大規模な計算も可能です。所属の関係で利用相談を受けることはほとんど無いのですが、少しでも利用者のお役に立てればと思います。

田中 元志(たなか もとし)

秋田大学 大学院工学資源学研究科 准教授

平成 14 年度から相談員をさせて頂いております。学生時代から UNIX 環境には触れており、C 言語、TeX は使用しておりました。現在は、この他に MATLAB を使用しております。 FDTD (Finite Difference Time Domain : 有限差分時間領域) 法による計算機シミュレーションを行っておりました頃は、Fortran90 も使用しました。解析モデルにもありますが、パソコンで実行すると丸 1 日かかるような計算が 1 時間程度で済んでしまいました。すごいですね。このような計算には、本センターのスーパーコンピュータの利用は欠かせません。皆さんも本センターを大いに利用して下さい。質問に対して十分にお答えすることができない場合があると思いますがよろしくお願ひ致します。

板垣 幸由 (いたがき ゆきよし)

山形大学 理学部 技術専門職員

私は、理学部の所属ですが、通常は学術基盤センターで学内 LAN と各種サーバ群の管理を行っています。以前はサイバーサイエンスセンターの前身である大型計算機センター・システム管理係に所属しスーパーコンピュータ等大規模計算機システムの管理を行っていた時期もありましたが、山形大学に赴任してきた平成 9 年度以降はネットワークの管理・運用業務が多くなりました。昔はセキュリティといった言葉もあるにはありましたが、今ほど意識する必要はありませんでした。しかし近年コンピュータ・ネットワークが一般家庭に普及するにつれ、これらを取り巻く環境は劇的に変化してきました。SPAM メールの嵐、ウィルスメールによる被害、ファイル交換ソフトを使った著作権侵害等、問題が山積された世の中となり、それらを監視している私達の仕事も増え、日々頭を悩ませているというのが現状です。

サイバーサイエンスセンターを利用されているみなさんも、計算機の利用や、ネットワークに関する悩みを抱えている方は少なくないと思います、そのような場合は、迷わずテクニカルアシスタンントにご相談ください。きっと、良い解決法やヒントがみつかるはずです。

高野 勝美 (たかの かつみ)

山形大学 大学院理工学研究科 准教授

光ファイバ通信の研究を行っております。通信システムという多数のパラメータからなる非線形システムの設計に数値計算を使っております。また、大学院生の頃から現在も電磁波・光波の電磁界解析も行っており、境界要素法、ビーム伝搬法、FD-TD法などを使った数値計算にも携わってきました。Fortranを使った計算が主ですが、MATLABなども使います。東北大学の計算機や山形大学のベクトル計算機を使った経験があります。

数値計算は、予測しにくいものや目に見えないものを可視化することができます。解析的に解くことが難しい問題や実験をすることが困難な課題の全体像をイメージすることができます。PC ソフトウェア開発のプログラム作りとはまた違った、数値計算の楽しさを相談者と分かち合えたらと思っています。

鈴木 勝人 (すずき かつひと)

山形大学 工学部学術情報基盤センター 技術専門職員

私は米沢市にある工学部でネットワークや各種サーバ類の面倒をみています。計算機と係わって 40 年ほど。最近は学生さんなどの質問で、意味不明というか本来の意味と違う表現に思わず笑いながら答えることもしばしばです。

サイバーサイエンスセンターの素晴らしい計算資源を活用していただき、時間的余裕を楽しんでみてはいかがでしょうか。時間距離を考える事なく、本当に速い計算機を自分の PC を使う感覚で利用できる現在は、非常に恵まれた環境にあるといえます。費用も発生しますが、青葉山の速い計算機を皆さんでフルに使ってみましょう。どうぞ宜しくお願ひします。

[展示室便り⑨]

磁気ディスク装置と磁気記録媒体

これまでの展示室便りでは、全国共同利用施設として提供してきた汎用コンピュータ（N2200 シリーズ、ACOS シリーズ）、スーパーコンピュータ（SX シリーズ）、並列コンピュータ（Exemplar、TX7）について演算装置とメモリを中心に紹介してきました。今回は、これらのコンピュータでオペレーティング・システムや利用者ファイルを保存するために使用され磁気ディスク装置と磁気記録媒体について紹介します。

コンピュータの演算性能向上に伴い演算結果が大量に出力されるようになり、コンピュータの更新ごとに磁気ディスク装置も増強されました。表 1 は 1971 年から 2008 年まで、その時にセンターで保有していたディスク容量を示しています。容量は、1971 年から 2002 年までの 31 年間で約 3,300GB、2002 年から 2008 年までの 6 年間で約 106,700GB と近年急激に増加しています。

写真 1 は汎用コンピュータ NEAC2200-700（1971 年）で使用されたディスク・ファイル装置（容量は 134MB）、写真 2 はディスク・パック装置（9MB/台）です。

表 1 ディスク容量

年	ディスク容量(GB)
1971	1
1987	68
1993	199
1997	1,244
2002	3,287
2003	9,800
2006	16,800
2008	110,000



写真 1



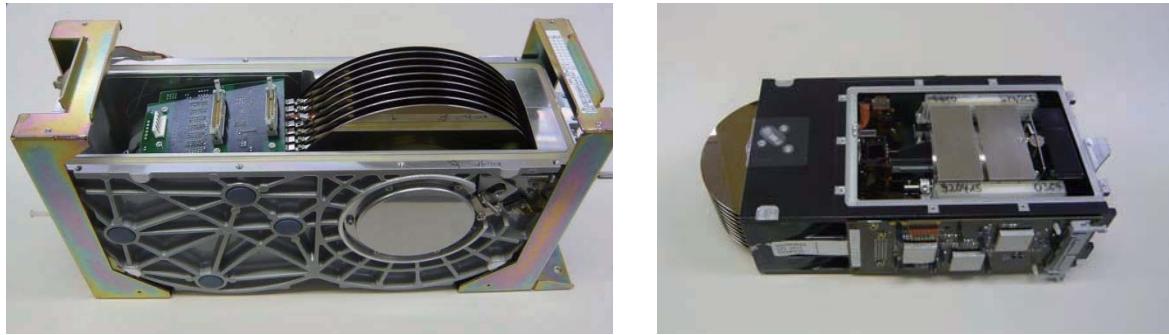
写真 2



展示品 1

展示品 1 は ACOS2020(1987 年)の通信機器装置として使用された MS-135 の磁気ディスク装置（85MB）です。磁気ディスク装置の基本的な構成である記録される円盤と読み書きを行なうアームが見られます。

展示品 2 は、左側が汎用コンピュータ ACOS2020 の磁気ディスク装置（1.3GB）、右側が ACOS3900（1993 年）で使用された磁気ディスク装置（1.53GB）です。



展示品 2

展示品 3 は、TX7/i9610（2006 年）のファイルサーバ（10TB）で使用された磁気ディスク装置の一部です。このディスク装置は、1 個のディスクを複数個まとめて一台の磁気ディスク装置として管理するディスクアレイ装置です。左側が 1 個のディスク（300GB）、右側がディスクアレイ装置です。現在運用で提供しているファイルサーバもこのディスクアレイ形式の装置です。



展示品 3



展示品 4

展示品 4 は、利用者の方が他機関とのデータ交換などによく利用されていたオープンリース形式とカセット形式の磁気テープです。使用するときは、人手で磁気テープ装置に 1 本ずつセットします。1997 年頃までセンターでは、オープンリールの磁気テープを利用者ファイルのバックアップのために大量に使用していました。一度のバックアップで多いときは 120 本近くにもなりました。

展示品 5 は自動的にテープ装置にセットすることができたカートリッジ型の磁気テープです。左側のカートリッジ（約 50MB）はセルと呼ばれる蜂の巣状をした格納庫（図 1）に納められました。この格納庫は、ACOS1000 のときに大容量ファイルシステム（MDF:Mass Data File）として利用者へ提供されました。中央のカートリッジは ACOS2000 時に使用したもので。右側のカートリッジ（42GB）は TX 時にファイルサーバのバックアップ装置で使用されました。



展示品 5

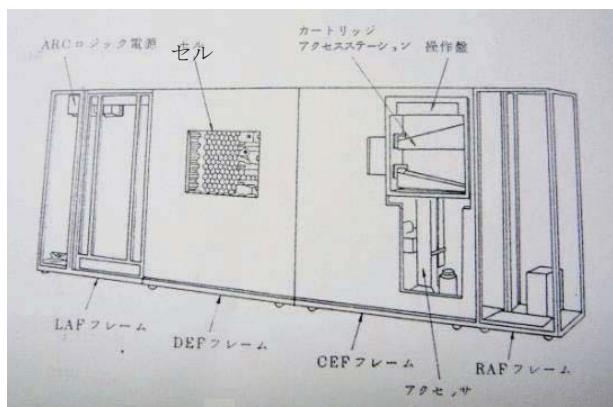


図 1 MDF の装置外観（セルは左側中央）

展示品 6 は、システムのインストール媒体や PC のデータ交換に使用された磁気記録媒体類です。左から 8 インチ、5 インチ、3.5 インチのフロッピーディスク、MO、DAT テープなどです。



展示品 6

展示室に来られた見学者の方は、「昔、このフロッピーを使っていた。」と懐かしそうに話されます。当然ながら見学者の年代により、そのサイズや使用時の年令は違っています。

[Web 版大規模科学計算システムニュースより]

大規模科学計算システムニュースに掲載された記事の一部を転載しています。 <http://www.ss.isc.tohoku.ac.jp/taylor/>

Gaussian 09, GaussView 5 の媒体貸出について (No. 151)

東北大学では Gaussian 09 および GaussView 5 のサイトライセンスを取得しており、東北大学内のコンピュータにインストールすることができます。東北大学所属の教職員または学生の利用が可能です。インストール媒体を貸し出しますので、利用を希望される方は利用申請書を共同利用支援係(センター1階受付)までご提出下さい。

利用申請書は以下のリンクからダウンロードできます。

http://www.ss.isc.tohoku.ac.jp/application/word/gaussian_license.doc

Gaussian 09 D.01 (Windows版、OS X版、Linux版、ソース版)

動作環境については以下のリンク先のページをご参照下さい。

Windows版 (http://www.gaussian.com/g_prod/g09w.htm)

OS X版、Linux版、ソース版 (http://www.gaussian.com/g09_plat.htm)

GaussView 5.0.9 (Windows版、Linux版)

動作環境についてはリンク先のページをご参照下さい。

http://www.gaussian.com/g_prod/gv5_plat.htm

(共同利用支援係)

平成 25 年度講習会案内 <8 月 9 月開催分> (No. 151)

No.	名 称	開催日時	講 師	内 容 概 略
6	ネットワークとセキュリティ入門	8月2日(金) 13:30-16:00	水木 敬明	・ネットワークの基本的な仕組み ・ネットワークの危険性と安全対策
7	Gaussian入門	8月9日(金) 13:00-17:00	岸本 直樹 (理学研究科)	・Gaussian の基本的な使い方
8	Mathematica入門	9月3日(火) 13:00-17:00	横井 渉央 (情報科学研究科)	・Mathematica の基本的な使い方
9	UNIX入門	9月9日(月) 13:00-16:10	後藤 英昭	・UNIX システムの基本的な使い方 ・エディタの使い方 ・プログラムの実行方法
10	スーパーコンピュータと並列コンピュータの基本的な利用法	9月10日(火) 13:00-16:00	大泉 健治	・スーパーコンピュータ、並列コンピュータの紹介 ・見学 ・利用法
11	スーパーコンピュータと並列コンピュータの高速化技法の基礎(実習形式)	9月11日(水) 9:30-17:00	江川 隆輔	・実習によるプログラムの高速化を目的とした最適化および並列化の基礎
12	MPIプログラミング入門(実習形式)	9月12日(木) 10:00-17:00	小松 一彦	・MPI による並列プログラミングの基礎 ・利用法
13	Marc入門	9月13日(金) 13:00-17:00	内藤 英樹 (工学研究科)	・Marc の基本的な使い方

各講習会の詳細や申込みに関しては、ウェブページをご覧ください。

<http://www.ss.isc.tohoku.ac.jp/guide/kosyu.cgi>

(共同利用支援係)

— SENAC 執筆要項 —

1. お寄せいただきたい投稿内容

次のような内容の投稿のうち、当センターで適当と判定したものを掲載します。その際に原稿の修正をお願いすることもありますのであらかじめご了承ください。

- ・一般利用者の方々が関心をもたれる事項に関する論説
- ・センターの計算機を利用して行った研究論文の概要
- ・プログラミングの実例と解説
- ・センターに対する意見、要望
- ・利用者相互の情報交換

2. 執筆にあたってご注意いただく事項

- (1) 原稿は横書きです。
- (2) 術語以外は、「常用漢字」を用い、かなは「現代かなづかい」を用いるものとします。
- (3) 学術あるいは技術に関する原稿の場合、200字～400字程度のアブストラクトをつけてください。
- (4) 参考文献は通し番号を付し末尾に一括記載し、本文中の該当箇所に引用番号を記入ください。
 - ・雑誌：著者、タイトル、雑誌名、巻、号、ページ、発行年
 - ・書籍：著者、書名、ページ、発行所、発行年

3. 原稿の提出方法

原稿のファイル形式はWordを標準としますが、PDFでの提出も可能です。サイズ*は以下を参照してください。ファイルは電子メールで提出してください。

—Wordの場合—

- ・用紙サイズ：A4
- ・余白：上=30mm 下=25mm 左右=25mm 縫じ代=0
- ・標準の文字数（45文字47行）

<文字サイズ等の目安>

- ・表題=ゴシック体14pt中央 ・副題=明朝体12pt中央
- ・氏名=明朝体10.5pt中央
- ・所属=明朝体10.5pt中央
- ・本文=明朝体10.5pt
- ・章・見出し番号=ゴシック体11pt～12pt

*余白サイズ、文字数、文字サイズは目安とお考えください。

4. その他

- (1) 執筆者には、希望があれば別刷50部を進呈します。50部を超える分については、著者の実費負担とします。別刷の希望部数等は投稿の際に申し出てください。
- (2) 投稿予定の原稿が15ページを超す場合は今まで前もってご連絡ください。
- (3) 初回の校正は、執筆者が行って、誤植の防止をはかるものとします。
- (4) 原稿の提出先は次のとおりです。

東北大学サイバーサイエンスセンター内 情報部情報基盤課共同利用支援係
e-mail uketuke@isc.tohoku.ac.jp
TEL 022-795-3406

スタッフ便り

センター職員（研究員）として2年目を迎えた毎日を過ごしています。私の研究分野はコンピューターアーキテクチャです。近年のコンピュータは消費電力の削減が大きな課題となっており、私もコンピューターアーキテクチャの観点からこの課題に取り組んでいます。最近、コンピュータをはじめとするIT機器の消費電力が日本の全電力の2025年までに20%を超えるという記事を見つけました。電力の供給不安が叫ばれている昨今のこともあり、この課題の社会的意義といったものを改めて認識することとなりました。今後も研究活動を通して、この課題に取り組んでいきたいと思います。（M.S）

センターの職員として採用されて2年が経過しました。2年前というとちょうど東日本大震災があり、震災後のあわただしい中着任となりました。センターでの仕事はというと、スーパーコンピュータを利用している方のプログラムの高速化支援から、大判カラープリンタの用紙の交換まで幅広く実施しています。スーパーコンピュータの性能を引き出して利用するとなるとコンピュータの多くの知識が必要になるので、少々敷居が高い印象です。この敷居を低くして多くの方にスーパーコンピュータを利用していただけるようにしていきたいと思います。（D.S）

サイバーサイエンスセンター・情報部情報基盤課スタッフ 転出・転入者のお知らせ

[転出]

2013.7.1 早坂 哲夫（庶務係*・係長） 教育・学生支援部へ
2013.7.1 元木 亜紀（会計係・一般職員） 理学部・理学研究科へ

[転入]

2013.7.1 佐藤恵美子（総務係*・係長） 医学部・医学系研究科より
2013.7.1 村山 一弘（会計係・主任） 環境科学研究科より
2013.7.1 澤田 宏史（CSI研究室・産学官連携研究員） 採用

* 2013.7.1より旧庶務係は総務係となりました。

SENAC 編集部会

小林広明 曽根秀昭 水木敬明 後藤英昭
江川隆輔 佐藤恵美子 大泉健治 小野 敏
斎藤くみ子



サイバーサイエンスセンター前
整備中の青葉山新キャンパス

平成25年7月発行

編集・発行 東北大
サイバーサイエンスセンター
仙台市青葉区荒巻字青葉6-3
郵便番号 980-8578

印 刷 創文印刷出版株式会社

システム一覧

計算機システム	ホスト名	機種
スーパーコンピュータ	super. isc. tohoku. ac. jp	SX-9
並列コンピュータ	gen. isc. tohoku. ac. jp	Express5800

サービス時間

利用システム名	利用時間帯
スーパーコンピュータ	連続運転
並列コンピュータ	連続運転
館内利用	月曜日～金曜日は8:30～21:00、 土・日・祝日は閉館

ジョブクラスと制限値

計算機システム	処理	ジョブクラス	CPU時間	メモリ容量
スーパー コンピュータ	会話型 バッチ 処理	(4cpu)	1時間	8GB
		ss (4cpu)	1時間	256GB
		s (4cpu)	無制限	32GB
		p8 (8cpu)	"	512GB
		p16 (16cpu)	"	1024GB
		p32 (32cpu)	"	1024GB×2
		p64 (64cpu)	"	1024GB×4
並列 コンピュータ	会話型 バッチ 処理	(4並列)	1時間	8GB
		as (非並列)	無制限	16GB
		am (Marc 専用)	"	16GB
		am2 (Marc 専用)	"	128GB
		a8 (8並列)	"	128GB
		a16 (16並列)	"	256GB
		a32 (32並列)	"	512GB

目次

東北大学サイバーサイエンスセンター

大規模科学計算システム広報 Vo.46 No.3 2013-7

[共同研究成果]

月と火星の全球地震波伝播シミュレーション	豊國 源知 1 竹中 博士 趙 大鵬 石原 吉明
----------------------------	-----------------------------------

DC-RF ハイブリッド熱プラズマ流の非定常 3 次元数値シミュレーション.....	茂田 正哉 13
--	----------

[研究成果]

超大規模数値計算に基づく核融合炉先進ブランケットデザイン条件に おける高精度 MHD 熱伝達データベースの構築	山本 義暢 19 功刀 資彰
--	-------------------

[資料]

高機能数値計算・可視化機能ソフト MATLAB の基本的な使い方.....	陳 国躍 29 共同利用支援係
---------------------------------------	--------------------

[利用相談室便り]

利用相談について	44
テクニカルアシスタント自己紹介	46

[展示室便り⑨]

磁気ディスク装置と磁気記録媒体	51
-----------------------	----

[Web 版大規模科学計算システムニュースより]

Gaussian 09, GaussView 5 の媒体貸出について (No.151)	54
平成25年度講習会案内 〈8月9月開催分〉 (No.151)	54

執筆要項	55
------------	----

スタッフ便り	56
--------------	----