

## 大規模マルチスケール地震サイクルシミュレーション Large- and multi-scale earthquake cycle simulation

平原 和朗<sup>1\*</sup>, 大谷 真紀子<sup>1</sup>, 兵藤 守<sup>2</sup>, 堀 高峰<sup>2</sup>

Kazuro Hirahara<sup>1\*</sup>, Makiko Ohtani<sup>1</sup>, Mamoru Hyodo<sup>2</sup>, Takane Hori<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Grad. School Science, Kyoto University, <sup>2</sup> JAMSTEC

Tse and Rice(1986) 以来、速度・状態依存の摩擦構成則に基づく、地震サイクルシミュレーションが行われ、過去の地震発生履歴の再現に成功し、地震発生予測に役立てようという研究が行われている。通常、半無限均質弾性媒質中に、断層面やプレート境界を設定し、摩擦パラメータを分布させ、プレート運動を駆動力とする地震サイクルを計算している。その際、境界要素法的に、断層面やプレート境界を摩擦パラメータから決まる臨界セルサイズより小さなセル(通常 1km 以下)に分割し、各セルにおける運動方程式と摩擦力を連立させて、すべりの発展を追っている。現状における課題として、1) 準動的ではなく動的破壊伝播過程を地震サイクル計算に含める必要性、2) 媒質の不均質性・粘弾性媒質の影響、3) 断層帯における間隙流体の問題、4) 高速すべりに関する摩擦構成則の問題が挙げられる。これらに加えて、大規模マルチスケールシミュレーションの問題が挙げられる。

本講演では、主として、均質弾性体における準動的な地震サイクルシミュレーションに話を限り、次世代スーパーコンピュータを念頭に、まず、特に沈み込み帯における、大規模マルチスケール地震サイクルシミュレーションの必要性を議論する。これには1) 2011年東北地方太平洋沖地震や南海トラフ巨大地震といった超巨大地震サイクル、また、日本列島全域のプレート境界を対象とした列島規模地震サイクルシミュレーションといった大規模シミュレーション、2) 地域を限ったものでも、マグニチュード分布がGR則に従う小地震から大地震まで含むマルチスケール地震サイクルシミュレーションが挙げられる。これは例えば、東北日本と南海トラフで発生する地震規模分布の違い、大地震発生前の $b$ 値の時間変化のメカニズム解明、更には短期・長期スロースリップを含む南海トラフ地震サイクルシミュレーションなどがターゲットになる。

これらの大規模マルチスケールシミュレーション実現するには、計算メモリおよび計算時間が膨大になることが障害となる。また、データ同化手法を用いた摩擦パラメータ推定が最近行われようとしているが、その際にも膨大な繰り返し計算が必要となる。こういった大規模マルチスケールシミュレーションやデータ同化を実現するためには、地震サイクルシミュレーションにおいて、省メモリ化・高速化が必須である。断層やプレート境界を $N$ 個のセルに分割した場合、すべり応答関数行列( $N \times N$ )とすべり遅れベクトル( $N$ )の積、すなわち $O(N \times N)$ の繰り返し計算がシミュレーションで必要とされる。このメモリ量や計算量を $O(N)$ - $O(N \log N)$ とする省メモリ化・高速化手法として、FFT(高速フーリエ変換)、FMM(高速多重極法)、更にはH-matrices(階層型行列)法が挙げられる。これらの手法を適用し、どのように大規模マルチスケールシミュレーションに挑もうとしているか、現状と展望を述べる。

キーワード: 地震サイクル, 大規模シミュレーション, マルチスケールシミュレーション, プレート境界地震, 沈み込み帯

Keywords: Earthquake cycle, Large-scale simulation, Multi-scale simulation, Interplate earthquake, Subduction zone

## 3次元不均質構造モデルの構築とそれをベースにした統合的な地震発生から都市振動までの評価シミュレーション

### Construction of 3D heterogeneous structure model in subduction zone and integrated simulation from earthquake generation

市村 強<sup>1\*</sup>, 堀 高峰<sup>2</sup>, 縣 亮一郎<sup>1</sup>, 兵藤 守<sup>2</sup>, 平原 和朗<sup>3</sup>, 堀 宗朗<sup>1</sup>

Tsuyoshi Ichimura<sup>1\*</sup>, Takane Hori<sup>2</sup>, Ryoichiro Agata<sup>1</sup>, Mamoru Hyodo<sup>2</sup>, Kazuro Hirahara<sup>3</sup>, Muneo Hori<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構地震津波・防災研究プロジェクト, <sup>3</sup> 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地球物理学教室

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, <sup>2</sup>Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>3</sup>Department of Geophysics, Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyoto University

従来、地震発生やそれに伴う地殻変動等の計算は、半無限均質など単純化した構造を用いて主に行われてきた。しかし、沈み込み帯は3次元的に不均質な構造であり、それが変形や応力場に与える影響が無視し得ないことは明らかである。今後10～20年のHPCの進歩を考えれば、こうした不均質構造をきちんと考慮したモデル化を行うことが視野に入ることが十分期待できる。実際、1億自由度を超える詳細な3次元不均質有限要素モデルを構築し、有限要素法で地殻変動や地震波動を高速に計算するコードをすでに我々は開発している。今後10～20年で、HPCの実効性能が100倍～1000倍に向上すれば、断層周辺をさらに細分化した地震発生シミュレーションの実行や、物性や形状の曖昧さを考慮したstochasticな構造モデルを用いた計算が可能になると期待される。そうすれば、観測データの誤差をより忠実に考慮した地震発生シナリオ計算を行うことが可能となる。さらに、上記の計算は列島スケールの不均質構造モデルを用いることになるが、これに地域スケールや都市スケールのより詳細な構造情報を反映したモデルを組み合わせることで、地震発生～強震動生成・伝播～地盤震動～都市全体の揺れをシームレスに計算する統合シミュレータを構築することができると期待される。

## 地震学における大規模・高性能 GPU 計算 Large-Scale High-Performance GPU Computing for Seismology

岡元 太郎<sup>1\*</sup>, 竹中 博士<sup>2</sup>, 青木 尊之<sup>3</sup>  
Taro Okamoto<sup>1\*</sup>, Hiroshi Takenaka<sup>2</sup>, Takayuki Aoki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 九州大学 地球惑星科学部門, <sup>3</sup> 東京工業大学 学術国際情報センター  
<sup>1</sup>Dept. Earth Planet. Sci., Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Dept. Earth Planet. Sci., Kyushu University, <sup>3</sup>GSIC, Tokyo Institute of Technology

Simulation of seismic-wave propagation is essential in modern seismology in order to probe the Earth's and other planets' interiors, to study earthquake sources, and to evaluate the strong ground motions due to earthquakes for the seismic hazard analysis. The modeling of the seismic-waves is a computational challenge because of the effect of the structural heterogeneity and the required large domain size. The effect of the lateral heterogeneity is especially important for the shallow suboceanic earthquakes around Japanese islands where all the heterogeneities such as the steeply varying topography of the trenches, oceanic water layer, thick sediments, crust with varying thickness and subducting oceanic plate, can affect the excitation and propagation of the seismic-waves radiated from the earthquakes (e.g., Okamoto, EPS 2002; Nakamura et al. BSSA 2012). The scale length of the heterogeneity and topography is often small (a few hundred meters or even less than one hundred meters) and we need to use very small grid spacing in the simulation. Also, a very large domain size is often required because the fault size and the affected area can become large especially for the megathrust interplate earthquakes such as the 2011 Tohoku-Oki earthquake of which fault is roughly 200 km wide and 500 km long. Thus for the modeling of the seismic-waves we need all the resources for the high-performance computing, such as large-sized memory system, fast computing devices, fast interconnect network, and high-performance softwares.

In this paper we review our 3-D finite-difference time domain (FDTD) method developed for the simulation of seismic-wave propagation. As the accelerator, we use the GPUs in our simulation (Okamoto et al., 2010; 2013). The GPU (Graphics Processing Unit) is a remarkable device due to its multi-core architectures and high memory bandwidth. The GPU delivers extremely high computing performance at a reduced power and cost compared to conventional central processing units (CPUs): recent GPUs have achieved performances of about 3.5 to 3.9 TFLOPS in single precision arithmetic at power consumption of 225 to 235 W. Simulation of seismic wave propagation is a memory intensive problem which involves a large amount of data transfer between the memory and the arithmetic units, while the number of arithmetic computations is relatively small. Thus, the simulation can benefit from the high-memory bandwidth of the GPU, and various approaches to adopt GPU to the simulation have been proposed recently (e.g., Abdelkhalik et al., 2009; Aoi et al., 2009; Komatitsch et al., 2009, 2010; Micikevicius, 2009; Okamoto et al., 2010, 2013; Michea and Komatitsch, 2010).

We will show our recent results that were done by using several hundred to more-than one thousand of GPUs of the TSUB-AME supercomputer in Tokyo Institute of Technology from the field of the seismology: the forward wave propagation in realistic 3D structure model for the Japanese islands, the inverse problem for the study of the earthquake sources using 3D Green's tensor waveforms, the computation of the sensitivity kernels for perturbations in the structural parameters of the earth model, and the simulation of scattering of seismic-waves from the moon-quakes as the feasibility study for the future seismic exploration of the moon and other planets. We will also discuss the future direction of the GPU computing in the field of seismology such as the real-time simulation of the wave propagation.

### [References]

Okamoto et al. Earth Planets Space, 62, 939-942, 2010.

Okamoto et al, in GPU Solutions to Multi-scale Problems in Science and Engineering, ed. D.A. Yuen et al., Springer, 2013.

キーワード: GPU, 地震波伝播, 破壊過程, 地球内部構造, 月・惑星探査, 災害想定

Keywords: GPU, seismic-wave propagation, rupture process, structure of the Earth, seismic exploration of planets, hazard analysis

## 東日本大震災における高精細津波浸水シミュレーション High refining tsunami inundation simulation of the 2011 Great East Japan Earthquake

有川 太郎<sup>1\*</sup>, 富田孝史<sup>1</sup>

Taro Arikawa<sup>1\*</sup>, TOMITA, Takashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 港湾空港技術研究所

<sup>1</sup>Port and Airport Research Institute

津波災害は、特定地域における浸水被害ではなく、広域にわたって破壊を伴う大災害となりうる可能性があることが、2011年に生じた東日本大震災によって示された。そこで得られた教訓として、これまでのように、破壊するかしないかの判定だけでなく、どのように破壊するかということまで評価できる手法が必要となる。そのため、広域かつ高精細に検討できるシミュレーションツールは必須であり、急務である。本研究は、その研究の第一歩として、津波の発生源から街中の浸水までを検討できるツールを検証するとともに、街中の高精細な計算をするシミュレータの計算効率を検討する。

キーワード: 東日本大震災, 津波, 遡上, 数値計算, VOF, スパコン

Keywords: the Great East Japan Earthquake, Tsunami, Inundation, Numerical Simulation, VOF, High performance computing

地震津波による災害に対する危機管理の将来的な課題とHPCに期待する役割  
Future issues and expected role of HPC to solve them for risk management for earthquake  
and tsunami disaster

牧 紀男<sup>1\*</sup>

Norio Maki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

危機管理においては一般に、リスク評価 戦略計画の策定 標準的な危機対応システムの構築 研修・訓練というプロセスを連続して行う体制を整えることが必要である。地震津波による災害を対象とした場合も例外ではなく、わが国においては、災害対策基本法にもとづいて整備されている防災体制が最も包括的なものといえる。ここで重要なことは、リスク評価だけで終わるのではなく、そのリスクに対して、どのように立ち向かうかの戦略、その戦略を実際に形にしていくためのシステムの構築までが含まれているということである。その体制の現状と、今後10～20年にわたる将来的な課題について述べるとともに、課題解決において次世代のハイパフォーマンスコンピュータが果たし得ると期待する役割について議論したい。

## 想定外地震対応に資する崩壊余裕度の定量化 Quantification of Collapse Margin to Respond to "Beyond Scenario Earthquakes"

中島 正愛<sup>1\*</sup>, 林 旭川<sup>1</sup>, 野澤 貴<sup>1</sup>

Masayoshi Nakashima<sup>1\*</sup>, LIN, Xuchuan<sup>1</sup>, NOZAWA, Takashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

わが国に未曾有の被害をもたらした2011年の東北大地震は私たちに多くの教訓を与えた。耐震工学においても、これら教訓を活かしてより安全で安心な社会の実現に向けて解決すべき課題が少なくない。これらのなかでも、(1)耐震設計における想定外大地震に対する対応、(2)大地震後の事業継続と早期回復は、焦眉の課題と認識されている。これらの解決に資する具体的な工学研究テーマとして、(A)構造物が有する崩壊余裕度の定量化、(B)構造モニタリングと健全度判定、が挙げられる。(A)のテーマについては、設計用地震力は社会的要因を考慮して決められるものであるから、再現期間があまりにも長い超巨大地震に匹敵する地震力を設定するわけにはゆかない、という背景がある。とすればどこで折り合いをつけるべきか。それに対する現実的な対処は、崩壊余裕度の定量化、つまり、設計地震力の何倍までの地震に対して構造物は崩壊しない(人命を護り切れる)かを、量として把握しておくことにある。

それでは崩壊余裕度はどのようにして定量化しうるか。それは崩壊に至るまでの挙動を追跡する数値解析の精度に依存する。数値解析技術の進歩はめざましく、幾多の最新解析法が提案され利用されている。しかしながら、これら解析法が崩壊予測に対して持つ精度がいかほどのものであるかについては、構造物崩壊に対する実データを持ちあわせていないので、私達は確たる回答を出すことができない。この事態を打開するために、文科省は2012年度から5年間にわたって、「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト」を立ち上げ、そのなかの一課題として「都市の機能維持・回復のための調査・研究」を採り上げることにした。この課題では、鋼構造高層建物やRC造中層建物に対する振動台実験を通じて、構造物崩壊に関する実データを獲得するとともに、それと平行して実施する高度数値解析との照合によって、構造物崩壊に対して数値解析がもつ精度の厳正な評価と飛躍的な向上をめざしている。本論では、このプロジェクトの概要と現在までに得られた知見を総括する。

キーワード: 想定外地震, 崩壊余裕度, 大規模振動台実験, 数値解析

Keywords: beyond scenario earthquake, collapse margin, large-scale shaking table test, numerical simulation

## ハイパフォーマンスコンピューティングが拓く固体地球科学の未来ー導入 Creating future of solid Earth science with high performance computing (HPC): Introduction

堀 高峰<sup>1\*</sup>, 日野 亮太<sup>2</sup>, 本蔵 義守<sup>3</sup>, 金田 義行<sup>1</sup>, 有川 太郎<sup>4</sup>, 市村 強<sup>5</sup>, 前田 拓人<sup>5</sup>  
Takane Hori<sup>1\*</sup>, Ryota Hino<sup>2</sup>, Yoshimori Honkura<sup>3</sup>, Yoshiyuki Kaneda<sup>1</sup>, Taro Arikawa<sup>4</sup>, Tsuyoshi Ichimura<sup>5</sup>, Takuto Maeda<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構地震津波・防災研究プロジェクト, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター,  
<sup>3</sup> 東京工業大学火山流体研究センター, <sup>4</sup> 独立行政法人 港湾空港技術研究所, <sup>5</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>2</sup> Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, To, <sup>3</sup> Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, <sup>4</sup> Port and Airport Research Institute, <sup>5</sup> Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

本セッションでは、固体地球科学分野においてハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) を梃として今後10～20年を目標に解決すべき社会的・科学的課題を整理し、現状と将来の期待を議論する。特に、HPCが実現する地震・津波による災害軽減に向けたシミュレーション技術の高度化や、近年の地震・津波観測網の充実に伴うビッグデータの新たな解析手法の開発、幅広い時空間スケールをカバーする固体地球モデル構築など、固体地球の予測科学の発展に向けた課題と展望について考える。この導入では、将来のHPCIシステムのあり方の調査研究として様々な分野が協力して作成・改訂を進めている「計算科学ロードマップ白書」を紹介し、議論の出発点とする。

## マンテル対流シミュレーションのHPC: これまでとこれから Mantle convection simulations on HPC: present and future

亀山 真典<sup>1\*</sup>, 宮腰 剛広<sup>2</sup>, 古市 幹人<sup>2</sup>, 中川 貴司<sup>2</sup>, 柳澤 孝寿<sup>2</sup>, 中久喜 伴益<sup>3</sup>, 小河 正基<sup>4</sup>

Masanori Kameyama<sup>1\*</sup>, Takehiro Miyagoshi<sup>2</sup>, mikito furuichi<sup>2</sup>, Takashi Nakagawa<sup>2</sup>, Takatoshi Yanagisawa<sup>2</sup>, Tomoeki Nakakuki<sup>3</sup>, Masaki Ogawa<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>2</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構, <sup>3</sup> 広島大学, <sup>4</sup> 東京大学総合文化研究科  
<sup>1</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University, <sup>2</sup>IFREE/JAMSTEC, <sup>3</sup>Hiroshima University, <sup>4</sup>University of Tokyo at Komaba

「マンテル対流」とは、岩石からなるマンテルが主に固体の状態を保ったまま、非常に長い時間(数百万年~数億年)をかけて、ゆっくりとした速度(数 cm/年)で地球内部を流動している現象を指す。この流動は、我々が地球表面で観察できる地学現象(地震・火山・プレート運動など)のほとんど全てに関与している重要なものである一方で、地球深部で起こっている流動・変動現象の中でもとりわけ特異な性質をもつ流体の運動でもある。かくも特異なマンテル対流の全貌を理解する上では、数値シミュレーションが不可欠なツールの1つである。実際、マンテル対流を数値流体シミュレーションから理解しようという試みは、古くは1960年代にまで遡ることができ、それ以来HPCの進歩はマンテル対流研究の進展に重要な意味をもっている。

本発表では、マンテル対流のシミュレーションのこれまでの進歩を簡単に振り返りつつ、今後のHPCの発展と歩調を合わせながら進んでいくであろうマンテル対流研究の方向性について考えてみたい。まずは現在までの研究でターゲットとしてきた科学的なテーマとその成果の概略について述べる。その後、マンテル対流研究が中長期的のスパンで取り組むべき科学的課題、及びその実現に必要な技術的な課題とそれに対する取り組みについても紹介したい。

キーワード: マンテル対流, 数値シミュレーション

Keywords: mantle convection, numerical simulations



## その場可視化動画データの対話的再生 An Approach to Exascale Visualization: Interactive Viewing of In-Situ Visualization

山田 知輝<sup>1\*</sup>, 陰山 聡<sup>1</sup>  
Tomoki Yamada<sup>1\*</sup>, Akira Kageyama<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院システム情報学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of System Informatics, Kobe University

In the coming era of exascale supercomputing, in-situ visualization is an inevitable approach to reduce the output data size. A problem of the in-situ visualization is that it loses interactivity unless a steering method is adopted. In this paper, we propose a new in-situ visualization method for exascale simulations. This method applies a lot of (hopefully millions of) in-situ visualizations at once with (thousands of) different visualizations taken from (thousands of) different cameras. The output in this strategy is not numbers, but movies. Even when a simulation produces one million of movies, the total output data size is only 10 TB when each movie is compressed to 10 MB. It should be noted that the size of 10 TB is rather small in the coming exascale era. The output of million movies will be analyzed as a post-processing in our proposed method. A specially designed movie player will read the million movie files and display a sequence of images in a window. By extracting a proper image sequence from different movie files, we can effectively walk through the visualization objects while the dynamic phenomena are shown in the window. To demonstrate the feasibility of the proposed method, we have performed a dynamo simulation in which 125 in-situ visualizations are applied. The visualization code is hybrid MPI-OpenMP. This calculation was performed on FX-10. We have also developed a movie player that reads hundreds of movie files and play a movie on a PC window. The movie player also has a function to show current position in or around the simulation region. We have confirmed that this method—in-situ visualization with interactive view—is not only feasible, but also practical for visualizations of large-scale simulations.

キーワード: 大規模可視化, その場可視化, 並列可視化

Keywords: large-scale visualization, in-situ visualization, parallel visualization

## GPGPU 超並列信号処理による相似地震検出及び解析の高速化 GPGPU-Accelerated Digital Signal Processing Method for Detection and Analysis of Repeating Earthquake

川上 大喜<sup>1\*</sup>, 大久保 寛<sup>1</sup>, 内田 直希<sup>2</sup>, 竹内 伸直<sup>2</sup>, 松澤 暢<sup>2</sup>

Taiki Kawakami<sup>1\*</sup>, Kan Okubo<sup>1</sup>, Naoki Uchida<sup>2</sup>, Nobunao Takeuchi<sup>2</sup>, Toru Matsuzawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 首都大学東京システムデザイン研究科, <sup>2</sup> 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

<sup>1</sup>Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Tohoku University

相似地震とは、プレート境界において同一のアスペリティが原因で発生する地震のことを指す。相似地震は同じ地点で観測すると、発生日時が異なってもほぼ同一な波形が得られるという特徴を有している。この相似地震を詳細に調べることにより、個々の地震を引き起こすアスペリティの特性を明らかにすることや、プレート境界でのすべりの時空間発展をモニタすることが可能となる。また、小さいアスペリティ由来の地震は短期間で繰り返し発生する傾向にあるため、数回の観測を実施することによってそのアスペリティの地震周期を特定することが可能となる。さらに、この小規模な繰り返し地震から相似地震群を特定し、そこから得られた周期を用いることでプレート境界における地震の中期的な発生予測の実現が期待できる。近年では GPU 観測網により準静的すべり域の特徴が徐々に解明されているが、十分な情報であるとは言いがたい。

先行研究により、アスペリティ及び相似地震の存在、またアスペリティと準静的すべり域の関連については多くが明らかになってきているが、相似地震を安定かつ高速に検出・解析する手法は未だ確立されているとは言えない。

本研究では、相似地震の検出法として帯域制限型フーリエ位相相関法を、また解析法として直交 3 成分地震波データを用いた振幅 2 乗コヒーレンス関数を適用してその有効性を検討した。更に、GPU (Graphics Processing Units) を用いた高速化の検討も併せて実施した。

従来、GPU は主に画像処理演算に用いられる装置であったが、近年ではその演算能力の高さから関心が集まり、GPGPU (General-Purpose computing on GPU) と呼ばれる GPU を用いた汎用計算が一般的に行われるようになってきている。GPU は CPU と比較してコア数が多い為、これら多数のコアを効果的に並列動作させた場合、GPU は CPU よりも数段高速に演算を実行することが可能となる。我々は本研究で用いる手法と GPGPU との親和性の高さに着目し、GPU による高速化を試みた。

相似地震の検出法に用いた帯域制限型フーリエ位相相関法は、2 つの信号の位相情報にのみ着目して相関値を導出する方法である。本研究では地震波の特徴であるコーナー周波数に着目して 1Hz から 10Hz の間の周波数帯域のみを利用した。相似地震波形に対して本手法を適用すると相関結果に鋭いピークを確認できる。

相似地震の解析法として適用した直交 3 成分地震波データを用いた振幅 2 乗コヒーレンス関数は、信号間のコヒーレンスを算出することで 2 つの信号間の相似度合いを周波数ごとに解析することが出来る方法である。地震波は鉛直・東西・南北方向と、物理的に直交した 3 成分の波形が観測されるため、これらを用いてコーレンス計算を行った。

CPU で処理した場合と GPU で処理した場合の計算処理時間を比較した結果、帯域制限型フーリエ位相限定相関法では約 8.0 倍、直交 3 成分コヒーレンス関数では約 12.7 倍 GPU の方が高速であった。従って、これらの相関計算に GPGPU を適用することは有意であるといえる。しかし、現行の手法は RAM と VRAM のデータ転送とファイルの I/O については、克服すべき課題がある。

今後はデータ I/O の効率化や CPU 処理と GPU 処理を並行して実行できるようなアルゴリズムの提案・実装、また演算のマルチ GPU 化を実現しさらなる高速化を検討する。

キーワード: 相似地震, GPGPU, CUDA, フーリエ位相相関, コヒーレンス関数

Keywords: Repeating Earthquake, GPGPU, CUDA, Fourier phase correlation, Coherence

## クラウドコンピューティングシステムを利用した地球物理データの多変量時系列解析 Multivariate Analysis of Geophysical Time-Series Data on a Cloud Computing System

長尾 大道<sup>1\*</sup>, 樋口 知之<sup>1</sup>  
Hiromichi Nagao<sup>1\*</sup>, Tomoyuki Higuchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 統計数理研究所

<sup>1</sup>The Institute of Statistical Mathematics

A multivariate analysis of time-series data based on the Bayesian statistics is always time-consuming especially in its complex programming and much computation time. Although Research and Development Center for Data Assimilation, the Institute of Statistical Mathematics provides software related to such Bayesian analysis, multivariate analysis requires many computer resources, which are often hardly obtained.

We have developed web application "CloCK-TiME" (Cloud Computing Kernel for Time-series Modeling Engine), which enables users to analyze their time-series data by using a networked PC cluster in a cloud computing system. A state space model decomposes uploaded time-series data into trend, seasonal, autoregressive and observation noise components, each of which are estimated using the particle filter algorithm. We show an application example in the case of tide gauge data recorded along the coastline of Japan. Tide gauge observations along the coastline of Japan have recorded the land sinking due to the continuous subduction of the oceanic plates. The proposed software extracts such long-term activities of the Earth's crust together with rapid displacements related to earthquakes, even before the establishment of the global positioning system, from monthly mean data of the sea levels. The spatial and temporal distributions of the extracted trend component clearly indicate the subduction, near which giant earthquakes have occurred or are predicted to occur. A multivariate analysis of the observatories located at the northeast coast of Japan successfully determines the past crustal displacement in the case of the 1978 Off-Miyagi Earthquake.

キーワード: クラウドコンピューティング, 時系列解析, 多変量解析, 潮位

Keywords: cloud computing, time-series analysis, multivariate analysis, tide gauge

## ビッグデータが開く新しい科学像 Paradigm shift in a scientific methodology driven by big data

樋口 知之<sup>1\*</sup>  
Tomoyuki Higuchi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 統計数理研究所

<sup>1</sup>The Institute of Statistical Mathematics

これまでの自然科学の研究の進め方は、仮説提起と検証のプロセスが独立でなければ真理に迫れないとする考え方に基づいてきた。しかしながら実際の地球科学の研究現場においては、この二つのプロセスは情報循環する形で無意識に統合されており、二つを分離する理由は弁証上の簡易性以上のもではない。また、現実社会からのサイエンスへの要請が、真理の探究から予測向上やリスク回避といった具体的な目標にシフトしてきているため、自然科学自体が認識科学から設計科学へ大きく変容しつつあると思われる。そこでビッグデータの登場である。ビッグデータは、研究対象をこれまでとは比較にならない緻密さとスケールで捉えるため、仮説提起と検証の情報循環プロセスをより緊密に協調・連携して実施可能になる。地球科学の本質的問題はすべて逆問題と言っても過言でないと思うが、逆問題にはそもそも設計科学的な考え方にもとづくアプローチが適している。つまり予測性能でもって現存の知識(モデル)を評価し、予測能力の向上をはかることで知識(モデル)改善の行う営みを永続的に続けるのである。ビッグデータの登場による情報循環の加速は、地球科学の認識科学から設計科学に向けたゆるやかな離脱と、新しい価値観もった研究者の増加を促すことであろう。本講演ではビッグデータの研究開発の潮流を傍観し、地球科学の研究スタイルがビッグデータの登場によりどう変わっていくのかを予想する。

キーワード: ビッグデータ, データ同化

Keywords: big data, data assimilation

## ハイパフォーマンスコンピューティングが拓く固体地球科学の未来 総合討論 Creating future of solid Earth science with high performance computing (HPC): Concluding discussion

日野 亮太<sup>1\*</sup>, 本蔵 義守<sup>2</sup>, 金田 義行<sup>3</sup>, 有川 太郎<sup>4</sup>, 市村 強<sup>5</sup>, 前田 拓人<sup>5</sup>, 堀 高峰<sup>3</sup>

Ryota Hino<sup>1\*</sup>, Yoshimori Honkura<sup>2</sup>, Yoshiyuki Kaneda<sup>3</sup>, Taro Arikawa<sup>4</sup>, Tsuyoshi Ichimura<sup>5</sup>, Takuto Maeda<sup>5</sup>, Takane Hori<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学, <sup>2</sup> 東京工業大学, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構, <sup>4</sup> 港湾空港技術研究所, <sup>5</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Tohoku University, <sup>2</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup>JAMSTEC, <sup>4</sup>Port and Airport Research Institute, <sup>5</sup>ERI, Univ. of Tokyo

ハイパフォーマンスコンピューティング(HPC)のめざましい進歩は、固体地球科学をどのように変えるだろうか? 招待講演を含む多角的な視点からの講演をうけ、今後10~20年という時間スケールで、HPCと固体地球科学との関わりを議論します。重要な科学的課題の解決とその成果の社会還元を視野にいれ、HPC開発の方向性に対する提言を、非講演者も含めた参加者の意見をもとに取りまとめます。その成果は、将来のHPCIシステムのあり方調査研究で改訂が進められている「計算科学ロードマップ白書」に反映させることを意図しています。

キーワード: ハイパフォーマンスコンピューティング

Keywords: High Performance Computing

## シミュレーションデータベース構築に向けた地震シナリオの蓄積 Accumulation of earthquake scenarios towards the construction of simulation database

兵藤 守<sup>1\*</sup>, 堀 高峰<sup>1</sup>  
Mamoru Hyodo<sup>1\*</sup>, Takane Hori<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト  
<sup>1</sup>JAMSTEC/SeismoLP

In recent years, earthquake cycle simulations based on plate motions and rock friction laws have been utilized for studies on the earthquake preparation process and repetition pattern of the earthquake which occurs in the plate boundary near the Japanese Islands (e.g., Hori et al., 2004, Nakata et al., 2012, etc.). In these studies, the target earthquakes are mainly events occurred in the past. Through the trial-and-error correction in the distribution of frictional property on faults, many forward simulations are carried out until the basic repetition patterns or magnitudes of target earthquake is reproduced. Then, for expecting the future repetition of target earthquakes, the extension of simulations for some tuned parameters might be utilized. However, an natural earthquake is a highly nonlinear problem with huge degrees of freedom, and the modeling error of forward simulations of earthquake cycles is generally large due to the simplicity. For this reason, "deterministic future prediction" is theoretically impossible through the above strategy based on the reproduction of old events.

That is, for the purpose of practical earthquake prediction, we need the prediction framework which can reflect the real-time observation data (such as crustal deformation) without large time lag, and can perform sequentially with increasing data. In order to realize such prediction, we propose the construction of a simulation database consisted of a large number of simulation results (scenarios) with various simulation models or model parameters. If such database is established, with the increase of realtime observation data, simulation results in the database are sequentially accessed and utilized to compare with observed data by likelihood evaluation. Then, the extrapolation of scenarios with higher likelihood values is regarded as the tentative prediction based on the last observation data. The large advantage of this prediction concept is that the resultant predictions have high flexibility according the real-time observation data.

Due to the recent development of domestic High Performance Computing Infrastructures(HPCI), such as K (RIKEN) or ES2 (JAMSTEC), within several days, we can calculate 100-1000 scenarios of quasi-dynamic earthquake cycle simulations, with moderate discretization (about 1km cell) of the plate interface (about 300kmx800km area). Now, for the Nankai Trough region where the next earthquake occurrence is anticipated, many earthquake scenarios with various frictional parameters are tried, and simulation database is under construction towards the establishment of earthquake prediction system.

In the presentation, we will introduce the more details of simulation database and the concept of our prediction system.

キーワード: ハイパフォーマンス・コンピューティング, 地震サイクルシミュレーション, データベース, 予測システム, リアルタイム観測データ

Keywords: High Performance Computing, earthquake cycle simulation, database, prediction system, realtime data

## 日本海溝における顕著な遠地実体波散乱の成因：大規模数値シミュレーションによる検討

### Cause of Significant scattering of teleseismic P-wave near Japan Trench as Inferred by Large-Scale Numerical Simulation

前田 拓人<sup>1\*</sup>, 古村 孝志<sup>2</sup>, 小原 一成<sup>1</sup>  
Takuto Maeda<sup>1\*</sup>, Takashi Furumura<sup>2</sup>, Kazushige Obara<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 東京大学総合防災情報センター  
<sup>1</sup>ERI, The University of Tokyo, <sup>2</sup>CIDIR, The University of Tokyo

#### はじめに

2009年7月15日に発生したニュージーランド南島付近(M7.8)では、日本列島の稠密高感度地震観測網(防災科研Hi-net)の20-50秒帯域の記録にきわめて顕著な散乱波が存在することが明らかになっている(前田・他, 2009)。本研究では、稠密記録のアレイ解析によってこの散乱波の起源をより精密に再検討するとともに、「京」コンピュータを用いた大規模な差分法シミュレーションによる地震波伝播の評価によってその成因を明らかにしたので報告する。

#### 散乱波の特徴とその起源

Hi-net記録の周期20~50秒の低周波数帯域での波動伝播の様子を把握するため、Maeda et al. (2009)のデコンボリューションフィルタにより計器特性を補正した上で、地震波位相の空間パターンの時間変化を調査した。その結果、南南東から北北西に向かう長波長のPP波に重畳して、関東地方から同心円状に位相速度約3.5 km/sで広がっていく波群が確認できた。この波形が観測された時間帯に他の大きな地震は無く、また高周波数成分に顕著な振幅が見られないことから、この波群は近地地震の直達波ではなく、日本列島周辺の地下不均質構造に伴う散乱波であると推定される。

その発生位置を推定するため、まず個々の観測点における波形記録を、直達波の波面に沿って重合することで得た平均的な直達波波形と、散乱波を主として含むと期待される残差波形とに分離した。それらのうち、残差波形に対し適当な見かけ速度を仮定したうえでセンブランス解析を行うことで散乱源の同定を行った。その結果、散乱源は千葉県南東沖の太平洋・フィリピン海プレート沈み込み口の三重会合点付近に決定された。アレイ解析に利用した観測点をランダムに変更するジャックナイフ法と、仮定する見かけ速度のグリッドサーチにより推定結果の安定性を評価したところ。推定された散乱源の位置のばらつきはたかだか40km以内、仮定した見かけ速度の違いによる系統的な推定位置のずれはたかだか80km以内に収まり、推定結果はきわめて安定していることが明らかになった。

#### 大規模数値シミュレーションによる検討

散乱波の成因について検討するため、「京」コンピュータを用いてMaeda et al. (2013)の大規模並列差分法コードを用いた数値シミュレーションを行った。計算は三重会合点を含む800 km(南北) x 1200 km(東西) x 600 km(鉛直)の範囲で行い、速度構造モデルは長周期地震動予測地図2012年試作版による全国一次地下構造モデル(暫定版)(Koketsu et al., 2008)とJTOPO30日本近海グリッド水深データを基礎とし、海域の地下構造データ欠落部分に地震活動等にもとづきなめらかなプレート境界を補外したものを利用した。鉛直下方から周期30秒のP波平面波を入射させ、地表面における地震動応答を評価した。

シミュレーションの結果、日本海溝に沿って顕著な散乱波が発生することが確認できた。この散乱波は、西方のプレート沈み込み方向に特に強く伝播する。これは、地表面と沈み込む太平洋プレートの境界面との間で重複反射した地震波がプレートの沈み込み方向に選択的に押し出されたためであると考えられる。同様のメカニズムによる散乱波はメキシコの沈み込み帯でも報告されており(Dominguez et al., 2012)、日本での観測事例はこのメカニズムを支持するものである。さらに、シミュレーションに海水層を考慮すると海水にトラップされた地震動がより継続時間の長い散乱波を生ずることが明らかになった。この効果は特に水深の深い三重会合点付近で顕著である。結果として、海水層を考慮したシミュレーションでは三重会合点付近から同心円状に広がる継続時間の長い散乱波が生成され、観測事実をよく説明する。

以上から、遠地実体波の入射により生成される散乱波は、沈み込むプレート境界面の大規模速度構造と、海水層内の重複反射による地震波増幅効果の複合要因で生成されることが明らかとなった。

謝辞：本研究は文部科学省HPCI戦略プログラム(分野3)「防災・減災に資する地球変動予測」の一環として行った。本研究の数値計算は理化学研究所計算科学研究機構の「京」コンピュータを利用した。記して謝意を表す。

キーワード: 地震波散乱, 沈み込み帯, 数値シミュレーション, ハイパフォーマンスコンピューティング, アレイ解析

# Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



---

STT59-P02

会場:コンベンションホール

時間:5月20日 18:15-19:30

Keywords: Seismic wave scattering, subduction zone, numerical simulation, high performance computing, array analysis



## スペクトル要素法を用いた全球を伝播する地震波形のシミュレーションについて Computation of teleseismic waves for large earthquake using Spectral-Element Method

坪井 誠司<sup>1\*</sup>, 中村 武史<sup>1</sup>, 古市 幹人<sup>1</sup>

Seiji Tsuboi<sup>1\*</sup>, Takeshi, Nakamura<sup>1</sup>, Mikito, Furuichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

地震は地球内部の大規模な破壊現象であり、断層面で発生した破壊により励起された弾性波である地震波は、地球内部を伝わって地球上の様々な部分に伝播していく。地震により励起された地震波を数値的に計算することは、1960年代から地球自由振動を用いた準解析的手法が用いられてきたが、地球の球対称からのずれを考えた場合は、数値解法を用いる以外に方法はない。我々は地球シミュレータ上でスペクトル要素法 (SEM) を用いて全球を伝播する地震波の計算を行ってきた。たとえば、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震について計算した例では、遠地実体波、強震動、測地データにより決定した多重震源解を用い、スペクトル要素法によって現実的な地球モデルに対する理論地震波形を計算し、観測波形との比較を行っている。震源解は Lee et al (2011) が、IRIS 広帯域地震計記録、強震計、GPS 観測網の記録を用いて決定した解を用いた。得られた解は、断層のサイズ: 400 km × 200 km、深さ: 24 km、破壊継続時間: 約 160 s、最大すべり量: 50.0m である。このモデルの破壊過程の時間分布は、大きく3回のピークを持っており最大すべりは震央から海側の海溝軸近くで起きているという特徴を持っている。震源モデルは、仮定した断層面上に9560個の点震源を時空間的に配置して震源の断層破壊過程をモデル化している。この多重震源解を用い地球シミュレータの127ノード(1014CPU)によって、周期3.5秒の精度で理論波形を計算することが出来る。遠地の観測点では、震源から南東方向と北西方向のそれぞれに伝播したP波および表面波の理論波形は観測を良く再現しており、震源モデルが破壊過程を良くモデル化している可能性を示唆している。同様な精度での計算は、京コンピュータの12288ノードを用いても実現しており、この場合は大幅な高速化が図れることが分かっている。地震により励起された地震波が地球表面を伝播していく過程は、球面上でポリゴンの変形により変位を3次元的に表現することのできる画像生成ツール (Furuichi and Tsuboi, 2012) により3次元的な動画により再現することが出来る。この動画は以下の URL から公開している。

<http://www.youtube.com/watch?v=j4tLFeJiAhY>

地震波伝播を3次元的に表現した動画からは、3次元構造による特徴的な地震波の位相も見ることが出来、より高精度な画像を作成することで地球内部構造の推定に手がかりを得ることが期待できる。

キーワード: 理論地震波形計算, スペクトル要素法

Keywords: Theoretical seismic waves, Spectral-Element Method

## 曲面スラブの沈み込みに伴う温度場・流れ場・地殻熱流量の3次元数値モデリング Three-dimensional numerical modeling of temperature, fluid flow and heat flow associated with subduction of curved slabs

季 穎鋒<sup>1\*</sup>, 吉岡 祥一<sup>2</sup>

Yingfeng Ji<sup>1\*</sup>, Shoichi Yoshioka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学理学研究科, <sup>2</sup> 神戸大学都市安全センター

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, Kobe University, <sup>2</sup>Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

In order to simulate distributions of temperature and fluid flow associated with subduction of a curved slab, we constructed a three-dimensional thermal convection model. We assumed that slab extends with time in a given shape with velocity of 6cm/year, dip angle of 10 deg. for 10 million years. We investigated the relation concerning shape of slab upper surface, subduction direction, distributions of temperature and fluid flow, and surface heat flow for various types of curved slabs. The results revealed a very likely relation between temperature distribution and upper surface shape of a slab, and composite subduction angle which is a compound of a dip angle and slab gradient slope angle along subduction direction. Not only thermal field, but also flow velocity differed greatly on each side of a curved slab. A bent slab leads to a complex fluid flow around it. The results also exhibited how oblique subduction performs in such a curved slab. Although symmetric slab shape models are constructed, oblique subduction resulted in some asymmetric patterns of interplate temperature and heat flow distributions. Isotherm on the plate interface appears to be dragged to the direction of oblique subduction, and low heat flow anomaly appeared on the descent slope of the subducting slab. Most of these simulated results are related to the composite subduction angle. The slab surface shallower than a depth of 60 km has a corresponding relation with surface heat flow distribution above it, whereas the effect gradually disappears when it is deeper than 60 km. Cooling effect associated with subduction is generally related to slab length from the model surface and the composite subduction angle. Large bent slab shape also has a negative effect on cooling down as compared with a flat one.

Keywords: curved slab, temperature, fluid flow, heat flow, numerical simulation

## HPCによる地球ダイナモシミュレーション研究 Numerical simulation of geodynamo with HPCs

宮腰 剛広<sup>1\*</sup>, 浜野 洋三<sup>1</sup>  
Takehiro Miyagoshi<sup>1\*</sup>, Yozo Hamano<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域  
<sup>1</sup>IFREE/Jamstec

スーパーコンピュータを用いて3次元球殻内で電磁流体力学方程式を解く地球ダイナモシミュレーション研究が始まってから約18年が経つ。この間に、自発的な磁場生成(ダイナモ)の過程、双極子磁場の再現、地磁気極性逆転の再現などの成果が得られてきた。コア内部は直接覗いて調べる事が出来ないため、数値シミュレーションから得られる知見は非常に有益なものである。

しかしながら、現在のスーパーコンピュータの能力の制約により、シミュレーションで使用されている物性値あるいは無次元パラメータの大部分は実際の地球コアのものとは何桁もかけ離れたものである。現在の知見がどの程度まで地球コアの対流やダイナモ、地磁気の特徴を捉えられているかを確かめるには、これらの物性値、特に粘性率を実際の値に近づけたシミュレーションを行う必要がある。

また、地磁気変動にはコア内だけでなくコア外からの影響(気候変動など)も関わっていると考えられるが、コア外からの影響を考慮したダイナモシミュレーションはあまり行われていない。地磁気変動を正確に理解しまた予測するには、今後それらの影響を考慮したシミュレーション研究が必要となる。

次世代のスーパーコンピュータでは、極端に時間スケールの異なるコア対流とマントル対流のカップリングに着目したシミュレーションが現実的なものになる可能性がある。もちろんその場合各々のシミュレーションで使用出来るパラメータ領域は制限されるであろうが、表層 マントル コアの活動がどのように結びついているのかを理解する上で有益な知見が得られるであろう。

本発表では著者らの研究成果なども交えながら以上のような、HPCの進展に伴うダイナモシミュレーション研究の今後取り組むべき方向性について提案する予定である。

キーワード: 地球ダイナモ, コア対流

## 惑星成長を伴うストークス流3次元コア形成シミュレーションコードの開発 Development of a simulation code for a growing planet with core formation in 3D

古市 幹人<sup>1\*</sup>, 中川 貴司<sup>1</sup>

Mikito Furuichi<sup>1\*</sup>, Takashi Nakagawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域

<sup>1</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Institute For Research on Earth Evolution

This talk introduces our developed a new numerical code for solving the Stokes flow in 3D to investigate the global core formation process in the planetary interior. The formation of a metallic core is widely accepted as the major differentiation event during planetary formation. In our simulation, the growing planet with the impact events and global sinking of the dense metal-rich material over long time scale are captured in the Stokes flow regime.

In order to simulate the core formation process in 3-D, we employ the spherical Cartesian approach. The surface of the material  $c$  is captured by the distribution of color functions. The dynamical boundary as a free surface is mimicked by surrounding low viscosity material with zero density, so-called sticky air. The viscosity of the sticky air varies laterally, depending on the neighbouring viscosity of planetary surface. Self-gravitating force is obtained by solving the gravity potential equation. For solving the momentum and continuity equations, we developed an iterative Stokes flow solver, which is robust to problems including jumps in the viscosity contrast. Our solver design consists of an inner and outer solver utilizing a strong Schur complement preconditioner and the Arnoldi type Krylov subspace method preconditioned with geometric multigrid method (GMG). We enhance the robustness of the inner solver for the velocity problem with a mixed (quad-double) precision Krylov kernel calculation. As the high precision calculation method, we employ the double-double precision algorithm which has high arithmetic intensity and is faster than normal quad arithmetic using a register or cache memory. Our mixed precision method improves the convergence of Krylov method without significantly increasing the calculation time.

All of our numerical algorithms are designed for the parallel-vector architecture especially for the Earth Simulator 2 (ES2). Our careful implementation of SOR smoother enables to achieve 34% of the peak performance of ES2 at the finest level of GMG. In the simulation with a grid size of  $256 \times 256 \times 256$ , our solver achieved 910.3Gflop using 8 nodes (13.9% of peak performance) which involves the cost for idling CPU for multigrid operations.

キーワード: コア形成, ストークス流れ, ジオダイナミクス, 混合精度演算, クリロフ部分空間法

Keywords: core formation, Stokes flow, mantle convection, double-double method, Krylov subspace method