

## 大規模計算を震源の理解につなげるために

### High-performance computing for understanding seismic sources

\*井出 哲<sup>1</sup>、堀 高峰<sup>2</sup>、市村 強<sup>3</sup>

\*Satoshi Ide<sup>1</sup>, Takane Hori<sup>2</sup>, Ichimura Tsuyoshi<sup>3</sup>

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2. 海洋研究開発機構、3. 東京大学地震研究所

1. Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

大地震が発生すると波形データを用いたインバージョン解析が行われ、震源における破壊すべりの時空間発展が推定される。この情報は震源における物理プロセスの理解に役立ち、また将来の地震をイメージする上でも重要なものであるが、解析条件によって結果にかなりのばらつきがあるのも事実である。このばらつきの原因は、たいてい観測データ自体が持つ誤差より、特に複雑な地下構造を正確にとりいれられないモデル誤差による。問題は構造に関する知識不足と、複雑な構造による波動計算の困難に分けられるが、特に後者に関しては最先端の大規模計算が役に立つかもしれない。

現在広く行われているインバージョン解析では、なるべくモデル誤差を小さくするために使えるデータが限られている。代表的なものは震源近傍の一次元速度構造で近似できる（と勝手に思っている）強震動や、PREMなどの一次元構造で計算される震源角距離30度から100度の遠地地震波形である。角距離数度から、30度までのデータは全く利用されていない。この距離範囲のデータは膨大であり、S/N比もかなり良い。但し波が複雑な経路をとるために、ある程度正確な地殻構造が必要で、またそれを用いた波動計算も簡単ではない。

正確な地殻構造と大規模計算機を用いた地震波形計算がこれらの問題を解決するかもしれない。複雑な速度構造を用いて大規模計算するための環境も整いつつある。Tsuboi et al. (2016)は1.2秒までの全地球三次元不均質構造について波形計算を行っているし、Ichimura et al. (2016)では日本周辺約3000kmスケールでの有限要素法により地殻変動場を計算しており、同様に波形計算も可能である。現実的三次元構造での理論波形計算は、利用可能なところまで近づいてきている。

これらの計算は原理的に可能だが、実際に行うには様々な煩雑さがある。例えば地理的座標と数値計算プログラム内部の座標表現のような単純な問題でさえ、実際に取り組む研究者をひるませる。特殊な条件の計算をひとつただけでは将来展望が開きにくく、やる気のでるテーマが必要である。そこで具体的なターゲットとして興味深い例をいくつか考えてみよう。

全地球三次元不均質構造の波形計算はコストがかかりすぎるが、海溝近傍の地形や沈み込むスラブを取り入れるだけで中間～遠地地震波形の精度はかなり向上する。日本のような密な観測網の下では震源情報だけから、沈み込むスラブの形は明らかであるが、世界の多くの沈み込み帯では詳細な速度構造がわからず、中間距離での地震データを十分活用できていないために、震源位置でさえ誤差が大きい。世界の沈み込み帯を数百km程度の小領域にわけ、各領域について海底地形とスラブを取り入れた地震波形のデータベースが作成できれば、世界各地での地震防災に貢献するとともに、比較沈み込み帯学にブレークスルーをもたらす。

一方で日本のような膨大な観測が行われている場所では、より高度なモデリングを目指す価値がある。トモグラフィー、レシーバー関数などの構造情報を取り入れることで、日本全域で日常的に発生する地震の波形をどこまで説明できるのか、実はほとんど知られていない。現実の地震波形と比較し、さらにチューニングしていくことで、近い将来、ある程度低周波であれば、日本周辺の地震の全波動場をすべて説明できるようになるかもしれない。そうすれば巨大地震の破壊すべりモデルの不確定さを大きく減らすことができる。

近年たくさん設置されている海底ケーブル地震計のデータは沈み込み帯の地震の理解に決定的な情報を与えるが、その解析はかなり難易度が高い。海底地形と海水の効果はもちろん、厚い堆積層の影響を適切に見積もることが必要となる。2016年4月1日に熊野灘で起きた地震は、これらの効果を適切に見積もることができなかったために、発生直後それがプレート境界の地震かどうかがわからなかった。幸いDONET1の近辺では日常的な地震に加えて、様々な帯域でスロー地震が発生しており、適切なモデル化と波形インバージョンで正確な

理論計算が可能になる。この理論計算波形は防災上の意義はもちろんスロー地震の理解にも役立つ。

キーワード：震源過程、理論波形、沈み込み帯

Keywords: Earthquake source process, Theoretical waves, subduction zones

## 3次元地下構造モデルを用いた沖合の浅発地震のメカニズム解推定と地震波伝播：2016年4月1日に発生した三重県南東沖の地震

### Moment tensor inversion of 2016 Southeast Off Mie earthquake via numerical simulation using a three-dimensional velocity structure model

\*武村 俊介<sup>1</sup>、木村 武志<sup>1</sup>、汐見 勝彦<sup>1</sup>、久保 久彦<sup>1</sup>、齊藤 竜彦<sup>1</sup>

\*Shunsuke Takemura<sup>1</sup>, Takeshi Kimura<sup>1</sup>, Katsuhiko Shiomi<sup>1</sup>, Hisahiko Kubo<sup>1</sup>, Tatsuhiko Saito<sup>1</sup>

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

#### はじめに

2016年4月1日に三重県南東沖を震源としたMw 5.8の地震が発生した。1944年東南海地震の破壊開始点付近であることから、地震のメカニズム解に大きな注目が集まっている。しかし、震源域が海域であることから、観測された地震動には沈み込むフィリピン海プレート、海洋堆積物（付加体）、海水層の影響が含まれていることが考えられる。実際に、沈み込むフィリピン海プレートの影響で初動極性から発震機構解を推定するのは困難であることが報告されている（Takemura et al. 2016）。そこで、本研究では、3次元不均質構造を用いた地震動シミュレーションによるGreen関数（以下、3次元Green関数）を用いたモーメントテンソルインバージョンにより、この地震のメカニズム解を推定することを試みる。

#### 手法

3次元Green関数の計算には地球シミュレータに最適化された差分法による並列地震動計算コード（Furumura and Chen, 2004; Takemura et al. 2015）を用いる。格子間隔などの技術的な詳細はTakemura et al. (2016)と同様である。3次元不均質構造モデルとして、全国1次地下構造モデル（Koketsu et al. 2012）を用いた。震央位置は気象庁一元化震源で固定し、セントロイド深さを様々に変え、周期30-100秒のF-net変位波形とのVariance Reductionが最小となる解を探索した。

#### 結果

3次元Green関数を用いてモーメントテンソルインバージョンを行ったところ、F-net MT解と比べ浅く低角な逆断層が最適解となった。長周期の変位波形だけでなく短周期のP波初動について比較を行ったところ、F-net MT解では観測と計算初動極性の間に一部不一致が認められたが、本研究で推定された解では改善され、観測された初動の特徴を再現することに成功した。

現状のモデルセッティングでは周期1.4秒まで計算を行っているため、1つの要素モーメントテンソルの計算に地球シミュレータ256ノードで1.5時間ほどかかっているが、長周期成分に特化することで、南海トラフの海溝型地震に特化した3次元Green関数を作成することが可能と考えられる。

#### 謝辞

防災科学技術研究所のHi-net/F-net/DONETの波形記録およびF-net MT解を使用しました。数値シミュレーションには海洋研究開発機構の地球シミュレータを使用しました。

キーワード：南海トラフ、地震、3次元地下構造、モーメントテンソル解、地震動シミュレーション

Keywords: Nankai Subduction zone, Earthquake, three-dimensional velocity structure, Moment tensor inversion, Numerical simulation of seismic wave propagation



## 京コンピュータによる全球理論地震波形計算

### Global seismic wave computation on the K computer

\*坪井 誠司<sup>1</sup>、安藤 和人<sup>2</sup>、三好 崇之<sup>3</sup>、Daniel Peter<sup>4</sup>、Dimitri Komatitsch<sup>5</sup>、Jeroen Tromp<sup>6</sup>

\*Seiji Tsuboi<sup>1</sup>, Kazuto Ando<sup>2</sup>, Takayuki Miyoshi<sup>3</sup>, Daniel Peter<sup>4</sup>, Dimitri Komatitsch<sup>5</sup>, Jeroen Tromp<sup>6</sup>

1. 海洋研究開発機構、2. 理化学研究所計算科学研究機構、3. 東京大学地震研究所、4. アブドラ王立科学技術大学、5. エクスーナルセイユ大学、6. プリンストン大学

1. JAMSTEC, Center for Earth Information Science and Technology, 2. RIKEN, RIST, 3. Univ. Tokyo, Earthquake Research Institute, 4. KAUST, 5. Aix-Marseille University, 6. Princeton University

地球内部構造を推定する上で、地震により励起された地震波による地震学的手段を用いることが一般的である。地震により励起され地球内部を伝播する地震波は、弾性体力学の運動方程式で記述され、地球が完全な球であるならば理論的な解析解が存在するが、地球は回転楕円体の形状をしており、地球内部の構造も球対称構造からのずれの成分は大きく、理論的に地震波を計算するために解析的手法を用いることは期待できない。一方、地球を構成する岩石の弾性的性質により、地震波のP波およびS波では周期1秒の波が卓越することが知られている。したがって、観測された地震波形を再現する理論地震波形計算において周期1秒の精度は到達すべき大きな目標であった。近年、大型計算機の発展と共に、数値的手法により理論的な地震波形を計算することは大きな進歩を成し遂げてきた。我々は2003年に当時世界最速のスーパーコンピュータであった「地球シミュレータ」を用いて、初めて現実的な地球モデルに対して周期5秒の精度で全球地震波伝播計算を実施した。全球地震波伝播計算では、有限要素法の一つであるスペクトル要素法を用いた。スペクトル要素法の計算では地球モデルの分割は地球全体を6個の四角錐に分割し、それぞれの四角錐をさらに細かい四角錐に分割してスーパーコンピュータの個々のCPUに割り当てて計算を実行する。2003年の計算では、周期5秒の精度で計算を実施するために地球シミュレータの1944個のCPUを用いて地球モデルを55億個の格子点に分割した。しかしながら、現実的な地球モデルに対して全球を伝播する地震波形を周期1秒の精度で計算するためには、さらに数十倍の細かさで行うことが必要であった。今回我々は、スペクトル要素法を用いてスーパーコンピュータ「京」の82,134ノード(全ノードの99%)により、地球モデルを6,652億個の格子点に分割することで周期約1.2秒の精度での理論地震波形記録計算を実施した。「京」上で大規模な計算シミュレーションを実行して十分な性能を発揮するためには、スペクトル要素法のプログラムを最適化することが必要である。今回、プログラム中の計算量の8割を占める部分の最適化を図り、8CPUを用いて計算量を分割した場合の性能向上が7.89倍となった。さらに、並列計算での性能を示すストロング・スケーリングでも、同じ規模の計算を36,504ノードで実行した場合と比較して、82,134ノードでの結果は99.54%の性能を示すという、極めて良好な結果が得られた。82,134ノードを用いた計算では、実効性能が1.24ペタフロップス(ピーク性能比11.84%)という性能となった。この計算では、2011年東北地方太平洋沖地震(マグニチュード9.0)により励起された地震波を日本列島付近の地震観測点で観測された地震波形と比較することを試みた。長野県松代の地震観測点における地震波形と理論波形を比較した結果は良い一致を示しており、地震の初期破壊の様子を周期1.2秒の精度で計算シミュレーションした理論地震波形が良く再現していることを示している。

謝辞：本研究は、文部科学省による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」の研究課題「地震の予測精度の高度化に関する研究」(課題代表者 古村孝志、課題番号 hp130013)の一環として実施された

キーワード：地震波形計算、スペクトル要素法、京コンピュータ

Keywords: seismic wave propagation, spectral element method, K computer

## 物理モデルと測地データに基づく地殻変動のモデリング

# Modeling crustal deformation with mechanical models and geodetic data

\*福田 淳一<sup>1</sup>、Johnson Kaj<sup>2</sup>

\*Jun'ichi Fukuda<sup>1</sup>, Kaj M. Johnson<sup>2</sup>

1. 東京大学地震研究所、2. Indiana University

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Indiana University

Over the past two decades, development of dense and continuous geodetic networks makes it possible to capture transient crustal deformation at high resolution in both space and time. A primary example of geodetically observed transient deformation in plate boundary zones is postseismic deformation following large earthquakes. Postseismic deformation observed at the surface reflects mechanical properties of faults, crust, and upper mantle. Thus mechanical models that are designed to fit the observed postseismic deformation may provide insights into these mechanical properties at depth.

Two primary processes that are responsible for postseismic deformation are viscoelastic relaxation of coseismic stress changes in the upper mantle and afterslip on the plate interface surrounding the coseismic rupture. Viscoelastic relaxation is governed by the rheological properties of the crust and upper mantle, while afterslip is governed by frictional properties of the plate interface. Both of the processes are initiated by stress changes due to coseismic slip. Therefore, geodetic observations of postseismic deformation could be used to constrain the frictional properties on the plate interface and upper mantle rheology.

In this talk, we present a three-dimensional coupled model of stress-driven frictional afterslip and viscoelastic stress relaxation for postseismic deformation following the 2011 Mw9.0 Tohoku-oki earthquake. In this model, we assume that afterslip is governed by a velocity-strengthening friction law that is characterized with a friction parameter  $(a-b) \sigma$ . Viscoelastic relaxation of the upper mantle is modeled with a biviscous Burgers rheology that is characterized with the steady-state and transient viscosities. We calculate the evolution of afterslip and viscoelastic relaxation using an assumed coseismic slip model as the initial condition.

We examine the effects of the friction parameters, mantle viscosities, elastic thickness of the slab and upper plate, and coseismic slip distribution on the model prediction and find that these parameters significantly affect the predicted surface postseismic displacements. Postseismic deformation following the 2011 Tohoku-oki earthquake has been captured by both on-land GNSS and seafloor GPS/Acoustic networks. We thus explore the range of the model parameters that can fit the postseismic observations. At this moment, we employ a trial-and-error approach to estimate the parameters. However, given the complexity of the model and the abundance of the observations, it is difficult to completely characterize uncertainties and trade-offs between the parameters by the trial-and-error approach, although such information is critically important for better understanding of the postseismic processes. A more complete model that fully accounts for uncertainties and trade-offs between the parameters could be obtained by building posterior probability distributions of the parameters using Bayesian inverse methods. Such Bayesian methods, however, require many forward calculations and thus it would not be easy to implement those methods with our model within a realistic computation time. It is therefore essential to

reduce the computational costs of the forward model simulations and Green's functions calculations, as well as to develop more efficient Bayesian methods to estimate posterior probability distributions, in order to develop more advanced models of geodetically observed postseismic deformation.

キーワード：地殻変動、物理モデル、測地データ

Keywords: crustal deformation, mechanical model, geodetic data

## A Bayesian hierarchical model for a seismic source inversion

笠原 天人<sup>1</sup>、\*八木 勇治<sup>2</sup>

Amato Kasahara<sup>1</sup>, \*Yuji Yagi<sup>2</sup>

1. 筑波大学大学院生命環境科学研究科、2. 筑波大学大学院生命環境系

1. Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 2. Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

The earthquake rupture processes of earthquakes are diverse reflecting the heterogeneous distribution of fault constitutive properties and stress, and fault geometry. Kinematic source parameters constrained by data provide the information related to the fault rupture dynamics and statistical properties of rupture processes. It is also used as an input for the calculation of Coulomb stress changes, the calculation of tsunami waveforms and the estimation of slip deficit.

A source inversion analysis using spatio-temporal displacement field data is able to be formulated as a discrete linear inverse problem when the Green function and the source fault are known. However, it is difficult to calculate an accurate Green function due to the lack of the accurate Earth structure model. Effects of the uncertainty of the Green function on the result of an inverse analysis increases with the improvement of the quality and the increase of the amount of data. Some of previous studies approximated the effects of the uncertainty of the Green function by introducing a new correlated and/or uncorrelated error term, which is added to data. The approximation, however, fails to capture important characteristics of the effects of the uncertainty of the Green function such as peak shift and heavy tails of the likelihood function under the uncertainty of the Green function.

To address the issue, we propose a hierarchical Bayes model for a seismic source inversion analysis. The model is targeted to the multi-data analysis with the multi-time-window finite fault source parameterization. We assume Gaussian observation errors and a Gaussian prior distribution for model parameters. In the model, a Green function is treated as a realization of a random variable  $G$ . We approximate the posterior distribution of the model parameters by approximately marginalizing  $G$  and the hyperparameters, which control the variance of the prior distribution of the model parameters and the variance of the observation errors. The marginalization of the hyperparameters is approximated by plugging in the maximum a posteriori hyperparameters given  $G$ . The marginal likelihood function for  $G$  is approximated by the Laplace approximation to the conditional posterior distribution of the hyperparameters given  $G$ . The marginalization of  $G$  is approximated by a Monte-Carlo integration method. The precisions of the two approximations are able to be improved by increasing the amount of data and number of samples of  $G$ .

We applied the method to synthetic data for far-field vertical P-wave displacement waveforms. We set a 1-D velocity structure consisting of two layers at the source region. We set the P-wave velocity, the S-wave velocity and the density of each layer to follow uniform distributions. We also set the depth of the interface of the layers to follow a uniform distribution. We made the true velocity structure by randomly sampling the 25th percentile point or the 75th percentile point for each random variable. We drew thousands of velocity structure samples from the probability density function (PDF), and then calculated the corresponding Green functions. For reference, we also conducted a conventional inversion, which used only a reference velocity structure (50th percentile point of the PDF of the velocity structure). We found that the conventional inversion result suffers artifacts especially at the later shallow part of the

rupture process, while the result with the proposed method does not suffer from the artifact. Note that the mitigation of the artifact was not possible with the simple mean-of-the-posterior-mean approach. We also found increase of the Variance of the posterior distribution of the potency due to the marginalization of  $G$ .

The method could be a reasonable counterpart for the recent increase of Bayesian approaches with Monte-Carlo methods to study velocity structures.

キーワード：階層ベイズモデル、震源過程解析

Keywords: Bayesian hierarchical model, Seismic source inversion

## HPCが拓く固体地球科学の未来：議論

### Creating future of solid Earth science with HPC: Discussion

\*堀 高峰<sup>1</sup>

\*Takane Hori<sup>1</sup>

1. 独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター

1. R&D Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

近年の計算機科学・計算科学の発達によって、様々な分野で従来は困難と考えられてきたフォワード計算やそれを利用した逆解析が可能になりつつある。固体地球科学においても、高密度化する観測データをフルに活用した高詳細なモデルでの地震波伝播や地殻変動・津波伝播の計算、多数回計算を行うことによる物性や構造の誤差の影響の検討、誤差にガウス分布以外の一般的な分布を許した断層すべりの逆解析などが行われつつある。そこで、実際にフォワード計算や逆解析を行っている方々に現状の手法の抱える問題を提起して頂くとともに、計算機科学・計算科学の発達についても講演頂き、これらを固体地球科学分野の様々なフォワード計算や逆解析にフルに活用して解決していく方向性について議論する。

キーワード：ハイパフォーマンス・コンピューティング、高詳細モデル、データ解析

Keywords: high performance computing, high fidelity model, data analysis

## 地震動シミュレーションによる長周期地震動の振幅と卓越周期についての考察：関東堆積盆地を対象とした検討

### A study on the characteristics of amplitude and dominant period of long-period ground motions via 3D finite-difference simulation: A case study for the Kanto sedimentary basin

\*吉本 和生<sup>1</sup>、鍛治川 謙吾<sup>1</sup>、和泉 綾華<sup>1</sup>、島津 香織<sup>1</sup>、武村 俊介<sup>2</sup>

\*Kazuo Yoshimoto<sup>1</sup>, Kengo Kajikawa<sup>1</sup>, Ayaka Izumi<sup>1</sup>, Kaori Shimazu<sup>1</sup>, Shunsuke Takemura<sup>2</sup>

1. 横浜市立大学大学院生命ナノシステム科学研究科、2. 国立研究開発法人防災科学技術研究所

1. Graduate School of Nanobioscience, Yokohama City University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

#### はじめに

関東堆積盆地では周期数秒以上の長周期地震動が頻繁に観測され、その卓越周期は観測地点の地震基盤深度と関係があることが指摘されている（例えば、Yoshimoto and Takemura, 2014b）。より詳細な解析からは、複雑な地震基盤構造の影響で震央方位による長周期地震動の励起の大きさに差異（震央方位依存性）が現れることや東京湾周辺の地域での長周期地震動の卓越周期の長周期化などが報告されている（例えば、湯沢・南雲, 2012; 鍛治川・他, 2016 SSJ）。しかしながら、このような長周期地震動の励起と発達の素過程についての理解は必ずしも十分には進んでいない。

そこで本研究では、関東堆積盆地における長周期地震動の励起と発達の素過程の把握を目的として、単純化した堆積層－地震基盤系の地震波速度構造モデルを使用して、堆積層の地震波速度構造と地震基盤の形状が長周期地震動の振幅と卓越周期に与える影響について詳しく調べた。また、大規模な実地震動シミュレーションを実施し、既往の関東堆積盆地の地震波速度構造モデルの問題点を明らかにするとともに、今後の研究の課題について検討した。

#### 長周期地震動シミュレーション

浅発の中規模地震による長周期地震動の発生を模擬した3次元差分法地震動シミュレーションを実施した。解析対象とする長周期地震動の周期を4秒以上とし、堆積層－地震基盤系構造と震源を含む150×60×72 km<sup>3</sup>の領域を計算対象として、この領域を0.15 km間隔で離散化した。堆積層の地震波速度構造モデルには、中深層観測井におけるVSP検測結果（Yoshimoto and Takemura, 2014a）を基にした横浜モデル（Yモデル）、千葉モデル（Cモデル）、岩槻モデル（Iモデル）を使用した。地震基盤の形状は、簡単のため、水平な形状（深度3.5km）とその一部が盛り上がった形状（3種類）を仮定した。地震基盤以深はJIVSM（Koketsu et al., 2012）を模擬した水平成層構造とした。震源には、横ずれ断層型と逆断層型の点震源モデルを採用し、それぞれLove波とRayleigh波の励起源とした。地震動シミュレーションは、小規模なワークステーション（2 Intel Xeon E5-2640V3, 16 cores）で行った。

#### 長周期地震動シミュレーションの結果

##### (1) Love波とRayleigh波の特徴

横ずれ断層型の震源モデルを用いた地震動シミュレーションでは単峰性のLove波エンベロープが見られたのに対して、逆断層型の震源モデルを用いた場合には分散性の強いRayleigh波エンベロープが見られた。これはLove波では基本モードが卓越するのに対して、Rayleigh波では基本モードだけではなく高次モードも発達するためであると解釈された。Rayleigh波の水平動成分と上下動成分の最大地動速度振幅（PGV）を比較したところ、水平動成分の方が大きなPGVを示す傾向が見られた。この特徴は、高次モードの振幅が優勢に発現したためと解釈される。

## (2)地震基盤形状とPGV

地震基盤の盛り上がりの大きなモデルほど大きなPGVを示す傾向が見られた。この傾向は、堆積層浅部で励起された比較的短周期のLove波によるAiry相の強化によって発生するものと解釈された。この結果は、関東堆積盆地の北部および西部で観測される単峰性のエンベロープをもった大振幅の長周期地震動が、堆積盆地端部でのLove波の強い励起によって引き起こされる事例を説明する。

## (3)長周期地震動の局所的な増幅

一定速度の堆積層からより低速度の堆積層に表面波が伝播することにより、長周期地震動の振幅が増幅することが確認された。例えば、YモデルからCモデルにLove波が伝播する場合には、フーリエスペクトルのうち周期5秒以上でスペクトル振幅が増幅し、特に周期10秒程度で東京湾周辺の地域で観測されたような大きな増幅が見られた。

上記の地震動シミュレーションで確認された長周期地震動の特徴は、JIVSMやSBVSM（増田・他、2016 SSJ）を用いた大規模な実地震動シミュレーションにおいても共通して見られる。しかしながら、これらの地震波速度構造モデルには、観測波形の再現性において東京湾周辺や関東平野西縁などの地域で改善の余地が残されている。今後の研究では、大規模な地震動シミュレーションによる逆解析（例えば、Iwaki and Iwata, 2011）を基本としながらも、本研究のようなフォワードモデリングによる表面波の励起と伝播の素過程の把握、さらに小規模地震動シミュレーションに局所的な実構造モデルを取り入れた逆解析などにより、総合的に関東堆積盆地の地震波速度構造モデルを高度化する必要があるものと考えられる。

キーワード：長周期地震動、関東堆積盆地、堆積層構造、表面波、最大振幅、卓越周期

Keywords: Long-period ground motion, Kanto sedimentary basin, Sedimentary structure, Surface wave, Maximum amplitude, Predominant period

# 大規模粘弾性有限要素解析を用いた準静的な地震サイクルシミュレーション手法の開発

## Quasi-static earthquake cycle simulation based on large-scale viscoelastic finite element analyses

\*縣 亮一郎<sup>1</sup>、市村 強<sup>2</sup>、兵藤 守<sup>1</sup>、Barbot Sylvain<sup>3</sup>、堀 高峰<sup>1</sup>

\*Ryoichiro Agata<sup>1</sup>, Ichimura Tsuyoshi<sup>2</sup>, Mamoru Hyodo<sup>1</sup>, Sylvain Barbot<sup>3</sup>, Takane Hori<sup>1</sup>

1. 海洋研究開発機構、2. 東京大学地震研究所、3. 南洋理工大学

1. JAMSTEC, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Nanyang Technological University

地震サイクルシミュレーションは、固体地球分野で地震発生過程を説明するために研究されているほか、地震発生シナリオを抽出して地震被害予測に役立てるなど、地震工学的側面においても重要な役割が期待される。シミュレーション手法として、地殻変動計算に半無限媒質でのグリーン関数を用いた境界要素法的なアプローチと、断層面上の速度・状態依存摩擦則を組み合わせた方法(e.g. Hori 2009; Barbot et al. 2012)がよく研究され、広く用いられている。一方、地殻変動計算においては、三次元的に複雑かつ不均質な地殻構造の影響や、マントルレオロジーや重力など非線形な物理からの影響が無視できない場合があると考えられる。これらを考慮するためには、有限要素法などの数値解析手法を用いた地殻変動計算と速度・状態依存摩擦則を組み合わせたサイクルシミュレーション手法を構築することが望ましい。このようなアプローチは従来計算コストの問題で実現が難しかったが、近年のスーパーコンピュータに適した高速有限要素ソルバー開発(Ichimura et al. 2016)などで解決可能と考えられる。そこで本研究ではIchimura et al. (2016)で開発された粘弾性有限要素解析による地殻変動計算手法を、速度・状態依存摩擦則に基づいた地震サイクルシミュレーションに適用する。

地震サイクルシミュレーションの支配方程式は、運動方程式、速度・状態依存摩擦構成則、状態変数の時間発展則の式からなる。ただし、従来は応力変化の計算にすべり応答関数の重ねあわせを用いていた部分を、有限要素法による粘弾性変形の時刻暦応答計算に置き換える。時間積分やその他の手法についてはすべてHyodo and Hori (2014)と同じものを用いる。

現在、正方形断層面の中央部に円形のすべり弱領域を配置した規範的な三次元問題(Noda and Hori, 2014)により、開発したコードの動作確認等を行っている。発表当日には、弾性変形のみを考慮したシミュレーションにより、既往手法における結果との比較を示す。また可能であれば、マントルレオロジーの例として粘弾性変形を考慮した場合の地震発生過程の変化についても考察する。

キーワード：地震サイクルシミュレーション、有限要素法、速度・状態依存摩擦則、大規模数値シミュレーション

Keywords: Earthquake cycle simulation, Finite element method, the rate- and state-dependent friction law, large-scale numerical simulation

# 南海トラフ地震震源域内で中～大規模地震が発生した後の推移の フォワードシミュレーションと対応する地殻変動

## Forward simulation of postseismic process after moderate and large interplate earthquakes along the Nankai Trough

\*兵藤 守<sup>1</sup>、縣 亮一郎<sup>3</sup>、市村 強<sup>2</sup>、堀 高峰<sup>1</sup>

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

1. 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター、2. 東京大学 地震研究所、3. 東京大学大学院工学研究科  
1. Earthquake and Tsunami Forecasting System Research Group R&D Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. School of Engineering, The University of Tokyo

従来の描像からは南海トラフでは、地震間における地震活動は低調で、蓄積した歪は、M8クラスの巨大地震によってのみ間欠的に解消されると考えられていた。しかし、2016年4月1日に南海トラフ地震の想定震源域内で且つ1944年の東南海地震震源近傍の熊野灘においてM6クラスの地震が発生している。また、最近の研究成果によると、宝永地震のような過去の超巨大イベントでは日向灘にまで南海トラフ地震の震源域が拡大していたことが示唆されており、過去においては南海トラフ地震の震源域内でM7クラスの地震(例えば1498年日向灘地震)も発生していたことになる。

巨大地震の震源域内で中～大規模地震が発生した後の挙動としては、上で述べた2016年の南海トラフにおける熊野灘の地震のようにそのまま収束する場合もあれば、東北地方太平洋沖地震の前震(2011年3月9日)のように、その後引き続き巨大地震に至ることもある。このように中～大規模地震後に多様な変動が起こり得るのは、震源域の巨大地震への切迫度に応じて中～大規模地震後の余効すべりの起こり具合が変化するためである。つまり、M6-7地震の地震が巨大地震の想定震源域内で発生した際には、引き続き地表・海底で観測される地殻変動の推移を適切に捉えることにより、余効すべりの進展パターンや、その後引き続き発生しうるシナリオを絞り込むことができる可能性がある。

本講演では、南海トラフを対象に、これまでに蓄積されている様々な地震サイクルシミュレーション結果に対し、日向灘でのM7地震や熊野灘でのM6地震を様々なタイミングで発生させることによって、余効すべりの進展パターンと巨大地震との切迫度の関係をまずは調べる。次に余効すべりの進展パターンによって、既存地殻変動観測網でどういった地殻変動が期待されるかを整理し、既存の地殻変動観測から余効すべりの進展パターンが区別できるのかの検討や、より進展パターンを識別しやすくするために必要な観測量・観測点配置の検討を実施する。なお、余効すべりから期待される地殻変動の評価には、半無限弾性モデルのみならず、高詳細な地殻構造や地表形状を考慮した有限要素モデルを用いた地殻変動のフォワードシミュレーション(例えば Agata et al., 2015, Ichimura et al., 2016) を通しても実施し、より現実的な条件で期待される地殻変動を見積もる。

キーワード：南海トラフ地震、地殻変動、巨大地震の切迫度

Keywords: Nankai Trough earthquake, crustal deformation, urgency of the great earthquake

## Challenge of Preparing for Careers in Big Data in Geosciences

Larry Zheng<sup>1</sup>, \*Gabriele Morra<sup>2,1</sup>, David A. Yuen<sup>3,1</sup>, Davin Loegering<sup>1</sup>, Henry Tufo<sup>4,1</sup>, Chuck Li<sup>5,1</sup>

1. Mc Data , Wuhan, 2. Department of Physics, University of Louisiana at Lafayette, LA, 3. Department of Earth Sciences, University of Minnesota, Minneapolis, MN , 4. Department of Computer Science, University of Colorado, Boulder, CO, 5. Wuhan Huawei Technology Co., Ltd

In the aftermath of the 2008 financial crisis we have seen the steady encroachment of Big Data into every facets of society, from finances to medical services. Students graduate lacking technological skills despite needing them in the lab and on the field. We believe that putting a stronger emphasis on programming and technology will prepare them for the demands of today' s modern job market in the geosciences and to use better measurement and analysis technology.

Our curriculum in educating students needs some changes, but universities move too slow. Therefore training centers are sorely needed. For this reason, we have established Mc Data Consult Ltd., based now in Wuhan, but poised to move anywhere.

Our aims are four fold:

- (1) To establish training courses at both fundamental and advanced levels, which will be taught with customized software embedded within a affordable data-analytic tool box built with (a) cheap processors such as Raspberries Pi and (b) higher-end Nvidia TX1. Students can learn and perform exercises according to their available time slots.
- (2) To provide professional consulting for various Big Data challenges encountered in industries.
- (3) To hold workshops and international conferences where we can mix people from various disciplines and engage them in Big Data immersion.
- (4) We also see the need to prepare suitable textbooks , focusing on high-performance computing, visualization and data analytics. We maintain that Python holds the key for preparing the students in Big Data analytics.

To be sure, the big data problem is not a new paradigm for geoscience. For instance, Peter Shearer (1991) used a relatively simple 1-dimensional velocity model to stack thousands of long-period body waves, revealing two upper mantle discontinuities, which was the first successful "big data" application: the primary computing happens for data processing, not for artificial modeling. Thus, we believe that geoscientists can be prepared to adapt to the big data era once they master the modern tools: they should master an open programming language suitable for large data, such as Python, and know how to harness parallel and distributed systems. They should learn sound software engineering skills, just as a wet chemist needs to learn to wash glassware. They should learn to produce a reproducible work: all analyses should be scripted and point-and-click tools should be avoided. They should have skills in data visualization and should master the rudiments of nonparametric, computationally based statistical inference, such as permutation tests.

Keywords: Big Data, Machine Learning, High Performance Computing, Python, Education