

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¹、堀 高峰²、市村 強³

*Satoshi Ide¹, Takane Hori², Ichimura Tsuyoshi³

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し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、比較沈み込み帯学研究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¹、木村 武志¹、汐見 勝彦¹、久保 久彦¹、齊藤 竜彦¹

*Shunsuke Takemura¹, Takeshi Kimura¹, Katsuhiko Shiomi¹, Hisahiko Kubo¹, Tatsuhiko Saito¹

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¹、安藤 和人²、三好 崇之³、Daniel Peter⁴、Dimitri Komatitsch⁵、Jeroen Tromp⁶

*Seiji Tsuboi¹, Kazuto Ando², Takayuki Miyoshi³, Daniel Peter⁴, Dimitri Komatitsch⁵, Jeroen Tromp⁶

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・スーマルセイユ大学、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 淳一¹、Johnson Kaj²

*Jun'ichi Fukuda¹, Kaj M. Johnson²

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¹、*八木 勇治²

Amato Kasahara¹, *Yuji Yagi²

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¹

*Takane Hori¹

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