

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^{1*}, 堀 高峰¹

Mamoru Hyodo^{1*}, Takane Hori¹

¹ 海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト

¹JAMSTEC/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^{1*}, 古村 孝志², 小原 一成¹
Takuto Maeda^{1*}, Takashi Furumura², Kazushige Obara¹

¹ 東京大学地震研究所, ² 東京大学総合防災情報センター
¹ ERI, The University of Tokyo, ² 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リ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。記して謝意を表する。

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^{1*}, 中村武史¹, 古市幹人¹

Seiji Tsuboi^{1*}, Takeshi, Nakamura¹, Mikito, Furuichi¹

¹ 海洋研究開発機構

¹JAMSTEC

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^{1*}, 吉岡 祥一²

Yingfeng Ji^{1*}, Shoichi Yoshioka²

¹ 神戸大学理学研究科, ² 神戸大学都市安全センター

¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, Kobe University, ²Research 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^{1*}, 浜野 洋三¹
Takehiro Miyagoshi^{1*}, Yozo Hamano¹

¹ 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域
¹IFREE/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^{1*}, 中川 貴司¹

Mikito Furuichi^{1*}, Takashi Nakagawa¹

¹ 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域

¹ 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