

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740333

研究課題名(和文)地震動と津波の3次元動的統合シミュレーション

研究課題名(英文) Unified three-dimensional numerical simulation of seismic and tsunami wave propagation

研究代表者

前田 拓人 (Maeda, Takuto)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：90435579

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、研究代表者がこれまで開発して来た地震と津波を一つの方程式系で同時に評価することのできる「地震・津波動的統合計算法」を大きく発展させ、現実的な地形・速度構造をもつ3次元に拡張した。この方法は、運動方程式に重力項を付加し、静水圧平衡のもとで弾性体と流体の現象を一つの方程式系の差分法により同時に計算するものである。大規模な並列シミュレーションに耐えるようなコード開発に成功し、2011年東北地方太平洋沖地震の地震津波統合シミュレーションを実施することで、海底ケーブル地震津波計をはじめとした地震・津波観測記録を再現することに成功した。

研究成果の概要(英文)：We developed a unified method on synthesizing seismic- and tsunami- wave propagation by single set of equation of motion. The original method and numerical code is further extended to the three-dimensional space having realistic topography, bathymetry and inhomogeneous medium structure. This method takes constant gravity force into account to the elastic equation of motion, and solves it under the equilibrium state by using finite difference method. We succeeded in developing fully parallelized numerical code that is suitable to the large-scale parallel numerical simulation with supercomputers. The method is applied to the 2011 Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9). The simulation result successfully reproduced the feature of observed seismic/tsunami records observed at ocean-bottom tsunameter and inland seismic stations.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：シミュレーション 地震波 津波 波動伝播

1. 研究開始当初の背景

海域浅部で大地震が発生すると、海底面に現れた地殻変動が津波を発生し、甚大な被害を引き起こす。日本近海では、津波災害軽減を目的とする津波予測の高度化に向けて、海域における津波と地震動のリアルタイム観測網の整備がすすめられている。これらの観測網では、2003年十勝沖地震や2004年紀伊半島南東沖地震について、津波に加えて、地震波、海中音波、地殻変動に伴う圧力変動など幅広い周期帯の現象が記録されてきた。

しかし、当時地震随伴現象を統一的に解析するモデルは存在しなかった。地震動と地殻変動を運動方程式を用いて解き、この結果を用いて津波の発生伝播を評価する、地震津波連成計算はすでにいくつか提案されている (Saito and Furumura, 2009; Ohmachi et al., 2001)。しかしこれらの方法では、海底面の変動を入力とした海中の海水運動の問題として津波が評価されるのみであり、地震動と津波の評価が事実上独立に行われるため、上記のような様々な観測記録を全て再現することはできず、近年の海底地震津波観測網の充実と比べ、地震津波計算方法への限界があらわになってきていた。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者がこれまで開発してきた地震と津波を一つの方程式系で同時に評価することのできる「地震津波動的統合計算法」を大きく発展させ、現実的な地形・速度構造をもつ3次元に拡張することを目的とする。この方法は、運動方程式に重力項を付加し、静水圧平衡のもとで弾性体の現象(地震波と音波、地殻変動)と流体の現象(津波)を一つの方程式系の差分法により同時に計算するもので、これまで独立に計算・解析されていた緒量を統一的に再現しようとするものである。

3. 研究の方法

(1) 統合シミュレーション手法の検証：本研究で開発する「3次元地震津波動的統合計算法コード」の有効性を検証する。流体運動の基本方程式である3次元 Navier-Stokes 式にもとづく従来型の計算との比較検討を行い、粘性項や海底における摩擦などが津波発生伝播に与える影響について着目し、これらの項を持たない本モデルの適用可能性を検討する。

(2) 海溝モデルの精緻化：海溝型大地震の精緻なシミュレーションのために、プレート境界面の形状や付加体の速度構造の精緻化をはかる。海陸構造探査(大大特プロジェクトなど)、標高海底情報・電子地図(国土地理院、日本海洋データセンターなど)を統合化し、日本近海における地震発生帯モデルを作成する。

(3) 大規模並列シミュレーションコードの整備：地球シミュレータ等のベクトル型スパコンに加えて、次世代スパコン等スカラー型スパコンの性能を良く引き出すことのできる並列計算コードを整備する。ここでは、計算の主要な部分である空気・海水・地殻の境界条件や、計算領域周囲に設ける無反射境界条件の計算不可バランスに着目したコードのチューニングをはかる。

(4) 海溝型巨大地震への適用と海底ケーブル観測網を用いた即時予測への適用可能性の検討：これらの数値計算、構造モデル構築結果に基づき、平成23年度に稼働を開始する次世代スパコン「京」等を用いて、巨大海溝型地震の現実的なシミュレーションを実施する。海底観測記録との比較から、震源過程が初期津波形成過程に与える影響について考察を行う。さらに、本数値計算手法などと海底ケーブル記を津波地震等のリアルタイム検知可能性について検討を行う。

4. 研究成果

(1) 統合シミュレーションの手法検証

本研究で提案する地震津波動的統合計算法は弾性体の運動方程式に一樣な重力項を付加して解くことで、弾性表面波の一種として津波を表現するものである。この手法に基づく数値計算コードを作成し、従来型の Navier-Stokes 方程式による津波計算との比較を行うことで、本手法で計算される津波の

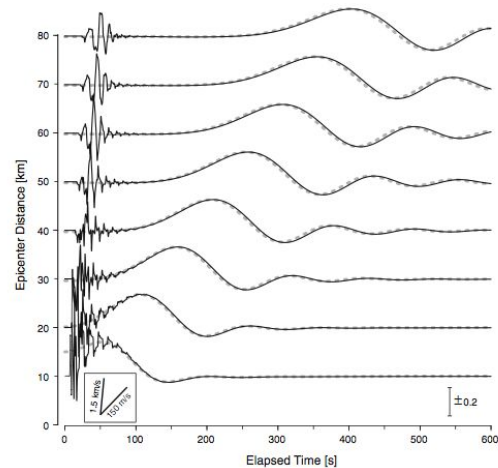


図1 地震津波シミュレーション結果(実線)と Navier-Stokes 方程式(点線)の比較 (Maeda and Furumura, 2013)。

妥当性を確認した(図1)。

(2) 統合シミュレーション法の拡張整備

計算の構成方程式のモデルとして、従来用いられていた線形弾性体や標準線形固体に買え、一般化 Zener 粘弾性体を新たに採用、実装した。これにより、計算負荷は増えるものの、より広帯域の内部減衰が再現可能になった。Zener 粘弾性体の計算量は内部減衰を再現する帯域幅に依存する。そこで、必要十分な帯域幅での内部減衰を実現しつつ、同じ

く計算負荷の大きい周辺の吸収境界条件と計算時間がうまくバランスするような調整を行って、ほぼ完全に並列計算ノード間の負荷が等しくなるようにすることに成功した。

(3) 大規模計算機活用のためのコードチューニング

2011 年度中盤に稼働を開始した「京」コンピュータをはじめとするスカラー型並列計算機では、演算性能に比べてメモリからのデータ供給能力（バンド幅）が低いため、地震動津波計算のように多量のメモリを要求する計算ではその性能を十分に活用することが困難である。制約がある中でも最大限に地震動津波計算の性能を引き出した大規模計算を実施するため、計算コードの再評価と分析をおこない、メモリ利用と演算量の比を検討することで、計算の理論的な性能上限を評価するとともに、計算が効率的に行われていないホットスポットを抽出した。評価された理論性能上限を目指して CPU キャッシュの効率的利用やメモリアクセス方法の変更、ループの分割・融合等のチューニングを行い、最終的に上限性能にほぼ等しい 20% のピーク性能比を実現し、かつ「京」コンピュータの最大規模である 82944CPU を用いた大規模並列計算まで性能向上が実現可能であり、かつ地球シミュレータ 2 で利用可能な最大計算資源の約 100 倍の規模の計算が可能であることを示した（図 2）。

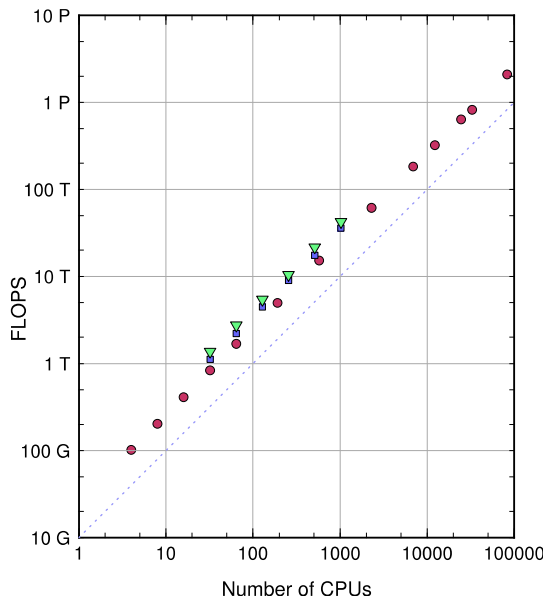


図 2 「京コンピュータ」における並列計算性能ウィークスケーリングテスト結果（●）ならびに地球シミュレータ（▲）との比較。

(4) 構造モデルの整備と東北地方太平洋沖地震等の大規模並列シミュレーション

地震調査研究推進本部より公表された長期周期地震動予測地図 2012 年試作版などの公表された構造モデルをコンパイルし、日本列島下不均質構造モデルデータを整備すると

ともに、本研究手法の大規模並列シミュレーションへの入力データとするための一連の開発を行った。これにより日本列島周辺の任意地域における地震津波シミュレーションが実施可能な環境が整った。

研究課題実施中に発生した 2011 年東北地方太平洋沖地震の地震津波動的計算法によるシミュレーションを実施した（図 3）。強震観測記録や地殻変動、津波記録とシミュレーション結果を比較したところ、シミュレーションは観測記録をよく再現しており、本手法の妥当性が確認された。一方、海底の津波記録の再現性が相対的には低いこと、近地での観測波形振幅が過小評価になるなどの差異も明らかになってきた。これは震源過程研究において考慮されていないプレート境界の複雑な形状や海水がシミュレーションに含まれているためであると結論された。海底地形の影響については種々の広帯域地震波形に見られる特徴的記録とシミュレーションとの比較検討も実施した。また、東日本太平洋側からたな海底ケーブルによる地震津波観測網の敷設が進行中であることを踏まえ、津波シミュレーションを海底における観測記録に即時的に同化するための手法開発を行った。

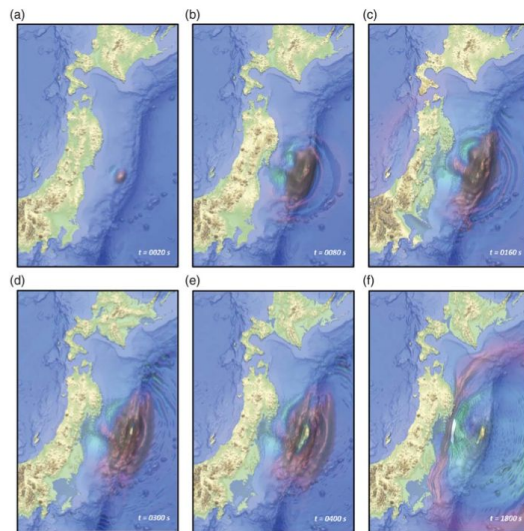


図 3 実施した 2011 年東北地方太平洋沖地震の地震津波シミュレーションの上下動変位スナップショット (Maeda et al., 2013)

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Maeda, T., T. Furumura, and K. Obara, Scattering of teleseismic P-waves by the Japan Trench: A significant effect of reverberation in the seawater column, *Earth Planet. Sci. Lett.* (査読有), 397(1), 101-110, doi:10.1016/j.epsl.2014.04.037, 2014.

Maeda, T., T. Furumura, S. Noguchi, S. Takemura, S. Sakai, M. Shinohara, K. Iwai, S. J. Lee, Seismic and tsunami wave propagation of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake as inferred from the tsunami-coupled finite difference simulation, *Bull. Seism. Soc. Am.* (査読有), 103(2B), Maeda, T., and T. Furumura, FDM simulation of seismic waves, ocean acoustic waves, and tsunamis based on tsunami-coupled equations of motion, *Pure Appl. Geophys.* (査読有), 170(1-2), 109-127, doi:10.1007/s00024-011-0430-z, 2013. Maeda, T., T. Furumura, S. Sakai, and M. Shinohara, Significant tsunami observed at the ocean-bottom pressure gauges during the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space* (査読有), 63(7), 803-808, doi:10.5047/eps.2011.06.005, 2011.

[学会発表](計 11 件)

Maeda, T., K. Obara, M. Shinohara, T. Kanazawa, and K. Uehira, Towards real time tsunami forecasting without source: A data assimilation approach with dense tsunamator network, AGU Fall Meeting 2013, Moscone Center (San Francisco, California, USA), USA, 2013/12/12.

Maeda, T., T. Furumura, and K. Obara, Significant far-field P-wave scattering along Japan Trench detected by Hi-net array and its numerical simulation, IAHS-IAPSO-IASPEI Joint Assembly, Congrex Sweden AB (Gothenburg, Sweden), 2013/07/24.

前田拓人・古村孝志・小原一成, 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, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ (千葉市), 2013/05/20.

Maeda, T., T. Furumura, and K. Obara, Long-period seismic wave scattering by bathymetric features at a triple junction detected by Hi-net array, AGU Fall Meeting 2012, Moscone Center (San Francisco, California, USA), 2012/12/07.

Maeda, T., K. Obara, M. Shinohara, T. Kanazawa, K. Uehira, A Feasibility Study on using data-assimilation technique for real time tsunami monitoring, ACES 8th International Workshop, Makena Conference Center (Kihei, Hawaii, USA), 2012/10/24.

前田拓人・小原一成・篠原雅尚・金沢敏彦・植平賢司, リアルタイム津波モニタリング手法としての津波データ同化の適用可能性, 日本地震学会 2012 年秋期大会, 函館市民会館 (函館市), 2012/10/17.

前田拓人・古村孝志, 「京」コンピュータによる大規模シミュレーションのための地震動計算コード Seism3D の高度化およ

び性能チューニング, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 幕張メッセ (千葉市), 2012/05/23.

Maeda, T., T. Furumura, S. Noguchi, S. Takemura, K. Iwai, S.-J. Lee, S. Sakai, and M. Shinohara, A unified numerical simulation of seismic ground motion, ocean acoustics, coseismic deformations and tsunamis of 2011 Tohoku earthquake, AGU Fall meeting 2011, Moscone Center (San Francisco, California, USA), 2011/12/05.

前田拓人・古村孝志・野口科子・武村俊介・岩井一央・Shiann-Jong Lee・酒井慎一・篠原雅尚, 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動・海中音波・地殻変動・津波の統一シミュレーション, 日本地震学会 2011 年秋季大会, 静岡県コンベンションアーツセンター・グランシップ (静岡), 2011/10/14.

Maeda, T., and T. Furumura, Huge-scale compound simulation of seismic waves and tsunamis, AOGS2011, Taipei International Convention Center (Taipei, Taiwan), 2011/08/09.

前田拓人・古村孝志, 地震と津波の統合シミュレーション法の大規模並列計算, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 幕張メッセ (千葉市), 2011/05/22.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

前田 拓人 (MAEDA, Takuto)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号 : 90435579