

平成 23 年 6 月 30 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740334

研究課題名 (和文) 海域における地震波動伝播シミュレーション研究

研究課題名 (英文) Seismic waveform simulation in oceanic area

研究代表者

中村武史 (NAKAMURA TAKESHI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波・防災研究プロジェクト・技術研究副主任

研究者番号：40435847

研究成果の概要 (和文)：

海域における地震波動場を計算するために、固体-流体の境界条件を正しく考慮した差分法コードを開発した。構築したコード、地下構造モデルを用いて、2009 年 8 月駿河湾で発生した地震についてシミュレーションを行い、観測波形の特徴をおおむね再現することができた。さらに、3 次元的に傾いた固体-流体境界を有する構造に対して、従来のスキームでは、顕著な計算誤差が発生する危険性があることを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

We proposed a responsible FDM solution in order to compute seismic wave propagation in models with both land and ocean-bottom topographies. We simulated 3D seismic wave propagation around the source region of the 2009 Suruga Bay earthquake employing the FDM code and the constructed structure model. The overall features of the synthetic waveforms fit well with the observed ones. We also found that the high order finite difference may cause the numerical error and be unsuitable to apply the calculation for a complex bathymetric structure.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

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：地震波シミュレーション、地震波動、波動伝播、差分法、FDM、地下構造モデル、海底観測

1. 研究開始当初の背景

海域における地震や津波、地殻変動などの物理的諸現象を観測・監視するために、海底に地震計や水圧計を設置する取り組みが世界各地で進められている。日本の海域においては、日本海溝や南海トラフ周辺でケーブル式の海底観測網が稼働している。2003 年十

勝沖地震の時には、震源近傍の釧路沖海底観測点において、本震時の強震動や海底地殻変動、津波を観測した (Watanabe et al. (2004), Mikada et al. (2006))。また、2004 年伊半島沖地震の時には、沿岸に津波が到達する 20 分前に室戸沖海底観測点で水圧変動を観測した (Matsumoto and Mikada

(2005))。最近では、複数のセンサーの水中着脱が可能な新しい方式の海底観測網も展開され始めており(金田・他(2010))、陸域の観測網に劣らない、多点の海底観測網が各地で構築されつつある。このような海底観測網で記録されるデータを解析活用することで、海溝型巨大地震をはじめとする海域で発生した地震のメカニズム解明、地震活動や海底地殻変動の監視、地震波・津波の早期検知、地下構造モデルの高精度化、などが期待される。また、観測データの蓄積と並行して、地震波や津波の波動伝播、地殻変動量などを推定するために、海域を主対象としたシミュレーション計算の役割も今後ますます重要となるであろう。しかしながら、地震波動伝播のシミュレーション計算に関しては、陸域で観測された地震波形の再現に主眼を置いた研究がほとんどであり、海水層の影響を考慮したシミュレーション研究(例えば、Shapiro et al. (2000), Okamoto and Takenaka (2009))や、海底観測点で実際に観測された自然地震波形の再現を目的とした研究は未だ少ない。

2. 研究の目的

海域で常時に観測データを取り続けることが巨大地震の発生メカニズムの解明や地震発生シミュレーション予測の精度向上、海域地下構造の高精度なモデル化につながる。また、T フェイズや乱泥流、海底火山活動の観測や解析のように、海域で地震を含む物理的諸現象の記録を確実に取得することにより、将来的に貴重なデータとして活用される可能性がある。このような背景のもと、1990年代以降海底観測点の設置が国内外各地で試みられ、さらには、海洋科学技術の進展により、海底に多点配置する計画が実行に移されている。現在既に運用されている海底での単点観測点あるいは臨時観測などの一時的な多点観測点のデータ活用は、震源決定やトモグラフィ調査等を目的とした、走時解析がほとんどである。しかし海底での多点観測網が実現しつつあることで、海域の現象に対して海底のデータを用いた解析が期待できる他、陸域と同様にして、走時だけでなく波形も有効に活用できることが期待される。その際、理論的な側面からデータ解析に取り組むためには、海域における地震波動場計算が重要となる。

本研究の目的は、海域における地震波動場を高精度に計算するためのコードの開発と詳細な3次元海域地下構造モデルを用いた地震波動伝播のシミュレーション解析を行うことである。そのためにまず、差分法コードに固体-流体の境界条件式を正しく取り入れ、固体及び流体中の観測点で実体波から表面波まで正しく(理論解と一致する)波形計

算を行う。このような研究は、1次元や2次元波動場では試みられているが(例えば、岡元・竹中, 2005)、3次元波動場については十分に調べられていない。計算で用いる構造については、現在までに反射法・屈折法探査で得られている構造探査結果やレーザ関数解析結果を収集・統合化させて詳細な3次元海域地下構造モデルを構築し、現実に近い構造モデルを計算に適用する。

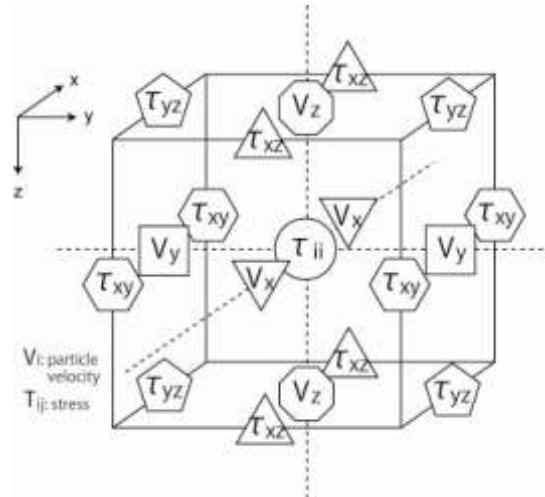


図1: スタガード格子における粒子速度と応力成分の配置

3. 研究の方法

海水層を含めた構造を適用しても解が発散せずに安定的かつ高精度に数値計算を行える差分法コードの開発を行った。固体-流体境界周辺においては、粒子速度や応力が不連続となる。この不連続量が差分式の中に含まれないように、境界面を境に流体側と固体側で別々に計算を行う必要がある。これは、粒子速度や応力についての差分計算を低次の差分近似精度で処理をすることで解決できる。そこで、固体-流体の境界条件を考慮するために、差分計算精度を空間的に適宜変更できる仕様とし、固体-流体境界周辺では低次精度差分式を適用するようにした。

さらに、海底地形に対して境界条件を正しく導入できるよう、固体-流体の境界形状を最適化できる仕様とした。スタガード格子(図1)上における境界面の配置位置については、岡元・竹中(2005)で示された方法と同様に、剪断応力の格子点上に配置し、構造を作成する段階において、流体-固体間の境界条件(剪断応力値が0)を正しく満たすようにした。構築した構造に対し、シミュレーションには、時間2次精度、境界面近傍以外は空間4次精度の差分法を用いる。最初は1次元の構造、次に2次元の構造が適用できるようにし、最終的には現実の構造に近い3次元

構造に対する波動場を計算できるようにコードの開発に取り組んだ。

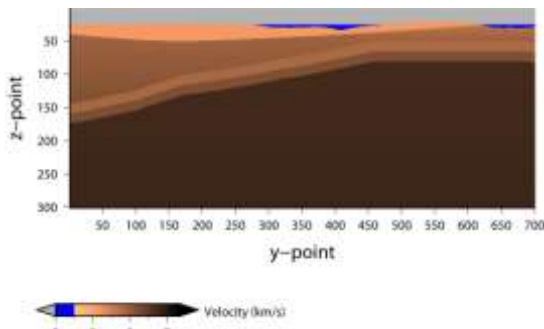


図 2：3次元海域地下構造モデル

計算コードの開発と平行して、実際に計算で使用する事となる 3次元海域地下構造モデルの構築も行った(図2)。南海トラフで実施された海域構造探査データを統合化した構造モデルについては、馬場・他(2006)や、本研究代表者が中心となって構築した中村・他(2007)がある。本研究では、これらの構造モデルを基にさらに、レシーバ関数解析に基づく中国四国地方のプレート境界面推定結果(例えば、Shiomi et al., 2004)や、Nakanishi et al. (2010)などの日向灘や足摺岬沖の構造探査結果を統合化し、日本周辺におけるフィリピン海プレートの海域地下構造モデルの構築を行った。

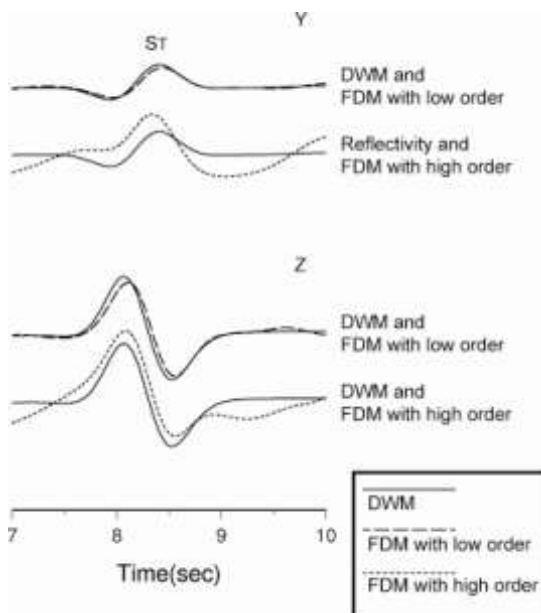


図 3: ストリー波での差分計算結果の比較。実線は離散化波数法による計算結果、破線は本研究のスキームによる計算結果、点線は従来のスキームによる計算結果をそれぞれ示す。従来のスキームによる波形は、離散化波数法による波形と形状が大きく異なること

が分かる。

開発した差分法コードを用いて地震波動場のシミュレーション計算を行い、海水層や付加体、海洋性地殻、海洋性マントル等の海域特有の構造が波形に与える影響について調べた。これらのシミュレーション結果を基に、相模湾や紀伊半島沖等、実際に既に運用されている海底地震観測点の観測波形と比較を行い、高精度な差分法コードと海域地下構造モデルの適用により理論波形計算がどの程度まで正確にできているのか評価を行った。

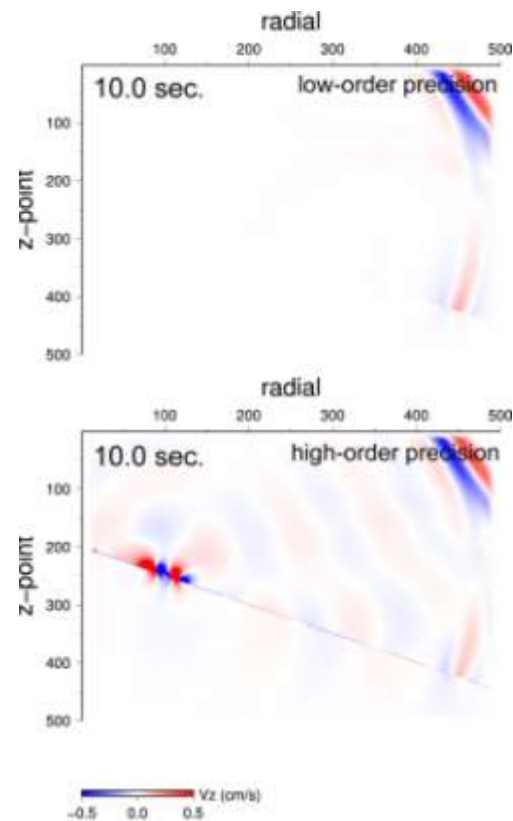


図 4: 上層に流体、下層に固体、3次的に傾いた固体-流体の境界面を有する構造に対する地震波動場のスナップショット。上図は本研究のスキームによる波動場のスナップショット、下図は従来のスキームによるスナップショットをそれぞれ示す。従来のスキームでは、境界面付近から、計算誤差に伴う新たな波が発生している様子が分かる。

4. 研究成果

第一に、固体-流体の境界条件を考慮した差分法コードを開発した。具体的には、構造に対してせん断応力成分の差分格子に境界を配置し、さらに構造境界周辺において差分計算精度の変更を行えるようにした。固体

-流体の境界面は、1次元だけでなく、3次元の形状を有していても適用できるようにした。このコードを用いて、海水層を含めた構造を適用しても安定的かつ高精度に数値計算を行えることを確認した。さらに、海水層を空気に置き換えた場合についても同様に計算を試み、安定的かつ高精度に数値計算を行えることを確認した。その成果については、2009年 SEGJ International Symposiumにて発表した。このように、計算対象領域の不均質構造、海水層、地形 (Heterogeneity, Oceanic layer, Topography) を考慮した本研究の差分法を HOT - FDM と呼ぶことにし、2009年日本地震学会秋季大会で研究の進捗と成果を発表した。

第二に、既往の構造探査データを統合化した海底地形・プレート境界のモデルを作成した。構築したコード、地下構造モデルを用いて、2009年8月駿河湾で発生した地震についてシミュレーションを行った。シミュレーションでは、本研究経費で契約した大型計算機を用いて計算を行った。その結果、陸域で観測された観測波形の特徴をおおむね再現することができた。その成果については、2009年 AGU Fall Meetingにて発表した。

第三に、3次元的に傾いた固体-流体境界のある構造に対して、流体と固体との境界面を持つ構造に対して数値シミュレーション実験を行った。境界条件の考慮の有無により、波形計算結果に大きな違いが生じることを示した (図3)。特に、傾斜を持つ境界面に対して、境界条件を考慮せずに差分計算を行うと、低周波成分を持つ波が境界面近傍から生じ (図4)、顕著な計算誤差となる。この計算誤差は、離散化に伴う誤差とは本質的に異なる。境界面近傍における計算誤差の発生を回避するためには、境界条件を正しく満たすよう、差分近似精度をあえて低次精度に落とし、差分式を解くことが必要であることを明らかにした。この成果については、2010年日本地球惑星科学連合と雑誌論文 地震2にて発表を行った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

①中村武史・竹中博士・岡元太郎・金田義行, 流体-固体境界周辺における3次元地震波動場の差分法に関する数値実験, 地震 2, 63, 189-196, 2011. (査読有り)

[学会発表] (計4件)

①中村武史・竹中博士・岡元太郎・金田義行, 液体を含んだ媒質に対する3次元差分法による地震波動場計算, 日本地球惑星科学連合2010年大会, 幕張, 2010年5月25日

②Nakamura, T., H. Takenaka, T. Okamoto,

and Y. Kaneda, Finite-difference simulation of strong motion from a sub-oceanic earthquake: Modeling effects of land and ocean-bottom topographies, AGU 2009 Fall Meeting, 2009年12月17日, San Francisco.

③中村武史・竹中博士・岡元太郎・金田義行, 2009年8月11日駿河湾で発生した地震の3次元HOT-FDMによる波動伝播シミュレーション, 日本地震学会秋季大会, 2009年10月21日, 京都.

④Takenaka, H., T. Nakamura, T. Okamoto, and Y. Kaneda, A unified approach implementing land and ocean-bottom topographies in the staggered-grid finite-difference method for seismic wave modeling, Proc. 9th SEGJ Int. Symp., 2009年10月14日, Sapporo.

6. 研究組織

(1) 研究代表者 中村武史 (NAKAMURA TAKESHI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波・防災研究プロジェクト・技術研究副主任
研究者番号: 40435847