

# 平成 26 年度 地球シミュレータ利用報告 研究成果概要

## 1. 課題名

3次元不均質場での波動伝播と強震動のシミュレーション

Numerical Simulation of Seismic Wave Propagation and Strong Ground Motions in 3-D Heterogeneous Media

## 2. 課題責任者

古村孝志（東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター／地震研究所）

Takashi Furumura

## 3. 課題の目的

3次元的に不均質な媒質中の地震波動伝播と強震動生成そして津波発生伝播の数値シミュレーションを実施する。陸海プレート境界地震や内陸活断層の地震に伴って放射される地震動が、不均質な地殻・上部マントルを伝播し、地殻表層部の軟弱な堆積層により強く増幅され、そして構造物に被害を引き起こす強震動が生成される一連の物理過程を、運動方程式の大規模計算により理解する。加えて、海溝型巨大地震が引き起こす海底地殻変動と、津波発生伝播を高精度に評価するための、地震と津波の連成シミュレーションを実施する。

地球シミュレータによる計算結果を、日本列島に展開された高密度強震・津波観測データ、そして過去の大地震の古記録と直接比較することにより、シミュレーションモデルを検証し、そしてモデル物性値の調整を進めてモデルの高精度化をはかる。こうして、将来発生が予想される大地震の強震動と津波を高い精度で予測し、災害軽減に活用するための強震動・津波予測シミュレーションを実現する。

## 4. 今年度当初の研究計画

周波数 1Hz 以上の高周波数地震動のシミュレーションの実現に向け、地殻・マントルの短波長不均質構造（スケールが数十メートル以下）の分布を推定するための、散乱シミュレーションを実施し、高密度地震観測データとの比較から日本列島の不均質地下構造モデルを確定する。本目的に向けて、今年度は以下の3つのテーマを重点的に進める：

- (1) 日本列島の地殻内を伝播する広角S波反射(Lg波)を実施し、日本及びその周辺を伝わる内陸地震及び海溝型地震の強震動の伝播特性とその地域性を明確化し、将来の内陸地震及び海溝型地震の強震動予測シミュレーションの高度化をはかる。
- (2) 海域の地殻・マントル(リソスフェア)を伝播する高周波数のP/S波(P<sub>0</sub>/S<sub>0</sub>波)のシミュレーションを実施し、周波数 1Hz 以上の高周波数地震動の散乱現象を正しく評価できるシミュレーションモデルを完成させる。

(3) 日本列島(西南日本)の不均質地下構造が作り出す、長い波群(S 波コーダ)を生成させる原因となる地震波の散乱現象をシミュレーション及び高密度地震観測データ解析から多面的な研究を進める。

こうして完成した高周波数地震動シミュレーションモデルや、地震波動伝播シミュレーションにかかる新たな知見は、京コンピュータ等を用いた他の研究プロジェクト(HPCI 戦略3分野研究、地震予知研究計画など)における、南海トラフ地震等の被害予測の実用的計算に活用する。

## 5. 研究計画に沿った利用状況

上記研究計画に沿って ES 利用研究を順調に進めることができた。当初計画の「地震—津波同時シミュレーションコード」の ES 向けチューニングについては、1)低 B/F マシンの利用を想定した「省メモリ版地震動コード」の ES への適用、2)PC クラスタや計コンピュータなど幅広いアーキテクチャを持つスパコンで高い実効性能と並列化性能が期待できる「一般的な地震動コード」利用の2つの観点から実施した。開発した高性能コードを用いて、海域および陸域で発生する地震の地震波伝播シミュレーション(海中音波を含む)を効率よく実施することができた。なお、ES と京コンピュータ利用の切り分けとして、ES では地震波伝播と強震動の生成メカニズムの検証と不均質構造における地震波の伝播・減衰特性の評価等、地球物理・地震学的課題を行うことを重視し、京コンピュータではより大きな計算機資源を用いて地震津波防災に向けた実用的シミュレーションを行うなど、ES と京の役割分担と連携による HPCI 資源全体の有効活用を行った。

## 6. 今年度得られた成果、および達成度

### <成果>

#### 1) 海洋リソスフェアの不均質構造と $P_0/S_0$ 波の伝播・減衰シミュレーション

昨年度に引き続き、海洋リソスフェアを伝播する  $P_0/S_0$  波の成因と伝播特性、そして不均質な海洋リソスフェアが  $P_0/S_0$  波の伝播と減衰に与える影響を、ES を用いた2元差分法シミュレーションと、海底地震観測データとの比較から詳しく検討した。ES 計算では、海水層と短波長不均質構造をモデル化した海域の地殻・マントル(リソスフェア)およびアセノスフェア構造をモデル化し、周波数 14Hz 程度までの高周波数地震動を評価した。海底地震計観測で記録された広帯域速度計記録との比較を進め、「地震・津波同時シミュレーションコード」を用いて 16 ノード利用による2次元並列計算により数百例のモデル計算を行った。シミュレーション結果と観測データとの比較から、海域を伝わる地震では海水層内に P 波が多重反射を起こして閉じ込められ、これが  $P_0$  波の特徴である長い後続相(コーダ波)を作る基本原因となっていることが確認できた。

さらに、海洋リソスフェア内に存在する短波長の不均質構造(相関距離が水平 5km/鉛直 0.5km 程度)により、周波数 2Hz 以上の高周波数地震動が強い前方散乱を起こして、不均質構造内の中に閉じ込められるように遠地まで良く伝わる「散乱導波効果」も確認された。プレート年代が古く(100Ma 程度)プレートが厚い(100km 程度)太平洋プレートに比べ、年代が若

く(30Ma 程度)プレートが薄い(30km 程度)フィリピン海プレートでは  $P_0/S_0$  波が伝播とともに急激に減衰するという観測結果も、これらのプレートの特徴を評価した ES シミュレーションで良く再現することができた。

以上の成果に基づき、現行の日本海溝および南海トラフ地震のシミュレーションモデルに海水層の組み込みと海洋リソスフェアの不均質構造のモデル化を進めた。これにより、東北地方太平洋沖地震の再現シミュレーションや想定南海トラフ地震のシミュレーションの精度を大きく高めることができた(国際学会発表2件、国内発表2件、論文発表2編)。

## 2) 統一的な地震動計算コード開発と長周期地震動の網羅的調査

これまで計算機クラスタ、ES、京コンピュータ等で個別に開発およびチューンアップされてきた地震動シミュレーションコードを整理統合し、PC・PC クラスタ・ES・京で高速に動作する統一的な地震動シミュレーションコードの開発を行った。従来は個別に行っていたプリプロセスおよびポストプロセスも、新コードに統合した。新コードでは、NetCDF 形式の地球内部不連続面情報ファイルを入力として、そこから自動的に構造モデル作成とその MPI 分割を実施し、計算結果は地震波形解析のデファクトスタンダードである SAC 形式に変換されてから出力される。この一連の開発によって、シミュレーションモデルの準備ならびに結果の変換にかかる労力が激減した。結果として入力パラメータを調整するだけで、日本列島の任意の領域の地震動シミュレーションが ES をはじめとした様々な環境で透過的かつ容易に実施できる環境が整った。

この新コードを用いて、過去 10 年にわたる日本列島および周辺領域のマグニチュード 6 以上のすべての地震について日本列島下不均質構造のコミュニティモデルを用いたシミュレーションを行い、稠密地震観測記録との網羅的比較を行った。特に周期 10 秒周辺の長周期地震動には、海溝およびトラフの 3 次元的地形形状ならびに海水層、付加帯などの低速度海底堆積層が極めて強く影響することが確認された。シミュレーションによる地震動の再現は良好であるが、その波形は通常震源決定や地震メカニズム推定に用いられている 1 次元速度構造とは大きく異なっている。そのため、今後 ES 後継機を用いて日本全体の地震波応答関数 (Green 関数) の整備を進めることで、日本列島下の構造ならびに地震発生不均質性の理解を大きく進めることができると期待される。

## 3) 海洋性地殻を伝播する高周波数トラップ波のシミュレーション

海洋プレートの最上部に存在する海洋性地殻は、地球深部への流体移送の担い手と考えられており、島弧火山の形成、スラブ内地震の発生および地球内部不均質の形成などの地球物理的な現象に大きく寄与していると考えられている。関東下に沈み込むフィリピン海プレートの海洋性地殻の構造を詳細に調べるため、高感度地震観測網 Hi-net で得られた関東下のフィリピン海プレートの海洋性地殻で発生した地震のトラップ P 波の性質を調べた。トラップ P 波は海洋性地殻内を長距離伝播することが知られており、海洋性地殻内部の物性を知る上で重要な手がかりとなる。観測記録解析の結果、周波数によらず、直達 P 波の数秒後にピーク遅延や分散を伴わないパルス的なトラップ P 波が観測されることがわかった。

この観測を踏まえ、現実的な地震波速度構造モデルを含んだ地震動シミュレーションを行った。基本的なケーススタディは 2 次元計算により行い、フィリピン海プレートの 3 次元形状の影響について地球シミュレータ 60 ノードを用いたシミュレーションにより検討した。シミュレ-

シオン結果と観測記録の比較から、これまでの地球内部構造探査で明らかになっていなかった、深さ 30-40 km における脱水反応による海洋性地殻第2層の地震波速度の増加の可能性を示すことができた。また、地震波の分散およびピーク遅延をとみなさないパルス的なトラップ P 波の成因は、深さ 40 km 以深で海洋性地殻第2層の地震波速度の増加により海洋性地殻が均質な構造となったために、効率的に P 波が海洋性地殻内にトラップされたためと説明することができた。以上より、関東下で発生するスラブ内地震の地震波伝播特性および沈み込みに伴う物質循環過程を明らかにすることができた(国内発表 2 件、論文発表 1 件)。

#### 4) 海洋の地震による特異な後続相の原因究明のための地震波動伝播シミュレーション

東北地方の太平洋沖で発生した地震の際に、東北・関東地方のほぼ全域において観測された特異な後続相の成因について、3次元差分法による波動伝播シミュレーションから検討した。シミュレーションモデルには、陸上・海底地形、海水層、軟弱な低速度の堆積層、大陸プレートおよび沈み込む海洋プレートの地殻・マントル構造をモデル化し、対象周期帯域 10 秒以上の長周期地震動について、地震発生から 1000 秒の波動伝播を計算した。計算対象領域は北海道から伊豆諸島に至ることから、ES16 ノードを用いた並列計算において、1 計算あたり約 5 時間を要した。さらに、海水層の有無、震源の深さ、震央位置、近傍で起こった他種の地震などについても同様のシミュレーションを合計数十回にわたって行い、特異な後続相を生成するプロセスを探った。

地震観測では得られない大量の波形や地震動、水中の変位などを出力したシミュレーション結果を検討した結果、以下の後続相生成メカニズムが明らかになった。深海底(約 6000 m)下で浅い地震が発生すると、陸上の地表で発生する表面波と同様の波群が生成される。これは陸上での表面波とは異なる性質をもち、一部は伝播速度が非常に遅く(陸上の表面波の約 1/3)減衰しにくい。さらにこの性質は海の水深に依存し、太平洋から東北・関東地方の大陸棚に近づくにつれて陸上の表面波に変換され伝播する。しかし最初に深海底で先行する波群から大幅に遅れるため、後続相として分離されて現れる。こうして、観測された後続相の大振幅、到達時刻、卓越周期、広い地域で観測されるなどの特徴がシミュレーションから良好に再現された。また、海水層を考慮しないシミュレーションでは、この後続相は現れず、そのため震動継続時間が 100 秒ほど短くなることから、海域地震の地震動シミュレーションでは海水層を考慮する必要性も示された(国内発表1件、論文発表1編)。

#### <達成度>

(年度当初の研究計画を全て達成した場合を 100% / 複数の目標があった場合は、それぞれについて達成度を数値で記載)

90%

## 7. 計算機資源の利用状況

#### <計算機資源の利用状況>

(計画的に計算機資源を利用できているか、状況を記載)

2013 年 12 月までに、本グループに今年度割り当てられた資源(23,833 ノード時間席))の 85%にあたる 20,277 ノード時間積を計画的に使用した。

#### <チューニングによる成果>

(ベクトル化、並列化チューニング等、計算機資源を有効利用するために行ったこととその効果を記載)

昨年度(H25 年度)に開発した、低 B/F マシン向けの省メモリ版地震動シミュレーションコードのベンチマークテストを ES 上で実施し、30%の実効性能が得られた。従来用いていた ES 向けチューニングコード(実効性能 27%)よりも性能が高く、低 B/F マシン向けの性能チューニングは、B/F が比較的高い(B/F=2.5)ES においても有効であるといえる。省メモリ版コードは、従来の7割程度のメモリ消費量であることから、より大きな規模のシミュレーションが可能である。こうした理由から、省メモリコードは B/F が1~4程度である新しいES(ES3)において、より有効に機能するものと期待できる。

また、これまで計算機クラスタ、ES、京コンピュータ等で個別に開発およびチューンアップされてきた地震動シミュレーションコードを整理統合し、PC クラスタ、ES、京で高速に動作する「統一的な地震動シミュレーションコード」の開発を今年度実施した。本コードは ES にのみ特化した内部構造を用いていないにもかかわらず、ほぼ完全(100%)なウィークスケーリング性能と 99%を超えるベクトル化率など、ES においても十分な性能を達成することができた。

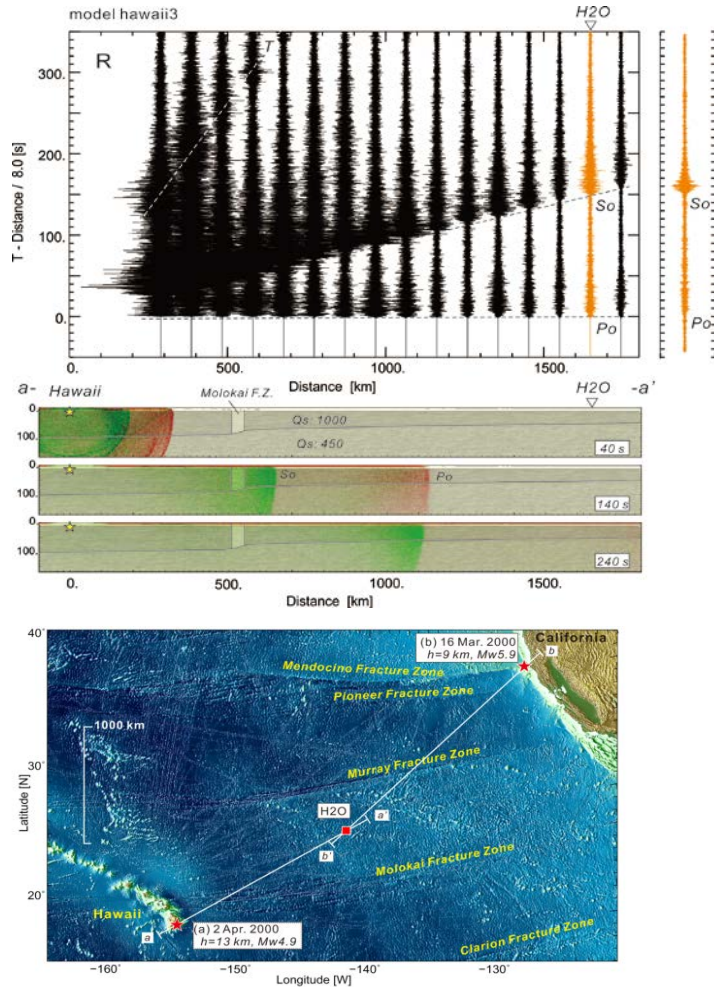
#### 8. 新聞、雑誌での掲載記事

なし

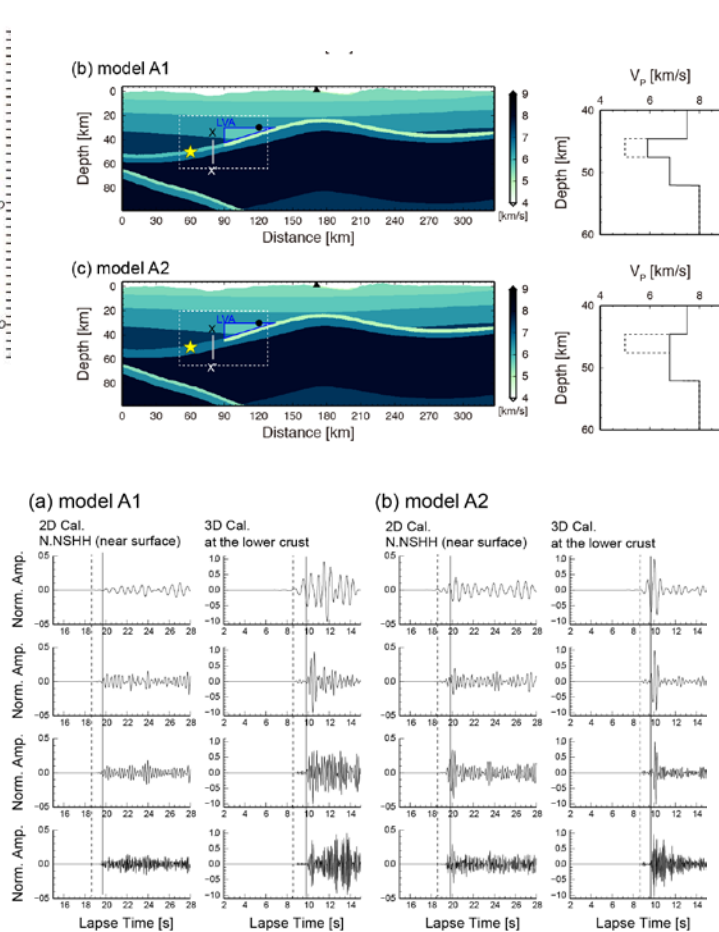
# 3次元不均質場での波動伝播と強震動のシミュレーション

古村孝志 東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター／地震研究所

## 海洋を伝わるPo/So波の評価



## 海洋性地殻のトラップ波の評価



## 海洋地震での特異な後続相の評価

