

10-NA10

地震と津波の大規模並列シミュレーションとその可視化

古村孝志・前田拓人（東京大学）

概要

近い将来に発生が予測される大地震の強い揺れと津波をコンピュータシミュレーションに基づき高精度に予測するため、地震と津波を統一的に説明する大規模シミュレーション法を構築し、大規模並列計算コードを作成した。ストロングスケーリングテストの結果、東大情報基盤センターHA8000において99.8%超の並列化率を達成し、次世代スパコンを用いた大規模な実用計算に向けての前進があった。また、地中内部を伝わる地震動の波動特性のさらなる理解と一般への普及のため、3次元ボリュームレンダリング法コードをHA8000に移植、拡張し、幾つかの典型的な地震学的速度構造に対して地震動の広がり方を効果的に示す可視化動画を作成した。

1. 研究の目的と意義

地震の発生と強い揺れによる建物の被害を予測し、災害軽減に資することのできる地震動シミュレーションの実現は、地震国日本のみならず世界の地震国の悲願である。2007年新潟県中越沖地震や2008年岩手・宮城内陸地震、そして2009年駿河湾の地震のように、日本各地で大地震にたびたび見舞われているほか、世界各地でも2010年にカリブ海ハイチの地震や、チリ北部の地震、そして中国青海省の地震など大災害が頻発している。今後30年以内には東海地震や宮城沖地震が80~90%以上の高い確率で発生することが避けられず、また首都直下地震は70%という高い確率が示されている。これらの海溝型地震による強い揺れと津波の高精度予測と首都直下型地震による強い揺れに備え、地震と津波のコンピュータシミュレーションの高度化への期待は大きい。

本共同研究では、近い将来に発生が予測される大地震の強い揺れ（強震動）と津波をコンピュータシミュレーションに基づき高精度に予測して、強震動と津波への事前の備え・災害軽減に資することを目的として、強震動と津波の大規模数値シミュレーションコードを開発した。特に、次世代スパコンを用いたMany core/Multi node 超並列大規模計算の実現を目的として、数万~数十万コアを用いた効率良い

計算の実現と、スカラー型CPUに適合する新しい計算アルゴリズムの整備に力を入れた。超大規模・高精度計算により得られた、複雑な地震波場の時空間変動を適切に表現するための、地震波動場のボリューム可視化技法を整備し、大地震による強い揺れの生成と特徴の理解を助けるための、研究者および一般への普及を目的とした地震シミュレーションコンテンツを試作した。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した大学名

東京大学大学院情報学環・地震研究所

東京大学情報基盤センター

独立行政法人防災科学技術研究所

神戸大学

(2) 共同研究分野・公募型共同研究の成果

地震・津波を専門とする研究者が、計算科学の専門家の助言を受けながら共同研究を進めることにより、many core/multi nodeの大規模計算に基づく実用計算に向けての前進があった。

3. 研究成果の詳細

3.1 地震動-津波統合連成シミュレーション

(1) はじめに

近年の計算機の急速な性能向上によって、津波

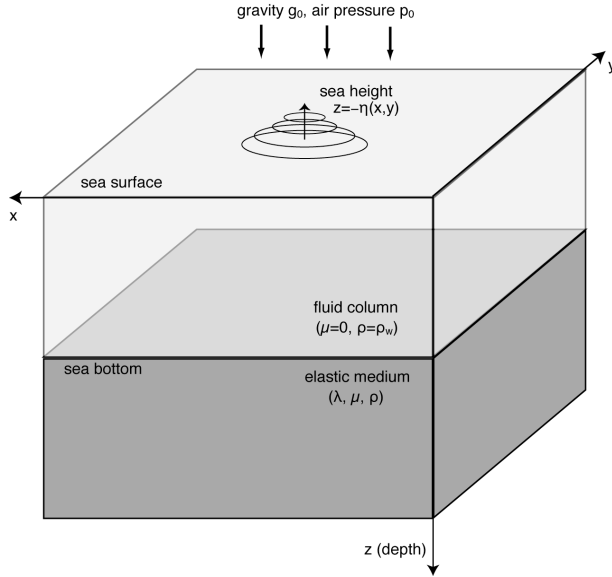


図1. 地震動と津波の統合連成シミュレーションで仮定するモデル領域と座標系。

シミュレーションが行われ始めた1970年代初期に比べて1000万倍以上高速な計算が可能になった。これらの高速計算機を用いることで、近似を用いずに3次元の流体運動方程式であるNavier-Stokes方程式を直接解くことで津波を計算する手法が提案され（Saito and Furumura, 2009）、特に近年観測が充実しつつある海底における圧力計の津波記録を極めてよく説明できるようになってきた（Saito et al., 2010）。これらの観測記録には津波だけではなく、高周波の地震動も含まれている。ところが、従来、地震動と津波計算は完全に独立した問題として取り扱われて来っており、観測記録をすべて用いた解析は行われていない。地震動シミュレーションにより評価された地殻変動を津波計算の入力として用いるなど、地震と津波の連成計算のアプローチもある（Furumura and Saito, 2010）が、地震動から津波に至る一連の現象を統一的に説明するためには、より直接的な物理モデルと、その大規模計算のための計算コード高度化の双方の面での協調的発展が不可欠である。

我々は、全く新しい方法として、弾性論に基づく地震動シミュレーションを基盤とし、地震動・地殻変動・海中音波そして津波までをひとつのフ

レームワークで統一的に再現する「地震・津波統合シミュレーション法」を構築し、東京大学情報基盤センターのスパコンによる大規模並列計算によりその再現性を評価した。

(2) 定式化

地震動シミュレーションは、以下の弾性体の運動方程式を基礎方程式とする。

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで v_x , v_y , v_z は地震動の速度場 ρ は媒質の質量密度である。 σ は応力テンソルで、構成程式に基づく以下の発展方程式に従う。

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_y}{\partial y} + \lambda \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_z}{\partial z} + \lambda \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial t} &= \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial t} &= \mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} &= \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)\end{aligned}\quad (2)$$

地震動と津波を統一的に扱うため、図1のように弾性体の上に海水が重畳している媒質を考え、線形弾性論の枠組みの中で、(1)一様重力場 ρg_0 を与える。(2)重力場と静水圧との平衡状態 σ_{ii}^D とそこからの摂動を考える。(3)流体はS波速度0の弾性体として取り扱う。以上の取扱いを経て、以下の基礎方程式を作ること、地震動だけでなく津波を表現できることを明らかにした（Maeda and Furumura, 2010）:

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{xx}^D}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} - \rho_w g_0 \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}^D}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} - \rho_w g_0 \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}^D}{\partial z}\end{aligned}\quad (3)$$

ここで $\eta(x,y;t)$ は海面における鉛直変位で、津波の高さをあらわす。この新しい方程式系は従来の地震動シミュレーションの基礎方程式(1)と極めてよく似ているため、従来の数値計算の技術をほぼそのまま援用して大規模な地震動・津波連成シミュレーションが実行可能である。

(3) 大規模並列コード試験

本モデルに基づいた大規模計算を行うため、3次元並列コードの開発とチューニングを行った。媒質は図2のように3次元に分割し、各小領域を1CPUもしくは1Coreに割り当て、隣接領域を担当するCPU/Core間にはMPIにより通信を行う。また、隣接間通信だけで良い従来の地震動シミュレーションに比べて、本手法では式(3)からわかるように、海面における津波高の空間微分が下にある全ての小領域で必要とされる。このため、地震・津波統合シミュレーションは従来の地震動シミュレーションより通信量が多くなる。

大規模並列計算時のパフォーマンスを調べるた

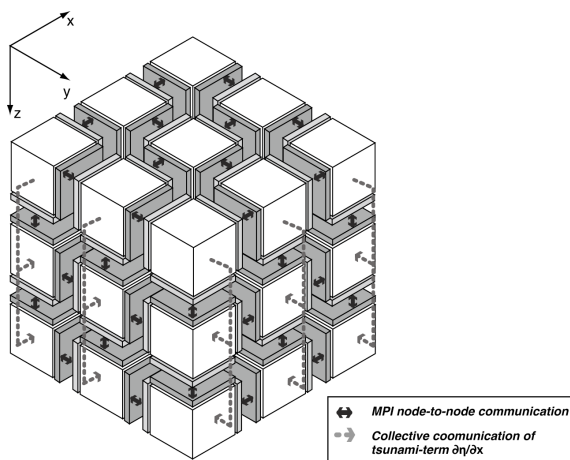


図2. 並列計算のための媒質の3次元分割。

め、モデル領域サイズを固定し、コア数の増大に伴う計算速度の向上を調べるストロングスケールングテストを行った。モデルサイズは512x512x512とし、東京大学情報基盤センターHA8000上で、Flat-MPIによる並列化を行った。ある程度の時間ステップまで計算を行い、1時間ステップあたりの平均計算時間を測定した。計算速度の向上は、1ノード16コアにおける計算結果を基準とし、そこからの相対高速化率

$$A_n = \frac{T_{n_0}}{T_n} = \frac{1-\alpha+\alpha/n_0}{1-\alpha+\alpha/n} \quad (4)$$

を推定した。ここで n はコア数、 α は並列化率である。

図3に16コアから4096コアまでの相対高速化率の推定結果を示す。512コア程度までは良好な結果が偉えたが、それより多数の並列計算になると完全なスケールリングは得られなくなり、4096コアの計算では2048コアと計算時間が変わらない頭打ち現象が観測された。これらの推定結果から、式(4)を用いて本コードの並列化率は99.839%と推定された。これは従来の3次元地震動シミュレーションコードの並列化率(99.9%超)とくらべて僅かに低い値である。これは、津波評価のため新たに追加されたノード間通信が影響しているためである。

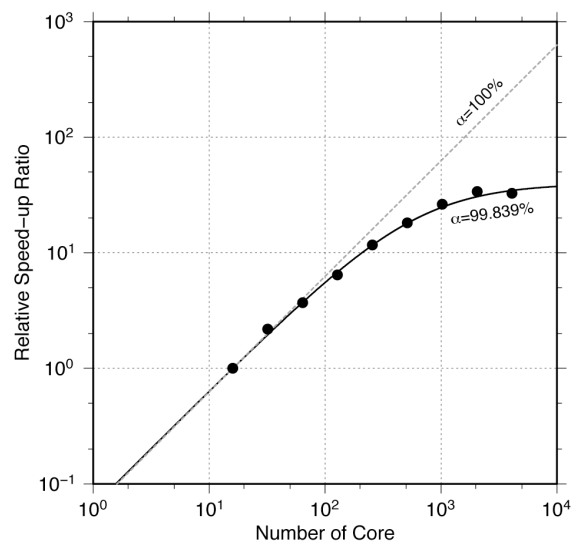


図3 地震動・津波統合コードの相対高速化率。

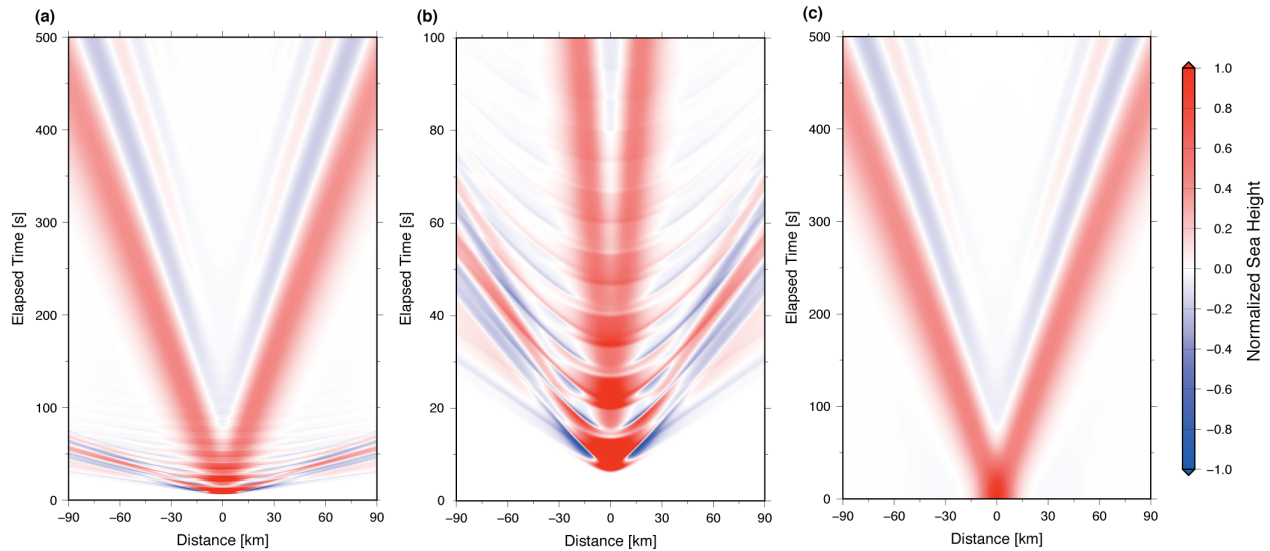


図4 (a)2次元媒質における地震動・津波統合シミュレーションの結果。海面における上下動変位の時空間分布を示す。(b)図(a)の0-100秒の拡大図 (c)Navier-Stokes方程式に基づく津波シミュレーション結果。

(4) 数値計算例

本手法の正当性を評価するために、2次元と3次元媒質におけるシミュレーションと、従来のNavier-Stokes方程式に基づく津波シミュレーションとの比較を行った。図4に2次元の弾性体-流体系における地震動・津波統合シミュレーションの結果例を示す。海面の上下動変位の時空間変化から、震源で輻射された地震波と海中で多重反射する海中音波、そして地殻変動が確認できる。経過時間と共に海面の地殻変動成分に重力が働き、シームレスに津波伝播に移行していくことが明らかになった(図4a,b)。また、その津波部分は、振幅、位相そして分散性からなる後続波まで、従来のNavier-Stokes方程式に基づく津波シミュレーション結果(図4c)に極めてよく一致していることが明らかになった。

さらに、本シミュレーションを3次元媒質の有限断層破壊に拡張した(図5)。海底面と海面における変位場の同時可視化により、地震動の生成から海底地殻変動の形成、津波の生成伝播までが統一的に理解できるようになった。

本シミュレーションは地震動シミュレーションの差分法にその基礎をおいているため、より現実的な不均質な地球内部構造への適用は極めて容易である。しかしその一方、本計算手法は短周期の地震動を評価するための小さな時間・空間離散化のもとで、長時間伝播する津波までを計算するため、計算量が極めて大規模になる。図5のシミュレーションは津波災害をもたらすような地震を再現するにはやや小さい領域であるが、それでもその実行には東大情報基盤センターのHA8000の32ノード(Hybrid-MPI)を用いて11時間を要している。より大規模なシミュレーションのためには、計算の高速化のためのいっそうのコードチューニングや、次世代スパコンの利用を睥んだ数万コア以上の大規模並列の改善が不可欠である。

3.2 地震動の4次元可視化法の開発

(1) はじめに

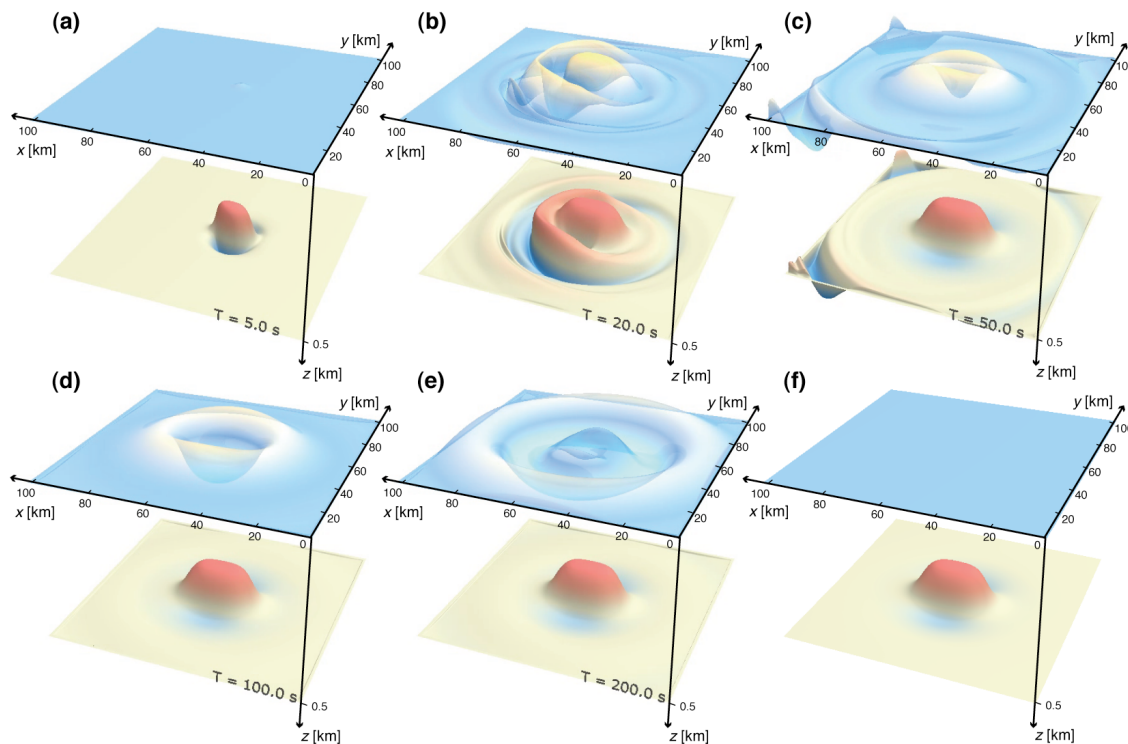


図5 (a-e) 3次元有限断層破壊の場合の地震動・津波統合シミュレーション結果。海底（下）と海面における上下動変位を3次元表示している。(f)本シミュレーションで仮定した震源断層により期待される海底地殻変動。

上記のような地震動・津波シミュレーション結果を適切に可視化し、地震の強い揺れと津波の生成メカニズムの理解をいっそう深めることは、一般へのわかりやすい情報伝達や教育のみならず、不均質媒質場中の波動伝播のメカニズムを理解するためにも極めて重要である。従来の多くの地震動シミュレーションの可視化は地表面や海面における地震動や津波の振幅を表示する2次元可視化であったが、特に地震動においては地中内部を伝播する3次元波動場の直接的な可視化が欠かせない。そこで、医学分野を中心として用いられてきたボリュームレンダリング手法を地震動シミュレーションに適用した過去の研究事例(Furumura and Chen, 2004)を東京大学情報基盤センターHA8000に拡張、移植し、シミュレーションと可視化の同時実行のための準備を行った。

(2) ボリューム可視化

地震動には初期微動として知られる速度の速いP波と、それより遅れてやってくる大振幅のS波があり、それぞれ地震波動の変位もしくは速度ベクトル場の発散および回転成分で特徴付けることができる。そこで、3次元媒質における地震動シミュレーションの各時間ステップにおける地震波動場の発散(P波)と回転(S波)成分の絶対値を計算し、波の種類と振幅に応じて1-256の値を割り当て、分類する。そして設定した視点・可視化強度に基づいて、3次元空間の各ピクセルにおける値を2次元平面に投影することでボリューム可視化を行う。特に、地震動は空間上のある一点である震源から、揺れである地震動が短時間放射されるため、地震波動場は空間的なコントラストの大きな波面を形成する。この波面を効率的に可視化するため、地震動の振幅のみならず、その空間勾配にも重みを与えることで地震波動場の効率的な可視化を行った。

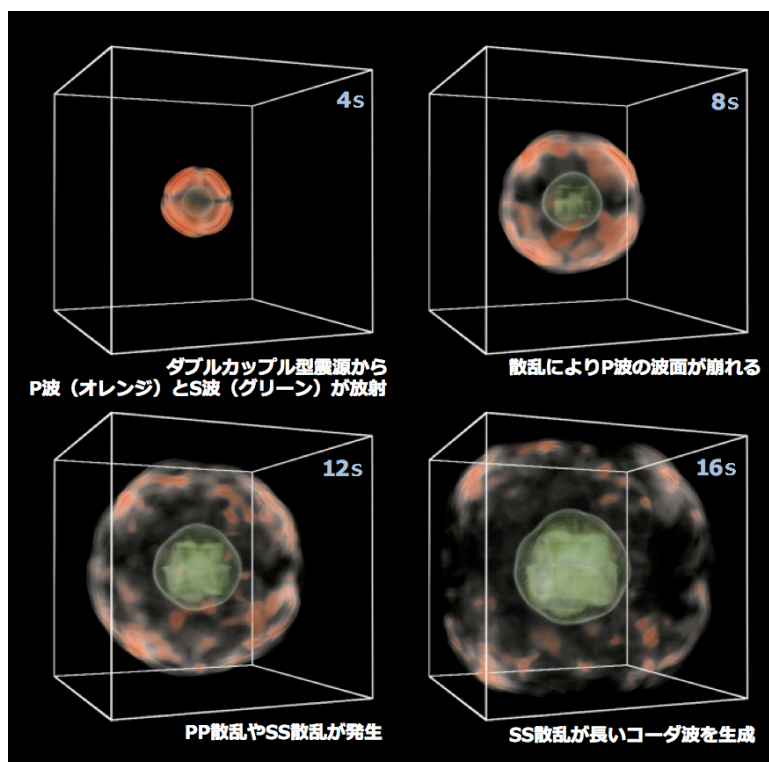


図6 短波長不均質構造中を広がる地震動のボリュームレンダリングの結果。

(3)計算例

本可視化コードを HA8000 に移植し、動作の確認と幾つかの典型的な媒質における地震動の可視化実験を行った。地震動は弾性体の運動方程式を空間 0.5km, 時間 0.005 秒で離散化した空間 4 次・時間 2 次精度のスタッガード・グリッドを用いて差分法によって計算した。図 1 に 192x192x192 km の一様ランダムな不均質媒質におけるボリュームレンダリング結果を示す。地球内部は、構成物質・岩石の違いにより地震波速度に短波長のゆらぎがあり、それが地震波の散乱を生じて継続時間の長いコーダ波と呼ばれる波が生成される。ボリュームレンダリングによって、地震動が震源から広がるにつれて波面が崩れていく様子や、S 波の波面内側にランダムに崩れたコーダ波が形成されていく様子を明瞭に可視化することができた。

また、地震動速度は地表から地中深くなるにつれて速くなる。このため、多くの地震動エネルギーは速度の遅い地表付近に集まり、地震発生から

しばらくすると地表に沿って伝わる表面波が卓越するようになる。図 7 は深さとともに速度が早くなる一次元速度構造におけるシミュレーションのボリュームレンダリングの例である。経過時間が短い間は震源から 3 次的に広がっていく波が卓越しているが、時間と共に地表付近にのみエネルギーが局在した表面波が卓越していく様子や、波長が長いほど速度が早い速度分散性が生じる様子もはっきりと見てとれる。

今回の結果から、地震動シミュレーション結果のボリュームレンダリングが地震動の可視化や、波動伝播メカニズムの理解に極めて有効であることが確認された。現在のところ、地震動シミュレーションと可視化はそれぞれ独立したプロセスで行っているが、そのためには地震動シミュレーションが各時間ステップ毎に大量のデータを出力しなければならず、ディスクの入出力速度が本シミュレーションの大規模化の阻害要因となっている。今後、シミュレーションと同時にメモリ上で同時可視化を行い、計算結果を残さずに可視化結果画

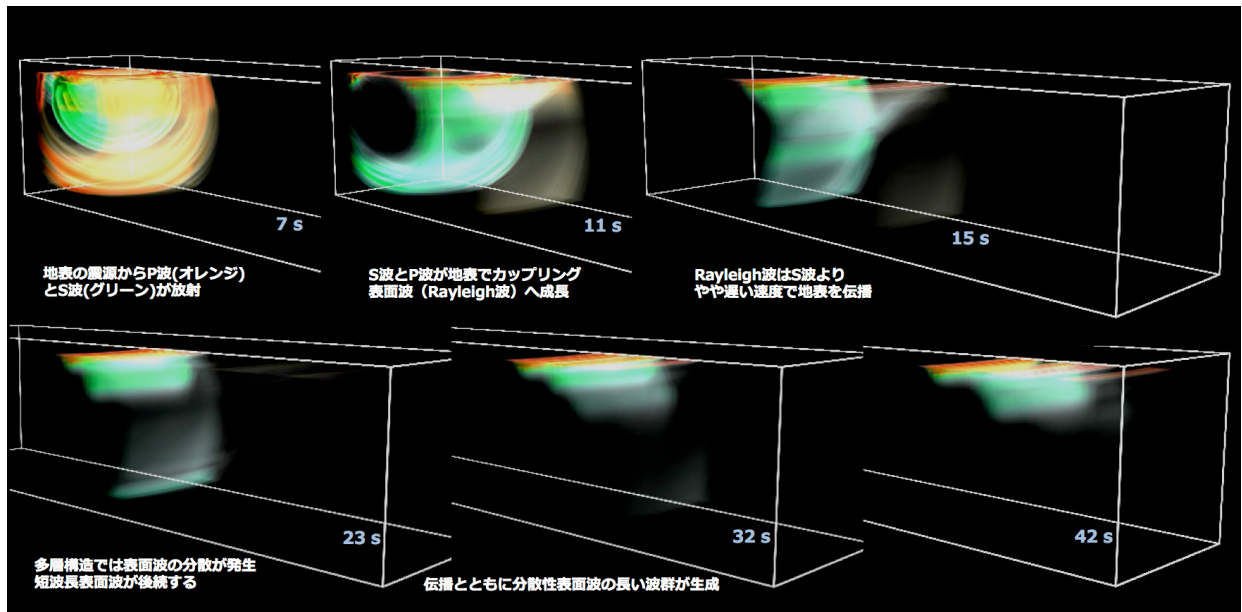


図 7 ボリュームレンダリングによって可視化された成層構造における浅い地震による表面波の生成と分散の様子。

像を出力していくことでこの問題の解決をはかる必要があるだろう。

4 これまでの進捗状況と今後の展望

本共同研究の成果では、次世代の大規模計算に向けた新しい地震動・津波連成手法の開発およびコードの開発と、シミュレーションとの同時可視化を目標とした3次元ボリューム可視化の評価を行った。今後、これらのコードに基づき、地震動・津波シミュレーションにおいては低速なメモリアクセスの抑制とキャッシュメモリの効率的な利用を含めたスカラーCPU向けのコードチューニングを、可視化については同時可視化のための計算・可視化両方を含む複数プロセスの同時実行とその計算バランスのチューニングを進める。

5 研究成果リスト

(1) 学術論文(投稿中のものは「投稿中」と明記)
Furumura, T., K. Imai, and T. Maeda, A revised tsunami source model for the 1707 Hōei earthquake and simulation of tsunami

inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan., J. Geophys. Res., in press, 2010.

(2) 国際会議プロシーディングス

(3) 国際会議発表

Furumura, T., K. Imai, and T. Maeda, Tsunami simulation for the 1707 Hōei earthquake: A revised source model and tsunami inundation to onshore lakes, 7th ACES international workshop, Otaru, 2010.

Noguchi, S., T. Maeda, and T. Furumura, FDM simulation of trench trapped Rayleigh Waves, 7th ACES international workshop, Otaru, October 2010.

Maeda, T. and T. Furumura, A unified dynamic numerical simulation of seismic, ocean acoustics, and tsunami waves, 7th ACES international workshop, Otaru, October 2010.

Takemura, S. and T. Furumura, Regional difference in small-scale heterogeneities in

the crust and upper mantle derived by the analysis of high-density regional seismic network and high-resolution computer simulation, 7th ACES international workshop, Otaru, October 2010.

Furumura, T., K. Imai, and T. Maeda, Tsunami simulation for the great 1707 Hiei, Japan, earthquake, 2010 AGU Fall Meeting, San Francisco, 2010.

Imai, K., A. Nishiyama, T. Maeda, T. Ishibe, K. Satake, and T. Furumura, Delayed Segment Rupture during Great Earthquake along the Nankai Trough - Estimation from Historical Documents and Tsunami Trace Heights of the 1707 Hiei Earthquake -, 2010 AGU Fall Meeting, San Francisco, 2010.

Noguchi, S., Maeda, T. and T. Furumura, Computer simulation of trench trapped Rayleigh waves, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2010.

Takemura, S. and T. Furumura, Estimation of the regional difference in small-scale heterogeneity in the crust and upper mantle around Japan derived by the analysis of high-frequency P-wave, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2010.

(4) 国内会議発表

古村孝志, 前田拓人, 今井健太郎, 1605年慶長地震による大津波発生メカニズム, 日本地震学会 2010年秋季大会

岩井一央・古村孝志・前田拓人・武村俊介, 4次元地震波動場のボリューム可視化, 日本地震学会 2010年秋季大会

前田拓人・古村孝志, 地震に伴う津波高と海中音波: 動的連成シミュレーションによる検討, 日本地震学会 2010年秋季大会

武村俊介・古村孝志, 高周波数 P 波を用いた短波長不均質構造の地域性の推定, 日本地震学会 2010年秋季大会

前田拓人・古村孝志, 地震波・海中音波・津波の動的連成シミュレーションの試み, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会

武村俊介・古村孝志, 地殻・マントルの不均質性と高周波数 P 波の伝播特性, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)