

( 1 ) 実施機関名：

東京大学地震研究所

( 2 ) 研究課題(または観測項目)名：

広帯域シミュレーションによる強震動・津波予測

( 3 ) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

( 3 ) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

( 3-2 ) 地震破壊過程と強震動

イ. 強震動・津波の生成過程

( 4 ) その他関連する建議の項目：

( 5 ) 本課題の 5 か年の到達目標：

大地震による強震動と津波の生成過程を理解し、地震現象の解明を目指すことを目的として、不均質な地下構造と震源断層運動を高い分解能でモデル化した、長周期～短周期地震動を含む、広帯域地震動および津波の発生伝播を、地球シミュレータ等のスーパーコンピュータを用いて高速かつ高精度に評価するための計算手法を確立する。強震動と津波のシミュレーション結果を用いて過去と未来の大地震の強震動と津波の発生過程の解明と予測、そしてこれを用いた地震・津波観測データの逆解析による震源と波源域の高精度推定を目指す。これまで地球シミュレータ向けに開発した地震動・津波シミュレーションコードを新型地球シミュレータ(2009年4月～)へ移植し、コードの最適化を図ることにより、従来10倍以上の性能を高めることにより、従来2～3倍以上の分解能(計算量は16～27倍)で上記計算を実行する。また、高分解能シミュレーションに必要となるスケールが1km以下の短波長不均質構造と、断層運動の不均質性(滑り分布、破壊伝播速度の揺らぎなど)を組み込んだ、広帯域シミュレーションの実用化を目指す。

( 6 ) 本課題の 5 か年計画の概要：

1. 短周期地震動の生成に寄与する断層面上のマイクロ構造と断層破壊運動の不均質性の寄与を大地震の震源解析および数値シミュレーションから評価する。断層不均質構造の不確定性に伴う、強震動評価のバラツキを考慮した、実用的な強震動予測手法を確立する。このために、高密度強震観測網(K-NET、KiK-net)および高感度観測網(Hi-net)観測データを用いて、地殻および最上部マントルの短波長不均質構造の分布特性と地域性を定量化する。S波の見かけ放射パターンの崩れの周波数依存性、P波コーダの3成分(Vertical, Radial, Transverse)のエネルギー分布、地震波伝播に伴うP波およびS波コーダエンベロープの拡大様式に着目し、地殻・マントルの短波長不均質構造の分布スケールとアスペクト比、そして強度(物性揺らぎの標準偏差)を定量的に評価する。

1. 短周期地震波動伝播に寄与する、地殻および上部マントルの物性の不均質ゆらぎの規模とその地域性を高密度地震観測データ解析と地震波伝播のコンピュータシミュレーションに基づく理解の深化を目指す。観測データ解析から求められた短波長不均質構造を計算モデルに組み込み、地球シミュレータ等のスーパーコンピュータによる大規模数値シミュレーションをもとに、内陸地震(2008年岩手・宮城内陸地震など)およびスラブ内地震(2008年岩手沿岸北部の地震など)における短周期地震波伝

播と、距離減衰異常（異常震域）の再現を行う。短周期地震動の生成に寄与する断層面上のミクロ構造と断層破壊運動の不均質性の寄与を大地震の震源解析および数値シミュレーションから評価し、断層不均質構造の不確定性に基づく強震動評価のバラツキを考慮した、実用的な強震動予測手法を確立する。

2. 地球シミュレータ向けにこれまで開発した「地震波伝播シミュレーションコード」と、「津波発生伝播シミュレーションコード」を、新型地球シミュレータに移植し、計算コードの最適化をはかることにより現在の2~3倍以上の分解能を持つ高分解能地震津波連成シミュレーション（計算量は現行の16~27倍）を実用化する。さらに、次世代スパコン（京速計算機）の利用を視野に入れた、数万~十数万CPU規模の大規模並列地震波動伝播と津波発生伝播計算コードの開発を進める。地震動シミュレーションと津波シミュレーションを連結した、「地震津波連成計算」による地震と津波の同時評価の実現を目指す。

#### （7）平成22年度成果の概要：

##### （1）1605年慶長津波地震の生成過程の検証

南海トラフで100~150年の間隔で繰り返す東海・東南海・南海地震の中で、1605年慶長地震は例外的な地震であり、強い揺れを伴わずに宝永地震と同等の大津波が突然押し寄せた「津波地震」であったことが知られている。慶長地震の発生メカニズムを探るために、震源断層の位置や震源破壊過程とこれにより生成する1)地震動、2)地殻変動、3)津波の3つをシミュレーションにより評価して、1707年宝永地震等との比較を行った。

慶長地震のメカニズムとしては、これまで海溝軸付近の浅いプレート境界が滑るモデルが多くの研究者により提唱されている（たとえば、Seno, 2002; 石橋, 1983; 安藤, 2006）。また、深海掘削船「ちきゅう」による熊野灘沖の掘削結果から、海溝軸付近の浅部プレート境界に地震によるものと考えられる高速滑りの痕跡が見つかった報告もあり、ここで過去に大地震が起きた可能性も示唆される。

そこで、慶長地震が深さ10km以浅の海溝軸付近のプレート境界地震であったと仮定し、1)地震動、2)地殻変動、3)津波の3つを地震津波連成シミュレーション（Furumura and Saito, 2009; Saito and Furumura, 2009）により評価して、深部プレート境界（深さ10~30km）で起きる通常の地震と比較した。

こうして作成した慶長地震の震源モデルでは、震源域が陸から海溝軸方向に75km遠ざかった結果、地殻変動量や堆積歪み量が激減し、宝永地震前後に紀伊半島や四国で観測されたような地殻変動や温泉・井戸の水位変化などが全く起きないことが確認できた。この一方で、震源域の周囲の海底隆起量は、震源が浅いことから通常の深部プレート境界滑りの場合と同等以上に大きく、海面には大きな初期津波が発生する。津波は距離減衰が小さく、沿岸での最大津波高は宝永地震のものと同様になることも確認できた。しかも、海岸線付近では地殻変動がなく、津波は引き波を伴わず、地震発生から十数分後に突然押し寄せることになる。

いっぽう、慶長地震の弱い地震動については、震源が遠ざかったことによる距離減衰や、浅部プレート境界の小さな剛性率による地震モーメントの低下だけでは全く説明できない。宝永地震では、西南日本全域で震度6強~4相当の強震動が観測されたが、これを震度3~0程度にまで小さくするためには、たとえば断層の破壊伝播速度を1km/s程度以下に遅くする「ゆっくり地震」等の別の特異な地震メカニズムを考える必要がある。

##### （2）地震津波同時シミュレーション法の新規開発

大地震による強震動と津波の高精度予測と、観測された地震波形と津波波形から震源破壊過程を詳細に理解する目的で、1)地震動、2)地殻変動、3)水中音波、4)津波を同時に評価できるシミュレーションコードを新規開発した（Maeda and Furumura, 2011）

本計算で用いる基本方程式は、地震動シミュレーションで一般的に用いられる3次元運動方程式に重力項を付加したものである。計算の安定化のために、重力を運動方程式に直接的に付与するかわりに、一様重力下での静水圧平衡を初期条件として、海水面の変動に伴う重力変動を外力として評価す

る工夫や、空気(気体)/海水(流体)/海底(固体)境界を差分法計算で高精度に評価する工夫(岡本・竹中、2005;中村・他、2011)、地震動・海中音波(～数Hz)から津波(～数十分)、そして地殻変動(～DC)を含む広帯域の波動場の差分法計算で有効な高性能の吸収境界条件(PML)の導入など、数々の数値計算上の工夫を行った(Maeda and Furumura, 2011)。シミュレーション結果は、従来の地震動計算の結果や、地殻変動の解析解(Okada,1985)、ナビエ・ストークス式に基づく津波計算結果との比較から検証を行った。また、地球シミュレータ等を用いた大規模計算の実用化に向けて、計算領域を多数のCPUで分担して進める領域分割型の並列計算コードを整備した。

地球シミュレータを用いて2004年紀伊半島南東沖の地震の地震津波シミュレーションを実施し、室戸沖の海底ケーブル津波計で記録された水中音波や、津波の分散性波群の再現に成功した。また、断層運動の時間関数を変化させたシミュレーションを多数実施し、海中音波の震幅が震源時間関数(断層破壊時間)に依存して激変すること、いっぽう、津波波高の変動は小さいことを確認した。この結果を用いることにより、海底ケーブル津波計で記録された海中音波と津波の震幅比を用いた、震源断層運動の推定法と「ゆっくり地震」の早期検出可能性など、震源過程解析や津波予測の高度化に向けた新たな可能性が見えてきた。

### (3) 地殻・マンツルの短波長不均質構造の空間分布性状の把握

現在の周期1～2秒以上の地震動シミュレーションの高度化をはかり、周期1秒以下の短周期地震動を含む広帯域地震動予測の実現に向けて、地殻・マンツルの短波長(数百～キロメートル)不均質構造の定量化に向けた基礎研究を継続実施した。

今年度は昨年度に引き続き、Hi-net高密度地震観測記録を用いて、RadialとVertical成分に振幅を持つP波が、地下の不均質構造における散乱によりTransverse(T)成分へ染み出す効果に着目し、多数の地震と観測点記録を用いた解析により、T成分の相対的な強度をEPと定義して、距離変化、周波数依存性とその地域性を議論した。その結果、EPは震源距離150km以内では震源距離によらず一定の値(0.1～0.3程度)を持ち、周波数の増加とともにEP値が単調増加すること、震源距離が150kmを超えると、EPが距離とともに直線的に増大に転じること、の2つの特徴が明確となった。また、EPは西南日本、東北日本の太平洋側、日本海側の順に大きくなるという、地域性も確認できた。

次に、観測されたEP変化とその地域性から、地殻・マンツルの短波長不均質構造を逆推定するために、大陸地殻(Kennett and Furumura, 2006)や太平洋プレート(Furumura and Kennett, 2005)の不均質性を議論した既往の研究を参考にして、上部地殻、下部地殻、最上部マンツルの物性のランダム揺らぎを与えたモデルを用いて3次元地震波動伝播シミュレーションを実施して上記観測結果との比較を行った。その結果、P波・S波速度の揺らぎの相関距離が $a=5\text{km}$ そして標準偏差が $e=2\%$ の場合に観測を良く説明できることが確認できた。また、震源距離150km以遠でEPの増大は、上部・下部地殻ともに等しい不均質分布を持つモデルでは説明できず、下部地殻の不均質性の強度を2倍( $e=4\%$ )と大きくすることにより初めて説明可能になることがわかった。これは、震源距離150km以内では直達P波が初動として、これ以遠ではPn波が初動として観測されるためであり、それぞれの波が上部地殻と下部地殻の影響を強く受けるためである。本結果から、高密度地震観測データ解析により、上部地殻と下部地殻の不均質性の分布とその地域性を詳しく調査して、短周期地震動シミュレーションの実現に向けた高分解能地下構造モデルを構築する見通しが得られた。

### (4) コーダ規格化法に基づく表層地盤のサイト増幅特性の推定

地下数メートル～数十メートルの表層地盤における周期1秒以下の短周期地震動の強い増幅は、大地震時の大きな加速度や局所的な震度の増大に大きく影響するため、短周期地震動の高精度評価に向けて、全国の表層地盤の増幅特性(サイト増幅)の見積もりが重要課題である。従来は、多数の地震と観測点を用いて、地震波のS波のスペクトル振幅から各観測点のサイト増幅を震源項と伝播経路(減衰)の効果と分離して求めるスペクトルインバージョン法が一般的に用いられてきた。一方、本研究では、S波コーダ波を用いることにより、伝播経路の効果を除き、かつ多数の微小地震を用いて広帯域のサイト増幅特性の高精度推定を試みた。

48個の地震について1800カ所のK-NETおよびKiK-net強震計記録を用いて、周波数 $f_c = 0.75$ ,

1.5, 3, 6Hz の帯域毎に、各観測点のサイト増幅係数を F-net 岩盤観測点の一つを基準として最小自乗法により推定し、全国の「周波数毎の揺れやすさ地図」を作成した。また、KiK-net の地中地震計記録を用いて同様の解析を行い、低周波数帯では地表増幅と地中増幅係数に良い相関が見られるが、高周波数になるほどその相関係数が小さくなることも確認した。

次に、求められたサイト増幅係数を用いて 2007 年新潟県中越沖地震等の加速度波形を仮想岩盤サイトのものに補正し、計測震度を計算した。補正により、震度の距離減衰曲線からのバラツキが半分程度に小さくなり、震央を中心とする同心円状の震度分布が再構成された。

今後、広帯域の地震動予測に向け、表層地盤増幅特性をより長周期（周期 1 秒～3 秒程度）側に拡張するためのコーダ規格化法の適用限界の確認と解析手法の改良を進める。

- ( 8 ) 平成 22 年度の成果に関連の深いもので、平成 22 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
- Kennett B.L.N. and T. Furumura, Tears or thinning? Subduction structures in the Pacific plate beneath the Japanese Islands, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 18, 52-58, 2010.
- Saito, T., K. Satake, and T. Furumura, Tsunami waveform inversion including dispersive waves: the 2004 earthquake off Kii Peninsula, Japan, *J. Geophys. Res.*, 115, , doi:10.1029/2009JB006884, 2010.
- Imai, K., K. Satake., and T. Furumura, Amplification of tsunami heights by delayed rupture of great earthquakes along the Nankai trough, *Earth Planets Space*, 62, 427-432, 2010.
- Maeda, T., and T. Furumura, 2011, An integrated numerical simulation of seismic waves, ocean acoustics, and tsunamis, *Pure and Applied Geophysics*, submitted.
- 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.*, doi:10.1029/2010JB007918, 2010.
- 古村孝志, 地球シミュレータによる地震波伝播と強震動シミュレーション, *計算工学*, 16, 1, 16-19, 2010.
- 古村孝志, 津波発生伝播の大規模 3 次元シミュレーション, *スーパーコンピューティングニュース*, 12, 1, 43-57, 2010.
- 竹本帝人・古村孝志・前田拓人・野口理子、コーダ規格化法によるサイト増幅特性の推定（4）全国強震観測網における増幅特性の統一の推定と地表と地中の比較、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、発表予定。

- ( 9 ) 平成 23 年度実施計画の概要：

( 1 ) これまでに開発した、1) 地震 津波同時シミュレーションコード、2) 短波長付不均質構造モデル、そして 3) 表層地盤（サイト）増幅モデルを統合して、1707 年宝永地震や想定南海トラフ地震の広帯域地震動・地殻変動・津波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のほか、平成 23 年 4 月より一部の試験運用が開始される次世代スパコン（京コンピュータ）を用いた大規模計算を施行的に行う。

( 2 ) 広帯域地震動 津波シミュレーションの実用化に向けて、1) 複雑な地表・海底地形に対応する気体/液体/固体の境界条件の高精度化、2) 吸収境界条件（PML）の安定かつ汎用化、3) 周波数 0.02～5 Hz 程度の広帯域地震動を評価する広帯域の非弾性減衰（ $Q_p/Q_s$ ）モデルの導入等の計算コードの改良を継続実施する。

( 3 ) 周期 1 秒以下の短周期地震動の強い散乱と減衰、長いコーダ波後の成因と考えられる、山地地形や海底地形と海水の影響を、短周期地震動シミュレーションに基づき定量的に評価する。全国の表層・海底地形のスペクトル解析と不均質性のフラクタル分布の地域性を評価し、これらをモデル化した地震波伝播計算から、S 波放射パターンの崩れや P 波の Transverses 成分への漏れ、距離減衰、コーダ波の生成における地形の影響を評価する。これまで集中的に研究を進めた、地殻・マントル内の短波長不均質構造による地震波の散乱現象と、地形散乱現象の違いを明確化させる。

( 10 ) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

古村孝志、瀨織一起、三宅弘恵

他機関との共同研究の有無 : 有

・ 強震観測については地方自治体等との共同研究

・ 強震動シミュレーションは、海洋研究開発機構地球シミュレータセンター、および東大情報基盤センターとの共同プロジェクトによる

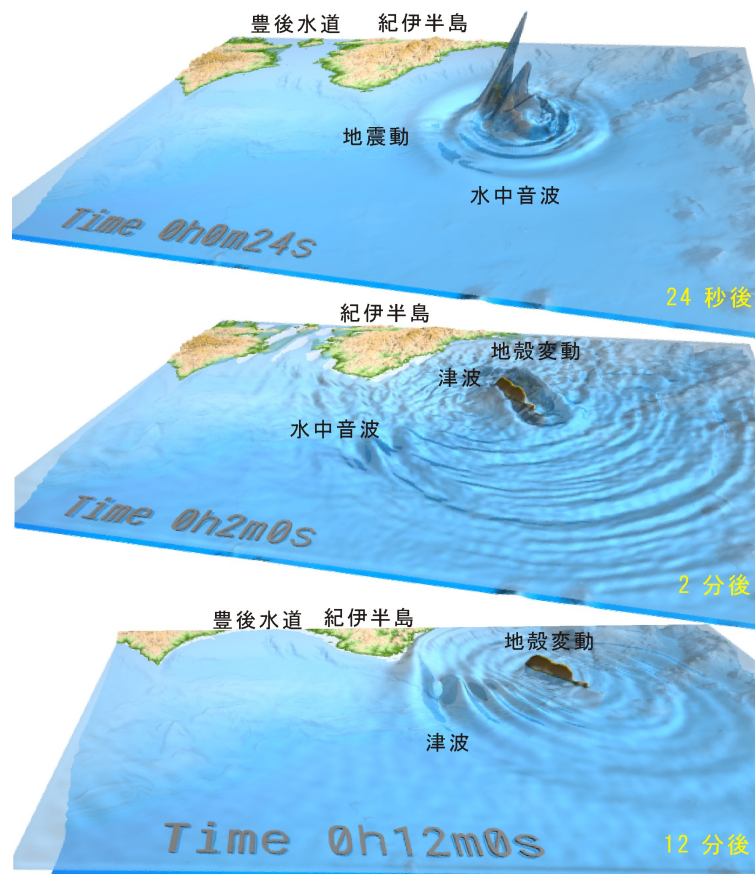
( 11 ) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 地震予知研究推進センター

電話 : 03-5841-5712

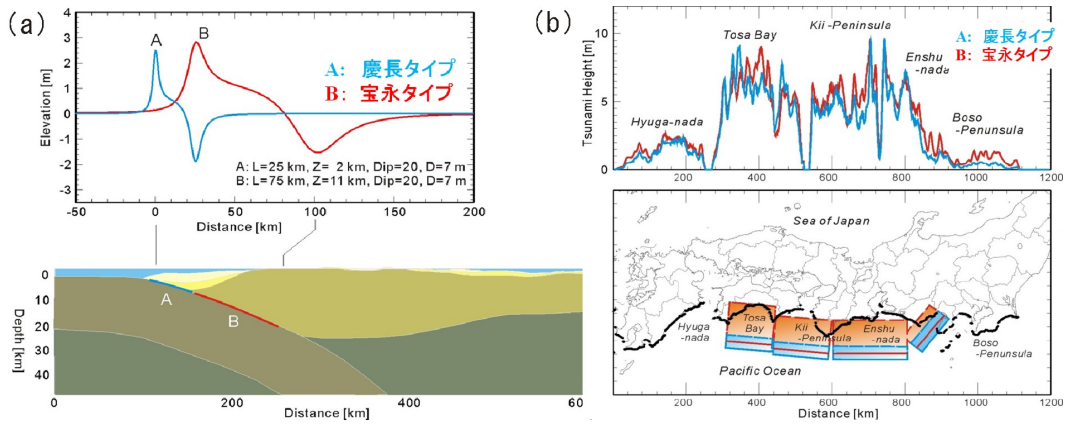
e-mail : yotik@eri.u-tokyo.ac.jp

URL : <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>



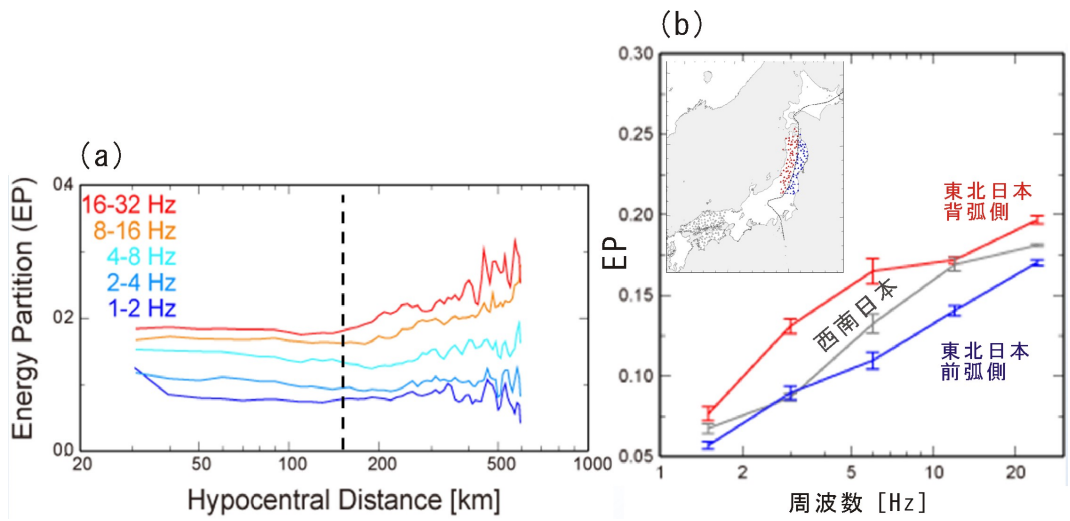
2004年紀伊半島南東沖地震の地震動-津波同時シミュレーション

地震-津波同時シミュレーションにより求められた2004年紀伊半島南東沖地震の地震動、水中音波、地殻変動、津波の伝播の様子(地震発生後24秒後、2分後、12分後)。地球シミュレータにより計算。



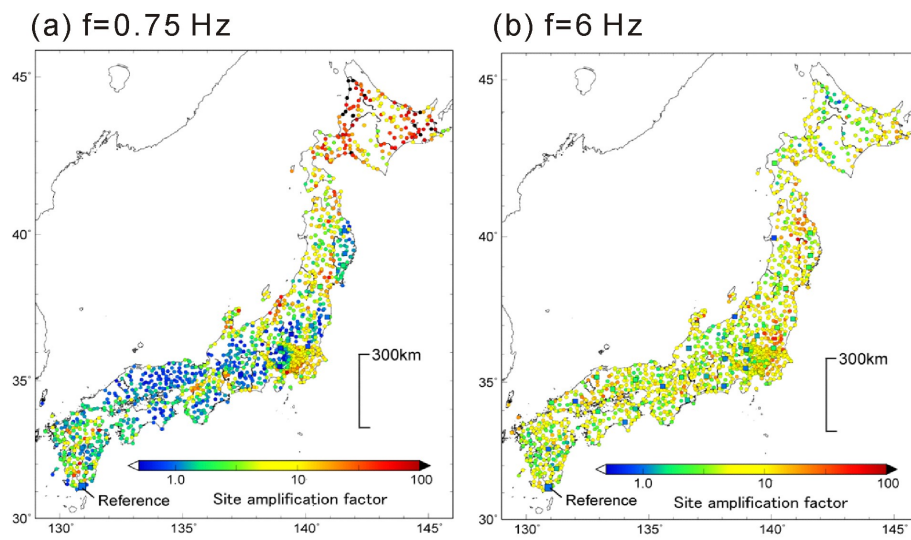
1605 年慶長地震の津波評価

(a) 海溝軸付近の浅部滑り (青) と深部プレート境界 (赤) による海底面の上下動地殻変動の比較と、(b) これによる九州～四国～紀伊半島の最大津波高分布の比較。



P 波の Transverse 成分強度 (EP) の周波数

(a) P 波の T 成分強度分布の距離・周波数依存性と、(b) その地域性 (東北前弧、背弧、西南日本)。



コーダ規格化法により求められた全国の表層地盤（サイト）増幅特性

(a) 周波数 0.75 Hz, (b) 周波数 6 Hz における、K-NET, KiK-net 強震観測点毎のサイト増幅係数。