

(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、広帯域地震動及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、従来の 10 倍以上の性能を高めることにより、従来の 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及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) 及び高感度観測網 (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 波コードの 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 波コード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、地殻及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) 及びスラブ内地震 (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及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図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24年度成果の概要：

大地震による強震動予測の確度向上に向け、短周期（高周波数）地震動の伝播に関わる地殻・マン托ルの不均質構造を的確にモデル化し、そして短周期及び長周期地震動を強く増幅させる堆積平野や、震源から平野への伝播経路の地下構造を詳細に把握するための研究を進めた。近年開発された高性能スパコンを用いた大規模な数値シミュレーションに基づき、過去地震の強震動の再現と将来発生が心配される大地震の強震動の高精度予測に向けた研究を進めた。今年度の成果は以下のとおりである。

（1）高密度地震観測とシミュレーションに基づくフィリピン海プレートの詳細形状の推定

これまで強震動や津波シミュレーションには、微小地震の震源分布を用いて作成された「スムーズ」なフィリピン海プレート（PHP）モデル（例えば、山崎・大井田,1985）が一般に用いられてきた。一方、近年、レーバ関数解析やトモグラフィ解析結果に基づき、局所的に大変形して折れ曲がる「複雑」なプレートモデルの概念が示された（Shiomi et al., 2008）。さらに、Ide et al. (2010) は、地震・火山等の地球物理データの統合的な解釈に基づき、プレートの曲率が急変する紀伊水道～兵庫でプレートが断裂している可能性も指摘している。プレート形状は、東海・東南海・南海地震の強震動と津波の評価に大きく影響し、そして連動発性の評価に重要な意味を持つことから、Hi-netデータの解析と地震波伝播シミュレーションの二面から、PHPの詳細な形状と地震波波動伝播特性を検討した。

まず、PHP内で発生したスラブ内地震の高周波数地震動の伝播と、地表の最大加速度（PGA）分布から、新しい複雑プレートモデルの有効性を検証した。例えば、2009年9月3日に豊後水道で発生した、深さ170kmのスラブ内地震（M6.0）では、PHPの深度コンターに沿って、PGAの分布が偏った「異常震域」が確認できた。PGAは、Shiomi et al. (2008) のPHP形状が大きく変化する岡山/兵庫県境付近で急激に減衰し、一方、形状変化の小さな徳島県～和歌山県では減衰が小さいなど、高周波数地震動の伝播と減衰は複雑プレートモデルの形状と良く整合することが確認できた。

次に、PHP形状の急変と高周波数地震動の伝播・減衰特性の関係を詳しく見るために、2次元差分法に基づく高周波数地震動の伝播シミュレーションを行った。計算では、800 km × 150 kmの鉛直断面を0.2 × 0.1kmの細かな格子間隔でモデル化し、1) 従来のスムーズなPHPモデル、2) 新しい複雑なPHPモデル、3) PHPの断裂モデル、の3つを用いて、高周波数地震波の伝播特性の違いを調べた。地殻・マン托ル及びPHP内部には、Furumura and Kennett (2008) に従い、高周波数地震動の散乱を支配する、ランダム速度揺らぎを与えた。

計算結果から、複雑なPHPモデルでは、プレート上面深度の急変（40 → 70km）に伴い、地震波がプレートからマン托ルに抜け出す様子や、これに伴ってPGAが急減するとともに、屈曲するプレート境界から強いS-P変換波が発生することによりS波震幅が小さくなるメカニズムが確認できた。この結果、新しい複雑なPHPモデルでは、震源域から離れた内陸にも大きな影響を与えることがわかり、南海トラフ地震の強震動予測における詳細なプレート形状の必要性が再確認された。なお、本シミュレーション（2次元モデル）からは、PHP断裂が地震波に与える効果は確認できず、今後、3次元モデルを用いた検討が必要である。

（2）日本海溝に沿って伝播する長周期表面波とその成因の研究

2005 年三陸はるか沖の地震など、岩手県の沖合の日本海溝付近で発生した浅発 ($h=10\sim 20\text{km}$) 地震の際に、伊豆一小笠原諸島の青ヶ島観測点において、S 波到着の 10 分後に周期 10 秒前後の表面波が到来することが確認された。同様の長周期の表面波は、2010 年 12 月 22 日の父島近海の浅発地震 ($M7.4$; $h=14\text{ km}$) においても太平洋沿岸の観測点で顕著に見られ、海溝付近で起きる浅発地震に見られる一般的な地震現象と考えられ、以前に Nakanishi et al.(1992) が以前に発見した、ウルップ島付近で発生した地震において北海道で記録された長周期表面波と同等のものと考えられる。

こうした長周期の表面波は、震源と観測点の位置関係から、水深が数千メートル以深の海溝軸に沿って海中を伝播してきた波と考えられることから、その成因を探るために、日本海溝付近の 2 次元及び 3 次元地下構造モデルを用いた地震動シミュレーションを実施した。海底地形と堆積層構造を詳細にモデル化するとともに、海水や堆積層の影響や、震源の位置、深さの影響を見るために、複数のシミュレーションを実施し、長周期表面波の生成メカニズムを調査した。その結果、震源から放出された地震波の一部が、速度の遅い海中音波に変換され、これが海底と海面との間を多重反射しながら海底を境界波としてゆっくりと伝播し、次に房総半島沖のプレートの 3 重会合点付近の海溝の屈曲地点の海底急傾斜面において表面波 (Rayleigh 波) に変換し、陸上観測点に向かうという一連のメカニズムが明らかになった (Noguchi, Maeda and Furumura, 2013)。

現在、一般的な強震動シミュレーションでは、計算の都合により海水や地表・海底地形を組み込まないことが多いが、日本海溝付近で発生する大地震による長周期地震動の評価には、海水層と海底地形を正しく組み込んだ数値シミュレーションが不可欠となることが確認された。

(3) 2011 年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーション

2011 年東北地方太平洋沖地震 ($M9.0$) において、関東平野、濃尾平野、大阪平野などで長周期地震動が発生し、超高層ビルが 10 分間以上にわたって長く揺れ、また大阪湾沿岸部の超高層ビルでは天井材の落下などの被害が出るなど大きな問題が発生した。

しところが、強震計記録から求めた周期 6 秒での速度応答スペクトル値 (減衰 = 5%) は 30cm/s 程度と小さく、例えば、2003 年十勝沖地震において石油タンクのスロッシング火災を起こした苫小牧地点の速度応答 (80cm/s) と比べても $1/3$ 程度に過ぎなかった。また、1944 年東南海地震 ($M7.9$) における東京大手町の気象庁強震計記録や、2004 年紀伊半島南東沖の地震 ($M7.6$) における大阪地点の KiK-net 強震計記録と比べても同程度であり、東北地方太平洋沖地震の $M9.0$ の地震規模と震源距離から考えて、過去の $M8$ 地震と同程度以下と小さかった。

東北地方太平洋沖地震において、長周期地震動の生成が小さかった可能性とその原因を調べるために、各地で発生した $M7$ 級地震における関東平野の強震計記録を比べ、長周期地震動の発生の様子を調べた。その結果、東北地方の太平洋側で発生した地震では、内陸の地殻内地震 (2004 年中越地震、2007 年中越沖地震、2007 年能登半島地震、2008 年岩手宮城内陸地震) や、南海トラフのアウトライズ地震 (2004 年紀伊半島南東沖地震) に比べて、周期 6 秒前後の長周期地震動 (表面波) の励起が $1/3$ 程度以下と小さく、速度応答スペクトルに優位なピークが現れないことが分かった。

また、大阪地点については、2004 年紀伊半島南東沖地震と 2000 年鳥取県西部地震の強震記録を用いて、大阪平野の東端の岩盤観測点である KiK-net 交野の強震記録と、大阪湾岸の KiK-net 此花での強震記録のスペクトル比 (長周期地震動の増幅率) を求めて、東北地方太平洋沖地震時のものと比較した。その結果、いずれの地震でも一次固有周期 (6 秒) で 30 倍、二次固有周期 (3 秒) で 20 倍、三次固有周期 (1.5 秒) で 15 倍程度の増幅が認められ、東北地方太平洋沖地震において特異な増幅現象が起きていないことを確認した。また、この増幅特性は、KiK-net の Web で公開されている観測点下の S 波速度構造を用いて SH 波の一次多重反射理論に基づき評価した理論増幅率と良く一致することも確認した。

このことから、既知の地下構造モデルを用いた地震動シミュレーションにより、大地震の長周期地震動の増幅特性は、地震の位置関係と平野への入射方向によらず適切に評価できることが再確認された。次に、東海・東南海・南海地震の 3 地震連動を想定した震源モデルを用いて長周期地震動を評価し、周期 6 秒の速度応答が東北地方太平洋沖地震時の 3 倍 (東京地点) ~ 5 倍 (大阪地点) 大きくなるほか、

個々の地震による長周期地震動の継続時間がそれぞれ数分続くことから、3地震が数分の時間差で連動発生した場合には長周期地震動が10~20分以上に長く継続する恐れがあることを確認した。

(4)「京」コンピュータを用いた大規模地震・津波同時シミュレーション

高性能スパコンを用いた大規模地震動シミュレーションの実現に向け、これまで地球シミュレータ用に関与した地震動シミュレーションコードを、2012年から本格稼働を開始した「京」コンピュータに移植した。運動方程式の差分法計算に基づく地震動シミュレーションコードを解析し、京のメモリ性能(0.5Byte/FLOPS)から期待される理論上の最大実効性能(20%程度)を評価して、これを目標として京コンピュータの内部構造(スカラー型CPU、tofuネットワーク等)に適合させ、高い実効性能と並列化性能を得るためのコードチューニングを行なった。最終的に、京の最大のノード数(82,944CPU)計算において、2.1PFLOPSの演算性能(実効性能は約19%)を達成した。

京コンピュータを用いて、東北地方太平洋沖地震の震源破壊過程と強震動、長周期地震動、津波の成因を詳しく検討するために、地震—津波同時シミュレーション(Maeda and Furumura, 2011)を実施した。計算結果を強震波形と海底ケーブル津波計と比較し、シミュレーションの有効性を確認した(Maeda et al., 2012)。ここで達成した演算の実効性能は、従来の地球シミュレータのフルノード計算(1,024CPU)の40倍の規模に相当する。これにより、3次元差分法計算において約2.5倍の高解像度化が可能であるほか、これまで難しかった地球シミュレータのフルノード規模のシミュレーションを頻繁に実施できる環境が整った。

(8)平成24年度の成果に関連の深いもので、平成24年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):

Chen, K., B.L.N. Kennett and T. Furumura, High frequency waves guided by the subducted plates underneath Taiwan and their association with seismic intensity anomalies, *J. Geophys. Res.*, accepted, 2012.

Furumura, T., K. Imai and T. Maeda, A revised tsunami source model for the 1707 Hoei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan, *French-Japanese Seminar on Earthquakes & Tsunami*, Tokyo, 13-14 Nov., 2012.

Furumura, T., Peta-scale FDM Simulation of Strong Ground Motion and Tsunami: Towards Disaster Prediction and Mitigation, *VECPAR2012*, Kobe, 20 July, 2012.

Furumura, T., Reevaluation of the Nankai-trough earthquake linkage scenario and computer simulation of expected strong ground motion and tsunami, *KAMAE International Workshop*, Kochi, 8 Feb., 2012.

Furumura, T., S. Padhy and T. Maeda, 2012, Detailed structure of the Philippine Sea plate subducting along the Nankai Trough, western Japan, inferred from high-frequency seismic wave analysis, *AGU Fall Meeting*, Sanfrancisco, 6 Dec., 2012.

Furumura, T., Strong ground motion and tsunami associated with the great 2011 off-Tohoku M9.0 earthquake derived from dense seismic and tsunami network and computer simulation, *Commemorate 60 Years of Collaboration between Japan and Turkey in Earthquake Engineering*, Istanbul, 2 July, 2012.

Maeda, T., T. Furumura, S. Noguchi, S. Takemura, S. Sakai, M. Shinohara, K. Iwai and 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.*, accepted, 2012.

Oishi, Y., M.D.Piggott, T. Maeda, S.C. Kramer, G.S. Collins, H. Tsushima and T. Furumura, Three-dimensional tsunami propagation simulations using an unstructured mesh finite element, *J. Geophys. Res.*, in revision, 2012.

Padhy, S., S. Takemura, T. Takemoto, T. Maeda and T. Furumura, Spatial and temporal variations in coda attenuation associated with the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku, Japan (Mw 9) Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, accepted, 2012.

Takemura, S. and T. Furumura, Scattering of high-frequency P wavefield derived by dense Hi-net array observations in Japan and computer simulations for seismic wave propagations, *Geophys. J. Int.*, in press, 2012.

Takemoto, T., T. Furumura, T. Saito, T. Maeda, and S. Noguchi, Spatial- and Frequency-Dependent Properties of Site Amplification Factors in Japan Derived by the Coda Normalization Method, Bull. Seism. Soc. Am., 102, 4, 1462-1476, 2012.

(9) 平成 25 年度実施計画の概要 :

- (1) 地下の堆積層モデルとプレートモデルに、地殻・マントルの短波長不均質構造 (相関距離 = 数キロメートル以下) や地表・海底地形を組み込んだ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伝播の評価を行う。
- (2) 広帯域地震動シミュレーションを実施し、日本海溝で発生する地震と南海トラフで発生する地震の長周期地震動の生成と伝播過程の違いをシミュレーション結果と地震観測との比較から詳しく評価する。
- (3) 京コンピュータ等のスパコンを用いて、東北地方太平洋沖地震の最新の震源モデルや日本列島の詳細な地下構造モデルを用いて、強震動と津波の再現シミュレーションを実施する。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

古村孝志、瀧澤一起、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、及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>

(12) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 古村孝志

所属 : 東京大学地震研究所 地震火山災害部門

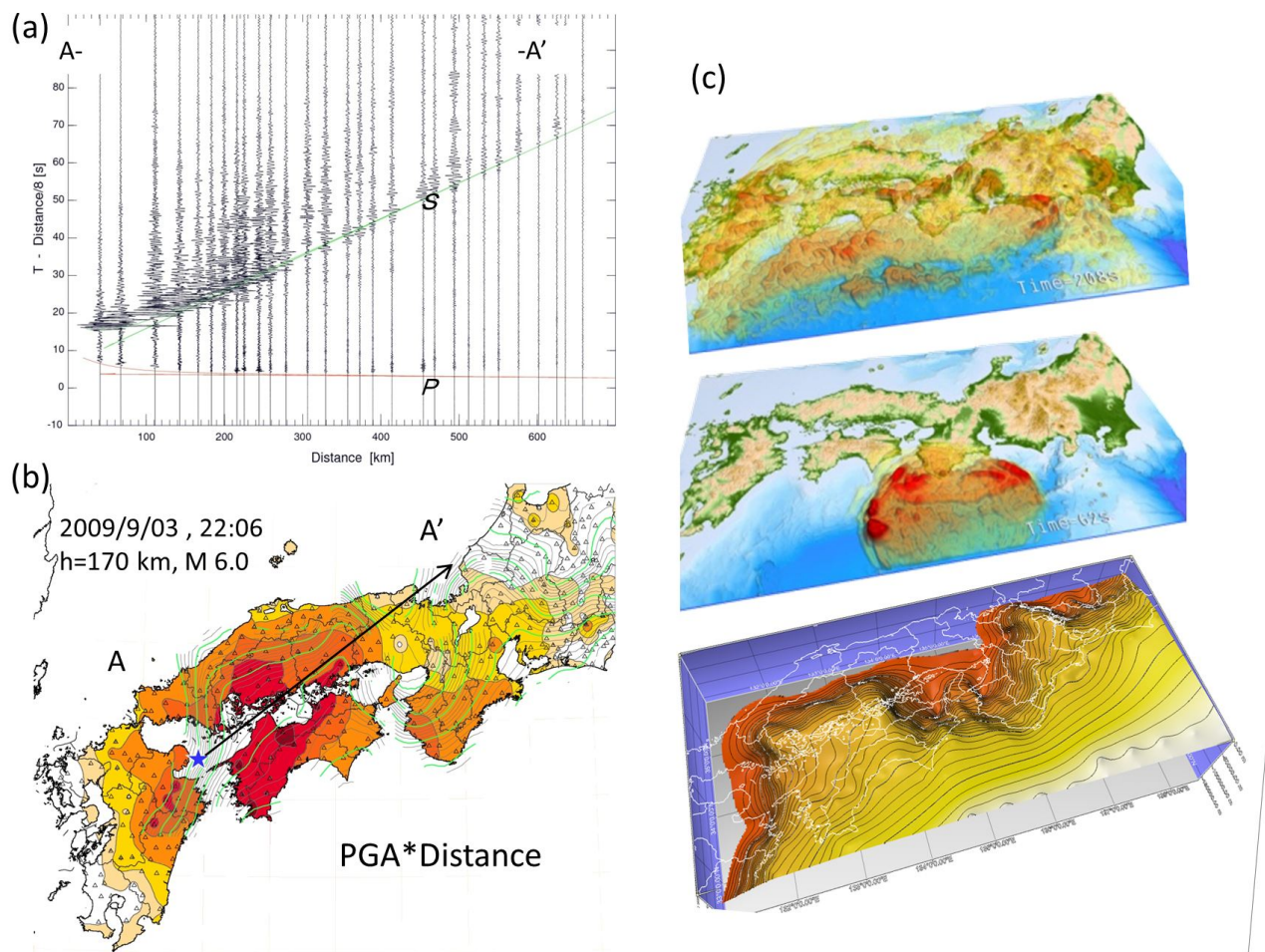


図1. 「複雑な」フィリピン海プレート等深度モデルと地震波の伝播特性。

(b) 豊後水道下で発生したスラブ内地震の最大加速度 (PGA) 分布は複雑なプレートモデルの等深度線と良く対応し、(a) プレートの屈曲地点で S 波振幅が急減し、遠地では再び震幅が回復する。(c) 複雑なプレートモデルを用いた南海トラフ地震のシミュレーションモデルと、地震発生から 62 秒、208 秒後の波動場。

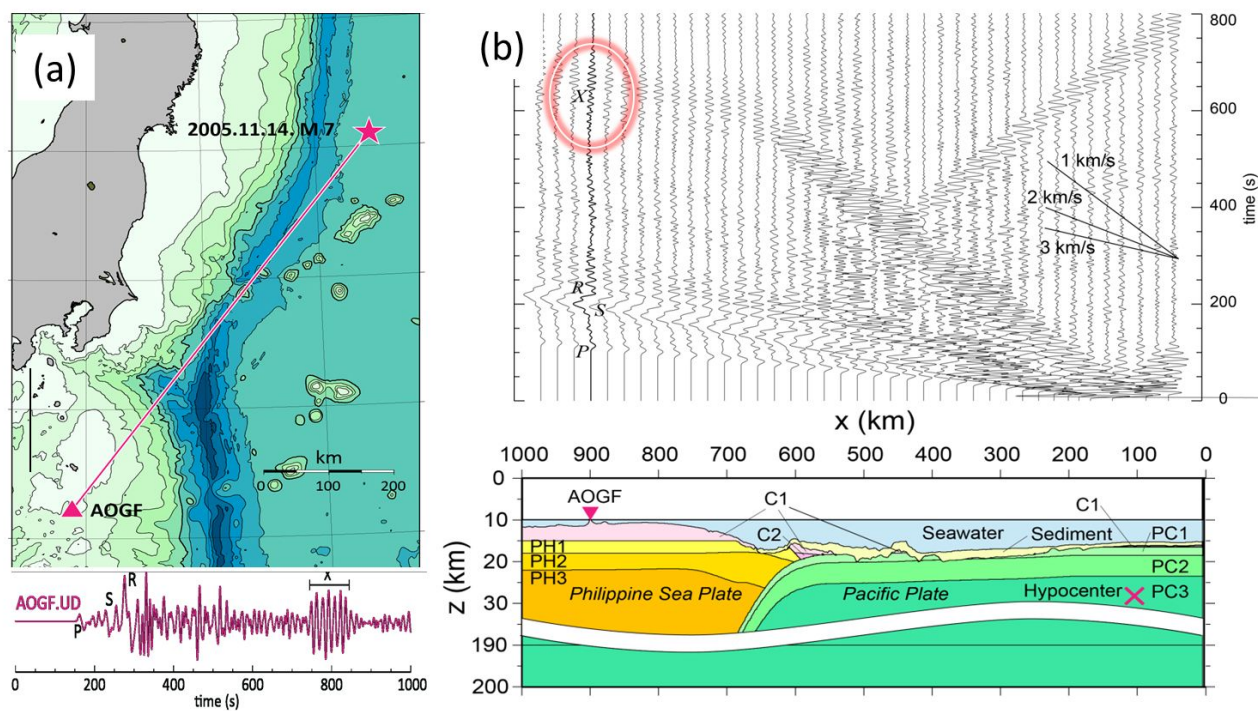


図 2. 日本海溝付近で発生する地震に見られる、長周期海溝トラップ波。

(a) 岩手沖のプレート内地震における、F-net 青ヶ島 (AOGF) 観測点で記録された周期 10 秒程度の長周期表面波 (X) と、(b) 2 次元シミュレーションによる海溝トラップ表面波の評価。

(b) 岩手沖のプレート内地震における、F-net 青ヶ島 (AOGF) 観測点で記録された周期 10 秒程度の長周期表面波 (X) と、(b) 2 次元シミュレーションによる海溝トラップ表面波の評価。

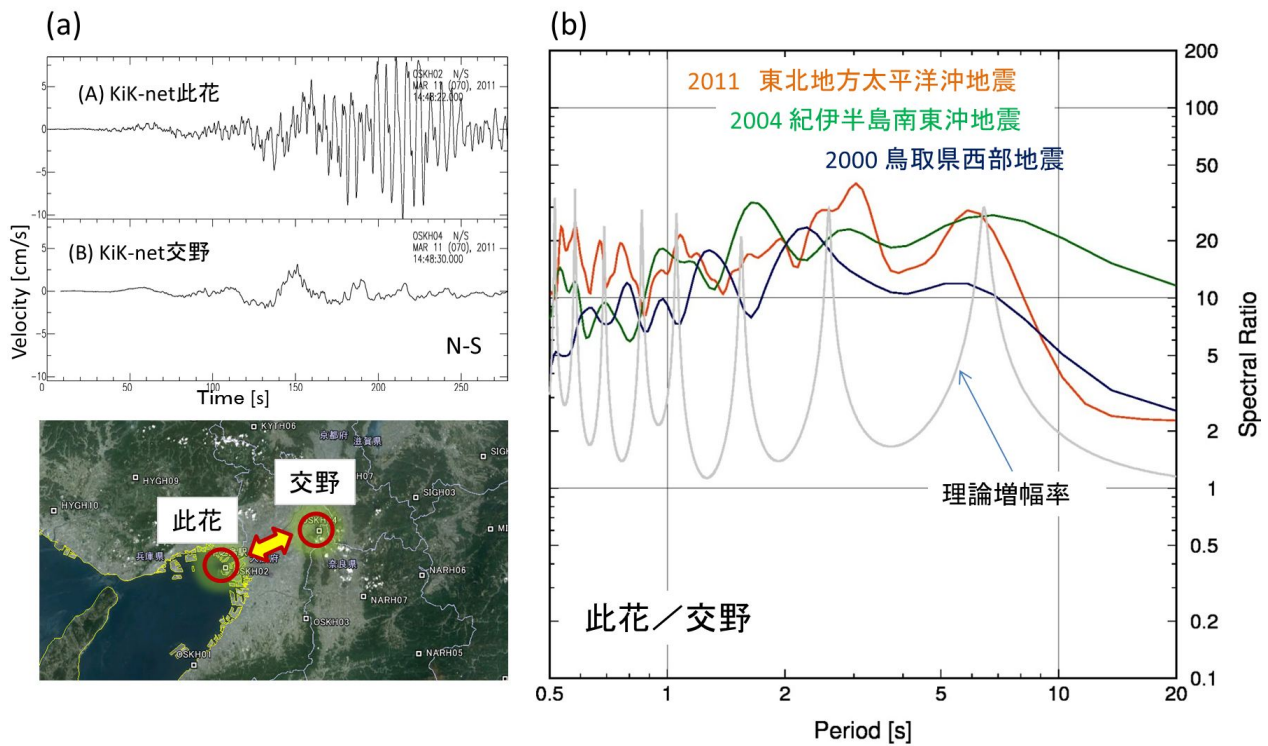


図 3. 大阪平野での長周期地震動の増幅特性（平野の中心の此花地点 / 平野の端の交野地点）。
 (a) 2011 年東北地方太平洋沖地震の地震波形（速度波形、NS 成分）の比較と、(b) 3 地震での此花 / 交野地点の長周期地震動の増幅特性（スペクトル比）及び、地下の S 波速度構造から求めた理論増幅率。

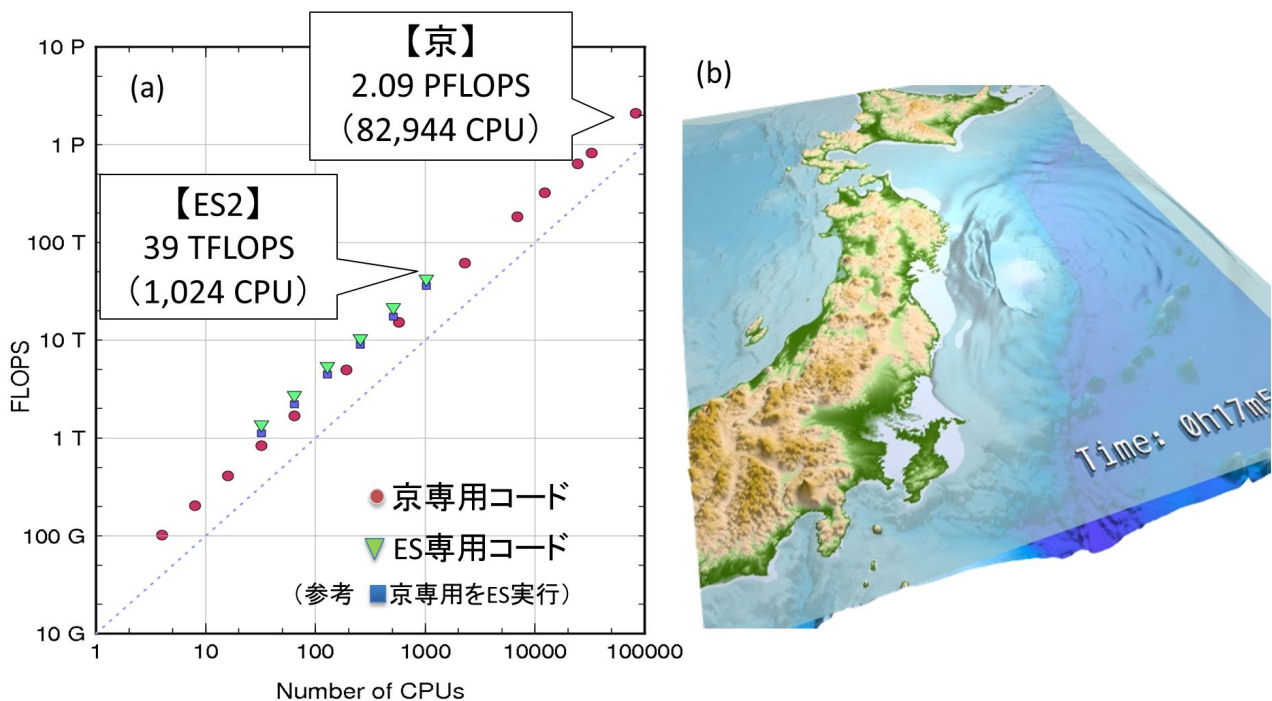


図 4 京コンピュータによる東北地方太平洋地震の地震津波同時シミュレーション。
 (a) 大規模並列計算による演算性能の比較（京コンピュータと地球シミュレータ（ES2））、(b) 東北地方太平洋沖地震の地震動と地殻変動、津波の同時シミュレーション（地震から 17 分後）。