

( 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）計画期間中（平成21年度~25年度）の成果の概要：

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・マンツルの不均質構造を的確にモデル化し、そして短周期およ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。地球シミュレータや京コンピュータ等の高速スパコンを用いた、地震波伝播と津波の大規模数値シミュレーションに基づき、過去地震の震源過程と波動伝播過程を再現して、地震被害を引き起こす強震動の成因を精査した。地震観測データとの一致からシミュレーションモデルを検証し、そして本モデルを用いて、将来発生が心配される大地震の強震動の高精度予測に関する研究を進めた。本課題の5か年間の成果は以下のとおりである。

（1）東北地方太平洋沖地震による強震動と長周期地震動の特性と成因

K-NETとKiK-net強震観測網で記録された、高密度地震計記録を用いて、東北地方太平洋沖地震における各地の強震動の特性を精査した。震源域に近い宮城県や茨城県で観測された重力加速度（1G）を超える近地強震波形には、周期0.2~0.5秒以下の極短周期地震動が強く含まれている一方、木造家屋の被害に結びつく周期1~2秒程度の、やや長周期の地震動成分は小さく、その速度応答スペクトル値（減衰定数5%で100cm/s程度以下）は兵庫県南部地震において鷹取や葺合での観測（200~300cm/s程度）よりずっと小さかったことが確認された（図1；Furumura et al., 2011; Furumura, 2014）。

こうした極短周期の地震動は、2003年宮城県沖の地震、2005年宮城県沖地震、2008年岩手沿岸北部の地震など、東北地方で起きるスラブ内地震やプレート境界地震で共通して見られる現象である。これらの地震記録の解析から、東北地方で卓越するごく短周期地震動の原因として、1) 広角で沈み込む太平洋スラブの比較的深い（25~50km）場所で発生する、応力降下量が大きな（高周波数地震動の放射が強い）震源特性、2) 高周波数地震動を遠地まで伝えるHigh-Qスラブの伝播経路の影響、3) 北上山地などの硬質岩盤上を覆う、数メートル以下の薄い風下層からなる表層地盤での極短周期地震動の強い増幅、の相乗効果が考えられた。東北地方太平洋沖地震における地盤崩落や液化化などの地盤災害の発生原因は、こうした極短周期地震動により地表に作り出された1Gを超える強い加速度と、M9地震の断層運動により生まれた3分間以上の長い揺れの継続が原因であると結論づけられた（Furumura, 2014）。

強震観測記録を用いて、地表の最大加速度を調べたところ、その距離減衰特性は、M8地震の距離減衰特性（Si and Midorikawa, 1999）と大きく変わらないことがわかった（図2）。これは、M9地震の広い震源域に沿って強震動に見舞われる範囲は拡大するものの、地震動自体は頭打ちすることが考えられる。また、太平洋側（前弧側）に沿って広がる震源域から日本海側（背弧側）に入ると、Low-Q地殻において地震波の減衰が大きいことも、比較的大きな距離減衰の原因となっていることも考えられる。巨大地震の強震動予測に向け、世界の他のM9地震の観測データを含めた詳細な検討が必要である。

周期が数秒を超える長周期地震動については、たとえば周期6秒の速度応答スペクトルは、震源域に隣接する宮城や福島でも最大100cm/s程度のレベルであり、2003年十勝沖地震（M8.0）において被害が発生した苫小牧地点などの観測を越えるレベルではなかった。関東平野（東京）では、超高層ビ

ルが十数分間以上にわたって大きく長く揺れたことが問題となったが、1944年東南海地震(M7.9)の強震観測データと比べても、同等の応答レベル(30cm/s)であり、東北地方太平洋沖地震の周期地震動のレベルは小さかった(過去のM8規模の地震と同等レベル)と結論づけられた(図3)。

この原因を探るために、近年の大地震(> M7)の地震波形記録を調べたところ、東北沖のアウトライズの地震、プレート境界地震、及びスラブ内地震ではいつも関東平野での長周期地震動の励起が小さい(他地域の地震に比べて1/2~1/3程度)ことがわかった。これは、急角で沈み込む太平洋スプレートの地震では、内陸地震やフィリピン海プレートの地震(プレート間地震)に比べて震源が深く、長周期地震動の原因である表面波の励起が小さいためである。また、震源の浅いアウトライズの地震においても海域の伝播経路において周期数秒の表面波が発達しないためと考えられる(図4)。これに対して、南海トラフの巨大地震では、1)震源が比較的浅く陸に近いこと、2)トラフ軸に沿って広がる付加体に沿って表面波が強く生成・誘導されること、の2点により、平野で長周期地震動が強く生成されるというメカニズムが考えられる。

### (2) 高精度津波シミュレーションに基づく震源過程の再評価

大地震の震源過程と津波の発生過程の詳細な評価のために、流体方程式(Navier-Stokes方程式)及び津波の線形分散波方程式に基づく高精度シミュレーションコードを開発した。これを用いて、2004年伊半島南東沖の地震(アウトライズの地震)における室戸沖と相模湾沖の沖合ケーブル津波計記録のインバージョン解析により、震源モデル(波源モデル)の再評価を行った(図3)。ケーブル津波計に見られる津波の分散波の特徴を説明するモデルとして、北西傾斜の断層面を持つ地震であったことが確認でき、従来、近地強震波形や遠地実体波を用いた震源解析からは区別できなかった断層面を決定づけることができた。沖合津波計は湾内の津波増幅の影響を受けないため、震源(波源)の特性を良く保存している。従来の地震波形を用いた震源解析において、津波とその後続相を補足的に用いることにより、震源インバージョンの拘束条件が格段に改善される可能性が示された。

また、1707年宝永地震の震源モデルを再考察し、足摺岬~大分県・宮崎県沿岸の津波高と、大分周辺に点在する津波湖での津波堆積物の存在を説明する、宝永地震の新しい震源モデルを確定した。このモデルにより、新震源断層が日向灘の70km\*100kmの範囲に伸展し、足摺岬~日向灘の津波高が従来モデルより1.2倍程度高まったことから、観測に良く一致することが示された。そして、日向灘の断層セグメントがゆっくり破壊(破壊伝播速度 $V_r=0.4-0.6\text{km/s}$ )を起こした場合には、津波発生・伝播のディレクティブティ効果による増幅現象が発生し、足摺岬~日向灘の津波高が最大1.5倍高くなる可能性が示された。このように、南海トラフ地震の津波の評価では、地震の運動性に加えて、断層の破壊伝播速度が重要な鍵となることが示された。

海溝型地震の震源過程と津波発生の詳細な評価に向けて、地震動(水中音波を含む)地殻変動、そして津波を一つのシミュレーションで同時に評価することのできる「地震-津波同時シミュレーション法」(Maeda et al., 2011)を新規開発した。これは、従来、地震動のシミュレーションに用いた運動方程式に津波の復元力となる重力の項を加えて、津波の発生伝播を水中の速度場として地震波や音波と同様の扱いで評価するものである。京コンピュータを用いて東北地方太平洋沖地震のシミュレーションを実施し、釜石沖の海底ケーブル津波計で記録された特異な津波成長過程を再現するとともに、地震地殻変動により海域に大津波が発生すると同時に、東北地方の海岸線が1m程度沈降した効果により内陸まで津波が伝わる過程が時間を追って再現できた(図5)。海底ケーブル津波計地点の海面と海底のシミュレーション結果から、地震時に170秒をかけて海底と海面の沈降が続き、その直後に周囲の海水の流入が開始、そして大津波が到来した過程が確認できた。また、断層運動速度が水中音波の震幅に大きく寄与することも確認でき、津波と水中音波の震幅比から、断層運動速度が遅い津波地震の検出ができる可能性も示された。

### (3) 地殻・マントルの短波長不均質構造を評価した広帯域強震動シミュレーション

将来の大地震の強震動評価の高度化に向け、周期1秒以下の短周期地震動を含む広帯域地震動シミュレーションを目指した、地下構造の短波長不均質構造のモデルに関する基礎的研究を進めた。

まず、不均質な地下構造で強い散乱を繰り返した高周波数P波がTransverse(T)成分に染み出

す現象に着目し、P波のT成分強度の周波数・距離変化を、K-NET, KiK-net 高密度強震観測データを用いて調査するとともに、不均質地下構造をモデル化した3次元地震波伝播シミュレーションとの比較により、地殻・マンツルの不均質地下構造パラメータ(相関距離、揺らぎの強度、分布特性など)を推定した。その結果、地殻・マンツルの不均質性として相関距離が $a=5\text{km}$ 程度、速度揺らぎが標準偏差 $e=7\%$ 程度のVon Karman型の分布特性を用いた不均質モデルで観測を良く説明できることを示した。

こうして求められた不均質地下構造モデルを用いて、2000年鳥取県西部地震の地震波伝播シミュレーションを行い、周期7秒以上のやや長周期の表面波の波形から短周期地震動の波形の特徴(P波とS波の実体波とコーダ波の包絡線形状)まで、広帯域の地震動を良く再現できることを確認した。

全国の、地下数メートルの表層地盤による地震動の増幅特性の評価のために、S波コーダ波を用いた全国のサイト増幅特性の推定を行った。K-NETおよびKiK-net強震計記録を用いて、周波数 $f_c = 0.75, 1.5, 3, 6\text{Hz}$ 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た、「全国の揺れやすさ地図」を作成した(図6)。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ところ、震度の距離減衰曲線からのパラッキが半分程度に小さくなり、サイト増幅が適切に求められたことが確認された。

近年、レシーバ関数解析やトモグラフィ解析結果に基づき議論されている、局所的に大変形して折れ曲がる複雑な形状(Shiomi et al., 2008)と、紀伊水道~兵庫でプレートが断裂している可能性の指摘(Ide et al., 2010)に対して、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検討を行った。

まず、フィリピン海プレートのスラブ内地震である、2009年9月3日に豊後水道の地震(深さ170km、M6.0)等の加速度波形を解析し、地表の加速度分布がShiomi et al.(2008)の複雑なプレートモデルの形状と良く整合することを確認した(図6)。次に、高周波数地震動伝播の2次元シミュレーションから、プレート上面深度の急変に伴って、地震波がプレートからマンツルに抜け出すことにより地動が急減する現象や、屈曲するプレート境界に沿って強いSP変換波が発生する現象が確認できるなど、観測データを定性的に説明することができた。なお、2次元シミュレーションからは、プレートの断裂が高周波数地震動に与える顕著な効果は確認できず、今後、3次元モデルを用いた再検討が必要である。

#### (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、地球シミュレータに最適化された地震動シミュレーションコード(Seism3D)の京コンピュータ向けチューニングを進めた。地球シミュレータの高いメモリバンド幅性能(2.5~4.0Byte/FLOPS)と比べて低い京のメモリ性能(0.5Byte/FLOPS)に対応させるための計算手順の大幅な見直しと京のCPU性能を引き出すためのコードの微調整(チューニング)を進め、京のメモリ性能から期待される最大実効性能(理論性能の20%)を達成することができた。これにより、京の最大ノード数(82,944CPU)を用いて、2.1PFLOPSの演算性能を達成し、従来の地球シミュレータの40倍の規模の大規模計算(約2.5倍のシミュレーションの高解像度化に相当)が可能となった(図7)。

また、低周波数~高周波数の広帯域地震動の高精度計算のために、地表や海底面での境界条件の高精度化や、計算領域の物理境界からの反射波を効果的に消去するための、PML吸収境界の導入など、シミュレーションモデルの高度化を進めた(Maeda et al., 2013)。

#### (8) 平成25年度の成果に関連の深いもので、平成25年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Furumura, T., Radiation and development of short- and long-period ground motions from the 2011 Off Tohoku, Japan, Mw9.0 earthquake, Journal of Disaster Research, 2014, submitted.

Furumura, T., T.-K. Hong, and B.L.N. Kennett, Lg wave propagation in the area around Japan: Observation and simulations, Progress in Earth and Planetary Science, 2013, submitted.

古村孝志、東京の地下構造と長周期地震動リスク、地学雑誌、2014、投稿中。

Maeda, T., K. Obara, T. Furumura, and T. Saito, Interference of long-period seismic wavefield observed by

- dense Hi-net array in Japan, *J. Geophys. Res.*, 116, 109, doi:10.1029/2011JB008464-127, 2013.
- Noguchi, S., T. Maeda, and T. Furumura, FDM simulation of an anomalous later phase from the Japan Trench subduction zone earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, DOI: 10.1007/s00024-011-0412-1, 2013.
- Maeda, T., and T. Furumura, FDM Simulation of Seismic Waves, Ocean Acoustic Waves, and Tsunamis Based on Tsunami-Coupled Equations of Motion, *Pure Appl. Geophys.*, 170, 10.1007/s00024-011-0430-z, 2013.
- 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.*, 193, 1, 421-436. doi: 10.1093/gji/ggs127, 2013.
- 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.*, 103, 2B, 1411-1428, doi: 10.1785/0120120026, 2013.
- 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.*, 118, 2, 665-680, 10.1002/jgrb.50071, 2013.
- 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.
- 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.*, 118, 6, 2998-3018, doi:10.1002/jgrb.50225, 2013.
- 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.*, 103, 2B, 1411-1428, 2013.
- Kennett, B.L.N., and T. Furumura, High-frequency Po/So guided waves in the oceanic lithosphere I long-distance propagation, *Geophys. J. Int.*, 195, 3, 1862-1877, 10.1093/gji/ggt344, 2013.

( 9 ) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

古村孝志、瀨瀬一起、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

( 10 ) 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>

( 11 ) 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

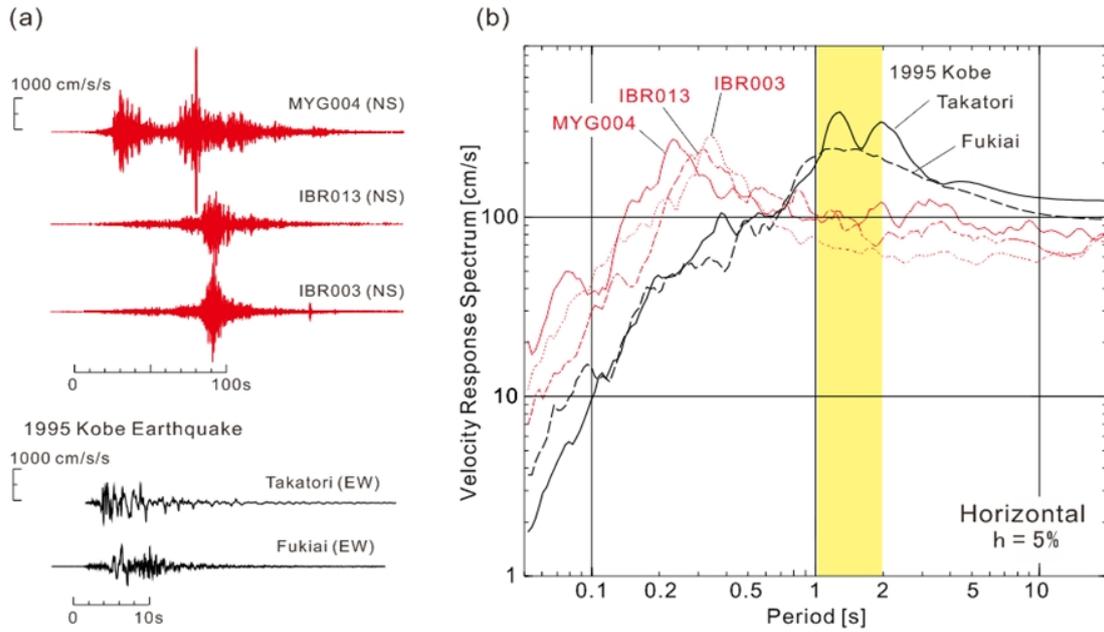


図 1. 東北地方太平洋沖地震における近地強震波形と応答スペクトル。

(a) 大加速度を記録した震源域近傍の 3 地点 ( MYG004, IBR013, IBR003 ) での加速度波形 ( NS 成分 ) と 1995 年兵庫県南部地震の断層近傍の加速度波形 ( 鷹取、葦合地点 ) (b) 速度応答スペクトルの比較 ( 水平動、減衰定数=5% )、黄色の帯は、木造家屋の被害に結びつく、やや長周期地震動帯 ( 1-2 秒 )

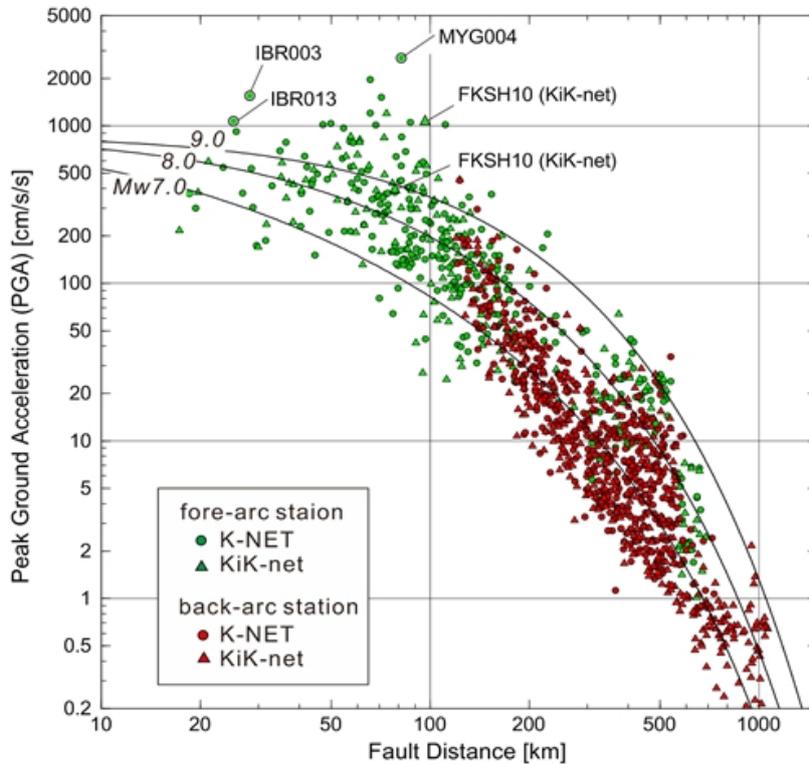


図 2. 東北地方太平洋沖地震における加速度の距離減衰。

K-NET と KiK-net で記録された地表加速度と断層距離の関係 ( 緑は太平洋側、赤は日本海側の観測点を表す )、実線は、日本の地震動予測式 ( Si and Midorikawa, 1999 ) による、Mw=7,8,9 の地震の加速度距離減衰。

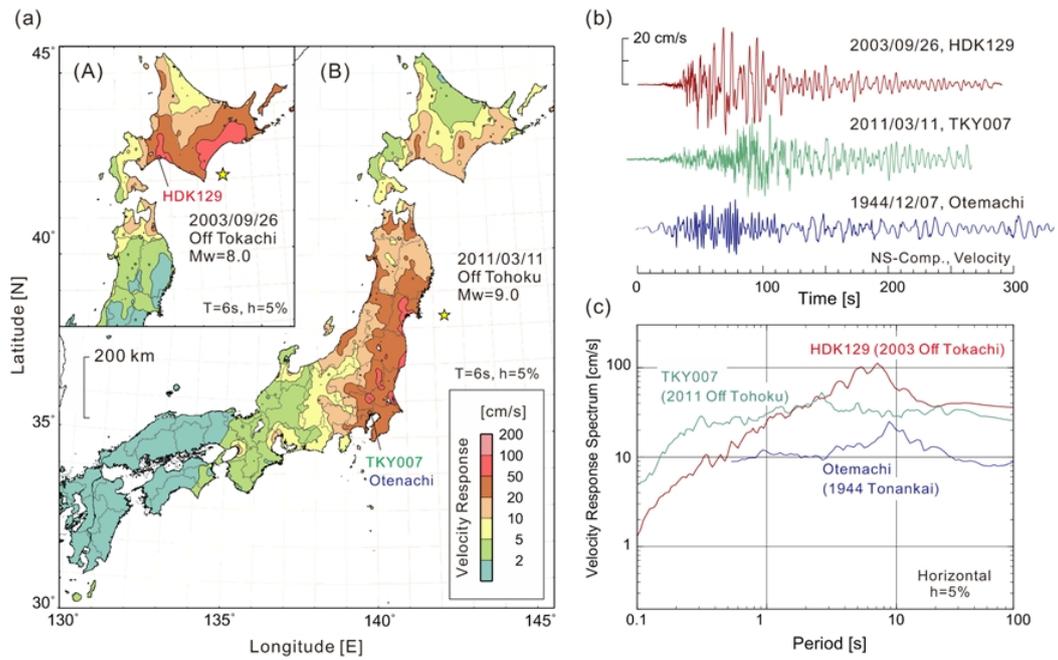


図 3. 東北地方太平洋沖地震による長周期地震動の分布特性と、関東平野での長周期地震動の過去地震との比較。  
 (a) 東北地方太平洋沖地震における、固有周期 6 秒の速度応答スペクトルの分布 (減衰定数 = 5%) (B) と、2003 年十勝沖地震の速度応答スペクトル (A) の比較。(b) 十勝沖地震における苫小牧観測点 (HDK129) での速度波形と、東北地方太平洋沖地震での新宿観測点 (TKY007) での記録、及び 1944 年南海地震での東京大手町の地震計記録の比較、及び (c) 速度応答スペクトルの比較。

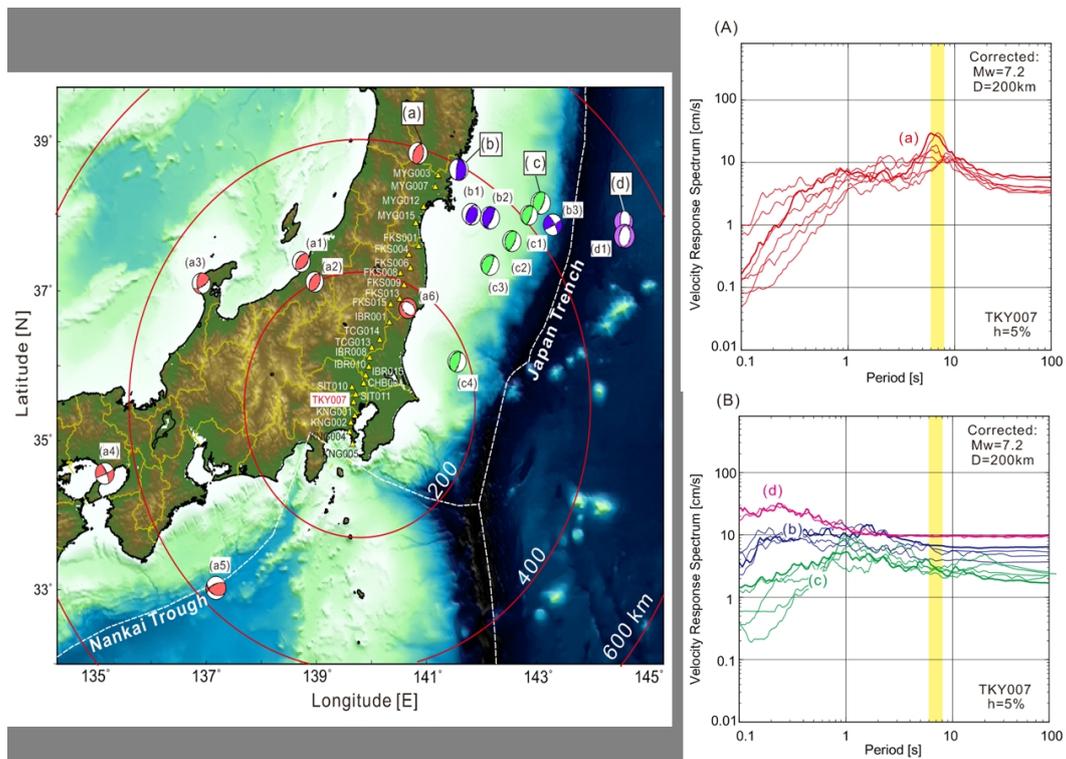


図4．関東における長周期地震動の生成特性。

(A) 内陸地震および南海トラフの地震における、新宿 (TKY007) 地点の速度応答スペクトル ( 基盤構造から推定される一次卓越周期 = 6 ~ 8 秒を黄色の帯で示す )、(B) 宮城県沖の地震 ( アウターライズ地震、プレート境界地震、スラブ内地震 ) の速度応答スペクトル。図中の (a)-(d) は左図の震源ラベルに対応。

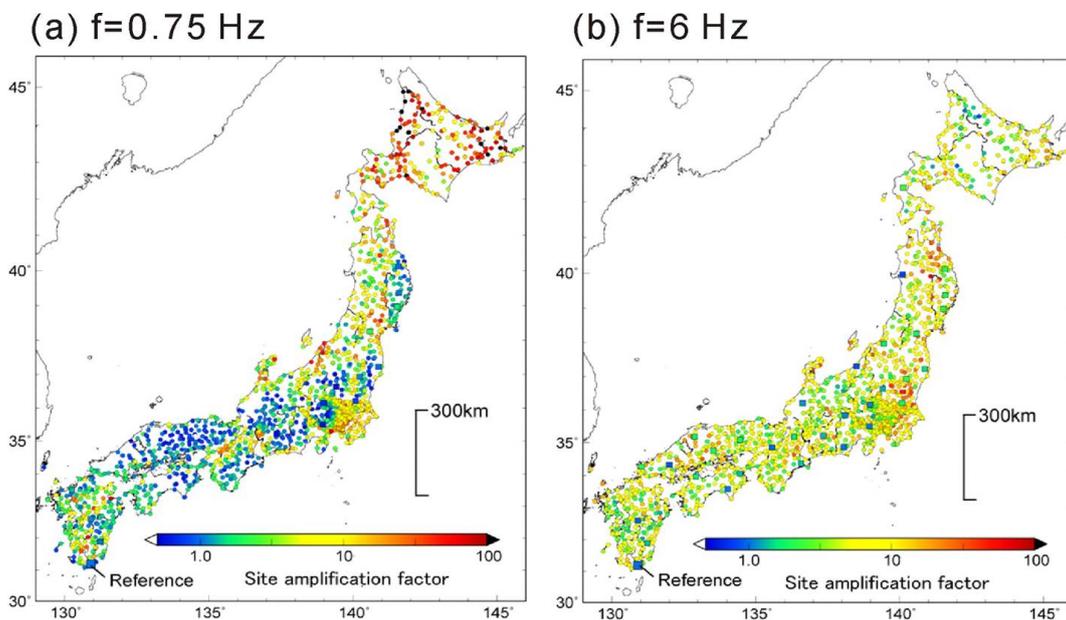


図5．コード規格化法に基づき推定した、全国のサイト増幅特性。

(a) 周波数 0.75Hz のサイト増幅特性と、(b) 6 Hz の高周波数 S 波に対するサイト増幅特性 (九州の岩盤観測点に対する相対値)。

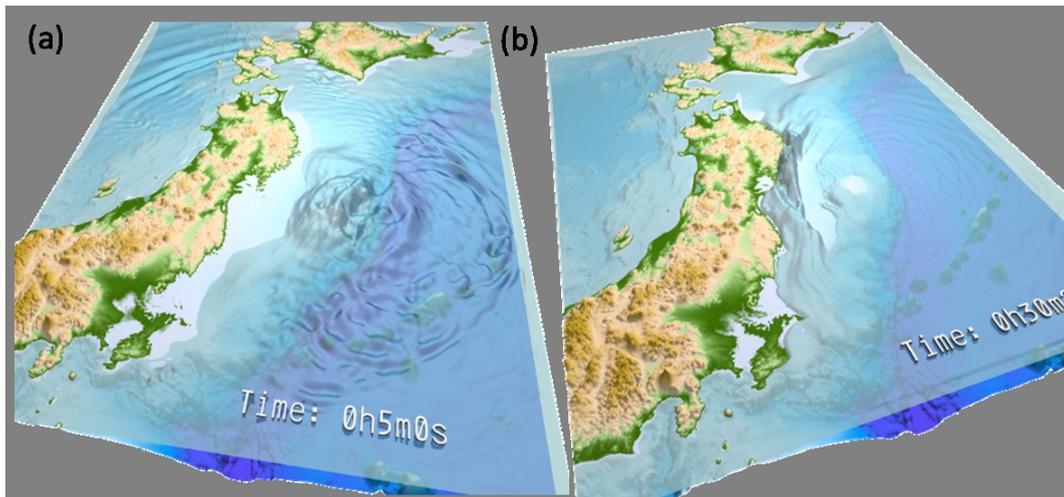


図6 . 東北地方太平洋沖地震の地震動と地殻変動、津波の同時シミュレーション。  
 (a) 地震から5分後の、震源域からの地震動と水中音波の広がり、地震地殻変動による海岸線の沈降の様子(鉛直スケールを650倍に拡大) (b) 地震から30分後の津波が沿岸に到達する様子。

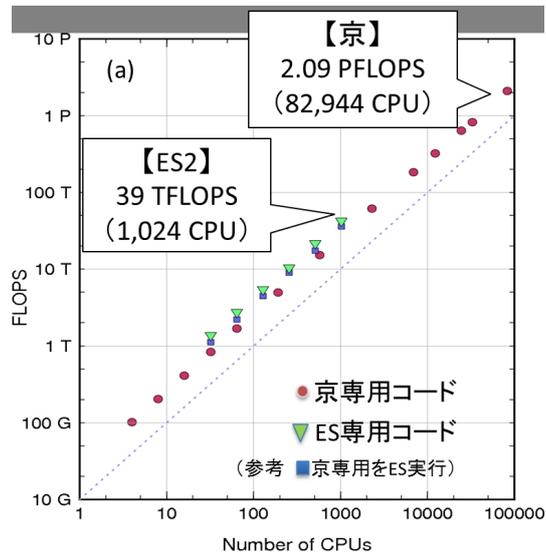


図7 . 京コンピュータによる地震波伝播の大規模シミュレーション性能。  
 並列計算に用いるCPU数(横軸)増大に伴う演算性能の向上(京コンピュータと地球シミュレータ(ES2)の比較)。