

3. 3. 10 海溝型地震の強震動予測のための海域地下構造モデルの作成

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 海域地下構造のモデル化

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
独立行政法人海洋研究開発機構 海洋工学センター 海底地震・津波ネットワーク開発部	部長	金田 義行	kaneday@jamstec.go.jp
独立行政法人海洋研究開発機構 海洋工学センター 海底地震・津波ネットワーク開発部	ポスドク 研究員	中村 武史	t_nakamura@jamstec.go.jp
独立行政法人海洋研究開発機構 地球内部変動研究センター	研究員	馬場 俊孝	babat@jamstec.go.jp

(c) 業務の目的

地震災害の軽減化に向けた強震動シミュレーション予測を行うためには、地震波の伝播経路上に存在する地下構造の詳細なモデル化に第一に取り組む必要がある。近年の計算機環境の飛躍的な向上により、差分法や有限要素法等による領域法で3次元地下構造モデルを適用した大規模な計算が可能となり、シミュレーションのための高精度な3次元地下構造モデル構築の需要が高まっている。特に、巨大地震の発生確率が高いとされている南海トラフや日本海溝周辺では、付加体の存在やプレートの複雑な沈み込み形状のため、地下構造が狭い範囲で急激に変化しており、これらの海域で発生する地震に対して或いは海域を伝播する地震に対しての強震動分布を正確にシミュレーションするためには、海域下の詳細な3次元地下構造モデルが必要である。南海トラフ及び日本海溝周辺の海域では、1990年代以降、反射法や屈折法による構造探査が精力的に行われており、3次元地下構造モデルを作成するために必要な構造探査結果の蓄積が進んでいる。これらの研究の中には、常時地震活動と地下構造との関連性だけでなく、過去の大地震の発生過程や発生場所を示す新たな知見も得られており、付加体の厚さやプレートの形状をはじめとする地下構造の把握はシミュレーションの入力値となる震源モデルが妥当か否かを判断するための手がかりにもなりうる。本研究では、より正確な強震動シミュレーション予測を実現するために、海域または海陸統合の既往の構造探査結果及び大規模大災害軽減化特別プロジェクトによる最新の構造探査結果を統合し、日本周辺海域の3次元地震波速度構造モデルを構築する。

(d) 5ヵ年の年次実施計画

- 1) 平成14～16年度：実施業務なし
- 2) 平成17年度：屈折法探査データに基づく海域地下構造モデルの作成
- 3) 平成18年度：海域地下構造モデルの高度化－大大特による構造探査結果などの統合

(e) 平成 18 年度業務目的

大大特プロジェクトによって関東地方と紀伊半島で実施された地下構造探査結果を統合し、さらに地震動を増幅させる性質を持つ表層堆積物のモデル化を行うことにより、昨年までに作成した海域下地殻構造モデルを高度化する。また、東南海地震、南海地震の東京圏への伝播系路上にある相模湾の地殻構造について構造探査結果をもとに検討する。これらの業務によって強震動予測の高精度化が期待される。

(2) 平成 18 年度の成果

(a) 大大特による構造探査結果の統合

海域地下構造モデル構築の対象とした範囲は、北緯 28-37 度、東経 128-142 度、深さ 0-70 km である (図 1)。この領域は、フィリピン海プレートと太平洋プレートが重なり合う関東直下の陸域と、関東から南九州にかけてフィリピン海プレートが沈み込む南海トラフの海域を含んでいる。昨年度のモデル化の範囲から、東西両方向に経度にして 1 度、南方向に緯度にして 2 度、統合化の対象とする範囲を拡大した。本研究では、海域構造モデル作成のために合計 34 本の構造探査結果を使用した (図 1)。

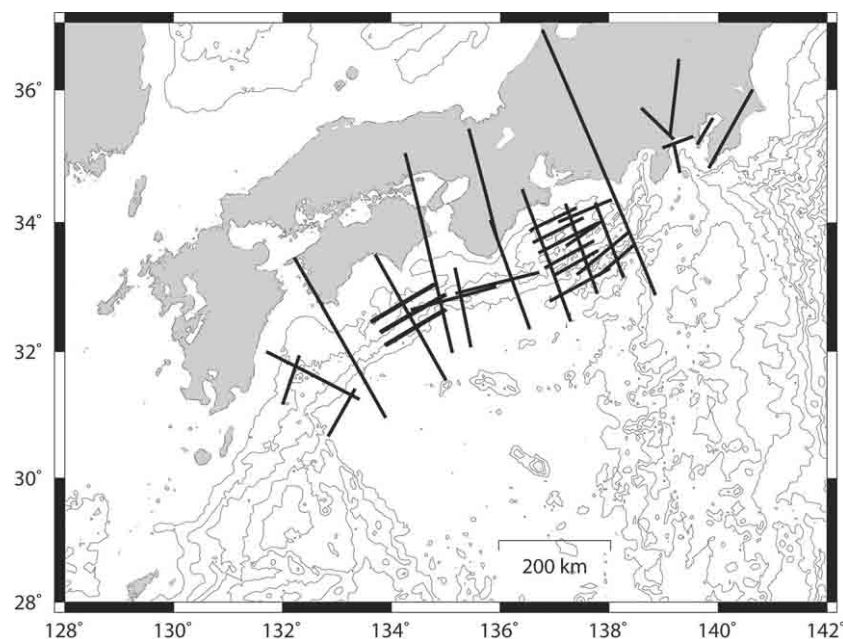


図 1 モデル構築に使用した構造探査結果：参考文献は以下のとおり：市川(1997)¹⁾、大都市大震災軽減化特別プロジェクト(2006)²⁾、Kodaira et al.(2000)³⁾、Kodaira et al.(2002)⁴⁾、Kodaira et al.(2005)⁵⁾、Kodaira et al.(2006)⁶⁾、Mochizuki et al.(1998)⁷⁾、Nakanishi et al.(1998)⁸⁾、Nakanishi et al. (2002a)⁹⁾、Nakanishi et al. (2002b)¹⁰⁾、西坂(1997)¹¹⁾、Sato et al.(2005)¹²⁾、Sato et al.(1998)¹³⁾、Takahashi et al.(2002)¹⁴⁾、Takahashi et al. (2003)¹⁵⁾。

図 2 は 1998 年に紀伊半島沖で実施された屈折法探査の解析結果 (Nakanishi et al., 2002a⁹⁾) である。フィリピン海プレートが西南日本の島弧地殻の下に沈み込み、半遠洋性堆積物が付加してできた付加体が島弧地殻とフィリピン海プレートの上に存在しているこ

とを示している。この例の場合、太実線を海洋性地殻第 2 層の上面として読み取って海域地下構造モデルを作成している。ただし、構造探査では深いところでも 40 km 程度までの領域しか分からないため、深部の構造については、気象庁一元化震源による地震活動分布を参考にして構造の全体的な形状を推定している。他の測線についても同様の読み取り作業を行い、全データを緯度・経度・深さに変換した後、曲率最小化アルゴリズム (Smith and Wessel, 1990¹⁶⁾) を用いて付加体の下面、海洋性地殻第 2 層、第 3 層、海洋性モホ面の上面の 3 次元形状を作成した。構築した海域地下構造モデルから、付加体の層厚を図 3(a) に示す。海洋性地殻第 2 層、第 3 層、海洋性モホ面の海面からの深さを図 3(b)-(d) にそれぞれ示す。海洋性地殻第 2 層の上面の 3 次元的な形状を図 4 に示す。また、昨年度作成した海域地下構造モデルとの比較の一例を図 5 に示す。昨年度のモデルと比べて、海域地下構造モデルと構造探査結果がより一致していることが分かる。

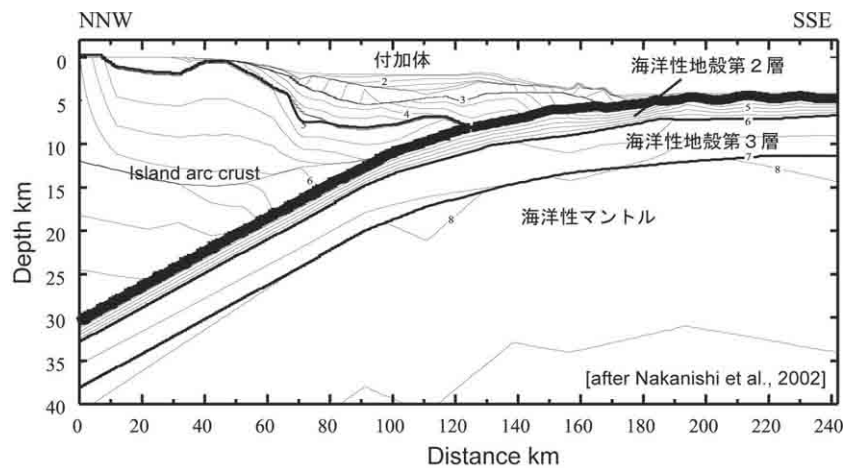


図 2 紀伊半島沖で実施された屈折法探査の結果：太実線は海洋性地殻第 2 層の上面を示す。

解析領域内での構造探査によって得られた付加体の P 波速度に、優位な差異は認められていない。そこで、付加体の内部には一定の P 波速度 (3.5km/s ; 表 1) を与えた。沈み込むプレートの一部である海洋性地殻第 2 層、第 3 層、海洋性マントルはその存在する深度が大きく変化するので、これらの層では深さに従って P 波速度が一定に増加すると仮定し、各層の P 波速度の勾配は岩石実験の結果 (Christensen, 1996¹⁷⁾) を参考にして決めた (表 1)。

日本周辺海域の構造探査では、S 波速度の詳細な解析はほとんど行われてこなかったが、1998 年に実施された足摺沖屈折法探査では、PPS 変換波を用いて付加体内の S 波速度の推定が試みられた (Takahashi et al., 2002¹⁴⁾)。本研究では、付加体の S 波速度については、この探査によって推定された値を南海トラフ全体に適用した (表 1)。海洋性地殻第 2 層、第 3 層、海洋性マントルの S 波速度は、構造探査によって推定されたケースはないため、それら各層については岩石実験の結果 (Christensen, 1996¹⁷⁾) を参考にして V_p/V_s を設定した (表 1)。

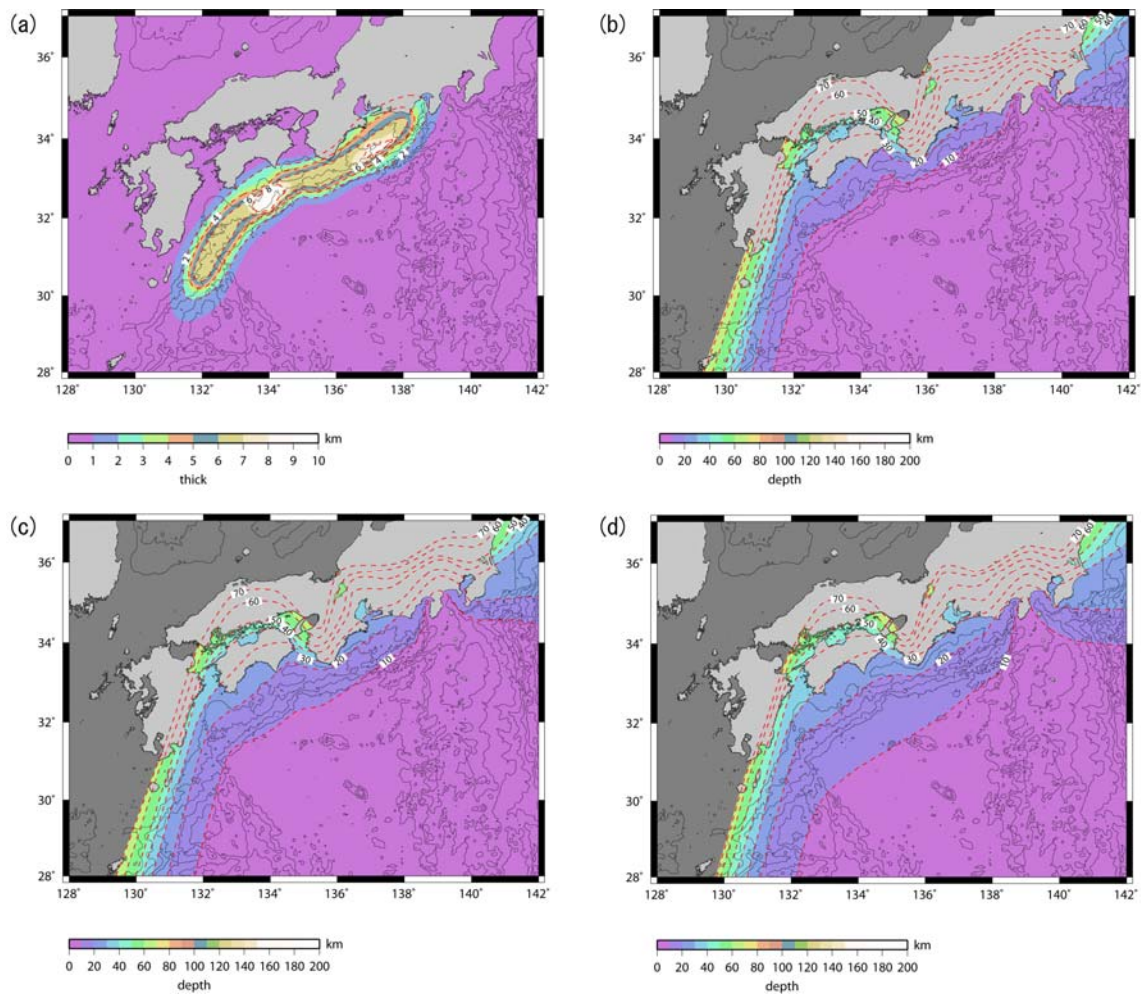


図3 南海トラフ3次元地殻構造モデル:(a) 付加体の厚さ、(b) 海洋性地殻第2層の上面深度、(c) 海洋性地殻第3層の上面深度、(d) 海洋性モホ面の深度。

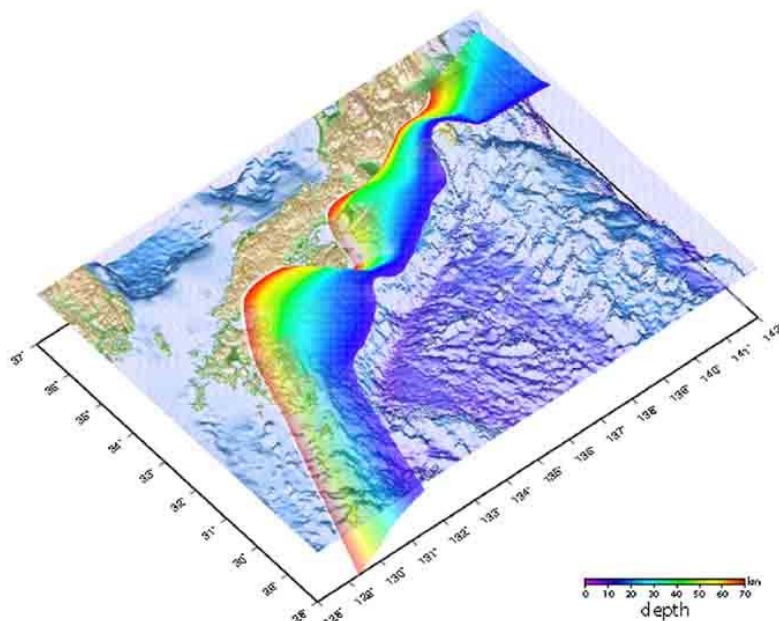


図4 海洋性地殻第2層上面の3次元形状

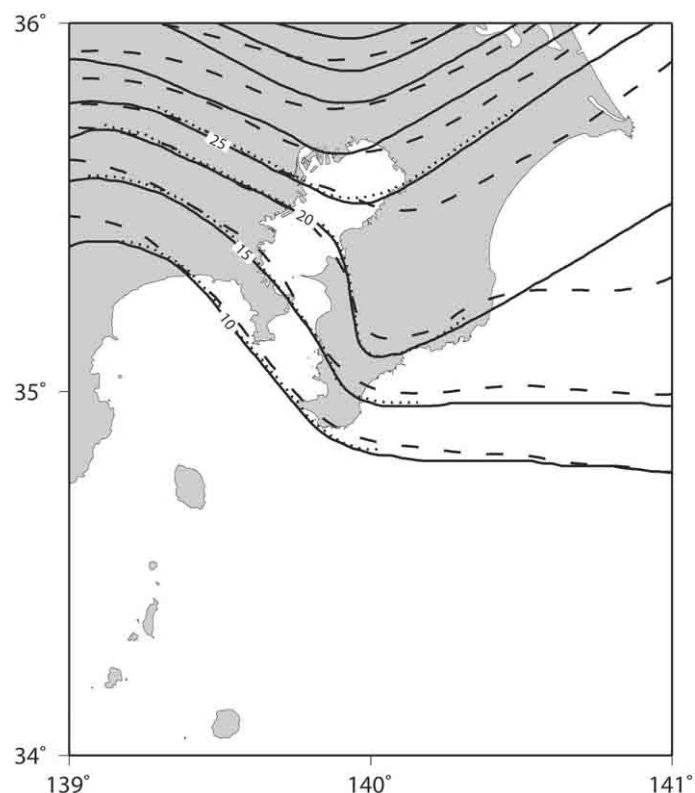


図 5 海域地下構造モデルと構造探査結果の比較：実線と破線は、本年度作成した海域地下構造モデルの海洋性地殻第 2 層上面の深度分布と昨年度のモデルによる深度分布をそれぞれ示す。点線は Sato et al. (2005)¹²⁾による構造探査結果を示す。

表 1：海域地下構造モデル（南海トラフモデル）で定義した P 波速度と V_p/V_s

	V_p (km/s)	V_p/V_s
付加体	3.5	2.20
海洋性地殻第 2 層	$5.4+0.0055 \times z$	1.94
海洋性地殻第 3 層	$6.5+0.0055 \times z$	1.87
海洋性マントル	$8.1+0.0053 \times z$	1.76

z : 海水面からの深さ(km)

(b) 表層堆積物のモデル化

石油公団の基礎物理探査（昭和 53 年度¹⁸⁾、昭和 57 年度¹⁹⁾、昭和 61 年度^{20)・21)}）に収められている全堆積量分布図を使用して表層堆積物のモデル化を行った。全堆積量分布図では海底面から基盤面までの往復走時を表している。これらの図のコンターを読み取り、数値計算に使用しやすいように、緯度経度方向に等間隔のグリッド状に数値化した。 V_p 、

V_s は Park et al. (2002)²²⁾、Takahashi et al. (2002)¹⁴⁾ を参考にして以下のように定義した。

$$V_p<m/sec> = 1500 + 0.5 \times depth$$

$$V_s<m/sec> = V_p/3.06 \ (\sigma = 0.44)$$

ここで、 $depth$ は海底面からの深さ<m>を示す。この関係式を用いて先にデジタル化した往復走時のデータを、表層堆積物の厚さに変換した (図 6)。三陸沖などでは基礎物理探査による全堆積物分布図が存在しないため、日本海溝モデルではモデル化された表層堆積物は疎らである。重力異常データなどを用いた表層堆積物分布の補間作業については今後の課題である。

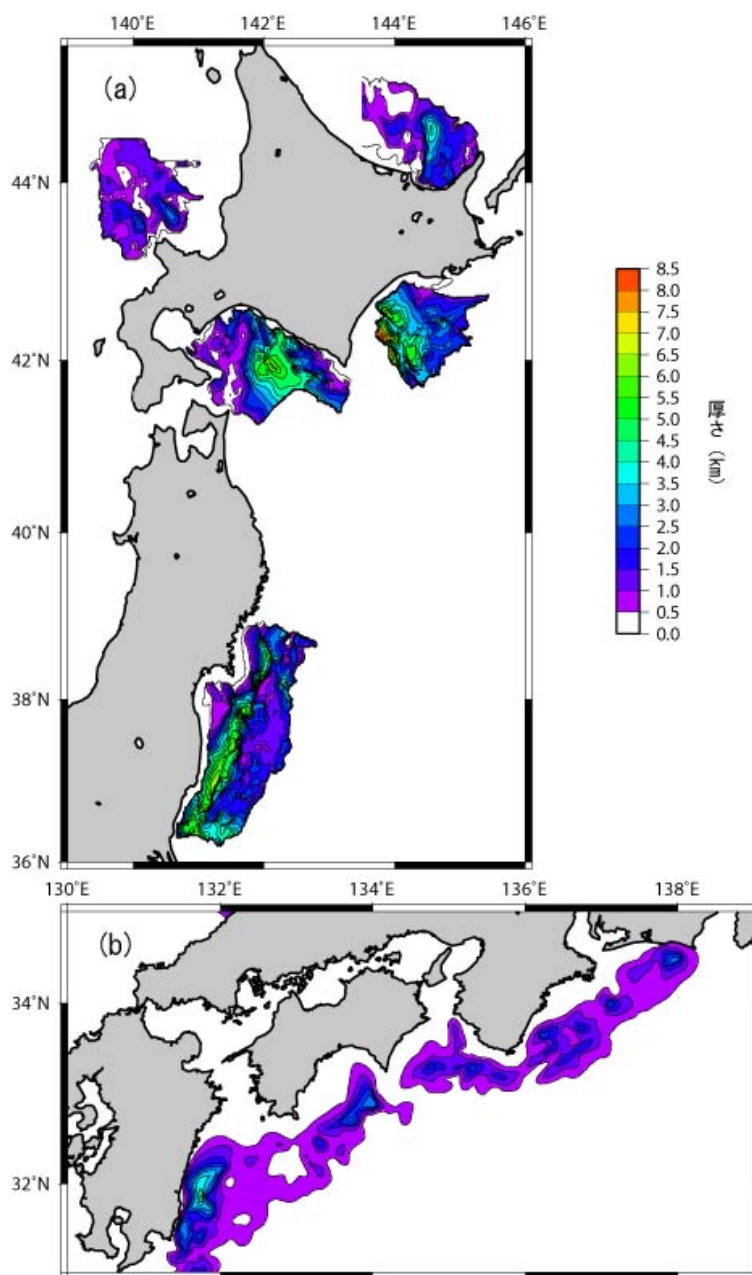


図 6 表層堆積物 (海底から基盤面まで) の厚さ : (a) 日本海溝海域 (b) 南海トラフ海域

北海道釧路沖、苫小牧沖には表層堆積物が比較的厚く分布しており、その厚さは平均で 6km、厚いところでは 8km にも達する。これらはこの地域で見られる負の重力異常と相関が良い。またこの地域に 2003 年に発生した十勝沖地震では苫小牧などで大きな長周期地震動が観測された。震源と苫小牧の間に位置するこの厚い表層堆積層を考慮することによって、この長周期地震動を高精度にシミュレートできると考えられる。南海トラフモデルでは平均して 1km から 2km の表層堆積物が分布し、比較的厚い地域は熊野海盆、四国海盆などの海盆地形と一致している。日向灘には 4km ほどの厚い表層堆積物が存在し、これもまた負の重力異常と相関がよい。

(c) 相模湾の地殻構造

本研究では、昨年度のモデルから相模湾の地殻構造も海域構造モデルに加えている。相模湾周辺は伊豆小笠原弧の衝突およびフィリピン海プレートの沈み込みにより複雑な速度構造を持つ地域である。また首都圏に近いこともあり、正確な強震動シミュレーション予測を行うために、相模湾の海域構造をモデルに組み込むことは重要である。相模湾の構造については、沖野・他(1994)²³⁾やNishizawa et al. (1996)²⁴⁾による構造探査結果が既に報告されているが、プレートの沈み込みを明瞭に示す構造は得られていない。本研究では、Kodaira et al. (2006)⁶⁾によるトモグラフィー解析の結果を地下構造データの統合化作業に使用した。図7にKodaira et al. (2006)⁶⁾のP波速度構造とFujie et al. (2006)²⁵⁾の手法による反射面分布(山下・他, 2006²⁶⁾)を示す。伊豆大島から真鶴にかけて、高速度層の貫入が深さ4kmまで確認できる。高速度層と低速度層の境界付近には反射面も分布している。この高速度層はプレートの沈み込みや火山活動と関係していると考えられる。また、山下・他(2006)²⁶⁾の反射断面から、相模トラフ内の浅部には付加体及び火山性堆積層が広がっており、トモグラフィーの解析結果では低速度層としてその存在を確認できる。本研究では、測線南部の深さ4kmから10kmにイメージングされている高速度層をプレート、測線全体に広がるP波速度2.5km/s以下の低速度層を付加体として地下構造データを統合化している。ただし、深部ではトモグラフィーの解像度が低いため(図7(c))、探査領域におけるプレート上面の2次元的な形状はP波速度6km/sの速度境界を参考にして直線近似で推定を行い、地下構造データを統合化している。

(d) まとめと今後の課題

本研究では、地震災害の軽減化に向けた正確な強震動シミュレーション予測の実現のために、西南日本及び東北日本の構造探査結果を統合した。西南日本では、北緯30-37度、東経129-141度、深さ0-70 kmの領域内における表層堆積物・付加体・海洋性地殻第2層・海洋性地殻第3層・海洋性マントルの高精度な海域地下構造モデルを構築した。東北日本では、北緯33-44度、東経138-148度の領域内における表層堆積物の高精度な海域地下構造モデルを構築した。海溝型巨大地震の発生が予想されている南海トラフ及び日本海溝のほぼ全域をカバーしており、強震動シミュレーション予測に有効なモデルデータである。

本研究による3次元海域地下構造モデルをシミュレーション計算に適用することで、観測波形と理論波形の一致性の向上を確認している(馬場・他, 2006²⁷⁾)。しかしながら、本研究では層境界の形状を中心にモデル化を進めており、各層内の速度は1次元速度構造を

適用している。海洋性地殻及び海洋性マントルのS波速度構造についてはChristensen (1996)¹⁸⁾による岩石実験の結果、付加体内のS波速度は1998年の足摺沖の構造探査で検出されたPPS変換波の解析によるS波速度の値 (Takahashi et al., 2002¹⁴⁾) を代表値として参照している。海域地下構造モデルのさらなる高精度化をめざして、今後の課題として、深部海底掘削による試料データの解析、海底地震観測による走時トモグラフィーやレシーバ関数解析、波形モデリングによる速度構造の解析など各種解析結果を海域地下構造モデルに導入する必要がある。

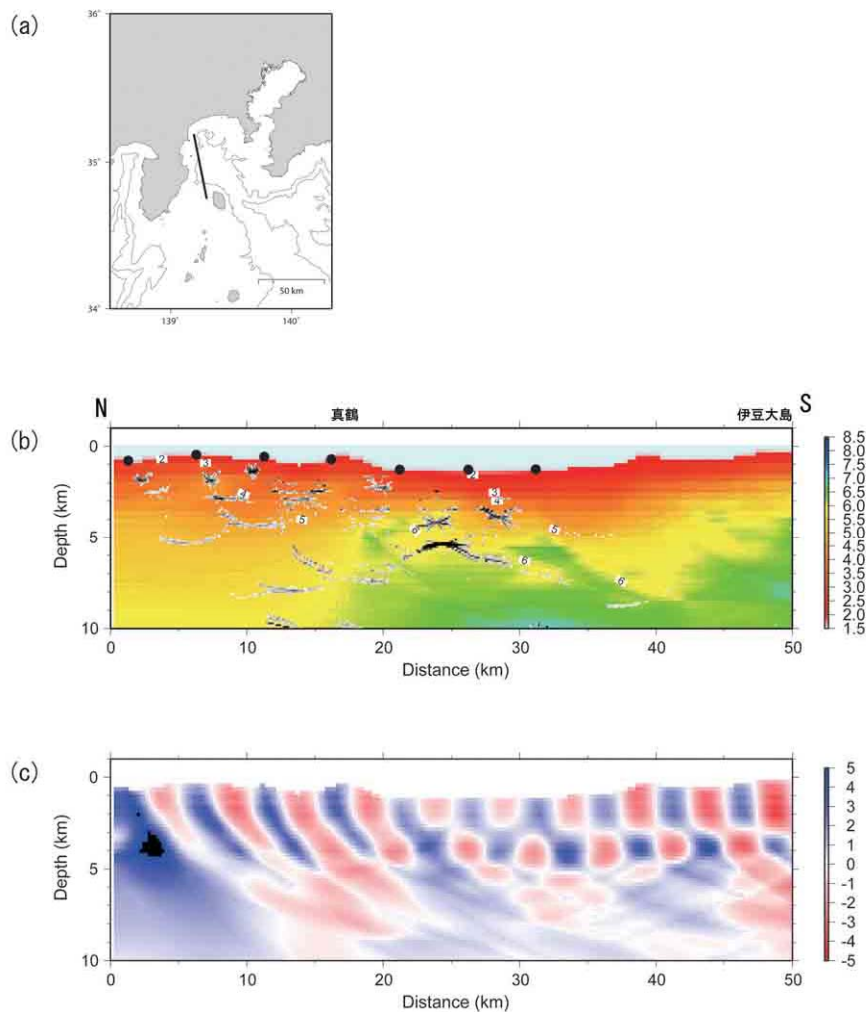


図 7 相模湾の地下構造：(a)構造探査測線の位置、(b)P 波トモグラフィーの解析結果 (Kodaira et al., 2006⁶⁾) と反射面の分布(山下・他, 2006²⁶⁾)、(c)チェッカーボードテスト結果

(e) 引用文献

- 1) 市川 岳：海底地震計を使った日向灘周辺の地殻構造研究，北海道大学修士論文，1997.
- 2) 大都市大震災軽減化特別プロジェクト，大都市大震災軽減化特別プロジェクト I 地震動（強い揺れ）の予測 「大都市圏地殻構造調査研究」平成 17 年度成果報告書，2006.
- 3) Kodaira, S., Takahashi, N., Park, J.-O., Mochizuki, K., Shinohara, M. and Kimura, S.: Western Nankai Trough seismogenic zone: Results from a wide-angle ocean bottom seismic survey, J.

- Geophys. Res., Vol.105, pp.5887-5905, 2000.
- 4) Kodaira, S., Kurashimo, E., Park, J.-O., Takahashi, N., Nakanishi, A., Miura, S., Iwasaki, T., Hirata, N., Ito, K. and Kaneda, Y.: Structural factors controlling the rupture process of a megathrust earthquake at the Nankai trough seismogenic zone, *Geophys. J. Int.*, Vol.149, pp.815-835, 2002.
 - 5) Kodaira, S., Iidaka, T., Nakanishi, A., Park, J.-O., Iwasaki, T. and Kaneda, Y.: Onshore-offshore seismic transect from the eastern Nankai Trough to central Japan crossing a zone of the Tokai slow slip event, *Earth Planets Space*, Vol.57, pp.943-959, 2005.
 - 6) Kodaira, S., Sato, T., Takahashi, N., Ito, A., Tamura, Y., Tatsumi, Y. and Kaneda, Y.: Seismological evidence for variable growth of crust along the Izu intra-oceanic arc, *J. Geophys. Res.*, 2006 (accepted).
 - 7) Mochizuki, K., Fujie, G., Sato, T., Kasahara, J., Hino, R., Shinohara, M. and Suehiro, K.: Heterogeneous crustal structure across a seismic block boundary along the Nankai Trough, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.25, pp.2301-2304, 1998.
 - 8) Nakanishi, A., Shiobara, H., Hino, R., Kodaira, S., Kanazawa, T. and Shimamura, H.: Detailed subduction structure across the eastern Nankai Trough obtained from ocean bottom seismographic profiles, *J. Geophys. Res.*, Vol.103, pp.27151-27168, 1998.
 - 9) Nakanishi, A., Takahashi, N., Park, J.-O., Miura, S., Kodaira, S., Kaneda, Y., Hirata, N., Iwasaki, T. and Nakamura, M.: Crustal structure across the coseismic rupture zone of the 1944 Tonankai earthquake, the central Nankai Trough seismogenic zone, *J. Geophys. Res.*, Vol.107, doi:10.1029/2001JB000424, 2002a.
 - 10) Nakanishi, A., Shiobara, H., Hino, R., Mochizuki, K., Sato, T., Kasahara, J., Takahashi, N., Suehiro, K., Tokuyama, H., Segawa, J., Shinohara, M. and Shimamura, H.: Deep crustal structure of the eastern Nankai Trough and Zenisu Ridge by dense airgun-OBS seismic profiling, *Mar. Geol.*, Vol.187, pp.47-62, 2002b.
 - 11) 西坂弘正：紀伊半島沖南海トラフにおけるフィリピン海プレートの沈み込み域，修士論文，千葉大学，1997.
 - 12) Sato, H., Hirata, N., Koketsu, K., Okaya, D., Abe, S., Kobayashi, R., Matsubara, M., Iwasaki, T., Ito, T., Ikawa, T., Kawanaka, T., Kasahara, K., Harder, S.: Earthquake source fault beneath Tokyo, *Science*, pp.462-462, 2005.
 - 13) Sato, T., Mochizuki, K., Kasahara, J., Fujie, G., Nishisaka, H. and Koresawa, S.: Depth variation of the crustal structure of the subducting plate along the Nankai Trough, off Kii Channel, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.25, pp.4011-4014, 1998.
 - 14) Takahashi, N., Kodaira, S., Nakanishi, A., Park, J.-O., Miura, S., Tsuru, T., Kaneda, Y., Suehiro, K. and Kinoshita, H.: Seismic structure of western end of the Nankai trough seismogenic zone, *J. Geophys. Res.*, Vol.107, doi:10.1029/2000JB000121, 2002.
 - 15) Takahashi, N., Kodaira, S., Park, J.-O. and Diebold, J.: Heterogeneous structure of western Nankai seismogenic zone deduced by multichannel reflection data and wide-angle seismic data, *Tectonophysics*, pp.167-190, 2003.
 - 16) Smith, W. H. F. and Wessel, P.: Gridding with continuous curvature splines in tension,

Geophysics, Vol.55, pp.293-305, 1990.

- 17) Christenson, N.I.: Poisson's ratio and crustal seismology, J. Geophys. Res., Vol.101, pp.3139-3156, 1996.
- 18) 石油公団：昭和 53 年度 大陸棚石油・天然ガス資源基礎調査 基礎物理探査「東海沖～熊野灘、宮崎沖、伊豆七島海域」調査書報告書，1978.
- 19) 石油公団：昭和 57 年度 大陸棚石油・天然ガス資源基礎調査 基礎物理探査「後志沖、十勝～釧路海域、オホーツク海」調査書報告書，1982.
- 20) 石油公団：昭和 61 年度 大陸棚石油・天然ガス資源基礎調査 基礎物理探査「道南～下北沖」調査書報告書，1986.
- 21) 石油公団：昭和 61 年度 大陸棚石油・天然ガス資源基礎調査 基礎物理探査「南三陸～鹿島沖」調査書報告書，1986.
- 22) Park, J.-O, Tsuru, T., Takahashi, N., Hori, T., Kodaira, S., Nakanishi, A., Miura, S. and Kaneda, Y.: A deep strong reflector in the Nankai accretionary wedge from multichannel seismic data: Implications for underplating and interseismic stress release, J. Geophys. Res., Vol.107, doi:10.1029/2001JB000262, 2002.
- 23) 沖野郷子, 西澤あずさ, 浅田昭: 相模湾北西部の地殻構造探査, 水路部研究報告, Vol.30, pp.383-393, 1994.
- 24) Nishizawa, A., Kanazawa, T., Iwasaki, T. and Shimamura, H.: Crustal structure related to the Philippine Sea plate subduction in the northeastern part of the Sagami Trough, Japan, Phys. Earth Planet. Int., Vol.93, pp.21-36, 1996.
- 25) Fujie, G., Ito, A., Kodaira, S., Takahashi, N. and Kaneda, Y.: Confirming sharp bending of the Pacific plate in the northern Japan trench subduction zone by applying a travelttime mapping method, Phys. Earth Planet. In., Vol.157, pp.72-85, 2006.
- 26) 山下幹也・木下正高・酒井慎一・佐藤 壮・高橋成実・金田義行：伊豆半島東方沖の浅部地殻構造とテクトニクス，日本地震学会秋季大会，C046，2006.
- 27) 馬場俊孝・伊藤重紀・金田義行・早川俊彦・古村孝志：制御地震探査結果から構築した日本周辺海域下の 3 次元地震波速度構造モデル，日本地球惑星科学連合 2006 年大会，S111-006，2006.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
馬場俊孝・伊藤重紀・金田義行・早川俊彦・古村孝志	制御地震探査結果から構築した日本周辺海域下の 3 次元地震波速度構造モデル	日本地球惑星科学連合 2006 年大会	平成 18 年 5 月

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

- | | |
|--------------|----|
| 1)特許出願 | なし |
| 2)ソフトウェア開発 | なし |
| 3) 仕様・標準等の策定 | なし |