

### 3. 3. 1 1 強震動予測手法の高度化（統括研究課題）

#### (1) 業務の内容

(a) 業務題目：強震動予測手法の高度化（統括研究課題）

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学地震研究所	教授	瀨瀬一起	koketsu@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	助手	三宅弘恵	hiroe@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	助教授	古村孝志	furumura@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	産学官連携研究員	小林励司	reiji@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	産学官連携研究員	呉 長江	wuchang@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	産学官連携アシスタント	田中康久	ystanaka@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	産学官連携アシスタント	室谷智子	s-muro@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	産学官連携アシスタント	木村武志	tkimura@eri.u-tokyo.ac.jp

(c) 業務の目的

「大深度弾性波探査」で得られる成果や防災科学技術研究所によって行われる大規模ボーリング調査の成果を基に、首都圏における高精度な強震動予測を行うための震源モデル・地下構造モデル等の構築に関する統括的な調査・研究を行う。そのため、本研究課題では研究課題1～9の成果を順次とりまとめ、モデル化手法の開発や、その手法を適用した震源モデル・地下構造モデルの構築を行う。また、構築した手法・モデルに基づき首都圏における強震動予測を実施する。

(d) 5カ年の年次実施計画

1) 平成14年度：(未設定)

2) 平成15年度：(未設定)

3) 平成16年度:震源モデル化のためのデータとして必要な震源過程インバージョン結果のコンパイルを進めるとともに、モデル化の前提となるスケーリング則を確立する。地下構造モデル化にデータとして必要な構造探査結果等のコンパイルを進めるとともに、地下構造一次モデルの構築を行う。

4) 平成17年度：得られたスケーリング則等に基づき、震源モデル化手法を確立する。得られた一次モデルに対して中小地震の強震記録等を用いてチューニングを行い、地下構造の高精度モデルを構築する。また、過去の地震のデータを用いることで、これら手法・モデルを検証する。

5) 平成18年度：高度化され検証された手法・モデルを、相模トラフや南海トラフ沿いに想定されている海溝型地震に適用し、強震動予測の試算を行う。

#### (e) 平成17年度業務目的

高精度化した強震動予測手法、特に、首都圏にとって近い将来の脅威となるにもかかわらず、内陸地震に比べ検討されることが少なかった、海溝型地震の強震動予測手法を構築する。さらには、構築された強震動予測手法を1923年関東地震等に適用して、予測結果と観測事実を比較することにより検証を行う。また、16年度に構築した首都圏の地下構造の一次モデルを、中小の自然地震記録を用いたチューニング等により高度化するとともに、浅部構造を追加する。

### (2) 平成17年度の成果

#### (a) 業務の要約

海溝型地震の強震動予測における具体的な震源モデル化手法を確立し、強震動予測手法の高度化に着手した。この高度化手法を検証するため1923年関東地震に適用したところ、長周期地震動シミュレーションの妥当性を確認できた。首都圏の深部地下構造の第一次モデルを南海トラフ沿いの海溝型地震にも使えるよう海域に拡張するとともに、自然地震の表面波スペクトルを用いたチューニングを進めた。また、地表の強震動予測には欠かせない浅部構造のモデル化を新たに行った。このほか、中越地震の震源域を対象として、こうした地下構造のモデル化手法の検証を開始した。

#### (b) 業務の成果

海溝型地震の強震動予測における震源モデルの構築において、波形インバージョンにより得られるすべり分布は基礎的な情報となる。室谷・三宅・瀨嶺(2005)<sup>1)</sup>は、日本における海溝型地震の波形インバージョン結果をコンパイルし、海溝型地震の断層面積やアスペリティ面積のスケージングは、内陸地震のそれらとほぼ似通っているとの結論を得ている。また、海溝型地震では内陸地震のように長周期アスペリティ≠強震動生成域とはならない可能性が指摘されており、特性化アスペリティと強震動生成域の物理的な関係について、応力降下量と実効応力の観点から見直しを行った。これらの研究を基に、海溝型地震の震源モデルは以下のような構築方法を取ることにした。

- ① 発生サイクルにおいて一回前の地震の震源過程モデルがわかっている場合、アスペリティは繰り返す(Yamanaka and Kikuchi, 2004)<sup>2)</sup>ことを前提に一回前の地震の震源過程モデルをそのまま用いる。
- ② 一回前がわかっていない地震については、震源過程モデルのコンパイルによるスケージング則を基にした特性化震源モデルを用いる。
- ③ 大規模な海溝型地震の波形インバージョン結果では中周期帯の強震動が不足する場合があるので、擬似動的震源モデル(Guatteri et al., 2004)<sup>3)</sup>を導入する。

次に、この震源モデル化手法を検証するため1923年関東地震に適用した。その際、2002～2003年の大深度弾性波探査でフィリピン海プレート上面が従来の想定(たとえばIshida, 1992)<sup>4)</sup>より浅く推定されているため、従来の震源過程インバージョン結果(Kobayashi and Koketsu, 2005)<sup>5)</sup>ではなく、新しいプレート上面位置に断層面を置いた場合のインバージョン結果(Sato et al., 2005; 図1)<sup>6)</sup>を用いた。さらに、この結果のすべり分布に対する擬似動的震源モデルを求めたところ、図2のように与えられた。

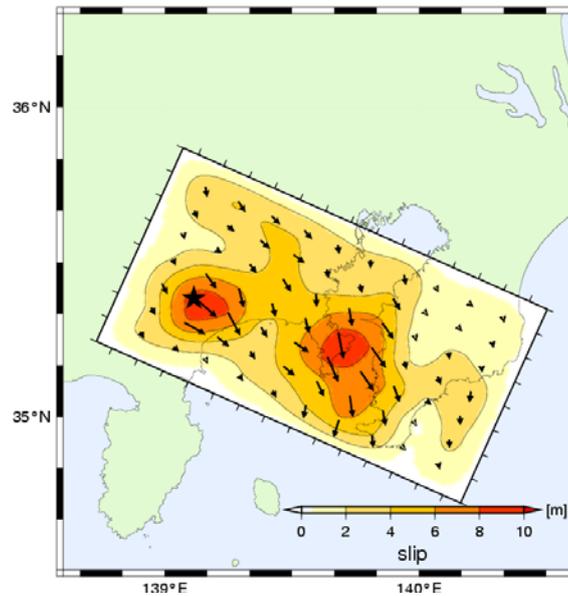


図1. 新しいプレート上面形状に基づいた1923年関東地震のインバージョン結果<sup>6)</sup>。

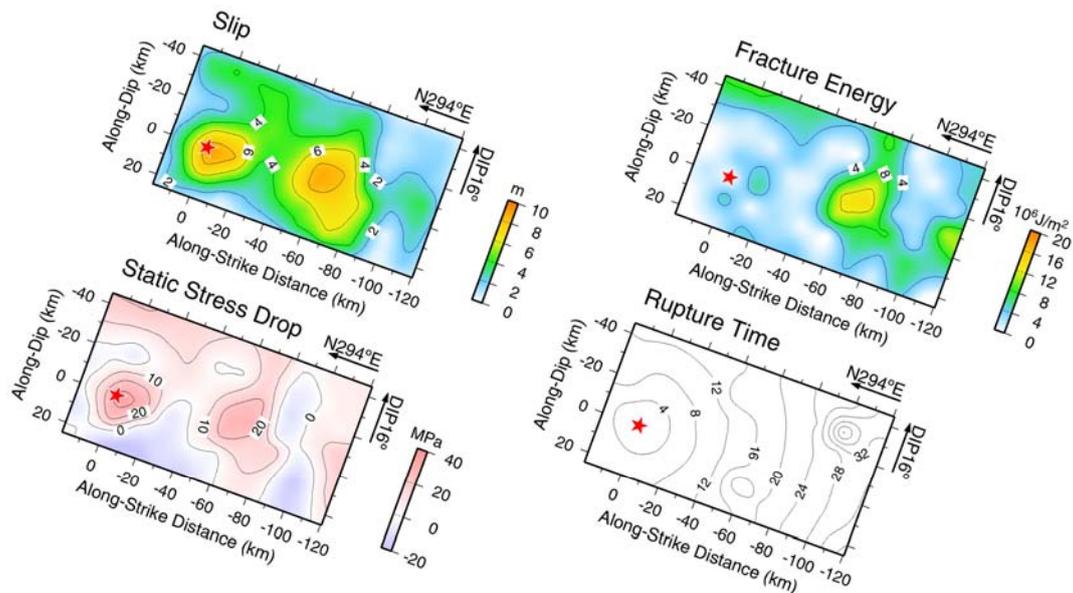


図2. 1923年関東地震のインバージョン結果<sup>6)</sup>に対する擬似動的震源モデル。

強震動評価の第一段階として、インバージョン結果を震源モデル、大大特統合モデルの第一次モデル(田中・他, 2005)<sup>7)</sup>を地下構造モデル、ボクセル有限要素法(Koketsu et al., 2004)<sup>8)</sup>を計算手法とした長周期地震動のシミュレーションを行った。その結果(図3)、東京本郷における1923年関東地震の観測記録(横田・他, 1989)<sup>9)</sup>を概ね再現するシミュレーション波形が得られた(図4)。

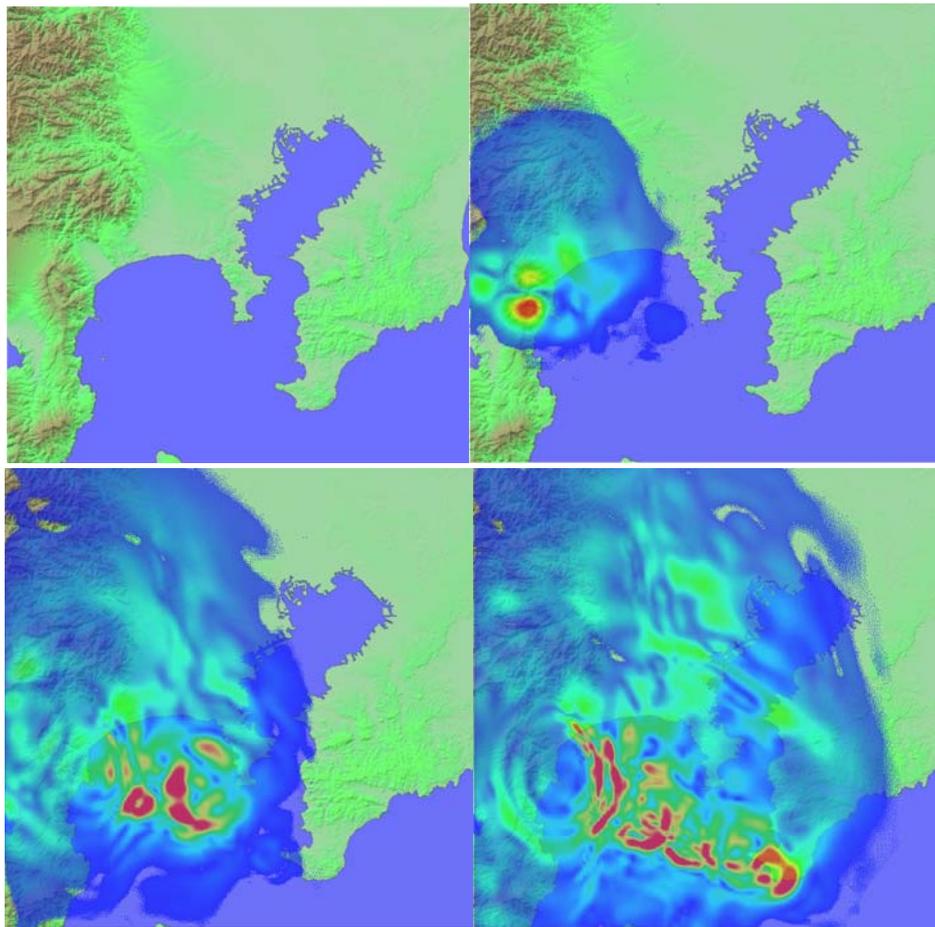


図 3. 長周期地震動のシミュレーション結果。左上から右下に向かって地震発生直後から 10 秒後、20 秒後、30 秒後の地動速度分布のスナップショット。

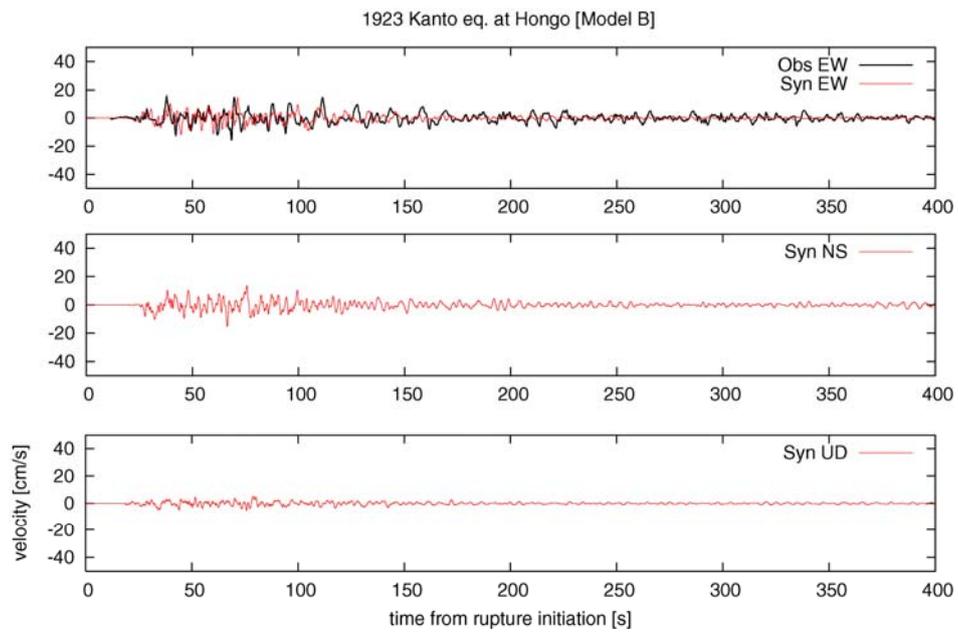


図 4. 東京本郷におけるシミュレーション波形（赤）と観測波形（黒）の比較。地震計の方位が逆時計回りに  $13^\circ$  ずれていることは折り込み済みで、観測は東西成分のみ。

海溝型地震における強震動予測では、計算領域が広大なことに加え、長周期地震動から短周期地震動までの評価が重要となる。2004年紀伊半島南東沖地震では豊富な観測記録が得られたため、長周期地震動の伝播経路における発達過程・盆地内における励起メカニズムの検討などを行った。その結果、Yamada and Iwata (2005) が指摘するように、トラフ周辺の付加体の構造が長周期地震動の発達に重要な役割を果たすことがわかったので、研究課題9「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」の成果である海域の構造モデルを大大特統合モデルに取り込む作業を行った(図5)。さらに、第一次モデルでは限定的に行われていた、自然地震の表面波 R/V スペクトルによるモデルのチューニングを関東平野全域の多数の強震観測点で実施し、第二次大大特統合モデルを構築した(図6)。

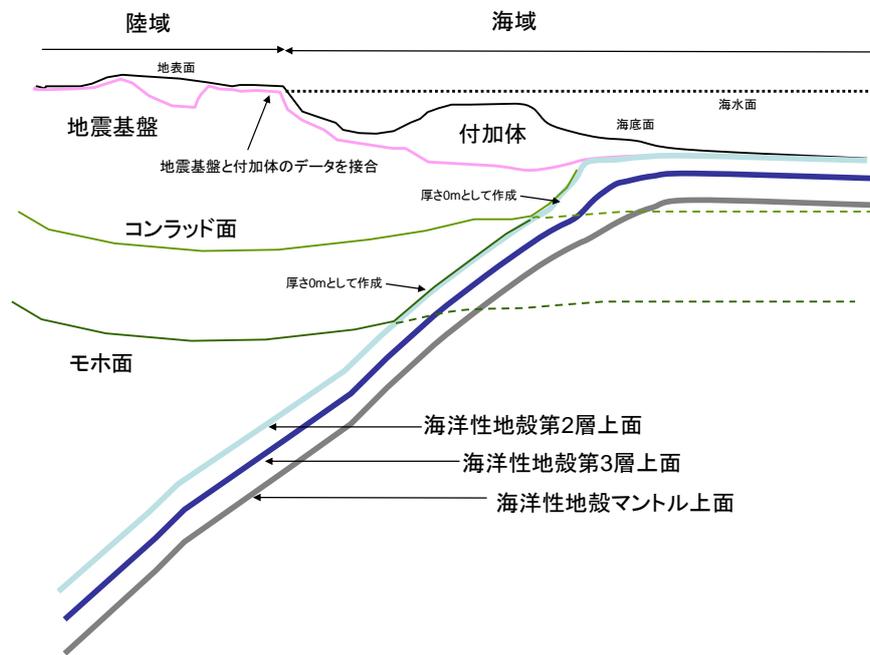


図5. 地下構造の陸域モデル(第一次モデル)と海域モデル(研究課題9「海溝型地震の強震動予測のための海域地下構造モデルの作成」による)の接続方法。

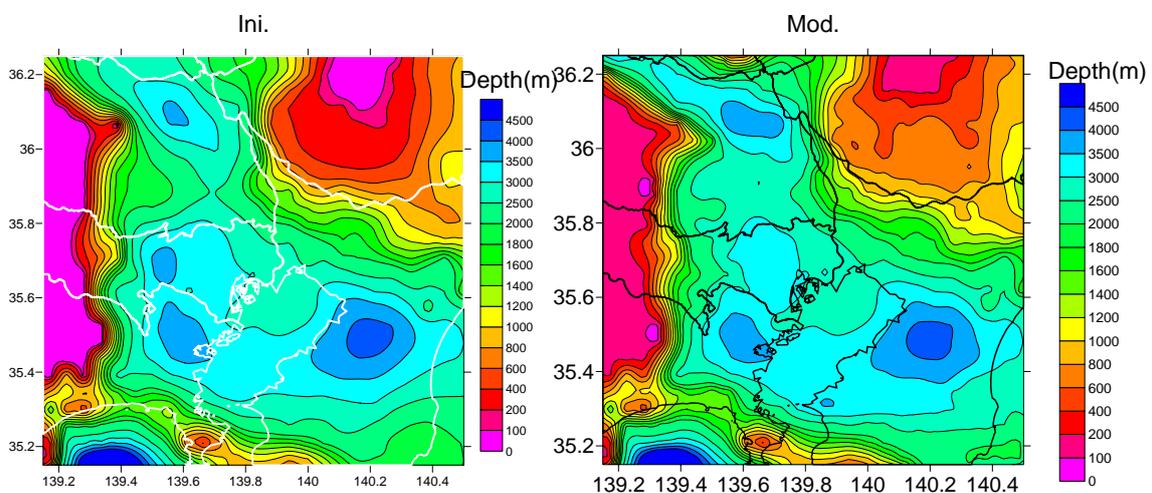


図6. 基盤面深さ分布の第一次モデル(左)とチューニング後の第二次モデル(右)。

以上の地下構造の平野部分は下総層・上総層・三浦層・基盤の4層から成り、下総層のS波速度は500 m/sと推定されており、山中・山田(2002)の微動探査でも400~600 m/sであるので、おおむね下総層上面は工学的基盤として扱うことができる。最終的に地表における強震動を予測するためには、この工学的基盤より上部の浅層地盤モデルを構築しなければならない。まず、首都圏の約78,000本の浅層ボーリングデータを収集し、その結果に基づきN値=50の等深度面を作成した(図7)。横浜から湾岸沿いに東京へ、そして東京から荒川沿いに埼玉へ向かう三日月形の領域が、特に等深度面が深い領域として浮かび上がり、その値は50m以上となった。また、N値=50の等深度面は、およそVs=400 m/sの等深度面として扱える可能性がPS検層との比較より示唆された。次に、K-NET、KiK-netおよびその他のPS検層と微動探査結果を基にVs=500 m/sの等深度面を構築した。横浜や千葉県北西部から埼玉において、等深度面がやや深くなる傾向がみられた。

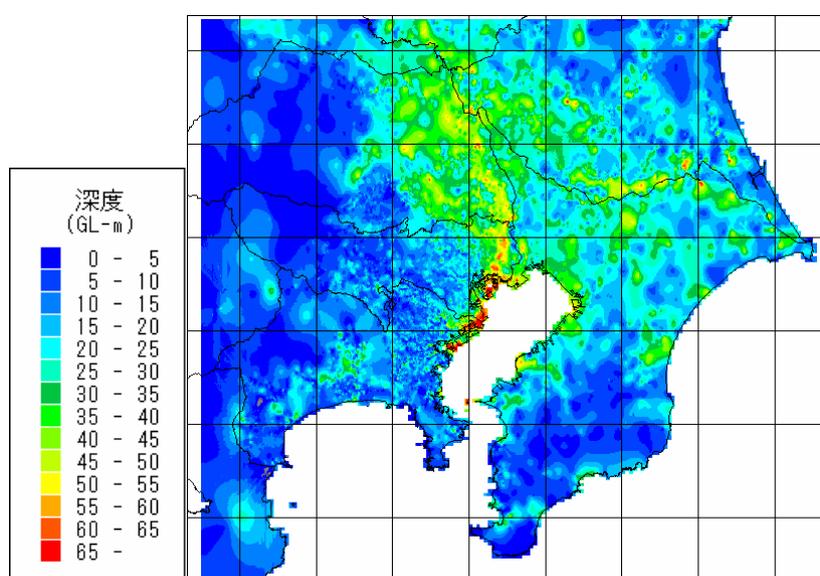


図7. ボーリングデータからモデル化されたN値50の等深度面。

最後に、これらの基準面を参考に250 mメッシュ毎のボーリング柱状データを作成し、浅層地盤モデルを構築した。ボーリングがある部分はメッシュを代表する柱状データを採用し、ボーリングがない部分は、同じ微地形内でもっとも近い柱状データを参照しながら補間した。なお、物性値の設定にあたっては、PS検層結果およびN値とVsの換算式を用いている。推定された浅層地盤モデルから得られたAVS30(地表下30mの平均S波速度)の分布(図8)は、若松・松岡(2003)によって微地形区分から経験的關係式により推定されたAVS30と調和的であった。ただし、両者の比をとると、東京湾から荒川沿いに埼玉へ北上する地域や、横浜、町田において、浅層地盤モデルから得られたAVS30が7割ほどの値となり、仮にこのモデルを用いて強震動計算を行った場合、地震動がより大きく推定されると考えられる。上記の地域は、安政江戸地震・明治東京地震・関東地震といった過去の被害地震のみならず、2005年の千葉県北西部等の近年首都圏直下で起きる地震によっても、震度が大きくなる傾向がみられており、地盤条件の評価の重要性が指摘されている。

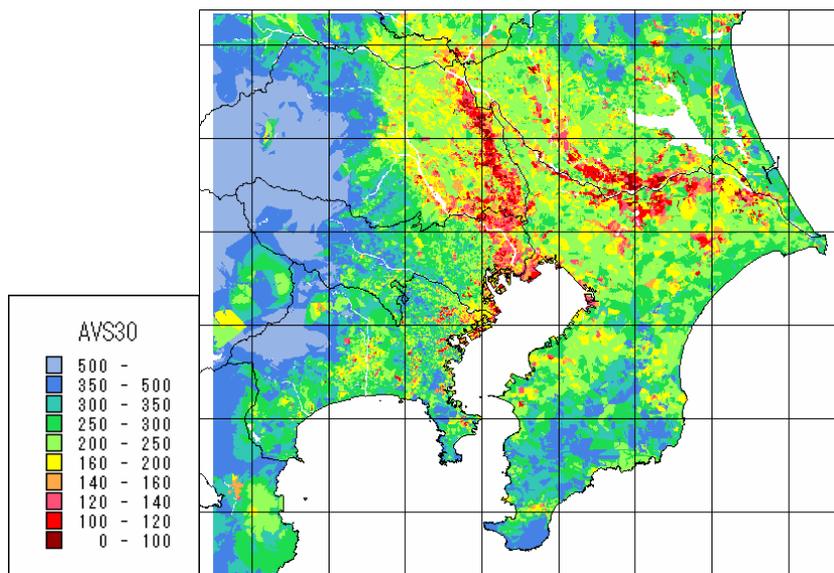


図 8. AVS30 (深さ 30m までの平均 S 波速度) の分布図。

以上のような深部あるいは浅部の地下構造モデルの構築やチューニングに関しても、そこで用いる手法の検証を開始した。2004 年に新潟県中越地震が発生するとともに、油田・ガス田地帯であるため豊富なデータの存在する 2004 年新潟県中越地震の震源域を中心とした領域を検証対象として、P 波および S 波の反射法探査を実施し、既存の探査やボーリング結果のコンパイルも行って、この地域の三次元構造モデルを構築した (図 9)。

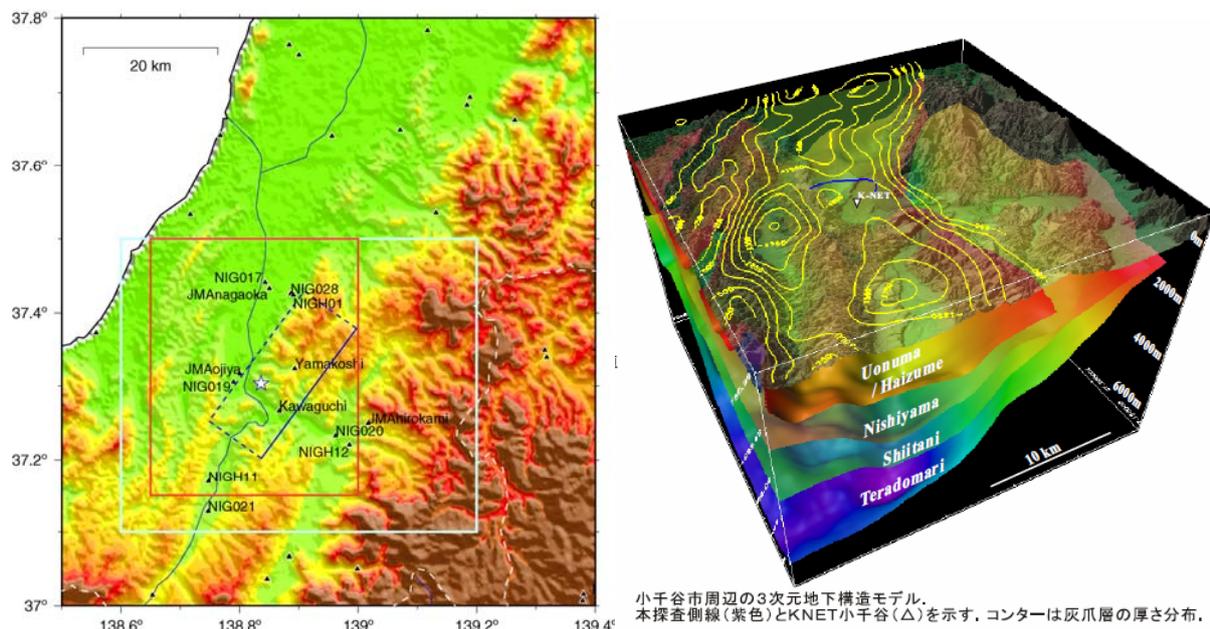


図 9 2004 年新潟県中越地震震源域のモデル化対象領域と三次元構造モデル。

(d) 結論ならびに今後の課題

海溝型地震の強震動予測手法について、1923 年関東地震を用いて長周期地震動の評価を検証した。今後は短周期地震動を含めた広帯域地震動を検証するとともに、広帯域地震動から得られる震度の分布を地震時の実際の震度分布と比較する予定である。深部および浅

部地下構造モデルはこの比較・検証の過程でさらなるチューニングが行われるとともに、プレート形状など震源に関係する部分は震源モデルとの整合性を検討する。中越地震震源域における地下構造モデル化手法の検証は、今後、構築した三次元モデルを用いて本震などの強震波形を計算し、実際の観測波形と比較する段階へ進める。

(e) 引用文献

- 1) 室谷智子・三宅弘恵・瀧瀬一起：海溝型地震の不均質断層パラメータのスケーリング則，地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会，S052-006，2005.
- 2) Yamanaka, Y. and M. Kikuchi: Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, Vol.109, No.B7, Art.No.B07307, 2004.
- 3) Guatteri, M., P. M. Mai and G. C. Beroza: A pseudo-dynamic approximation to dynamic rupture models for strong ground motion prediction, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol.94, No.6, 2051-2063, 2004.
- 4) Ishida, M.: Geometry and relative motion of the Philippine sea plate and Pacific plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan, *J. Geophys. Res.*, Vol.97, No.B1, 489-513, 1992.
- 5) Kobayashi, R. and K. Koketsu: Source process of the 1923 Kanto earthquake inferred from historical geodetic, teleseismic, and strong motion data, *Earth Planets Space*, Vol.57, 261-270, 2005.
- 6) Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, K. Kasahara and S. Harder, Earthquake source fault beneath Tokyo, *Science*, Vol.309, 462-464, 2005.
- 7) 田中康久，瀧瀬一起，三宅弘恵，古村孝志，佐藤比呂志，平田直，鈴木晴彦，増田徹：首都圏下の速度構造の大大特コミュニティモデル (1)：屈折法・重力・自然地震データによる第一次モデル地震動，地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会，S079-P010，2005.
- 8) Koketsu, K., H. Fujiwara and Y. Ikegami, Finite-element simulation of seismic ground motion with a voxel mesh, *Pure Appl. Geophys.*, 161, 2463-2478, 2004.
- 9) 横田治彦，片岡俊一，田中貞二，吉沢静代：1923 年関東地震のやや長周期地震動 今村式 2 倍強震計記録による推定，日本建築学会構造系論文報告集，Vol.401, pp.35-45, 1989.
- 10) Yamada, N. and T. Iwata: Long-period ground motion simulation in the Kinki area during the  $M_J$  7.1 foreshock of the 2004 off the Kii peninsula earthquakes *Earth Planets Space*, Vol.5, 197-202 2005.
- 11) 山中浩明・山田伸之：微動アレイ観測による関東平野の 3 次元 S 波速度構造モデルの構築，*物理探査*，55，53-65，2002.

(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
H. Miyake, K. Koketsu	Long-period ground motions from a large offshore earthquake: The case of the 2004 off the Kii peninsula earthquake, Japan	Earth, Planets and Space	平成 17 年 3 月
T. Hayakawa, T. Furumura, Y. Yamanaka	Simulation of strong ground motions caused by the 2004 off the Kii peninsula earthquakes	Earth, Planets and Space	平成 17 年 3 月
H. Sato, N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, K. Kasahara and S. Harder	Earthquake source fault beneath Tokyo	Science	平成 17 年 7 月
瀬瀬一起・三宅弘恵・大大特 I 研究グループ	プレート境界地震の震源モデル化と強震動評価	日本地震学会 2005 年度秋季大会	平成 17 年 10 月
池上泰史・瀬瀬一起・三宅弘恵	海溝型地震による長周期地震動(2): 伝播経路での発達過程	日本地震学会 2005 年度秋季大会	平成 17 年 10 月
小林励司・瀬瀬一起	プレート境界形状を考慮した相模トラフ沿いのアスペリティモデル	日本地震学会 2005 年度秋季大会	平成 17 年 10 月
古村孝志・三宅弘恵・瀬瀬一起・須田茂幸・川崎慎治	小千谷市街地付近の P 波・S 波反射法探査と地下構造モデル構築	日本地震学会 2005 年度秋季大会	平成 17 年 10 月
田中康久・池上泰史・小林励司・三宅弘恵・瀬瀬一起	首都圏の強震動評価: 1923 年関東地震の地震動シミュレーション	日本地震学会 2005 年度秋季大会	平成 17 年 10 月
Kobayashi, R. and K. Koketsu	Source Process of the 1923 Kanto Earthquake Using New Fault Geometry and 3-D Green's	2005 American Geophysical Union Fall	平成 17 年 12 月

	Functions	Meeting	
Miyake, H., K. Koketsu, R. Kobayashi, Y. Tanaka and Y. Ikegami	Broadband Ground Motion Validation of the Great 1923 Kanto Earthquake Using the New Image of the Philippine Sea Slab and Integrated 3D Velocity-Structure Model	2005 American Geophysical Union Fall Meeting	平成17年12 月
Tanaka, Y., K. Koketsu, H. Miyake, T. Furumura, H. Sato, N. Hirata, H. Suzuki and T. Masuda	Integrated Modeling of 3D Velocity Structure Beneath the Tokyo Metropolitan Area	2005 American Geophysical Union Fall Meeting	平成17年12 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

### (3) 平成18年度業務計画案

高度化された強震動予測手法の検証を引き続き行う。この手法および構築された震源モデルや地下構造モデルなどを、フィリピン海プレートの海溝型地震（東南海地震、東海地震、首都直下地震）に適用して強震動予測を行い、その結果を持って5ヵ年のまとめとする。