

3. 1. 2 プレート構造・変形過程と地震発生過程の解明

3. 1. 2. 1 構造探査とモデリングに基づくプレート構造・変形過程と地震発生過程の解明

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

地下構造探査・変動地形調査と、現実的なレオロジーモデルに基づく粘弾性数値モデル化によって、プレート構造・長期間から短期間での変形過程と地震発生過程を解明する。

(b) 平成 25 年度業務目的

東日本の構造モデルを作成し、三次元粘弾性有限要素法により平成 23 年東北地方太平洋沖地震後の余効変動・応力変化を求め、観測されたデータと比較し、既存弱面に作用するクーロン応力を求める。綾瀬川断層南部を横切る反射法地震探査を実施し、断層モデルを作成する。

(c) 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	佐藤比呂志	
東京大学 地震研究所	教授	岩崎貴哉	
東京大学 地震研究所	助教	石山達也	
東京大学 地震研究所	助教	蔵下英司	
東京大学 地震研究所	特任研究員	橋間昭徳	

(2) 平成 25 年度の成果

(a) 業務の要約

- 1) MeSO-net の地震波形データを用いてフィリピン海プレート上面の形状をイメージングするための手法を開発した。
- 2) 綾瀬川断層南部を横切る反射法地震探査を実施するとともに、断層モデルを更新した。
- 3) 三次元粘弾性有限要素法により平成 23 年東北地方太平洋沖地震後の余効変動・応力変化を求め、観測されたデータと比較し、既存弱面に作用するクーロン応力を求めた。

(b) 業務の成果

2011 年東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震と略称する。）は日本列島域全域にわたり大きな変形を及ぼした（Nishimura *et al.*, 2011¹⁾）。首都圏は東北沖地震の震源から 300 km 離れているが、この地震の後、地震活動が活発化している（Ishibe *et al.*, 2011²⁾）。今後の地震活動を物理的に予測するためには応力変化のモデル化が欠かせない。モデル領域は、日本列島域をすべて含む非常に広域的なものとなるが、この領域は、ユーラシア・太平洋・フィリピン海の 3 つのプレートが相互作用する場であり、この問題は本質的に三次元問題である。また、日本列島内部の不均質の影響が地殻変動に与える影響も指摘されている（Ohzono *et al.*, 2012³⁾; Takada and Fukushima, 2013⁴⁾）。地震後の地殻変動（余効変動）を駆

動するメカニズムとしては、東北沖地震の本震のすべり領域周辺における余効すべり、アセノスフェアの粘弾性緩和が挙げられる。従って、東北沖地震後の変動をモデル化するためには、日本列島域のプレート形状および地下の弾性-粘弾性構造を明らかにした上で、これらの形状や物性を取り入れることが可能な変動モデルを構築する必要がある。また、構築した変動モデルは、日本列島域で稠密に展開されている Hi-net、GEONET などの観測網によって得られる地震活動・地殻変動データにより随時更新していく必要がある。

一方、東北沖地震が引き起こした応力場に対して、首都圏下の断層活動がどのような影響を受けるのかを評価するためには、最低でもこれらの断層の地下形状を解明する必要がある。

上記の目的のために、本年度本業務では 1) MeSO-net による地震観測波形データを用いたフィリピン海プレートのイメージング、2) 綾瀬川断層南部を横切る反射法地震探査と、首都圏下の断層形状モデルの更新、3) 三次元粘弾性有限要素法による応力変化のモデル化を行なった。

1) MeSO-net による地震観測波形データを用いたフィリピン海プレートのイメージング

a) MeSO-net による地震観測波形データ

関東下のスラブ形状や物理特性を明らかにすることは、発生する地震を予測する上で重要な情報を与える。このため、物理探査の概念を利用して、MeSO-net で得られた地震観測波形から反射波などを用いた直接的なイメージングを行うことは有効である。このための手法開発を試みた。MeSO-net 観測網は 296 の観測点から構成され、首都圏の中央部に展開されている（平田・他、2009⁵⁾；平田、2013⁶⁾）。MeSO-net は、平面的な配置の他、4 つの線状のアレイを含んでいる。これらの線状のアレイについては、ここでは「地震観測測線」と呼ぶ。図 1（P.65）に観測測線の位置と名称を図示した。F-K 測線は 33、I-C 測線は 41、T-F 測線は 51、Y-N 測線は 39 の観測点から構成される。それぞれの測線で得られた地震波形は、探査地震学で取得された“ショット記録”に類似する。この利点は、アレイ上に到着する地震波の到着時刻の情報によって、P 波や S 波などの識別が容易となることである。フィリピン海プレート内やその上面付近で発生した三つの地震による観測波形ギャザーの例を図 2～4（P.65～66）に示す。図 2（P.65）では、P 波・S 波の直後に類似した波が到来しており、これらの二次的な P 波・S 波は、フィリピン海プレート内の構造に由来している可能性が高い。図 3（P.66）でも図 2（P.65）の地震と類似した特徴が見られる他、Y-N 測線ではこの地震が東端付近で発生したのに比べ、西端で発生した地震（図 4、P.66）も観測されており、探査地震学的な解析の可能性を示している。

b) 三次元波動伝播計算のための三次元速度構造モデル

MeSO-net で観測された地震波形を解釈する上で、フォワードモデリングによる理論波形の計算が有効である。三次元速度構造によって震源が決定され、P 波や S 波はこの速度場を伝播する。観測される初動は、速度構造に強く関係している。スラブ境界のような顕著な境界面が存在すれば、反射波のような後続波が発生する。三次元差分法で波動伝播を計算する場合、地震の低い周波数を考慮して、最低 200 m 間隔でのグリッドが必要となる。MeSO-net の研究グループによって、走時トモグラフィー法によって、三次元速度構造が

得られている(例えば、平田, 2013⁶⁾)。このトモグラフィーは、速度構造を水平方向に 10km、鉛直方向に 5 km ごとに求めている。このため、200 m 間隔へ速度構造を内挿した。対象領域は、(X, Y, Z)座標を東西・南北・上下方向にとり、X 方向の長さを 170 km ($-90 \text{ km} \leq X \leq 80 \text{ km}$)、Y 方向の長さを 140 km ($-80 \text{ km} \leq Y \leq 60 \text{ km}$)、深さは 101 km ($-100 \text{ km} \leq Z \leq 1 \text{ km}$) とした(図 5、P.67)。

関東下のフィリピン海および太平洋プレート上面からの反射波の検出を目的としていることから、スラブの形状を速度構造モデルに取り込む必要がある。太平洋スラブについては、Nakajima *et al.* (2009)⁷⁾による形状を用い、0.1 度間隔から、200 m 間隔に変換した。また、フィリピン海プレートについては多数の研究があるが、ここでは MeSO-net に基づくモデル(平田, 2013⁶⁾)を用いた。これらは 0.01~0.02 度間隔で形状が求められているが、200 m 間隔へと内挿した。速度モデル内に太平洋およびフィリピン海スラブを挿入するソフトウェアを作成した。このプログラムでは、スラブの多様な厚さ、速度減少の割合などの入力が可能である。図 6 (P.67) は、4 km の厚さの低速度層を有する関東下のスラブの速度構造モデルである。

c) 波動伝播シミュレーションによる理論波形の計算

南カリフォルニア大学で開発した三次元地震波動コードを用いて、前述した速度構造モデルに基づいて、有限差分法による三次元波動伝播シミュレーションを行った。対象とした地震は、2010 年 10 月 19 日 22 時 24 分に茨城県南部のフィリピン海プレート上面付近で発生した M4.1 の地震である。この地震の発生後 9 秒の波動伝播の様子を図 7 (P.68) に示す。フィリピン海プレート内の構造に起因する S'波やフィリピン海プレートに沿う guided wave 群が見られる。この計算に基づいて、観測測線での地震ギャザーとして表現した図が図 8 (P.69) である。ここでは、実際の観測波形も並べて表示した。P 波・S 波の基本的な特徴については概ね良好な一致を示すが、多くの箇所で不一致が見られる。とくに太平洋プレートに関連した波群は、対応する波形が明瞭には見られない。また、振幅・到達時間など、細部には不一致が多数存在する。しかしながら、この計算結果は物理探査の概念で自然地震の波形を使った構造解析の有効性を示している。今後、解析する地震数を増大させることにより、構造のチューニングを行い、その結果、境界面の物理特性の情報とともに、スラブ形状を明らかにしていく予定である。

2) 綾瀬川断層南部の反射法地震探査

首都圏ではこれまでの調査によって深部構造探査の断面は得られつつある。その一方で、活断層の浅部構造については、人口稠密地域でありノイズレベルが高く、加えて機器の展開に多大な労力と困難が伴うため、良好なデータは数少ないのが現状である。一方、近年汎用性の高い独立型の収録器が開発され、これらを多数で展開し、比較的出力の大きいバイブレーター型震源と併用することで、都市部における活断層の精度良いイメージングが可能になりつつある。平成 24 年度は首都圏の活構造でより高精度の浅部構造を明らかにする必要がある構造について、既存資料から検討を行った。その結果、綾瀬川断層南部については、都市部のノイズを克服する高精度反射法地震探査を実施して、綾瀬川断層南部の活動性と実態解明を行う必要性を指摘した。そこで、本年度は、このような伏在活構造が

分布する可能性のある大宮台地南東部にて、独立型収録機器の長大固定展開と中型バイブレーター型震源を用いた、高精度反射法地震探査を実施した。

本探査測線は、埼玉県さいたま市岩槻区新方須賀地区から元荒川沿いを経て同越谷市大林地区に到る約 4.3 km (Line-A) と、越谷市東大沢地区から大落古利根川沿いを経て吉川市上赤岩地区に到る約 5.5 km (Line-B) である (図 9、P.70)。本観測は 2013 年 7 月 19 日から同 31 日の 13 日間に実施した。主な観測パラメータを表 1 (P.64) に示す。本観測の 2 測線を設定するにあたり、大大特・大宮ー野田測線の結果 (佐藤・他, 2006⁸⁾) を参考にした (図 10、P.71)。すなわち、大宮ー野田測線の深度断面図を見ると、測線中央部付近に緩やかな撓曲構造が認められる。また、測線西部には半地溝構造が認められる。これまでの既存深部構造探査の結果より、関東平野には類似の半地溝構造が多数分布し、その一部は逆断層として第四紀に再活動している (Ishiyama *et al.*, 2013⁹⁾)。大宮ー野田測線で認められるこれら二つの構造の直上には沖積低地面と最終間氷期の段丘面が広範に分布するが、これらには明瞭な変動地形は認められない。そこで、これらの伏在断層の活動性を議論するためには、厚い第四系である上総層群・下総層群の詳細な構造のイメージングを得、変形構造について検討する必要がある。このような観点から、本観測では、大宮ー野田測線にほぼ沿った位置で、上記の撓曲構造と半地溝構造を包含する 2 本の高分解能反射法地震探査の測線 Line-A および Line-B を設定した。深部のイメージングを目的とした大宮ー野田測線の観測では、大型バイブレーター型震源を使用し、発震点間隔は 100–150 m、受振点間隔は 50 m であった。これに対して、今回の観測では、伏在断層の活動性を議論するために、地下 1.5 km 以浅の上総層群・下総層群の構造を明らかにするべく、受振・発震点間隔 10 m を採用するとともに、震源として、比較的コンパクトでありながら高エネルギーの震動を発生させることができ、ノイズレベルの高い都市部の発震作業に適した中型バイブレーター震源を用いた (図 11、P.71)。展開については、ポータブルで都市部の機器展開に適した、独立型地震波収録機器 (OYO Geospace 製 GSR) を多数使用し、固定展開での観測を実施した (図 12、P.72)。

観測の結果、都市部の測線にもかかわらず、ほとんどの発振点において比較的 S/N 比の高い良好なショット記録を得ることができた (図 13、P.72)。この観測記録を用いて、Super-X C ((株) 地球科学総合研究所製) を使用した共通反射点重合法に基づく初期的なデータ解析を行った。解析パラメータは以下の通りである。

AGC : 100 ms

Deconvolution : gate length 2000ms, operator length 240 ms, 予測距離 12 msec

Bandpass filter : 10-100 Hz

F-k マイグレーション 速度 : 80%

解析の結果、地表～地下 1.5 km までの良好なイメージが取得できた。Line-A では上総層群および下総層群に対比されるほぼ水平な反射面が分布しており、顕著な変形構造は認められない (図 14、P.73)。一方、Line-B では、測線中央部および東部に、僅かながら東に傾斜を増す部分や反射面の食い違いが認められ、緩やかな撓曲構造や断層による変位を示す可能性がある。今後、ノイズ低減を目的として更に浅部のイメージングを進め、このような構造が地下浅部、すなわち第四紀後期の地層に及んでいるかどうかを確認する必要がある。

石山・他(2011)¹⁰⁾では、主に深部構造探査のこれまでの成果と解釈(佐藤・他, 2010¹¹⁾)に基づいて、初期的な関東平野の断層モデルを提案した。今回は、それ以降の調査結果や Ishiyama *et al.* (2013)⁹⁾などによる断面の再検討を考慮して、関東平野の断層モデルについて再検討を行った(図 15、P.74)。武蔵野台地北東縁の断層については、ブーゲー重力異常の水平一次微分から推定される密度構造の不連続から、少なくとも 2 条の断層面から構成されると考えられる。このように、ブーゲー重力異常に基づく密度構造の解析は、特に平野下に伏在する半地溝構造の分布の推定に有効であると考えられる。

3) 三次元粘弾性有限要素法による 2011 年東北地方太平洋沖地震後の地殻変動モデリング

平成 24 年度業務においては、日本列島域のプレート境界を取り入れた有限要素モデルを構築し、簡単な弾性-粘弾性二層構造のもとで Ozawa *et al.* (2012)¹²⁾によるすべり分布を用いた地殻変動シミュレーションを行い、アセノスフェアにおける粘弾性緩和が地震後の地殻変動と周囲の応力変化に大きな影響を与えることを示した。

今後、日本列島域の現実的な物性条件のもとで粘弾性変動のモデリングを行なっていくにあたり、地震時の変動は初期条件にあたるので非常に重要である。地震時の変動は、弾性的な性質のみに依存し、粘性率分布にはよらない。地下の弾性構造は地震波速度分布から決定されるので、粘性構造に比べてモデル変数の拘束は比較的容易である。そこで、今年度業務として、昨年度構築した有限要素モデルに日本列島域の弾性構造を取り入れ、このモデルにより生成した震源域のすべりに対する変位応答関数を用いて地殻変動データからインバージョンにより地震時すべり分布を求める。このすべり分布を用いて、アセノスフェアの粘弾性緩和による地震後の地殻変動、応力変動を求め、関東地方の既存弱面におけるクーロン応力変化を求める。

a) 地震時すべりに対する弾性構造の効果

東北沖地震の地震時および地震後の変動は、日本列島全域にわたる国土地理院の GEONET (GNSS 連続観測システム) によって詳細に捉えられている。本業務では、国土地理院が公開している日々の座標値 (F3 解) から日本列島域の 1,332 観測点において 2011 年 3 月 12 日と 2011 年 3 月 10 日の座標値の差をとったものを東北沖地震の地震時変動とした。また、震源域の直上における太平洋沖の大陸斜面においても海上保安庁、東北大学による GPS 音響測距結合方式および海底圧力計による海底地殻変動観測によって地殻変動が得られている (Sato *et al.*, 2011¹³⁾; Ito *et al.*, 2011¹⁴⁾; Maeda *et al.*, 2011¹⁵⁾; Kido *et al.*, 2011¹⁶⁾; Hino *et al.*, 2011¹⁷⁾)。図 16 (P.75) にこれらの観測によって得られた地震時変動を示す。

上記の観測点において、震源域のすべりに対する変位応答を計算する。この計算には、昨年度業務において作成した有限要素モデルを用いた。東北沖地震のすべり面として、Nakajima and Hasegawa (2006)¹⁸⁾、Nakajima *et al.* (2009)⁷⁾、Kita *et al.* (2010)¹⁹⁾による太平洋プレート上面の形状モデルを用い、図 17 (P.75) に示す範囲で 24×11 の小断層面に分割し、それぞれの小断層面に対して、走向方向と傾斜方向の単位すべりによる弾性変形応答を計算した。

本業務で設定する日本列島下の弾性構造モデル (JE モデル) として、大陸・海洋地殻は、トモグラフィーによる地震波速度構造 (Matsubara *et al.*, 2008²⁰⁾; Matsubara and Obara,

2011²¹⁾、反射法地震探査による速度構造 (Miura *et al.*, 2005²²⁾) を参考にした。マンツルの速度構造は PREM モデル (Dziewonski and Anderson, 1981²³⁾) を用い、太平洋・フィリピン海プレートのスラブに関しては、周囲のマンツルより P 波、S 波速度が 5%大きい (Nakajima *et al.*, 2001²⁴⁾) と仮定して弾性定数を定めた。また、比較のために、全モデル領域が均質な弾性媒質だと仮定した場合 (HE モデル) の計算も行った。

観測方程式は

$$\mathbf{d} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{e} \quad (1)$$

と表される。ここでベクトル $\mathbf{d}$ は観測データベクトル、 $\mathbf{A}$ は弾性変位応答を表す係数行列、 $\mathbf{x}$ はすべりを表すモデルパラメーターベクトル、 $\mathbf{e}$ は誤差ベクトルである。 $\mathbf{d}$ と $\mathbf{A}$ には、普通、観測データの種類ごとに誤差の逆数に従う重みをかける。しかし、海底データと陸上データの違いが桁の違いになること、また、海底データの分布が偏っていることなどの理由から、重みを単純に誤差にしたがって与えてインバージョンを行なうと海底における変位を再現できないという問題が生じる (Ozawa *et al.*, 2012¹²⁾; Iinuma *et al.*, 2012²⁵⁾)。そこで、本業務では海底データに誤差によるものにさらに 5 倍の重みを与えることにし、各観測データの重みの比率は、陸上水平成分 : 陸上垂直成分 : 海底変位 = 1 : 1/3 : 1/2 とした。また、解の発散を抑えるために、すべり分布がなめらかであるという条件を課す。この条件は、

$$\mathbf{a}^2 \mathbf{L}\mathbf{x} = 0 \quad (2)$$

によって与えられる。 $\mathbf{L}$ は離散化したラプラス演算子によって表した。

観測方程式に対して、解のなめらかさの相対重み $\mathbf{a}^2$ をどの程度与えるかを決定するために、様々な値の $\mathbf{a}^2$ を用いて解を求め、それぞれの解において、観測変位と計算変位の一致度を示すパラメータである Variance reduction ($\mathbf{DS}^2$) とすべり分布の粗さ (なめらかさの逆数) のトレードオフ曲線を作成した (図 18、P.76)。この曲線の急勾配の所では $\mathbf{DS}^2$ の減少とともに、解の粗さも急激に低下する、つまり観測変位と計算変位の一致度の低下と引き換えになめらかな解が実現されるが、緩勾配のところでは、 $\mathbf{DS}^2$ が減少しても、なめらかさの程度はさほど変わらない。従って、観測値をできるだけ満たしつつ最大限なめらかなすべり分布を示す解は、このトレードオフ曲線で急傾斜から緩傾斜に移る点において実現される。この点を満たす $\mathbf{a}^2$ における解を最適すべり分布とした。

このインバージョンの結果得られたすべり分布を図 19(a) (P.76) に示す。比較のために HE モデルで計算した結果を図 19(b) (P.76) に示した。均質弾性の場合と比べると、日本列島下の弾性構造を考慮した JE モデルの方が広範囲なすべりを示す。最大すべり量は、JE モデルは 40 m、HE モデルは 45 m となる。日本列島域の現実的な弾性構造を考慮した効果は、最大すべり量が減少するかわりに広範囲な分布を示す点にある。地震モーメントは HE モデルが 5.1×10^{22} Nm に対して、JE モデルが 5.8×10^{22} Nm と 1 割程度増大する。これらの傾向は、均質モデルと平行成層モデルによるすべり分布の違いを示した Diao *et al.* (2012)²⁶⁾ の研究と調和的である。

このすべり分布による各観測点の変位と観測値との比較を図 20 (P.77) に示す。水平成分に関しては JE、HE 両モデルとも観測値をよく再現しているが、上下成分に関しては、HE モデルだと観測値よりも大きく見積もりすぎることが東北地方の太平洋岸、日本海岸の変位に現れている。

b) 関東地方の既存弱面におけるクーロン応力の変化

前節で得られたすべり分布を用いて、東北沖地震後のアセノスフェアの粘弾性緩和による日本列島域における応力の時間変化を有限要素モデルにより計算した。粘性率は大陸下では 30 km 以深、海洋下では 70 km 以深でスラブを除き一様に 10^{19} Pas とした。図 21 (P.78) に示すのは日本列島下の深さ 15 km における地震時 ($t = 0$)、3 年後、10 年後、30 年後のミーゼス応力分布である。ミーゼス応力は、応力テンソルの各成分を用いて

$$s_M = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (s_{xx} - s_{yy})^2 + (s_{yy} - s_{zz})^2 + (s_{zz} - s_{xx})^2 + 3(s_{xy}^2 + s_{xz}^2 + s_{yx}^2 + s_{yz}^2 + s_{zx}^2 + s_{zy}^2) \right\}} \quad (3)$$

の形で表され、剪断応力の代表値の一つである。また、図 22 (P.78) には東京、仙台、札幌、京都の各都市の深さ 15 km の 100 年間のミーゼス応力の時間変化を示した。仙台のように震源域に近い地域では、地震時に 1 MPa レベルの応力を受ける。札幌や京都のように 500 km 以上離れた地点においても地震時の応力変化は 0.01 MPa に及び、地震活動に有意に影響を与えるレベルである (Reasenbergs and Simpson, 1992²⁷⁾; Hardebeck *et al.*, 1998²⁸⁾)。一方、地震後の剪断応力変化は、震源からの距離によって振舞いが異なる。仙台のような震源に近い地域では 50 年ほどではほぼ定常状態に達する。一方、札幌や京都では数十年の時間スケールでは線形的な増加傾向を示す。このような地域では、地震後 20~30 年の応力変化は地震時のそれを上回る。東京においては両者の中間の振舞いを示し、剪断応力の増加率は減少するものの、100 年後ではまだ増加を示している。このような振舞いの違いは、粘弾性の緩和時定数が距離依存性を持つためと考えられる (例えば、Fukahata and Matsu'ura, 2006²⁹⁾)。ただし、仙台や東京など近地においては、アセノスフェアにおける粘弾性緩和に加えて、余効すべりの影響も考えられるため、この効果を今後調べていく必要がある。

ミーゼス応力は、図 21 (P.78) のように広域的な剪断応力場を視覚的に捉えるには便利な量である。一方、個々の断層面において断層運動に与える影響を評価するには、断層面の形状を考慮したクーロン応力という量が用いられる。クーロン応力 ΔCFS は、断層面の法線ベクトルを $\mathbf{n}$ 、断層面のすべり方向を $\mathbf{w}$ としたときに、

$$\Delta CFS = t^s + m\sigma^n = w_i s_{ij} n_j + m_i s_{ij} n_j \quad (4)$$

と表される (添字の繰り返しに対する総和規約を適用)。ここで第一項は法線応力ベクトル、第二項は断層のすべり方向への剪断応力である。また、 m は摩擦係数を表す。

前節 2) で求められた関東地方の矩形断層モデルに対してクーロン応力の時間変化を計算する。すべり方向 $\mathbf{w}$ は、最大剪断応力方向にとり、摩擦係数は Toda *et al.* (2011)³⁰⁾ に従い、0.4 の値を採用した。なお、摩擦係数の値を変化させると、クーロン応力自体の大きさは多少変化するものの、以下に示す断層面にかかる最大剪断応力方向や時間変化のパターンはあまり変化しなかった。図 23 (P.79) に各断層の上面にかかるクーロン応力をベクトル表示した。これらの断層は逆断層ないし横ずれ断層であるが、東北沖地震による応力変化は、いずれも 0.1 MPa 程度の正断層的な変化を引き起こすものであることが分かる。図 24 (P.79) には、これらの断層のうち、綾瀬川断層、立川断層南部、山手台地東縁断層、横浜沖断層の 4 つを選び 100 年間のクーロン応力の時間変化を表示した。各断層間の距離はせいぜい数十 km しかないにもかかわらず、北の綾瀬川断層が 100 年後でも増加傾向に

あるのに対し、南の横浜沖断層では 30 年で定常状態となり、顕著な振舞いの違いが見られる。これは、図 21 (P.78)、図 22 (P.78) で考察した震源からの距離と時定数の関係に当てはまらないように見える。このような違いは、関東では弾性的なフィリピン海スラブの存在により、南ほど粘弾性的な振舞いが抑制されるためだと考えられる。このことは、首都圏下における応力状態を考える上でのフィリピン海スラブの存在の重要性を示している。

(c) 結論ならびに今後の課題

- 1) MeSO-net で観測された自然地震の観測波形データに対して、制御震源での構造探査の概念を適応し、プレート境界などの反射面、反射強度などのマッピングの可能性が明らかになった。今後、多数の地震波形を用いた解析を行い、三次元でのプレート境界の位置と物理特性をマッピングしていく。
- 2) 大宮台地南東部において高分解能反射法地震探査を行い、緩やかな撓曲構造や断層による変位を示す可能性がある構造を見出した。今後、このような構造が地下浅部、すなわち第四紀後期の地層に及んでいるかどうかを確認するために、更に浅部のイメージングを進める必要がある。また、Ishiyama *et al.* (2013)⁹⁾などによる断面の再検討を考慮して、関東平野の断層モデルについて再検討を行った。今後取得される構造探査の結果や、ブーゲー重力異常の検討によって、順次断層モデルを改定していく。
- 3) 昨年度構築した三次元粘弾性有限要素モデルに日本列島域の弾性構造を取り入れ、このモデルにより生成した変位応答関数を用いて、地震時の地殻変動データからインバージョンにより地震時すべり分布を求めた。求めたすべり分布を用いてアセノスフェアの粘弾性緩和による余効変動・応力変化を求め、2)で求めた首都圏下の断層モデルに作用するクーロン応力を求めた。今後、余効変動データを用いて東北沖地震の余効すべり分布を求め、この影響も加味して首都圏下の応力変化を求める。

(d) 引用文献

- 1) Nishimura, T., Munekane, H. and Yarai, H.: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and its aftershocks observed by GEONET, Earth Planets Space, Vol.63, pp.631-636, 2011.
- 2) Ishibe, T., Shimazaki, K., Satake, K. and Tsuruoka, H.: Change in seismicity beneath the Tokyo metropolitan area due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, Vol.63, pp.731-735, 2011.
- 3) Ohzono, M., Yabe, Y., Iinuma, T., Ohta, Y., Miura, S., Tachibana, K., Sato, T. and Demachi, T.: Strain anomalies induced by the 2011 Tohoku Earthquake (Mw 9.0) as observed by a dense GPS network in northeastern Japan, Earth Planets Space, Vol.64, pp.1231-1238, 2012.
- 4) Takada, Y. and Fukushima, Y.: Volcanic subsidence triggered by the 2011 Tohoku earthquake in Japan, Nature Geoscience, Vol.6, pp.637-641, 2013.
- 5) 平田直, 酒井慎一, 佐藤比呂志, 佐竹健治, 瀬瀬一起: 首都直下地震防災減災特別プロジェクト①「首都圏周辺でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築」の概要, 東京大学地震研究所彙報, 84, pp.89-56, 2009.
- 6) 平田直: 地震計を用いた自然地震観測によるプレート構造調査, 文部科学省委託研究

- 首都直下地震防災・減災特別プロジェクト総括成果報告書, pp.7-14, 2013.
- 7) Nakajima, J., Hirose, F. and Hasegawa, A.: Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, *J. Geophys. Res.*, Vol.114, B08309, doi:10.1029/2008JB006101, 2009.
 - 8) 佐藤比呂志, 平田直, 岩崎貴哉, 瀨瀬一起, 伊藤潔, 伊藤谷生, 笠原敬司, 加藤直子: 大深度弾性波探査 3.1.2 北関東地殻構造探査(北関東測線 2006, 大宮ー野田測線), 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, pp.18-97, 2006.
 - 9) Ishiyama, T., Sato, H., Kato, N., Nakayama, T. and Abe, S.: Active blind thrusts beneath the Tokyo metropolitan area: Seismic hazards and inversion tectonics, *Geophys. Res. Lett.*, DOI: 10.1002/grl.50487, 2013.
 - 10) 石山達也, 佐藤比呂志, 中山俊雄, 加藤直子, 阿部進: 南関東の伏在逆断層と第四紀テクトニクス, 日本地質学会学術大会講演要旨, 2011.
 - 11) 佐藤比呂志, 笠原敬司, 平田直, 岩崎貴哉, 加藤直子, 伊藤谷生, 木村尚紀, 中山俊雄, 阿部進, 須田茂幸, 川崎慎治, 斎藤秀雄, 大西正純, 川中卓, 井川猛, 太田陽一: 首都圏における地下構造探査: 堆積平野からプレートまで, 日本地質学会関東支部-日本第四紀学会ジョイントシンポジウム「関東盆地の地下地質構造と形成史」講演資料集, S-1, pp. 12-15, 2010.
 - 12) Ozawa, S., Nishimura, T., Munekane, H., Suito, H., Kobayashi, T., Tobita, M. and Imakiire, T.: Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku earthquake, Japan, *J. Geophys. Res.*, Vol.117, B07404, doi:10.1029/2011JB009120, 2012.
 - 13) Sato, M., Ishikawa, T., Ujihara, N., Yoshida, S., Fujita, M., Mochizuki, M. and Asada, A.: Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, Vol.332, p.1395, 2011.
 - 14) Ito, Y., Tsuji, T., Osada, Y., Kido, M., Inazu, D., Hayashi, Y., Tsushima, H., Hino, R. and Fujimoto, H.: Frontal wedge deformation near the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.38, L00G05, doi:10.1029/2011GL048355, 2011.
 - 15) Maeda, T., Furumura, T., Sakai, S. and Shinohara, S.: Significant tsunami observed at ocean-bottom pressure gauges during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, Vol.63, pp.803-808, 2011.
 - 16) Kido, M., Osada, Y., Fujimoto, H., Hino, R. and Ito, Y.: Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.38, L24303, doi:10.1029/2011GL050057, 2011.
 - 17) Hino, R., Ito, Y., Suzuki, K., Suzuki, S., Inazu, D., Iinuma, T., Ohta, Y., Fujimoto, H., Shinohara, M. and Kaneda, Y.: Foreshocks and mainshock of the 2011 Tohoku Earthquake observed by ocean bottom seismic/geodetic monitoring, 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 5-9 Dec., Abstract U51B-0008, 2011.
 - 18) Nakajima, J. and Hasegawa, A.: Anomalous low-velocity zone and linear alignment of seismicity along it in the subducted Pacific slab beneath Kanto, Japan: Reactivation of subducted fracture zone?, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.33, L16309, doi:10.1029/2006GL026773,

2006.

- 19) Kita, S., Okada, T., Hasegawa, A., Nakajima, J. and Matsuzawa, T.: Anomalous deepening of a seismic belt in the upper-plane of the double seismic zone in the Pacific slab beneath the Hokkaido corner: Possible evidence for thermal shielding caused by subducted forearc crust materials, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol.290, pp.415-426, 2010.
- 20) Matsubara, M., Obara, K. and Kasahara, K.: Three-dimensional P- and S-wave velocity structures beneath the Japan Islands obtained by high-density seismic stations by seismic tomography, *Tectonophysics*, Vol.454, pp.86-103, 2008.
- 21) Matsubara, M. and Obara, K.: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake related to a strong velocity gradient with the Pacific plate, *Earth Planets Space*, Vol.63, pp.663-667, 2011.
- 22) Miura, S., Takahashi, N., Nakanishi, A., Tsuru, T., Kodaira, S. and Kaneda, Y.: Structural characteristics off Miyagi forearc region, the Japan Trench seismogenic zone, deduced from a wide-angle reflection and refraction study, *Tectonophysics*, Vol.407, pp.165-188, 2005.
- 23) Dziewonski, A.M. and Anderson, D.L.: Preliminary reference Earth model, *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol.25, pp.297-356, 1981.
- 24) Nakajima, J., Matsuzawa, T., Hasegawa, A. and Zhao, D.: Three-dimensional structure of Vp, Vs, and Vp/Vs beneath northeastern Japan: Implications for arc magmatism and fluids, *J. Geophys. Res.*, Vol.106, pp.21843-21857, 2001.
- 25) Iinuma, T., Hino, R., Kido, M., Inazu, D., Osada, Y., Ito, Y., Ohzono, M., Tsushima, H., Suzuki, S., Fujimoto, H. and Miura, S.: Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data, *J. Geophys. Res.*, Vol.117, B07409, doi:10.1029/2012JB009186, 2012.
- 26) Diao, F.Q., Xiong, X. and Zheng, Y.: Static slip model of the Mw 9.0 Tohoku (Japan) earthquake: Results from joint inversion of terrestrial GPS data and seafloor GPS/acoustic data, *Chinese Science Bull.*, Vol.57, pp.1990-1997, 2012.
- 27) Reasenber, P.A. and Simpson, R.W.: Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta Earthquake, *Science*, Vol.255, pp.1687-1690, 1992.
- 28) Hardebeck, J.L., Nazareth, J.J. and Hauksson, E.: The static stress change triggering model: Constraints from two southern California aftershock sequences, *J. Geophys. Res.*, Vol.103, pp.24427-24437, 1998.
- 29) Fukahata, Y. and Matsu'ura, M.: Quasi-static internal deformation due to a dislocation source in a multilayered elastic/viscoelastic half-space and an equivalence theorem, *Geophys. J. Int.*, Vol.166, pp.418-434, 2006.
- 30) Toda, S., Lin, J. and Stein, R.S.: Using the 2011 Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake to test the Coulomb stress triggering hypothesis and to calculate faults brought closer to failure, *Earth Planets Space*, Vol.63, pp.725-730, 2011.
- 31) 杉山雄一, 佐竹健治, 駒澤正夫, 須貝俊彦, 井村隆介, 水野清秀, 遠藤秀典, 下川浩一, 山崎晴雄, 石田瑞穂, 広島俊男, 長谷川功, 村田泰章: 50 万分の 1 活構造図「東京」(第 2 版) および説明書, 活構造図 8, 地質調査所, 1997.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所（学会等名）	発表時期	国際・国内の別
有限要素法による日本列島域における2011年東北沖地震の余効変動シミュレーション（口頭）	橋間昭徳, A. Freed, 佐藤比呂志, 西村卓也, D. Okaya, 石山達也, 松原誠, 岩崎貴哉, T.W. Becker	日本地球惑星科学連合 連合大会 2013 年大会（千葉市）	2013年5月23日	国内
外部イベントによる応力変化が房総沖スロースリップの発生間隔に与える影響の定量的評価（ポスター）	山崎隆史, 佐藤利典, 芝崎文一郎, 橋間昭徳, 廣瀬仁	日本地震学会 2013 年度秋季大会（横浜市）	2013年10月7日	国内
日本列島域の 3 次元的プレート構造を考慮した2011年東北沖地震による地殻変動（口頭）	橋間昭徳, A. Freed, T. W. Becker, 佐藤比呂志, D. Okaya, 水藤尚, 畑中雄樹, 松原誠, 武田哲也, 石山達也, 岩崎貴哉	日本地震学会 2013 年度秋季大会（横浜市）	2013年10月9日	国内
1995 年兵庫県南部地震後の 2013 年淡路島地震周辺への 粘弾性的応力再配分（ポスター）	橋間昭徳, 石辺岳男	日本地震学会 2013 年度秋季大会（横浜市）	2013年10月9日	国内
Coseismic deformation due to the 2011 Tohoku earthquake: influence of 3-D plate structure around Japan（ポスター）	A. Hashima, A.M. Freed, T.W. Becker, H. Sato, D. Okaya, H. Suito, Y. Hatanaka, M. Matsubara, T. Takeda, T. Ishiyama, T. Iwasaki	American Geophysical Union, 2013 Fall Meeting（サンフランシスコ）	2013年12月9日	国際

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文（論文題目）	発表者氏名	発表場所 （雑誌等名）	発表時期	国際・国内の別
Quasi-static strain and stress fields due to a moment tensor in elastic-viscoelastic layered half-space	Hashima, A., Fukahata, Y., Hashimoto, C., and Matsu'ura, M.	Pure and Applied Geophysics	2014年3月	国際
Active blind thrusts beneath the Tokyo metropolitan area: Seismic hazards and inversion tectonics	Ishiyama, T., Sato, H., Kato, N., Nakayama, T., and Abe, S.	Geophysical Research Letters	2013年6月	国際

マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 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26年度業務計画案

首都圏の断層モデルの高度化のため、武蔵野台地北東縁で反射法地震探査などの変動地形・地球物理学的な調査を実施する。地殻・プレート構造を反映させたより高度な粘弾性有限要素モデルを構築し、地殻変動データとの比較によりモデルの高度化を図る。さらに首都圏下の既存の弱面に作用するクーロン応力の粘弾性的変化を求める。