

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 26 年度業務目的

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。

(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 26 年度の成果

(a) 業務の要約

- 1) 武蔵野台地北東縁部を横切る反射法地震探査を実施するとともに、反射法解析を行い、伏在断層のイメージングを行った。
- 2) 首都圏の地下構造を推定するために、既存重力データを収集するとともに 50 点の重力測定を行い、ブーゲー重力異常図と各種微分フィルタ処理を施した重力異常図を作成した。
- 3) 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を高度化した。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た。

(b) 業務の成果

1) 武蔵野台地北東縁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。大都市大震災軽減化特別プロジェクト（大大特）で実施された北関東測線では、荒川低地北部に東傾斜の伏在逆断層が捉えられ、少なくとも中部更新統を変形させていることが指摘された（Ishiyama *et al.*, 2013¹⁾）。しかし、その分布については不明である。そこで、Ishiyama *et al.*

(2013)¹⁾で指摘された伏在逆断層の分布を明らかにする目的で、武蔵野台地北東縁部において、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、埼玉県狭山市掘兼から川越市、ふじみ野市を経て富士見市東大久保に至る約 11 km の区間である（図 1、P.57）。本観測は 2015 年 2 月 20 日から同 3 月 1 日の 10 日間に実施した。主な観測パラメーターを表 1 に示す。本測線を設定するにあたり、大大特・北関東測線の結果（佐藤・他、2006²⁾；佐藤・他、2010³⁾；Ishiyama *et al.*, 2013¹⁾）を参考にした（図 2、P.58）。すなわち、北関東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、その下方延長には東傾斜の正断層で境された半地溝構造が認められる。このことから、ここでは中新世に形成された半地溝構造を構成する正断層が第四紀に再活動したと解釈される。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.*, 2013¹⁾）。北関東測線で認められるこの伏在逆断層の直上には沖積低地面が広範に分布するが、ここでは明瞭な変動地形は認められない。一方、この南方に広がる武蔵野面上には、断続的に東側低下の低崖地形が認められる。そこで、このような低崖地形を横断する高分解能反射法地震探査の測線を設定した。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 1 台から 4 台使用し、標準 10m 間隔の発震点を 894 点確保した（図 3、P.58）。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 1002 点に固定展開し、観測を実施した（図 4、P.59）。また、精度良い速度構造の推定と深部反射の観測を主な目的として、低重合反射法探査及び屈折法地震探査を実施した。主な調査仕様を表 1（P.54）に示す。

図 5～7（P.60～P.62）に典型的な浅層高分解能反射法の発震記録を示す。狭山市での発震記録（図 5、P.60）では、中型バイブレータ 4 台による 3 回重合の記録であるが、ふじみ野市市街地の高ノイズ区間に阻害され、確認できる屈折初動はオフセット距離 2.8km 付近までに限定される。一方、反射波は往復走時 1.5 秒付近まで確認できる。測線中央部のふじみ野市での発震記録（図 6、P.61）では、同様に中型バイブレータ 4 台による 3 回重合の記録であるが、オフセット距離約 4 km まで初動を確認できる。また、往復走時 1 秒付近までの反射波と、往復走時 2 秒付近の反射波を確認できる。図 7（P.62）に測線東端部の富士見市での発震記録を示す。中型バイブレータ 4 台による発震記録であるが、ふじみ野市市街地の高ノイズ区間に阻害され、確認される屈折初動はオフセット距離約 2km 付近までに限定される。

同様に、図 8～10（P.63～P.65）に典型的な屈折法及び低重合反射法バイブレータ発震記録を示す。同図 8 には埼玉県狭山市での発震記録を示す。中型バイブレータ 4 台による 20 回重合の記録であり、屈折初動は一部不明瞭な区間があるものの、発震点から測線東端付近まで確認できる。

これら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標準的な反射法データ処理フローによるデータ解析を行った（図 11、

P.66)。以下に主な処理ステップについて記述する。

(1) フォーマット変換及びデータ編集 (Format Conversion and Trace Edit)

フィールドデータとして記録された原記録(SEG-D Format)について、Super X (JGI Internal Format)フォーマットへ変換を行った。また、バイブレータ発震記録は、発震測線に関して下記の発震記録を発震点番号の昇順に従って抽出した反射法データ解析結果には、本調査で取得された全ての発震記録 (VP1~VP1002、計 894 点) の寄与が含まれている。さらに、S/N 比が著しく低く、初動が判別できないトレースを処理対象から除外した。

(2) トレースヘッダーへの測線情報の入力 (Geometry Application)

Super X トレースヘッダーに関して、発震点、受振点及び各 CMP のインデックス、座標、標高値、オフセット距離、基準面標高値等の測線情報を入力した。データ解析における基準標高面は標高 0m に設定した。また、CMP 重合測線は CMP 間隔 5.0m、重合測線からの最大偏倚は制限無しとし、受振測線の屈曲度及び想定される構造の走向に直交するように重合測線を決定した。

(3) 屈折波初動解析 (Refraction Analysis)

改良型タイムターム法による屈折初動解析を行い、受振点及び発震点タイムターム値と表層基底層速度を算出した。改良型タイムターム法解析には、以下のパラメーターが採用された。初動読み取り位相：正のピーク位置、表層基底速度を求める際のブロック区分：1000m、屈折波インバージョンに用いるオフセット距離：150-500m

また、改良型タイムターム法解析の結果を用いて、表層速度として受振点側及び発震点側共に 600m/sec を採用し、表層基底深度を計算した。

(4) 最小位相変換 (Minimum Phase Conversion)

バイブレータ発震記録については、零位相であるバイブレータ震源のスィープ波形について、最小位相変換処理を適用した。

(5) 振幅補償 (Gain Recovery)

弾性波の震源からの伝播に伴う幾何減衰、多層構造内を透過、多重反射することによる伝播損失及び非弾性効果による減衰、さらには受振点、発震点毎のカップリングの相異に起因する振幅特性の変化を補償することを目的として、自動振幅調整による振幅補償を行った。Instantaneous AGC：ウィンドー長 600msec

(6) デコンボリューション (Deconvolution)

基本波形を地震トレースから推定・除去し、記録の分解能向上を図るために以下に示すデコンボリューションを適用した。予測距離：4.0 msec、設計ゲート：2000 msec、オペレータ長：300 msec、プリホワイトニングファクター：5.0%

(7) 共通反射点編集 (Common Midpoint Sorting)

上述(2)のパラメーターによって、共通反射点の編集を行った。

(8) 重合速度解析 (Stacking Velocity Analysis)

以下に示す定速度重合法による速度解析を実施した。図 12 (P.66) に重合速度プロファイルを示す。

(9) NMO 補正 (Normal Moveout Corrections)

速度解析によって求めた重合速度-時間の関数を時間-空間方向に内挿し、速度テーブルに従って NMO 補正を適用した。ストレッチミュートファクターは 2.0 とした。

(10) ミュート(Outside Mute)

NMO 補正に伴う波形の伸長及び far オフセット側に残留する屈折波初動部分を抑制する目的で、ミュート処理を全 CMP アンサンブルについて設計・適用した。

(11) 残差静補正 (Residual Static Corrections)

NMO 補正後の CMP アンサンブルを入力として、基準トレースとの相互相関関数から得られる最大ラグ値を用いて Surface-consistent な発震点、受振点残差静補正量を統計的に計算し、これを適用した。時間シフトの最大許容値： 4 msec、時間ウィンドウ：100-1500 msec

(12) 共通反射点重合処理 (CMP Stacking)

NMO 補正および残差静補正適用後の共通反射点アンサンブルに関して、以下の有効オフセット距離について水平重合処理を実施した。

(13) 帯域通過フィルター (Bandpass Filter)

反射波の有効周波数帯域が周波数成分析によって決定され、以下の零位相帯域通過フィルターを採用した。オペレータ長：1000 msec、通過帯域 100 ms：15-80 Hz、1000 ms：10-50 Hz、1500 ms：8-24 Hz

(14) 基準面補正 (Datum Corrections)

浮動基準面から基準面への時間補正を適用し、図 13 (P.67) に示す CMP 重合時間断面図を得た。

(15) 時間マイグレーション (Time Migration)

時間断面上の反射点位置を実際の位置に移動させ、回折波を回折点に復元することを目的として、時間-空間座標領域における差分法時間マイグレーションを実施した。マイグレーション処理では以下のパラメーターを用いた。下方接続ステップ幅：4 msec、最大傾斜角度：45 度

(16) 深度変換 (Depth Conversion)

図 12 (P.66) に示した重合速度プロファイルを時空間方向に平滑化した平均速度分布を

用いて、vertical Stretch 法による深度変換を実施した。

以上の処理ステップを逐次経ることによって、図 13 (P.67) の CMP 重合時間断面図、図 14 (P.67) の重合後時間マイグレーション断面図が得られた。また、これらの重合記録及び重合後時間マイグレーション記録を用いて深度変換を実施した結果を、図 15 (P.68) に示した。深度断面図をみると、CMP800 付近を境に西側で上総層群相当の反射面群の傾斜が東に比べて急になっており、緩やかな東向きの撓曲構造が認められる。今後、武蔵野台地の変動地形を再検討すると共に、次節で述べる重力異常のデータや北関東測線など既存の反射断面を再検討し、今回見出された撓曲構造の分布や第四紀後期における活動性を検討する。

2) 首都圏の重力探査および解析

先述のように、近年精力的に取得されつつある地下構造探査によって、首都圏の震源断層の分布や構造が明らかになりつつある。しかし、反射法地震探査などの地下構造探査は殆どの場合二次元探査であることから、特に地表における変形の証拠に乏しい活構造の場合、得られた断面のみではイメージングされた伏在断層の長さを知ることは困難である。一方、大大特・北関東断面の解釈で示されたように、伏在活断層の多くは中新世に形成された半地溝を構成する正断層の再活動である (Ishiyama *et al.*, 2013¹⁾)。したがって、上総・下総層群の下位に伏在中新世の半地溝の分布を解明し、反射断面と組み合わせることによって、伏在活構造の分布をある程度明らかにすることが出来ると期待される。

このような背景から、首都圏を含む関東の広域で既存の重力データを収集した。既存測定点の分布を検討した結果、測点密度が疎な地域を選定し、50 点にて重力測定を実施した (図 16、P.69)。重力測定には La-Coste & Romberg 社製 G 型重力計 (G-366) を用いた。各測定点においては、測定回数 3 回以上、読取値が $\pm 10 \mu \text{Gal}$ 以内で再現できるまで測定を繰り返して測定を行なった。重力計の仕様を表 2 (P.55) に示す。

取得した重力値と、既存の重力値 (地質調査総合センター(編)、2013⁴⁾) を使用して、仮定密度 (2.28g/cm^3)、グリッドサイズ 200m のブーゲー異常図を作成した。また、深部構造の広域傾向面のトレンドである長波長成分を除去するため、ブーゲー異常に対して上方接続高度 7 km の上方接続フィルタを適用した。また、ブーゲー異常より上記の上方接続の傾向面を除去して、上方接続残差重力異常を算出した (図 17、P.69)。

このようにして算出された上方接続残差重力異常に上方接続高度 500m のフィルタを適用し、7km の上方接続残差から除去してから微分フィルタを適用したものを作成した (図 18、図 19、P.70)。上方接続残差重力異常 (接続高度 7km) は、解析範囲の基盤構造を概ね反映していると考えられる。上方接続残差重力異常に残存する長波長成分をカットして、さらに上方の浅部構造を抽出するために、残差重力異常に対して 2 次元 FFT を用いた周波数解析を行った。除去する長波長成分に対応するカットオフ波数を特定した。深度推定図で傾斜が変化する波数で、3 点のカットオフ波数を以下のように設定した。

番号	カットオフ波数 (cycle/m)	波長 (km)
K0	2.4×10^{-5}	41.7
K1	3.2×10^{-5}	31.3
K2	4.0×10^{-5}	25.0

各カットオフ波数でのバンドパスフィルタリングによる残差重力異常を算出した。波数 k_1 における残差重力異常図を図 20 (P.71) に示す。さらに、各カットオフ波数での残差重力異常に対して、鉛直 1 次微分、水平 1 次微分を実施し、構造境界に関する異常図を作成した。このうち、波数 k_1 における鉛直 1 次微分を図 21 (P.71) に、水平 1 次微分を図 22 (P.72) に示す。合わせて、高度 500m の上方接続前の重力異常にカットオフ波数 k_1 のバンドパスフィルタリングを適用し、算出した重力異常の鉛直 1 次微分を図 23 (P.72) に、水平 1 次微分を図 24 (P.73) に示す。また構造の傾向を認識し易くする目的で、各カットオフ波数での陰影図を作成した。陰影図の傾向としては、光源の方位は $0^\circ \sim 135^\circ$ の間で構造が識別しやすく、 45° の場合が全体の構造傾向を良く反映していると考えられる。緯度 36° 以北では南北系の構造が、また 36° より南では東西系の構造が判別できる。ここでは、波数 k_1 の場合について、光源の仰角を 45° 、光源の方位 45° とした場合の陰影図を図 25 (P.73) に示す。

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。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を進め、首都圏の断層モデルを改定していく予定である。

なお、既存重力の収集に際しては、独立行政法人産業技術総合研究所・伊藤 忍主任研究員に多大なご協力を頂いた。また、国土地理院・石油資源開発株式会社・国際石油開発帝石にはデータ使用許可を頂いた。ここに記して謝意を表す。

3) 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

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.*, 2011⁵⁾)。関東地方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.*, 2011⁶⁾)。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リングが欠かせない。

本業務では、平成 25 年度までに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 (FEM) を構築し、このモデルによって生成した変位応答関数を用いて東北沖地震による地殻変動データから東北沖地震の本震すべり分布を求めた。さらにこのすべり分布を用いて、有限要素モデルでアセノスフェアの粘弾性緩和により東北沖地震後に関東地方の伏在断層におけるクーロン応力変化を見積もった。上記の計算で仮定した弾性構造は基本的に地殻-マントルの成層構造であり、求めた東北沖地震のすべり分布はその基本的な特徴を反映していると考えられる。しかし、近年の地震波トモグラフィーにより、東北地方下の地殻構造不均質が明らかにされてきた (例えば、Nakajima *et al.*, 2001⁷⁾ ; Matsubara *et al.*, 2008⁸⁾)。一方、東北沖地震時の地殻変動データには地殻内部の弾性不均質に由来する変形異常の存在が指摘されている (Ohzono *et al.*, 2012⁹⁾ ; Takada and Fukushima, 2013¹⁰⁾ ; Ozawa and Fujita, 2013¹¹⁾)。FEM はこのような地下の内部構造による地殻変動の効果を見積もるの

に適した手法である。そこで今年度の業務として、東北地方下の弾性不均質が東北沖地震の地殻変動におよぼす効果を検証した。

a) 2011 年東北地方太平洋沖地震の地殻変動に対する東北地方下の弾性不均質の影響

まず、昨年度用いた FEM モデルと地殻変動データからインバージョン解析により求めたすべり分布を用いて、GPS 観測点における地表変動を計算する。図 26(a) (P.74) に実際に観測された変位ベクトルと計算による変位ベクトルを並べて示す。この図では、特に陸上では計算変位は観測変位をほとんど説明しているように見える。しかし観測値から計算値を差し引いた残差の大きさは東北地方で数 cm であり、観測誤差よりは有意に大きい量である (図 26b, c)。図 26(b) (P.74)、図 26(c) (P.74) からは残差ベクトルの向きが地域的な特徴を持つことがわかる。特徴的なものは三陸海岸の西向きベクトル、北上低地帯をはさんだ東向きベクトルと西向きベクトルの領域、いわき沿岸の西向きベクトルが挙げられる。また、ベクトルの大きさ自体は小さいものの、男鹿半島以南の日本海沿岸は東向きベクトルであり、男鹿半島から飛鳥、粟島を経て佐渡島には西向きベクトルを示している。Ohzono *et al.* (2012)⁹⁾は、東北沖地震時の GPS 観測点における変位からひずみ分布を求め、さらに Nishimura *et al.* (2011)⁵⁾の矩形断層モデルを用いて計算したひずみ分布を差し引いて東西ひずみの残差分布を示した。彼らの結果は三陸海岸沿い、いわき沿岸から北上低地帯に沿った地域の東西短縮のひずみと日本海沿岸の東西伸張のひずみが現れているが、ひずみは変位の微分であることを考えれば、図 26 (P.74) の変位残差ベクトル分布は彼らの研究と調和的な結果であるといえる。

Ohzono *et al.* (2012)⁹⁾は、このようなひずみの残差が起こる原因を地殻の弾性不均質にあると述べている。そこで、まず弾性不均質の存在が引き起こす変位異常の基本的な性質を示す。弾性不均質領域の位置を図 27(a-c) (P.74) の矩形領域の地下に設定する。その深さは(a) 5-15 km、(b) 20-30 km、(c) 45-55 km の 3 通りを考えた。設定した領域には、周囲の同じ深さの弾性体に比べて剛性率を 20 GPa 大きくした。ポワソン比は周囲と同じ値 0.25 で固定した。それぞれの計算において、すべり分布は昨年度の業務で得たものを用いる。得られた変位場から不均質領域を設定しない場合の変位場の差をとることでそれぞれ不均質の影響を見ることができる。図 27(a-c) (P.74) からは、弾性不均質をどの深さにおいても不均質領域を挟むように東側に西向き、西側に東向きの変位 (東西短縮) が生ずることが見て取れる。また、変位の大きさは東側の西向きベクトルが大きい。不均質領域の深さが深くなると、変位パターンはほぼ同じだがベクトルの大きさは小さくなり東向きベクトルと西向きベクトルの転換点がやや西にずれる等の変化が見られる。深さ 40 km 以上になると、ベクトルの大きさは 1 cm 以下となり、観測誤差以下となる (図 27c, P.74)。したがってマントルにおける弾性不均質はほとんど地表変位に寄与しないと考えてよい。このような変位場は不均質領域と周囲の剛性率の差に比例する。不均質領域の位置と形状とがほぼ同じであれば、不均質領域の体積にもほぼ比例する。したがって、剛性率がまわりよりも小さい場合は図 27 (P.74) とは逆に東西伸張的な変位パターンが見られる。また、鉛直変位場についてはいずれの場合もせいぜい 1 cm 程度となったので、ここではその効果を考慮しないことにする。

このような弾性不均質による東北沖地震による地表変位パターンの性質をもとに、図

26(b-c) (P.74) の変位残差ベクトルを検討すると、三陸海岸やいわき沿岸の強い西向きベクトルは地下での高剛性率領域を、北上低地帯と日本海側の東西伸張変位パターンが地下の低剛性率領域を示唆している。実際に、三陸海岸やいわき沿岸の地下ではマントル物質の上昇によりモホ面が浅くなっており (Matsubara and Obara, 2011¹²⁾)、日本海東縁や北上低地帯では堆積層が形成されている。そこでこれらの領域におおまかに弾性不均質領域を設定し、図 26(b) (P.74) の残差ベクトル分布との対応を調べる。日本海沿岸と北上低地帯には地表から深さ 5 km にかけて周囲より 12 GPa 小さい低剛性率領域を、三陸海岸といわき沿岸には深さ 20 km から深さ 30 km にかけて周囲より 20 GPa 大きい高剛性率領域を多角形状に設定し、それぞれの場合について FEM を用いて変位パターンを計算した (図 28、P.75)。それぞれのパターンは図 26 (P.74) の変位パターンの特徴をよく再現できている。

これらの変位パターンを用いて観測変位場から弾性不均質の影響を除去し、新たな変位場に対してインバージョンを行ってすべり分布を求める。ただし、図 28 (P.75) の計算に用いた各不均質領域の剛性率の値や形状には任意性があるので、適当な係数を乗じて図 26 (P.74) の変位パターンになるべく近くなるようにする。それぞれの係数は試行錯誤的にもとめ、日本海沿岸北部で 1、日本海沿岸南部で 2、北上低地帯では 1、三陸海岸で 3、いわき沿岸で 2 とした。インバージョンに用いる変位応答関数は FEM を用いて計算した。ただし昨年度の業務で用いたモデルに比べ、すべり領域を広くとり相模トラフ、伊豆小笠原海溝下のプレート境界の影響も考慮できるように改善したものを用いた。得られた東北沖地震のすべり分布および観測変位から計算変位を差し引いた残差ベクトルを図 29 (P.76) に示す。東北沖地震のすべり分布は最大すべり量が 38.5 m でモーメントマグニチュード (Mw) は平均剛性率を 40 GPa として 9.1 となった。一方で残差ベクトル図を見ると、日本海沿岸、北上低地の堆積層による残差はよく除くことができているが、三陸海岸、いわき沿岸周辺では依然として残差が残る。これは深部の不均質は、より長波長の変位パターンを作り出すために、短波長の残差が残ってしまうことによる。

得られたすべり分布をもとに関東地方の伏在断層におけるクーロン応力の変化を計算した (図 30a、b、P.76)。断層形状は昨年度の業務で得たものをを用いた。すべり方向は立川断層南部では左横ずれとした。その他の断層ではすべり方向を指し示す地質学的、変動地形学的な証拠が伏在断層では得られないために、本計算では東北沖地震による最大剪断すべり方向のクーロン応力をベクトルにて表示した。昨年度の業務で計算したものに比べると、フィリピン海プレート上のすべりによる効果が加わっているが、時間変化の傾向 (図 30c、P.76) は変わらなかった。

(c) 結論ならびに今後の課題

- 1) 武蔵野台地北東縁部を横切る反射法地震探査を実施するとともに、反射法解析を行い、伏在断層のイメージングを行った。その結果、これまで確認されていなかった東向き撓曲構造が伏在することが明らかになった。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、変動地形調査や浅部のイメージングを進める必要がある。
- 2) 首都圏の地下構造を推定するために、既存重力データを収集するとともに 50 点の重力

測定を行い、ブーゲー異常図を作成し、微分フィルタ処理を行った。今後取得される構造探査の結果や、今回得られたブーゲー重力異常の検討によって、首都圏の断層モデルを改定していく予定である。

- 3) 有限要素モデルに東北日本下の弾性不均質を取り入れ、東北沖地震の地殻変動に対する不均質構造の効果を検証した。特に日本海沿岸や北上低地帯の堆積盆に関しては、地殻変動に対する弾性不均質の効果を説明することができた。観測された地殻変動データからこれらの効果を取り除いた上ですべりインバージョンを行った。その結果、計算した地殻変動と観測データのフィッティングは向上したが、すべり分布そのものには弾性不均質は大きな影響が見られなかった。したがって、今後東北沖地震によるクーロン応力計算を効率的に行っていくためには、対象領域である関東地方の伏在断層周辺の弾性構造を取り入れればよいということが明らかになった。

(d) 引用文献

- 1) Ishiyama, T., Sato, H., Kato, N., Nakayama, T., and Abe, S.: Active blind thrusts beneath the Tokyo metropolitan area: Seismic hazards and inversion tectonics, *Geophysical Research Letters*, DOI: 10.1002/grl.50487, 2013.
- 2) 佐藤比呂志, 平田直, 岩崎貴哉, 額額一起, 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-野田測線), 大都市大震災軽減化特別プロジェクト 1 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.
- 3) 佐藤比呂志, 笠原敬司, 平田直, 岩崎貴哉, 加藤直子, 伊藤谷生, 浅尾一己, 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.
- 4) 地質調査総合センター(編), 日本重力データベース DVD 版, 数値地質図 P-2, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2013.
- 5) Nishimura, T., Munekane, H. and Yurai, 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.
- 6) 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.
- 7) 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, *Journal of Geophysical Research*, Vol.106, pp.21843-21857, 2001.
- 8) 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.
- 9) 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 (M_w 9.0) as observed by a dense GPS network in northeastern Japan, *Earth Planets Space*, Vol.63, pp.1231-1238, 2012.

- 10) Takada, Y. and Fukushima, Y.: Volcanic subsidence triggered by the 2011 Tohoku earthquake in Japan, *Nature Geoscience*, Vol.6, pp.637-641, 2013.
- 11) Ozawa, T. and Fujita, E.: Local deformations around volcanoes associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Journal of Geophysical Research*, Vol.118, pp.390-405, 2013.
- 12) 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.

(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
2011 年東北沖地震後の首都圏周辺断層にかかる応力への粘弾性的影響（口頭）	橋間昭徳, A.M. Freed, T.W. Becker, 佐藤比呂志, D.A. Okaya, 水藤尚, 畑中雄樹, 松原誠, 武田哲也, 石山達也, 岩崎貴哉	日本地球惑星科学連合 連合大会 2014 年大会（横浜市）	2014 年 5 月 1 日	国内
Coseismic deformation due to the 2011 Tohoku earthquake and its stress transfer（ポスター）	A. Hashima, A.M. Freed, T.W. Becker, H. Sato, D.A. Okaya, H. Suito, Y. Hatanaka, M. Matsubara, T. Takeda, T. Ishiyama, T. Iwasaki	Asia Oceania Geosciences Society, 11 th Annual Meeting（札幌市）	2014 年 8 月 1 日	国際
2011 年東北沖地震の地震時すべり：日本列島域の 3 次元弾性構造の影響と周辺域の断層にかかる応力（ポスター）	橋間昭徳, T.W. Becker, A. Freed, 佐藤比呂志, D. Okaya, 水藤尚, 矢来博司, 松原誠, 武田哲也, 石山達也, 岩崎貴哉	日本地震学会 2014 年度秋季大会（新潟市）	2014 年 11 月 24 日	国内
濃尾地震断層域におけるレシーバ関数解析結	飯高隆, 橋間昭徳, 五十嵐俊博, 岩崎	日本地震学会 2014 年度秋季	2014 年 11 月 26 日	国内

果に基づく地殻構造のモデリング（口頭）	貴哉，加藤愛太郎，濃尾地震断層域合同地震観測グループ	大会（新潟市）		
Coseismic deformation due to the 2011 Tohoku, Japan, earthquake: influence of 3-D elastic heterogeneity（ポスター）	A. Hashima, T.W. Becker, A.M. Freed, H. Sato, D.A. Okaya, H. Suito, Y. Hatanaka, M. Matsubara, T. Takeda, T. Ishiyama, T. Iwasaki	American Geophysical Union, 2014 Fall Meeting（サンフランシスコ）	2014 年 12 月 17 日	国際

学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

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 27 年度業務計画案

首都圏の断層モデルの高度化のため、富士山東麓部の伏在断層を対象に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。地殻変動解析等より得られた現実的な粘性構造を三次元有限要素モデルに取り込み、クーロン応力変化計算手法の高度化を図る。課題(1)a、c と連携して計算したクーロン応力変化と首都圏域の地震活動の関係を解明する。

表 1 反射法および屈折法地震探査の観測パラメーター一覧

調査項目/測定諸元	高分解能反射法地震探査	屈折法及び低重合反射法地震探査
発震種別	バイブレータ稠密発震	バイブレータ高エネルギー発震
測線長	10.74 km	10.74 km
調査測線位置概要	受振器展開は全区間。 測線上に標準 10m 間隔で発震点を設定	受振器展開は全区間。 測線上に標準 500m 間隔で発震点を設定。
発震系パラメーター		
震源	中型バイブレータ (EnviroVib)	中型バイブレータ (EnviroVib)
バイブレータ台数	1-4 台	2 台もしくは 4 台
標準発震点間隔	10 m	500 m
発震区間	10.74 km (道路沿い)	10.74 km(道路沿い)
スイープ長	16 sec	20 sec
発震回数/発震点	2-3 回	20 回
スイープ周波数	8～90Hz	8～40Hz
バイブレータアレイ長	B-B	B-B
総発震点数	891 点	21 点
受振系パラメーター		
受振点間隔	10m, 20m	
受振器種別	SM-24 10Hz, GS-1 10Hz	
受振器数/受振点	3 個組, シングル	
展開パターン	固定展開	
展開長	10.74 km	
総受振点数	1030 点(オフセット受振点 28 点を含む)	
展開設定に関する特記事項	受振点 2001-2028 区間は受振のみのオフセット受振点	
記録系パラメーター		
サンプルレート	4msec	4msec
チャンネル数	1030(固定)	1030(固定)
プリアンプゲイン	30dB	30dB
記録長	連続観測(データ取得後に下記パラメータにて編集作業を実施)	

Diversity Edit パ ラメータ	W=2.0sec(Ovl=1.0sec) $\alpha=3.0$	W=2.0sec(Ovl=1.0sec) $\alpha=3.0$
相互相関	CAS	CAS
編集後記録長	6 sec	12 sec

表 2 重力計の仕様

名称形式	La-Coste & Romberg, INC. Model G Geodetic Gravity Meter
No.	366
観測範囲	0～7386.54 mgal
恒温槽温度	51.7℃
Reading Line	2.90
購入年月	1974 年 9 月
本体寸法	17×15×22 (cm)
本体重量	9.1 kg

表 3 測定重力データ（平面直角座標系・系番号 IX を使用）

測点 番号	緯度(m)	経度 (m)	地盤標高 (m)	絶対重力値 (mGal)	正規重力値 (mGal)	地形補 正值 (mGal)	ブーゲー異 常値 (mGal)
1	3549.18	13939.35	4.607	979,808.500	979,803.688	0.072	6.635
2	3549.06	13941.44	4.314	979,808.188	979,803.563	0.058	6.441
3	3549.15	13943.39	3.779	979,809.313	979,803.688	0.046	7.314
4	3548.76	13943.86	3.422	979,808.375	979,803.125	0.044	6.860
5	3549.15	13944.98	4.363	979,811.000	979,803.688	0.039	9.122
6	3548.47	13945.61	4.284	979,808.625	979,802.688	0.035	7.702
7	3549.10	13946.73	4.407	979,812.625	979,803.625	0.030	10.837
8	3548.57	13947.37	3.074	979,811.125	979,802.813	0.028	9.810
9	3547.94	13946.17	4.193	979,807.063	979,801.938	0.034	6.888
10	3547.33	13945.66	3.198	979,804.438	979,801.063	0.036	4.928
11	3546.92	13945.93	1.892	979,803.750	979,800.500	0.036	4.535
12	3547.53	13943.89	11.482	979,801.500	979,801.375	0.097	3.461
13	3548.17	13942.61	2.187	979,805.313	979,802.250	0.052	4.385
14	3548.10	13941.56	12.522	979,802.375	979,802.188	0.121	3.738
15	3548.10	13940.62	4.075	979,803.875	979,802.188	0.066	3.449
16	3548.33	13939.39	2.755	979,804.625	979,802.500	0.075	3.589
17	3547.63	13939.14	4.437	979,800.625	979,801.500	0.083	0.941
18	3547.01	13939.72	5.272	979,797.563	979,800.625	0.098	-1.052

19	3546.68	13940.86	5.250	979,797.375	979,800.125	0.082	-0.775
20	3546.78	13941.67	5.717	979,798.563	979,800.313	0.099	0.360
21	3546.25	13941.48	14.888	979,793.875	979,799.500	0.074	-1.615
22	3547.03	13943.92	2.165	979,801.688	979,800.625	0.046	2.381
23	3546.13	13946.29	1.825	979,801.750	979,799.375	0.036	3.657
24	3546.43	13947.25	0.274	979,804.250	979,799.813	0.031	5.393
25	3544.91	13944.42	23.588	979,791.188	979,797.625	0.076	-0.533
26	3545.48	13943.53	19.974	979,792.625	979,798.438	0.053	-0.685
27	3545.59	13942.71	17.921	979,792.438	979,798.563	0.055	-1.460
28	3545.15	13941.75	25.565	979,786.500	979,797.938	0.062	-5.153
29	3545.38	13940.97	31.275	979,785.000	979,798.250	0.066	-5.765
30	3545.73	13939.79	30.877	979,785.188	979,798.750	0.070	-6.161
31	3546.13	13938.53	35.507	979,784.813	979,799.375	0.080	-6.131
32	3539.28	13935.98	39.107	979,754.188	979,789.563	0.121	-26.210
33	3540.64	13935.83	48.952	979,755.063	979,791.500	0.102	-25.172
34	3541.94	13936.03	47.699	979,758.063	979,793.375	0.102	-24.305
35	3543.47	13935.97	50.504	979,762.313	979,795.563	0.097	-21.641
36	3544.32	13936.12	47.703	979,767.250	979,796.750	0.103	-18.514
37	3544.27	13934.89	51.296	979,765.688	979,796.688	0.105	-19.241
38	3542.89	13935.10	54.650	979,759.125	979,794.750	0.111	-23.120
39	3542.01	13934.49	47.693	979,758.688	979,793.438	0.133	-23.770
40	3540.34	13934.46	46.052	979,754.313	979,791.063	0.122	-26.108
41	3539.03	13935.08	27.390	979,755.750	979,789.250	0.159	-26.779
42	3545.26	13946.29	5.889	979,791.750	979,798.125	0.037	-4.240
43	3544.23	13946.75	1.846	979,790.500	979,796.625	0.037	-4.873
44	3544.07	13945.64	10.408	979,786.688	979,796.438	0.043	-6.640
45	3542.56	13946.64	11.053	979,784.688	979,794.250	0.065	-6.347
46	3540.09	13946.59	-1.726	979,773.063	979,790.750	0.050	-17.163
47	3539.12	13946.64	2.836	979,768.563	979,789.375	0.043	-19.309
48	3540.37	13941.51	24.250	979,762.688	979,791.125	0.112	-22.411
49	3540.55	13942.82	24.769	979,764.438	979,791.375	0.070	-20.807
50	3540.12	13944.26	23.686	979,765.625	979,790.750	0.071	-19.243