

3. 2 制御震源を用いた地殻構造探査

3. 2. 1 低重合反射法地震探査及び自然地震波干渉法による地殻・上部マントル構造調査研究

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

首都圏において、制御震源を用いた反射法・屈折法地震探査等を行い、10 km~15km 程度の深さまでの地殻の速度構造や不連続面の形状等を把握する。制御震源のほかに自然地震も併用して詳細な地殻・上部マントル構造断面を明らかにする。

(b) 平成 23 年度業務目的

平成 22 年度の霞ヶ浦-つくば測線とつくば-水戸測線で取得した稠密自然地震観測データを地震波トモグラフィ法・地震波干渉解析法・レシーバ関数解析法により解析し、首都圏の地殻とフィリピン海プレートの詳細な構造（地殻の速度構造や不連続面の形状等）を明らかにする。平成 20 年・21 年に関東山地周辺で取得した制御震源による構造探査データと、稠密自然地震観測データについて協調的な統合解析を行い、首都圏の地殻とその下に沈み込むフィリピン海スラブの詳細な構造を明らかにする。大都市大震災軽減化特別プロジェクトで取得した大深度地殻構造探査データを含めて、首都圏の地殻・プレート構造データを検討し、構造的な弱面を抽出する。海外で開催される会議や学会に出席して最新の研究成果を発表し、各国から参加する研究者との議論を通じて、本プロジェクトの目標達成に有益な情報を収集するため、国際測地学・地球物理学連合総会（6 月、豪州）、米国地球物理学連合秋季大会（12 月、米国）などに出席する。

(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	特任教授	笠原 敬司	
東京大学地震研究所	助教	蔵下英司	
東京大学地震研究所	助教	石山達也	
東京大学地震研究所	特任研究員	新井隆太	
東京大学地震研究所	特任研究員	中山俊雄	

(2) 平成 23 年度の成果

(a) 業務の要約

1) 平成 22 年度の霞ヶ浦-つくば測線とつくば-水戸測線で取得した稠密自然地震観測データを地震波トモグラフィ法・地震波干渉解析法・レシーバ関数解析法により解析し、首都圏の地殻とフィリピン海プレートの詳細な構造（地殻の速度構造や不連続面の形状等）を明らかにした。

2) 平成 20 年・21 年に関東山地周辺で取得した制御震源による構造探査データと、稠密

自然地震観測データについて協調的な統合解析を行い、首都圏の地殻とその下に沈み込むフィリピン海スラブの詳細な構造を明らかにした。

3) 大都市大震災軽減化特別プロジェクトで取得した大深度地殻構造探査データを含めて、首都圏の地殻・プレート構造データを検討し、構造的な弱面を抽出した。

4) 本プロジェクトの最新の研究成果を国際測地学・地球物理学連合総会（6月、豪州）、米国地球物理学連合秋季大会（12月、米国）などで発表し、各国から参加する研究者との議論を通じて、本プロジェクトの目標達成に有益な情報を収集した。

(b) 業務の成果

1) 地震波トモグラフィ解析および地震波干渉法による首都圏北東部下のスラブ接触域構造

a) 観測地域及びアレイ観測測線（霞ヶ浦-つくば測線・つくば-水戸測線）

関東地域下では、フィリピン海プレートが陸側プレートと太平洋プレートとの間に沈み込むという複雑なプレート配置を形成している。フィリピン海プレートのスラブは、関東北東部下で太平洋スラブと接触し、沈み込むスラブを変形させ、首都圏下の被害地震の要因になる可能性がある¹⁾。関東北東部下におけるフィリピン海プレートと太平洋プレートの接合部の構造を高い精度で把握することは、関東地方下におけるプレートの運動方向に拘束条件を与える上で重要であり、首都直下地震を考察する上でも必要不可欠である。そこで、スラブ接触域の詳細な構造を得る為に、平成22年度に制御震源地殻構造探査（九十九里-霞ヶ浦測線）と稠密自然地震観測（霞ヶ浦-つくば測線・つくば-水戸測線）を首都圏北東部において実施した（図1）。制御震源地殻構造探査データの解析で得られた反射法断面図では、フィリピン海プレートが明瞭にイメージングされている²⁾。さらに深部の、フィリピン海プレートと太平洋プレートが接触する領域の構造を把握する為には、自然地震データを用いた解析が有効である。そこで、本年度は両測線で観測された自然地震データによる地震波トモグラフィ解析と地震波干渉法による構造解析を行った。

b) 観測とデータ

稠密自然地震観測は、茨城県稲敷市から加波山山塊北端に至る測線長が約50kmの「霞ヶ浦-つくば測線」及び、つくば市から那珂市に至る測線長が約65kmの「つくば-水戸測線」で実施した（図1）。「霞ヶ浦-つくば測線」は、制御震源を用いた地殻構造探査測線「九十九里-霞ヶ浦測線」の西方延長上に設定し、主システム（1.0 Hz 速度型地震計）と副システム（デジタルMEMS型加速度計）³⁾を原則として交互に設置して、2010年6月10日から2010年10月10日まで観測を実施した。観測点は500-750mの間隔で、計65カ所に設置した。「つくば-水戸測線」は、MeSO-net 観測網の「つくば-藤沢測線」の東北部とその延長上に設定し、1.0 Hz 速度型地震計（Lennartz Electric LE-3D lite）とオフラインレコーダ⁴⁾を用いて、2010年6月8日から2011年1月24日まで観測を実施した。また、制御震源地殻構造探査測線（九十九里-霞ヶ浦測線）上には、デジタルMEMS型加速度計³⁾を使用したオフライン観測点が設置されており、2010年7月3日から2010年7月12日までの期間中では、822カ所で連続観測記録が得られた。

「霞ヶ浦-つくば測線」と「つくば-水戸測線」上に設置した観測点で得た連続記録からイベント毎へのデータ編集、図 2 で示す周辺の 95 点のテレメータ観測点で得られたデータとの統合作業及び各観測点における P 波到達時刻、S 波到達時刻、最大振幅、P 波初動振動方向の読み取り作業は平成 22 年度に実施した²⁾。本年度は、これらイベントの中で、「九十九里-霞ヶ浦測線」上に設置したオフライン観測点で収録されたイベントの P 波到達時刻の読み取り作業を行った。また、「九十九里-霞ヶ浦測線」上とその西方延長上で実施された発破 (SP10D、SP15D) は、「霞ヶ浦-つくば測線」、「つくば-水戸測線」でも観測されている。そこで、これら 3 測線で得た発破データと図 2 で示す測線近傍の定常観測点で取得された発破データを統合したデータを作成し、P 波到達時刻の読み取り作業を実施して走時データの作成を行った。

c) 解析

i) 地震波トモグラフィ解析

自然地震波形データからの検測値から、読み取り観測点数が、P 相が 20 個以上、S 相が 10 個以上ある地震の走時データと発破データ (SP10D、SP15D) からの検測値を解析に使用した。トモグラフィ解析には、プログラム simul2000⁵⁾を使用し、3次元速度構造の推定と震源再決定を行った。解析を行う際には、調査地域に X-Y-Z 座標系を設定し(図 2)、その領域内に格子を 3 次元的に作成した。設定した座標系の X 軸は、「つくば-水戸測線」に沿った方向とし、格子点は、アレイ測線内では X 方向、Y 方向が 5km 間隔に設定した。また、Z 方向には、-3、0、5、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100、110、130、150、200km をそれぞれ設定した。トモグラフィ解析の初期モデルには、連携震源決定法⁶⁾を用いて計算した 1次元速度構造モデルを使用した。トモグラフィ解析により再決定された震源分布を図 3 に示す。得られた 3次元速度構造と観測地域の地震活動度との検討を行うために、本研究で得た定常観測点の観測点補正值・3次元速度構造を用いて、2007年 4月 1日から 2011年 2月 28日、2011年 3月 13日から 2011年 7月 17日までの気象庁一元化処理震源の検測値を用いた震源再決定を行った。気象庁一元化処理震源の再決定後の震源分布を図 4 に示す。また、トモグラフィ解析により得られた 3次元速度構造から、Y=0 km (「つくば-水戸測線」) 下の P 波速度構造と V_p/V_s 構造を図 5、図 6 に、X=5 km (「霞ヶ浦-つくば測線」近傍) 下の P 波速度構造と V_p/V_s 構造を図 7、図 8 にそれぞれ示す。

ii) 地震波干渉法解析

近年、不均質媒質において、解析対象である最下層以深に分布する震源からの透過波を含むデータについて、各受振点記録間の相互相関を行い、因果律を満たす記録部分を抽出することによって、地表震源によるグリーン関数を抽出する試みが提示されてきている⁷⁾。これは、透過波が地表面で反射して生成されるゴースト波を抽出することに相当し、全受振点位置における発震記録が生成されることと等価である。こうしたデータでは発震-受振系の対称サンプリングが自動的に実現されていることから、速度解析を含む反射法地震探査の基本技術を直接的に適用できることが可能となる。本研究では、観測期間内に「つくば-水戸測線」下の $-20\text{km} < X < 60\text{ km}$ 、 $Y \pm 5\text{ km}$ の範囲内で発生したマグニチュード 2.0

以上の地震で、S/N が良い 16 イベントを抽出して解析に使用した。図 9 に抽出した震源の分布を示す。「つくば-水戸測線」データにおいて、これら抽出したイベントデータの各受振点記録間の相互相関処理を行うことで、全ての観測点を仮想発震点・仮想受振点とする稠密合成波形データを作成した。得られた稠密合成波形データに共通反射点重合法による反射法解析を実施し、「つくば-水戸測線」下の断面図を得た。なお、NMO 補正・マイグレーション処理、深度変換処理の際に必要な速度構造は、トモグラフィ解析によって得た P 波速度構造（図 7）をもとにして作成した。得られた「つくば-水戸測線」下の $0 < X < 30$ km における断面図を図 10 に示す。

d) 結果

トモグラフィ解析により得られた「霞ヶ浦-つくば測線」近傍 ($X=5$ km) の P 波速度構造と震源分布図（図 5）より、香取市からつくば市下の 35 km - 50 km 付近に北西傾斜の震源分布が確認できる。「九十九里-霞ヶ浦測線」で得られた反射法断面図²⁾と比較すると、沈み込むフィリピン海プレート上面付近の反射イベントと対応することから、これら震源分布はフィリピン海プレートの沈み込みに起因した地震であると考えられる。また、深さ 50 km - 70 km 付近にも北西傾斜の震源分布が確認でき、これらは太平洋プレートの沈み込みに起因した地震であると解釈できる。島弧下マントルウェッジ内の P 波速度は、約 8km/s であるが、フィリピン海プレートの沈み込みに起因した地震活動度が高い領域の近傍では P 波速度が低下する傾向がみられる。フィリピン海プレート内の V_p/V_s 値は、周囲よりも高い値を示している（図 6）。「つくば-水戸測線」下の P 波速度構造と震源分布図（図 7）より、測線南部の深さ 40 km から 60 km には北東傾斜の震源分布が、60 km から 70 km 付近には南西傾斜の震源分布が、それぞれ確認できる。「霞ヶ浦-つくば測線」での解釈を踏まえると、前者がフィリピン海プレート、後者が太平洋プレートの沈み込みに起因した地震と解釈できる。測線南部下のフィリピン海プレート内の V_p/V_s 値は、周囲よりも高い値を示している（図 8）。両震源分布が隣接するつくば市から水戸市下の深さ 40km から 60km は、周囲に比べて P 波速度が低下し、 V_p/V_s 値が高い値を示している。自然地震干渉法による解析結果（図 10）では、深さ 45 km - 50 km に水平なイベント、深さ 60 km - 65 km 付近に南西傾斜のイベントが確認できる。「つくば-水戸測線」下の速度構造や震源分布と比較すると、前者は、周囲に比べて P 波速度が低下し、 V_p/V_s 値が高い値を示している領域と対応する。後者は、太平洋プレートの沈み込みに起因した地震と対応し、太平洋プレート上面に関連したイベントと考えられる。本研究で得られたプレート接触域の詳細な構造は、プレートの接触やそれに伴うプレート変形を起因とする地震を考察する上で重要な知見となる。

2) 2005 年小田原-山梨測線の屈折法広角反射法追加解析

大都市圏地殻構造調査の一環で 2005 年に探査を実施した小田原-山梨測線についてはこれまでに、国府津-松田断層系の浅部構造および首都圏西縁部に沈み込むフィリピン海スラブの形状解明を主とする広域深部構造の把握に焦点を当てたデータ解析を行った⁸⁾。このため測線全域にわたる弾性波速度構造を抽出することを目的とした解析は実施されていない。しかし、断層モデルの構築や強震動予測の観点から、地殻浅部から深部にかけての

連続的な速度不均質の把握とより短波長変化を含む高精度の情報を抽出する必要があるが生じている。また、これまでの解析では用いられていない広角反射波の伝播時間及び振幅データを解析することで、スラブの沈み込みに関する地殻深部のより詳細な不均質構造を明らかにすることができる。こうした背景から、地殻上部の詳細な速度構造と地殻深部の不均質構造の構築を主眼とした屈折法広角反射法の追加解析を実施した。

ここで対象としたのは、足柄平野から丹沢山地・御坂山地を経て、甲府盆地を南北に縦断する約 75km の小田原-山梨測線⁸⁾である。本節では、この小田原-山梨測線に関して、屈折法広角反射法の追加解析を実施した概要に関して記述する。図 11 に調査測線概略図を示した。

a) 初動走時を用いた屈折トモグラフィ法解析による上部地殻構造の解明

小田原-山梨測線については、ダイナマイト発震点 11 点、バイブレータ集中発震 7 点の計 18 点の屈折法広角反射法データに関して、改良型タイムターム法及び波線追跡法による解析が行われている⁸⁾。そこで新たに、反射法バイブレータ足柄測線で得られた稠密発震データも追加して屈折波解析を行った。

i) 屈折トモグラフィ法による屈折波解析

地殻上部における水平方向の速度不均質を抽出することを目的とし、全区間での屈折初動読み取り値に対して屈折トモグラフィ法解析を行った。本解析には屈折トモグラフィ解析用プログラム FAST⁹⁾を使用した。この手法は、アイコナル方程式を有限差分法で解くことによって屈折波の走時及び波線を計算する。観測走時、計算走時及び速度モデルを用いてインバージョンを実施し、走時残差と速度モデルのラフネスが小さくなるように速度モデルの修正を行う。こうした速度モデルの修正を反復して行い、走時残差が十分に収束した時点で解析を終了する。初期速度モデルには、鉛直速度勾配を持つ 1 次元水平成層構造を設定した。以下に、今回の屈折トモグラフィ解析で使用したパラメータを示す。

走時計算のための格子間隔.....	水平方向	200.0m	鉛直方向	200.0m
走時計算のための格子数.....	水平方向	401	鉛直方向	81
インバージョンのための cell の大きさ.....	水平方向	1600.0m	鉛直方向	1000.0m
インバージョンのための cell の数.....	水平方向	50	鉛直方向	16
解析に用いた初動読み取り値総数.....		39032		
速度モデルの反復修正回数.....		13 回		
初期モデルにおける走時の平均二乗残差...		1282ms		
最終モデルにおける走時の平均二乗残差...		63ms		

図 12 に屈折トモグラフィ解析に用いた初期速度モデルと得られた最終速度モデルを示す。測線北西部では、甲府盆地の堆積構造と先新第三系の基盤構造が明らかとなった。測線南東部では足柄平野の堆積構造と伊豆小笠原弧上部地殻の構造が明らかとなった。また南東傾斜の曾根丘陵断層、北西傾斜の藤の木-愛川構造線、神縄断層、国府津松田断層に対応する速度不均質を抽出することができた。これらは伊豆小笠原弧の一連の衝突過程に起因する構造境界である。

b) 初動走時と広角反射波走時・振幅データの統合解析による地殻全体構造の解明

地殻浅部の速度不連続面と地殻深部の不均質構造を明らかにすることを目的とし、初動走時と広角反射波走時・振幅データを用いたフォワードモデリングを行った。本解析には波線追跡法による屈折波広角反射波の走時計算プログラム¹⁰⁾と波形計算プログラム SEIS83¹¹⁾を使用した。波線追跡法は、任意の射出角に対して波線方程式を差分法で解くことによって、屈折波と広角反射波の走時及び波線を計算する。また SEIS83 では、点震源を仮定した震源時間関数を用い、平面波近似で計算される速度境界面での反射・透過係数から理論波形を与える。その際、波線上での幾何学的な減衰効果も考慮されている。フォワードモデリングではまず、ある速度モデルに対して理論走時と理論波形を計算する。得られた理論走時と理論波形が、屈折波初動及び広角反射波の観測走時と観測波形を再現できるようにするまで試行錯誤的に弾性波速度と反射面の位置及び形状の修正を行い、最終速度モデルを得る。図 13 に初動走時の観測値と P 波速度構造モデルから計算される理論走時の比較を示す。図 14 に示す深さ 10km までの P 波速度構造は、観測データをよく説明できていることがわかる。また図 15、16 に示すように、最終速度モデルから計算される理論走時及び理論波形も観測データをよく説明できている。

フォワードモデリングによる最終速度モデルと広角反射波の反射面構造を図 17 に示す。本解析により、曾根丘陵断層、藤の木・愛川構造線、神縄断層、国府津松田断層の各構造境界の詳細な形状を地表面から地殻深部まで追跡することが可能となった。また本解析結果と伊豆小笠原弧の P 波速度モデル¹²⁾との比較から、御坂山地・丹沢山地の各地塊は伊豆小笠原弧の上部地殻及び中部地殻上部に相当し、衝突の過程で地殻下部から剥離したものと解釈される。また沈み込むフィリピン海プレートが伊豆島弧の中部地殻最下部及び下部地殻に相当することが明らかとなった。これら一連の結果は反射法地震探査から推定したフィリピン海スラブ⁸⁾および伊豆衝突帯東部で実施された 2003 年関東山地東縁測線の解析結果¹³⁾と整合的である。

c) 結論

2005 年小田原・山梨測線の反射法地震探査データ及び屈折法広角反射法地震探査データについての追加解析を行い、構造境界である断層群の深部形状と測線下の詳細な P 波速度構造を明らかにした。また、反射法地震探査から推定したフィリピン海スラブの構造⁸⁾が、P 波速度モデルとも整合することが明らかになった。

3) 関東平野堆積層の速度構造の統合解析

大都市大震災軽減化特別プロジェクトや首都直下地震防災減災特別プロジェクトの一環として、収集された地殻構造データの他、関東平野周辺の反射法地震探査データ、地殻活動観測井、および公開されている各種情報を用いて、下記の手順で三次元速度構造モデルの構築を行った。この速度構造モデルは、自己組織化マップ (Self-organizing map: SOM) を利用した解析を使用しており、データの増加に伴う更新が可能であるという点で特徴がある。ここで構築した速度構造モデルは、多様な波形計算などの基礎的な資料となる。また、同時に、MeSO-net 全観測点のステーションコレクション量、すなわち地震計・基準面 (平均海水面下 2km) 間および基準面・基盤上面間それぞれの走時の推定を行った。得ら

れた補正值は、MeSO-net の地震波形データに基づくトモグラフィ解析の基礎資料として活用された (3.1.1 (b) 2) c))。

a) コントロールポイントの情報整理

関東平野周辺の坑井情報を収集し、坑井位置、掘削深度、基盤岩深度そして基盤岩速度を表 1・2 にまとめ、位置図を図 18 に示した。坑井情報は防災科学技術研究所の地殻活動観測井¹⁵⁾のほかに、Hi-net ボーリング柱状図¹⁶⁾および鈴木(2002)¹⁷⁾および林 (2006)¹⁸⁾などを参照した。まず坑井情報をモデルに反映させるため、基盤へ到達した坑井の位置での基盤上面確認深度を深度コントロールポイントとして配置した。つぎに平成 18 年度に大都市圏大震災軽減化特別プロジェクトで構築した関東地域の地下構造データベース¹⁹⁾を参照し、深度データポイントを作成した (図 19、20)。関東南部では、葉山・嶺岡隆起帯以南は新第三系の付加体から構成され、伊豆衝突帯においても、標準的な関東平野下で見られるような、先新第三系と新第三系との間に明瞭な弾性波速度の不連続を示さない。このため、ここでは先新第三系の中でも速度の遅い四万十南帯の速度に対応して、4.5 km/s に相当する速度を抽出し、深度コントロールポイントとして使用した。基盤相当の深度分布を抽出測線は、2003 年関東山地東縁⁸⁾および 2005 年小田原-山梨^{21,22)}、2009 年相模湾横断²³⁾、2002 年房総半島縦断²⁴⁾である。さらに地質図において先第三系に区分される地点での標高値も深度データポイントに利用した。

次に速度コントロールポイントの設定では、表 1・2 の坑井のうち速度検層情報を有するものを参照した。コントロールポイントに基づくモデルの速度調整は堆積層と基盤それぞれについて行う。堆積層の速度コントロールは、基準面から観測点までの走時についてモデルと坑井で一致させることで行うが、その準備としてここではまず各坑井について速度プロファイルを作成し、それに基づいて地表-基準面 (平均海水面下 2km) 間および地表-地震計設置深度までの走時を P 波と S 波それぞれについて算出した。なお P 波速度コントロールポイントには、速度検層情報に加えて屈折トモグラフィ解析による P 波速度プロファイルも利用している。

関東平野の基盤岩は帯状配列を示し、地質区分毎の弾性波速度に共通性が見られることから、基盤岩速度の推定には林(2006)¹⁸⁾の地体構造区分を考慮した。すなわち基盤速度の情報を持たない坑井では、同一地体区分内で近隣の基盤速度データを割り当てて使用した。表 1 および 2 に各坑井位置に配分された基盤岩速度を示す。ここで P 波速度が 4 km/s を下回る値については、全体の傾向と矛盾することから、入力データとしては使用していない。また関東南部では関東中部のように、新第三系基盤と堆積層の間に見られるような、速度不連続が存在しない。このため関東南部では、先新第三系の仮定の値として P 波・S 波それぞれ 4.5 km/s、2.5 km/s を設定した。

b) 基盤上面深度構造の推定

自己組織化マップ (Self-organizing map: SOM) は脳の記憶方式を計算機上で模倣した人工知能技術の一つであり、情報をパターン化して貯蔵し、部分的な情報を手がかりとして必要な情報を取り出す“連想”を数値的に実現させる²⁵⁾。ここでは、深度データの補間において地質状況などの地域性を考慮するため自己組織化マップ (SOM) を利用した。

まず重力異常分布から線形回帰的に推定した基盤上面深度構造を推定した。続いて深度コントロールポイントにおける深度残差と各種空間属性 (広域ブーゲー重力異常²⁶⁾、地表

地質区分¹⁴⁾、地形区分²⁶⁾、標高（水域では水深）および緯度・経度）との関係を SOM の手法を用いて表現し、これを用いて空間属性の類似性に基づいた深度補正を行った（図 21）。推定した基盤上面深度分布図（図 22）では、南関東で深部に位置する構造が得られた。葉山-嶺岡隆起帯は、東西走向の顕著な複背斜構造をなし、軸部には地表では古第三系の嶺岡層群が分布することから、弾性波速度の上からも P 波速度の大きな岩石が浅部まで位置しているものと考えられている。しかしながら、房総半島縦断測線の屈折トモグラフィや、相模トラフ横断測線、東京湾測線などの速度解析結果からは、関東盆地北部に分布する 5 km/s を越える P 波速度を有する弾性波速度を示す領域は、隆起構造を示さずに葉山-嶺岡隆起帯では逆に低下する。これらは、地質学的にはこの隆起帯そのものが、フィリピン海プレートの付加体によって構成されているため、新しい堆積物が下から付加することにより、全体としての速度構造が特異なパターンを示しているためと推定される。

c) 三次元速度モデルの構築

三次元速度モデルは既往の研究成果や坑井速度情報をコンパイルし構築した。地表付近の速度モデルには松岡・翠川(1994)²⁷⁾の地形区分から推定する表層 30m までの平均 S 波速度 (AVS30) を使用した。堆積層の速度は林ほか(2008)²⁸⁾による関東平野堆積層の深度と地震波速度の関係式を利用した。基盤速度構造は、b) で推定した基盤上面深度構造と、基盤岩に到達した坑井から推定した速度分布の組み合わせによって与えた。b 堆積層速度のコントロールポイントにおいて速度モデルの更正を行った。すなわち地表から基準面（平均海面下 2km）までの走時を整合させる速度補正係数分布を求め、これをモデルに乗じた。

d) 首都圏地震観測網 (MeSO-net) 各観測点の走時補正量検討

三次元速度構造モデルより MeSO-net に関する速度構造 (V_p, V_s 及び V_p/V_s) を観測点毎に作成した。また、これら速度プロファイルを使用して全観測点のステーションコレクション量（地震計-基準面間および基準面-基盤上面間それぞれの走時）を推定した（図 23）。

4) 統一パラメータによる広角反射法地震探査断面の再解析

大都市圏地殻構造探査や首都圏直下地震防災・減災プロジェクトによって取得した（図 24）、高エネルギー発震記録である大薬量ダイナマイト発震、エアガン集中発震及びパイプレータ集中発震データを使用して、統一パラメータおよび解析フローを適用した再解析を実施した。

本プロジェクトにおいては、関東平野及び辺縁部を含む全域の三次元速度構造モデルを作成した（3）参照）。この三次元速度構造モデルでは、首都圏地震観測網 (MeSO-net) 全観測点直下の P 波速度構造、S 波速度構造及び V_p/V_s 比構造が提示され、各点における堆積層に由来する時間補正量が推定されている。本解析では、MeSO-net データから推定された速度構造を含め、下記の速度情報について相互確認を実施した。MeSO-net データによるトモグラフィ解析有効領域に含まれる関東山地東縁測線及び九十九里-つくば測線に関しては、MeSO-net トモグラフィ結果及び下記 [2] の堆積盆スケール速度構造を用いて、NMO 補正、重合後マイグレーション及び深度変換速度を確定させた。一方、MeSO-net データによるトモグラフィ解析有効領域の外側に位置する小田原-山梨測線及び飯能-笛吹

測線に関しては、下記の全速度関数を参照し、関東山地東縁測線との交点位置での検証を踏まえて、速度関数を最終的に確定させた。参照した速度構造を下記に示す。

[1] 広角反射波データを構成する大薬量ダイナマイト発震及びバイブレータ集中発震記録に関する同一反射位相を合致させる'Phase Matching'法によって推定された速度構造、

[2] 既存の反射法及び屈折法から推定される堆積盆スケールの浅層速度構造、

[3] (独)防災科学技術研究所の高感度地震観測網(Hi-net)及び強震観測網(K-net)データを用いた地震波トモグラフィ解析から推定される広域三次元速度構造モデル(Matsubara et al.(2005)²⁹⁾、 Matsubara et al.(2008)³⁰⁾

[4] 大都市圏地殻構造調査 2003年関東山地東縁測線及び2005年小田原-山梨測線の広角反射波データに関する高精度地震波トモグラフィ及びフォワードモデリング解析によって推定されたP波速度構造詳細モデル(Arai et al.(2009)²⁰⁾及びArai et al.(2011)²²⁾

図25にデータ処理フローを示した。また、図26・27に上記の各速度情報について検証した結果を示した。この図では、Area-A及びArea-Bについて、「往復走時-平均速度」及び「深度-区間速度」に関する各種速度の対比結果が表示されている。図中において青色表示した速度関数が最終速度(NMO速度、マイグレーション速度及び深度変換速度)に対応する。

図28-31に、得られた深度変換断面を示す。

5) レシーバ関数-地震波干渉法複合解析によるフィリピン海スラブのイメージング

a) 解析対象測線

プレート構造のイメージングについては、自然地震波を用いた解析が有効であり、このためフィリピン海プレートが太平洋プレートと接合する首都圏東北部と、複雑な形状を示す伊豆衝突帯において稠密自然地震観測を実施してきた。

2008年度 首都圏直下地震防災・減災プロジェクト 飯能-御坂測線(領域A)

2009年度 首都圏直下地震防災・減災プロジェクト 関東山地東縁測線(領域A)

2010年度 首都圏直下地震防災・減災プロジェクト 霞ヶ浦-つくば測線(領域B)

2010年度 首都圏直下地震防災・減災プロジェクト つくば-水戸測線(領域B)

本節ではこれらの測線で実施した稠密自然地震観測データを用いたレシーバ関数及び地震波干渉法によるイメージング解析結果を記述する。

b) 解析手法

一般に、制御震源による地殻構造探査では、高エネルギー震源による稠密長大展開の採用によって、浅部の堆積盆から地震発生層基底面までの上部地殻構造に関するプロファイルを構築できる可能性は比較的高い。しかし、モホ面に至る中下部地殻構造及び島弧下に沈み込むスラブのイメージングについては、制御震源データはエネルギー透過度及びノイズレベル等によってデータ品質は大きく影響を受けるため、自然地震データを補完的に用いた確実度の高い統合プロファイルの構築が望まれる。近年、ポータブル型の観測システムが徐々に普及するにつれて比較的稠密な観測アレイが可能となり、遠地地震から求められるレシーバ関数について、P-S変換点マッピング及びマイグレーションといった反射法地震探査における解析技術の適用が定着している。また、各地表受振点記録間の相互相関を行い、二点間のグリーン関数を抽出する地震波干渉法を用いた遠地地震への適用例が報

告されている。一方、近地地震を用いた地殻構造のイメージングに関しては、地震波干渉法及び逆VSP解析に等価な重合前マイグレーション法が有望であるとされているが、実データへの適用事例は少ない。

ここでは、主に遠地地震を解析対象として、Abe et al.(2007)³¹⁾及びShragge et al.(2006)³²⁾に準拠して、従来型のレシーバ関数と相互相関処理によるグリーン関数抽出を前提とした地震波干渉法解析の複合型イメージング処理を実施した。レシーバ関数解析では、反射法地震探査におけるP-SV変換波重合処理手法に準拠した標準的な手法(Wilson et al.(2005)³³⁾)を用いた。図32に地震波干渉法と併せた遠地地震に関する解析フローを提示する。レシーバ関数解析の処理ステップは順に、ジオメトリ情報のコンパイル、震源-受振点間のアジマス回転、スペクトラルデコンボリューション、2.5次元速度構造を前提とした共通P-SV変換点ビンニング、NMO補正及び共通変換点重合である。また、信号強調処理であるSVDフィルターであるK-L(Karhunen-Loeve)変換処理を適用した。レシーバ関数解析には、マグニチュードが5.7~7.5で、震央距離が23~85度の遠地地震が用いられた。但し、受振点条件及びノイズ環境によって有意なレシーバ関数を推定できなかった場合は、最終的なイメージング対象から除外した。次に、地震波干渉法型解析によって' Surface-related' 多重反射波の内、PpPp及びPpSpを抽出しPsレシーバ関数プロフィールと加算したハイブリッド型の遠地地震プロフィールを構築した。

図 33・34 に自然地震イメージング解析によって得られた最終深度断面図を、各々、領域 A 及び領域 B に関して作成した。

5) 東京の地下地質：あきる野-印西統合測線の地質対比

関東平野には厚い新生代後期の堆積物が分布するが、その地下地質については不明な点も多い。首都圏に伏在する活断層を抽出するための基礎データとして、反射法などの物理探査の知見と、ボーリングなどの地下地質データを組み合わせて、堆積層の層序を明らかにしていくことが必要である。今年度はこうした背景から、東京・千葉を結ぶ東西深部構造探査断面と既存ボーリングの層序対比を行い、次に房総半島中央部を東西に切る探査測線で認定された鍵反射面との対比を行った。

首都圏ではこれまで、多くの機関で反射法地震探査が行われている。これら個々の反射測線を結合し首都圏地下構造探査測線網(図 35)が平成 22 年度作成された(佐藤ほか、2010)³⁴⁾。これら探査測線網を利用することにより、これまで首都圏の各地ごとに築かれてきた地下地質層序対比が可能になる。浅尾ほか(2007)³⁵⁾は下総層群・上総層群の模式地である房総半島中央部を東西に切る探査測線(E測線、図 35)で、鍵層準として R1 から R10 までを認定している(図 36)。

今回、この首都圏地下構造探査測線の中央を東西に切る B 反射測線(図 35)について、既存ボーリング資料と房総半島から追跡される鍵(反射)層準との対比を行った。B 反射測線は千葉県印西市から東京都昭島市を結ぶ測線である。測線の東、千葉県印西市-松戸市間については、浅尾ほか³⁵⁾が R11(先第三系基盤岩上面)、R10(三浦層群相当層上面、R9(黄和田層相当層上面)、R4(笠森層相当層上面)を認定している。

東京の地下地質は、その層相特徴をもとに下位から、泥岩層が卓越する北多摩層、砂層が卓越する東久留米層、砂礫・粘土・砂互層からなる舎人層・江戸川層・高砂層に区分さ

れている（上部更新統・完新統については省略）³⁶⁾。また、これら地層は、火山灰鍵層から房総半島の上総層群との対比（図 37）³⁷⁾ が行なわれおり、23 区の地域については古地磁気データからブリュンヌ・松山境界深度分布図（図 38）が得られている³⁶⁾。

東京都区間について、測線の近傍の地盤沈下観測井地質調査ボーリング 14 本を用いて地質断面図を作成した（図 39、40）。この地質断面図と B 反射測線を用いて、千葉県で認定されている鍵層準との比較を行ったこの結果以下のことが明らかになった（図 41）。

- ① 深度 2000m から 3000m に断続して見られる反射面は、千葉県での R11 に連続することから先第三系の基盤面である
- ② 深度 1000～1500m にみられる明瞭な反射面は、千葉県側では一部不明瞭になるが印西付近で見られる鍵層準 R10 につながると考えられる。
- ③ R9 は火山灰 KD5A と O18 の間にあることから舎人層の下部層準に相当することになる。R9 は反射断面では東から西に、足立区では 400～200m、板橋区では 200～70m と徐々に浅くなり、再び深くなり東久留米では 100～200m となり、東大和では再び 100～20m と浅くなる。
- ④ 笠森層は高砂層（江戸川層上部？）に対比されることから、R4 はブリュンヌ・松山境界深度より以浅となり、足立区では 150m 以浅、板橋区では 50m 以浅に分布することになるが、反射面として追跡することはできない。

鍵層準の対比から、先第三系上面深度は千葉県から東京にかけて（西から東に）1500m から 3000m と深くなり、上位の三浦層群相当層も西に向かって層厚を増している。これを覆う上総層群中黄和田層相当層以深の地層が層厚 1000m 以上の厚さで分布する。房総半島の黄和田層模式地での層厚は約 670m とされている。これに比べ東京では 1000m を超える厚さになっている。黄和田層の堆積年代は約 190 万年から 120 万年前とされている。黄和田層相当層である北多摩層・東久留米層のうち、北多摩層は産出する有孔虫から外洋性の半深海環境が、東久留米層は陸棚性環境が推定されている。

黄和田層相当層上位の地層は東京では数 100m であるのに対し、房総半島中央部では 2000m 以上に達している。200 万年以降の堆積盆地の変遷過程の一部が明らかになった。今後、首都圏全体での堆積盆地の変遷過程の全体像を明らかにする必要がある。

6) 首都圏の伏在活断層

関東平野に分布する活断層を横断する深部構造探査断面と周辺地域および既存ボーリングの層序の対比を行い、伏在活断層の深部形状について推定を行った。

関東平野には、立川断層や深谷断層・綾瀬川断層といった活動的な逆断層が分布する（活断層研究会、1991）³⁸⁾（図 42）。近年、関東平野では大深度地殻構造探査が数多く行われ、いくつかの測線ではこれらの活断層を横断している。また、このほかにも関東平野を含む南関東地域の活構造については、上総層群・下総層群および中期更新世以降の海成・河成段丘面の分布・編年に基づいた数多くの研究がある（例えば貝塚、1987）³⁹⁾が、その成因については明らかになっていないものも多い。本研究では、5) で行った反射断面と周辺地域の新生代層序との対比の結果に基づき、南関東の平野域に分布する伏在活断層・活構造の深部形状について検討を行った。

大大特・北関東測線の深部構造探査の結果（佐藤ほか、2010）³⁴⁾によると、北関東測線が延びる青梅から春日部にかけての区間では、地下に半地溝構造（ハーフ・グラベン）がいくつか認められる。これらは、既往の反射断面で見出された、前期-中期中新世の半地溝構造（川越ハーフグラベン；高橋ほか、2006⁴⁰⁾）と同時期に形成されたと考えられる。このうち、綾瀬川断層については、東傾斜と西傾斜の正断層 2 条が大宮台地の地下に存在し、このうち西傾斜の正断層が最近の地質時代に逆断層として再活動したものとみられる。この反転構造の直上に分布する大宮台地（下末吉面相当）には背斜状の変形が認められる³⁹⁾（図 43）。加えて、ボーリング調査および浅層反射法地震探査から下総層群・上総層群に撓曲構造が *growth strata* の証拠が認められるほか、段丘面の年代および変形量から 0.1 mm/yr の平均変位速度が推定される（石山ほか、2005）⁴¹⁾。

また、野田隆起帯³⁹⁾と大宮台地の西側にあたる武蔵野台地北東縁部の地下にも半地溝構造が認められる。このうち、野田隆起帯の地下に伏在する西傾斜の逆断層上盤側では、上総層群・下総層群が参加する、西翼が緩く傾斜する背斜構造が認められる（図 44）。この西翼の構造は、木下層基底の海退時浸食面に認められる西傾斜の構造（中澤・田辺、2011）⁴²⁾と整合的である可能性がある。

武蔵野台地北東縁部（荒川沈降帯³⁹⁾）の地下も同様に、見かけ上西に傾斜する断層上盤側のリフト期以降の新第三系・第四系に微弱な背斜構造が認められ、鮮新世から更新世にかけて反転した可能性がある（図 45）。これに対応して、深層ボーリング等に基づく武蔵野台地～東京低地の断面から地下に上総層群上部の撓曲構造が伏在するとされる（遠藤・中村、2000）⁴³⁾。一方、より最近の変動については、武蔵野台地の段丘地形が北東向きの傾動を受けているとする考え（貝塚、1957）⁴⁴⁾と、これを否定する考え（廣内、1999）⁴⁵⁾がある。また、貝塚（1957）⁴⁴⁾は武蔵野台地の「傾動」をその北東縁部全体に認めている。一方、今回明らかになった反転構造を規制する西傾斜の断層は、高橋ほか（2006）⁴⁰⁾の「川越ハーフグラベン」を規制する断層と逆の傾斜を示しており、両者の間には不連続が認められる。このように、これまで認定されている変動地形と地下の断層構造については必ずしも統一的に説明できるわけではない。このような点を考慮し、今回明らかになった荒川沈降帯後下に伏在する西傾斜の断層の第四紀後期の活動性については今後十分に検討する必要がある。

このほか、北関東測線および東京都の測線では、狭山丘陵東縁部の地下に、上総層群相当層が参加する西向きの撓曲構造が認められ、この地下には西傾斜の逆断層が伏在すると推定される（図 46）。この断層は、狭山丘陵西縁部に分布する東傾斜の逆断層である立川断層とともに、狭山丘陵の形成に寄与した可能性がある。ただし、下総層群については必ずしも変位が認められず、第四紀後期には活動を停止ないしは活動性が衰微した可能性がある。

以上の結果と、伏在断層によって形成されたと考えられる変動地形の分布に基づき、関東地域の活断層・活構造についての震源断層モデルを矩形で図示したのが図 47 である。また、ここでは第四紀後期に活動的な断層にあわせて、鶴川向斜の地下に伏在する逆断層のように、現在は活動的ではないが、上総層群に変位が認められる構造についても図示している。ただし、個々で示した矩形断層モデルはあくまで初期的なものであり、後述するように今後のデータ取得によって改善されるべきものである。

関東平野に分布する伏在活断層の深部形状について推定を行った結果、これまで成因が不明であった活構造を含めて、いくつかの伏在活断層の深部形状を推定した。ただし、現状では地下構造のデータは著しく不足しており、荒川沈降帯などでは伏在断層の長さを推定することは現状では困難である。このことは断層のセグメンテーションを推定することを難しくしており、断層のセグメンテーションを議論するためには、更に構造探査を実施するほか、ブーゲー重力異常値などのポテンシャルデータを高密度かつ平面的に取得して密度構造を推定することにより、特定の断層面の空間的な広がり把握する必要がある。また、第四紀後期の活動性を把握するためには、高精度浅層反射法地震探査や群列ボーリング調査などを行う必要がある。

7) 首都圏の地殻プレート構造の総合解析

制御震源による堆積層の地震探査やボーリング・重力異常などを総合して、堆積盆地の構造を求め、MeSO-net 観測点の補正值を求めた (3) 関東平野堆積層の速度構造の統合解析を参照)。それらを用いた地震波トモグラフィによって、速度構造が明らかになった。このトモグラフィの結果や、制御震源による速度構造を総合的に検討し (4) 統一パラメータによる広角反射法地震探査断面の再解析を参照)、これまでに大大特や首都直下で得られた、地震探査断面を総合的に検討された速度構造を用いて深度変換を施した。これらの結果を基に、フィリピン海プレート上面の等深度線を描いた (図 48)。

高密度の観測点のデータによって求められたトモグラフィによって、フィリピン海プレートの構造が高精度で明らかになった。制御震源を用いた反射法・屈折法の探査では相対的に浅部の構造を高い分解能で明らかにすることができる。ここでは制御震源での探査データによって、主として MeSO-net の展開地域では、20km 以浅の構造を補完した。また、MeSO-net 展開地域の外側に位置する関東北東部と、伊豆-衝突帯でのフィリピン海スラブの形状を追加した。

トモグラフィによって求められた新しいフィリピン海プレート上面の構造は関東平野下では、東西方向の走向を示し平坦である。これとは対照的に伊豆衝突帯での複雑な形状が明瞭になった。伊豆衝突帯では、本州弧との衝突-浮揚性沈み込みにより、伊豆-小笠原弧起源の島弧地殻が本州弧に付加し、その中下部地殻が沈み込んでいる。沈み込んだスラブは、東翼が緩傾斜、西翼が急傾斜の非対称褶曲をなしている。飯能-御坂測線でのレーシーバ関数-干渉法解析の結果では、側方への不連続も見いだされ、これらのシェブロン褶曲状に変形したスラブが屈曲部などで、断裂している可能性もある。この背斜状の構造は、広域的な自然地震トモグラフィから推定されたフィリピン海プレート上面の形状⁴⁷⁾と調和的である。この背斜状構造の東翼は関東地震の震源となっており、スラブの屈曲構造がプレート上面の震源断層の形状を規制している。

(c) 結論ならびに今後の課題

首都圏下のフィリピン海プレートは、北東部で太平洋プレートと接し、西部では島弧-島弧衝突帯である伊豆衝突帯で複雑な形状を示す。プレートの構造を明らかにすることは、プレート内や境界部で発生する地震活動を理解する上で重要であり、制御震源と稠密自然地震観測による調査・研究を行ってきた。

北東部の太平洋プレートとフィリピン海プレートの接合部では、自然地震トモグラフィ・地震波干渉法・レーザ関数解析法により、両プレートの形状と接合状況が明らかになった。

一方、伊豆-衝突帯では2005年に実施した小田原-山梨測線において、詳細な速度構造解析を行い、本州弧に付加した伊豆-小笠原弧の変形の実態が明らかになった。フィリピン海プレートの浮揚性沈み込みにより、伊豆-小笠原弧の上部地殻が本州側に付加し、プレート境界での滑りを地殻内の断層によって歪を分配している。

MeSO-netでの自然地震トモグラフィによって得られるプレート構造の高精度値を目的として、これまで得られているは制御震源による構造探査、坑井資料、重力異常値を統合して、観測点補正値を求めた。こうしてトモグラフィによって新しく求められた速度構造を総合し、得られている地殻スケールの反射断面について、深度変換を実施した。また、関東北東部と伊豆衝突帯で実施した稠密自然地震を、レーザ関数・地震波干渉法の統合解析を行い、統合された速度構造による深度変換を実施した。MeSO-netの展開領域の外側にある伊豆-衝突帯や、十分な分解能がない浅部の情報を追加して、首都圏でのフィリピン海プレート上面の形状を明らかにした。

関東地方で実施されてきた既存の反射断面について統合的な解析を行い、共通の解析プロセスを経た断面を、地質・変動地形な情報とともに再検討した。その結果、いくつかの伏在活断層を見だし、その矩形断層モデルを提示した。

2011年3月に発生した東北太平洋沖地震は、首都直下の地震活動にも大きな変化をもたらした。この地震に伴う東北地方を中心とした大規模な地殻変動は、首都圏の地震活動についても大きな影響を与えることが危惧されている。今年度、明らかにしたフィリピン海プレートの形状や、堆積盆地の形状・速度構造モデル、活断層の震源断層の形状推定については、この地震の影響を定量的に明らかにする際には、欠かせないデータであり、今後、これらの構造を活用した地震発生評価が重要な課題である。

また、伏在する推定活断層については、基礎データも収集されておらず、今後、東北沖地震の影響もあり、早急に情報を収集する必要がある。

(d) 引用文献

- 1) Wu, F., Okaya, D., Sato, H., and Hirata, N.: Interaction between two subducting plates under Tokyo and its possible effects on seismic hazards, *Geophys. Res. Letts.*, 34, L18301, doi:10.1029/2007GL30763, 2007.
- 2) 佐藤比呂志・岩崎貴哉・蔵下英司：制御震源を用いた地殻構造探査 3.2.1低重合反射法地震探査及び自然地震波干渉法による地殻・上部マントル構造調査研究，首都直下地震防災・減災特別プロジェクト ① 首都圏でのプレート構造調査，震源断層モデル等の構築等（平成22年度），79-133,2011.
- 3) 村上文俊，佐藤比呂志，黒田徹，阿部進，加藤直子：自然地震観測におけるMEMS型加速度センサーの特性評価、東京大学地震研究所彙報，251-266, 2009.
- 4) 篠原雅尚・平田直・松田滋夫：GPS時計付き地震観測用大容量デジタルレコーダ，地震2，50，119-124. 1997.

- 5) Thurber, C. and D. Eberhart-Phillips: Local earthquake tomography with flexible gridding, *Comp. Geosci.*, **25**, 809–818, 1999.
- 6) Kissling, E., W. L. Ellsworth, D. Eberhart-Phillips, and U. Kradolfer: Initial reference models in local earthquake tomography, *J. Geophys. Res.*, **99**, 19635–19646, 1994.
- 7) Wapenaar, K., J. Thorbecke, and D. Draganov: Relations between reflection and transmission responses of three-dimensional inhomogeneous media, *Geophys. J. Int.*, **156**, 179-194, 2004.
- 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 3.1.3. 関東地殻構造探査 (小田原-山梨測線), 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, 98-182, 2005.
- 9) Zelt, C. A. and Barton, P. J.: Three-dimensional seismic refraction tomography: A comparison of two methods applied to data from the Faeroe Basin. *J. Geophys. Res.*, **103**, 7187-7210, 1998.
- 10) 岩崎貴哉: 海底地震探査に基づく地下速度構造研究のための波線追跡プログラム. *地震*, **41**, 263-266, 1988.
- 11) Červený, V. and Pšenčík, I.: Program package SEIS83, Charles University, Prague, 1983.
- 12) 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 intraoceanic arc, *J. Geophys. Res.*, **112**, B05104, doi:10.1029/2006JB004593, 2007.
- 13) Arai, R., T. Iwasaki, H. Sato, S. Abe and N. Hirata: Collision and subduction structure of the Izu-Bonin arc, central Japan, revealed by refraction/wide-angle reflection analysis, *Tectonophysics*, **475**, 438-453.
- 14) 産業技術総合研究所地質調査総合センター:100万分の1日本地質図 第3版 CD-ROM第2版,産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2003.
- 15) 鈴木宏芳・小村健太郎:関東地域の孔井データ資料集, 防災科学技術研究資料, **191**, 1-80, 1999.
- 16) http://www.hinet.bosai.go.jp/st_info/detail/
- 17) 鈴木宏芳: 関東平野の地下地質構造. 防災科学研究報告書, **63**, 1-19, 2002.
- 18) 林広樹・笠原敬司・木村尚紀: 関東平野の地下に分布する先新第三系基盤岩類. *地質雑*, **112**, 2-13, 2006.
- 19) 佐藤比呂志・伊藤谷生・笠原敬司・加藤直子: 大深度弾性波探査 3.1.4. 関東地域の地下構造データベース, 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18年度) 成果報告書, 215-230, 2007.
- 20) Arai, R., T. Iwasaki, H. Sato, S. Abe, N. Hirata: Collision and subduction structure of the Izu-Bonin arc, central Japan, revealed by refraction/wide-angle reflection analysis, *Tectonophysics*, **475**, 438-435, 2009.

- 21) 佐藤比呂志・平田直・岩崎貴哉・瀬瀬一起・伊藤 潔・伊藤谷生・笠原敬司・加藤直子: 大深度弾性波探査 3.1.3. 関東地殻構造探査 (小田原-山梨測線), 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, 98-182, 2006.
- 22) Arai, R., T. Iwasaki, H. Sato, S. Abe, N. Hirata: Detailed crustal structure and a new evolution model of the Izu collision zone: Arc-arc collision in 1 central Japan (submitted).
- 23) 佐藤比呂志・岩崎貴哉・飯高隆・蔵下英司: 3.1 断層帯の三次元形状・断層帯周辺の地殻構造解明のための調査観測 a. 制御震源地震探査による地殻構造の解明, 神縄・国府津-松田断層帯における重点的な調査観測 平成21年度成果報告書, 5-47, 2010.
- 24) 佐藤比呂志・平田直・伊藤谷生・岩崎貴哉・瀬瀬一起・笠原敬司・伊藤潔: 大深度弾性波探査 2. 房総半島縦断地殻構造探査 (房総 2002), 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「大都市圏近く構造調査研究」(平成 14 年度) 成果報告書. 7-87, 2003.
- 25) Kohonen, T.: "Self-organizing maps", Springer, 501p., 2000.
- 26) 若松加寿江・久保純子・松岡昌志・長谷川浩一・杉浦正美: 2005, 日本の地形・地盤デジタルマップ. 東京大学出版会.
- 27) 松岡昌志・翠川三郎: 国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング, 第22回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, 23-34, 1994.
- 28) 林広樹・柳沢幸夫・武田哲也・関口渉次・笠原敬司: 関東平野の地下における新第三系の年代と地震波速度, フィクション・トラック ニュースレター, 21, 9-15, 2008.
- 29) Matsubara, M., Hayashi, H., Obara, K., and Kasahara, K.: Low-velocity oceanic crust at the top of the Phillipine Sea and Pacific plates beneath the Kanto region, central Japan, imaged by seismic tomography, *J. Geophys. Res.*, 110, B12304, doi:10.1029/2005JB003673, 2005.
- 30) 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*, 454, 86-103, 2008.
- 31) Abe, S., Kurashimo, E., Sato, H., Hirata, N., Iwasaki, T., and Kawanaka, T.: Interferometric seismic imaging of crustal structure using scattered teleseismic waves, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L19305, doi:10.1029/2007GL030633, 2007.
- 32) Shragge, J., Artman, B., and Wilson, C.: Teleseismic shot-profile migration, *Geophysics*, 71, SI221-229, 2006.
- 33) Wilson, D., and Aster, R.: Seismic imaging of the crust and upper mantle using regularized joint receiver functions, frequency-wave number filtering, and multimode Kirchhoff migration, *J. Geophys. Res.*, 110, B05305, doi:10.1029/2004JB003430, 2005.
- 34) 佐藤比呂志ほか: 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, 12-15, 2010.

- 35) 浅尾一己、佐藤比呂志、伊藤谷生: 大大特房総 2002 反射断面における上総—下総層群の鍵層準の設定、大大特プロジェクト「(地震動) (強い揺れ) の予測、「大都市圏地殻構造調査」(平成 18 年度) 報告書, 2007.
- 36) 東京都土木技術研究所: 東京都(区部) 大深度地下地盤図—東京都地質図集 6-, 66 pp., 1996.
- 37) 日本地質学会編: 日本地方地質誌 3 関東地方, 570pp., 2008.
- 38) 活断層研究会: 新編日本の活断層—分布図と資料—, 東京大学出版会, 437pp, 1991.
- 39) 貝塚爽平: 関東の第四紀地殻変動, 地学雑誌, 96, 51-68, 1987.
- 40) 高橋雅紀・林広樹・笠原敬司・木村尚紀: 地質学雑誌, 112, 33-52, 2006.
- 41) 石山達也・水野清秀・水野清秀・杉山雄一・須貝俊彦・中里裕臣・八戸昭一・末廣匡基・細矢卓志: 変動地形・ボーリング・反射法地震探査により明らかになった綾瀬川断層北部の撓曲変形, 活断層古地震研究報告, 5, 29-37, 2005.
- 42) 中澤努・田辺晋: 野田地域の地質. 地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅), 72p, 産総研地質調査総合センター, 2011.
- 43) 遠藤毅・中村正明: 東京都区部の深部地盤構造とシルト層の土質特性, 土木学会論文集, 654/III-51, 185-194, 2000.
- 44) 貝塚爽平: 武蔵野台地の地形変位とその関東造盆地運動における意義. 第四紀研究, 1, 20-30, 1957.
- 45) 廣内大助: 武蔵野台地・大宮台地における第四紀後期段丘面の高度分布から見た荒川断層の活動性についての再検討, 地理学評論, 72A-5, 335-344, 1999.
- 46) 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.
- 47) Nakajima, J., F. Hirose, A. Hasegawa: Seismotectonics beneath Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap seismicity, J. Geophys. Res., 114, B08309, doi:10.1029/2008JB006101, 2009.

(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
Characterization of the upper surface of the Philippine Sea plate beneath Kanto, central Japan, revealed by seismic reflection profiling (ポスター)	Sato, H., S. Abe, T. Iwasaki, E. Kurashimo, D. Okaya, T. Kawanaka, N.Hirata	Austria Center Vienna, Vienna, Austria (European Geophysical Union General Assembly 2011)	平成23年 4月5日	国際
関東北東部のフィリピ	佐藤比呂志・	幕張メッセ国際会	平成23年	国内

ン海スラブの形状: 九十九里-霞ヶ浦測線における地殻構造探査 (口頭)	阿部進・蔵下英司・岩崎貴哉・平田直・溝畑茂治・酒井慎一・浅尾一己・伊藤谷生	議場、千葉市 (日本地球惑星科学連合)	5月23日	
稠密地震観測による首都圏北東部地域のプレート構造 (口頭)	蔵下英司・佐藤比呂志・阿部進・溝畑茂治・平田直	幕張メッセ国際会議場、千葉市 (日本地球惑星科学連合)	平成23年 5月23日	国内
関東平野の伏在活断層の地下構造 (口頭)	石山達也・佐藤比呂志・加藤直子・阿部進	幕張メッセ国際会議場、千葉市 (日本地球惑星科学連合)	平成23年 5月23日	国内
関東から西南日本にかけての第四紀地殻変動: レビューと展望 (口頭)	石山達也・佐藤比呂志	幕張メッセ国際会議場、千葉市 (日本地球惑星科学連合)	平成23年 5月26日	国内
制御震源データに基づく伊豆小笠原弧の多重衝突・沈み込み構造 (口頭)	新井隆太・岩崎貴哉・佐藤比呂志・阿部進・平田直	幕張メッセ国際会議場、千葉市 (日本地球惑星科学連合)	平成23年 5月23日	国内
伊豆小笠原弧の沈み込み構造と地震活動への示唆 (ポスター)	新井隆太・岩崎貴哉・佐藤比呂志・阿部進・平田直	幕張メッセ国際会議場、千葉市 (日本地球惑星科学連合)	平成23年 5月23日	国内
伊豆衝突帯北西部の地殻構造: 御坂地塊の衝突構造と甲府花崗岩体の貫入構造への制約 (ポスター)	新井隆太・岩崎貴哉・佐藤比呂志	幕張メッセ国際会議場、千葉市 (日本地球惑星科学連合)	平成23年 5月23日	国内
深部構造探査により得られた綾瀬川断層の地下構造	石山達也・佐藤比呂志・加藤直子・阿部進	日本地球惑星科学連合 2011 大会 (幕張メッセ国際会議場)	2011年5月23日	国内
南関東の伏在逆断層と第四紀テクトニクス	石山達也・佐藤比呂志・中山俊雄・加藤	日本地質学会 2011 年大会 (茨城大学)	2011年9月9日	国内

	直子・阿部 進			
Geometry of the upper surface of Philippine Sea plate beneath Kanto, central Japan, revealed by seismic reflection profiling (ポスター)	Sato, H., S. Abe, T. Iwasaki, E. Kurashimo, R. Arai, D. Okaya, T. Kawanaka, N. Hiara	Melbourne Convention & Exhibition Centre, Melbourne, Australia (The XXV IUGG General Assembly)	平成23年 7月1日	国際
Crustal structure of the Izu Collision zone, central Japan, revealed by dense seismic array observations (ポスター)	Kurashimo, E., H. Sato, S. Abe, N. Kato, M. Ishikawa, K. Obara	Melbourne Convention & Exhibition Centre, Melbourne, Australia (The XXV IUGG General Assembly)	平成23年 7月1日	国際
Active Tectonics of Tokyo Metropolitan Area (ポスター)	Ishiyama, T., H. Sato, N. Kato, T. Iwasaki, S. Abe	Melbourne Convention & Exhibition Centre, Melbourne, Australia (The XXV IUGG General Assembly)	平成23年 7月1日	国際
Multiple Collision and Subduction Structure of the Izu-Bonin Arc, Central Japan, Revealed by Active Source Seismic Data (口頭)	Arai, R., T. Iwasaki, H. Sato, N. Hirata	Melbourne Convention & Exhibition Centre, Melbourne, Australia (The XXV IUGG General Assembly)	平成23年 7月2日	国際
Subduction Structure of the Izu-Bonin Arc, Central Japan, and its Implications for the Seismic Activity (ポスター)	Arai, R., T. Iwasaki, H. Sato, N. Hirata	Melbourne Convention & Exhibition Centre, Melbourne, Australia (The XXV IUGG General Assembly)	平成23年 7月1日	国際
稠密地震観測による伊豆衝突帯の地殻構造 (口頭)	蔵下英司	上越市教育プラザ、 上越市 (研究集会 「本州中部の地殻 構造と震源断層モ デル」)	平成23年 8月30日	国内

伊豆衝突帯の地殻構造と衝突・沈み込みプロセス（口頭）	新井隆太	上越市教育プラザ、上越市（研究集会「本州中部の地殻構造と震源断層モデル」）	平成23年 8月30日	国内
関東地域の地下構造調査：堆積盆地からプレートまで（口頭）	佐藤比呂志・笠原敬司・平田直・岩崎貴哉・加藤直子・蔵下英司・石山達也・中山俊雄・伊藤谷生・浅尾一己・木村尚紀・阿部進・川崎慎治・斉藤秀雄・溝畑茂治・川中卓・太田陽一・須田茂幸・大西正純・井川猛	茨城大学、水戸市（日本地質学会第118年学術大会）	平成23年 9月9日	国内
南関東の伏在逆断層と第四紀テクトニクス（口頭）	石山達也・佐藤比呂志・中山俊雄・加藤直子・阿部進	茨城大学、水戸市（日本地質学会第118年学術大会）	平成23年 9月9日	国内
屈折・反射法弾性波探査による東京都の地下構造（口頭）	中山俊雄	茨城大学、水戸市（日本地質学会第118年学術大会）	平成23年 9月9日	国内
制御震源探査に基づく伊豆小笠原弧多重衝突・沈み込み構造（口頭）	新井隆太・岩崎貴哉・佐藤比呂志・阿部進・平田直	茨城大学、水戸市（日本地質学会第118年学術大会）	平成23年 9月10日	国内
Detailed crustal structure and evolution	Arai, R.	Apoi Sanso Hotel, Samani,	平成23年 10月2日	国際

model of the Izu collision zone		Hokkaido, Japan (Workshop for understanding of the collision process - Detailed structure beneath the Hokkaido and Izu collision zones-)		
稠密地震観測による首都圏北東部下のスラブ接触域における地震波速度構造 (口頭)	蔵下英司・佐藤比呂志・阿部進・溝畑茂治・平田直	静岡県コンベンションアーツセンター・グランシップ、静岡市 (日本地震学会2011年秋季大会)	平成23年 10月12日	国内
Seismic structure of southern margin of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake aftershocks area: slab-slab contact zone beneath northeastern Kanto, central Japan (ポスター)	Kurashimo, E., H. Sato, S. Abe, S. Mizohata, N. Hirata	Moscone Convention Center, San Francisco, CA, USA (American Geophysical Union)	平成23年 12月9日	国際
Structures of Active Blind Thrusts Beneath Tokyo Metropolitan Area (口頭)	Ishiyama, T., H. Sato, N. Kato, T. Nakayama, T. Iwasaki, S. Abe	Moscone Convention Center, San Francisco, CA, USA (American Geophysical Union)	平成23年 12月9日	国際
Multiple Collision and Subduction Structure of the Izu-Bonin Arc: Tectonics of the Arc-arc Collision in Central Japan (ポスター)	Arai, R., T. Iwasaki, H. Sato, N. Hirata	Moscone Convention Center, San Francisco, CA, USA (American Geophysical Union)	平成23年 12月9日	国際
Structures of active blind thrusts beneath Tokyo metropolitan area	Ishiyama, T., Sato, H., Kato, N.	The 3rd SCEC-ERI joint workshop Stanford University,	2011年12月 11日	国際

	Nakayama, T., Iwasaki, T., Abe, S.	USA		
--	--	-----	--	--

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