

3. 研究報告

3. 1 南関東の地震像の解明

3. 1. 1 首都圏での地震発生過程の解明

3. 1. 1. 1 首都圏主部での地震発生過程の解明

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

首都圏地震観測網（MeSO-net）の観測データによって、首都圏のプレート構造の解明を進め、プレートの詳細な構造と2011年3月11日以降活発化した地震活動の関係を解明し、将来発生が予想される首都直下地震の地震像（地震規模、地震発生頻度、発生場所）を解明する。首都圏の地盤の揺れの特性を解明する。そのために、MeSO-netを維持・補修し、観測データを蓄積する。首都圏主部、特に、東京湾域、房総半島域などの地震活動に注目し、詳細なプレート構造を解明するための調査研究を行う。「データ収集・処理・公開センター」を運用する。

(b) 平成28年度業務目的

- 1) 首都圏及び東京湾に整備された296か所の中感度地震観測点と房総半島に整備された25か所の房総アレイ観測点からなる首都圏地震観測網（MeSO-net）を維持・管理し、自然地震観測を行う。必要に応じて、老朽化した一部設備の補修等を行う。
- 2) 国立大学法人東京大学地震研究所の「データ収集・処理・公開センター」の整備を進めて、MeSO-netの自然地震観測データを収集・処理する。また、サブプロジェクト②が建物に設置した地震計のデータを収集する。これらの収集データは、サブプロジェクト①で実施する解析やデータの利活用、サブプロジェクト②の地盤－基礎－建物系の応答の研究における観測データ、サブプロジェクト③に提供する情報として活用される。
- 3) 収集したMeSO-netのデータを、国立研究開発法人防災科学技術研究所の「統合・保管センター」と神奈川県温泉地学研究所に送信する。共同研究者等にウェブを利用したデータの提供を行う。また、サブプロジェクト②が設置した地震計のデータとMeSO-netのデータをサブプロジェクト②と共有する。
- 4) 2)で収集・処理されたデータをこれまでに国内で設置された既存観測点のデータと併せ、震源決定法・地震波トモグラフィ法等の手法を用いて、震源分布や地震波速度と非弾性常数の三次元的分布等の解析を進め、予察的な関東地方のプレート構造を求める。また、収集したデータ等を用いて、MeSO-netの観測点地表における震度相当値の補正值等を求め、震度予測の高度化のための手法を検討する。
- 5) 1)～4)で得られた情報を首都圏での中小地震と大地震の発生過程の関係の解明のために課題(1)c「首都圏での中小地震と大地震の発生過程の関係の解明」に提供する。

(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	平田 直	hirata@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	教授	小原 一成	
東京大学地震研究所	教授	岩崎 貴哉	
東京大学地震研究所	教授	鷹野 澄	
東京大学地震研究所	准教授	酒井 慎一	
東京大学地震研究所	准教授	飯高 隆	
東京大学地震研究所	准教授	鶴岡 弘	
東京大学地震研究所	准教授	加藤 愛太郎	
東京大学地震研究所	講師	中川 茂樹	
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	五十嵐 俊博	
東京大学地震研究所	助教	前田 拓人	
東京大学地震研究所	特任研究員	パナヨトプロ	
東京大学地震研究所		ス ヤニス	
東京大学地震研究所	技術専門職員	八木 健夫	
東京大学地震研究所	技術専門職員	宮川 幸治	
	技術職員	田中 伸一	
	学術支援専門職員	川北 優子	

(2) 平成 28 年度の成果

(a) 業務の要約

- 1) 首都圏及び東京湾に整備された 296 か所の中感度地震観測点と房総半島に整備された 25 か所の房総アレイ観測点からなる首都圏地震観測網 (MeSO-net) を維持・管理し、自然地震観測を行った。必要に応じて、老朽化した一部設備の補修等を行った。
- 2) 国立大学法人東京大学地震研究所の「データ収集・処理・公開センター」の整備を進めて、MeSO-net の自然地震観測データを収集・処理した。また、サブプロジェクト②が建物に設置した地震計のデータを収集した。これらの収集データは、サブプロジェクト①で実施する解析やデータの利活用、サブプロジェクト②の地盤-基礎-建物系の応答の研究における観測データ、サブプロジェクト③に提供する情報として活用された。
- 3) 収集した MeSO-net のデータを、国立研究開発法人防災科学技術研究所の「統合・保管センター」と神奈川県温泉地学研究所に送信した。共同研究者等にウェブを利用したデータの提供を行った。また、サブプロジェクト②が設置した地震計のデータと MeSO-net のデータをサブプロジェクト②と共有した。
- 4) 2) で収集・処理されたデータをこれまでに国内で設置された既存観測点のデータと併せ、震源決定法・地震波トモグラフィ法等の手法を用いて、震源分布や地震波速度と非弾性常数の三次元的分布等の解析を進め、予察的な関東地方のプレート構造を求めた。また、収集したデータ等を用いて、MeSO-net の観測点地表における震度相当値の補正值等を求め、震度予測の高度化のための手法を検討した。

5) 1) ～4) で得られた情報を首都圏での中小地震と大地震の発生過程の関係の解明のために課題(1)c「首都圏での中小地震と大地震の発生過程の関係の解明」に提供した。

(b) 業務の成果

1) 首都圏地震観測網 (MeSO-net) による自然地震観測

a) 観測網の維持

本プロジェクトでは、首都圏地震観測網 (MeSO-net) を維持し、得られたデータを有効に活用した研究を進めている (図 1、P18.)。MeSO-net は、文部科学省委託業務「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト (2007 年～2011 年)」(前プロジェクトと呼ぶ。)において、首都圏における地震活動や地下構造等を明らかにするために構築された (平田・他, 2009¹⁾, 汐見・他, 2009²⁾)。この観測網は、296 ヶ所の地震観測点からなり、各観測点では約 20 m のボアホールに 3 成分の加速度計が設置されている (図 2、P.18)。測定データはボアホールの孔底でデジタル変換され、ISO11898 に準拠したシリアルバス (CAN バス) を用いて接続された地上部装置へ伝送されている。人工ノイズの多い地表から離れたこと、温度変化の少ない地中で測定したこと、すべてデジタルで伝送したこと等から、都市部における地震観測としては、十分なシグナルを得ることができている。地上装置は、インターネットを利用して地震研究所のデータセンターまで送信するが、回線の混雑時や回線断の時には自ら判断してメモリにデータを蓄積し、回線が空いてきた時に改めて送信するといった再送機能を有した自律協調型の装置である。さらに、停電時にも稼働できるようにバッテリーを備えているため、データの欠落はほとんどなく、24 時間 365 日ほぼすべてのデータを収集している。

地上部装置は観測装置の制御部として重要な機能を有しているだけでなく、データセンターにおける各装置の動作状況の監視を円滑かつ自動的に行うため、SNMP (Simple Network Management Protocol) を利用した監視システムを導入した。これにより、少人数での観測網の運用が可能となっている。また、データセンターから遠隔操作で観測装置のファームウェアの更新や各機能の制御パラメータの変更を行うことができ、保守に係る人的・時間的コストの軽減を実現した。データセンターで収集されたデータは、国立研究開発法人防災科学技術研究所および神奈川県温泉地学研究所へ送られ、周辺の既存観測点のデータと共に統合され、研究や高精度処理に利用されている。これらのデータは、共同研究として本プロジェクト以外の研究者と共に地震防災に関わる様々な研究に利用されている。さらに、WEB を使って教育関係者等へも渡されていて、防災教育や理科教育にも利用されている。

b) 老朽化した設備の移設及び交換

今年度は、6 観測点 (太東小学校、七郷小学校、日吉台小学校、高松中学校、増穂北小学校、南白亀小学校) で地震計の交換を行った。原因は不明であるが、ある成分だけに不具合が生じ、正しい記録を得られない状態が続いていたため、地下にある地震計を引き上げ、新しい地震計と交換した。その他、昨年度までの総合調査で不具合の見られた観測点において、あらためて点検と修理を行った。バッテリーの交換が 39 ヶ所あり、正常な観測が維持できるように努めた。なお、今年度のルーター電源の不具合は、6 ヶ所であった。

これで、のべ 44 ヶ所になるが、そのうち 2007 年度設置観測点が 39 ヶ所である。

2) データ解析

a) 震源分布

今年度は、これまでに処理してきた解析結果を整理した。MeSO-net で収録したデータは、周辺のテレメータ観測点のデータ（東京大学地震研究所、気象庁、国立研究開発法人防災科学技術研究所、神奈川県温泉地学研究所）と統合して、気象庁一元化処理震源カタログに基づき以下の基準で選んだものである。

- ・北緯 34.85 度～36.60 度、東経 138.8 度～140.8 度、マグニチュード 2.5 以上
- ・北緯 35.40 度～36.00 度、東経 140.8 度～141.1 度、マグニチュード 4.0 以上

これらの地震に対し、各観測点の P 波到着時刻、S 波到着時刻、最大振幅、P 波初動振動方向を読み取り、震源決定を行ったものである（図 3、P.19）。2010 年 12 月 19 日から 2015 年 3 月 15 日の期間に発生した地震の中から 1,947 個の地震を選び出した。読み取り数の合計は P 相が 508,200 個、S 相が 279,583 個、最大振幅が 529,115 個、初動振動方向が 288,028 個である。震源決定には、前プロジェクトと同じく地震研究所の通常処理で使用されている 1 次元 P 波速度構造を使用した。また、 V_p/V_s 比を 1.73 と仮定して求めた S 波速度を用いた。最初の震源決定後、観測走時と計算走時の差の平均値を基に観測点補正値を決定した。観測点補正値を求めるために使用した地震は、今年度の処理データに加えて昨年度の処理データを合わせたものの中から、東経 138 度から 141 度、北緯 34 度から 38 度、深さ 150 km 以浅で発生した地震のうち、P 相、S 相ともに 50 個以上の読み取りのある 507 イベントである。観測点補正値の分布を図 4（P.20）に示す。

b) 地震波速度構造

MeSO-net で取得したデータ及び既存のデータを用いて、二重走時差トモグラフィ法（Double-difference tomography）（Zhang and Thurber, 2003³⁾）による走時データ・インバージョン解析を行い、首都圏の地震波速度構造の推定を試みた。群列配置された観測網に本手法を適用して地震波速度構造を推定することは、Kato *et al.* (2009)⁴⁾などの研究により、震源の相対走時の精度を向上させ結果として分解能の向上に寄与することが示されている。さらに列状配置された観測網間も、地下深部であれば精度良く推定されることが示されている。本解析は、基本的には Hagiwara *et al.* (2006)⁵⁾が房総半島を中心とした関東地方を対象領域として行ったトモグラフィ解析を参考にした。解析には、前項 a) で作成した MeSO-net および定常観測網の検測値データを利用した。

解析グリッドの水平位置は、東西方向(X)と南北方向(Y)に基本的には 10 km 間隔（都心部は 5km、外周部は 20 km 間隔）となるようにグリッドを配置した。また、深さ方向(Z)は、深さ 70 km までは 5 km 間隔に、それ以深は 80、90、100、150 km にグリッドを配置した。インバージョン解析用の初期速度構造および初期 V_p/V_s として、国立研究開発法人防災科学技術研究所高感度地震観測網が、ルーチン処理で用いている構造（鶴川・他, 1984⁶⁾）を採用した。インバージョン解析に使用した地震は、2010 年 12 月 19 日から 2015 年 3 月

15日までに発生した計1,871個で、気象庁一元化処理震源カタログのうちマグニチュード2.2以上の地震に相当する。使用した走時データの内訳は、絶対走時データはP波が476,730個、S波が303,797個であり、二重走時差データはP波が944,771個、S波が612,383個である。その結果、速度構造の分解能が向上し、前プロジェクトで得られた速度構造と矛盾しない結果が得られた(図5、P.21)。

c) 非弾性常数の三次元分布

首都圏下に沈み込むプレート構造と首都圏で発生する地震活動との関係を理解するために地震波の減衰構造(Q構造)を求めた。これまでも、地震波減衰構造に関して調べられてきた。日本全国の大規模構造に対しては、たとえばJin and Aki (2005)⁷⁾やEdwards and Rietbrock (2009)⁸⁾、関東地方の地域的な減衰構造に対しては、ボアホール観測記録を利用したKinoshita (1994)⁹⁾やYoshimoto and Okada (2009)¹⁰⁾、強震動記録を用いたNakamura *et al.* (2006)¹¹⁾などが知られている。しかしながら、それらは観測点密度が不十分であるため得られる減衰構造の分解能が低く、沈み込むプレート境界やプレート内の物質特性を知るために十分な精度とは言えない。前プロジェクトで構築されたMeSO-netの観測点間隔は2~5kmと稠密であるため、首都圏下の減衰構造が従来よりも高空間分解能で得られることが期待される。

まず、MeSO-netで観測された地震波形記録に対して、震源から観測点までの地震波の減衰効果を表すパラメータ(t^* 、 f_c)を求める。一般に観測された波形のフーリエスペクトル $H(f)$ は、震源スペクトルと地震波伝播経路と観測点直下での減衰または増幅の効果の積として表わされる。本研究ではBrune (1970)¹²⁾の震源モデルを用い、観測されたスペクトル $H(f)$ が以下の式(1)(例えば、Boatwright, 1978¹³⁾; Lindley and Archuleta, 1992¹⁴⁾)で表わされるとして、 t^* を求めた。

$$H(f) = \frac{\Omega_0 \exp(-\pi f t^*)}{\left(1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2\gamma}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

ここで、 f は周波数、 Ω_0 は周波数 $f=0$ のスペクトル振幅、 t^* は地震波伝播経路での減衰の影響を表すパラメータ、 f_c はコーナー周波数、 γ は震源スペクトルの周波数依存性を決めるパラメータである。本研究では、 $\gamma=2$ とし、オメガ二乗(ω^2)震源モデルを用いた。観測された加速度波形を2回積分して変位波形を求めてからフーリエ変換してフーリエ振幅を求めた。積分に伴うドリフトを補正するためにハイパスフィルター(0.2 Hz)を通した地震波形に対し、P波到着時刻1秒前から3秒後の範囲でスペクトルを求め、理論スペクトルに合致する Ω_0 、 t^* 、 f_c をグリッドサーチで得た。

観測された地震波のスペクトルを見ると、6~18 Hzの周波数範囲での増幅度が大きく、これは主に関東盆地の厚い堆積層の影響と考えられる(図6、P.22)。推定された見かけのコーナー周波数 f_c はばらつきが大きく、推定された t^* も同様にばらついていた。そこで本研究では、安定した t^* を求めるために、一つの地震に対してはどの観測点でも同一の f_c であると仮定して、平均的な f_c を利用することにした。走時差が1割以下である隣接した観測点を選び、平均フーリエスペクトルを求め、これをその地震に対するコーナー周波数 f_c とした。この f_c を用いて、観測点ごとの Ω_0 と t^* を推定した。

一方で、 t^* は減衰の程度を示す Q と地震波速度 V の関数で表すことができる（例えば、Wittlinger *et al.*, 1983¹⁵); Hough *et al.*, 1988¹⁶); Lees and Lindlay, 1994¹⁷)。観測記録から得られる t^* は波線経路上の Q の積分と観測点の付近のサイト効果を示す t_0^* から(2)式になる。

$$t^* = t_0^* + \int_{\text{ray path}} \frac{1}{QV} ds \quad (2)$$

この式は、地震波速度トモグラフィ解析と同様の手法を適用して、速度 V の代わりに減衰 Q に関するインバージョン解析を行うことで、多数の地震の t^* 値から減衰 Q の3次元分布が得られることを示している(Thurber and Eberhart-Phillips, 1999¹⁸); Rietbrock, 2001¹⁹)。

本研究では、2008年4月1日から2015年2月9日までに発生した地震のうち、計測震度が0.5以上で、なるべく多くの観測点でS/Nの良い記録を得ることができた3,174個の地震を選び、 t^* を求めた(図7、P.22)。得られた t^* を用いて地震波減衰トモグラフィ解析(SIMUL2000)(Thurber and Eberhart-Phillips, 1999¹⁸); Rietbrock, 2001¹⁹)を行い、P波の減衰構造(Q_p 分布)およびS波の減衰構造(Q_s 分布)を推定した。空間分解能テスト(図8、P.23)から、水平方向に10 km間隔、深さ方向に10 km間隔で格子点を配置した。初期速度構造は3次元構造を用い(Hirata *et al.*, 2012²⁰)、初期減衰構造(Q_p および Q_s)は、深さ0 kmで116、深さ0 km以深では400で、水平方向に一樣とした。観測点直下の地盤の違いを考慮するために、観測点毎に求めた t^* の残差の平均値を初期 t_0^* として、再び式(2)を解くことを5回くりかえして最終的な t_0^* とした(Lee *et al.*, 2010²¹)。得られた t_0^* は、観測点近傍の基盤増幅率(国立研究開発法人防災科学技術研究所地震ハザードステーションJ-SHIS²²)と特に相関が高いわけではなかった。MeSO-netの地震計は、工学的基盤に近い約20 mのボアホール底に設置されているため、最も大きな減衰効果を示す地表浅部の影響を受けにくいことが原因と考えられる。従って、得られた t^* は深部における減衰の効果をより多く反映していると考えられる。

得られた首都圏下のP波の減衰構造から千葉県西部や東京都東部における深さ40 km付近には低 Q 域が存在し、フィリピン海プレート内の太平洋プレートと接合している領域と対応することがわかる。一般的に古くて冷たいプレート内部では Q 値は高いと考えられている(宇津, 2001²³)だが、沈み込むフィリピン海プレート内部は低 Q 値であり、先行研究でP波とS波の地震波速度比(V_p/V_s)が大きいとされている部分である(Kamiya and Kobayashi, 2000²⁴)。この領域では、フィリピン海プレートの下に太平洋プレートが沈み込んでいて、海洋プレート内部の岩石が脱水反応を伴う変成作用が起こる深さに達していると考えられている。この領域における低 Q 値、高 V_p/V_s は、太平洋プレートから脱水した水が浅部にあるフィリピン海プレート内にとどまり、プレート内部のカンラン岩に蛇紋岩化が起こり始めている可能性を示唆する(笠原・他, 2003²⁵)。同じ地域のS波の減衰構造でも同様な低 Q 域が存在するが、P波の減衰構造と比べて顕著ではない(図9、P.24、図10、P.24)。

本研究で得られた減衰構造で、首都圏で観測される震度分布の不均質を説明することができる。例えば、太平洋プレート上面の地震では、震源地直上ではなく、東京都東部で最大計測震度が観測されることがある(図11、P.25)。フィリピン海プレート内の低 Q 域を通過した地震波がより大きく減衰すると考えれば、定性的にはこの観測事実を説明することが可能である。地震観測記録の無い歴史上の地震における震源地を被害分布に基づき推

定する際は、地盤構造だけでなく、このような地殻内やプレート内の減衰の効果を考える必要がある。本研究で得られた減衰構造と速度構造を統合して解釈することにより、沈み込むプレートの物質特性を知ることができる。これらの成果を利用することでより現実的な強震動シミュレーションが可能になり、首都圏の地震防災・減災に寄与すると考えられる。

3) 発震機構解の分布

今年度処理を行った MeSO-net および定常観測網の検測値データを課題(1)c 「首都圏での中小地震と大地震の発生過程の関係の解明」へ提供し、HASHv2 (Hardebeck and Shearer, 2002²⁶⁾) を修正したプログラムを用いて発震機構解を求めた (3.1.3 節図 1、P.106) (詳細は 3.1.3 節を参照)。

4) 地震防災知識の普及、防災意識の啓発への活用

地震防災知識の普及のため、MeSO-net を設置した学校等では収集したデータを閲覧できるようにウェブを運用している。さらに、防災意識の啓発に活かすための教育者や研究者、行政関係者等とのメイリングリストを運営している。一方で、MeSO-net を設置した学校や関係自治体等では、防災意識の啓発を目的とした出張授業や講演会を行った (詳細は 3.3 節を参照)。

(c) 結論ならびに今後の課題

「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」で構築した首都圏地震観測網(MeSO-net) に対して総合点検や監視を行い、正常にデータを収集するように観測網を維持した。その観測データは周辺の既存観測データと統合され、「データ収集・処理・公開センター」を運用した。それらのデータを利用して、震源決定、速度構造解析、減衰構造解析、発震機構解解析などの解析を行って、首都圏のプレート構造の解明を進めた。プレートの詳細な構造と 2011 年 3 月 11 日以降活発化した地震活動の関係や、将来発生が予想される首都直下地震の地震像 (地震規模、地震発生頻度、発生場所) を明らかにするための基礎的の情報を得ることができた。首都圏主部、特に、東京湾域、房総半島域などの地震活動に注目し、詳細なプレート構造を解明するための調査研究を行った。

このデータは、本プロジェクトの各サブテーマにも提供され、将来発生が予想される首都直下地震の地震像 (地震規模、地震発生頻度、発生場所) を解明し、首都圏の地盤の揺れの特性の解明を推進する。

(d) 引用文献

- 1) 平田直, 酒井慎一, 佐藤比呂志, 佐竹健治, 瀬戸一: 「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」サブプロジェクト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等」の概要, 地震研究所彙報, Vol. 84, pp. 41-56, 2009.
- 2) 汐見勝彦, 佐々木俊二, 酒井慎一, 笠原敬司, 関根秀太郎, 中川茂樹, 小原一成, 平田直, 棚田俊收: 地震動の長周期成分を用いた首都圏地震観測網 (MeSO-net) の設置方位推定, 地震研究所彙報, Vol. 84, pp. 115-125, 2009.
- 3) Zhang, H. and Thurber, C.: Double-difference tomography: The method and its application to

- the Heyward fault, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 93, pp. 1875-1889, 2003.
- 4) Kato, A., Kurashimo, E., Igarashi, T., Sakai, S., Iidaka, T., Shinohara, M., Kanazawa, T., Yamada, T., Hirata, N. and Iwasaki, T.: Reactivation of ancient rift systems triggers devastating intraplate earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 36, L05301, doi:10.1029/2008GL036450, 2009.
 - 5) Hagiwara, H., Igarashi, T., Hirata, N. and Sakai, S.: Velocity structure in the Kanto Region from dense array observation: A new configuration of the Philippine Sea plate, AGU 2006 Fall Meeting, 2006.
 - 6) 鵜川元雄, 石田瑞穂, 松村正三, 笠原敬司: 関東・東海地域地震観測網による震源決定方法について, *国立防災科学技術センター研究速報*, Vol. 35, pp. 1-88, 1984.
 - 7) Jin, A. and Aki, K.: High-resolution maps of Coda Q in Japan and their interpretation by the brittle-ductile interaction hypothesis, *Earth Planets Space*, 57, pp. 403-409, 2005.
 - 8) Edwards, B. and Rietbrock, A.: A Comparative Study on Attenuation and Source-Scaling Relations in the Kantō, Tokai, and Chubu Regions of Japan, Using Data from Hi-Net and KiK-Net, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 99, No. 4, pp. 2435–2460, 2009.
 - 9) Kinoshita, S.: Frequency-Dependent Attenuation of Shear Waves in the Crust of the Southern Kanto Area, Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 84, No. 5, pp. 1387-1396, 1994.
 - 10) Yoshimoto, K. and Okada, M.: Frequency-dependent attenuation of S-waves in the Kanto region, Japan, *Earth Planets Space*, 61, pp. 1067-1075, 2009.
 - 11) Nakamura, R., Satake, K., Toda, S., Uetake, T. and Kamiya, S.: Three-dimensional attenuation (Q_s) structure beneath the Kanto district, Japan, as inferred from strong motion records, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 33, L21304, doi:10.1029/2006GL027352, 2006.
 - 12) Brune, J. N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.* 75, pp. 4997–5009, 1970.
 - 13) Boatwright, J.: Detailed spectral analysis of two small New York state earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 68, pp. 1117-1131, 1978.
 - 14) Lindley, G. T. and Archuleta, R. J.: Earthquake source parameters and the frequency dependence of attenuation at Coalinga, Mammoth Lakes, and the Santa Cruz Mountains, California, *J. Geophys. Res.*, 97(B10), pp. 14137–14154, doi:10.1029/92JB00550, 1992.
 - 15) Wittlinger, G., Haessler, H. and Granet, M.: Three-dimensional inversion of Q_p from low magnitude earthquakes analysis, *Ann. Geophys.* 6 (1), pp. 427–437, 1983.
 - 16) Hough, S.E., Anderson, J.G., Brune, J., Vernon III, F., Berger, J., Fletcher, J., Haar, L., Hanks, T. and Baker, L.: Attenuation near Anza, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 78, pp. 672–691, 1988.
 - 17) Lees, J.M. and Lindley, G.T.: Three-dimensional attenuation tomography at Loma Prieta: inversion of t^* for Q , *J. Geophys. Res.* 99 (B4), pp. 6843–6863, 1994..
 - 18) Thurber, C., and Eberhart-Phillips, D.: Local earthquake tomography with flexible gridding, *Comput. Geosci.* 25, pp. 809–818, 1999.
 - 19) Rietbrock, A.: P wave attenuation structure in the fault area of the 1995 Kobe earthquake, *J. Geophys. Res.* 106 (B3), pp. 4141–4154, 2001.

- 20) Hirata, N., Sakai, S., Nakagawa, S., Ishikawa, M., Sato, H., Kasahara, K., Kimura, H. and Honda, R.: A new tomographic image on the Philippine Sea Slab beneath Tokyo - Implication to seismic hazard in the Tokyo metropolitan region, Abstract T11C-06 presented at the AGU 2012 fall meeting, AGU, San Francisco, Calif., 3-7 Dec., 2012.
- 21) Lee, C. P., Hirata, N., Huang, B. S., Huang, W. G. and Tsai, Y. B.: Evidence of a highly attenuative aseismic zone in the active collision orogen of Taiwan, Tectonophysics, 489, pp. 128-138, 2010.
- 22) 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>.
- 23) 宇津徳治: 地震学, 第3版, 共立出版, 390pp, 2001.
- 24) Kamiya, S. and Kobayashi, Y.: Seismological evidence for the existence of serpentized wedge mantle, Geophys. Res. Lett., 27, pp. 819-822, 2000.
- 25) 笠原順三, 鳥海光弘, 河村雄行編: 地震発生と水, 東京大学出版会, 412pp, 2003.
- 26) Hardebeck, J. L. and Shearer, P. M.: Using S/P Amplitude Ratios to Constrain the Focal Mechanisms of Small Earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., 93, pp. 2434-2444, 2002.

(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
都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト:①首都直下地震の地震ハザード・リスク予測のための調査・研究(口頭)	平田直・中川茂樹・酒井慎一・鶴岡弘・佐藤比呂志・佐竹健治・木村尚紀・本多亮・堀宗朗・長尾大道・石辺岳男・村岸純・加納将行・中村亮一・パナヨトプロスヤニス・横井佐代子	日本地球惑星科学連合2016年大会(千葉市)	2016年5月23日	国内
MeSO-netの地下の観測データから地表の揺れを推定する試み その2(口頭)	酒井慎一・中川茂樹・平田直	日本地球惑星科学連合2016年大会(千葉市)	2016年5月23日	国内
A new model of P and S wave attenuation structure for the Tokyo Metropolitan area using the	Panayotopoulos, Y., N. Hirata, S. Sakai, S. Nakagawa, R. Nakamura	日本地球惑星科学連合2016年大会(千葉市)	2016年5月23日	国内

MeSO-net station network (口頭)				
Present and Future of Metropolitan Seismic Observation network (MeSO-net) in Japan (口頭)	Naoshi Hirata	AGU Fall Meeting (サンフランシスコ)	2016年12月12-16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

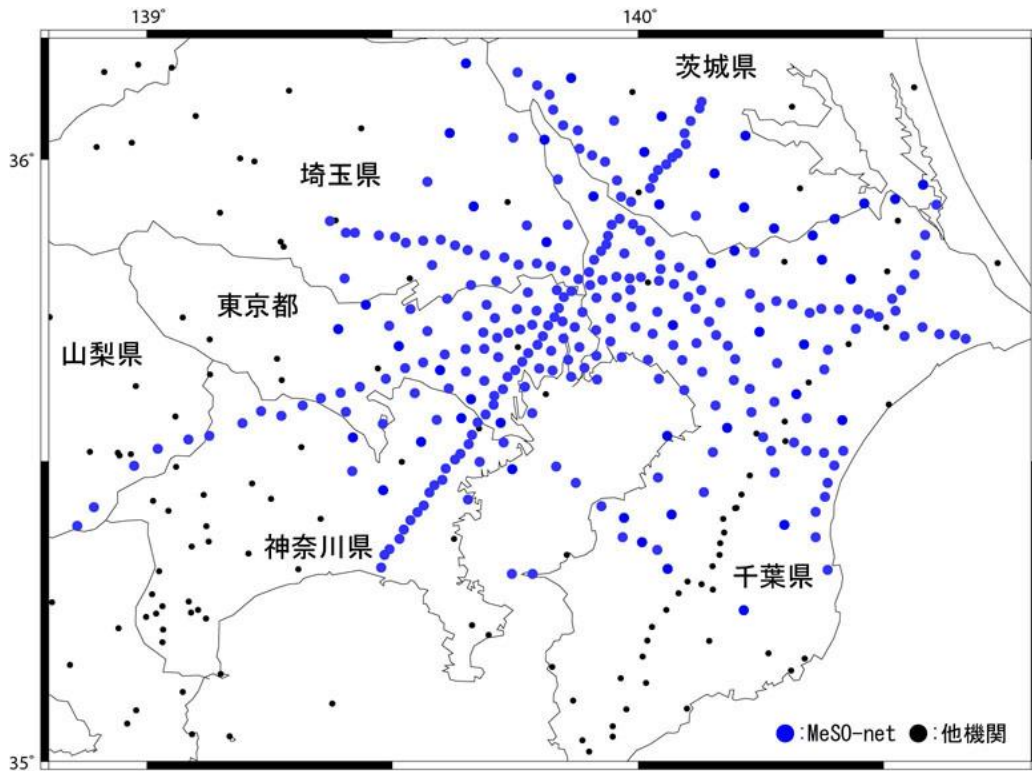


図1 観測点分布。首都圏 296ヶ所に設置された観測点を維持。



図2 観測点の概要。地下 20m の深さに地震計が設置され、その信号をテレメータ装置が、地震研究所へ 24 時間 365 日連続して送信している。

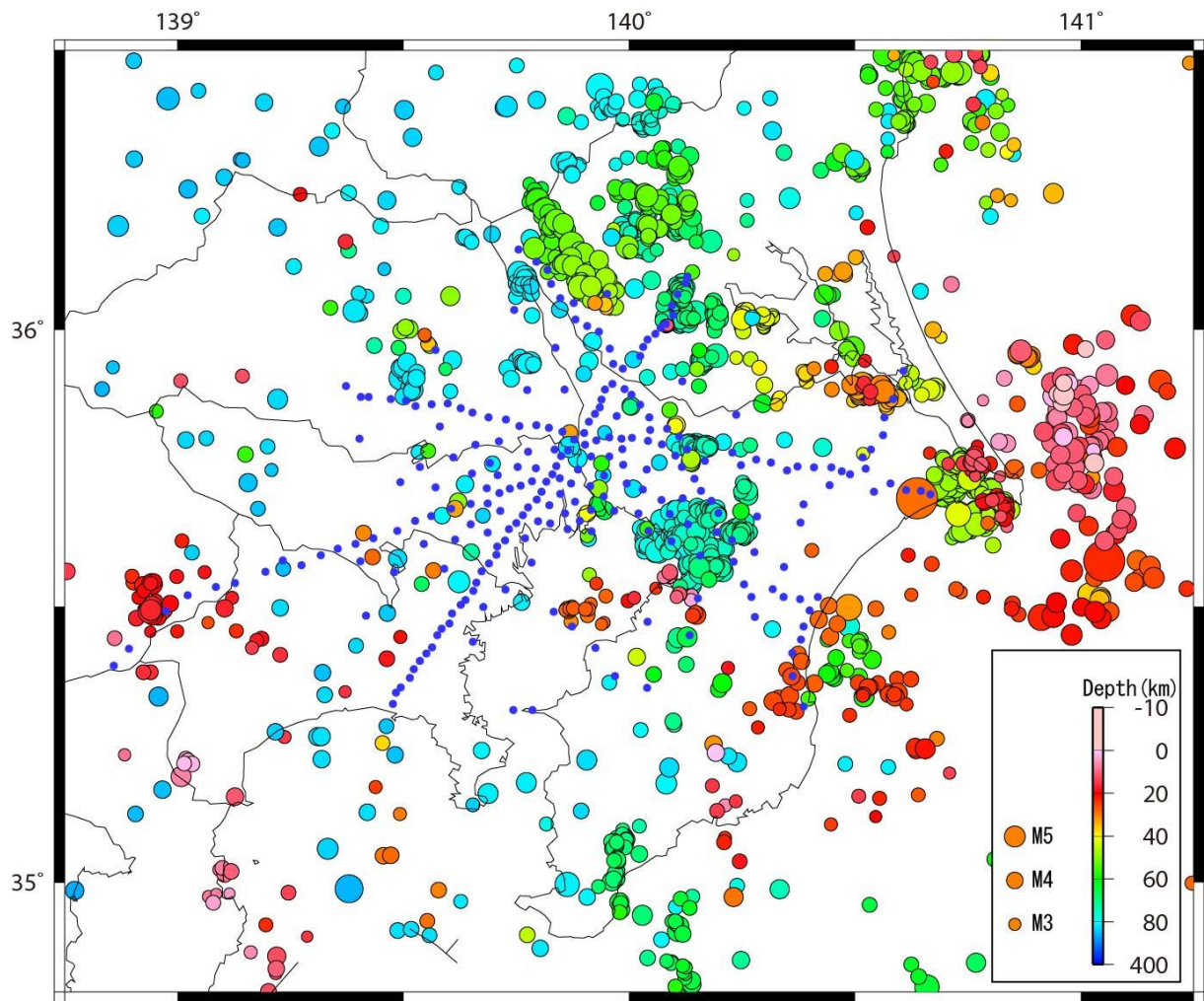


図3 震源分布。これまでに処理した震源(2010年12月19日～2015年3月15日)。色は震源の深さを表し、暖色系の色は浅い震源に対応する。

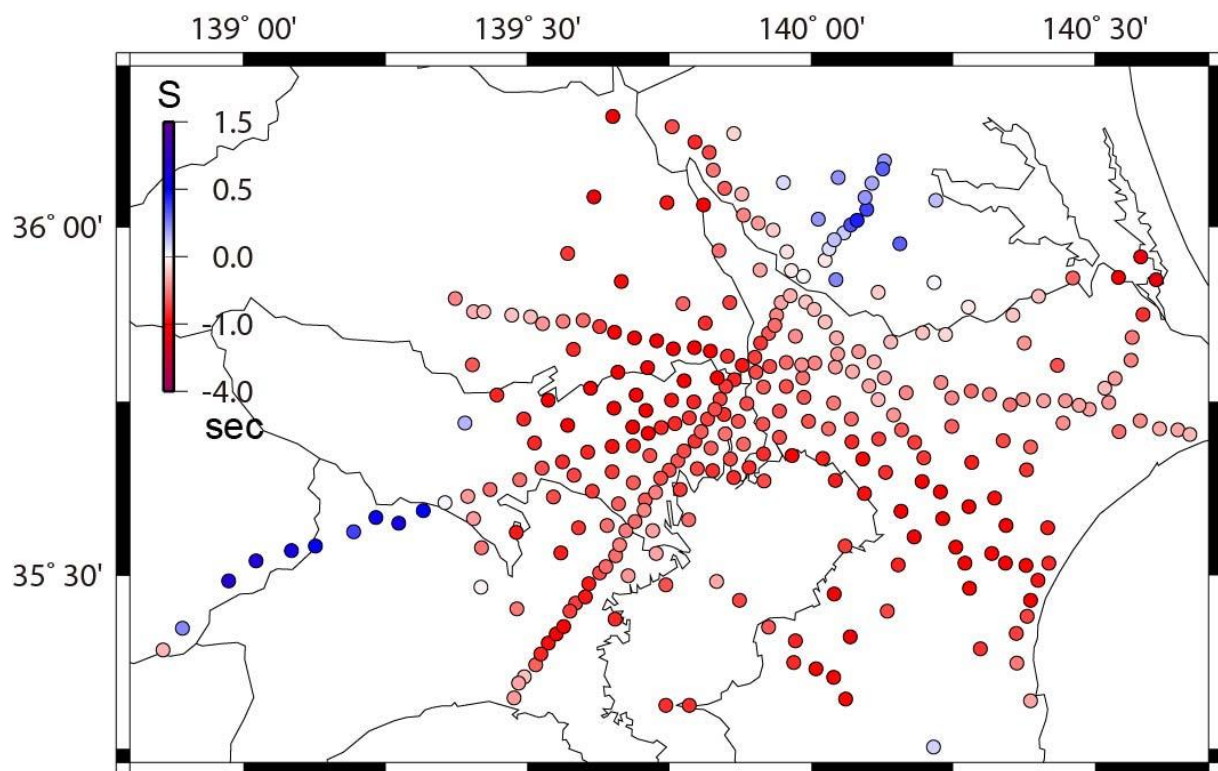
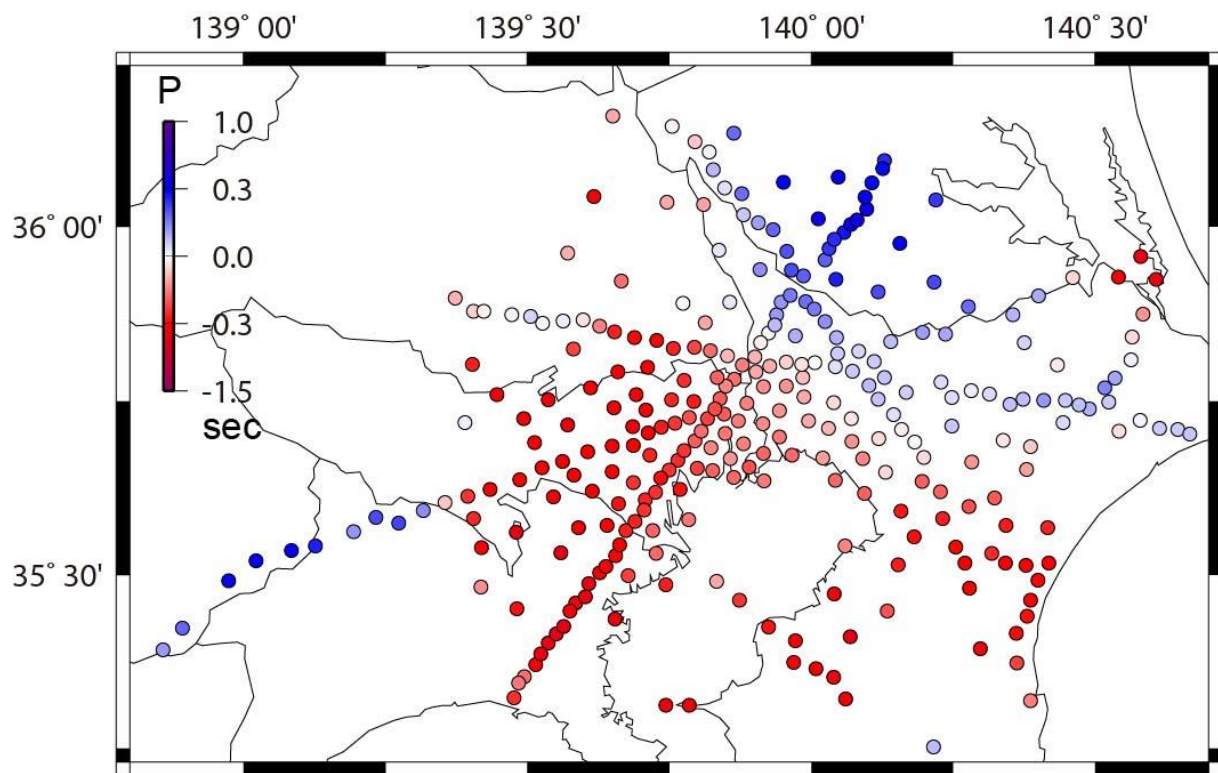


図4 観測点補正值分布（上図：P波、下図：S波）。赤は、平均的な速度構造より遅いことを補正する観測点。

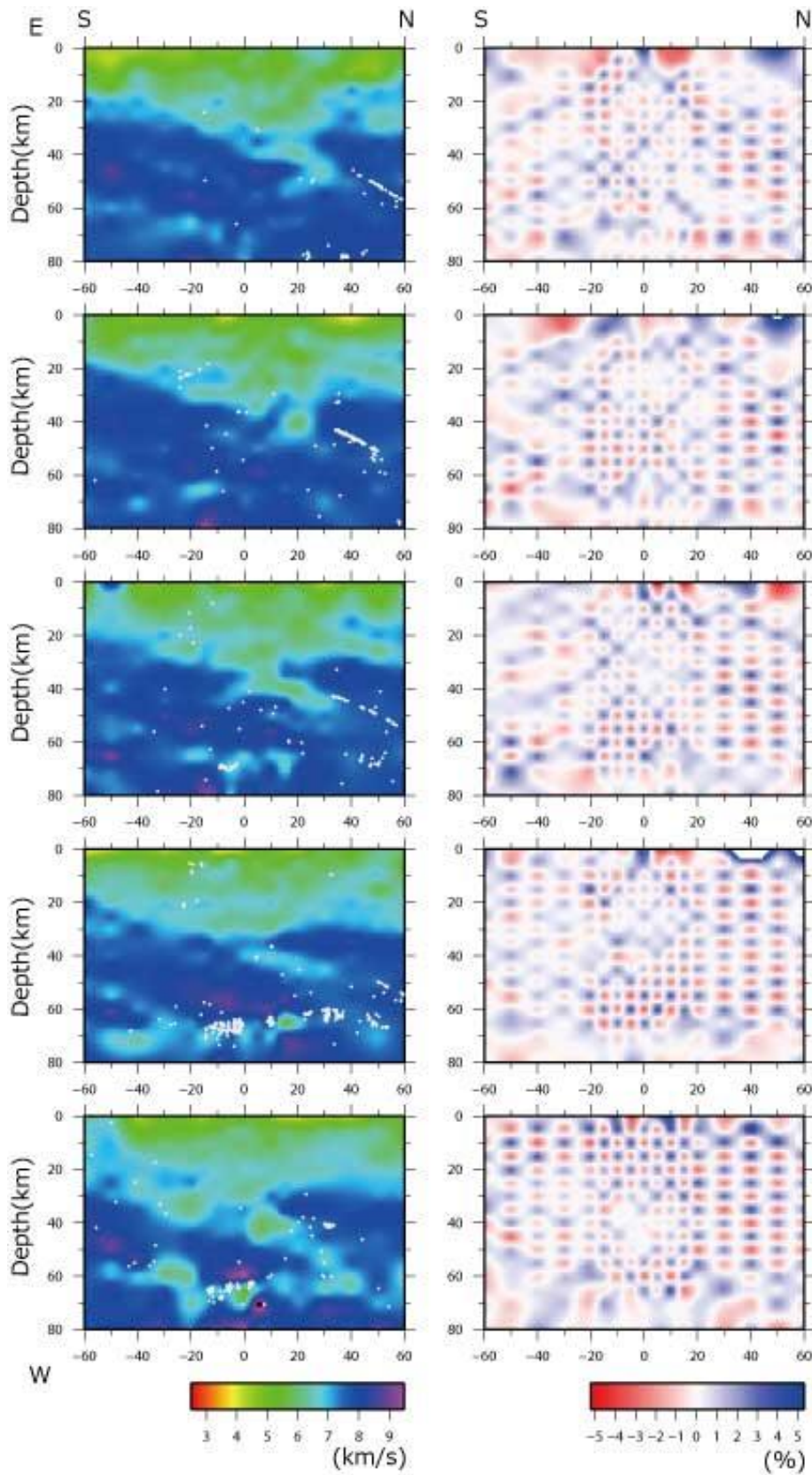


図5 P波速度構造（南北断面）。左図：P波速度、右図：チェッカーボードテストの結果。上から順に西（東経 139.625 度）から東（東経 140.125 度）へ向かっての断面図が並んでいる。

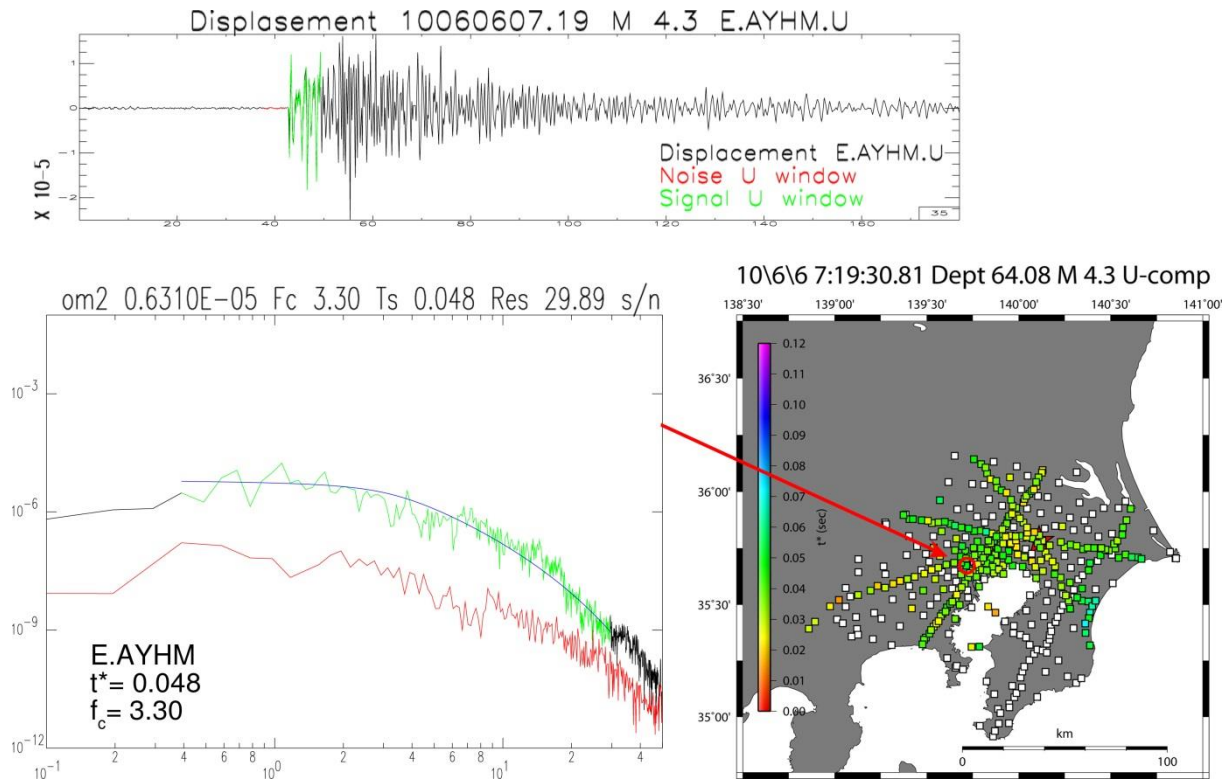


図 6 観測波形のスペクトルと得られた t^* (青山高校)。

上図に波形記録を示す。緑線が解析窓、赤線はノイズ波形の解析窓に対応する。

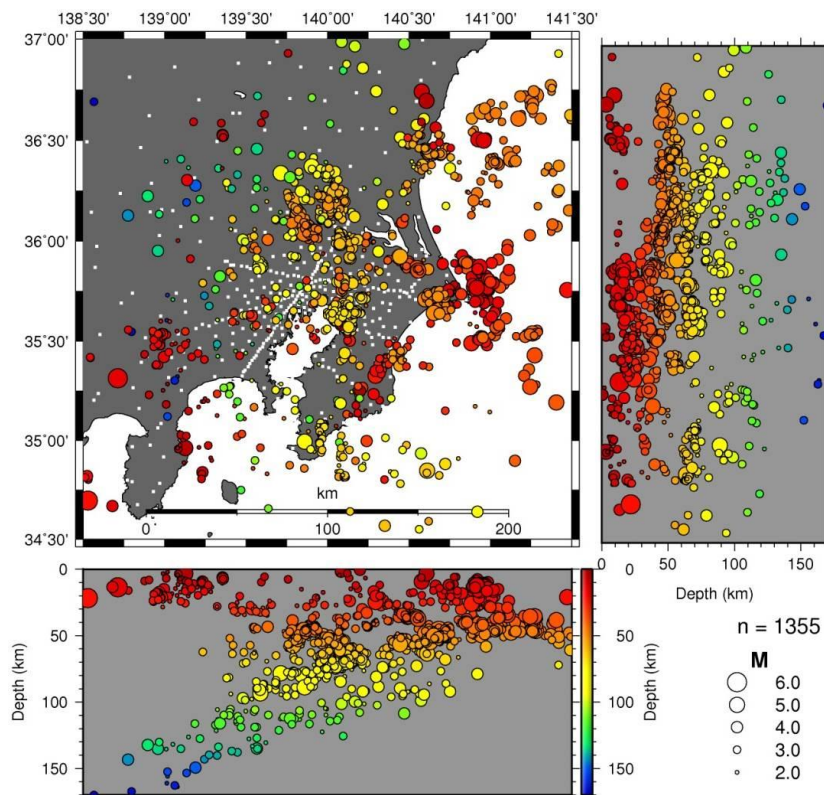


図 7 減衰トモグラフィ解析に利用した震源分布と観測点。

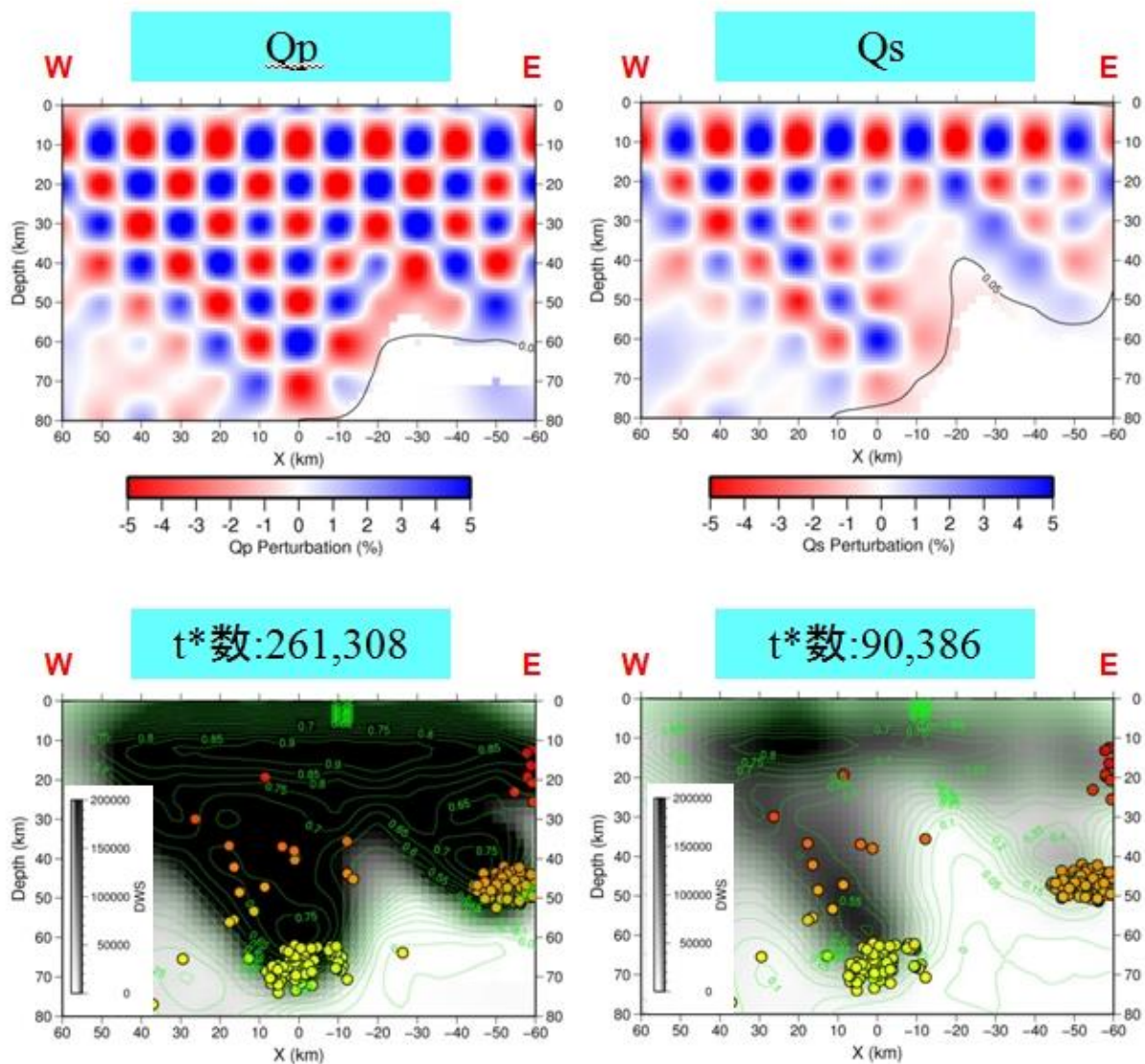


図 8 チェッカーボードテストの結果（上図）と t^* の分布（下図）。今回は、水平 10 km、深さ 10 km の格子点間隔で解析したため、 Q_p に関しては、深さ 60 km 程度（フィリピン海プレート）まで赤青のパターンが再現できていて、信頼できる結果と言える。 Q_s に関しても、地域によっては、深さ 50 km 程度までが信頼できる結果と言える。波線が多い所ほど（DWS の値が大きいほど）、解像度が高いことが分かる。

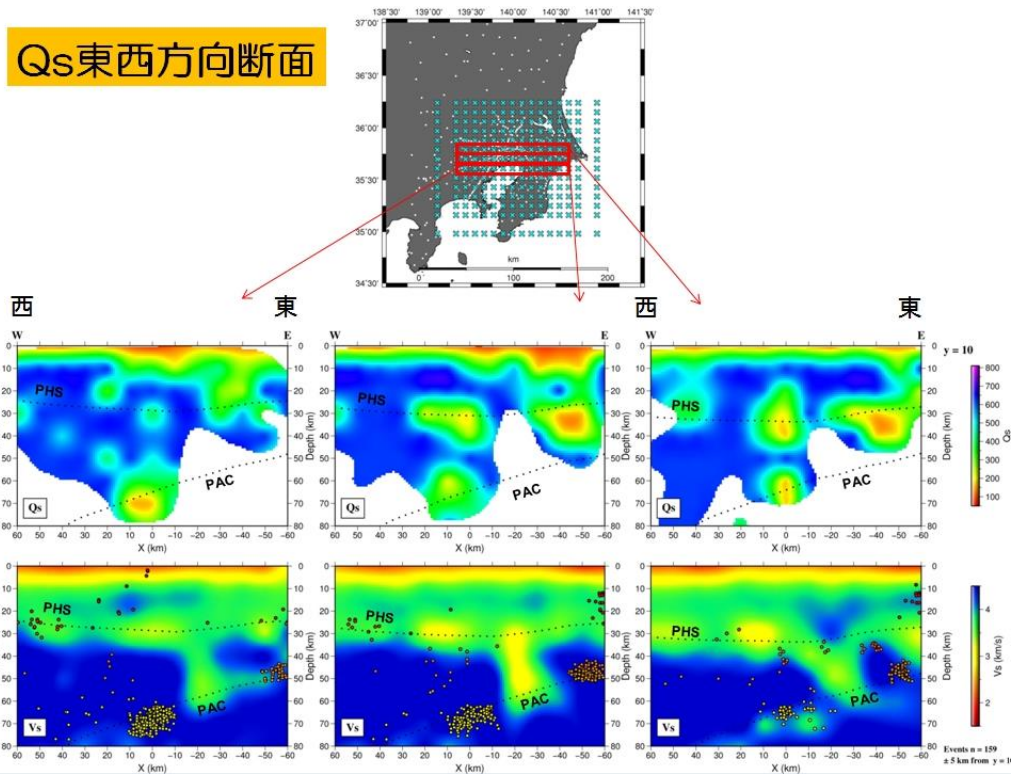


図9 上図に示した3つの領域下の Q_s と V_s の東西断面図。中図の色は Q_s の大小を表し、暖色は Q_s が小さい(減衰が大きい)。下図の色は V_s の大小を表し、暖色は V_s が小さい(遅い)。下図の破線はプレートの上面、丸印は速度構造解析に使用した地震。

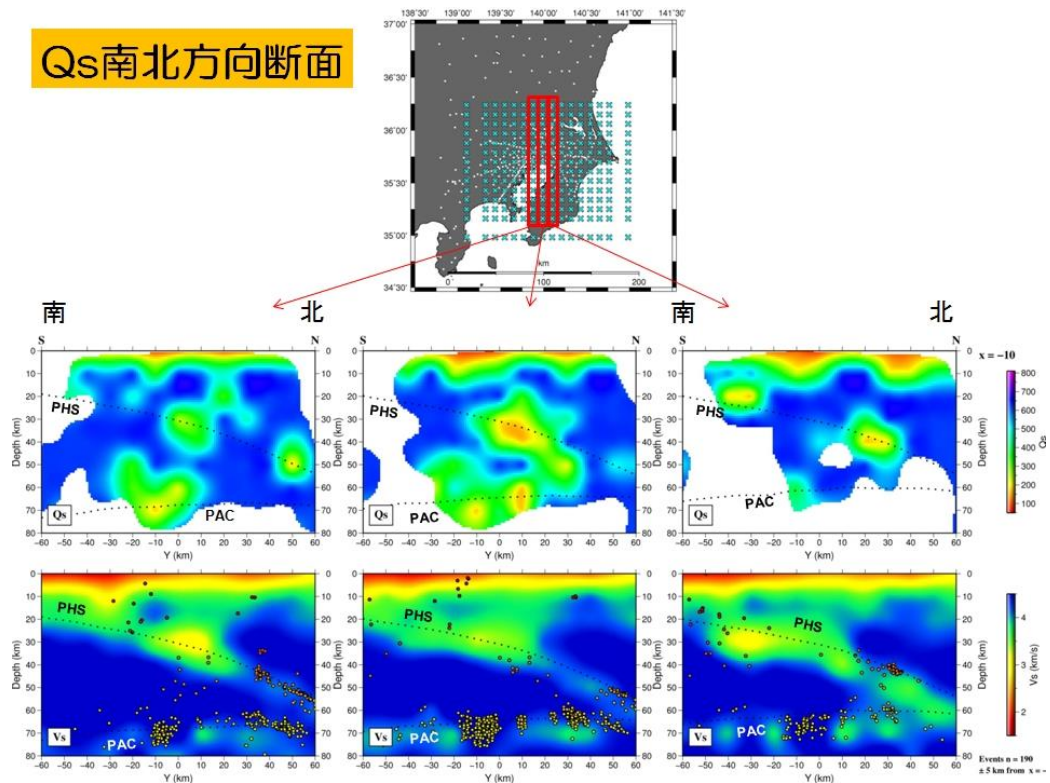


図10 上図に示した3つの領域下の Q_s と V_s の南北断面図。中図の色は Q_s の大小を表し、暖色は Q_s が小さい(減衰が大きい)。下図の色は V_s の大小を表し、暖色は V_s が小さい(遅い)。下図の破線はプレートの上面、丸印は速度構造解析に使用した地震。

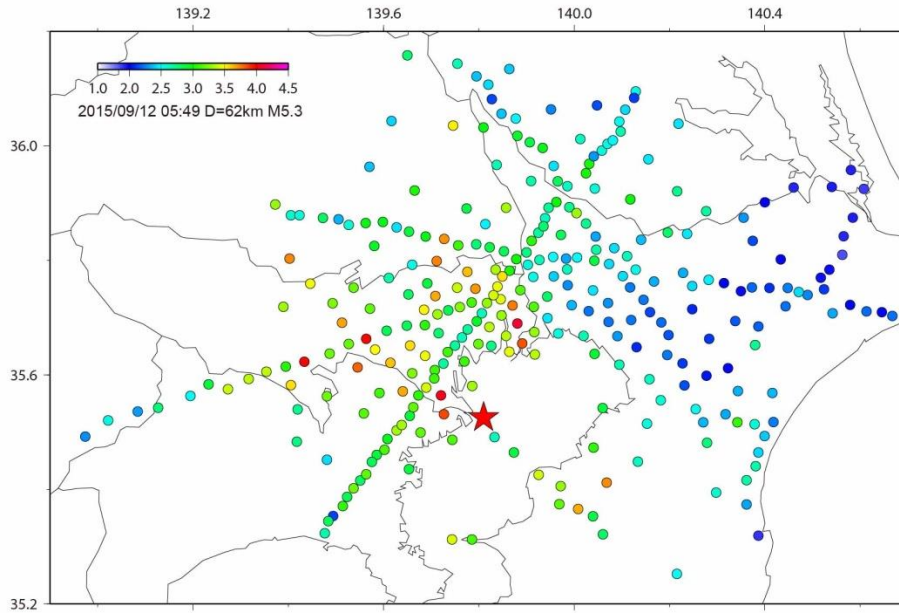


図 11 2015年9月12日に東京湾の深さ約62kmで発生したM5.3の地震のときにMeSO-netで観測された波形から計算した計測震度相当値の分布図（暖色ほど計測震度が大きい）。必ずしも震源地の近傍で計測震度は大きくなり、東京都23区東部、東京都一神奈川県境等で揺れが大きかったことがわかる。