

## 首都圏地震観測網 (MeSO-net: Metropolitan Seismic Observation network) について The Metropolitan Seismic Network for Detecting Mega-thrust and Intra-slab Earthquakes beneath the Tokyo Metropolitan Area

笠原 敬司<sup>1\*</sup>, 酒井 慎一<sup>1</sup>, 中川 茂樹<sup>1</sup>, 楠城 一嘉<sup>1</sup>, パナヨトプロスヤニス<sup>1</sup>, 森田 裕一<sup>1</sup>, 鶴岡 弘<sup>1</sup>, 小原 一成<sup>1</sup>, 平田 直<sup>1</sup>, 木村 尚紀<sup>2</sup>, 明田川 保<sup>3</sup>, 伊東 明彦<sup>4</sup>

Keiji Kasahara<sup>1\*</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>1</sup>, Shigeki Nakagawa<sup>1</sup>, Kazuyoshi Nanjo<sup>1</sup>, Yannis Panayotopoulos<sup>1</sup>, Yuichi Morita<sup>1</sup>, Hiroshi Tsuruoka<sup>1</sup>, Kazushige Obara<sup>1</sup>, Naoshi Hirata<sup>1</sup>, Hisanori Kimura<sup>2</sup>, Tamotsu Aketagawa<sup>3</sup>, Akihiko Ito<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所, <sup>3</sup> 神奈川県温泉地学研究所, <sup>4</sup> 宇都宮大学教育学部

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University, <sup>2</sup>NIED, <sup>3</sup>Hot Springs Res. Inst. of Kanagawa Pref., <sup>4</sup>Faculty of Education, Utsunomiya University

MeSO-net プロジェクトでは、首都圏に約 300 か所の中感度地震観測点を配置し、定常的な自然地震の稠密観測を行い、震源分布や地震波速度・非弾性常数の三次元的な分布を高精度に明らかにし、プレート境界面の形状やプレート内における弱面の存在等を把握する。首都圏は経済活動や交通などによる雑振動が多く、高感度地震観測は不可能であるが、可能な限りノイズ軽減を図る目的で地震計を深さ 20 m のポアホール内に設置し、精度の高い観測（中感度観測）を実施する。東京を中心とした半径 50 km においては、MeSO-net 観測網は 200 か所設置を予定している（既存高感度観測点は 10 数か所）。これにより首都圏の「地下の映像」はより鮮明になることが期待される。

地震計設置孔は深さ 20m 程度の縦孔を掘削し、地震計を 5 インチのケーシングパイプの先端に収納する。また、方位を北に合わせるキーが取り付けられており、ケーシングパイプをセメンチングにより固定する際にキーの方向を北へ向ける。このような方法で、水平動センサを正確な方向に設置し、再設置の場合も方位の再現性を高めた。地震計及び AD 変換器等の電子回路は直径約 12cm、長さ約 60cm の円筒形の防水型ステンレス容器に収納し、ポアホール内に設置される。地震計は熔融水晶をばねにした、DC 安定性の高い JA-40GA02 を使用した。AD のダイナミックレンジは 135dB 以上、周波数特性は DC ~ 80Hz となっている。上下動の分解能は 10 倍程度低い。精度の高いサイエンスモデルの提言は、精度の高い観測データが必要であるが、上記のシステムがもたらす取得データベースは、その推進に役立つであろう。

稠密観測は飛躍的なメカニズム解の精度向上をもたらした。特に観測網の直下の地震では、射出角が上方に向くので、地下構造の影響を受けにくくなる。このため、小さな地震でも発振機構解の精度高く決めることが出来る（酒井他, 2010）。また、中川他（2009）、利根川他（2009）、西田他（2009）、吉本他（2009）等により様々な手法で地下構造の研究が開始され、新しい地下イメージが提出されている。また、学校関係を中心に設置されていることから、観測データの学校現場への還元についての試みも行っている。MeSO-net 観測網は、平成 22 年度末までに設置予定の 23 点と既設点を合わせ、総計 249 点となる。平成 23 年度までにおよそ 300 か所の観測点を計画しているので、今後首都圏の地震発生様式や首都圏の被害地震解明に向けた研究は更に進むものと確信している。

キーワード: 地震計測, 沈み込み帯, 震源メカニズム, トモグラフィー, 地震工学

Keywords: Seismic instruments and networks, Subduction zones, Earthquake source observation, Tomography, Earthquake ground motion and engineering seismology

SSS031-P02

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

## 稠密地震観測による首都圏の不均質な震度分布 Heterogeneous distribution of seismic intensity in the Metropolitan area by MeSO-net

酒井 慎一<sup>1\*</sup>, 中川 茂樹<sup>1</sup>, 楠城 一嘉<sup>1</sup>, 笠原 敬司<sup>1</sup>, パナヨトプロス ヤニス<sup>1</sup>, 鶴岡 弘<sup>1</sup>, 蔵下 英司<sup>1</sup>, 小原 一成<sup>1</sup>, 平田 直<sup>1</sup>, 木村 尚紀<sup>2</sup>, 明田川 保<sup>3</sup>

Shin'ichi Sakai<sup>1\*</sup>, Shigeki Nakagawa<sup>1</sup>, Kazuyoshi Nanjo<sup>1</sup>, Keiji Kasahara<sup>1</sup>, Yannis Panayotopoulos<sup>1</sup>, Hiroshi Tsuruoka<sup>1</sup>, Eiji Kurashimo<sup>1</sup>, Kazushige Obara<sup>1</sup>, Naoshi Hirata<sup>1</sup>, Hisanori Kimura<sup>2</sup>, Tamotsu Aketagawa<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所, <sup>3</sup> 神奈川県温泉地学研究所

<sup>1</sup>E. R. I., Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>NIED, <sup>3</sup>HSRI

首都圏で発生する M7 級の地震の位置・深さ・規模などの震源要素を解明するとともに、地震による被害の軽減と首都機能維持に資することを目的とする「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」が、文部科学省により実施されることとなった(平田ほか・2010)。首都圏は経済活動や交通などによる雑振動が非常に強く、微弱な地面の揺れをとらえることが必要な自然地震観測には不利な地域であるが、本プロジェクトでは約 300 か所の観測点を集中的に設置して観測点密度を高め、初動のみならず後続波の検知能力を上げる。それらを利用した解析により、想定した地震断層周辺の構造の解像度を向上させることを期待している。観測点は、2007 年度から 2010 年度までの 4 年間の設置により 249ヶ所になった。この期間に観測されたデータのうち、気象庁マグニチュード(M) 2 以上の地震を約 1800 個選び、周辺の観測データ(気象庁, 防災科技研, 地震研, 温泉地学研)と統合し、その震源再決定を行った。

M の決定には、各観測点の上下動成分の最大振幅を読み取り、渡辺の式(震源距離と最大振幅から M を決める)を用いているが、その値は観測点ごとに傾向が異なる。大きめに出る観測点はいつも大きめの値を示すことから、観測点ごとの最大振幅は、その地盤特性や伝播経路上の減衰構造の不均質の影響を含んでいるためと考えられる。そこで、観測点ごとに求めた M と全観測点で決めた M との差を観測点ごとに平均し、その分布を見てみた。東京 23 区東部の M が平均 0.3 くらい 23 区西部よりも大きくなる傾向や埼玉県中央南部での M が平均 0.2 くらい小さくなる傾向等、地域ごとの揺れの増減が見える。これらは、観測点直下の地盤構造のためと考えられるが、もう少し深い構造の影響も見られるようであり、沈み込むフィリピン海プレートの形状や減衰構造等との関係を推測する情報になる。

キーワード: 首都圏地震観測網, 超稠密地震観測, 震度分布, 地震活動, プレート構造

Keywords: MeSO-net, ultra-dense seismic network, intensity, seismicity, plate structure

SSS031-P03

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

How do waves attenuate under urban areas?: Insight from the Tokyo Metropolitan Seismic Observation network (MeSO-net).

How do waves attenuate under urban areas?: Insight from the Tokyo Metropolitan Seismic Observation network (MeSO-net).

パナヨトプロス ヤニス<sup>1\*</sup>, 酒井 慎一<sup>1</sup>, 中川 茂樹<sup>1</sup>, 笠原 敬司<sup>1</sup>, 平田 直<sup>1</sup>, 明田川 保<sup>2</sup>, 木村 尚紀<sup>3</sup>

Yannis Panayotopoulos<sup>1\*</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>1</sup>, Shigeki Nakagawa<sup>1</sup>, Keiji Kasahara<sup>1</sup>, Naoshi Hirata<sup>1</sup>, Tamotsu Aketagawa<sup>2</sup>, Hisanori Kimura<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, <sup>2</sup>Hot Springs Research Institute, <sup>3</sup>NIED

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, <sup>2</sup>Hot Springs Research Institute, <sup>3</sup>NIED

The Tokyo Metropolitan area is situated inside the 4 km deep Kanto sedimentary basin and is under-plated by both the Philippine and the Pacific sea plates. The material properties of the complex subduction zone beneath the Tokyo Metropolitan can be estimated by the seismic attenuation  $Q$  of seismic waves observed at local seismic stations. The waveform data used in this study are recorded at the dense seismic array of the Metropolitan Seismic Observation network (MeSO-net). The station network is distributed on five lines with an average spacing of 3 km and in an area with a spacing of 5 km in the central part of Kanto plane. The MeSO-net stations are equipped with a three-component accelerometer at a bottom of a 20-m-deep borehole, signals from which are digitized at a sampling rate of 200 Hz with a dynamic range of 135 dB. The attenuation of seismic waves along their path is represented by the  $t^*$  attenuation operator that can be obtained by fitting the observed P wave amplitude spectrum to a theoretical spectrum using an omega square source model. In order to accurately fit the spectral decay of the signal, only earthquakes that are recorded with intensity greater than 1 in the Japan Meteorological Agency intensity scale are selected. A grid search method is applied to determine the  $t^*$  values by matching the observed and theoretical spectra. The apparent corner frequency of the signal at each station is constrained before fitting for the  $t^*$ . The  $t^*$  data were then inverted to estimate a 3D  $Q_p$  structure under the Tokyo Metropolitan area, using a layered initial  $Q$  model. Two different models were tested, one model with a homogeneous  $Q$  600 structure and one model with the top layer at 0 km representing the Kanto Basin set to 100, with all the grids below that layer to 600. The poor station/event distribution has as a result a  $Q$  structure greatly dependent on the initial model and ray paths. For the homogeneous initial model the  $Q$  below the Kanto basin is estimated to an average 340, and failed to resolve to probable low  $Q$  values inside the basin. For the layered  $Q$  model it is estimated approximately at 500 below the Kanto basin. In addition, a notable amplification of the spectrum in the 6 - 18 Hz range can also be observed in the data of several MeSO-net stations, which suggests that is not a minor local effect but a possible characteristic of the Kanto basin.

キーワード: attenuation, tomography, MeSO-net

Keywords: attenuation, tomography, MeSO-net

SSS031-P04

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

## 稠密地震観測による首都圏北東部地域のプレート構造

### Seismic structure of the northeastern Tokyo Metropolitan area by dense seismic array observations

蔵下 英司<sup>1\*</sup>, 佐藤 比呂志<sup>1</sup>, 阿部 進<sup>2</sup>, 溝畑 茂治<sup>2</sup>, 平田 直<sup>1</sup>

Eiji Kurashimo<sup>1\*</sup>, Hiroshi Sato<sup>1</sup>, Susumu Abe<sup>2</sup>, Shigeharu Mizohata<sup>2</sup>, Naoshi Hirata<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大地震研, <sup>2</sup> 地科研

<sup>1</sup>ERI, Univ. Tokyo, <sup>2</sup>JGI, Inc.

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。沈み込むフィリピン海スラブは、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。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、プレート接触域の詳細な構造を得るために、「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」の一環として、制御震源を用いた地殻構造探査を、茨城県稲敷市から下総台地・千葉県旭市を経て九十九里沖に至る「九十九里-霞ヶ浦測線」で、稠密自然地震観測を、茨城県稲敷市から加波山山塊北端に至る「霞ヶ浦-つくば測線」、および茨城県つくば市から那珂市に至る「つくば-水戸測線」でそれぞれ実施した(佐藤・他, 2010年秋地震学会)。「九十九里-霞ヶ浦測線」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(佐藤・他, 2010)。さらに深部の、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把握する為には、自然地震データを使用した解析が有効である。測線長が約50kmの「霞ヶ浦-つくば測線」上に設置した65観測点では、2010年6月15日から2010年10月10日まで、測線長が約65kmの「つくば-水戸測線」上に設置した45観測点では、2010年6月8日から2011年1月24日まで、それぞれ連続収録を行っている。そこで、これら測線で得られた自然地震観測データを用いてトモグラフィー解析(Thurber and Eberhart-Phillips, 1999)を行った。解析を行うにあたって、各観測点で得られた記録は連続記録である為、地震毎のデータに編集する作業が必要である。上記観測期間中における、両方の測線を含む研究対象地域(緯度35.8°-36.5°N; 経度140.0°-140.6°E)では、気象庁一元化震源カタログによると、581個のマグニチュード1.0以上の地震の震源が決定されている。これら地震の震源時刻に従って、連続記録から地震毎へのデータ編集を実施した。その後、臨時観測点の波形データと測線周辺の95点のテレメータ観測点で得られている波形データとの統合作業を行った。このようにして作成した地震波形データから測線近傍で発生した135イベントを抽出し、P波・S波の手動検測を行った。得られた走時データを用いてトモグラフィー解析を実施し、調査地域下の地震波速度構造を得た。「つくば-水戸測線」に沿った $V_p/V_s$ 構造の鉛直断面図からは、Uchida et al.(2010)で示されたフィリピン海プレートと太平洋プレートが接する深さ60km付近での $V_p/V_s$ 値は水平方向に変化し、特に地震の発生が集中している領域で $V_p/V_s$ 値が大きくなる傾向が確認できる。

謝辞:「つくば-水戸測線」のデータ収録・処理を行うにあたっては、東京大学地震研究所技術部総合観測室の方々にご協力を頂きました。気象庁、防災科学技術研究所の波形データを利用しました。解析に使用した震源リスト作成には、気象庁と文部科学省が協力してデータを処理した結果(気象庁一元化処理震源カタログ)を使用させて頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

キーワード: 稠密自然地震観測, フィリピン海プレート, 太平洋プレート, 地震波トモグラフィー

Keywords: dense seismic array observation, Philippine Sea Plate, Pacific Plate, seismic tomography



SSS031-P05

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

## S波スプリッティングから推定した、伊豆衝突帯の異方性強度分布 Distribution of anisotropic intensity beneath Izu collision zone estimated from S-wave splitting.

本多 亮<sup>1\*</sup>, 行竹 洋平<sup>1</sup>, 原田 昌武<sup>1</sup>, 伊東博<sup>1</sup>, 吉田 明夫<sup>1</sup>

Ryou Honda<sup>1\*</sup>, Yohei Yukutake<sup>1</sup>, Masatake Harada<sup>1</sup>, Ito Hiroshi<sup>1</sup>, Akio Yoshida<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神奈川県温泉地学研究所

<sup>1</sup> Hot Springs Research Institute

我々は、これまで神奈川県西部地域について、S波スプリッティング解析を行ってスプリッティングパラメータを推定してきた。その結果、箱根火山においては、大規模な群発地震活動の前後で、分離したS波の時間差の変化が捉えられている (Honda and Tanada, 2007)。また、丹沢山地と足柄平野でLSPDの方向がやや異なること等も報告されている (本多他, 2006)。本報告では、観測された時間差と震源決定に使用される速度構造モデルを用いて、箱根を含む神奈川県西部地域の異方性強度を推定した。

データは、神奈川県西部地域の温泉地学研究所および防災科学技術研究所・東京大学地震研究所の速度地震波形で、トリガー波形からS波部分を切り出し、2-8Hzのバンドパスフィルターを掛けたものを解析に使用した。スプリッティングパラメータの推定には、相互相関法を使用し、観測点への入射角が40°以内の地震について相関係数が0.8以上のもののみを採用した。

箱根火山での異方性強度は、通常の期間でおよそ1~2%である。群発地震の期間には観測点近傍にある破砕帯の走向とみられる方向のLSPDが卓越し、異方性強度が1.5倍から2倍以上増加した。仙石原にある観測点では、平常期で1.5%程度の異方性強度であったものが最大で5%程度まで上昇した。駒ヶ岳付近の異方性強度は平常期でも仙石原付近よりもやや大きく、2~2.5%程度であるが、やはり群発地震活動の際には5%程度まで上昇している。

丹沢山地や足柄平野を通過する波線上では1~2%程度の異方性強度が得られ、時間変化は見られなかった。

上部地殻の異方性強度は、Nakamura et al (1996) や Mizuno et al (2001) 等の結果では2%前後と推定されており、本報告の結果と調和的である。4.5%を超えると、破砕帯のような周囲とは異なる場と考えてよい (例えば Crampin and Zatsepin, 1997)。箱根の観測点で、群発地震活動の際に5%に達するような異方性強度が観測されていることは、傾斜計のデータから駒ヶ岳のごく近傍で開口クラックの存在が示唆されていることや、2009年に仙石原付近で大規模な群発地震活動が発生し、震源がある平面上に分布することとも一致する。

キーワード: 異方性, 箱根, 伊豆衝突帯

Keywords: anisotropic intensity, Izu collision zone, Hakone

## 伊豆小笠原弧の沈み込み構造と地震活動への示唆 Subduction structure of the Izu-Bonin arc and its implications for the seismic activity

新井 隆太<sup>1\*</sup>, 岩崎 貴哉<sup>1</sup>, 佐藤 比呂志<sup>1</sup>, 阿部 進<sup>2</sup>, 平田 直<sup>1</sup>  
Ryuta Arai<sup>1\*</sup>, Takaya Iwasaki<sup>1</sup>, Hiroshi Sato<sup>1</sup>, Susumu Abe<sup>2</sup>, Naoshi Hirata<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 地球科学総合研究所

<sup>1</sup>ERI, Univ. Tokyo, <sup>2</sup>JGI Incorporated

近年の制御震源を用いた地殻構造探査により、伊豆衝突帯における衝突沈み込み構造が解明されつつある。2003年に大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環で行われた関東山地東縁測線では、丹沢地塊の楔形構造と沈み込むスラブからの剥離が明らかとなった (Sato et al., 2005; Arai et al., 2009)。また、2005年小田原-山梨測線からは、御坂地塊・丹沢地塊を区切る衝突境界の形状が明瞭にイメージングされた (佐藤他, 2006; 新井他, 2009)。しかし、丹沢地塊に南から衝突している伊豆地塊の構造、及びその衝突・沈み込み構造と丹沢山地の深部 (深さ 15~30km) で発生している地震活動との関係は十分理解されていない。そこで本研究では、丹沢地塊・伊豆地塊の衝突・沈み込み構造の解明、及び衝突・沈み込みに起因する地殻不均質構造と地震活動の関連性を明らかにすることを目的とし、地震波トモグラフィ解析を行った。

解析では、2003年関東山地東縁測線に沿う東部測線と、2005年小田原-山梨測線に沿う西部測線に対して行った。これらの地殻構造探査データと測線近傍で観測された自然地震の読み取り値を統合した走時データセットを作成し、double-difference tomography法 (Zhang and Thurber, 2003) を適用することで、震源分布と地震波速度構造を同時に決定した。

得られた地震波速度構造は水平方向に不均質性が強く、伊豆小笠原弧の衝突・沈み込み構造を強く反映している。丹沢と伊豆の両地塊の間には低速層が北に傾斜する様子が見られ、衝突境界である国府津松田断層帯に付随するトラフ充填堆積物と解釈される。その深部には、P波速度 6.5-7.0km/s を持つ伊豆地塊の中部・下部地殻が丹沢地塊の下に沈み込んでいる。丹沢山地深部の地震活動はこの北に傾斜する中部・下部地殻内で発生しており、深さ 15-30km に厚さ 10km ほどの地震帯を形成している。こうした分布から、この地震活動は伊豆地塊の沈み込みに伴って発生していると考えられる。地震発生域の  $V_p/V_s$  比は平均で 1.76 と中間的な値を示すが、これは伊豆小笠原弧の中部・下部地塊を構成する角閃石斑礫岩がドライな環境下で測定された値とよい一致を示す (Nishimoto et al., 2008)。また  $V_p/V_s$  比だけでなく、 $b$  値や比抵抗構造 (Aizawa et al., 2004) など複数の地球物理学的データから、地震活動域は流体に乏しく、伊豆小笠原弧の沈み込みに伴う脱水反応は非活発であることが示される。さらに、この流体に乏しいという解釈は制御震源を用いたスラブ上面の速度構造解析からも支持される結果である (Arai et al., 2011)。以上の点から、丹沢山地下での地震活動発生に対する流体の関与は小さいと結論づけられる。この地震活動の発生要因として、(1) 現在、伊豆地塊の中部・下部地殻において剥離が進行しており、それに伴い周囲に破碎帯が形成されている、(2) 元々の伊豆小笠原弧の中部・下部地殻がクラックに富む、という2つの可能性が挙げられる。

キーワード: 伊豆衝突帯, 地震波速度構造, 物理特性,  $b$  値, 地震活動, 地震波トモグラフィ

Keywords: Izu collision zone, Seismic wave velocity structure, Physical property,  $B$  value, Seismicity, Seismic tomography

SSS031-P07

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

## H/V スペクトル比の逆解析による首都圏深部地下構造の初期推定 Primary estimation of deep subsurface structures in the Tokyo metropolitan Area, by the inversion of H/V spectral ratios

津野 靖士<sup>1\*</sup>, 山中 浩明<sup>1</sup>, 酒井 慎一<sup>2</sup>, 平田 直<sup>2</sup>, 笠原 敬司<sup>2</sup>, 木村 尚紀<sup>3</sup>, 明田川 保<sup>4</sup>

Seiji Tsuno<sup>1\*</sup>, Hiroaki Yamanaka<sup>1</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>2</sup>, Naoshi Hirata<sup>2</sup>, Keiji Kasahara<sup>2</sup>, Hisanori Kimura<sup>3</sup>, Tamotsu Aketagawa<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東工大, <sup>2</sup> 東大・地震研, <sup>3</sup> 防災科研, <sup>4</sup> 温泉地研

<sup>1</sup>Tokyo Inst. of Tech., <sup>2</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>3</sup>NIED, <sup>4</sup>Hot Springs Res. Inst.

We estimated deep subsurface structures in the Tokyo metropolitan Area, using dominant periods of H/V spectral ratios of coda waves observed by MeSO-net (Metropolitan Seismic Observation network). At first, we obtained dominant periods of H/V of coda waves averaged by several different earthquakes and the dominant periods are quite stable with a small variability (Tsuno et al., 2010). The dominant periods of H/V obtained by MeSO-net are generally in good agreement with the depths of the seismic bedrock in the Tokyo metropolitan Area (Yamanaka and Yamada, 2006). Also, we compared the observed dominant periods of H/V with peak periods of ellipticities calculated by the theory of fundamental mode of Rayleigh waves using Yamanaka and Yamada's model. The dominant periods of H/V matched well for sites where the shallow basin structures are located; however, dominant periods of H/V didn't match well for sites where the deep basin structures are located. In Yamanaka and Yamada's model, which is based on phase velocities of Rayleigh waves obtained by array microtremors observations, there are still uncertainties in the data obtained from deep basin structures when phase velocities for long periods were not obtained by array microtremors observation data. Therefore, we improved the S-wave velocity structural model in the Tokyo metropolitan Area, especially for bedrock and/or a deep boundary between layers, using the inversion method of H/V of coda waves observed by MeSO-net.

We applied the Genetic Algorithm (Yamanaka and Ishida, 1996) for the inversion of H/V spectral ratio of coda waves. Deep S-wave velocity structures were inverted from H/V spectral ratio on and around the dominant periods. As the estimated structures, we adopted the best fit between observations and calculations over 3 trials of changing random numbers in the inversion. S-wave velocities of all the layers and a depth of the top surface layer from Yamanaka and Yamada's model were constrained; and therefore, the thicknesses of the second layer ( $V_s$  1.0 km/s) and the third layer ( $V_s$  1.5 km/s) were estimated by this inversion procedure. Peak periods from ellipticities of fundamental mode of Rayleigh waves by the estimated structures matched well with the observed dominant periods of H/V. The estimated structures are deeper than the previous model proposed by Yamanaka and Yamada (2006) for the area of the west coast of the Tokyo Bay, where the calculated dominant periods of H/V were underestimated. At some sites in this area, the interface of the seismic bedrock was estimated at a depth of about 3.5 km (In Yamanaka and Yamada's model, the depth of the interface was about 2.5 km.).

Preliminarily, we estimated the deep subsurface structures in the Tokyo metropolitan Area, using H/V spectral ratios of coda waves on and around the dominant periods. However, the amplitudes of H/V spectral ratio, which are defined by the division of the geometric mean between horizontal components by a vertical component, are composed of Rayleigh waves and Love waves; and therefore, we would need to include the amplitude of Love waves for the inversion of H/V. As a next step, we will examine the contribution of Love waves for the horizontal amplitude of H/V in the inversion process.

Keywords: Deep underground structures, Tokyo metropolitan Area, H/V spectral ratio, Coda waves, MeSO-net, Inversion

## 東工大・大岡山キャンパスにおける微動及び地震動のアレイ観測によるS波速度構造の推定

### Estimation of S-wave velocity structure in Ookayama, Tokyo, using array microtremors and earthquake observations

加藤 圭<sup>1\*</sup>, 津野靖士<sup>1</sup>, 山中浩明<sup>1</sup>

Kei Kato<sup>1\*</sup>, Seiji Tsuno<sup>1</sup>, Hiroaki Yamanaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology

定量的に地盤震動特性を評価するためには、地下速度構造の把握、特にS波速度の理解が重要となる。関東平野や大阪盆地などの大規模かつ厚い堆積層で覆われた地域では長周期までの地震動特性を評価する必要があり、深部までの地下速度構造の把握が必要不可欠である。表面波を用いて深部までの地下速度構造を推定するためには、長周期の表面波位相速度を観測する必要があるが、長周期までの大きなパワーを持った微動を観測することは難しい。一方で、地震記録では規模の大きなあるいは震源の浅い地震を観測することで、長周期の表面波を得ることが出来る。そこで、地震観測が実施されている東京工業大学大岡山キャンパス内及びその周辺で微動アレイ観測を実施し、レイリー波の位相速度を逆解析することよりS波速度構造を推定した。微動データの解析には空間自己相関法（SPAC法）を適用し、周期2.5秒までのレイリー波位相速度を求めた。さらに長周期側の位相速度に対しては、マグニチュード5以上の地震記録にセンブル解析を行うことで周期3~5秒のレイリー波位相速度を求めた。また、地震動の到来方向と位相速度の関係を調べ、位相速度の到来方向による相違を検討した。

微動アレイ観測では、最長のアレイ半径が約300mと80mの2種類の7つの観測点による複合正三角形アレイを用いた。SPAC法による微動解析から、0.5~2.5秒の周期帯で安定したレイリー波分散曲線を得た。2.5秒以上の長周期帯のレイリー波位相速度を求めるために、地震記録を用いたF-K解析及びセンブル解析を行った。地震記録をF-K解析することで得られた位相速度は、対象とした周期帯の違いがあるものの微動記録から得られた位相速度に比べ、ばらつきが大きい結果となった。このことは、主として波の定常性を仮定したF-K解析を非定常性が強い地震記録に適用していることによる。また、非定常データの解析に適したセンブル解析を地震記録に適用することで得られた位相速度は、解析に用いた地震によってばらつきの具合が異なった。山中・山田（2006）に基づいた大岡山キャンパス周辺のS波速度構造から計算された位相速度を参考にすることで、最終的な分散曲線を決定した。微動記録のSPAC解析と地震記録のF-K解析及びセンブル解析から得られたレイリー波分散曲線に、遺伝的アルゴリズム（山中・石田、1995）を用いた逆解析を適用することで、深部までのS波速度構造を求めた。推定したS波速度構造は、山中・山田（2006）によるモデルと比べて各層の境界面が浅く、基盤深度は約1.9km付近と推定された。また、センブル解析によって得られた位相速度の方向性を検討した結果、到来方向による位相速度の違いが見られた。このことは、対象地域の地下構造が不整形性を有することを示唆している。ただし、位相速度の方向性は周期や対象とした地震によって異なり、系統的な特性を見出すには至らなかった。

本研究では、微動と地震のアレイ観測データを用いて、大岡山キャンパスに於けるS波速度構造をレイリー波の位相速度の逆解析より求めた。また、地下構造の不整形性によって生じるレイリー波位相速度の方向依存性を地震記録のセンブル解析より確認した。

謝辞：本研究は、GCOE（震災メカリスク軽減の都市地震工学国際拠点）の支援を受けました。

キーワード: 微動アレイ観測, SPAC法, F-K法, センブル解析, S波速度, 関東平野

Keywords: Array microtremors observation, the SPAC method, the F-K analysis, the Semblance analysis, S-wave velocity, the Kanto Plain



## 地震波干渉法による表面波の群速度トモグラフィによる関東平野の地下構造モデルのバリデーション

### Validation of subsurface structure in Kanto basin by surface wave tomography using seismic interferometry

地元 孝輔<sup>1\*</sup>, 山中 浩明<sup>1</sup>, 諸井 孝文<sup>2</sup>, 池浦友則<sup>3</sup>, 纈織 一起<sup>4</sup>, 坂上実<sup>4</sup>, 中井正一<sup>5</sup>, 関口徹<sup>5</sup>, 小田 義也<sup>6</sup>

Kosuke Chimoto<sup>1\*</sup>, Hiroaki Yamanaka<sup>1</sup>, Takafumi Moroi<sup>2</sup>, Tomonori Ikeura<sup>3</sup>, Kazuki Koketsu<sup>4</sup>, Minoru Sakaue<sup>4</sup>, Shoichi Nakai<sup>5</sup>, Toru Sekiguchi<sup>5</sup>, Yoshiya Oda<sup>6</sup>

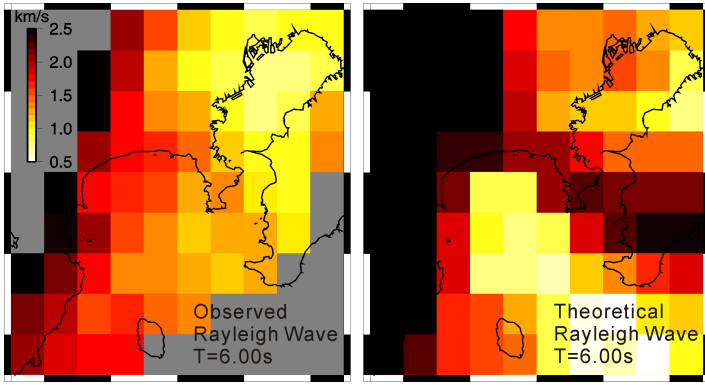
<sup>1</sup> 東京工業大学大学院総合理工学研究科, <sup>2</sup> 小堀鐸二研究所, <sup>3</sup> 鹿島技術研究所, <sup>4</sup> 東京大学地震研究所, <sup>5</sup> 千葉大学大学院工学研究科, <sup>6</sup> 首都大学東京都市環境学研究科

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Kobori Research Complex Inc., <sup>3</sup>Kajima Technical Research Institute, <sup>4</sup>Earthquake Research Institute, <sup>5</sup>Chiba University, <sup>6</sup>Tokyo Metropolitan University

関東平野のような大規模平野において強震動の予測を適切に行うには、厚い堆積層の影響について適切に評価しなければならない。そこで強震動予測における重要な指標となる堆積層のS波速度構造のモデルが提案されている(例えば、Koketsu, 2009)。それらの妥当性を検証(以下、バリデーション)するためには、中小地震のシミュレーションなどが行われているが、震源特性や平野外部の影響を受けるため容易ではない。近年、長期間の連続微動を用いた地震波干渉法によって2点間のグリーン関数の抽出が試みられている(例えば、Shapiro and Campillo, 2004)。グリーン関数の表面波成分は、その分散性から2点間の地下構造を推定できるので有益である。地震波干渉法によってグリーン関数が推定できれば、今までにない2点間の地下構造を評価する新たな手法となる。また、複数の観測点による高密度な観測網によって複数のグリーン関数が得られればそれらの走時をもとにトモグラフィ解析による表面波の速度構造を推定することも試みられている(例えば、Shapiro et al., 2005)。

著者らは地震波干渉法による既往のモデルのバリデーションを目的とし、東京湾、相模湾を囲むようにして関東地域の16地点で長期間の連続微動観測を行い、地震波干渉法の考えに基づき、120組の2点間のレイリー波とラブ波の基本モードにおける群速度を推定することに成功し、既往のモデルと比較した(山中ほか, 2010)。その結果はおおむね既往のモデルの妥当性を実証するものとなったが、関東平野端部や伊豆半島、相模湾などを挟んだ2点間の理論群速度と観測群速度の間には大きな違いが見られた。これは、そのような地域では探査が難しいためモデルを構築する際には仮定した部分も多いためであると考えられる。

本研究では山中ほか(2010)による観測をさらに深く検討し、地域的なモデルバリデーションのために、レイリー波とラブ波のスローネスを基にしたトモグラフィ解析を行った。トモグラフィ解析ではストレートパスを仮定し、セル分割は、 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ の大きさとした。逆投影法による同時反復法によって繰り返し計算を実行し、各セルにおける繰り返し計算の前のモデルと新しいモデルとの走時残差が最小となるように各ブロックのスローネスを推定した。周期2-6秒におけるレイリー波とラブ波についてそれぞれ解析し、対象地域の地域的な表面波群速度を推定した。また、比較のために既往のモデルにおいても同様なセル分割を行い各セルの平均的な深さの平行成層モデルを仮定し、理論表面波群速度を推定した。地震波干渉法によって推定された表面波群速度の分布は、理論値に比べて全体的に若干遅い結果となったが、関東平野の中央から東京湾にかけて既往のモデルでは基盤深度が大きくなっている地域や、三浦半島や平野端部など基盤深度が浅い地域では表面波群速度についても地域的な特徴をよく示していることがわかる。しかし、伊豆半島や相模湾においては差異がみられ、トモグラフィ解析による結果からもモデルの修正の必要性を示唆している。



キーワード: 地震波干渉法, トモグラフィ, 微動, 関東平野, 群速度

Keywords: seismic interferometry, tomography, microtremor, Kanto basin, group velocity

SSS031-P10

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

## 関東地震のタイプ分けと再来間隔に関する研究の整理 (1)

### Reviews version 1 of the earthquake type and the recurrence interval for the Kanto Earthquakes

金 幸隆<sup>1\*</sup>

Haeng Yoong Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> ERI, University of Tokyo

過去の地震履歴を解明することは、地震サイクルを理解する上で大切である。これまでに実施されてきた関東地震の再来間隔に関する研究論文を整理する。

関東地震の再来間隔と地震タイプについては、1970年代以降、主に離水海岸地形の地形学的・地質学的研究によって明らかにされた過去地震の発生時期とその変位量の累積性に関する情報に基づき議論が進められてきた。1990年後半になると、津波堆積物の情報が増加し、それらの堆積年代から津波の来襲間隔が見積もられている。また1990年代後半以降、測地・測量の地殻変動データに基づきプレートの相対的運動様式が解読され、さらに地震波の解析による関東地震のすべり量も精度良く解明されはじめ、それらのデータに基づき関東地震の再来間隔が見積もられている。

学術雑誌(特集号・紀要・短報を含む。商用雑誌は含まない。)に掲載された論文を基に、再来間隔の見積もり値を比較すると、研究により見解に相違が見られる。地震調査研究推進本部(2004)は、再来間隔の見積もり値の相違を考慮し、関東地震の再来間隔を200年~400年としている。再来間隔の情報は関東地震のサイクルを解明する上で重要であるため、本研究では過去の優れた研究における再来間隔の見解に相違をもたらす原因をみる。過去の地震履歴に関する研究を整理すると、見解の相違をもたらす要因は、導出方法、使用するデータ、調査地域、地震のタイプ分けにおける違いがあると判断された。また解釈の違いや誤差の見積もりも、大きな要因である。これらの要因の中で、地震のタイプ分けを行うことは、何の地震の再来間隔を表しているのかを理解する上で最も重要な研究課題である。本研究では上述した学術雑誌を基に、関東地震のタイプをA:1923年大正タイプ、B:1703年元禄タイプ、C:大正・元禄一対相補タイプ(仮名称)(発生場所の異なる大正と元禄の地震は、連動もしくは一対となって発生するタイプ)、D 関東地震総和タイプ(仮名称)(大正と元禄の地震を区別せずに、三浦沖の相模トラフで混合タイプに分けて、過去の再来間隔および発生時期を整理することを試みたので報告する。また各研究論文の見解をどのように表現するべきか、議論する。

キーワード: 関東地震, 地震タイプ, 再来間隔, 履歴, 地震サイクル, 長期予測

Keywords: Kanto earthquake, earthquake type, recurrence interval, occurrence time, earthquake cycle, long period prediction

## 過去の横ずれ型大地震による静的クーロン応力変化と近年の地震活動の相関性 Correlation between Coulomb Stress Changes Imparted by Large Historical Earthquakes and Current Seismicity in Japan

石辺 岳男<sup>1\*</sup>, 島崎 邦彦<sup>1</sup>, 鶴岡 弘<sup>1</sup>, 山中 佳子<sup>2</sup>, 佐竹 健治<sup>1</sup>, 室谷 智子<sup>1</sup>

Takeo Ishibe<sup>1\*</sup>, Kunihiko Shimazaki<sup>1</sup>, Hiroshi Tsuruoka<sup>1</sup>, Yoshiko Yamanaka<sup>2</sup>, Kenji Satake<sup>1</sup>, Satoko Murotani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科

<sup>1</sup>ERI, the Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Grad. Sch. of Env. St., Nagoya Univ.

1900年以降に日本の内陸で発生した8個の横ずれ断層型大地震によるクーロン応力変化(CFF)と1997年10月以降の地震活動分布との相関性を二つの手法で調査した。一つは、過去の大地震と受け手側の地震の断層メカニズムが同じであると仮定して、CFFと地震の空間分布を比べる従来の手法である。もう一つは、断層メカニズム解が既知の地震についてCFFを計算しその確率分布を調べた。空間分布からは4地震(1927年丹後地震・1943年鳥取地震・1948年福井地震・2000年鳥取県西部地震)について明瞭な相関が認められたが、残りの4地震(1931年西埼玉地震・1963年若狭湾地震・1969年岐阜県中部地震・1984年長野県西部地震)については認められなかった。一方、断層メカニズム解が決定されている地震に対して計算されたCFFの分布からは、地震がCFF増加域に顕著に偏って発生していることが示された。即ち、現在の地震活動は明らかに過去の大地震によるCFFと相関があると結論できた。また、横ずれ断層型と縦ずれ断層型が混在する地域では、受け手側のメカニズムを仮定した従来の手法からは、必ずしも正しい結論が得られるとは限らないことがわかった。

余震が長期間にわたって継続することが報告されているが、過去の大地震によるCFFと近年の地震活動分布の相関性を調査した研究は少ない。これまで、大地震の発生に伴う周辺の応力場の変化による地震のトリガリングや地震活動度の変化が数多く議論されてきた(例えば、Harris and Simpson, 1992; Stein et al., 1992; Toda et al., 1998)。Mueller et al. (2004)は、1811から1812年にNew Madridで発生した4つのM7級地震の位置や断層メカニズムを、CFFと近年の地震活動分布から推定している。近年の地震がこれらの地震の余震であるとすれば、200年近く継続していることになる。また日本においても、岐阜における有感地震発生回数が1891年濃尾地震以降、100年間にわたり大森公式に従って減衰していることが報告されている(Utsu et al., 1995)。

本研究では、1997年10月から2010年5月までの一元化気象庁震源カタログを用いて、上記の8地震によるCFFと近年の地震活動分布の相関性を調査した。受け手側の断層メカニズムを仮定した従来の手法に加えて、防災科学技術研究所で決定された断層メカニズム解を受け手側の断層メカニズムとした場合のCFFを計算した。様々な型の地震が混在する複雑な応力場において、受け手側の断層メカニズムを仮定した場合、大きな誤差を生じる可能性がある。この不確実性は実際に決定された断層メカニズム解を用いてCFFを計算することで、軽減することが可能であると考えられる(例えば、Toda, 2008)。

本研究で得られた結果は地震カタログから推定された背景的地震活動度が、その推定に用いた期間よりも前に発生した大地震による影響を受けている可能性を強く示唆する。また、CFFと近年の地震活動との分布対応が地震毎に大きく異なることは、余震活動や余震の継続時間を支配する要因の多様性を反映していると考えられる。

### 謝辞

本研究においては、一元化気象庁震源カタログならびに、防災科学技術研究所が決定したメカニズム解を使用させて頂いた。また、CFFの計算にはOkada(1992)のプログラムを使用させて頂いた。ここに記して感謝申し上げます。なお、本研究は科学技術振興費「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト 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」における「過去地震の類型化と長期評価の高度化に関する調査研究」の一環として実施された。

キーワード: クーロン応力変化, 地震活動, 震源メカニズム

Keywords: Coulomb stress change, Seismicity, Focal mechanism



## 地震発生予測検証実験：関東を予測地域とした実験の結果 Earthquake forecast testing experiment: Kanto as a testing region

楠城 一嘉<sup>1\*</sup>, 鶴岡 弘<sup>1</sup>, 横井 佐代子<sup>1</sup>, 平田 直<sup>1</sup>  
Kazuyoshi Nanjo<sup>1\*</sup>, Hiroshi Tsuruoka<sup>1</sup>, Sayoko Yokoi<sup>1</sup>, Naoshi Hirata<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>ERI, Univ Tokyo

本講演では“地震発生予測検証実験”の概要と、関東を予測領域とした実験結果を説明する。関東には堆積平野があり、その下に南東側からフィリピン海プレートが沈み込み、さらにその下に東側から太平洋プレートが沈み込んでいる、世界で最も地震の多い場所である。そのような地域に適用可能な予測モデルの可能性を探求するために関東を実験領域に選んだ。

標準的な地震活動を予測するモデルの開発を促し、その性能を予測科学の観点から比較検証する国際的なプロジェクト Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP) が、米国・ヨーロッパ・日本等の地震国が中心となり国際連携で進められている。これは同時に、従来提案されている地震活動の活発化・静穏化による各種の地震活動予測手法の有意性と確率利得を評価する基盤を整備することでもある。我が国では「地震及び火山噴火予知のための観測研究(平成21年-25年)」の一課題として、CSEPの日本版“地震発生予測検証実験”が2009年11月から実施されている。

検証実験の重要な点は、単に地震発生予測をするだけではなく、客観的かつ厳密な手法で予測結果の評価をすることである。そのためには、以下の3点が考慮されている。

i. 予測モデルを作る研究者(モデラー)と独立に、その結果を評価する組織(テストセンター)を作り、モデラーが実験の途中で予測モデル(予測値)を修正出来ないようにする。このために、モデラーは予測モデルのプログラムコードを実験開始前にテストセンターへ提出することが推奨されている。テストセンターは、そのプログラムコードを実装して予測値を算出する。ii. テストセンターは、あらかじめ決められた手続きに基づいて予測を検証(テスト)する。iii. 予測は事後予測ではなく、本当に未来の地震を予測する。これは、モデラーが結果に合わせてモデルパラメータを原理的に調整出来ないようにするためである。

まず、実験開始前に研究者コミュニティで「実験ルール」を定義した。以下に主な4つのルールを示す。従来の地震予知研究に比べ、モデル間の優劣を厳密に評価出来る。

(I) 予測検証領域として、(a) 日本全体、(b) 日本の離島を含まない領域(本土)、(c) 関東地域を設定する。(II) 予測検証期間を1日、3ヶ月、1年、そして3年と設定し、その期間に発生する地震数を予測、検証する。対象とする予測期間が3ヶ月以下の場合にはマグニチュード4以上(M<sub>4</sub>)、1年以上の期間ではM<sub>5</sub>の地震の発生を予測する。(III) 検証に用いる観測データは、気象庁が決めた震源(気象庁一元化カタログ)を用いる。(IV) 予測の検証には、領域全体での地震総数(N)テスト、地震規模の頻度分布(M)テスト、時空間規模分布の尤度(L)テスト、空間(S)テスト、尤度比(R)テストを用いる。これらの評価を使うことは、CSEPの共通ルールである。

予測モデルを国内外から公募した結果、3つの領域、4つの予測期間の計12のカテゴリに対して、合計91モデルが提出された。本研究では、(c) 関東領域に提出された予測モデル(4個の1日モデル、7個の3か月モデル、8個の1年モデル、8個の3年モデル)の実験結果を報告する。さらに本研究の見通しを基に、“首都直下地震防災・減災特別プロジェクト”との連携についても議論する。

キーワード: 地震, 国際連携, 予知・予測, 地震活動・テクトニクス, 日本, 統計地震学

Keywords: Earthquake, Global collaboration, Prediction and forecasting, Seismicity and tectonics, Japan, Statistical seismology