I-1 地震計を用いた自然地震観測によるプレート構造調査

平田直 (東京大学地震研究所)

1. 研究の目的

首都圏では大地震の発生の可能性が高く¹⁾、人口密度や資本の集積度が高いため、大地震が起きると大きな被害が発生することが予想されています²⁾。しかし、実際にどこでどのような地震が起きるか、その地震によってどのような揺れが発生するのかについては、よく分かっていません。そこで、高精度の地震計を使って観測し、どこで、どのような地震が発生するかを明らかにすることが、この調査研究の目的です。その地下構造や震源分布によって、首都圏に大きな被害を及ぼす地震を理解し、その発生による被害の程度を知り、被害を軽減することがこのプロジェクト全体の大きな目標です。

そのために、まず新たに稠密な地震観測網を構築し、これまでに例のない都市部での定常的な連続観測を行いました。そのデータを解析し、震源分布や地下構造を明らかにし、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これまで以上の精度で把握しました。その結果、PHS プレートの上面は、これまで知られているものより浅いことがわかり、そこで発生すると想定された地震の震源断層も浅くなりました。この情報は、今後、関東地方で発生するM7程度の地震をはじめとする首都直下地震の詳細を明らかにするための基礎的な情報になり、首都直下地震の長期予測の精度向上や、高精度な強震動予測につながります 3 。

2. 研究の実施内容

2.1 中感度地震観測の整備

都市部は、人間活動による人工的な振動(ノイズ)が多く、地震観測には適していない地域ですから、少しでもノイズの少ない観測地点を選定することが、観測網構築には大切です。一般に人工ノイズ源は地表付近に存在するため、これまでは、そこから離れた深い(2,000m~3,000m)縦孔の底で観測されていました。しかし、このような深い孔は、建設費用、工事期間、用地確保交渉等の大きなコストを伴います。そこで、本プロジェクトでは、多数の観測点を集中配置することで、シグナルを際立たせ、地下の様子を探ることにしました。

一方、都市部においても様々な事故や落雷などによる停電や回線の断絶が頻繁に発生します。そのため、記録の伝送が途切れたときでも連続的に確実にデータを収集する仕組みが必要です。そこで、障害が発生してもデータを取得できる伝送方式を新た

に開発しました⁴⁾。この仕組みは、首都圏に大地震が発生した時や通信回線の故障時においてもデータが途絶しない重要なものです。このような地震観測網として、首都圏地震観測網(Metropolitan Seismic Observation network: MeSO-net)を東京大学地震研究所、神奈川県温泉地学研究所、防災科学技術研究所が協力して構築しました(図 1)。

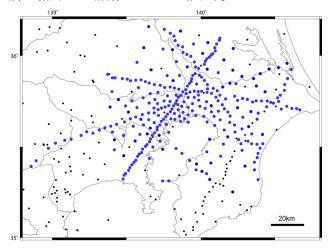


図 1 首都圏中感度地震観測網(MeSO-net)の観測点配置。 青丸が MeSO-net 観測点 296 箇所。小さい黒丸は、大学、 気象庁、防災科学技術研究所、温泉地学研究所の既存の 観測点を示します。

首都圏下には、南方からフィリピン海(PHS)プレートが沈み込み、その下へ東方から太平洋(PAC)プレートが沈み込んでいます。この PHS プレートの沈み込む範囲を覆うような観測網を検討しました。一方で、PHS プレートが沈み込む前後での地下構造や地震活動の対比を行うために、PHS プレートが沈み込む直前の関東山地周辺も観測範囲に加えました。全体として、東京都東部を中心とした半径約80km の範囲が研究対象領域です。

本プロジェクトでは、M7級地震(断層サイズ約20km)の解明を目的の一つとしているため、このサイズの地震断層より細かな分解能での観測が不可欠です。平均間隔を5km程度として、単純に首都圏(半径約80kmの円内)をその間隔で均一に覆うと、約850点の観測点が必要になります。しかし観測点を集中させるなどして、少ないながらも適切な配置を考えました50。その結果、5本の直線状の観測点分布(2~3km間隔)と半径約80kmの面状分布(4~10km間隔、中心で密)で、最終的に296ヶ所の観測点を選定しました。

この5本の直線状観測点は、過去に発生した大地 震の直上や現在発生している地震活動域の直上を 通るように選んでいます。さらに、これまでの研究 成果で指摘されていた不均質な構造が存在する地 域、繰り返し小地震およびゆっくりすべりが発生す る領域などの注目すべき地域の直上を通ることも 考慮に入れています。

さらに、様々な機関(地震研究所、気象庁、防災科学技術研究所)が、設置している地震観測網も取り込み、統合処理しています。その結果、東京駅を中心とした半径 40km の範囲では、これまでの約 20 倍の観測点密度になりました。



図 2 MeSO-net 観測点の構成。主に小中学校の校庭に 20mの観測井を掘って設置しました。

都市部では、人工ノイズが少ない静かな環境を選 定することは困難です。そこで、地震計を縦孔の底 に設置し、孔底でデジタル化して伝送することによ ってノイズの軽減を図りました。掘削深度は、設置 に掛かる経費・日数とデータ品質の兼ね合いで決ま りますが、本プロジェクトの科学的な目的に必要な データが得られる深さとして、すべての観測点で20 mとしました。具体的な観測点候補地としては、道 路や鉄道路線から比較的離れることが可能で、地震 計を設置する縦孔を掘削することが可能な広いグ ランドを持つ学校や公園を選びました。幸い学校は、 地域の防災拠点になっていることや、地震に興味を もった先生や児童・生徒が多いため、本プロジェク トを進めるにあたって多くの協力を得ることがで きました。そのような方々に対しては、専用のウェ ブサイトで各地点での地震波形や環境測定データ (気温・気圧)を閲覧できるようにし、理科教育や 防災教育のための生きた教材として活用さること を望んでいます (図2)。

大地震発生前後の観測記録には、前震、本震、余 震が含まれていて、それらを漏れなく記録すること は、本プロジェクトのように大地震の地震像を解明 する場合、特に重要です。そのため、小地震から大 地震の地震動を飽和せずに記録できる広いダイナ ミック・レンジの観測システムが必要です。小地震 をねらいとした高感度地震計と強い地震動の観測 を目的とした強震観測との中間的な地震観測とい う意味で、中感度地震観測装置と呼んでいます。

地下のセンサ部装置は、負帰還型加速度センサ部と測定部からなり、1 つのケースに収められています。センサ部は、鉛直・南北・東西の3 成分を測定し、フルスケールは水平成分で $\pm 1,500$ gal、鉛直成分で ± 500 gal です。測定部は、センサ部で得られた信号を変換し、デジタル信号として CAN (Controller Area Network) バスを用いて地上部装置に伝送します。サンプリングは、地上部装置から送信される基準時刻情報に対して $\pm 50\mu s$ 以内で同期し、分散配置された複数の観測点間で同一タイミングでの測定を可能としました。

地上部装置では、センサ部装置からの測定データを WIN フォーマットに変換し、データセンターへ UDP/IP(User Datagram Protocol/Internet Protocol)手順により送信します。そのデータ転送は、自律協調型通信方式によって行われ、回線状態やデータ処理センター側の状況に応じて適切な伝送速度を自ら選択します。データ処理センターから送られるデータ受信通知(ACK 信号)を地上部装置が受け取った時点でデータ伝送が完了することとし、ACK 信号を受信できなかった場合は、測定データが自動的に再送されます。また、回線不通時には測定データを記憶装置上に蓄積し、復旧後に未送信データの送信を自動的に再開します。

時刻は、GPSで常に時刻校正が行われ、CANバスを通じてセンサ部装置に伝達されるため、1ミリ秒以下の精度が確保されています。地上部装置は商用電源により動作し、停電時には自動的に蓄電池に切り替わり、2日間以上(約50時間)にわたって連続測定できます。観測点それぞれにおいて装置の動作監視が自動的に行われ、その情報を自動的かつ確実にセンターに伝えるために、Simple Network Management Protocol(SNMP)を利用した監視システムを導入し、296ヶ所の観測装置を少人数で監視・保守しています。各観測点の回線は常時接続型の形態で、回線切断時の復旧のために観測点のルータリセットが可能なため、保守性能が高いシステムになっています。

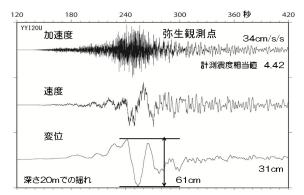


図3 MeSO-net で記録された 2011 年東北地方太平洋沖地震の波形例 (弥生観測点の上下動)。計測震度相当値は、深さ 20mでは 4.42 であったが、地表に設置された地震計では 4.92 と大きい。その一方で、加速度を 2 回積分して得られる変位は、どちらも約 31cmであった。

2011年3月11日の東北地方 沖地震の発生時には、首都圏でも多くの地点で停電や回線断が発生しましたが、本システムでは、最終的に途切れることなく全地震記録を得ることができましたfl図3)。 震源域から遠く離れた首都圏でも計測震度6 弱相当になる場所があるなど、地域による揺れの違いが明らかになっています(図4)。

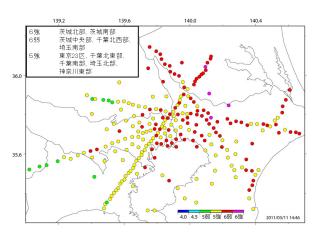


図 4 MeSO-net で記録された 2011 年東北地方太平洋沖 地震の計測震度相当値。都内でも震度 6 弱に相当する 強いゆれがあったことがわかります。

さらに、MeSO-net の地震計は小さなゆれから大きなゆれまで正しく記録することができるので、観測波形を用いることで、この地震がどの地点から地震波を多く放出したか、といった震源過程の研究にも用いられました 6 (図 5)。

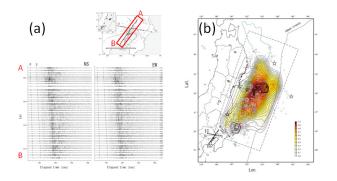


図5 バックプロジェクション法で求めた東北地方太平洋沖のすべり量分布。(a)MeSO-net で記録された本震の波形例。(b)本震で放出されたエネルギーの分布。色の濃いところが放出量の多い所。

2.2 首都圏下のプレート構造

2.2.1 地震波走時トモグラフィによる速度分布

MeSO-net で取得したデータと既存の地震観測網のデータを統合して、二重走時差トモグラフィ法 (Double-difference tomography) 7 による地震波走時トモグラフィ解析を行い、首都圏下の速度構造を求めました。集中配置された観測網にこの手法を適用して速度構造を推定することは、震源の相対走時の精度を向上させ、分解能の向上に寄与することが示されています 7 。 MeSO-net データを用いると得られる速度分布の画像がより鮮明になりました(図 6)。

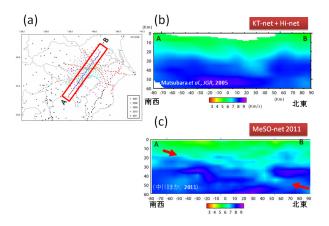


図 6 MeSo-net 観測点のデータを用いたトモグラフィ解析結果と従来の観測点だけの比較。(a)断面の位置。

- (b)MeSo-net 観測の始まる前のデータによる Vp 分布。
- (c) MeSO-net 観測データを加えた Vp 分布。

推定した速度構造の深さ断面図では、沈み込む PHS プレートや PAC プレートの海洋性地殻が、周辺部分と比較して低速度な領域として見られます (図 8、図 9)。海洋性地殻内やその上面付近で微小地震が多数発生していることがわかります。

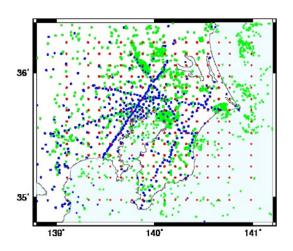


図 7 トモグラフィ解析に用いた地震(緑丸)と格子点配置(赤丸)。グリッド配置は、水平方向に 10km間隔(外周部は一部 20km間隔)。深さ方向は深さ 10km~60kmは 5km間隔、それ以深は 70、80、100、150km。解析に用いた観測点を青の丸で示しました。使用した地震数は計 1.958 個。

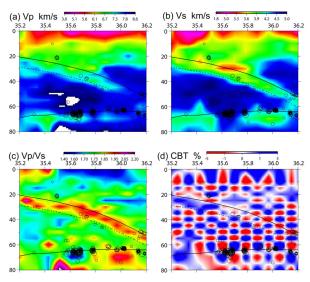


図8 速度構造の深さ南北断面図(東経 140.1°、左が南で右が北)。実線は、PHS プレートの上面と PAC プレートの上面。破線は、PHS プレートのモホ面。(a) P波速度:暖色ほど速度が遅い、(b) S波速度 (c) Vp/Vs (d) チェッカーボードテスト。±5%の速度変化を与えて作った走時データを元にして求めた速度構造。得られた解の確からしさの目安になる。この断面図は、東京湾を南北に横切るもので、Vp/Vsの高い領域が連続して見られる。これは、PHS プレートの海洋性地殻であると考えられる。深さ 70 km付近では、PACプレート上面での地震活動度が高く、これらの地震は逆断層型の地震であった。

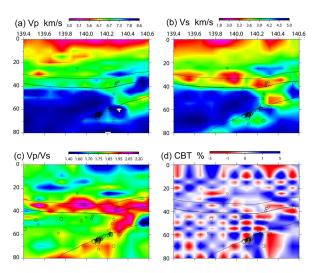


図9 速度構造の深さ東西断面図(北緯 35.8 度、左が南で右が北)。実線は、PHS プレートの上面と PAC プレートの上面。破線は、PHS プレートのモホ。(a) P波速度:暖色ほど速度が遅い、(b) S波速度 (c) Vp/Vs (d) チェッカーボードテスト。この断面図も、東京湾北部を東西に横切るもので、ここでも Vp/Vs の高い領域として PHS プレートの海洋性地殻が見られる。東経 140.2 度から 140.6 度では、PHS プレートと PAC プレートとが接している領域でも Vp/Vs が高い。

2.2.2 首都圏下の減衰(Q)構造

首都圏下に沈み込むプレート内の減衰構造を求めました。まず、2010 年 1 月 1 日から 2011 年 5 月 31 日までに観測された地震のうち、計測震度相当値が 1.0 以上の地震 465 個を選択し、これらの地震に対して、震源から観測点まで地震波が伝播する際に生じる減衰効果を表す指標である t^* を計算しました。観測された加速度波形を 2 回積分して変位波形にしてからスペクトルを計算し、 ω^2 震源モデルによる理論スペクトル曲線を合わせることでコーナー周波数を求め、それを用いて観測点ごとの t^* を得ました。この t^* を使って、 $SIMUL2000^{8}$ を用いた減衰構造トモグラフィ解析を行いました。

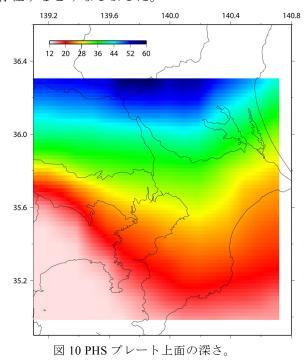
解析の結果、首都圏下に沈み込む PHS プレートに起因すると考えられる減衰領域が見られ、特に千葉県中央部の下では顕著な減衰域(約300)が存在しました。この部分は、地震波トモグラフィによって得られた速度構造における高 Vp/Vs 領域とほぼ一致しています。

2.2.3 PHS プレートの形状

得られた地震波速度構造を基にして、首都圏下のプレート境界面の形状を推定しました。首都圏下には、PHS プレートと PAC プレートが沈み込んでいますが、これまでの研究でも、地震活動や地下構造の不均質等から、これら 2 枚のプレート形状が求め

られています。しかし、今回得られた成果は、過去のどの研究よりも格段に高精度であり、それから得られるプレート形状においても、高精度・高分解能なものになりました。

まず、得られた地震波速度の深さ断面図を作成し、その範囲内で発生している地震の震源分布を重ねました。その断面図に、プレート境界を特徴づける速度の不連続、低角逆断層型地震、くりかえし小地震が共通して存在するところをプレート境界面であるとみなしました。さらに、PHS プレートが海洋性地殻(厚さ約8km)を伴ったまま沈み込んでいると考え、プレート境界面下約8kmの部分の速度不連続面をモホとし、その上8kmにプレート上面が存在するとみなしました。



一方、隣り合う深さ断面図では、地震波速度がなめらかに変化すると考えられるため、これまでに得られた切れ切れの不連続面を基にして、速度不連続が見られないところや地震活動の無いところでも、周辺と連続的につながるような面を考え、プレート境界面の等深線を推定しました(図 10)。この等深線は、東京湾で行われた反射法地震探査の結果、房総半島付近で行われた変換波解析の結果、茨城県南部における繰り返し小地震の分布による結果等の最近の研究とも比較し、大きな矛盾が生じないようなものになっています。従来の研究(例えばIshida,1992)と比較すると、一部で約 10km 浅くなりました。

房総半島東部周辺では沈み込む PHS プレート上面付近で、1923 年関東地震の最大余震(M7.5)、ゆっくり滑り、および小繰り返し地震といった様々なタ

イプの地震が発生しています(図 11)。そこで、MeSO-net のデータと防災科技研のデータを統合処理し、房総半島沖の地震による PHS プレート上面でP波からS波へ変換する波を使って、その変換点の分布を調べました。その結果、北西から西北西方向に傾斜している面状分布と、ほぼ水平からやや北方向に緩やかに傾斜している 2 つの面状分布のある構造が明らかになりました(図 12)。これらの知見は、図 10 の PHS プレートの上面分布を作成する際に活かされています。

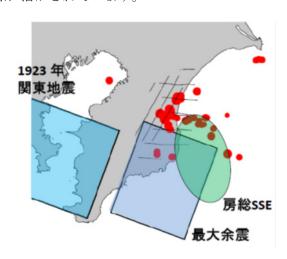


図 11 地震波の変換点(赤丸)と房総半島付近の PHS プレート上面で起きる現象。1923 年関東地震の最大 余震の震源域(青の四角)、ゆっくり滑り(SSE:緑 の楕円)の発生領域を示しました。

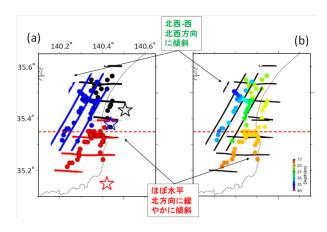


図 12 PHS プレート上面の詳細な形状。(a) P 波変換波より推定された変換面の形状。星印は震央を、コンターは変換面の等深線を、丸印は変換点の位置を示します。等深線は青線 5km 間隔、それ以外は 1km 間隔。(b)変換点の深さを色で表わしました。

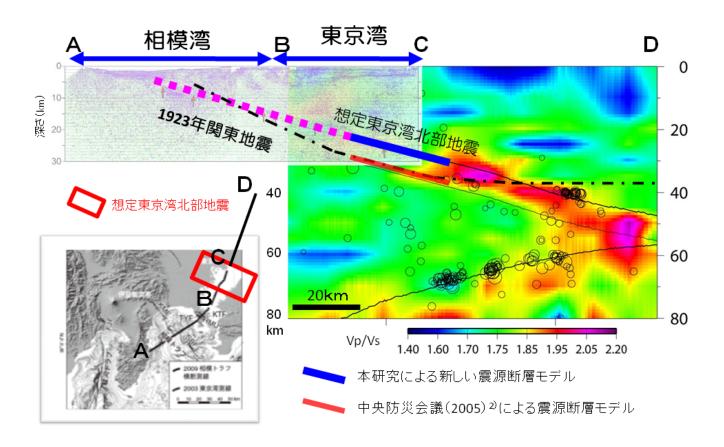


図 13 想定された東京湾北部の地震断層面の深さの比較。中央防災会議が想定した地震断層面(赤)と、本プロジェクトによる震源断層面(青)。反射法地震探査断面図と Vp/Vs の分布をあわせて示し、 $Ishida(1992)^{10}$ による古いプレートモデルを一点鎖線で、1923 年関東地震の震源断層面を破線で示しました。東京湾北部の地震断層面は、これまでの結果より約 10km 浅くなり、その周辺の陸の下部地殻や PHS プレートの海洋性地殻の Vp/Vs が標準的な値を示す領域(緑色)に位置するため、地震を起こさない領域であるとは言えません。

2.3 震源断層モデルの設定

2.3.1 プレート境界の地震

首都圏で発生する地震として、まず PHS プレー トの上部境界で発生するプレート境界型地震を考 えてみます。プレート境界において、プレート同士 が強く固着してひずみを蓄積している部分が地震 を起こす可能性があると考え、プレート境界付近に おける地震波速度の不均質から、そのような場所の 特定を試みました。S波速度が遅く、Vp/Vsが大き な領域では地殼内の流体含有率が高く、流体圧が高 くなり大きな地震が発生しにくい傾向があります ⁹⁾。しかし、あらたなプレート境界モデルを用いて、 そのすぐ上(約3km)の地震波速度の分布に異常が見 られるかどうか調べたところ、特に低速度な領域が 広くあるわけではなく、標準的な速度の分布が見ら れました。したがって、速度構造から地震断層とな りうる可能性のある部分を限ることはできません でした。逆に言えば、プレート境界のどの部分にお いても、地震を起こすことのできる標準的な速度構 造であると言えます。

そこで、2005 年に中央防災会議が被害想定をした 18 種類の地震の中で、最も被害が大きくなると想定された東京湾北部の地震 $^{2)}$ をプレート境界型の地震の一例として、ここでは取り上げることにしました。これは、PHS プレートの上面で発生する地震で、本プロジェクトによる新たな PHS プレートの形状モデルに基づき、断層面の深さを推定すると、従来のモデルより約 $10 \, \mathrm{km}$ 浅い断層面になります(図 13)。この想定東京湾北部の地震の震源断層は、プレート境界上盤側の Vp/Vs が標準的な領域に位置します。この付近では通常の地震活動が存在し、プレート境界における低角逆断層型の地震も観測されていて、大地震を発生させる可能性のある地域と言えます。

震源断層面が中央防災会議の想定より浅くなる ということは、地表での揺れが大きくなる可能性が あることを意味します。

2.3.2 プレート内の地震

首都圏で起きる地震には、沈み込むプレートの内部で起きるものも考えられます。その一つとして、千葉県中部の地下 25km から 65km の深さに震源断層を想定しました(図 14)。この断層面は、PHS プレート内部に分布する Vp/Vs の高い領域の西端に位置し、ほぼ南北の走行を持つ高角の断層です。断層面積から、地震の規模は M6.9 と推定されました。この場所は、普段から横ずれ型の地震の活動度が高い所です。想定千葉県中部の断層を含む断面図を図15に示します。

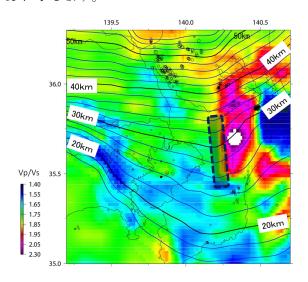


図 14 想定千葉県中央部の地震(M6.9)の断層領域。PHS プレート内の地震。プレート境界上面より 20km 深い部分の Vp/Vs の分布をあわせて示しました。

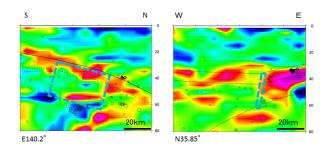


図 15 (想定) 千葉県中央部の地震 (N6.9) の断層領域。 Vp/Vs の分布をあわせて示しました。上端の深さ 25km、下端の深さ 65km、走向 5 度、傾斜 80 度、長さ 40km、幅 25km

2.4 地震活動の時間的変化とプレート運動

首都圏では、被害を及ぼすような M7 級の地震が 明治以降約 120 年間で 5 回発生していて、地震調査 委員会の評価で、30 年間に M7 級の地震の発生が 70%とされています。一方で、南関東の中小地震の 数を調べてみると、ほぼ GR 則に従い、明治以降の

5回の M7級の地震から求めたものと同じ傾向の中に収まります。この 120 年程度、南関東では、M7級の地震とそれ以下のM1程度までの小地震の発生の統計的な性質はよく似ていると言えます。

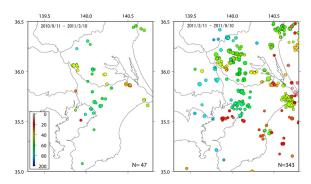


図 16 首都圏の地震活動度の変化。気象庁一元化 震源 (M3 以上) の数を、2011 年 3 月 11 日以前と 以後の 6 ヶ月で比較した。

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震の発生 以降、首都圏でも地震活動度が高くなりました(図 16)。地震活動が活発化したのは主として、PHS プレートの上面と PAC プレートの上面で発生するプレート境界型地震です(図 17)。

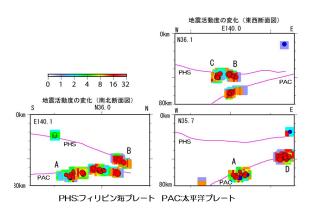


図 17 地域ごとの地震活動の変化。活発化した地震の深さ分布を示す。PHS は PHS プレートの上面、PAC は PAC プレートの上面を示します。

プレート境界では、ほぼ同じ場所が繰り返し破壊されることによって生じる小地震があります。この小地震を解析すると、プレートの相対運動の速さを推定することができます ¹¹⁾。 3 月 11 日以前と以後の小繰り返し地震の発生間隔を調べると、PHS プレートと陸側プレートの相対速度も、PAC プレートとその上盤側のプレートとの相対速度も増加していることが分かりました。

PAC プレートが西方へ沈み込む速度が、3 月 11 日の地震前後で大きく変わる可能性は少ないと考えられますので、この相対速度の変化は、プレート境界の上盤側のプレートの動きを反映していると解釈できます。東北地方太平洋沖地震の後に PAC

プレート上面で進行している余効滑りの影響で、東日本は東方へ引き延ばされるように動いています。そのために、沈み込む PAC プレートや PHS プレートとの相対運動が増加したと考えることができます。この考えが正しければ、プレート境界の地震活動が活発化している状態は、余効滑りなどの影響が続く間は継続することが予想されます。1964 年アラスカ地震 (M9.2) の余効変動が数十年間続いたという報告 12)がありますので、日本でも長く続く可能性が高いでしょう。

また、2011 年 10 月下旬に房総半島東部で、ゆっくり滑り現象(SSE: Slow Slip Event)とそれに伴う群発地震活動が観測されました。Hi-net 傾斜計データの解析により、房総半島沖の PHS プレート上面付近に断層モデルが推定されました(防災科研、2011)¹³⁾。これまで房総 SSE は 5~7 年間隔で繰り返してきましたが、今回は、これまでで最も短い 4年2ヶ月の間隔で再来しました。この間に東北地方太平洋沖地震が発生していて、この再来間隔が短いことは、東北地方太平洋沖地震の影響の可能性が考えられます。房総 SSE は巨大地震発生域の深部側に隣接することから、今後の活動状況を注意深く見ていく必要があります。

3. まとめ

首都圏に 296 点の地震計からなる首都圏地震観測網(MeSO-net)を構築し、都市部における連続的な地震観測を続けてきました。2011 年東北地方太平洋沖地震の本震や大きな余震も観測することができました。それらのデータを用いて、地震波走時トモグラフィ法により詳細な地下構造を求めました。その結果、フィリピン海プレートの上面が従来の在定に比べて約10km 浅いことがわかりました。このプレートの構造を用いて、首都圏で起きる可能性のある震源断層モデルを作りました。新しい震源断層モデルは従来のモデルより浅いため、地表での揺れが大きくなる可能性があります。現在、首都圏において、プレート境界での地震活動が活発化していて、プレート間の相対運動が増加したことを示しています。

参考文献

- 地震調査研究推進本部・地震調査委員会、相模トラフ沿いの地震活動の長期評価(平成 16 年 8 月 23 日)、2004
 - .http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04aug_saga mi/index.htm (参照 2011-12-17)
- 中央防災会議・首都直下地震対策専門調査、首 都直下地震対策専門調査会報告、(平成17年 7月)、2005

http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/shutochokka/houkoku.pdf (参照 2011-12-17)

- 3) 平田 直、酒井慎一、佐藤比呂志、佐竹健治、 纐纈一起、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、東京大学地震研彙報、No.84、 pp.41-56、2009
- 4) 森田裕一、酒井慎一、中川茂樹、笠原敬司、平田直、鏡弘道、加藤拓弥、佐藤峰司、首都圏地震観測網 (Meso-net) のデータ伝送方式について一自律協調型データ送信手順 (ACT protocol) の開発 、東京大学地震研究所彙報、No. 84、pp.89-105、2009
- 5) 酒井慎一、平田直、首都圏地震観測網の設置計画、東京大学地震研究所彙報、本特集号、2010
- 6) Honda, R., et al., A complex rupture image of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake revealed by the MeSO-net., Earth Planet. Space, No.63, pp.583-588, 2011
- Kato, A., et al., Variations of fluid pressure within the subducting oceanic crust and slow earthquakes, Geophys. Res. Lett., 37, L14310, doi:10.1029/2010GL043723, 2010
- 8) Zhang, H., and C. H. Thurber, Double-difference tomography: the method and its application to the Hayward fault, California, Bull. Seismol. Soc. Am. 93, pp.1875–1889, 2003
- 9) Thurber, C., and D. Eberhart-Phillips, Local earthquake tomography with flexible gridding, *Comput. Geosci.*, No.25, pp.809-818, 1999
- 10) Ishida, M., Geometry and Relative Motion of the Philippine Sea Plate and Pacific Plate Beneath the Kanto-Tokai District, Japan, J. Geopyhs. Res.97, pp.489-513, 1992
- 11) Kimura, H., Kasahara, K., Igarashi, T., and Hirata, N., Repeating earthquake activities associated with the Philippine Sea plate subduction in the Kanto district, central Japan: a new plate configuration revealed by interplate assismic slips. Tectonophysics, No.417, pp.101–118, 2006
- 12) Suito, H., and J. T. Freymueller, A viscoelastic and afterslip postseismic deformation model for the 1964 Alaska earthquake, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2008JB005954, 2009
- 13) 防災科学技術研究所、房総半島沖で「スロー地震」再来"、防災科研高感度地震観測網ホームページ、2011

http://www.bosai.go.jp/press/2011/pdf/20111031_0 1.pdf (参照 2011-12-17)