

3. 1. 2 統合処理によるプレート構造調査研究及びデータ保管

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

新たに設置される中感度稠密地震観測データと、首都圏内において深さ 3000m の基盤岩に達する深層地震観測を含む既存の高感度地震観測データとの統合処理を行い、自然地震波形データベースを構築・保管すると共に、高精度震源・メカニズム解決定に基づく地震クラスターの分類、3次元地震波速度・減衰構造、地震波形解析に基づくプレート境界面形状及び浅部地震基盤構造を明らかにし、首都直下におけるプレートモデルを構築する。

(b) 平成 23 年度業務目的

- 1) 国立大学法人東京大学地震研究所に集約される中感度稠密地震観測データを防災科学技術研究所地震研究部地震観測データセンターに転送し、基盤的地震観測網データと統合的に処理を行い、本プロジェクトの研究基盤となるデータベースの維持及び保管を継続して行う。
- 2) 相似地震活動や群発地震活動の高精度相対震源決定処理により地震クラスターの特徴を解析するとともに、3次元地震波速度・減衰構造に基づき、首都直下後続位相解析装置を用いて後続波解析等を行うことで、プレート境界面性状、浅部地震基盤構造を明らかにし、首都直下のプレートモデルを構築する。
- 3) 「3. 1. 1 中感度地震観測によるプレート構造調査」にこれまでの研究成果を提供し、3. 1. 1(1)(b)3)の研究成果取りまとめに協力する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
独立行政法人 防災科学技術研究所	主任研究員	木村尚紀	
地震・火山防災研究ユニット			
同 地震・火山防災研究ユニット	ユニット長	関口渉次	
同 地震・火山防災研究ユニット	総括主任研究員	堀貞喜	
同 地震・火山防災研究ユニット	主任研究員	汐見勝彦	
同 地震・火山防災研究ユニット	主任研究員	武田哲也	
同 地震・火山防災研究ユニット	主任研究員	浅野陽一	
同 地震・火山防災研究ユニット	主任研究員	松原誠	
同 地震・火山防災研究ユニット	主任研究員	斉藤竜彦	
同 地震・火山防災研究ユニット	研究員	松澤孝紀	
同 地震・火山防災研究ユニット	研究参事	野口伸一	

(2) 平成 23 年度の成果

(a) 業務の要約

- 1) 国立大学法人東京大学地震研究所に集約される中感度稠密地震観測データを防災科学

技術研究所地震・火山観測データセンターに転送し、基盤的地震観測網データと統合的に処理を行い、本プロジェクトの研究基盤となるデータベースの維持及び保管を継続して行った。

2) また、相似地震活動や群発地震活動の高精度相対震源決定処理により地震クラスターの特徴を解析するとともに、3次元地震波速度・減衰構造に基づき、首都直下後続位相解析装置を用いて後続波解析等を行うことで、プレート境界面性状、浅部地震基盤構造を明らかにし、首都直下のプレートモデルを構築した。

3) 「3. 1. 1 中感度地震観測によるプレート構造調査」にこれまでの研究成果を提供し、3. 1. 1(1)(b)3)の研究成果取りまとめに協力する。

(b) 業務の成果

1) サブテーマ① 基盤的地震観測網データとの統合処理による自然地震波形データベース構築および保管

首都直下防災減災プロジェクト（以下首都直下プロジェクト）において各観測点において観測された波形データは地震研究所に集められたのち、防災科学技術研究所(以下、防災科研とする)に転送され蓄積される。本年度も、本プロジェクトの研究基盤となるデータベースの維持および補完を引き続き行った。

首都直下プロジェクトにおける観測点数は最終的に300観測点弱となり、首都直下プロジェクトのデータ収集においては、大学間の地震波形データが流れているJDXnetを用いている。首都直下データの収集を円滑に進めるため、受信部においてデータが正常に流通しているかどうかを確認している。

2) サブテーマ②首都直下地震クラスター解明

a) 房総半島沖スロースリップイベントに伴う群発地震活動の詳細分布

i) はじめに

房総半島沖では5-7年間隔でスロースリップイベント(SSE)が繰り返し発生することが知られている。関東地方ではフィリピン海プレートが沈みこみ、その境界面の20kmより浅い領域は強く固着し、歪が限界に達すると破壊が発生することで1923年関東地震およびその最大余震(M7.5)(Kimura et al., 2009a)¹⁾等の巨大地震が発生してきたと考えられる(図1)。フィリピン海プレート上面境界の深い側では相似地震が分布し、相似地震がほぼ一定の間隔・規模で繰り返し発生することから、歪の蓄積を伴わずに定常的にずれが進行している安定すべり域と考えられる(Kimura et al., 2006; 木村, 2010)²⁾³⁾。房総SSEの発生域は20km以浅の固着域と深部の安定すべり域の間に位置し、房総SSEは両者の中間的な性質を持った遷移的なすべり現象と考えられている。房総SSEは巨大地震震源域の深い側に隣接することから、その発生自体が巨大地震を誘発する可能性があり、巨大地震震源域における応力の蓄積状況をモニターする上で重要である。2007年8月に発生した前回の房総SSEでは、SSEによる地殻変動が防災科研Hi-netに併設された高感度加速度計(傾斜計)によって明瞭に捉えられ、傾斜データの解析により、関東地方下に沈み込むフィリピン海プレート上面付近にSSE断層モデルが推定されている(Sekine et al., 2007)⁴⁾。房総SSEは群発地震を伴う事が特徴で、これらの地震は房総SSEすべり域の周りを

縁どるように分布する。これらの地震の震源深さと房総 SSE 断層面の深さがほぼ同じことから、両者はおなじプレート境界上のすべり現象であり、群発地震は房総 SSE のすべりによって誘発されたと推測される。2011 年 10 月 23 日以降、過去の房総 SSE と類似した群発地震活動が発生し、同時に Hi-net 傾斜計によって明瞭な地殻変動が捉えられた(図 2 および 3)。傾斜データの解析により、房総沖のフィリピン海プレート上面付近に位置する断層モデルが推定された(防災科研、2011) 5)。この 2011 年に発生した房総 SSE に伴う群発地震活動の特徴を明らかにするため、その時系列を詳しく調査するとともに詳細震源分布を決定した。

ii) 房総 SSE に伴う群発地震活動

2011 年房総 SSE に伴って多数の地震が群発的に発生した。図 2 に房総 SSE に伴う地震の震央分布、および主な地震の Hi-net および AQUA (Accurate and QUick Analysis System for Source Parameters; 松村他、2006) 6)による発震機構解を示す。いずれもフィリピン海プレートの相対運動方向に調和的な方向のすべりを有する低角逆断層型に求まっている。また、群発地震活動の中には相似地震も発生している。活動の時間変化を見るため、図 2 の a-b および c-d 方向に投影した時空間分布、勝浦東観測点 (KT2H) における傾斜記録、および相似地震から推定した平均積算すべりを図 3 に示す。傾斜変動には傾斜方向の明瞭な変化が見られたことから、傾斜方向の変化により (A) ~ (C) の 3 期間に区分した。これを見ると、期間 (A) では a 付近で地震が発生しはじめ、期間 (B) に入った 10 月 27 日昼頃から b 方向へ地震発生域が拡大する様子が見られる。次に c-d 方向で見ると、はじめ c-d の中央付近で地震が発生しはじめ、そこから両方向へ活動域が拡大した。期間 (B) になってからは、主に d 側で地震が発生している。KT2H における傾斜記録を見ると、27 日昼頃から傾斜方向が変化すると共に、南北成分の傾斜変動が特に顕著になっている。これは、房総 SSE すべり域が移動したためと考えられる。この時期は、前述の群発地震活動域が a から b へ拡大する時期と重なる。これより、房総 SSE のすべり域の変化に応じて群発地震の発生域も移動している可能性が考えられる。相似地震より求めた平均積算すべりを見ると、主に期間 (A) および (B) にすべりの増加が見られ、期間 (C) でややすべった後、大きなすべりは推定されていない。これは、相似地震が房総 SSE 活動の初期の部分で発生したことを示している。また、傾斜変動の大きな時期を含み、相似地震が房総 SSE すべり過程の指標として利用可能であることが示唆される。

iii) 房総 SSE に伴う群発地震の詳細分布

房総 SSE に伴う群発地震の詳細分布を決定した。震源決定は Waldhauser and Ellsworth (2000) 7) による Double Difference 法を用い、波形相関による相対走時差データも用いた。得られた結果を図 4 に示す。鉛直断面を見ると、最決定震源はほぼ水平に分布する。発震機構解および相似地震の発生に加えて、ほぼ水平な震源分布が得られたことから、群発地震はフィリピン海プレート上面で発生したと考えられる。

iv) 過去の房総 SSE との比較

房総 SSE は 5-7 年間隔で繰り返してきたことから、今回の活動と過去 29 年間の活動を比較した。房総半島沖の地震による M-T 図(図 5)に、房総 SSE の発生時期を赤矢印で示し、房総 SSE の再来間隔をあわせて記した。2007 年房総 SSE まで、房総 SSE は 5-7 年間隔で繰り返してきたが、2011 年はこれまでで最も短い 4 年 2 ヶ月で再来した。この

間には、緑矢印で示した時期に東北地方太平洋沖地震が発生している。今回再来間隔が最も短かったことは、東北地方太平洋沖地震の影響によって発生が早まった可能性が考えられる。房総 SSE は巨大地震発生域の深い側に隣接することから、今後の活動状況の監視を注意深く継続する必要がある。

過去 6 回の房総 SSE 毎の震央分布を重ねて示すと図 6 のようになる。いずれの場合も群発地震は房総半島沖で発生しており、活動域はほぼ重なる。これは、房総 SSE が毎回房総沖のほぼ同じ場所で発生しており、それによって、毎回地震が誘発されるとすると良く説明できる。しかし、よく見ると活動域にはわずかな違いが見られ、房総 SSE のすべり過程が毎回わずかに異なる可能性がある。関連した現象として、関東地方の相似地震がプレート運動の指標となること、および相似地震が短期間で集中的に発生したことから、地殻変動観測では捉えられない、小規模な SSE が 2000 年 9 月に発生していた可能性が指摘されている (Kimura et al., 2009b)⁸⁾。2007 年房総 SSE と比べて、2002 年房総 SSE では北部のすべりが小さかったが、これは直前に発生した 2000 年房総 SSE によって歪が解消されていたためと考えられている。2011 年房総 SSE は通常より短い間隔で再来したことから、一部の領域で歪の蓄積が十分でなく、すべり発生に至らなかった可能性も考えられる。房総沖の歪の蓄積状況を把握するため、今後も監視を継続する必要がある。

3) サブテーマ③プレート境界性状解明

a) 首都圏地震観測網(MeSO-net)でとらえた変換波より推定される房総半島下のプレート構造

i) はじめに

首都圏直下で発生しうる M7 クラスの地震の全体像を探るため、詳細な地下構造を明らかにすることは重要である。前項で述べたように、房総沖では沈み込むフィリピン海プレート上で、1923 年関東地震(M7.9)の最大余震(M7.5)、房総 SSE、および相似地震といった様々なタイプのプレート境界現象が発生する(図 1)。このような場の構造を明らかにすることは、その発生メカニズムを解明する上で重要である。

地下の速度不連続について、自然地震の後続位相は有用な情報を与えてくれる。房総半島沖の相似地震より深い地震の波形記録には、P 波と S 波の間に到達する位相がしばしば見られ、多数の波形記録の詳細な検討によりフィリピン海プレート最上部に分布する火山性砕屑物・火山岩層(以下、VCR 層とする)での変換波に同定されている(Kimura et al., 2010)⁹⁾。これまで、MeSO-net による波形記録に、堆積層基盤、および VCR 層下面からの SP 変換波が見られることを報告してきた。しかし、房総半島東岸では観測された変換波の走時が既存の構造モデルで良く説明できるものの、房総半島中部から西岸で理論走時と比較して変換波の到達が系統的に遅く、房総半島の東西で構造の違いがあることが示唆された。走時解析に基づき変換面形状を推定したところ、西に傾斜する形状が推定された。しかし、房総半島東岸の構造とどのように連続するか明らかではない。そこで、MeSO-net の稠密な観測点分布の利点を活かし、詳細な変換面の形状を推定した。

ii) 変換面形状決定

解析の方法はこれまでとほぼ同様で、以下のようにして変換面の形状を決定した。変換面形状決定の際は、初期構造モデルにおける(1)変換面の深さを 5, 10, 15 km 深くした

モデル、(2)変換面を房総半島東岸から西に傾斜角度 10, 20, 30, 45, 60 傾斜させたモデル、(3) N70° W の方向に傾斜させた場合を検討し、S 波と SP 変換波の走時差の残差 2 乗和(S)を比較し最小となるモデルを採用した。

初期構造モデルは以下のように構築した。Hi-net のルーチン処理で用いられる構造を参考に作成し、さらに深部反射法構造探査によりフィリピン海プレートの表層にイメージングされた VCR 層(Kimura et al., 2009; Kimura et al., 2010)¹⁾⁹⁾を加えた。関東平野は厚い堆積層に覆われ、低速な未固結堆積物による走時遅れが大きい。このため、変換波等の走時を評価するにはこの影響を取り除く必要がある。そこで、堆積層の影響を適切に評価するため、「地震ハザードステーション」(Japan Seismic Hazard Information Station, J-SHIS)による深部地盤構造モデル(藤原ほか、2009)¹⁰⁾を用いた。J-SHIS では、地震調査研究推進本部による「地震動予測地図」、および「地震動予測地図」作成の前提条件となる地下構造モデル等の評価プロセスに関わるデータを「地震ハザードの共通情報基盤」として一般に公開している。J-SHIS による深部地盤構造モデルによれば、今回の主な解析対象である房総半島中央部では Vp5000 m/s の層の上位に Vp3200m/s 以下の層が分布する。VSP 法あるいは PS 検層によって推定された P 波速度と岩相との対比(林他、2006)¹¹⁾によれば、深成岩あるいは変成岩により構成される基盤岩はおおよそ Vp5000m/s 前後の値を示す。そこで、ここでは速度構造モデルの浅部を J-SHIS による Vp3800m/s 以下の層で置き換え、堆積層とした。Vp3800m/s 以下となる層の下限深度分布を示すと図 7 のようになる。既存の先新第三系基盤岩類の深度分布(鈴木、2002; 林他、2006)¹²⁾¹¹⁾と比較すると、房総半島中央部で基盤深度が最も深く、4000m を越える点はよく類似している。また、その周囲の深度分布もおおよそ再現されている。先新第三系基盤岩類の深度分布モデルは地質年代による分類であり、必ずしも P 波速度構造と 1 対 1 に対応するとは限らないが、P 波速度と岩相との対比(林他、2006)¹¹⁾によれば、ある程度の対応が見られることから、Vp3800m/s 以下となる堆積層の下限深度分布および基盤深度の対応は今回の解析に用いる浅部地震基盤構造の妥当性を支持すると考えられる。

なお、変換波の走時を比較する際は、直達 S 波と SP 変換波との走時差を用いた。どちらの波も震源から変換面までは S 波として進行するため、両者の走時差をとることで震源から変換面までの経路の影響は相殺される。これにより震源位置の不確定性の影響を取り除くことが出来、これまでより広い範囲の地震を解析に用いることが出来た。房総半島周辺の M3 以上の地震で、広い範囲で P 波および S 波が明瞭な地震を対象とした。理論走時の計算は首都直下後続位相解析装置にて Zelt and Barton (1998)¹³⁾による差分法走時計算プログラム FAST を用いた。

解析に先立ち、表層の速度構造の妥当性を確認するため、堆積層基盤での SP 変換波の走時を検討した。図 8 に灰色星印で示した地震による、青矩形で示した範囲の MeSO-net 観測点の南北成分および上下動成分を図 9 に示した。南北成分では S 波の立ち上がりが明瞭である。一方、黒丸で示した時刻に S 波の前に上下動成分で明瞭な位相が見られる。この位相の立ち上がりも明瞭で、これまでの解析から、堆積層基盤での SP 変換波と考えられる。この地震に加えて、図 8 に星印で示した地震について同様の解析を行い、S 波と SP 変換波の走時差の、観測値と理論値についての残差の頻度分布を示すと図 10 のようになった。ごく少数残差の大きいデータもあるが、多くのデータは 0.0 秒の付近に集中してお

り、平均は 0.01s であった。これより、ここで用いた浅部地盤モデルはおおむね堆積層基盤での変換波の走時を説明でき、深部の変換面の解析にも妥当であると言える。

深部の変換面からの SP 変換波の波形例を図 11 に示す。この例のように SP 変換波の立ち上がりは極めて明瞭で、連続して追跡でき、到達時刻を精度よく読み取ることができた。SP 変換波の到達時刻を変換面形状解析の基礎データとした。

iii) 結果および考察

初期構造、および変換面形状の各モデルに対する最適な結果を図 12 に示す。初期構造を用いた場合、房総半島東岸では残差が小さく観測走時が良く再現できるものの、房総半島北部および南部で残差が大きくなる傾向が認められる。黒枠で囲ったモデル(N70° W の方向に 45° 傾斜したモデル)において走時差の残差二乗和が最小となり、7.93 sec² となった。このモデルでは、房総半島北部・南部での残差が小さくなると共に、房総半島東岸の残差も小さいままであり、房総半島の広い領域にわたって観測走時を良く再現できている。このモデルに対して、変換点の分布を示すと図 13 のようになる。コンターは変換面の形状を 1km 間隔で示している。変換点がおよそ 10×30km の広がりを持って分布することから、変換面の形状が安定して求められていると考えられる。

房総半島沖で発生した他の地震についても同様の解析を行った。多数の MeSO-net 観測点で SP 変換波の立ち上がりが明瞭に認められた場合に解析を行い、得られた解析結果において、多数の変換点が空間的な広がりを持って分布し、変換面形状が安定して求められたと考えられる結果を採用した。得られた結果を重ねると図 14 のようになる。

得られた結果の特徴として、房総半島東岸では、北方向にゆるやかに傾斜する変換面が推定された。それに対して半島中央では北西方向に急傾斜する形状が得られている。変換点の深さ分布を見ても、半島東岸では 20km 前後で深さの変化が小さいのに対して、半島中部では北西方向に急激に深くなる傾向が見られる。

このような構造変化は地震活動にも影響を与える可能性があることから、周囲のプレート境界現象と比較した。形状が急変する境界は、相似地震活動域の西端とほぼ一致し、この境界の南方延長は 1923 年関東地震と最大余震境界とほぼ重なる(図 15)。このことは、このような構造変化がセグメント境界として機能している可能性を示す。房総半島南部の東西方向に投影した速度構造および変換点分布の鉛直断面を示すと図 16 のようになる。速度構造は、MeSO-net による読み取り走時データを用いたトモグラフィ解析結果を示す(Nakagawa et al., 2010)¹⁴⁾。変換点の分布に沿って低速度領域が深部に突き出す構造が見られ、変換点より西で低速になっている傾向が、特に S 波速度構造で明瞭である。これは、VCR 層が厚くなっていることによる可能性がある。また、減衰構造の解析結果(関根ほか, 2009)¹⁵⁾ によると房総半島直下に高減衰領域の存在が示されており、速度構造のみでなく減衰構造でも特徴的な構造が認められる。

(c) 結論ならびに今後の課題

東京大学地震研究所に集約される中感度稠密地震観測データを防災科学技術研究所地震研究部地震観測データセンターに転送し、基盤的地震観測網データと統合的に処理を行い、本プロジェクトの研究基盤となるデータベースの維持及び保管を引き続き行った。

また、相似地震活動および群発地震活動の高精度相対震源決定処理により房総半島沖

SSEに伴う群発地震活動の特徴を解析するとともに、首都直下後続位相解析装置を用いて、房総半島沖の地震による変換波を元に、深部変換面の形状および浅部地震基盤構造の特徴を明らかにし、3次元地震波速度構造・減衰構造との比較によりプレート境界性状を解明し、房総半島沖のプレート構造を明らかにした。

本課題によりこれまで得られた地震クラスター解析結果、3次元速度構造、および減衰構造を「3.1.1 中感度地震観測によるプレート構造調査」に提供し、3.1.1 (1)(b)3の研究成果取りまとめに協力した。

(d) 引用文献

- 1) Kimura, H., Kasahara, K., and Takeda, T.: Subduction process of the Philippine Sea Plate off the Kanto district, central Japan, as revealed by plate structure and repeating earthquakes, *Tectonophysics*, 472, 18–27, doi:10.1016/j.tecto.2008.05.012, 2009a.
- 2) 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 aseismic slips. *Tectonophysics*, 417, 101–118, 2006.
- 3) 木村尚紀: 関東地方の相似地震, 地震予知連絡会会報, 83, 596-608, 2010.
- 4) Sekine, S., H. Hirose, H. Kimura, and K. Obara: The 2007 Boso Slow Slip Event and the associated earthquake swarm, *Eos Trans. AGU*, 88(52), Fall Meet. Suppl., Abstract T21A-0363, 2007.
- 5) 防災科研高感度地震観測網ホームページ: <http://www.hinet.bosai.go.jp> “房総半島沖で「スロー地震」再来”, 2011.
- 6) 松村 稔・伊藤善宏・木村尚紀・小原一成・関口渉次・堀 貞喜・笠原敬司: 高精度即時震源パラメータ解析システム(AQUA)の開発, 地震 2, 59, 167-184, 2006.
- 7) Waldhauser, F. and Ellsworth, W. L.: A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1353-1368, 2000.
- 8) Kimura, H., T. Takeda and K. Obara, K. Kasahara: The small Boso slow slip event in 2000 detected by small repeating earthquakes, *Eos Trans. AGU*, 88(52), Fall Meet. Suppl., T11C-1840, 2009b.
- 9) Kimura, H., Takeda, T., Obara, K., and Kasahara, K.: Seismic Evidence for Active Underplating Below the Megathrust Earthquake Zone in Japan, *Science*, 329, 210-212, 2010.
- 10) 藤原広行・河合伸一・青井真・森川信之・先名重樹・工藤暢章・大井昌弘・はお憲生・早川讓・遠山信彦・松山尚典・岩本鋼司・鈴木晴彦・劉瑛: 強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料 第 337 号, 2009.
- 11) 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, 地質学雑誌, 112, 2-13, 2006.
- 12) 鈴木宏芳: 関東平野の地下地質構造, 防災科学技術研究所研究報告, 63, 1-19, 2002.

- 13) Zelt, C. A. and Barton, P. J.: 3D seismic refraction tomography: A comparison of two methods applied to data from the Faeroe Basin, *J. Geophys. Res.*, 103, 7187-7210, 1998.
- 14) Nakagawa, S., A. Kato, S. Sakai, K. Nanjo, Y. Panayotopoulos, E. Kurashimo, K. Obara, K. Kasahara, T. Aketagawa, H. Kimura, and N. Hirata: Heterogeneous Structure and Seismicity beneath the Tokyo Metropolitan Area, Abstract S41A-2004 presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 13-17 Dec, 2010.
- 15) 関根秀太郎・小原一成・酒井慎一・中川茂樹・笠原敬司・平田直・棚田俊收: MeSO-net データを用いた関東地方の Q 構造, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会予稿集, S221-009, 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	発表者氏名	発表場所	発表時期	国際・国内の別
首都圏地震観測網 (MeSO-net) でとらえた変換波より推定される房総半島下のプレート構造 (その 2)	木村尚紀・武田哲也・小原一成・酒井慎一・笠原敬司・平田直	日本地球惑星科学連合大会	2011年5月	国内
Plate structure below the Boso Peninsula, central Japan, estimated from converted waves observed by the MeSO-net	Kimura, H.	SCEC-ERI Joint workshop	2011年12月	国際

(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