

### 3. 1. 1. 3 首都圏を含む関東広域の地震発生過程の解明

#### (1) 業務の内容

##### (a) 業務の目的

MeSO-net データと防災科学技術研究所高感度地震観測網 (Hi-net) 等の既存データを統合して、関東広域のプレート構造と地震活動の関係を解明する。統合データを蓄積して、データベースを構築し、MeSO-net 開始以前を含む長期・広域の地震活動を解明する。

##### (b) 平成 24 年度業務目的

東京大学地震研究所の「データ収集・処理・公開センター」で収集された MeSO-net の自然地震観測データを受信し、首都圏内における防災科学技術研究所高感度地震観測網 (Hi-net) をはじめとした既存の地震観測データと統合処理を行い、地震波形統合データベースを構築・保管する。

統合データベースを元に、長期・広域の地震活動を解明するための高精度震源・メカニズム解決に基づく地震クラスターの分類、地震波形解析に基づくプレート構造解明のための手法開発を進める。

##### (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			
地震・火山防災研究ユニット	主任研究員	木村尚紀	
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	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	任期付研究員	松澤孝紀	

#### (2) 平成 24 年度の成果

##### (a) 業務の要約

- 1) 東京大学地震研究所の「データ収集・処理・公開センター」で収集された MeSO-net の自然地震観測データを受信し、首都圏内における防災科学技術研究所高感度地震観測網 (Hi-net) をはじめとした既存の地震観測データと統合処理を行い、地震波形統合データベースを構築・保管した。
- 2) 統合データベースを元に、長期・広域の地震活動を解明するための高精度震源・メカニズム解決に基づく地震クラスターの分類、地震波形解析に基づくプレート構造解明のための手法開発を進めた。

## (b) 業務の成果

### 1) 統合処理による地震波形統合データベースの構築・保管

「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」によって整備された、首都圏地震観測網 (MeSO-net) において記録された波形データは地震研究所の「データ収集・処理・公開センター」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。受信したデータを首都圏内における防災科研高感度地震観測網(Hi-net)をはじめとした既存の地震観測データと統合処理を行い、「統合・保管センター」として地震波形統合データベースを構築・保管した。MeSO-net 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広域 L2 網を活用した JDXnet を用いている。MeSO-net 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) 統合データベースを用いた長期・広域の地震活動の解明

#### a) 東北地方太平洋沖地震後の関東地方の小繰り返し地震活動

##### i) はじめに

関東地方では相模トラフよりフィリピン海プレートが沈み込み、その下に日本海溝より沈み込む太平洋プレートが存在し、これら 2 つのプレートの双方でその上面に沿って小繰り返し地震が見出されている (Kimura *et al.*, 2006<sup>1)</sup>; 木村, 2010<sup>2)</sup>)。関東地方の小繰り返し地震は波形の相似性が極めて高く、プレート境界上の微小なアスペリティにおける破壊の繰り返しと考えられ、その活動は周囲のプレート運動を反映すると期待される。一方、2011 年 3 月 11 日に日本の地震観測史上最大となる東北地方太平洋沖地震 (M9.0) が発生した。この地震後、関東地方では地震活動が大きく変化した (Ishibe *et al.*, 2011<sup>3)</sup>)。また、東北地方太平洋沖地震の震源域の深部延長にあたる、東北地方の沖から銚子沖にかけての領域で大規模な余効すべりが発生した (Ozawa *et al.*, 2011<sup>4)</sup>)。以上の結果は関東地方下でもプレート運動が大きく変化した可能性を示唆する。実際に、小繰り返し地震の平均繰り返し間隔が東北地方太平洋沖地震後に大きく短縮した (木村, 2012<sup>5)</sup>)。一方、小繰り返し地震の発震機構解については、東北地方太平洋沖地震前後で変化は見られない。そこで、特に詳細分布について、東北地方太平洋沖地震前後の小繰り返し地震の詳細活動を解明するための手法を検討した。

##### ii) 小繰り返し地震グループの分類

波形の相似性の高い小繰り返し地震を抽出するため、地震波形記録の相互相関解析に基づいて同定を行った。内陸で発生した地震を対象とし、個々の地震から水平方向 10km 以内、鉛直方向 20km 以内の地震との組み合わせ (ペア) について、同一の観測点で観測された地震波形記録を解析し、2 観測点以上で 0.95 以上の相関係数が得られた場合に小繰り返し地震のペアと判定した (Kimura *et al.*, 2006<sup>1)</sup>; 木村, 2010<sup>2)</sup>)。得られた小繰り返し地震のペアから、共通した小繰り返し地震を共有するペアを同一のグループと見なしグルーピングを行った。これにより、同一グループ内の小繰り返し地震は、同一の断層で破壊を繰り返したと期待される。定常的に活動する小繰り返し地震を抜き出すため、グループ毎の活動期

間が 10 年以上のグループを対象とした。同定された小繰り返し地震は、震源位置および発震機構解に基づきフィリピン海プレートおよび太平洋プレートに分類した。1979 年 7 月 1 日から 2012 年 3 月 31 日までの期間を解析した結果、東北地方太平洋沖地震後も多数の小繰り返し地震が検出され、全期間でフィリピン海プレートでは 190 グループ 1033 イベント、太平洋プレートでは 376 グループ 3868 イベントが抽出された(木村, 2012<sup>5</sup>)。

### iii) 小繰り返し地震の高精度震源決定

小繰り返し地震の発生場を明らかにするため、小繰り返し地震の詳細分布を決定した。2002 年 9 月 1 日から 2012 年 3 月 31 日に発生した小繰り返し地震を対象とし、小繰り返し地震グループ毎に波形相関を用いた Double Difference (DD)法(Waldhauser and Ellsworth, 2000<sup>6</sup>)により詳細震源分布を決定した。波形相関は、グループ内の地震すべてのペアについて解析した。

得られた結果を、小繰り返し地震のグループ内で、処理期間内に 1 番目に発生した地震に対する 2 番目以降の地震の相対位置を、地震の規模から推定される断層サイズで正規化して示す(図 1、P.47)。半径 1 の円内に多くの地震が分布し、ほぼすべて(94%)の小繰り返し地震は、地震の規模から期待される断層サイズの範囲内に分布した。これは東北地方太平洋沖地震後も同様である(図 2、P.47)。これより、東北地方太平洋沖地震後に発生した小繰り返し地震も、東北地方太平洋沖地震以前と同一の断層で破壊を繰り返したといえる。

## b) 房総沖の地震クラスターの詳細震源決定手法の検討

### 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急激なすべりを起こすことで 1923 年関東地震およびその最大余震(M7.5)(Kimura *et al.*, 2009a<sup>7</sup>)等の巨大地震が発生してきた。こうした巨大地震による揺れを正確に推定するためには、地下のプレート構造を詳細に把握する必要がある。東京湾では、大都市大震災軽減化特別プロジェクトによって大規模な深部地殻構造探査が実施され、深さ約 20km までの詳細なフィリピン海プレートの形状が解明された (Sato *et al.*, 2005<sup>8</sup>)。その後、首都直下地震防災・減災特別プロジェクトにより稠密な首都圏地震観測網(MeSO-net)が整備され、トモグラフィー解析により深さ約 60km までのフィリピン海プレートの詳細な速度構造・プレート構造がイメージングされた。その結果、これまでより約 10km 浅い位置にプレート境界が存在することが明らかとなった。房総沖でも、深部地殻構造探査によりフィリピン海プレートの上面がイメージングされている(Kimura *et al.*, 2009a<sup>7</sup>)。房総沖で発生する地震の詳細分布および後続位相の解析により、プレート境界で発生する微小地震と深部構造探査でイメージングされたプレート境界の相対位置が決定された。その結果、フィリピン海プレート最上部に分布する火山性砕屑岩・火山岩(VCR)層が、プレートの本体からはがれ、上盤側プレートの底部に付加される「底付け作用」と呼ばれる現象が、現在進行しつつあることが明らかとなった(Kimura *et al.*, 2010<sup>9</sup>)。

一方、房総 SSE は群発地震を伴うことが特徴である。房総 SSE すべり域の深い側を縁取

るように房総 SSE に伴う群発地震が発生する領域が広がる。房総 SSE に伴う地震発生域の移動パターンは測地データから推定されたすべり域の移動とよく対応する(Hirose *et al.*, 2012<sup>10)</sup>)。このことは、群発地震が SSE すべりの指標となりえることを示している。また、房総 SSE は巨大地震震源域の深い側に隣接して位置しており、その領域でのプレート境界の特性を解明することは、関東地方の長期・広域の地震活動を把握するために重要である。

以上のように、プレート境界地震の位置はプレート境界すべり面を表しており、また、プレート境界地震が SSE すべりの指標となることから、その活動を詳細に把握することは、プレート境界の特性の解明に役立つと期待される。既往研究より広い範囲での詳細な震源位置、特に震源深さを決定することを目的とし、そのための解析手法を検討した。

## ii) 解析手法

関東平野は低速な堆積層に厚く覆われ、震源決定を行う上での障害となっている。この影響を避けるため、房総半島の掘削深度 1000m 級以上の観測点を用いて震源決定を行った。掘削深度 1000m 級以上の観測点 5 点を用いて、4 点以上で読み取りが得られた場合に再決定した(以下、「再決定震源」とする)。再決定には hypomh (Hirata and Matsu'ura, 1987<sup>11)</sup>) を使用した。これを初期震源として、波形相関を用いた DD 法により詳細分布を決定した(以下、「再決定 DD 震源」とする)。比較のため、Hi-net 震源を初期震源として波形相関を用いた DD 法により詳細分布を決定した(以下、「Hi-net DD 震源」とする)。

## iii) 結果

初期震源および DD 再決定後の震央分布を図 3(P.48)および図 4(P.48)に示す。破線で示した矩形領域の地震について、同一の地震の震央位置のずれ、震源深さの差の頻度分布を図 5(P.49)および図 6(P.49)に示す。Hi-net 震源および再決定震源の震央位置のずれは平均 2.0km、震源深さの差は平均 -1.6km であった。また、震源深さの差を、断面の方向に投影して図 7(P.50)および図 8(P.50)に示す。断面は、観測網に近い図 3(P.48)に実線で示した矩形領域について示した。Hi-net 震源と比較して、再決定震源では北部で震源深さが減少し、南部では増加した。震源深さの差は図 7(P.50)の投影方向の -40 ~ -20 km の範囲では平均 1.1km、-8 ~ 20km の範囲では平均 -2.7km であった。一方、再決定 DD 震源と Hi-net DD 震源では、震央位置のずれは平均 1.3km、震源深さの差は平均 -1.9km であった。Hi-net DD 震源と比較して、再決定 DD 震源では南部では大きな差は見られなかったが、北部で震源深さが減少した。震源深さの差は図 8(P.50)の投影方向の -40 ~ -20 km の範囲では平均 0.0km、-8 ~ 20km の範囲では平均 -2.4km であった。再決定 DD 震源では、ゆるやかに北に傾斜する面状分布が確認された(図 8、P.50)。

次に、発震機構解を確認した。M2.5 以上の地震について、防災科研 Hi-net による発震機構解を図 9(P.51)に示す。房総沖では低角逆断層型の地震が多く発生している。そのすべりの方向は、プレート運動モデルから期待されるプレート相対運動方向と調和的である。なお、小繰り返し地震の CMT 解でも同様の特徴が確認されている(木村, 2012<sup>5)</sup>)。鉛直断面を見ると、低角逆断層型の地震は前述した地震の面状分布に沿って分布する(図 10、P.51)。また、小繰り返し地震もこの面に沿って分布している。これより、この面がプレート境界

すべり面に相当すると考えられる。そこで、発震機構解および小繰り返し地震の分布をもとに、図 10(P.51)に示したようにプレート境界とプレート内の地震を分離した。

#### iv) 房総沖の地震クラスター活動

プレート境界と内部の地震を分離できたことから、房総 SSE に伴う群発地震の発生場を確認した。図 11(P.52)に房総 SSE に伴う群発地震の震央分布、時空間分布、および発生数の時系列を示す。時空間分布は、プレート境界地震の最大傾斜方向に相当する N10°W に投影して示した。地震発生数をカウントするタイムウィンドウは 10 日間とし、これを 1 日ずつずらしながらカウントした。その結果、2007 年、2011 年房総 SSE のどちらも、SSE に伴う地震はほぼすべてプレート境界の地震であることが確認された。2011 年房総 SSE に伴う群発地震の分布を 2007 年と比較すると、2007 年は九十九里浜沖で地震が多く発生したのに対し、2011 年は房総半島南東岸で多くの地震が発生した(図 11、P.52)。先述の面状分布から、房総半島南東岸の地震もプレート境界地震と考えられ、こうした地震発生域の違いは SSE すべり分布の違いを反映している可能性がある。

次に、2007 年・2011 年房総 SSE を含む長期の活動を示す(図 12、P.52)。房総 SSE に伴う地震の発生数がきわめて大きく、大部分の地震は房総 SSE に伴って発生している。しかし、SSE と SSE の間の期間にもプレート境界地震の小さなピークが見られ、小規模なクラスター活動が発生していることが分かる。そこで、以下のようにして小クラスターを抽出し、その活動を調査した。

クラスターの抽出は、発生数が 5 個以上の連続した期間を対象とし、次いで、3km 以内の地震を抽出することで空間的なクラスタリングを行った。抽出されたクラスターの例を図 13(P.53)に示す。2008 年 10 月 10 日から 10 月 24 日の期間に発生したプレート境界地震のうち空間的にクラスタリングされた地震を黒丸で示す。解析の結果、1105 個のプレート境界地震の中、660 イベントがクラスター活動として同定された。ただし、この中には房総 SSE に伴う群発地震 455 個が含まれ、大きな割合を占める。なお、このうちクラスタリングされた地震は 428 イベントである。そこで、房総 SSE に伴う地震を除くと、650 イベント中 232 イベントがクラスター活動となり、クラスター活動の占める割合は 36%となった。

個々のクラスターの活動を目視で確認したところ、明瞭な震源の移動(マイグレーション)が見られるものが見出された。図 13(P.53)に示した例では、約 0.5km/day の速度で南から北へ伝播した様子が確認される(図 14、P.53)。地震の時系列は、きわだって大きな地震は見られず、本震-余震系列というよりは群発的な活動である。房総 SSE に伴う群発地震が SSE すべり過程の指標と見なせることとの類推から、こうした活動も小規模な SSE と関連している可能性がある。実際に、図 15(P.54)に示した活動ではクラスター活動とほぼ同期して傾斜変動がみられた。まず、Hi-net 勝浦東観測点(KT2H)にて約 2.4 $\mu$ rad の北下がりの傾斜変動が観測され、その約 5 日後にクラスター活動が開始した。クラスターの活動は群発的で、活動の初期段階でおよそ 4km/day の速度で南から北へのマイグレーションが見られる(図 15、P.54)。なお、傾斜変動は千葉観測点(CBAH)では明瞭ではない。これは、房総 SSE の際には、いずれの観測点でも変動が明瞭だったこととは対照的である。KT2H で

のみ変動が見られたことは、SSEが発生したとしてもKT2Hのごく近傍でのみすべりが発生したためと考えられる。傾斜変動のデータが十分ではないため、種々の条件のもとに試行錯誤的に断層モデルを決定すると、10km四方の断層でMw5.5のSSEが発生したとすると観測された変動が説明できる(木村・武田, 2010<sup>12</sup>)。小規模なSSEが発生したことにより傾斜変動が発生し、そのすべりがクラスター域に到達し、その後も小さなすべりが続いたことで、クラスター活動が引き起こされたとすると観測結果を説明できる。ただし、傾斜変動データが十分ではないことから、今後さらに事例を積み重ねていく必要がある。

類似の現象が過去に発生していたかどうかを確認するため、より長期の活動を調査した。ただし、図13~15(P.53~54)に示した活動よりも、やや規模の大きい活動を対象とした。房総SSEに伴う群発地震とは別に、1994年、2000年、および2011年3月にも活動が認められる(図16、P.54)。この活動の震央分布は図17(P.55)のようになる。1994年および2000年の活動の際の震源域の広がりには約10kmで、房総SSEに伴う群発地震が約50kmあるのと比べると規模が小さく、前述の小クラスターと房総SSEの中間的な規模である。一方、2011年3月の活動は、空間的広がりには約50km程度あるが、活動期間が約4日と、通常の房総SSEの約7-10日に比較して短い。また、この活動の際には房総SSEに匹敵するような水平変動はGPSでは捉えられていない(Hirose *et al.*, 2012<sup>10</sup>)。なお、いずれの活動も期間中に小繰り返し地震が発生しており、プレート境界の活動と考えられる。2000年の活動については、北から南に約10km/dayの速度でマイグレーションが認められた(図18、P.56)。この活動の直前まで三宅島およびその周辺において活発な地震・火山活動が継続し、この活動による地殻変動が房総半島南部でも観測された。しかし、房総沖のプレート境界における応力変化は約0.2kPaと推定され(Kimura *et al.*, 2009b<sup>13</sup>)、前述の2011年房総SSEの際の応力変化と比較すると約3桁小さく、2000年の活動と三宅島の活動との関連についての詳細は不明である。

### (c) 結論ならびに今後の課題

東京大学地震研究所の「データ収集・処理・公開センター」で収集されたMeSO-netの自然地震観測データを受信し、首都圏内における防災科学技術研究所高感度地震観測網(Hi-net)をはじめとした既存の地震観測データと統合処理を行い、地震波形統合データベースを構築・保管を行った。

統合データベースを元に、東北地方太平洋沖地震前後の関東地方の小繰り返し地震の詳細分布を確認する手法、および房総沖の地震クラスターの詳細決定手法の検討を行い、長期・広域の地震活動を解明するための高精度震源・メカニズム解決定に基づく地震クラスターの分類、地震波形解析に基づくプレート構造解明のための手法開発を進めた。今後は、他の地域についても検討し事例を追加していく必要がある。

### (d) 引用文献

- 1) 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*, Vol.417, pp.101–118, 2006.
- 2) 木村尚紀: 関東地方の相似地震, 地震予知連絡会会報, Vol.83, pp.596-608, 2010.
  - 3) Ishibe, T., Shimazaki, K., Satake, K., and Tsuruoka, H.: Change in seismicity beneath the Tokyo metropolitan area due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, Vol.63, pp.731-735, 2011.
  - 4) Ozawa, S., Nishimura, T., Suito, H., Kobayashi, T., Tobita, M., and Imakiire, T.: Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake, *Nature*, Vol.475, pp.373-376, 2011.
  - 5) 木村尚紀: 東北地方太平洋沖地震後の関東地方の相似地震活動: 地震予知連絡会会報, Vol.88, pp.500-504, 2012.
  - 6) 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.*, Vol.90, pp.1353-1368, 2000.
  - 7) 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*, Vol.472, pp.18–27, doi:10.1016/j.tecto.2008.05.012, 2009a.
  - 8) Sato, H., Hirata, N., Koketsu, K., Okaya, D., Abe, S., Kobayashi, R., Matsubara, M., Iwasaki, T., Ito, T., Ikawa, T., Kawanaka, T., Kasahara, K., and Harder, S.: Earthquake Source Fault Beneath Tokyo, *Science*, Vol.309, pp.462-464, 2005.
  - 9) Kimura, H., Takeda, T., Obara, K., and Kasahara, K.: Seismic Evidence for Active Underplating Below the Megathrust Earthquake Zone in Japan, *Science*, Vol.329, pp.210-212, 2010.
  - 10) Hirose, H., Kimura, H., Enescu, B., and Aoi, S.: Recurrent slow slip event likely hastened by the 2011 Tohoku earthquake, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol.109, No.38, pp.15157-15161, doi:10.1073/pnas.1202709109, 2012.
  - 11) Hirata, N. and Matsu'ura M.: Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol.47, pp.50-61, 1987.
  - 12) 木村尚紀, 武田哲也: 2009年12月24日房総半島東岸の地震, 地震予知連絡会報, Vol.84, pp.122-125, 2010.
  - 13) Kimura, H., Takeda, T., Obara, K., and Kasahara, K.: The small Boso slow slip event in 2000 detected by small repeating earthquakes, *Eos Trans. AGU*, Vol.90, No.52, Fall Meet. Suppl., Abstract T11C-1840, 2009b.

(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	国内・ 外の別

2011 年房総スロースリップイベントに伴う群発地震の詳細分布（口頭）	木村尚紀・ 武田哲也・ 小原一成・ 笠原敬司	日本地球惑星科学連 合大会	2012年5月	国内
房総沖のスロースリップイベントとプレートダイナミクス（口頭）	木村尚紀	スロー地震合同研究 集会、東京大学地震 研究所	2013年3月	国内
Repeating earthquake activity below the Kanto region after the Off the Pacific coast of Tohoku Earthquake	Hisanori Kimura	International Workshop of Special Project for Reducing Vulnerability for Urban Mega Earthquake Disasters (Miyagi, Japan)	2012年10月	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

**(3) 平成25年度業務計画案**

- 1) 東京大学地震研究所の「データ収集・処理・公開センター」で収集された MeSO-net の自然地震観測データを受信し、首都圏内における防災科学技術研究所高感度地震観測網 (Hi-net) をはじめとした既存の地震観測データとの統合処理を引き続き行い、地震波形統合データベースの構築・保管を継続する。
- 2) 統合データベースを元に、高精度震源・メカニズム解推定結果に基づく地震クラスターの分類、地震波形解析に基づくプレート構造解明、予察的な関東地方のプレート構造解析に基づき、首都圏における長期・広域の地震活動を解明するための手法開発を継続し

て進める。