

2 (3) 首都直下地震総合研究

「首都直下地震」総合研究グループリーダー 酒井慎一

(東京大学地震研究所)

1. はじめに

首都直下地震については「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について（建議）」の中で、災害科学の発展に著実に貢献できることや、発生した場合の社会への影響の甚大さを考慮して、総合的な研究として優先して推進するとされている。しかし、地震・火山現象の解明のための研究、地震・火山噴火の予測のための研究、地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究の3分野に、広くまたがるような総合的な研究課題は存在しなかった。そのため、三つの分野に存在している研究課題の中から、首都直下地震に関連した研究成果を集めて統合し、社会的にも重要である首都直下型地震による災害の軽減につなげることが、本総合研究グループの目標であるとした。

2. 5年間（平成26年-30年度）の成果

(1) 5年間の成果の概要

大学や気象庁・国土地理院・防災科学技術研究所等の各機関は、首都圏においても基盤観測網の維持・拡充を行い、安定的にデータを流通させてきた。その結果、これらの基礎的なデータは、国内外の多くの研究に利用され、多くの成果を得ることに貢献してきた。

速度構造、震源分布、断層パラメータ等の推定によって、関東平野の下に沈み込むフィリピン海プレート内で発生する孤立的な地震の多くは、周辺と温度構造や応力状態に特別な差異が見られないことから、スラブ内の局所的な含水化が原因であると推測された。2014年に房総沖で発生したスロースリップ(SSE)に対する観測とシミュレーションによって、SSEの発生が、ある条件下の速度・状態依存摩擦構成則によりモデル化できることが示された。

関東平野に入射する表面波について、震源の放射指向性の影響と堆積平野の3次元構造による複雑な表面波増幅・伝播特性の影響の二つについて地震波シミュレーションを行い、長周期地震動の生成・増幅特性の方位依存性を明らかにした。首都圏に多く存在する丘陵地帯を切り拓いて作った造成地では、地震動によって地すべり現象を引き起こす可能性があるため、そのような地域での増幅特性を見積もった。地震動の推定に必要な地下構造の分解能を知るために臨時観測を行ったところ、約100m間隔の近距離でもゆれの振幅比が約2倍になる場合があった。また、安政江戸地震における文献や絵画を検討し、余震が続く中での避難方法や避難場所、幕府側の施策、余震の発生状況や気象条件に起因する避難状況の変化などが明らかになった。過去にプレート境界で発生した地震の履歴と隆起パターンなどを復元することで、関東地震の多様性を評価した。

(2) 基盤観測網の維持・拡充

全国の大学だけでなく気象庁・国土地理院・防災科学技術研究所等の機関は、首都直下地震の研究に必要な基盤観測網の維持・拡充を進めた。それらの基礎的なデータを継続的に安定して取得するために、膨大なデータを効率的に流通させるためのシステムを構築してきた（東大地震研 [課題番号：1518]、国土地理院 [課題番号：6005, 6006, 6012]、気象庁 [課題番号：7012, 7014, 7020]、海

上保安庁〔課題番号：8001, 8002, 8004〕)。

(3) 首都直下地震の解明のための研究

首都直下地震は、統一した地震像が示されていないため、関東地方の平野部に存在する活断層で発生する地震、沈み込むプレートの境界部分で発生する地震、沈み込むプレート内で発生する地震などが考えられている。本計画では、沈み込むプレート内で発生するプレート内地震に関する研究課題において、関東平野下のP波減衰構造を推定し、フィリピン海プレートのマントル東端部で、顕著に高い減衰を示すことを明らかにした。この高減衰域の広がりには蛇紋岩化していると解釈されている地震波低速度の領域とほぼ一致する。一方、高精度震源分布と断層パラメータの推定によって、相似地震のグループ毎の断層面が互いに重ならず相補的であることや起震応力場が空間的に大きく変化していることを明らかにした。また、伊豆半島の北方で孤立して発生する地震群は、震源および推定された発震機構解から、その多くがプレート内で局所的に発生していたことがわかった。周辺と温度構造や応力状態に特別な差異が見られないことから、局所的な含水化が発生原因であると推測された(東北大〔課題番号：1201〕)。

(4) 首都直下地震の予測のための研究

首都直下のプレート境界部分で発生する地震に関しては、地震活動や地殻変動を詳細に観察することによって、プレート間の固着状態をモニタリングしようとする試みがなされてきた。本計画の実施期間中の2014年に房総半島沖でSSEが観測され、それに伴って発生した地震活動や地殻変動から、SSEの発生に関する研究が進められた。

房総半島沖のSSEは、これまで約6年の間隔で発生していたが、2011年の東北地方太平洋沖地震の発生によって、発生間隔が乱された可能性がある(東大地震研〔課題番号：1509〕)。一方で、小繰り返し地震によるすべりの調査によると、SSEの発生間隔は、東北地方太平洋沖地震によって短くなったものの、その後、元の発生間隔に戻りつつあると考えられる(東大地震研〔課題番号：1510〕)。2014年のSSEに関して、傾斜変動データおよびGNSSデータを用いて断層モデルを推定した所、すべり域はこれまでのSSEにおけるすべり域と重なるが、地震モーメントは約半分と小さく推定された(防災科研〔課題番号：3002〕)。過去のSSEについても解析を行い、SSEの規模や破壊過程はイベントごとに大きく異なることが示された。特に、2018年に発生したSSEは、2011年のSSEと比較して、地表変位は房総半島中部ではほぼ同程度であるが、北部ではやや大きく、房総半島で観測されたSSEとしては最大規模であると推定された(東大地震研〔課題番号：1509〕)。

房総半島沖SSE発生時のフィリピン海プレート上面におけるすべり・すべり速度の時空間発展を、臨時観測点を加えたGNSS時系列データを用いて、時間依存インバージョン解析により推定した。この推定結果と地震活動の時間変化とを比較すると、群発地震活動がSSEによる応力変化によってトリガーされたことが示唆される。さらに、推定されたSSE発生時のすべりや応力の時空間発展を速度・状態依存摩擦構成則に基づいてモデル化した。すべり速度をインバージョン解析からの推定値に固定し、摩擦パラメータ等を未知パラメータと仮定して摩擦構成則の式を数値的に計算し、インバージョン解析から求められた応力の時空間変化を再現できるような摩擦パラメータ等を推定した。応力の時空間変化は速度・状態依存摩擦構成則で良く説明でき、推定されたパラメータからSSE発生域における臨界断層長は30~50km程度と見積もられた。推定されたSSEのすべり域の半径は臨界半径と同程度かそれよりも

やや小さくなり、これは SSEの発生が条件付安定の摩擦特性に支配されていることを示唆する (Fukuda, 2018) (東大地震研 [課題番号: 1509])。

(5) 首都直下地震の災害誘因予測のための研究

将来発生が予想されている首都直下地震による強震動や長周期地震動の事前予測の高度化を図った。関東平野における長周期地震動の生成・増幅特性には方位依存性があり、その原因として、震源から関東平野に向けての表面波の放射指向性の影響、堆積平野の3次元構造による複雑な表面波増幅・伝播特性の影響の2つが考えられた。まず震源からの放射特性の影響を評価するためにシミュレーションを行い、都心部での速度応答スペクトルの強度を比べた。その結果、関東平野を伝播する表面波は、2004年新潟県中越地震では強く、2011年福島県浜通りの地震では弱かった。また、長周期地震動に関しては、中越地震では、断層の走向を変えてもあまり変わらないが、浜通りの地震では走向の変化による変動が大きく、発震機構に敏感であることがわかった (東大地震研 [課題番号: 1516])。

次に、関東平野の3次元堆積層構造と長周期地震動の増幅の方位依存性を検討した。中越地震では、関東平野の深い溝状構造で表面波が焦点を結ぶように集まり増幅すること、および、山地を伝わって屈折してきた表面波が合流するため長い波群を作り出すことが確認できた。一方、浜通りの地震では、筑波山付近の浅く緩い堆積層構造を通して平野に入射する際に波面が拡散することで振幅が小さくなること、および、揺れの継続時間も短くなることが確認できた。この特徴は、同じ方位で発生する他の地震でも見られ、関東平野で一般的な現象である (東大地震研 [課題番号: 1516])。

大地震の震動による地すべり現象は災害要因の一つであるが、首都圏では丘陵地帯を切り拓いて作った造成地に多くの住居があることから、そのような地域の増幅特性を見積もった。人工的に改変された盛土では、S波の上下動成分の10Hz前後に顕著な増幅が見られ、揺れの大きさは地山に比べて約3倍に増幅することがわかった。大正関東地震の時に地滑りが発生した地域の調査を行い、一回の地震ですべての地すべりが生成されたのではなく、繰り返す地震によって何度も発生していることが分かった。そのような地域では、今後も地滑りが起こる危険性があることが示唆された。さらに、甚大な地すべり被害を引き起こす降下火砕物について、航空レーザー計測データを活用して分布域を推定し、ハザードマップに反映させる手法の試案をとりまとめた。関東地方南西部の降下火砕物の分布しているところでは、大正関東地震などによって流動的崩壊が多数発生したことがわかった (京大防災研 [課題番号: 1912])。

地震動の推定を行う際には、地盤や地下構造の不均質を知る必要がある。地盤による差が、どの程度の分解能で表れるのかを知るため、約100m間隔の近距離で地震計を設置したところ、観測された地震波形の振幅比が約2倍になる場合があった。揺れの推定には、より高分解能な構造の違いを考慮する必要があることを確認した (東大地震研 [課題番号: 1514])。

首都圏全体に被害を及ぼすような首都直下地震は、大正関東地震を除いて、地震計によって観測されたことが無いため、明確な地震像は得られていない。そのため、歴史資料や地質情報等などに基づく検討がなされた。現代とは異なる社会状況の下で発生した災害への対応を読み解くことにより、今後の防災・減災施策や復興計画などの検討に資する材料を提示することができる。安政江戸地震(1855年)における文献や絵画を検討し、余震が続く中で町の町人の避難方法や避難場所、幕府側の施策、余震の発生状況や気象条件に起因する避難状況の変化などが明らかになった。江戸市中での被害と復興の様子を描いた絵巻「江戸大地震之図」(島津家文書)の舞台が薩摩藩芝屋敷の周辺であることが判

明し、基本史料として用いることが可能となった（東大地震研 [課題番号：1513]）。

また、過去の関東地震の履歴と隆起パターンなどを復元することにより、関東地震の多様性を評価した。房総半島南部千倉低地の海岸段丘について、ボーリングコア試料の解析から離水年代の再検討を行った結果、従来知られていた年代よりも全体的に新しくなった。さらに、房総半島九十九里浜において津波堆積物調査を実施し、これまで歴史上に知られていない津波の痕跡を検出した。房総半島南部の海岸段丘について、詳細DEM（数値標高モデル）の解析とボーリングコア試料の解析から段丘の分布パターンと離水年代の再検討を行った。その結果、段丘の区分と年代が更新され、再来間隔が非常にばらつくことが明らかになった（産総研 [課題番号：5004]）。

3. 平成 30 年度の成果の概要

首都直下地震の解明のための研究、首都直下地震の予測のための研究、首都直下地震の災害誘因予測のための研究に必要な基盤となる観測網の維持・拡充を進め、データを継続的に取得すると共に、膨大なデータを効率的に流通させるためのシステムを構築してきた（東大地震研 [課題番号：1518]、国土地理院 [課題番号：6005, 6006, 6012]、気象庁 [課題番号：7012, 7014, 7020]、海上保安庁 [課題番号：8001, 8002, 8004]）。

首都直下地震は、統一した地震像が示されていないため、関東地方の平野部に存在する活断層で発生するもの、沈み込むプレートの境界部分で発生するもの、沈み込むプレート内で発生するものが考えられている。沈み込むプレート内で発生する地震に関しては、東北地方中央部の太平洋スラブ上面で発生している地震の震源とメカニズム解を決定したところ、正断層地震と逆断層地震が100 m 以内という非常に近接した場所で発生していることが明らかになった。この結果は、沈み込むプレートのエクロジャイト化に伴う体積減少によりプレート表面近くで正断層地震が発生するという従来の解釈を支持するものであるが、相転移による応力擾乱は極めて局所的であることを強く示唆している。中部地方下の深発地震（深さ約350 km）の波形解析により発見された二つの相似地震グループは、数百m から数km 離れた一つの断層面上で発生していた。深発地震が既存の弱面の再活動で発生していることを強く示唆している（東北大 [課題番号：1201]）。

千葉・茨城で行っている臨時観測点と周辺の観測点のデータを解析し、2018年6月～7月に房総半島でSSEによると考えられる地殻変動が起きたことが分かった。2011年のSSEと比較して、地表変位は房総半島中部ではほぼ同程度であるが、北部ではやや大きく、房総半島で観測されたSSEとしては最大規模であると考えられる。過去のSSEの時空間発展をGNSS時系列データと改良型のNetwork Inversion Filter を用いて推定した結果、すべりの加速様式、すべりの伝播方向、伝播速度など、すべりの時空間発展のイベント毎の共通性と違いが明らかになった。SSEの発生と同時に、地震活動や相似地震活動が増加したが、推定される滑り量は、過去に発生したものと同程度であった（東大地震研 [課題番号：1509, 1510]）。

大地震の際に平野で発生する長周期地震動の即時予測の実現に向けた、高速計算環境による観測データと高速シミュレーション同化の実現可能性を数値実験により評価した。データ同化手法には、震度や津波の即時予測で広く活用されている最適内挿法を用いた。データ同化は、領域内のK-NET、KiK-net強震観測データを用いて行い、地震発生から30, 50, 70, および90 秒までデータ同化を行った後に、高速計算により未来（地震発生から160 秒後）の長周期地震動を予測した。予測精度と猶予時間にはトレードオフがあるが、データ同化が進むにつれ、長周期地震動の振幅と継続時間が良く予

測できることが確認された。評価領域外で発生した、2011年東北地方太平洋沖地震においても本即時予測手法が適用できることを確認した。データ同化完了後に100秒後の波動場の予測に要する時間は、東大と筑波大が共同運用するOakforest-PACS 計算機の並列計算（2048 CPU）で12.4秒であった。これは、長周期地震動の伝播にかかる実時間よりずっと短く、観測データの取得に合わせて即時予測を繰り返し進め、予測の精度を高めることが可能である。差分法計算の解像度（格子サイズ）を2倍に広げ、長周期地震動の評価対象を5.4秒以上に限定すれば、より小規模の計算機システム（128 CPU 程度）でも同程度の時間で実施可能である（東大地震研 [課題番号：1516]）。

昨年度の臨時観測では、約100mしか離れていない観測点でも、ゆれの振幅が約2倍になることを示した。今年度は、その観測領域を広げて、14ヶ所で臨時観測を行ったところ、ゆれの大きさの分布に特徴が見られた。近傍のボーリングデータと比較をしたところ、揺れの大きさは、浅部の地質構造との関係が深いことが明らかになり、揺れの推定には、より高分解能な地盤構造の違いを考慮する必要があることを確認した（東大地震研 [課題番号：1514]）。

安政江戸地震は、安政二年十月二日（1855年11月11日）夜に発生し、関東地方南部に甚大な被害をもたらした地震である。薩摩の島津家に伝来した「江戸大地震之図」（東京大学史料編纂所蔵島津家文書）には地震に襲われた江戸市中の状況が描かれており、地震後に発生した火事で被害がさらに拡大した様子を見とることができる。関連する文献史料をあわせて検討した結果、絵巻にある火災の場面は、薩摩藩芝屋敷の北に位置し一町が全焼した町を描いたものと判断される。被災した屋敷や町など特定の場所を描いていると判明したことで、絵巻における被災状況の描写の史料的価値が認められ、地震に起因しない火災がたびたび起きていた江戸で、火災後に復興していく市中の様相を知るうえでもこの絵巻を史料として活用できる可能性が示された（東大地震研 [課題番号：1513]）。

房総半島南部の海岸段丘について、おもに平砂浦地域で地中レーダ探査および掘削調査を実施し、また詳細DEMの解析を行った（産総研 [課題番号：5004]）。

4. 今後の展望

首都直下地震が発生した場合には、我が国の首都機能や経済活動全体に深刻なダメージを与える可能性が高いことから、総合的な研究として優先して推進するテーマの一つとされてきた。ただ、本計画を作る最後の段階で、この考え方が示されたため、解明のための研究、予測のための研究、災害誘因予測のための研究の三分野に、広くまたがるような総合的な研究課題がなかった。そこで、研究課題の中から、首都直下地震に関連した研究成果を集めて統合させることが、本総合研究グループの目標であるとしてきた。しかし、関連する研究課題数は多くはなく、総合的に研究を推進するという体制を組むこともできなかつたため、それらの研究成果を統合させることができなかった。

そこで、今後は、首都直下地震の発生による被害を軽減させるために、どんな研究が必要なのかを検討するための体制づくりから始める必要がある。首都圏という人口の密集地および政治経済の中心地での大地震発生が、どのような複合的な被害を引き起こしてしまうのか、首都圏が被災するということが、日本全体に与える影響といった視点もスコープに入れるべきであろう。そのような、理学だけでは対応できない様々な研究分野を総合的に推進させるような体制が必要であると思われる。

具体的な研究課題は、首都直下地震として想定される多様な震源について、発生メカニズムや発生可能性を評価する研究を行う。それらの地震が発生する場として、関東平野下の詳細な地盤構造やプレート構造を明らかにして、地震発生環境をモニターする研究を行う必要がある。さらに、多様な震

源モデルによる揺れの予測に稠密観測データや地震史料の情報を反映し、新たな地震動の予測手法の開発を目指す。また、関東平野の複雑な地殻構造を用いた大規模数値シミュレーションに基づいて、地震動を高精度に予測する手法を高度化する。そして、各項目の研究成果を有機的に結び付け、高度に集約化された社会環境下での防災リテラシー向上に資する総合的研究を実施することが必要である。

成果リスト

- Chigira, M. & Suzuki, K. 2016. Prediction of earthquake-induced landslides of pyroclastic fall deposits. In: Aversa et al. (eds.) Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice. Associazione geotecnica Italiana, Rome, 93-100. Invited paper.
- Fukuda, J., 2018, Variability of the space-time evolution of slow slip events off the Boso Peninsula, central Japan, from 1996 to 2014, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, doi:10.1002/2017JB014709.
- Furumura, T., Maeda, T., and Oba, A. (2019), Early forecast of long - period ground motions via data assimilation of observed ground motions and wave propagation simulations, *Geophysical Research Letters*, <https://doi.org/10.1029/2018GL081163>.
- Igarashi, T., Aseismic slip histories inferred from sequences of small repeating earthquakes beneath the Boso Peninsula, central Japan, American Geophysical Union Fall Meeting, T33F-0481, Washington, D.C., 2018.
- Komori, J., Shishikura, M., Ando, R., 2017, History of the great Kanto earthquakes inferred from the ages of Holocene marine terraces revealed by a comprehensive drilling survey, *Earth Planetary Science Letters*, 471, p74-84.
- Nakajima, J., and N. Uchida, Repeated drainage from megathrusts during episodic slow slip, *Nature Geo-science*, 11, 351-356, doi:10.1038/s41561-018-0090-z, 2018.