

4. 全体成果概要

これまで未解明であった連動型地震の発生確率算出や連動条件の検討を実施し、地震調査研究推進本部の長期評価における新たな評価手法を提案することを目標として、糸魚川－静岡構造線断層帯の北部区間～中北部区間を主な対象として、以下の調査研究を実施した。

1) 変位履歴に基づく連動性評価のための地形地質調査では、北部区間・神城断層の2014年長野県北部の地震では未破壊の区間において、過去7回の変位履歴等を明らかにした。これらを基に、2014年長野県北部の地震で活動しなかった神城断層では、今後30年以内に6～17%のBPTによる地震発生確率、地震後経過率は80～140%と推定した。さらに、7回のイベントのうち2回は6～9mのネットスリップを伴う連動型イベントであったと認定し、その連動間隔を約3100～3300年と推定した。中北部区間・松本盆地東縁断層南部において3Dトレンチ調査等による変位履歴調査を実施し、西暦7世紀に生じた最新活動に伴い7.1±3.6mの左横ずれ変位が生じたことを明らかにした。また、松本盆地東縁断層南部及び周辺断層において反射法地震探査を実施し、それぞれ東傾斜75°と西傾斜40～45°の断層形状を推定した。糸静断層帯で最大規模の区間境界である諏訪湖周辺において、中北部区間と中南部区間の連動イベントを検討し、約3100～3200年前に両区間が連動したイベントが生じた可能性を明らかにした。中南部区間の南端付近に位置する下葛木断層において3Dトレンチ調査等による変位履歴調査を実施した。その結果、最新活動は約1400～1700年前に生じ、西暦762年に対比される中南部～中北部区間の連動イベントとは異なることを明らかにした。最近2回の活動時期は南部区間と調和的であり、これらを連動イベントと考えた場合、連動間隔は約3700～7200年である可能性を指摘した。以上の成果と既往成果を整理し、地震時変位量と断層長の経験式から地震イベント毎の活動範囲を推定し、連動間隔や連動範囲を推定した。連動間隔を基にポアソン過程に基づく連動確率を試算した。その結果、北部区間と中北部区間が連動したイベントは、連動範囲は長さ約120km、地震規模はMj8.0程度もしくはそれ以上、連動間隔は約3100～3300年、今後30年間の連動確率は0.9～1.0%と推定した。北部区間の松本盆地東縁断層北部から中北部区間と中南部区間を含む連動イベントは約3100～3200年前に生じ、連動範囲は長さ約78km、地震規模はMj8.0程度もしくはそれ以上、連動間隔は7000年程度以上、今後30年以内の連動確率は0.4%以下と推定した。中南部区間の下葛木断層と南部区間が連動したイベントは、連動範囲と地震規模は不明、暫定的な連動間隔は約3700～7200年、今後30年以内の連動確率は0.4～0.8%と推定した。糸静断層帯全体の連動イベントは、連動範囲は約160km、地震規模はMj8.0程度もしくはそれ以上、連動間隔は約1万年以上、今後30年間の連動確率は0.3%以下と推定した。このように、変位履歴に基づく連動型地震の発生間隔により連動確率を評価する手法を構築し、様々な連動範囲の試算を初めて提示することができた。

2) 速度構造不均質を考慮した精密震源決定では、速度構造モデルについてレビューを行い、この地域において震源決定を行う上で適切な構造モデルについて検討を行った。事業期間中に生じた2017年12月6日の長野県中部の地震(Mj5.3)の解析を進め、余震分布が50°前後で東傾斜することを明らかにした。活断層の地表トレースとの位置関係から、松本盆地東縁断層帯の深部における活動であった可能性を指摘した。2018年5月12日に発生した長野県北部の地震(Mj5.2)の震源決定とメカニズム解決定を行った。その結果、余震分布は約70°の高角東傾斜を示し、2014年長野県北部の地震の余震分布の傾向と調和的であった。2018年

の地震は、2014年の地震で壊れ残した場所で発生したと予想され、活断層の地表トレースとの位置関係から、傾斜角は浅部で緩くなると推定される。本震、余震のメカニズム解から推定される応力場は北西－南東圧縮の横ずれ成分を含む逆断層場を示す。牛伏寺断層に関しては、既存カタログから断層形状を考察した。この断層直下では2002年10月に特徴的な地震活動が発生しており、hypoDDを用いた精密震源結果からも活断層としての牛伏寺断層は、高角傾斜であることが支持された。中南部及び南部周辺における地震活動と同断層帯との間の関係を調べたが、直接的な関係は明瞭には見られなかった。今後の課題として、メカニズム解まで推定するためには独自の読み取りと時間が必要になる。短期間で結果を出すためには、信頼性の高い自動処理手法の開発も並行して検討していく必要がある。また、大地震時及びその直後のみ地震発生深度の範囲が拡大するという観測事実が知られているため、大地震の断層モデルの断層幅の設定において、そのような地震活動を生む要因を特定するための基礎研究が必要である。

3) 三次元有限要素法 (FEM) による断層モデルの高度化では、地震時変位量と断層長のスケーリング則を考慮した有限要素解析手法による断層変位計算手法を構築した。北部区間と中北部区間を念頭に、スリップパーティショニングが発生しやすい条件を仔細に検討し、発生条件として断層形状と最大主応力の方位を定量的に探索した。また、スケーリング則を考慮した有限要素解析手法を北部区間と中北部区間に適用し、研究項目 1 及び 2 の新知見を反映して応力方位に関するパラメトリックスタディーを実施した。その結果、調査観測結果と整合する最大主応力方位が $N60^{\circ} W$ となることを示した。中北部区間と中南部区間の境界付近に形成された諏訪盆地を模擬するため、プリアパート構造についてステップ幅、オーバーラップ、最大主応力方位を様々に変化させて 715 ケースにおよぶパラメトリックスタディーを実施した。この結果、(1) 最大主応力の方位によらず、オーバーラップが大きい場合にプリアパート構造中心部の沈降量は小さくなること、(2) プリアパート構造中心部の沈降量に対するオーバーラップの感度はステップ幅のそれよりも高いことがわかった。これらの知見を一連のパラメトリックスタディーによって初めて明らかにした。北部区間から中南部区間にわたる有限要素モデルを作成し、諏訪湖を挟む断層面群の相互作用について検討した。その結果、静解析の範囲内では、諏訪湖東側の断層群が諏訪湖西側の断層面群に及ぼす影響は小さいという結果を得た。これにより、着目している断層面に他の断層面の有無がどのような影響を及ぼすのかを定量的に検討し、断層面の有無・配置を自由に設定することができる特徴の一つを具体的に提示した。矩形に断層面を区切るケースでは、トレンチ調査等で得られたずれ量に比べてシミュレーション結果が小さくなることを示し、これを改善するために矩形断層面を滑らかに接合する新たな方法を検討した。断層面を滑らかに接合するモデルを作成することで、断層面を矩形で区切る場合に比べて調査結果に近いシミュレーション結果を得ることができた。どの程度の平滑度が適切なのかは引き続き検討する必要があるが、今回実施した断層面長大化の取り組みは、一定の合理性を保持しつつ断層面を決定する方法論の一つである。今後の課題として、より調査結果を説明するためのモデル構築に向け、(1) 一体化した断層面の平滑度についての検討、(2) 長大な断層面に対するスケーリング則を考慮した断層面上の剛性の設定方法についての検討およびその有限要素法への実装を示した。

4) 動的破壊シミュレーションによる連動性評価では、初めに2014年長野県北部の地震の動力的震源モデルを構築し、周辺断層との相互作用を検討した。南北 2 枚のセグメント

と破壊開始点となる鉛直なセグメントの3面からなる単純な断層モデルで、強震波形インバージョン結果と概ね調和する破壊の伝播過程と最大すべりを再現できた。また、過去の活動履歴を考慮して南側セグメントの応力降下量を小さくすることで、観察された地点での最大上下変位量を説明することもでき、各断層面の活動履歴を考慮する必要性を示した。続いて、糸魚川-静岡構造線断層帯北部～中南部区間を対象としたシミュレーションをおこなうため、各断層面の走向と傾斜角を反映できるよう、一般座標系を直交座標系にmappingする手法を用いて、シミュレーションに用いるコードを改良した。また、検証済のコードによる計算結果と比較し、本事業で開発したコードでの計算結果がよく一致していることを確認した。さらに、糸魚川-静岡構造線断層帯北部～中南部区間のうち、中北部区間と中南部区間を対象として、震源モデルを構築し、連動可能性を検討した。中北部区間北端、もしくは、南端から破壊が始まる場合には、中北部区間と中南部区間が連動する可能性を明らかにした。ただし、この場合は野外調査等による地震時変位量を4地点全てでは満たさず、相当大きな応力降下量を設定する必要があることを明らかにした。そのため、調査観測で得られた地震時変位量を説明できるイベントは、北部区間や南部区間も含めたより広い範囲での連動である可能性を指摘した。今後、応力降下量の設定の改良や、一般座標系コードの検証およびシミュレーションが更に必要である。

5) 全ての研究項目に関連し共通する断層モデル構築に資するため、地表から地下深部までの統合的な断層モデル形状を設定した。地表から深さ数 km 程度までは、主に研究項目1による新たな成果や既報の活断層分布、丘陵や平野の大地形と鮮新-更新統以降の地質分布を拘束条件とした。地下数 km 程度以深については、主に研究項目2により実施した2014年長野県北部の地震と余震分布をもとに地下で折れ曲がる断層形状を設定し、北部区間の基本モデルとした。その他の区間では、既報の高精度震源カタログや2017年12月の長野県中部の地震、2018年5月の長野県北部の地震及びそれらの余震分布を参考に断層形状を設定した。さらに、中南部区間について検討した結果、震源断層面を示唆する微小地震は確認できなかったものの、中南部区間を境として北東側のフォッサマグナ側では微小地震が分布せず、南西側のMTL等を含む西南日本外弧側ではMTL等に関連した微小地震等が生じていることを確認した。その分布境界面はほぼ鉛直をなしており、本事業では中南部区間の震源断層面をほぼ鉛直と設定することとした。

以上のように、糸魚川断層帯北部区間から中南部区間を主な対象として、1) 変位履歴に基づく過去の連動型地震の認定と連動間隔の推定、ポアソン過程に基づく連動確率の試算、2) 速度不均質を考慮した高精度震源位置決定手法による2017年12月及び2018年5月の地震、牛伏寺断層等周辺への適用、それらに基づく断層地下形状と応力場の推定、3) 有限要素法に基づく断層変位評価手法の開発と北部区間～中南部区間への適用、平滑な断層面形状を考慮した断層モデルの改良、4) 各サブテーマによる変位履歴、断層形状、応力場等を反映した動的破壊シミュレーションの実施、平滑な断層モデルを考慮した動的震源モデルの構築へ向けたシミュレーションコード改良と検証、5) 全ての研究項目に関連する断層モデル形状の設定手順と整理などの新たな知見が得られた。