

## 4. 全体成果概要

森本・富樫断層帯（以下「本断層帯」という。）における重点的な調査観測（以下「本調査観測」という。）では、森本・富樫断層帯の地震規模及び長期的な発生時期の予測精度の高度化、周辺断層帯との関係、断層帯周辺における地殻活動の現状把握の高度化、強震動の予測精度の高度化等の調査観測研究を令和4年6月から7年3月までの2年10ヶ月間の計画で実施した。

本調査観測では、1) 活断層の詳細位置・形状・活動性及び周辺の地下構造解明のための調査として、1. 1) 活断層の詳細位置・形状・活動性解明のための調査、と、1. 2) 重力探査に基づく地下構造調査、2) 断層帯周辺の地殻活動の現状把握調査、3) 浅部・深部統合地盤構造モデルの構築と強震動予測として、3. 1) 浅部地盤構造モデルの構築、3. 2) 深部地盤構造モデルの構築と強震動予測、の5つのサブテーマ研究グループを構築して、調査観測を進めるとともに、これらの活断層調査の実施に際して、関係自治体や事業者等と連携を図るとともに、調査観測成果を地域へ普及・還元する観点から、4) 地域連携・地域の内在地震ハザード情報共有、のサブテーマを設定した。

以下、令和4～6年度に実施した本調査観測の成果概要を記す。

1. 1) 活断層の詳細位置・形状・活動性解明のための調査では、森本・富樫断層帯の変動地形調査を行い、断層帯の位置やその分布を明らかにした。また、浅部・深部構造探査を森本・富樫断層帯を横断する複数の測線で行い、断層帯を構成する主要断層の浅部・深部形状を明らかにするとともに、近接する断層帯との構造的な関係を明らかにした。さらに、断層帯の活動性調査（群列ボーリング・トレンチ・浅層高分解能反射法地震探査）を森本・富樫断層帯北部及び南部で行い、北部ではこれまでの推定よりも大きな平均上下変位速度を、南部では完新世後期の断層活動の可能性を推定した。構造探査データおよび地震活動解析により推定した地震発生層厚さに基づき震源断層モデルを構築した。これらの調査で得られたデータを森本・富樫断層帯の長期評価のための特性表としてとりまとめた。

今後の課題としては、上記のほかに、森本・富樫断層帯の活動履歴に関する情報のさらなる拡充が望まれる。本調査観測では、これまでデータの無かった森本・富樫断層帯の南部における活動履歴のデータを提示したが、過去複数回の断層活動時期に関するデータは得られなかった。本断層帯は金沢市およびその近郊に位置することから、様々な社会・経済的条件等の制約の中で、トレンチ調査などを実施する適地を見出すことは一般に困難である。今回の事業期間内でも最適と考えられる調査箇所ですトレンチ調査を実施することはできなかった。引き続き、より古地震調査に適した地点において古地震調査を実施し、活動履歴に関する情報を増やすことが重要である。また、本断層帯の北部についても、さらにボーリング調査地点を1～2点増やすことで、断層活動時期に関する解析を進めることができると期待される。上記の成果を踏まえた上での継続的な調査研究が、森本・富樫断層帯の長期予測と強震動予測の精度向上に必要であると考えられる。

1. 2) 重力探査に基づく地下構造調査では、森本・富樫断層帯周辺で重力測定を行い、1071点の新規重力データを追加した。また、既存データの精査を行い、信頼性が低いと推測される重力データ248点について除去を行い、そのうち82点について同一地点にて再測定を行い、信頼性の高い重力データを得た。これらの重力データを加えた重力異常図及

びその勾配図を作成し、森本・富樫断層帯及び周辺の活断層に関する重力異常の特徴を抽出した。森本・富樫断層帯は全体として、重力異常図では断層構造の特徴が明瞭ではないが、堆積盆の構造を示す低重力異常域に断層帯が区画されていることが明らかとなった。また、森本・富樫断層帯の傾斜方向の重力異常の勾配からは森本断層及び野町断層については断層構造に起因する可能性のある重力異常が見られるものの、富樫断層では不明瞭であった。断層周辺での重力異常の特徴が不明瞭であることは、基盤における鉛直方向の断層変位が小さい可能性を示唆する。さらに重力勾配図の特徴から、森本・富樫断層帯の断層構造は邑知瀧断層帯の断層構造と連続しないことが考えられる。

観測重力異常分布に基づき森本・富樫断層帯周辺地域において三次元重力インバージョン解析を行い、2層構造を仮定した場合の2層の境界深度分布の推定を行った。複数例の初期深度分布及び密度差に対して解析を行った結果、本調査観測で実施した反射法地震探査結果と概ね整合的であり、観測重力異常分布を説明する境界深度分布が得られた。

また、令和4年度実施の反射法地震探査測線である犀川－医王山測線及び令和5年度実施の内灘－南砺測線にて二次元タルワニ法解析を行った。内灘－南砺測線では、反射法地震探査結果に基づく二次元密度構造により測線沿いの観測重力異常値を概ね説明可能であり、反射法地震探査から推定された層構造は重力異常の観点から妥当であることを確認した。犀川－医王山測線では、観測重力異常値を説明するために最深部の層境界において反射法地震探査結果に基づく二次元密度構造の修正が必要であったが、堆積層の層構造は妥当であることが確認できた。これらの結果を参照し、反射法地震探査測線以外の森本・富樫断層帯を直交する5測線においても二次元タルワニ法解析を行い、森本断層及び野町断層は類似の密度構造が連続するが、富樫断層は異なる構造を示す可能性を持つことが分かった。さらなる精度向上のためには、基盤深度に達する大深度のボーリングデータでの実測値に基づく密度値の設定と拘束条件になり得る境界深度値が必要となる。

稠密かつ高精度な重力測定データを用いた重力異常図の作成は、活断層の断層構造を面的に推定する上で有効である。本調査観測では平野部では約500 mの格子に重力測定点が1点含まれるように重力測定を実施したが、山間部では道路の制約等により均質な重力測定点分布を得ることが難しい。山間部での均質な重力測定データを得るためには、今後の高精度な空中重力測定方法の開発等が望まれる。

2) 断層帯周辺の地殻活動の現状把握調査では、森本・富樫断層帯周辺に11点の3成分地震計からなる臨時高感度地震観測網(MTKV-net)を令和4年9月に構築し、さらに当断層帯の主に上盤側に25点の1成分地震計からなる臨時稠密地震観測網(MTMT-net)を令和5年7月に構築した。これら観測網で令和6年12月まで観測し、MTKV-netでは約2年3ヶ月間、MTMT-netでは約1年4ヶ月間の連続地震観測データを取得した。

MTKV-netと周辺の定常観測点のデータを用い、深層学習モデル等を用いた自動処理により、地震を検出し震源を決定した。これにより森本・富樫断層帯周辺で、同期間の気象庁一元化震源カタログの約3倍の数の地震を検出した。P波初動極性を検出し、P波とS波の振幅比も用いて29個の地震の震源メカニズムを決定した。断層のタイプは逆断層型と横ずれ断層型のいずれのものも見られた。さらに、応力テンソルインバージョンにより、応力場を推定したところ、森本・富樫断層帯の走向に直交する圧縮方位を持つ同断層帯を動かしやすい応力場が得られた。応力場推定に不可欠な震源メカニズムの決定には多点で

の地震データが必要であるため、臨時地震観測は極めて有用であり、当該断層帯の地殻活動に関する知見は増大した。しかし、森本・富樫断層帯周辺の地震活動は、令和6年能登半島地震以降にやや増加したものの依然として低調であるゆえに、稠密な臨時地震観測をもってしても震源メカニズムを決定できた地震数は29個にとどまり、応力場の空間分布の推定にまでは至らなかった。地震活動の低調な活断層帯は日本中に数多く存在する。このような活断層帯に対する応力場推定には、本事業で実施したような2年間強程度の観測では足りず、より稠密な地震観測を長期間実施する必要がある。

臨時地震観測網（MTKV-net、MTMT-net、サブテーマ3.2による臨時観測網）および既存の定常地震観測網の連続地震データを用いて表面波解析を実施した。地震波干渉法およびSPAC法を適用し、2観測点間を伝播する表面波の群速度および位相速度を推定した。推定した2観測点間の位相速度分散曲線をもとに、周波数ごとの位相速度マップを推定した。位相速度マップをもとにインバージョン解析を行い、3層構造としての森本・富樫断層帯周辺の広域三次元S波速度構造を推定した。その結果、金沢平野から砺波平野にかけては表層にS波速度が0.7 km/s程度の層が厚く分布し、2層目では金沢平野周辺では1.6 km/s程度の層が約1.5 kmの厚さで分布する構造が得られた。最下層の3層目のS波速度は、金沢平野および砺波平野を除く多くの範囲で地震基盤に相当する3.0 km/s以上の値が得られた。当該三次元S波速度構造の妥当性を検証するために、群速度と位相速度を指標として全国1次地下構造モデル（暫定版）と比較した。その結果、推定した広域三次元S波速度モデルは、全ての周波数帯において、群速度と位相速度の観測値をよく説明することが示された。なお、得られた3次元S波速度構造の検証にはボーリングデータや実体波の走時など他の情報を使用して行われることが望ましい。こうした情報が広域に得られることは稀であり、まだ課題が残されている。

本調査観測で推定した応力場情報とサブテーマ1により推定された森本・富樫断層帯の断層形状を用いて、slip tendencyおよび断層活動様式を推定した。応力場の最適解に対しては、森本・富樫断層帯は力学的にすべりやすい断層であり、その運動センスは逆断層が卓越することが確認できた。また、応力場の不確実性を考慮した際にも、この特性は概ね変わらないことが確認できた。

3.1) 浅部地盤構造モデルの構築では、森本・富樫断層帯における強震動評価を実施するために、震度5強以上が想定される、当該断層帯を中心とした石川県中南部・富山県西部を中心とした地域において、約2,000地点の小アレイ微動探査と解析を実施した。また、ボーリングデータ等の既往の地質情報を可能な限り収集・整理し、サブテーマ3.2と協働で浅部・深部統合地盤構造モデル構築を行った。本検討によって作成された浅部地盤構造モデルは、小アレイ探査の位相速度およびH/Vスペクトル比等の結果と調和的であり、既往の地盤モデルと比べ、より最適な浅部地盤構造モデルが構築できたものとする。また、森本・富樫断層帯の近傍において、測線として稠密に展開した小アレイ微動探査によって得られるS波速度構造断面より、より詳細な断層位置や地質構造を推定することができた。

主として浅部地盤の影響の評価方法として、微地形区分などとAVS30、AVS30と増幅率との経験的關係式より、微地形区分に基づく浅部地盤の地震動増幅率と、今回構築した浅部地盤S波速度構造に基づく地震動増幅率は、金沢市平野部北部の河北潟周辺等では後者が

より大きくなった一方、手取川下流部の扇状地においては、後者が小さくなった。現地での多数の微動探査やボーリング資料の活用により構築された浅部地盤構造モデルの有効性が示された。

サブテーマ 3. 2 においては、強震観測点サイトにおける浅部・深部統合地盤構造モデルの地震基盤より上の理論増幅率と、観測から得られているサイト増幅特性の比較を行い、構築された浅部・深部統合地盤構造モデルのパフォーマンスチェックが行われた。

一方で、作成された 250 m メッシュ浅部地盤構造モデルには、微動観測結果の位相速度と比較して乖離が大きい（精度が十分でない）メッシュも存在する。そのような場所の多くは、メッシュ内で地盤構造が大きく変化するような地形の変化点（不整形地盤等）であることが分かった。今後において、そのような場所でモデルの精度を向上させるためには、より稠密な観測を行い、より詳細なメッシュサイズ（例えば 50 m メッシュ）での検討を行う必要がある。

3. 2) 深部地盤構造モデルの構築と強震動予測では、3. 1) と同じく、森本・富樫断層帯の地震で強い揺れに見舞われることが想定される石川県や富山県西部を主な対象として、深部地盤構造モデル高度化のための観測や調査、資料収集等を実施した。また、これまでのサブテーマ 3. 2 での調査や、他のサブテーマの調査結果を集約し、対象地域の浅部・深部統合地盤構造モデルの作成を行った。本調査観測の研究チームで検討した森本・富樫断層帯の震源断層モデルと地震シナリオにもとづいて、強震動の試算を行った。

堆積平野が広がっている金沢市及び白山市の計 11 地点において、令和 4 年 9 月から 7 年 3 月まで、強震計を用いた臨時地震観測を実施した。臨時地震観測で新たに得られた地震波形記録に加えて、既存の各機関の震度計や強震計観測点で記録された対象地域の有感地震等の波形記録を取得し、観測された波形の特徴等を分析し、加賀平野内で震度が相対的に大きな地点や小さな地点を把握した。地震動特性の空間的な違いを定量的に把握するためには、実際に地震動を観測することが最も有用であることは言うまでもない。今後も、地方公共団体による震度計波形データなどのさらなる有効活用が期待される。なお、主として金沢平野の堆積層上に展開した臨時地震観測の連続波形記録はサブテーマ 2 にも提供し、サブテーマ 2 の実施課題にも活用できるように連携して取り組んだ。

盆地基盤面深度程度までを目標探査対象範囲とした微動アレイ観測を、森本・富樫断層帯の地震で強震動に見舞われる可能性が強い石川県 9 地点、富山県 2 地点で実施し、深部地盤構造モデル高度化のための S 波速度構造に関する物理探査情報を充実させることができた。また、単点微動観測も多数の地点で実施し、各地点の地盤震動特性に関する情報をもっている H/V スペクトル比データを得た。これらの調査結果や、サブテーマ 1. 1 の反射法地震探査、サブテーマ 1. 2 の重力探査結果なども参照したほか、石川県や富山県を対象に実施された既往文献等による微動アレイ探査、単点微動観測、反射法地震探査結果も収集した。これらの探査データを統合して解析し、対象地域の浅部・深部統合地盤構造モデルを作成した。本調査観測で作成した浅部・深部統合地盤構造モデルは、現行の J-SHIS V4 モデルに比べて、観測波形や観測サイト増幅特性の再現性が大きく改善されたことを確認した。今後も、地震動の伝播特性や増幅特性に大きく影響する堆積平野の S 波速度構造に関する探査情報のさらなる充実が、地盤構造モデルの信頼性向上と揺れの予測精度向上には不可欠である。

対象断層帯が活動した場合に強い揺れを受ける地域において、地盤材料の動的変形特性

試験の既存資料を収集し、断層近傍で表層地盤が軟弱と考えられ、情報が無い2地点において浅部ボーリング調査と動的変形試験を実施した。得られた動的変形特性は、標準的な特性に似ていることを確認することができた。強震時の地盤の非線形応答や液状化は大きな地震災害を引き起こす可能性があるため、原位置での動的変形特性を知ることは重要であり、試験を実施するとともに、既存情報の収集を進める必要がある。

最終年度である令和6年度には、本調査観測のプロジェクト全体から調査結果や知見を持ち寄って議論を重ね、森本・富樫断層帯の震源断層モデルを提案し、破壊様式やアスペリティ配置、地震規模などの異なる5ケースの検討用地震シナリオを策定した。本調査観測で構築された浅部・深部統合地盤構造モデルを用い、これら5ケースの予測地震動を試算した。地表での地震動波形の計算では、金沢市内で取得した動的変形特性曲線を用いた等価線形解析を行うことで、対象地域の土質特性を浅部での地盤応答特性の評価に取り入れた。これにより、ケース間の地震動分布のバラツキをみたほか、浅部地盤応答の計算方法の違いによる地表の地震動分布の違いを検討し、対象地域の地震ハザード評価のための基礎的資料を得た。本断層帯の一部のみが破壊することを想定した、地震規模の小さなケース（ケース4～5）であっても、特に1秒以下の短周期帯域では、断層近傍の地点等では、森本・富樫断層帯全体が破壊するケース（ケース1～3）に匹敵する地震動強さや応答スペクトルが得られる場合も見られた。森本・富樫断層帯全体が同時に破壊しないケース（いわゆるひとまわり小さな地震）であっても、当該断層帯周辺の確率論的地震ハザードを検討する上で重要といえる。

面的な強震動予測や地震ハザード評価で広く用いられている簡便法では、地表でのAVS30が工学的基盤のS波速度よりも小さい場合、増幅率は必ず1よりも大きくなるため、地表での最大速度は工学的基盤のそれよりも必ず大きくなる。このため、地表の震度も工学的基盤での震度を上回る傾向にある。一方で、より現実的な等価線形解析を用いた場合には、河北潟や邑知潟のように、S波速度が極めて小さく、層厚の厚い浅部地盤に、大きな地震動が入力した場合、地盤内のひずみが大きくなることで、減衰定数が大きくなり、剛性率が低下することで卓越周期が変化したりすることにより、地表での最大加速度、最大速度、震度が工学的基盤のそれらより小さくなることもある。このように、対象地域の地盤特性を反映した、より現実的な予測地震動を得るためには、本報告書で述べたように、詳細な深部・浅部統合地盤構造モデルを作成し、浅部地盤の各土質に対応する動的変形特性を適切に与えた上で、地表の時刻歴波形を得ることが重要である。そのためには、ボーリングデータの蓄積と分析に加え、各々の地域の土質特性を反映した動的変形特性試験結果の充実が必要不可欠である。

4) 地域連携・地域の内在地震ハザード情報共有では、本調査観測で対象としている森本・富樫断層帯が活動した場合に強い揺れに見舞われる地域となる石川県、富山県、福井県等の自治体及びインフラストラクチャ事業者等の関連部局に呼びかけ、毎年度1回ずつ地域勉強会を実施した。そこでは、低頻度だが大災害につながる可能性のある多様な直下地震ハザードと社会基盤の持続性の観点から、当事業で実施された新たな調査結果や、地震防災に係る重要な事象に関する情報共有と意見交換を行った。当該地域では調査観測期間中に令和6年能登半島地震が発生し、金沢周辺でも最大震度5強の揺れに見舞われ、地盤の液状化による地盤災害などの被害が発生した。実際の被害を踏まえて、住民への地

震防災の意識づけを進めるためにも、本調査観測の成果をまず自治体の地震防災や都市計画、ライフライン維持管理などの担当者と共有し、理解してもらうことで、社会の防災力を高めていくことに繋げる必要がある。これまでの地域勉強会に参加された方々には、3年間の成果を改めて情報共有する機会を準備することを考える必要がある。本調査観測の成果は地震本部の長期評価や強震動評価の高度化に反映されるものと考えているが、こういった国の評価を地方自治体の防災力向上に確実に反映させるために、より一層の努力が必要と考える。