

#### 4. 全体成果概要

本章では、平成17年～21年度に実施した本重点的調査観測の各サブテーマの成果の概要を述べることにする。本年度は最終年度にあたり、全体の取りまとめを念頭において調査観測及び解析を行うとともに、サブテーマの調査観測の参加者による意見交換会を7月と11月に開き、成果についての紹介と議論を行った。以下にその成果の概要をサブテーマ毎にまとめる。尚、サブテーマ6（強震動評価高精度化のための強震観測・地下構造調査）は、本調査の成果を総合的に反映させて行われているため、本章の最後にその成果をまとめることにする。

サブテーマ1（断層帯の地下構造解明）で実施された反射法・重力探査では、糸魚川－静岡構造線断層帯（以降、「本断層帯」）の構造が、諏訪湖を挟んで南と北で大きく異なることが直接的に明らかとなった。即ち、塩尻より北では、糸魚川－静岡構造線（以降、「糸静線」）の主断層面は東傾斜である。地表地質・地形データから判断して、この傾斜した断層面は中新世のリフティングに伴って生じた正断層を起源とし、現在では同断層面上で逆断層すべりと左ずれが起こっていると考えられる。この構造は、松本以北における糸静線の構造と基本的に同じである。一方、これより南の諏訪湖域では、浅層反射法探査により下諏訪及び茅野では西傾斜の正断層構造（+左ずれ）が認められ、西傾斜の面が糸静線の主断層である可能性が高い。この結果は、諏訪湖を横断する深部反射法探査の結果および屈折法によってより明瞭な形で確かめられた。つまり、諏訪湖の北端部周辺で断層形状が大きく変わっているのである。諏訪－富士見間では、同断層帯に沿って、鮮新世以前に活動があった証拠は認められなかった。更に南でも断層の傾斜は変わらない。しかし、すべりのセンスは変化し、左ずれとともに逆断層すべりが南部ほど卓越してくる。白州より南では、糸魚川構造線に沿う断層活動は減衰し、それに替わって甲府盆地西縁の下円井－市之瀬断層が活動的となる。御勅使川－甲府盆地北部側線に沿う探査の結果では、下円井－市之瀬断層は低角で西に傾斜しており、深部では糸魚川構造線に収れんするものと解釈される。両断層は中新世に付加した火山弧起源の物質（巨摩層群）を挟んで全体として覆瓦構造を成しているため、下円井－市之瀬断層は中新世における沈み込み帯の一部が再活動したものと考えられる。

松本から富士見の間では、逆断層とその上盤側を併走する左ずれ断層とが存在し、いわゆる「すべり分配」(slip partitioning) が顕著に認められる。本研究による地下構造探査の結果、すべり分配は表層現象であることが分かった。地表で併走する2列の断層は地下浅部(0.5～2 km)で収れんし、それより深部では、傾斜する断層面上で斜めすべりが生じていると解釈される。このことは、本断層帯が現在の広域応力場に完全には適合していないことを意味し、断層面の強度が小さい「良く成熟した」断層であると考えられる。

サブテーマ2（断層周辺の不均質構造を解明するための電磁気探査）では、自然電磁場を用いた広帯域MT法探査を実施した。広帯域MT法では、地震学的なパラメータと独立な比抵抗という物理量で地下構造をイメージでき、特に水平方向に急激に変わる構造や、断層破碎帯などの鉛直に立った構造に対して敏感であるという特徴がある。本調査観測によって、これまで不明であった断層帯周辺の地殻の比抵抗の不均質構造が明らかとなった。糸静線南部セグメント南端では、断層の西側の深度約500m～1000m付近に低比抵抗層が、

断層位置から西側に向けて徐々に深くなる傾向があること、また高比抵抗基盤が西に向かって急激に深くなることが明らかとなり、比抵抗が基本的に西傾斜の構造を示すことがわかった。これは、断層が西傾斜であるというサブテーマ1の反射法探査の調和的である。一方、諏訪湖周辺では、本断層帯の深部比抵抗構造を測線長50kmの測線で深度20kmまでの範囲で解明することができた。諏訪盆地直下の鉛直状の低比抵抗はその深部では南西側に傾き、更に伊那谷との間でU字型の低比抵抗になることが推定された。サブテーマ3で得られた精密震源分布と比較すると、U字の低比抵抗周辺に地震が起きているように見える。この低比抵抗帯は、せん断帯であると考えられる。鉛直状の低比抵抗異常は、牛伏寺セグメントの崖の湯においても見えている可能性がある。実際、横ずれ断層であるニュージーランドのアルパイン断層やサンアンドレアス断層では、断層深部にある流体を含んだせん断帯が低比抵抗異常として解析されている。諏訪湖周辺で見出された地殻深部の低比抵抗も同様なせん断帯であると考えられる。

サブテーマ3（断層帯周辺における自然地震観測）で行われた長期機動観測では、本断層帯を含むやや広域的な地震活動が明らかとなった。この機動観測では、定常観測網を補完して精密な地震観測を行うための観測点整備が行われた。まず、気象庁が本調査観測に先駆けて整備したパイロット重点の5観測点（松本中山・長野四賀・長野穂高・長野安曇・信州新町）を防災科研に移管し、機器の更新や調整を行った後、データをHi-netに準じたデータ流通経路に乗せた。また、計器深度が約50mの孔井地震観測点を糸静線周辺域の15箇所にも新設した。さらに、これら計20観測点のデータと防災科研Hi-netや大学・気象庁の観測点のデータとの効率的な即時併合処理実現のため、データ処理システムを整備した。データについては、Hi-netに準じた蓄積と公開を行った。

この機動観測で蓄積されたデータの解析から、断層帯周辺域におけるやや広域の地震波速度構造や詳細な震源分布等が明らかとなった。トモグラフィ解析から得られた地震波速度構造は、糸静線に沿って深さ数kmの部分に低速度領域が分布していることを示している。より詳細に見ると、その低速度の程度に地域性が認められ、断層セグメンテーションに関係している可能性がある。また、糸静線の北端と南端には顕著な低速度領域が存在しており、その低速度に関係した媒質の非弾性的性質が断層帯の端部を規定しているものと考えられる。一方、下部地殻においては諏訪湖を中心とする低速度域が南北に広く分布するが、その位置は、サブテーマ1で求められた断層の傾斜方向に対応して、北部では糸静線の東側、南部では糸静線の西側となっている。もし、地殻深部の流体がこのような低速度域の原因であるならば、地殻下部の強度低下、更に上部地殻への応力集中をもたらし、その結果として断層形成に大きな影響を及ぼしている可能性がある。また、以上のように推定された三次元地震波速度構造によって約6年間に発生した地震の震源決定を行い、その震源分布に基づいて地震発生層の上限および下限の深さを評価した。その結果、糸静線中部では地震発生層の厚さが北部や南部よりも薄いことが明らかとなった。更に、この解析によって求められた三次元地震波速度構造モデルを用いた高精度震源決定によって、糸静線周辺域の地震活動を明らかにした。その結果、牛伏寺断層直下および糸静線南部の一部の震源クラスターは、糸静線を構成する断層の活動である可能性があることが分かった。一方、それ以外の領域では、想定される断層面の形状と一致するような震源分布は検出されなかった。

上記の長期機動観測と平行して進められた稠密アレー観測では、本断層帯周辺の詳細な 3次元地震波速度構造、微小地震の震源分布、震源メカニズム及び応力分布が明らかになった。使用した自然地震の波形データは、本調査観測で東大地震研が5ヶ年にわたって実施した稠密アレー観測、産総研による臨時微小地震観測、および気象庁・防災科学研・大学の定常観測点によって収録されたものである。これらのデータに対してトモグラフィ解析を実施し、本断層帯の地殻深部に至る3次元地震波速度構造・微小地震の震源分布を推定した。その結果によれば、本断層帯北部では、フォッサマグナの底に沿って低角度で東傾斜の構造境界が存在し、糸静線に関連した微小地震もこの構造境界周辺に分布する。糸静線中部では、東傾斜の構造は見られず、微小地震の発生領域も糸静線を中心に幅約15 kmの範囲内に集中する。また、多くの微小地震は、高角度の線状配列を示すクラスターとして分布するが、南に向かって微小地震の活動度は低調になる。糸静線南部では、微小地震の活動度は活発であり、地質学的な糸静線の西側に分布することがわかった。断層帯に沿った微小地震の震源分布と速度構造の特徴を見ると、本断層帯の北部、中部及び南部を区分する構造境界が存在する可能性が高い。更に防災科研が実施した長期機動観測データも取り入れ、2003年1月から2009年11月に発生した糸静線近傍の微小地震の震源を、3次元地震波速度構造で再決定した。その結果、糸静線近傍の長期間にわたる微小地震活動の特徴が明らかすることができた。

また、本断層帯周辺で発生する極微小地震まで（マグニチュード0程度まで）を含めた地震454個について、P波初動押し引きのみならずP波・S波の振幅値まで利用して震源メカニズム解を求めた。更に、糸静線全域を10の領域に区分けし、それぞれの領域で応力テンソルインバージョンを実施し、糸静線全域の主応力方位分布図を作成した。推定された応力場は、大局的には北部と南部が逆断層型、中部が横ずれ型であった。この結果は、松本盆地東縁断層の南部にあたる領域を除いて、活断層の運動センスの空間分布と調和的である。一方で、松本盆地東縁断層の南部は地質学的に横ずれの運動が卓越していることが近年報告されており、今回推定した応力場と調和的で極めて興味深い結果となった。

サブテーマ4（地震時断層挙動の予測精度向上に向けた変動地形調査）では、「長期的な地震発生時期及び地震規模の予測精度の向上」と「強震動の予測精度の向上」に貢献するため、航空写真判読や現地地形調査、航測システムを用いた変動地形の高解像度DEMや地形断面の作成、断層変位地形が明瞭に確認できていなかった場所のLiDAR計測、および地形面編年を実施することにより、活断層線の位置・変位量等に関する高密度・高精度な情報を網羅的に取得し、本断層帯全域の変動地形情報に関するデータセットをWebGIS形式で完成させた。

このデータセットを用いて平均変位速度（slip rate）分布を求め、過去の地震時変位量分布の累積過程を検討した上で、将来の地震時変位量分布やアスペリティの位置を予測した。その結果、白馬付近、池田付近、松本南部付近、茅野～富士見付近、白州南部付近、および市之瀬台地付近にアスペリティが存在する可能性が高いと推定した。さらに各区分における断層地下形状を考慮し、1回変位量が推定できる場合と平均活動間隔を想定した場合について、区分毎のモーメントマグニチュードを推定した。なお、松本～岡谷においては、従来ギャップとされていた場所にも横ずれ断層が見つかり、地表起伏に関わらず直

線的な断層トレースが認められたことから、高角～鉛直であると推定した。得られた活断層情報は「糸魚川－静岡構造線活断層情報ステーション」としてインターネットで公開され、変動地形資料集としても整理された。

サブテーマ5（より詳しい地震活動履歴解明のための地質学および資料地震学的調査）では、本断層帯北部の神城断層および松本盆地東縁断層において、群列ボーリングおよびトレンチ掘削調査を実施し、過去の地震活動に関する重要な知見を得た。神城断層南端（木崎湖南方）では、約14,000年前以降に堆積した地層が撓曲変形していることが確認された。また、最近約5,000年間に3回の撓曲変形イベントが検出され、最新活動時期は紀元前約750年以降であり、西暦約660年以降の可能性もある。先行する2回のイベントは紀元前約2480年～紀元前約1700年、紀元前約3350年～紀元前約2870年に発生したと推定された。一方、約9,000年前～5,000年前の期間に地層に変形が記録されるようなイベントは確認できない。松本盆地東縁断層中央部では、完新世の地層を累積的に変位させる明瞭な低角逆断層を伴う撓曲構造が認められ、同断層で初めて複数回の古地震イベントを検出することに成功した。地層の変形の特徴から、同断層は約6,000年前以降少なくとも2回の活動（3回の可能性もある）が推定された。 $^{14}\text{C}$ 年代値のばらつきが大きいため各イベントの発生時期を十分に絞り込むことが困難であったが、新しいものから西暦約690年～西暦約890年、（紀元前約2280年西～西暦約890年：イベントの可能性あり）、紀元前約2570年～紀元前約2040年と推定された。既存の調査結果と合わせると、少なくとも中部区間の牛伏寺断層から神城断層に至る約60kmの区間が西暦762年もしくは西暦841年の歴史地震で地震断層を伴う破壊が生じた可能性が高い。

しかしながら、本調査で明らかになった最近約6,000年間における神城断層および松本盆地東縁断層の活動間隔は牛伏寺断層よりも長い。なお、松本盆地東縁断層ではイベント時期が十分絞り込めていないが、過去約6,000年間の活動頻度は神城断層と大きく変わらない。従って、最新活動時には牛伏寺断層から神城断層にかけての長さ約60kmの区間での破壊の連動が生じたものの、それよりも古いイベントでは、本断層帯の北部と中部で異なる時期に活動した可能性がある。

サブテーマ7（GPS観測による詳細地殻変動分布の解明）では、平成14年度から開始したパイロット重点観測で糸静線中部から北部周辺に設置した27ヶ所および平成18年度に糸静線中部の諏訪湖周辺に設置した7ヶ所の観測点において、毎年1回のGPSキャンペーン観測を実施した。このデータを周囲のGPS連続観測点のデータとともに解析して正確な座標値を求め、2002年以降の日座標値に基づいて各観測点の地殻変動速度を求めた。得られた地殻変動は、糸静線中部地域から北部地域にかけて現在進行しつつある地殻変動パターンを明瞭に示し、糸静線の断層沿いに変形様式および地震発生様式が顕著に変化している可能性が示唆される。さらに、断層すべりによる変形のモデル化を実施した。その結果、糸静線中部では、ほぼ鉛直な断層で接したブロックが5～6 mm/yr の速度で左横ずれ運動をし、弾性的な歪みを蓄積していると理解できる。一方、糸静線北部の短縮変形は、地形学的に得られる変形と比べて顕著に大きく、東傾斜の逆断層が地表付近まで非地震性のすべりを起こしている可能性が示唆された。

サブテーマ8（SAR干渉解析による構造線断層帯周辺の地殻変動検出）では、干渉 SAR

解析によって地殻変動の面的分布の獲得を目指すものであった。予想される変動量は年数ミリメートル程度であるため、本調査観測では、干渉 SAR による微小な地殻変動の検出技術の向上を目指し、活断層周辺域の微小地殻変動観測手法の有効性について検証した。干渉解析にそれぞれ特性の異なる C-band および L-band 波長帯のマイクロ波で観測された SAR データを用いた。データ量の豊富な C-band に関しては、スタッキング処理により S/N 比を向上させ微小な変動検出を試みた。解析の結果得られた糸静線周辺の面的地殻変動速度分布から、本断層帯北部（神城断層付近）および長野盆地西縁断層近傍に変形が集中している、大町付近では、変動速度が本断層帯周辺の約 30km の幅で緩やかに変化している、などの特徴が得られた。なお、本断層帯中部（牛伏寺断層付近）では変形の集中は認められないが、左横ずれから期待される南北方向の変動には SAR 観測による感度がないことによる可能性がある。これらの結果は GPS 観測の結果と調和的であり、断層帯近傍の微小な地殻変動を面的に検出できる可能性が示唆するものである。

最後にサブテーマ 6（強震動評価高精度化のための強震観測・地下構造調査）では、これまで述べてきた成果を踏まえて本断層帯における強震動予測の高度化を目指した。正確な強震動予測を行うためには、対象領域の地下構造を把握する必要がある。そこで本調査観測では、松本盆地及び諏訪盆地において強震観測点 12 点を整備して強震観測を実施し、得られた中小地震記録の波形解析から盆地内における地震波伝播や地震動増幅特性を評価した。更に松本・諏訪・長野盆地を含む広域の地下構造モデルを構築し、実際に起きた中小地震に対して三次元波動シミュレーションを行って、合成波と観測記録の比較から地下構造モデルの妥当性を検証した。

強震観測とともに、各調査観測成果（地下構造探査や活断層等に関する詳細な調査結果等）および既存の資料等に基づいて糸静線周辺の地下構造と震源断層のモデル化を行った。上述のように、松本盆地から諏訪湖北端にかけての断層形状については、反射法・重力探査からは東傾斜低角である可能性が強いのに対し、変動地形学的調査観測では、少なくとも地殻浅部では高角であることが示唆されている。この差については、まだ不明の点が多く残されている。そこで、断層モデルについては、構造探査の結果の解釈に従った「構造探査ベースモデル」と、変動地形学的解釈に従った「変動地形ベースモデル」の 2 種類のモデルを提案した。そして、両モデルの特徴を鑑みて 4 つの地震シナリオを作成し、簡便法と詳細法による強震動評価を実施した。前者は、破壊過程やアスペリティが地震動に与える影響は考慮せず、マグニチュードと断層からの距離の経験式から、最大加速度、最大速度、加速度応答スペクトル等の値を算出する方法である。これに対して後者は、破壊過程やアスペリティが地震動に与える影響を考慮して時刻歴波形を予測する手法である。両者の方法で計算された速度分布を見ると、想定したシナリオの内容の違いによって各地の地震動の強さが大きく変化することが示された。これは、地震動の大きさが、計算で仮定する破壊の伝播方向や断層位置およびアスペリティの分布に強く依存するためと考えられる。その一方で、全ての場合に共通して、地表への増幅率が大きい松本・諏訪・甲府・伊那盆地の地震動が特に強いこと、新潟平野や長野盆地など断層帯から遠く離れた地震基盤が深い地域では長周期地震動が励起されることが示された。

簡便法および詳細法によって得られた速度分布を基に、地表での震度分布への換算を行った。大震度が予想される地域は、断層面近傍（詳細法ではアスペリティ近傍）と地表で

の増幅率が大きい場所、および基盤が深い地域となっている。2つの計算手法による震度分布の違いを見ると、詳細法による震度6強以上の高震度領域は簡便法による強震領域よりも広範囲に分布する。また、断層帯全体が破壊するというシナリオにおいて、簡便法による震度5強～6弱程度領域が詳細法による領域よりも広範囲に分布する。前者の特徴は、高震度領域の違いがアスペリティ周辺に集中している。即ち、強震動評価においてアスペリティの設定が如何に重要であるかということを示している。また、後者の特徴については、断層の幅方向の広がりには顕著な違いが見られることから、破壊過程が影響していると考えられる。

これらの結果は、本調査で実施してきたような震源断層の特性（形状や変位量）の解明と特に人口密集域の地下構造調査を両輪として推し進めることが、強震動予測精度の高度化に不可欠であることを強く示すものである。更に、強震動予測精度を高めるには、アスペリティ分布や破壊様式(破壊開始点や破壊の伝播経路)等の情報が不可欠であることが、改めて認識された。