

6. むすび

地震調査研究推進本部による、「今後の重点的な調査観測計画について（一活断層で発生する地震及び海溝型地震を対象とした重点的観測、活断層の今後の基盤的調査観測の進め方）」に基づき、平成17年度から、糸魚川－静岡構造線断層帯（以降、「本断層帯」）における重点的な調査観測が5ヵ年計画で始まった。本年度は、この重点的調査観測の最終年度にあたり、各項目の調査観測の最終取りまとめを行うとともに、サブテーマ間で成果の相互比較を行い、強震動予測に用いる断層モデルの妥当性についても詳細な検討を行った。第3章で述べたように、各調査観測は5ヶ年にわたり順調に進行し、本断層帯の性状や活動履歴、周辺の地震・地殻変動活動について幾つもの重要な知見を得ることができた。また、本断層帯周辺の人口密集地域である松本・諏訪及び長野盆地の地下構造調査及びモデリングも進展し、断層帯そのものに関する知見を合わせて、本断層帯で発生する可能性のある地震についてその強震動予測を高度化することができた。ここでは、各サブテーマの成果を断層帯の性状、本断層帯周辺の地殻活動、及び強震動予測の高度化の3つの観点からまとめ直し、本調査観測で残された課題を最後に述べることとする。

6.1. 断層帯の性状

反射法・重力探査は、断層形状を推定する直接的且つ最も有効な手段である。本調査観測及び先行するパイロット的な重点的調査観測による調査によって、本断層帯が、諏訪湖を挟んで南と北でその構造が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、現在では逆断層すべりと左ずれが起き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、西傾斜の面が糸静線の主断層であることが明瞭となった。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。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、糸静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。反射法データで見える限り、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ものの、そのすべり分配は表層現象であると考えられる。断層周辺の不均質構造解明を目的とした電磁気探査では、これまで不明であった本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。諏訪盆地直下に存在する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字型の形状を示す。微小地震の震源位置と比較すると、U字の低比抵抗体周辺に地震が起きており、この低比抵抗体は、せん断帯であると考えられる。一方、南部セグメント南端では、断層の西側の低比抵抗層が、断層位置から西側に向けて徐々に深くなるなど比抵抗が基本的に西傾斜の構造を持つことがわかった。これらの結果は、反射法地震探査で得られた結果とほぼ調和的である。

地質学的調査（変動地形調査や活断層履歴調査）では、この断層帯の変位量分布や過去の活動履歴に新しい知見が出された。変動地形調査においては、航空写真判読や現地地形調査、高解像度DEM等種々の方法から活断層線の位置・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、断層帯全域の変動地形情報のデータセットを WebGIS 形式で完成させることができた。更に、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。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。さらに各区間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、区間毎のモーメントマグニチュードを推定し、本断層帯に発生する地震の規模予測に貢献した。また、活断層履歴を明らかにするために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。その結果と既存の調査結果を合わせると、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、その一方で、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。これらの結果から、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北部と中部で異なる時期に活動した可能性があり、本断層帯北部と中部の地震破壊が連動しない場合があり得るといふ重要な知見が提出された。

6.2 断層帯周辺の地殻活動

本調査研究で行われた地震観測や地殻変動観測は、断層帯周辺に既存観測網を補完するように機動的観測点を設置し、断層帯及びその周辺で進行している地殻活動を精度よく捉えることを目指した。また、SAR のような宇宙技術を導入し、技術的進展を図った。地震・GPS 観測における既存観測網と機動的観測の連携は極めて有効で、断層帯周辺の地震活動や地殻の変形様式がこれまでにない精度でわかったと言えよう。

地震観測では、長期機動地震観測とともに稠密アレー地震観測も実施され、断層帯における詳細な構造や応力場の様子が明らかとなった。トモグラフィ解析によれば、地震波速度構造は、糸静線に沿って上部地殻 (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、その地域的特徴の差が断層セグメンテーションに関係している可能性がある。一方、下部地殻においては諏訪湖を中心として南北に広がる低速度域が見られるが、その低速度域は北部では糸静線の東側に、南部では糸静線の西側に分布する。もし、地殻深部の流体がこの低速度域形成の原因であるならば、その流体は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す可能性が示唆される。得られた精密震源分布によれば、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、本断層帯の活動である可能性があるが、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していない。

GPS 観測による詳細地殻変動観測から得られた地殻変動は、本断層帯の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。更に、断層すべりによる変形のモデル化を実施した結果、断層帯中部では、ほぼ鉛直な断層で接したプロ

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。

6.3 強震動予測

これまで述べてきた成果を踏まえ、本断層帯における想定震源モデル及び破壊のシナリオを作成し、強震動評価及びその高精度化を行った。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で強震観測を実施して盆地内における地震波伝播や地震動増幅特性を評価するとともに、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た。

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ため、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種類のモデルを想定した。両モデルの特徴を鑑みて4つの地震シナリオを作成し、強震動評価を実施した。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、地震動の程度は、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本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。また、地表での震度分布を見ると、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た。強震動評価において単に断層の形状だけでなくアスペリティ分布、また評価される地点の地下構造の情報が如何に重要であるかということを示している。

6.4 今後の課題

一般に内陸地震断層の特性の解明は、プレート境界地震に較べて難しい。それは、規模が小さいこと及び内陸部の構造がプレート境界ほど単純ではないことに起因する。更に、活動間隔が長いこと、その履歴に不明の点が多く残されている。このような状況を打破するため、本調査観測では地球物理学的調査と地質学的調査を連携させ、断層の特性解明に取り組んだ。その結果として得られた断層帯の形状については、特にその中部から南部においてこれまでの知見を大きく変えるものであった。例えば、反射法地震探査から得られた断層面は、諏訪湖の北端でその形状が急変している。このような知見は、活断層履歴調査から得られた過去の地震活動と連動性の評価と合わせ、この地震の破壊様式を拘束する重要な情報である。内陸地震のアスペリティ分布を推定することは、非常に難しい。しかし、本調査観測では詳細かつ面的な変動地形調査を行うことによって、本断層帯のアスペリティ分布に一定の拘束条件を与えることができた。本調査で得られた断層の性状と断層周辺の地下構造モデルによって、精密な強震動予測を実施することができた。

しかしその一方で、本調査観測で得られた本断層帯中部の構造については、反射法地震探査と動地形学的調査の間で大きな差が出た。即ち、前者は東傾斜低角断層を強く示唆するのに対し、後者は少なくとも地殻浅部では高角断層を示唆するものであった。GPS 観測で得られた変動データも、この高角断層モデルを支持する。しかし、本調査観測で得られた精密地震分布によれば、特に牛伏寺断層周辺の活動は地殻浅部に限られており、GPS 観測から得られる固着域とは整合しない。これまでのところ、これらの成果に対する統一的理解は見つかっていない。本調査観測における強震動予測においては、地震のシナリオとして全体が破壊する場合及び諏訪湖北端の構造急変域 (segment boundary) の北と南がそれぞれ破壊する場合を考えた。しかし、断層履歴調査によれば、本断層帯北部と中部における連動性についても多様性のある可能性が提出された。更に GPS 観測によれば、本断層帯北部の変形様式は、少なからず非弾性的特徴を伴っている。とすれば、この部分が、脆性的破壊を引き起こすかどうかは今後の検討課題となろう。従って、この断層帯及びその周辺で進行している地殻内の運動特性や断層の破壊過程は、これまで考えられてきた以上に時間的にも空間的にも複雑なメカニズムに支配されていると考えられる。

上記の問題を解決するためには、より稠密且つ多項目の調査を実施し、その結果の相互比較し且つ齟齬を解消しながら知見を高めていく努力が必要なことは言うまでもない。しかし、本断層帯のような内陸断層は山岳地域に拮がっている場合が多く、調査項目によっては新たなデータ取得が困難な場合も想定される。本調査観測においては、種々の調査から断層の挙動を推定するという、言わば帰納的アプローチを取った。しかし、既往研究成果がある程度揃った段階で、それらの情報を可能な限り取り込んだモデリングを行うことによって、地質スケールの変動から現在の地殻活動までの総合的予測を目指した“演繹的”調査研究が重要となると考える。このようなモデリングの結果として、今後の研究進展のために重要な調査領域や鍵となる物性情報を絞りこみ、それらに焦点を当てた新たな調査観測を行うことが有効且つ効率的と思われる。また、このようなモデリングから、地震破壊のシナリオを予測し、それに対して強震動予測を行うことによって更なる高度化を図ることが可能となる。