

### 3. む す び

推進委員会主査 岩 崎 貴 哉  
(東京大学地震研究所教授)

これまでの研究によれば、糸魚川－静岡構造線断層帯中部は、諏訪湖を境にして南北でその構造が大きく異なっていることが示唆されてきた。この構造線断層帯の深部までの構造や運動の特性、地殻活動の詳細については、この断層帯沿いに発生する大地震の規模予測や強震動予測に不可欠な情報であるにも拘わらず、まだ多くの不明な点が残されている。平成 14 年度より 3 年間実施されたパイロット的な重点的調査観測では、構造線断層帯の形状・物性解明、地殻活動把握及び地震活動履歴解明を 3 つの柱として掲げ、有効な調査手法の検討も含めた調査研究を実施してきた。

#### 1. 糸魚川－静岡構造線断層帯の形状・物性解明のための調査研究

本調査研究では、糸魚川－静岡構造線の構造が大きく変わるとされる諏訪湖を挟んで北と南に調査地域を設定し、反射法地震探査・重力探査及び電磁探査によって、この構造線の地域特性を明らかにすることを目指した。この面で、本調査観測は直接的な成果をあげたと言える。

反射法地震探査・重力探査では地下 4000-5000m までの構造がイメージングされ、諏訪湖を挟んでその北と南側で大きな地域差の存在することが明らかとなった。北側（松本地域）の調査では、松本盆地東縁断層は東傾斜で、その深部（>2 km）での傾斜が比較的低角（30-40 度）であることが判明した。また、牛伏寺断層は、極浅部（地表下 100 m ぐらいまで）を除けば、高角東傾斜であることがわかった。これらの結果より両断層は深度約 1.5 km で収斂すると予想される。変動地形学的データから見て、牛伏寺断層はほぼ純粋な横ずれ断層であるのに対し、これに併走する松本盆地東縁断層のすべり速度は、垂直成分を持つ。従って、糸魚川－静岡構造線は深さ 1.5km 以浅で高角の横ずれ断層（牛伏寺断層）と東傾斜の逆断層（松本盆地東縁断層）とに分岐し、断層帯内で slip partitioning が生じていると考えられる。しかし本調査の結果によれば、これはあくまで表層現象に過ぎず、地下深部では斜めすべりが起こっていることになる。断層面が 40 度ないしそれ以下の比較的 low angle で傾斜しているにもかかわらず横ずれが卓越しているということは、糸魚川－静岡構造線活断層帯の断層面の強度が低いことを示唆している。一方、諏訪湖の南側の富士見地区においては、糸魚川－静岡構造線活断層帯の主断層面が、松本地域の場合とは逆に、西傾斜であることが分かった。西傾斜の主断層面は、浅部（深度数 100 m）で若宮断層（左ずれ）と青柳断層（スラスト）の併走する 2 断層に分岐していると推定される。従って、ここでも松本地区と同様に、断層帯内で slip partitioning が生じている可能性が高い。

本調査観測ではより総合的な構造の解明を目指すために、電磁探査の測線を反射法地震探査・重力探査と同一の調査地域に設定した。その結果、反射法・重力探査と調和的かつ補完的な興味深い知見を得ることができた。諏訪湖の北側（松本地域）の牛伏寺断層周辺では、牛伏寺断層は深度 1km までは高比抵抗を示し、それより深部では調査域全体にわたって東落ちの低比抵抗異常が捉えられた。この低比抵抗は、牛伏寺断層の西方にある東落ちの逆断層（松本盆地東縁断層の南方延長）によって形成された可能性がある。この結果は反射法・重力探査から判明した東落ちの構造と調和的で、松本盆地を埋めた第四紀の堆積物に対応する可能性が強い。一方、諏訪湖の南側（富士見地区）で行われた調査では、青柳断層よりも東側の八ヶ岳西麓において、断層を境として比抵抗基盤が急激に深くなることがわかった。高比抵抗基盤より上位の低比抵抗は、火山性砕屑物であると考えられる。青柳断層の地表下数 1km 程度までは基盤が南西落ちの傾向を示し、若宮断層より西側では逆に北東落ちの傾向がある。しかしながらサンアンドレス断層で見られるように断層自体の破碎帯が低比抵抗異常を示すことはない。また、測線西端の深度 2-3km にはある低比抵抗帯は、反射法地震探査で見られた青柳断層の深部延長上の reflective な層に対応すると考えられ、断層深部の流体に富む破碎帯に伴う構造の可能性もある。

また、電磁探査で求められた比抵抗構造と地震活動との対応を示唆する結果の得られたことも重要な成果と言える。例えば、2002 年 10 月に発生した群発地震の震源は、牛伏寺断層よりも東側の深度 1-2.5km に求められ、本調査観測で求められた低比抵抗帯が東側に途切れる構造境界に位置する。更に、牛伏寺断層下の深さ 5km にある低比抵抗帯周辺で、近年地震活動が活発である。富士見地域での広域的な調査でも、測線の西側の深度 10km 以深に顕著な低比抵抗異常が見られ、気象庁の 1 元化震源はこの低比抵抗帯の上に集中している。一般に、低比抵抗帯の成因として地殻内流体が大きな役割を果たしていると考えられる。今回得られた低比抵抗帯と微小地震の対応は、地震の発生と地殻内流体の関連性を示すものとして、断層帯における地殻活動の物理的なメカニズムを考える上で重要である。

## 2. 糸魚川ー静岡構造線断層帯周辺域における地殻活動把握のための観測研究

構造線断層帯及びその周辺における地震活動・地殻変動を観測するために、本調査観測ではテレメータ観測及び稠密アレー観測を実施するとともに、得られたデータを既存観測網データと組み合わせて解析することによって詳細な活動様式を求めることとした。これらの観測項目は、長期間のデータの蓄積が必要とされるが、その有効性を示す結果が出つつある。

本調査観測でのテレメータ方式自然地震観測点は、合計 5 ヶ所に設置された。本調査観測の間に Hi-net 観測点の整備も進み、構造線断層帯周辺の観測網が充実した。これらの観測点全てが稼働した期間はまだ短いが一ヶ月平均で 1 割程度の震源決定数が増え、およそ M0.3 程度までの地震を検知していると考えられる。従って、観測点の整備によって

検知能力に向上が見られたと言えよう。また、観測点整備とともに検測手法の検討が実施され、震源決定計算において観測点補正值の導入、Double-Difference 法の適用、震源決定における水平方向の構造変化の考慮などによって、震源位置の信頼性が向上するとともに、ルーティン的に決定した一元化震源で不明瞭であった震源分布パターンの特徴がかなり鮮明になった。今後データが蓄積すれば、本調査観測で開発した処理手法を用いることによって糸魚川－静岡構造線断層帯域の詳細な震源分布が把握できると考えられる。従って、本調査観測により設置した5観測点は、今後の地震活動を観測するために有効な観測点であると考えられる。

稠密アレーによる自然地震観測では、3カ所の稠密臨時自然地震観測と、1カ所の線状稠密臨時自然地震観測を実施して、地震活動の把握と地殻構造調査に資するデータを取得した。この稠密高精度の観測によって震源決定精度が向上し、また、過去の制御震源探査や本調査観測で明らかになった断層面の構造を参照することによって、地震活動領域と断層面との位置関係が明らかになった。構造線北部の青木湖周辺域における観測では、定常観測（一元化震源）の約4倍の数の微小地震の震源を決定することができ、その中には繰り返し発生する群発地震活動も含まれていた。この調査観測で得られた震源は、一元化震源に比べてより狭い領域に集中していた。即ち、最も活発な活動の深さは14kmから16kmであり、この地域の糸魚川－静岡構造線断層帯の断層面より有意に深いことが分かった。更に、少なくとも3カ所に集中的活動（クラスター）が存在していることが分かった。最も浅いクラスターは深さ約8kmに位置しており、断層活動との関係が考えられる。富士見地域の地震波速度構造をトモグラフィ法で求めた結果、八ヶ岳西麓の火山性砕屑物のある領域と、この地域の糸魚川－静岡構造線断層（青柳断層）の上盤側の低速度領域の存在が明らかになった。また、3次元的速度構造を考慮すると震源の深さは従来の報告より3-5km浅くなり、この領域の浅い地震活動の一部は、断層活動と関連していることが示唆された。

GPSによる観測は、キャンペーン観測方式をとった。3年間の繰り返し観測結果によれば、キャンペーン観測点の座標値の再現性が連続観測点と比べても遜色なく、従ってこの観測方式の有効性が示されたと言える。1年間あたり僅か1週間程度の観測であるにもかかわらず、本調査観測の結果から計算された地殻変動速度ベクトルが、この地域の地殻変動速度をかなり正確に表現していることがわかった。例えば、大町市から上田市に至る線上では、これまでの連続観測と同様に松本盆地東縁断層周辺に集中した短縮変形の傾向を示す。一方、白馬村から長野市に至る線上では、東西圧縮変形が神城断層と長野盆地西縁断層、さらにはその間に挟まれた地域で分配されていることが示唆された。また、牛伏寺断層付近では断層に平行な方向の変位成分が断層と直交する方向に変化する傾向があり、左横ずれ的な剪断歪みが蓄積しているものと考えられる。この様に、本調査観測を通して、これまで一部の測線沿いを除くと非常に低い空間分解能でしか見えていなかった構造線北部周辺域の地殻変動の様子が明らかになりつつあると言える。観測期間中に地殻変動傾

向が変化しないという仮定のもとではあるが、このような稠密なGPSのキャンペーン観測は断層帯周辺の地殻変動の詳細分布を明らかにするために有効な手段であると言える。

干渉SARによる解析は、新しい観測技術の有効性を検証する目的で実施されたものである。牛伏寺断層、松本盆地東縁断層を含むデータで解析が行われ、JERS-1/SAR データから得られたパターンの中には活断層の分布と関連するような位相変化パターンが見られた。また、波長の短いマイクロ波を用いるために分解能が高いとされるERS-1及びERS-2データでは、植生の影響の少ない盆地部・平野部の活断層であれば、その周辺の地殻変動を調査することは可能との見通しを得た。しかし、前者のデータについては軌道縞の除去等が、後者について大気中の水蒸気の影響の除去等が、今後の処理技術の課題として残されている。

### 3. 糸魚川ー静岡構造線断層帯の過去の地震活動履歴解明のための調査研究

本調査観測では、構造線断層帯の過去の地震活動履歴を解明する目的で、地質学的調査・資料調査を実施してきた。下葛木断層におけるトレンチ・地層抜き取り調査の結果、断層の活動時期、平均変位速度に関して以下の新たな知見を得た。調査地点周辺の地形発達史とトレンチ壁面の層序・年代から、下葛木断層の横ずれ平均変位速度は最大で5.5mm/yrと算出できる。この結果、下葛木断層の平均変位速度は、従来の1.5mm/yrという推定を上回る1.5~5.5mm/yrとなった。また、トレンチデータの解析手法の高度化が試みられた。即ち、ベイズ理論に基づく改良年代決定ルーティンを用いて、イベントの年代を定量的に求めた。その結果、糸魚川ー静岡構造線における並柳トレンチと中山トレンチの年代再計算結果の比較から、中山トレンチについてこれまでの推定法では検知できなかった不良データを検出でき、イベント年代の決定の信頼性を向上させることができた。

高解像度DEM等に基づく変動地形情報解析は、前出の干渉SARによる解析と同様に新しい観測技術の有効性の検証するために本調査観測に取り入れたものである。具体的には、高解像度DEM・リモートセンシング・GISに基づいて変動地形の数値情報解析を行い、断層変位地形の3D情報の整備とそれをベースにした断層活動評価・監視計画の雛形の作成を目的として実施した。LiDAR(レーザーレーダ)計測は糸魚川ー静岡構造線断層帯の牛伏寺断層付近で実施され、50cmメッシュDEMを作成した。その結果、植生のために上空から判別不能な変位地形が明瞭に観察され、断層線の位置情報の高精度把握、複数の横ずれ変位地形の確認、撓曲を含む変位地形の確認に有効であることがわかった。更に、糸魚川ー静岡構造線断層帯についての数値解析を可能にするPOS/IMU計測を併用した空中写真撮影及び航測図化を行い、10mメッシュDEMの作成及び活断層位置の3次元データ解析、データオルソ画像作成を行った。これによって、断層の累積変位量を多地点で計測して強震動予測のためのデータを提示できる最も基礎的なシステムが構築された。また、高度な幾何補正を施した航空写真を用いることで、活断層線の高精度な位置情報取得や、地震前後の地殻変動量計測が可能になり、活断層監視を目的とした活断層情報システム(活断層GIS)のモデ

ル開発が可能となった。

断層帯付近の過去の地震活動解明のための調査研究においては、構造線上に歴史時代に生じたと考えられる正徳4年(1714)小谷地震、宝暦元年(1751)越後高田地震、および安政5年(1858)大町地震の詳細震度分布図を得た。その結果、小谷地震と大町地震は糸魚川ー静岡構造線断層帯が滑って起きた地震であったことがほぼ確実になった。この2つの地震の震度6以上の震域は、糸静線に沿いつつもの西側にはほとんど被害域が延びておらず、東側には張り出して次第に震度が弱まっていくような分布を示しており、反射法・重力探査から判明した東下がり傾斜の断層面の形成と調和的である。宝暦元年(1751)越後高田地震の震源は糸静線から20 kmほど東によっているが、実は糸静断層のやや深い面でのすべりによる可能性がある。この地震も被害域の西縁は明瞭に糸静断層線できわめて明瞭に縁取られているのに対して、東側の震度分布はしだいに、弱まっていく様子が判明した。また、この構造線ではM6-7クラスの地震が発生していることがより明確なり、今後の地震規模予測や強震予測のための貴重なデータを提供した。

以上述べたように、3年間にわたる本調査研究は、概ね順調に実施された。構造線断層帯の形状・物性解明については、反射法探査・重力探査及び電磁探査によって諏訪湖を挟んでその北部と南部で構造に大きな差があることが明らかになった。今回の調査で取得した反射法・重力及び電磁探査データは相補的であり、幾つかの調査項目からなる多面的観測が、断層帯の構造解明に極めて有効であることが示された。更に、電磁探査からは、地殻内流体が関与する可能性のある構造が出され、地殻活動を解釈する上での拘束条件を提供した。

また、地殻活動把握のための調査研究では、既存の地震・GPS観測網に重ね合わせる形でテレメータ観測や機動的稠密観測が進められた。その結果、これまでない詳細な震源分布や地殻変動のパターンが得られ、その中から調査域の地殻活動の特徴が抽出されつつある。本調査観測では断層面位置と微小地震発生域との位置関係が明瞭になった。このような知見は、断層帯及びその周辺で進行しつつある歪・応力の集中プロセスの解明に必要な不可欠のもので、本調査観測のような精密な地下構造イメージングと高精度の地震観測の密接な連携によって始めて実現されたものである。糸魚川ー静岡構造線域の地殻活動はプレート境界域に比較して低く、変動量も小さい。このような状況の中で、断層帯に起因する地殻活動情報を引き出すには、高密度・高精度の地震・GPS観測を長期的・継続的に実施することが極めて重要である。また、SARによる変動解析も実用に向けて更に進展させる必要があろう。

過去の地震活動履歴解明のための調査研究についても、進展があった。断層帯の地殻活動及び地質時代まで溯った活動履歴解明のための新技術として高解像度DEM等に基づく変動地形情報解析を実施した。その結果、植生による被覆のために上空から判別不能な変位地形が明瞭に観察され、断層線の位置情報の高精度把握が可能となるとともに、変位測量

も可能となった。この新手法は、トレンチ調査と組み合わせて、断層帯の運動による長期間の変形を比較検討する意味で重要な役割を果たすこととなろう。資料調査から正徳 4 年(1714)小谷地震と安政 5 年(1858)大町地震の震度分布調査が進展し、これらの地震に対応する断層面は、東下がりである可能性が高いことが示された。この結果は、本計画で行った反射法・重力探査及び電磁氣的探査の結果を、実際に起きた地震から裏付けるものといえる。また、この構造線に沿って M6-7 クラスの地震の発生していることが明瞭となった。このような知見の集積は、将来の地震規模予測や強震動予測にも資するものである。

本調査観測によって、糸魚川-静岡構造線断層帯に関する理解が大きく進展した。また、このような内陸断層系を調査する有効な手法が幾つか提出されたことも大きな成果である。一般に、内陸側で発生する地震については、内陸域への歪・応力の蓄積、特定断層への応力の集中の過程がまだ十分わかっていない。これらの現象は不均質構造を持つ場の中で複雑な物理機構に支配されていると考えられ、特定の観測だけでその全貌を解明することは困難であろう。この意本調査観測で実施したような多面的な観測は、極めて重要である。各調査項目間の連携を強化して、得られた成果に対してより総合的・統一的な解釈を行うことによって内陸断層系の理解が一層深まり、強震動予測に貢献するものとする。