



「陸域地下構造フロンティア研究」 の現状

熊澤 峰夫 國友 孝洋 脇田 宏
吾妻 瞬一 安藤 雅孝 何 培明*

陸域地下構造フロンティア研究プロジェクト
* 東濃地科学センター

資料番号: 104-9

Present Conditions of the "Earthquake Frontier Research for
Terrestrial Subsurface"

Mineo KUMAZAWA Takahiro KUNITOMO Hiroshi WAKITA
Shun-ichi AZUMA Masataka ANDO Peiming HE*
Frontier Research for Terrestrial Subsurface
* Tono Geoscience Center

地震の発生機構の解明を目的とする「陸域地下構造フロンティア研究」は、平成8年度より本格的に開始した。本研究は、①地殻内部の微小変動を検知するための新しい地下探査法アクロスの開始、②東濃鉱山の坑道と水位観測井における連続観測による地下水の変動と地震活動との関連の解明、③跡津川断層系の地殻変動及び茂住祐延断層を貫く調査坑道での活断層の調査、の3つのテーマからなる。①では、東濃鉱山に設置した音波アクロス震源により種々の実験を行いつつ、信号源、観測システム及び解析法の新規開発を行っている。また、②と③では、主な観測機器の設置が完了し、調査研究を継続している。本報告では、これらの研究内容及び現状を紹介する。

"Frontier Research for Terrestrial Subsurface" started in April 1996 to clarify the mechanism of earthquake occurrence. This research consists of three themes. First, development of ACROSS (Accurately Controlled Routinely Operated Signal System), a new subsurface investigation method for detecting the slight deformation in the crust. Second, study on the earthquake-groundwater interaction, with some observation in a gallery and wells at Tono mine. Third, studies on the crustal deformation in the area of the Atotsugawa active fault system and on the mechanism of fault formation in an investigation gallery across the Mozumi-Sukenobu fault of the fault system.

In the first theme, experiments on the Acoustic-ACROSS source at Tono mine and development of new sources, observation systems and analysis methods are being achieved. In the second and the third themes, main instruments have been installed, and the observations are underway. This paper introduces outlines of contents and present conditions of those three themes.

キーワード

アクロス、地下構造、物理探査、地下水、東濃鉱山、跡津川断層系、地殻変動、断層破砕帯
ACROSS, Subsurface Structure, Geophysical Exploration, Groundwater, Tono Mine, the Atotsugawa Fault System, Crustal Movement, Fault Fracture Zones

1. はじめに

阪神・淡路大震災を契機に、地震防災対策特別措置法が平成7年6月に成立した。同特別措置法に基づき科学技術庁長官を本部長とする地震調査研究推進本部が総理府に設置され、国内の地震観測網を強化するとともに今後の地震研究を強力に推進することとなった。これを受けて科学技術庁においては、傘下の研究機関（動燃事業団、理化学研究所、海洋科学技術センター、日本原子力研

究所、宇宙開発事業団）により地震総合フロンティア研究を進めることとした。

動燃事業団では、地下深部での地殻の動きに着目し、地震発生機構の解明及び新たな地震観測手法の開発を目的とする「陸域地下構造フロンティア研究」を実施している。本研究は表1に示す、(1)地震発生に関する研究、(2)地震発生と地下水挙動に関する深地層研究、(3)活断層帯での地殻活動研究の3つの研究テーマからなり、図1に示す岐

表1 陸域地下構造フロンティア研究の概要

テーマ	内 容	目 標	現 状
(1) 地震発生に関する研究	新しい地下探査法アクロス（詳細は後述）の開発。 (地下の地震波速度及び電気伝導度の分布構造とその状態を高分解能で観測することができる)	①広範囲に適用するアクロス技術の実用化。 ②地震発生場における物理過程や震源核の時間的変化追跡による、地震発生機構の解明。	①東濃鉱山に音波信号送信装置（音波アクロス）を構築し、地下構造の微小な時間変化の追跡に必要な高い精度の送信技術を確認した。 ②送受信試験による送受信技術の蓄積、受信装置、受信データ解析法及び新型送信装置の開発中。
(2) 地震と地下水挙動に関する深地層総合研究	地下の岩石の物理学的特性、地下水の水理特性・化学的特性、地下ガスの化学特性の変化の連続観測、及びその地震活動との関連について研究。	①観測ネットワークの強化と、多角的観測データの蓄積。 ②地震を含めた地殻変動に伴う地盤や地下水の挙動調査及びメカニズムの解明。	①東濃鉱山坑内と周辺で、岩盤の歪と傾斜、岩盤及び地下水からのラドン放出量、坑内の気体組成、試験孔内の地下水位と水圧等の連続観測中。 ②新たな総合観測井の掘削工事や観測機器の設置を実施中。
(3) 活断層帯での地殻活動研究	活断層の活動様式、形成過程、内部構造と周辺場の特徴等についての長期観測及び調査研究。	①総合的な活断層研究模式地の構築。 ②断層活動による地震発生予測に必要な基本的要素の抽出と地震発生環境の解明。	①跡津川断層系を対象とし、精密地殻変動観測、集中地震活動観測及びガイドウェーブ（詳細は後述）観測を開始。 ②茂住一枯延断層を横切る活断層調査坑道内で、断層破砕帯調査、応力測定、精密弾性波測定、レーザ測距、岩盤比抵抗、地下水調査等を実施する。

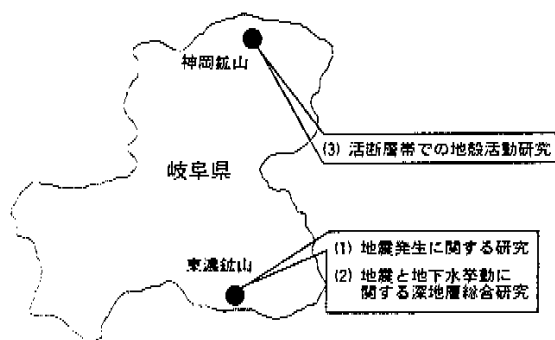


図1 調査研究実施位置図

岐阜東濃鉱山及び神岡鉱山において、各種の観測及び研究調査を行っている。本稿では、これらの研究の内容と現時点で得られた成果を紹介する。

2. 地震発生に関する研究（アクロス研究）

2.1 研究の目的

アクロス(ACROSS)は、精密制御定常信号システム (Accurately Controlled Routinely Operated Signal System) の略称であり、地震波速度の分布構造(音波アクロス)及び電気伝導度の分布構造(電磁波アクロス)をリモートセンシングで解明し、さらに地殻の微小変動を常時モニタするための地下探査法として名古屋大学で開発された^{1)~5)}。これは、地下の構造とその状態までを高分解能で観る「光と目」としての機能を有する総合的な探査手法であり、地震発生場解明の基盤となる。そこ

で、陸域地下構造フロンティア研究では、名古屋大学の主力研究者を引き取り、平成8年度からアクロスの組織的研究開発に着手した。アクロス技術を適用する具体的な目標は、10m程度の小規模地域の精密物理探査から、災害をもたらすかもしれない地震や噴火の発生が予想される地域の地殻深部における歪み・応力や地下流体の状態等を常時モニタする国土予測管理にまで広範に及ぶ。

ここでは、アクロス技術の実用化に向けた技術開発研究の成果のうち、特に音波アクロスを中心に、アクロスの概要、開発の現状、及び蓄積しつつある実証データの例を示し、広範な目標を視野に入れた将来展望を述べる。

2.2 アクロスの概要

アクロスは、地下に向けて信号を発信する送信装置、地中を通った信号の受信装置、及びその受信データの解析法の三要素で構成される。

送信装置は、周波数と位相を精密に制御した多周波数チャンネルの正弦波信号を連続して地下に送信するものである。弾性波用送信装置(震源装置)の場合には、

- ①地盤の非破壊
- ②振動公害を起こさない

という2つの条件を満たす必要がある。アクロスでは、送信波が既知で不変であることを前提として、受信波の変動を観測することで、信号伝搬経路にある地下の状態の時間変動をモニタする。地盤が破壊されると波の放射効率など送信条件が変化するので、精密な地下モニタのためには①の条

件は欠かせない。そのために、震源装置が発生する力が設置岩盤に与える応力を岩盤の疲労破壊応力以下にする岩盤カブラ（強固なコンクリートブロック内に震源本体を仕込み、広い面積で地盤に振動を伝えることで地盤の破壊を防ぐ役割を果たす）を装備する。②のためには、送信装置の設置場所にも依存するが、当面、人体に感じられる範囲が50m以下になる大きさに発生力を限定する。このような装置から送信される波動の振幅は、薬量の大きい爆発震源等と比べると比較にならない程微弱であるが、周波数が非常に精密に制御されているので、信号よりも圧倒的に大きいノイズの中からでも信号を検出できる。また、多数の装置からの同時送信も、周波数帯域を少しずらせば混信することはなく、能率的かつ連続的な地下構造のモニタが可能である。

受信装置は、送信波に正確に同調できる多周波数チャンネル時間区間蓄積記録計（TSS：Time Segment Stacking recorder）である。TSSは、送信された波動を振動センサーで検出し、送信波の周期の整数倍の時間区間ごとに自動的に区切って積算平均化し、記録する装置である。記録データのS/Nは積算回数の平方根に比例して上がる。送信装置と受信装置は、それぞれGPS（Global Positioning System：衛星に搭載された原子時計を基準に、観測点の位置と時刻を精密に決定するシステム）時計に同期して制御することによって（世界中どこにあって）相互に1μ秒以内の誤差で同期を取ることができる。

データ解析法としては、存否法⁶⁾をアクロス用に発展させた存否セプストラム法⁷⁾の研究が行われた。これは、連続的に送受信される限られた周波数範囲の比較的少数の正弦波を用いて、複数の波の伝播時間を精密決定する手法である。また、波の伝播速度と減衰定数の周波数依存性の解析もできる。

2.3 これまでの開発と成果及び研究の現状

研究の第一段階として、実用試験及び実用化に向けた技術開発を主目的とした音波アクロス送信装置を設計製作し、平成8年7月には最大発生力がほぼ20tonf（20,000kg重）の縦置き型2台、横置き型1台の合計3機の震源を東濃鉱山内に設置した。この送信装置は、偏心質量の回転をサーボモータによって精密に位相制御する、いわゆる回転型アクロス（図2）で、3機の最大発生周波数はそれぞれ25、35、50Hzである。縦置き型はP波及びSH波、横置き型はP波及びSV波の送信試験

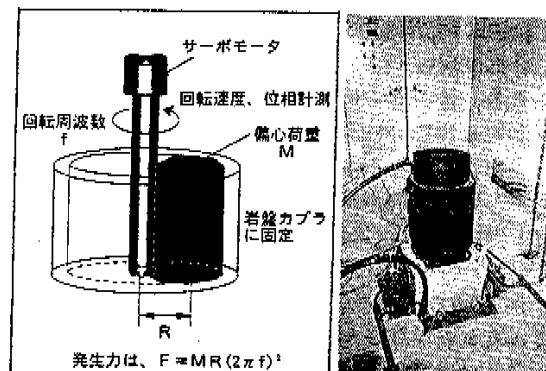


図2 回転型音波アクロスの原理と概観

を意図したものである（図3）。これらの送信装置は試験用ではあるが、東濃鉱山とその近傍の地殻構造探査及び地下構造の時間変動のモニタの他、将来は、「東海地震」の想定震源域断層面をモニタするために、御前崎から土岐市に至る「地中音波送信点アレイ」の一つへと移行することも念頭においている。

この装置設置以降、その性能評価のための種々の試験及び精密制御のためのシステム開発を行ってきた。以下その中の幾つかの結果を紹介する。

(1) 送信装置試験

アクロス震源の制御は、フロンティア研究により開発された精密制御・遠隔操作システムにより、下記の精度に達した。

1) 回転周波数は、刻時精度0.15μ秒のGPS時計

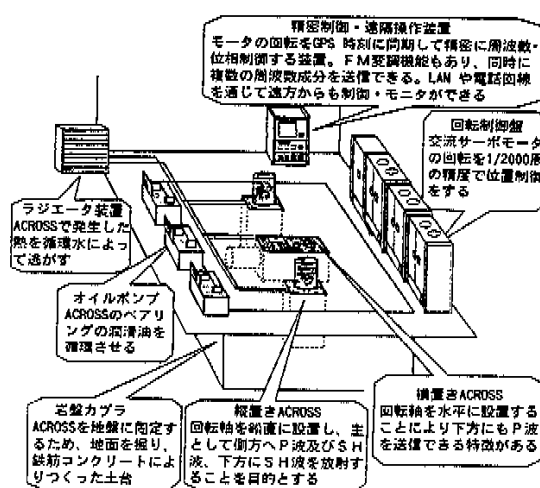


図3 東濃鉱山地中音波送信所の概念図

を基準として、一定周波数回転の場合は36pHz (3.6×10^{-11} Hz)、周波数変調 (FM) 送信の場合は58nHz (5.8×10^{-8} Hz) 以内の精度で設定できる。モータの回転ムラにより、1回転ごとに測定した見かけ周波数には1mHz程度のランダムな揺らぎが現れるが、それは高調波成分であり、送信波の観測精度には全く影響しない。

2) 偏心質量の位相 (モータの位相) は、 7×10^{-4} rad程度のランダムな揺らぎと高精度で予測可能な直線的ドリフト (最大 6.583×10^{-4} rad/h) が存在するだけで、極めて安定している。モータ位相は、1秒ごとに1周の1/8000 (8×10^{-4} rad) の分解能でモニタでき、適宜の位相修正やデータ取得後の補正により、設定値に対し常に 8×10^{-4} rad以内に収めることができる。

このような高い周波数精度と長期にわたる位相の安定性を確保したことにより、長時間のスタッキング (積算平均化) によるS/N向上の効果が保証され、地下構造の微小な時間変化の追跡が可能となった。また、モータの回転速度をGPS時刻に同期して精密に加減速することを可能とし、多周波数チャンネルの正弦波の同時送信技術も確立した。

上述の精度は、サーボモータの性能やGPSの刻時精度をほぼ最大限に引き出したものである。それ故に偏心質量回転型送信装置の制御に関する開発研究は一段落ついたと考えてよい。現在は、FM変調波形の最適化を進めつつ、偏心質量回転型よ

りも安価でエネルギー効率がよく、使い勝手にすぐれた普及型送信装置の開発研究に重点を移している。大量生産可能な普及型送信装置が開発されれば、アクロス震源のポテンシャルは飛躍的に向上することが期待される。多数の送信装置を組み合わせることで多次元アレイを構成することにより、送信波を指向性ビームとして地下の特定領域に照射することができ、より遠方 (地下深部) の構造のより精密かつ効率的探査を実現できるからである。

(2) 受信装置

TSSも目標の性能が達成され、以下の実証実験に使用している。

1) 送信受信実証実験 1 (信号強度と微小信号受信試験)

図4は、25Hz・10tonfのアクロス信号の距離による減衰を示している。震源近傍では、50m離れると地動加速度振幅に換算して 0.01 m/s^2 (約 10^{-3} G ; 人間が感じる最低の加速度) 以下となっている。振幅は、ほぼ距離の2乗に反比例して減少している。3km離れば $1 \mu \text{ kine}$ (10^{-8} m/s) 以下の振幅となる。日本で最も静かな観測点でも、そのノイズレベルは数 $\mu \text{ kine}$ 程度あり、5km以上離れば既存の微小地震観測にも全く影響を与えない信号レベルになる。ただし、これは10tonfによる値であり、最大出力 (20tonf) の場合は7km以上となる。なお、アクロス信号は、17km先でも1時間程のスタッキングで明瞭に捉えられている。信号の振幅は時間波形で見ればノイズレベルの1/1000以下であり、それにも関わらず検知で

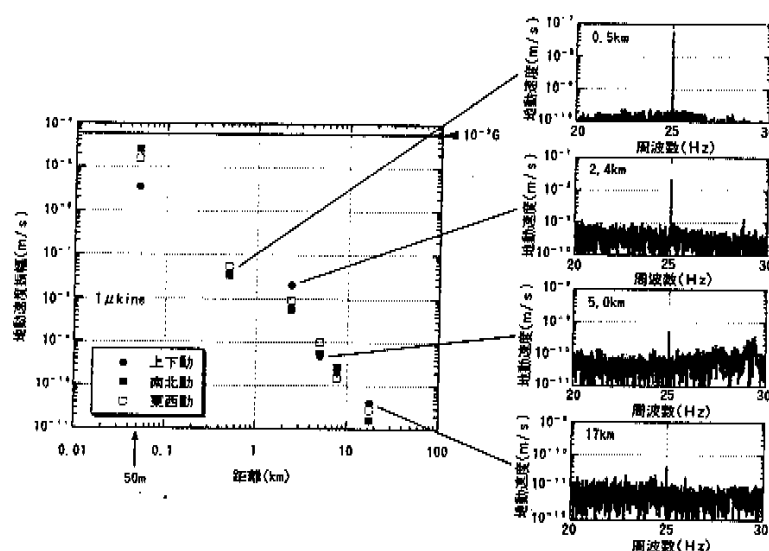


図4 アクロス信号 (25Hz-10tonfの場合) の距離による減衰

きるのは、精密制御とスタッキング効果によるものである。

2) 送信受信実証実験2 (地下状態変化モニタ試験)

アクロスの主な目的である地震波速度構造の時間変化検出のための基礎研究も同時に進めた。平成9年2月に行った3日間の単一周波数送信(2機を18、25Hzで稼働)による連続運転試験では、2.4km離れた名古屋大学瑞浪地殻変動観測壕での記録に、潮汐による地盤の伸縮変化や重力変化にほぼ対応したアクロス信号の位相変化が検出された。これは潮汐応力により地下の地震波速度が変化した結果を見ている可能性が高い。ただし、単一周波数であるため、P波・S波・表面波及びそれらの複数の経路の波(直接波、屈折波、反射波)が複合された結果の位相を見ていることになり、解釈は必ずしも容易ではない。次の段階では、

- ①距離の異なる複数点で受信する
- ②受信点をアレイにする
- ③震源のFM変調による多周波数チャンネル同時送信をする

ことにより、個々の波の走時変化を追跡していく必要がある。

3) 送信受信実験において浮上した受信装置の問題とそれへの対応

送信装置の安定性が確保された現在、その精度を最大限に生かすための制約は既存の振動センサー(地震計)の特性不安定にあることが判明した。これまでの検討の結果、地震計そのものの改良と地震計の設置環境の安定性とをともに確保する必要があることがわかった。さらに、受信装置は、送信装置と同様に多数の地震計を多次元のアレイにすることにより、地下構造の空間分解能や信頼性を飛躍的に上げることができる。そこで現在は、高精度高安定度の性能を持ちながらも、安価であり、なおかつ環境安定性のある浅部地下に簡便に埋設できる地震計の開発研究に着手している。

2.4 今後の展望

(1) 技術開発研究

これまでの研究開発の積み上げの結果として、時間変動までを含めた地下構造とその状態解明に、アクロスは欠くことのできない基礎技術になる、と確信できる段階に至った。当面の最大目標は、地下の実時間「カラーホログラフィ」の実現とその実用化である。それには、アクロスの送信装置の2次元アレイによる指向性ビーム送信技術

開発、振動センサーの3次元アレイによる高分解能受信装置の開発、データの自動解析アルゴリズム、それらを一つのシステムとして運用して機能させるシステム工学の確立等を必要とする。そこで、長期的観点で、その全システムを構成する要素技術の研究開発を推進する計画である。

(2) 地下構造調査研究

アクロスの技術の一部は、適用目的によってはすでに実用化に耐えるものがあり、また、ほんの少しの投資で実用化し、有用な成果が得られると予測されるものもある。上述の長期的観点での開発の他にも、できるところから直ちに具体化・実用化する研究も並行して推進する計画である。具体的な例(括弧内は、説明と装置または必要技術)を以下に示す。

- ①小規模領域の電気伝導度構造の解明と時間変動モニタ、地下水の挙動モニタ(従来の電磁探査法に取って代わる新手法の適用。電磁アクロス装置)
- ②小規模領域の弾性波探査、特に、S波による構造の解明(従来の弾性波探査に取って代わる新手法の適用。既存の小型送信装置の改良と高信頼度地震計アレイ)
- ③弾性波と電気伝導度の孔井間トモグラフィ(ボアホール内装着の送信装置と坑内用高信頼度地震計アレイ)
- ④海域にまたがる小規模領域弾性波構造探査(浅海底S波送信装置と海上用指向性送信装置)
- ⑤地盤、構造物の力学特性解析(小型ロックング/アンチロックング送信装置と高信頼度地震計システム)

もっと将来への展望は、アクロスを日本列島全体の地殻活動モニタの標準的な手法として確立することにある。音波アクロスと電磁波アクロスを総合して地下を組織的に観測できるようになった時には、地震発生場における物理過程や震源核等の縮約構造の時間発展を直接追いかけて解明する道が開けるはずである。東海地震想定断層モニタについては、陸域の観測システムの現実的な方策を詰めるとともに、それを補完する海域での観測にも適切な提案ができるようにしたい。

3. 地震と地下水挙動に関する深地層総合研究

3.1 研究の目的及び概要

地殻は、固体である様々な種類の岩石だけでなく、液体である地下水や気体である地下ガスによって構成されている。したがって、地震前後の地殻変動を捉える際には、岩石の物理学的特性の

みならず、地下水の水理学的特性・化学的特性、地下ガスの化学的特性に関する情報を取得することが必要不可欠である。そこで、フロンティア研究における「地震と地下水挙動に関する深地層総合研究」（以下、地震地下水研究と略称する）では、地震活動と地下水や地下ガスを含めた地質環境の変化との関係を把握することにより、地震に対する応答現象（前兆現象等）を解明することを目的とする。

東濃地科学センターでは、地質環境に関する基礎的な研究の一環として、東濃鉱山周辺における地表から地下深部（深度最大1,000 mまで）の地下水理特性・地下水の地球化学特性等を把握するために、30本近い試錐井を用いての調査・研究を昭和63年から実施している。このうち、現在までに得られている地下水位観測データ（特に、図5のような深度130 mのSN-3 観測井における連続観測結果）は、地震との関連性を示し、地震予知研究にとって極めて興味深いデータであることが判明している（詳細は後述する）。そこで、地震地下水研究においては、地震のような地殻変動に対し敏感な当地域の特性を生かして、種々の物理学的・化学的な地殻変動の総合的な観測体制を確立し、実際の変動を捉えることや、その変動が当地域で観測されるメカニズムを探ることを目的とした研究を行っている。ここでの観測を拡充・強化することは、地震予知の基礎データを得る上で大変有効である。本研究を東濃鉱山周辺で進めることには、以下の利点がある。①東濃地域は、海岸から約50 km以上離れた内陸部に位置するため、海洋潮汐による影響が少ない。②大都市から離れているため人工的なノイズが少ない。③同一地点で多種類・多項目観測を行うことが可能であ

る。④東濃鉱山坑道内は気温変動が少なく観測環境に恵まれている。⑤東濃鉱山やその周辺領域は、調査坑道及び地表から掘削した調査試錐孔が数多く存在し、地質構造が明らかである。

当地域の基盤は白亜紀—先新第三紀の土岐花崗であり、その上位を新第三紀中新世の瑞浪層群が不整合に覆っている。さらにその上位を新第三紀鮮新世から第四紀更新世にかけての瀬戸層群が不整合的に覆っている。東濃鉱山には走向N80°E・傾斜70°Sの月吉断層が横切り、瑞浪層群と土岐花崗岩を切っている。この断層は、南側が北側にのし上がる形の逆断層である。瑞浪層群は、下位より土岐夾炭累層・明世累層・生俣累層（月吉断層北側のみ）の3累層に区分される。東濃鉱山の坑道の大部分は月吉断層の南側に存在し、調査立坑の基底部付近に土岐花崗岩が露出している以外、その大部分は土岐夾炭累層中に開削されている。

3.2 主な観測体制

本研究では、以下の項目に焦点をあて、連続観測を行っている。特に東濃鉱山及びその周辺地区では、以下の観測装置を集中的に配備し、総合的観測を行っている。

(1) 岩盤の変動を捉えるための連続観測

ボアホール埋設型の地殻変動総合観測装置⁹⁾（以下、ボアホール総合観測装置と略称する）を東濃鉱山坑内や周辺に設置する。これは、長さ約2.6 mの機器の中に上からジャイロ方位計・加速度計（3成分）・傾斜計（水平直交2成分）・歪計（3成分）・温度計を組み入れたもので、文字どおり地殻の歪や変動に関する様々な地球物理的なデータを同時に連続観測することができる。特に歪計は高感度で、 10^{-9} のオーダーでの観測が可能である。これは、表面に歪ゲージをつける方法に比べ千倍ほど高感度である。個々の装置で得られたデータは電話回線により任意の場所からデータ回収が可能である。また、比較のため地殻変動が活発な三浦半島の油壺観測所（東京大学地震研究所）においても同様な観測を実施している。

(2) 地下水の変動を捉えるための連続観測

東濃鉱山周辺の観測井（SN-1、SN-3）に地下水位計（水圧計）・地下水温計・気圧計・雨量計等を設置し、地下水位・地下水温・気圧・降雨量等の連続観測を行っている。また、すでにMPシステム（Multiple Piezometer System）が設置してある既存の試錐孔（TH-7、TH-8）に、多深度水圧自動測定装置（MOSDAX）を設置して、各地層における地下水位を自動的に測定してい

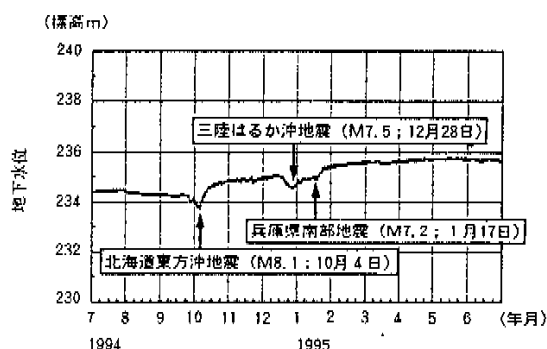


図5 東濃鉱山周辺SN-3号孔における地下水位変化の観測例

る。さらに、東濃鉱山坑道内の観測井に設置されている多成分水質分析装置を用いて深度150m付近の地下水の水質（物理化学パラメータ：電気伝導度・pH・溶存酸素濃度・酸化還元電位・地下水温）の連続観測を行っている。

(3) 地下ガスの変動を捉えるための濃度連続観測
東濃鉱山の調査坑道・第1及び第2計測坑道の壁面にラドン濃度測定（気中ラドン測定及び水中ラドン測定）装置を設置し、連続観測を行っている。通気立坑口には、ラドン計と、マスフィルタ型ガス分析計（四重極質量分析計）に繋がる気体採入口とを設置し、岩盤あるいは断層から放出される窒素・酸素・二酸化炭素・希ガス等の地下ガス濃度を連続観測している。これにより、坑道全体を一つのセンサーと考え、全気体放出量の把握が可能となる。

具体的な観測地点に関しては図6に示すとおりである。これらは、SN-1・SN-3 観測井の地下水位・水温観測と坑道内の水質モニタリング観測を除いては、平成9年の1月から3月にかけて鉱山坑内・周辺の各所に設置し、観測体制を整えつつある。将来的には、これらの各観測機器をLANで結んでネットワーク化する予定である。

さらに、今年度に掘削する97FT-01号総合観測井には、ボアホール総合観測装置・地下水位計・水温計・四重極質量分析計・ラドン計を同時に設置し、一点における多角的総合観測を行う予定である。

3.3 これまでの観測と研究の現状

(1) ボアホール地殻総合観測

これまでボアホール総合観測装置を、油壺観測所にある深さ約150mの観測孔と、東濃鉱山坑内30m南延の深さ約40mの所に埋設した。埋設に際しては、装置周囲に空隙を作らないように、先にコンクリートを流し込み、これが固まる前に観測機器の方向をモニタしながら設置した。

観測開始直後には、双方とも流し込んだコンクリートが固化する際の歪みや温度の変化が観測された。コンクリートが完全に固まると、周囲の地層と一体になり、地殻歪みの連続観測が可能となった。地殻歪みについて観測した結果、地殻の潮汐に伴う周期的な変動が観測された。これらは計算によって取り除く事が可能である。また、油壺観測点の方では海洋潮汐及び海流の影響と思われる歪みの変動も観測された。油壺は半島の先端付近であるため、周囲に相模湾や東京湾（浦賀水道）が存在し、特徴的な湾流が流れている。この影響

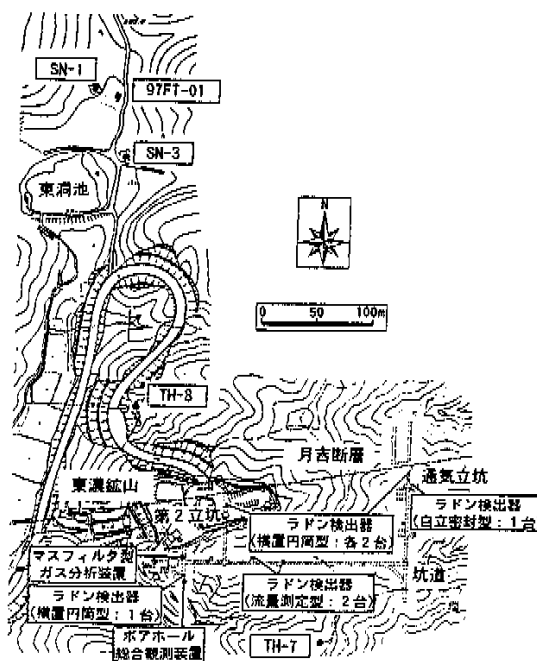


図6 東濃鉱山周辺及び坑道内の観測点

を取り除き、地殻本来の歪みの変化を捕らえる事が今後の課題である。個々の観測は順調に行われており、今後の観測を継続する中で、地殻の変動を捕らえる事が期待される。

(2) 地下水位（水圧）連続観測

月吉断層の北側にあるSN-1及びSN-3 観測井の水位連続観測を平成元年4月から継続している。井戸深度はそれぞれ91mと130mであり、それぞれ土岐炭層・土岐花崗岩に達している。これまでの観測及び解析結果から、特にSN-3の水位は地震に対して非常に敏感に反応することがわかった。

一般に、地下水位の変動は地殻歪みに敏感で、大気圧の変動や潮汐の影響を日常的に受けている。また、降雨にも影響を受ける。実際の水位変動データの解析においては、生データから大気圧応答成分（大気圧と逆相関の変動）や計算で得られる潮汐応答成分を取り除き、トレンド成分に直して行う。トレンド成分と降雨データを比較することによって、降雨による水位の変動を取り除き、地震イベントと比較することによって、地震に関連した変動を取り出す。このSN-3は、降雨による水位変化がほとんど見られないという特長を持っている。

SN-3では、地震に関連した水位変動が多数観測された。中部日本とその周辺地域で発生したM

4～6 クラスの中規模地震に対しては、地震発生と同時に（コサイスミックな）水位変化が20余例検出された。変化の大きさは2～42cm程で、潮汐変化の振幅（約2cm）に比べて十分大きい。遠隔地の大地震（北海道東方沖地震・三陸はるか沖地震・兵庫県南部地震）では、図5に見られるようにコサイスミックな水位変化だけでなく、地震直後から、地震後の（ポストサイスミックな）水位上昇が10数日にわたって観測され、地震以前の水位より高いレベルで安定する傾向が見られた。地震前の水位の低下が見られたが、これが前兆現象を捉えたものかどうかは検討中である。ポストサイスミックな水位上昇については、特に、平成9年3月の愛知県東部の地震に関しては、図7のように、同じ月吉断層の北側のTH-8号孔に設置したばかりのMOSDAXの土岐花崗岩部分（深度191.5m部分）の水圧にも同様の変化が観測された。一方、断層南側のTH-7の土岐花崗岩層（深度193.5m部分）には同様の変化が見られなかった。従来の研究は、月吉断層はよく固着していて遮水壁的な役割を果たしていることを示している⁹⁾。また断層の南側では東濃鉱山の坑道が存在し、土岐花崗岩より上位では静水圧に比べて間隙水圧の低下が見られている⁹⁾。これらのことが、断層南側に比べてSN-3やTH-8のような断層北側の土岐花崗岩層において地下水位（水圧）が特徴的な地震応答を示すことに関連している可能性がある。

(3) 地下ガス連続観測

東濃鉱山坑道内に8台のラドン検出器を設置した。検出器の内訳は、横穴に埋め込むタイプの横置き円筒型が5台（内、坑内に露頭がある月吉断層近傍には3カ所）、坑内への湧水を見る流量測定型が2台、通気立坑口前の自立密封型が1台である。これらの検出器と、ロード（計測器）及び坑内のワークステーションを光ファイバーで結び、ラドン濃度の計測システムを構築した。また東濃鉱山では、空気を調査立坑及び第2立坑から採り入れ、北延奥の通気立坑から強制的に排気しているため、坑道から出るガスが通気立坑口に集まってくる。ここから排気の一部をポンプで連続的に吸入して、マスフィルタ型ガス分析装置による連続的なガス組成の分析を開始した。今後の観測を継続する中で、地殻の変動に伴う変化を捕らえることが期待される。

3.4 今後の課題

月吉断層北側のSN-3観測井に見られる特徴的

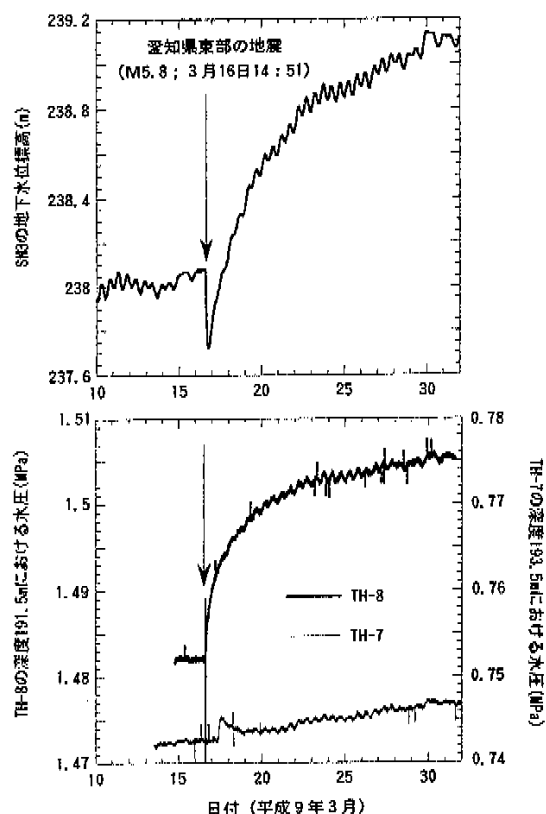


図7 月吉断層北側（SN-3、TH-8）と南側（TH-7）の地震に対する地下水位・水圧の変動（生データ：潮汐による変動込み）

な地震応答性は、地震発生・地震前兆検知の研究に重要であり、そのメカニズムの解明が求められている。今後、開始された個々の観測や、新たに掘削する新観測井での集中的な総合観測によって、日常的な地殻の基礎データを積み上げていく。そして、これらの個々の観測データを組み合わせることや、地震の際のデータの変動と比較することによって、メカニズムが解明されることが期待される。

4. 活断層帯での地震活動研究

4.1 研究の目的及び意義

本研究は、跡津川断層系を対象として、活断層の内部構造、活動様式等について、多角的に基礎研究を行い、跡津川断層及びその周辺の岩盤物性や応力状態、地下水等の場の性質を把握し、地震の発生メカニズムを明らかにすることを目的としている。

跡津川断層は、飛騨山地北縁部にあたる富山県南部と岐阜県北部に存在する延長60数キロの右横

ずれ断層であり、走向は東北東—西南西、傾斜はほぼ垂直である。この断層は、日本列島上で地震活動がもっとも活発な活断層の一つである。これまでの京都大学防災研究所の地震観測網の観測から、跡津川断層沿いの細い帯状の範囲内に、微小地震活動が集中して分布することがわかっている。また、国土地理院の跡津川断層での地殻変位の測量からは、断層クリープの可能性が指摘されている。

このような動きを示す内陸の活断層は、日本では特殊なもので、現在、他には知られていない。このような動きを示す跡津川断層を研究調査の対象とすることは、他の断層との比較研究を通して、断層の活動様式を決める基本的な要素を抽出する上で最適と考えられる。

また、跡津川断層の北側の数キロの範囲内に、断層の走向とほぼ平行に茂住—祐延断層及び牛首断層が存在し、断層に沿って分布する微小地震活動も観測されている。これらの断層を含めて跡津川断層系と呼ばれており、このような平行する断層はどのような関連をもって形成したのかを把握することは、断層の形成メカニズムの解明にとって、極めて興味深い課題である。

本研究では、神岡鉱山の既存坑道を利用して、茂住—祐延断層を横断する活断層調査坑道を掘削し、直接的かつ連続的に断層内部の研究調査ができるようになった。

4.2 研究の内容及び現状

本調査研究は、跡津川断層の活動様式の把握、

活断層調査坑道における調査研究、の2項目に焦点をあて総合的かつ集中的に実施されている。

(1) 跡津川断層の活動様式の把握

地震学及び測地学的手法を用いて、跡津川断層の微小地震活動と動きの量をより正確に検出し、その関連を明らかにすることを目的とする。このため、以下の研究を実施している。

1) 集中地震活動観測

跡津川断層の微小地震活動とクリープの関連性を明らかにするためには、断層沿いの震源決定の深度方向の精度を上げなければならない。京都大学防災研究所上宝観測所の既設観測網の約20年間にわたる観測から、跡津川断層沿いの地震活動のほとんどは20km以浅に分布することがわかった。しかし、深さ20km以内の精度を得るためには、20kmより狭い測点間隔が必要とする。このため、断層付近の既存の観測点（間隔25km程度）の間に、図8に示す臨時観測点を設置することにした。平成6年に神岡鉱山の茂住坑道内に茂住観測点を設置した。この観測点の平成7年4月から1年間のデータを既設観測網のデータに加えて得られた震源深度は、既設観測網のデータのみで決定した深度よりも数キロ深くなることがわかった。この結果、跡津川断層上には、茂住観測点付近に長さ10km、深さ方向に5kmの地震空白域が存在することもわかった¹⁰⁾。これは測地測量から明らかになった断層面上のクリープの発生域と対応していることが興味深い。今後、断層付近でさらに数カ所の臨

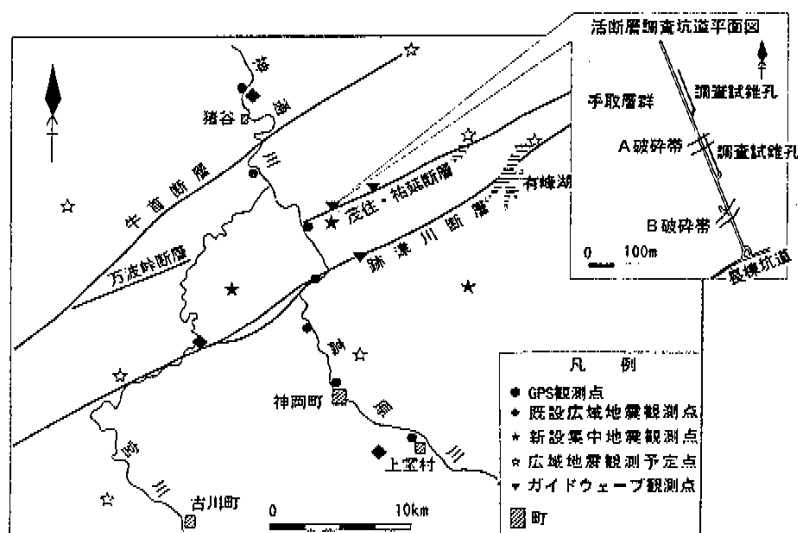


図8 跡津川断層系における各種観測の実施位置図

時観測点を増設し、跡津川断層系のより高い精度の地震活動分布を把握する。平成8年秋には、山之村及び洞の2観測点を設置し、観測を開始した。

2) 連続GPS地殻変動観測

跡津川断層のクリープを正確に捉え、その性質と原因を明らかにするには、断層地域に絞った精密な地殻変動観測を連続して行う必要がある。本研究では、今年度、跡津川断層系と直交する延長約30kmにわたる基線の上に、図8に示す7カ所のGPS観測点を設置した。使用しているGPS受信機は、GP-R1DY（メーカー：トプコン）であり、30秒サンプリングで連続観測を行っている。今後の長期観測により、跡津川断層系における地殻変動をmmオーダーで捉え、断層のクリープに関する詳細なデータを取得する。

国土地理院によるGPS観測点は、30～40km間隔で跡津川断層周辺にも設置されている。1年間の観測から、跡津川断層を挟む南北2点間で断層のずれに調和的な1cmに及ぶ動きが捉えられている。この動きが跡津川断層面上で進行しているのか、または、その深部の延長面上か上部地殻の下面（水平面）に生じているのか、それとも全域が一様に剪断歪を受けているのか、茂住を中心とするGPS稠密観測から明らかになるはずである¹¹⁾。

3) 断層破砕帯におけるガイドウェーブ観測

活断層の動き及び地震の発生メカニズムを解明するには、断層内部の性状、つまり断層破砕帯の構造を明らかにしなければならない。ガイドウェーブとは、断層内で発生した地震波のうち、断層破砕帯を伝わっていく地震波（Seismic Guided Wave）である。断層上に設置した地震計により、このような波を検知・解析することによって断層破砕帯の構造がわかる。本研究では、平成8年秋に、茂住一祐延断層の東部に茂住観測アレイ（96chデータ収録装置、2Hz3成分地震計32台）を設置して観測を行った。現在、平成8年秋に跡津通洞坑口に設置した跡津アレイ（48chデータ収録装置、2Hz3成分地震計16台）と、平成9年5月に茂住の活断層調査坑道内に設置した茂住アレイ（96chデータ収録装置、2Hz3成分地震計32台）の観測を継続している¹²⁾。

(2) 活断層調査坑道における調査研究

本研究は、断層の構造、断層物質の性質及び断層周辺の場を把握するため、茂住一祐延断層を地表下約300mで横切るように、図8に示す活断層

調査坑道を掘削し、各種の観測や調査を展開している。

1) 活断層調査坑道の掘削

これまでの跡津川断層系における調査研究は、主に地表部を対象に行われてきたが、地表では風化や侵食作用で断層面が不明瞭であり、活断層の地下での様子や断層の生い立ちを究明するには、地表だけでは十分に情報が得られない。本研究では、活断層を直接地下で観察するため、跡津川断層系の茂住一祐延断層にもっとも近接す神岡鉱山の長棟坑道を利用して、断層を貫く活断層調査坑道を掘削した。坑道掘削は平成8年5月に開始し、平成9年2月に終了した。調査坑道は、裸坑断面の幅3.3m、高さ3.5mで、延長481mである。この坑道は、茂住一祐延断層を地表から約300mの深度で貫き、地下深部での断層の様子を直接に観察することができる。この調査坑道は、人工ノイズが少なく、断層の諸性質を長期観測する上で、最適な観測環境といえる。

2) 活断層破砕帯に関する調査

活断層調査坑道掘削の事前調査として、断層破砕帯の位置を正確に把握するための地表地質調査、空中写真判読及び物理探査を行った。また、調査坑道の掘削工事と並行にして、坑内地質調査や坑内ボーリング調査を実施した。これらの調査によって、茂住一祐延断層として2つの断層破砕帯を活断層調査坑道内で捉えることができた。今後、断層破砕帯の性状、断層の活動史及び断層物質の内部構造に関する基礎データを取得するため、詳細な坑内地質調査、断層破砕帯の年代測定及び断層物質の微小変形構造の解析等の研究を実施する。また、断層の3次元構造解明の基礎データを取得するため、茂住一祐延断層全線を対象とする地表地質調査を実施し、断層破砕帯の分布を明らかにする。

3) 活断層調査坑道内での連続精密観測

地殻応力は、地殻変動や地震を引き起こす最も重要な要因の一つである。また、断層の動きは、断層破砕帯の形成に大きく寄与していると考えられる。現在、調査坑道内において、応力測定、精密弾性波連続測定、精密比抵抗連続測定及び変位測定（レーザ測距）のための観測機器の設置や予備調査等が行われている。今後、これらの観測データや調査結果と地表での地殻変動の観測データを総合的に解析することによって、断層周辺の応力分布、岩盤物性及び変位等の時間的変化と断層活動との関連を把握す

ることができる。

4) 地下水調査

活断層の存在及びその活動は、断層周辺の地下水の水理特性・化学特性にも影響を及ぼすと考えられる。断層破碎帯周辺の水理地質構造を把握するため、活断層調査坑道内において、傾斜60°、孔長約150mの水理調査ボーリング2本を掘削し、水理試験を実施した。また、断層周辺の地下水の化学特性を調査するため、調査坑道内の地下水の化学成分・同位体比の分析を行った。今後、これらの調査を継続し、活断層周辺の地下水の水理特性・化学特性に関する情報を蓄積する。

4.3 茂住一祐延断層の調査結果

茂住一祐延断層は、富山・岐阜県境付近に存在する延長20数キロ、走向は東北東～西南西、傾斜はほぼ垂直な右横ずれ活断層である。この断層の存在は、跡津川断層の東北部の北側数キロ範囲内にある茂住谷や広川等の直線的に連続する谷地から推定されている。しかし、これまでの地表調査では、断層の動きを明瞭に示すような露頭は確認されていなかった。今回、茂住谷付近で実施した地表物理探査及び調査坑道掘削によって、茂住一祐延断層西端部の断層破碎帯の存在を確認した。

(1) TEM法電磁気探査による断層の検出

断層調査坑道掘削の事前調査として、茂住一祐延断層を対象とするTEM法(Transient Electro-Magnetic method: 過渡現象電磁法)電磁気探査を行った。今回の調査では、茂住谷の南斜面に100×200mの大きさの送信ループを固定して設置し、3成分受信コイルセンサーを用いて予想した断層と直交方向に配置した測線上で測定を行っ

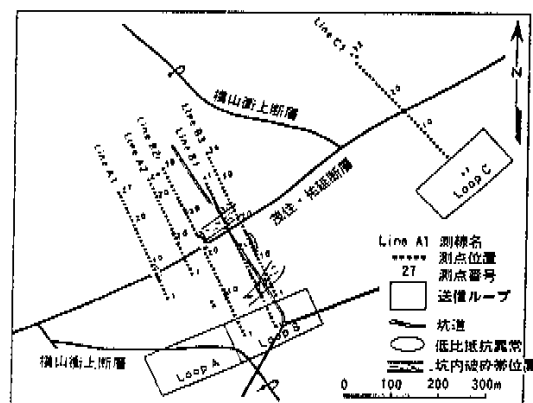


図9 茂住一祐延断層におけるTEM法電磁気探査

た(チューラム配置)。設置した3つの送信ループA、B、Cに対してそれぞれ2、3、1本の測線を設定した。測定は10m間隔で行い、測線長は230m～410mである。測線の配置及び低抵抗異常帯の分布を図9に示す。測定データに基づいた3次元モデル計算の結果、茂住谷の河床付近とその南方約120m地点の2カ所で低抵抗異常帯が検出された。異常帯の比抵抗値と周辺の比抵抗値とのコントラストは、少なくとも1:3以上あると推定された。この低抵抗異常帯は、手取層群中に存在する茂住一祐延断層の破碎帯に起因するものと想定され、後に調査坑道掘削で確認した断層破碎帯の位置とよく調和している。したがって、断層破碎帯と周辺岩盤との間に、十分に検知できる導電性の相違がある場合、TEM法は、断層調査の手法として有効であることが実証された¹³⁾。

(2) 活断層調査坑道で確認した茂住一祐延断層

活断層調査坑道は、茂住一祐延断層にほぼ直交する方向に延長481mである。坑道周辺の地質は白亜紀前期の手取層群に属する砂岩・頁岩の互層からなる。地表から約300mの深度では、図10に示す茂住一祐延断層の2つの断層破碎帯の存在が確認できた。2つの破碎帯はそれぞれ茂住谷の直下(A破碎帯、幅20m)及びその南約160m付近(B破碎帯、幅28m)に位置し、茂住一祐延断層の走向方向とほぼ平行するトレンドを有する。い

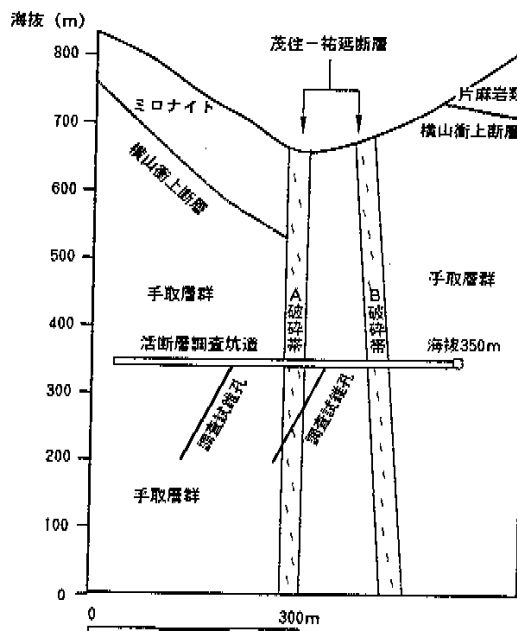


図10 活断層調査坑道断面図

ずれも断層ガウジや断層角礫帯が存在することで、茂住一祐延断層はその西端部で2本の破碎帯からなることが推定できる。また、B破碎帯の境部に発達する小断層の鏡肌で水平に近い方向を示す条痕が認められ、本断層の最終活動が横ずれであったことを示している¹⁴⁾。今後、断層破碎帯物質の年代測定や微小変形構造の解析によって、本断層の活動史及び内部構造の解明に新たな情報を取得していく。また、断層の3次元構造を把握するため、調査坑道内及び断層周辺の地表において、精密な地質調査を実施し、断層周辺の地質に関する基礎データをさらに充実する。

4.4 今後の展望

跡津川断層に関する調査研究は、地形・地質学的な研究をはじめ、地球物理学、地球化学的な研究が長年にわたって行われ、諸分野において豊富な成果が蓄積されてきた。本研究調査は、これまでの観測体制をさらに高精度に充実させるとともに、新しい調査手法も取り入れ、従来より一段と高い研究段階に入ったといえよう。今後、地表及び坑内で実施する各分野の研究調査により、跡津川断層系に関する基礎データを着実に積み上げ、活断層研究の模式地として断層の形成及び地震の発生メカニズムの解明に大きく寄与するものと期待される。

5. おわりに

陸域地下構造フロンティア研究は、平成7年度末の開始以来、東濃鉾山においては、アクロス震源装置、ボアホール地殻変動総合観測装置等、神岡鉾山においては、活断層調査坑道、GPS観測網等、主要な研究設備の構築や観測機器の設置を完成した。現在、アクロス装置の性能試験や解析法の開発、各種観測の継続と強化、現地における調

査研究等が着実に進められており、その成果は、今後、随時に学会や専門誌に発表される。

参考文献

- 1) 熊澤峰夫, 武井康子: "精密制御音波放射による能動的地下構造常時モニター手法の研究、その1、目的と原理", 日本地震学会, 1994年秋季大会講演予稿集, P158 (1994)。
- 2) 武井康子, 熊澤峰夫, 他: "精密制御音波放射による能動的地下構造常時モニター手法の研究、その2、精密制御回転震源設計試作とその評価", 日本地震学会, 1994年秋季大会講演予稿集, P159 (1994)。
- 3) 熊澤峰夫, 武井康子: "精密制御音波放射による能動的地下構造常時モニター手法の研究、その3、波の到達時刻を少数のフォーリエ成分から決定する理論", 日本地震学会, 1994年秋季大会講演予稿集, P160 (1994)。
- 4) 熊澤峰夫, 小川克郎, 他: "精密制御定常震源システムの開発(1) 全体概念と物理探査への応用可能性", 物理探査学会, 第92回学術講演会講演論文集, P277-281 (1995)。
- 5) 武井康子, 熊澤峰夫, 他: "精密制御定常震源システムの開発(2) システム", 物理探査学会, 第92回学術講演会講演論文集, P282-285 (1995)。
- 6) Kumazawa, M., Inanishi, Y., et al.: "A theory of spectral analysis based on the characteristic property of a linear dynamic system", *Geophys. J. Int.*, 101, P613-630 (1990)。
- 7) 熊澤峰夫, 武井康子: "ACROSS信号のイベント解析と存否ケプストラム理論", 地球惑星科学関連学会1995年合同大会予稿集, P374 (1995)。
- 8) 石井 敏: "深部ボアホール地殻活動総合観測と今後の地震予知研究", 月刊地球/号外, No.18, P109-114 (1997)。
- 9) 尾方伸久, 小田篤: "地層科学研究の現状2、地下水流動に関する研究 2-3-1東濃鉾山第2立坑掘削影響解析", 地層処分研究開発の現状(平成8年度), P236-238 (1996)。
- 10) 和田博夫, 伊藤潔, 他: "神岡鉾山・茂住坑における地震観測", 京都大学防災研究所年報, 第39号B-1, P241-250 (1996)。
- 11) 平原和朗, 安藤雅孝, 他: "跡津川断層GPS観測網", 日本地震学会1997年秋季大会講演予稿集, C61 (1997)。
- 12) 伊藤久男, 西土欽也, 他: "跡津川・茂住祐延断層におけるガイドウェーブ観測の概要", 日本地震学会1997年秋季大会講演予稿集, P107 (1997)。
- 13) 和田一成, 筒井直, 他: "TEM法ニューラム測定配置による断層検出の試み—モデル計算と実例—", 物理探査学会第96回学術講演会論文集, P200-204, (1997)。
- 14) 竹内章, 伊藤谷生, 他: "活断層調査坑道で確認した跡津川断層系・茂住祐延断層(速報)", 日本地震学会1997年秋季大会講演予稿集, P106 (1997)。