

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

濃尾断層系における歪・応力集中過程と破壊様式解明のための総合的研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-1) 地震準備過程

ウ．ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築

(2-1) 地震発生予測システム

イ．地殻活動予測シミュレーションの高度化

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

内陸地震の発生プロセスにはまだ不明の点が多く残されている，従って，研究対象域を選ぶにあたり，破壊様式を支配する不均質構造の検知の容易なこと及び地震・地殻変動が顕著なことが重要な条件となろう．本計画では，変形速度の大きな構造帯である新潟-神戸歪集中帯内に位置する国内最大級の内陸地震である 1891 年濃尾地震の震源域(濃尾断層系)に焦点をあて，総合的観測とモデリング研究を密接な連携のもとに実施する．具体的には，断層下の地殻・上部マントル不均質構造とそその運動特性を明らかにし，その知見を踏まえて内陸地震発生の歪・応力の蓄積・集中の物理メカニズムに対する定量的モデルの構築を行う．

濃尾断層系は幾つかの segment に分かれており，segment 間の連動的破壊が進行したと考えられている．従って，断層を含む上部地殻には，この地震のアスペリティとともに，segment 境界における連動性破壊を示唆する不均質構造の存在が強く示唆される．一方，現計画の跡津川断層域における総合観測の成果から，濃尾断層系下の下部地殻内にも局在化した異常構造域(低速度異常)が期待されることである．この異常域ではすべり運動が進行している可能性があり，その運動によって蓄積される歪・応力が不均質構造を介在させて下部地殻から上部地殻に再配分され，更に断層面近傍に集中して連動型を含めた破壊に至ると想定される．

そこで本計画では，破壊様式を支配する上部不均質構造(アスペリティ・segment 境界・断層端域)と，歪・応力の蓄積の原因となる下部地殻構造不均質及びそこで進行している運動の特性を，総合的観測(広域地震観測・稠密自然地震観測・電磁氣的観測・GPS 観測・制御震源探査)から明らかにする．地殻内流体は，上部・下部地殻を問わず，応力の集中に重要であるので，地震・電磁氣観測によってその分布・挙動を明らかにする．更に，この総合的観測で得られた知見を元にモデリング研究を実施し，この地震に対する歪・応力の集中プロセス(不均質構造の中での応力の蓄積・再配分・集中プロセス)やこの地震で特徴的な連動型破壊の物理的メカニズムを明らかにする．

(6) 本課題の 5 か年計画の概要 :

平成 21 年度 :

5 か年観測の立ち上げ年度である。従って、衛星テレメータを主体とする広域地震観測網の整備及び GPS 観測点の設置を開始する。また、断層帯周辺における稠密アレー観測を実施する。

広域地震観測：濃尾断層を取り囲むように 100 km 四方の地域において衛星および電話線を用いた 40 点のテレメータ観測網を構築する。調査地域は山岳地や電気等が通じていない地域が予想される。そこで、その様な地域においては、オフラインレコーダを用いた観測を行うことにより観測空白域のないように対応する。今年度のオフラインレコーダの展開は 10 点程度を予定している。観測されたデータは、東京大学地震研究所と京都大学防災研究所に収録システムを構築しデータの収録をおこなう。また、精密震源決定によって地震活動を把握するとともにメカニズム解、走時データ等データを取得する。

稠密アレー観測：震源域南部において、断層帯の走行と直交する方向 (WSW-ENE) に 3 本の稠密アレーから成る自然地震観測網 (合計 90 点) を約 6 ヶ月間展開する。各々の稠密アレーは、約 30 点の観測点から構成され、観測点の設置間隔は約 1 km である。各観測点では、1 Hz - 3 成分速度型地震計を使用して連続波形記録を収録する。

GPS 観測：濃尾断層帯の中央部付近に 20 点程度の稠密 GPS 観測網を構築する。観測点は堅固な構造物にアンテナ固定用ボルトを設置するか、地中に直接ピラーを埋設する。可能な範囲で連続観測を実施するが、それ以外の観測点については 1 ヶ月程度のキャンペーン観測を実施する。データ解析の体制を整備し、キャンペーン観測データを解析して初期座標値を得る。

モデリング：モデルについては、H21 年度は、前計画で様々な結果が得られた跡津川についてのまとめおよび定量モデルの構築を行う。また、その結果も踏まえて、濃尾断層帯におけるモデル化の方針について検討する。

H22 年度 :

広域地震観測：観測点設置を継続して行うとともに、データ解析に着手する。

稠密アレー観測：前年度に引き続き、アレー観測を実施する。また、前年度データを併せ、解析に着手する。

電磁気観測：比抵抗構造探査を実施する。

GPS 観測：観測点を維持するとともに、データ収集・解析を実施する。

モデリング：計算機環境を引き続き整えるとともに、モデリングのための基礎的コード等を整備する。

この年度末までに、当該地域の不均質構造及び地殻変形様式の概略を明らかにする。

H23 年度

広域地震観測：観測点を維持し、データ収集を図るとともに、解析を実施する。

稠密アレー観測：前年度に引き続き、アレー観測を実施する。また、前年度までデータを併せ、解析を継続して行う。

電磁気観測：前年度の比抵抗構造探査の解析を実施する。

GPS 観測：観測点を維持するとともに、データ収集・解析を実施する。

モデリング：モデルリング計算に着手する。

次年度の制御震源探査に備え、当該地域の不均質構造と断層近傍で進行しているであろう変動現象の概略を明らかにする。

H24 年度

広域地震観測：観測点を維持し、データ収集を図るとともに、引き続き解析を実施する。

稠密アレー観測：前年度に引き続き、アレー観測を実施する。また、前年度までのデータを併せ、解析を継続して行う。

制御震源地震探査：自然地震観測、電磁気観測、GPS 観測の結果を踏まえ、大規模制御震源地震探査を実施する。

電磁気観測：前年度までの結果を踏まえ、比抵抗構造探査を実施する。また、前年度までのデータについては解析を継続して行う。

GPS 観測：観測点を維持するとともに、データ収集・解析を実施する。

モデリング：モデルリング計算を継続して実施する。

この年度から、全体の取りまとめを目指した総合的解析を実施する。

H25 年度

広域地震観測：解析を引き続き実施するとともに、観測点の撤収を行う。

稠密アレー観測：前年度までのデータの解析を継続して実施する。

制御震源地震探査：前年度のデータの解析を引き続き実施する。電磁気観測：前年度までの比抵抗構造探査の解析を実施する。

電磁気探査：データ解析を継続して行うとともに、観測点の撤収を行う。

GPS 観測：データ解析を実施するとともに、観測点の撤収を行う。

モデリング：モデルリング計算を継続して実施する。

全体の成果のとりまとめを行う。

(7) 平成 23 年度成果の概要：

【濃尾地震震源域の総合集中観測】

本計画では、変形速度の大きな構造帯である新潟 - 神戸歪集中帯内に位置する国内最大級の内陸地震である 1891 年濃尾地震の震源域（濃尾断層）に焦点をあて、総合的観測とモデリング研究を密接な連携のもとに実施する。本課題の総合的観測は、自然地震観測、電磁気観測、GPS 観測及び制御震源地震探査から構成されている。

自然地震観測については、昨年度までに 48 点のテレメータ観測点及び山岳域の 21 点のオフライン観測点から成る広域地震観測網がほぼ完成した。これらのデータは、京都大学防災研究所に集められた後に各機関に送られ、本格的な解析が実施されている。2009 年 11 月から 2011 年 5 月の間に広域地震観測網及び定常地震観測網で観測された地震 797 個を用いて、地震波トモグラフィ解析を行った。その結果、濃尾平野下の下部地殻は P 波、S 波とも周囲に比べ低速度であること、その中でも特に、濃尾地震の際にすべり量が大きかった温見断層直下の下部地殻の速度が遅いこと、モホ面直下の構造は濃尾地震の震源付近を境にその南東と北西で急激に変化していることなどが明らかになった（図 1、図 2）。稠密アレー観測では、今年度に、濃尾地震の震源域南東延長部に計 36 点からなる稠密地震計アレイを約 6ヶ月間展開し、連続波形記録を取得した。2009-2010 年に実施した観測データについては総合的なトモグラフィ解析及びレシーバー関数解析を行った。トモグラフィ解析によれば、濃尾地震の破壊開始点と考えられる断層北東部（温見断層）の地震発生層深部に低速度体が存在し、その低速度体の上面は断層の南東部へ向かって徐々に深くなる。この低速度体は、跡津川の断層深部で見られたものと類似した特徴を示す。また、温見断層セグメントの地震発生層は、高速度を示すとともに、地震活動度は極めて低調である。V_p/V_s 比は、地震発生層の全体にわたって低い値を示すが、濃尾地震の震源域南東延長部の中部地殻では、V_p/V_s 比が若干増加する。一方、レシーバー関数解析から、濃尾地震の震源域の南東部の深さ約 40 km 付近に沈み込むフィリピン海プレートの海洋性地殻が明瞭に示された。東海地域において、海洋性地殻は傾斜角約 15 度で北西方向に沈み込んでいるが、濃尾地域ではほぼ水平に沈み込む。マントル・ウェッジの厚みは 10km 未満と狭く、V_p/V_s 比は周辺よりも高い値を示す。これは、マントル・ウェッジが蛇紋岩化していると考えられる。

この地域の減衰構造推定のため、今年度は昨年以降発生した地震から空間的に均一な分布となるよう波形データを追加し、計 113 個の地震の波形スペクトルに対して Q トモグラフィを行った。緯度 35.6 °以南、136.4 °~ 136.7 °付近では深さ 35km までのブロックで、濃尾地震の震源断層である根尾谷断層南半分から梅原断層直下の Q 値が推定された（図 3）。断層に沿った方向で見ると、断層中央部の水鳥付近で、地表から約 35km の深度まで相対的に低い Q 値を取るのに対し、それより南側では深さ 10~20km のブロックがその上下のブロックより高 Q となる傾向が見られた。Q 値の分布と濃尾地震

時のすべりの空間的対応関係を調べると、濃尾地震時に大きな上下変動が見られた水鳥付近や、梅原断層中央部付近は、地表から 35km までのブロックまで、ほぼ低 Q 値を示すが、水平方向に大きなすべりの見られた領域は、地殻中部にやや高 Q の領域が見られ、側方への構造変化が存在する。

S 波スプリッティング解析は、深さ 30km 以浅で発生した地震に対して行った。その結果、速い S 波の偏向方向は概ね東 - 西から北西 - 南東であり、新潟 - 神戸歪集中帯を広く解析した Hiramatsu et al. (2010) の結果と一致することがわかった (図 4)。これは、この地域の地殻の異方性は広域応力場に支配されたクラックの選択配向により生じていることを示す。また、波線長で正規化した時間差を GPS 解析から得られた差歪速度と比較すると、Hiramatsu et al. (2010) で報告されている歪集中帯における差歪速度との比例関係と整合的な結果が得られ、差歪速度に対応する速度で上部地殻に応力が蓄積していることを示している。

2009 年 10 月 9 日 ~ 11 日にかけて千葉大学他により実施された 8 点の発破を、濃尾地震震源断層域合同観測のアレイ地震観測点で記録した波形を解析した結果、各ショットのゼロオフセット記録には往復走時 10 秒付近から 2 秒程度継続する反射波群が見られた。このうち、浅い方の反射波群の深度は 28 ~ 32km、深い方の深度は 38km ~ 40km を越え、北西-南西方向の軸を持って北東および西側に深くなる凸型の形状をしていると考えられ、下部地殻ラミネーションの上面と下面に相当すると解釈される。

電磁氣的観測では、2011 年 3 月末よりネットワーク MT 観測を開始した (図 5)。濃尾断層を取り囲む福井県北東部から岐阜県中西部地域において 20 交換所エリア (福井県：7 エリア、岐阜県：13 エリア) を選定し、1 エリアあたり 3-5 点の電極を設置して、観測を継続している。現在までのところ、福井県内から岐阜県の中北部にかけては概ね良好な応答関数を推定することが可能であったが、岐阜県南西部では、直流電化路線からの漏れ電流や集落からのノイズの影響を受け、十分な品質の応答関数が得られていない。しかし、impedance tensor の形に合成した応答関数の非対角成分には、長周期帯で異常位相が認められる観測点があり、今後、観測を継続して応答関数推定の精度をあげるとともに、上記の異常位相の存在を考慮に入れた 3 次元構造解析が必須となる (図 5)。

GPS 観測については 20ヶ所の観測点設置後データ収集を行っていたが、観測開始直後の 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震が発生し、観測データに大きな影響が出た。3 月の地震発生以前の 1 年余の座標値変化から計算した地殻変動速度分布によれば、濃尾断層系で左横ずれの変形が生じている様子がぼんやりながら分かり、断層帯周辺に変形が集中しているようには必ずしも見えない。但し、観測期間が短いために、十分な議論をすることは難しい。同じ観測網で見た東北太平洋沖地震時の変動は、地震時の変動はほぼ東西方向の伸張であり、特に断層帯に関連したローカルな影響は見られない。一方、この地震発生後 1 ヶ月間の水平変位を見ると、余効変動の影響が顕著に見られる。即ち、濃尾断層帯一体で東西方向の伸びと若干の右横ずれ変形が生じており、こうした地震時および地震後の変形と関係して地震活動に変化が見られるか、注目する必要がある。

【跡津川断層域の総合集中観測】

前計画で実施した跡津川断層域における総合集中観測については、地震波形データを用いて、コード Q (QC) の再解析を行った。変更点は、これまで上下動成分のみでコード Q 値の推定を行っていたものを 3 成分それぞれの波形を用いてコード Q 値を推定するようにした点である。解析に用いた地震は 2004 年 11 月から 2006 年 12 月に飛騨地方および北陸地方で発生した M1.8 以上、深さ 30 km 以浅の 186 個の地震で、1.5-24 Hz までの 10 周波数帯において、Sato (1977) の一次等方散乱モデルを適用し、コード Q 値を推定した。その結果、新潟 - 神戸構造帯に対応するコード Q の空間変化は低周波数帯で顕著であることが判明した。低周波数帯のコード Q 値の空間分布について、Nakajima and Hasegawa (2007) による地震波トモグラフィーの S 波速度構造と比較すると、上部地殻下部から下部地殻での S 波速度と相関が見られ、低周波数帯におけるコード Q 値は地殻の脆性 - 延性遷移領域を反映したパラメータであると考えられる。また、Hiramatsu et al. (2010) による方法を用いて、コード Q 値と GPS 観測で得られた差歪速度 (Sagiya et al., 2000) との関係から応力蓄積速度の空間変化量を推定すると、1.5 Hz 帯で 15 ± 3 kPa/year、2.0 Hz 帯では 18 ± 4 kPa/year と求められる。これらの値は Jin and Aki (2005) の結果から推定された値 (13 ± 3.5 kPa) (Hiramatsu et al., 2010) より若干大きく、跡津川断層帯

周辺地域では応力蓄積速度の空間変化量が新潟 - 神戸構造帯での平均的な値より大きい可能性がある。
【内陸地震域応力集中プロセスのモデリング】

この濃尾断層系の応力場の特徴について、2009年5月から2010年10月までのM1.5以上、深さ30km以浅の地震約130個の震源メカニズム解を使用して応力テンソルインバージョン解析を行い、濃尾地震断層周辺の平均的な広域応力場を推定した。最大・中間・最小主応力を σ_1 、 σ_2 、 σ_3 とすると、 σ_1 軸：strike = -88°、dip = 1°、 σ_2 軸：strike = 2°、dip = 7°、 σ_3 軸：strike = 177°、dip = 83°、および応力比 $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3) = 0.12$ という結果を得た(図6)。最大主応力軸の方向はTownend and Zoback [2006]の結果と良く一致している。また、応力比が0.12なので、 σ_2 や σ_3 が σ_1 に比べて相対的にかなり小さいことを示しており、濃尾地震断層周辺の広域応力場は東西方向の圧縮場が卓越していることになる。さらに、跡津川断層への応力蓄積メカニズムを詳細に理解するために、堀内ら(2011)のアルゴリズムを用いて先行研究(Katsumata et al. 2010)より一層多くの微小地震のメカニズム解を自動決定した。現在、決定精度の検証を行っている。メカニズム解の深さ方向変化を調べた結果、断層深部ほど右横ズレ型が卓越する傾向が見られるようであるが、その確度を検証する必要がある。また、跡津川断層近傍の重力異常と地震分布を比較した。断層西部では重力異常の勾配は緩やかで地震もやや広がりを持って発生する一方、断層東部では重力異常の勾配が急で、地震は断層近傍に集中する傾向を見出した。

(8)平成23年度の成果に関連の深いもので、平成23年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
白井嘉哉・上嶋誠・小河勉・吉村令慧・大志万直人・山口覚・藤浩明・村上英記・宇都智史・兼崎弘憲・望戸裕司・相澤広記・丹保俊哉・最上巴恵・小川康雄・西谷忠師・坂中伸也・三品正明・佐藤秀幸・後藤忠徳・笠谷貴史・茂木透・山谷祐介・原田誠・塩崎一郎・本蔵義守・小山茂・望月裕峰・中尾節郎・和田安男・藤田安良, 新潟 - 神戸ひずみ集中帯における深部比抵抗構造 - 広帯域MT法とネットワークMT法のジョイントインバージョン - Conductivity Anomaly 研究会2010年論文集,41-47, 2011。

(9)平成24年度実施計画の概要：

広域地震観測においては、平成21-22年度に設置した観測点を維持しデータの蓄積を行い、地震活動、地震波トモグラフィ、レシーバ関数解析、メカニズム解解析、反射・散乱解析、S波スプリッティング、減衰構造等の研究を推進させ、地震学的にさまざまな視点で濃尾地震断層を明らかにしていくとともに、地殻変動観測や地球電磁気観測のデータともつぎ合わせ、濃尾地震断層域について総合的な理解を目指す。

稠密アレー観測においては、前年度までのデータの解析を精力的に進め、アスペリティや断層、セグメントの連動性に影響を与える不均質構造を明らかにする。必要に応じて、補助的な観測も実施も考慮する。

また、本断層帯域において制御震源地震探査を実施し、上部・下部地殻の不均質構造を解明し、自然地震を用いたトモグラフィ解析・レシーバ関数解析、Q構造や散乱構造と対比しつつ総合的解釈に着手する。

電磁氣的観測においては、福井、岐阜におけるネットワークMT観測を継続するが、福井県については概ね良好な応答関数が得られつつあるので早い時期に撤収する。一方、岐阜県側については、良好な磁気擾乱を数回とらえるまで、観測を継続する。3次元インバージョンへ向けての準備を行い、広域的深部構造推定につとめる。

地震のメカニズム解の解析においては、震源メカニズム解を増やすとともに、領域を細分化して応力テンソルインバージョン解析を行い、応力の空間分布を得る。また、跡津川断層周辺および高山 - 大原断層帯で得た微小地震のメカニズム解の決定精度の検証を終え、応力逆解析を行い、応力場の深さ依存性やこれまで明らかになった不均質構造との関係を詳細に調べる。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

東京大学地震研究所（岩崎貴哉・飯高隆・平田直・酒井慎一・蔵下英司・加藤愛太郎）

他機関との共同研究の有無：有

北海道大学・弘前大学・東北大学・茨城大学・千葉大学・東海大学・名古屋大学・愛知教育大学・京都大学防災研究所・金沢大学・九州大学・鹿児島大学・国立極地研究所・気象庁・防災科学研究所

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所

電話：03-5841-5708

e-mail：iwasaki@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：岩崎貴哉・飯高隆

所属：東京大学地震研究所

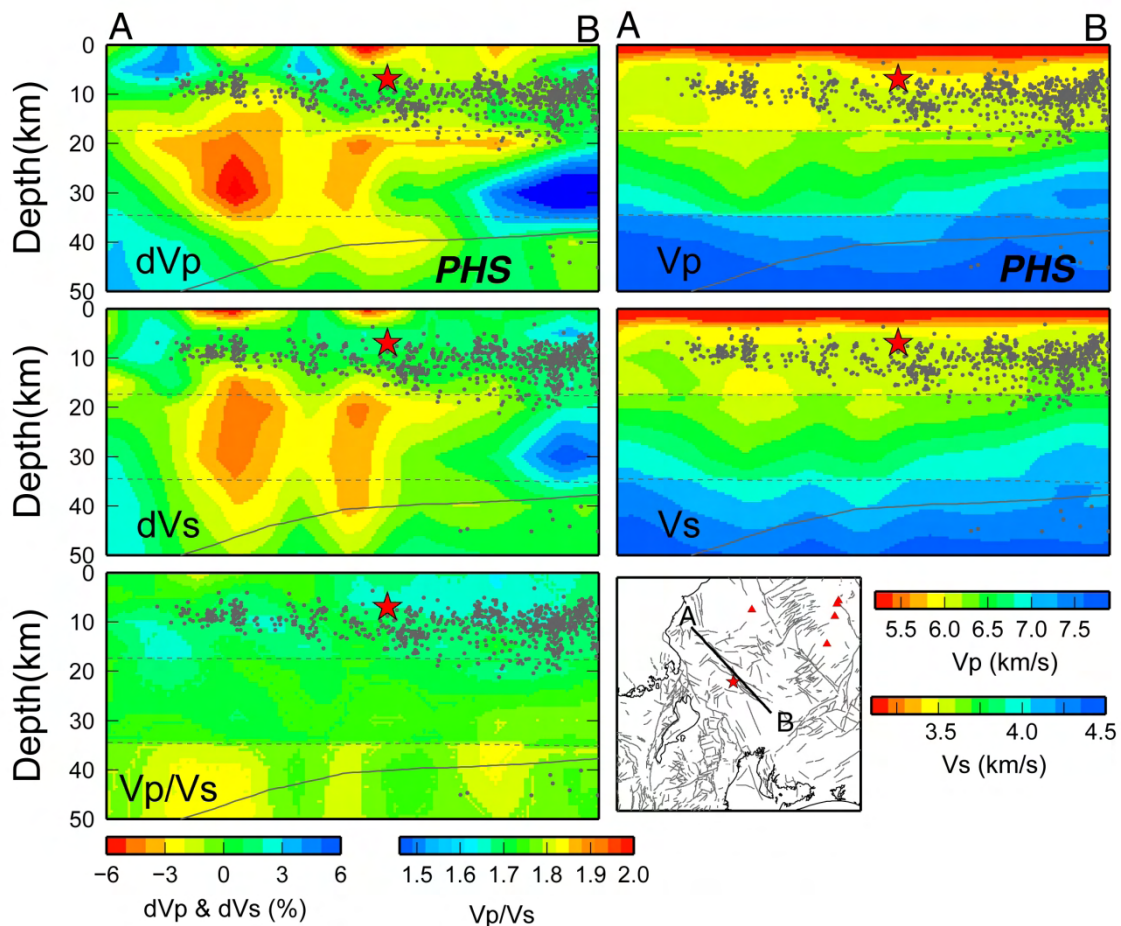


図1 濃尾断層に沿う鉛直断面図。

赤星は濃尾地震の震源，灰色点は微小地震，灰色線はフィリピン海プレートの上境界をあらわす。