

(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る。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 22 年度成果の概要：

本計画では、内陸地震の応力集中プロセスの解明に向けて、濃尾地震震源域において総合集中観測を実施している。その一方で、前計画で実施された跡津川断層域における総合集中観測については、各観測項目について最終結果が提出されつつある。二年目に入った濃尾地震震源域の総合集中観測では、地震・GPS 等のデータが順調に蓄積されるとともに、注目すべき成果が出始めた。広域地震観測及び稠密アレー観測の暫定的な解析によれば、濃尾地震破壊開始点近傍にアスペリティに相当すると思われる高速度域、その下には低速度域が存在する。中部日本下に沈み込むフィリピン海プレートは、その沈み込み角度が震源域下でほぼ水平となり、更に震源域北西部に向かって島弧側モホ面が約 25 km と浅くなる。上述のアスペリティ下の低速度域は、この浅くなったモホ面の上部に存在する。これらの結果は、濃尾地震の発生には、沈み込むフィリピン海プレートと島弧側地殻・上部マントルの間に強い相互作用が働いている可能性が高いことを示唆する。

一方、跡津川断層域の総合集中観測については、トモグラフィ解析や制御震源探査データの解析から、新潟-神戸歪集中帯の中の跡津川断層域に更なる低速度異常の存在が確実となった。これは、いくつかの異なった空間スケールの構造的不均質が階層構造を形成していることを意味するものである。

モデリングについては、様々なデータがほぼ出揃った跡津川断層域で行われ、地震観測から明らかとなった応力分布をほぼ説明するモデルが提案された。

【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、4 点を観測網南部域に新設し、濃尾地震断層を取り囲む 100 km 四方域における 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、様々な解析が開始された。

最も基礎的情報となる断層周辺の地震活動に関しては、連続波形データに対してエンベロープ波形相関法を適用して、震源断層近傍の微小地震の自動震源決定を行い、活動状況の迅速な把握に努めた。その結果、手動検読読み震源位置と比べて若干のずれ (0.5-1 km 程度) があるものの、気象庁一元化処理震源と比べて約 1.5 倍の検知能力のあることがわかった。暫定的ではあるが、断層周辺の震源分布の全体的な特徴として、震源域北部から南部にかけて地震発生層の下限が徐々に深くなるとともに、

活動度が活発化する傾向にある。更に、主要断層セグメントに対応して、下に凸型の震源分布を示す点が興味深い。

断層域及びその周辺域の3次元不均質構造を解明する目的で、地震波トモグラフィ解析が開始された。広域地震観測網及び定常地震観測網で観測された地震515個を用いた予備解析によれば、濃尾地震震源域直下の下部地殻ではS波が特に低速度である。本年度の稠密地震アレーは、震源断層沿いに90kmの長さにわたってほぼ直線状に展開され、6ヶ月間の観測が実施された。これらのデータを周辺の定常観測網・本研究の広域地震観測網のデータと統合し、断層近傍の精密トモグラフィ解析を行った。その結果、破壊開始点と考えられる震源域北西部(温見断層)の地震発生層深部には低速度体が存在し、地殻内流体の存在を示唆する結果を得た(図1)。この低速度体の直上には顕著な高速度体が存在($X = -22 \sim 0$ km)し、その中では地震活動度が低調である。地表変位量が最大値を示す根尾谷断層の中央部でも地震活動度が相対的に低く、高速度体は深さ10km以深に存在する。震源分布の特徴は、前述の自動震源決定された震源分布と良く一致する。これらの高速度体が、アスペリティに相当する可能性が高い。

対象域の深部構造解明を目指し、定常観測網及び本計画の広域及び稠密地震観測網データを用いたレーザー関数解析が行われた。その結果、震源域の南東部の深さ約40km付近に沈み込むフィリピン海プレートの海洋性地殻上面と海洋性モホ面に対応する低速度・高速度の不連続面が明瞭に示された(図3)。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。特筆すべき特徴として、南東部では深さ約30kmに島弧側モホ面が存在するが、震源域北西部に向かってモホ面が約25kmと浅くなる。この浅くなったモホ面の浅部には、トモグラフィ解析で見つかった低速度体が存在する。濃尾地震の発生には、沈み込むフィリピン海プレートと島弧側地殻・上部マントルの間の強い相互作用が働いている可能性が高い。

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によれば、濃尾地震断層周辺では横ずれ型と逆断層型の解が支配的で、ほとんどの地震のP軸の方位は、広域応力場と調和的な西北西～東南東、東～西、西南西～東北東を向く(図3)。更に、広域観測網内で応力降下量の推定を行ったところ、その値は1.5-30MPaと求められた。この値は、過去の大地震および小地震の応力降下量の解析結果と調和的である。今後のデータの集積と解析の進展により、濃尾地震断層周辺の微細な応力場の変化、あるいは震源メカニズム解や応力降下量の空間変化と構造の対応関係が明らかにできるものと考えられる。

この地域の減衰構造を求める解析も始まり、濃尾地震震源域合同観測網で観測したデータの波形データのスペクトルに対しQトモグラフィの空間分解能テストが行われた。地震波干渉法を用いた雑微動の自己相関関数の減衰率(Q_{ACF})の推定も開始された。

電磁氣的観測では、防災科学技術研究所による既存の3測線でのMT観測測線を取り囲み、跡津川断層周辺域での観測につなげ広域深部比抵抗構造を求めることを念頭に、岐阜県内に13交換所エリア、福井県内に7交換所エリアを選定した。現在、その交換所周りの電極設置工事が進行している段階であり、平成23年4月から観測を開始できる見込みである。また、中竜鉦山坑道内に3成分磁力計を設置し、平成23年1月末よりデータ取得を開始した。

GPS観測においては、昨年度設置した20箇所のうち7観測点において、前年度に開始した観測を7月まで継続して連続データを取得した。更に前年度から取得したデータを、周囲のGEONET観測点22箇所、IGS観測点7箇所のデータと併せて解析して精密な日座標値を得た結果、その座標値の再現性が非常に高いことがわかった。これまで得られたから水平速度ベクトルを得てはいるが、観測期間が2～8ヶ月程度と短いため、有意な地殻変動の検出には至っていない。今後観測期間が3年以上に伸びれば速度推定の精度が向上し、議論が行えるようになるものと期待される。

【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、広域観測網地震データを用いたトモグラフィ解析がほぼ終了した。その結果として、10km程度の分解能で不均質構造を推定できた。

断層域の地震活動は、下に凸の分布形状を示し、浅部で活動が抜けている領域には、中部地殻からつながる低速度域が存在する。また、その両側は高速度で、地震は主として高速度域で発生している。これは、断層域の稠密アレー観測によるトモグラフィ結果とほぼ調和的である。跡津川断層帯直下の下部地殻は、周囲（NKTZ内）に比べ、さらに3-6%ほど低速度になっている。母岩を仮定して速度低下を全て流体の寄与だと仮定すると、跡津川直下の下部地殻は2-3vol%、その周囲のNKTZ下では0.8vol%程度の流体があればこの速度低下を説明可能である。速度不均質構造から推定される流体分布からは、NKTZの外、NKTZ内、跡津川断層下と、階層構造になっていることが強く示唆される。

更に2007年に行われた構造探査についても解析が進展した。跡津川断層直下では基盤層の深さが浅く、深さ15km程度から厚さ5km-10kmの顕著なReflective Zoneが見られた。Reflective Zoneの位置は、自然地震トモグラフィ解析によって得られたS波の低速度域と調和的であった。また、この地域では比抵抗構造探査が行われており、下部地殻から牛首断層、跡津川断層、高山-大原断層帯へと伸びる3つの低比抵抗域が得られている。構造探査の反射法解析によって得られた顕著なReflective Zoneは、これらの低比抵抗域と重なるように存在している。今回の構造探査によって得られたReflective Zoneが、低速度構造や低比抵抗構造であることから、下部地殻における流体の存在と大きく関係していることは明白である。実際、両者の空間分布の大局的傾向は、比較的良好一致を示す。しかし、流体分布の局在化の特定については、各々の観測の解像度を含めて、更なる検討が必要である。

跡津川断層のGPSデータの解析も終了し、詳細な地殻変動分布が明らかとなった。その結果、跡津川断層周辺で明瞭な右横ずれ変形が見られ、断層の応力蓄積過程を反映した地殻変動分布が得られた。最大剪断ひずみ速度の分布では、跡津川断層両端に剪断ひずみの集中が見られる点、跡津川断層の南側では西半分だけに剪断ひずみの集中が見られる点が特徴である。前者は、火山活動に起因するものと解釈できる。即ち、熱異常により脆性-延性遷移領域が浅くなり、上部地殻内で非弾性変形が進行していると考えられ、地震発生域の下限の深さ分布とも整合的である。後者の特徴は、跡津川断層の南側に位置する高山-大原断層帯の断層トレースは跡津川断層の西半分の南側に分布していることに対応していると考えられる。従って、GPSで見られる地殻変形分布が断層の応力蓄積過程を反映した結果と見ることができる。地殻変動の分布は各断層の地表トレースに対応したひずみ分布を示すことから、各断層には独立した応力蓄積の仕組みを持っていると考えられ、下部地殻内における各断層の深部延長で変形集中が生じているとするモデルと整合的である。

また、この速度分布に基づいて各断層で区切られた弾性ブロックの相対運動速度として各断層の平均変位速度を推定したところ、跡津川断層で7-9mm/年、牛首断層で2-3mm/年、高山-大原断層帯で2-3mm/年という値が得られた。これらの値は地質学的に推定された値と比較して系統的に2-3倍大きい。このことは、地殻で生じる変形のうち長期的に主要活断層で解消される分は1/2~1/3程度で、残りは他の小断層や地殻全体の非弾性的な変形によって賄われていることを示すと考えられる。こうした傾向はプレート境界域の特徴と異なる日本列島内陸部の変形の特徴と考えられるが、他地域のデータとも比較した検討が今後必要である。

【内陸地震域応力集中プロセスのモデリング】

これまでの観測で得られた知見を元に、内陸地震の応力集中メカニズム解明のためのモデリングが行われている。本年度は、山陰地方の地震帯に関するFEMモデル(Kawanishi et al., 2009)を発展させ、断層の下部延長だけでなく断層の両端の不均質構造も考慮できる有限要素モデルを作成し、Katsumata et al. (2010)らにより推定された跡津川断層周辺の応力場を説明することを試みた。この計算では、下部地殻は、全体に線形粘弾性としたが、断層の直下および両端の領域は、周辺より緩和時間を小さく設定している。また、モデル領域は地殻だけとし、最上部マントルとはデカップルしていると仮定した。モデルの側面と上下の面に一定の応力を加えて、十分に時間が経過した後の断層周辺の応力場を、断層域の推定応力場と比較した。Katsumata et al. (2010)によれば、跡津川断層周辺では横ずれ型、断層から離れると逆断層型の応力場となる。このような特徴は、逆断層型の応力場をモデル領域の側面に与えることにより、断層周辺の横ずれ型応力場を含めて再現できることが分かった。更に、下部延

長の粘性の小さな領域の幅を変えて計算を行ったが、応力場の推定結果の空間分解能が十分ではなく、下部延長の幅を拘束するには至っていない。

- (8) 平成 22 年度の成果に関連の深いもので、平成 22 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :
- Aochi, H., and A. Kato (2010), Dynamic rupture of cross-cutting faults: Possible rupture process of the 2007 Mw6.6 Niigata-Ken Chuetsu-Oki earthquake, *J. Geophys. Res.*, 115, B05310, doi:10.1029/2009JB006556.
- Hiramatsu, Y., K. Iwatsuki, S. Ueyama, T. Iidaka, and the Japanese University Group of the Joint Seismic Observations at NKTZ, Spatial variation in shear wave splitting of the upper crust in the zone of inland high strain rate, central Japan, *Earth Planets Space*, 62,675-684, 2010.
- Kato, A., T. Miyatake, and N. Hirata (2010), Asperity and Barriers of the 2004 Mid-Niigata Prefecture Earthquake Revealed by Highly Dense Seismic Observations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 1, 298-306.
- Kato, A., T. Iidaka, R. Ikuta, Y. Yoshida, K. Katsumata, T. Iwasaki, S. Sakai, C. Thurber, N. Tsumura, K. Yamaoka, T. Watanabe, T. Kunitomo, F. Yamazaki, M. Okubo, S. Suzuki, N. Hirata (2010), Variations of fluid pressure within the subducting oceanic crust and slow earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L14310, doi:10.1029/2010GL043723.
- Kato, A., T. Iidaka, T. Iwasaki, N. Hirata, and S. Nakagawa (2010), Reactivations of boundary faults within a buried ancient rift system by ductile creeping of weak shear zones in the overpressured lower crust: the 2004 mid-Niigata Prefecture Earthquake, *Tectonophysics*, 486, 101-107.
- Kato et al. (2011), Anomalous depth dependency of the stress field in the 2007 Noto Hanto, Japan, earthquake: Potential involvement of a deep fluid reservoir, *Geophys. Res. Lett.*, in press.
- Katsumata, K., M. Kosuga, H. Katao, and the Japanese University Group of the Joint Seismic Observations at NKTZ, Focal mechanisms and stress field in the Atotsugawa fault area, central Honshu, Japan, *Earth Planets and Space*, 62, 367-380, 2010.
- Nakajima, J., A. Kato, T. Iwasaki, S. Ohmi, T. Okada, T. Takeda, and The Japanese University Group of the Joint Seismic Observations at NKTZ, Deep crustal structure around the Atotsugawa fault system, central Japan: A weak zone below the seismogenic zone and its role in earthquake generation, *Earth Planets Space*, 62, 555-566, 2010.
- 津村紀子・森智之・青柳恭平・阿部信太郎・小田義也. 微小地震スペクトルを用いた Q トモグラフィ - 震源パラメータと Q 値の同時推定法の中越地震震源域への適用例 - , *物理探査*, 63, 印刷中, 2011

(9) 平成 23 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、レシーバー関数解析、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。

電磁氣的観測においては、防災科学技術研究所による既存の 3 測線での MT 観測測線を取り囲み、跡津川断層周辺域での観測につなげ広域深部比抵抗構造を求めることを念頭に、岐阜県内に 13 交換所エリア、福井県内に 7 交換所エリアを選定した。現在、その交換所周りの電極設置工事が進行している段階であり、平成 23 年 4 月から観測を開始できる見込みである。

GPS 観測では、平成 22 年度以降は、観測機器が使用できる期間にできるだけ長期の連続的な観測を実施して、地殻変動の検出を進めていく。

モデリングについては、引き続き跡津川域のシミュレーションを行うとともに、その知見を活かして濃尾震源域におけるモデリングに着手する。

(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：

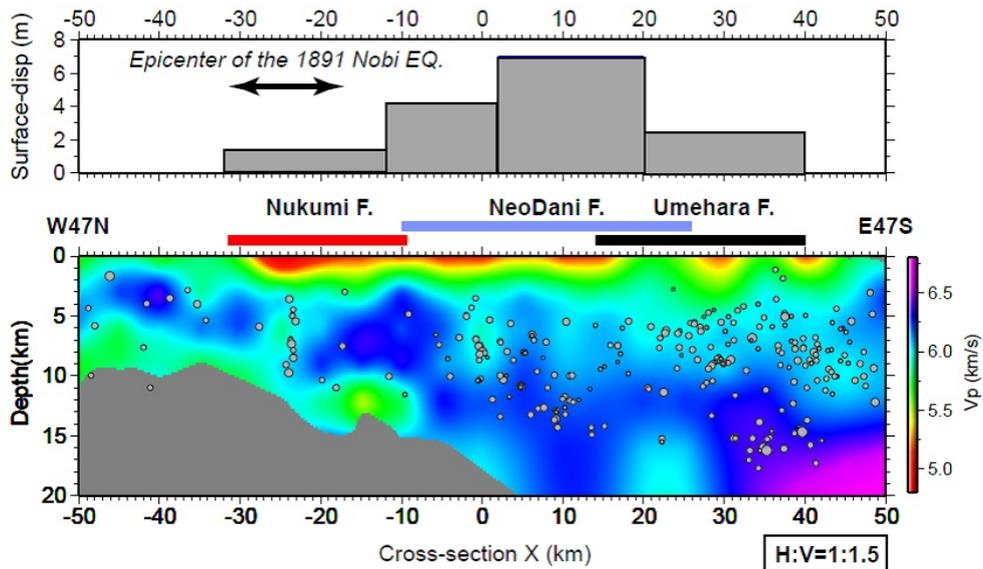


図 1. 濃尾地震震源断層沿いの P 波速度構造の深さ断面図を示す（下図）。濃尾地震に関連した主要活断層の位置と地表変位量を参考のために上図に示す。

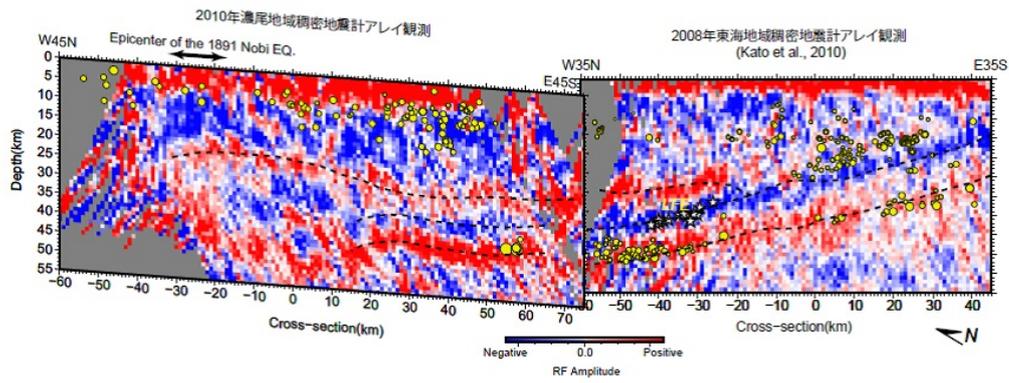


図 2. 濃尾地域と東海地域で得られたレイナー関数の深さ断面図を示す．黄色の印は微小地震の震源，白い印は深部低周波地震（LFE）の震源を表す．

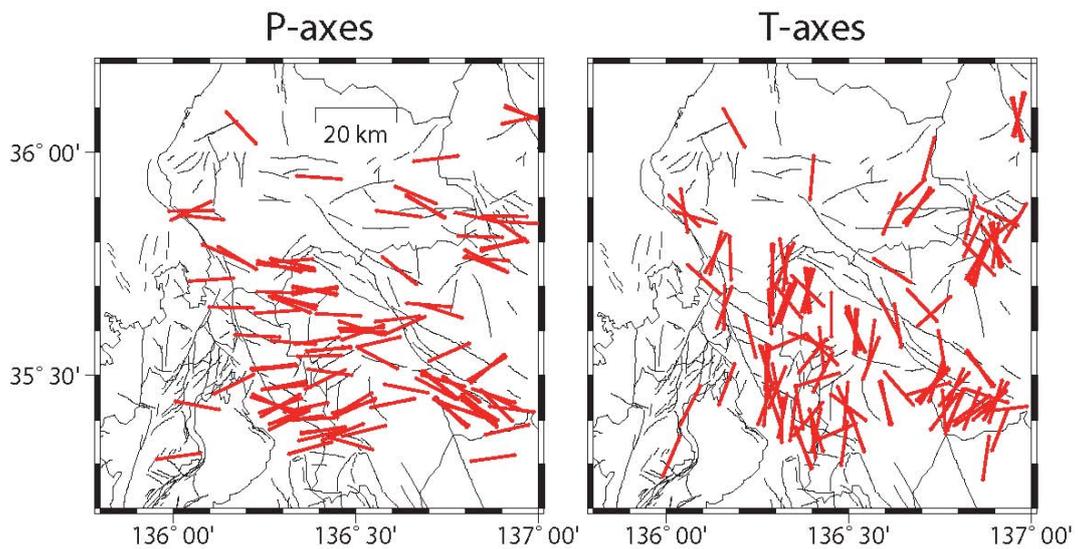


図 3. 濃尾地震断層域周辺の地震メカニズム解から得られた P-軸及び T-軸分布．