

( 1 ) 実施機関名：

京都大学防災研究所

( 2 ) 研究課題(または観測項目)名：

内陸地震の発生機構と発生場の解明とモデル化

( 3 ) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

イ. 内陸地震

( 4 ) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

イ. 地震断層滑りのモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

オ. 構造共通モデルの構築

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

( 5 ) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

首都直下地震

( 6 ) 平成 30 年度までの関連する研究成果(または観測実績)の概要：

- ・ 跡津川断層系において、InSAR と GNSS を組み合わせることにより、歪集中帯内部の歪が不均質であることを明らかにした (Takada et al., 2018)。
- ・ 山陰地方の島根県東部から鳥取県にかけて顕著な歪集中帯を発見した (Nishimura and Takada, 2017)。
- ・ 四国地方で広帯域 MT 観測を約 30 点で実施し、中東部と中西部の比抵抗の不連続領域が深部低周波微動の発生域に対応することを再確認した。中西部では MTL 付近に比抵抗構造の境界があり、南側の低比抵抗領域が北側の高比抵抗領域の下に北傾斜の形状で存在すること、周期 1 秒～数 10 秒の見かけ比抵抗の面的分布の特徴から MTL が比抵抗構造境界であることが示唆された。
- ・ 鳥取県中部の地震 ( M6.6 ) 震源域周辺の比抵抗データから、2015 年と 2016 年の地震発生域に連続する低比抵抗領域が帯状に存在することが示唆された。

- ・山陰地方の地震帯直下の深さ 25km において、幅約 50km 程度の低速度異常域を見出した。さらに、島根県東部から鳥取県西部にかけて、地震帯直下の Weak zone の変形によると解釈できる応力場の回転を捉えた (Iio et al., 2017)。
- ・山陰地方の地震帯周辺において、近年発生した大地震の断層端に低速度異常域を系統的に見出した。
- ・島根県東部の定常的な地震活動域において、非常に小さな断層強度を推定した (Iio et al., 2017)。
- ・鳥取県中部地震の断層の両端で地震前に応力緩和していたことを示唆するメカニズム解が得られた。
- ・近畿地方中北部において、レシーバー関数解析と S 波の反射法解析により、モホ面や S 波の反射面の詳細な形状が明らかになった (Aoki et al., 2016, Katou et al., 2018)。S 波の反射面が花折断層や西山断層直下の下部地殻において断層沿いに分布していること、モホ面の形状に関して、微小地震の集中している北摂丹波地域では非常にフラットであるがその南側および東側に向かって浅くなっていることが見出された。
- ・長野県西部地域において、数十 m 以内と近接して発生する地震のペアの P 軸が大きく異なっていることから、微小地震の断層の強度が非常に小さい可能性が指摘された (Iio et al., 2017)。
- ・御嶽山周辺域のテクトニック応力場の推定を行い (Terakawa et al., 2016)、これを基に地震メカニズムトモグラフィー法を用いて、間隙流体圧分布の推定を実施した (Terakawa et al. 2013b; Terakawa 2017)。その結果、東麓の群発地震発生域の間隙流体圧レベルは 10-30 MPa 程度であることを示した。また、地震メカニズムトモグラフィー法を用いて、注水実験による誘発地震のメカニズム解から間隙流体圧場の時間発展を推定した (Terakawa 2014)。
- ・御嶽山直下で発生する火山性地震のメカニズム解のタイプから、応力場の時間変化に基づいて御嶽山の火山活動をモニターする手法について提案した (Terakawa et al., 2016)。
- ・間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場のモデル化・推定法 (Terakawa and Hauksson, 2018) を用いて、1992 年ランダース地震震源域の絶対応力場を推定した。
- ・西南日本における地殻変動観測データを用いて、ブロック断層モデルによる内陸ブロック境界での相対運動速度と南海トラフ・相模トラフにおけるプレート間カップリングの同時推定を行った (Nishimura et al., submitted)。その結果、アムールプレート安定部とフィリピン海プレート安定部の相対運動速度 (約 7cm/yr) のうち、1/3 から 1/4 は中央構造線や山陰ひずみ集中帯などの西南日本内陸部での変形によって賄われており、残る 2/3 から 3/4 が南海トラフから沈み込むプレート境界域での変形によって賄われていることが明らかになった。この陸側プレート内の変形が集中している領域は、新潟-神戸ひずみ集中帯から淡路島を通り、中央構造線から大分、阿蘇、布田川・日奈久断層帯へと至る領域であり、これらの領域では概ね 1cm/yr 程度の相対運動を賄っていると推定される。また、南海トラフ沿いのプレート境界域での固着分布は一樣ではなく、最もカップリング率の大きな深さ 10-25km の領域において、東経 132 度、136 度、137 度付近に固着の弱い場所があり、過去の巨大地震のセグメント境界に対応することがわかった。
- ・鳥取県中部地震 (Mj6.6) は、詳細な地殻変動解析より余効すべりが地震時すべりの小さかった浅部領域で主に発生していることが明らかになった。
- ・気象庁一元化震源データや阿武山微小地震観測網のデータに非定常 ETAS モデルおよび時空間 ETAS モデルを当てはめ、地震活動の時間変化を定量的に捉えた。1989 年頃からの静穏化とその加速、約半年前の活発化と兵庫県南部地震直前の急激な静穏化が示された。
- ・近年発生した内陸大地震に関連した地震活動変化と GNSS 観測データの関連について詳しい調査を行い、GNSS 観測データの小さな変化については注意深い検討が必要であることが分かった。
- ・深部延長に延性剪断帯を持つ大規模な内陸活断層の数値モデルを使用し、外部からの擾乱に対し内陸活断層がどのように反応するかを調べ、活動期の長さや海溝型地震サイクルの長さのスケールリングについて予察的な結果が得られつつある。

(7) 本課題の 5 か年の到達目標 :

地震の発生機構や発生場の解明のためには、断層近傍の応力場および断層の強度の解明が重要である。本研究の主な目的は、西南日本のひずみ集中帯などにおける内陸地震の断層への载荷過程および断層の強度低下過程の解明である。

断層への载荷過程においては、様々な手法を駆使して、内陸地震の断層周辺の不均質構造や変形場を捉えて、応力場の形成過程を解明する。より具体的には、歪集中帯の内部構造や詳細な変形様式の解明、地殻・マントル上部の比抵抗構造の不均質性の解明、内陸地震の断層周辺の3次元の不均質構造、低周波地震活動や応力場の解明等による非弾性変形と断層への応力集中過程の解明、西南日本のブロック断層モデルの高度化と数値シミュレーションによる内陸地震の発生過程の解明、地震活動変化の解明を主な目的とする。また、内陸活断層の数値モデルに応力擾乱を加える数値実験を行い、海溝型巨大地震サイクルに伴う準周期的な応力変動と内陸地震の関係(活動期)について理解する。現計画の期間には、満点方式の高密度地震観測網内において、2018年島根県西部と大阪北部の地震が発生した。鳥取県西部と中部の地震が地震発生域をほとんど断ち切るようなM7クラスの大地震だったのに対して、これらは一回り小さいM6クラスで、余震域は深さ5km以深に限定されているため、両端に加えて浅い側での大地震発生の可能性の評価も必要である。特に、大阪北部の地震は、都市域で発生し、しかも周辺に、上町断層帯や有馬高槻断層帯、宇治川断層など、大都市直下の大きな活断層が複数分布しており、それらへの影響が懸念されているため、山陰地方のひずみ集中帯で得られた知見等も活用して、地震の発生過程と今後の推移の予測を試みる。

断層の強度低下過程の解明においては、間隙流体圧等の上昇に伴う断層強度の低下を解明する。従来は、断層面での剪断応力の蓄積が重要視されてきたが、2011年東北地方太平洋沖地震後に東日本内陸域の広い範囲で誘発地震が発生したことは、本震の引き起こした応力変化よりも、間隙流体圧等の急激な上昇に伴う断層強度の低下が地震の発生に重要な役割を果たしたことを強く示した(e.g., Terakawa et al. 2013a)。プレート境界から数100km離れた内陸域では、プレート運動による広域応力蓄積レートに比べて、間隙流体圧場の時間変化のスケールは有意に速いと考えられる。このことは、一般的な内陸地震の発生においても、断層強度の低下が重要な役割を果たす可能性があることを意味する。本研究においては、地震メカニズムトモグラフィ法(FMT法)による三次元間隙流体圧場の時間発展解析(Terakawa et al., 2013b; Terakawa, 2014)を軸とし、と間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場のモデリング手法(Terakawa and Hauksson, 2018)内陸地震の発生における間隙流体圧及び応力の役割を定量的に分析することを目的とする。

#### (8) 本課題の5か年計画の概要:

##### ・断層帯周辺の稠密地殻変動とモデリング

山陰地方、大阪府北部、跡津川断層系周辺の3つの横ずれ断層が支配的な地域を対象にGNSSとInSARによる稠密地殻変動観測を行い、断層周辺域における歪速度の詳細分布や時間変化の有無を明らかにして、断層帯深部の定常すべりの検出や変形様式の考察を行う。

H31:GNSS観測網の再構築と大阪府北部地域における新規観測点の設置、跡津川断層周辺のInSAR解析

H32:既存GNSSデータに基づくひずみ速度分布の解明、跡津川断層周辺のInSAR解析

H33:新規GNSS観測点のデータも含めた詳細ひずみ速度分布の解明と地殻変動の時間変化の検討、跡津川断層周辺のInSAR解析

H34:新規GNSS観測点のデータも含めた詳細ひずみ速度分布及び時間変化の解明、跡津川断層周辺のInSAR解析、地殻変動モデリング

H35:GNSSデータとInSARデータを統合し、観測された地殻変動に基づくモデリングと考察を行う。

##### ・比抵抗観測とモデル化

中国・四国地方の基盤的比抵抗構造では緯度・経度方向に5分×7.5分の測点密度観測網を展開する。(a)鹿野・吉岡・岩坪断層を含む線状配列をなす地震活動帯、(b)中国地方東部域(地震活動帯から那岐山断層帯を越え吉備高原中北部の鳥取・岡山県境周辺域)ならびに中国地方中北部域(島根県東部地震空白域から鳥取県境付近)において広帯域MT観測を実施する。(c)四国地方では未測定エリア

において 10 分 × 10 分基盤的測点データを取得すべく広帯域 MT 観測を展開する。以上、測点密度を向上させた 3 地域における広域的・基盤的比抵抗構造調査をもとに、主に、流体分布の観点から、地殻・マントル上部の空間的構造不均質性を明らかにし、地震・火山現象を支配する場の解明とモデル化に寄与する。

各年度の主な計画は次の通り。H31:中国中北部・東部及び四国地方の MT 予備調査と選点完了地域における本観測ならびに既存データを用いた四国地方の基盤的比抵抗構造解析を実施。H32:同じく中国・四国地方の MT 予備調査と選点完了地域における本観測を実施。H33:四国地方の MT 観測ならびに中国地方の基盤的比抵抗構造解析を実施。H34:四国地方及び中国地方の基盤的比抵抗観測網の未測定エリアにおいて補観測を実施。H35:中国・四国地方の基盤的比抵抗観測の未測定エリアにおいて補観測を実施。中国地方中北部・東部域～四国地方の基盤的比抵抗構造統合モデルを構築し、地震・火山現象を支配する場の解明とモデル化に寄与する。

#### ・高密度地震観測による内陸地震の発生機構と発生場の解明

山陰地方の地震帯、近畿地方中北部や長野県西部地域など西南日本の横ずれ断層の活動域において高密度地震観測を行い、内陸地震の断層周辺の 3 次元の不均質構造、低周波地震活動や応力場の解明等を行う。特に、大阪北部の余震域とその周辺において高感度地震観測を強化して、有馬高槻断層帯などの断層周辺の 3 次元の不均質構造、応力場や断層の強度などを推定する。また、震源に極近い観測点の連続波形記録等から前震から本震に至る過程を調査する。また、余震観測等を含む高密度な地震観測網記録に地震波干渉法を適用することによって、都市部での断層構造や浅部地下構造推定の可能性を調べる。

H31: 高密度地震観測網の再構築、大阪北部の地震の詳細な余震分布および余震域とその周辺の応力場の推定、大阪北部の地震の本震前の連続波形記録や測地学的記録の精査、

H32: 大阪北部の地震の余震域とその周辺の 3 次元不均質構造の推定、大阪北部の地震の本震に至るモデル化

H33: 大阪北部の地震の余震域周辺における低周波地震活動の解明、観測点ペアにおける地震波干渉法の適用

H34: 大阪北部の地震の発生過程と今後の地震活動の推移の予測、全波動場計算の結果と地震波干渉法により得られた疑似地震波形との比較による構造推定と解釈

H35: 統合モデル化、地震波干渉法の都市部地下構造探査への応用可能性の検討、高密度地震観測網の撤収。

#### ・地震の発生における応力と流体の役割の解明

本研究では、プレート運動による応力蓄積率の遅い内陸地域を対象に、地震のメカニズム解から地殻内の絶対応力場、及び地震の発生における応力と流体の役割を定量的に評価することを目指す。このため、内陸域にありながら活発な地震活動が観測される御嶽山周辺域などを対象とする。研究の軸となる FMT 法 (Terakawa et al., 2010; Terakawa, 2014) と間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場モデリング手法 (Terakawa and Hauksson, 2018) では、地震のメカニズム解をデータとして用いる。このため、研究期間全体を通じて、名古屋大学をはじめとする諸機関の定常地震観測によって得られた良質な地震データから、気象庁カタログには掲載されない微小地震も含めて震源とメカニズム解を推定し、データベースを構築する。

H31-32: FMT 法は、応力場と地震メカニズム解の関係から、地殻内の間隙流体圧場を三次元的に推定する手法である。この手法では、応力場のパターンの推定誤差がインバージョン解析のモデル誤差となり、結果に偏りを生じる可能性があることがわかっている (Terakawa, 2017)。このため、応力場の推定誤差を取り入れた定式化を行うことを検討する。

また、これまでの成果により、御嶽山東麓の群発地震発生域に、静水圧を  $15 \pm 5$  MPa 程度上回る安定な高圧間隙流体圧場が形成されている可能性があることがわかった (Terakawa, 2017)。本研究では、改良した FMT 法と微小地震から求めた局所応力場とその推定誤差 (Terakawa et al., 2016) を用いて、この領域の間隙流体圧分布の時間発展解析を行い、活発な群発地震活動と間隙流体の関係を定量的に

明らかにする。

H33-34: 間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場モデリング手法では、文字通り、( 応力場の最適面に働く ) 間隙流体圧をパラメータに絶対応力場をモデル化し、大地震の引き起こす応力変化や弾性歪エネルギーの変化に基づいて適切な間隙流体圧レベルを推定し、これを通じて絶対応力場を求める ( Terakawa and Hauksson, 2018 )。この絶対応力場の推定解析を、本研究で推定した大量の地震のメカニズム解に適用し、2017年6月25日の長野県南部の地震 ( M 5.6 ) の発生直前の絶対応力場を推定することを試みる。一方、地震の発生した断層運動のタイプと応力場のパターンの関係を統計的に調べて、観測データから絶対応力場レベルを測る手法について検討することを試みる。地震は既存弱面を利用した応力解放過程であるため、一様な応力場の下においても、ばらついたメカニズム解が観測されることがある。このメカニズム解のばらつきは、経験的に、地震の規模が大きくなるにつれ観測されなくなる傾向があり、ばらつきが観測されなくなる最小マグニチュード ( ここでは  $M_c$  と定義する ) は地域毎に異なる ( Terakawa et al., 2012, 2013b; Terakawa, 2014 )。本研究では、大量のメカニズム解のデータから、 $M_c$  の分布を場の情報として求めて、絶対応力レベルとの関係を調べる。また、御嶽山周辺域以外の内陸地域 ( 2016年熊本地震、2009年ラクイラ地震、1992年ランダース地震の震源域など ) について、同様な解析により絶対応力場や  $M_c$  の分布を推定し、テクトニクスによる絶対応力場の特徴の違いなどを分析することも視野に入れる。

H35: H33-34年度に推定した絶対応力場と間隙流体圧レベルを基に、まず、長野県南部の地震の引き起こす応力変化が原因で余震が活発化すると考えられる地域を調べて、実際の余震活動と比較する。次に、本震による応力変化で説明できない余震活動を特定し、FMT法の考え方をを用いて、応力場とメカニズム解の関係から間隙流体圧の影響を定量的に調べることを試みる。

#### ・西南日本の地殻変動と内陸地震の活動期のモデリング

西南日本において内陸域のひずみ集中帯を含む広域地殻変動場をブロック断層モデルを用いてモデル化し、南海トラフの巨大地震サイクルに伴う内陸地震の活動期・静穏期を CFF ( Coulomb 's Failure Function ) とブロック形状に基づくシミュレーションと個別の断層に着目した摩擦構成則を用いたシミュレーションによって再現して、そのメカニズムを明らかにする。

H31:GNSS データ及びブロック構造に関連する知見の整理、個別の断層に与える長期的滑り速度や地震発生層の厚さ等の境界条件の整理、シミュレーションプログラムのコーディング

H32: 粘弾性変形を考慮したブロック断層モデルの高度化と CFF 及び摩擦構成則を用いた個別断層のシミュレーションの構築、シミュレーションプログラムのコーディング

H33:シミュレーションと実際の地震活動及び地殻変動との比較によるシミュレーションのパラメータのチューニング

H34: シミュレーションと実際の地震活動及び地殻変動との比較によるシミュレーションのパラメータのチューニング、 CFF と摩擦構成則を用いたシミュレーションの統合に関する検討

H35:内陸地震の活動期のシミュレーションの統合化とまとめ

#### ・地震活動変化

内陸大地震の発生前の地震活動変化はゆっくりすべりによる応力変化 ( CFS ) に起因するという説を、GNSS 観測データの解析や地下構造や応力場のデータも含めて検証するとともに、地震活動の異常性を業務的に捉えられるようなモデルとそのソフトウェアを開発し、確率予測が可能になるような統計モデルの提案を目指す。

H31-32:地震データの整理と予備的な解析。H33:地震活動変化解析。H34-35:統計モデル作成。

#### ( 9 ) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

京都大学防災研究所

他機関との共同研究の有無 : 有

名古屋大学大学院環境学研究科、鳥取大学大学院工学研究科、北海道大学大学院理学研究院、九州大学大学院理学研究院、東京大学地震研究所、林能成 ( 関西大学社会安全学部 )、尾形良彦 ( 統計数理

研究所名誉教授)

( 10 ) 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：京都大学防災研究所

電話：

e-mail：

URL：

( 11 ) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：飯尾能久

所属：京都大学防災研究所