

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19H02000

研究課題名(和文)なぜ活断層の少ない山陰ひずみ集中帯で内陸地震が多発するのか？

研究課題名(英文)Why do many inland earthquakes occur in the San-in shear zone where a few active faults exist.

研究代表者

西村 卓也(Nishimura, Takuya)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：90370808

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：GNSS観測点の新設と既存の観測点の統合解析により、山陰ひずみ集中帯を中心とする西南日本周辺の詳細地殻変動分布が明らかになった。広域の地殻変動解析から、山陰ひずみ集中帯はアムールプレートとフィリピン海プレートの相対運動の一部を担うブロック境界であることが明らかになる一方、鳥取県では顕著に見られるひずみ速度の集中域は、鳥根県西部より西側では顕著ではなく、ブロック境界は沖合に存在することが示唆される。また、南海トラフの地震サイクルに伴う地殻変動シミュレーションから、マンツルの粘弾性緩和の影響は、地震サイクルの後半では過去の大地震の影響とプレート間固着の影響が打ち消し合うため、小さいことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、山陰ひずみ集中帯がアムールプレート安定部と西南日本の日本海側地域との間の運動学的なブロック境界であることがはっきりし、アムールプレートとフィリピン海プレートの相対運動の一部をまかなう変形帯であることが明らかになった。そのため、山陰ひずみ集中帯は、長期的にも内陸地震が多発する地帯であることがわかった。また、南海トラフ地震のプレート間固着の推定に、1990年代から現在までのGNSSによって観測された地殻変動を使う場合は、地下の媒質を弾性体と近似できることを示した。

研究成果の概要(英文)：The detailed crustal deformation distribution around southwestern Japan centering on the San-in shear zone has been clarified through the installment of new GNSS stations and the integrated analysis of new and existing stations. The regional crustal deformation analysis reveals that the San-in shear zone is a block boundary that accommodates a part of the relative motion of the Amurian Plate and the Philippine Sea Plate, while the concentrated area of strain rate that is prominent in Tottori Prefecture is less prominent in western Shimane Prefecture. It suggests that the block boundary is offshore in this region. This suggests that the block boundary exists offshore in this region. Simulations of crustal deformation associated with the Nankai Trough earthquake cycle indicate that the effect of viscoelastic relaxation in the mantle is small in the latter half of the earthquake cycle because the effects of past large earthquakes and interplate locking cancel out each other.

研究分野：測地学

キーワード：GNSS 山陰地方 ひずみ集中帯 地震 テクトニクス ひずみ分配 粘弾性緩和

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

西日本では、山陰地方の海岸線に沿って多くの内陸被害地震が発生しており、山陰地方の地震帯と呼ばれているが、なぜこのような内陸地震の多発地帯が形成されているのかはまだ十分に理解されていない。近年、GNSS データの解析から、この地域に周辺よりひずみ速度が大きい帯状の領域である「山陰ひずみ集中帯」があることが発見された(Nishimura and Takada, 2017)。大きなひずみ速度は、近年の活発な地震活動と調和的であるが、この地域では顕著な活断層は見られない。そのため、大地震の発生頻度が高く、測地学的にひずみ速度が高い領域で、なぜ活断層が発達していないのかが謎であった。山陰ひずみ集中帯の範囲自体も詳細には明らかにならず、広域のテクトニクスにおける解釈も定まっていなかった。一方、西日本の内陸地震は南海トラフ巨大地震の前後で多発する傾向があることが知られており、山陰地方の地震帯においても 1946 年の南海地震の前に、大地震が発生している。山陰ひずみ集中帯の地殻変動の時間変化は今まで調べられておらず、内陸地震の活動期のメカニズム及び発生過程を理解するため、本研究では地殻変動の時間変化に注目した。

2. 研究の目的

本研究は、山陰ひずみ集中帯における詳細地殻変動分布を稠密 GNSS 観測によって明らかにし、微小地震分布や地表の活断層分布と比較することによって、内陸震源断層における応力載荷過程の解明を目指すものである。そして、山陰ひずみ集中帯では測地観測データからはひずみ速度が大きく地震活動が活発であるのに、なぜ活断層が存在しないかを明らかにし、測地観測データを用いた地震発生ポテンシャル評価の高度化に貢献する。また、アムールプレート東縁部におけるプレート内部変形と山陰ひずみ集中帯の関係を広域テクトニクスの観点から理解し、南海トラフの巨大地震の各ステージにおける山陰ひずみ集中帯の変形速度を明らかにすることで、西南日本における内陸地震の活動期のメカニズムの解明に迫ることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究においては、(a)GNSS 稠密観測によるひずみ速度詳細分布の解明、(b)測地測量データに基づく過去百年間のひずみ速度の時間変化と北但馬地震 ($M_{JMA}6.8$) の震源断層解明、(c)粘弾性モデリングに基づく内陸地震の応力蓄積過程のモデル化と測地、地震、地質データを統合した山陰ひずみ集中帯の変形過程の考察という 3 つの観点から山陰ひずみ集中帯に関連する地震と地殻変動を明らかにすることを試みた。

具体的には、(a)については、ひずみ集中帯西端部にあたる島根県西部において 10 点の GNSS 連続観測点を新設し、周辺のデータが公開されている GNSS 観測点のデータと統合処理することによって、各観測点の日座標値を算出し、最小二乗法により観測期間の平均的な速度を計算した。2011 年の東北地方太平洋沖地震以降は、この地域の地殻変動には余効変動の影響が含まれるため、1次元の成層構造を仮定した粘弾性モデル(Pollitz et al., 1997; Wang et al., 2006)を用いて、粘弾性緩和による余効変動を計算し、観測速度から差し引くことによって補正を行った。さらに、変位場を基底関数展開によって表現する手法(Okazaki et al., 2021)を用いて、変位場及びその空間微分であるひずみ速度場の推定を行った。(b)については、鳥取県中部で 1965-1992 年に国土地理院によって行われた菱形基線測量データを再解析して、この期間と現在の GNSS データから得られるひずみ速度の比較を行った。また、1925 年北但馬地震の解析については、1927 年に隣接地域で発生した北丹後地震 ($M_{JMA}7.3$) の直後に行われた一等から三等三角点までの三角測量の測量データ(Tsuboi, 1932)と北但馬地震の震央付近を通る一等水準路線の測量データを用いて、震源断層モデルの推定を試みた。(c)については、過去 130 年間に発生した地震の震源断層モデルを用いて、マンツルの粘弾性緩和による現在の余効変動を、粘弾性モデルを用いて計算した。さらに、南海トラフの地震サイクルにおける山陰地方を含む西南日本広域の変位速度の時間変化を、1990 年代から 2020 年代までの GNSS データと粘弾性緩和を考慮したプレート間固着モデルを用いた地殻変動シミュレーションの両面から検討した。

4. 研究成果

(a)の GNSS 観測に基づくひずみ速度の詳細分布の解明においては、新設した GNSS 観測点において 3 年半以上の観測が実施され、日本列島から朝鮮半島までの広域地殻変動を mm/年の精度で推定することができた(図 1)。粘弾性緩和の補正により、山陰ひずみ集中帯の北に位置する対馬や隠岐などの日本海の島嶼部においても、フィリピン海プレートの沈み込み方向の微小な変位速度が確認できた。このような変位速度は、南海トラフ沿いのプレート間固着による変形と考えられ、アムールプレート安定部に対するブロック的な運動は認められない。このような観測事実は、山陰ひずみ集中帯がアムールプレート内のブロック境界であることを支持し、山陰ひずみ集中帯より北側には、ブロック境界が存在しないことを意味する。最大剪断ひずみ速度の分布からは、ひずみ速度の大きな領域が丹後半島付近から、観測点を新設した島根県西部三瓶山付近まで、海岸線に沿った地震帯に重なるように分布していることが明らかになった。よって、山陰地方ひずみ集中帯の西端は、島根県西部であることがわかった。この山陰ひずみ集中帯の西端付近

では、海岸線に沿った地震帯に対して直交方向の地震活動が見られるが、地震活動域の南部ではひずみ速度の集中は確認できなかった。ひずみ集中帯と直交方向の地震活動は、三瓶山周辺では陸域での変動帯の幅が広がっていることに関連していると考えられる。

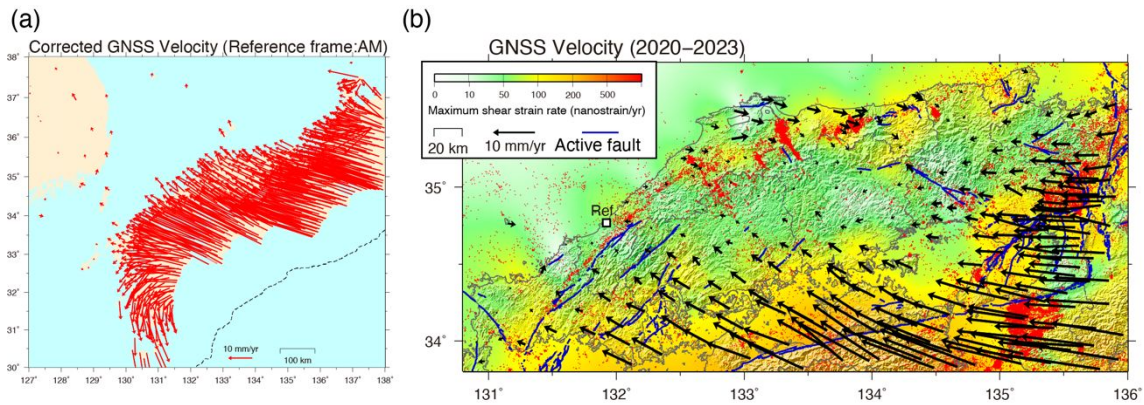


図1 本研究で得られた西南日本とその周辺の GNSS 観測点とその水平変位速度。東北地方太平洋沖地震の粘弾性緩和による余効変動はモデルを用いて補正している。(a)広域の水平変位速度場。(b)山陰地方の水平変位速度場と最大せん断ひずみ速度 ($\dot{\gamma}$) 場。赤点は 1998-2023 年の深さ 20km 以浅の震源分布。

(b)に関する北但馬地震の解析では、北但馬地震の三角測量データに、北但馬地震の震央や豊岡市の西側で南向きの変位が大きく、50 cm を超えている場所があることがわかった。また、地震後の 1927-1928 年に得られた水準測量データと地震前の水準測量データとして地震前後の比高変化から上下変動から、豊岡から南で最大 30cm 程度の沈降が生じていることが明らかになった(図2)。これらの地殻変動から北但馬地震の震源断層モデルを試行錯誤的に推定すると、長さ \times 幅が 12 km、走向 168°、傾斜角 75°、滑り角 56°、滑り量 1.01 m とする矩形断層モデルで観測データを概ね再現することができた。剛性率を 30 GPa とすると M_w は 6.36 であり、西日本の内陸地震の M_w がより M_{JMA} より一般的に小さいことを考えれば妥当であると考えられる。推定された断層の走向から、この地震も、2000 年の鳥取県西部地震のように、山陰ひずみ集中帯の走向に対して高角に交わる共役リーデル剪断面での破壊と考えられる。1965-1992 年に鳥取県中部で行われた菱形基線測量データの再解析からは、西北西-東南東短縮、北北東-南南西伸長で 2×10^{-7} /年程度のひずみ速度が得られた。ひずみ速度の主軸の方向は 2014 年 10 月から 2016 年 10 月までの GNSS 観測から得られたひずみ速度場に似ているが、ひずみ速度の大きさは GNSS から得られたものより数倍大きかった。このことは、1965-1992 年に 2016 年鳥取県中部地震 (M_{JMA} 6.6) の震源断層及びその周辺で非弾性変形が進んでいた可能性を示唆するが、ひずみ集中帯の中軸部に位置しているため、ひずみの計算に用いる観測点の範囲により、計算されるひずみ速度の大きさが異なるため、時間変化が有意なものかどうかはさらに検討する必要がある。

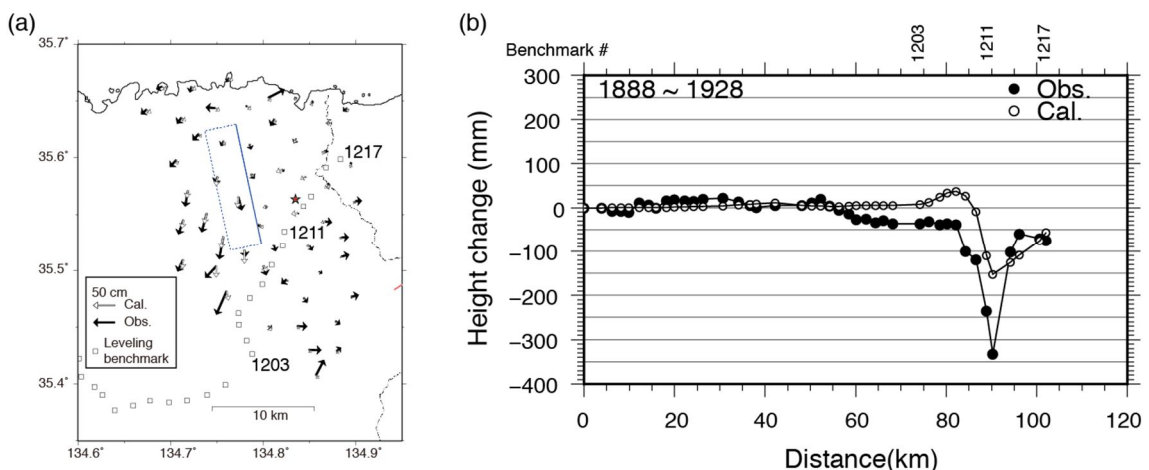


図2 北但馬地震の断層モデルと地殻変動の観測値及び計算値の比較。(a)水平変位と断層モデルの位置。赤星及び青四角がそれぞれ震央及び矩形断層モデルの位置を表す。(b)上下変位の比較。グラフの上には番号を示した水準点の位置は(a)に表示した。

(c)に関する過去の内陸大地震による粘弾性緩和は、マンツルの粘性率が一般的な値 (10^{19} Pa s 程度)であれば、現在のひずみ集中帯周辺の地殻変動場に与える影響は小さいことがわかった。

一方、南海トラフの地震サイクルに伴う粘弾性緩和の影響による地殻変動速度の変化は、一般的な粘性率の範囲において大地震後 30 年程度は大きい。しかし、GNSS 観測が行われている地震後 50 年から 70 年の期間では、特に日本海沿岸域での速度変化が粘性率に大きく依存することがわかった。(a)の GNSS 統合解析から得られた地震後 50 年から 70 年における時間変化は 2 mm/yr 以下である。このような小さな速度変化を再現するためには、西日本のマンツルの粘性率は少なくとも 1×10^{19} Pa s より高い必要がある。現在の GNSS データの時間変化から、マンツルの粘性率に対する制約を加えることができたことは、本研究の計画段階では予想していなかった新たな知見である。

地震調査研究推進本部の海域活断層の長期評価によると、島根県西部では活動度の高い東西走向の海底活断層が複数あることが示されている。山陰ひずみ集中帯の西端が島根県西部であり、それより西側では顕著なひずみ集中帯が見られない原因は、中国地方と大陸安定部の相対運動が、この地域では活断層に沿った内陸の地震帯から沖合にかけてのブロードな変動帯によって賄われているためであり、地震発生ポテンシャルが高い領域も広範に広がっている可能性がある。一方、島根県西部よりも東側では、山陰ひずみ集中帯に地震発生ポテンシャルが高い領域も集中していると考えられる。ただし、このような変形は、地質学的時間スケールでは比較的最近顕在化したため、明瞭な活断層が存在しないものと考えられる。

<引用文献>

- Nishimura T., and Y. Takada, San-in shear zone in southwest Japan, revealed by GNSS observations, *Earth Planets Space*, 69:85, doi:10.1186/s40623-017-0673-8, 2017.
- Okazaki, T., Y. Fukahata, and T. Nishimura, Consistent estimation of strain-rate fields from GNSS velocity data using basis function expansion with ABIC, *Earth Planets Space*, 73:153, doi:10.1186/s40623-021-01474-5, 2021.
- Pollitz, F. F., Gravitational viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical Earth, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B8), 17921-17941, doi:10.1029/97jb01277, 1997.
- Tsuboi, C., Investigation on the deformation of the Earth's crust in the Tango district connected with the Tango earthquake of 1927. (Part 4.), *Bull. Earth. Res. Inst.*, 10, 411-434, 1932.
- Wang, R., F. Lorenzo-Martín, and F. Roth, PSGRN/PSCMP—a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory, *Computers & Geosciences*, 32(4), 527-541, doi:10.1016/j.cageo.2005.08.006, 2006.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Okazaki Tomohisa, Fukahata Yukitoshi, Nishimura Takuya	4. 巻 73
2. 論文標題 Consistent estimation of strain-rate fields from GNSS velocity data using basis function expansion with ABIC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-021-01474-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 西村卓也・橋本学・藤原智	4. 巻 63A
2. 論文標題 2018年大阪府北部地震(M6.1)前後の地殻変動	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 京都大学防災研究所年報	6. 最初と最後の頁 61-68
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nishimura Takuya	4. 巻 74
2. 論文標題 Time-independent forecast model for large crustal earthquakes in southwest Japan using GNSS data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-022-01622-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 西村卓也・田部井隆雄・松島健・廣瀬仁	4. 巻 60
2. 論文標題 測地観測に基づく九州の地殻変動分布と活断層との関係	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 活断層研究	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 西村卓也
2. 発表標題 測地観測に基づく九州の地殻変動と活断層分布
3. 学会等名 日本活断層学会2023年秋季学術大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西村卓也
2. 発表標題 西日本のGNSS速度場の時間変化に基づく粘弾性変形に関する考察
3. 学会等名 日本測地学会第140回講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西村卓也
2. 発表標題 ひずみ集中帯における稠密GNSS観測 山陰及び有馬-高槻断層帯における詳細速度分布
3. 学会等名 日本地震学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuya Nishimura
2. 発表標題 Probabilistic forecast model of crustal earthquakes in southwest Japan using GNSS data
3. 学会等名 2021 AGU Fall Meeting（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村卓也, 西川友章, 佐藤大祐
2. 発表標題 能登半島において2020年12月に開始した群発地震に同期する地殻変動
3. 学会等名 日本測地学会第136回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuya Nishimura
2. 発表標題 Preliminary forecast model of crustal earthquakes in southwest Japan based on GNSS data
3. 学会等名 IAG General Assembly 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuya Nishimura
2. 発表標題 Preliminary forecast model of crustal earthquakes in southwest Japan based on GNSS data
3. 学会等名 EGU General Assembly 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohisa Okazaki, Yukitoshi Fukahata, Takuya Nishimura
2. 発表標題 Estimation of Deformation Fields from GNSS Data Using Basis Function Expansion: Comparison with the Method by Shen et al. (1996)
3. 学会等名 JpGU-AGU 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuya Nishimura
2. 発表標題 Likelihood model of crustal earthquakes in southwest Japan using GNSS strain rate data
3. 学会等名 JpGU-AGU 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村卓也, 水戸川司
2. 発表標題 1925年北但馬地震 (M6.8) の震源断層モデル
3. 学会等名 日本測地学会第134回講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村卓也, Meneses Gutierrez Angela
2. 発表標題 GNSSデータから明らかになった山陰ひずみ集中帯
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

西村卓也ホームページ http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/~nishimura/index.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------