

(9) 京都大学大学院理学研究科・防災研究所

①理学研究科

海溝型巨大地震の長期予測を目指して、岩石実験から得られた速度・状態依存摩擦則に基づく、地震サイクルシミュレーション研究を行った。断層領域を N 個の小断層に分割して計算を行うが、計算時間およびメモリーは $O(N^2)$ を要する。南海トラフや日本海溝での巨大地震では N が $10^4 \sim 10^6$ となる超大規模計算となり地球シミュレーター等のスパコンでしか計算が出来なかった。そこで階層化行列法を初めて地震サイクルシミュレーションに適用し、計算時間を $O(N \log N)$ 、メモリーを $O(N)$ に低減することに成功し、大学の大型計算機センターでの現実的な巨大地震サイクル計算を可能にした¹⁾。

2011 年東北地方太平洋沖地震に関する研究では、階層アスペリティモデルを構築し、上記手法を用いた地震サイクル計算を行った²⁾。また、粘弾性を考慮した陸域 GNSS および海域の GNSS/A データのインバージョン解析により、余効すべりの時空間発展を求めた³⁾。

これまで、上記のように物理モデルに基づくシミュレーション研究と観測データの運動学的インバージョン解析は独立に行われてきたが、大気海洋分野で開発された両者を融合するデータ同化手法を用いて、余効すべりと長期的スロースリップ GNSS データを解析し、摩擦パラメータ推定およびすべりの発展予測を行う 2 手法の開発を行った。一つは、アジョイント法による解析で、2003 年十勝沖地震の余効変動をデータとして摩擦パラメータと余効すべりを推定した⁴⁾。もう一つは、アンサンブルカルマンフィルター法による解析で、八重山および日向灘で繰り返し発生するスロースリップデータを対象に開発を行った。スロースリップに関しては、現在は双子数値実験の手法開発段階であるが、GNSS データを用いた実データ解析が期待される。

また、南海トラフ巨大地震発生前 50 年から地震後 20 年間に西南日本内陸で地震活動が活発化することが知られているが、その物理機構は不明であった。東西圧縮、フィリピン海プレートの沈み込みによるローディングおよび南海トラフ地震による地震時および粘弾性余効変動による応力変動をソースとして、各内陸活断層におけるクーロン破壊関数の時間変動 (ΔCFF) を計算したところ、多くの活断層で地震発生直前に ΔCFF がピークに達していることが分かった⁵⁾。このように、今後不均質粘弾性モデルの導入等により、西南日本内陸活断層における地震発生予測に貢献するモデル構築が期待される。

地下トンネルを利用した地殻変動連続観測として六甲高雄観測室(神戸市)では埋設型歪計、伸縮計等による観測を継続している。断層破砕帯を貫く同観測点では

地下水流動の観測も拡充させつつあり、地震間の断層破砕帯の挙動に関する研究が行われている。湧水量変化と間隙水圧変化を組み合わせることで、2011 年東北地方太平洋沖地震等による地震動によって断層破砕帯の透水性構造が変化することを明らかにした⁶⁾。

②防災研究所

1. 近畿地方中北部の異常地殻活動

大阪府北部から京都府中部、琵琶湖西岸にかけての北摂・丹波山地は、微小地震活動の活発な地域である。いわゆる近畿三角帯の西縁に位置し、また新潟神戸歪集中帯の一翼を担う場所にあたる。北摂・丹波山地内には西山断層、亀岡断層、三峠断層、花折断層など多くの活断層が存在するが、微小地震分布はこれら特定の活断層に沿うのではなく、むしろ小さなクラスターを形成しながら面的にやや広域に広がっており、過去の大地震の余震活動とは考えにくい。有馬高槻構造線を境にして南北で地震活動の様相は対照的で、北側の北摂・丹波山地の活発な活動に対して、南側の大阪平野での活動は極めて低調である。

丹波山地の地震活動の大きな特徴は、地震活動が極めて定常的であることである。積算の地震発生数は時間とともに「右肩上がり」の直線を示す。M3～5 中規模地震が多数の余震をともなって発生した場合は積算曲線に段差を生じるが、北摂・丹波山地全体を長期にわたって見た場合その影響は少ない。大きな例外として、1995 年 1 月に兵庫県南部地震(M7.3)が発生すると、その震源域に隣接する北摂・丹波山地の地震活動はそれ以前の数倍活発化した。兵庫県南部地震前後の期間に分けて見ると積算発生数は各々ほぼ一直線を描く。兵庫県南部地震後の活発化した活動も通常の余震活動のような急激な減衰はみられず、ほぼ定常的に高い発生レートを維持してきた。

ところが、2003 年 1 月末ごろ微小地震発生数は突然それ以前の約 7 割に低下し⁷⁾、その後静穏状態は長期にわたり一定の低レートを維持して継続していた。また、微小地震活動の変化とほぼ同期して、近畿地方各地に設置した伸縮計(阿武山、屯鶴峯、天ヶ瀬、逢坂山)のデータにもトレンド変化が現れた。1946 年南海地震や 1995 年兵庫県南部地震前の時期にこの地域の地震活動が低下したことが知られており、兵庫県南部地震前には伸縮計などの地殻歪変化が現れていたという報告もあった。これらの活動変化の原因は分からないが、中期的には非常に安定している北摂・丹波山地の地殻活動は、周辺の広域応力場の変化に敏感に反応する側面も持ち合わせ

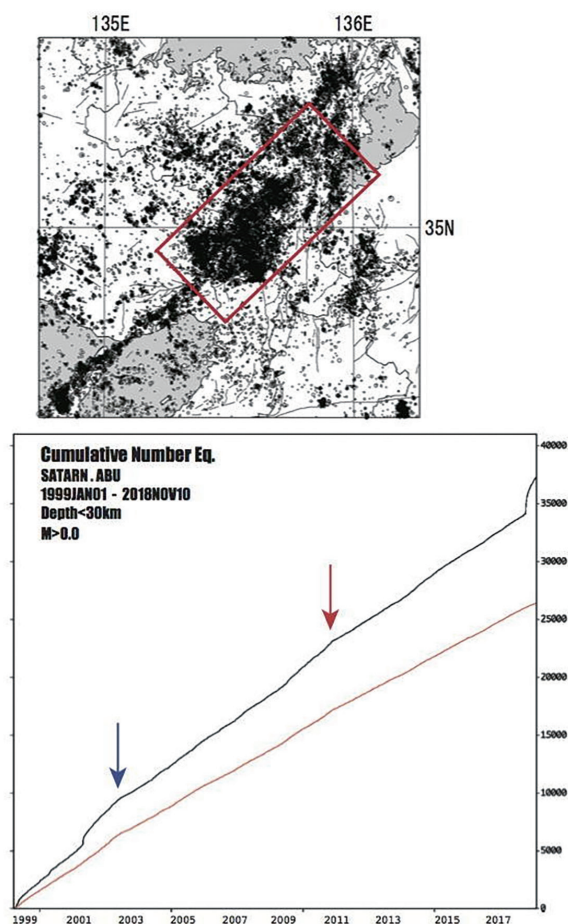


図 1 上に示す近畿地方北部の矩形範囲内における積算地震発生数。1999 年 1 月～2018 年 11 月 10 日。30km 以浅。京都大学防災研究所地震予知研究センターによる。青矢印は北摂・丹波山地の静穏化が始まった 2003 年初頭の時期を、赤矢印は東北地方太平洋沖地震前にさらに発生レートが低下した時期を示す。赤線は Reasenberg⁹⁾の方法で除群したカタログに基づく積算発生数。

ているのかもしれない。それらを踏まえて、2003 年の静穏化以降の地殻活動変化に注目し、その推移を地震予知連絡会にも毎回報告を行っていた⁷⁾。

その後、2011 年 1 月末になって、さらに微小地震発生数が減少し、2003 年以来最低のレートを記録している。2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震前後にはとくにレートに変化は見られなかったが、2011 年 2 月以降この低いレート（図 1 の矩形範囲内で約 1400 events/year）が維持されている⁸⁾。この間、北摂・丹波山地およびその周辺では、特筆すべき中規模以上の地震は発生していなかった。2018 年 6 月 18 日の大阪府北部の地震（M6.1）は、従来の「北摂・丹波山地」の微小地震活動域の南限である有馬高槻構造線よりさらに南側の大阪平野側で発生した。余震域の北半部は北摂・丹波山地の従来からの活動域と重なっているが、除群（decluster）操作で余震を取り除いた積算発生数には、その前後でほとんどレートの変化は見られなかった。

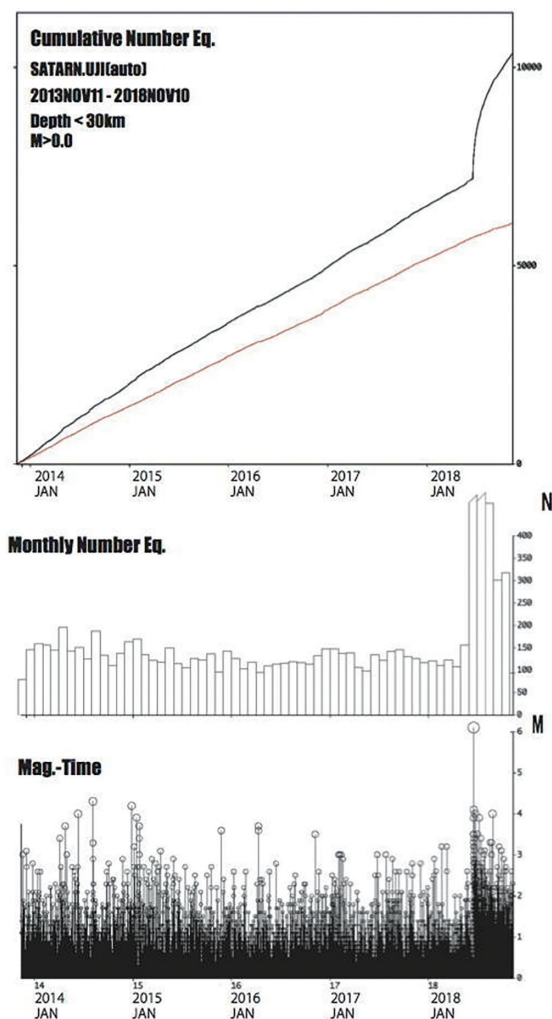


図 2 （上）図 1 の上に示す近畿地方北部の矩形範囲内における積算地震発生数。京都大学防災研究所地震予知研究センターによる。赤線は Reasenberg⁹⁾の方法で除群したものの積算数。2013 年 11 月 11 日～2018 年 11 月 10 日、30km 以浅。（中）同範囲内での月別地震発生数。（下）同じく気象庁一元化震源に基づく MT 図。

2. 西南日本の地殻変動のモデル化

京都大学防災研究所では、1990 年代から GNSS 連続観測を開始し、最近 10 年においても近畿地方、山陰地方、中部地方北部及び九州東部地方（宮崎県）を中心に、内陸のひずみ集中帯や南海トラフ・南西諸島海溝沿いのプレート間相互作用の観測を目的とした GNSS 連続観測網を展開している。これらの観測点と国土地理院の GEONET 等の観測データを合わせて解析することにより、西南日本の詳細な地殻変動場と変動メカニズムを明らかにする研究を続けている。

2.1 南海トラフ沿いのプレート間カップリング

東北地方大洋沖地震前の比較的静穏な時期（2005 年～2009 年）の西南日本の地殻変動場（図 3）は、北西～西北西向きの変動速度が太平洋側ほど大きくなっており、このデータから南海トラフから沈み込むフィリピン

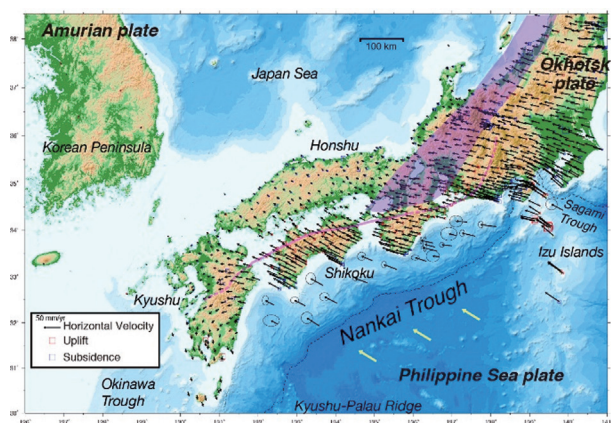


図3 GNSS と GNSS-A による西南日本の地殻変動速度場 (Nishimura et al., 2018)¹³⁾. 速度推定に用いたデータ期間は、陸上の GNSS 観測点が 2005 年 4 月 -2009 年 12 月、海底の GNSS-A 観測点は 2004 年 -2016 年。海底観測点のデータに含まれる東北地方太平洋沖地震の地震時・地震後地殻変動は補正により除去している。紫の網掛け領域は新潟―神戸ひずみ集中帯 (Sagiya et al., 2000)¹¹⁾。

海プレートと陸側プレートとの間の固着（プレート間カップリング）分布を推定する研究が多数行われてきた。特に近年は海底での地殻変動観測データ速度を用いることにより、従来の陸上観測データでは解像できなかった沖合の固着分布の不均質性が明らかになった（例えば、Yokota et al., 2016)¹⁰⁾。一方、陸側プレート内の南海トラフから比較的離れた内陸部や日本海側でもひずみ集中帯と呼ばれる変動速度の急変帯があることが明らかになっており、図 3 でも新潟―神戸ひずみ集中帯 (Sagiya et al., 2000)¹¹⁾ を挟んで東西方向の変位速度は大きく異なっている。このような変動を考慮しないでプレート間の固着分布を推定すると、得られた固着分布に系統的誤差をもたらす原因となる（例えば、Nishimura and Hashimoto, 2006)¹²⁾。そこで、Nishimura et al. (2018)¹³⁾ は、東北地方太平洋沖地震発生前で大地震や長期的スロースリップイベント (SSE) がほとんど発生していなかった 2005 年 4 月から 2009 年の GNSS データと 2004-2016 年の GNSS 音響測距結合方式海底地殻変動観測 (GNSS-A) データを用いて、陸側プレートを 11 個、海洋プレートを 3 個のブロック（マイクロプレート）に分割し、個々のブロックの剛体回転運動とブロック間の断層における固着分布の推定を行った。推定された南海トラフ及び相模トラフから沈み込むフィリピン海プレートと陸側プレートとの間の固着をすべり欠損速度で表した分布を図 4 に示す。すべり欠損速度の大きい場所は、土佐湾や紀伊半島の沖合に存在する。これらは 1944 年東南海地震や 1946 年南海地震でのすべり量の大きな場所 (Sagiya and Thatcher, 1999)¹⁴⁾ に概ね対応しており、現在これらの場所が強く固着していて、次の地震へ向けて

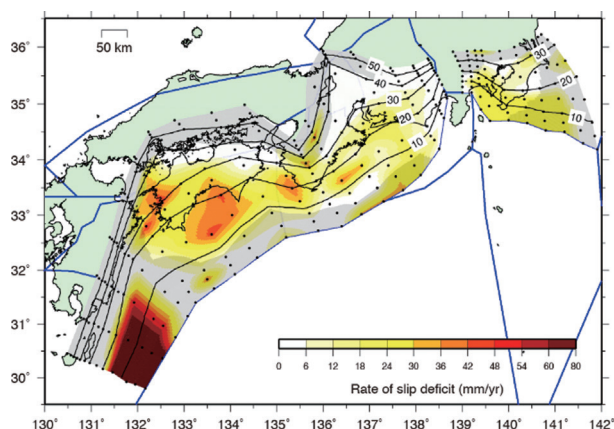


図4 海陸地殻変動データから推定された南海トラフ及び相模トラフ沿いのすべり欠損速度 (Nishimura et al., 2018)¹³⁾. 網掛けの領域は推定誤差が 20mm/yr 以上の誤差が大きな領域。10 から 50 までのラベル付き等値線はプレート境界面の深さを表す。

ひずみを蓄積していることがわかった。なお、豊後水道のすべり欠損速度の大きな場所は、長期的 SSE 発生領域に対応しており、SSE の発生領域でも SSE の非発生時は強く固着していることを示している。一方、南九州から種子島の沖合でも大きなすべり欠損速度が推定されたが、この領域ではすべり欠損の推定誤差が大きく、陸域の地殻変動データにも顕著な短縮変形は見られないため、系統誤差である可能性が疑われる。しかし、日向灘南部には海底地殻変動の観測点がなく、陸上データだけから固着の有無を決めることはできない。南海トラフと日向灘以南の南西諸島海溝沿いの地震の連動の可能性やこの地域で発生するスロー地震に伴うすべりを明らかにするために、この地域における海底観測の強化が望まれる。

2.2 内陸のひずみ集中帯

西村 (2017)¹⁵⁾ は、Nishimura et al. (2018)¹³⁾ のすべり欠損速度分布とほぼ同じモデルを用いて、陸域の GNSS 速度場からプレート境界の固着による弾性変形を除去し、内陸部のひずみ速度の不均質性を明瞭に示した。また、内陸のひずみ速度分布と活断層や内陸地震の震央分布を比較して、それらの関係性を議論した (図 5)。西日本においては、ひずみ速度の大きな場所は概ね主要活断層と対応しているが、活断層周辺でもひずみ速度が比較的小さい地域や山陰地方や九州南部のように主要な活断層がなくてもひずみ速度の大きな地域もある。1923 年以降の M6 以上の地殻内の大地震の多くは、ひずみ速度の大きな場所で発生しており、近年の内陸被害地震 (例えば、2016 年熊本地震 (M7.3)、2016 年鳥取県中部地震 (M6.6)、2018 年大阪府北部の地震 (M6.1) など) も同じ傾向があることから、ひずみ速度の大きな場所は内陸地震が多発する「ひずみ集中帯」として、社会的

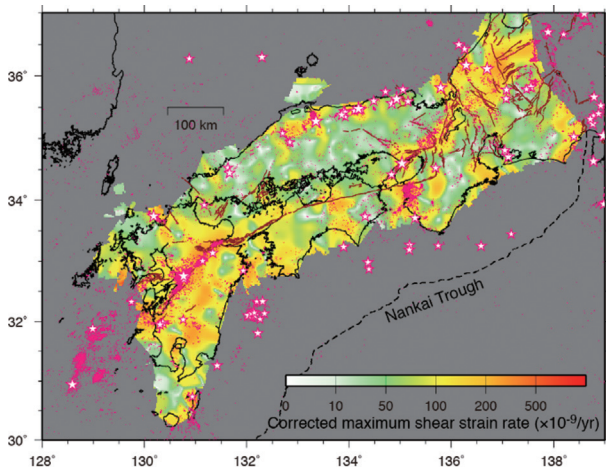


図 5 西南日本の最大せん断ひずみ速度分布 (西村, 2017)¹⁵⁾。南海トラフ沿いのプレート間カップリングによる弾性変形はモデルを用いて除去した。茶色線は、地震調査委員会 (2019)¹⁷⁾ による主要活断層。星印と赤点は、深さ 20km 以浅の地震の震央を表し、前者が 1923 年～2016 年に発生した M6 以上、後者が 1998 年～2016 年に発生した M2 以上の震央を表す。

にも注目されるようになった。またこのような相関関係は、内陸地震が地震発生層より深部の非弾性的変形による载荷により発生するという内陸地震の発生メカニズムの仮説 (例えば, Iio and Kobayashi, 2002)¹⁶⁾ を支持するものと考えられる。GNSS データなどの測地学的に得られたひずみ速度は、地震を発生させる弾性ひずみと非弾性ひずみの両者を含むことに注意する必要があるが、弾性ひずみの蓄積速度と地震によるモーメント解放速度は長期的には一致すると考えられるので、測地データを用いて内陸地震の発生ポテンシャル評価が可能であると考えられる。ひずみ速度の推定手法は、その計算手法や観測点分布にも依存し、現状の GEONET の観測点密度では、小規模なひずみ集中帯の検出には不十分であることに加え、ひずみ速度から地震発生確率等へ変換する手法も様々なものが提案されており、確立していない。しかし、今後の 10 年間では、従来主に活断層の発生履歴から評価されてきた内陸地震の長期評価を測地データから補完、補強する新たな長期評価手法を構築していくことが重要であり、この 10 年ではその基礎となる研究が行われたと言える。

(平原 和朗, 向井 厚志, 福田 洋一, 片尾 浩, 西村 卓也, 澁谷 拓郎)

参考文献

- 1) Ohtani, M., K. Hirahara, Y. Takahashi, T. Hori, M. Hyodo, H. Nakashima and T. Iwashita, 2011. Fast computation of quasi-dynamic earthquake cycle simulation with hierarchical matrices. *Procedia Computer Science*, 4, 1456-1465.
- 2) Ohtani, M., K. Hirahara, T. Hori, T. and M. Hyodo, 2014. Observed change in plate coupling close to the rupture initiation area before the occurrence of the 2011 Tohoku earthquake: Implications from an earthquake cycle model. *Geophys. Res. Lett.*, 41(6), 1899-1906.
- 3) Yamagiwa, S., S. Miyazaki, K. Hirahara and Y. Fukahata, 2015. Afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0) inferred from inland GPS and seafloor GPS/Acoustic data, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 66-73, doi:10.1002/2014GL061735.
- 4) Kano, M., S. Miyazaki, Y. Ishikawa, Y. Hiroshi, K. Ito and K. Hirahara, Real data assimilation for optimization of frictional parameters and prediction of afterslip in the 2003 Tokachi-oki earthquake inferred from slip velocity by an adjoint method, 2015. *Geophys. J. Int.*, 203(1), 646-663, doi: 10.1093/gji/ggv289.
- 5) Shikakura, Y., Y. Fukahata and K. Hirahara, Long-term changes in the Coulomb failure function on inland active faults in southwest Japan due to east-west compression and interplate earthquakes, 2014. *J. Geophys. Res.*, 119, doi:10.1002/2013JB010156.
- 6) 向井厚志・大塚成昭・福田洋一, 2016, 地震に伴う湧水量および間隙水圧変化から推定された破砕帯の水理学的特徴, 測地学会誌, 第 62 巻, 第 2 号, 63-78.
- 7) 京都大学防災研究所地震予知研究センター (2005), 丹波山地における最近の微小地震活動の静穏化, 予知連会報, 74, 381-383.
- 8) 京都大学防災研究所地震予知研究センター (2011), 近畿北部の地震活動～丹波山地における最近の微小地震活動の静穏化と東北地方太平洋沖地震～, 予知連会報, 86, 505-508.
- 9) Reasenber, P. (1985), Second-Order moment of Central California seismicity, 1969-1982, *J. Geophys. Res.*, 90, B7, 5479-5495.
- 10) Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, and A. Asada, 2016. Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone. *Nature*, 534 (7607), 374.
- 11) Sagiya, T., S. Miyazaki, and T. Tada, 2000. Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. *Pure Applied Geophys.*, 157, 2303-2322.

- 12) Nishimura, S., and M. Hashimoto, 2006. A model with rigid rotations and slip deficits for the GPS-derived velocity field in southwest Japan. *Tectonophysics*, 421 (3-4), 187-207.
- 13) Nishimura, T., Y. Yokota, K. Tadokoro, T. Ochi, 2018. Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from GNSS and GPS-A data, *Geosphere*, 14, doi:10.1130/GES01529.1.
- 14) Sagiya, T. and W. Thatcher, 1999. Coseismic slip resolution along a plate boundary megathrust: The Nankai Trough, southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, <https://doi.org/10.1029/98JB02644>.
- 15) 西村卓也, 2017. GNSS データから見出される日本列島のひずみ集中帯と活断層及び内陸地震, *活断層研究*, 46, 33-39, doi:10.11462/afr.2017.46_33.
- 16) Iio, Y., and Y. Kobayashi, 2002. A physical understanding of large intraplate earthquakes. *Earth, Planets Space*, 54 (11), 1001-1004.
- 17) 地震調査委員会, 2019. 主要活断層帯の長期評価 . https://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/major_active_fault/