

## □ GNSS を用いた地殻変動の観測と海溝型大地震

京都大学防災研究所地震災害研究センター教授 西村 卓也

## 1. 地殻変動の観測と GNSS 観測網

日本列島は、地震の発生や火山が多い環太平洋造山帯に位置する。起伏が多く平野部の少ない日本列島の形は、激しい地殻変動の結果生じたものであり、今後も地殻変動により、日本列島の形は絶えず変わっていくであろう。現在進行している地殻変動を実測するためには、精密な測量が必要で、我が国では1880（明治13）年の全国の測地測量（三角測量、水準測量）の開始によって、地殻変動の観測が始まった。ただ、当時の測地測量は、実施に要する労力や費用の面から、観測ができるのは数十年～十年に一度であり、観測精度の問題から、進行している地殻変動の時空間変化を詳細に把握することは難しかった。

1990年代に入ると人工衛星を用いた測位システムである米国のGPS（Global Positioning System）が実用化され、民間利用に開放されたことで、測量の観測精度や時間分解能が大幅に向上した。現在では米国だけでなく、ロシア、欧州連合（EU）、中国により、世界中で使える人工衛星を用いた測位システムが運用されており、このような衛星を用いた測位システムを総称してGNSS（Global Navigation Satellite System）と呼ぶ。一般にはGNSSとGPSが混同されて使われることもあるが、本稿ではより適切な用語であるGNSSを用いる。

1990年代半ばから2000年代前半にかけて、国土交通省国土地理院では、日本全国約1,300か所の

GNSS連続観測点からなるGEONET（GNSS Earth Observation Network System）を構築した。これにより、日々の日本列島の地殻変動が詳細に観測できるようになった。地殻変動の観測結果は、地震や火山活動のモニタリングための資料として、毎月国土地理院から発表されるとともに、大地震の発生時には、リアルタイムのデータ解析による震源断層モデルの即時推定<sup>[1]</sup>により、緊急防災情報としての活用も行われている。また、世界的に見てもGNSSを用いた高精度の位置情報は、ユビキタス情報通信時代の自動車等の自動運転や機械の自動制御に必要な不可欠なものとなっており、多くの国でGNSS観測網の設置が進められた。そのため現在では、環太平洋などの地殻変動の激しい地域のみならず、ヨーロッパなどの安定大陸でも多数のGNSS連続観測点が設置され（図1）、地殻変動の観測が行われている。さらに、日本国内では国土地理院や大学等の公的機関による観測点に加えて、民間企業による独自のGNSS観測網の設置も進められている。ソフトバンク株式会社では、全国約3,300か所に独自のGNSS基準点を設置しており、これらの観測点のデータを用いた地殻変動観測研究も進められている。

本稿では、観測開始から30年が経過しようとしているGEONETのデータから日本列島の地殻変動の特徴を示すとともに、観測された地殻変動のメカニズムを海溝型大地震の発生と関連付けながら述べる。

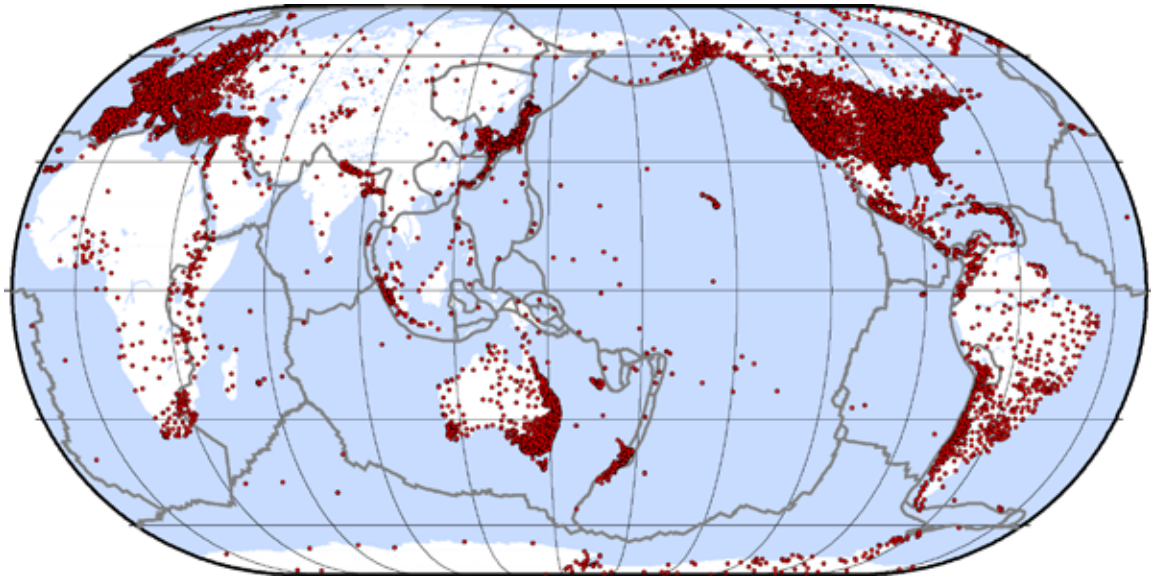


図1 米国ネバダ大学測地学研究室によって解析・公開されているGNSS観測点の分布図（2023年6月現在）。丸はGNSS観測点（20,840点）、灰色の線はプレート境界<sup>[3]</sup>を表す。

## 2. 日本列島の地殻変動

GNSSを用いて丸一日観測すると、測定される位置の精度は、水平方向で約2mm、上下方向では1cm弱となる。地球の表面を覆っているプレートの運動速度が年間数cmであるから、1年間GNSS観測を続けるとプレートの運動に伴う地殻変動は十分な精度で観測できることになる。日本

列島の周辺には4つのプレートがあることが知られている（図2）が、これらのプレートの運動もGEONETによって詳細に明らかになった。

2022年1年間にGEONETによって観測された日本列島の水平方向の地殻変動を図3に示す。この図は、長崎県五島列島の福江観測点に対して相対的な水平地殻変動を表示したもので、福江観測点は朝鮮半島や中国大陸北部から構成される大陸

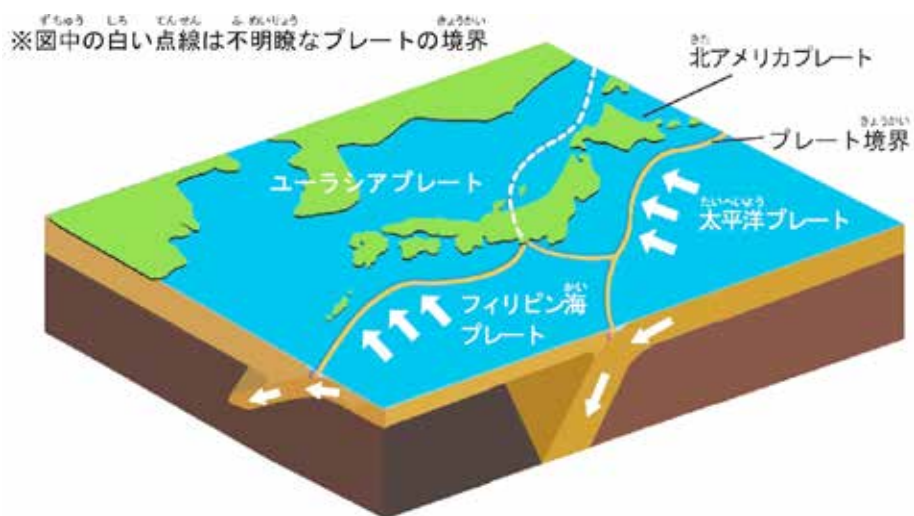


図2 日本列島周辺のプレート

（出典：地震調査研究推進本部）

プレート（ユーラシアプレート）に位置しているため、伊豆・小笠原諸島に見られる北西方向に3～6 cm 程度の動きは、ユーラシアプレートに対する西日本の海洋プレート（フィリピン海プレート）の動きを表している。図の範囲外であるが、日本の国土で唯一、東日本の海洋プレート（太平洋プレート）に位置している南鳥島では、西北西方向に10cmの動きが観測されている。

一方、日本列島の大半は、大陸プレートに位置しており、北海道と本州の東半分は北アメリカプレート、本州の西半分と四国、九州はユーラシアプレート（アムールプレートという説もある）に属している。北アメリカプレートはユーラシアプレートに対して1-2 cm/年で西向きに移動していることが知られており、北海道北部などに見ら

れる北西向きの変動の大部分は、北アメリカプレートの運動を表している。

2つの大陸プレートに属する地域でも、北海道や関東から東海、近畿、四国及び九州地方の太平洋側は、概ね北西方向に年間3～5 cm 程度で動いている。プレートテクトニクスの基本概念では、プレートは硬くてほとんど変形しないものだと考えられていたが、実際は二つのプレートが接している地域では、二つのプレートの相互作用により、プレートが変形することが知られている。太平洋側の北西方向の動きは、東日本では、千島海溝や日本海溝から日本列島の下に沈み込む太平洋プレート、西日本では南海トラフや南西諸島海溝から沈み込むフィリピン海プレートによって、陸側のプレートが押されて変形していることを表し

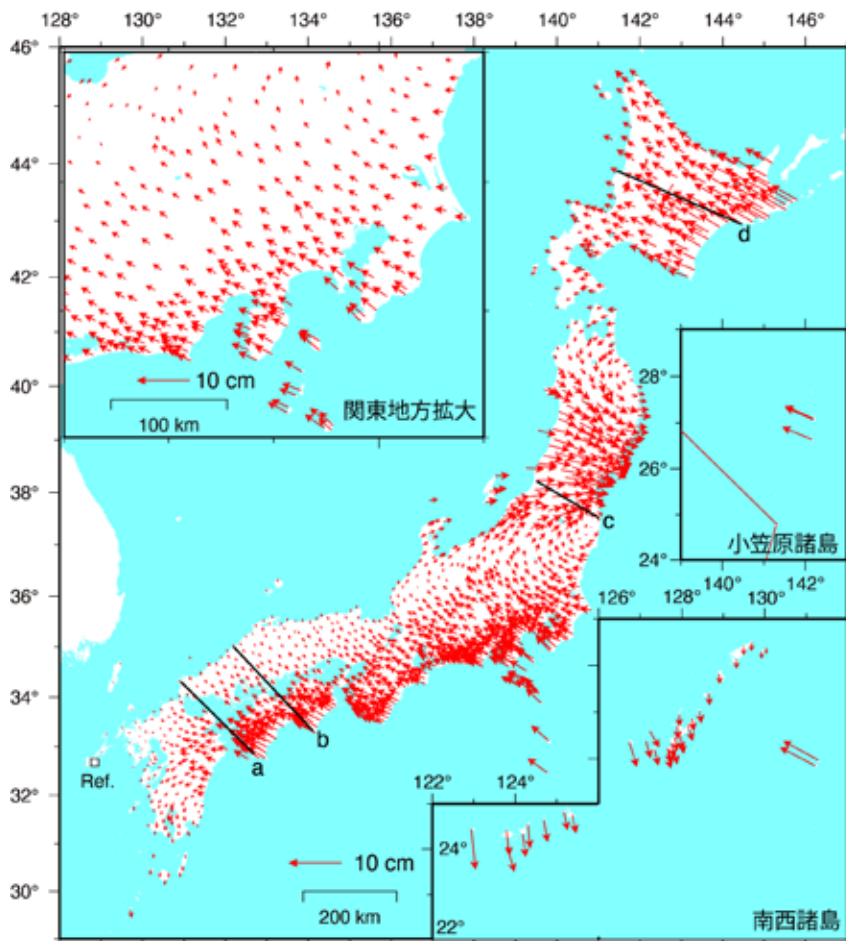


図3 GEONETによって観測された日本全国の地殻変動。矢印は、長崎県福江観測点（図中のRef.）に対する2022年1年間の各GNSS観測点の水平移動量を表す。a-dは、図4に時系列を示す基線の位置を示す。

ている。一方、東北地方の中部だけは、日本海側から太平洋側まで東方向に移動している。これは、2011年の東北地方太平洋沖地震（マグニチュード9.0）の後から見られるようになった特徴で、この地震より前は、東北中部の太平洋側も西向きに移動していた。大地震後に観測される地震前と傾向の異なる地殻変動は余効変動と呼ばれており、東向きの変動は地震から12年経過した今でも余効変動が継続していることを表す。

図3で最大の変動量は、矢印がスケールアウトしてしまっているが、小笠原諸島の硫黄島で観測されており、南南西に52cmもの水平変動が観測されている。硫黄島のもう一つの観測点でも北西方向に34cmの水平変動を観測しており、島内で非常に大きな地殻変動が進行していることを示している。硫黄島は活発な活火山であるため、観測された地殻変動も火山活動が原因であると考えられる。

次に過去30年にわたる地殻変動の時間変化を見よう。図4は、図3に位置を示した太平洋側

と日本海側の観測点を結ぶ4つの基線における基線長変化の時間変化を示したものである。四国の室戸岬と日本海側の観測点の基線（図4b）では、過去30年間にわたって、距離が一定の速度で短縮しており、短縮量は112cmに達している。北海道の釧路と日本海側の観測点の基線（図4d）では、複数の地震による瞬間的な数cmの伸びと地震後の余効変動の期間を除くと、概ね一定の速度で短縮している。一方、福島県の太平洋側と日本海側を結ぶ基線（図4c）では、2008年の福島県沖の地震などを除けば、2011年東北地方太平洋沖地震の発生前まで短縮していたが、地震時には一気に175cmも伸び、その後も数年間にわたって伸び続けた。2017年以降は、再び短縮傾向にあるが、1990年代の短縮速度に比べると、短縮速度は小さいままである。四国の足摺岬と日本海側を結ぶ基線（図4a）では、特徴的な時間変化が見られている。全体的な短縮傾向は、他の基線と同様であるが、1997年、2003年、2010年、2018-2019年頃に伸長している時期がある。地震による伸長であ

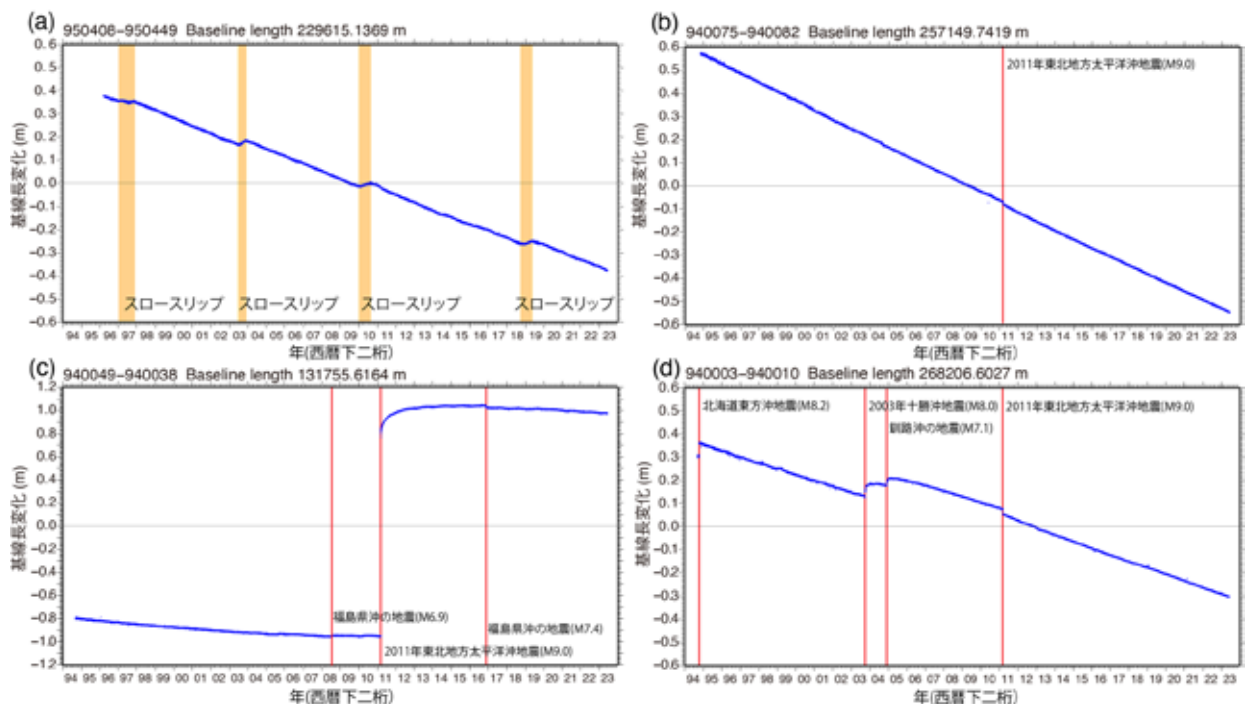


図4 GNSS観測による30年間の基線長変化。各基線の位置を図3に示す。(c)のみ縦軸のスケールが異なることに注意。

れば、一瞬の変化なのであるが、ここで見られる伸長は数ヶ月～1年程度の期間にゆっくりと伸びている。このような現象はスロースリップ（ゆっくりすべりやSSEと呼ばれることもある）と呼ばれ、GNSS観測によって世界中の様々な地域で発生していることが発見された。

### 3. 海溝型地震とスロースリップのメカニズム

大陸プレートと海洋プレートがぶつかると、密度の重い海洋プレートが大陸プレートの下に潜り込む形となる。この大陸プレートの海洋プレートが接している境界で発生する地震を海溝型地震と呼び、2011年東北地方太平洋沖地震や将来発生が懸念されている南海トラフ地震が例としてあげられる。海溝型地震が発生するメカニズムは、海洋プレートがプレート運動により移動すると、プレート境界に働く摩擦力により、大陸プレートを引きずり込む（図5）。このように二つのプレートが一緒になって沈み込んでいる状態を、プレート境界が固着しているといい、海洋プレートの運動速度に対して、大陸プレートが引きずり込まれ

る速度の割合を固着率と呼ぶ。海洋プレートの沈み込みが続き、大陸プレートのひずみが大きくなって反発する力が強くなると、固着が外れて断層が急激にずれる。このような現象が海溝型地震である。一方、数日から数年間かけてゆっくりと断層がずれる現象がスロースリップである。

スロースリップが発生すると、発生した場所ではひずみが解放されることになるので将来の地震の発生可能性は低くなる。しかし、今までに観測されたスロースリップは、巨大地震と比べると規模が小さく、図5に示した大地震のようにプレート境界全体がすべり、大陸プレート全体がはね上がることはなく、一部のみがすべる場合が多い。その場合、スロースリップが発生した場所の周囲では、ひずみが高まり地震が起りやすくなると考えられる。実際、2011年東北地方太平洋沖地震や中南米で発生した複数の海溝型地震の前に、地震の震源域の近傍でスロースリップが発生していたことが知られており、スロースリップが大地震発生最後の引き金を引いたと指摘する研究<sup>[2]</sup>もある。

海溝型大地震にむけてひずみが蓄積している期間（図5左）の地殻変動データを用いると、大陸

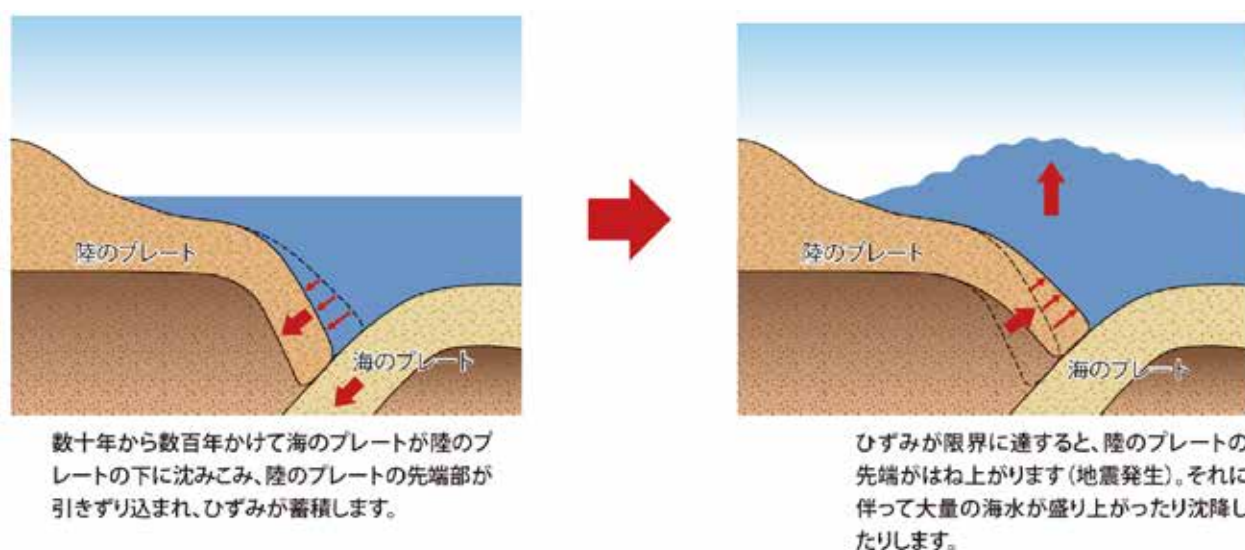


図5 海溝型地震の発生メカニズム（出典：地震調査研究推進本部）。図では陸のプレートが変形しているのは海底部分だけであるが、実際は陸域も含めて広い範囲が変形することが知られている。

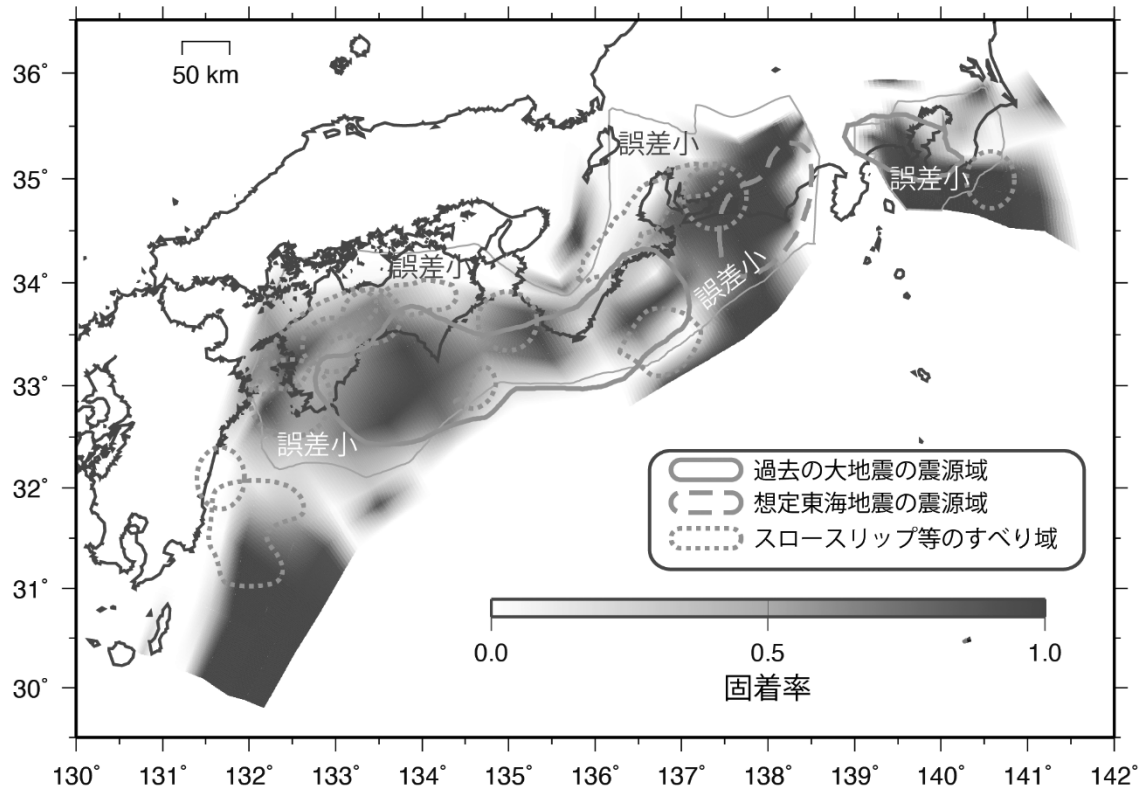


図6 南海トラフと相模トラフ沿いのプレート間固着率分布<sup>[4]</sup>。2005-2009年の地殻変動データから推定したもの。誤差小と書いた細線の領域の外側では、固着率の推定誤差が大きいことに注意。

プレートが海洋プレートからどれだけ引きずり込まれているか、すなわち固着域が推定できる。この固着域は、将来の大地震の震源域となりうる領域を示すため、地震の長期予測において重要な情報である。GNSSと海底地殻変動データを用いて、南海トラフと相模トラフの固着率分布を推定した結果(図6)を見ると、海岸線付近から沖合にかけて、固着率が大きな場所が分布している。三浦半島や房総半島先端部、静岡県から愛知県東部、高知県では、陸域でも固着率が高く、将来の大地震の震源域となる可能性が高いため、これらの地域では津波だけでなく、強い地震動に対する備えを強化する必要がある。固着率が高い領域は、過去の大地震の震源域と概ね重なっており、過去の大地震の震源域で現在はひずみが蓄積中であると言える。一方、過去の大地震の震源域周辺では、さまざまな継続時間を持つスロースリップが発生しており、これらの領域では、スロースリップによ

て蓄積されたひずみの一部が解消していると考えられる。

固着率が比較的高い場所でも、図中では過去の大地震やスロースリップの発生領域と重なっていない場所がある。そのような場所でも時代をよりさかのぼると大地震が発生していた場所もある。例えば、房総沖では1707年の元禄関東地震(マグニチュード8.2)が発生したし、日向灘では、1662年に日向灘地震(マグニチュード7.3~8.0)が発生している。これらの領域で推定された固着域は、再来間隔の長い大地震の震源域でのひずみ蓄積を表している可能性もあるが、地殻変動観測点から離れているため推定誤差が大きく、確定的なことを言うことは難しい。ただ、誤差が大きいため、これらの地域での大地震の発生可能性を排除することがあってはならない。東北地方太平洋沖地震の発生前に、GNSS観測から宮城県沖を中心とする東北地方太平洋沖に固着域があること

は推定されていたが、その知見がこの地域での大地震の想定に十分生かすことができなかったことを教訓とし、不確かな情報でも防災に役立てていく必要がある。

#### 4. おわりに

1990年代半ばに構築された GNSS 観測網により、日本列島の地殻変動に関する理解は劇的に深まり、海洋プレートと大陸プレートの境界での固着により周辺にひずみが蓄積し、海溝型地震の発生に至る過程が高精度に観測できるようになった。また、断層がゆっくりすべることによりひずみを解消するスロースリップが、多数発生していることも明らかになったが、スロースリップと大地震との関連性については、未解明の課題も多い。これらの GNSS 観測網を用いた技術や地殻変動に関する知見を、防災に活かす取り組みはまだ端緒にすぎたばかりであり、筆者も微力ながら取り組んでいきたい。

#### <謝辞>

本稿では、国土地理院 GEONET のデータを利用しました。ここに記して、観測網の維持管理を行っている関係者に感謝いたします。

#### 【文献】

- [1] 川元智司・他, (2016), 電子基準点リアルタイム解析システム (REGARD) プロトタイプの開発, 国土地理院時報, 128, 55-66, <https://www.gsi.go.jp/common/000137236.pdf>
- [2] Ito, Y., et al. (2013), Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, 600, 14-26, doi:10.1016/j.tecto.2012.08.022.
- [3] Bird, P. (2003), An updated digital model of plate boundaries, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(3), doi:10.1029/2001gc000252.
- [4] Nishimura, T., Y. Yokota, K. Tadokoro, and T. Ochi (2018), Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data, *Geosphere*, 14(2), 535-551, doi:10.1130/ges01529.1.