論　説

スロースリップと南海トラフ地震

名古屋大学名誉教授　愛知工業大学地域防災研究センター　山岡 耕春

スロースリップ

スロースリップと聞くと、2021年TBS制作のドラマ「日本沈没」で田所博士（香川照之）のセリフを思い出される方も多いと思います。このドラマでは筆者が地震学監修を務め、プロデューサを交えたディスカッションの中で「スロースリップ」をドラマに取り入れることになりました。ドラマの筋書き上で、日本列島の地下で進行する現象のうち政府が隠蔽できる現象として取り上げることになったのです。通常の地震活動は体に感じるから隠蔽などはできませんが、スロースリップは体に感じない現象なので、隠蔽できるという設定になりました。

現実に起きているスロースリップは、ドラマで描かれる現象とは多少異なります。ドラマではスロースリップによって形成された海底の段差が描かれていましたが、実際のスロースリップはもっと深い場所で発生するので、海底に段差が現れることはありません。それでも、実際のスロースリップは巨大地震の発生に深く関わる現象であり、ドラマのスロースリップが日本沈没の前兆とした設定につながっています。なお、スロースリップは「ゆっくりすべり」「スロー地震」などとも呼ばれていて名称の統一ができていませんが、意味は同じです。

ところでそのスロースリップとは、プレート境界が「ゆっくり」「すべる」ことを示しています。「すべる」というのは地震学者が多用する用語で、「ずれ動く」あるいは「ずれる」と言い換えることができます。海側から沈み込むプレートと陸側のプレートが、ずれ動くことを慣習的に「すべる」と表現しているのです。通常の地震は「速く」すべるため、強い地震波を発生させますが、スロースリップは「ゆっくり」すべるため、強い地震波を発生させることはありません。ゆっくりと、静かにずれ動く現象です。この現象は南海トラフにおいて地震計にかすかに捉えられる振動（微動）としてまず発見されました（Obara, 2002）。その後、北米西海岸カスケードのプレート沈み込みにおいて微動に伴う地殻変動が発見され、最終的にプレート境界のスロースリップとして認識されるに至りました。

スロースリップと地震

南海トラフなどプレートが沈み込む場所では、海側のプレートが沈み込む際に陸側のプレートを引きずっています。その引きずりが限界に達すると陸側のプレートが跳ね返って大きな地震を発生する、というのが通常説明される巨大地震発生のメカニズムです。この説明は単純でわかりやすいのですが、実際はもっと複雑で、スロースリップという現象が深く関わっています。その様子を示したのが図1です。この図は沈み込むプレートと陸側のプレートとの境界面を模して描いた図で、速くすべる領域とゆっくりすべる領域がプレート境界面にまだらに存在することを示しています。

プレート境界面の深い部分は温度が高いため、定常的にずれ動いています。これを「定常す

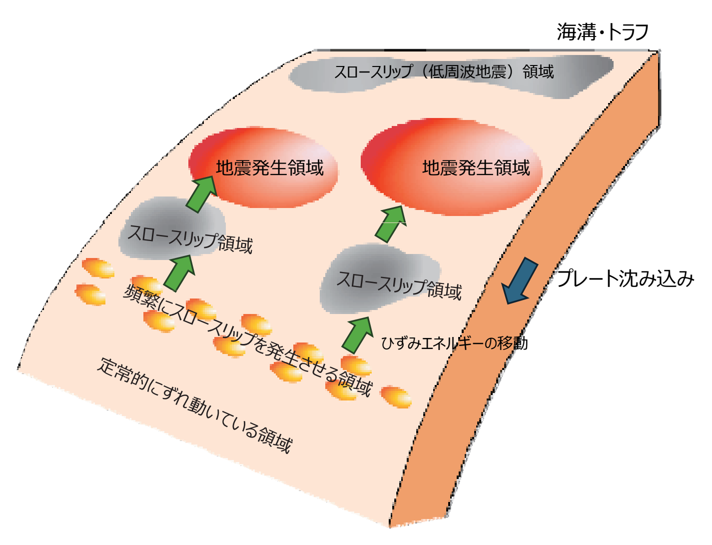

図１　沈み込むプレートと陸側プレートとの境界面における、滑りの多様性を示した。スロースリプを発生させる領域と地震を発生させる領域は異なっている。

べり」と呼んでいます。ずれ動く速度が一定であるため、プレートが沈み込む速度と同じで年間１cmから10cm程度でずれ動いています。定常すべりはゆっくりとしたすべりなのですが、慣習的にスロースリップとは呼びません。定常すべりの領域に隣り合う浅い領域では、プレート境界が時々ゆっくりとずれ動きます。この時々ずれ動く現象をスロースリップと呼んでいます。スロースリップはその頻度により大きく二種類に分類され、比較的短期間で終了するスロースリップと長期間継続するスロースリップがあります。短期間で終了するものを短期的スロースリップとも呼び、比較的長期間継続するものを長期的スロースリップと呼びます。短期的スロースリップの継続時間は数日程度ですが頻繁に発生します。一方で、長期的スロースリップは数ヶ月から数年継続することがありますが、その間隔は年単位と長くなります。短期的スロースリップを発生させる領域の方が長期的スロースリップが発生する場所よりも深い場所にあります。これらスロースリップを発生させる領域よりも浅い場所には長期間ずれ動かない領域があります。この領域は、一気に高速でずれ動き、地震を発生させます。もっと浅い領域で海溝・トラフ軸に近い領域にもスロースリップを起こす領域があることがわかっています。

以上のことを、地震を発生させる「ひずみエネルギー」という観点から解釈してみます。地震は震源周辺の岩盤に蓄えられたひずみエネルギーを高速のずれ動きによって解消（放出）する現象です。そのひずみエネルギーは、プレート境界の定常すべり領域とスロースリップ領域の境界付近で生産されます。スロースリップ領域といっても普段は動いていないので、いつもずれ動いている定常すべり域とスロースリップ領域の動きの差によってひずみエネルギーが生産されます（このひずみエネルギーは、プレートが地球の重力で沈み込むときに解放されるエネルギーから変換されたものですが、ここでは深入りしません。）。

そこで生産されたひずみエネルギーは、短期的スロースリップが発生するとその一部が解消されると同時に隣り合う領域に運搬されます。そこには長期的スロースリップ領域があるため、その周辺の岩盤にひずみエネルギーが蓄積されます。そのひずみエネルギーは長期的スロースリップが発生するたびに一部が解消されるとともに残りがさらに周辺の領域に運搬されます。そこにあるのが地震発生領域なのです。地震発生領域は長期間動かないので、ひずみエネルギーがどんどんたまっていきます。このように短期的や長期的スロースリップが発生する

ことで地震発生領域の周囲の岩盤にひずみエネルギーが蓄積されていくのです。

図には地震発生領域を２つ描いてありますが、その両方にひずみエネルギーが蓄積されていきます。ただし、いつも２つの領域が同時にずれ動いて地震を発生するわけではありません。地震発生のパターンは領域の大きさや位置などの関係によって異なります。それでもどちらか一方で地震が発生すると、ひずみエネルギーを解消すると同時にもう片方の地震発生領域にひずみエネルギーを運搬します。その結果、そちらでも地震が発生しやすくなります。

南海トラフでスロースリップが起きる場所

それでは、南海トラフのスロースリップを起こす場所はどこでしょう。図２にはその場所を地図上に示しました。この図は、海上保安庁がYokota et al（2016）として論文発表し、公表した図に筆者の解釈を加えたものです。

南海トラフ沿いには、四国と九州の間の豊後水道直下から四国・紀伊半島をとおり東海地方の直下まで細長く分布する短期的スロースリップ領域があることがわかっています。ここでは毎月のように場所を変えながらスロースリップが発生しています。それはスロースリップが発生する際に、わずかに震動（微動）を発生するからです。この震動を地震計で捉えて場所を同定します。それと同時に傾斜計やひずみ計などの計測装置で地殻変動が捉えられ、ずれ動きとして解釈されています。それぞれの場所ではおおむね年間２回程度のスロースリップが発生し、いったん発生すると数日から１週間程度継続します。この短期的スロースリップよりも深いプレート境界（北側）が定常すべり域です。一方、浅い領域（南側）には長期的スロースリップを発生させる領域があります。こちらは空間的には連続せず、何カ所かに分かれているようです。長期的スロースリップはそれぞれの場所で数年に１度発生します。こちらは地震計に捉えられるような震動は発生しませんが、地殻変動を計測するGNSS（Global Naviation

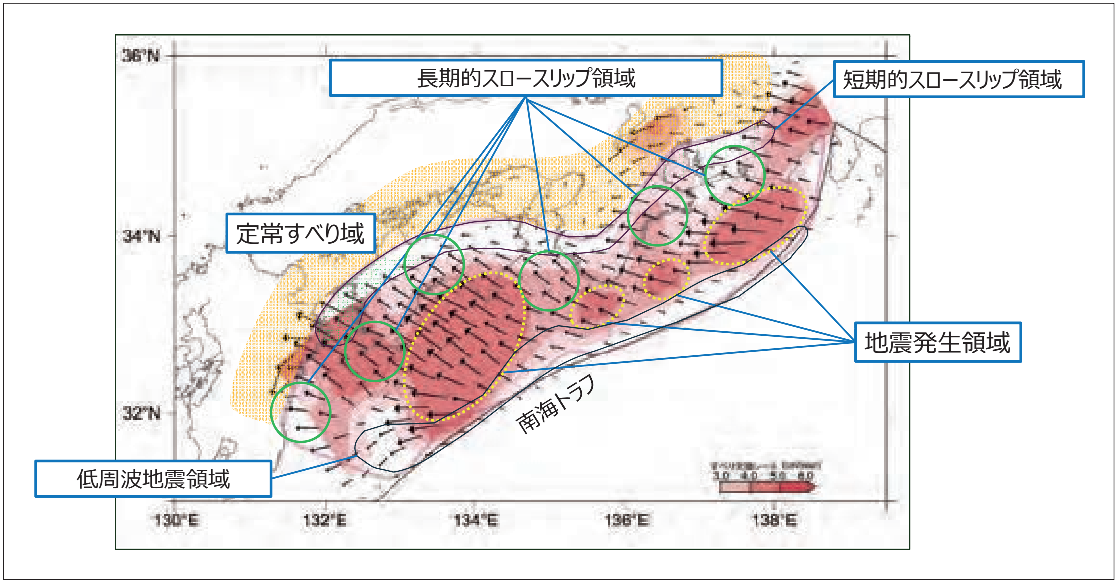

図２　南海トラフ沿いのプレート境界におけるスロースリップや地震発生領域の分布。Yokota et la.（2016）に基づき海上保安庁が発表した図に筆者が加筆した。

Satellite System、GPSも含まれる）の解析により発生を知ることができます。その結果によると、場所によって継続期間や発生間隔が異なっていることことがわかります。

さらに浅い場所には地震発生領域があります。この地震発生領域は、海上保安庁が実施している海底地殻変動観測データの解析によって明らかになりました（Yokota et al. , 2016)。解析結果にはいろいろな解釈の仕方がありますが、ここでは地震発生域（固着域）として解釈しています。図では大小4カ所の固着域を認めることができます。固着域が複数あることが、過去の南海トラフ地震の発生様式の多様性の原因であるものと思われます。また、図1で説明したように、地震発生域の一つで地震が起きた場合、他の地震発生域にひずみエネルギーが運搬され、地震が発生しやすくなります。南海トラフの過去の地震で、紀伊半島の東側と西側の地震が連動するのはこのようなひずみエネルギーの運搬が原因と考えられます。さらに南側のトラフ軸付近にもスロースリップを発生させる領域があります。ここで発生するスロースリップは周波数の低い低周波地震としても観測されています。

南海トラフ地震臨時情報

このように南海トラフ沿いでは日常的にスロースリップが発生しています。気象庁で月例で開催される南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会でも、ほぼ毎回スロースリップの発生が報告されます。スロースリップの発生は、南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）の発表につながる場合もあります。発表の条件としては、「(南海トラフ地震）想定震源域内のプレート境界面において、通常とは異なるゆっくりすべり（スロースリップ）が発生したと評価した場合」とされています。幸いなことに、南海トラフ地震臨時情報の運用が開始した2017年11月以降、今まで「通常と異なるスロースリップ」は発生していません。上記の定例の評価検討会で報告されるスロースリップは、それまでに観測されてきたスロースリップと同程度のものであるためです。しかし、本論で説明したように、スロースリップ現象は地震発生領域にひずみエメルギーを蓄積していく現象に他ならず、いずれ限界に達して巨大な南海トラフ地震が発生します。それまでに同程度のスロースリップが発生し続けるのか、それとも徐々にスロースリップの発生形態が変化していくのか、あるいは突然大きなスロースリップが発生するのか、どのような経過をたどるかはわかりません。蓄積していくひずみエネルギーの推定は可能ですが、どこまで蓄積すると地震が発生するかはわかりません。地震学にできることは、観測を続けることと、その観測データを説明するモデルシミュレーションにより解釈を加えることだと考えています。このような地道な努力を続けることで、次の南海トラフ地震までに蓄積されたひずみエネルギーの分布と地震で解放されたひずみエネルギーの推定が可能となり、その結果その次の南海トラフ地震の予測に貢献するものと思われます。南海トラフ地震の周期は100年から150年と長いため、息の長い観測が必要となります。運が良ければ、大きなスロースリップが発生し、南海トラフ地震の予知につながることがあるかもしれませんが、それはあくまで運が良ければの話です。地道に観測と研究を続けることで、南海トラフ地震に関する知見を増やし、災害軽減につながればと願っています。

引用文献
Obara K.（2002）Science, 296, 1679-1681.
Yokota Y, Ishikawa T, Watanabe S, Tashiro T, Asada A.（2016）Nature 534, 374-377.