

SLOW EARTHQUAKES

ここまでわかったスロー地震

～新学術領域「スロー地震学」の成果～

● Geophysics

04 スロー地震の不均一な分布や変化からプレート境界の状態を把握する

▶ A01 班代表 小原 一成

06 地表のわずかな変動から、地下深くのスロー地震をつかまえる

▶ A02 班代表 廣瀬 仁

● Geology

08 スロー地震はどこで起きるのか、地震波や電磁気を使った観測でその場の構造を探る

▶ B01 班代表 望月 公廣

10 地質学の視点から、岩石中にスロー地震の痕跡を探す

▶ B02 班代表 氏家 恒太郎

Slow Earthquakes

02 『スロー地震学』で分かったこと

▶ 領域代表 小原 一成

● Physics

12 モデルと観測を統合して、スロー地震の全体像を理解する

▶ C01 班代表 井出 哲

14 非平衡・統計物理学の目でスロー地震を理解する

▶ C02 班代表 波多野 恭弘

$$P_f(x) = \frac{P_f(x=0)}{(k_L/k_0) - 1} \left[\left(\frac{k_L}{k_0} \right) \exp(-ax) - 1 \right]$$

SLOW EARTHQUAKES

『スロー地震学』で分かったこと

領域代表 小原 一成 東京大学地震研究所 教授



1. はじめに

地震とは、岩盤内の歪みを解消するために断層を挟んで岩盤同士がずれ動く現象で、通常は瞬間的にずれが生じ、揺れ、つまり地震波が生じる。これに対して、通常の地震に比べ断層がゆっくりずれ動く現象が、世界に先駆けて2000年前後に西南日本で発見された。これがスロー地震である。この発見は、阪神・淡路大震災を契機として日本全国に展開された地震・GPS観測網によってなされ、その後、日本だけでなく世界各地でも多くのスロー地震が検出されてきた。スロー地震は沈み込み帯の巨大地震発生域

に隣接して分布することから、巨大地震の発生との関わりが指摘されていた。実際に、2011年東北沖地震の直前にスロー地震が起きていたことが明らかとなり、その可能性を裏付けることになった。しかし、スロー地震研究はまだ始まったばかりで、巨大地震との関連性とはもとより、スロー地震そのものの理解が十分ではない。そこで、スロー地震の発生様式・発生環境・発生原理の理解を深めるため、科学研究費新学術領域研究「スロー地震学」が2016年に開始した。このプロジェクトによって、スロー地震における新たな知見が得られたとともに、地球物理学だけでなく地質学や物理学の

視点も加え、スロー地震の様々な特徴を説明するためのモデル化が進んだ。本章では、「スロー地震学」で得られた成果を概観してその一部を紹介する。

2. スロー地震の普遍性

スロー地震は、断層のずれの速度の違いによって、いくつかの種類に分かれる(図1)。地震波を出さずにゆっくりと断層がすべる現象をスロースリップイベント(SSE)と呼び、地殻変動としてGPSやひずみ計などによって観測される。SSEは継続時間の違いにより短期的SSE(数日)と長期的SSE(数か月～数年)に大別される。一方、地震計で捉えられる現象は、微動(数Hz)と超低周波地震(数10秒、以下VLFEと呼ぶ)であり、それぞれ高感度地震計と広帯域地震計が用いられる。これらのスロー地震は、深さによって種類の組み合わせが異なっていたり、発生場所や継続時間が離散的であったり、多様性、つまりバラバラ感が目立っていた。本プロジェクトの成果の一つは、離散していた隙間が埋まって普遍的な性質を有することが分かった点であり、それに基づいて、改めて多様性を捉え直すことができた。まず、スロー地震の普遍性について、順に紹介しよう。

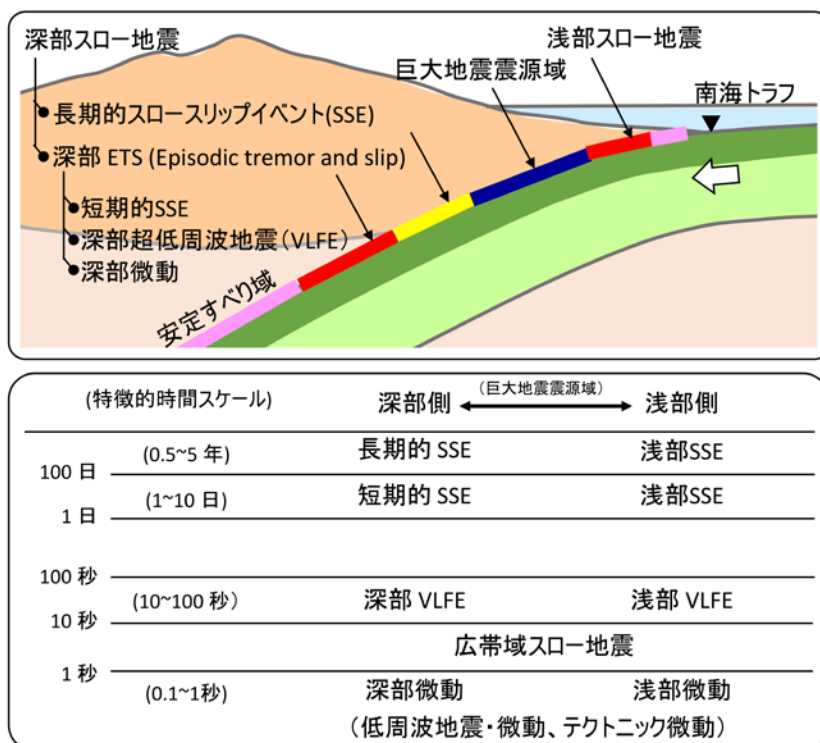


図1 南海トラフにおけるスロー地震の分類

3. 微動から超低周波帯域まで連続する広帯域地震現象

これはC01の成果で、詳しくは12ページをご覧ください。2002年に

固着域深部の微動が、2005年に南海トラフ近傍の浅部VLFEがそれぞれ別の場所で発見され、2007年には固着域深部の微動、VLFE、SSEの同時発生(Episodic Tremor and Slip; ETS)が発見されたが、これらの現象は周波数的に離散していた。微動とVLFEの間の帯域では、海洋波浪起源のノイズが常時卓越し、微弱な地震波の信号を隠していたが、**C01**班長の東京大学の井出教授らのグループが多くの波形を足し合わせる手法を用いて、スロー地震シグナルの存在を証明した。これにより、微動からVLFEの帯域までスロー地震が連続的な現象であることを明らかにしたのである。

4. 浅部スロー地震と 深部スロー地震との共通性

西南日本のスロー地震は、沈み込むフィリピン海プレートの境界面に沿って、巨大地震想定震源域の深部側と南海トラフ近傍浅部の2つの深さに分かれる。これまで、深部側ではETSや長期的SSEが検出されていたが、浅部側ではVLFEのみと、浅部と深部でスロー地震の組み合わせが異なっていた。しかし、近年になって海域の地震・地殻変動観測網が整備され、いずれも同様のスロー地震群が起きていることが分かったのである。

紀伊半島南東沖では、2017年に**C01**班研究協力者の海洋研究開発機構・荒木グループリーダーが、間隙水圧の孔内観測により浅部微動やVLFEに同期したSSEを発見し、2018年には**C01**班研究分担者の海洋研究開発機構・中野副主任研究員により、SSEによる間隙水圧変化とVLFEのモーメント積算変化が良く一致することを突き止めた。このことは、浅部スロー地震が、深部と同様のETSとして発生していることを示している。また、日向灘では**A01**班研究分担者の京都大学・山下助教が機動的海底地震観測により2015年に浅部微動を発見したが、日本海溝付近でも**A01**班研究分担者の防災科学技術研究所・田中主任研究員や**C01**班研究協力者の京都大学・西川助教らが2019年にS-netのデータを用いて浅部微動を検出し、2011年

の東北沖地震の大すべり域と棲み分けていることを示した。日向灘や東北沖では、微動やVLFEにSSEが同期するかどうかまだ明確ではなく、今後の観測研究に期待される。

5. 長期的SSEの プレート走向方向の連続性

長期的SSEは、スロー地震の中で最も早く1999年に発見された。その後2002年に発見された微動が西南日本の東西600 kmに渡って分布するのに対し、長期的SSEは東海地方と豊後水道のみ繰り返し検出されていた。**A02**班研究分担者の東北大学・高木助教は、国土地理院のGNSSデータを解析し、長期的SSEがフィリピン海プレートの走向方向に沿って分布することを明らかにした。その深部にはETSが、また浅部には巨大地震震源域が同様に走向方向に広がり、深さに応じて現象が遷移することを示している。

6. スロー地震の多様性

以上の新たに分かったスロー地震の普遍性をもとに、スロー地震の多様性の再検討が可能となった。3. のスロー地震の広帯域性については、微動からVLFEまでの連続性が確立され、未検出の領域はVLFEとSSEとの間のギャップのみとなった。このギャップを埋める現象が存在するのかどうかは、今後の観測技術の革新が必要であろう。5. については、走向方向に長期的SSEが並ぶが、すべり量や発生間隔などは空間変化を有するという不均質な性質を有する。それは、さらに深部で起きるETSも同様である。つまり、深部スロー地震は、深さに応じて異なる種類の現象が発生するが、走向方向には同一現象が不均質に分布する。一方、4. では、浅部スロー地震が深部と同じ組み合わせで発生することが分かったが、海溝軸に沿って異なる現象が分布する様相は、同一現象が並ぶ深部スロー地震とは異なる。つまり、深部と浅部スロー地震とは、分布の不均質性の程度が異なるという多様性が存在する

と言える。その違いを明らかにするためには、さらに高分解能な地下構造イメージング等、不均質性を特徴づける要因を見出す必要があるだろう。

7. スロー地震のモデル化

「スロー地震学」では、多様な観点からスロー地震の様々な特徴を説明するためのモデル化が進められた。その中で、重要な成果が地質学との融合によって産み出されている。**B02**班長の筑波大学・氏家准教授らは、地表露頭の石英鉱物脈が過去のスロー地震の痕跡であることを明らかにし、その地質学的分析からスロー地震の発生間隔を割り出すことに成功した(10ページ)。これは、過去のスロー地震発生履歴を解明する手掛かりとして非常に注目される。**C01**班研究協力者の東京大学・安藤准教授らは、断層帯の地表露頭における固いブロックが柔らかいマトリックスで取り囲まれている様子から、摩擦すべりの脆性部分と流動変形する延性部分を考慮し、さらに延性物質の粘性の温度依存性も取り入れた物理モデルを構築した。その結果、深部スロー地震にみられる、深さと共に系統的に発生様式が遷移する様子を再現することに成功した。**C02**班長の大阪大学・波多野教授らは、地質巡検等でインスパイアされた地質学的凸凹構造をモデル化したシミュレーションにより、不均質性が強いほどスロー地震が発生しやすくなったり、巨大地震に先行するスロー地震の特徴の再現に成功した。

8. おわりに

スロー地震学が新学術領域に採択されたことで、地球物理学だけでなく地質学や物理学の観点も融合した多様な研究の連携が可能となり、スロー地震に関する理解は飛躍的に進んだと言える。この限られた紙面では、そのすべての成果を網羅することはできず、ごく一部だけの紹介となるが、スロー地震のことを少しでもご理解いただければ幸いである。

A01 (地震観測) 班の研究成果について聞きました

2000年代に入ってから急速に知見が積み重なってきたスロー地震の全体像を理解するため、A01班は新しいデータ解析方法などを駆使して、超低周波地震、微動、スロースリップの発生状況や相互作用、あるいはそれらと巨大地震の関連について明らかにしてきた。詳しい全体像が見えてくるにつれ、その空間的、時間的な不均質性がより明瞭になってきた。それはプレート境界の不均質な構造を反映する指標であるとともに、巨大地震の切迫度と関連している可能性も見えてきた。



A01班代表
小原 一成 教授
東京大学地震研究所

スロー地震の不均一な分布や変化から プレート境界の状態を把握する

● 超低周波地震を網羅的に 探し出す

スロー地震の一種である超低周波地震 (VLFE) が初めて報告されたのは2005年のことだ。この地震は、周期10～100秒の、とてもゆっくりした地震波を出す。この周期は、低周波微動とスロースリップの中間に相当する。

長い周期は、遠くから観測するのに適している。周期の長い地震波は減衰しにくいので、陸から100キロ以上離れた海底で断層面が数センチずれる程度の超低周波地震でも、陸上にある観測装置で捕まえることができるのだ。

阪神・淡路大震災後に国内約800か所に張り巡らされた高感度地震観測網 (Hi-net) は、普通の小さな地震 (周期1秒程度以下) の観測用なので、VLFEの観測には向いていない。そこで東京大学の小原一成教授や大学院生の馬場慧さんは、もっと周期の長い地震波まで測れる広帯域地震計の観測網 (F-net) を使った。F-netは、防災科学技術研究所が1994年から展開している広帯域地震計のネットワークで、現在約70か所に観測点がある。もともとは巨大地震の震源域が割れていく過程を詳細に調べたり、地球の深部構造を探ったりするねらいで整備されてきたものだ。

VLFEのシグナルは非常に弱いため、データを見ていて「あ、今起きた」と人間の目で判別することは難しい。そこで地震学の分野で2000年代後半から使われ始めた「テンプレートマッチング」という方法で、膨大な観測データの中から

VLFEの信号を見つけ出せるようにした。

例えば北海道から東北沖では、日本海溝から陸よりのプレート境界に123か所の仮の震源を配置し、それぞれの場所でVLFEが起きたら、どんな地震波がF-netの観測点に到達するか計算して弾き出す。その計算した波の形が、F-netで蓄積された十数年分の連続観測データの中に埋もれていないか自動的に、網羅的に探し出すという手順だ。

● プレート境界の不均一さを 反映したVLFE発生のばらつき

そうしてVLFEを全部探し出した結果が図1である。VLFEがたくさん起きている領域は、濃い色のマス目で表示されている。日向灘や十勝沖は色が濃いのが、南海トラフや日本海溝沿いでも色は均一ではなくて発生の仕方に差があることが

わかる。

図1に等高線のように記入されている線は、プレート境界の固着の度合いを示している。四国沖、宮城沖の楕円状に線が閉じているところが最も固着が強く、そこから離れていくほど固着は弱くなっていく。

これを見ると、プレート境界の固着が強いところではVLFEがほとんど起きておらず、それより離れたところで発生していることがわかる。

また西南日本の地図で、プレート境界の深いところ (平面的には四国や紀伊半島などの地下) のマス目は薄い色で、色のばらつきは少ないが、一方で浅いところ (南海トラフに近いところ) は、マス目の色の濃淡にばらつきが大きい。

深いところではプレート境界の構造が比較的均一なので、それに対応して粒

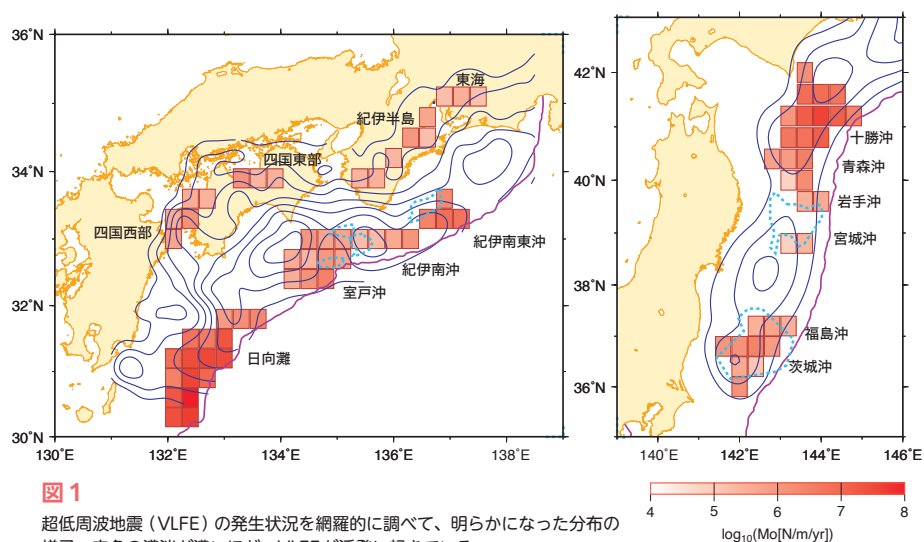


図1

超低周波地震 (VLFE) の発生状況を網羅的に調べて、明らかになった分布の様子。赤色の濃淡が濃いほど、VLFEが活発に起きている。

の揃ったVLFEが起きている。一方で浅い領域では、プレート境界の構造が極端に違う領域が、すぐ隣同士に並んでいることもある。それが、VLFEが起きたり起きなかったり、あるいは振幅が非常に強かったり弱かったりといった、多様性を生み出しているのではないかと考えられている。

この多様性には温度や地形が関わっていると推測されている。浅いところでは、まだプレートが沈み込んだばかりなので、温度のばらつきや、海山など形のばらつきが保たれている。ところがプレートが沈み込み、巨大地震の固着域も通りすぎて深いところに到達すると、温度は300℃から400℃と高くなり、形のばらつきも小さくなっているからだ。そのようなプレート境界の温度や形のばらつき度合いが、VLFEの活動の違いに反映されていると考えられる。

●東北地方太平洋沖地震の前後で大きな変化

図2は、VLFEの発生が時間を経るにつれ、どのように変化しているかを見たものだ。ここでも興味深い現象が見つかった。

図1で「岩手沖」と書かれた4つのマス目で発生しているVLFEの時間変化を示したものが図2(A)、「宮城沖」と書かれた2つのマス目における時間変化が図2(B)になる。

岩手沖では、2011年3月の東北地方太平洋沖地震(大地震)が発生する(オレ

ンジの点線)までは、VLFEの活動度は低い。ところが大地震後は、急に活発になり、その後再び徐々に数が減ってくる。

一方、宮城沖はその逆だ。大地震前はある程度活動していたのに、大地震後はほとんどVLFEが発生しなくなる。

岩手沖と宮城沖でVLFEの時間変化の様子が大きく異なっているのは、それぞれの場所が、大地震の際に大きくずれた断層面の外側か、内側かの違いによるらしい。

図2(C)と図2(D)で、緑色の濃淡で示されているのは、大地震を起こした断層のすべり量の分布だ。緑色の濃いところは50メートル以上ずれている。図2(C)で、赤い星印で示しているのが岩手沖のマス目の場所になる。ここは大地震で断層が大きくすべった領域の外側にある。一方、図2(D)の赤い星印で示された宮城沖のマス目は、大きくすべった領域の中になる。

宮城沖の時間変化を示す図2(B)のグラフを見ると、大地震の前に、VLFEの発生が増えてグラフが急激に立ち上がる時期と、VLFEが発生しない時期が繰り返し、階段状になっている。

「本震が発生する前に、ちょっとずつプレート境界がすべる、少しずつ固着が剥がれていくような現象が起きて、それがVLFEの活動度に反映されていたのではないかと考えられる。この階段のような挙動は、本震の発生の切迫度を反映するものかもしれない、注目される現象だ」と小原教授は言う。

大地震の後、岩手沖でVLFEが増えたのは、大きな地震の後で震源域の周辺がゆっくりすべり続ける「余効すべり」を反映したものらしい。宮城沖で減るのは、大地震ですべり尽くしてひずみが解消されたため、と考えることができる。これらも、プレート境界の状態を把握するには重要な情報になる。

●VLFEのリアルタイムモニタリングでプレート境界を監視

VLFEだけでなく、微動やスローリップでも、発生する場所が不均一であったり、あるいは発生する場所が一定の方向へ移動する傾向があったりするなど、スロー地震の多様性の理解が進んだ。それらも巨大地震を引き起こすプレート境界の環境を反映しているので、巨大地震を探る手がかりになる。

南海トラフや日本海溝などでは海底地震観測網の整備も進んでおり、スロー地震を、これまでより発生の現場の近くで観測できる領域も増えてきた。ただし陸上に比べると観測網はまだ粗いので、遠くの陸上から観測できるVLFEを介してプレート境界の様子をつかむ手法は今後も役立つ。

「今回示したやり方ならば、VLFEの変化をリアルタイムでモニタリングすることができるので、日本全体の地殻活動やプレートの状況を調べたり監視したりする上で重要な手法だと思う」と小原教授は話している。

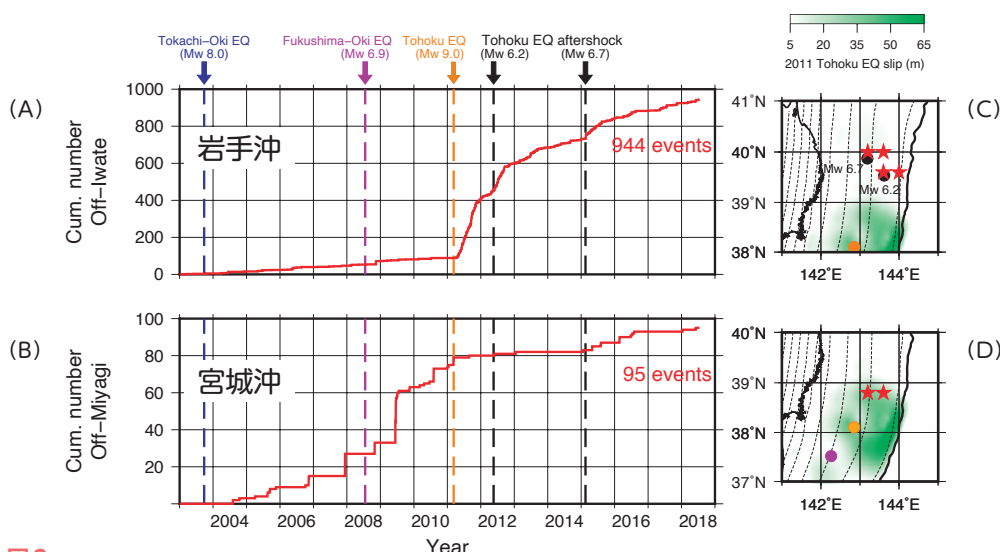


図2

岩手沖(A)宮城沖(B)で発生する超低周波地震(VLFE)の時間変化。岩手沖(C)宮城沖(D)のVLFEが発生した位置(赤い星印)。緑色の濃淡は、東北地方太平洋沖地震で断層がすべった量を示す。

A02(測地観測)班の研究成果について聞きました

人工衛星による全地球測位システム(GPS)や傾斜計など、地表のごくわずかな変動を検知できる測地学の方法を使って、地下深くのプレート境界で発生しているスロー地震を探るのがA02班の研究だ。マグニチュード8を超える巨大地震と、スロー地震が起きる場所が、重ならないように棲み分けている様子や、時にはスロー地震の発生場所が、巨大地震の発生する領域に浸み出している様子などが見えてきた。



A02班代表
廣瀬 仁 准教授
神戸大学
都市安全研究センター

地表のわずかな変動から、 地下深くのスロー地震をつかまえる

● 測地学の方法で 断層のずれやひずみを把握

兵庫県・淡路島にある野島断層保存館を訪ねると、阪神・淡路大震災(1995年)を引き起こした断層が地表まで現れているのを目の当たりにすることができる。この断層は、最大で横に約2メートル、上下に約1メートルもずれた。保存館では、断層が民家の塀をずらして壊した様子もそのまま残している。

スロー地震の正体も、同じような断層のずれだ。しかし地下深いところで起きているから直接ずれを見るのは難しい。神戸大学の廣瀬仁准教授らは、測地学の方法を使って、このずれの大きさや位置を地表から推定する研究をしている。主な道具は、国土地理院の観測網にA02班独自の観測点を加えたGPS観測網と、防災科学技術研究所が全国に張り巡らせている傾斜計だ。

地下数十キロのプレートの境界で一回に数センチずれるようなスロー地震が、地表では1キロメートル先の地面が0.1ミリ上下するようなごく小さな変動として現れる。最先端の測地学的手法を使ってその地表の動きをつかみ、それをもとに地下の断層がずれている様子を計算で求める。

断層面が1年間ぐらいかけて、ずれると動く長期的スロースリップイベント、数日から数週間かけてずれる短期的スロースリップなどが、どこで起きているのか、巨大地震の起きる場所との関係はどうなっているのかを調べた。そして海洋プレートが潜り込むことで年々蓄積

される地下のひずみが、スロー地震の発生によって解放されているのか、逆にどのくらい残っているのか、次の巨大地震の発生時期を知る重要な手がかりも探っている。

● スロー地震と大きな地震、 見えてきた「棲み分け」

スロー地震の起きる場所と、巨大地震の起きる場所は、どんなふうに分かれているのだろうか。それを鮮やかに示したのが、東北大学の高木涼太助教らの研究だ。20年分以上蓄積された国土地理院のGPS観測の膨大なデータを自動的に解析する手法を開発し、九州の日向灘から四国西部にかけての領域で、24個の長期的スロースリップを見つけ出した。うち11個はこれまで報告されていなかったものだ。

いくつかの特徴がわかった。

一つは、百数十年の周期でマグニチュード8クラスの南海地震が起きる場所(固着域)と、微動が起きている領域の間に、長期的スロースリップが普遍的に存在していることだ(図1)。

そして、長期的スロースリップの発生にパターンがあるらしいことも見えた。一番発生頻度の高い宮崎県の沖合では、2、3年に一度発生していた。起こっていること自体は知られていたが、網羅的にとらえたことで周期をつかむことができた。

さらに、まず宮崎県沖で発生した長期的スロースリップは、次は大分沖、さらに四国西部へと北東方向に3、4年か

けて移動しながら、連鎖的に発生していることもわかった。その移動の流れは、データを分析した20年の間に4回あった。

このスロースリップの起こり方やその変化は、巨大地震を起こす固着域の状態変化を反映している可能性もあり、巨大地震の予測にも役立つかもしれないと期待されている。

● 巨大地震の固着域に 侵食するスロースリップ

東北大学の加納将行助教らは、GPSの記録を使って、1週間から数週間続く短期的スロースリップを四国西部で調べた。

短期的スロースリップは、一回ずれ動いても地表で検出できる変位は1~2ミリというレベルでしかない。通常の計算方法ではノイズに埋もれてしまうため、多数のスロースリップの信号を加え合わせてノイズを減らし、地下の断層面の動きを求められるようにした。

その結果、微動が起きている領域と同じところで短期的スロースリップが多数検出された。このことは微動と短期スロースリップの同時発生現象(ETS)として従来から知られていたもので、驚くようなものではなかった。注目されたのは、プレート境界のもっと浅い場所、巨大地震の固着域とほとんど重なっているようなところでも短期スロースリップが起きていたことだ(図2)。

これまでは、短期スロースリップが起きている領域と、巨大地震の固着域は、きちんと分かれていると考えられていた。

しかし、スロースリップの一部は、時には固着域に侵食して、そこでもすべりを起こしているらしい。

「深い場所でゆっくりしたすべりが起きる時に、浅い固着域に近い場所でもちょっとだけすべっているのではないか」ということを初めて見出した成果。スロースリップのすべりが、巨大地震に何らかの影響を及ぼす可能性もある。驚きの結果でした」と廣瀬准教授は話す。

●水の動きが見えた

GPSや傾斜計とは別の測地的な方法でも成果があった。

東京大学の田中愛幸准教授らは絶対重力計という装置を使って地下の様子を探っている。真空の筒の中で特殊な鏡を落下させ、落下した距離をレーザーで、落下に要した時間を原子時計で測って、その場の重力の値を求める。実際に物を落として重力を測るという素朴にも見える方法だが、精度は極めて高く、重力の値が10億分の1ほど変化しても検知できる。この変化は、観測点の地下の物質の密度や分布の変動を反映している。

田中准教授らは、この装置を使って、東海地震の震源域近くで断続的に起きているスロースリップの際に重力がどう変化するか20年以上調べている。観測点

は、プレートが潜り込む駿河トラフに近い静岡県の御前崎・掛川と、スロースリップが実際に起きている場所の中心に近い愛知県・豊橋の3か所だ。

2001年から2006年、2013年から2017年に2回、地下約30キロのプレート境界でスロースリップが起きていた。観測の結果、そのスロースリップが生じている間は重力の変化が小さく、一方でスロースリップの起きていない期間は、重力の値が増えていた。

スロースリップがすべり始めると、地下の岩石の間に水が染み込み、その水が断層に沿って浅い方に移動していると考えると重力の変化を説明できることがわかった。「地震と水の関わりを観察できた成果。これはスロー地震だけでなく、通常の地震を含む断層運動への水の影響の解明に役立つ」と廣瀬准教授。

●長期的な変化を知りたい

阪神・淡路大震災（1995年）以降、全国にGPSや傾斜計が急速に配備された。国土地理院は全国約1300カ所にGPSを設置し、傾斜計も防災科学技術研究所が全国に約800点設置している。これだけ高密度の観測網があるのが、日本の地震研究の強みだ。

日本列島が載っている陸側のプレ

ートの地下深くに、フィリピン海プレートや太平洋プレートが年間数センチの速さで潜り込んでいる。フィリピン海プレートの上に位置する北大東島などの島に設置されたGPSの信号を見れば、島が日本に刻々と近づいている様子を、ほぼリアルタイムで確かめることができる。「プレートがゆっくりと動いていく様子を感じることができるのが測地的な方法で地震を研究する魅力だ」と廣瀬准教授は言う。

廣瀬准教授が博士課程の大学院生だったころ、国土地理院がGPS観測を始めて3、4年目で、ちょうど蓄積されたデータが使えるようになり始めた時期だった。それを生かして、廣瀬准教授は1999年に豊後水道の付近で起きているスロースリップを初めて報告した。

それから20年余り。GPSや傾斜計の記録を分析していると、初めの10年間ぐらいは全然起きていなかったのに、最近10年ぐらいになって出現するようになった現象があるという。「次の10年で行き渡らぬのか、まだ誰も知らない世界。巨大地震がもうすぐ、と差し迫ってきたら、また違う変化が出てくるかもしれない。長い目で、スロー地震の起こり方がどう変わっていくのか知りたい」と廣瀬准教授は話している。

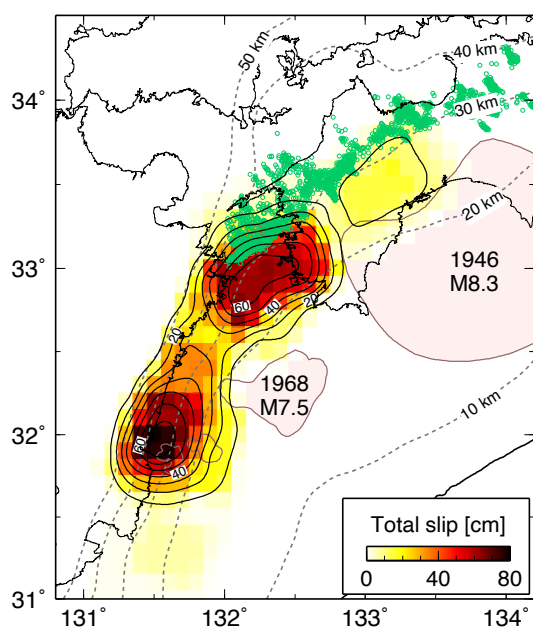


図1 長期的スロースリップが起きている場所

巨大地震の固着域（1946年南海地震、1968年日向灘地震）と、微動の起きている領域（緑の点）の間で、長期的スロースリップが起きている。色が黄色から赤に濃くなるほど、累積したすべり量は大きい。

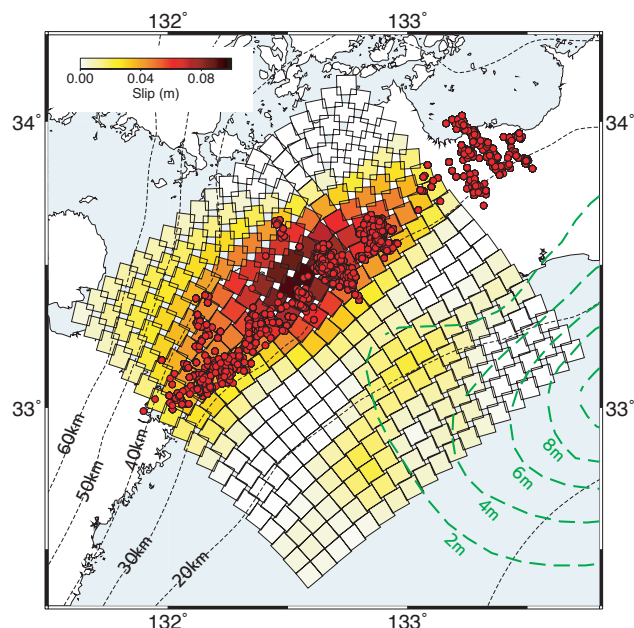


図2 短期的スロースリップが起きている場所

緑の点線で示されている南海地震の固着域の中に、黄色で示されたスロースリップが一部侵入しているのがわかる。赤の点は、微動の起きている領域。

B01 (地球物理学的構造調査) 班の研究成果について聞きました

断層がずれると、あるときは巨大地震になり、またあるときはスロースリップや微動などのスロー地震となる。その違いはなぜ生じるのだろうか。B01班は、断層ずれが起きるプレート境界の構造を、地震波や電磁気を使った複数の観測手法を組み合わせで探った。その結果、プレート境界に不均一に水が存在し、それがスロー地震や巨大地震の発生パターンと関わっていることが見えてきた。



B01班代表
望月 公廣 准教授
東京大学地震研究所

スロー地震はどこで起きるのか、 地震波や電磁気を使った観測でその場の構造を探る

● 豊後水道でプレート境界を 集中観測する

四国と九州の間にある豊後水道は、瀬戸内海と太平洋をつないでおり、両岸には美しいリアス式海岸が連なる。愛媛県・佐多岬から大分県・佐賀関まで最短航路なら約30キロの幅だ。この豊後水道を中心とする領域が今、スロー地震の研究で世界最先端の現場となっている。

四国や九州が載るユーラシアプレートと、その下に沈み込むフィリピン海プレートとの境界が、豊後水道の海底下20キロから40キロあたりに広がっている。この付近では、1946年の南海地震(マグニチュード8.0)や、1968年の日向灘地震(マグニチュード7.5)などの巨大地震だけでなく、微動、スロースリップなど、いろいろな種類のスロー地震が起きていることが近年明らかにされてきていた。

四国の南にある南海トラフから年間数センチずつ沈み込むフィリピン海プレートがひずみを生み出し、プレート境界の浅いところから深いところまで、さまざまな断層すべりを引き起こす。その断層のすべりは巨大地震になったり、スロースリップになったり、微動になったりする。どんな地震になるのか、その違いはプレート境界の環境による。境界の深さによって環境が変化すると見られているが、その特徴を明らかにするのが東京大学の望月公廣准教授らの研究班の目的だ。豊後水道ならば海からだけでなく、四国西部の陸上での観測も組み合わせられるのがこの地域で研究する強みとなる。

人の体の様子を調べる時、X線を使ったCTスキャン(コンピューター断層撮影)やMRI(磁気共鳴断層撮影)、超音波断層撮影などを使い、得られた結果を組み合わせで判断することができる。地震研究でも同じように、地震の波や電磁気の伝わり方など、多様な手段で地下の構造を探る。ただし人体の断層撮影は、知りたい臓器の周囲360度から信号を検知して精度を上げられるが、地球が相手ではそうはいかず、プレート境界の上面からの情報を、何十キロも離れた場所から検知するという制約はある。

「みんなで一堂に集まっているんな手法で見ることによってプレート境界のすべりを見ていこうという大規模な研究。世界中でもこれだけ複数の手法で詳しく調べた海域は、ほかにはないのではないかと」望月准教授は話す。

● 水とスロー地震の関わりが 見えてきた

調査船で圧縮空気を使って地震波を発生させ、地下構造から反射される信号を解析して海底下の断面図を作る。海底地震計を2キロ間隔で沈めて、地震波の速度が変化する場所を探り出す。電位差を測る装置も海底に設置し、地下で電気の伝わりやすい領域、伝わりにくい領域を見つけて構造の不均一さを探る。そんな調査を進めた。

その結果、フィリピン海プレートとユーラシアプレート、その間にマントルが挟まる様子が三次元でつかめてきた。地震の波が伝わる速さは、岩石に水が多

く含まれると遅くなる。また電気の伝わりやすさも、水が多いところでは伝わりやすくなる。それらの結果を組み合わせで解釈すると、水が多く存在するところで微動が多く発生している様子も見えてきた(図1上)。

現在、一つのモデルとしては、水が多い場所では、マントルが変化するため微動が発生するのではないかと考えられている。マントルが水を含むと変成して蛇紋岩という柔らかい岩石になる。それは通常のプレート境界で固着している部分にある岩石より柔らかく、すべりやすい特性を持つ。それが微動を生み出しているのではないかといいのだ。

また豊後水道の南部で、日向灘地震が発生したプレート境界付近では電気が伝わりにくく、その西側のスロースリップが起きている領域では伝わりやすいこともわかった(図1下)。

電気が伝わりやすい場所は、水が存在していることが推測される。一方、日向灘地震のような強い地震が起こるところは、電気が伝わりにくいこともわかった。

微動を引き起こした蛇紋岩化のメカニズムとはまた別の仕組みで、電気が伝わりにくい領域が形成されており、それが巨大地震の発生とも関わっているらしい。

「一つのキーワードとしては水。それがどのように存在するかということと、スロー地震や巨大地震の関係が、プレート境界の浅いところから深いところまで見えてくる」

● スロー地震発生前の構造変化も捉えた

豊後水道だけでなく、四国から紀伊半島にかけてのプレート境界や、東北地方の日本海溝やニュージーランドのプレート境界などでも研究を進めている。そこでも、水の動きや、プレート境界に沈み込んだ海山による構造が地震に与える影響などが見えた。

紀伊半島沖の海底では、南海トラフ地震の研究のための海底地震津波観測網 (DONET) が東日本大震災 (2011) 後、本格的に稼働している。これを使った観測では、地下の構造の時間変化とスロースリップの関係も見えてきた。

豊後水道で用いた海底地震計はバッテリー内蔵で、短期間の計測が済めば浮上させてデータを回収する。一方、海底ケーブルにつないで観測しているDONETの地震計は、何年もの長期間にわたって継続してリアルタイムでデータを集められる。そのデータを解析した。

DONETの複数の海底地震計の記録を比較すると、スロースリップが起きる2～9ヶ月前に、地下の構造が変化しているらしいことがわかった。その原因として、ここでも水が関わっていると推測されている。プレート境界に水がたまってくると、それが地下の構造の変化として海底地震計で捉えられるようになる。そして、さらに水が溜まり続けて、スロー

スリップを引き起こすらしい。

望月准教授は「ニュージーランドでも変化が見られている。それらも合わせて検討すると、この構造の変化は水の動きと関連づけて説明できそうだ」と言う。

● 海から研究する魅力

望月准教授の専門は海域地震学で、年に1か月程度は大学の調査船などに乗って海から地震の研究をしている。

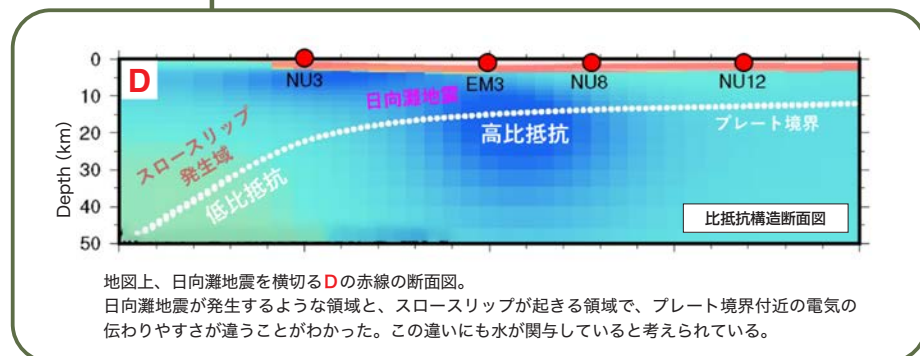
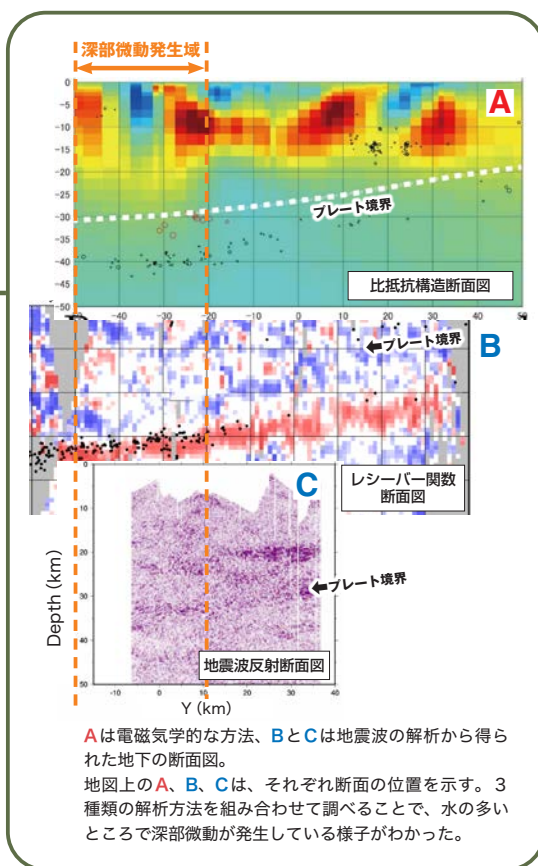
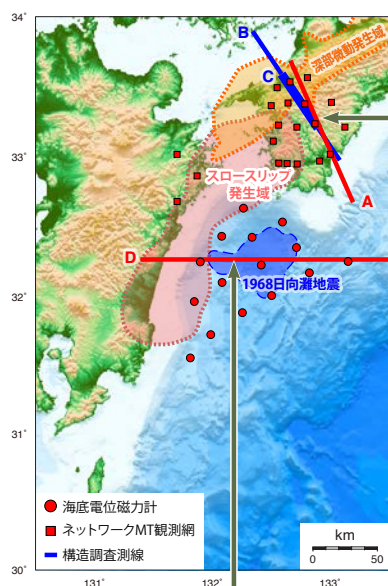
豊後水道沖から日向灘にかけての海域調査で力を発揮した電磁気学的方法は、これまで陸上や陸から遠く離れた海底では実績があったものの、陸地に近い海底で使うのはまだ挑戦的な段階だったという。陸の上とは違い、電磁気の信号は海底ではとても弱くなる。さらに陸の近くでは複雑な海底の凸凹地形によって電磁場は複雑になる。これらの問題を、スロー地震学の研究メンバーが開発した解析手法を駆使することにより解決し、海陸境界の近くでプレート境界付近の電気の伝わりやすさを三次元で解明することに世界でほぼ初めて成功した。

海底地震計による地震波の観測も、スロー地震のようなゆっくりした周期の揺れを捕まえるのは技術的に難しくなってくる。陸上に設置する地震計は、地盤の良いところを選んで、地面にがっちり固定してある。ところが海底地震計は、海底の柔らかな堆積物の上にふわりと着地するだけ。観測が終われば浮上させなければならないので、海底にしっかり固定することも難しい。

「極端に言えば、とうふの上で地震を観測するイメージ」と望月准教授。そして海特有のノイズも多い。高感度で揺れを測定する地震計にとって、海面でポチャポチャする程度の波さえ大きなノイズになる。

それでも、海からの観測には魅力が大きいという。知りたいプレート境界の秘密は、陸の上からでは深く遠くなる。海からならば、調査したいところの近くに観測機器を置いて、解像度の高い情報が得られる。スロー地震の研究に、海から貢献できる領域はまだ広がっているという。

図1
地図上のそれぞれの断面において、3種類の異なる解析方法で調べた。



B02(地質)班の研究成果について聞きました

スロー地震を引き起こす断層では、どんな種類の岩石が、どのような構造を作ってすべりを引き起こしているのだろう。そして巨大地震と異なりゆっくりすべるのはなぜなのだろうか。断層の実物を露頭から顕微鏡レベルで観察して、スロー地震の詳細な発生メカニズムに迫るのがB02班の地質学者たちのテーマだ。過去にスロー地震を起こしていた「現場」が九州東岸の陸上に露出しているのを見つけ出し、その観察から、スロー地震の動きを説明できる有力なモデルを示すことができた。



B02班代表
氏家 恒太郎 准教授
筑波大学生命環境系

地質学の視点から、 岩石中にスロー地震の痕跡を探す

●地震を起こした断層面を 探ってきて調べる

巨大地震やスロー地震を引き起こすプレートの境界面は、図では単純な一本の「線」で描かれていることが多い。地震計や全地球測位システム(GPS)などを使った地表からの観測によって、その「線」上で起きていることを間接的に知ることができるが、実際には厚みのある地下深くの断層がどんな様子になっているのか、直接見たり手で触れたりして、調べてみることはできないのだろうか。

筑波大学の氏家恒太郎准教授らは、東日本大震災を引き起こしたプレートの境界面を、地球深部探査船「ちきゅう」で孔を掘って調べた結果を2013年に報告している。宮城県牡鹿半島の東約200

キロの水深約6900メートルの海底からさらに約820メートルも地中を掘り、断層面を掘り起こした。断層がすべった面には粘土が多いことや、断層のすべりで摩擦熱が発生し、その熱が断層中の水を膨張させてさらにすべりやすくさせ、結果として断層のすべりはとても大きくなり大津波を引き起こしたことを明らかにした。

では、スロー地震を引き起こす断層は、大きな揺れや大津波を引き起こす断層とはどこが違うのだろう。

●石英からなる 白い鉱物脈に注目

スロー地震(微動やスロースリップ)を起こしている領域は、巨大地震の震源

域よりさらに地下深いところにあるので、残念ながら掘削して調べることは難しい。そこで昔のプレート境界面が、長い時間を経て隆起して陸上に露出している場所でその正体を探ることから始めた。

「今活動的な地震を病気に例えると、掘削するのは、孔を開けて内視鏡で手術するのと似ている。一方、陸上に露出している断層を調べるのは、すでに死んでいる地震を解剖するようなもの。今活動していないが、そのかわり広範囲で徹底的に調べることができる。掘削はその一点しか調べられないから一長一短がある」と氏家准教授。

大分県から宮崎県にかけての太平洋岸に7000万年前から8000万年前ごろにプレート境界付近で作られた岩石など

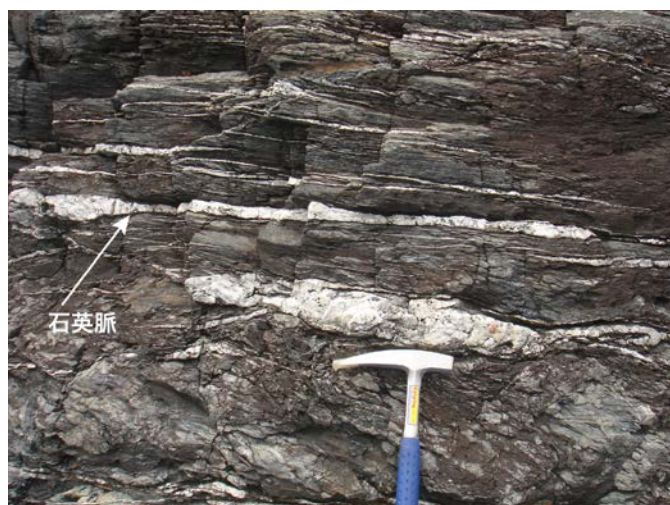


図1

陸上に露出しているのが見つかったスロー地震発生域(ETSの発生域)の様子。変成岩の間に、石英からなる白い鉱物脈が何層にも重なって数多く発達する。

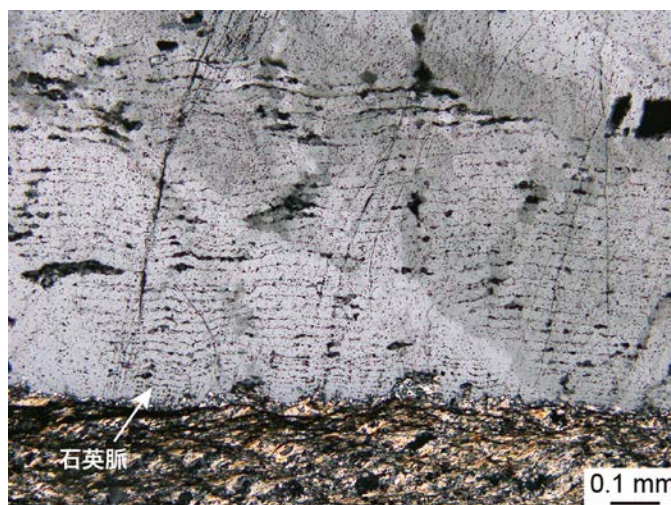


図2

石英からなる鉱物脈の中に見られる縞模様。破壊と石英の析出が何度も起こったことを示す。

が隆起している場所があることが知られていた。それを形成したのは、今の南海トラフと同じような性質を持つプレートと見られていた。さらに隆起して露出している岩石は、スロー地震が起きる温度や圧力と同じような条件で形成されていたので、スロー地震の「化石」を探すには持ってこいの場所に思われた。

手がかりは水だ。地震波の伝わり方などによる研究から、スロー地震の発生に水が関わっているらしいことが明らかになりつつあった。スロー地震発生の現場には、水の痕跡があるはずだ。

氏家准教授らは、変成岩中の石英からなる白い鉱物脈に注目した(図1)。鉱物脈は、流体の化石とも言われている。水に含まれていたシリカが岩石の割れ目に染み込み、圧力が下がるなどの要因で溶解度が落ちると割れ目の中に析出して石英の鉱物脈を形成する。「温泉に含まれる成分で、温泉のパイプがだんだん詰まっていくようなもの」と氏家准教授は説明する。

鉱物脈一つ一つの長さは約1～10メートル、厚さは数センチメートル以下で、その鉱物脈が厚さ約60メートル、長さ100メートル以上の領域に濃集していた。この鉱物脈濃集地帯がスロー地震の発生現場の有力な候補として浮上した。

● スロー地震を記録した 縞々を地質学で読み解く

巨大地震時に断層は毎秒1mぐらいの速さですれる。その時に発生する熱の痕跡が断層面に残っていれば、その断層が地震を引き起こした証拠になる。しかしゆっくり動くスロー地震の場合、この方法では証明が難しい。そこで、この鉱物脈が濃集したところが、スロー地震を起こしたと言うためには、別の証拠を見出さなければならなかった。

スロー地震は

- 1) 低角逆断層運動で起きる
- 2) 断層はとても弱い力ですべっている
- 3) 水圧が高い条件下で起きている
- 4) 発生は数年以内で繰り返すという特徴を持つ。

鉱物脈でこの4条件が満たされるか調べたところ、1)から3)は、岩石の破壊の発生条件を明らかにすることで確認できた。4)については、鉱物脈を顕微鏡で観察すると見えるミルフィーユのような縞模様が手がかりになった(図2)。この縞模様は破壊と石英の析出が何度も繰り返して起こったことを示している。それがどのくらいの時間間隔で繰り返しているか石英の析出反応速度から求めた。その結果もスロー地震の特徴と一致した。

これで過去にスロー地震を起こしていた「現場」だとする説得力が増し、有力な地質モデルの一つとして注目されるようになった。複数の鉱物脈が連動して破壊されることによる微動の発生と、それを取り囲む変成岩のゆっくりとした流動によるスロースリップで、微動とスロースリップの同時発生が説明できる。薄い面が一気に高速ですべる巨大地震とは、大きく様相が異なる。この研究がきっかけになり、イタリアやニュージーランドなど海外からも同様の報告が続いているという。

もう一つの有力モデルは、ブロック・イン・マトリックスと呼ばれるもので、硬いブロック(岩塊)が柔らかいマトリックス(基質)に取り囲まれていて、硬いブロックで破壊を起こして柔らかいマトリックスで流動する。硬い岩塊の破壊が微動や低周波地震を起こし、柔らかいマトリックスの流動がスロースリップとして観察されるというモデルだ。氏家准教授らは、こちらのモデルの研究も進めている。

またスロー地震を読み解く鍵となる「水」がどこからやってくるのかの研究も進めている。地下深いところで異なる種類の岩石が接すると化学反応を起こし、水が排出されることがある。また、プレートが沈み込んで温度と圧力が増加するとすると岩石に含まれている水が排出されることがある。これらの原因で生じた水が破壊に寄与したり、断層をすべりやすくすることでスロー地震が発生するのではないかと調べている。

● 他分野との連携で 地質学の威力を発揮

フィリピン海プレートのような海洋プレートが沈み込むと、プレートの上に載っていた堆積物などはぎ取られて陸側プレートに付け加わる。それは付加体と呼ばれる。付加体は隆起して陸上に露出しているところがあるが、その中に、かつてのプレート境界断層があると認識されるようになったのは比較的最近のことだ。

付加体が過去に受けた最高温度を導き出す研究が進み、約150℃から300℃ぐらいとわかってきていた。これはプレート境界の巨大地震が起きている場所の温度とだいたい同じぐらいだ。すると付加体の研究をしていた地質学者たちは、今まで自分たちが調べてきた付加体は、震源域そのものではないかと考え始めた。

氏家准教授は付加体の形成過程に関する研究で1998年に博士学位をとっているが、地震とは関係のないテーマだった。そのころ付加体と巨大地震の関係がわかりはじめ、「付加体を研究するならば今後は地震だ。地震発生を付加体から紐解きたい」と新たな方面に挑戦を始め、今につながる。その後、今度はスロー地震の研究が急速に進み、スロー地震が発生するプレート境界の環境についてわかりはじめた。「それも、岩石に記録されているはずだ」と研究に着手。付加体より深いところに着目し、鉱物脈を見出した。

地震という短時間現象を追うには、長い時間スケールが得意な従来の地質学的手法とは異なるアプローチが必要だ。物理化学的な手法を新たに取り入れていく必要がある。また地球物理や地震のモデルを手がける他分野の研究者とも議論し、手がかりをもらったり、逆に提供したりしながら、地質からの視点で実際の地震現象をどのように説明出来るのか研究を進めている。「そういう知的好奇心に根差したワクワクする研究が好きなんです。スロー地震の研究はまさにそういう場です」と氏家准教授は話す。

C01 (地球科学モデル) 班の研究成果について聞きました

C01班では、地球科学的モデル化を通じてスロー地震の発生原理を探った。大きな成果は三つあり、一つ目は観測によってスロー地震がひとつながりの広帯域現象であることを確かめ、それを数学的に説明できるモデルを提示したこと。二つ目は、スロー地震の多様性を説明できる温度と水の数値計算を可能にしたこと。そして三つ目は、断層がゆっくりすべる「プレスリップ」を大型の実験装置で再現・観測し、その発生条件を明らかにしたこと、である。



C01班代表
井出 哲 教授
東京大学理学系研究科

モデルと観測を統合して、 スロー地震の全体像を理解する

● スロー地震は広帯域の ひとつながりの現象だった

スロー地震の一種として別々の名前が付けられている「微動」「低周波地震」「超低周波地震」は、それぞれ全く別の現象なのか、それとも同じ現象の違う側面を観察しているだけなのか、はっきりしていなかった。

東京大学の井出哲教授らは、後者の考え方が正しいらしいことを観測で確かめ、その大元の現象を「広帯域スロー地震」と名付けた。そして微動から超低周波地震まで、その性質をひとつくりに説明できる数学的なモデル「二次元拡散的確率過程モデル」を構築した。

これまで広帯域スロー地震を見つけるのが難しかったのは、地球が常に小さく揺れている「脈動」が大きなノイズとなり、特定の周波数帯域ではスロー地震を観測することが難しかったためだ。井出

教授らは、紀伊半島沖で2011年から本格運用が始まった海底観測網 (DONET 1) の地震計を使って、様々なスロー地震を震源により近い位置で検出することで、ひとつながりの事象であることを確かめた。

図1で、縦軸はその地震が継続する時間、横軸は地震モーメント (地震のエネルギーの大きさ) を示している。低周波地震 (LFE)、超低周波地震 (VLFE)、スロースリップ (SSE) などは、ほぼ直線に並ぶ。LFEとVLFEの間の領域では、これまでスロー地震の信号が確認されていなかった。しかしそれは存在し、LFEとVLFEをひとつながりの同じ現象としてつなぐその正体が、広帯域スロー地震なのだ。

図1では、普通の地震 (ファスト地震) の継続時間と地震モーメントの関係も直線になることを示している。マグニチュード7の地震は、マグニチュード3の地震より長く続くという関係だ。ただし、スロー地震とファスト地震では直線の傾きが大きく異なる。「スロー地震とファスト地震で、断層を破壊してすべることは共通しているが、断層の破壊が広がる原理が異なる、全く別物の現象だからだ」と井出教授は説明する。

断層の破壊によるすべりは、ファスト地震では波動で急速に広がる。破壊で生じた地震波が、先々の断層の破壊を手助けする。一方、スロー地震では波動と破壊はカップルせず、破壊は拡散現象で比較的ゆっくり伝わる。断層が破壊されてすべるとその周辺が持ち堪えられなく

なってまたズルっとすべるが、それはシワが伝わるように周囲にじわじわ伝わっていく。

井出教授は、2007年にネイチャーに発表した論文でこのグラフの原型と考え方を示し、スロー地震の研究分野に大きな影響を与えた。ここ5年間で、広帯域スロー地震を見つけ、拡散をもとにした数学的モデルで説明できるようにしたことで、その考え方はさらに強く裏付けられたという。

● スロー地震の発生に関わる 温度と水、世界の沈み込み帯 で比較

東日本と西日本ではスロー地震の起こり方が違う。西日本では、プレート境界の浅いところでスロー地震が起こり、もう少し深いところに行くとならばファスト地震が起こって、さらに深くなるとまたスロー地震が起こる。そんな区分けが比較的是っきり見える。一方、東日本では、そのような明瞭な区分けがなく、場合によっては同じ場所でスロー地震とファスト地震がミックスして起きているように見える。

西日本で南海トラフに沈み込むフィリピン海プレートの年齢は、南海トラフ付近で約2000万年程度。これに対し、東日本で沈み込む太平洋プレートは日本海溝付近で約1億3千万年。そのためプレート境界付近の温度や含まれる水の様子、沈み込む速度などの環境が異なっていると考えられている。

神戸大学の吉岡祥一教授らは、日本

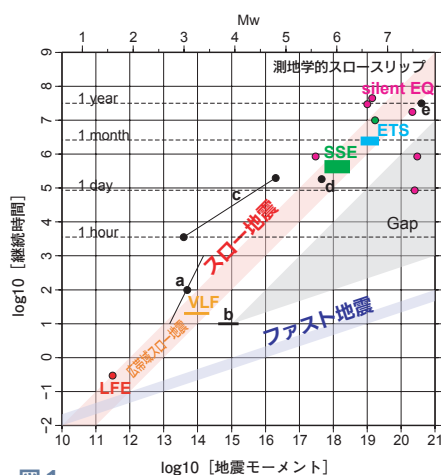


図1
低周波地震 (LFE) と超低周波地震 (VLFE) の間にもスロー地震の信号があることを見つけ、ひとつながりの広帯域スロー地震であることがわかった。

だけでなく、北米（カスケード沈み込み帯）、南米（チリ沈み込み帯）、ニュージーランド（ヒ克蘭ギ沈み込み帯）などで、沈み込むプレートが作り出す熱や水の分布の様子などの数値計算をし、実際にそのそれぞれのプレート境界で測定されている温度のデータを説明するようなモデルを作成した。「このモデルのおかげで、沈み込み帯のスロー地震の発生環境を一般化して、世界各地の沈み込み帯での温度や水の構造、プレート境界の形などが及ぼす影響を議論できるようになった」と井出教授は言う。

これで説明される一例が、伊勢湾でなぜスロー地震が少ないのかという問題だ。

南海トラフ沿いで、東海地域と紀伊半島ではスロー地震が多く発生している。しかしその間にある伊勢湾ではスロー地震が観察されにくい場所がある。吉岡教授らは、プレート境界付近の温度が伊勢湾は周辺部と異なることから、そこにある水を含んでいる鉱物の温度・圧力条件が違い、そのため地下で水の出し方が同じではないので部分的にスロー地震が起

こりにくい条件が存在しているのではないかと説明している。

● 巨大摩擦試験機で スロースリップを再現

防災科学技術研究所の山下太主任研究員らは、同研究所にある大型振動台を使って断層すべりの実験をしている。振動台の大きさは縦15メートル横14.5メートルもあり、世界第2位の規模を誇る。もともとは建物の耐震能力などを調べるために作られた振動台なので、重いものを載せても速く大きく動かせる能力を持つ。この力を生かして、これまでは難しかった大きな岩石を使った実験ができるようになった。メートルサイズの岩石を使った実験は、世界的にみてもまだ珍しく、大きくすることで摩擦の条件を実際の環境に近づけることができる利点がある。

振動台の上に岩石を上下に積み重ねて、長さ1.5メートルの断層を再現する（図2-1）。下の岩石は振動台の動きにあわせて動くが、上の岩石は振動台の外側に固定してあり動かない。双方がずれ動く様子を断層面の下に十数センチ間隔で埋め込んだひずみゲージで計測し、断層の破壊過程を二次元で観察することに世界で初めて成功した。

下の岩石を動かして断層をすべらせるための力を加えていくと、断層面上のある一か所からプレスリップが始まり、それに引き続いてすべる面積が加速度的に広がって高速ですべり出す。プレスリップとは、高速すべり（ファスト地震）が起きる前に生じるゆっくりしたすべりで、これも一種のスロースリップだ。ど

んな条件でプレスリップが生じやすいか、詳細に調べた。

振動台で断層をすべらせる速度がゆっくりな場合はプレスリップがよく見えるが、速度を速くすると、突然高速すべりが起こり、プレスリップは見えなくなる（図2-2）。数値モデルでも予測されていたが、実験で示すことができた。「ざっくり言えば、プレートの沈み込みが速いとプレスリップが見えない、ゆっくりだと見えるという関係につながる」と井出教授は話す。

また断層面が粗くなるにつれてプレスリップの継続時間は長くなる傾向にあるが、再現性が低くなり、長く続くとともに続かないときもあって、いつ高速すべりに至るのがわかりにくくなる。予測が困難になるのだ。

● スロー地震発生の核心へ

プレスリップが広がる時には、破壊と波動を拡散させる何か周囲の手助けが必要となる。水、粘弾性変形などの候補が挙げられているが、まだよくわかっていない。大型振動台での実験では、水などの条件は含まれていなかった。また普段はスロー地震の断層すべりを起こす場所が、周囲の環境の変化に引きずられ、あるときは高速ですべて巨大地震を引き起こすこともあると考えられている。「そんなメカニズムも、まだ解明していない。ファストとスローがミックスになっていることが普通にあっていいのかもしれない。ファスト地震、巨大地震の理解にもつながるそんな過程の解明は、今後の大きな課題です」と井出教授は話している。

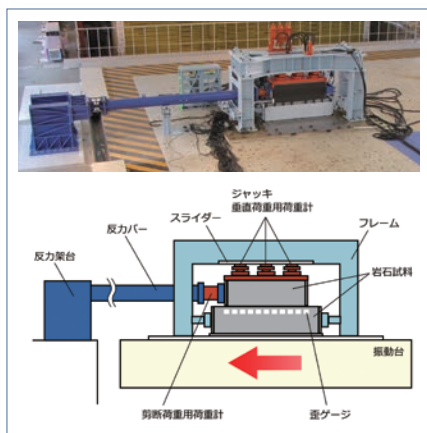


図2-1

大型振動台に大きな岩石を載せて動かす実験装置

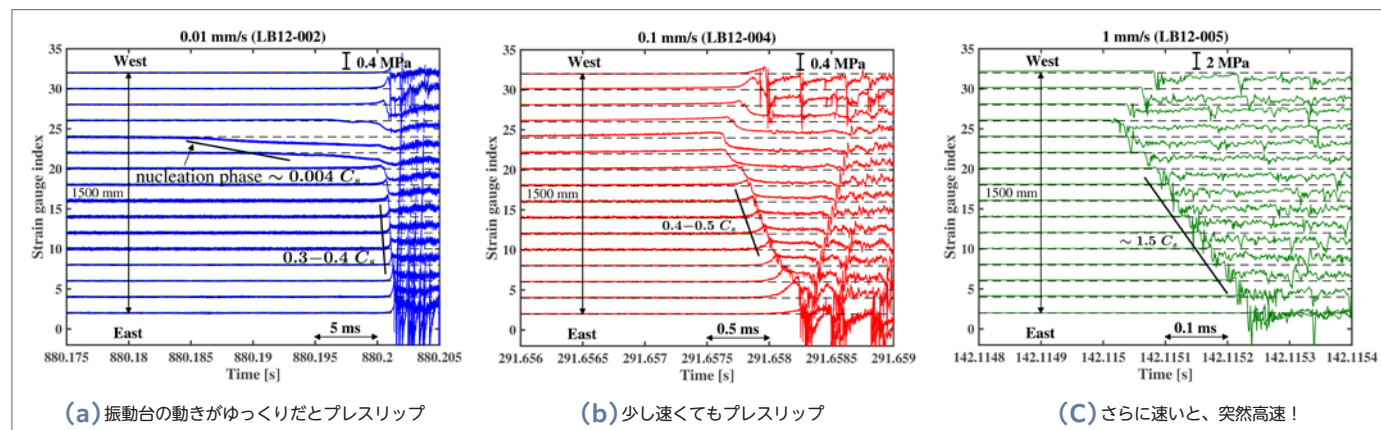


図2-2 断層をすべらせる速さによって、プレスリップの表れ方が異なってくる。

C02 (物理) 班の研究成果について聞きました

C02物理班は、非平衡物理学や統計物理学など、これまでの地震学研究であまり馴染みのなかった領域の物理学の視点から、スロー地震や巨大地震の正体に迫った。断層面の凸凹や水の存在などの不均一性が、すべりの多様性を生み出す仕組みが見えてきた。また、不均一な環境下で起きる現象である地震を扱ってきた地震学の豊富な知見を、他の分野に「輸出」する取り組みも進めた。



C02班代表
波多野 恭弘 教授
大阪大学理学研究科

非平衡・統計物理学の目で スロー地震を理解する

● 地震学とは違う視点から 地震を普遍的に記述したい

今から約140年前の1880年、日本地震学会が設立された。明治政府の招きでやってきたお雇い外国人が中心メンバーとなり、地面が揺れる波を記録する地震計の開発を皮切りに、地震の本格的研究は始まった。それ以来、地震の研究は、地震の波から地下で何が起きているのか探るのが中心だった。だから伝統的に地震学者の多くは波動を扱う物理の領域には強い。ただし、それは物理学のほんの一部にすぎない。

C02班代表、大阪大学の波多野恭弘教授は、狭義の地震学者ではなく、非平衡物理や統計物理を専門とする物理学者である。「スケールの異なった多様な現象をつなぐ普遍的な理論を導き出し、数式で記述することを目指す研究分野」という。

物理学者としては、ミリオーダーの粉体を使う摩擦の実験から、数百キロの断層がずれ動く巨大地震まで、普遍的に

記述できる法則を見つけ出したい。それに迫るキーワードの一つが不均質性だという。

スロー地震や巨大地震を起こすプレート境界の断層は、場所によって岩石や鉱物の種類が違う。鉱物の種類が違えば変形するときやすべるときの性質が大きく異ってくる。水の量や温度の状態の違いもあり、断層はとても不均質な環境になっている。

そんな性質の違うものが雑多に集まった断層が、全体としてどういう挙動を示すかを解き明かすのは、これまでの地震学の方法論だけでは足りなさそう。そこで統計物理など地震とは別の領域で発展してきた方法論を適用する道筋を作ってきた。

● 凸凹の引き起こす挙動を シミュレーションや実験で示す

不均質の一つの表れが凸凹だ。スロー地震を引き起こす断層は、きれいで均一な平面ではない。過去に地震を起こして

いたと見られる断層が長い時間を経て地表に現れている露頭をいろいろな計測装置で測ると、特徴のある凸凹を持っていることがわかる。その特徴を数学的にコンピューターの中に再現して(図1-1)、断層はどういうふうにするか、シミュレーションによって調べた。

凸凹がすごく小さくほとんど平らに近いような場合、すべりは早い段階で加速して、最終的にはさらにすべりが速くなっていった普通地震に成長する。

凸凹が大きくなるほど、大きくすべる前に局所的にゆっくりしたすべりが始まる。凸凹の度合いが大きいほど前兆的にすべる領域は広くなり、長くゆっくりすべる。凸凹の程度が変わることで、断層は普通地震のようにスパッとすべったり、あるいはスロー地震のようにゆっくり長くすべったりすることを示すことができた。この凸凹の度合いを一つのパラメーターで表すことも可能にした。

このような計算は計算負荷が高く、面が曲がっていたりするとさらに負荷は

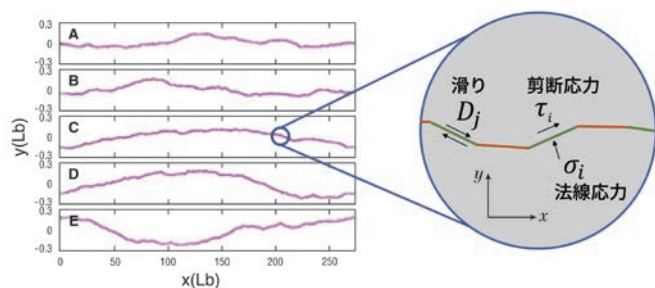


図1-1

断層面の凸凹を数値化してすべりの様子をシミュレーションする。

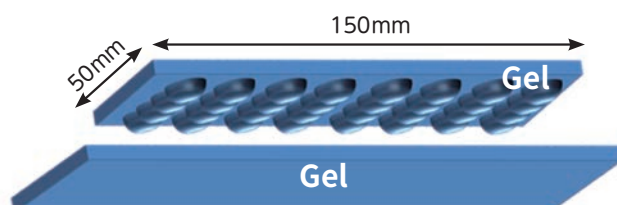


図1-2

高分子の柔らかい固体(ゲル)を上下に合わせて模擬的な断層を作り、凸凹の大きさを変えると摩擦やすべりの様子がどう変わるか実験する。

増える。波多野教授らのグループは、計算の高速化のテクニックを駆使し、すべりがどう続いていくのか時間的な経過まで追えるようにすることができた。

実験からも凸凹が引き起こすすべりの多様性を見出した。高分子の柔らかい固体（ゲル）の表面に凸凹を作り、これを上下に合わせて擦り合わせ、模擬的な断層すべりを再現する（図1-2）。凸凹の大きさを変えると、摩擦力の性質が変わることがわかった。

一つ一つの凸凹が小さい断層は、すべりが速くなればなるほど摩擦力が増える。この場合、すべりが始まってさらに加速しようとするするとブレーキが強くなるので、地震が起こりにくく、ゆるめるとすべる。スロー地震の起こり方に近い。一方、一つの凸凹が大きい断層は、すべりが速くなるとブレーキは弱くなる。この場合はざっとすべって止まる、それを繰り返す挙動を示す。通常の地震タイプだ。同じ材質で作った断層でも、凸凹の状態を変えるだけで地震の起こり方が全く変わってくることを示せた成果だ。

● 不均一に存在する水が断層すべりを次々に伝えるモデル

不均一性に関わるもう一つ重要な要素は「水」だ。地震波、全地球測位システム（GPS）、電磁波、重力などさまざまな観測によって、スロー地震の発生に水の不均質な存在が関わっていると考えられるデータが増えてきている。波多野教授らは水と地震の関わりを説明するために以下のようなモデルを提案した。

図1-3の下列は断層面の水圧分布の時間発展を表しており、赤い区画は水がいっぱいあって水圧が高いところ、その他は低い状態で、水圧が不均質になっている。水圧が高い区画はすべりやすい。水圧がある一定値に達するとそこがずるっとすべって、水を隣接する領域に排出する。排出された先の区画は、水圧が高まるからよりすべりやすくなる。最初に水の不均一性があって、それがすべりと相互作用して水が移動していき、水が移動することによってまたすべりが促進されるというモデルである。上列はすべりの累積分布で、時間と共に複雑化していく様子が分かる。

このモデルで、どんなふうにするべりが伝播していくか時間を追って性質を調べたところ、スロー地震の挙動をかなり再現できたという。スロー地震のエネルギーの特性（パワースペクトル）と、モデルで計算されたそれが非常によく似ていたのだ。

また一回のスロー地震の継続時間と、その地震でどのくらいのモーメント（地震のエネルギー）が解放されるかの関係でも、実際の地震から得られたデータに近い結果が得られた。

「ごく単純なモデルで、観測事実を再現できるというのが重要な成果です」と波多野教授は話す。

● 地震学の豊富なデータや知見を他の領域に「輸出」

物理学の視点を地震学で生かす。それとは逆方向に、地震学で解明された成

果を他の分野へ「輸出」する方向も、物理班では研究している。

「地震学者は地球が大好きなので、視点がそこに限定されてしまう傾向がある。地震学の分野では面白い現象が豊富に起こっている。それを一度抽象化し、一般化した視点で見ることによって、実は他の分野を変えていくインパクトがある研究になりうる」と波多野教授は言う。抽象化、普遍化するのには物理学の一つの役目だから、ここも物理班の出番だというのだ。

たとえばスロー地震を起こす断層のように、ねっとり変形するもの（基質）とパキッと壊れるもの（岩塊）が混在している物体の挙動を説明するモデルや理論は、材木と金属の組み合わせの変形を説明することにも使えるかも知れない。

材木を組み立てる時に、ネジで固定したり金具で補強したり接着剤でくっつけたりする。それに力を加えると、ネジのような金属の部分はゆっくり曲がっていく。一方、材木の方はあまり変形しないのでどこかで一気に壊れる。変形する性質が異なる二種類の物質を組み合わせたものに、力を加えたらどういう挙動を示すか、その理解にスロー地震の研究と共通性がありそうだ（図2）。丈夫な木造家屋を建てたり補強したりするのに役立つかも知れない。

「地震学の分野では、観測技術がどんどん進歩して観測データが多く蓄積されている。しかし他分野の物理学の人はそれにまだ気づいていない。面白い材料をここで発見できる、宝の山ですよ」と波多野教授は話す。

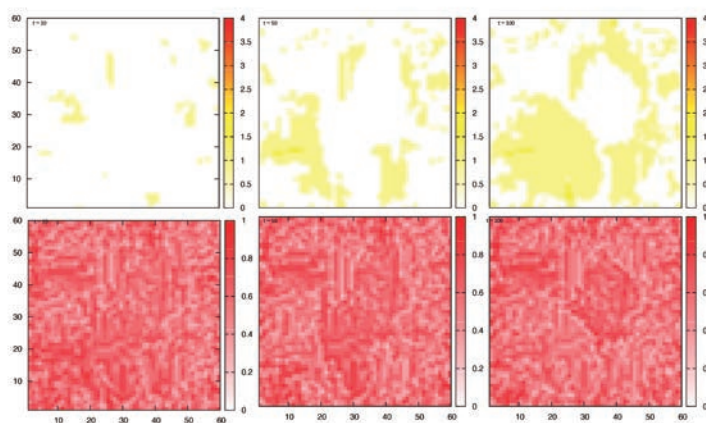


図1-3

不均一に存在している水が、すべりと相互作用して移動していき、それがすべりを促進させるモデル（上の列：累積すべり分布の時間発展 下の列：応力場の時間発展）

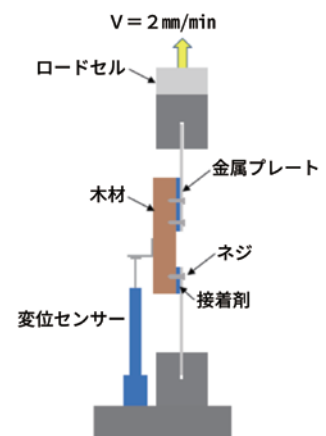


図2

木材とネジを組み合わせた構造の強度を調べる実験



発行・問い合わせ先

新学術領域研究「スロー地震学」事務局
〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1 (東京大学地震研究所内)
Email : sloweq-office@eri.u-tokyo.ac.jp
<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/project/sloweq/>

新学術領域研究 (研究領域提案型)



スロー地震学
Science of Slow Earthquakes

発行日 2022.2