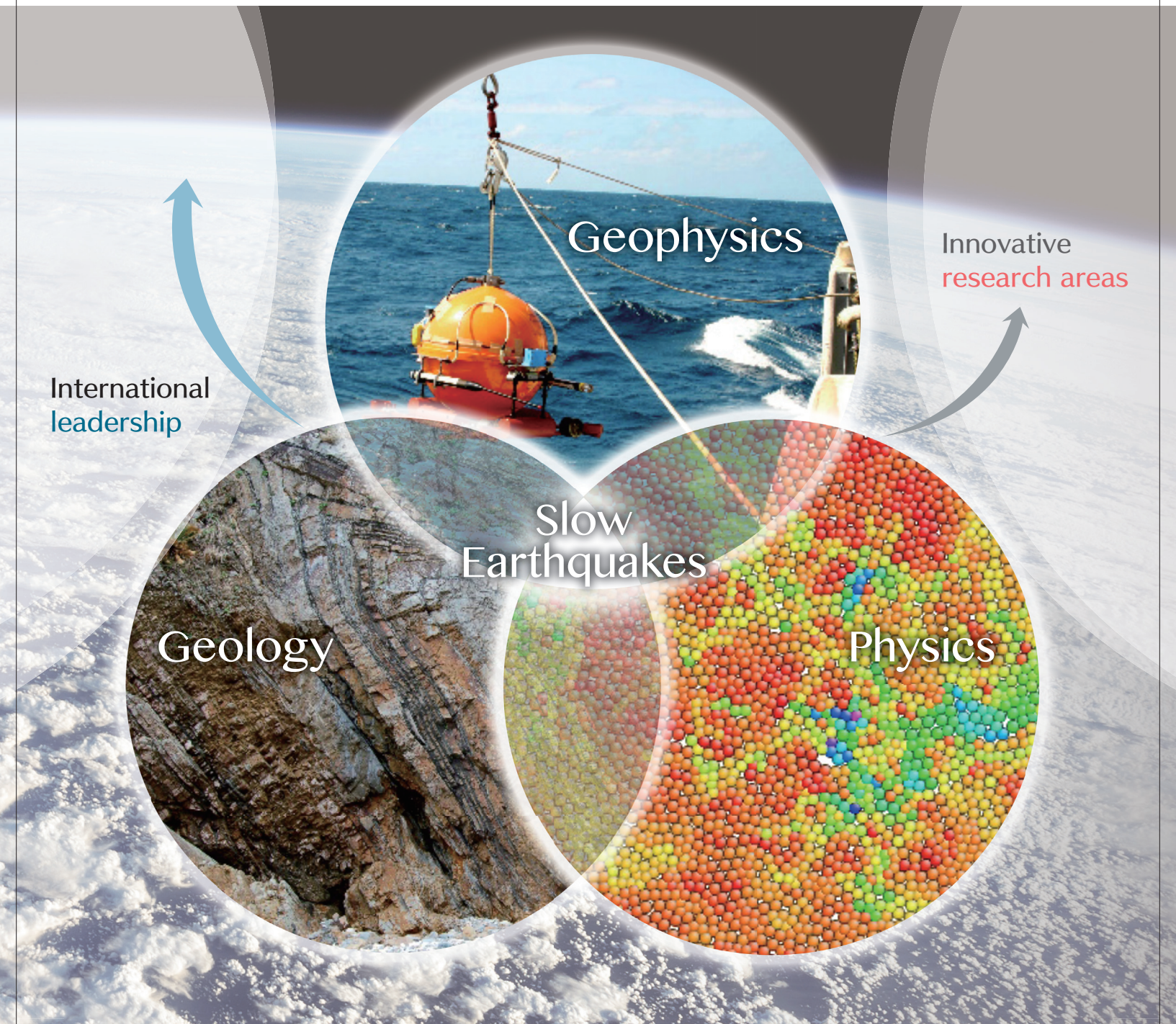


SLOW

Newsletter01

スロー地震学

EARTHQUAKES



International
leadership

Innovative
research areas

Slow
Earthquakes

Geology

Physics

平成 28 - 32 年度 文部科学省・日本学術振興会科学研究費助成事業

新学術領域研究「スロー地震学」(領域番号 2804)

SLOW

新学術領域研究

「スロー地震学」

EARTHQUAKES



社会を大混乱に陥れる巨大地震はどのように起きるのか？地震の揺れは地下の岩盤における破壊とすべりから発せられるという常識ができて久しい。十分確立された弾性体の運動方程式を用いれば、破壊が起きてから後の地震の揺れは科学的に良く解明されているようだ。一方、どうやって岩盤の破壊が起き、摩擦すべりを伴いながら巨大地震になるのか？これは現在でも良くわからない大問題であり、地震の研究者は、もう何十年もこのダイナミックな破壊すべり現象に注目して研究してきた。しかし、この一見派手な破壊すべり現象は、より視野を広げて地震という現象を見た時、必ずしも本質ではないかもしれない。

強力な地震波を出さずに地下の断層がゆっくり

とすべる。このような現象は20世紀から示唆されていたが、観測は不十分で、あるとしても珍しいことだと考えられていた。しかし20世紀末から日本全国に稠密に展開された地殻変動観測網、地震観測網によって、次々と奇妙な現象が見つかった。まず1997年に豊後水道で1年近くかけて多数のGPS観測点が一斉に普段と違う方向に動き、それは沈み込むフィリピン海プレート境界のゆっくりとしたすべり、「スロースリップイベント (SSE)」だと理解された。続いて2002年にサイエンス誌に報告された、非常に微弱な地震波源「低周波微動」の発見はいくつかの意味で衝撃的であった。まず一見ノイズと見紛う小さな揺れが、地下のプレート境界起源だと特定できたこと、それがきわめて頻繁に起きて

いたこと、そして何よりその場所が、過去に何度も日本に壊滅的な震災を引き起こしてきた、「南海トラフの巨大地震」発生域を縁取っていたことである。それから20年も経たない今、同じようなSSEや微動は、世界各国（カナダ、米国、メキシコ、コスタリカ、エクアドル、ペルー、チリ、ニュージーランド、台湾）で発見が相次いでいる。珍しいどころか、きわめて普遍的な現象のようである。

SSEや微動が何であるかは、その後の研究でかなりわかってきている。どちらも普通の地震同様プレート境界のすべり運動で、しばしばSSEと微動はほぼ同時に同じ場所あるいは隣の場所で起きる。SSEのマグニチュード(M)を普通の地震同様に計算するとM7近くなることもあるが、微動はM1以下の小さな地震「低周波地震」が続けて起きる現象と考えられる。両者の中間のサイズの現象「超低周波地震」と合わせて、これらすべての現象を「スロー地震」と呼ぶ。スロー地震の応力変化量、空間移動速度、各種統計法則は普通の地震とかなり異なる。

近年スロー地震の謎が次々に明かされていく中で、2011年に東北沖地震が発生した。M9の超巨大地震が起こす破壊的な震災を予見できなかったことを、「地震学の敗北」と糾弾する声もあった。形

容はともかく現時点で、地震発生の物理プロセスが十分に理解できていないことは認めざるを得ない。その重要な一要素がスロー地震である。ダイナミックな破壊すべりが起きるすぐそばでスロー地震が頻発し、絶えず地震発生場を変え続けている。普通の地震つまり高速のすべりを準備しているのは様々な低速の変形である。一要素どころか主役かもしれない。この従来の地震研究に足りなかった重要な視点、低速変形と高速すべりの統一的理解から、地震研究の再構築を目指すことが、本領域研究の目的である。

スロー地震研究の歴史は浅く、基本的な発生様式にもわからないことが多い。また発生場所は地下深部であり、そこに存在する物質も物理条件も不明である。さらにその支配物理法則は、普通の地震とは明らかに異なるものの、定性的にもわからないことが多い。そのようなスロー地震の謎を解き明かすためには旧来の地震学だけでなく、地球物理学（地震学、測地学）、地質学、物理学等のアプローチを必要とする。そこで基本的な研究戦略として、スロー地震の発生様式、発生環境、発生原理の解明に向けて、それぞれ2つの異なるアプローチから、以下に示すように、合計6つの課題に取り組む。

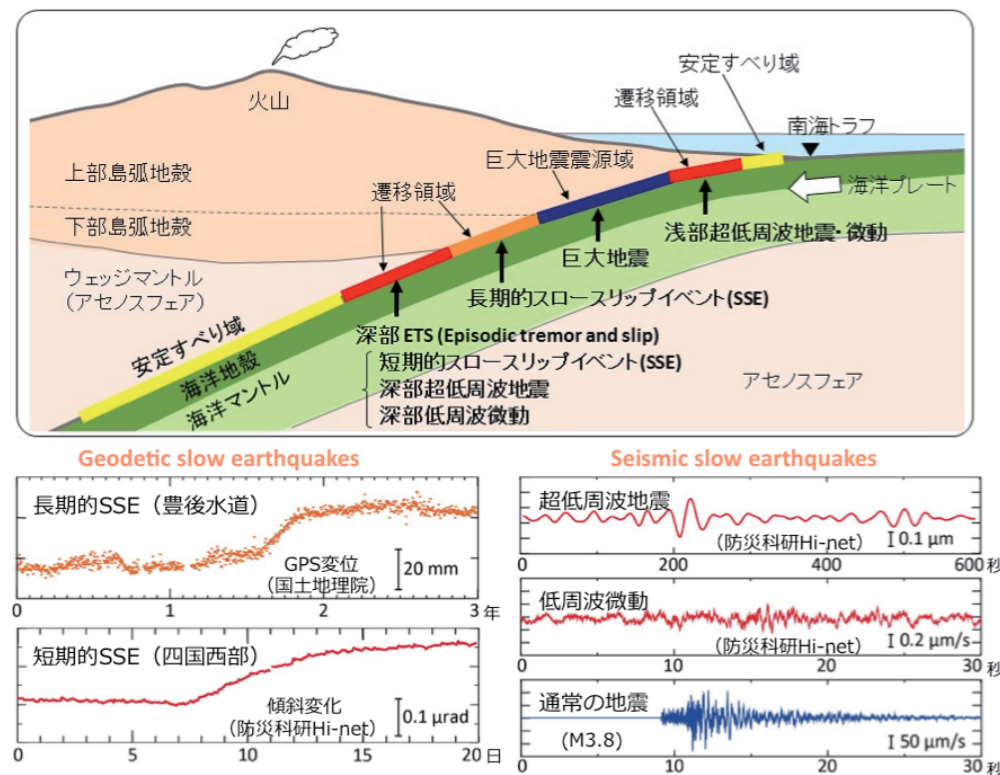


図1 南海トラフのスロー地震

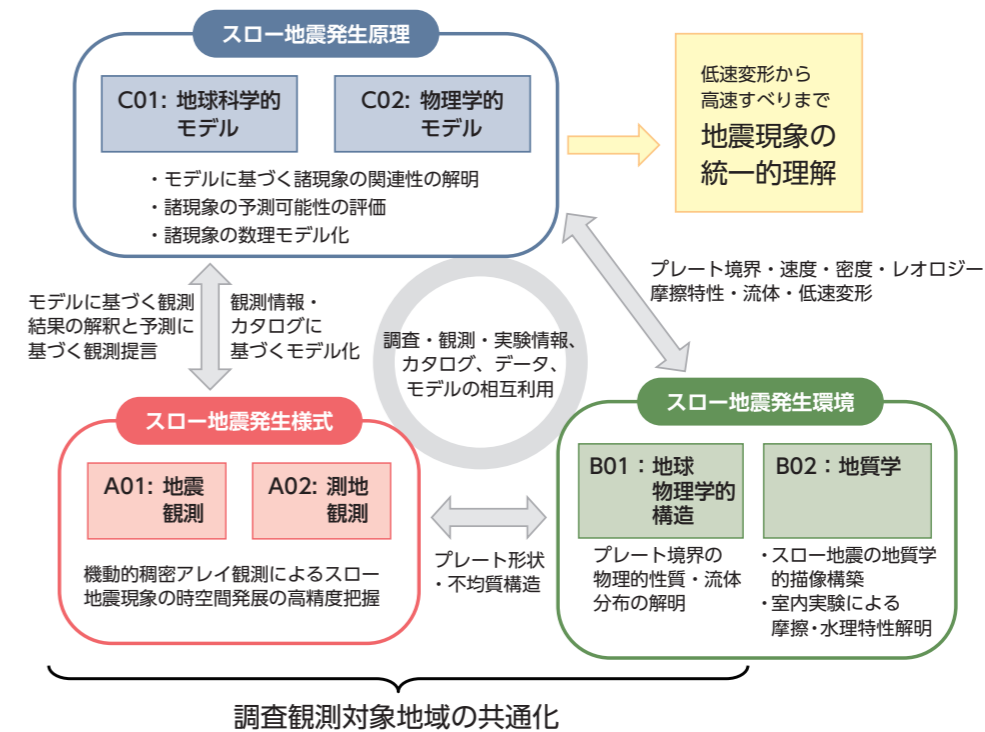


図2 「スロー地震学」の研究体制

研究項目 (A)
スロー地震の
発生様式の解明

西南日本の海域及び陸域に機動的な地震・地殻変動観測を実施し、基盤のデータと高度データ解析手法を用いて、スロー地震の発生場所と大きさ、その時間空間的な変化を高精度高分解能で明らかにする。

研究項目 (B)
スロー地震の
発生環境の解明

様々な構造探査で得られたデータの地球物理学的分析と、地質学的観察・岩石実験を比較して、スロー地震の発生地域の地下構造と物質構成、およびその不均質性を明らかにする。

研究項目 (C)
スロー地震の
発生原理の解明

大規模数値シミュレーションに基礎物理学理論・アナログ実験を組み合わせ、スロー地震を支配する物理法則とその場での物理条件を明らかにする。

計画研究 A01 5

海陸機動的観測に基づく
スロー地震発生様式の解明

地震
観測班

短周期及び広帯域地震観測等から、各種スロー地震（微動・超低周波地震等）の時空間発展や相互作用を解明する。さらにスロー地震と潮汐、遠地地震等との相互作用を解明する。

計画研究 A02 7

測地観測による
スロー地震の物理像の解明

測地
観測班

GNSS、重力、傾斜、歪観測により SSE の詳細な時空間発展を明らかにし、スロー地震発生域のすべりや摩擦の特性を解明する。SSE、津波地震、巨大地震を比較し、新しい地震の震源像に迫る。

計画研究 B01 9

スロー地震発生領域周辺の
地震学的・電磁気学的構造の解明

構造班

深さ方向に変化するプレート境界の変成プロセスとプレート境界面の物理的性質の関係を解明する。特にプレート間固着強度に影響する流体分布を、地震学的・電磁気学的調査から解明する。

計画研究 B02 11

スロー地震の地質学的描像と
摩擦・水理特性の解明

地質班

スロー地震発生域で形成された付加体・変成岩等の観察・分析からスロー地震の発生像を構築する。地質・模擬試料を用いた実験により、低速変形から高速すべり時の摩擦・水理特性を解明する。

計画研究 C01 13

低速変形から高速すべりまでの
地球科学的モデル構築

モデル班

スロー地震から巨大地震まで、地震発生過程の地球科学的総合モデルを構築し、世界各地に適用する。モデルを用いて地域ごとの現象の多様性の原因を考察し、現象の予測可能性を評価する。

計画研究 C02 15

非平衡物理学に基づくスロー地震と
通常地震の統一的理解

物理班

スロー地震と通常地震の違いを、レオロジー不均一場における時空ダイナミクスの実験と安定性解析により理解する。両者の相互作用を非線形動力学における協同現象の観点から解明する。

スロー地震学 活動報告 18

計画研究 A01

海陸機動的観測に基づく
スロー地震発生様式の解明

地震
観測班

スロー地震は、20 世紀末以降から日本を含む環太平洋の沈み込み帯各地域で発見されてきた、断層破壊がゆっくりした現象である。その発生源は巨大地震震源域に隣接することから、スロー地震が巨大地震の発生に関わっていることが期待されるが、両者の関連性を含め、スロー地震現象の物理メカニズムについてはまだ分かっていない。スロー地震とは、普通地震に比べて断層すべりや破壊伝播速度が遅い地震現象の総称であり、時定数の異なる複数の現象から構成される。例えば、南海トラフ巨大地震震源域の深部側プレート境界では、数日間の時定数を有する短期的スロースリップイベント (SSE)、卓越周期数 10 秒の超低周波地震、および数 Hz に卓越する低周波微動がほぼ同時に同じ場所で発生する。また、豊後水道ではそれらのスロー地震より

もやや浅い場所で、数ヶ月の時定数を有する長期的 SSE が発生する。一方、固着域より深部側でのスロー地震については世界各地で検出されてきているが、日本周辺では南海トラフをはじめとする海溝付近の極浅部でもスロー地震が検出された。以上のスロー地震は時空間的に同時あるいは連続して発生し、密接な相互作用を示す場合がある。また、地球潮汐や遠地地震等によってスロー地震が頻りに誘発されるなど、周囲の応力変化の影響を受けやすい性質を有しているとともに、発生周期、移動パターンなど、様々な特徴的活動を示す。地震学的及び測地学的観測手法を駆使して、これらのスロー地震の発生様式や時空間発展、現象間の因果関係を正確に把握することができれば、スロー地震の発生メカニズムの解明につながるものと期待される。

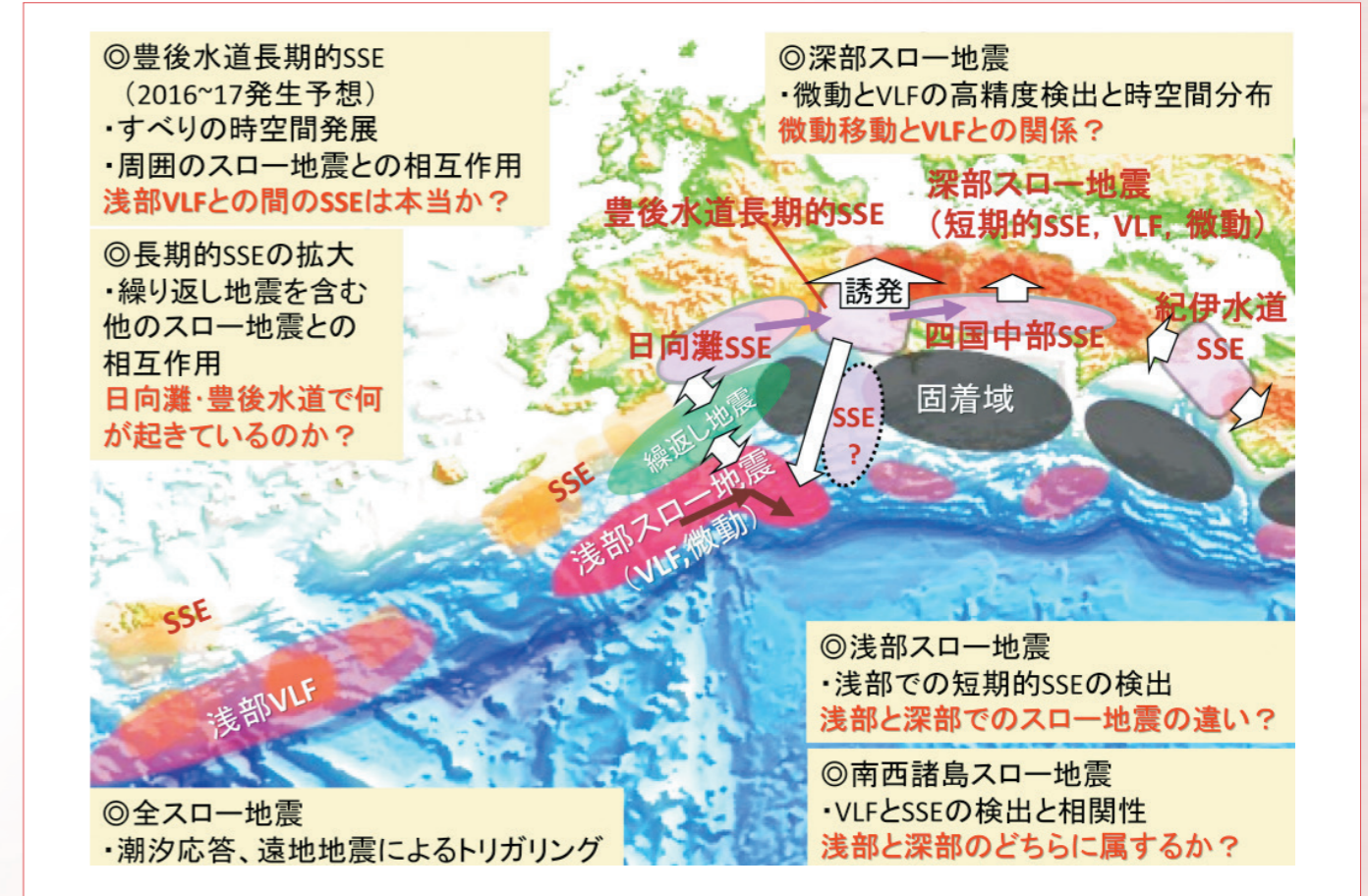


図1 「スロー地震学」観測班 (A01・A02) 研究対象

以上の点を踏まえ、本計画研究では、スロー地震が世界的にも最も活発な地域のひとつである四国西部・南海トラフ西部から南西諸島を対象に、以下の疑問を解決しながら、スロー地震の発生様式を明らかにする。

- Q 浅部で短期的 SSE は本当に起きているか？
- Q 浅部スロー地震の発生様式は深部スロー地震と同じなのか、異なるのか？
- Q スロー地震の構成要素の発生様式やスケールングはどうなっているか？
- Q スロー地震同士や繰り返し地震、通常の地震などの現象との相互作用はどうなっているか？

浅部スロー地震としては、これまで微動と超低周波地震が確認されており、両者の時空間的一致性や移動特性が深部スロー地震と酷似していることから、浅部微動・超低周波地震活動の背景にも短期的 SSE の存在が予想される。これらの浅部スロー地震活動の詳細が明らかになれば、スロー地震構成要素間の相互関係性や活動様式について深部スロー地震活動との比較が可能となり、それらのスロー地震発生場のモデル化に制約を与える。深部スロー地震に関しては、既に微動・超低周波地震・短期的 SSE が定常観測で明らかにされており、空間分解能を向上させることで、より小さなイベントや高速移動現象などを新たに捉え、詳細な活動様式およびスケールングを明らかにする。一方で、豊後水道の長期的 SSE 発生期間中に影響を受ける深部微動と浅部スロー地震の活動様式は必ずしも同様ではない。これらのスロー地震に加え、繰り返し地震から推定されるスロースリップや通常の地震間の相互作用を解明し、周囲のすべり速度や固着度がこれらの地震に与える影響を解明する。これらの研究結果は、スロー地震の全体像の理解及びモデル化を通して、通常の地震現象を含む統一的理解を進めるといふ本領域の推進に大きく貢献する。

具体的には、既存の基盤的定常地震観測及び海陸機動的観測に基づき、次のスロー地震を対象として研究を実施する。

A 浅部スロー地震

南海トラフ西部において機動的な海底地震・圧力観測を実施し、その存在が予想される浅部スロースリップイベントの測地学的直接検出に挑戦し、そのすべりの空間分布を推定するとともに、浅部微動や浅部超低周波地震の検出を行なう。また、南西諸島において、島嶼部における機動的広帯域地震観測、また、日本と台湾の定常的広帯域地震観測データを用い、浅部スロー地震活動の詳細な時空間発展や地球潮汐応答等の活動様式を明らかにし、これらの現象のスケールングや相互関係性を評価する。

B 深部スロー地震

西南日本の中で活動が最も活発な四国西部を対象として、稠密な広帯域地震計アレイ、及び超多点短周期地震計アレイを展開し、超高速移動を含む深部低周波微動や超低周波地震の詳細な時空間発展を抽出するとともに、深部超低周波地震のより小さなイベントまでのスケールング則の適用性を明らかにし、これらの相互作用を明らかにする。さらに、地球潮汐応答、遠地地震表面波による誘発現象などを含めた活動様式を明らかにする。

C 繰り返し地震

南海トラフ西部から南西諸島において、繰り返し地震解析からその背景に存在するスロースリップを推定し、その時空間変化を明らかにするとともに、周囲の浅部スロー地震や通常の地震との相互作用を明らかにする。

以上の浅部・深部スロー地震の活動様式の共通性や相違点を明らかにするとともに、これらのスロー地震及び繰り返し地震間の相互作用を明らかにし、さらに長期的スロースリップイベントが及ぼす影響を、A02 測地観測班で推定される断層パラメータを活用して定量的に評価する。

計画研究 A02

測地観測による スロー地震の物理像の解明

西南日本の南海トラフおよび琉球海溝沿いの地域では、世界的にみて最も多彩なスロー地震活動が発生している。それらは波形の特徴や主要な周波数、継続時間の違いにより「微動」「超低周波地震 (VLFE)」「スロースリップイベント (SSE)」といった異なる現象として検出されている。これら種々のスロー地震は、地域によって多様な活動パターンを示すが、その顕著な特徴の一つに、微動と SSE が時間空間的に同期して発生する現象に代表される、「スロー地震の同期発生現象」がある。この同期現象は、スロー地震全般の発生メカニズムを探る上で鍵となる現象の一つであるが、その大局的な活動パターンは、スロー地震の中で規模がもっとも大きい SSE が規定していると考えられる。すなわち、SSE の発生様式やその地域性などを生む要因を明らかにすることを通して、スロー地震全体の理解が進むと期待される。

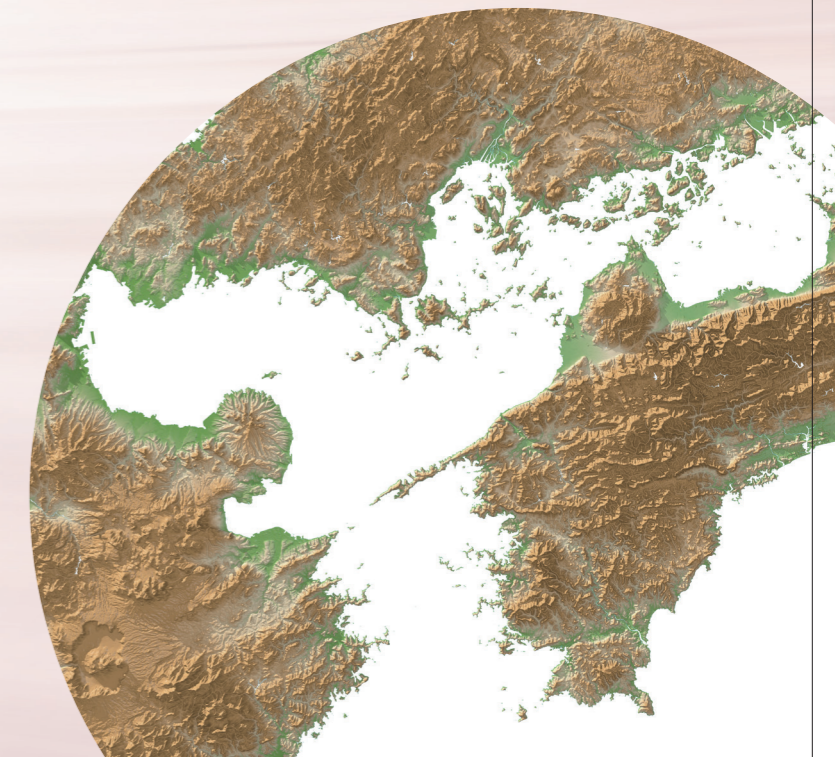
そのような問題意識に立ち、この計画研究では、主として以下の3つの課題に取り組む。

(1) SSE のすべり範囲特定とその相互作用の解明

豊後水道域で、マグニチュード7に迫る大規模な SSE が6~7年間隔でほぼ規則的に発生している(豊後水道 SSE)。一方、その隣接領域である四国西部では、典型的には約1週間程度の継続時間の SSE (短期的 SSE) が半年程度の周期で繰り返している。この短期的 SSE の繰り返し活動は、豊後水道 SSE 発生前後の時期では、発生間隔が普段より短くなるなどの活動の変化が観測されている。これは、より規模の大きい豊後水道 SSE によって短期的 SSE の活動が促進されていることを示していると考えられる。また、豊後水道をはさむ反対側の九州・日向灘地域でも、短期的 SSE や、より長い継続時間の SSE が発生しているが、これらと豊後水道 SSE との関連はよく分かっていない。

そこで、既存の国土地理院 GEONET (GNSS)、防災科研 Hi-net (傾斜)、産総研地下水等観測網(歪計)に加えて、新たに GNSS 連続観測点を四国・九州に設置し、それらのデータを統合的に解析することで、各 SSE の活動を詳細に把握する。具体的には、それぞれの SSE のすべり範囲を高精度に推定し、近傍の SSE 間に働く相互作用を明らかにする。また、すべり速度と SSE による応力変化を比較することや、SSE によって解放される歪とプレート間相対運動で蓄積される歪とを長期的に比較することなどを通して、スロー地震発生領域のプレート間カップリングや、プレート境界面付近の摩擦特性についての知見を得る。

さらに、豊後水道 SSE の発生時期に活発化する、足摺岬沖の浅部 VLFE 活動について、SSE のすべりとの直接的な関連は未だ不明だが、九州太平洋側の海岸沿いへの GNSS 展開・A01 班にて実施予定の海底圧力計観測による地殻変動・南海トラフ沿いでの海底地殻変動観測とのデータ統合などによって、プレート境界浅部の SSE 活動やプレート間カップリングを推定することにより、その謎の解明に挑む。



(2) SSE 発生様式的环境要因の検討

琉球海溝沿いの地域でも、いくつかの地域で SSE の活動が観測されている (図1)。これら地域の SSE は、豊後水道周辺の SSE とは異なり、孤立的に発生しているようである。そのうちの沖縄本島周辺では、プレート境界の浅部で SSE が発生していると推定されるのに対し、八重山諸島周辺では、深部で SSE が発生していると推定されている。これらの活動は、GEONET の観測データに基づく研究結果であるが、対象領域が島嶼部であり、観測点数が限られているので、それら SSE のすべり領域の分布、特にスラブの傾斜方向へのすべり域の広がりについては、限定的な議論しかなされていない。

そこで、主としてこれら2つの地域での SSE の検知能力を向上させるとともに、すべり分布の分解能を改善し、SSE 発生間隔・すべりの継続時間・すべりの深さ範囲といった SSE 活動様式を把握するため、GNSS 連続観測点を離島などに展開する。両地域の SSE 活動の特徴を抽出し、他の地域の活動と合わせて、B01 班の探査で得られる地下構造との対比、CO1 班で実施されるリアリスティックな数値モデルとの対比などを通して、プレート境界でのすべり特性を規定している要因を制約する。

(3) SSE に関連した地殻流体移動の検出

海洋プレートの沈み込みに伴い、スラブから水が沈み込み帯に供給されていると考えられている。そのような流体がプレート境界面に存在すれば、有効法線応力を低下させ、すべりを促進させることに寄与すると考えられる。このような議論はスロー地震に限らず、断層すべり現象に一般的に行われているが、一方で、例えば、微動を伴う SSE の場合、典型的には約 10 km/day の速度ですべりが走向方向へ伝播していることが知られているが、このように通常の地震の破壊伝播に比べて著しく遅い伝播速度と、流体との関連性は未解明のままである。

この問いに答えるためには、まず地殻流体の移動を観測でとらえる必要がある。このような目的で、可搬型の超伝導重力計を用いて、SSE 発生地域にて連続観測を行い、重力の時間変化の検出を試みる。この地殻流体の移動に伴う重力変化を検出することそれ自体が挑戦的な課題であるが、これに定量的な制約を与え、GNSS 等の地殻変動観測から得られる SSE のすべりの時間発展とを比較することで、SSE の発生・進展と地殻流体との関連性に迫りたい。

計画研究 B01

スロー地震発生領域周辺の地震学的・電磁気学的構造の解明

通常地震からスロー地震まで、プレート境界面上の断層すべりの多様性は、境界面の形状や、そこに存在する物質の物理的性質や水の分布などの構造・環境的要因を反映した、プレート境界面摩擦特性の不均質性に起因すると考えられる。これまで、断層すべりと構造・環境的要因との関係については、多くの研究がなされてきた。しかしながら、プレート境界面上断層滑りの多様性を説明する構造・環境的要因が、十分に理解されているという状況にはない。本計画研究では、多様な断層すべりがプレート境界の浅部から深部にかけて連動して発生する豊後水道周辺域を主要な対象領域として、地震学的・電磁気学的手法を総動員し、プレート境界周辺構造の包括的な理解、さらには断層すべりの発生に伴う構造内の変化を捉えることに挑戦する。

四国と九州に挟まれた豊後水道では (図1)、これまでプレート境界面のほぼ同じ領域で、およそ6年の一定間隔で数か月間継続するスロースリップが発生してきたことがわかっている。またその発生と連動して、海溝軸周辺のプレート境界浅部では超低周波地震が、スロースリップ発生領域の深部側では低周波微動の活動が確認されている。つまり、これらの一連の活動は、深さ方向に変化する摩擦特性を反映した断層すべりが、連動して発生しているといえる。これらの活動の特徴的スケールが 50 km 程度であるため、地球物理学的調査・観測対象として適当なサイズであり、また長期的スロースリップの発生域が四国・九州に囲まれているため、発生域を取り囲む陸域観測網によって長期観測も可能である。この陸域観測網に海域での構造調査を加えることによって、海溝軸から陸域までの連続したプレート境界面周辺域の構造を明らかにし、特徴的な断層すべりに対応する構造要因を把握することが可能であると考えられる。本計画研究では、このような好条件を有する豊後水道において、海域(プレート境界浅部)から陸域(プレート境界深部)までの

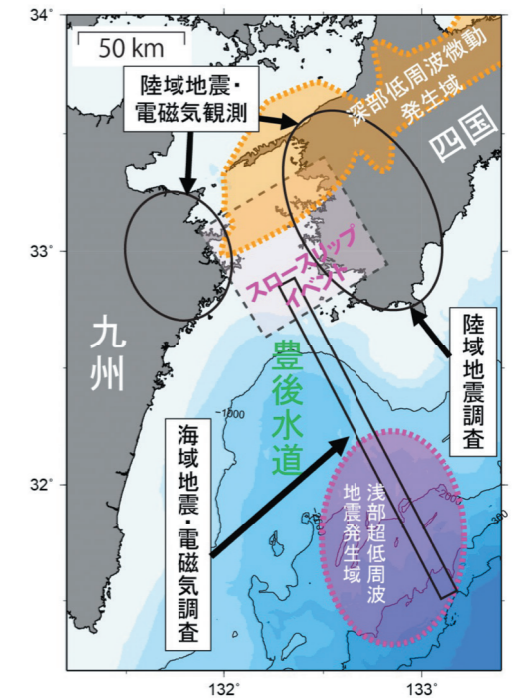


図1 本計画研究で主要な研究対象領域である豊後水道周辺での、地震学的および電磁気学的調査・観測実施領域

シームレスな構造と断層すべりとの詳細な関係を明らかにすることを目的としている。本計画研究期間中に長期的スロースリップの発生が想定され、それと連動する深さ方向に特徴的な断層すべりと、構造中の微小な変化をも捉えることにも挑戦する。これらの結果を合わせて、断層すべりの物理モデル構築に貢献することを目的として、研究を進めていく予定である。

これまでの微動発生を説明する構造モデルは正しい?

そもそも、これまで考えられていた微動発生モデルは正しいのだろうか? これまでも、微動の発生と沈み込むプレート内の脱水反応との関係は議論されており、微動発生領域でのプレート境界より上盤側には、変成作用を受けた蛇紋岩の存在が指摘されていた。関東から九州までの微動発生域に沿って、プレート境界直上の上盤側の物性と微動の活動とを比

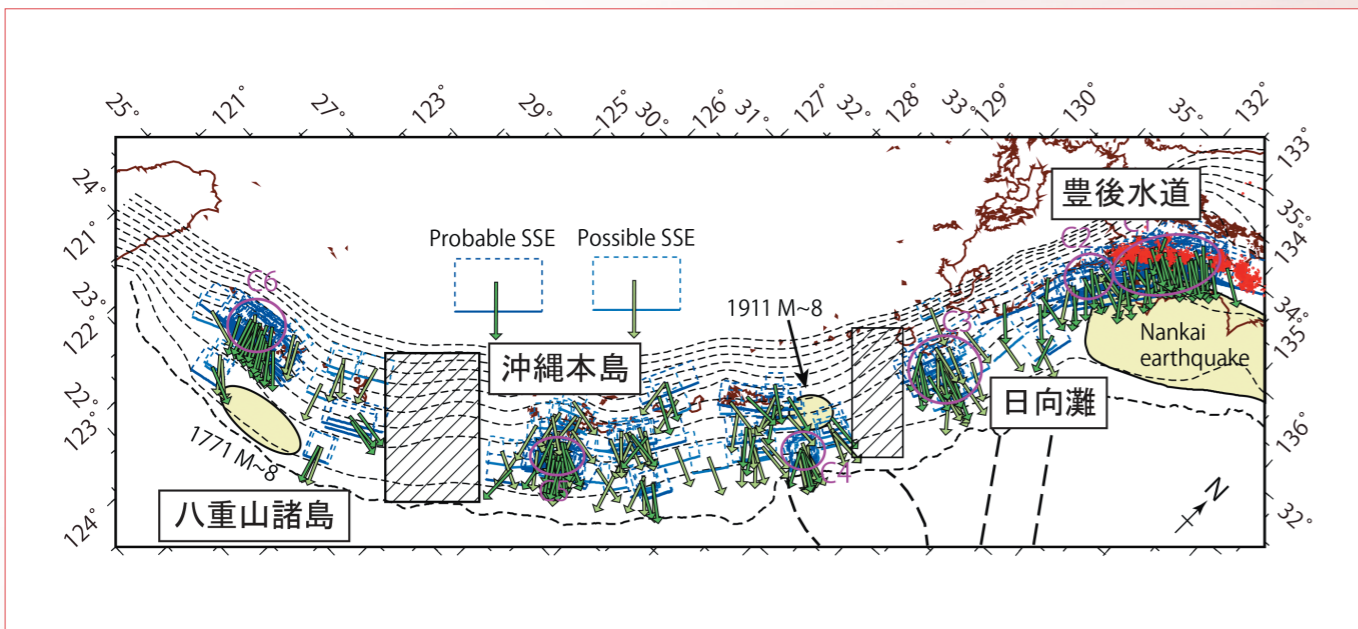


図1 短期的 SSE の発生場所 (Nishimura, 2014 の図に加筆修正) と研究対象地域

較してみると、微動の発生が見られる場所では、地震波速度、 V_p/V_s や、地震波減衰や異方性の大きさなど、特に異常な値を示しているものはないことがわかった。一方で、微動が発生していない領域では、地震波速度が低く、減衰も大きいなど、特徴的な性質を示している。この結果から、微動発生領域のプレート境界は、脱水反応で生じた水が上盤側へ上昇するのを妨げる性質を持っていることが予想され、微動活動域と上盤側の変成作用との関係について従来とは反対の構造モデルが提案された。プレート境界周辺の構造について詳細を明らかにし、断層すべりの多様性を生む要因について調べることが必要である。

プレート境界周辺域の地震学的構造

多様な断層すべりを示すプレート境界面について、その周辺域を詳しく調べる地震学的手法として、レーザー関数解析がある。地震波速度や物質密度が深さ方向に不連続なプレート境界で、P波からS波に変換したPs変換波を抽出することによって、プレート境界形状をマッピングし、また、Ps変換効率を調べることから境界面周辺の物性の把握が可能となる。海域に設置した海底地震計の観測波形記録では、観測環境条件からレーザー関数解析が難しかったが、最近ではその問題点克服に向けた解析手法も開発され、海域から陸域までレーザー関数によるプレート境界のマッピングも可能となりつつある。これにより、プレートの沈み込みに伴う脱水反応などを把握することが期待される。

人工震源地震波構造調査

海域での船舶から曳航されたエアガンの発震、あるいは陸域でのダイナマイト発破による人工震源を用いた構造調査によって、プレート境界周辺までの地殻内のP波速度構造を知ることができる。それに加え、プレート境界から反射してきた反射波の振幅強度分布を調べることによって、プレート境界面における物性の不均質を把握することが可能である。本研究計画では、4年目と5年目に、海域と

陸域での人工震源構造調査を計画している(図1)。海域ではプレート境界の浅部から深部までの物性の変化を、また陸域では発破点と受震点を平面的に配置することによって、プレート境界面に沿った不均質を明らかにすることを目的としている。

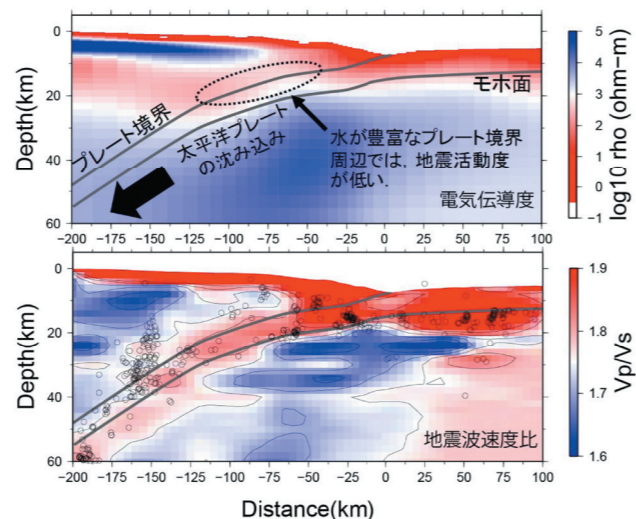


図2 東北沖における日本海溝に直交した測線に沿った、(上)電気伝導度構造、および(下)地震波速度比構造。電気伝導度構造から推測される、水の量が豊富なプレート境界周辺では、地震活動度が低いことがわかる。

電磁気観測による地殻内流体分布の把握と、スロー地震に伴う流体移動の検出

豊後水道内に設置した海底電位差磁力計、およびそれを取り囲む陸域電磁気観測網によって、流体がどのように分布しているかを示す指標となる比抵抗構造を3次元的に明らかにする(図2)。さらに自然電位をモニターすることにより、スロー地震に伴う流体移動の検出を試みる。さらに、比抵抗構造の時空間変化を検出し、間隙水の分布や間隙の連結構造の変化の抽出を試みる。これらの試みは、世界的にも成功した例は報告されておらず、非常にチャレンジングな内容である。しかし、もしその検出に成功したら、スロー地震発生の物理モデルの構築に大きな貢献ができる重要な課題である。

以上の研究課題で得られた結果について、統合的な解釈の構築によって、プレート境界面断層すべりの多様性について、その構造・環境的要因の解明に取り組んでいく。

計画研究 B02

スロー地震の地質学的描像と摩擦・水理特性の解明

本研究計画では、1スロー地震発生深度で形成された付加体・変成岩の地質調査・試料分析、2スロースリップ発生域掘削、3地質・模擬試料を用いた摩擦・透水実験を基に研究に取り組んでいる。

1 スロー地震発生深度で形成された付加体・変成岩の地質調査・試料分析

地震・測地観測により、スロー地震はプレート境界地震震源域より浅い領域と深い領域で発生していることが明らかとなっている。日本列島に分布する四万十付加体や三波川・長崎変成岩類には、プレート沈み込みによりそれぞれ浅部と深部スロー地震発

生深度に持ち込まれた岩石が現在地表に露出している(図1)。これらの岩石を対象に地質調査と試料分析を行い、スロー地震を引き起こす物質、低速変形の特徴、変形メカニズムを明らかにする。

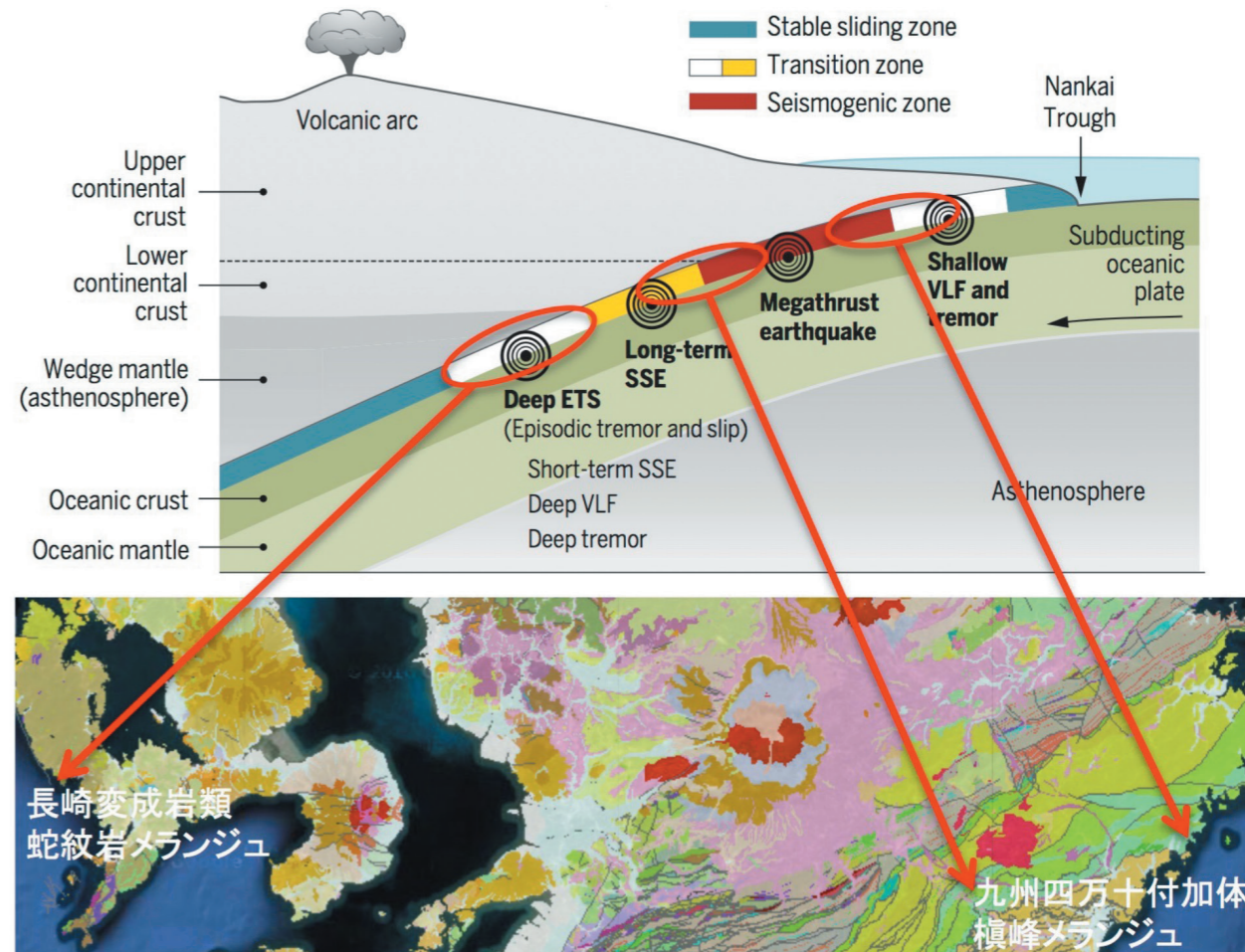


図1 (上図) 沈み込み帯で発生する様々なタイプのスロー地震 (Obara and Kato, 2016)。 (下図) 九州地方に露出するスロー地震発生深度で形成された付加体・変成岩 (地質図 Navi より抜粋)。

2 スロースリップ発生域掘削

平成 30 年前半において、米国科学掘削船ジョイデス・レゾリューション号によるスロースリップ発生域掘削がニュージーランド・ヒクラング沖において実施される (図 2)。この掘削計画に乗船参加し、スロースリップ発生域における物性、応力状態、物質、変形様式、スロースリップに果たす流体の役割を明らかにする。

3 地質・模擬試料を用いた摩擦・透水実験

1 の付加体や変成岩、2 のスロースリップ発生域掘削で採取された物質やその模擬試料を用いて摩擦・透水実験を行い、物質や間隙水圧を変化させた際の摩擦特性の違いや低速変形から高速すべりへ至る際の摩擦・水理特性を明らかにする。実験後、回収された試料と 1 や 2 で採取された試料の比較・検討を行い、低速変形から高速すべりを支配する要因と素過程を明らかにする。

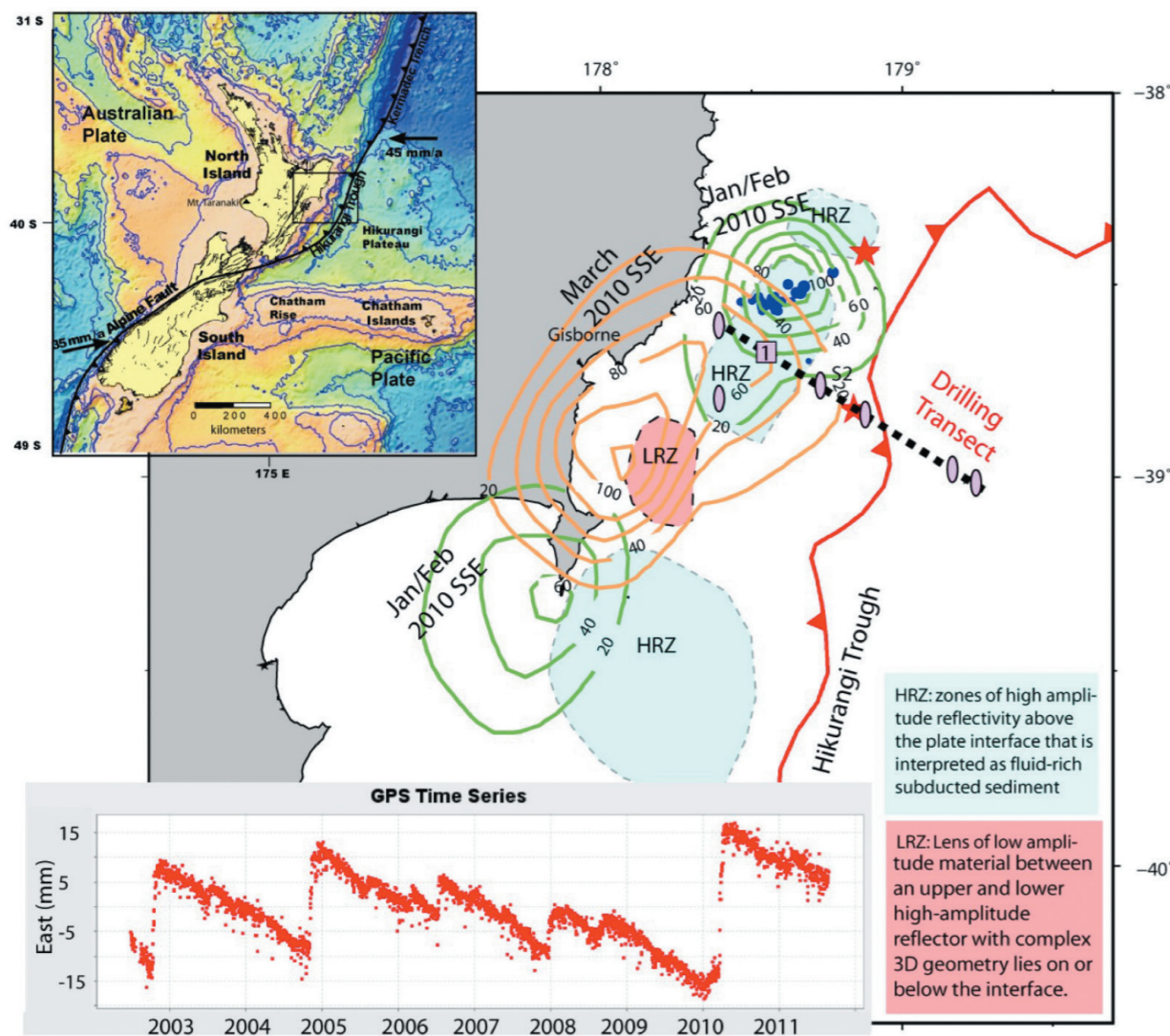


図 2 ニュージーランド・ヒクラング沖スロースリップ掘削予定地点。ヒクラング沖では 2 年ごとにスロースリップが発生しており、掘削によるスロースリップ実態解明を目指している (掘削プロポーザル 781A-Full より抜粋)。

計画研究 C01

低速変形から高速すべりまでの地球科学的モデル構築

モデル班

この計画研究では、スロー地震とその関連現象を理解するためのモデル構築を、大規模シミュレーションやデータ解析によって進める。本新学術領域に 2 つ設定したモデル構築研究グループのひとつとして、「地球科学的」という語句を研究課題名に入れた理由は、特に地球内部現象としてのリアリティを意識しながら研究を進めるためである。多様

な切り口をもつモデル研究のうち、私たちは特に 1 スロー地震現象の時間空間的な関連性、2 現実的プレート運動システム、3 巨大地震とプレート運動システムの予測可能性という 3 つのカテゴリに注目する。以下にそれぞれのカテゴリについて、計画されている研究の例を紹介する。

1 スロー地震現象の時間空間的な関連性

ひとまとめにスロー地震と呼んでいる現象は、基本的にはプレート境界のすべり運動であるが、地震波を発生するような短周期の破壊すべり的な現象から、長期の地殻変動によってのみ検出可能なスロースリップまで、特徴的時定数の異なる様々な現象が含まれる。多くの現象が通常の地震の発生域の周辺で発生する一方、大地震前後のプレスリップやアフターリップの場所は、ほぼ通常の地震の発生域内である。すなわちスロー地震の発生場所は沈み込み帯の浅部から深部まで、幅広い範囲にわたる。このような時間、空間的なスロー地震の多様性を把握し、それを生み出す原理を理解する必要がある。

そのための数値シミュレーション研究として、プレート境界の摩擦法則に特徴的な空間分布を持たせたモデルを数種類開発する予定である。例えば、スロースリップが自発的に発生するか、外的要因に

よって発生するかの違いを区別するためのモデル、スロー地震近傍の小繰り返し地震の発生様式の変化を説明するためのモデル、すべり弱化・強化領域の空間分布によって微動からスロースリップ、さらに通常の地震の発生までを再現するモデル等の開発を予定している。

一方で現実のスロー地震多様性の定量化研究も進める。他の計画研究と連携して世界のスロー地震カタログを構築しつつ、それぞれの地域で周波数帯ごとに異なるスロー地震を、地震モーメント、地震波エネルギー等の物理指標を用いて定量化する。具体的研究地域は、国内 (東海・紀伊・四国・九州・沖縄)、台湾、ニュージーランド、カナダ、米国、メキシコ、チリ等である。更に国際活動支援班の活動を通じて対象を広げていく。

2 現実的プレート運動システム

多くの数値モデルは単純な設定で開発されるが、単純な理論と複雑な現実とのギャップを埋めるには、複雑な現実を可能な限り取り入れるタイプのモデル研究も欠かせない。すでに南海トラフをはじめ、様々な地域で現実に近いプレート形状を取り入れた数値モデルの開発が進んでいる (図 1) が、本研究ではそれをさらに推進する。

今までモデルに取り入れられていなかった現実的要素のひとつが潮汐応力である。潮汐応力は地震時の応力変化の千分の一程度の大きさしかないが、これはスロー地震の応力変化と同レベルで、実際に微動やスロースリップは顕著な潮汐依存性を示す。そこで長期プレート運動による応力変化に加えて潮汐応力の擾乱を加えたモデルを開発し、その挙動を

調べる。平行して地殻変動データを用い、潮汐応力とスロー地震の関係からプレート境界での摩擦法則を推定し、モデルにフィードバックする。

スロー地震発生条件に温度が関わっていることは良く知られているが、現実的なプレート境界での温度分布は必ずしもよくわかっていない。そこで日本、メキシコ、ニュージーランドなどの沈み込み帯において、3次元プレート形状を仮定した温度構造モデリングを実施する。

3 巨大地震とプレート運動システムの予測可能性

スロー地震と巨大地震の関係は、本新学術領域全体にとって重要な研究対象である。本計画研究では開発された様々な数値モデルや、データ解析、岩石実験などの結果を元に、巨大地震とスロー地震を含むプレート運動システムの予測可能性を検討する。

近年いくつかの大地震の前に、震源近傍で時間とともに拡大する地震活動が見られており、それらはプレスリップの一種と示唆されている。高精度データ解析によって、より規模の小さい地震を対象に前駆的地震活動を検出し、その振る舞いの統計的性質を明らかにすることで、プレスリップの出現確率とスケール法則を調べる。さらにプレスリップから大地震の初期破壊過程につながる部分の振る舞いに特化したデータ解析を行い、両者の関係をより明らかにする。プレスリップのような現象は岩石実験においても観察される。大型岩石試料を用いた摩擦実験によって、スロースリップの発生条件を調べる予定である。

これらの知見から確率的地震予測の可能性検証を行うことも本研究の重要な目的である。スロー地震の発生、もしくはその背後にある潮汐などの外部作用により、地震発生確率および地震成長確率が変化する可能性がある。先日発表された潮汐による地震頻度統計変化(図2)はその一例である。今後より多くの情報をとりいれ、この確率変化を定量化し予測可能性を評価する予定である。

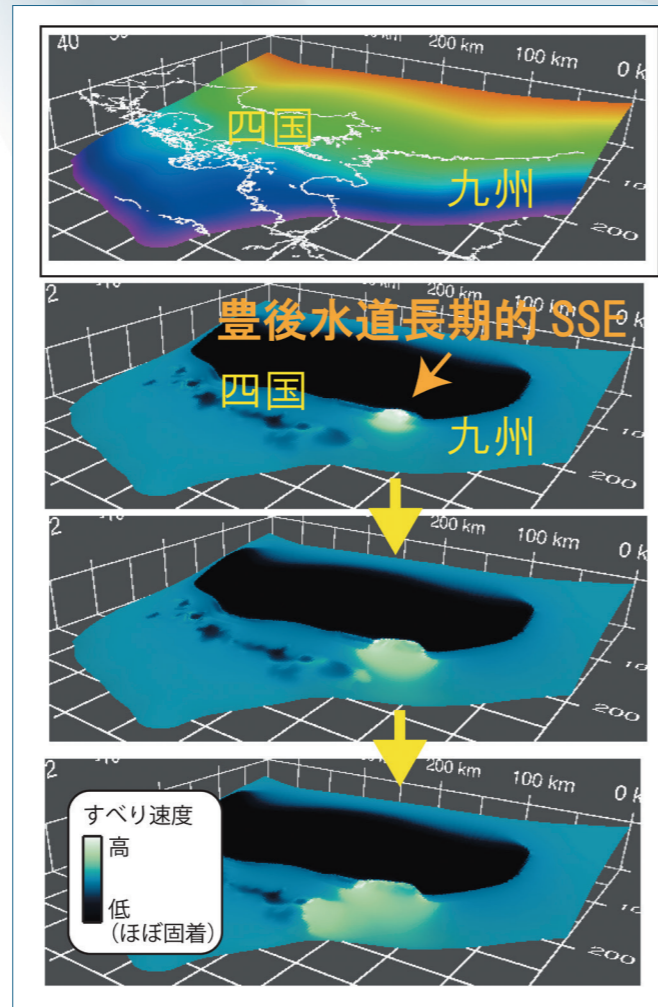


図1 西日本の現実的スロー地震モデル

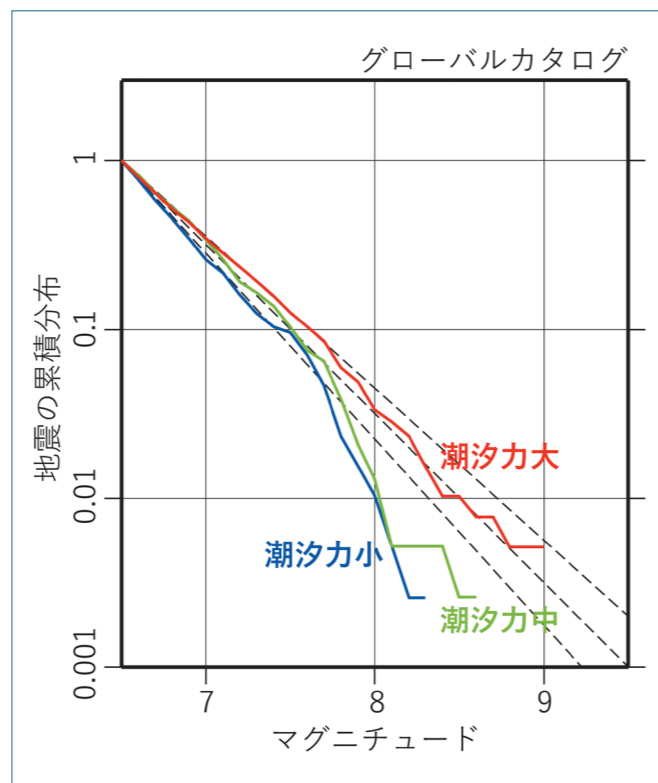


図2 潮汐応力による地震頻度統計の変化

計画研究 C02

非平衡物理学に基づくスロー地震と通常地震の統一的理解

物理班

微動の発見以来15年あまりを経て、スロー地震研究のステージは「発見」から「理解」へと移行しつつある。低速変形から高速すべりまでの地震現象の統一的理解へ向けて、世界各国の地震学者がスタートを切っているのではないだろうか。

その一方、地震学者にとってはほとんど異分野であろう非平衡物理学においても、多様な摩擦現象の理解へ向けた新たな試みが開始されている。たとえば、透明な弾性体を用いた室内摩擦実験では、「その場観察」によってスロー地震に酷似した複雑な時空ダイナミクスが発見されている。のみならず、遅いすべりは不安定すべりに先行するが、これは巨大地震に先行するスロー地震を想起させる。このような「遅い運動と速い運動の切り替わり」は、弾性体のみならず流体系においても見られる。例えば粘弾性流体の界面運動では高速破壊的な運動とゆっくり

した粘性的運動が競合する。これらの実験系はもちろんプレート境界のすべりと同一ではないが、弾性体や流体には固有の長さ定数がないので、原理的には巨大な系とのアナロジーが成立する可能性がある。

他方、すべり現象一般において重要な物理である摩擦法則に関しては、面のトポグラフィなどを通じて固有の長さ定数が入り込む可能性がある。岩石の摩擦を調べる実験は地球科学分野で古くから行われているが、その結果を実験室スケールから断層スケールまで外挿するロジックは現在のところ存在しない。室内摩擦実験の結果を地球科学スケールへつなげるために、摩擦法則を始めとする室内実験結果のスケール依存性を解明することが必要である。以上の点を踏まえて、本計画研究においては主に以下三つの課題に取り組む。(図1も参照)

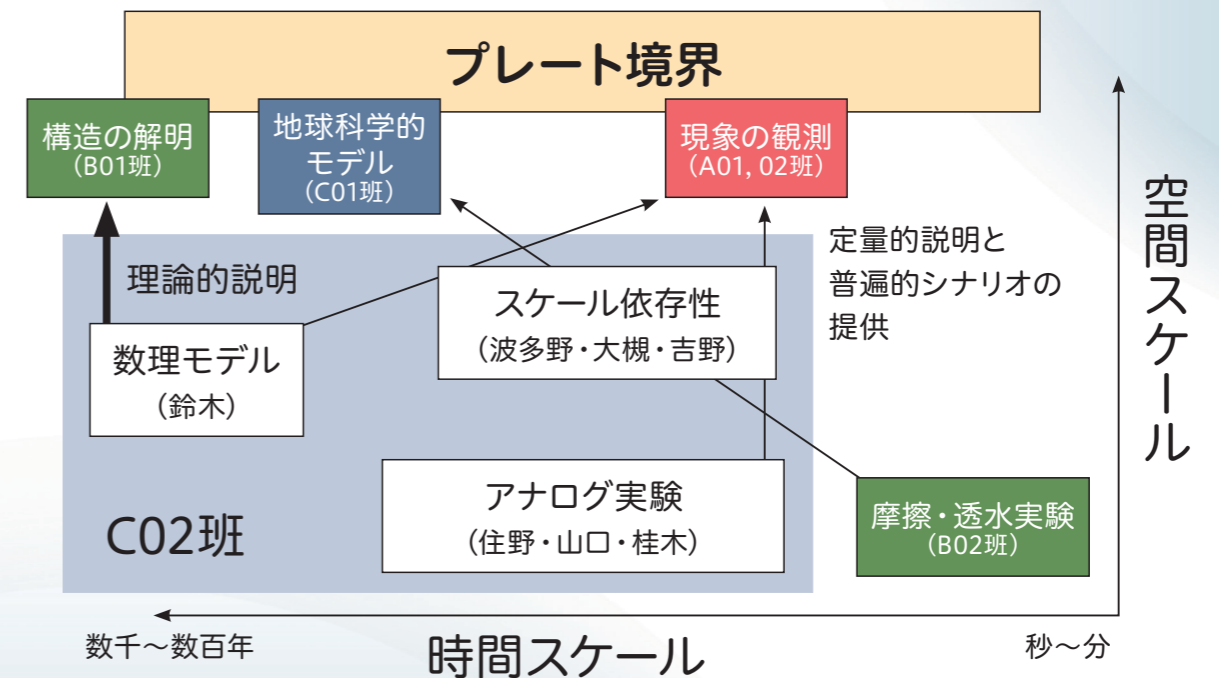


図1 C02班の研究と他の班との連携に関する概念図。

1 スロー地震と通常の地震の相互作用：室内アナログ実験

プレート境界を「時定数（安定性）の異なる複数の運動機構が共存・競合する系」とみて、同じ特徴をもつ実験系を構築する。物性や境界条件を自由に制御できる室内実験のメリットを生かし、複数の運動機構が出現する過程やそれらの競合・協同現象を解明する。具体例は「透明な弾性体によるすべり実験」や「粘弾性流体の界面進行の実験」などである。いずれも界面運動をその場観察し、高速すべり

と遅いすべりのスイッチ・分岐機構を定量的に特徴付ける。

さらに、実験系の数理モデルを構築し、時定数や安定性の異なる多様な運動モードが競合・干渉する系に共通する普遍的メカニズムを抽出したい。単なるアナログではなく、現象の数理的な理解を通じて、複雑なすべりダイナミクス的一般論へ迫ることが目標である。

2 実験室とプレート境界のスケールギャップを埋める理論的研究

摩擦現象における固有の長さ定数の有無とそのスケール依存性を解明する。とくに上記のアナログ実験、および B02 班で行う摩擦・透水実験に関して、その結果を地球科学的スケールまで適用する際の交換規則を理論的に解明し、実験室における現象とプレ

ート境界との対応関係を明らかにする。この作業は、C01 班の地球科学的モデルで仮定される摩擦法則の物理的基礎とスケール依存性を与えることにもなり、領域内計画研究の有機的な結合に寄与する。

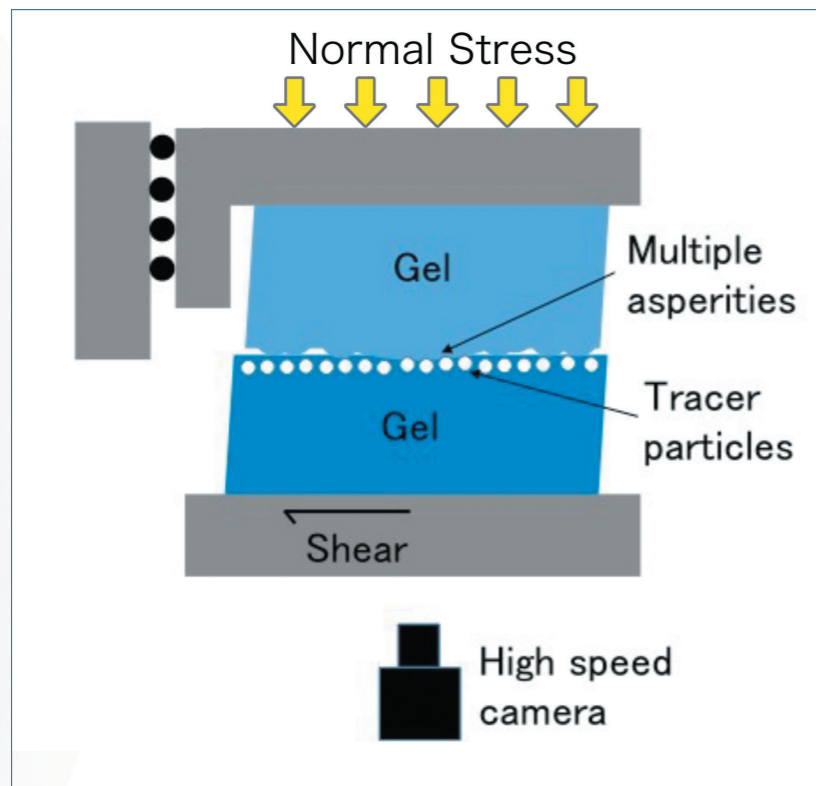


図2 弾性体のすべり実験。弾性体は透明なゲルなので、すべりの時空ダイナミクスをその場観察できる。また、摩擦面の加工も容易である。

3 プレート境界の物理的実体に即したミニマル数理モデルの構築・解析

すべりによる摩擦熱・微小亀裂の生成・流体移動という三つの物理的要因だけを仮定し、それらが動的に相互作用しながらすべり速度が決まる数理モデルを構築する。モデルの解析を通じてスロー地震から通常の地震までを支配する統一なメカニズムを解明する。同時に、地質学的時間スケールまでシミュレーションを実行し、B02 班で明らかになった地質（地震学的・水理学的）構造や C01 班で仮定されるレオロジー構造の物理的根拠を与えることによって、本領域の目的に貢献する。

C02 班の研究は、プレート境界そのものからはあえて少し距離を置き、抽象的・数理的な理解を深めようとする点に特徴がある。一般的には、モデルを頑張って実地に近づけようとするほど複雑になっていき、系統的なパラメタ依存性などの調査が困難になるというジレンマがある。C02 班はまさに逆方向へと努力する。実地の詳細はできる限り捨てることによって、詳細には依らない普遍的ダイナミクスを明らかにしたい。

このような抽象化は、室内アナログ実験の重視にもつながっていく。地球科学における室内実験は「スケールが違うので信頼できない」という理由が

ら然るべき注意を払われない傾向がある。しかし、実験結果の数理的理解を通じてそのスケール特性まで解明できれば、室内アナログ実験を一種の普遍モデルまで高めることができる。とくに、物理学の理論は「スケールを大きくしていったときに現象がどう変わっていくか」を考えることで発展してきた面がある。スケール依存性に関する物理学の方法論を地球科学に持ち込み、室内実験を地球スケールまでつなげる方法論を確立することによって、今後の地球科学は大きく変わっていくであろう。

将来的には、地球科学の範疇を超えた学際的研究の創生まで期待したい。たとえば B02 班で発見される地質学的性質を C02 班が物性物理観点から解明することで、新奇な摩擦特性を持つ物質開発への道が拓けるかもしれない。また、株式市場や所得分布などの社会・経済系でも地震類似の現象が知られているが、スロー地震的な現象もあるのだろうか？本領域でその普遍的ダイナミクスを解明することにより、経済・社会現象においても「遅いイベントと速いイベントの競合」という観点が重要になるかもしれない。物理は一つなのだから、地球物理学者が「地球」に縛られる理由はあまり無いのである。



図3 粘弾性体の界面進展実験。透明な薄い準二次元的セル内部にチューブで粘弾性体を吹き込むと、遅い運動と速い運動が同時に進行していく。

スロー地震合同研究集会

2016年9月13日から9月15日まで、スロー地震合同研究集会が開催され、海外研究者も交え多彩な発表・議論が行われました。13日にはキックオフミーティングが行われ、各計画研究代表から概要の説明がありました。本ニュースレターの2～17ページにおいても、その内容をご紹介します。尚、研究集会の内容につきましては当領域のウェブサイト <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/project/slowneq/> をご覧ください。またこちらには、各班のメンバーも掲載しておりますので併せてご覧ください。

09.13 ▶ 09.15
合同研究集会

日本・チリ学術フォーラム 2016

井出 哲
(東京大学 大学院理学系研究科、C01 班代表者)

11月7日から11日まで南米チリ（パタゴニア）において、東京大学、チリ大学、チリ・カトリカ大学共同主催の日本・チリ学術フォーラム2016が開催されました。2日間にわたって行われた地震学関連のワークショップでは、巨大地震、津波、そしてスロー地震に関連する議論が盛り上がりました。また氷河地形を観察するエクスカージョンも行われました（写真）。チリは巨大地震とスロー地震の関連を研究するのに最適な地域のひとつであり、近年地震観測網の新展開など急速に研究環境が整いつつあります。本新学術領域研究では、今回の研究者交流をきっかけとして、今後の共同研究へつなげるべく各種企画を検討中です。

11.07 ▶ 11.11
パタゴニア

キックオフ巡検の報告

波多野 恭弘
(東京大学 地震研究所、C02 班代表者)

11月11日から13日にかけて、徳島県牟岐町から美波町にかけての海岸線に露出する牟岐メランジュをターゲットとしたキックオフ巡検が開催されました。参加メンバーはB02、C01、C02班を中心とした14名で、「スロー地震学キックオフ巡検」と呼ぶのはあまり適切でないかもしれませんが、「数理的な研究をする者ほど巡検に出かけて現物をよく知らねばならぬ」という（筆者が統計物理分野から地震研究所へ着任後、ことあるごとに言われた）教えに基づけば、C01、C02のメンバーこそ優先的に巡検に行くべきなのでしょう。特にC02班は初めて断層露頭を見るメンバーもあり、強い印象を受けたようでした。

今回の露頭はメランジュが受けた様々な剪断構造の宝庫で、ダクティル変形に伴う各種の褶曲構造から、高速変形に伴うシュードタキライトやベインへのガウジ貫入などを至近距離でじっくりと観察できました。個人的には数cmから数m程度まで約二桁に及ぶ断層の非平面構造を観察できたことが大収穫でした。

今回はあくまで「キックオフ」巡検であり、今後も継続的に開催される予定なので、今回参加できなかった皆様も次回以降は積極的に参加して頂きたいと思います。巡検はまた合宿でもあり、期間中昼夜問わずに議論を深められる素晴らしい機会でもあります。巡検の詳細・参加者のコメントはウェブサイトをご覧ください。

11.11 ▶ 11.13
徳島県牟岐町

シュードタキライト露頭前で撮影した巡検参加者の記念集合写真



fluidization を記録した断層岩露頭を前に白熱した議論をする巡検参加者



シュードタキライトを間近で見るべくロープを使って崖を登る波多野班長

新学術領域研究（研究領域提案型）



Newsletter01

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）

TEL : 03-5841-2956

Email : sloweq-office@eri.u-tokyo.ac.jp

発行日 2016.12

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/project/sloweq/>