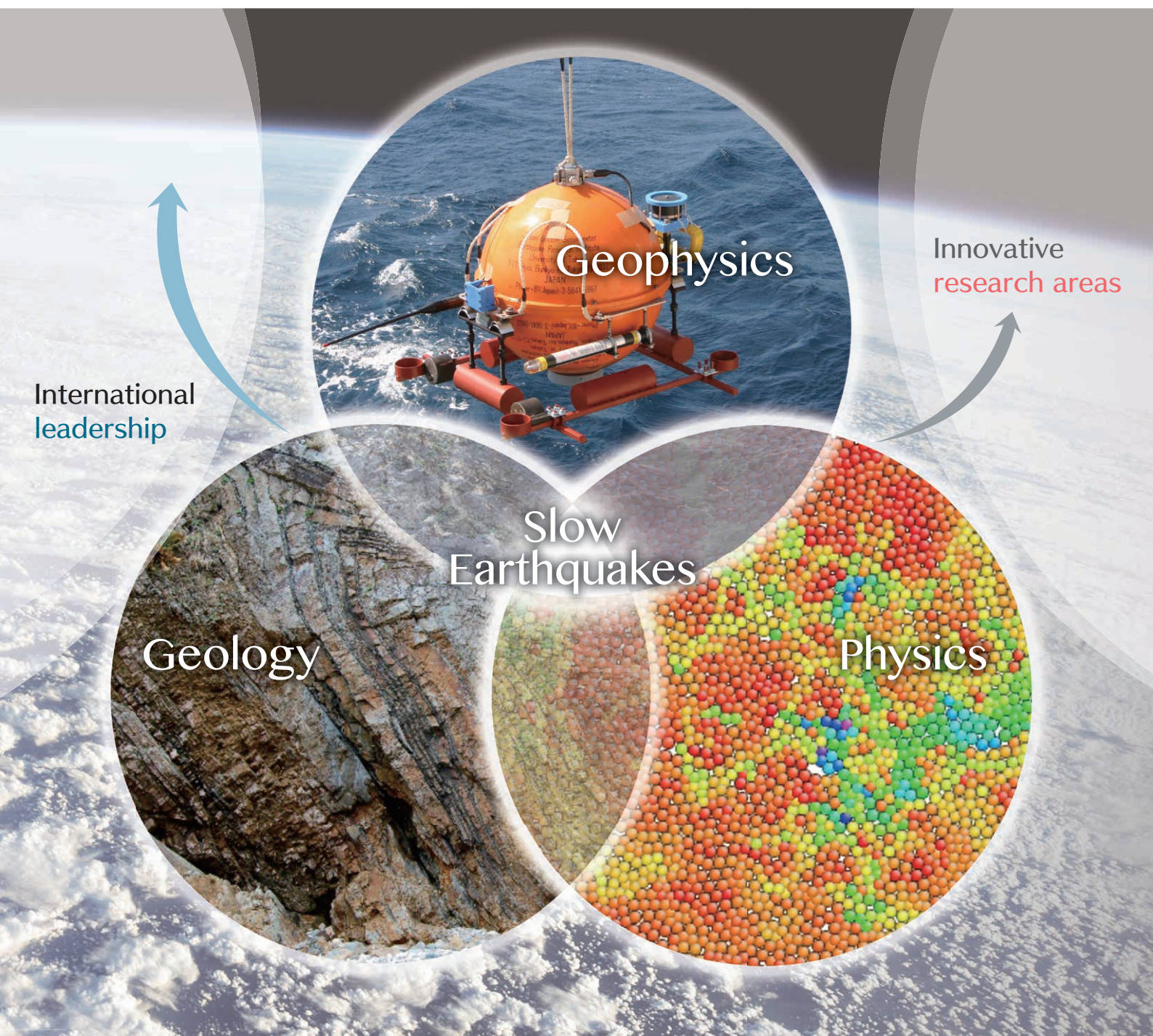


SLOW

Newsletter02
スロー地震学

EARTHQUAKES



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)

INDEX

A01班研究紹介..... 3

南西諸島でおこる様々なスロー地震

琉球大学 理学部 中村 衛

A02班研究紹介..... 5

陸上のボアホールひずみ観測による 浅部 SSE の検出

産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 板場 智史

B01班研究紹介..... 7

非排水性プレート境界で発生する低周波地震

東京工業大学 理学院地球惑星科学系 中島 淳一

B02班研究紹介..... 9

スロースリップの巨大地震への役割

京都大学 防災研究所 伊藤 喜宏

C01班研究紹介..... 11

メートル級岩石摩擦実験中の 前駆的スロースリップ

防災科学技術研究所 地震津波防災研究部門 山下 太

C02班研究紹介..... 13

地震のスケール依存性の理解へ向けて

東京大学 地震研究所 波多野 恭弘

スロー地震学 活動報告

・観測班.....	4
・JpGU-AGU Joint Meeting 2017.....	4
・若手研究者海外派遣報告.....	6
・カタログ班.....	8
・スロー地震学合同研究集会 2017.....	10
・沖縄巡検.....	12
・三波川巡検.....	12
・物理班交流セミナー.....	14
・新企画！スロー地震カフェ.....	15

A01班研究紹介

南西諸島でおこる様々なスロー地震

琉球大学 理学部 中村 衛



南西諸島ではプレート間巨大地震の発生が少ないため、琉球海溝でのプレート間カップリングは小さくプレートは定常的に沈み込んでいると考えられてきた。一方、最近の調査からは、定常的な沈み込みが卓越する中で様々なスロー地震が極めて活発に発生している様子が判明してきた。ここでは次第に明らかになってきた南西諸島での様々なスロー地震について解説し、その持つ意味について述べる。

(A) スロースリップイベント (SSE)

南西諸島の南西部に位置する西表島の直下では、継続時間が1カ月程度のSSEが6～7ヶ月間隔で繰り返し発生している(Heki and Kataoka, 2008 JGR)。SSEの規模は平均Mw6.7である。過去数回のSSEの破壊過程は、いずれも西表島の北西沖で開始したSSEの破壊が周辺へと広がる様子を示している(加納・他、2017 JpGU)。継続時間が数日の短期SSEは奄美群島付近や沖縄島付近でも発生している。これらの地域でのSSEはM6.4以下であり、西表直下のSSEよりも規模が小さい(Nishimura, 2014 PEPS)。

(B) 超低周波地震 (VLFE)

周期20～50秒の地震波に卓越するVLFEは、日向灘から琉球海溝に沿って広範囲で発生する(Ando *et al.*, 2012 GRL; Asano *et al.*, 2015 GRL; Nakamura and Kakazu, 2015 GRL)。琉球海溝では奄美群島付近、沖縄島付近、そして八重山諸島付近で特にクラスター状に発生する。各地域ではVLFEが1日～数日間に集中して発生している。そのような活動が各地域で2～3ヶ月間隔で起こっている。

このVLFE活動は潮汐応力による潮汐応答を示す(Nakamura and Kakazu, 2017 JGR)。干潮(プレート面でのせん断応力が最大)時に活動が最大になる。潮汐応答には地域性が見られ、奄美群島付近と沖縄島付近では潮汐応答が見られるのに対し、八重山諸島では潮汐応答が見られない。さらにこの潮汐応答には季節変化が見られ、冬季に潮汐応答が大きくなる傾向がある。大気圧や海底圧力変化による数十Pa程度の小さい応力変化で潮汐応答が変化している可能性がある(中村、2017 JpGU)。

(C) 低周波地震 (LFE)

南西諸島ではVLFE活動が活発なときに、VLFE波形の高周波成分としてLFEが検出されることが多い。LFEのマグニチュードは-0.6～1.9程度であり、高感度地震観測網が整備されていない南西諸島では小さなLFEを検出するのが難しいと思われていた。しかし気象庁の設置した短周期地震計でも、注意してみるとLFEが意外と捉えられていた。

このようなLFEは沖縄島の南方沖、および西表島から石垣島にかけての南方沖に集中してクラスター状に発生している(Nakamura, 2017 EPS)。南西琉球海溝での海底地震観測で検出されたLFEも、多くがプレート間で発生している(Arai *et al.*, 2016 NatureComm)。また他の沈み込み帯と同様に、遠地地震の表面波に伴って、または通過後、LFEまたは低周波微動が見られることもある(Chao and Obara, 2016 JGR; 金城・他、2017 JpGU)。

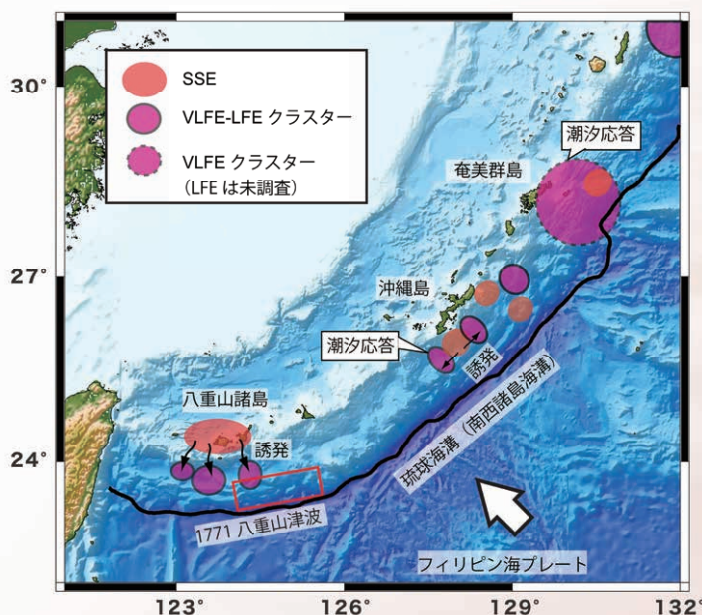


図1 南西諸島で起こる様々なスロー地震

(D)スロー地震の住み分け

これらLFEとSSE、さらに普通の低角逆断層型地震は住み分けて発生していることが明らかになってきた。これはプレート面での滑り状態の空間変化を反映していると考えられる。沖縄島周辺および八重山諸島では、SSE発生時にVLFE・LFEが起こることが多い。SSEの破壊が進行することによってVLFE・LFEが誘発されていることを示している。ところが沖縄島と八重山諸島では、SSE断層とLFE発生領域の位置関係に違いが見られる。沖縄島ではLFEがSSEの断層近傍で発生している。いっぽう八重山諸島では、島の直下で発生するSSEから離れたところでLFEが発生している。この違いが何に起因するのかはまだ分かっていない。

これらの活動には未解決な点が多く存在するものの、琉球海溝で起こる様々なスロー地震は互いに影響を及ぼし合っていることが次第に判明してきた。このプロセスはプレート間の応力を再配分させる一方で、海溝軸付近の浅部プレート境界面へ影響を与えているだろう。南西琉球海溝の海溝軸付近には、最大遡上高約30mの巨大津波を引き起こした1771年八重山地震津波の波源域が分布する。琉球海溝ではプレート間カップリングが小さいことを冒頭で述べたが、数百年に一度の時間スケールでは巨大津波が南西琉球海溝で発生している。周辺で起こる様々なスロー地震は、この場所にどのような影響を与えているのであろうか。様々なスロー地震の発生様式・相互作用とその原因を観測・数値シミュレーション等をもとに解明していくことで、将来起こるであろう巨大津波の成因へと迫ることができるだろう。

スロー地震学 活動報告



観測班

京大防災研の山下 裕亮さんが取りまとめを行って、観測班集会在2017年1月13日に東大地震研で開催されました。**A01**、**A02**、**B01班**のメンバーにより、地震観測、地殻変動及び重力観測、海底圧力観測、電磁気観測等について、担当メンバーが観測計画を発表するとともに、その背景や想定される結果について、分野を超えた熱い議論がなされました。特に、観測機器や方法に関する質疑応答では、それぞれの観測グループ独自の工夫が語られ、今後観測を行う上で参考になる情報も多く出ました。観測領域が重複するグループ間については、よりよい観測が行えるよう情報共有を今後も継続していくことが確認されました。今後、観測班として観測を計画通り遂行すると共に、領域WEBサイトや学会・研究集会の機会を利用して情報共有を図ることで成果を最大限に生み出せるよう、データ解析を主とする研究者との連携を密に行っていく予定です。



2017.01.13
観測班集会

JpGU-AGU Joint Meeting 2017

2017年5月20日から25日まで幕張メッセで行われた今年度の日本地球惑星科学連合(JpGU)大会は、アメリカ地球物理学連合(AGU)との初めての共同主催となりました。当領域は、“Subduction zone dynamics from regular earthquakes through slow earthquakes to creep”のセッション実施に協力しました。24日、25日には海外からの招待講演者(Jessica Hawthorne, Lisa McNeill, Donna Shillington, Matt Ikari, William Frank, Eric Dunham, Onno Oncken)を含む全24件の口頭発表が行われ、また24日の夕方には65件ものポスター発表が行われました。ポスター発表が50件を超えたのは、全大会を通じても高校生セッションと我々のセッションだけであり、大会を通じて最大の学術セッションとなりました。AGUとのジョイントミーティングということで海外からの参加者が多く、海外研究者も含めた活発な議論が今後の研究の新展開につながることを期待されます。

2017.05.20 ▶ 05.25
JpGU-AGU

A02班研究紹介

陸上のボアホールひずみ観測による 浅部 SSE の検出

産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 板場 智史



1. はじめに

南海トラフ沿いの地域では、固着域より深部側で発生する深部スロー地震と、浅部側で発生する浅部スロー地震双方が発生していることが明らかになっている。深部スロー地震としては、地震学的観測手法により検出可能な微動や超低周波地震(VLFE)、測地学的観測手法により検出可能であり数日間程度の時定数を有する短期的スロースリップイベント(SSE)、数ヶ月以上の時定数を有する長期的SSEが発生している。一方、浅部スロー地震としては、微動やVLFEが発生することは明らかになっていたが、海域における高精度な

測地学的観測の困難さ故に、近年までSSE(以下、浅部SSE)は検出されていなかった。

産総研では、2017年現在、東海・紀伊半島・四国地方の17カ所の掘削井戸においてひずみや地下水、地震等の観測を行っている。この観測網では、主に観測網の直下で発生する深部スロー地震活動の詳細な把握を目的としており、高感度なボアホールひずみ計を用いた短期的SSEの詳細なモニタリングなどを行っている。

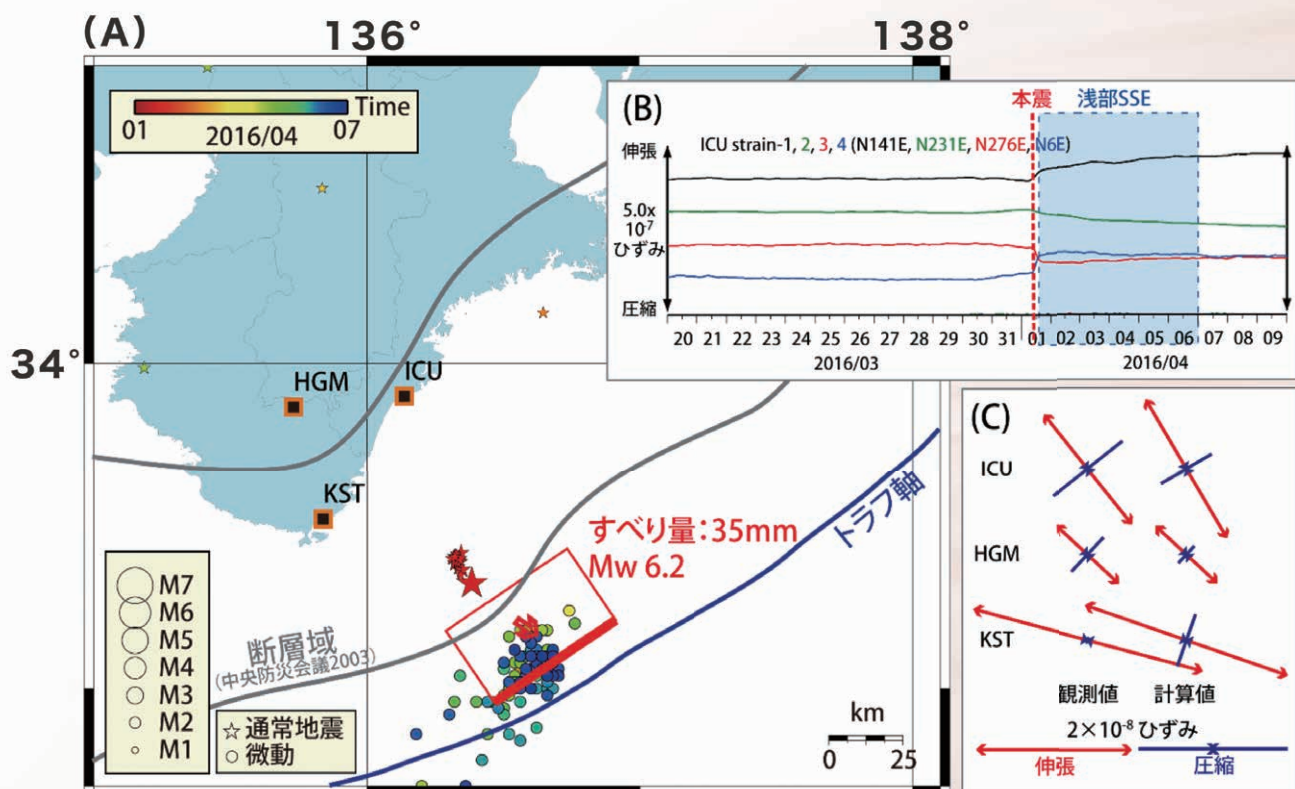


図 1

(A) 2016年4月1日～6日に観測された浅部SSEの推定断層面(赤色矩形)、浅部微動・通常地震の震央分布、および解析に使用したボアホール歪観測点の位置図。浅部微動(○印)の震源は、Annoura *et al.* (2017)を、通常地震の震源(☆印)は、気象庁一元化震源をそれぞれ使用した。震源の色は、浅部微動・通常地震が発生した時間を示す。(B) 浅部SSE前後のICUにおける水平4方向の歪観測結果。(C) 3観測点における主歪の観測値および浅部SSEの断層モデルからの計算値の比較図。推定された断層面は、観測された歪変化をよく説明できていることが分かる。

2. 紀伊半島沖における浅部SSEの検出

2016年4月1日、紀伊半島沖のプレート境界においてM6.5の地震(以下、本震)が発生し、上述の観測網のうち、ひずみ3観測点において、地震時のステップ状の変化(静的ひずみ変化)に引き続き、ゆっくりとした変化が観測された。このゆっくりとしたひずみ変化を解析したところ、紀伊半島沖において本震直後から浅部SSEが発生していたことが分かった。この地域における浅部SSEの発生を陸上観測網から検出したのは、これが初めてである。Annoura *et al.* (2017)によると、本震の2日程度後から、本震震源の南東側(浅部側)20～40km程度の領域において浅部微動活動が活発化したことが明らかになっている。この浅部微動活動は、本震により誘発されたものと考えられるが、本震とは時間で2日弱程度、空間で20km程度のギャップがあった。一方、上述の浅部SSEは、本震直後からはじまっているほか、そのすべり範囲は、浅部微動の活発な活動領域～本震震源に近接する領域にまでおよんでおり、本震と浅部微動との間の時間・空間のギャップを含有している。これらのことから、2016年4月のイベントでは、本震によって浅部SSEが誘発され、浅部SSEによって浅部微動が誘発されたものと推定される。本ニュースター 01号のA02測地観測班の研究計画紹介では、微動とSSEが時間空間的に同期して発生する現象につ

いて、「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」としているが、今回確認された現象は、まさにSSEが浅部微動の活動を規定している事例の一つである。

3. 今後に向けて

紀伊半島沖では、国際深海科学掘削計画(IODP)において構築された、紀伊半島沖の2カ所の掘削点における孔内観測システムの海底下間隙水圧観測により、浅部SSEが繰り返し発生していることが、近年明らかになっている(Araki *et al.*, 2017)。2016年4月のイベントについても、1カ所の掘削点において間隙水圧変化を観測し(1カ所は作業により欠測)、本震の1.5日程度後から浅部SSEが発生したことが示されている。今後は、ひずみ・傾斜・GNSSなどの陸上観測だけでなく、このような海底下間隙水圧観測等の海域観測とも積極的に連携し、深部・浅部のSSEの詳細な発生様式や、微動・VLFEとの相互関係について、理解を深めたい。

引用文献

Annoura, S., *et al.* (2017) *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 3564–3571.

Araki, H., *et al.* (2017) *Science*, **356**, 1157–1160.

スロー地震学 活動報告



若手研究者海外派遣報告

2017年は次の3名の研究者が派遣されました。広島大学特任助教の北 佐枝子さんは、3月4日から20日までUC DavisのDonna Eberhart-Phillips博士、University of WashingtonのHeidi Houston教授の下に滞在し、日本列島の速度・減衰構造とスロー地震との関係や、スロー地震の発生間隔に関する研究を行いました。

東京大学地震研究所D1の栗原 亮さんは8月9日から9月7日までGeorgia Institute of Technologyに滞在し、受入教員のZhigang Peng教授や、Northwestern UniversityのKevin Chao博士とともに、表面波によって誘発される微動の研究を行いました。

京都大学D1の片上 智史さんは、7月12日から9月13日までMiami University、University of California, Riversideに滞りました。Miami

UniversityではMike Brudzinski博士と、理学的な研究内容のみならず、石油採掘で誘発される低周波微動の可能性のような工学的な内容についても議論を行いました。

それぞれの分野における、これらの先端的な研究の内容や各研究者が滞在中に感じたことなどの詳細は、当領域WEBサイトをご覧ください。



渡航中の栗原亮さん(Zhigang Peng教授と)

2017
若手海外派遣

B01 班研究紹介

非排水性プレート境界で発生する
低周波地震

東京工業大学 理学院地球惑星科学系 中島 淳一



1990年代以降、世界の沈み込み帯で様々なタイプのゆっくり地震(スロー地震・スロースリップ)が見出され、現象の普遍性や多様性の理解が徐々に進んできた。西南日本で発見された深部低周波微動(低周波地震)は、プレート境界固着域の深部延長で発生しており、遠地震の表面波や地球潮汐などの微小な応力変化で誘発されるという特徴がある。微動発生域のプレート境界では、間隙水圧の上昇により有効法線応力が小さく、せん断破壊強度は極めて小さいと考えられているが、間隙水圧を上昇させるメカニズムの理解は十分でない。本報告ではNakajima and Hasegawa(2016)による地震波不均質構造と低周波地震分布の対応関係を概説し、プレート境界での間隙水圧上昇のひとつのモデルを紹介する。

Nakajima and Hasegawa(2016)では関東から九州までの約1000kmにわたる帯状の低周波地震発生領域において、フィリピン海プレート上部境界面近傍の地震波速度・減衰・異方性構造の推定を行い、得られた構造不均質と気象庁が決定している低周波地震分布との比較を行った。その結果、プレート境界直上の構造不均質と低周波地震活動の間に明瞭な関係が存在し、(1)低周波地震が活発な領域では、上盤側の速度は平均的かやや速く、減衰は小さいこと、(2)紀伊水道や伊勢湾、関東～伊豆、九州のように低周波地震が発生していない、または極めて少ない領域では、上盤側が低速度、高減衰であり、異方性もやや大きいことが明らかになった(図1)。ここで得られた上盤の構造不均質と低周波地震分布の関係は、従来考えられてきた上盤側が蛇紋岩化している領域で低周波地震が発生するというモデルでは説明できない。

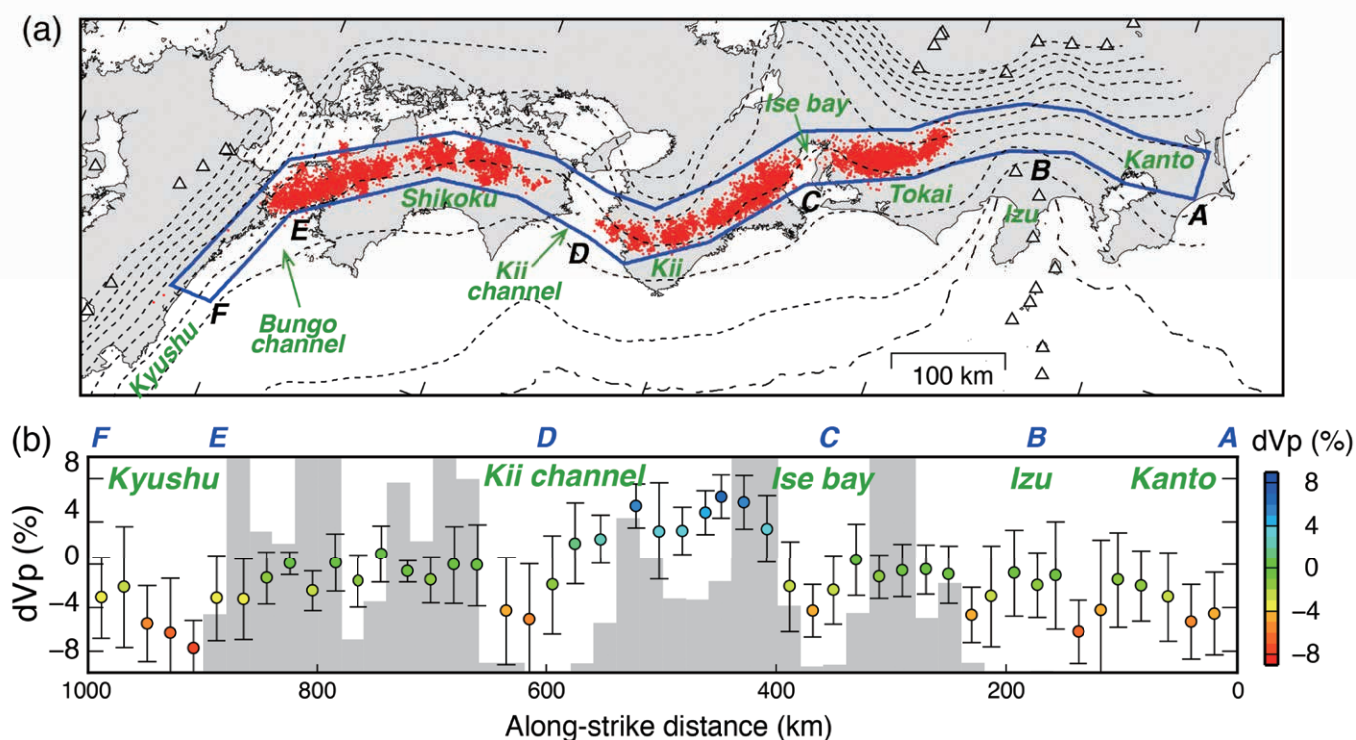


図 1

(a) 解析領域。赤点は低周波地震の震央、波線はフィリピン海プレートの等深度線(10km間隔)。青色の帯の領域内の地震波不均質を計算し、低周波地震分布と比較した。(b) プレート境界上部境界から1～4 km浅部のP波速度偏差の平均値と標準偏差。値は平均速度からのずれを表す。

そこで上盤側の構造不均質と低周波地震の活動度との関係は、プレート境界での排水条件(上盤の透水性)の違いに起因するというモデルを提案した。排水性のプレート境界では、上盤側に水が抜けやすいため間隙流体圧の上昇が妨げられ、低周波地震は発生しない。その代わりに、水の付加により上盤側の変成が進み、それが低速度・高減衰域としてイメージされていると考えられる(図2b)。上盤内の水の上昇は、低周波地震が発生していない領域で上盤の地震活動が活発なことと調和的である。一方で、プレート境界が非排水性の場合には、上盤側に水がほとんど抜けられないためプレート境界に水が効率的に供給されるであろう。そのためプレート境界の間隙流体圧が上昇し、せん断破壊強度が低下することで低周波地震が多く発生すると解釈できる(図2a)。

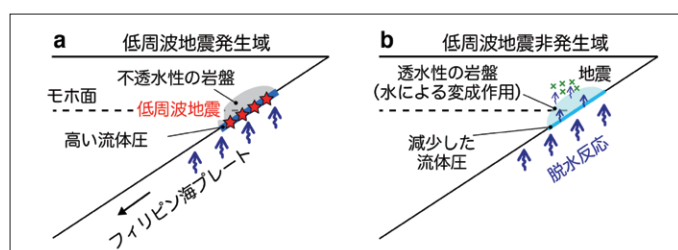


図2 低周波地震の発生域(a)と非発生域(b)における水の挙動の模式図

「水漏れの有無」がプレート境界の間隙水圧をコントロールするという考えは、上盤側の蛇紋岩化やシリカの沈殿による目詰まりといった特定の変成反応を必要としない。そのため、このモデルは西南日本の深さ約30kmの低周波地震だけではなく、より浅部のプレート境界やトランスフォーム断層などで見出されている低周波地震(微動)の発生も説明できる可能性がある。しかしながら、ここで提案したモデルでは、地震波不均質は変成作用が原因であること、スラブからの水の供給レートが地質学的な長い時間に渡り島弧走向方向で一定であること、上盤に抜けた水はすべて変成作用に使われることなどが仮定されている。また、排水条件が何に規定されているかもわかっていない。モデルの検証には、プレート境界周辺のより詳細な構造解析やそこでの水収支の定量化などが不可欠であろう。新学術領域研究「スロー地震」による今後の研究の進展に期待したい。

引用文献

Nakajima, J. & Hasegawa, A., Tremor activity inhibited by well-drained conditions above a megathrust, Nat. Commun. 7, 13863, doi: 10.1038/ ncomms13863, 2016.

スロー地震学 活動報告



カタログ班

各機関や研究者の作成した様々なスロー地震のカタログを簡単に比較・ダウンロード可能とし、多くの研究者が利用することによってスロー地震学の発展に貢献することを目的として、「スロー地震カタログ共有・公開に向けたワーキンググループ」が昨年に結成され、2016年10月29日のキックオフ会合を皮切りに多くのカタログを収集してきました。また、2017年10月17日に行なわれたカタログ集会において、12月の公開に向けたWEBサイト(英語)の構築準備状況の確認が行なわれました。また、データジャーナルへの投稿も予定されています。

2017.10.17
カタログ集会

Slow Earthquake Catalog

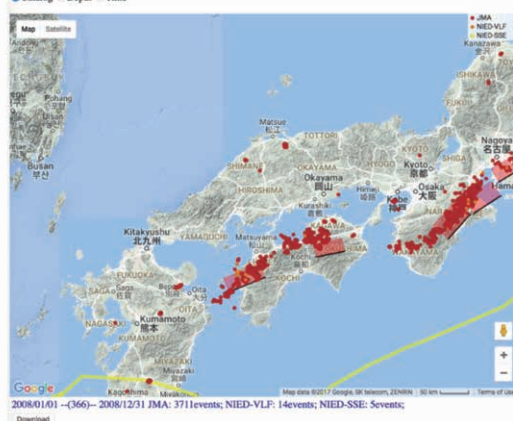
Time Span:
Start date: 2008/01/01 Length: 365 End date: 2008/12/31

Catalog Selection:

Region	LFE	Tremor	VLF	Slow Slip
Japan	☒	☐	☐	☐
Cascadia	☐	☐	☐	☐

Clear Catalog Selection

Colored by:
☒ Catalog ☐ Depth ☐ Time



B02班研究紹介

スロースリップの巨大地震への役割

京都大学 防災研究所 伊藤 喜宏



スロースリップは巨大地震の発生にどのような影響を与えるのだろうか？最近の観測事例から巨大地震発生へのスロースリップの作用として、次の2つが指摘されている。(1)固着域周囲でスロースリップが発生することで固着域への応力蓄積速度が一時的に加速することで地震が誘発される(誘発作用)。(2)スロースリップそのものが、断層上の摩擦弱화를引き起こす(促進作用)。(1)については、これまでいくつかの研究事例が報告されているが、(2)の作用については議論が十分ではない。しかしながら、東北地方太平洋沖地震時に大きくずれ動いた領域と地震発生直前まで継続していたスロースリップ域が一致していたことから、(2)の作用についても十分検討する必要がある。ここでは、国際深海科学掘削計画(IODP)の東北地方太平洋沖地震調査掘削(JFAST)で、海底下820m付近から取得されたプレート境界物質を用いた摩擦実験によりスロースリップの「促進作用」を検証した結果を述べる。(Ito and Ikari 2015; Ito et al., 2016)

せん断摩擦試験の概要を以下に述べる。試料は粉碎した後、円筒形の試料容器に封入し海水で飽和させ16MPaの法線応力を加えて圧密し、10 μ m/sのすべり速度で3.5mmせん断させた。その後、初期速度 V_0 (2.7nm/s, 0.1 μ m/s, 1 μ m/s, 3.7 μ m/s, または10 μ m/s)で変形させた後、最終速度 V (0.1, 3.7, または140 μ m/s)まで速度を増加させる、すなわち速度ステップを与えるせん断試験を行った(図1)。ここでは、さまざまな初期速度と最終速度の組み合わせについて、摩擦のすべり依存性を速度ステップの前後で比較した。本研究では、摩擦のすべり依存性として $\eta = d\mu/dx$ を測定した。 μ は摩擦係数、 x は変位量である。

本研究で得られた摩擦のすべり依存性を示す η 値は、ほとんどの場合、速度ステップ後に正の値、すなわちすべりに伴い摩擦が増加するすべり強化の傾向を示した。ただし、以下の2つの場合についてのみ、速度ステップ後にすべり弱화가観測された(図2)。(1)初期速度がプレート収束速度の $V_0=2.7$ nm/sで速度ステップ後の速度が $V=0.1\mu$ m/sの場合。(2)初期速度が $V_0=3.7$ または10 μ m/sで速度ステップ後の速度 V が140 μ m/sの場合。初期のすべり速度によって、ステップ後のすべり依存性が同じ最終速度であっても変化するメカニズムは未だ不明ではあるが、発達したせん断帯で見られる鱗片状構造などの微細構造によるのかもしれない。

日本海溝では2011年東北地方太平洋沖地震の前に2種類のスロースリップが、本震時のすべり量が30mを超えた領域で観測された。一つは本震の1ヶ月前からM7.3の最大前震発生直前まで継続して発生していたスロースリップ、もう一つは最大前震後から本震発生直前までの51時間継続して発生していた最大前震の余効すべりである。本震1ヶ月前から発生していたスロースリップ域のすべり速度は、最大前震の余効すべりが周辺で発生したことにより、本震発生前に増加していた可能性が高い。最大前震前のスロースリップのすべり速度は、せいぜい0.1 μ m/s程度であるのに対して、余効すべりのすべり速度は $\sim 2\mu$ m/sであり、スロースリップ域のすべり速度も近隣の余効すべりの影響により、本震発生直前に $\sim 2\mu$ m/sまで増加していた可能性が考えられる。

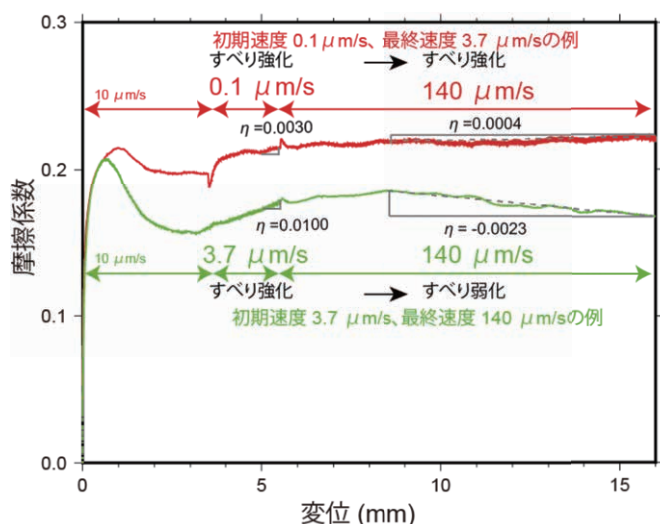


図 1

せん断摩擦試験の測定結果の例。初期速度0.1 μ m/s、最終速度3.7 μ m/sの測定結果を赤線、初期速度3.7 μ m/s、最終速度140 μ m/sの測定結果を緑線で示す。それぞれについて変位量に対する摩擦係数の増加量を、すべり依存性 η として測定した。

東北地方太平洋沖地震のプレート境界から取得された断層物質のすべり摩擦特性を調べた結果、次の2点の特徴を挙げることができる。(1)プレート収束速度からスロースリップの速度にすべり速度を増加させた場合、すべり弱化とな

る。(2)スロースリップのすべり速度($0.1 \mu\text{m/s}$)から、すべり速度を増加させた場合はすべり強化となるのに対して、それよりもやや早いすべり速度($3.7\text{--}10 \mu\text{m/s}$)から増加させた場合はすべり弱化となる。

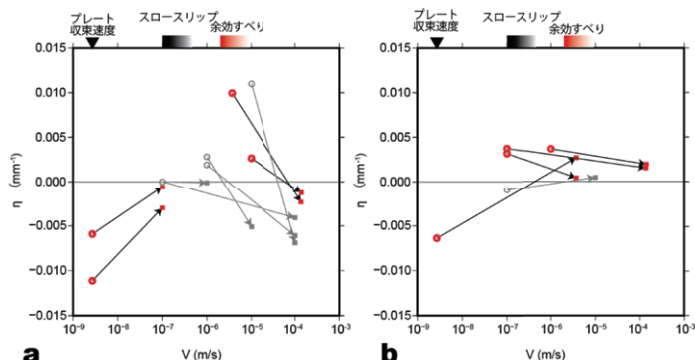


図 2

速度ステップ前後でのすべり依存性 η の変化。速度ステップ前および後の η を赤丸および四角で示し、矢印で結んで示した。(a)速度ステップ後にすべり弱化が観測されたもの。(b)速度ステップ後にすべり強化が観測されたもの。薄い灰色は、別な粘性土性堆積物を用いてえられた測定結果を示す。

(1)のすべり弱化による摩擦の不安定は、スロースリップの発生に寄与するだろう。(2)のすべり弱化については、最大前震の余効すべりのように、事前に発生していたスローなすべりにより地震時すべりが促進されたと解釈できる。すなわち、通常のスロースリップよりもやや大きなすべり速度でずれ動いている領域に高速すべりが伝播し、スロースリップ域内ですべり弱化が生じること、スロースリップ域内の高速すべりの伝播が可能となったのかもしれない。

引用文献

Ito and Ikari (2015), *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 9247–9254, doi:10.1002/2015GL065829.

Ito, Ikari, Ujiie, and Kopf (2017), *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 8749–8756, doi:10.1002/2017GL074307.

スロー地震学 活動報告



スロー地震学合同研究集会2017

2017.09.19 ▶ 09.21
合同研究集会

「スロー地震学」2年目の合同研究集会は、9月19日から21日まで、愛媛県松山市内で開催されました。昨年同様、東大地震研共同利用研究集会「スロー地震の発生メカニズムを探る：観測・調査・実験・理論・モデリングからの情報の統合化と巨大地震との関連性の解明を目指して」、および、京大防災研共同利用一般研究集会「南海トラフ巨大地震災害の減災に向けたスロー地震研究の今後の可能性」との合同で実施しました。松山市が選ばれたのは、その直下で深部低周波微動が発生していることに加え、直前に日本地質学会が愛媛大学で開催されたからです。台風の影響が心配されましたが、一過の好天の下、予定通り行なうことができました。研究集会には、領域内外を合わせて130名の研究者・学生(うち外国人18名)が参加し、活発な議論が繰り広げられました。発表内容は、地震学、測地学、地球内部構造学、地質学、非線形物理学、数理統計学など、多様な研究分野にまたがり、幅広い分野における進展が報告されました。



C01 班研究紹介

メートル級岩石摩擦実験中の
前駆的スロースリップ

防災科学技術研究所 地震津波防災研究部門 山下 太



日本および世界各地のプレート沈み込み帯で広く発見されているスロー地震の多くは、通常の地震時に高速にすべって強い地震波を放射する領域(しばしばアスペリティと呼ばれる)とは異なる領域で観測されることから、当初は温度圧力条件と関連した摩擦特性の違いにより発生領域が異なっていると考えられていた。しかしながら、近年、様々な観測により、巨大地震発生前にその発生域においてスロー地震が開始し、巨大地震へと遷移していくことが報告されている。このことは一つの断層が低速変形から高速すべりまでの多様な挙動を示すことを示している。一方、岩石実験や数値シミュレーション研究においては、地震に先行して断層面上のある一箇所からスロースリップが開始した後、加速度的にそのすべり域が拡大(破壊が伝播)して不安定な高速すべりに至る震源核形成過程が確認されている。一つの断層がスロースリップから高速すべりまでの多様な振る舞いを示すことは普遍的な特性であると言えそうである。その物理を明らかにすることはスロー地震、ひいては地震現象全般のメカニズムを理解することにつながると期待される。そこで我々は過去の室内実験に比べ、より現実的な大きさの断層面で発生する前駆的スロースリップを、稠密な測定網で詳細に観察するためのメートル級岩石試料を用いた摩擦実験をおこなっている。

図1に本研究で使用している試験装置の模式図を示す。本装置の最大の特徴はその動力に大型振動台を利用していることである。大型振動台は本来、大型構造物の耐震能力や振動特性を調査するために使用されるものであるため、非常に大きな载荷能力を有し、高速かつ大変位の断層運動を再現できる。防災科学技術研究所がつくば本所に所有する大型振動台は、最大変位速度1m/s、最大変位量0.4mが実現可能である。これを利用することで従来の摩擦実験では困難だった大型岩石試料を速く・大きくすべらせる実験が可能となった。図1に示されるようにメートル級の岩石試料ペアを上下に重ね(上:L1.5×H0.5×W0.5m、下:L2.0×H0.5×W0.1~0.5m)、下側試料は試験装置のフレームとともに振動台に固定されている。上側試料は反力バーによって側面を支えられ、その反力バーは振動台と切り離された外側の基礎に固定されている。断層面への垂直応力は上側試料上部にローラーを介して取り付けられたジャッキによって与えられ、振動台が紙面左側に移動すると上下試料間の模擬断層面で摩擦すべりが発生し、反力バーと上側試料の間に設置した荷重計で断層面に生じたせん断断力を測定する。実験では、荷重計で測定される巨視的な力学データに加え、断層近傍に設置したひずみゲージアレイによって局所的な応力データも収録する。

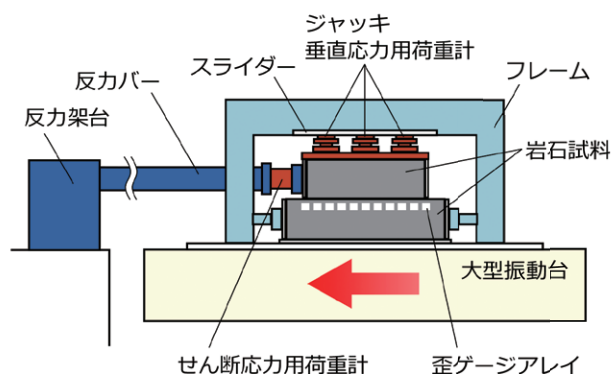


図1

大型振動台を利用した岩石摩擦試験装置の模式図

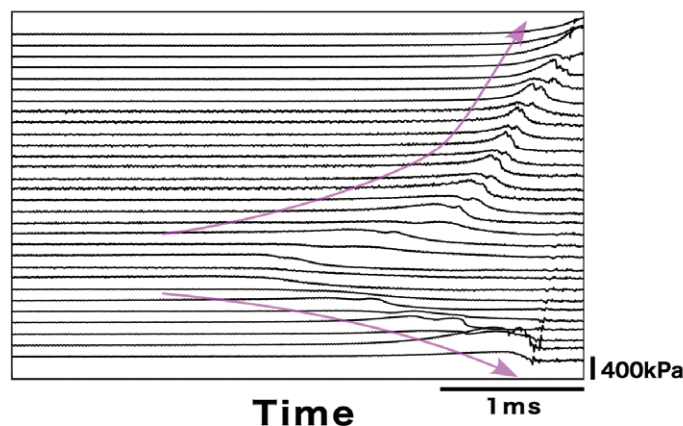


図2

ひずみゲージアレイでスティックスリップイベント直前に観測された前駆的スロースリップ

図2に示す波形はこのひずみゲージレイによって測定されたスティックスリップイベント発生直前の、断層沿いのせん断応力の時系列である。従来の震源核形成モデルと同様、断層のある一点からすべりが始まり、破壊域がゆっくりと広がった後に加速度的に拡大する前駆的スロースリップの様子が捉えられている。比較的なめらかな断層面では、毎回ほぼ同じ場所からこのようなスロースリップが始まり高速破壊に至ることが確認された。しかしながら現実の断層はより粗く不均質であると予想される。そこで同じ試料ペアを用いた摩擦実験を繰り返しおこなうことで粗い断層面を再現し、断層面の状態が前駆的スロースリップに与える影響を調べた。その結果、断層が粗くなるにつれてスロースリップが始まる場所のばらつきが増加し、また、断層全体の応力降下量が同等であってもスロースリップの開始位置によって断層上の応力降下量分布も大きく影響を受けることが確かめられた。

なお、これらの観察は比較的薄い断層面(L1.5m×W0.1m)の試料ペアでおこなわれ、局所的な応力も従来の実験と同様に断層端の1次元的なレイにより観察されたものである。我々は前駆的スロースリップのよりリアリスティックな伝播過程を観察するため、断層面がL1.5m×W0.5mとなる試料ペアを用い、下側試料の断層面にひずみゲージを埋め込むことで断層面上の応力状態を2次元的にモニターした。このような2次元ひずみゲージレイによる観察例の報告は目にしたことがなく、おそらく、世界初の試みである。実験の結果、前駆的スロースリップの多様な発生・伝播の様相を捉えることに成功し、その過程は断層端の観測のみでは正しく把握できないものであることを確認した。

今後はさらにひずみゲージレイの稠密な測定を推し進め、弾性波等の観測や数値シミュレーション結果との比較により、破壊伝播様式の物理を定量的に明らかにしていく予定である。

スロー地震学 活動報告



沖縄巡検

沖縄本島における四万十付加体の巡検が2017年7月8日、9日に行われました。8日は嘉陽層を巡検し、付加変形に伴って形成された褶曲とスラスト、低速域で速度弱化と速度強化の摩擦挙動を示す断層岩などを観察しました。9日には名護メランジュを巡検し、プレート境界沿いの剪断に伴って形成された地質構造、高間隙水圧下で形成された構造などを観察しました。



2017.07.08 ▶ 07.09
沖縄巡検

三波川巡検

松山市で開催された全体集会後の9月22日、23日に三波川変成帯の巡検を行いました。22日は高知県長岡郡付近の、23日は愛媛県新居浜市付近の変成岩を観察しました。巡検の参加者は国内外の研究者や学生を含む総勢20名で、専門分野も地質学、非平衡物理学、地震学、統計数理学など多岐に渡りました。沈み込み帯における脱水・吸水反応の証拠を見られたことは大変有意義でした。スロー地震発生帯の岩石と水の相互作用について、分野を超えた議論が活発化することが期待されます。巡検参加者の多数の報告が領域WEBサイトに掲載されていますので、ぜひご覧ください。



2017.09.22 ▶ 09.23
三波川巡検

C02班研究紹介

地震のスケール依存性の理解へ向けて

東京大学 地震研究所 波多野 恭弘



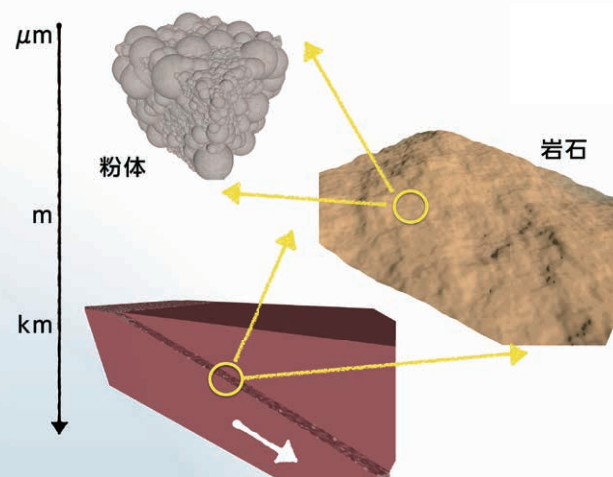
スロー地震まで含めた地震発生過程を物理的に理解するための鍵は何だろうか？物理科学のアプローチの常道は、「複雑な問題は、(より簡単な)サブ問題に分割せよ」であるから、系を構成要素に分けてステップバイステップで理解していけばよからう。地震の場合は、「地震発生場の各種(地震学的・地質的・電磁氣的)構造と物性(摩擦・透水性など)の理解」がサブ問題にあたるだろう。本学術領域では主に**B01**、**B02班**が構造と物性の探求を担当している。では、分割して理解できたサブ問題から実際の地震をどう理解すべきか？これが**C01**、**C02班**の一つの研究目的にもなっている。本稿ではその問題について少し考えてみたい。

「構造」と「物性」は密接にリンクしているが、まずは摩擦や透水性などの物性について考えよう。これらの性質は基本的に岩石やコア試料の室内実験によって求められる。室内実験の試料は数cm～数十cmである一方、実際の地震での断層滑りは(M_w 8なら)数百km四方に及ぶので、実験試料と地震では空間スケールが約6～7桁も違うことになる。プレート境界面が2次元だと思えば、実験試料が $10^{12} \sim 10^{14}$ 個集まった面として地震発生場を考えていくことになる。これはアボガドロ数とまでは行かないが、およそ10ミクロン立方の物質内部にある分子数と同程度である。分子スケールの現象と10ミクロンスケールの現象とは基本別物だが、室内実験で分かる物性と M_w 8クラスの地震も別物と考えた方がよいのだろうか？もしそうだとすると、我々は地震をどのように理解すればよいのだろうか？

室内実験から分かっているように、摩擦などの岩石物性は温度・圧力・岩石種などの詳細に敏感に依存するので、プレート境界全域にわたって均一であるはずはなく、不均一に分布しているはずである。単純に考えれば、このような不均一構造を、実験試料サイズ程度である10cmの解像度で与えて滑りのシミュレーションをすれば、プレート境界の滑り挙動は完全に理解できるはずである。そのような超微細構造を持つ不均一場での滑り挙動がどのようなものになるかは興味深いが、問題が二つある。：1) M_w 8クラスの地震を考える際には、プレート境界上に $10^{12} \sim 10^{14}$ 個のメッシュを与え

ることになるが、そのような計算は負荷が高すぎて計算できない。2) 実際のプレート境界の物性を10cm程度の解像度で知ることが無理である。これら2点の困難はいずれも現時点での話であり、将来は解決されるのかもしれないが、そう近い将来でもないだろうから、我々は別の手段を考えなくてはならない。

すぐに思いつくのは以下のような指針である。プレート境界を実験室スケールのメッシュに切るのが不可能なら、観測の解像度程度のメッシュに切るのが現実的であろう。例えばこのサイズを数kmとすると、数km程度の空間スケールでの摩擦法則をシミュレーションに与えればよいことになる。現状では、この数kmのメッシュに実験室スケールでの摩擦法則を与えることが多いが、10cmの試料で成り立つ摩擦法則が(それよりも4桁大きい)数kmの岩盤でも成り立つ保証は全くない。先に述べたように、実験試料が 10^{14} 敷き詰められた系の性質は異なると考えるのが自然であろう。したがって、我々の仕事は、何とかして数kmスケールで成り立つ摩擦法則を探すことになる。これは実験は不可能なので、理論的に探していくことになる。例えば10cm程度の波長で分布する不均一性を与えた際に、系に働く実効的な摩擦力を求めるといふ指針があり得るだろう。ここでの問題は、10cm程度の不均一性をどう与えるかという点にある。これは観測からは決まらない情報なので一層難しい。



この素朴なアプローチで予想されるもう一つの困難は、力学的不安定性(カオス)である。ここでのカオスとは、「系の挙動は決定論的で、初期条件と境界条件を与えれば一意的に決まるが、初期条件と境界条件がほんのわずかに異なる二つの系を比較すると、その挙動は時間の経過とともに全く異なってしまう」という現象である。地震の動的破壊がカオスであることを示した研究は(知る限りでは)まだ無いのだが、もしカオスだとすると、シミュレーションによる大地震発生予測には深刻な問題が生じる。つまり、プレート境界の不均一物性や応力場をどんなに詳細に与えたとしても、観測誤差の範囲内で分布させたパラメタセットで実現する地震の様子が毎回大きく異なってしまう、ということが起こりうる(例えばほとんど同じパラメタセットを与えたシミュレーションでも M_w 6の地震になったり M_w 9の地震になったり、あるいはスロースリップになるなど)。これは力学的不安定性の度合いと、初期条件・境界条件の不確定性の度合いの兼ね合いから定量的に決まるので、ケースバイケースの具体的な研究が今後必要である。

以上論じたように、初期条件・境界条件の不確定性と、(もし存在すれば)力学的不安定性から、ある特定の場所で起こる地震の規模と滑りの様相を決定論的に予測することは非常

に困難であることが予測される。つまり、「いつ」も予測できないし「規模」も予測できないというわけである。このような場合に我々はどうすればよいのだろうか？

一つの指導原理は、「知り得ないことについては無バイアスで推定し、結果については統計的に述べる」ということである。これは例えば統計力学において等重率の原理を仮定し(無バイアス推定)、知りたい物理量はその確率分布について統計的に求めていることと対応するだろう。地震についても、地震発生場について知り得ないこと(短波長の不均一性や応力場など)については統計的分布を考え、知りたいこと(発生する地震の挙動)はその分布について統計的に論じる、ということになる。このようなやり方でも、「現時点で M_w 8以上の地震が起こる確率」などは論じることができるので、全く役立たずというわけではない。ただし、そのためには上述したような大スケールでの(粗視化された)摩擦法則が必要になるし、断層の動的破壊過程における力学的不安定性の度合いについて定量的な知見を深めることも必要である。それらの理論的根拠が揃って初めて、高精度の観測データを用いた地震災害の確率的予測へ進むことができるのだろうと考えている。

スロー地震学 活動報告



物理班交流セミナー

C02物理班と他班の交流を深めるため、研究会やセミナーを開催しています。2017年2月21日、22日には**C01/C02**合同研究会が福岡市(九州大学)で開催されました。本領域で招聘した、粉体をベースとした摩擦法則の専門家であるイリノイ大学のAhmed Elbanna氏が基調講演を行い、2班合わせて14名の講演と活発な議論が繰り広げられました。微動の観察から、数理的なモデル、大規模岩石実験など、様々な角度からスロー地震に取り組む研究の最先端が紹介されました。

「**C02物理班**交流セミナー」として、2017年3月30日にOISTの瀬戸 亮平さん(固体の流れ方—高濃度粒子分散系の局所レオロジーと連続体モデル)、7月20日にリヨン大学のOsvanny Ramosさん(Modelling Earthquakes with a Granular Experiment)、7月28日に青山学院大学の鈴木

岳人さん(動的震源過程を記述する二変数非線形系に現れる普遍性と臨界性)、10月12日に東京大学の麻生 尚文さん(Stochastic numerical simulation of regular and slow earthquakes)が講演し、活発な議論が行われました。



C01/C02班合同研究会(2017年2月21日)

2017.02.21 ▶ 02.22
C01/C02 合同研究会

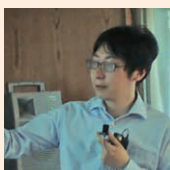
新企画 スロー地震カフェ

2017年3月より、スロー地震に関わる様々な話題を提供し、ざっくばらんに意見を交換することでスロー地震の謎を領域内外で共有し、解決に向けた糸口を探る企画が始まりました。これまでにお話をされた方とテーマを紹介します。



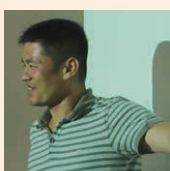
3月30日 波多野 恭弘 (東大地震研)

「スロー地震の理解のために統計物理は何ができるか？」



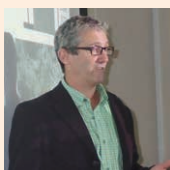
6月15日 内田 直希 (東北大)

「様々なスロー地震間の時空間的關係～東北沖と日向灘での事例」



7月20日 Kevin Chao (Northwestern Univ.)

“Dynamic Triggering of Tectonic Tremor : What are the similarities and differences between triggered and ambient tremor?”



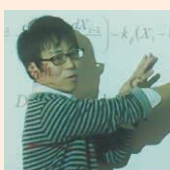
7月29日 Chris Marone (Pennsylvania State Univ.)

“The Spectrum of Fault Slip Behaviors and The Mechanics of Slow Earthquakes : A View From The Laboratory”



9月8日 市村 強 (東大地震研)

「固体地球科学のための超並列高速有限要素法の開発～スロー地震学への適用を目指して～」



11月9日 住野 豊 (東京理科大)

「地震・スロー地震の単純モデル実験系作成に向けて～バネブロックモデル縮約を導入として」

カフェは主に東大地震研で開催されますが、7月29日には岩石の摩擦すべり実験の世界的第一人者である Chris Maroneさんを神戸大学にお招きして、関西で初めてカフェを開催しました。非常に活発な質問を挟み、かつ、急遽「コーヒープレーク」も途中で設けつつ、約3時間にわたって熱心な講演と議論が交わされました。



新学術領域研究（研究領域提案型）



Newsletter02

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 2017.12

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