令和3~7年度 文部科学省 科学研究費助成事業 学術変革領域研究(A)



# SLOW TO FAST 地震学

# NEWSLETTER

Vol.3 March 2024



## INDEX

- 2 各班研究紹介
- 14 公募研究紹介
- 19 新規メンバー紹介
- 20 イベント紹介

国際合同研究集会2023

- 22 押しかけワークショップ in 台湾
- 23 コルシカ島サマースクール/ミニ押しかけワークショップ in イタリア
- 24 若手研究者海外派遣
- 25 若手·ダイバーシティーTFより
- 26 拡大班会議/合宿
- 27 巡検/講演会
- 28 報告





## 粉体摩擦とスロー地震・スロー地すべり

#### 山口 哲生・Chengrui Chang (東京大学 大学院農学生命科学研究科)



私たちは、室内実験と理論による記述を用いて、地球科学現象、とくに、スロー地震とスロー地すべりのメカニズム解明に取り組んでいます。ここでは、岩塩粒子系の粉体摩擦実験についてご紹介したいと思います。

浅部のスロー地震やスロー地すべりにおいては、母岩が未固結のまますべりイベントが起こることが想定されます。また、すべりが起こると岩石には少なからず破砕が生じると考えられます。そのような状況を室内実験で模擬するため、私たちは、アナログ物質として岩塩粒子に着目しました。室内実験では、実際の断層で働く大きな法線応力を再現し、破砕を起こすことは容易ではありませんが、岩塩粒子は10MPa程度の小さな降伏応力をもち、簡単に破砕を起こすことができます。過去には、スロー地震の構成則(Shibazaki et al. 2007)を導くきっかけになった、嶋本先生による有名な研究(Shimamoto 1986)があります。

この性質を利用して、岩塩粒子に対するリングせん断摩擦実験(図1(a)参照)を行ってみました(Chang et al.,under review)。実験装置のジオメトリは、今年前半に流行った、ステーキを食べるときに食塩や胡椒の粉をふりかけるための"ペッパーミル"に似ています。その結果、図1(b)のように、せん断を始めてしばらくは摩擦係数がほぼ一定値 $(\mu_0)$ を示しますが、あるすべり変位 $(L_0)$ の後、摩擦係数が指数関数的に減少していくすべり弱化挙動が観察されました。また、法線応力 $\sigma$ を変えて実験を行ってみると、 $\sigma$ が大きければ大きいほど、 $L_0$ も、すべり弱化に要する変位 $L_w$ も短くなり、図2に示されるように、ともに $\sigma$  $\sigma$ -2乗に比例することが分かりました。

つぎに、この実験結果を説明するため、私たちは現象を記述する理論の開発に取り組みました。理論では、角ばった岩塩粒子がすべり変位とともに破砕され、丸みを帯びた微細な粒子が生成す

(b)

coefficient [-]

1000

1500

ると仮定しました。すると、すべり初期は破砕によって微細粒子が生成するものの、岩塩粒子間の空隙に逃げ込むため、岩塩粒子間の接触状態は初期のまま変わらず、摩擦係数は一定の値を示しますが、生成した微細粒子がちょうど岩塩粒子間の空隙を埋めると、岩塩粒子に働く"有効法線応力"が減少し始めます。その結果、初期過程では摩擦係数が一定で、後期過程では摩擦係数が低下するメカニズムを提案することができました。また、この理論は、2つのすべり変位がともに法線応力の-2乗に比例するという実験事実を再現し、摩擦係数がすべり弱化の過程で指数関数的に減少することも説明できます。

このように、アナログ物質を用いた摩擦実験と理論による現象の記述を併用することによって、現象をより深く理解することができたと考えています。今後は、X線CTを用いた内部状態の可視化や、粒子破砕素過程の可視化および定量化、粒子シミュレーション(離散要素法、DEM)などの手法を用いてより詳細に現象を捉えることで、今回提案したメカニズムの検証を行う予定です。私たちは、物質科学的な視点に立ちながらも、実物質を直接用いるのではなく、一歩引いたアナログモデリングという手法を用いて、スロー地震やスロー地すべりの研究に取り組んでいます。観測では理解が困難で、数値計算では解析できないような事例をうまく見つけてモデル化することにより、新現象の発見や解明、普遍的な現象の理解を目指していきたいと考えています。



図1:(a)リングせん断摩擦実験装置の概略図、(b)典型的な摩擦挙動および摩擦挙動を特徴づけるパラメータ。

#### 引用文献

Chang, C. et al. under review.

Shibazaki, B. et al. (2007) Geophys. J. Int., 171(1), 191-205. Shimamoto, T. (1986) Science, 231(4739), 711-714.

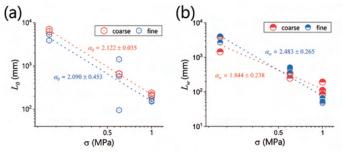


図2:(a) 初期の特徴的すべり変位 $L_v$ の法線応力依存性、(b)後期のすべり弱化変位 $L_w$ の法線応力依存性。図中の2つの線は、異なる初期粒子サイズ(coarse, fine)による実験結果を示している。



## 沈み込み帯浅部における付加体中の断層変形と間隙水圧変化



#### 堤 昭人・田代 圭吾 (京都大学 大学院理学研究科)

スロー地震の発生には断層を構成する物質中の間隙を満たす流体(間隙流体)の移動や圧力(間隙流体圧)変動が影響を及ぼすと考えられています。しかしながら、断層の応力が徐々に蓄積する過程における断層変形と間隙流体圧変化の様子を明らかにすることを目的とした実験的研究例は限られており、断層がすべりはじめる際の間隙構造発達の様子は明らかになっていません。本研究では、沈み込み帯浅部における付加体中の断層初期変形の詳細を明らかにすることを目的として、天然の付加体浅部物質を用いた実験的研究をすすめています。

三浦・房総半島には、埋没深度が1km程度と浅いことにより沈み込み帯浅部における付加体の初期変形が保存された上部中新統から下部鮮新統からなる地質体(三浦・房総付加体)が分布しています。この付加体中に発達する衝上断層においては、しばしば断層ガウジが上盤側に注入している様子が観察され、断層形成時の高間隙流体圧の痕跡として注目されています(Yamamoto et al., 2005)。我々は、三浦・房総付加体中に発達する衝上断層周辺から採取した半遠洋性シルト岩を用いて剪断変形の進行に伴う間隙流体圧上昇の過程が断層の剪断強度に及ぼす影響を調べています。

京都大学防災研究所の大型リング剪断試験機(Sassa et al., 2004)を用いて行った実験結果の例を図に示します。初期応力500kPaの条件下で剪断応力を徐々に増大させ(0.1kPa/sec)、変形が破壊線に達して巨視的断層すべりに移行する際の断層挙動を検討しました。システムからの水の出入りを封じた「非排水」の条

件で行った実験では、剪断応力が増大して破断し巨視的なすべりが開始すると、間隙流体圧の増大とともに有効垂直応力が徐々に減少し、剪断応力は約40kPaまで低下して定常値に達しました(図a)。また、巨視的すべりが開始するまでの段階においてすでに、剪断応力の蓄積とともに間隙流体圧が上昇する様子が見られることも明らかになりました(図b)。システムからの水の出入りを許容する「排水」の条件で行った実験では、間隙流体圧の上昇は見られません。断層のすべり量に対する剪断応力の低下の様子を非排水条件と排水条件で比較すると、排水条件では剪断応力が定常値に減少するのに450mm程度のすべりを必要とするのに対し、非排水条件では約100mmのすべり量で定常値に達することが示されました。

この実験結果は、断層の巨視的すべりが開始するまでの段階における断層変形に起因した間隙流体圧上昇量が、すべり時の間隙流体圧上昇量と同程度の大きさになることを示しています。今後は、すべり開始前後での間隙流体圧上昇を経験した断層の内部構造の詳細な観察をすすめ、天然の断層で観察される構造との比較を行う予定です。

#### 引用文献

Sassa, K. et al. (2004) Landslides, 1, 7–19. Yamamoto, Y. et al. (2005) Tectonics, 24, TC5008.

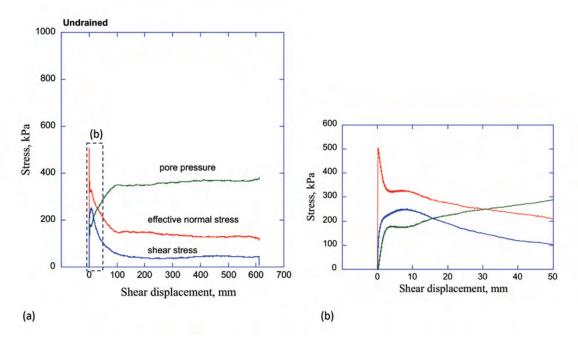


図:(a) 半遠洋性シルト岩の大型リング剪断実験で観察された非排水条件下でのすべり弱化挙動。(b) (a)の剪断初期の部分の拡大。青実線:剪断応力、 緑実線:間隙流体圧、赤実線:有効垂直応力。



## 日向灘スロー地震発生域につながる上盤プレート内流体経路の発見



#### 新井 隆太 (海洋研究開発機構 海域地震火山部門)

南海トラフの最西端に位置する日向灘では、M7クラスのプレート境界地震が複数発生しており、また、それらの地震の震源域より浅部において、低周波微動や超低周波地震といったスロー地震が発生していることが知られています。これらプレート境界地震およびスロー地震の発生域には九州パラオ海嶺が沈み込むことから、海山の沈み込みと地震活動に関連があることが示唆されてきましたが、その詳細はわかっていません。また、日向灘の海底には多数の泥火山が分布しています。これらの泥火山の形成には上盤プレート内での粘土鉱物の脱水反応が寄与していると考えられていますが、流体そのものの起源や流体が上昇してくる経路については不明な点が残されています。さらに、日向灘は南海トラフで1946年に発生したプレート境界型の巨大地震(南海地震)の震源域とも隣接しています。上記のような地殻深部での流体分布と巨大地震・スロー地震との関連を明らかにすることは、南海トラフ巨大地震の発生機構の理解のためにも重要です。

こうした背景から、海洋研究開発機構・東京大学・高知大学の研究グループは、浅部スロー地震発生域を南海トラフと平行な方向に横断する測線において屈折法地震探査・反射法地震探査を実施しました(Arai et al., 2023; 図1)。2km間隔に展開された海底地震計で記録した屈折法データに波形インバージョン解析を適用したところ、海底面からプレート境界(深さ10-13km)まで鉛直方向につながる幅数kmの低速度体が上盤プレート内に複数存在することを発見しました(図2)。これらの低速度体は沈み込む九州パラオ海嶺の直上と周囲に発達しており、起伏に富んだ海山群によって上盤プレートが強く破砕された場所であると解釈されます。次に、同じ測線での反射法データを確認したところ、低速

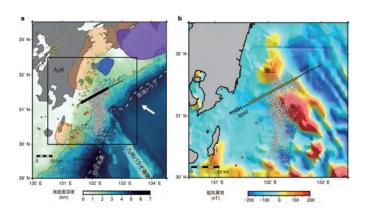


図1:日向灘におけるプレート沈み込みと地震活動の位置関係を表す海底地形図(a)と磁気異常図(b)。HYU01測線上の黄色丸の位置に海底地震計50台を設置して屈折法データを取得した(図2)。紫色、青色、緑色の領域は過去のプレート境界型地震の震源域、オレンジ色の領域はスロースリップの発生領域、白点は低周波微動、黄色四角は繰り返し地震、赤三角は泥火山の位置をそれぞれ表す。

度体の浅部では堆積層がドーム状(凸形状)に変形していること もわかりました。さらに、こうした地下構造と海底地形を比較し たところ、破砕帯の周囲には線上につづく急勾配の地形や円形の 海丘を多数確認することができました。特に、円形の海丘の一部 は海底面に泥火山を形成している可能性があります。こうした一 連の特徴から、上盤プレート内の破砕帯はプレート境界等の地殻 深部から上昇してくる流体の経路となっていると考えられます。 波形インバージョン解析で得られた速度構造モデルをさらに分析 したところ、上盤プレート内とプレート境界周辺で、深さ方向に 速度が逆転している箇所が存在することがわかりました。また、 スロー地震が発生する場所では、プレート境界の反射効率が高く なっていることもわかりました。いずれの結果も、上盤プレート 内やプレート境界に低速度媒質として流体が存在することを示唆 します。日向灘で発生するスロー地震の正確な深度はわかってい ませんが、この結果は流体分布とスロー地震が密接に関連してい ることを支持するものです。

本研究では、地震波データの詳細な解析を通じて、九州パラオ 海嶺が沈み込むことで生じる上盤プレート内の破砕帯構造を明ら かにするとともに、それらの構造がプレート内の流体や地震の分 布を規定する重要な要因となっていることを示しました。これら の成果はプレート沈み込み帯、特に海山が沈み込む場での流体循 環およびスロー地震の発生機構を理解するうえで重要な知見と考 えられます。

#### 引用文献

Arai, R. et al. (2023) Nature Communications, 14, 5101.

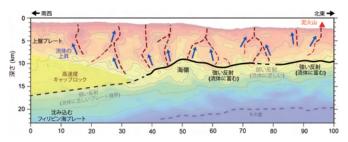


図2:波形インバージョン解析による上盤プレートおよびプレート境界周辺のP波速度構造と その解釈。



## 鉱物脈の幾何情報から間隙流体圧の時間変化を読み解く

#### 大坪 誠 (産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門)



スロー地震発生域における亀裂の発生、流体の移動、鉱物の析出のプロセスと流体圧の変化は、スロー地震発生の環境条件や時間スケールを理解するカギの一つと考えられています。ここでは、岩石の空隙を満たす流体や断層面付近に存在する流体の圧力を総じて間隙流体圧 ( $P_f$ ) とします。その間隙流体圧の状況に応じて、鉱物脈の姿勢や形態(アスペクト比)などが変化することが報告されています。鉱物脈は過去に岩石内の亀裂に流体が流れた痕跡です。ここでは、鉱物脈を扱って間隙流体圧を推定する試み(Otsubo et al., 2023)を紹介します。

スロー地震が発生する深さ10~30km程度のプレート境界周辺の環境を経験している付加体や変成岩帯はプレート境界周辺の陸上アナログであり、それらでは鉱物脈が普遍的に観察することができます。さらに、露頭では複数の鉱物脈を平行した形で観察することがあります。また、平行する鉱物脈群は鉱物脈同士の距離にバラツキがあったり、密になっていたりする場合があります(図1)。

今回取り扱った弾性体のモデルでは、平行する鉱物脈群の間隔は、亀裂中の間隙流体圧の過剰分の大きさ、ヤング率、および亀裂の開口幅に依存することが知られています(Otsubo et al., 2023)。これは、本が詰まっている本棚にもう一冊本を差し込むことに例えることができます。詰まった本が柔らかければ厚い本を容易に差し込むことができるし、詰まった本がある程度硬ければ、本は無理やり差し込まないと本棚にはなかなか入りません。鉱物脈が形成される際は、亀裂内に析出した鉱物脈の厚み分だけ母岩側が弾性的に短縮する必要があります(Price and Cosgrove, 1990)。そこで、今回の弾性体モデルでは、平行鉱物脈群の間隔D、亀裂中の間隙流体圧の過剰分 $\Delta P_f$ 、母岩のヤング率E、および鉱物脈の開口幅Wの関係を、

 $\Delta P_f = E(W/D)$  (式1)

と表すことができ、式1をDについての式に書き換えると、

#### $D = EW/\Delta P_f$ (式2)

となります。例えば、スロー地震の発生時の応力降下量(0.01~ 1.0 MPa程度)を踏まえて、平行に並んだ鉱物脈群の形成時の間隙流体圧の過剰分がスロー地震の発生時の応力降下量と同レベルの1 MPaの時と50 kPaの時のD を考えてみます。つまり、これは間隙流体圧が最小主応力 $\sigma_3$  よりも1 MPa大きい場合と50 kPa大きい場合の2つのケースです。母岩のヤング率を7.5 GPa、鉱物脈の幅を50 μmとします。式2 を用いて計算した結果、間隙流体圧の過剰分が1 MPaの時はD=0.3 m、間隙流体圧の過剰分が50 kPaの時

はD=7.5mとなります。このことは、間隙流体圧の余剰分が変化すると、鉱物脈の間隔が変化する、すなわち、水が通る亀裂の間隔(亀裂帯の幅)が変化することを意味します。このことは、鉱物脈がスロー地震と関係する場合、鉱物脈の間隔からスロー地震発生サイクル内での間隙流体圧の過剰分の時間変化を読み取れる可能性があり、その場合は間隙流体圧の過剰分( $\sigma_3$ より大きい分の水圧)がスロー地震のサイズ(剪断帯の幅など)を知る手がかりになると考えています(図2)。

#### 引用文献

Otsubo, M. et al. (2023) Water-Rock Interaction WRI-17, OC6-05. Price, N. J. & Cosgrove, J. W. (1990) Cambridge University Press, Cambridge, 502p.

Ujiie, K. et al. (2018) Geophysical Research Letters, 45, doi:10.10 29/2018GL078374.



図1: 露頭で認められる鉱物脈濃集帯の例。宮崎県延岡市直海東方の海岸。Ujiie et al. (2018) は、この露頭の石英脈濃集帯をスロー地震の痕跡の可能性として報告しています。この露頭では石英脈群の分布にパラツキが認められます。

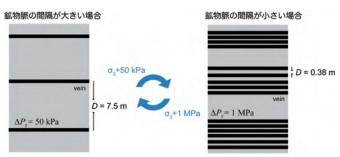


図2: 鉱物脈の間隔の大きさから読み解く間隙流体圧の変化の例。



## 火山噴火に先行する低速から高速への傾斜変動の系統的調査



#### 前田 裕太 (名古屋大学 大学院環境学研究科)

Slow-to-Fast地震学プロジェクト全体の主要な研究対象は地震ですが、A03(国際比較)班では他のslow to fastな自然現象の研究も推奨されており、その中には火山現象も含まれます。私は火山地震学の専門家として火山で観測されるシグナルの研究を行っており、スロー地震には直接関係しませんがslow to fastという視点で研究できます。

火山噴火にはしばしば傾斜変動が先行します(図)。多くの場合、低速の傾斜変動から始まって次第に高速な傾斜変動になります。 そして、更に高速で破壊的な現象である噴火に至ります。したがって噴火前傾斜変動はslow to fastな現象の一種と考えられます。先行研究で報告されている噴火前傾斜変動の多くは山体膨張の極性を示し、その発生には火山性流体(マグマ、火山ガス、地下水等)の浅部への上昇や揮発性成分の溶離・気化が何らかの形で関与すると考えられる場合が多いです。傾斜変動の有無、大きさ、時間スケール、時間変化パターンは火山や噴火によって様々です。個々の傾斜変動の研究は多数ありますが、それらの網羅的なリスト化や定量的比較は行われていません。

私は日本の全ての活火山における噴火前傾斜変動を網羅的に調べました(Maeda, 2023)。そのためには火山近傍の傾斜計または広帯域地震計の連続波形記録が公開されていることと正確な噴火日時が分かっていることが必要で、12火山の計7890回の噴火がこれらの条件を満たしました。噴火時刻を既知の値として与えて連続波形記録から噴火に先行する傾斜変動を自動的に同定する手法を開発し、同手法をこれら全ての噴火に適用しました。

その結果、多くの火山で約半数の噴火が先行する傾斜変動を伴うこと、この割合は噴火頻度によらないことが明らかとなりました。検知された傾斜変動は極性も、先行時間や継続時間も、振幅も、加速(slow-to-fast)か減速(fast-to-slow)かといった時間パターンもまちまちでした。加速型が最多であったものの減速型も少なからず見つかりました。爆発的噴火の方が非爆発的噴火よりも傾斜変動が先行する割合がやや高く、その差は僅かであるものの統計的に有意でした。このことから噴火タイプは傾斜変動の有無に影響する1つの要素である一方、他の様々な要素が傾斜変動の有無

に影響すると考えられます。

今後は噴火に先行する傾斜変動の系統的調査を海外の火山を対象に行う予定です。その利点としては噴火事例数を増やせること、いくつかの国では連続波形データを無制限に入手可能であることが挙げられます。そのような連続波形データを用いれば噴火を伴わない傾斜変動の研究も可能になります。海外の火山を対象にこの研究を進める上での難題は、ほとんどの国で正確な噴火日時の情報が固定書式のカタログとして用意されていないことです。そのため噴火日時の情報を効率的に収集する方策を見出すことが目下の課題です。

#### 引用文献

Maeda, Y. (2023) J. Volcanol. Geotherm. Res., 439, 107831.

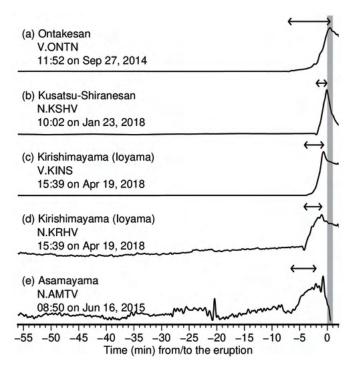


図: 噴火(灰色の縦線)に先行する傾斜変動の例(矢印)。 Maeda (2023)の図2。



## 南海トラフ沿いのフィリピン海プレートの沈み込み史に適用した 2次元粘弾塑性沈み込みモデル



Erika Jessenia Moreno (神戸大学) 末永 伸明 (京都大学) 吉岡 祥一 (神戸大学)

南海トラフに沿って沈み込むフィリピン海プレートは、15Maに沈み込みを開始しており、現在約26Ma~15Maの年代を示している若いプレートによって特徴づけられています(Tatsumi et al., 2020)。南海トラフ沿いのフィリピン海プレートの沈み込み史については諸説あります。例えば、その1つは、小さな沈み込み角と高い収束速度で沈み込みが始まる沈み込み史です(Tatsumi et al., 2020)。沈み込み角が小さいことは、新しく誕生した四国海盆に代表される、非常に若く、暖かく、浮力のある海洋プレートの沈み込みの開始によって説明可能です(Tatsumi et al., 2020)(図 1)。若いフィリピン海スラブの高温度場はスラブの急激な融解を引き起こし、その結果、14~12Maに西南日本において、瀬戸内火山弧と急激な深成岩の形成を引き起こしました(Tatsumi et al., 2020)。12Ma以降南西日本では火山活動が消失し、その後第四紀まで再び活動しました。

一方、Kimura et al. (2014)は、原始伊豆弧と伊豆-小笠原-マリアナ海溝が、中新世中期及びその後に移動したと提唱しました。この伊豆-小笠原-マリアナ弧の移動は、15Maの南海トラフに沿ったフィリピン海プレートの沈み込みの開始と連動して、大量の火成活動をもたらし、このことは紀伊半島にみられるような南海トラフ付近での深成岩の形成に関連している可能性があります。この沈み込み史では、フィリピン海プレートの沈み込みが12Ma~6Maに停止することによって、西南日本で火成活動が停止したことを説明しています (Kimura et al., 2014)。

これまで数値的手法を用いて西南日本におけるテクトニックな 進化過程に関する異なる仮説を評価した研究は行われていません でした。我々の最近の研究では、沈み込み過程の数値モデリング

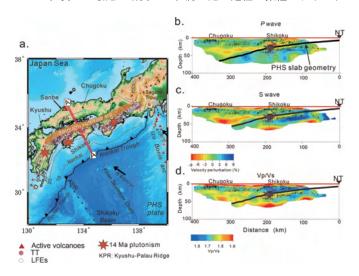


図 1: (a) 四国地方と中国地方を通る測線A-A 付近の研究対象地域。(b) P 波、(c) S 波の地震波速度異常、及び (d) Vp/Vs 比 (Matsubara et al., 2022)。フィリピン海スラブの上面の形状は黒い実線で示されています (Hirose et al., 2008)。(a)、(b)、(c)、(d) の黒点は地震の震源を表し、白点は深部低周波地震 (LFE) を表しています。これらのデータは2003 年~2019 年の気象庁一元化震源カタログによるものです。ピンク色の点は、http://www-solid.eps.su-tokyo.ac.jp/~slowe q/?page=mapのデータベースから取得した2011 年~2015 年のテクトニック微動 (TT) を表しています。

の専門家であるメキシコ国立自治大学のVlad Constantin Manea 博士とMarina Manea博士と協力して、粘弾塑性レオロジーを用いた2次元沈み込みモデルを南海トラフ沈み込み帯に初めて適用しました。このモデルでは、粘弾塑性条件により、スラブは、岩石のレオロジー、プレートの運動速度、プレートの年齢条件に応じて自由に進化することができます。本研究では、四国~中国地方を通る測線で、フィリピン海スラブの小さい沈み込み角を再現することを目的として、数値シミュレーションを実施しました (Hirose et al., 2008) (図 1)。

その結果、Tatsumi et al. (2020)によって提唱された15~3 Maでの速い収束速度の場合に、現在、四国および中国地方下で 見られているような小さい沈み込み角を再現することが可能であ ることが示されました(図2)。九州下で見られるような高角の沈 み込みは、沈み込み帯付近で火山弧の形成を引き起こします。し かし、四国~中国地方の火山活動は南海トラフから遠く離れた場 所で起こっています(図1a)。メキシコ横断火山帯があるメキシ コの沈み込み帯で見られるように(Manea et al., 2013)、この数 値モデルの結果から、15Ma~6Maの小さい沈み込み角が南海ト ラフ付近の火山活動の消失と西南日本の内陸側への移動を引き起 こしたという説を我々は提唱します(図2a)。我々の数値研究を 通して、収束速度とプレート年齢に対する若い海洋プレートの感 度を理解することで、これまで数値的に扱われていなかった南西 日本のテクトニックな進化過程を説明することができました。本 研究成果をとりまとめた論文は、2023年10月18日にScientific Reports に受理されました。

#### 引用文献

Tatsumi, Y. et al. (2020) Scientific Reports, 10:15005.

Kimura, G. et al. (2014) Tectonics, 33, 1219-1238.

Hirose, F. et al. (2008) J. Geophys. Res. Solid Earth, 113, B09315.

Matsubara, M. et al. (2022) Earth, Planets and Space, 74(1), 1-27.

Manea, V. C., Manea, M. & Ferrari, L. (2013) Tectonophys., 609, 56-81.

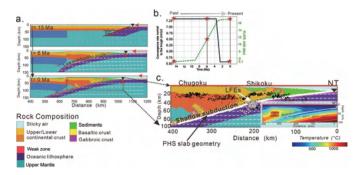


図 2:図 1(a)の 測線A-A'に沿った粘弾塑性レオロジーを用いた 2次元数値沈み込みモデル。
(a) 岩石組成を用いた 15 Ma、6 Ma、0 Maでの数値シミュレーション結果。 (b) Tatsumi et al. (2020)の仮説を用いた、図1(a)の測線A-A'のプレート運動速度(黒の実線)とプレート年齢(緑の破線)の時間変化。 (c) 最終時間ステップ (0 Ma) における岩石の組成と温度分布 (右下)。フィリピン海スラブの上面の形状は、前者と後者の図で、それぞれ白色と黒色の曲線で示されています (Hirose et al., 2008)。白色と黒色の点は、それぞれ深部低周波地震と地震の震源を表しています。



## 光ファイバセンシングで測る南海トラフ海底

#### 荒木 英一郎 (海洋研究開発機構 海域地震火山部門)



南海トラフでは、100-200年の周期で発生する巨大地震の 震源域の周囲でプレート境界が「ゆっくり滑り」を起こして いることが知られています。震源域の多くの地域は海底下に ありますが、震源域のさらに沖合の浅い沈み込みの側でも 「浅部ゆっくり滑り」が繰り返し発生していることが、 GNSS-A海底測地観測(1)や海底掘削孔内の観測(2)から確認 されています。また、浅部ゆっくり滑りと深く関係している と考えられる「超低周波地震」や「低周波微動」も海底ケー ブルを使った観測網(DONET)で観測・解析(3)がされるよう になっています。

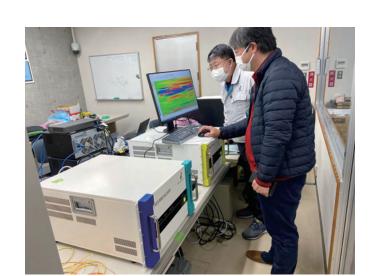
ゆっくり滑り等のプレート境界の断層滑りが、どのような 仕組みで始まり、拡がっていくのか、また、それが巨大地震 を起こしているプレート境界の「固着」とどのような関係が あるのか考えたいと思うのですが、浅部ゆっくり滑りは、現 状では「発生した」ことはわかるものの、その断層滑りがど の地域で進行しているのか?など、観測点の密度が発生する 滑りのスケールと比べてかなり粗いため、解析が困難です。 そのため、私はプレート境界の断層滑りの近傍で高密度かつ 高感度な地殻変動の観測をすることが必要だと考えていま す。

それには、断層の近傍に敷設された海底光ケーブルの伸縮 を「光ファイバセンシング」という新しい技術で計測するこ とが役立つのではないか?と考えました。

JAMSTECでは南海トラフ室戸沖に沖合120kmに渡って海底光ファイバケーブルを敷設しており、そこに今回開発したTW-COTDRという光ファイバセンシング技術を使った観測装置を接続、1年弱の期間連続観測を試みました(図1)。その結果、約80km沖合まで、1mおき、約20分おきに海底光ファイバケーブルの歪・温度の変動を観測することができ(図2)、実際に海底ケーブルで震源域沖合での高密度な観測が行えることが示されました。







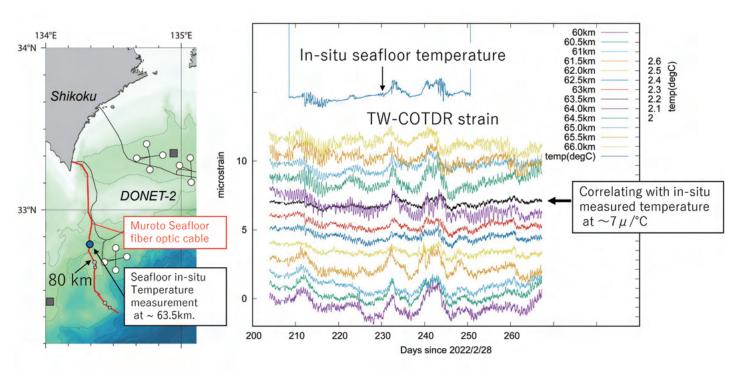


図2 :室戸沖海底光ファイバケーブルによるTW-COTDR光ファイバセンシング計測結果と海底水温を比較。

観測された光ファイバーの変動には、日変動や長期間の変動がみられ、日変動は小さいところでも歪に換算して1μ歪程度見られました。海底水温計を設置して比較したところ良く相関していることから、観測された変動の多くは海底の水温変動によるものと考えられ、ゆっくり滑りの断層滑りを捉えるためには、この海底水温変動の影響を観測データから除去することが課題となることが明確になりました。このため、光ファイバケーブルの仕組みを工夫し、温度・歪を分離して観測することや、温度変化の少ない掘削孔内での観測に取り組んでいます。

また、20分おきの観測は、地震や超低周波地震に伴う地殻変動を見るには時間幅が粗く、現在は、DASと呼ばれる地震

観測のために用いられる光ファイバセンシング技術も併用して観測に取り組んでいますが、一つの観測装置でゆっくり滑りから地震まで網羅した観測ができるよう、TW-COTDRをより高頻度に観測できる光ファイバセンシング技術の開発にも現在着手しています。

#### 引用文献

- 1)Yokota, Y. & Ishikawa, T. (2020) GNSS-A. Sci. Adv. 6, eaay5786.
- 2) Araki, E. et al. (2017) Science, 356, 1157-1160.
- 3) Yamamoto, Y. et al. (2022) Earth Planets Space 74:14.



## Slow地震、Fast地震の判別問題からAIが何を考えているのかを考察する

#### 中野 優 (海洋研究開発機構 海域地震火山部門)

近年の地震観測網の全国的な展開により地震観測点が増えたた め、震源決定等のために処理すべきデータの量は格段に増えてき ました。また観測機器の取り扱いが容易になり、多数の地震計を 用いた集中的な臨時観測も多く実施され、迅速に成果を出すため にも即自的に大量の地震波形データを処理する必要度が増してい ます。地震観測の最も基本的な処理である震源決定におけるP 波、S波初動到達時刻の読み取りや、火山における多様な火山性 地震の分類などはこれまで人間の目に頼ってきました。しかしデ ータ量の増大や地震観測の社会的重要性の高まりとともに、これ らの処理を自動的に行い、即時的に情報を得る必要性が増してき ました。その中でも機械学習(AI)を用いた手法は近年目覚まし い発展を見せています。AIはシグナルの特徴を自動的に学習し、 これまで人間にしかできなかった作業を精度よく実施してくれま すが、どのような特徴を学習し、どのような基準で判断を行って いるかを知るのは容易ではなく、その処理はブラックボックスで あるとよく言われます。

プレート境界で発生する低周波微動と通常の地震や、多様な火山性地震は波形の特徴によって区別されますが、最も基本的なのは卓越周波数です。従ってこれらの判別において、シグナルに含まれる周波数成分の時間変化を表したランニングスペクトルを入力とすれば、精度よく判別が出来ると考え、畳み込みニューラルネットワーク(CNN)による画像認識による判別手法を開発しました(Nakano et al. 2019)。この手法がうまく行くと、ランニングスペクトルを計算する手間を省き、地震波形を直接入力した場合に同様の精度でシグナルの判別が出来るかどうかに興味を持ちました。AIの研究では中間層の数などを変えて性能を評価し、最も良いものを選ぶことは普通に行われていますが、入力データのドメイン(ランニングスペクトルと時系列)を変えて比較した研究は見たことが無かったので、画像認識(2Dデータ)と時系列(1Dデータ)を入力とした場合の性能を比較しました。Slow地震、Fast地震として南海トラフで発生した低周波微動と通常の地

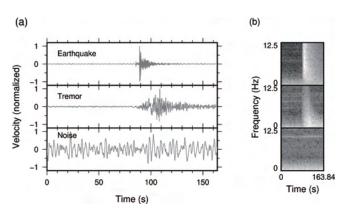


図1: (a)AIの学習に用いた波形、および (b) ランニングスペクトルの例(Nakano and Sugiyama, 2022)。

震、また桜島で発生した噴火に伴う(Slow)シグナルと火山構造性(Fast)地震に対し、それぞれのSlow地震、Fast地震にノイズを加えた三つのクラスのデータセットを作成してニューラルネットワークを学習させ、判別性能を評価しました(Fig.1)。その結果、両者はほぼ同等の判別性能であることが分かりました(Nakano and Sugiyama, 2022)。興味深いことに、誤判定したデータの約半数は、1D、2Dともに同じように間違える結果となりました(Slow地震→ノイズと誤判定など)。この結果はどちらのCNNもシグナルの同様の特徴を見ている事を示唆しています。つまり、波形を直接入力した場合も周波数成分の違いを見ている可能性があります。そこで、1D CNNについて詳しく調べてみました。

CNNの最大の特徴である畳み込み層はFIRフィルタと同じ式で表されます。という事は、1層目の畳み込み層は入力波形にフィルタを掛けているのと等価であると考えられます。そのフィルタ特性を見ると、1層目の畳み込み層は5~6Hzを境に通過特性が異なるフィルタとなっています(Fig.2)。入力シグナルの平均的な周波数特性を見ると、この周波数を境に大小関係が変化しています。つまり、この1D CNNは第一義的に低周波側と高周波側のパワーの違いを見てシグナルを判別していると考えられます。もちろん、判別処理は2層目以降に引き継がれ、他にも色々な特徴を見ていると考えられるため、話はそう単純ではありません。しかし、AIが第一義的に何を見ているかが分かれば、シグナルの特徴について理解が深まり、物理プロセスを調べる助けになるかもしれません。

#### 引用文献

Nakano, M. et al. (2019) Seism. Res. Lett., 90, 530–538. Nakano, M. & Sugiyama, D. (2022) Earth Planet. Space, 74:134.

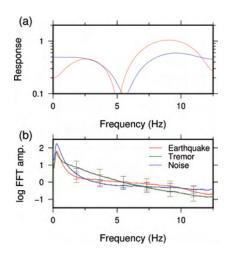


図2:(a) 畳み込み層1層目のコンボリューション層から計算したFIRフィルタ特性。(b) 入力 シグナルの平均スペクトル(Nakano and Sugiyama, 2022)。



## Slow-to-Fast地震現象の検知・解明に資するデータ解析技術開発

#### 矢野 恵佑 (統計数理研究所 数理・推論研究系)

私の専門は統計学です。SF地震学ではSlow-to-Fast地震現象の発見・解明に資するデータ解析技術の開発を目指しています。地震学とデータ科学の結びつきは古く、時空間ETASモデル・ベイズモデル・赤池情報量規準といった統計手法が今なお広く活用されていることはご存知のことと思います。しかし、計測技術の発展により、地震・測地データの時間的・空間的な粒度が年々細かくなっており、データの膨大さは深刻になる一方です。そのため、その膨大なデータの中からSlow-to-Fast地震現象を発見するには、これまでの解析技術に加えて新たな情報科学技術を活用してこれらの膨大なデータを余すところなく解析する必要があります。私はこれまでにグラフ分割を利用した畳み込みニューラルネットによる複数観測点での地震検知(Yano et al., 2021)や構造正則化を加えたトモグラフィー(Yamanaka et al., 2022)といった手法開発に関わってきました。

以下ではSF地震学が始まり私が関わった新情報科学技術を紹介します。まず、ゆっくり滑りの自動検知手法を開発しました(Yano and Kano, 2022)。ゆっくり滑りは衛星測位システムや傾斜計、歪み計を用いて観測可能ですが、通常は目に見える地殻変動を伴わないため、高精度の自動検出技術が必要です。私たちは「スパースモデリング」と「p-値の統合」を応用し、衛星測位データからゆっくり滑りを自動的に検出する方法を開発しました。我々のアプローチでは、スパースモデリングを利用して時系列データ内の急な変化点を検出し、複数の観測点で観測されるというゆっくり滑りの特徴に焦点を当てています。この新しい手法を四国西部の衛星測位データに適用した結果、過去2年間で未発見だった12件のゆっくり滑りを同定することに成功しました(図1)。

次に、私たちは深層学習を使った日本海溝における微動検知法を開発しました(Takahashi et al., 2021)。エンベロープ相関法と

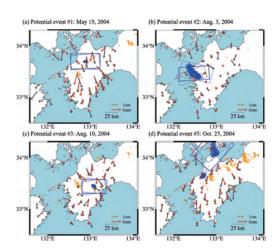


図1:新検知の逆解析結果。灰色の矢印は観測値、赤色の矢印は矩形一枚断層を仮定した場合の理論値、黄色の矢印はMCMC標本の平均によるすべりベクトルを表す。Yano and Kano (2022)より引用。

呼ばれる従来の微動検出法では、観測点間での波形の包絡線の類似性に基づいて検出を行いますが、この方法では微動だけでなく通常の地震も誤って検出してしまう問題がありました。私たちは、Nakano et al. (2019)により提案された深層学習による微動・地震・ノイズの判別器に着目し、日本海溝での通常地震・微動・ノイズ判別のための深層学習器を構築しました。

最後に、私たちの最新の研究成果として、地震カタログデータの整理・解析に資する変数間の依存関係分析ツールを開発しました (Sei and Yano, 2023)。地震カタログデータには、緯度・経度・深さといった連続的な数値や、震度のようなカテゴリカルな値、また、初動発震機構解のように相互に直交する二つの軸といった複雑なデータが含まれています。そのような混合ドメインの多変量データに対する依存関係を解析するための最小情報従属モデルを開発しました。図2は最小情報従属モデルを初動発震機構解と震源深さの解析に適用した結果です。最小情報従属モデルによって震源の深さの依存関係が強くなる軸方向とその推定の不確実性を定量的に評価することができます。

現在も地震学におけるさまざまなデータ解析手法を開発しています。データの解析にお困りの際にはぜひお声掛けください。

#### 参考文献

Nakano, M. et al. (2019) Seismol. Res. Lett., 90, 530–538. Yano, K. et al. (2021) J. Geophys. Res. Solid Earth, 126, e2020JB020269.

Takahashi, H. et al. (2021) Earth, Planets and Space, 73, 186. Yamanaka, Y. et al. (2022) Earth, Planets and Space, 74, 43. Yano, K. & Kano, M. (2022) J. Geophys. Res. Solid Earth, 127, 5, e2021JB023258.

Sei, T. & Yano, K. (2023) accepted at Bernoulli.

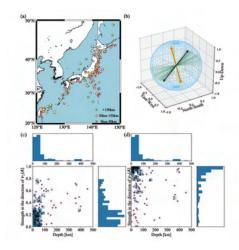


図2: 初動発震機構解と深さの関係。(a)観測(b)深さと最も関係があるP軸の向き(c,d)向きに射影した場合のヒストグラム。Sei and Yano (2023)より引用。



## スロー地震のスケール法則2023年改訂版

#### 井出 哲 (東京大学 大学院理学系研究科)



スロー地震は、強い地震波を出さないという点で、普通の地震とは明らかに違います。その違いの本質は何でしょうか?スロー地震とファスト(普通の)地震を区別して、それぞれの物理プロセスの特徴を明らかにするうえで、2007年に提案した、「スロー地震のスケール法則」は効果的でした。この法則が正しければ、スロー地震とは、地震モーメントが、継続時間と比例するように、1秒以下から1年以上まで継続し大きくなる現象だということになります。これはファスト地震の地震モーメントが継続時間の3乗に比例するという性質と大きく異なります。

この法則は発見以来、世界中の研究者によって議論されました。スロー地震とファスト地震の間をつなぐ現象を見逃しているのではないか?比例関係はある大きさで破綻するのでは?ある地域の活動についてはスロー地震もファスト地震と同じ関係を持つ、などいろいろな可能性が指摘されました。さらに、その可能性を考慮したモデルなども提案され、2020年代初めには、少々混沌の様相を帯びておりました。そこで、状況を整頓しようとして、スケール法則の再評価をしたのが、本研究(Ide & Beroza, 2023)です。

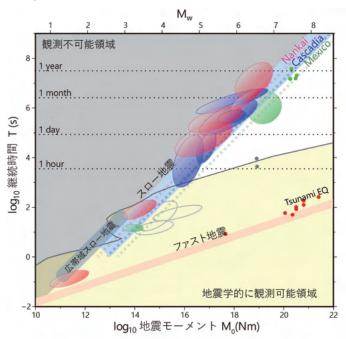


図:スロー地震のスケール法則2023年改訂版。地震モーメントと継続時間の関係。スロー地震については南海、カスケード、メキシコのカタログから、データ点の分布を楕円で近似したもの。ファスト(普通の)地震の関係と比較している。

まず、スロー地震とファスト地震の間の現象はすべて観測できるわけではありませんが、ファスト地震は地震学的な観測限界範囲内で、スロー地震と明瞭に区別できることを確認しました。比例関係がどこかで破綻するという議論は、不適切なデータの解釈によるものだということを、実例を用いて示すことができました。さらに研究によっては、データの処理手法に基本的な問題を含むものすらありました。

一方、この間の世界中の研究成果の蓄積によって、2007年には離散的なデータ点から示唆された法則は、M1からM7程度まで、ほぼ連続的なデータ点から支持されるようになっています(図)。この中には、近年提案されている、テクトニック微動の連続的な発生を一つのイベントとしてみなす仮説や、スロー地震は0.1-100 秒くらいの広帯域でシグナルを放出するという仮説も役立っています。

スロー地震とファスト地震のスケール法則の本質的な違いを理解することも重要です。ファスト地震の場合、ほぼすべての現象は地震学的な観測限界内で発生していますが、スロー地震は観測限界ぎりぎりの現象であり、観測できない現象が発生している可能性は非常に高いです。したがって、スロー地震のスケール法則は現象の最大規模(最高速度)を制約する法則と理解する必要があります。

地球内部では、様々な速度の変形現象が発生していることは間違いありません。そのうちの比較的高速な現象が、ぎりぎり観測限界を超え、あるスケール法則で規定される現象、スロー地震として認識されているようです。そうすると、このスケール法則にまったく従わず、桁違いの高速で進行する現象、ファスト(普通の)地震は、地球内部の変形現象としては「普通でない」ということになります。これまで地震の研究者は、地震を普通の現象だと考え、スロー地震を奇妙な現象だと考えてきましたが、その認識自体を良く検討してみる必要があるかもしれません。

#### 参考文献

Ide, S. & Beroza, G. C. (2023) PNAS, 120, e2222102120.



## 前震活動におけるb値の時間変化に関する物理的メカニズム



金子 善宏 (京都大学 大学院理学系研究科)

前震活動のメカニズムを理解することは、震源物理の基礎的な理解や地震の予測につながる重要な課題です。大地震発生前の地震活動の観測により、Gutenberg-Richter則の累積地震数とマグニチュードの関係における傾き、すなわちb値が、大地震の発生前に減少することが多数報告されています。例えば、2011年Mw9.0東北地方太平洋沖地震の震源域におけるb値が本震前に減少したことが示唆されています(Nanjo et al., 2012)。また、数オーダーで異なる時空間スケールからなる室内岩石摩擦実験において、同様の現象が報告されています(Yamashita et al., 2021)。しかし、b値の時間変化を物理的に解釈することは依然として困難です。そこで本研究では、比較的単純な断層摩擦不均質性を伴う動的地震サイクルシミュレーション(Kaneko et al., 2016; Lapusta et al., 2000)を用いてb値の時間変化の再現を試みるとともに、b値の時間変化の要因について検証しました。

まず本震開始前に活発化する前震がみられるような摩擦パラメータの範囲を特定し、その前震の時空間分布に注目すると、観測と定性的に類似した複雑に遷移する前震分布がみられました。モデル化された前震活動を統計的に解析しb値を求めたところ、本震前におけるb値の減少を再現できました(図1)。b値の顕著な減少は、本震の再来間隔の数パーセント未満の期間にわたって発生しており、微小亀裂の成長を促進する応力の増加によって引き起こされるという広く提唱されている現象(Scholz, 1968)とは異なりま

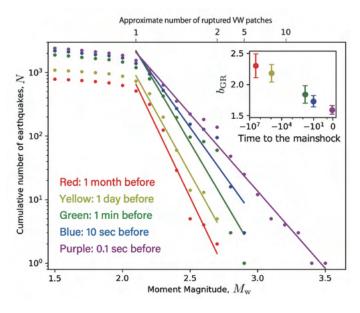


図1:数値モデルにおける前震活動のb値の時間変化。色は異なる時間窓。本震前におけるb値の減少を再現。

す。モデルでは、多数の前震に伴い断層上で局所的に余効すべりが起きています。この局所的な余効すべりの領域内におけるせん断応力が徐々に増えることで、固着域から発生し伝播してきた地震性破壊がその余効すべり領域を通過する確率を上昇させます(図 2)。そのため、前震の規模が確率的に大きくなり、b値が減少します。つまりb値の減少は、ゆっくりすべっている領域(スロー地震の領域)において、地震破壊のバリアとなる効果が減少することに起因しています(図 2)。余効すべりの領域内のせん断応力は前震活動や時間と共に増加しますが、断層全体におけるせん断応力の空間平均値は変化していません。

モデルの結果は、自然地震や室内岩石摩擦実験で観測されたb値の減少の特徴と整合的であります。また、なぜ発生直後は小さかった本震の破壊が大きくなるのかを説明することができます。この結果は、なぜ本震が前震より大きい地震となったのかという大地震を予測する上で重要な問題の鍵となります。さらに、モデルでのb値の変化は本震の時刻に近づくにつれて、より大きくなることを示唆しており、b値を詳細に観測することで将来の本震の時刻を予測できる可能性を示しています。

詳細はIto & Kaneko (2023)に掲載されています。

#### 引用文献

Ito & Kaneko (2023) J. Geophys. Res., 128, e2023JB027413. Kaneko, Y. et al. (2016) J. Geophys. Res. Solid Earth, 121(8), 6,071-6,091.

Lapusta, N. et al (2000) J. Geophys. Res., 105(B10), 23.765-23.789.

Nanjo, K. Z. et al. (2012) Geophys. Res. Lett., 39(20), L20304. Scholz, C. H. (1968) Bull. Seismol. Soc. Am., 58(1), 399-415. Yamashita. F. et al. (2021) Nat. Comms. 12, 4302.

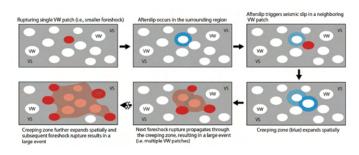


図2:本震前にb値が減少するメカニズムの模式図。赤は地震性すべり、青は余効すべりが起きている断層面上の領域。オレンジはすでに余効すべりや地震性すべりが起きた場所で、前震の破壊が伝播した領域。応力が溜まっている余効すべりの領域が大きくなることで、前震の破壊領域が大きくなる確率が高くなるため、b値が減少。

#### 沈み込み帯の岩石一流体反応の溶液依存性と水理学的応答

岡本 敦 (東北大学 大学院環境科学研究科)

プレートの沈み込み境界では、含水鉱物の分解により 大量の流体が発生し、間隙水圧や摩擦挙動を変化させ、 地震現象に大きな影響を与えます。そのような力学的な 側面に加えて、流体は多様な元素をイオンや錯体として 含む「溶液」であり、岩石と反応して、鉱物の溶解・析 出を引き起こします。近年、鉱物一溶液平衡解析が深部 条件においても可能となり、沈み込み帯に沿った溶液組 成(元素濃度、pHなど)の変化が明らかになりつつありま すが、岩石一流体反応が断層の水理学的・力学的特性や 地震発生過程に与える影響については、まだよくわかっ ていません。本研究では、スロー地震との関連が指摘さ れている高圧変成帯の特徴的な岩石一流体反応である交 代作用と石英脈形成に着目し、流通式水熱反応実験によ り、元素移動や固体体積変化を伴う反応進行の素過程と ミクロな構造形成、それによる水理学的特性の変化(空 隙率や浸透率)を調べています。その上で、沈み込み帯 に沿った鉱物一溶液平衡計算を軸に、高圧変成岩の天然 組織と低圧条件での水熱実験を結びつけて、沈み込み帯 の地震現象に対する流体の化学的性質が与える影響につ いて検討しています。

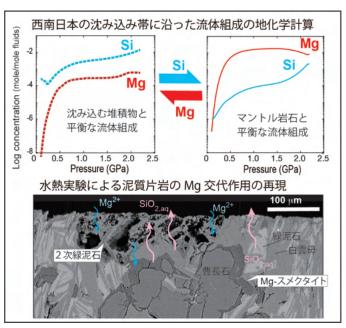


図:西南日本の沈み込み帯に沿って計算した堆積物とマントル岩石に平衡な流体組成(上)と水熱実験により再現した泥質片岩のMg交代作用の生成物(下)。

#### 公募研究A01

## 一次相転移としてのゆっくり地震と高速地震の遷移

鈴木 岳人(青山学院大学理工学部 物理科学科)

ゆっくり地震と高速地震という2つの地震は、見かけに は異なる地震ですが、やはり統一的に扱いたいと考えるの が理論的側面からの自然な発想です。加えて、ゆっくり地 震の繰り返しで高速地震に至ることはあるのか知見を与え ることは社会的側面からも重要でしょう。それはゆっくり 地震から高速地震への「遷移」と表現できると思われま す。更には、そもそも両地震が定性的に全く異なる地震で あると考えることもまた現象間での「遷移」と言えます。 この遷移をシンプルなバネ・ブロックモデルと熱・流体・ 空隙相互作用の下で解析したことを報告します。まず、一 回の地震の滑り量 $u_f$ のある関数 $F(u_f)$ を見出し、それは二重 井戸型の形となりかつ原点を通ることを示しました。また その極値はすべて $u_f>0$ の領域にあるため、極大値が正 (負)の時正の解が3つ(1つ)になります。詳細は省略 しますが、3つの時がゆっくり地震、1つの時が高速地震 に対応します。すなわち両者の違いは一次相転移的に考え られることが明らかになりました。とりわけ、そこでは滑 り開始時の断層面上での流体圧 $p_0$ と空隙率 $\phi_0$ が重要な役割を 果たしていることが特筆すべき結果です。ある近似の下で その相転移の境界を $p_0$ - $\phi_0$ 空間上に描くことにも成功しまし た。その近似も多くの場合で有効であると現在考えていま す。両地震の間の違いを定量的に示すことができたと言え る成果です。

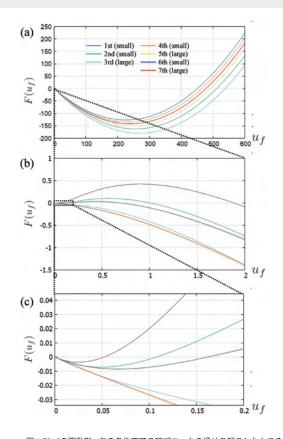


図: $F(u_f)$ の関数形。ある条件下で7回ブロックの滑りを起こしたところ、1,2,4,6回目がゆっくり地震、3,5,7回目が高速地震となりましたが、その際の $p_0$ と $\phi_0$ の値を用いて描いた $F(u_f)$ です。(a)及びその拡大図(b),(c)を見て分かるように、ゆっくり地震では極大値が正、高速地震ではそれが負です。なお、4回目と6回目の曲線が殆ど重なっています。

#### 地化学機械学習から探るSlow-to-Fast地震発生帯のシリカ輸送量

宇野 正起 (東北大学)

Slow地震やFast地震の再来周期には、岩石中の亀裂へのシリカ(SiO<sub>2</sub>)の沈殿が深く関与していると考えられています。これは、シリカが岩石中の水の主な溶存種であるためですが、プレート境界の深度に伴いどのようにシリカ輸送量が変化するかは分かっていません。

本研究では、近年発達してきた堆積岩の地球化学データベースと機械学習、そして変成堆積岩の化学分析を組み合わせることで、Slow-to-Fast地震発生帯におけるシリカ輸送量の解明を目指しています。シリカ輸送量を求めるためには、「現在の岩石」と変質前の「元の岩石」の化学組成を比較する必要がありますが、「元の岩石」は原理的に手に入らないため、その比較は難しいのが現状でした。本研究では、Ti, Th, Zr, Nbなどの水への溶解度の低い元素群が、「元の岩石」の情報を保持していることを利用して、「現在の岩石」の化学組成のみから、「元の岩石」のシリカ濃度を評価できる原岩組成復元モデルの開発に成功しています。

実際に、Slow-to-Fast地震発生域に相当する四万十帯や三波川帯の泥質変成岩を解析してみると、地質帯によって大きくシリカ輸送量が異なることが明らかになってきました。泥質変成岩の化学組成のコンパイルから全球的なシリカ輸送量を明らかにするとともに、四万十帯や三波川変成帯などのフィールド調査からシリカ輸送の素過程の解析を進めています。

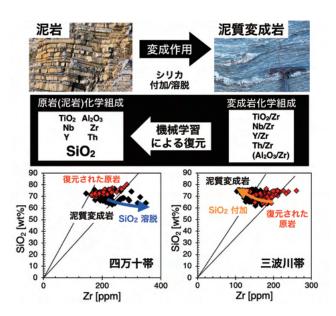


図:地化学機械学習によるシリカ輸送量の推定。(上)原岩組成復元モデルのコンセプト。変成作用で輸送されない不動元素(TiOz, Zr, Nb, Y, Th)の濃度比から,原岩のSiOz濃度を求める。(中)四万十帯の泥質変成岩への適用例。泥質変成岩は復元された原岩に比べてSiOzに乏しく、変成作用に伴うシリカの溶脱を示す。(下)三波川帯の泥質変成岩への適用例。変成作用に伴うシリカの付加を示す。

#### 公募研究A02

#### 断層内流体流動を決定づける岩石物性値の室内計測

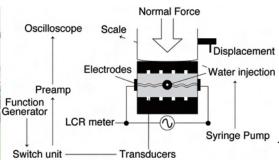
澤山 和貴 (京都大学 大学院理学研究科)

地下の水がスロー地震発生に深く関与している可能性が指摘されていますが、実際に地下の水の流れ場を可視化することはできません。水の流れは地下構造に強く制約されるため、地震波速度や電気比抵抗等の構造探査から間接的に推定する手段が有効です。ところが断層を含むような複雑な地下構造では、地震波速度や電気比抵抗が水の流れやすさ(透水性)とどのように関係しているか未解明でした。本研究では、透水性と地震波速度・電気比抵抗との関係を結ぶ法則の解明を目指し、様々な応力を加えた断層試料に水を流しながらこれらを同時に計測する実験システムを開発しました(図)。断層試料は3Dプリンタで作成し、現実の露頭断層の粗さ特性・スケール則を

考慮して数値的に造成しています。

これまでのところ、断層に加える応力を上げていくと水の流れが局在化していくこと、そのタイミングで電気比抵抗の変化の様式も変わることが明らかとなりました。32点のセンサーを配置したミニチュア地震探査からは、地震波速度が局所的な断層の接触面積とよく相関しているという結果を得ました。これらの物性値から推定される構造(局所的な流れ・断層接触部)では水圧上昇が予想されるため、微動の発生と関連しているかもしれません。この仮説を検証するために、天然規模の断層(1辺1km)をコンピュータ上でシミュレートし、微動の発生様式との関係について今後明らかにしていく予定です。





■図:断層物性同時測定システム。右側の概略図は 左側の写真中の並び通りとしている。

#### 沈み込み帯流体と深部低周波微動

川本 竜彦 (静岡大学 理学部)

私は、偶然手にしたピナツボ火山のマントル捕獲岩の中に 塩水の流体包有物を発見し、沈み込み帯流体は海水に似た塩 水で二酸化炭素を含むと提案しています。海水が地球深部ま で沈み込んでいることも思いがけない発見ですが、地球化学 的には塩水であることによって炭酸塩鉱物の水への溶解度 を高めることが重要です。図は、複数地域の沈み込み帯流体 の塩濃度を集めたもので、3.5%のNaClを含む海水よりも少 ししょっぱいようです。この塩水が1000℃のマントルに加 わると、マントルを部分融解させてマグマを作ります。それ よりも低い温度、600℃では、マグマを作らずに上昇し有馬 や宝塚の温泉の源になります。さらに低温では、マントルに 加わってマントルを水和・炭酸塩化します。この時に滑石と 炭酸塩ができ、それらの性質の違いが深部低周波微動を起こ すと想像します。深部低周波微動発生領域と温度圧力条件が 似ているというのが根拠ですが、今後、混合物の変形挙動を 知ることが必要です。沈み込み帯流体が塩水であるため、マ ントルを水和・炭酸塩化することによって、深部低周波微動 を起こすと想像しています。

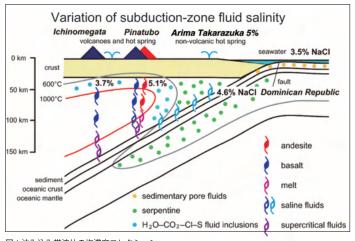


図:沈み込み帯流体の塩濃度コレクション。

#### 公募研究A02

#### 野外調査による地震発生帯の内部構造と形成様式の解明

志村 侑亮 (産業技術総合研究所 地質調査総合センター)

プレート沈み込み型の地震発生帯では、SlowからFastまでの多岐にわたるすべりが観測されており、Slowすべり領域からFastすべり領域までの全体を網羅した総合的・包括的な現象理解が重要です。一方で、現時点での海洋掘削可能深度は海底下わずか数kmであり、すべりをもたらす物質を地震発生帯の深度方向へ連続的に採取することは難しいといえます。

日本列島には、白亜紀当時の地震発生帯における浅部物 質である付加体と深部物質である高圧変成岩類が広く陸上 に露出しており、現在の地震発生帯で生じるすべり現象の 陸域アナログとして重要な役割を担っています。本研究で は、白亜紀の浅部付加体(推定深度5~15km)・深部付加 体(推定深度15~20km)・高圧変成岩類(推定深度20~ 35km) が広域的かつ連続的に露出している紀伊半島に着目 し、野外調査に立脚した研究を実施しています。これによ り、①地震発生帯におけるすべり形態が深度に応じてどの ように変化するのか?②すべりをもたらす物質は何なの か?③内部構造はどのように広がっているのか?この3点を 明らかにすることを目的としています。この研究は野外調 査に基づいて数十kmスケールの広域地質図を作成するた め、本研究のみで完結せず、紀伊半島における研究開発プ ラットフォームの構築とともにSlow-to-Fast地震学の更な る研究推進へ貢献できると考えています。

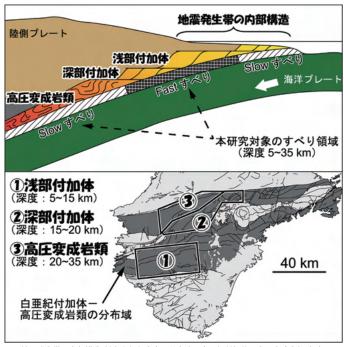


図:地震発生帯の内部構造(上)と紀伊半島に分布する白亜紀付加体ー高圧変成岩類(下)。

#### 高空間分解能歪速度分布によるプレート衝突帯周辺の地殻変動検出

道家 涼介 (弘前大学 大学院理工学研究科(元:神奈川県温泉地学研究所))

プレート衝突帯は巨大地震の発生場であり、そのテクトニクスの理解および発生する地震の具体像を明らかにすることは重要な課題です。その為には、同地帯で定常的もしくは非定常的に進行する地殻変動の理解が不可欠です。しかしながら、プレート衝突帯は非常に複雑な変形の場にあり、既存のGNSS観測網の観測点間隔では、その詳細を把握するのには不十分です。そこで、本研究では、高密度なGNSS観測網によるデータに、干渉SAR時系列解析による高空間解像度の変位速度分布のデータを統合することにより、プレート衝突帯における定常・非定常地殻変動を高い時空間分解能で捉えることを目指しています。

研究対象地域である伊豆衝突帯は、フィリピン海プレートに乗った伊豆半島が本州に衝突する最前線に位置しており、複雑な現象が起きている地域です。また、この地域において、時折、非定常的な地殻変動が発生することにも注目しています。本研究では、同地域に独自に設置しているGNSS観測点に加え、さらに近年整備が進んでいる民間企業によるGNSS観測網のデータを活用し、これらと干渉SAR時系列解析の結果を統合することにより、この地域における歪速度を高空間分解能で推定することを目指しています。

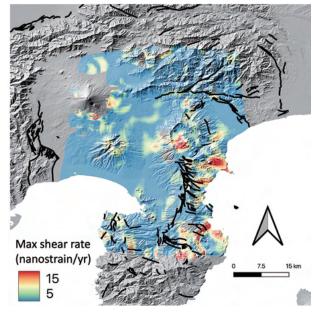


図:GNSSおよび干渉SAR時系列解析結果から推定した最大剪断歪速度分布(暫定的 な解析結果)。

#### 公募研究B01

#### スロースリップ時空間遷移の実態把握の高精度化に向けた開発研究

町田 祐弥 (海洋研究開発機構 海域地震火山部門)

南海トラフ地震発生帯周辺におけるスロースリップイベントは、これまで陸域のボアホール歪計においても実態把握が進められ、その安定した設置環境や計測手法の確立により深部スロースリップだけではなく、浅部スロースリップを捉えることにも成功しています。しかしながらボアホールによる計測は高精度な計測が必要であるために、センサー極近傍における岩盤でのカップリング用のセメントの膨張やひび割れ、観測点周辺の帯水中の水の影響を強く受けやすい問題点があり、ボアホール周辺の環境変動の把握を同時に行うことで、より高精度な計測が可能となると考えられていました。

そこで本研究ではボアホール観測点にて分布型光ファイバ 歪計の設置・計測を行うことで環境変動の把握を行い、ボアホール歪計による歪計測技術を合わせることでスロースリップを捉える観測帯域での計測精度高度化を図ることを提案します。分布型光ファイバ歪計による計測は、ボアホール内全長における任意の点の歪変化を捉えることができ、これにより降雨や気圧変化による微小な温度や地下水流動の変化等のローカルな環境変動のモニタリングを行うことが可能となることが期待されます。さらにはボアホール歪計と分布型光ファイバ歪計の比較観測に関する実証的な技術開発検討を通して、将来的な分布型光ファイバ歪計による歪計測の大きな一歩として進めていきたいと考えています。

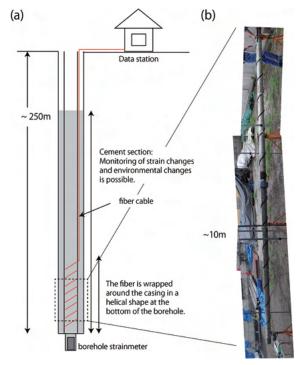


図:a) 分布型光ファイバ歪計の設置模式図。(b) 孔底部の光ファイバケーブル巻き付け区間の確認試験。

#### 公募研究B02

#### スロー地震活動を予測する

西川 友章 (京都大学 防災研究所)

スロー地震は、ファスト地震(いわゆる普通の地震)の発生メカニズムに深く関係しています。例えば、スロー地震は、ときに巨大地震や群発的なファスト地震活動を誘発することが知られています。また、地震発生シミュレーション研究では、巨大地震発生前にスロー地震の活動が変化する可能性が指摘されています。以上の知見を踏まえると、スロー地震活動の理解と予測は、ファスト地震の発生予測の精度を向上させる上で不可欠です。しかし、現在、スロー地震活動をうまく記述する標準的なモデルは存在しません。そのため、現在の地震学では、将来のスロー地震活動を予測することは困難です。

そこで、本研究は、スロー地震活動をうまく記述・予測する新たなモデルの構築に取り組んでいます。具体的には、南海トラフ沈み込み帯における低周波地震活動をうまく説明する統計モデルの開発を進めています。その研究の過程で、低周波地震活動の余震(後続する低周波地震)発生頻度の時間変化をうまく記述する新たな経験

式を得ることができました。これは、ファスト地震の余 震の大森・宇津公式に対応する経験式です。今後、この 新たな経験式に基づいて、モデルのさらなる改良を進め ていきます。

#### 低周波地震の余震発生頻度の時間変化 h(t) の経験式:

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$$

$$f(t) = \frac{\phi_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1 t} \exp\left\{-\frac{(\log(t) - \log(\mu_1))^2}{2{\sigma_1}^2}\right\} + \frac{\phi_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2 t} \exp\left\{-\frac{(\log(t) - \log(\mu_2))^2}{2{\sigma_2}^2}\right\}$$

$$F(t) = \int_0^t f(t') \, dt'$$

 $\mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2, \phi_1, \phi_2$ はパラメータ。

#### ファスト地震の余震発生頻度の時間変化 h(t)の経験式:

大森・宇津公式

 $h(t) \propto \frac{1}{(t+c)^p}$ 

c,p はパラメータ。

図:低周波地震(上)とファスト地震(下)の余震発生頻度の時間変化の経験式。



同じ応力場で形成されたと解釈される、共切断関係を示す鉱物脈と共役断層。高知県室戸岬。(撮影:山口飛鳥)

A03班 協力者

A03班 協力者

B02班協力者

B03班協力者

#### NL vol. 2発行後に加わっていただいたメンバーをご紹介いたします。

A01·A02班 協力者

A02班協力者

A03·B01班 協力者

A03班 協力者

B02班協力者



奥田 花也

海洋研究開発機構高知コア研究所・研究員

専門:実験岩石力学

キーワード:摩擦、付加体、断層



A02班協力者 ミンダリョワ ディアナ

東北大学大学院環境科学研究科・助教

専門:岩石学、地質学

キーワード:短い流体浸透タイムスケール、

地球化学モデリング



細野 日向子

産業技術総合研究所地質調査総合センター・ 研究員

専門:構造地質、岩石力学

キーワード:流体移動、実験、フィールド



#### 佐脇 泰典

産業技術総合研究所地質調査総合センター・ ポスドク

専門:地震学

キーワード:断層面形状推定、クラスタリング、 地殻構造、レシーバ関数、海底地震観測



井上 智裕

東京大学生産技術研究所・ポスドク

専門:測地学

キーワード:海底地殻変動、スロースリップ



末永 伸明

京都大学防災研究所附属地震災害研究センター・ ポスドク

専門:固体地球物理学

キーワード:沈み込み帯、熱対流モデリング、

プレート間地震



Erika Jessenia Moreno 神戸大学 都市安全研究センター・助手

専門:ジオダイナミクス

キーワード:沈み込み、数値モデリング、 · フィリピン海プレート、沈み込み史



山谷 里奈

防災科学技術研究所・特別研究員

専門:海域地震学

キーワード:地震波形解析、震源メカニズム、

地震波速度構造



上田 拓

京都大学防災研究所・特定研究員(学振 PD)

専門:統計地震学

キーワード:地震活動、地殻変動、ETAS モデル



佐藤 大祐

海洋研究開発機構海域地震火山部門・研究員

専門:震源物理、地震学

キーワード:破壊シミュレーション、断層摩擦、

ベイズ推定





渡辺 哲史

小堀鐸二研究所地震地盤研究部・副部長

専門:地震工学

キーワード:地震動評価、地震波伝播解析



#### 国際合同研究集会@東京

#### 東京大学 大学院理学系研究科 井出 哲

今年も国際合同研究集会、International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2023が、9月13日から15日まで東京大学伊藤国際ホールにて開催されました。集会は昨年に引き続きハイブリッドでの口頭セッションと現地でのポスターセッションという構成で実施しました。現地参加者158名、オンライン参加者71名と、盛大な集会になりました。台湾、米国、フランス、イタリア他、海外からも多数の参加者がありました。今年の集会では特に3つのトピック「Slow-to-Fast Earthquakes around Metropolitan Areas」「Connecting Geophysical and Geological Timescales of Slow and Fast Earthquakes」「Comparative Convergentlogy on Slow-to-Fast Earthquake Science」を取り上げました。上記トピック関連の6件の基調講演を含む36件の口頭発表、79件のポスター発表が行われ、様々な議論で盛り上がりました。2日目のブレークアウトセッションでは、小グループで研究の方向性や、若手育成、国際協力などについて活発な討論が行われました。3日目の大学院生主催のキャンパスツアーも好評だったようです。ワークショップ前日12日には若手集会に約50名の参加者があり、また翌日16日の房総半島への巡検では房総半島南部に分布する海成段丘の巡検を行いました。

## 東京集会後巡検:過去の関東地震を記録する房総半島南部の段丘地形

東京大学 大気海洋研究所 山口 飛鳥

東京集会翌日の9月16日に、小森純希さん(シンガポール・南洋理工大学)・安藤亮輔さん(東京大学)のご案内で、房総半島南部に分布する海成段丘の巡検を行いました。参加者は37名で、大型バス1台で移動しました。館山市見物の海岸では、元禄と大正の2つの関東地震による隆起が実際の地形として観察されました。野島崎での昼食の後に訪れた南房総市白浜では、隆起量が房総半島の東西で変化することが説明されました。最後に訪れた南房総市千倉では、3段の段丘崖を歩くことにより、さらに古い時代の地震による隆起の記録も段丘に記録されていることがよく理解できました。また、段丘面に露出する地層の中に見られる海底地すべり堆積物やタービダイト層についても、堆積学的観点から議論が交わされました。連休初日ということで懸念されていた渋滞もなく、暑さの厳しい日でしたが、リラックスした雰囲気の中、測地・地形・地質など学際的な議論が盛り上がりました。



見物海岸での集合写真。2段目は1923年大正関東地震、3段目は1703年元禄関東地震で離水した段丘面。

#### SF地震学国際合同研究集会に参加して

京都大学 理学部4年 福嶋 陸斗

本集会では海外からの参加者を含む数多くの研究者の研究発表を拝聴し議論することができ、大変充実した時間を過ごすことができました。私は物理深層学習を用いた物理と観測の融合による摩擦特性推定手法について口頭発表しました。発表後に、岩石実験・地震モデリング・インバージョン等様々な背景を持つ方からフィードバックを頂くことができ、多様な視点からの議論は今後の研究の発展の方向性を考える上での大きな収穫となりました。研究発表では、普段は地球物理的な研究を聞く機会が多いのですが、本ワークショップでは地質学的アプローチの研究を多く聞けたのが魅力だと感じています。スロー地震のメカニズム解明には地震学・地質学両方のアプローチが重要だということを改めて感じ、地質学の研究にもアンテナを張って勉強を続ける必要があるなと痛感しました。

前日に開催されました若手イベントにも参加しましたが、比較的年齢の近い人達とわからないことを気軽に質問できる空気間の中で様々な分野の研究について議論でき、大変有意義な時間でした。Workshop後に開催された巡検は普段室内で研究をしている私には大変新鮮であり、実際に沈み込み帯の現象をこの目で見る



ポスターを前にしての議論

ことができたのはとても貴重な経験となりました。これらの経験 を糧に、これからも日々の研究活動に精進しようと思います。

#### 東京国際研究集会レポート

Marum, University of Bremen Matt Ikari

9月13日から15日にかけて、東京大学の伊藤ホールで「Slow-to-Fast地震学国際合同研究集会」が開催されました。伊藤ホールは、セレモニーにふさわしい、天井の高い印象的なデザインの建物で、完璧な会場でした。学生や若手研究者を中心に約150人の参加者があり、中には著名な一流の研究者も参加していました。集会は非常にうまく構成されており、招待講演者の基調講演には長い時間がとられました。ポスター発表の時間も十分に確保され、ポスター会場には多くの人が集まり、研究の質も高いものでした。テーマ的には、観測



ブレークアウトセッションでの議論

地球物理学、数値シミュレーション、実験 研究がうまくミックスされていましたが、 地震学と測地学の膨大な観測成果は印象的 で、現在のSlow-to-Fast地震学を牽引して いるとの印象を受けました。機械学習、 Slow-to-Fast地震の社会的側面、地震予知 の現状、Slow-to-Fast地震科学における現 在の知識のギャップなど、その他のトピッ クについて議論するためのブレークアウト セッションはとても良いものであり、この ような試みは、今後のワークショップに向 けても有益であると私は確信しています。 この分野のリーダーたちによる最先端の科 学と、若手研究者たちによる新展開が融合 した素晴らしい会議であり、会議中のすべ ての会話が楽しいものでした。

(訳:山口飛鳥)

## >

#### 押しかけワークショップ in 台湾

#### 台湾押しかけワークショップの開催

京都大学 防災研究所 伊藤 喜宏

2023年3月13日と14日に台湾南部の台南市の国立成功大学において、押しかけワークショップ、"Slow-to-Fast Earthquake Workshop in Taiwan"が開催されました。最初の二日間で口頭発表、ポスター発表、および共同研究のためのブレークアウトセッションが開催されたあと、15日から最長17日まで高雄の泥火山、台東のクリープ断層及び花蓮のMilun fault Drilling and All-inclusive Sensing project (MiDAS)の観測設備をめぐる巡検が行われました。日本からの参加者39名を含む127名の参加者がありました。また、2月下旬には本ワークショップに先行して、B01班の研究者3名が、新技術に関する日台の二国間交流の枠組みを利用し、成功大学、陽明交通大学、Academia Sinica地球科学研究所の3か所で講演会も行っています。これらの交流を通じて日本と台湾両国の研究者・学生が、各領域で行っている最新の研究や技術開発について紹介しつつ、交流を深めました。

今回のワークショップの様子を台湾のテレビ局が報道していま

す。以下URLからYouTubeでご覧になれます。 https://www.youtube.com/watch?v=byIcAu\_XcN8 また、集会のHPは以下の通りです。 https://youb1707.wixsite.com/2023-sf-eq-tw



国立成功大学の国際会議室がある建物前での集合写真

#### 押しかけワークショップ in Taiwan参加報告

3月13日から14日にかけて「Slow-to-Fast Earthquake Workshop in Taiwan」が台南市の国立成功大学で開催されました。COVID-19のパンデミックから回復してひさしぶりの外国出張となった方が多く見受けられたように思います。本ワークショップでは、大きく「Ryukyu subduction zone」「Creeping fault」「Emerging technology」の3トピックが設



地震発生に伴う活構造(巡検)

#### 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 志村 侑亮

けられ、様々な研究バックグラウンドを持つ研究者や学生が口頭発表やポスター発表を通じて多くの議論を交わしました。特に印象に残っているのは、14日午後に行われた日本と台湾の国際共同研究連携に関する議論です。日本と台湾では、それぞれ異なる地震発生帯の特徴を持っています(日本はプレート沈み込み型、台湾はプレート衝突型)。この特徴差が地震発生プロセスにどのような違いをもたらすのか、それがどのように地質学的痕跡として残されるのかについて多くの議論が行われました。

15日から17日にかけては、台湾の地質や活構造の観察と地震観測機器の見学が含まれた巡検が行われました。日本の地質を研究してきた私にとって、台湾の地質・山脈形成プロセス、そして地震との関連性に関するこれまでの研究成果は感銘を受けるものでした。一方で、未解明な点も残されていることを知ることができ、私自身の今後の研究方針を模索する上でもよい機会となりました。

## 7

#### コルシカ島サマースクール

#### なんで、私がコルシカに!?

京都大学 大学院理学研究科 西沢 貴志

「この分野の最高峰を見ておいで」そう言って本支援を紹介してくれたのは防災研の西川友章先生でした。詳しく話を伺うと博士の時にこのサマースクールに参加したらしく、国際的に活躍する研究者を見て大変感心したとのこと。そこまで言うならと人生初めての海外遠征に踏み切ったのが事の始まりでした。

コルシカの気候は地中海性であり、10月とはいえ体感30度ほどありました。幸い天候に恵まれ、沈み込みによって形成された岩石の露頭や剪断帯(写真)を2日間かけて巡検することができました。特にデュープレックス構造が地表に隆起するメカニズムは私の研究テーマ(島弧の地形形成)とも接する点があり、面白い内容でした。続くサマースクール(Cargèse 2023 School on Subduction Zone Processes)では、沈み込み帯をテーマに100人近い研究者がプレゼンを行いました。2日目には私も口頭発表を行い、拙い英語ではあったものの海外のPh.D.や大先生と議論を交わすことが出来ました。また、高知コア研の奥田さんを始め、海外で活躍する日本人の研究に対する姿勢や情熱は本当に印象的であり、西川先生の言葉が身に染み

て理解できました。この体験は一生忘れないと思います。

最後に、サマースクールへの旅費をご支援いただき誠にありがとうございました。普段関わることのない、実験やフィールドの研究者が沈み込み帯の地形形成をどのように考えているか知れたことは大きな収穫でした。今回の遠征を生かしてこれからも研究に励みたいと思います。



Lancône valleyで見る付加堆積物

#### 7

#### ミニ押しかけワークショップ

#### イタリア・ピサ大学でのミニ押しかけワークショップ

筑波大学 生命環境系 地球進化科学専攻 氏家 恒太郎

ミニ押しかけワークショップを2023年10月18日にイタリア・ピサ大学で開催しました。日本側からはA03班研究代表者の伊藤喜宏さん、A03班研究分担者の私(氏家)、A02班研究協力者の川本竜彦さんとその学生(大澤陽介さん)の4



イタリア・ピサ大学でのミニ押しかけワークショップの様子

名が参加し、イタリア側からは構造地質学、地震学を専門とする教員、学部・大学院生計6名が参加しました。日本側からは沈み込み帯におけるスロー地震に関する地質学的・地震学的・地球化学的研究成果、イタリア側からは大陸衝突帯のテクトニクスと流体移動、誘発地震とイタリアの地震観測に関する話題提供がありました。各人の発表持ち時間が十分確保されていたこともあり、活発な議論を存分に行うことができました。ミニ押しかけワークショップを開催したことにより、日本とイタリア間での地質学、地震学をベースとする共同研究が2件立ち上がり、今後互いに密接に関わりながら研究を推進していくことになりました。ミニ押しかけワークショップ開催に多大なるご協力を頂いたFrancesca Meneghiniさんをはじめ、皆様に感謝申し上げます。

#### 若手研究者海外派遣

#### 若手研究者海外派遣報告(シンガポール南洋理工大学)

山口大学 国際総合科学部 浜橋 真理

2023年2月10日~24日の約2週間、シンガポール南洋理工 大学・Earth Observatory of Singaporeでの滞在研究を行う機 会を頂きました。今回の訪問の目的は、1)国際深海科学掘削計 画(IODP)第362次航海で掘削されたスンダ海溝・北部スマト ラ島沖合の沈み込み堆積物の広域分布と前縁付加体の地質構 造との対比を行うこと、2)沈み込み帯に関する教材作成に使 用する3D visualizationのプラットフォームの開発を行うこと でした。これらの研究において、Shengji Wei博士、Aron Meltzner博士、Lujia Feng博士、Lauriane Chardot博士、 Victoria Khoo氏らとスンダ海溝における地震分布や地質構造 の特性について、Sumatran GPS Array観測網、スマトラ島北 部の地震観測網、前弧島の地質図、マイクロアトールを用いた 古地震履歴解析の知見などに基づいて議論を行い、南海トラフ や日本海溝との比較検討を行いました。また、Lauriane Chardot博士とVictoria Khoo氏との共同研究では、3Dツール による地質構造データの効果的な可視化や教材ツールの作成 に取り組みました。今回の滞在研究では、新たな共同研究を立

ち上げることができ、科研費申請や論文の執筆の下地を作ることができました。海外渡航を支援してくださったSF地震学関係者の皆様、事務局の皆様には、深く御礼を申し上げます。

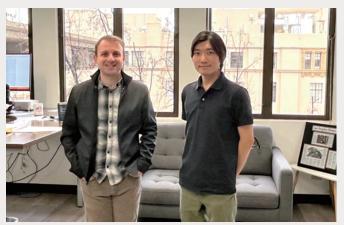


Shengji Wei研究室でのゼミの様子(筆者:前方左端)

#### カリフォルニア工科大学地震研究所で得たもの

# 東京工業大学 理学院地球惑星科学系 柴田 律也

2022年10月から2023年2月にかけて、カリフォルニア工科大学地震研究所(以後Caltech地震研)に滞在し、Weiqiang Zhu博士およびZachary E. Ross博士と共同研究を行いました。この派遣では、「どのような過程を経て本震に至るのか?」を表現する様々なモデルの妥当性を検証するために、機械学習手法を



Zachary E. Ross博士(左)と私

適用して前震の検出と前震活動の地震活動解析を行う新たな研究プロジェクトを立ち上げました。現地では、Zhu博士の開発した地震波ピック手法であるPhaseNetを適用して、前震を検出しました。この手法を適用するにあたってはZhu博士に多大なご助力をいただきました。Ross博士とは全体的な方針を話し合い、検出した前震系列を評価する方法に関してアドバイスをいただきました。この課題は現在も継続的に取り組んでいます。

この派遣では、Caltech地震研やカリフォルニア州内の他大学の研究者との研究議論を通じて、地震学の最新技術・研究に関する造詣を深めることができました。今回得られた貴重な体験は今後の研究へのモチベーションになり、どのような研究者を目指すかという点においても重要なファクターになるのではないかと感じています。今回の海外渡航において支援してくださったSF地震学関係者の皆様、そして勝手がわからず色々とご迷惑をおかけした事務局の皆様には深く御礼申し上げます。

#### 若手・ダイバーシティタスクフォースより

#### SF地震学研究集会前日若手イベント開催報告

海洋研究開発機構 高知コア研究所 奥田 花也

東京大学で開催された「International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2023」に先立ち、2023年9月12日(火)に学生・若手研究者向けのイベントを東京大学地震研究所とZoomのハイブリッド形式にて開催しました。地震学や地質学など幅広いバックグラウンドを持つ学生・若手研究者が現地には40名、オンラインには10名参加しました。海洋研究開発機構・新井研究員からは「比較沈み込み帯学ー地震観測から見た地震発生帯構造と地震活動ー」、東北大学・野准教授からは「地質学からみたプレート境界深部の流体活動と岩石破壊」と題して、沈み込み帯毎の地震波速度構造の特徴や、スロー地震の原因の1つとして挙げられる流体の挙動について講演していただきました。講演は基礎的な内容から始まり、最後には最先端の研究まで紹介していただいたことで、翌日からの国際研究集会に向けて理解を深める機会となりました。また勉強会のあとには、地震研究所ラウンジにて

現地参加者のみでポスター発表会(11件)を開催し、地震現象に関する議論や参加者同士の交流を深めました。



#### 若手・ダイバーシティタスクフォース2023年度活動報告

若手ダイバーシティTF <sup>-</sup>

建築研究所 国際地震工学センター 北 佐枝子

若手・ダイバーシティ企画タスクフォースの一員として、標記の件の報告をさせていただきます。現在、これまでオンライン実施だった若手・ダイバーシティ企画イベントを、今年度は徐々に対面形式へ移行中です。前項の報告のとおり、9月には大盛況だった若手中心の交流対面イベントが実施されました。このような対面イベント時には、領域へのさまざまな期待、各種要望等も寄せられ、参加者間での議論も進みます。寄せられた「海外研究者との議論の機会が欲しい」との要望への対応イベントが、早速晩秋に実施されます。本領域に関係する海外研究者と領域内の若手・中堅研究者(博士課程院生以上を想定。希望者のみ。)との「30分間の研究議論(1on1の遠隔会議形式)」の機会提供イベントです。まずは海外研究者として、仏国Université Grenoble Alpesの Anne Socquet教授(専門:測地学)(11/27と12/4を予定)と、同国Ecole Normale SuperieureのAlex Schubnel教授(専門:地震学および岩石力学)(12/18-21を予定)を議論パートナーとしてお呼びいたしまして、各研究者(日本側)と個別に議論を実施いただきます。今後も同様のイベント実施時には、若手からの積極的な応募と、シニア研究者の方の若手への周知働きかけも併せてお願いいたします。

若手ダイバーシティイベントは、多様な立場の方への配慮を行い、領域活動の活性化を目的として実施されますが、現状としては今まさにライフイベントに遭遇している若手・中堅研究者自身が主な担い手です。持続可能な実施とするため、引き続き皆様のご理解・ご協力の程、よろしくお願いいたします。

## 7

拡大班会議

#### 拡大班会議

東京大学 大気海洋研究所 山口 飛鳥

A02班では、「定例会」と称して毎月第1火曜日の朝にオンラインセミナーを行っていますが、2023年8月・9月は「拡大定例会」と題して領域全体に呼びかけ、「プレート境界断層帯の厚さと、その深度変化について」「スロー地震のa-bについて」という2つのトピックに関する議論を行いました。拡大定例会の内容は9月の東京集会に向けての知識の整理に役立ったものと思われます。

また、11月27・28日には、A01班・A02班合同の研究集会を高知コアセンターで開催しました。理論・実験・観測・フィールドなど、2日間で14件の発表があり、活発な議論が交わされました。集会1日目の午後には、国際深海科学掘削計画(IODP)のコア保管庫見学、藤内智士さんと藤内研の学生さんによる砂箱実験とX線CTを用いた砂箱の内部構造解析の実演、奥田花也さん・廣瀬丈洋さんらによる高速摩擦実験の実演と変形試験機の紹介など、高知コアセンターならではのラボツアーが行われました。牟岐・室戸巡検から引き続いて参加したメンバーも多く、充実した集会となりました。

SF地震学も折り返し点を迎えつつあります。班の間の連携や共同研究がますます推奨されるでしょうから、今後も、班の枠を超えたイベントを積極的に行ってゆければと思います。



高知コアセンターでのコア保管庫見学

## **)** 合宿

#### 別府・箱根での温泉合宿

京都大学 防災研究所 伊藤 喜宏

A03班が主催する研究集会が2023年に2回開催されました。第1回は、2月9-11日に別府市の亀の井ホテルで開催しました。A02班、B01班、B03班からの参加者も含めて、28名が参加しました。このうち9名が学生でした。各自の研究の進捗状況の報告に加えて、発表者には学生向けの初歩的な内容についての講演もお願いしました。三日間にA03班らしい広い分野からの興味深い研究報告が続きましたが、わかりやすく理解が進んだと参加した学生からも好評でした。

第2回は8月26-27日に神奈川県温泉地学研究所にて開催しました。研究集会の開催に先立って8月24-25日には、ミニ合同観測を伊東市北部で実施しました。この地域は、先に行われた別府の合宿の際、道家涼介さんより話題提供のあった特に歪速度が局所的に大きな領域でした。その直上に地震計5台を設置し5日間ほどの臨時地震観測を実施しています。研究集会とミニ合同観測には、A02班、B02班からの参加者も含

めて、14名が参加し、特に研究集会では各自の研究の進捗内容について活発な議論がなされました。



亀の井ホテルの研究集会

巛検

#### A02班の巡検企画

東京大学 大気海洋研究所 山口 飛鳥

A02構造解剖班では、沈み込み帯のSlow-to-Fast地震発生帯の実態に関して共通の認識を得るべく、2023年度に3回の野外巡検を企画しました。5月12-16日の紀伊半島巡検(案内者:志村侑亮さん、参加者20名)では、紀伊半島を横断し、白亜紀のプレート境界を深部から浅部に横切る形でさまざまな岩石と変形構造を観察しました。また南紀熊野ジオパークの露頭見学も行いました。7月14-16日の延岡巡検(案内者:大坪 誠さん・山口、参加者18名)では、過去の巨大分岐断層である延岡衝上断層の露頭の前で、様々な視点から沈み込み帯での亀裂発生や流体移動などの議論を行いました。A01班と合同で行った11月24-26日の牟岐・室戸巡検(案内者:橋本善孝さん・藤内智士さん・山口、参加者20名)では、四万十帯牟岐メランジュや室戸岬周辺の堆積岩・火成岩を観察し、プレート境界のSlow・Fastの変形からテクトニクスまで議論を行いました。いずれの巡検も、中堅・若手を中心にべ

テランや学生、複数の公募研究代表者が参加し、フィールド・実験・観測・理論など多様な観点から議論が盛り上がっただけでなく、参加者間の親睦も深まりました。



7月延岡巡検、延岡衝上断層前での参加者集合写真

#### 講演会

#### 南紀熊野ジオパークセンターでの講演会開催

A02班のメンバーによる「南紀熊野ジオパークとの協 働」の一環として、2023年1月16日に紀伊半島の最南端 に位置する串本町の南紀熊野ジオパークセンターにて、下 記のように第6回南紀熊野ジオパークセンター講演会が開 催されました。今回はA02班研究分担者の北が講演会の講 師を担当し、「スロー地震とスラブ内地震と海溝型巨大地 震」というタイトルで、地震の基礎から2021年に出版さ れた論文の内容まで、約40名程度の方に1時間ほど解説い たしました。現地会場にはジオパークガイドに勤められて いる方の講演会参加も多く、活発な質疑応答の機会もいた だくことができました。講演に際して手話通訳や要約筆記 のサポートもあり(写真)、南海トラフ地震の備えに向け ての啓発情報周知に幅広く心をくばる地元自治体の真摯な 姿勢も知ることができました。講演会を実現するにあた り、ご調整・ご尽力いただきました皆様に深く御礼申し上 げます。

建築研究所 国際地震工学センター 北 佐枝子

開催形態:対面形式での開催(手話通訳・要約筆記あり) 共催:和歌山県立南紀熊野ジオパークセンターおよび Slow-to-Fast地震学

後援:国立研究開発法人建築研究所

領域からの本企画メンバー:本郷宙軌(A02班)、北佐枝子(A02班)、山口飛鳥(A02班長)



南紀熊野ジオパークセンターでの講演会の様子(2023年1月16日開催)

#### > 受賞

#### 平朝彦国際深海科学掘削研究賞

辻 健(A02班研究分担者 東京大学大学院工学研究科)

#### 2022年日本地震学会論文賞

宮川 歩夢・野田 篤・高下 裕章

(A02班研究協力者 産業技術総合研究所 地質調査総合センター)

#### 2023年度日本地質学会論文賞

野田 篤 (A02班研究協力者 産業技術総合研究所 地質調査総合センター)

#### 日本統計学会 小川研究奨励賞

松田 孟留(B02班研究分担者 東京大学 大学院情報理工学系研究科)

#### 日本地球惑星科学連合2023年大会 学生優秀発表賞

增田 滉己(B03班学生 東京大学 大学院理学系研究科)

西沢 貴志(B02班学生 京都大学 大学院理学研究科)

柴田 律也(B03班学生 東京工業大学 理学院)

上田 瑞貴(A03班学生 筑波大学 生命環境系)

#### 日本地質学会第130年学術大会 学生優秀発表賞

細川 貴弘(A02班学生 高知大学 大学院理工学専攻)

内田 泰蔵(A02班学生 高知大学 大学院理工学専攻)

宮副 真夢(A02班学生 京都大学 防災研究所/理学研究科)

#### 日本地震学会2023年度秋季大会 学生優秀発表賞

福嶋 陸斗(研究協力者 京都大学 理学部)

#### > 出版物

鈴木 岳人(A01班研究協力者 青山学院大学理工学部)

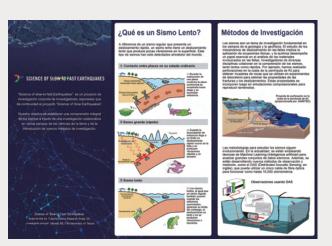
「問題を解くことで学ぶベクトル解析- 楽しみながら解くことを意識して -」コロナ社

藤内 智士(A01班研究分担者 高知大学理工学部)

「変動が作る岩石たちの関係」南の風社

#### > スペイン語版リーフレットの発行

スロー地震とファスト地震の比較などを分かりやすく伝えるリーフレットについて、これまで日本語版と英語版を作成していました。2024年2月にメキシコで予定している押しかけワークショップに向けて、新たにスペイン語版のリーフレットを作成しました。印刷したものは事務局(sfeq-post-group [at] g.ecc.u-tokyo.ac.jp)にありますので必要な方はお知らせください。また、pdf版をウェブサイトにて公開しています。



#### ン 公式 SNS の紹介

XやFacebookなどをSNSを通じて、Slow-to-Fast地震学関連のイベントやセミナーなどの告知・報告などを、Slow-to-Fast地震学関係者のみならず、一般の皆さんに向けて日々発信しています。 Slow-to-Fast地震学関係者で発信したい情報がありましたら、事務局(sfeq-post-group[at]g.ecc.u-tokyo.ac.jp)までご連絡ください。写真の提供も大歓迎です。













#### プ イベント予定

#### Japan Geoscience Union Meeting 2024

日程: 2024年5月26日(日)~31日(金)

会場:幕張メッセ+オンライン

Slow-to-Fast地震学国際合同研究集会2024

日程:2024年9月17日(火)~19日(木)

会場: 別府国際コンベンションセンター(大分県別府市)

#### 編集後記

ニュースレター第3号をお届けします。2023年は、コロナ5類移行に伴い、海外との交流・国際研究集会や野外調査・巡検などが活発に行われ、多くの記事が集まりました。また、人材育成・ダイバーシティー推進はこのプロジェクトの大きな柱であり、多彩で優秀な若手研究者が育っている様子もご覧いただけるかと思います。

2024年は元日の能登半島地震とともに幕を開けました。私は1995年に神戸で阪神・淡路大震災を経験しましたが、あの時を思い起こさせる被害の大きさに心が痛みます。一方で津波による被害、救援の手が届きにくい半島の地理的事情、寒さと雪、隆起による港湾被害、など、神戸の震災と異なる点も多くあり、同じような規模の地震でも1つとして同じ地震被害はないのだということを思い知らされました。本学術変革領域内では、この地震に関連して複数の研究者が観測・解析や調査に奔走しています。研究者にできることは現象の理解と社会への周知であり、直接・間接を問わず引き続き研究に取り組むことで、地震の理解と災害の低減に貢献する一助となればと思います。

末筆ながら、令和6年能登半島地震によりお亡くなりになった方のご 冥福をお祈りするとともに、被災された方々にお見舞い申し上げます。



#### 【表紙写真】

(左)国際合同研究集会@東京大学伊藤国際ホール (右上)南紀熊野ジオパークでの巡検 (右下)押しかけワークショップin台湾

令和3~7年度 文部科学省 科学研究費助成事業 学術変革領域研究(A)



## SLOW TO FAST 地震学

ニュースレター Vol.3 2024年3月発行

発行・お問い合わせ Slow-to-Fast 地震学事務局 https://slow-to-fast-eq.org



編集: Slow-to-Fast地震学 ニュースレター編集委員会 山口 飛鳥・竹尾 明子・北 佐枝子・濱田 洋平・大坪 誠・矢部 優 横田 裕輔・三井 雄太・野田 朱美・渡邊 倫子・利根川 奈美