

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

流体の寄与に注目した地震断層すべり物理モデルの高度化

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

イ. 地震断層滑りのモデル化

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

イ. 内陸地震

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

流体が深部に局所的に豊富に存在していると、そこで歪速度が上昇しやすくなり、その浅部に応力・歪が集中しやすくなると考えられる。また、断層中に流体があれば、間隙圧が上昇して強度が低下すると考えられる。このように流体は地震発生に大きくかかわっていると考えられていたが、多くは定性的な理解にとどまり、定量的な理解が進んだのはごく最近のことである。このような定量的な検討から、地震発生域では差応力が小さく、断層の強度がこれまで考えられていた値の1/10程度と極めて低いことが次第に明らかになって来ており、その原因としてはやはり断層の中の流体の可能性が一番高いと考えられている。しかし、その流体が断層に及ぼす影響や流体の存在形態はまだ必ずしもよくわかっていない。このような問題意識のもと、下記のサブテーマを実施し、これらを統合することにより、特に流体の寄与に注目して地震断層すべり物理モデルの高度化を目指す。

1) 応力・強度推定手法の高度化と強度低下原因の解明

地震断層すべりの理解の上で応力と強度を正しく把握することが重要である。応力については主応力の方向と応力比の情報に加えて、大地震やかぶり圧の影響を正しく評価することにより、差応力の大きさについても情報が得られつつある。今後、高精度・多量の震源分布と発震機構解を利用し、小規模な地形や中規模地震が応力場に与える影響から、差応力の大きさの分布を高精度で推定することを目指す。さらに地震の振幅情報も用いて、発震機構解と応力場と観測点補正值を同時に推定する新しい手法を開発する。また、大地震による構造の時空間変化を推定し、それと地震活動や応力の時空間変化と比較することにより、地震活動に対する流体の寄与についてより詳細に明らかにする。

2) 摩擦強度の環境依存性の解明

速度・状態依存摩擦則の微視的過程は真実接点における圧力溶解クリープであり、その振る舞いは雰囲気中の水蒸気量に依存することが最近の実験で示されている。一方、摩擦すべりに伴って局所的な脆性破壊（AE）が発生することや、脆性破壊強度が雰囲気中の水蒸気量に依存することは知られているが、これらが複合して摩擦の振る舞いにどのような影響を与えているのかは調べられていない。本サブテーマでは水蒸気量を制御した雰囲気中で摩擦実験を行い、摩擦の振る舞いとAE活動の関係を調べることで、脆性破壊の水蒸気量依存性が摩擦強度の環境依存性に及ぼす影響を明らかにする。こ

の成果は微小地震活動モニタリングに基づくプレート境界の摩擦特性の推定や固着状態の評価にも貢献し得る。

3) 実験・数値シミュレーション・野外観察に基づく岩石-水相互作用の解明

地殻流体が地震の発生に強く関与していることが指摘されているが、地震に関与する地殻流体の物理化学的性質および動的挙動についての知識は希薄である。特に地震発生帯やその直下での温度・圧力条件での地殻流体の基本的性質についての理解が進んでおらず、状態方程式、化学反応性、流体分子構造、輸送現象の解析などが未整備の状態である。本サブテーマでは、地殻流体の熱物理、化学反応、分子構造、輸送現象、破壊現象間の関わりについて先端設備を用いた室内実験や数値シミュレーションにより明らかにするとともに、地上に露出した化石地震発生帯の野外観察などの情報を融合させて、地震発生における地殻流体の役割と振る舞いについての検討を進める。

4) 高温高压状態における地殻流体の存在形態の解明

地球物理学的に観測される地震波速度と電気伝導度から、岩石の粒間に存在する地殻流体の存在量・組成・存在形態を見積るには変数が過剰であり、岩石相など何らかの仮定を置く必要がある。もし流体の化学組成と間隙流体の存在形態・電気比抵抗との間の関係式を新たに与えることができれば、制約条件が増え、流体量などのより正確な推定が可能となる。地殻流体は、有馬型熱水に代表されるようにCO₂とNaClの濃度が高いと考えられているが、この両成分は、流体の二面角に対して相反する効果を与え、両者が共存した場合の二面角がどのような挙動を示すかについては殆ど知られていない。そこで、H₂O、CO₂、NaCl三成分系の流体と鉱物間の二面角を高温高压実験によって決定する。

5) 下部地殻のレオロジーにおける流体（水・メルト）の効果の解明

地震波トモグラフィや電磁気探査から断層深部延長の下部地殻に流体（水や部分溶融体）の存在が示唆され、流体の存在による歪局所化が断層深部への局所的ローディングを引き起こす可能性が指摘されている。つまり、流体の存在は、断層の強度を低下させるのみならず、断層のローディング機構にも深くかかわっている可能性がある。そこで、下部地殻条件における流体の効果を明らかにするために、実験室において下部地殻の温度圧力を発生することのできる試験機を用いて、下部地殻岩石のレオロジーに及ぼす流体の効果を明らかにする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

● 1年目（令和元年度）

1) 応力・強度推定手法の高度化と強度低下原因の解明

2011年東北地方太平洋沖地震後の応力場の時空間変化を追跡し、歪速度場の時空間変化と比較することにより、応力の時空間変化の原因を探る。中規模地震の破壊過程を詳細に調べることにより、強度の不均質性と破壊の不均質性の関係を検討する。ニュージーランド等、海外の応力場と日本の応力場の違いと共通性を検討する。応力場を推定する新たな手法の開発に着手する。

2) 摩擦強度の環境依存性の解明

試料室を外気と隔離できるようにしたロータリー式低速せん断試験機（最大すべり速度は約0.8 mm/s、法線応力は15MPaまで）で摩擦すべり実験を行い、水蒸気量が摩擦強度や摩擦のパラメータ、AE活動に及ぼす影響を調べる。現状では、試料室の雰囲気制御は乾燥状態（湿度がほぼ0%）、飽和状態（湿度がほぼ100%）、室内状態の3通りに限られている。初年度は実験を行いつつ、雰囲気制御範囲を広げるよう試験機の改良を行う。

3) 実験・数値シミュレーション・野外観察に基づく岩石-水相互作用の解明

超臨界地殻流体の300-500℃、50-1000 MPaでの状態方程式と、その条件での岩石と流体の反応についての状態方程式や熱力学データが全く不足している。特に、地殻流体の平衡計算をする上で重要となる電荷のある溶存種について熱力学データについて、既存のデータには存在しない超臨界、気相領域まで経験的に外挿することを試み、実験によって検証する。

鉱物界面での純水の構造化を調べた実験装置と技術を用いて、H₂O-NaCl-CO₂の混合流体と鉱物との相互作用および鉱物界面での流体分子を調べる。さらに、既に開発している超臨界条件における真三軸応力発生ならびに水圧破碎装置を用いて、300-500℃、50-150 MPa条件での岩石内の3次元き裂の優先流路の形成の時間発展ならびに地殻流体透水性に関する流体流動実験に着手する。また、三波川変成帯、東北地方の花崗岩類と接触変成岩における流体通路（鉱物充填脈）の分布、特性を評価し、沈み込み帯と地殻における流体の物理化学的特性とその動的挙動を調べる。

4) 高温高压状態における地殻流体の存在形態の解明

鉱物の界面エネルギー異方性が比較的小さく、いわゆる組織平衡の状態を想定しやすい、最上部マントルを構成する主要鉱物である橄欖石の、 H_2O 、 CO_2 、 $NaCl$ 三成分系流体との二面角を、ピストンシリンダー装置を用いて1-4 GPa, 900-1200 °Cの条件で実験を行う（高圧側では $MgCO_3$ が共存する条件となる）。

5) 下部地殻のレオロジーにおける流体（水・メルト）の効果の解明

下部地殻を構成する鉱物粉末を焼結し人工多結晶体を焼結する。さらに細粒変成岩試料を出発試料として、下部地殻の温度・圧力を発生することのできる変形試験機を用いてこれらの多結晶体の変形実験を行い、下部地殻の変形における流体の効果調べる。

●2-4年目（令和2-4年度）

1) 応力・強度推定手法の高度化と強度低下原因の解明

応力場の推定手法の開発を継続し、実施しやすい地域から随時応力場の推定を行っていく。合わせて誤差の評価も行うことにより、差応力の推定範囲を正しく見積もる。顕著な応力変化が見られた地域において地震波干渉法等により構造の時空間変化を推定し、地殻流体と地震発生の関係を明らかにする。また、海外も含めた様々な地域での応力推定結果を比較し、地殻流体の観点から、応力場や強度の地域性の解釈を行う。

2) 摩擦強度の環境依存性の解明

改良された試験機を用いて、より多様な雰囲気中で摩擦の振る舞いとAE活動の関係を調べることにより、脆性破壊の水蒸気量依存性が摩擦強度の環境依存性に及ぼす影響を明らかにする。

3) 実験・数値シミュレーション・野外観察に基づく岩石-水相互作用の解明

H31年度に開発された計算コードを用いて、既存の H_2O - $NaCl$ - CO_2 系流体中の石英の溶解実験データから、同系流体の誘電率を見積もる。鉱物界面での流体の状態・挙動の実験を継続し、 H_2O - $NaCl$ - CO_2 の混合流体と鉱物との相互作用および鉱物界面での流体分子を明らかにする。流体流動実験を継続し、岩石内の3次元き裂の優先流路の形成の時間発展と地殻流体透水性を明らかにする。さらに、領家変成帯や三波川変成帯における流体通路の調査を継続し、母岩の温度構造と流体の物理化学的特性との関係を明らかにする。

4) 高温高圧状態における地殻流体の存在形態の解明

2年目は橄欖石の実験を継続する。二面角は、鉱物表面の分極度と、流体の分子スケール構造によって決定され、後者の方が前者に比べて、温度圧力条件によって大きく変化すると考えられるため、橄欖石の実験結果を解析することで、他の鉱物と三成分系流体との間の二面角についても、流体組成による変化傾向が推定できる。そこで3年目は石英・輝石など地殻を構成する主要構成鉱物と三成分系地殻流体との二面角についての見積りを行う。地殻流体の電気比抵抗と化学組成の関係については、近年、市来らによるモデル化が進んでいるので、以上によって求めた地殻流体組成と流体形状の関係式と併せることで、宮城県北部地域など地震波トモグラフィやMT法の同時観測が行われている地域について、地殻流体量の再見積りを4年目に行う。

5) 下部地殻のレオロジーにおける流体（水・メルト）の効果の解明

人工および天然の変成岩類多結晶体の変形実験を継続し、下部地殻の変形における流体の効果明らかにする。特に岩石の組成や流体量、実験の温度・圧力・ひずみ速度を制御することで、岩石の強度に対する反応（含水反応）などの効果を定量的に評価し、下部地殻レオロジーに及ぼす流体（水・メルト）の効果定量的に評価する。

●5年目（令和5年度）

各サブテーマにおいて最終的な解析を行い、それらを取りまとめて、流体が断層に及ぼす影響や流体の存在形態を明らかにすることにより、流体の寄与を考慮した新たな地震断層すべり物理モデルを提案する。

(8) 令和3年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

1) 応力・強度推定手法の高度化と強度低下原因の解明

(a) 地球内部の地震波速度と電気伝導度を統合解析することにより、岩石と液体の種類、量比、分布形状を推定する手法を開発した。

(b) 東北沖地震後に深部から浅部への流体移動で発生したと推定される群発地震の発生シミュレーションを行い、観測された震源移動や破壊伝播方向の特徴を説明することができた（図1）。2017年に鹿

児島湾で発生した M5地震の前震活動・余震活動を詳細に調べることにより、それらの活動が複数の面構造の中をmigrationしていたことが明らかとなった。

(c) 箱根火山内において2019年5月に発生した群発地震活動期間中に観測された傾斜変動記録は、観測された傾斜変動に対して、東西走向での断層面上で開口成分とせん断成分の両方を考えたshear tensile modelで最もよく説明できることが分かった(図2)。このうち、せん断変形は3mmと推定され、これは相似地震から求めた非地震性すべり量と一致した。これらのことから一連の地震活動は非地震性すべりを伴い、その拡大が群発地震震源の移動様式に影響を与えた可能性が示唆された。

(d) 地震波干渉法による常時微動表面波トモグラフィーの高度化のため、多成分常時微動クロススペクトルの非線形フィッティングによりマルチモード分散曲線をロバストに推定する手法を開発した。また、水平方向に不均質な背景位相速度に対する有限周波数効果を取り入れた表面波トモグラフィー手法の開発を行った。

2) 摩擦強度の環境依存性の解明

ロータリー試験機を用いて、

(1) 準乾燥状態(湿度約5%)の大島花崗岩(すべり面を#60のカーボランダムで研磨)

(2) 金属製載荷ブロックで挟んだ準乾燥状態の石英ガウジ(粒径108 μ m以下、質量1g、ガウジ層厚~1.7mm)

(3) 湿潤状態の石英ガウジ((2)のガウジに精製水0.5mlを滴下)

の3種類の試料の速度ステップ摩擦実験を行った(図3)。いずれも、法線応力は5MPa、すべり速度は1-100 μ m/s、最大累積すべり量は120-150mmである。同時に、上下の花崗岩試料あるいは金属製載荷ブロックに取り付けたAEセンサーで微小破壊(AE)活動の計測も行った。

いずれの実験でも、実験開始直後は、摩擦係数のすべり速度依存性を表すパラメタである(a-b)値は正であった。(1)と(2)では、累積すべり量(D)の増加と共に(a-b)値は漸減し、Dが数mmで負に転じる。その後も(a-b)値の減少は続き、Dが数十mmで一定値(-0.005~-0.01)に落ち着く。一方、(3)では、(a-b)値は急減し、D~10mm以降はほぼ一定の負の値(-0.005~-0.01)をとる。

単位すべり量当たりのAEの発生数(N)のすべり速度(V)に対する依存性($\alpha=(dN/N)/d\ln V$)は、(1)と(2)では、Dが数mm以下では負であるが、それ以降は正($\alpha\sim 0.1-0.2$)となる。(3)でも、Dが大きくなるほど $\alpha\sim 0.1$ であった。ただし、実験開始直後はばらつきが大きかったため、Dに対する依存性は不明である。さらに、(2)では、 α 自体がすべり速度に対して正の依存性を示す傾向が見られた。

3) 実験・数値シミュレーション・野外観察に基づく岩石-水相互作用の解明

マントル起源の蛇紋岩体に炭酸塩脈が発達していることを発見し、反応と破壊、せん断変形を繰り返しながら複数の炭酸塩鉱物が析出していることを見出した。さらに、この蛇紋岩の炭酸塩化は、固体体積が収縮しながら脱水する反応で、間隙水圧の上昇が起こるために、き裂形成・物質移動・反応が自己促進的に進行することをつきとめた(図4)。

また、MgOを模擬物質とした高温高压下での反応透水実験により、体積膨張を伴う岩石-流体反応によって岩石に破壊が生じ、それによって流体の流れを加速させることを世界で初めて実験的に示した。さらに、破壊や流体流れの加速が生じるためには、反応の速度が流体流れの速度に比べて十分に大きい必要があることを突きとめた。

花崗岩および周囲の接触変成岩の解析から、マグマ溜まりから放出された流体と長石の反応により、地殻中に大量のマイクロ空隙が生成されていることを発見した。空隙の量は~1%にも達し、反応により形成される空隙が、深部地熱地帯での主要な流体存在形態となりうるということが分かった。

4) 高温高压状態における地殻流体の存在形態の解明

(a) MT法による電気伝導度観測から地下深部に存在する水の量を推定するためには、流量と電気伝導度の関係を定量的に理解する必要がある。今回、前弧マントルに相当する高温高压条件で、水を粒間を含むカンラン・石多結晶体の電気伝導度測定に初めて測定に成功した。その結果、Modified Archie's law ($m=1.9$)でフィッティングできることを実証した。前弧マントルの高い(0.01 S/m)電気伝導度には、塩濃度を5wt%と仮定した場合 >1.0 vol.%の塩水の存在が必要である。

(b) 沈み込み境界におけるアスペリティの形成やスロー地震には流体からのシリカ鉱物の析出が重要な役割を果たしていると考えられている。流体へのシリカの溶解度は、シリカのフラックスを決定する

最も基本的なパラメタである。近年、玄武岩質の地殻や泥質堆積物に伴う流体はアルカリ性であるという報告が出されており、シリカ溶解度のpH依存性が注目されている。本研究では、750°Cおよび1.5GPaまでの0.5および1.5m [mol / kg H₂O] Na₂CO₃およびNaOH溶液への石英の溶解度を水熱DAC実験により決定し、純水の場合に比べ同じ温度圧力条件で溶解度は2~10倍増加することがわかった(図5)。なおラマン分光法による化学種の測定により、アルカリ性流体に溶解したシリカの大幅な増加は、中性および脱プロトン化されたモノマーの形成とそれに続くオリゴマー化によって説明できる。

5) 下部地殻のレオロジーにおける流体(水・メルト)の効果の解明

本研究では下部地殻のレオロジーに対する水や粒径の効果を明らかにするために、粒径や含水量等を制御した長石多結晶体の作成を行った。出発試料として、マダガスカル産のラブラドライト(曹灰長石)単結晶を粉砕し、平均径0.29 μ mの細粒粉末を作成し、固体圧変形試験機で焼結することで多結晶体の合成を行った。斜長石と水が安定な1GPa, 900-1000°Cにおいて、最長240時間焼結することで、粒成長を調べた。回収組織の電子顕微鏡観察から、240時間後の試料は、平均粒径が $2.8 \pm 1.2 \mu$ mで格子定向配列をもたず空隙率が5%以下の緻密な多結晶体を合成することができた(図6)。一方、粒成長は遅く、約5時間の焼結では粒径の変化は小さいことが明らかになり、約173.5時間の焼結試料では、試料上部は粒成長と緻密化が進んだ。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況

1) 応力・強度推定手法の高度化と強度低下原因の解明

(a) 岩石と液体の種類、量比、分布形状を推定する手法を開発したことにより、地殻とマントル最上部の構造イメージングによる流体分布の理解が大きく進み、地震・火山活動の理解に資すると期待される。

(b) 観測とシミュレーションから得られた破壊伝播の特徴により、特に流体による有効法線応力に時空間変化がある場合についての情報が得られた。これは、建議項目「地震断層滑りのモデル化」と直接的に関係する内容である。鹿児島湾の地震の前震の本震断層面上での migration, 余震活動にみられる深部から浅部への migration から、深部起源の流体が浅部へ移動していく過程で、一連の前震-本震-余震系列が発生していたことが示唆された。

(c) 群発地震の発生において間隙流体圧の増加に加えて、それに伴い非地震性のすべりが励起され地震発生に重要な役割を果たしている可能性が示唆され、群発地震の発生モデル化のための重要な知見が得られた。

(d) マルチモードかつ有限周波数効果を取り入れたトモグラフィーによって、深さ方向・水平方向ともに高分解能なS波構造推定が可能になると考えられ、東北沖における構造不均質や流体分布と地震・スロー地震の理解に貢献できると期待される。

2) 摩擦強度の環境依存性の解明

実験では、AEの活動度の指標として単位すべり量当たりの発生数(N)を用いたが、一般に地震活動度として評価できるのは単位時間当たりの発生数(Nt)であり、 $Nt=N \cdot V$ と表すことができる。実験結果が単純に適用できるとすると、プレート境界のように十分に成熟した断層では、 $\alpha \sim 0.1-0.2$ と予想されるので、Ntは断層のすべり速度の1.1-1.2乗に比例することになる。つまり、地震活動の増減は、断層すべりの加速・減速を敏感に反映すると予想される。

3) 実験・数値シミュレーション・野外観察に基づく岩石-水相互作用の解明

H₂O-CO₂流体と岩石の反応が破壊を伴いながら自己加速的に進むことを野外調査および室内実験から明らかにしており、地球内部の水・二酸化炭素循環とプレート境界の流体化学、地震活動を結びつける新しい研究を開拓しつつある。

4) 高温高压状態における地殻流体の存在形態の解明

(a) 地震発生場における岩石粒間水の存在量やその供給経路の理解は、地震発生過程の解明とモデル化にとって本質的に重要と考えられる。本研究は、前弧下部地殻に連続する高電気伝導度領域での水の存在量や楔形マントルでの水の循環の解明に貢献する。

(b) 地震発生過程に重要な役割を果たしていると考えられるシリカの溶解析出のフラックスは、流体へ

のシリカの溶解度に左右される。本実験により、この溶解度が流体のアルカリ度が高いと2~10倍増加することがわかった。これは岩石の化学的性質がシリカの溶解析出にも関係することを示す。

5) 下部地殻のレオロジーにおける流体(水・メルト)の効果の解明

「地震断層滑りのモデル化」において、下部地殻のレオロジーは上部地殻への応力・歪集中に密接にかかわるため、その解明は必要不可欠である。そのレオロジーにおける流体の効果を明らかにするためには粒径の時間変化や粒径とレオロジーの関係を明らかにする必要がある、そのための基礎研究を本年度は進めた。

(9) 令和3年度の成果に関連の深いもので、令和3年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

・論文・報告書等

- Dandar, O., A. Okamoto, M. Uno, and N. Tsuchiya, 2021, Redistribution of magnetite during multi-stage serpentinization: Evidence from the Taishir Massif, Khantaishir ophiolite, western Mongolia, *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 116, 176-181, doi:10.2465/jmps.201130a
- Hirauchi, K., Y. Nagata, K. Kataoka, R. Oyanagi, A. Okamoto, and K. Michibayashi, 2021, Cataclastic and crystal-plastic deformation in shallow mantle-wedge serpentinite controlled by cyclic changes in pore fluid pressures, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 576, 117232, doi:10.1016/j.epsl.2021.117232
- Huang, Y., H. Guo, T. Nakatani, K. Uesugi, M. Nakamura, and H. Keppler, 2021, Electrical conductivity in texturally equilibrated fluid-bearing forsterite aggregates at 800°C and 1 GPa: Implications for the high electrical conductivity anomalies in mantle wedges, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 126, e2020JB021343, doi:10.1029/2020JB021343
- Iwamori, H., K. Ueki, T. Hoshide, H. Sakuma, M. Ichiki, T. Watanabe, M. Nakamura, H. Nakamura, T. Nishizawa, A. Nakao, Y. Ogawa, T. Kuwatani, K. Nagata, T. Okada, and E. Takahashi, 2021, Simultaneous analysis of seismic velocity and electrical conductivity in the crust and the uppermost mantle: A forward model and inversion test based on grid search, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 126, e2021JB022307, doi:10.1029/2021JB022307
- Kameda, J., and A. Okamoto, 2021, Generation of oxidising fluids by comminution of fault rocks, *Geochem. Perspect. Lett.*, 19, 32-35, doi:10.7185/geochemlet.2131
- Kundu, S., A. Opris, Y. Yukutake, and T. Hatano, 2021, Extracting correlations in earthquake time series using visibility graph analysis, *Front. Phys.*, 9, 656310, doi:10.3389/fphy.2021.656310
- Mannen, K., Y. Abe, Y. Daita, R. Doke, M. Harada, G. Kikugawa, N. Honma, Y. Miyashita, and Y. Yukutake, 2021, Volcanic unrest at Hakone Volcano after the 2015 phreatic eruption — Reactivation of a ruptured hydrothermal system?, *Earth Planets Space*, 73, 80, doi:10.1186/s40623-021-01387-3
- Matsumoto, Y., K. Yoshida, T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, 2021, Fault-valve behavior estimated from intensive foreshocks and aftershocks of the 2017 M 5.3 Kagoshima Bay earthquake sequence, Kyushu, southern Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 126, e2020JB020278, doi:10.1029/2020jb020278
- Matsuno, S., M. Uno, A. Okamoto, and N. Tsuchiya, 2022, Machine-learning techniques for quantifying the protolith composition and mass transfer history of metabasalt, *Sci. Rep.*, 12, 1385, doi:10.1038/s41598-022-05109-x
- Nomuulin, A., N. Tsuchiya, O. Dandar, A. Okamoto, M. Uno, U. Batsaikhan, and J. Wang, 2021, Multi-stage serpentinization of ultramafic rocks in the Manlay Ophiolite, southern Mongolia, *Mong. Geosci.*, 26, 1-17, doi:10.5564/mgs.v26i53.1787
- Nurdiana, A., A. Okamoto, K. Yoshida, M. Uno, T. Nagaya, N. Tsuchiya, 2021, Multi-stage infiltration of Na- and K-rich fluids from pegmatites at mid-crustal depths as revealed by feldspar replacement textures, *Lithos*, 388-389, 106096, doi:10.1016/j.lithos.2021.106096
- Okamoto, A., H. Ishii, R. Oyanagi, and N. Tsuchiya, 2021a, Albite-K-feldspar-quartz equilibria in hydrothermal fluids at 400, 420°C and 20–35 MPa: Experimental measurements and thermodynamic calculations, *Geothermics*, 94, 102109, doi:10.1016/j.geothermics.2021.102109
- Okamoto, A., R. Oyanagi, K. Yoshida, M. Uno, H. Shimizu, and M. Satish-Kumar, 2021b, Rupture of

wet mantle wedge by self-promoting carbonation, *Commun. Earth Environ.*, 2, 151, doi:10.1038/s43247-021-00224-5

Oyanagi, R., A. Okamoto, M. Satish-Kumar, M. Minami, Y. Harigane, and K. Michibayashi, 2021, Hadal aragonite records venting of stagnant paleoseawater in the hydrated forearc mantle, *Commun. Earth Environ.*, 2, 243, doi:10.1038/s43247-021-00317-1

Sugiyama, D., S. Tsuboi, and Y. Yukutake, 2021, Application of deep learning-based neural networks using theoretical seismograms as training data for locating earthquakes in the Hakone volcanic region, Japan, *Earth Planets Space*, 73, 135, doi:10.1186/s40623-021-01461-w

Takahashi, N., T. Tsujimori, S. Kamada, and M. Nakamura, 2022, In-situ Raman spectroscopic analysis of dissolved silica structures in Na_2CO_3 and NaOH solutions at high pressure and temperature, *Contrib. Mineral. Petrol.*, accepted

Uno, M., K. Koyanagawa, H. Kasahara, A. Okamoto, and N. Tsuchiya, 2022, Volatile-consuming reactions fracture rocks and self-accelerate fluid flow in the lithosphere, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 119, e2110776118, doi:10.1073/pnas.2110776118

Wang, Q.-Y., M. Campillo, F. Brenguier, A. Lecointre, T. Takeda, and K. Yoshida, 2021, Seismic evidence of fluid migration in northeastern Japan after the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 563, 116894, doi:10.1016/j.epsl.2021.116894

吉田圭佑, 2021, 地殻深部から上昇する流体が地震の発生に及ぼす影響の研究 —2011年東北地方太平洋沖地震に誘発された地震活動による拘束—, *地震*, 74, 95-116, doi:10.4294/zisin.2020-20

Yoshida, K., H. Noda, M. Nakatani, and B. Shibazaki, 2021, Backward earthquake ruptures far ahead of fluid invasion: Insights from dynamic earthquake-sequence simulations, *Tectonophys.*, 816, 229038, doi:10.1016/j.tecto.2021.229038

行竹洋平・萬年一剛, 2021, 水蒸気噴火の発生場と噴火過程の観測—最近の進展と今後の展望—, *地学雑誌*, 130, 731-753, doi:10.5026/jgeography.130.731

Yukutake, Y., Y. Abe, R. Honda, and S. Sakai, 2021, Magma reservoir and magmatic feeding system beneath Hakone volcano, central Japan, revealed by highly resolved velocity structure, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 126, e2020JB021236, doi:10.1029/2020JB021236

・学会・シンポジウム等での発表

Eberhard, L., P. Eichheimer, M. Thielmann, M. Nakamura, G. Golabek, and D. Frost, 2021, Permeability determination from multi-anvil experiments: Implications for the fluid flux in subduction zones, *JpGU Meeting 2021*

藤田和果奈・中村美千彦・上杉健太郎, 2021, Fluid segregation and chemical compaction through efficient solute transport along wet grain boundaries, *JpGU Meeting 2021*

本多亮・安部祐希・石瀬素子・酒井慎一・行竹洋平・道家涼介, 2021, 伊豆衝突帯とその周辺におけるフィリピン海プレートおよびスラブの地殻の厚さ, *日本地震学会2021年秋季大会*, S06-07

Huang, Y., H. Guo, T. Nakatani, K. Uesugi, M. Nakamura, and H. Keppler, 2021, Electrical conductivity in texturally equilibrated fluid-bearing forsterite aggregates at 800°C and 1 GPa: implications for the high electrical conductivity anomalies in mantle wedges, *JpGU Meeting 2021*

池田里奈・吉田圭佑・高橋諒・松澤暢・長谷川昭, 2021, 2011年東北沖地震後から福島-茨城県境周辺で活発化した地震活動に見られる内陸の繰り返し地震, *日本地球惑星科学連合2021年大会*

金亜伊・中村勇士・畠山海・上松大輝・行竹洋平・安倍祐希, 2021, 箱根火山における機械学習を用いた地震波検測の性能評価, *日本地震学会2021年秋季大会*, S22P-01

萬年一剛・安部祐希・道家涼介・行竹洋平, 2021, 箱根火山における2015年噴火後に発生した異常の特徴と熱水系, *地球惑星科学連合2021年大会*, SVC29-04

棕平祐輔・宇野正起・吉田圭佑, 2021, Inverse analysis of seismic swarm induced by slab-derived fluids, *日本地球惑星科学連合2021年大会*

Nanjo, K., and Y. Yukutake, 2021, A preliminary study on low-frequency earthquakes at Mt. Fuji, Japan, using the matched filter method, *AGU Fall meeting 2021*, V25D-0142

楠城一嘉・行竹洋平, 2021, 富士山直下で起きる低周波地震の研究の序報: Matched Filter法を用いた地震カタログの作成とカタログの性能評価, *日本地震学会2021年秋季大会*, S09P-09

楠城一嘉・行竹洋平・野田洋一, 2021, Matched Filter法を用いて富士山の低周波地震を検知する研究:

序報,地球惑星科学連合2021年大会,SCG48-P02

織茂雅希・吉田圭佑・平貴昭・松澤暢・長谷川昭・江本賢太郎,2021,日本列島内陸域の通常地震と低周波地震の震源スペクトルの形状の推定,日本地震学会2021年度秋季大会

Takagi, R., and K. Nishida,2021,Ambient noise tomography in the offshore forearc region along the Japan trench using S-net data,JpGU Meeting 2021,invited

高橋菜緒子・辻森樹・鎌田誠司・中村美千彦,2021,HDAC experiments on silica solubility and speciation in Na₂CO₃-H₂O fluids at high pressure and temperature,JpGU Meeting 2021

Tsuboi, S. D. Sugiyama, and Y. Yukutake,2021,Application of deep learning-based neural networks using theoretical seismograms as training data for locating earthquakes in the Hakone volcanic region, Japan,AGU Fall meeting 2021,S35C-0226

Yoshida, K., A. Hasegawa, S. Noguchi, and K. Kasahara,2021,Low-frequency earthquakes in close vicinity of repeating earthquakes in the brittle upper crust of Hakodate, Hokkaido, northern Japan,JpGU Meeting 2021,invited

行竹洋平・安部祐希・本多亮・酒井慎一,2021,地震波速度構造から明らかになった箱根火山のマグマ溜まりとマグマ供給系,地球惑星科学連合2021年大会,SCG48-P03

行竹洋平・吉田圭佑・本多亮,2021,Aseismic process driving the earthquake swarm, revealed by the dense seismic observation,地球惑星科学連合2021年大会,SSS06-01

行竹洋平・鶴川元雄・栗田敬・小菅正裕・前田拓人,2021,箱根火山深部ハーモニック微動に対する数値モデリング,日本火山学会2021年秋季大会,P1-21

(10) 令和3年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：地震：その他：地質：野外地質調査

概要：市野川鉱山において断層運動と熱水活動に関する野外調査を行った。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：愛媛県西条市市ノ川 33.8890 133.2143

調査・観測期間：2021/6/1-2021/6/4

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

(11) 令和4年度実施計画の概要：

1) 応力・強度推定手法の高度化と強度低下原因の解明

・定常・臨時地震観測網のデータを用いて、地震波速度構造・メカニズム解/応力場などから、流体に関する情報を抽出し、地殻流体と地震との関わりについて検討を進める。

・地震の放射エネルギー、破壊の複雑性と流体との関係を調べる。特に前震や群発地震系列について、震源移動や流体起因の震源近傍の Vp/Vs・Q構造異常を系統的に調べる。

・群発地震の震源移動現象について、観測された地殻変動及び地震活動をもとに、その要因や高圧流体との関係について検証をさらに進める。

・S-netや海陸の稠密観測網のデータへの適用し、高分解能な構造推定をもとに、地震・スロー地震活動等との比較を行う。

2) 摩擦強度の環境依存性の解明

・実験の事例数を増やして結果の再現性を検証するとともに、異なる法線応力下でも実験を行い、AE活動の法線応力依存性についても検討する。

3) 実験・数値シミュレーション・野外観察に基づく岩石-水相互作用の解明

・近年開発してきたき裂-反応帯系における微量元素反応輸送モデルにより、天然変成岩の反応帯から数時間～年程度の地質学的超短時間の流体活動を制約するとともに、き裂の走向傾斜を大規模に取得することで応力インバージョンをおこない、短時間流体活動と地殻破壊に伴う応力状態の変遷を物質科学的に捉える。

・機械学習をもちいた地化学解析により、変質した変成岩から元のシリカ濃度を推定する原岩組成推定モデルを開発する。これにより、島弧地殻におけるシリカ輸送量を天然岩石から解析する。

・流通式水熱反応実験をおこない、シリカ等によるき裂の反応・閉塞過程を明らかにする。・三波川

変成帯，東北地方の花崗岩類と接触変成岩におけるき裂の組織と化学組成を調査し，島弧地殻におけるき裂の特性と分布を調べる。

4) 高温高圧状態における地殻流体の存在形態の解明

- ・地震発生メカニズムに重要な役割を果たす粒間流体の存在量や存在形態を地震波速度や電気伝導度の観測データから見積もるため，これまで，カンラン石と多成分系流体との二面角を系統的に測定してきた。カンラン石をはじめとするケイ酸塩鉱物は界面エネルギーの異方性を持つため，その流体連結度に対する効果が以前から注目されてきた。R4年度は，これまでの豊富な実験産物の結晶方位解析により，二面角や流体の連結性に対する異方性の効果を詳しく調べ，結晶方位の定向配列が予測されるマントル対流場での流体連結度に制約を与える。
- ・地震発生場でのシリカの溶解析出は，高溶解度場から低溶解度場へのシリカの運搬が必要となる。この溶解度の変化をもたらす要因の一つとして，岩石のporoelasticityに起因する間隙水圧勾配に着目し，その効果を考察する。

5) 下部地殻のレオロジーにおける流体（水・メルト）の効果の解明

- ・今年度の試料で見られた試料中の黒鉛の存在に起因する粒成長阻害の影響を改良することで，均質な多結晶体を合成する。

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

中村美千彦（東北大学大学院理学研究科），武藤潤（東北大学大学院理学研究科），矢部康男（東北大学大学院理学研究科），岡田知己（東北大学大学院理学研究科），吉田圭佑（東北大学大学院理学研究科），高木涼太（東北大学大学院理学研究科），松澤 暢（東北大学大学院理学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

土屋範芳（東北大学環境科学研究科先進社会環境学専攻），岡本敦（東北大学環境科学研究科），行竹洋平（神奈川県温泉地学研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学 大学院理学研究科
電話：022-225-1950
e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp
URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：松澤 暢
所属：東北大学 大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

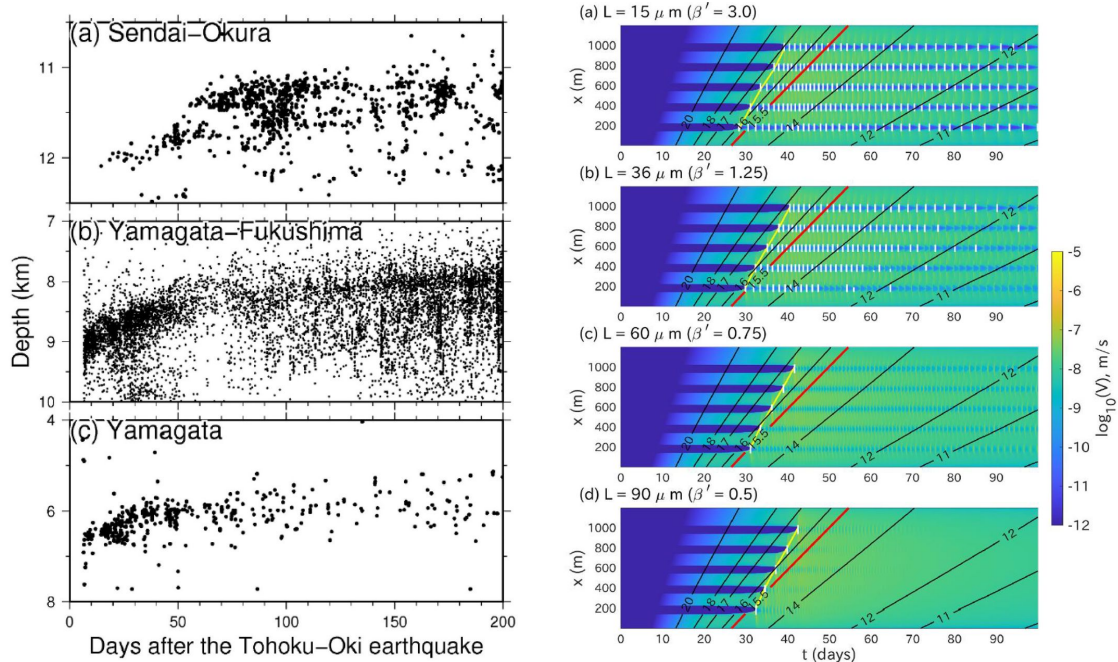


図1 2011年東北地方太平洋沖地震後に東北日本内陸域で発生した群発地震活動の発生シミュレーション (Yoshida et al., 2021)。

左図：(a) 仙台市大倉，(b) 山形-福島県境，(c) 山形県で生じた群発地震活動の深さの時間変化。右図：速度強化域の中に複数の速度弱化域があった場合に深部から高間隙圧水が上昇してきたときの地震活動のシミュレーション。滑り速度を色で示す。Lと β' はそれぞれ特徴的滑り量Lと最初に地震が生じた時のbrittleness（速度弱化域サイズと臨界断層長の比）。黒線は有効法線応力（MPa）のコンター，黄色線は地震活動の始まりを表す。間隙圧の上昇とともにクリープが次第に深部から浅部に上昇するとき，地震活動の始まり（黄色線）は，15.5MPaの有効法線応力のコンター（赤線）の傾きよりも早く上昇していることがわかる。

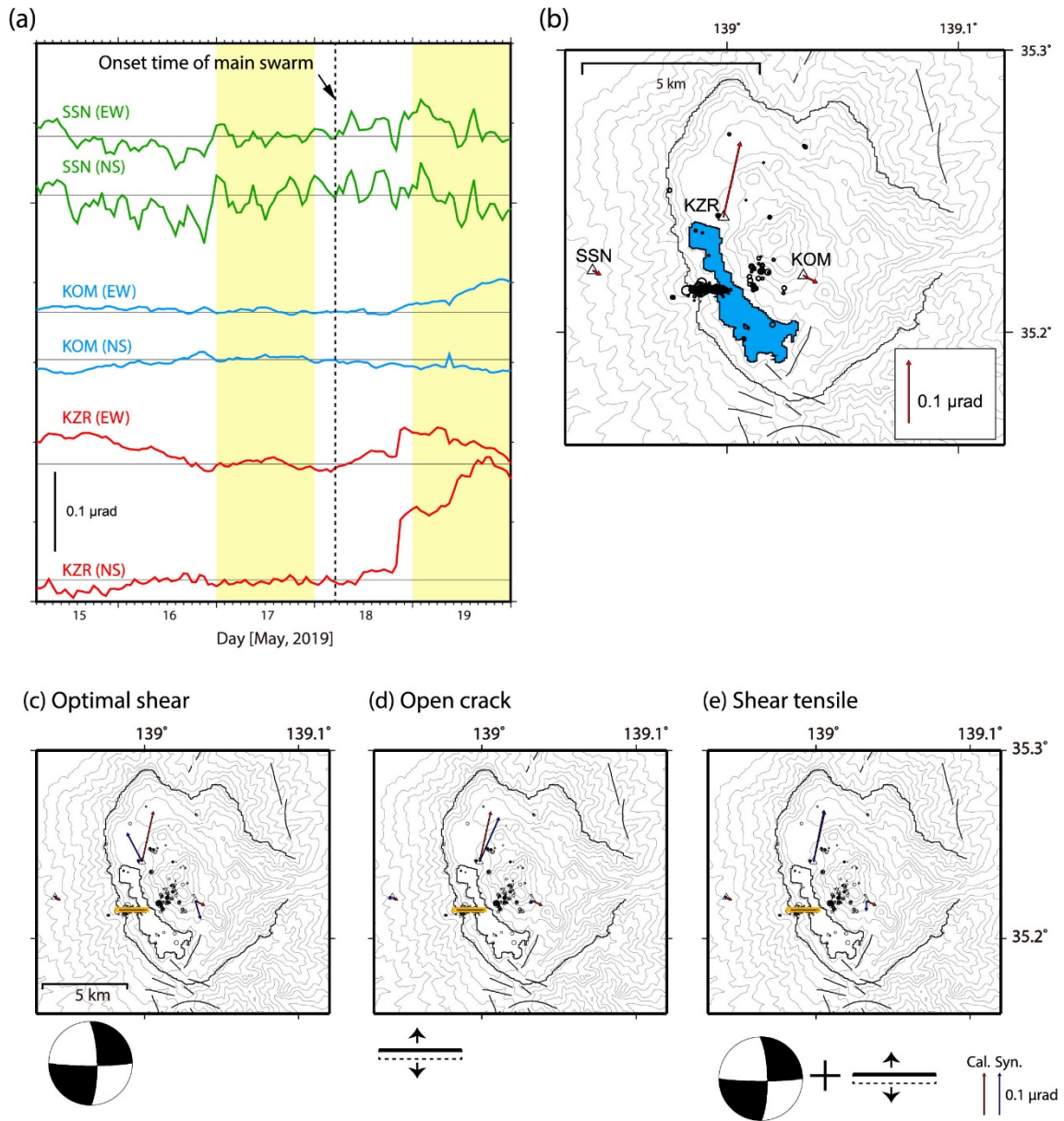


図2 2019年5月箱根カルデラ内での群発地震期間中に観測された傾斜変動と断層モデル。
 (a)傾斜計時系列, (b)観測された傾斜変動ベクトル, (c)せん断成分, (d)開口成分, (e)開口+せん断成分を仮定したときの理論傾斜ベクトルと観測ベクトルとの比較。(e)のモデルがAIC最小となる。

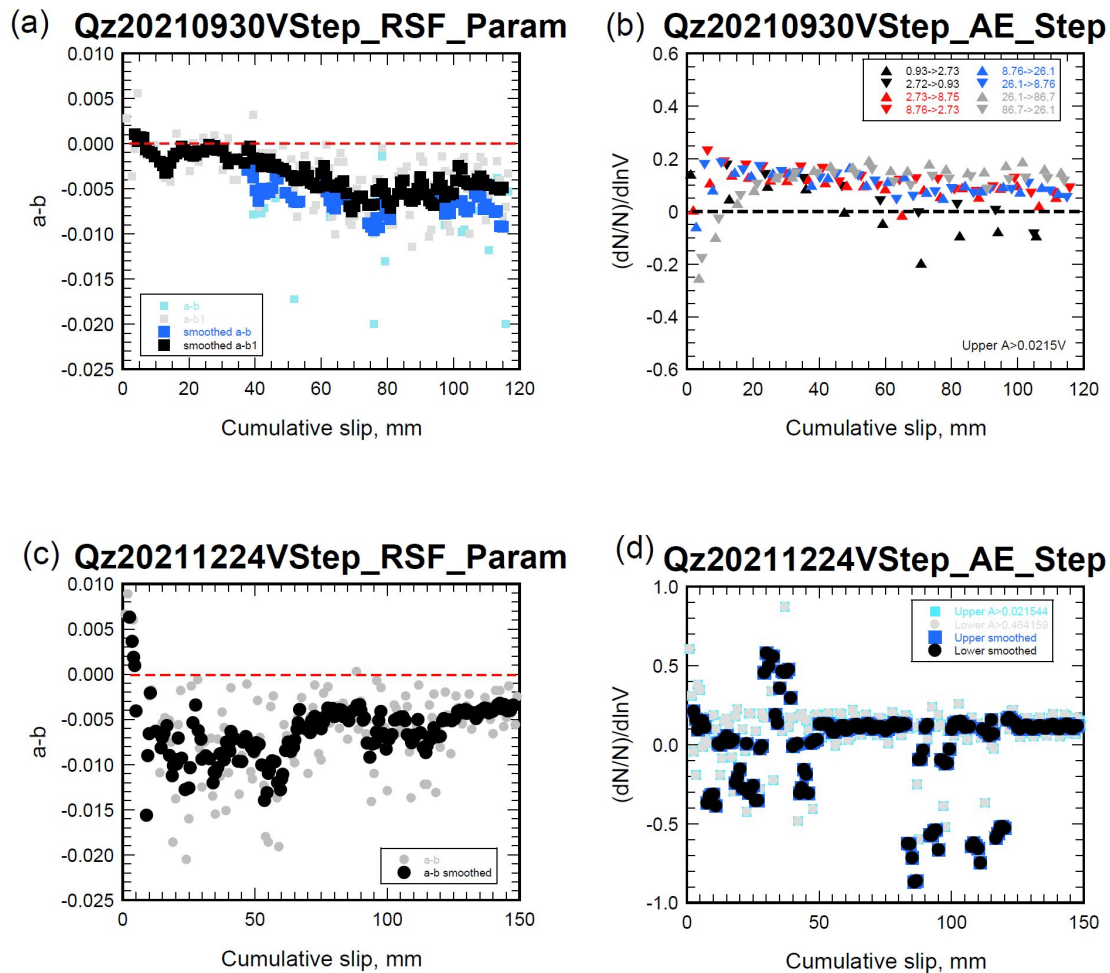


図3 準乾燥状態 (a, b) および湿潤状態 (c, d) で行った石英ガウジの速度ステップ摩擦実験結果。横軸は累積すべり量を示す。(a, c) : 速度ステップに対する応答にslip-lawを適用して求めた(a-b) 値。(a) では、必要に応じて2つの状態変数を用いている。2つの状態変数のうち、dcの小さなものをb1、大きなものをb2とし、黒四角は(a-b1)を、青四角は(a-b1-b2)を示している。(c)では、状態変数は1つしか用いていない。いずれの図においても、薄い色のシンボルは生の値、濃い色のシンボルは5点の移動平均である。(b, d) : 単位すべり量当たりのAE発生数(N)のすべり速度(V)に対する依存性。(b)では、上側の载荷ブロックに取り付けたAEセンサーで計測したAE活動から求めた α をすべり速度のレンジごとに異なる色で示している。上向きの三角は速度増加のステップ、下向きの三角は速度減少のステップで求めた値である。移動平均はとっていない。(d)の青四角は上側の载荷ブロックに、黒丸は下側の载荷ブロックに取り付けたAEセンサーで計測したAE活動から求めた値。薄い色のシンボルは生の値を、濃い色のシンボルは5点の移動平均を示す。

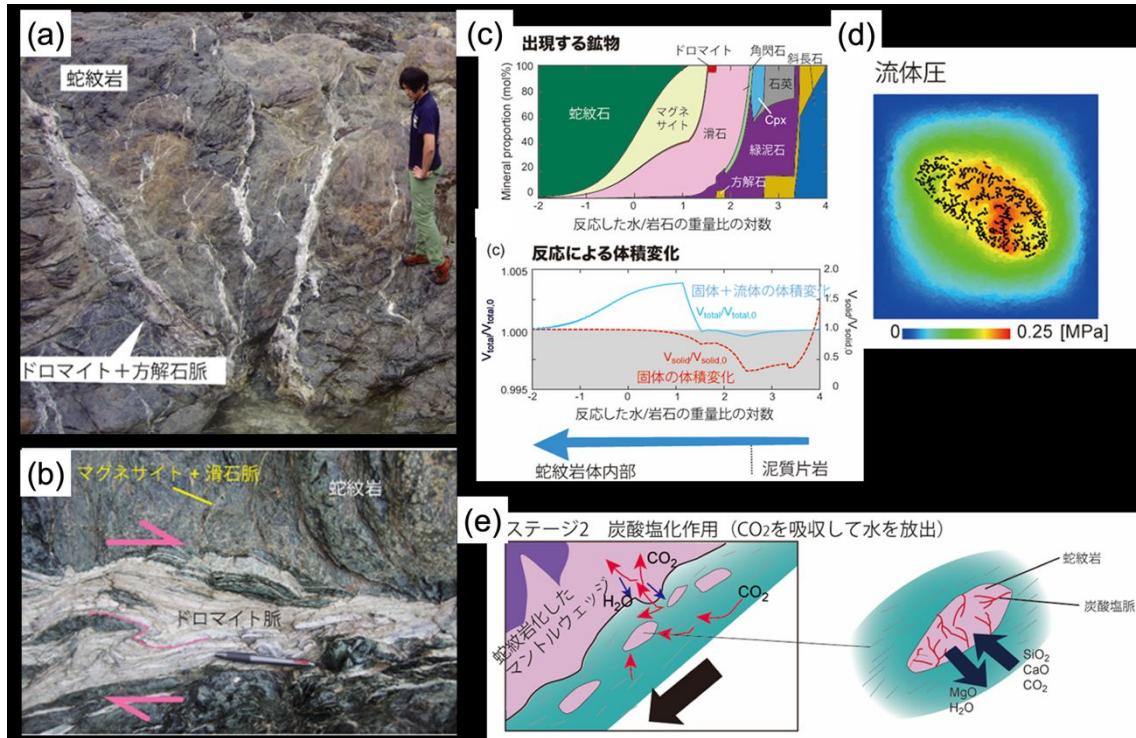


図4 マントルウェッジ蛇紋岩の炭酸塩化（三波川変成帯; Okamoto et al., 2021b）。

(a, b) 蛇紋岩体中の炭酸塩脈の産状。(a) 蛇紋岩を切って発達する炭酸塩脈のネットワーク（ドロマイト： $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ，方解石： CaCO_3 ）。(b) 炭酸塩脈の構造は脈形成後にせん断変形を受けている。(c) 岩石-流体平衡計算の結果。炭酸塩（マグネサイト MgCO_3 ）の生成に伴い、流体が発生し、固体+流体の体積が増加していることがわかる。(d) 離散要素法を用いた模式的な炭酸塩化反応によるき裂形成と流体圧の変化。(e) マントルウェッジでの炭酸塩化作用の模式図。蛇紋岩化したマントルウェッジは CO_2 流体が流入すると脱水しながら、局所的に炭酸塩化反応が進行する。この反応はき裂を作りながら自己促進的に進行する。マントルウェッジの一部は変成岩の中に取り込まれ、本岩体のように変成帯の一部として上昇する。

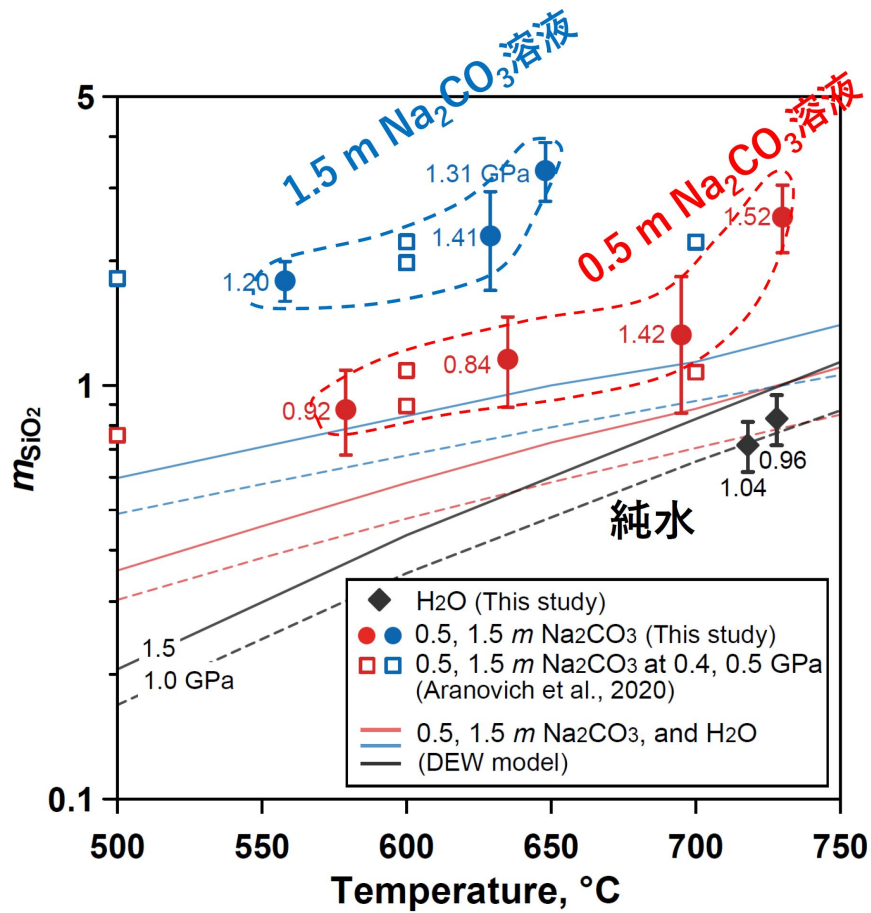


図5 高温高压下におけるアルカリ性流体 (Na_2CO_3 溶液) への石英の溶解度測定結果。純水の場合に比べ同じ温度圧力条件で溶解度は2~10倍増加している。

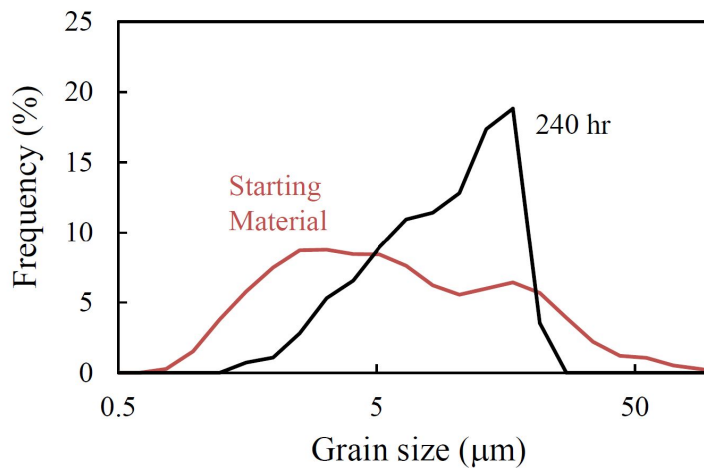


図6 多結晶体の合成における粒径分布の変化。

マダガスカル産のラブラドライト（曹灰長石）単結晶を粉砕してできた細粒粉末を，斜長石と水が安定な1GPa，900-1000°Cにおいて固体圧変形試験機で焼結することで多結晶体の合成を行った。赤線が出発試料，黒線が240時間後の粒径分布。粒径が大きい方へシフトし，揃ってきていることがわかる。