



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Fault Slip Behaviors in Plate Subduction Zones inferred from the Nano-scale Pore Structure of Fault Rocks [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	中元, 啓輔
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第15601号
Issue Date	2023-09-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/90763">https://hdl.handle.net/2115/90763</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Keisuke_Nakamoto_abstract.pdf, 論文内容の要旨



# 学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(理学) 氏名 中元啓輔

## 学位論文題名

### Fault Slip Behaviors in Plate Subduction Zones inferred from the Nano-scale Pore Structure of Fault Rocks (断層岩のナノスケール間隙構造からみるプレート沈み込み帯の断層すべり挙動)

岩石の間隙構造は流体やガスの輸送過程に影響を与える要因の1つである。頁岩のような細粒の鉱物を多く含む岩石では、ナノスケールの細孔構造が特に重要な役割をもつと考えられている。本研究が対象とする地殻の断層岩も、岩石-水相互作用によって形成される微細な粘土鉱物や破碎された細粒岩片で構成されるため、断層帯における流体やガスの輸送過程を理解する上でナノスケールの間隙構造評価が重要と考えられる。さらに、これらのプロセスを理解することは、断層の力学的挙動や地殻内の物質循環を解明するために不可欠である。本論文では、プレート沈み込み帯深部から浅部までの様々な環境において地震性の高速すべり変形の影響を受けた断層岩を対象として、主にナノスケールの間隙構造に基づいて、断層の形成・発達過程や力学的性質を検討し、沈み込み帯内の変形過程の変化を明らかにすることを目的とする。

第1章では、断層挙動を理解する上で間隙構造評価の重要性と、その評価手法としてのガス吸脱着測定法の有用性を述べる。

第2章では、ガス吸脱着測定の原理と解析手法について紹介する。

第3章では、房総付加体に発達する白子断層の断層ガウジを対象として、断層変形に伴う内部構造の変化を検討した。先行研究によりこの断層は、沈み込み帯浅部での地震性高速すべりを記録していると考えられている。ガス吸脱着測定および水銀圧入法による間隙構造解析の結果、断層ガウジにおいては細孔径が低下する一方で、10 nm以下の細孔容積や BET 比表面積は増加することが分かった。一般に BET 比表面積の増加は粒子破碎による影響が考えられるため、X線 CT による粒子径分析を行ったところ、石英や長石の粒子径は母岩と断層ガウジの間でほとんど変化が見られなかった。このことから、より細粒な粘土鉱物の破碎とそれに伴う細孔の形成が考えられる。そこで、先行研究で得られている白子断層の smectite-illite 混合層の XRD スペクトルに注目して、Newmod を用いたパターンシミュレーションを行った。その結果、断層ガウジのスペクトルが、混合層鉱物の積層数の減少によって説明できることを明らかにした。本断層においては、断層すべりに伴う長石や石英粒子の破碎が殆ど起こらず、粘土鉱物の剥離・変形が優先的に生じたと考えられる。このことは、地震発生時の粒子破碎に伴うエネルギー散逸が抑制され、その結果高速断層すべりがより促進された可能性を示唆している。

第4章では、2011年東北地方太平洋沖地震 ( $M_w = 9.0$ ) を引き起こした日本海溝プレート境界断層の断層ガウジ試料を用いて、粒子間の微視的な相互作用と断層すべり過程との関連性について検討した。粒子間相互作用力を評価するため、電気泳動法によりゼータ電位を測定し、さらに接触角測定を行うことで粒子の表面自由エネルギーを求めた。これらの測定結果と拡張 DLVO 理論に基づいて粘土粒子間の相互作用力を評価したところ、断層帯の間隙水に相当する高塩濃度条件では、粒子間に作用する力が極めて小さいことが分かり、このことが断層帯の粘性抵抗力を弱め、地震発生時の大きな断層変位をもたらした可能性がある。また、得られた相互作用エネルギー曲線にはポテンシャル井戸が存在することが分かり、これはエネルギー的に安定な粒子配置が存在することを示している。ガス吸脱着法により推定される平均的な粒子間距離は、この安定構造から逸脱したものであり、地震発生に伴う粒子構造体の安定状態の破壊と地震発生後の構造緩和(強度回復過程)を見ている可能性がある。さらにこのような地震発生に伴う粒子構造体の破壊とその後の構造緩和は、断層のチキソトロピー性とそれに伴う自発的なスティックスリップ運

動を発現させる可能性がある。

第5章では、スメクタイトに富む沈み込み帯浅部の断層帯を想定して、断層の膨潤挙動に関する評価を行った。モンモリロナイトと石英の混合サンプルを作成し、0.6 M NaCl 水溶液と純水を使用した膨潤圧測定実験を行った。実験の結果、同一の間隙率条件においては、スメクタイトの含有率が高いほど膨潤圧が増加することがわかった。また、溶液のイオン強度が大きくなると膨潤圧が小さくなることがわかった。この結果に基づいて、スマトラ沖海溝のインプットサイトにおける断層相当層準（プロトデコルマ）の原位置膨潤圧を検討した。この層準は遠洋粘土層に相当し、高いスメクタイト含有率（60 wt.%以上）で特徴づけられる。このスメクタイト含有量は、断層相当層準に作用する有効垂直応力に匹敵する膨潤圧を発生させるのに十分であることがわかり、このことが遠洋粘土層における局所的な強度低下を引き起こし、せん断変形（プロトデコルマの発達）の引き金となった可能性を示唆している。

第6章では、九州の四万十帯に属する延岡衝上断層を対象として、断層の間隙構造と特に断層中軸部（主せん断帯）付近に見られる脆性変形との関連性について検討した。延岡衝上断層は、現世南海トラフに見られるデコルマから派生した巨大分岐断層深部の陸上アナログと考えられている化石断層であり、過去の海溝型地震に伴う変形を記録していると考えられている。ここでは、延岡断層を貫通するボーリングコア試料を用いて、ガス吸脱着解析による間隙構造評価とXRD分析による鉱物組成の定量を行った。分析の結果、主せん断帯においては mesopore 容積の減少に起因する micropore の比率が増加する一方で、BET 比表面積には明瞭な変化は見られなかった。先行研究の成果を踏まえると、これはイライト粒子の破壊に伴う細粒化と mesopore への選択的充填が起こった結果と考えられる。こうした細孔の閉鎖は、透水性の低下を引き起こし、地震発生時の高速変形に伴う動的断層弱化過程（熟圧化）に寄与した可能性がある。本章の最後では、延岡衝上断層の知見に加え、より浅部の断層岩を用いて実施した間隙構造解析の結果に基づいて、沈み込み帯の深度に応じて、断層変形に伴う間隙構造がどのように変化するかを検討した。ここでは、micropore 容積や mesopore 容積との相関の高かった BET 比表面積を例にとり、各試料の母岩の比較を行ったところ、深さ3 km 程度を境に、比表面積の急激な減少が確認された。これは、この深度付近から流体を介した多様な続成作用（スメクタイトのイライト化反応や鉱物のセメンテーション、圧力溶解変形）が始まることに対応していると考えられる。一方、断層中軸や破碎帯といった脆性変形帯における比表面積の変化に注目すると、深さ3 km 程度を境に、それ以浅では母岩に対して増加する傾向にある一方、深部ではほぼ変化が見られないかむしろ低下する傾向にあることがわかった。先述の通り、これは深部における流体を介した続成作用の進行が大きく作用していると考えられる。本研究により、沈み込み帯における地震発生帯の成立過程において、続成作用が大きく関与していることが示された。またプレート沈み込み帯における続成作用と地震発生過程のさらなる実態解明に向けて、ガス吸脱着法による間隙構造評価が極めて有効な方法であることが示唆された。