

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18734

研究課題名（和文）高圧水を必要としない地震の断層の新しいモデルと高サンプリングデータによる検証

研究課題名（英文）A new model of earthquake faulting that does not require high-pressure water and validation with high-sampling data

研究代表者

飯尾 能久（Iio, Yoshihisa）

京都大学・防災研究所・名誉教授

研究者番号：50159547

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000 円

研究成果の概要（和文）：断層に沿って孤立した塊状の粘弾性領域を分布させることにより、高い間隙水圧なしに、地震性の断層を弱く出来る新しい断層モデルを構築した。長野県西部地域において2017年に発生したM5.6の地震の断層の上下の端付近において、地震前に差応力が非常に小さかったことを見出した。この付近では地震波の低速度域が見いだされており、水の効果による非弾性変形により応力緩和した可能性が示唆される。M4クラスの地震の前震活動において、震源分布に塊状のものがあることや震源移動の途中に分布の飛びが見られることから、前震がカスケード的に発生したのではなく、水の効果により起こされたことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、地震を起こす応力は、従来の定説より桁違いに小さいことが明らかになってきた。その原因として、断層に働く間隙水圧が非常に高いという考えが定説となり、あらゆる現象が高間隙水圧に絡めて説明されている。しかし、地震を起こす断層で高い間隙水圧を長期間保持することは一般的には極めて困難という矛盾が存在していた。高い間隙水圧なしに地震性の断層を弱く出来る断層モデルが構築されたことにより、生起している現象を素直に解釈することが可能となる。地震の発生に関する水の役割についても、客観的な議論や調査研究が進むことにより、災害の軽減に資する地震の発生予測に関する研究が一段と進展するものと期待される。

研究成果の概要（英文）：We developed a new fault model that can weaken seismic faults without high pore pressure by distributing isolated massive viscoelastic regions along the fault. We found that near the upper and lower fault ends of the 2017 M5.6 earthquake in the western Nagano Prefecture region, the differential stress was very small before the earthquake. We found a low-velocity region in this area, suggesting that the stress may have been relaxed by inelastic deformation due to the effect of water. In the foreshock activity of M4-class earthquakes, it is inferred from the clumped hypocentral distributions and jumps in distribution during hypocenter migrations that the foreshocks were not caused by cascading but by water effects.

研究分野：地震学

キーワード：断層の強度 間隙水圧 粘性流動 応力緩和 長野県西部 前震

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、地震を起こす応力の大きさは、従来の定説より桁違いに小さいことが分かってきた。その原因として、断層に働く間隙水圧が非常に高いために強度が下がっているという考えが広く受け入れられている。しかしながら、内陸地震を起こす断層の深部において高い間隙水圧を長期間保持するためには、断層への流体の供給、および、高圧を発生させるための流体の閉じ込めという、相反する2つのことが同時に成り立つ必要がある。これは一般的には極めて困難であり、高い間隙水圧以外の原因を考える必要がある。

断層破砕帯の岩石には、水の存在下で粘性流動するものが存在することが知られており、粘弾性変形に伴う応力緩和により、断層を弱くすることが可能である。このことは、これまで全く検討されてこなかったが、内陸地震の断層端において、大地震の前に応力緩和が起こっていたことが余震の詳細な解析から示されており(Iio et al., 2023)、地震発生域において、実際に粘弾性変形が起こっている可能性が高い。このように、粘弾性変形による断層の強度に関する研究が重要となっていた。

2. 研究の目的

断層近傍の粘弾性領域の存在による断層の強度低下の可能性を、観測データの解析と数値シミュレーションにより検討することが本研究の主な目的である。地震発生に関する水の役割を解明することも目的とする。

3. 研究の方法

有限要素法を用いて、断層破砕帯における粘弾性変形による応力緩和によって、断層の強度が低下することを示す。長野県西部地域における稠密地震観測網による約30年間にわたる地震波形データから、大量かつ高精度の地震読み取りデータを作成し解析することにより、モデルの検証を行うとともに、地震発生と水との関係を実証的に明らかにする。

4. 研究成果

(1) 高圧水を必要としない弱い断層モデルの構築

地震発生域の断層帯の深部において、断層沿いに孤立した粘弾性領域が分布する有限要素モデルをABAQUSを用いて構築した。図1に断層に直交するモデルの断面を示す。1つの対角線の位置に断層があり、それに沿う紺色の長方形の部分粘弾性領域である。下面と右面を固定、上面を一定速度で押し、左面を同じ速度で引くと、断層を押し付ける力(法線応力)は一定のまま、断層をずらせる力(せん断応力)が直線的に増加する。粘弾性領域の無い均質な弾性体のモデルでは、せん断応力が、仮定した断層の摩擦係数に対応する値となると断層がすべり始める。一方、粘弾性領域がある場合、十分な時間が経過した後は、応力緩和のために、せん断応力は支えなくなるが、法線応力は引き続き支えられる。粘弾性領域の間の弾性領域(アスペリティ領域)では、粘弾性領域が支えなくなったためにせん断応力の増加速度が大きくなる一方、法線応力は変わらないので、断層がすべりやすくなり強度が低下することが分かった。

粘弾性領域の形状や分布を色々変えて計算を行った結果、図2に示すように、粘弾性領域の総面積が大きくなるほど、断層に加わるせん断応力の増加速度が大きくなり、強度が低下する傾向にあることが分かった。アスペリティ領域の長さが粘弾性領域に比べて相対的に短い場合には、強度低下がより大きくなる一方で、断層直交方向の粘弾性領域の幅が広がると、その傾向は弱まることもわかった。

断層粘土などにより断層が弱くなることが知られているが、これらの断層物質の摩擦特性は、基本的にはすべり速度とともに摩擦が大きくなるため、すべりの加速を起こさないものであり、そこで地震を起こすことは難しい。本研究の「断層」モデルは、断層周辺の母岩の変形特性に関するモデルであり、断層面の摩擦特性には何の拘束も与えないため、地震を起こす断層を弱くすることが可能である。

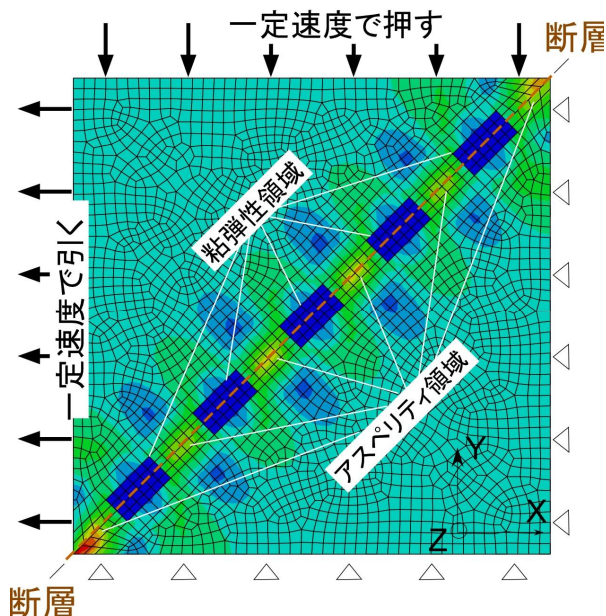


図1 粘弾性領域のある断層の有限要素モデル

(2) 長野県西部地域におけるM5.6の地震の断層周辺の応力場とその成因

1995年から2023年までの10kHz高サンプリング地震データの手動読み取りを完了して、約28年間におよぶ高精度のデータセットを作成した。2008年から2023年までの満点地震観測データについては、手動読み取りデータに、加藤(2023)による機械学習を活用した自動読み取りシステムの処理結果の中の精度のよいものをマージしたデータセットを作成した。

この2つの読み取りデータを統合し、地震波トモグラフィーを行うとともに高精度の震源分布とメカニズム解を求め、逆解析により、約500mから1kmグリッドという高分解能の応力場を推定した。

2017年6月25日にM5.6の地震が、1984年長野県西部地震の断層の北側の、深さ2~5kmで発生した。図3にこの地震の前後の震源分布を断層タイプとともに示した。地震波トモグラフィーにより、断層の上端付近の深さ2kmにおいて顕著なP波の低速度異常域が推定されていた。また、断層の下端の上方、深さ約2km付近において速度構造の時間変化が検出され、水が周囲から流れ込んだ可能性が示唆された。

このM5.6の地震の断層周辺の応力場を高分解能・高精度で推定するために、最初に、その断層面を出来るだけ正確に推定した。地震後には、断層すべりによる応力の急激な空間変化が断層面と断層端付近で起こると考えられるからである。稠密地震観測網により得られた高精度のメカニズム解を活用して、その節面に平行な面から余震の震源までの距離の二乗和が最小となるように断層面の走向と傾斜を決定した。次に、矩形を仮定した断層面の大きさ、位置と向きを、3通りの方法で推定した。i)断層端に余震が集中するように手動で推定、ii)断層端から余震の震源までの距離の和が最小となるように推定、iii)断層直交方向も含めて断層面内の余震数と断層端の位置の関係を折れ線でfitした折れ曲がり点から推定。これらの方法で推定した断層面と断層端が、応力逆解析における解析領域の端になるように、各解析領域を設定して、応力場を推定した。また、断層のごく近傍の余震を外した解析も行った。その結果、図4aに示すように、M5.6の発生後、いずれの結果においても、断層の上下の端付近において、最大主応力の傾斜角が水平から回転することが見いだされた。一方、断層面内付近においてはそのような回転は見られず、安定した方位分布が見られた。

M5.6のすべり分布と初期応力を仮定して地震後の応力の再現を試みた。その際に、断層の上下の端付近において地震前に差応力が非常に小さくないと、上記の主応力の回転についての解析結果を再現できないことが分かった。また、地震前には、このような主応力の回転は見られなかった。

断層の上端付近においては、顕著な低速度異常域が推定されていた。また、下端付近の速度構造の時間変化が検出された領域は、断層の下端より数km上方であるが、差応力の低下が推定された領域に非常に近い。また、この領域

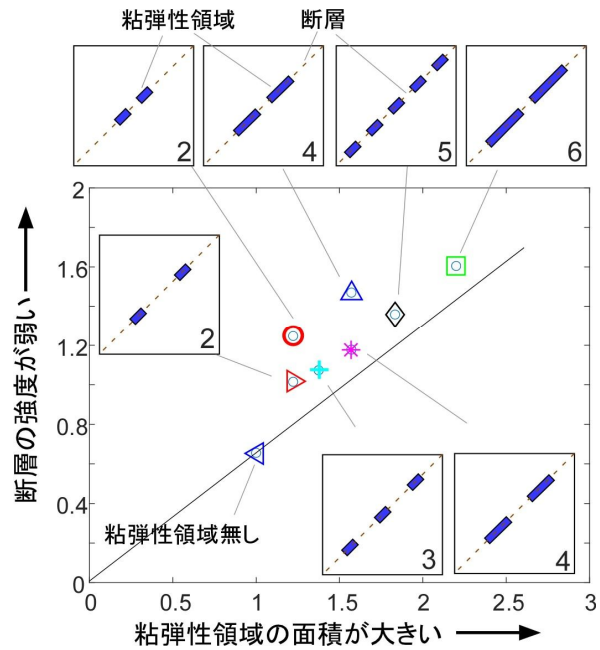


図2 粘弾性領域の分布形状・面積と断層の強度の関係。横軸:断層の総面積と弾性領域の面積の比、縦軸:せん断応力の増加速度。

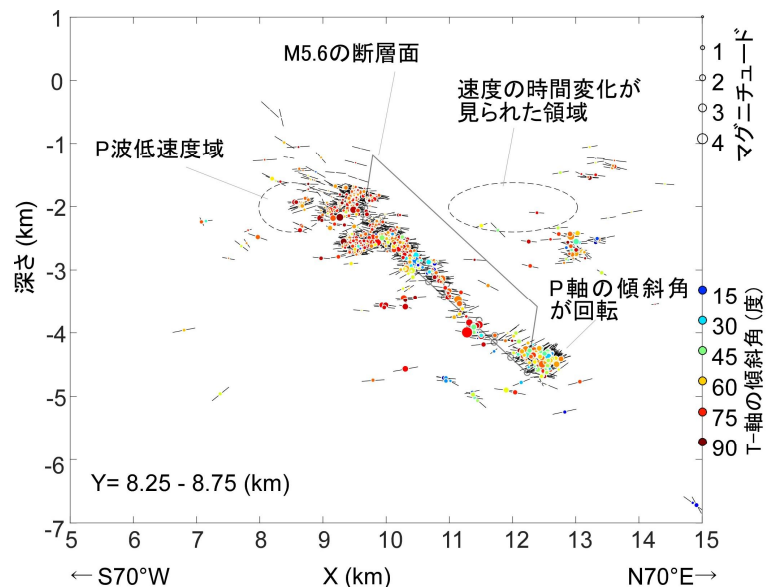


図3 2017年6月25日M5.6の地震の余震の震源分布(2022年3月31日まで)。長野県西部地震の断層の走向と平行な断面に投影。P軸とT軸の傾斜角も表示。四角はM5.6の推定断層面(i)による。

では、余震の震源がぼっかり抜けた空白域となっているが、地震前にも地震活動はほとんど見られなかった。これらのことから、M5.6の発生前に、断層の上下の端付近において、水の効果による非弾性変形により、応力緩和が発生していた可能性が高いと考えられる。この緩和により、M5.6の断層へ応力集中が発生して、地震が発生したものと推定される。また、断層の上下の延長部が存在した場合には、その部分の断層強度が小さかった可能性も考えられる。

(3) 高精度相対震源決定による地震活動の推移の原因の解明

10kHz サンプリング波形データを活用して、Ito(1985)の手法により地震群の高精度相対震源決定を行った。この手法は、ある観測点におけるマスターイベントと他の地震の走時差を、別の観測点の同じ地震ペアの走時差と引き算することにより、地震の発震時を消去して解くべきパラメータの数を減らして、高精度の震源決定を可能とするものである。通常地震波形の場合は、P波やS波の波形全体の相互相関から走時差を推定するが、10kHz サンプリングデータでは、P波初動部分のみを用いることにより破壊開始点の決定が可能となり、個々の地震の位置関係を初めて詳細に把握することが可能となった。M4クラスの地震の前震群にこの手法を適用することにより、前震活動の推移を詳細に明らかにすることが出来た。その結果、前震活動は面状に起こるものと塊状に起こるものの両方があること、震源移動が見られること、震源移動の途中に大きな分布の飛びが見られることがあることが分かった。前震活動は、前に起こった地震が次々と隣接領域を破壊するカスケード的な発生過程を示すものが多いと言われているが、震源移動を示す塊状の震源分布やその中での活動域の飛びは、前震がカスケード的に引き起こされているのではなく、水の効果により引き起こされていることを示唆している。

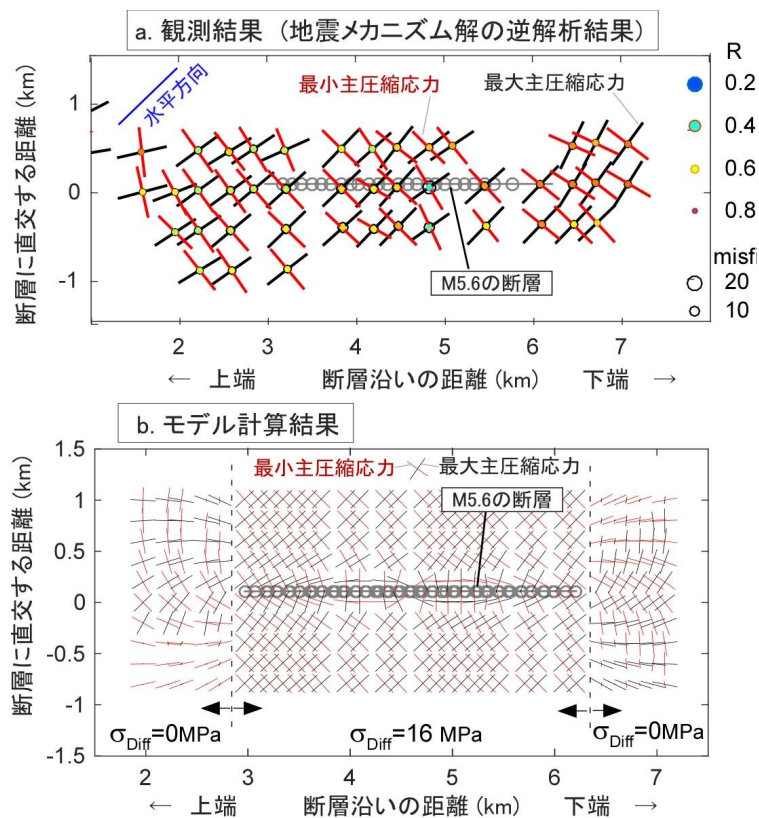


図4 M5.6の地震の断層周辺の応力場。断層に直交する断面に投影。 a. i)の方法で推定した断層面が解析領域の端になるように設定して得られた応力場。 b. M5.6のすべり分布と初期応力を仮定して計算した地震後の応力場。初期応力の差応力(σ_{Diff})を断層端では0MPa、中央部では16MPaと仮定すると、観測結果を再現できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 飯尾能久・野木ひかり・加藤慎也・富阪和秀・澤田麻沙代・野田俊太・土井一生
2. 発表標題 2017年長野県南部の地震(Mj5.6)に関連する応力場
3. 学会等名 日本地震学会2023年秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 飯尾能久
2. 発表標題 高間隙水圧を必要としない弱い断層モデル
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2024年大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	土井 一生 (Doi Issei) (00572976)	京都大学・防災研究所・准教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------