

氏 名	田 所 敬 一
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2184 号
学位授与の日付	平 成 12 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 地 球 惑 星 科 学 専 攻
学位論文題目	Physical Properties of Fault Zone in the Postseismic Stage and its Temporal Change (本震直後における断層の物理的特性とその時間変化)

論文調査委員 (主 査) 教 授 安 藤 雅 孝 教 授 竹 本 修 三 教 授 Mori J. James

論 文 内 容 の 要 旨

これまでの活断層研究から、大地震は同じ活断層が繰り返し破壊して、発生することが明らかにされている。このことは、本震で破壊した活断層は次の大地震までに完全に固着することを意味している。活断層と地震の関係、地震サイクル、さらに地震予知の研究には、断層の固着に関する理解が不可欠である。この問題は現在の地震学で重要な研究項目のひとつである。断層の固着を考えるためには本震直後の震源断層の物理的特性を把握することも重要である。さらに、これまで提唱されてきた断層のふるまい(物理的特性の時間変化)に関しては、Postseismic や interseismic という大雑把な時間区分しかなされていなかった。このようなモデルでは地震発生と関連づけた活断層像を確立したとは言えず、具体的な時間軸の導入が不可欠であった。

本研究は、1995年兵庫県南部地震の震源断層である野島断層を研究対象としている。研究の課題は、震源断層の物理的特性の把握と断層の固着の検出から、時間軸を含んだ断層のふるまいを明らかにすることである。固着完了前後を post-seismic stage と interseismic stage に分け、本震後 interseismic stage に移行するまでの過程を明らかにする。本震後数年しか経過していない野島断層は、本研究にとって最適なフィールドである。

第1章では、研究の意義や位置づけについて述べている。

第2章では、野島断層で行われた注水試験による誘発地震活動をもとに断層の物理的特性を明らかにした。「断層解剖計画」の一環として1997年2月～3月(本震後25～26ヵ月)に注水試験が行われた。注水孔は深さ1800mのボアホールである。注水点はその孔底であり、野島断層破碎、断層破碎帯の透水率(固有透過係数)を求めた。固有透過係数の式はダルシー則、圧縮率の定義、質量保存則から導かれる。その際に必要になる水頭拡散率の値は、拡散方程式の解から誘発地震活動を考慮して得られた。拡散方程式を立てるときには、(1)断層破碎帯は鉛直な半平面、(2)注入された水はその平面内だけを移動する2次元流、(3)水理学的力源はデルタ関数で表される、の3点を仮定した。計算の結果、透水率は $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{ m}^2$ と求められた。この透水率は他地域でのそれよりも大きく、本震後25～26ヵ月の野島断層は透水性が高いことを示唆している。また、注水孔と同じボーリング孔で行われた水圧破壊法による地殻応力測定の結果を用いて、クーロンの破壊基準から誘発地震が発生した場所の摩擦係数を求めた。求められた摩擦係数は0.3以下で、室内実験で得られる値よりも有意に小さいものであった。また、注水による水圧増加は、通常時の間隙水圧や剪断応力の10%程度であることが分かった。これは、この時期の野島断層は、わずかな間隙水圧や剪断応力の増加ですべりを起こすほど強度が低かったことを意味している。以上の議論から導き出された断層破碎帯の性質である高透水性と低強度を根拠にして、本震後25～26ヵ月の野島断層は、いまだ postseismic stage に属すると結論づけられる。

第3章において、野島断層破碎帯の固着をS波スプリッティングの時間変化から検出した。本研究では、本震時の断層運動で断層破碎帯内に形成されたフラクチャの閉塞を断層の固着と定義する。S波スプリッティングの時間変化から断層の固

着が検出できることは、次に述べるような1995年10月～1996年1月（本震から9～12ヵ月；Period IIとする）に発生した兵庫県南部地震の余震を用いたS波スプリッティングの解析結果とその解釈をもとにして提唱された手法である。すなわち、野島断層直上の観測点では、速いS波の振動方向は断層にほぼ平行（北東―南西）であった。これは、本震時の断層運動による断層に平行なフラクチャが破碎帯内に存在することを示唆している。一方、1596年慶長・伏見地震で活動した淡路島東岸の活断層上では、速いS波の方向は広域の最大水平圧縮圧力方向に平行（ほぼ東西）であった。この観測事実は、慶長・伏見地震によって形成されたであろう断層に平行なフラクチャは、過去400年間に固着し、現在では広域応力場によるクラックが支配的になっているためだと解釈できる。以上の解析結果とその解釈から、「断層の固着はS波偏向異方性の時間変化から検出できる。固着にともなう速いS波の振動方向が断層に平行な方向（固着前）から最大水平圧縮圧力方向（固着後）に変化する。」との説がすでに提唱されている[Tadokoro et al., 1999]。本章では、この説に則って野島断層の固着をとらえるため、野島断層破碎帯内の同じ観測点で、Period IIの前後の期間に同様の解析を行なった。まず、大学合同地震観測班による兵庫県南部地震余震観測の波形を用いて、1995年2月（本震から1ヵ月；Period Iとする）において、同様の解析を行なった。Period IIでの解析結果と比較すると、両期間でフラクチャの配列方向を示す早いS波の方向には有意な変化がなかったが、クラック密度がPeriod IとPeriod IIの間で約40%減少したことが明らかになった。これは、一部のフラクチャが完全に閉塞した（断層の固着が進行した）ことを意味している。次に、1997年10月？1998年9月（本震から33？45ヵ月；Period IIIとする）の間に独自に観測点を設置し、地震観測を行なった。解析の結果、野島断層直上の観測点では、速いS波の振動方向がほぼ東西に変化していることが明らかになった。この方向は広域の最大水平圧縮圧力方向に平行であり、広域応力場によるクラックの存在を示唆している。つまり、Period IおよびIIで見られた本震によるフラクチャは完全に閉塞したことを意味しており、断層の固着が完了した証拠である。したがって、本震から33ヵ月後には、野島断層はすでにinterseismic stageにあったといえる。固着の完了までに要した時間は本震後33ヵ月（約2年半）以内であり、野島断層の活動の再来周期が約2000年であることを考慮すると、驚異的な速さである。しかし、このような早期の断層固着は十分に可能であると考えられる。なぜなら、ボアホール・ブレイクアウトの観察や余震のP軸から明らかになっているとおり、1996年の段階では、野島断層近傍での局所的な最大水平圧縮圧力方向が断層に垂直であったからである。そのような応力場の下で断層に平行なフラクチャは急速に閉塞したものと考えられる。また、断層に垂直な最大水平圧縮圧力の下では、野島断層は剪断応力を蓄積することができない。しかし、Period IIIでのS波スプリッティングの解析結果から、野島断層近傍でも主圧力方向が広域応力場と同方向になっていることが示唆される。したがって、野島断層はすでに次の大地震に向かって剪断応力を蓄積しはじめたものと考えられる。

以上の議論を総合すると、野島断層は本震後25～33ヵ月の間にpostseismic stageからinter seismic stageに移行したと結論づけられる。

論文審査の結果の要旨

申請論文は、大地震で破壊して数年以内の野島断層を研究対象として、断層の物理的特性およびその時間的変化の研究を行なったものである。主論文はふたつの部分から構成されている。まず、「野島断層断層解剖計画」で行われた注水試験による誘発地震活動をもとに、本震直後の破碎帯の性質を議論している。申請者は、注入された水が断層破碎帯内を拡散していくとして拡散方程式を立て、その解を用いて断層破碎帯の透水性を $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{ m}^2$ であると求めた。他の地域で行われた測定結果と比較した上で、本震から25～26ヵ月後の野島断層破碎帯は透水性が高かったことを定量的に示した。このほかに、クーロンの破壊基準と水圧破壊法による地殻応力測定の結果をもとにして、誘発地震発生域の摩擦係数を見積もった。得られた摩擦係数は0.3以下であり、室内実験で得られた値よりも有意に小さいことが明らかになった。また、この時期の野島断層破碎帯は、間隙水圧や剪断応力がわずかに10%増加しただけですべり（誘発地震）を起こすほど強度が低かったことも明らかにした。断層の強度に関してはこれまでも議論されてきたが、どの程度の応力増加ですべりを起こすかを具体的に示した例はほとんどない。申請者の研究は、地震断層の物性を知る上で重要な貢献をしたと評価される。

申請者は、以上の議論に際していくつかの仮定を設けているが、それらの仮定が地球物理学的に妥当であることを注意深く検討している。次に、S波スプリッティングの時間変化から断層の固着を検出している。この手法は申請者および共同研究者によって提唱されたものである。S波スプリッティングはよく知られた地震学的現象であるが、それを固着過程の検出

に応用したところが、申請者の研究の新しい発想である。解析には、大学グループの合同地震観測で得られたデータと、これとは別の期間に申請者自身が独自に設置した観測点で記録された波形を用いている。申請者は、データの選別や解析結果のチェックを入念に行っており、得られた解析結果の信頼性は十分に高いものと考えられる。

申請者は、異なる期間での解析結果を比較することにより、フラクチャの閉塞という断層の固着の証拠をS波スプリッピングからとらえることに成功した。また、この結果から野島断層の固着は、本震から33ヵ月という非常に短い期間で完了したことが明らかになった。固着完了までの期間が非常に短いことを示した点を明らかにした点が意義が高い。本申請論文は、断層の固着過程に関して新たな知見を与えた。申請論文では、上記の議論を総合して本震後の震源断層の挙動を具体的な時間経過とともに明らかにし、それに基づき断層固着過程のシナリオを示している。このことは、地震の準備過程や地震予知の研究に大きく貢献するものとして評価される。以上のことから、本論文は博士（理学）の学位論文として価値があるものと認め、平成12年1月24日に論文内容に関する口頭試問を行った結果、合格と認めた。