



Title	Theoretical study on triggering mechanism of earthquakes by stress perturbation
Author(s)	坂本, 龍之輔
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/96419">https://hdl.handle.net/11094/96419</a>
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、<a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 ( 坂 本 龍 之 輔 )	
論文題名	Theoretical study on triggering mechanism of earthquakes by stress perturbation (応力摂動による地震誘発メカニズムに関する理論的研究)
<p>論文内容の要旨</p> <p>海面の変化(潮汐)や地震波による揺れなどは、断層に微小な応力変化をもたらす。こうした応力摂動は地震発生と相関を示すことがある。これは、あと少し応力がかかると、地震が発生する状態にある断層に、応力摂動が作用したためと解釈できる。しかしこれだけでは、スロー地震の一種である微動の潮汐鋭敏性が時間変動する観測結果や、地震波による地震の誘発されやすさに地域性がある観測結果は説明できない。観測されるこれらの現象のメカニズムを推定することは、地震発生の初期過程を理解することや、断層帯の物理特性を制約することにも繋がるため重要である。</p> <p>以上の背景に基づき、本研究では、断層帯に存在し、滑り挙動において重要な役割をする流体圧やガウジ(摩擦により生成された岩石の粉末)が応力摂動に対しどのように応答するかを理解することを第1の目的とした。更に、その理解を基にして、観測された現象のメカニズムを推定し、断層帯の物理特性を制約することを第2の目的とした。これらの目的を達成する為に(1)長周期応力摂動(潮汐応力)に対する流体圧と非地震性滑り域の応答と(2)短周期応力摂動(地震波)に対するガウジの応答を、それぞれ数理モデルを用いて解析した。</p> <p>まず、(1)では、非地震性滑り域を1自由度バネブロックでモデル化し、そのモデルに流体圧変化の効果を組み込んだ。流体圧変化の効果をモデルに導入した場合としない場合で、潮汐応答が全く異なることが明らかとなった。このモデルは微動の潮汐鋭敏性が時間変動する観測結果を再現できる。この結果から、微動の潮汐応答は微動の地震性パッチを取り囲む非地震性滑り域の加減速によって説明できることや、潮汐鋭敏性が時間変動する原因は流体圧変化が徐々に小さくなるためであることが分かった。更に、断層の摩擦特性や水理特性を制約することに成功した。</p> <p>次に、(2)では、粒子シミュレーションによりせん断ガウジをモデル化した。ガウジは共鳴波長において応力摂動に対し鋭敏であり、その理由はせん断剛性率の低下が著しいためであることが明らかとなった。さらに、せん断剛性率低下のメカニズムは粒子間で多数の滑り接触が発生するためであることも発見した。このモデルは地震波による地震の誘発されやすさに地域性がある観測結果を再現できる。この結果から、ガウジが地震波による地震の誘発において重要な役割を果たすことや、地震の誘発されやすさの地域性は断層の成熟度合いの違いを反映している可能性があることが明らかとなった。</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 坂 本 龍 之 輔 )		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査 教授	波多野 恭弘
	副 査 教授	桂木 洋光
	副 査 教授	吉野 元
	副 査 准教授	湯川 諭
	副 査 准教授 (基礎工学研究科)	大槻 道夫

論文審査の結果の要旨

本学位論文は、地震およびスロー地震が微弱な応力摂動によって引き起こされる現象について、地震断層の物理モデルに基づき観測事実の説明と地震断層の特性の制約を試みるものである。その対象は以下二つである：i) 潮汐に伴う応力変動に対応して、スロー地震の一種である微動の発生率が変動する現象のモデル化。ii) 遠地地震波の通過に伴う応力変動によって通常地震が誘発される、「動的誘発」と呼ばれる現象のモデル化。

微動発生率の潮汐応答性に関しては、微動発生率と応力変動の間に生じる位相差が微動バースト前期と後期で異なることが観測から知られている。この現象がどのような物理的機構によって生じるのか、従来の理論的研究では説明ができていなかった。本研究で提出されたモデルにおいては、微動の発生するプレート境界面に間隙流体圧の高い領域を仮定し、すべりに伴うダイラタンシーによって間隙流体圧が変動する効果を考えた。注目領域の一様性を仮定することで、モデルは最終的に三変数の常微分方程式系に帰着されるが、このモデルはその簡素さとは裏腹に非自明な結論をいくつか導き出す。例えば微動発生率の値と応力変動の間に生じる位相差を岩石物性と摩擦則のパラメタの関数として計算できる。そして発生率と位相差を観測結果と比較することで、実験・観測からは同定が難しい断層パラメタに制約を与えることができる。ここでは、地震学の文脈で重要な量であるが同定が難しい「臨界すべり長」について、それが  $10^{-2}$  から  $10^{-1}$  [m] 程度であることを結論した。この値自体は現時点で直接の検証は不可能であるものの、いくつかの間接的な推定とは大きく離れていない。スロー地震の本質的な物理過程を抽出した簡素な数理モデルを構築し、微動発生率と応力変動の位相差を説明する点において、固体地球科学における本研究の意義は高いと認められる。

動的誘発の研究においては、断層面に広く存在する岩石摩耗物（断層ガウジ）に注目し、これを粉体層とみなして粒子レベルの力学まで考慮することでモデルの空間解像度を高めた。これは、地震波が潮汐よりはるかに高周波数の応力変動であるため、より小さいスケールでの物理過程が本質的と考えられることによる。臨界剪断応力の8割程度の応力状態にある粉体層に、地震波を模擬した過渡的な動的歪みを与えて、不安定すべりが誘発される動的歪みの下限値（臨界歪み）をシミュレーションによって調べた。その結果、臨界歪みは波長に大きく依存し、共鳴波長において顕著に低下することを発見した。共鳴波長においてはまず粉体層全体としての剛性率が低下し、その結果ゆっくりとしたすべりが始まり、ある時点で一気に加速する。このことを確かめた上で、端緒となる剛性率の低下が粒子間のすべりによってもたらされていることを発見した。

ただしシミュレーションにおける臨界歪みの値は  $10^{-6}$  程度であり、例えばカリフォルニアにおける観測値  $10^{-9}$  とは大きな乖離がある。この乖離はシミュレーションと天然断層のスケールの違いに原因があると考えられるため、系の大きさ（厚み以外の方向の長さ）を系統的に変えたシミュレーションを実施し、臨界歪みが系の大きさにどのように依存するか調べた。その結果、臨界歪みは大きな系で小さくなり、その依存性はベキ法則で記述されることを発見した。このベキ則を十分大きな系まで外挿すると、臨界歪みは共鳴波長の時に  $10^{-9}$  程度まで低下すると推定され、観測を十分説明しうる。以上の結果は、動的誘発という重要な観測結果を説明するシナリオとして新奇性が高く、かつ説得力があるものであり、地震学分野における高い重要性が認められる。

共鳴波長の時に臨界歪みが顕著に低下するという知見に基づく、動的誘発の起こりやすさに関して地域依存性があることも説明可能である。実際、日本とカリフォルニアにおける臨界歪みは大きく異なり、日本では  $10^{-6}$  程度、カリフォルニアでは  $10^{-9}$  程度であることが知られている。本論文では、この違いを断層破碎帯の典型的な厚みの違いに起因するとして説明している。この説明は外挿に基づく推測とはいえ一定の説得力を持つもので、他地域での観測結果も含めて今後の観測研究による系統的な検証が待たれる。

このように、本論文では地震断層の応力摂動に対する応答について簡素な理論モデルに基づき説明を与えている。これらの説明はいずれも先行研究では十分なし得ていなかったものであり、地震学に対する本論文の重要な貢献とみなすことができる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。