

令和 4 年 5 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04032

研究課題名(和文) 不安定すべりの発生に先行する長期的な非地震性すべりの発展過程に関する理論的研究

研究課題名(英文) Long-term aseismic sliding processes preceding unstable slip

研究代表者

加藤 尚之 (Kato, Naoyuki)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：60224523

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：速度・状態依存摩擦則を利用した数値シミュレーションにより、不安定すべり(地震)発生に先行する非地震性すべりの伝播過程を調べた。深部の速度強化域の非地震性すべりによる固着域底部での応力集中により地震間の早い時期から速度弱化域内部で非地震性すべりが発生し、浅部に向けて低速で伝播する。伝播速度は、法線応力に反比例し速度・状態依存摩擦則の特徴的すべり量には依存しないことなどがわかったが、この結果は、非地震性すべり域先端での応力集中に着目した破壊力学的モデルで説明できる。地殻変動などからプレート境界での非地震性すべり伝播過程を観測できれば、プレート境界での応力や摩擦特性が推定できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

速度・状態依存摩擦則を利用したモデルにより、プレート境界の多様なすべり現象が説明可能となり、地震サイクルの数値モデルが実現している、しかしながら、プレート境界の応力や摩擦パラメタについての情報は乏しい。本研究では、観測データから、プレート境界の応力や摩擦パラメタを推定できる可能性を示し、より適切な地震サイクルモデルの実現に寄与すると考えられる。また、地震発生に先行する非地震性すべりの特徴を明らかにしたことから、地震に至る過程の詳細が解明され、地震発生への切迫度が評価できる可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：I investigated propagation of aseismic sliding preceding unstable slip, by conducting numerical simulations of earthquake cycles with a rate- and state-dependent friction law. Aseismic sliding within the shallow velocity-weakening plate interface is generated by stress concentration due to deep stable sliding within the velocity-strengthening region. The propagation velocity of aseismic sliding, which propagates upward along the plate interface, is inversely proportional to the applied effective normal stress and independent of the characteristic slip distance of the friction law. This result is theoretically consistent with a model on the basis of fracture mechanics. Stresses and frictional property of plate interfaces may be estimated from observational data about propagation of aseismic sliding.

研究分野：地震学

キーワード：地震 非地震性すべり 摩擦 地震サイクル

1. 研究開始当初の背景

不安定すべりに先行して発生する非地震性すべり(前駆すべり)は多くの室内実験で確認されてきたほか、理論的にも、破壊先端域でのエネルギー解放率と断層を破壊するために必要な破壊エネルギーとの関係で説明されてきた。また、断層摩擦構成則として現在の標準モデルである速度・状態依存則を利用した数値シミュレーションや理論的解析などにより、前駆すべりの発生過程は詳細に調べられている。速度・状態依存摩擦則に基づく地震サイクルの数値シミュレーションによると、断層の地震発生域(速度弱化摩擦域)は地震間に完全に固着しているわけではなく、非地震性すべりがゆっくりと伝播し、地震発生域内部に応力集中域が形成される。このような地震発生域内をゆっくりと伝播する非地震性すべりは、測地データからも推定されるようになってきた。また、近年の地震活動やGNSS等の観測から、プレート境界大地震の数年~数ヶ月前程度に顕著な地震活動や地殻変動が検出され、エピソード的な非地震性すべりの発生による可能性が指摘されている。2011年東北地方太平洋沖地震に先行しては、非地震性すべり速度の周期的変動による地震活動の変化と解釈できるような現象も報告されている。これらは地震発生直前の加速的な非地震性すべりではなく、より長期的な、地震間の非地震性すべりの発展過程に関係するものと考えられる。このような加速的な非地震性すべりに至るまでの過程を理解することは、地震発生に結びつく応力集中過程の解明や、地震の中期的予測可能性を検討するためには重要である。

2. 研究の目的

地震発生直前の加速的な非地震性すべりに限定せず、地震発生に至るまでの長期的な断層面上の非地震性すべりの時空間発展過程を物理モデルに基づいた数値シミュレーションにより詳細に調べる。その結果から、地震発生に必要な応力集中過程についての物理的理解を深め、地震発生に至るまでの中長期的過程を明らかにする。地震発生前の非地震性すべりの伝播速度、すべり速度などが、摩擦パラメータや応力にどのように依存するかを明らかにする。これらの結果を用いて、測地観測から推定されている非地震性すべり過程がモデルで説明可能か否かを検討し、説明可能な場合には断層面の摩擦特性などを推定する。また、ほぼ定常的な非地震性すべりの伝播過程から、地震発生直前の非地震性すべりの加速過程への遷移について詳しく調べ、地震発生に先行する現象の観測結果を説明するかを検討する。

3. 研究の方法

沈み込み域のプレート境界を想定し、速度・状態依存摩擦則を仮定したモデルを用い地震発生サイクルシミュレーションを行う。プレート境界浅部では定常摩擦が速度弱化で不安定すべりが発生する条件、深部では速度強化摩擦で安定すべりが発生しているとする。数値シミュレーションにより、プレート境界にすべり速度とせん断応力の時間発展を計算し、速度弱化域で深部から浅部へとゆっくりと伝播する非地震性すべりの伝播過程を調べる。速度・状態依存摩擦則のパラメータ a (摩擦の速度依存性を表すパラメータ)、 b (摩擦強度回復の時間依存性を表すパラメータ)、 L (摩擦のすべり量依存性を表すパラメータ)やプレート境界にかかる有効法線応力を変化させて、非地震性すべりの伝播過程に及ぼす影響を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 速度弱化域での非地震性すべりの伝播過程のシミュレーション結果 深部の安定すべり域では常に非地震性すべりが発生しており、浅部の固着域(速度弱化域)の最深部では応力集中が発生する。これにより、非地震性すべりは深部から浅部へ向けてゆっくりと伝播する(図1)。この時のすべり速度は、プレート運動速度の1/10程度であり、応力降下量は地震時のそれに比べると非常に小さいが、伝播距離とともに徐々に大きくなっていく。また長期的先行すべりの発生時には、すべりの進行とともにせん断応力が低下するすべり弱体化がみられるが、その際のすべり弱体化距離は、摩擦パラメータである特徴的すべり量の2倍程度である。速度・状態依存摩擦則には、状態変数の発展を記述する式がいくつか提案されているが、aging law, slip law, composite lawについて長期的先行すべりの発生を確認した。この低速のすべりは、ほぼ一定の伝播速度で浅部に向けて伝播する。伝播速度は、プレート運動速度に比例、法線応力に反比例、特徴的すべり量に依存しないことがわかった(図2)。平均的なすべり速度は、地震発生間隔の約80%までは、ほぼ一定であるが、最終的な破壊核形成過程に向けて加速し、すべり速度は地震発生までの時間の逆数に比例して大きくなっていくことがわかった。

(2) 破壊力学に基づく理論的解析 (1)のシミュレーション結果を理解するために、伝播する非地震性すべりの先端での応力集中に着目し、破壊力学的解析を行った。非地震性すべりの進展により、速度弱化域のせん断応力は増大する。これは、非地震性すべりの進展前には、プレート境界のせん断応力は前の地震に発生により、ほぼ地震時すべり速度 V_{seis} に対応する定常的摩擦(いわゆる動摩擦) $\tau_{ss}(V_{seis})$ まで低下している。しかし、非地震性すべりの進展により、非地震性すべり速度($\approx 0.1V_{pl}$, V_{pl} は仮定したプレート相対運動速度)に対応する定常的摩擦 $\tau_{ss}(0.1V_{pl})$ に変化する。地震発生可能な速度弱化域では $\tau_{ss}(V_{pl}) > \tau_{ss}(V_{seis})$ であるため、非地震性すべりの進展により応力が増大するのである。この応力変化(負の応力降下量) $\Delta\tau$ は次のように書ける。 $\tau_{ss}(0.1V_{pl}) - \tau_{ss}(V_{seis}) \approx (b-a)\sigma_n^{eff} \ln(V_{seis}/0.1V_{pl})$ 。ここで、 σ_n^{eff} は有効法線応力である。この応力変化による応力拡大係数は、次のように書ける。 $K_{sl} = 2\Delta\tau(2l/\pi)^{1/2}$ 。ここで、 l は速度弱化域に進展した非地震性すべり発生域の長さである。一方、深部の非地震性すべりにより、非地震すべり域先端では応力集中が生じる。そこでの応力拡大係数は $K_{ds} = G\Delta u(2\pi l)^{-1/2}/(1-\nu)$ 。ここでは深部の非地震性すべり量($V_{pl}T$)、 T は前の地震からの経過時間、 G は剛性率、 ν はPoisson比である。非

地震性すべりが不安定にならず、ほぼ定常的に伝播することから、 K_{si} と K_{ds} はほぼ等しいことがわかる。非地震性すべり発生域の長さ l の時間変化 dl/dt が、その伝播速度 v_r であるから、 v_r は次のように与えられる。 $v_r = GV_{pl}/[8(1-\nu)(b-a)\sigma_n^{eff}\ln(V_{seis}/0.1V_{pl})]$ 。このことから、(1)のシミュレーション結果、非地震性すべりの伝播速度は、プレート運動速度に比例、法線応力に反比例、特徴的すべり量に依存しない、は理論的に説明可能であることがわかる。また、シミュレーションで仮定した数値を代入すると、シミュレーションで得られた非地震性すべりの伝播速度は定量的にもほぼ説明できることも確認した。この結果から、非地震性すべりの伝播速度が観測から推定できれば、プレート境界での $(b-a)\sigma_n^{eff}$ が推定可能であることがわかる。プレート境界、特に地震発生域である速度弱化域での摩擦パラメータや有効法線応力についてはほとんどわかっていないが、これらは地震発生サイクルの適切なモデル化のためには不可欠であり、これらの推定は非常に有用である。

(3) 観測データとの比較 非地震性すべりの伝播は測地データなどから検出できる可能性がある。Bruhat & Segall (2017)は Cascadia 沈み込み帯においてプレート境界の固着域で伝播する非地震性すべりの伝播速度を 30–120 m/y と推定した。(2)で得られた関係を使うと、 $(b-a)\sigma_n^{eff}$ は 0.1–0.3 MPa と推定することができる。この値は、これまで速度・状態依存摩擦則を利用した沈み込みプレート境界域での地震サイクルシミュレーションで、もっともらしい結果を得るために仮定されてきた値とほぼ調和的である。

(4) エピソディックすべりの発生 固着域内部を進展する非地震性すべりは地震サイクルの後半で加速し、エピソディックすべりが発生する場合がある(図1の80年付近のすべり速度の増大)。これは、定常的な非地震性すべりの伝播から、不安定すべり発生に先行する加速過程に移行するものの、すべり域の先端が固着域内部の低応力域に突入したために破壊伝播が停止して、結果としてエピソディックすべりになったものと考えられる。このエピソディックすべりは、 L が小さいほど、また σ_n^{eff} が小さいほど顕著となる傾向がある。このエピソディックすべりは、浅部の低応力域で停止するが、深部方向には高速で逆伝播し、その伝播速度は、その前に定常的な低速伝播過程での伝播速度の数十倍になる。

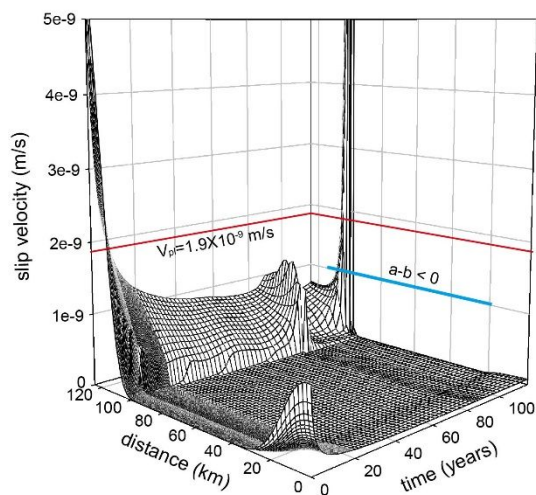


図 1. プレート境界でのすべり速度の時間発展のシミュレーション結果の例。地震発生直後から次の地震発生直前までのすべり速度の変化を示している。時間は前の地震からの経過時間。距離は地表からのプレート境界に沿った距離。113.2km より浅部では速度弱化の摩擦特性、深部では速度強化の摩擦特性である。深部では常に安定すべりが発生し、この安定すべりが速度弱化域に徐々に侵入している過程が見られる。

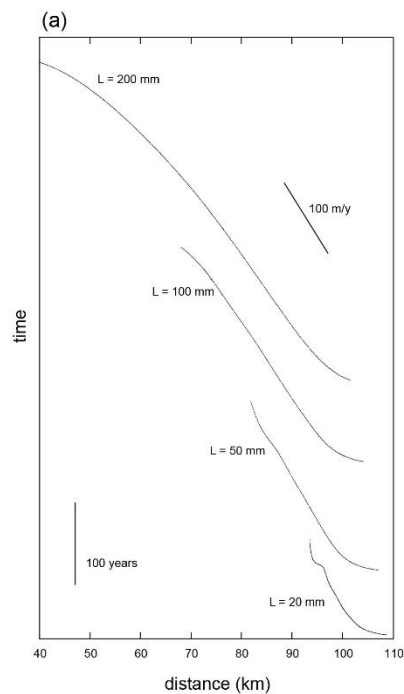


図 2. プレート境界での非地震性すべりの伝播過程のシミュレーション結果の例。非地震性すべり先端の位置を時空間上にプロットした。特徴的すべり量 L を変化させ、他の摩擦パラメータや有効法線応力は一定とした。 $L=20\text{mm}$ の結果は図 1 に対応している。 $L=20\text{mm}$ ではすべり伝播が一度加速した後に減速しているが、これはエピソディックすべり発生に対応している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kato, N.	4. 巻 177
2. 論文標題 Complexity in the earthquake cycle increases with the number of interacting patches	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Pure and Applied Geophysics	6. 最初と最後の頁 4657-4676
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00024-020-02555-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kato, N.	4. 巻 228
2. 論文標題 Propagation of a precursory detachment front along a seismogenic plate interface in a rate and state friction model of earthquake cycles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 17-38
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggab331	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Naoyuki Kato
2. 発表標題 Relation between heterogeneity of frictional property and complexity of earthquake cycles
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤尚之
2. 発表標題 固着域を伝播する非地震性すべりの伝播速度
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------