

(1) 実施機関名：

京都大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

(和文) 地震サイクルにおける断層すべりのモデリングにおけるデータ同化研究  
(英文) Data assimilation study on the fault slip during earthquake cycles

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地震発生確率の時間更新予測

ア. 地震発生の物理モデルに基づく予測と検証

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測（重点研究）

ア. プレート境界巨大地震の長期予測

5 分野横断で取り組む地震・火山噴火に関する総合的研究

(1) 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 本課題の5か年の到達目標：

本課題では、物理モデルによる地震発生予測のプロトタイプの完成を目指している。具体的には以下の通り。

A. 豊後水道と琉球における現実的なプレート形状を用いたSSEデータ同化

(a) 豊後水道および琉球海溝を対象とし、現実的なプレート形状のモデルを用いて、SSEデータ同化システムを構築する。データ同化手法により得手・不得手があるので、アジョイント法とアンサンブルカルマンフィルターの2つの手法で同化システムを構築する。ある程度できているので、早期に完成を目指す。

(b) (a)で開発したモデルを用いて双子実験を行い、摩擦パラメータの推定を行う。また、摩擦パラメータと物理量の初期値の同時推定を試行する。

(c) プレート境界にSSE発生域に加えて固着域がある場合に対して(b)と同様の実験を行う。

(d) 実データを用いた同化実験を行い、SSE発生、および、固着域の固着状態の時間発展の予測可能性を評価する。

(e) (a)~(d)と並行して、八重山地域における独自のGNSS観測を継続する。

B. 粘弾性応答関数の取り込みを実装する。

C. Physics Informed Neural Network による摩擦パラメータの推定手法を開発する。データ同化システムでの利用を試行する。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

物理法則に基づいた断層すべりの予測を目指し、日向灘沖~四国沖の複数セグメントで発生するSSEを対象としたEnKFデータ同化を実施する。これまでの研究で、走向方向に長い断層上での自発的な応力不均質の形成というこれまで見過ごされていたSSEのセグメント化メカニズムが見出されたが、実際

のSSE発生域においては、さらに断層面形状や周囲の断層面固着状態の時空間不均質などを考慮する必要がある。令和6・7年度は、これらを考慮したシミュレーションにより各要素がどのように実際のSSEの挙動、セグメント化を支配するのかを明らかにする。令和8・9年度には、その結果を踏まえて、EnKFを用いたデータ同化の実現に重要となる初期アンサンブルの設定を行い、実際の観測データに対してデータ同化を実施する。令和10年度は、データ同化の実施により構築した数値モデルの現状のデータ再現能力と予測能力を評価する。

また物理深層学習（PINN）を用いた摩擦特性推定・断層すべり予測手法を、実際のSSEに適用する。令和6年度は物理深層学習（PINN）を用いた摩擦特性推定・断層すべり予測手法を2次元断層モデルに拡張し、より現実的な問題設定におけるPINNの有効性を検証する。令和7年度は、現実的なプレート形状を導入し、データ同化による摩擦特性推定・断層すべり予測に関する数値実験を行う。平面形状の場合の結果と比較を行う。この結果に基づき、令和8年度に実観測データへの適用により摩擦特性の推定を行う。また令和9年度には得られた摩擦特性により次のSSEの発生やSSEの時空間発展の断層すべりの予測の試行を試みる。令和10年度は、より現実的に、運動学的に固着域を置いたときの過去の断層すべり状態の推定および将来予測の試行を行う。上記をデータ同化とPINNを用いた手法で検証する。

また巨大地震後の余効変動に対するデータ同化適用において、粘弾性変形・余効すべりを考慮した同化手法開発および数値モデルの改良を行う。令和6・7年度はEnKF及びアジョイント法の適用・非線形数値モデルに対する両者の性能を比較する。東北地方太平洋沖地震後の余効変動等実際の問題に適用する。令和8年度からは、剛性率の不均質構造を考慮できるよう数値モデルの改良を行い、変形すべりの推定・推移予測の向上を図る。

## (7) 令和6年度の成果の概要：

### ・今年度の成果の概要

#### (1) 南海トラフにおけるSSEの発生物理モデル - データ同化のためのモデル構築

断層すべりは岩石の摩擦実験から得られた速度状態依存摩擦則（RSF則; Dieterich, 1979; Ruina, 1983）に基づいてモデル化され、現実の断層で見られる不均質なすべりは通常摩擦特性や断層形状といった不均質性により解釈される。実際、速度弱化特性を持つ高速すべり（地震）は、モデル内においてすべりの伝播が停止するには何らかの不均質を必要とする。これに対して非地震性のすべりイベントであるスロースリップイベント（SSE）は、地震と同様に速度弱化ではあるが、走向方向に長い断層においては断層面上の不均質がなくても、セグメントに分裂して発生することが報告されている（大島2023）。南海トラフ沿いでは、プレート境界の深さ35km程度の位置に長期的SSEが広く分布し、複数のセグメントに分かれて発生している。この観測されるSSE発生様式の背景には、大島（2023）で示されたSSEのすべりの特性が関係している可能性がある。そこで、本年度我々は（大島（2023）で示されたSSEすべりの特性を、数値モデルを用いてより詳細に調べた。

走向方向に長い均質断層で起こるSSEは、前述の通り自発的に分裂して発生する。断層の摩擦特性によって、SSEセグメントの境界は時間方向に変化しない場合（大島, 2023）や境界が現れたり消えたりと時間方向に変動する場合（Liu, 2014; Li et al., 2018）がこれまでに報告されている。本研究では、全無限均質等方弾性体中の一定速度で載荷される平面断層を設定する（図1）。この断層は走向方向に長い一様なVW領域とそれを囲む速度強化（VS）領域を持つ。我々はVW領域で発生するSSEの発生様式を網羅的に調べる数値実験を実施し、VW領域のすべりパターンがVS領域の有効法線応力 $\sigma$ に大きく影響されることを見出した（図2）。断層強度を $|a - b|\sigma$ とすると（Luo and Ampuero, 2018; a, bは摩擦パラメータ）、VS/VW領域の強度比が10を超えるような大きな値を持つとき、SSEはカオス的なパターンを示し、セグメント境界は一定でなく時間方向に変動した。一方VS/VW領域の強度比が1.0程度と小さい場合には、周期的で持続的なSSEが発生し、セグメント境界は時間方向に変化せず一定であった。このすべりパターンの違いの原因は未だ十分に解明されていないが、SSE発生時のVS領域へのすべりの染み出し方の違いが原因として考えられる（図3）（錦織・他、2024地震学会）。

我々はさらに、数値計算における初期値依存性もまた地震とSSEで異なることを見出した（図4）。数値計算では、RSF則に従う断層すべりの時間発展を計算する際、初期条件（すべり速度・状態変数の分布）を人工的に与える必要がある。地震サイクルシミュレーション（ECS）では、これら初期条件の影響は時間が経過するにつれて消失するという暗黙の仮定がなされる。実際、断層全域を破壊するようなイベントが起こるケースでは、初期条件の影響を受けた不規則なパターンがシミュレーションの

初期段階で現れるが、数サイクル後には摩擦特性に依存した規則的なパターンに収束することが示されている。地震による急速で大きな応力変化が断層全体に及び初期条件の影響を打ち消すように作用すると考えられ、そのためECSでは一般的に初期条件の影響は無視できるとされてきた。

一方走向方向に長い均質断層上のSSEの場合には、初期条件の影響が持続し、SSEの発生パターンに継続的に影響を与えることが分かった。VW領域の摩擦特性を固定した上で、走向方向に沿った正弦波形の初期すべり速度分布 $V$ を導入し、初期すべり速度分布の波長 $\lambda$ を様々に変化させる数値実験を行った。VS/VW強度比が10以上と大きな値を持つ場合、 $\lambda$ の違いによるすべりパターンの違いは確認できなかった。これは、地震の場合と同様に、時間の経過とともに初期条件の影響が消失することを示唆している。一方、VS/VW強度比が1程度と小さい場合、発生する周期的で持続的なSSEのセグメント数が $\lambda$ に依存して変化することが確認された。VW領域の摩擦特性に基づく臨界核形成長さにおよそ依存してセグメントサイズ・セグメント数には上下限が存在するが、これらは初期速度の波長 $\lambda$ によって変化し、つまり初期条件の影響が継続して残ることを示している。このことは、地震の場合とは対照的に、SSEではイベントの発生による緩やかな応力変化は初期条件を打ち消すには不十分であると解釈され、地震とSSEの持つ異なるすべり特性であると言える。

## (2) 八重山地方でのGNSS連続観測

琉球海溝の八重山地方では、1771年に明和の大津波が発生しており、これが巨大地震によるものであれば、200年以上にわたって歪みエネルギーを蓄積していることになる。また、プレート境界深部では、スロースリップイベントが6~8ヶ月おきに発生しており、地震発生域での応力の増加と相互作用している可能性がある。我々は、7点（石垣島2点、西表島2点、黒島1点、小浜島1点、与那国島1点）のGNSS独自観測点を設置し、2012年から観測を継続している。しかし、コロナ禍で設置している学校の校舎内へのアクセスが制限され、機器の不調により中断していた。2023年度までに問題を把握し、2024年度中に7点中6点を再稼働させることができた。

## (3) 応力回転とすべり分布による地中の背景応力場の推定

本課題での目的の1つであるすべり分布推定に用いるデータは地表付近で得られた地殻変動データであり、地下のすべり分布の推定精度や分解能には限界がある。一方、地震波データを元にした応力インバージョンから得られた応力場の空間的な不均質、特に主応力軸の空間的な差異（応力回転）に着目することで、すべり分布の推定精度・分解能向上に寄与できる可能性がある。その基礎的な試みとして、応力回転と既に得られたすべり分布から地中の背景応力場推定を行った。

解析対象としたのは2000年鳥取県西部地震の余震域である。P波初動データにより応力場（具体的には主応力軸の向き）の空間変動を推定する手法[Iwata, 2018, JGR; Iwata, 2023, JpGU]により、本震時に大きく滑ったとされる領域の両端で顕著な応力回転が得られている。断層モデルには波形インバージョンに基づく岩田・他[2000, 地震学会秋季大会]によるものを用い、この応力回転を説明するよう、背景応力場の推定を行った。

具体的には以下の通りである。岩田・他[2000]のモデルとOkada[1992, BSSA]のプログラムより、本震の断層運動により生じた静的応力変化を求め、これを空間一様な背景応力場に加えることで地震後の応力場の空間分布を得ることが出来る。この応力場の主応力軸の向きと、P波初動データから推定されたものが極力合うような背景応力場を求めればよい。山陰地方における過去の研究に基づき、 $\sigma_2$ （中間主応力）軸の向きは鉛直方向であると仮定した。そして、応力軸の向きの差異は平均0のvon Mises分布（角度に対して頻繁に用いられる確率分布）に従うとし、最尤法により $\sigma_1$ （最大主応力）および $\sigma_3$ （最小主応力）軸の（水平面内での）向き及び各主応力の大きさを推定した。

推定結果として得られた背景応力場の各主応力の大きさは $\sigma_1 = 19.1$ 、 $\sigma_2 = 11.2$ 、 $\sigma_3 = -26.2$ （正の値は圧縮方向の応力に対応。単位はMPa）で、 $\sigma_1$ 軸の向きはN103°E（よって $\sigma_3$ 軸の向きはN13°E）であった。既存の研究（例えば塚原・小林[1991, 地震]）では山陰地方における広域応力場の水平面内での $\sigma_1$ 軸の向きは東西あるいは西北西-東南東であり、それと整合的である。但し、この背景応力場と断層モデルから得られる地震後の応力場の向きの空間分布と、P波初動データから得られたものとの絶対的な合い具合は必ずしも高いものではなく、今後の更なる検討が必要である。

- ・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に

## 対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

現時点の我々の成果は予測には直結しないが、現象の把握と理解のための観測と予測のための物理モデルの両方が物理的予測には必要であり、そのためのプロセスをたどっている状況である。本研究の目標は、現在までの地殻変動データのモニタリング結果と、ある物理モデルがデータにフィットする場合の将来の予測を行うことである。技術的な困難のため完成には至っていないが、まずは現存する摩擦の物理をモニタリング結果に加えることでどのような将来予測が推定されるかを、予測値と予測誤差のセットで求めることは、将来の災害軽減を考える上で不可欠な貢献となると考えている。今後は今計画中に地域を特定して同化モデルを走らせ、観測と摩擦の物理に基づく同化実験を行う予定である。

## (8) 令和6年度の成果に関連の深いもので、令和6年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

- ・論文・報告書等

- ・学会・シンポジウム等での発表

Makiko Ohtani ” Numerical experiments on estimating the fault frictional properties and the viscosity from the postseismic deformation” ,EGU General Assembly 2024, 15 April, 2024 , Austria (Vienna)

錦織健人(京大理)・大谷真紀子(京大理)・平原和朗(香川大学・理研AIPセンター)「走向方向に長い平面一様断層で発生するSSEのセグメンテーションー数値シミュレーションー」、日本地球惑星科学連合大会2024、SCG40-P44、2024年5月28日、幕張市(千葉県)

錦織健人(京大理)・大谷真紀子(京大理)・平原和朗(香川大学・理研AIPセンター)「一様平面断層で自発的に生じるスロースリップイベントのセグメンテーション様式ー速度弱化・強化域の強度日に着目した数値実験ー」、日本地震学会2024年度秋季大会、A08-10、2024年10月23日、新潟県新潟市

岩田貴樹, 応力回転を用いた2000年鳥取県西部地震余震域の背景応力場推定, 日本地球惑星科学連合2024年大会, 2024

Iwata,T.,The background stress estimated from stress rotation using a Bayesian approach, The 4th International Conference on Mathematics and Statistics (ICMS25), 2025

## (9) 令和6年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

## (10) 令和7年度実施計画の概要：

### (1)巨大地震後の粘弾性応答に対するデータ同化手法の適用

過去の東南海地震・南海地震のような隣り合う巨大地震間の誘発可能性評価には断層面上の応力の時間発展を評価・予測する必要がある。地震発生後の余効すべり・粘弾性変形を考慮した断層すべり発展予測を目標とし、我々はこれまでに、均質な弾性-粘弾性の水平二層構造媒質を仮定した二次元粘弾性変形モデルにおいて、地表面変位から粘弾性媒質の粘性率・粘性変形の時間発展を推定するデータ同化手法を開発した。線形粘弾性を仮定した同一のモデルにおいて、EnKF法及びAdjoint法の両手法を適用し、両手法によって同様の推定結果が得られることを確認した。今年度は、非線形粘弾性を考えた場合や、粘性率の不均質がある場合に両手法の推定能力を調べる。

### (2)南海トラフにおけるSSE発生の物理

物理法則に基づいた断層すべりの予測を目指し、我々は長期的スロースリップ(L-SSE)を対象としたデータ同化手法開発を行ってきた。その準備段階として、これまでにL-SSEの基本的な物理メカニズムの調査を進めており、南海トラフ沿い断層深部のように、走向方向に長い領域で発生するL-SSEは、断層面上の摩擦特性が不均質であっても自発的にセグメントに分かれて発生する可能性があることを見出した。そのセグメント化の様子はL-SSE発生域の摩擦特製のみならず、L-SSE発生域を取り囲む領域

の特性にも依存する。L-SSEのすべりが沈み込み方向への染み出許容できるかどうかが大きく影響している可能性があり、本年度はこの点について詳細に調べ、自発的なセグメント化現象のすべりパターンを制御する要因を明らかにする。またL-SSEのセグメント化にするこれまでの一連の研究成果を論文にまとめて国際誌に投稿する。

以上のL-SSEのすべりのパターン研究は、断層面上でゆっくりすべりがどのように開始し停止するかに係る重要な問題である。上記はモデルによる研究であったが、実際の断層面上でこれらを支配する要因を明らかにするには、地殻変動データを用いた実問題の検証が必要である。L-SSEは規模が大きく地殻変動データとして捉えやすい一方で、頻度が少なく、イベント回数は少ない。これに対して、短期的スロースリップ(S-SSE)は規模が小さくシグナルは小さいが、頻度が多い。同一の断層面上で繰り返し発生し、またその空間パターンの変化が捉えられており、L-SSEに加えてS-SSEを調べることで断層面上のゆっくりすべり挙動の解明により近づくことができると考えられる。そこで今年度我々は、L-SSEに加え、S-SSEの物理モデルの構築を試みる。

### (3)八重山地方GNSS連続観測の継続とすべり様式の解明

八重山地方で発生しているスロースリップは発生間隔が6~8ヶ月程度の準周期的なイベントであるが、規模や再来間隔、各イベントのすべり震源関数の様相が異なっており、データ同化実験の格好の場と考えている。2024年度に京都大学独自のGNSS観測点がほぼ復旧したので、2025年度も引き続きGNSS観測を行う。また、「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の枠組みを通じ、ソフトバンク株式会社およびALES株式会社よりソフトバンクの独自のGNSS基準点の後処理解析用データの提供を受け、より稠密な観測点分布でスロースリップの時間発展および琉球海溝での固着の様相を調査する。2025年度は稠密な観測網によるSSEの発生履歴を求め、2026年度以降の同化実験につなげる。

### (4)深層学習に基づく新しいグリーン関数の計算方法の開発

通常のインバージョンと同様、データ同化で用いるグリーン関数が誤差を含むと、予測値や推定値(解析値)に写像されてしまい、予測結果に大きな影響をもたらす。本課題では、今計画の期間中に、Okazaki et al. (2025)によって開発されたPhysics Informed Neural Network (PINN)の手法を用い、弾性・非線形粘弾性の任意の不均質媒質に対してグリーン関数を計算する手法を開発する。2025年度は、2次元のanti-plane, in-planeの問題に対して、弾性不均質性の導入の開発を行う。

### (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

宮崎真一（京都大学理学研究科）,大谷真紀子（京都大学理学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

加納将行（東北大学理学研究科）,研究協力者：岩田貴樹（広島県立大学）,研究協力者：平原和朗（香川大学）,スタンフォード大学,統計数理研究所

### (12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学理学研究科 地球惑星科学専攻

電話：075-753-3911

e-mail：miyazaki.shinichi.2m@kyoto-u.ac.jp

URL：

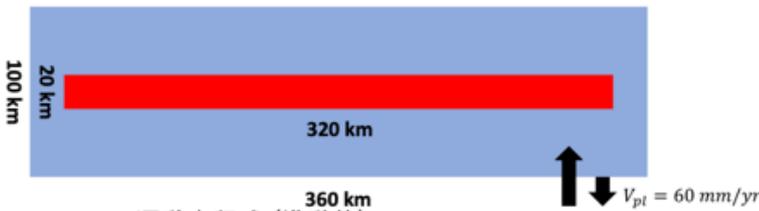
### (13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宮崎真一

所属：京都大学理学研究科

# 走行方向に長い均質なSSE断層モデル

- 全無限弾性体中の均質平面断層
- 速度強化域に囲まれた  
走向方向に長い**速度弱化域**



運動方程式 (準動的)

$$\tau_i = \sum_j K_{ij}(u_j - V_{pl} t) - \frac{G}{2c} V_i$$

[Rice, 1993]

速度状態依存摩擦則

$$\tau_i = \sigma_i \left( \mu_0 + a_i \ln \frac{V_i}{V_0} + b_i \ln \frac{V_0 \theta_i}{d_{ci}} \right)$$

aging law  $\frac{d\theta_i}{dt} = 1 - \frac{V_i \theta_i}{d_c}$  [Dieterich, 1979; Ruina, 1983]

速度弱化(VW)

$$\begin{aligned} a &= 0.010 \\ b &= 0.014 \\ d_c &= 7 \text{ mm} \\ \sigma_{VW} &= 5 \text{ MPa} \end{aligned}$$

速度強化(VS)

$$\begin{aligned} a &= 0.010 \\ b &= 0.006 \\ d_c &= 7 \text{ mm} \\ \sigma_{VS} &: \text{various} \end{aligned}$$

変化させる

$$|b - a| \text{ は VW 域と VS 域で同一}$$

$a_i, b_i, d_{ci}$ : 摩擦パラメータ  
 $\sigma_i$ : 有効法線応力

$u_i$ : セル*i*でのすべり  
 $V_i$ : セル*i*でのすべり速度  
 $\theta_i$ : セル*i*での状態変数  
 $V_{pl}$ : プレート収束速度 = 60 mm/yr  
 $G$ : 剛性率 = 30 GPa  
 $c$ : S波速度 = 3.5 km/s  
 $K_{ij}$ : すべり応答関数

2

図1 断層モデルと設定した摩擦パラメータ

# 速度弱化域と速度強化域の強度比に依存するSSEパターン

断層強度  $\equiv |b - a|\sigma$      $\alpha = \text{VW 域強度} / \text{VS 域強度}$  (Luo & Ampuero, 2018)

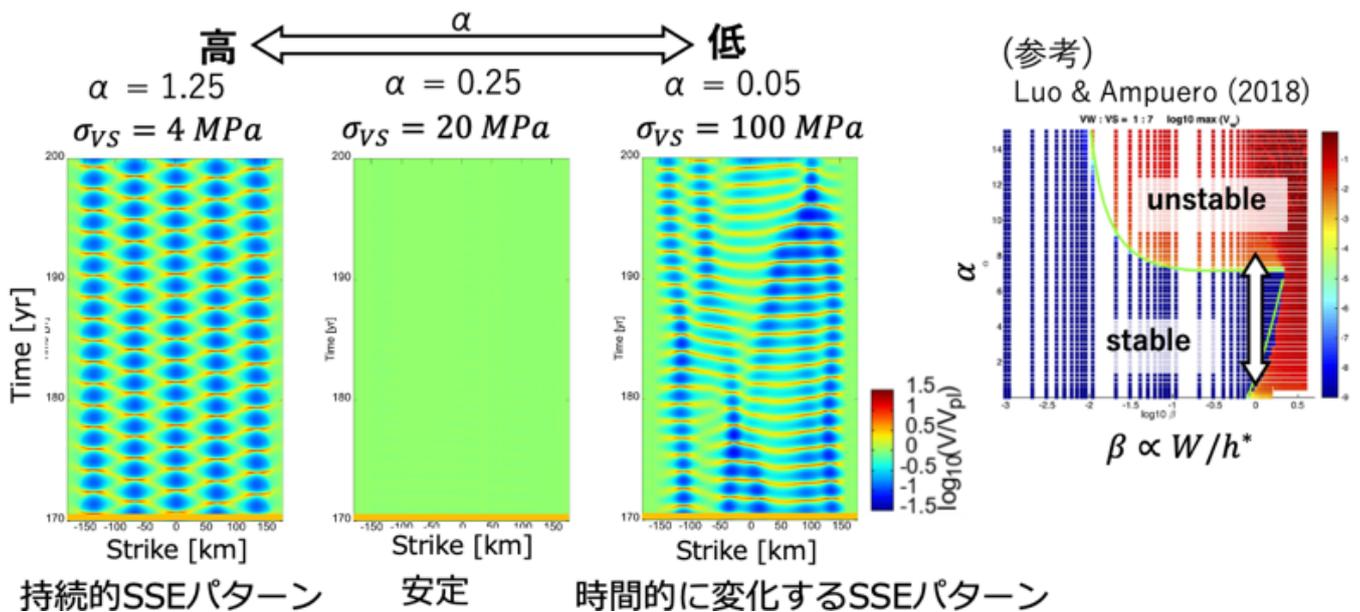


図2 速度弱化域と速度強化域の強度比に依存するSSE 発生パターン

# SSEパターンの違い：速度強化域への染み出し方の違い

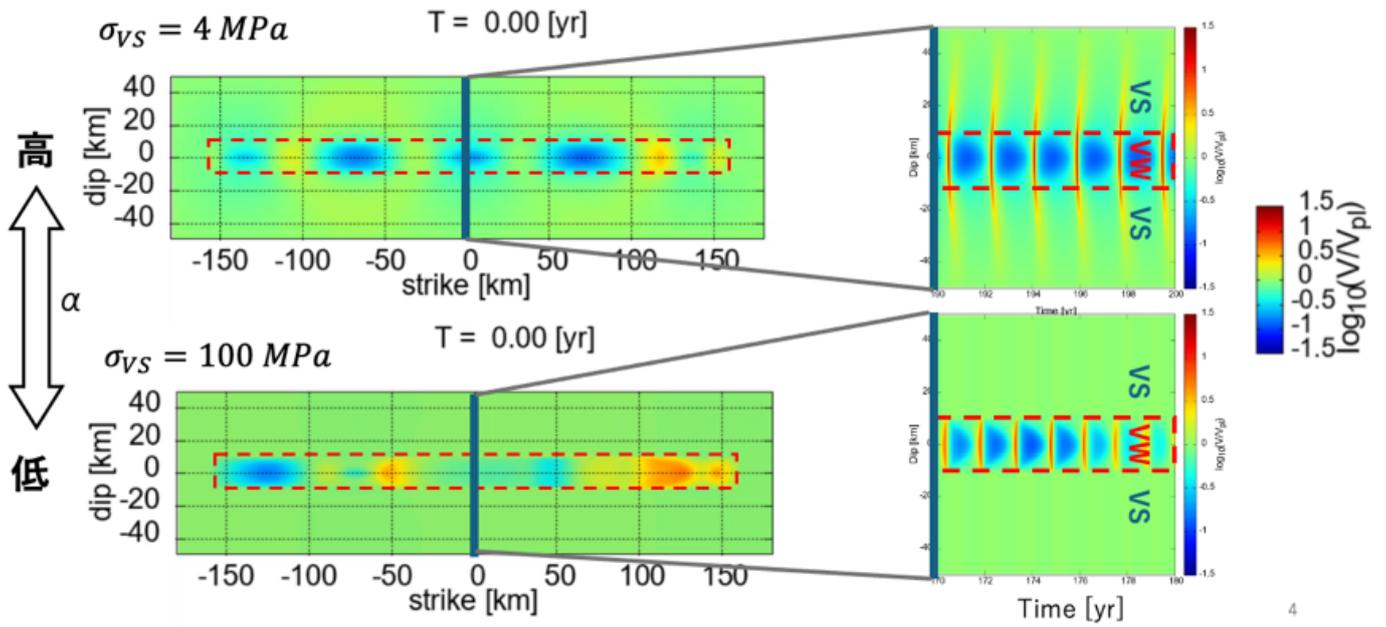


図3 SSEの発生パターンの違い

# 初期条件に依存するSSE発生パターン

Strike方向にsin形な初期すべり速度分布(時刻  $t = 0$ )

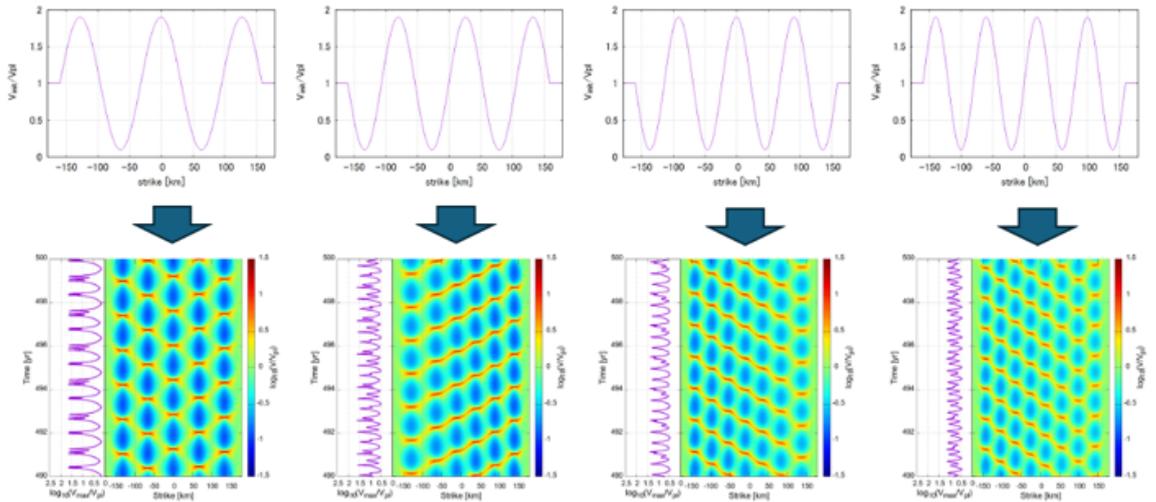
速度弱化(vw)

$a = 0.010$   
 $b = 0.014$   
 $d_c = 6.25 mm$   
 $\sigma_{VW} = 5 MPa$

速度強化(vs)

$a = 0.010$   
 $b = 0.006$   
 $d_c = 6.25 mm$   
 $\sigma_{VS} = 7 MPa$

$\alpha = 1.25$



断層すべりの時空間発展

初期速度分布の波数に応じて、SSEのstrike方向の個数が変化

図4 SSE発生パターンの初期条件依存性