

(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、変形やすべりの推定・推移予測の向上を図る。

## (7) 令和7年度の成果の概要：

- ・今年度の成果の概要
- 課題番号：KUS\_01

### 1.はじめに

この課題では、主として地殻変動の観測データ（以下、単に観測データとよびます）と、摩擦構成則に基づく断層面上のすべり履歴に関する数値モデル（以下、単に数値モデルとよびます）とを統合することで、観測データに合う数値モデルを求めるデータ同化の手法を開発することが目的です。2025年度は、[1] 物理ベースの深層学習 PINNに基づくすべり応答関数の計算手法の開発、[2] PINNによる豊後水道におけるスロースリップのデータ同化による摩擦パラメータの推定、[3] 南海トラフにおけるSSEの発生物理モデル、[4] 南海トラフ沿いで発生する巨大地震発生モデル構築に関する研究、[5] をすすめました。

### [1] 物理ベースの深層学習 PINNに基づくすべり応答関数の計算手法の開発

データ同化を行うためには、現実的な観測モデルや数値モデルを用いることが重要です。最近開発された物理に基づく深層学習（PINN）は、支配方程式系、初期条件、境界条件、観測データとの適合性の和を損失関数の形で表わし、興味のある変数・パラメータに関する最適化問題として捉えることで、逆問題を解くことができます。通常の逆解析と異なり、支配方程式や初期・境界条件にも残差を許していることが特徴です。Okazaki et al. (2022) は2次元面外問題において、地震時の断層すべりに対する変位・応力応答の順問題に、Okazaki et al. (2025) は2次元面内問題において、地震時の地殻変動データからすべり分布を求める逆問題にPINNを適用しました。本研究では Okazaki et al. (2022) を粘弾性緩和の問題に拡張し、断層運動に対する地震時・地震後の変位・応力応答の順問題と、地震時・地震後の変位データから地震時のすべり分布を求める逆問題にPINNを適用しました。

Okazaki et al. (2022) にならって、2次元の半無限媒質を考えましょう。2層水平成層構造で、上に弾性層、下に Maxwell 媒質の粘弾性基盤があり、弾性層に地表まで延びる鉛直な断層が走っているモデルを考えます。まず最初に順問題として、初期時刻にこの断層で  $s$  だけ横ずれすべりがあったとする面外問題を考えました。このときの媒質の変位応答は、運動方程式と媒質の構成方程式、地震時において断層面上のすべり量を与える初期条件・境界条件、自由表面の境界条件、層境界での接続条件をL2ノルムの形で表し、その和をとった量（損失関数）が最小になるような最適解を求めました。

得られた変位場と応力場は、解析解の特徴をよく再現していますが、ほぼ完全に一致するとはまだ言えない状況です。

さらに、解析解に基づいて人工的にデータを生成して観測データとし、観測値とPINNによる計算値の差を損失関数に与え、PINNですべり分布を求める逆問題にも取り組みました。得られたすべり分布は、PINNに与えている方程式系を満たす力学的に整合がとれた解になっていますが、真のすべり分布から有意にずれており、その原因を検討しているところです。

## [2] 物理ベースの深層学習 PINNに基づく断層面上の摩擦パラメータ分布の推定

物理法則を組み込んだ機械学習手法である物理深層学習（Physics-Informed Neural Networks、PINN）を用いた摩擦特性の空間分布推定手法を、2010年に豊後水道で発生した長期的スロースリップを含むGNSSデータに適用しました。その結果、四国南西部から豊後水道にかけて東西に楕円型に伸びる速度弱化域とその周囲を取り囲むような速度強化域が推定されました（図1）。この結果からすべりが足摺岬直下で始まり西方へ伝播したことが明らかになりました。また、推定された断層すべりを用いると、強い制約を課す従来型のデータ同化では再現できない地表変位の時空間パターンを再現することが分かりました。この成果は、PINNを用いた物理に基づく逆解析の有効性を示すもので、断層の物理の理解や将来的な断層すべり予測の発展につながる可能性を示しています。

なお、本成果は「情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト」との共同で得られた成果です。

## [3] 南海トラフにおけるSSEの発生物理モデル

### (1) 走向方向に長い均質平面断層上のすべり挙動

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てきました。しかし、走向方向に長い均質な断層面上において、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) が自発的にセグメントに分裂して発生する様子が数値モデル研究により報告されており(Dal Zilio et al., 2020; 大島2023)、我々はこのようなSSE挙動を、数値モデルを用いて詳細に調べてきました。

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します。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)が報告されています。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します。この断層は走向方向に長い一様な速度弱化(VW)領域とそれを囲む速度強化(VS)領域を持つものとします。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ました。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領域の強度比が大きいとき、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ました。一方強度比が小さい場合には、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した。前者でSSEはVS領域へすべりがよく染み出すのに対して、後者では殆ど染み出さしません。この違いがカオス的/規則的なSSE挙動の変化原因と考えられます(錦織・他、2024地震学会)。

本年度我々は、VS領域の $\sigma$ に依存するSSE挙動を理解するために、上記断層モデルに対して線型安定性解析を行ないました。低 $\sigma$ では、実現されるSSEセグメントの空間パターンは大きな成長率を持つ線形化摂動の空間パターンに対応し、安定した規則的なセグメント化したSSEとなっていると理解できます。一方高 $\sigma$ では、大きな成長率を持つ線形化摂動の空間パターンは単一セグメントのものでした。単一セグメント、つまり分裂しないSSEが予測されますが、モデル上では様々なサイズにカオス的にする分裂SSEが観測されます。これは、予測される単一セグメントのサイズが、断層のdip方向の幅と同程度である震源核形成サイズよりもはるかに大きいために、不安定の成長過程でそのサイズを維持できず、結果として起こるSSEは分裂し、低 $\sigma$ の場合とは異なりその分裂は安定なものではなくカオス的になると解釈されます。

これらの結果は、先行研究で示された均質断層におけるSSEのダイナミクスを説明するものです。本研究はSSE断層の周囲の状況がSSEのすべり挙動を決める重要な要因であることを示しています。本研

究では特に周辺領域の有効法線応力に焦点を当てましたが、隣接する地震発生域の位置や固着状況など、SSEの染み出し方に関わるものは同様にSSEのすべり挙動に作用すると考えられます。以上の研究成果を現在国際誌に投稿中です(Nishikiori et al., submitted)。

## (2)短期的SSEの発生モデル構築

SSEのうち、特に発生期間が数日から数週間程度まで、再来間隔が数か月程度までと短いものを短期的SSE(以下S-SSE)といいます。南海トラフ領域では四国西部の深部で多数のS-SSEが検出されており、7か月程度の再来間隔や、11日程度の継続期間を持つことがわかっています(Yabe et al., 2023)。またYabe et al. (2025)はS-SSEの詳細なすべり過程を明らかにし、断層面上を伝播する様子や、モーメントレート関数の概形が頂点の前後で非対称となり後ろに伸びた形であることを示しました。

本年度、我々はこれらの特徴を再現するS-SSE発生モデルの構築を試みました。速度・状態依存摩擦則(RSF則; Dieterich, 1979; Ruina, 1983)、Aging則(Ruina, 1983)に基づく断層すべり準動的シミュレーションを実施し、現れるすべりイベントのモーメントレートの時間発展や、最大すべり速度・継続時間・発生間隔といった物理量を調べました。

まず平面断層を仮定し、SSEの発生域として速度強化(VS;  $a - b > 0$ )領域に囲まれた円形または矩形の速度弱化(VW;  $a - b < 0$ )パッチを考えます。VW領域の形状に依らず、 $a - b$ またはLの増加に伴い各物理量は減少しました。これは震源核形成サイズが増加することに伴うすべりの変化として解釈できます。ただし矩形パッチではLの増加に伴い発生間隔が増加し、これはイベントの開始位置がケースによって変化することによると解釈できます。イベントの発生様式はVWパッチ形状によって異なり、円形の場合は同一のイベントが繰り返す規則的な周期的イベントが現れました。一方矩形パッチでは規則的な周期的イベントを示すケースに加え、摩擦パラメタによっては、イベントのくり返しごとにすべり過程が変化する非周期的なケースも見られ、非周期的なケースでは観測で見られた複数のピークを持つモーメントレートを描くものもありました。またS-SSEのすべり挙動はVS領域の有効法線応力にも依存し(Nishikiori et al., submitted)、VS領域の有効法線応力がVW領域に比べて高い場合には、すべりが局所化しさらに走行方向に伝播する様子が再現できました。しかし、いずれの場合においても、観測される全ての物理量を再現する摩擦パラメタは存在しませんでした。例えば観測と同程度の最大すべり速度・発生間隔を持つ場合の継続時間は観測より長くなりました。

次に、実際の断層面形状を取り入れ、一定の深さにVW領域を設定して、現れるすべり挙動を調べました。断層面形状の効果により、イベント時に大きくすべる領域は観測と同様に四国西部に局所化しましたが、観測で見られたような走行方向のすべりの伝播は見られませんでした。以上のことから、観測で見られる南海トラフ深部S-SSEの特徴を再現するには、今回設定したaging lawとは異なる摩擦則や断層面上により複雑な摩擦不均質を考える必要があると考えられます。

## [4] 南海トラフ沿いで発生する巨大地震発生モデル構築

南海トラフ沿いでは、マグニチュード8~9クラスの巨大地震が繰り返し発生しています。これら一連の地震発生は、プレート境界上の摩擦不均質を考慮した3次元断層モデルを用いた、速度・状態依存摩擦則(RSF則; Dieterich, 1979; Ruina, 1983)に基づく準動的シミュレーションによって再現されています(Hirose et al., 2022; Hyodo et al., 2016)。最近、Noda et al. (2021)によってプレート境界における現在の剪断応力変化率が推定されており、力学的な固着域を示唆する4つの局所的なピークの存在が指摘されています。これらの領域は過去に発生した地震の主要なすべり域に対応しており、将来の主な破壊領域となる可能性を示しています。本研究では、以上の観測された剪断応力変化率分布を再現できる地震発生モデルの構築を試みました。なお、上記剪断応力変化率は現在におけるスナップショットであり、地震間を通して必ずしも一定であるとは限らないことに留意する必要があります。まず我々はHyodo et al. (2016)に従い、主に深さ依存する摩擦特性分布を採用し、プレート境界面形状を導入した断層モデルにおいてすべりの時間発展を計算しました。地震時のすべり分布は過去に発生した地震と矛盾しないものが得られましたが、地震間の剪断応力変化率分布は比較的一様な様子を示し、観測で得られたような局所的なピークは現れませんでした。そこで次に、上記深さ依存する摩擦特性分布に加え、観測された応力変化率分布の4つのピークを表す4つの円形パッチを導入しました。パッチを摩擦パラメタ $a - b$ の不均質によって表されたモデル( $a - b$ モデル)と、特徴的すべり距離Lの不均質によって表したモデル(Lモデル)の2種類を比較します。比較のため、円形パッチ内の摩擦パラメ

タは固定し、パッチの外側領域のパラメータを変化させます。

a-bモデルでは、地震間の剪断応力変化率における4つのピークは再現されるものの、地震は各パッチで独立して発生し、歴史記録とは整合しません。一方、Lモデルにおいて周囲のL値がパッチ内のL値よりは大きいものの極端には大きくない値を取る場合、地震間の剪断応力変化率は、摩擦特性の深さ依存のみを仮定した場合の結果と同様に局所的なピークは現れませんでした。しかしながら、1回のイベントで破壊が複数のパッチにまたがって及ぶ点は歴史記録と整合的でした。パッチ周囲のL値が極端に高い場合、地震は個々のパッチで単独に発生するようになり、a-bモデルと同様に剪断応力変化率のピークが現れました。更なるパラメータ調査は必要ですが、本研究の結果より、単純化された4つのパッチ設定では、観測された剪断応力変化率分布と地震発生様式の両方を同時に再現することは困難である可能性があり、より複雑な摩擦特性不均質を考慮する必要があるかもしれません。

#### [5] 応力比の空間分布推定の試み

地震発生予測や地震の物理を理解するためには滑りの時（空）間発展がどのようになっているかを知ることが重要で、これは主に地殻変動データから推定が行われています。地殻変動データは地表近傍でしか得られず、推定精度や分解能には限界があるため、これに対する方策として、地殻変動以外の他のデータ、例えば応力場情報を用いることが考えられます。

以前、P波初動極性（押し引き）から応力場の空間パターンを推定する手法を開発しまし

た[Iwata, 2018, JGR]。手法の特徴は解析対象領域を分割せず応力場推定を行う点にあります。推定においては主応力軸の向きを3つの角度の組（オイラー角）で表し、オイラー角の空間変化が滑らかに変化するという制約（空間平滑化）を課します。そして、その制約の強さ（重み）も合わせて推定する階層ベイズモデルを用いました。なお、主応力軸の向きの空間変動を推定する際、応力比は空間変動がない（一定）としていました。これは、応力比に空間変動を許して推定を行っても、空間平滑化の重みが非常に大きくなり「応力比が空間一定」ということになってしまうためです。

しかし、こうなる理由は応力場推定の定式化に起因すると考えられます。元々、応力場は応力テンソル6成分で表されますが、P波初動極性は3つの主応力の値の差を反映するに過ぎず、さらにそれらの差の比にのみ影響されます。よって独立に求め得るのは応力テンソル6成分のうち4成分（自由度4）となり、これを3つの角度であるオイラー角と応力比に分けて推定を行っています。このように本来は対等である4つのパラメータを「オイラー角」「応力比」という意味合いの異なるパラメータに分けていることが、応力比の空間変動を求めにくくしていると考えられます。

これを踏まえて、応力テンソルそのものの空間変動を推定することを試みました。上記の通り、P波初動極性から得られるものは応力テンソル6成分のうち4成分なので、「対角成分の和が0」という制約を課し、さらに「応力テンソルに対応する行列の各成分の2乗和が1」（フロベニウスノルムで正規化した行列、以下「正規化行列」）の空間変動を求めることとしました。また、この正規化行列の各成分に対して空間平滑化を課し、Iwata [2018]と同様、階層ベイズモデルにより空間平滑化の重みも推定しました。そして推定された正規化行列より、主応力軸の向きや応力比を求めました。

Iwata [2018]で解析した2000年鳥取県西部地震の余震データへ適用した例を示します。な

お、Iwata [2018]では応力場に対応するパラメータの空間パターンを表現するのにcubic B-splineを用いていました。これに対し、ここでは震央位置を三角形の頂点とするドロネー三角形分割を用い、各震央位置に応力場を表すパラメータを配置する（岩田[2023, 地球惑星科学連合2023年大会]）ことで空間解像度の向上を図っています。

図2に示すとおり、複雑な応力比の空間変動が見て取れます。特に2000年鳥取県西部地震本震時に大きな滑りがあったとされる領域（図2の紫色の矢印のある領域）の中央付近（ $(x, y) = (2, -2)$ の付近）で応力比が小さくなっており、これは本震時の応力解放に対応するものかもしれません。但し、これ以外にも局所的に応力比が小さくなっている箇所が点在しているため、物理的な解釈は今後の課題です。また、計算にはマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いているため計算負荷が過大であり、今回示している結果はあくまで暫定的なものであることにも注意する必要があります。

・「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

(8) 令和7年度の成果に関連の深いもので、令和7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

Fukushima, R., Kano, M., Hirahara, K., Ohtani, M., Im, K., & Avouac, J.-P. (2025). Physics-informed deep learning for estimating the spatial distribution of frictional parameters in slow slip regions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130, e2024JB030256. <https://doi.org/10.1029/2024JB030256>, 査読有, 謝辞無

加納将行、プレート境界の断層すべりの現状把握・短期推移予測に資するデータ同化研究の進展、システム制御情報学会誌「システム／制御／情報」、第69巻8号、2025, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Masayuki Kano, Data Assimilation for Monitoring Fault Slip Behavior, International Workshop on Interdisciplinary Research of Information Science and Seismology, Tokyo, Japan, November 2025

加納将行、福嶋陸斗、大谷真紀子、平原和朗、PINNを用いた断層すべりモニタリング手法の開発、「数値解析が切り開く新たな情報社会～データ駆動型から「富岳NEXT」～」研究集会、京都、2025/10

(9) 令和7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8年度実施計画の概要：

2025年度に行った研究を継続し、発展させます。

(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

Obs / PINN 02/2010 – 08/2010

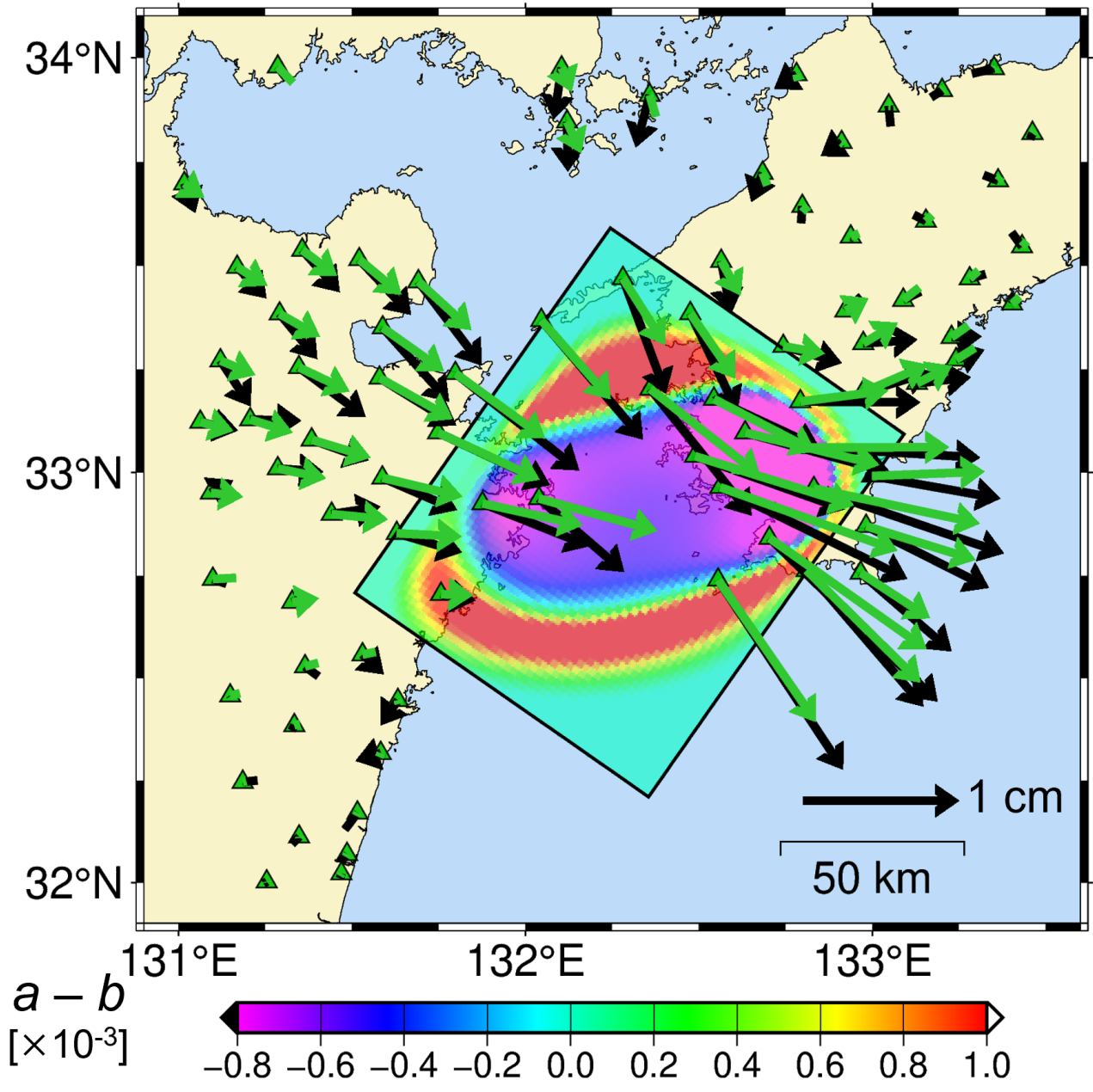


图 1

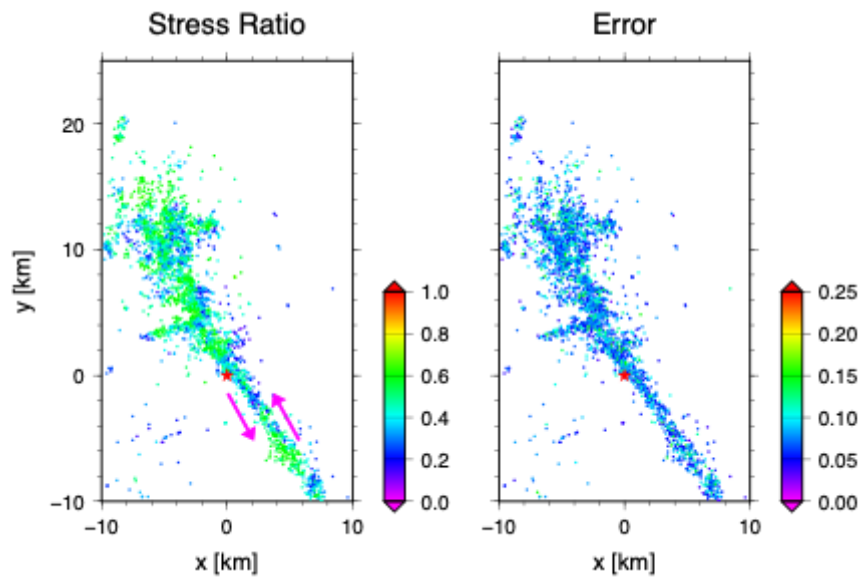


图 2