

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2022

課題番号：20K22368

研究課題名（和文）断層条線の特性から探る大地震の破壊伝播方向

研究課題名（英文）Inferring earthquake rupture direction from curved slickenlines

研究代表者

金子 善宏（Kaneko, Yoshihiro）

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10880255

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：現在、活断層トレンチングによる古地震学的観測から、大昔の大地震の場所、大きさ、頻度を推定することはできるが、破壊伝播方向を知ることは不可能である。本研究では、地震により形成された断層面の擦り傷「条線」の特性に着目し、断層の破壊伝播方向を古地震学的観測から推定することが可能か検証した。まず、過去の大地震で記録された条線の記録と構築した理論に基づき、破壊伝播方向と断層条線の湾曲方向に関係性があることを明らかにした。また、パラメータの異なるモデル計算を数多く実行し、条線の湾曲の特性と断層形状の関係やその物理的要因を明らかにした。これらの研究結果を国内・国際学会で発表し、論文2編を国際誌で出版した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の結果により、地震時に断層面上で記録される条線の湾曲の向きと断層の破壊伝播方向との間に関係性があり、条線の観察から古地震の破壊伝播方向を推定できる可能性が示された。本研究で得られた知見は、世界で起きた古地震の破壊伝播方向の推定や地震ハザードの理解の向上に繋がるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：Currently, we are unable to understand the details of earthquakes that occurred in the distant past. In this work, we propose a new method to uncover the rupture propagation direction of past large earthquakes using geological features preserved on faults scarps, called slickenlines. Slickenlines are scratch marks that form when two sides of a fault move past one another during an earthquake. We developed a theoretical framework that links the geometry of slickenlines with rupture propagation direction for all types of faults and test our model using a global catalog of surface-breaking earthquakes. Our results reveal a strong link between our model and the available data, providing a new way to uncover the rupture direction of large earthquakes that are not recorded by modern seismic instruments.

研究分野：地震発生物理学

キーワード：破壊伝播方向 断層条線 大地震 動的破壊シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

活断層の古地震調査研究は、地震ハザードを推定する上で重要な役割を担っている。これまでの研究手法では、地震波形データが存在しない過去の大地震の場所、大きさ、頻度を推定することは可能であるが、動的パラメータとなる断層の破壊伝播方向を知ることは難しいと考えられている。しかし、地震災害の主原因となる強震動は、断層の破壊伝播がどの方向に進むかによって大きな影響を受けることが分かっている。そこで、「断層の破壊伝播方向を古地震学的観測から推定することは本当に不可能であるのか？、また大昔の大地震の破壊伝播方向を知ることで、地震災害の軽減の為に必要な地震ハザードの予測を飛躍的に向上することができるのではないか」とする「問い」を立て、これへの回答を推進すべく、本研究を立案した。

### 2. 研究の目的

2019年に行われた先行研究において、申請者らはニュージーランドで起きたカイコウラ地震の破壊伝播方向と断層面に形成された擦り傷「条線」の特性に関係があるという仮説を立てた。これまで大地震に伴い地表断層面に形成された条線は、構造地質学者らによって度々記録されてきた。断層条線は、ある地点での断層すべりが起きた方向・動作を示していると考えられているが、破壊伝播方向との関連性に着目した研究は他に例がない。申請者らの新しい仮説は、断層力学の理論に基づいており、断層条線の湾曲の特性と破壊方向の明快な関係を提案している。本研究では上述の仮説をさらに検証するために、過去に世界で起きた大地震の条線の観測結果の解析と、すべての断層メカニズムを包含した一般理論の形成を主目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では以下の3つの課題を進めた。

#### (1) すべての断層メカニズムを包含した一般理論の形成

申請者らがこれまで解析した条線の記録は横ずれ断層であるが、他の種類の断層（正断層や逆断層）においても、過去に条線が記録されている。これらの記録と理論を比較、検証するために、すべての断層メカニズムを包含した一般理論を動的破壊モデルを用いて構築することを試みた。

#### (2) 世界で起きた過去の大地震の条線の観測結果と理論の比較、検証

これまで過去に起きた約55の内陸大地震において、数多くの地震については断層条線の記録が残っている。その内約70%の条線が湾曲しており、断層を挟んで地層が直線的に動いていないことを示している。これらの地震に対して、実際に波形データから推定された破壊伝播方向、震源と湾曲した条線が観測された場所の記録を調べることで、理論との比較、検証を行った。

#### (3) 複雑な断層形状がもたらす条線への影響と理論の発展

実際に観測された地表面の断層は複雑な形状をしていることが多く、条線の形成に大きく影響するはずである。条線の特性が複雑な断層形状によりどのような影響を受けるのかを、簡略化された平面でない断層を取り入れた動的破壊モデルを使って検証した。さらに、ある大地震において観測された条線、断層形状、断層すべり分布、震源について動的破壊モデルを用いて再現できるかを試み、上述の理論の適応性を判断した。

#### 4. 研究成果

(1) まず動的破壊モデルを用いて、すべての断層メカニズムを包含した破壊伝播方向と断層条線の湾曲の一般理論を構築した(図1)。それぞれの代表的なモデルにおいて、HPCを用いて大型の並列計算を行った。その結果、すべての断層メカニズムにおいて、破壊伝播方向と断層条線の湾曲の関係性を示した(図1)。

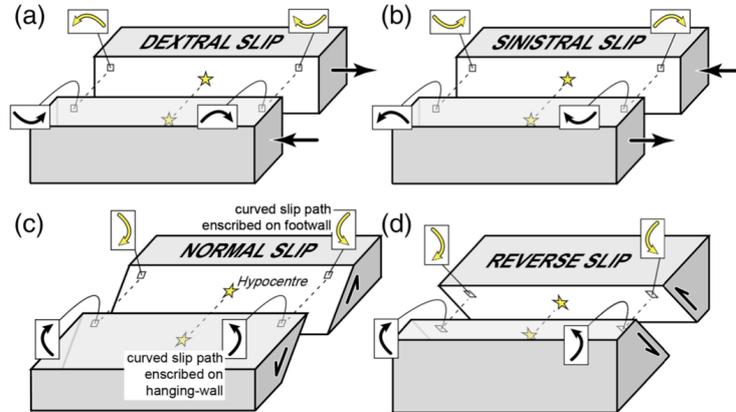


図1：動的破壊モデルから導かれた条線の湾曲と破壊伝播方向の関係性。星は震源、曲がっている矢印はモデルによって導かれた、ある観察点での条線。

(2) これまで世界で起きた、断層条線の記録がある内陸大地震において、実際に波形データから推定された破壊伝播方向、震源と湾曲した断層条線が観測された場所の記録を調べることにより、構築した一般理論との比較・検証を行った。その結果、過去の大地震で記録された条線のほとんど全てにおいて、破壊伝播方向と断層条線の湾曲方向に関係性があることが明らかになった。具体例として、複数の詳細な条線記録が残っている2011年に福島県で起きたM6.6の地震に対して、それらの条線の湾曲方向を動的破壊モデルを用いて再現した(図2)。

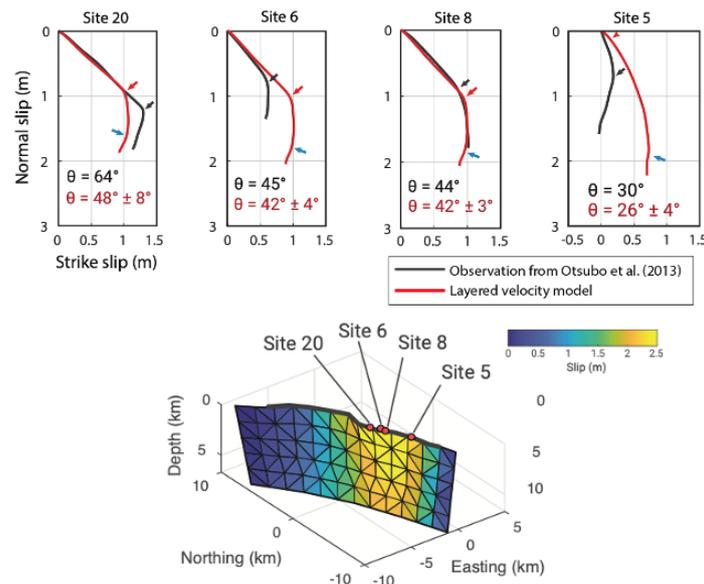


図2：2011年福島県で起きたM6.6地震で観測された条線と、動的破壊モデルから計算された条線の比較。下の図は条線が観測された位置と断層のすべり分布を表している。Macklin et al. (2021)より引用。

(3) 条線の特徴が複雑な断層形状によりどのような影響を受けるのか理解するため、簡略化された平面でない断層を取り入れた動的破壊モデルや形状が粗い断層を含むモデルを構築し、数値解析を行った。その結果、局所的な断層形状の影響により、条線の湾曲方向が周囲に比べ逆向きになるという過去の記録と整合的な結果が得られた(図3)。さらに、パラメータの異なるモデル計算を数多く実行し、条線の湾曲の特性と断層形状の関係やその物理的要因を明らかにした。

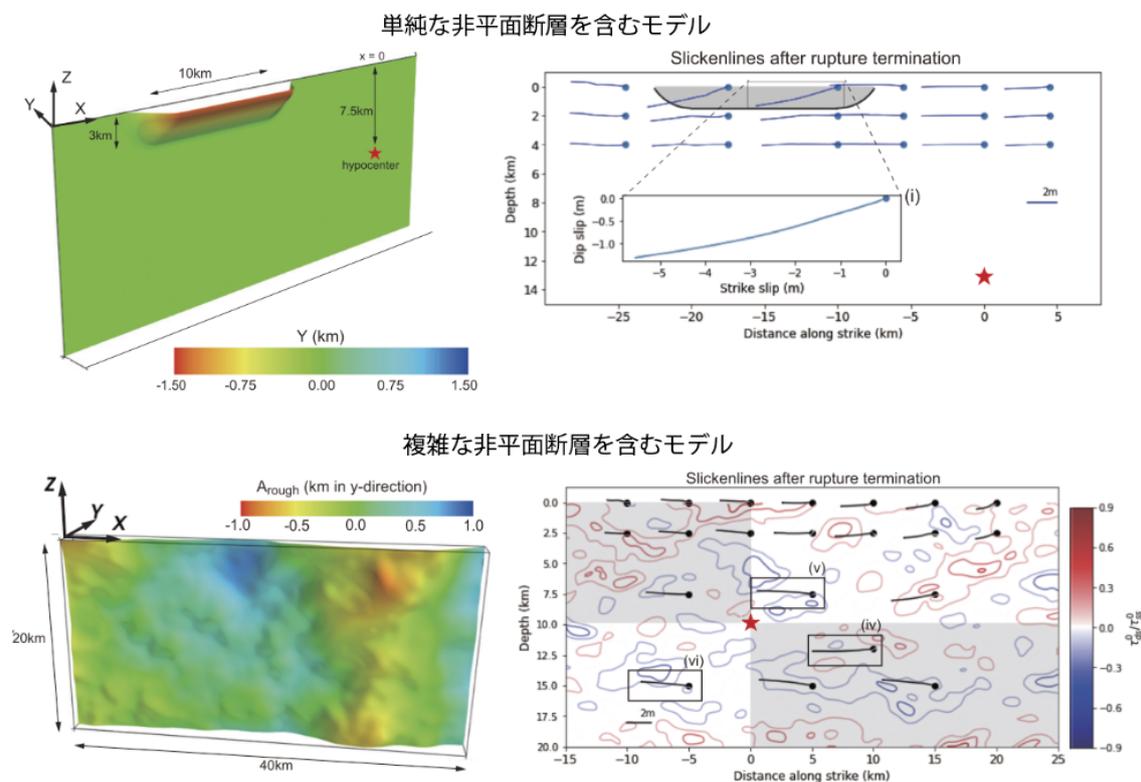


図3：非平面断層モデルにおける条線の湾曲方向への影響。上図は単純な非平面断層を含むモデルの結果。下図は複雑な非平面断層（rough fault）を含むモデルの結果。Aoki et al. (2023)より引用。

本研究の結果により、地震時に断層面上で記録される条線の湾曲の向きと断層の破壊伝播方向との間に関係性があり、条線の観察から古地震の破壊伝播方向を推定できる可能性が示された。

<引用文献>

Aoki, T., Y. Kaneko, J. Kearse (2023). Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults. *Geophysical Journal International*, 233(2), 1124–1143, doi:10.1093/gji/ggac501.

Macklin, C., Y. Kaneko, and J. Kearse (2021). Coseismic slickenlines record the emergence of multiple rupture fronts during a surface-breaking earthquake. *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2021.228834.

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 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Aoki T, Kaneko Y, Kearse J	4. 巻 233
2. 論文標題 Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1124 ~ 1143
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggac501	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 該当する

1. 著者名 Macklin Clarrie, Kaneko Yoshihiro, Kearse Jesse	4. 巻 808
2. 論文標題 Coseismic slickenlines record the emergence of multiple rupture fronts during a surface-breaking earthquake	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.tecto.2021.228834	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 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 青木拓実、金子善宏、Jesse Kearse
2. 発表標題 動的破壊モデルから考察する複雑な断層形状がもたらす条線への影響
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Aoki, Yoshihiro Kaneko, Jesse Kearse
2. 発表標題 Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults
3. 学会等名 JpGU Meeting（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Aoki, T., Y. Kaneko, J. Kearse
2. 発表標題 Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Aoki, Y. Kaneko, J. Kearse
2. 発表標題 動的破壊モデルから考察する複雑な断層形状がもたらす条線への影響
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Aoki, Y. Kaneko, J. Kearse
2. 発表標題 Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Kaneko, C. Macklin, J. Kearse
2. 発表標題 Coseismic slickenlines record the emergence of multiple rupture fronts during a surface-breaking earthquake
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Kaneko, and J. Kearse
2. 発表標題 On-fault geological fingerprint of earthquake rupture direction
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 J. Kearse, and Y. Kaneko
2. 発表標題 On-fault geological fingerprint of earthquake rupture direction
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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