

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18879

研究課題名（和文）地表断層変位の高精度予測を可能にする新理論の構築

研究課題名（英文）Development of Theory for Accurate Prediction of Surface Fault Displacement

研究代表者

澤田 純男（Sawada, Sumio）

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：70187293

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,400,000円

研究成果の概要（和文）：ライフライン構造物のように空間的に複雑なネットワークを構成するシステムの地震対策を進めるためには、システム全体の機能が影響を受けることを避けるため、地表断層変位への対策が必要である。本研究は、スリップパーティショニングや分岐断層により生じる断層変位の発生に関する新しい力学的理論を構築しその高精度予測を目指した。分岐断層を解析可能な数値解析手法を開発した。その上で、いくつかの具体的な事例（2016年熊本地震や1992年Landers地震）について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ライフライン構造物のように空間的に複雑なネットワークを構成するシステムの地震対策を進めるためには、システム全体の機能が影響を受けることを避けるため、地表断層変位への対策が必要である。本研究は、断層の動き方や地表断層の表れ方について、数値解析を駆使しながら実際の現象についてメカニズムの面から考察した。

研究成果の概要（英文）：To promote earthquake countermeasures for spatially complex networks of systems such as lifeline structures, it is necessary to countermeasure against surface fault displacement to avoid affecting the function of the entire system. This study aims to develop a new mechanical theory of fault displacement caused by slip partitioning and bifurcation faults and to predict them with high accuracy. We developed a numerical analysis method that can analyze branching faults. Then, several specific cases (the 2016 Kumamoto earthquake and the 1992 Landers earthquake) are discussed.

研究分野：地震工学

キーワード：地表断層 断層運動 数値解析 XFEM

1. 研究開始当初の背景

ライフライン構造物のように空間的に複雑なネットワークを構成するシステムの地震対策を進めるためには、システム全体の機能が影響を受けることを避けるため、地表断層変位への対策が必要である。地表断層変位は、逆断層・正断層・横ずれ断層といった震源メカニズムに対応する地下の断層運動が支配的であって、それに対応した変位が表れると通常考えられている。ところがスリップパーティショニングが生じた場合、例えば2016年熊本地震のように地下の右横ずれ運動と正断層運動を別々の地表断層変位によって解消する場合や、分岐断層により複雑に断層変位を生じることがある。

2. 研究の目的

本研究は、スリップパーティショニングや分岐断層により生じる断層変位の発生に関する新しい力学的理論を構築しその高精度予測を目指すものである。このため、本研究では断層破壊そのものを力学的に取り扱うことのできる数値シミュレーション(断層破壊シミュレーション)を用いて、スリップパーティショニングや分岐断層を解析し、断層変位を取り扱うための新理論の構築をはかる。

3. 研究の方法

本研究ではまず、分岐断層を解析可能な数値解析手法を開発する。その上で、いくつかの具体的な事例(2016年熊本地震や1992年Landers地震)について検討を行う。

本研究課題の申請時にはスリップパーティショニングの生成に関する検討がメカニズムの分析において重要であると考えていた。しかし、スリップパーティショニングを引き起こす原因は断層の分岐部にあり、その分岐部の力学的な挙動は明確でない点が多いことから、断層分岐部の静的・動的な挙動と断層破壊全体との関係について深く論じることが有用であると考えた。そこで、研究の力点を断層分岐部の挙動の解明におくこととし、その理解をまず目指すこととした。

4. 研究成果

(1) 数値解析手法の開発

断層分岐部の力学挙動を理解するためには、断層分岐部を適切に表現できる数値解析手法が必要である。本研究では拡張有限要素法(XFEM)を用いて解析することとするが、従来の解析方法では分岐部での不連続面の従属関係が明確でない場合に一意な表現とならない問題があった。本研究では、図1のように不連続面の屈曲や分岐を、要素内部に不連続面の先端が存在するようなtip要素の重ね合わせとして表現することを考える。それぞれの従属関係(主断層-副断層のような関係)を明示する必要がないため、重ね合わせるだけで分岐や屈曲のような複雑な断層構造をシンプルに表現できることが特徴である。

本手法の妥当性を、直線上に繋いだtip要素の解析結果を通常の単一の不連続面による解析結果と比較することで検証したところ、最大で0.01%程度の誤差であり十分な精度が確保されていることを確認している。

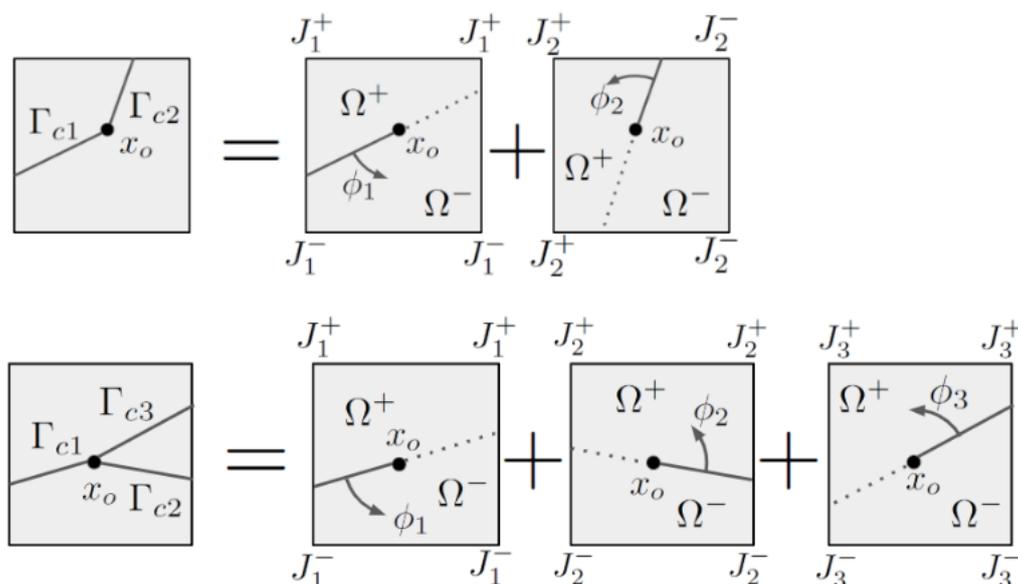


図1 tip要素の重ね合わせとしての分岐や屈曲の表現

(2) 2016年熊本地震

2016年熊本地震の本震は、日奈久断層と布田川断層の2つの断層が主な運動したことが知られており、このうち布田川断層のすべり量が大きく最大2mの地表断層変位が出現している。震源は2つの断層分岐部の日奈久断層寄りに位置していて、布田川断層に向かって破壊が進展した。一方、地震本部等の強震動評価では、断層トレースに分岐部がある場合は過去の地震で分岐に向かって破壊が進展したと考えられていることから、分岐に向かって破壊が進展するようなシナリオを想定することが一般的に多い。このため、熊本地震の本震でみられた事実と相反する(図2)。

そこで、熊本地震の断層セグメントレイアウトを模した断層モデルについて、様々な初期応力、強度分布を持つ場合について断層の破壊がどのように進展するかを解析した(図3)。初期応力場の最大せん断方向が53~64度の範囲ではセグメント1から破壊が生じる。最大せん断方向が65度を超えるとセグメント3でも破壊が生じるようになり、72~78度ではセグメント3からセグメント1に向かって破壊が進展するケースが相対的に増え、これが熊本地震本震で生じた破壊様式に似たものである。すなわち、断層の分岐形状によらず、初期応力場の状況によってどちらからも破壊が生じることが明確となった。

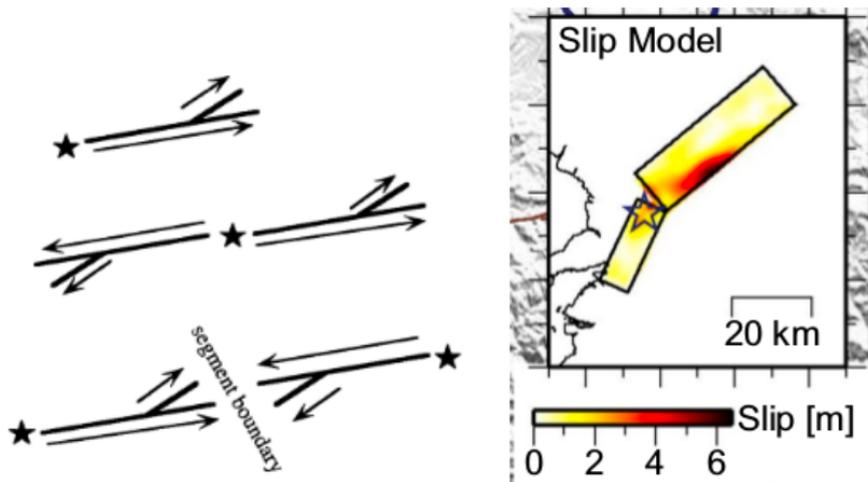


図2 分岐断層の破壊方向に関する仮定(中田他, 1998)(左)と2016年熊本地震の震源位置と日奈久断層(左下)と布田川断層(右上)のすべり量(Uchide et al. 2016)(右)。

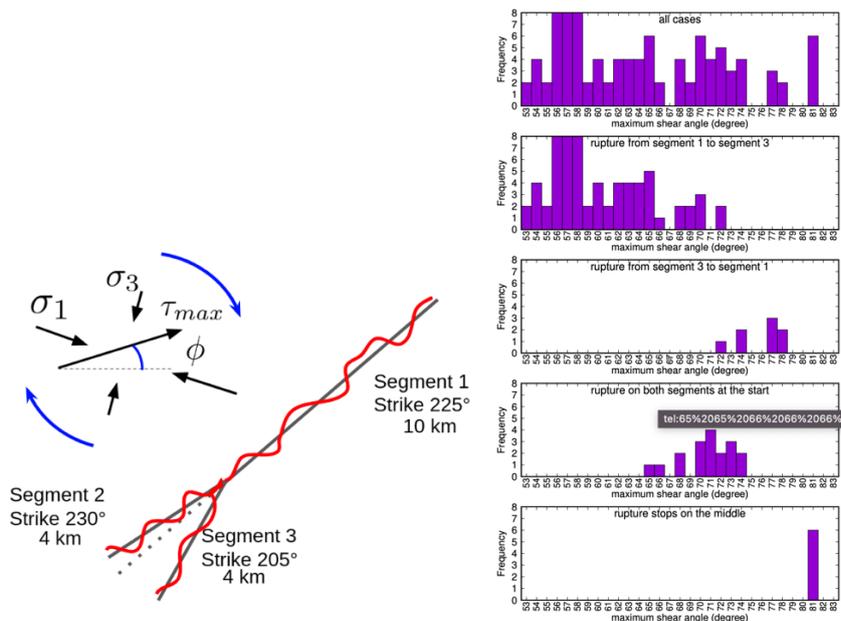


図3 解析対象の断層モデル(左)と解析された破壊様式の最大せん断方向毎のヒストグラム。

### (3) 分岐断層の動的な形成過程

断層の分岐部が最初から存在するかはそもそもの疑問である。元々は複数の独立したクラックが存在し、そのうち 1 つのクラックが破壊する時に周辺のクラックも連続して破壊させる中で、自然に分岐断層が形成されると考えることも力学的には可能である。このような一連の形成過程を見るため、自発的に断層が形成されるような XFEM による解析を通じて検討を行った。

図 4 に示すような直線上の断層において、様々な応力条件下で自発的な断層破壊を計算し、周辺の応力擾乱を分析した。初期せん断応力の値や断層の強度等を変化させた多くのケースを整理したところ、初期せん断応力とせん断強度の差 (S 値) によって応力擾乱のモードに違いが見られることがわかった。初期せん断応力がせん断強度より小さいほど (S 値が大きいほど)、断層破壊を励起するような応力擾乱が圧縮場側に生成される。一方、初期せん断応力がせん断強度に近いほど (S 値が小さいほど) 応力擾乱は複雑な形状となり、引張場側に高周波成分が放射されることがわかった。このような高周波励起はこれまでの研究では明記されていなかったが、要素サイズにより解像度が十分でないと明瞭に像を結ばないためであったと考えられる。

実際、この応力擾乱を 1992 年 Landers 地震における断層セグメント間の破壊乗り移りに照らしてみると、高周波の応力擾乱により断層破壊が励起されたと考えerとうまく説明ができる。

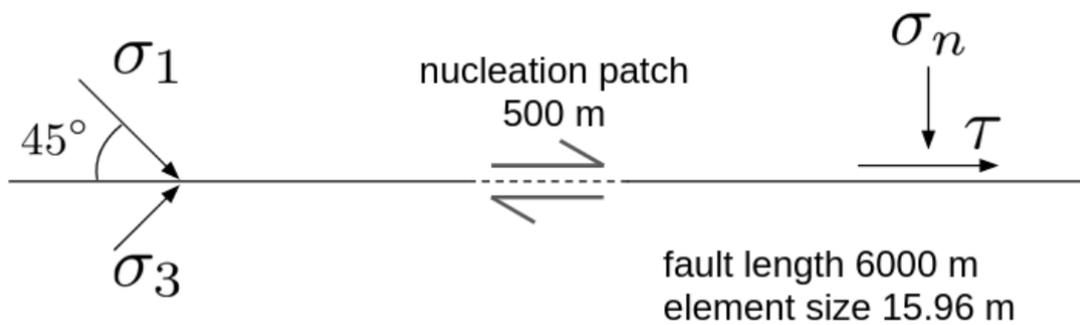


図 4 解析モデル

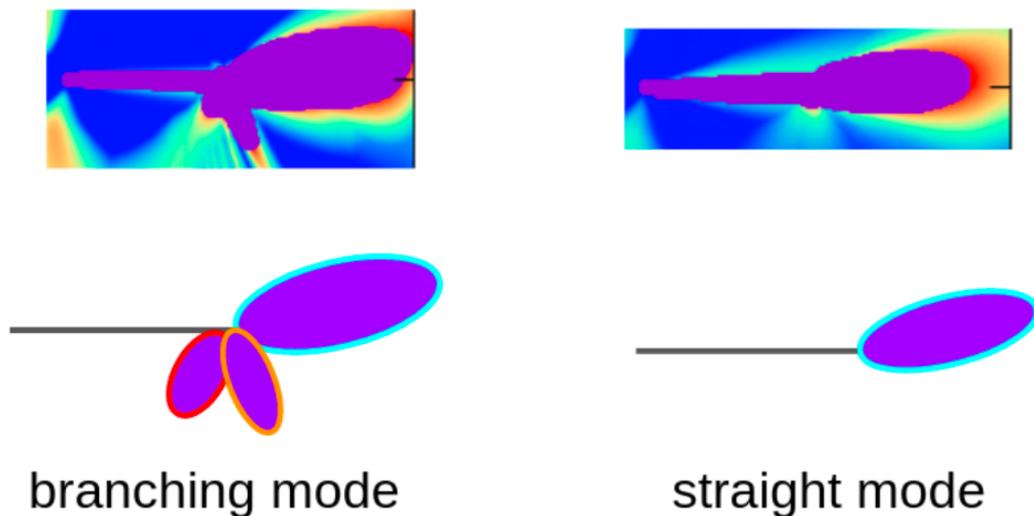


図 5 解析結果に表れた 2 つのモード (branching mode と strait mode). S 値が小さいほど branching mode が卓越して高周波成分が励起されやすい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>YAMASHITA Daiki、GOTO Hiroyuki、SAWADA Sumio   | 4. 巻<br>76                  |
| 2. 論文標題<br>XFEM SIMULATION OF RUPTURE DIRECTION ON BRANCHING FAULT   | 5. 発行年<br>2020年             |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))                                  | 6. 最初と最後の頁<br>I_217 ~ I_224 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.2208/jscejam.76.2_I_217   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |
| 1. 著者名<br>Otake Ryota、Kurima Jun、Goto Hiroyuki、Sawada Sumio  | 4. 巻<br>91                  |
| 2. 論文標題<br>Deep Learning Model for Spatial Interpolation of Real-Time Seismic Intensity                                  | 5. 発行年<br>2020年             |
| 3. 雑誌名<br>Seismological Research Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>3433 ~ 3443   |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1785/O220200006   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |
| 1. 著者名<br>Goto Hiroyuki、Toyomasu Aki、Sawada Sumio  | 4. 巻<br>124                 |
| 2. 論文標題<br>Delayed Subevents During the Mw 6.2 First Shock of the 2016 Kumamoto, Japan, Earthquake                       | 5. 発行年<br>2019年             |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Geophysical Research: Solid Earth   | 6. 最初と最後の頁<br>13112 ~ 13123 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1029/2019JB018583   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |
| 1. 著者名<br>HARADA Yomi、GOTO Hiroyuki、SAWADA Sumio   | 4. 巻<br>76                  |
| 2. 論文標題<br>STUDY ON GENERATION MECHANISM OF OPEN CRACKS IN THE SOIL EMBANKMENT UNDERLYING LIQUEFIABLE SOIL GROUND        | 5. 発行年<br>2020年             |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)) | 6. 最初と最後の頁<br>I_96 ~ I_105  |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.2208/jscejseee.76.4_I_96  | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>TANAKA Yuki, GOTO Hiroyuki, SAWADA Sumio   | 4. 巻<br>75                  |
| 2. 論文標題<br>SYSTEMATIC UNDERSTANDING OF THE GROUND MOTION AMPLIFICATION ON THREE-DIMENSIONAL BASIN STRUCTURE              | 5. 発行年<br>2019年             |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)) | 6. 最初と最後の頁<br>I_416 ~ I_425 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.2208/jscejsee.75.I_416  | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>山下大輝, 後藤浩之, 澤田純男            |
| 2. 発表標題<br>分岐断層の破壊進展方向に関するXFEMシミュレーション |
| 3. 学会等名<br>令和2年度 京都大学防災研究所 研究発表講演会     |
| 4. 発表年<br>2021年                        |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Daiki Yamashita, Hiroyuki Goto, Sumio Sawada             |
| 2. 発表標題<br>XFEM simulation of rupture direction on branching faults |
| 3. 学会等名<br>AGU Fall Meeting 2020 (国際学会)                             |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>大武亮太, 栗間淳, 後藤浩之, 澤田純男       |
| 2. 発表標題<br>深層学習を利用したリアルタイム震度の空間補間と即時予測 |
| 3. 学会等名<br>日本地震学会2020年度秋季大会            |
| 4. 発表年<br>2020年                        |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>原田陽弓, 後藤浩之, 澤田純男                   |
| 2. 発表標題<br>液状化地盤上の盛土における引張クラック発生メカニズムについての一考察 |
| 3. 学会等名<br>第39回地震工学研究発表会                      |
| 4. 発表年<br>2019年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>山下大輝, 後藤浩之, 澤田純男            |
| 2. 発表標題<br>分岐断層の破壊進展方向に関するXFEMシミュレーション |
| 3. 学会等名<br>日本地震学会2019年度秋季大会            |
| 4. 発表年<br>2019年                        |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>竹本幸士郎, 澤田純男, 後藤浩之               |
| 2. 発表標題<br>土粒子の慣性に起因するせん断抵抗の速度依存性に関する微視的考察 |
| 3. 学会等名<br>令和元年度土木学会全国大会                   |
| 4. 発表年<br>2019年                            |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>豊増明希, 後藤浩之, 澤田純男                   |
| 2. 発表標題<br>平成28年熊本地震前震における後続パルス波を再現する3次元断層モデル |
| 3. 学会等名<br>令和元年度土木学会全国大会                      |
| 4. 発表年<br>2019年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>山下大輝, 後藤浩之, 澤田純男                    |
| 2. 発表標題<br>強度にばらつきを持つ分岐断層の破壊方向に関するXFEMシミュレーション |
| 3. 学会等名<br>令和元年度土木学会全国大会                       |
| 4. 発表年<br>2019年                                |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>澤田純男・原田陽弓                |
| 2. 発表標題<br>引張破壊を考慮した盛土の地震時破壊現象の再現解析 |
| 3. 学会等名<br>平成30年度 京都大学防災研究所 研究発表講演会 |
| 4. 発表年<br>2019年                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hiroyuki GOTO・Daiki YAMASHITA                            |
| 2. 発表標題<br>Dynamic Analysis on Rupture Direction of Branching Fault |
| 3. 学会等名<br>平成30年度 京都大学防災研究所 研究発表講演会                                 |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>豊増明希, 後藤浩之, 澤田純男              |
| 2. 発表標題<br>平成28年熊本地震前震における単発のパルス波の生成原因分析 |
| 3. 学会等名<br>日本地震学会2018年秋季大会               |
| 4. 発表年<br>2018年                          |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>林穂高, 後藤浩之, 澤田純男                       |
| 2. 発表標題<br>微動アレー観測に含まれるばらつきを考慮した地盤増幅特性の評価法に関する検討 |
| 3. 学会等名<br>日本地震学会2018年秋季大会                       |
| 4. 発表年<br>2018年                                  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>栗間淳, 後藤浩之, 澤田純男              |
| 2. 発表標題<br>深層学習を用いた周辺の観測波形に基づく震度分布推定の試み |
| 3. 学会等名<br>日本地震学会2018年秋季大会              |
| 4. 発表年<br>2018年                         |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|
|         |         |