

「非活動的な」領域を挟む2つのセグメントの連動性

Dynamic rupture processes on two fault segments with an "inactive" area

加瀬祐子¹

Yuko Kase¹

¹ 活断層研究センター (Active Fault Research Center, GSJ/AIST, kasep@ni.aist.go.jp)

Abstract: It is possible that two "active" segments with an "inactive" area where no dislocation remains on ground surface connect under the surface and rupture simultaneously. We simulate dynamic ruptures on such two fault segments. The inactive area is assumed to be under low initial shear stress and to have long critical displacement (D_c). Varying the length and lower depth of the inactive area, we investigate rupture propagation and jump to the second segment. The aspect ratio of the inactive area affects rupture processes, especially rupture jump and direction on the second segment. For fault geometry in which a rupture cannot jump across a discontinuity without the inactive area or jump to a shallow portion, a rupture can jump to the deep portion and propagates horizontally.

キーワード: 連動型地震, 数値シミュレーション, 動力学的震源モデル, 差分法, 非活動的な領域

Keywords: multiple-segment rupture, numerical simulation, dynamic rupture, finite-difference method, inactive area

1. はじめに

地表で観察される活断層は, 近接した複数のセグメントから構成されていることが多い. それらの断層が, 真に別の断層面なのか, 地下深くではつながっているのかは, 断層の連動性を考える上で重要である. 地表では変位, 変形がほとんど観測されない「非活動的な」領域を挟む2つの「活動的な」セグメントも, 地下深くではつながっていて, 連動破壊する可能性がある.

連動性については, 活断層系の実測に基づいた研究 (例えば, 松田, 1990) や波形インバージョンによる地震の破壊過程の研究とともに, 数値シミュレーションによる理論的な研究もおこなわれている. 個別の地震については, 断層形状や強度や応力降下量の不均質を考慮することにより, 数値シミュレーションは現実をよく再現する (例えば, Aochi and Fukuyama, 2002) が, 比較的単純なモデルを用いた系統的な研究においては, 現実の地震の破壊過程とは異なるいくつかの特徴を示す. 例えば, 数値シミュレーションでは, 破壊は地表付近で乗り移る (Harris and Day, 1999; Kase and Kuge, 2001) ことが多いが, 波形インバージョンで求められる地震の破壊過程には, そのような乗り移り方はみられない. また, 松田 (1990) などでも示されるように, 5 km 以下の不連続で区切られるセグメントは連動して破壊することがあるが, 数値計算では, 2 km 程度以上の不連続を破壊が乗り移ることは難しい (Kase and Kuge,

2001). このような現実との不一致の原因はいくつか考えられるが, 2つのセグメントが地下ではつながっているという可能性も, そのひとつである.

壇ほか (2007) は, 地表では非活動的な領域で区切られているが, 地下ではつながっている2つのセグメントの連動性について, 数値実験をおこなった. 彼らは, 非活動的な領域で区切られたセグメントを断層の一部分での応力降下量を負とすることで表現し, 非活動領域の下限の深さが浅いほど, 応力上昇 (負の応力降下量の絶対値) が小さいほど, 非活動領域の両側のセグメントが連動しやすいこと, また, 連動する時には, 非活動的な領域も破壊されることを示した. 本研究では, 深さ依存性のある応力場を考慮するとともに, 地表では非活動的な領域で区切られ, 地下でも不連続なセグメントの連動性についても, 非活動的な領域の長さや下限の深さを変えて, 連動性や破壊伝播の様子がどのように変化するか, パラメータスタディにより調べる. 更に, 地下ではつながっている2つのセグメントの連動性と, 地下でも不連続なセグメントの連動性とを比較することにより, 2つのセグメントの地下形状のモデル化の違いが, 現実と数値実験結果をどの程度乖離させるのかについて議論する.

2. 手法

2.1 断層モデル

半無限完全弾性体 (P波速度 = 6.0 [km/s], S波速

度 = 3.464 [km/s], 密度 = 2.67 [g/cm³]) 中に鉛直左横ずれの断層を考える。断層は地表を切っているものとする。断層は2つのセグメントから成り、これらが深部でつながっている場合は1枚の面(第1a図)で、不連続な場合は2枚の面(第1b図)でモデル化する。第1a図のようなモデル化では2つのセグメント間のオフセットが表現できないため、厳密には、地表で第1b図のように断層トレースが観察される2つのセグメントの深部がつながっている場合のモデルとは異なるが、1枚の面上を破壊が伝播する場合には、法線応力の変化の寄与は小さい(Aochi *et al.*, 2002; Kame *et al.* 2003) ため、近似的に用いることは可能である。

2つのセグメントの境界は、非活動的な領域であるとする。地表では2つのセグメントに区切られて観察されるが深部ではつながっている場合については、第1a図のように、ある長さもった長方形の非活動的な領域を置くことによってモデル化する。深部でも不連続な場合については、第1b図のように、2つのセグメントのオーバーラップ部分を非活動的な領域としてモデル化する。

非活動的な領域の長さや下限の深さなどを様々に変えて、数値計算をおこなった。非活動的な領域の長さは1 km 刻みに5 km まで、下限の深さは1, 3, 5, 7, 10, 15 km の6通りを試みた。ただし、非活動的な領域が極端に細長いとは考えにくいいため、長さや下限の深さの比が1:3 から3:1 までの場合のみモデル化した。

2.2 応力場モデル

断層面にはたらく初期剪断応力と初期法線応力、摩擦係数と臨界変位量をまとめたものを、第2図に示す。

媒質には、以下のような深さに比例する主応力がはたらいているとする。

$$\sigma_1 = 27.14z + 13.57$$

$$\sigma_3 = 7.14z + 3.57$$

ここで、 σ_1 は最大主圧縮応力 [MPa], σ_3 は最小主圧縮応力 [MPa], z は深さ [km] で、圧縮を正とする。 σ_1 , σ_3 はともに水平面内にあり、 σ_1 は断層面に対して45° の方向にはたらいているとする。摩擦構成則に関するパラメータ(静摩擦係数、動摩擦係数、臨界変位量 D_c) が断層面上で一様であるとすれば、断層面にはたらく初期剪断応力と初期法線応力はともに、深さに比例する。断層の主要部(第2図のArea 1)では、この応力がそのままはたらいている。

深さ1 km より浅い部分(第2図のArea 2)は堆積層などの比較的軟弱な層で構成されるとし、セグメントの不連続部(第2図のArea 3)と同様に、非活動的な領域とした。これらの領域では、非弾性的な変形により剪断応力が蓄積しにくいと考え、初期剪断応力を4 MPa とした。また、臨界変位量 D_c は、

非弾性体の摩擦構成則を模して、Area 2 で1 m, Area 3 で4 m と、Area 1 よりも長い値を仮定した。深さ0 km での動摩擦応力は4.50 MPa であるから、これらの領域では応力降下量は負となる。

壇ほか(2007)では、応力降下量が負になるモデルとして、動摩擦応力が周囲よりも大きいモデルを用いている(壇ほか, 2007の第9図)が、本研究では、摩擦応力を摩擦係数と法線応力の積として与えるため、これらは深さ依存性のみを持つとし、初期剪断応力が小さいために応力降下量が負になると考える。動力的な破壊計算では、応力の差分のみが効くため、壇ほか(2007)のモデル化でも本研究のモデル化でも、計算結果は同じになる。

2.3 数値計算手法

断層面に境界条件を与えて弾性体の運動方程式を数値的に解くことによって、断層面上の破壊伝播過程を計算する。

時刻 $t = 0$ に初期クラック上で応力降下が起こり、破壊は自発的に広がっていく。剪断応力が静摩擦応力に達するとすべりが始まり、その後は、すべり弱化的摩擦構成則(第3図: Andrews, 1976)に従って、剪断応力は動摩擦応力まで降下する。静摩擦応力と動摩擦応力を摩擦係数と法線応力との積として定義することにより、法線応力を考慮した破壊過程を求める。

数値計算には、Kase and Kuge (2001) の差分法を用い、空間グリッド間隔は0.25 km, 時間刻みは0.025 s で計算した。

3. 結果

3.1 非活動的な領域がない場合の連動性

非活動的な領域の影響を見る前に、非活動的な領域がない場合の連動性について確かめる。

断層端から破壊が始まる場合、連動できるオフセットの幅は、オフセットの構造、オーバーラップの長さによって異なるものの、オフセットの幅が1~2.5 km 程度であれば、不連続なセグメントでも連動できる応力場の条件となっている(第1表)。現実の断層(松田, 1990)よりもやや連動しにくいものの、概ね現実的な条件であるといえる。オフセットの幅が狭い場合は、破壊フロントは2つのセグメントを連続的に広がっていく(第4図)。しかし、セグメント間の距離が1.5 km 以上になると、2つめのセグメントの破壊は、浅いところから深いところへと広がっていく(第5図)。これは、応力場が基本的に深さに比例するという仮定により、浅い領域で相対的に壊れやすい環境になっているためである(加瀬, 2002)。また、2次元や3次元でも応力が一様と仮定したシミュレーションの結果(Harris and Day, 1993; Harris and Day, 1999; Kase and Kuge, 2001) と異なり、

オフセットの構造が圧縮場になっているモデルの方が、伸長場になっているモデルよりも遠くまで連動する。これは現実と対応した結果であり、応力場が基本的に深さに比例するという仮定によって再現できる特徴である（加瀬，2002）。

不連続な2つのセグメントの境界から始まる破壊は、2つめのセグメントには乗り移りにくく、オフセットの幅が1.0 km以上のモデルは連動しない（第2表）。

3.2 深部でつながっている2つのセグメントの連動性：断層端から破壊が始まる場合

初期クラックが断層端にある場合の連動性を、第3表にまとめる。セグメントがつながっているため、ほとんどのモデルで、セグメントは連動する。非活動的な領域の長さが1 km、下限の深さが1 kmのモデルでは、非活動的な領域の存在は破壊過程にほとんど影響しない（第6図）。非活動的な領域が大きくなるにつれて、非活動的な領域を避けて破壊が伝播するようになるものの、破壊時刻の全体的な分布は、それほど影響を受けないことがわかる（第7図上図）。これは、応力場の深さ依存性のない先行研究（壇ほか，2007）とも一致する。その一方で、すべり量分布には、非活動的な領域の影響がより顕著に現れる。非活動的な領域での破壊が抑制され、断層面全体のすべり量分布は2つのピークを持つようになる（第7図下図）。非活動的な領域が断層の幅全体にわたって（深さ15 kmまで）存在する場合、その長さが5 km以上であれば、両側のセグメントは連動しない（第8図）。

3.3 深部でつながっている2つのセグメントの連動性：セグメント境界から破壊が始まる場合

初期クラックが非活動的な領域の傍にある場合の連動性を、第4表にまとめる。連動性は、初期クラックが断層端にある場合とほとんど変わらないが、補完的な計算をおこなった結果、初期クラックが断層端にある場合よりもやや連動しにくいことが確かめられている。これは、連動には、初めに破壊するセグメントである程度の距離を破壊が伝播することが必要であるためである。非活動的な領域がある深さまでしか存在しない場合については、その下の領域を破壊が伝播していく（第9図）。

3.4 不連続な2つのセグメントの連動性：断層端から破壊が始まる場合

非活動的な領域が存在するモデルで、オフセットが圧縮側に0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 kmの場合の連動性を、それぞれ第5, 6, 7, 8, 9表にまとめる。オフセットの幅が広がるに従って、非活動的な領域が長く、深いモデルほど、連動しにくくなる傾向がある。また、第1表と比較すると、非活動的な領域が存在しないモデルよりも連動しにくいことがわかる。これは、

非活動的な領域の面積が大きくなるほど、より多くのエネルギーを吸収され、セグメント端での応力集中が小さくなることと、非活動的な領域で破壊が減速して停止するために、**stopping phase**が励起されにくいこととで、2つめのセグメント上の破壊を励起することが困難になるためである。これは、初期応力がセグメント端で減少する2次元のモデルでの数値実験結果（Oglesby, 2008）とも調和的である。非活動的な領域の長さが短いモデルでは、オフセットの幅が広い場合には連動できない（第9表）。これは、非活動的な領域の長さを2つのセグメントのオーバーラップと等しくしているため、オーバーラップが長いほうが連動しやすいという特徴（第1表）が現れているためである。

オフセットの幅が狭い場合は、不連続の影響はそれほど小さくなく、セグメントが連続な場合と連動性はほとんど同じである（第3, 5表）。破壊伝播の様子も同様で、非活動的な領域の長さが1 km、下限の深さが1 kmのモデルでは、非活動的な領域の存在は破壊過程にほとんど影響しない（第10図）。また、非活動的な領域が大きくなると、非活動的な領域を避けて破壊が伝播するようになる点も同様である（第11図）。

オフセットの幅が広いと、非活動的な領域がない場合と同様に、破壊は浅いところへ乗り移る。同時に、1つめのセグメントの非活動的な領域の下部を伝播した破壊によって、2つめのセグメントの非活動的な領域の端で破壊が励起される（第12図）。非活動的な領域が大きくなると、2つめのセグメントの非活動的な領域の端で励起される破壊は成長できなくなり（第13図）、更に非活動的な領域が大きいモデルやオフセットの幅が広いモデルでは、2つめのセグメントの非活動的な領域の端での破壊の励起は起きない（第14図）。

オフセットが伸長側に0.5, 1.0, 1.5, 2.0 kmの場合の連動性を、それぞれ第10, 11, 12, 13表にまとめる。非活動的な領域がない場合と同様に、オフセットの構造が圧縮であるモデルよりも連動しにくいのが、オフセットの幅が長くなるに従って、非活動的な領域が長く、深いモデルほど、連動しにくくなる傾向は、圧縮であるモデルと同様に見られる。

3.5 不連続な2つのセグメントの連動性：セグメント境界から破壊が始まる場合

3.1節で述べたように、不連続な2つのセグメントの境界から始まる破壊は、2つめのセグメントには乗り移りにくく、オフセットの幅が1.0 km以上のモデルは連動しない（第2表）。非活動的な領域は連動を抑制するため、非活動的な領域が深くまで存在するモデルでは、オフセットの幅が1.0 km以下でも、連動しない（第14, 15表）。また、連動するモデルの多くは、2つめのセグメントの破壊が励起されてか

ら成長するまでに 10 秒程度の時間を要する。そのため、2 つめのセグメントの破壊に時間遅れが生じているように見える (第 15 図)。

4. 議論

4.1 地下形状のモデル化による計算結果の差

深部でつながっている 2 つのセグメントのモデルと不連続な 2 つのセグメントのモデルとで運動性や破壊過程を比較し、2 つのセグメントの地下形状のモデル化の違いが、数値実験結果にどのように反映されるかを考えてみる。

破壊が断層端から始まる場合は、オフセットの幅が 0.5 km 程度であれば、第 3 表と第 5, 10 表との比較からわかるように、連続なモデルと不連続なモデルとで、運動性はほとんど同じである。また、第 11 図で 2 つのセグメントのオーバーラップ部分を重ねると、第 7 図とほぼ同じ絵になることから、非活動的な領域がある程度の大きさを持っていれば、破壊伝播の様子やすべり量の分布も、連続なモデルと不連続なモデルとで大きくは変わらないといえる。しかし、非活動的な領域が小さいと、破壊伝播の様子はほぼ同じであるが、すべり量の分布はモデル化によって異なる。第 10 図で 2 つのセグメントのオーバーラップ部分を重ねたものと第 6 図とを比較すると、不連続なモデルでは、不連続部でのすべりがゼロになるため、すべり量は 2 つのピークを持つが、連続なモデルでは 1 つの大きなピークを持つ。一方、オフセットの幅が広いと、運動性そのものが、連続なモデルと不連続なモデルとで大きく異なる。また、破壊が深いところで乗り移れないため、破壊伝播の様子はモデル化によって異なるが、非活動的な領域が大きければ、すべり量の分布はほぼ同じになる。破壊がセグメント境界から始まる場合は、連続なモデルは非活動的な領域の下部を通じて破壊が伝播できる。そのため、非活動的な領域がなく、セグメントが不連続なモデルに比べて、非常に運動しやすい。一方、不連続なモデルでは、非活動的な領域がない場合と同程度に運動しにくい。

以上のような、2 つのセグメントの地下形状のモデル化の違いによる数値実験結果の差を考慮すると、非活動的な領域で区切られた 2 つのセグメントの運動性や、そこで発生するであろう地震の震源モデルを考える上での場合分けができる。オフセットの幅が狭く、近接しているならば、セグメントの連続性に関わらず運動し、破壊過程に大きな差は生じないため、基本的には運動するものと考えることができる。オフセットの幅がより広い場合には、地下形状や破壊開始点の位置によって運動する場合と運動しない場合とが考えられ、地下構造調査や過去の活動履歴の調査が重要となる。地震サイクル中の応力条件によっては、運動する場合と運動しない場合の両

方が起こり得るとも考えられるため、震源モデルの作成には注意が必要である。ただし、セグメント境界から破壊が始まるとすると、セグメントが連続である場合のみ、運動が起こりうると考えられる。本研究で用いた応力条件では、基本的に運動する場合とそうではない場合との境界は、オフセットの幅で 0.5~1.0 km 程度、非活動的な領域の長さで 4~5 km 程度であるが、この絶対値は、応力条件によって多少変動しうる。

4.2 地下形状のモデル化と応力場の仮定に関する問題点

本研究では、不連続なセグメントの地下形状をモデル化する際に、2 つの面で構成される非活動的な領域の構造が、地震発生層全体にわたって保たれているとしている。また、非活動的な領域では、初期剪断応力は周囲よりも小さいが、摩擦応力は周囲と同じとしている。現状の数値計算方法の限界を考えると、これらの仮定は、不均質構造が運動性や破壊過程に与える影響を調べる第一段階としては妥当ではあるが、やや非現実的な仮定であることは否めない。今後、不均質構造とその成因を考慮して、断層形状のモデル化や摩擦構成則の与え方を改善する必要がある。

5. まとめ

セグメントの不連続部を、地表では変位、変形が観測されにくい「非活動的な領域」と考え、その領域の長さや下限の深さを変えて、2 つのセグメントの運動性や破壊伝播の様子がどのように変化するかを数値計算により調べた。

2 つのセグメントが深部でつながっている場合は、非活動的な領域が 10 km 程度の深さまでであれば、その下部を破壊が伝播することで運動する。すべり量分布は、非活動的な領域の存在により 2 つのピークを持つようになるが、破壊時刻の全体的な分布は、それほど非活動的な領域の影響を受けない。

セグメントが不連続な場合は、初期クラックの位置により運動性が大きく異なる。初期クラックが断層端にある場合は、オフセットの幅が 2.5~3 km 程度であれば運動し、オフセットの幅が広くなるに従って、非活動的な領域が長く、深いモデルほど、運動しにくくなる傾向がある。一方、初期クラックがセグメント境界にある場合は、オフセットの幅が 1 km を越えると運動せず、非活動的な領域が深くまで存在するモデルでは運動しない。

以上の特徴から、オフセットの幅が 0.5~1.0 km 以下、非活動的な領域の長さが 4~5 km 以下ならば、基本的には運動するものと考えることができる。オフセットの幅がより広い場合には、地下形状によって運動する場合と運動しない場合とが考えられ、地

震サイクル中の応力条件によっては、連動する場合と連動しない場合の両方が起こり得るとも考えられる。ここであげた距離の絶対値は、本研究で用いた応力条件下での値であり、応力条件によって多少変動しうることには注意が必要である。

謝辞 本研究は、応用地質株式会社からの請負研究として実施されました。本稿に用いた図の一部は、GMT (Generic Mapping Tool version 3.4: Wessel and Smith, 1998) を用いて作成しました。記して感謝いたします。

文 献

- Andrews, D.J. (1976) Rupture velocity of plane strain shear cracks. *J. Geophys. Res.*, 81, 5679-5687.
- Aochi, H. and Fukuyama, E. (2002) Three-dimensional nonplanar simulation of the 1992 Landers earthquake. *J. Geophys. Res.*, 107, doi: 10.1029/2000JB000061.
- Aochi, H., Madariaga, R. and Fukuyama, E. (2002) Selectively of spontaneous rupture propagation on a branched fault. *J. Geophys. Res.*, 107, doi:10.1029/2001JB000500.
- 壇 一男・武藤真菜美・鳥田晴彦・大橋泰裕・加瀬祐子 (2007) 動力学的破壊シミュレーションによる断層の連動破壊に関する基礎的研究. 活断層・古地震研究報告, No. 7, 259-271.
- Harris, R. A. and Day, S.M. (1993) Dynamics of fault interaction: parallel strike-slip faults. *J. Geophys. Res.*, 98, 4461-4472.
- Harris, R.A. and Day, S.M. (1999) Dynamic 3D simulations of earthquakes on en echelon faults. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2089-2092.
- Kame, N., Rice, J.R. and Dmowska, R. (2003) Effect of prestress state and rupture velocity on dynamic fault branching. *J. Geophys. Res.*, 108, 2265, doi:10.1029/2002JB002189.
- Kase, Y. and Kuge, K. (2001) Rupture propagation beyond fault discontinuities: Significance of fault strike and location. *Geophys. J. Int.*, 147, 330-342.
- 加瀬祐子 (2002) 断層間での破壊の乗り移り—応力が深さに依存する場合についての考察—. 地学雑誌, 111, 287-297.
- 松田時彦 (1990) 最大地震規模による日本列島の地震分帯図. 地震研究所彙報, 65, 289-319.
- Oglesby, D. (2008) Rupture termination and jump on parallel offset faults. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 98, 440-447, doi: 10.1785/0120070163.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998) New, improved version of Generic Mapping Tools released. *Eos Trans. AGU*, 79, 579.

(受付: 2008年9月22日, 受理: 2008年10月18日)

第1表. 非活動的な領域がなく, 初期クラックが断層端にある場合の, 不連続な2つのセグメントの連動性. ○は連動したことを, ×は連動しなかったことを示す(以下同じ).

Table 1. Numerical results of simultaneous rupturing on not-connecting two segments without inactive areas. An initial crack is located in the end of the fault system. 'o' and 'x' indicate a multi-segment and a single-segment rupture, respectively.

Offset type	Offset width [km]	Overlap length [km]	
		0	5
Compression	0.5	○	○
	1.0	○	○
	1.5	○	○
	2.0	○	○
	2.5	×	○
	3.0	×	×
Extension	0.5	○	○
	1.0	○	○
	1.5	×	○
	2.0	×	○
	2.5	×	×

第2表. 非活動的な領域がなく, 初期クラックがセグメント境界にある場合の, 不連続な2つのセグメントの連動性.

Table 2. Numerical results of simultaneous rupturing on not-connecting two segments without inactive areas. An initial crack is located in the boundary of the segments. The meanings of 'o' and 'x' are the same as those for Table 1.

Offset type	Offset width [km]	Overlap length [km]	
		0	5
Compression	0.5	○	○
	1.0	×	×
Extension	0.5	×	○
	1.0	×	×

第3表. 2つのセグメントが深部でつながっていて, 初期クラックが断層端にある場合の連動性. ○は連動したことを, ×は連動しなかったことを, -はモデル対象外であることを示す(以下同じ).

Table 3. Numerical results of simultaneous rupturing on connecting two segments with an inactive area. An initial crack is located in the end of the fault system. The meanings of 'o' and 'x' are the same as those for Table 1. '-' indicates out of modeling.

Lower depth of inactive area [km]	Length of inactive area [km]				
	1	2	3	4	5
1	○	○	○	-	-
3	○	○	○	○	○
5	-	○	○	○	○
7	-	-	○	○	○
10	-	-	-	○	○
15	-	-	-	-	×

第4表. 2つのセグメントが深部でつながっていて, 初期クラックが非活動的な領域の傍にある場合の連動性.

Table 4. Numerical results of simultaneous rupturing on connecting two segments with an inactive area. An initial crack is located in the boundary of the segments. The meanings of 'o', 'x', and '-' are the same as those for Table 3.

Lower depth of inactive area [km]	Length of inactive area [km]				
	1	2	3	4	5
1	○	○	○	-	-
3	○	○	○	○	○
5	-	○	○	○	○
7	-	-	○	○	○
10	-	-	-	○	○
15	-	-	-	-	×

第5表. 2つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は圧縮側に0.5 km、初期クラックは断層端にある場合の連動性。
Table 5. Numerical results of simultaneous rupturing on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose a compressional jog, and the distance between the segments is 0.5 km. An initial crack is located in the end of the fault system. The meanings of 'o', 'x', and '-' are the same as those for Table 3.

Lower depth of inactive area [km]	Length of inactive area [km]				
	1	2	3	4	5
1	○	○	○	-	-
3	○	○	○	○	○
5	-	○	○	○	○
7	-	-	○	○	○
10	-	-	-	○	○
15	-	-	-	-	×

第6表. 2つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は圧縮側に1.0 km、初期クラックは断層端にある場合の連動性。
Table 6. Numerical results of simultaneous rupturing on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose a compressional jog, and the distance between the segments is 1.0 km. An initial crack is located in the end of the fault system. The meanings of 'o', 'x', and '-' are the same as those for Table 3.

Lower depth of inactive area [km]	Length of inactive area [km]				
	1	2	3	4	5
1	○	○	○	-	-
3	○	○	○	○	○
5	-	○	○	○	○
7	-	-	○	○	○
10	-	-	-	○	×
15	-	-	-	-	×

第7表. 2つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は圧縮側に1.5 km、初期クラックは断層端にある場合の連動性。
Table 7. Numerical results of simultaneous rupturing on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose a compressional jog, and the distance between the segments is 1.5 km. An initial crack is located in the end of the fault system. The meanings of 'o', 'x', and '-' are the same as those for Table 3.

Lower depth of inactive area [km]	Length of inactive area [km]				
	1	2	3	4	5
1	○	○	○	-	-
3	○	○	○	○	○
5	-	○	○	○	○
7	-	-	○	○	○
10	-	-	-	○	×
15	-	-	-	-	×

第8表. 2つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は圧縮側に2.0 km、初期クラックは断層端にある場合の連動性。
Table 8. Numerical results of simultaneous rupturing on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose a compressional jog, and the distance between the segments is 2.0 km. An initial crack is located in the end of the fault system. The meanings of 'o', 'x', and '-' are the same as those for Table 3.

Lower depth of inactive area [km]	Length of inactive area [km]				
	1	2	3	4	5
1	○	○	○	-	-
3	○	○	○	○	○
5	-	○	○	○	○
7	-	-	○	○	×
10	-	-	-	×	×
15	-	-	-	-	×

第9表. 2つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は圧縮側に2.5 km、初期クラックは断層端にある場合の連動性.

Table 9. Numerical results of simultaneous rupturing on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose a compressional jog, and the distance between the segments is 2.5 km. An initial crack is located in the end of the fault system. The meanings of 'o', 'x', and '-' are the same as those for Table 3.

Lower depth of inactive area [km]	Length of inactive area [km]				
	1	2	3	4	5
1	×	×	×	-	-
3	×	○	○	○	○
5	-	×	×	×	×

第10表. 2つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は伸長側に0.5 km、初期クラックは断層端にある場合の連動性.

Table 10. Numerical results of simultaneous rupturing on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose an extensional jog, and the distance between the segments is 0.5 km. An initial crack is located in the end of the fault system. The meanings of 'o', 'x', and '-' are the same as those for Table 3.

Lower depth of inactive area [km]	Length of inactive area [km]				
	1	2	3	4	5
1	○	○	○	-	-
3	○	○	○	○	○
5	-	○	○	○	○
7	-	-	○	○	○
10	-	-	-	○	○
15	-	-	-	-	×

第11表. 2つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は伸長側に1.0 km、初期クラックは断層端にある場合の連動性.

Table 11. Numerical results of simultaneous rupturing on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose an extensional jog, and the distance between the segments is 1.0 km. An initial crack is located in the end of the fault system. The meanings of 'o', 'x', and '-' are the same as those for Table 3.

Lower depth of inactive area [km]	Length of inactive area [km]				
	1	2	3	4	5
1	○	○	○	-	-
3	○	○	○	○	○
5	-	○	○	○	○
7	-	-	○	×	×
10	-	-	-	×	×
15	-	-	-	-	×

第12表. 2つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は伸長側に1.5 km、初期クラックは断層端にある場合の連動性.

Table 12. Numerical results of simultaneous rupturing on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose an extensional jog, and the distance between the segments is 1.5 km. An initial crack is located in the end of the fault system. The meanings of 'o', 'x', and '-' are the same as those for Table 3.

Lower depth of inactive area [km]	Length of inactive area [km]				
	1	2	3	4	5
1	○	○	○	-	-
3	×	×	×	×	×

第13表. 2つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は伸長側に2.0 km、初期クラックは断層端にある場合の連動性。
 Table 13. Numerical results of simultaneous rupturing on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose an extensional jog, and the distance between the segments is 2.0 km. An initial crack is located in the end of the fault system. The meanings of 'o', 'x', and '-' are the same as those for Table 3.

Lower depth of inactive area [km]	Length of inactive area [km]				
	1	2	3	4	5
1	×	×	○	-	-
3	×	×	×	×	×

第14表. 2つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は圧縮側に0.5 km、初期クラックは非活動的な領域の傍にある場合の連動性。

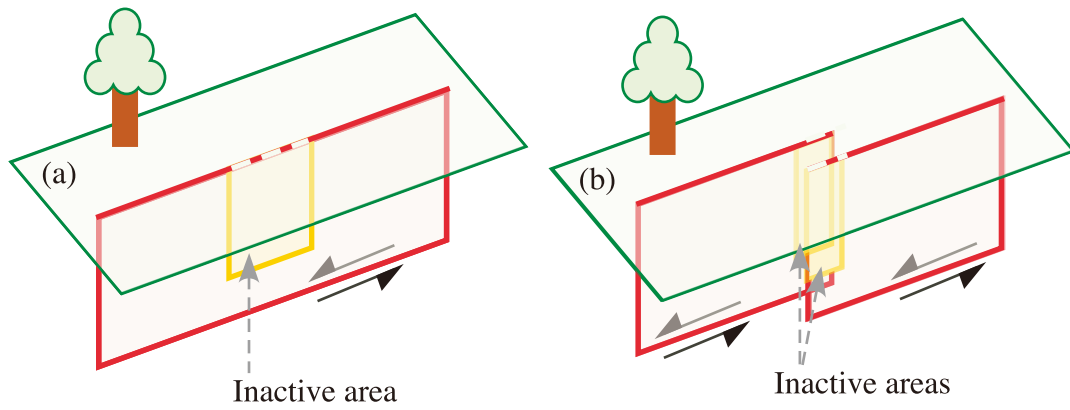
Table 14. Numerical results of simultaneous rupturing on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose a compressional jog, and the distance between the segments is 0.5 km. An initial crack is located in the boundary of the segments. The meanings of 'o', 'x', and '-' are the same as those for Table 3.

Lower depth of inactive area [km]	Length of inactive area [km]				
	1	2	3	4	5
1	○	○	○	-	-
3	○	×	×	×	×
5	-	×	×	×	×

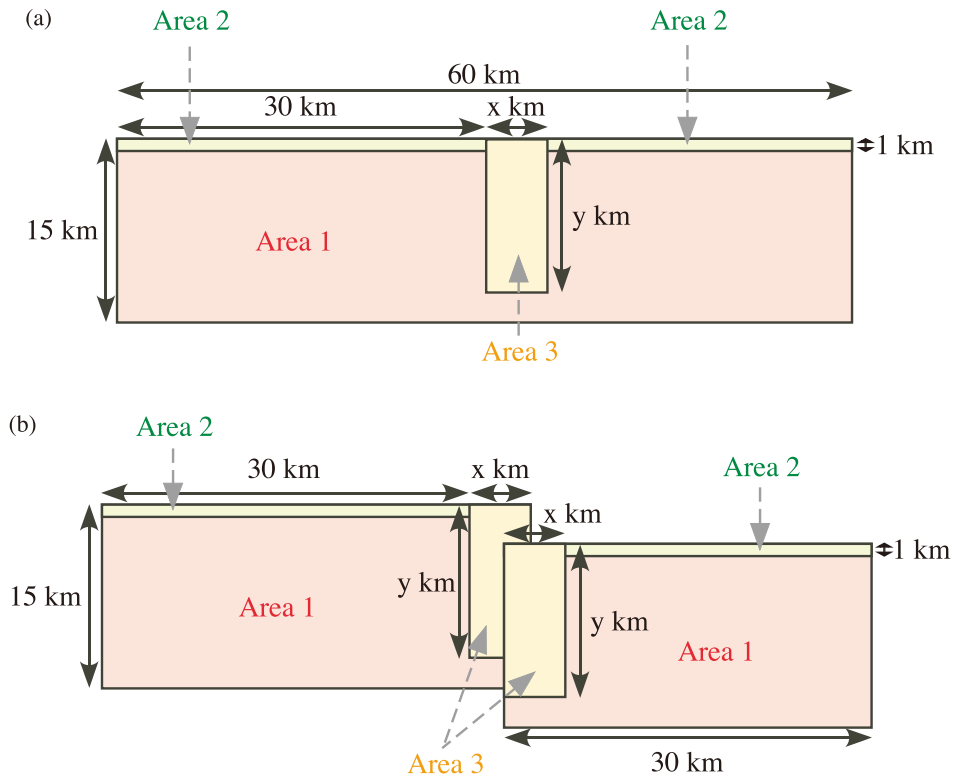
第15表. 2つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は伸長側に0.5 km、初期クラックは非活動的な領域の傍にある場合の連動性。

Table 15. Numerical results of simultaneous rupturing on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose an extensional jog, and the distance between the segments is 0.5 km. An initial crack is located in the boundary of the segments. The meanings of 'o', 'x', and '-' are the same as those for Table 3.

Lower depth of inactive area [km]	Length of inactive area [km]				
	1	2	3	4	5
1	×	○	○	-	-
3	×	×	×	×	×



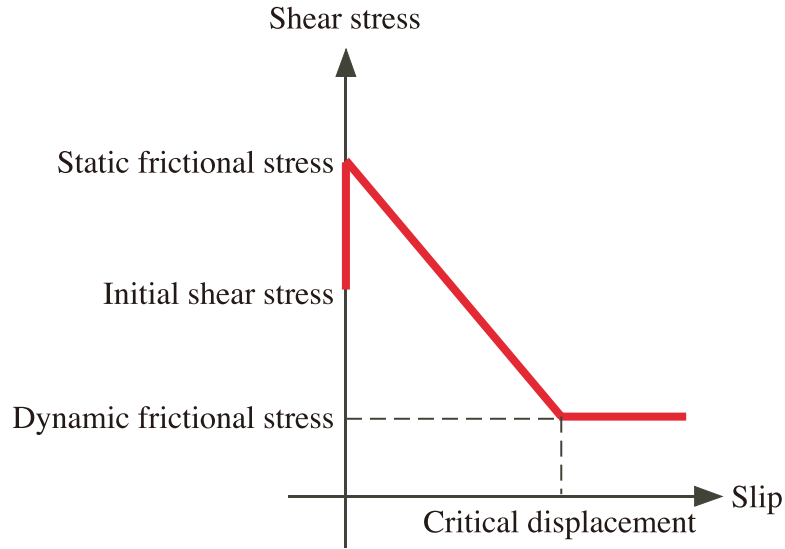
第1図. 断層モデル. (a) 2つのセグメントが深部でつながっている場合. (b) 2つのセグメントが不連続な場合.
 Fig. 1. Fault models in cases of connecting (a) and not-connecting (b) two segments.



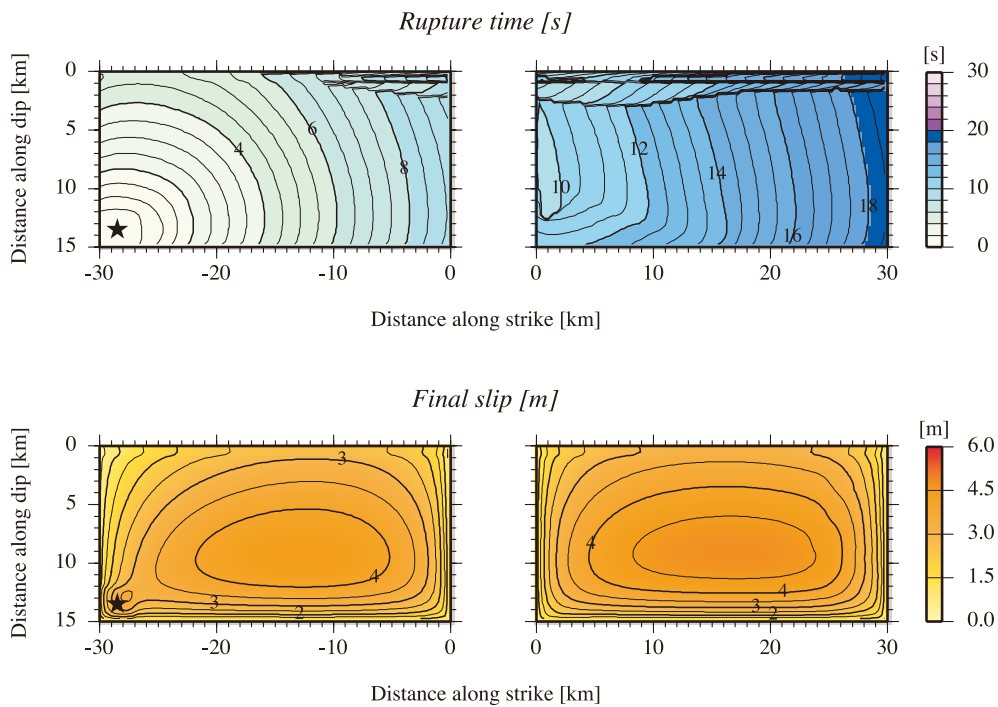
	Area 1	Area 2	Area 3
Initial shear stress [MPa]	$10z + 5$	4	4
Critical displacement [m]	0.4	1.0	4.0
Initial normal stress [MPa]	$17.14z + 8.57$		
Static coefficient of friction	0.677		
Dynamic coefficient of friction	0.525		

第2図. 断層面にはたらく初期剪断応力と初期法線応力, 摩擦係数と臨界変位量.
 z は深さ [km]である. Area 3が非活動的な領域. (a) 2つのセグメントが深部でつながっている場合. (b) 2つのセグメントが不連続な場合.

Fig. 2. Stress condition used in this study. z is depth in km. Area 3 is an inactive area.
 (a) Two segments are connected. (b) Two segments are not connected.

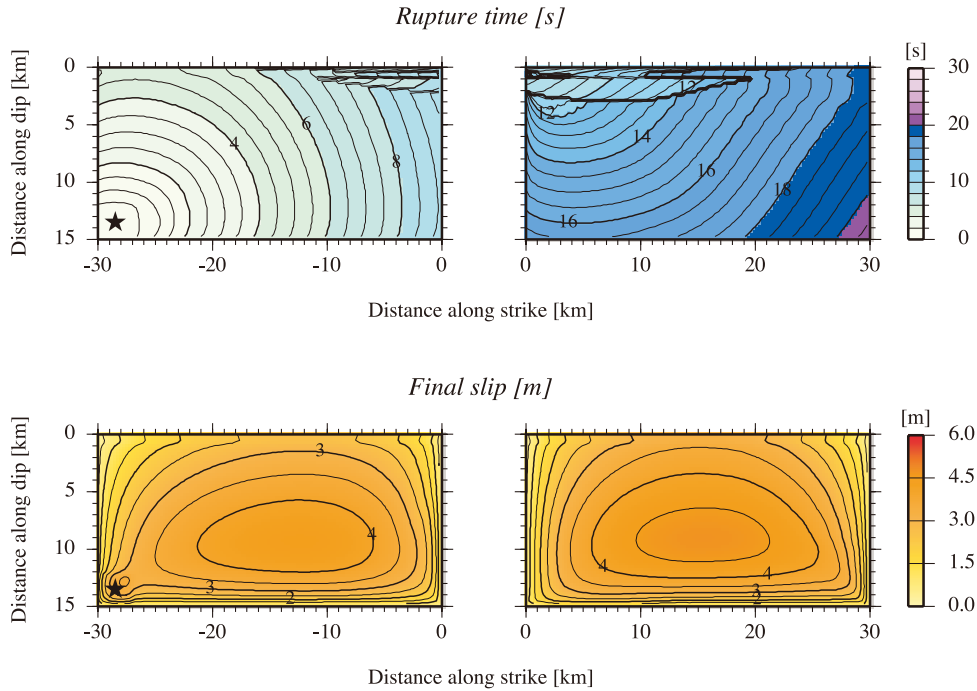


第3図. すべり弱化的摩擦構成則.
Fig. 3. Slip-weakening friction law.



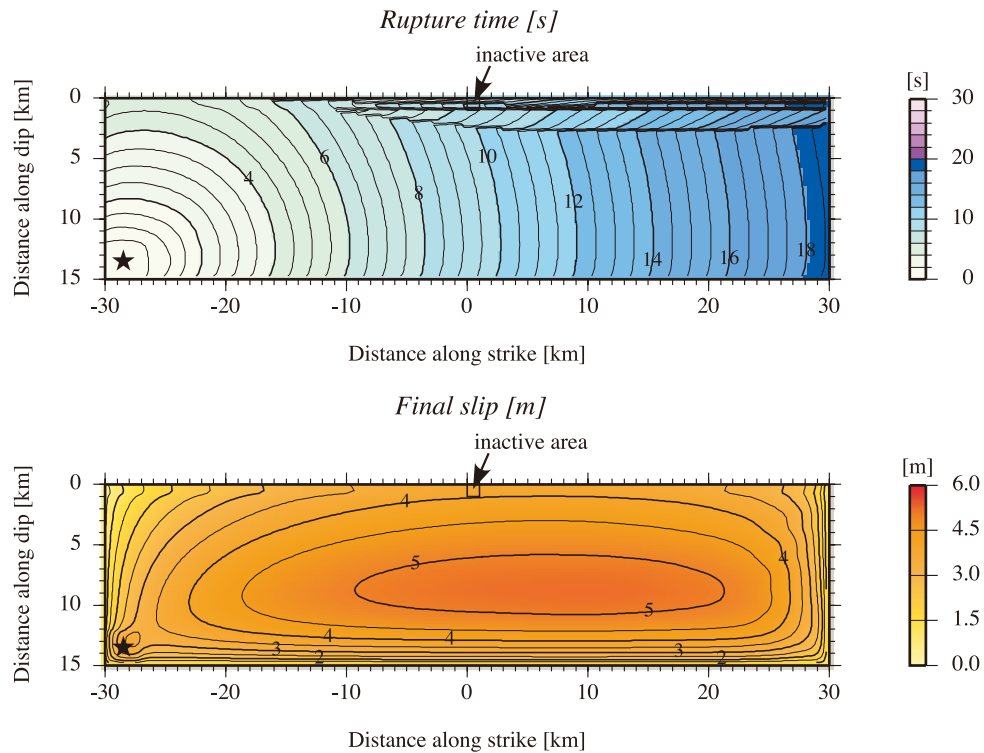
第4図. 非活動的な領域がなく、2つのセグメントは不連続で、初期クラックが断層端にある場合の破壊過程。オフセットの幅は圧縮側に0.5 km、オーバーラップは0 km。上は破壊時刻、下はすべり量の分布を示す。初期クラックの位置は星印で示される(以下同じ)。

Fig. 4. Rupture process on not-connecting two segments without inactive areas. An initial crack is located in the end of the fault system. The two segments without an overlap compose a compressional jog, and the distance between the segments is 0.5 km. The upper and lower panels show rupture time and slip distribution, respectively. An star indicates an initial crack location.



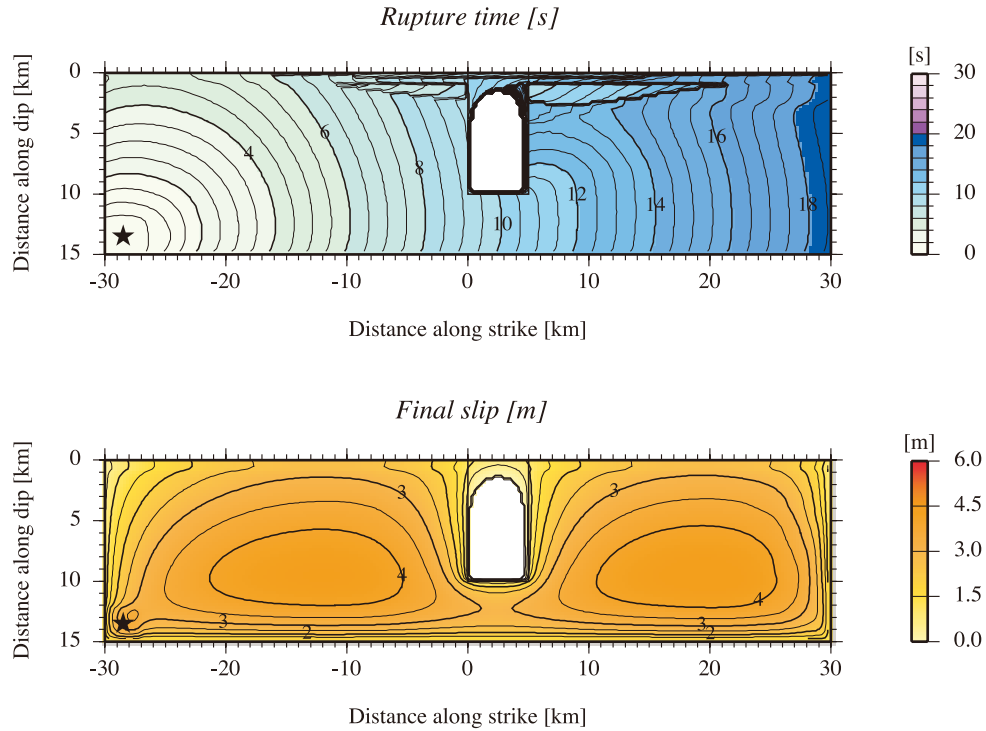
第5図. 非活動的な領域がなく、2つのセグメントは不連続で、初期クラックが断層端にある場合の破壊過程. オフセットの幅は圧縮側に1.5 km、オーバーラップは0 km.

Fig. 5. Rupture process on not-connecting two segments without an overlap. An initial crack is located in the end of the fault system. The two segments without an overlap compose a compressional jog, and the distance between the segments is 1.5 km. The details are the same as for Fig. 4.



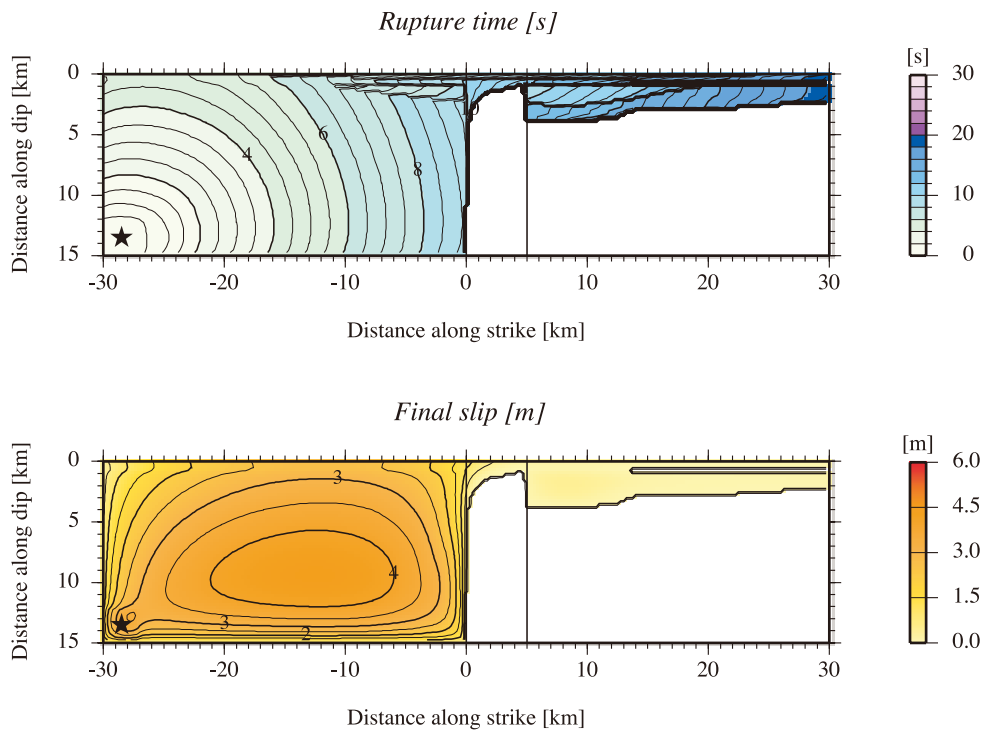
第6図. 2つのセグメントが深部でつながっていて、初期クラックが断層端にある場合の破壊過程. 非活動的な領域の長さは1 km、下限の深さは1 km. 非活動的な領域は黒実線で囲まれた矩形で示される(以下同じ).

Fig. 6. Rupture process on connecting two segments with an inactive area. An initial crack is located in the end of the fault system. The length and lower depth of the inactive area is 1 km and 1 km, respectively. The details are the same as for Fig. 4. A rectangle indicates an inactive area.



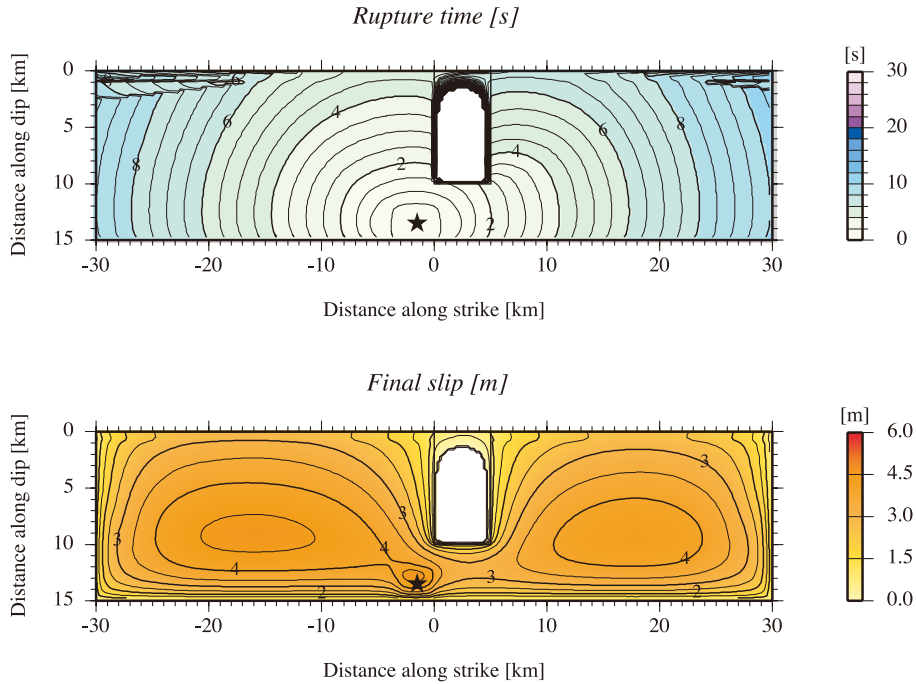
第7図. 2つのセグメントが深部でつながっていて、初期クラックが断層端にある場合の破壊過程。非活動的な領域の長さは5 km、下限の深さは10 km。

Fig. 7. Rupture process on connecting two segments with an inactive area. An initial crack is located in the end of the fault system. The length and lower depth of the inactive area is 5 km and 10 km, respectively. The details are the same as for Fig. 6.



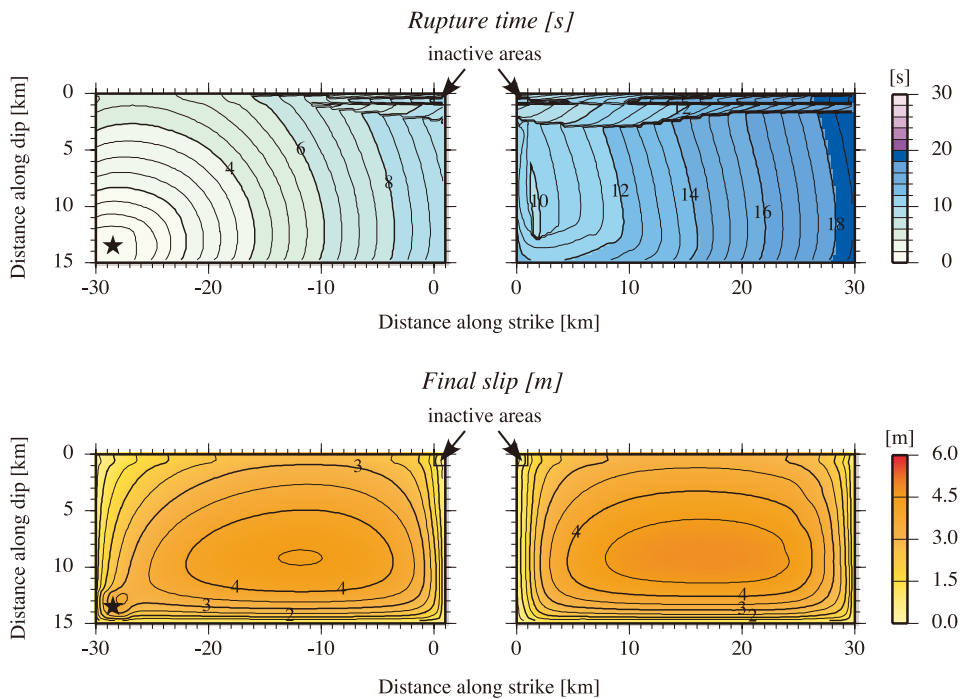
第8図. 2つのセグメントが、長さ5 km、下限の深さ15 kmの非活動的な領域で分断されていて、初期クラックが断層端にある場合の破壊過程。

Fig. 8. Rupture process on two segments divided by an inactive area whose length and lower depth is 5 km and 15 km. The details are the same as for Fig. 6.



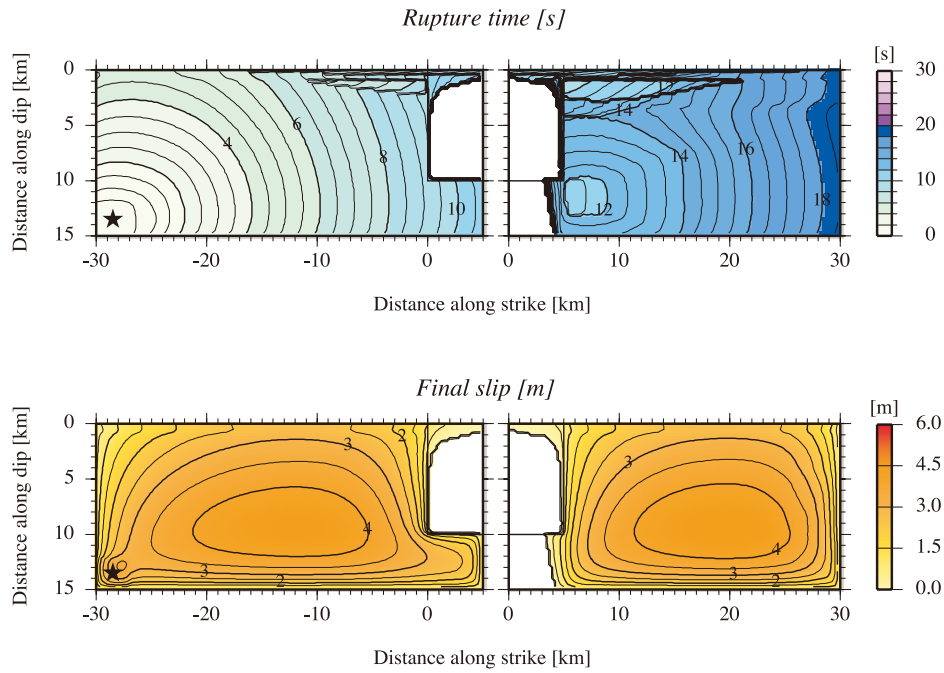
第9図. 2つのセグメントが深部でつながっていて、初期クラックが非活動的な領域の傍にある場合の破壊過程. 非活動的な領域の長さは5 km, 下限の深さは10 km.

Fig. 9. Rupture process on connecting two segments with an inactive area. An initial crack is located in the boundary of the segments. The length and lower depth of the inactive area is 5 km and 10 km, respectively. The details are the same as for Fig. 6.



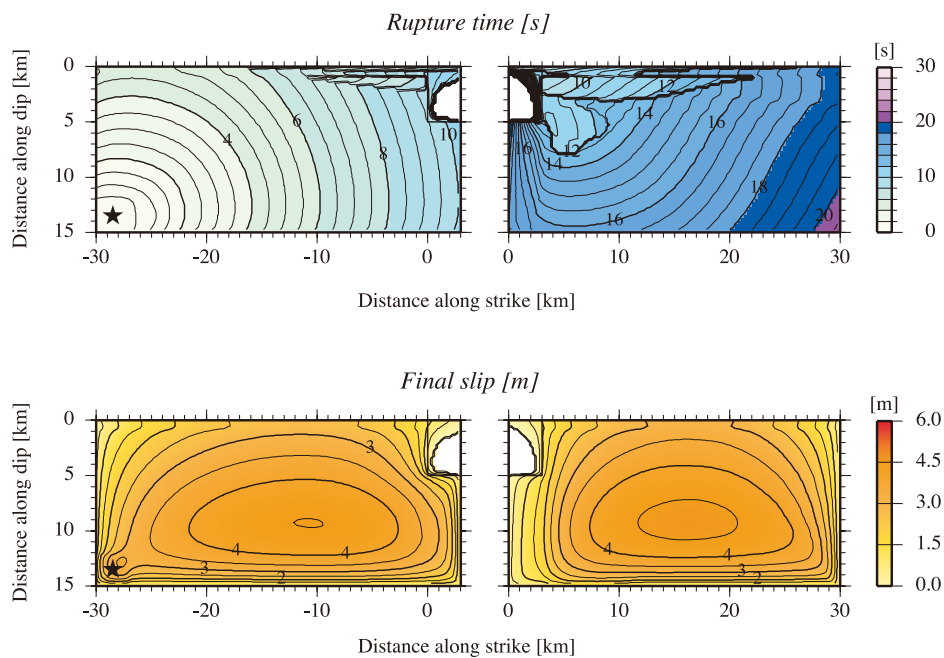
第10図. 2つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は圧縮側に0.5 km, 初期クラックは断層端にある場合. 非活動的な領域の長さは1 km, 下限の深さは1 km.

Fig. 10. Rupture process on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose a compressional jog, and the distance between the segments is 0.5 km. An initial crack is located in the end of the fault system. The length and lower depth of the inactive area is 1 km and 1 km, respectively. The details are the same as for Fig. 6.



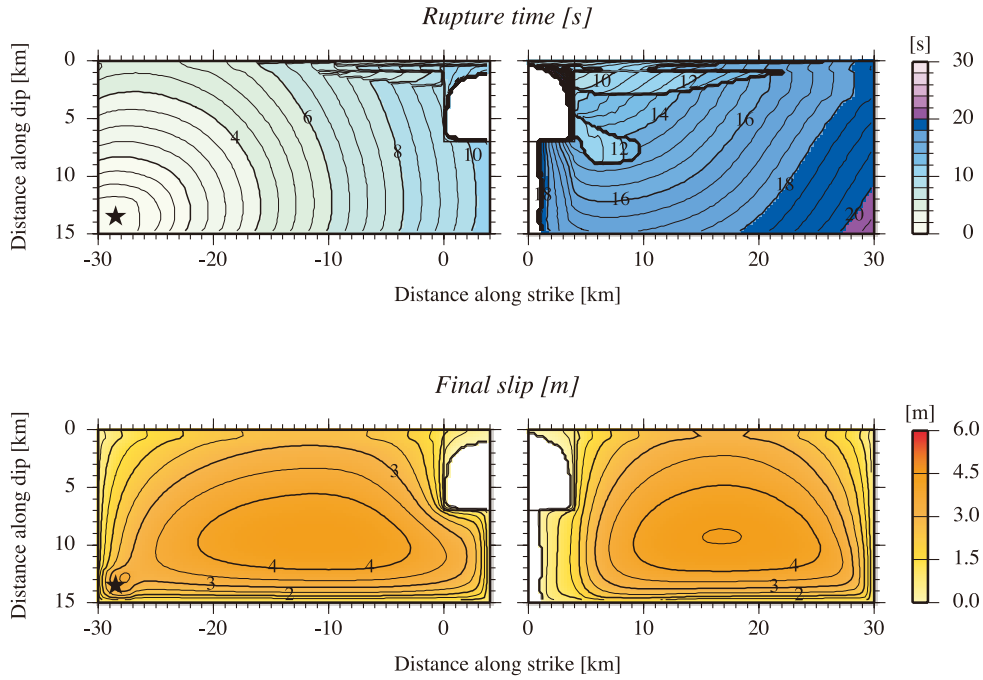
第 11 図. 2 つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は圧縮側に 0.5 km、初期クラックは断層端にある場合. 非活動的な領域の長さは 5 km、下限の深さは 10 km.

Fig. 11. Rupture process on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose a compressional jog, and the distance between the segments is 0.5 km. An initial crack is located in the end of the fault system. The length and lower depth of the inactive area is 5 km and 10 km, respectively. The details are the same as for Fig. 6.



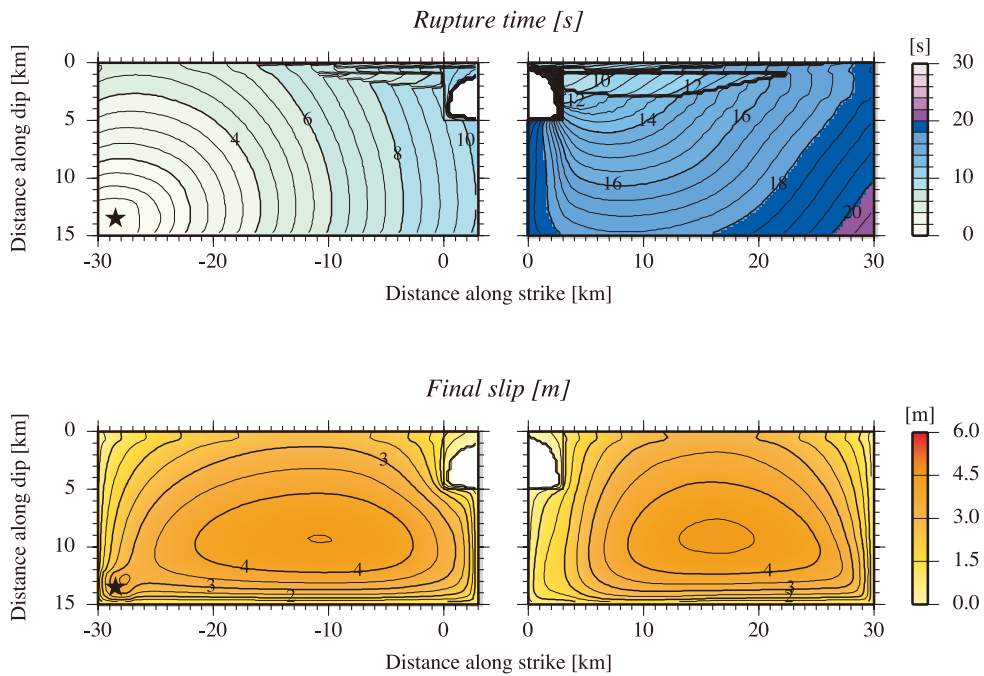
第 12 図. 2 つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は圧縮側に 1.0 km、初期クラックは断層端にある場合. 非活動的な領域の長さは 3 km、下限の深さは 5 km.

Fig. 12. Rupture process on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose a compressional jog, and the distance between the segments is 1.0 km. An initial crack is located in the end of the fault system. The length and lower depth of the inactive area is 3 km and 5 km, respectively. The details are the same as for Fig. 6.



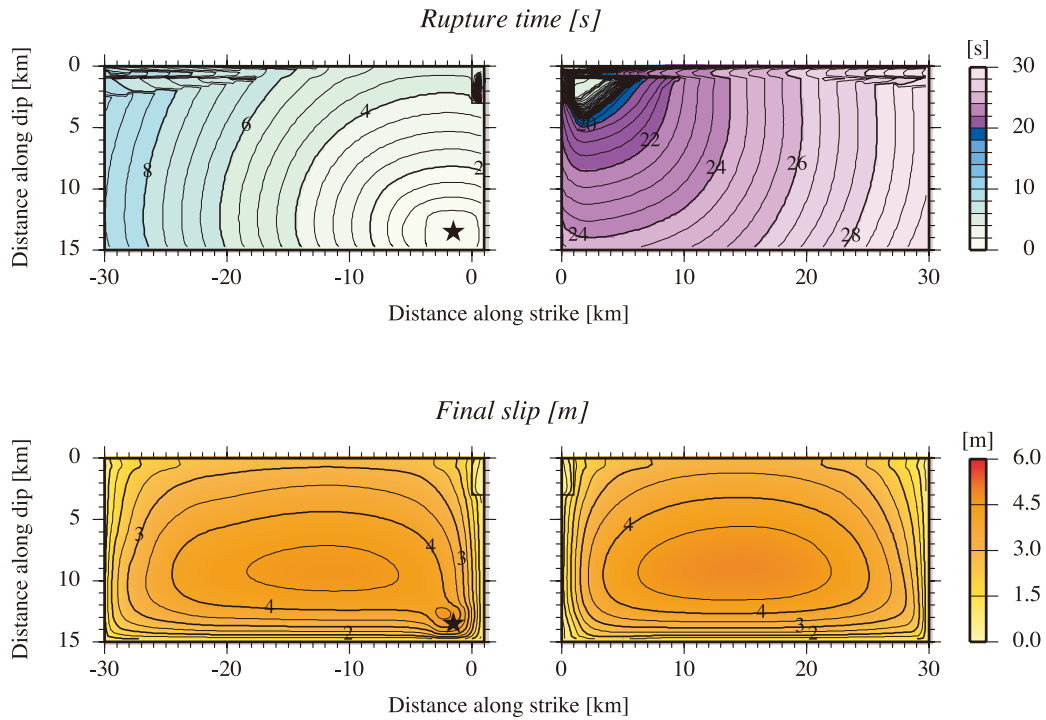
第13図. 2つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は圧縮側に1.0 km、初期クラックは断層端にある場合. 非活動的な領域の長さは4 km、下限の深さは7 km.

Fig. 13. Rupture process on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose a compressional jog, and the distance between the segments is 1.0 km. An initial crack is located in the end of the fault system. The length and lower depth of the inactive area is 4 km and 7 km, respectively. The details are the same as for Fig. 6.



第14図. 2つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は圧縮側に2.0 km、初期クラックは断層端にある場合. 非活動的な領域の長さは3 km、下限の深さは5 km.

Fig. 14. Rupture process on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose a compressional jog, and the distance between the segments is 2.0 km. An initial crack is located in the end of the fault system. The length and lower depth of the inactive area is 3 km and 5 km, respectively. The details are the same as for Fig. 6.



第15図. 2つのセグメントは不連続で、オフセットの幅は圧縮側に0.5 km、初期クラックが非活動的な領域の傍にある場合. 非活動的な領域の長さは1 km、下限の深さは3 km.

Fig. 15. Rupture process on not-connecting two segments with inactive areas. The two segments compose an compressional jog, and the distance between the segments is 0.5 km. An initial crack is located in the boundary of the segments. The length and lower depth of the inactive area is 1 km and 3 km, respectively. The details are the same as for Fig. 6.