

動力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

Basic examination on consecutive fault rupturing by dynamic rupture simulation

壇 一男¹・武藤真菜美²・鳥田晴彦³・大橋泰裕⁴・加瀬祐子⁵

Kazuo Dan¹, Manami Muto², Haruhiko Torita³, Yasuhiro Ohashi⁴ and Yuko Kase⁵

^{1,2,3,4} 大崎総合研究所 (Ohsaki Research Institute, Inc., dan@ohsaki.co.jp)

⁵ 活断層研究センター (Active Fault Research Center, GSJ/AIST)

Abstract: It is necessary to judge whether the closely located active faults will rupture together or independently for predicting the magnitude and the probability of the next earthquake. In this paper, we carried out some basic examinations on the consecutive rupturing of the two active faults by the dynamic rupture simulations based on the slip-weakening model. Our results showed the following conditions are needed for the second fault to rupture completely after the first left-lateral fault ruptures: 1) shorter distance between the two faults, larger length of the first fault, 2) lower strength excess normalized by dynamic stress drop, 3) narrower depth and larger negative stress drop of the inactive area between the two faults, 4) left bending of the second fault rather than right bending, and 5) right step of the second fault rather than left step.

キーワード: 連動破壊, 断層間距離, 動力的破壊シミュレーション, すべり弱化モデル, 強度超過

Keywords: Consecutive Rupturing, Fault Distance, Dynamic Rupture Simulation, Slip-Weakening Model, Strength Excess

1. はじめに

地表で観察される活断層が地中深くにある震源断層とどのようにつながっているかを、物理的なモデルで解釈することは、地震時の強震動や地盤変位を予測する上で重要な課題の一つである。一度の地震で地表に現れる断層、すなわち地表地震断層は近接したいくつかの断層から構成されている場合が多い。したがって、近接して分布している活断層の将来の活動を予測する場合、それぞれが独立して地震を発生するだけではなく、断層群全体が同時に破壊する場合も想定しておく必要がある。一方で、中央構造線のように、長大な断層帯は、いくつかの部分区間ごとに地震を起こしていることも指摘されている(例えば、松田, 1990)。そのため、特に、隣り合う複数の活断層が、連動して破壊するのか、あるいは単独でしか破壊しないのかを判断すること、および長大な断層帯が一度に破壊するのか、あるいは分割して破壊するのかを判断することは、想定される地震の規模や発生確率を予測するために不可欠である。

このような断層群の連動破壊の有無に関しては、個別の地震については研究事例 (Aochi and Fukuyama, 2002 など) があるが、系統的な検討はほとんど行われていない。そこで、本研究では、断層の連動破壊に関する基礎的な検討として、2枚の断

層を対象に、どういう条件のときに連動破壊が生じやすいかを動力的なシミュレーションによって調べた。具体的には、以下のとおりである。

まず、同一平面上にある隣り合う2つの断層間距離や断層長さが異なる場合に、どのような条件であれば断層が連動破壊を生じやすいかを検討した。また、断層の破壊に関しては、すべり弱化モデルのパラメータの設定値にも大きく影響を受けると考えられる。そのため、パラメータのうち、特に、強度超過が連動破壊に与える影響を検討した。さらに、地表では変位、変形が観測されない非活動的な領域を挟んでいる2つの活断層も、地中ではつながっている可能性がある。それを調べるために、非活動的な領域は、断層の一部で応力降下量が負であるために生じると仮定し、その部分の幅や応力降下量を変えた感度解析を行った。最後に、隣り合う2つの断層が同一平面上にない場合の検討として、2つの断層の走向差および並行する2つの断層の相対位置が連動破壊に与える影響を調べた。

2. 計算に用いたすべり弱化モデルとパラメータ

本研究で用いた座標系とすべり弱化モデルを第1図と第2図に示す。第1図では、広域応力($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)の方向が構成する座標系を(X, Y, Z)とし、断層面

とその法線が構成する座標系を (x, y, z) としている。ここに、広域応力場としては、日本列島の広域応力場を念頭に、東西圧縮場とした。

解析は、Kase and Kuge (2001) による 3 次元差分法で行い、解析領域、地盤物性、解析時間は、以下に示す値を用いた。

- ・ 解析領域 : $x=135$ km, $y=60$ km, $z=45$ km, 差分格子間隔 $\Delta x=\Delta y=\Delta z=0.25$ km (断層端部より領域境界まで約 30 km 程度を確保)

- ・ 初期破壊領域 : 3.25 km \times 3.25 km

- ・ 地盤物性 : 密度 $\rho=2.7$ g/cm³, P 波速度 $\alpha=6.0$ km/s, S 波速度 $\beta=3.5$ km/s

- ・ 解析時間 : 0~30 秒 (時間増分 0.025 秒)

一方、すべり弱モデルの各パラメータは、以下のように設定した。これらのパラメータは断層面上で一様な値をとると仮定している。ただし、これらの値を用いて動的破壊過程を計算した結果の破壊伝播速度やすべり量は、それぞれのモデルによって異なる分布を示す。

- ・ 広域応力 : σ_1 (東西方向) と σ_2 (南北方向) は、加瀬 (2002) で用いられた下の (1) 式と (2) 式の Z [km] に、断層の平均深さ (地震発生層下端深さ 15 km の半分) 7.5 km を代入して求めた。また、 σ_3 (上下方向) は 0 MPa とした。ただし、本研究では鉛直横ずれ断層のみをあつかっているため、 σ_3 はシミュレーション結果には関わらない。

$$\sigma_1 = \sigma_{max} = 42 Z [\text{km}] + 6 \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{min} = 20 Z [\text{km}] + 2 \quad (2)$$

- ・ 断層の走向 : 東西圧縮場で左横ずれとなるように 45° (北西-南東方向) と設定した。

- ・ 動的応力降下量 $\Delta\sigma_d$: 断層面積を 1000 km² 程度としたとき、下の (3) 式で表される入倉・三宅 (2001) の断層面積 S [km²] と地震モーメント M_0 [dyne·cm] の経験的関係式と (4) 式で表される円形クラックの応力降下量 $\Delta\sigma_s$ の式より、 $\Delta\sigma_d = \Delta\sigma_s$ として 4 MPa とした。

$$M_0 = \{S/(4.24 \times 10^{-11})\}^2, M_0 \geq 7.5 \times 10^{25} \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_s = (7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5}) \quad (4)$$

- ・ 強度超過 SE : Andrews (1976) によると、動的応力降下量 $\Delta\sigma_d$ と強度超過 SE の比が約 1.6 程度で、破壊伝播速度が S 波を超えずに安定的に破壊が進展することから、下式より求めた値を基本とした。

$$SE = 1.6 \Delta\sigma_d \quad (5)$$

- ・ 臨界すべり変位量 D_c : Andrews (1976) によると、すべり弱の構成則に従う 2 次元面内せん断クラックの破壊フロント (すべりが D_c 以下の領域) の長さ L_c は下の (6) 式で表されること、本研究で用いた解析コードで一様断層の計算を行

う場合には、 $L_c=8 \Delta x$ 程度が必要となることから、(6) 式に $L_c=8 \times 0.25$ km, $\rho=2.7$ g/cm³, $\alpha=6.0$ km/s, $\beta=3.5$ km/s, $\Delta\sigma=4.0$ MPa, $SE=1.6 \Delta\sigma_d$ を代入して、 $D_c=25$ cm とした。

$$L_c = \frac{2\mu(\lambda + \mu)(\sigma_s - \sigma_d)D_c}{\pi(\lambda + 2\mu)(\sigma_0 - \sigma_d)^2} \quad (6)$$

ここに、 λ, μ は Lamé 定数である。

以上、述べたすべり弱モデルのパラメータをまとめて第 1 表に示す。

3. 同一平面上にある隣り合う 2 枚の断層の距離が連動破壊に与える影響

検討に用いた断層モデルを第 3 図に示す。本研究では、以降の節も含めて、はじめに破壊する第一断層の長さを 30 km, 隣りの第二断層の長さを 20 km, また、幅はともに 15 km のモデルを基本モデルとした。

第 4a 図は断層間距離が 1.0 km, 第 4b 図は断層間距離が 1.5 km のときの結果である。図より、断層間距離が 1.0 km では連動破壊し、1.5 km では連動破壊しないことがわかる。

一方、第 5a 図には、第 4a 図と同じ条件で、短い断層をはじめに破壊させた結果を示す。図より、短い断層を先に破壊させると、長い断層の一部は破壊するものの、破壊は拡大せず、連動破壊しないことがわかる。これは、先に破壊する断層が短いため、破壊伝播の指向性の効果が十分ではなく、周囲に放出される応力が隣りの断層の破壊を進展させるほど大きくならなかったためと考えられる。この結果をうけて、第 4b 図で、はじめに破壊の生じる第一断層の長さを 30 km から 50 km に長くして、断層の端から破壊を伝播させたところ、第 5b 図に示すように、連動破壊が生じ、上述した現象を再確認できた。なお、第 5b 図の第一断層では、30 km を超えると浅部から深部への破壊の伝播が見られるようになった。これは、破壊フロントが鉛直に近くなることに加え、自由表面で破壊が進みやすいために起こる現象である。

検討したすべてのケースのパラメータと連動破壊が生じたか否かを第 2 表に示す。表中、consecutive rupture は連動破壊が生じたことを、single rupture は単独破壊のみが生じ、連動破壊は生じなかったことを示す。

以上の結果より、断層の連動破壊にあたっては、断層間距離が短くなるほど連動破壊が生じやすくなり、また、断層間距離が大きくてもはじめに破壊が伝播する長さが長いほど連動破壊が生じやすくなることがわかった。

4. すべり弱化モデルの違いが連動破壊に与える影響

すべり弱化モデルを規定するパラメータのうち、強度超過 SE の違いが連動破壊に与える影響について検討するために、既往の研究 (Kase and Kuge, 2001; Aochi and Fukuyama, 2002; Fukuyama *et al.*, 2003; Mikumo *et al.*, 2003; Aochi and Ide, 2004; Piatanesi *et al.*, 2004; Kase and Day, 2006) での強度超過の値を調べた。その際、それぞれの研究で、初期せん断応力や強度超過の絶対値のばらつきが大きいため、モデルどうしの比較をしやすいように、次式で与えられる無次元化パラメータである S 値を用いて整理した。

$$S = \frac{SE}{\Delta\sigma_d} = \frac{\sigma_s - \sigma_0}{\Delta\sigma_d} \quad (7)$$

既往の研究で用いられているすべり弱化モデルを、第 6a 図に示す。ここに、横軸はすべり変位を表し、縦軸は次式で示される基準化したせん断応力を表す。

$$\frac{\sigma - \sigma_0}{\Delta\sigma_d} \quad (8)$$

この図において、すべり弱化モデルの応力の値が最大となる点が S 値と一致する。第 6b 図に、第 6a 図に示したすべり弱化モデルの臨界すべり変位量 D_c と S 値を示す。臨界すべり変位量 D_c は 0.1~0.8 m の範囲に分布し、 S 値は 0~2.5 の範囲に分布をしている。これらの値を参考にして、本検討では、 S 値を 1.6 以外の値として、1.0, 0.5 とした場合の検討を行った。

第一断層の長さを 30 km、第二断層の長さを 20 km とし、断層間距離を 5 km としたときの S 値の違いが連動破壊に与える影響を第 7 図に示す。第 7a 図は $S=1.0$ の場合、第 7b 図は $S=0.5$ の場合で、 S 値を小さくすると、連動破壊を生じやすくなっていることが確認される。また、 S 値が小さくなると破壊伝播速度が大きくなり、 S 波速度を超えやすくなっていることがわかる。

検討したすべてのケースのパラメータと連動破壊が生じたか否かを第 3 表に示す。

以上より、 S 値に小さな値を設定すると、断層間距離が大きくても連動破壊が生じることがわかった。

5. 非活動領域を持つ断層帯の破壊

つぎに、活断層と活断層の間に、非活動的な領域を持つ活断層帯を想定し、非活動領域の両側の活断層の連動破壊の有無を調べた。

ここでは、第 8 図に示すように、非活動領域の長さを 5 km、その幅を 5 km の場合と 15 km の場合を考えた。また、非活動領域が周囲の断層運動にできるだけ引きずられないように、非活動領域のすべり弱化モデルとして、動摩擦係数 σ_d が初期せん断力 σ_0 より大きく、動的応力降下量 $\Delta\sigma_d$ が負となる場合 (応

力上昇となる場合) を考えた。具体的には、第 9 図に示すように、強度超過 SE を活動領域の強度超過 SE^* (6.4 MPa) と同じとしたうえで、動的応力降下量 $\Delta\sigma_d$ を、モデル A で活動領域の動的応力降下量 $\Delta\sigma_d^*$ (4 MPa) の -0.5 倍、モデル B で -1.0 倍、モデル C で -1.5 倍とした。

第 10 図には、非活動領域のすべり弱化モデルがモデル B のときの結果を示す。第 10a 図は非活動領域の幅が 5 km のときの結果で、非活動領域がない場合の破壊伝播 (第 5b 図の第一断層) と比較すると、非活動領域で破壊の伝播が急激に遅くなっているものの、破壊は非活動領域を含む全体に及んでいることがわかる。一方、第 10b 図は非活動領域の幅が 15 km のときの結果で、第 10a 図と同様、非活動領域で破壊の伝播が急激に遅くなっており、特に、深いほうで破壊が一旦停止していることがわかる。

第 11 図には、非活動領域のすべり弱化モデルがモデル C のときの結果を示す。第 11a 図に示した非活動領域の幅が 5 km の結果は、すべり弱化モデルがモデル B のときの結果とほとんど変わらないが、第 11b 図に示した非活動領域の幅が 15 km のときは、破壊は非活動領域で停止し、右側へは進展していないことがわかる。

検討したすべてのケースのパラメータと連動破壊が生じたか否かを第 4 表に示す。

以上より、非活動領域の幅が狭いほど、また、応力上昇が小さいほど、非活動領域の両側に位置する活断層は連動破壊しやすいことがわかった。また、連動破壊するとき、非活動領域もあわせて破壊することがわかった。

6. 走向差が連動破壊に与える影響

第一断層に対し、第二断層の走向を -30 度から 30 度まで 10 度刻みで変えて、隣り合う断層の走向差が、連動破壊に与える影響を調べた。ここに、負の走向差は左屈曲を、正の走向差は右屈曲を表している。

第 5 表には、すべてのケースの走向差と結果を、第 12a 図には、走向差が -30 度のときの破壊伝播のようすを、第 12b 図には、走向差が 30 度のときの破壊伝播のようすを示す。

これらの図表より、第二断層が左に屈曲するほうが、破壊は連動しやすいことがわかる。これは、第一断層が左横ずれ断層で、その破壊により、左前方にある第二断層の法線方向の圧縮力が減少するためと考えられる。

7. 並行する 2 枚の断層の相対位置が連動破壊に与える影響の検討

最後に、第二断層が第一断層に対して左に 0.75 km ステップする場合と右に 0.75 km ステップする場合を考え、さらに、断層間距離が 0, 2, 5, 10 km の場

合を考えた。ここに、強度超過 SE は動的応力降下量 $\Delta\sigma_d$ の 1.0 倍の 4 MPa とした。各ケースのパラメータと結果を第 6 表に示す。

第 13a 図は、左ステップで断層間距離が 5 km の結果で、第一断層の破壊は第二断層のごく一部を破壊しているものの、破壊は進展していないことがわかる。一方、第 13b 図は、断層間距離を 2 km とした結果で、断層間距離が小さくなったため、第二断層の破壊が全体に進展していることがわかる。

第 13c 図は、右ステップで断層間距離が 5 km の結果で、この場合は、連動破壊が生じている。一方、第 13d 図は右ステップで断層間距離を 10 km とした結果で、この場合は、断層間距離が大きくなったため、第一断層の破壊は、第二断層の破壊に全く影響していないことがわかる。

8. まとめ

本研究では、断層の連動破壊に関する基礎的な検討として、隣り合う 2 枚の断層を対象に、どのような条件のときに連動破壊が生じやすいかを動学的シミュレーションによって調べた。結果は、以下のとおりである。

- 1) 断層間距離が短くなるほど連動破壊が生じやすくなり、また、断層間距離が大きくても、はじめに破壊が伝播する長さが長いほど連動破壊が生じやすくなった。
- 2) 強度超過に小さな値を設定すると、断層間距離が大きくても連動破壊が生じた。
- 3) 非活動領域の幅が狭いほど、また、非活動領域の応力上昇が小さいほど、非活動領域の両側に位置する活断層は連動破壊しやすかった。連動破壊する場合は、非活動領域もあわせて破壊した。
- 4) 第一断層が左横ずれのとき、第二断層が左に屈曲するほど、破壊は連動しやすかった。これは、第一断層が左横ずれ断層で、第二断層が第一断層の左にある場合、第一断層の破壊により、第二断層の法線方向の圧縮力が減少するためと考えられる。
- 5) 第一断層が左横ずれのとき、第二断層は左ステップより右ステップのほうが連動破壊しやすかった。これは、第一断層が左横ずれの破壊をするとき、右ステップ側の断層の法線方向の圧縮力が減少するためと考えられる。

上記の結果は数値的な感度解析の結果であり、連動が起こる具体的な条件までは明らかにできなかった。今後、連動を支配するパラメータの特定と、連

動の起こる条件の定量化ができれば、実務に供しやすくなると考えられる。また、本研究では、基礎的な検討として、断層面全体で一様なすべり弱化モデルを適用したが、実際の断層ではパラメータに不均質性があると考えられるため、今後、アスペリティなどを考慮した場合の連動破壊の検討を行う必要がある。

文 献

- Andrews, D. J. (1976) Rupture velocity of plane strain shear cracks, *Journal of Geophysical Research*, 81, 5679-5687.
- Aochi, H. and Fukuyama, E. (2002) Three-dimensional nonplanar simulation of the 1992 Landers earthquake, *Journal of Geophysical Research*, 107 (B2), doi: 10.1029/2000JB000061.
- Aochi, H. and Ide, S. (2004) Numerical study on multi-scaling earthquake rupture, *Geophysical Research Letters*, 31 (2) 10.1029/2003GL018708.
- Fukuyama, E., Mikumo, T. and Olsen, K. B. (2003): Estimation of the critical slip-weakening distance: Theoretical back ground, *Bulletion of the Seismological Society of America*, 93, 1835-1840.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵 (2001) シナリオ地震の強震動予測, *地学雑誌*, 110 (6) 849-875.
- Kase, Y. and Kuge, K. (2001): Rupture propagation beyond fault discontinuities: Significance of fault strike and location, *Geophysical Journal International*, 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.
- Kase, Y. and Day, S. M. (2006) Spontaneous rupture processes on a bending fault, *Geophysical Research Letters*, 33, doi: 10.1029/2006GL025870.
- 松田時彦 (1990) 最大地震規模による日本列島の地震分帯図, *東京大学地震研究所彙報*, 65, 289-319.
- Mikumo, T., Olsen, K. B., Fukuyama, E. and Yagi, Y. (2003) Stress-breakdown time and slip-weakening distance inferred from slip-velocity functions on earthquake faults, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93 (1), 264-282.
- Piatanesi, A., Tinti, E., Cocco, M. and Fukuyama, E. (2004) *Geophysical Research Letters*, 31, L04609, doi: 10.1029/2003GL019225.

(受付：2007年7月31日，受理：2007年11月1日)

第1表. 本研究で解析に用いたすべり弱化モデルのパラメータ.

Table 1. Parameters of the slip-weakening model used in this paper.

tectonic stress	σ_1	321 MPa	$\sigma_{\max} = 42 Z [\text{km}] + 6$ (Kase, 2002)
	σ_2	152 MPa	$\sigma_{\min} = 20 Z [\text{km}] + 2$ (Kase, 2002)
	σ_3	0 MPa	
fault angle to X axis	θ	45°	left lateral slip
fault angle to Z axis	ϕ	0°	vertical fault
dynamic stress drop	$\Delta\sigma_d$	4 MPa	eqs. (3) and (4) in the text
initial stress	σ_{yy}	-236.5 MPa	$\sigma_{yy} = (\sigma_1 \sin^2 \theta + \sigma_2 \cos^2 \theta) \cos^2 \phi + \sigma_3 \sin^2 \phi$
	σ_{yx}	84.5 MPa	$\sigma_{yx} = (-\sigma_1 + \sigma_2) \sin \theta \cos \theta \cos \phi$
	σ_{yz}	0 MPa	$\sigma_{yz} = (-\sigma_1 \sin^2 \theta - \sigma_2 \cos^2 \theta + \sigma_3) \sin \phi \cos \phi$
initial shear stress	σ_0	84.5 MPa	$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_{yx}^2 + \sigma_{yz}^2}$
strength excess	SE	6.4 MPa	$SE = 1.6 \Delta\sigma_d$ for the initial model
critical distance	D_c	0.25 m	eq. (6) in the text
density	ρ	2.7 g/cm ³	
P -wave velocity	α	6.0 km/s	
S -wave velocity	β	3.5 km/s	

第2表. 同一平面上にある隣り合う2枚の断層間距離と第一断層の長さが連動破壊に与える影響を検討したモデルのパラメータと結果.

Table 2. Parameters of the models for the examination of the effect of the distance between the two faults in the same plane and the length of the first fault on the consecutive rupturing and the results.

fault length		fault distance	result	Figure
first fault	second fault			
30 km	20 km	1.0 km	consecutive rupture	Fig. 4(a)
		1.5 km	single rupture	Fig. 4(b)
		2.0 km	single rupture	—
20 km	30 km	1.0 km	single rupture	Fig. 5(a)
40 km	20 km	1.0 km	consecutive rupture	—
		1.5 km	consecutive rupture	—
		2.0 km	single rupture	—
50 km	20 km	1.0 km	consecutive rupture	—
		1.5 km	consecutive rupture	Fig. 5(b)
		2.0 km	single rupture	—

第3表. 強度超過の違いが連動破壊に与える影響を検討したモデルのパラメータと結果.

Table 3. Parameters of the models for the examination of the effect of the strength excess on the consecutive rupturing and the results.

fault distance	$S = SE / \Delta\sigma_d$	result	Figure
2 km	1.6	single rupture	—
	1.0	consecutive rupture	—
	0.5	consecutive rupture	—
3 km	1.6	single rupture	—
	1.0	consecutive rupture	—
	0.5	consecutive rupture	—
5 km	1.6	single rupture	—
	1.0	single rupture	Fig. 7(a)
	0.5	consecutive rupture	Fig. 7(b)

第4表. 非活動領域を持つ断層帯の破壊を検討したモデルのパラメータと結果 ($\Delta\sigma_d^*$ は活動領域の動的応力降下量).

Table 4. Parameters of the models of the fault systems including the inactive area and the results. Here, $\Delta\sigma_d^*$ is the dynamic stress drop of the active area.

width of the inactive area	$\Delta\sigma_d / \Delta\sigma_d^*$	result	Figure
5 km	-0.5	consecutive rupture	-
	-1.0	consecutive rupture	Fig. 10(a)
	-1.5	consecutive rupture	Fig. 11(a)
15 km	-0.5	consecutive rupture	-
	-1.0	consecutive rupture	Fig. 10(b)
	-1.5	single rupture	Fig. 11(b)

第5表. 走向差が連動破壊に与える影響を検討したモデルのパラメータと結果.

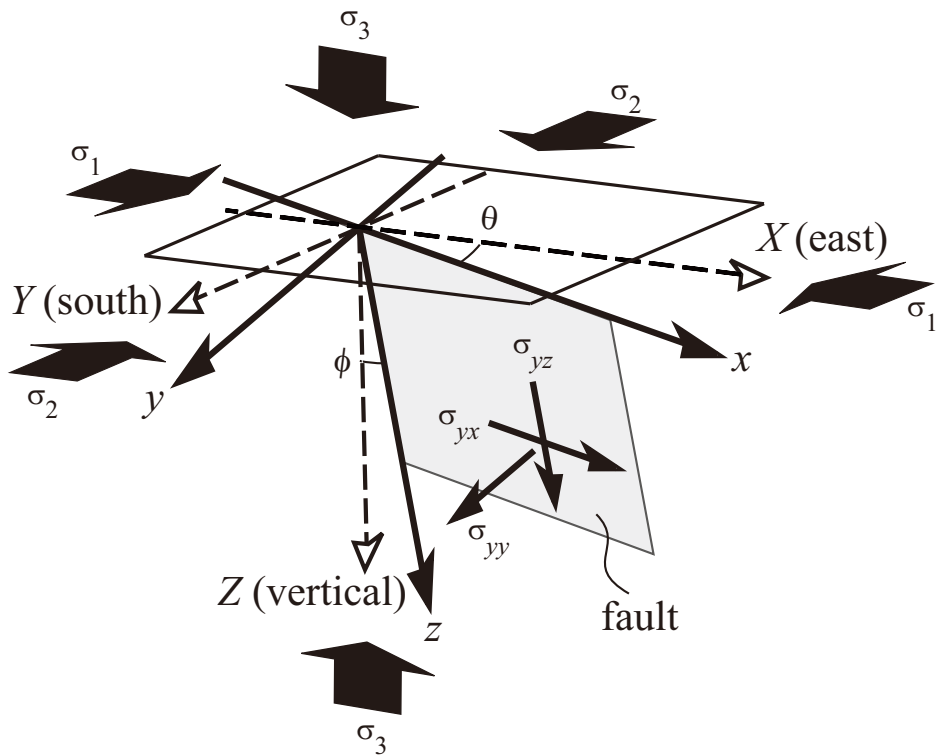
Table 5. Parameters of the models for the examination of the effect of the difference in the strikes of the two faults on the consecutive rupturing and the results.

difference in the strikes	result	Figure
-30° (left bending)	consecutive rupture	Fig. 12(a)
-20° (left bending)	consecutive rupture	-
-10° (left bending)	consecutive rupture	-
0°	consecutive rupture	-
10° (right bending)	single rupture	-
20° (right bending)	single rupture	-
30° (right bending)	single rupture	Fig. 12(b)

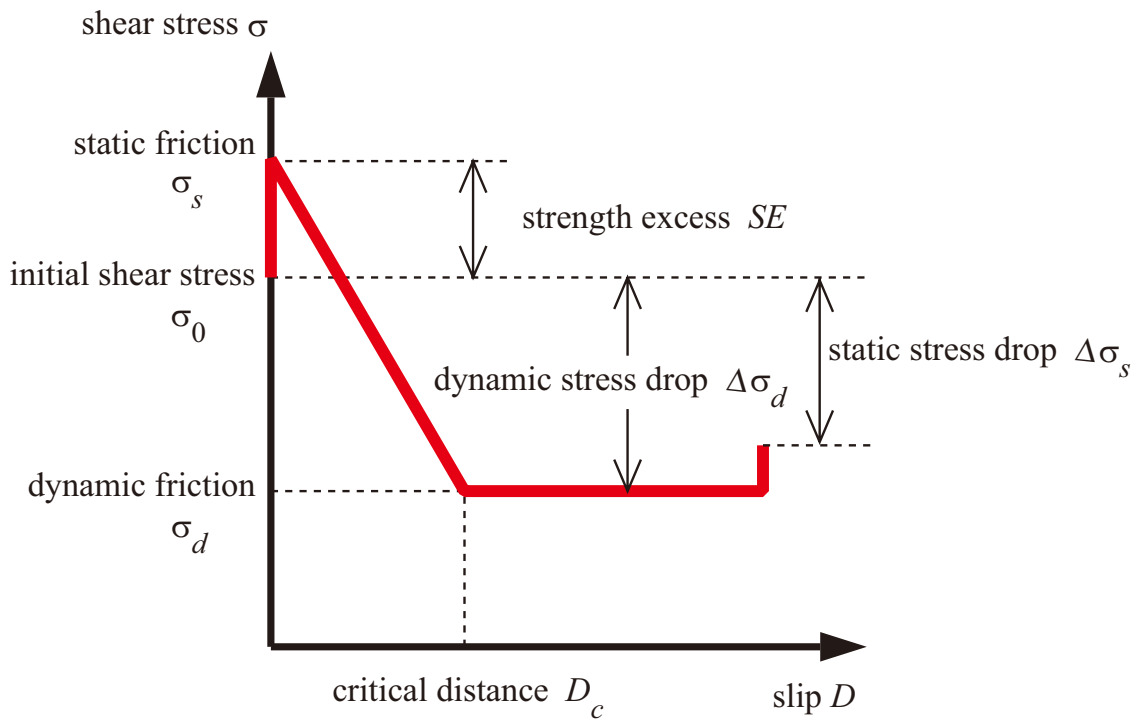
第6表. 並行する2枚の断層の相対位置が連動破壊に与える影響を検討したモデルのパラメータと結果.

Table 6. Parameters of the models for the examination of the effect of the relative location of the two parallel faults on the consecutive rupturing and the results.

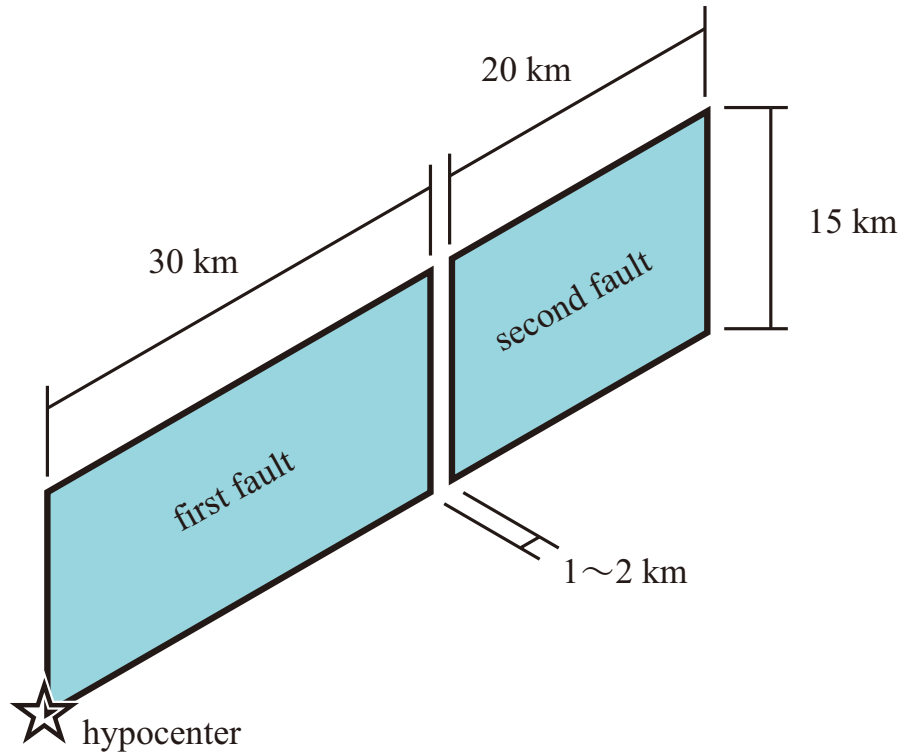
relative location	fault distance	result	Figure
left step of 0.75 km	0 km	consecutive rupture	-
	2 km	consecutive rupture	Fig. 13(b)
	5 km	single rupture	Fig. 13(a)
	10 km	single rupture	-
right step of 0.75 km	0 km	consecutive rupture	-
	2 km	consecutive rupture	-
	5 km	consecutive rupture	Fig. 13(c)
	10 km	single rupture	Fig. 13(d)



第1図. 本研究で解析に用いた座標系.
Fig. 1. Coordinates used in this paper.

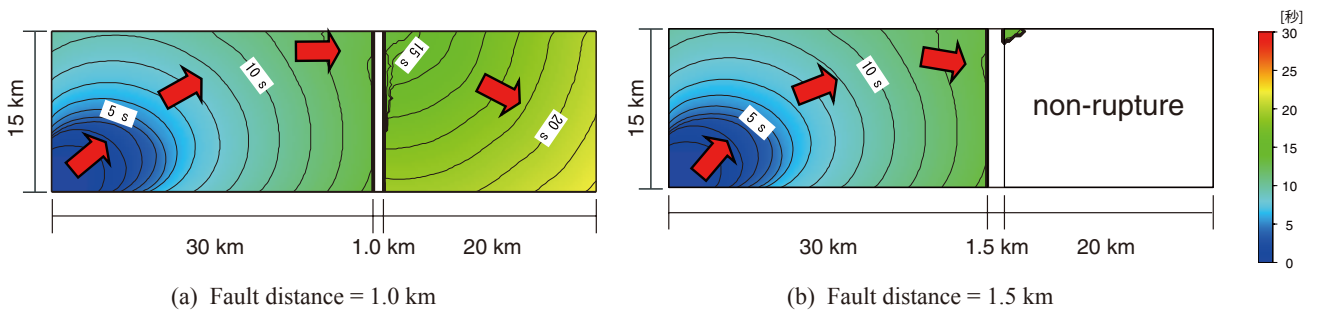


第2図. 本研究で解析に用いたすべり弱化学モデル.
Fig. 2. Slip-weakening model used in this paper.



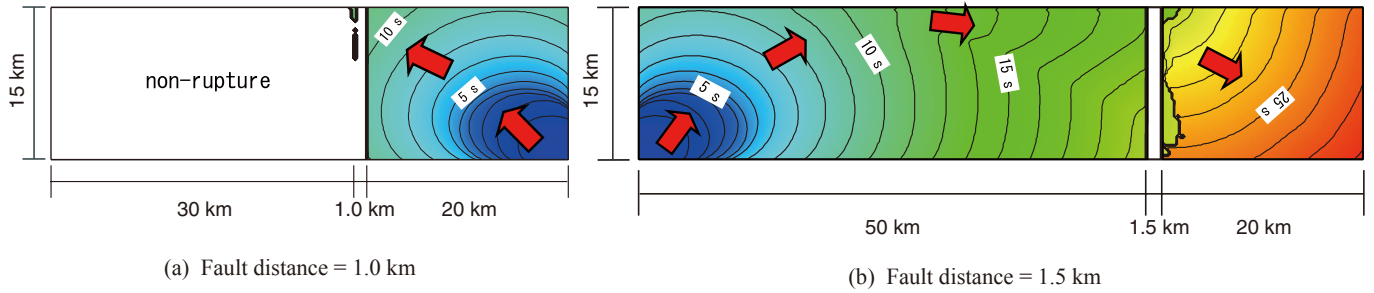
第3図. 同一平面上にある隣り合う2枚の断層間距離が連動破壊に与える影響を検討した基本モデル.

Fig. 3. Basic model for the examination of the effect of the distance between the two faults in the same plane on the consecutive rupturing.

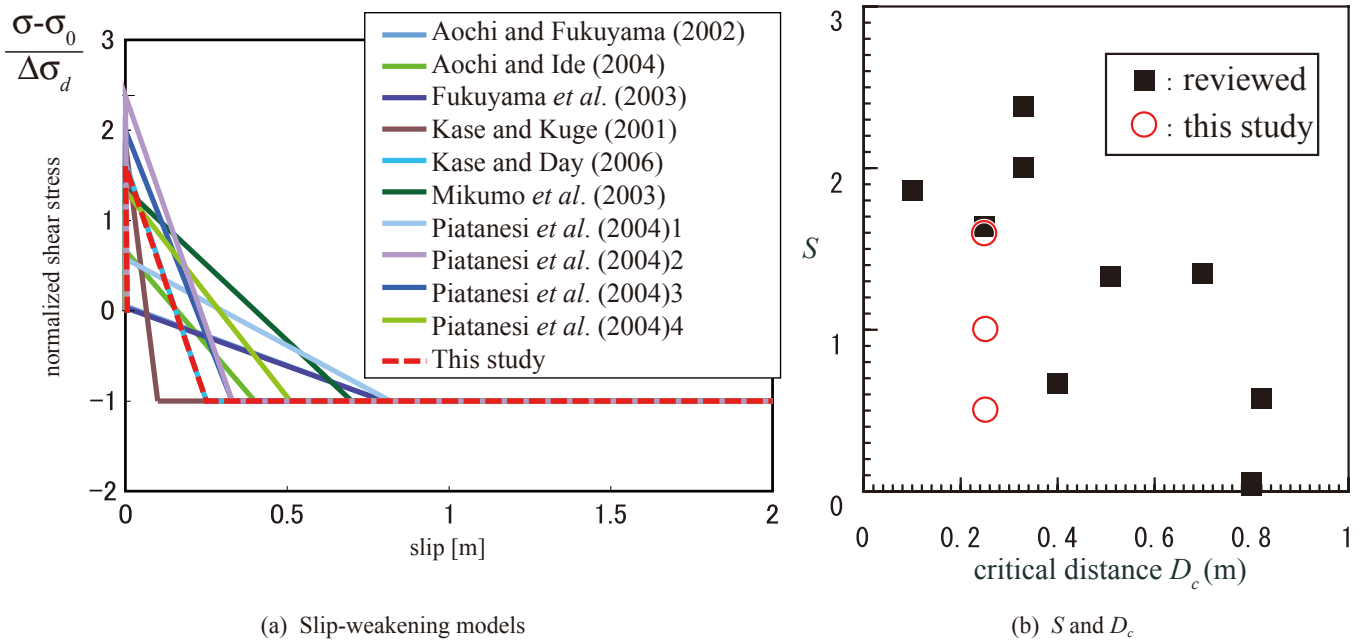


第4図. 断層間距離が連動破壊に与える影響.

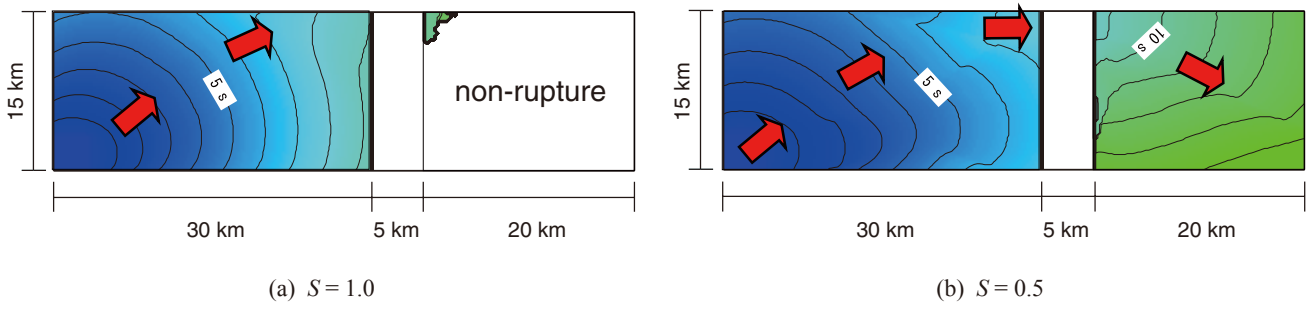
Fig. 4. The effect of the fault distance on the consecutive rupturing.



第 5 図. 第一断層の長さが連動破壊に与える影響.
Fig. 5. The effect of the length of the first fault on the consecutive rupturing.

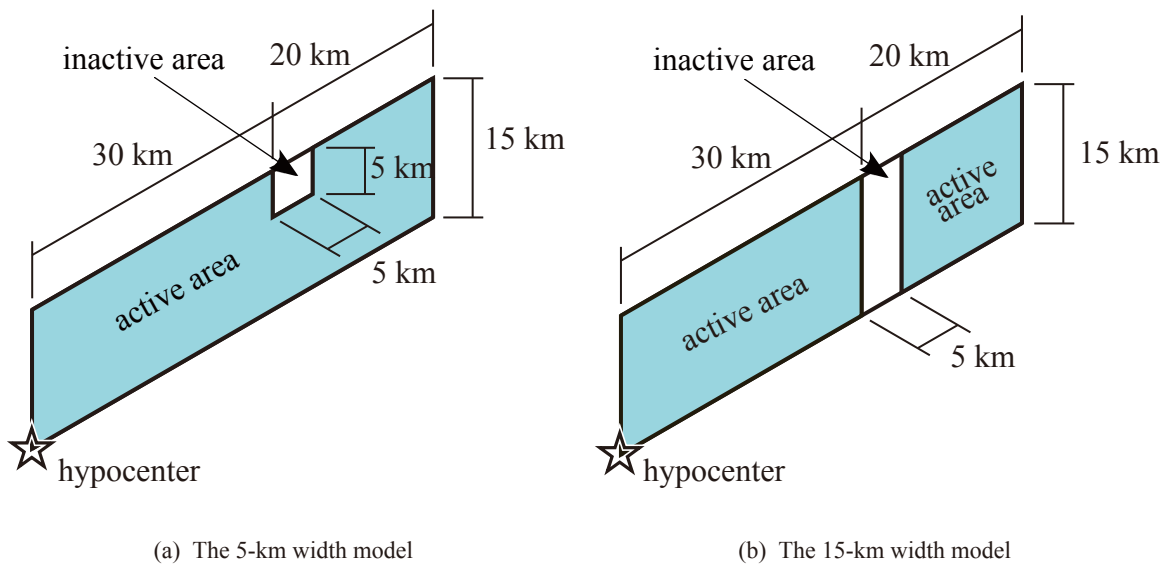


第 6 図. 連動破壊に与える影響を検討したすべり弱化モデル.
Fig. 6. Slip-weakening models for the examination of the effect on their consecutive rupturing.



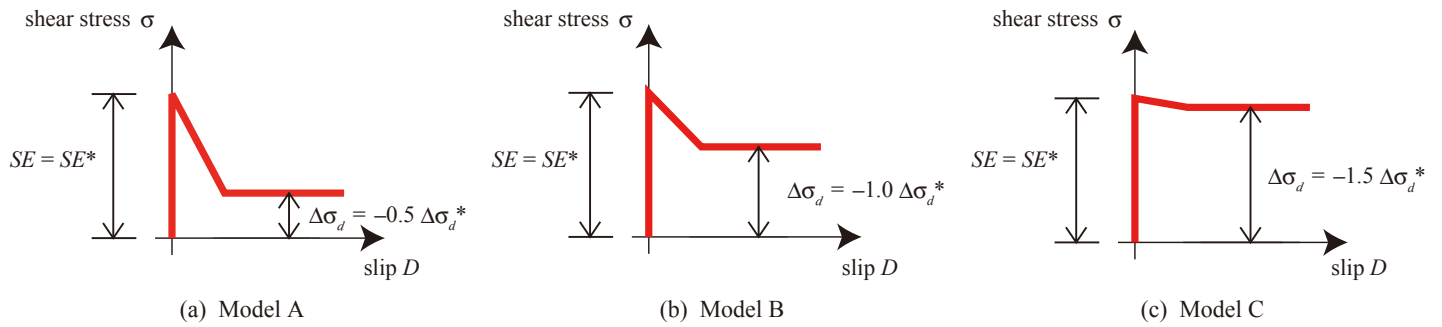
第 7 図. 強度超過が連動破壊に与える影響 (断層間距離 = 5 km) .

Fig. 7. The effect of the strength excess on the consecutive rupturing (fault distance = 5 km).

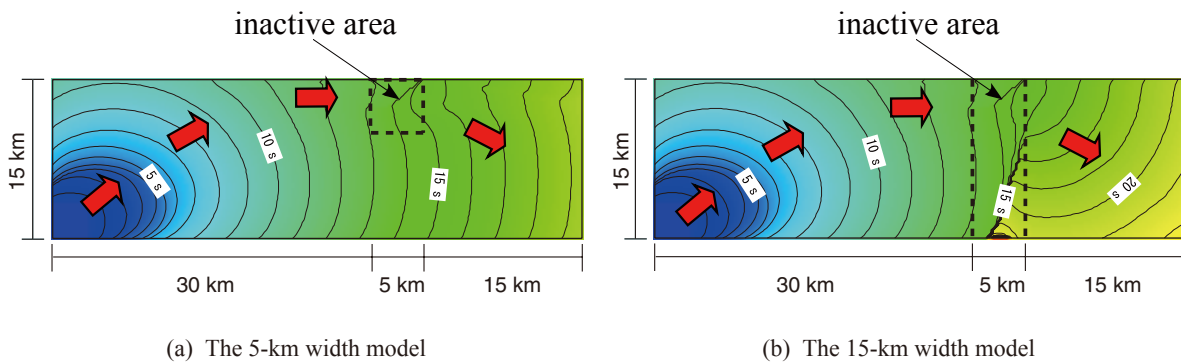


第 8 図. 非活動領域を持つ断層帯の破壊を検討したモデル.

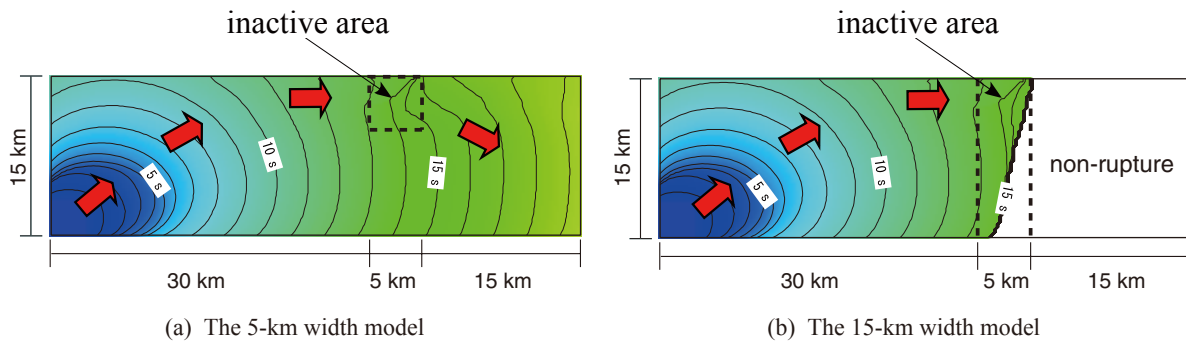
Fig. 8. Models of the fault systems including the inactive area.



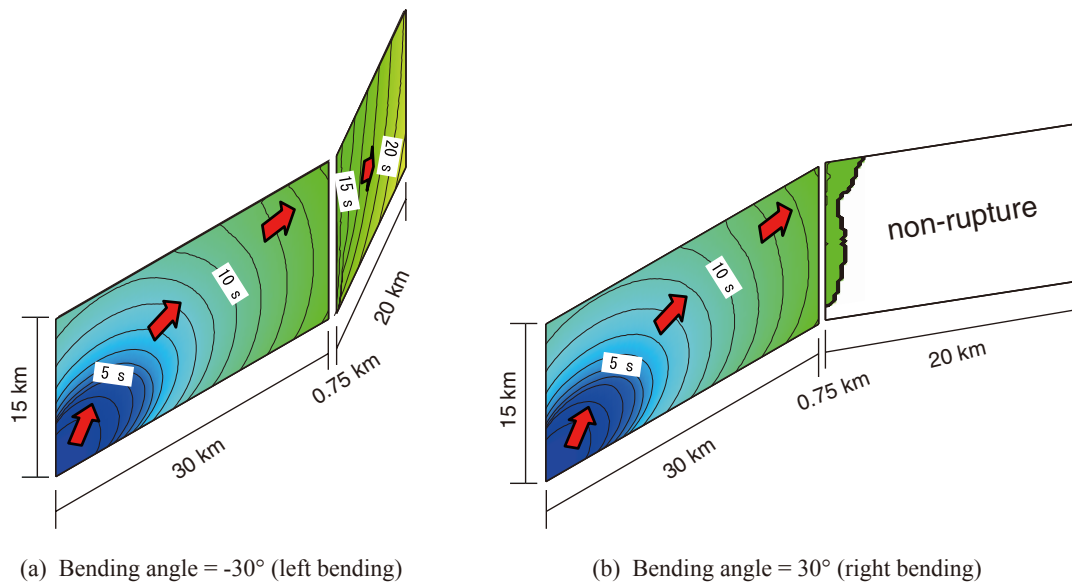
第9図. 非活動領域のすべり弱化モデル (SE^* は活動領域の強度超過, $\Delta\sigma_d^*$ は活動領域の動的応力降下量).
 Fig. 9. Slip-weakening models of the inactive area. Here, SE^* is the strength excess of the active area, and $\Delta\sigma_d^*$ is the dynamic stress drop of the active area.



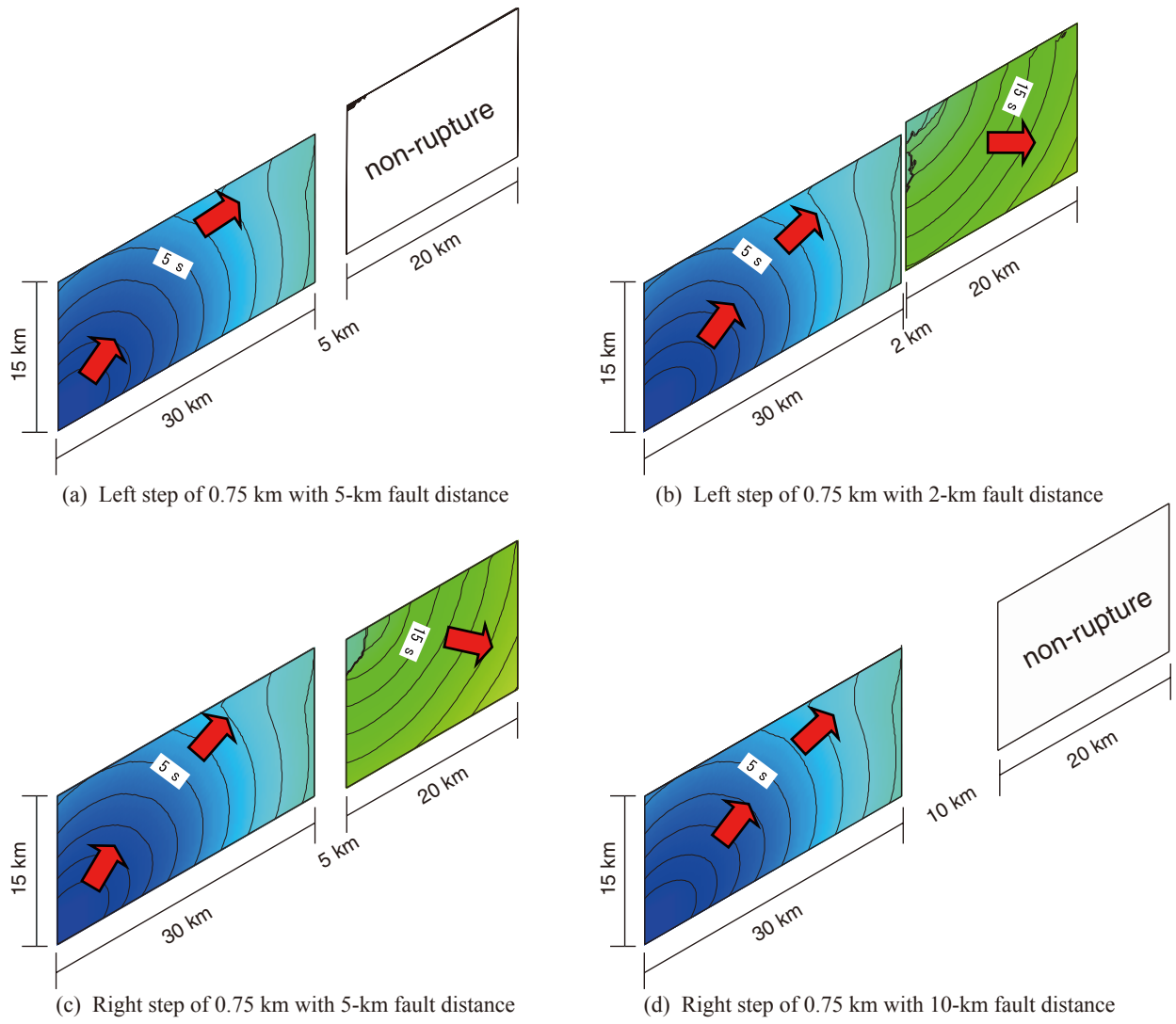
第10図. 非活動領域の幅と動的応力降下量が連動破壊に与える影響 (非活動領域のすべり弱化モデル = モデル B).
 Fig. 10. The effect of the width and dynamic stress drop of the inactive area between the active faults on the consecutive rupturing. Here, Model B is used as the slip-weakening model of the inactive area.



第 11 図. 非活動領域の幅と動的応力降下量が連動破壊に与える影響 (非活動領域のすべり弱化モデル = モデル C).
 Fig. 11. The effect of the width and dynamic stress drop of the inactive area between the active faults on the consecutive rupturing. Here, Model C is used as the slip-weakening model of the inactive area.



第 12 図. 走向差が連動破壊に与える影響.
 Fig. 12. The effect of the difference in the strikes of the two faults on the consecutive rupturing.



第 13 図. 並行する 2 枚の断層の相対位置が連動破壊に与える影響.

Fig. 13. The effect of the relative location of the two parallel faults on the consecutive rupturing.