

動力的破壊シミュレーションによる傾斜する断層の連動性の検討

Dynamic rupture simulations on two dipping fault segments

加瀬祐子¹

Yuko Kase¹

¹ 活断層・火山研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Earthquake and Volcano Geology, AIST, kasep@ni.aist.go.jp)

Abstract: There are many reverse active faults in Inland Japan, and it is an important factor in earthquake size whether or not multiple reverse faults rupture together. We investigate spontaneous rupture processes on two reverse fault segments by numerical simulations. In pure reverse faults, a rupture jump more easily to a segment in the hanging-wall side than a segment in the foot-wall side. In faults under a strike-slip stress regime, the probability of multi-segment rupture depends on distance between segments, dip direction, step direction, and strike-slip component (right-lateral or left-lateral).

キーワード: 連動型地震, 数値シミュレーション, 動力的震源モデル, 差分法

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

1. はじめに

複数の断層の連動性に関する数値実験的な考察については、これまでも複数の研究例がある。たとえば、Harris *et al.* (1991), Harris and Day (1993) では2次元の、Harris and Day (1999) では3次元の平行な2つの横ずれ断層の動的破壊伝播を数値計算し、伸張場にある断層のほうが、圧縮場にある断層よりも破壊が乗り移りやすいことを示した。Kase and Kuge (1998) や Kase and Kuge (2001) は、2次元および3次元の共役な横ずれ断層の動的破壊伝播を計算し、平行な断層以上に、伸張場と圧縮場で連動性に差がでることを示した。また、Lozos *et al.* (2014) は2次元の断層モデルを用いて、すべり弱摩擦則の臨界変位量が小さいほど連動できる断層間距離が長くなることを示した。これらの研究では、断層の置かれている応力場は一樣と仮定されているが、3次元の断層モデルを用いた場合、連動できる断層間距離が1~2 km程度であること、地表付近のごく浅いところに乗り移ること、など、現実の地震で観測されている現象との矛盾が指摘されてきた。

上記の矛盾を説明するために、加瀬 (2002) は、深さに依存する応力場を考慮することで、連動できる断層間距離が4 km程度まで広がること、比較的深いところに乗り移れることを示した。また、Urata *et al.* (2012) は、thermal pressurization を考慮することで、連動できる断層間距離が更に広がり、深い乗り移りも実現できることを示した。

以上の研究では、2次元、もしくは、3次元の場合には傾斜角90°の横ずれ断層から成る断層系がモデル化されてきた。しかし、日本列島の内陸活断層には、

低角~比較的高角な逆断層も数多く含まれており、逆断層や斜めずれ断層の連動性についての知見も必要である。本研究では、平行な2枚の比較的高角に傾斜する断層の連動性について、傾斜角、断層の走向と最大水平圧縮応力のなす角度、断層境界の規模と形状を変えて、数値実験により検討した。

2. 手法

2.1 断層モデル

半無限完全弾性体中に平行な2つのセグメントから成る断層系を考える (Fig. 1)。断層系の全長は60 km、幅は15 kmで、地表を切っているものとする。初期クラックを持つセグメント (Segment 1) からもう一方のセグメント (Segment 2) に向かって左に傾斜しているモデルを考える。すなわち、走向を0°と考えたとき、Segment 2はSegment 1の南側に位置する。Segment 1は長さ30 kmで、初期クラックは断層端最深部に置く。Segment 2はSegment 1とオーバーラップ、もしくは、Segment 1との間にギャップがあり、Segment 1の破壊で生じる応力変化により、破壊が励起される。

傾斜角は55°, 60°, 65°の3通りとし、2つのセグメント間の距離、ステップの幅や向きを変えて、数値計算をおこなった。

2.2 応力場モデル

媒質には、深さに比例する主応力がはたらいしているとす。最小主圧縮応力 σ_3 は鉛直応力に等しいとし、断層の走向と最大主圧縮応力 σ_1 のなす角 Θ (Fig. 1) は、x軸から時計回りに60°, 90°, 120°の3

通りを仮定した。 $\Theta=90^\circ$ のときに剪断応力は逆断層成分のみを持ち、 $\Theta=60^\circ$ のときには右横ずれ、 $\Theta=120^\circ$ のときには左横ずれ成分を伴う。横ずれ成分の大きさは、逆断層成分とほぼ同等になる。 σ_1 と摩擦係数は、傾斜角および Θ によらず、断層面の平均的な強度が 8 MPa、平均的な応力降下量が 5 MPa になるように設定した。

すべての数値計算で共通して用いたパラメータを Table 1 に、傾斜角および Θ に依存するパラメータは傾斜角ごとに Tables 2~4 に示す。

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 (Fig. 2: Ida, 1972; 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 (2010) の差分法を用いた。差分法は、有限要素法などに比べると計算負荷が小さく、本研究のような 3 次元モデルを用いたパラメータ・スタディで、大量の計算を必要とする場合に適している。反面、空間表現の自由度が低く、一般に直方体格子で計算領域を区切るため、傾斜する断層は、断層面というよりは、薄い断層帯として扱われてきた (例えば, Zhang *et al.*, 2006)。加瀬ほか (2002) は、直方体格子の座標平面上に断層を、対角面上に地表面を置くことで、傾斜する断層面上の破壊伝播を精度よく計算したが、この方法では、断層が地表を切れないという問題があった。Kase (2010) では、斜方格子を用いることで、傾斜する断層面と地表面の両方を座標平面上に置いている。そのため、断層面と地表面双方の変位や応力を直接、求めることができ、地表を切る破壊伝播を精度よく計算できる。なお、用いた計算コードは、SCEC/USGS ベンチマークテスト TPV10 で検証されている (Harris *et al.*, 2009)。

3. 結果と考察

Segment 1 の破壊過程はすべての断層モデルでほぼ同じ、Segment 2 の破壊が動的に伝播し始めて以降の破壊速度はほぼ一定であるので、Segment 2 上の破壊の終了時刻の差は、Segment 2 の破壊が励起されるために要する時間、および、励起されてから動的に伝播し始めるまでの時間を反映する。すなわち、Segment 2 上の破壊の終了時刻が遅いほど、

Segment 2 は連動しにくいことを意味する。したがって、この値を連動破壊のしやすさの指標として用いる。

Segment 2 上の破壊の終了時刻は、Segment 1 と Segment 2 の間を波動が伝播するために必要な時間も反映しており、原理的に、Segment 間の距離が長いほど、Segment 2 上の破壊の終了時刻は遅くなる。そのため、Segment 間距離が異なる場合、厳密には、Segment 2 上の破壊の終了時刻を連動破壊のしやすさの指標として用いることはできない。本稿では、Segment 間距離が同じで、ステップの向きが異なるモデル同士の比較に議論を絞ることとする。

3.1 すべり角による連動性の変化

剪断応力の横ずれ成分の有無、および、その向きによって連動性がどのように影響を受けるかを見るため、傾斜角が 60° のモデルで断層の走向と最大主圧縮応力 σ_1 のなす角 Θ を変えた場合の結果を比較する。

剪断応力が逆断層成分のみを持つ場合 ($\Theta=90^\circ$)、ステップの向きによる違いは大きくないが、左ステップの方がやや連動しやすい傾向が見られる (Table 5, Fig. 3)。これは、断層の傾斜方向とは逆 (右) にあたる下盤側にステップする場合では、Segment 2 の法線応力が Segment 1 のすべりによって増加するのに対し、傾斜方向 (左) にあたる上盤側にステップする場合には、Segment 2 の法線応力が減少し、より破壊を励起しやすくなるためと考えられる。

剪断応力が右横ずれ成分を伴う場合 ($\Theta=60^\circ$)、右ステップする Segment 2 は非常に連動しにくく、ステップの向きによる連動性の差が顕著に現れる (Table 6, Fig. 4)。右横ずれ成分のみを考えると、左ステップは圧縮場、右ステップは伸張場で、深さ依存性のある応力場では左ステップ (圧縮場) のほうが連動しやすい (Kase, 2010)。右横ずれでの連動のしやすさは左傾斜の純粋な逆断層の場合と同様の傾向を持つため、ステップの向きによる連動性の差が大きくなる。

剪断応力が左横ずれ成分を伴う場合 ($\Theta=120^\circ$)、ステップ幅が狭い (概ね 4 km 以下) モデルでは、左傾斜の純粋な逆断層と同様に、左ステップのほうが連動しやすい。一方、ステップ幅が広い (概ね 4 km 以上) モデルでは、右ステップの方が連動しやすい (Table 7, Fig. 5)。左横ずれ成分のみを考えると、左ステップは伸張場、右ステップは圧縮場で、深さ依存性のある応力場では右ステップ (圧縮場) のほうが連動しやすい (Kase, 2010)。逆断層成分と左横ずれ成分とで、ステップの向きによる連動のしやすさが逆になるため、連動のしやすさの傾向がより複雑になる。

以上のように、横ずれ成分を伴う逆断層の連動性は、断層の傾斜方向とステップの方向との両方の影

響を受ける。本稿では左傾斜の断層モデルを用いたが、逆傾斜 (Segment 1 から Segment 2 に向かって右に傾斜) の場合には、先に述べた結果とは逆、すなわち、左横ずれを伴う場合には右ステップ優位の傾向が顕著に現れ、右横ずれを伴う場合にはステップ幅によって運動性の傾向が変わると推測されることに、注意が必要である。

なお、横ずれ成分の有無や向きに関わらず、Segment 1 と Segment 2 とのオーバーラップの長さは、運動のしやすさにそれほど影響を与えない (Tables 5 ~7)。これは、Segment 2 の破壊はオーバーラップ部分からではなく、Segment 1 端近くで励起されるためである。一方、ギャップが大きいほど、Segment 間距離が長くなることから、運動しにくくなる傾向が見られる。この傾向は、運動しにくいモデル (例えば、右横ずれ成分を伴う場合の右ステップする Segment 2) ほど顕著であり、Segment 2 の破壊終了時刻は、Segment 間を波動が伝播するために要する時間以上に遅れている (Table 6)。

3.2 傾斜角による運動性の変化

傾斜角によって運動性がどのように影響を受けるかを見るため、傾斜角が 55° および 65° のモデルですべり角を変えた場合の結果を比較する。

傾斜角が 55° で断層の走向と最大主圧縮応力 σ_1 のなす角 Θ を変えた場合の破壊の終了時刻を Tables 8 ~10 に、破壊過程の例を Figs. 6~8 に、傾斜角が 65° で Θ を変えた場合の破壊の終了時刻を Tables 11~13 に、破壊過程の例を Figs. 9~11 に示す。応力降下量と強度が同じでも、傾斜角が高角になるほど、破壊が進展しにくい傾向がある。

前節で述べたとおり、横ずれ成分を伴う逆断層の運動性は、断層の傾斜方向とステップの方向との両方の影響を受けるが、その影響は、 Θ によらず、共通してみられる。ただし、右横ずれ成分を伴う場合 ($\Theta=60^\circ$) に見られるステップの向きによる運動性の差は、高角の場合に特に顕著に現れる (Tables 6, 9, 12)。その一方で、左横ずれ成分を伴う場合 ($\Theta=120^\circ$) には、左横ずれの特徴 (右ステップ優位) と逆断層の特徴 (左ステップ優位) が競合するが、どちらの特徴が優位になるかの境界は、傾斜角 10° 程度の範囲では、大きな違いは見られない (Tables 7, 10, 13)。

4. まとめ

平行な 2 つの逆断層の運動性について、断層の走向と最大水平圧縮応力のなす角度、および、セグメント境界の規模と形状を変えて、数値実験により検討した。

純粋な逆断層の場合、1 枚目の断層が破壊することによって生じる応力変化により、断層の傾斜方向にステップする場合の方がやや運動しやすい傾向に

あることがわかった。1 枚目の断層から 2 枚目の断層に向かって左に傾斜する断層系の場合、右横ずれ成分を伴う逆断層では、右横ずれによっても左にステップする断層の運動を促進するため、左ステップ優位の傾向が顕著に見られる。一方、左横ずれ成分を伴う逆断層では、左横ずれによって右にステップする断層の運動が促進されるため、運動のしやすさの傾向はより複雑になることが明らかになった。また、この傾向は、傾斜角が $55^\circ\sim 65^\circ$ の範囲では共通してみられる。

横ずれ成分を伴う逆断層の運動性は断層の傾斜方向とステップの方向との両方の影響を受けるため、傾斜方向による影響とステップの方向による影響が逆の傾向を持つ組み合わせの場合には、運動性の傾向はセグメントの位置関係により複雑に変化する。したがって、運動性を考える上では、大まかなすべりのセンス (逆断層、右横ずれ、左横ずれ) だけではなく、すべりの方向に関する詳細な情報が必要であり、断層の傾斜方向も考慮して慎重に議論する必要があることがわかる。

本稿では、傾斜角 55° , 60° , 65° の断層モデルを扱った。これは日本列島の内陸活断層として多くみられるインバージョンテクトニクスによって再活動した比較的高角な活断層をモデルとしたためである。今後、逆断層の運動性について一般的な議論をおこなうためには、より低角な逆断層も考慮し、傾斜角によって運動性がいかに変化しうるかについても研究を進める必要がある。また、このような考察を実際に運動性の検討に用いるにあたっては、運動性に対するすべり方向や傾斜角の感度についての解析をおこない、必要な情報の精度をあらかじめ知っておくことで検討結果の信頼性を評価するとともに、必要かつ十分な活断層調査計画の策定に資することも重要である。

謝辞 本研究の一部は、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 4.5: Wessel and Smith, 1998) を用いて作成しました。編集担当の今西和俊博士と匿名の査読者から、有益なコメントをいただきました。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.
- 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.

- Harris, R.A., Archuleta, R.J. and Day, S.M. (1991) Fault steps and the dynamic rupture process: 2-D numerical simulations of a spontaneously propagating shear fracture. *Geophys. Res. Lett.*, 18, 893-896.
- Harris, R.A., Barall, M., Archuleta, R., Dunham, E., Aagaard, B., Ampuero, J.P., Bhat, H., Cruz-Atienza, V., Dalguer, L., Dawson, P., Day, S., Duan, B., Ely, G., Kaneko, Y., Kase, Y., Lapusta, N., Liu, Y., Ma, S., Oglesby, D., Olsen, K., Pitarka, A., Song, S. and Templeton, E. (2009) The SCEC/USGS Dynamic Earthquake Rupture Code Verification Exercise. *Seism. Res. Lett.*, 80, 119-126.
- Ida, Y. (1972) Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and Griffith's specific surface energy, *J. Geophys. Res.*, 77, 3896-3805.
- 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. (2010) Slip-length scaling law for strike-slip multiple segment earthquakes based on dynamic rupture simulations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 473-481.
- Kase, Y. and Kuge, K. (1998) Numerical simulation of spontaneous rupture processes on two non-coplanar faults: the effect of geometry on fault interaction. *Geophys. J. Int.*, 135, 911-922.
- 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・堀川晴央・関口春子・佐竹健治・杉山雄一 (2002) 上町断層系の動的破壊過程の推定. *活断層・古地震研究報告*, no.2, 325-340.
- Lozos, J.C., Dieterich, J.H. and Oglesby, D.D. (2014) The effects of d_0 on rupture propagation on fault stepovers. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 104, in press.
- Urata, Y., Kuge, K. and Kase, Y. (2012) Spontaneous dynamic rupture propagation beyond fault discontinuities: effect of thermal pressurization. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 102, 53-63.
- Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1998) New, improved version of Generic Mapping Tools released. *Eos Trans. AGU*, 79, 579.
- Zhang, W., Iwata, T. and Irikura, K. (2006) Dynamic simulation of a dipping fault using a three-dimensional finite difference method with nonuniform grid spacing, *J. Geophys. Res.*, 111, B05301.

(受付 : 2014 年 8 月 1 日, 受理 : 2014 年 9 月 26 日)

第1表. 計算に用いたパラメータのうち, すべての数値計算で共通するもの.
zは深さで, 単位は km (以下, 同じ).

Table 1. Simulation parameters. z is depth in km.

Intermediate compressional stress: σ_2	$30.000z + 3.00$ [MPa]
Minimum compressional stress: σ_3	$26.166z + 2.62$ [MPa]
Critical displacement: Dc	0.40 [m]
P wave velocity: V_p	6000 [m/s]
S wave velocity: V_s	3464 [m/s]
Density: ρ	2670 [kg/m ³]
Grid interval of space: $\Delta x, \Delta z$	0.2 [km]
Grid interval of time: Δt	0.02 [s]

第2表. 計算に用いたパラメータのうち, 傾斜角が 55° の場合に用いたもの.
Table 2. Simulation parameters used in cases for dip angle of 55°.

Maximum compressional stress: σ_1	$52.940z + 5.29$ [MPa]
Angle between strike and σ_1 : Θ	60° 90° 120°
Static coefficient of friction: μ_s	0.455 0.397 0.455
Dynamic coefficient of friction: μ_d	0.398 0.347 0.398
Grid interval of space: Δy	0.423 [km]

第3表. 計算に用いたパラメータのうち, 傾斜角が 60° の場合に用いたもの.
Table 3. Simulation parameters used in cases for dip angle of 60°.

Maximum compressional stress: σ_1	$62.897z + 6.29$ [MPa]
Angle between strike and σ_1 : Θ	60° 90° 120°
Static coefficient of friction: μ_s	0.491 0.386 0.491
Dynamic coefficient of friction: μ_d	0.445 0.347 0.445
Grid interval of space: Δy	0.400 [km]

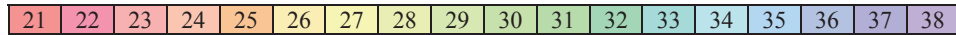
第4表. 計算に用いたパラメータのうち, 傾斜角が 65° の場合に用いたもの.
Table 4 Simulation parameters used in cases for dip angle of 65°.

Maximum compressional stress: σ_1	$90.919z + 9.09$ [MPa]
Angle between strike and σ_1 : Θ	60° 90° 120°
Static coefficient of friction: μ_s	0.554 0.372 0.554
Dynamic coefficient of friction: μ_d	0.523 0.347 0.523
Grid interval of space: Δy	0.382 [km]

第5表. 傾斜角が60°で、剪断応力が逆断層成分のみを持つ場合 ($\Theta=90^\circ$) のSegment 2が破壊し終わる時刻. 単位は秒. -は、Segment 1とSegment 2が重なるため、モデル化の範囲外であることを示す. 各欄の背景色は、カラーバーに示すSegment 2が破壊し終わる時刻に対応する.

Table 5. Time of rupture termination on Segment 2 in cases for dip angle of 60° without strike-slip shear stress component ($\Theta=90^\circ$) in second. '-' indicates out of modeling. Background colors correspond to the time of rupture termination on Segment 2 shown in color bar.

Step width of faults	Overlap						Gap				
	5 km	4 km	3 km	2 km	1 km	0 km	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km
Left step of 8.66 km	28.14	28.26	28.12	28.16	28.32	28.24	28.56	28.70	28.58	28.58	29.08
Left step of 6.93 km	27.76	27.64	27.58	27.74	27.86	27.84	27.94	28.08	28.18	28.28	28.48
Left step of 5.20 km	27.30	27.16	27.22	27.16	27.32	27.14	27.26	27.38	27.60	27.98	27.94
Left step of 3.46 km	26.68	26.60	26.70	26.82	26.76	26.72	26.74	26.96	27.00	27.48	27.98
Left step of 1.73 km	25.50	25.48	25.40	25.50	25.40	25.56	25.86	26.24	26.92	27.32	27.92
0 km	-	-	-	-	-	-	25.40	26.42	27.32	27.86	28.12
Right step of 1.73 km	26.48	26.52	26.46	26.60	26.62	26.98	27.18	27.58	27.72	27.84	28.22
Right step of 3.46 km	26.94	27.00	27.10	27.10	27.16	27.16	27.38	27.54	27.76	28.04	28.26
Right step of 5.20 km	27.38	27.44	27.48	27.36	27.58	27.52	27.66	27.96	27.94	28.30	28.46
Right step of 6.93 km	27.72	27.66	27.68	27.92	27.86	27.86	27.92	28.00	28.18	28.36	28.52
Right step of 8.66 km	27.98	28.08	28.06	28.02	28.06	28.32	28.20	28.30	28.48	28.74	28.72



第6表. 傾斜角が60°で、剪断応力が右横ずれ成分を伴う場合 ($\Theta=60^\circ$) のSegment 2が破壊し終わる時刻. 記号および背景色の詳細は、第5表を参照.

Table 6. Time of rupture termination on Segment 2 in cases for dip angle of 60° with right-lateral strike-slip shear stress component ($\Theta=60^\circ$) in second. The details are the same as for Table 5.

Step width of faults	Overlap						Gap				
	5 km	4 km	3 km	2 km	1 km	0 km	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km
Left step of 8.66 km	27.60	27.64	27.54	27.44	27.74	27.88	27.78	27.64	27.96	27.90	27.78
Left step of 6.93 km	27.02	27.14	26.96	27.10	27.02	26.90	27.22	27.12	27.30	27.10	27.30
Left step of 5.20 km	26.34	26.46	26.40	26.44	26.68	26.54	26.58	26.54	26.64	26.58	26.52
Left step of 3.46 km	24.74	24.90	24.86	24.76	24.82	24.54	24.82	24.86	24.88	25.32	25.78
Left step of 1.73 km	23.28	23.32	23.18	23.24	23.28	23.28	23.46	23.64	23.92	24.40	24.66
0 km	-	-	-	-	-	-	22.88	23.40	23.88	24.50	24.76
Right step of 1.73 km	26.14	26.26	26.50	26.26	26.32	26.42	26.34	26.30	26.52	27.00	27.48
Right step of 3.46 km	29.22	29.08	29.04	29.94	29.42	29.74	29.56	30.46	30.02	29.82	31.02
Right step of 5.20 km	30.28	30.52	30.66	31.10	31.34	30.08	31.24	30.86	31.36	30.52	32.14
Right step of 6.93 km	30.46	30.66	30.84	31.36	31.72	31.78	31.64	32.00	32.22	33.64	32.28
Right step of 8.66 km	32.38	32.64	31.76	32.48	32.70	32.74	32.90	32.70	33.74	33.14	35.70

第7表. 傾斜角が60°で、剪断応力が左横ずれ成分を伴う場合 ($\Theta=120^\circ$) のSegment 2が破壊し終わる時刻. 記号および背景色の詳細は、第5表を参照.

Table 7. Time of rupture termination on Segment 2 in cases for dip angle of 60° with left-lateral strike-slip shear stress component ($\Theta=120^\circ$) in second. The details are the same as for Table 5.

Step width of faults	Overlap						Gap				
	5 km	4 km	3 km	2 km	1 km	0 km	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km
Left step of 8.66 km	29.32	29.56	29.54	29.76	29.88	29.52	29.88	30.44	30.62	30.60	30.54
Left step of 6.93 km	28.82	28.84	28.66	29.16	29.30	29.30	29.64	29.82	30.04	30.00	31.20
Left step of 5.20 km	27.76	27.68	27.60	27.72	28.32	28.68	28.32	28.40	28.88	29.14	29.80
Left step of 3.46 km	26.08	25.92	25.82	26.02	25.82	25.78	26.24	26.08	26.06	26.08	26.12
Left step of 1.73 km	25.14	24.78	25.18	25.00	24.98	25.48	25.48	26.00	26.20	26.22	26.44
0 km	-	-	-	-	-	-	24.92	27.66	29.72	30.84	34.32
Right step of 1.73 km	25.50	25.42	25.68	25.58	25.90	25.88	26.52	26.42	26.92	27.14	27.26
Right step of 3.46 km	25.98	25.80	25.92	26.36	26.06	26.28	26.18	26.38	26.40	26.64	26.52
Right step of 5.20 km	26.24	26.06	26.28	26.18	26.36	26.38	26.56	26.74	26.62	26.60	26.88
Right step of 6.93 km	25.92	26.32	26.48	26.52	26.54	26.50	26.60	26.72	26.86	27.04	27.10
Right step of 8.66 km	26.08	26.34	26.30	26.68	26.48	26.72	26.88	26.96	26.92	27.38	27.54

第 8 表. 傾斜角が 55° で、剪断応力が逆断層成分のみを持つ場合 ($\Theta=90^\circ$) の Segment 2 が破壊し終わる時刻. 記号および背景色の詳細は、第 5 表を参照.

Table 8. Time of rupture termination on Segment 2 in cases for dip angle of 55° without strike-slip shear stress component ($\Theta=90^\circ$) in second. The details are the same as for Table 5.

Step width of faults	Overlap						Gap				
	5 km	4 km	3 km	2 km	1 km	0 km	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km
Left step of 5.20 km	23.76	23.68	23.64	23.68	23.70	23.80	23.76	23.78	23.72	23.84	23.88
Left step of 3.46 km	23.28	23.24	23.24	23.30	23.32	23.36	23.36	23.38	23.38	23.46	23.52
Left step of 1.73 km	22.74	22.70	22.74	22.80	22.84	22.82	22.82	22.90	22.96	23.08	23.22
0 km	-	-	-	-	-	-	22.36	22.56	22.76	22.94	23.20
Right step of 1.73 km	22.80	22.86	22.88	22.84	22.80	22.82	22.82	22.94	23.10	23.48	23.72
Right step of 3.46 km	23.64	23.58	23.62	23.66	23.58	23.66	23.72	23.76	23.82	23.86	23.96
Right step of 5.20 km	23.94	23.90	23.94	23.90	23.92	23.90	23.94	23.96	23.96	24.04	24.02

第 9 表. 傾斜角が 55° で、剪断応力が右横ずれ成分を伴う場合 ($\Theta=60^\circ$) の Segment 2 が破壊し終わる時刻. 記号および背景色の詳細は、第 5 表を参照.

Table 9. Time of rupture termination on Segment 2 in cases for dip angle of 55° with right-lateral strike-slip shear stress component ($\Theta=60^\circ$) in second. The details are the same as for Table 5.

Step width of faults	Overlap						Gap				
	5 km	4 km	3 km	2 km	1 km	0 km	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km
Left step of 5.20 km	23.82	23.86	23.94	23.98	24.02	24.10	24.02	24.14	24.10	24.18	24.20
Left step of 3.46 km	23.12	23.12	23.22	23.20	23.18	23.12	23.20	23.32	23.30	23.40	23.46
Left step of 1.73 km	21.98	21.86	21.90	21.94	21.92	21.94	22.02	22.06	22.14	22.32	22.52
0 km	-	-	-	-	-	-	21.54	21.72	21.90	22.14	22.28
Right step of 1.73 km	22.70	22.68	22.80	22.72	22.78	22.78	22.92	23.04	23.02	23.06	23.16
Right step of 3.46 km	24.00	24.00	24.38	24.00	24.02	24.10	24.20	24.34	24.36	24.18	24.28
Right step of 5.20 km	24.98	24.88	24.74	25.10	24.98	24.98	25.12	24.94	25.16	25.00	25.14

第 10 表. 傾斜角が 55° で、剪断応力が左横ずれ成分を伴う場合 ($\Theta=120^\circ$) の Segment 2 が破壊し終わる時刻. 記号および背景色の詳細は、第 5 表を参照.

Table 10. Time of rupture termination on Segment 2 in cases for dip angle of 55° with left-lateral strike-slip shear stress component ($\Theta=120^\circ$) in second. The details are the same as for Table 5.

Step width of faults	Overlap						Gap				
	5 km	4 km	3 km	2 km	1 km	0 km	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km
Left step of 8.66 km	24.96	25.18	24.46	25.10	24.94	25.36	25.36	25.08	25.20	25.24	25.28
Left step of 6.93 km	23.60	23.80	23.66	23.56	23.52	23.62	23.48	23.54	23.60	23.50	24.08
Left step of 5.20 km	22.60	22.78	22.70	22.60	22.62	22.52	22.70	22.58	22.68	22.64	22.72
Left step of 3.46 km	22.38	22.52	22.40	22.62	22.50	22.58	22.50	22.44	22.44	22.36	22.62
Left step of 1.73 km	22.36	22.26	22.14	22.26	22.52	22.34	22.56	22.50	22.70	22.68	22.92
0 km	-	-	-	-	-	-	21.84	22.64	23.16	23.38	23.48
Right step of 1.73 km	22.92	22.94	22.92	22.94	23.08	23.20	23.26	23.36	23.48	23.36	23.60
Right step of 3.46 km	22.90	22.90	23.02	22.98	23.06	23.08	23.12	23.26	23.24	23.44	23.50
Right step of 5.20 km	22.98	22.98	23.02	23.02	23.12	23.16	23.14	23.32	23.28	23.30	23.40
Right step of 6.93 km	23.12	23.10	23.16	23.14	23.22	23.22	23.24	23.30	23.40	23.46	23.60
Right step of 8.66 km	23.42	23.40	23.46	23.44	23.56	23.50	23.56	23.58	23.60	23.62	23.74

第 11 表. 傾斜角が 65° で、剪断応力が逆断層成分のみを持つ場合 ($\Theta=90^\circ$) の Segment 2 が破壊し終わる時刻. x は Segment 2 上で破壊が励起されなかったことを示す. その他の記号および背景色の詳細は、第 5 表を参照.

Table 11. Time of rupture termination on Segment 2 in cases for dip angle of 65° without strike-slip shear stress component ($\Theta=90^\circ$) in second. 'x' indicates a single-segment rupture. The other details are the same as for Table 5.

Step width of faults	Overlap						Gap				
	5 km	4 km	3 km	2 km	1 km	0 km	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km
Left step of 5.20 km	30.24	30.20	30.26	30.46	30.56	30.72	31.12	31.14	31.34	31.74	32.52
Left step of 3.46 km	30.10	30.06	30.14	29.84	30.16	30.08	30.30	30.62	30.62	31.08	32.14
Left step of 1.73 km	28.72	28.54	28.5	28.56	28.42	28.66	29.04	30.04	30.50	31.38	31.78
0 km	-	-	-	-	-	-	28.66	30.54	31.74	32.38	x
Right step of 1.73 km	30.04	30.26	30.22	30.34	30.54	31.40	31.84	32.56	32.64	36.00	35.12
Right step of 3.46 km	30.42	30.52	30.48	30.48	30.56	30.70	31.38	31.56	32.36	32.40	36.10
Right step of 5.20 km	30.46	30.48	30.68	30.58	30.74	31.02	31.34	32.06	31.84	32.20	32.74

第 12 表. 傾斜角が 65° で、剪断応力が右横ずれ成分を伴う場合 ($\Theta=60^\circ$) の Segment 2 が破壊し終わる時刻. 記号および背景色の詳細は、第 11 表を参照.

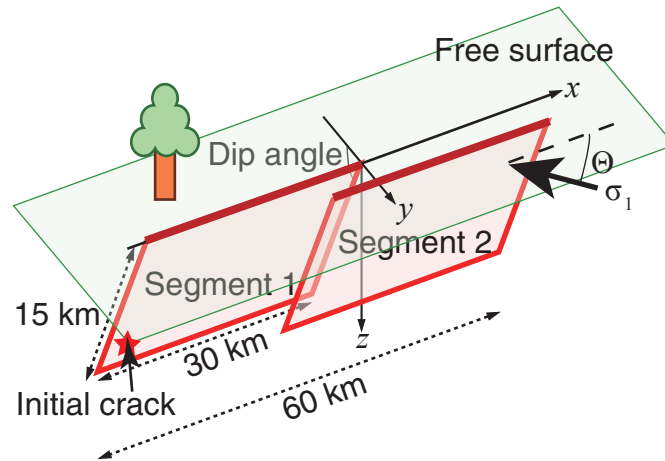
Table 12. Time of rupture termination on Segment 2 in cases for dip angle of 65° with right-lateral strike-slip shear stress component ($\Theta=60^\circ$) in second. The details are the same as for Table 11.

Step width of faults	Overlap						Gap				
	5 km	4 km	3 km	2 km	1 km	0 km	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km
Left step of 5.20 km	29.30	30.82	29.46	29.34	29.38	29.40	29.68	29.30	29.26	29.22	29.29
Left step of 3.46 km	37.66	27.96	28.40	27.86	27.90	27.98	27.70	27.72	27.88	28.24	28.24
Left step of 1.73 km	25.24	25.54	25.18	25.38	25.14	25.16	25.68	26.02	26.66	27.02	28.22
0 km	-	-	-	-	-	-	24.64	25.52	27.02	27.36	28.38
Right step of 1.73 km	32.06	32.52	33.48	32.5	32.62	32.46	32.60	32.56	33.22	32.74	32.82
Right step of 3.46 km	36.78	38.74	37.92	x	x	x	x	x	x	x	x
Right step of 5.20 km	37.88	46.58	x	x	x	x	x	48.02	x	x	x

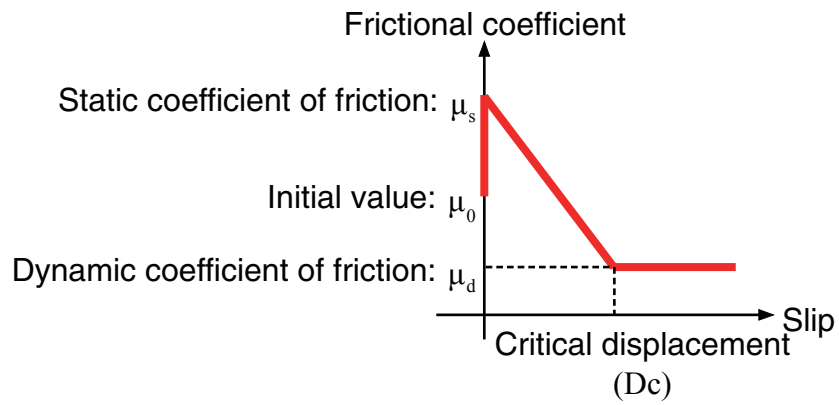
第 13 表. 傾斜角が 65° で、剪断応力が左横ずれ成分を伴う場合 ($\Theta=120^\circ$) の Segment 2 が破壊し終わる時刻. 記号および背景色の詳細は、第 11 表を参照.

Table 13. Time of rupture termination on Segment 2 in cases for dip angle of 65° with left-lateral strike-slip shear stress component ($\Theta=120^\circ$) in second. The details are the same as for Table 11.

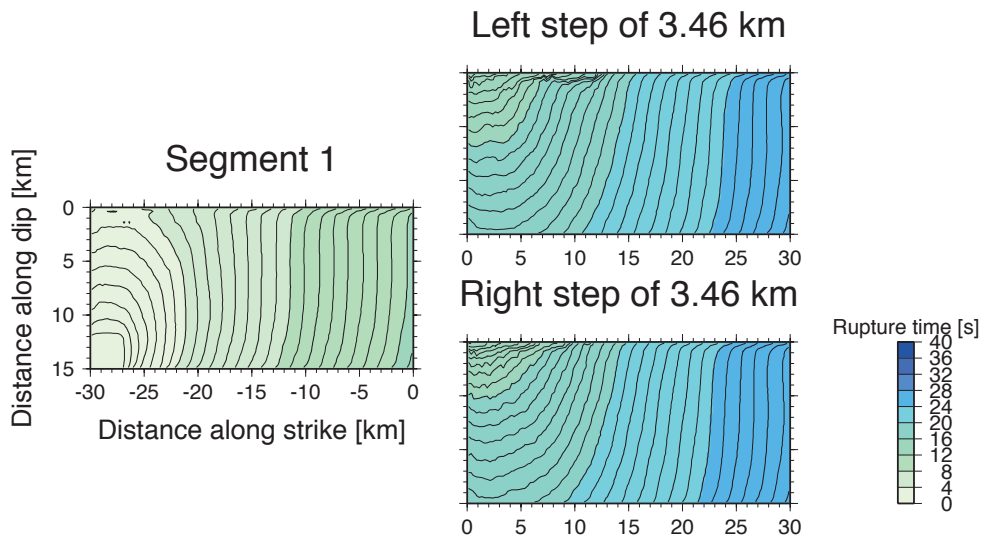
Step width of faults	Overlap						Gap				
	5 km	4 km	3 km	2 km	1 km	0 km	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km
Left step of 8.66 km	32.88	33.56	33.54	34.08	33.60	33.67	34.22	35.00	36.58	35.72	35.52
Left step of 6.93 km	32.44	32.54	32.36	32.54	32.12	32.38	32.96	34.18	33.64	35.28	34.28
Left step of 5.20 km	29.44	29.80	29.90	29.74	30.12	30.28	30.38	30.08	30.34	36.88	35.52
Left step of 3.46 km	28.18	28.38	28.16	28.46	28.72	28.16	29.06	28.62	29.22	33.76	34.58
Left step of 1.73 km	27.10	27.42	27.58	27.40	27.58	28.22	28.04	28.22	28.28	29.62	29.80
0 km	-	-	-	-	-	-	27.06	x	x	x	x
Right step of 1.73 km	28.36	28.46	28.88	28.40	29.34	28.76	29.84	30.04	30.72	30.78	30.60
Right step of 3.46 km	29.20	29.44	29.46	29.50	29.64	29.40	29.78	29.64	30.26	29.94	30.26
Right step of 5.20 km	29.54	29.88	29.96	30.34	29.92	30.22	30.68	30.52	30.96	32.04	31.28
Right step of 6.93 km	30.32	30.30	30.24	30.50	30.64	30.66	31.00	31.28	31.50	31.82	32.04
Right step of 8.66 km	30.48	30.22	30.86	31.06	31.58	31.88	32.34	32.08	32.40	32.30	33.82



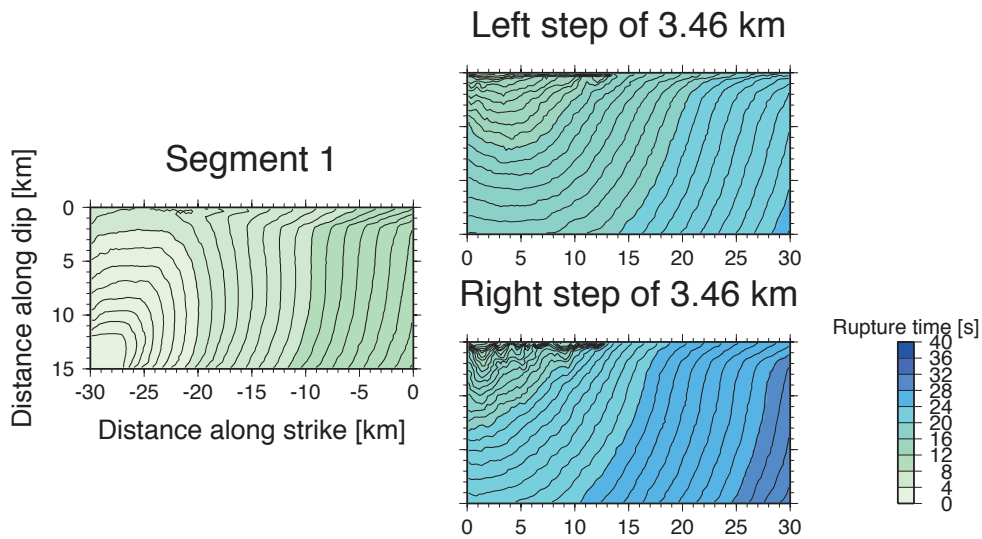
第1図. 断層モデル.
Fig. 1. Fault model.



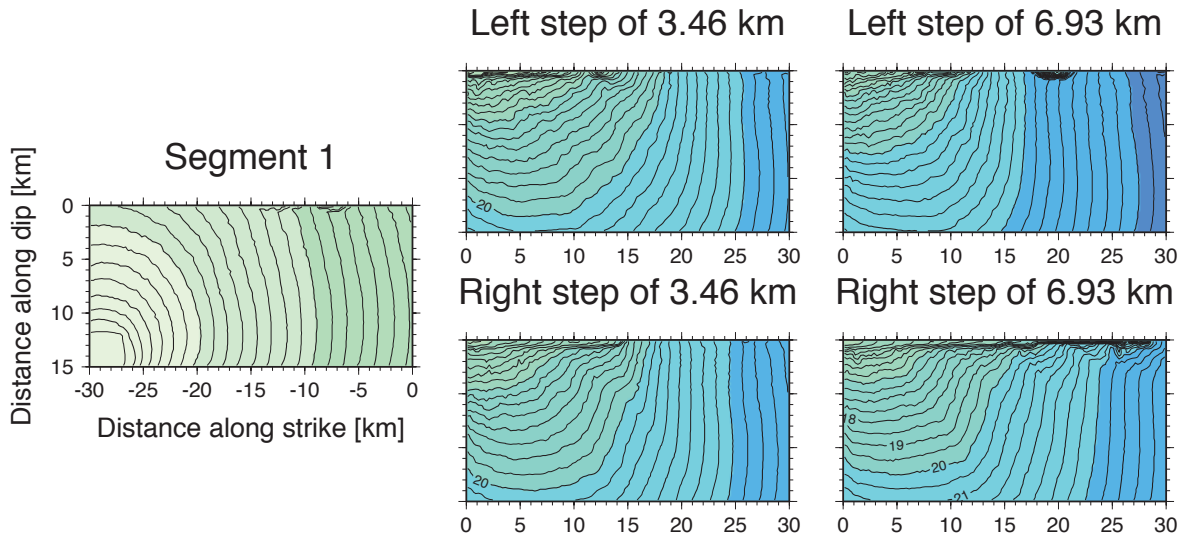
第2図. すべり弱化的摩擦構成則.
Fig. 2. Slip-weakening friction law.



第3図. 傾斜角が 60° で、剪断応力が逆断層成分のみを持つ場合 ($\Theta=90^\circ$) の破壊時刻分布の例. (左) Segment 1. (右上) 左に 3.46 km ステップする Segment 2. (右下) 右に 3.46 km ステップする Segment 2.
 Fig. 3. Rupture time on Segment 1 (left panel), Segment 2 with left step of 3.46 km (upper right panel), and Segment 2 with right step of 3.46 km (lower right panel) in cases for dip angle of 60° without strike-slip shear stress component ($\Theta=90^\circ$).

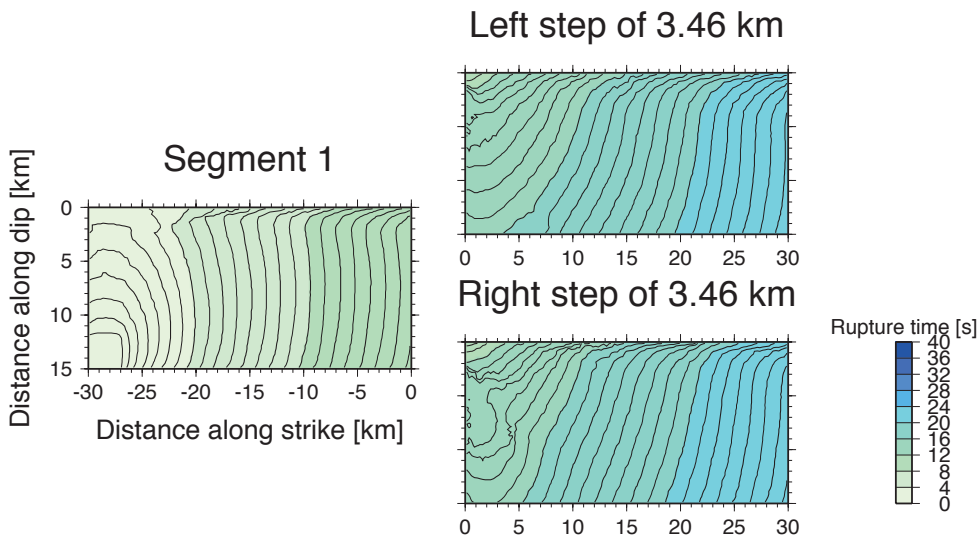


第4図. 傾斜角が 60° で、剪断応力が右横ずれ成分を伴う場合 ($\Theta=60^\circ$) の破壊時刻分布の例.
 図の詳細は、第3図を参照.
 Fig. 4. Rupture time in cases for dip angle of 60° with right-lateral strike-slip shear stress component ($\Theta=60^\circ$). The details are the same as for Fig. 3.



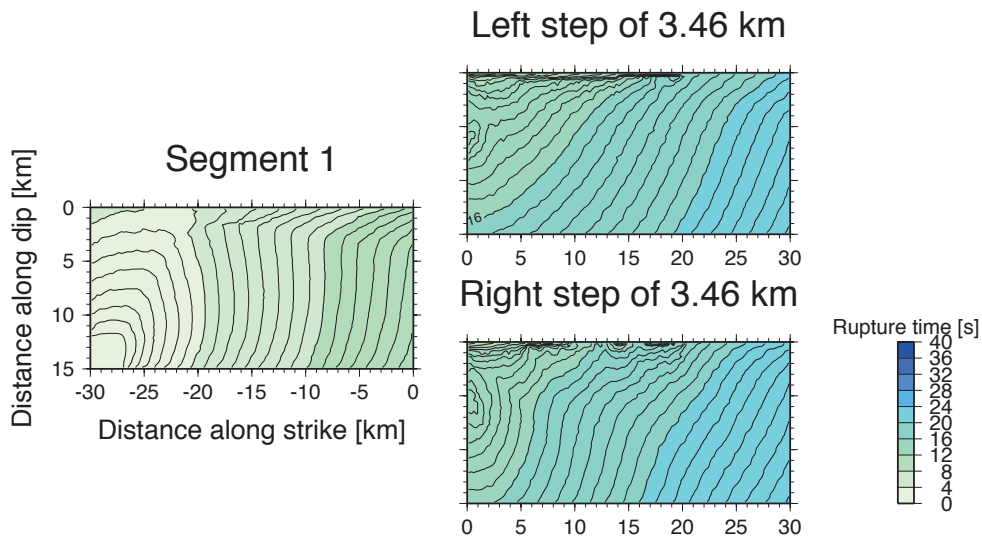
第 5 図. 傾斜角が 60° で、剪断応力が左横ずれ成分を伴う場合 ($\Theta=120^\circ$) の破壊時刻分布の例. (左) Segment 1. (中上) 左に 3.46 km ステップする Segment 2. (中下) 右に 3.46 km ステップする Segment 2. (右上) 左に 6.93 km ステップする Segment 2. (右下) 右に 6.93 km ステップする Segment 2.

Fig. 5. Rupture time on Segment 1 (left panel), Segment 2 with left step of 3.46 km (upper middle panel), Segment 2 with right step of 3.46 km (lower middle panel), Segment 2 with left step of 6.93 km (upper right panel), and Segment 2 with right step of 6.93 km (lower right panel) in cases for dip angle of 60° with left-lateral strike-slip shear stress component ($\Theta=120^\circ$).



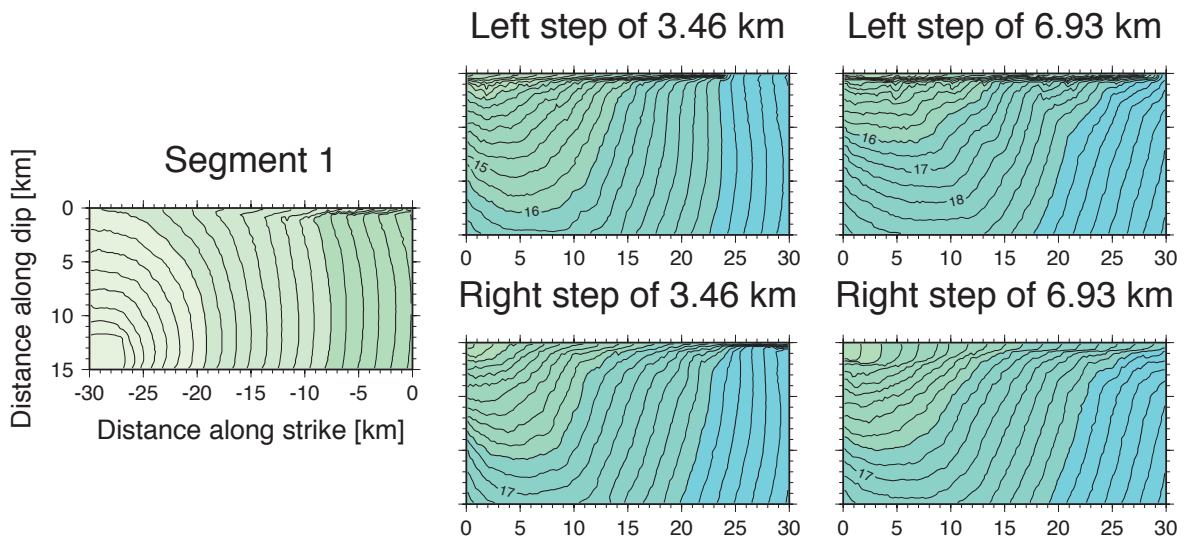
第 6 図. 傾斜角が 55° で、剪断応力が逆断層成分のみを持つ場合 ($\Theta=90^\circ$) の破壊時刻分布の例. 図の詳細は、第 3 図を参照.

Fig. 6. Rupture time in cases for dip angle of 55° without strike-slip shear stress component ($\Theta=90^\circ$). The details are the same as for Fig. 3.



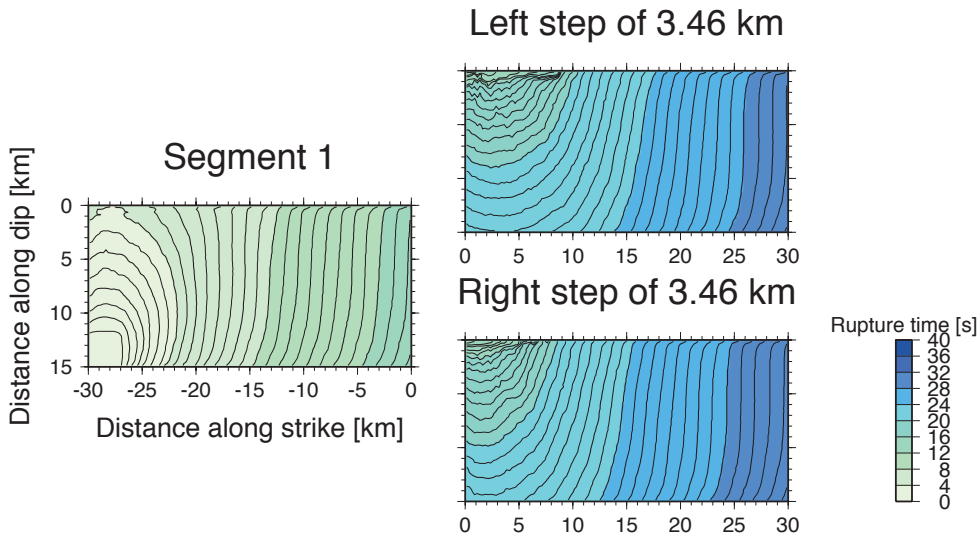
第7図. 傾斜角が 55° で、剪断応力が右横ずれ成分を伴う場合 ($\Theta=60^\circ$) の破壊時刻分布の例.
図の詳細は、第3図を参照.

Fig. 7. Rupture time in cases for dip angle of 55° with right-lateral strike-slip shear stress component ($\Theta=60^\circ$). The details are the same as for Fig. 3.



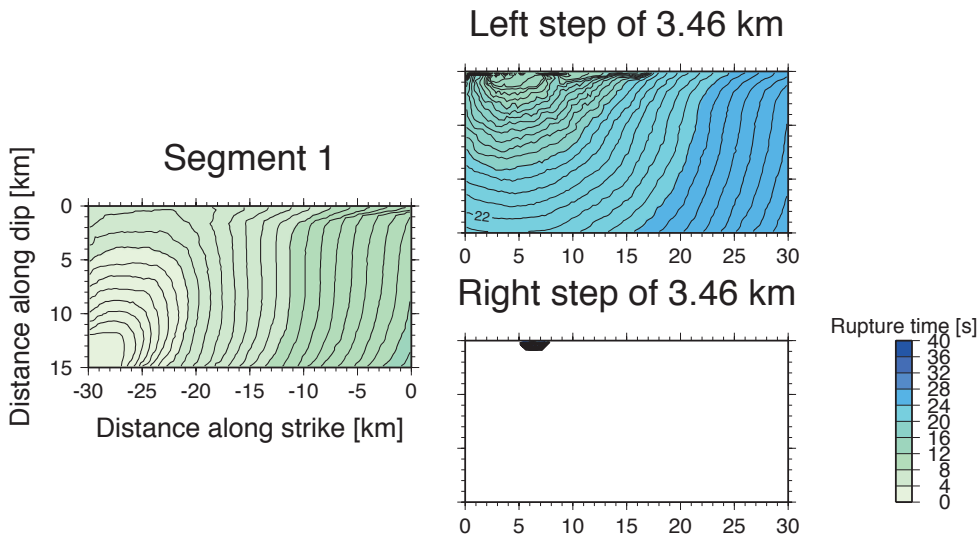
第8図. 傾斜角が 55° で、剪断応力が左横ずれ成分を伴う場合 ($\Theta=120^\circ$) の破壊時刻分布の例.
(図の詳細は、第5図を参照.)

Fig. 8. Rupture time in cases for dip angle of 55° with left-lateral strike-slip shear stress component ($\Theta=120^\circ$). The details are the same as for Fig. 5.



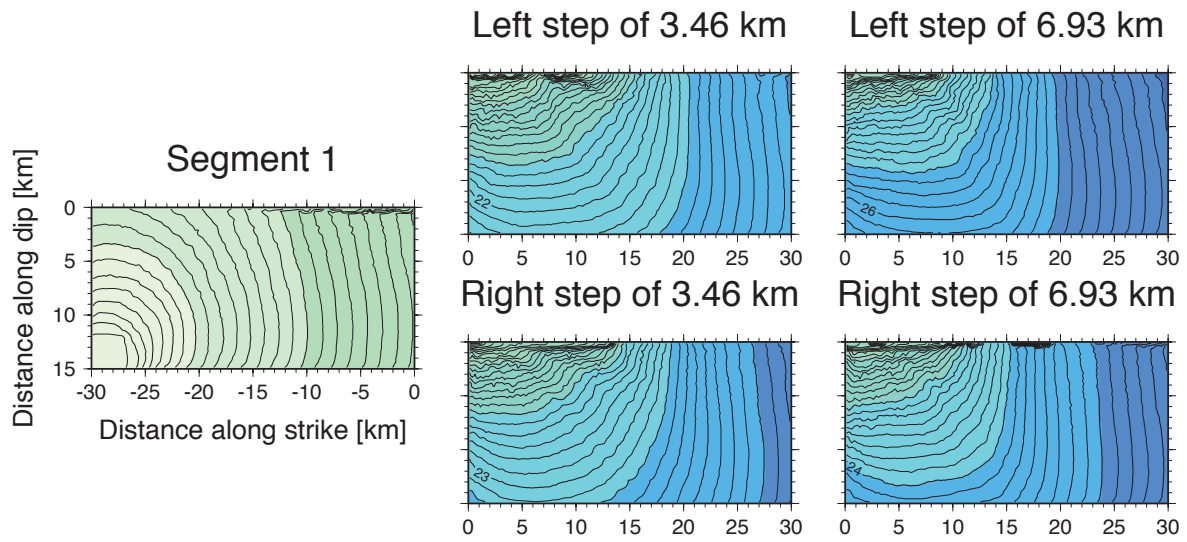
第9図. 傾斜角が 65° で、剪断応力が逆断層成分のみを持つ場合 ($\Theta=90^\circ$) の破壊時刻分布の例。
図の詳細は、第3図を参照。

Fig. 9. Rupture time in cases for dip angle of 65° without strike-slip shear stress component ($\Theta=90^\circ$).
The details are the same as for Fig. 3.



第10図. 傾斜角が 65° で、剪断応力が右横ずれ成分を伴う場合 ($\Theta=60^\circ$) の破壊時刻分布の例。
図の詳細は、第3図を参照。

Fig. 10. Rupture time in cases for dip angle of 65° with right-lateral strike-slip shear stress component ($\Theta=60^\circ$). The details are the same as for Fig. 3.



第 11 図. 傾斜角が 65° で, 剪断応力が左横ずれ成分を伴う場合 ($\Theta=120^\circ$) の破壊時刻分布の例.
図の詳細は, 第 5 図を参照.

Fig. 11. Rupture time in cases for dip angle of 65° with left-lateral strike-slip shear stress component ($\Theta=120^\circ$). The details are the same as for Fig. 5.