

# 応力降下量と破壊時刻を既知とした動力学的震源モデルの地震動予測研究への 適用可能性—傾斜する断層の場合—

## Applicability of dynamic rupture model given stress drop and rupture time for strong ground motion prediction—Dipping fault model—

加瀬祐子<sup>1</sup>・入江紀嘉<sup>2</sup>・壇 一男<sup>2</sup>・鳥田晴彦<sup>2</sup>

Yuko Kase<sup>1</sup>, Kiyoshi Irie<sup>2</sup>, Kazuo Dan<sup>2</sup> and Haruhiko Torita<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 活断層・火山研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, kasep@ni.aist.go.jp)  
<sup>2</sup> (株)大崎総合研究所 (Ohsaki Research Institute, Inc)

**Abstract:** We extend a dynamic rupture model for predicting ground motions to dipping fault model with a constant subshear rupture velocity. We calculate dynamic rupture simulations under given stress drop and rupture time on strike-, dip-, and normal-slip faults, and then calculate a spontaneous rupture under the given static frictional stress distribution obtained by the dynamic rupture simulations with a constant subshear rupture velocity. The calculated rupture time and slip distributions are almost the same as those of the dynamic rupture with a constant subshear rupture velocity, as the same as the vertical strike-slip fault model. Although a rupture may not widely propagate with a supershear rupture velocity in dip- and normal-slip fault, peak locations of ground velocity caused by the spontaneous supershear rupture are obviously different from the dynamic rupture with a constant subshear rupture velocity. Thus, a dynamic rupture model with a subshear rupture velocity is needed for a ground motion prediction to avoid a spontaneous supershear rupture in a characterized source model.

**キーワード:** S波速度以上で伝播する破壊, 傾斜する断層, 特性化震源モデル, 動力学的震源モデル, 数値シミュレーション, 差分法

**Keywords:** supershear rupture, dipping fault, characterized source model, dynamic-rupture source model, numerical simulation, finite-difference method

### 1. はじめに

特性化震源モデルを基本とした動力学的震源モデルを用いた検討 (例えば, 入江ほか, 2010; 入江ほか, 2013) においては, 断層全体に破壊を広げるために, きわめて小さい強度を仮定せざるを得ず, その結果, 破壊伝播速度が S 波速度を超えてしまう問題点がある. S 波速度を超える破壊伝播は, 理論的に予測され (例えば, Andrews, 1976), 室内実験でも観測されており (例えば, Rosakis *et al.*, 1999), 2002 年 Denali 地震などでも, 破壊伝播速度が S 波速度を超えたことが示唆されている (Dunham and Archuleta, 2004) が, 現実の地震で観測されることはまれである. 断層面の強度や幾何形状などの不均質により, S 波速度を超える破壊伝播速度が生じる (Dunham *et al.*, 2003) 一方で, 一旦, 破壊伝播速度が S 波速度を超えても, すぐに S 波速度以下に戻ってしまう (Fukuyama and Madariaga, 2000) ため, 広範囲にわたって S 波速度以上で破壊が伝播するのは難しいことが理由と考えられている.

この特性化震源モデルを基本とした動力学的震源

モデルを用いた検討における破壊速度の問題を解決するため, 加瀬 (2016) では, 入江ほか (2010, 2013) が自発的に伝播させていた破壊を, 各グリッドにおける破壊時刻を破壊条件として伝播させることで, 破壊伝播速度を抑える方法を提案した. 加瀬 (2016) は, 特性化震源モデルにおいて, 破壊時刻を破壊条件として動力学的破壊を計算し, 更に, 破壊時刻までの剪断応力の最大値を静摩擦応力として自発的な破壊を計算した場合に, 破壊時刻を破壊条件とした破壊過程を再現できることを確認した. 再現できない領域はアスペリティ周辺の背景領域に限られるため, 地表面での速度波形と最大地動速度分布は, 破壊時刻を破壊条件とした場合とほぼ一致しており, 物理的には, 得られた静摩擦応力分布を破壊条件とした自発的な破壊を扱うこととほぼ等価である. このようにして, 統計的な不均質を加味した動力学的震源モデル (Andrews and Barall, 2011) を導入することなく, 現実に観測されることのまれな S 波速度を超える破壊伝播を回避する方針を示した.

加瀬 (2016) では, 鉛直な横ずれ断層を対象とした検討がおこなわれたが, 現実の地震は, 断層面が

傾斜していることが多く、また、逆断層すべりや正断層すべりも発生する。そこで、本研究では、傾斜した横ずれ断層、逆断層、および、正断層を対象とし、同様の検討をおこなう。特性化震源モデルにおいて、破壊時刻を破壊条件として動力的破壊を計算し、更に、破壊時刻までの剪断応力の最大値を静摩擦応力として自発的な破壊を計算した場合に、破壊時刻を破壊条件とした破壊過程を再現できるかどうかを確認する。

## 2. 手法

半無限完全弾性体中に傾斜角  $60^\circ$  の断層が 1 枚あるモデルを考える (第 1 図)。断層は、地表を切っているものとする。断層には 2 つのアスペリティがあり、以下では、初期クラックを含むアスペリティを第 1 のアスペリティ、もう一方を第 2 のアスペリティと呼ぶ。この断層モデルは、鉛直な横ずれ断層での検討 (加瀬, 2016) で用いた断層を、長さ幅ともそのまま、傾斜角を  $60$  度にしたものである。断層面に境界条件を与えて弾性体の運動方程式を数值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。

自発的破壊を扱う動力的断層モデルでは、断層面上の各点での応力降下量と強度を与える。この場合、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、すなわち、剪断応力の初期値との差が強度を超え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 2 図: Ida, 1972; Andrews, 1976) に従って、剪断応力は動摩擦応力まで降下する。初期剪断応力と動摩擦応力の差が応力降下量にあたる。計算に用いたパラメータを第 1 表、速度構造モデルを第 2 表に示す。これらの値は、鉛直な横ずれ断層での検討 (加瀬, 2016) で用いたものを、すべりの向き (横ずれ、逆断層、正断層) に応じて、初期剪断応力の向きを変えて設定した。初期破壊領域の応力降下量は  $11.00$  MPa、強度は  $-0.10$  MPa、アスペリティの応力降下量は  $11.00$  MPa、強度は  $8.25$  MPa、背景領域の応力降下量は  $0.00$  MPa、強度は  $0.01$  MPa である。応力降下量が  $0$  MPa の背景領域で自発的破壊が伝播できるようにパラメータを設定しているため、背景領域の強度はきわめて小さい値を設定している。

本研究では、断層面上の各点での応力降下量と破壊時刻を与える。破壊は自発的に広がるのではなく、各点に与えられた破壊時刻になるとすべりが始まる。一旦、すべりが始まった後は、すべり弱化的摩擦構成則に従って、剪断応力が動摩擦応力まで降下する点は、応力降下量と強度を与えた動力的断層モデルと同じである。

自発的破壊の数値計算には Kase (2010) の差分法

コードを用いた。このコードは、SCEC/USGS ベンチマークテスト TPV10 で検証されている (Harris *et al.*, 2009)。また、このコードを基に、与えられた破壊時刻に達するとすべりが生じるように変更したコードを用いて、断層面上の各点での応力降下量と破壊時刻を与えた場合の動力的破壊を計算した。各グリッドにおける破壊開始時刻までの剪断応力の最大値は静摩擦応力に相当すると考えることができるため (例えば、Miyatake, 1992; Mikumo and Miyatake, 1993)、各グリッドにおける破壊開始時刻を与え、各グリッドにおける応力の時刻歴を確認して、静摩擦応力分布を求める。この静摩擦応力分布を破壊条件として、再び、動力的破壊シミュレーションのコード (Kase, 2010) で自発的破壊を計算し、与えた破壊開始時刻を再現できるかどうかを確認する。各段階のシミュレーションの概要を第 3 表にまとめる。

## 3. 結果と考察

初めに、与えられたモデルとパラメータで計算した自発的な破壊を第 3 図に示す。横ずれ断層の場合、in-plane 方向となる走向方向に伝播する破壊が、S 波速度を超える。初期クラックを除く第 1 のアスペリティ内の破壊伝播速度は平均約  $2.24$  km/s、第 2 のアスペリティ内の破壊伝播速度は平均約  $2.82$  km/s で、それぞれ S 波速度の  $0.64$  倍、 $0.81$  倍と S 波速度を下回っているが、第 2 のアスペリティ内の最終的な破壊伝播速度は  $4.71$  km/s に達し、S 波速度の  $1.35$  倍となっている (第 3 図 a)。また、背景領域の破壊伝播速度は平均約  $4.07$  km/s で、S 波速度の  $1.16$  倍で伝播している。断層面上の最大すべり量は  $2.58$  m、地表面での最大すべり量は  $2.00$  m となった (第 3 図 b)。破壊時刻の分布は、鉛直な横ずれ断層の場合 (加瀬, 2016) と概ね同じであるが、傾斜角方向に  $1$  km (深さ  $0.87$  km) 程度より浅い部分では、鉛直の場合よりも早く破壊が励起されており、また、すべり量は、鉛直な場合よりもやや大きくなった。これらは自由表面の影響と考えられる。

逆断層の場合、in-plane 方向となるのは傾斜角方向であるため、S 波速度を超えて破壊が伝播するのは、第 1 のアスペリティから浅部もしくは深部へと向かう領域となる。初期クラックを除く第 1 のアスペリティ内の破壊伝播速度は平均約  $2.17$  km/s、第 2 のアスペリティ内の破壊伝播速度は平均約  $2.49$  km/s で、それぞれ S 波速度の  $0.62$  倍、 $0.71$  倍となり、2 つのアスペリティの間や第 2 のアスペリティを越えた先の背景領域でも、S 波速度以下で破壊が伝播する (第 3 図 c)。ただし、第 2 のアスペリティを越えた先の浅い部分では、地表面の影響を受けて、破壊が加速している。横ずれ断層に比べて、S 波速度を超えて破壊が伝播する領域が小さいため、背景領域

の破壊伝播速度は平均約 3.35 km/s で、S 波速度以下となっている。断層面上の最大すべり量は地表面に現れ、4.93 m となった (第 3 図 d)。

正断層の場合、逆断層と同様、S 波速度を超えて破壊が伝播するのは傾斜角方向となり、破壊時刻の分布は、逆断層の場合と概ね同じであるが、第 2 のアスペリティを越えた先の浅い部分での破壊の加速は見られない。初期クラックを除く第 1 のアスペリティ内の破壊伝播速度は平均約 2.17 km/s、第 2 のアスペリティ内の破壊伝播速度は平均約 2.53 km/s で、それぞれ S 波速度の 0.62 倍、0.72 倍となり、2 つのアスペリティの間や第 2 のアスペリティを越えた先の背景領域でも、S 波速度以下で破壊が伝播する (第 3 図 e)。断層面上の最大すべり量は 2.69 m、地表面での最大すべり量は 1.67 m となった (第 3 図 f)。

次に、Geller (1976) に基づき、地震調査研究推進本部 (2016) で平均破壊伝播速度として用いられている S 波速度の 0.72 倍の速度で破壊を伝播させる (第 4 図 a)。横ずれ断層では、断層面上の最大すべり量は 2.42 m、地表面での最大すべり量は 2.01 m (第 4 図 b)、逆断層では、断層面上の最大すべり量は地表面に現れ、5.88 m (第 4 図 c)、正断層では、断層面上の最大すべり量は 2.66 m、地表面での最大すべり量は 1.77 m (第 4 図 d) となった。このとき得られた静摩擦応力の分布は、破壊の進行方向に対して、アスペリティの端からその先にかけて、自発的な破壊計算で仮定した値よりも大きく求められた (第 5 図)。特に、横ずれ断層の場合、アスペリティを越えた先に位置する背景領域では、アスペリティ内部よりも大きな値となる領域もあった (第 5 図 a)。背景領域の応力降下量を負にすることなく、破壊を S 波速度以下で伝播させるためには、かなり大きな強度の値が必要であることがわかる。一方、逆断層や正断層の場合は、横ずれ断層の場合ほど、大きな静摩擦応力は得られていない (第 5 図 c, e)。逆断層や正断層では、傾斜角方向に伝播する破壊速度を抑える必要があるため、第 1 のアスペリティの上下端に静摩擦応力の大きい領域が現れることが期待される。しかし、初期破壊領域から、第 1 のアスペリティの上下端までの距離が、走向方向の端までの距離よりも短いため (第 1 図)、第 1 のアスペリティ上下端で、それほど大きな剪断応力集中が起こらなかった。そのため、アスペリティや初期破壊領域の位置や大きさによっては、より強度の大きな領域が必要となる場合もあると考えられる。また、破壊の伝播方向に依存して強度が変化しているが、これは、破壊エネルギーのクラックサイズ依存性 (例えば、Lawn, 1993) を臨界すべり量一定のモデルで解釈していることによる。地震動予測においては、初期破壊領域やアスペリティの位置を変えて、複数のモデルで計算をおこなうが、アスペリティの位置が同じでも、初期破壊領域の位置によって、強い強度を持つ位置

が異なることになる。本研究で提案する手法では、強度の値を構成則として用いないため、地震動分布には影響を与えないが、それぞれのモデルの強度分布を参照する際には、応力状態の不均質と破壊エネルギーのクラックサイズ依存性の両方を反映していることに注意が必要である。

S 波速度の 0.72 倍の速度で破壊を伝播させたときの断層面上のすべり、すべり速度、剪断応力の時刻歴を第 6-8 図に示す。全体的に、すべり速度は、自発的な破壊 (黒線) に比べてやや小さめになっている。

S 波速度の 0.72 倍の速度で破壊を伝播させたときの地表面での速度波形と最大地動速度分布を第 9-11 図に示す。最大地動速度は、断層形状を反映して、断層上盤側で大きくなっている。自発的な破壊 (黒線) と比較すると、横ずれ断層の場合は、断層平行方向成分 (第 9 図 b) と断層直交方向成分 (第 9 図 d) は小さく求められ、鉛直成分 (第 9 図 f) はほぼ同程度となった。これは、断層面上のすべり速度が小さめであることが影響している。また、逆断層の場合は、3 成分とも大きく求められた (第 10 図)。これは、断層面上の地表付近の浅い部分で、すべりが大きくなったことが影響している。一方、正断層の場合は、断層平行方向成分 (第 11 図 b) は小さく、断層直交方向成分 (第 11 図 d) は大きく求められ、鉛直成分 (第 11 図 f) はほぼ同程度となった。いずれの場合も、自発的な破壊で破壊伝播速度が S 波速度を超える領域の応力降下量が 0 MPa であるため、最大地動速度分布の傾向は似ているが、自発的破壊に比べて地動速度のピークは破壊の進行方向に対して手前側に寄っている。これは、鉛直横ずれ断層の場合と同様、破壊伝播速度の設定の影響を無視できないことを示している。特に、逆断層や正断層の場合は、初期破壊領域から up-dip 方向の破壊伝播速度が影響を受けるため、断層極近傍の地動速度分布が大きく変わる可能性がある。

第 5 図に示した静摩擦応力分布を破壊条件として自発的破壊を計算すると、断層面の大部分では、S 波速度の 0.72 倍の速度で伝播する破壊を再現できるが、横ずれ断層の場合は、鉛直横ずれ断層の場合と同様、第 2 のアスペリティの上下に、S 波速度を超えた速度で破壊が伝播する領域が生じた (第 12 図 a)。この領域は、第 1 のアスペリティを越えた先に生じる強度の大きい領域の先に存在し、強度は小さく求められており、第 1 のアスペリティの応力降下量の影響を受けて加速しようとする破壊を抑えきれていない。一方、逆断層 (第 12 図 c) および正断層 (第 12 図 e) の場合は、S 波速度を超えた速度で破壊が伝播する領域は、2 つのアスペリティそれぞれを越えた先の深部の一部分のみであった。逆断層および正断層では、in-plane 方向となるのは傾斜角方向であるため、S 波速度を超えて破壊が伝播するのは、第 1 のアスペリティから浅部もしくは深部へと向かう領

域となるが、この領域の破壊速度を抑えることができている。断層面の広い領域で、S波速度の0.72倍の速度で伝播する破壊を再現できた。なお、いずれの場合にも、すべり量分布は、S波速度の0.72倍の速度で伝播する破壊のものをよく再現できている(第12図b, d, f)。

断層面上のすべり、すべり速度、剪断応力の時刻歴(第13-15図)を見ると、横ずれ断層、逆断層、正断層のいずれの場合も、背景領域の応力降下量は0 MPaであるため、S波速度を超えた速度で破壊が伝播する領域でいったん破壊しても、そのすべりはすぐに止まってしまい、主要なすべりは、S波速度の0.72倍の速度で伝播する破壊フロントと同時に生じている。そのため、地表面での速度波形と最大地動速度分布(第16-18図)は、S波速度の0.72倍の速度で破壊が伝播する場合(第9-11図)とほぼ一致している。このことから、破壊伝播速度をS波速度の0.72倍とした動学的断層モデルは、第5図の静摩擦応力分布を破壊条件とする自発的破壊と物理的にほぼ等価であることが確認できた。

本研究のモデルでは、S波速度の0.72倍の速度で伝播する破壊を再現できないのは背景領域のため、地震動分布はS波速度の0.72倍の速度で破壊が伝播する場合とほぼ一致しているが、アスペリティ領域でS波速度の0.72倍の速度で伝播する破壊を再現できない場合には、地震動分布に影響を与える可能性がある。しかし、背景領域で早い時刻に破壊するのは、背景領域の静摩擦応力が小さく、初期クラックやアスペリティの破壊で生じるP波による小さな応力変化によって破壊することができるためである。一般に、アスペリティ領域の静摩擦応力は、背景領域に比べて十分大きいと考えられるため、設定した破壊伝播速度から想定されるよりも早い時刻に破壊することは難しい。そのため、アスペリティの位置や大きさが本研究のモデルとは異なる場合でも、設定した破壊伝播速度で伝播する破壊を再現できない領域が、アスペリティ領域に及ぶとは考えにくく、地震動分布への影響もほとんどないと考えられる。

以上のように、傾斜した横ずれ断層、逆断層、正断層のいずれのモデルでも、破壊時刻を既知とした動学的震源モデルによって、破壊伝播速度をS波速度以下に抑えたモデル化が可能となった。現実の地震は、純粋な横ずれ、逆断層すべり、もしくは、正断層すべりであることはなく、すべり角は様々である。また、すべり角は断層面上で一定ではなく、場所によって大きく変化していることも少なくない。そのような地震を対象とした場合も、破壊時刻を既知として破壊伝播速度をS波速度以下に抑えたモデル化は、有効であると考えられる。

鉛直横ずれ断層の場合(加瀬, 2016)で指摘されたように、破壊伝播速度の設定においては、S波速度の0.72倍(Geller, 1976; 地震調査研究推進本部,

2016)や、0.8倍(Somerville *et al.*, 1999; 片岡ほか, 2003)が第1選択肢となるであろう。横ずれ断層では、in-plane方向となるのは走向方向であるため、長さ100 kmを超えるような断層では、特にアスペリティ内でS波速度を超える破壊伝播速度を仮定する必要もあると考えられる。一方、逆断層や正断層の場合、in-plane方向となるのは傾斜角方向であるため、広範囲で破壊速度がS波速度を超えるような設定をする必要はないと考えられる。第9-11図に示された通り、地動速度のピークの位置は、破壊伝播速度の設定の影響を受けて変化する。また、地震調査研究推進本部(2016)に従った地震動計算では、破壊伝播速度によって、地震動の長周期成分の計算結果がばらつくことがわかっている(地震調査委員会強震動評価部会, 2008)。そのため、破壊伝播速度は、複数の値を仮定して、地震動のばらつきを評価する必要がある。

#### 4. まとめ

傾斜した断層を対象として、特性化震源モデルを用いて自発的な破壊を計算した場合に破壊伝播速度がS波速度を超える現象を回避するため、各グリッドにおける破壊時刻を破壊条件として動学的破壊を計算する方法を提案し、地震動予測への適用可能性を検討した。

傾斜した横ずれ断層、逆断層、および、正断層を仮定し、破壊時刻を破壊条件として動学的破壊を計算した。更に、破壊時刻までの剪断応力の最大値を静摩擦応力として自発的な破壊を計算した場合に、破壊時刻を破壊条件とした破壊過程をほぼ再現できることを確認した。これは、破壊時刻までの剪断応力の最大値として計算される静摩擦応力分布が、与えられた震源モデルと破壊時刻分布を物理的に成立させるために必要な条件であることを示している。破壊時刻を破壊条件とした破壊過程を再現できない領域はアスペリティ周辺の背景領域に限られるため、地表面での速度波形と最大地動速度分布は、破壊時刻を破壊条件とした場合とほぼ一致しており、物理的には、得られた静摩擦応力分布を破壊条件とした自発的破壊を扱うこととほぼ等価であることを確認した。

逆断層や正断層の場合は、in-plane方向となるのは傾斜角方向であるため、横ずれ断層に比べて、広範囲で破壊速度がS波速度を超えることはないと考えられる。しかし、初期破壊領域からup-dip方向の破壊伝播速度が影響を受けるため、断層極近傍の地動速度分布が大きく変わる可能性がある。そのため、特性化震源モデルに基づく動学的震源モデルにおいて、破壊時刻を破壊条件とすることで、現実を観測されることのまれなS波速度を超える破壊伝播を回避することは、地震動予測研究を進める上で必要であると考えられる。

**謝辞** 本研究は、国立研究開発法人産業技術総合研究所と株式会社大崎総合研究所との共同研究「地震動予測の高度化に資する動力学的断層モデルの研究」として実施されました。査読者である大谷真紀子博士と編集担当の今西和俊博士から、有益なコメントをいただきました。本稿に用いた図の一部は、GMT (Generic Mapping Tool version 5.4.4: Wessel *et al.*, 2013) 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.
- Andrews, D. J. and Barall, M. (2011) Specifying initial stress for dynamic heterogeneous earthquake source models. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 101, 2408-2417, doi:10.1785/0120110012.
- Dunham, E. M., Favreau, P. and Carlson, J. M. (2003) A supershear transition mechanism for cracks. *Science*, 299, 1557-1559.
- Dunham, E. M. and Archuleta, R. J. (2004) Evidence for a supershear transient during the 2002 Denali Fault earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, S256-268, doi:10.1785/0120040616.
- Fukuyama, E. and Madariaga, R. (2000) Dynamic propagation and interaction of a rupture front on a planar fault. *Pure Appl. Geophys.*, 157, 1959-1979.
- Geller, R. J. (1976) Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66, 1501-1523.
- 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.
- 入江紀嘉・壇 一男・生玉真也・入倉孝次郎 (2010) 地中震源断層と地表地震断層の断層パラメータ間の経験的關係を拘束条件とした動力学的断層破壊モデルの構築—強震動予測のための運動学的断層モデルの高度化をめざして—. *日本建築学会構造系論文集*, 75, 1965-1974.
- 入江紀嘉・壇 一男・鳥田晴彦・加瀬祐子 (2013) 長大断層を対象とした逆断層型内陸地震の動的応力降下量の算定式の検討. *日本地震工学会第10回年次大会梗概集*, 375-376.
- 地震調査委員会強震動評価部会 (2008) 2005年福岡県西方沖の地震の観測記録に基づく強震動評価手法の検証 (平成20年4月11日公表).
- 地震調査研究推進本部 (2016) 震源断層を特定した地震の地震動予測手法 (「レシピ」). 46p.
- 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.
- 加瀬祐子 (2016) 破壊時刻を既知とした動力学的震源モデルの地震動予測研究への適用可能性. *活断層・古地震研究報告*, no. 16, 143-170.
- 片岡正次郎・日下部毅明・村越 潤・田村敬一 (2003) 想定地震に基づくレベル2地震動の設定手法に関する研究. *国土技術政策総合研究所研究報告*, 15.
- Lawn, B. (1993) *Fracture of Brittle Solids*, 2nd ed., Cambridge Univ. Press, New York.
- Mikumo, T. and Miyatake, T. (1993) Dynamic rupture processes on a dipping fault, and estimates of stress drop and strength excess from the results of waveform inversion. *Geophys. J. Int.*, 112, 481-496.
- Miyatake, T. (1992) Reconstruction of dynamic rupture process of an earthquake with constraints of kinematic parameters. *Geophys. Res. Lett.*, 19, 349-352.
- Rosakis, A. J., Samudrala, O. and Coker, D. (1999) Cracks faster than the shear wave speed. *Science*, 284, 1337-1340.
- Somerville, P. B., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N. and Kowada, A. (1999) Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion. *Seism. Res. Lett.*, 70, 59-80.
- Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. and Wobbe, F. (2013) Generic Mapping Tools: Improved version released. *Eos Trans. AGU*, 94, 409-410, doi:10.1002/2013EO450001.

(受付：2018年8月6日，受理：2018年10月1日)

第 1 表. モデルのパラメータ.  
Table 1. Simulation parameters.

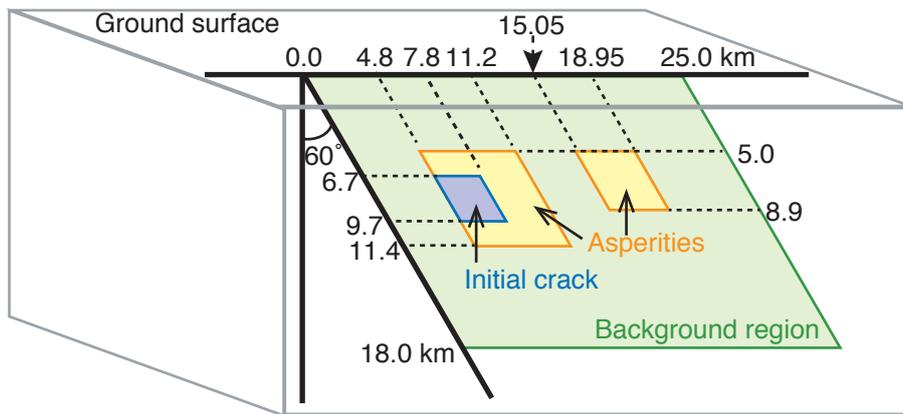
	Initial crack	Asperities	Background region
Initial shear stress in the along-strike-direction for the strike-slip fault	73.5 MPa	73.5 MPa	62.5 MPa
Initial shear stress in the along-dip-direction for the strike-slip fault	0 MPa	0 MPa	0 MPa
Initial shear stress in the along-strike-direction for the dip-slip fault	0 MPa	0 MPa	0 MPa
Initial shear stress in the along-dip-direction for the dip-slip fault	73.5 MPa	73.5 MPa	62.5 MPa
Initial shear stress in the along-strike-direction for the normal-slip fault	0 MPa	0 MPa	0 MPa
Initial shear stress in the along-dip-direction for the normal-slip fault	-73.5 MPa	-73.5 MPa	-62.5 MPa
Initial normal stress	120.0 MPa	120.0 MPa	120.0 MPa
Static coefficient of friction	0.61167	0.68125	0.52092
Dynamic coefficient of friction	0.52083	0.52083	0.52083
Slip-weakening critical distance	0.40 m	0.40 m	0.40 m
Grid interval of space	0.05 km	0.05 km	0.05 km
Grid interval of time	0.005 s	0.005 s	0.005 s

第 2 表. 動力的破壊の計算に使用される速度構造モデル.  
Table 2. Velocity structure for dynamic rupture simulations.

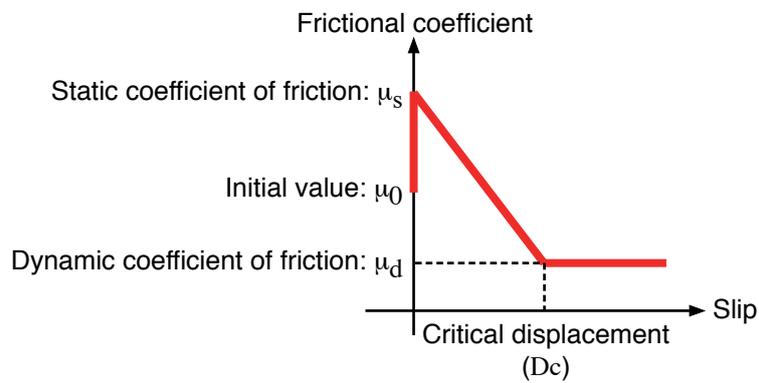
Depth [km]	P-wave velocity [m/s]	S-wave velocity [m/s]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]
0.0	2100	680	2000
0.6	2700	1240	2200
1.2	3500	1810	2300
1.8	4200	2370	2500
2.4	5200	2940	2600
3.0	6000	3500	2700

第 3 表. シミュレーションの概要.  
Table 3. Summary of simulations.

	Given parameters	Simulation code
Spontaneous rupture simulation	Stress drop, Strength excess	Kase (2010)
Simulation assuming fixed subshear rupture velocity	Stress drop, Rupture time	Code extended in this study
Spontaneous rupture simulation given static frictional stress distribution	Stress drop, Static frictional stress of dynamic rupture propagating at fixed subshear rupture velocity	Kase (2010)

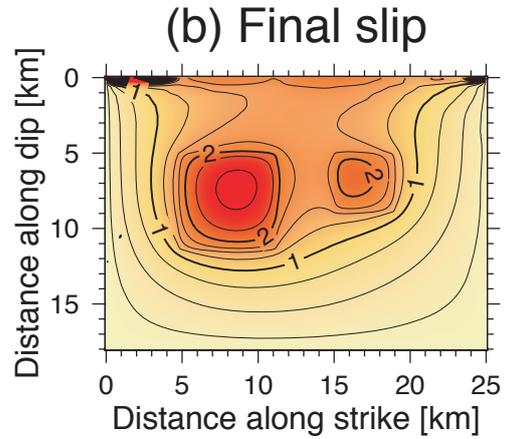
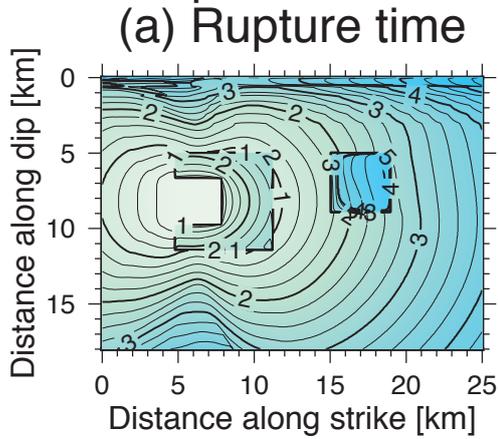


第1図. 断層モデル. 半無限均質弾性体中に傾斜角  $60^\circ$  の断層が1枚置かれている.  
 Fig. 1. Fault model. A  $60^\circ$  dipping fault is set in a homogeneous elastic half-space.

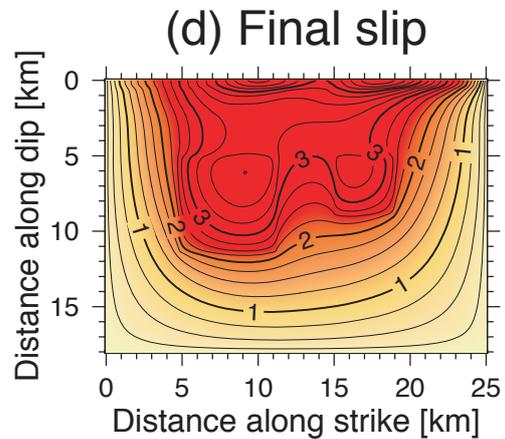
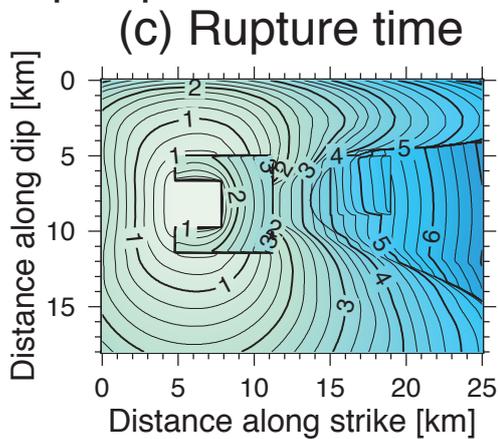


第2図. すべり弱化的摩擦構成則.  
 Fig. 2. Slip-weakening friction law.

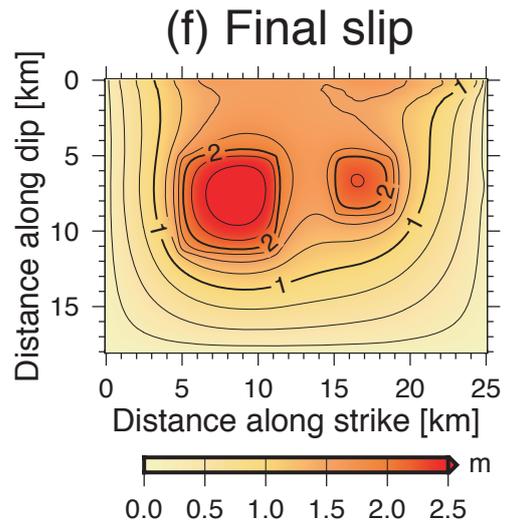
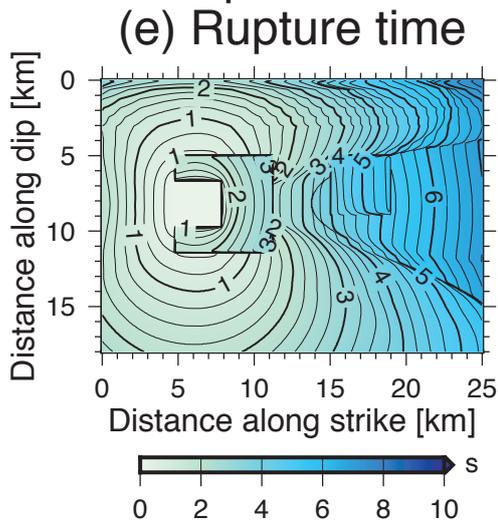
### Strike-slip case



### Dip-slip case

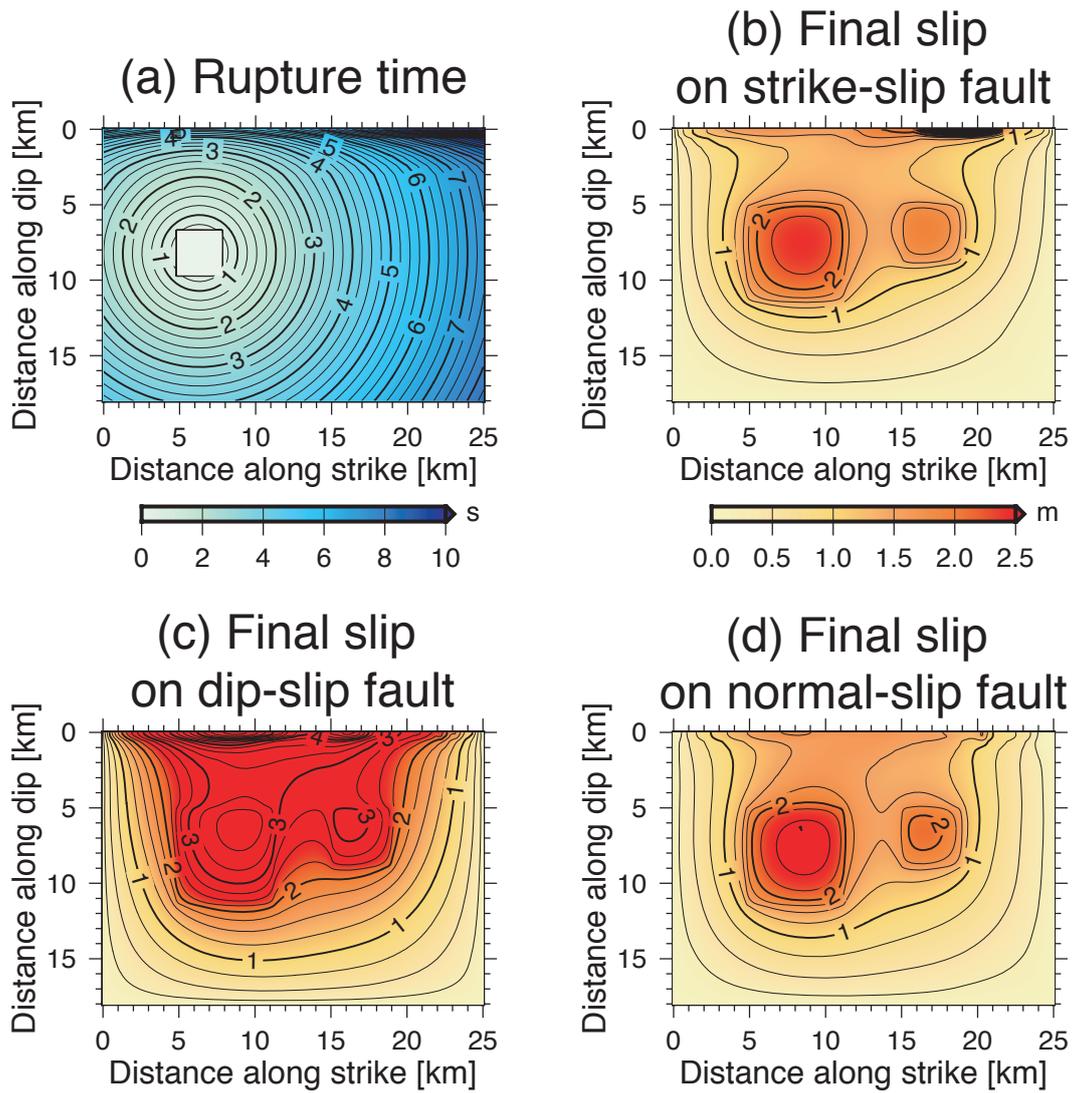


### Normal-slip case



第3図. 第1図のモデルの横ずれ断層で自発的に破壊を伝播させたときの破壊時刻(a)とすべり量(b), 逆断層で自発的に破壊を伝播させたときの破壊時刻(c)とすべり量(d), 正断層で自発的に破壊を伝播させたときの破壊時刻(e)とすべり量(f)の分布.

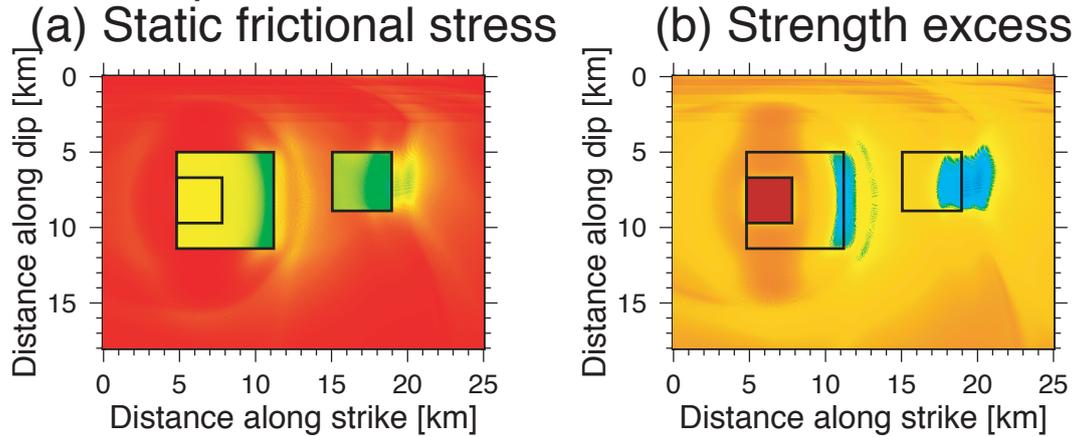
Fig. 3. Rupture time (a) and slip (b) distributions of a spontaneous rupture of the strike-slip fault model shown in Fig. 1, rupture time (c) and slip (d) distributions of a spontaneous rupture of the dip-slip fault model, and rupture time (e) and slip (f) distributions of a spontaneous rupture of the normal-slip fault model.



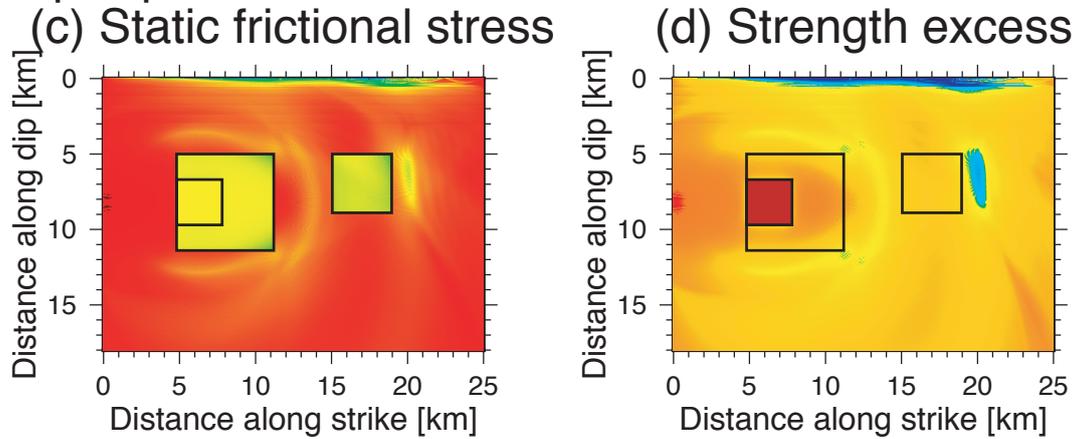
第4図. S波速度の0.72倍の一定速度で破壊が伝播する場合の破壊時刻 (a) と, その破壊時刻を既知として計算した第1図のモデルの横ずれ断層上の動学的破壊によるすべり分布 (b), 逆断層上の動学的破壊によるすべり分布 (c), 正断層上の動学的破壊によるすべり分布 (d).

Fig. 4. (a) Rupture time assuming a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.72 V_s$ ). Slip distributions of a dynamic rupture of the strike-slip (b), dip-slip (c), and normal-slip (d) fault model shown in Fig. 1 given the rupture time shown in (a).

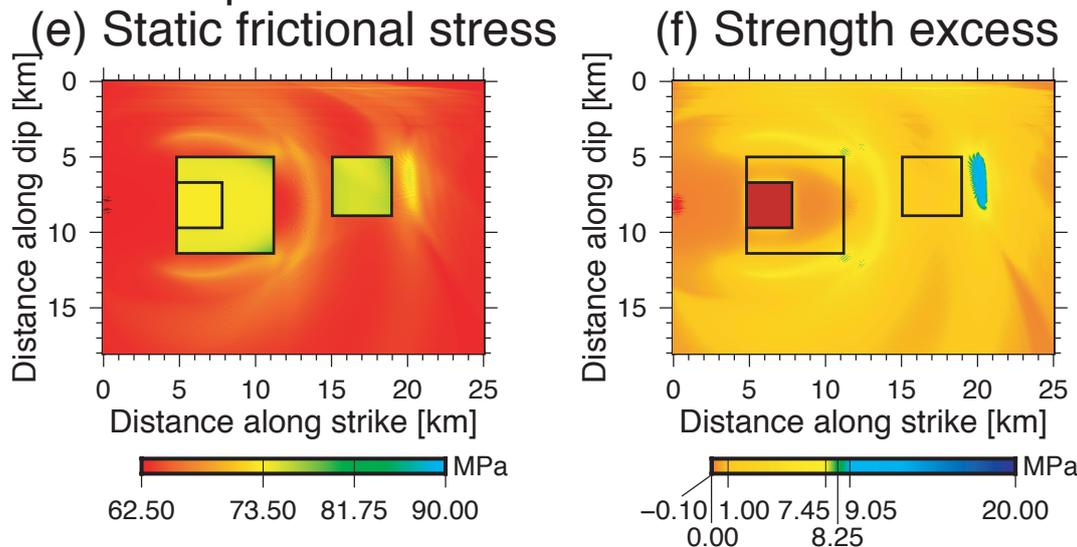
### Strike-slip case



### Dip-slip case



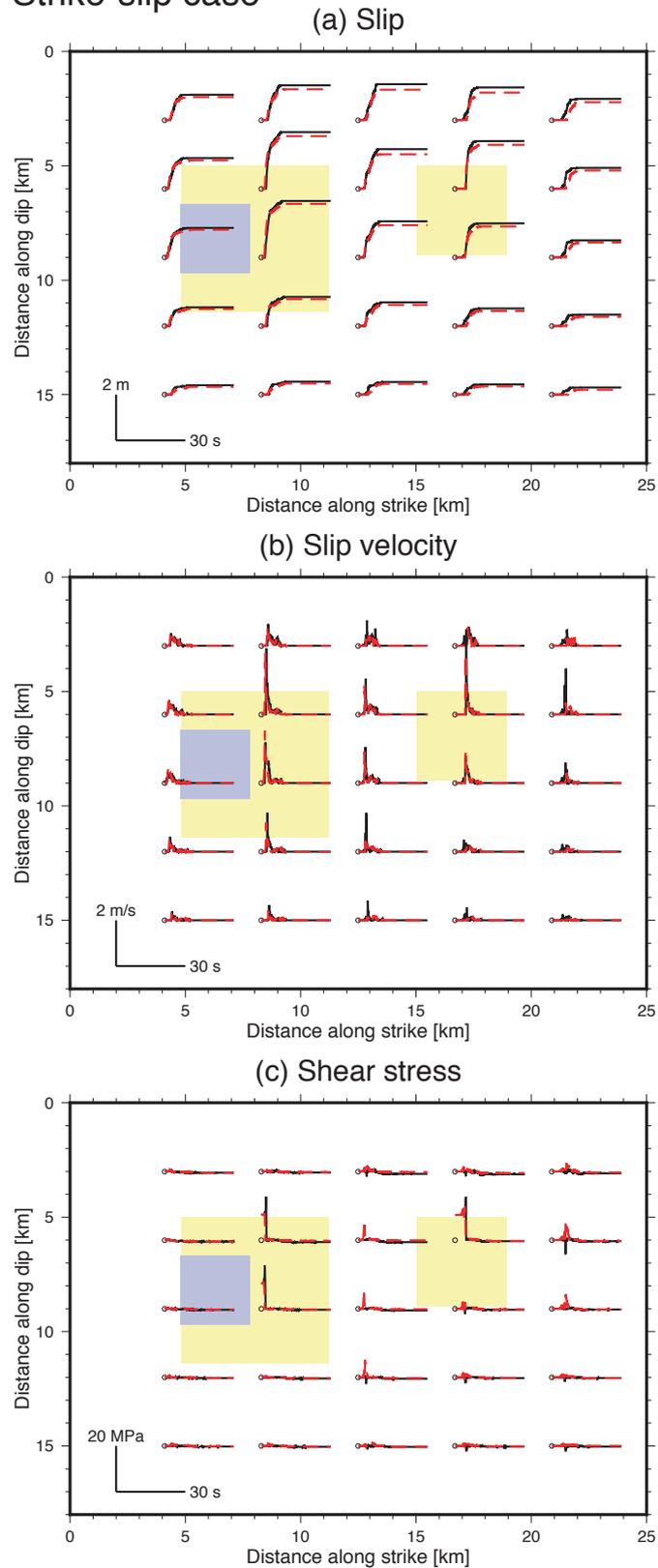
### Normal-slip case



第 5 図. 第 1 図のモデルの横ずれ断層において S 波速度の 0.72 倍の一定速度で破壊が伝播する場合の静摩擦応力 (a) と強度 (b), 逆断層において S 波速度の 0.72 倍の一定速度で破壊が伝播する場合の静摩擦応力 (c) と強度 (d), 正断層において S 波速度の 0.72 倍の一定速度で破壊が伝播する場合の静摩擦応力 (e) と強度 (f) の分布.

Fig. 5. Static frictional stress (a) and strength excess (b) distributions of a dynamic rupture of the strike-slip fault model shown in Fig. 1 propagating at a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.72 V_s$ ), static frictional stress (c) and strength excess (d) distributions of a dynamic rupture of the dip-slip fault model propagating at a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.72 V_s$ ), and static frictional stress (e) and strength excess (f) distributions of a dynamic rupture of the normal-slip fault model propagating at a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.72 V_s$ ).

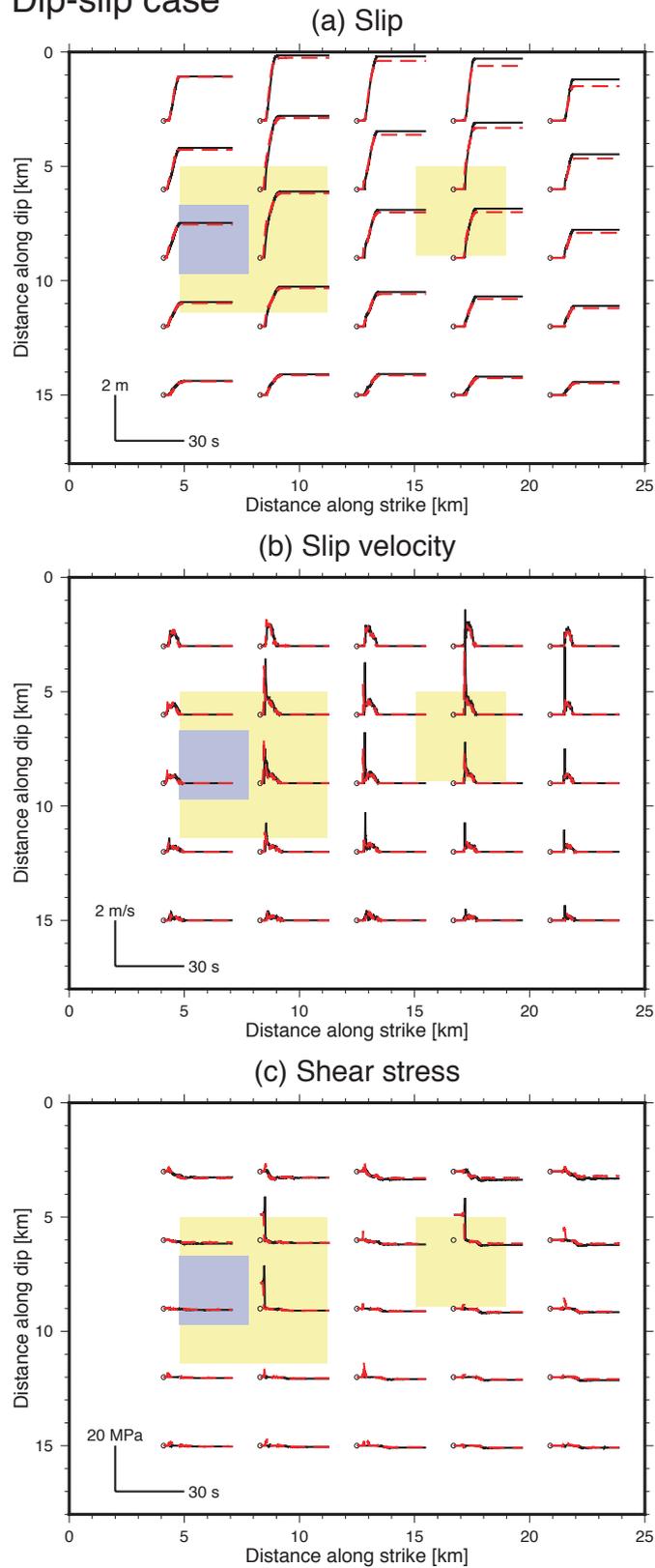
### Strike-slip case



第 6 図. 第 1 図のモデルの横ずれ断層において S 波速度の 0.72 倍の一定速度で破壊が伝播する場合の断層面上のすべり (a), すべり速度 (b), 剪断応力 (c) の時刻歴 (赤点線). 黒線は, 自発的に破壊を伝播させたときの時刻歴. 黄色の領域はアスペリティ, 紫の領域は初期破壊領域を示す.

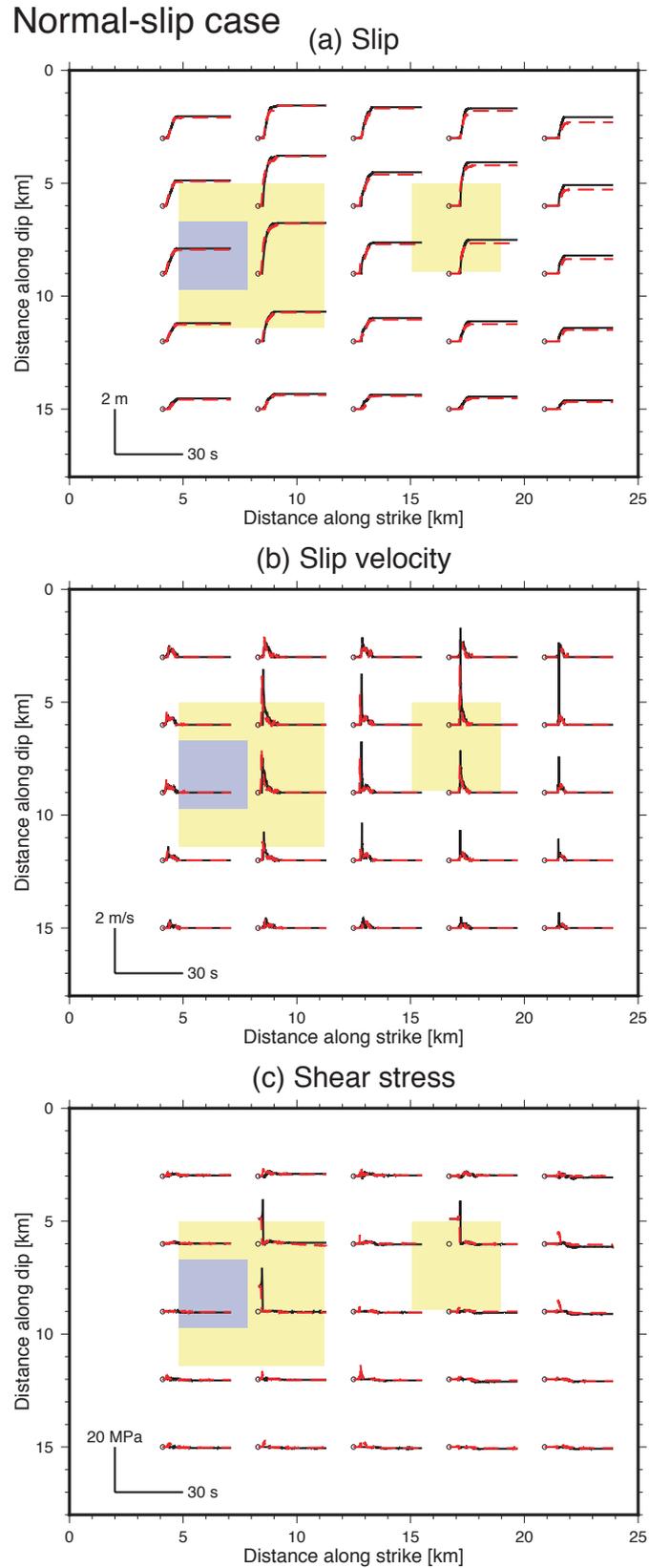
Fig. 6. Red dashed lines: Time histories of slip (a), slip velocity (b), and shear stress (c) of a dynamic rupture of the strike-slip fault model shown in Fig. 1 propagating at a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.72 V_s$ ). Black lines: Time histories of a spontaneous rupture. Yellow and purple regions indicate asperities and the initial crack, respectively.

Dip-slip case



第7図. 第1図のモデルの逆断層においてS波速度の0.72倍の一定速度で破壊が伝播する場合の断層面上のすべり (a), すべり速度 (b), 剪断応力 (c) の時刻歴 (赤点線). 黒線は, 自発的に破壊を伝播させたときの時刻歴. 図の詳細は, 第6図と同じ.

Fig. 7. Red dashed lines: Time histories of slip (a), slip velocity (b), and shear stress (c) of a dynamic rupture of the dip-slip fault model shown in Fig. 1 propagating at a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.72 V_s$ ). Black lines: Time histories of a spontaneous rupture. The details are the same as for Fig. 6.

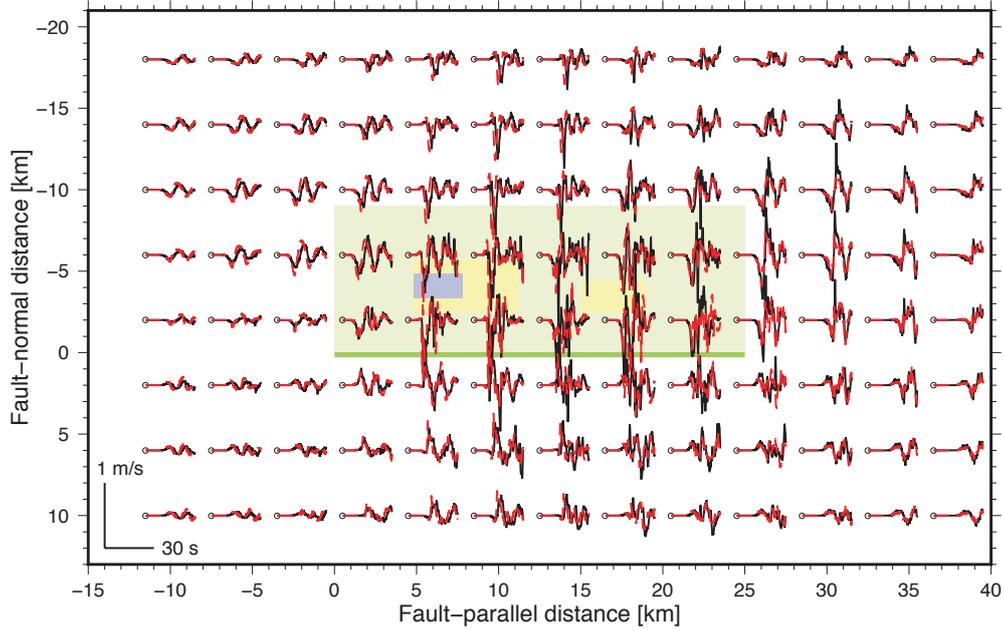


第8図. 第1図のモデルの正断層においてS波速度の0.72倍の一定速度で破壊が伝播する場合の断層面上のすべり (a), すべり速度 (b), 剪断応力 (c) の時刻歴 (赤点線). 黒線は, 自発的に破壊を伝播させたときの時刻歴. 図の詳細は, 第6図と同じ.

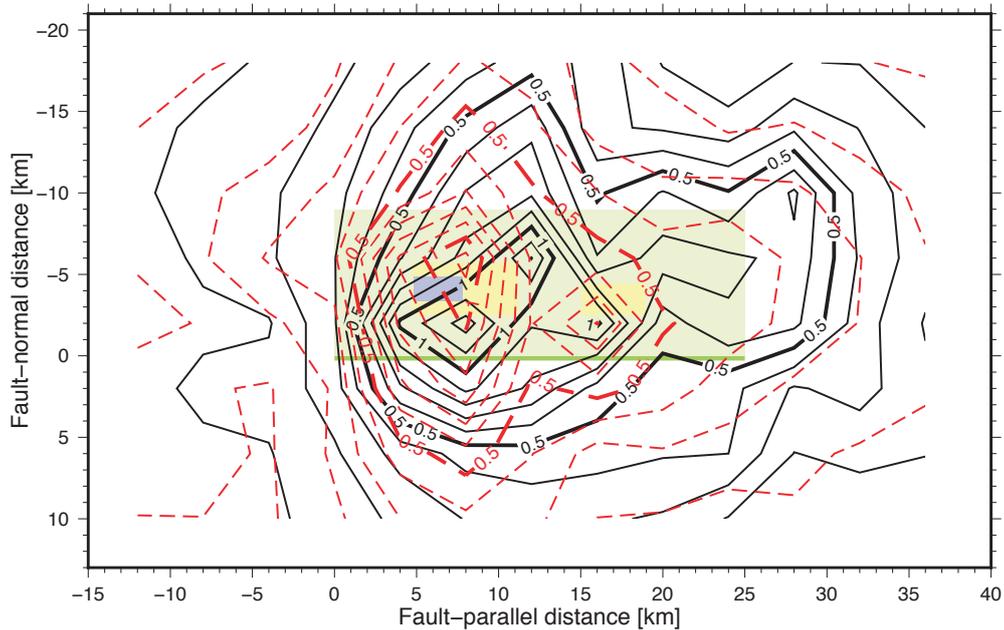
Fig. 8. Red dashed lines: Time histories of slip (a), slip velocity (b), and shear stress (c) of a dynamic rupture of the normal-slip fault model shown in Fig. 1 propagating at a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.72 V_s$ ). Black lines: Time histories of a spontaneous rupture. The details are the same as for Fig. 6.

Strike-slip case

(a) Velocity (parallel)



(b) Peak absolute value of velocity (parallel)

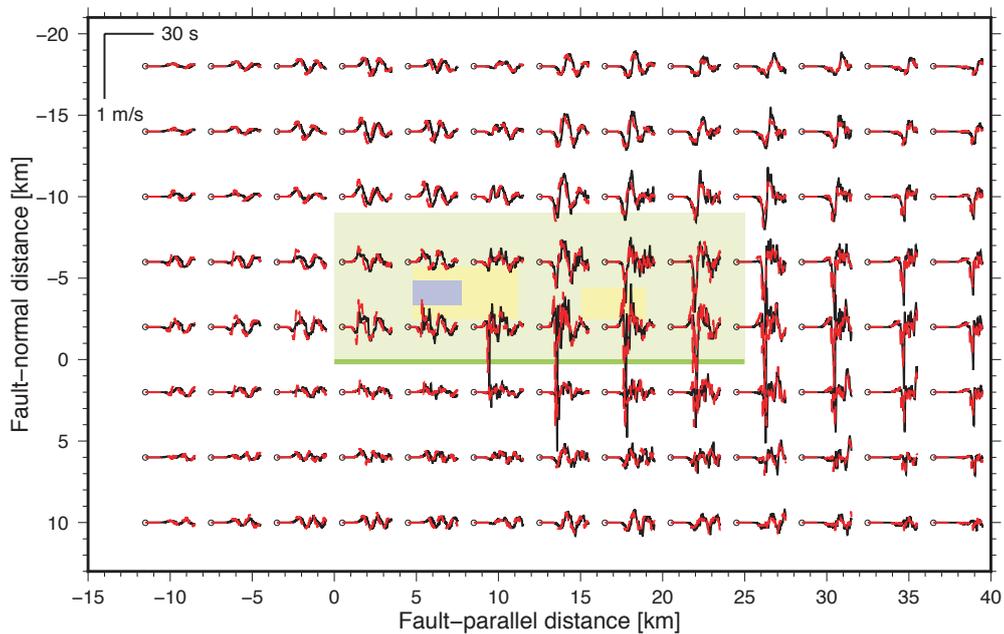


第9図. 第1図のモデルの横ずれ断層においてS波速度の0.72倍の一定速度で破壊が伝播する場合の地表面での2 Hz low-pass フィルタをかけた速度波形の断層平行成分 (a), 断層平行成分の最大地動速度分布 (b), 速度波形の断層直交成分 (c), 断層直交成分の最大地動速度分布 (d), 速度波形の鉛直成分 (e), 鉛直成分の最大地動速度分布 (f) (赤点線). 黒線は, 自発的に破壊を伝播させたときの速度波形と最大地動速度分布. 緑の領域は断層面, 黄色の領域はアスペリティ, 紫の領域は初期破壊領域の地表面への投影を示す. 緑太線は, 地表の断層トレースを示す.

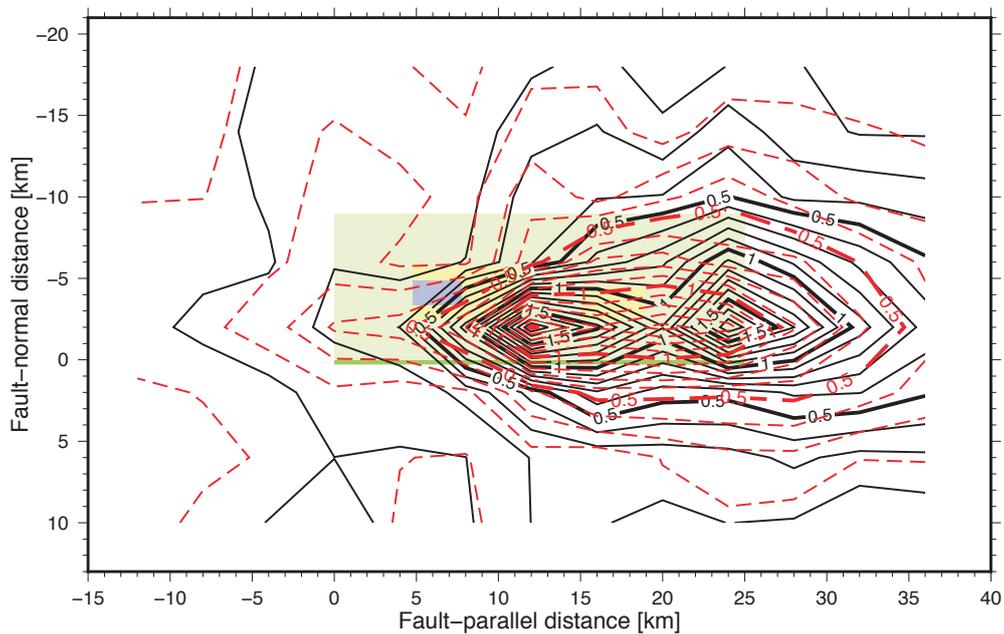
Fig. 9. Red dashed lines: 2 Hz low-pass filtered time histories of the fault-parallel component of ground velocity for a dynamic rupture of the strike-slip fault model shown in Fig. 1 propagating at a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.72 V_s$ ) (a), distribution of the peak absolute value (b), time histories of the fault-normal component of ground velocity (c), distribution of the peak absolute value (d), time histories of the vertical component of ground velocity (e), and distribution of the peak absolute value (f) (Red dashed lines). Black lines: Time histories of ground velocity and distribution of the peak absolute value of a spontaneous rupture. Green, yellow, and purple regions indicate ground surface projections of the fault plane, asperities and the initial crack, respectively. A thick green line indicates a surface trace of the fault plane.

Strike-slip case

(c) Velocity (normal)



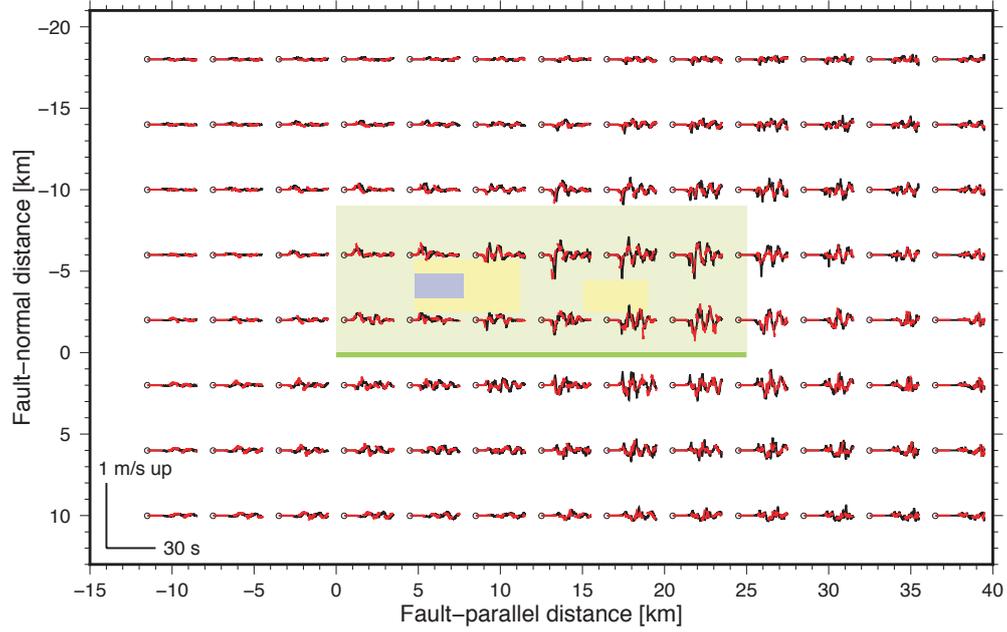
(d) Peak absolute value of velocity (normal)



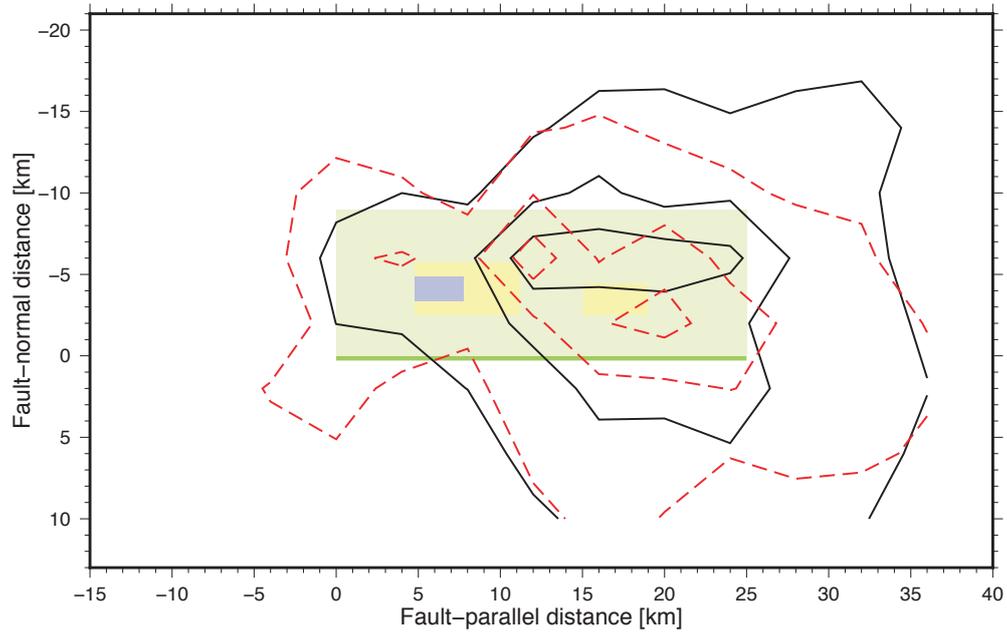
第9図. (続き)  
Fig. 9. (continued)

Strike-slip case

(e) Velocity (vertical)

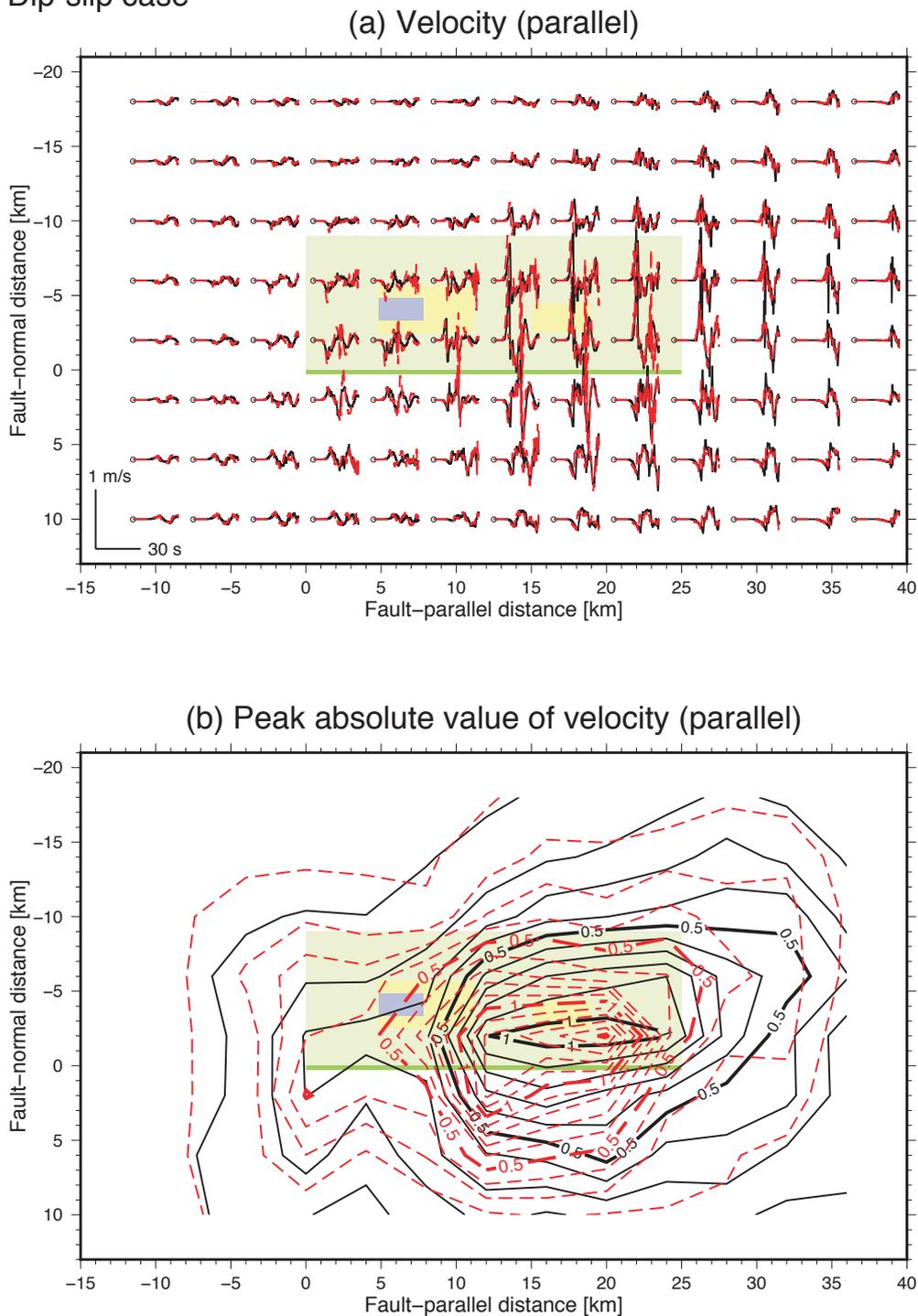


(f) Peak absolute value of velocity (vertical)



第9図. (続き)  
Fig. 9. (continued)

Dip-slip case

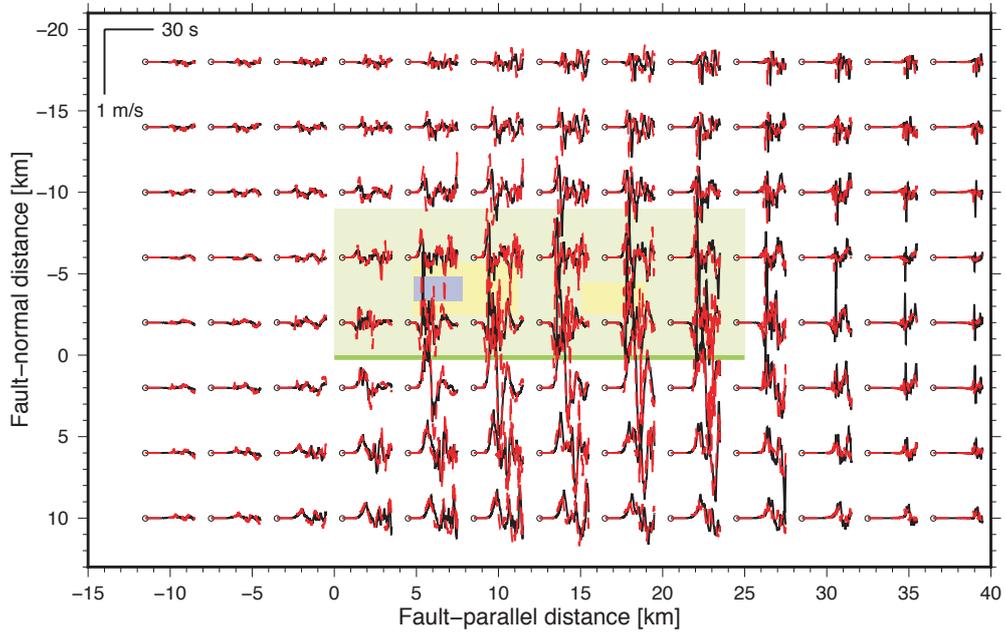


第 10 図. 第 1 図のモデルの逆断層において S 波速度の 0.72 倍の一定速度で破壊が伝播する場合の地表面での 2 Hz low-pass フィルタをかけた速度波形の断層平行成分 (a), 断層平行成分の最大地動速度分布 (b), 速度波形の断層直交成分 (c), 断層直交成分の最大地動速度分布 (d), 速度波形の鉛直成分 (e), 鉛直成分の最大地動速度分布 (f) (赤点線). 黒線は, 自発的に破壊を伝播させたときの速度波形と最大地動速度分布. 図の詳細は, 第 9 図と同じ.

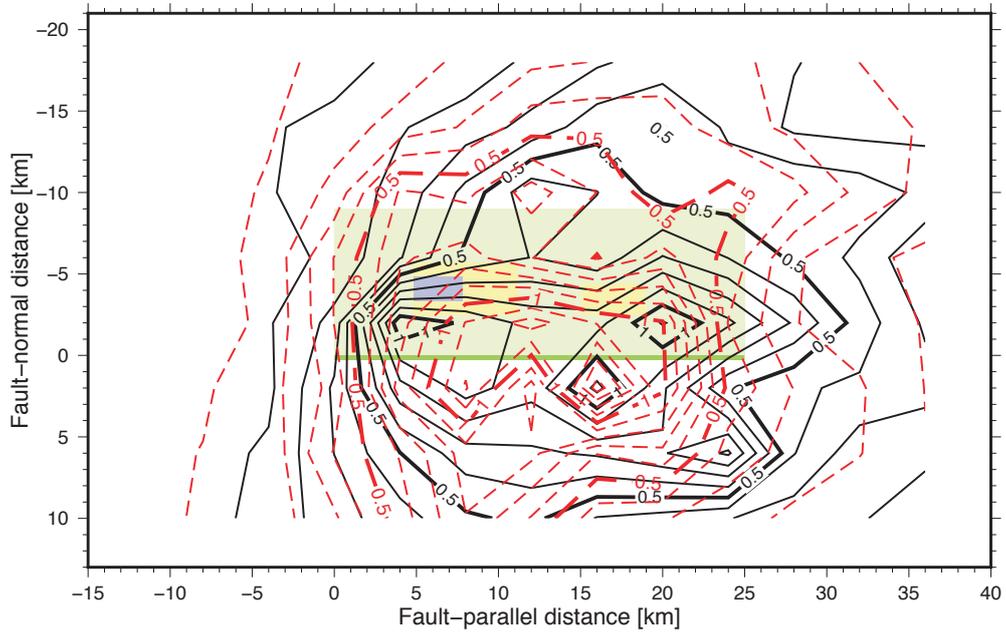
Fig. 10. Red dashed lines: 2 Hz low-pass filtered time histories of the fault-parallel component of ground velocity for a dynamic rupture of the dip-slip fault model shown in Fig. 1 propagating at a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.72 V_s$ ) (a), distribution of the peak absolute value (b), time histories of the fault-normal component of ground velocity (c), distribution of the peak absolute value (d), time histories of the vertical component of ground velocity (e), and distribution of the peak absolute value (f). Black lines: Time histories of ground velocity and distribution of the peak absolute value of a spontaneous rupture. The details are the same as for Fig. 9.

Dip-slip case

(c) Velocity (normal)



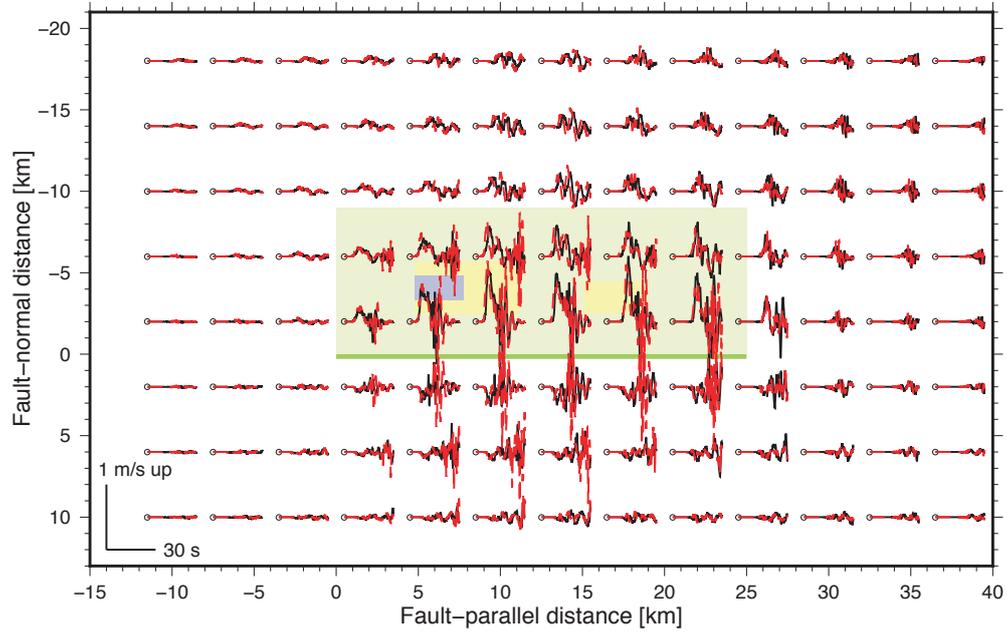
(d) Peak absolute value of velocity (normal)



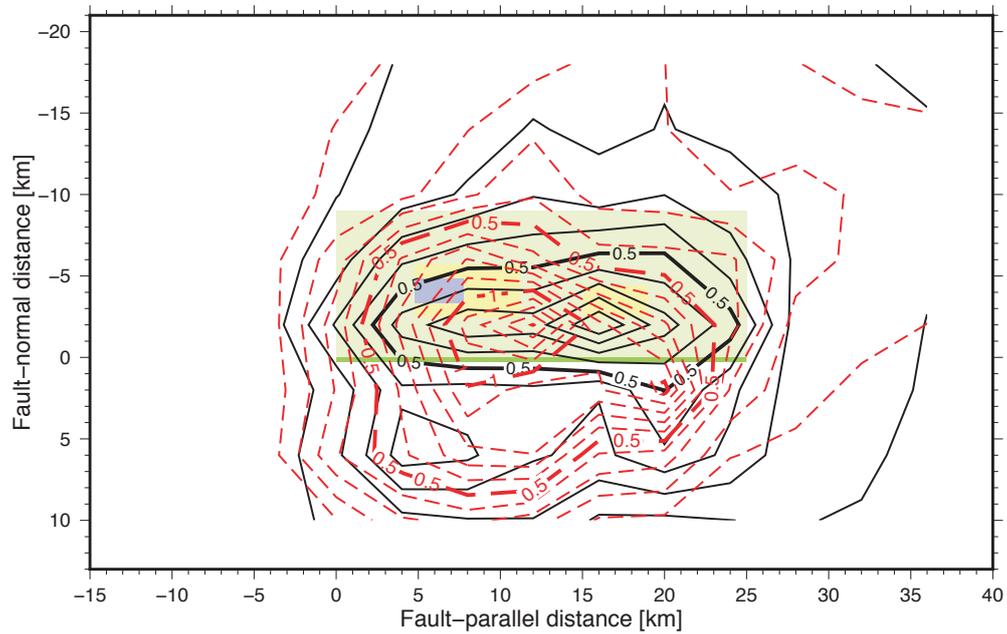
第 10 図. (続き)  
Fig. 10. (continued)

Dip-slip case

(e) Velocity (vertical)



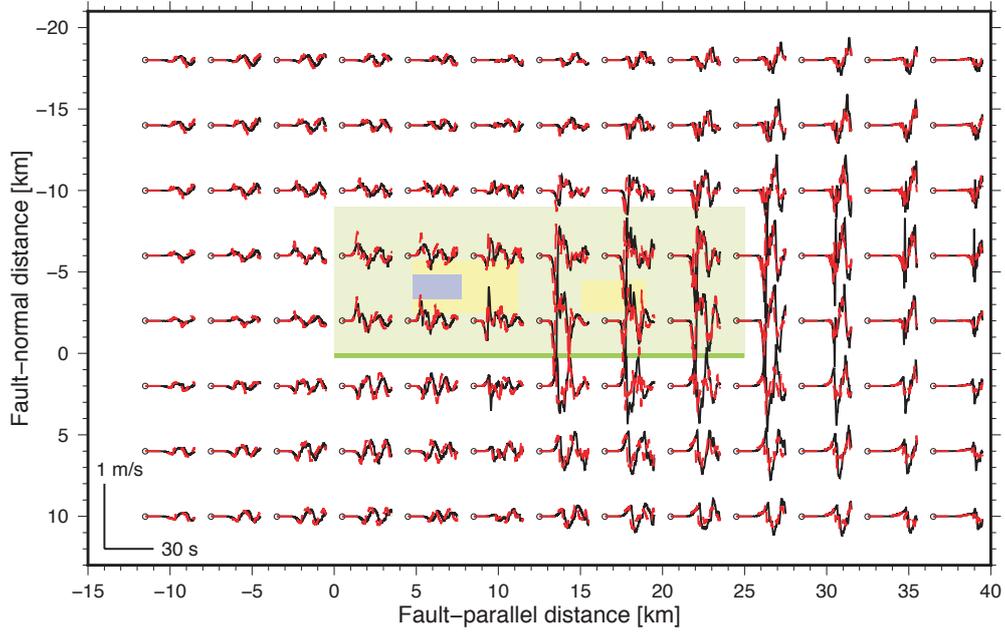
(f) Peak absolute value of velocity (vertical)



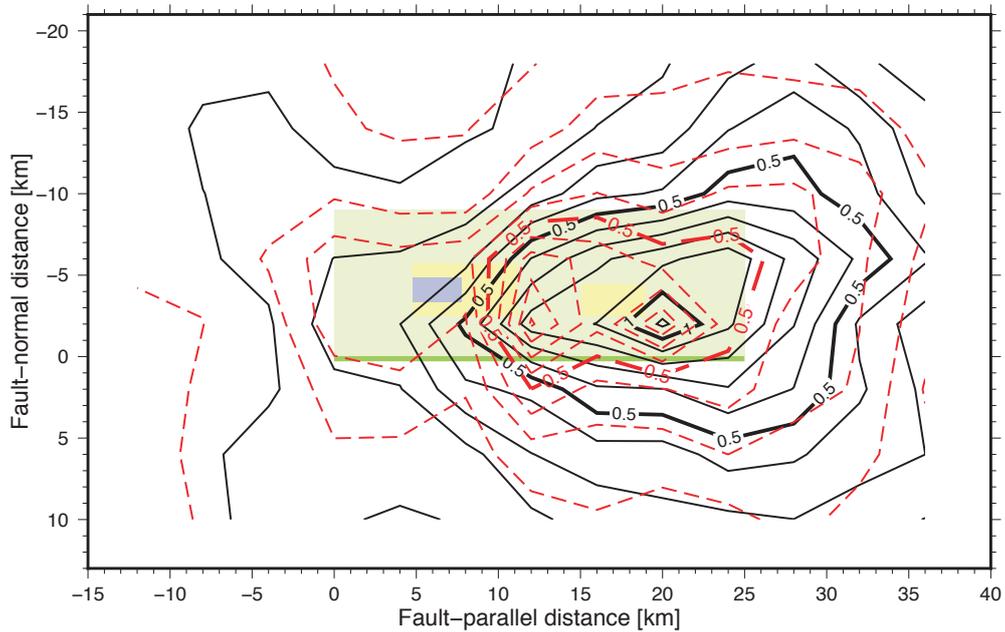
第 10 図. (続き)  
Fig. 10. (continued)

Normal-slip case

(a) Velocity (parallel)



(b) Peak absolute value of velocity (parallel)

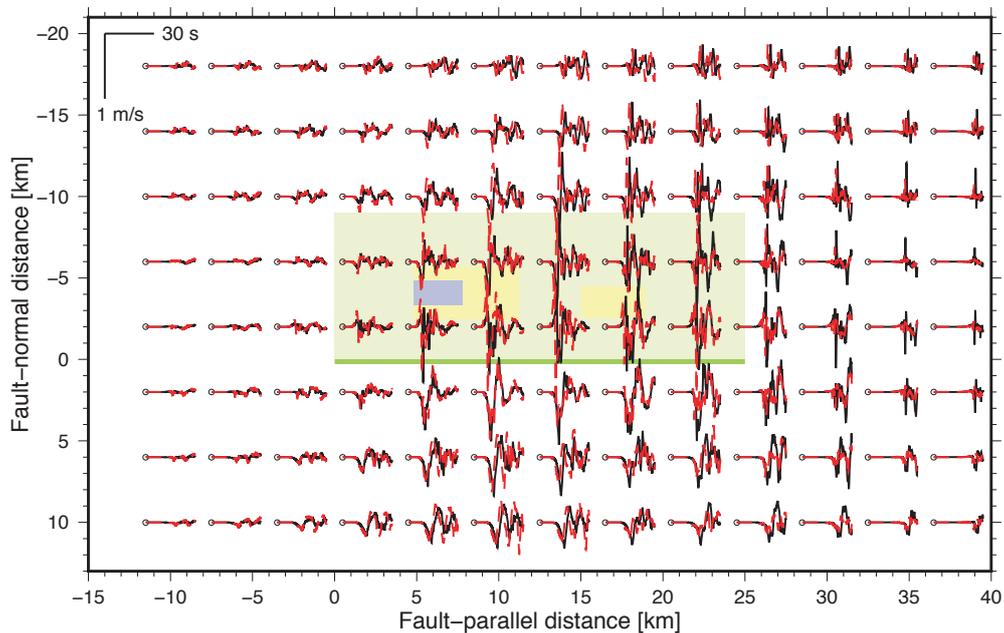


第 11 図. 第 1 図のモデルの正断層において S 波速度の 0.72 倍の一定速度で破壊が伝播する場合の地表面での 2 Hz low-pass フィルタをかけた速度波形の断層平行成分 (a), 断層平行成分の最大地動速度分布 (b), 速度波形の断層直交成分 (c), 断層直交成分の最大地動速度分布 (d), 速度波形の鉛直成分 (e), 鉛直成分の最大地動速度分布 (f) (赤点線). 黒線は, 自発的に破壊を伝播させたときの速度波形と最大地動速度分布. 図の詳細は, 第 9 図と同じ.

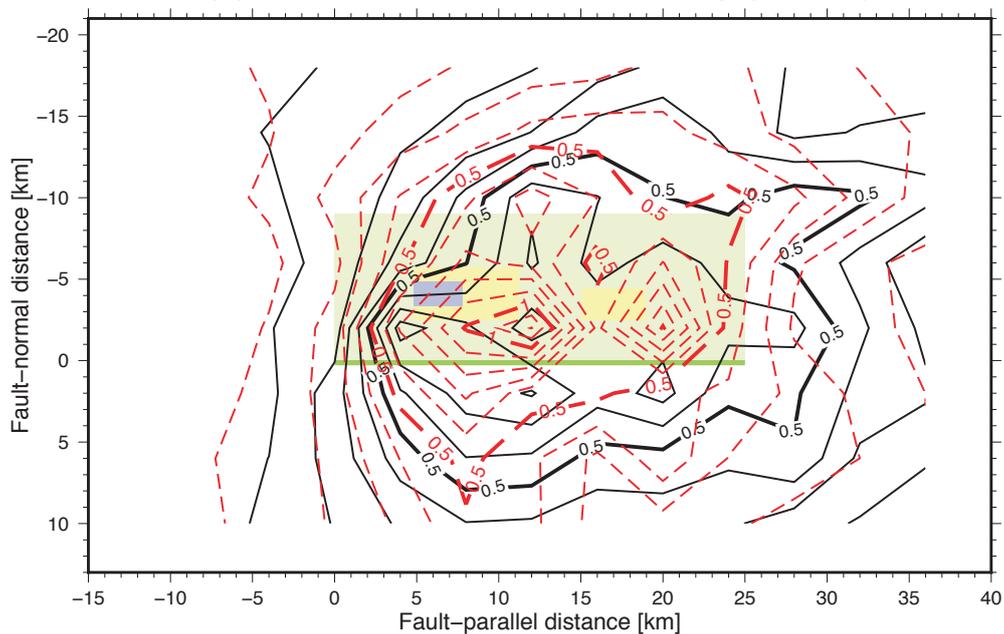
Fig. 11. Red dashed lines: 2 Hz low-pass filtered time histories of the fault-parallel component of ground velocity for a dynamic rupture of the normal-slip fault model shown in Fig. 1 propagating at a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.72 V_s$ ) (a), distribution of the peak absolute value (b), time histories of the fault-normal component of ground velocity (c), distribution of the peak absolute value (d), time histories of the vertical component of ground velocity (e), and distribution of the peak absolute value (f). Black lines: Time histories of ground velocity and distribution of the peak absolute value of a spontaneous rupture. The details are the same as for Fig. 9.

Normal-slip case

(c) Velocity (normal)



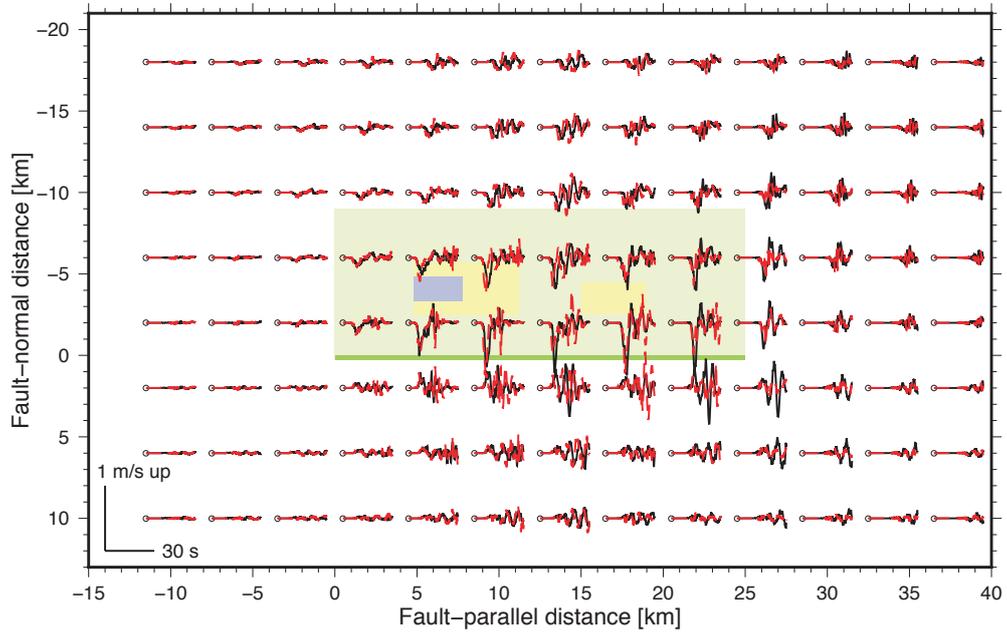
(d) Peak absolute value of velocity (normal)



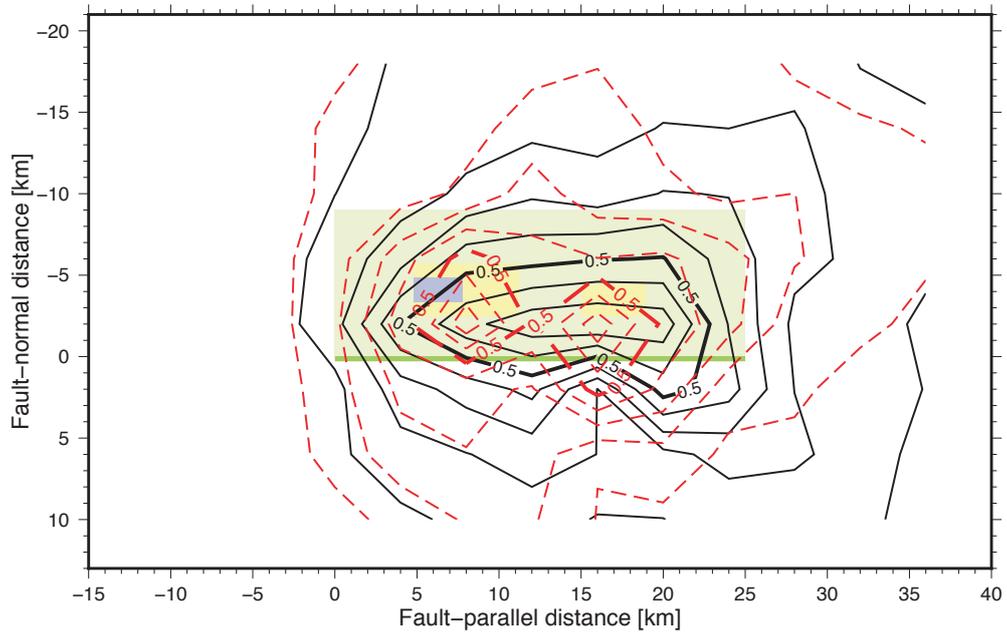
第 11 図. (続き)  
Fig. 11. (continued)

Normal-slip case

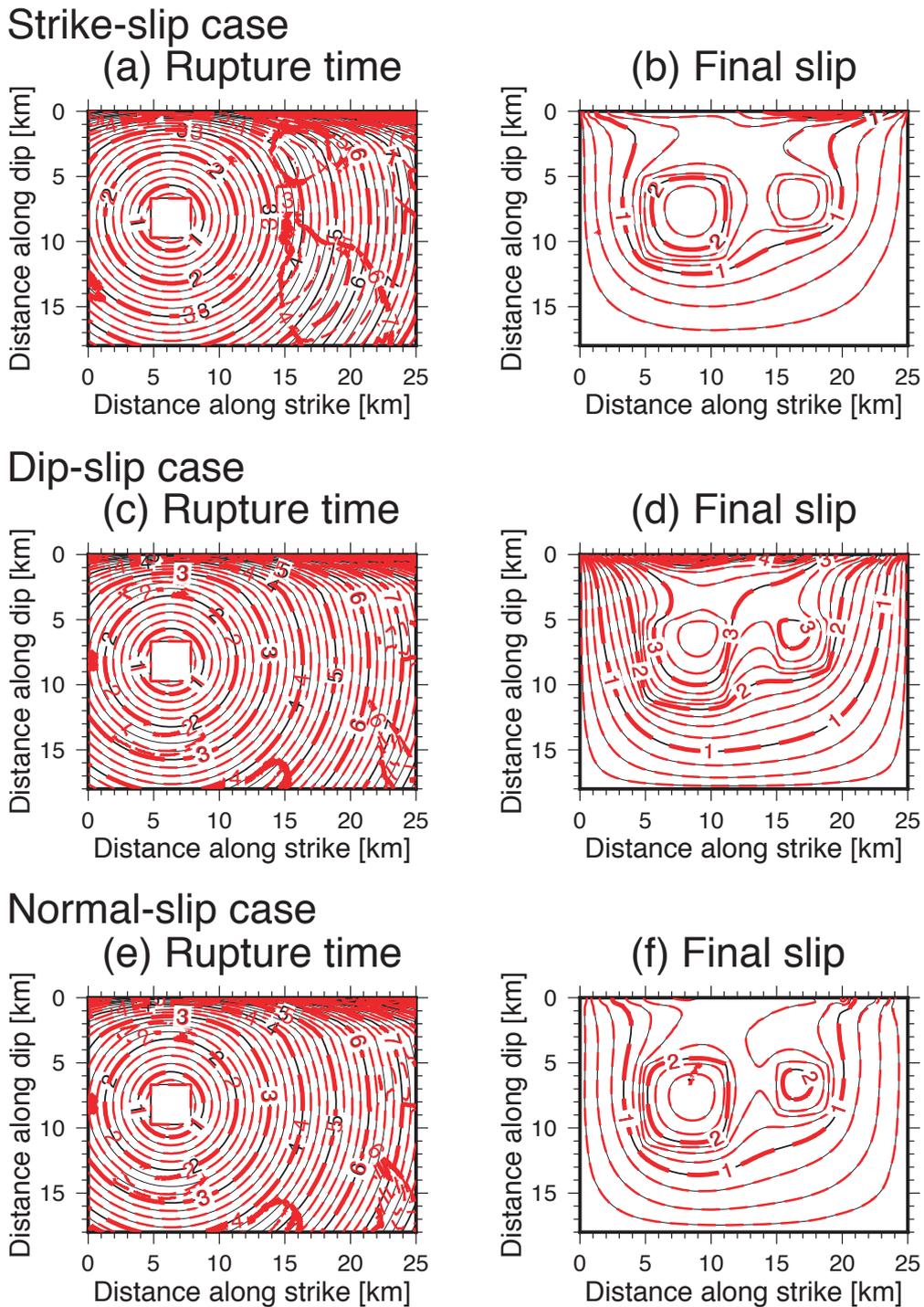
(e) Velocity (vertical)



(f) Peak absolute value of velocity (vertical)



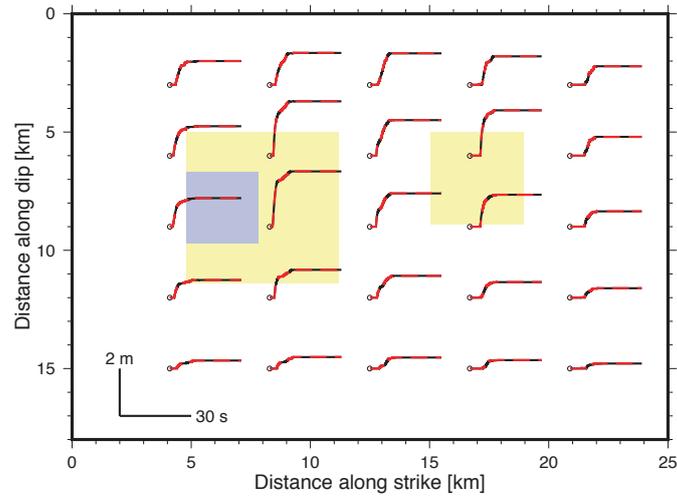
第 11 図. (続き)  
Fig. 11. (continued)



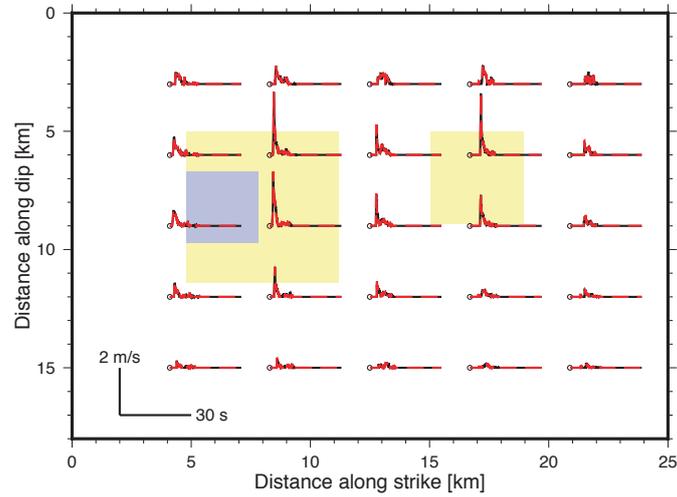
第 12 図. 第 5 図で示した静摩擦応力分布を破壊条件として計算して得られた横ずれ断層上の自発的破壊の破壊時刻 (a) とすべり (b), 逆断層上の自発的破壊の破壊時刻 (c) とすべり (d), 正断層上の自発的破壊の破壊時刻 (e) とすべり (f) の分布 (赤点線). 黒線は, 第 4 図に示す S 波速度の 0.72 倍の一定速度で伝播する破壊の破壊時刻とすべり. Fig. 12. Red dashed lines: Rupture time (a) and slip (b) distributions of the spontaneous rupture on the strike-slip fault given the static frictional stress distribution shown in Fig. 5, rupture time (c) and slip (d) distributions of the spontaneous rupture on the dip-slip fault, and rupture time (e) and slip (f) distributions of the spontaneous rupture on the normal fault. Black lines: Rupture time and slip distributions of a subshear rupture ( $V_r=0.72 V_s$ ) shown in Fig. 4.

Strike-slip case

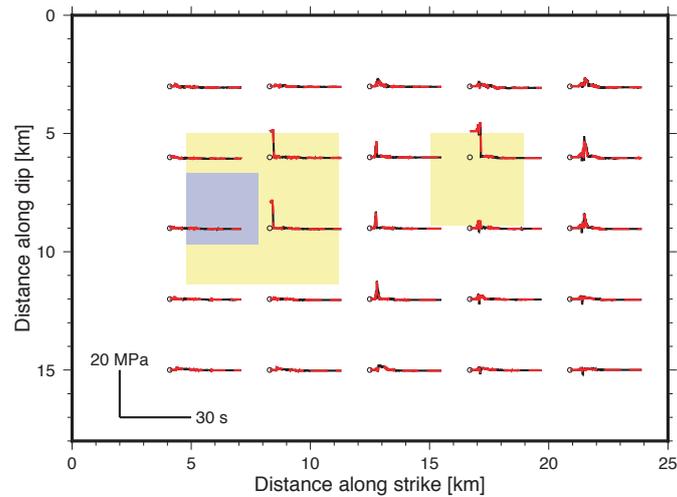
(a) Slip



(b) Slip velocity

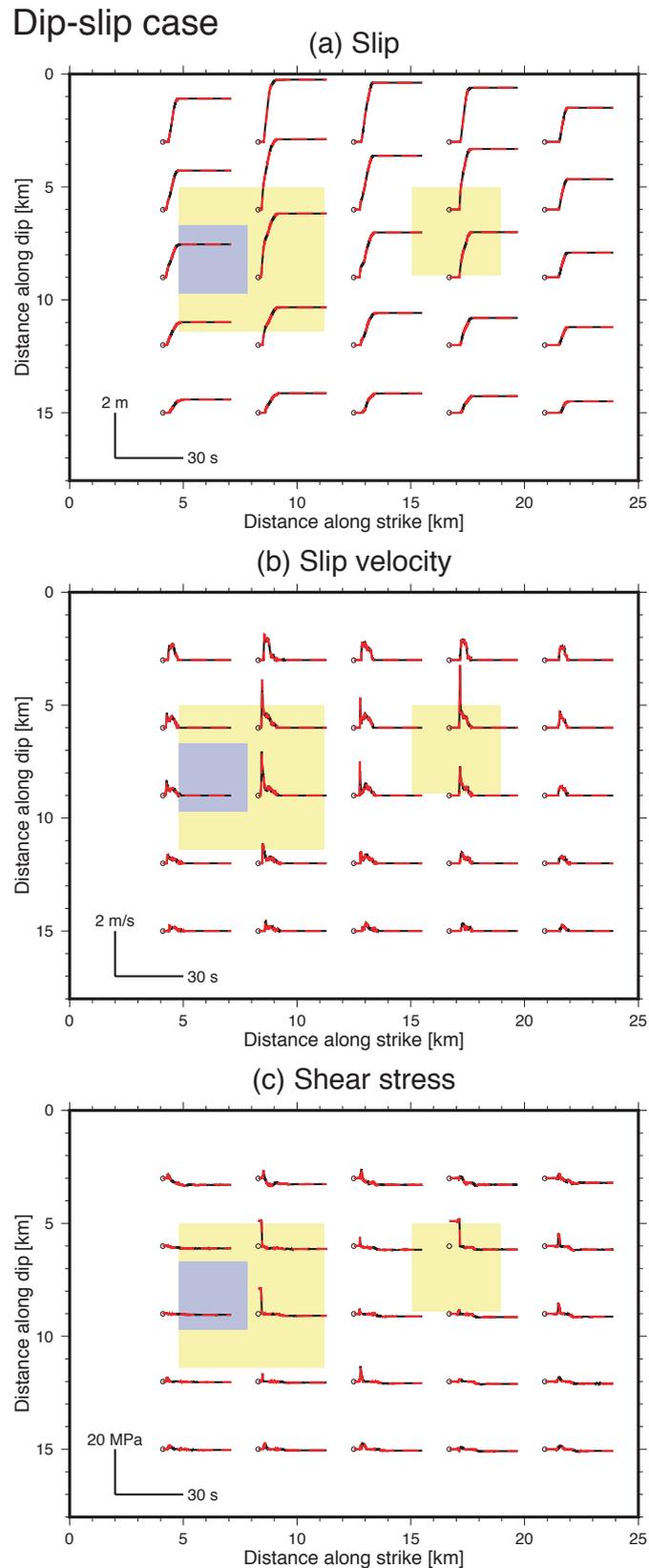


(c) Shear stress



第 13 図. 第 5 図 a で示した静摩擦応力分布を破壊条件として計算して得られた横ずれ断層上の自発的破壊の断層面上のすべり (a), すべり速度 (b), 剪断応力 (c) の時刻歴 (赤点線). 黒線は, 第 6 図に示される S 速度の 0.72 倍の一定速度で破壊を伝播させたときの時刻歴. 図の詳細は, 第 6 図と同じ.

Fig. 13. Red dashed lines: Time histories of slip (a), slip velocity (b), and shear stress (c) of the spontaneous rupture on the strike-slip fault given the static frictional stress distribution shown in Fig. 5a. Black lines: Time histories of a subshear rupture ( $V_r=0.72 V_s$ ) shown in Fig. 6. The details are the same as for Fig. 6.

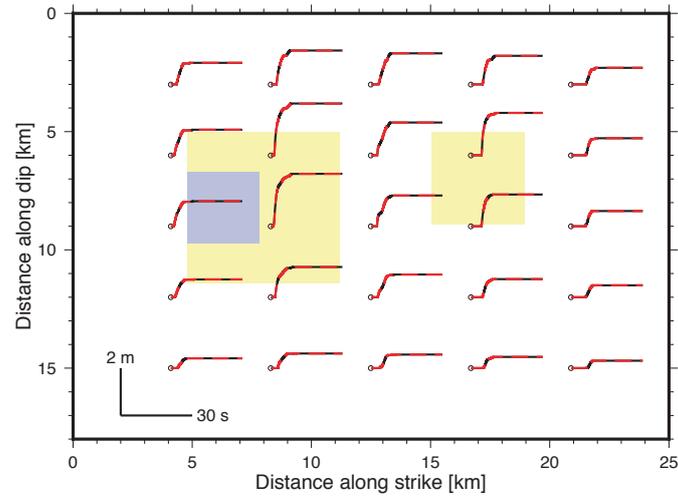


第14図. 第5図cで示した静摩擦応力分布を破壊条件として計算して得られた逆断層上の自発的破壊の断層面上のすべり (a), すべり速度 (b), 剪断応力 (c) の時刻歴 (赤点線). 黒線は, 第7図に示されるS波速度の0.72倍の一定速度で破壊を伝播させたときの時刻歴. 図の詳細は, 第6図と同じ.

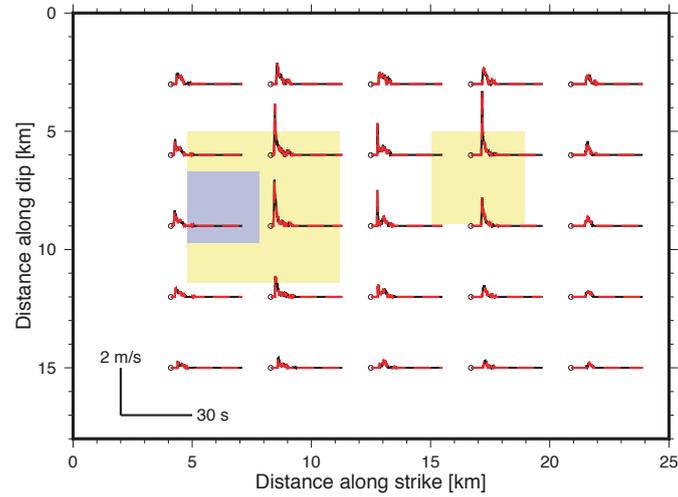
Fig. 14. Red dashed lines: Time histories of slip (a), slip velocity (b), and shear stress (c) of the spontaneous rupture on the dip-slip fault given the static frictional stress distribution shown in Fig. 5c. Black lines: Time histories of a subshear rupture ( $V_r=0.72 V_s$ ) shown in Fig. 7. The details are the same as for Fig. 6.

Normal-slip case

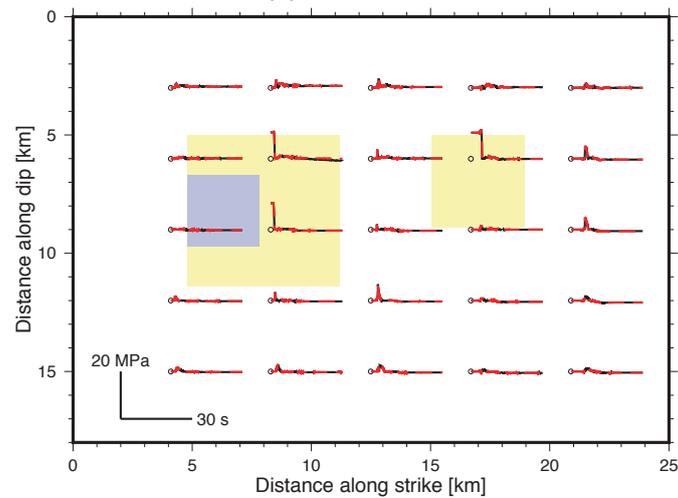
(a) Slip



(b) Slip velocity



(c) Shear stress

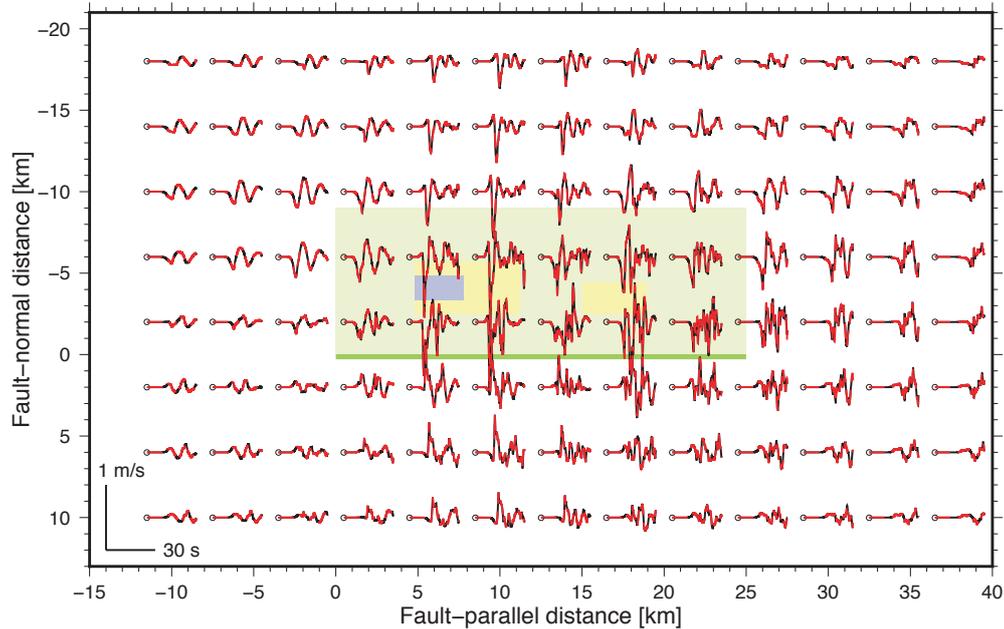


第 15 図. 第 5 図 e で示した静摩擦応力分布を破壊条件として計算して得られた正断層上の自発的破壊の断層面上のすべり (a), すべり速度 (b), 剪断応力 (c) の時刻歴 (赤点線). 黒線は, 第 8 図に示される S 波速度の 0.72 倍の一定速度で破壊を伝播させたときの時刻歴. 図の詳細は, 第 6 図と同じ.

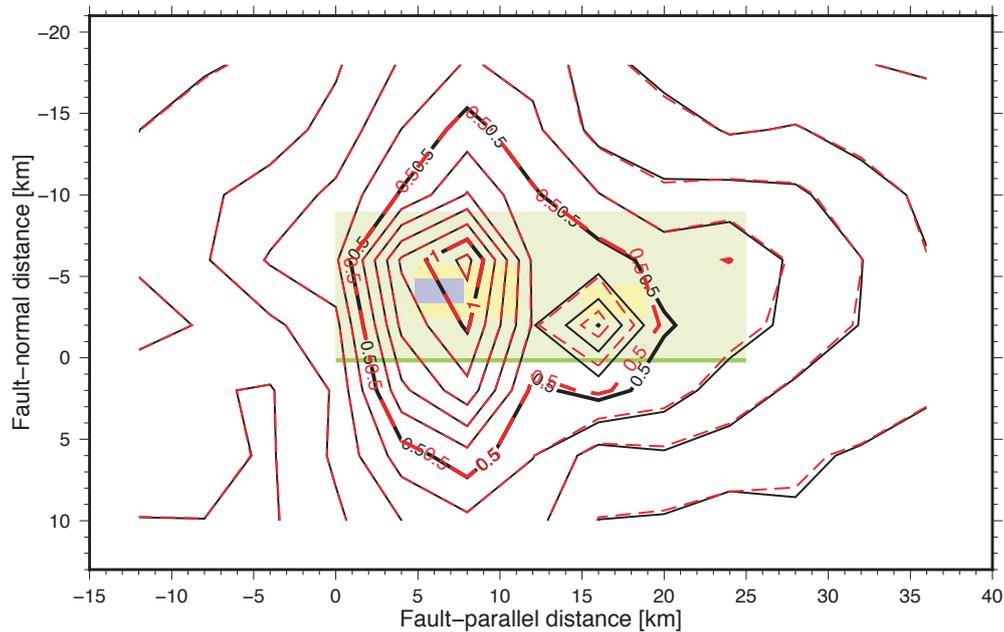
Fig. 15. Red dashed lines: Time histories of slip (a), slip velocity (b), and shear stress (c) of the spontaneous rupture on the normal-slip fault given the static frictional stress distribution shown in Fig. 5e. Black lines: Time histories of a subshear rupture ( $V_r=0.72 V_s$ ) shown in Fig. 8. The details are the same as for Fig. 6.

Strike-slip case

(a) Velocity (parallel)



(b) Peak absolute value of velocity (parallel)

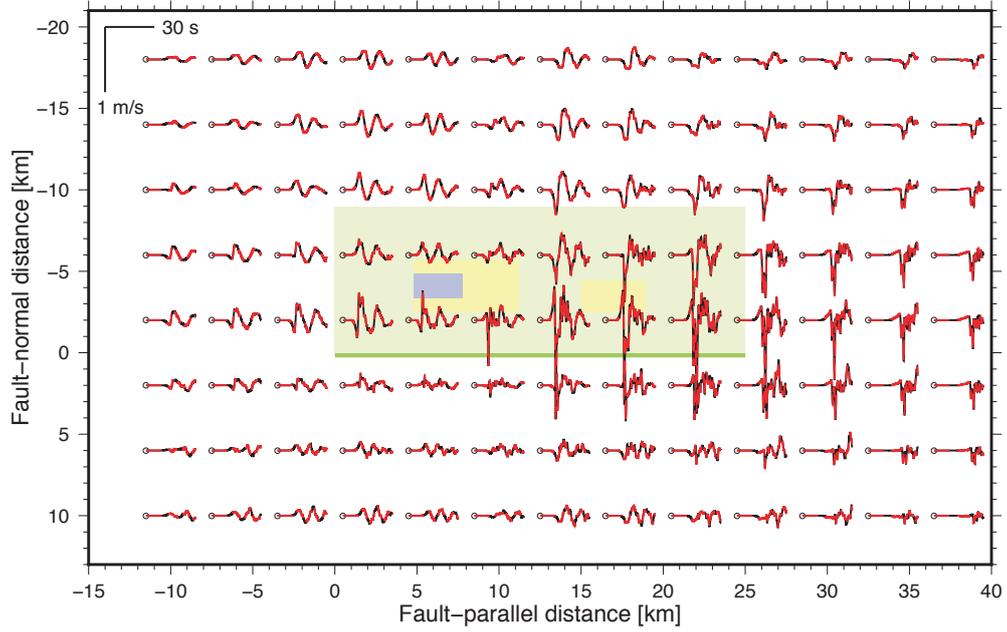


第 16 図. 第 5 図 a で示した静摩擦応力分布を破壊条件として計算して得られた横ずれ断層上の自発的破壊の地表面での 2 Hz low-pass フィルタをかけた速度波形の断層平行成分 (a), 断層平行成分の最大地動速度分布 (b), 速度波形の断層直交成分 (c), 断層直交成分の最大地動速度分布 (d), 速度波形の鉛直成分 (e), 鉛直成分の最大地動速度分布 (f) (赤点線). 黒線は, 第 9 図に示される S 波速度の 0.72 倍の一定速度で伝播する破壊の速度波形と最大地動速度分布. 図の詳細は, 第 9 図と同じ.

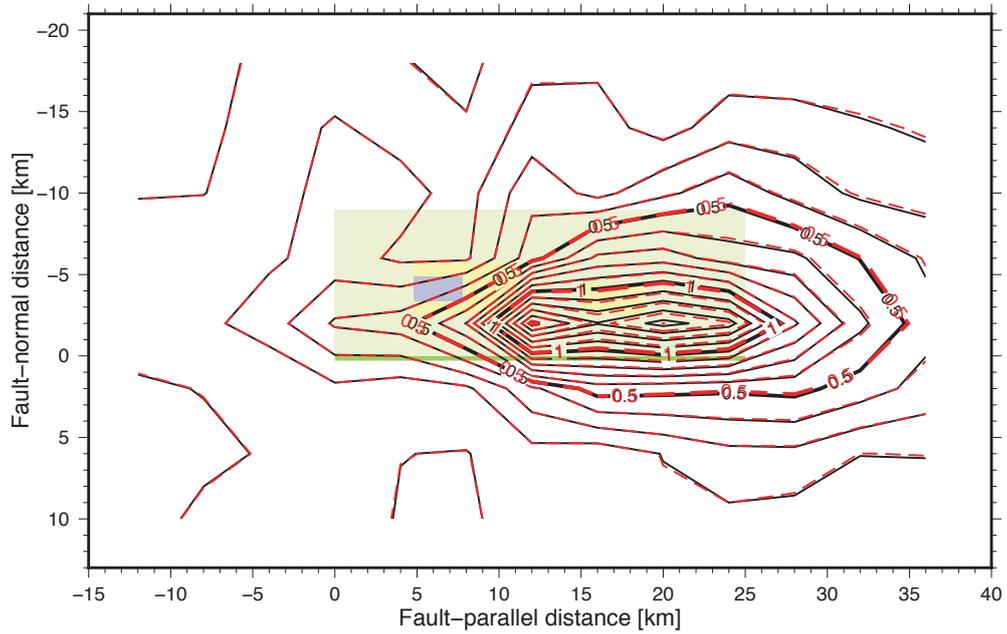
Fig. 16. Red dashed lines: 2 Hz low-pass filtered time histories of the fault-parallel component of ground velocity for a spontaneous rupture on the strike-slip fault given the static frictional stress distribution shown in Fig. 5a (a), distribution of the peak absolute value (b), time histories of the fault-normal component of ground velocity (c), distribution of the peak absolute value (d), time histories of the vertical component of ground velocity (e), and distribution of the peak absolute value (f). Black lines: Time histories and distribution of peak absolute value of the fault-parallel component of ground velocity of a subshear rupture ( $V_r=0.72 V_s$ ) shown in Fig. 9. The details are the same as for Fig. 9.

Strike-slip case

(c) Velocity (normal)



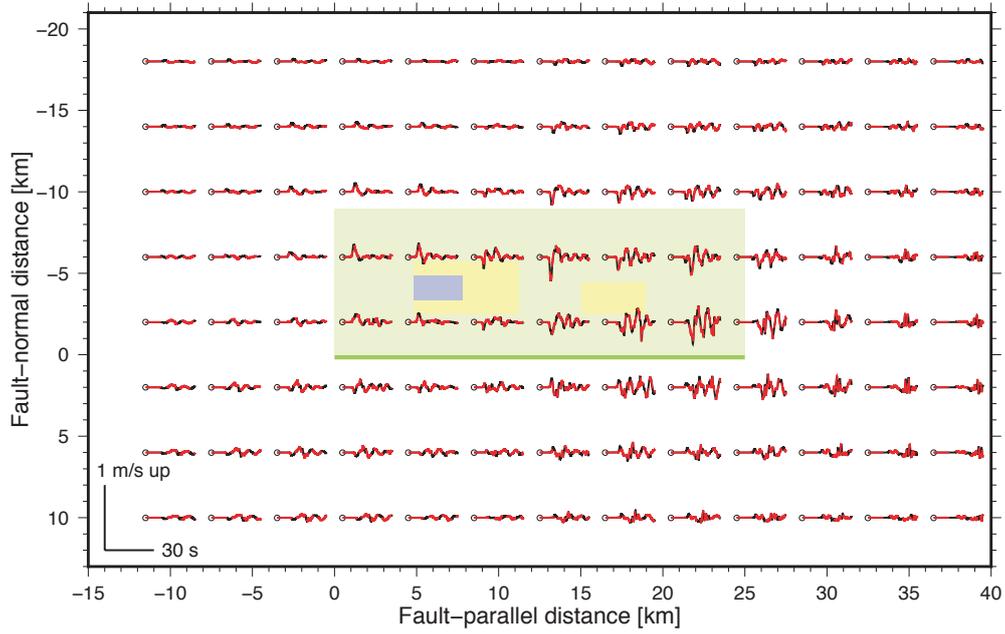
(d) Peak absolute value of velocity (normal)



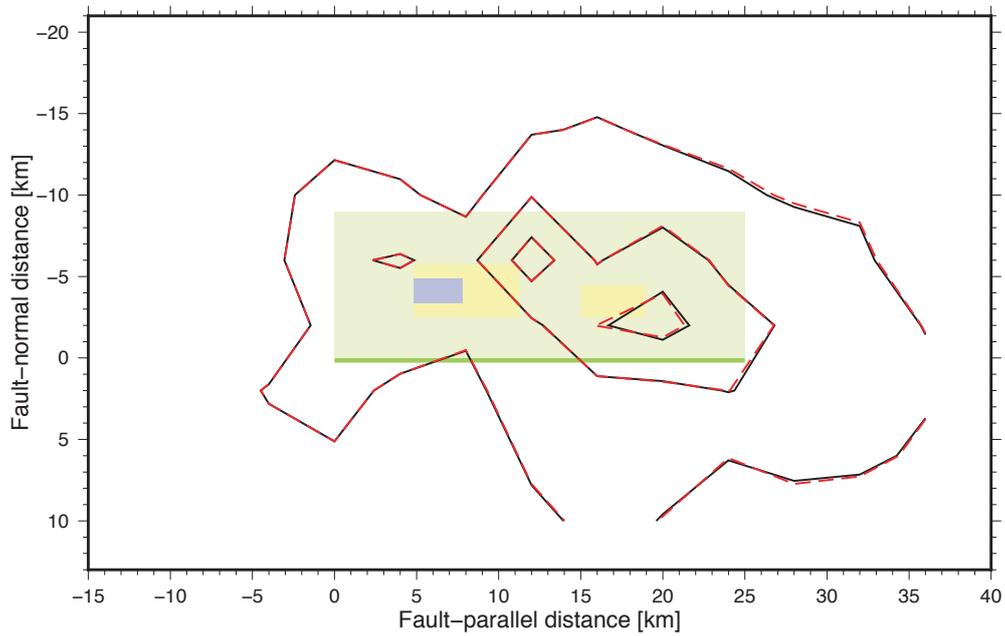
第 16 図. (続き)  
Fig. 16. (continued)

Strike-slip case

(e) Velocity (vertical)



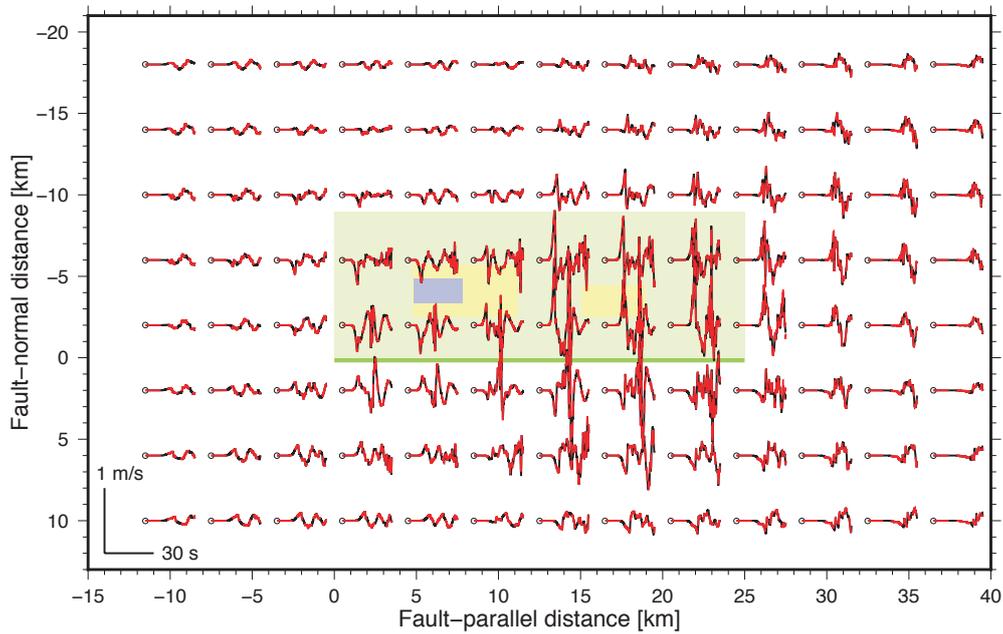
(f) Peak absolute value of velocity (vertical)



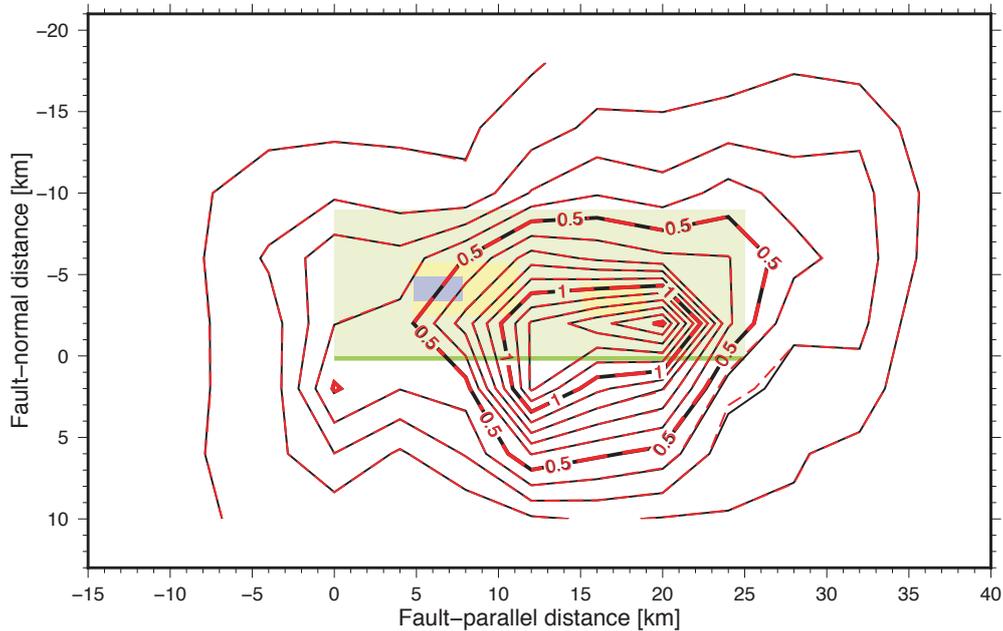
第 16 図. (続き)  
Fig. 16. (continued)

Dip-slip case

(a) Velocity (parallel)



(b) Peak absolute value of velocity (parallel)

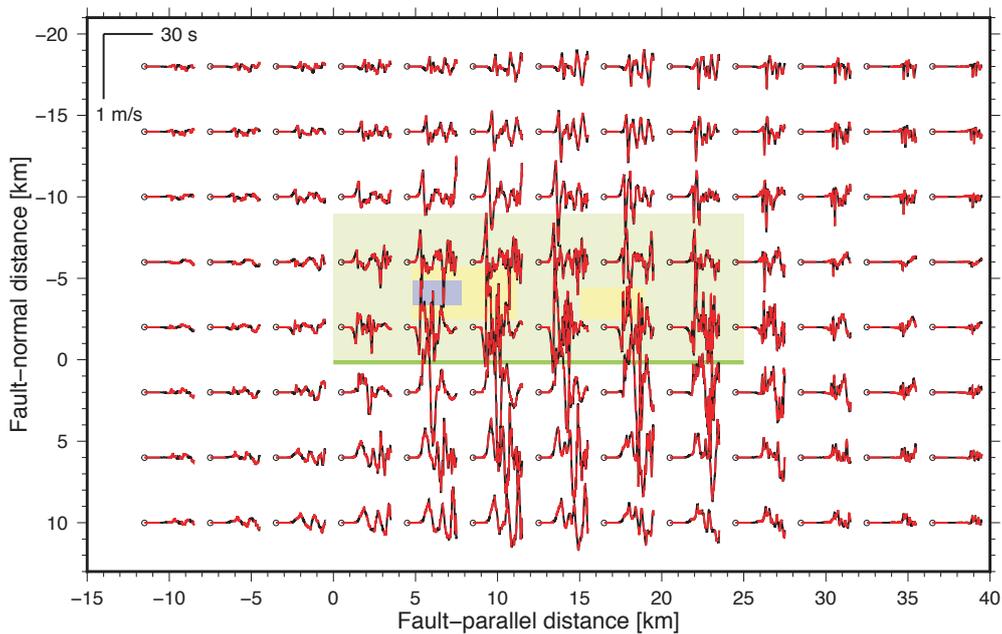


第 17 図. 第 5 図 c で示した静摩擦応力分布を破壊条件として計算して得られた逆断層上の自発的破壊の地表面での 2 Hz low-pass フィルタをかけた速度波形の断層平行成分 (a), 断層平行成分の最大地動速度分布 (b), 速度波形の断層直交成分 (c), 断層直交成分の最大地動速度分布 (d), 速度波形の鉛直成分 (e), 鉛直成分の最大地動速度分布 (f) (赤点線). 黒線は, 第 10 図に示される S 波速度の 0.72 倍の一定速度で伝播する破壊の速度波形と最大地動速度分布. 図の詳細は, 第 9 図と同じ.

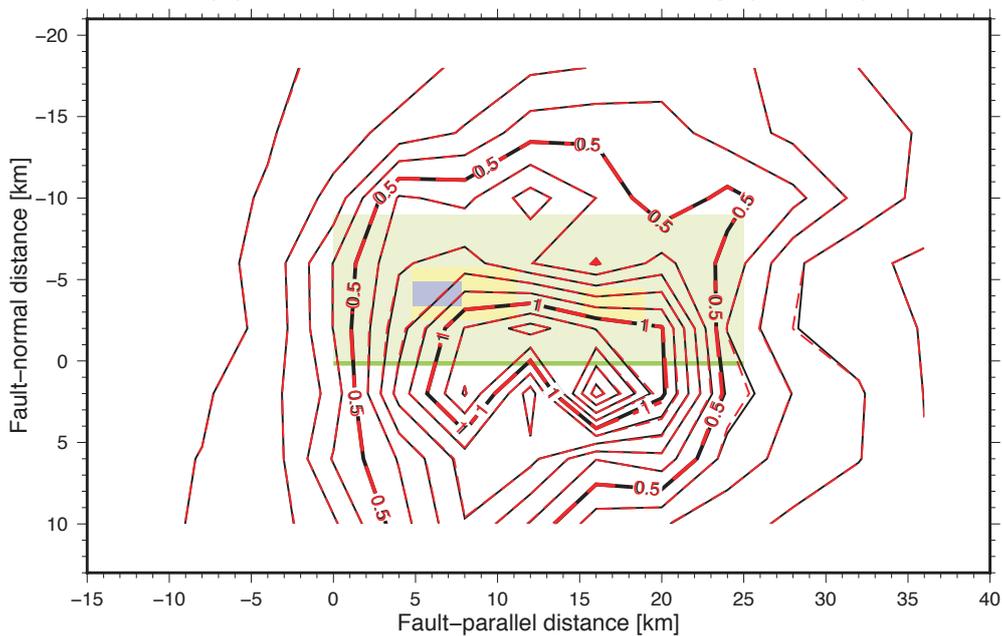
Fig. 17. Red dashed lines: 2 Hz low-pass filtered time histories of the fault-parallel component of ground velocity for a spontaneous rupture on the dip-slip fault given the static frictional stress distribution shown in Fig. 5c (a), distribution of the peak absolute value (b), time histories of the fault-normal component of ground velocity (c), distribution of the peak absolute value (d), time histories of the vertical component of ground velocity (e), and distribution of the peak absolute value of the fault-parallel component of ground velocity of a subshear rupture ( $V_r=0.72 V_s$ ) shown in Fig. 10. The details are the same as for Fig. 9.

Dip-slip case

(c) Velocity (normal)



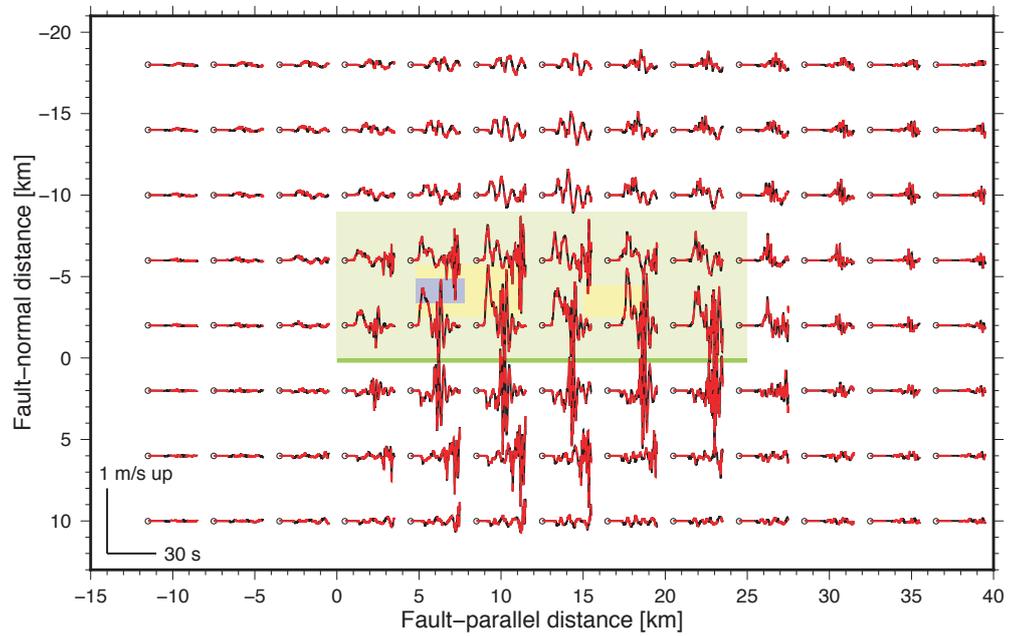
(d) Peak absolute value of velocity (normal)



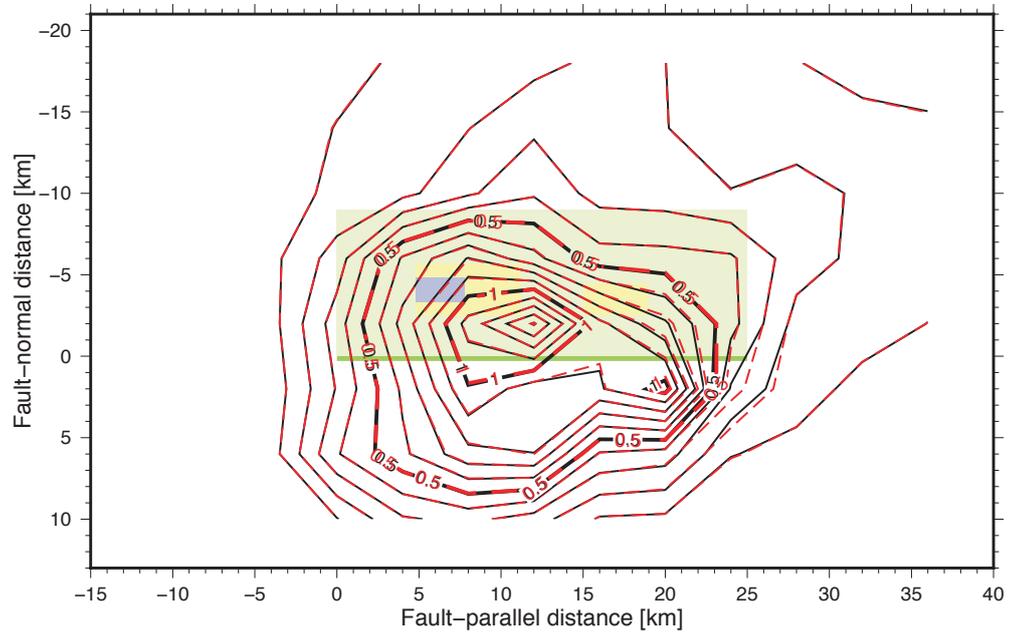
第 17 図. (続き)  
Fig. 17. (continued)

Dip-slip case

(e) Velocity (vertical)

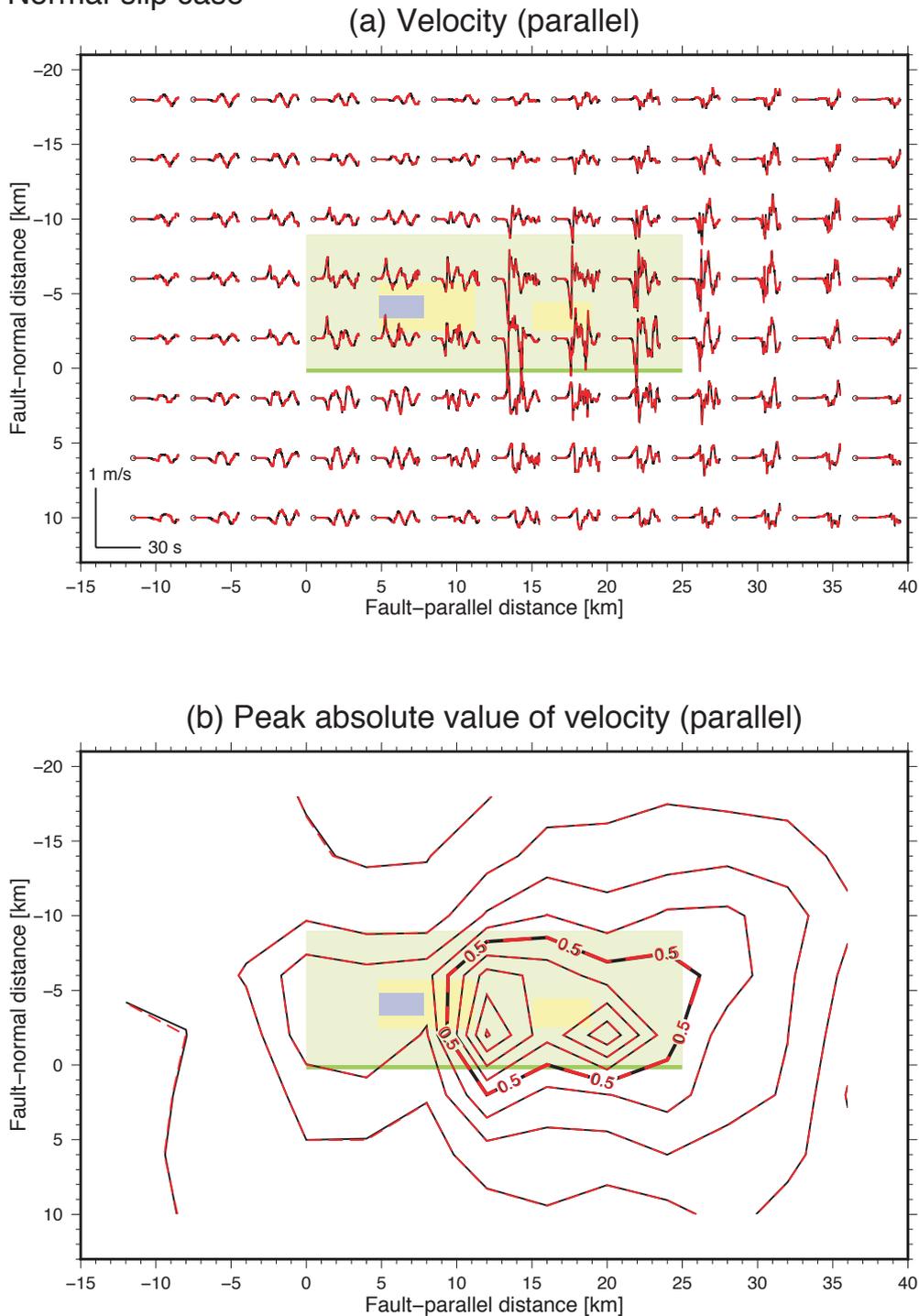


(f) Peak absolute value of velocity (vertical)



第 17 図. (続き)  
Fig. 17. (continued)

Normal-slip case

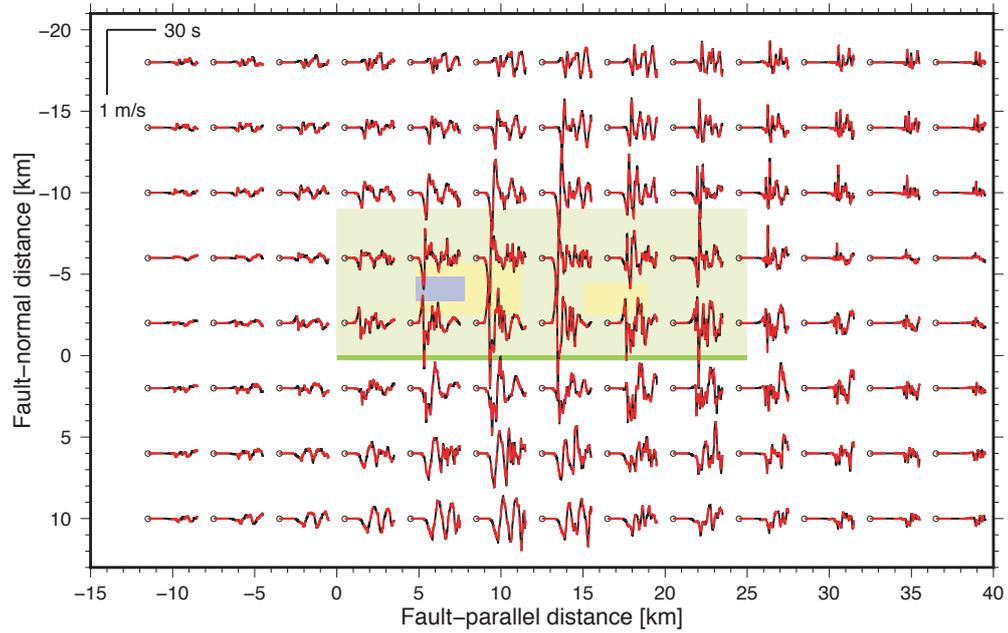


第 18 図. 第 5 図 e で示した静摩擦応力分布を破壊条件として計算して得られた正断層上の自発的破壊の地表面での 2 Hz low-pass フィルタをかけた速度波形の断層平行成分 (a), 断層平行成分の最大地動速度分布 (b), 速度波形の断層直交成分 (c), 断層直交成分の最大地動速度分布 (d), 速度波形の鉛直成分 (e), 鉛直成分の最大地動速度分布 (f) (赤点線). 黒線は, 第 11 図に示される S 波速度の 0.72 倍の一定速度で伝播する破壊の速度波形と最大地動速度分布. 図の詳細は, 第 9 図と同じ.

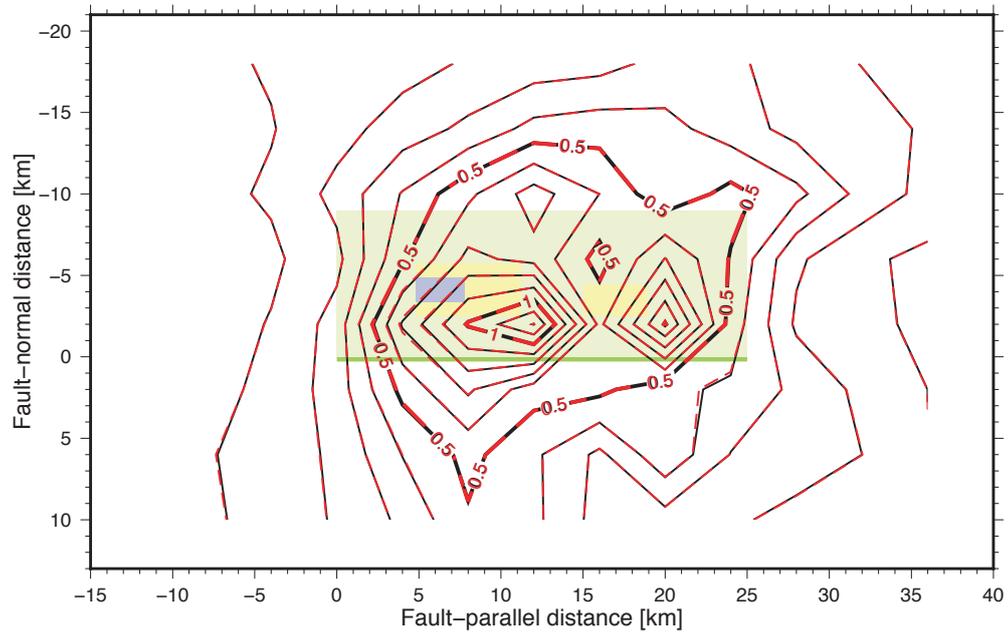
Fig. 18. Red dashed lines: 2 Hz low-pass filtered time histories of the fault-parallel component of ground velocity for a spontaneous rupture on the normal-slip fault given the static frictional stress distribution shown in Fig. 5e (a), distribution of the peak absolute value (b), time histories of the fault-normal component of ground velocity (c), distribution of the peak absolute value (d), time histories of the vertical component of ground velocity (e), and distribution of the peak absolute value (f). Black lines: Time histories and distribution of peak absolute value of the fault-parallel component of ground velocity of a subshear rupture ( $V_r=0.72 V_s$ ) shown in Fig. 11. The details are the same as for Fig. 9.

Normal-slip case

(c) Velocity (normal)



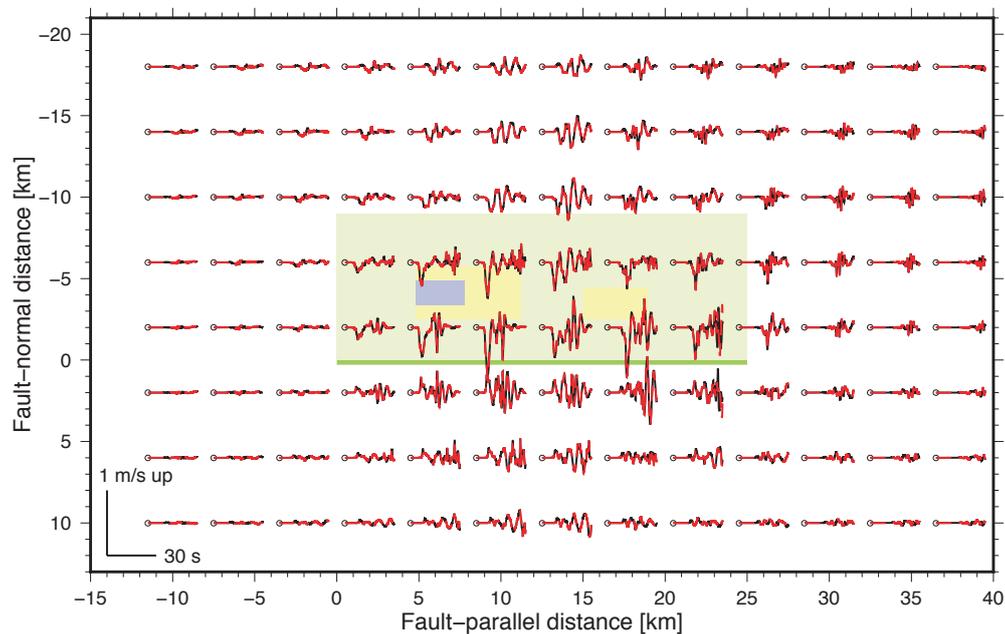
(d) Peak absolute value of velocity (normal)



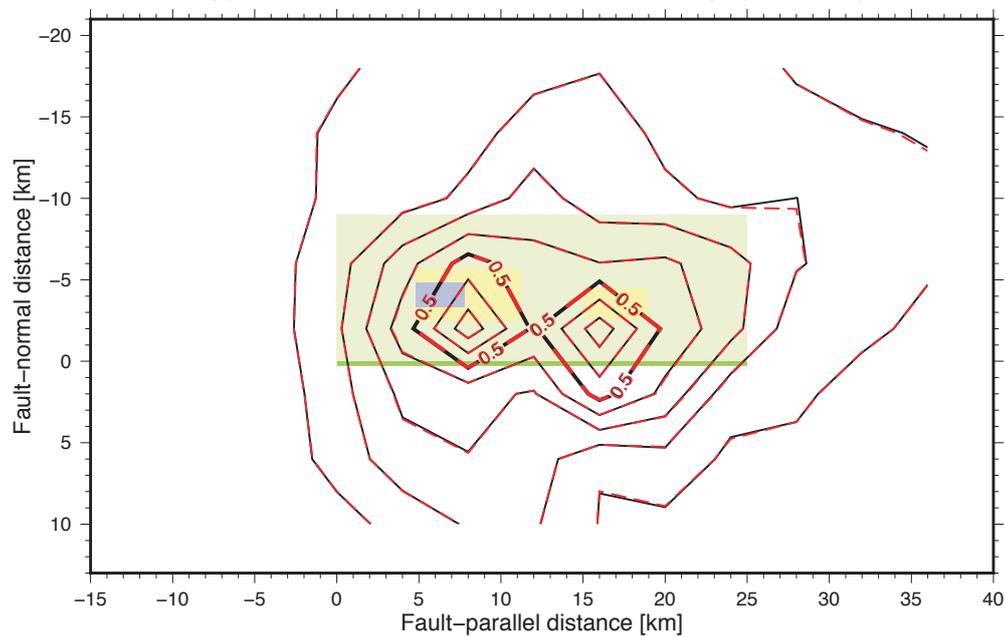
第 18 図. (続き)  
Fig. 18. (continued)

Normal-slip case

(e) Velocity (vertical)



(f) Peak absolute value of velocity (vertical)



第 18 図. (続き)  
Fig. 18. (continued)