

# 応力降下量と破壊時刻を既知とした動力的震源モデルの 地震動予測研究への適用可能性

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

加瀬祐子<sup>1</sup>

Yuko Kase<sup>1</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)

**Abstract:** We propose a dynamic rupture model with a constant subshear rupture velocity for a ground motion prediction to avoid a spontaneous supershear rupture in a characterized source model. We also calculate a spontaneous rupture given a static frictional stress distribution of the dynamic rupture 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. In a supershear rupture, energy is focused in a pair of beams propagating obliquely away from the fault, as described in the previous studies. In the spontaneous supershear rupture based on a characterized source model, the energy focusing is not clear compared with a supershear rupture based on a homogeneous source model, because of no stress drop in a background region. Since peak locations of ground velocity caused by the spontaneous supershear rupture are obviously different from the dynamic rupture with a constant subshear rupture velocity, however, a dynamic rupture model with a subshear rupture velocity is useful for a ground motion prediction based on a characterized source model.

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

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

### 1. はじめに

現在, 日本における地震動予測では, 主に応力降下量の大きいアスペリティと応力降下量が0の背景領域から構成される特性化震源モデルが用いられている. モデルのパラメータは, 地震調査研究推進本部(2016)に基づき, 断層の長さなどを基に, 経験式や理論式を積み重ねて導出されている. 一方, 断層の長さが100 kmを超えるような断層では背景領域の応力降下量が負に算出されてしまう, 地震発生層より浅い部分のすべりを考慮していないなど, 現在の特性化震源モデルではうまく対応できない課題に対処するため, 動力的震源モデルを用いた検討がおこなわれている(例えば, 入江ほか, 2010; 入江ほか, 2013). しかし, これらの検討では, 特性化震源モデルを基本としているため, 断層全体に破壊が広がるために, 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った.

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

いる(例えば, Rosakis *et al.*, 1999). また, 近年では, 2002年 Denali地震などで, 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. その理由として, 断層面の強度や幾何形状などが不均質であることが挙げられる. 不均質はS波速度を超える破壊伝播速度を生じさせることもある(Dunham *et al.*, 2003)が, 断層全体が不均質であることにより, 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できることは少ないと考えられる.

最近では, 統計的な不均質を加味した動力的震源モデル(Andrews and Barall, 2011)を用いた地震動予測も試みられており(例えば, Baumann and Dalguer, 2014), そこで用いられる動力的震源モデルの破壊伝播速度は, 一部でS波速度を超えるものの, 平均的にはS波速度以下になっている. しかし, モデルの設計思想が根本的に異なるため, Andrews and Barall (2011)の不均質を, アスペリティと背景

領域から構成される特性化震源モデルにそのまま導入することは難しい。

本研究では、入江ほか (2010, 2013) では自発的に伝播させていた破壊を、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、特性化震源モデルによる地震動予測への適用可能性を検討する。はじめに、初期クラック以外の領域での応力降下量が一樣である均質な断層モデルを用いて、破壊時刻を破壊条件とする場合の適用範囲について調べる。その上で、特性化震源モデルに適用し、破壊伝播速度が S 波速度を超える場合と超えない場合の地表地震動の特徴が、既往研究と矛盾しないことを確認する。また、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鉛直な左横ずれ断層が 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。

自発的な破壊を扱う動学的断層モデルでは、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。

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学的断層モデルと同じである。

数値計算には、応力降下量と強度を与えた動学的破壊過程を計算する Kase and Kuge (2001) の差分法コードを基に、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た。

## 3. 結果と考察

### 3.1 応力降下量が一樣なモデル

応力降下量が一樣なモデルを用いて、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検証する。各グリッドの破壊開始時刻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、既往の動学的破壊シミュレーションのコード (Kase and Kuge, 2001) で自発的な破壊を計算し、与えた破壊開始時刻を再現できるかどうかを確認する。これは、与えた破壊開始時刻の妥当性を検証するとともに、物理的にはどのようなモデルを扱っているのかを提示するために必要である。

検証用のモデルとして SCEC spontaneous rupture code verification project (Harris *et al.*, 2009; [http://sceccdata.usc.edu/cvws/benchmark\\_descriptions.html](http://sceccdata.usc.edu/cvws/benchmark_descriptions.html)) の TPV4 (半無限弾性体中に、鉛直な横ずれ断層が 1 枚) を用いて、初期クラック以外の断層面上の応力降下量が一樣なモデルの挙動を調べる。TPV4 の断層面モデルを第 3 図、計算に用いるパラメータを第 1 表に示す。初期クラック内の応力降下量は 18.6 MPa、強度は -0.36 MPa、それ以外の領域の応力降下量は 7 MPa、強度は 11.24 MPa である。初期クラック内の強度を負にすることで自発的に破壊が始まるような設定となっている。自発的な破壊過程を計算した結果の破壊時刻とすべりの分布を第 4 図に示す。走向方向の破壊伝播速度は約 3.030 km/s で、S 波速度の約 0.87 倍である。

初めに、自発的な破壊伝播過程である TPV4 の破壊時刻を、そのまま既知の破壊時刻として入力して計算し、断層面上の各点において、破壊時刻までの剪断応力の最大値を求める (第 5 図)。TPV4 で仮定している値 (81.24 MPa) とそれほど変わらない値が、断層面全体で得られている。また、第 5 図で示した静摩擦応力分布を破壊条件として自発的な破壊を計算すると、破壊時刻、すべり分布とも、破壊時刻を既知として計算した動学的破壊をよく再現できている (第 6 図)。与える破壊開始時刻が自発的な破壊のものであるので、破壊開始時刻を与えた動学的破壊は元の自発的な破壊と等価なモデルであり、破壊過程を再現できたことで、コードが正しく動いていることが確認された。

次に、S 波速度の 0.8 倍の一定速度で破壊を伝播させる。このとき得られた静摩擦応力の分布は、自発的な破壊の破壊時刻を入力とした場合と比べて、きわめて不均質なものである (第 7 図)。自発的な破壊に比べて破壊伝播速度が遅いため、破壊が広がるほど、破壊時刻までの剪断応力が大きく求められるためである。第 7 図で示した静摩擦応力分布を破壊条件として自発的な破壊を計算すると、自発的な破壊の破壊時刻を入力とした場合ほどではないが、破壊時刻、すべり分布とも、破壊時刻を既知として計算した動学的破壊をよく再現できている (第 8 図)、第 7 図に示す静摩擦応力分布が、S 波速度の 0.8 倍の一定速度で破壊が伝播するために必要であることが示された。

更に、S波速度の1.2倍の一定速度で破壊を伝播させる。この場合、断層面の広い範囲で、静摩擦応力は動摩擦応力(70 MPa)と同程度の値となる(第9図)。自発的な破壊に比べて破壊が速く進むため、剪断応力が増える間もなく、破壊時刻を迎えるためである。第9図で示した静摩擦応力分布を破壊条件として自発的な破壊を計算すると、初期クラックの上下で、一斉に破壊する領域が生じる(第10図)。この方向に伝播する破壊はmode IIIにあたり、S波速度を超えて自発的に破壊が伝播することはできない。このように、物理的に不可能な破壊伝播を仮定した場合には、その破壊伝播を自発的な破壊で再現できないので、破壊時刻の仮定には注意が必要である。

以上より、各グリッドにおける破壊時刻を既知として得られた静摩擦応力を破壊条件として動力学的断層モデルに与え、自発的な破壊を計算した場合、仮定した破壊過程(破壊時刻およびすべり分布)が再現されることが確認された。これにより、破壊時刻を既知とした動力学的震源モデルが、静摩擦応力を既知とした自発的な破壊と物理的にほぼ等価であることが示された。ただし、破壊時刻を仮定する際には、物理法則に反しないよう、注意する必要がある。

### 3.2 特性化震源モデル

背景領域と2つのアスペリティからなる特性化震源モデルについて、破壊時刻を既知とした動力学的破壊過程および最大地動速度分布を計算し、自発的な破壊過程と比較した。

断層モデルを第11図に、計算に用いたパラメータを第2表、速度構造モデルを第3表に示す。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な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となっている。

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12図に示す。初期クラックを含む第1のアスペリティ内の破壊伝播速度は約3.030 km/s、第2のアスペリティ内の破壊伝播速度は平均で約3.021 km/sで、それぞれS波速度の0.866倍、0.863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4.255 km/sに達し、S波速度の1.22倍となっている。また、背景領域の破壊伝播速度は約5.128 km/sで、S波速度の1.47倍で伝播している。断層面上の最大すべり量は2.46 m、地表面での最大すべり量は2.02 mとなった。この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13図に、地表面での速度波形と最大地動速度分布を第14~16図に示す。破壊伝播速度がS波速度を超えた場合、断層から斜めに延びる領域

にエネルギーが集中し、速度振幅が遠くまで減衰しないことが知られており(例えば、Bernard and Baumont, 2005; Andrews, 2010)、主として断層平行成分の最大地動速度分布(第14b図)にその影響が見られる。ただし、破壊伝播速度がS波速度を超えているのは、ほとんどが背景領域であり、応力降下量が0 MPaであるため、応力降下量が一樣で、断層全体で破壊伝播速度がS波速度を超えているBernard and Baumont (2005)やAndrews (2010)で示されているほど顕著に振幅が大きくなっているわけではない。

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17図)。断層面上の最大すべり量は2.36 m、地表面での最大すべり量は1.81 mとなり、自発的な破壊(第12図)よりやや小さい。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前方にかけて、仮定した値よりも大きく求められた(第18図)。特に、アスペリティの先方に位置する背景領域では、強度をきわめて小さく(0.01 MPa)仮定したにもかかわらず、アスペリティ内部よりも大きな値となる領域もあった。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。

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19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20~22図に示す。最大地動速度は、断層近傍で大きく、断層からの距離に従って急速に減衰する。また、断層直交成分は破壊伝播方向で大きくなる、といった、標準的なdirectivity効果が見られる。自発的な破壊(第14~16図)と比較すると、特に断層極近傍において、断層直交方向成分は小さく、断層平行方向成分は大きく求められた。鉛直成分の大きさには顕著な差はないが、自発的な破壊では見られない走向方向0~5 kmに沿った領域でのピークが現れる点が異なる。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、自発的な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。ここに、S波速度を超える破壊伝播の影響を見ることができる。これは、断層近傍の特定地点での地震動を予測する上では、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。

第18図に示した静摩擦応力分布を破壊条件として自発的な破壊を計算すると、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、2つめ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23図)。この領域は、1つめのアスペリティの前方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、1つめ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。ただし、断層面上のすべり、すべり速度、剪断応力の時刻歴(第24図)を見ると、この領域の応力降下量は0 MPaであるため、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ことがわかる。そのため、地表面での速度波形と最大地動速度分布(第25~27図)は、S波速度の0.72倍の速度で破壊が伝播する場合(第20~22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18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。

第18b図から、アスペリティ前方の背景領域では、応力降下量は0 MPaだが、高い強度を持つことになり、やや不自然にも思える。しかし、第18a図を見ると、高い強度を持つ背景領域の静摩擦応力は、アスペリティの値と同等か、それ以下であり、アスペリティ周辺では、それ以外の領域よりはやや強く固着していると解釈すれば、非現実的な仮定ではない。また、アスペリティ内や背景領域との境界における破壊伝播速度の変化がないことで、地震動の高周波数成分が小さくなっている可能性は否定できない。しかし、背景領域の応力降下量は0 MPaで、地震動にはほとんど寄与しないこと、また、特性化震源モデルを用いた地震動予測では、本稿で用いた手法と同様の差分法で低周波数領域を、統計的グリーン関数法(例えば、釜江ほか, 1991; 壇・佐藤, 1998)で高周波数領域を計算し、ハイブリッドする手法が主に用いられているため、破壊時刻を既知とした動学的震源モデルを用いることによる弊害は小さいと考えられる。

地震動予測に破壊時刻を既知とした動学的震源モデルを用いる際に、破壊伝播速度をどのように設定するのかは、重要な問題である。Geller (1976)による経験式では、平均破壊伝播速度はS波速度の0.72倍とされ、地震調査研究推進本部(2016)でもこの値が用いられている。また、Somerville *et al.* (1999)で得られた内陸地震の破壊伝播速度は平均で2.7 km/sであり、地震発生層のS波速度を3.4 km/sとすると、その約0.8倍である(片岡ほか, 2003)。破壊伝播速度の設定においては、これらの値が第1選択肢となるであろう。

一方、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1通りではなく、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。現実には2002年 Denali 地震などでS波速度を超える破壊伝播が示唆されていることを考慮すれば、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ろう。破壊時刻を既知とした動学的震源モデルは、必ずしも破壊伝播速度を一定にする必要はなく、場所によって変化させることも可能であるので、地震動のばらつきを評価する上でも有効なモデルとなっている。

#### 4. まとめ

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。

均質な断層モデルにおいて、破壊時刻を破壊条件として動学的破壊を計算し、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。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。ただし、S波速度を超えて自発的に破壊が伝播することはできない地点にまで、S波速度を超えた破壊時刻を仮定するなど、物理的に不可能な破壊伝播を仮定しないように、注意が必要である。

特性化震源モデルを用いて、破壊伝播速度がS波速度を超える場合と超えない場合の地表地震動の特徴が、Bernard and Baumont (2005) や Andrews (2010) などの既往研究と矛盾しないことを確認した。ただし、特性化震源モデルを用いた場合に破壊伝播速度がS波速度を超える領域は、ほとんどが背景領域で、応力降下量が0 MPaであるため、S波速度を超える破壊伝播の影響は限定的であった。しかし、断層近傍で最大地動速度のピークがあらわれる位置が異なるため、破壊伝播速度の設定が特定地点の地震動予測に与える影響は無視できない。現実の地震でS波速度を超える破壊伝播速度はまれにしか観測されないことを考慮すると、破壊時刻を既知とすることで、破壊伝播速度をS波速度以下に抑えたモデル化が必要である。また、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。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。

以上のことから、特性化震源モデルに基づく動力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、現実には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有効であると考えられる。

**謝辞** 本研究は、平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費（新規規制基準を踏まえた震源極近傍の地震動評価の高度化）事業の一部を、株式会社大崎総合研究所から受託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 4.5: 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.
- Andrews, D.J. (2010) Ground motion hazard from supershear rupture. *Tectonophysics*, 439, 216-221.
- 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.
- Baumann, C. and Dalguer, L.A. (2014) Evaluating the compatibility of dynamic rupture -based synthetic ground motion with empirical ground-motion prediction equation. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 104, 634-652, doi:10.1785/0120130077.
- Bernard, P. and Baumont, D. (2005) Shear Mach wave characterization for kinematic fault rupture models with constant supershear rupture velocity. *Geophys. J. Int.*, 162, 431-447.
- 壇 一男・佐藤利明 (1998) 断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測. 日本建築学会構造系論文集, 509 49-60.
- 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関係を拘束条件とした動力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.
- 釜江克宏・入倉孝次郎・福地保長 (1991) 地震のスケールリング則に基づいた大地震時の強震動予測: 統計的波形合成法による予測. 日本建築学会構造系論文集, 430, 1-9.
- Kase, Y. and Kuge, K. (2001) Rupture propagation beyond fault discontinuities: Significance of fault strike and location. *Geophys. J. Int.*, 147, 330-342.
- 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.
- 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. and Smith, W.H.F. (1998) New, improved version of Generic Mapping Tools released. *Eos Trans. AGU*, 79, 579.
- (受付：2016年8月7日，受理：2016年9月28日)

第1表. SCEC spontaneous rupture code verification project TPV4のパラメータ.  
Table 1. Simulation parameters for TPV4 of SCEC spontaneous rupture code verification project.

Initial shear stress in the along-strike-direction within the initial crack	81.6 MPa
Initial shear stress in the along-strike-direction outside of the initial crack	70.0 MPa
Initial shear stress in the along-dip-direction	0 MPa
Initial normal stress	120.0 MPa
Static coefficient of friction	0.677
Dynamic coefficient of friction	0.525
Slip-weakening critical distance	0.40 m
P wave velocity	6000 m/s
S wave velocity	3464 m/s
Density	2670 kg/m <sup>3</sup>
Grid interval of space	0.1 km
Grid interval of time	0.01 s

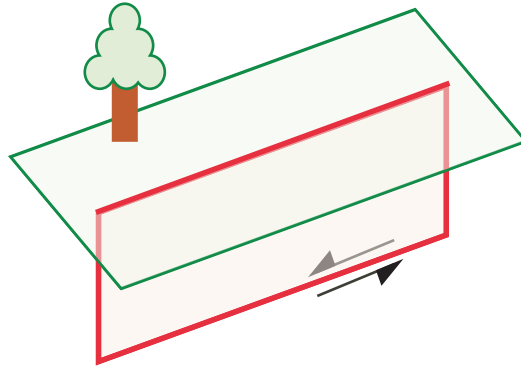
第2表. 背景領域と2つのアスペリティから成るモデルのパラメータ.  
Table 2. Simulation parameters for a model composed of a background region and two asperities.

	Initial crack	Asperities	Background region
Initial shear stress in the along-strike-direction	73.5 MPa	73.5 MPa	62.5 MPa
Initial shear stress in the along-dip-direction	0 MPa	0 MPa	0 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

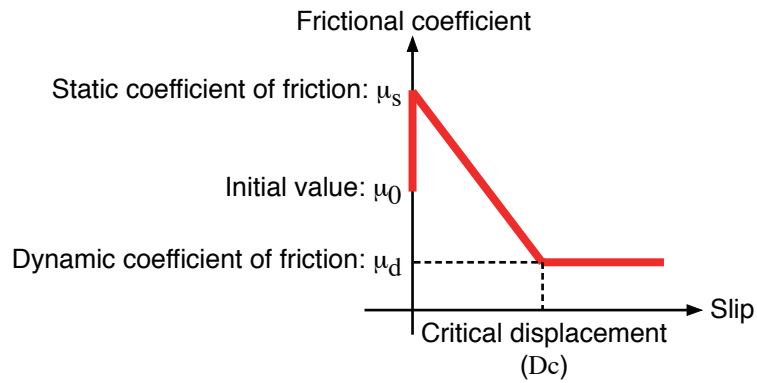
第3表. 背景領域と2つのアスペリティから成るモデルの動力的破壊の計算に使用される速度構造モデル.

Table 3. Velocity structure for a model composed of a background region and two asperities used for dynamic rupture simulations.

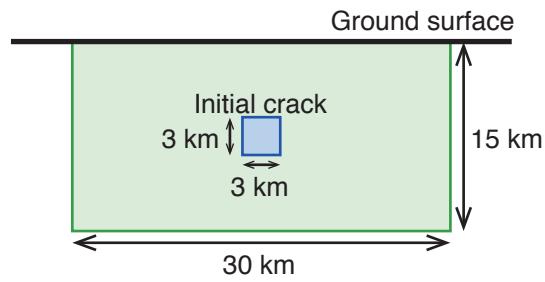
Depth [km]	P-wave velocity [m/s]	S-wave velocity [m/s]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]
0.0	2100	680	2000
0.6	2700	1240	2200
1.2	3500	1810	2300
1.8	4200	2370	2500
2.4	5200	2940	2600
3.0	6000	3500	2700



第1図. 断層モデル. 半無限均質弾性体中に鉛直な左横ずれ断層が1枚置かれている.  
Fig. 1. Fault model. A vertical left-lateral strike-slip fault is set in a homogeneous elastic half-space.

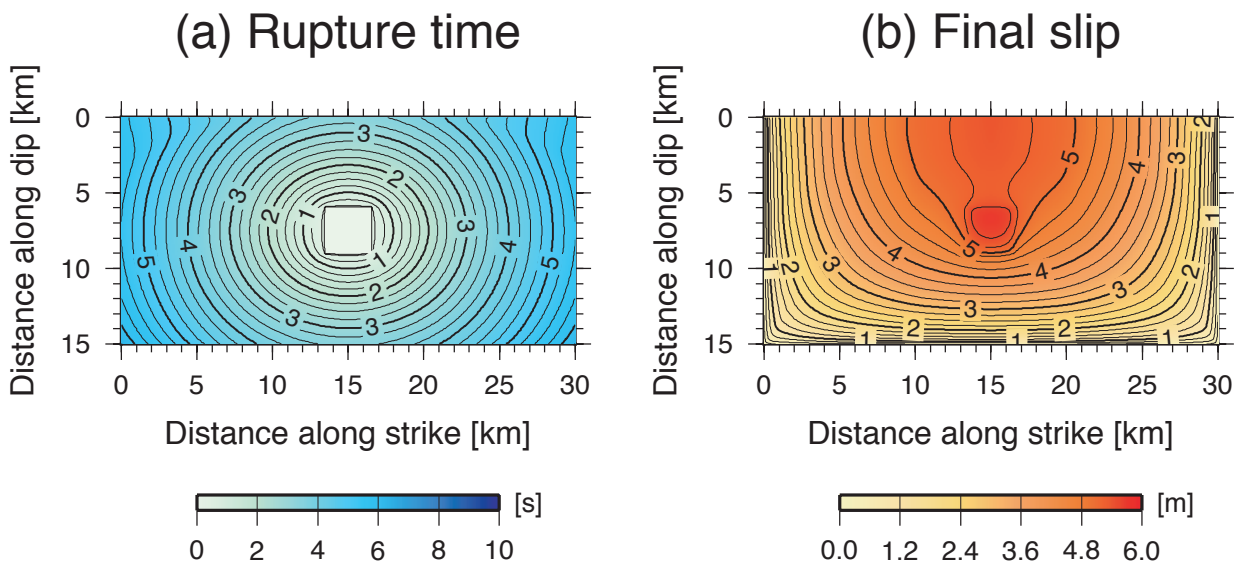


第2図. すべり弱化的摩擦構成則.  
Fig. 2. Slip-weakening friction law.



第3図. SCEC spontaneous rupture code verification project TPV4の断層面モデル. モデルパラメータを第1表に示す.

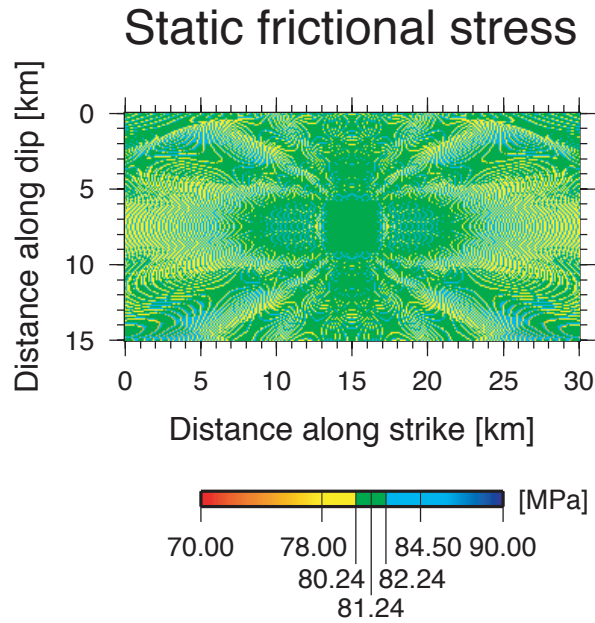
Fig. 3. Fault plane model of TPV4 of SCEC spontaneous rupture code verification project. Model parameters are shown in Table 1.



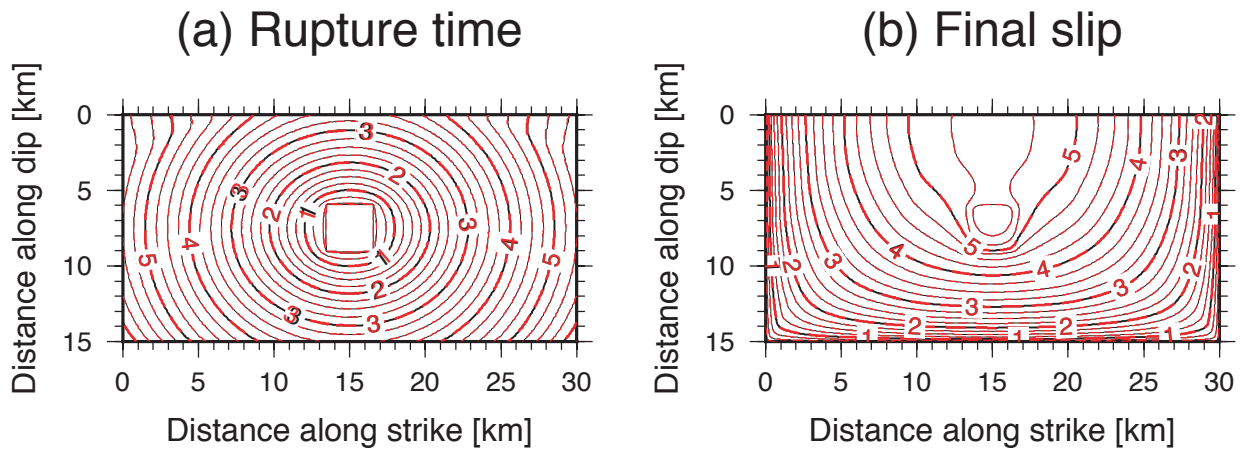
第4図. SCEC spontaneous rupture code verification project TPV4の破壊時刻 (a) とすべり量 (b) の分布.

Fig. 4. Rupture time (a) and slip (b) distributions of TPV4 of SCEC spontaneous rupture code verification project.



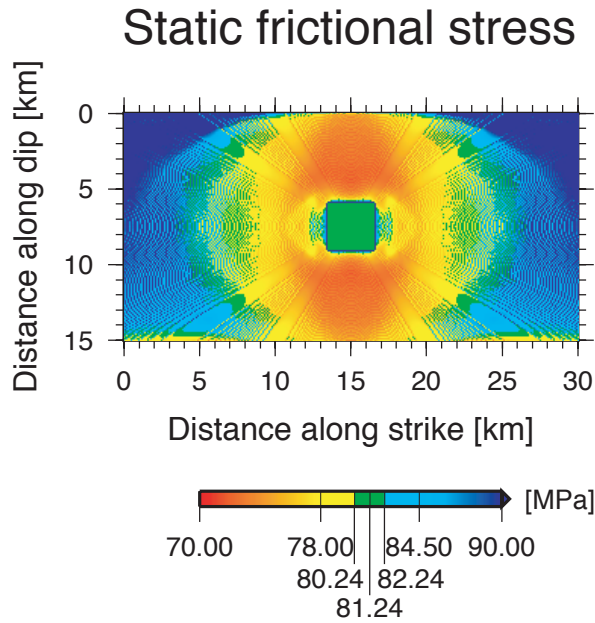


第 5 図. TPV4 の破壊時刻を既知として計算して得られた静摩擦応力分布.  
 Fig. 5. Static frictional stress distribution of a dynamic rupture given the rupture time of TPV4.

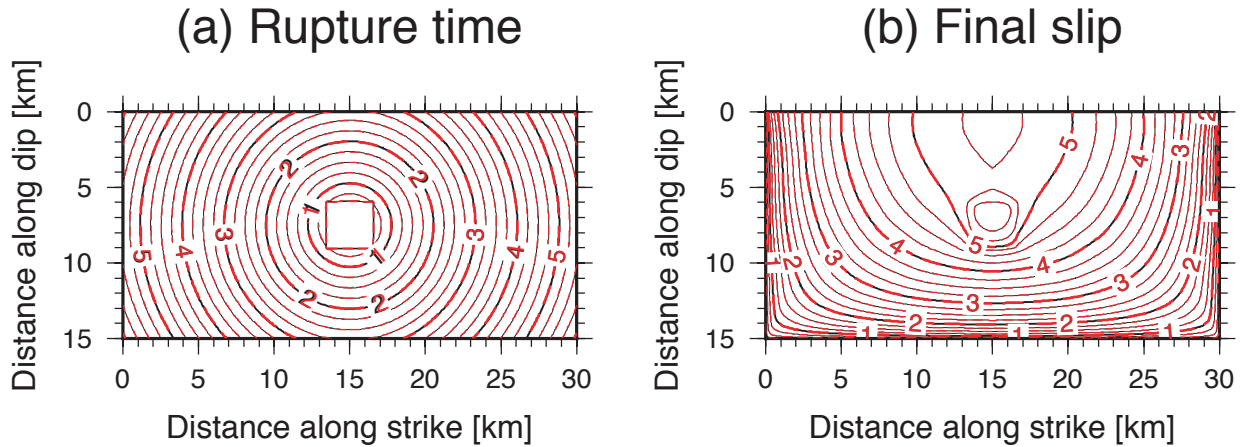


第 6 図. 第 5 図で示した静摩擦応力分布を破壊条件として計算して得られた自発的破壊 (赤点線) の破壊時刻 (a) とすべり (b) の分布. 黒線は, TPV4 の破壊時刻を既知として計算した動学的破壊の破壊時刻とすべり.

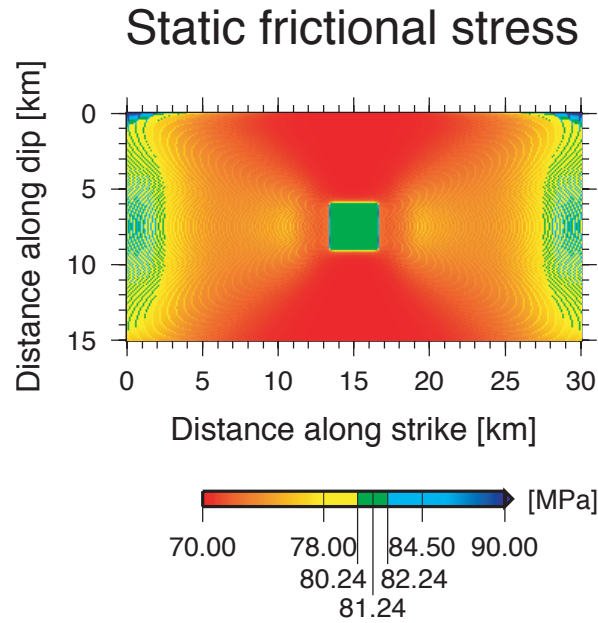
Fig. 6. Red dashed lines: Rupture time (a) and slip (b) distributions of a spontaneous rupture given the static frictional stress distribution shown in Fig. 5. Black lines: Rupture time and slip distributions of a dynamic rupture given the rupture time of TPV4.



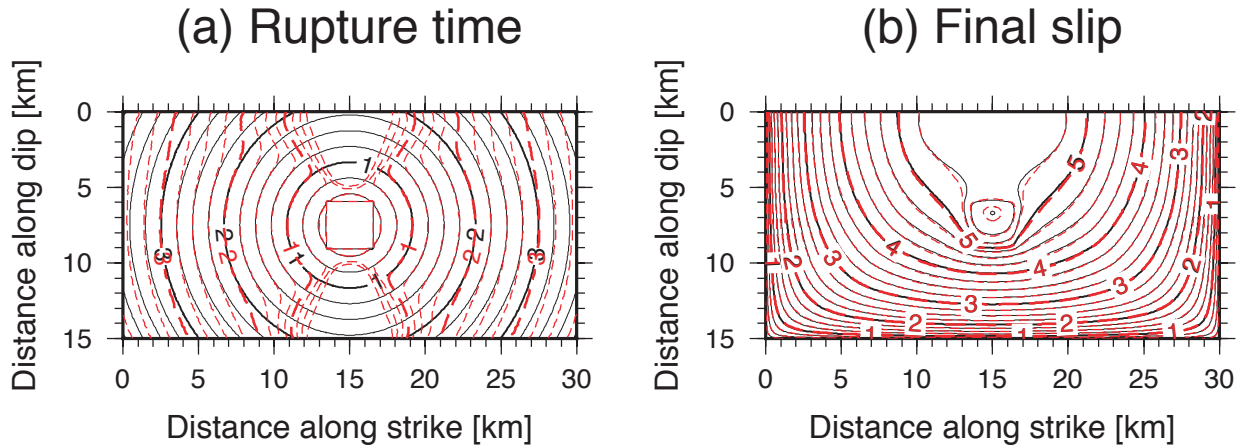
第 7 図. S 波速度の 0.8 倍の一定速度で破壊が伝播する場合の静摩擦応力分布.  
 Fig. 7. Static frictional stress distribution of a dynamic rupture propagating at a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.8 V_s$ ).



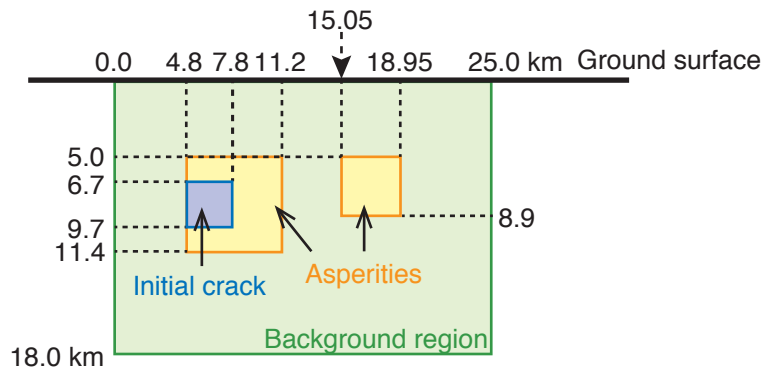
第 8 図. 第 7 図で示した静摩擦応力分布を破壊条件として計算して得られた自発的破壊 (赤点線) の破壊時刻 (a) とすべり (b) の分布. 黒線は, S 波速度の 0.8 倍の一定速度で伝播する破壊の破壊時刻とすべり.  
 Fig. 8. Red dashed lines: Rupture time (a) and slip (b) distributions of the spontaneous rupture given the static frictional stress distribution shown in Fig. 7. Black lines: Rupture time and slip distributions of a subshear rupture ( $V_r=0.8 V_s$ ).



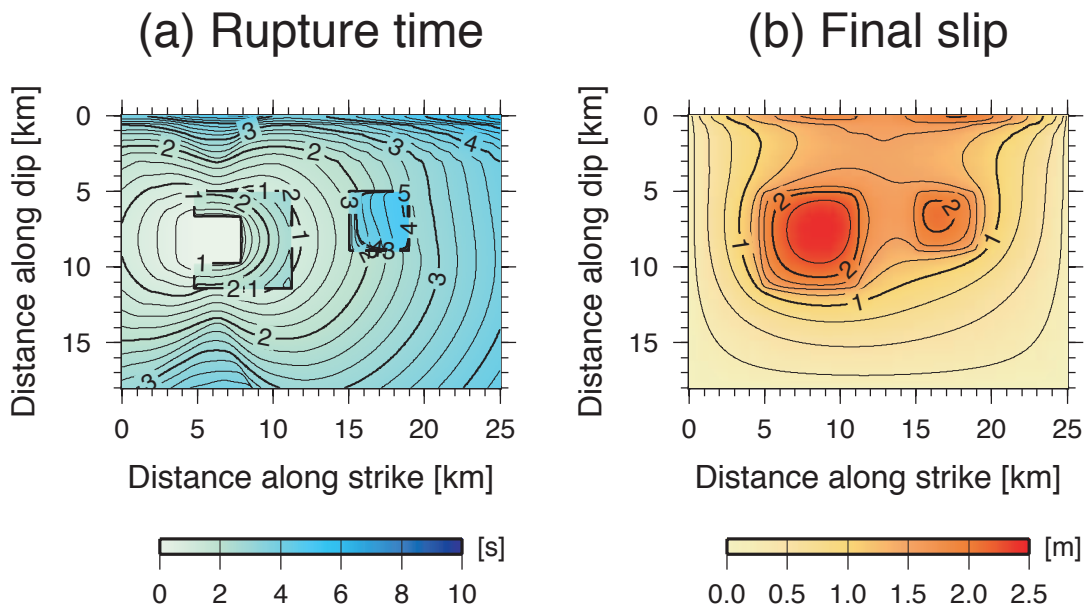
第9図. S波速度の1.2倍の一定速度で破壊が伝播する場合の静摩擦応力分布.  
 Fig. 9. Static frictional stress distribution of a dynamic rupture propagating at a fixed supershear rupture velocity ( $V_r=1.2 V_s$ ).



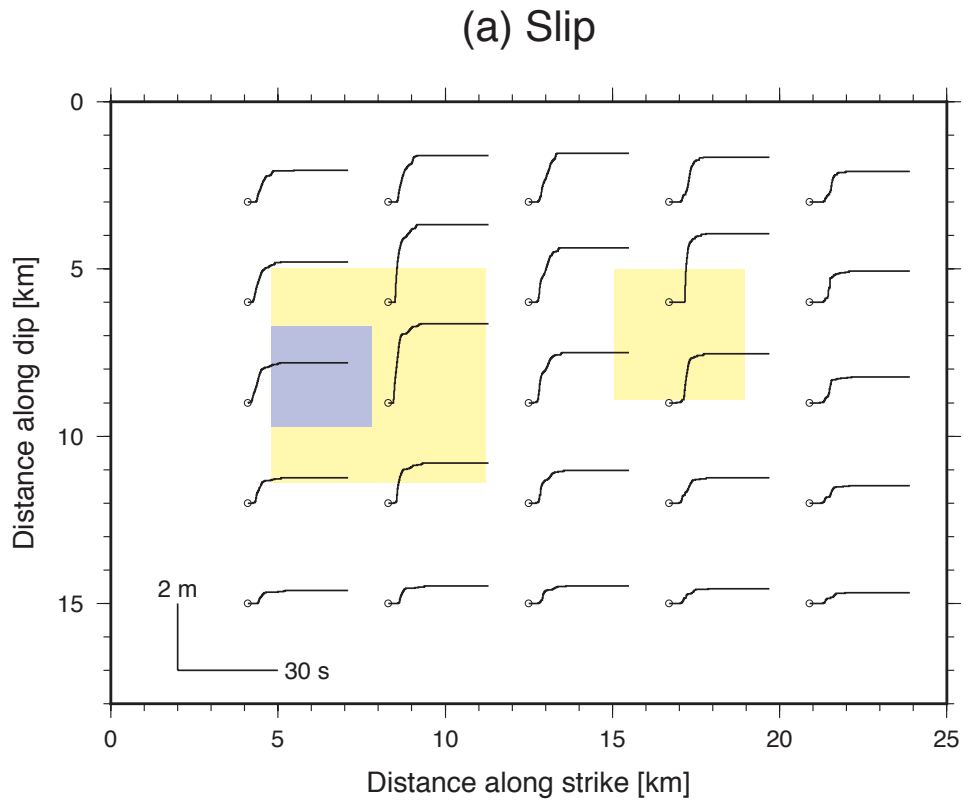
第10図. 第9図で示した静摩擦応力分布を破壊条件として計算して得られた自発的破壊（赤点線）の破壊時刻 (a) とすべり (b) の分布. 黒線は, S波速度の1.2倍の一定速度で伝播する破壊の破壊時刻とすべり.  
 Fig. 10. Red dashed lines: Rupture time (a) and slip (b) distributions of the spontaneous rupture given the static frictional stress distribution shown in Fig. 9. Black lines: Rupture time and slip distributions of a supershear rupture ( $V_r=1.2 V_s$ ).



第 11 図. 背景領域と 2 つのアスペリティから成る断層面モデル. モデルパラメータを第 2 表に示す.  
 Fig. 11. Fault plane model composed of a background region and two asperities. Model parameters are shown in Table 2.

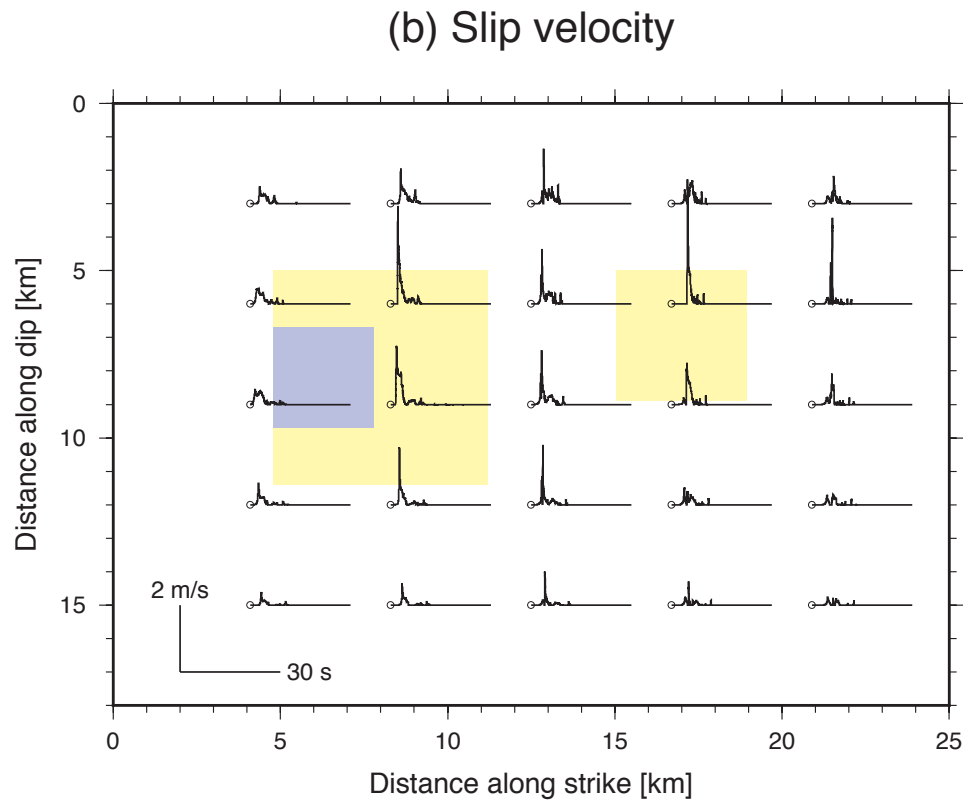


第 12 図. 第 11 図のモデルで自発的に破壊を伝播させたときの破壊時刻 (a) とすべり量 (b) の分布.  
 Fig. 12. Rupture time (a) and slip (b) distributions of a spontaneous rupture of the model shown in Fig. 11.



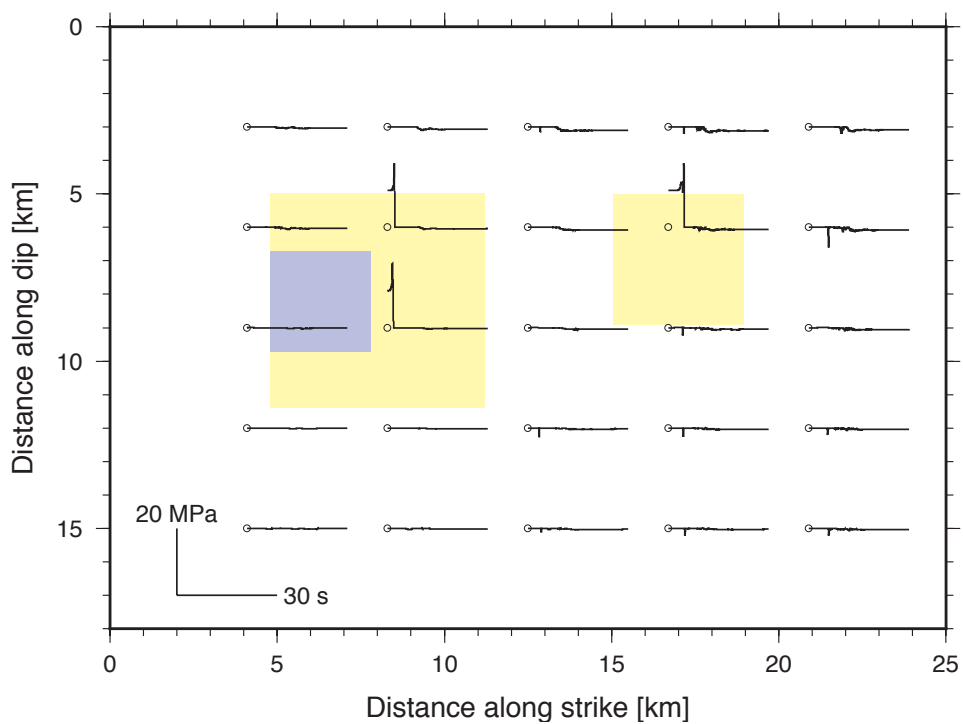
第 13 図. 第 11 図のモデルで自発的に破壊を伝播させたときの断層面上のすべり (a), すべり速度 (b), 剪断応力 (c) の時刻歴. 黄色の領域はアスペリティ, 紫の領域は初期破壊領域を示す.

Fig. 13. Time histories of slip (a), slip velocity (b), and shear stress (c) of a spontaneous rupture of the model shown in Fig. 11. Yellow and purple regions indicate asperities and the initial rupture area, respectively.



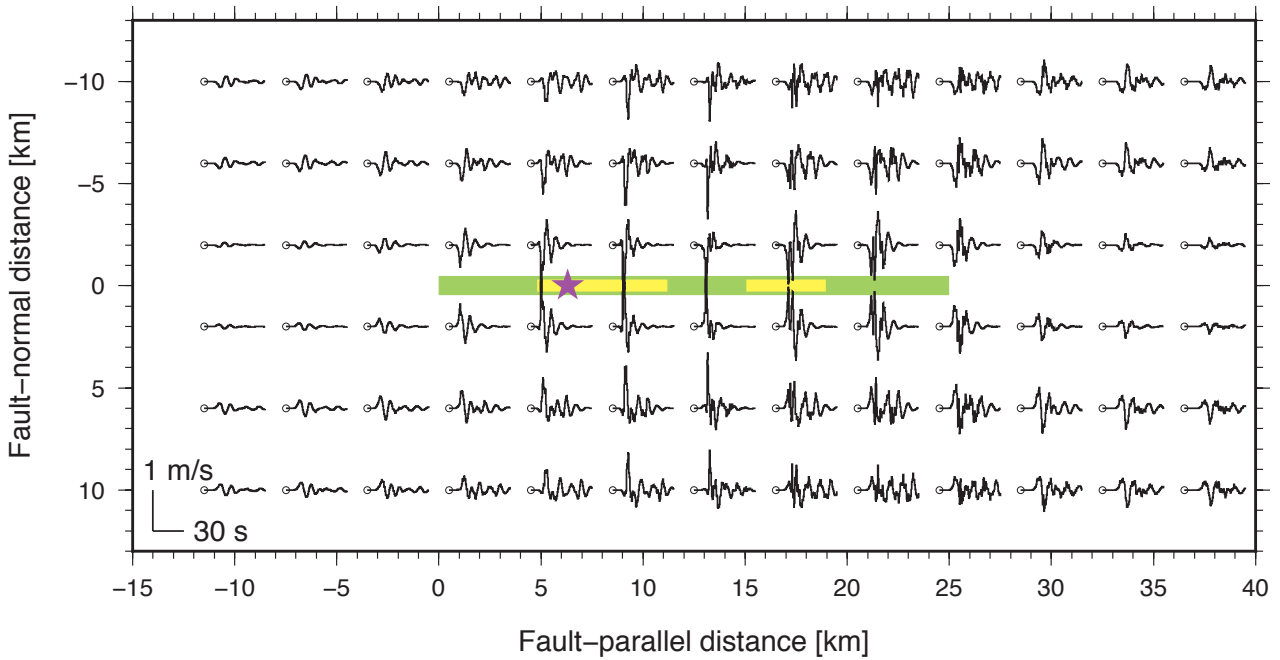
第 13 図. 続き.  
Fig. 13. Continue.

(c) Shear stress

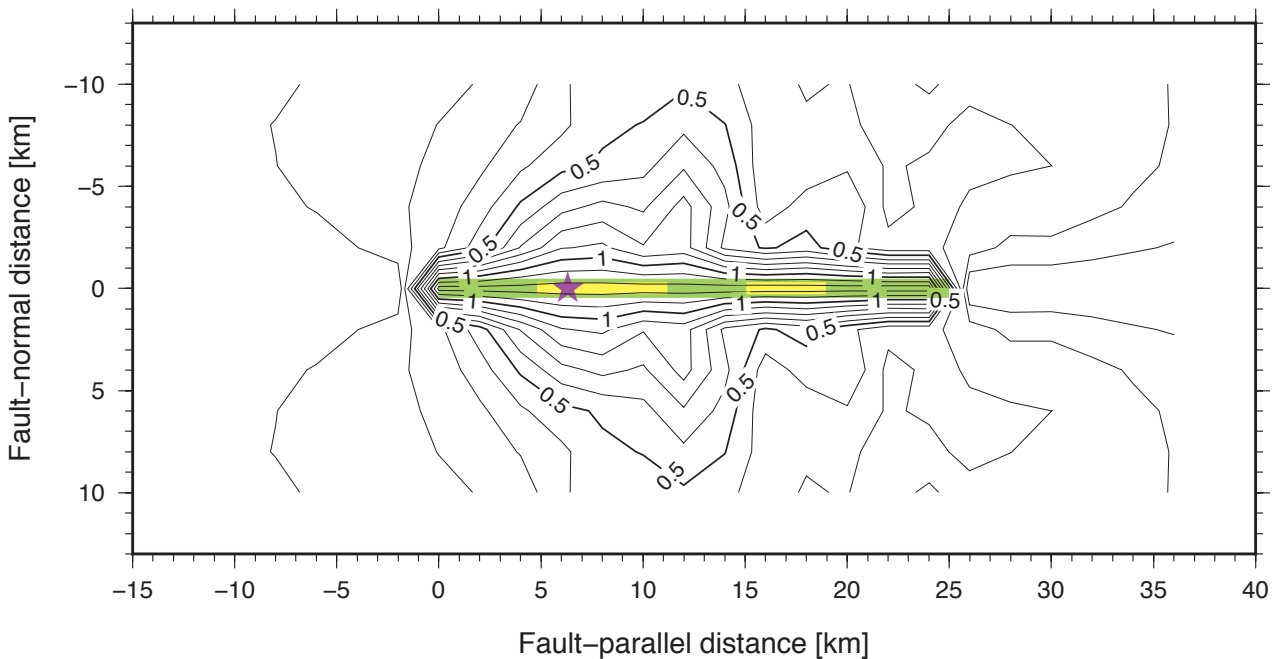


第 13 図. 続き.  
Fig. 13. Continue.

(a) Velocity (parallel)



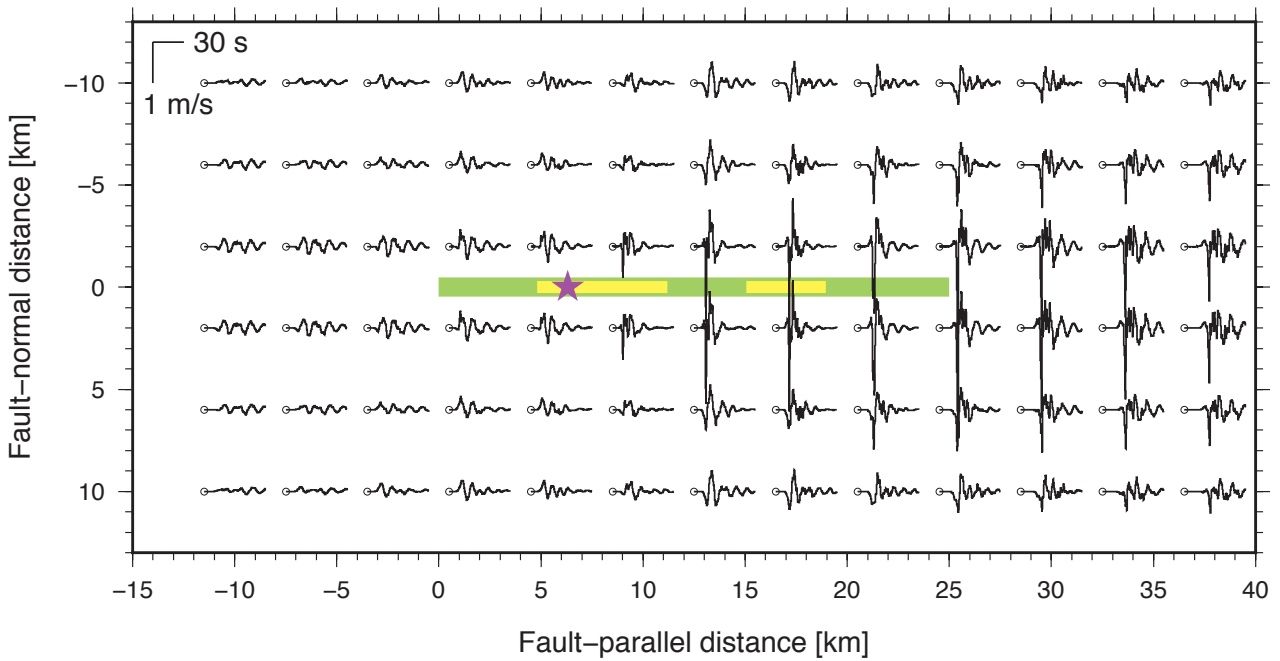
(b) Peak absolute value of velocity (parallel)



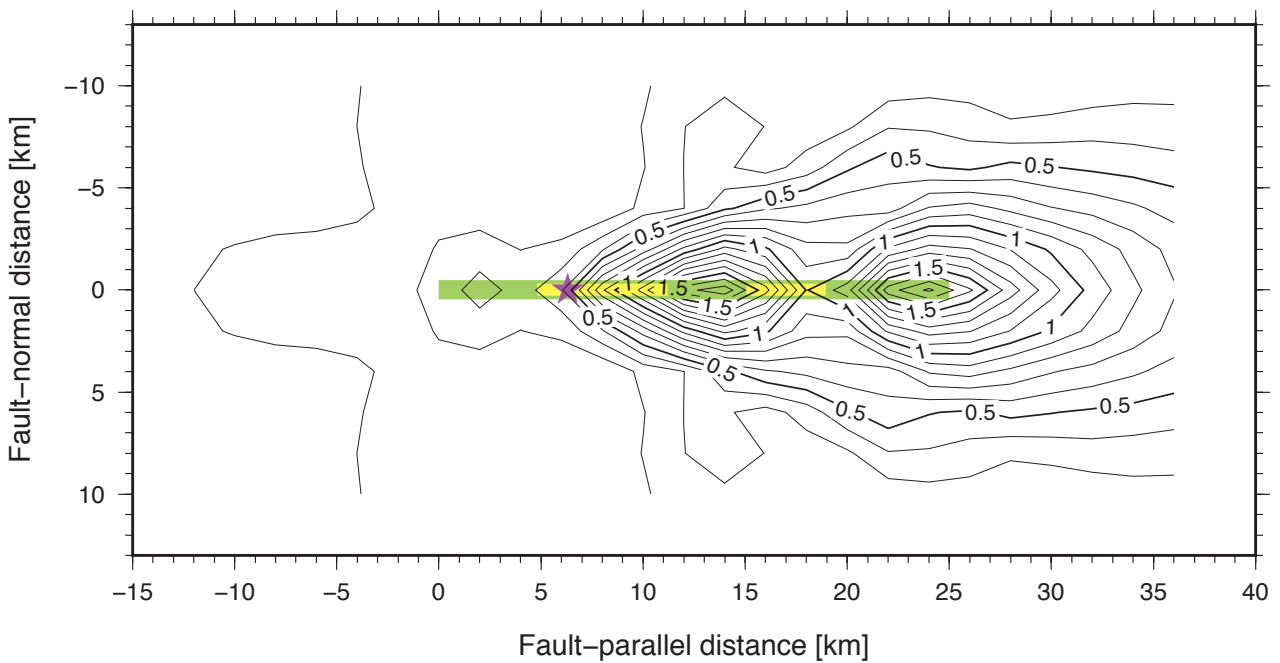
第 14 図. 第 11 図のモデルで自発的に破壊を伝播させたときの地表面での 2 Hz low-pass フィルタをかけた速度波形の断層平行成分 (a) と断層平行成分の最大地動速度分布 (b). 緑線は断層, 黄色線はアスペリティ, 星印は初期破壊領域を示す.

Fig. 14. 2 Hz low-pass filtered time histories of the fault-parallel component of ground velocity for a spontaneous rupture of the model shown in Fig. 11 (a) and distribution of the peak absolute value (b). Green and yellow lines indicate a fault and asperities, respectively. A star indicates the initial rupture area.

(a) Velocity (normal)



(b) Peak absolute value of velocity (normal)

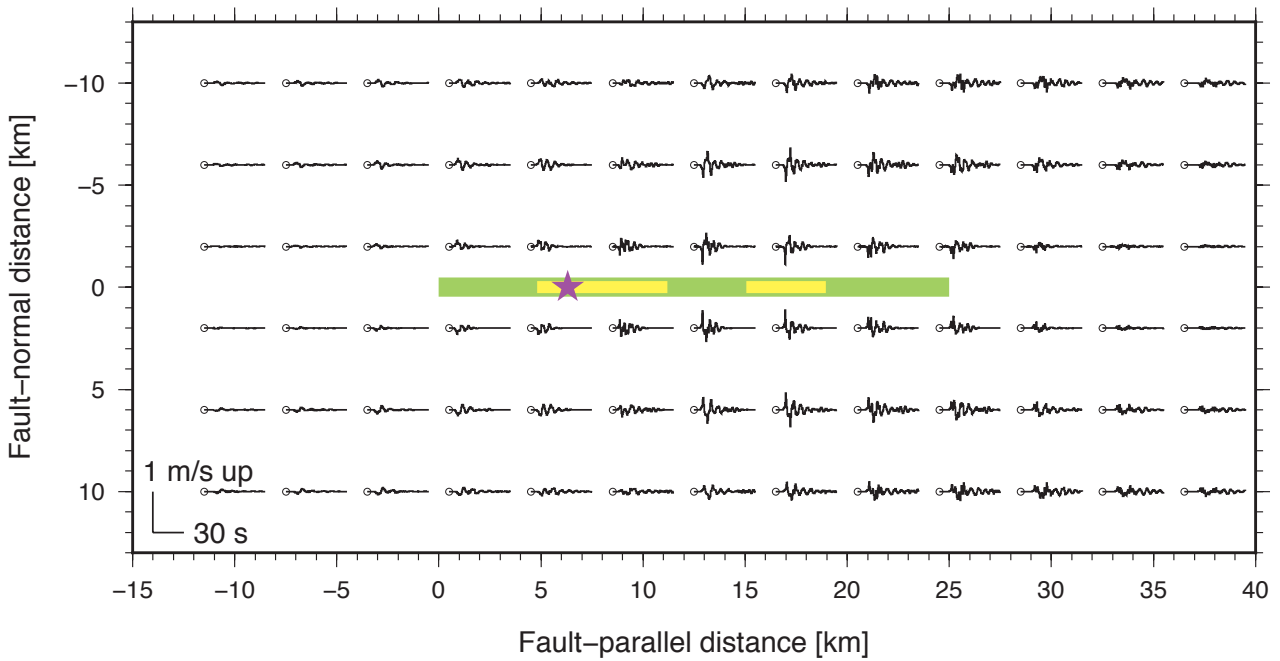


第 15 図. 第 11 図のモデルで自発的に破壊を伝播させたときの地表面での 2 Hz low-pass フィルタをかけた速度波形の断層直交成分 (a) と断層直交成分の最大地動速度分布 (b). 図の詳細は, 第 14 図と同じ.

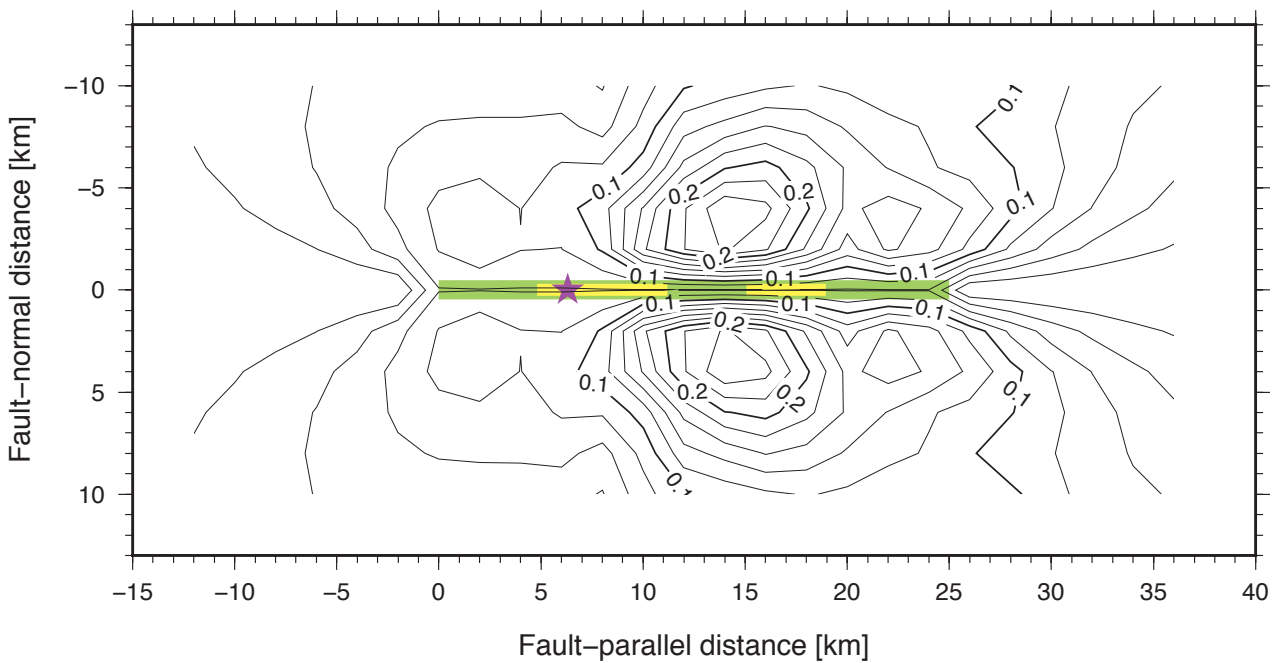
Fig. 15. 2 Hz low-pass filtered time histories of the fault-normal component of ground velocity for a spontaneous rupture of the model shown in Fig. 11 (a) and distribution of the peak absolute value (b). The details are the same as for Fig. 14.



(a) Velocity (vertical)

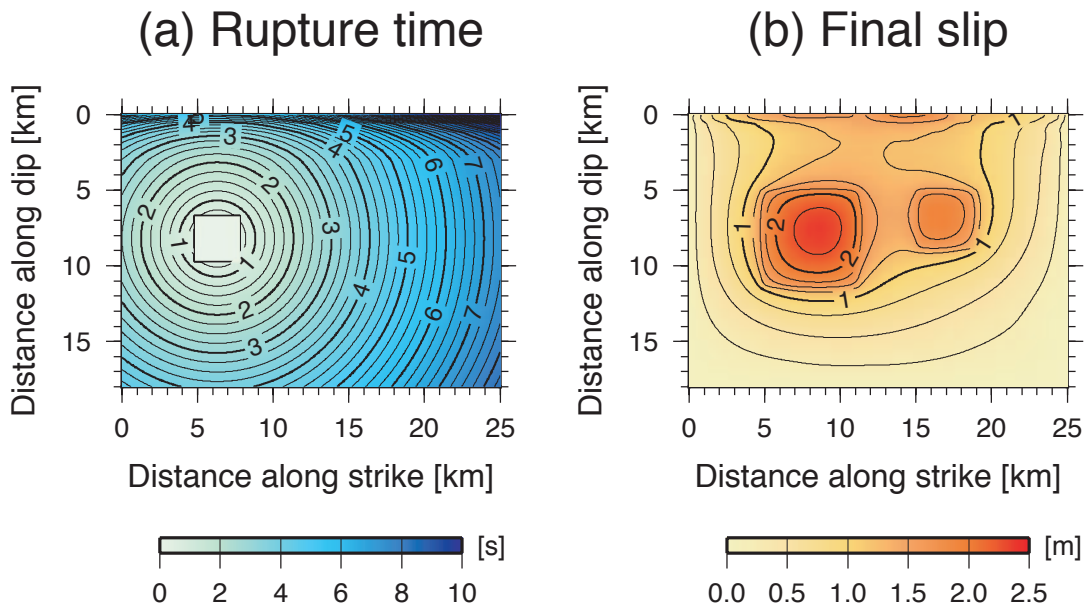


(b) Peak absolute value of velocity (vertical)



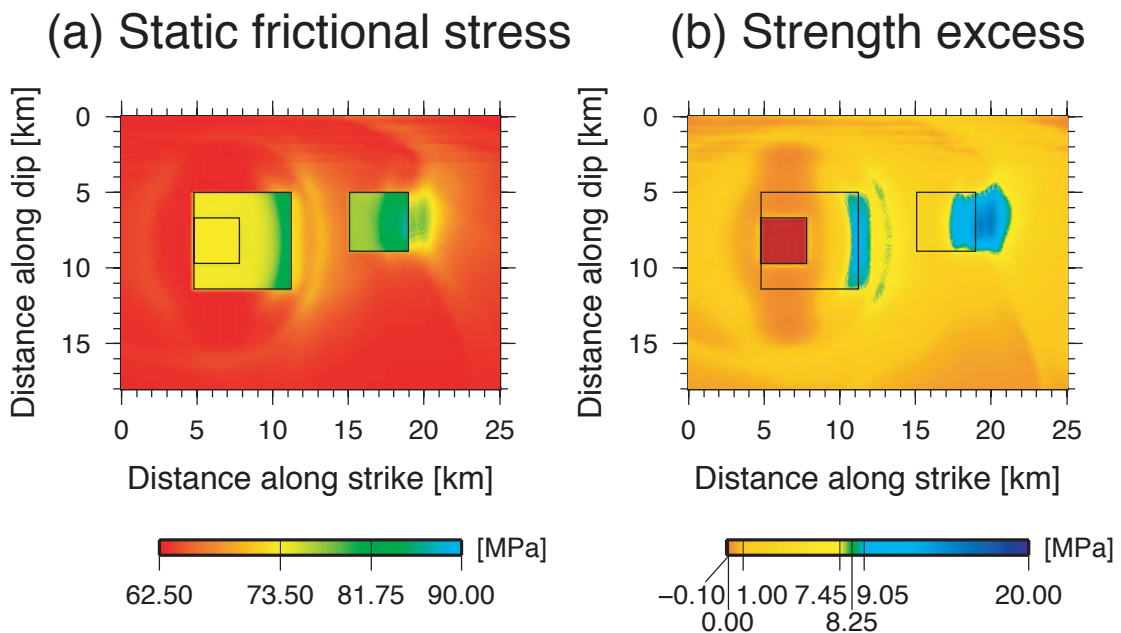
第 16 図. 第 11 図のモデルで自発的に破壊を伝播させたときの地表面での 2 Hz low-pass フィルタをかけた速度波形の鉛直成分 (a) と鉛直成分の最大地動速度分布 (b). 図の詳細は, 第 14 図と同じ.

Fig. 16. 2 Hz low-pass filtered time histories of the vertical component of ground velocity for a spontaneous rupture of the model shown in Fig. 11 (a) and distribution of the peak absolute value (b). The details are the same as for Fig. 14.



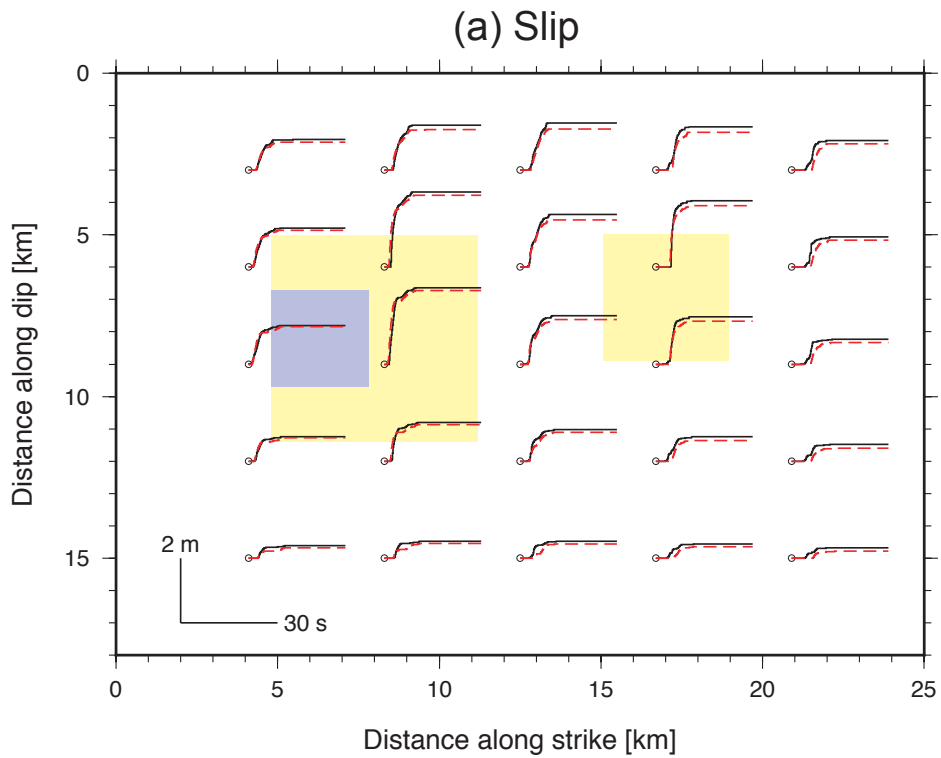
第 17 図. S 波速度の 0.72 倍の一定速度で破壊が伝播する場合の破壊時刻 (a) とその破壊時刻を既知として計算した第 11 図のモデルの動学的破壊によるすべり分布 (b).

Fig. 17. (a) Rupture time assuming a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.72 V_s$ ). (b) Slip distributions of a dynamic rupture of the model shown in Fig. 11 given the rupture time shown in (a).



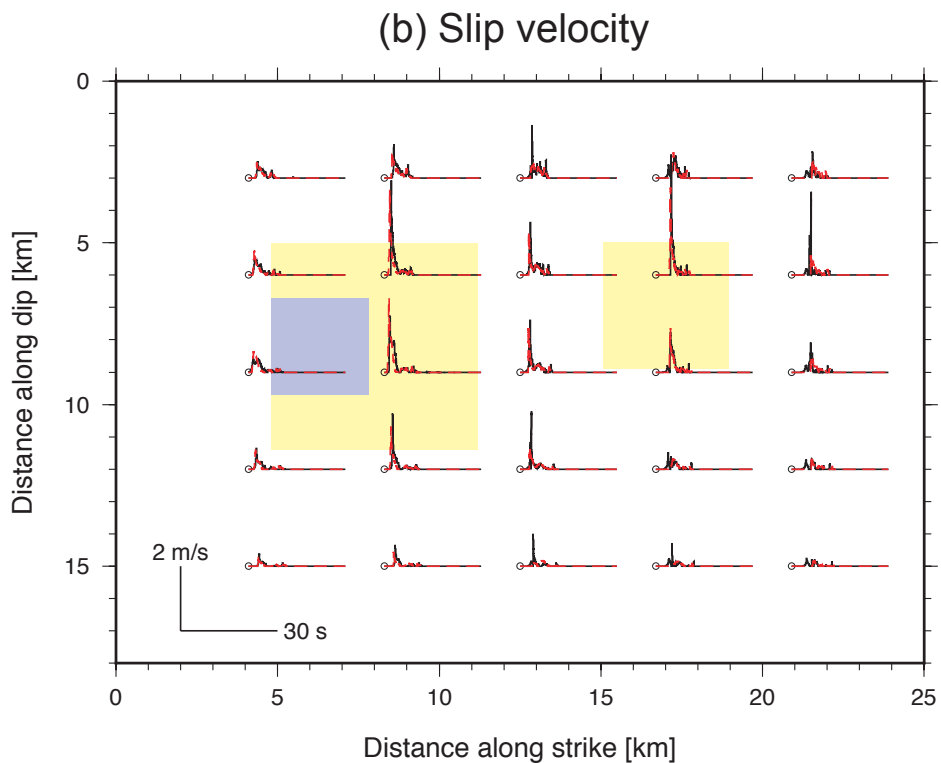
第 18 図. 第 11 図のモデルにおいて S 波速度の 0.72 倍の一定速度で破壊が伝播する場合の静摩擦応力 (a) と強度 (b) の分布.

Fig. 18. Static frictional stress (a) and strength excess (b) distributions of a dynamic rupture of the model shown in Fig. 11 propagating at a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.72 V_s$ ).

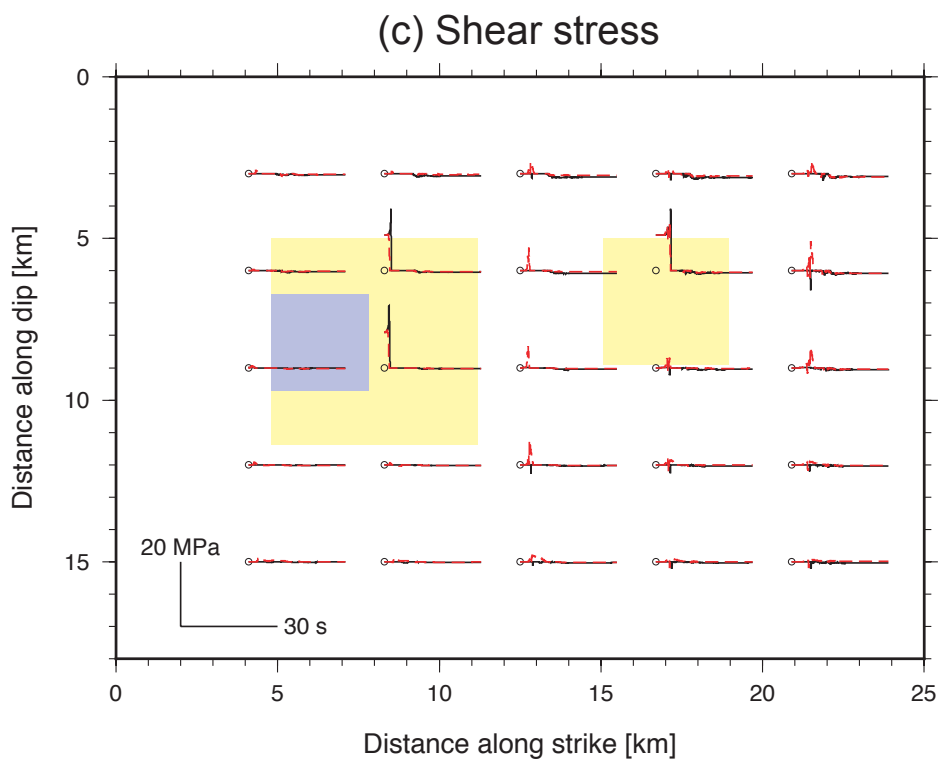


第 19 図. 第 11 図のモデルにおいて S 波速度の 0.72 倍の一定速度で破壊が伝播する場合の断層面上のすべり (a), すべり速度 (b), 剪断応力 (c) の時刻歴 (赤点線). 黒線は, 第 13 図に示す自発的に破壊を伝播させたときの時刻歴. 図の詳細は, 第 13 図と同じ.

Fig. 19. Red dashed lines: Time histories of slip (a), slip velocity (b), and shear stress (c) of a dynamic rupture of the model shown in Fig. 11 propagating at a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.72 V_s$ ). Black lines: Time histories of a spontaneous rupture shown in Fig. 13. The details are the same as for Fig. 13.

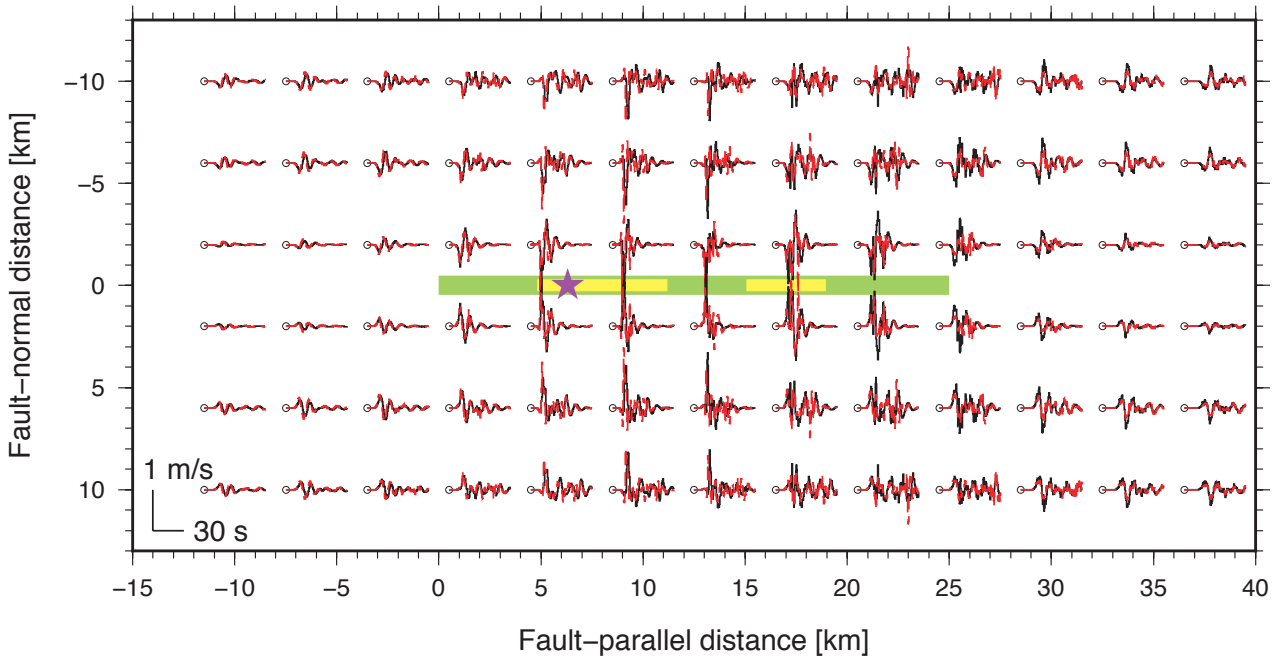


第 19 図. 続き.  
Fig. 19. Continue.

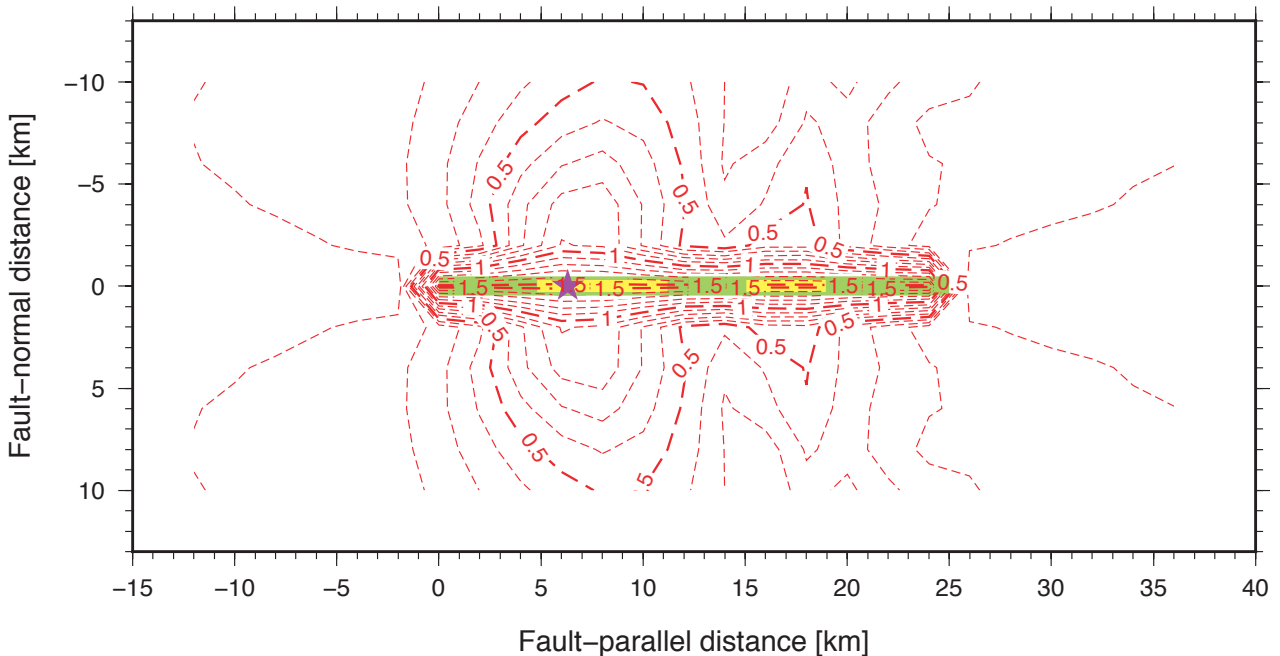


第 19 図. 続き.  
Fig. 19. Continue.

(a) Velocity (parallel)



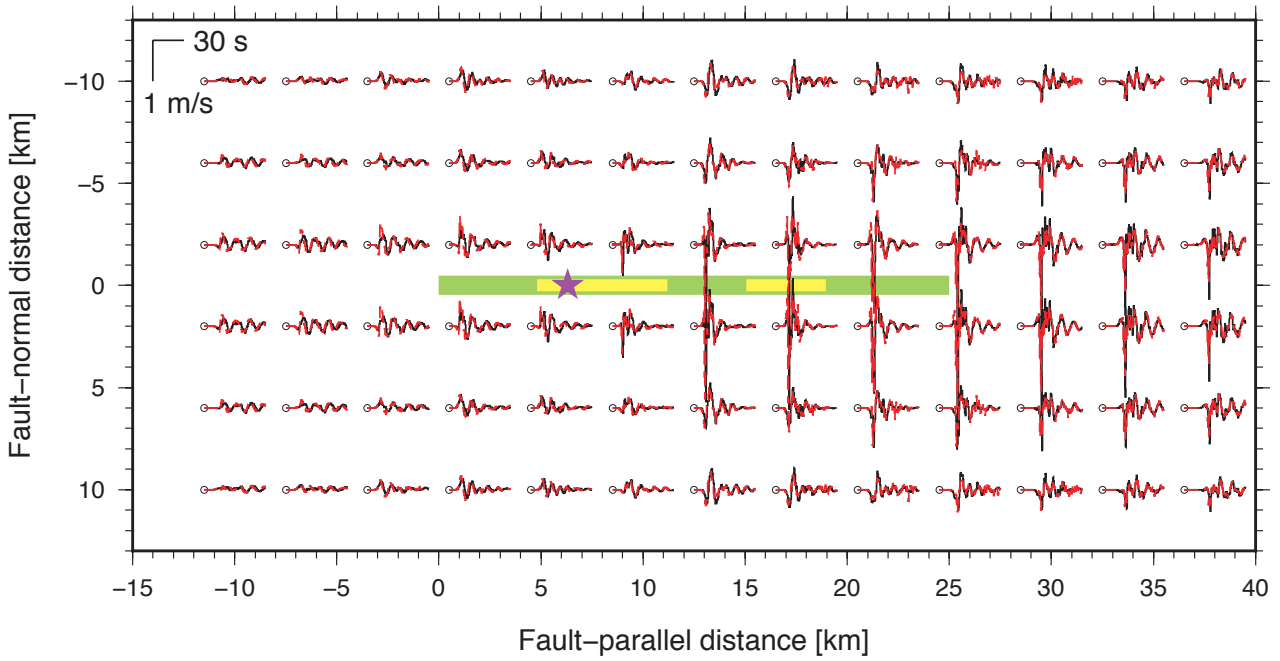
(b) Peak absolute value of velocity (parallel)



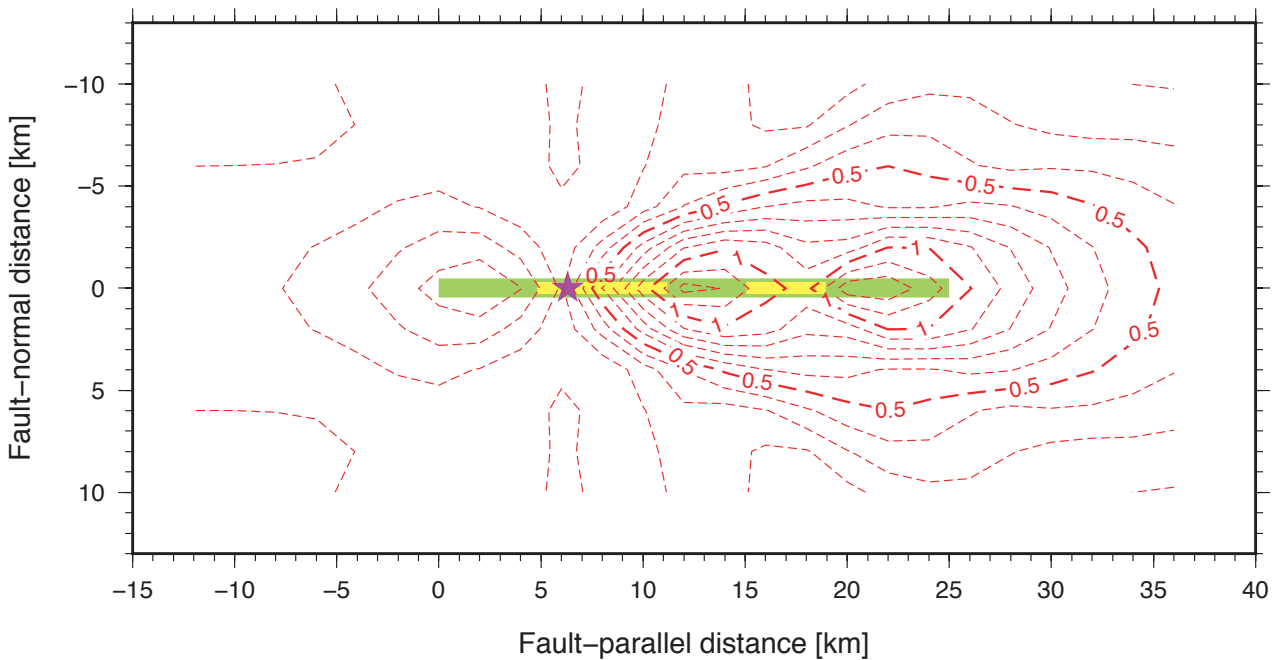
第 20 図. 第 11 図のモデルにおいて S 波速度の 0.72 倍の一定速度で破壊が伝播する場合の地表面での 2 Hz low-pass フィルタをかけた速度波形の断層平行成分 (a) と断層平行成分の最大地動速度分布 (b) (赤点線). 速度波形の黒線は, 第 14 図に示す自発的に破壊を伝播させたときの速度波形. 図の詳細は, 第 14 図と同じ.

Fig. 20. Red dashed lines: 2 Hz low-pass filtered time histories of the fault-parallel component of ground velocity for a dynamic rupture of the model shown in Fig. 11 propagating at a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.72 V_s$ ) (a) and distribution of the peak absolute value (b). Black lines: Time histories of the fault-parallel component of ground velocity of a spontaneous rupture shown in Fig. 14. The details are the same as for Fig. 14.

(a) Velocity (normal)



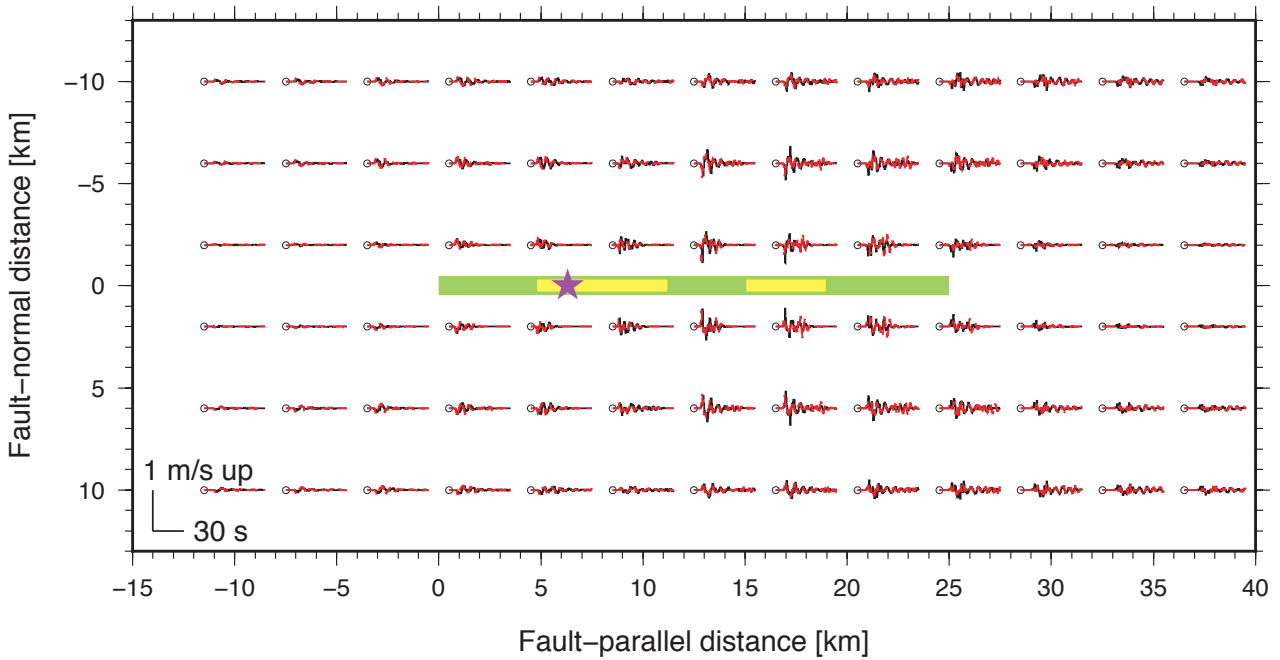
(b) Peak absolute value of velocity (normal)



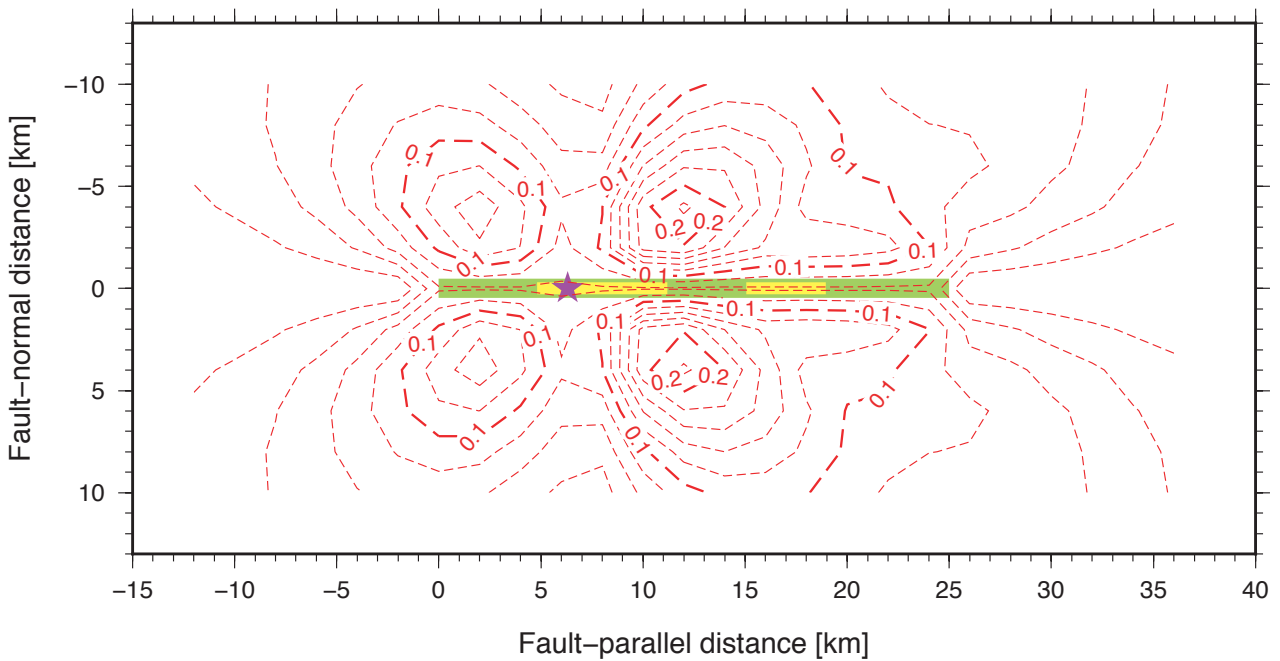
第 21 図. 第 11 図のモデルにおいて S 波速度の 0.72 倍の一定速度で破壊が伝播する場合の地表面での 2 Hz low-pass フィルタをかけた速度波形の断層直交成分 (a) と断層直交成分の最大地動速度分布 (b) (赤点線). 速度波形の黒線は, 第 15 図に示す自発的に破壊を伝播させたときの速度波形. 図の詳細は, 第 14 図と同じ.

Fig. 21. Red dashed lines: 2 Hz low-pass filtered time histories of the fault-normal component of ground velocity for a dynamic rupture of the model shown in Fig. 11 propagating at a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.72 V_s$ ) (a) and distribution of the peak absolute value (b). Black lines: Time histories of the fault-normal component of ground velocity of a spontaneous rupture shown in Fig. 15. The details are the same as for Fig. 14.

(a) Velocity (vertical)

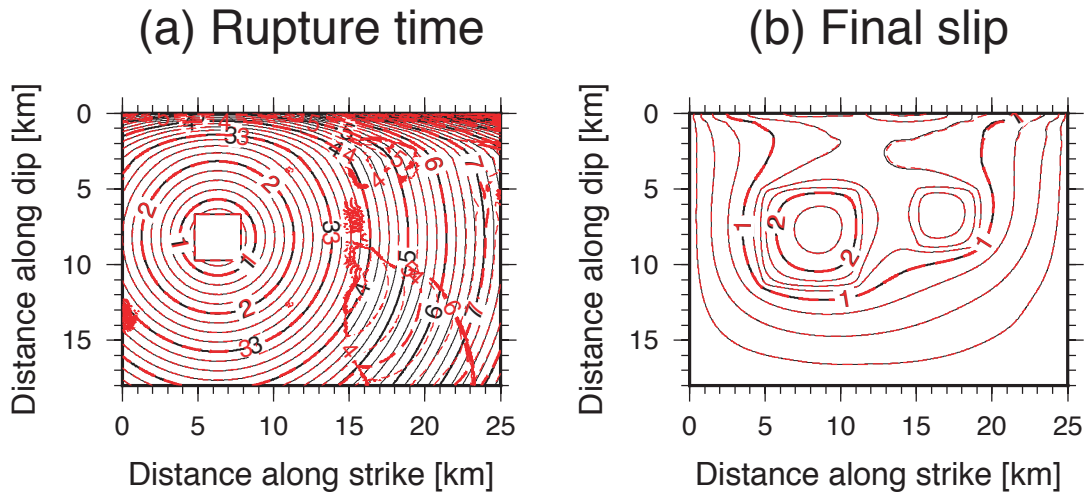


(b) Peak absolute value of velocity (vertical)



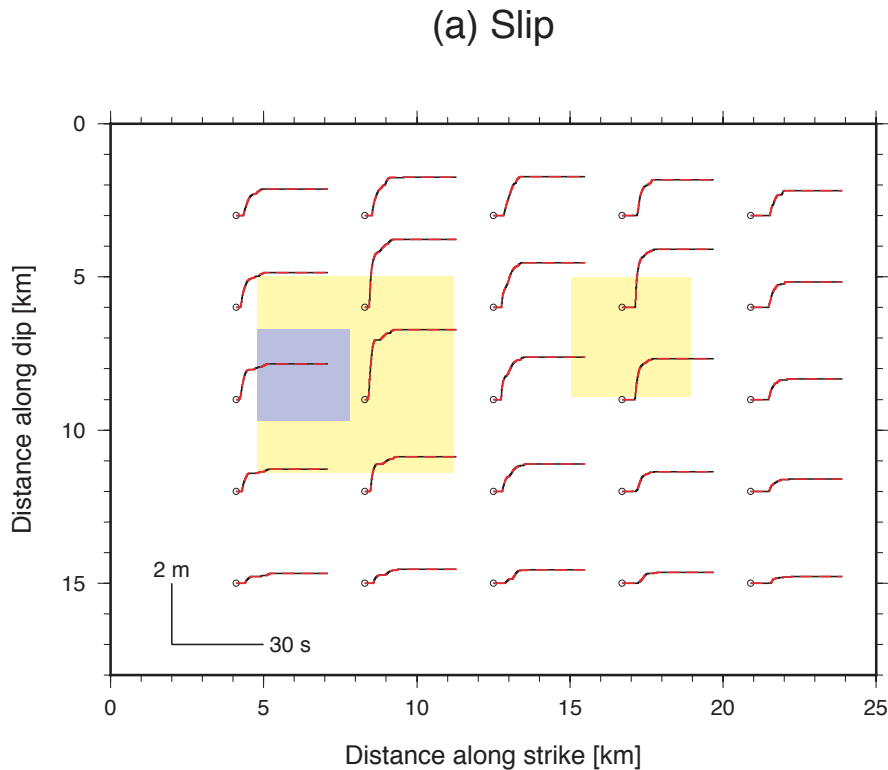
第 22 図. 第 11 図のモデルにおいて S 波速度の 0.72 倍の一定速度で破壊が伝播する場合の地表面での 2 Hz low-pass フィルタをかけた速度波形の鉛直成分 (a) と鉛直成分の最大地動速度分布 (b) (赤点線). 速度波形の黒線は, 第 16 図に示す自発的に破壊を伝播させたときの速度波形. 図の詳細は, 第 14 図と同じ.

Fig. 22. Red dashed lines: 2 Hz low-pass filtered time histories of the vertical component of ground velocity for a dynamic rupture of the model shown in Fig. 11 propagating at a fixed subshear rupture velocity ( $V_r=0.72 V_s$ ) (a) and distribution of the peak absolute value (b). Black lines: Time histories of the vertical component of ground velocity of a spontaneous rupture shown in Fig. 16. The details are the same as for Fig. 14.



第 23 図. 第 18 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自発的破壊の破壊時刻 (a) とすべり (b) の分布 (赤点線). 黒線は, 第 17 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. 23. Red dashed lines: Rupture time (a) and slip (b) distributions of the spontaneous rupture given the static frictional stress distribution shown in Fig. 18. Black lines: Rupture time and slip distributions of a subshear rupture ( $V_r=0.72 V_s$ ) shown in Fig. 17.

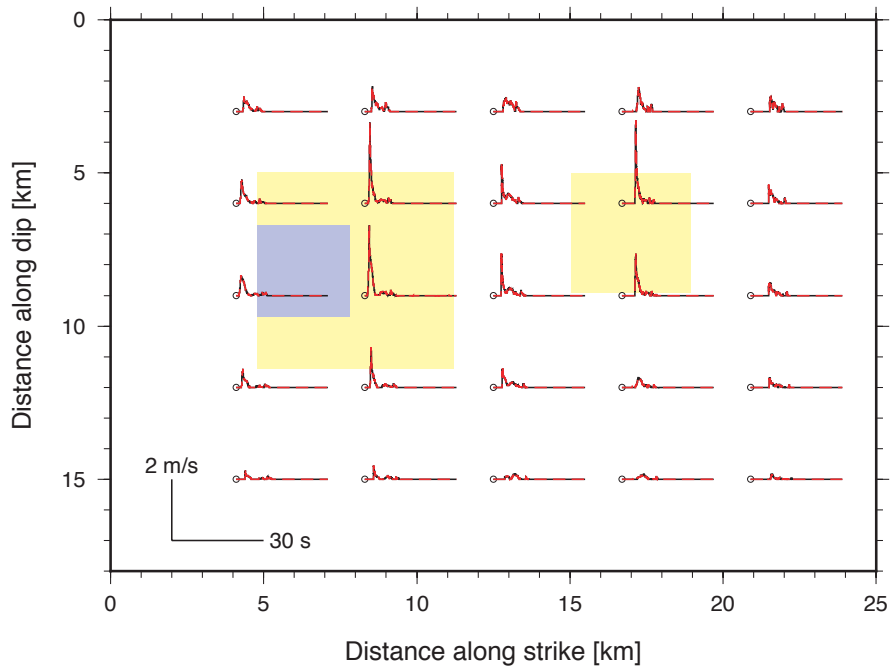


第 24 図. 第 18 図で示した静摩擦応力分布を破壊条件として計算して得られた自発的破壊の断層面上のすべり (a), すべり速度 (b), 剪断応力 (c) の時刻歴 (赤点線). 黒線は, 第 19 図に示される S 波速度の 0.72 倍の一定速度で伝播する破壊の時刻歴. 図の詳細は, 第 13 図と同じ.

Fig. 24. Red dashed lines: Time histories of slip (a), slip velocity (b), and shear stress (c) of the spontaneous rupture given the static frictional stress distribution shown in Fig. 18. Black lines: Time histories of a subshear rupture ( $V_r=0.72 V_s$ ) shown in Fig. 19. The details are the same as for Fig. 13.

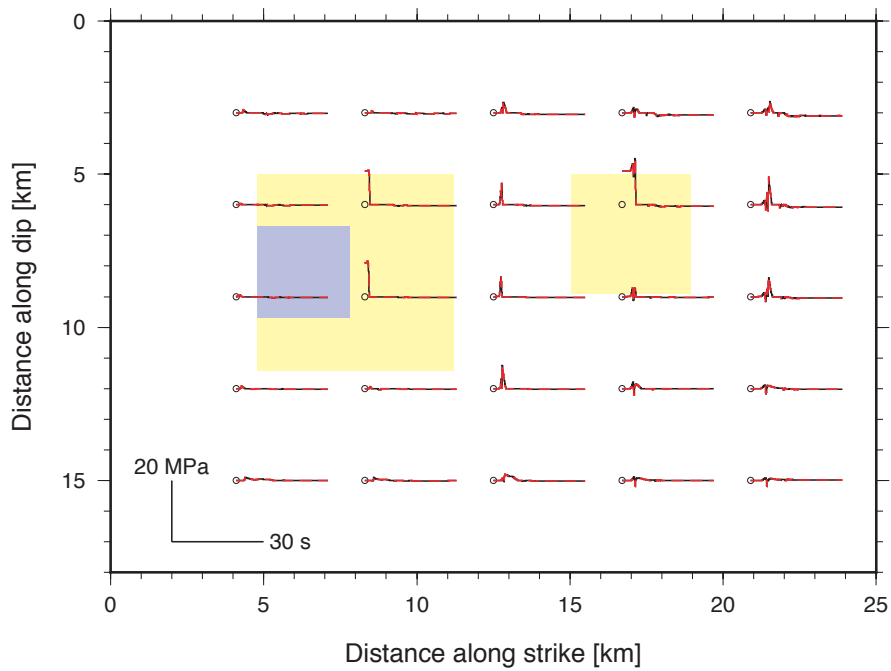


### (b) Slip velocity



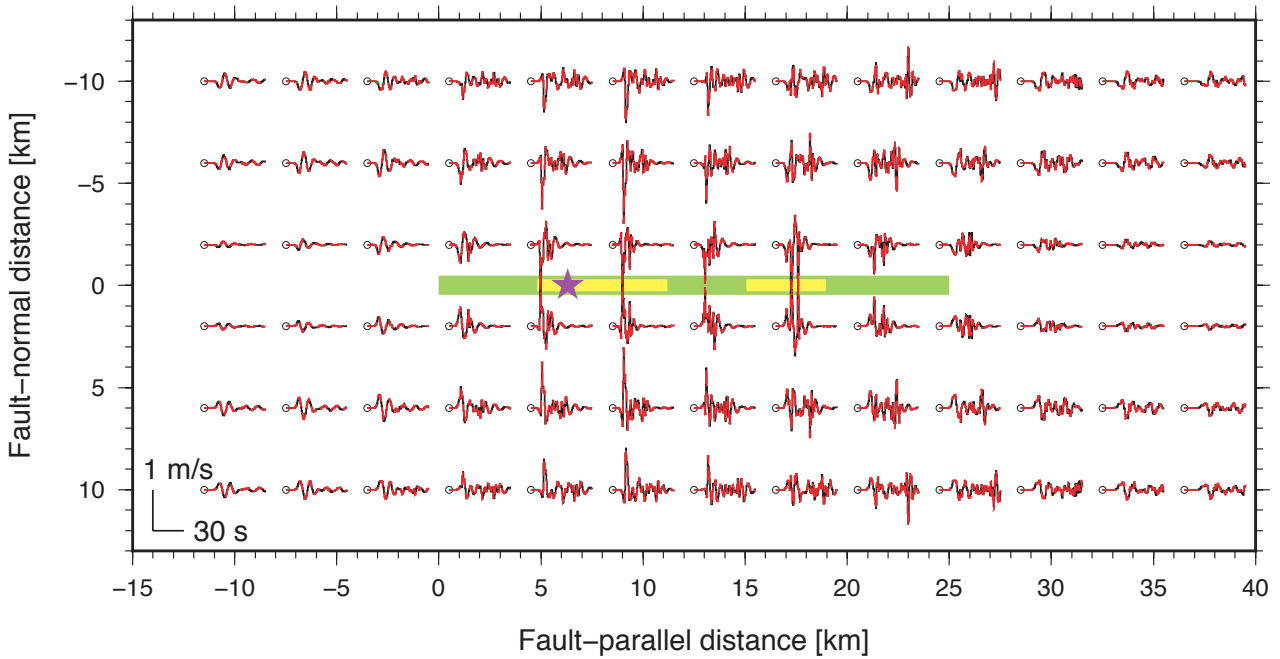
第 24 図. 続き.  
Fig. 24. Continue.

### (c) Shear stress

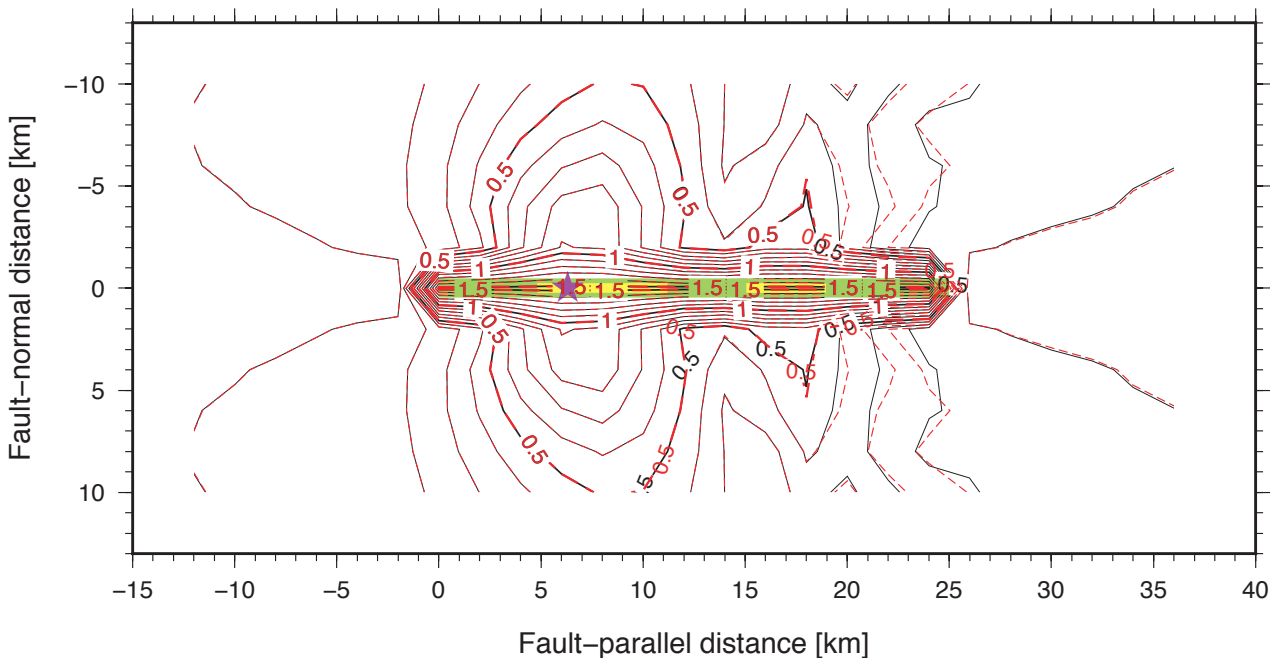


第 24 図. 続き.  
Fig. 24. Continue.

## (a) Velocity (parallel)



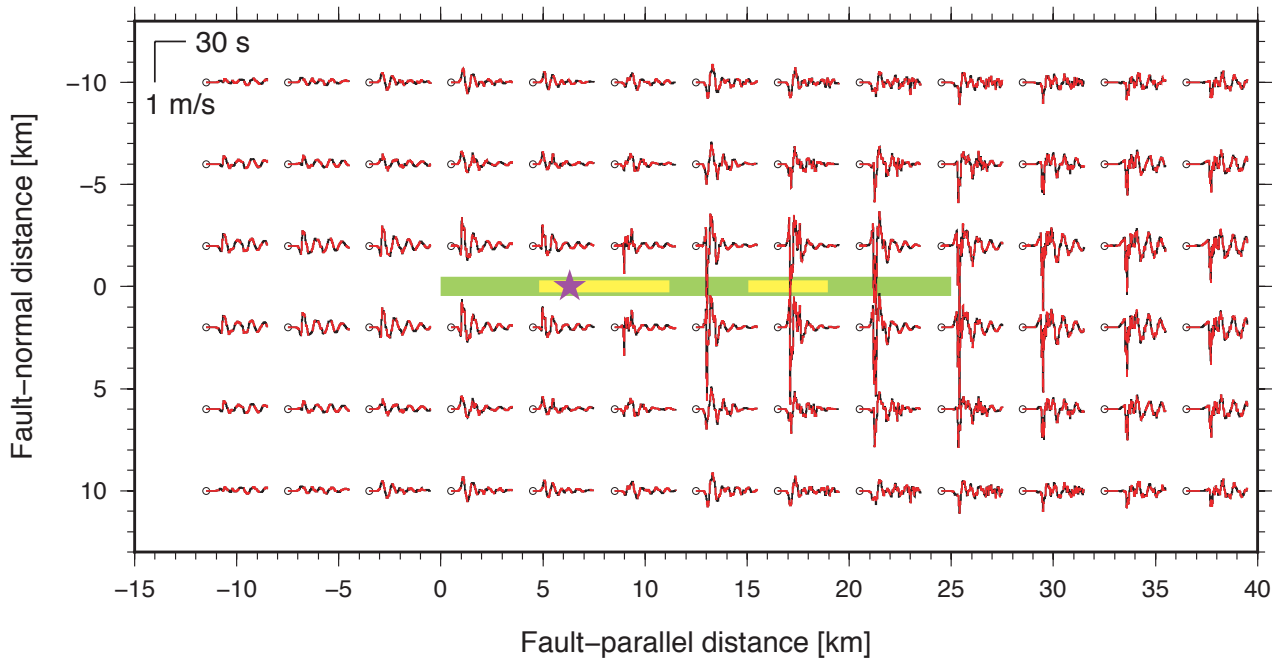
## (b) Peak absolute value of velocity (parallel)



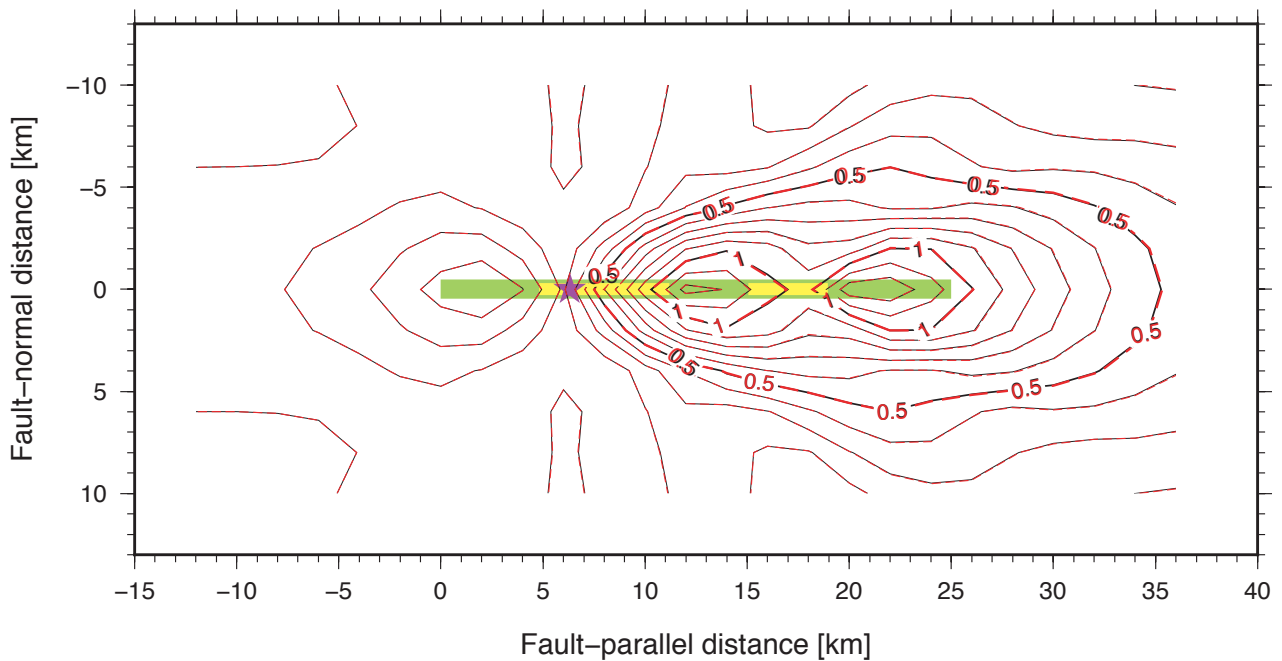
第 25 図. 第 18 図で示した静摩擦応力分布を破壊条件として計算して得られた自発的破壊の地表面での 2 Hz low-pass フィルタをかけた速度波形の断層平行成分 (a) と断層平行成分の最大地動速度分布 (b) (赤点線). 黒線は, 第 20 図に示される S 波速度の 0.72 倍の一定速度で伝播する破壊の速度波形と最大地動速度分布. 図の詳細は, 第 14 図と同じ.

Fig. 25. Red dashed lines: 2 Hz low-pass filtered time histories of the fault-parallel component of ground velocity for a spontaneous rupture given the static frictional stress distribution shown in Fig. 18 (a) and distribution of the peak absolute value (b). 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. 20. The details are the same as for Fig. 14.

(a) Velocity (normal)



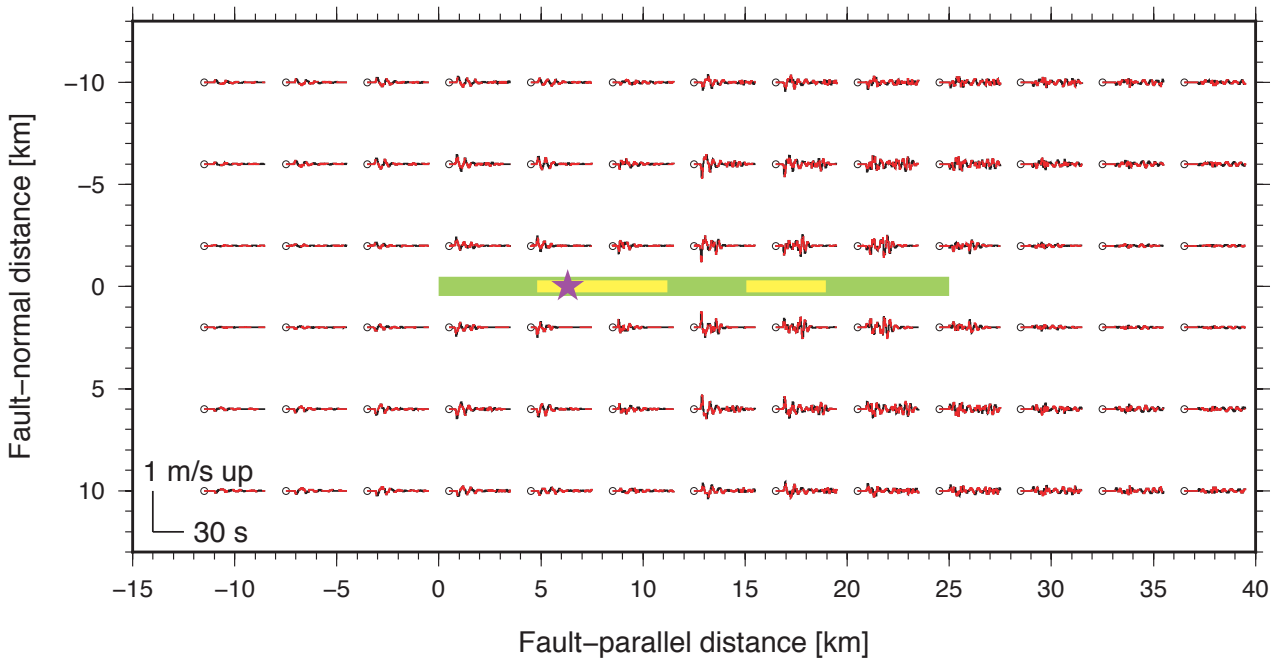
(b) Peak absolute value of velocity (normal)



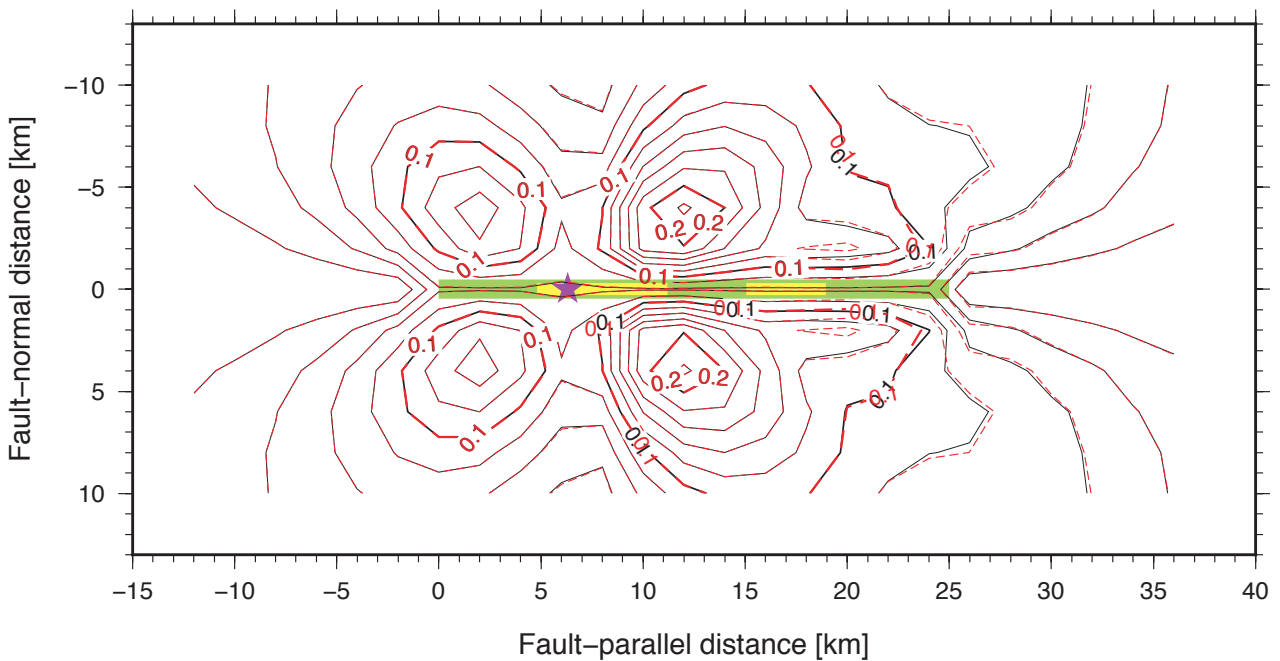
第 26 図. 第 18 図で示した静摩擦応力分布を破壊条件として計算して得られた自発的破壊の地表面での 2 Hz low-pass フィルタをかけた断層直交成分 (a) と断層直交成分の最大地動速度分布 (b) (赤点線). 黒線は, 第 21 図に示される S 波速度の 0.72 倍の一定速度で伝播する破壊の速度波形と最大地動速度分布. 図の詳細は, 第 14 図と同じ.

Fig. 26. Red dashed lines: 2 Hz low-pass filtered time histories of the fault-normal component of ground velocity for a spontaneous rupture given the static frictional stress distribution shown in Fig. 18 (a) and distribution of the peak absolute value (b). Black lines: Time histories and distribution of peak absolute value of the fault-normal component of ground velocity of a subshear rupture ( $V_r=0.72 V_s$ ) shown in Fig. 21. The details are the same as for Fig. 14.

(a) Velocity (vertical)



(b) Peak absolute value of velocity (vertical)



第 27 図. 第 18 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自発的破壊の地表面での 2 Hz low-pass フィルタをかけた鉛直成分 (a) と鉛直成分の最大地動速度分布 (b) (赤点線). 黒線は, 第 22 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 14 図と同じ.

Fig. 27. Red dashed lines: 2 Hz low-pass filtered time histories of the vertical component of ground velocity for a spontaneous rupture given the static frictional stress distribution shown in Fig. 18 (a) and distribution of the peak absolute value (b). Black lines: Time histories and distribution of peak absolute value of the vertical component of ground velocity of a subshear rupture ( $V_r=0.72 V_s$ ) shown in Fig. 22. The details are the same as for Fig. 14.