

### 3.8 強震動予測高精度化のための震源モデル、堆積盆地構造モデルの構築に関する研究

#### 3.8.1 動学的断層モデルに関する研究

##### (1)業務の内容

(a) 業務題目：動学的断層モデルに関する研究

##### (b) 担当者

岩田知孝（京都大学防災研究所 助手）

入倉孝次郎（京都大学防災研究所 教授）

亀 伸樹（九州大学大学院理学研究院 助手）

##### (c)業務の目的（業務全般の基本的な目的）

運動学的震源インバージョンから得られた震源モデルによって構築されている強震動予測のための震源モデル高精度化の方法として、動学的断層モデルに関する研究の推進を行う。ここでは、主に2つの研究項目を遂行する。ひとつは、実記録に基づいた断層面上の動学的パラメータの推定に関する研究で、もうひとつは、動力学モデルによる分岐断層上の破壊伝播に関する研究である。これまで、運動学的な枠組みによって議論されてきた断層モデルを、動学的な条件を含めてモデル化することにより、より広帯域の震源像に近づくことを目的としている。

##### (d) 5カ年の年次実施計画

計画年度においては以下の研究項目の実施を計画している。

平成14年度：運動学的震源モデルに基づく動学的パラメータの推定方法

動力学モデルによる分岐断層上の破壊伝播シミュレーション

平成15年度：動学的パラメータの推定と特徴抽出

複雑な断層面形状が破壊進展に及ぼす影響評価

動的破壊モデルに基づく震源インバージョン手法の開発

平成16年度：動学的パラメータの深さ分布に関する研究

すべり分布と断層面形状の関係

動的破壊モデルに基づく震源インバージョンの実施

平成17年度：動学的パラメータと運動学的モデルの比較

構造探査によって得られた断層面形状に基づく動的破壊モデリング

平成18年度：動的破壊を考慮した断層モデルの構築

##### (e) 平成14年度業務目的

今年度は、運動学的震源モデルに基づく動学的パラメータの推定と動力学モデルによる分岐断層上の破壊伝播シミュレーションについての研究を行う。

## (2)平成14年度成果

### (2-1)動力学パラメータの推定

岩田知孝（京都大学防災研究所）

iwata@egmdpri01.dpri.kyoto-u.ac.jp

入倉孝次郎（京都大学防災研究所）

irikura@egmdpri01.dpri.kyoto-u.ac.jp

#### (a) 業務の要約

強震記録を用いた運動学的震源インバージョンによって求められたすべりの時空間分布から、応力の時空間分布を推定し、断層面上の動学的パラメータを推定する。これらパラメータは断層破壊の動学的モデルの構築や短周期レベル生成に関する情報を含んでおり、強震動予測に対する高精度の震源モデル構築にも必要不可欠となる。これらの断層面上の空間的不均質性に対して詳細な分析を進めていく。

#### (b) 業務の実施方法

##### はじめに

人口集中都市の地震災害軽減には、想定地震（シナリオ地震）に基づく強震動予測がその基礎となることは論を待たない。都市が甚大な被害を受けた1995年兵庫県南部地震時の震源近傍域強震動の生成原因が、震源及び地下構造のモデルに基づく理論的強震動評価手法によって解明されたことを契機として、震源及び地震波伝播経路のモデル化に基づく地震動波形（時刻歴）を出力とする強震動予測手法の高精度化と実用化に関する研究が積極的に進められている。時刻歴波形を提供することによって、最大値のみならず建造物応答特性の検討やそれに基づく有効な耐震構造に関する研究をすすめることができる。

この強震動予測手法の高精度化には、震源及び地下構造モデルの構築が必須である。このうち震源のモデル化の基礎となっているのは、分解能の高い震源インバージョンによるデータセットの蓄積である。80年代より米国カリフォルニア州を中心として、強震波形を用いた震源インバージョンによって断層面上の時空間すべりが推定されるようになってきて、これらの結果、断層すべりが空間的に非常に不均質であることがわかってきた。Somerville et al. (1999, SRL) ではこれらの強震記録に基づく震源インバージョンの結果を元に、断層全体に対してすべりの大きい領域（ここではアスペリティとよぶ）を抽出し、その大きさにも自己相似的な地震規模依存性があることを示した。1995年兵庫県南部地震や2000年鳥取県西部地震などの国内における内陸地殻内地震、1999年のトルコ・コジャエリ地震、台湾・集集地震などのM7クラスの地震の強震記録がとられ、それらの分析の結果、これらの地震もSomerville et al. (1999)の経験式に沿うアスペリティ領域があることがわかり、この成果が強震動予測のための震源モデル構築の基礎的な考え方となっている（入倉・三宅, 2001; 入倉・他, 2002）。当然のことながら、特に震源域での破壊的強震動がこのような不均質な震源過程に支配されていることは、1995年兵庫県南部地震、2000年鳥取県西部地震において検証されている（例えばIwata et al., 1998; 岩田・関口, 2002）

我々が現在のところ到達している、強震記録を使った震源過程のインバージョン分解能は、周期1秒程度より長周期側に留まっている。周期数秒より短周期側の地下構造モデルを適切に与えることが短周期になるにつれて困難になるからである。特に周期1秒程度より短周期側においては、闇雲な仮定の下での地下構造モデルを例え与えたとしても、信頼のある震源像は浮かび上がってこないであろう。したがって、強震観測網の充実により、1つのイベントに対して多くの観測記録を得られるようになってき

ているが、それでも震源インバージョンの分解能はその程度であり、それから帰結される震源モデルの主たる特徴は周期 1 秒程度より長周期の特徴を中心としたものとなっている。これを打開し、より短周期を含む震源モデルの構築には、短周期領域での信頼ある地下構造モデルの構築、経験的な方法、動力学的な解釈・手法による震源モデルのより実像化、等が考えられる。例えば宮腰・他(2002)では余震記録で構造モデルを担保しながら、震源インバージョン用のモデルを構築し、より短周期域への震源インバージョンを試みている。このような研究は、3.4 項で行われる研究によって高精度化が計られるであろうし、年次を追って、総合的な研究にしていく必要がある。

本稿では 1 秒より短周期側を含む広帯域強震動予測のための震源のモデル化には短周期帯からみた震源モデルが必要に鑑み、以下の視点から震源モデルの特性化を行う。即ち、地震動の短周期レベルは断層面上の実効応力分布によって決定されることから、断層面上のすべり時刻歴から応力時刻歴を推定し、断層面上の応力の不均質についての知見を得る。また、短周期帯地震動の統計的な取り扱いに基づく、加速度地震記録の包絡形状をターゲットとするエンベロープインバージョン法による短周期地震動生成震源モデルの推定法に従った震源モデルの特性化を行い、1 秒以上の波形インバージョンから得られている特性化震源モデルとの関係を把握する。

このうち今年度は 1999 年トルコ・コジャエリ地震の応力降下量分布を推定し、アスペリティとの関係を考察することとする。

#### 1999 年トルコ・コジャエリ地震の運動学的震源モデル

1999 年 8 月に起きたトルコ・コジャエリ地震ではイズミット地域を中心に甚大な地震動被害を引き起こした。北アナトリア断層において大地震の懸念がなされていた地域で発生した地震である。地表断層は長さ 140km にわたって生じ、最大右ずれすべりは約 5 m であった。また本地震においては地震学的見地において、震源に近い SKR 観測点で得られた記録の S-P time が理論的な走時から予測されるものより短く、S 波速度より速い(あるいは P 波トリガー)破壊伝播の可能性(例えば Ellsworth and Celebi, 1999; Anderson et al., 2000) や、3 ヶ月後に本地震の東となりで起きた Duzce 地震 (Mw7.1) との関係が議論されている。ここではトルコ公共事業省やボアジチ大学によって設置されていた強震計によって得られた記録を用いて、震源インバージョンを行った (Sekiguchi and Iwata, 2002)。

断層面の設定には、地表断層トレース (地質調査所, 2000) と余震の分布 (Honkura et al., 2000, Ito et al., 2002) 及び遠地記録のモーメントテンソル解をもとに 4 セグメントからなる断層面モデルを立てた。図 1 に仮定した断層モデルと用いた観測点の位置を示す。波形インバージョンは、このセグメント分けとは別に 3 領域、1) 断層面モデル西端から破壊開始点まで、2) 破壊開始点から観測点 SKR まで、3) 観測点 SKR から断層面モデル東端まで、においてそれぞれの領域内での最も妥当な第一タイムウィンドウ伝播速度を探索しつつ行った、探索区間は、領域 1) に関しては 2.6-3.4km/s、2) に関しては 4.6-6.0km/s、3) に関しては 2.6-6.0km/s で、観測記録の S-P 時間および地震波速度構造モデルを基に設定した、解析に用いた地震波形データは震央距離 140km 以内の 10 観測点で、0.1-1.0Hz の速度波形 3 成分をターゲットとした。グリーン関数のための地下構造モデルは、短周期表面波の群速度から推定されたトルコ北西部地域の 1 次元速度構造を用いた (Mindevalli and Mitchell, 1989)。震源インバージョンの基本スキームは Hartzell and Heaton (1983) のマルチタイムウィンドウ線形インバージョン法で、拘束条件や解の選択は Sekiguchi et al. (2000, 2002) による。

推定された断層破壊モデルを図 2 に示す。破壊の様子は不均質で、震源からみて西側やや深いところに大きなアスペリティがあり、東側は浅い部分にすべりの大きい領域があることがわかる。この最大すべ

り量は5 m程度である。地表地震断層のくいちがい量と、地震波を用いた震源断層のすべりの浅い小断層のすべり量の分布は、震源インバージョンの信頼性がある領域では、良い一致を見せる。すべりの位置と破壊の広がりには震源位置から東に70km以上、西に40km程度であったと考えられる。震央の東約35kmのSapanca湖辺りの地下比較的浅いところに生じたアスペリティは、そのトリガー時刻より、破壊開始点からのP波によってトリガーされたものと考えられる、第1タイムウィンドウ伝播速度は、破壊開始点から観測点SKRまでの区間で5.8km/s、それ以外の領域で3.0km/sと推定された、最大アスペリティは、破壊開始点の西10-20km、深さ10km以深に得られた、最も東のセグメントであるDuzce断層上に破壊が進展した可能性を支持するが、このセグメントの大半は本解析で使ったデータセットで議論できる範囲を超えている。

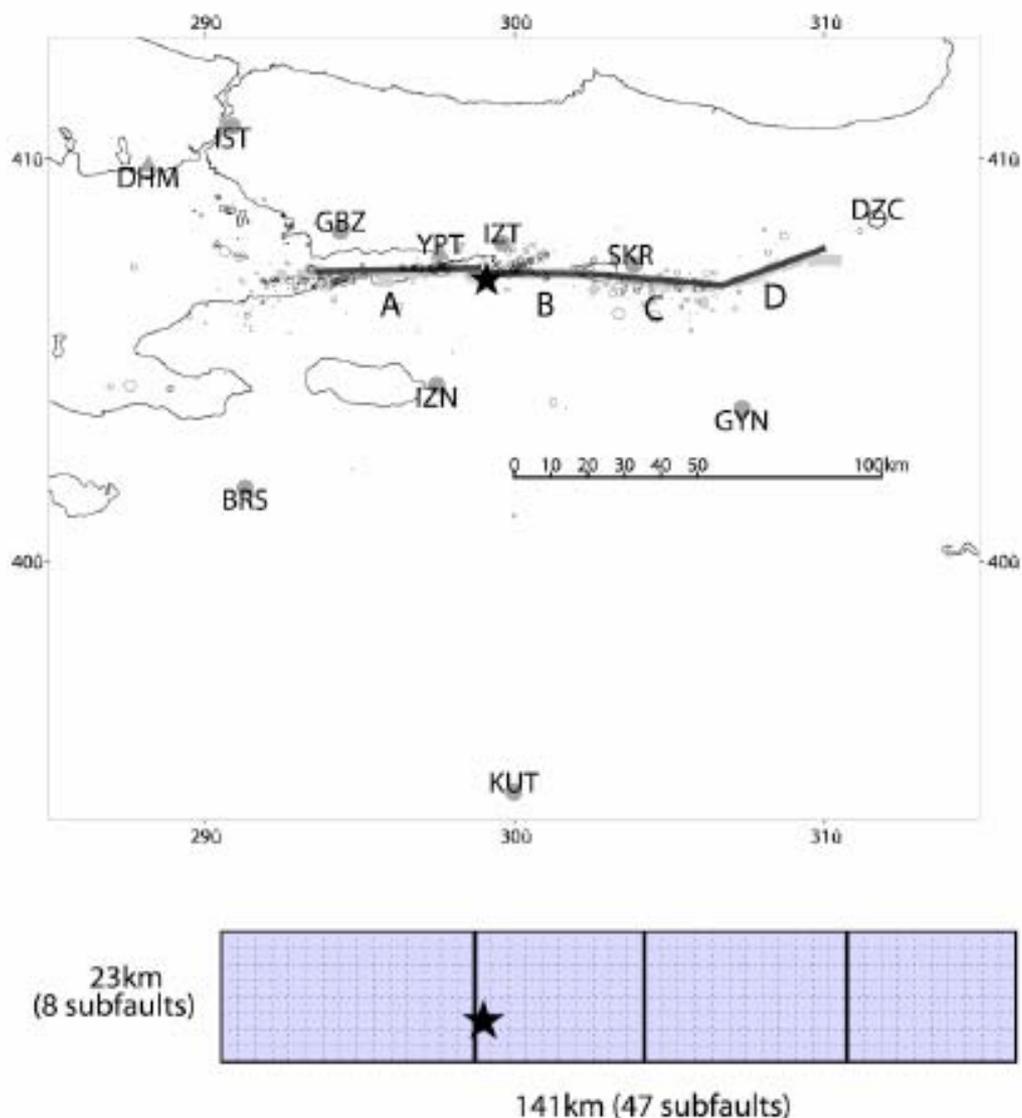


図1 1999年トルコ・コジャエリ地震の断層モデルと使用した強震観測点分布(印)。実線が仮定した断層面の地表投影で、薄い実線が地表地震断層トレースを表す。断層面dip角は90度としている。走向の違う4つのセグメントを繋いでいる。黒い星は破壊開始点(震央)を表す。小さいは余震の震央を表す(Honkura et al., 2000; Ito et al., 2002)。下には、4セグメントと小断層面を表す。

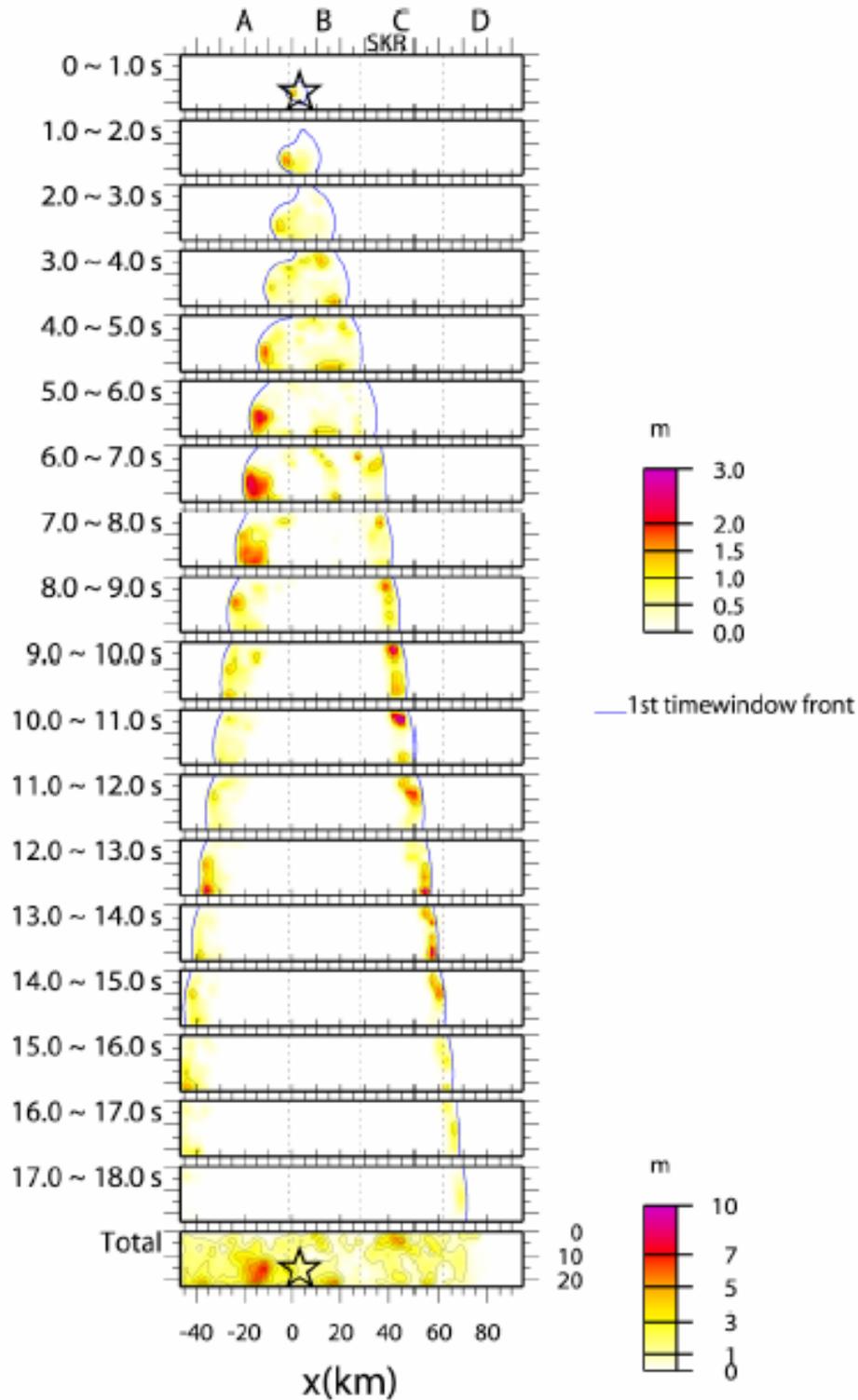


図2 推定された断層破壊。1秒ごとのすべり量分布を示している。最後のコラムは、最終すべり量分布。

(c) 業務の成果

**動力学的パラメータの推定**

上記の運動学的震源モデルを用いて、断層面上の応力の変化を求めた。図3にはそのうち、静的応力降下量 (Static stress drop) の分布の比較を示している。正の応力降下量を示している領域が、すべり領域に比して小さくみうけられる。これはコジャエリ地震のアスペリティが孤立的にいくつかあることによるものと考えられる。またアスペリティの応力降下量値の深さ依存性についても検討していく必要がある。

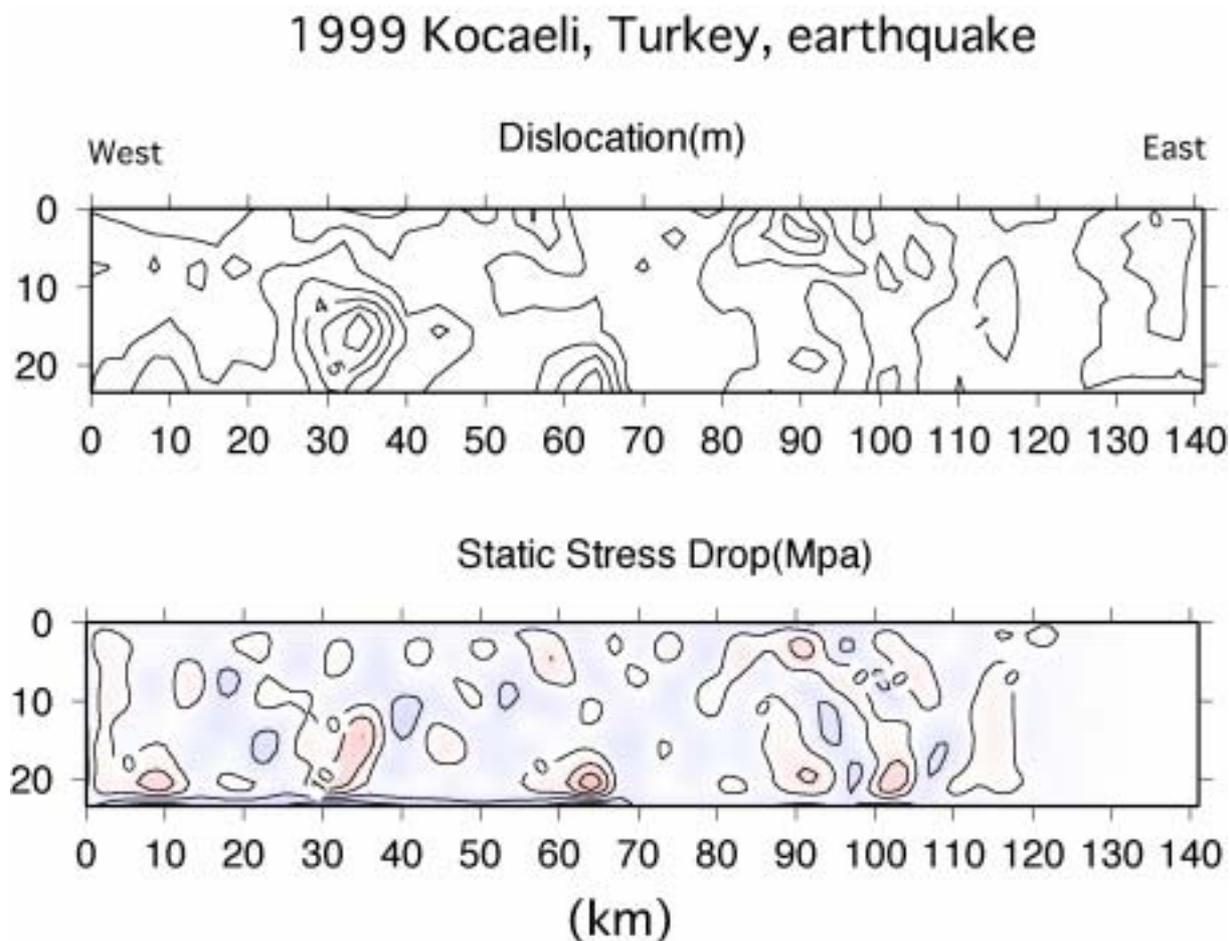


図3 1999年トルコ・コジャエリ地震の最終すべり分布(上)と静的応力降下量分布(下)。正の応力降下量を暖色で示している。

(d) 結論ならびに今後の課題

強震記録を用いた運動学的震源インバージョンの現状とその課題について簡単にレビューし、時空間的に分解能の高いすべりの時空間分布から、応力の時空間分布を推定し、断層面上の動力学的パラメータを推定することを試みた。題材とした1999年トルコ・コジャエリ地震では孤立的なアスペリティ分布に対応する、応力降下量分布が推定されている。同様の手法を行うために、運動学的なインバージョン結果(例えばBirgoren et al., 2002)を収集し、その応力降下の特徴について考察していく必要がある。

応力降下量の深さ分布特性についてはこれまでも研究がなされてきている。Asano et al.(2003)は、深さ 100km 程度までのスラブ内地震の強震動生成領域の推定を行い、応力降下量の深さ依存性を指摘している。このような強震記録を用いた震源モデルの分析は、強震動予測のための震源モデルの構築には不可欠と考えられ、今後積極的に進めていく必要がある。

本研究においては、関口春子博士、L. Dalguer 博士、Gulum Birgolen、浅野公之各氏の協力を得ている。期して感謝致します。

(e) 引用文献

- 1) Anderson, J. G., H. Sucuoglu, A. Erberik, T. Yilmaz, E. Inan, E. Durukal, M. Erdik, R. Anoshehepoor, J. N. Brune, and Shean-Der Ni: Strong ground motions from the Kocaeli and Duzce, Turkey, earthquake, and possible implications for seismic hazard analysis, EERI report, 2000.
- 2) Asano, K, T. Iwata, and K. Irikura: Source characteristics of shallow intraslab earthquakes derived from strong motion simulations, *Earth Planetary Science*, 55, e5-e8, 2003.
- 3) Birgoren, G., H. Sekiguchi, and K. Irikura: Broadband strong ground motion simulation of the 17 August and 12 November 1999, Turkey earthquakes, AGU Fall meeting, S12B-1215, 2002.
- 4) 地質調査所: 1999 年トルコ・イズミット(コジャエリ)地震の地表地震断層の調査結果, 地震予知連絡会会報, 63, 564-566, 2000.
- 5) Ellsworth, W. L. and M. Celebi: Near field displacement time histories of the M7.4 Kocaeli (Izmit), Turkey, earthquake of August 17, 1999, EOS Transactions of 1999 AGU fall meeting, F648, 1999.
- 6) Hartzell, S. H. and T. H. Heaton: Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 1553-1583, 1983.
- 7) Honkura, Y., A. M. Isikara, N. Oshiman, A. Ito, S. B. Ucer, S. Baris, M. K. Tuncer, M. Matsushima, R. Pektas, C. Celik S. B. Tank, F. Takahashi, M. Nakanishi, R. Yoshimura, Y. Ikeda, T. Komut: Preliminary results of multidisciplinary observations before, during and after the Kocaeli (Izmit) earthquake in the western part of the North Anatorian Fault zone, *Earth Planets Space* 52, 293-298, 2000.
- 8) Ito, A., B. Ucer, S. Bartis, A. Nakamura, Y. Honkura, T. Kono, S. Hori, A. Hasegawa, R. Pektas, and A. M. Isikara: Aftershock activity of 1999 Izmit earthquake, Turkey, revealed from microearthquake observations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 418-427, 2002.
- 9) 入倉孝次郎, 三宅弘恵: シナリオ地震の強震動予測, *地学雑誌*, 110, 849-875, 2001.
- 10) 入倉孝次郎, 三宅弘恵, 岩田知孝, 釜江克宏, 川辺秀憲: 強震動予測のための修正レシピとその検証, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, 567-572, 2002.
- 11) Iwata, T. and H. Sekiguchi, A. Pitarka, K. Kamae, and K. Irikura: Evaluation of strong ground motions in the source area during the 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) earthquake, *Proc. 10th Japan Earthq. Eng. Symp.*, 1, 73-78, 1998.
- 12) 岩田知孝, 関口春子: 2000 年鳥取県西部地震の震源過程と震源域強震動, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, 125-128, 2002.
- 13) Mindevalli O. Y. and B. J. Mitchell: Crustal structure and possible anisotropy in Turkey from

surface wave dispersion, *Geophys. J. Int.*, 98, 93-106, 1989.

- 14) 宮腰 研, Anatoly PETUKHIN, 岩田知孝, 関口春子: 1997 年鹿児島県北西部地震におけるやや短周期域の震源モデル, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, 129-132, 2002.
- 15) Sekiguchi, H., K. Irikura, and T. Iwata: Fault geometry at the rupture termination of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 117-133, 2000.
- 16) Sekiguchi, H. and T. Iwata: Rupture process of the 1999 Kocaeli, Turkey, earthquake estimated from strong motion waveforms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 300-311, 2002.
- 17) Sekiguchi, H., K. Irikura and T. Iwata: Source inversion for estimating continuous slip distribution on the fault - Introduction of Green ' s functions convolved with a correction function to give moving dislocation effects in subfaults - *Geophys. J. Int.*, 150, 377-391, 2002.
- 18) Somerville, P.G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. J. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada: Characterizing earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, 70, 59-80, 1999.
- 19) U. S. Geological Survey: Implications of earthquake risk reduction in the United States from the Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999, U.S. Geological Survey Circular, 1193, 65pp. 2000.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1)論文発表

著者	題名	発表先	発表年月日
なし			

2)口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
Birgoren, G., H. Sekiguchi, and K. Irikura	Broadband Strong Ground Motion Simulation Of The 17 August And 12 November 1999, Turkey Earthquakes	AGU 2002 Fall Meeting, American Geophysical Union, San Francisco, USA.	December 10, 2002
Asano, K., T. Iwata, and K. Irikura	Source Characteristics of Shallow Intraslab Earthquakes from Strong Motion Data	AGU 2002 Fall Meeting, American Geophysical Union, San Francisco, USA.	December 10, 2002

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

なし

## (2-2) 動力学モデルによる分岐断層上の破壊伝播シミュレーション -初期応力場と破壊速度の効果-

亀 伸樹 (九州大学大学院理学研究院)

kame@geo.kyushu-u.ac.jp

### (a) 業務の要約

雁行配列や分岐構造を含む複雑な幾何形状の既存断層系において地震が発生した場合に、断層系のどの部分を選択して破壊するかということは地震危険度評価に対して非常に重要である。本研究では特に分岐断層構造における破壊経路選択問題に取り組む。主断層上を伝播するモード II の動的破壊が派生する分岐断層との分岐点に出会う動力学モデルを考える。境界積分方程式法を用いて破壊の経路が動的な応力に応じて選択される地震破壊の動的シミュレーションを行い、我々は次の問題を調べた。破壊は分岐断層に沿って励起されるのか？励起された破壊は成長し続けるか？動的分岐に適しているのは圧縮側か引張側か？主断層上の破壊は分岐点を越えて成長し続けるのか？分岐断層上でどのような破壊経路が最終的に選択されるのか？破壊の記述には、いかなる滑り量に対しても強度が法線応力に比例するクーロン型滑り弱摩擦則を用いた。

我々のシミュレーション結果は次の事を示す。破壊先端周辺の動的な応力は、破壊速度の増加と共に主断層面上よりもむしろ断層面に集中するようになり、派生する分岐断層上の破壊を局所的に励起することが出来る。これまでの研究から示唆されてきた通り、分岐断層上に励起された局所的な破壊が継続成長して大規模になるかどうかは、主断層に対する最大主圧縮軸の方向と分岐点における破壊速度に依存する。動的破壊分岐に最も適した分岐断層の派生方向は、初期応力の主圧縮軸の傾きが主断層面に対して浅くなるにつれ、主断層上の滑りに対する引っ張り側から圧縮側に移行する。主断層上と分岐断層上の同時破壊は分岐角が大きい時は励起され得るが、小さい角度の時には両断層間の強い応力相互作用のために抑制され一般的に困難になる。しかしながら、小さい角度の場合であっても分岐点における主断層上の破壊の伝播速度がレイリー波速度に非常に近づいた際には両断層上の同時破壊伝播が可能になる。

### (b) 業務の実施方法

#### はじめに

主要な地震の破壊帯にはしばしば断層の屈曲、分岐、雁行配列等の幾何的な複雑さが見られる。このような非直線的な断層構造は破壊の開始、伝播、停止の地震破壊の動的過程に影響を与えると考えられている [King and Nabelek(1985), Sibson(1985)]。本研究では分岐断層に注目する。過去、既存の分岐断層構造に沿って地震が発生した例は少なくない [King(1986)]。例えば、1979 年インペリアルヴァレー地震、1992 年のランダース地震が挙げられる [Archuleta(1984), Sowers et al.(1994)]。雁行配列や分岐構造を含む複雑な幾何形状の既存断層系において地震が発生した場合に、断層系のどの部分を選択して破壊するかということは地震危険度の評価に対して非常に重要である。

弾性体の応力場解析の理論解から、破壊が潜在的な分岐断層の方向へ曲ろうとする性質は破壊速度  $v_r$  と破壊前の初期応力状態に支配されることが示される [Poliakov et al.(2002)]。破壊が滑り弱摩擦則で記述されるモデルにおいて、高速に伝播する破壊先端付近における応力は、破壊面前方の直線上より側面方向に集中することが示される。そしてこの性質は破壊速度がレイリー波速度 (モード II の破壊における臨界破壊伝播速度で剪断波速度  $c_s$  の約 92%) に近づくと顕著になる。この応力に

よって破壊先端周辺で二次的に破壊される領域の予測パターンは、主断層に対する初期応力場の最大主圧縮軸  $S_{max}$  のなす角  $\theta$  に非常に強く影響されている。高角の  $\theta$  に対しては、二次的な破壊励起は主断層上のモード II の右ずれ破壊に対して引っ張り側に卓越することが予想されるのに対して、低角の  $\theta$  に対しては、圧縮側、引っ張り側共に同程度の破壊励起が予想される。また、両角度共に、二次的な破壊予想領域は破壊速度がレイリー波速度に近づくにつれ著しく増える（図1）。しかしながら、この理論解は数学的単純さの要請から破壊が直線断層上に有り続ける場合に限定されており、上の議論は分岐する断層上に実際に破壊が始まったことで生じる応力場の変化は全く考慮されていないことに注意が必要である。分岐断層上の二次的な破壊励起を伴いながら、どのような破壊経路が力学的に自己選択されるかは未知の問題である。この問題は数値的な手法を用いて解析する必要がある。

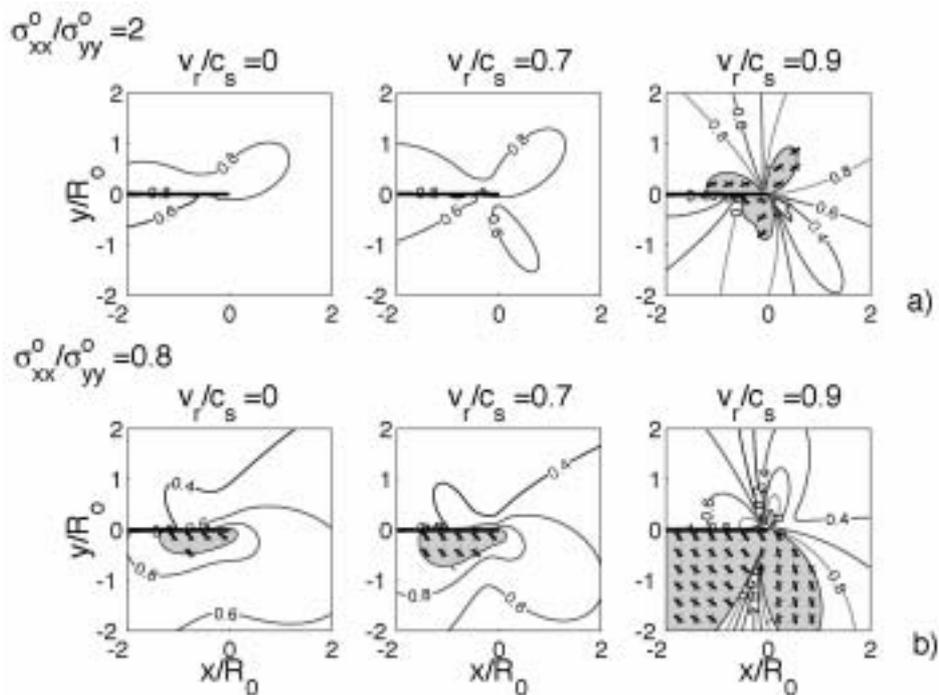


図1 Illustrations of dynamic elastic stress fields associated with slip-weakening rupture on a planar fault for two pre-stress ratios and different rupture velocities  $v_r$ . This is Figure 11 of Poliakov et al.. (a) When  $-\sigma_{yy}^0 < -\sigma_{xx}^0$ . Here  $-\sigma_{xx}^0 / -\sigma_{yy}^0 = 2.0$  corresponds to low inclination of  $S_{max}$  with respect to the fault plane. (b) When  $-\sigma_{yy}^0 > -\sigma_{xx}^0$ .  $-\sigma_{xx}^0 / -\sigma_{yy}^0 = 0.8$  corresponds to high inclination of  $S_{max}$ . The shaded regions show where the maximum local shear stress  $\tau_{max}$  exceeds to Coulomb strength  $\tau_{Coulomb}$  based on the local normal stresses, and the expected Mohr-Coulomb rupture directions are shown. Contour lines of  $\tau_{max} / \tau_{Coulomb}$  are shown where it is less than unity, outside the shaded zone.

### これまでの研究

近年の境界積分方程式法の発展により複雑な幾何形状をもつ断層上の自発的破壊成長のシミュレーションが可能になってきた。Kame and Yamashita(1999a, 1999b, 2002)は、破壊経路が自己選択される亀裂モデルを用いて動的な分岐現象を調べた。彼らは高速破壊時に方位分布が変化する動的な波動応力場を明示的に取り入れ、亀裂の進展方向の選択に剪断力最大の基準を採用した。彼らは、亀裂は高速破壊の段階に達すると先端に波動応力の効果により集中した応力により分岐することを見事に示した。亀裂は

局所的最適方向に分岐した後、大規模に作用する初期応力場により停止する結果となる。しかしながら、法線応力の効果をいかに適切に彼らのモデルに組み込むか？という課題は残されたままである。また、彼らの亀裂先端に注目するモデリングは、分岐したのち主断層が再び破壊成長することを許していないが、そのことは破壊の動力学にとって決定的に重要な性質である。Aochi et al.(2000a, 2000b)は3次元問題で屈曲断層と分岐断層上の自発的破壊成長シミュレーションを行った。Aochi and Fukuyama(2002)はその手法を1992年ランダース地震の理解のために適用し、分岐断層上における破壊経路選択における初期応力場の作用する方向の重要性を議論している。その研究もまた破壊基準に剪断応力のみを用いているが、ごく最近 Aochi et al.(2002)は彼らの解析を拡張して、法線応力の効果も同時に組み込んだ。彼らのシミュレーションで破壊速度  $v_f$  の効果は依然として調査されずに残されている。この理由の一部に、3次元のシミュレーションにおいて高速破壊時に断層面側方向に集中する応力を分解可能な、もしくは、破壊速度を剪断速度以下に保ち続けるのに必要な、十分に細かいグリッド間隔を彼らはとれなかったことがある。

我々のここでの目的は、数値動力学的手法により動的破壊分岐における初期応力場と破壊速度の効果を調査し、分岐していない直線上の破壊によって生じる応力場の解析に基づく幾分定性的な Poliakov et al.(2002)分岐予想の有効性を検証することである。

## モデル

我々は直線主断層上を伝播する二次元モード II の右ずれ破壊を考え、分岐点において主断層に対して角度  $\phi$  を成して派生する分岐断層に出会うモデルを考える (図 2a)。断層系は無限均質等方弾性体にあるとする。デカルト座標系  $(x, y)$  を取り、主断層を  $x$  軸上に分岐点を原点にとる。断層表面は全ての場所で閉じていると仮定する、すなわち、接線方向の滑りのみで開口滑りのない純粋なモード II である。初期応力は媒質に  $(-\sigma_{yy}^0) > 0$ ,  $(-\sigma_{xx}^0) > 0$ ,  $(-\sigma_{yx}^0) > 0$  (引っ張りを正に取る) と作用すると仮定し、主圧縮  $S_{max}$  の軸の方向が主断層に対して角度  $\Psi$  であるとする。

## クーロン型滑り弱化摩擦則

破壊は Ida(1972) と Palmer and Rice(1973) により提唱された滑り弱化則により記述する。断層強度  $\tau$  は一度ピーク強度  $\tau_p$  に達した後、滑り  $\Delta u$  の進行と共に線形に残留値  $\tau_r$  まで減少する。加えて、我々は滑り弱化則に広く断層上の摩擦力を研究するのに用いられているクーロン摩擦則を導入する (ここでは  $\tau$  は法線応力  $(\sigma_n)$  に比例する) クーロン型滑り弱化摩擦則の下ではいかなる滑り量に対しても強度  $\tau$  が法線応力  $(\sigma_n)$  に比例する (図 2b)。ここで  $\mu_s, \mu_d, D_c$  はそれぞれ静摩擦係数、動摩擦係数、臨界変位量である。エネルギー解放率によって決まる最小臨界滑り領域の大きさ  $L_c$  は、滑り弱化のパラメタを用いて  $\Delta\chi = 16\mu\Gamma/[3\pi(\sigma_{\psi\xi}^0 - \tau_p)^2] = 64P_0(\tau_\pi - \tau_p)^2/9\pi^2(\sigma_{\psi\xi}^0 - \tau_p)^2$  と表現される。ここで  $G$  は媒質の破壊エネルギー、 $\mu$  は剛性率であり、Palmer and Rice(1973), Rice(1980)の  $P_0$  の表現式を利用した。本研究において、破壊は既存の断層構造上のみで許され、ここでは摩擦特性は均質であると仮定した。採用した係数はそれぞれ  $\mu_s = 0.60$ ,  $\mu_d = 0.12$  である。ここでは流体飽和による圧力変化の効果を考えないが、この効果はある極限において適切に減じた  $\mu_s$  の値でモデルに取り入れることができる [Cocco and Rice, (2002)]。

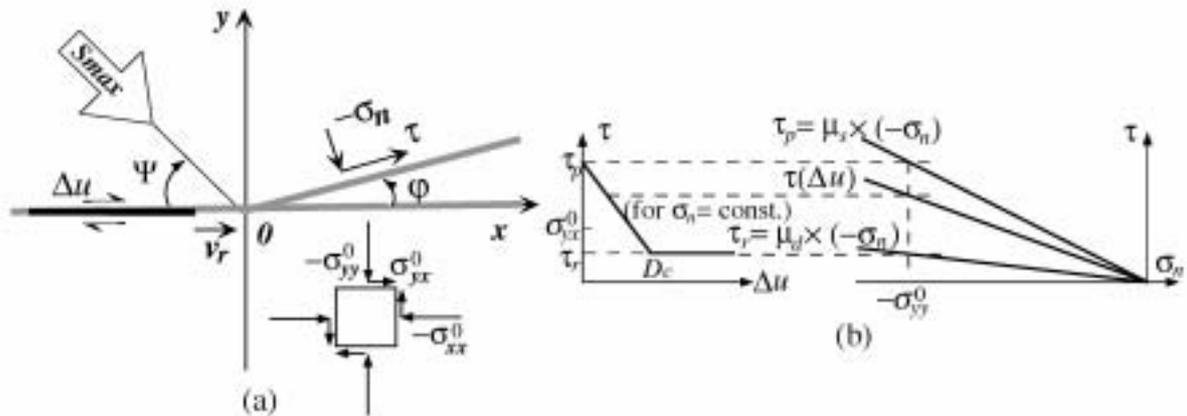


図2 Model configuration and assumed slip-weakening Coulomb friction law. (a) Configuration of a preexisting branched fault system and pre-stress state. Gray lines indicate potential rupture surface and black line indicates propagating rupture.  $\tau$  and  $(-\sigma_n)$  represent shear stress and compressive normal stress on fault surface. (b) Slip-weakening Coulomb friction law. The peak and residual strength  $\tau_p$ ,  $\tau_r$ , and strength  $\tau$  at any particular amount of slip  $\Delta u$ , is proportional to normal stress  $(-\sigma_n)$ .

### 解析方法

破壊の経路が動的な応力に応じて自己選択される地震破壊の動的シミュレーションには Kame and Yamashita(1999b) の境界積分方程式法を用いた。この定式化において断層面上の滑りによる増加分の剪断応力は断層面全体での滑り速度履歴の観点から評価される。破壊進展の評価においては境界積分方程式法で評価された応力の増加分と初期応力場を加えた合計の応力を用いることに注意する。

### 採用したパラメタ

我々は分岐断層構造上で動的に自己選択される破壊経路を全てのパラメタの組み合わせに対して網羅的に調査した(48シミュレーション: 初期応力場4種類×破壊速度3種類×分岐角度4種類)。主断層に対する初期応力場の最大主圧縮軸  $S_{max}$  のなす角  $\Psi$  は  $\Psi=56^\circ, 45^\circ, 25^\circ, 13^\circ$ 、主断層上の破壊先端が分岐点に達する時の破壊速度  $v_r$  は  $v_r=0.6c_s, 0.8c_s, 0.9c_s$ 、そして分岐角度  $\phi$  は  $\phi=-30^\circ, -15^\circ, +15^\circ, +30^\circ$  を考える。ここで  $\phi=-30^\circ, -15^\circ$  を引張り側分岐、 $\phi=+15^\circ, +30^\circ$  を圧縮側分岐と呼ぶ。なぜなら分岐点に達した主断層上のモードIIの右ずれ破壊は、それぞれの側に法線応力の減少と増加をもたらすからである。

### (c) 業務の成果

#### 解析結果と考察

動的破壊伝播シミュレーションから得られた最終的な破壊経路の全結果をここに示す。参考のため初期応力場の効果のみで評価された分岐断層上のピーク強度  $\tau_p^b$  と応力降下量  $\Delta\sigma^b$  を図中に示す(主断層上のそれはそれぞれ  $\tau_p^0=0.6$  と  $\Delta\sigma^0=0.12$  である)。破壊経路は全体の応力(初期応力場と滑りによる変化分の和)によって選択されており、それは分岐断層上の破壊の相互作用により動的に変化していることを注意する必要がある。

・最大主圧縮軸  $S_{max}$  のなす角  $\Psi=56^\circ$  の場合。初期応力状態で応力降下量が最大になる分岐断層の最適方向は  $-15^\circ$  (引っぱり側) である。(1) 圧縮側：初期応力場に対して分岐断層は破壊に適していないので主断層上の破壊が常に自己選択される。(2) 引っぱり側：分岐角が小さい場合には引っぱり側が常に選択される。同時破壊は低速時は困難であるが、高速時に可能になる。分岐角が大きい場合には両断層上の破壊が選択される (図3a 参照)。

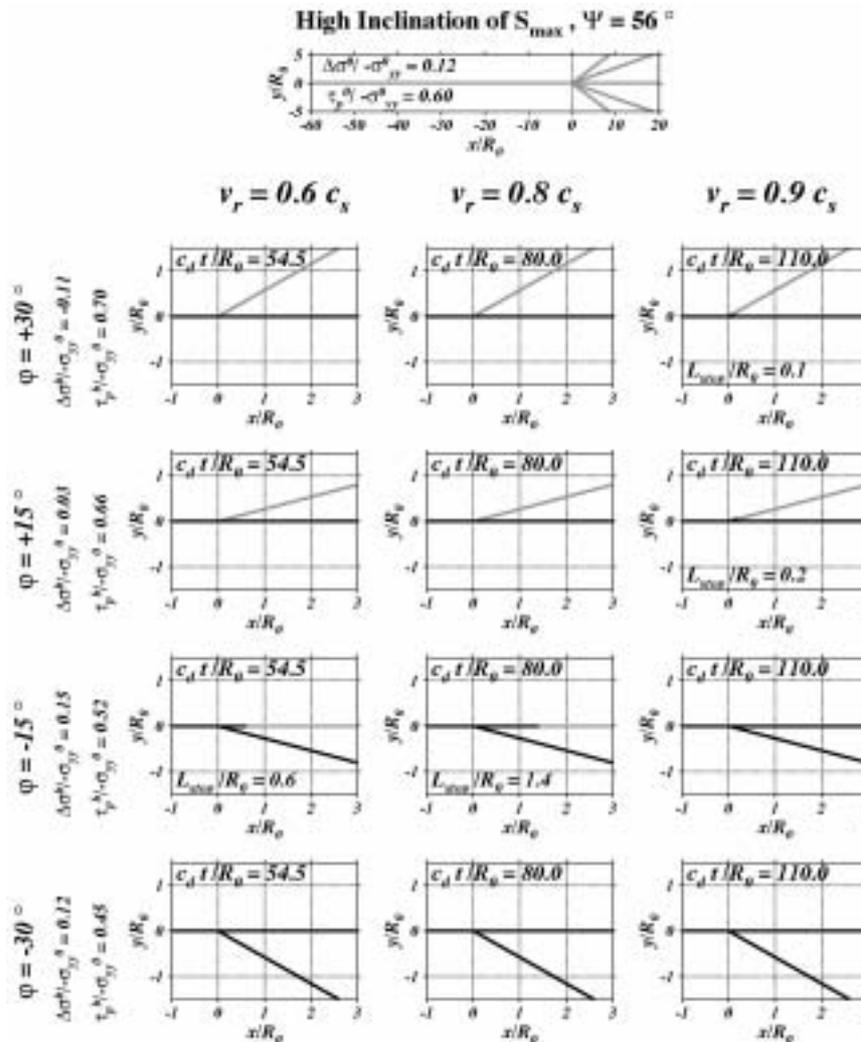


図3 (a) Diagram of final rupture traces in the vicinity of the intersection for cases with high inclination of  $S_{max}$ ,  $\Psi=56^\circ$ .  $L_{stop}$  indicates the length of arrested rupture once dynamically nucleated; those are given in terms of the slip-weakening zone size  $R_0$  for low-speed rupture along the main fault.

・最大主圧縮軸  $S_{max}$  のなす角  $\Psi=45^\circ$  の場合。初期応力状態で応力降下量が最大になる分岐断層の最適方向は  $-3^\circ$  (引っぱり側) である。(1) 圧縮側：初期応力場に対して分岐断層は破壊に適していないので主断層上の破壊が常に自己選択される。(2) 引っぱり側：傾向は  $56^\circ$  の時と同じであるが、停止した側の断層上の破壊の長さが長くなる (図3 b 参照)。

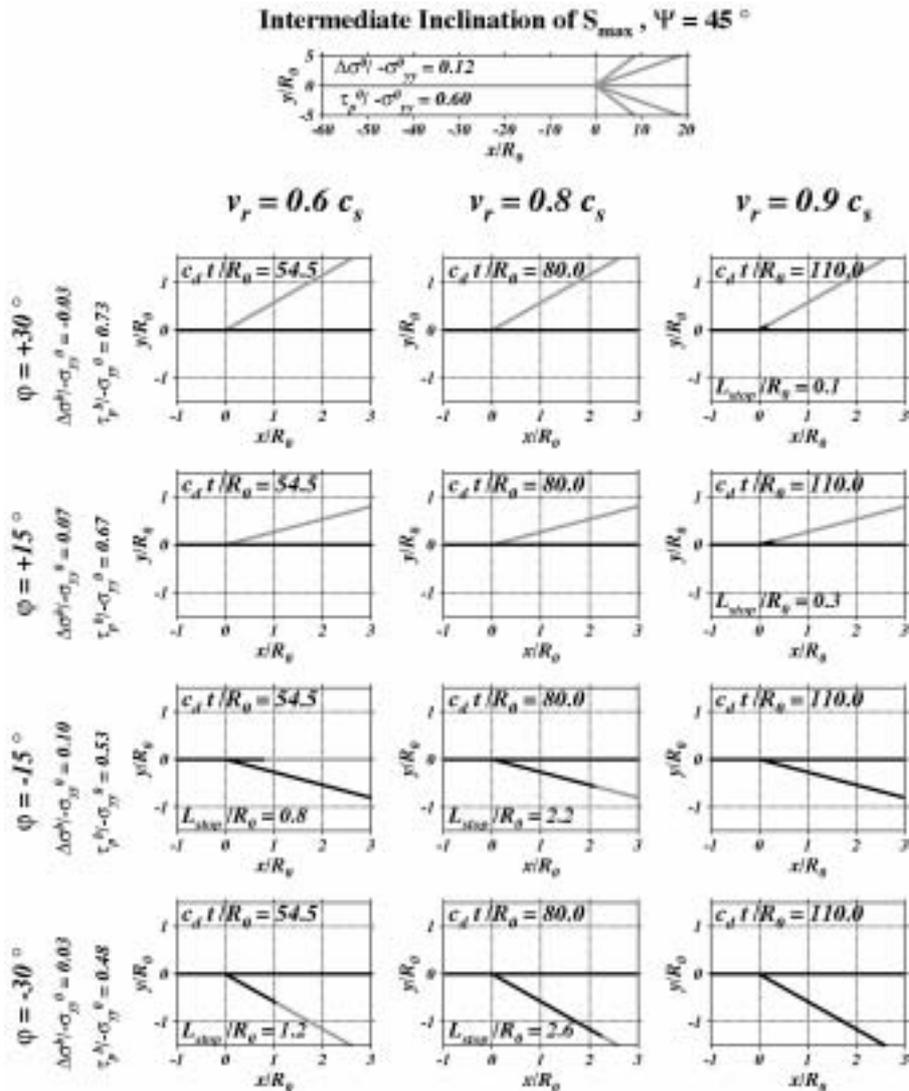


図 3 (b) Diagram of final rupture traces in the vicinity of the intersection for cases with intermediate inclination of  $S_{max}$ ,  $\Psi=45^\circ$ .

・最大主圧縮軸  $S_{max}$  のなす角  $\Psi=25^\circ$  の場合。初期応力状態で応力降下量が最大になる分岐断層の最適方向は  $+16^\circ$  (圧縮側) である。(1) 圧縮側：分岐断層は応力降下が正の破壊に適した方向にあるが、圧縮側にあるため特に主断層の破壊が分岐点に到達したときにピーク強度が高くなる。このような場合、分岐断層上の破壊は主断層の破壊先端が近づいた時ではなく破壊先端が通り過ぎた後に破壊励起する。これは「後方分岐現象(Branching Behind)」である。これは高速破壊時に起きる主断層面上の破壊先端周辺の応力集中によりもたらされる。従って、主断層上の破壊先端が遠ざかった後には、主断層上の応力解放領域(応力の影[Yamashita and Umeda(1994)])に覆われてしまい分岐断層上の破壊は停止する。(2) 引張り側：分岐断層は破壊に適していない(応力降下量が負)ので主断層上の破壊先端が分岐点に近づく際に動的に励起されるのみで、大規模な破壊にまで成長できない(図3c 参照)。

Intermediately Low Inclination of  $S_{\max}$ ,  $\Psi = 25^\circ$

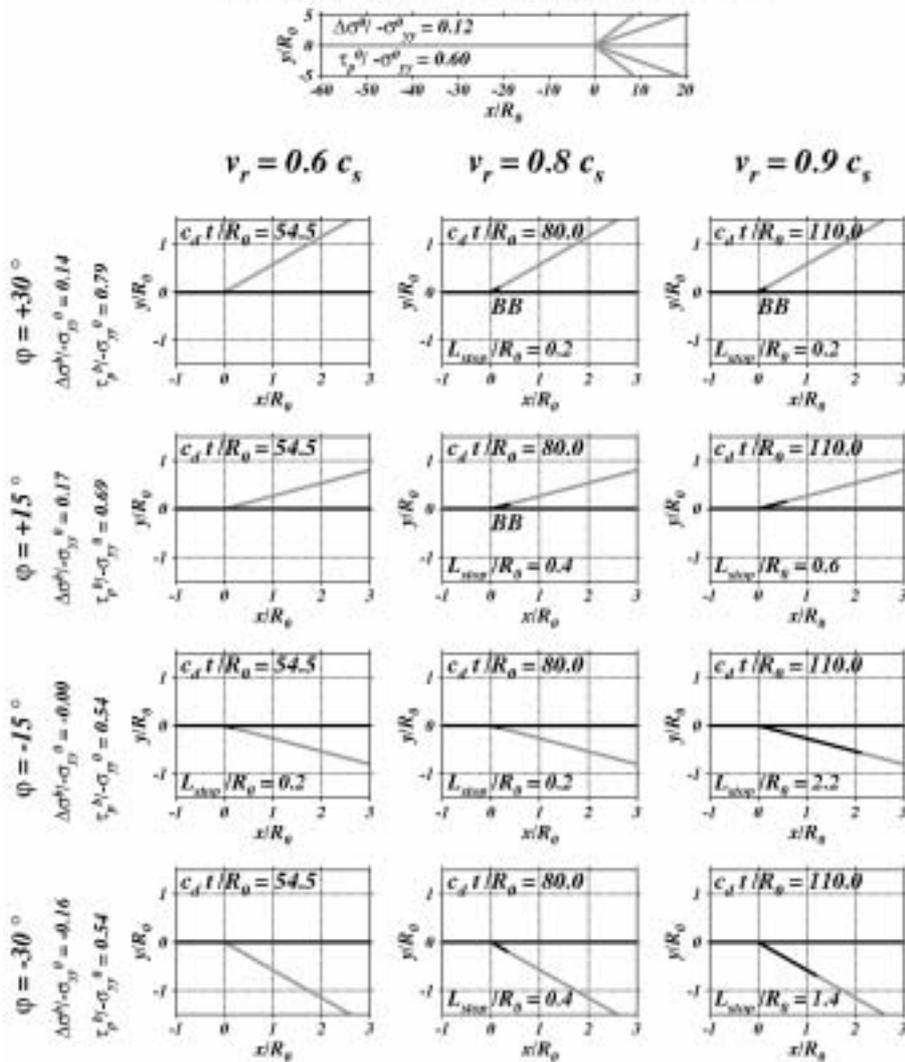


図3(c) Diagram of final rupture traces in the vicinity of the intersection for cases with intermediately low inclination of  $S_{\max}$ ,  $\Psi=25^\circ$ . BB indicates cases with *Branching Behind*; i.e., the rupture front on the main fault had propagated somewhat beyond the junction before slip initiated on the branch fault.

・最大主圧縮軸  $S_{\max}$  のなす角  $\Psi=13^\circ$  の場合。初期応力状態で応力降下量が最大になる分岐断層の最適方向は  $+29^\circ$  (圧縮側) である。(1) 圧縮側:  $30^\circ$  の場合にはいずれも後方分岐を起こすが、破壊速度が低速の場合は主断層上の破壊先端周辺の応力集中が十分でなく、分岐断層上で励起した破壊は応力の影に入り停止する。高速の場合には、分岐断層の破壊励起の継続が大規模破壊へと至るまで十分に起きることにより両断層状の同時破壊となる。 $15^\circ$  の場合、分岐断層上の破壊励起が成功し、応力降下量が大いことと狭い分岐角度による強い応力相互作用により、主断層上の破壊は停止して分岐断層上の破壊のみ継続する。(2) 引っ張り側: 常に主断層上の破壊が選択される(図3d 参照)。

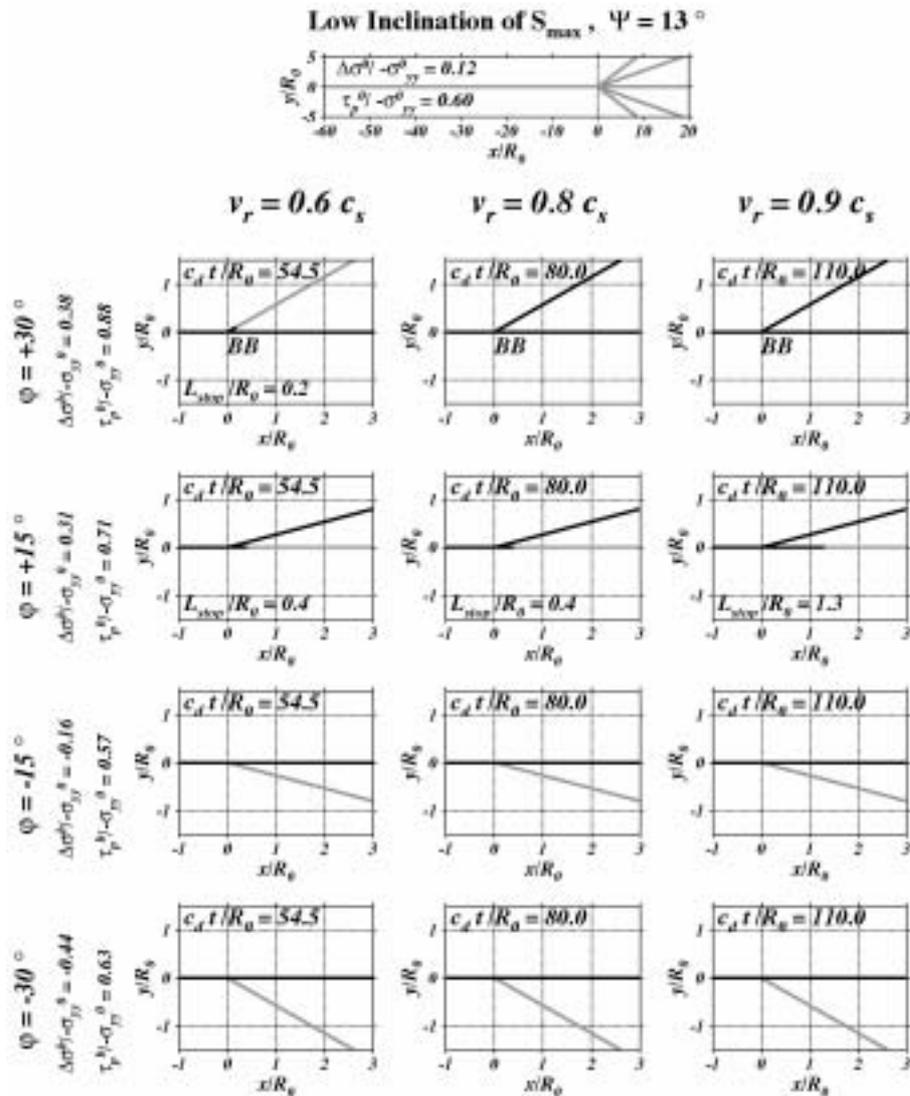


図3(d) Diagram of final rupture traces in the vicinity of the intersection for cases with low inclination of  $S_{max}$ ,  $\Psi=13^\circ$ .

(d) 結論ならびに今後の課題

我々は分岐断層構造における動学的に破壊経路が自己選択される破壊伝播シミュレーションを行い、初期応力場、破壊速度と分岐角度の効果を明らかにした。

第一に、我々は初期応力状態が動的分岐に対する最適な方向において重要な効果を持つことを見いだした。最適な分岐断層の方向は最大主圧縮軸の傾きが主断層面に対して浅い角度になるにつれ、引っ張り側から圧縮側へ移行する。この効果は Poliakov et al. (2002) が分岐条件の解析で示した定性的に予測されていたが、我々のシミュレーションと Aochi and Fukuyama (2002) の定量的解析と調和的であった。

第二に、Kame and Yamashita (1999a, 1999b) と Poliakov et al. (2002) で示唆されていた通り、我々は、高速伝播する破壊により高められた破壊先端付近の動的応力により、必ずしも初期応力場に対して最適でない方向の分岐断層上でも破壊が励起され得ることを見いだした。この効果は破壊速度がレイリー波速度に近づくにつれ非常に著しくなる。この効果により主断層と分岐断層上の両方での同時破壊が可能になる。

第三に、我々は分岐角度の効果を明確にした。動的分岐の後に両断層上での同時破壊進展は分岐角度

が小さいほどもう一方の断層上の破壊を応力の影により抑制する応力相互作用によって困難に成るであろう。

境界積分方程式法や他の最新の数値計算手法を用いて、我々は原理的には実際の断層系における将来の地震の破壊経路を、少なくともその幾何形状が既知である限りは、決定論的に予測できる段階に近づきつつある。しかし、現実の断層系への適用には克服すべき課題が残る。我々は地中で断層面の形状を正確に知っている状態とは言い難い。これに関しては、断層構造探査による地下断層の形状情報の精密化が期待される。また、我々の研究は断層系を取り巻く初期応力状態、特に分岐点付近の応力主軸の方向を知ることが重要であることを示唆する。これらの応力の方向には、その地域のテクトニックな応力だけでなく以前にその断層系で発生した地震の効果も含めなければいけない(この効果は広域応力から、強い局所的応力の偏向をもたらすかもしれない)。したがって、地殻応力状態の詳細の解明が期待される。そのような応力不均質が存在する場合には、破壊速度に依存する分岐点における経路選択は容易には予測できないであろう。しかし、地震危険度評価に貢献するためにはこのような研究を推進していくことは重要である。

我がここに示した解析は2次元であり、現在のコンピューターの限界内で分岐点付近の滑り弱化過程の性質を十分なグリッド分解能を達成できる例である。しかしながら、2次元モデルはやむを得ない近似解でしかない。少なくとも二つの、Aochi and Fukuyama(2002)のモデルで示された3次元の性質が断層分岐現象において重要な役割を果たす。一つは破壊速度の深さ方向分布であり(なぜなら堆積層や地殻浅部における帯水状態の違いによって、破壊速度は地殻浅部では遅いことが一般的である)、もう一つは破壊先端の不規則な形状である(2次元モデルと異なり、3次元では破壊面の前線が同時に分岐点に到着しないであろう)。更なる3次元モデリングと実際のフィールド調査の事例解析によって、3次元の性質がどれだけ重要か示していく必要がある。

#### (e) 引用文献

- 1) Aochi, H., and E. Fukuyama: Three-dimensional non-planar simulation of the 1992 Landers earthquake, *Journal of Geophysical Research*, 107 (B2), cn: 2035, doi: 10.1029/2000JB000061, pp. ESE 4-1 to 4-12, 2002.
- 2) Aochi, H., E. Fukuyama, and M. Matsu'ura: Spontaneous rupture propagation on a non-planar fault in 3D elastic medium, *Pure and Applied Geophysics*, 157, 2003--2027, 2000a.
- 3) Aochi, H., E. Fukuyama, and M. Matsu'ura: Selectivity of spontaneous rupture propagation on a branched fault, *Geophysical Research Letters*, 27, 3635--3638, 2000b.
- 4) Aochi, H., R. Madariaga, and E. Fukuyama: Effect of normal stress during rupture propagation along non-planar faults, *Journal of Geophysical Research*, 107 (B2), cn: 2038, doi: 10.1029/2001JB000500, pp. ESE 5-1 to 5-10, 2002.
- 5) Archuleta, R. J.: A faulting model for the 1979 Imperial Valley earthquake, *Journal of Geophysical Research*, 89, 4559--4585, 1984
- 6) Cocco, M., and J. R. Rice: Pore pressure and poroelasticity effects in Coulomb stress analysis of earthquake interactions, *Journal of Geophysical Research*, 107 (B2), cn: 2030, doi: 10.1029/2000JB000138, pp. ESE 2-1 to 2-17, 2002.
- 7) Ida, Y.: Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and Griffith's specific surface energy, *Journal of Geophysical Research*, 77, 3796-3805, 1972.

- 8) Kame, N., and T. Yamashita: A new light on arresting mechanism of dynamic earthquake faulting, *Geophysical Research Letters*, 26, 1997-2000, 1999a.
- 9) Kame, N., and T. Yamashita: Simulation of spontaneous growth of dynamic crack without constraints on the crack tip path, *Geophysical Journal International*, 139, 349-358, 1999b.
- 10) Kame, N., and T. Yamashita: Dynamic branching, arresting of rupture and seismic wave radiation in self-chosen crack path modeling, submitted to *Geophysical Journal International*, 2002.
- 11) King, G. C. P.: Speculations on the geometry of the initiation and termination process of earthquake rupture and its relation to morphology and geological structure, *Pure and Applied Geophysics*, 124, 567--585, 1986.
- 12) King, G. C. P., and J. Nabelek: The role of fault bends in the initiation and termination of earthquake rupture, *Science*, 228, 984-987, 1985.
- 13) Palmer, A. C., and J. R. Rice: The growth of slip surfaces in the progressive failure of over-consolidated clay, *Proceedings of Royal Society of London, A* 332, 527-548, 1973.
- 14) Poliakov, A. N. B., R. Dmowska and J. R. Rice: Dynamic shear rupture interactions with fault bends and off-axis secondary faulting, *Journal of Geophysical Research*, 107 (B11), cn: 2295, doi: 10.1029/2001JB000572, pp. ESE 6-1 to 6-18, 2002.
- 15) Rice, J. R.: The mechanics of earthquake rupture, in, *Physics of the Earth's Interior (Proc. Int'l. School of Physics `Enrico Fermi', Course 78, pp. 555-649, 1979; ed. A. M. Dziewonski and E. Boschi)*, Italian Physical Society and North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1980.
- 16) Sibson, R.H.: Stopping of earthquake ruptures at dilatational fault jogs, *Nature*, 316, 248-251, 1985.
- 17) Sowers, J. M., J. R. Unruh, W. R. Lettis, and T. D. Rubin: Relationship of the Kickapoo fault to the Johnson Valley and Homestead Valley faults, San Bernardino County, California, *Bulletin of the Seismological Society America*, 84, 528--536, 1994.
- 18) Yamashita, T., and Y. Umeda: Earthquake rupture complexity due to dynamic nucleation and interaction of subsidiary faults, *Pure and Applied Geophysics*, 143, 89--116, 1994.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 論文発表

著者	題名	発表先	発表年月日
Nobuki Kame, James R. Rice and Renata Dmowska	Effects of pre-stress state and rupture velocity on dynamic fault branching	Journal of Geophysical Research Solid Earth-	Accepted January 18, 2003

2) 口頭発表 その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
Nobuki Kame, James R. Rice and	Effects of pre-stress state and rupture velocity on	日本地震学会秋期大会、 日本地震学会、	2002年 11月

Renata Dmowska	dynamic fault branching	横浜パシフィコ、日本。	12日
Nobuki Kame, James R. Rice and Renata Dmowska	Effects of pre-stress state and rupture velocity on dynamic fault branching	AGU 2002 Fall Meeting, American Geophysical Union, San Francisco, USA.	December 10, 2002

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定  
なし

(3)平成 15 年度業務計画案

平成 15 年度においては、今年度開始した研究を発展させ、動力学的パラメータの推定と特徴抽出、および複雑な断層面形状が破壊進展に及ぼす影響評価を行う。また、地震記録から直接に動的パラメータを推定するために、動的破壊モデルに基づく震源インバージョン手法の開発を行う。