

(1-2) 断層破壊面の動的結合過程と同等な不均質動力学モデルの構築の試み

亀伸樹 (九州大学大学院理学研究院)

kame@geo.kyushu-u.ac.jp

内田浩二 (九州大学大学院理学研究院)

uchida@geo.kyushu-u.ac.jp

(a) 業務の要約

従来の波形逆解析において推定されてきた断層パラメタ不均質と、断層帯で生じている複雑な破壊過程の実体とを関連づけるため、断層破壊面の動的結合過程と等価な不均質モデルの構築を試みた。まず、モード II 型断層の動力学モデルを用いて、主亀裂から開始した破壊が副亀裂と動的結合するシミュレーション (結合モデル) を行い、破壊過程の複雑さを調べた。結果、滑り速度は結合位置で大きく副亀裂内で小さく、また破壊速度は副亀裂の両端を境に不連続になり、特に副亀裂の内側で S 波速度を超えることが分かった。この過程で生じる高速度の滑り速度パルスは、高周波成分に富む地震波源となる。次に、この破壊過程の複雑さを、破壊パラメタ (破壊強度と応力降下量) が不均質に分布する中を主亀裂のみが成長するモデルにより同じ滑り速度分布の再現を試みた (不均質モデル)。その結果、副亀裂付近は破壊強度の減少領域、応力降下量の増加領域として現れた。これらの不均質分布形状の特徴は、古典的な孤立亀裂の破壊進展理論における短周期地震波の放射機構の条件を満たしていることが分かった。

(b) 業務の成果

はじめに

観測地震波形の逆解析と断層の動力学モデリングは近年めざましい進歩を遂げた (Ide and Takeo, 1997¹⁾)。これまで波形逆解析手法においては、破壊フロントが単調に拡大する平面震源モデルが用いられてきた。これは、地下断層構造の詳細な幾何形状情報が不足しているのに加えて、波形データの分解能が破壊フロントの詳細を決定するには不十分であるからである。実際の地震断層は、第一次近似的には平面であるが、セグメント構造、および飛び・屈曲・分岐構造を示す。これらの断層面形状が地震破壊成長に影響を及ぼすことが近年の地震破壊シミュレーションから明らかにされてきた (Harris and Day, 1999²; Kame and Yamashita, 1999³; Kame et al., 2003⁴; Aochi et al., 2000⁵; Aochi et al., 2000⁶; Oglesby and Archuleta, 2003⁷)。また、結合・収束といった単調に拡大しない破壊フロントにより生じる複雑さについても動力学モデルによる研究が行われてきた (例えば、断層帯中の亀裂の多重合体 (Kame and Yamashita, 1997⁸); アスペリティー周上で起きる破壊フロントの衝突 (Fukuyama and Madariaga⁹); 円形バリアを回り込む破壊フロント (Dunham et al., 2003¹⁰))。

断層構造や破壊フロントの拡大様式により生じる破壊過程の複雑さが明らかになってきた現在、従来の波形逆解析において推定されてきた不均質と複雑な破壊過程の実体との対応を示すことは、地震発生地域の断層構造・地殻応力といった情報とそこでの地震発生による地震波形情報とを関係づける観点から重要である。本研究の目的は、近年発展したこ

れら非平面断層や非単調拡大破壊の動力学モデリングの研究成果をふまえ、破壊に影響を与えるこれらの要素が、地震断層の破壊過程にどのような複雑さ生み出し、単調拡大する平面断層を過程した断層モデルを用いた逆解析においてどのような見かけの不均質性となって現れているか明らかにすることである。ここでは、その第一歩として、二つの亀裂面が合体するという単純なモデルが、従来の単調に拡大する孤立亀裂を仮定したモデルにおいて、どのような「見かけの不均質性」として対応するのか調査した。

動的破壊成長の計算手法

ここでは地震発生を無限均質等方弾性体中のモードII型亀裂の動的成長過程としてモデル化する。これらの亀裂面はデカルト座標系 (x, y) の $x = 0$ 平面上に位置するものとする。我々はこの問題を境界積分方程式法³⁾を用いて解く。定式化において、亀裂面上の応力は代数方程式により亀裂面上の滑り速度と関係づけられる。亀裂の滑っている表面に対して、我々は単純に線形減少する滑り弱摩擦構成則 (Ida, 1972¹¹⁾) を仮定する。境界積分方程式法において、モードII亀裂表面上のせん断トラクション Tt^{ln} と亀裂面上の滑り速度 Vt^{ln} は以下の式で関係づけられる：

$$Tt^{ln} = -(\mu/2C_s) Vt^{ln} + \sum_{k < n} \sum_i K^{ln:ik} Vt^{ik} + \tau_0^{ln}, \quad \text{式(1)}$$

$0 < \Delta t Vt^{ln} + Dt^{ln} < Dc$ の場合,

$$Tt^{ln} = (\tau_p^{ln} - \tau_r^{ln}) / Dc (\Delta t Vt^{ln} + Dt^{ln}) + \tau_r^{ln}, \quad \text{式(2a)}$$

$Dc < \Delta t Vt^{ln} + Dt^{ln}$ の場合,

$$Tt^{ln} = \tau_r^{ln}, \quad \text{式(2b)}$$

ここで、

$$Dt^{ln} = \Delta t \sum_{k=0:n-1} Vt^{ln}, \quad \text{式(3)}$$

であり、 $K^{ln:ik}$ は、 (i, j) にある滑り速度要素が (l, n) に作用する応力のせん断成分を表す。二次元破壊モードに対する $K^{ln:ik}$ の表現は Tada and Madariaga (2001)¹²⁾ に網羅的に述べられている。初期応力 $\tau_0^{ln} = \sigma_{0xy} + \Delta\tau_0^{static}$ は、載荷応力 σ_{0xy} とプレスリップによる応力 $\Delta\tau_0^{static}$ から構成される。式(1)は、亀裂面上の境界条件を表し、式(2)は亀裂面に作用する摩擦構成則を示す。 τ_p^{ln} は破壊強度、 τ_r^{ln} は残留強度、 Dc は臨界滑り量、 μ は剛性率である。 Dt^{ln} は $t = n \Delta t$ において既知であることに注意する。我々は各々の時間ステップにおいて式(1)と式(2)の連立方程式を解くことにより自発的な破壊成長過程を研究する。

以下の数値計算においては、全てのパラメタは無次元量 $Tt' = Tt / \sigma_{0yy}$, $Vt' = Vt \mu / \sigma_{0yy}$, $x' = x / \Delta x$, $t' = t C_s / \Delta x$ を用いた。 C_p は P波速度、 C_s は S波速度を表し、 $C_p / C_s = 1.7321$ とする。時間離散間隔・応力評価点の時間位置はそれぞれ $C_s \Delta t / \Delta x = 1/4$, $et = 1.0$ とした¹⁹⁾。これらの規格化は、載荷法線応力、グリッド長、時間ステップの倍長に基づいている。以下、簡単な為プライム記号は簡単のため省略した。数値計算の安定化のために導入された粘性項³⁾の係数は 0.5 とした。

モデルと境界条件

我々は三つのモデルを考える。(a)「基準モデル」：主亀裂から動的破壊を開始し、均質パラメタ分布中を伝播し、バリアで停止する。(b)「結合モデル」：主亀裂から動的破壊を開始し、副亀裂と動的結合を起こし、バリアで停止する。(c)「不均質モデル」：主亀裂が

破壊パラメタの不均質分布中を伝播し、「結合モデル」と同じ滑り速度分布を与える。全てのモデルにおいて、主亀裂では動的成長に先立ちプレスリップをおこし臨界状態にあるとする。「結合モデル」においては加えてプレスリップをおこした副亀裂を考える（図1）。

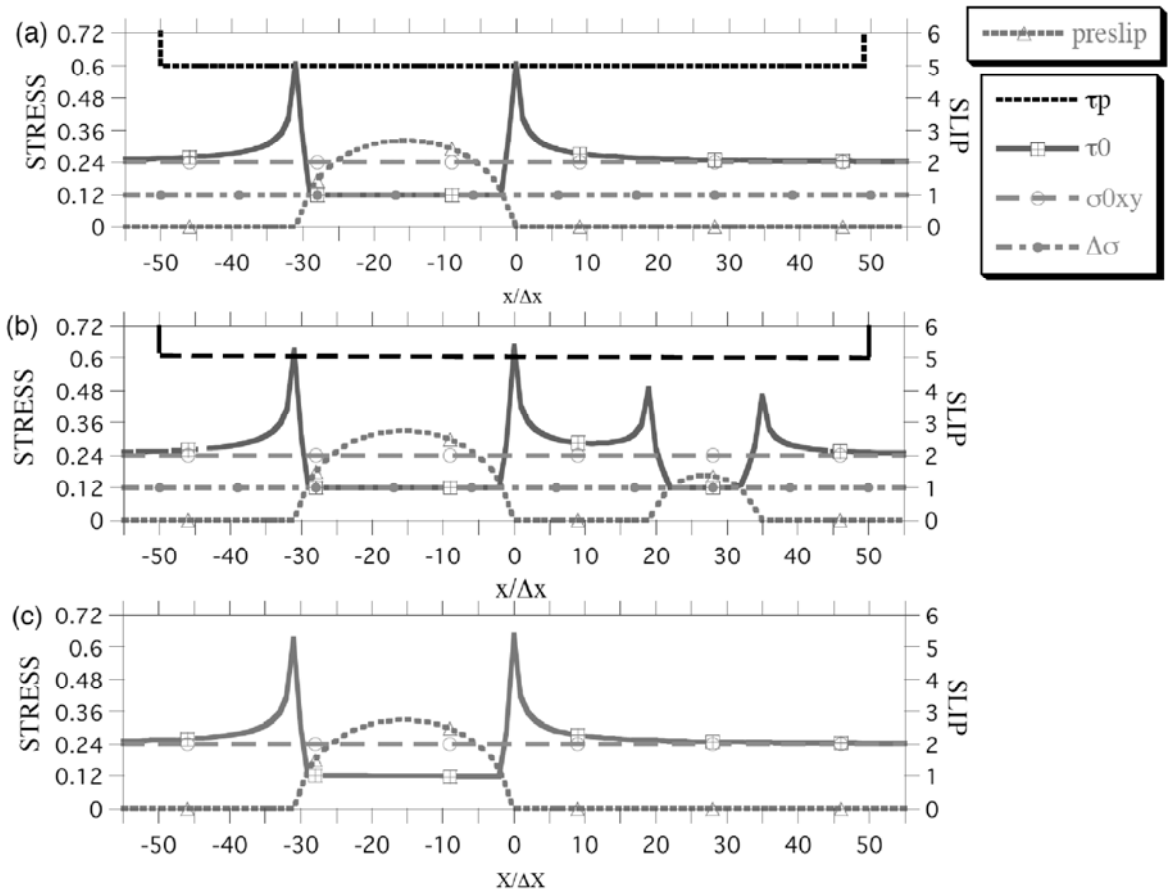


図1 三つのモデルの初期亀裂配置と応力、滑り、破壊強度、応力降下量の分布。a) 「基準モデル」・b) 「結合モデル」において破壊強度 τ_p 、载荷応力 σ_{0xy} 、残留強度 τ_r はそれぞれ0.6, 0.24, 0.12に取り、空間一様分布とした。本研究では、c) 「不均質モデル」における破壊強度 τ_p 、応力降下量 $\Delta\sigma$ の分布を推定する。破壊はバリア領域 ($x < -50$, $x > 50$) にて停止する。主亀裂と副亀裂の初期位置はそれぞれ $-30 < x/\Delta x < 0$, $20 < \Delta x < 35$ とする。

「基準モデル」と「結合モデル」の破壊過程

時刻 $t = 0$ に破壊開始させ、摩擦構成則に従う亀裂の自発的な動的成長を模擬する。図2に「基準モデル」と「結合モデル」の亀裂面上の滑り速度履歴を示す。

「基準モデル」では破壊開始後、破壊速度は単調に増加し、モード II 型破壊の終端速度であるレイリー波速度に漸近していく。破壊フロント付近に大きな滑り速度が分布し、亀裂長が大きくなるにつれフロント付近の滑り速度は増加していく。そして破壊がバリア領域に達すると、破壊の停止が突然起きる。亀裂内に停止フェーズが伝わっていくのが見える。

「結合モデル」では、主亀裂の右破壊フロントの接近により副亀裂左端も破壊成長を開始し $t/dt = 152$ に結合する。この時、結合地点($x=18$)付近で大きな破壊速度が生じているのが見て取れる。「基準モデル」の同じ位置と比較して滑り速度は約 1.69 倍大きくなる。主亀裂の右破壊フロントが、副亀裂の内側を通過する間は、滑り速度は小さくなる。これは、そこで既に歪みエネルギーが解放されているからである。破壊強度に関しては、破壊に先立ち残留強度レベルまで低下しているため、破壊速度は不連続に加速し、P 波速度に達する。破壊フロントが副亀裂内を通過した後、副亀裂右側の未破壊領域($x > 35$)を破壊しはじめる。この時、滑り速度は増加に転じ、破壊速度は不連続に減少しレイリー波速度より小さい速度になる。

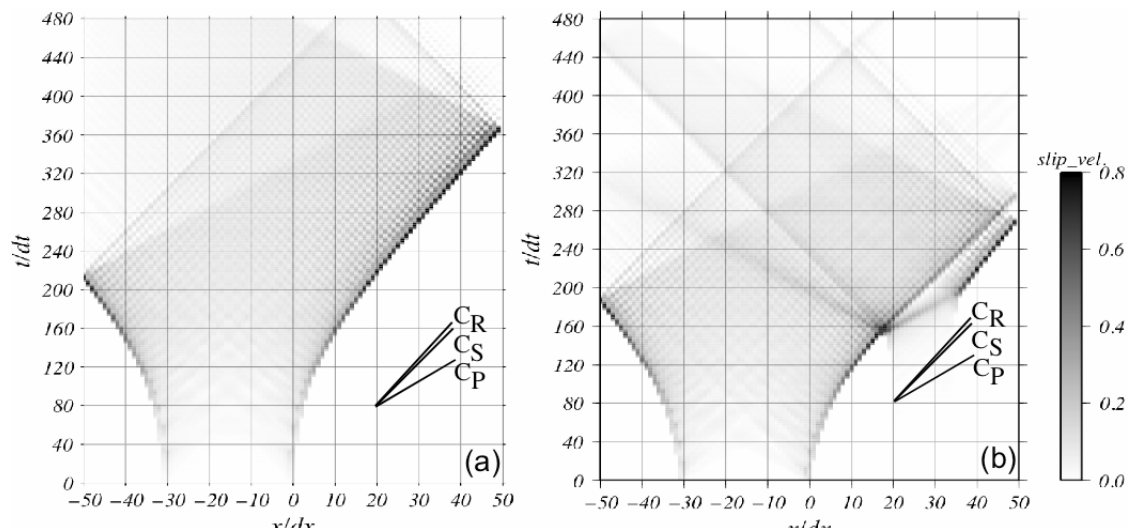


図2 (a)「基準モデル」と(b)「結合モデル」の滑り速度履歴。レイリー波速度 V_R 、S 波速度 C_S 、P 波速度 C_P を参照速度として示す。

「基準モデル」と「結合モデル」の放射地震波

一旦、すべり速度履歴が得られれば、表現定理式を用いて放射される弾性波形を合成することができる。ここで我々は、「基準モデル」と「結合モデル」から放射される加速度波形を比較し、結合過程に特徴的なフェーズについて抽出することにする。図3に加速度の合成波形を示す。観測点は亀裂平面の極近く $y/Dx = 2$ 上に $x/Dx = 1$ から 65 まで等間隔に分布する 34 点に設定した。

滑り方向と平行な x_1 成分(図3左)の波形において、「基準モデル」では破壊開始($x=0$)から破壊停止($x=50$)までの破壊成長に伴い大きくなる破壊フロント付近の滑り速度と良い対応を示す。滑りが直下に存在しない観測点($x > 50$)では、振幅が小さくなる。「結合モデル」では、結合部($x=18$)の大きな滑り速度に対応する「結合フェーズ」が同定できる。副亀裂内では小さい滑り速度のため振幅は小さい。副亀裂内をフロントがP波速度で伝わり、右端を通過後、再び振幅が大きくなり、バリア領域で小さくなる。

滑り方向と直交する x_2 成分(図3右)の波形において、「基準モデル」では破壊の拡大と共に破壊フロント付近の滑り速度が増加し、それに伴って波形の振幅は増加している。し

かし、バリア領域において破壊面が直下に存在しない観測点 ($x > 50$) においても振幅の低下が見られない。

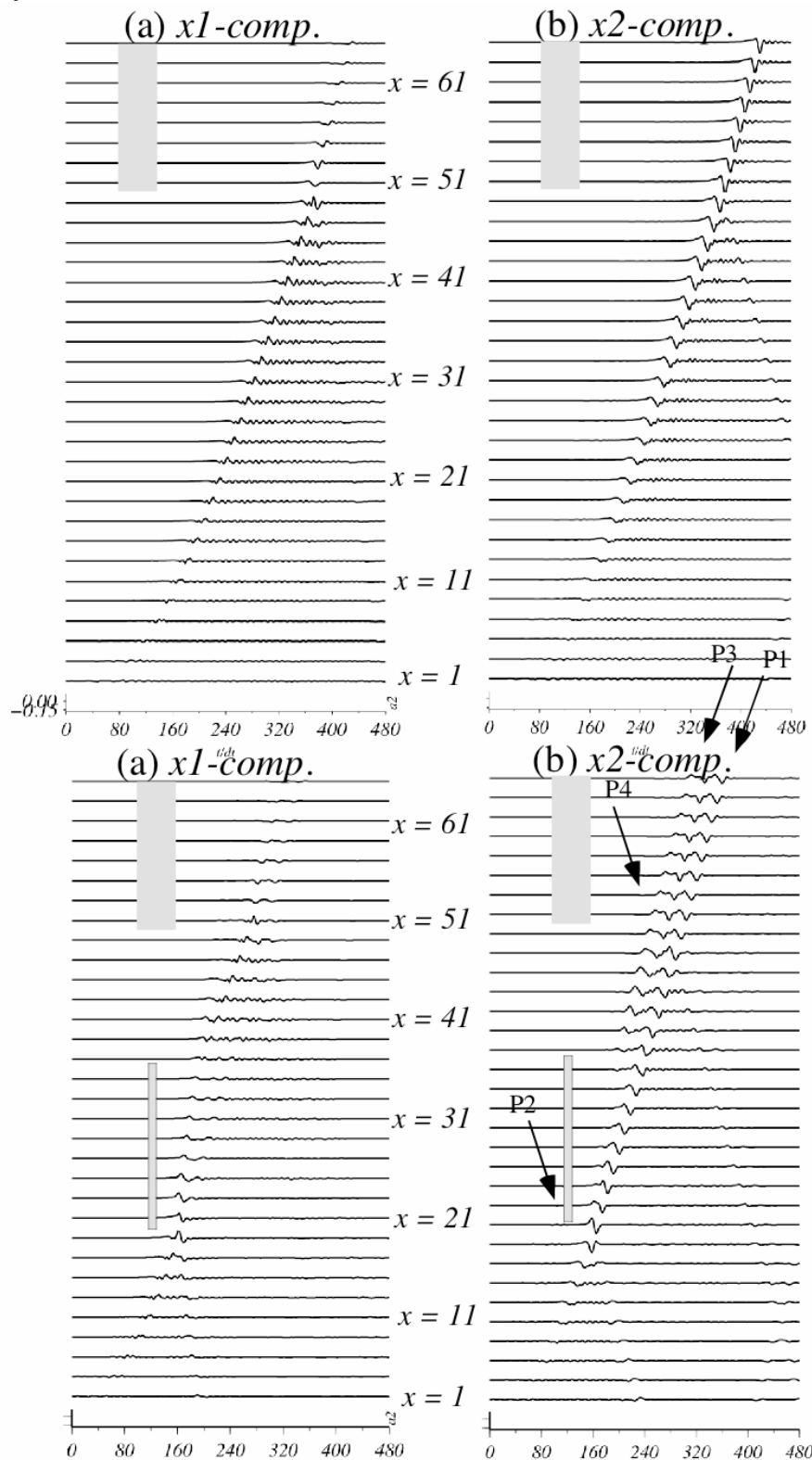


図3 近地の観測点における「基準モデル」(右)と「結合モデル」(左)の近地の速度変位波形の比較。横軸は時間。上が亀裂平行 $x1$ 成分、下が亀裂直交 $x2$ 成分。元データに無次元周波数 0.10 のローパスフィルターを通した。全ての成分は同じ振幅尺度で描かれている。灰色領域は副亀裂とバリア領域の範囲を示す。

これは、波形の x_2 成分は、S 波の放射パターンの方角特性を考慮すると主として S 波の伝播によるからである。破壊停止フェーズが $x=50$ のバリア地点より発生し、 x 軸負の方向へ伝わるのが見て取れる。

「結合モデル」では、主亀裂の破壊に伴うフェーズ P1 に加え、結合部分 ($x = 18$) からの結合フェーズ P2、また $x=35$ の副亀裂右端の未破壊領域への破壊フロントの進入によるフェーズ P3、 $x=50$ からの破壊停止フェーズ P4 が明瞭に見える。副亀裂内側での破壊フロントの速度が P 波速度となるため、フェーズ P1 とフェーズ P3 が分離する。

「不均質モデル」の構築手法

結合過程により生じる地震破壊過程の複雑さは、亀裂が単調に拡大するモデルを用いた場合、どのような「見かけの不均質」として現れるのであろうか。この問いに答えるために「結合モデル」と同じ滑り速度履歴を持つ「等価不均質モデル」の構築を試みる。

今回試みた解析方法について述べる。我々は载荷応力と主亀裂上のプレスリップを知っているが、副亀裂の存在は知らない場合を考える (図 1 (c) 「不均質モデル」参照)。主亀裂から始まる動的破壊が破壊強度と応力降下量の不均質分布の中を成長する過程で、「結合モデル」と同じ滑り速度を再現することを目指す (臨界滑り量はここでは空間一定値を仮定する)。まず、「結合モデル」の滑り速度履歴を用いて、式 (1) より、亀裂面上の応力の時空間履歴を求める。次に、亀裂上の各空間位置において、応力値の時間履歴における最大値・最小値を求める。これらの応力値の最大値をその位置での破壊強度、最小値を残留強度とする。こうして求めた破壊強度と残留強度の空間分布を図 4 に示す。このパラメタ分布を持つ「不均質モデル」において、主亀裂の破壊成長のシミュレーションを行い、滑り速度履歴を得る。実際に解析を行った結果、「結合モデル」の滑り速度の時空間発展のパターンをほぼ再現することに成功した。しかしながら、再現できない部分も確かに存在する。例えば、最大滑り速度の空間分布である (図 5)。結合により生じる高速度滑り速度の大きさは同程度になるが、最大値の場所がずれ、また、副亀裂内での分布が異なっている。

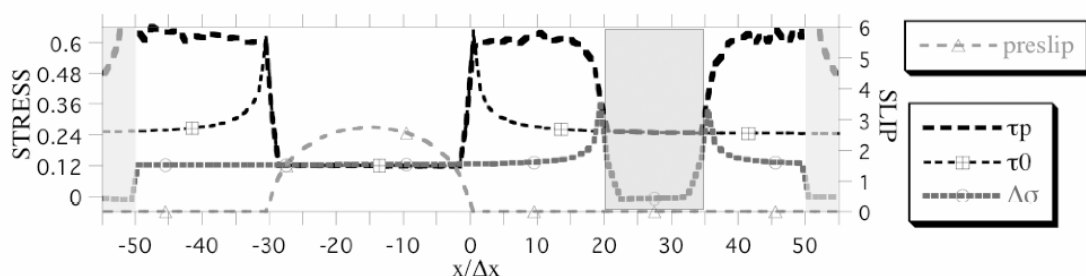


図 4 推定された「不均質モデル」における破壊強度と応力降下量の分布。灰色領域は副亀裂とバリアの空間位置を示す。

破壊結合過程の生み出す「見かけの不均質」の特徴

結合過程の「見かけの破壊パラメタの不均質」の特徴の考察と解釈をおこなう。副亀裂が存在していた付近に注目すると、破壊強度は副亀裂外側領域で亀裂境界に向かって急激

に減少し、応力降下量は急激に増加している。これらの特徴的な分布は、破壊強度、応力降下量共に、本当は存在するはずの副亀裂のプレスリップが作り出す特異的な応力場の形を反映している。これらの不均質の破壊過程への効果は次の通りである：主亀裂の破壊フロントが $x=20$ に近づくと、破壊強度の減少域・応力降下量の増加域に遭遇する。これらは共に破壊を加速する効果を持ち、滑り速度も応力降下量の大きさにより増加する。しかし、 $x=20$ を超えると、そこでは破壊強度・応力降下量ともに小さい値を持つ。そこでは、破壊フロントはP波速度という高速進展するが、滑り速度は小さくなる結果となる。この空間的な不均質が、高速滑り速度パルスを発生する。次に、 $x=35$ を超えると、破壊強度・応力降下量共に大きな領域になる。そこでは、破壊を抑制する効果（破壊強度大）と促進する効果（応力降下量大）が打ち消しあい、同じ応力降下量分布を持つ $x=20$ にくらべ相対的に小さな滑り速度となる（図5）。以上の破壊過程により、結合部付近に高速滑り速度が局在化する。Madariaga (1983)¹³⁾は孤立亀裂破壊伝播による高周波地震波生成機構の理論的研究において、破壊速度の不連続と特異的な応力降下量が、 ω^{-2} の周波数依存性を持つ同じ強さの高周波源となることを示した。「不均質モデル」において $x=20$ 付近においては、破壊強度減少と応力降下量増大による破壊速度の急激な加速の効果と、特異的な応力降下量そのものの効果が重なり、高周波数の波を放射する結果となる（図3のP2）。しかしながら $x=35$ 付近においては、破壊促進と破壊抑制の効果が打ち消し合い、相対的に高周波発生が小さくなる。本解析の結果、「結合モデル」の破壊過程は、「不均質モデル」において強度と応力降下量の特異的に減少・増加する「みかけの不均質分布」として現れることがわかった。

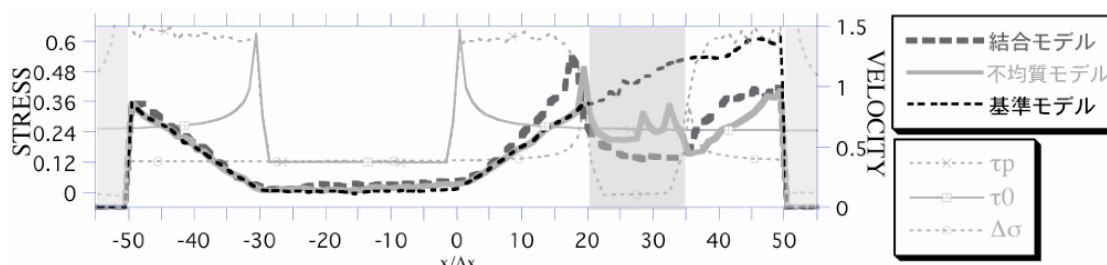


図5 三つのモデルの滑り速度履歴における最大滑り速度の空間分布図。「不均質モデル」の破壊パラメータ分布、初期応力分布を灰色線で示す。

「不均質モデル」の問題点

「結合モデル」と「不均質モデル」の滑り速度履歴は、完全には一致しない。これは「不均質モデル」には「結合モデル」に存在した基本的な力学効果が欠けているからである。それは「亀裂間に働く力学的相互作用」である。同一平面上に存在する亀裂は、互いの成長を強め合う効果を持つ。この効果により、結合に先立ち副亀裂の x 軸負の方向への破壊伝播が開始した（図2参照）。これにより、高速度滑りパルスの発生位置が $x=18$ にずれた。破壊フロントが単調に拡大するモデルには、この運動を取り入れることができない。力学的相互作用により、副亀裂上の滑り速度は、破壊フロントの運動に影響を及ぼす。これらが、滑り履歴が一致しない原因として考えられる。

(c) 結論ならびに今後の課題

本業務では、従来の波形逆解析において推定されてきた断層パラメタ不均質と、断層帯で生じている複雑な破壊過程の実体とを関連づけるため、断層破壊面の動的結合過程と等価な不均質モデルの構築を試みた。我々は二つの破壊面が動的結合をおこす「結合モデル」における破壊過程の複雑さを対象に選んだ。破壊成長のシミュレーションには境界積分方程式法を用い、同手法を用いた不均質破壊パラメタの推定方法（「不均質モデル」の構築法）を提案した。解析の結果、「結合モデル」と同じ破壊過程を「不均質モデル」で再現することに成功し、結合過程に特徴的な不均質パラメタ分布を明らかにした。さらに、二つのモデル間で一致しない部分については、その原因について特定することができた。

今回我々は複雑な地震破壊過程の例として破壊面の結合について解析を行った。はじめに述べた通り、破壊過程の複雑さの実体は破壊面合体のみならず、セグメント構造、および飛び・屈曲・分岐構造である可能性があり、これらの断層面の幾何形状が地震破壊成長に影響を及ぼすことが近年の地震破壊シミュレーションから明らかにされている。本業務において開発した「不均質モデル」構築手法を用いて、これらの複雑な断層構造により生じる「見かけの不均質」について明らかにすることが今後の課題である。

(d) 引用文献

- 1) Ide, S. and Takeo, M.; Determination of constitutive relation of fault slip based on seismic wave analysis, *J. Geophys. Res.*, 102, pp.27239-27391, 1997.
- 2) Harris, R. A. and Day, S. M.; Dynamic 3D simulations of earthquakes on en echelon faults, *Geophys. Res. Lett.*, 26, pp.2089-2092, 1999.
- 3) Kame, N. and Yamashita, T.; Simulation of the spontaneous growth of a dynamic crack without constraints on the crack tip path, *Geophys. J. Int.*, 139, pp.345-358, 1999.
- 4) Kame, N. and Yamashita, T.; Dynamic branching, arresting of rupture and the seismic wave radiation in a self-chosen crack path modelling, *Geophys. J. Int.*, 155, pp.1042-1050, 2003.
- 5) Kame, N., Rice, J.R. and Dmowska, R.; Effects of pre-stress state and rupture velocity on dynamic fault branching, *J. Geophys. Res.*, 108(B5), 2265, doi:10.1029/2002JB002189, 2003.
- 6) Aochi, H., Fukuyama, E. and Matsu'ura, M.; Spontaneous rupture propagation on a non-planar fault in 3D elastic medium, *Pure appl. Geophys.*, 157, pp.2003-2027, 2000.
- 7) Oglesby, D. D. and Archuleta, R. J.; The three-dimensional dynamics of a non-planar thrust fault, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93,2222-2235; DOI: 10.1785/0120020204, 2003.
- 8) Kame, N. and Yamashita, T.; Dynamic nucleation process of shallow earthquake faulting in a fault zone, *Geophys. J. Int.*, pp.128, 204-216, 1997.
- 9) Fukuyama, E. and Madariaga, R.; Dynamic propagation and interaction of a rupture front on a planar fault, *Pure and Applied Geophysics*, 157, pp.1959-1979, 2000.
- 10) Dunham, E. M., Favreau, P. and Carlson, J. M.; A super-shear transition

mechanisms for cracks. Science, 299, pp.1157-1159, 2003.

- 11) Ida, Y.; Cohesive force across the slip of a longitudinal shear crack and Griffith's specific surface energy, J. Geophys. Res., 77, pp.3796-3805, 1972.
- 12) Tada, T. and Madariaga, R.; Dynamic modelling of the flat 2-D crack by a semi-analytic BIEM scheme, Int. J. Num. Methods Engin., 50, pp.227-251, 2001.
- 13) Madariaga, R.; High frequency radiation from dynamic earthquake fault models. Ann. Geophys., 1, pp.17-23, 1983.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
内田 浩二, 亀伸樹	Effect of crack coalescence on dynamic source-parameter estimation	地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会	平成 17 年 5 月 23 日
亀伸樹, 小国健二	不均質媒質中の地震破壊のシミュレーションー破壊現象の解析に適した有限要素法 FEM- β を用いてー	日本地震学会 2005 年度秋季大会	平成 17 年 10 月 20 日
Nobuki Kame and Kenji Oguni	Quasi-statically self-chosen faulting path modeling in heterogeneous medium: FEM-beta approach	American Geophysical Union 2005 Fall Meeting	平成 17 年 12 月 8 日

(g) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし