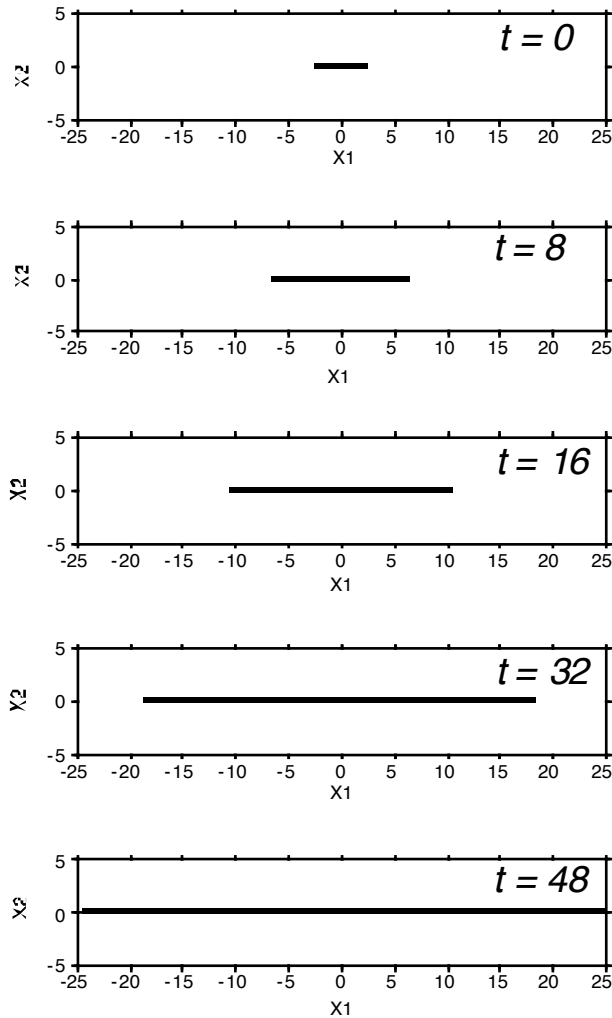


断層面形状の複雑化を考慮に入れた地震破壊ダイナミクス の理論的研究

2004年地震学会秋季大会
若手学術奨励賞受賞記念講演

九州大学 亀 伸樹

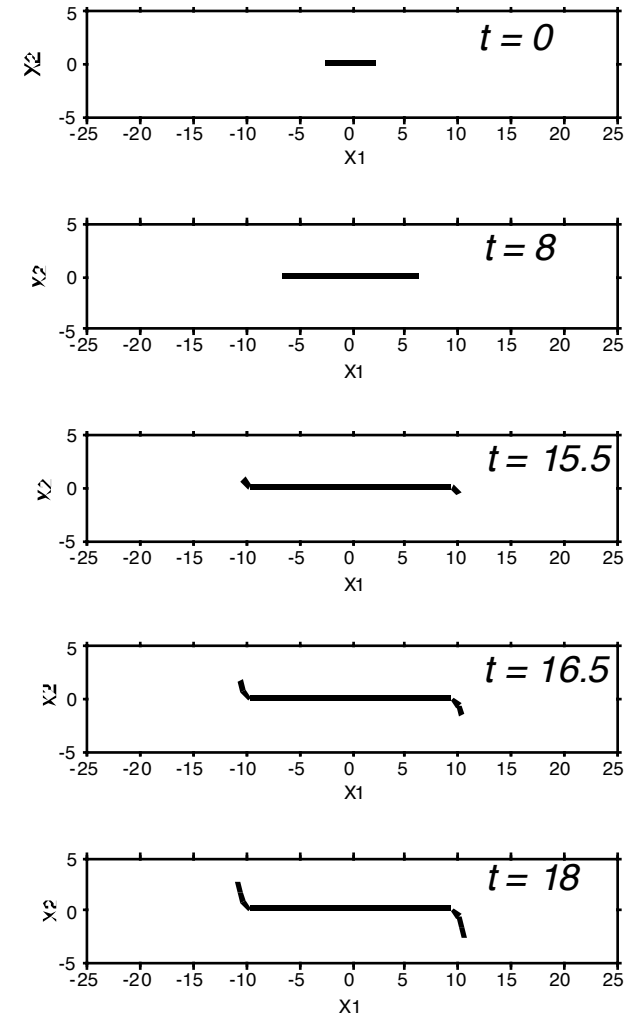
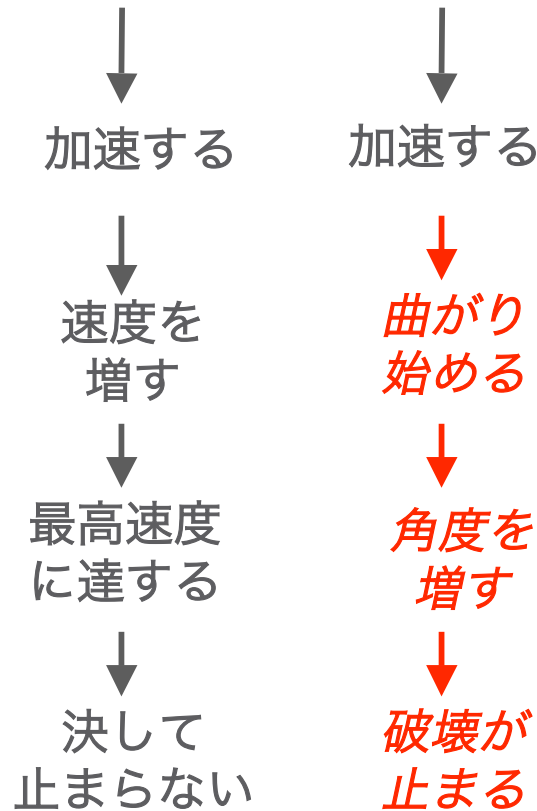
従来の破壊の理論



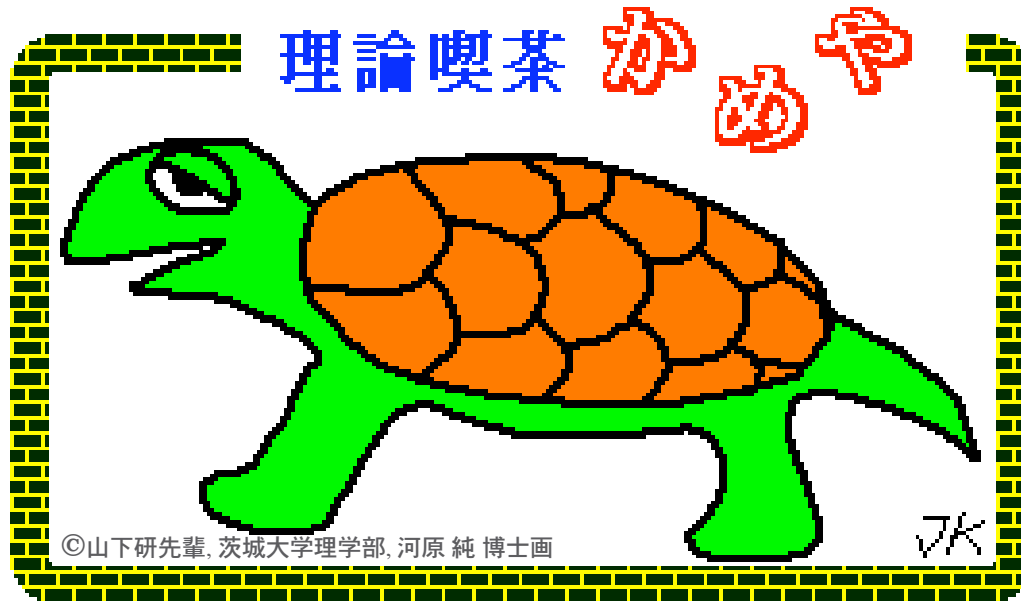
亀裂の動的成長のシミュレーション

本研究

破壊の開始



謝辞



山下研院生室看板



山下研直営 ★ 風味芳醇 ★ 滋養満点

- 亀裂の研究へ導いてくださった山下輝夫教授にこの場をお借りしまして御礼申し上げます。

亀 伸樹

本日の目次

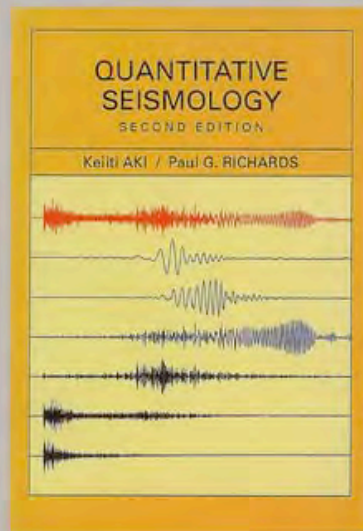
1. 破壊の予測：地震学における魅力的な問題
2. 地震の力学モデル：破壊の開始と停止
3. ではどうすれば地震は止まるのか：破壊面の形
4. 破壊が進むべき方向に成長するシミュレーション
5. 破壊面の複雑化による地震停止の仕組み

1. 地震学における最も魅力的な問題の一つは、

安芸敬一 P.G.リチャーズ

地震学 定量的アプローチ

上西幸司・亀 伸樹・青地秀雄 訳



古今書院

絶賛発売中

- 震源域の岩石の物理特性と
- その領域に存在するテクtonニックな応力の研究から、
- 地震の発生と結果として生じる地震の運動を予測することである

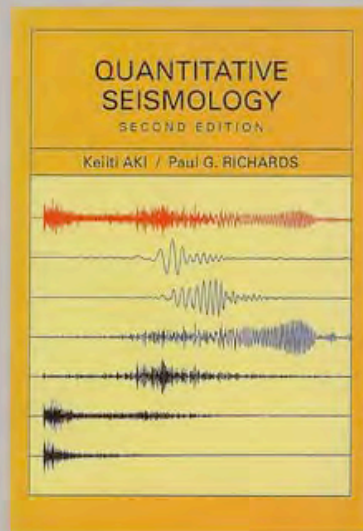
第11章「地震の震源：動力学」第2節
「自発的な平面破壊伝播の動力学」より

主な研究の進路が三つある

安芸敬一 P.G.リチャーズ

地震学 定量的アプローチ

上西幸司・亀 伸樹・青地秀雄 訳



古今書院

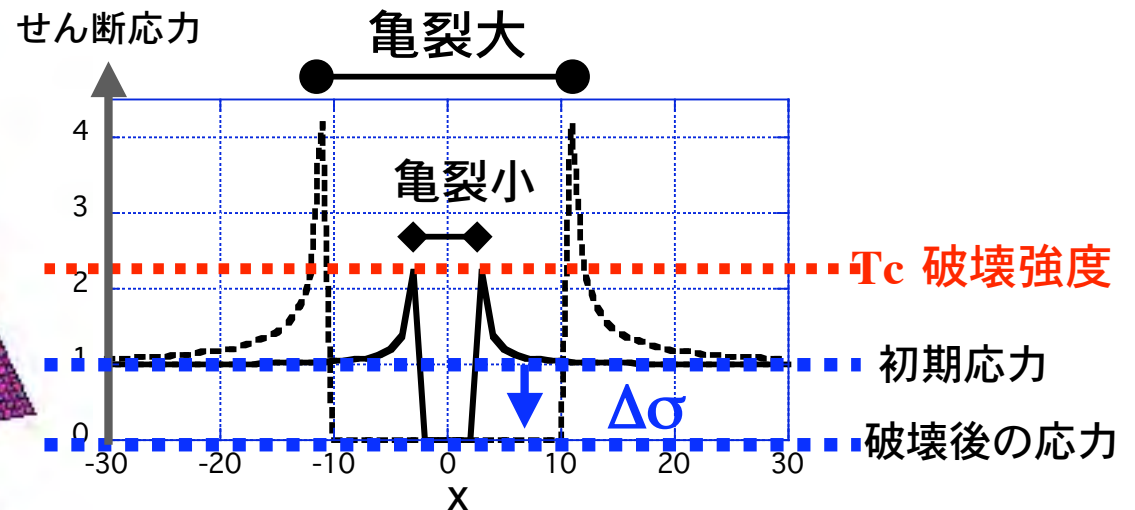
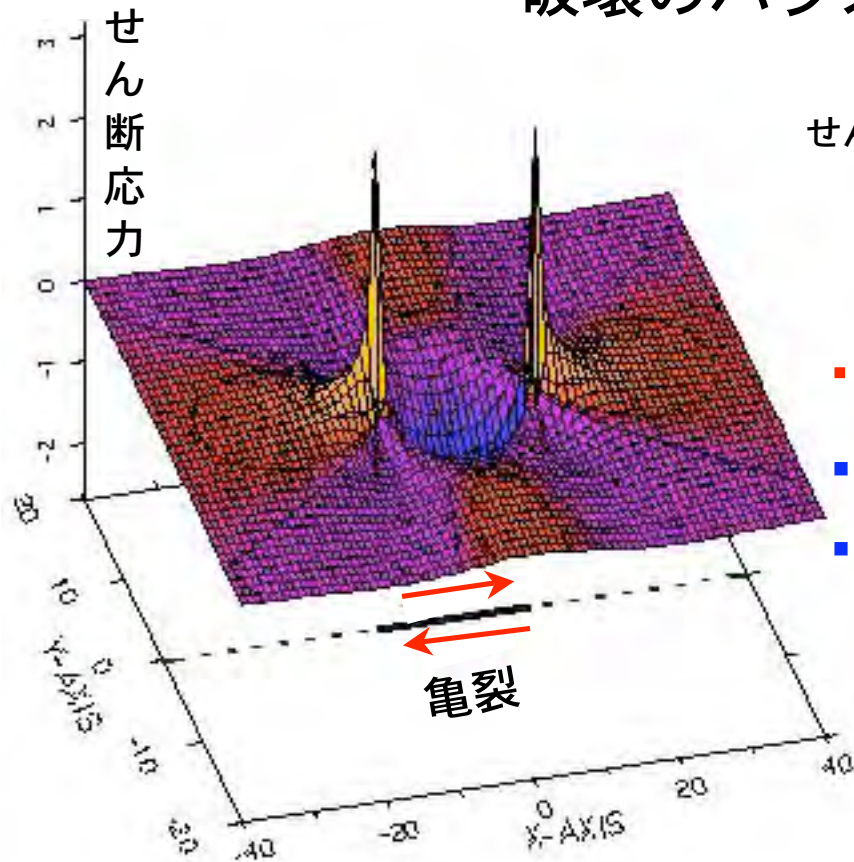
第11章「地震の震源：動力学」第2節
「自発的な平面破壊伝播の動力学」より

1. 固有表面エネルギーや終端領域の長さ、また摩擦の静的 動的な値といった断層粘土物質の特性と、その空間分布を調べなければならない
2. 断層帯に作用しているテクトニックな応力を決定しなくてはならない
3. 初期応力条件と断層帯の物性だけに基づいて、始まりから終わりまでの全体の破壊現象を予測することができなければならない

地震の力学モデルによる
破壊の進展・停止に関する理論的研究

2. 地震の力学モデル (a)破壊の開始

破壊のパラメタ：破壊強度 T_c と応力降下量 $\Delta\sigma$



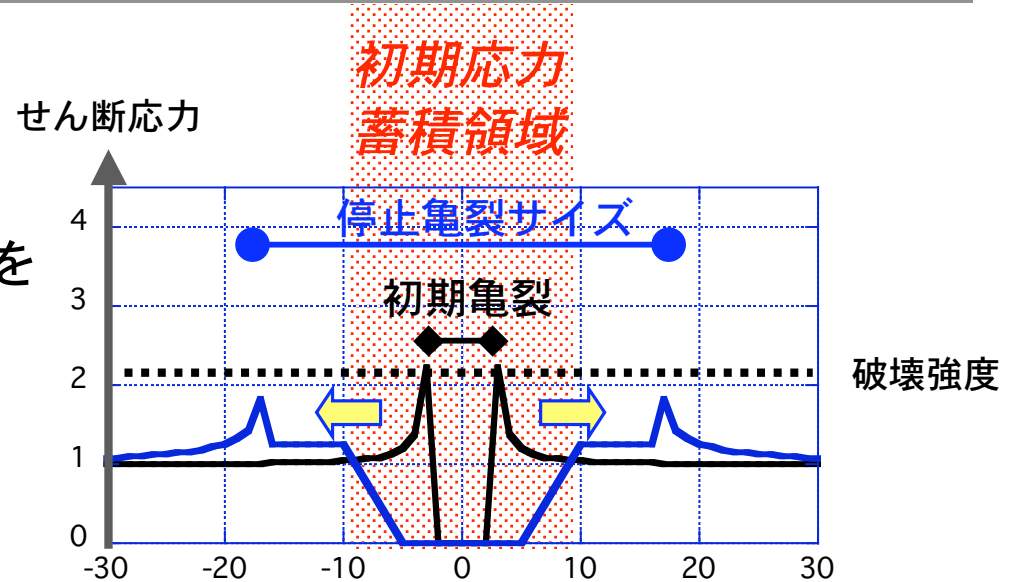
- 弾性体中の亀裂の進展・停止を破壊の力学に基づき決定する
- 動的成長の開始→高速破壊 (2-3km/s)

地震の力学モデル (b)破壊の停止

初期応力分布の不均質性

- 初期応力が加わっている領域を全て破壊しつくして止まる

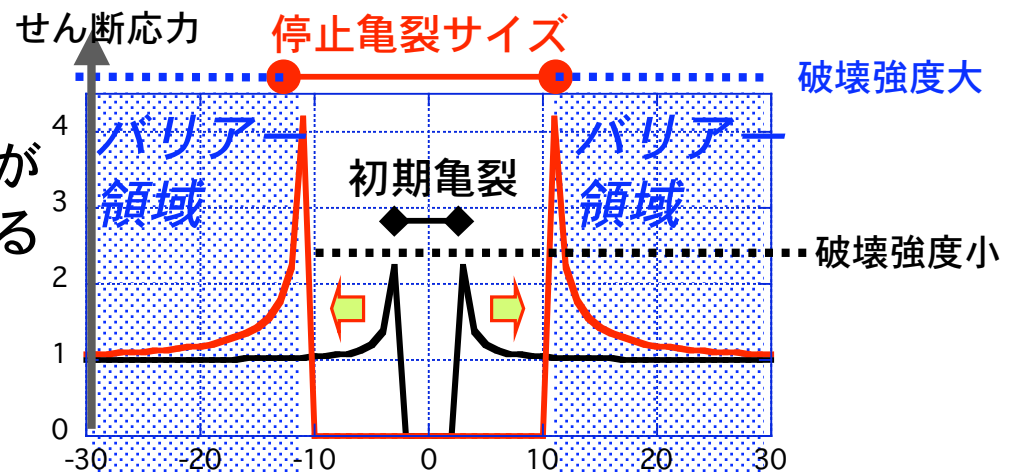
大地震直前に小地震発生



破壊強度分布の不均質性

- 破壊強度が局所的に高く、亀裂が進むことが出来ない領域で止まる

非現実的な強度が必用



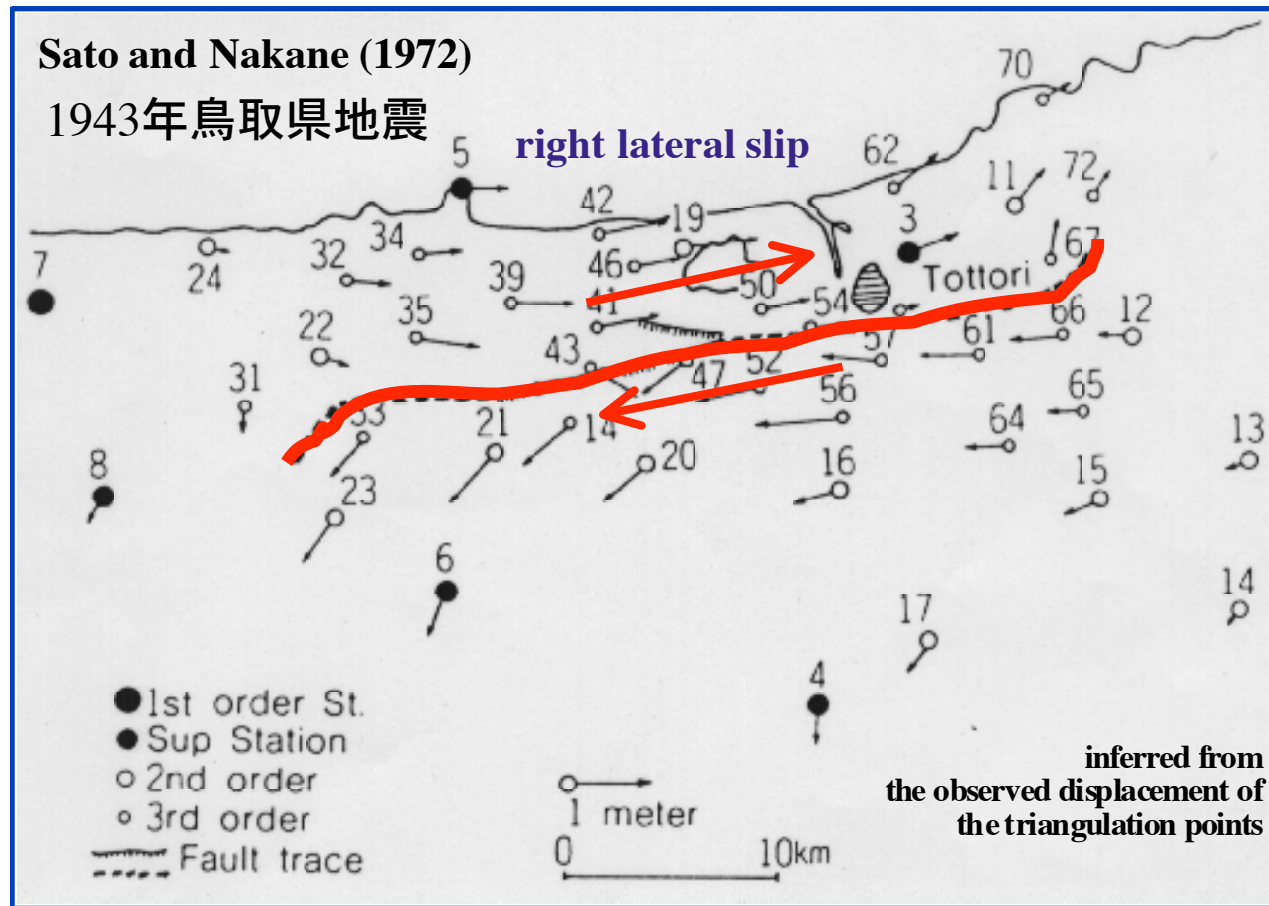
地震の力学モデル：破壊をなんとか止める

地震の大きさの観測データ

- **ゲーテンベルグ・リヒターの公式**
 - マグニチュードが1大きくなる毎に発生地震の数は10分の1に減る
 - 発生地震の数
 - M 3、 10000回（断層長およそ0.4 km）
 - M 4、 1000回
 - M 5、 100回
 - M 6、 10回
 - M 7、 1回（断層長およそ40 km）

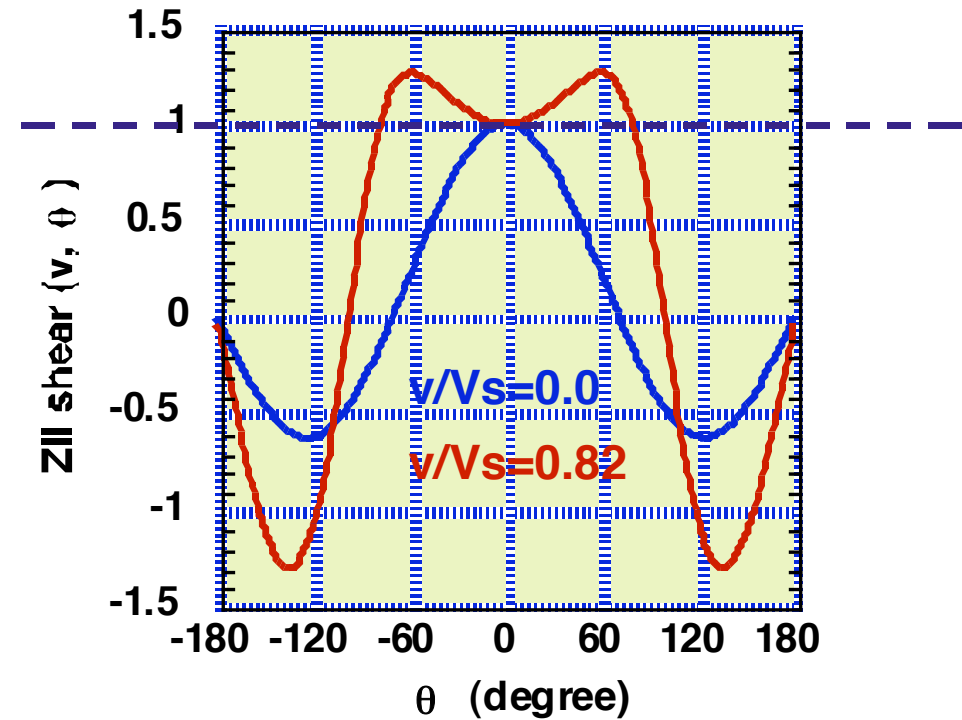
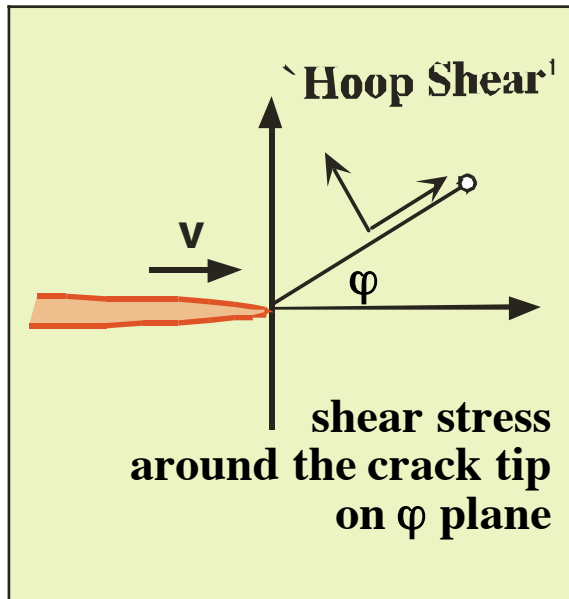
地震はすぐに止まるものが圧倒的に多い

3. では、地震はどのように止まるのだろうか？



1943年鳥取県地震の推定断層面：平面からのわずかなズレ

破壊は曲がろうとする：Yoffeの理論(1951)



- 破壊速度大 \rightarrow 最大せん断周応力の方向が平面外へずれる

4. 新しい計算手法の開発

$$\tau(\vec{x}, t) = -p \cdot f \cdot \int_{\text{wavecone}} \Delta u(\vec{\xi}, \tau) \cdot \frac{\partial^2}{\partial x_p \partial x_q} G h(\vec{x} - \vec{\xi}, t - \tau) d\xi d\tau$$

stress slip velocity kernel functions

stress evaluation point for the fracture criterion

crack surface

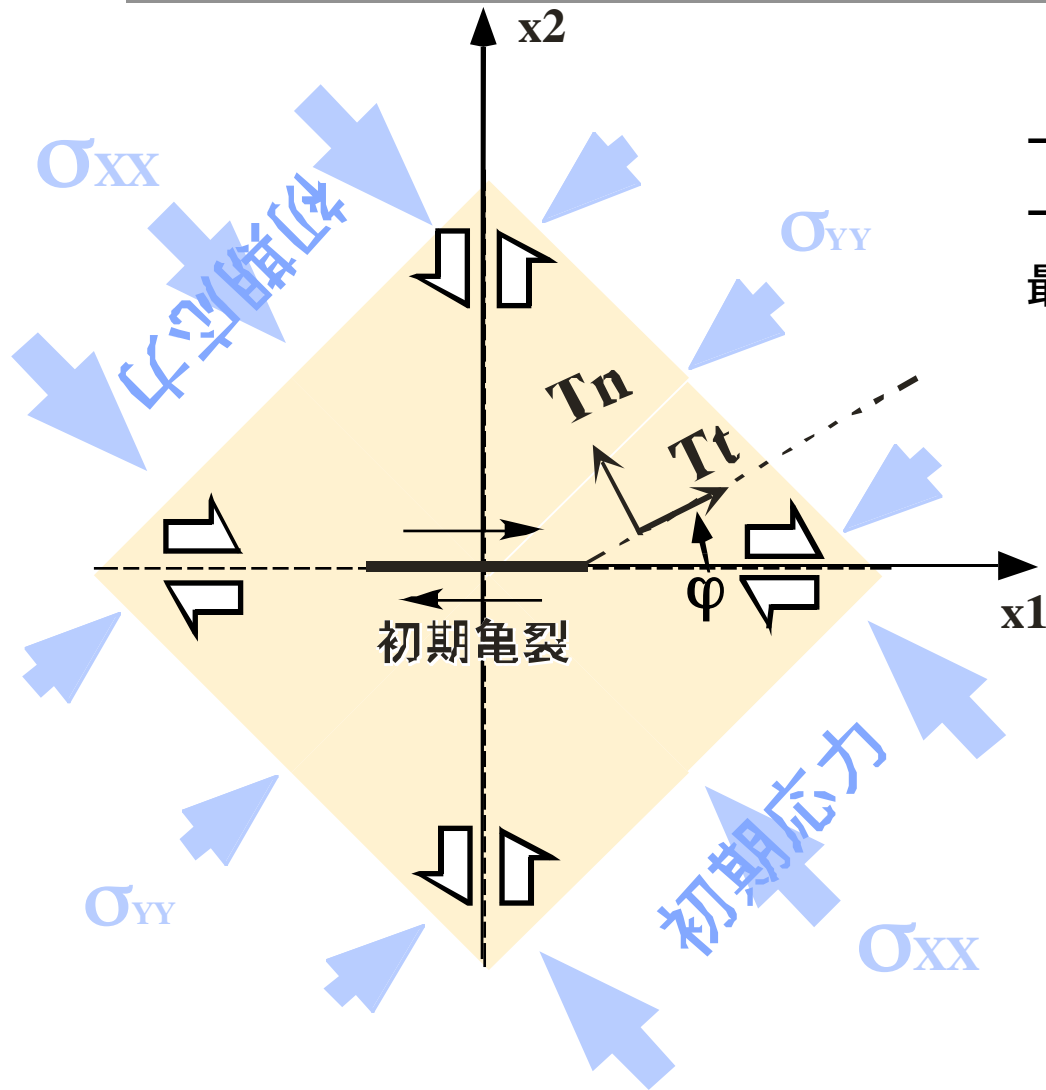
discrete elements for slip velocity

stress evaluation points for the B.C.

Kame & Yamashita, *GJI*, 1999

- 破壊がこれからどちらに進んでも良い画期的な手法
 - 境界積分方程式法による定式化
 - 超特異積分は超関数理論の有限部分で評価


破壊のシミュレーション：基本問題を解く



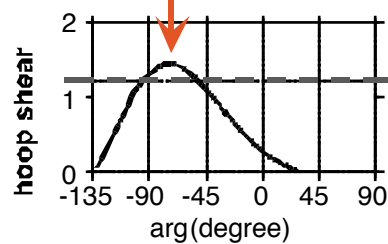
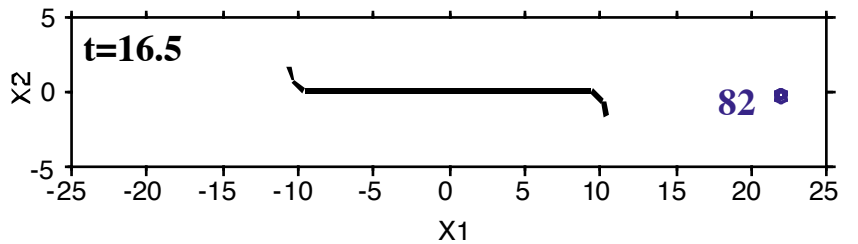
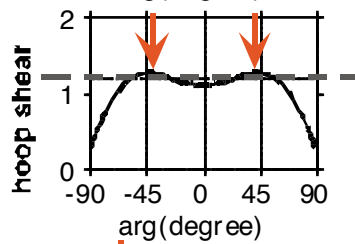
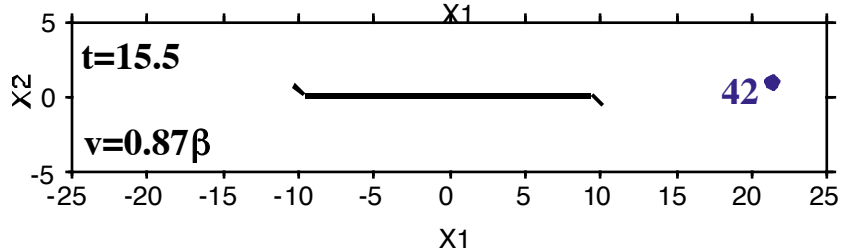
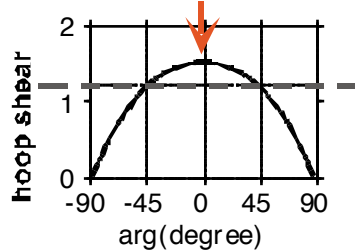
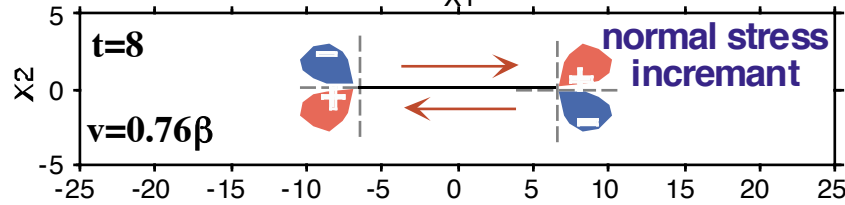
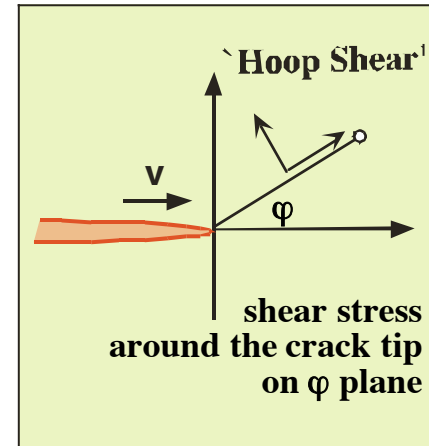
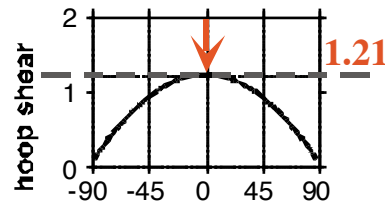
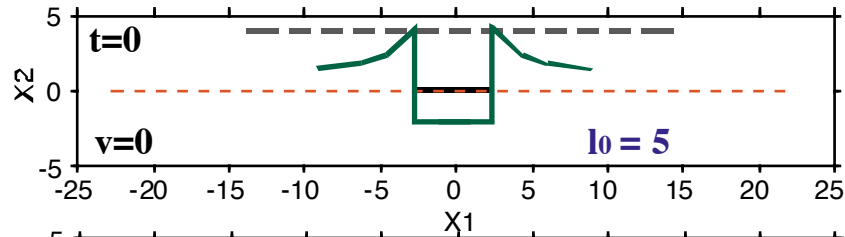
- 様な初期応力（二軸の圧縮载荷）
- 様な破壊強度（全空間で一定値）
- 最大せん断周応力の方向に成長する



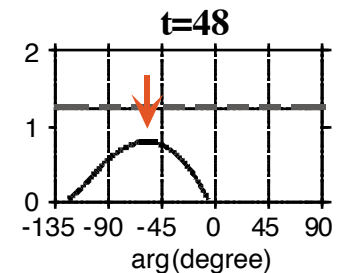
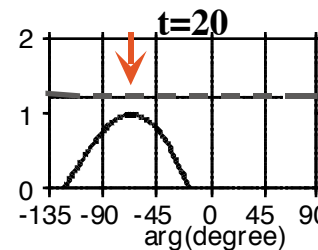
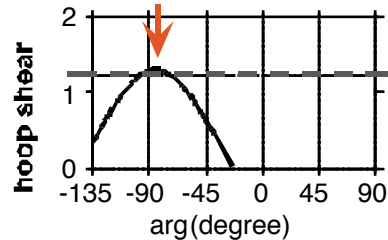
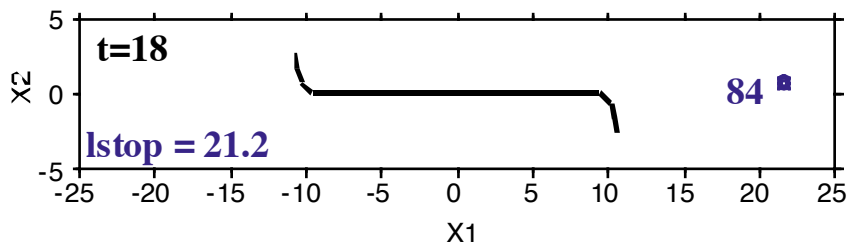
どのような形に破壊が進むのか？

 : 初期応力を解放するすべりの向き

シミュレーション結果

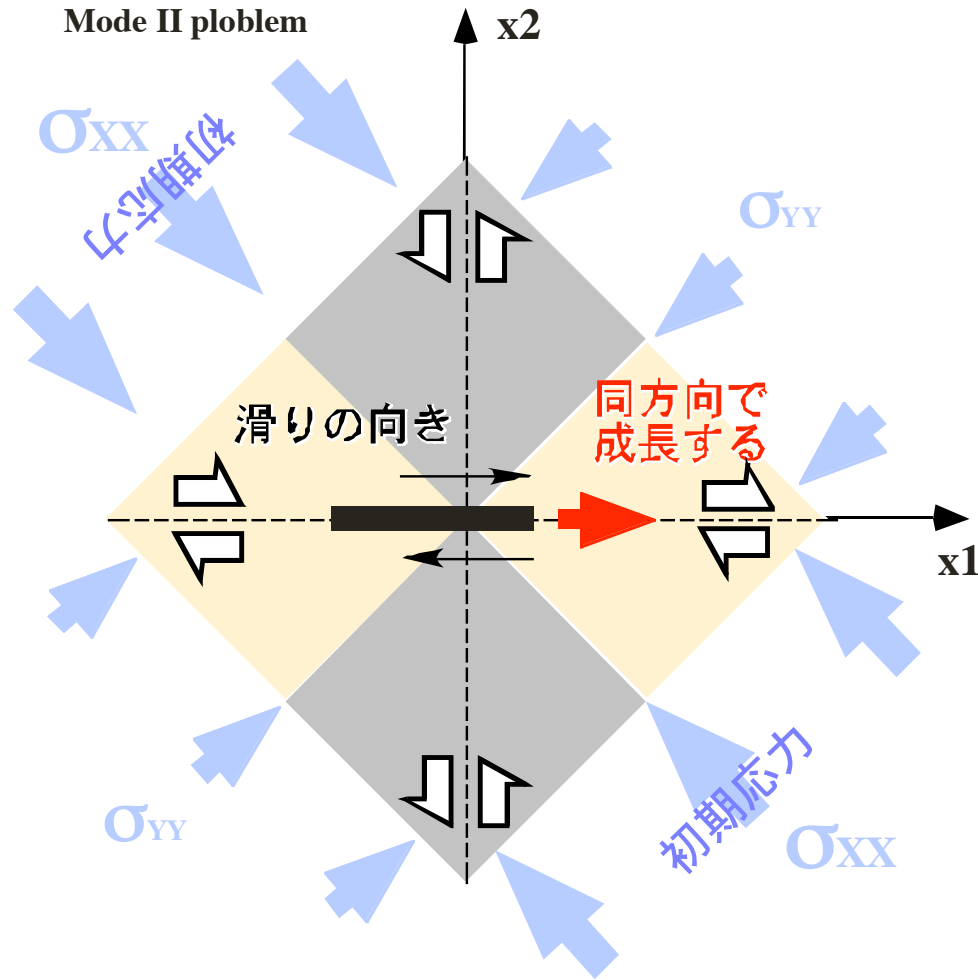


曲がって止まった

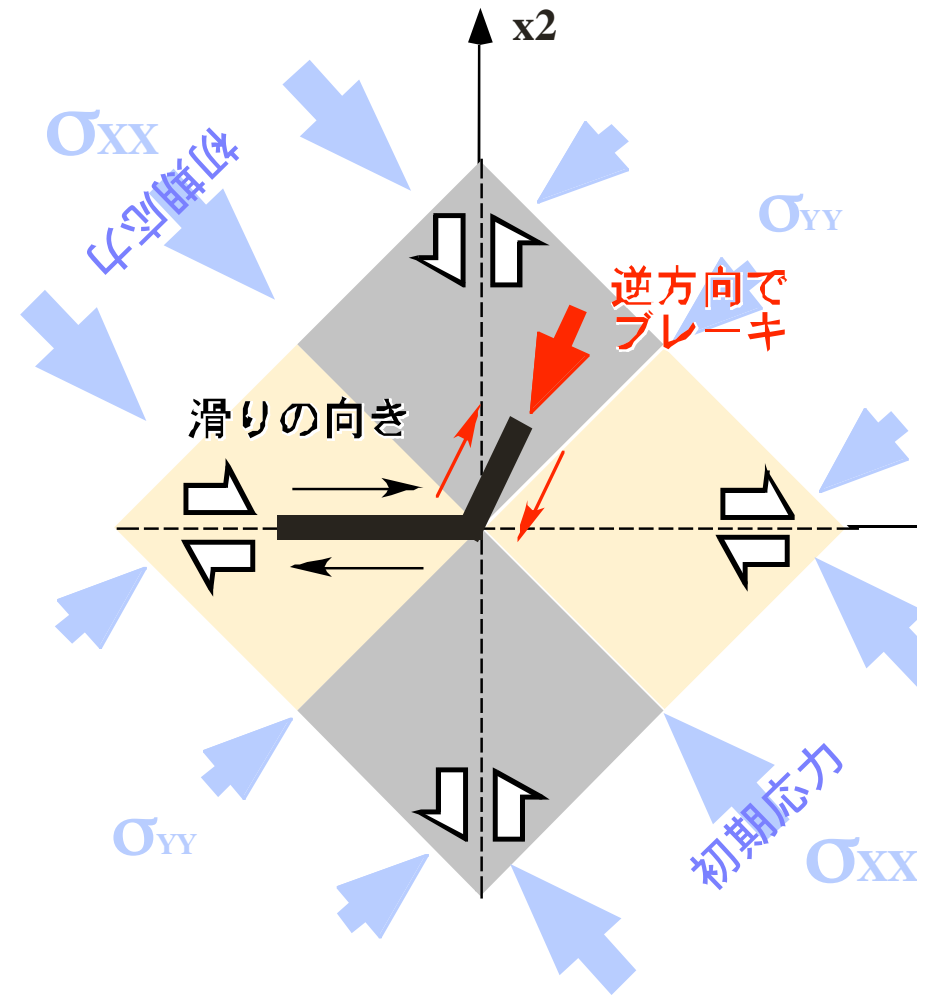



破壊が止まるメカニズム

最初は順調

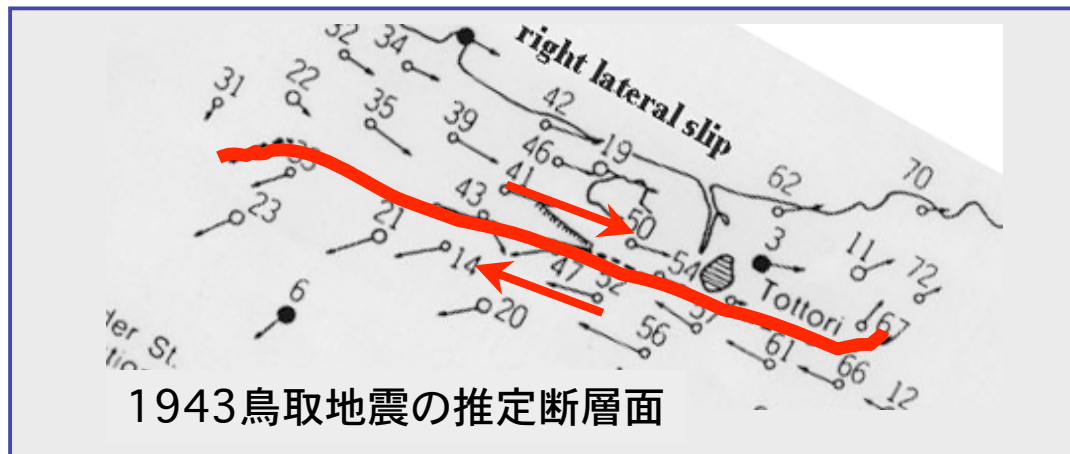
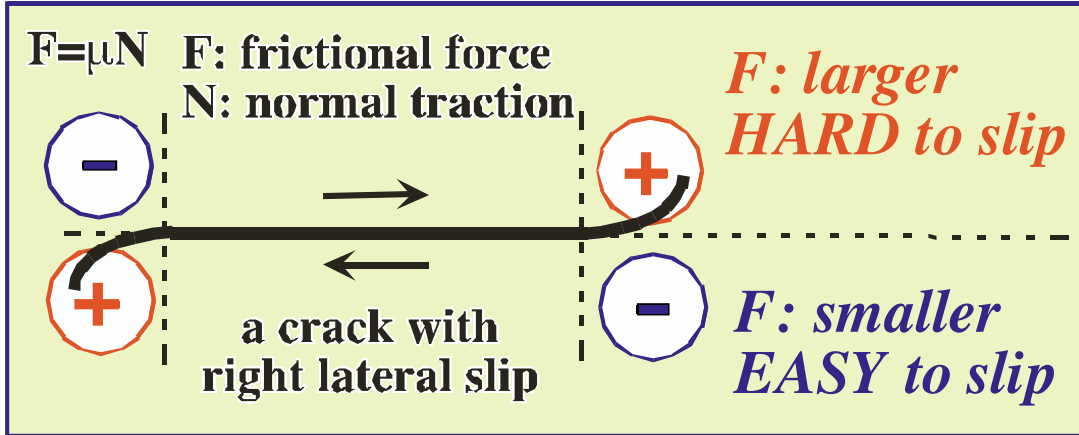
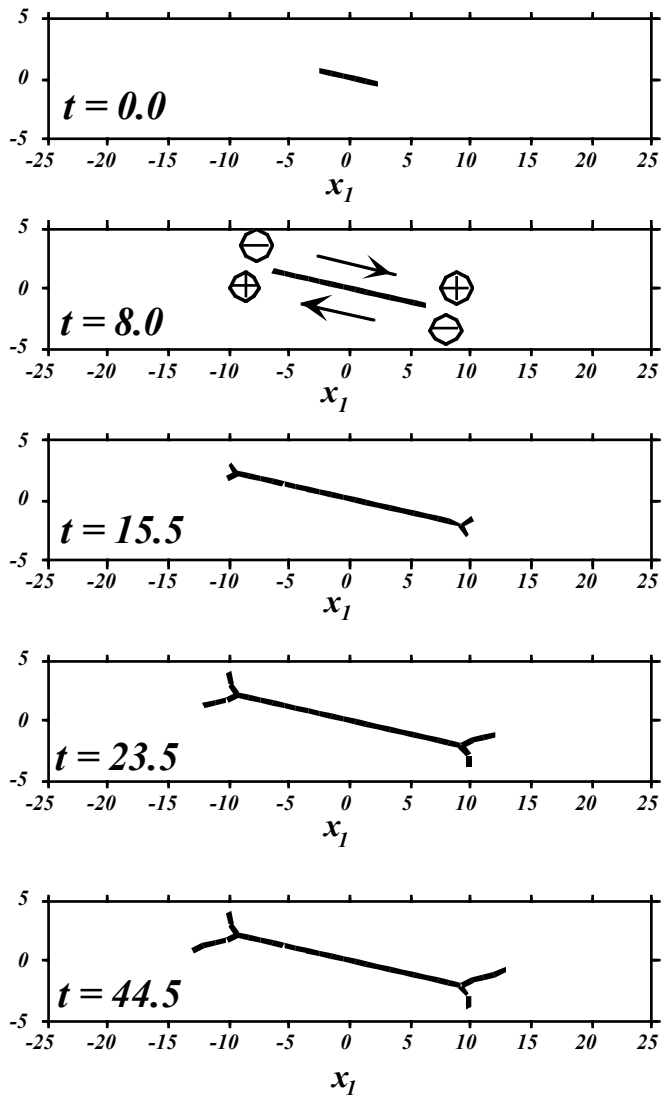


断層曲がるとブレーキ



 : 初期応力を解放するすべりの向き

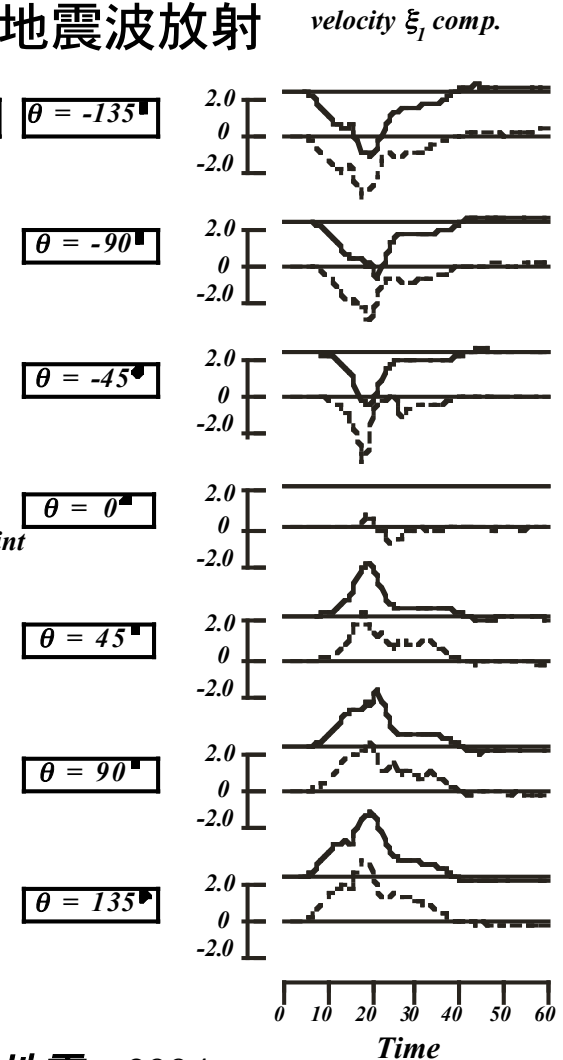
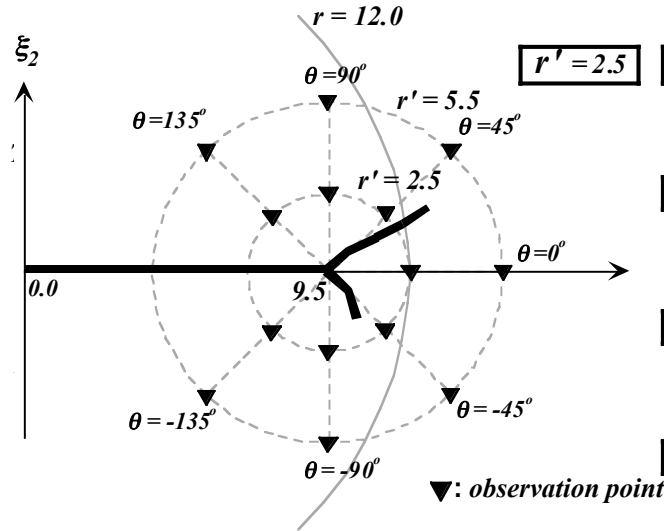
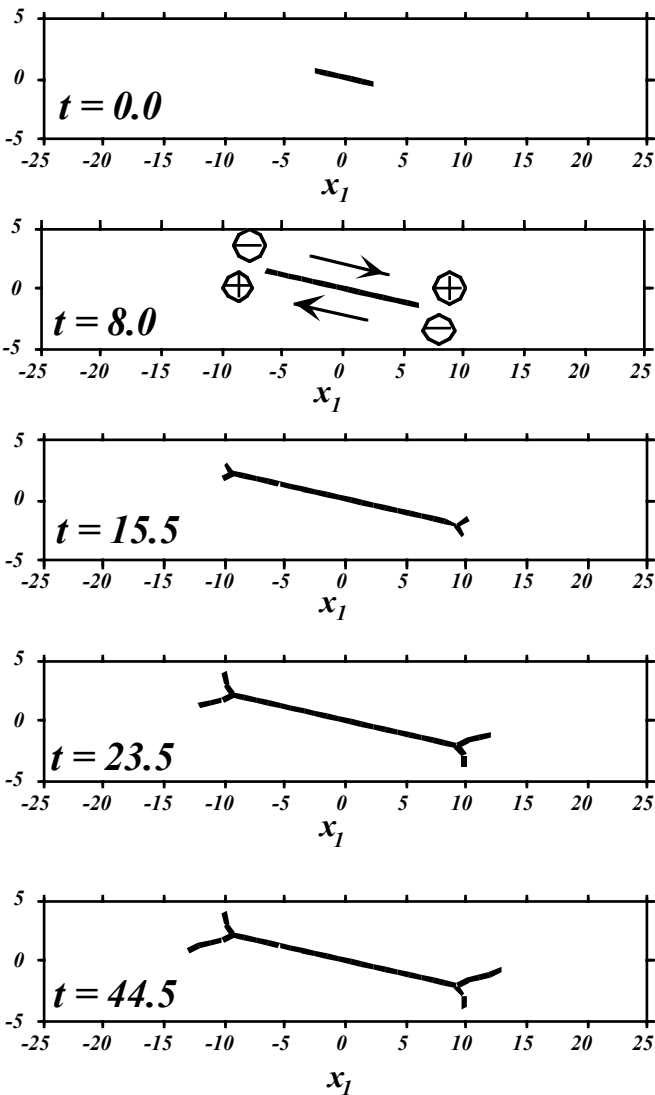
破壊面の複雑さの生成



- 摩擦力の大きい側に破壊が成長する

破壊面が複雑化する時の地震波放射は？

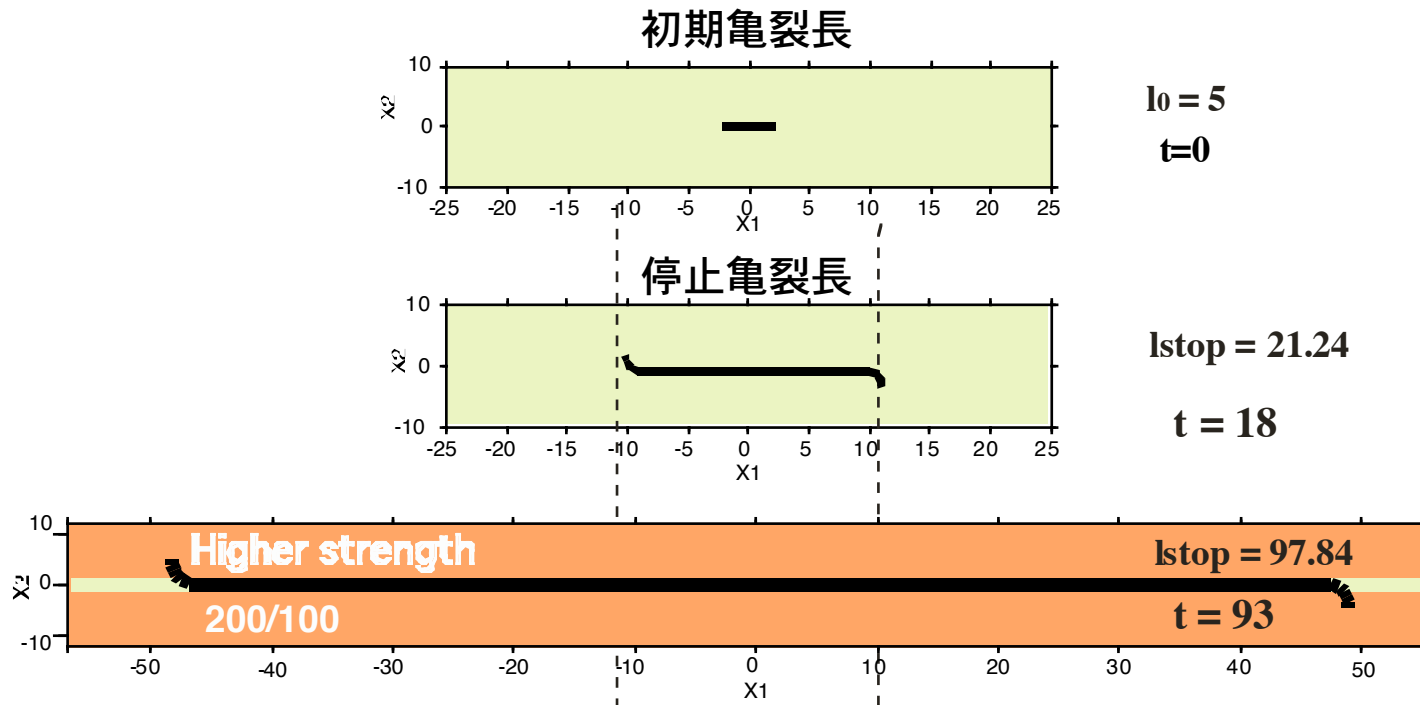
本日ポスター会場 P019、内田浩二・亀 伸樹
分岐断層動力学モデルの地震波放射



内田浩二・亀 伸樹、分岐断層動力学モデルの地震波放射, *地震*, 2004
Kame & Yamashita, *GJI*, 2003

大地震発生の条件

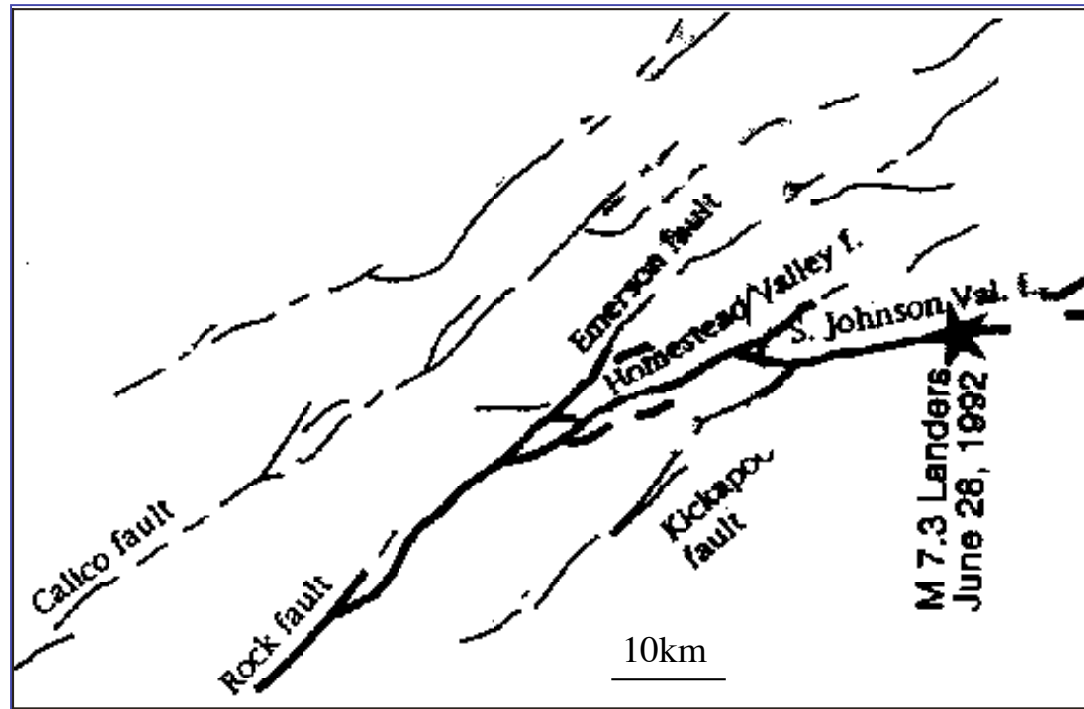
- 断層帯のモデル：既存の弱面の存在



Kame & Yamashita, *GRL*, 1999

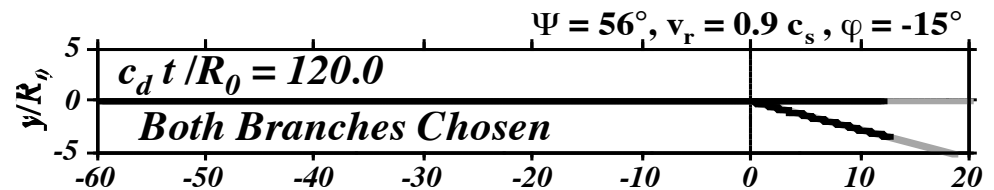
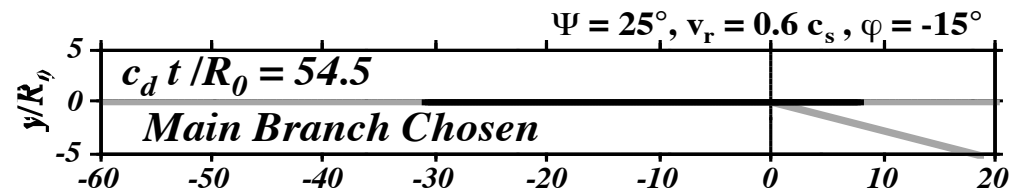
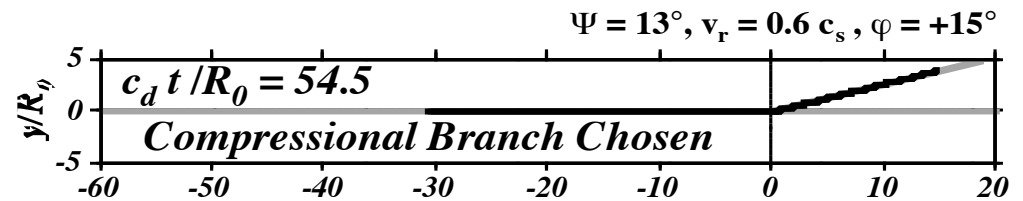
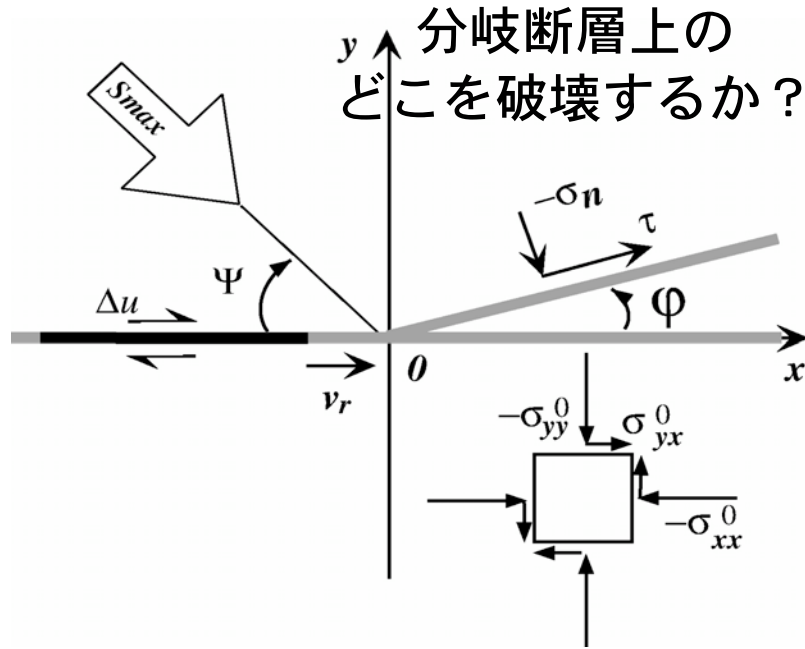
より現実的な地震の力学モデルへ

断層帯の幾何的複雑さ：分岐、屈曲、飛びの既存弱面構造



- どの弱面が破壊するか？破壊の経路予測の問題

破壊の経路選択を支配するものは？

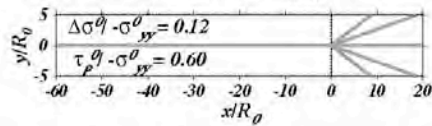


- 主圧縮軸の配向、分岐角度、破壊速度

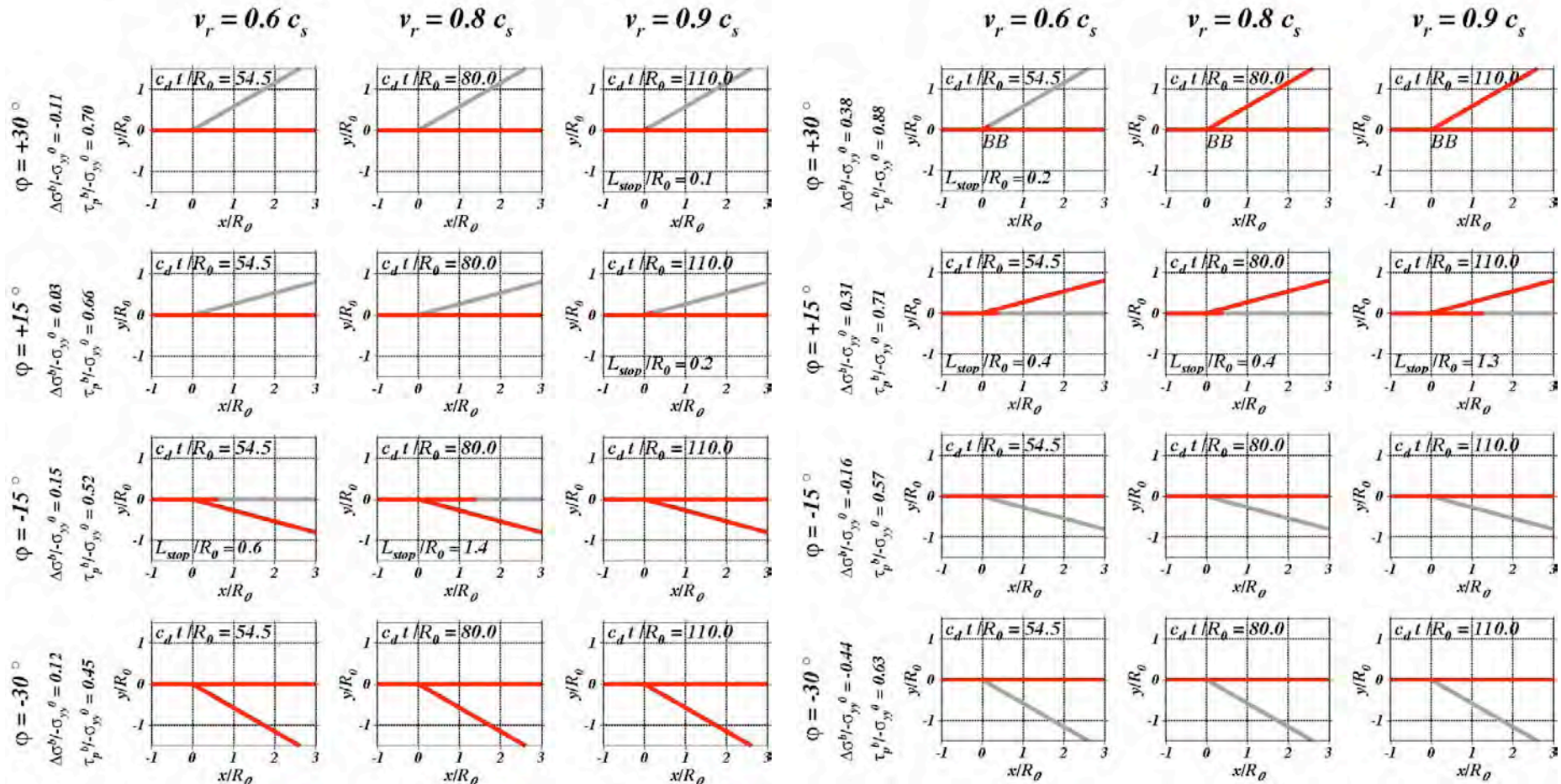
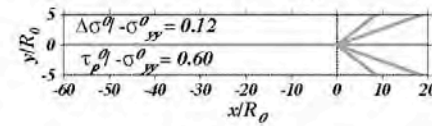
Kame, Rice & Dmowska, *JGR*, 2003

網羅的に調べる

High Inclination of S_{\max} , $\Psi = 56^\circ$



Low Inclination of S_{\max} , $\Psi = 13^\circ$



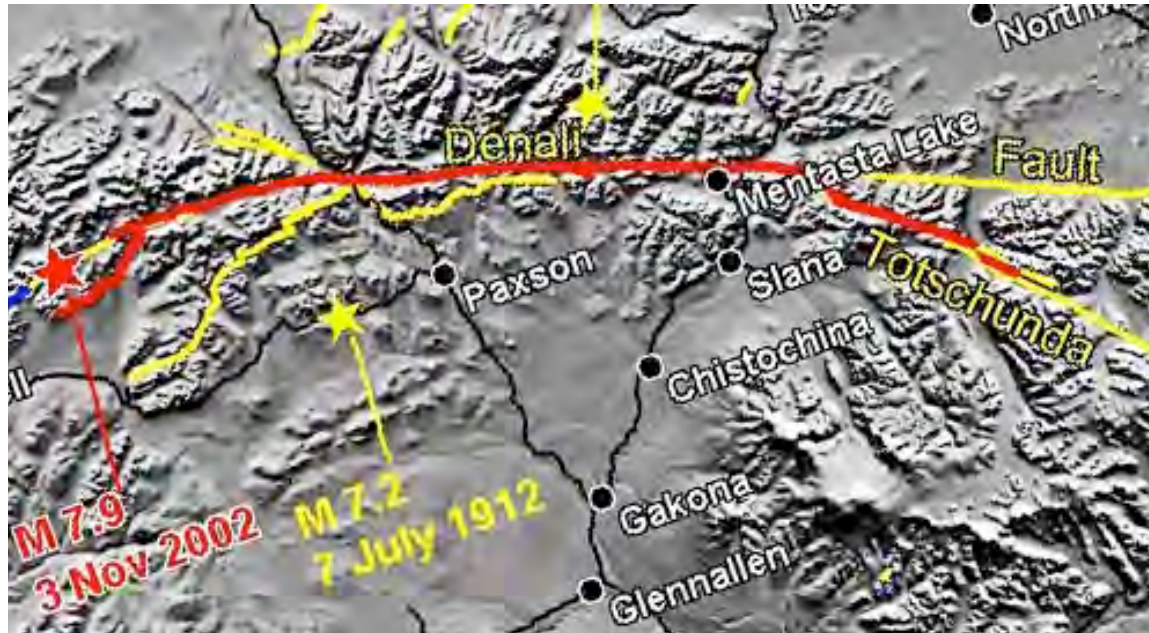
分岐断層の破壊経路予測カタログの作成

Kame, Rice & Dmowska, *JGR*, 2003

2002年アラスカデナリ地震

テクトニックな応力+分岐角度 → $\Psi = 70deg.$

モデル



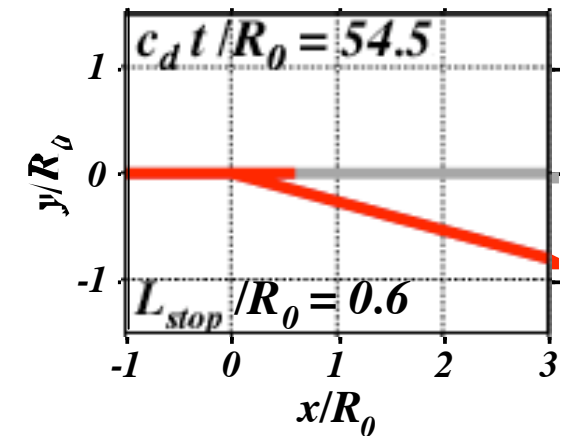
S_{max}



$v_r = 0.8c_s$

$\vartheta = -15deg.$

シミュレーション結果



$\Delta\sigma^b / -\sigma_{yy}^a = 0.15$

$\tau_{xy}^b / -\sigma_{yy}^a = 0.52$

- デナリ断層からトチュンダ断層への破壊面の乗り移りが再現された

断層面形状の複雑化を考慮に入れた地震破壊ダイナミクスの理論的研究 まとめ

1. 平面断層モデルでは従来は説明困難であった「地震の停止」
2. 破壊成長と共に複雑化する断層モデルという立場
3. 進むべき方向に成長できる破壊の新計算手法の開発
4. 破壊面が複雑化する地震破壊モデルの世界で初めての解析
5. 地震の止まる自然な力学的な仕組みの提唱

断層面形状の複雑化を考慮に入れた 地震破壊ダイナミクス of 理論的研究 -文献-

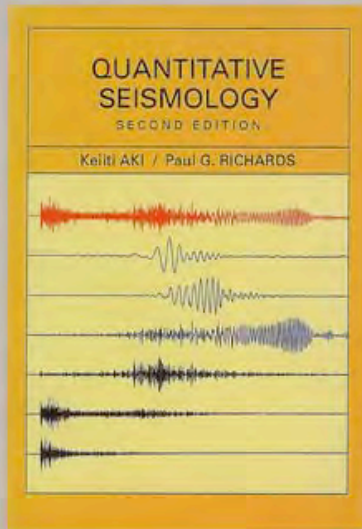
1. Nobuki KAME and Teruo YAMASHITA, [A new light on arresting mechanism of dynamic earthquake faulting](#), *Geophysical Research Letters*, 26, 1997-2000, 1999a.
2. Nobuki KAME and Teruo YAMASHITA, [Simulation of the spontaneous growth of a dynamic crack without constraints on the crack tip path](#), *Geophysical Journal International*, 139, 345-358, 1999b.
3. Nobuki KAME and Teruo YAMASHITA, [Dynamic branching, arresting of rupture and the seismic wave radiation in a self-chosen crack path modelling](#), *Geophysical Journal International*, 155, 1042-1050, 2003.
4. Nobuki KAME, James R. RICE, and Renata Dmowska, [Effects of pre-stress state and rupture velocity on dynamic fault branching](#), *Journal of Geophysical Research*, 108(B5), 2265, doi:10.1029/2002JB002189, 2003.
5. Harsha S. BHAT, Renata DMOWSKA, James R. RICE and Nobuki KAME, [Dynamic slip transfer from the Denali to the Totschunda faults, Alaska: testing theory for fault branching](#), *BSSA*, 2004.
6. 上西幸司・亀 伸樹・青地秀雄（共訳）、「地震学 -定量的アプローチ-」（「Quantitative Seismology Second Edition」 [Aki & P.G. Richards 著] の翻訳書）、2004。 古今書院
7. 内田浩二・亀 伸樹、分岐断層力学モデルの地震波放射、*地震*、2004。

第2章1節「定式化」より

安芸敬一 P.G.リチャーズ

地震学 定量的アプローチ

上西幸司・亀 伸樹・青地秀雄 訳



古今書院

「自ら進んで理論地震学あるいは応用地震学の問題を解く能力を磨きたいと望む読者は、すぐに問題がどのように『設定』されるのかという疑問に直面するであろう。つまり、地震の震源の物理的記述—そして近地と遠地の受信器で生じる運動を計算するという一般的问题—をどのように特定の数学的問題に焼き直すのか？大部分では、そのような問題を設定する能力は、式2.41-2.43および3.1-3.3により様々な形式で与えられる表現定理の習熟から派生するものであろう。」