

Fault damage zones

Kim et al .,2004

固体地球科学大講座M1

小林今日子

要旨

- ▶ 断層周辺のダメージゾーンの総括的な分類が目的
- ▶ 野外の露頭における断層とダメージゾーンの位置に焦点を当てる
- ▶ 横ずれ断層を主にすすめる
- ▶ ダメージゾーンを3つに分けて整理
- ▶ 正断層も逆断層も大体似ている
- ▶ 三次元的なダメージゾーンモデルを作成できた

目的

- ▶ 最近横ずれ断層に沿うダメージゾーンの記載が盛ん
- ▶ しかし体系的な分類がない
- ▶ よってこの論文では正断層と逆断層も含めて分類し、まとめる事が目的

ダメージゾーンとは？

- ▶ 断層の出来始めや伝播、それらの相互作用、滑りの結果として出来る、断層周辺の変形ゾーンのこと
- ▶ その構造から断層伝播や流体の流れ、地震の始まりと終わりを推測できる

主に扱う露頭とその研究

- ▶ Crackington Haven, north Cornwall, UK (Kim, 2000; Kim et al., 2000, 2001a)
- ▶ Rame Head, south Cornwall, UK Cornwall, UK (Kim et al., 2001b)
- ▶ Kilve, Somerset, UK (Peacock and Sanderson, 1995a; Kelly, 1998)
- ▶ Rush, near Dublin, Ireland (Dewey, 1966)
- ▶ Gozo, Maltese islands (Kim et al., 2003)

方法

- ▶ 天然における断層周辺のダメージゾーン



- ▶ 岩石種・断層に関連した地層の傾斜・応力システムのような様々な要因に規制される



- ▶ しかしこの論文では野外に基づいたダメージゾーンの分類のために、断層周辺のどの位置か？ということを重要視し、そこに焦点をあてる

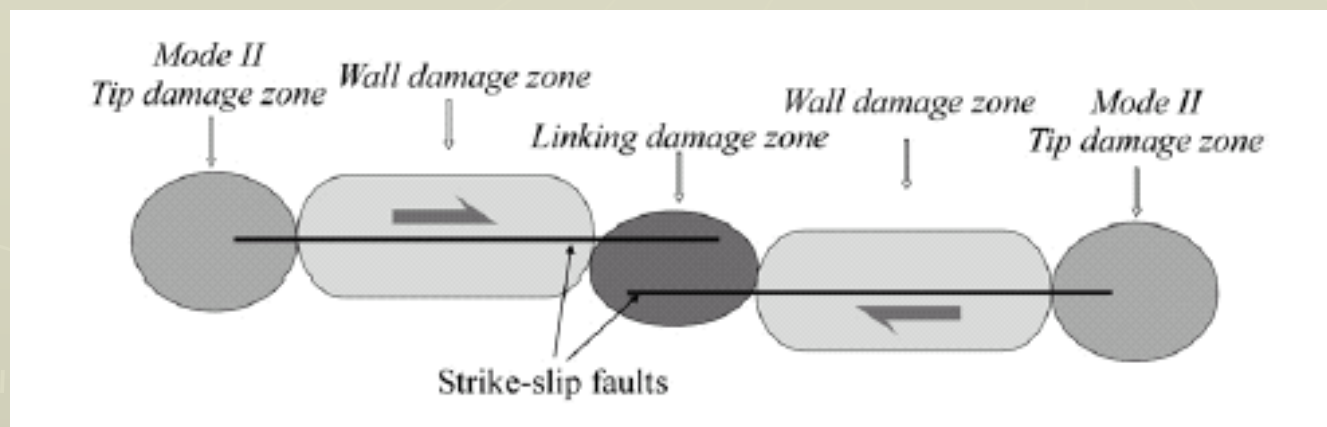
方法のつづき...

- ▶ 断層の幾何、ダメージゾーンの位置、その構造から分類する
- ▶ とくにモードⅡかモードⅢのどちらかが卓越する断層先端を選ぶ

実際にどのような分類をしたか？

位置に基づくダメージゾーンの分類

- 断層帯中の位置に基づいてtip-, linking-, wall-に分類



- ▶ Tipダメージゾーン→断層先端での応力集中により出来る
- ▶ Linking ダメージゾーン→断層の連結部に出来る
- ▶ Wall ダメージゾーン→モードⅡ、Ⅲのtipダメージゾーンが伝播した後や、断層の滑りに関連して出来る

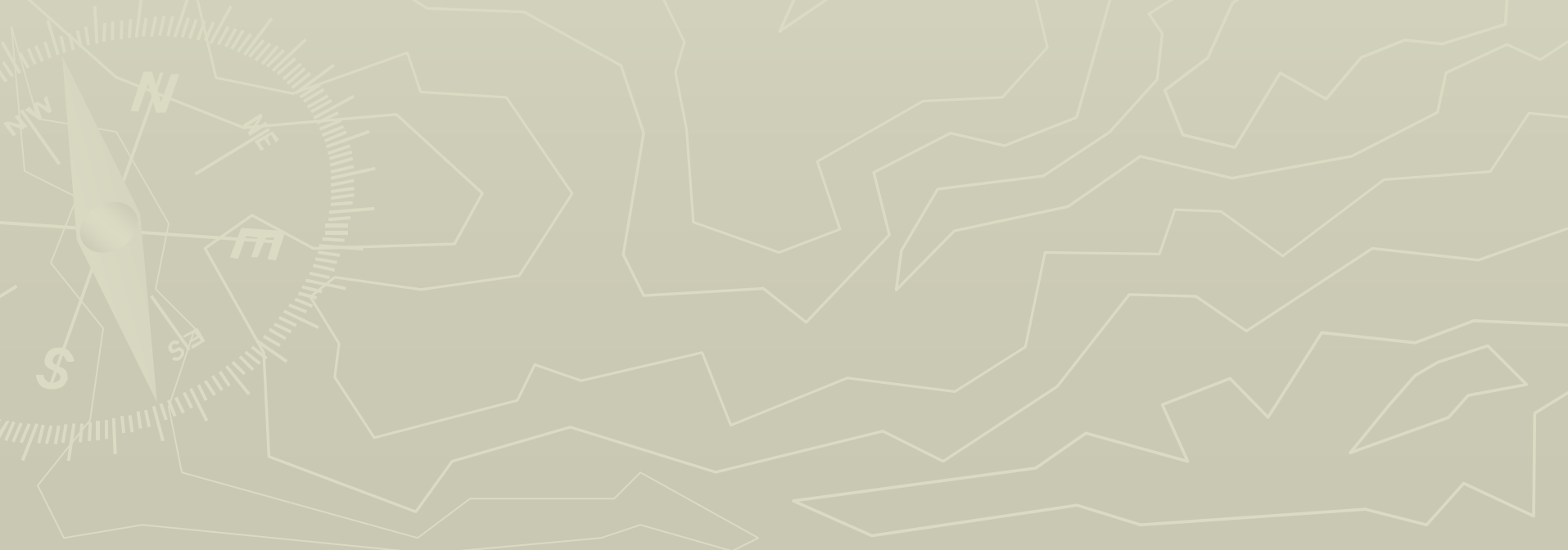
- ▶ 分類は三次元になるとダメージゾーンが重なってよりややこしくなる



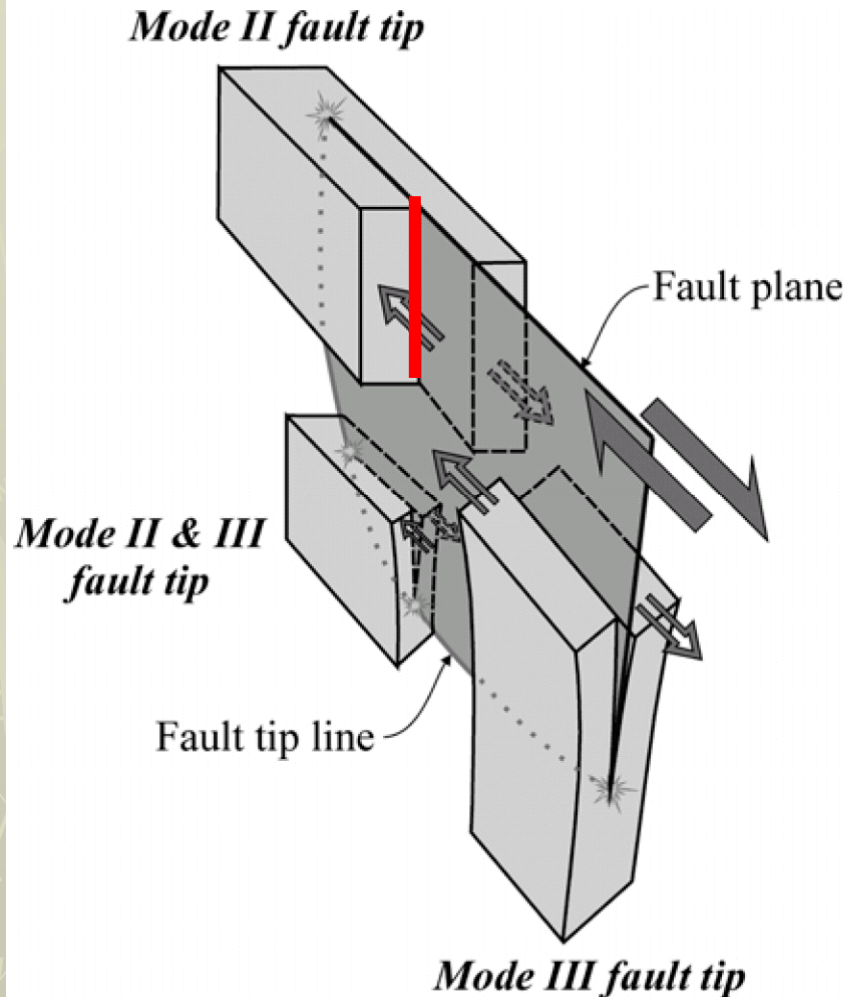
横ずれに伴う モードⅡのtipダメージゾー ン



- ▶ Cowie and Scholz(1992)→断層先端付近が最も高い応力であることを仮定している
- ▶ Martel(1997)→そうである必要はないといっている

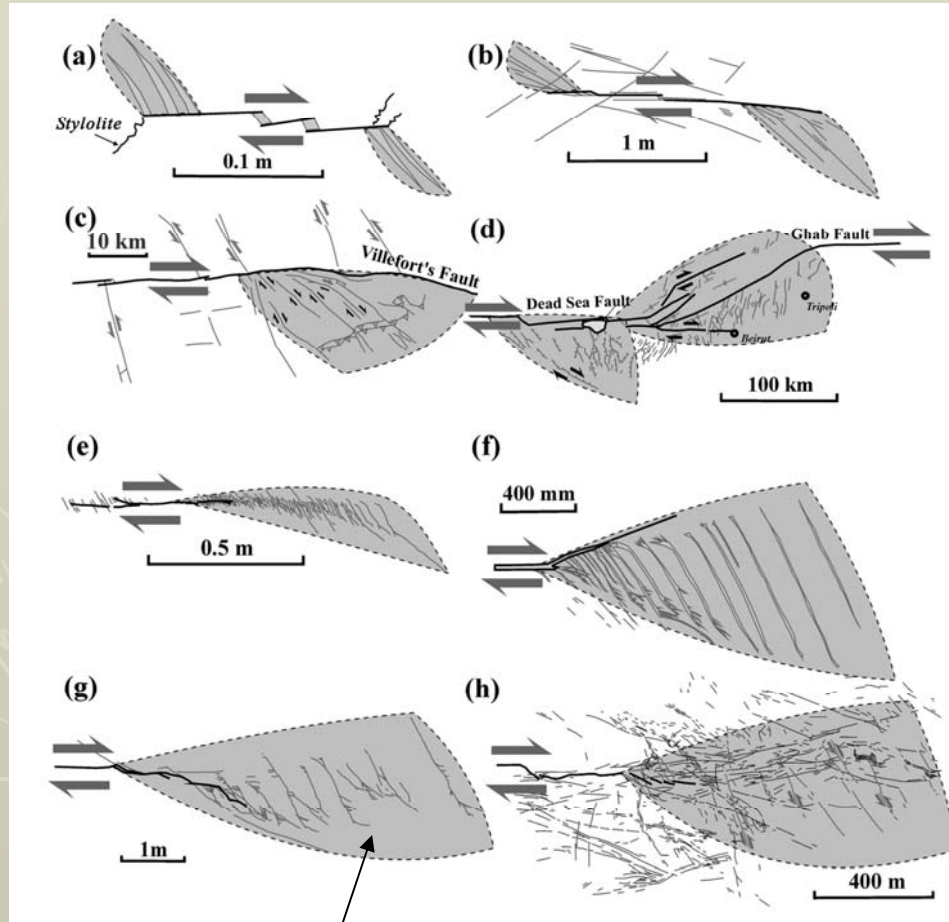


横ずれに伴う断層先端部のモデル



- ▶ モードⅡ、Ⅲという端成分とその中間的なものがある
- ▶ ここではモードⅡについて述べ、Ⅲは後で扱う
- ▶ モードⅡの断層先端は先端線が滑りの方向と垂直

様々なダメージゾーン

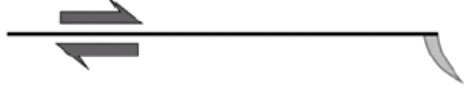


•影の部分がダメージゾーン

- ▶ このように様々なダメージゾーンが推定されている
- ▶ モードⅡの応力配分は断層に非対称なのでダメージゾーンも非対称
- ▶ これらは4つの単純な分類で表現できる

4つの単純な分類

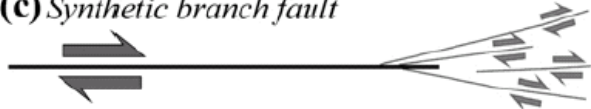
(a) *Wing crack*



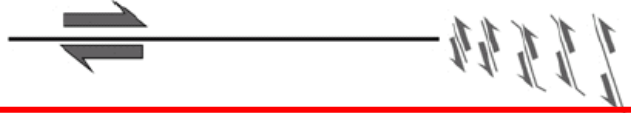
(b) *Horsetail splay or pinnate fracture*



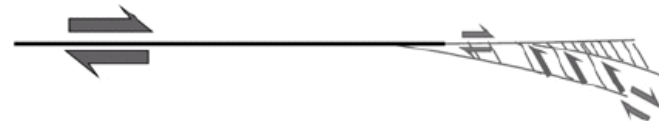
(c) *Synthetic branch fault*



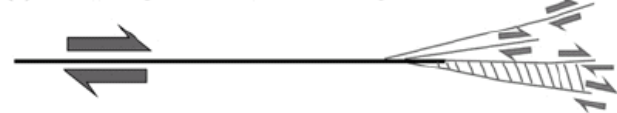
(d) *Antithetic fault*



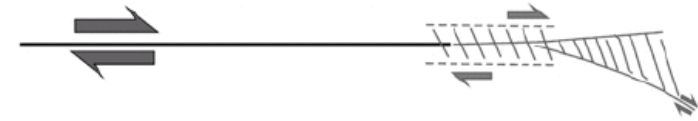
(e) *Horsetail splay + Antithetic fault*



(f) *Branch fault + Antithetic fault*



(g) *Mixed mode tip (II & III)*



▶ 羽毛状クラック

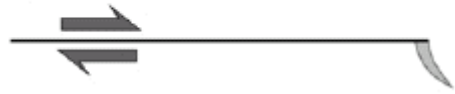
▶ 馬の尾フラクチャー

▶ シンセティック分岐断層

▶ アンチセティック断層

羽毛状クラックと馬の尾フラクチャー

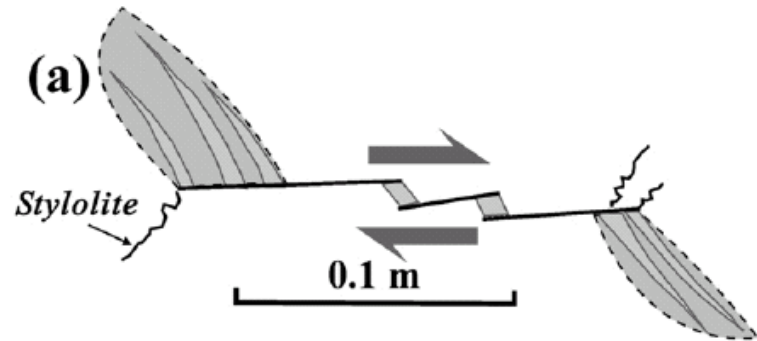
(a) Wing crack



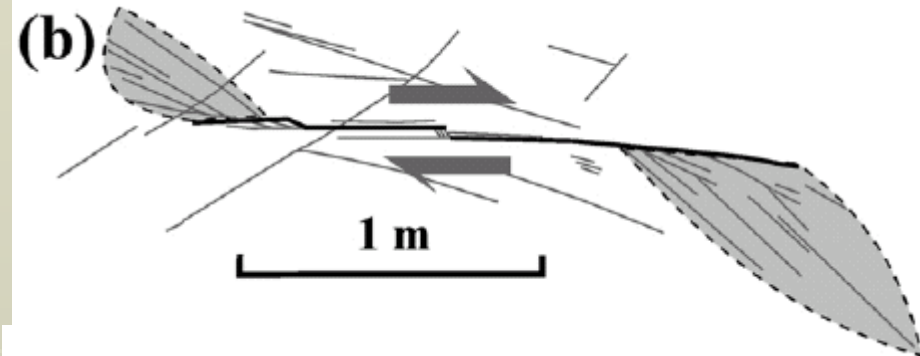
(b) Horsetail splay or pinnate fracture



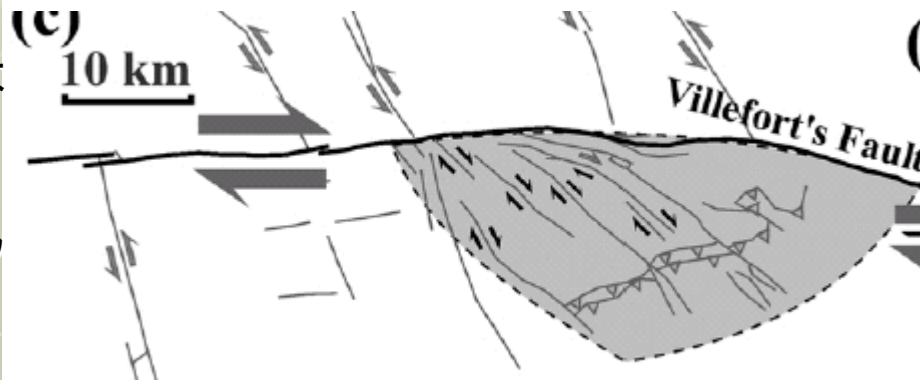
(a)



(b)



(c)



▶ 羽毛状クラックは低差応力・低封圧下もしくは低有効応力下での早い滑りで出来る

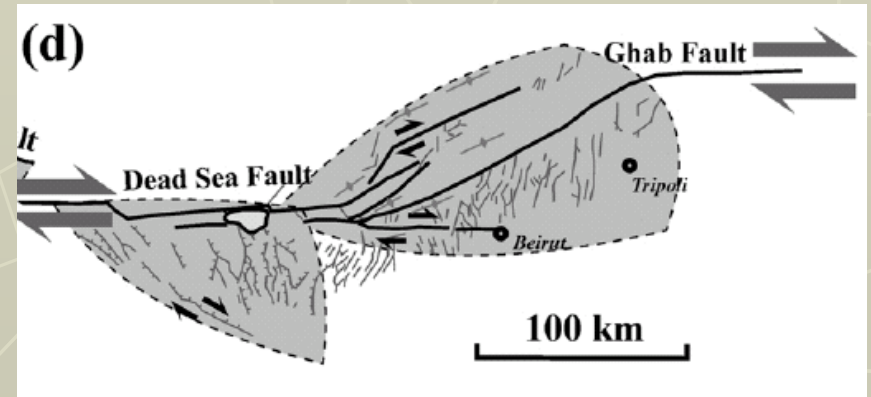
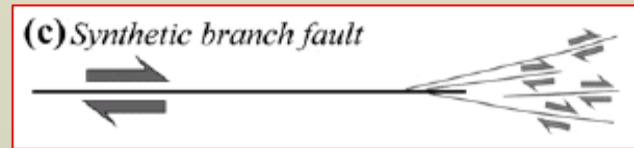
▶ 両者は幾何学的・機械的に似るが、馬の尾フラクチャーの方が主断層に対してより低角

▶ 馬の尾フラクチャーのほうが断層先端にむけて漸移的に消滅する

▶ 両タイプはモード I クラックとして伝播するので湾曲しているものやキンクのものも多く、断層形成時の全体的な圧縮方向に平行

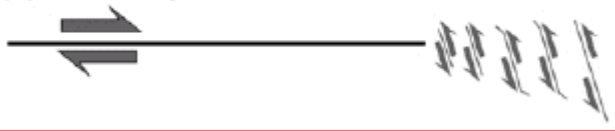
シンセティック分岐断層

- ▶ 似たものをスプレー断層やsecond order shearsとも呼ぶ
- ▶ 分岐断層の滑りの方向は主断層と同じで、近くの断層と連結することもある

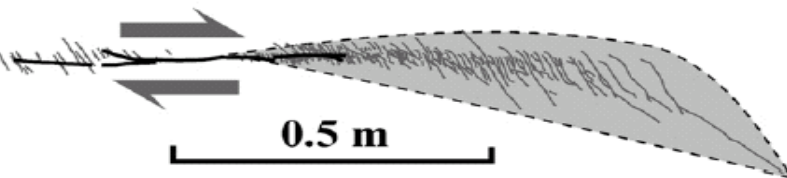


アンチセティック断層

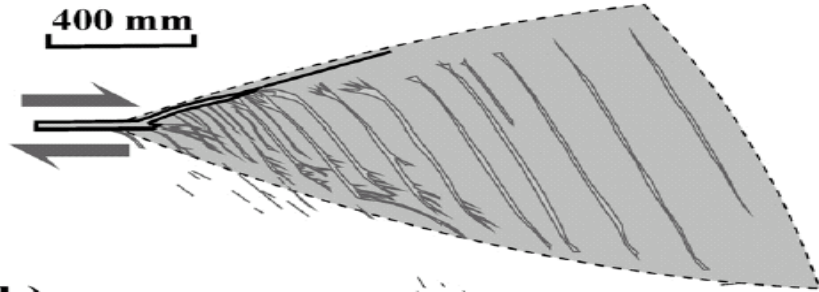
(d) Antithetic fault



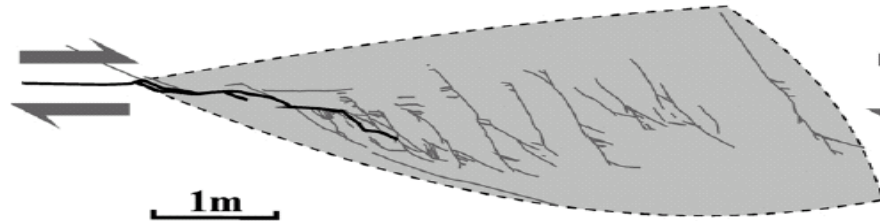
(e)



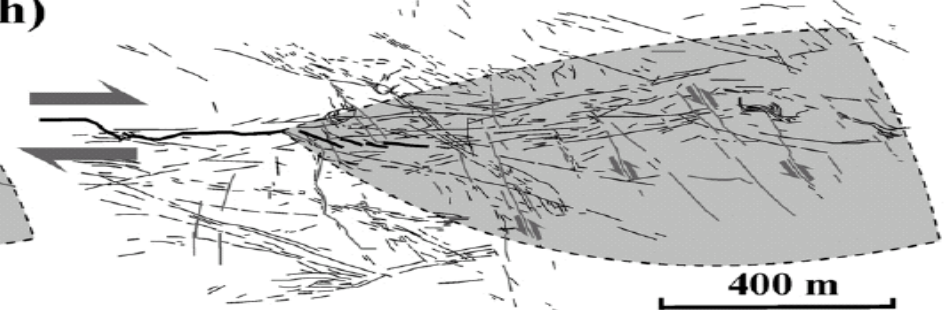
(f)



(g)



(h)



- ▶ 端から長さの間隔を増しながら消えていく
- ▶ 結合力の強い断層なら最大主圧縮力に対して約 30° の方向に発達する
- ▶ Petit and barquins (1988)のガラス板の実験



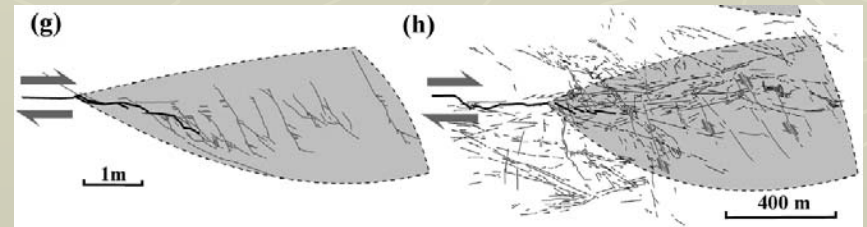
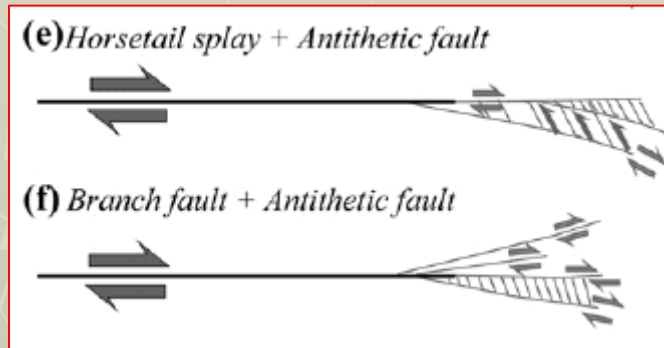
引張部が曲がって圧縮部になるフラクチャーがある
ダメージゾーンに馬の尾フラクチャーや分岐断層が含まれることもある

分類案の注意点

1. ダメージゾーンには異なるタイプも含まれる事がある
例

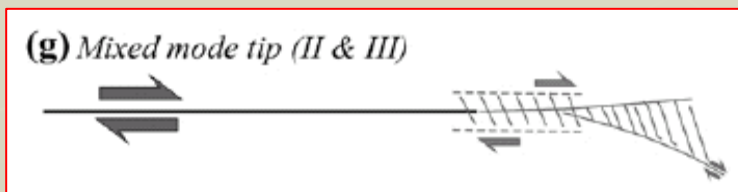
シンセティック馬の尾フラクチャー

シンセティック分岐断層とアンチセティック断層のセット



異なるダメージゾーンの型とアンチセティック断層と組み合わせるとブロックの回転が起こる

2. モードⅡとⅢが混在するものあり



3. フラクチャーはダメージゾーンで発達するということ

例 主断層の滑りの増加によって伸張フラクチャーに剪断が発達する

4. この論文で紹介していないほかの構造が卓越するダメージゾーンもある可能性がある

例 節理、脈、変形帯が卓越するダメージゾーン

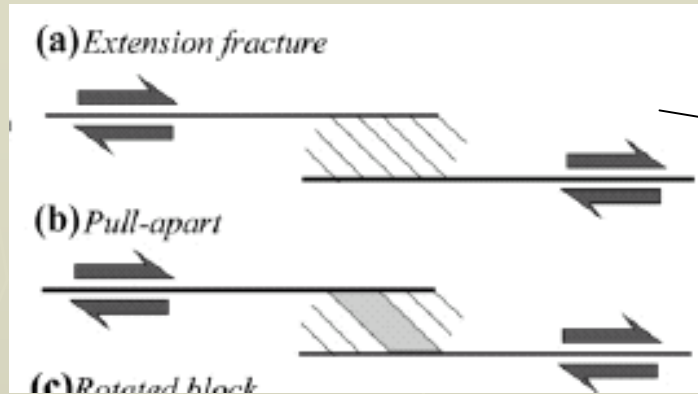
横ずれ断層系における モードⅡのlinking(連結)ダ メージゾーン



linkingダメージゾーンとは

- ・他のダメージゾーンの型にくらべて複雑で激しいフラクチャー
 - ▶ 近くの断層の端をつなぐ部分に発達
 - ▶ 伸張場となる場合と圧縮場となる場合で特徴が異なる

伸張ステップに発達する構造

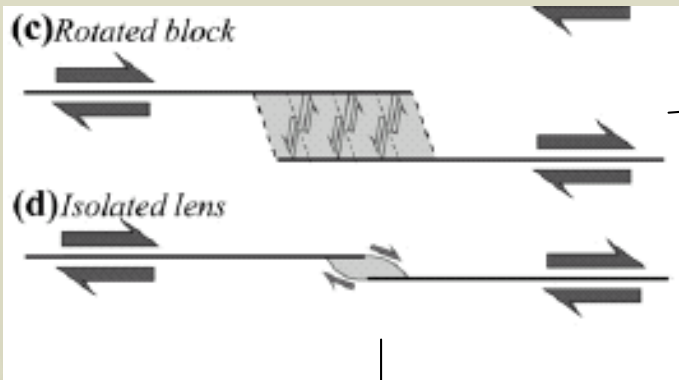


伸張フラクチャー

- ▶ 節理もしくは脈が一定の範囲に出来る
- ▶ 局所的な最大主圧縮応力にほぼ平行
- ▶ 断層セグメントの引張部分に卓越する
- ▶ 断層に接する

プルアパート

- ▶ 二つの断層セグメント間で開口する引張フラクチャーのタイプの一つ
- ▶ 断層の滑りの増加により出来る形は節理や脈、シンセティック断層やアンチセティック断層のようなプルアパートの境界を作るフラクチャーと関連して決まる



レンズ状部

- ▶ 横ずれデュープレックスや一つの断層で境される
- ▶ 似たものはsidewall ripoutsや open eye-structuresとも呼ばれる
- ▶ 引張ステップには断層境界ブロックの周りに、空の空間や引張部分がよく出来、脈や堆積物で埋められる
- ▶ デュープレックスはステップセグメントをつなぐ断層によく破碎される

回転したブロック

- ▶ ステップの断層は主断層にアンチセティックで回転したブロックの周りに伸張フラクチャーが出来る
- ▶ はじめは主断層に鋭角なステップの断層は鈍角に回転される事がある
- ▶ ブロックはずれの増加と共に角度を増して対照的に回転する
- ▶ 回転方向はステップ部分が伸張ならシンセティック回転で圧縮ならアンチセティック回転
- ▶ ブロックと主断層の間には三角形の開口部が出来やすい

実際の露頭

伸張フラクチャー
節理や脈 断層に接する

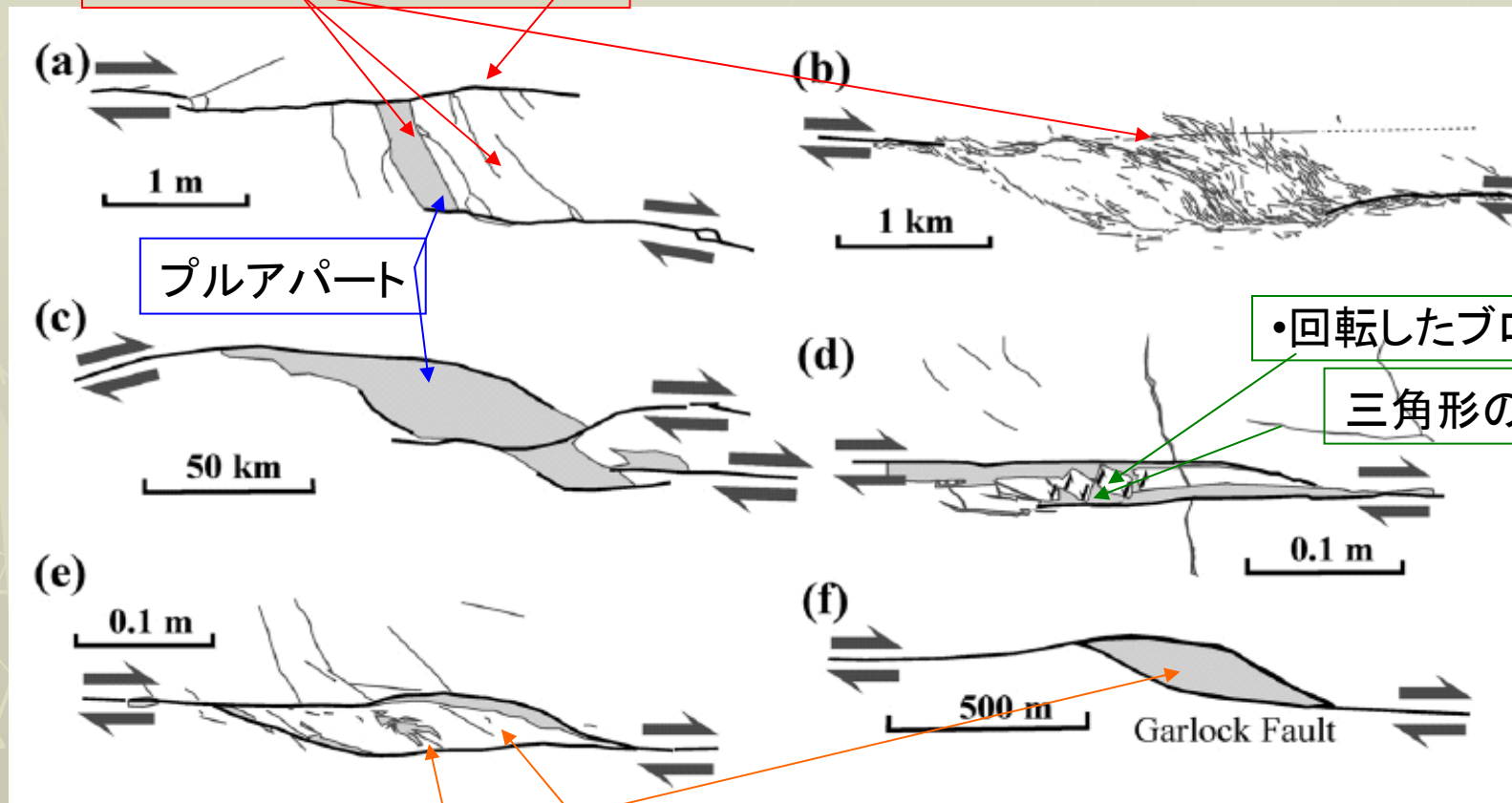
プルアパート

•回転したブロック

三角形の開口部

•レンズ状部

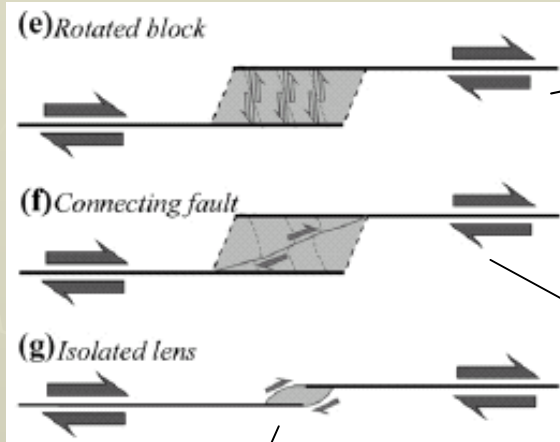
破碎されたデュープレックス



露頭写真 プルアパート



圧縮ステップに発達する構造



回転したブロック

- ▶ 主断層とシンセティックな回転
- ▶ ステップの断層には、単純剪断や σ 状のものがある場合もある
- ▶ ステップ中のアンチセティック断層は断層の端から分岐する

横ずれデュープレックスやレンズ状部

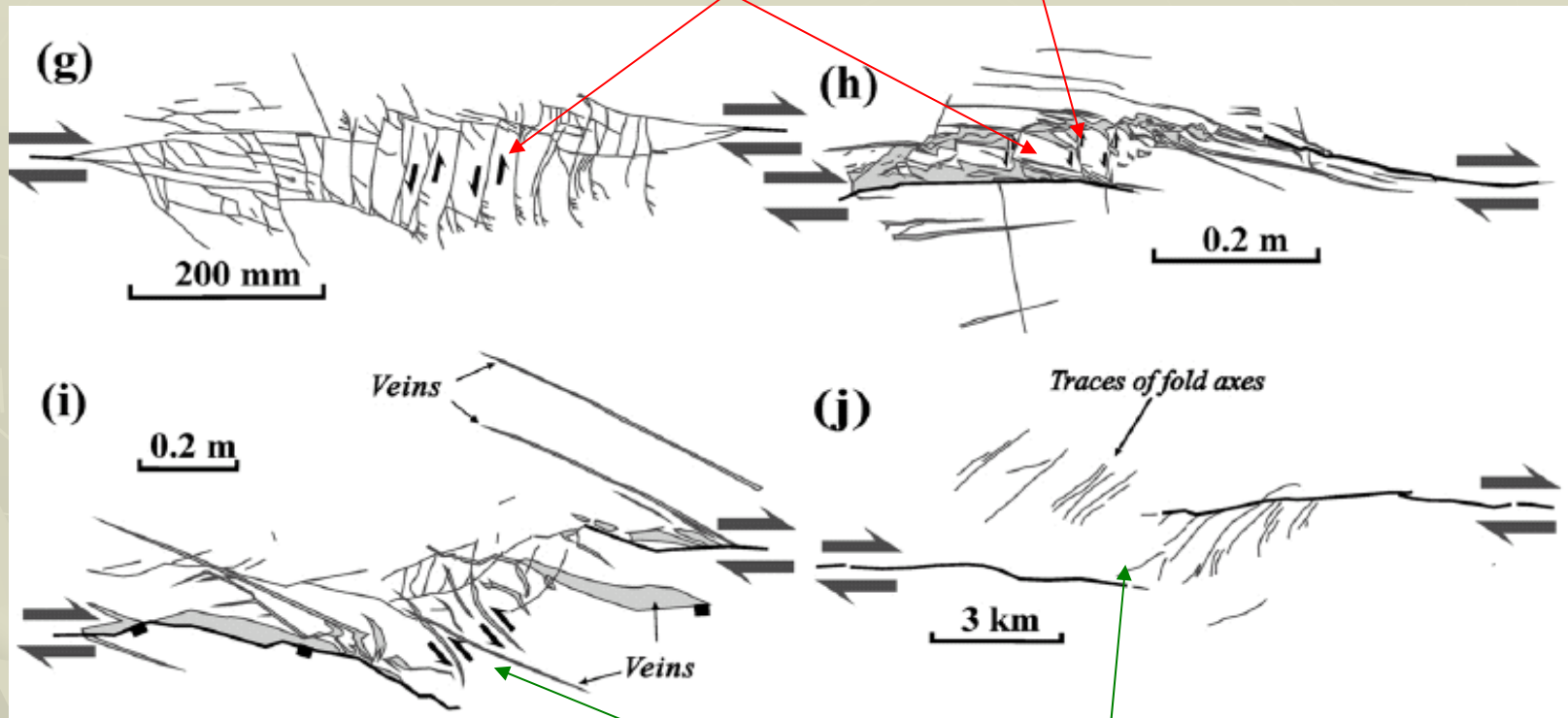
- ▶ 通常伸張ステップに出来るが圧縮ステップにも出来る
- ▶ 運動学的にはスラストに沿うデュープレックスに似た構造

connecting断層

- ▶ 二つの断層を連結する
- ▶ 圧縮ステップ中に横ずれランプが見られる事がある
- ▶ 脈、アンチセティック断層、圧力溶解シームも断層ステップにできる
- ▶ 横ずれランプは部分的にシンセティック断層に破碎され、発達すると断層で切られる事がある

実際の露頭

回転したブロック σ 状



connecting断層
横ずれランプ

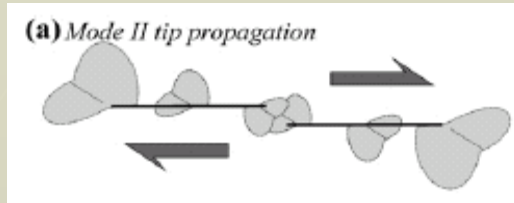
横ずれ断層周辺のWallダメージゾーン



Wallダメージゾーンとは

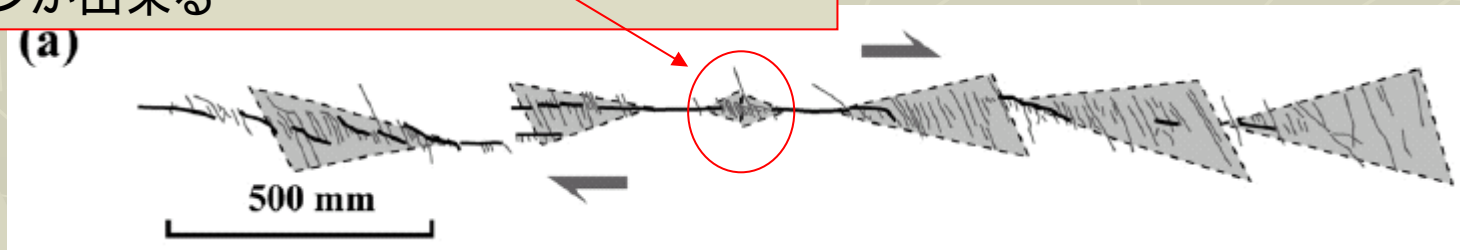
- ▶ Wallダメージゾーンは断層全体に分布
- ▶ ダメージゾーンの放棄と断層の両側に新たな構造が出来た結果
- ▶ このようなダメージゾーンについて3グループに分けた

1. ウェッジ型Wallダメージゾーン



- ▶ 中心から端に向かって広がり、断層に沿って繰り返す
- ▶ モードⅡ、もしくはモードⅡとⅢの漸移的な伝播の結果だ

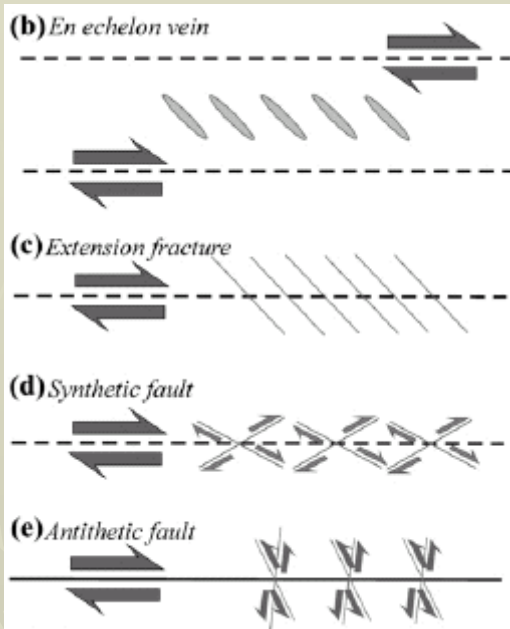
•このような小規模なセグメントの伝播やずれによって、繰り返すウェッジ型Wallダメージゾーンが出来る



断層沿いに同じ幅でダメージゾーンが見られない理由は2つ考えられている

- ▶ 1: ウェッジ型WallダメージゾーンはモードⅡにのみ発達するが、断層表面の中央を通らないセクションが調査した断層の端のみに発達しているというもの
- ▶ 2: 断層が放射状に伝播しているというよりもむしろ、セグメント連結部に成長しているというもの

2. 長く、比較的狭いWallダメージゾーン



岩石中を断層が伝播したときのものであろう

最大主圧縮力に平行な引張フラクチャーは主断層の形成以前のフラクチャーであると仮定する人もいる

雁行状フラクチャー

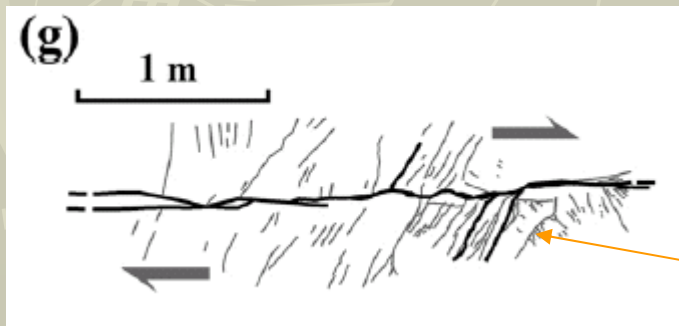
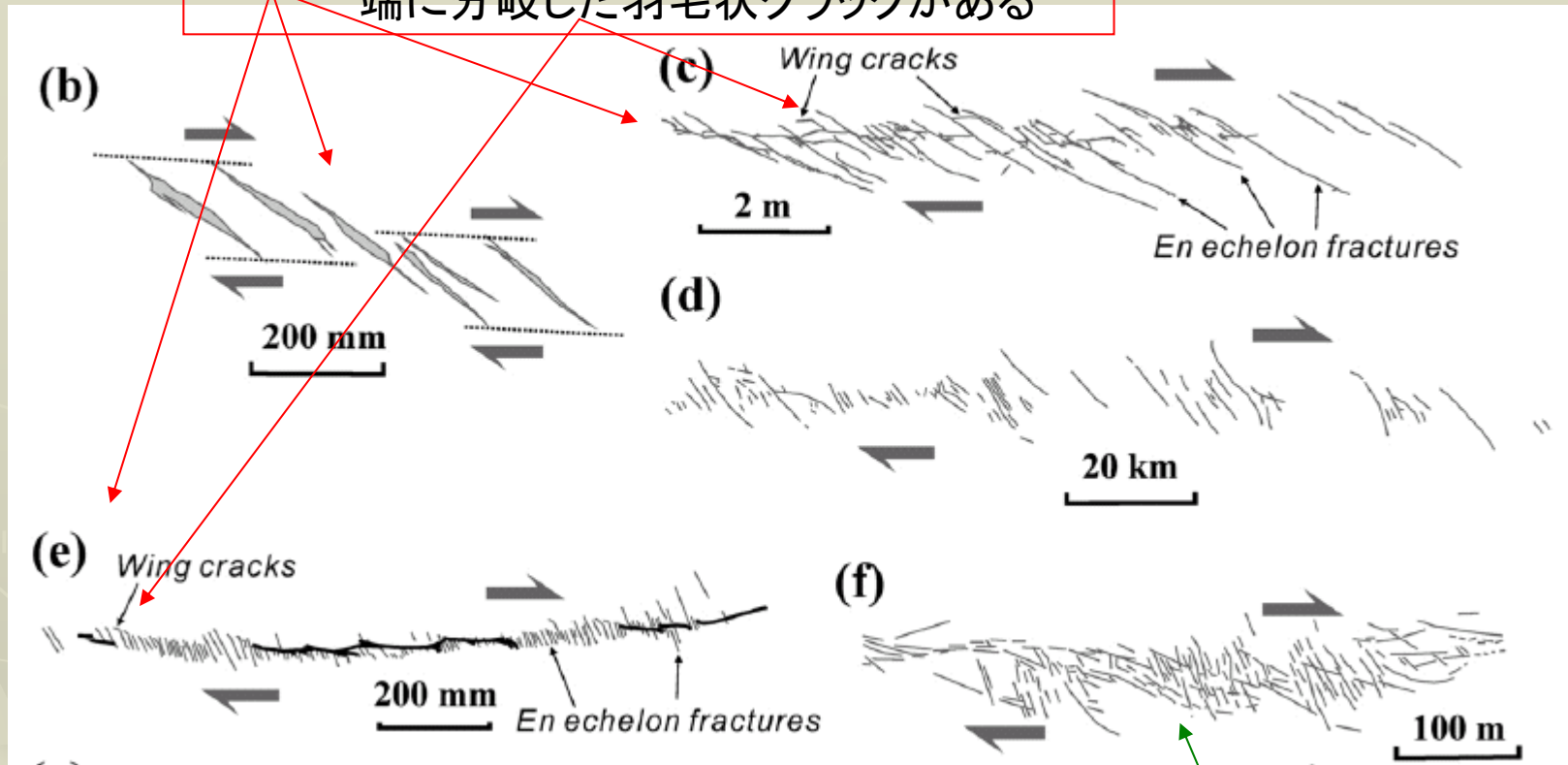
- 端に分岐した羽毛状クラックがある
- 初期のアンチセティック断層かもしくは、アンチセティック断層として再活動した引張フラクチャーであると考えられる

- シンセティック断層は主断層のWallダメージゾーンに出来る
- シンセティック断層とアンチセティック断層のセットがモードⅢの断層付近に出来る事がある
- フラクチャーパターンは非対称的だが断層をはさんで大きさと形は対称的
- マップ規模でも薄片でもモードⅢのダメージゾーンは一般に対称的
- 応力も断層に対称的
- モードⅡのダメージゾーンは非対称になる傾向がある。

実際の露頭

雁行状フラクチャー

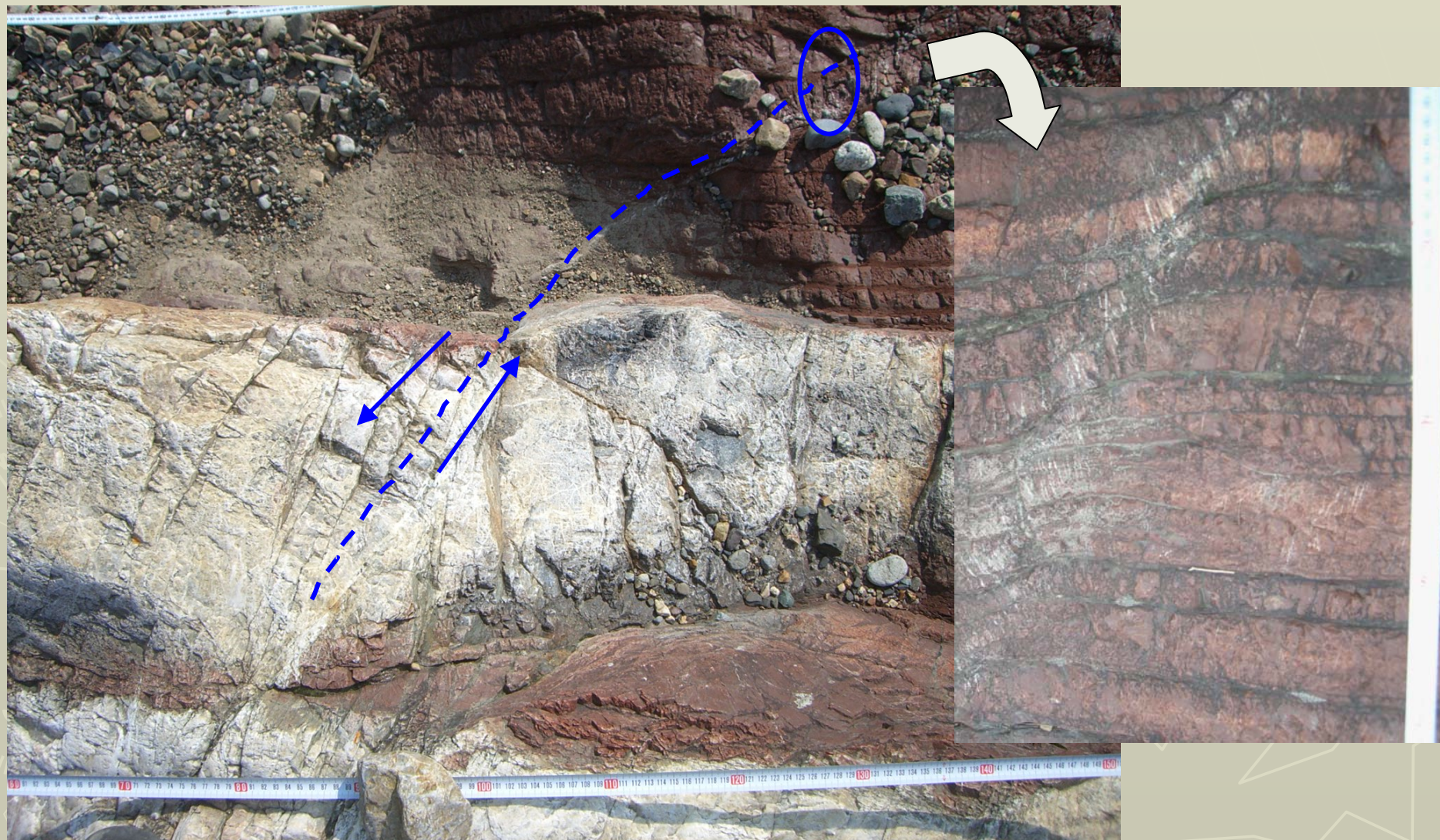
端に分岐した羽毛状クラックがある



シンセティック断層

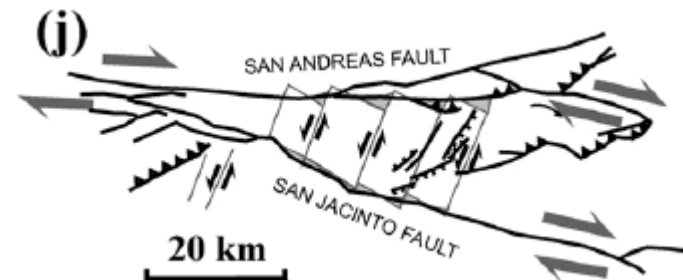
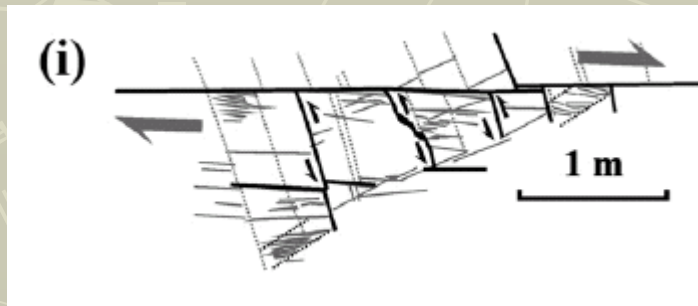
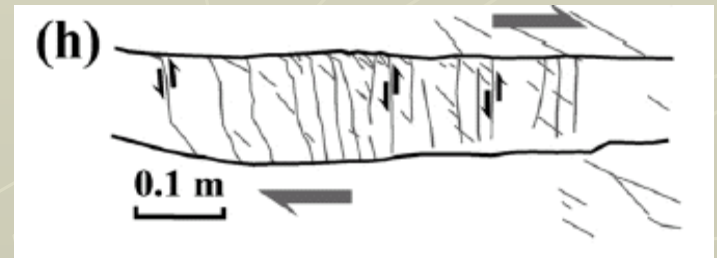
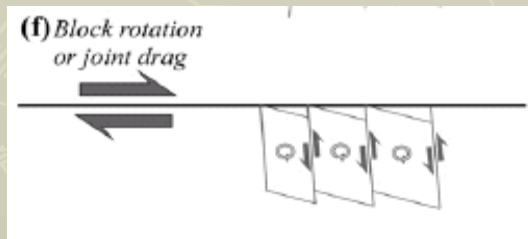
アンチセティック断層

露頭写真



3. 断層に非対称なWallダメージゾーン

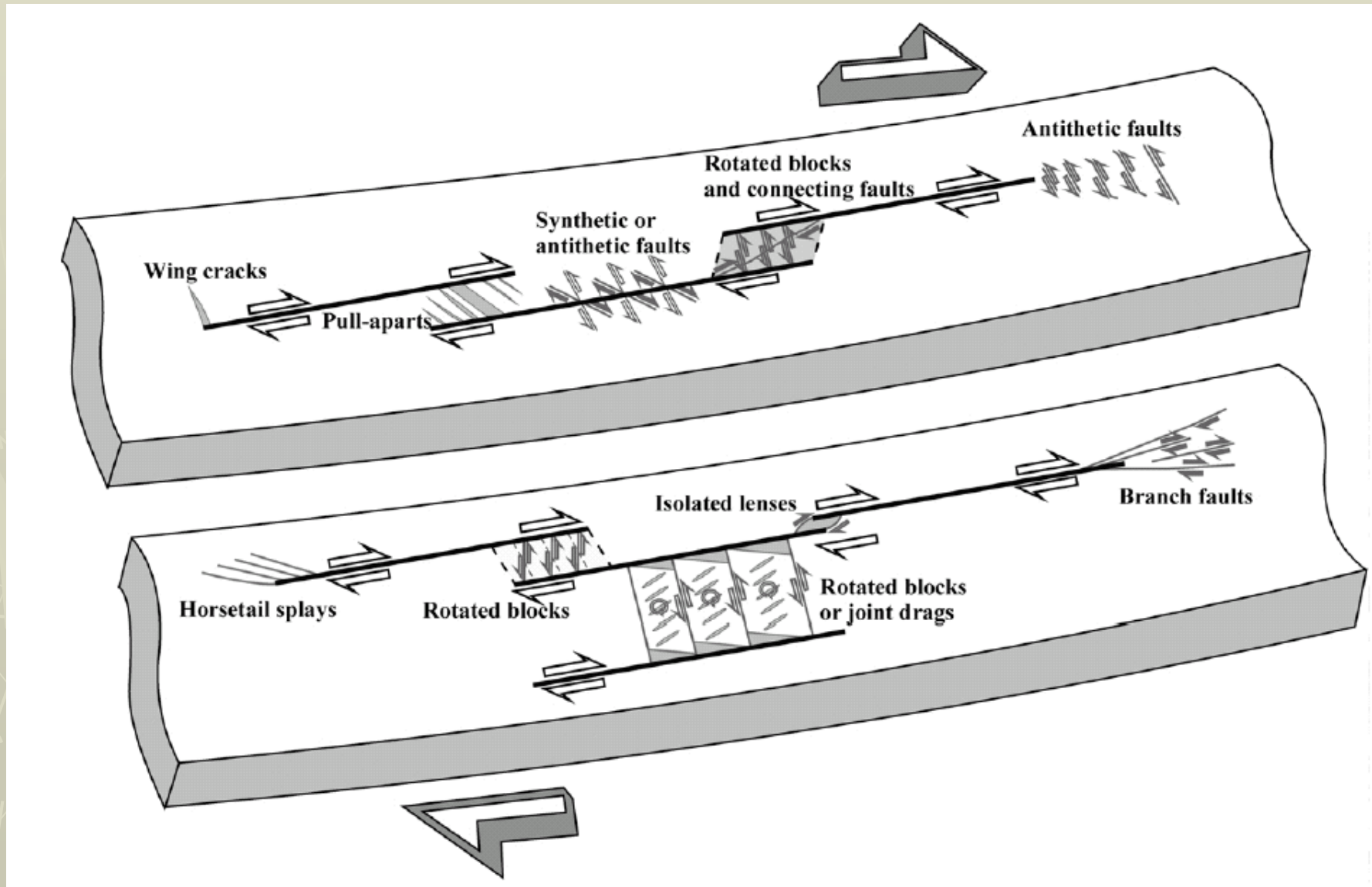
- ▶ 激しいダメージゾーンは断層の摩擦で出来る。
- ▶ ブロックの回転は大きな滑りの断層沿いで出来る
- ▶ 小規模なブロックの回転に断層との間の三角形の開口部がよく伴う
- ▶ アンチセティック断層は主断層にほぼ垂直
- ▶ ブロックは主断層に対称的に回転する
- ▶ Joint drags はこのタイプのダメージゾーンの例
- ▶ 同じような回転ブロックは順平行断層と断層ステップにも観察されている。



横ずれ断層周辺における ダメージゾーンのモデル

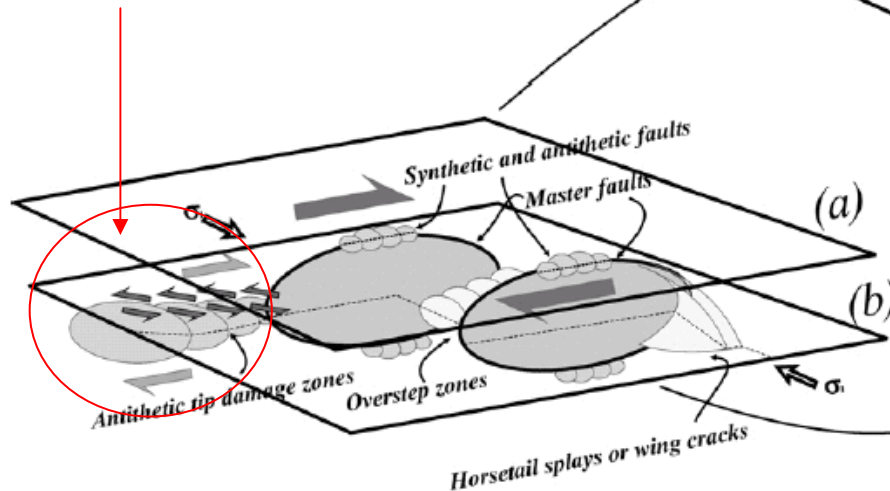


横ずれ断層周辺の典型的な構造まとめ

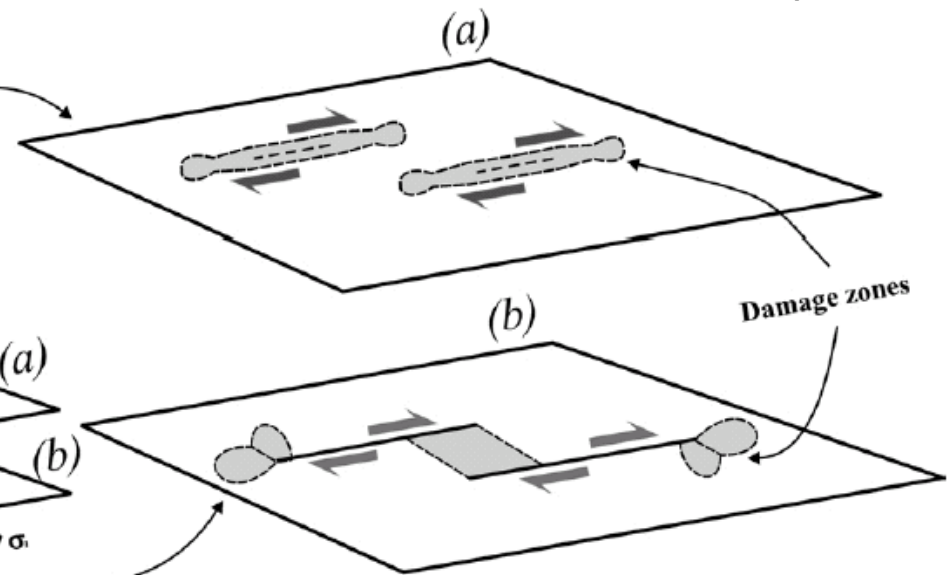


横ずれ断層周辺の三次元的モデル

- 断層端は対照的な円錐型の応力配置を示し、フラクチャーパターンは分岐花形構造に似ている



モードⅢ ダメージゾーンは対称的



モードⅡ ダメージゾーンは非対称的

モデル関係事項

- ▶ 断層周辺の二次的な断層とフラクチャーは断層端のモードと位置に関連している
- ▶ McGrath and Davison (1995)によるとトランスプレッションやトランステンション、単純剪断のような応力構造がダメージゾーンの幾何を決めるといっている
- ▶ Martel and Boger (1998)もフラクチャーについて同様
- ▶ しかし単純すぎて今回のまとめのような多様性はなかった。

ダメージゾーンのパターン

- ▶ 断層周辺の三次元的な位置・断層端のモード・滑りの量・断層セグメント間の相互作用による応力配置によって決まるといえる

同じ断層端のモードにおける差異

- ▶ 封圧や最大主圧縮応力の姿勢、断層伝播の方向、断層の発達度合いの違いによるだろう
- ▶ これら以外にも岩石種や流体圧、温度が影響し、そう単純にモデル化できないことは確か
- ▶ しかし今回のまとめた図は断層先端線周辺でダメージゾーンがどのようなになっているかを説明している

ダメージゾーンの発達過程はどうか

- ▶ パターンがより複雑
- ▶ 断層先端のダメージゾーンは断層の始まりとして発達し、岩石に伝播する
- ▶ 滑りと長さを増すにつれ断層は連結しながら伝播
- ▶ 断層ステップの応力状態によりダメージゾーンは変化に富む
- ▶ 滑りの増加に伴って連結部に断層帯を作り、それがそれまでの変形に重なる
- ▶ 複雑な再活動を経験した断層には複雑な微小歪が関係してくる

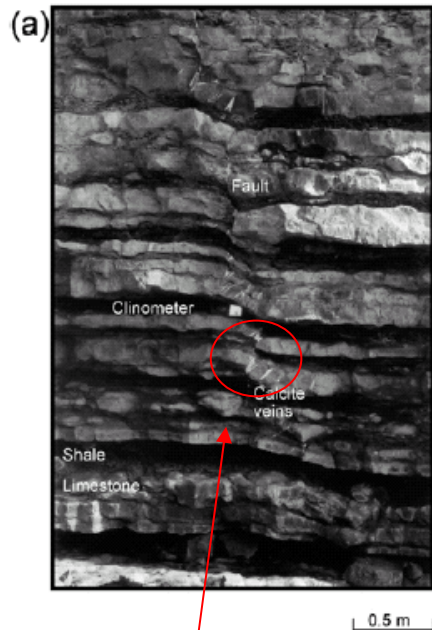
正断層と逆断層周辺の ダメージゾーン

横ずれ断層の分類案の応用として

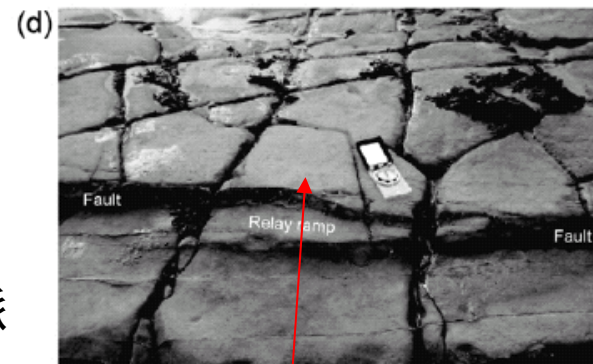
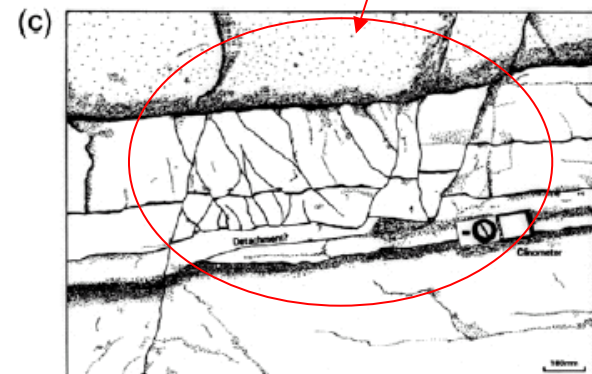
正断層のダメージゾーン

- ▶ ダメージゾーンは大まかには横ずれと似ている

引張ステップではプル
アパートが特徴



圧縮ステップではアンチセ
ティック断層が特徴



断層のずれで回転した脈

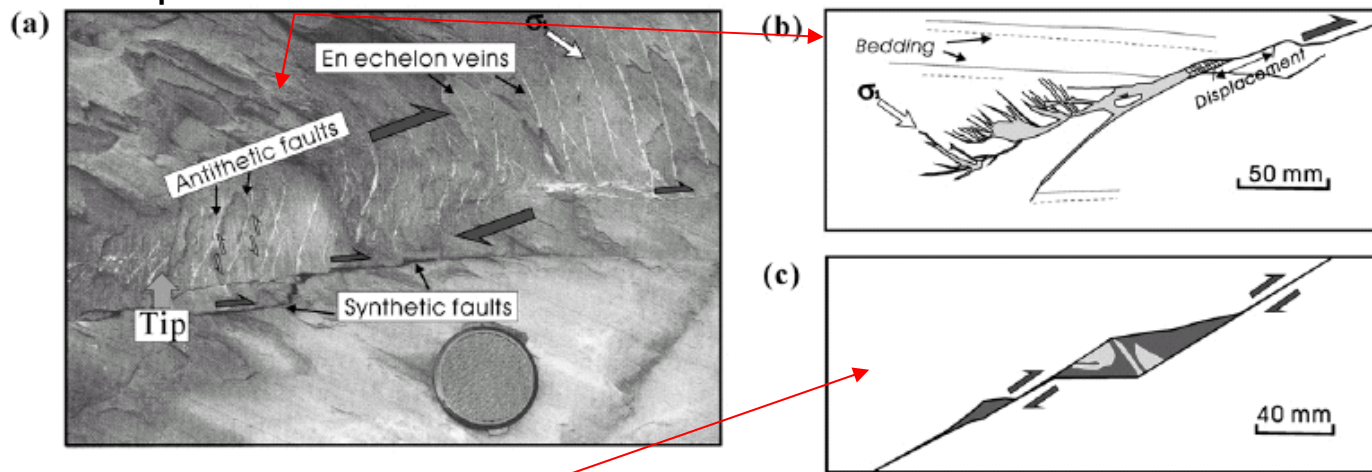
マップ規模の正断層に
よって出来るリレーランプ

引きずられた地層

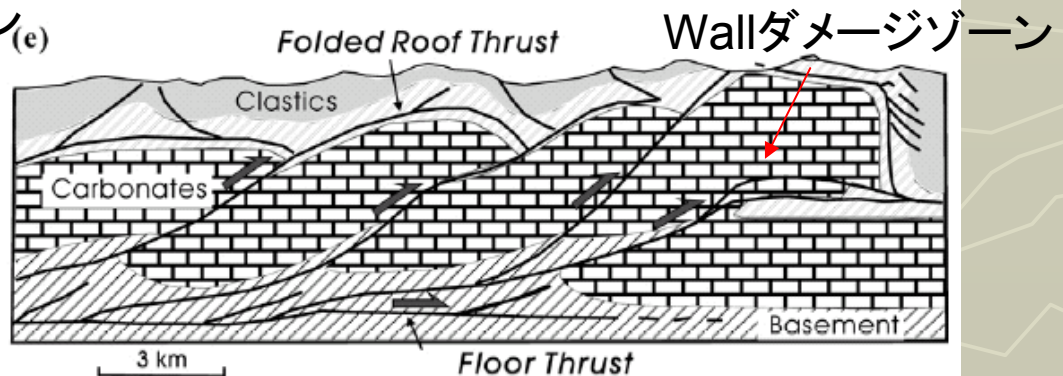
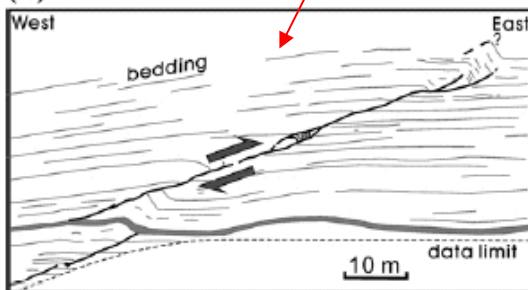
逆断層のダメージゾーン

- ▶ 逆断層のダメージゾーンも大体は横ずれに似ている
- ▶ 断層端ダメージゾーンには、端が断層に交わる褶曲軸面がよくある
- ▶ 横ずれと正断層系としてシンセティック断層やアンチセティック断層、馬の尾フラクチャーもある
- ▶ 引張ステップはまれ→逆断層が層序的セクションでステップアップするからだろうか
- ▶ 層面滑りや小褶曲、破碎流動、厚層化をよく伴うスプレー断層やバックスラスト(逆向き衝上断層)がよくみられる

tipダメージゾーン



linkingダメージゾーン



露頭写真



Conclusions



- ▶ 断層ダメージゾーンは多様な幾何学とフラクチャーパターンがある。それらの場所に基づき主に三つに分ける事が出来た



tipダメージゾーン

- ▶ tipダメージゾーンは断層先端部においてすべるモードとフラクチャーパターンから分けられる
- ▶ モードⅡ部では羽毛状クラックや馬の尾フラクチャー、アンチセティック断層、シンセティック断層が出来る
- ▶ 断層に沿った引張と短縮のせいで、典型的にダメージゾーンは非対称。
- ▶ モードⅢ部では断層沿いの滑りにより、シンセティック断層とアンチセティック断層ができ、ダメージゾーンは対称的である

linkingダメージゾーン

- ▶ linkingダメージゾーンは同一の面ではないほぼ平行な二つの断層間に発達する
- ▶ 幾何や構造はステップが引張か圧縮かで大きく異なる
- ▶ 引張フラクチャーやプルアパートは引張ステップの典型
- ▶ connecting断層は圧縮ステップに発達する
- ▶ 回転したブロックやレンズ状部や横ずれデュープレックスは両ステップタイプに見られる

wallダメージゾーン

- ▶ wallダメージゾーンは岩石中のモードⅡとモードⅢの伝播もしくは断層での滑りによって出来る
- ▶ 雁行状伸張フラクチャーやアンチセティック断層、シンセティック断層、三角形の開口部を伴うブロックの回転がある

まとめ

- ▶ 小スケールから大スケールの横ずれ断層、正断層、逆断層付近のダメージゾーンはこの分類案によく一致
- ▶ 断層の成長が一つの面上で単純に進むのではなく、より複雑な破壊によって形成されている事が、物理的な断層成長のモデルを複雑にしている
- ▶ 断層帯にある複雑さは異なる滑りが再活動するところで特に顕著
- ▶ しかし今回主なダメージゾーンの分類案を示せた