

地質学的手法で見た溶岩流の破壊の痕跡

Tuffen et al. (2003)とTuffen and Dingwell (2005)の

レビューとその背景

最終回

Keywords: 剪断応力, 脆性破壊, 塑性変形, 歪み速度, annealing,
sintering, cooling

火山センター 野口 聡

Repeated Fracture and Healing process

phase 1: crackの形成(脆性破壊)

phase 2: fracture networkの形成

摩擦熱による温度上昇、局所すべりによる
粒子の細粒化

phase 3: cohesive deformationが起こる(塑性変形)

(温度上昇、歪み速度の低下)

annealing(結晶化と既存のtextureの記録(p1,2,3)が消える)

phase 4: flow bandの形成

脆性破壊 (seismogenic)

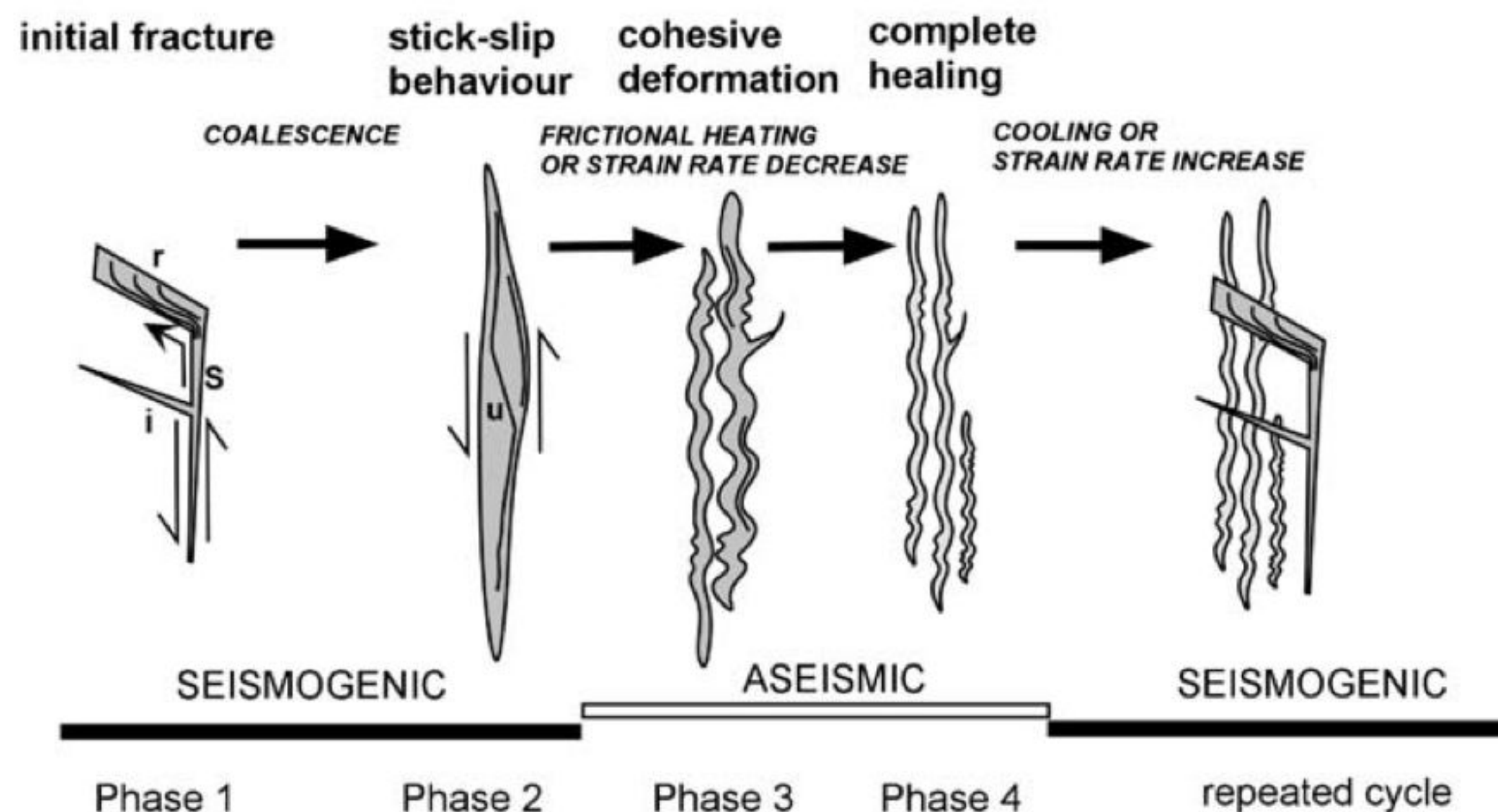
脆性破壊→クラックの成長

- ・カタクレーサイト
- ・ガラス質のシュードタキライト

塑性変形 (aseismic)

粒子同士がくっつく→粘着性が増す
→塑性変形が生じる

- ・マイロナイト
- ・ウルトラマイロナイト



Phase 1 Initial fracture

シュードタキライトの組織に似ている
→ **シュードタキライトの形成過程**

剪断応力の蓄積により破壊強度
を超えて破砕が生じる。

$$\sigma_s + \frac{\eta_s}{G} \frac{\partial \sigma_s}{\partial t} = \varepsilon \eta_s$$

$$\varepsilon \eta_s > 10^8 \text{ Pa}$$

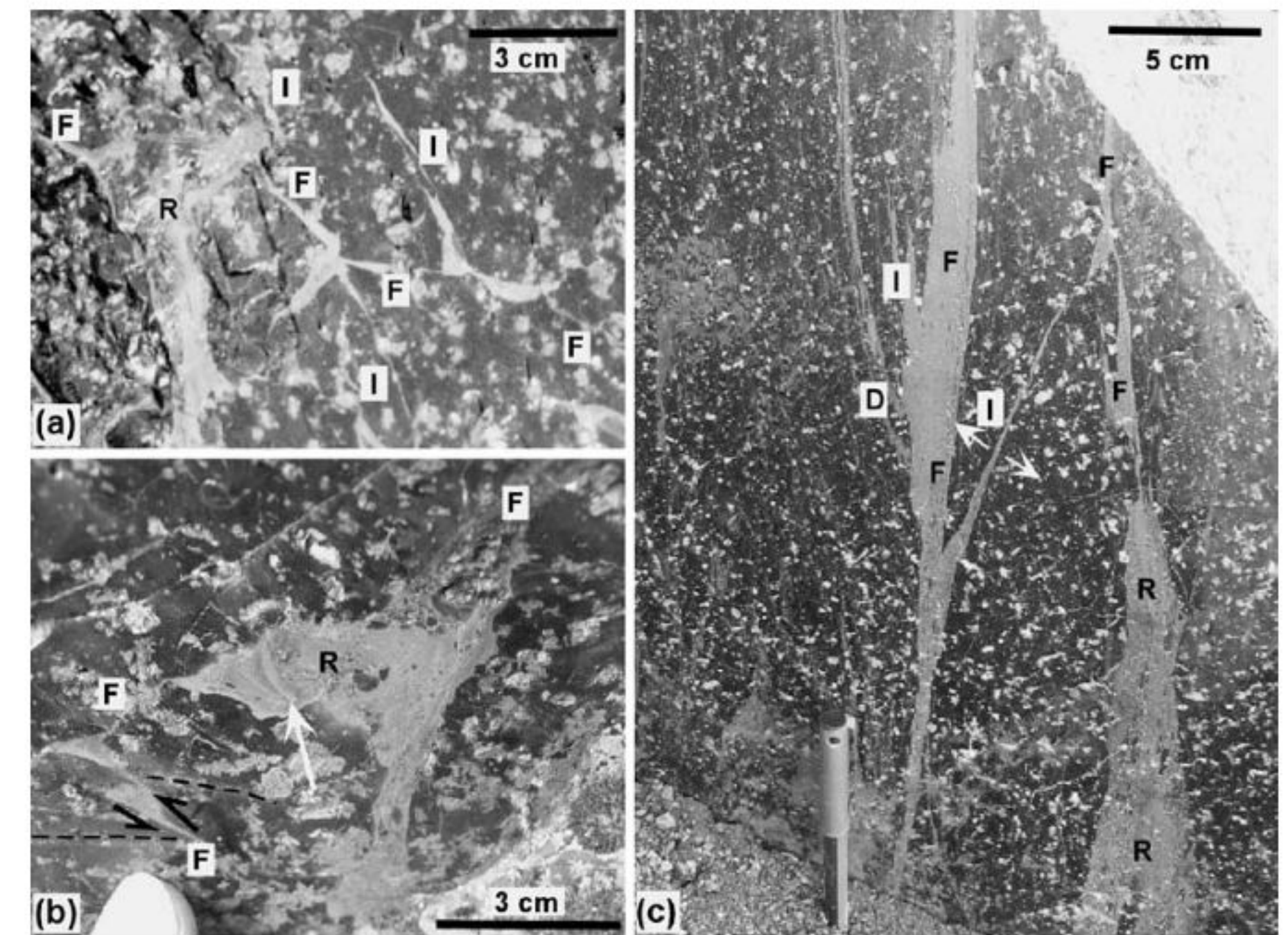
ε : strain rate $10^{-2} \sim 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

η_s : viscosity $10^9 \sim 10^{14} \text{ Pa s}$

Tuffen et al. (2003)

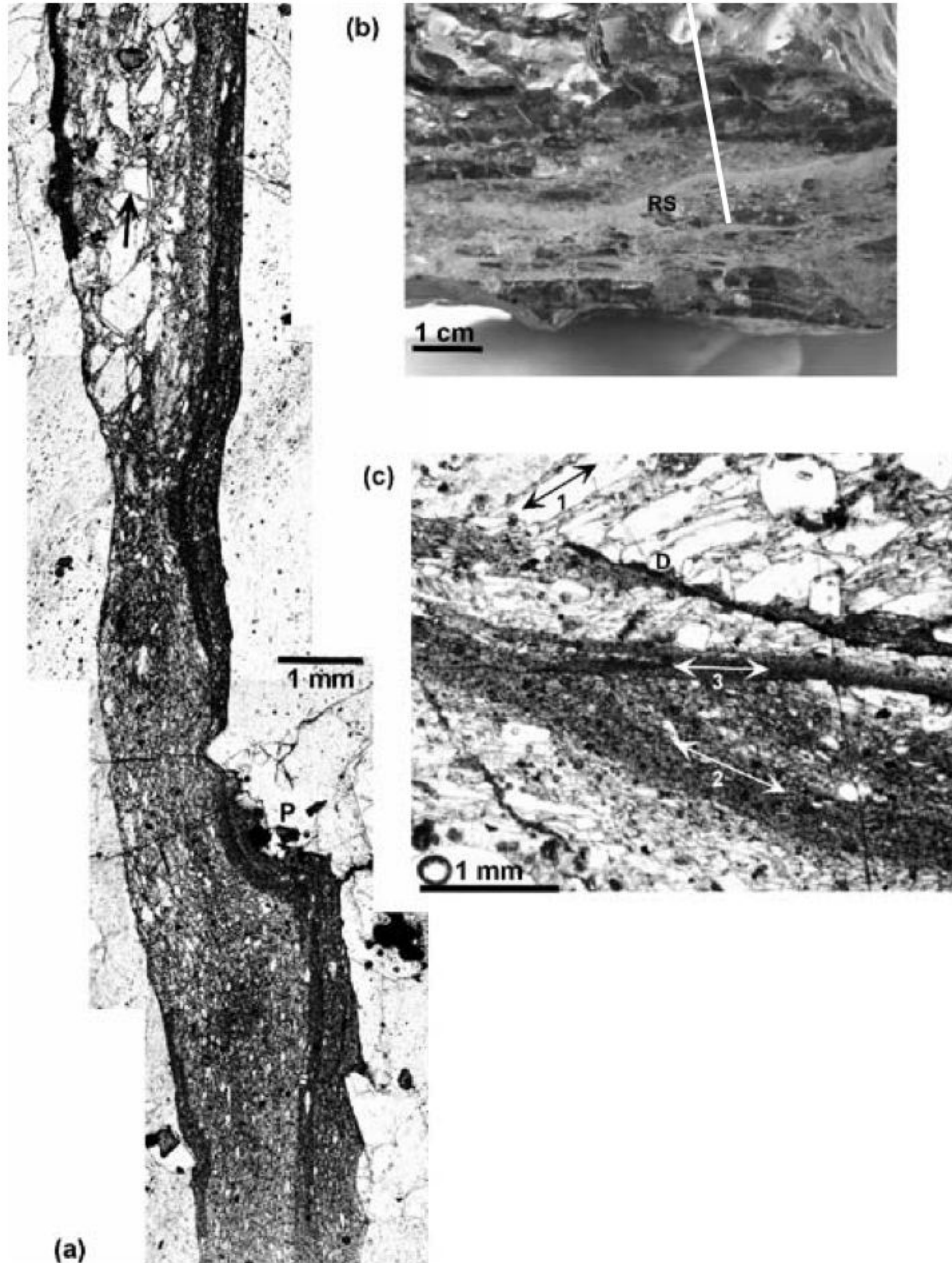
詳しくは後で述べる・・・

1. 火道壁で剪断応力の蓄積が起こり、脆性破壊が生じる
2. Fractureが形成される事で空間が生じ、一時的な圧力差が生じる
3. Veinの形成: fractureの壁の一部が摩耗し、粒子(破片)がガスと共にfracture内に取り込まれる



Phase 2 Slip on cataclasite shear zone

Riedel shear zone



カタクレーサイト、ウルトラカタクレーサイトの形成過程

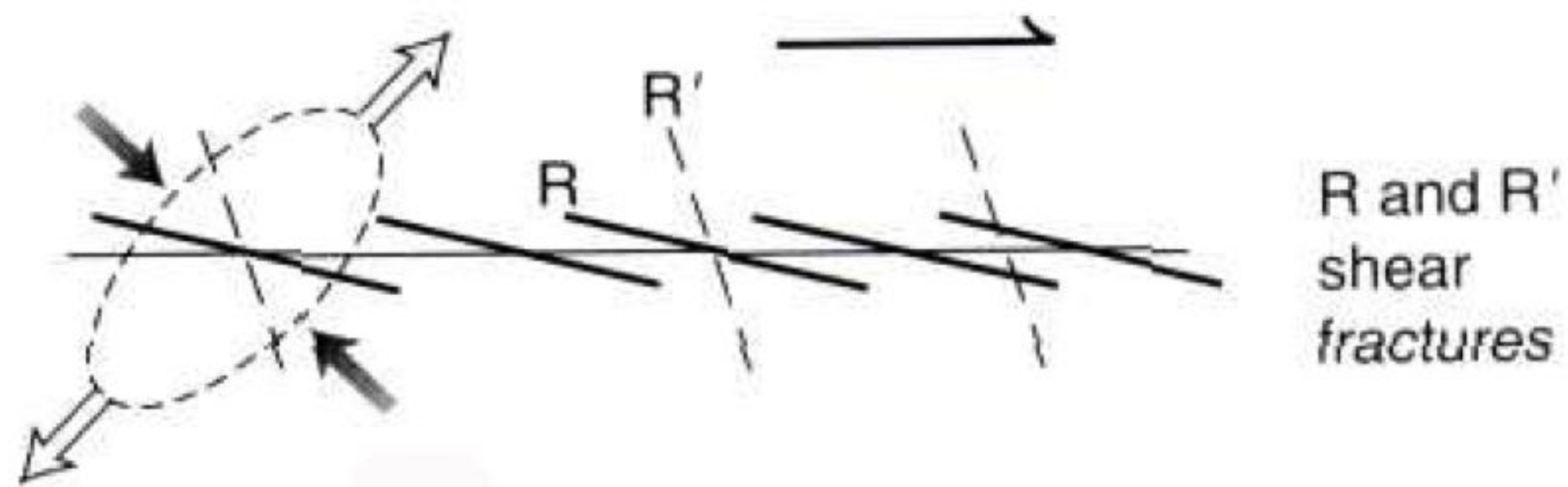
典型的な断層ガウジ、断層角礫、カタクレーサイトの形成過程と同様の形成プロセス

Initial fractureの形成からfracture networkの形成まで

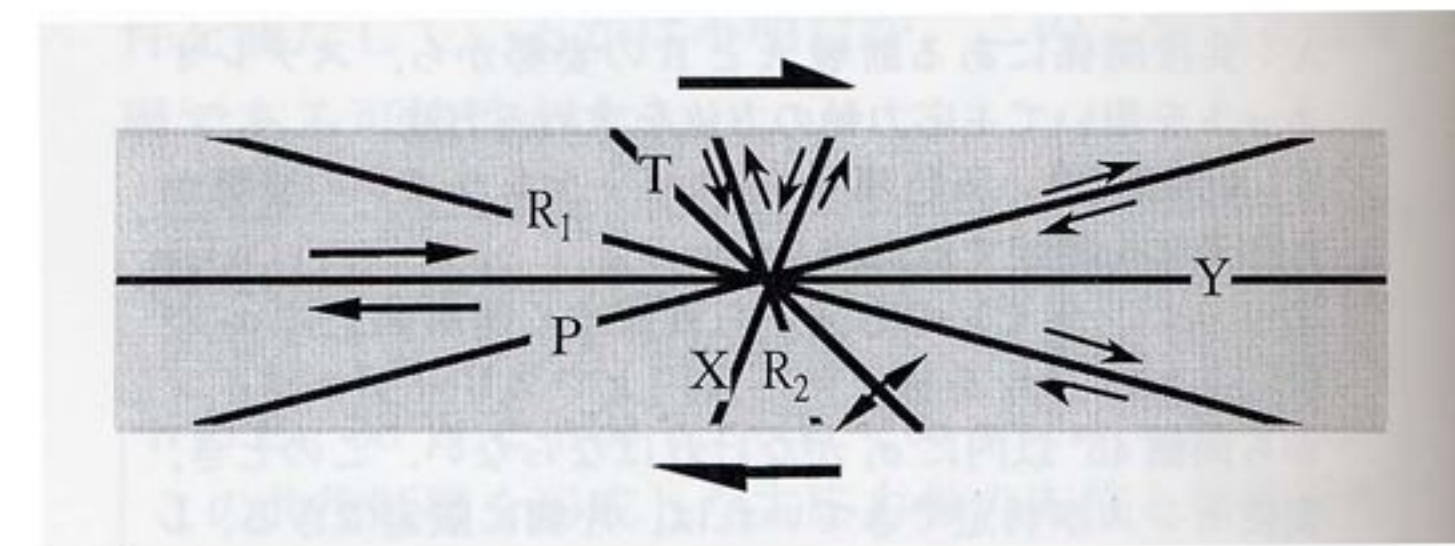
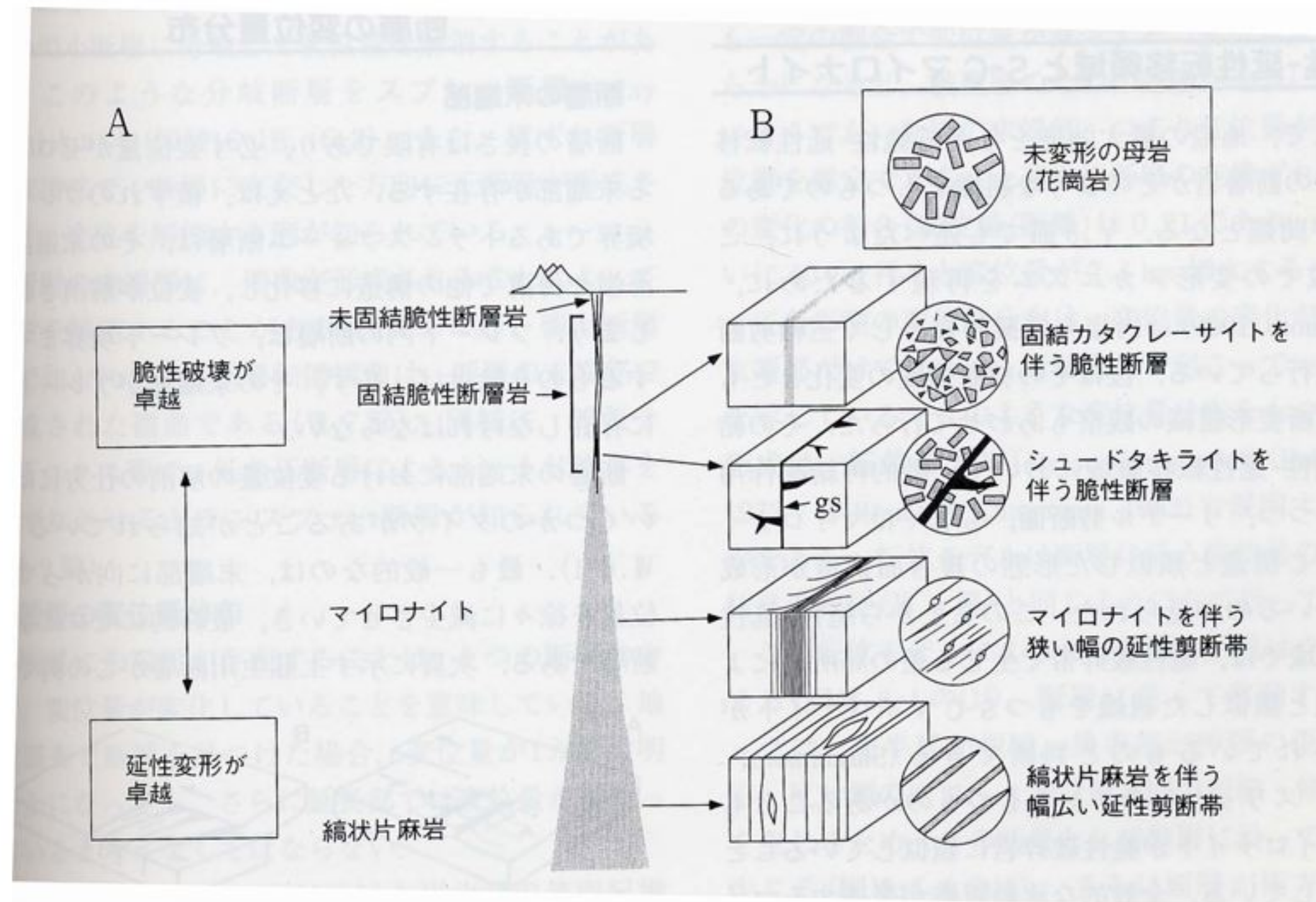
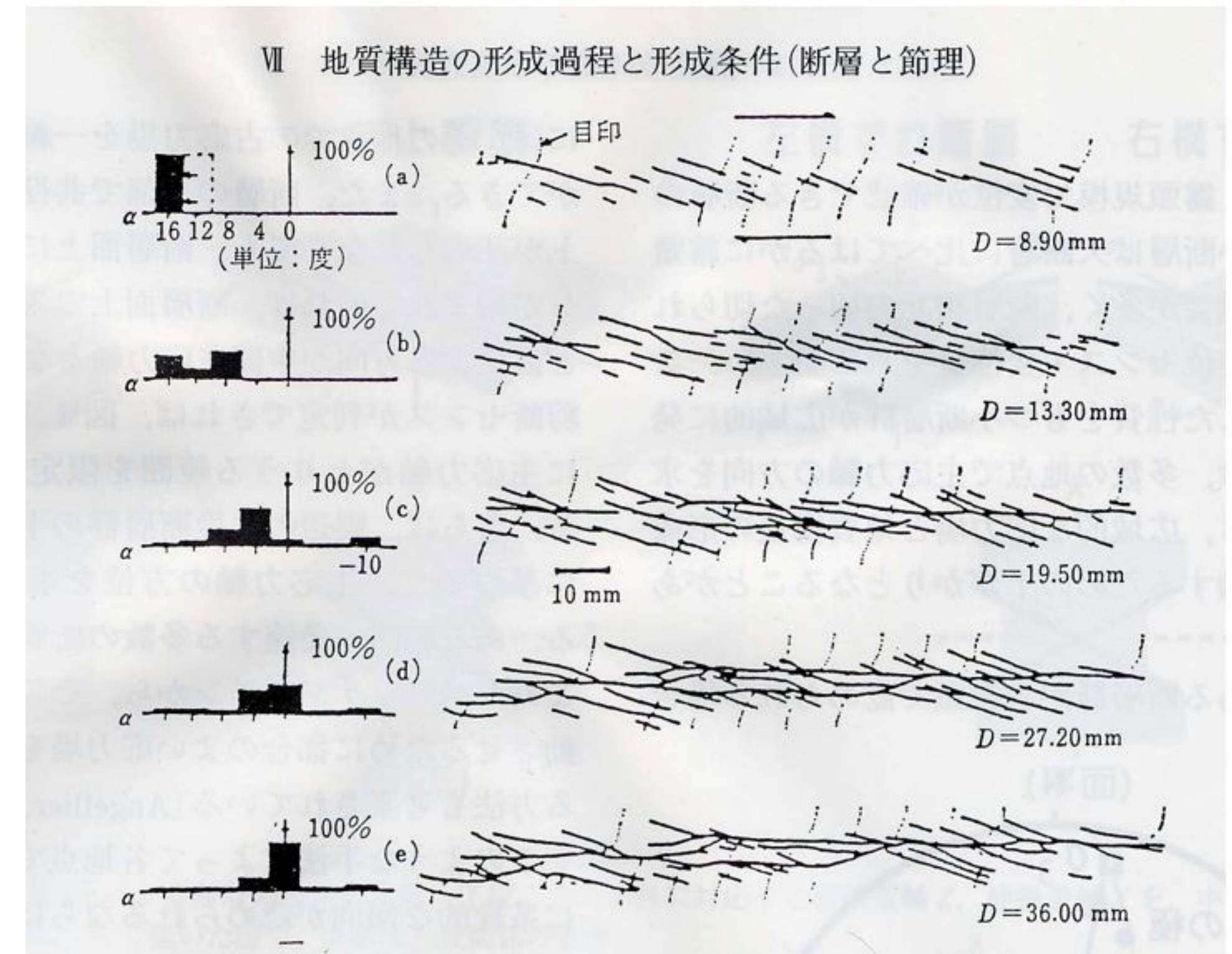
→断層の成長過程

アナログ実験により

Riedel shear experiment



変位量の増加



→シュードタキライトを伴う脆性断層

シュードタキライトの形成過程

粉碎説: 地震断層運動の衝撃破碎によって形成される

熔融説: 地震時の急激な断層運動に伴う摩擦熱により熔融した高温の液体が破碎岩片を伴って破断面に貫入し、細粒基質部は急冷によって形成される。

→ 厳密に定義されていない

天然の観察事実から見ると、ガラス質のシュードタキライトは熔融した組織を示す。



ガラス質のシュードタキライト
SCEC homepageから

シュードタキライトは脆性・塑性転移領域を見ている可能性がある

McNulty, 1995

Phase 3 Ductile deformation of cataclasite zones

Cataclasiteが褶曲構造を示す

破片状結晶がbandに平行に配列している

破片状の粒子が自己破砕(fracture)していない

Cataclasiteに粘着力(cohesion)があり
変形した

Phase 2からphase 3の形成

ポイント: cohesive deformationが生じる為には、
strain rateの減少、温度上昇(正確には粘性低下)が必要

1. strain rateの減少

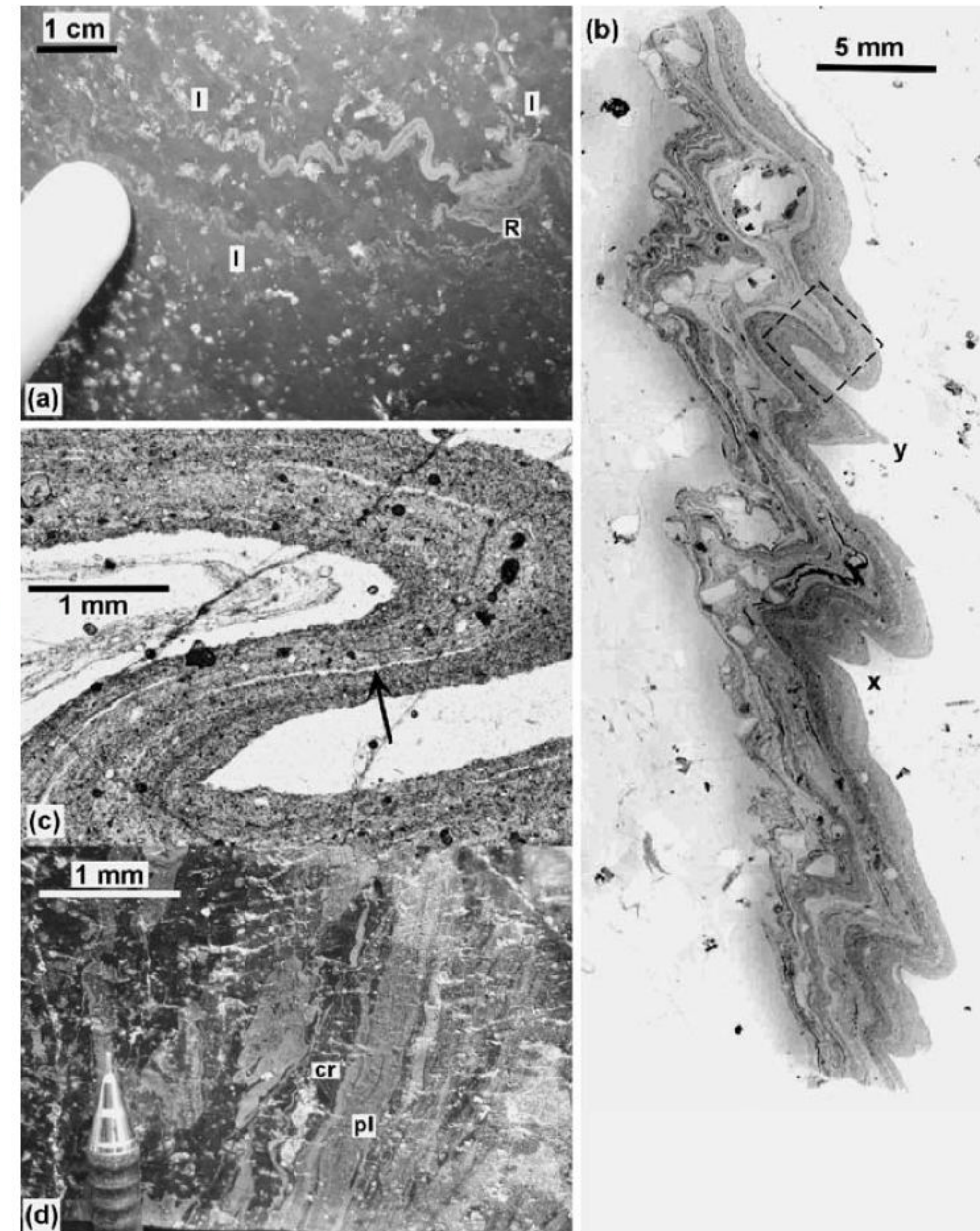
cohesive deformation

Strain rateが高いと粒子同士の境界面で局所すべりが生じるため

- fracture networkに伴い粗い粒子から細かい粒子になる; 粒径 10–100 μm

凝集性(sintering)が関係している!?

→ 粘着力が増加する



2. 温度の上昇 (Strain rate 一定)

cohesive deformationが生じる為には、
温度上昇も必要

annealing: ガラス転位点より上(液体の状態)
で結晶化が起こる(自由エネルギー
が最小の状態)

- ・摩擦熱により温度が上昇する
→ガラス転位点を越える→ annealing

ガラス転位点付近では粘性が二桁以上変化する 塑性変形になる

annealingが一度進行すると, slipは起こりにくくなる

Phase 3になると鉄チタン酸化物が大量に認められる

しばしばガラス質のシュードタキライトでも認められる

- 摩擦熱によりガラス転位点を越えた可能性がある
annealingによる結晶化

Phase 4 Formation of flow banding from healed cataclasite

Flow bandの特徴とそれぞれのbandの形成過程

4a: dark zone

破片状の結晶などが存在する

→phase 2,3のcataclasite zoneの塑性変形で作られたもの

ガラス質シュードタキライトに非常に類似している

4b: 斑晶やmicroliteはband中に含まれている

→phase 2-4a zoneの塑性変形で作られた。

4c: microlite大量に含まれる

→phase 3-4のmelting,結晶化によってできる

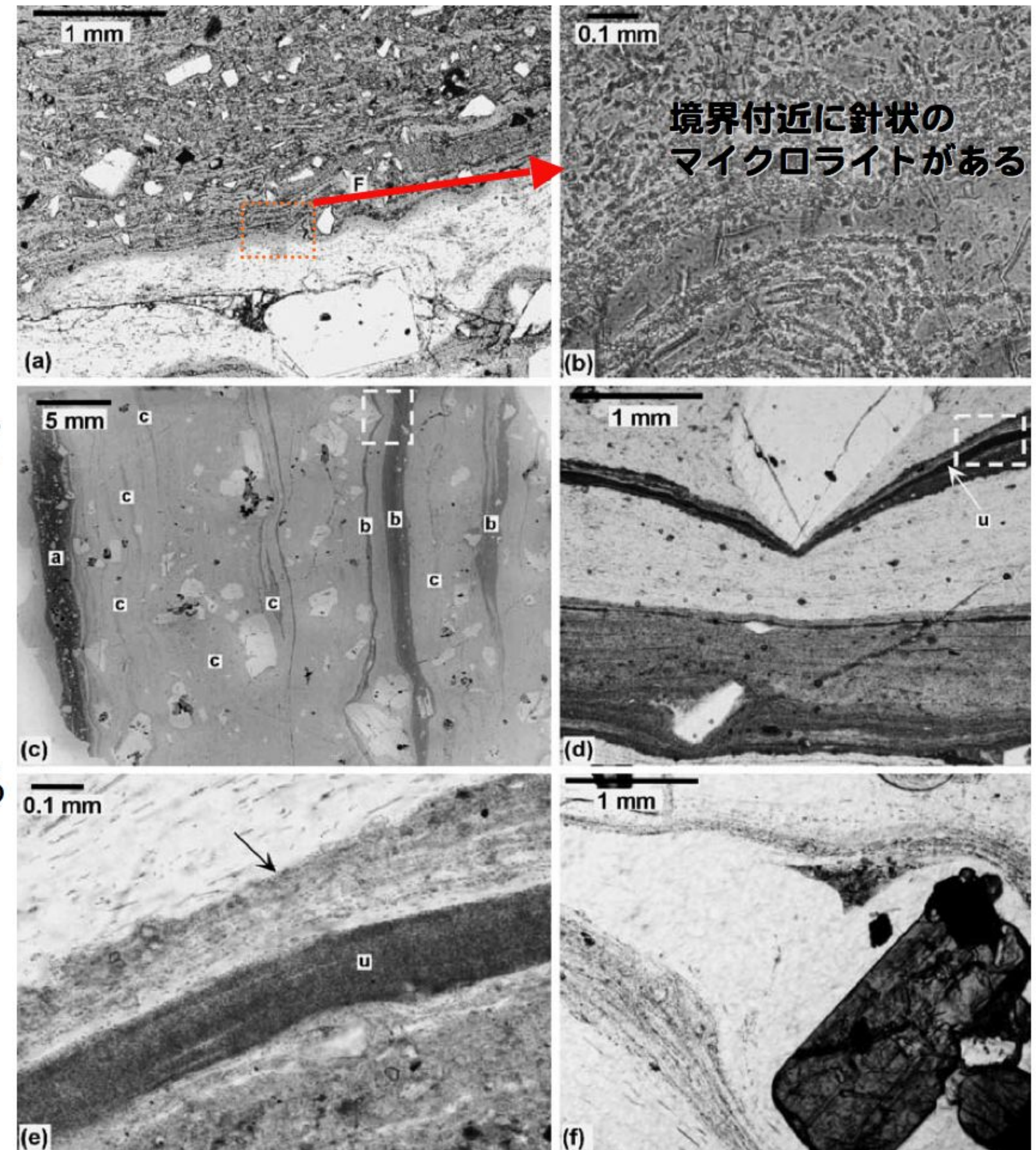
4a→4b→4cの順で進行する

Phase 4

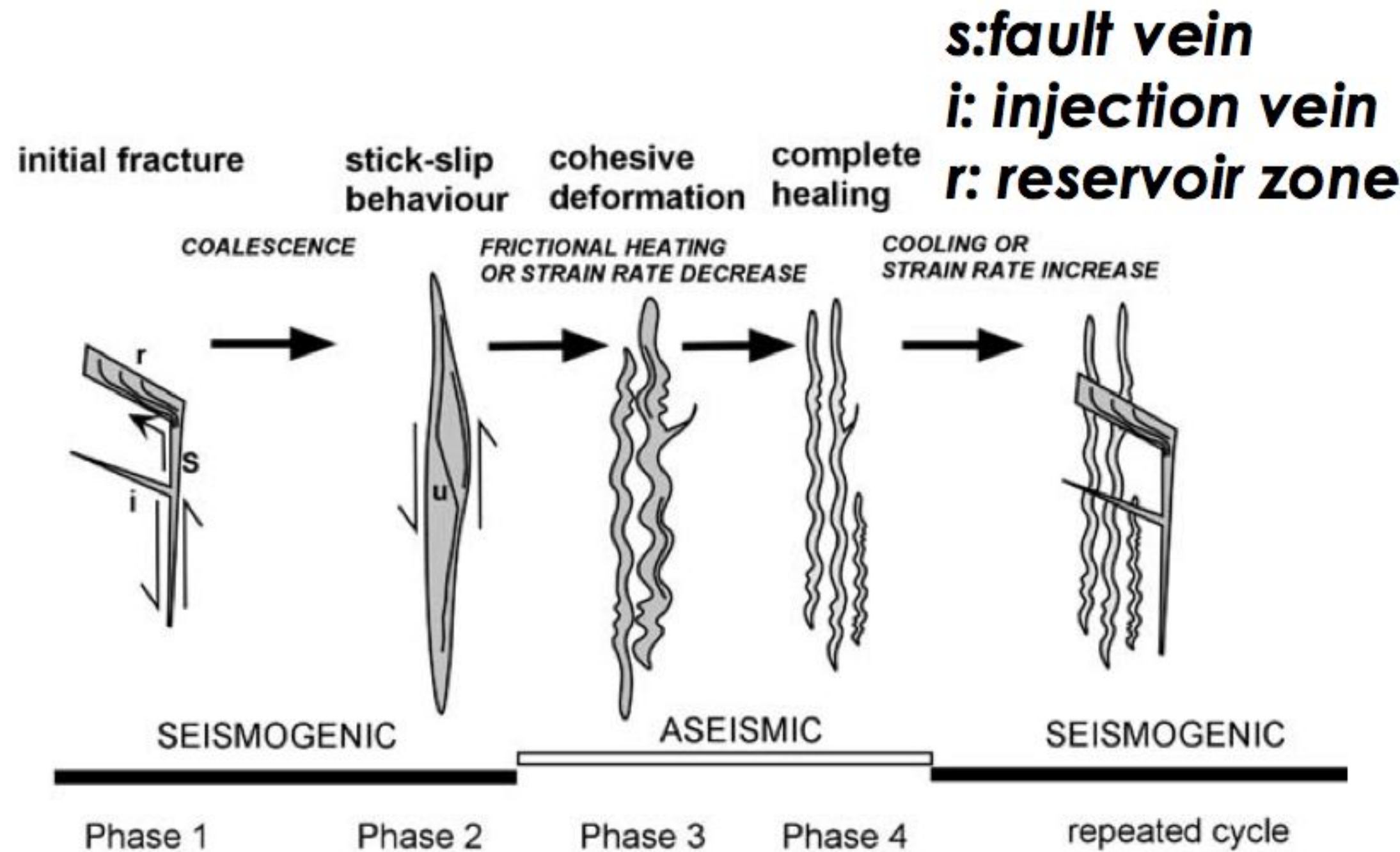
- **annealing**が起こる

→結晶化が起こる

- **texture**の記録が消える



Cycle brittle-ductile deformation



phase 1: crackの形成(脆性破壊)

phase 2: fracture networkの形成

摩擦熱による温度上昇、局所すべりによる
粒子の細粒化

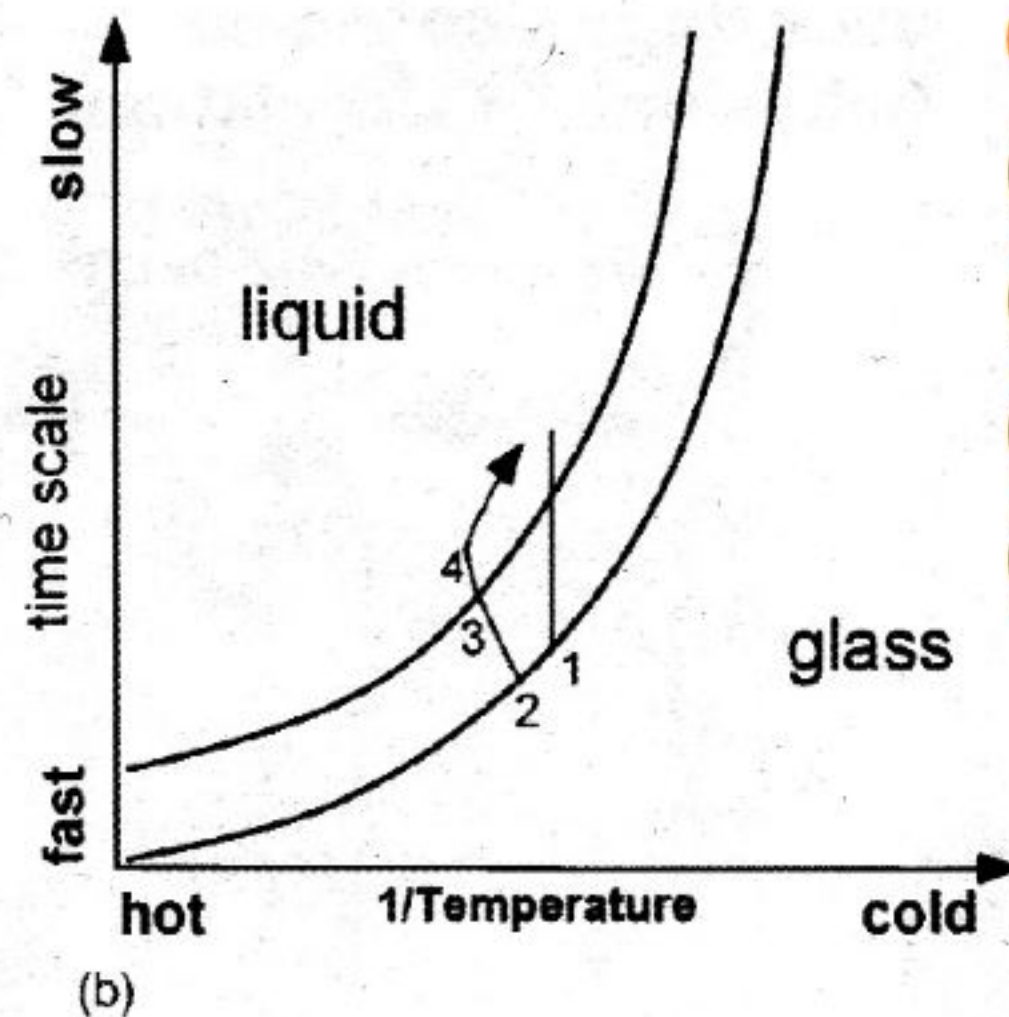
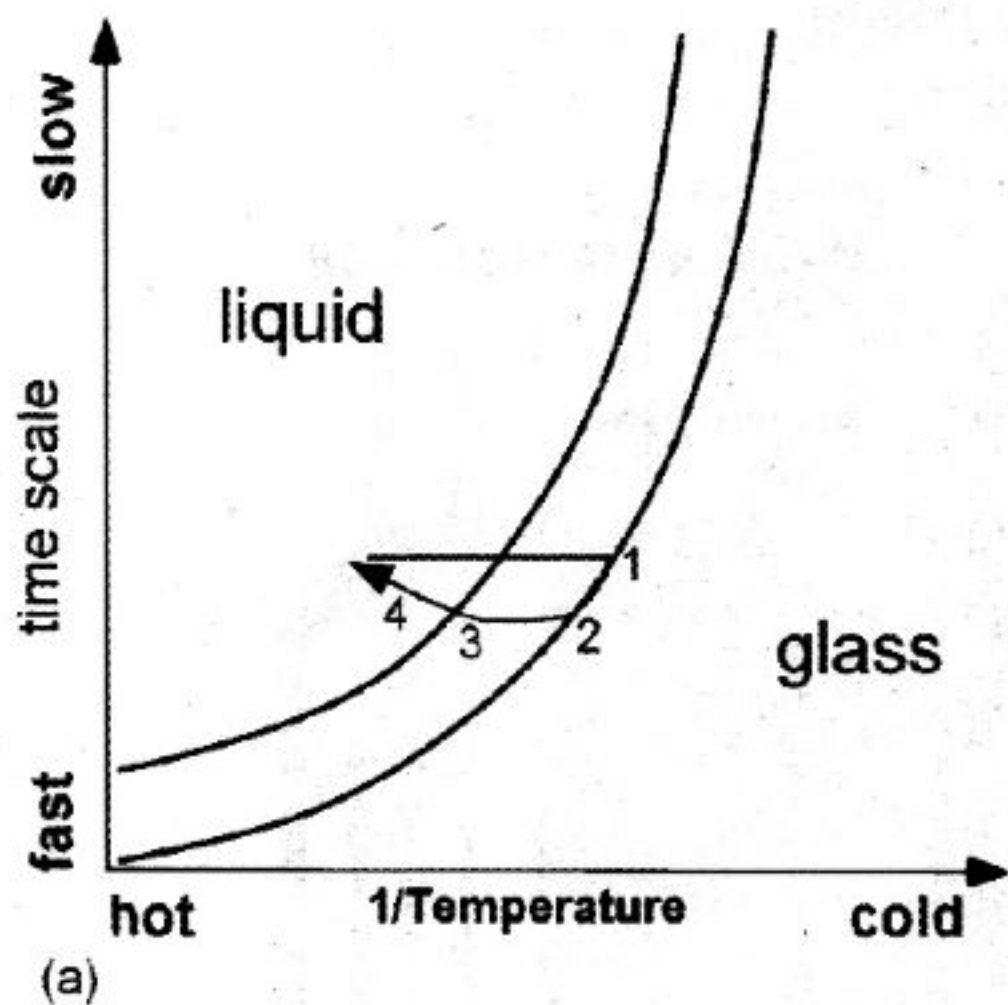
phase 3: cohesive deformationが起こる(塑性変形)

(温度上昇、歪み速度の低下)

annealing(結晶化と既存のtextureの記録(p1,2,3)が消える)

phase 4: flow bandの形成

Cooling
Constant strain rate
strain rate
Constant temperature



cooling:

- (1) 冷却によって塑性的な状態から脆性的になる→破壊
- (2) Frictional slip→温度上昇
- (3) 粒子の凝集(sintering)→annealing
- (4) 結晶化が進む→冷却されると(1)にもどる

strain rate:

- (1) Strain rateの増加
- (2) Strain rateがさらに増加
- (3) 粒子の細粒化→strain rate減少
- (4) 液体になる、再び増加すると(1)にもどる

Faulting mechanisms ~火山性地震との関係~

火山性地震 マグマの上昇に伴い繰り返し起こる

長周期地震

Hybrid 地震

火山性構造地震

モーメントマグニチュードは-1~3

Tuffisite veinの規模からモーメントマグニチュードを推定すると・・・

モーメントマグニチュード

$M_0 = DGA$

Aは震源断層面積、Dは平均変位量、Gは剛性率

最大のサイズから見積もると(2005年)

$D = 0.13 \text{ m}, G \sim 10^{10} \text{ Pa}, A = 25 \text{ m}^2$

平均のveinのサイズ(2003年)

$D = 10 \text{ mm}, G \sim 10^{10} \text{ Pa}, A = 3 \text{ m}^2$

$M_0 = -1 \sim -0.3$

LP, Hybrid eventとよく一致する

Faulting mechanisms

Timescale of Repeated Fracture and Healing (RFH) process

fracture time t_f 地震性

$$\sigma_s + \frac{\eta_s}{G} \frac{\partial \sigma_s}{\partial t} = \varepsilon \eta_s \quad (1)$$

Webb and Dingwell (1990)

Initial condition: $\sigma_s=0$ at $t=0$

$$\sigma_{st} = \varepsilon \eta_s \left(1 - e^{-tG/\eta_s}\right) \quad (2)$$

σ_s : 剪断応力
 η_s : 粘性
 G : 剛性率
 ε : 歪み速度
 τ_s : 剪断強度

$$t_f = -\frac{\eta_s}{G} \ln \left(1 - \tau_s / \varepsilon \eta_s\right) \quad (3)$$

脆性破壊: $\varepsilon \eta_s$ が τ_s を超えることが条件

η_s : $10^9 - 10^{14}$ Pa s

ε : $10^{-2} \sim 10^{-6}$ s⁻¹

G : 10^{10} Pa

τ_s : 10^6 Pa

ただし $\varepsilon \eta_s$ は $10^7 - 10^{10}$ Pa

t_f の値: $10^{-4} \sim 10^3$ s

diffusion-related process t_d

annealing

~ relaxation timescale とすると

$$t_d = \eta_s / G$$

$10^{-1} \sim 10^4$ s

viscous deformation t_v

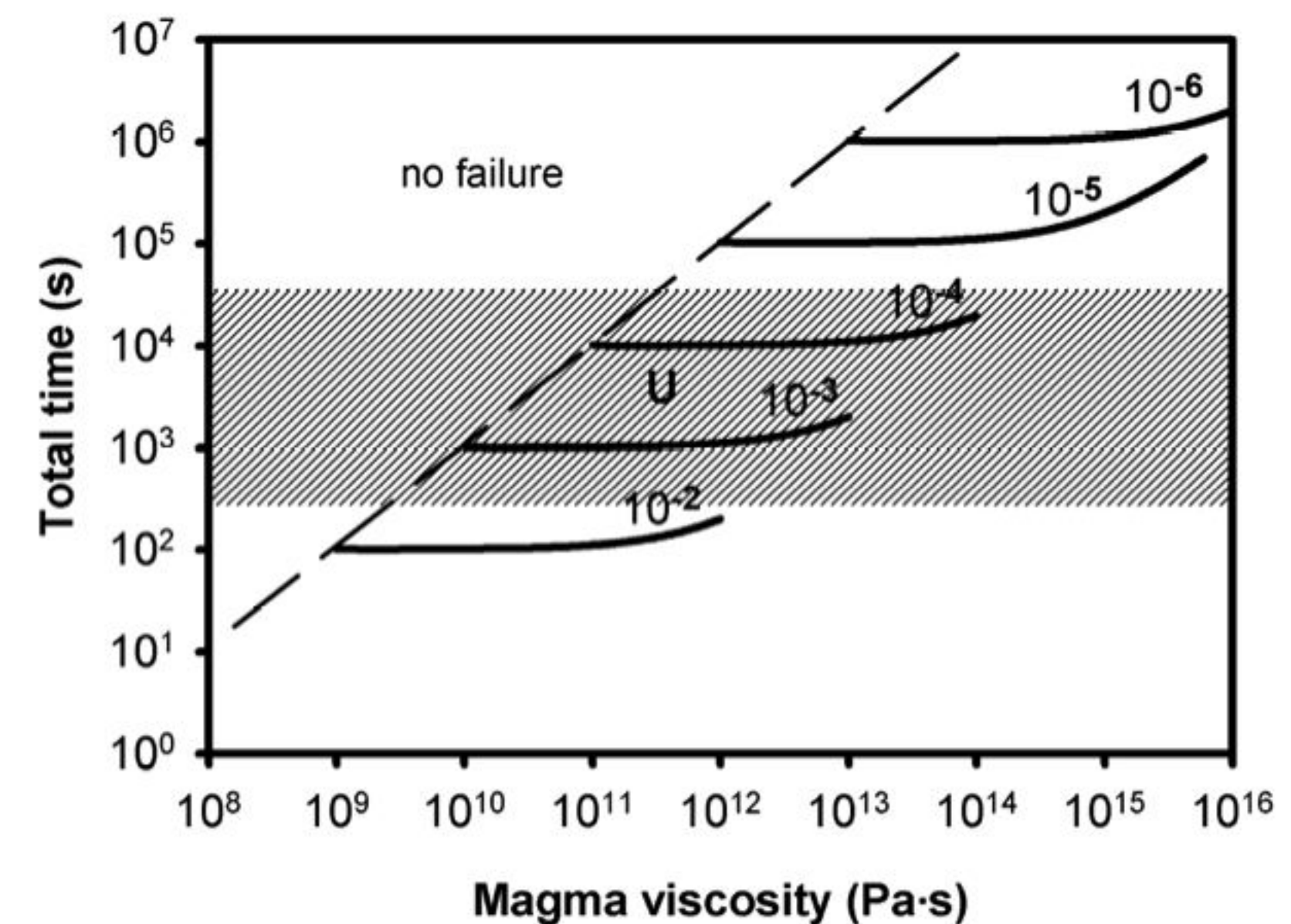
非地震性

$$t_v = 1 / \varepsilon$$

$10^2 \sim 10^6$ s

Dingwell, (1996, 1997)

$$t_f + t_d + t_v = \text{Total time}$$



LP地震
Hybrid地震

数時間から数週間