

地震発生論セミナー(6月18日) 破壊エネルギー(3)

Slip zone and energetics of a large earthquake from the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project

台湾車籠埔断層掘削計画により得られた大地震の滑り帯とエネルギー論

Kuo-Fong Ma, Hidemi Tanaka, Sheng-Rong Song, Chien-Ying Wang,
Jih-Hao Hung, Yi-Ben Tsai, Jim Mori, Yen-Fang Song, Eh-Chao Yeh,
Wonn Soh, Hiroki Sone, Li-Wei Kuo and Hung-Yu Wu

Nature, **444**, 473-476, 23 November 2006

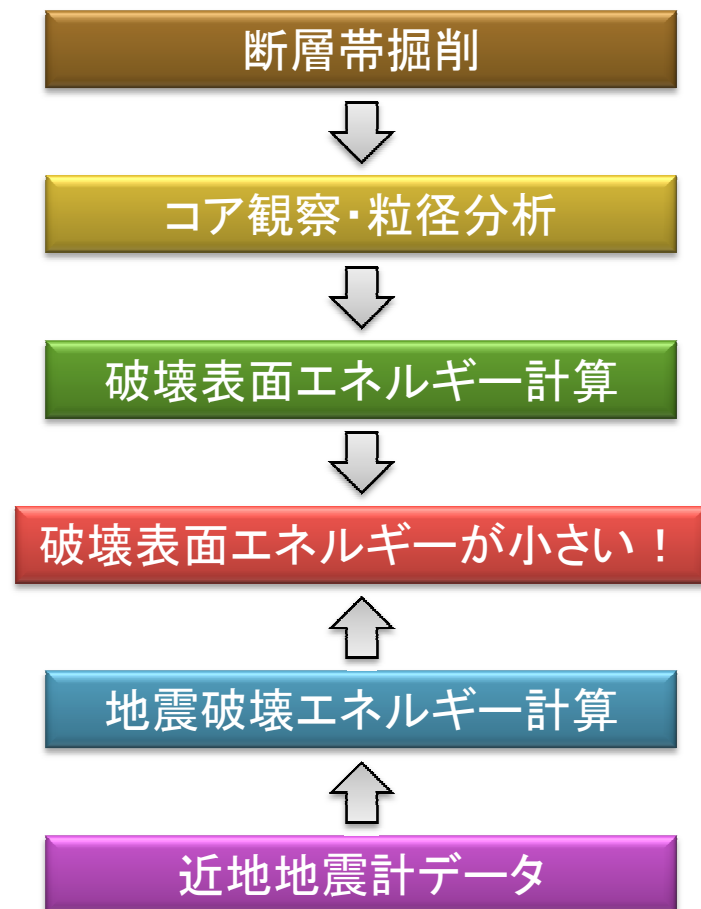
発表担当

野津太一
(地惑田中研M1)

本論文の概要

台湾集集地震の滑り帯を断層コアにおいて同定し、その滑り帯内部の粒子の大きさを光学および電子顕微鏡観察により測定した。得られた粒径分布から破壊表面エネルギーを計算し、近地地震計のデータから計算された地震破壊エネルギーと比較した結果、破壊表面エネルギーは地震破壊エネルギーの6%に過ぎないことが分かった。

このことから、今回の研究対象である車籠埔断層は比較的成熟していると考えられる。



断層帯掘削 — 車籠埔断層と集集地震

台湾車籠埔(Chelungpu)断層

走向: ほぼ南北

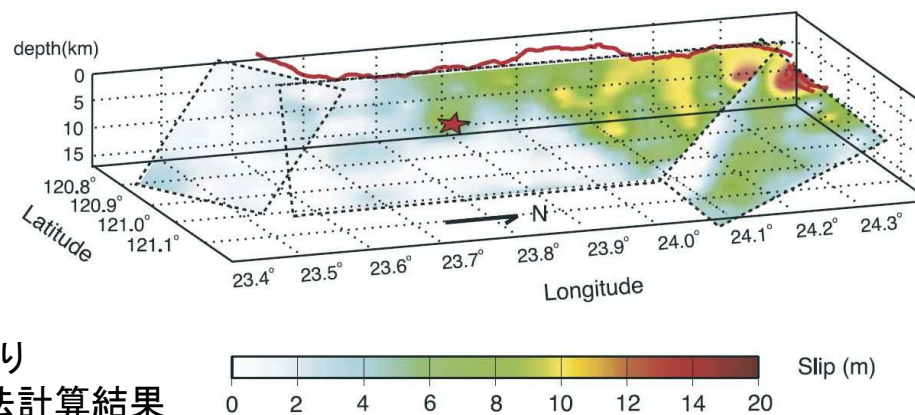
傾斜: 東に約30度

全長: 約90km

母岩: 鮮新統錦水(Chinshui)頁岩(5-1.6Ma)

1999年集集(Chi-Chi)地震

台湾車籠埔断層を震源とする, $M_w=7.6$ の内陸逆断層型地震. 変位量が南部では小さく, 北部では大きい.



Ji et al.(2001) より

有限断層逆解法計算結果

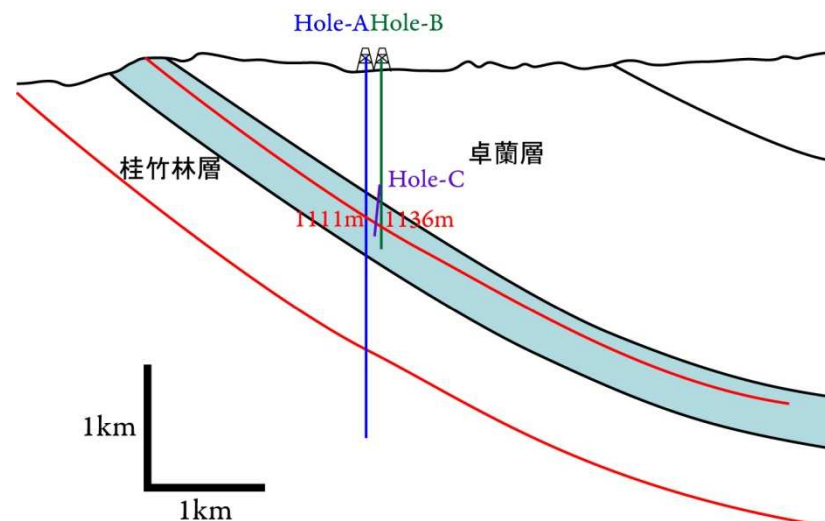


Ma et al.(1999) より

断層帯掘削 —台湾車籠埔断層掘削計画

台湾車籠埔断層掘削計画(TCDP)

Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project
大坑(DaKeng)付近で車籠埔断層を掘削.
掘削孔付近での滑り量は8.3m(強震計・GPSより).



掘削孔	掘削深度	連続コア回収深度
Hole A	2000m	500-2000m
Hole B	1300m	950-1300m
Hole C (Bの分岐)	950-1200m	950-1200m

コア観察 —主剪断帯と滑り面の同定

Hole-A コア 観察結果

- 車籠埔断層は断層角礫及び断層ガウジを含んだ深度1105-1115mのダメージゾーンとして観察された.
- 主要剪断帯(PSZ)は極細粒断層ガウジの観察された1111.23-1111.35mの12cm.

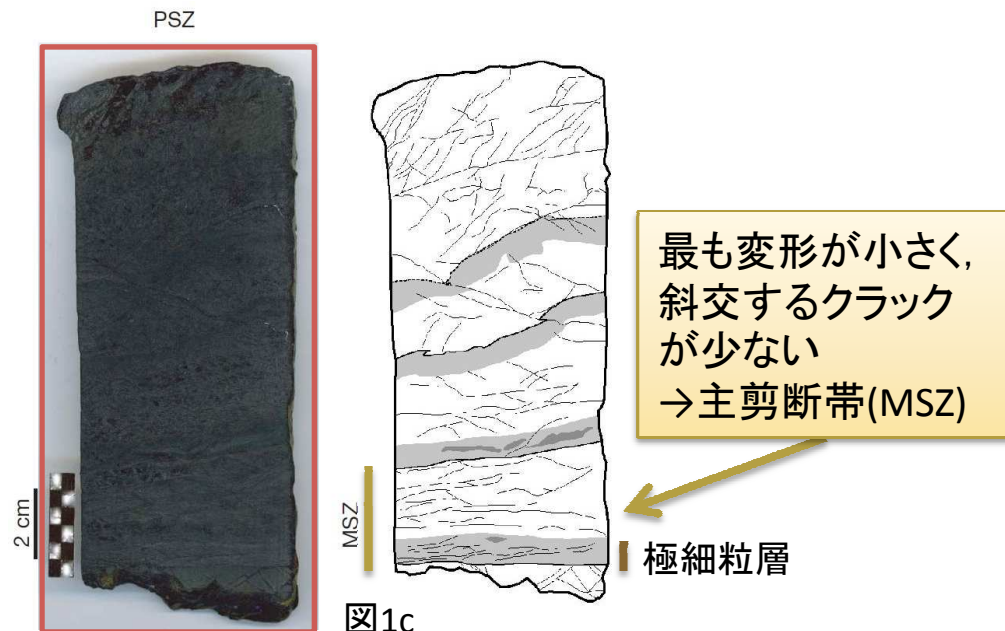


図1c

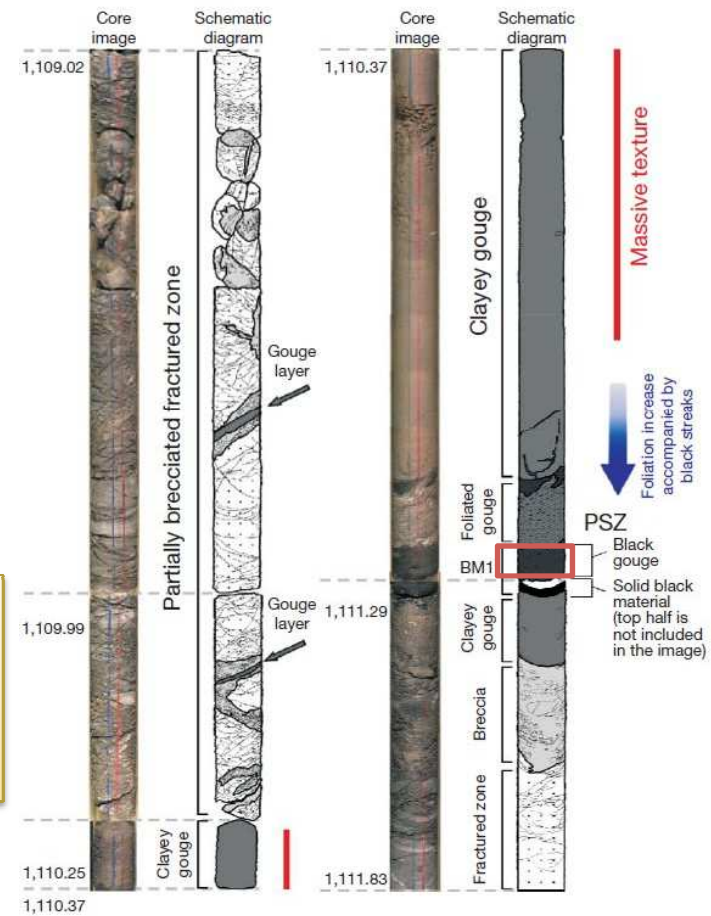


図1b

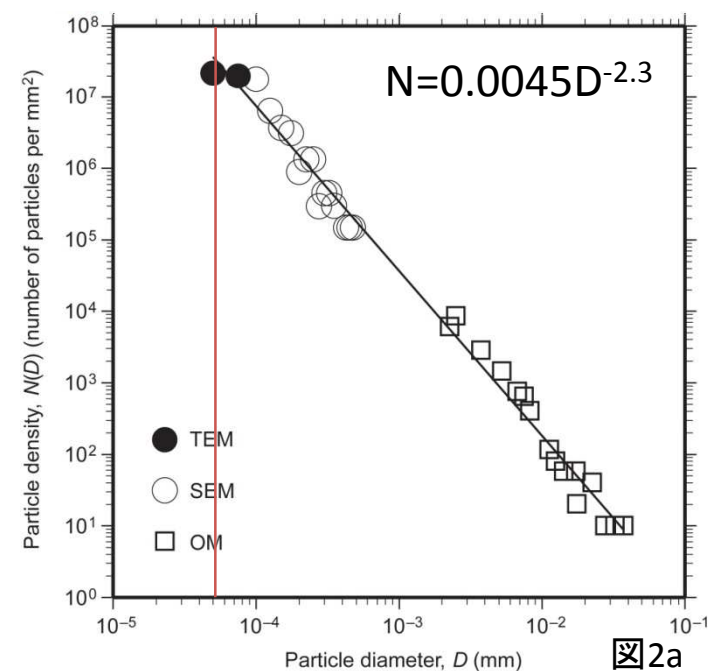
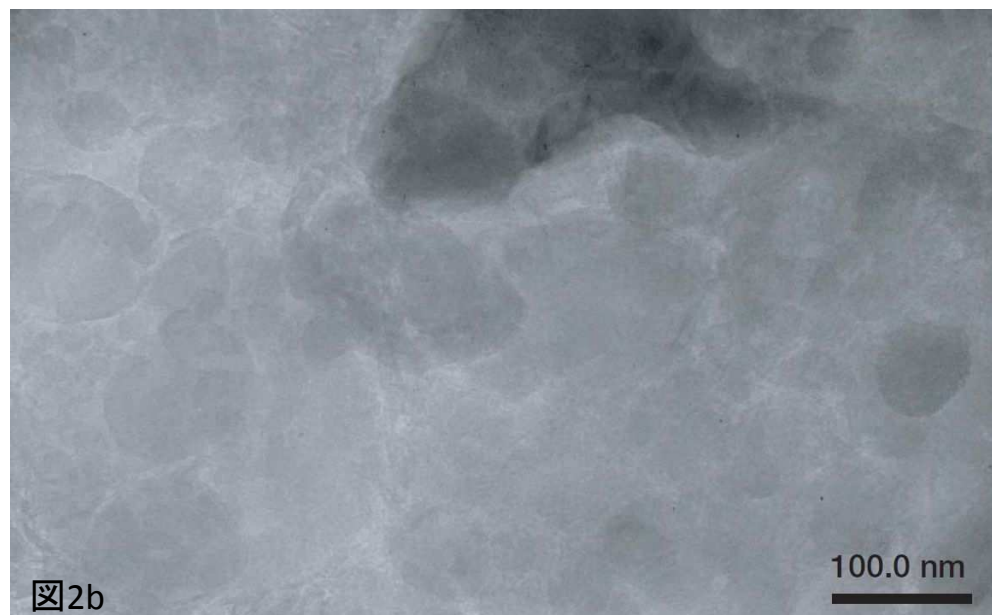
粒径分析 —破壊由来の粒子の限界

破壊粒子の粒径

50nmに満たない微小粒子は円磨度が高い(透過型電子顕微鏡像による).

これら微細粒子は破壊ではなく沈殿により生じた可能性がある.

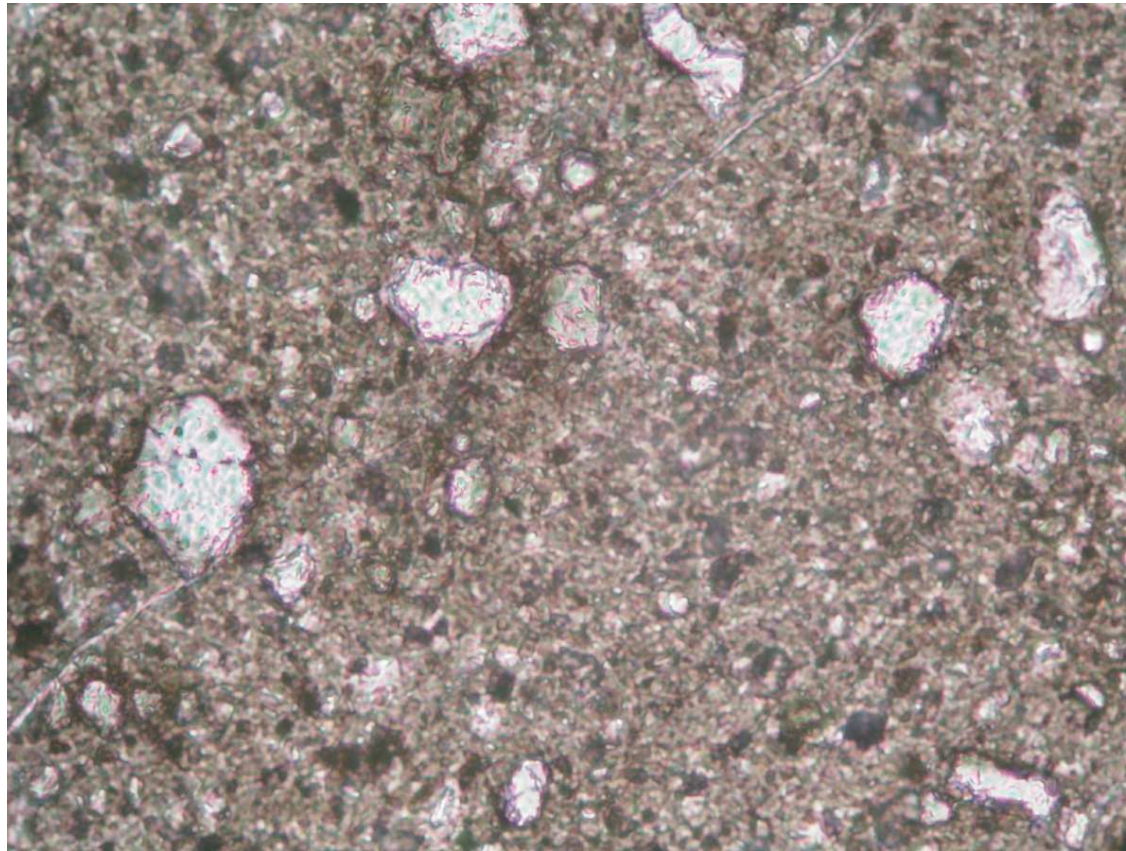
破壊エネルギーの計算には50nm以上の粒子のみを用いる.



粒径分析 一粒径別の粒子形状

(参考) 粒子形状の比較

光学顕微鏡



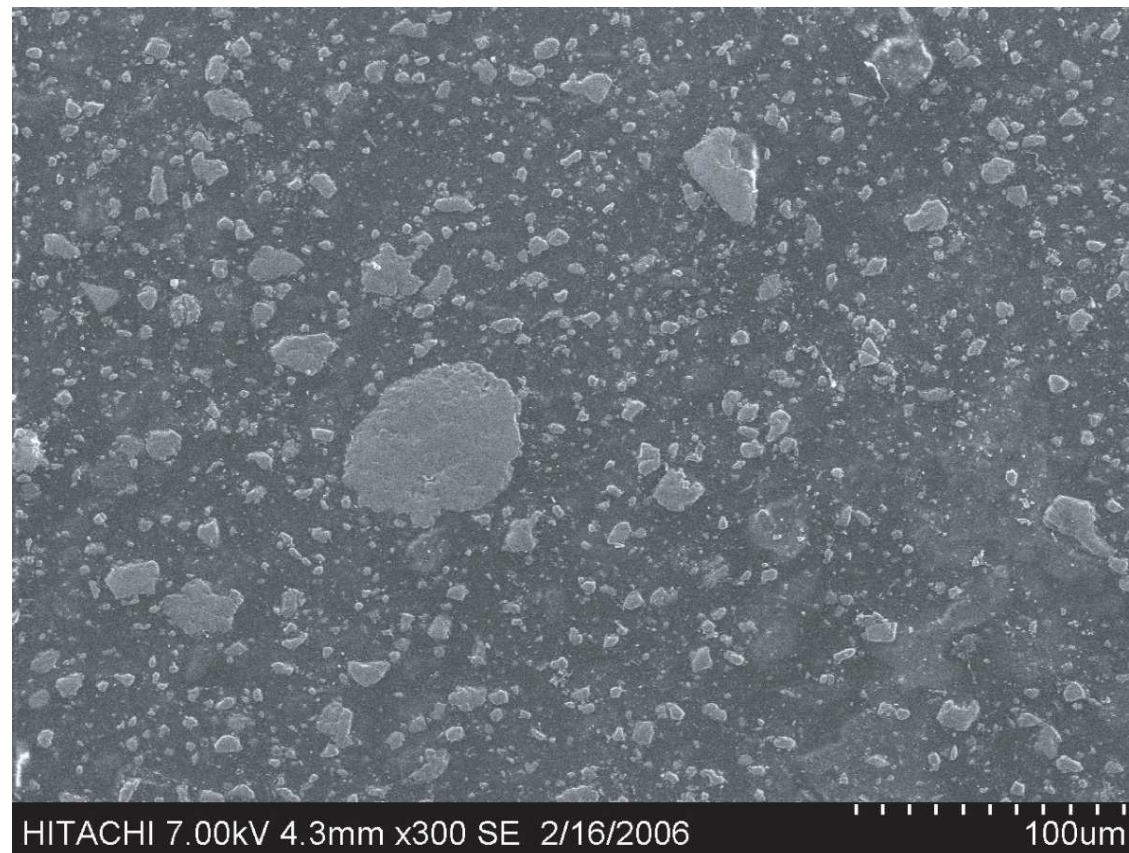
補足図1, 図2b

100 μm

粒径分析 一粒径別の粒子形状

(参考) 粒子形状の比較

SEM像

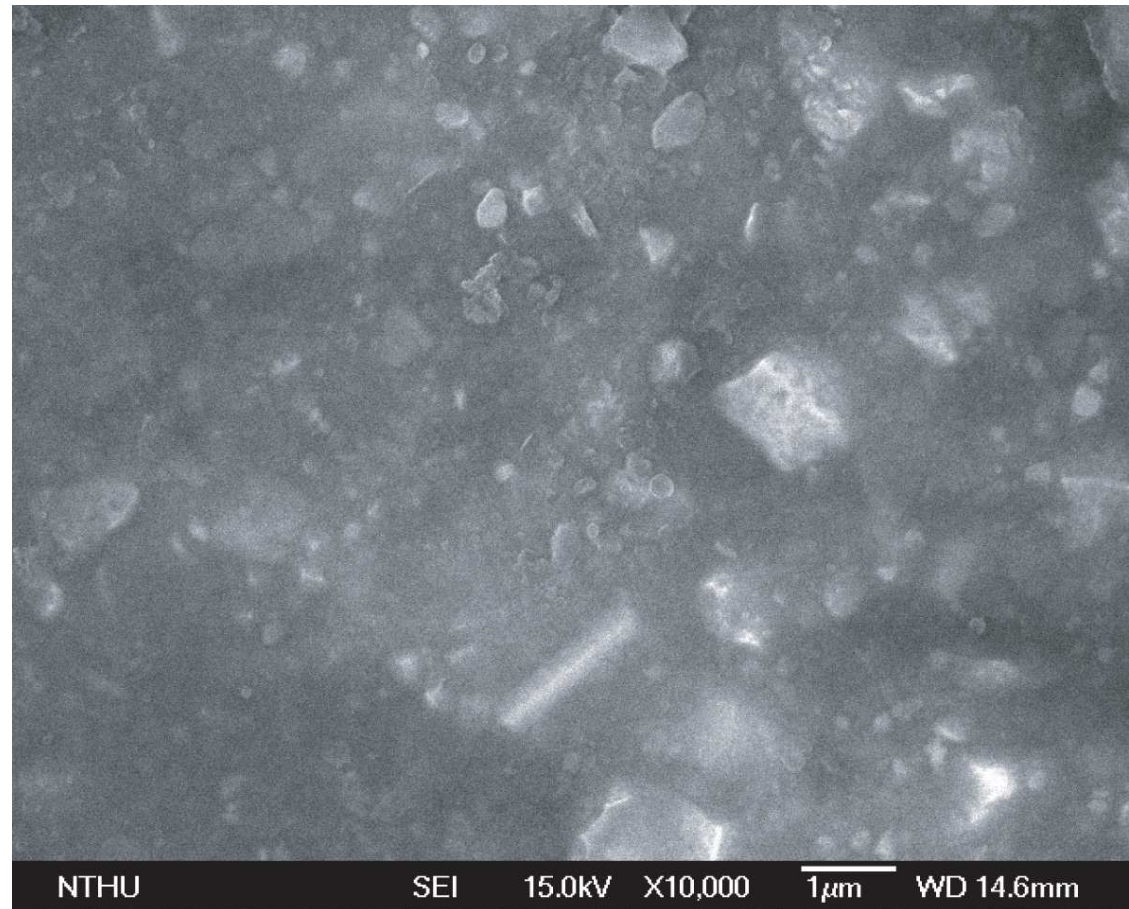


補足図1, 図2b

粒径分析 一粒径別の粒子形状

(参考) 粒子形状の比較

SEM像



補足図1, 図2b

粒径分析 一粒径別の粒子形状

(参考) 粒子形状の比較

TEM像



補足図1, 図2b

破壊表面エネルギー—粒径ごとの体積

粒子の表面積・体積比

各粒子を球体と近似して表面積・体積比を考えると,

$$S_{sph} = 4\pi r^2$$

$$V_{sph} = \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$\therefore S_{sph}/V_{sph} = 3/r \quad \dots(a)$$

体積で表した粒径分布

粒径分布の近似式は $N = aD^{-2.3}$ ($a = 0.0045$)

特定の粒径Dの粒子について, 断面1mm²あたりの粒子面積は

$$\begin{aligned} \pi r^2 \times N &= \frac{1}{4}\pi D^2 N \\ &= \frac{a}{4}\pi D^{-0.3} \end{aligned}$$

よって, 特定の粒径Dの粒子について, 試料1mm³あたりの粒子体積は

$$V = \frac{a}{4}\pi D^{-0.3} \quad \dots(b)$$

破壊表面エネルギー — 破壊表面積の計算

破壊表面積

$$S_{sph}/V_{sph} = 3/r \quad \dots(a)$$

$$V = \frac{a}{4}\pi D^{-0.3} \quad \dots(b)$$

(a), (b)より, 特定の粒径Dの粒子について, 試料1mm³あたりの表面積は

$$\begin{aligned} S &= 6V/D \\ &= \frac{3a}{2}\pi D^{-1.3} \end{aligned}$$

この式から階級別に表面積を算出し, 合計すると $3.27 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{m}^3$



厚さ 2cm の主剪断帯(MSZ) 1m² あたりの表面積は $S_{MSZ}=6.46 \times 10^5 \text{ m}^2$

破壊表面エネルギー — 特徴的な破壊エネルギー

特徴的な破壊エネルギー

Mode I クラックを生成する際の結合破壊エネルギーについて考える。
ずれ距離(δ)に対する復元力(σ)を正弦曲線で近似すると,

$$\sigma = \sigma_c \sin\left(\frac{\delta}{a}\pi\right)$$

$\delta \approx 0$ について考えて,

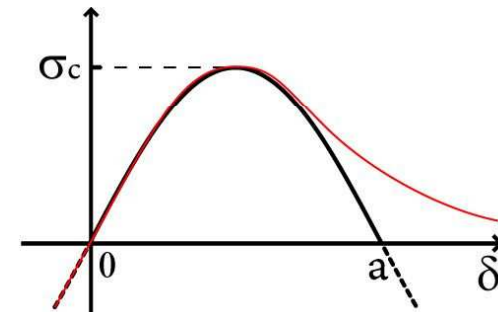
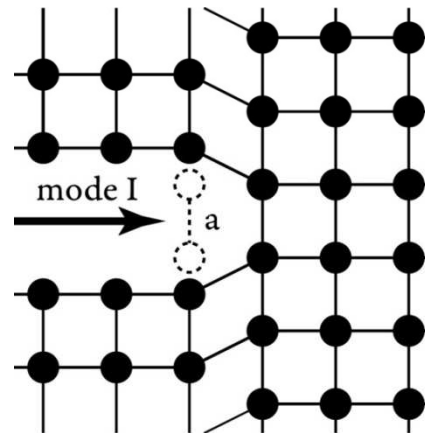
$$\sigma = \sigma_c \cdot \frac{\delta}{a}\pi$$

$$= \sigma_c \pi \cdot \varepsilon$$

$$\sigma_c = \pi^{-1} \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

$$= \pi^{-1} E$$

$$\begin{aligned} \therefore G_c &= \int_0^a \sigma d\delta \\ &= \frac{2a\sigma_c}{\pi} \\ &= \frac{2aE}{\pi^2} \end{aligned}$$



Orowan (1949) に加筆

→この測定値が, ガウジ試料の70%を占める石英について $G_c=1.0 \text{ J/m}^2$ (Scholz, 2002).

破壊表面エネルギー — 破壊表面エネルギーの計算

粒子表面の粗さ

粒子表面に N_2 を吸着させるBarrett-Emmett-Teller(BET)法により測定した実際の(ミクロな凹凸のある)表面積と幾何学的な(球状の)表面積との比を λ とすると, San Andreas 断層の滑り帯の断層ガウジについて Wilson *et al.* (2005) が $\lambda=6.6$ としているので, 今回この値を用いた.

破壊表面エネルギー

破壊表面エネルギーは, 真の破壊表面積 ($S\lambda$) に特徴的な破壊エネルギー (G_c) を乗じて得られる. 即ち,

$$G_{MSZ} = S_{MSZ} \lambda G_c$$

これにより, 破壊表面エネルギー $G_{MSZ}=4.3 \text{ MJ/m}^2$ が得られた. これが, 一回の地震で主剪断帯(MSZ)を生成するために必要な最低限のエネルギーだと考えられる. (MSZの外側の岩石の破壊はこの10%以下のエネルギーしか消費しない)

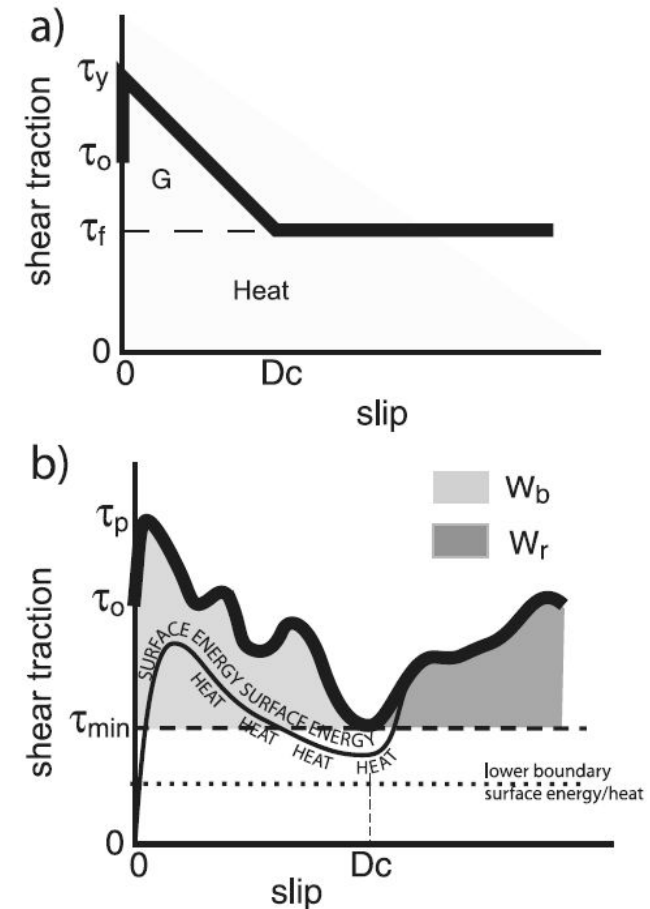
地震破壊エネルギー—滑り弱化曲線の計算

応力変化の計算法

- 三次元有限差分法によって、断層面上での応力の時間変化を計算した.
- Traction-at-split-node (TSN)法を用いている:
断層面上の節点は分割され、それぞれが断層面の片側に属する.
- 断層面上の境界条件として滑り速度を与えた.

破壊仕事 (Breakdown work)

破壊仕事 (Breakdown work; W_b) は、滑りの間に最小剪断応力($\tau_{\min}$)を超えていた分の仕事(余剰仕事: Excess work; W_e)のうち、滑りが始まってから最小剪断応力に達するまでの間になされるもの (Tinti *et al.*, 2005).



Tinti *et al.* (2005) 図4.
a)が古典モデル, b)が余剰仕事を
含めた考え方.

地震破壊エネルギー—破壊仕事の計算

破壊仕事の計算

応力変化を計算し、その積分値

$$W_b = \int_0^{T_b} (\tau(t) - \tau_{\min}) v(t) dt$$

を考えると、この仕事(右図斜線部)が破壊仕事に相当し、グリッドサイズ0.95km, タイムステップ0.054sで計算したところ $W_b = 11.6 \text{ MJ/m}^2$ が得られた。

破壊仕事の解釈

破壊仕事は滑り帯生成のための表面破壊エネルギーのみならず、断層運動の間のエネルギー散逸も含んでいると考えられる (Tinti *et al.*, 2005).

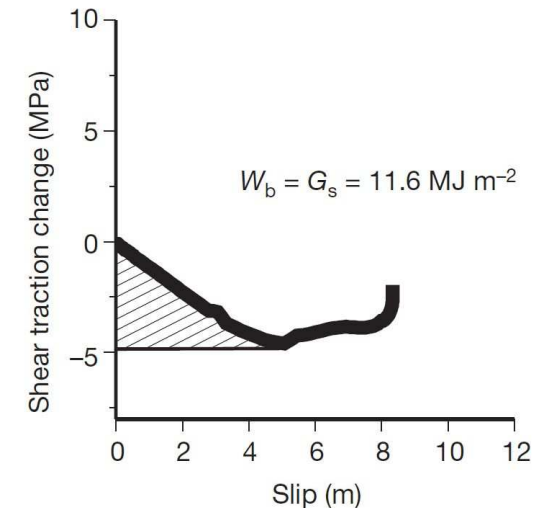


図3: 掘削孔付近での応力降下

検討 一破壊表面エネルギーの寄与

滑り帯の厚さ

車籠埔断層の滑り帯厚／変位量比を考える.

	滑り帯厚さ (T)	変位量 (D)	T/D
車籠埔断層全体(主要剪断帯)	12cm	300m	4×10^{-4}
主剪断帯(MSZ)	2cm	-	-
1999年集集地震	3.3mm	8.3m	4×10^{-4}

主剪断帯(MSZ)の中で毎回同じ位滑って同じ位の厚さの滑り帯を作ると考えると, 主剪断帯の中には $2\text{cm}/3.3\text{mm}=6.06$ 回 の断層運動が記録されているはずである.

集集地震に伴う破壊表面エネルギー

主剪断帯(MSZ)	6.06回	4.3 MJ/m^2
1999年集集地震	1回	0.71 MJ/m^2

破壊仕事 $W_b=11.6 \text{ MJ/m}^2$ に対して, 0.71 MJ/m^2 は 約6% に相当する.

検討 一破壊仕事の中身

破壊仕事の内訳

破壊表面エネルギーが破壊仕事の6%分にしかない



残りの候補としては,

Thermo pressurization:

断層運動に伴う摩擦発熱の際, 断層面周辺に流体があれば, その圧力が上がり, (断層面が持ち上げられて) 剪断強度が低下する (Wibberly and Shimamoto, 2005).

潤滑 (Lubrication):

断層運動の際, 断層面周辺に流体があれば,

1. 薄い流体膜が粒間を支えるため, 剪断応力が粘性応力相当になる(固体同士の場合より小さくなる)
2. 運動に伴い機械的に上昇した流体圧が断層面同士の有効圧を下げる(断層面を持ち上げる)

ため, 摩擦応力が低下する (Brodsky and Kanamori, 2001).

検討 一放射効率

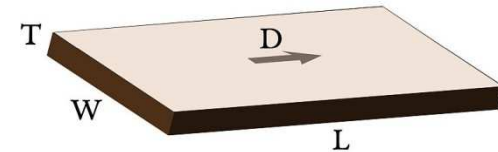
破壊エネルギーの算出 (Kanamori, 2001)

地震モーメント $M_o = \mu LWD$ (L: 断層長, W: 断層の幅, D: 変位量)より,

$$LW = M_o / \mu D$$

また, 剪断帯の粒子を直径dの一様な球で近似し, その体積の和 V_G が剪断帯体積だと考えると, 粒子の全表面積 S_G と破壊エネルギー E_G は,

$$\begin{aligned} S_G &= 6V_G/d \quad \dots(c) \\ &= 6LWT/d \\ &= \frac{6M_o T}{\mu D d} \\ \therefore E_G &= S_G \lambda G_C \\ &= \frac{6\lambda M_o}{\mu} \left(\frac{T}{D} \right) \left(\frac{G_C}{d} \right) \end{aligned}$$



検討 一放射効率

放射効率の計算・まとめ

以上より, 放射効率は

$$\begin{aligned}\eta'_R &= \frac{E_R}{E_R + E_G} \\ &= \frac{E_R}{E_R + \frac{6\lambda M_o}{\mu} \left(\frac{T}{D}\right) \left(\frac{G_C}{d}\right)} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{6\lambda}{\mu C_R} \left(\frac{T}{D}\right) \left(\frac{G_C}{d}\right)} \quad (C_R \equiv E_R/M_o)\end{aligned}$$

と表せて,

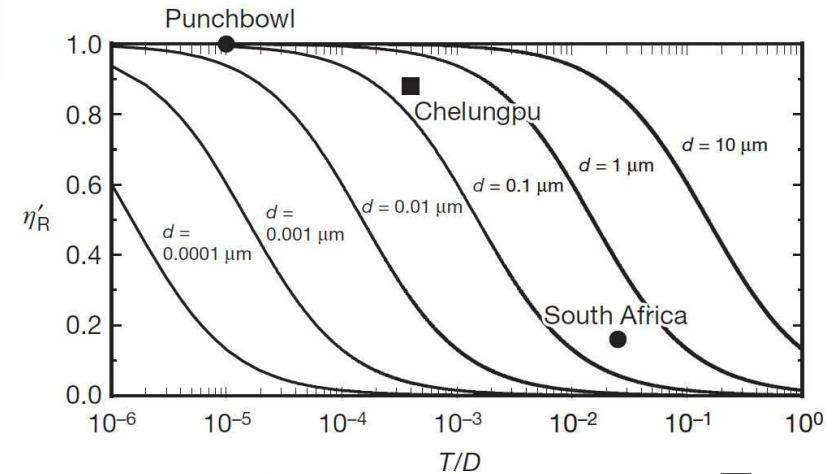
$$C_R = 2 \times 10^{-5}$$

$$\mu = 30 \text{ GPa}$$

また (c) より

$$d = 6 \times T/S_{MSZ} = 1.86 \times 10^{-1} \mu\text{m}$$

を用いて, $\eta'_R = 0.88$ となる.



← 同じところが何度も滑る

図4

- 車籠埔断層の1999年集集地震に対応するガウジ層は, 破壊仕事の6%で生成された.
- 放射効率は0.88であった.
- 大地震が成熟した断層で起こると, 破壊によるエネルギー散逸が小さい.