

岩石力学のスケーリング則

Part 1. 界面導電現象

私が大学院生のころ、松代群発地震(1965–1970:有感地震が6万回以上)、海城地震(1975; Mw=7.0 予知がされ住民避難の後に、地震が起きた)などの事件があり、この頃地震予知の可能性が論じられるようになった。

Scholtz *et al.* (1973)はdilatancy-fluid diffusion model を提唱し、地震の前駆現象を説明しようとした。

私は松代で観測されたと言う発光現象に興味をもち、Electrokinetic Phenomena associated with Earthquakes (Geophys. Res. Lett., 1976) を書いた。

界面導電現象とは(1)

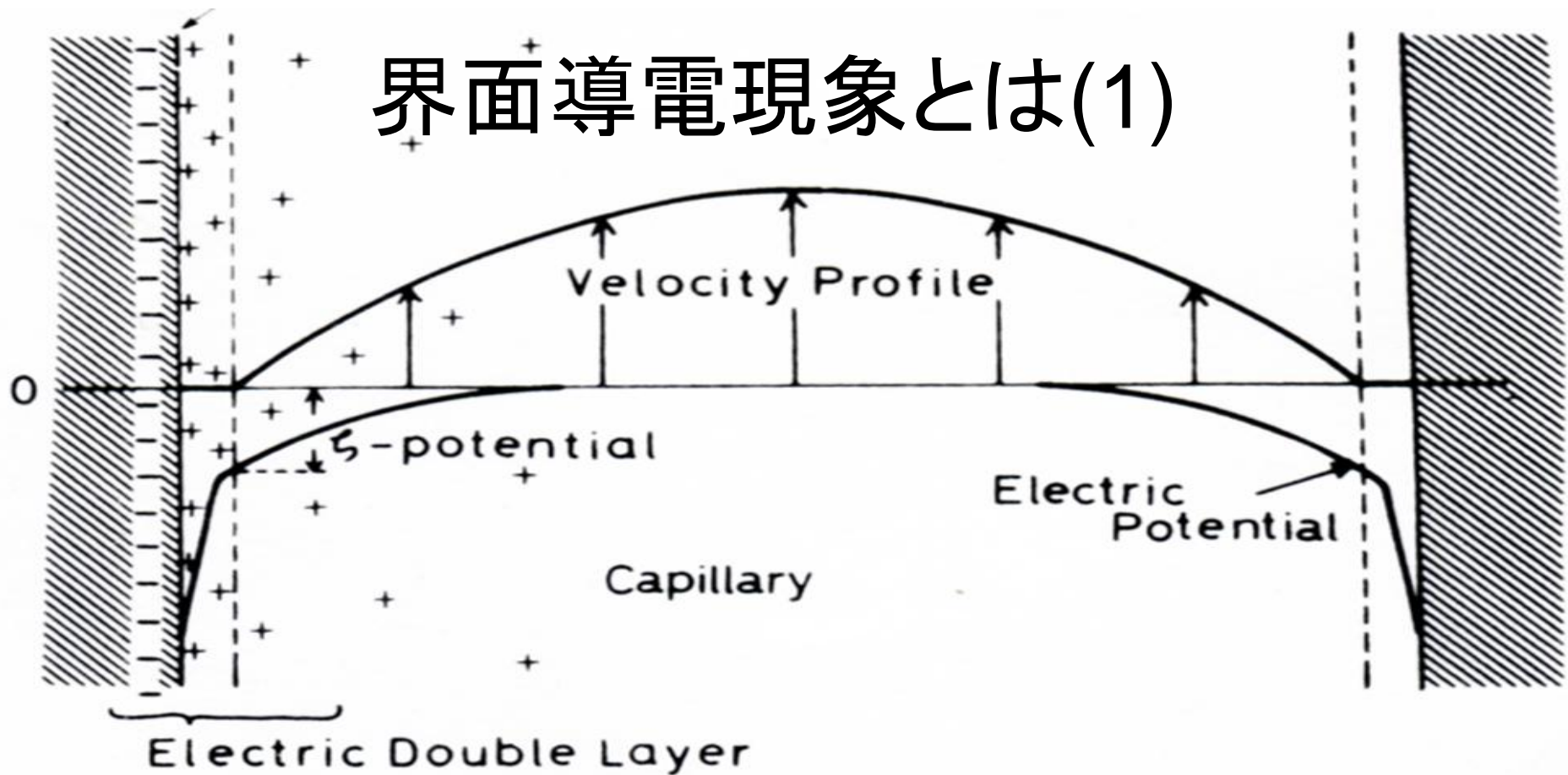


Fig. 1. Schematic diagram of electric double layer and velocity profile in a capillary.

電圧を掛けると流体が
流れる: 電気浸透流
(electro-osmosis)

$$j = \frac{\epsilon \zeta}{\eta} \text{ grad } E$$

界面導電現象とは(2)

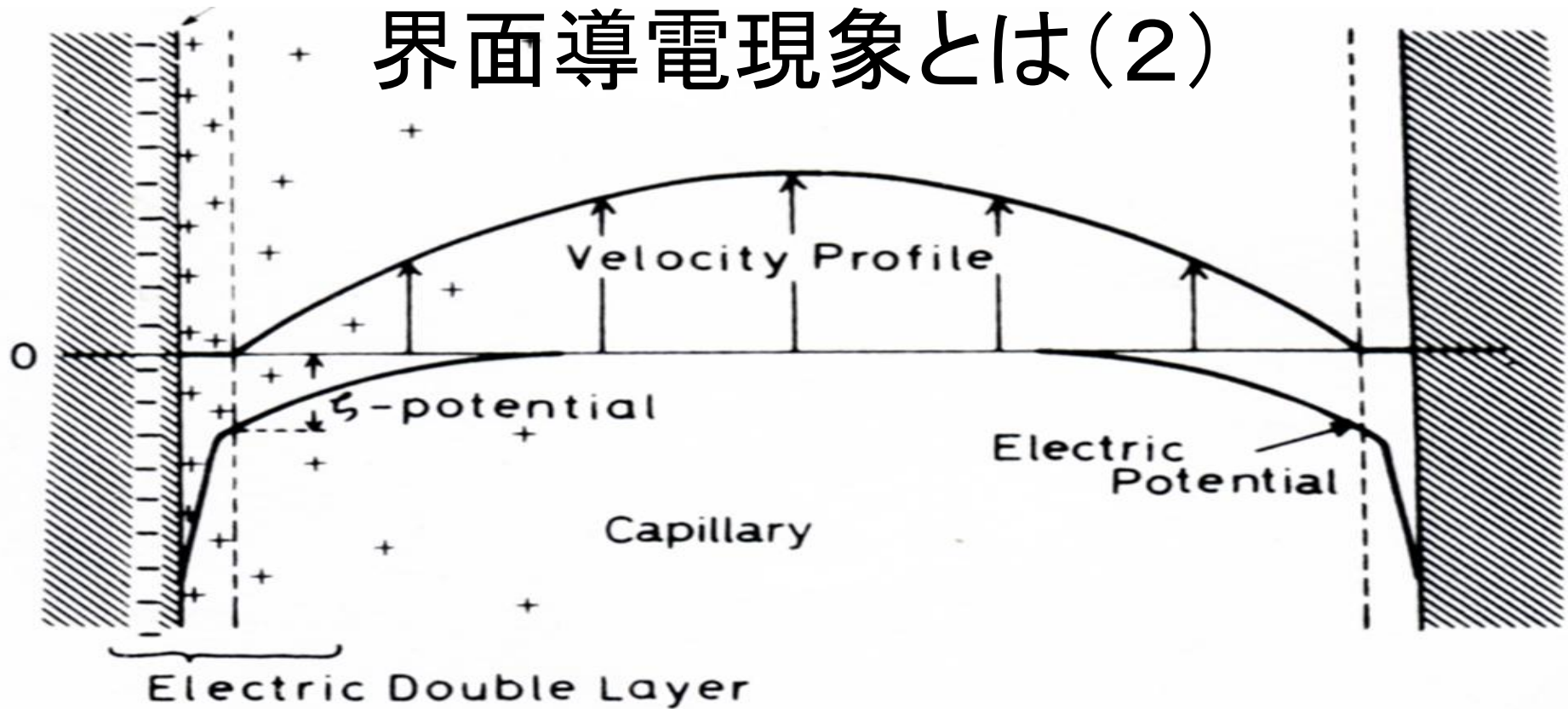
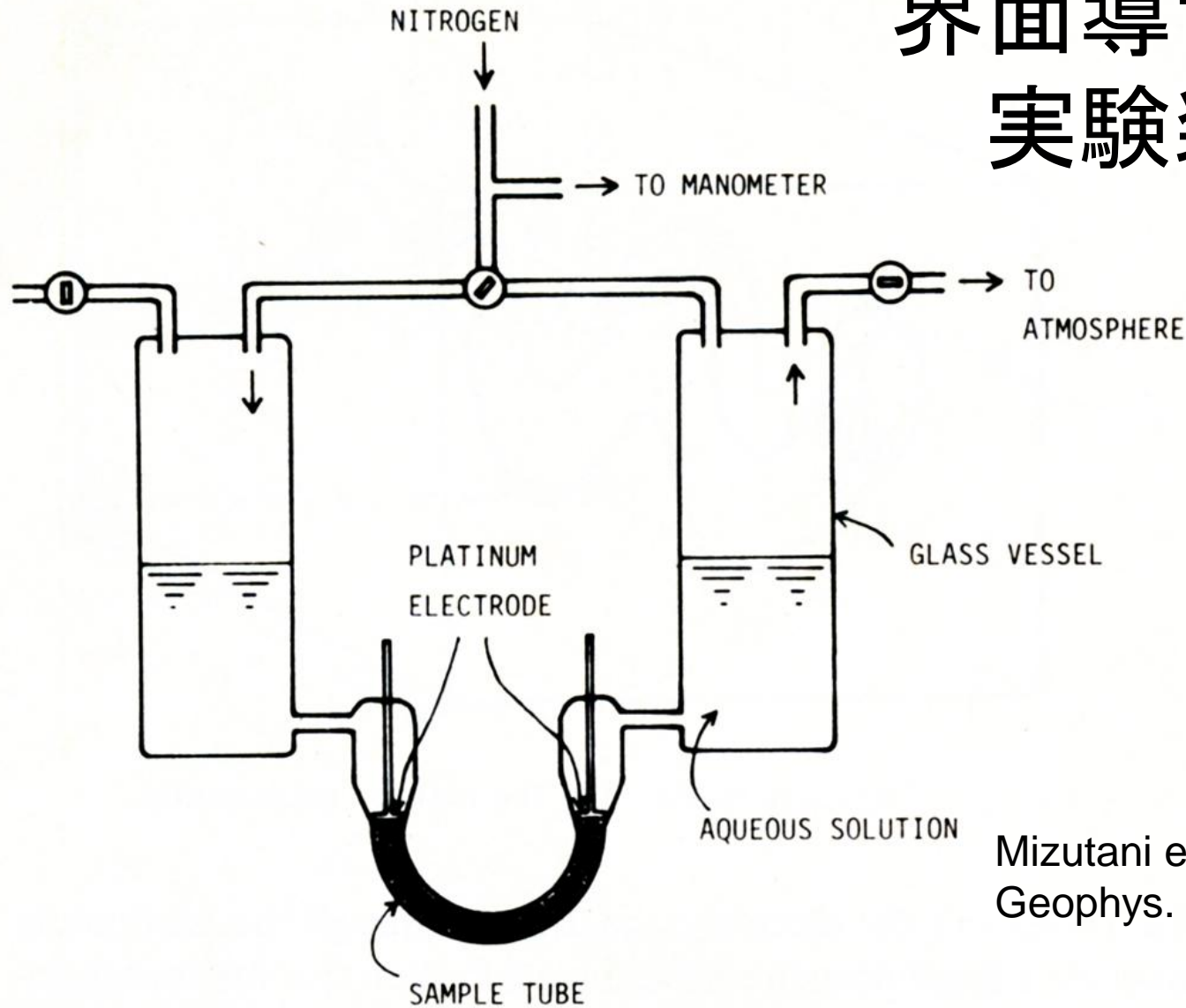


Fig. 1. Schematic diagram of electric double layer and velocity profile in a capillary.

- 圧力を掛ければ、電位が発生する: 流動電位

$$\text{grad } E = \frac{-\epsilon \zeta}{\eta \sigma} \text{ grad } P$$

界面導電現象 實驗裝置



Mizutani et al., 1976:
Geophys. Res. Lett., 3, 7, 365

Fig. 3. A schematic diagram of cell assembly used for streaming potential measurements.

界面導電現象とは(3)

- キャピラリの界面導電現象の一般化

$$-i = L_{11} \text{ grad } E + L_{12} \text{ grad } P$$

$$-j = L_{21} \text{ grad } E + L_{22} \text{ grad } P$$

where

$$L_{11} = \sigma \quad (\text{オームの法則})$$

$$L_{12} = L_{21} = \frac{-\varepsilon \zeta}{\eta}$$

$$L_{22} = k^* / \eta \quad (\text{キャピラリ1本のpermeability}) \\ (\text{ダルシーの法則})$$

岩石の界面導電現象

$$-I = \phi\sigma \text{ grad } E - \frac{\phi\varepsilon\zeta}{\eta} \text{ grad } P$$

$$-J = -\frac{\phi\varepsilon\zeta}{\eta} \text{ grad } E + \frac{k}{\eta} \text{ grad } P$$

- Φ = porosity, k = permeability, σ = 電気伝導度

界面導電現象に関連する数値

Mizutani et al., 1976: Geophys. Res. Lett., 3, 7, 365

Table 1. Physical constants and model parameters used in the present study.

ζ	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	V
k	$10^{-11} \sim 10^{-9}$	m^2/sec
η	10^{-4}	$\text{N} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$
ϵ	$80/(4\pi \times 9 \times 10^9)$	F/m^2
σ	10^{-1}	mho/m
ϕ	10^{-2}	
L	10^4	m
grad P	$10^2 \sim 10^4$	N/m^3

地震前に起こりそうな現象？

地震の前にPore Pressureが変化すると

$$\begin{aligned} \text{grad } P &= \Delta P \text{ (地震のストレスドロップ)} / L \text{ (震源域の大きさ)} \\ &= (10 \sim 1000) \text{ bar} / (10 \sim 100) \text{ km} \\ &= 0.1 \sim 100 \text{ bar} / \text{km} \\ &\text{とすると} \end{aligned}$$

$$-I = \frac{\phi \epsilon \zeta}{\eta} \text{ grad } P$$

$$I = 0.7 \times (10^{-7} \sim 10^{-4}) \text{ A} / \text{m}^2$$

地震前後の発光現象はありえるか

電流が流れた後には電位が高くなる。
(したがって流体の流れは止まる)

$$\frac{\text{grad } E}{\text{grad } P} = \frac{\epsilon \zeta}{\eta \sigma} = 10^2 \sim 10^3 \text{ V/kb}$$

発光現象は起こりそうもない！

ζポテンシャルが重要

- T. Ishido and H. Mizutani (1981),
Experimental and Theoretical Basis of
Electrokinetic Phenomena in Rock-Water
Systems and its Application to Geophysics,
J.Geophys. Res. Vol. 86, 1763-1775 (石戸
君のD論となった)
- 地熱エネルギー、地下水探索にも有効ではな
いか。

ゼータ電位の測定

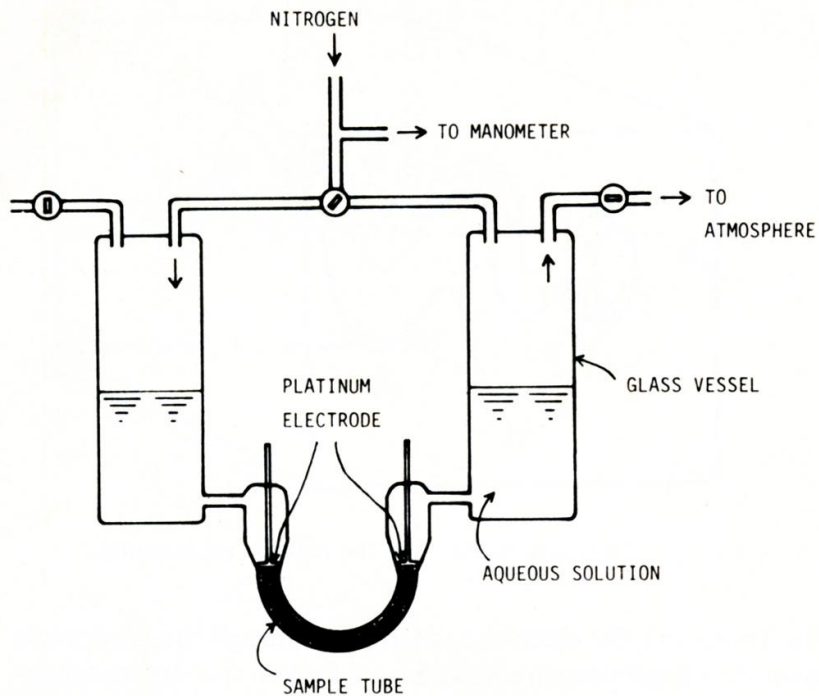
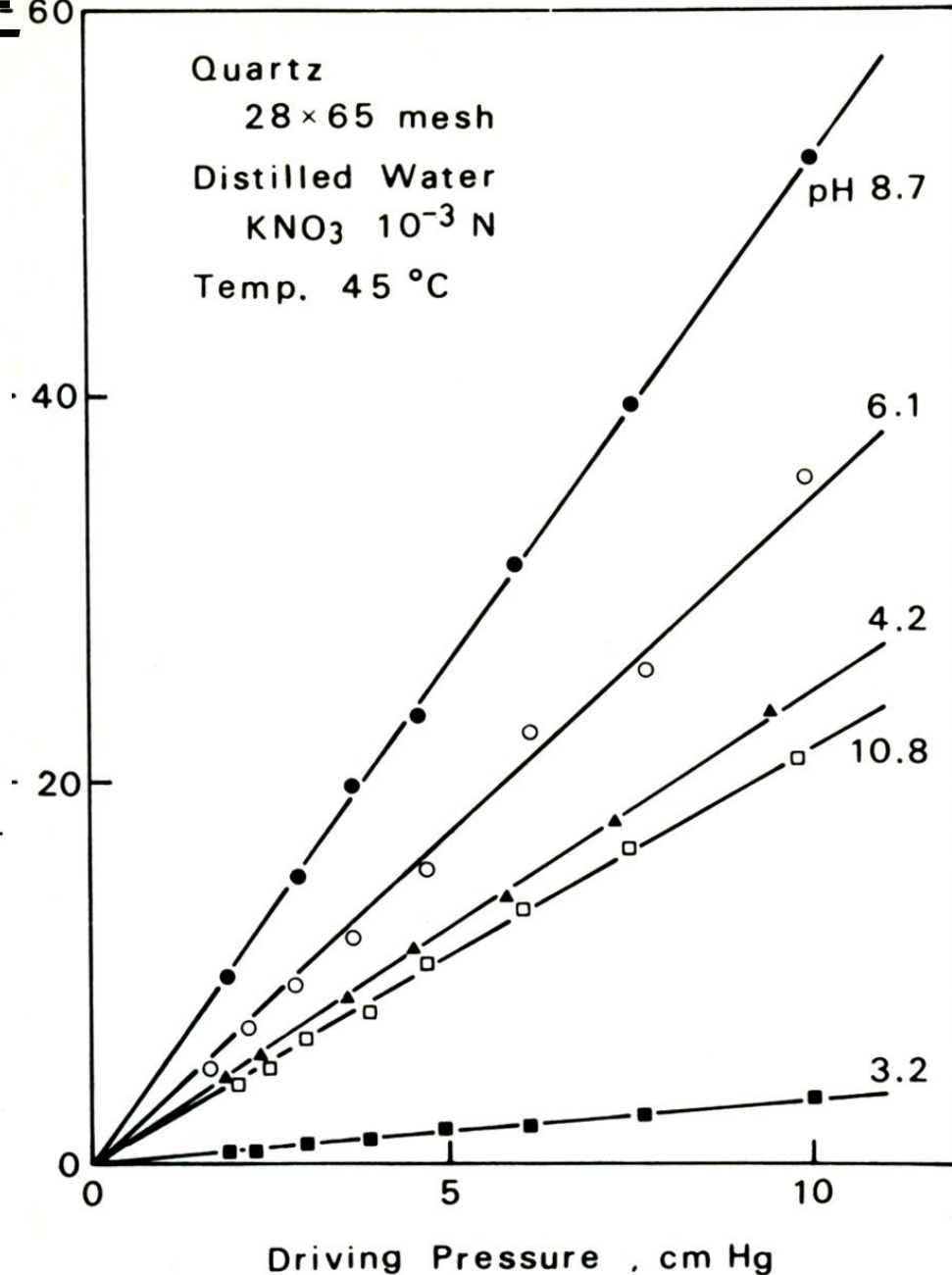
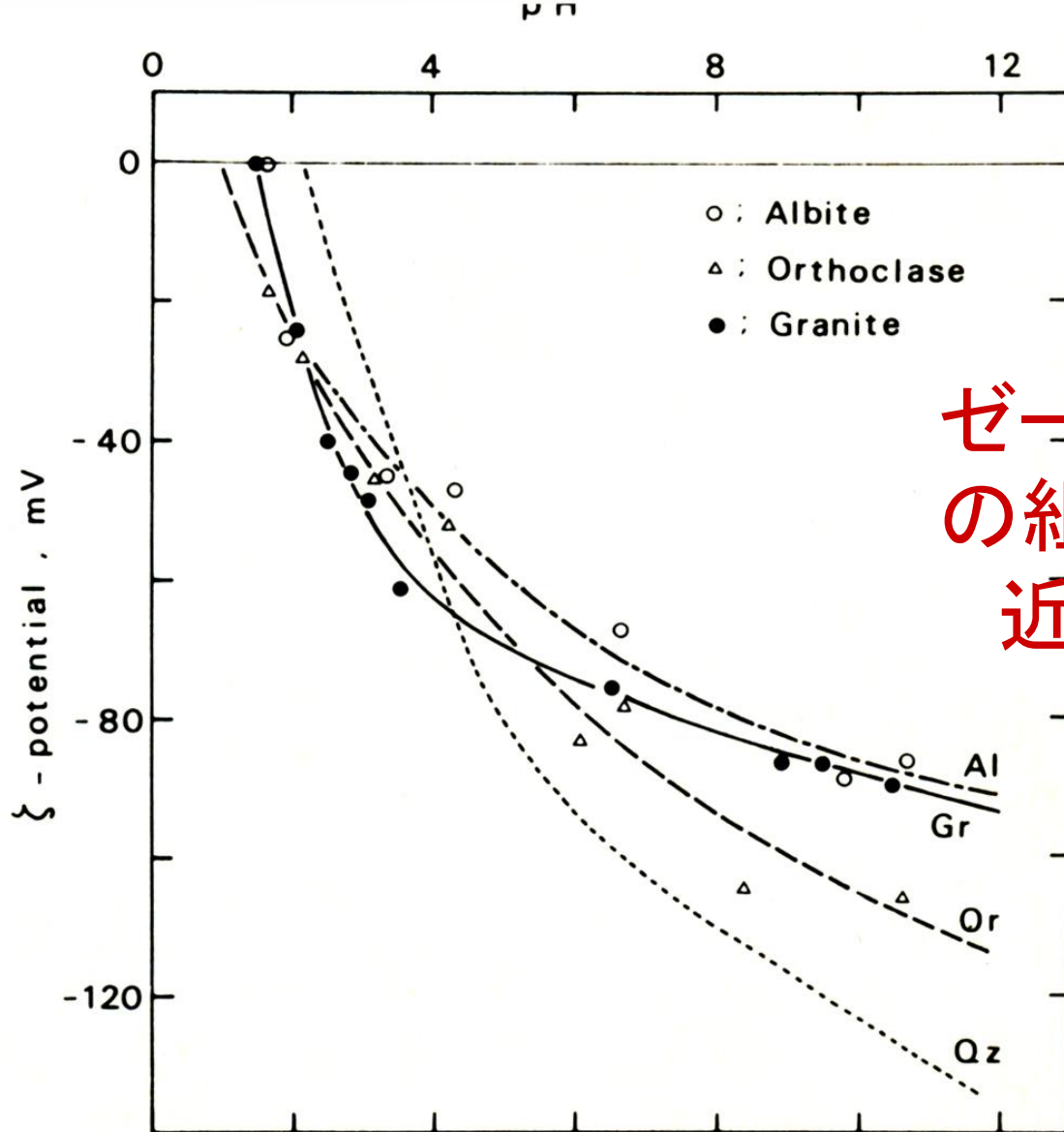


Fig. 3. A schematic diagram of cell assembly used for streaming potential measurements.

$$\frac{\text{grad } E}{\text{grad } P} = \frac{k}{\epsilon \zeta \phi}$$

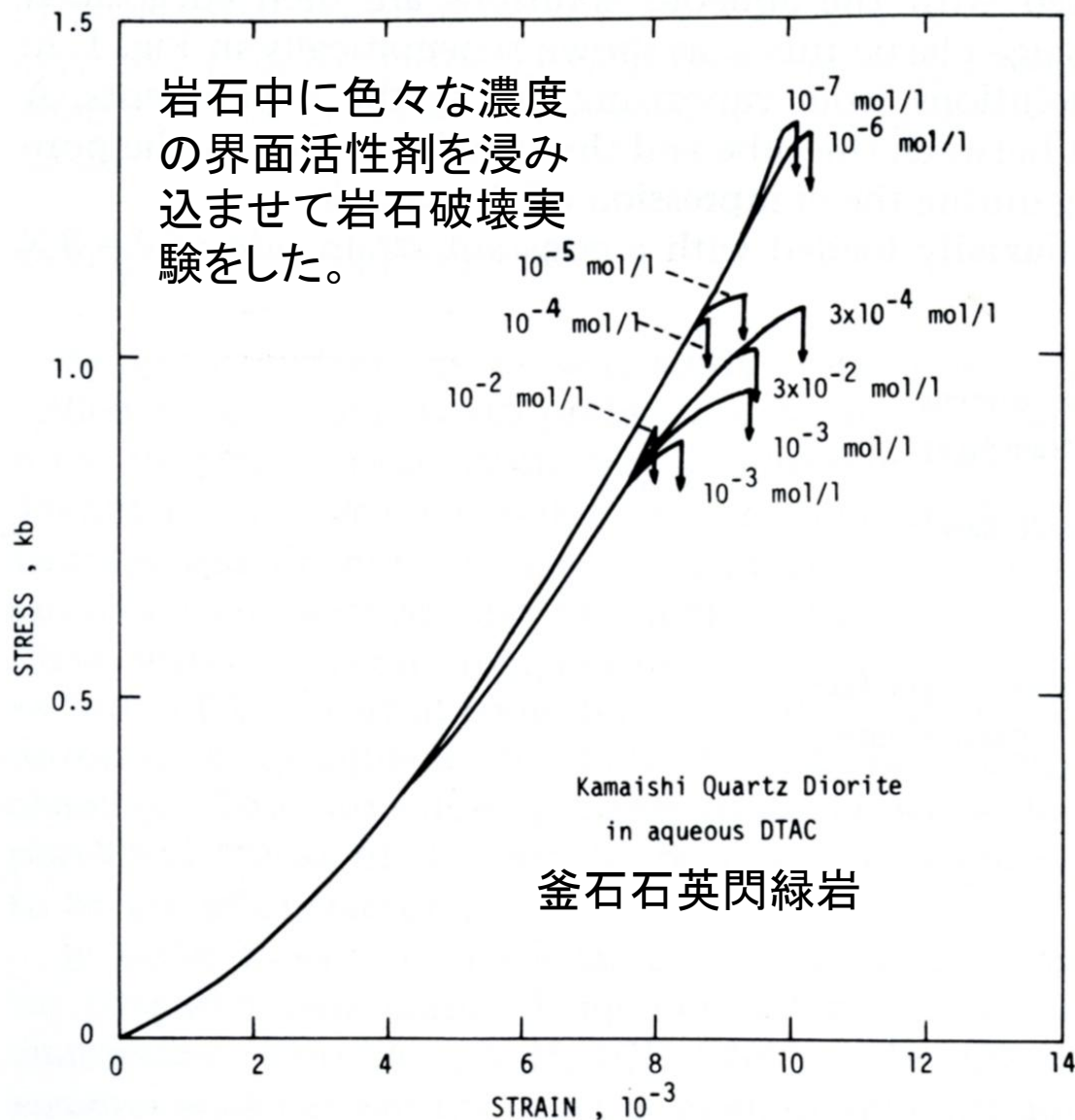




ゼータポテンシャルは水の組成による。pH=7.0近傍では80mV程度

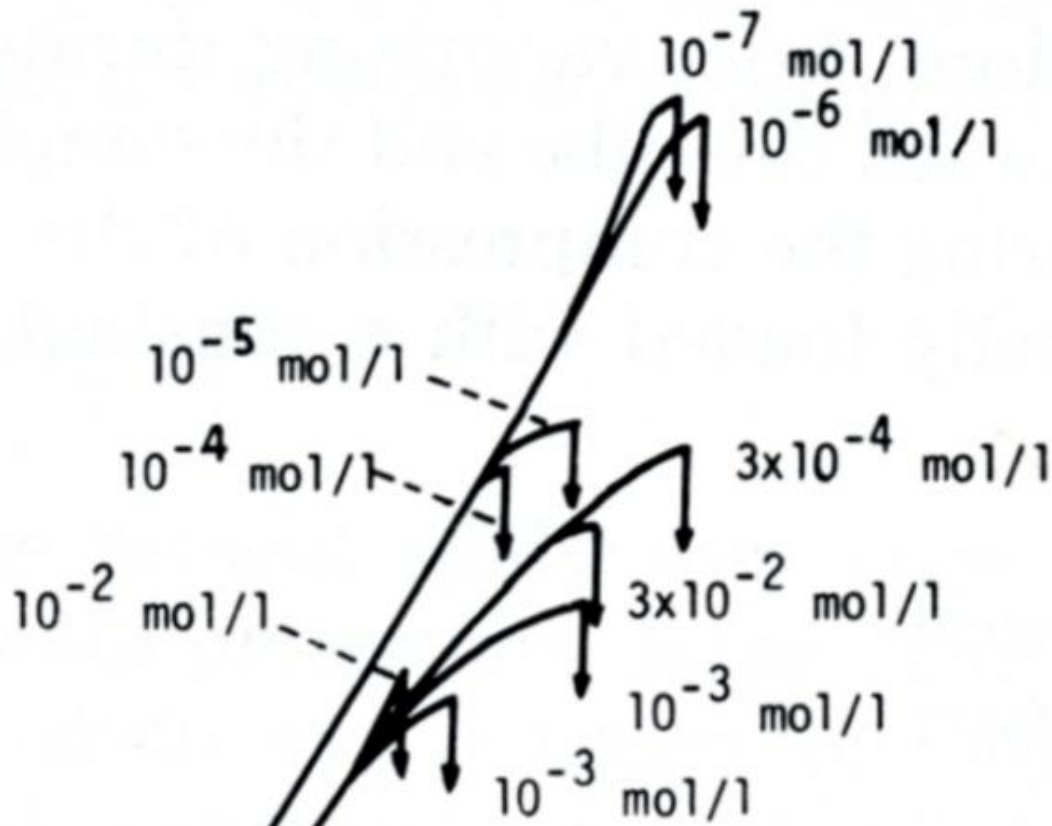
Fig. 6. Variation of the ζ potential of orthoclase, albite, and granite as a function of pH in aqueous solutions of $10^{-3} N KNO_3$. Temperature is set at $45^\circ C$. The curve Qz represents the data given in Figure 5 for quartz.

ゼータ電位が岩石の破壊強度に影響



- 石油掘削において、ドリリングの効率を上げるために界面活性剤を使っているらしい？

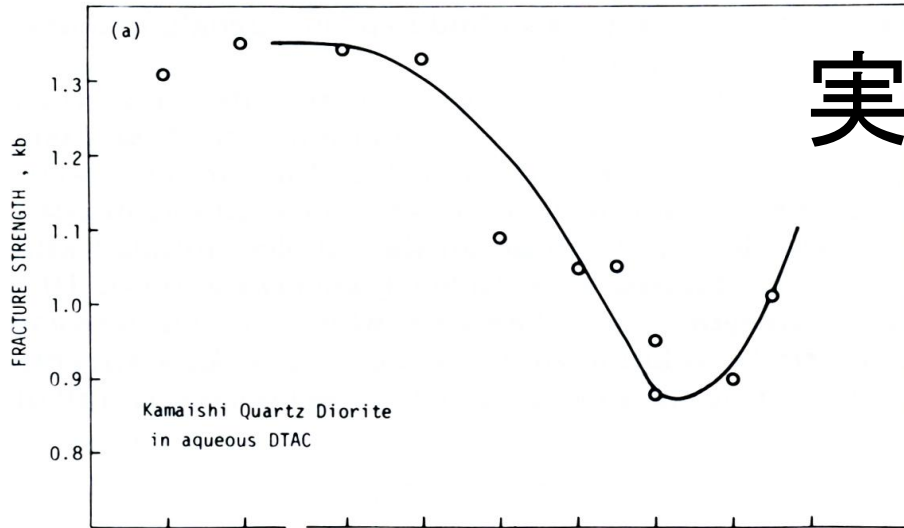
DTACとは: ドデシル トリメチル アンモニウム クロライド



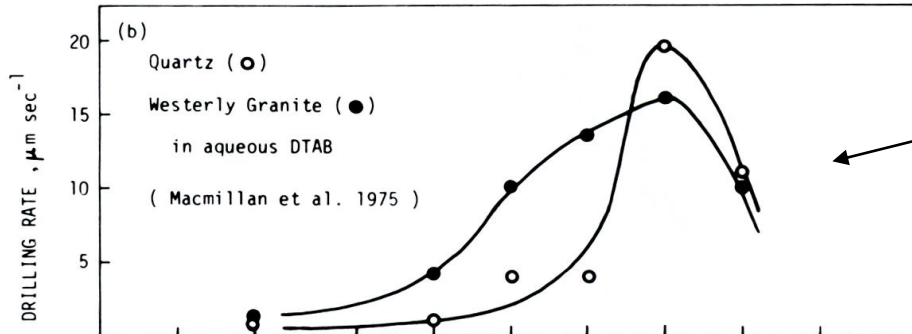
ゼータ電位と破壊強度
拡大図

実験結果のまとめ

破壊強度、 K_b

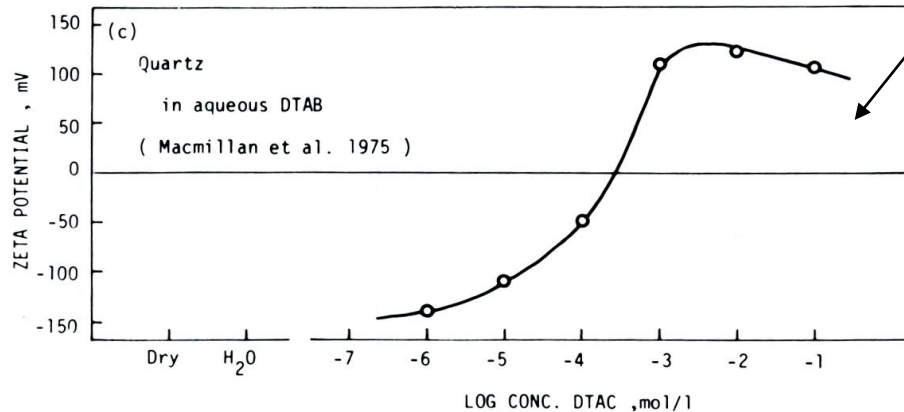


掘削速度、 μm /秒



MacMillan et al. 1975 より

ゼータ電位



岩石の破壊強度

硝酸アルミニウム水溶液中

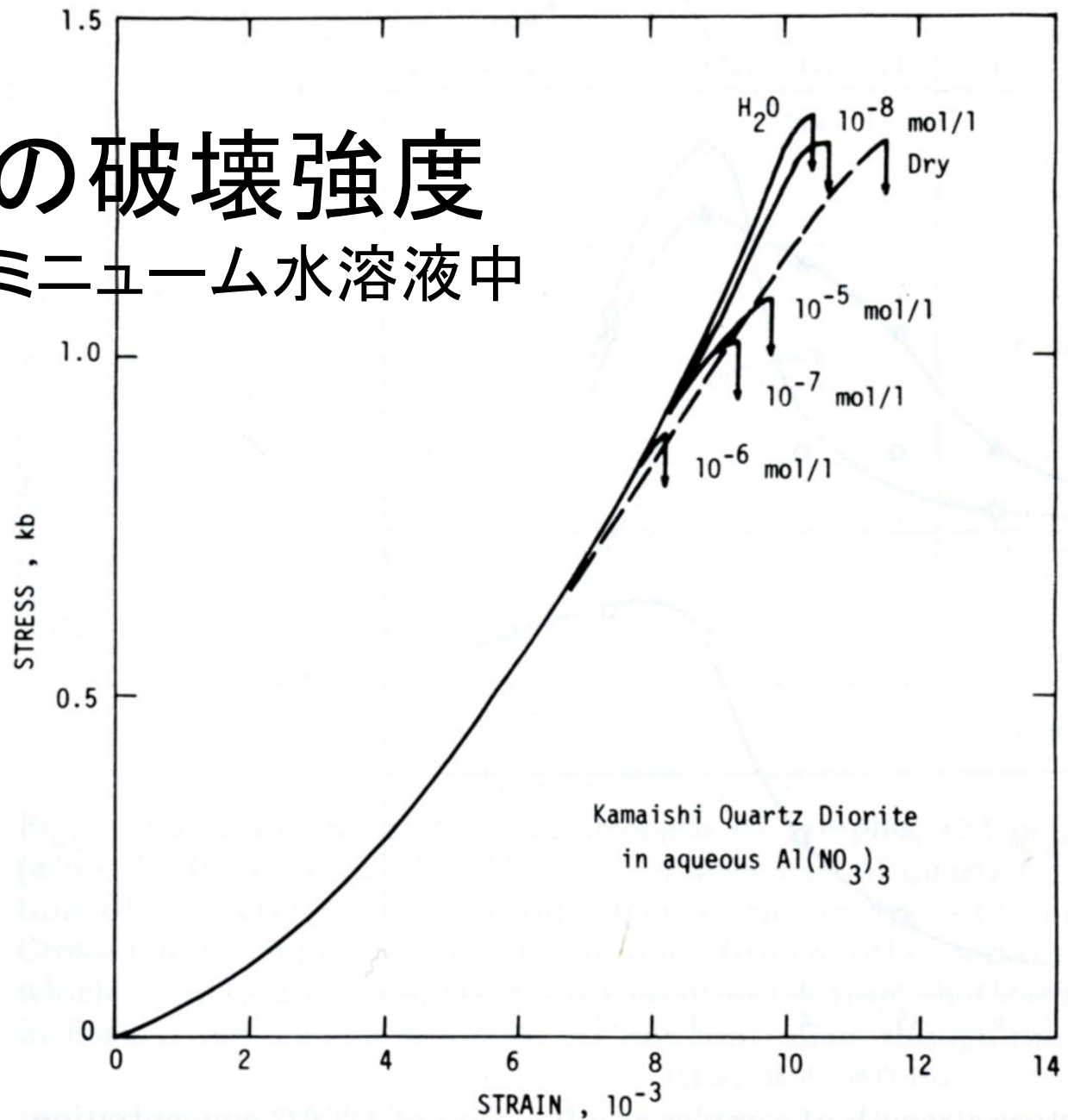
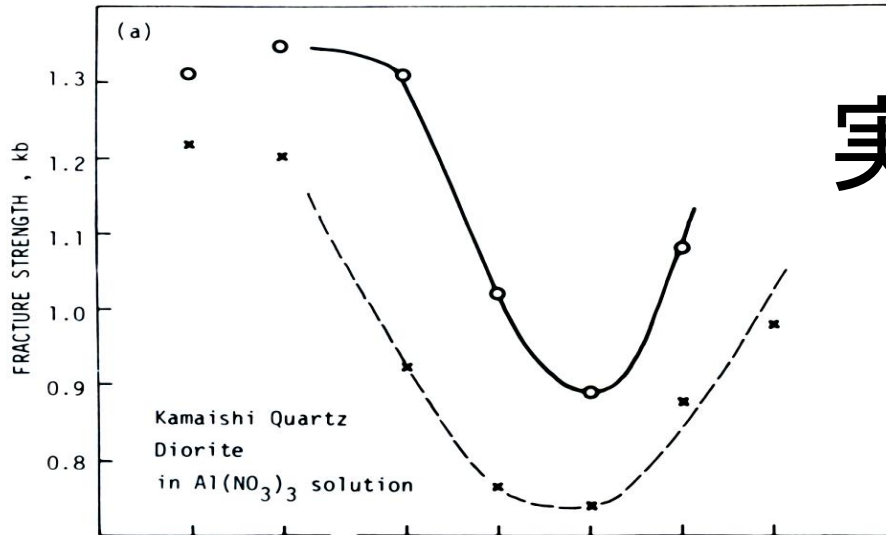


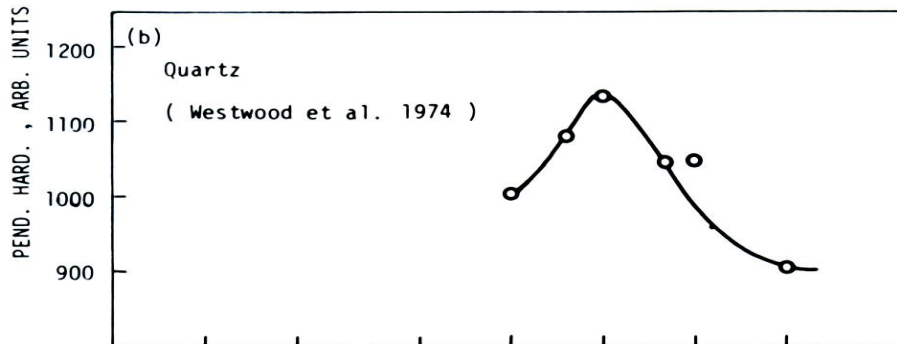
Fig. 3 Stress-strain curves of samples saturated with aqueous Al(NO₃)₃

実験結果のまとめ (1981)

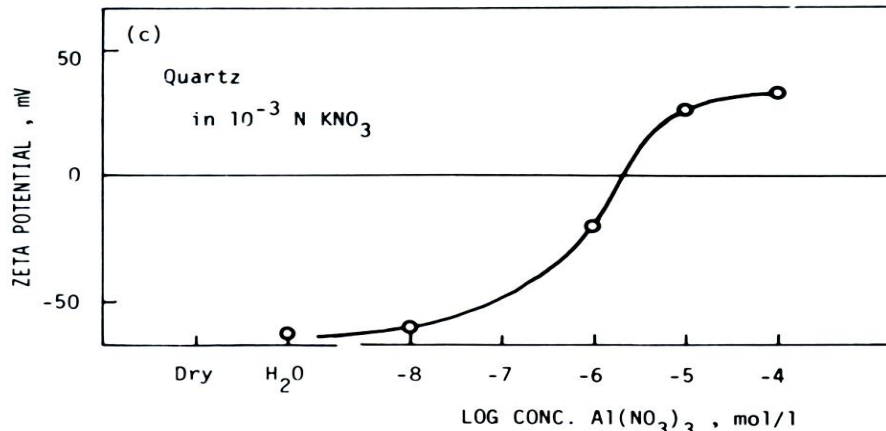
破壊強度



振り子固さ



ゼータ電位



1. ゼータ電位は岩石の破壊強度に大きな影響を与える。

2. 僅かな界面活性剤でゼータ電位は変化する。

3. 地下水の岩石への浸透は岩石の力学的性質に我々の思いつかないような影響を与えている。

横軸;硝酸アルミニウム:界面活性剤の濃度

Ishido et al, 1981:
J.Geophys.Res, 86, B3, 1763

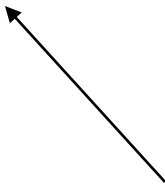
岩石力学のスケーリング則

• Part 2. 超真空中の岩石強度

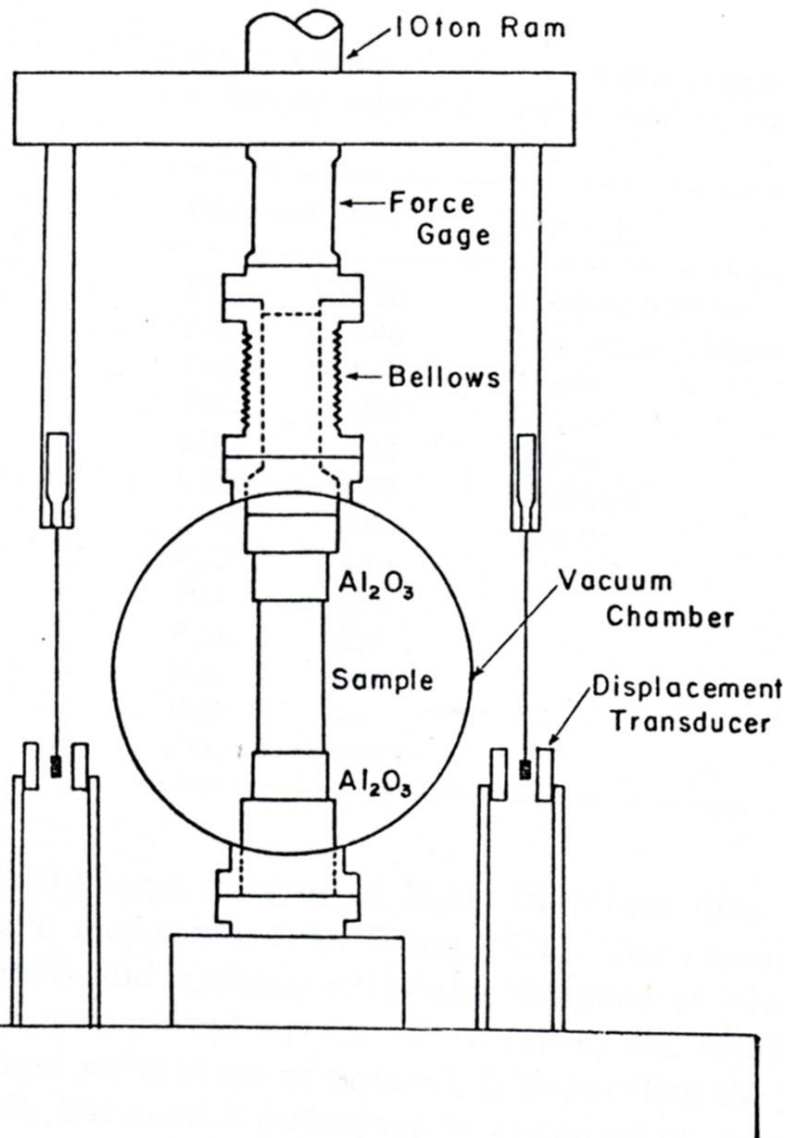
1. 月震の振動継続時間が異常に長い。
2. 超真空中では月の岩石のQが以上に高い、
Q=5000程度
3. コロラド大学で超真空中での岩石の振る舞いを調べてみようと考えた。(1978)

Hartmut Spetzler, Ivan Getting Jr., N. Soga (京大)との共同研究を始めた。

GPS衛星の発案者の息子

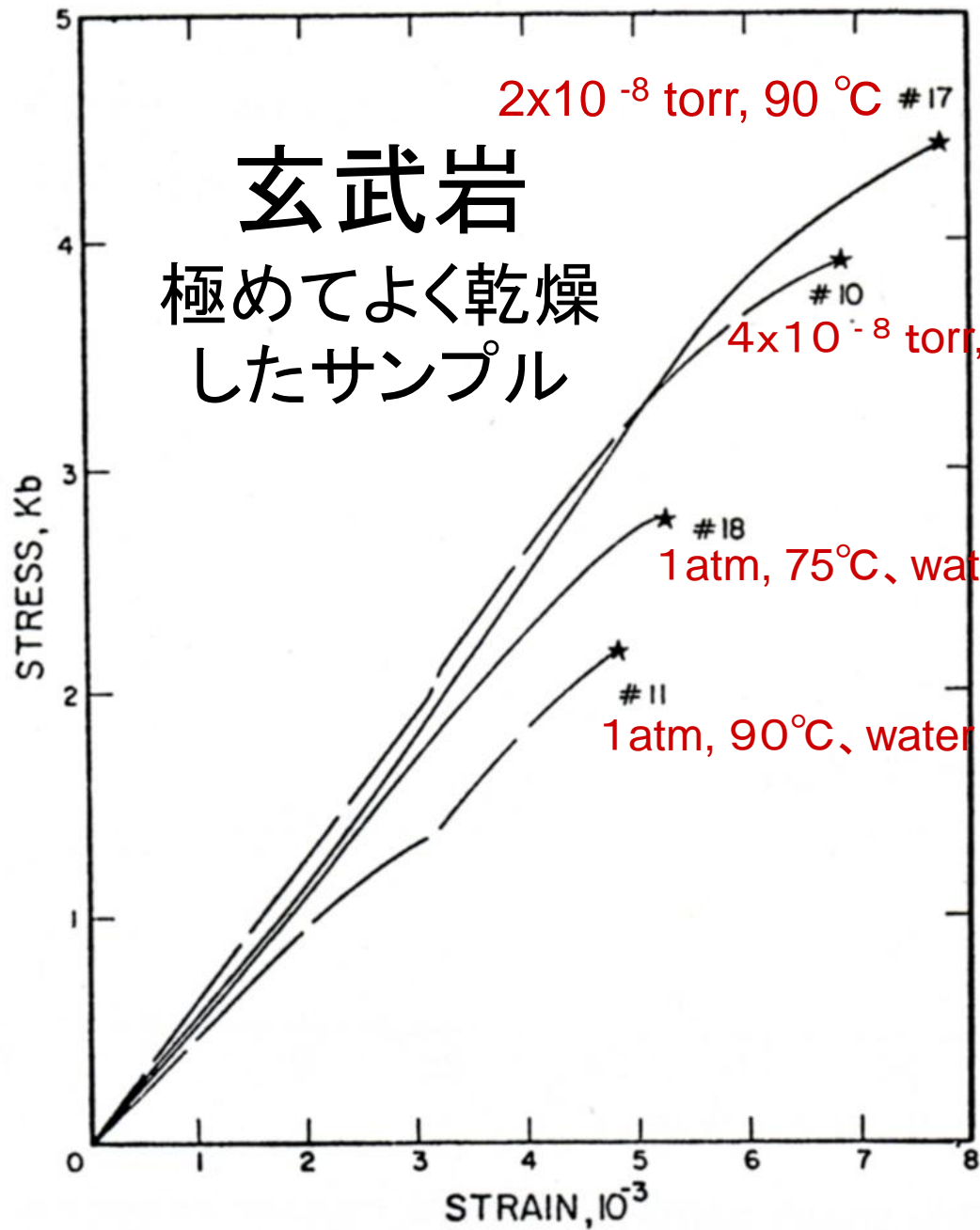


超真空下での岩石破壊実験装置



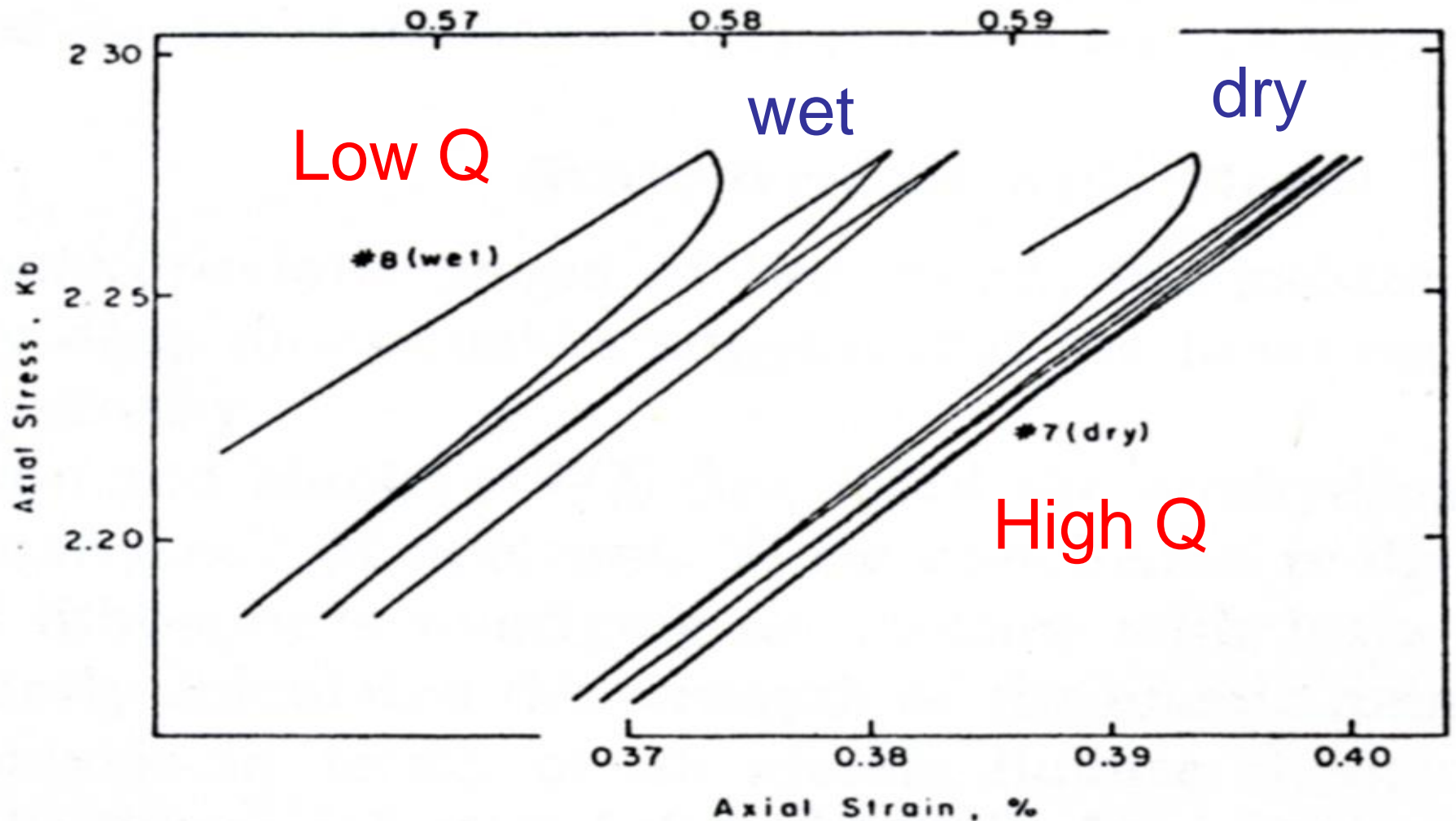
実験装置を作ってくれる
有り難さを痛感。
優れた技術者の重要性。

Fig. 1. Schematic diagram of sample assemblage.

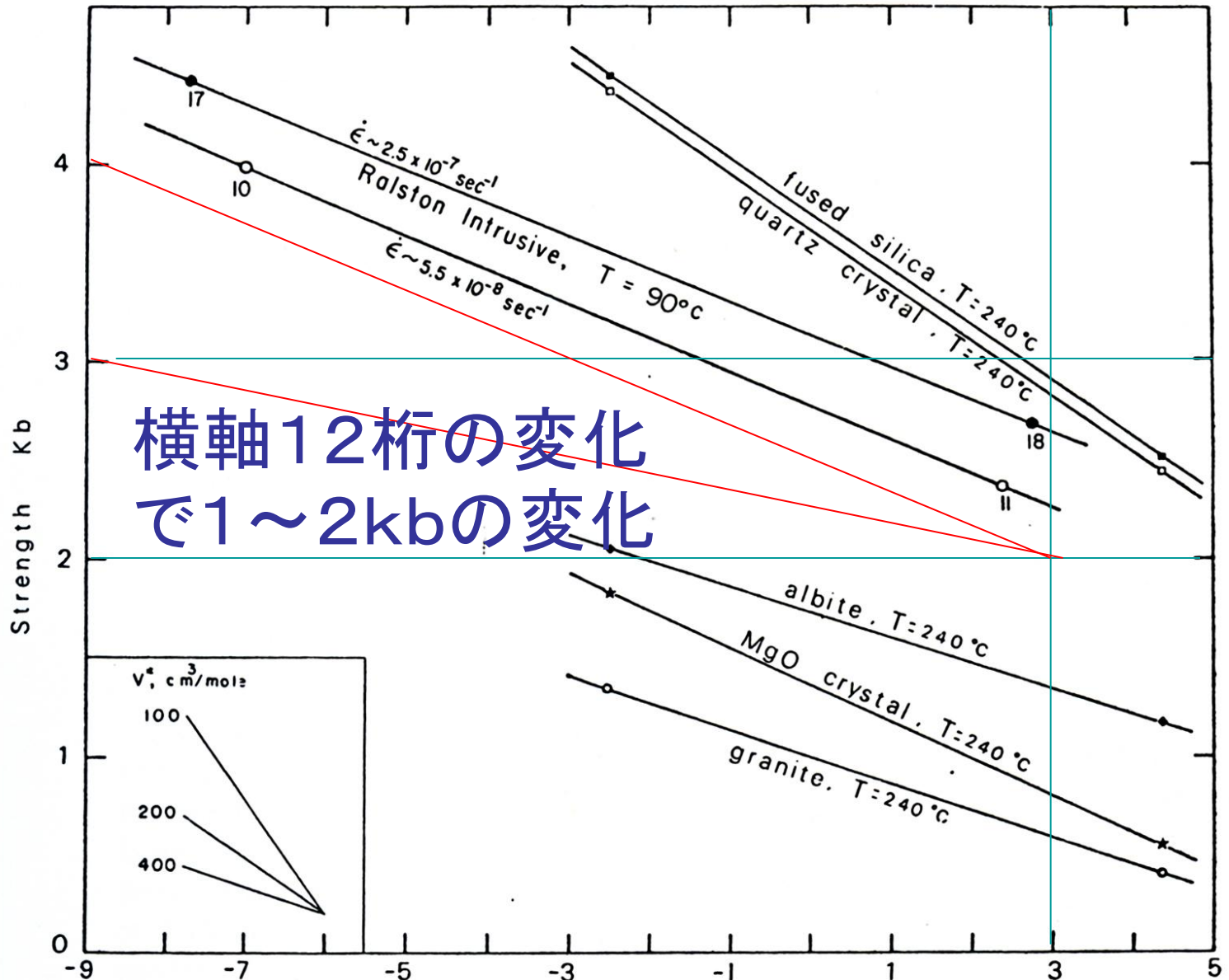


超真空下では岩石の強度が著しく高くなる。

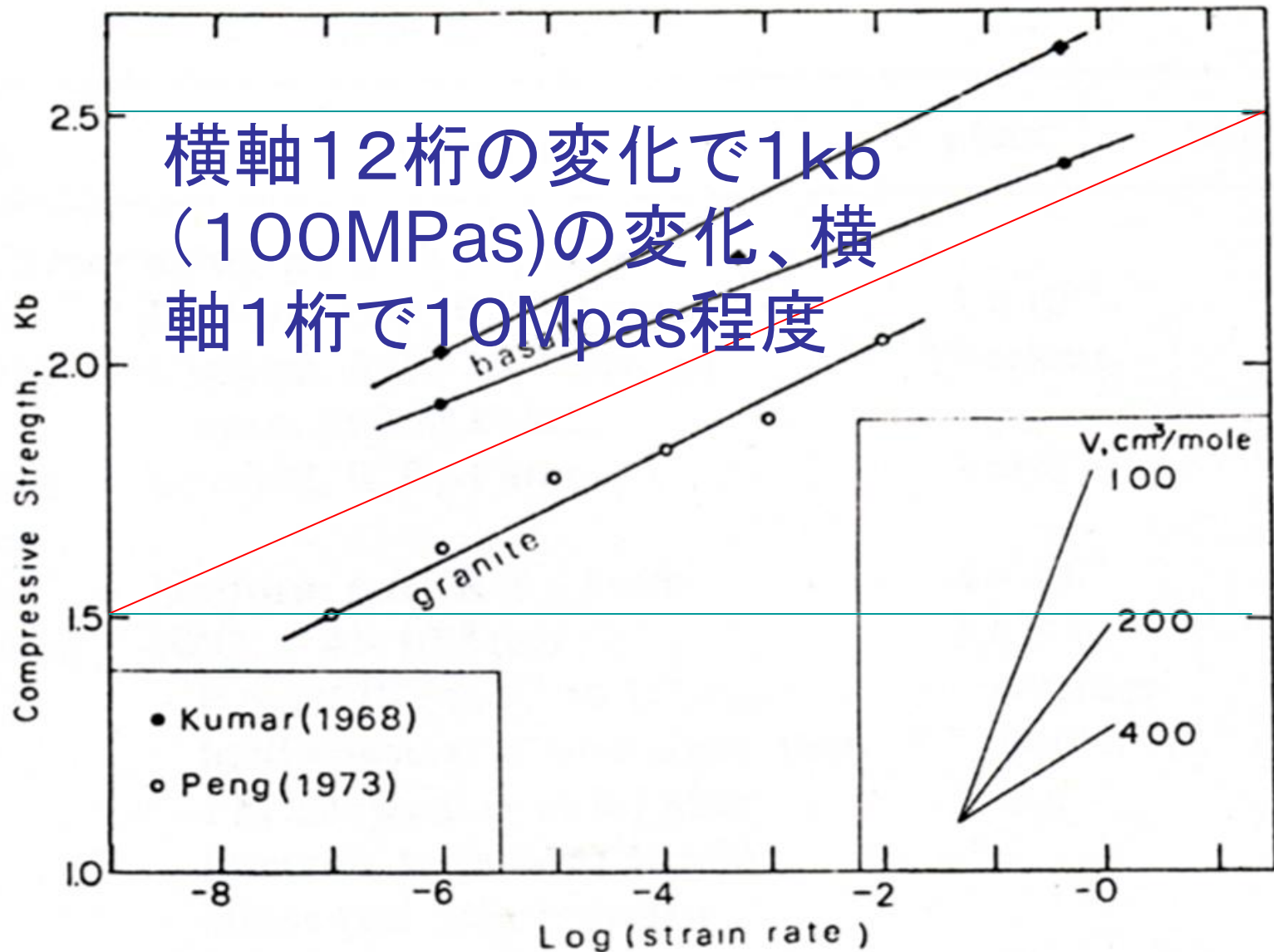
超真空下では応力-歪曲線のヒステリシスも変化する



岩石の破壊強度の P_{H_2O} 依存性



岩石破壊強度の歪速度依存性



岩石破壊のMizutaniスケーリング則

1. 破壊強度 σ の歪速度依存性

$$S = S_0 + \frac{RT}{fV^*} \ln e \quad \square$$

2. 破壊強度 σ の水蒸気圧依存性

$$S = S_0 - \frac{RT}{fV^*} \ln P_{H_2O}^n$$

3. 疲労破壊までの時間 τ の応力依存性

$$\ln \tau = \ln \tau_0 - \frac{fV^* \sigma}{RT}$$

岩石力学のスケーリング則

• Part 3 岩石破壊過程を究める

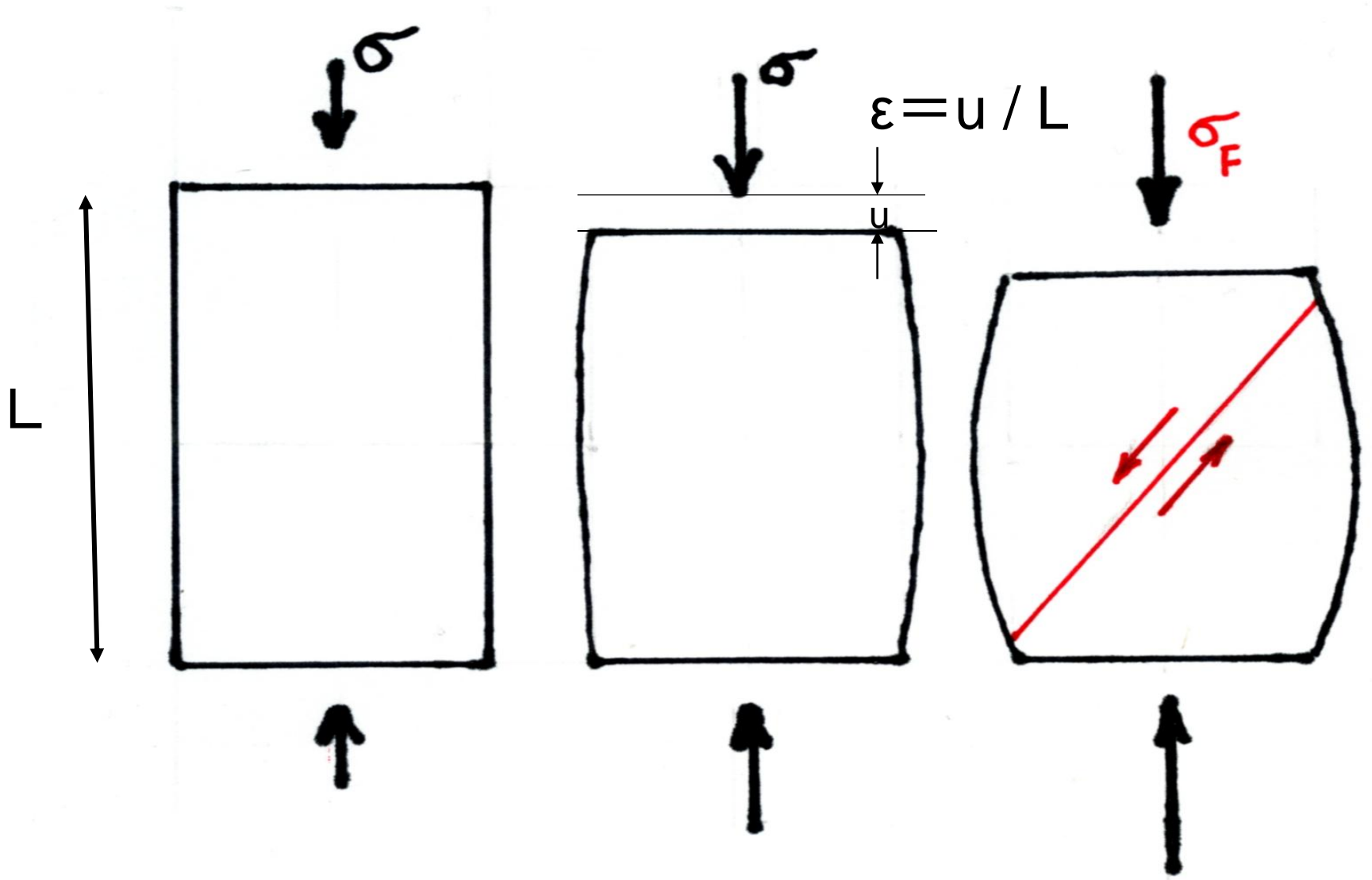
実験室と自然の間のギャップは歪速度の違いにある。

1. 歪速度の小さな実験のために、装置運転を
完全自動化
2. 封圧2kb(200MPa)までの圧力容器を持つ
3. 剛性の高い圧縮実験装置
4. Acoustic Emissionを複数点で測定できる

実験結果は増田幸治君(現産総研)のM論、D論と成った。

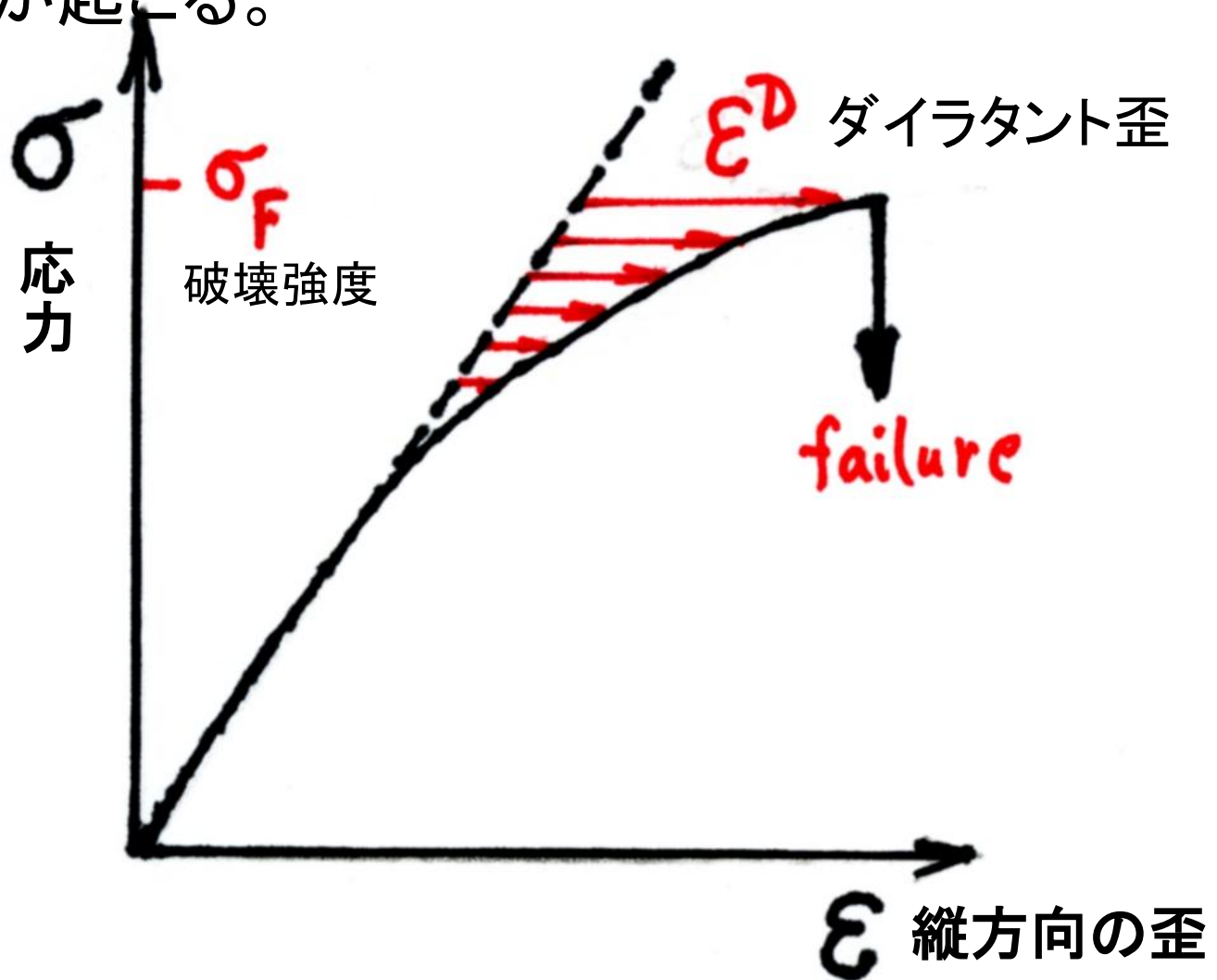
岩石の破壊過程

- 岩石を圧縮すると、下図のように変形し、破壊する



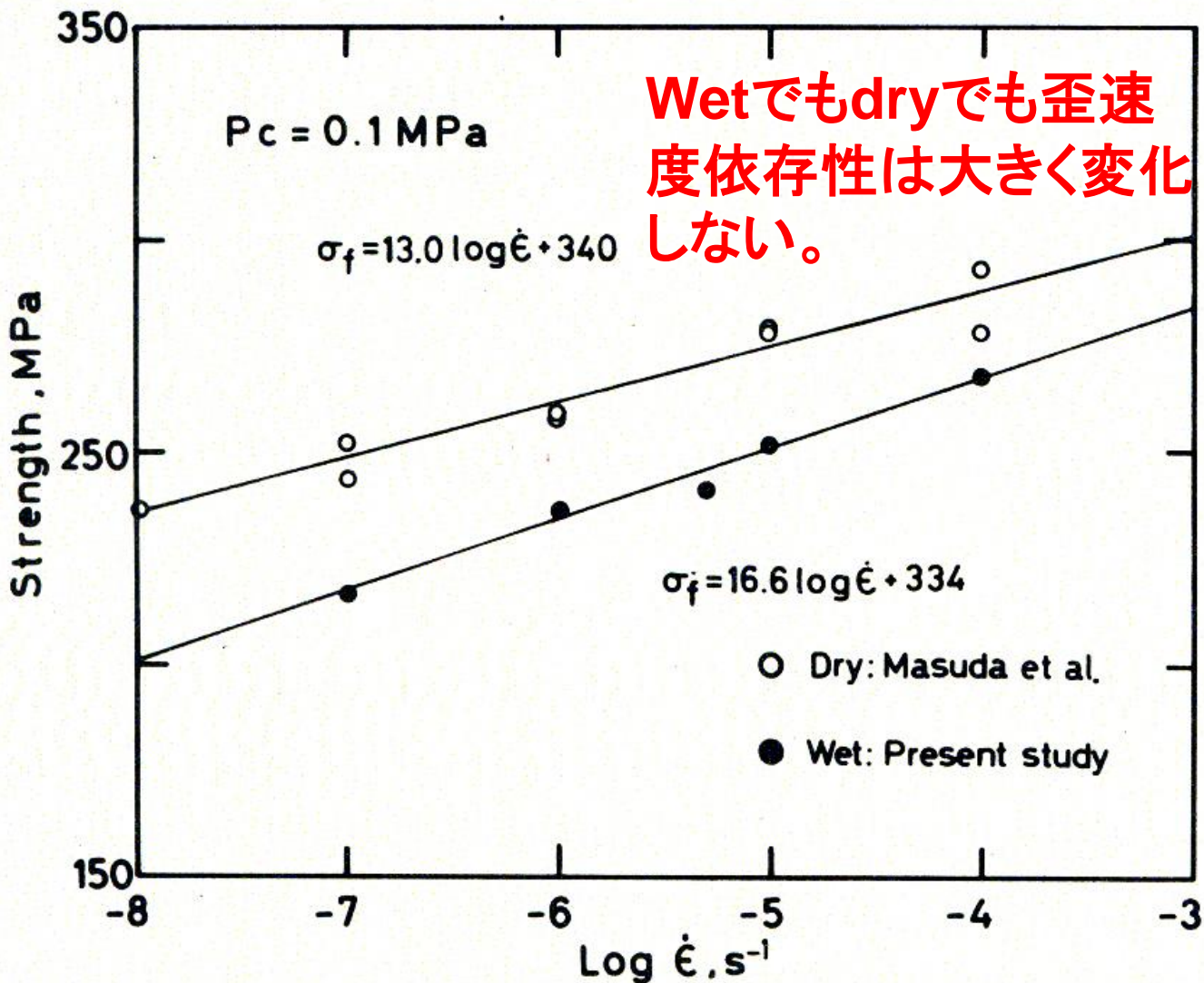
岩石の応力-歪曲線

- 破壊に近づくときと体積が膨張する、ダイラタンシーという現象が起こる。



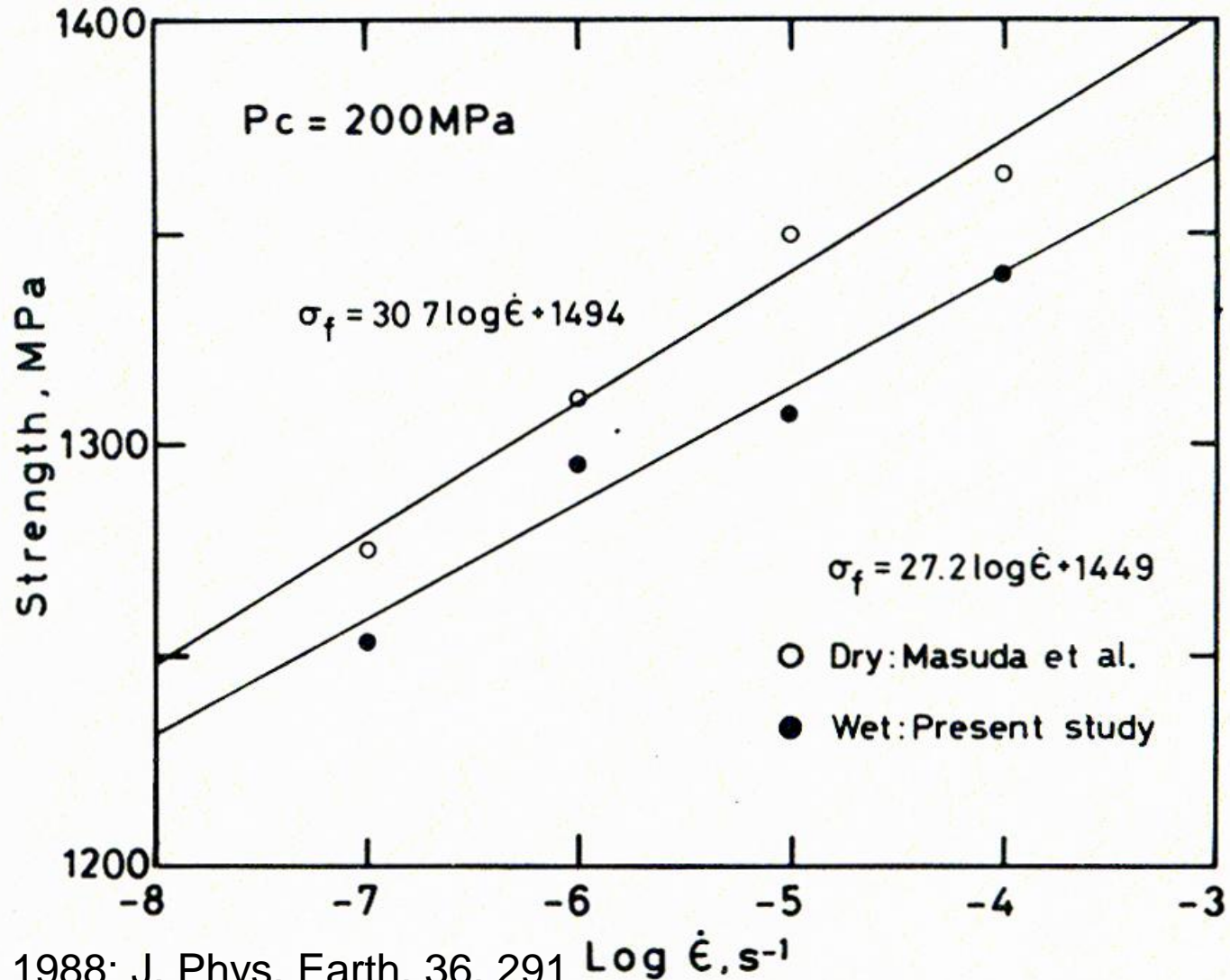
歪速度依存性、wet、dry環境下

- 花崗岩の破壊強度の歪速度依存性



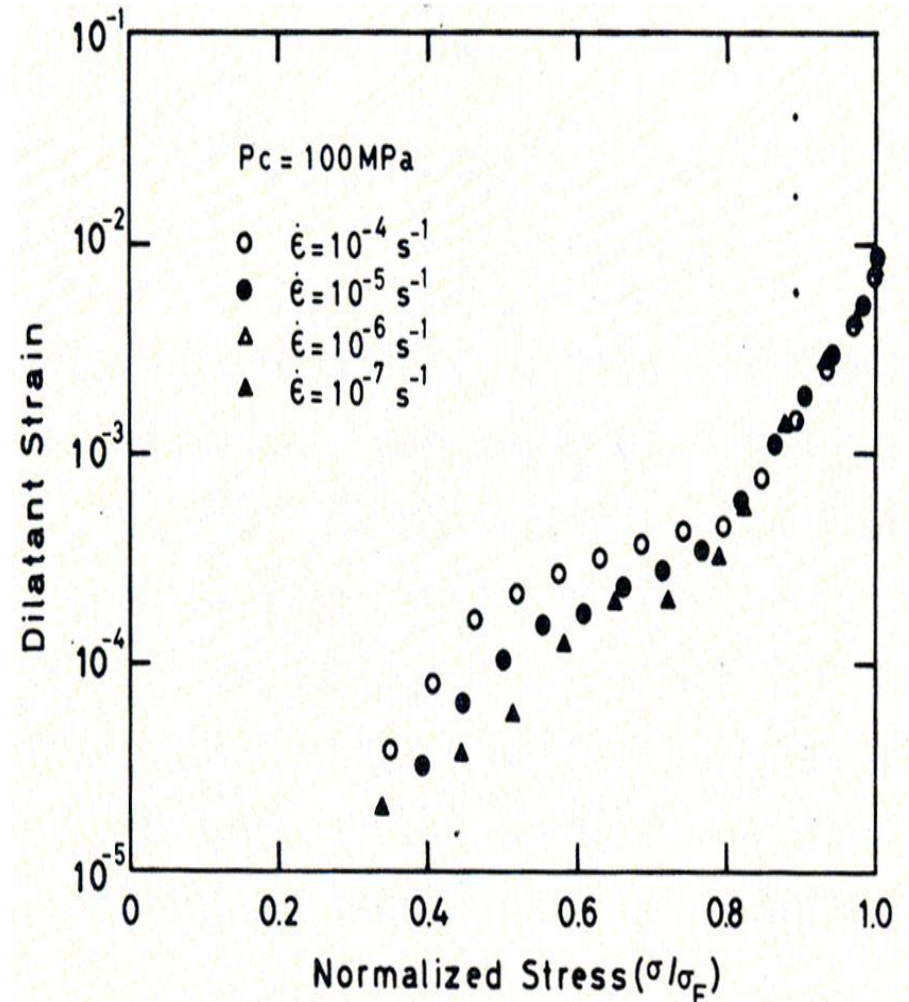
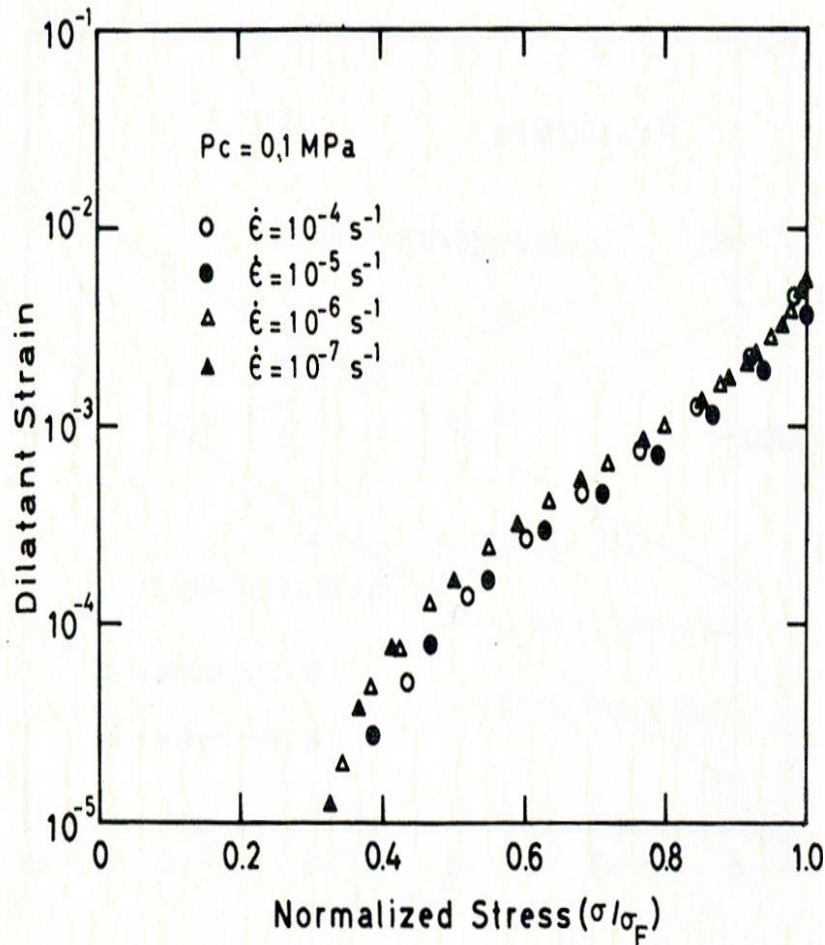
高压下での歪速度依存性

- 封圧が高くなると、歪速度依存性が高くなる。



Dilatancy は歪速度によらない

- 応力を破壊強度で正規化して dilatant 歪を描くと ε_D の絶対値も応力による変化も歪速度にはよらない。



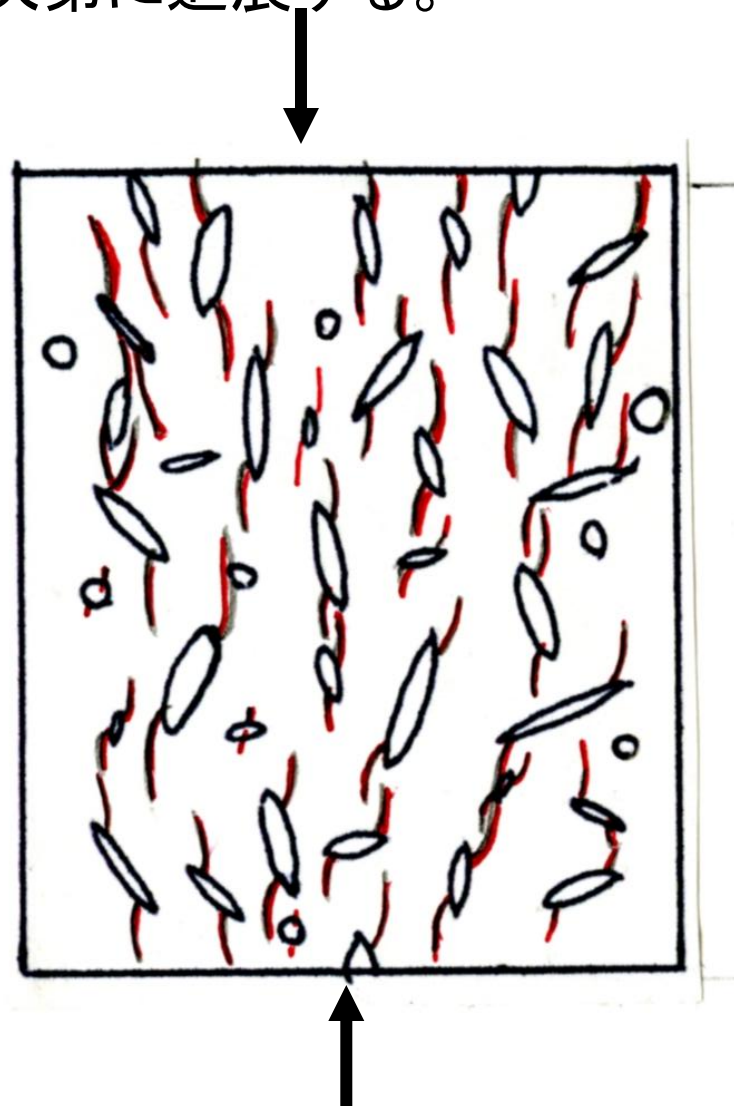
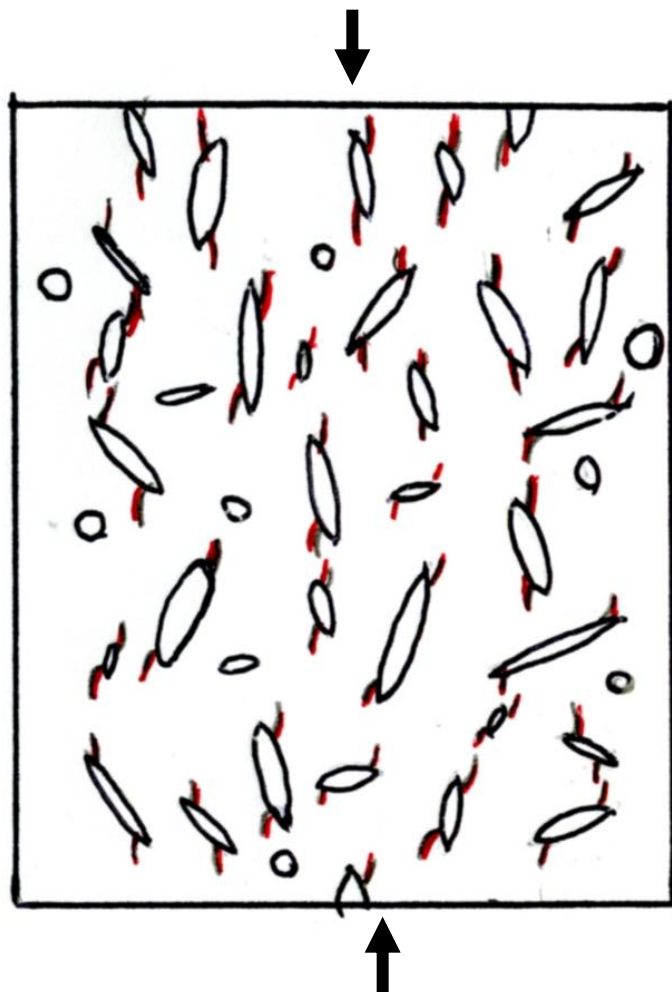
岩石破壊の統一理論

＜この考えは私がコロラド大学にいるころ、1978年（今から30年以上前）に考え付いたが、それを関係者以外の人にちゃんと説明するのは今回が初めて。断片的には色々な論文で触れられているが・・・＞

- 岩石の破壊は無数の小さなクラックの進展による。
- クラックの進展は応力腐食現象として説明する。

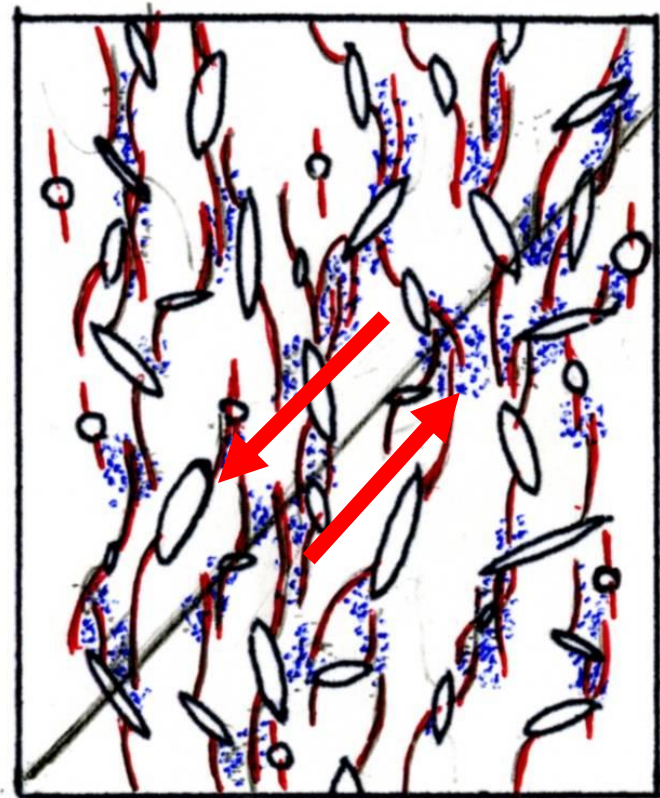
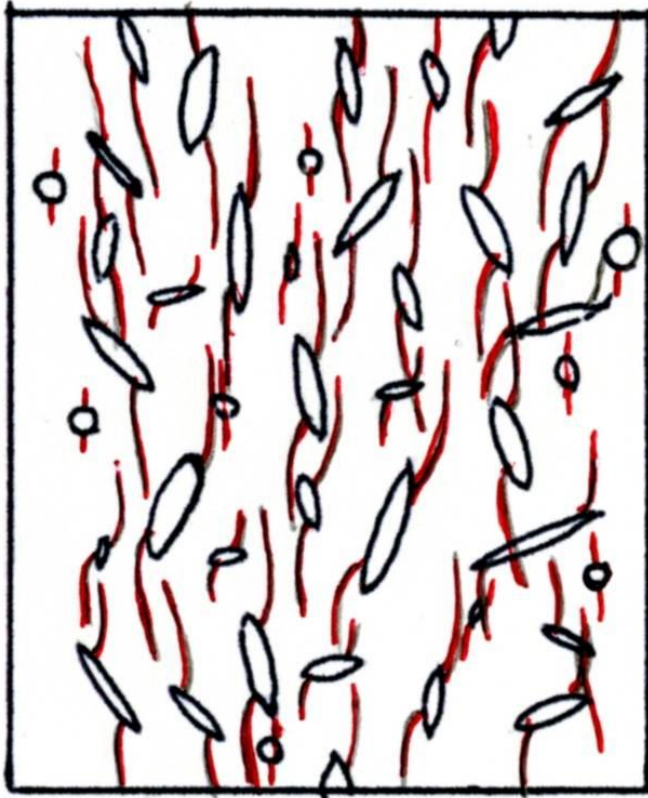
半理論的考察：クラックモデル

- 岩石にはもともと小さなクラックがいっぱいあったと考える
- このクラックは応力によって次第に進展する。



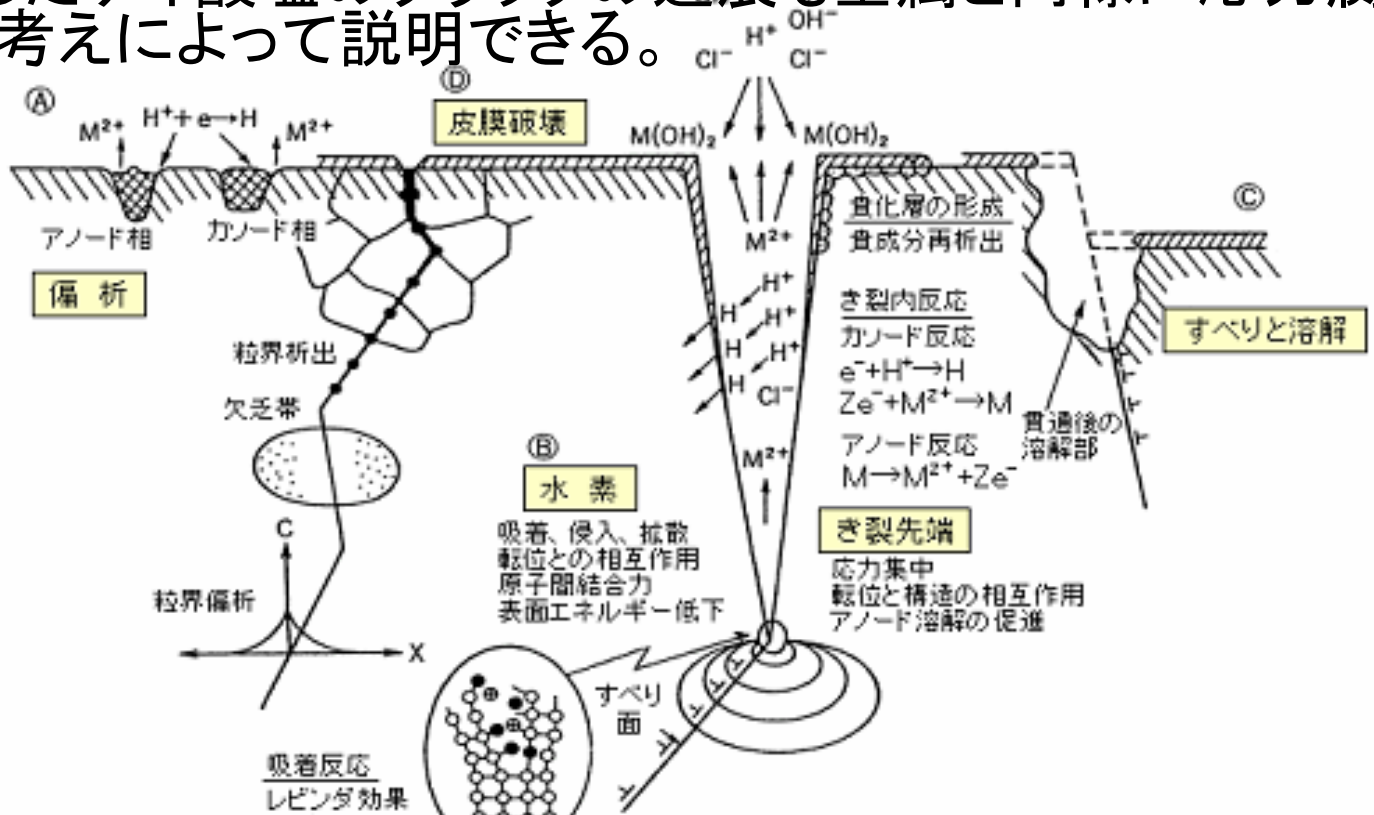
クラックモデル(2)

- 応力が高くなるとクラックは長くなる。
- 最終的にはクラック同士が相互作用するようになって全面破壊に至る。

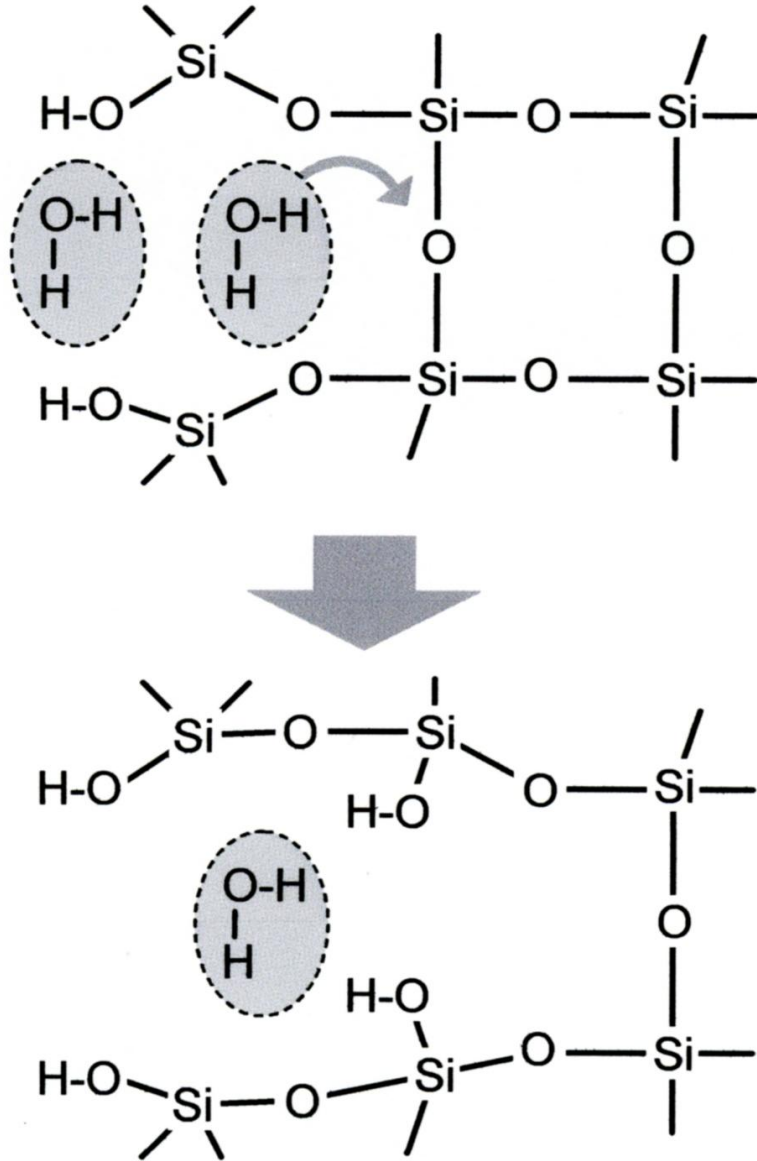


クラックの進展

- 金属材料の破壊過程において応力腐食という概念が提唱されていた。
- セラミックスやガラス工学では単一クラックの進展の法則が研究されていた。
- ゆっくりしたケイ酸塩のクラックの進展も金属と同様に応力腐食という考えによって説明できる。



岩石の応力腐食の概念図



- クラックの先端でSi-O-Si ボンドがSi-OH・HO-Siボンドと腐食され、弱いH・Hボンドが切れる。
- これは熱活性化過程である。

図1 ガラスの水による応力腐食の模式図

クラック進展速度

S. M. Wiederhorn (1967)、J. Am. Ceram. Soc.
50, 407–414

はセラミックの中でゆっくりと進展するクラックの進展速度 v は次の式で表されると提唱した。

$$v = AP_{H_2O}^n \exp\left(-\frac{U - fV^* \sigma}{RT}\right)$$

ここで

P_{H_2O} は水蒸気圧

f はクラックチップでの応力と外から与えられた応力の比を表す定数

U は反応の活性化エネルギー

V^* は活性化体積

クラックの長さの時間変化

$$a = a_0 + \int v dt$$

ここで

a_0 はクラックの最初の長さ

$$v = AP_{H_2O}^n \exp\left(-\frac{U - fV^* \sigma}{RT}\right)$$

破壊のCriterionを a が a_{critical} を超えた時とすると、破壊のスケーリング則が求められる。

疲労破壊の場合

- ストレスを一定であったとしても、いずれ破壊する。遅れ破壊とか疲労破壊という現象。
- この場合は $\sigma = \text{一定}$ であるから、 $a = a_0 + \int v dt$ の積分は簡単である。

$$a = a_0 + AP_{H_2O}^n \exp\left(-\frac{U - fV^* \sigma}{RT}\right) \cdot t$$

$a \gg a_0$ として両辺の対数をとれば、

$$\ln a_{crit} = \ln A + n \ln P_{H_2O} - \frac{U - fV^* S_f}{RT} + \ln t$$

すなわち

$$\ln t = \ln t_0 - \frac{RT}{fV^*} \ln S$$

歪速度一定の場合

$\sigma = E \epsilon$ と考えて、応力増加速度も一定とする。

$$\sigma = \sigma t \quad \text{だから} \quad dt = d\sigma / \dot{\sigma}$$

$$a = a_o + \int_0^t v dt = a_o + \frac{1}{\dot{\sigma}} \int_0^{\sigma} v d\sigma$$

これを実行すれば以下の式を得る。

$$a_{crit} = a_o + \frac{A P_{H_2O}^n}{\dot{\sigma} f V^*} \exp\left(-\frac{U}{RT}\right) \left[\exp\left(\frac{f V^* \sigma_f}{RT}\right) - 1 \right]$$

定歪速度の場合

$$a_{crit} \gg a_o$$

$$\exp\left(\frac{fV^* \sigma_f}{RT}\right) \gg 1$$

を仮定すれば

次の式が得られる。

$$\ln a_{crit} = const. + n \ln P_{H_2O} - \ln S + \frac{fV^*}{RT} S_f$$

これから

$$S_f = S_o + \frac{RT}{fV^*} \ln S$$

と

$$\sigma_f = \sigma_o - \frac{RT}{fV^*} \ln P_{H_2O}^n$$

岩石破壊のMizutaniスケーリング則

1. 破壊強度 σ の歪速度依存性

$$S = S_0 + \frac{RT}{fV^*} \ln e \quad \square$$

2. 破壊強度 σ の水蒸気圧依存性

$$S = S_0 - \frac{RT}{fV^*} \ln P_{H_2O}^n$$

3. 疲労破壊までの時間 τ の応力依存性

$$\ln t = \ln t_0 - \frac{fV^* S}{RT}$$

岩石破壊スケーリング

- よく考えると様々な破壊現象の間に統一性があることがわかった。
- しかし、どんな岩石力学の教科書にもこんなことが触れられていない。
- このような破壊現象の性質と実際の地震現象を結びつける研究がこれから行われるべきだろう。

参考文献

- H. Mizutani, T. Ishido T. Yokokura, S. Ohnishi, 1976: Electrokinetic phenomena associated with earthquakes, Geophys. Res. Lett., 3, 7, 365-368
- T. Ishido, H. Mizutani, 1981: Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, J.Geophys.Res, 86, B3, 1763–1775
- H. Mizutani, H. Spetzler, I. Getting, R. J. Martin, N. Soga, 1977: The effect of outgassing upon the closure of cracks and the strength of lunar analogues, Proc. Lunar Sci. Conf. 8th 1235-1248
- K. Masuda, H. Mizutani, I. Yamada, Y. Imanishi, 1988: Effects of water on time-dependent behavior of granite, J. Phys. Earth, 36, 291-313