

**地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証**

**(3-2) 地殻変動が地層の透水性に与える  
影響の把握**

**令和5年8月28日**

**国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
核燃料・バックエンド研究開発部門  
幌延深地層研究センター 深地層研究部  
石井 英一**

# 説明概要

## 課題

- 処分場の設計や閉鎖後の安全評価では、処分場に存在し得る小規模な断層の局所的な透水性や水理的な連結性がテクトニックな応力変化などにより変化する可能性を考慮する必要あり
- しかし、処分場に存在し得る全ての小規模な断層についてそれらの変化の可能性を調べることは非現実的

## 目的・内容

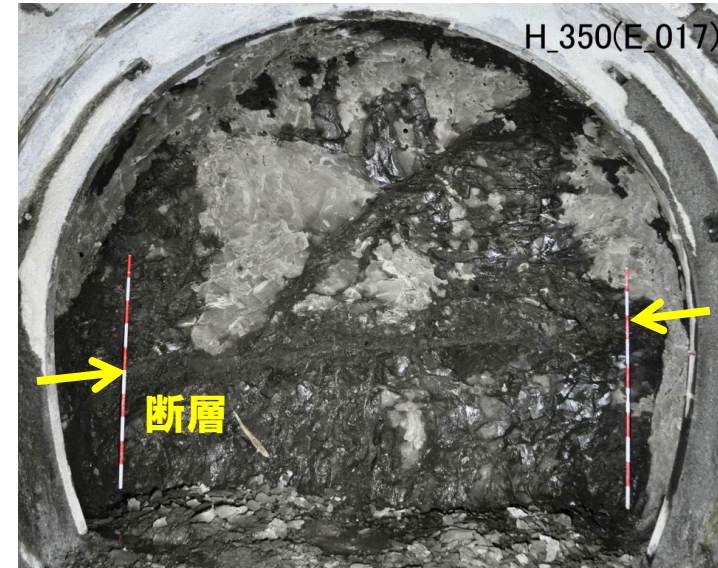
- テクトニックな応力変化などに伴う断層の局所的な透水性や水理的な連結性の変化の可能性を空間的に推定するための手法を幌延などで得られた観測/実験データを用いて検討

## これまでの成果

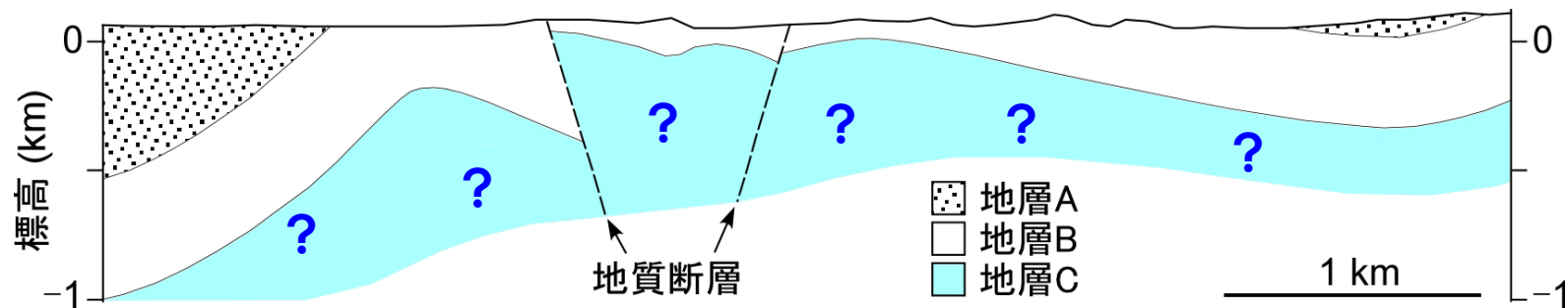
- (1) 断層の局所的な透水性の上限は $DI$ (平均有効応力 $\div$ 岩石の引張強度)により経験的に推定できること、(2) 地下数百メートルで想定される $DI$ (例えば4以下)で断層の局所的な透水性が低い状態を保つためには垂直応力の効果だけでは不十分で、鉱物/粘土による継続的な割れ目充填が必要であること、(3) 石英などの鉱物による充填の場合は断層がずれると充填が破壊され透水性が一定の上限値まで増加し得ること、を確認
- (1)  $DI \geq 2$ 領域は断層沿いに断層内の隙間の連結を促進させる引張性割れ目が発達しにくいこと、(2)  $DI \geq 2$ 領域は断層の水理的連結性が低いため、断層の局所的な透水性が高くても地層の巨視的な透水性が健岩部相当の低さを保ち得ること、を確認

# 背景

- 廃棄体を埋設する地層の透水性は低いことが望ましいが、透水性が低くても小規模な断層が発達する可能性あり
- 処分場の設計や閉鎖後の安全評価では、テクトニックな応力変化や廃棄体の発熱による応力変化により、処分場の断層の局所的な透水性や水理的な連結性が変化する可能性を考慮する必要あり
- しかし、処分場の全ての断層についてそれらの変化の可能性を調べることは非現実的



坑道掘削時に遭遇する断層の例



地層に存在し得る小規模な断層の局所的な透水性や水理的な連結性は変化するか？

# 本日の内容

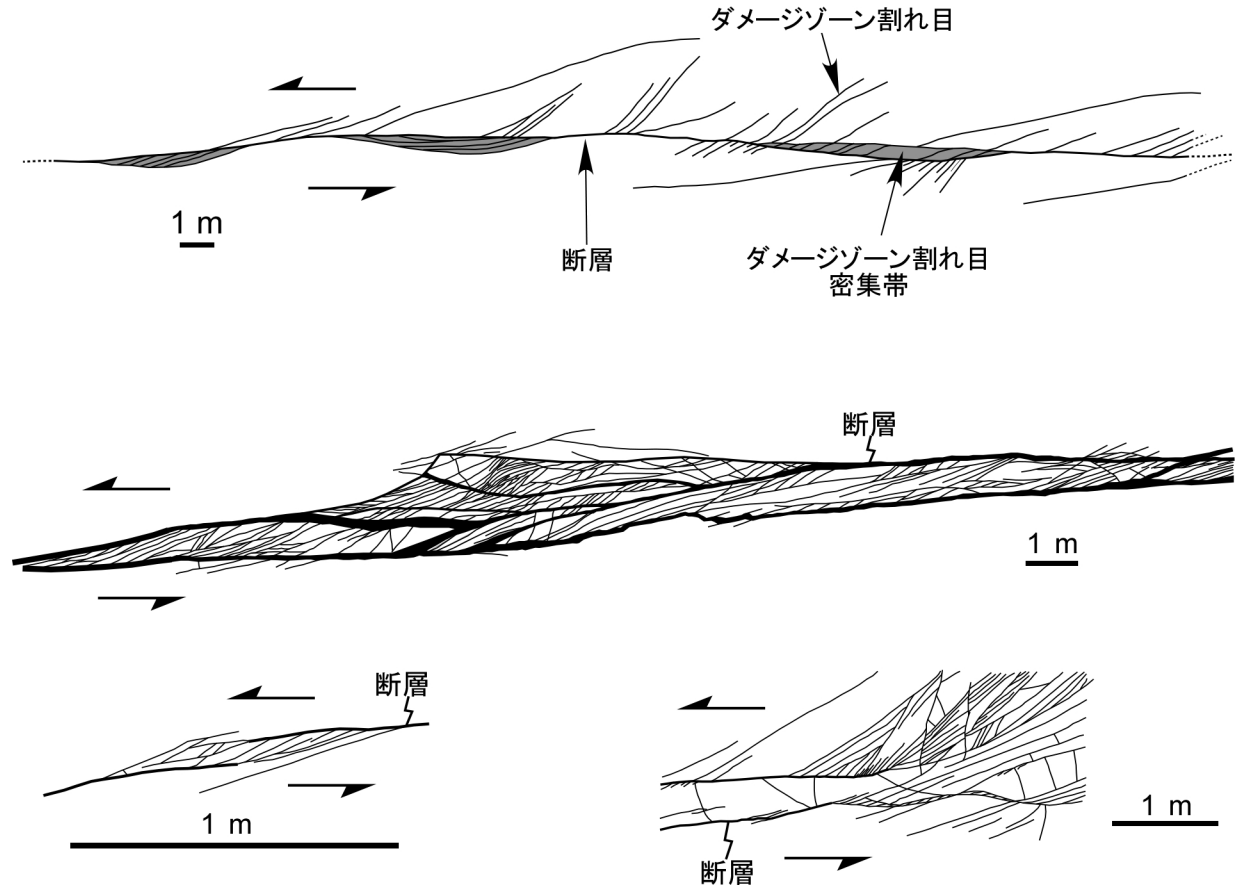
---

1. 断層の局所的な透水性の上限を空間的に推定するモデルの構築と水圧擾乱試験によるモデルの検証
2. 断層の水理的な連結性を空間的に推定するモデルの構築と水圧擾乱試験によるモデルの検証



# 断層の局所的な透水性

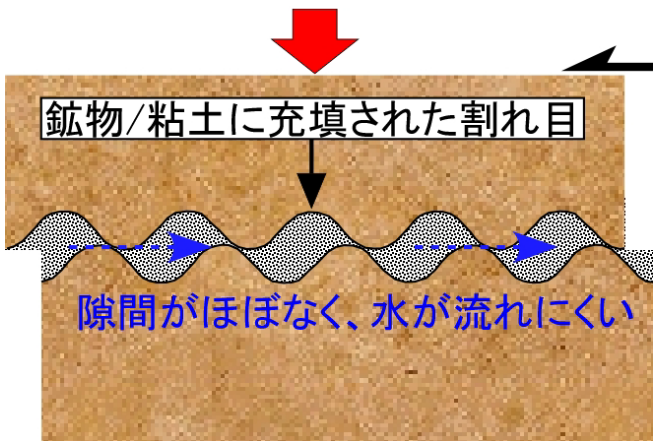
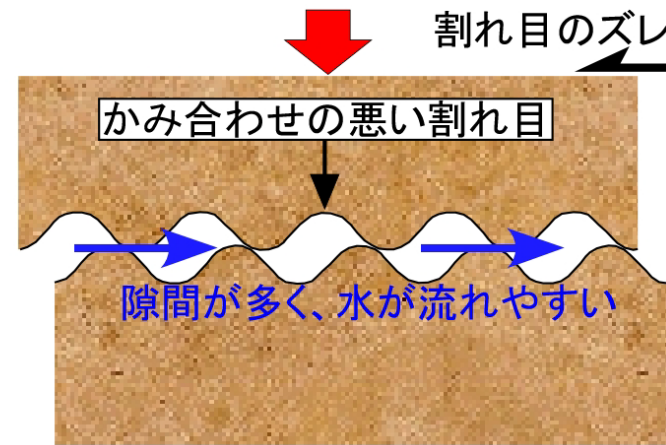
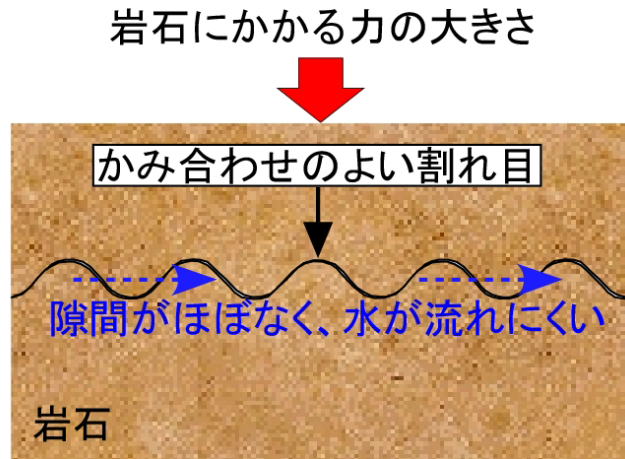
- 断層 = 断層岩を伴う割れ目
- 断層はしばしば断層帯を形成
- 断層帯のサイズや形状は様々だが、本質的には単一割れ目の集合体
- 単一割れ目の局所的な透水性が断層帯の局所的な透水性を支配



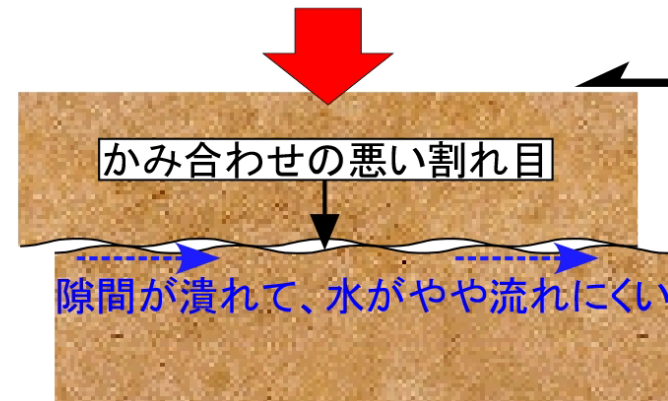
断層のスケッチ

石井・福島(2006、応用地質)

# 単一割れ目の局所的な透水性を支配するメカニズム



岩石の硬さに対して垂直応力が大きい



**鉱物/粘土の充填がない場合、割れ目の局所的な透水性の上限は割れ目のかみ合わせ、岩石の硬さ、および垂直応力により決まると推定**

# 空間分布の推定可能なパラメーターと透水性の関連付け

## Barton-Bandisのモデルを使用

水理的開口幅  $e = JRC_0^{2.5} / (E/e)^2$

力学的開口幅  $E = E_0 - (1/V_m + K_{ni}/\sigma'_n)^{-1}$

↓  
 $E_0 \approx V_m$   
 $K_{ni} = 0.2899\sigma_t/V_m$

$E = E_0(1 + \sigma'_n/0.2899\sigma_t)^{-1}$

↓  
 $\sigma'_n = b\sigma'_m$

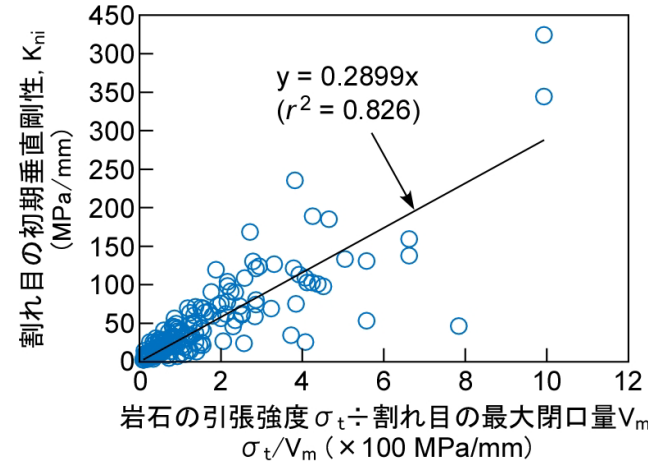
$E = E_0(1 + b\sigma'_m/0.2899\sigma_t)^{-1}$

↓  
 $DI = \sigma'_m/\sigma_t$

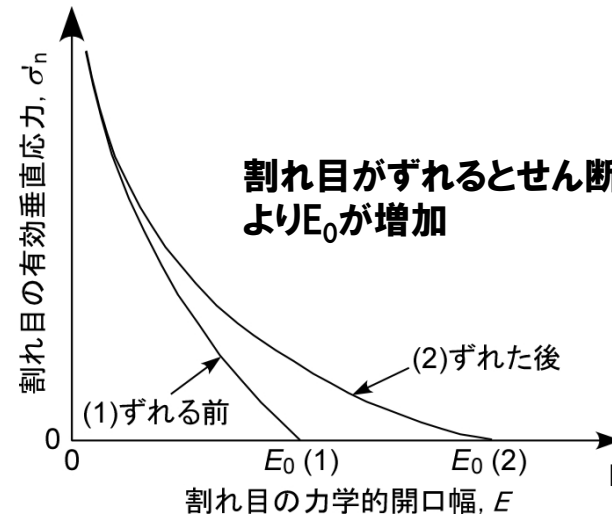
$e = E^2/JRC_0^{2.5}$

平均有効応力÷岩石の引張強度  
空間分布の推定が可能

$E = E_0(1 + bDI/0.2899)^{-1}$



Bandis (1980, D論) の室内実験データ

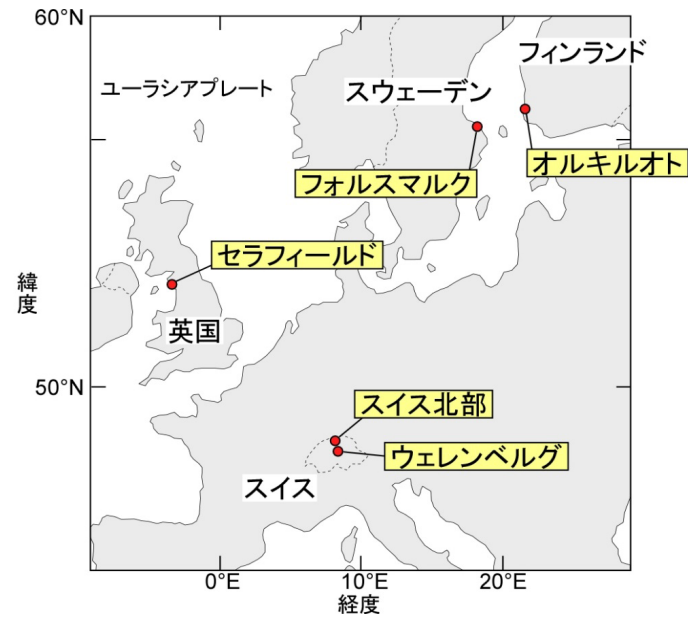


割れ目の垂直応力と開口幅の関係

Ishii (2021, Eng Geol)

割れ目の局所的な透水性の上限は、DI、 $JRC_0$  (面の粗さ)、 $E_0$  (初期開口幅)、 $b$  (方向性) により決まると推定

# 断層中の主要な水みち割れ目の透水性とDIの関係の検討

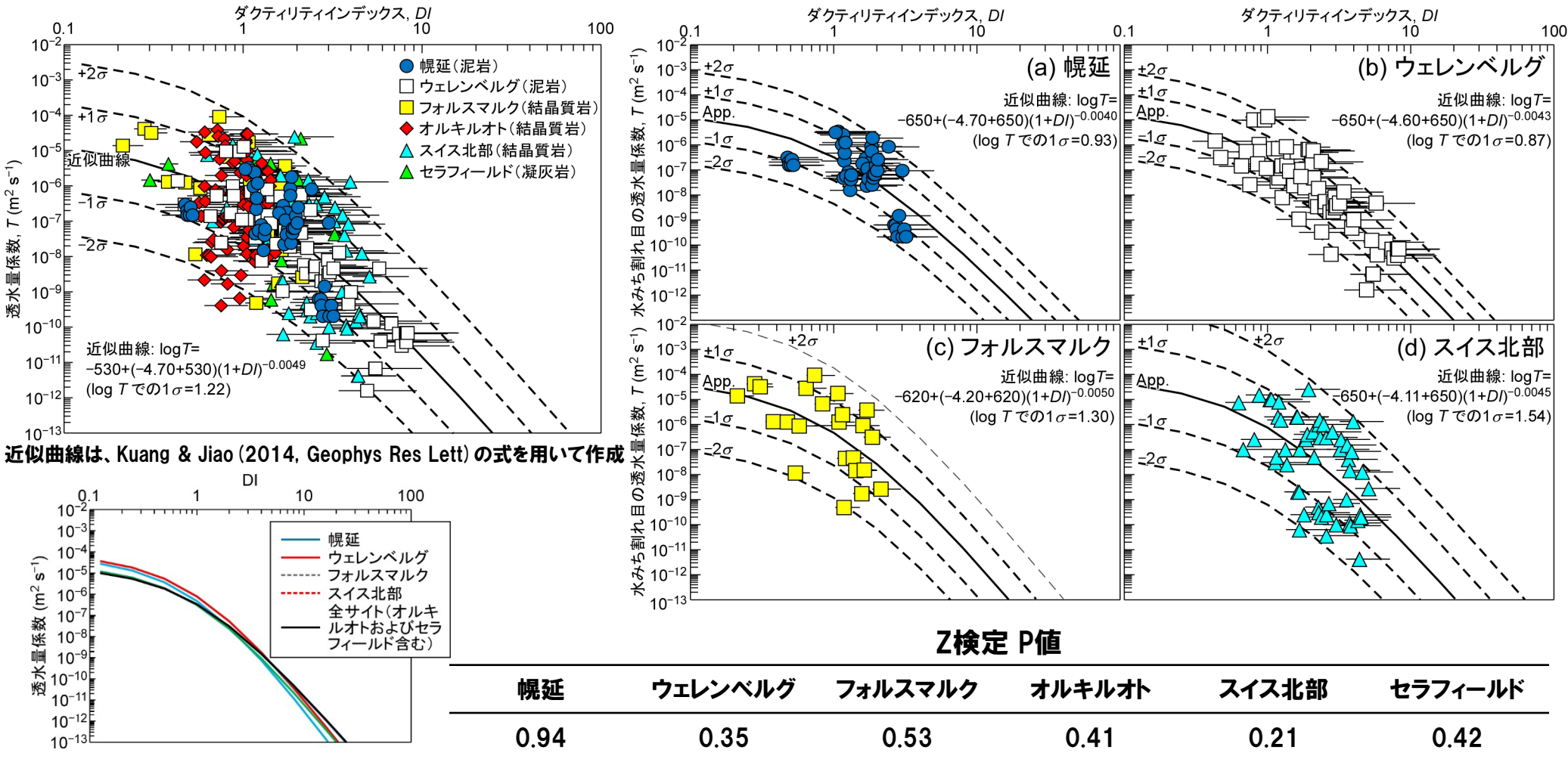


サイト	岩種	岩石引張強度	初期応力(手法)	断層コアの厚さ	水みち検出方法
幌延	珪質泥岩	0.9~3.2 MPa	HF	≒数十センチ	流体検層
ウェレンベルグ	泥灰岩	2.0~5.0 MPa	HF	≒数十センチ	流体検層
フォルスマルク	花崗(閃緑)岩	11~19 MPa	OC、HF	≒数メートル	PFL検層
オルキルオト	片麻岩	9.2~15.0 MPa	OC、HF	≒数十センチ	PFL検層
スイス北部	花崗岩/片麻岩	6.1~10.1 MPa	HF、OC	≒数十センチ	流体検層
セラフィールド	火砕岩	7.2~9.2 MPa	HF、OC	≒数十センチ	流体検層

Ishii (2015, J Geophys Res)

様々な岩種で鉱物/粘土充填に乏しい断層関連水みち割れ目の透水性とDIを検討

# 断層に関連する水みち割れ目の透水性とDIの関係

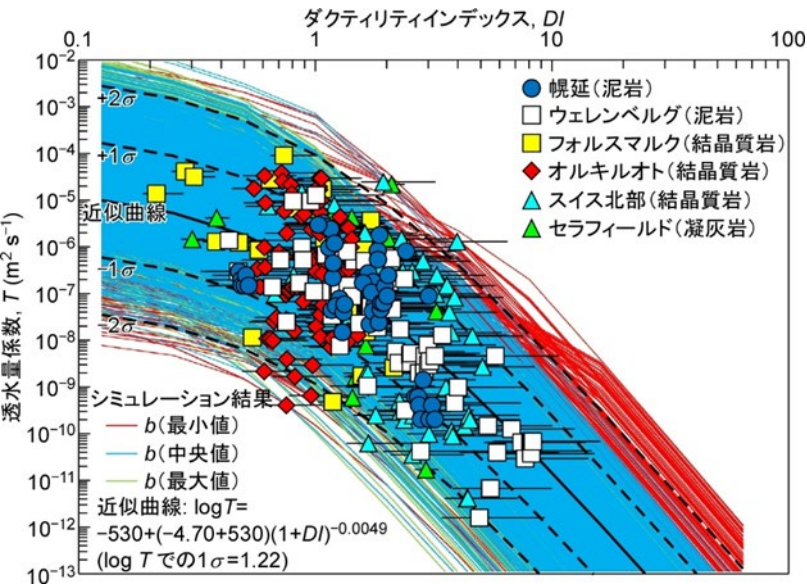


Ishii (2021, Eng Geol)

断層中の主要な水みち割れ目の透水性とDIの関係がサイト間で一致  
 ⇒天然の断層の局所的な透水性の上限はDIから経験的に推定できる可能性あり



# 得られた経験式とBarton-Bandisモデルの比較



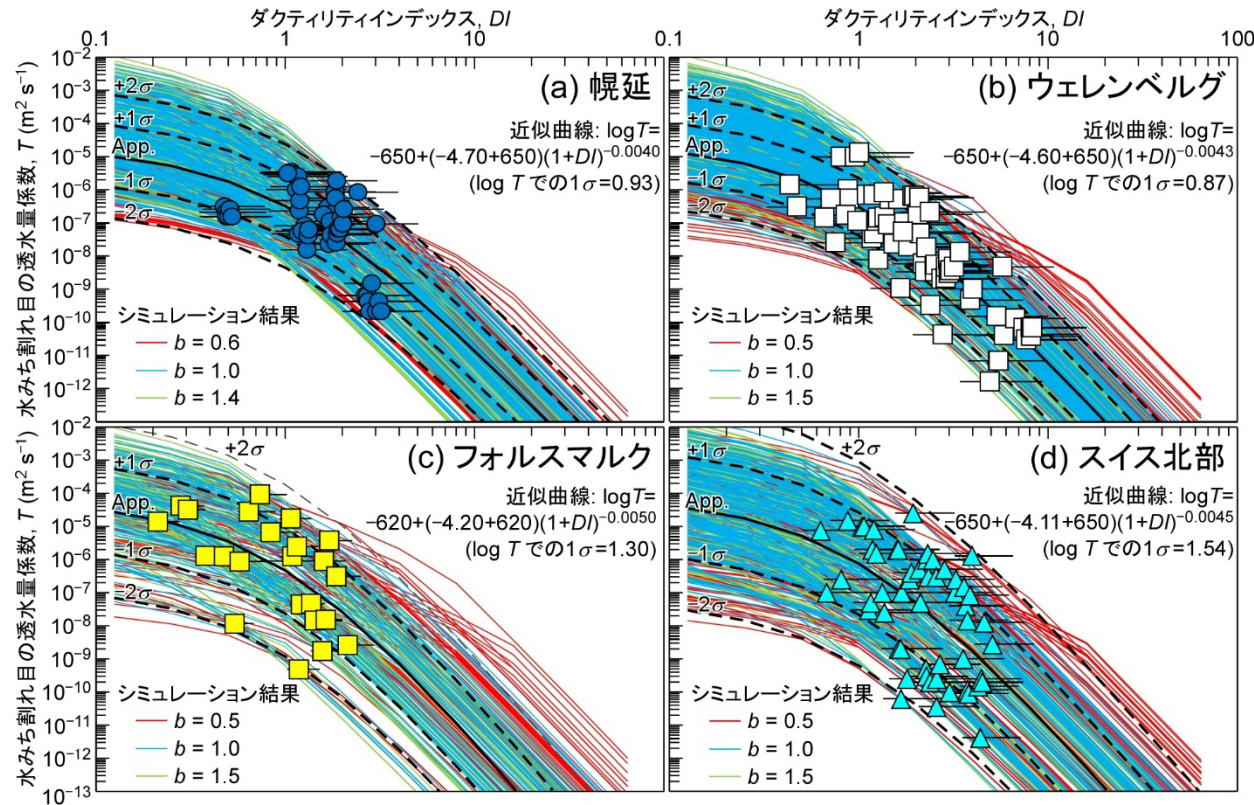
現実的な $JRC_0$ と $b$ の値を仮定し、計測された $e$ と $DI$ から $E_0$ を算出。この $E_0$ を用いて $DI$ を変化させると、 $e(T)$ の変化傾向が近似曲線と一致。

3~15を仮定

0.5~1.5を仮定

$$e = E^2 / JRC_0^{2.5}$$

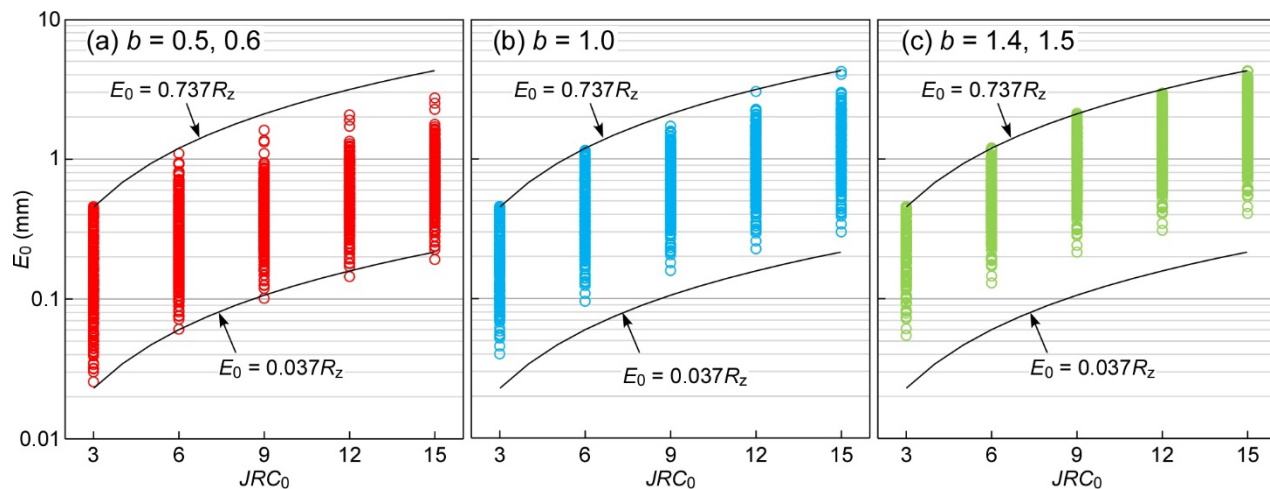
$$E = E_0(1 + bDI/0.2899)^{-1}$$



Ishii (2021, Eng Geol)

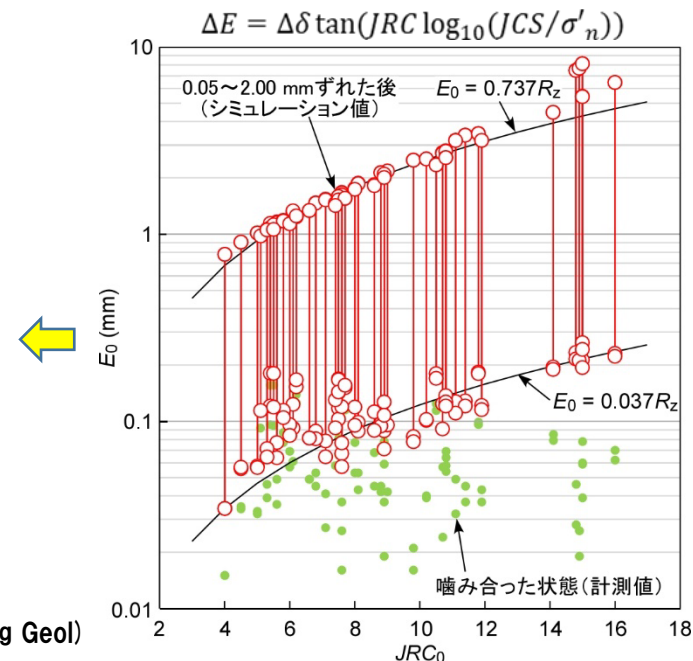
Barton-Bandisモデルを用いたシミュレーションにより、得られた経験式はせん断膨張により一定の $E_0$ に達した割れ目の透水性と $DI$ の関係を表すと解釈可能

# 算出された初期開口幅 $E_0$ の意味

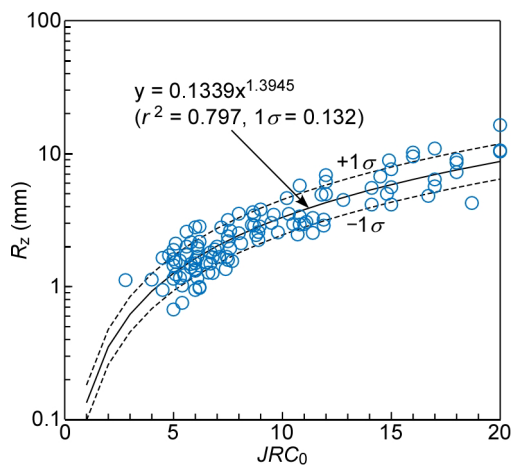


天然の断層関連水みち割れ目で推定される $E_0$

Ishii (2021, Eng Geol)



Bandis (1980, D論) の室内実験結果とシミュレーション結果



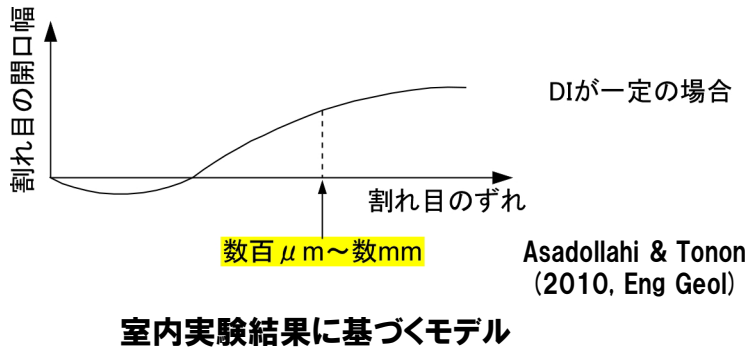
Li & Zhang (2015, Int J Rock Mech Min Sci) の室内実験データ

算出された $E_0$ (数十 $\mu$ ～数ミリ)は、地質学的に無視し得るほどの僅かなせん断変位(0.05～2.00 mm)に伴うせん断膨張により実現可能



# せん断膨張のせん断変位依存性

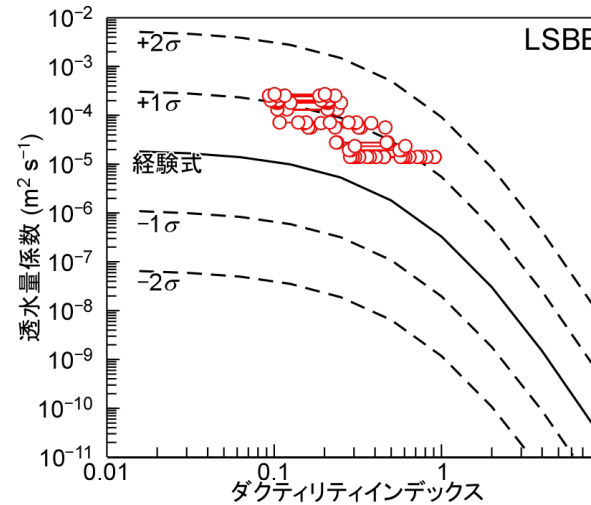
## せん断膨張とせん断変位の関係



一般に、**数百  $\mu\text{m}$  ~ 数mm程度**のせん断変位で割れ目のせん断強度のピークに達し、それ以上割れ目がずれても開口幅は増加しにくくなる(以降はガウジが形成し始める)

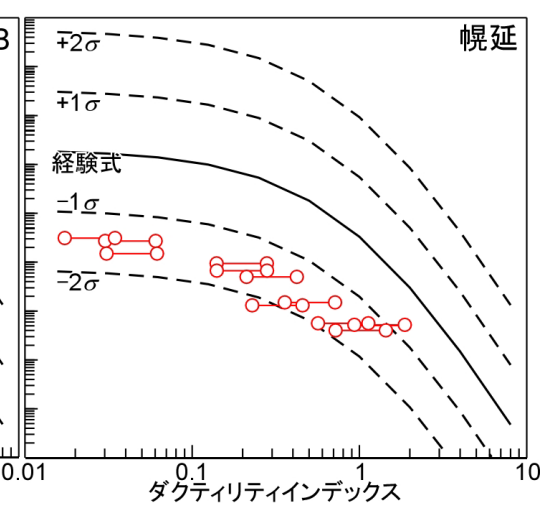
## 低騒音地下研究所 (LSBB、フランス)の例

試験中、1.2 mmのせん断変位が発生



## 幌延地下施設の例

試験中、数センチのせん断変位が発生

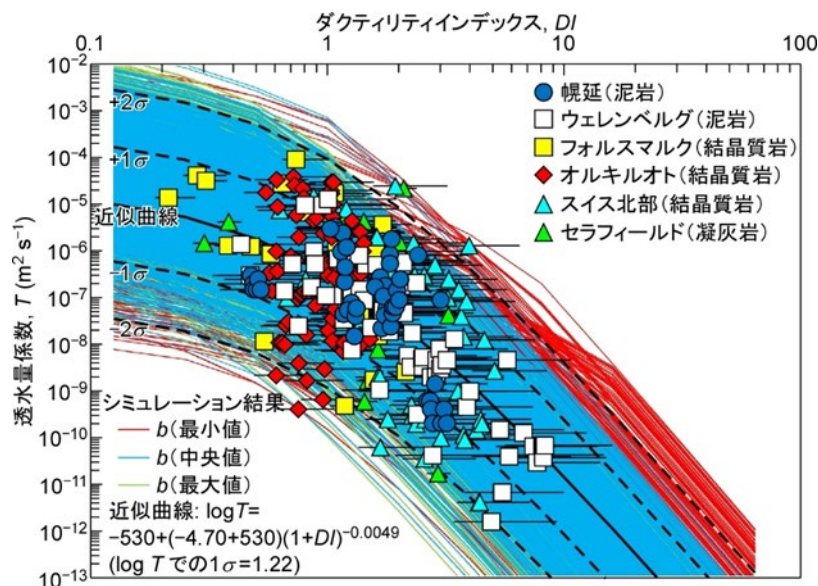


Ishii (2021, Eng Geol)

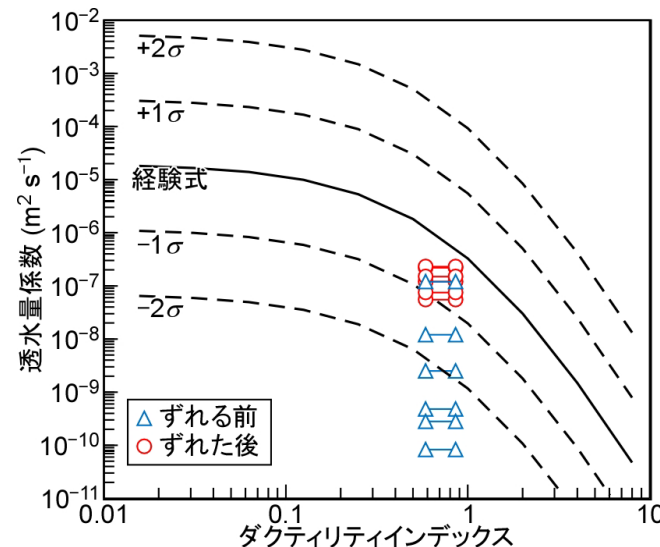
水圧擾乱(定圧段階注水)試験中、DIの低下とともにせん断変位が発生したが、断層の透水性は経験式のトレンドに概ね沿って増加  
⇒試験中に $E_0$ がほとんど変化していない

一度、 $E_0$ が数十  $\mu$  ~ 数ミリに達すると、せん断変位が発生してもせん断膨張が生じにくくなる( $E_0$ が増加しにくくなる)

# 断層中の水みちの局所的な透水性の上限



透水性とDIの関係



石英などの鉱物に充填された断層がずれた後に経験式の値の範囲まで透水性が増加

グリムゼル試験場の水圧擾乱試験結果 Ishii (2021, Eng Geol)

- 断層の局所的な透水性を垂直応力の効果により低い状態に保つためには非常に高いDIが必要(例えば $T < 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ で $DI > 4$ )
- 地下数百メートルの領域で想定されるDI(例えば $DI \leq 4$ )で断層の局所的な透水性を低く保つには鉱物/粘土による継続的な割れ目充填が必要
- 石英などの鉱物による充填の場合、断層がずれると充填が破壊され、経験式の値の範囲まで透水性が増加する可能性あり

# まとめ

## 1. 断層の局所的な透水性の上限を空間的に推定するモデルの構築と水圧擾乱試験によるモデルの検証

DIを用いて断層の局所的な透水性の上限を空間的に推定するための経験式を様々な岩種のボーリングデータから構築し、その経験式の物理的根拠や妥当性をBarton-Bandisのモデルを用いたシミュレーションと水圧擾乱試験により確認した。

- (1) 地下数百メートルで想定されるDI(例えば4以下)で断層の局所的な透水性が低い状態(例えば $T < 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ )を保つには垂直応力の効果だけでは不十分で、鉱物/粘土による継続的な割れ目充填が必要であること、
- (2) 石英などの鉱物による充填の場合、断層がずれると充填が破壊され、透水性が一定の上限値まで増加し得ること、などが分かった。

# 本日の内容

---

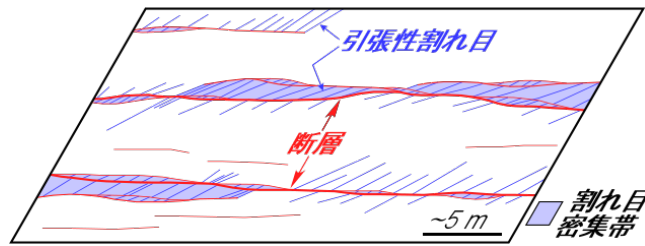
**1. 断層の局所的な透水性の上限を空間的に推定するモデルの構築と水圧擾乱試験によるモデルの検証**

**2. 断層の水理的な連結性を空間的に推定するモデルの構築と水圧擾乱試験によるモデルの検証**

# 断層の水理的連結性を支配するメカニズム

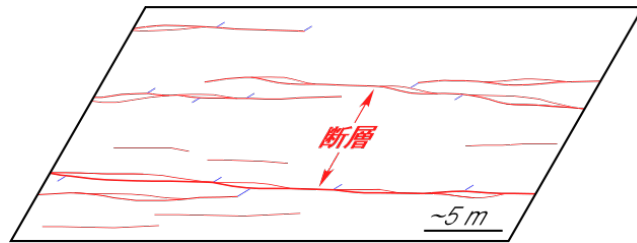
断層の局所的な透水性(隙間)が大きくても、断層の水理的連結性(隙間のつながり)が低ければ地層の有効透水係数は低い

断層の水理的連結性が高いケース



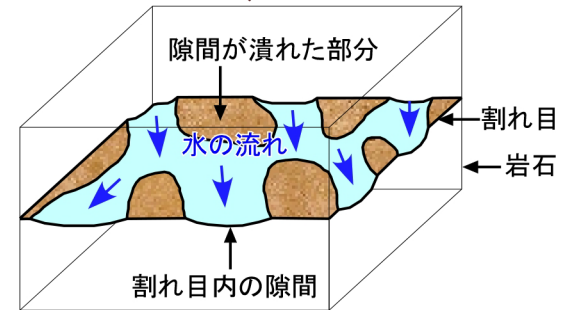
引張性割れ目が断層内の隙間をバイパス

断層の水理的連結性が低いケース

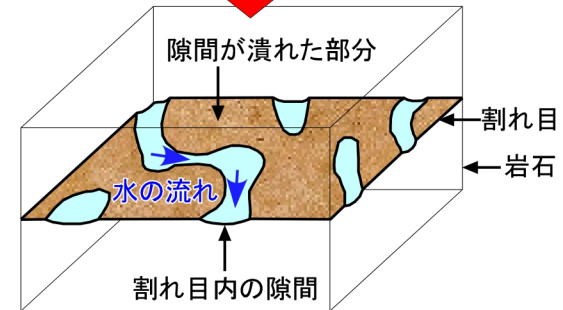


断層沿いの引張性割れ目の発達の程度が断層の水理的連結性を支配する可能性(本日の内容)

↓ DIが小さい



↓ DIが大きい



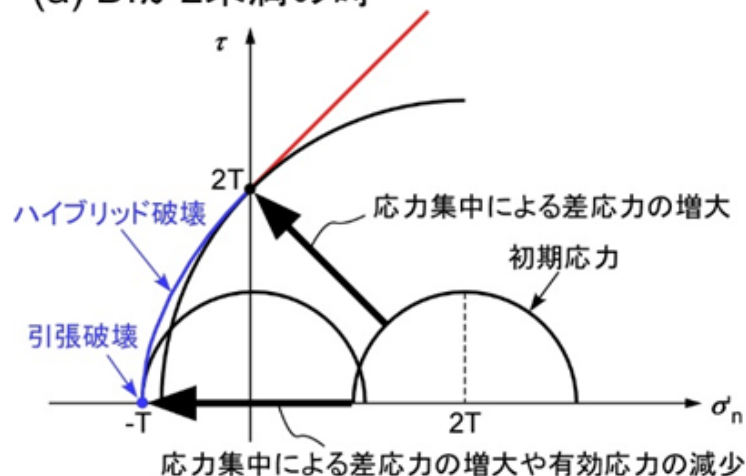
割れ目の弾力的な垂直変位に伴う流路面積の変化が水理的連結性を支配する可能性(検討中)

# 断層沿いの引張性割れ目の発達を支配するメカニズム

グリフィスクーロンの破壊規準を使用

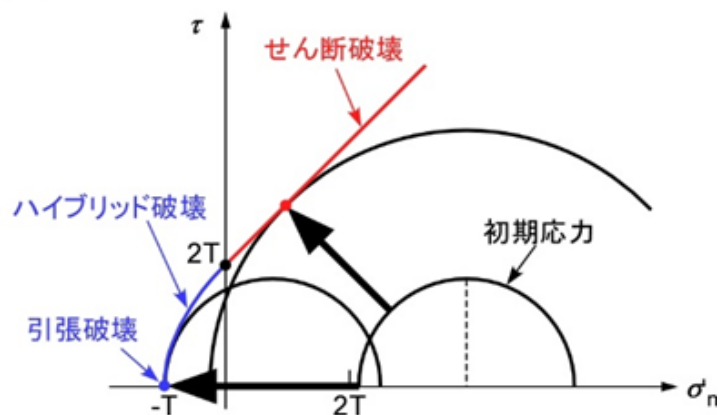
DIは引張強度で応力を標準化したモールの中心位置にも相当

(a) DIが2未満の時



断層運動に伴って引張／ハイブリッド割れ目がダメージゾーン亀裂として形成

(b) DIが2以上の時



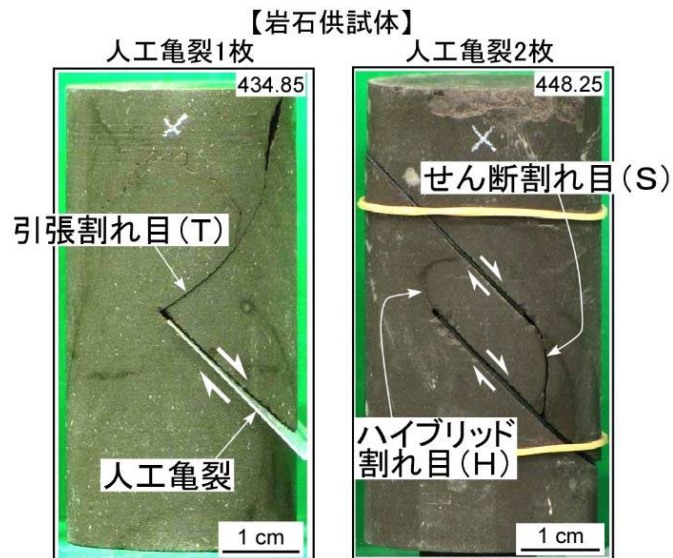
せん断割れ目の形成が引張／ハイブリッド割れ目の形成を抑制

Ishii (2016, J Geophys Res)

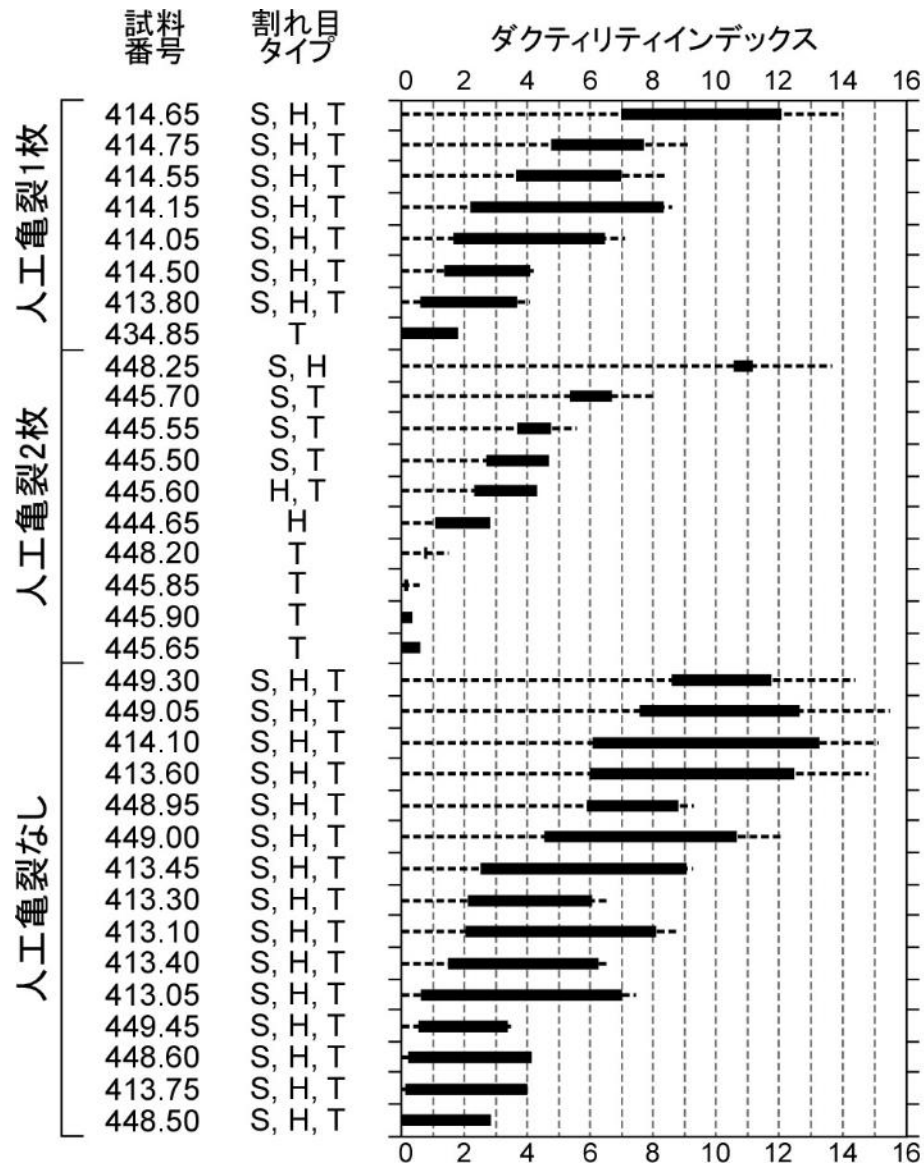
DI < 2だと断層沿いに引張性割れ目が発達しやすいが、DI  $\geq$  2だとせん断破壊と引張破壊の競合により、引張性割れ目の発達が抑制される



# 人工割れ目を用いた破壊実験

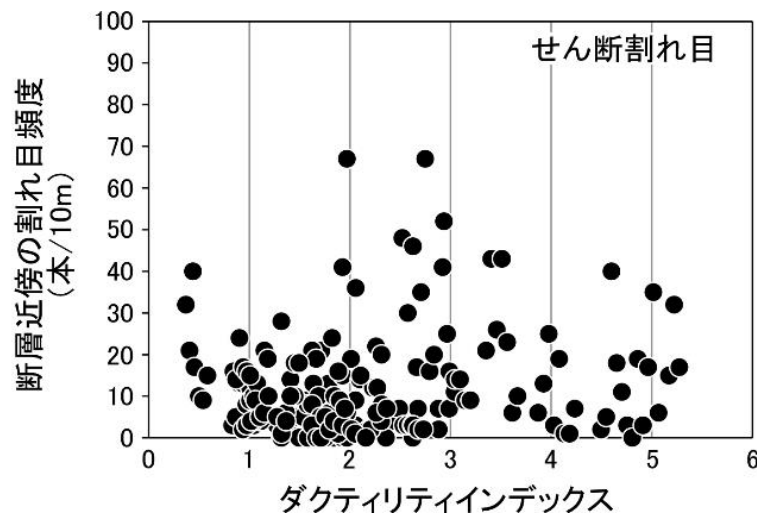
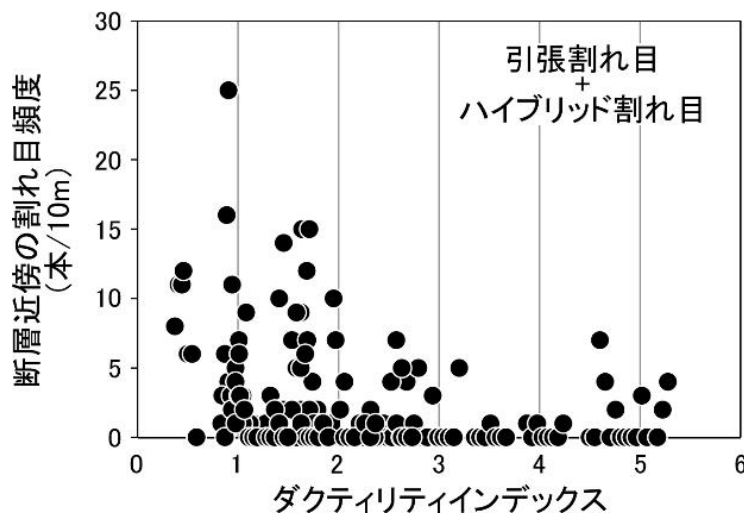


$DI < 2$ だと引張/ハイブリッド割れ目のみが形成され、 $DI \geq 2$ だとせん断割れ目の形成により引張性割れ目の形成が抑制されることを実験により確認



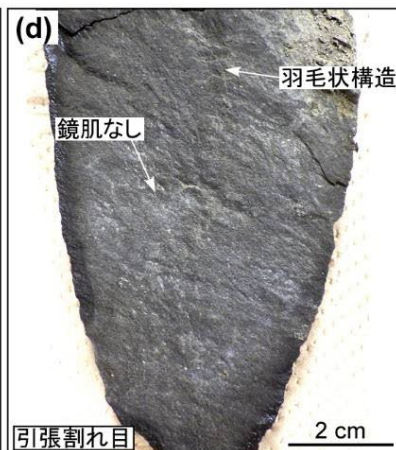
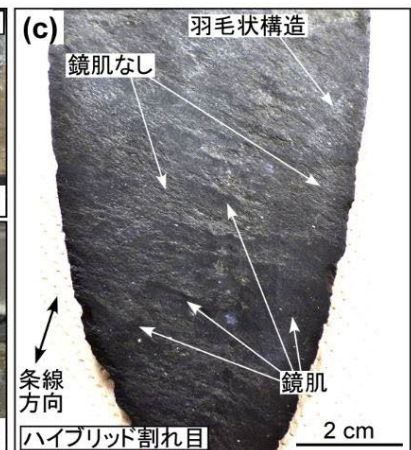
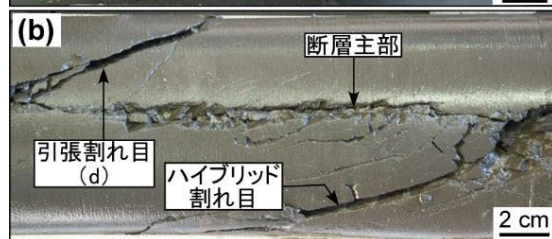
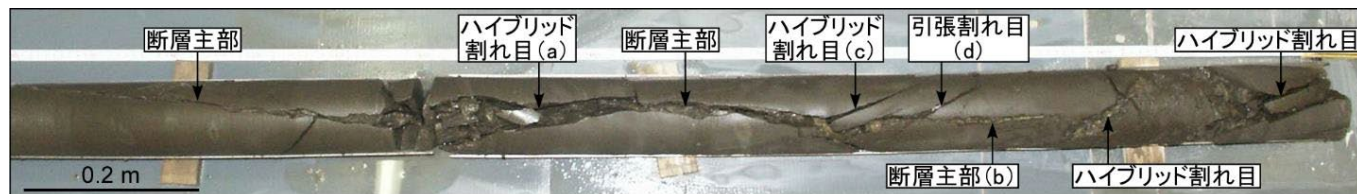


# 天然の引張性割れ目の発達状況との比較



DI < 2だと引張/ハイブリッド割れ目が断層近傍によく発達し、DI ≥ 2だとせん断割れ目が主に発達することを天然の割れ目で確認

DI ≥ 2の領域は断層の水理的連結性が低いと予想



# 透水試験結果を用いた検証

ボーリング孔における透水試験時の注水/揚水流量 $q$ と区間圧 $H$ の関係 (Barker, 1988, Water Resour Res)

$$q(t) = [\Delta H \cdot 4\pi^{1-\nu} K b^{3-n} / r^{2\nu}] \cdot \Gamma^{-1}(-\nu, u)$$

$$\nu = 1 - n/2$$

$$u = S_s r^2 / 4Kt$$

$K$ : 透水係数、 $b$ : 試験区間の大きさ、 $r$ : ボーリング孔半径、 $S_s$ : 比貯留係数、 $t$ : 時間

定流量試験で $u < 0.01$ の時、

$$\log dp/d \ln t \approx \log C + (1 - n/2) \log t$$

水圧の伝搬フロントの面積が試験区間から離れるにつれ

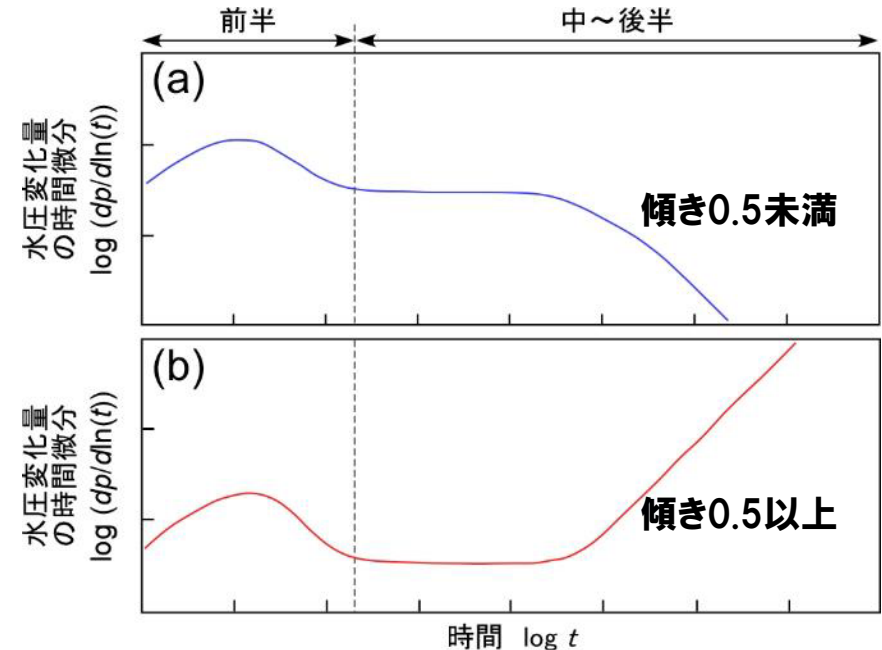
広がる場合( $n$ が1~3の時)

⇒右図の中~後半の傾きで0.5未満

狭まる場合( $n$ が0~1の時)

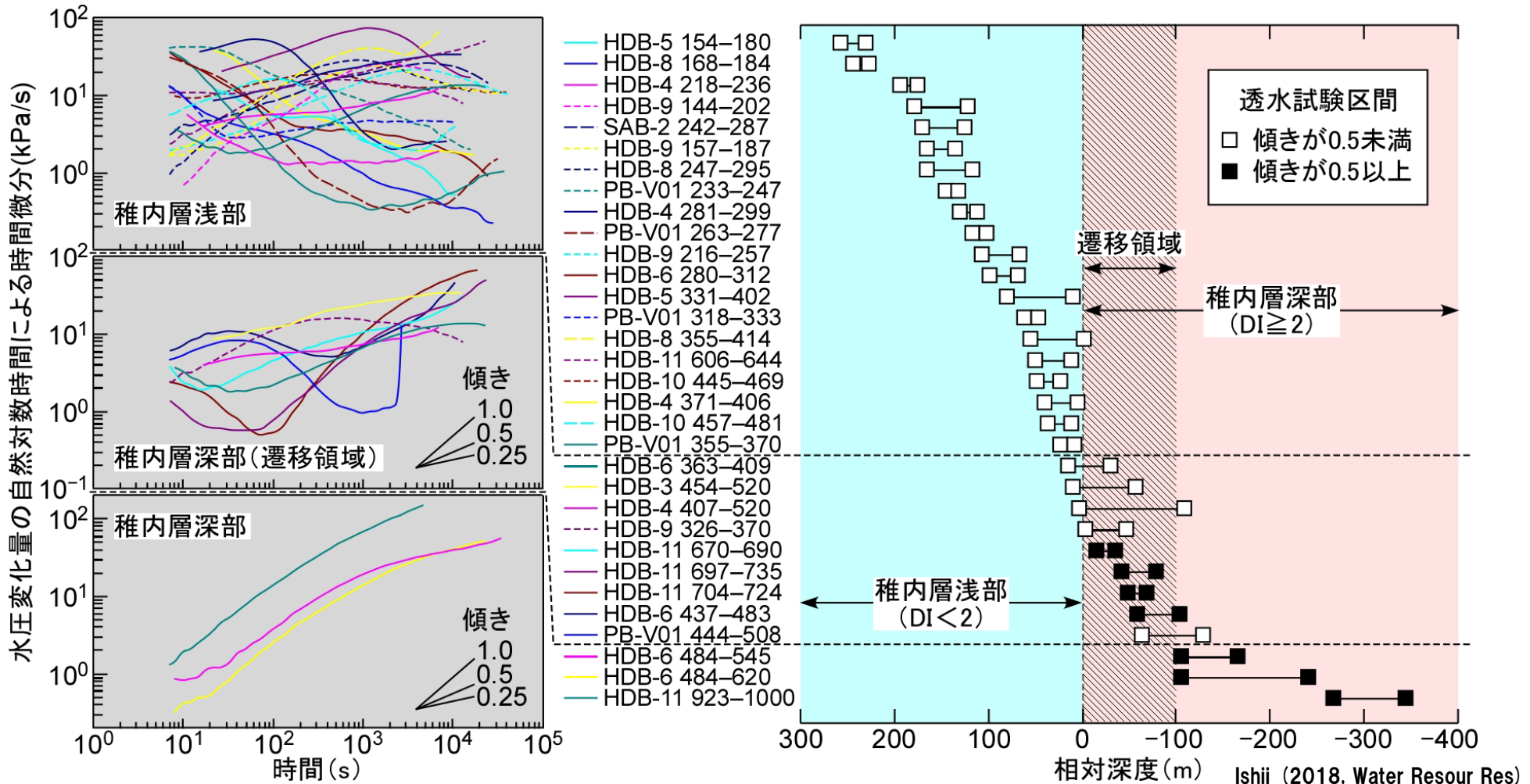
⇒右図の中~後半の傾きで0.5以上

## デリバティブプロット



透水試験から得られるデリバティブプロットで、傾きが0.5未満だと水理的連結性が高く(中~高程度)、0.5以上だと低い、と診断可能

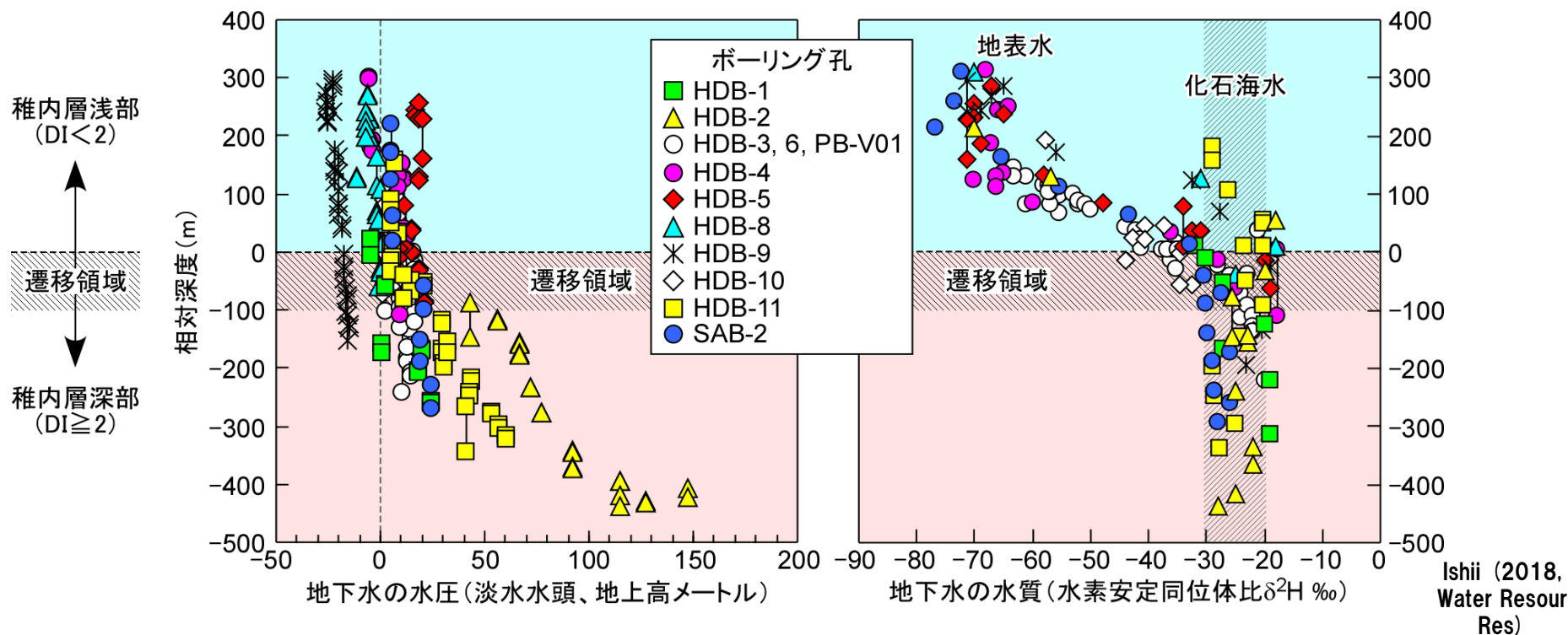
# 検証結果



**DI ≥ 2の領域は傾き0.5以上を示す区間が多く認められ、断層の水理的連結性が低いことが示唆される(ただし、DI < 2領域との境界付近に遷移領域が存在)**



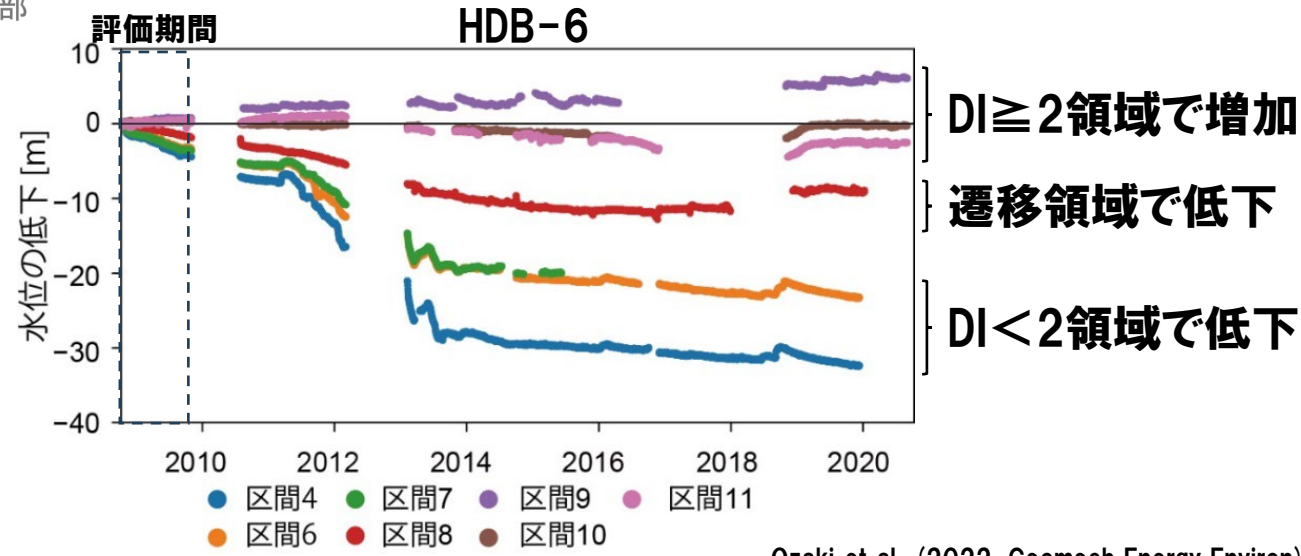
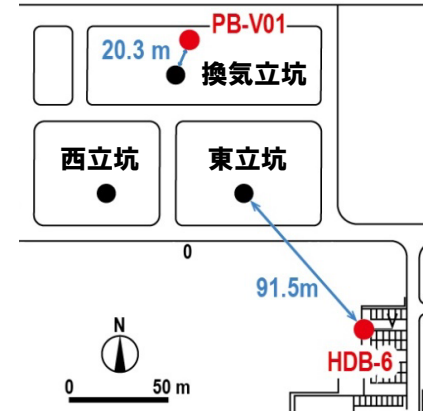
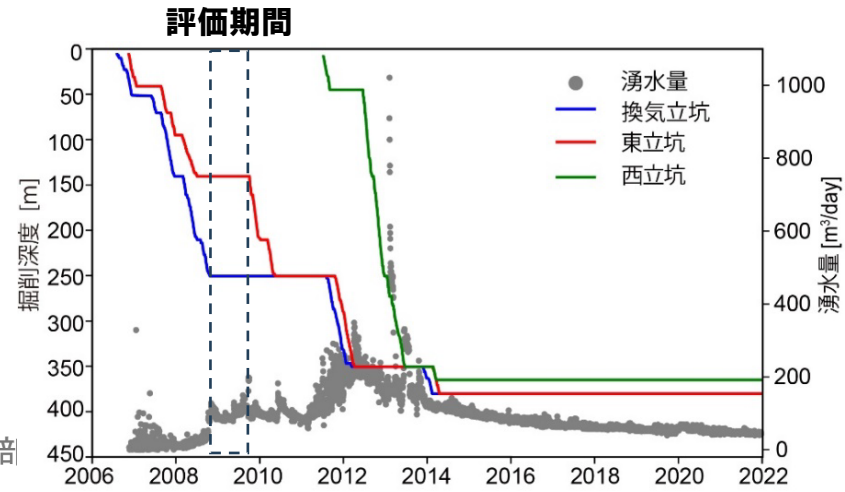
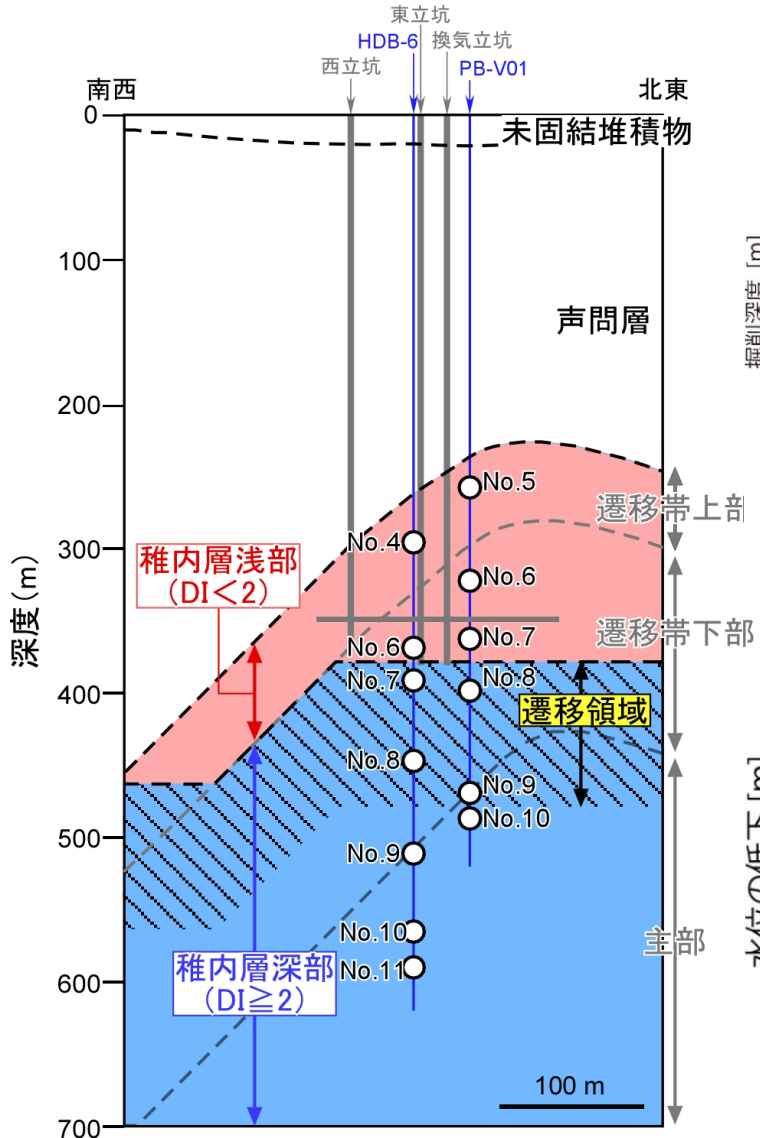
# 地下水の水圧/水質分布との比較



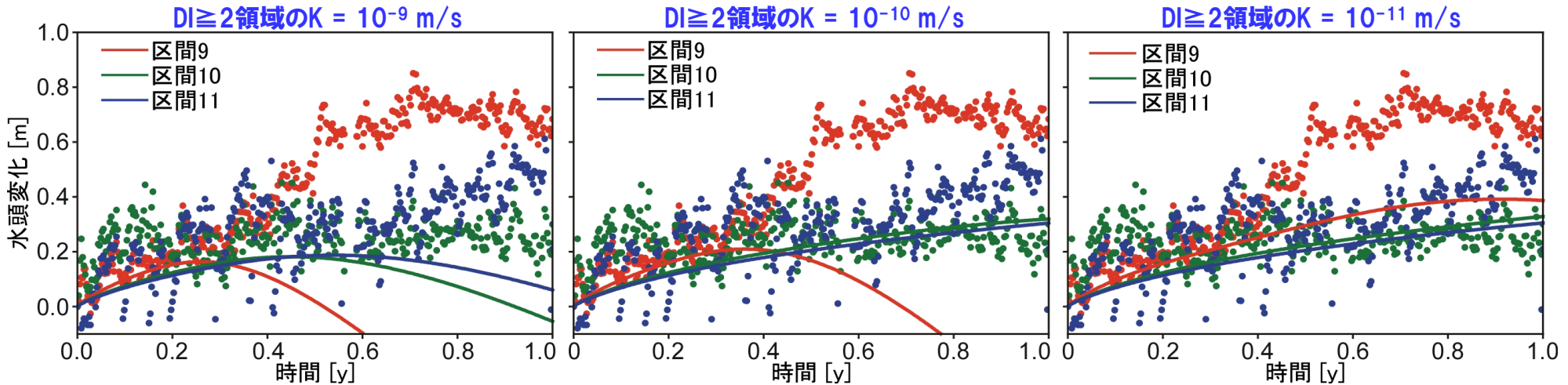
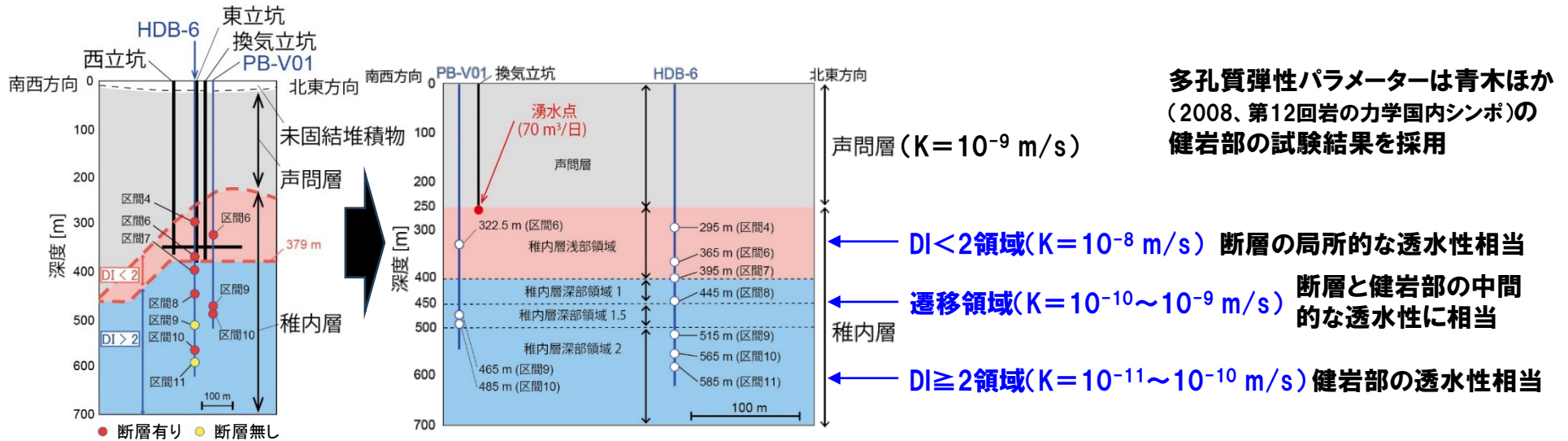
Ishii (2018, Water Resour Res)

**$DI \geq 2$ の領域(遷移領域外)は高い動水勾配が存在し、地層の巨視的な透水性が長期にわたって健岩部相当の低さである必要あり**(Neuzil, 2015, Geophys Res Lett)  
**⇒地表水の混入も認められず、推定される断層の水理的連結性と整合的**  
**⇒同様の結果はウェレンベルグの泥岩(Palfris層)でも確認**

# 地下施設の掘削に伴う周辺の水圧変化との比較



# 多孔質弾性変形を考慮した浸透流解析の実施



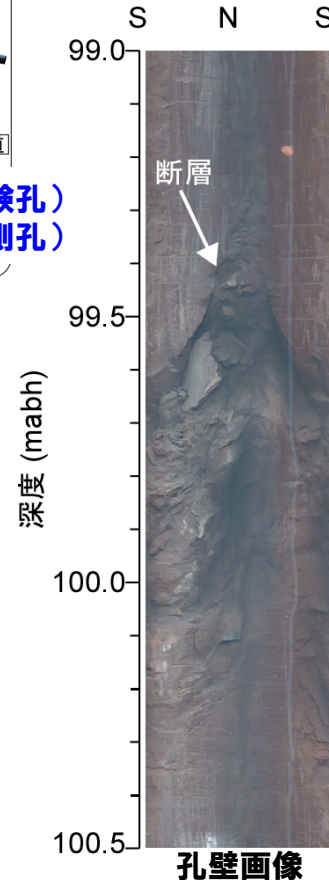
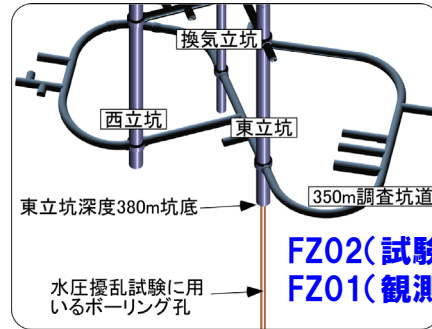
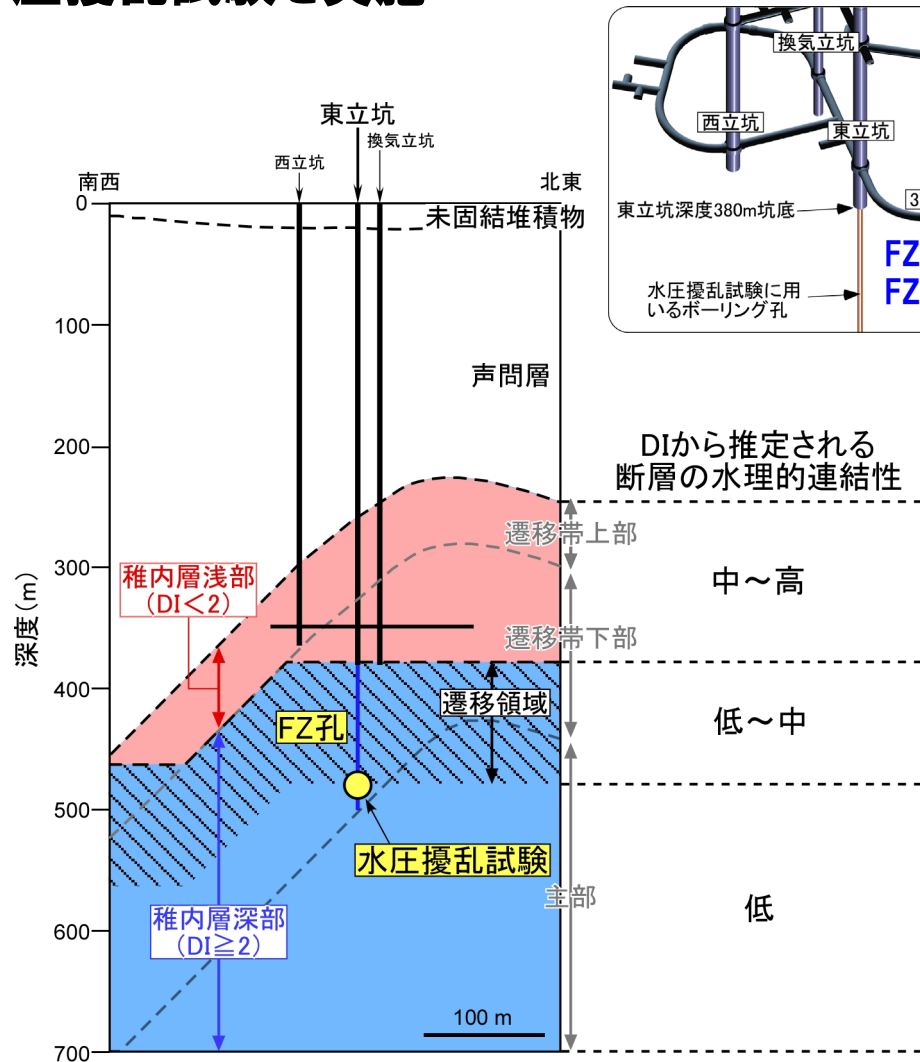
HDB-6孔のDI  $\geq 2$  領域の水圧観測結果とシミュレーション結果の比較例

Ozaki et al. (2022, Geomech Energy Environ)

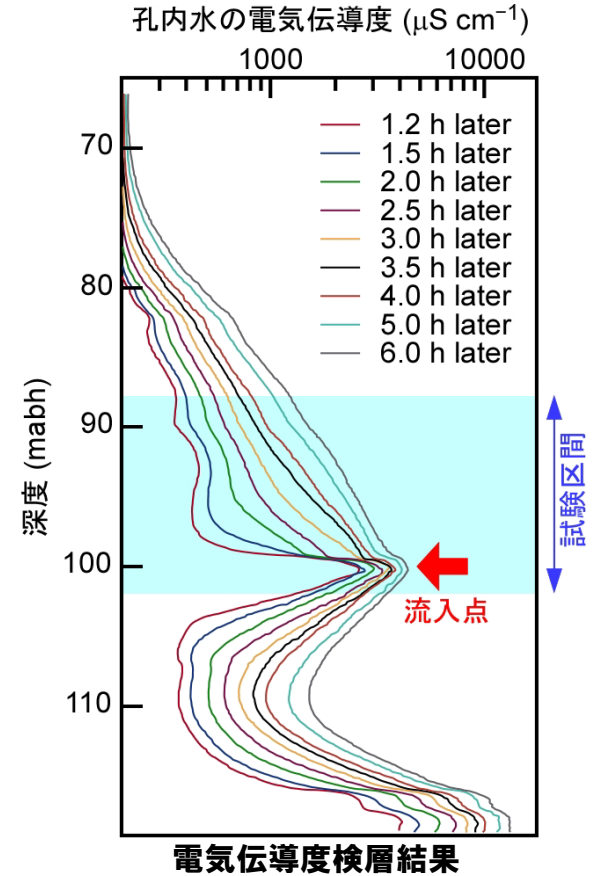
**地下施設周辺で圧縮変形が発生。DI  $\geq 2$  領域で健岩部相当の透水性を仮定すると同領域の継続的な水圧増加を再現可能⇒デリバティブプロットや水圧/水質分布と整合**

# 水圧擾乱試験の実施

断層がずれても、 $DI \geq 2$ 領域の断層の水理的連結性が低いままかを調べるために、水圧擾乱試験を実施

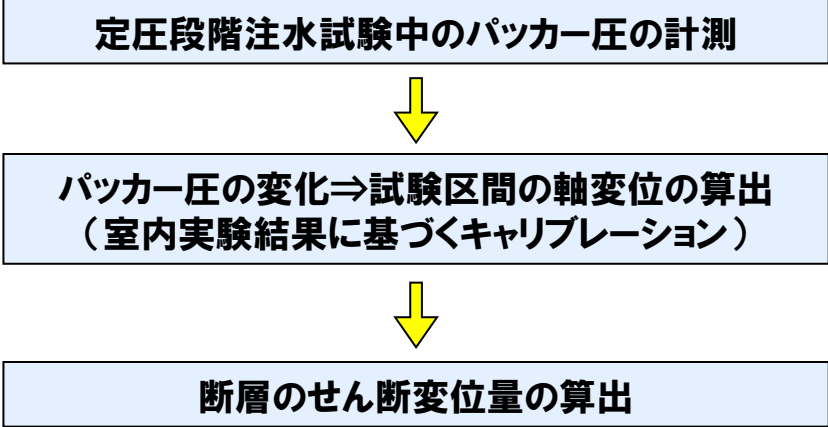


試験を実施したFZ02(試験孔)の断層

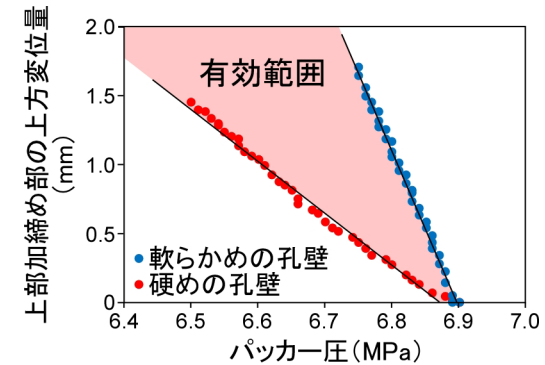




# 水圧擾乱試験の方法

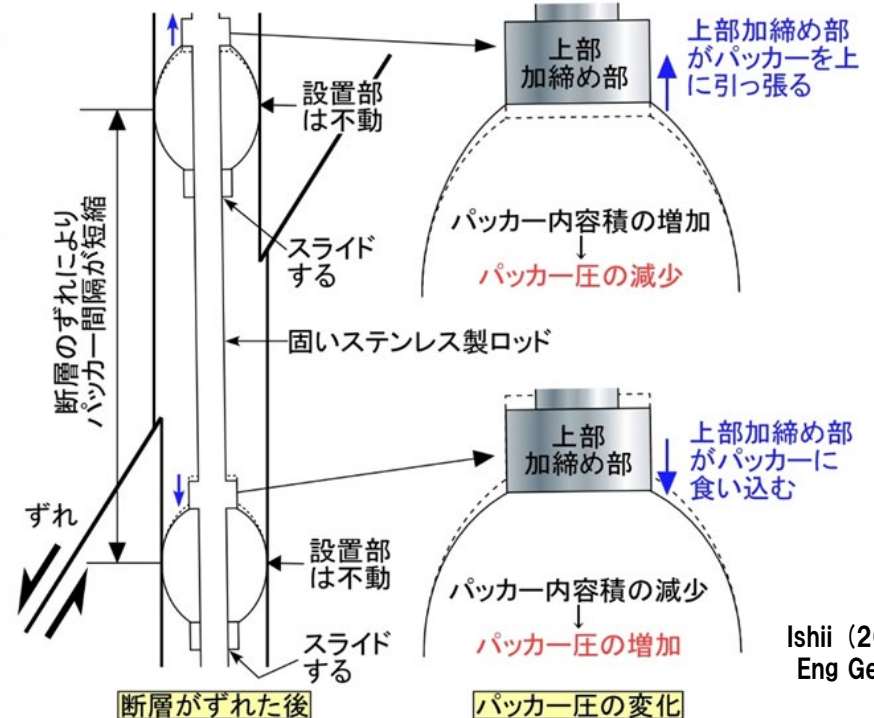
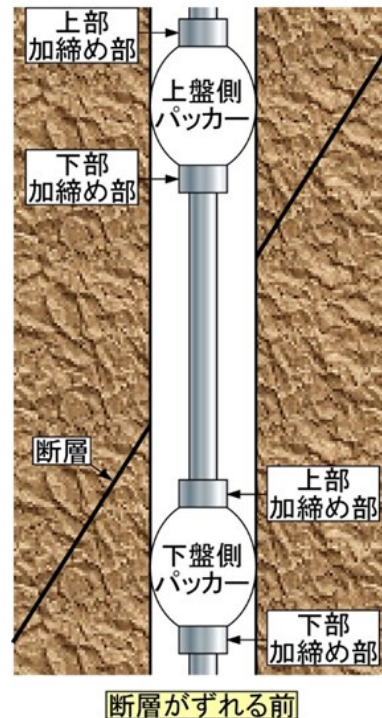


【室内実験】



上部加締め部の変位量とパッカー圧の関係を把握

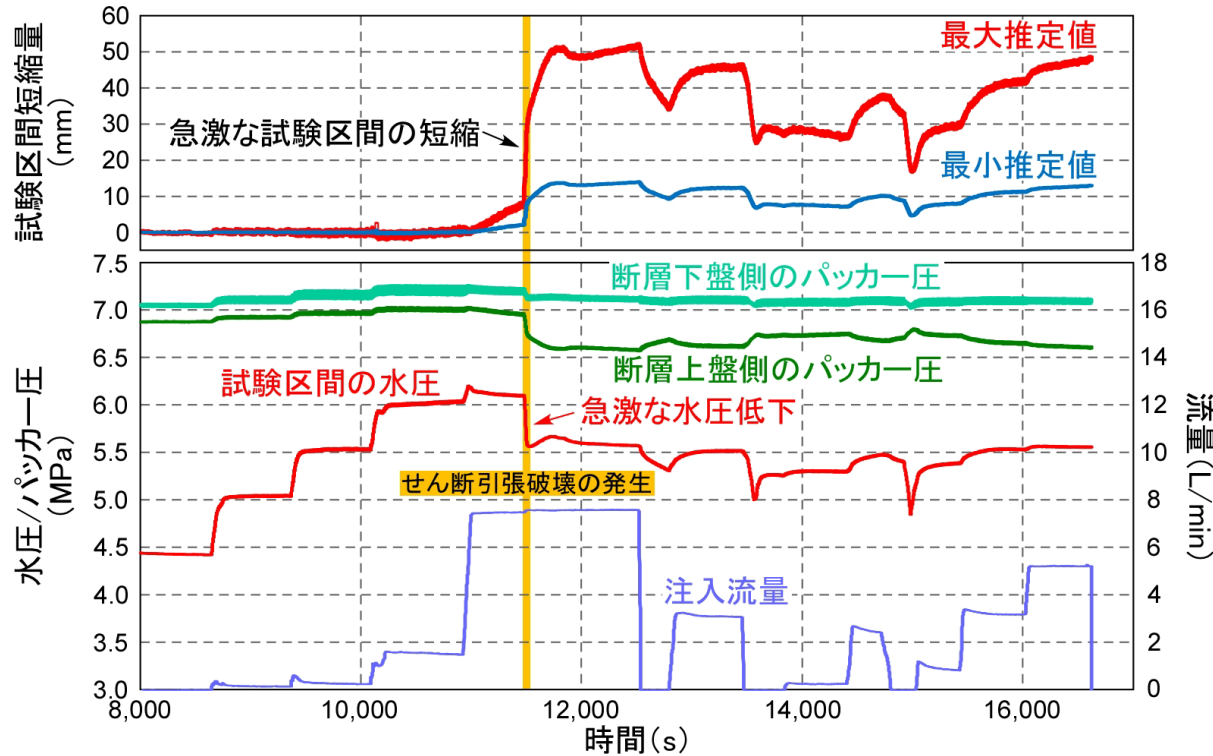
透水試験用のスライド式ダブルパッカーを用いて定圧段階注水試験を行い、注水中のパッカー圧の変化から試験区間の軸変位を算出  
⇒断層のずれを検出



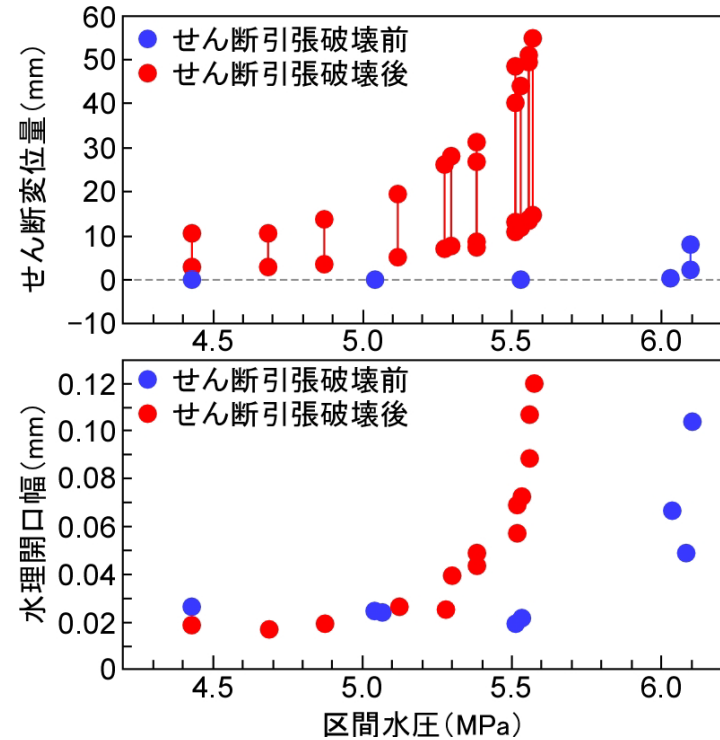
Ishii (2020, Eng Geol)

# 試験結果

高圧注水中に試験区間が急激に短縮( $10^{-4}$  m/s)  
⇒断層内でせん断引張破壊が発生



試験中の計測結果

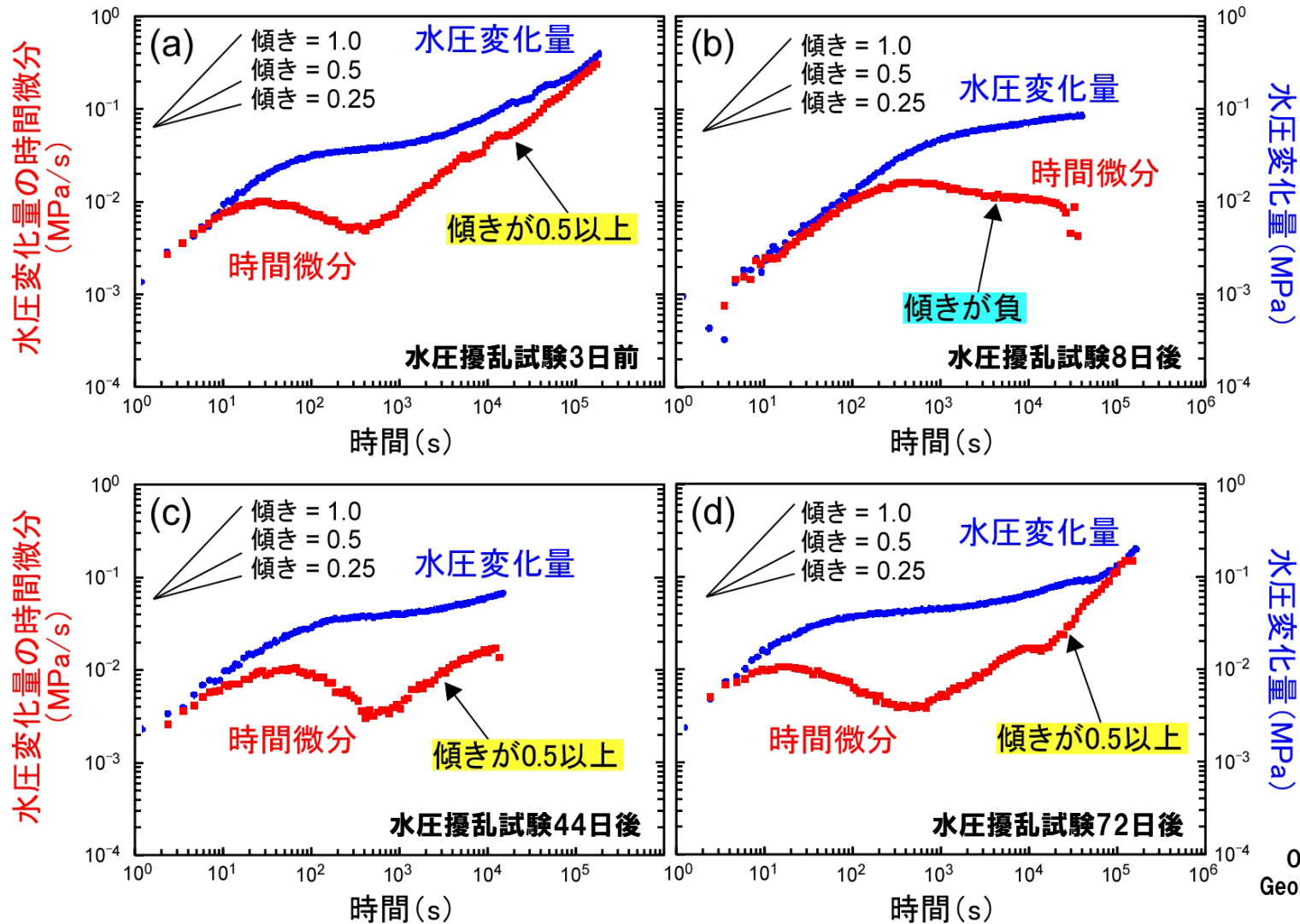


試験中のせん断変位/透水性と区間圧の関係

Ishii (2020, Eng Geol)

**水圧擾乱試験により断層内にせん断引張破壊が発生し、その後、数ミリのせん断変位が断層沿いに残留**

# 試験結果(デリバティブプロット)



Ohno & Ishii (2022, Geomech Energy Environ)

水圧擾乱試験によって断層がずれた後、断層の水理的連結性は一時的に高くなったが、その後、元の低い状態に戻った。

# まとめ

## 2. 断層の水理的な連結性を空間的に推定するモデルの構築と水圧擾乱試験によるモデルの検証

**DI $\geq$ 2の領域は断層沿いに断層内の隙間の連結を促す引張性割れ目が発達しにくいことをグリフィスクーロンの破壊規準、室内破壊実験および天然の割れ目観察より確認した。**

**DI $\geq$ 2領域は断層の水理的な連結性が低く、断層の局所的な透水性が高くても地層の巨視的な透水性が健岩部相当の低さを保ち得ることをボーリング調査における透水試験結果(デリバティブプロット)、地下水の水圧/水質分布、地下施設建設にともなう周辺の水圧変化、および水圧擾乱試験結果から確認した。**

# 本日の発表内容に係る論文リスト

## 1. DIと断層/割れ目の透水性の関係を示した論文

- E. Ishii, 2015, Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology: preliminary results. *J Geophys Res: Solid Earth*, 120, 2220–2241.
- E. Ishii, 2017, Estimation of the highest potential transmissivity of discrete shear fractures using the ductility index. *Int J Rock Mech Min Sci*, 100, 10–22.
- E. Ishii, 2017, Preliminary assessment of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones by core logging. *Eng Geol*, 221, 124–132.
- K. Aoyagi, E. Ishii, 2019, A method for estimating the highest potential hydraulic conductivity in the excavation damaged zone in mudstone. *Rock Mech Rock Eng*, 52, 385–401.
- E. Ishii, 2021, The highest potential transmissivities of fractures in fault zones: Reference values based on laboratory and in situ hydro-mechanical experimental data, *Eng Geol*, 294, 106369.

## 2. DIと断層/割れ目の水理的な連結性の関係を示した論文

- E. Ishii, 2016, Far-field stress dependency of the failure mode of damage-zone fractures in fault zones: Results from laboratory tests and field observations of siliceous mudstone. *J Geophys Res: Solid Earth*, 121, 70–91.
- E. Ishii, 2018, Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, *Water Resour Res*, 54, 3335–3356.
- A. Mochizuki, E. Ishii, 2022, Assessment of the level of activity of advective transport through fractures and faults in marine deposits by comparison between stable isotope compositions of fracture and pore waters, *Hydrogeol J*, 30, 813–827.
- Y. Ozaki, E. Ishii, K. Sugawara, 2022, Variation in fracture hydraulic connectivity with depth in mudstone: An analysis of poroelastic hydraulic response to excavation in the Horonobe URL, *Geomech Energy Environ*, 31, 100311.
- E. Ishii, 2023, Effects of flow dimension in faulted or fractured rock on natural reductions of inflow during excavation: a case study of the Horonobe Underground Research Laboratory site, Japan, *Hydrogeol J*, 31, 893–911.

## 3. 水圧擾乱試験の方法を示した論文

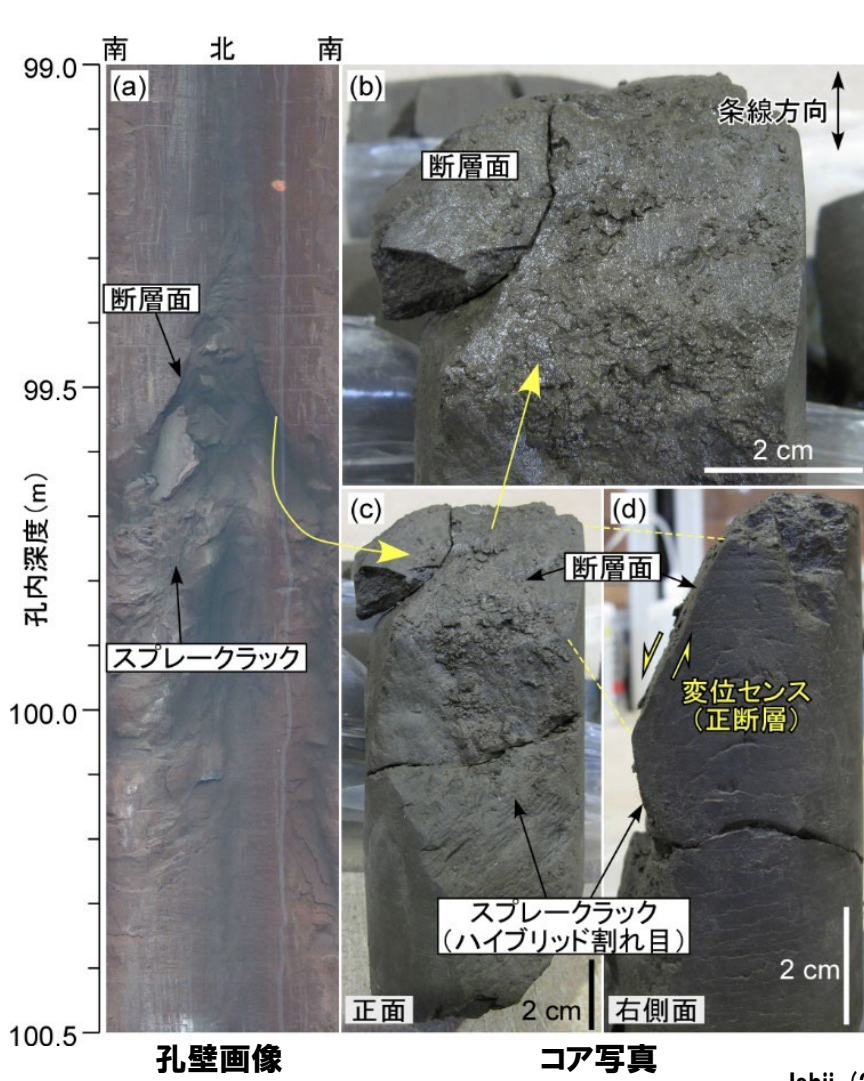
- E. Ishii, 2020, A conventional straddle-sliding-packer system as a borehole extensometer: Monitoring shear displacement of a fault during an injection test, *Eng Geol*, 275, 105748.
- H. Ohno, E. Ishii, 2022, Effect of fault activation on the hydraulic connectivity of faults in mudstone, *Geomech Energy Environ*, 31, 100317.

---

# 參考資料



# 水圧擾乱試験の力学的な影響範囲

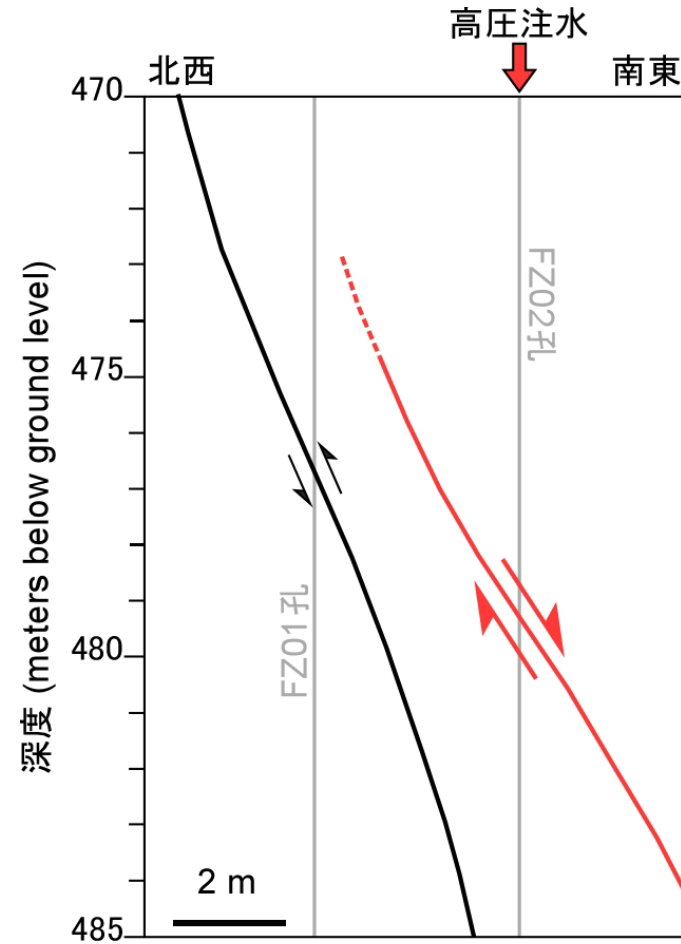


孔壁画像

コア写真

Ishii (2020, Eng Geol)

試験を実施したFZ02(試験孔)の断層(正断層)



FZ02(試験孔)注水時のFZ01(観測孔)における断層の連動

**試験区間の断層のせん断変位時に  
4.5 m離れた観測区間の断層も逆  
の変位センスで連動**