

幌延深地層研究計画に関する 令和6年度の成果及び令和7年度の計画

(2) 必須の課題のうち令和6年度に取りまとめる課題

3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

令和7年3月11日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
幌延深地層研究センター

解析条件などの詳細説明箇所には、
補足資料 と付記しています。

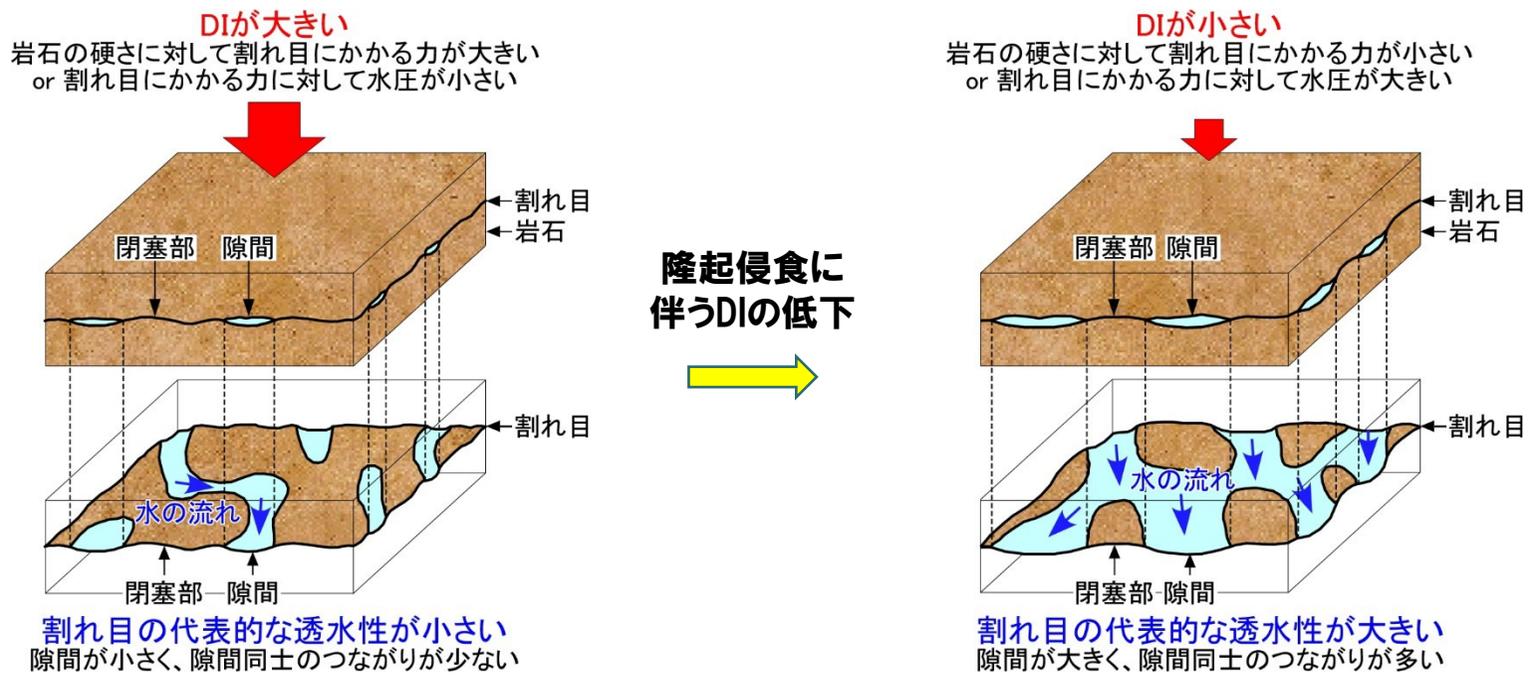
3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

【第4期中長期計画 目的】

地殻変動が地層の透水性に与える影響を推測するため、ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験と、その結果に基づく隆起侵食の影響を含めた透水性評価、断層の力学的な安定性評価の手法を整備

【令和6年度の計画】

- 断層/割れ目の水理学的連結性とDIの関係や断層の力学的な安定性に関する検討
- これまでの成果の取りまとめ

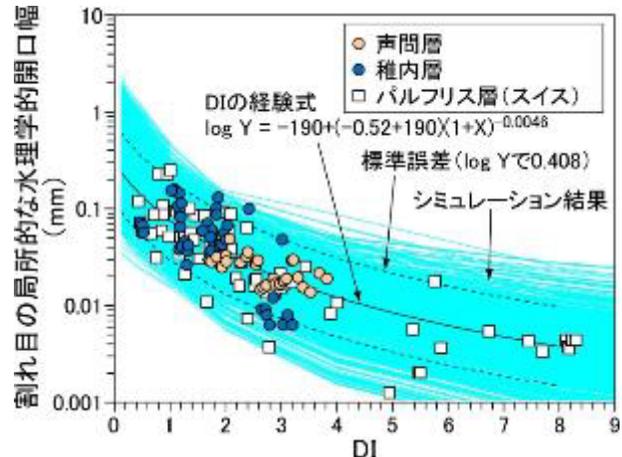


DI*と割れ目の代表的な透水性の関係

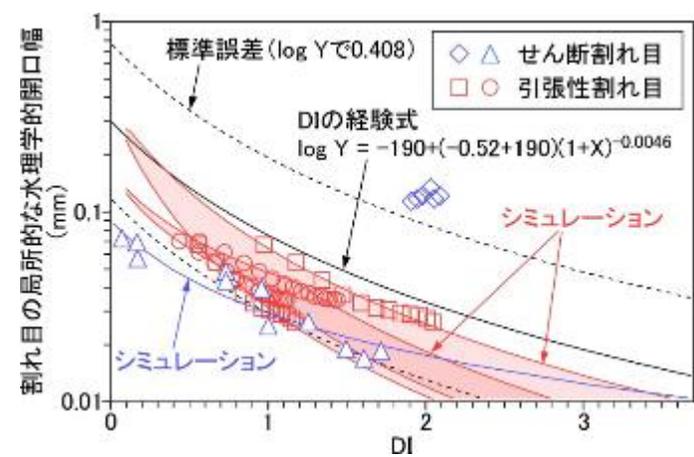
*DI(ダクティリティインデックス): 岩石にかかる力を岩石の引張り強さで割ったもの

3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

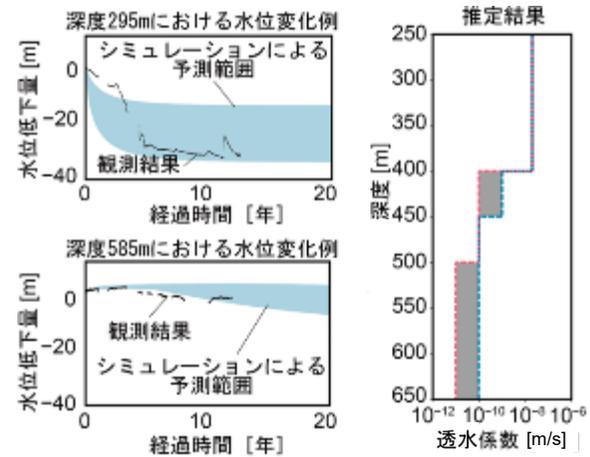
【成果取りまとめ】水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備



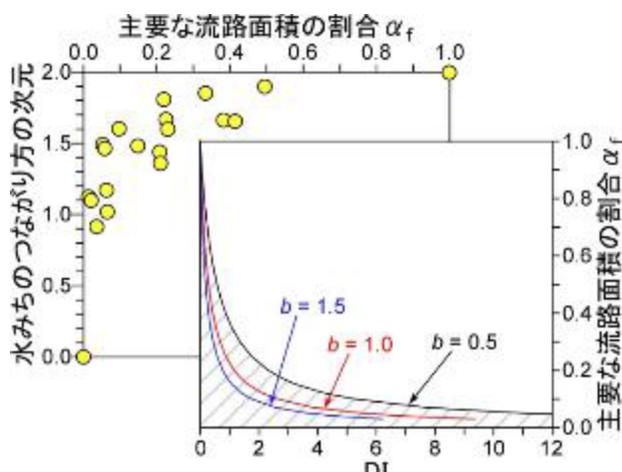
割れ目内の隙間の大きさとDIの関係の構築とシミュレーションによる検証



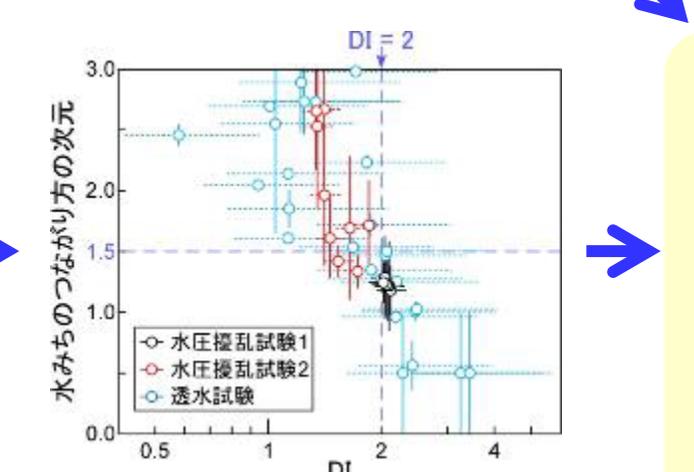
稚内層における割れ目を対象とした水圧擾乱試験による検証



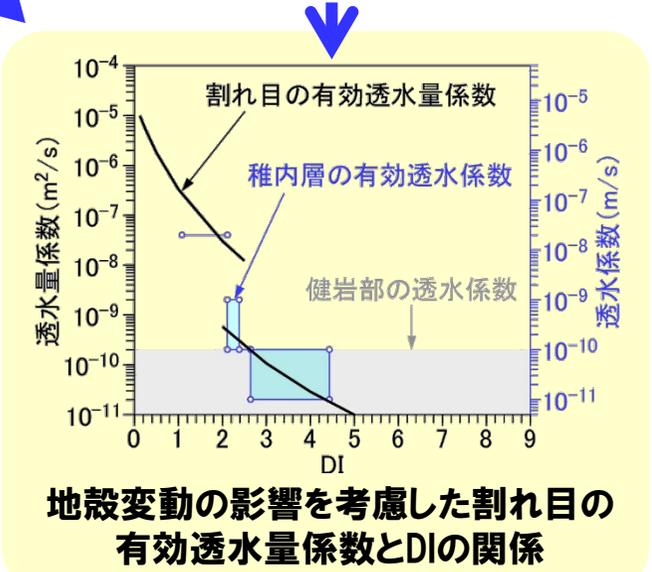
地下施設周辺の水圧変化に基づく稚内層の有効透水係数の推定



仮想透水試験による割れ目内の隙間のつながり具合とDIの関係



稚内層における断層帯を対象とした透水試験と水圧擾乱試験による検証

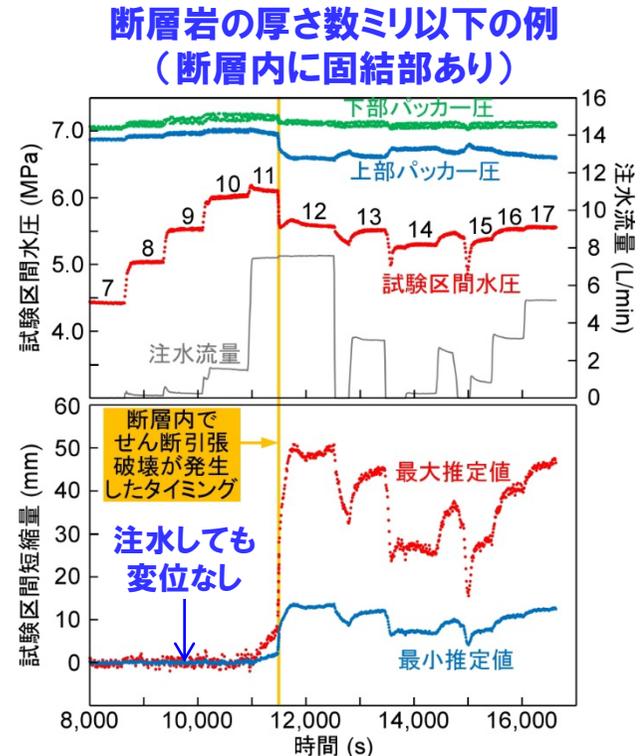
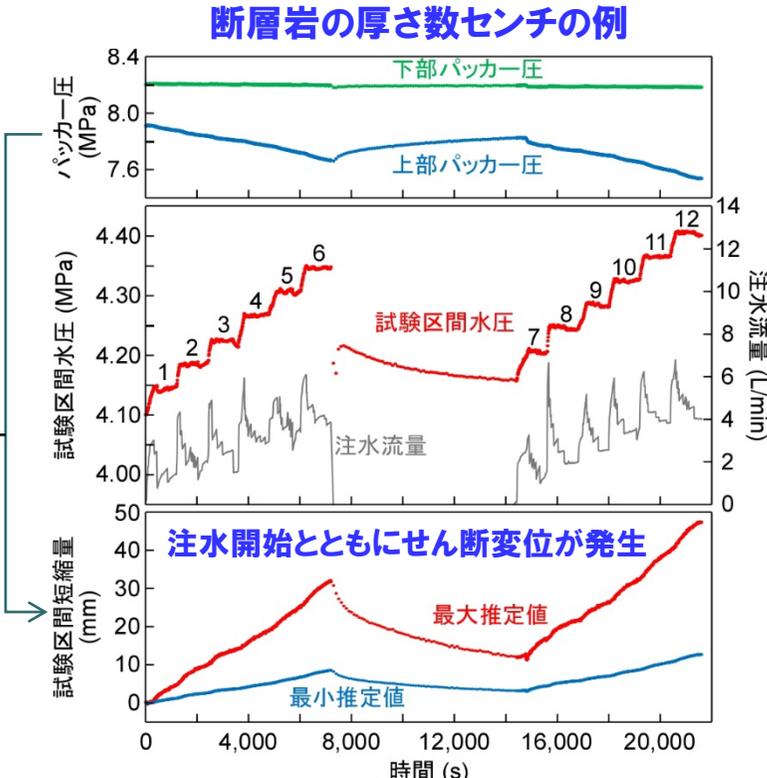
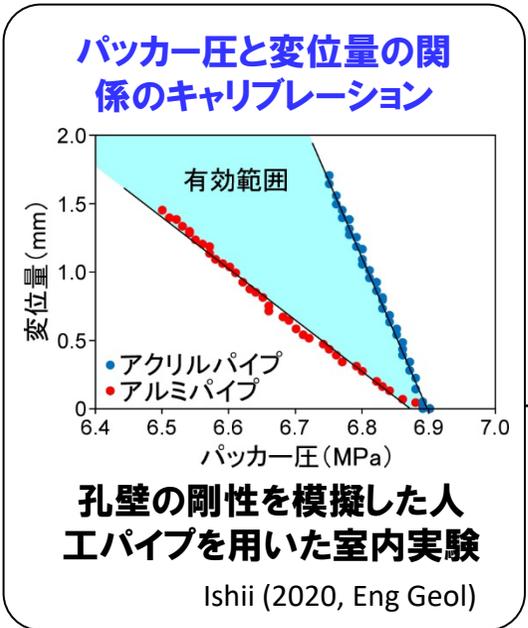


地殻変動の影響を考慮した割れ目の有効透水量係数とDIの関係

3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

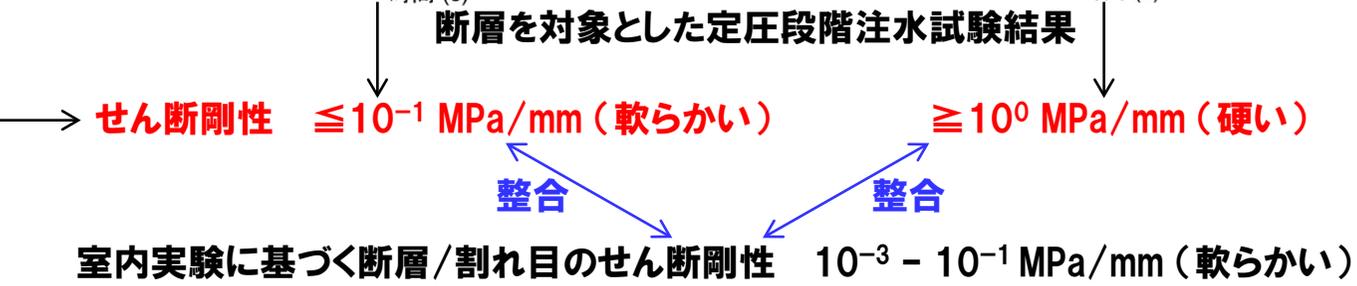
【成果取りまとめ】水圧擾乱試験による断層の力学的な安定性の評価手法の整備

水圧擾乱試験(室内実験+原位置透水試験)により断層のせん断剛性を原位置で計測できることを確認



試験中の断層のせん断変位に基づいて推定した応力場 (MPa)

σ_V	σ_H	σ_h
7.6	6.1-6.9	5.3



目次

1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備

1-1. 割れ目内の隙間の大きさとDIの関係

1-2. 割れ目内の隙間のつながり具合とDIの関係

1-3. 割れ目の代表的な透水性とDIの関係

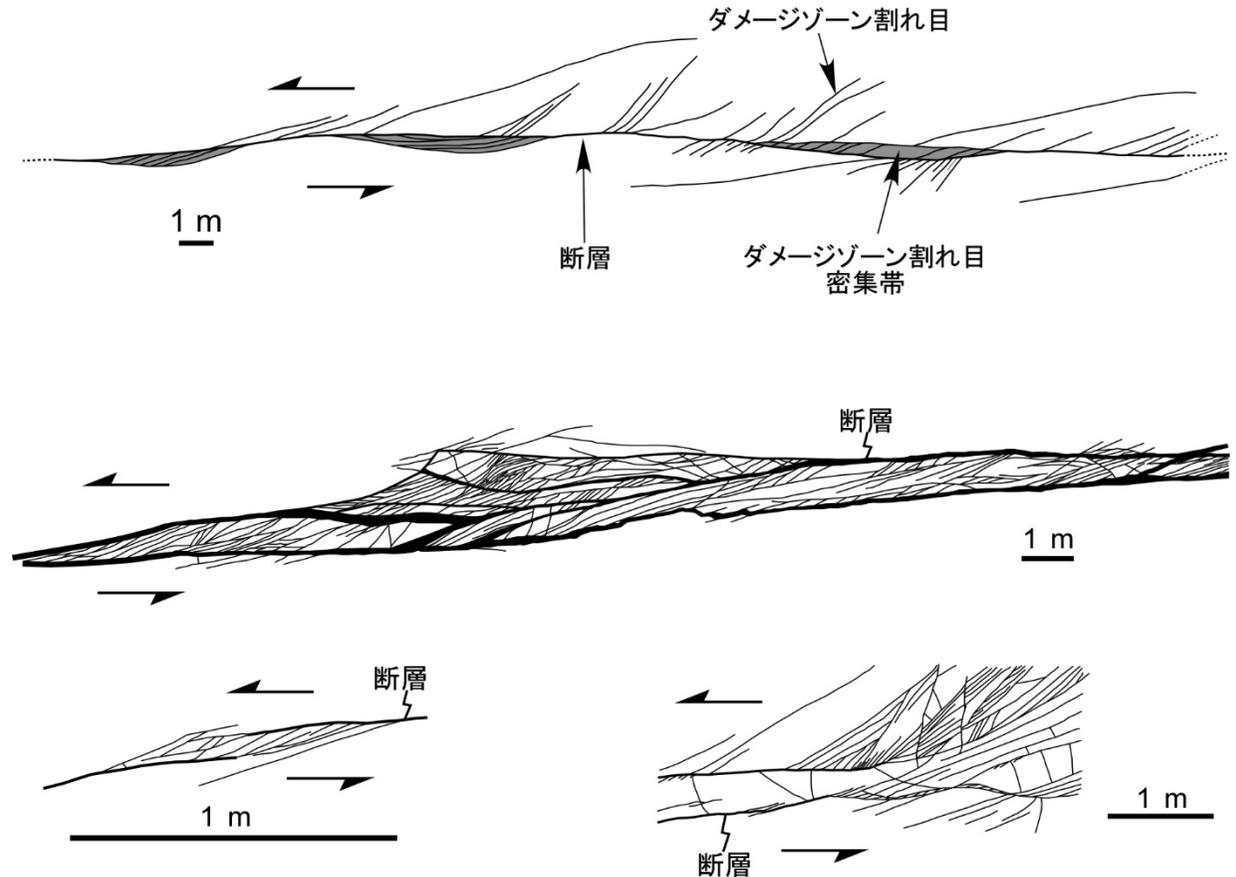
2. 水圧擾乱試験による断層の力学的な安定性の評価手法の整備

1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備

1-1. 割れ目内の隙間の大きさとDIの関係

【用語の定義】

- 断層 = 断層岩を伴う割れ目
- 断層は断層帯を伴う
- 断層帯は割れ目の集合体
- 割れ目の透水性が断層帯の透水性を支配

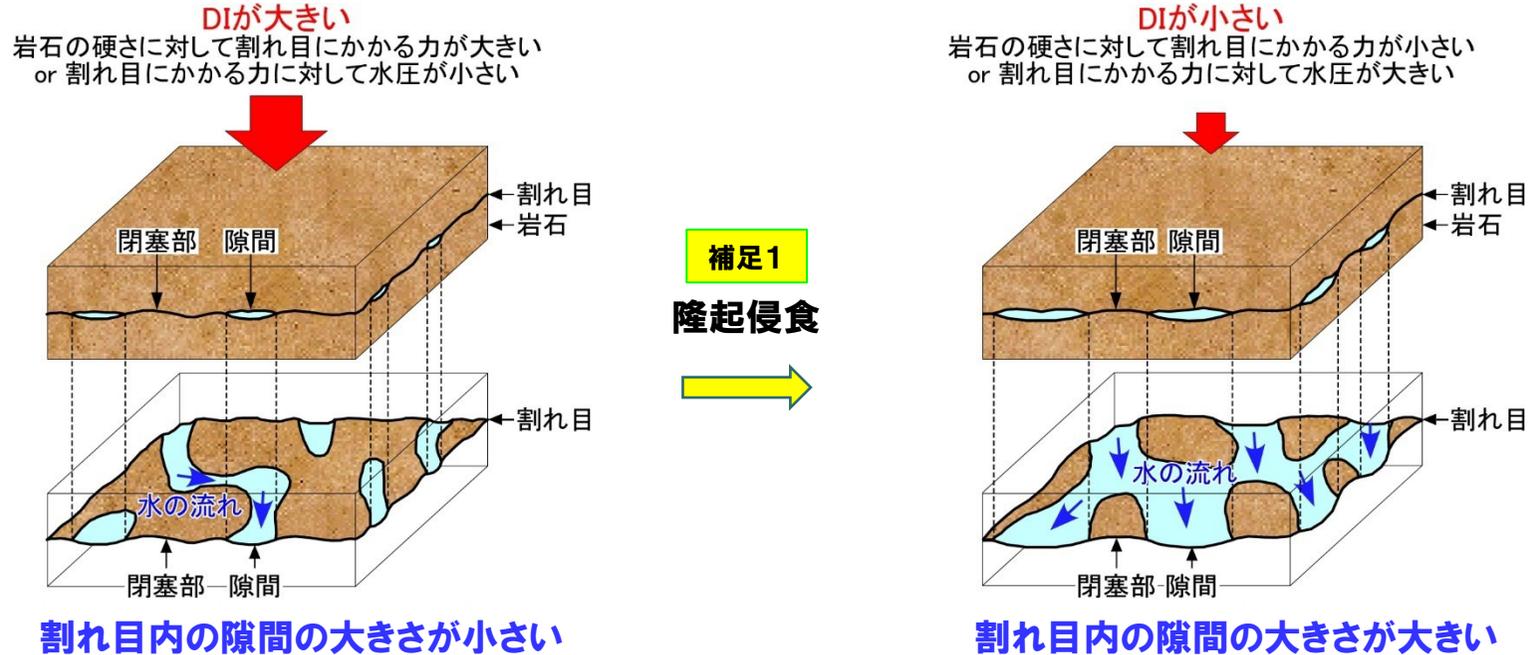


稚内層中の断層のスケッチ(29)

1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備

1-1. 割れ目内の隙間の大きさとDIの関係

【作業仮説】



割れ目内の隙間の大きさ(=局所的な水理学的開口幅)とDIの関係⁽¹³⁾

$$T = ge^3 / 12\nu$$

T 透水量係数 g 重力加速度 e 水理学的開口幅 ν 動粘性

岩石の硬さに対して割れ目にかかる力が小さいほど、割れ目の局所的な水理学的開口幅は大きくなる

1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備

1-1. 割れ目内の隙間の大きさとDIの関係

【バートン・バンディスの改良モデル⁽²⁾】

水理学的開口幅 $e = JRC_0^{2.5} / (E/e)^2$

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

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

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

$\sigma'_n = b\sigma'_m$

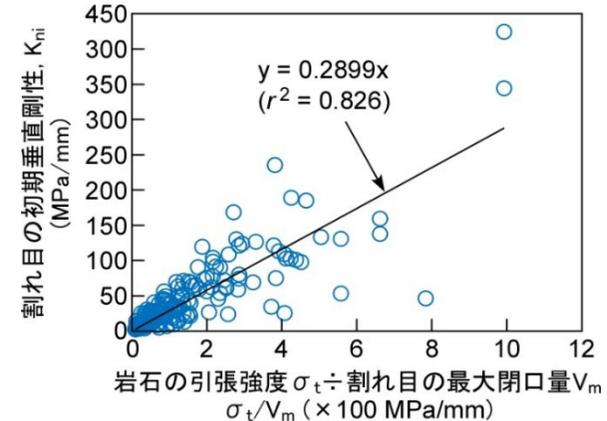
$E = E_0(1 + b\sigma'_m/0.2899\sigma_t)^{-1}$

$DI = \sigma'_m/\sigma_t$ 補足2

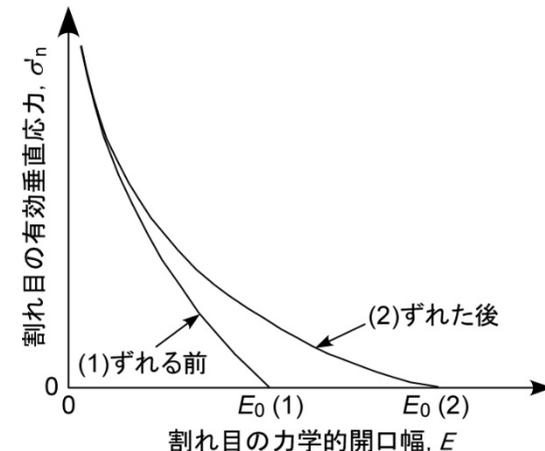
平均有効応力÷岩石の引張強度
空間分布の推定が可能

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

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



Bandis (1980, D論)の室内実験データ⁽²⁾
 K_{ni} と σ_t/V_m が相関



割れ目の開口に関するモデル⁽²⁾

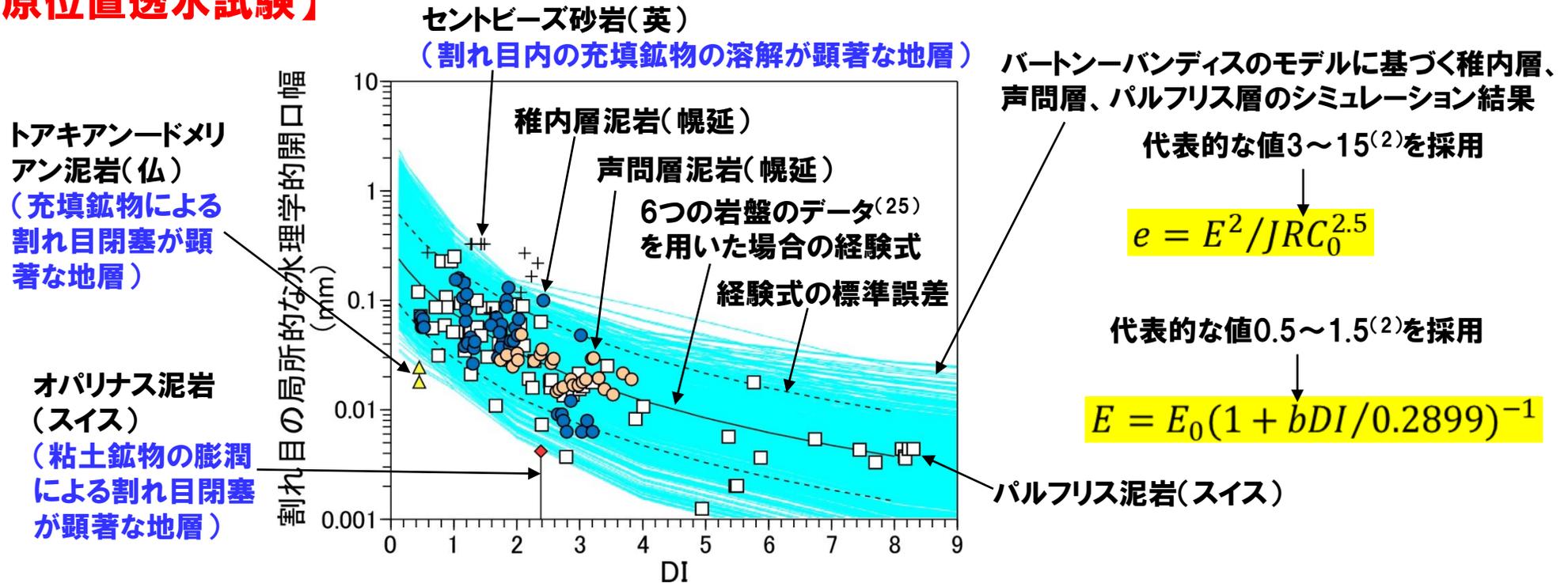
割れ目がずれるとせん断膨張により E_0 が増加

割れ目の局所的な水理学的開口幅は、DI(平均有効応力÷岩石の引張強度)、 JRC_0 (割れ目面の粗さ)、 E_0 (割れ目の初期開口幅)、 b (割れ目の方向性)に支配される

1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備

1-1. 割れ目内の隙間の大きさとDIの関係

【原位置透水試験】



断層帯やせん断割れ目の原位置試験結果(シンボル)とシミュレーション結果(青線)⁽²⁾

DIの経験式⁽²⁾ $\log_{10} e = \log_{10} e_r + (\log_{10} e_s - \log_{10} e_r)(1 + DI)^{-\beta}$

e 水理開口幅 e_r e の下限値(-190) e_s e の上限値(-0.52) β 係数(-0.0046)

補足3

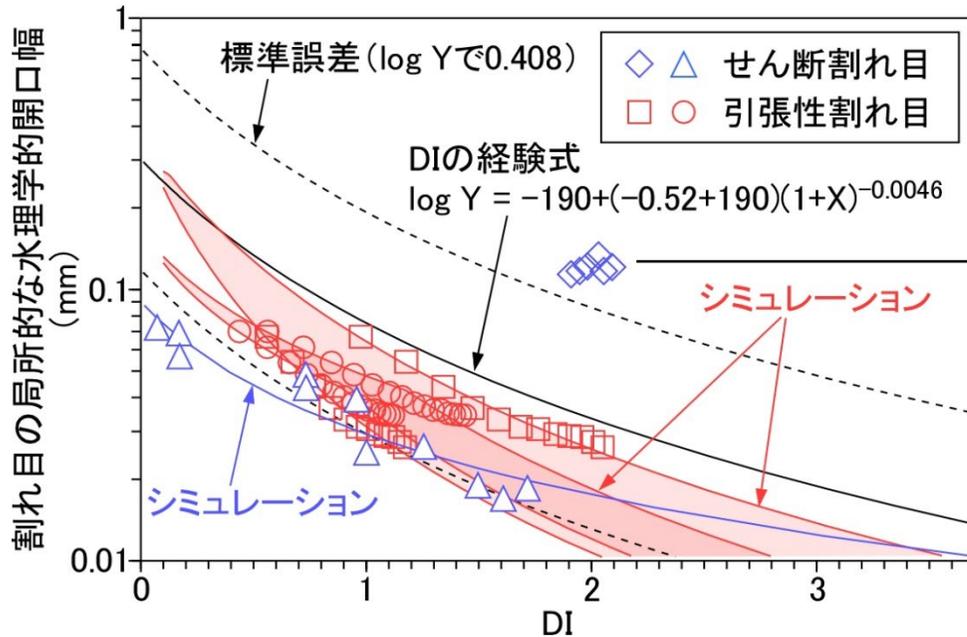
赤字は6つの岩盤のデータ⁽²⁵⁾に基づく値

粘土鉱物の膨潤や充填鉱物の影響が限定的な地層中の割れ目は局所的な水理的開口幅とDIの間に一定の関係が認められ、 Barton-Bandisのモデルで再現可能

1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備

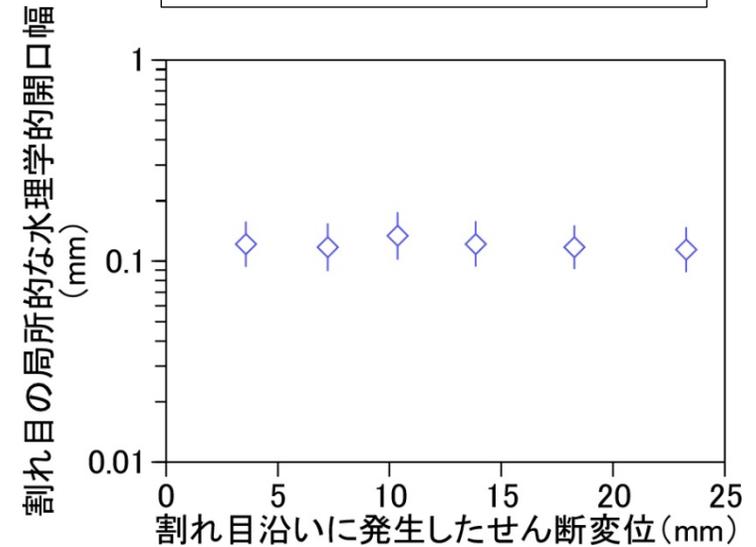
1-1. 割れ目内の隙間の大きさとDIの関係

【水圧擾乱試験/定圧段階注水試験】



稚内層中のせん断割れ目の水圧擾乱試験結果、引張性割れ目の定圧段階注水試験結果、およびシミュレーション結果^(1~3, 9)
 DIを変化させるとDIとの関係に従って開口幅が可逆的に変化

水圧擾乱試験A:スライド23参照



稚内層中のせん断割れ目の水圧擾乱試験結果^(9, 11, 41)
 せん断変位が水理学的開口幅に与える影響は小

隆起侵食やせん断変位が発生しても割れ目の局所的な水理学的開口幅はDIとの関係により推定可能で、その推定は水圧擾乱試験/定圧段階注水試験により検証可能

目次

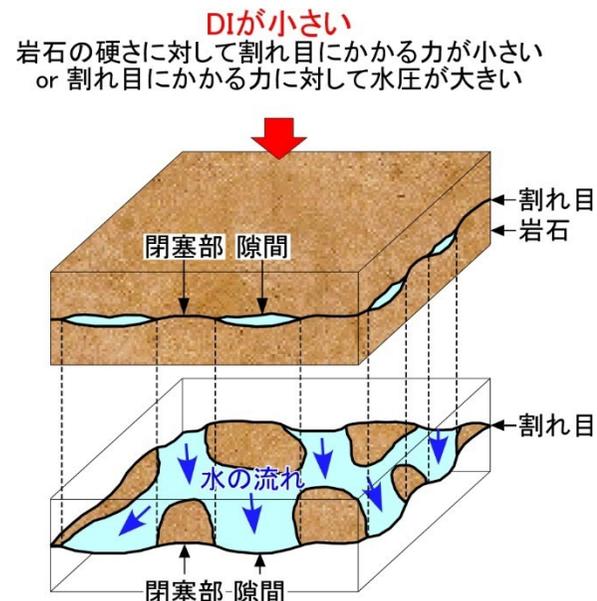
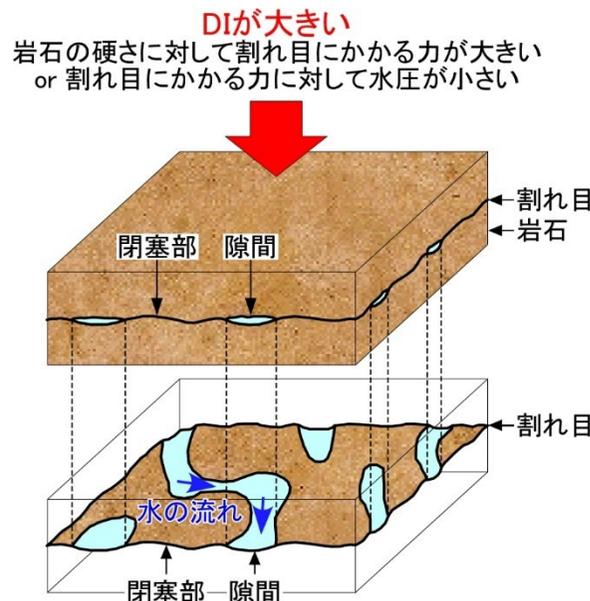
1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備
 - 1-1. 割れ目内の隙間の大きさとDIの関係
 - 1-2. 割れ目内の隙間のつながり具合とDIの関係
 - 1-3. 割れ目の代表的な透水性とDIの関係

2. 水圧擾乱試験による断層の力学的な安定性の評価手法の整備

1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備

1-2. 割れ目内の隙間のつながり具合とDIの関係

【作業仮説】



隆起侵食



割れ目内の隙間のつながりが少ない
(水みちのつながり方の次元が1に近い)

割れ目内の隙間のつながりが多い
(水みちのつながり方の次元が2に近い)

割れ目内の隙間のつながり具合(=水みちのつながり方の次元)とDIの関係⁽¹³⁾

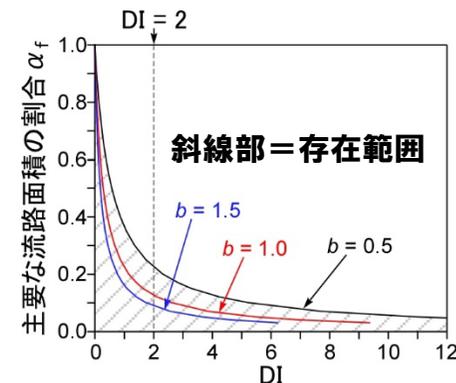
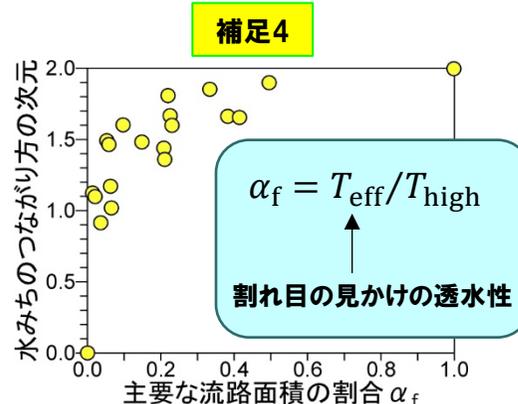
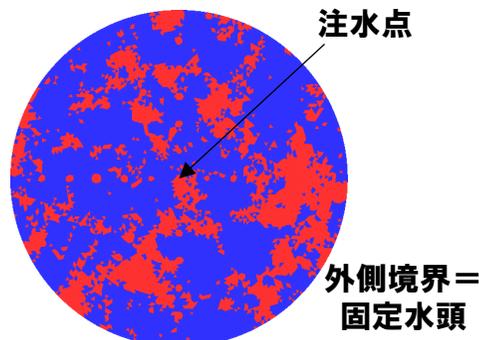
バーカーのモデル $A \propto r^{n-1}$ (水みちの透水性/貯留性は均質と仮定)
A 流路断面積 r 発信点からの距離 n 水みちのつながり方の次元 or 流れの次元

岩石の硬さに対して割れ目にかかる力が小さいほど、割れ目内の水みちのつながり方の次元が高くなる

1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備

1-2. 割れ目内の隙間のつながり具合とDIの関係

【仮想透水試験】



赤 = 開口部 (透水性 T_{high})、青 = 閉口部 (透水性 T_{low})
仮想透水試験の割れ目モデルの例⁽¹³⁾

T_{high}/T_{low} が大きい時の解析結果⁽¹³⁾
 $\alpha_f < 0.2$ だと次元が概ね1.5以下

理論式に基づく α_f と DI の関係⁽¹³⁾
DI > 2だと概ね $\alpha_f < 0.2$

有効応力係数 α とバートンバンディスマodelの関係^(2, 13, 53)

$$\alpha = (1 + (\sigma_n - p)/(K_{ni} V_m))^{-1}$$

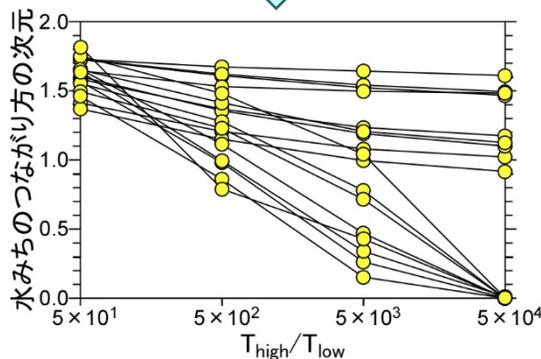
代表的な値0.5~1.5⁽²⁾を採用

$$K_{ni} V_m = 0.2899 \sigma_t$$

$$(\sigma_n - p)/\sigma_t = b(\sigma_m - p)/\sigma_t = bDI$$

$$\alpha \geq \alpha_f$$

$$DI \leq 0.2899 \left((1/\alpha_f) - 1 \right) / b$$



解析結果⁽¹³⁾

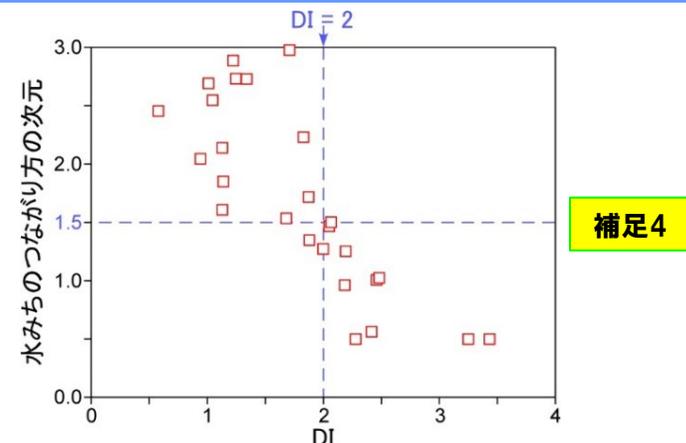
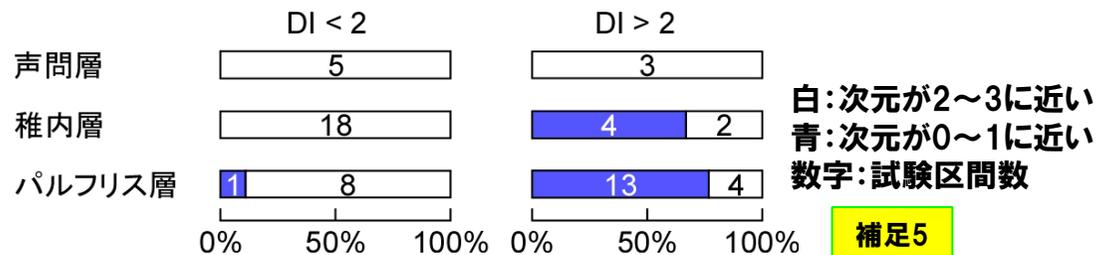
健岩部の透水性 (T_{low}) が高いと次元も高い

割れ目内の水みちのつながり方の次元はDIの増加とともに減少し、DI > 2だと概ね1.5以下。しかし、健岩部の透水性が高いとDIに関係なく次元は常に高くなる。

1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備

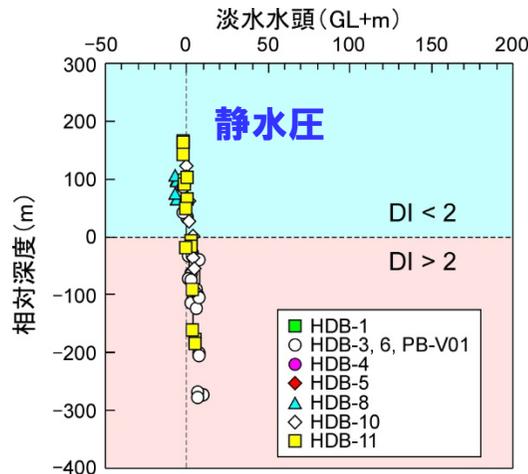
1-2. 割れ目内の隙間のつながり具合とDIの関係

【原位置透水試験/水圧観測】

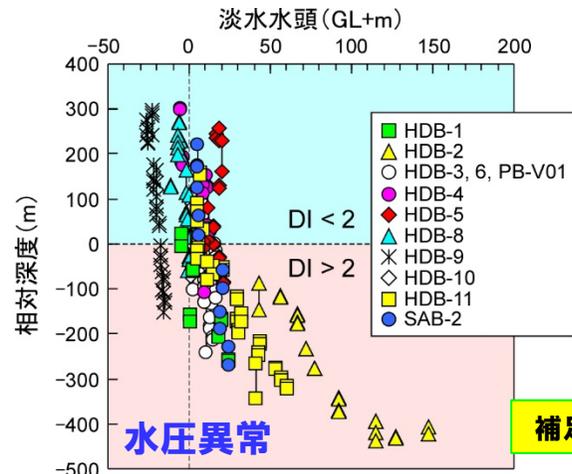


断層帯の透水試験時のデリバティブプロットに基づく
割れ目内の水みちのつながり方の次元⁽²⁷⁾
DI<2は次元が2~3に近く、DI>2は0~1に近い

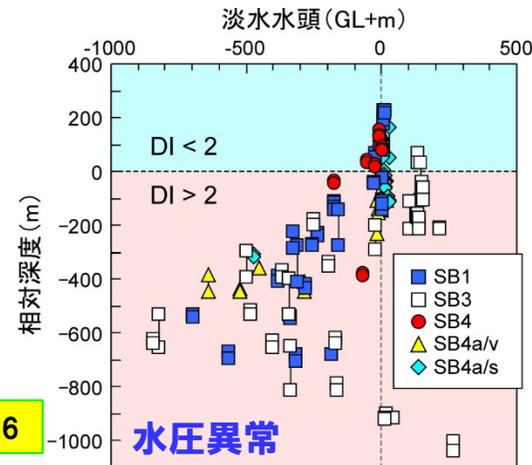
稚内層の断層帯を対象とした透水試験の解析結果⁽¹³⁾
DIの増加とともに次元が減少し、DI>2で概ね1.5以下



声問層の水圧分布とDI⁽²⁷⁾



稚内層の水圧分布とDI⁽²⁷⁾



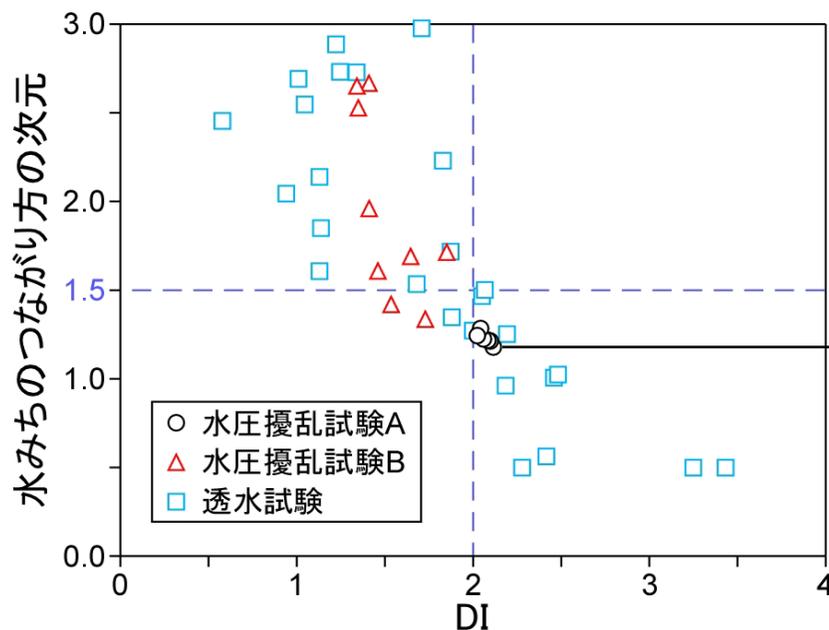
パルプリス層の水圧分布とDI⁽²⁷⁾

仮想透水試験の結果は稚内層/パルプリス層(健岩部透水性低)や声問層(健岩部透水性高)で認められる割れ目内の水みちのつながり方の次元や水圧分布と整合的

1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備

1-2. 割れ目内の隙間のつながり具合とDIの関係

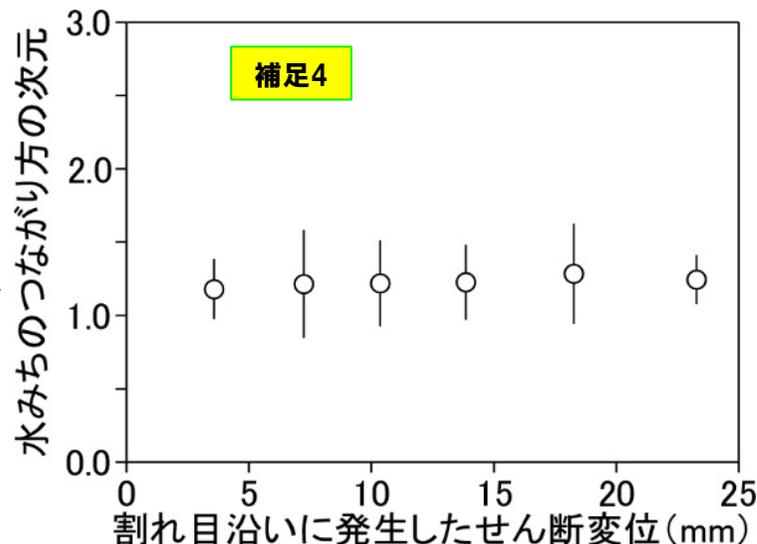
【水圧擾乱試験】



稚内層中の断層帯の水圧擾乱試験/透水試験結果⁽¹³⁾
DIを変化させるとDIとの関係に従って次元が可逆的に変化

補足7

水圧擾乱試験A:スライド23参照



稚内層中の断層帯の水圧擾乱試験結果⁽¹³⁾
せん断変位が次元に与える影響は小

隆起侵食やせん断変位が発生しても割れ目内の水みちのつながり方の次元はDIとの関係により推定可能で、その推定は水圧擾乱試験により検証可能

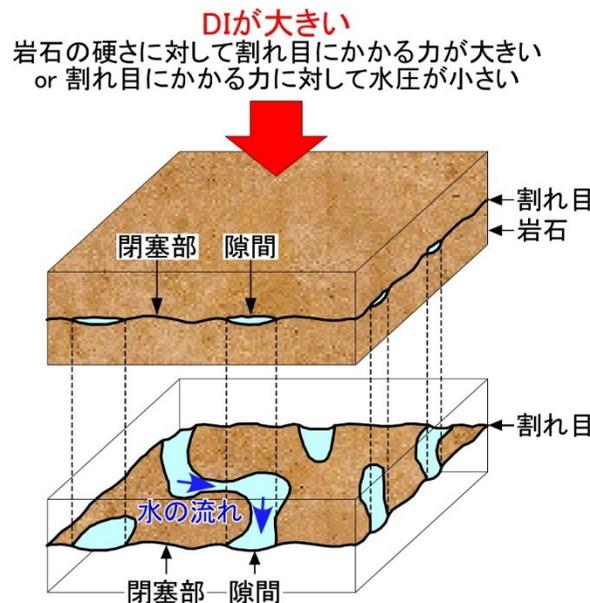
目次

1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備
 - 1-1. 割れ目内の隙間の大きさとDIの関係
 - 1-2. 割れ目内の隙間のつながり具合とDIの関係
 - 1-3. 割れ目の代表的な透水性とDIの関係
2. 水圧擾乱試験による断層の力学的な安定性の評価手法の整備

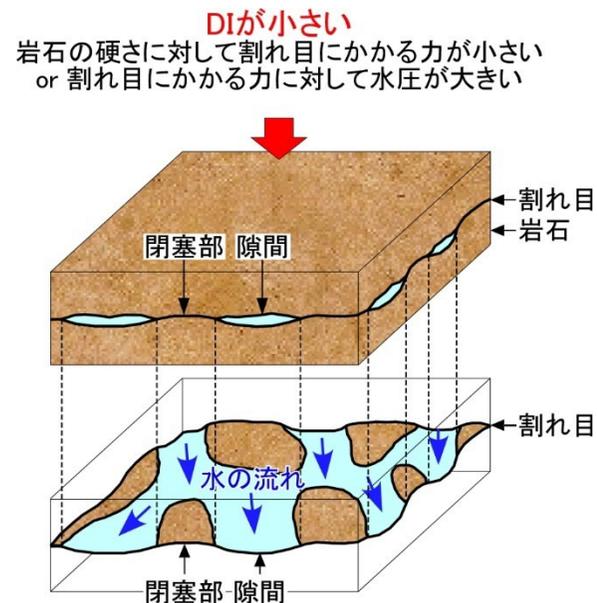
1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備

1-3. 割れ目の代表的な透水性とDIの関係

【作業仮説】



割れ目の代表的な透水性が小さい



割れ目の代表的な透水性が大きい

隆起侵食



割れ目の代表的な透水性(= 有効透水量係数)とDIの関係⁽¹³⁾

$$K_{eff} \propto T_{eff}$$

K_{eff} 地層の代表的な透水性(有効透水係数) T_{eff} 割れ目の有効透水量係数

割れ目の発達する地層の代表的な透水性は割れ目の**有効透水量係数**が支配

1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備

1-3. 割れ目の代表的な透水性とDIの関係

【マセロンのモデル】

マセロンの式 $T_{eff} = T_G \cdot \exp \left[\sigma^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{D_q} \right) \right]$ (割れ目内の局所的な透水量係数は対数正規分布に従い、水は一定の方向に流れると仮定)

T_{eff} 有効透水量係数 T_G 局所的な透水量係数の対数平均 σ 局所的な透水量係数の自然対数の標準偏差 D_q 空間次元(整数)

+

DIの経験式⁽²⁾ $\log_{10} T_G = \log_{10} T_r + (\log_{10} T_s - \log_{10} T_r)(1 + DI)^{-\beta}$



6つの岩盤のデータ⁽²⁵⁾を用いる場合

$$\log_{10} T_G = -530 + (-4.70 + 530)(1 + DI)^{-0.0049} \quad (\sigma = 1.22 \text{ in } \log_{10} T)$$



DI<2の割れ目の有効透水量係数⁽¹²⁾
(割れ目内の水みちのつながり方の次元≒2)

$$D_q = 2 \quad T_{eff} = T_G$$

DI>2の割れ目の有効透水量係数⁽¹²⁾
(割れ目内の水みちのつながり方の次元≒1)

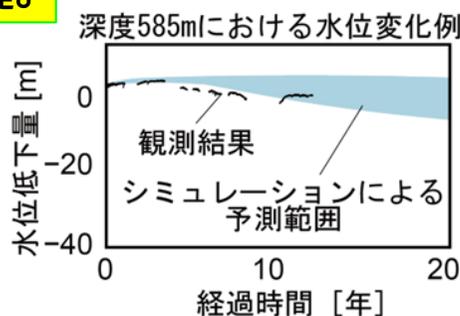
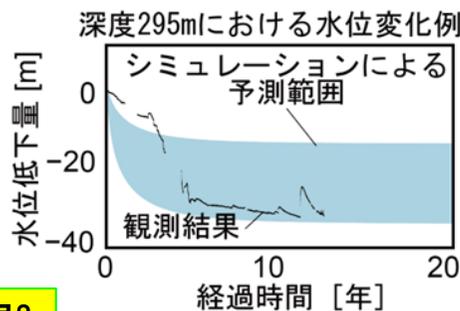
$$D_q = 1 \quad T_{eff} = T_G \cdot \exp[-0.5\sigma^2]$$

マセロンの式とDIの経験式を統合させることにより、DIを用いて割れ目の有効透水量係数を推定可能

1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備

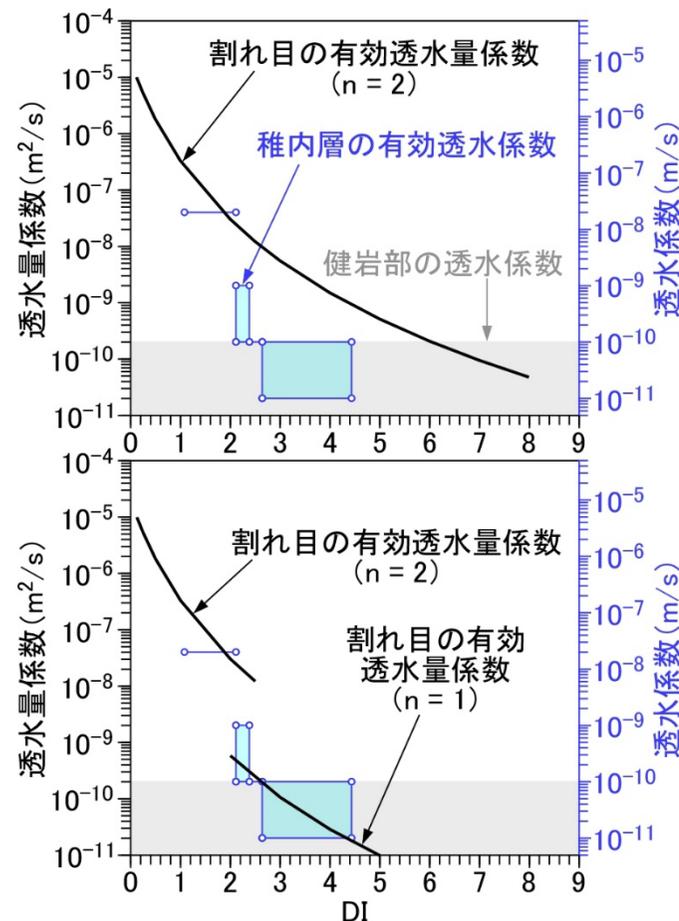
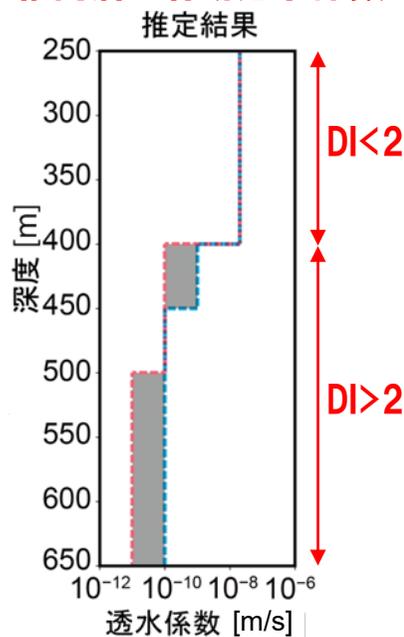
1-3. 割れ目の代表的な透水性とDIの関係

【水圧観測と水理解析】



補足8

稚内層の有効透水係数



深度350mまでの地下施設建設時に観測された周辺孔での水圧応答とそれを再現する稚内層の有効透水係数分布^(6, 12)

DI > 2になると有効透水係数が大きく減少

【ボーリング調査結果】

- ・稚内層中の主要な水みち=断層
- ・断層の分布密度に有意な深度依存性なし

補足9

マセロンの式とDIの経験式に基づく割れ目の有効透水量係数と左図に示す稚内層の有効透水係数^(6, 12)
DI > 2でn = 1を仮定すると両者の変化が一致⁽¹²⁾

割れ目の有効透水量係数とDIの関係から隆起侵食やせん断変位に伴う地層の有効透水係数の変化を推定でき、その関係は坑道掘削時の水圧応答などから検証可能

1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備

1-3. 割れ目の代表的な透水性とDIの関係

【本研究の適用範囲】 割れ目の発達する堆積岩(単層)の水理地質学的な分類^(2, 12, 13, 25)

分類	粘土鉱物の膨潤による割れ目の自己閉塞	鉱物充填による割れ目の自己閉塞	割れ目充填鉱物の溶解	岩石(健岩部)の透水性	地層例	割れ目の局所的な水理学的開口幅とDIの相関性	割れ目内の水みちのつながり方の次元とDIの相関性	割れ目の有効透水量係数	割れ目の有効透水量係数の調査・評価手法
I-a	限定的	限定的	限定的	小	稚内層泥岩 ^b 、 バルブリス泥岩 ^c (スイスウエレンベルグ)	強い ^h	強い ⁱ	大～小	水理試験などから得られる原位置データに加えて、DIと割れ目の局所的な水理学的開口幅や水みちのつながり方の次元との関係から推定可能 ^{b, c}
I-b				大 ^a	声間層泥岩 ^d	弱い	弱い	大	水理試験などから得られる原位置データより推定可能 ^{d, e, f, g}
II			強い	セントピース砂岩 ^e (英セラフィールド) トアキアノードメリアン泥岩 ^f (仏トゥルヌミール)					
III			強い	-	小				
IV	強い	-	-	-	オパリナス泥岩 ^g (スイスモンテリ)				

本研究の成果は主に表中の分類I-aの堆積岩に適用可能

a: 原位置透水試験において割れ目を含む区間と健岩部の透水性の差が3オーダー未満⁽²⁸⁾

b: 文献(2, 4~6, 8, 10, 12, 13, 27, 51)

c: 文献(2, 27, 33~35, 40, 42, 50)

d: 文献(6, 7, 10, 12~14, 26~28, 31, 39, 51)

e: 文献(24, 25, 37, 38, 43, 47)

f: 文献(16, 17, 21, 23, 32, 44~46, 48, 49)

g: 文献(18~20, 22, 23, 30, 36, 44, 52)

h: 割れ目の開口幅とDIが一定の関係で相関し、その関係をパートナーバンディスのモデル⁽¹⁵⁾で再現可能

i: DI<2.0の領域で水理学的連結性が高く(流れの次元が1.5以上、動水勾配が相対的に小さい)、DI>2.0の領域で水理学的連結性が低い(流れの次元が1.5未満、動水勾配が相対的に大きい、若い外部由来の地下水がない)^(13, 27)

目次

1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備

1-1. 割れ目内の隙間の大きさとDIの関係

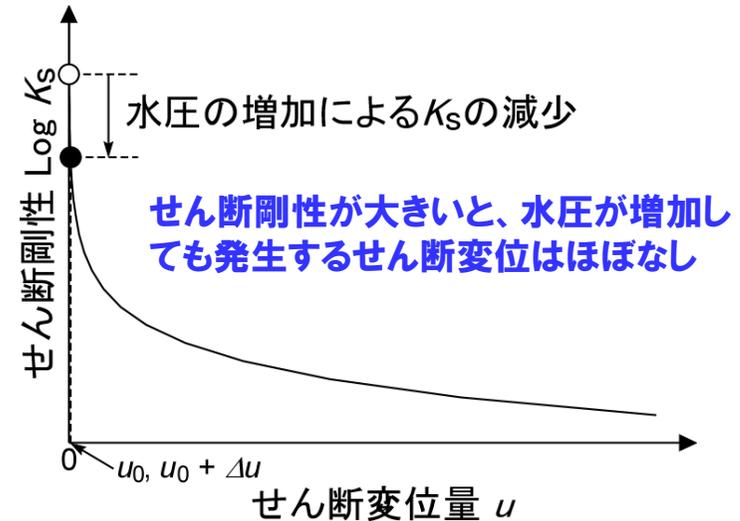
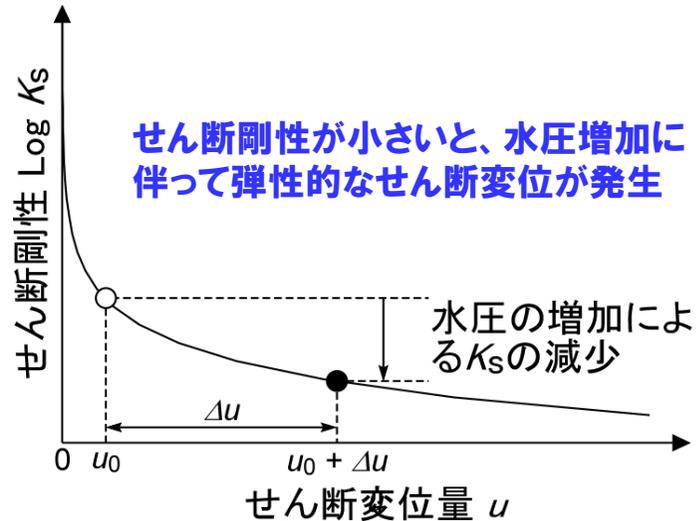
1-2. 割れ目内の隙間のつながり具合とDIの関係

1-3. 割れ目の代表的な透水性とDIの関係

2. 水圧擾乱試験による断層の力学的な安定性の評価手法の整備

2. 水圧擾乱試験による断層の力学的な安定性の評価手法の整備

【作業仮説】



割れ目のせん断剛性(弾性的なせん断変形のしにくさ)と水圧との関係⁽⁹⁾

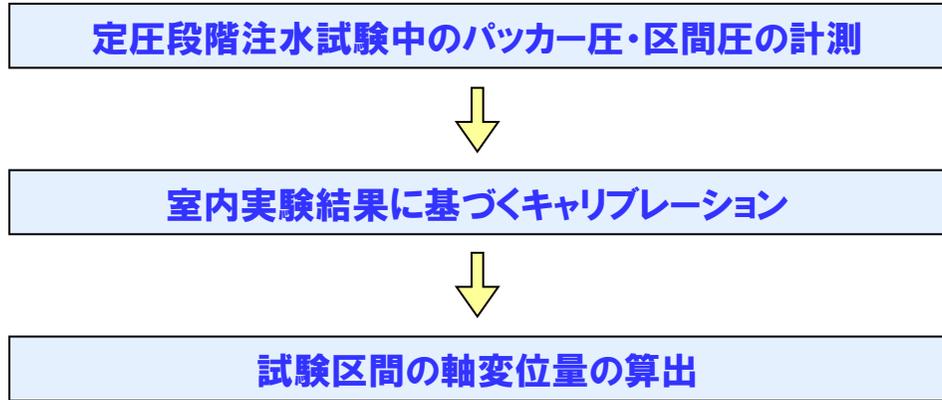
$$K_s = \tau / u$$

K_s せん断剛性 τ せん断応力 u せん断変位量

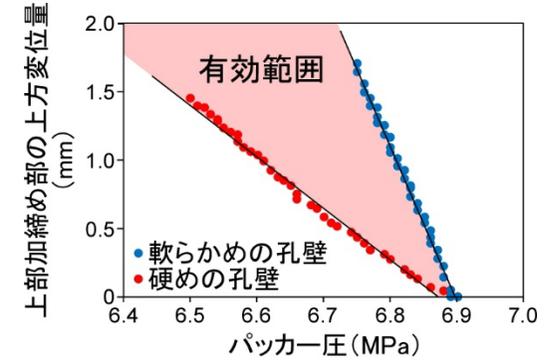
断層内の水圧を増加させた時の可逆的なせん断変位の発生量を計測することで、断層の力学的な安定性を表す指標の一つであるせん断剛性を推定可能

2. 水圧擾乱試験による断層の力学的な安定性の評価手法の整備

【水圧擾乱試験】

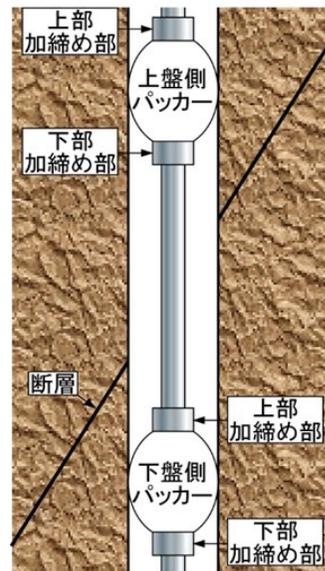


試験区間の軸変位量の算出手順⁽¹⁾

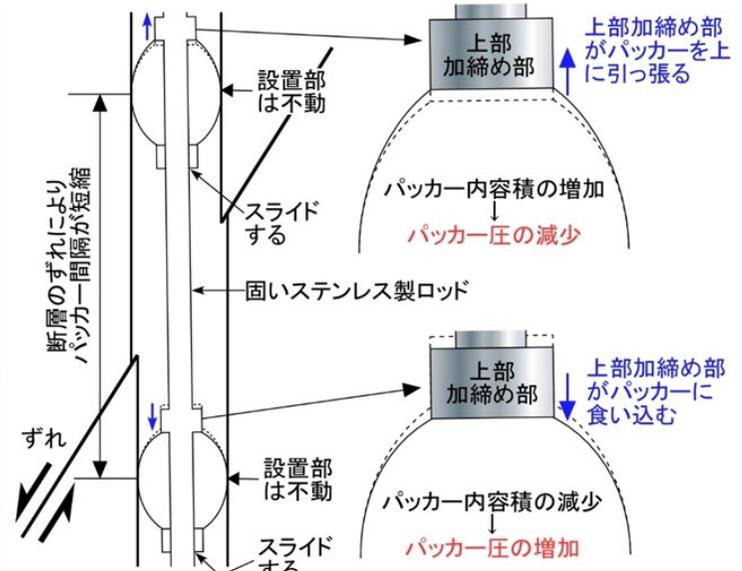


人工パイプを用いたパッカーの室内実験結果⁽¹⁾
軸変位量とパッカー圧の関係を把握

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と区間圧の変化から試験区間の軸変位量を算出
⇒水圧増加に伴う断層のせん断変位量を計測可能



断層がずれる前



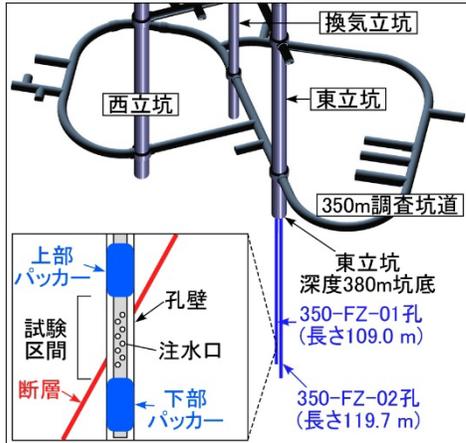
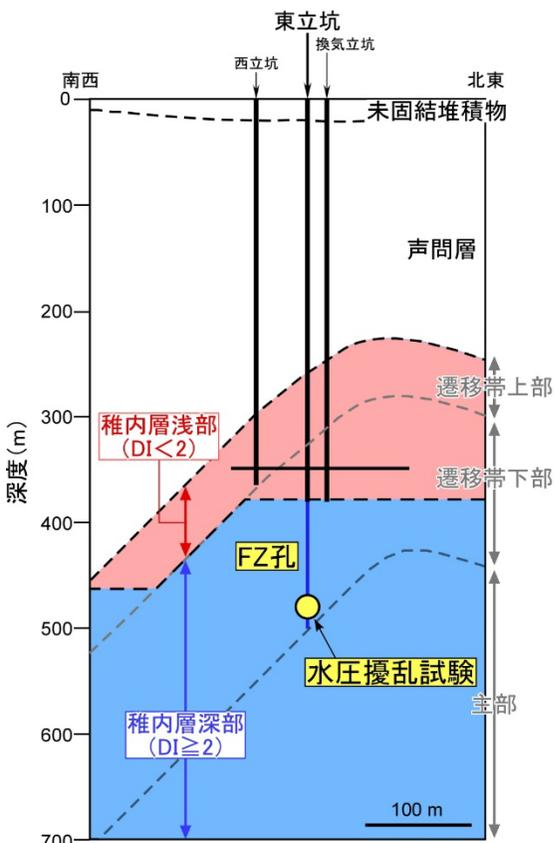
断層がずれた後

パッカー圧の変化

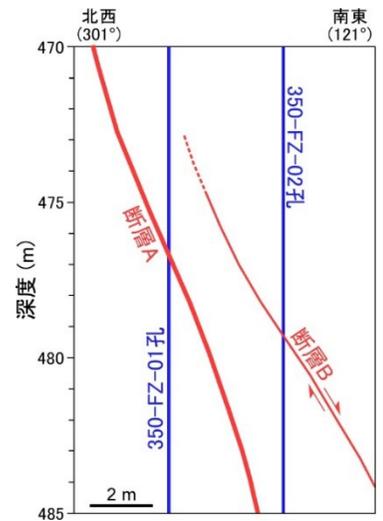
断層のせん断変位に伴ってパッカー圧が変化するメカニズム⁽⁹⁾

2. 水圧擾乱試験による断層の力学的な安定性の評価手法の整備

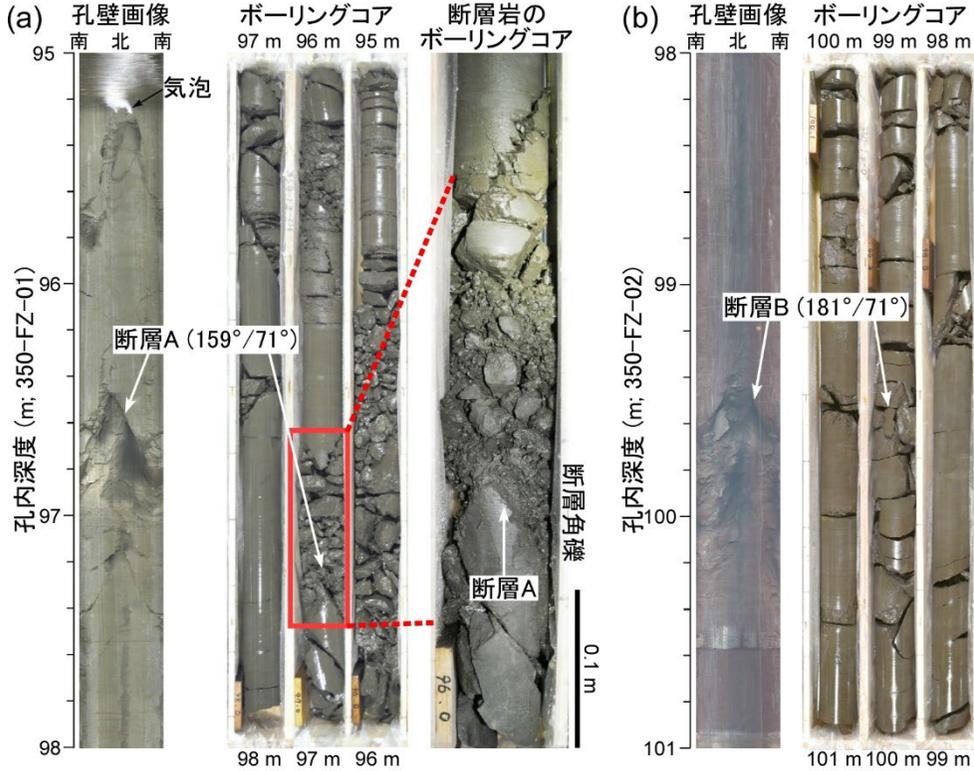
【試験実施位置】



試験に用いた2本のFZ孔 (9)



断面図 (9)

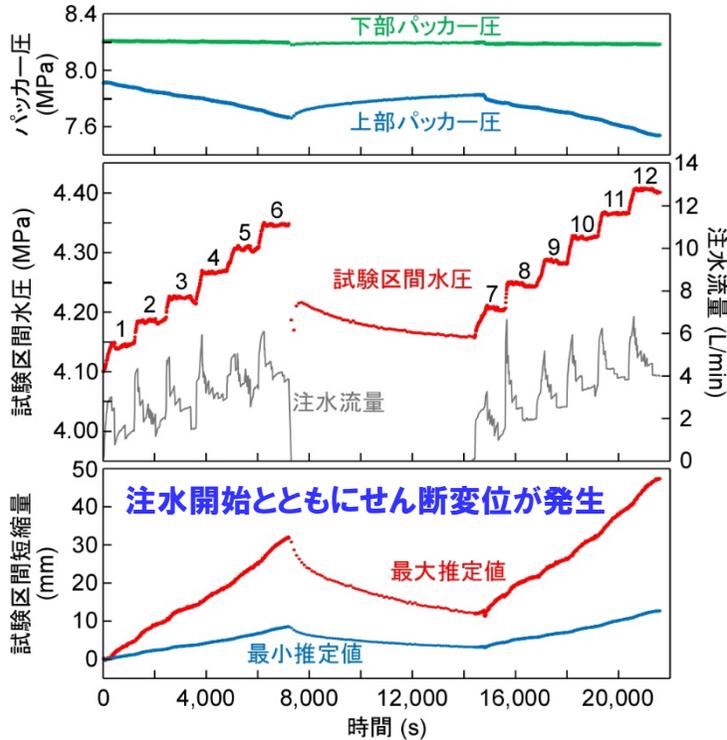


試験を実施したFZ01孔の断層AとFZ02孔の断層B (9)

**FZ01孔の断層Aで水圧擾乱試験A、
FZ02孔の断層Bで水圧擾乱試験Bを実施**

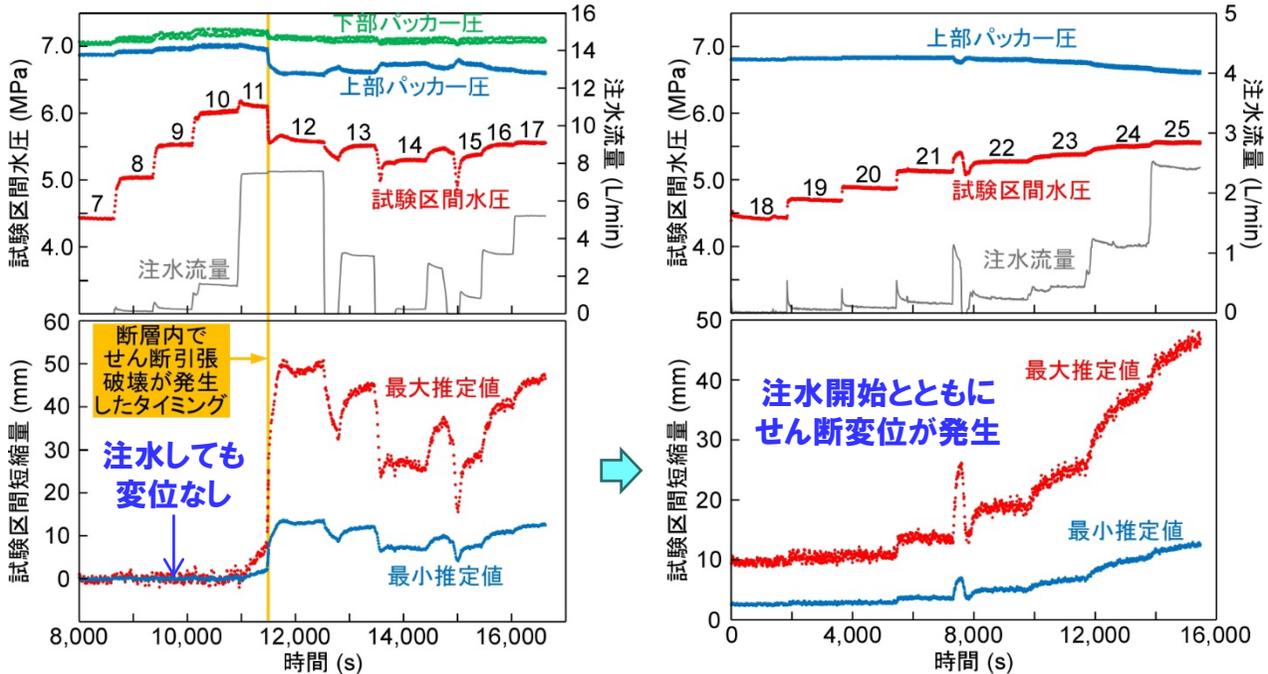
2. 水圧擾乱試験による断層の力学的な安定性の評価手法の整備

【試験結果】

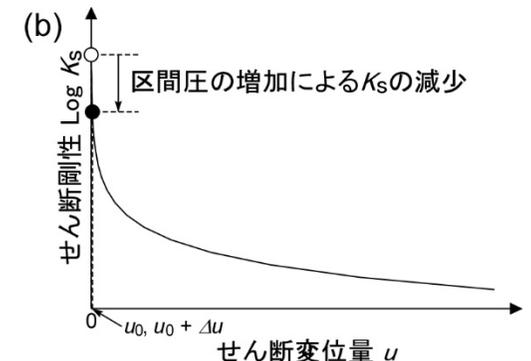
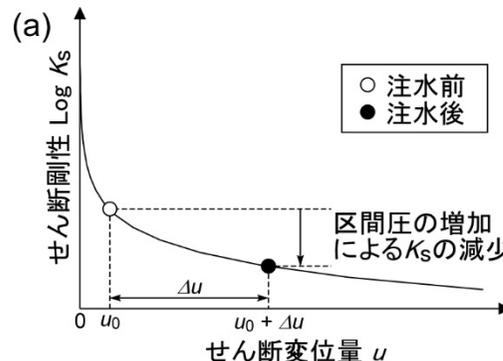


断層岩の厚さ数センチの断層Aの試験結果(9)

注水による断層のせん断剛性の低下により、断層A沿いに弾性的なせん断変位が発生。断層Bは一部固結していたが、破壊発生後に弾性的なせん断変位が発生。



断層岩の厚さ数ミリ以下の断層Bの試験結果(9)



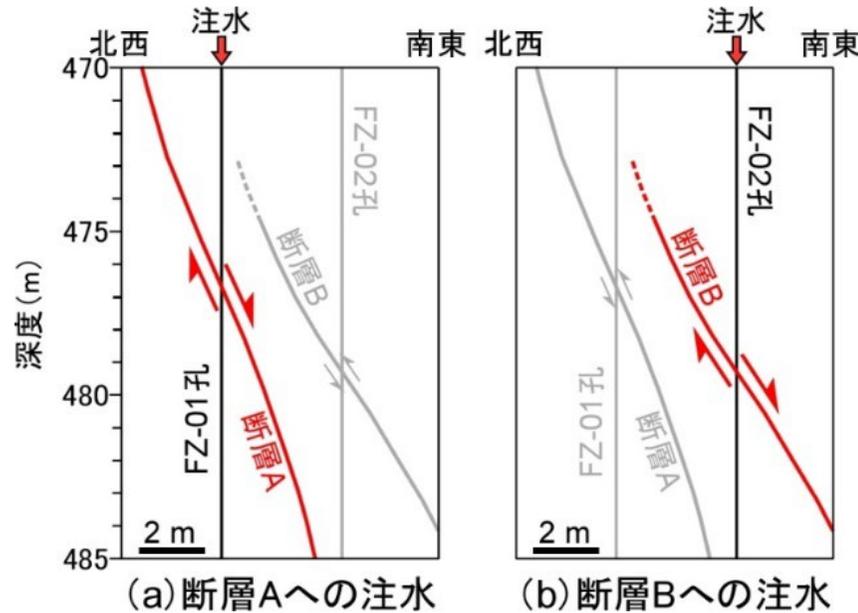
注水によるせん断剛性の低下とせん断変位の発生メカニズム(9)
 (a)注水開始とともにせん断変位が発生 (b)注水しても変位なし

2. 水圧擾乱試験による断層の力学的な安定性の評価手法の整備

【初期応力の推定】

以下の仮定の下、応力を算出⁽⁹⁾

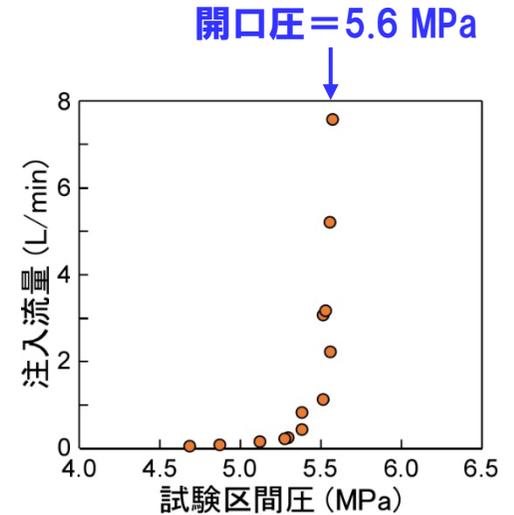
- 主応力の一つは鉛直方向で土被り圧に等しい
- 水平最大応力方向は地域固有の方向に等しい
- 発生したせん断の方向は断層面の最大剪断応力方向に平行で、発生した試験区間の軸変位と整合する
- 断層の垂直応力は断層の開口圧に等しい
- せん断変位量の孔軸直交成分は孔壁とロッドのクリアランス(3 cm)を超えない



試験中に発生した試験区間の軸変位
(断層のせん断変位)⁽⁹⁾

推定した応力値(MPa)⁽⁹⁾

	鉛直応力	水平最大	水平最小	最大せん断応力	垂直応力
断層A	7.6	6.1~6.9	5.3	0.7~0.8	5.7~5.8
断層B	7.6	6.1~6.8	5.3	0.7	5.6

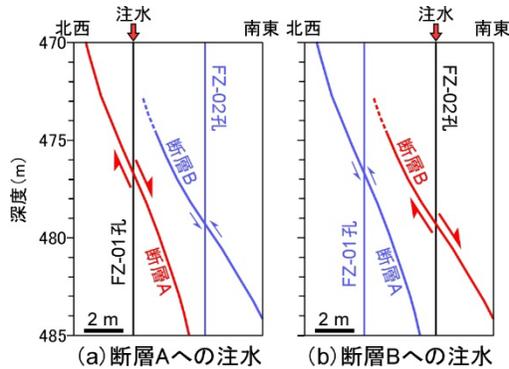


断層Bのステップ12~25
の観測結果と開口圧⁽⁹⁾

幾つかの仮定に加えて、複数点の水圧擾乱試験で得られる試験区間の軸変位や断層の開口圧などの情報を用いることで、応力値を絞り込むことが可能

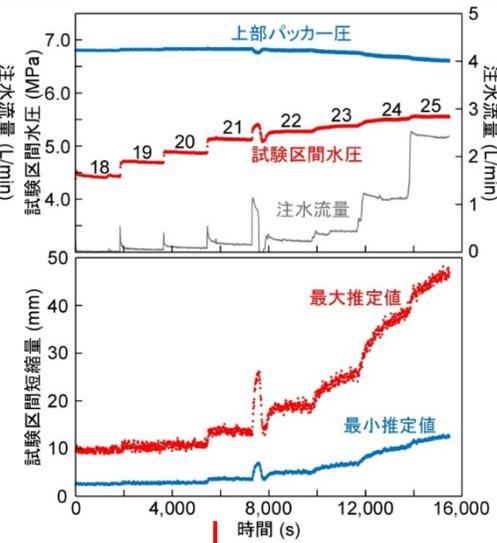
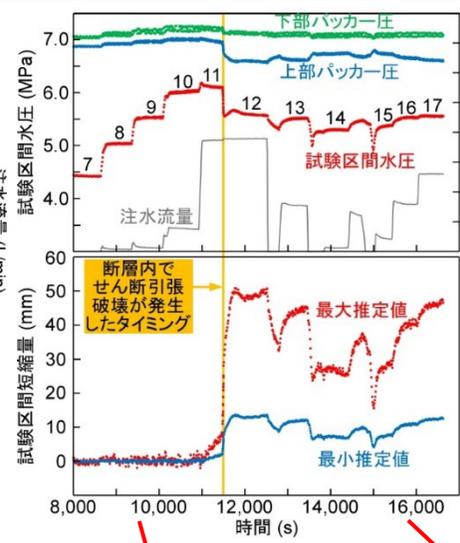
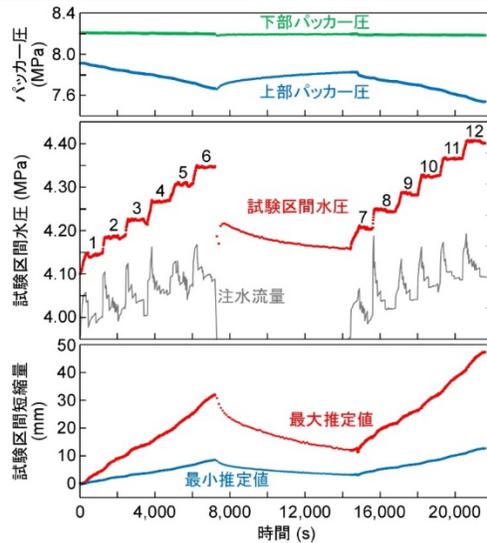
2. 水圧擾乱試験による断層の力学的な安定性の評価手法の整備

【せん断剛性の推定】



試験中に発生した断層の連動(9)

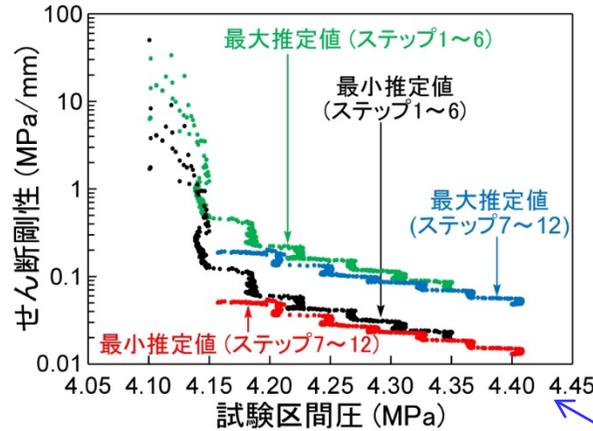
せん断変位の発生範囲 ≧ 数メートル



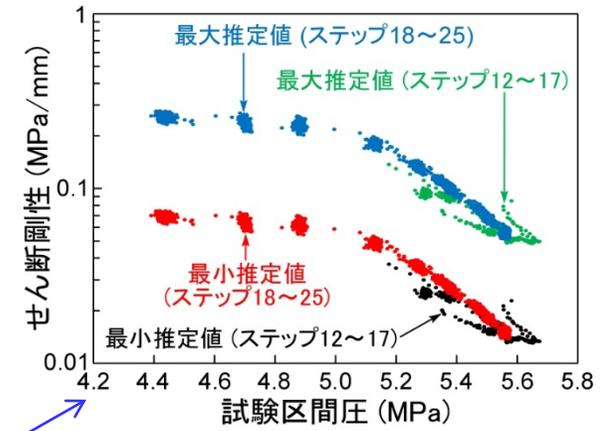
試験結果(9)

せん断剛性 $\leq 10^{-1}$ MPa/mm (軟らかい)

せん断剛性 $\leq 10^{-1}$ MPa/mm (軟らかい)



一部固結した断層のせん断剛性 $\geq 10^0$ MPa/mm (硬い)



水圧擾乱試験により断層のせん断剛性を原位置で計測できることを確認

推定結果(9)

推定結果(9)

室内実験に基づく数メートルの断層/割れ目のせん断剛性 = $10^{-3} \sim 10^{-1}$ MPa/mm (軟らかい)⁽¹⁵⁾

まとめ

1. 水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備

- 稚内層に類似する地層(スライド18の分類I-a)の場合、割れ目内の隙間の大きさ(=局所的な水理学的開口幅)、割れ目内の隙間のつながり具合(=水みちのつながり方の次元)、あるいは割れ目の代表的な透水性(=有効透水量係数)は、地殻変動により隆起侵食やせん断変位が生じたとしても、その変化をDIとの関係により推定可能
- その推定結果やDIとの関係は水圧擾乱試験や坑道掘削時の水圧応答により検証可能
- これらの方法を適用することで、透水性の推定の信頼性を向上させることが可能

2. 水圧擾乱試験による断層の力学的な安定性の評価手法の整備

- 水圧擾乱試験により断層や割れ目のせん断剛性を原位置で調べることが可能

文献リスト

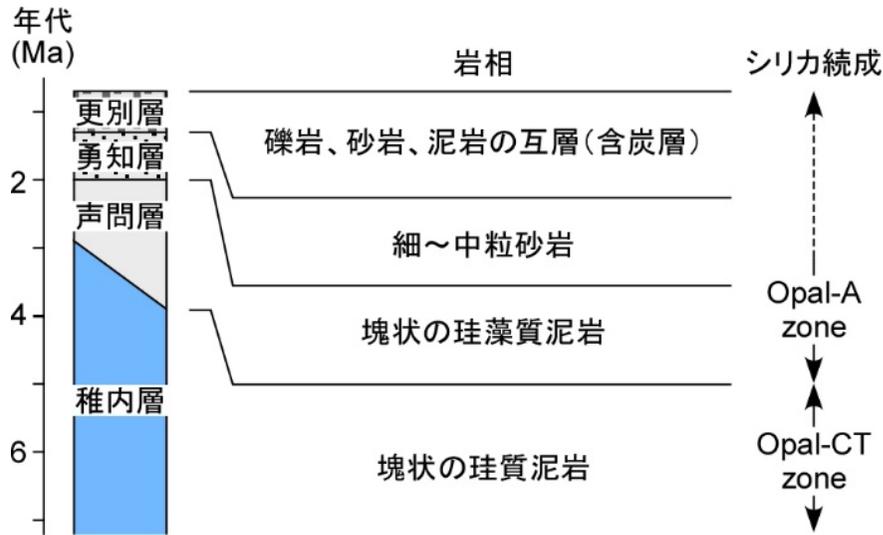
赤字: 主要文献(令和2年度以降の本研究成果)

1. Ishii, E. (2020) A conventional straddle-sliding-packer system as a borehole extensometer: monitoring shear displacement of a fault during an injection test, *Engineering Geology*, vol.275, 105748.
2. Ishii, E. (2021) The highest potential transmissivities of fractures in fault zones: reference values based on laboratory and in situ hydro-mechanical experimental data, *Engineering Geology*, vol.294, 106369.
3. Ishii, E. (2022) Constant-head step injection tests to quantify the stress dependence of fracture transmissivity in an excavation damaged zone: a case study from the Horonobe Underground Research Laboratory, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.159, 105229.
4. Mochizuki, A., Ishii, E. (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, *Hydrogeology Journal*, vol.30, pp.813-827.
5. Ohno, H., Ishii, E. (2022) Effect of fault activation on the hydraulic connectivity of faults in mudstone, *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol.31, 100317.
6. Ozaki, Y., Ishii, E., Sugawara, K. (2022) Variation in fault hydraulic connectivity with depth in mudstone: an analysis of poroelastic hydraulic response to excavation in the Horonobe URL." *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol.31, 100311.
7. Ishii, E. (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, *Hydrogeology Journal*, vol.31, pp.893-911.
8. Mochizuki, A., Ishii, E. (2023) Paleohydrogeology of the Horonobe area, Northern Hokkaido, Japan: groundwater flow conditions during glacial and postglacial periods estimated from chemical and isotopic data for fracture and pore water, *Applied Geochemistry*, vol.155, 105737.
9. Ishii, E. (2024) Constant-head step-injection tests using a conventional straddle-sliding-packer system for investigating the shear capabilities of minor faults, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol.57, pp.8861-8878.
10. 宮川和也、石井英一、今井久、平井哲、大野宏和、中田弘太郎、長谷川琢磨 (2024) 亀裂性堆積岩を対象とした地下水流動解析における有効間隙率の与え方: 北海道幌延に分布する声問層と稚内層浅部の事例、*原子力バックエンド研究*、vol.31、no.2、pp.82-95.
11. Ohno, H., Ishii, E., Takeda, M. (2024) Modelling transport pathways of faults with low hydraulic connectivity in mudstones with low swelling capacity, *Geoenergy*, vol.2, geoenergy2023-047.
12. Ozaki, Y., Ishii, E. (2024) Relationship between fault transmissivity, flow dimensions and effective hydraulic conductivity in siliceous mudstone of the Wakkanai Formation around the Horonobe Underground Research Laboratory in Japan, *Geoenergy*, vol.2, geoenergy2023-056.
13. Ishii, E., Ozaki, Y., Aoyagi, K., Sugawara, K. (2025) Rock strength and stress dependence of local flow-path connectivity within faults or fractures: a preliminary overview of virtual and in-situ hydraulic tests, *Hydrogeology Journal*, vol.33, pp.63-85.
14. Arthur et al. (2023) *Applied Geochemistry*, vol.155, 105707.
15. Barton et al. (1985) *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol.22, pp.121-140.
16. Boisson et al. (2001) *Hydrogeology Journal*, vol.9, pp.108-123.
17. Donzé et al. (2023) *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol.27, pp.2587-2601.
18. Gautschi (2017) *Grundwasser*, vol.22, pp.221-233.
19. Giger and Marschall (2014) *Nagra NAB 14-01*, 86p.
20. Gonçalves et al. (2023) *Applied Clay Science*, vol.242, 107016.

文献リスト

21. Guglielmi et al. (2015) *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.120, pp.7729-7748.
22. Guglielmi et al. (2020) *Geophysical Journal International*, vol.221, pp.1684-1695.
23. Guglielmi et al. (2021) *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol.111, 103471.
24. Gutmanis et al. (1998) *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, vol.52, pp.159-175.
25. Ishii (2015) *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.120, pp.2220-2241.
26. Ishii (2017) *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.100, pp.10-22.
27. Ishii (2018) *Water Resources Research*, vol.54, pp.3335-3356.
28. Ishii et al. (2011) *Journal of Geophysical Research*, vol.116, B09206.
29. 石井・福島 (2006) *応用地質*, vol.47, pp.280-291.
30. Jeanne et al. (2018) *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.123, pp.1694-1710.
31. Kurikami et al. (2008) *Physics and Chemistry of the Earth* vol.33, pp.S37-S44.
32. Lefèvre et al. (2016) *Journal of Structural Geology*, vol.83, pp.73-84.
33. Mazurek (1999) *Applied Geochemistry*, vol.15, pp.211-234.
34. Mazurek (2001) *Proceedings of the self-healing topical session of the IGSC working group on measurement and physical understanding of groundwater flow through argillaceous media (Clay Club)*, OECD/NEA, pp.31-34.
35. Mazurek et al. (1998) *Journal of Contaminant Hydrology*, vol.35, pp.1-17.
36. Mazurek et al. (2011) *Applied Geochemistry*, vol.26, pp.1035-1064.
37. Medici et al. (2019) *Hydrogeology Journal*, vol.27, pp.2835-2855.
38. Milodowski et al. (1998) *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, vol.52, pp.215-241.
39. Miyakawa et al. (2014) *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol.70, pp.332-342.
40. NAGRA (1997) *Nagra NTB 96-01*, 511p.
41. 中山編 (2021) *JAEA-Review 2023-032*.
42. Neuzil (2015) *Geophysical Research Letters*, vol.42, pp.4801-4808.
43. Nirex (1997) *Nirex report SA/97/065*.
44. OECD/NEA (2022) *NEA No. 7249*, 242p.
45. Savoye et al. (2003) *Proceedings of the IAH Conference of Groundwaters in Fractured Rocks*, pp.383-384.
46. Savoye et al. (2008) *Physics and Chemistry of the Earth*, vol.33, pp.S67-S74.
47. Streetly et al. (2006) *Geological Society Special Publication*, vol.263, pp.155-167.
48. Su et al. (2017) *Geological Society, London, Special Publications*, vol.443, pp.97-113.
49. Tremosa et al. (2012) *Water Resources Research*, vol.48, W04530.
50. Vomvoris et al. (1999) *Use of hydrogeochemical information in testing groundwater flow models*, OECD/NEA, pp.107-117.
51. 山本ほか (2002) *JNC TJ1400 2002-010*, 921p.
52. Yu et al. (2017) *Swiss Journal of Geosciences*, vol.110, pp.85-104.
53. Zhao et al. (2021) *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.137, 104556.

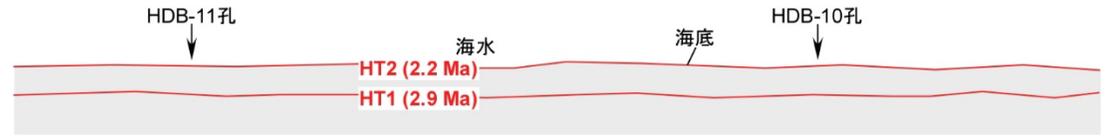
補足1



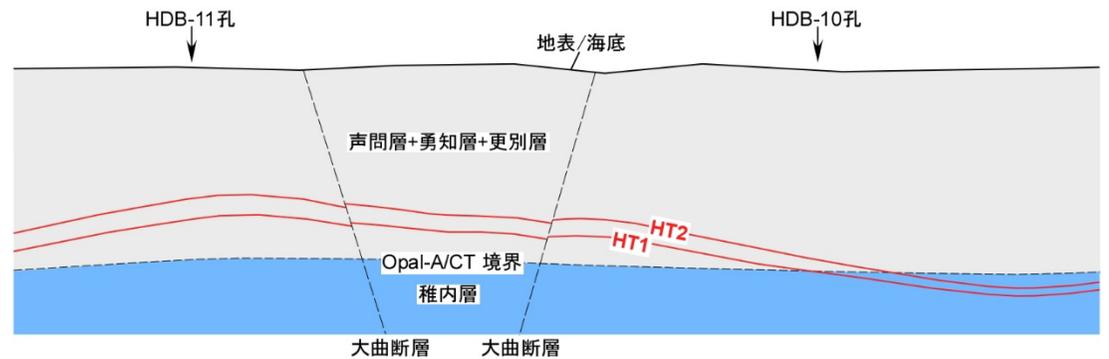
地下施設周辺の模式柱状図

2.2～1.0 Maの間に背斜成長が始まり、約1 Maに最大埋没。以降、数百メートル以上の隆起侵食が発生。

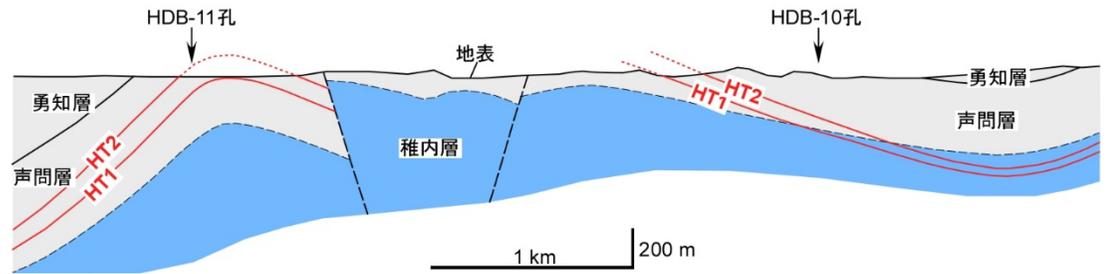
(a) 火山灰層HT2の堆積時 (2.2 Ma)



(b) 火山灰層HT2の最大埋没時 (約1.0 Ma)



(c) 現在



地下施設周辺の埋没史

補足2 (1/3)

$$DI = \sigma'_m / \sigma_t = ((\sigma_1 + \sigma_3) / 2 - \alpha p) / \sigma_t \quad (DIの計算では有効応力係数 \alpha = 1を仮定)$$

【DIに類似する既存のパラメーター】

土木分野: competence factor (一軸圧縮強度 ÷ 有効鉛直応力)

土質分野: over-consolidation ratio (過去最大有効鉛直応力 ÷ 現有効鉛直応力)

地質分野: ductility (圧縮試験のピーク強度時の歪み量)

鉱山分野: brittleness (一軸圧縮強度 ÷ 引張強度)

石油地質分野:

over-consolidation ratio (等方圧密降伏強度 ÷ 現有効鉛直応力)

brittleness index (一軸圧縮強度 ÷ 有効鉛直応力 × 2、ヤング率 ÷ ポアソン比、他多数)

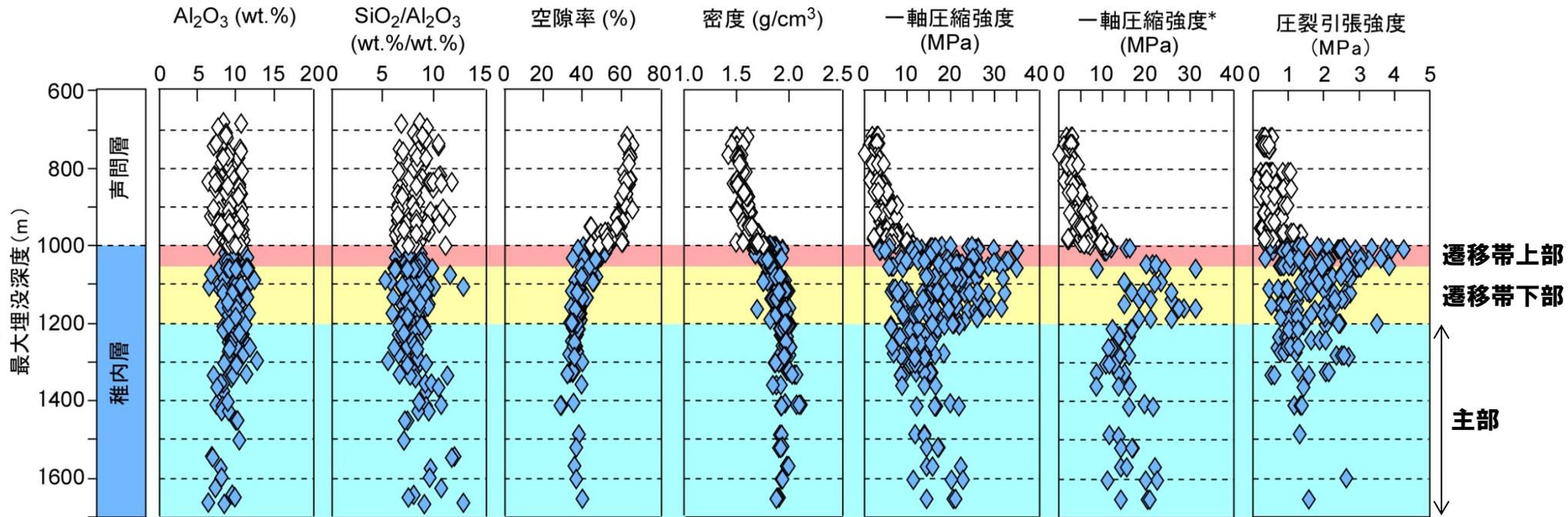
$X_{\text{shear}} X_{\text{tensile}}$ (引張/せん断破壊曲線とモール円との距離)

p / p^* (平均有効応力 ÷ 等方圧密降伏強度)

地層処分量: dilation tendency $((\sigma_1 - \sigma_n) / (\sigma_1 - \sigma_3))$

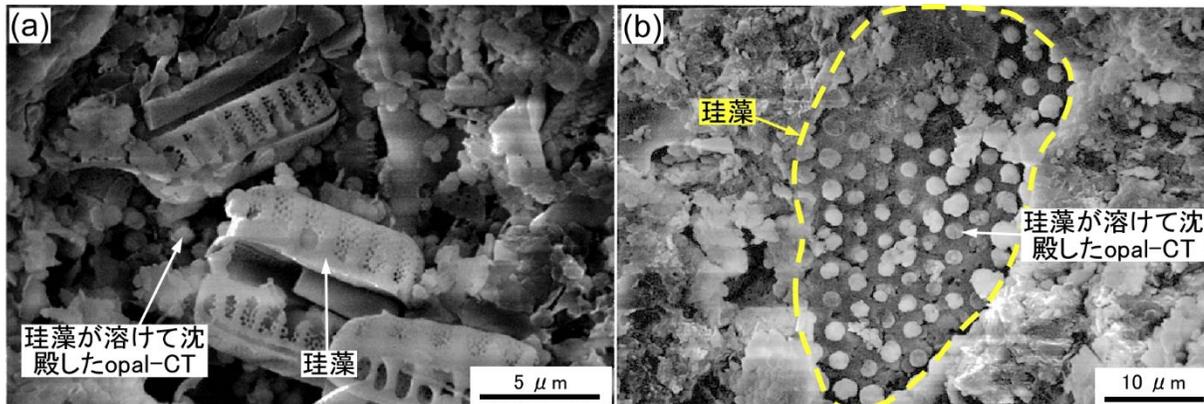
その他: σ_3 / σ_1 (最小主応力 ÷ 最大主応力)

補足2 (2/3)



ボーリングコアの室内分析/試験結果

*層理面の影響を除去



稚内層遷移帯の岩石基質部のSEM画像

稚内層の引張強度

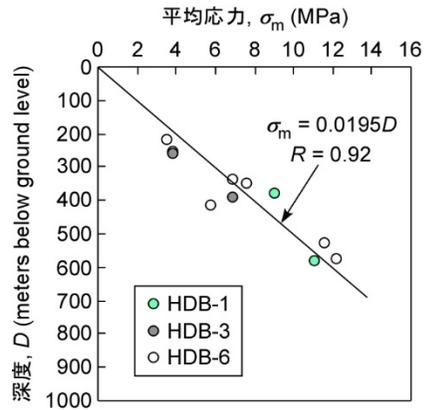
遷移帯上部 = 2.2 ± 1.0 MPa

遷移帯下部 = 1.8 ± 0.7 MPa

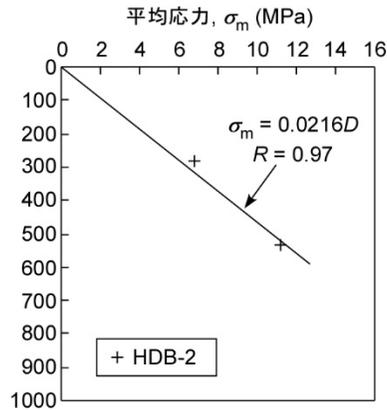
主部 = 1.5 ± 0.6 MPa

補足2 (3/3)

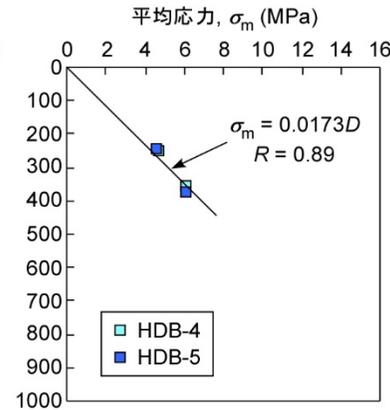
(a) HDB-1, 3, 6, PB-V01, SAB-1孔



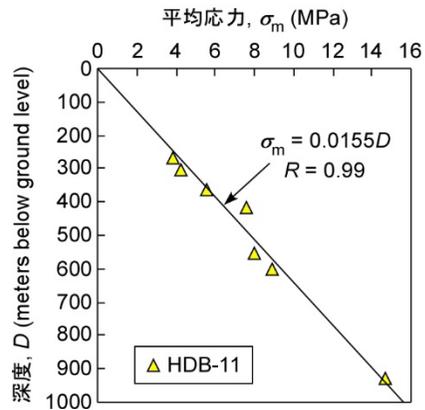
(b) HDB-2孔



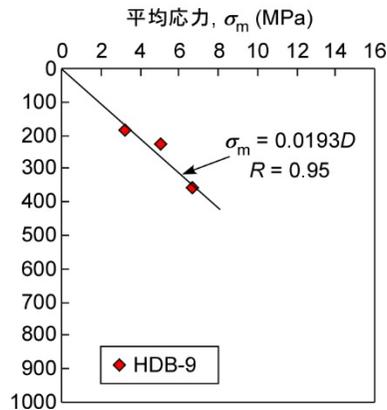
(c) HDB-4, 5, 8, 10, SAB-2孔



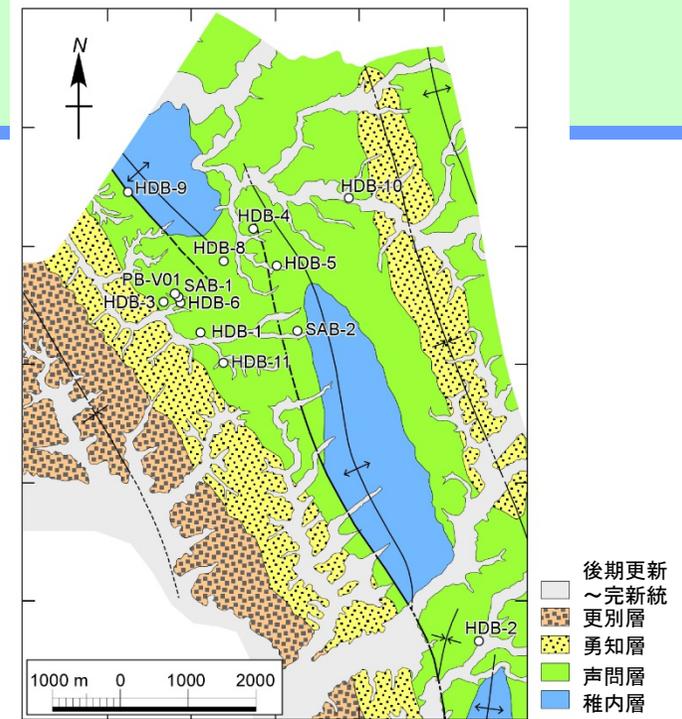
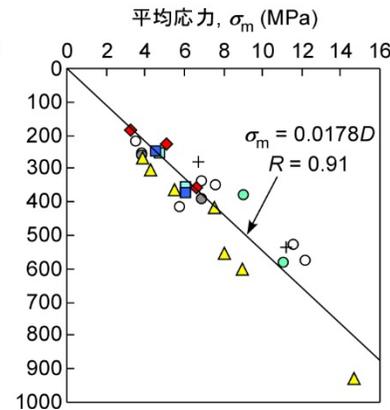
(d) HDB-11孔



(e) HDB-9孔

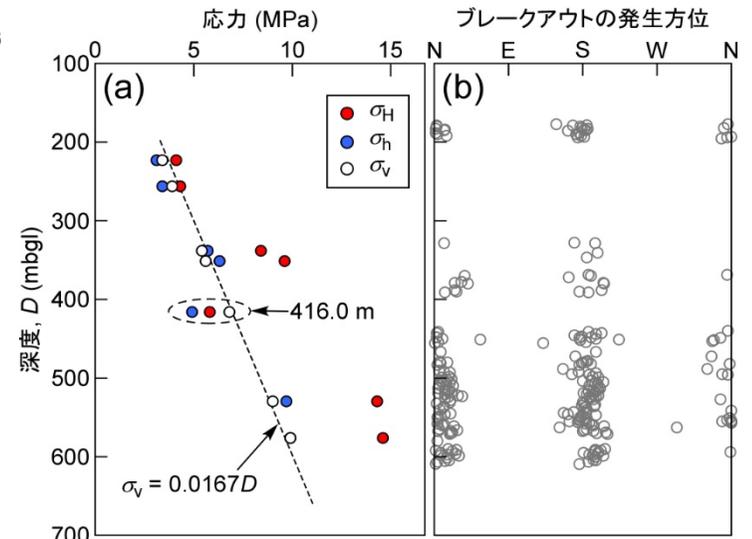


(f) 全孔



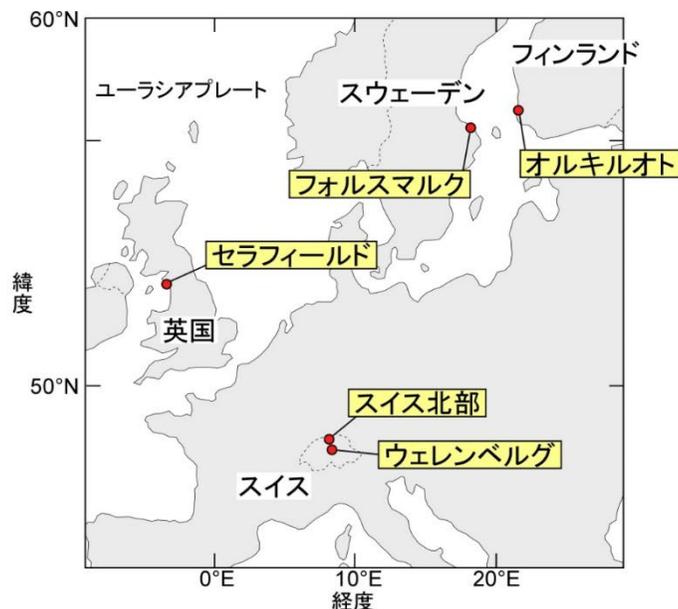
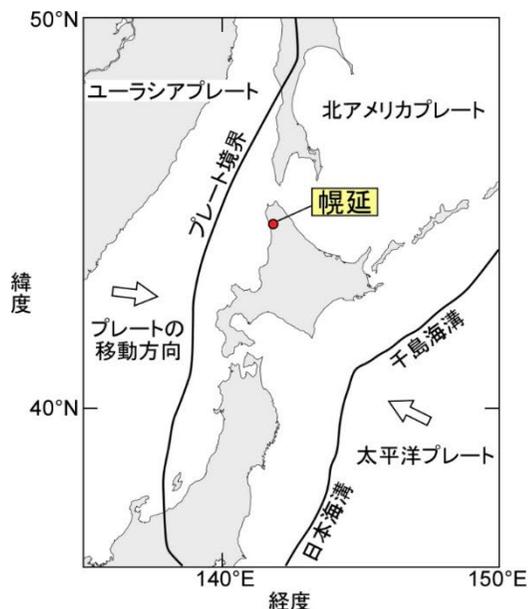
地質図とボーリング孔位置

孔内水圧破碎試験結果に基づく平均応力と深度の関係



HDB-6孔の応力分布とポアホールブレイクアウト⁽⁹⁾

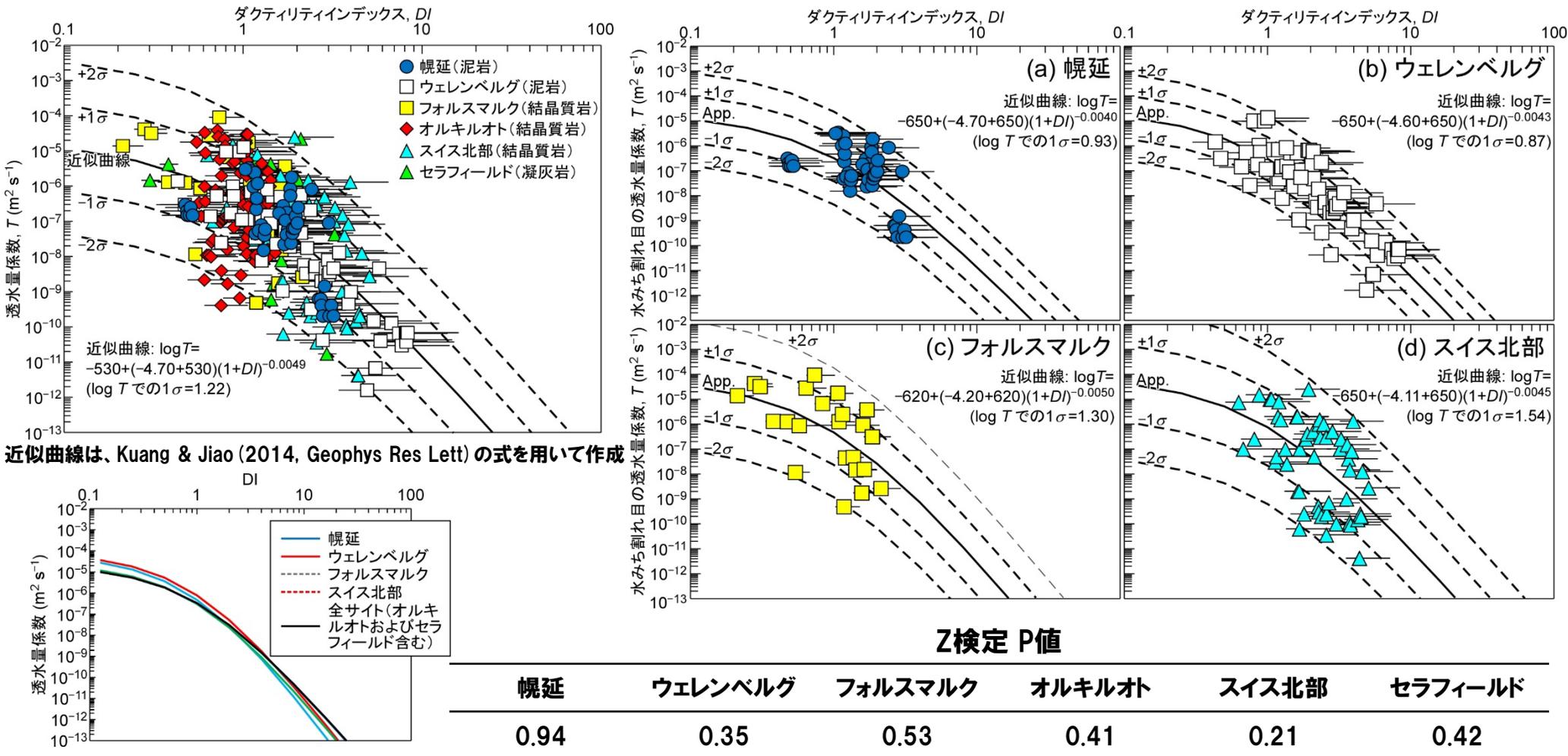
補足3 (1/2)



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

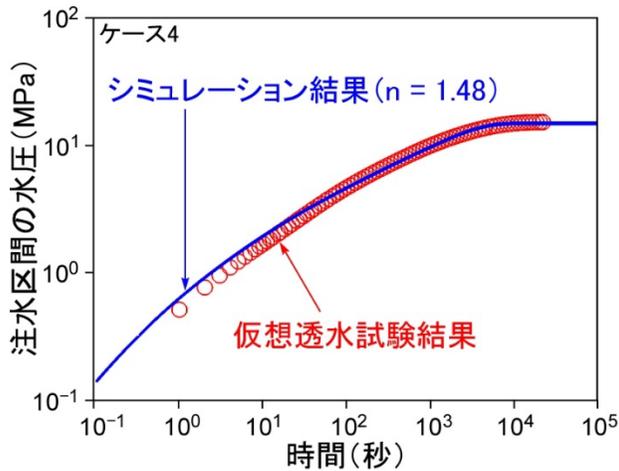
割れ目内の水みちの鉱物/粘土充填が限定的な6つの岩盤のデータ⁽²⁵⁾

補足3 (2/2)

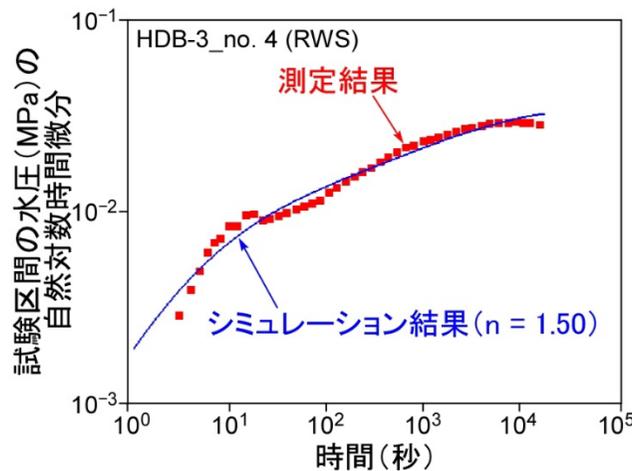


割れ目内の水みちの鉱物/粘土充填が限定的な6つの岩盤のデータ⁽²⁵⁾

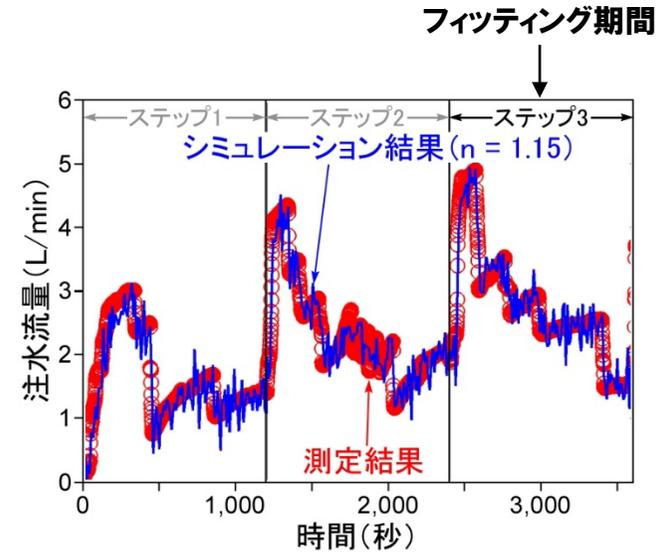
補足4



仮想透水試験結果の
フィッティング例⁽¹³⁾



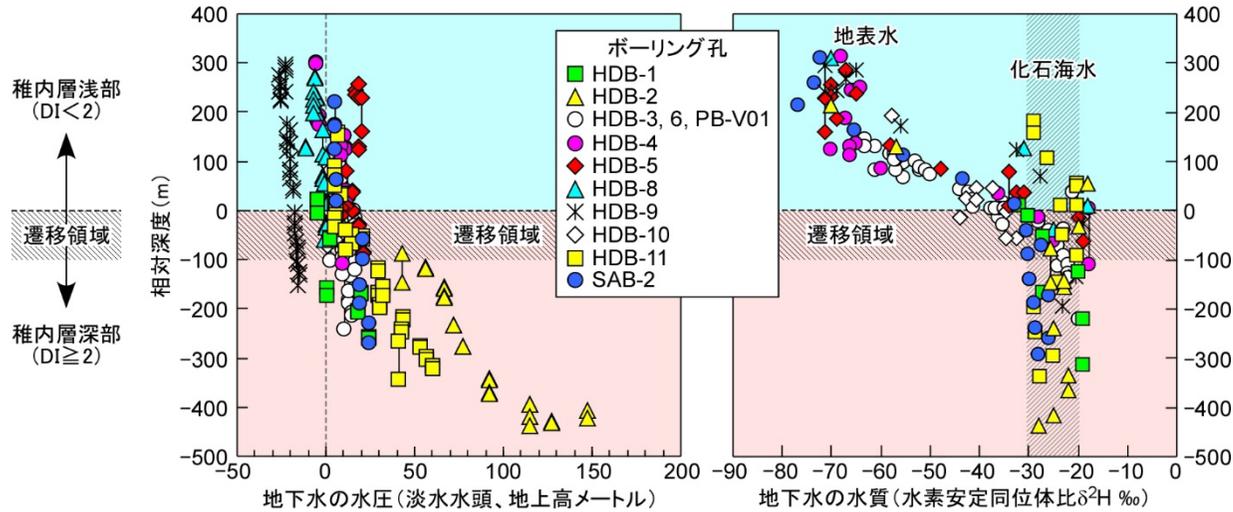
原位置透水試験結果の
フィッティング例⁽⁷⁾



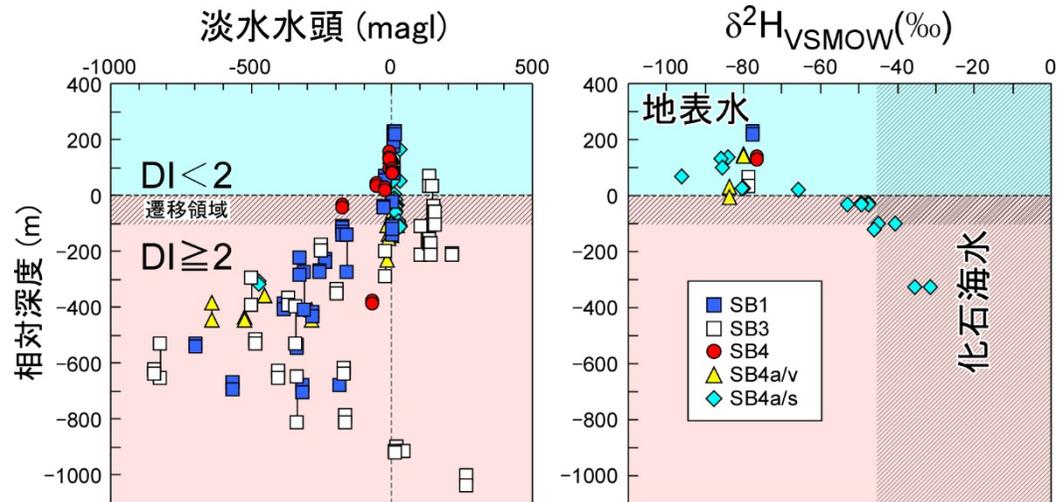
水圧擾乱試験結果の
フィッティング例⁽¹³⁾

割れ目内の水みちのつながり方の次元を専用のシミュレーター(nSIGHTS)により決定

補足6

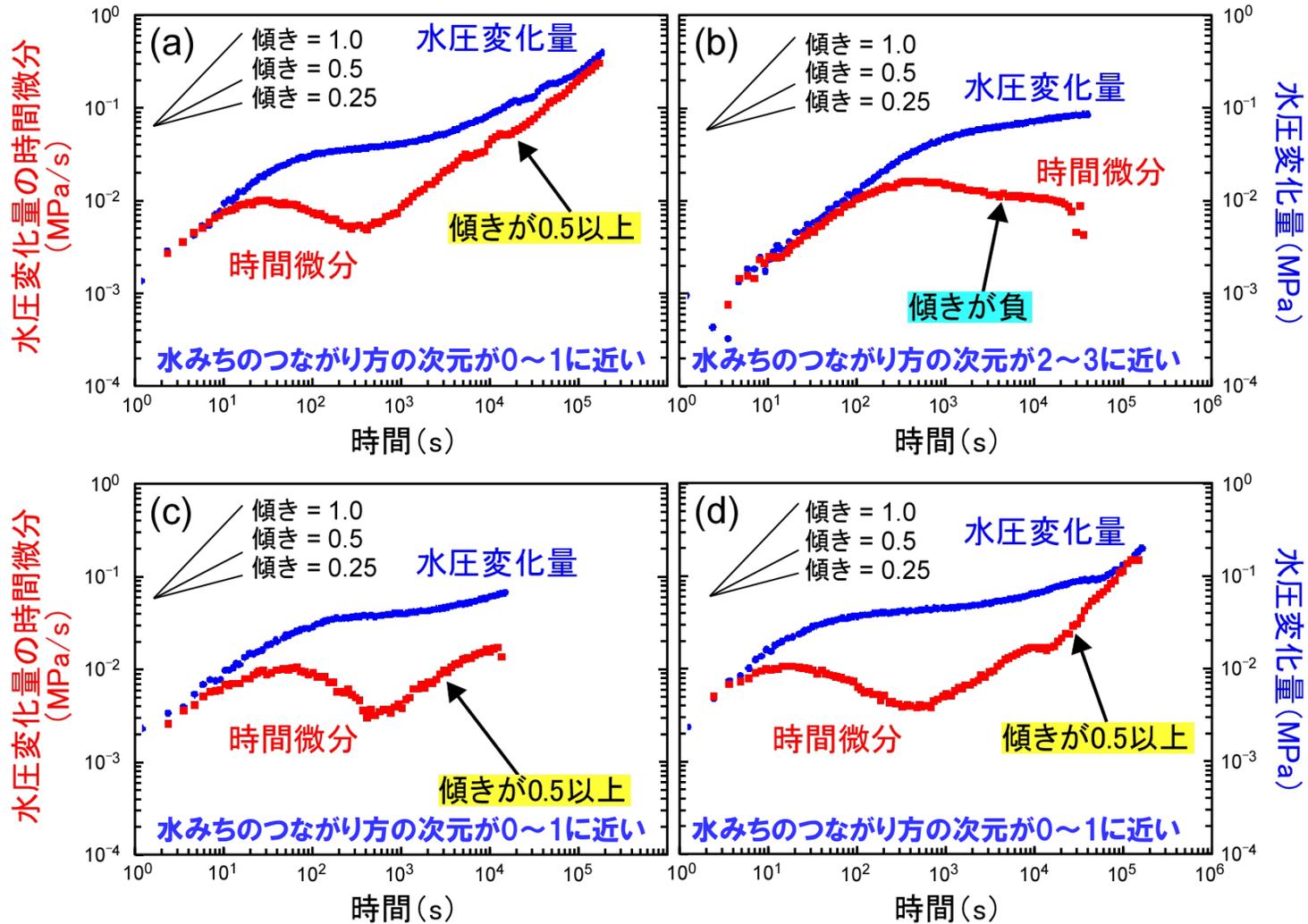


稚内層の地下水の水圧と安定同位体比⁽²⁷⁾



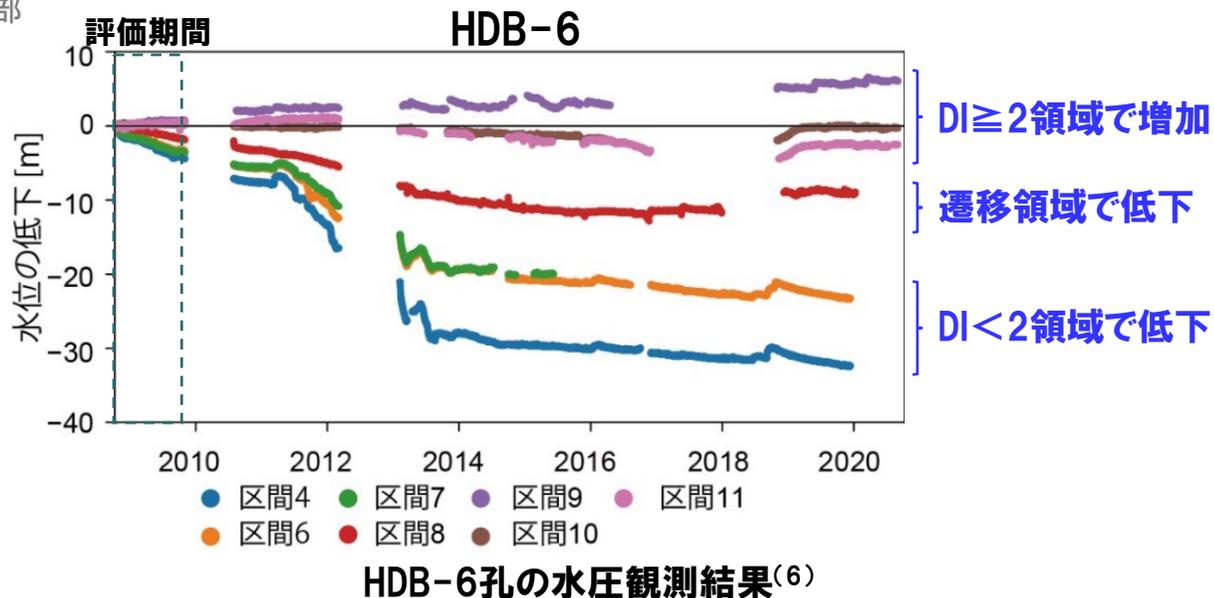
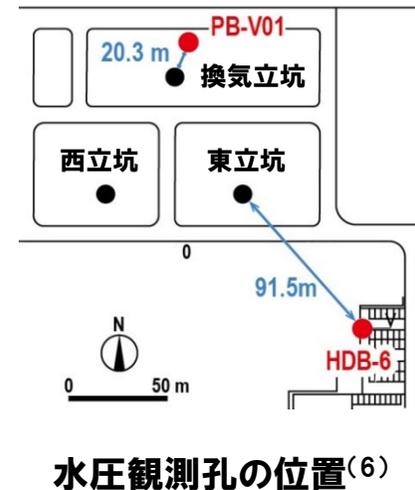
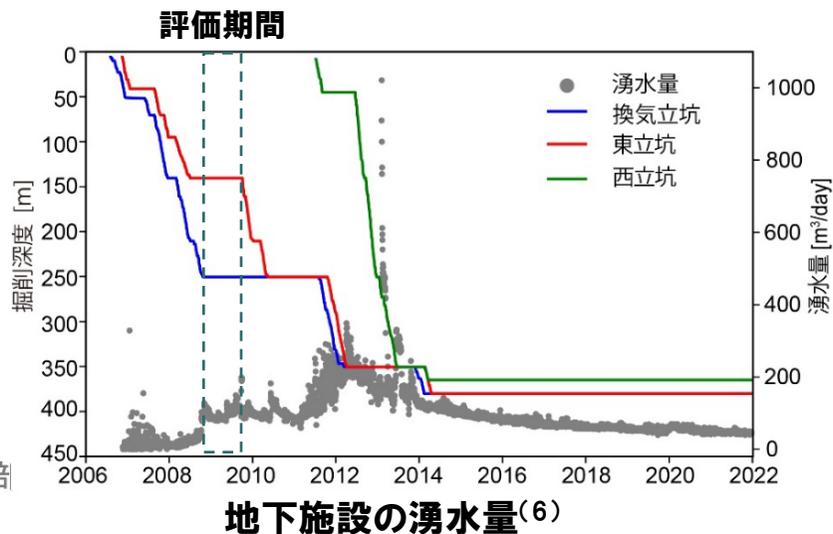
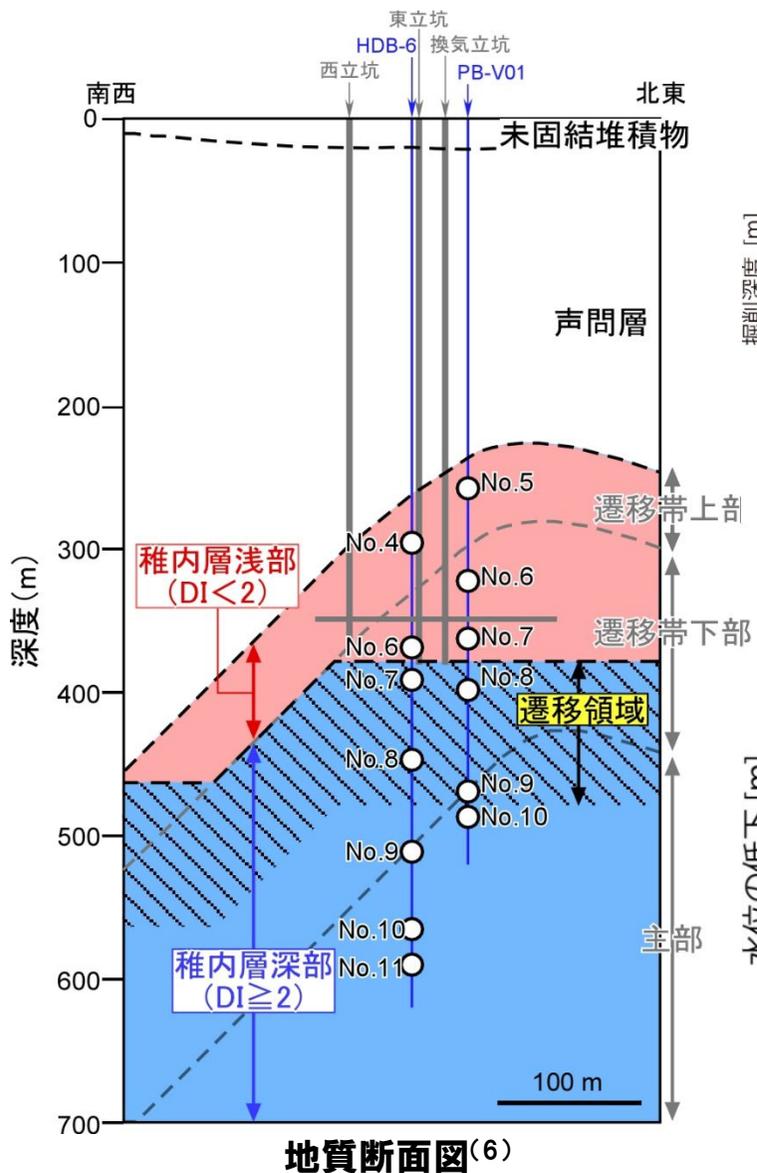
パルプリス層の地下水の水圧と安定同位体比⁽²⁷⁾

補足7

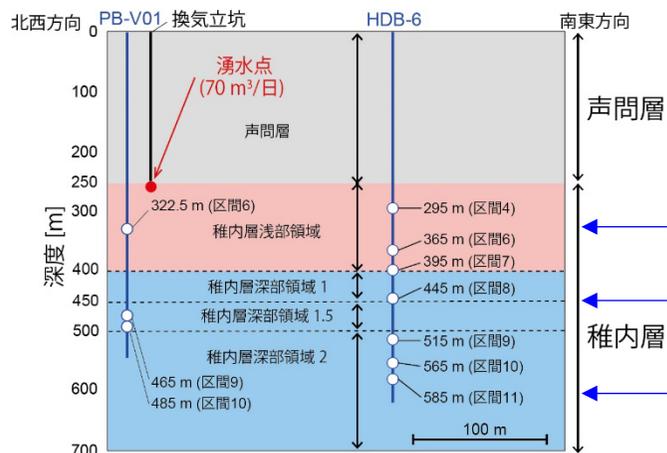


稚内層中の断層帯を対象とした水圧擾乱試験の直前(a)、8日後(b)、44日後(c)、および72日後(d)に実施した透水試験時のデリバティブプロット⁽⁵⁾

補足8 (1/2)



補足8 (2/2)

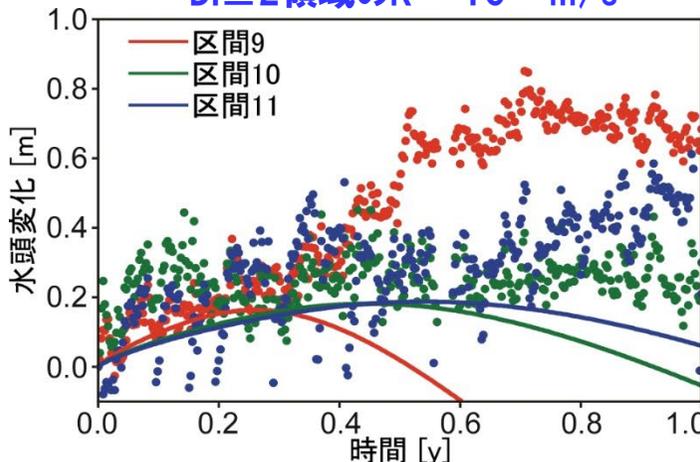


多孔質弾性パラメーターは青木ほか(2008、第12回岩の力学国内シンポ)の健岩部の試験結果を採用

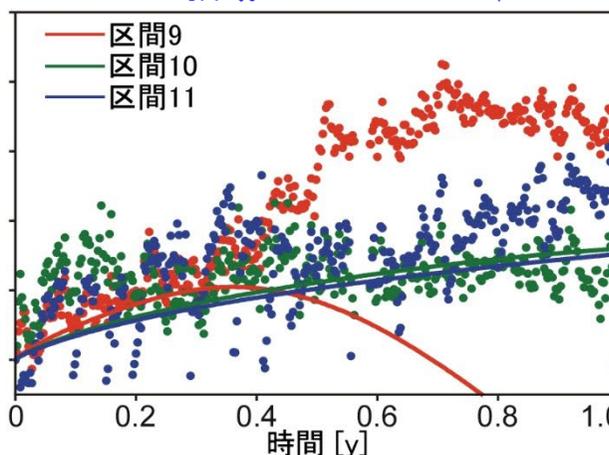
- ← $DI < 2$ 領域 ($K = 10^{-8}$ m/s) 断層の局所的な透水性相当
- ← 遷移領域 ($K = 10^{-10} \sim 10^{-9}$ m/s) 断層と健岩部の中間的な透水性に相当
- ← $DI \geq 2$ 領域 ($K = 10^{-11} \sim 10^{-10}$ m/s) 健岩部の透水性相当

水理地質モデル(6)

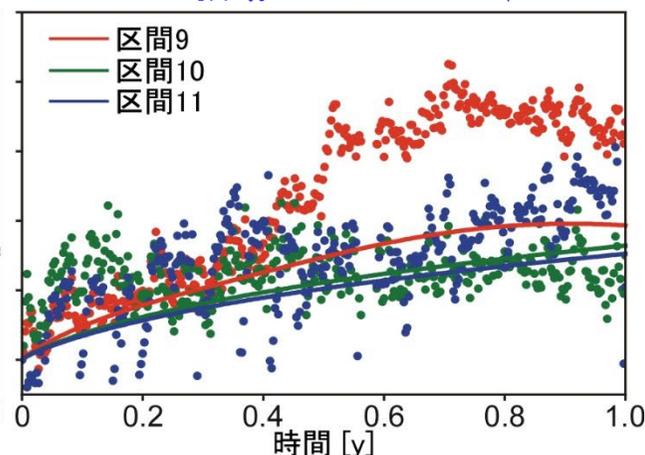
$DI \geq 2$ 領域の $K = 10^{-9}$ m/s



$DI \geq 2$ 領域の $K = 10^{-10}$ m/s



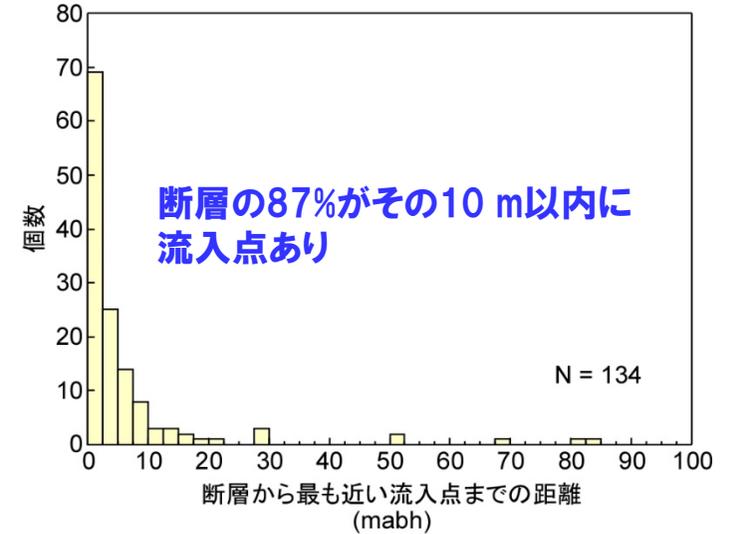
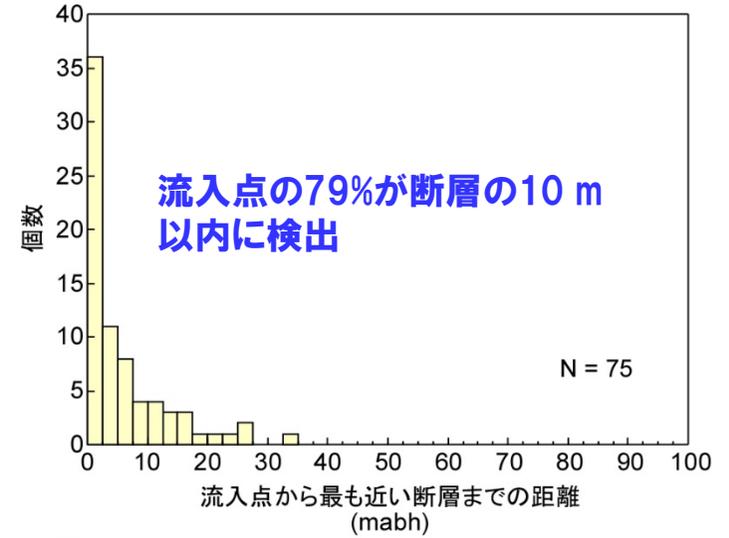
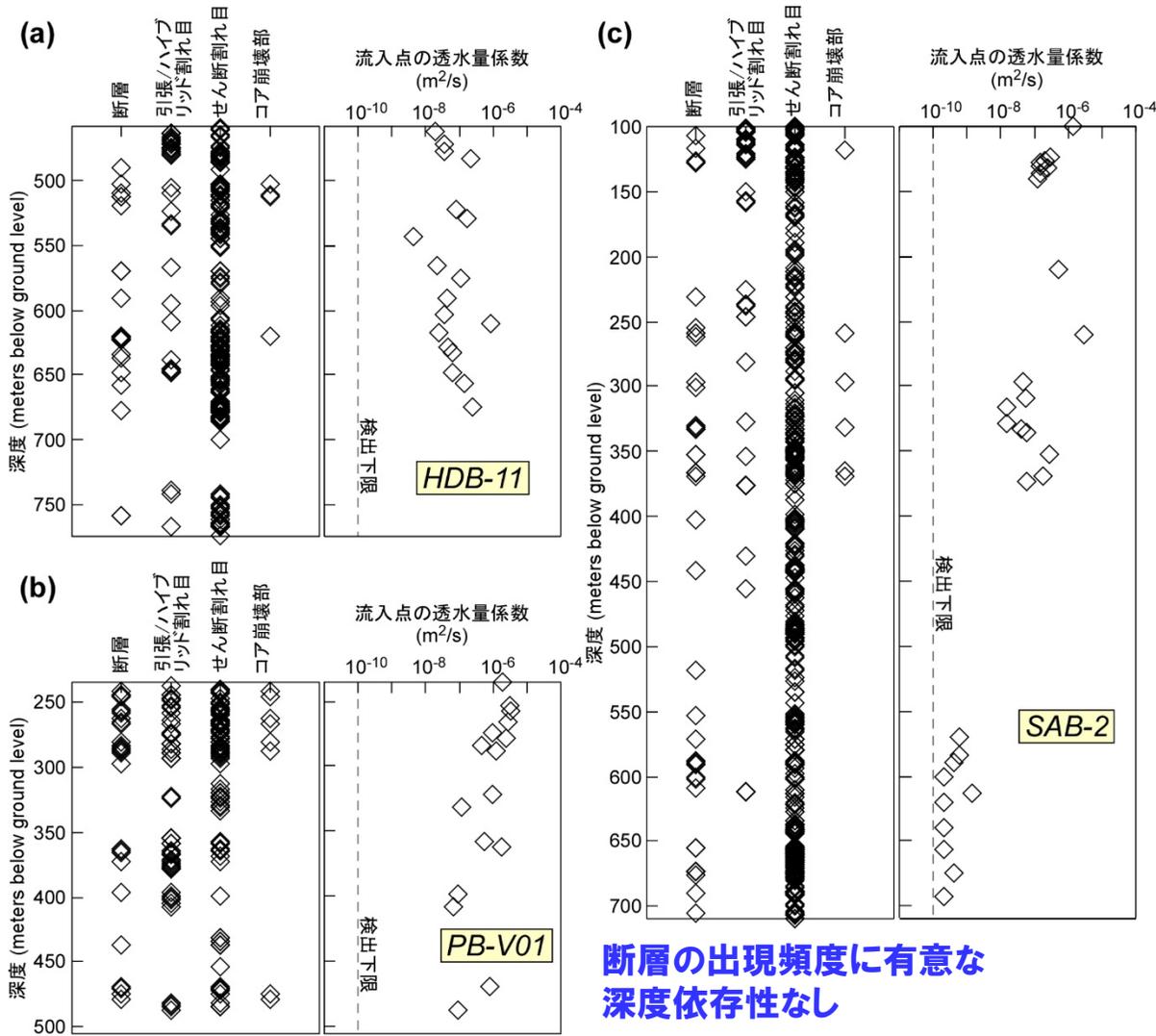
$DI \geq 2$ 領域の $K = 10^{-11}$ m/s



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(6)

$DI \geq 2$ 領域の透水係数 K を 10^{-10} m/s もしくは 10^{-11} m/s に設定すると観測された水圧を再現可能

補足9



椎内層のボーリングコア観察と流体電気電導度検層の結果