

高透水性や低透水性岩盤における浸透特性の調査、評価方法

2015/11/14

安藤ハザマ 今井 久

内容

1. 渡邊邦夫先生
2. 高透水性岩盤の浸透特性評価
高粘性流体を使用した透水試験
3. 低透水性岩盤の浸透特性評価
蒸発量測定による岩盤浸透特性の調査方法
4. おわりに

1. 渡邊邦夫先生

渡邊先生のプロフィール

埼玉大学名誉教授

専門分野 深層処分工学・地圏環境工学

1949年3月15日生(岐阜県)

1973年 名古屋大学理学部地球科学科卒

1974年 埼玉大学工学部

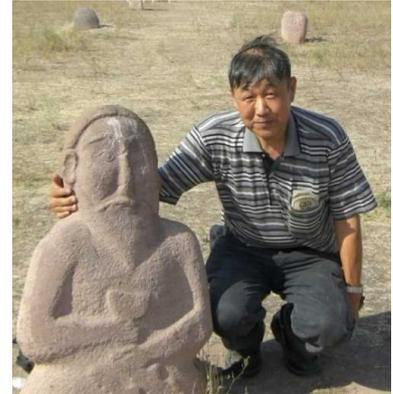
地盤水理実験施設 助手

1985年 埼玉大学工学部 助教授

1997年 埼玉大学工学部 教授

2014年 退職

2015年7月08日没(享年66歳)



博士論文:(東京大学), 1983年

「岩盤割れ目系の諸地質量を考慮した
岩盤浸透流の解析に関する基礎研究」

2

渡邊先生の仕事 —業績を8分野に整理—

1. 地盤や岩盤割れ目系の評価、モデル化に関する研究

渡邊邦夫、花崗岩中に発達するMicro-crack系の性状とその定量評価の2、3の試み、応用地質、vol.20,no.2,pp.58-68,1979.

2. 岩盤中の浸透流の性質に関する研究

渡邊邦夫、星野吉昇、岩盤中に発達する単一開口割れ目の透水係数の算定、応用地質、vol.21,no.2,pp.60-70,1980.

3. 岩盤内浸透流に関する割れ目ネットワークの開発と解析

田中達也、渡邊邦夫、前川恵輔、中村直昭、地質構造を基礎とした、フラクチャーネットワークモデルの開発(その1)、応用地質、vol.35, no.3, pp.22-33, 1995.

4. 岩盤中のトンネル壁面からの蒸発測定、不飽和パラメーター推定

渡邊邦夫、藍沢稔幸、小野誠、柳沢孝一、佐久間秀樹、山本肇、神田信之、蒸発量計測によるトンネル壁面からの湧水量の測定、(その1)、応用地質、vol.30, no.4, pp.189-196,1989.

5. 不飽和浸透流と蒸発特性に関する研究

渡邊邦夫、今井久、水みちを持つ斜面内の非定常地下水流れの性質、応用地質、vol.25, no.1,pp.222-232, 1984.

6. 地下水の水質や河川水の流況変化に関する研究

大野博之、対馬孝治、小倉紀雄、渡邊邦夫、橋脚工事による河川敷内の流水変化について、応用地質、vol.43, no.3, pp. 156-167, 2002.

7. 河川流出解析や地下環境管理に関する研究

星野吉昇、内田善久、渡邊邦夫、藤井健知、ANNモデルの学習の高度化とロックフィルダムの間隙水圧の挙動予測、土木学会論文集F、Vol. 62, No. 2 pp.387-404、2006.

8. 環境考古学、遺跡修復に関する研究

渡邊邦夫、古墳土構造にみる不飽和浸透流制御、土と基礎、vol.40, no.1, pp.19-24, 1992.

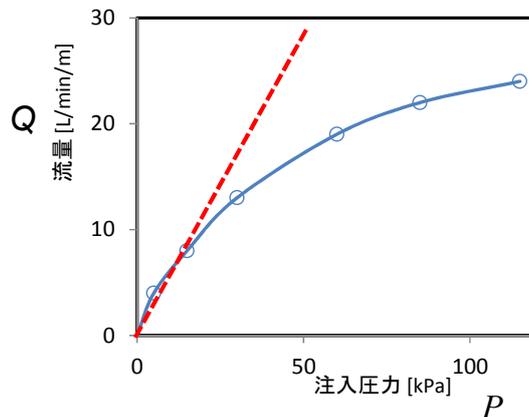
3

2. 高透水性岩盤の浸透特性評価 高粘性流体を使用した透水試験

高透水性岩盤でルジオン試験などの注水試験を実施した場合、流れが乱流になり、層流を前提としたダルシー則の適用範囲外で、流動抵抗が大きく、みかけ上、透水係数が小さく評価される。

$$Q = \frac{2\pi kL}{\ln(L/r_0)} P$$

Q : 流量、 k : 透水係数、
 L : 区間長、 P : 注入圧力水頭、
 r_0 : 口径



乱流の影響を受けた流量減少型PQ曲線

4

層流と乱流

層流と乱流は、無次元量であるレイノルズ数 Re により判定される。

$$Re = \frac{Du}{\nu} = \frac{4Ru}{\nu} \quad R = \frac{A}{S} = \frac{\pi D^2/4}{\pi D} = \frac{D}{4}$$

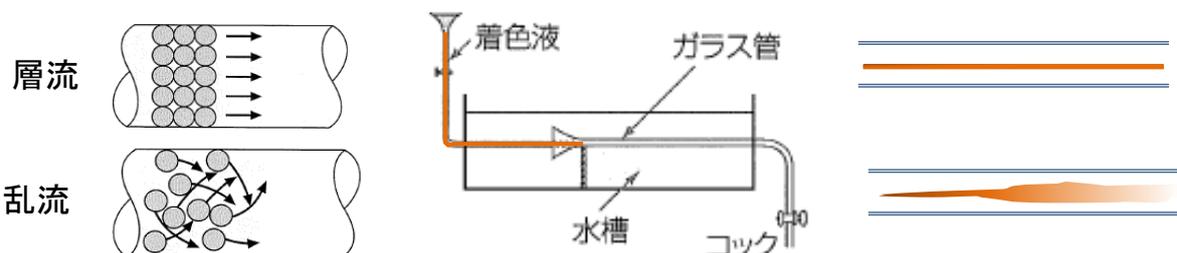
ここで、 D は管路の直径、 u は管路内の平均流速、 ν は動粘性係数、 R は径深
 A は断面積、 S は潤辺長

一般に管路(管路面は平滑)の場合は

$Re \leq 2000$ 層流
 $2000 < Re < 4000$ 過渡状態
 $Re \geq 4000$ 乱流

割れ目内に凹凸があると
 $Re \leq 500$ で層流

動粘性係数が大きく(粘性が大き)くなると Re は小さくなり、層流となりやすい。

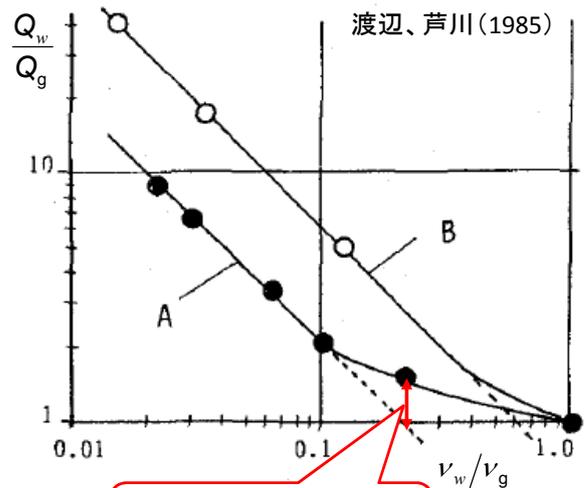
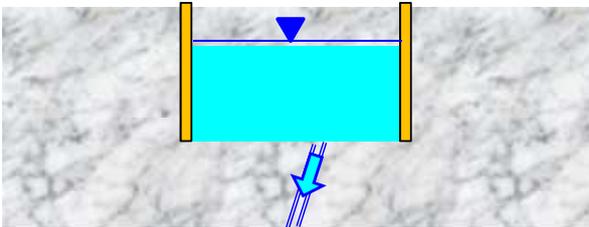


高粘性流体を使用した透水試験

開口割れ目の多い安山岩の上を掘り込み、A,B二つのピット(広さ40cm×40cm×深さ30cm)を設け、ピット内を一定水位に保持し、一定水位で注水を行い定常時の流量を測定。注水に使用する水の粘性をグリセリンにて調整し、粘性の異なる流体ごとの流量を測定。

$$k = \frac{\rho g}{\mu} K = \frac{g}{\nu} K \quad \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

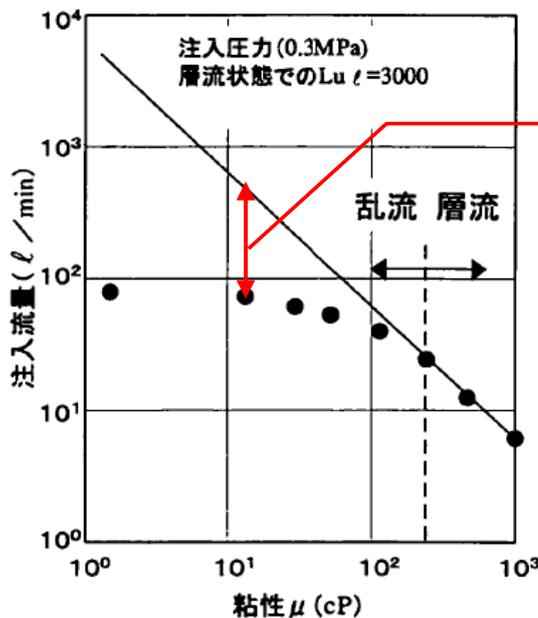
k : 透水係数 [LT⁻¹]、 K : 固有透過係数 [L²]、
 g : 重力加速度 [LT⁻²]、 ρ : 粘性係数 [ML⁻¹T⁻¹]、
 ν : 動粘性係数 [L²T⁻¹]



A-Lineの傾向より大きい
 ⇒ Q_g が小さい

- ν_w 水の動粘性係数 (0.01cm²/s)
- ν_g グリセリンを混ぜた水の動粘性係数
- Q_w 水の注水量
- Q_g グリセリンを混ぜた水の注水量

粘性係数と注入流量



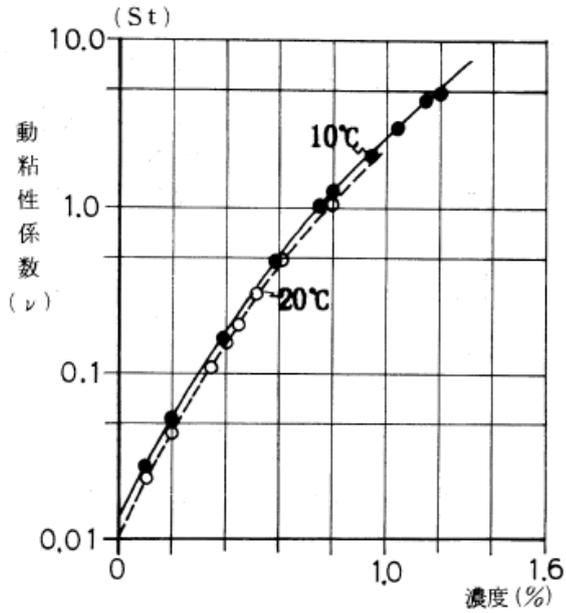
乱流抵抗による流量減

出典: 角江, 俊昭氏博士論文 2003、節理性岩盤の透水性評価ならびに基礎処理工法に関する研究

増粘剤の濃度と粘性係数

増粘剤

- ・グリセリン
粘性の高い液体
比重1.25程度
高価
- ・メチルセルロース
水溶性の微粉末
動粘性係数は
0.5%で水の30倍
1.0%で水の200~250倍
水との密度の差が小さい



メチルセルロース濃度と動粘性係数
出典:岩本ほか(1990)

8

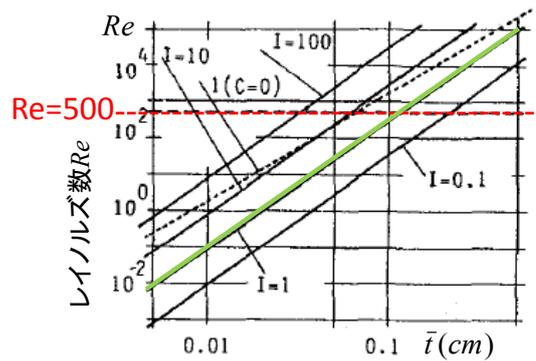
割れ目幅、動粘性係数、レイノルズ数

割れ目幅が6.5mm以下で割れ目内に凹凸がある場合の流速推定式(渡辺1981)

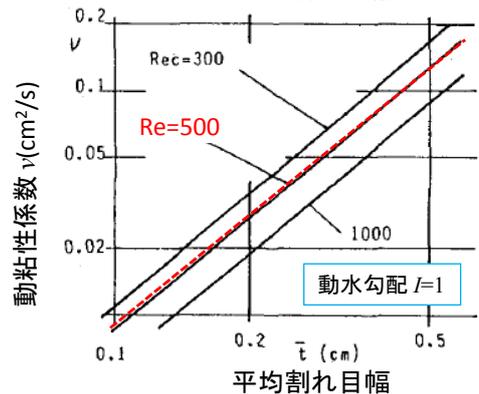
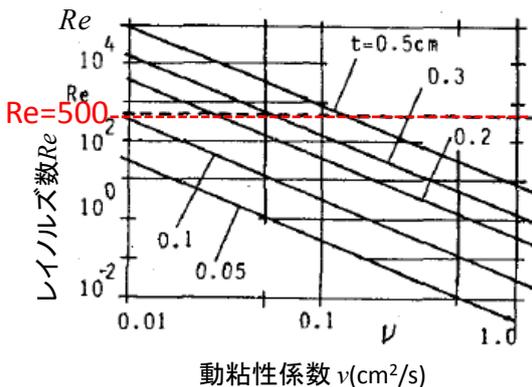
$$u = \frac{g\bar{t}^2 I}{12\nu(1+\bar{t}^{-0.6})} \quad \Rightarrow \quad Re = \frac{2g\bar{t}^3}{12\nu^2 \cdot (1+\bar{t}^{-0.6})}$$

$$k = \frac{g\bar{t}^2}{12\nu(1+\bar{t}^{-0.6})} \quad Re \approx \frac{2\bar{t}u}{\nu}$$

凹凸がある場合 $Re \leq 500$ で層流



平均割れ目幅



平均割れ目幅

9

高粘性流体を使用した主な研究事例

著者	タイトル	投稿誌	年
渡辺邦夫、芦川亮一	割れ目岩盤の透水試験における乱流の影響評価の試み	第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.161-165	1985
山口嘉一、渋市秀雄、松本徳久	ルジオン試験における乱流の影響と対策	第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.401-405	1989
岩本忠信、園元秀夫、有門英幸、上妻睦男	高粘性流体を用いた岩盤透水係数の測定—溶結凝灰岩を対象としたルジオンテスト—	応用地質 31巻2号 pp.1-8	1990
角江俊昭、久保田克寿、萩原義孝	亀裂性岩盤における透水試験結果の評価について	第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.471-475	1993
山口嘉一、渋市秀雄、松本徳久	高粘性流体試験による高透水性岩盤の透水性評価	地下水学会誌、第37号, pp.31-46	1995
角江俊昭、岸裕和、西垣誠	節理性岩盤のルジオン値と透水性の関係とその評価方法	土木学会論文集 No.736/III-63, pp.67-82	2003
長谷川琢磨、田中靖治、西垣誠	高粘性流体の注入による有効間隙率と流れの次元の評価	土木学会論文集C Vol.63 No.1, pp.163-173	2007

10

渡辺・芦川(1985)以降の研究成果

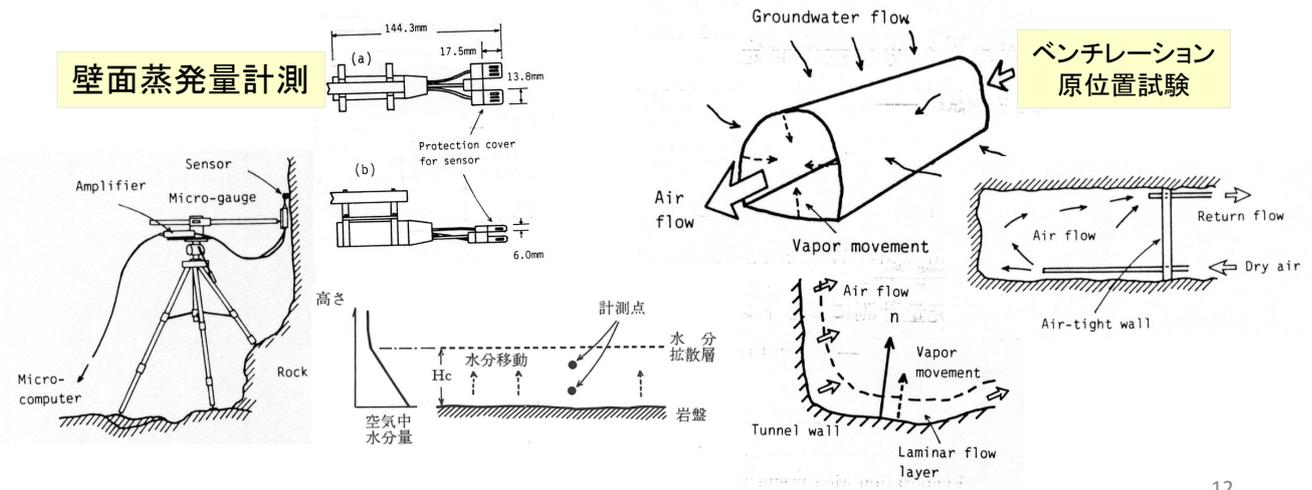
- ◆ 増粘剤をグリセリンからメチルセルロースへ(コストダウン)
- ◆ 使用する高粘性流体物性の正確な把握
- ◆ ルジオン試験における多くの高粘性流体適用試験の実施によるデータの蓄積と適用性・有効性の確認
- ◆ 10Lu以上の岩盤では、層流状態で試験すると乱流状態より1オーダー以上大きなLu値(透水係数)評価
- ◆ 理論的な考察、評価
- ◆ 流れ場形状の推定への応用

11

3. 低透水性岩盤の浸透特性評価 蒸発量測定による岩盤浸透特性の調査方法

放射性廃棄物処分では、従来の土木工事等では不透水とされていた低透水性岩盤の透水性を評価する必要がある。低透水性岩盤からの湧水量を従来の方法で測定することは難しく、坑道壁面からの湧水を水蒸気として測定する方法が渡辺(1989, 1990)により提案された。

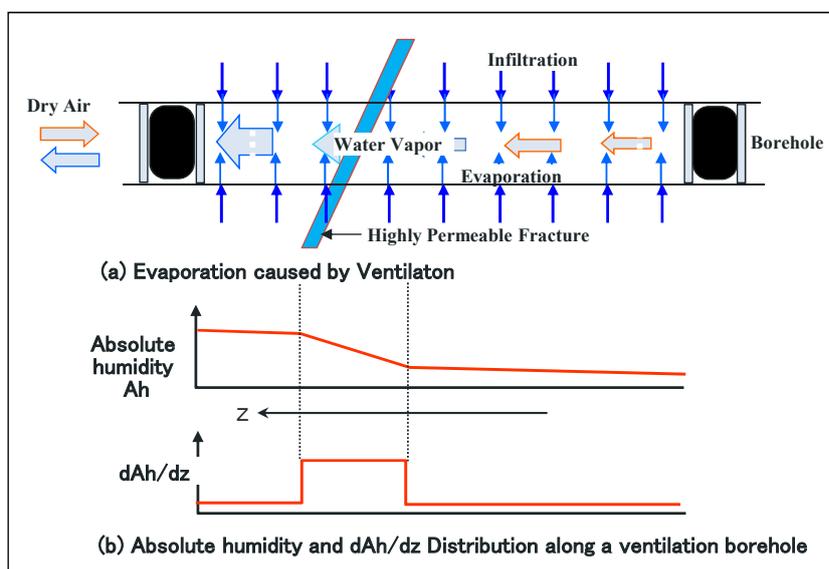
ここでは、ボーリング孔を利用した蒸発量測定法“Evaporation Logging”について紹介する。



12

Evaporation Logging とは

透水性の低い岩盤のボーリング孔内で蒸発量を測定し、岩盤からの湧水量、透水ゾーンを調査するための調査法



13

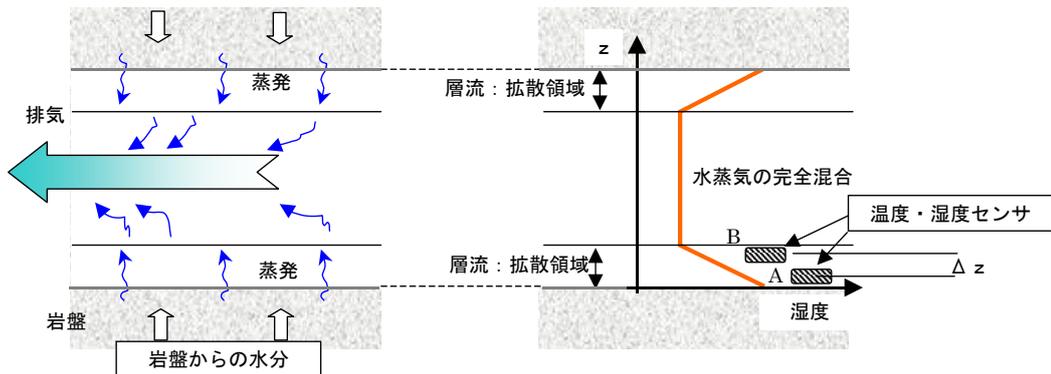
測定原理 — 蒸発量の算定 —

1センサー
$$\frac{\delta ah(x)}{\delta x} \cdot \Delta x \cdot q = Ev(x) \cdot \Delta x \cdot L$$

ah(x): 孔軸方向の絶対湿度、x: 孔軸方向距離、
Ev(x): 孔壁からの蒸発量(孔周方向平均)、L: ボーリング孔周長

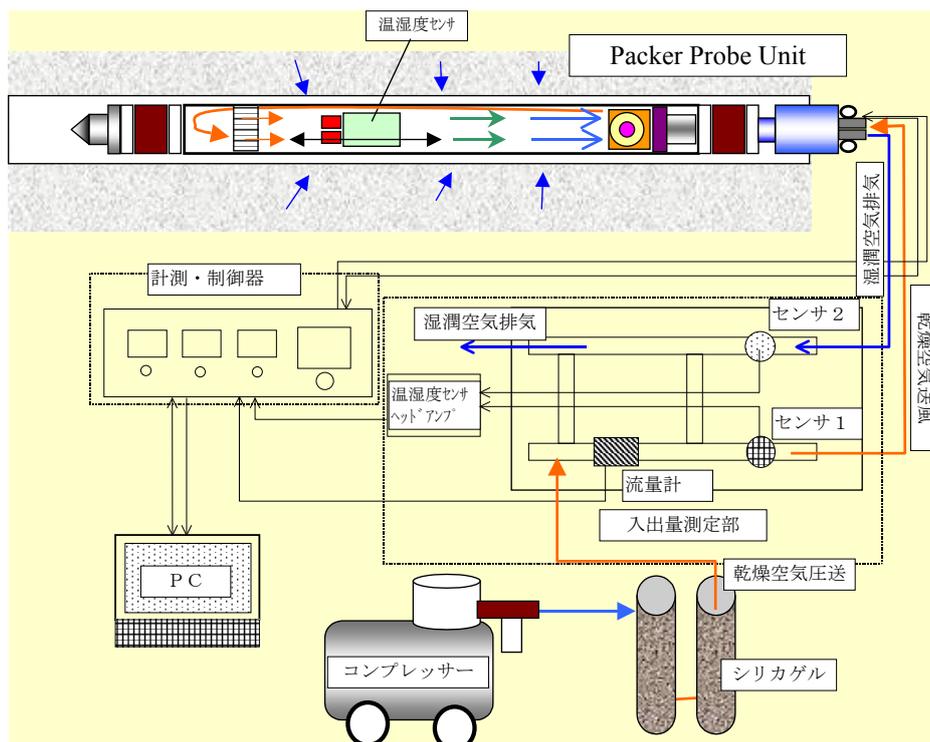
2センサー
$$Ev(x) = -D \frac{\partial AH(x, z)}{\partial z} = -D \frac{AH_A - AH_B}{\Delta z}$$

D: 水分拡散係数、z: 孔壁からの距離



14

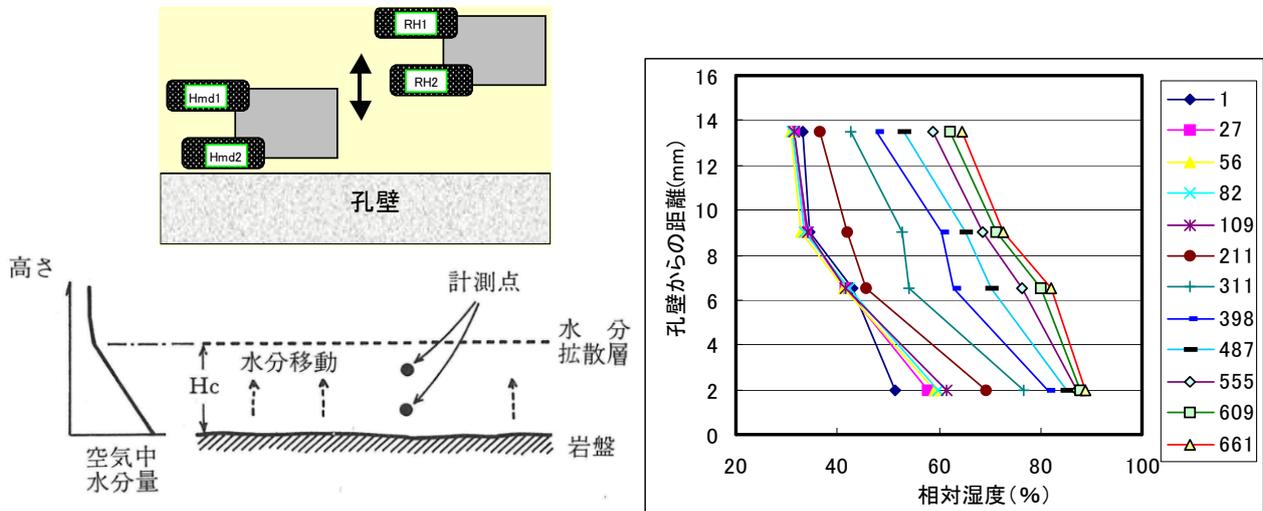
装置の概要



15

孔壁からの距離と相対湿度

相対湿度勾配の線形性の確認



16

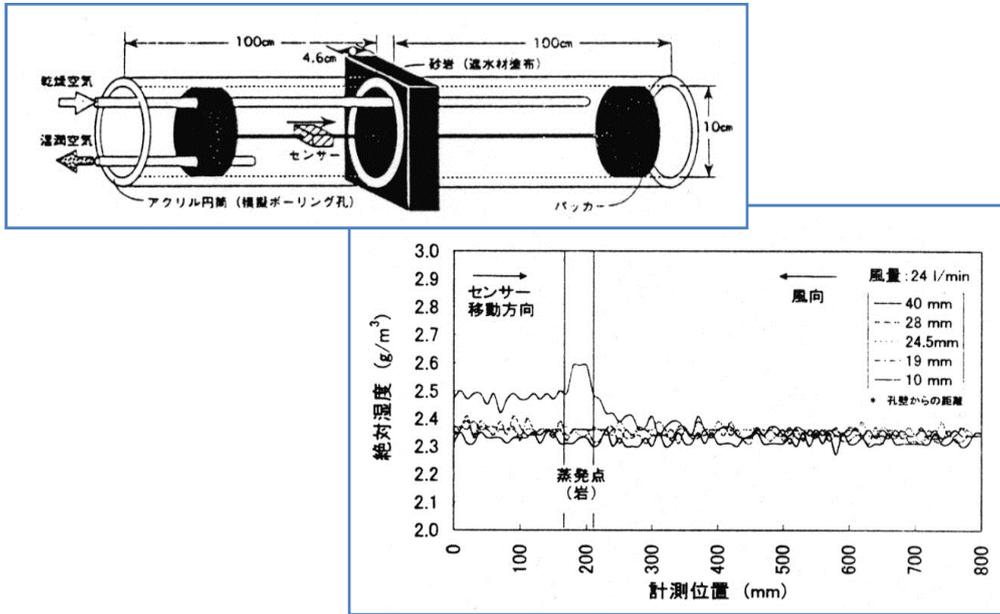
3種類の試験方法

- ① Traverse test: 乾燥空気送気時に試験区間内で湿度センサーを移動・計測し、湿度分布を測定し試験区間内の蒸発量のコントラスト(水分を供給する亀裂等)を把握
- ② Ventilation test: 試験区間内へ送った水分量(送気の温度・湿度・圧力測定による)と試験区間内から排出される水分量の差から試験区間内の岩盤からの蒸発量(経時変化)を測定し区間平均の水分供給能力を把握
- ③ Recovery test: 試験区間内へ十分に乾燥空気を送風し試験区間内湿度を低下させた後に乾燥空気の送風を停止し試験区間内の湿度の上昇を測定し周辺からの水分供給能力を測定

17

(1) Traverse test

室内試験により風量とセンサ位置の関係を把握
 蒸発量供給部を検出するためには風量24l/minで10mm以下
 である必要性
 送風停止後すみやかに測定することも有効

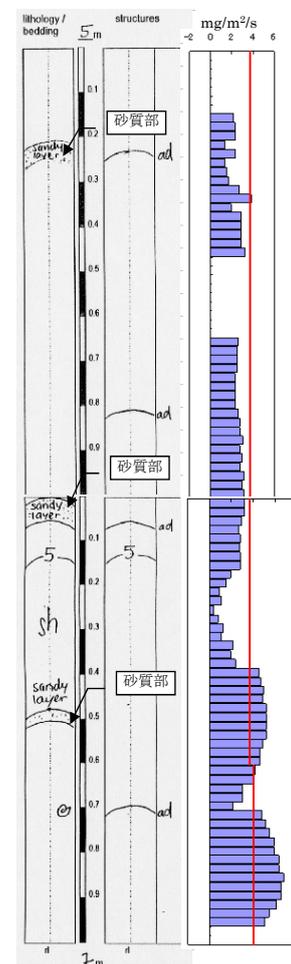
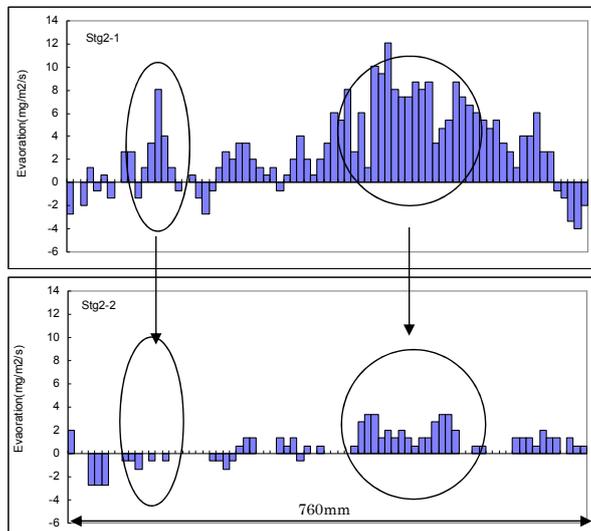


18

Traverse test 試験結果

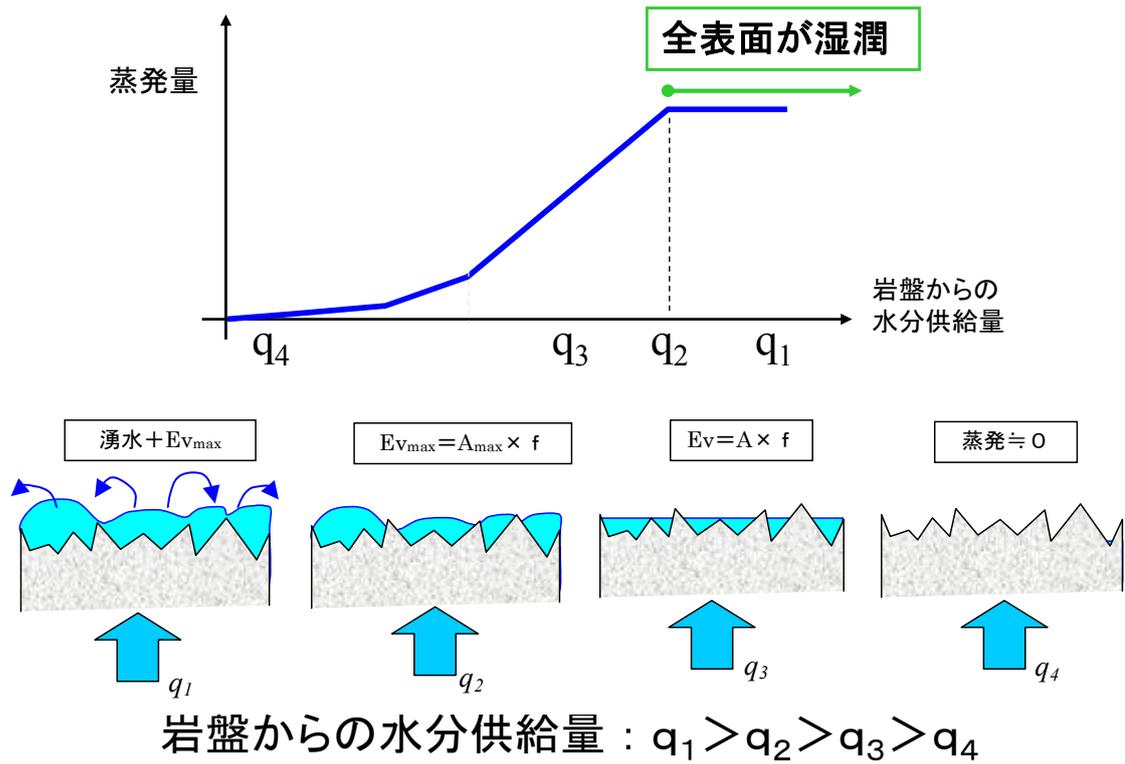
鉛直ボーリング孔での地質所見との対比

同一箇所での繰り返し測定



19

蒸発量と岩盤からの水分供給



20

蒸発量と岩盤からの水分供給 - 3 -

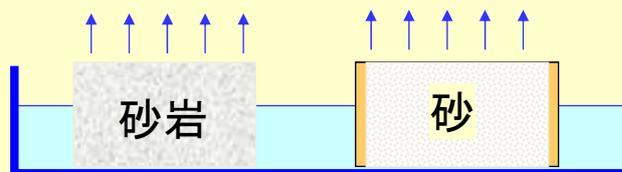
留意点

蒸発量は必ずしも岩盤からの水分供給量を表していない

例: 砂からの蒸発量と岩石からの蒸発量はほぼ同じ

$$E_{v1} \doteq E_{v2}$$

$$K_1 < K_2$$

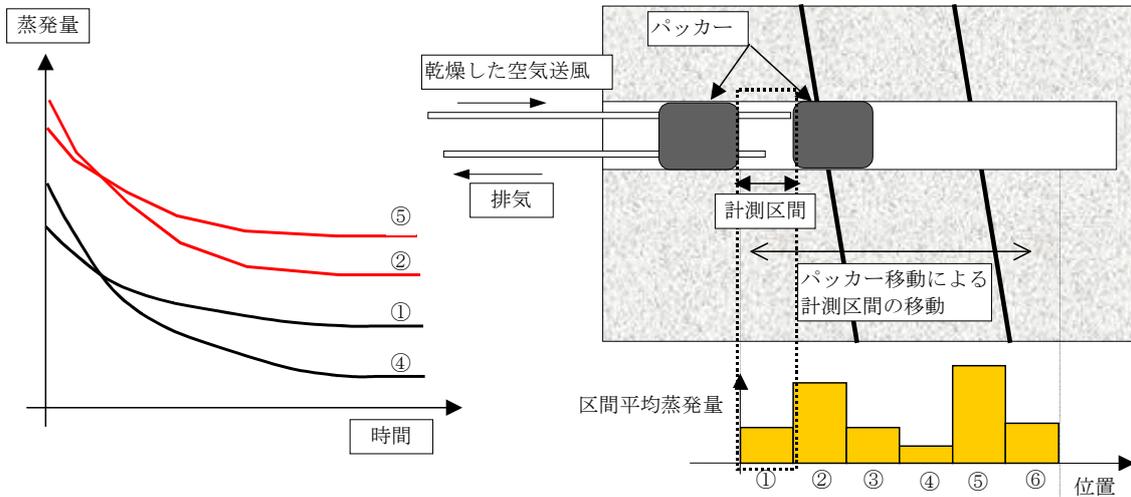


どのような状態での蒸発量かを把握する事が必要

21

(2) Ventilation test

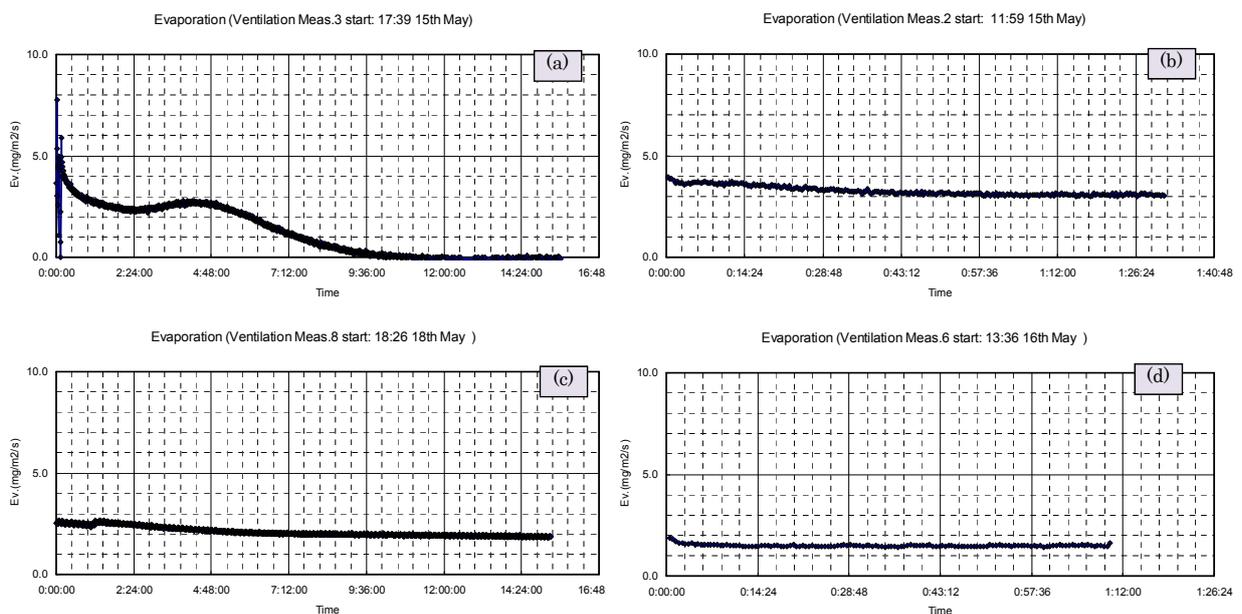
パッカーで区切られた区間へ乾燥空気を送り、送風と排気に含まれる水分量を測定、両者の差から区間内への周辺岩盤の水分供給能力を区間内の平均値として測定する方法



(a)各計測区間での蒸発量の経時変化 (b)試験レイアウトと試験結果イメージ
Ventilation test概念図

22

Ventilation testの結果



23

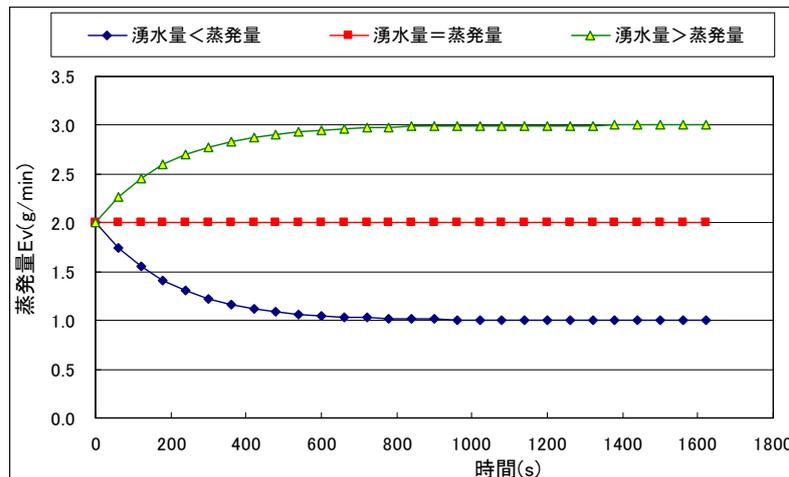
蒸発量と岩盤からの水分供給

■ 蒸発量 E_v と蒸発寄与部面積 A

$$E_v = f(T, RH, V, Sr) \longrightarrow q_{E_v} = E_v \cdot A$$

■ 蒸発寄与部面積 A の蒸発量 E_v による現象と水圧湧水による増加

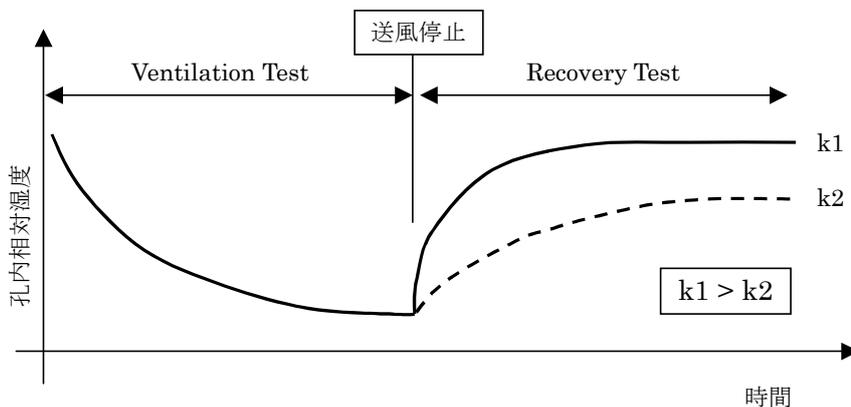
$$\frac{dA}{dt} = -k_1 \cdot E_v + k_2 \cdot p \longrightarrow E_v = \frac{k_2}{k_1} \cdot p - \left(E_v^0 - \frac{k_2}{k_1} \cdot p \right) \cdot e^{-k_1 \cdot f \cdot t}$$



24

(3) Recovery test

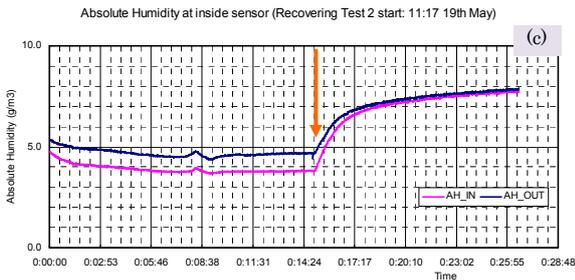
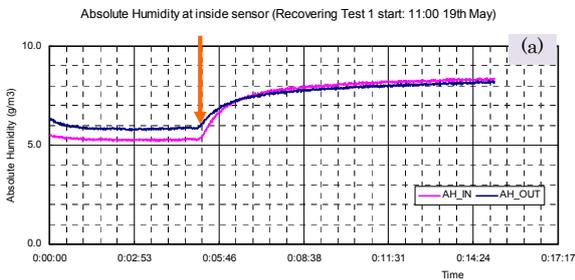
Recovery testはVentilation test終了後送気を止め、区間内の絶対湿度の回復(絶対湿度の上昇)状況を測定する試験
これにより試験区間の平均的水分供給能力を評価



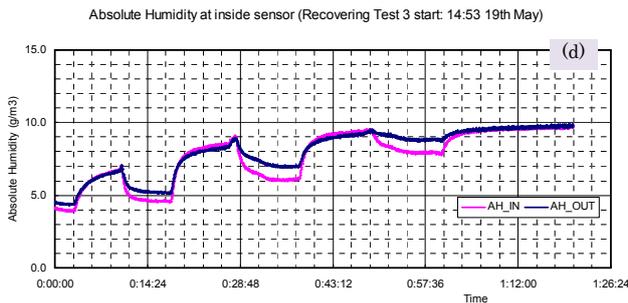
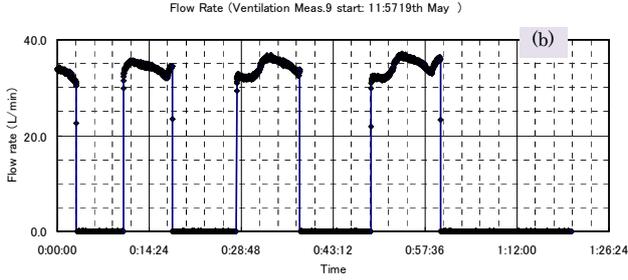
25

Recovery testの結果

単発試験



連続試験



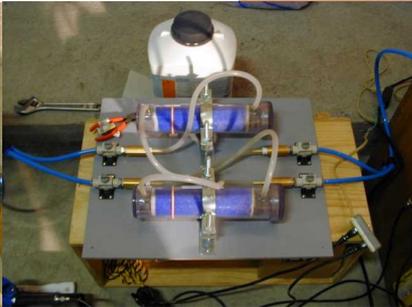
試験装置・試験状況



制御部



コンプレッサー(供气)

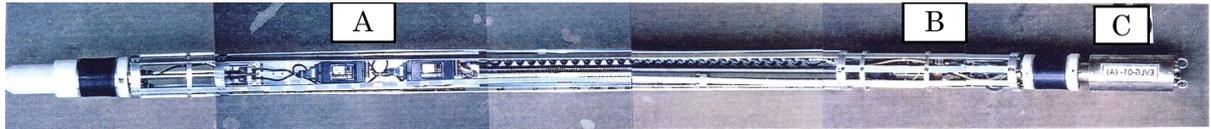


シリカゲル



湿度、流量センサ部

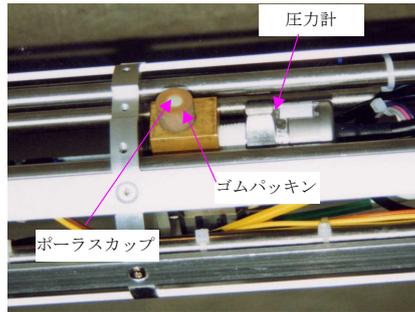
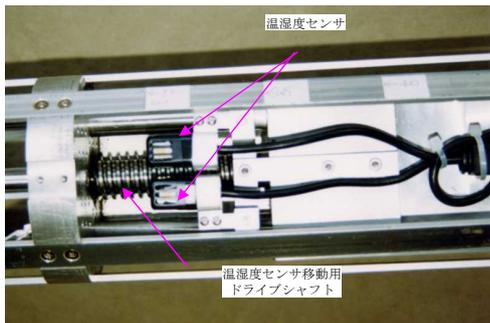
装置の写真ー パッカープローブ ー



初期型



改良型



試験状況 2001



応用のアイデア：透水係数評価の試算

湧水量と蒸発量が釣り合った状態を岩盤間隙中に水分を保持しているポテンシャルと孔壁近傍の水蒸気ポテンシャルが釣り合った状態にほぼ近いと仮定
水蒸気ポテンシャルは土壌物理学の分野では化学ポテンシャル H とし、相対湿度の関数として次式のように示される。

$$H = \frac{R \cdot T}{M \cdot g} \cdot \ln(Rh)$$

M : 水の分子量 (0.018kg/mol)、 T : 絶対温度 (K)、 R : 気体定数 (8.314 J/K/mol)
 Rh : 相対湿度、 g : 重力加速度 (9.8m/s)

上記化学ポテンシャルを岩盤間隙中に水分を保持しているポテンシャルと等しいとして孔内ポテンシャル(孔内水位に相当)とし、ダルシー則に基づく円筒状飽和流れの連続式から透水係数を導く

$$k = \frac{Ev \cdot r_w \cdot \ln(Re/r_w)}{H_0 - H_w}$$

k : 透水係数 (m/s)、 Re : 影響半径 (m)、 r_w : ボーリング径 (m)
 H_0 : 境界部ポテンシャル水頭 (m)、 H_w : 孔壁部ポテンシャル水頭(m)

30

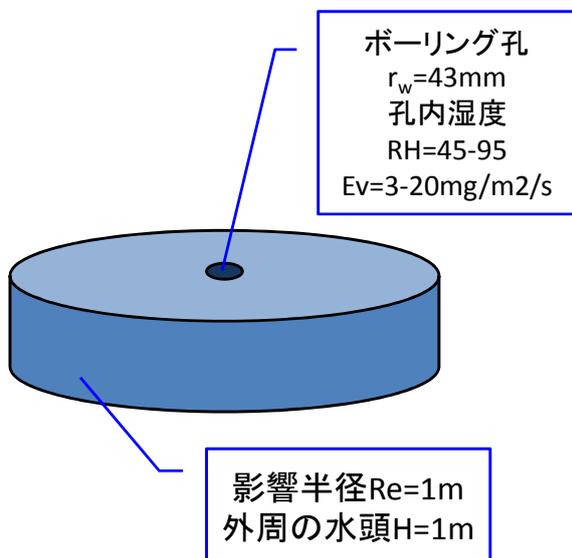
蒸発量と透水係数の関係試算結果

ボーリング口径86mm

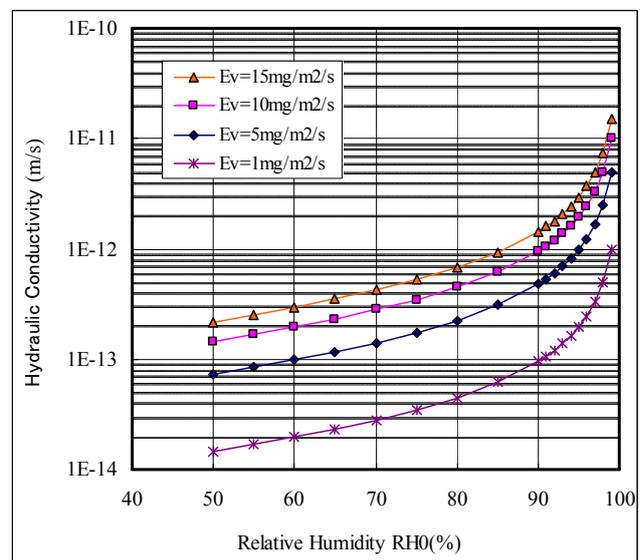
($r_w=43\text{mm}$)

影響半径1m

そこでの水頭を1mと仮定して計算



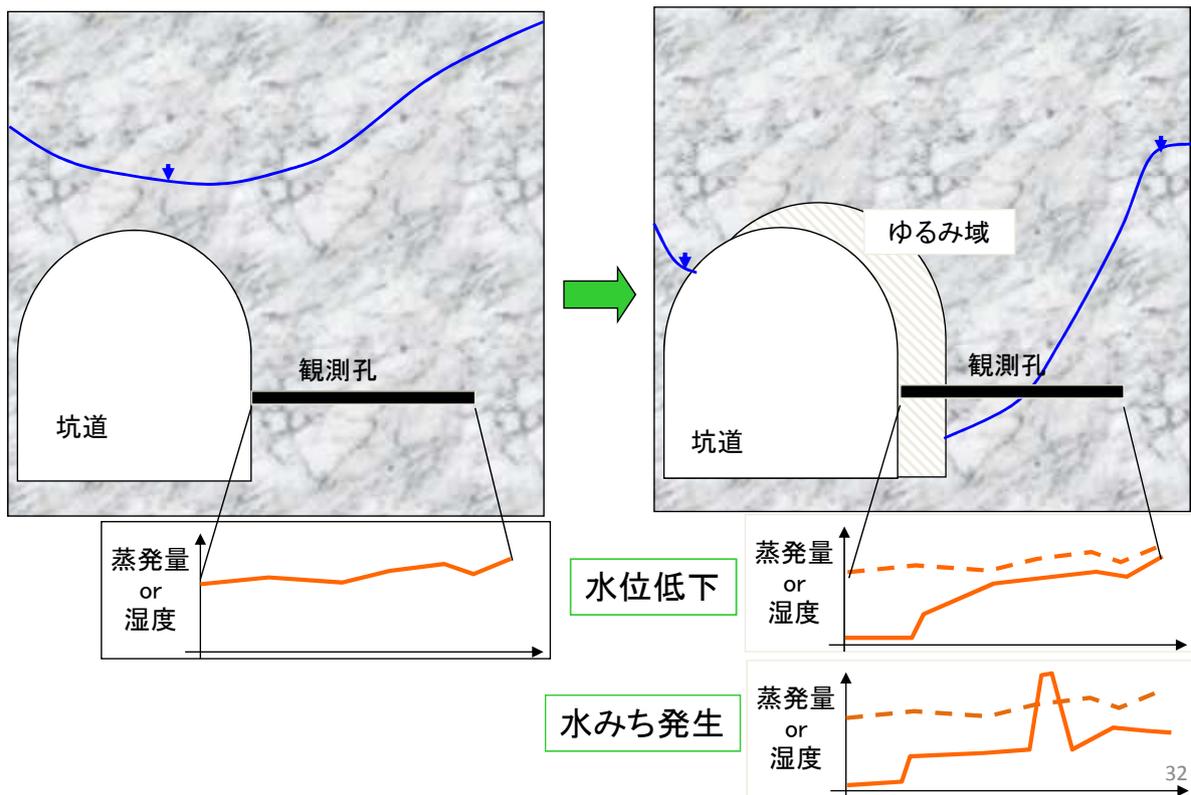
	Rh0 (%)	Ev (mg/m ² /s)	T (K)	Hw (mH ₂ O)	Re (m)	rw (m)	k (m/s)
Case-1	70	3	286.5	-4816	1.0	0.043	8.4E-14
Case-2	50	5	286.5	-9360	1.0	0.043	7.2E-14
Case-3	80	20	286.5	-3013	1.0	0.043	9.0E-13
Case-4	45	3	286.5	-10783	1.0	0.043	3.8E-14
Case-5	90	20	286.5	-1423	1.0	0.043	1.9E-12
Case-6	95	20	286.5	-693	1.0	0.043	3.9E-12



31

応用のアイデア：モニタリング

坑道周辺などの掘削影響領域の評価や経時変化の評価



今後検討すべき課題

- 1) パッカー区間内乾燥空気吹き出し部の整流機能を向上し、乾燥空気吹き出し部付近で気流の乱れによる蒸発量評価不能な欠測部を少なくする。
- 2) 調査精度を上げるためには蒸発量を抑えた比較的湿度の高い(飽和湿度に近い)条件で試験することが必要と考えられる。このため、高湿度に適用可能な湿度計を探し適用する。
- 3) 試験方法の紹介で透水係数評価の可能性を示したが現時点では透水係数を評価するに至っていない。また今回示した方法以外にも透水係数を評価する方法が考えられる。このため、これら評価方法を整理し、データの解析を進めこれら評価方法の適用性を確認するとともに、室内試験等追加・補足の試験を実施しEvaporation Loggingによる透水係数の定量的評価を確立する。
- 4) 孔内の蒸発から周辺岩盤の間隙水圧にどの程度、どの範囲で影響を与えて得るかを確認していない。透水係数評価を行う上からも確認しておく必要がある。
- 5) Evaporation Loggingはまだ適用実績も少なく、送風量、送風空気の湿度を変えた試験や長期にわたる試験を行うなど、さらなるデータ・実績の蓄積が必要である。

4. おわりに

「高透水性や低透水性岩盤における浸透特性の調査、評価方法」と題して、渡邊邦夫先生が考案した二つの調査方法、

- 1) 高透水性岩盤の浸透特性評価方法として高粘性流体を利用した調査、評価方法
- 2) 低透水性岩盤の浸透特性評価方法として蒸発量を利用した調査、評価方法

について示した。

これらの方法は

“自然科学の研究では、まず現象を観察することが大事”
という考え方から生まれたものだと思います。