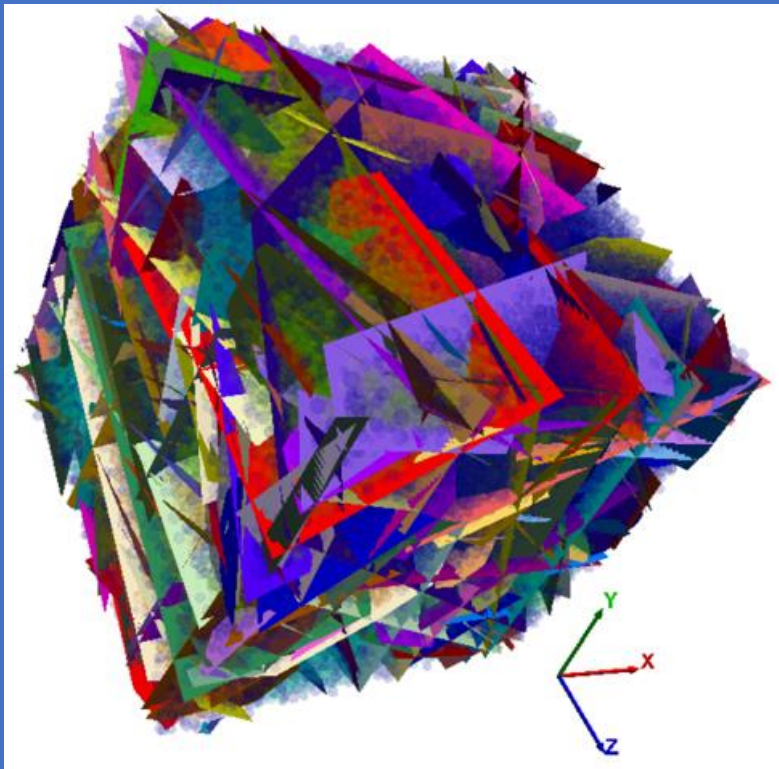


# 亀裂性媒体の地下水流動・核種移行解析における 不確実性

## Uncertainty in flow and mass transport model of fractured rock



### Fracture Flow Solutions

内田 雅大

Masahiro UCHIDA

2022年5月17日

土木学会シンポジウム

# 内容

## Contents

---

- 亀裂ネットワークモデル(DFN)  
Discrete Fracture Network Model (DFN)
- Geo-DFN vs Hydro-DFN  
Geo-DFN vs Hydro-DFN
- 連結性  
Connectivity of fractures
- チャンネリング  
Channeling
  - ① マトリクス拡散寄与面積  
Flow wetted surface
  - ② マトリクス拡散深さ  
Matrix diffusion depth
- まとめ  
Summary

# 内容

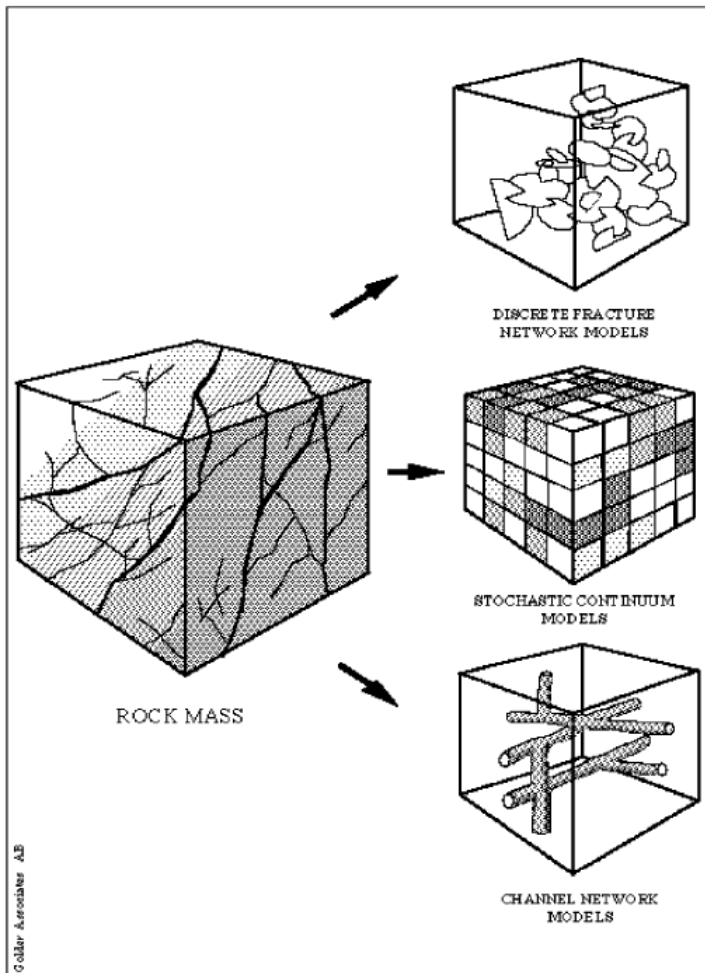
## Contents

---

- 亀裂ネットワークモデル(DFN)  
Discrete Fracture Network Model (DFN)
- Geo-DFN vs Hydro-DFN  
Geo-DFN vs Hydro-DFN
- 連結性  
Connectivity of fractures
- チャンネリング  
Channeling
  - ① マトリクス拡散寄与面積  
Flow wetted surface
  - ② マトリクス拡散深さ  
Matrix diffusion depth
- まとめ  
Summary

# 亀裂性岩盤中の水理・物質移行解析に 使用されるモデル

Models used for flow and mass transport simulation of fractured rock



- 亀裂ネットワークモデル  
(DFN: Discrete Fracture Network Model)

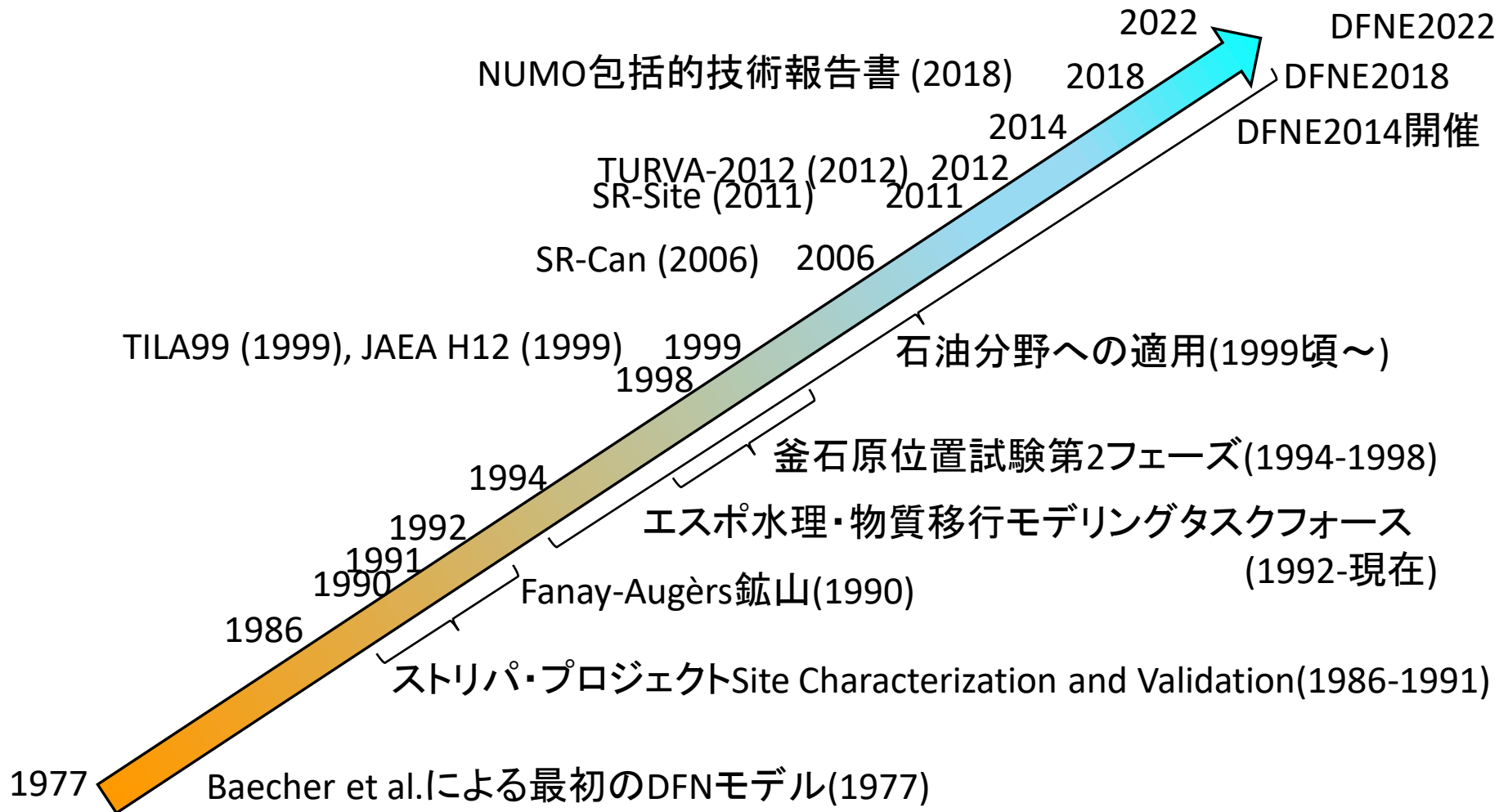
- 等価多孔質媒体モデル  
(EQPM: Equivalent Porous Media Model)

- チャンネルネットワークモデル  
(CN: Channel Network Model)

ハイブリッド  
モデル  
Hybrid model

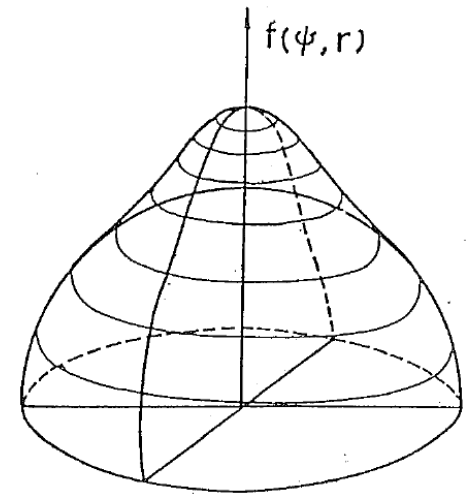
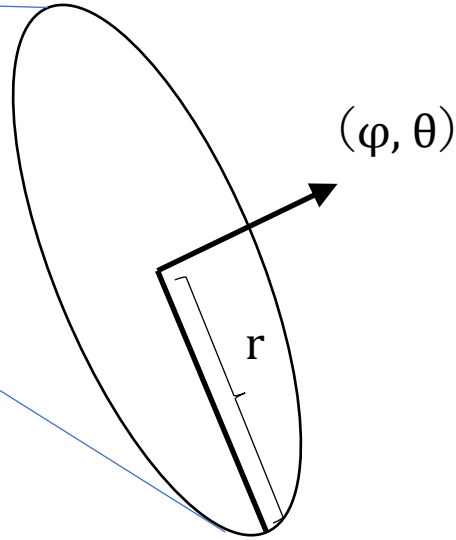
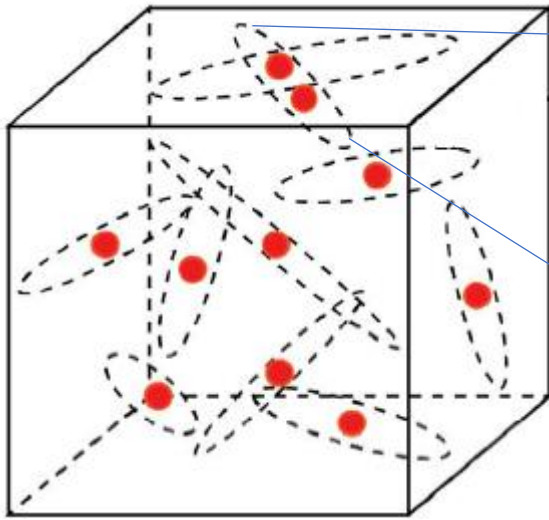
# DFNの歴史

History of DFN



# 亀裂ネットワークモデルの作成手順

## Modelling procedure of DFN



Fisher分布

- ① 亀裂中心：主にPoisson分布  
Fracture center: mainly Poisson model
- ② 亀裂の方向：主にFisher分布  
Fracture orientation: mainly Fisher distribution
- ③ 亀裂半径：対数正規分布、べき乗分布  
Fracture radius: log normal distribution, power-law distribution
- ④ 透水量係数：対数正規分布  
Transmissivity: log normal distribution



亀裂面積の合計が設定値( $P_{32}$ )になるまで確率密度関数からのサンプリングを繰り返し、亀裂を発生  
Generate fractures until sum of fracture surface area reaches prescribed fracture intensity ( $P_{32}$ )



リアライゼーション → 指定回数繰り返す  
Realizations: generate the prescribed number of realizations

# 内容

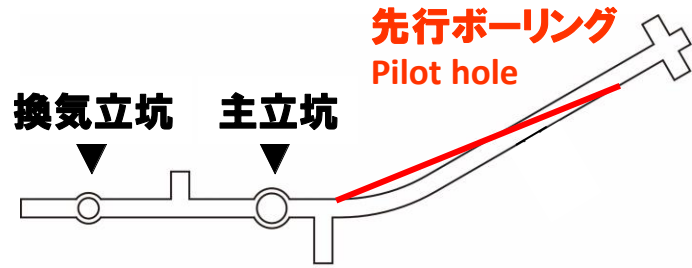
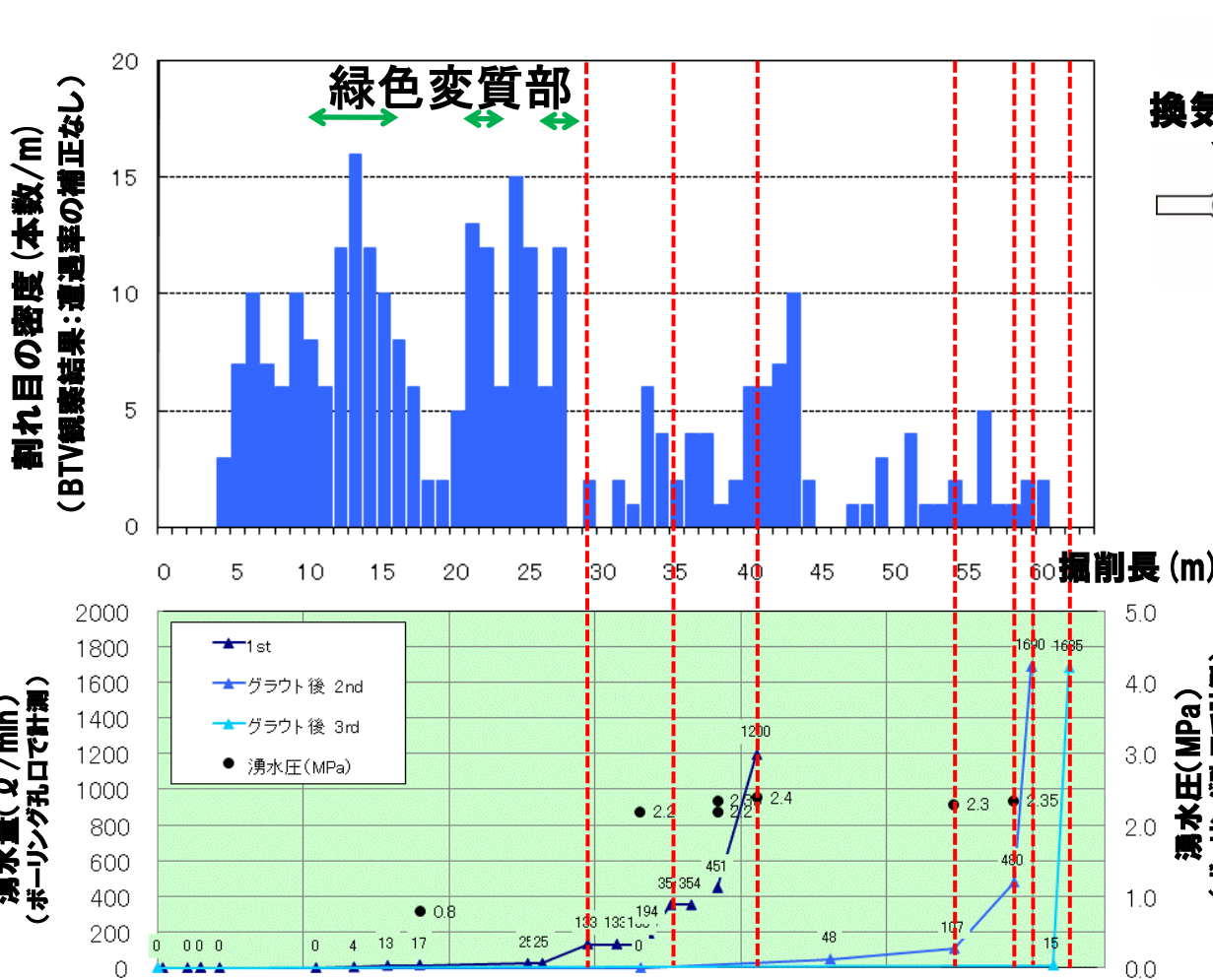
## Contents

---

- 亀裂ネットワークモデル(DFN)  
Discrete Fracture Network Model (DFN)
- Geo-DFN vs Hydro-DFN  
Geo-DFN vs Hydro-DFN
- 連結性  
Connectivity of fractures
- チャンネリング  
Channeling
  - ① マトリクス拡散寄与面積  
Flow wetted surface
  - ② マトリクス拡散深さ  
Matrix diffusion depth
- まとめ  
Summary

# JAEA瑞浪の地下研での透水性亀裂

## Conductive fractures in Mizunami Underground Research Laboratory



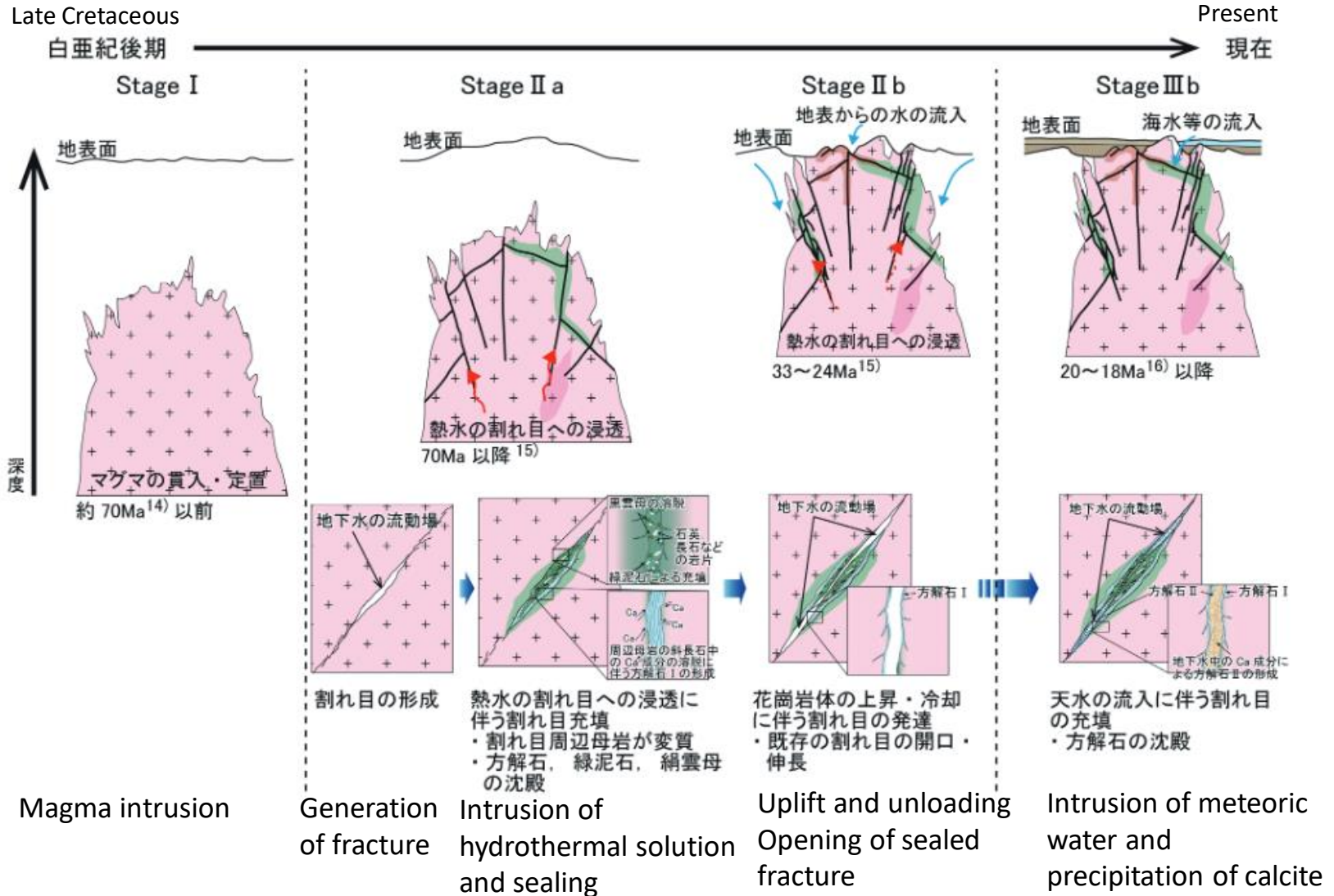
- ・非変質岩盤(28m以深)で湧水  
Most outflow occurs in the unaltered granite (deeper than 28m along the borehole)
- ・主に、割れ目密度の小さい箇所で湧水が認められる。  
Major outflows occur where fracture frequency is low.

先行ボーリングで観測された湧水量と亀裂頻度  
Outflow and fracture frequency observed in the pilot hole



# 割れ目の繰り返し開口・充填のイメージ

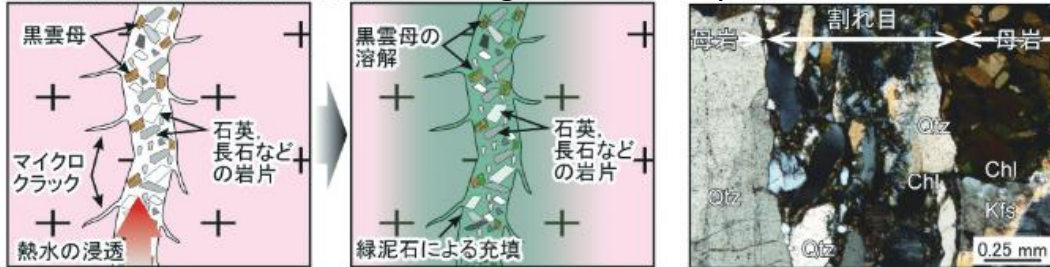
## Schematic drawing of repeated opening and sealing of fractures



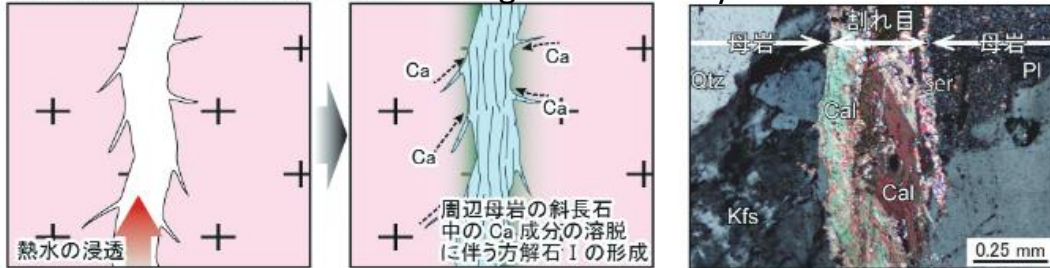
# 充填と開口の複数回の繰り返し

## Multiple events of opening and sealing of fractures

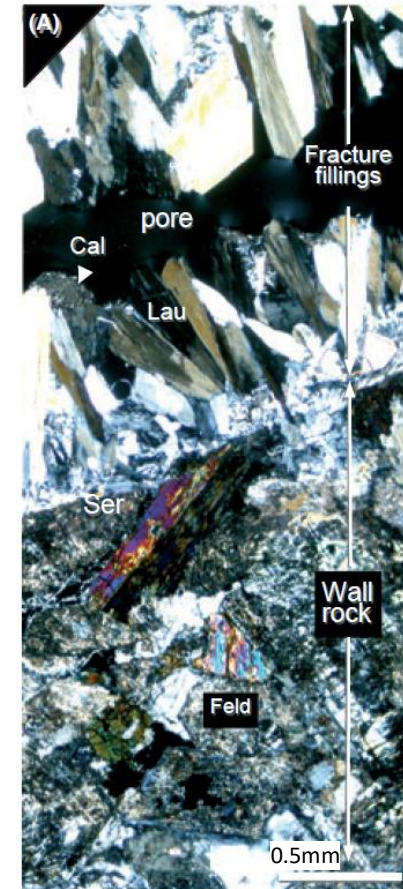
(a) 緑泥石による割れ目の充填 Sealing of fracture by chlorite



(b) 方解石 I による割れ目の充填 Sealing of fracture by calcite I



(c) 方解石 II による割れ目の充填 Sealing of fracture by calcite II



濁沸石上の方解石  
Calcite formed on the laumontite

# 透水性亀裂と非透水性亀裂のサイズの違い

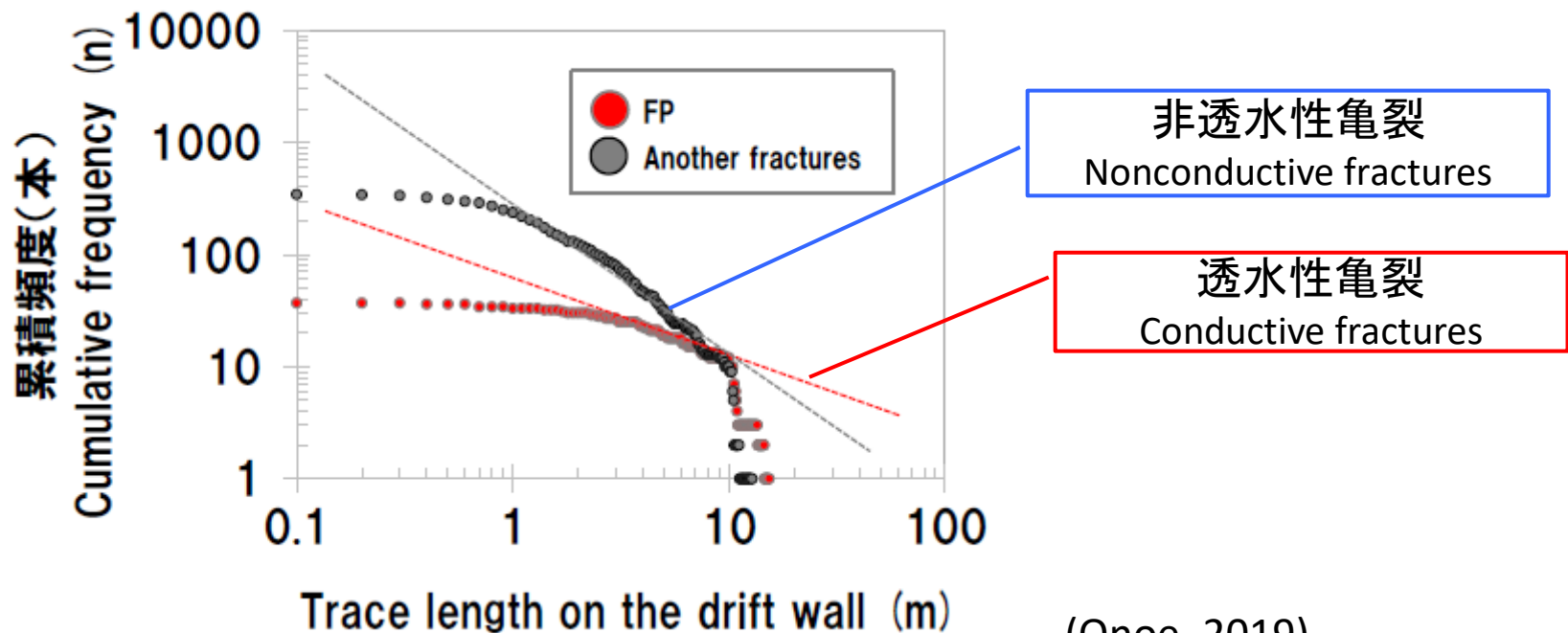
Difference in fracture size between conductive fractures and non-conductive fractures

- べき乗則は、通常全亀裂に対して定義されており、透水性亀裂を表現していない可能性がある。瑞浪では両者に違いがあることが示されている。

Power law parameters are different between nonconductive fractures and conductive fractures

✓大きな亀裂は連結する可能性が高く、透水性となる可能性が高い  
Large fractures are more likely to be connected and likely to form flow path

✓小さな亀裂は連結する可能性が低く、非透水性亀裂となる可能性が高い  
Small fractures are more likely to be isolated and likely to be non-conductive fractures



(Onoe, 2019)

# Geo-DFN vs Hydro-DFN

---

- 目的に応じたDFNの使い分けが必要  
Need to model different fractures for DFN depending on the model purpose (such as geology, rock mechanics, flow, etc.)
- 地質的亀裂と透水性亀裂の不一致  
Disagreement of geologic fractures and conductive fractures
  - ✓ 沈殿・充填によるシールと開口(reactivation)の繰り返し  
Repeated events of sealing and opening (reactivation)
  - ✓ 現在の地下水から沈殿した自形鉱物に着目  
Use of euhedral minerals precipitated from modern groundwater as a marker of conductive fractures
- 透水性亀裂の亀裂パラメータを設定する必要  
Need of determining fracture parameters specific to conductive fractures

# 内容

## Contents

---

- 亀裂ネットワークモデル(DFN)  
Discrete Fracture Network Model (DFN)
- Geo-DFN vs Hydro-DFN  
Geo-DFN vs Hydro-DFN
- 連結性  
Connectivity of fractures
- チャンネリング  
Channeling
  - ① マトリクス拡散寄与面積  
Flow wetted surface
  - ② マトリクス拡散深さ  
Matrix diffusion depth
- まとめ  
Summary



## 2. 連結性

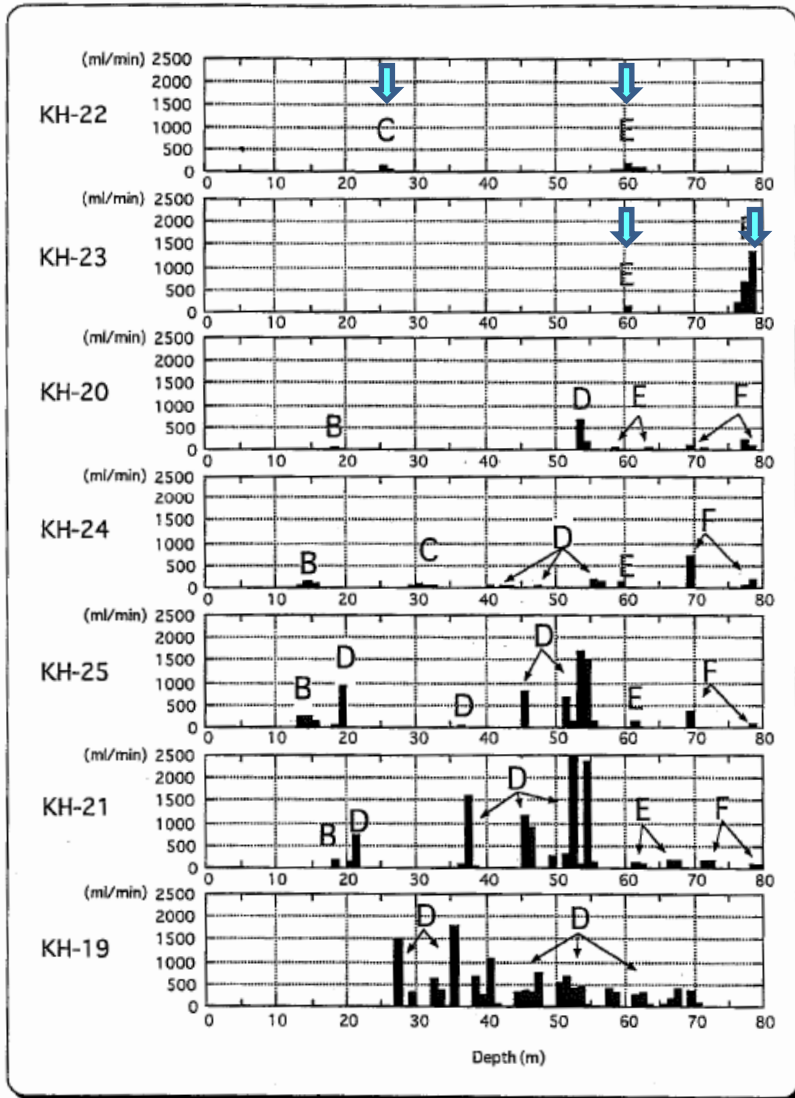
# Connectivity of fractures

---

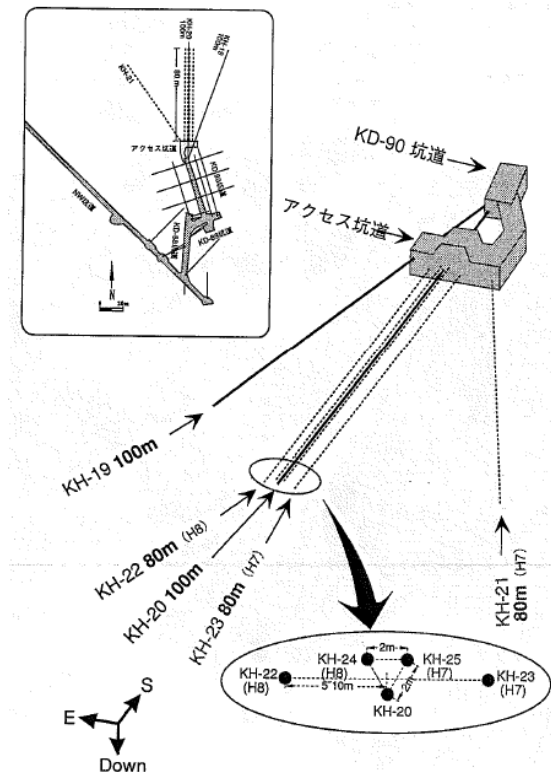
- 従来のDFNモデルは、連結性を過大評価する(overconnectivity)傾向があり、連続体モデルに近い挙動を示す  
Traditional DFN models tends to overestimate the connectivity (overconnectivity) and behaves like a continuum model
- 実際の岩盤は、「水みち」が偏在する傾向にあり、これを十分に表現できていない  
Conductive pathways in the actual rock are localized and DFN models fail to reproduce
- この問題は、John Blackが指摘しており、Sparse channel network modelが提唱されている  
This issue is pointed out by John Black and he proposes “Sparse channel network model”
- 水理コンパートメント  
Flow compartment

# 釜石鉱山トレーサー試験エリアでの流量検層結果

## Flow log results in the tracer experiment area of the Kamaishi mine



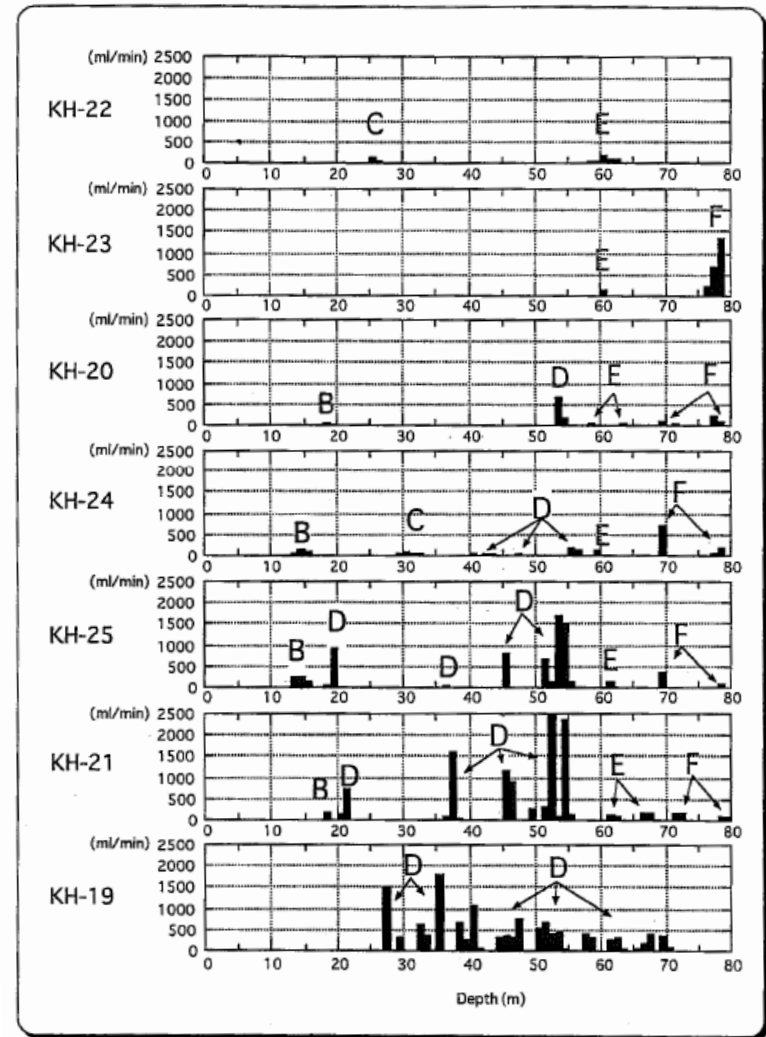
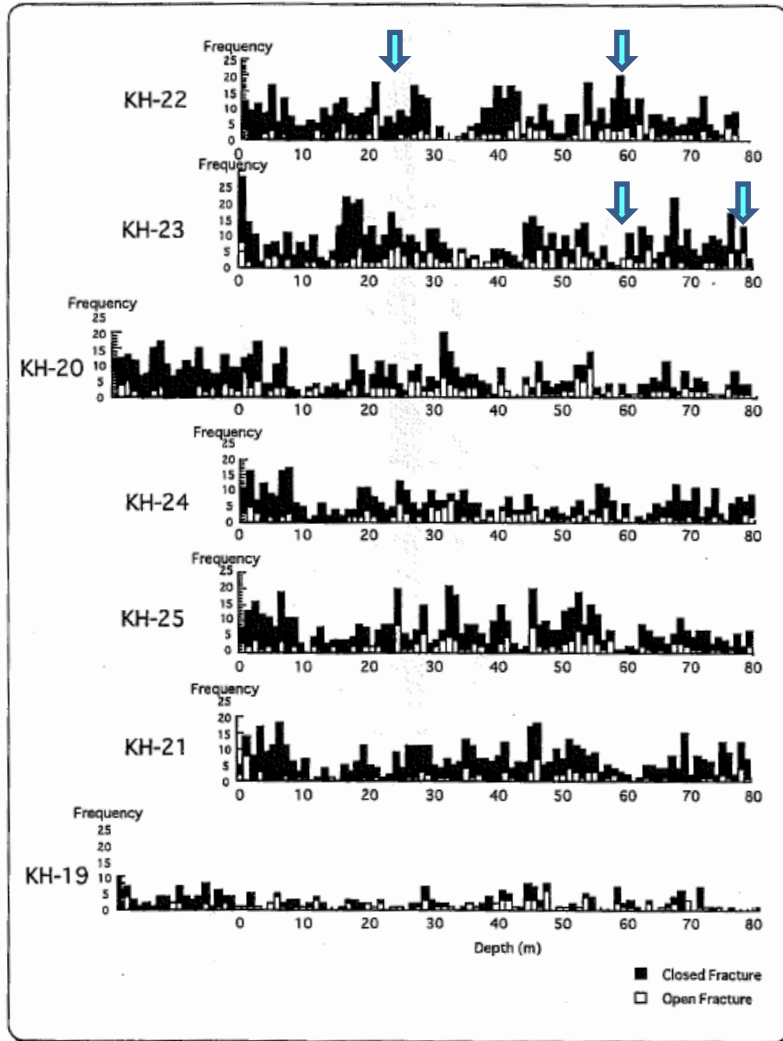
- KH-22孔およびKH-23孔では2箇所ではしか湧水が認められず、湧水箇所が偏在している。  
Only 2 outflow points are found in KH-22 and KH-23 indicating outflow points are localized



# 釜石鉱山トレーサー試験エリアでの亀裂頻度と流量検層結果の比較

## Comparison of fracture frequency with flow log

- 透水に寄与するのはごく一部の亀裂である  
A limited number of fractures contribute to flow

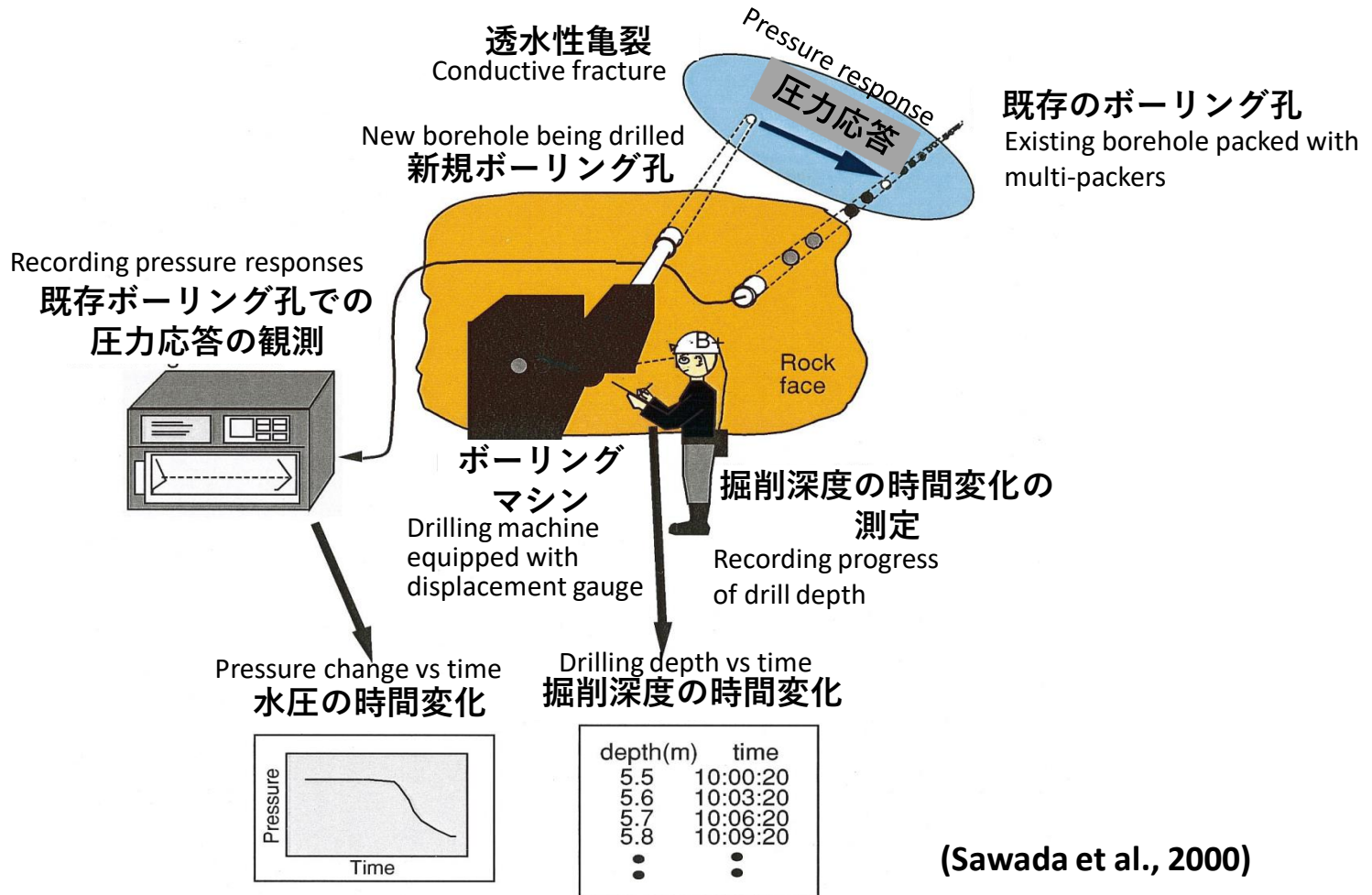




# コンパートメント構造の調査方法

*A method for characterizing flow compartments used in the Kamaishi mine*

- 掘削深度と水圧変化を同時に記録することにより掘削に伴う圧力干渉を把握  
Detect different pressure domain by monitoring drilling progress and pressure response



(Sawada et al., 2000)



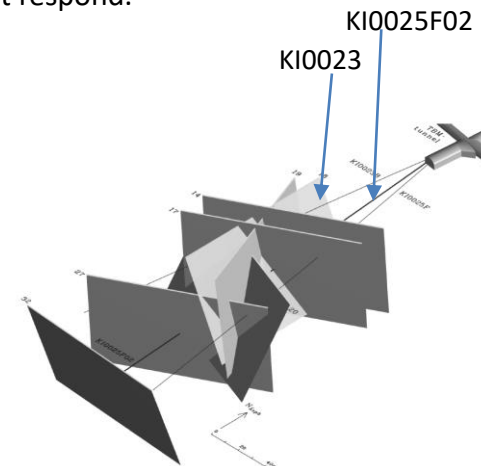
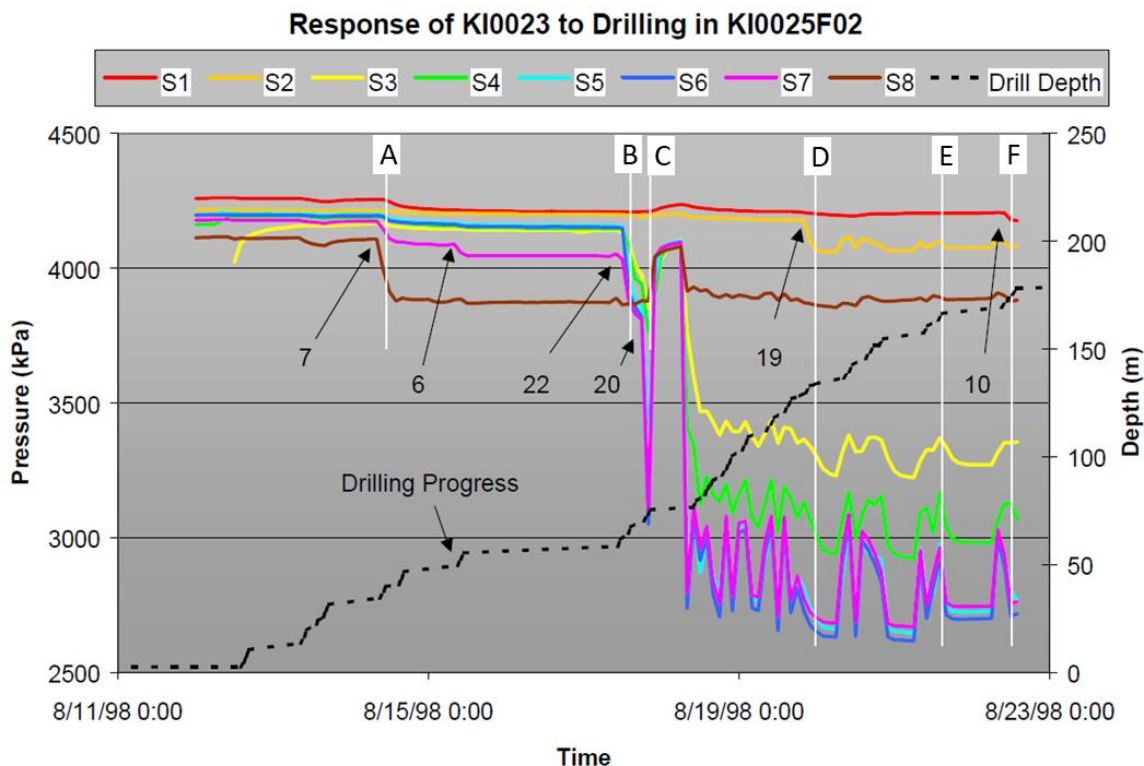


# エスポHRL-TRUE Block Scale試験エリアにおけるコンパートメント構造を示唆するボーリング掘削時の応答

Pressure responses indicating flow compartments at the TRUE Block Scale Experiment area in the Äspö Hard Rock Laboratory in Sweden

- KI0025F02孔掘削時に観測孔(KI0023)の一部区間のみ応答し、その他の区間では応答がない  
 例 A到達時に、S7とS8が強く応答したが、S2とS3は全く応答せず  
 B到達時に、S3,S4,S5,S6が応答開始  
 D到達時に、S2が応答開始

Pressure responses are recorded at the specific sections of the monitoring hole (KI0023) during drilling of KI0025F02  
 i.e. When drilling reached A, Sections S7 and S8 strongly responded. But, S2 and S3 did not respond.  
 When drilling reached B, Sections S3,S4,S5 and S6 started to respond  
 When drilling reached D, Sections S2 started to respond



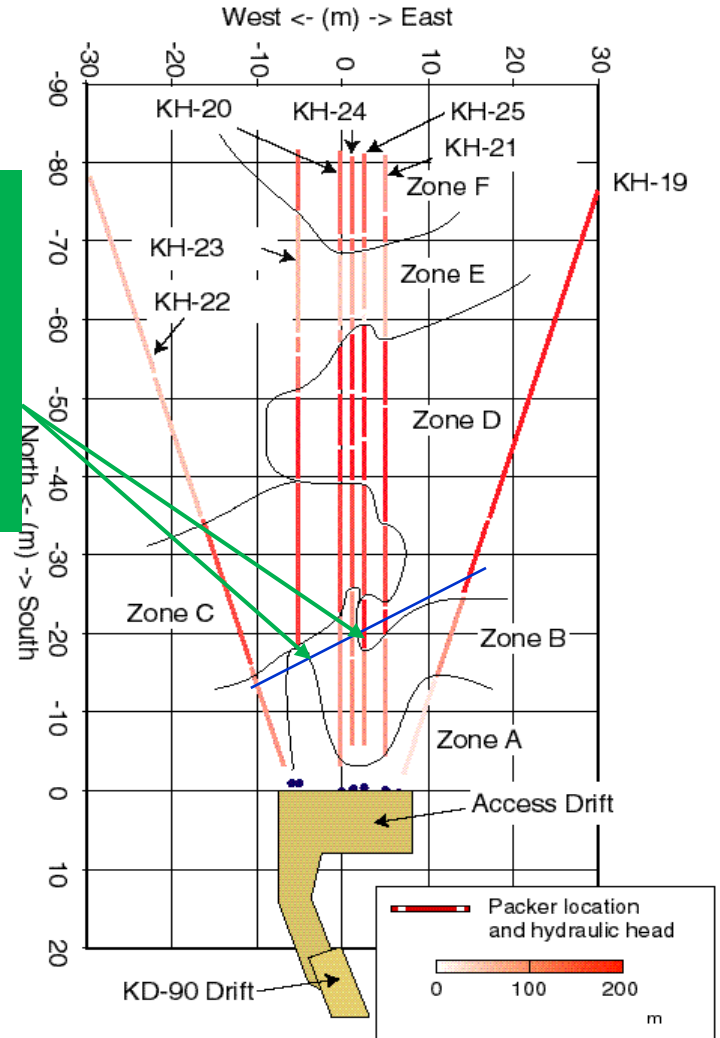
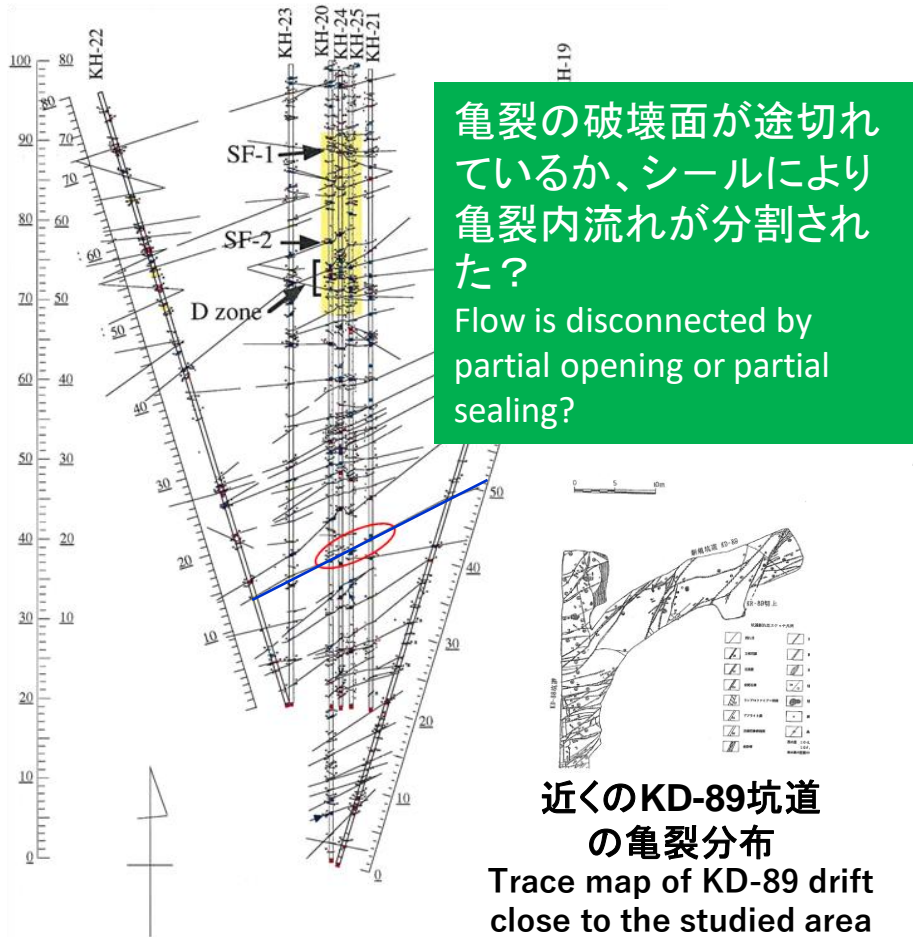
Monitoring Sections (m)

KI0023B:P1	113.7-200.7
KI0023B:P2	111.25-112.7
KI0023B:P3	87.20-110.25
KI0023B:P4	84.75-86.20
KI0023B:P5	72.95-83.75
KI0023B:P6	70.95-71.95
KI0023B:P7	43.45-69.95
KI0023B:P8	41.45-42.45
KI0023B:P9	4.6-40.45

(Andersson et al, 2002)

# 地質的連結性と水理的連結性

## Geologic connectivity and hydraulic connectivity



ボアホールTVから推定した亀裂ネットワーク  
Fracture network predicted from borehole TV log

水頭分布とコンパートメント  
Pressure distribution and flow compartment

# 水みちのモデル化

透水量係数の相関性の仮定

## Concepts of flow path modelling

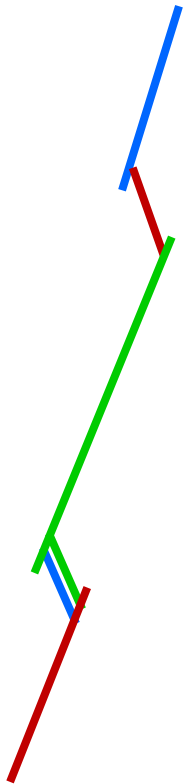
Options for assigning transmissivity

### 非相関

#### No correlation

対数正規分布からランダムに  
サンプリング

T is randomly sampled from log  
normal distribution



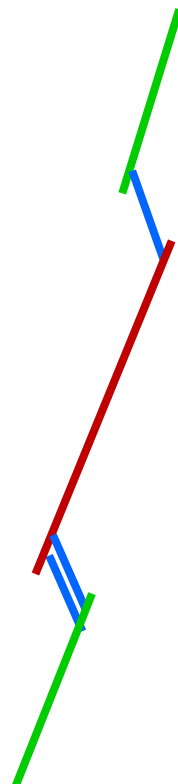
### 亀裂半径との相関

#### Positive correlation

#### between size and T

大きな亀裂ほど高い透水性

Large fracture has higher T

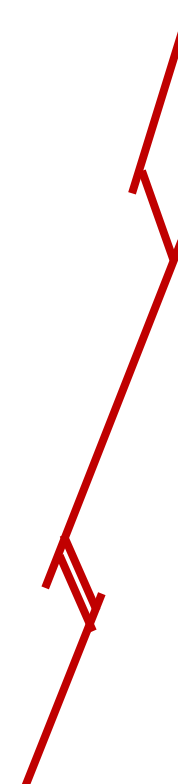


### 移行経路相関

#### Pathway correlation

選択的移行経路を形成するよう  
高い透水性を設定

T's are assigned so that pathway  
becomes preferential path



高透水性の亀裂  
High T fracture

中透水性の亀裂  
Middle T fracture

低透水性の亀裂  
Low T fracture

# 2. 連結性

## Hydraulic Connectivity

- 亀裂に透水量係数を割り当てる際に、従来はランダムあるいは亀裂サイズとの相関性を考慮していたが、「移行経路相関」のように特定の移行経路に高い透水性を割り当てる必要  
Traditional DFN assigns T randomly or correlating to fracture size. There may be a need to assign T to reproduce preferential flow path.
  - ✓その際、非現実的な移行経路とならないよう、移行経路全体の水理的抵抗と移行経路頻度が実測を再現することが重要  
It is important to reproduce both measured flow resistance along the flow path and the measured frequency of the flow paths to avoid generating unrealistic pathways
- コンパートメントは、上記とは逆に連結性を遮るような低透水性を割り当てることで再現可能  
Flow compartment can be reproduced by assigning low T in the pathway
  - ✓コンパートメントの原因は、充填と開口の複数回の繰り返しにより生じた可能性がある  
Flow compartment may be formed by multiple events of sealing and reopening of fractures
  - ✓ただし、コンパートメントは完全に閉じた領域を形成していない可能性があり、不確実性として閉じた場合とそうでない場合の両方のケースを考慮する必要  
Flow compartment may not be perfectly closed. Uncertainty such as closed case and non-closed case need to be considered.

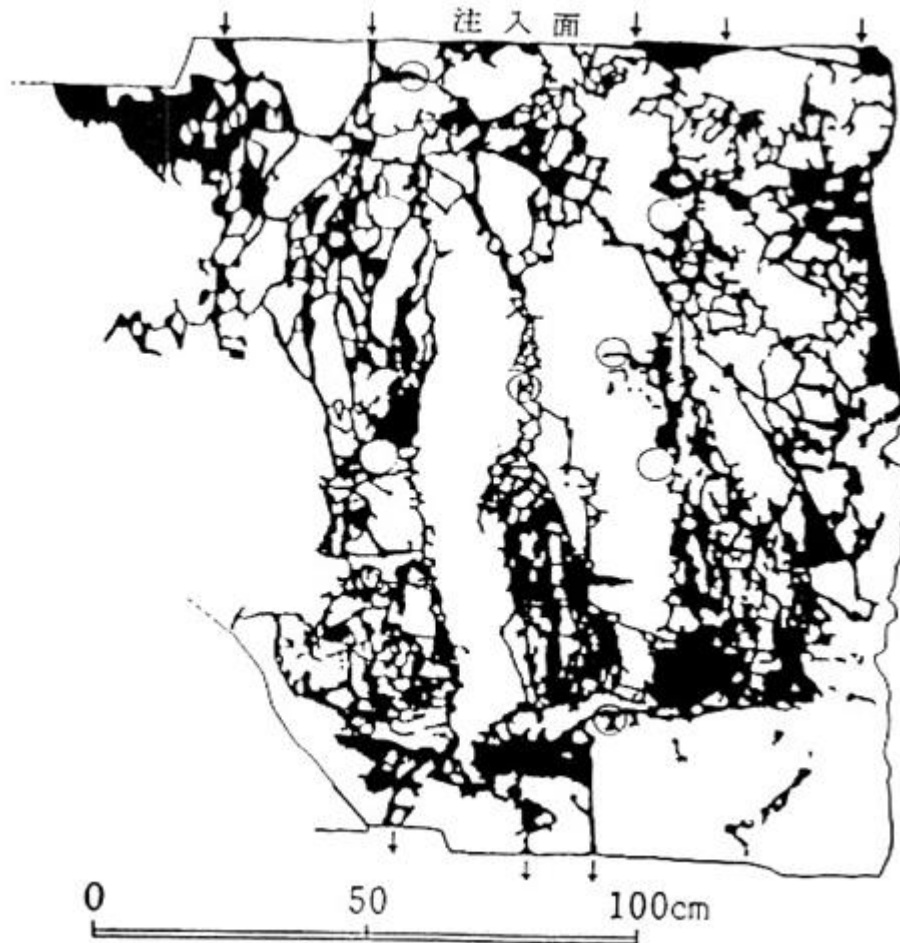
# 内容

## Contents

---

- 亀裂ネットワークモデル(DFN)  
Discrete Fracture Network Model (DFN)
- Geo-DFN vs Hydro-DFN  
Geo-DFN vs Hydro-DFN
- 連結性  
Connectivity of fractures
- チャンネリング  
Channeling
  - ① マトリクス拡散寄与面積  
Flow wetted surface
  - ② マトリクス拡散深さ  
Matrix diffusion depth
- まとめ  
Summary

### 3. チャンネリング Channeling



■ 2つの課題・不確実性  
Two issues/uncertainties

①マトリクス拡散寄与面積  
Flow wetted surface

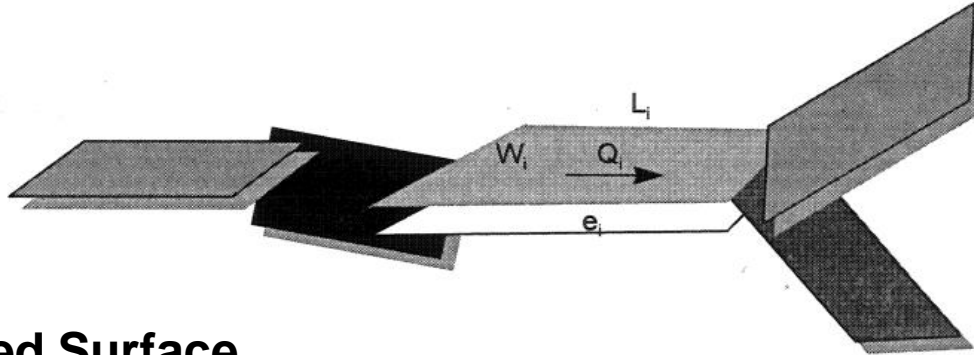
②マトリクス拡散深さ  
Matrix diffusion depth

(Mito et al., 1990)



# Flow Wetted Surfaceと F-パラメータ、u-パラメータ

Flow Wetted Surface, F-parameter, u-parameter



Flow Wetted Surface

$$FWS = W_i L_i$$

**F-parameter**       $F_i = 2 W_i L_i / Q_i$

距離  $L_i$  下流の地点での濃度  $C_f$  (分散考慮せず、無限大マトリクス拡散深さの場合)

Concentration  $C_f$  at the point with distance  $L_i$  from source (w/o dispersion, infinite matrix diffusion depth)

$$C_f(L_i, t) = C_0 \operatorname{erfc}(u_i t^{1/2})$$

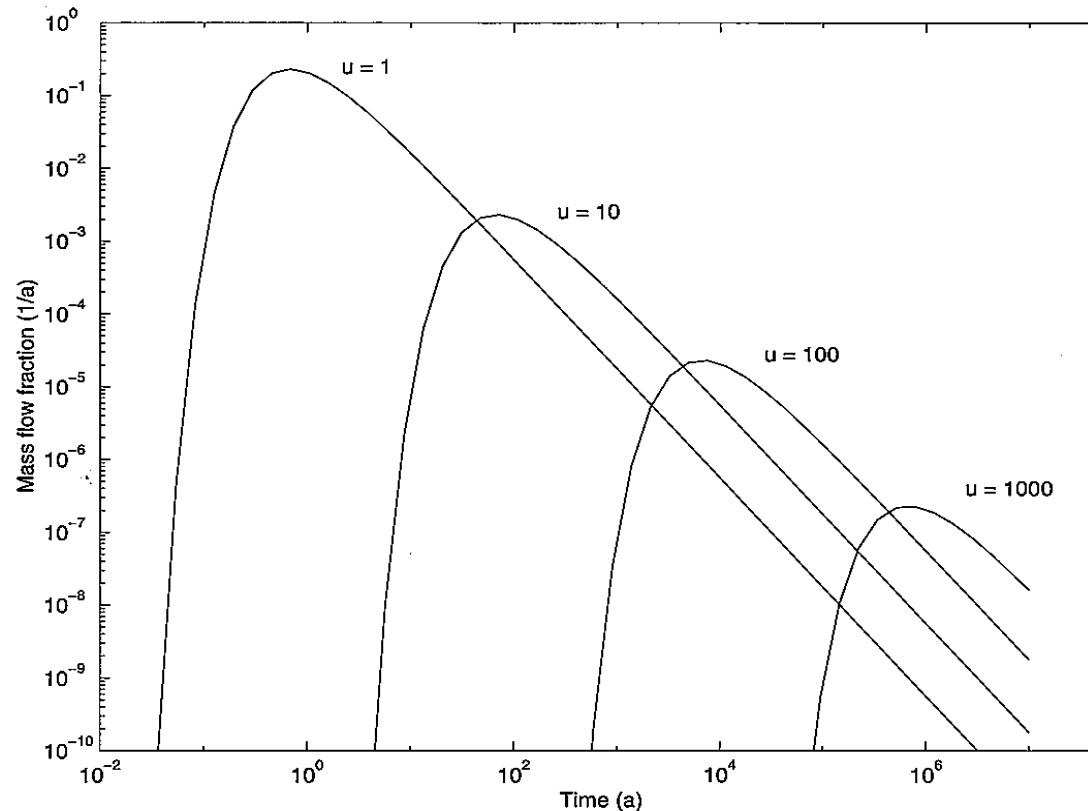
**u-parameter**:  $u_i = F_i \sqrt{D_{m,i} (\epsilon_{m,i} + K_{d,i} \rho)}$        $D_m$ : 拡散係数、 $K_d$ : 分配係数

➡ 収着性トレーサー :  $u_{\text{sorb}} \approx F_i \sqrt{D_{m,i} K_{d,i} \rho}$   
Sorbing tracer

非収着性トレーサー:  $u_{\text{nonsorb}} \approx F_i \sqrt{D_{m,i} \epsilon_{m,i}}$   
Nonsorbing tracer

# u-パラメータと破過曲線

## u-parameter and Breakthrough curves



(Vieno et al., 1999)

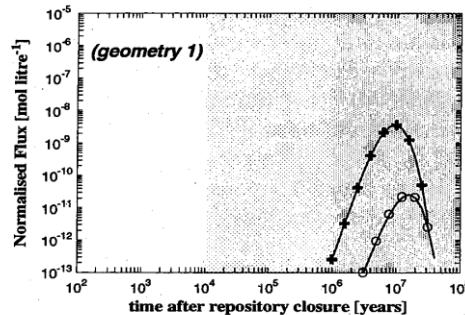
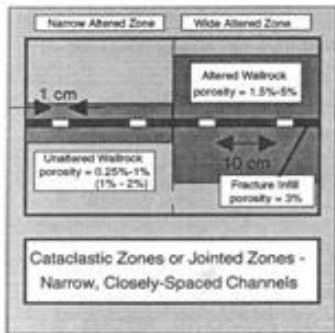
**u-パラメータの増加→ピーク時間の遅れ、ピーク濃度の低下**  
**Larger u-parameter → delay of peak time → decrease in peak concentration**

# チャンネルリング

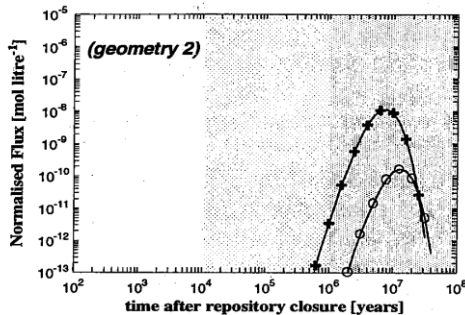
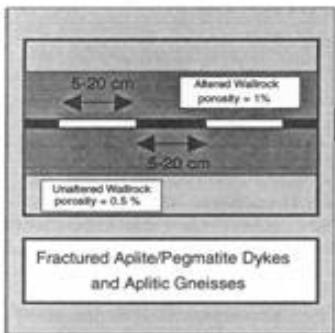
—NagraのKrystalline-1における亀裂内部構造のモデル化と評価結果—

Channeling

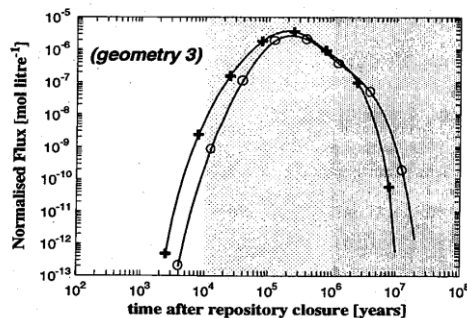
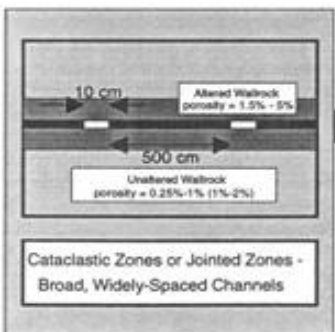
- Different channeling assumptions and resulting nuclide flux in Kristalline-I safety assessment by Nagra -



亀裂の内部構造 (チャンネルの幅、間隔)  
Internal structure of fracture (width and spacing of channels)



安全評価結果に大きく影響  
(約3桁の違いを生じる)  
Significant impact on the performance assessment  
(approx. 3 orders of magnitude difference)



亀裂の内部構造が重要  
Internal structure of fracture is critical

(Nagra, 1993より)

# ①マトリクス拡散寄与面積

## Flow wetted surface

- 2つの課題・不確実性:  
Two issues/uncertainties:

i) 亀裂充填物を介したマトリクス拡散寄与面積の増加  
Increase in FWS by lateral diffusion through fracture fillings



- ✓ 変質ハローは、チャンネルの両側だけでなく、亀裂のかなりの範囲あるいは全面にわたって生じることが多い  
Alteration halo develops along the significant portion of fracture or sometimes along the entire length of fractures

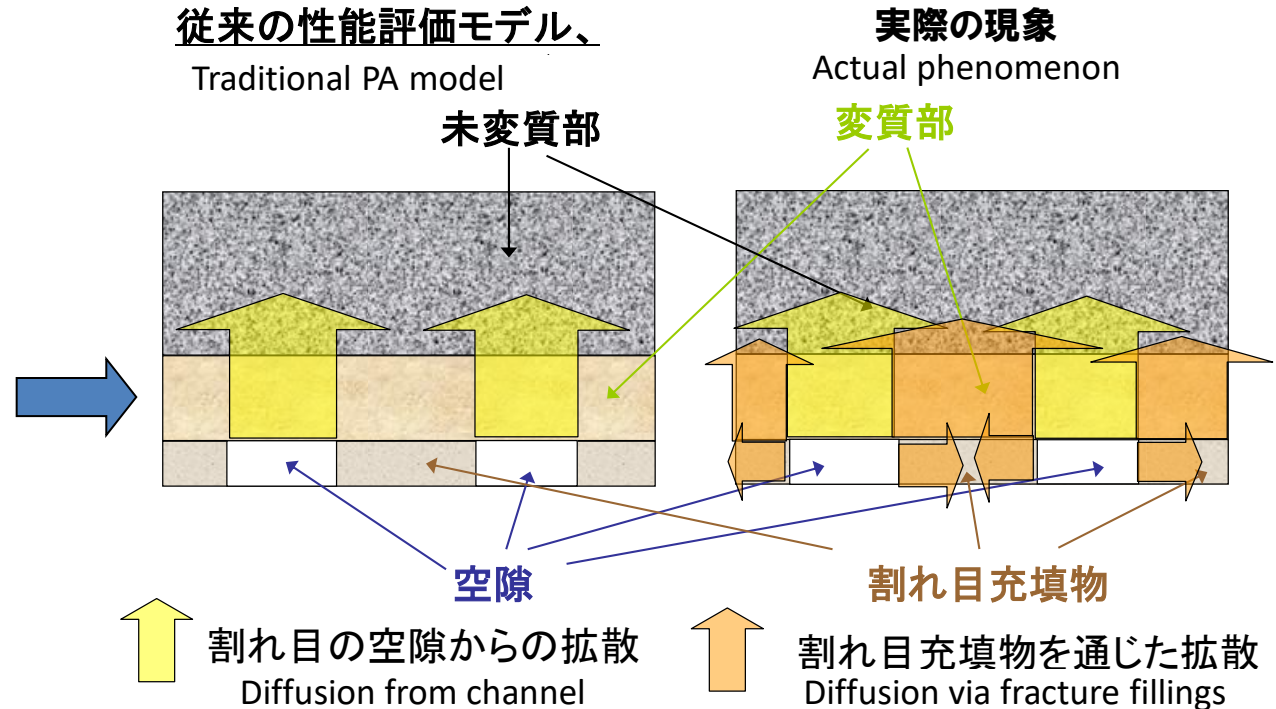
ii) 複雑な内部構造を有する亀裂のマトリクス拡散寄与面積  
FWS of fracture with complicated internal structure

# 移行経路の概念モデル

## Conceptual model of single fracture



亀裂全面に生じた変質ハロー



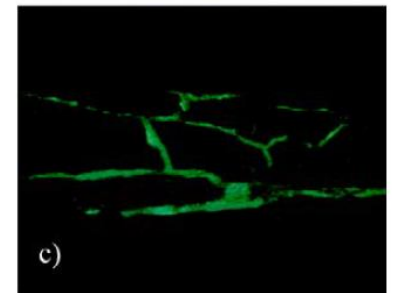
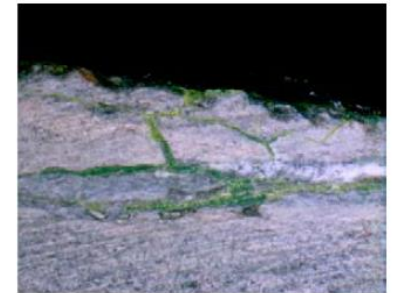
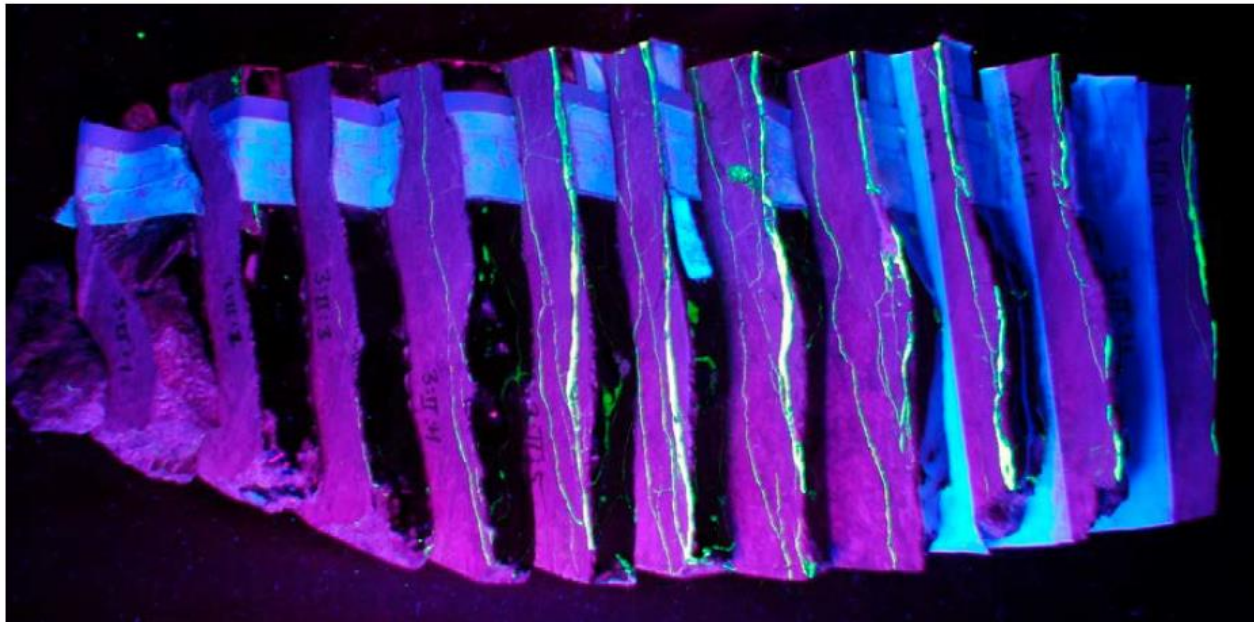
→より広い範囲への拡散が起き、遅延効果が増大する  
More fracture surface become available for matrix diffusion,  
thereby increase retardation



# 複雑な内部構造を有する亀裂のマトリクス拡散寄与面積

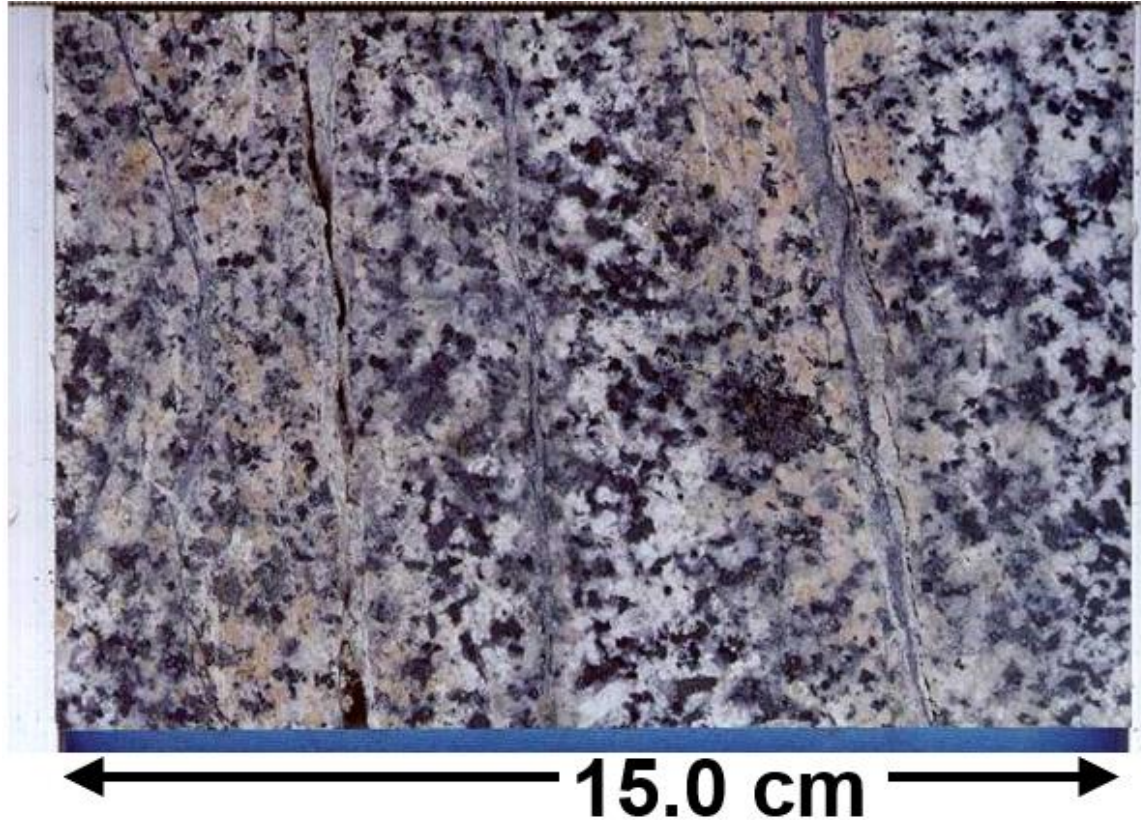
FWS of fracture with complicated internal structure

- 「単一亀裂」であっても内部に複数の破断面が存在  
“Single” fractures sometimes have multiple micro fractures
- 安全評価の時間スケールで有効なマトリクス拡散寄与面積の設定が必要  
Need to determine effective FWS in the time scale of safety assessment



Äspö地下研究施設におけるTRUE-1トレーサー試験、Feature Aの断面  
Cross-sections of Feature A of TRUE-1 Tracer Test Area in Äspö Hard Rock Laboratory

② マトリクス拡散深さ  
Matrix diffusion depth



釜石鉱山の花崗閃緑岩中の亀裂に生じた変質ハロー  
Alteration halo developed along the fracture within the granodiorite in the Kamaishi mine

# マトリクス拡散深さ

## Matrix diffusion depth

- 安全評価上の重要パラメータ  
Important parameter for safety assessment
- それにも拘わらず、2つの意見が対立  
Nevertheless, there exist two conflicting opinions:
  - ① 拡散深さに制限はない: スウェーデンSKB  
Unlimited diffusion depth: SKB (Sweden)
  - ② 拡散深さに制限がある: Wogelius他(2020)  
Limited diffusion depth : Wogelius et al. (2020)
    - ⇒ 2次的方解石が微小空隙を充填することにより拡散深さは亀裂面から数cm以内に制限  
Diffusion depth is limited within a few cm due to sealing of micropores by precipitation of secondary calcite
- どちらが正しいのか、あるいは両方を統合的に説明できる別の考え方があるのか検討が必要  
Necessary to settle the argument or develop a new idea to reconcile both opinions



# チャンネルリングに関する課題・不確実性

## Issues and uncertainty of channeling

---

### ■ マトリクス拡散寄与面積

Flow wetted surface

- 割れ目充填物を介したマトリクス拡散の効果

Enhanced fracture surface area available for matrix diffusion via fracture fillings

- 複雑な亀裂内部構造を有する場合のパラメータ設定

Determine parameter for fractures which have a complicated internal structure

### ■ マトリクス拡散深さ

Matrix diffusion depth

- マトリクス拡散深さは制限が存在する vs 存在しない

Limited matrix diffusion depth vs unlimited matrix diffusion depth

# 内容

## Contents

---

- 亀裂ネットワークモデル(DFN)  
Discrete Fracture Network Model (DFN)
- Geo-DFN vs Hydro-DFN  
Geo-DFN vs Hydro-DFN
- 連結性  
Connectivity of fractures
- チャンネリング  
Channeling
  - ① マトリクス拡散寄与面積  
Flow wetted surface
  - ② マトリクス拡散深さ  
Matrix diffusion depth
- まとめ  
Summary

# まとめ

## Summary

- **亀裂性媒体のモデル化に際して、非透水性亀裂と透水性亀裂の識別と透水性亀裂の亀裂パラメータの設定が重要**

Distinguishing conductive fractures from nonconductive fractures is important. Also, it is important to determine fracture parameters specific to conductive fractures.

- **透水性亀裂は空間的に偏在する傾向があり、「水みち」を形成するように亀裂への透水性の設定が必要。その際、「水みち」の頻度と移行経路全体の透水性について実測値による拘束が必要**

Conductive fractures are unevenly distributed. Transmissivity should be assigned to form preferential pathways. In this case, constraining the frequency of pathways and resistance along the pathways by measurement is important.

- **コンパートメントも不確実性の一つ。完全に閉じていない可能性があり、その不確実性を考慮することが重要**


Flow compartment is one of the uncertainty. There is a possibility that compartments are not fully closed

- **マトリクス拡散寄与面積は、充填物を介した拡散寄与面積の増加、複雑な内部構造を有する場合の評価、が課題**

As to flow wetted surface, possible increase due to lateral diffusion through fracture fillings and evaluation of FWS of “single” fracture with multiple micro fractures are the issues.

- **マトリクス拡散深さは有限とする考え方と無限とする考え方が対立しており、統一した見解が必要**

There is an argument over limited matrix diffusion depth vs unlimited matrix diffusion depth. Necessary to settle the argument or develop a new idea to reconcile both opinions



ご清聴ありがとうございました  
謝謝您們的聆聽