

# 亀裂発生からはじまる岩盤の長期透水性変化プロセスを紐解く革新的マルチフィジックスシミュレータの構築と放射性廃棄物地層処分問題への適用

Development of coupled thermal-hydraulic-mechanical-chemical simulator describing the long-term evolution of rock permeability initiated by fracture generation and its application to geological disposal of high-level radioactive waste

大阪大学 助教 緒方奨

## (研究計画ないし研究手法の概略)

### 1. 本研究の背景と目的

高レベル放射性廃棄物を深地層下の岩盤内に隔離し、長期に渡りその閉じ込め性能を保証するためには、物質移行経路となる岩盤内の亀裂が有する透水性の詳細な把握が重要である。そのためには、数値シミュレータを用いて、地層処分時に想定される次の①～②のプロセスを評価することが必須である。

- ① 廃棄物を処分する空洞を岩盤内に掘削する際に岩盤中に亀裂が発生・進展
- ② 廃棄物処分後、地圧と廃棄物からの熱放出の影響により、温度・応力に依存する化学反応（岩石鉱物－水の溶解・沈殿反応）が発生し、亀裂の構造及び透水性が長期にわたり時間変化する（図1）。

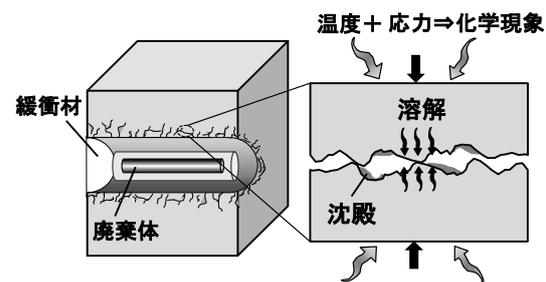


図1 空洞掘削後の化学現象発生概念図

しかし、このような温度、水、応力・損傷、化学反応が絡む一連のプロセスを評価可能なシミュレータは未だない。

そこで本研究では、上記の亀裂発生・進展にはじまる岩盤の長期透水性変化プロセスを一貫して評価可能な熱－水－力学－化学連成数値シミュレータを構築する。さらに、それを用いて高レベル放射性廃棄物地層処分を想定した長期予測解析を実施し、地層処分時における信頼性の高い岩盤の透水性変化シナリオを提示することを目指す。

### 2. 構築したシミュレータの概要

本研究では、岩盤内での亀裂生成・進展（損傷）、地下水流動、熱や物質の移動、岩石鉱物の空隙水中への溶解・沈殿等の様々な現象群が相互に影響し合う複雑な熱－水－力学（応力・損傷）－化学連成場を統合的に考慮可能なマルチフィジックスシミュレータの開発に成功した。このシミュレータで考慮する連成相互作用を図2に示す。図2に示す通り、代表者らがこれまでに整備を進めてきた連成数値シミュレータ<sup>1)</sup>（白色矢印）では考慮できなかった損傷（亀裂発生・進展）とそれに伴う岩盤の熱・水理・化学特性の変化（黒色矢印）を考慮可能な仕様となっている。

特に、図中の Damage⇒Chemical の作用で表される、亀裂の発生・進展とその後亀裂内で生じる経時的な化学現象（鉱物溶解・沈殿）との関係性を考慮している点が特徴である。これにより、亀裂の発生からその先の化学現象による長期的な透水性変化までを連続的に評価可能とした。なお、当初の計画では、Damage⇒Chemical の作用を記述する上で必要となる、新規発生した亀裂の内部構造（亀裂同士の接触部構造等）を予測する数値モデルを室内力学実験に基づき構築する予定であったが、新型コロナウイルスの影響により上記試験が実施困難となったため、既往の理論モデル<sup>2)</sup>を援用した。

また、本研究で考慮する化学現象は、亀裂同士の接触部で生じる鉱物溶解（圧力溶解現象）と、亀裂と岩石実質部（亀裂以外の領域）内の空隙中の自由表面で生じる鉱物溶解・沈殿（自由表面溶解・沈殿現象）である。上記の圧力溶解と自由表面での沈殿は岩盤の透水性を低下させ、反対に自由表面での溶解は透水性を増加させる機構を持つ。

高レベル放射性廃棄物地層処分を想定した数値解析にシミュレータを適用する際の計算フローと、シミュレータの構成要素である2つの数値解析モデル（FDEMとDFNモデル）の簡単な概念図を図3に示す。計算フローでは、まず、連続体 - 不連続体ハイブリッド解析手法であるFDEM（Finite Discrete Element Method）を用いて廃棄体処分空洞掘削時の亀裂発生・進展挙動を計算する。FDEMは、連続体から不連続体への変遷過程、つまり物体

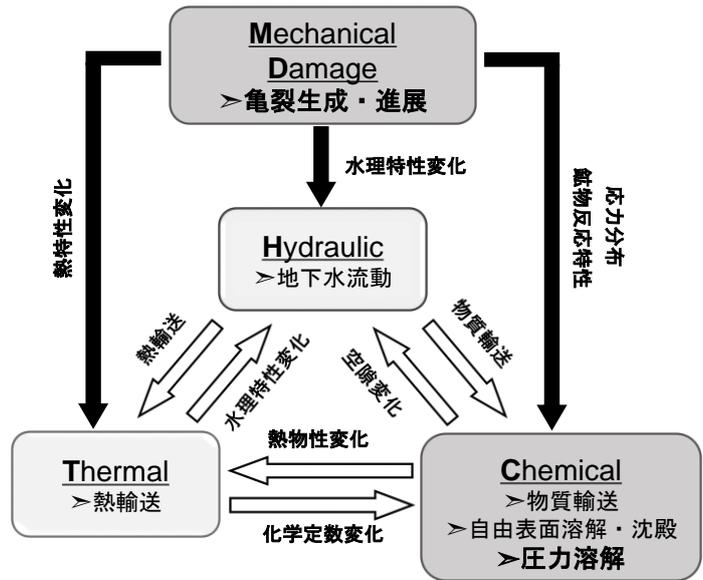


図2 シミュレータで考慮する連成相互作用

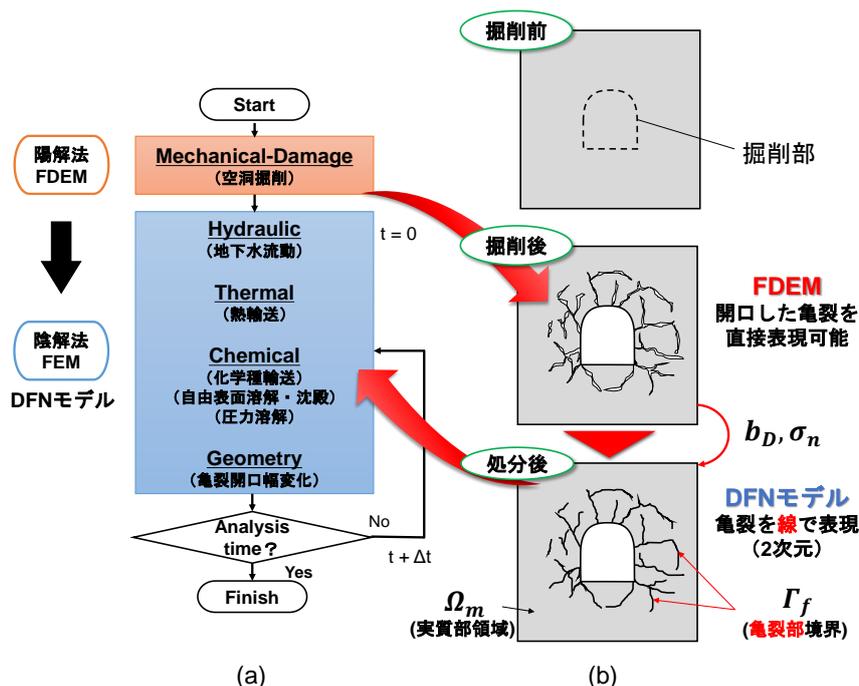


図3 (a)解析フロー、(b)FDEMとDFNモデルの概念図

の破壊プロセスを記述できるため、発破や空洞掘削、破壊試験などに対する数値解析に高い適用性を誇る。また、割れ目幅（開口幅）を含めた亀裂の形状を陽に表現することができ、岩盤での現実的な亀裂生成・進展挙動を記述可能である。続いて、前述した空洞掘削解析より算出される亀裂の分布や開口幅、亀裂に作用する圧力などの情報をふまえ、掘削した空洞に廃棄体を処分してから後の長期間を対象とする連成解析を DFN（Discrete Fracture Network：不連続亀裂ネットワーク）モデルを用いて実施する。DFN モデルは、三次元的な亀裂の幾何形状を面要素（二次元解析では線要素）で表現した上で、亀裂内の流体挙動や岩石実質部—亀裂間での相互作用等を解く不連続体モデルであり、亀裂で顕在化する地下水流や熱・物質輸送を合理的かつ精緻に評価することができる。

亀裂の構造・透水性変化に対する時空間的に高精度な予測評価の実現を念頭に、亀裂における局所的な現象群を精緻に取り扱うことのできる数値解析モデル（FDEM 及び DFN モデル）と化学現象とを組み合わせた全く新しい計算フレームを構築・実装している点も開発したシミュレータの特徴であり、高い独自性を誇る。

### （実験調査によって得られた新しい知見）

### 3. 高レベル放射性廃棄物の地層処分を想定した長期予測解析

構築した連成数値シミュレータを用いて高レベル放射性廃棄物の地層処分を想定した長期予測解析を実施した。この解析では、まず初めに、廃棄体処分空洞の掘削解析を実施する。次に、掘削後、空洞に廃棄体を処分してから先の  $10^3$  年を対象とした連成解析を行い、岩盤の超長期的な透水性変化を予測評価した。

本解析で想定する廃棄体の処分様式は、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—総論レポート<sup>3)</sup>に示されている横置き方式を採用した。解析対象とする全体領域は、地表からの深度 300 m から深度 400 m を対象とした、幅 20 m の 2 次元モデルであり（図 4(b)）、廃棄体は深度 350 m に処分するものとした。掘削解析では、計算コストの軽減を意図し、全体領域中の深度 340~350 m の範囲のみを解析領域とし（図 4(a)）、廃棄体処分空洞の直径は 2 m に設定した。解析対象は石英のみで構成される珪質堆積岩（湿潤密度  $1840 \text{ kg/m}^3$ ）と仮定し、初期の空隙率及び透過率はそれぞれ、41.6 %、 $2.88 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  に設定した<sup>4)</sup>。岩盤の力学物性については、各種強度（一軸引張強さ、粘着力）を Weibull 分布に基づき岩盤中に不均質に分布させ、他の物性値は岩盤内で均一に設定した。地質環境条件については、動水勾配を 1/1000、地温勾配を  $5^\circ\text{C}/100\text{m}$ 、地表面を  $15^\circ\text{C}$  に設定した。

掘削解析より得られた空洞周辺の損傷変数  $D$  と最小主応力の分布を図 5 に示す。本解析では、 $D > 0$  の領域は亀裂とみなすことができ、 $D$  が 1 の領域は巨視的な亀裂を表す。また、応力は引張を正、圧縮を負としている。時間ステップを追うごとに空洞周辺に無数の亀裂が生成・進展していく（図 5(a)）とともに、亀裂先端での応力集中発生も確認できる（図 5(b)）。また、図 6 に示す掘削完了時の空洞周辺における透過率分布（対数表示）では、掘

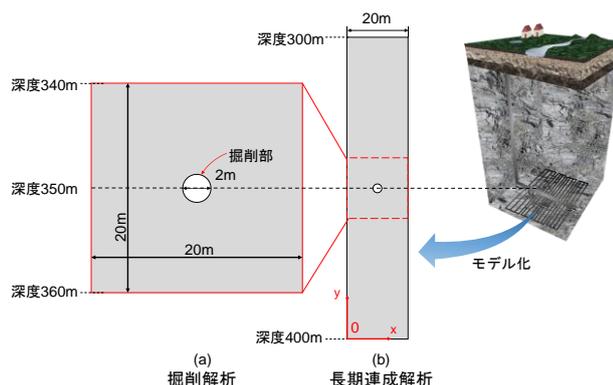


図 4 計算領域：(a)掘削解析 (b)長期連成解析

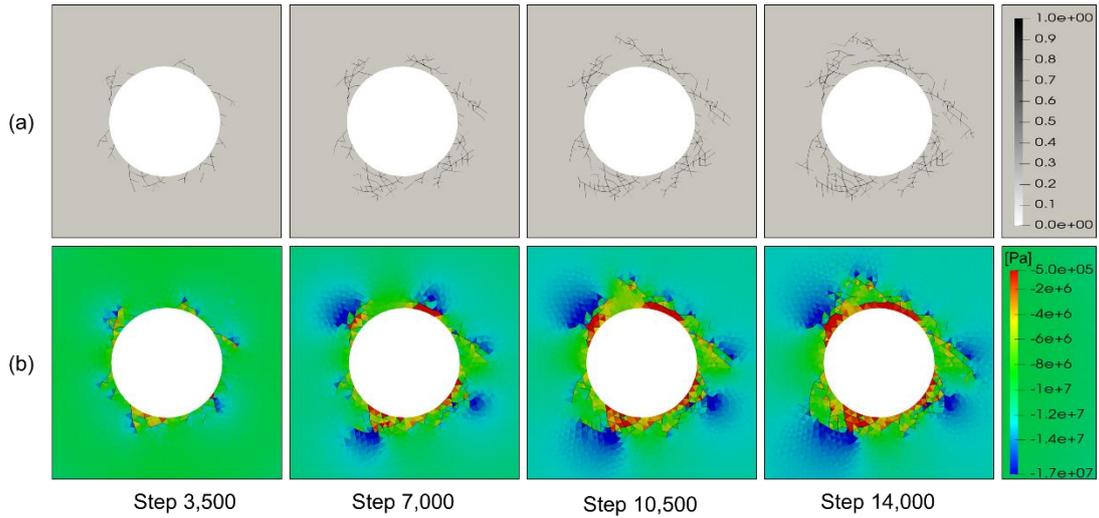


図 5 処分空洞掘削時の空洞周辺における(a)損傷変数  $D$  と (b)最小主応力の分布の変化

削に伴い発生した亀裂の透過率は亀裂以外の健岩部に比べて最大 10 オーダー程度高くなっている。

廃棄体処分後の各時点（1、10、 $10^2$ 、 $10^3$ 年）における亀裂の透過率を空洞掘削完了時の透過率で除した正規化透過率（対数表示）の分布を、圧力溶解を考慮した場合と考慮しない場合で比較した（図 7）。この正規化透過率は、掘削完了時からの亀裂の透過率変化割合を表している（正の値だと透過率増加、負の値だと透過率低下）。圧力溶解を考慮した場合（図 7(a)）では、局所的にいくつかの亀裂で顕著な透過率低下が確認できる（最大で初期状態の  $10^{-2.62}$  倍）一方で、圧力溶解を考慮していない場合（図 7(b)）は、透過率が変化している亀裂はほとんど見られなかった。なお、亀裂以外の岩石実質部での透過率変化は僅か 0.1 %以下であった。さらに、前述した亀裂の透過率変化をより詳細に経時把握するた

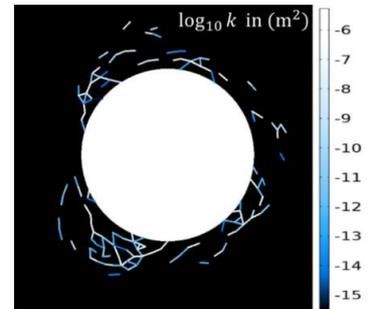


図 6 掘削終了時の透過率分布（対数表示）

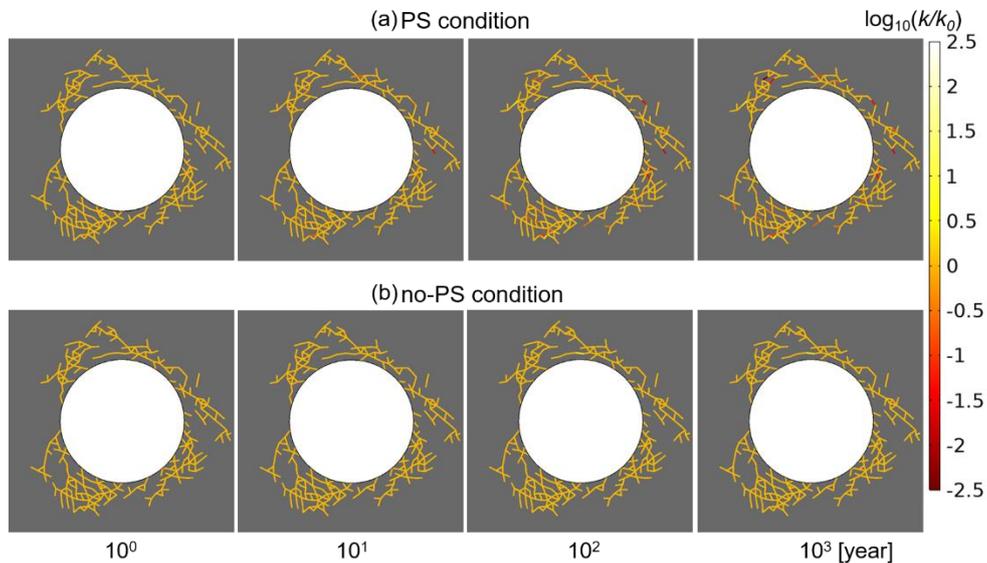


図 7 廃棄体設置後  $10^3$  年間の透過率分布 (a) 圧力溶解考慮有り (b) 圧力溶解考慮無し

め、図 7(a)において透過率低下が確認された亀裂内部に観測点を設置し、透過率経時変化を評価した(図 8)。圧力溶解を考慮した場合、廃棄体設置後 100 年で透過率は初期状態の 0.032 倍まで低下し定常状態に至る傾向が確認できる。一方、圧力溶解を考慮していない場合、図 7(b)で観察された傾向と同様で透過率にほぼ変化は見られない。

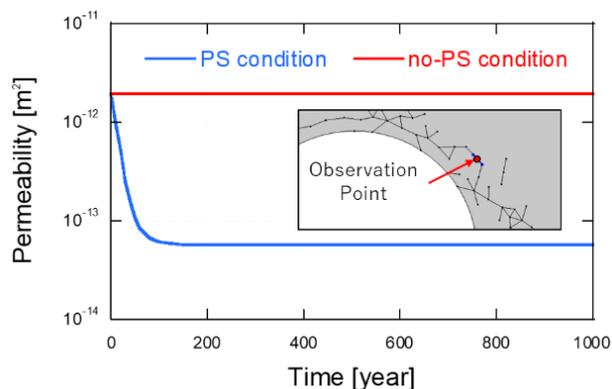


図 8 圧力溶解を考慮した場合と考慮しない場合の亀裂内観測点における透過率経時変化

#### 4. 結論—本研究で得られた新しい知見—

本研究では、これまで記述不可能であった、亀裂発生を起点とする実岩盤の長期構造・透水性変化を一貫して記述可能なマルチフィジックスシミュレータを新たに開発した。本シミュレータを用いて高レベル放射性廃棄物地層処分を想定した長期予測解析を実施した結果、廃棄体処分空洞掘削に伴い発生・進展した無数の亀裂の内、圧力溶解という化学現象が生じる亀裂では透水性が大幅に減少し、その他の亀裂では透水性にほとんど変化がないことが確認された。このような化学現象による局所的な亀裂の透水性変化挙動は、既存のシミュレータでは一切追跡することのできなかつた画期的な成果・知見である。これらをふまえ、本シミュレータによって従来よりも格段に実際的な岩盤の放射性核種閉じ込め性能評価が可能となり、我が国の地層処分技術の安全性・信頼性の更なる向上に大いに寄与するものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) Ogata, S., Yasuhara, H., Kinoshita, N., Cheon, D. S. and Kishida, K.: Modeling of coupled thermal-hydraulic-mechanical-chemical processes for predicting the evolution in permeability and reactive transport behavior within single rock fractures, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, pp. 271-281, 2018.
- 2) Hertz, H.: Uber die Berührung Fester Elastischer Korper, *Journal for Pure and Applied Mathematics*, Vol. 92, pp. 156-171, 1882.
- 3) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物 地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—総論レポート, JNC TN1400 99-022, pp. 634, 1999.
- 4) Aoyagi, K. and Ishii, E.: A Method for Estimating the Highest Potential Hydraulic Conductivity in the Excavation Damaged Zone in Mudstone, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 52 pp. 385-401, 2019.

#### ( 発表論文 )

- 1) 三寫星輝, 緒方燦, 乾徹, 安原英明, 岸田潔, 青柳和平：損傷モデルによる珪質泥岩を対象とした坑道掘削解析, 第 15 回岩の力学講演概要集, pp.215-220, 2021.
- 2) S. Ogata, H. Yasuhara, N. Kinoshita, T. inui, S. Mishima and K. Kishida : Prediction of permeability evolution in granite under the coupled THMC interactions with pH alteration, *Proceedings of the International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media*, GS01-02, 2020.