

琉球石灰岩を対象とした階層的な 空隙スケールモデリングの試み

増岡 健太郎^{1*}・山本 肇¹・平塚 裕介¹

¹大成建設株式会社 技術センター（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）
*E-mail: msoknt00@pub.taisei.co.jp

近年、帯水層中の地下水浸透や物質移行特性の評価に関し、X線CT装置により岩石の空隙形状を数 μm スケールの解像度で可視化し、三次元で直接モデル化して流体解析する事例が報告されている。しかし、空隙径の分布幅が大きい場合、X線CT装置の解像能力の限界から、全ての空隙形状を直接モデル化することは困難になる。そこで本研究では、X線CTで得られたCT値から岩石内の空隙率の分布を作成し、別に行う高解像度のモデルを用いた空隙スケール解析により浸透率を与える階層的なモデル化を行った。本モデルを用いた物質移行解析では、低浸透部の効果を強調することで実験結果に近づく結果が得られたと同時に、空隙率の小さい部分の浸透率の扱い方が全体の塩分濃度変化に大きく影響を与えることが分かった。

Key Words : multilevel modeling, pore-scale simulation, x-ray CT, Ryukyu-limestone, tailing

1. はじめに

近年、帯水層中の地下水浸透や物質移行特性の評価を目的として、X線CT装置により数 μm スケールの解像度で供試体を撮影し、空隙部を三次元で直接モデル化して流体解析する事例（空隙スケール解析）が報告されている^{1),2),3)}。しかし、対象とする岩石の空隙径の分布幅が大きい場合、X線CT装置の解像能力の限界から、全ての空隙形状を直接モデル化することは困難である。

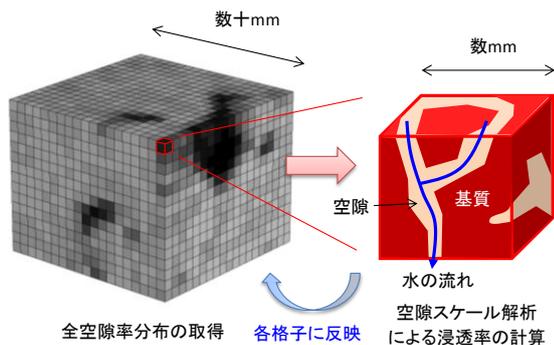
そこで本研究では、複雑な空隙構造を有する試料に対する空隙スケール解析を利用した階層的なモデル化手法を提案する。図-1に本モデル化手法の概念を示す。はじめに、供試体のX線CT画像より、供試体内部の空隙率分

布モデル（全体モデル）を作成する（図-1左）。なお、ここでは特に断らない限り、全空隙率を空隙率と称し、実際の流れに寄与する空隙率を有効空隙率と称する。次に、同じコアから抜き取った小さなサンプルに対する数 μm の高解像度のX線CT画像より、全体モデルの1格子分の領域における空隙形状を表した局所モデルを作成する（図-1右）。そして、局所モデルを用いた空隙スケール解析を行って空隙率と浸透率の関係を求める。この関係を全体モデルの各格子に適用して浸透率を計算する。そして、作成したモデルを用いた物質移行解析を行い、室内トレーサー試験結果⁴⁾と比較して本モデル化手法の妥当性について検討する。

2. 供試体

(1) 寸法および外観

本研究では、複雑な空隙構造を有する試料として、沖縄県伊江島の地下ダム建設現場から採取した琉球石灰岩コアを供試体として用いた。供試体の外観を写真-1に示す。供試体の形状は、直径50 mm、高さ47 mmの円柱状コアである。外観は肉眼で容易に識別できる幅数mm程度の大きな空隙や、やや小さい空隙、非常に緻密で基質部分と考えられる部分などが複雑に入り組んだ空隙構造を呈する。



【全体モデル(ダルシーモデル)】【局所モデル(空隙スケールでの流体解析)】

図-1 本研究での階層的な空隙スケールモデリングの概念

(2) 基本物性

供試体の空隙率，浸透率，空隙径分布の測定結果を表-1に示す．空隙率は窒素ガスを用いたガス置換法から0.16が得られた．浸透率は窒素ガスを用いた透気試験により $5.9 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ （透水係数として約 $5.9 \times 10^5 \text{ cm/s}$ ）が得られた．水銀圧入法による空隙の細孔分布測定結果を図-2に示す．測定は質量約2 gのサンプルに対して行った．図より，本供試体の空隙径は，数ナノメートルまで広く分布することがわかる．なお，水銀圧入法による空隙率は0.15であり，窒素ガスによる試験結果と同等の値が得られた．また第4章で後述するX線CT撮影の解像度で検



写真-1 試験供試体

表-1 供試体基本物性

測定項目	値
直径 [mm]	50
高さ [mm]	47
空隙率 (窒素ガス置換)	0.16
真密度 [g/cm^3] (同)	2.701
浸透率 (窒素ガス透気試験) [m^2]	5.9×10^{-14}

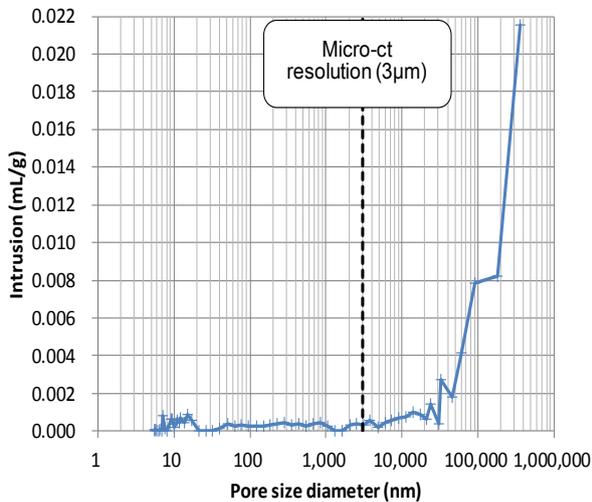


図-2 水銀圧入法による空隙の細孔分布

出可能な3 μm 以上の大きさの空隙の割合は，水銀圧入法で測定された全空隙の約8割と計算された．

3. X線CTによる空隙率分布の計算

まず，X線CT画像に基づいて岩石全体の空隙率分布を推定する．はじめに，マイクロフォーカスX線CT装置「inspeXio SMX-225CT（島津製作所）」を使用して，前述の琉球石灰岩供試体を撮影した．供試体は，撮影前に

表-2 X線CT (inspeXio SMX-225CT) 撮影条件

項目	値
X線管電圧 [kV]	180
X線出力電流 [μA]	100
画像サイズ [pixel]	1024×1024
ピクセル当量長 [$\mu\text{m}/\text{pixel}$]	55
スライスピッチ [μm]	55

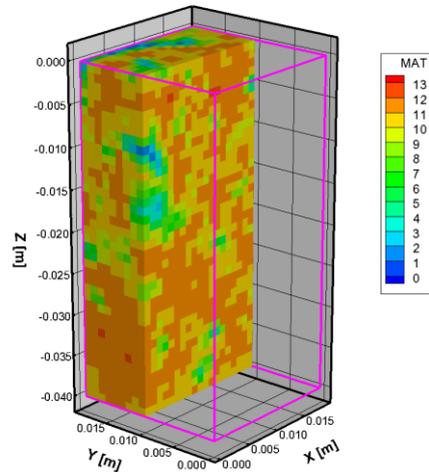


図-3 CT値でランク分けした全体モデル (半断面表示)

表-3 全体モデルにおけるランク毎の格子数と空隙率

ランク番号	CT値の範囲	格子数	空隙率
1	$0 \leq X \leq 20$	24	1.000
2	$20 < X \leq 40$	38	0.917
3	$40 < X \leq 60$	58	0.833
4	$60 < X \leq 80$	41	0.750
5	$80 < X \leq 100$	80	0.667
6	$100 < X \leq 120$	98	0.583
7	$120 < X \leq 140$	145	0.500
8	$140 < X \leq 160$	204	0.417
9	$160 < X \leq 180$	410	0.333
10	$180 < X \leq 200$	1143	0.250
11	$200 < X \leq 220$	5189	0.167
12	$220 < X \leq 240$	6894	0.083
13	$240 < X$	116	0.001

蒸留水を用いて十分に洗浄し、その後110°Cの乾燥炉へ約2日間入れて絶乾させて撮影に供した。X線CTの撮影条件を表-2に示す。撮影で得られた8bit出力のCT画像は、画像処理ソフト「ImageJ」を用いて、空隙部分がCT値0の画像になるように、元のCT画像の130~255の範囲のCT値分布を8bitのCT値の分布(0~255)に変換した。そして、同画像処理ソフトによる双一次補間によって、解像度約55 μmのオリジナルのCT画像を、解像度約1 mmまで粗くした。そして、CT画像における供試体のノイズ(主にビームハードニング)による空隙率分布作成への影響を低減するために、解像度を粗くしたCT画像から、供試体中心部(19 mm×19 mm×40 mm)の範囲のみを取り出し、解像度約1 mmの格子上下でのCT値の分布を求めた。

X線CT装置で得られるCT画像は、撮影解像度の直方体(ボクセル)の集合により表されたもので、一つ一つのボクセルはCT値として被写体の三次元での情報を所有しており、CT値と密度は比例関係を持ち^{5,6)}、密度が高いほどCT値が高くなる。そこで、上記モデルの格子をCT値20毎に全13段階でランク付けを行い、CT値の範囲が0以上20以下の部分を空隙率1.0、240より大きい部分を空隙率0.001とし、他ランクの空隙率を線形補間により計算して空隙率の分布を表す全体モデルを作成した。このようにすると、全体モデルの全体での空隙率は0.157となり、表-1に示す供試体全体での実測結果とほぼ同じ値を与える。図-3に作成した全体モデル(半断面表示)、表-3にモデルに与えたランク毎の格子数と空隙率を示す。

4. 空隙スケール解析による空隙率—浸透率関係の推定

(1) 空隙スケールモデルの作成

全体モデルにおける1格子(1 mm³)毎の浸透率を空隙スケール解析から求めるために、計算領域が約1 mm³、解像度が3 μm、空隙部と基質部に二値化された空隙スケールモデル(局所モデル)を作成する。以下に、その作成手順を述べる。

はじめに、全体モデルを作成した供試体から直径約6 mmのサンプルを採取した。採取したサンプルをマイクロフォーカスX線CT装置「Versa XRM-500 X-Ray Microscope (Zeiss X-Ray Microscopy)」を用いて解像度3 μmで撮影した。ここでのX線CTの撮影条件を表-4に示す。撮影で得られたCT画像に対して、Non-Local Mean Edge Preserving Filter^{7,8)}によるノイズ処理を行い、Marker-Controlled Watershed法により空隙部分と基質部分に分ける二値化処理を行った。そして、二値化処理したCT画像から、空

隙の連結性が確認される約1 mm³の範囲(画素数: 333×333×333)を複数位置で抽出し、それぞれに対して空隙スケール解析を実施し、空隙率と浸透率の関係を数値的に推定した。本解析の実施には、英国インペリアル・カレッジ・ロンドンの開発したporeFoam^{1), 2), 3)}を用いた。

(2) 局所モデルによる空隙スケール解析結果

空隙率の異なるいくつかのサンプルに対して上記の空隙スケール解析を行って求めた空隙率と浸透率との関係

表-4 X線CT (Versa XRM-500 X-Ray Microscope) 撮影条件

項目	値
X線管電圧 [kV]	80
出力 [W]	7
画像サイズ [pixel]	2000×2000
スライス数	2000
ピクセル当量長 [μm/pixel]	3.00
スライスピッチ [μm]	3.00

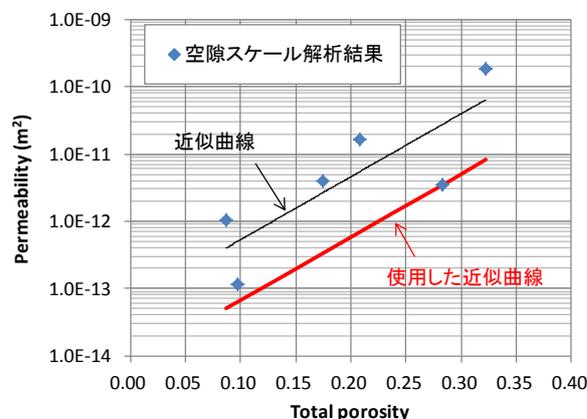


図-4 空隙スケール解析による空隙率と浸透率の関係

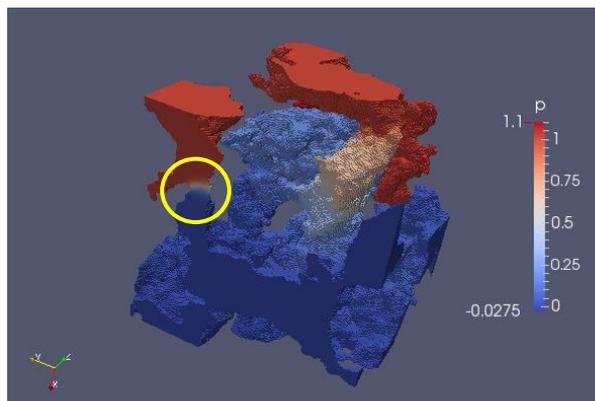


図-5 空隙スケール解析結果の一例(連結空隙のみで表示した標準化した圧力分布)

を図-4に示す。また、解析で得られた空隙内の圧力分布の一例を図-5に示す。図-4より、空隙率と浸透率の間には一定の相関傾向を見ることができ、同程度の空隙率であっても浸透率には1オーダー程度、もしくはそれ以上の差が生じる場合も見られる。図-5の黄色丸部分で示されるような空隙のスロート部分など、空隙率で表されない空隙のサイズや連結性などの要因により浸透率は大きく変化するためである。したがって、上記の要因による局所的な不均質性が存在すると考えられるが、ここでは空隙率と浸透率に局所的に一定の関係が存在すると仮定して以下の検討を進める。

5. 全体モデルによる物質移行解析

(1) 全体モデルへの浸透率の割り当て

3章で作成した全体モデルの各格子にはCT値から推定した空隙率を与えられている。ここでは4章の空隙スケール解析により求めた空隙率と浸透率を適用する。図-4のプロットを指数関数で近似した上で、表-1に示す全体での浸透率と同程度を与えるように近似曲線をシフトした(図-4 赤線)。ただし、浸透率は最大で $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ とした上、空隙率0.001のランク13(表-3参照)の浸透率には、連結性が非常に乏しいと考慮して $1.0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ の低い浸透率を与えた。また、本モデルでは空隙率(全空隙率)と有効空隙率は等しいものと仮定して計算した。

(2) 計算ケース

均質モデルとして、供試体全体の空隙率0.16および浸透率 $5.9 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ (表-1参照)を全格子に与えた平均的な多孔質媒体モデルを考え、これをケース0とする。次に、上記(1)で得られた不均質モデルをケース1とする。図-6中にケース1で与えた空隙率と浸透率の関係を示す。ケース2は、ケース1における基質部分(表-3, ランク12, 空隙率0.083)の浸透率を約2オーダー低下して $1.0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ を与えた場合である。

(3) 全体モデルによる物質移行解析結果

解析コードには、積分差分法による多成分多相流解析コードTOUGH2-MP^{9,10}(EOS7, 米国ローレンスバークレー国立研究所開発)を用いた。解析で与えた境界条件の概要を図-7に示す。初期条件として、上下端の圧力固定境界以外の格子には塩水飽和条件(塩分濃度(図中XB)1.0)を与えた。境界条件として、モデル上端面を淡水飽和条件(XB=0)の圧力固定境界、下端面中央の1格子を同様に淡水飽和条件の圧力固定境界とし、上側から下側へ室内試験⁴と同程度の淡水を流入させた。その他の境界部分是不透水境界とした。塩水密度は試験と同

じ 1.53 g/cm^3 を与えた。

解析結果として、図-8に下流側の濃度変化(初期濃度に対する相対濃度変化)を示す。横軸は下流端での積算流出量を全空隙体積で除した値であるポアボリューム

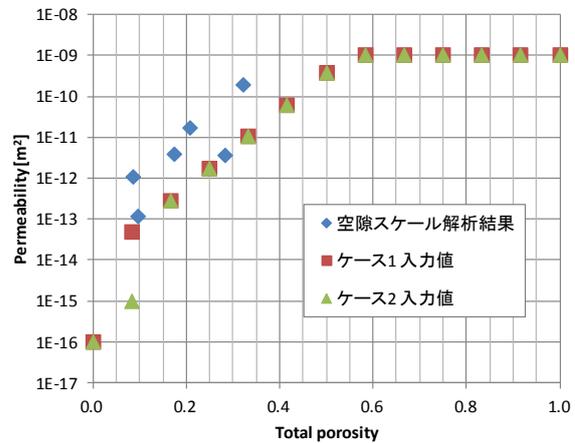


図-6 全体モデルに与えた空隙率と浸透率の関係

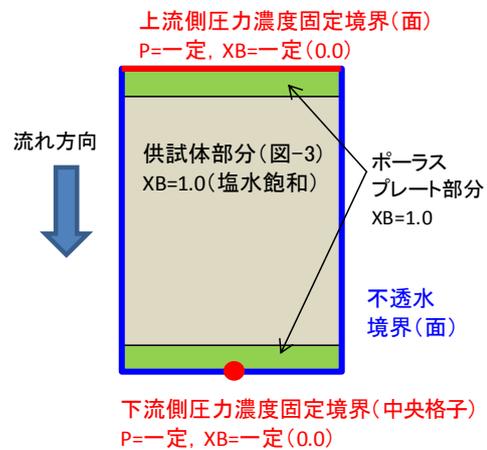


図-7 全体モデル解析概要(鉛直断面表示)

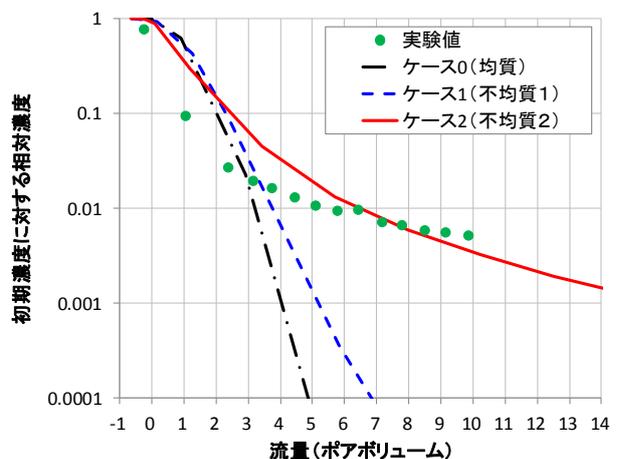


図-8 下流側の濃度変化の比較

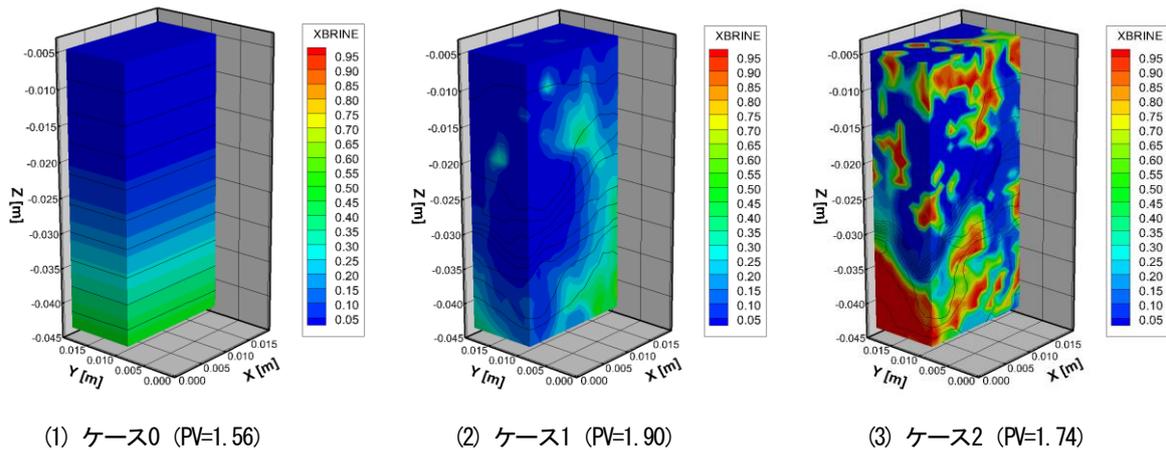


図-9 モデル供試体部分の塩分濃度分布（色塗）と等圧力値線（黒実線）の様子

(PV) で示してある。図中には、本研究で用いた同じ岩石供試体で行った室内トレーサー試験⁴⁾の結果を示す。供試体全体を塩水飽和した状態から淡水を上側から注入したときの下端での塩分濃度変化である。1PV頃までの通水初期の濃度変化を比べると、不均質モデル（ケース1, 2）の方が、均質モデル（ケース0）よりも濃度比較位置での濃度低下量がわずかに大きくなっている。この理由として、不均質モデルでは選択的な流れが生じ、上側から供給される淡水が早期にモデル下方へ到達するためと考えられる。ある計算ステップでのモデル内部の塩分濃度分布を図-9に示す。均質モデルの場合、塩分濃度のコンターは流れ方向と垂直であり、塩水が均等に置換されていることが分かる。一方不均質モデルでは、透水性の高い部分が優先的に置換され、透水性の低い部分の塩分濃度が緩やかに低減する。

図-8の濃度変化についてケース1の結果を実験結果と比べると、実験結果で見られる濃度低下の遅延（テーリング）を十分に表せていない。ランク12（表-3、空隙率0.084）の浸透率を低くして低浸透部の効果を強調すると（ケース2）より実験結果に近づくが十分ではない。この点については、連結性の効果などから、今回仮定した空隙率と浸透率の関係の線形性が成立していない、あるいは局所モデルのサンプル数が不均質性を表すのに十分でないことなどが考えられる。また、空隙率の小さい基質部分の浸透率の扱い方が下流側における塩分濃度変化に大きな影響を与えることが分かる。

6. まとめ

琉球石灰岩を対象に、マイクロフォーカスX線CTを用いて供試体内部の空隙構造を空隙率の分布で表した全体

モデルを作成し、さらに解像度 $3\mu\text{m}$ で空隙形状を表した局所モデルを用いた空隙スケール解析を行って、空隙率と浸透率の関係を求め、それに基づいて全体モデルの各格子に対して浸透率を与える階層的なモデル化を行った。そして、作成したモデルを用いた物質移行解析を行い、解析結果を室内トレーサー試験結果と比較した。その結果、本モデルにおいて、低浸透部の効果を強調することで実験結果に近づく解析結果が得られたと同時に、空隙率の小さい基質部分の浸透率の扱い方が、モデル全体での塩分濃度変化に大きな影響を与えることが分かった。

今後の課題として、局所モデルのサンプル数が不十分であると考えられた事から、より多くのサンプルを用いた同様の検討や、局所モデル内の空隙率と合わせて、空隙分布等の統計情報を考慮した浸透率の推定を行うことなどが考えられる。

謝辞：本研究における小サンプルに対するマイクロフォーカスX線CTの撮影および空隙スケール解析には、英国インペリアル・カレッジ・ロンドンのBijeljic, Branko氏、Lin, Qingyang氏に多大なるご指導ご協力を賜った。また、Blunt, Martin J教授には、客員研究員として同大学で本研究を行う機会を快く与えて頂いた。この場を借りて厚く御礼を申し上げるとともに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Mostaghimi, P., Blunt, J. M. and Bijeljic, B.: Computations of Absolute Permeability on Micro-CT Images, *Mathematical Geosciences*, 45, pp.103-125, 2013.
- 2) Bijeljic, B., Mostaghimi, P. and Blunt, M. J. : Insights into non-Fickian solute transport in carbonates, *Water Resources Research*, 49, 2714-2728, 2013.
- 3) Bijeljic, B., Raeni, A., Mostaghimi, P. and Blunt, M. J. : Prediction of non-Fickian solute transport in different classes of porous media using direct

- simulation on pore-scale images, *Physical Review E*, 87, 013011, 2013.
- 4) 増岡健太郎, 山本肇, 青木智幸 : フローティング型地下ダムにおける淡水貯留シミュレーション, 大成建設技術センター報, Vol.46, 52, 2013.
 - 5) 大谷順, 尾原祐三, 菅原勝彦, 棕木俊文 : 地盤工学における産業用 X 線 CT スキャナーの適用, 土と基礎, 48-2, 2000.
 - 6) 菊池喜昭, 水谷崇亮, 永留健, 梶俊郎 : マイクロフォーカス X 線 CT スキャナーの地盤工学への適用性の検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1125, 2006.
 - 7) Buades, A., B. Coll, and J. M. Morel : Nonlocal Image and Movie Denoising, *International Journal of Computer Vision*, 76(2), pp. 123-139, 2008.
 - 8) Buades, A., B. Coll, and J. M. Morel : A non-local algorithm for image denoising, *CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on, Volume:2*, 2005.
 - 9) Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G. : TOUGH2 user's guide. Version 2.0, *Report, LBNL-43134*, 1999.
 - 10) Keni Zhang, Yu-Shu Wu, and Karsten Pruess : User's guide for TOUGH2-MP - A Massive Parallel Version of the TOUGH2 Code, *Report, LBNL-315E*. 2008.

A STUDY ON MULTILEVEL MODELING OF PORE-SCALE FLUID FLOW AND MASS TRANSPORT IN RYUKYU-LIMESTONE

Kentaro MASUOKA, Hajime YAMAMOTO and Yusuke HIRATSUKA

Recently, pore-scale modeling, in which pore structures observed on micro-CT images are directly modeled, has been utilized for simulation studies of fluid flow and mass transport in geologic media. However it is often difficult to incorporate all the pores with having a broad range of size. In this study we examined a multilevel approach to model a limestone that has a heterogeneous pore structure. The permeabilities of the respective 1mm cubes were determined based on a porosity-permeability relationship by pore-scale flow simulations. The simulation results showed the overall behavior of mass transport observed in a tracer test and the impact of the permeability in a low porosity part.