

信州大学審査学位論文

X線CTを用いた琉球石灰岩帯水層中の
塩水淡水置換挙動評価のモデル化に関する研究

令和3年3月

増岡 健太郎

信州大学大学院
総合工学系研究科
山岳地域環境科学専攻

要 旨

IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第5次評価報告書によれば、温室効果ガスの排出による地球温暖化の進行について疑う余地はなく、今世紀末には世界平均気温は0.3～4.8℃上昇し、世界平均海面水位は0.26～0.82m 上昇すると予測されている。世界平均気温の上昇に伴い、短時間強雨の頻度増加や強度増大、台風やハリケーンの大型・強化が懸念されており、世界平均海面水位の上昇と合わさることで、我が国においては高潮や洪水などの災害の増加が懸念されている。

サンゴ礁の低平な島々からなる島嶼国は、地球温暖化の影響を大きく受けると予想されている。これらの島嶼国は、経済力に乏しく、安定的な淡水源を持たないため、海面上昇と気候変動による淡水資源の減少が危惧される。

このような背景において、離島における新しい淡水資源の確保技術として、農林水産省と沖縄総合事務局はフローティング型地下ダムを考案している。フローティング型地下ダムとは、島の地下に止水壁を周状に構築することで、止水壁に囲まれた内側で地盤へ浸透した雨水が、地下の浅い深度で海へ流出するのを抑制し、止水壁を建設した深度付近まで淡水レンズの厚さを増大させる技術である。すなわち、淡水レンズ下方の海水で満たされた帯水層を、上方から供給される淡水（雨水）で置換することで淡水を貯留する。しかし、フローティング型地下ダムを建設した実績は世界でも未だ無い。また、環礁島の帯水層を形成する第四紀石灰岩層における塩水淡水置換プロセスは、同岩石が複雑な空隙構造を有することから特異な地下水流動挙動を示すと考えられ、フローティング型地下ダムの実現性や利水計画を考える上で、石灰岩帯水層中における塩水と淡水の流動挙動の予測評価手法を確立することは重要な課題である。

そこで、本研究では、環礁島の帯水層を形成し、複雑な空隙構造を有する第四紀の琉球石灰岩を用い、同岩石中の物質移行（塩水淡水置換挙動）を数値シミュレーションで再現するための新しいモデル化手法を確立することを目的とし、以下の検討を行った。

- ① 塩水を用いた室内トレーサー試験による琉球石灰岩中の塩水淡水置換挙動の把握
- ② X線 CT スキャンによる琉球石灰岩の空隙特性の把握
- ③ 琉球石灰岩帯水層中の塩水淡水置換挙動評価のモデル化の検証

①では、琉球石灰岩コアを用いた塩水淡水置換室内トレーサー試験を実施し、フローテ

リング型地下ダムの淡水貯留過程での塩水の濃度低下傾向などの基本データを取得した。また、X線CTを用いた同様の塩水淡水置換室内トレーサー試験を実施し、淡水貯留過程における空隙内の塩水の濃度低下傾向を可視化することで、琉球石灰岩中の塩水淡水置換メカニズム（特にテーリング（トレーサー試験などにおける濃度破過曲線での急激な濃度変化とその後の緩やかな濃度変化を示す物質移行の遅延現象）の原因）について考察した。その結果、琉球石灰岩の塩水淡水置換過程においては、空間的に独立性の高い空隙に残留する塩水によってテーリングが生じている可能性を示すとともに、それらを再現する合理的なモデル化手法が必要であることを明らかにした。

②では、大きさの異なる琉球石灰岩供試体をX線CTで撮影し、同岩石の空隙特性について評価した。また、数値モデル化を念頭に、空隙体積と空隙表面積が維持される単純化された空隙形状について検討した。その結果、第四紀の琉球石灰岩の空隙は、広いサイズ範囲で空隙体積と空隙表面積の頻度分布でバイナリフラクタルの特性を有することが示された（空隙体積で12オーダー、空隙表面積で10オーダー）。また、空隙クラスターの体積に応じて大きさを変える小球の集合体で空隙クラスターをモデル化し、空隙クラスターの形状の複雑さの程度を表す新しいパラメータを導入することで、実際の空隙クラスターの表面積と体積の両方の分布とよく一致する空隙クラスター分布を作成できる結果が得られた。

③では、空隙サイズが広く分布する琉球石灰岩コアに対して、一般的な地下水解析手法である連続体モデルと、近年実施例が増加しているポアスケールモデリングを組み合わせたモデル化手法を提案し、実際の琉球石灰岩コアに対して同モデルを適用させ、塩水淡水置換室内トレーサー試験結果の再現解析を行うことでモデルの妥当性について検証した。その結果、提案したモデル化手法で計算された空隙率と浸透率は、いずれも室内試験で測定された空隙率と浸透率と同様の値を示した。また、試験で得られた下流側排水中のトレーサー濃度の経時変化についても、同モデル化手法で概ね再現できることを確認した。数値シミュレーション結果より、琉球石灰岩中の液相での物質移行におけるテーリングの主な原因は、同石灰岩は移流が卓越する主要な空隙部分と、拡散が支配的なマトリックス部分が混在する二重空隙的な挙動によると考えられた。

X線CTを用いた琉球石灰岩帯水層中の 塩水淡水置換挙動評価のモデル化に関する研究

目次

第1章	序論	1-1
1.1.	本研究の背景	1-1
1.2.	本研究の目的	1-6
1.3.	本論文の構成	1-7
1.4.	1章参考文献	1-9
第2章	従来の研究	2-1
2.1.	環礁島浅部の水文地質	2-1
2.2.	琉球石灰岩の水理地質パラメータ	2-5
2.3.	地下水解析手法	2-10
2.3.1.	等価多孔質媒体モデル	2-10
2.3.2.	二重空隙モデル	2-13
2.3.3.	ポアスケールモデリング	2-14
2.4.	本研究の位置づけ	2-17
2.5.	2章参考文献	2-18
第3章	室内トレーサー試験による琉球石灰岩中の物質移行特性	3-1
3.1.	はじめに	3-1
3.2.	塩水淡水置換の室内トレーサー試験	3-3
3.2.1.	目的	3-3
3.2.2.	試験方法	3-3
3.2.3.	試験結果	3-9
3.2.4.	考察	3-11
3.3.	マイクロフォーカスX線CTを用いた塩水淡水置換室内トレーサー試験	3-15
3.3.1.	目的	3-15
3.3.2.	X線CTの概要 ¹⁴⁾	3-15
3.3.3.	試験方法	3-16

3.3.4.	試験結果.....	3-20
3.3.5.	考察.....	3-26
3.4.	二重空隙モデルによる再現解析	3-28
3.4.1.	目的.....	3-28
3.4.2.	解析手法.....	3-28
3.4.3.	解析結果および考察.....	3-29
3.5.	3章のまとめ	3-31
3.6.	3章参考文献	3-32
第4章	X線CTスキャンによる琉球石灰岩中の空隙特性.....	4-1
4.1.	はじめに	4-1
4.2.	試験方法	4-2
4.2.1.	供試体.....	4-2
4.2.2.	供試体前処理.....	4-3
4.2.3.	X線CT撮影.....	4-3
4.2.4.	水銀圧入試験.....	4-6
4.2.5.	X線CT画像からの空隙ボクセルの抽出.....	4-7
4.2.6.	二値化画像を用いた空隙クラスター解析	4-8
4.3.	試験結果	4-10
4.3.1.	水銀圧入試験結果.....	4-10
4.3.2.	空隙クラスターの比表面積.....	4-11
4.3.3.	空隙クラスターの体積のヒストグラム	4-13
4.3.4.	空隙クラスターの表面積のヒストグラム	4-15
4.4.	考察	4-17
4.4.1.	空隙クラスターの形状に関する特徴.....	4-17
4.4.2.	空隙クラスターの体積および表面積の分布特性.....	4-18
4.4.3.	空隙クラスターの形状の単純化.....	4-21
4.5.	4章のまとめ	4-26
4.6.	4章参考文献	4-27
第5章	琉球石灰岩帯水層中の塩水淡水置換挙動評価のモデル化.....	5-1
5.1.	はじめに	5-1

5.2. モデル概要	5-3
5.3. 検討手法	5-4
5.3.1. 供試体.....	5-4
5.3.2. X線 CT スキャンによるグローバルモデルのメッシュ作成.....	5-5
5.3.3. ローカルモデルによる空隙率—浸透率の相関関係の推定	5-7
5.3.4. 室内トレーサー試験の再現解析.....	5-8
5.4. 検討結果	5-10
5.4.1. グローバルモデルの空隙率.....	5-10
5.4.2. ローカルモデルによる空隙率—浸透率の相関.....	5-11
5.4.3. 室内トレーサー試験の再現解析結果.....	5-12
5.5. 考察	5-15
5.5.1. 琉球石灰岩の低空隙率部分の局所浸透率.....	5-15
5.5.2. 琉球石灰岩帯水層の物質移行特性とモデル適用性.....	5-16
5.6. 5章のまとめ	5-19
5.7. 5章参考文献	5-20
第6章 結論	6-1

謝辞

付録

- A) 琉球石灰岩基質部の密度試験結果
- B) 琉球石灰岩供試体の外観写真
- C) 琉球石灰岩供試体の X 線 CT 画像
- D) グローバルモデルにおける浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域
- E) 塩淡水置換トレーサー試験の再現解析でのモデル内の相対濃度分布
- F) クラスターラベリングプログラム

図目次

図 1-1	淡水レンズとフローティング型地下ダムの模式図.....	1-2
図 1-2	従来型の地下ダムの模式図	1-2
図 1-3	本論文の構成	1-8
図 2-1	島嶼の分類と成り立ち (文献 1)より引用)	2-1
図 2-2	淡水レンズの概要 (文献 1)より引用)	2-2
図 2-3	Hidajat et al.のトレーサー試験結果 (文献 13)より)	2-4
図 2-4	沖縄諸島琉球石灰岩分布図 (文献 20)より)	2-5
図 2-5	先島諸島琉球石灰岩分布図 (文献 20)より)	2-6
図 2-6	奄美諸島琉球石灰岩分布図 (文献 20)より)	2-6
図 2-7	名和らによる原位置トレーサー試験の概略 (文献 29), 30)より)	2-8
図 2-8	パイプフローを有する帯水層モデルの模式図 (文献 31)より)	2-10
図 2-9	等価不均質連続体モデルの概念. (a) 亀裂ネットワークモデル, (b) 等価不均質 連続体モデル (文献 35)より)	2-11
図 2-10	スメアード割れ目モデルの概念図 (文献 38)による)	2-12
図 2-11	二重空隙モデルの概念 (文献 40)より)	2-13
図 2-12	二重空隙モデル (MINC モデル ^{41), 42)} の概念 (文献 40)より)	2-13
図 2-13	岩石サンプルの X 線 CT 画像例 (文献 45)より)	2-15
図 2-14	三次元空隙構造の可視化の例 (文献 45)より)	2-16
図 2-15	ネットワークモデルの例 (文献 45)より)	2-16
図 3-1	イラクの層序 (文献 9)による)	3-2
図 3-2	本試験で用いた琉球石灰岩の採取位置 (沖縄県伊江島)	3-4
図 3-3	塩水淡水置換の室内トレーサー試験装置の概略.....	3-6
図 3-4	塩水淡水置換の室内トレーサー試験の実施状況.....	3-6
図 3-5	供試体養生の様子 (エポキシ樹脂注入前)	3-7
図 3-6	塩水淡水置換室内トレーサー試験の通水手順 (a⇒b⇒c)	3-8
図 3-7	トレーサー試験における排水中の塩化物イオン濃度変化 (時間表記)	3-10
図 3-8	トレーサー試験における排水中の塩化物イオン濃度変化 (PV 表記)	3-11
図 3-9	トレーサー試験における排水中の導電率変化 (時間表記)	3-13

図 3-10	トレーサー試験における排水中の導電率変化 (PV 表記)	3-13
図 3-11	供試体 D100-2 と D100-3 の外観.....	3-14
図 3-12	X 線 CT 画像の模式図.....	3-16
図 3-13	画像再構成のイメージ.....	3-16
図 3-14	D50 供試体の外観.....	3-17
図 3-15	X 線 CT を用いた塩水淡水置換の室内トレーサー試験装置の概略.....	3-18
図 3-16	X 線 CT を用いた塩水淡水置換の室内トレーサー試験の実施状況.....	3-18
図 3-17	トレーサー試験における排水 (下流側) の相対濃度変化 (時間表記)	3-20
図 3-18	トレーサー試験における排水 (下流側) の相対濃度変化 (PV 表記)	3-21
図 3-19	供試体全体を撮影した場合 (ケース 1) のヨウ化カリウム水溶液—淡水置換 室内トレーサー試験中の供試体 CT 画像 (上端面から約 18mm 位置の水平断面)	3-23
図 3-20	ケース 2 の CT 画像 (各左上画像は供試体上端から約 36mm の位置) ...	3-24
図 3-21	ケース 2 の CT 値の差分画像 (a : 図 3-20a-b、b : 図 3-20b-c)	3-25
図 3-22	独立性の高い大きな空隙からの基質部分を介した拡散のイメージ.....	3-26
図 3-23	二重空隙モデルによる再現解析結果.....	3-30
図 4-1	供試体の外観.....	4-2
図 4-2	D6 供試体の X 線 CT 撮影の様子 (VersaXRM-500X)	4-4
図 4-3	D100 供試体の X 線 CT 画像の例 (解像度 119 μ m)	4-5
図 4-4	D50 供試体の X 線 CT 画像の例 (解像度 55 μ m)	4-5
図 4-5	D6 供試体の X 線 CT 画像の例 (解像度 3 μ m、フィルター処理後)	4-6
図 4-6	水銀圧入試験で用いた琉球石灰岩の小岩片.....	4-6
図 4-7	D6 供試体 CT 画像の二値化 (空隙部分ボクセルの抽出) プロセス. (a) トリ ミング後の CT 画像、(b) フィルター後の CT 画像、(c) 二値化画像、(d) 二値化 のための閾値.....	4-8
図 4-8	空隙ボクセルの連続性判定. (a) 連続性あり、(b) 連続性なし.....	4-9
図 4-9	MICP 試験結果 (空隙径と水銀圧入量の関係)	4-10
図 4-10	D100 供試体の空隙クラスターの三次元可視化の例. (a) 識別した全ての空 隙クラスター、(b) 10mm ³ を超える体積の空隙クラスター.....	4-11
図 4-11	評価体積と比表面積の関係.....	4-12
図 4-12	空隙クラスターの体積の頻度分布. (a) 供試体毎のプロット、(b) D100、	

	D50、D6 毎のプロットと回帰線（最小二乗法）	4-14
図 4-13	空隙クラスターの表面積の頻度分布. (a) 供試体毎のプロット, (b) D100、D50、 D6 毎のプロットと回帰線（最小二乗法）	4-16
図 4-14	1m ³ あたり空隙クラスターの体積の頻度分布	4-19
図 4-15	1m ³ あたり空隙クラスターの表面積の頻度分布	4-20
図 4-16	空隙クラスターの単純化形状の概略.	4-22
図 4-17	空隙クラスターの表面積の計算された度数分布.....	4-24
図 4-18	不均質連続体モデルの作成手順のイメージ. (a) 二値化画像（黒色：空隙、白 色：マトリックス）、(b) 小球の集合体として単純化された空隙を生成したイメ ージ b1 と b2、(c) 不均質連続体モデルのイメージ c1 と c2.	4-25
図 5-1	本研究で提案するモデル化手法の概要	5-3
図 5-2	D50 供試体（D50-1）の外観（再掲）	5-4
図 5-3	D50 供試体の X 線 CT 画像	5-5
図 5-4	グローバルモデル解析条件概要	5-9
図 5-5	グローバルモデルの解析格子	5-10
図 5-6	ローカルモデルによる計算結果	5-11
図 5-7	グローバルモデルにおける浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域.....	5-13
図 5-8	モデル出口での初期濃度に対する相対濃度変化.....	5-14
図 5-9	各ケースの相対濃度分布（グローバルモデル）. (a) ケース 0（PV =約 0.05）、 (b) ケース 1（PV =約 2.3）、(c) ケース 2（PV =約 2.2）、(d) ケース 3（PV =約 2.2）	5-15
図 5-10	グループ毎に計算したペクレ数の平均	5-18
図 A-1	琉球石灰岩基質部の密度試験結果.....	A-1
図 B-1	D100-1 外観写真（直径 100mm）	B-2
図 B-2	D100-2 外観写真（直径 100mm）	B-2
図 B-3	D100-3 外観写真（直径 100mm）	B-3
図 B-4	D100-4 外観写真（直径 100mm）	B-3
図 B-5	D100-5 外観写真（直径 100mm）	B-4
図 B-6	D100-6 外観写真（直径 100mm）	B-4
図 B-7	D100-7 外観写真（直径 100mm）	B-5

図 B-8	D100-8 外観写真 (直径 100mm)	B-5
図 B-9	D50-1 (X 線 CT 塩淡水置換試験に使用) 外観写真 (直径 50mm)	B-6
図 B-10	D50-2 外観写真 (直径 50mm)	B-6
図 C-1	D100-1 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 119 μ m)	C-7
図 C-2	D100-2 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 119 μ m)	C-7
図 C-3	D100-3 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 119 μ m)	C-8
図 C-4	D100-4 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 119 μ m)	C-8
図 C-5	D100-5 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 119 μ m)	C-9
図 C-6	D100-6 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 119 μ m)	C-9
図 C-7	D100-7 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 119 μ m)	C-10
図 C-8	D100-8 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 119 μ m)	C-10
図 C-9	D50-1 (X 線 CT 塩淡水置換試験に使用) 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 55 μ m)	C-11
図 C-10	D50-2 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 55 μ m)	C-11
図 C-11	D6-1 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 3 μ m)	C-12
図 C-12	D6-2 供試体の X 線 CT 画像例 (1) (解像度 3 μ m)	C-13
図 C-13	D6-2 供試体の X 線 CT 画像例 (2) (解像度 3 μ m)	C-13
図 C-14	D6-3 供試体の X 線 CT 画像例 (1) (解像度 3 μ m)	C-14
図 C-15	D6-3 供試体の X 線 CT 画像例 (2) (解像度 3 μ m)	C-14
図 C-16	D6-4 供試体の X 線 CT 画像例 (1) (解像度 3 μ m)	C-15
図 C-17	D6-4 供試体の X 線 CT 画像例 (2) (解像度 3 μ m)	C-15
図 C-18	D6-5 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 3 μ m)	C-16
図 D-1	グローバルモデルのケース 1 の各 YZ 断面での浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域 (1)	D-17
図 D-2	グローバルモデルのケース 1 の各 YZ 断面での浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域 (2)	D-18
図 D-3	グローバルモデルのケース 2 の各 YZ 断面での浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域 (1)	D-19
図 D-4	グローバルモデルのケース 2 の各 YZ 断面での浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域 (2)	D-20
図 D-5	グローバルモデルのケース 3 の各 YZ 断面での浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域 (1)	D-21
図 D-6	グローバルモデルのケース 3 の各 YZ 断面での浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域 (2)	

.....	D-22
図 E-1 再現解析ケース 1 におけるモデル内の相対濃度分布 (1)	E-23
図 E-2 再現解析ケース 1 におけるモデル内の相対濃度分布 (2)	E-24
図 E-3 再現解析ケース 1 におけるモデル内の相対濃度分布 (3)	E-25
図 E-4 再現解析ケース 2 におけるモデル内の相対濃度分布 (1)	E-26
図 E-5 再現解析ケース 2 におけるモデル内の相対濃度分布 (2)	E-27
図 E-6 再現解析ケース 2 におけるモデル内の相対濃度分布 (3)	E-28
図 E-7 再現解析ケース 2 におけるモデル内の相対濃度分布 (4)	E-29
図 E-8 再現解析ケース 3 におけるモデル内の相対濃度分布 (1)	E-30
図 E-9 再現解析ケース 3 におけるモデル内の相対濃度分布 (2)	E-31
図 E-10 再現解析ケース 3 におけるモデル内の相対濃度分布 (3)	E-32
図 E-11 再現解析ケース 3 におけるモデル内の相対濃度分布 (4)	E-33
図 E-12 再現解析ケース 0 におけるモデル内の相対濃度分布	E-34

表目次

表 1-1	太平洋島嶼国データ一覧（文献 2）に加筆）	1-4
表 1-2	その他の太平洋島嶼と地域の島嶼国データ一覧.....	1-5
表 2-1	既往研究における琉球石灰岩の物性値	2-7
表 3-1	琉球石灰岩円柱状供試体の基本データ	3-4
表 3-2	塩水淡水置換トレーサー試験の試験条件	3-9
表 3-3	X 線 CT を用いた塩水淡水置換の室内トレーサー試験での X 線 CT 撮影条件	3-19
表 3-4	二重空隙モデル ^{19), 20), 21)} を用いたヨウ化カリウム—淡水置換の 室内トレーサー試験の再現解析における主な入力パラメータ	3-29
表 4-1	円柱状供試体の主要諸元	4-3
表 4-2	X 線 CT 撮影条件	4-4
表 4-3	X 線 CT を用いて計算される琉球石灰岩の空隙に関するパラメータ	4-12
表 5-1	D50 円柱状供試体（D50-1）の基本物性	5-4
表 5-2	X 線 CT 撮影条件	5-5
表 5-3	グローバルモデルの解析格子のグループ分けと空隙率.....	5-6
表 5-4	各計算ケースでのグループ毎の空隙率と浸透率.....	5-12

第1章 序論

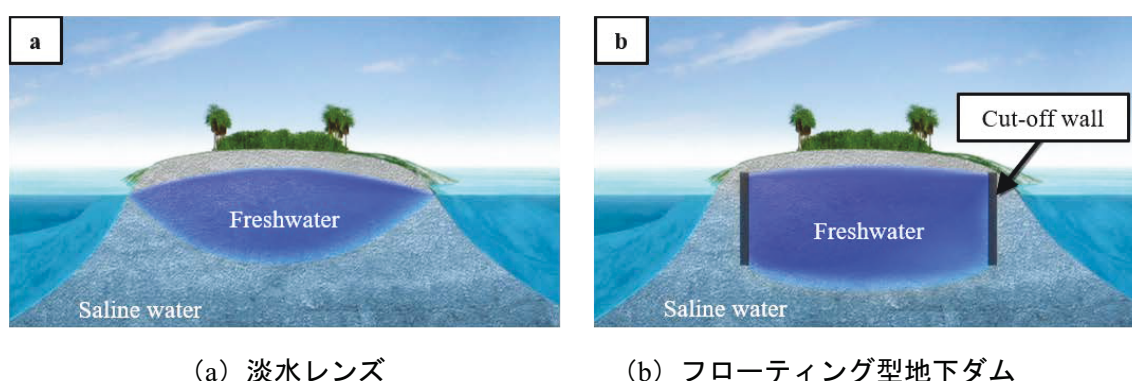
1.1. 本研究の背景

IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第5次評価報告書によれば、温室効果ガスの排出による地球温暖化の進行について疑う余地はなく、今世紀末には世界平均気温は0.3～4.8°C上昇し、世界平均海面水位は0.26～0.82m上昇すると予測されている¹⁾。世界平均気温の上昇に伴い、短時間強雨の頻度増加や強度増大、台風やハリケーンの大型・強大化が懸念されており、世界平均海面水位の上昇と合わさることで、我が国においては高潮や洪水などの災害の増加が懸念されている。

サンゴ礁の低平な島々からなる島嶼国は、地球温暖化の影響を大きく受けると予想されている^{2), 3), 4), 5)}。表 1-1 および表 1-2 に島嶼国の基本データを示す²⁾。一般に、これらの島嶼国はサイクロンの進路にあたる。しかし、国土面積は小さく、主な産業は農業、漁業、観光業などである国がほとんどで、経済力およびエネルギーに乏しく、住民の多くは沿岸域に居住するが、海岸の防災施設は脆弱である。淡水資源に関しては、エネルギーに乏しいため脱塩処理プラントを使用している国は僅かであり、一部のリゾート施設での利用に限定される。標高の比較的高い大きな火山島を有する国では淡水源に表流水が含まれるが、環礁などの低平な島で構成されるキリバス、マーシャル諸島共和国、ナウル、ニウエ、ツバル、モルジブ共和国などの国の主な淡水源は、降雨のタンクなどへの直接貯留や地下水利用に限定される。このような、経済力に乏しく安定的な淡水源を持たない島嶼国では、海面上昇と気候変動による淡水資源の減少が危惧される。

これらの島々に対して、安定的な淡水資源を供給する方策が求められる。海水淡水化プラントはその一つであり、その淡水製造方法は主に「蒸発法」と「膜分離法」の二つに分類される⁶⁾。蒸発法では、水の相変化を伴うことから一般に膜分離法より大量のエネルギーを必要とするため、石油や電力の安価な産油国以外の地域での使用はほとんど無く、エネルギーに乏しい島嶼国への適用は困難である。一方、膜分離法は蒸発法よりエネルギーを必要としないため、日本を含めた島嶼国において現在使用されており、日本で主に使用されているような1000 m³/day未満の小規模なものが約86%を占めている。膜分離法の問題点は、海水を昇圧するためにエネルギーを必要とすること（4.6～12 kWh/m³）、エネルギーの使用に伴うCO₂の発生、浸透膜の目詰まり、目詰まり防止のための前処理に伴う廃薬剤・廃汚泥の発生、濃縮塩水の排出に伴う環境への影響等が問題として考えられる。上記の問題を解決するために、目詰まりを防止するために海洋深層水を用いた場合や、風力発電を使用した低エネルギー型の海水淡水化プラントの研究などが行われている⁷⁾。

上述したような背景の中、農林水産省と沖縄総合事務局は、離島における新しい淡水資源の確保技術として、フローティング型地下ダムを考案している^{8),9)}。一般に、島の地下水(淡水)は、地盤へ浸透する雨水と地盤中で海へ流出する地下水が平衡し、淡水と海水の密度差によって、島の地盤中へ入り込んだ海水の上部に、「淡水レンズ」と呼ばれる薄いレンズ状で存在する(図 1-1a)。フローティング型地下ダムとは、図 1-1b に示すように、島の地下に止水壁を周状に構築することで、止水壁に囲まれた内側で地盤へ浸透した雨水が、地下の浅い深度で海へ流出するのを抑制し、止水壁を建設した深度付近まで淡水レンズの厚さを増大させる技術である。



(a) 淡水レンズ

(b) フローティング型地下ダム

図 1-1 淡水レンズとフローティング型地下ダムの模式図

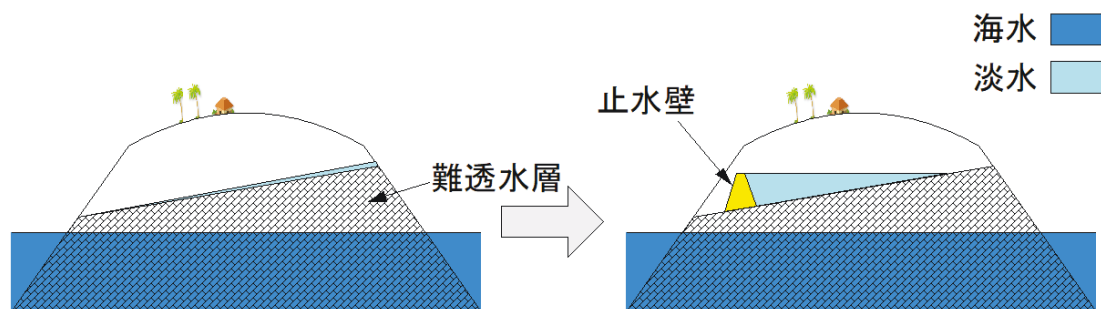


図 1-2 従来型の地下ダムの模式図

従来型の地下ダムは、帯水層の下側に難透水層が存在するような地盤において、難透水層の上に止水壁を構築することで地下水の流れを堰き止め、地下水位が上昇することで淡水を貯留する(図 1-2)。すなわち、従来型の地下ダムは、空気や古い地下水が新鮮な地下水によって置換されることで淡水を貯留する。これに対して、フローティング型地下ダムでは、元来存在する淡水レンズ下方の海水で満たされた帯水層を、上方から供給される淡水(雨水)で置換することで淡水を貯留する(図 1-1b)。すなわち、フローティング型地下ダムは、空

隙内に存在する海水が淡水（雨水）によって置換されることで淡水が貯留する。このように、フローティング型地下ダムと従来型の地下ダムでは、淡水で置換する空隙内の流体が異なる。

沖縄総合事務局⁸⁾は、沖縄県の津堅島において、約 20m 四方の範囲で地盤中に遮水壁を建設して、フローティング型地下ダムに関する実証試験を実施し、淡水が地下の塩水上に浮かんだ状態で貯留されることを確認している。課題として、淡水レンズの効率的利用のための取水に伴う塩水侵入の回避と、淡水レンズの強化のための地下水涵養技術の確立を挙げている。また、フローティング型地下ダムでは、遮水壁の内側と外側の水位差によって、淡水（雨水浸透水）は遮水壁内側の地下へ浸透して貯留されるため、ダムの構造形態による遮水壁内側での地下水面の上昇に関する検討も課題として挙げられる。また、環礁島の帯水層を形成する石灰岩層における塩水淡水置換のプロセスは、同岩石が複雑な空隙構造を有することから特異な挙動を示すと考えられ、フローティング型地下ダムの実現性や利水計画を考える上で、石灰岩帯水層中の塩水と淡水の挙動の予測評価手法を確立することは重要な課題である。

表 1-1 太平洋島嶼国データ一覧（文献2)に加筆）

国名	人口	国土面積	島数	島分類	主な淡水源	主な淡水利用	安全な使用率	供給率	主な産業
		km ²					%(人口に対して)		
太平洋島嶼国									
クック諸島	13,572	237	15	火山島(5)、サンゴ島(10)	SW、GW、RW	WS、 T	95	100	農業、漁業(真珠養殖)、観光
ミクロネシア連邦	110,218	700	607	火山島～サンゴ島	SW、GW、RW	WS	44	-	水産業、観光
フィジー諸島共和国	831,263	18,270	300	火山島～サンゴ島	SW、GW、RW、D(リゾート地のみ)	WS、 T、 H、 I	77	47	観光、砂糖、衣料が三大産業
キリバス共和国	92,428	730	33	サンゴ島	GW、RW、D(制限)	WS	76	47	漁業、コブラの生産
マーシャル諸島共和国	55,981	180	1225	サンゴ島	RW(空港貯水池から建物まで)、GW、D(緊急時)	WS	82	-	農業(コブラ、ココヤシ油)、水産業
ナウル	10,131	21	1	隆起サンゴ島	D(普段使用)、RW、GW(僅か)	WS	100	-	磷鉱石の採掘
ニウエ	1,591	259	1	隆起サンゴ島	GW、RW	-	100	100	農業、観光業
パラオ共和国	19,907	488	約 200	火山島～サンゴ島	SW、GW、RW	WS	86	79	観光業、漁業
バブア・ニューギニア	6,187,000	462,000	約 700	火山島～サンゴ島	SW、GW、RW	WS、 M	24	42	鉱業(原油、金、銅)、農業(パーム油、コーヒー)、林業(木材)
サモア独立国	185,000	2,840	9	火山島～サンゴ島	SW、GW、RW	WS	100	99	農業、沿岸漁業
ソロモン諸島	534,000	28,900	約 1000	主に火山島	SW、GW、RW	WS	64	71	第 1 次産業(コブラ、木材、魚)中心の経済
トンガ王国	99,298	750	171	火山島～サンゴ島	GW、RW	WS	95	100	農業(コブラ、やし油、かぼちゃ)
ツバル	9,652	26	129	サンゴ島	RW(主要)、GW(僅か)、D(緊急時)	WS	85	100	農業及び漁業が主要な産業であるが、自給自足的な部分が大い。その他、若干の建設業、サービス業等
ヴァヌアツ共和国	221,417	12,190	約 80	火山島	SW、GW、RW	WS、 T、 H	87	88	伝統的経済部門(全人口の 80%、GDP の 20~30%)と、近代部門(観光、その他タックス・ヘイブンを利用した金融活動等)の二重構造。

淡水源記号 SW (Surface Water) : 表流水、GW (Ground Water) : 地下水、RW (Rain Water) : 雨水、D (desalinate) : 淡水化プラント

淡水利用記号 WS : 地域への供給、T : 観光業、H : 水力電気、M : 鉱山業、I : 灌漑用水

表 1-2 その他の太平洋島嶼と地域の島嶼国データ一覧

国名	人口	国土面積	島数	島分類	主な淡水源	主な淡水利用	安全な使用率	供給率	主な産業
		km ²					% (人口に対して)		
その他の太平洋島嶼(アメリカ領、フランス領)									
アメリカ領サモア	70,260	199	7	火山島～サンゴ島	SW、GW、RW	WS	-	-	農業、漁業、観光
フランス領ポリネシア	253,506	4,167	約 120	火山島～サンゴ島	SW、GW、RW、D	WS、T	-	-	観光業
グアム(アメリカ領)	163,941	549	1	火山島	SW、GW、RW、D	WS	-	-	農業、漁業、観光
フランス領 ニューカレドニア	230,789	18,575	-	-	SW、GW、RW	WS、M	-	-	鉱業、観光
その他地域の島嶼国									
東ティモール	947,000	14,000	-	-	SW、GW、RW	WS	-	-	
モルジブ共和国	269,000	298	約 1200	サンゴ島	D(main island)、 GW、RW(outer island)	WS	-	-	漁業、観光

淡水源記号 SW：表流水、GW：地下水、RW：雨水、D：淡水化プラント

淡水利用記号 WS：地域への供給、T：観光業、H：水力電気、M：鉱山業、I：灌漑用水

1.2. 本研究の目的

環礁島における地球温暖化問題への適応策として、降水を島の地下に侵入している海水の上に浮かべて淡水資源として貯留させるフローティング型地下ダムが考案されている。しかし、実際にフローティング型地下ダムを建設した事例は世界でまだ無く、フローティング型地下ダムの淡水貯留メカニズムが従来の地下ダムとは異なる（塩水で飽和した空隙を淡水で置換する）ため、ダムの淡水貯留層となる石灰岩層における塩水と淡水の置換メカニズムを予測評価する方法を確立することが重要である。

そこで本研究では、室内試験のスケールとして、環礁島の帯水層を形成する第四紀石灰岩層である琉球石灰岩を用い、複雑な構造を有する空隙を飽和する塩水が、上方からの淡水浸透によってどのような濃度変化を示すかを室内試験により調べ、その濃度変化を数値シミュレーションで再現するための新しいモデル化手法の確立を目的とした。

1.3. 本論文の構成

本研究では、沖縄県の伊江島で採取した琉球石灰岩を対象としたフローティング型地下ダムにおける物質移行特性（塩水から淡水への置換）に着目し、前述した目的に対する検討を行った。本論文は、図 1-3 に示すように、第 1 章から第 6 章までの 6 つの章で構成されている。各章の内容は以下の通りである。

第 1 章では、研究の背景、目的と論文の構成を示した。

第 2 章では、環礁島浅部の水文地質に関する既往研究をレビューし、環礁島帯水層における物質移行に関する課題や特徴を整理した。そして、環礁島帯水層を形成する第四紀石灰岩として沖縄県に広く分布する琉球石灰岩の水理地質パラメータに関する既往研究を調べ、これまでの知見と課題について整理した。さらに、本研究で提案するモデル化に関する地下水解析手法の概要と課題について整理した。

第 3 章では、琉球石灰岩コアを用いた塩水淡水置換の室内トレーサー試験を実施し、フローティング型地下ダムの淡水貯留過程について調査した。さらに、X 線 CT を用いた同様の塩水淡水置換の室内トレーサー試験を実施し、空隙内部の濃度変化を可視化することで、琉球石灰岩中の塩水淡水置換のメカニズムについて考察した。また、亀裂性岩盤が主な対象である二重空隙モデルによる同試験結果（下流側濃度変化）の再現解析を試みた。

第 4 章では、大きさの異なる琉球石灰岩試験体を X 線 CT で撮影し、同岩石の空隙特性について幅広いサイズスケールで評価した。また、琉球石灰岩中の物質移行を再現可能な数値モデル化を念頭に、空隙体積と空隙表面積が維持される単純化された空隙形状を提案した。

第 5 章では、空隙サイズが広く分布する琉球石灰岩コアに対して、一般的な地下水解析手法である連続体モデルと近年実施例が多いポアスケールモデリングを組み合わせた新しいモデル化手法を提案するとともに、実際の琉球石灰岩コアに対して同モデルを適用させ、塩水淡水置換の室内トレーサー試験の再現解析を行うことで、同モデルの妥当性について検証した。

第 6 章では、第 2 章～第 5 章で得られた知見について総括した。また、それらを踏まえて、今後の課題について述べた。

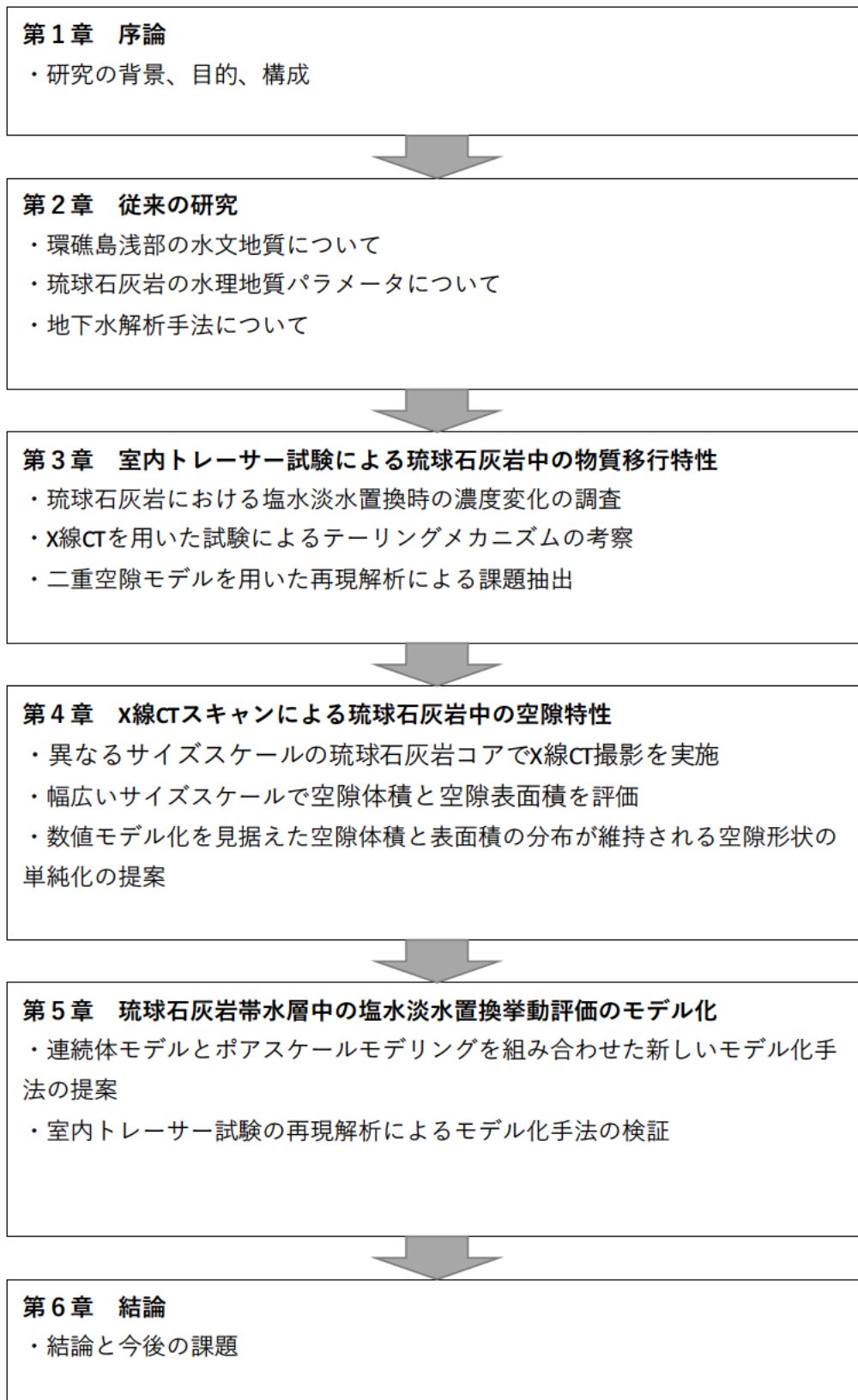


図 1-3 本論文の構成

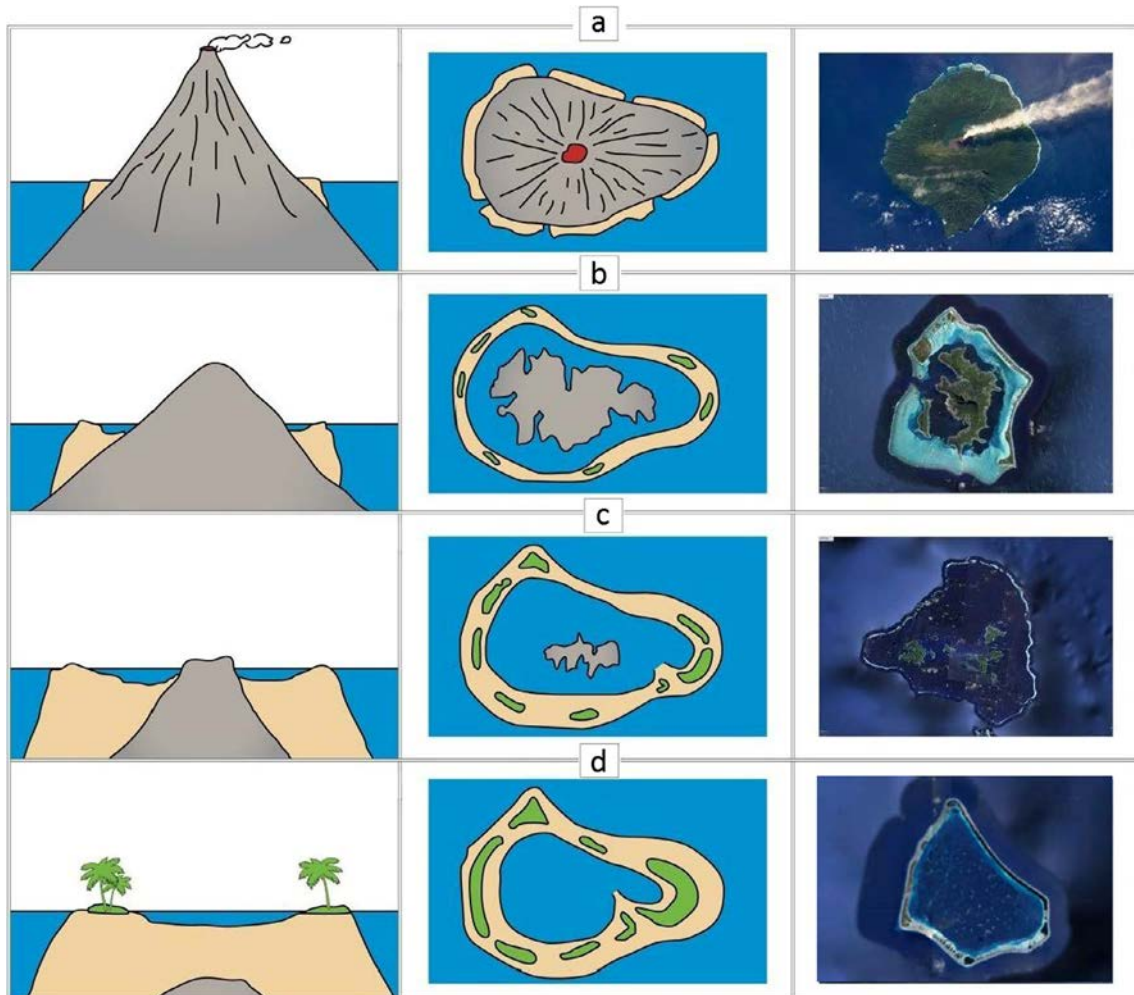
1.4. 1章参考文献

- 1) 気象庁, 文部科学省 (2015) : IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 技術要約.
- 2) SOPAC (2004): An Overview of Integrated Water Resources Management in Pacific Island Countries: A National and Regional Assessment, SOPAC Miscellaneous Report 554 Revised Edition.
- 3) 三村信男, 原沢英夫 (2000) : 海面上昇データブック, 国立環境研究所 地球環境研究センター.
- 4) 中田聡史 (2010) : 環礁州島における水資源と淡水レンズの劣化, 水環境学会誌, Vol.33, No.8, pp.239-244.
- 5) 山野博哉 (2010) : グローバル・ローカルな要因による小島嶼国の環境問題, 水環境学会誌, Vol.33, No.8, pp.234-238.
- 6) 芹澤暁 (2009) : 海水淡水化技術の動向と課題, 日本海水学会誌, 第63巻, 第1号, pp.8-14, DOI: <https://doi.org/10.11457/swsj.63.8>.
- 7) 公文勇喜 (2005) : 小島嶼地域におけるエコロジカルな海水淡水化プロジェクトに関する研究— 台湾・澎湖諸島を事例として —, 高知工科大学修士論文.
- 8) 農林水産省農村振興局企画部資源課 内閣府沖縄総合事務局農林水産部土地改良課 (2008) : 淡水レンズを活用した水源開発を目指して「淡水レンズ開発調査」「淡水レンズ強化技術実証調査」調査成果の概要.
- 9) Furukawa, H. and Kuroda, T. (2011): The underground dam: a new concept in water resource development to meet the challenges of natural disaster & climate change, Kaichosha. ISBN: 9784874158241.

第2章 従来の研究

2.1. 環礁島浅部の水文地質

島嶼国の島々は、その形成過程から、主に火山島（裾礁、堡礁含む）、サンゴ島（環礁、卓礁）、隆起サンゴ島に分類できる。例として、火山島、裾礁、堡礁、環礁までの成り立ちの模式図を図 2-1 に示す^{1),2)}。地球内部から噴出したマグマは地表で冷やされて火山島を形成する（図 2-1a）。その後、火山島の周囲にはサンゴ礁が成長して裾礁（図 2-1b）や堡礁（図 2-1c）が発達する。その後、地殻変動を伴いながら火山島は沈降するがサンゴ礁は成長を続けるため、環礁島（図 2-1d）や卓礁が形成される。環礁島や卓礁が地殻変動で隆起すると、海水面より上で火山岩基盤上に石灰岩層が形成する地層の隆起サンゴ島となる。



a: 火山島、b: 裾礁、c: 堡礁、d: 環礁（左：断面図、中央：平面図：右：衛星写真）

図 2-1 島嶼の分類と成り立ち（文献1）より引用

環礁島の地盤は、主にサンゴ片や有孔虫の死骸が堆積して出来たものであり、第四紀石灰岩に属する^{3),4),5)}。同石灰岩層の浸透率は非常に高く^{6),7),8)}、雨水は地盤中へ速やかに浸透するため、河川や湖などの地表水はほとんど存在しない。さらに、最大標高が5mを超える島は少なく、平坦な地形は地上ダムの建設に適さないことから、環礁島で降雨を地表に貯留することは困難である。

環礁島の地下水（淡水）は、地盤へ浸透する雨水と、地盤中で海へ流出する地下水が平衡状態となり、淡水と海水の密度差から、島の地下に侵入している海水の上部に浮かんだ状態で存在する。地下水（淡水）が存在する鉛直方向の厚さは、図 2-2 に示すように、一般に島の中央ほど厚く、海岸に近いほど薄くなるレンズ状の形を呈することから、「淡水レンズ」と呼ばれている。

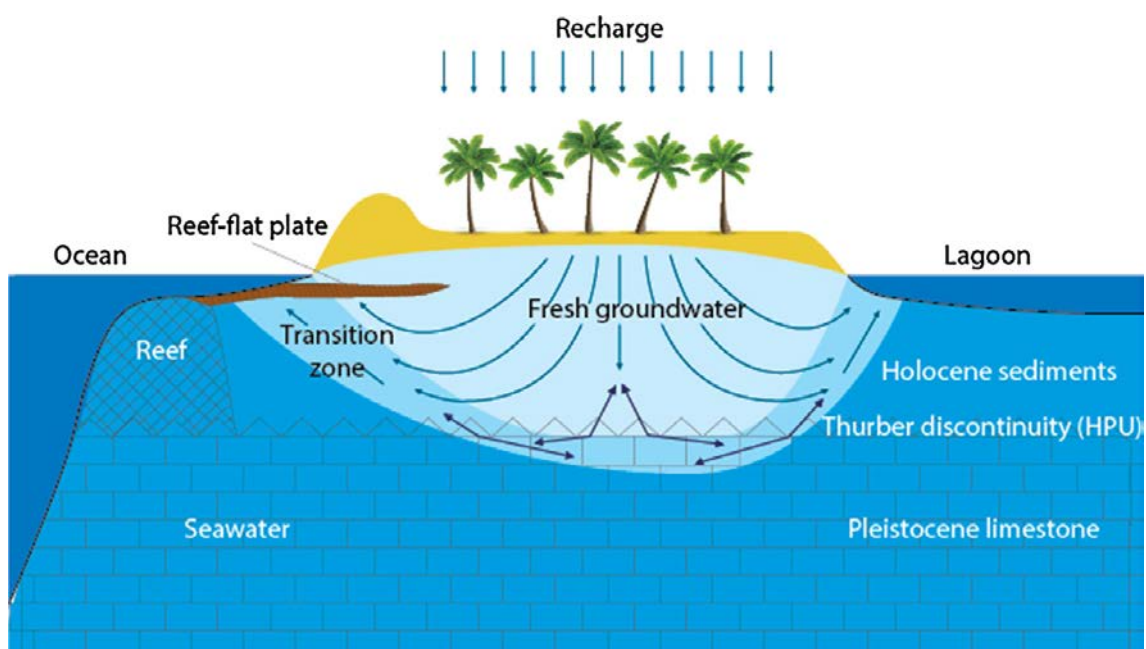


図 2-2 淡水レンズの概要（文献 1)より引用）

淡水レンズは島の住民の貴重な淡水資源として井戸などを設置して利用されている。石田ら⁹⁾は、環礁島浅部の石灰岩層における塩分残留性に関して、マーシャル諸島共和国マジユロ環礁における事例を報告している。同報告では、1998年に塩淡境界付近で過剰に淡水を取水した結果、取水地点付近で塩水が楔状に淡水域へ入り込むアップコーニングが生じ、その塩水楔は2009年においても回復していないと報告されている。また、沖縄総合事務局によるフローティング型地下ダム^{10),11)}の実証試験¹⁰⁾では、海水で飽和した琉球石灰岩帯水層に遮水壁で区分した26m×30mの平面領域の上方から淡水を10日間で3,121m³供給した

結果、淡水化（電気伝導率が 2mS/cm 未満）した領域の鉛直厚さは最大 5m であったと報告されている。海水から淡水への置換がピストンフローで生じると仮定した場合、有効空隙率を 0.2 とすれば、 $3,121\text{m}^3$ の淡水供給によって形成される淡水領域の厚さは $3121\text{m}^3 \div 26\text{m} \div 30\text{m} \div 0.2 = 20\text{m}$ となる。したがって、実証試験で淡水化した領域（体積）の厚さは、ピストンフローで考えた淡水化する領域の約 1/4 (=5÷20) とやや少ない結果となっている。

一般に、空隙の大きさが均等でなく、粗い空隙と微細な空隙が発達しているような地盤における物質移行の特徴として、トレーサー試験などにおける濃度破過曲線での急激な濃度変化とその後の緩やかな濃度変化（テーリング）が生じることが過去の研究で示されている¹²⁾。たとえば、Hidajat et al.¹³⁾は、テキサス州西部で採取された数 mm の大きさの空隙を有する石灰岩コア（直径 1~1.5"）を用いた室内トレーサー試験を実施している。同試験では、トレーサー溶液にはヨウ化ナトリウム (NaI) 12%の水溶液を用い、塩化ナトリウム (NaCl) 1%の塩水で飽和したコアの下端から注入し、微小導電率計を用いてコア上端の出口側で NaI 濃度を測定している。図 2-3 は濃度変化を示す結果で、横軸がトレーサー溶液の通水量をポアボリューム (PV) で示した値で、縦軸はトレーサー濃度を 1.0 とした相対濃度である。ここで、ポアボリュームとは、積算通水流量を供試体の空隙体積で除した値である（第 3 章を参照）。図より、均質材料での濃度変化と比較して、大きな空隙を有する石灰岩コアでの濃度変化は、通水初期のより早い段階で急激な濃度上昇が生じ、その後濃度上昇傾向が緩やかになるテーリングが生じることが分かる。

第四紀のサンゴ礁堆積物からなる石灰岩層は、堆積当時の空隙構造（一次空隙）や続成作用による幅広いスケールの空隙（二次空隙）が見られ、非常に複雑な空隙構造を有する^{14), 15), 16), 17), 18)}。したがって、フローティング型地下ダムで淡水が貯留する過程（塩水淡水置換の過程）では、ダムの貯留層（第四紀石灰岩層）の一部で上述した試験のような塩分の残留が生じ、淡水貯留（塩分濃度の低下）に時間を要することが懸念される。しかしながら、環礁島の浅部に堆積する第四紀石灰岩に対して、テーリングやそのメカニズムについて詳しく調べた研究事例は見られない。

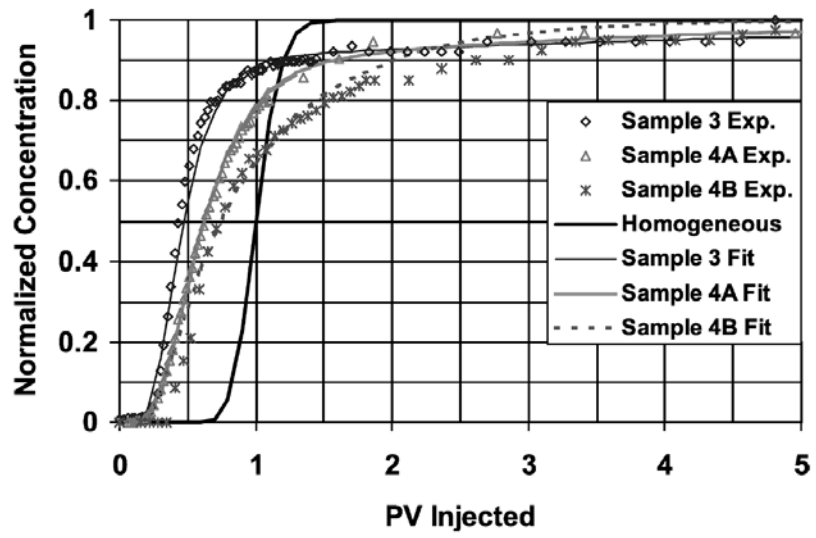


図 2-3 Hidajat et al.のトレーサー試験結果 (文献 13)より

2.2. 琉球石灰岩の水理地質パラメータ

琉球石灰岩は、第四紀更新世に堆積したサンゴ礁堆積物から成り、我が国の南西諸島の島々に、北限を喜界島として南限の波照間島まで同地域に広く分布する第四紀石灰岩である^{19), 20)}。岩相区分によって泥質石灰岩、サンゴ石灰岩、砂質石灰岩、石灰藻球石灰岩、細層性石灰岩などに区分される¹⁹⁾。溶食や再結晶化が複雑に生じており、大小の空隙が入り組んだ非常に複雑な空隙構造を呈する。沖縄諸島、先島諸島、奄美諸島における琉球石灰岩の分布図²⁰⁾を、それぞれ図 2-4、図 2-5、図 2-6 に示す。

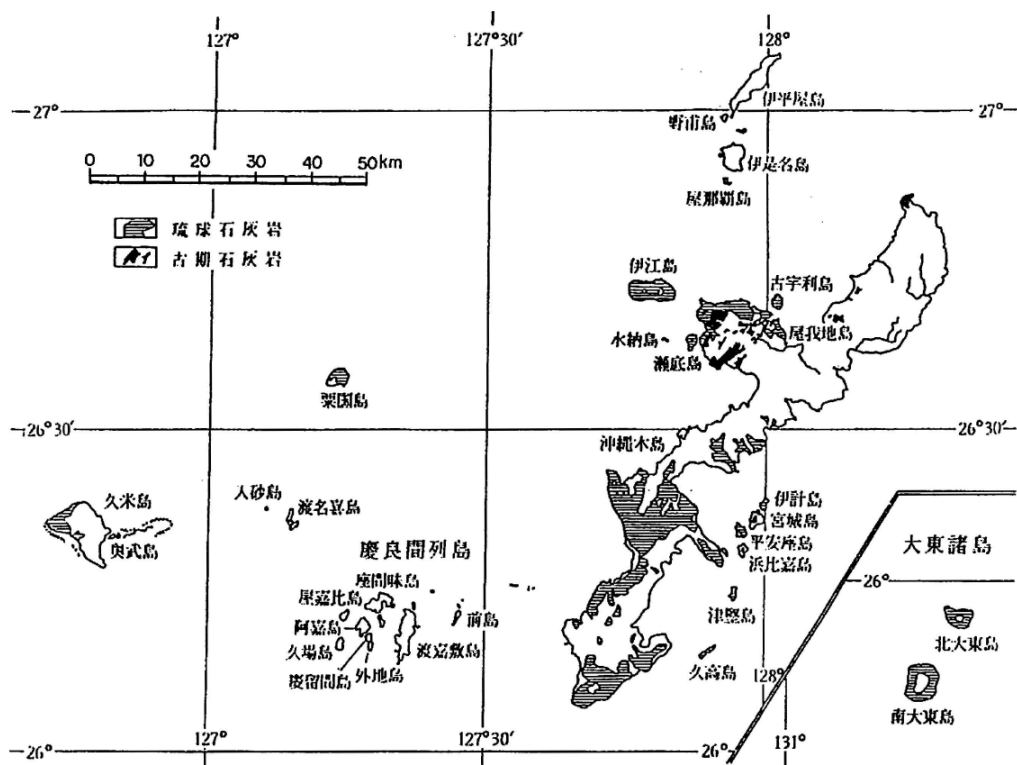


図 2-4 沖縄諸島琉球石灰岩分布図 (文献 20)より)

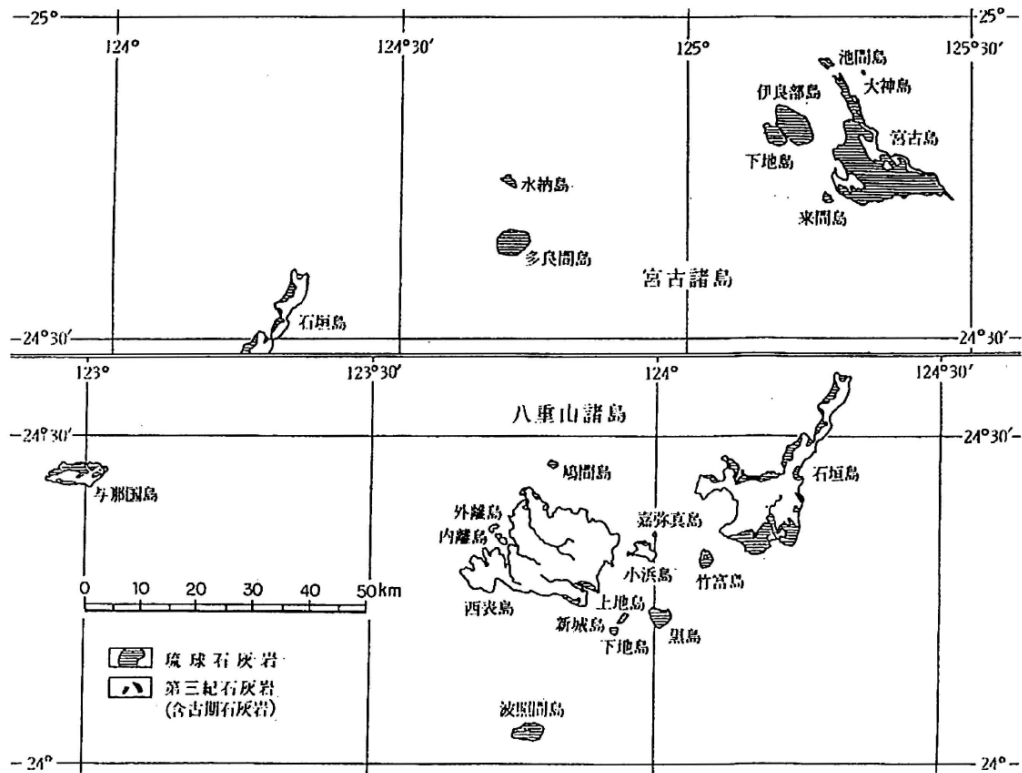


图 2-5 先島諸島琉球石灰岩分布图 (文献 20)より

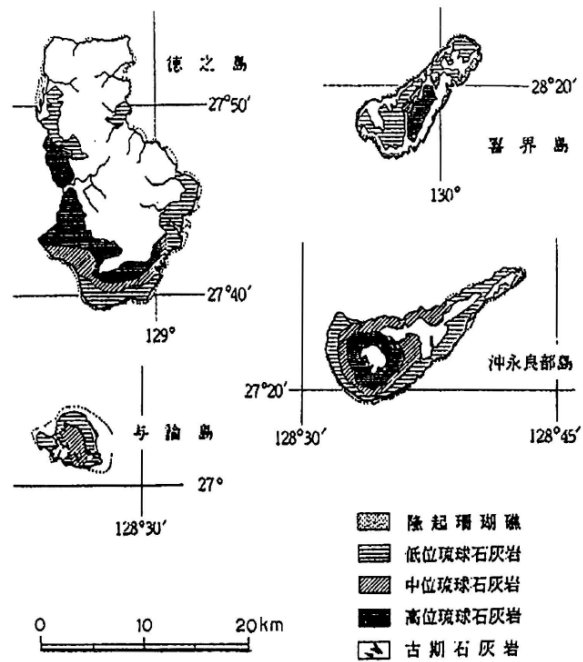


图 2-6 奄美諸島琉球石灰岩分布图 (文献 20)より

琉球石灰岩の力学特性に関しては、一軸圧縮強度をベースにした研究が行われている。新城・中村は²¹⁾、沖縄各地から採取した琉球石灰岩を用いて一軸圧縮強度を測定し、空隙率の増加に伴い圧縮強度が減少することや、ポアソン比が圧縮強度に関係なく平均で 0.25 となる結果を示している。宮城・小宮は²²⁾、宮古島の来間大橋付近の海底から採取した琉球石灰岩の棒状コアに対して、空隙率、有効空隙率、圧縮強度について試験を行い、粒子密度 2.71Mg/m^3 を用いて平均空隙率 18.8%、平均有効空隙率 12.3%、空隙率と圧縮強度の関係を指数関数で近似している。小暮ら²³⁾は、一軸圧縮試験を通して、圧縮強度は供試体の寸法と密度、および割線ヤング率の関数で表されることを示している。空隙率は、最大で 36.4%、最小で 9.4%、平均 19.8%の結果を粒子密度 2.71Mg/m^3 を用いて求めている。

琉球石灰岩の水理特性に関しては、透水性が高いという言及が既往文献で多く見られるが、詳細な調査や評価が行われている事例は少なく、主に地下ダムの建設に際して施工されたボーリング孔を用いた原位置透水試験に関する研究が行われている。長田ら²⁴⁾は、多良間島に分布する琉球石灰岩の透水係数を調査し、 $8.8\times 10^{-2}\sim 2.5\times 10^{-4}\text{m/s}$ の測定値を得ている。岸ら²⁵⁾は、沖縄県の津堅島で行った揚水試験より、琉球石灰岩層の透水係数として $1.5\times 10^{-4}\sim 2.6\times 10^{-3}\text{m/s}$ が得られている。森ら²⁶⁾は、宮古島の砂川地下ダムの透水係数として $2.71\times 10^{-3}\sim 4.34\times 10^{-3}\text{m/s}$ の測定値とともに、粘土含有コア長との相関が強いことを示している。また、棒状コアの空隙率は、4~14%となっている。山田ら²⁷⁾は、前述と同じ多良間島に分布する琉球石灰岩について調査し、有効空隙率は約 12~26%、透水係数は $1.05\times 10^{-2}\sim 2.91\times 10^{-2}\text{m/s}$ の測定結果を得ている。上述のように、琉球石灰岩の透水係数は、 $10^{-2}\sim 10^{-4}\text{m/s}$ と非常に大きい値を示す結果が多く得られている。表 2-1 に、既往研究における琉球石灰岩の物性値のまとめを示す。

表 2-1 既往研究における琉球石灰岩の物性値

	宮城・小宮 ²²⁾	小暮ら ²³⁾	長田ら ²⁴⁾	岸ら ²⁵⁾	森ら ²⁶⁾	山田ら ²⁷⁾
空隙率 (%)	5~40 Ave. 18.8	9.4~36.4 (Ave. 19.8)	値なし	値なし	4~14	値なし
有効空隙率 (%)	3~35 Ave. 12.3	値なし	値なし	値なし	値なし	12~26 (Ave. 17.12)
乾燥密度 (Mg/m^3)	1.7~2.4 (図より)	1.72~2.45 (Ave. 2.17)	値なし	値なし	値なし	値なし
透水係数 (m/s)	値なし	値なし	$8.8\times 10^{-2}\sim 2.5\times 10^{-4}$	$1.5\times 10^{-4}\sim 2.6\times 10^{-3}$	$2.71\times 10^{-3}\sim 4.34\times 10^{-3}$	$1.05\times 10^{-2}\sim 2.91\times 10^{-2}$
場所	宮古島	沖縄本島 (西原町)	多良間島	津堅島	宮古島	多良間島

物質移行に関する調査事例は非常に少ない中、名和ら^{29), 30)}によって米須地下ダム貯水池における原位置トレーサー試験で分散長の推定が行われている(図 2-7)。トレーサーには海水、サマリウム、ディスプロシウムを用い、揚水井と観測孔の間の距離が 8.1~52.6m でトレーサー試験を実施している。分散長として 0.8m~6.5m の結果が得られているとともに、一部の観測井では分散長が試験距離以上の非常に大きな値となる結果も得られており、琉球石灰岩中の物質移行が非常に複雑であることが示唆されている。なお、透水係数は、揚水試験結果より $2.8 \times 10^{-3} \sim 3.2 \times 10^{-2} \text{m/s}$ が得られている。

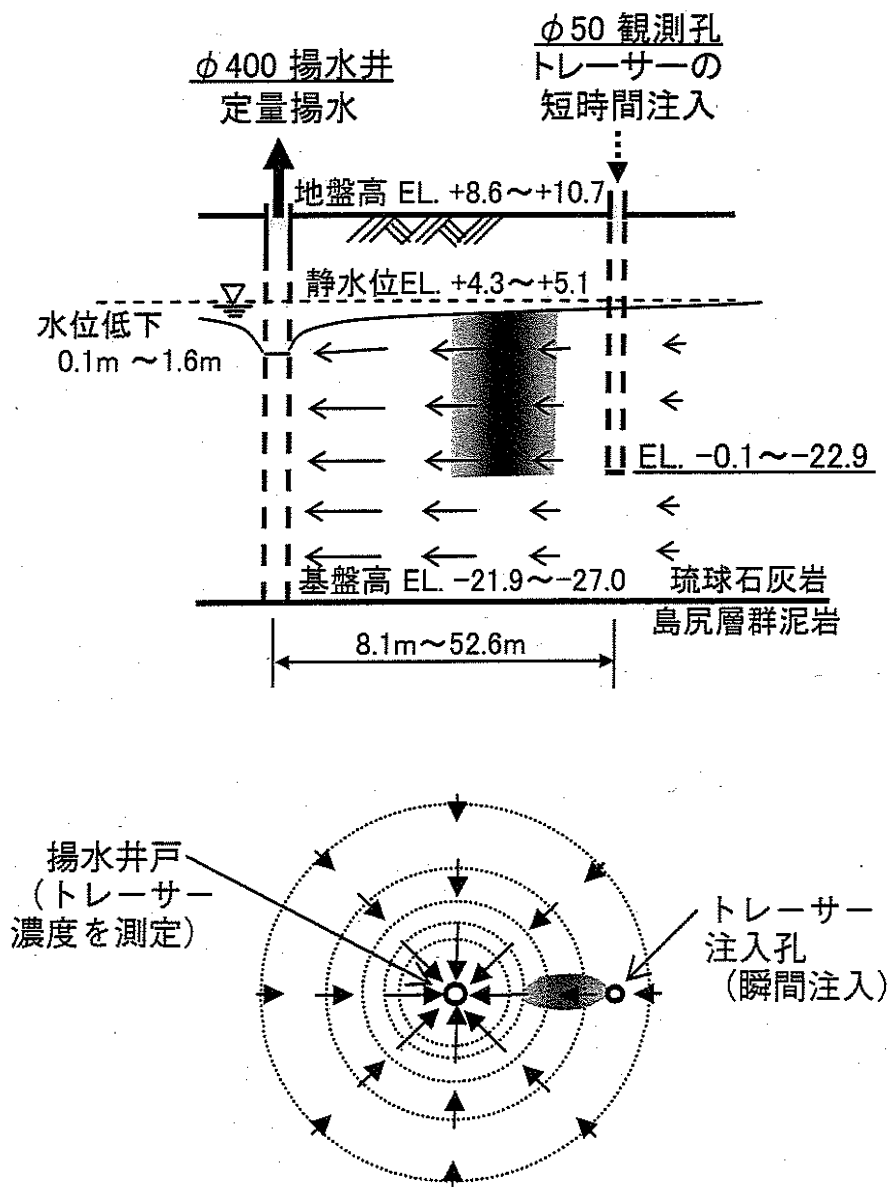


図 2-7 名和らによる原位置トレーサー試験の概略(文献 29), 30)より)

上述したとおり、琉球石灰岩の力学特性に関しては、ボーリング調査のコアを用いた一軸圧縮強度と空隙率など、比較的多くの調査が行われている。一方で、透水係数に関しては原位置試験による事例がほとんどであり、室内試験による詳細な検討を行っている事例はあまり見られない。さらに、物質移行特性に関しては、淡水レンズにおける塩淡水境界や淡水の過剰取水による塩水混入障害など関係する現象は多く報告されているが、室内試験等により琉球石灰岩中の物質移行メカニズムを詳細に調査した事例は無い。また、地下水流れや物質移行における基本的な部分となる空隙構造について調査・評価した事例についてもほとんど見られない。吉本ら¹⁷⁾は、炭酸塩岩帯水層の不飽和浸透についてレビューを行っているが、対象としている石灰岩はカンブリア紀～古第三紀の石灰岩であり、環礁島浅部の石灰岩や琉球石灰岩のような第四紀石灰岩とは異なる。また、第四紀石灰岩中の物質移行に関するモデル化手法についての研究はほとんど見られない。

2.3. 地下水解析手法

フローティング型地下ダムの建設対象となる場所は主に環礁島であり、貯留層は地表から数十 m の深度の浅部帯水層が想定される。一般に、環礁島の浅部帯水層は第四紀のサンゴ礁堆積物からなる石灰岩層であり、生物遺骸の骨格からなる一次空隙が多く残るものの、降雨や地下水による溶解や、化学風化・圧密・膠着・再結晶などの続成作用によって二次空隙も発達しており、空隙は非常に複雑な構造を呈する^{14), 15), 16), 17), 18)}。

第 1 章で述べたとおり、フローティング型地下ダムは、島の浅部帯水層（第四紀石灰岩層）に侵入している海水（塩水）を、降雨由来の淡水で置換することで、帯水層に淡水を貯留する地下ダムである。淡水の貯留過程において、帯水層の塩淡水境界位置は深度方向へ遷移するほか、淡水取水時には深部海水を引き込まない適切な取水量を設定する必要があるなど、フローティング型地下ダムの運用において、複雑な空隙構造を呈する石灰岩帯水層での淡水と海水のインタラクションを評価できるモデル化手法が必要である。

以下、本研究で提案するモデル化に関する地下水解析手法の概要と課題について示す。

2.3.1. 等価多孔質媒体モデル

吉本ら³¹⁾は、炭酸塩岩帯水層の不均質性を表現するモデル化方法についてレビューしている。モデル化は等価多孔質媒体（EPM : Equivalent Porous Media）モデルで計算領域を区分して異なる透水係数を与えるものと（図 2-8b）、洞窟網を通過するパイプフローを水理学的に記述するプログラムを付加するもの（図 2-8c）に大別できると報告している。堆積年代が比較的新しい場合には一次空隙が優勢となり、マトリックス部を浸透する分散的な地下水の流れだとする報告³²⁾があるとともに、南西諸島では透水性の不均質性が示唆されるが、洞窟網の存在が不明な地区では EPM モデルの利用が第一選択となりうることを言及している。

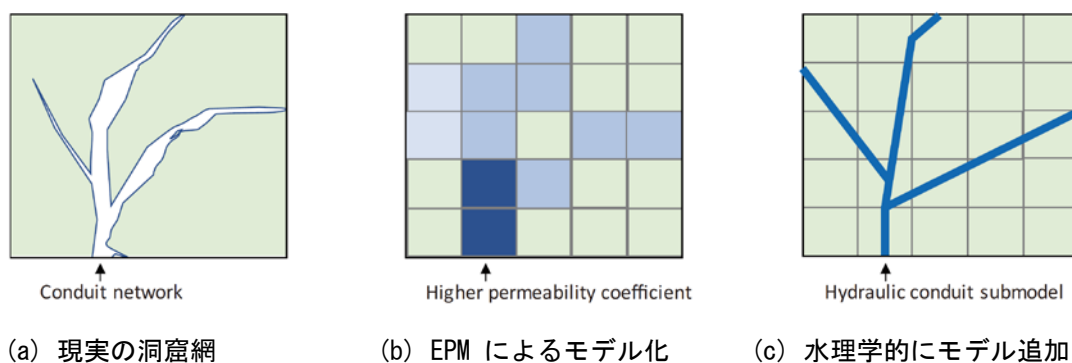


図 2-8 パイプフローを有する帯水層モデルの模式図（文献 31）より）

安元ら³³⁾は、沖縄県南部の米須地下ダム流域を対象として、空洞部を含めた透水係数の分布を PEST (Parameter ESTimation code³⁴⁾) で推定し、高透水領域と空洞分布位置とが比較的よく対応する結果を得ている。このように、EPM モデルの利用においては、洞窟や亀裂の分布を踏まえて初期的な透水係数分布を設定し、キャリブレーションによって用いる値を決定する機会が多いことが報告されている³¹⁾。

亀裂性岩盤において、下茂・山本ら^{35), 36)}は、ボーリング調査や露頭調査で得られた割れ目の空間分布に関する情報を、連続体モデルの水理物性の空間分布に反映し、不均質かつ不連続な岩盤内の地下水流動を表現する等価不均質連続体モデルを提案している (図 2-9)。亀裂ネットワークモデルと同様な手法で、3次元空間に分布する割れ目を、面積、開口幅を有する多角形の平行平板でモデル化し、岩盤内に発生させる。次に、岩盤を小要素 (有限要素メッシュなど) に分割し、個々の小要素の透水テンソルおよび比貯留係数を、基質部と小要素に交差する割れ目の値の体積平均として定義している。しかしながら、琉球石灰岩の空隙は、割れ目や開口幅で表されるような亀裂とは全く異なるため、上述した手法をそのまま利用することは困難である。

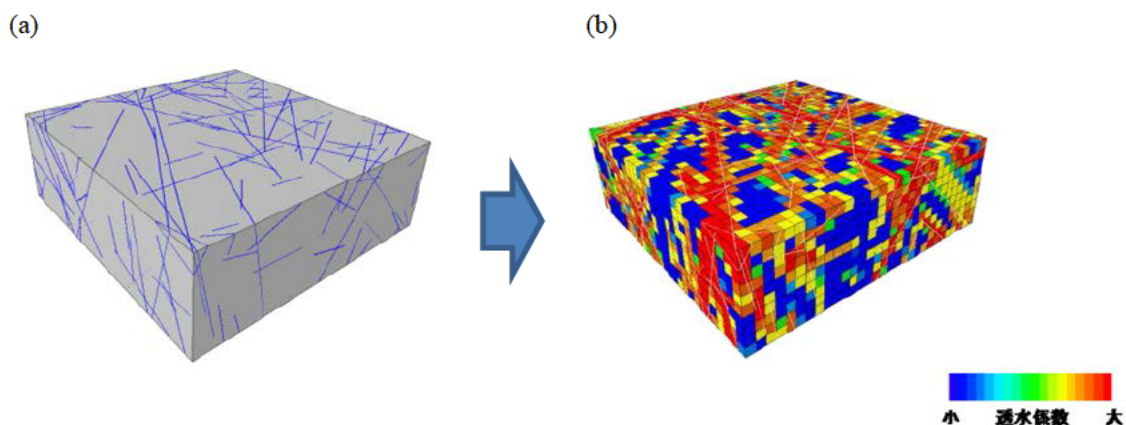


図 2-9 等価不均質連続体モデルの概念. (a) 亀裂ネットワークモデル, (b) 等価不均質連続体モデル (文献 35)より)

河西ら³⁷⁾は、割れ目の分布が複雑であっても、割れ目分布を意識せずに要素分割し、割れ目が通過する要素については異方性を考慮した等価透水係数で置換するスメアド割れ目モデルを提案している (図 2-10)。透水係数は、亀裂部分の透水係数とマトリックス部の透水係数を用い、亀裂部とマトリックス部の面積比例配分によって計算される。スメアド割れ目モデルは、前述の等価不均質連続体モデルが透水係数を三乗則 (亀裂を 2 枚の平行平板でモデル化した場合に、その透水量係数は、開口幅の三乗に比例するという考え) により与える点でも異なる。しかしながら、スメアド割れ目モデルも、“割れ目”が対象であり、琉

球石灰岩に見られるような複雑な空隙構造である岩石には適さないと考えられる。

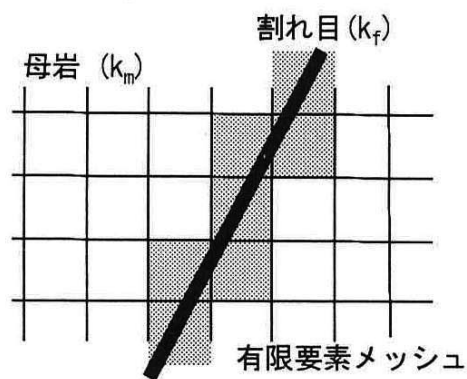


図 2-10 スメアド割れ目モデルの概念図 (文献³⁸⁾による)

以上で述べたように、亀裂系岩盤に関しては、解析要素に含まれる亀裂の情報を基に、当該要素の透水係数を与える連続体モデルが行われるが、これらの手法を空隙形状の複雑な琉球石灰岩に対して適用させることは困難である。

2.3.2. 二重空隙モデル

図 2-11 に二重空隙モデル^{39),40)}の概念を示す。二重空隙モデルは、亀裂性多孔質媒体を扱うことを目的に考案されたモデルで、亀裂部の解析格子内に基質部を表す解析格子を入れ子状に組み込むことで、主要な水みち（亀裂）を通じた地下水や溶質の物質移動と同時に、亀裂—基質間での物質移動を同時に計算するモデルである（図 2-12 参照）。

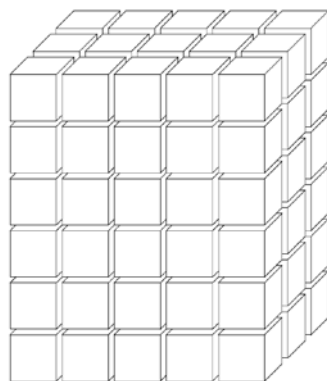


図 2-11 二重空隙モデルの概念（文献 40)より）

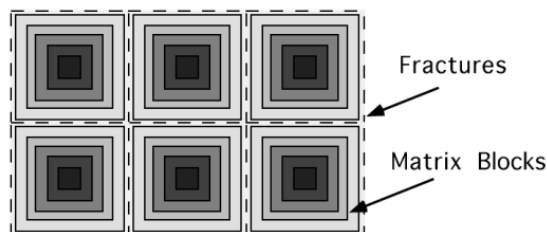


図 2-12 二重空隙モデル（MINC モデル^{41),42)}の概念（文献 40)より）

二重空隙モデルに関する研究事例として、大西ら⁴³⁾は、飽和—不飽和両領域からなる地盤の挙動を把握するために二重空隙モデルを用いた応力・変形を考慮した浸透流解析コードを開発している。また、市川⁴⁴⁾は、マクロ場・メソ場・マイクロ場の二重幾何構造を有する二重空隙多孔質体を対象に、各スケールにおける流速と水圧（間隙圧）を求めることのできる多段階均質化浸透理論を提案している。しかしながら、二重空隙モデルに関する研究事例の多くは亀裂性岩盤を対象としたものであり、市川らは、メソスケールにおける亀裂系（fissure）の幾何特性（開口幅・方向・連続性等の情報）の設定が課題であると指摘するなど、琉球石灰岩のような第四紀石灰岩へ従来の二重空隙モデルをそのまま適用することは

困難である。

2.3.3. ポアスケールモデリング

X線CT (X-ray computed tomography) などの非破壊検査機器を用いることにより、岩石内の三次元の空隙形状を数 μm の解像度で可視化することが可能である⁴⁵⁾(図 2-13、図 2-14)。ポアスケールモデリングは、抽出された三次元の空隙構造を基に、多孔質中の流体シミュレーションを空隙スケールで行う技術である。

ポアスケールモデリングの一つに、ネットワークモデルがある⁴⁶⁾。同モデルは、X線CTなどにより抽出した空隙に対して、比較的大きな空隙に球を適用し、それぞれの球をスロートと呼ばれる連結チャンネルで接続することで、球とスロート部の連結によって空隙構造をモデル化して再現する(図 2-14、図 2-15)。浸透現象が主にスロート部分により支配されることから、浸透(单相流、多相流)に関する計算を主眼に置く場合、同モデル化は有効であると考えられる。一方で、空隙表面で発生する化学風化などの岩石-水相互反応は、通常、空隙表面と流体の境界で発生する。したがって、地化学反応まで考慮するシミュレーションを行う場合、空隙体積と同時に空隙表面積を考慮したモデル化を考える必要がある。しかしながら、空隙の表面が複雑な形状である場合、ネットワークモデルで空隙表面積まで反映させることは困難である。したがって、ネットワークモデルは、地化学反応まで考慮する場合のモデル化手法として適切でないと考えられ、空隙体積と空隙表面積の両方が反映されるモデル化が求められる。

近年では、抽出した三次元の空隙構造を数値解析格子として直接モデル化し、ナビエ・ストークス方程式などにより流体の流れや物質移行を直接解く数値シミュレーションも行われている^{45), 47), 48), 49)}。同モデリングによって、これまで室内試験等で求めていた水理パラメータ(透水係数や水分特性曲線など)を、コンピューターによる数値シミュレーションによって求めることが可能になる。たとえば、Mostaghimi et al.⁴⁹⁾は、X線CTを利用して約1mm角の石灰岩の空隙構造をモデル化し、数値シミュレーションにより空隙内の流速分布の不均質性を示している。

しかし、X線CTの解像度と測定領域の大きさは相反関係にある。たとえば、大きなサンプルを撮影する場合には必然的に解像度は大きく(粗く)なり、解像度を小さく(細かく)する必要がある場合には、サンプルを小さくすることが必須である。そのため、空隙サイズの分布が幅広い場合には、大きなサンプルをX線CTで撮影した場合のポアスケールモデリングは、解像度以下の大きさの空隙の影響は無視されるため、計算結果の精度は必然的に低下する。また、広域的な地下水解析へのポアスケールモデリングは、全ての空隙をモデル化することは現状ではほぼ不可能であるため、現実的ではない。

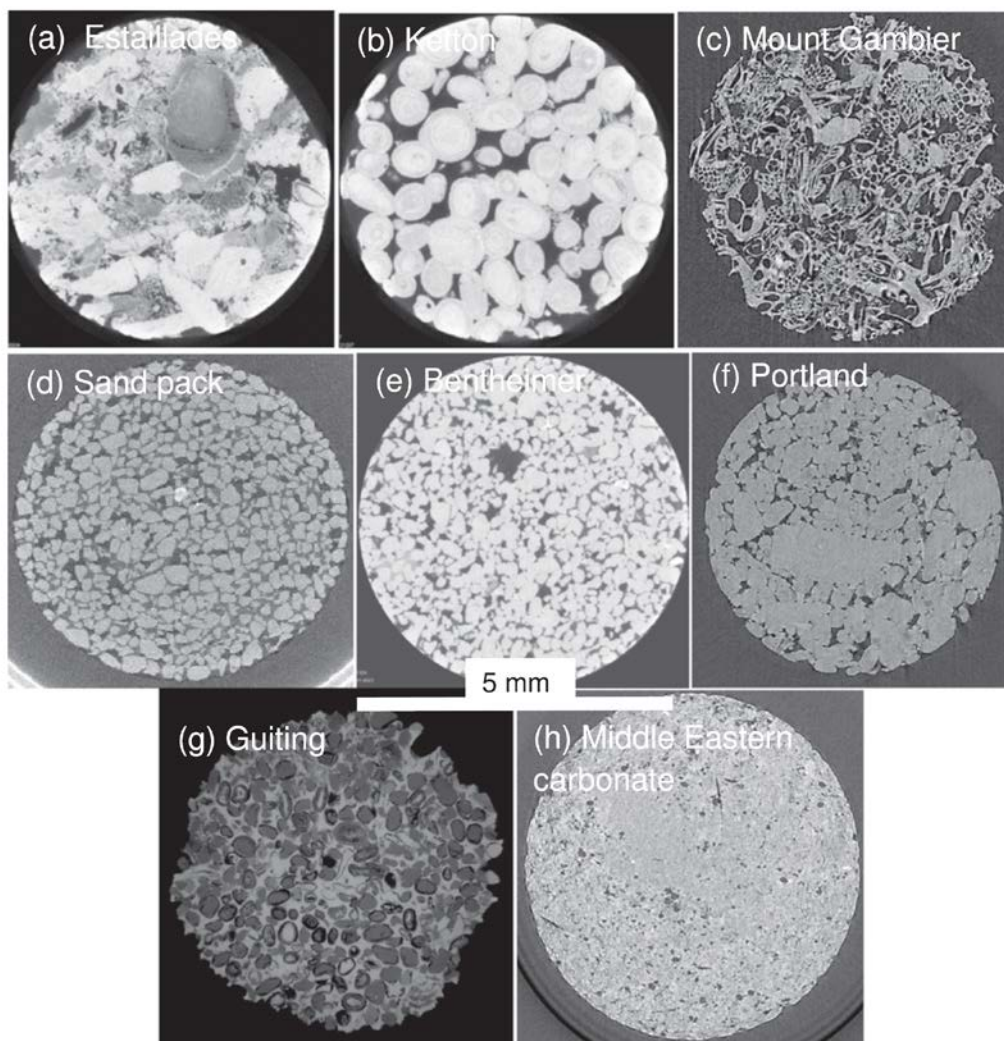


図 2-13 岩石サンプルの X 線 CT 画像例 (文献 45)より)

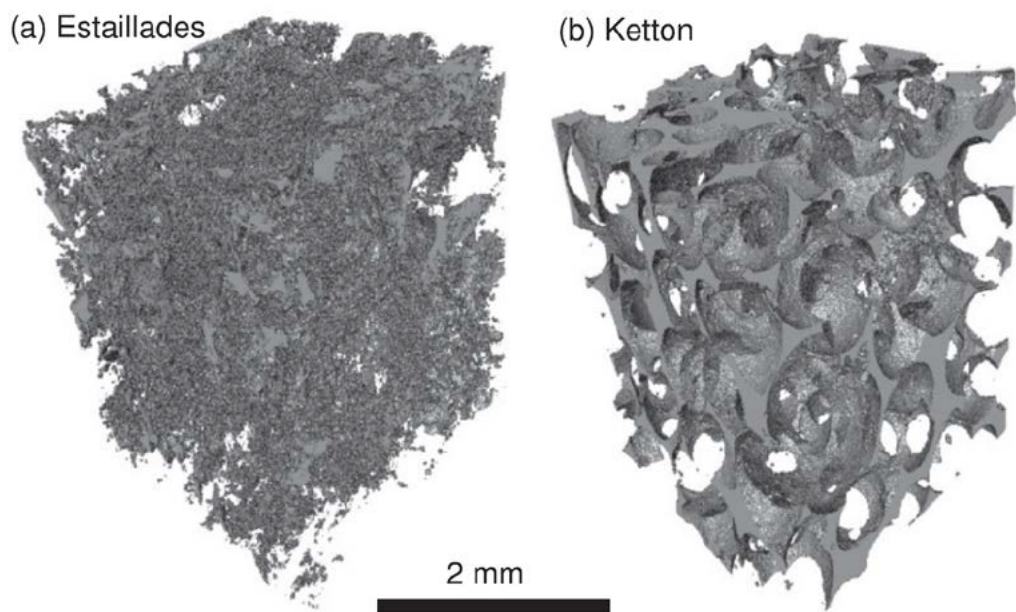


図 2-14 三次元空隙構造の可視化の例 (文献 45)より)

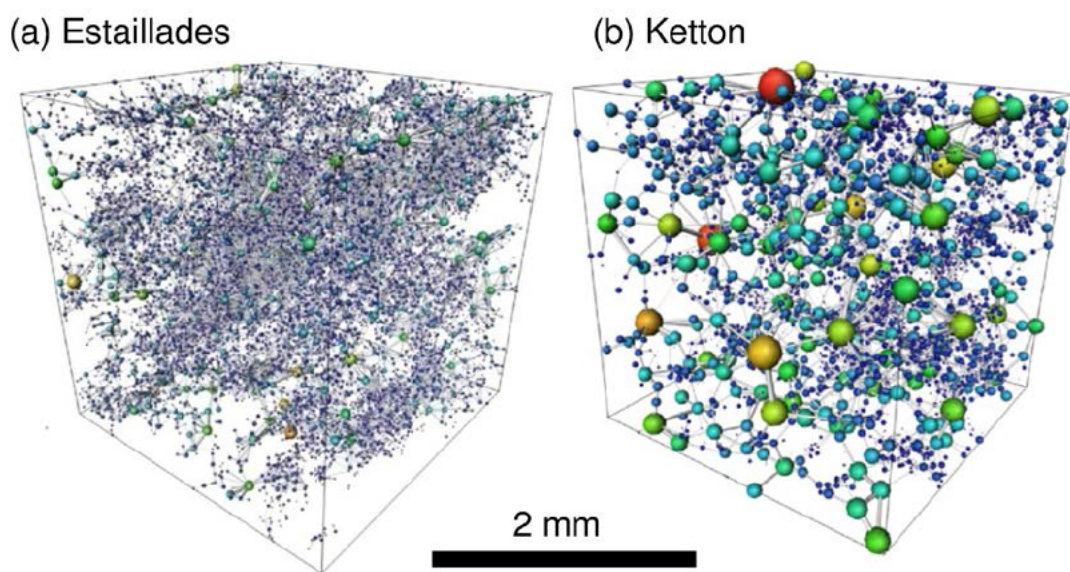


図 2-15 ネットワークモデルの例 (文献 45)より)

2.4. 本研究の位置づけ

環礁島の水文地質に関して、第四紀石灰岩の力学特性や透水係数に関するデータは取得されているものの、物質移行に関する基礎データは非常に少ない。また、同石灰岩の物質移行のモデル化についての研究事例もほとんど見られない。しかしながら、環礁島における物質移行は、複雑な空隙構造に起因するとみられる特異な現象の報告⁹⁾があり、環礁島への建設が想定されるフローティング型地下ダムの運用においては、塩淡水境界の挙動をはじめとした第四紀石灰岩における物質移行挙動を評価可能なモデル化手法が求められる。

本研究では、フローティング型地下ダムで懸念される淡水貯留時の塩分残留性に関し、環礁島浅部の第四紀のサンゴ礁堆積物からなる石灰岩として琉球石灰岩を用い、コアスケールでマイクロフォーカス X 線 CT を用いた塩水淡水置換のトレーサー試験を行い、岩石内部の空隙中の濃度変化を詳細に観察し、既往の研究ではほとんど行われていない同石灰岩中の物質移行メカニズムに関する基本的なデータの取得を行った。

近年では、X 線 CT の高解像度化とコンピューターの計算処理能力の向上により、ナノスケールの解像度での撮影も可能になっている⁵⁰⁾。たとえば、中島は⁵¹⁾、X 線 CT を利用して数 mm 角の岩石試料の空隙構造を解析している。しかしながら、X 線 CT の解像度はサンプルサイズと相反関係であるため、空隙径のサイズが広く分布する第四紀石灰岩の空隙の特徴を X 線 CT で評価しようとする場合、一つの大きさのサンプルの撮影では不十分である。そこで、本研究では、大きさの異なる同石灰岩の複数のサンプルに対して X 線 CT 撮影を行い、結果を統合して評価することで、同石灰岩の空隙の特徴を幅広いサイズスケールで検証した。また、得られた結果から、同石灰岩中の物質移行解析のモデル化を念頭にした空隙形状の単純化を提案した。

亀裂性岩盤で行われてきた等価多孔質モデルを第四紀石灰岩に対して適用することは、琉球石灰岩の空隙が亀裂とは全く異なるものであるために困難である。そこで、一般的な地下水解析手法である連続体モデルと近年多く実施されているポアスケールモデリングを組み合わせた新しいモデル化手法を提案した。そして、実験結果と比較することで同モデル化を検証した。

2.5. 2章参考文献

- 1) Werner, A.D., Sharp, H.K., Galvis, S.C., Post, V.E.A., and Sinclair, P. (2017): Hydrogeology and management of freshwater lenses on atoll islands: Review of current knowledge and research needs, *Journal of Hydrology*, 551, pp.819–844, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.047>.
- 2) 大山桂 (1978) : サンゴ礁と石灰岩 (2), 地質ニュース, No.289, pp.8-13.
- 3) Gischler, E. (2007): Pleistocene facies of Belize barrier and atoll reefs, *Facies*, 53, 27–41, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10347-006-0086-9>
- 4) Marshall, J.F. and Jacobson, G. (1985): Holocene growth of a mid-Pacific atoll: Tarawa, Kiribati, *Coral Reefs*, 4, 11–17, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00302199>.
- 5) Woodroffe, C.D. and McLean, R.F. (1998): Pleistocene morphology and Holocene emergence of Christmas (Kiritimati) Island, Pacific Ocean, *Coral Reefs*, 17, 235–248, DOI: <https://doi.org/10.1007/s003380050124>.
- 6) Underwood, M.R., Peterson, F.L., and Voss, C.I. (1992): Groundwater lens dynamics of atoll island, *Water Resources Research*, Vol.28, Issue 11, pp.2889–2902, DOI: <https://doi.org/10.1029/92WR01723>.
- 7) White, I. (1996): Fresh groundwater lens recharge, Bonriki, Kiri-bati, preliminary report, IHP-V Project 6-1, UNESCO, Paris.
- 8) Bailey, T.R., Jenson, J.W., and Olsen, A.E. (2010): Estimating Ground Water Resources of Atoll islands, *Water*, 2, pp. 1-27, DOI: <https://doi.org/10.3390/w2010001>.
- 9) 石田聡, 吉本周平, 小林勤, 幸田和久, 土原健雄, 万福裕造 (2010) : マーシャル諸島共和国マジュロ環礁における地下水の塩水化について, 地盤工学会誌, 58-5, 628, pp.22-25.
- 10) 農林水産省農村振興局企画部資源課, 内閣府沖縄総合事務局農林水産部土地改良課 (2008) : 淡水レンズを活用した水源開発を目指して「淡水レンズ開発調査」「淡水レンズ強化技術実証調査」調査成果の概要.
- 11) Furukawa, H. and Kuroda, T. (2011): The underground dam: a new concept in water resource development to meet the challenges of natural disaster & climate change, Kaichosha. ISBN: 9784874158241.
- 12) 藤縄克之 (2010) : 環境地下水学, pp.179-207, 共立出版.
- 13) Hidajat, I., Mohanty, K.K., Flaum, M., and Hirasaki, G. (2004): Study of vuggy carbonates using NMR and X-ray CT scan-ning, *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, Vol.7, Is-sue 05, DOI: <https://doi.org/10.2118/88995-PA>.
- 14) Vacher, H.L. and Quinn, T.M. (2004): Geology and hydrogeology of carbonate islands, *Developments in Sedimentology*, Vol.54, Elsevier.

- 15) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2012) : 地球温暖化対策技術普及等推進事業 モルディブ共和国における海洋深層水多段利用インフラ事業の案件組成調査, 平成 23 年度成果報告書.
- 16) Scholle, P.A. and Ulmer-Scholle, D.S. (2003): A color guide to the petrography of carbonate rocks: Grains, textures, porosity, diagenesis, AAPG Memoir 77.
- 17) 吉本周平, 土原健雄, 石田聡, 今泉眞之 (2008) : 炭酸塩岩帯水層における不飽和浸透に関する研究レビュー, 農工研技報, No.207, pp.109-126.
- 18) 今泉眞之, 奥島修二, 塩野隆弘 (2002) : 琉球石灰岩洞くつの空間分布特性—米須地下ダム流域を例として—, 農業土木学会論文集, No. 217, pp.89-100, DOI: <https://doi.org/10.11408/jsidre1965.2002.89>.
- 19) 沖縄県 (1984) : 土地分類基本調査 宮古地域, pp.13-22.
- 20) 野間泰二 (1992) : 琉球石灰岩地帯における地下水の開発と保全, 地下水学会誌, 第 34 巻, 第 3 号, pp.163-170, DOI: <https://doi.org/10.5917/jagh1987.34.163>.
- 21) 新城俊也, 中村一幸 (1975) : 琉球石灰岩の圧縮強度について, 琉球大学農学部学術報告, Vol.22, pp.269-277.
- 22) 宮城調勝, 小宮康明 (2003) : 琉球石灰岩の有効空隙率と圧縮強度, 琉球大学農学部学術報告, Vol.50, pp.131-135.
- 23) 小暮哲也, 青木久, 前門晃, 松倉公憲 (2005) : 琉球石灰岩の一軸圧縮強度に与える寸法効果と岩石物性の影響, 応用地質, 第 46 巻, 第 1 号, pp.2-8, DOI: <https://doi.org/10.5110/jjseg.46.2>.
- 24) 長田実也, 古川博恭, 富田友幸, 座波吉実 (1988) : 沖縄・多良間島の淡水レンズ: 琉球石灰岩の透水性について, 日本地質学会第 95 年学術大会講演要旨, 420.
- 25) 岸智, 浜谷直史, 長田実也, 原郁男, 楠本岳志 (1998) : 沖縄県津堅島における集水井を利用した淡水レンズからの地下水開発, 応用地質, 第 39 巻, 第 3 号, pp.298-305, DOI: <https://doi.org/10.5110/jjseg.39.298>.
- 26) 森一司, 浅野将人, 窪田正和, 菅原利夫, 白川俊明, 桑畑英紀 (1997) : 宮古島砂川地下ダム流域に分布する琉球石灰岩の水文地質学的検討, 地質学雑誌, 第 103 巻, 第 5 号, pp.463-474, DOI: <https://doi.org/10.5575/geosoc.103.463>.
- 27) 山田茂昭, 與那原信夫, 祖父江久徳 (2009) : 多良間島の第四系琉球層群と水理地質的特徴, 日本地質学会学術大会講演要旨, O-91.
- 28) 石田聡, 土原健雄, 吉本周平, 皆川裕樹, 増本隆夫, 今泉眞之 (2009) : 沖縄県多良間島における淡水レンズ形状, 農工研技報, 210, pp.1-9.
- 29) 名和規夫, 中尾仁, 宮崎憲二, 村上玄 (2008) : 米須地下ダムの塩水浸入予測手法の検討

- と分散長の現地試験，農業農村工学会誌，76巻，1号，pp.21-24, DOI: <https://doi.org/10.11408/jjsidre2007.76.21>.
- 30) 名和規夫，中尾仁，新城三雄，村上玄，宮崎憲二，杉山茂 (2009)：米須地下ダム貯水池におけるトレーサー試験による分散長推定について，地下水学会誌，第51巻第2号，pp.141-150, DOI: <https://doi.org/10.5917/jagh.51.141>.
- 31) 吉本周平，土原健雄，白旗克志，中里裕臣，石田聡 (2019)：炭酸塩岩帯水層における不均質性を考慮した地下水シミュレーション手法に関するレビュー，農研機構報告，農村工学部門3，13～27
- 32) Quinlan, J.F. and Ewers, R.O. (1985): Ground water flow in limestone terranes: Strategy, rationale and procedure for reliable, efficient monitoring of ground water quality in karst areas. Proceedings of 5th National Symposium and Exposition on Aquifer Restoration and Ground Water Monitoring, pp.197-234.
- 33) 安元純，阿部真己，中野拓治 (2015)：琉球石灰岩帯水層における広域地下水流動モデルの構築，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.71，No.4，I_217-I_222, DOI: https://doi.org/10.2208/jscejhe.71.I_217.
- 34) Doherty, J.E., Hunt, R.J., and Tonkin, M.J. (2010): Approaches to highly parameterized inversion: A guide to using PEST for model-parameter and predictive-uncertainty analysis, USGS Scientific Investigations Report 2010-5169.
- 35) 下茂道人，山本肇 (1996)：等価不均質連続体モデルによる亀裂性岩盤の浸透流解析手法，大成建設技術研究所報，Vol. 29, pp.257-262.
- 36) 下茂道人，山本肇 (1998)：釜石鉱山における岩盤浸透流解析，動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書，PNC TJ 1205 98-004.
- 37) 河西基，田中靖治，五十嵐敏文 (1994)：高レベル放射性廃棄物地層処分の天然バリア性能評価手法の開発(その1)－割れ目系岩盤中の地下水流動解析手法－，電力中央研究所 研究報告書，U93054.
- 38) 長谷川琢磨，田中靖治，馬原保典，五十嵐敏文 (2004)：Äspö Hard Rock Laboratory 建設に伴う地下水流動の変化に着目した解析モデルの検証，土木学会論文集，No.757，III-66，pp.189-202, DOI: https://doi.org/10.2208/jscej.2004.757_189.
- 39) Barenblatt, G.I., Zheltov, I.P., and Kochina, I.N. (1960): Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks (strata), PMM, Vol. 24, 852, pp.1286-1303, DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(60\)90107-6](https://doi.org/10.1016/0021-8928(60)90107-6).
- 40) Pruess, K., Oldenburg, C., and Moridis, G. (1999): TOUGH2 user's guide. Version 2.0, Report, LBNL-43134.
- 41) Pruess, K. and Narasimhan, T.N., (1982): On Fluid Reserves and the Production of Superheated

- Steam from Fractured, Vapor-Dominated Geothermal Reservoirs, *Journal Geophysical Research*, 87, B11, pp.9329-9339, DOI: <https://doi.org/10.1029/JB087iB11p09329>.
- 42) Pruess, K. and Narasimhan, T.N. (1985): A Practical Method for Modeling Fluid and Heat Flow in Fractured Porous Media, *Society of Petroleum Engineers Journal*, 25, No.1, pp.14-26, DOI: <https://doi.org/10.2118/10509-PA>.
- 43) 大西有三, 小林晃, 塩田卓央 (1988) : 二重空隙モデルを用いた地盤挙動に関する考察, *土木学会論文集*, 第 394 号, III-9, pp.61-70, DOI: https://doi.org/10.2208/jscej.1988.394_61.
- 44) 市川康明 (2002) : 地盤力学における二重空隙理論と多段階均質化法, *材料*, Vol. 51, No.2, pp.130-134, DOI: <https://doi.org/10.2472/jsms.51.130>.
- 45) Blunt, M.J., Bijeljic, B., Dong, H., Gharbi, O., Iglauer, S., Mostaghimi, P., Paluszny, A., and Pentland, C. (2013): Pore-scale imaging and modelling, *Advances in Water Resources*, Vol.51, pp.197–216, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.003>.
- 46) Dong, H. and Blunt, M.J. (2009): Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images, *Physical review E* 80, 036307, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.80.036307>.
- 47) Bijeljic, B., Mostaghimi, P., and Blunt, M.J. (2013): Insights into non-Fickian solute transport in carbonates, *Water Resources Research*, 49, pp.2714-2728, DOI: <https://doi.org/10.1002/wrcr.20238>.
- 48) Bijeljic, B., Raeini, A., Mostaghimi, P., and Blunt, M.J. (2013): Prediction of non-Fickian solute transport in different classes of porous media using direct simulation on pore-scale images, *Physical Review E*, vol.87, 013011, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.87.013011>.
- 49) Mostaghimi, P., Blunt, M.J., and Bijeljic, B. (2013): Computations of Absolute Permeability on Micro-CT Images, *Mathematical Geosciences*, 45, pp.103–125, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11004-012-9431-4>.
- 50) 西川幸宏, 太田直秀, 小升雄一朗, 高橋雅興 (2011) : 高コントラスト X 線 CT の高分子カーボン繊維複合材料への応用, *材料*, Vol. 60, No. 1, pp. 29-34, DOI: <https://doi.org/10.2472/jsms.60.29>.
- 51) 中島善人 (2005) : X 線 CT で岩石中の空隙をイメージングする, *地学雑誌*, 114 (6), pp.1032–1043, DOI: https://doi.org/10.5026/jgeography.114.6_1032.s

第3章 室内トレーサー試験による琉球石灰岩中の物質移行特性¹⁾

3.1. はじめに

環礁島の帯水層は、主にサンゴ礁堆積物からなる第四紀石灰岩層で構成される^{2), 3), 4)}。堆積当時の空隙構造（一次空隙）に、降雨や地下水に伴う溶解や続成作用による空隙（二次空隙）が加わった大小さまざまな大きさの空隙が肉眼でも容易に確認できる非常に複雑な空隙構造を有する^{5), 6), 7), 8)}。フローティング型地下ダムにおける淡水貯留層は、そのような複雑な空隙構造を有する第四紀石灰岩層となる。元来空隙中を満たしている塩水（海水）が、ダムの遮水壁内側に浸透する降水によって入れ替わることで、ダムに淡水が貯留される。しかしながら、上述したとおり、貯留層は非常に複雑な空隙構造を有するため、塩水から淡水に容易に置換されない可能性が考えられる。

石灰岩層中の物質移行に関する研究は、石油貯留層としての石灰岩層が多く存在することから、石油・ガス分野で多く行われている。しかし、石油貯留層としての石灰岩層は、ジュラ紀～第三紀など^{9), 10)}環礁島浅部の石灰岩（第四紀石灰岩層）よりも古い時代に堆積した石灰岩層であることが一般的である（例えば、図 3-1）。また、石油貯留層の石灰岩層の分布する深度は1000mオーダーであり、環礁島に分布する石灰岩層の深度よりはるかに深い。そのため、石油・ガス分野で研究対象となる石灰岩の多くは、環礁島で一般的に見られるものよりも空隙が少なく、空隙の径も小さい¹¹⁾。そのような中、空隙構造が複雑で比較的大きい空隙を有する石灰岩層を使用した室内トレーサー試験をHidajat (2004) ら¹²⁾が行っている。その結果、第2章の図 2-3で示したように、カラム出口での濃度変化は試験開始初期に急激に大きく生じ、その後緩やかになるテーリングが観察されている。このような濃度変化は通常の移流分散で再現することは困難であり、原因として石灰岩の空隙構造であると推察されているものの、そのメカニズムについては十分な検討が行われてない。また、同試験で用いられている石灰岩の空隙の最大径は数ミリメートル程度と小さく、環礁島で見られる第四紀石灰岩とは大きく異なる。上記のように、環礁島浅部に見られる第四紀石灰岩層に対する空隙構造や物質移行メカニズムについては、詳細に調査した研究事例はほとんど見られない。

そこで、本研究では、第四紀石灰岩に分類される琉球石灰岩を用いた室内トレーサー試験を行い、フローティング型地下ダムにおける淡水貯留過程（塩水淡水置換）における濃度変化の特徴について調べた。また、同様の室内トレーサー試験をマイクロフォーカスX線CTを用いて供試体内部を撮影しながら行うことで、同岩石中の物質移行メカニズムに関して考察した。さらに、既往の解析モデル（二重空隙モデル）による再現解析を行うことで、試験

結果を再現するためのモデル化の課題を考察した。

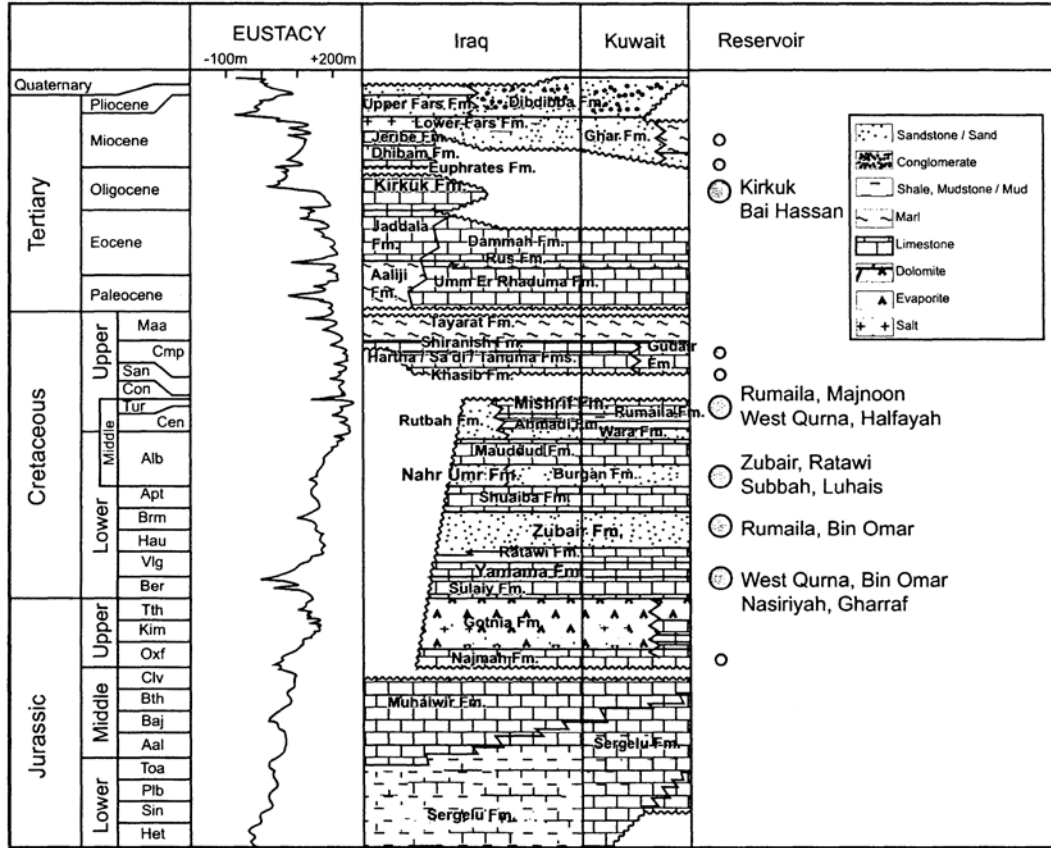


図 3-1 イラクの層序 (文献 9)による)

3.2. 塩水淡水置換の室内トレーサー試験

3.2.1. 目的

フローティング型地下ダムにおける淡水貯留過程を模擬した塩水淡水置換の室内トレーサー試験を実施し、試験カラム出口側における濃度測定により、第四紀石灰岩における物質移行特性に関する基本的なデータの取得を目的とした。

3.2.2. 試験方法

(1) 供試体

我が国の南西諸島の島々には第四紀石灰岩に分類される琉球石灰岩が広く分布しており、この地域の多くの島々の浅部帯水層を形成している。本試験では、環礁島浅部の石灰岩と同じ第四紀石灰岩である琉球石灰岩を供試体に利用した。

琉球石灰岩は沖縄県伊江島の地下ダム建設現場から採取した（図 3-2）。採取した琉球石灰岩のブロックサンプルは、コアカッターを使用して円柱状のコアを採取し、端面を整形して直径 100mm、高さ約 100mm の円柱状供試体を複数本作成した。作成した供試体のうち、比較的端面の整形状態が良く室内トレーサー試験の実施に支障が無いと判断された 8 体を室内トレーサー試験に用いた（以降、「D100」に 1～8 の枝番号を付けた表記で供試体を表す）。供試体の基本データの一覧を表 3-1 に示す。乾燥密度は 2.11～2.28 Mg/m³、空隙率は 0.15～0.22、有効空隙率は 0.03～0.08 である。空隙率は、同岩石を破砕して微粉末にすることで得られる粒子密度の測定値 2.694Mg/m³ から計算した（付録 A 参照）。有効空隙率は、トレーサー溶液で飽和した試料の重力排水後の重量から計算した¹³⁾。D100-1～8 供試体の外観を付録 B（図 B-1～図 B-8）に示す。



国土地理院地理院地図より

図 3-2 本試験で用いた琉球石灰岩の採取位置（沖縄県伊江島）

表 3-1 琉球石灰岩円柱状供試体の基本データ

供試体	D100-1	D100-2	D100-3	D100-4	D100-5	D100-6	D100-7	D100-8
直径[mm]	100							
長さ[mm]	100	100	99	100	100	100	100	99
乾燥密度 [Mg/m ³]	2.22	2.28	2.25	2.23	2.11	2.14	2.27	2.19
空隙率※ ¹	0.18	0.15	0.16	0.17	0.22	0.21	0.16	0.19
有効空隙率※ ²	0.07	0.05	0.03	0.06	0.06	0.08	0.05	0.07

※¹ 同岩石を粉砕することで粒状体に調整した試料の粒子密度の測定値 2.694Mg/m³ から計算

※² 水溶液で飽和させた供試体を重力排水させた重量から計算¹³⁾

(2) トレーサー溶液

本試験では、蒸留水 100g に対して塩化ナトリウム 3.5g を溶解して作成した塩化ナトリウム水溶液（Cl 濃度で約 20000mg/L、密度約 1.02Mg/m³）をトレーサー溶液として用いた。

(3) トレーサー溶液による供試体の初期飽和

供試体中の微細な空隙にトレーサー溶液を浸透させることを目的として、トレーサー溶液による初期飽和を行った。具体的には、供試体を蒸留水で十分に洗浄し、110°C に設定した乾燥炉に約 2 日間入れて絶乾させた。その後、絶乾供試体をトレーサー溶液中に浸漬させ、真空容器内で減圧させた状態で約 2 週間浸漬させることで初期飽和を行った。

(4) 有効空隙率の算出

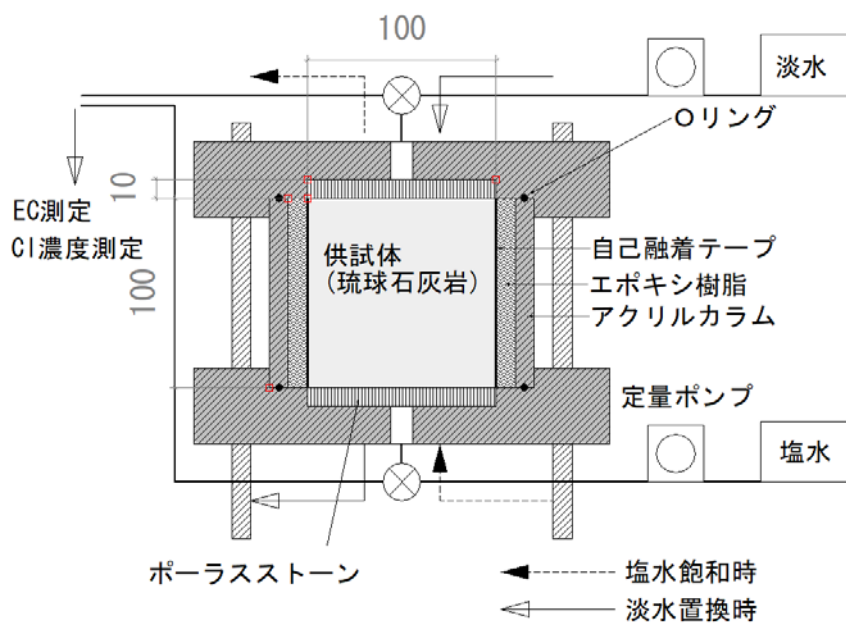
トレーサー溶液による初期飽和の終了後、宮城・小宮¹³⁾の方法を参考に有効空隙率を計算した。具体的には、供試体をトレーサー溶液から取り出し、乾燥を防止するために容器底へ水を張ったデシケーターの中に静置して、供試体中へ浸透させたトレーサー溶液を重力排水した。約 24 時間後、容器から供試体を取り出して湿潤質量を測定し、以下の式(3-1)により有効空隙率を算出した（表 3-1）。

$$n_e = n - n_{rs} \quad (3-1)$$

ここで、 n_e は有効空隙率、 n は空隙率、 n_{rs} は供試体に保持された液相（水溶液）の体積分率である。

(5) 試験装置

試験装置の概略を図 3-3 に、試験の様子を図 3-4 に示す。トレーサー溶液で飽和させた供試体を、外径 130mm、肉厚 12mm のアクリルカラム内にセットし、供試体とアクリルカラムの隙間をエポキシ樹脂で充填させて試験カラムを作成した。エポキシ樹脂を充填する際は、琉球石灰岩供試体の側面に存在する大きい空隙内に樹脂が浸透してしまうことが無いように、供試体側面に自己融着テープを巻き付けて養生した（図 3-5）。なお、テープには伸縮性のある物を使用し、引き延ばしながら緩みの生じないように養生することで、供試体側面に水みちが生じないようにした。試験カラムの上下端は、両端ともポーラスストーンを介してバルブへ接続し、上下の任意方向から流体の供給または排出が行えるものとした。



※寸法単位：mm

図 3-3 塩水淡水置換の室内トレーサー試験装置の概略



図 3-4 塩水淡水置換の室内トレーサー試験の実施状況

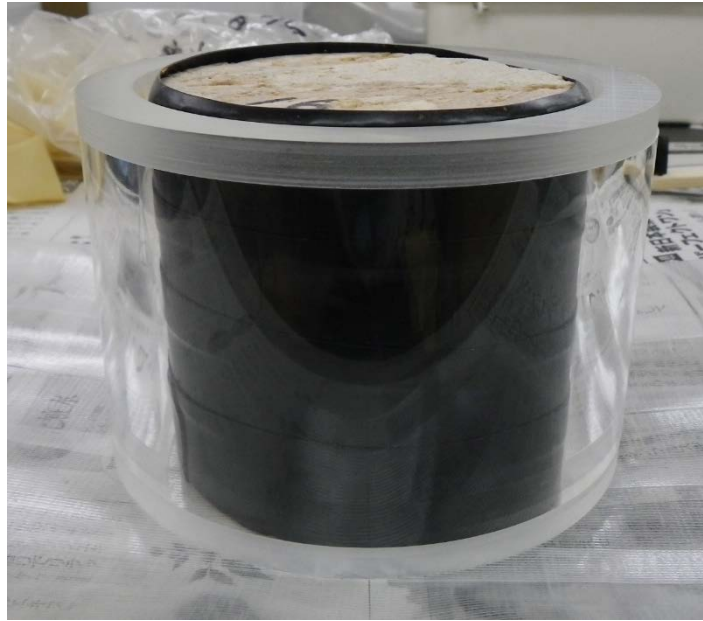


図 3-5 供試体養生の様子（エポキシ樹脂注入前）

(6) 通水および濃度測定

試験カラムへの通水の手順を図 3-6 に示す。試験カラムを試験装置に設置後、重力排水によって流出した水溶液を補うために、前述の塩化ナトリウム水溶液 (Cl 濃度約 20,000mg/L) を試験カラム下方から流量約 0.07mL/min で約 24 時間注入し続けた (図 3-6a)。注入には、チューブポンプ (アトー社製ペリスタポンプ、SJ-1220) を使用した。試験装置の継目からの水溶液の漏洩がなく、カラム上側のチューブからのみ水溶液が排出していることを確認してポンプを停止し、試験カラム下側のバルブを閉じた (図 3-6b)。その後、試験カラム上側のバルブを淡水 (蒸留水) 側、下側のバルブを排水側へそれぞれ切り替え、ポンプにより淡水注入を開始して試験開始とした (図 3-6c)。淡水として用いた蒸留水の Cl 濃度は非検出である。試験カラム下方からの排水を約 1 日毎にサンプリングし、イオンクロマトグラフ (DX-500、DIONEX 社) により塩化物イオン濃度を測定した。

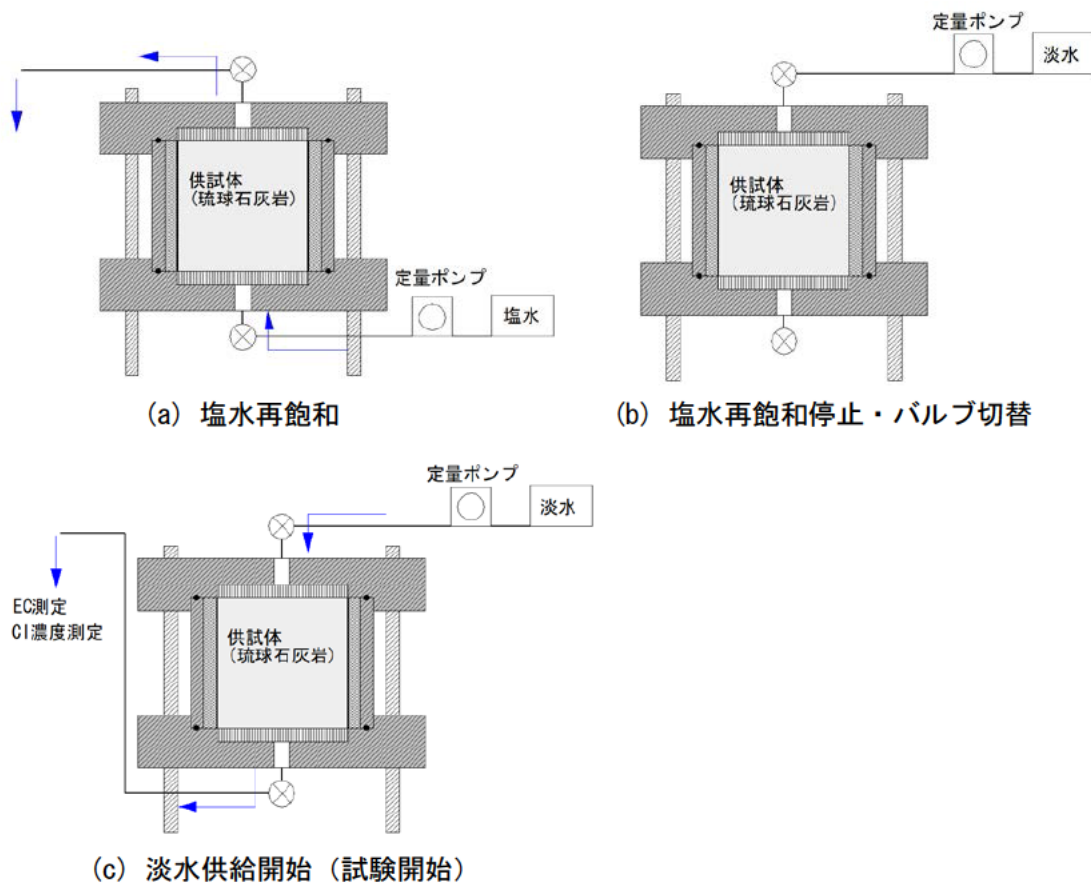




図 3-6 塩水淡水置換室内トレーサー試験の通水手順 (a⇒b⇒c)

(7) 試験ケース

試験は、琉球石灰岩コアを用いた 8 ケースに加えて、細屑性試料との比較をするために、観賞魚用の敷き砂として市販されているコーラルサンド（粒径 8～25mm）を乾燥密度 1.16 Mg/m³で充填した 1 ケース（ケース C）を加えた合計 9 ケースで実施した。表 3-2 に各試験ケースの条件を示す。試験カラムへの蒸留水の注入量は 0.07mL/min を基本（降雨強度換算で約 0.5mm/h）とし、流速の違いによる影響を調べるためにケース D100-8 のみ 0.14mL/min に設定した。また、チューブポンプのダイヤル設定の誤差により D100-6 は 0.06mL/min、D100-7 は 0.08mL/min である。各 D100 供試体の外観写真については付録に示す。

表 3-2 塩水淡水置換トレーサー試験の試験条件

ケース	D100-1~D100-8	C
供試体材料	琉球石灰岩	コーラルサンド
空隙率	0.15 ~ 0.22*	0.59
淡水注入流量	D100-1~5 : 0.07 mL/min D100-6 : 0.08 mL/min D100-7 : 0.06 mL/min D100-8 : 0.14 mL/min	0.07 mL/min
供試体外観	 供試体 D100-1	 粒径 : 8~25mm

※ 供試体毎の詳細値は表 3-1 を参照

3.2.3. 試験結果

図 3-7 に通水開始からの経過時間と排水中の塩化物イオン濃度の関係を示す。図 3-7 より、琉球石灰岩を用いたケース（D100 シリーズ）では、通水開始から約 100 時間頃までにかけて排水中の塩化物イオン濃度が大きく低下し、その後、D100-3 を除くケースで濃度低下傾向が緩やかになる結果が得られた。淡水の注入流量が大きい D100-8 では、他 D100 ケースで濃度低下傾向が緩やかになる期間（100 時間以降）での濃度が、他 D100 ケースでの濃度よりもやや低くなった。ケース D100-3 は、100 時間以降も濃度低下傾向は他 D100 ケースよりも大きくなった。コーラルサンドを用いたケース C での排水中の塩化物イオン濃度は、通水開始後しばらく高濃度となるが、一旦濃度が低下し始めると、低下傾向の遅延も生じずに 10mg/L 以下まで速やかに低下する変化を示した。

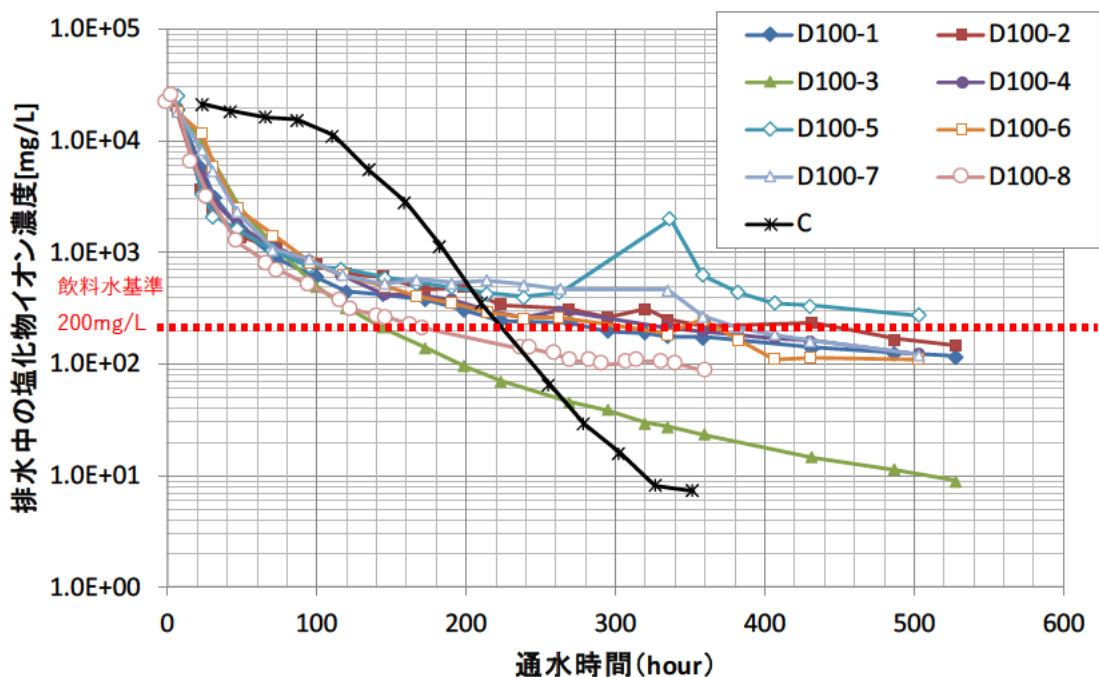


図 3-7 トレーサー試験における排水中の塩化物イオン濃度変化（時間表記）

図 3-8 にポアボリューム（PV）と排水中の塩化物イオン濃度の関係で整理した結果を示す。なお、ポアボリュームは積算通水流量を供試体の空隙体積で除した値で、以下の式(3-2)で表される。

$$PV = \frac{V_{inj}}{V_p} \quad (3-2)$$

ここで、 V_{inj} は積算通水量(L³)、 V_p は表 3-1 の空隙率から計算した全空隙体積(L³)である。

図 3-8 より、コーラルサンドを用いたケース C で急激な濃度低下を示したタイミングは 1PV 付近となった。一方、琉球石灰岩を用いたケース D100 シリーズでは、ケース D100-3 を除き、いずれのケースも同様に 1PV 前の極めて早い時間で濃度が急激に低下し、その後、濃度低減の傾向が小さくなる濃度変化を示した（テーリング）。なお、排水中の塩化物イオン濃度が飲料水基準である 200mg/L まで低下するのに要した淡水注入流量は、ケース C で約 2PV であるのに対し、ケース D100 シリーズでは 5~10PV 程度となった。なお、ケース D100-5 では一時的な濃度上昇が見られるが、チューブポンプのホースが摩耗し、注入流量が一時的に平均約 0.02mL/min まで低下したためによる。

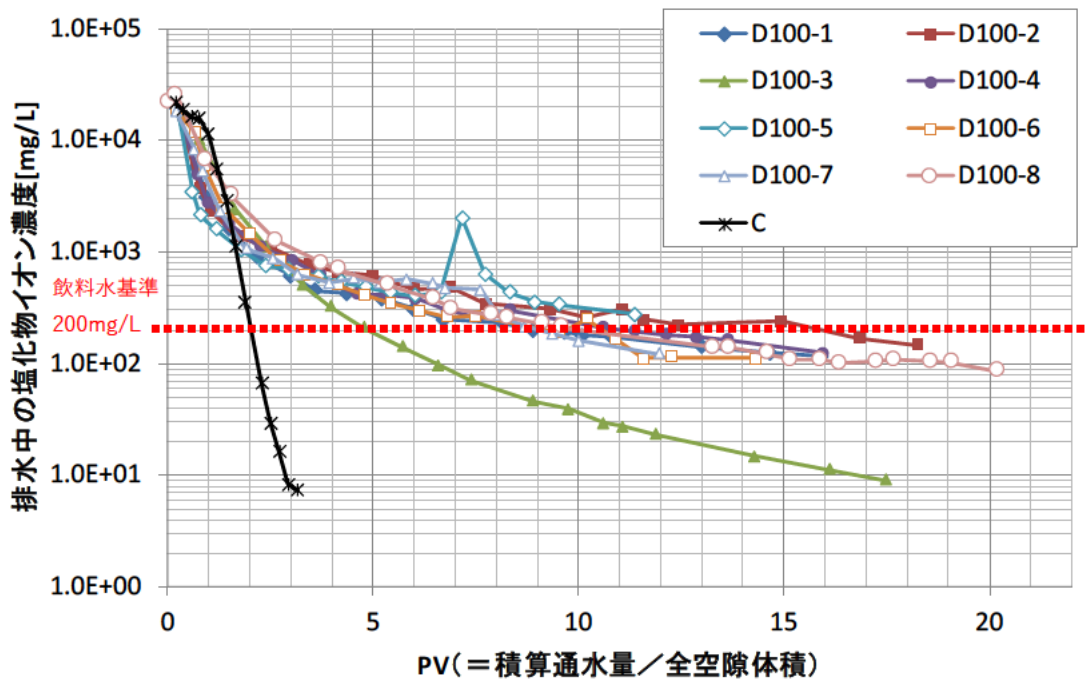


図 3-8 トレーサー試験における排水中の塩化物イオン濃度変化 (PV 表記)

3.2.4. 考察

沖縄総合事務局により津堅島で実施されたフローティング型地下ダムの現場試験では、26m×30mの止水壁で囲まれた琉球石灰岩地盤に10日間で3121m³の淡水を涵養した結果、厚さ約5mの範囲で塩水飽和領域が淡水領域に変わったと報告されている。琉球石灰岩の有効間隙率を0.2と仮定すると、塩水から淡水に置換された領域の空隙体積は26×30×5×0.2=780m³と計算され、涵養させた淡水の総量は約4PV(≒3121÷780)として計算できる。この現場実験では2mS/cm未満の水を淡水としている。図3-7と図3-8を導電率で表して2mS/cm部分を赤破線で示した結果を図3-9と図3-10に示す。本トレーサー試験において導電率が2mS/cm以下になるタイミングは約4PV以降(100時間以降)であり、上述の津堅島における現場実験の結果と整合するが、コアスケール～フィールドスケールにおけるスケール依存の有無については今後の検討課題であると考えられる。

図3-7と図3-8で示した細屑性試料(ケースC)と琉球石灰岩(ケースD100シリーズ)の濃度低下曲線について考察する。下流側の塩化物イオン濃度が飲料水基準である200mg/L以下となるまでに要した淡水注水量は、図3-8のグラフより、ケースCで約2PVであるのに対し、ケースD100シリーズでは5～10PV程度となった。前述したとおり、ポアボリューム(PV)は累積空隙体積である。完全なピストン流の場合には、1PVの流入量で、空隙内に元来存在する流体全てが新たに注入された流体で完全に入れ替わることとなり、排水中

の塩化物イオン濃度は実験条件に依存せずに 1PV でパルスのな濃度変化となることが予測される。したがって、ケース C において、図 3-7 で示すように通水開始後しばらくは高濃度が続く、図 3-8 で示すとおり 1PV 付近で急激な濃度低下が生じたことから、ケース C では実流速のばらつきが小さく（＝分散長が小さい）、ピストン流のようにパルスの塩水と淡水が入れ替わったことを示すと考えられる。

ケース D100 シリーズにおいては、図 3-7 および図 3-8 に示される 1PV 前となる通水開始後の極めて早い時間での急激な濃度低下とその後のテーリングは、琉球石灰岩に大空隙から微細空隙まで様々な大きさの空隙が存在し、水みち的な流れが生じていることを示唆していると考えられる。なお、ケース D100-3 では、塩化物イオン濃度の低減傾向が、他の D100 シリーズのケースよりもやや大きくなった。図 3-11 に D100-2 と D100-3 の外観を示す。外観上、D100-3 供試体は他の供試体（例えば D100-2）と比べて基質部分の占める割合がやや多く観察された。また、表 3-1 より、D100-3 供試体は、他の供試体よりも有効空隙率が小さい特徴が挙げられる。ケース D100-3 の結果は、その他の D100 シリーズの供試体と比較して D100-3 では水みち的な流れが極端でない可能性を示唆する。

図 3-7 より、排水中の塩化物イオン濃度が飲料水基準である 200mg/L まで低下するのに要した時間は、降雨強度 0.5mm/h（4380mm/年）程度で 150～400 時間である。実規模のフローティング型地下ダムにおける淡水貯留を想定し、5m 厚の淡水領域を形成するのに要する時間を試算すると、本実験で用いた供試体長さが約 10cm であることから、試験の 50 倍（＝500cm/10cm）となる 312～833 日と試算される。導電率 2mS/cm 以下まで低下するのに要する時間を同様に降雨強度 0.5mm/h として試算すると、図 3-9 より導電率 2mS/cm 以下となるまでの時間は 100～200 時間であることから、5m 厚の淡水領域を形成するには 208～416 日を要すると試算される。

以上より、フローティング型地下ダムにおける一定強度での淡水供給による淡水貯留過程においては、ダム貯留層（第四紀石灰岩層を想定）の空隙構造が複雑な場合、塩化物イオン濃度が飲料水基準である 200mg/L 以下となるまで長期間を要する可能性があり、同期間は涵養強度が大きいほど短くなる傾向があると示唆された。一方で、2mS/cm 以下を淡水として考える場合には、飲料水基準よりも短くなることが考えられる。なお、淡水供給の強度を時間変化させた場合の挙動については今後の課題であると考えられる。また、淡水貯留過程における濃度低下傾向は同じ岩石であっても空隙構造の違いによって異なる可能性があることが確認できた。次節では、同様の室内トレーサー試験をマイクロフォーカス X 線 CT で供試体内部を観察しながら行い、テーリングの原因について考察する。

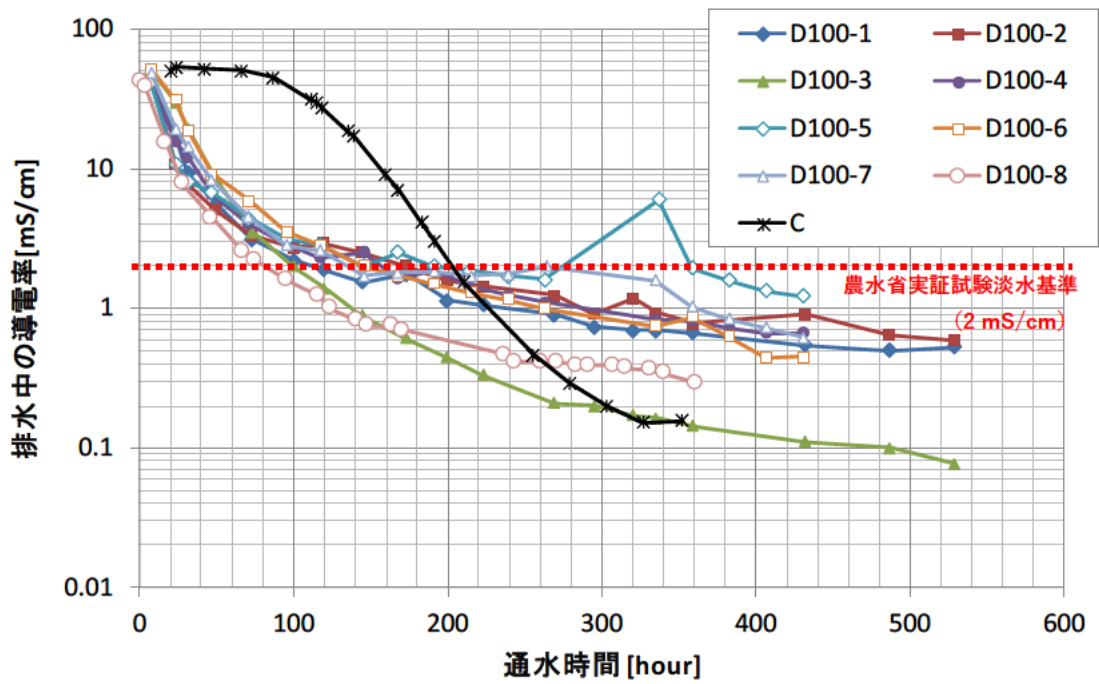


図 3-9 トレーサー試験における排水中の導電率変化（時間表記）

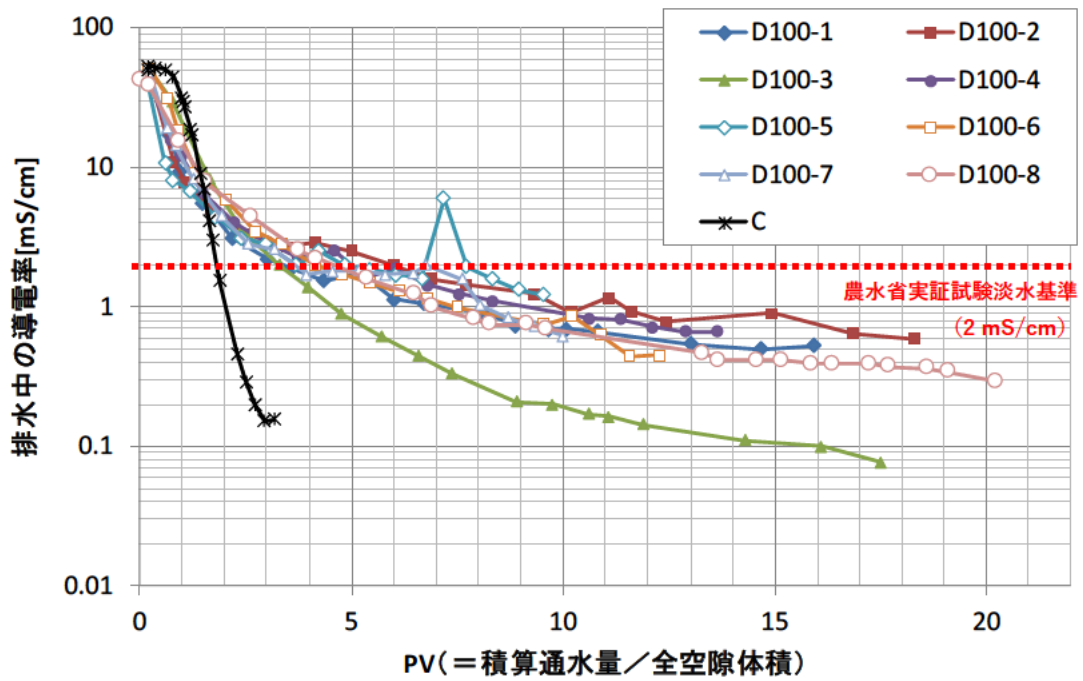


図 3-10 トレーサー試験における排水中の導電率変化（PV 表記）



(a) D100-2



(b) D100-3

図 3-11 供試体 D100-2 と D100-3 の外観

3.3. マイクロフォーカス X 線 CT を用いた塩水淡水置換室内トレーサー試験

3.3.1. 目的

塩水淡水置換の室内トレーサー試験を、マイクロフォーカス X 線 CT で供試体内部を撮影しながら行い、前節で確認された琉球石灰岩における塩水淡水置換時のテーリング現象の原因究明に資するデータの取得を目的とした。すなわち、下流側で測定されるトレーサー溶液の濃度変化とともに、供試体内部の空隙中の塩水濃度変化を可視化した。

3.3.2. X 線 CT の概要¹⁴⁾

X 線は波長 1pm~10nm 程度の電磁波の一種である。X 線の特徴の一つに物体を透過する特徴が挙げられ、X 線 CT ではこの特徴を利用して物体の三次元画像を取得する。短波長の X 線では、X 線が物体を透過する時の X 線強度の減衰は、以下の式(3-3)で表される。

$$I = I_0 e^{-\mu L} \quad (3-3)$$

ここで、 I は物体透過後の X 線強度、 I_0 は物体透過前の X 線強度、 μ は X 線吸収係数[L⁻¹]、 L は X 線が透過する部分の物体の厚み[L]である。一般に、X 線吸収係数は、X 線が透過する部分の物質の原子番号が大きいほど、また、密度が大きいほど大きくなる。

X 線 CT は、大きく産業用と医療用の 2 つのタイプに大別される。本研究では産業用 X 線 CT を使用した。産業用 X 線 CT では、サンプルを試料ステージ上に設置し、試料ステージを回転させることにより、撮影対象となる物体に対して X 線をさまざまな角度から照射し、それぞれの角度における物体通過後の X 線強度のデータを収集する。それらのデータをコンピュータで解析することで、物体内部の X 線吸収量の分布を求め、その大きさをグレースケールで表示することで物体内部の三次元画像を作成する（画像再構成）。

物体内部の X 線吸収量は、解像度で区分される直方体毎に求まる。したがって、X 線 CT 画像では「体積 (Volume)」と「ピクセル (Pixel)」を掛けた「ボクセル (Voxel)」という言葉が「ピクセル」の代わりに使用される。図 3-12 に示すように、1 枚の X 線 CT 画像ファイルのピクセルに入る値は、通常の写真のようにある断面で切断した場合の切り口を表す二次元情報（切り口面で反射する可視光線）ではなく、奥行き方向の厚みを考慮した三次元情報（直方体での平均 X 線吸収量）を表す。

二次元での画像再構成の概要を図 3-13 に示す。図はサンプル通過前の X 線強度を 10（図中橙色矢印）とした際の 2 ピクセルの検出器でのイメージ図であり、サンプル通過後の X 線強度をそれぞれ橙白抜き矢印に、サンプル内の X 線吸収量を格子内に数字で記したもの

である。この場合には4元の連立方程式を解くことで、解像度で分割された各区画のX線吸収量の値が求まる。なお、医療現場で用いられるレントゲン画像は、物体透過後のX線強度をグレースケールで表した画像であり、図3-13の場合には橙白抜き矢印の数字を表す画像となる。通常、CT画像では、X線の減衰が小さいこと（空気など）を示すボクセルは黒色で表示され、X線の減衰が大きいこと（密度の大きい物質）を示すボクセルは白色で表示される。各ボクセルの出力（CT値）は8ビットまたは16ビットが使用される。

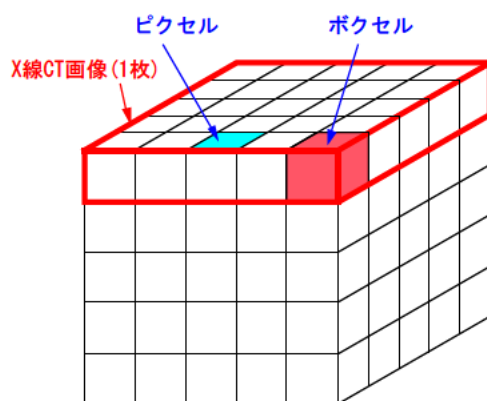


図 3-12 X線CT画像の模式図

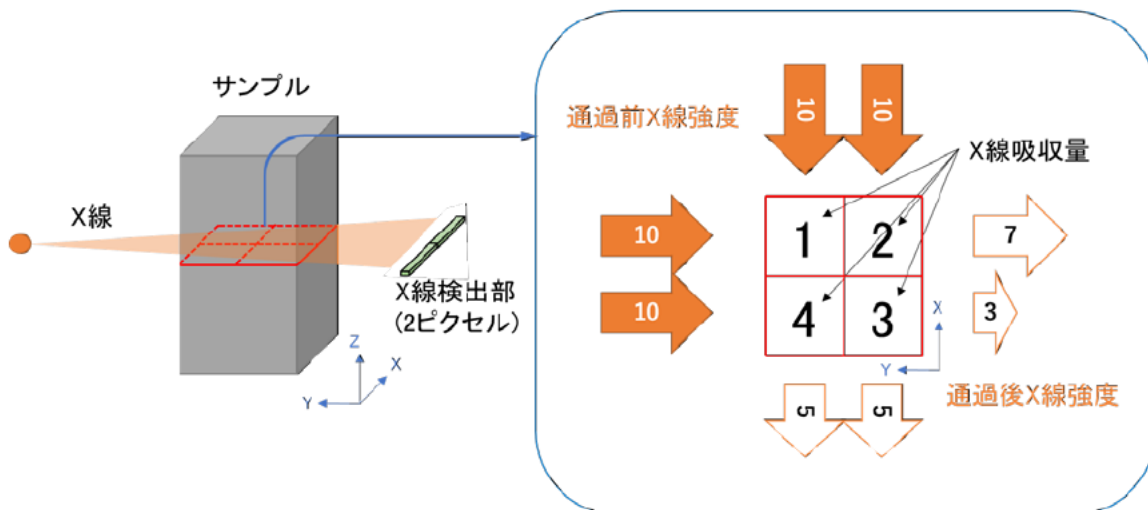


図 3-13 画像再構成のイメージ

3.3.3. 試験方法

(1) 供試体

基質部分においても水溶液の濃度変化を高解像度で明瞭に捉えるために、3.2節で述べた琉球石灰岩ブロックから新たに直径50mmのコアを抜き取り、端面を整形した長さ47mm

の円柱状供試体を製作して本試験に用いた (D50-1 供試体)。供試体の外観を図 3-14 に示す。



図 3-14 D50 供試体の外観

(2) トレーサー溶液の作成と供試体の飽和

X線 CT でボクセル毎に得られる出力値は、ボクセル内の密度とその場所に含まれる物質の原子番号によって変化する。密度が大きく、原子番号が大きいほど、ボクセル毎の X 線吸収量は大きな値となる。本実験では、空隙内がトレーサー溶液から淡水へ置換した場合のコントラストを強調する (X 線 CT の出力値の変化量を大きくする) ために、原子番号が大きく水への溶解度が高いヨウ化カリウムをトレーサーに使用した。ヨウ化カリウムを蒸留水に溶解し、密度約 1.53Mg/m^3 の水溶液 (トレーサー) を作成した。なお、ヨウ化カリウム水溶液は地下水トレーサーとして多く使用されており、高濃度における粘性変化が小さいことが示されている¹⁵⁾。

供試体は、蒸留水で十分に洗浄した後、 110°C に設定された乾燥炉へ約 2 日間静置して絶乾させた。乾燥させた供試体は、真空容器内で前述したヨウ化カリウム水溶液中に約 2 週間浸漬させ、基質部分の空隙を同水溶液で飽和した。その後、水溶液中から供試体を取り出し、乾燥を防止するために容器の底へ水を張ったデシケーターの中に供試体を静置して重力排水した。約 2 日後、供試体の湿潤質量を測定し、式(3-1)で有効空隙率を計算した¹³⁾。

(3) 試験装置

試験装置の概略を図 3-15 に示す。本実験は、(独) 港湾空港技術研究所保有のマイクロフォーカス X 線 CT 装置「SMX-225CT-SV2 特型 (島津製作所)」および CT 装置内で使用可

能な三軸透水試験装置を利用して行った¹⁶⁾。供試体にスリーブを被せて試験装置に設置し、セル内の圧力をゲージ圧で約26kPaとした。試験カラムの上下端は、両端ともポーラスストーンを介してバルブへ接続し、上下の任意方向から流体の供給または排出が行えるものとした。試験の実施状況を図 3-16 に示す。

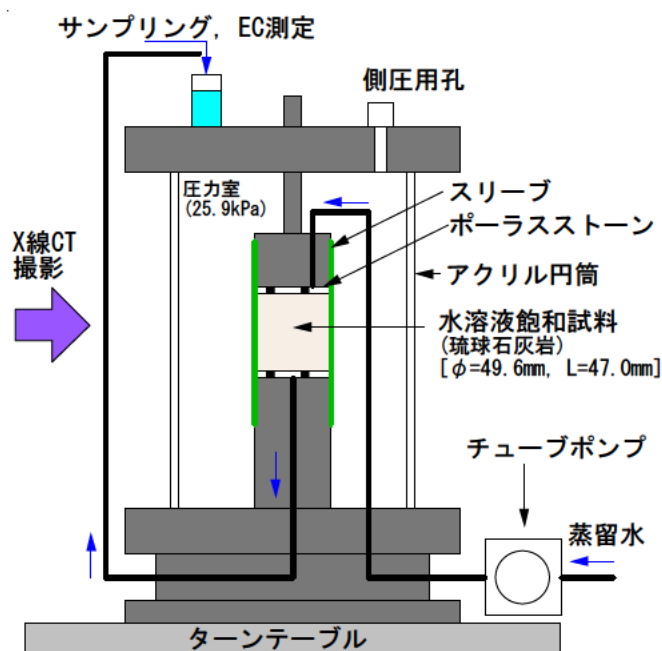


図 3-15 X 線 CT を用いた塩水淡水置換の室内トレーサー試験装置の概略

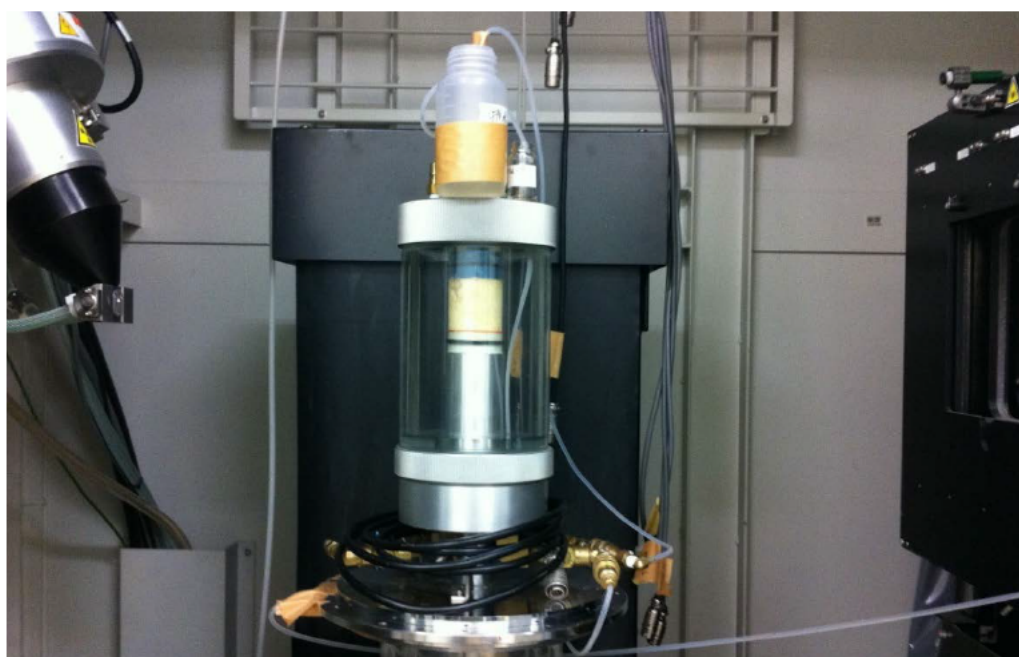


図 3-16 X 線 CT を用いた塩水淡水置換の室内トレーサー試験の実施状況

(4) 通水および濃度測定

チューブポンプ（アトー社製ペリスタポンプ、SJ-1220）を用いてヨウ化カリウム水溶液を約 0.2mL/min の流量で供試体下方から注入し、重力排水後の供試体（大きい空隙の水溶液が失われている）をヨウ化カリウム水溶液で再飽和した。供試体上方から水溶液が排出することを確認した後、下方からの水溶液の注入を停止した。装置下側のバルブを排水系統へ切り替え、供試体上方から蒸留水を通水（約 0.3mL/min（降雨強度換算で約 9mm/h））して試験開始とした。約 30 分間隔で供試体下方からの排水を採取し、イオンクロマトグラフによりカリウムイオン濃度を測定した。

(5) X 線 CT 撮影

蒸留水の通水前後および通水途中で X 線 CT による撮影を行った。X 線 CT 撮影はおおよそ 10 分程度を要するが、蒸留水の注水を止めずに通水したままで撮影を行った。1 回の撮影毎に、撮影視野をボクセルサイズで分割した枚数分の CT 画像（16bit グレースケール）が得られる。

(6) 試験ケース

試験は、X 線 CT の撮影範囲を供試体全体とした場合（ケース 1）と、供試体上端から約 22mm～41mm の範囲の供試体側面付近を拡大した場合（ケース 2）の合計 2 回行った。各ケースにおける X 線 CT の撮影条件を表 3-3 に示す。試験中の蒸留水の流量は、ポンプのダイヤル調整で行うため、完全に同一条件とはならない。実際の排水量と時間を測定して計算される流量は、ケース 1 が 0.34mL/min、ケース 2 が 0.32mL/min であった。

表 3-3 X 線 CT を用いた塩水淡水置換の室内トレーサー試験での X 線 CT 撮影条件

項目	ケース 1	ケース 2	ドライスキャン
CT 画像	図 3-19a, b, c	図 3-20	図 3-19d
撮影視野範囲	供試体全体	供試体一部 (上端から約 22mm～ 41mm の供試体側面付近)	供試体全体
撮影機種	SMX-225CT-SV2 特型（島津製作所）		
X 線管電圧 [kV]	200		
X 線出力電流[μA]	400		
画像サイズ [pixel]	1024×1024		512×512
ボクセルサイズ [μm]	65.37	20.70	107.09

3.3.4. 試験結果

(1) カラム出口の経時濃度変化

排水量 (PV : ポアボリューム) と排水中のカリウムイオン濃度 (初期濃度に対する相対濃度) 変化を、図 3-17 に X 軸を時間の対数軸とした場合、図 3-18 に X 軸を PV とした場合を示す。各図とも縦軸の相対濃度は、試験開始前の初期カリウムイオン濃度に対する相対濃度である。比較として、塩化ナトリウム水溶液を用いた試験 (3.2) における供試体 D100-1 と D100-3 の結果を黒破線で示す。本試験におけるダルシー流速は約 $2.8 \times 10^{-6} \text{m/s}$ であり、塩化ナトリウムを用いた試験での $1.5 \times 10^{-7} \text{m/s}$ (0.07mL/min の時) の約 19 倍に相当する。試験カラム出口での濃度変化を PV で整理すると、本試験における濃度変化は、塩化ナトリウムを用いた試験と同様に、通水初期の急激な濃度低下とその後テーリングを示す結果となった。試験終了時の全排水量とカリウムイオン濃度から計算したトレーサー回収率は、ケース 1 で 86%、ケース 2 で 90% と計算された。

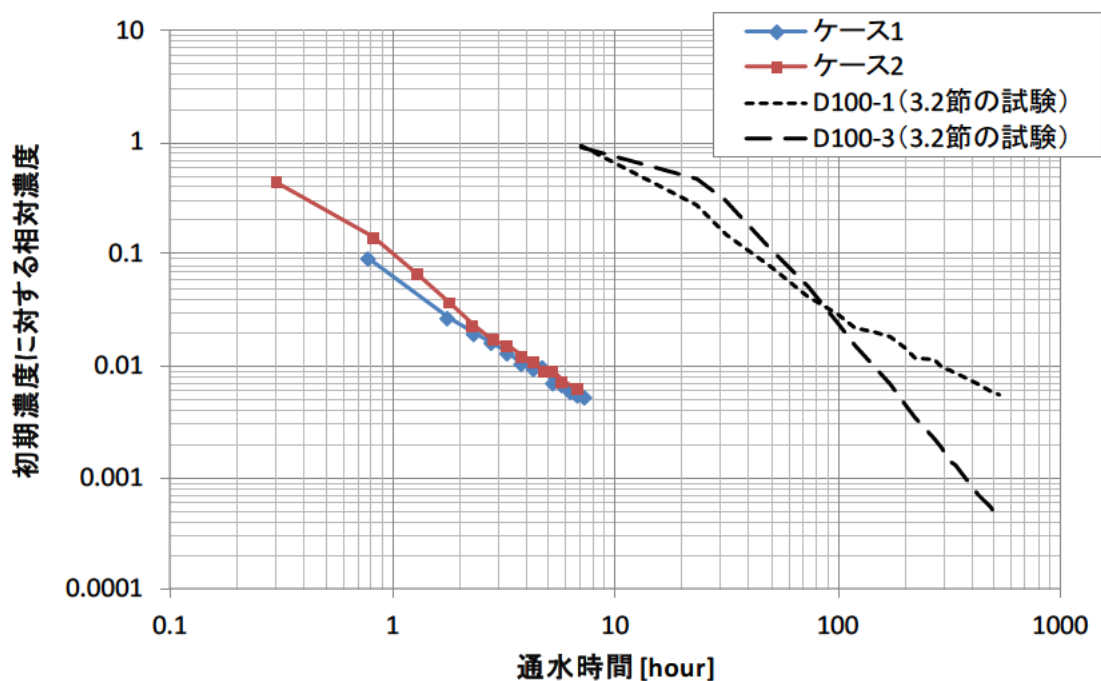


図 3-17 トレーサー試験における排水 (下流側) の相対濃度変化 (時間表記)

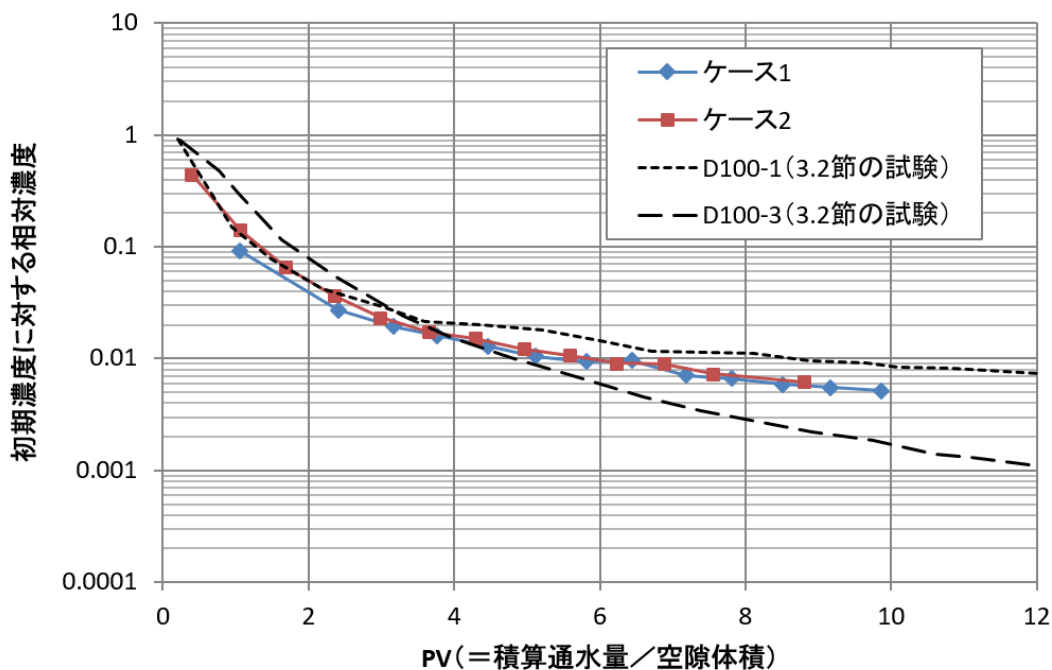


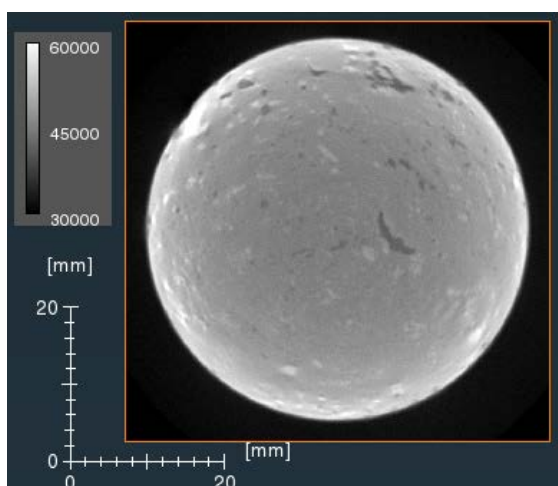
図 3-18 トレーサー試験における排水（下流側）の相対濃度変化（PV 表記）

(2) CT 画像による大空隙部分のトレーサー濃度変化

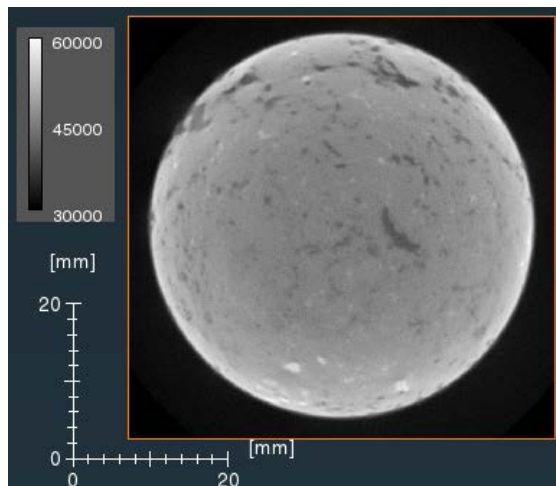
空隙径の幅が約 0.5mm 以上の空隙部分を大空隙部分として、同空隙部分の CT 値の変化について述べる。ケース 1 の PV=0、2.1、9.9（試験終了時）および絶乾状態における CT 画像を図 3-19 に示す。図 3-19a~c は CT 値 30,000~60,000 を、図 3-19d は CT 値 35,000~50,000 の範囲をグレースケールで表示した画像である。X 線は密度が大きい、もしくは原子番号が大きい物質ほど減衰量が大きくなるため、本実験では水溶液の造影剤として原子番号が大きいヨウ素を含むヨウ化カリウム水溶液を使用した。図中の黒色部分は X 線減衰が小さい空気部分を表し、白色部分は X 線減衰が大きい部分（ここでは空隙が少ない部分やヨウ化カリウム水溶液で満たされた空隙）を表す。図 3-19a、b より、通水前（PV=0）および初期（PV=2.1）における大空隙部分の様子を比べると、通水前にはヨウ化カリウム水溶液で満たされて白色を示した大空隙部分は、その大部分が通水初期で黒色へ変化しており、大空隙部分のヨウ化カリウム水溶液が淡水によって置換され易いことが確認できる。一方、図 3-19c を見ると、試験終了時（PV=9.9）にも白色のままの大空隙部分も確認でき、一部の大きな空隙部分ではヨウ化カリウム水溶液が残留することが確認できた。図 3-19d は絶乾状態での画像で、黒色部分は空隙を示す。したがって、図 3-19c、d を比較することでも、図 3-19c の白色部分が鉱物等ではなく、空隙に残留している水溶液であることが分かる。

ケース 2 の PV=0、1.2、9.0（試験終了時）における CT 画像を図 3-20 に示す。それぞれ

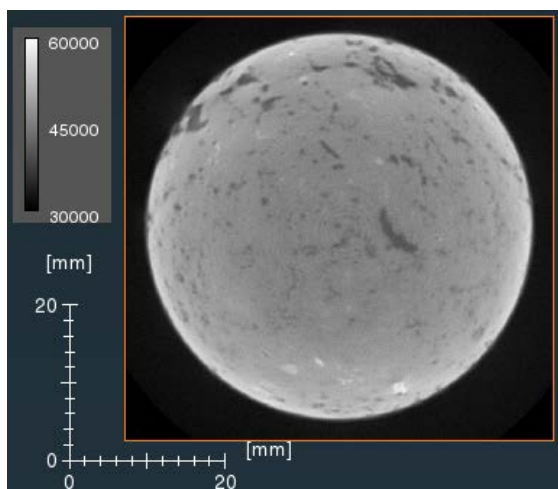
3 断面で表示した CT 画像で、左上の画像が水平断面、右側および下側の画像はグリーンまたはピンク線位置での鉛直断面である。撮影位置が供試体の側面付近であるため、水平断面画像の左下側は供試体側面となっている。各画像とも 16bit の出力値で、33,000~43,000 の範囲でグレースケール表示したものである。図 3-20 の赤色丸で示す箇所を見ると、PV=1.2 の時点で暗灰色に変化しており、通水開始から比較的早い段階で空隙内のヨウ化カリウム水溶液が淡水で置換されていることが分かる。一方、青色丸で示す箇所は、PV=1.2 の時点では白色で、試験終了時に暗灰色へ変化しており、試験期間を通して徐々にヨウ化カリウム水溶液の濃度が低下した空隙であることが分かる。また、黄色丸で示す箇所は、その数 mm 範囲内に位置する青色丸部分の空隙内が淡水で置換されても、試験期間を通して白色を示すことから、大空隙であっても水溶液が残留し、濃度低下し難い独立性の高い部分が存在することが分かる。



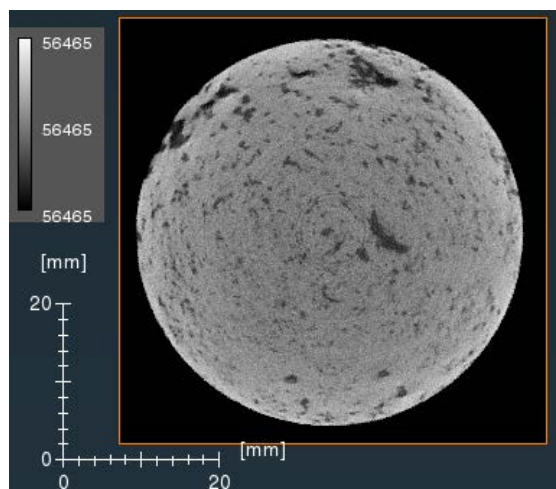
(a) PV=0 (通水前、解像度 65.37 μ m)



(b) PV=2.1 (通水中、解像度 65.37 μ m)



(c) PV=9.9 (試験終了時、解像度 65.37 μ m)



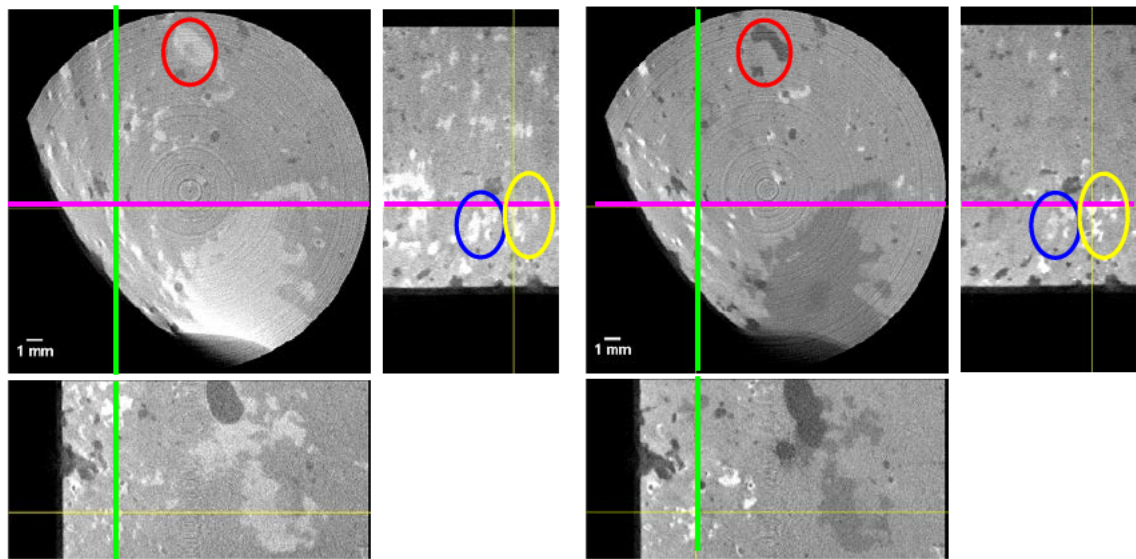
(d) 乾燥状態 (解像度 107.09 μ m)

※ (a)~(c)は CT 値 30000~60000 の範囲を、(d)は CT 値 35000~50000 の範囲をグレースケール表示した CT 画像

黒色部分 : X 線減衰が小さい空気部分

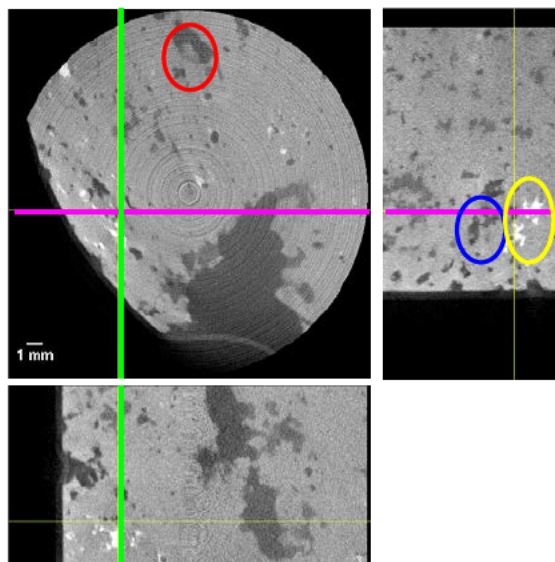
白色部分 : X 線減衰が大きい部分 (空隙が少ない部分やヨウ化カリウム水溶液で満たされた空隙)

図 3-19 供試体全体を撮影した場合 (ケース 1) のヨウ化カリウム水溶液—淡水置換室内トレーサー試験中の供試体 CT 画像 (上端面から約 18mm 位置の水平断面)



(a) PV=0 (通水前)

(b) PV=1.2



(c) PV=9.0 (試験終了時)

- ヨウ化カリウム水溶液から淡水へ速やかに置換した空隙
- ヨウ化カリウム水溶液から淡水へ置換するが、置換するまでに時間のかかった空隙
- 本試験の実施時間では、ヨウ化カリウム水溶液から淡水へほとんど置換しなかった空隙

※ 解像度 20.7 μ m、CT 値 33,000~43,000 の範囲でグレースケール表示した CT 画像

黒色部分 : X 線減衰が小さい空気部分

白色部分 : X 線減衰が大きい部分 (空隙が少ない部分やヨウ化カリウム水溶液で満たされた空隙)

図 3-20 ケース 2 の CT 画像 (各左上画像は供試体上端から約 36mm の位置)

(3) CT 画像による基質部分のトレーサー濃度変化

図 3-21 に、図 3-20 の CT 画像の CT 値の差分画像を示す。図 3-21a は PV=0~1.2 の通水初期（図 3-20a~b）の CT 値の差分画像で、図 3-21b は PV=1.2~9.0（図 3-20b~c）の CT 値の差分画像である。なお、本実験における絶乾供試体の基質部分の CT 値は約 42,000、ヨウ化カリウム水溶液で飽和した空隙部分は約 47,000、淡水で飽和した空隙部分は約 40,000 であった。図 3-21a、b の両図とも、青色丸で示すような基質部分において、CT 値が 1,000 ~2,500 程度変化するボクセル（赤色を示すボクセル）が分布しており、基質部分の空隙内のヨウ化カリウム水溶液の濃度が低下したことが分かる。また、赤色点の分布の特徴として、図 3-21a、b を比べると、両期間とも基質部分の全体に散布的に生じ、さらに通水初期の方が通水初期以降よりも分布の数が多い。

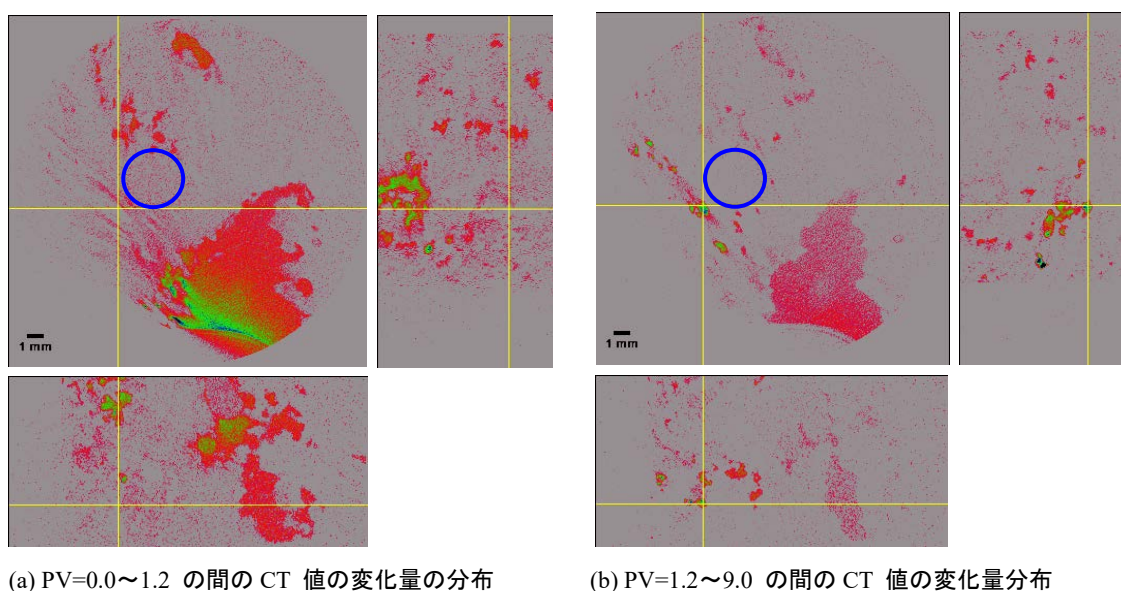


図 3-21 ケース 2 の CT 値の差分画像 (a : 図 3-20a-b、b : 図 3-20b-c)

3.3.5. 考察

(1) 大空隙部分における物質移行特性

図 3-19 および図 3-20 の X 線 CT 画像より、多くの大空隙部分において、ヨウ化カリウム水溶液の濃度は通水初期に大きく低下することが観察された。本実験の X 線 CT 画像の結果より、X 線 CT 画像で容易に識別できる程度の大空隙部分（経路の狭くなった部分の幅がおおよそ 0.5mm 以上）の多くが地下水の主要な流動経路になっていることが確認できた。一方で、一部の空隙部分においては、全通水期間でヨウ化カリウム水溶液が残留する様子も観察できた。これは、琉球石灰岩の空隙は、大きな空隙同士が必ずしも連続して主要な地下水の流路となるのではなく、大きくても空間的に独立性の高い空隙が存在することを示唆すると考えられる。すなわち、同石灰岩が降雨や地下水による溶解によって径が大きくなる空隙が存在する一方で、化学風化・圧密・膠着・再結晶などの続成作用によって独立性が高くなる大きな空隙が存在することを意味する。そして、琉球石灰岩における物質移行においては、このような空間的に独立性の高い空隙からの基質部分を介した拡散が生じ、テーリングの原因の一つになっているものと考えられる（図 3-22）。

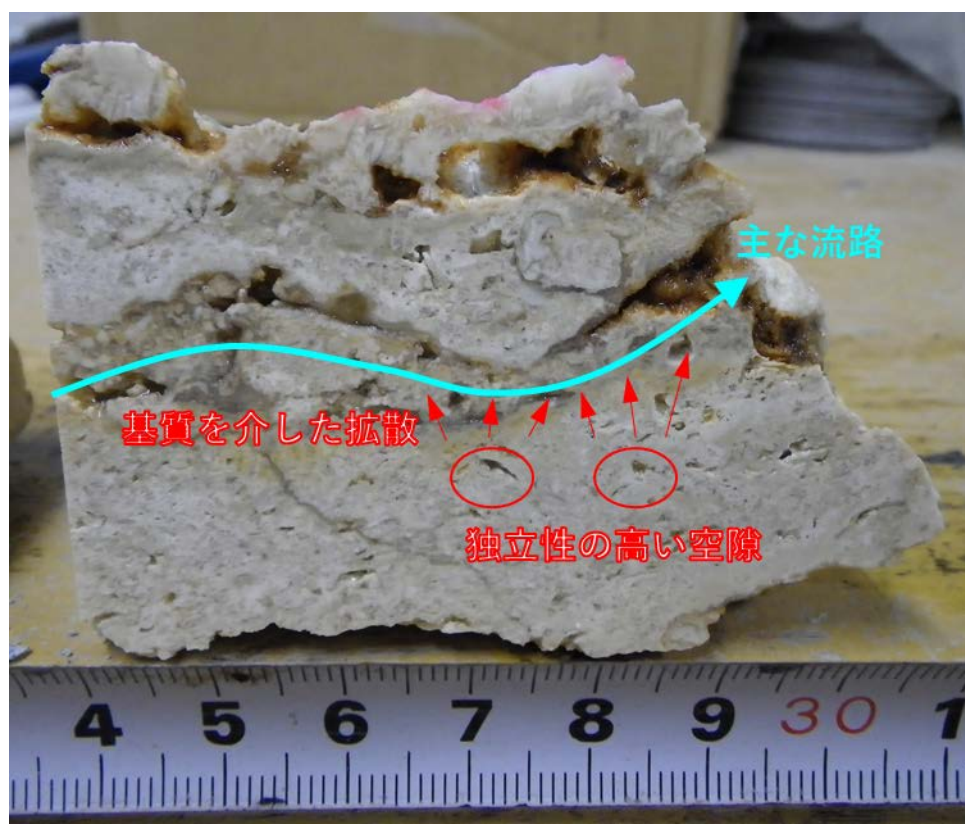


図 3-22 独立性の高い大きな空隙からの基質部分を介した拡散のイメージ

(2) 基質部分における物質移行特性

熊本ほか¹⁷⁾による亀裂を含む多孔質岩盤に対する試験では、基質部分が拡散支配である時、亀裂部分に近いほど濃度変化（CT 値の変化）が大きくなる結果が得られている。しかし、前述したように、本実験における基質部分とみられる位置で CT 値が比較的大きく変化したボクセルは、大空隙の近くに偏ることなく基質部分の全体に散布的に存在しており、さらに、その分布は $PV=0\sim 1.2$ の通水初期までに多く観察された。これらの特徴は、基質部分の物質移行が拡散支配のみでなく、微細空隙における淡水の移流で水溶液濃度が低下したことを示唆すると考えられる。一方、図 3-21b における基質部分の赤色点は、基質部分の微細空隙のうち、連結性が低く流れが生じにくい空隙のヨウ化カリウム水溶液の濃度の低下を表していると考えられる。以上より、琉球石灰岩における水の流れは、大きな空隙のパイプフローのみではなく、大きな空隙を優先的に流れるもののマトリックス部分においても移流が生じる分散的な地下水流れであることを示唆すると考えられる。これは、堆積年代が比較的新しい場合、空隙構造は、堆積物の骨格に起因するマトリックス部の空隙（一次空隙）が、堆積後に新たに生じる二次的な空隙（降雨や地下水による溶解など）よりも優勢となり、マトリックス部を浸透する分散的な地下水の流れが生じるとする報告¹⁸⁾と整合する。すなわち、琉球石灰岩における地下水の流れは、空隙率の大きい高透水部分と空隙率の小さい低透水部分が複雑に入り組んだ二重空隙様な流れであることが推察される。

3.4. 二重空隙モデルによる再現解析

3.4.1. 目的

図 3-21a、b に示した実験結果より、琉球石灰岩における塩水淡水置換において、大空隙の多くの部分が主要な地下水の流動経路になっているとともに、大空隙以外の部分（基質部分）についても移流による濃度低下の影響が大きいことが考えられた。上記の特徴を再現可能である解析手法の一つとして、米国ローレンスバークレー国立研究所で開発された多成分多相流解析コード TOUGH2¹⁹⁾ の二重空隙モデル (MINC: Multiple Interacting Continua^{20), 21)} が挙げられる。実験結果より、琉球石灰岩に対する二重空隙モデルの基質部分の扱いは、基質部分同士の間での物質移行を考慮する方法 (Dual Permeability) が試験結果に即すると考えられる。ここでは、再現解析を実施し、同手法が複雑な空隙構造を有する琉球石灰岩に対しても適用可能であるかを検討するとともに、琉球石灰岩について同モデルを適用する場合の課題について検討した。

3.4.2. 解析手法

表 3-4 に本計算で与えたパラメータを示す。亀裂部分の体積割合は、絶乾状態の供試体の CT 画像で比較的多く空隙を含むボクセルとして考え、CT 値が 42,000 より小さいボクセル数の全ボクセル数に対する割合である 0.09 を与えた。基質部分の体積割合は、亀裂以外の部分として計算した。亀裂部分の空隙率は 0.999 とし、全空隙率（基質+亀裂）がカラム試験供試体の全空隙率と整合するように、基質部分の空隙率を与えた。亀裂部分の浸透率は $1.0 \times 10^{-9} \text{m}^2$ (透水係数で約 $1.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$)、基質部分は $1.0 \times 10^{-14} \text{m}^2$ (透水係数で約 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$) を仮定して与えた。有効拡散係数は、 K^+ の 25°C の水中における分子拡散係数を $1.96 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ ²²⁾、屈曲率を 0.5 で仮定して与えた。MINC モデルにおける基質内の分割数は、同体積で 3 分割とした。なお、亀裂間隔、基質部分の分割数、屈曲率（多孔体中における流路の複雑さを表し、直線距離を L 、屈曲した流路長を L_e とすると、 $\tau = (L/L_e)^2$ で表される²³⁾）は、カラム試験の破過曲線とのフィッティングによって値を仮定した。

表 3-4 二重空隙モデル^{19), 20), 21)} を用いたヨウ化カリウム—淡水置換の室内トレーサー試験の再現解析における主な入力パラメータ

項目	値
亀裂部分の体積割合	0.09
基質部分の体積割合	0.91
基質部分の分割数	3
亀裂間隔 (m)	0.05
亀裂部分の浸透率 (m ²)	1.0×10 ⁻⁹
基質部分の浸透率 (m ²)	1.0×10 ⁻¹⁴
亀裂部分の空隙率	0.999
基質部分の空隙率	0.080
全体 (基質+亀裂) での空隙率	0.163
有効拡散係数 (m ² /s)	9.8×10 ⁻¹⁰

3.4.3. 解析結果および考察

再現解析の結果を図 3-23 に実線で示す。解析により、実験で見られる通水開始初期の比較的早い段階での急激な濃度低下や、その後の濃度低下遅延を良く再現できることが分かる。このように、複雑な空隙構造を持つ琉球石灰岩を二重空隙モデルで簡易化し、塩水淡水置換時の残留塩分の効果をマクロに評価できる可能性を確認した。

しかしながら、本解析における基質部分の分割数、亀裂間隔、浸透率は、試験データとのフィッティングから同定したものであり、異なるスケールや条件での適用範囲は限られる。また、ここでの検討のように、仮に実際の濃度変化を再現できるパラメータを選定したとしても、それらのパラメータが実際の岩石の物性を表すことを合理的に説明することはできない。以上より、前述した試験結果や本解析検討より、琉球石灰岩中の物質移行においてテーリングが生じる原因として、二重空隙的な流れによることが原因だと考えられるが、それを合理的に再現する空隙（構造）モデル化手法の確立が必要である。

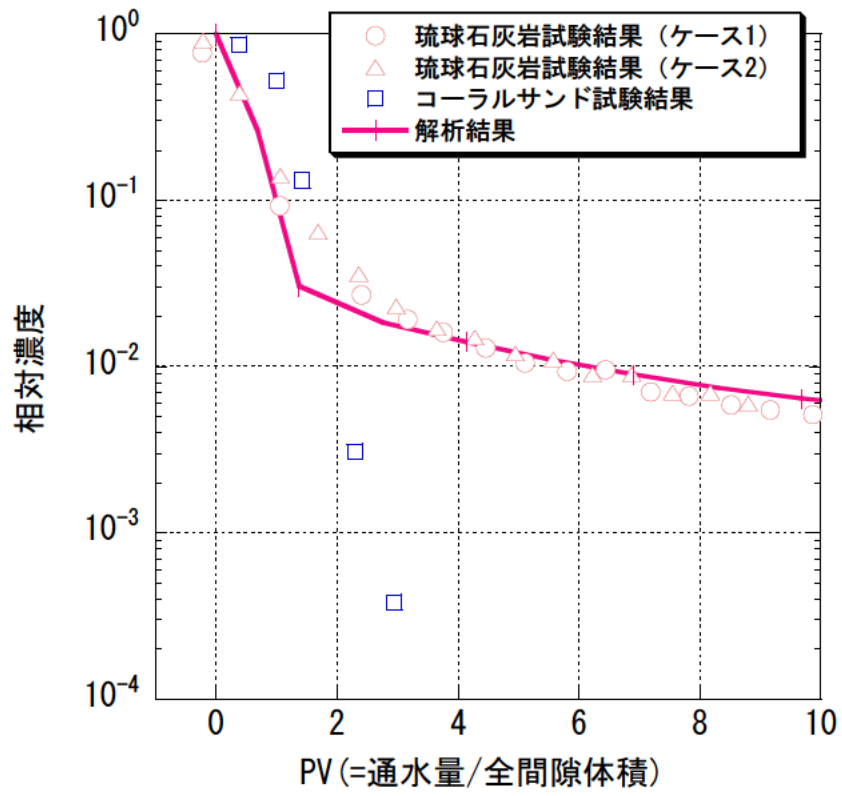


図 3-23 二重空隙モデルによる再現解析結果

3.5. 3章のまとめ

第四紀石灰岩に分類される琉球石灰岩を用いた室内トレーサー試験を行い、フローティング型地下ダムにおける淡水貯留過程における濃度変化の特徴について調べた。また、同室内トレーサー試験をマイクロフォーカス X 線 CT を用いて供試体内部を撮影しながら行うことで、同岩石中の空隙内の濃度変化を可視化し、物質移行メカニズムに関して考察した。さらに、既往の解析モデル（二重空隙モデル（MINC モデル））による再現解析を行うことで、試験結果を再現するためのモデル化の課題について考察した。

塩水淡水置換の室内トレーサー試験の結果より、琉球石灰岩における濃度低下は、均質試料の濃度変化と比較して、通水初期に大きく低下するとともに、その後は濃度低減傾向が緩やかになるテーリング挙動を示した。さらに、通水中の X 線 CT 画像からは、近接する大きな空隙であっても濃度低下に大きな違いが生じる場合があることを確認した。すなわち、琉球石灰岩における物質移行は、二重空隙的な挙動を示すと同時に、大きな空隙が必ずしも主な流路になる訳ではない複雑な挙動を示すことが明らかになった。

二重空隙モデルによって、上記試験結果の濃度変化をシミュレーションできることを確認した。しかしながら、元来亀裂性岩盤を対象とする二重空隙モデルの入力パラメータに対して、計算で与えたパラメータに合理的な説明を与えることは困難である。したがって、複雑な空隙構造を有する琉球石灰岩に対して、二重空隙的な物質移行挙動を合理的に説明可能な新しい「空隙（構造）モデル化手法」が必要であることを示した。

3.6. 3章参考文献

- 1) 増岡健太郎 (2016) : マイクロフォーカス X 線 CT を用いた琉球石灰岩中の塩分濃度変化に関する実験的研究, 土木学会論文集 C (地圏工学), 72, 巻 2 号, pp.136-148, DOI: <https://doi.org/10.2208/jscejge.72.136>.
- 2) Gischler, E. (2007): Pleistocene facies of Belize barrier and atoll reefs, *Facies*, 53, 27–41, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10347-006-0086-9>.
- 3) Marshall, J.F. and Jacobson, G.: Holocene growth of a mid-Pacific atoll (1985): Tarawa, Kiribati, *Coral Reefs*, 4, 11–17, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00302199>.
- 4) Woodroffe, C.D. and McLean, R.F. (1998): Pleistocene morphology and Holocene emergence of Christmas (Kiritimati) Island, Pacific Ocean, *Coral Reefs*, 17, 235–248, DOI: <https://doi.org/10.1007/s003380050124>.
- 5) Vacher, H.L. and Quinn, T.M. (2004): *Geology and hydrogeology of carbonate islands*, *Developments in Sedimentology*, Vol.54, Elsevier.
- 6) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2012) : 地球温暖化対策技術普及等推進事業 モルディブ共和国における海洋深層水多段利用インフラ事業の案件組成調査, 平成 23 年度成果報告書.
- 7) Scholle, P.A. and Ulmer-Scholle, D.S. (2003): *A color guide to the petrography of carbonate rocks: Grains, textures, porosity, diagenesis*, AAPG Memoir 77.
- 8) 吉本周平, 土原健雄, 石田聡, 今泉眞之 (2008) : 炭酸塩岩帯水層における不飽和浸透に関する研究レビュー, 農工研技報, No.207, pp.109-126.
- 9) 横井研一, 佐藤隆一 (2004) : イラクの石油ポテンシャル—石油地質概要と南部の大規模未開発油田—, 石油技術協会誌, 第 69 巻, 第 1 号, pp.12-22, DOI: <https://doi.org/10.3720/japt.69.12>.
- 10) Konyuhov, A.I. and Maleki, B. (2006): The persian gulf basin: geological history, sedimentary formations and petroleum potential, *Lithology and mineral resources*, Vol. 41, No. 4, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024490206040055>.
- 11) Rashid, F., Glover, P.W.J., Lorinczi, P., Collier, R., and Lawrence, J. (2015): Porosity and permeability of tight carbonate reservoir rocks in the north of Iraq, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 133, pp-147–161, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.05.009>.
- 12) Hidajat, I., Mohanty, K.K., Flaum, M., and Hirasaki, G. (2004): Study of vuggy carbonates using NMR and X-ray CT scan-ning, *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, Vol.7, Is-sue 05, DOI: <https://doi.org/10.2118/77396-MS>.
- 13) 宮城調勝, 小宮康明 (2003) : 琉球石灰岩の有効空隙率と圧縮強度, 琉球大学農学部学術報告, Vol.50, pp.131-135.

- 14) 戸田裕之 (2019) : X 線 CT 産業・理工学でのトモグラフィー実践活用, 共立出版.
- 15) 佐藤晃 (2013) : X 線 CT 法による多孔質内流動現象の可視化と分析, 資源・素材 2013, pp.173-176.
- 16) 菊池喜昭, 水谷崇亮, 永留健, 畠俊郎 (2006) : マイクロフォーカス X 線 CT スキャナ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.
- 17) 熊本創, 下茂道人, 佐藤晃, 深堀大介, 内田雅大, 前川恵輔 (2008) : X 線 CT による亀裂を有する堆積岩中の移流および拡散現象の可視化, 第 43 回地盤工学研究発表会講演要旨集, pp.1051-1052.
- 18) Quinlan, J.F. and Ewers, R.O. (1985): Ground water flow in limestone terranes: Strategy, rationale and procedure for reliable, efficient monitoring of ground water quality in karst areas. Proceedings of 5th National Symposium and Exposition on Aquifer Restoration and Ground Water Monitoring, pp.197-234
- 19) Pruess, K., Oldenburg, C., and Moridis, G. (1999): TOUGH2 user's guide. Version 2.0, Report, LBNL-43134.
- 20) Pruess, K. and Narasimhan, T.N. (1982). On Fluid Reserves and the Production of Superheated Steam from Fractured, Vapor-Dominated Geothermal Reservoirs, Journal Geophysical Research, 87, B11, pp.9329-9339, DOI: <https://doi.org/10.1029/JB087iB11p09329>
- 21) Pruess, K. and Narasimhan, T.N. (1985). A Practical Method for Modeling Fluid and Heat Flow in Fractured Porous Media, Society of Petroleum Engineers Journal, 25, No.1, pp.14-26, DOI: <https://doi.org/10.2118/10509-PA>.
- 22) 地盤工学会 (2002) : 地盤工学・実務シリーズ 15 土壌・地下水汚染の調査・予測・対策
- 23) 藤縄克之 (2010) : 環境地下水学, pp.179-207, 共立出版.

第4章 X線 CT スキャンによる琉球石灰岩中の空隙特性¹⁾

4.1. はじめに

第3章では、フローティング型地下ダム^{2),3)}における淡水の貯留過程を模擬した塩水淡水置換の室内トレーサー試験を琉球石灰岩を用いて実施し、同石灰岩中の空間的に独立性の高い空隙(浸透率の低いマトリックス内の空隙やマトリックスに囲まれた空隙)からの拡散によって濃度低下傾向の減衰(テーリング)が生じることが分かった。

フローティング型地下ダムにおける淡水の貯留過程を数値シミュレーション等で予測するためには、ダム内部の淡水貯留層となる第四紀石灰岩層におけるテーリングのメカニズムの理解と合わせて、幅広い大きさの空隙を有する琉球石灰岩の空隙特性を把握することが不可欠である。

亀裂性岩盤においては、空隙特性の把握に関して亀裂分布の特徴を明らかにするための研究が多く行われている。たとえば、Nakaya et al. (2003)⁴⁾、Nakaya (2005)⁵⁾、Nakaya and Nakamura (2007)⁶⁾は、岩盤の破壊長と位置の両方でフラクタルであるバイナリフラクタル亀裂ネットワークモデルを提案している。ただし、堆積岩で溶解や続成作用を受けた第四紀石灰岩の空隙形状は、亀裂性岩盤のものとは全く異なる。岩石物理学的アプローチでは、岩石の空隙率と空隙径分布を決定するいくつかの方法が示されている⁷⁾。ただし、これらの方法の多くは、最大空隙径が約100 μmの岩石を対象としており、最大空隙径が数センチメートル以上であるような第四紀石灰岩の空隙構造の調査には適していない。

一方、近年、物体を非破壊かつ三次元で可視化可能なX線コンピューター断層撮影(X線CT)が、岩石の空隙構造に関する多くの研究で利用されている(たとえば、Blunt et al. 2013⁸⁾)。しかし、X線CTの解像度とサンプルサイズは相反関係であり、供試体の大きさによってX線CTで識別可能な空隙サイズが制約される。したがって、大小のサイズの空隙が複雑に入り組んで存在する琉球石灰岩のような岩石の場合、一つの大きさのコアに対するX線CT撮影では、空隙構造の調査という観点で十分とは言えない。これまで、第四紀石灰岩の空隙特性を幅広いスケールで調査した研究事例は見られず、特に琉球石灰岩の空隙体積と表面積の特性および数値シミュレーションへのモデル化を念頭に置いた空隙形状に関する研究事例は無い。

そこで本研究では、幅広いサイズスケールで琉球石灰岩の空隙体積と表面積の特性を見出すことを目的として、直径が異なる18個の琉球石灰岩コアに対してX線CT撮影を実施した。また、数値シミュレーションによるモデル化を見据えて、複雑な空隙形状を単純化するための新しい方法を提案する。

4.2. 試験方法

4.2.1. 供試体

第3章で用いた D100 コア（直径 100mm コア）と D50 コア（直径 50mm コア）に直径約 6mm の D6 コアを加えた、直径が異なる 18 体の琉球石灰岩コアを供試体として用いた。D100 コアは3章で用いたコアと同じ 8 体を供試体とした。D50 コアは、3章で用いたコアに 1 本を追加作成して合計 2 体を供試体とした。D6 コアは、D50 コアの X 線 CT スキャン後に、同コアをリコアリングすることで直径 6mm の小径コアを 8 体作成した。3章と同様に、「D100」、「D50」、「D6」に枝番号を付けた表記で各供試体を表す。なお、D50 コアについては、D50-1 が第3章の試験に利用したコアである。D100、D50、D6 供試体の外観の例を図 4-1 に示す。D100-1～8、D50-1～2 供試体の外観については付録 B（図 B-1～図 B-10）に示す。

各供試体の主要諸元を表 4-1 に示す。供試体長さは、D100 と D50 はそれぞれ約 100mm、50mm で、D6 は削孔したコアにより異なり、おおむね 30mm である。乾燥密度は 2.110～2.298Mg/m³、空隙率は 0.147～0.217（3章で用いた粒子密度 2.694Mg/m³ を使用して計算）である。D6 コアに関しては、端面が未整形で体積を測定することができないので、表中には後述する水銀圧入試験（MICP : Mercury injection capillary pressure）結果の値を参考値として括弧書きの数字で示している（乾燥密度、空隙率）。

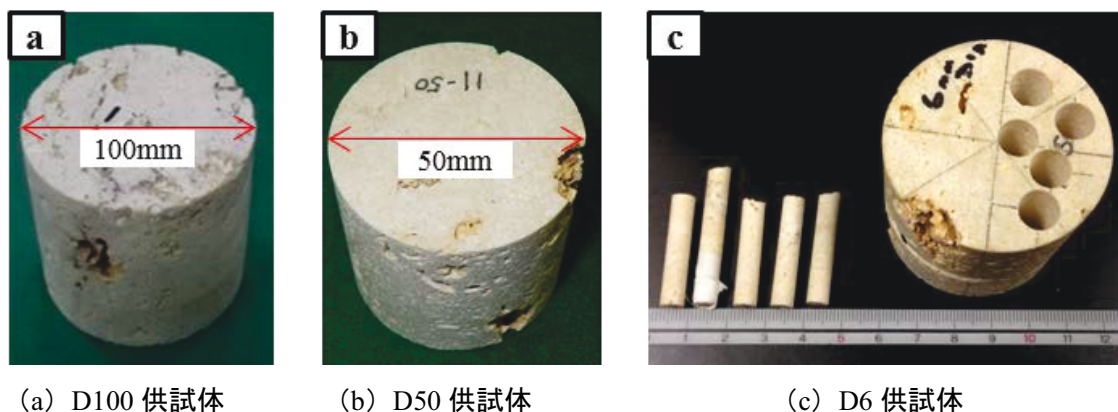


図 4-1 供試体の外観

表 4-1 円柱状供試体の主要諸元

供試体分類	D100	D50	D6
直径 [mm]	100	50	6
数量	8	2	8
長さ [mm]	約 100	約 50	約 10
乾燥密度 [Mg/m ³]	2.110~2.278 (平均 2.210)	2.251、2.298 (平均 2.275)	(2.283 [※])
空隙率	0.154~0.217 (平均 0.180)	0.147、0.164 (平均 0.156)	(0.153 [※])
採取元	ブロックサンプル		D50 供試体

※ 水銀圧入試験結果による値

4.2.2. 供試体前処理

X線 CT 撮影では、供試体の空隙部分を CT 画像上で識別しやすくするために、絶乾させた供試体を使用した。供試体を乾燥させる過程で、元来、岩石内部に含まれる塩水によって塩分が析出することを避けるために、乾燥前に供試体を蒸留水で洗浄した。洗浄は供試体を蒸留水に 1 週間以上浸漬し、供試体を浸した蒸留水の導電率がほぼ上昇しないことを確認することで、供試体の洗浄が十分に行われたと判断した。洗浄後、供試体を約 110°C の乾燥炉で 2~3 日間静置して絶乾させた。供試体を室温 (20°C) までデシケータ内で自然冷却して X線 CT の撮影に供した。

4.2.3. X線 CT 撮影

供試体のサイズ毎に 2 種類の産業用マイクロフォーカス X線 CT (VersaXRM-500X、inspeXio SMX-225CT FPD) を使用して X線 CT 撮影を行った。一例として D6 供試体の撮影時の様子を図 4-2 に、各供試体の X線 CT 撮影の条件を表 4-2 に示す。D100 供試体撮影時の解像度は 119 μ m、D50 供試体撮影時は 55 μ m、D6 供試体撮影時は 3 μ m である。ボクセル数は D100 供試体で 1024 \times 1024 \times 1024、D50 供試体で 1024 \times 1024 \times 1024、D6 供試体で 2000 \times 2048 \times 2008 である。撮影で得られた CT 画像の D100 供試体の例を図 4-3、D50 供試体の例を図 4-4、D6 供試体の例を図 4-5 に示す (各供試体の X線 CT 画像については付録 C の図 C-1~図 C-18 を参照)。各 CT 画像の白色部分はマトリックス部分(空隙率の低い部分)を示し、黒色部分は空隙を示す。灰色部分はマトリックス部分と空隙の間で、マトリックス部ほど緻密でない多孔質部分となる。

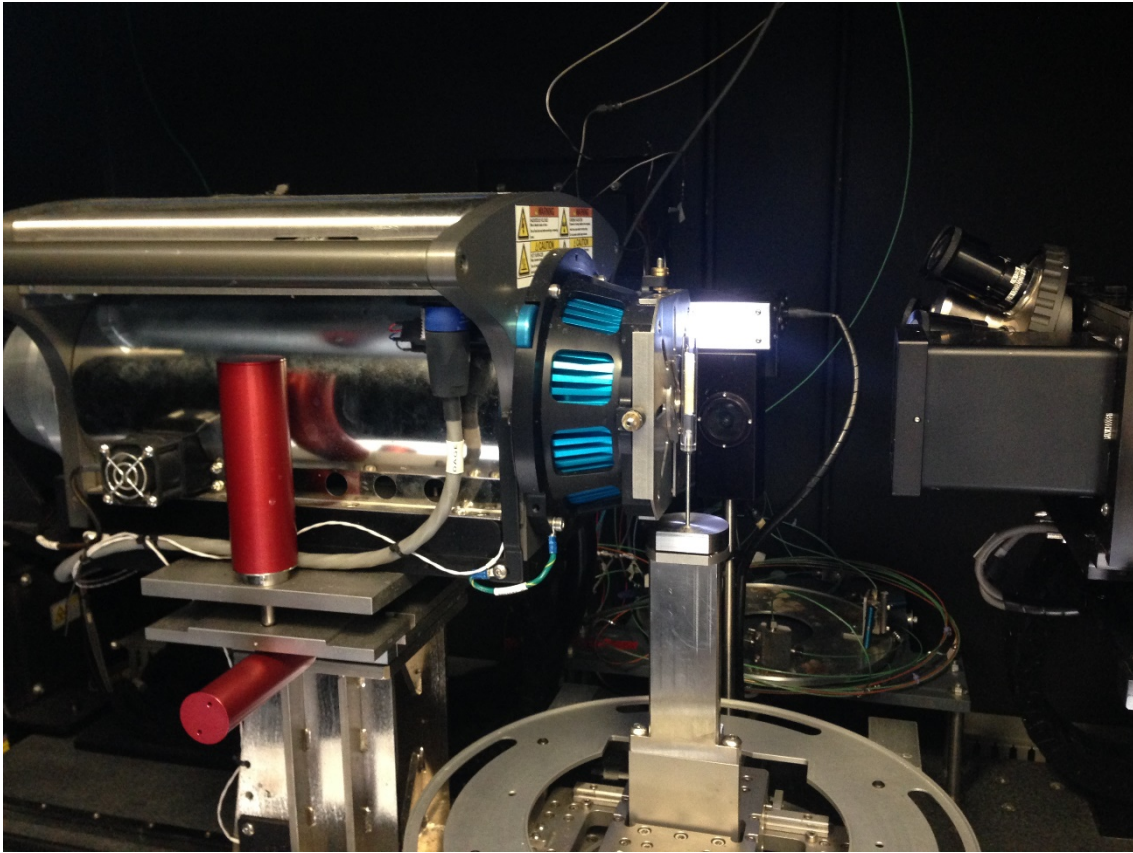


図 4-2 D6 供試体の X 線 CT 撮影の様子 (VersaXRM-500X)

表 4-2 X 線 CT 撮影条件

供試体分類	D100	D50	D6
X 線 CT 装置名称	inspeXio SMX-225CT FPD		Versa XRM-500 X-Ray Microscope
解像度(ボクセルサイズ) [μm]	119	55	3
ボクセル数	1024^3	1024^3	$2000 \times 2048 \times 2008$
撮影視野体積 [mm^3]	122^3	56^3	6^3
X 線管電圧 [kV]	220	200	80
X 線管電流 [μA]	250	160	88
トリミング後ボクセル数 (画像解析対象)	500^3	500^3	1000^3
トリミング後視野体積 [mm^3]	60^3	28^3	3^3

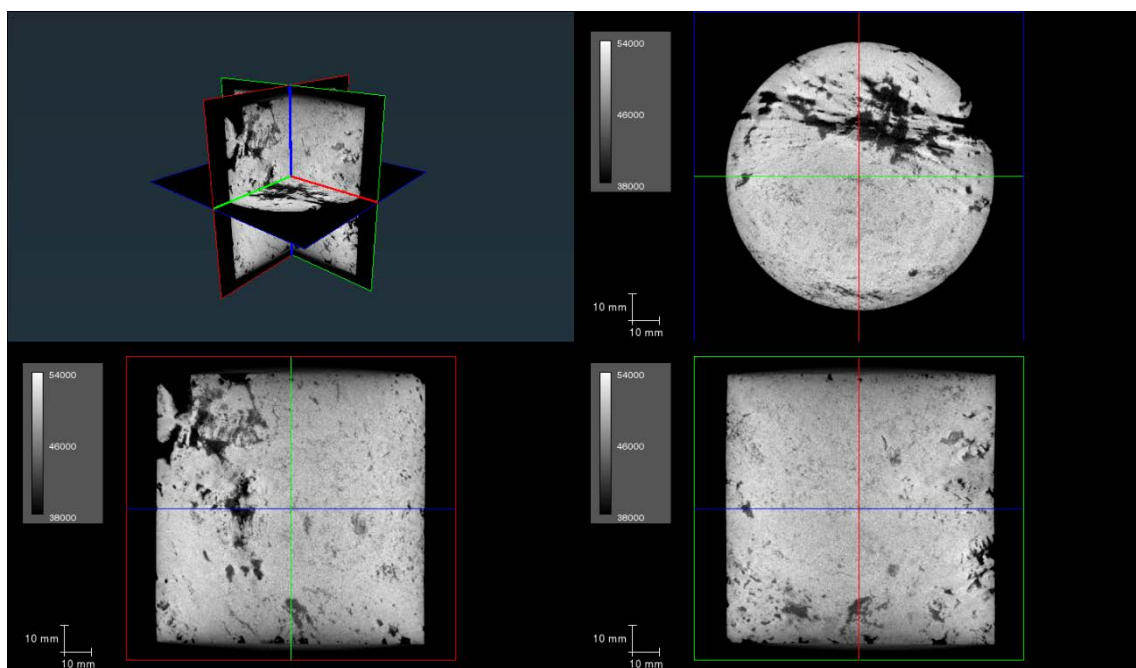


図 4-3 D100 供試体の X 線 CT 画像の例（解像度 119 μ m）

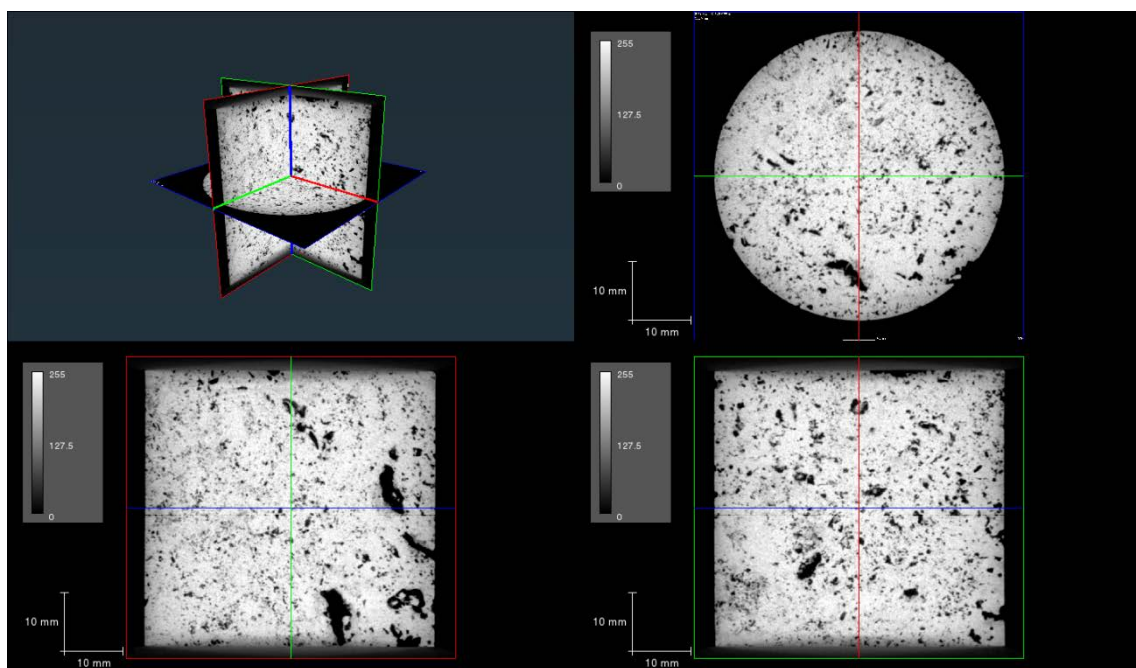


図 4-4 D50 供試体の X 線 CT 画像の例（解像度 55 μ m）

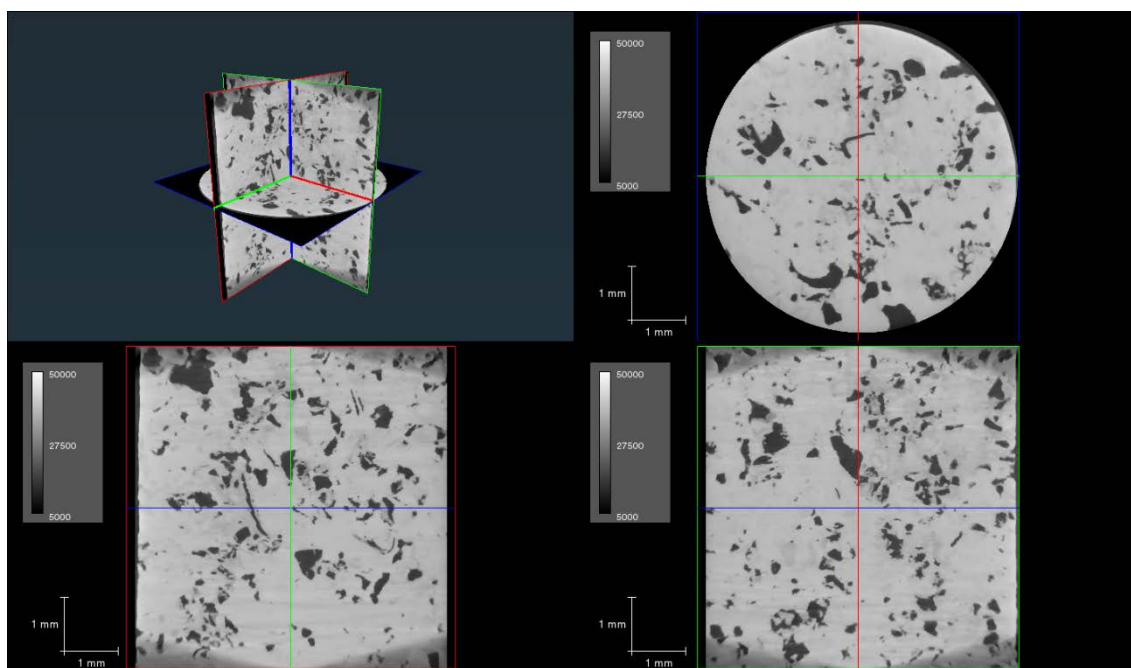


図 4-5 D6 供試体の X 線 CT 画像の例（解像度 3 μ m、フィルター処理後）

4.2.4. 水銀圧入試験

X 線 CT での撮影が困難であるサブミクロンスケールの非常に小さい空隙径の分布を調べるために、D6 供試体の CT 画像の撮影後、供試体の一部を破砕して複数の小岩片を作成して水銀圧入試験（MICP : Mercury Injection Capillary Pressure test）を行った。MICP 試験に供した小岩片の乾燥重量の合計は 2.1235g である。試験で用いた小岩片の様子を図 4-6 に示す。



図 4-6 水銀圧入試験で用いた琉球石灰岩の小岩片

4.2.5. X線 CT 画像からの空隙ボクセルの抽出

CT 画像から空隙構造を評価する際のアーチファクト（ビームハードニング）の影響を低減するために、評価に用いる CT 画像が供試体中央付近のみの CT 画像となるように、元の CT 画像をトリミングした。トリミングは、トリミング後の CT 画像のボクセル数が D100 供試体の CT 画像で $500 \times 500 \times 500$ 、D50 供試体で $500 \times 500 \times 500$ 、D6 供試体で $1000 \times 1000 \times 1000$ となるように行った。トリミング後の CT 画像の画像視野サイズは、D100 供試体で $60\text{mm} \times 60\text{mm} \times 60\text{mm}$ 、D50 供試体で $28\text{mm} \times 28\text{mm} \times 28\text{mm}$ 、D6 供試体で $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 3\text{mm}$ である。その後、撮影に伴うノイズ除去のため Non-local mean フィルター^{9),10)}をトリミング後の CT 画像に適用した。

トリミング後の CT 画像に対して、ボクセルを空隙部分（CT 画像での黒色部分）と空隙以外の部分（白色～灰色部分）の二つに分ける二値化処理を行った。具体的には、CT 画像に対して閾値を設定し、閾値以上の CT 値のボクセルと閾値未満の CT 値のボクセルで CT 画像を二値化する。閾値の設定値は、CT 画像上で明瞭な空隙形状が二値化処理でとらえられることを目安に設定した。トリミング後のフィルタリングから二値化までの画像の例を図 4-7 に示す。図 4-7a はトリミング後の CT 画像である。これに対して、Non-local mean フィルターを施した画像が図 4-7b である。大きな空隙の形に基づいて閾値を決定し、CT 画像を空隙部とそれ以外の部分に二値化した画像が図 4-7c である。さらに、図 4-7a と図 4-7b の画像の CT 値のヒストグラムと、設定した閾値について図 4-7d に示す。

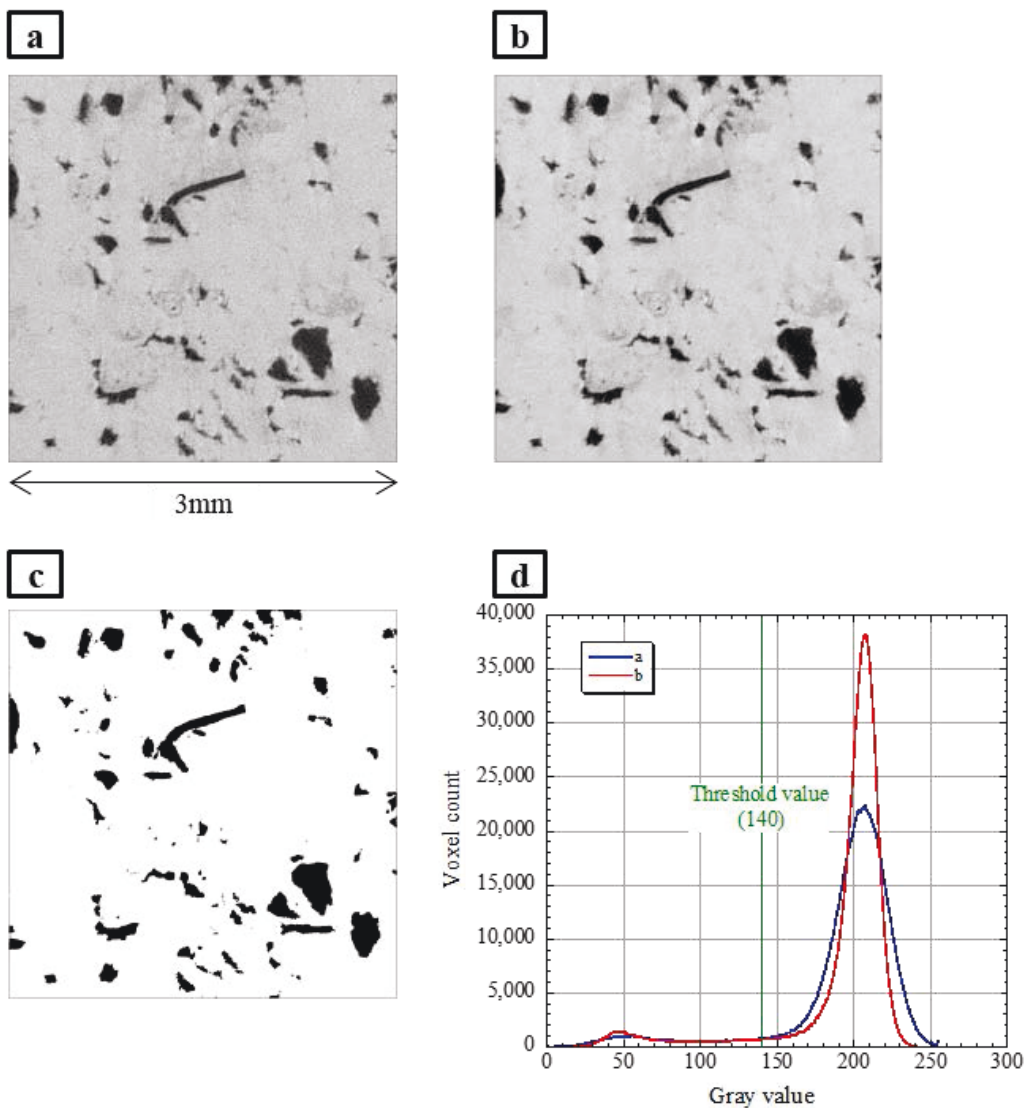


図 4-7 D6 供試体 CT 画像の二値化（空隙部分ボクセルの抽出）プロセス. (a) トリミング後の CT 画像、(b) フィルター後の CT 画像、(c) 二値化画像、(d) 二値化のための閾値.

4.2.6. 二値化画像を用いた空隙クラスター解析

二値化画像の空隙ボクセルに対して、連続する空隙を一つの空隙クラスターとして考える。そして、全ての空隙クラスターの体積と表面積を計算し、大きさ毎の頻度分布を作成する空隙クラスター解析を行った。

空隙ボクセルの連続性の判定基準を図 4-8 に示す。二つの空隙ボクセルの連続性は、空隙ボクセルの 6 つの面のうちの一つがもう一方の空隙ボクセルの面と接触している場合とした^{11), 12)}。そして、連続性を有する空隙ボクセルは、同じ空隙クラスターに属するものとしてラベル付けする (図 4-8a)。二つの空隙ボクセルが面接触していない場合、これらの空隙ボクセル間には連続性がないものとし、それぞれ別の空隙クラスターであるとして異な

る番号の空隙クラスターとしてラベル付けされる（図 4-8b）。

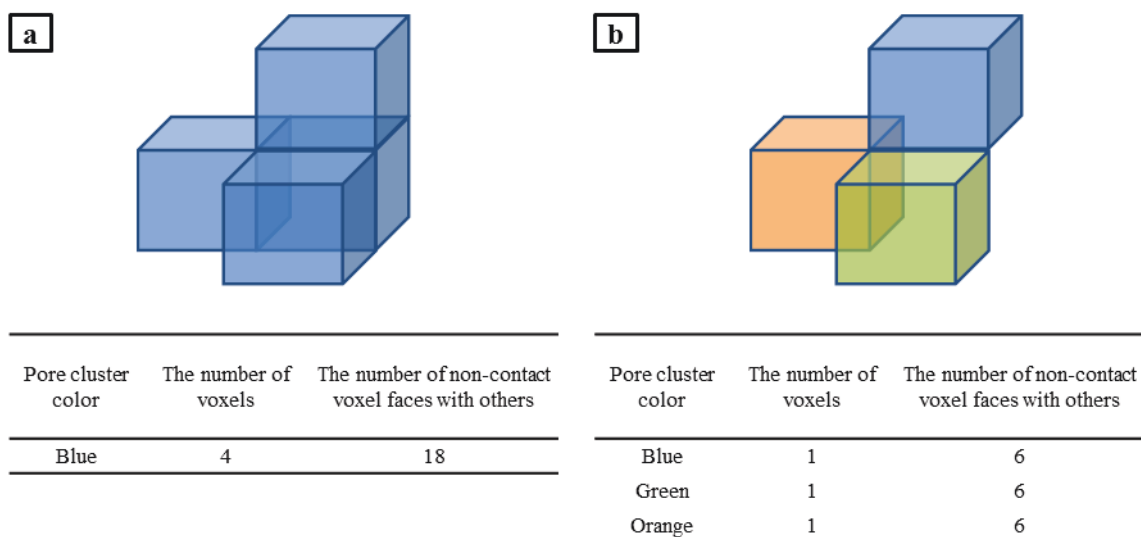


図 4-8 空隙ボクセルの連続性判定. (a) 連続性あり, (b) 連続性なし

各空隙クラスターの体積は、ボクセル一つの体積と空隙クラスターを構成するボクセル数を乗じることで計算した。空隙クラスターの表面積は、ボクセルの一つの面の面積と別のボクセルと接触していないボクセルの面の数を乗じることで計算した。一例として、図 4-8a のように、ボクセル形状が一辺 $3\ \mu\text{m}$ の立方体である場合、ボクセル一つの体積は $27\ \mu\text{m}^3$ であり、空隙クラスターを構成するボクセルの数は 4 であることから、空隙クラスターの体積は $108\ \mu\text{m}^3$ と計算される。空隙クラスターの表面積は、ボクセルの一つの面の面積は $9\ \mu\text{m}^2$ であり、別の空隙ボクセルと接触していない面の数は 18 であり、空隙クラスターの表面積は $162\ \mu\text{m}^2$ と計算される。同様に、図 4-8b では、ボクセル一つの体積は $27\ \mu\text{m}^3$ 、ボクセルの一面の面積は $9\ \mu\text{m}^2$ 、各空隙クラスターを構成するボクセルの数はそれぞれ 1 であることから、各空隙クラスターの体積は $27\ \mu\text{m}^3$ であり、表面積は $54\ \mu\text{m}^2$ となる。

上記の空隙クラスター解析を各供試体の二値化画像のすべての空隙ボクセルに対して実行し、すべての空隙クラスターの体積と表面積を計算した。そして、全空隙クラスターの体積と表面積に対して、大きさで区分した頻度分布を作成した。空隙クラスター解析に用いたプログラムを付録 F に記す。

4.3. 試験結果

4.3.1. 水銀圧入試験結果

水銀圧入試験結果より、試験に供した小岩片の体積の合計は 0.93cm^3 と測定された。MICP 試験による空隙径と水銀圧入量の関係を図 4-9 に示す。図は空隙径と水銀圧入量の関係を示す。小さな空隙径に圧入できる水銀量は、水銀の界面の表面張力と注入圧に依存する。したがって、水銀の注入圧によって空隙径が決定し、空隙径と体積（水銀圧入量）の関係が得られる。図 4-9 より、琉球石灰岩の空隙の最小径はナノメートルのスケールまで分布することが分かる。これに加えて、D100 供試体などでは、外観上、目視で容易に観察できる空隙も存在する。なお、試験で得られた空隙率は 0.153 である。以上を考慮すると、琉球石灰岩の空隙径は、ナノメートルから数十ミリメートルの範囲の広い分布を有するものと判断できる。

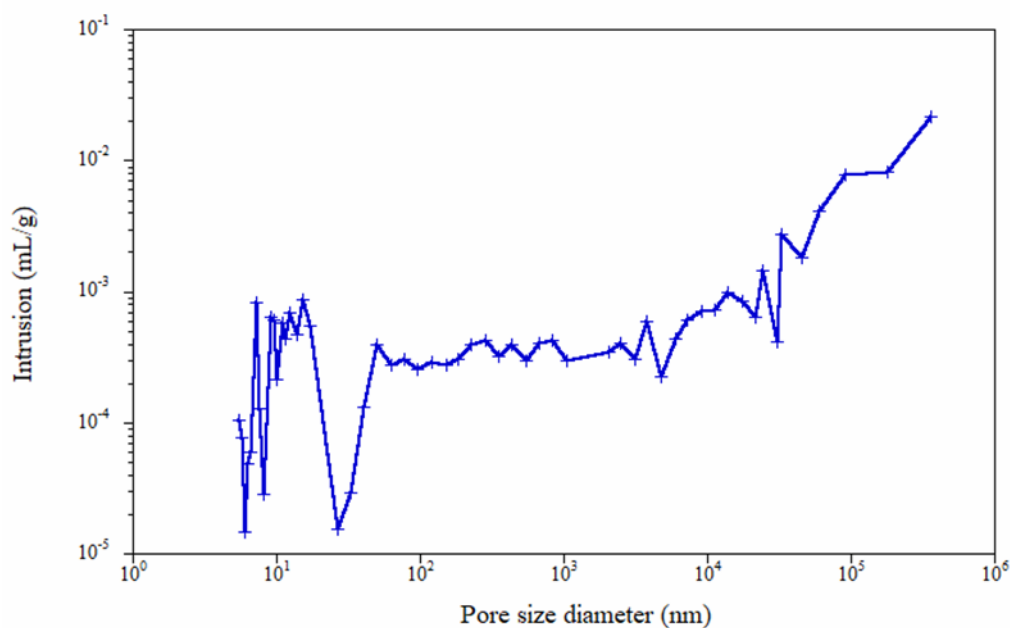


図 4-9 MICP 試験結果（空隙径と水銀圧入量の関係）

4.3.2. 空隙クラスターの比表面積

D100 供試体の空隙クラスターを三次元可視化した結果を図 4-10a に示す。ここで表示される空隙クラスターは、解像度 119 μm で識別された空隙ボクセルによって作成されたもので、領域内の全ての空隙クラスターを反映している結果ではない。なお、図 4-10b は、複雑な形状を見やすくするために、図 4-10a から体積が 10mm^3 を超える空隙クラスターのみを表した画像である。各画像とも、近接する空隙クラスターで異なる色となるように配色されている。

表示領域（二値化画像の全ボクセル）における空隙ボクセルの体積比率の平均は、D100 供試体で 0.119、D50 供試体で 0.091、D6 供試体で 0.102 となり、全ての供試体で空隙ボクセルの体積比率（空隙率に相当）は、試験で測定された空隙率の平均値（表 4-1 参照）より小さい。これは、撮影解像度で空隙として識別されなかった分の空隙が存在すること、すなわちオリジナルの X 線 CT 画像における灰色部分に存在する空隙を無視していることに起因する結果だと考えられる。MICP 試験結果から空隙径の分布がナノメートルのサイズに及ぶ結果であることにも整合する。

また、本研究で計算された空隙パラメータを、別の琉球石灰岩コア（沖縄本島南部の海岸で採取）の結果¹³⁾と比較した一覧を表 4-3 に示す。X 線 CT で識別可能な空隙の体積割合は約 0.1（10%）前後で、評価対象とするサイズで大きく変化しない結果となった。一方で、比表面積と評価対象とするサイズを比較した結果を図 4-11 に示す。図より、両対数グラフ上で、評価対象とするサイズが小さくなると比表面積は大きくなる線形関係が得られた。

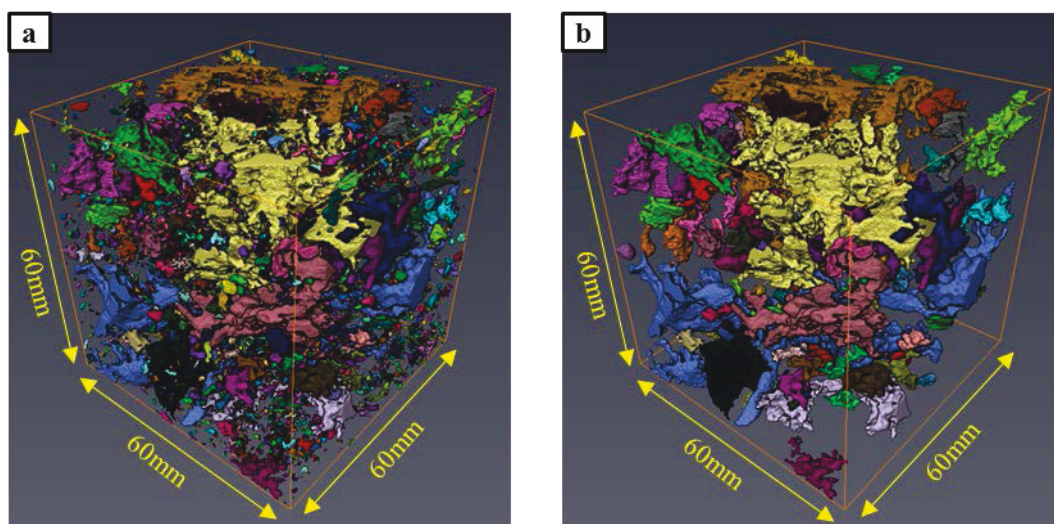


図 4-10 D100 供試体の空隙クラスターの三次元可視化の例。(a) 識別した全ての空隙クラスター、(b) 10mm^3 を超える体積の空隙クラスター。

表 4-3 X線CTを用いて計算される琉球石灰岩の空隙に関するパラメータ

	評価対象部分 の体積 (cm ³)	空隙体積 (cm ³)	表面積 (m ²)	比表面積 (m ² /L)	空隙率
D100 (平均)	210.6	25.1	0.122	4.86	0.119
D50 (平均)	20.74	1.895	0.027	14.25	0.091
D6 (平均)	0.027	0.0027	0.00020	74.07	0.102
別供試体 (沖縄本島南部にて採取)	1233.7	108	0.485	4.49	0.09

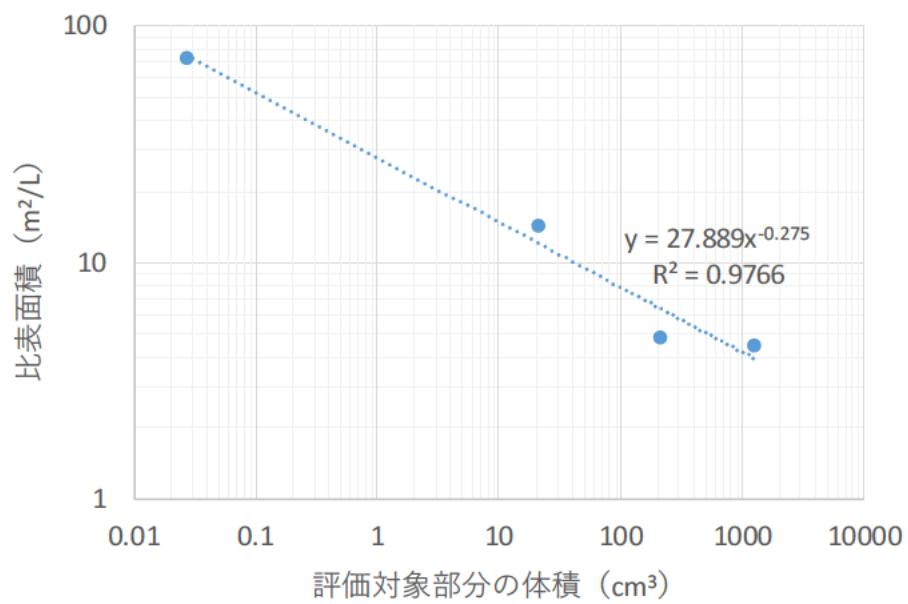


図 4-11 評価体積と比表面積の関係

4.3.3. 空隙クラスターの体積のヒストグラム

空隙クラスターの体積の頻度分布を図 4-12a に示す。X 軸は空隙クラスター体積の対数で、Y 軸の N は体積が V より大きい空隙クラスター数（累積数）を示す。D100、D50、D6 のプロットはそれぞれの供試体毎に計算した（D100：青色、D50：緑色、D6：橙色）。すなわち、D100 では 8 体、D50 では 2 体、D6 では 8 体、各々の供試体で分布を計算した。D100、D50、D6 のプロット毎に作成した回帰線（最小二乗法）を図 4-12b に示す。各供試体の $\log V$ と $\log N$ の間には両対数で線形関係が得られた。D6、D50、D100 での分布の違いは、二値化画像の範囲と解像度の違いによる。したがって、得られた空隙クラスターの体積の度数分布が、対象とする領域が大きくなった場合にも同じ直線上になるか確認するために、得られたデータを単位体積あたりに換算する処理を行って考察した。

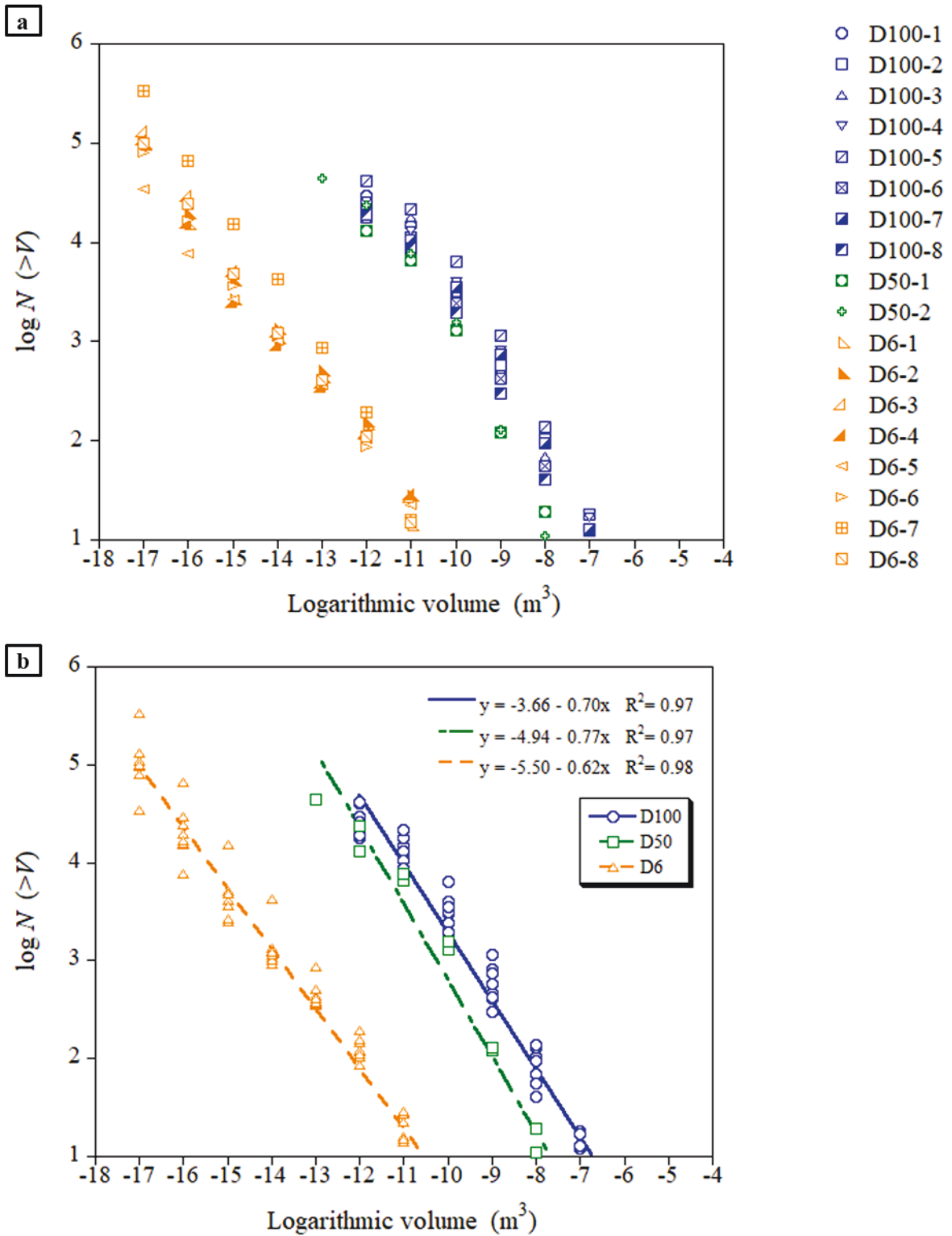


図 4-12 空隙クラスターの体積の頻度分布. (a) 供試体毎のプロット, (b) D100、D50、D6 毎のプロットと回帰線 (最小二乗法)

4.3.4. 空隙クラスターの表面積のヒストグラム

空隙クラスターの表面積のヒストグラムを図 4-13a に示す。X 軸は空隙クラスター表面積の対数で、Y 軸の N は表面積が S より大きい空隙クラスター数（累積数）を示す。D100、D50、D6 のプロットはそれぞれの供試体毎に計算したプロットである（D100：青色、D50：緑色、D6：橙色）。すなわち、D100 では 8 体、D50 では 2 体、D6 では 8 体、各々の供試体で分布を計算した。D100、D50、D6 のプロット毎に作成した回帰線（最小二乗法）を図 4-13b に示す。各供試体の $\log S$ と $\log N$ の間には両対数で線形関係が得られた。D6、D50、D100 の違いは、二値化画像の範囲と解像度の違いによる。したがって、得られた空隙クラスターの体積の度数分布が、対象とする領域が大きくなった場合にも同じ直線上になるかどうか確認するために、得られたデータを単位体積あたりに換算する処理を行って考察した。

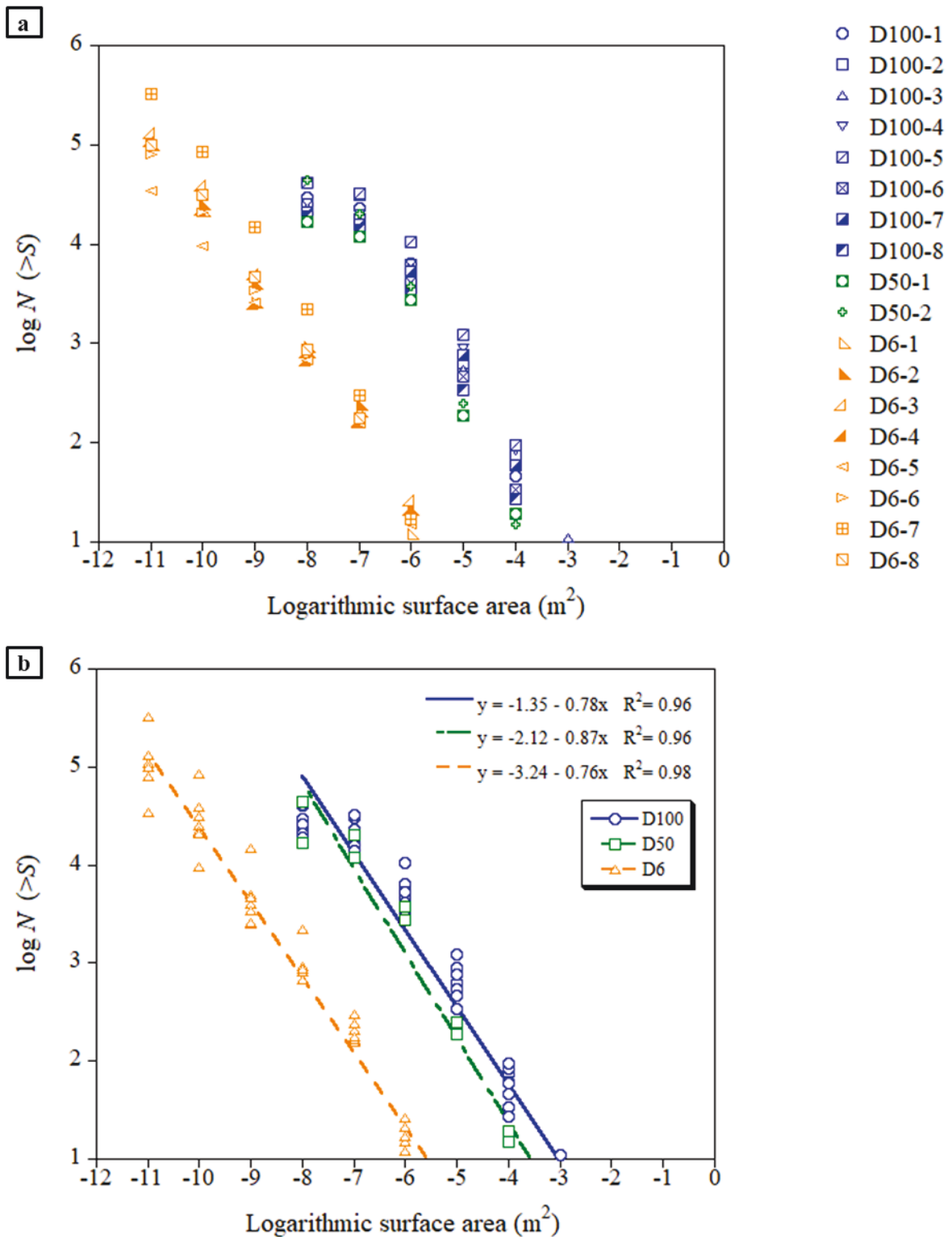


図 4-13 空隙クラスターの表面積の頻度分布. (a) 供試体毎のプロット, (b) D100、D50、D6 毎のプロットと回帰線 (最小二乗法)

4.4. 考察

4.4.1. 空隙クラスターの形状に関する特徴

図 4-10a は、D100 供試体の空隙クラスターを三次元可視化した結果である。図中の色は、近くの空隙クラスター同士を区別できるように、空隙クラスターにランダムに割り当てられている。したがって、同色のクラスターが広範囲にまとまって存在していないことから、本解像度で識別可能な多くの空隙クラスターが存在するけれども、それぞれの空隙クラスターが本解像度で連続していないことが分かる。したがって、多くの空隙クラスターは、ここで設定した解像度より小さい径の空隙で繋がっているものと考えられる。

さらに、大きい空隙を対象に絞って考察する。図 4-10b は 10mm^3 を超える体積を持つ大きな空隙クラスターのみを表示したものである。図から明らかなように、これらの空隙クラスターは、ここでの解像度では互いに連続していない。しかし、MICP 試験結果がナノメートルスケールの空隙の存在を示すことを考慮すれば、琉球石灰岩の空隙は、体積が大きくても空間的に独立性の高い（他の大きな空隙とは非常に小さい径の空隙を介して連続する）大きな空隙として存在する可能性も示唆される。

以上の結果より、琉球石灰岩内部の空隙形状に関する特徴として、複数の大きな空隙が近接して存在していても連続性が乏しいなど、大小の空隙が不均質に分布する非常に複雑な空隙構造であることが示された。この結果は、3章で行った X 線 CT を用いた室内トレーサー試験結果で、近接する大きな空隙で濃度低減挙動が異なる結果に対する考察と同様である。この非常に複雑な空隙構造が形成される原因として、琉球石灰岩が比較的新しい時代に堆積した石灰岩であることから、堆積物（サンゴ片や有孔虫など）の骨格などによる微細な一次空隙を残しつつ、溶結や続成作用によって大きい空隙が形成されたためと考えられる。

4.4.2. 空隙クラスターの体積および表面積の分布特性

図 4-12b で、各コアの $\log N$ と $\log V$ の線形関係を示す傾きの平均値は、D100 供試体で-0.70、D50 供試体で-0.77、D6 供試体で-0.62 となった。各供試体で $\log N$ と $\log V$ の間に線形関係が存在することから、空隙クラスターの体積の分布が各供試体でフラクタル特性を示すことを意味する。また、異なる大きさの供試体で同様の勾配値が得られており、上記のフラクタル特性が広範囲のサイズスケールで成り立つ可能性が示唆された。しかしながら、これらのプロット範囲は、供試体毎に、供試体のサイズで制限されるため、そのままでは得られた特性の広範囲のサイズスケールでの評価が行えない。そこで、得られたプロットを単位体積 (1m^3) あたりの値に変換することで各供試体の結果を正規化し、広範囲のサイズスケールでの体積と表面積の分布を評価した。

正規化を行う前に、決定係数 R^2 に基づいて、供試体毎に得られたプロットのうち有効と判断されるプロットを選定した。ここで、有効なプロットは、プロットが空隙クラスターの体積または表面積に対して十分な解像度で得られた値であることを意味する。例えば、解像度が十分でない場合、空隙クラスターの数は、体積または表面積の小さい側で過小に評価される傾向が出る (頻度が少なくなる)。したがって、次の式を使用して計算される R^2 に基づいて、信頼性の低い小さい側のプロットを除く処理を行った。

$$SS_{\text{tot}} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (4-1)$$

$$SS_{\text{res}} = \sum_i (y_i - f_i)^2, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (4-2)$$

$$f = a + b \log x \quad (4-3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{res}}}{SS_{\text{tot}}} \quad (4-4)$$

ここで、 y は N の対数、 N は V または S よりも大きい属性を持つ空隙クラスターの数、 f はプロットの回帰線で予測される空隙クラスターの数の対数で、 a と b は定数として $f = a + b \log x$ と表される。 x は空隙クラスターの体積 V または表面積 S 、 \bar{y} は y の算術平均、 m は V または S の有効プロットの分布範囲を示す数で、全プロット数から有効でないプロット数を引いた値となる。下付き文字 i を持つ N は V_i または S_i に対応し、 i は R^2 を計算する際に使用するプロットの番号を意味する整数である。

回帰線は、 V_1 から V_i までの番号が付けられたプロットを使用して作成した。 m を変更することにより、いくつかの分布範囲のプロットに対して回帰線を作成した。 m の値が最大値の場合 (全プロットを使用する場合) から 1 ずつ引いた場合で回帰線を作成して R^2 を計算し、

回帰線を作成するプロット範囲毎の R^2 を比較した。最も大きい R^2 が計算された m のプロット範囲を有効プロットとした。ただし、有効プロット数の下限を4とした ($m \geq 4$)。同様の操作をすべての供試体プロットに対して実行した。その後、広範囲のサイズにわたる空隙クラスターの変換された度数分布を作成するために、抽出した有効プロットを使用した。

有効プロットを岩石の単位体積 (1m^3) あたりの値に変換するために、空隙クラスターの数 N に、評価領域の体積に対する単位体積の比率を乗じた。評価領域の体積は、D100 で約 $211\text{cm}^3 (= (0.0119[\text{cm}] \times 500)^3)$ 、D50 で $21\text{cm}^3 (= (0.0055[\text{cm}] \times 500)^3)$ 、D6 で $0.027\text{cm}^3 (= (0.0003[\text{cm}] \times 1000)^3)$ である。したがって、単位体積 (1m^3) に対する評価領域の比率は、D100 で約 $4739 (=100^3/211)$ 、D50 で $47619 (=100^3/21)$ 、D6 で $37037037 (=100^3/0.027)$ と計算された。単位体積あたりで考えた $\log N_b$ と $\log V$ の関係を図 4-14 に、 $\log N_b$ と $\log S$ の関係を図 4-15 に示す。ここで、 N_b は V (または S) より大きい体積 (または表面積) である空隙クラスターの 1m^3 あたりの数 (累積数) となる。プロットの回帰線も併せて図 4-14 と図 4-15 に示す。

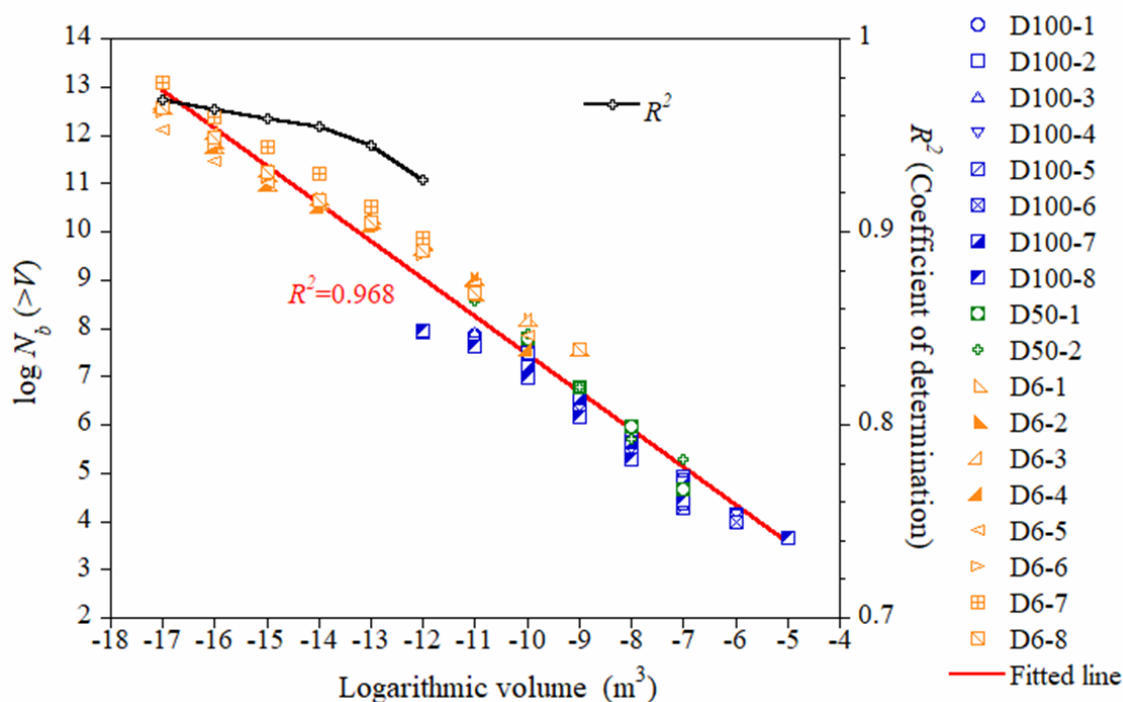


図 4-14 1m^3 あたり空隙クラスターの体積の頻度分布

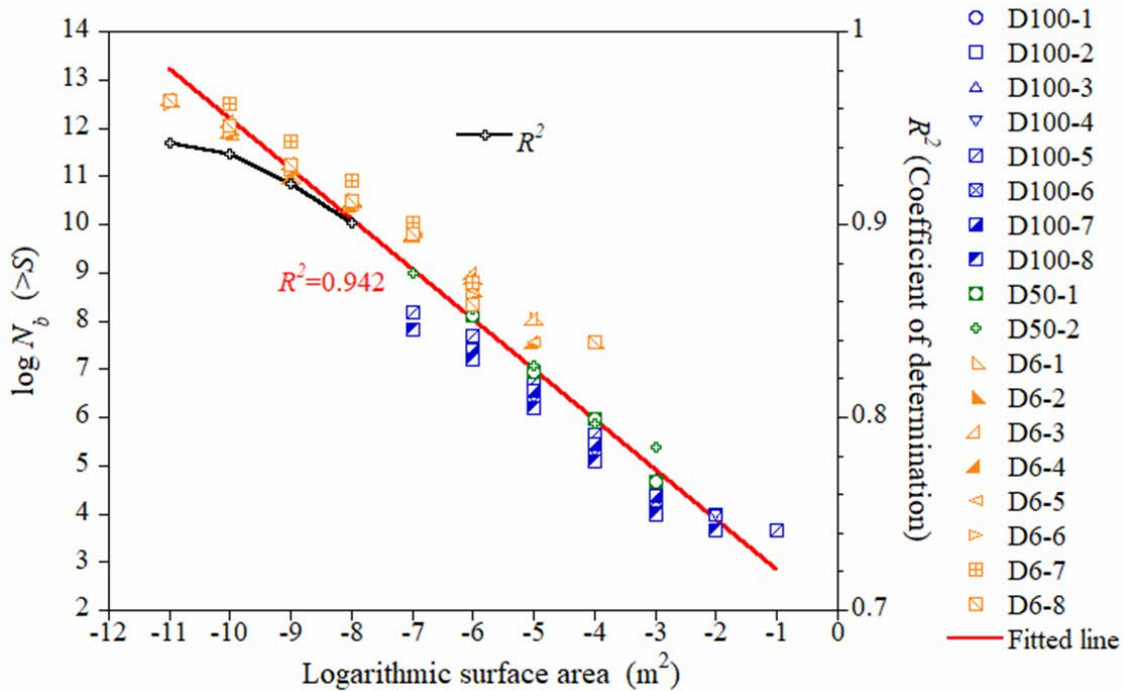


図 4-15 1m³ あたり空隙クラスターの表面積の頻度分布

図 4-14 からは、 $\log V$ が-17~-5 のすべてのプロットを使用した場合、回帰線は $R^2 = 0.968$ と最も高い値となった。また、図 4-15 からは、 $\log S$ が-11 から-1 のすべてのプロットを使用した場合、回帰線は $R^2 = 0.942$ と最も高い値となった。すなわち、空隙クラスターの体積および表面積の度数分布では、両対数グラフ上で、空隙体積が 12 桁、空隙表面積が 10 桁と非常に広範囲のサイズスケールで線形関係が得られた。これは、琉球石灰岩の空隙体積と空隙表面積の三次元分布は、いずれも広範囲のサイズスケールでフラクタルであることを示す。これを本研究ではバイナリフラクタルと呼ぶ。

Wu et al. (2012)¹⁴⁾は、フラクタル理論を適用して、石灰岩の空隙構造の複雑さを、SEM 画像から得られた空隙境界線のフラクタル次元で表している。研究で得られたフラクタル次元は異なる SEM 倍率間で平均 1.59 であり、石灰岩が優れたフラクタル体であり、その複雑さをフラクタル次元によって評価できることを示した。しかし、この研究結果は石灰岩の 2 次元の SEM 画像から得られたものであり、石灰岩内部の 3 次元の空隙分布がフラクタルであるという結果は得られていない。さらに、彼らの研究で使用された石灰岩の堆積年代は中生代の三畳紀で、新生代第四紀の琉球石灰岩よりも古い地質年代であり空隙径も小さい。

本研究で得られた琉球石灰岩の空隙体積と空隙表面積の三次元分布でのバイナリフラクタル性に基づいて、フラクタルがスケールフリーであることから、実スケールでの数値モデリングに拡張して利用できる可能性があると考えられる。Sok et al. (2010)¹⁵⁾は、マイクロ

フォーカス X 線 CT、SEM、FIB-SEM 技術を利用してより細かい解像度での画像を取得し、プラグスケールでの CT 画像の多孔質領域のボクセルにデータを補完する手法を示している。しかし、この方法はデータの内挿であり、アップスケールモデルの作成には適していない。また、空隙堆積および空隙表面積の特性について、利用されたサイズ範囲内であっても示されていない。

4.4.3. 空隙クラスターの形状の単純化

岩石中の水と岩石の地化学的反応は、空隙体積は反応物質の量、空隙表面積は反応面積として、両方が影響する。したがって、環礁島の帯水層における水と岩石の相互作用を考慮した物質移動を予測するための数値解析を行う場合、空隙体積と空隙表面積の情報を数値モデル上に反映させることが重要である¹³⁾。しかし、第四紀石灰岩（琉球石灰岩）の空隙形状や構造は、これまで述べてきたとおり不均質でかつ、非常に複雑であり（図 4-10）、空隙構造を正確に表すことができる数値モデルはこれまであまり見られない。ここでは、この課題に対処するために、数値シミュレーションによる琉球石灰岩のモデル化を念頭に、琉球石灰岩の複雑な空隙形状と空隙構造の分布を単純化する方法について考察した。

空隙構造を反映させた既往の研究としてネットワークモデルが挙げられる¹⁶⁾。同モデルは、X 線 CT などにより抽出した空隙に対して、比較的大きな空隙に球を適用し、それぞれの球をスロートと呼ばれる連結チャネルで接続することで、球とスロート部の連結によって空隙構造をモデル化して再現する。浸透現象が主にスロート部分により支配されることから、浸透（単相流、多相流）に関する計算を主眼に置く場合、同モデル化は有効であると考えられる。一方で、空隙表面で発生する化学風化などの岩石-水相互反応は、通常、空隙表面と流体の境界で発生する。したがって、地化学反応まで考慮するシミュレーションを行う場合、空隙体積と同時に空隙表面積を考慮したモデル化を考える必要がある。しかしながら、空隙の表面が複雑な形状である場合、ネットワークモデルで空隙表面積まで反映させることは困難である。したがって、ネットワークモデルは、地化学反応まで考慮する場合のモデル化手法として適切でないと考えられ、空隙体積と空隙表面積の両方が反映されるモデル化が求められる。

本試験では、琉球石灰岩の空隙体積と表面積の統計的特性はバイナリフラクタルであることが分かった。ここでは、空隙クラスターの体積の分布が前述の回帰線に基づく場合、空隙クラスターの表面積の分布を表現可能な空隙クラスターの形状について検討した。ここで検討した空隙クラスターの単純化形状のパターンの概略を図 4-16 に示す。

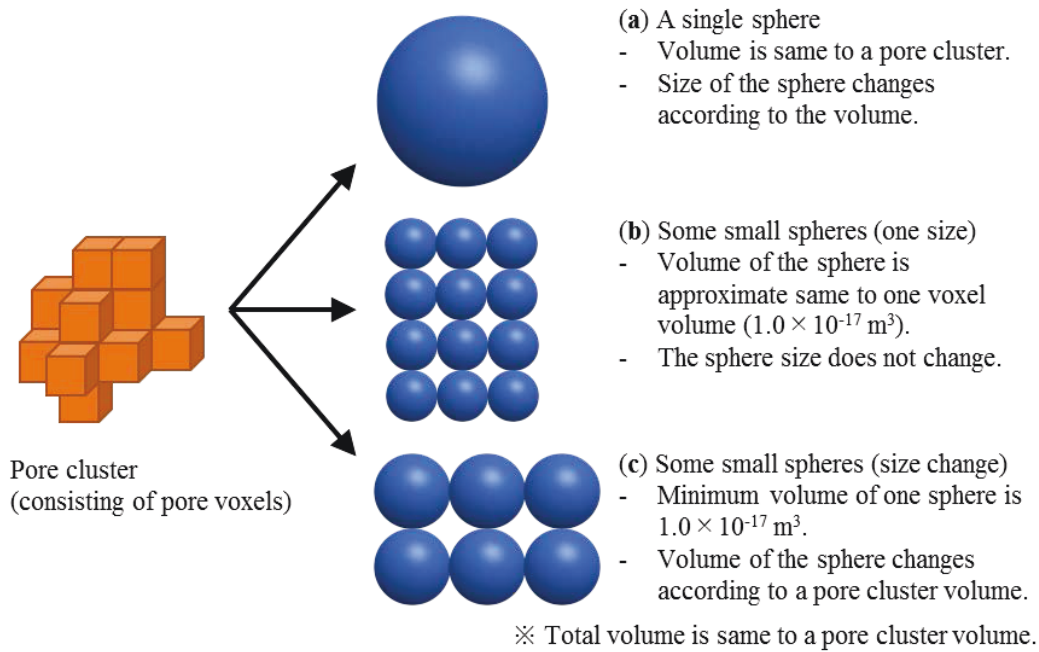


図 4-16 空隙クラスターの単純化形状の概略.

図 4-16a は、空隙クラスター形状を単一球でモデル化した場合である（モデル a）。単一球の体積を、空隙クラスターの体積と合わせ、簡略化された空隙クラスターの表面積を球の表面積の公式 ($S = 4\pi r^2$) で計算する。図 4-16b は、空隙クラスター形状を複数の小球の集合体としてモデル化した場合である（モデル b）。小球 1 つの体積は、CT 画像のボクセル 1 つの体積とほぼ同じ $1.0 \times 10^{-17} \text{ m}^3$ に設定するとともに、空隙クラスターの体積の大きさによらず同一とし、小球の合計体積を空隙クラスター体積と同等にした。単純化された空隙クラスターの表面積は、小球 1 つの表面積 ($2.24 \times 10^{-11} \text{ m}^2$) にクラスターを構成する小球の数を乗じることで計算する。図 4-16c は、図 4-16b と同様に、空隙クラスター形状を複数の小球の集合体としてモデル化するが、空隙クラスターの体積に応じて、小球の体積を変化させてモデル化した場合である（モデル c）。ここで、小球 1 つの体積は、次の式に従って変化させる。

$$\bar{V}_j = \hat{a}V_j^{\hat{b}} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, k) \quad (4-5)$$

$$\hat{a} = \frac{\alpha^n V_{min}}{V_j^{\hat{b}}} \quad (4-6)$$

$$\hat{b} = \log \alpha \quad (4-7)$$

$$n = \log \left(\frac{V_j}{V_{min}} \right) \quad (4-8)$$

ここで、 \bar{V}_j は小球1つの体積、 V_j は空隙クラスターの体積の度数分布で使用される空隙クラスターの代表体積（任意の値）、 V_{min} は V_j のうちの最小体積、 α は \bar{V}_{j-1} から \bar{V}_j の増加率を定義する任意の数字、 k は空隙体積または表面積の分割数である。

$\alpha = 1$ の場合、 \bar{V}_j はどの V_j でも V_{min} となる（モデルb）。一方、 $\alpha = 10$ の場合、 \bar{V}_j は \bar{V}_{j-1} の10倍で増加する。同体積での表面積は、 \bar{V}_j が小さいほど大きくなることから、 α は空隙クラスター形状の球形状に対する複雑さの程度を表すパラメータとなる。

N_{ss} は以下に示すとおり V_j （度数分布で使用される空隙クラスターの代表体積）に対する小球の数で、 V_j を小球体積 \bar{V}_j で除算することで計算される（小数点を切り上げた整数）。

$$N_{ss} = \frac{V_j}{\bar{V}_j} \quad (4-9)$$

モデルcにおける空隙クラスターの表面積 S_{sp} は、以下に示すように、小球の数 S_r に基づいて計算される。

$$S_{sp} = N_{ss} \times S_r \quad (4-10)$$

α 、 k 、 V_j を空隙クラスターの体積の分布に合わせるように設定する。たとえば、 $\alpha = 4$ 、 $V_j = 1.0 \times 10^{-15} \text{m}^3$ 、 $V_{min} = 1.0 \times 10^{-17} \text{m}^3$ の場合、式4-5より \bar{V}_j は $1.6 \times 10^{-16} \text{m}^3$ と計算でき、小球の数 N_{ss} は式4-9より6となる。その結果、単純化された空隙クラスターの表面積は $8.91 \times 10^{-10} \text{m}^2$ と計算される。

各モデルで、単純化された空隙クラスターの表面積を、クラスター分析によって得られた空隙クラスターの体積分布から計算した結果を図4-17に示す。X軸は表面積の対数を示し、Y軸は表面積が S より大きい空隙クラスターの数の対数を示す。プロットは、図4-15に示すクラスター解析で測定されたプロットで、黒実線はその回帰線である。他の線は、モデル毎に計算された空隙クラスター表面積の度数分布を結んだ線である。青破線が単一球でモデル化した場合（図4-17a）、緑破線は大きさの変化しない小球の集合体としてモデル化した場合（図4-17b）、赤実線は空隙クラスターの体積に応じて大きさを変化させる小球の集合体としてモデル化した場合（図4-17c）の度数分布を結んだ線である。bは各線の傾きを示す。

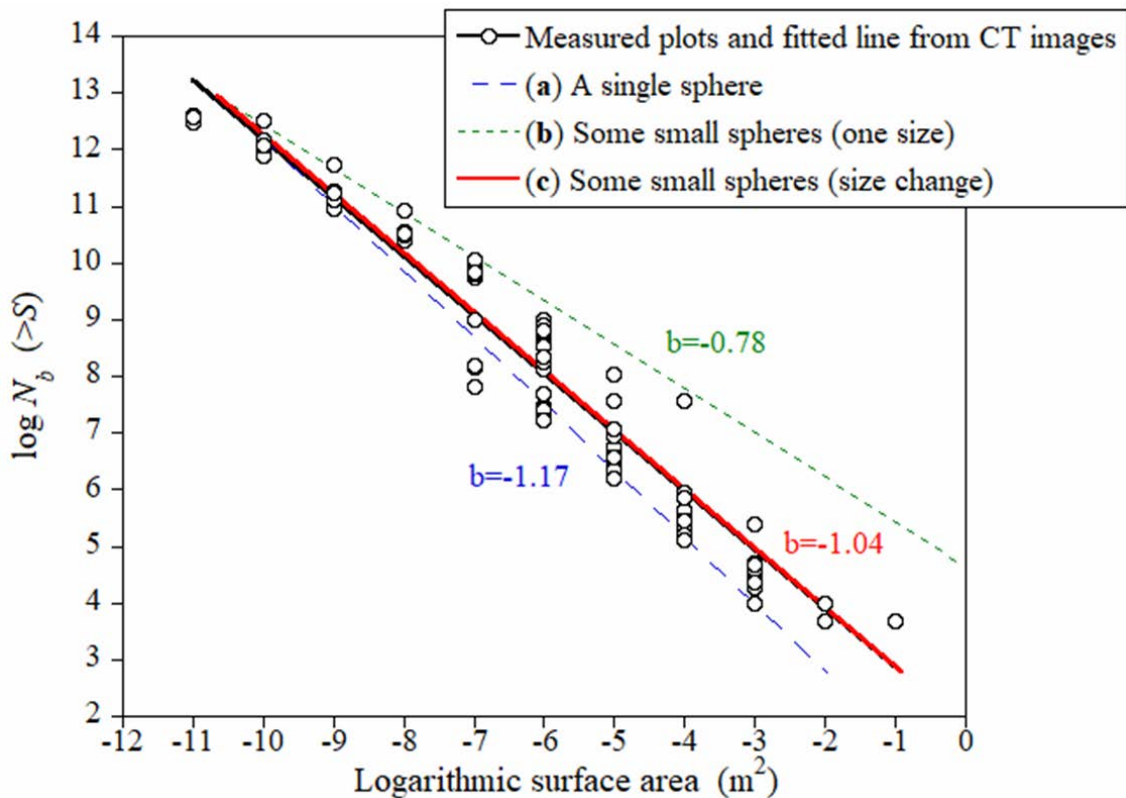


図 4-17 空隙クラスターの表面積の計算された度数分布

図 4-17 のモデル a の傾き ($b = -1.17$) は、黒実線の傾き ($b = -1.04$) よりも小さい。これは、琉球石灰岩の空隙表面積の形状は、単一球よりも複雑であることを示唆する。したがって、単一球でのモデル化 (モデル a) は、空隙クラスターの体積と表面積の両方を表すモデル化として適した形状ではないことが分かった。モデル b の傾き (-0.78) は、黒実線の傾き (-1.04) よりも大きい。これは、空隙クラスターのモデル化による形状が、実際の形状よりも細かすぎることを示唆する。モデル c の傾きは、 $\alpha = 5.6$ を適用すると、クラスター解析で得られた分布とモデルによる分布が一致する。したがって、空隙クラスターの体積に応じて大きさを変化させる小球の集合体を用いることで、琉球石灰岩の空隙体積と表面積の分布の両方を実際の分布に合わせるモデル化が可能であることを示す。

以上より、本研究で提案する空隙の単純化によって、琉球石灰岩の空隙体積と空隙表面積の両方の度数分布が、実際に測定された分布とよく一致した。したがって、ここで提示したモデリング方法は、透過性ととも岩石-水相互反応に関連する問題にも適用できる可能性がある。たとえば、単純化された空隙構造は、バイナリフラクタル特性に基づいて数値的に生成することができる (図 4-18b1、b2)。次に、モデル空間を離散化し、離散化された各要素に含まれる空隙クラスターに基づいて、各要素の空隙率と表面積を計算することができ

る。その結果、空隙体積（空隙率）と空隙表面積の両方を反映させた不均質連続体モデルを数値的に作成することが可能であると考えられる。図 4-18c1、c2 に不均質連続体モデルのイメージを示す。モデル領域はマゼンタラインで空間離散化され、暗色グリッドは空隙率の高いグリッド、明色のグリッドは空隙率の低いグリッドを示す。本モデル化は、琉球石灰岩の空隙構造が空隙体積と空隙表面積の両方のフラクタルがスケールフリーであることが保証されれば、フィールドスケールでの空隙構造（空隙率と空隙表面積の不均質分布）を数値的に生成することが可能であると考えられる。その場合、連続体モデルの空隙率に応じた浸透率の与え方が課題となるが、岩石の局所領域での空隙スケールの流体解析を使用して推定された空隙率と透水係数の関係に基づいて取得できることが可能であると考えられ、この点に関して次章で述べる。

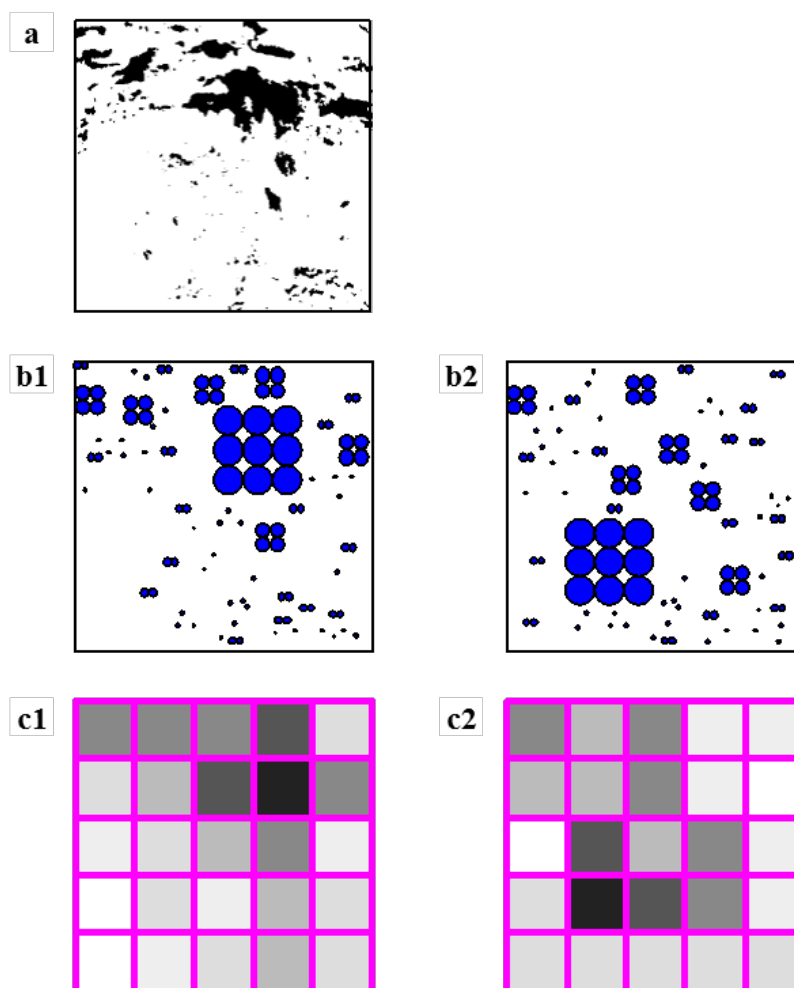


図 4-18 不均質連続体モデルの作成手順のイメージ. (a) 二値化画像（黒色：空隙、白色：マトリックス）、(b) 小球の集合体として単純化された空隙を生成したイメージ b1 と b2、(c) 不均質連続体モデルのイメージ c1 と c2.

4.5. 4章のまとめ

環礁島の地下に淡水を貯留するフローティング型地下ダムを導入するためには、環礁島の帯水層である第四紀石灰岩の空隙構造と塩水淡水置換時の塩分低下の遅延（テーリング）を理解することが不可欠である。近年、岩石中の空隙構造を把握する手段としてX線CTが用いられることがあるが、X線CTの解像度とサンプルサイズの間には相反関係があるため、1つの解像度のみでのX線CTスキャンでは、幅広い空隙サイズを有する同石灰岩の空隙構造を把握するには不十分である。そこで、異なる直径（100mm、50mm、6mm）の琉球石灰岩供試体18体に対してX線CT撮影を実施した。

撮影で得られたCT画像から空隙部分を抽出してクラスター解析を行い、琉球石灰岩の様々なサイズの空隙の統計的特性を調査した。その結果、琉球石灰岩は、広範囲のサイズにわたり、空隙体積と空隙表面積の頻度分布の両対数プロット上で線形関係を示した（空隙体積で約12オーダー（ $1.0 \times 10^{-17} \text{m}^3$ から $1.0 \times 10^{-5} \text{m}^3$ ）、空隙表面積で10オーダー（ $1.0 \times 10^{-11} \text{m}^2$ ~ $1.0 \times 10^{-1} \text{m}^2$ ））。すなわち、第四紀石灰岩である琉球石灰岩の空隙は、広いサイズ範囲で空隙体積と空隙表面積の両方に対するバイナリフラクタルの特性を有することが示唆された。

空隙体積と空隙表面積の両方を反映させる連続体モデルを念頭に、空隙クラスター形状の単純化方法について3つの幾何学的モデルを提案して検証した。その結果、1つ目の方法として空隙クラスターと同じ体積の単一球で空隙クラスターを再現する方法では、表面積の分布数が実際よりも過小となった。2つ目の方法としてすべての空隙クラスターに対して大きさが一定の小球の集合体による方法では、表面積の分布数が実際よりも過大となった。3つ目の方法として空隙クラスターの体積に応じて大きさを変える小球の集合体による方法では、空隙クラスターの形状の複雑さの程度を表す新しいパラメータを導入することで、測定で得られた空隙表面積と空隙体積の両方の度数分布がよく一致する結果となった。

4.6. 4章参考文献

- 1) Masuoka, K. and Nakaya, S. (2021): Pore structure evaluation of Quaternary highly vuggy limestone by a combination of X-ray CT images of differently sized cores, Rock Mechanics and Rock Engineering, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02352-4>
- 2) 農林水産省農村振興局企画部資源課 内閣府沖縄総合事務局農林水産部土地改良課 (2008) : 淡水レンズを活用した水源開発を目指して「淡水レンズ開発調査」「淡水レンズ強化技術実証調査」調査成果の概要
- 3) Furukawa, H., Kuroda, T. (2011): The underground dam: a new concept in water resource development to meet the challenges of natural disaster & climate change, Kaichosha. ISBN: 9784874158241
- 4) Nakaya, S., Yoshida, T., and Shioiri, N. (2003): Percolation conditions in binary fractal fracture networks: Applications to rock fractures and active and seismogenic faults, J. Geophys. Res. - SOLID EARTH, 108(B7), DOI: <https://doi.org/10.1029/2002JB002117>.
- 5) Nakaya, S. (2005): Fractal properties of seismicity in regions affected by large, shallow earthquakes in western Japan: Implications for fault formation processes based on a binary fractal fracture network model, J. Geophys. Res.-SOLID EARTH, 110(B01310), DOI: <https://doi.org/10.1029/2004JB003097>
- 6) Nakaya, S. and Nakamura, K. (2007): Percolation conditions in fractured hard rocks: A numerical approach using the three-dimensional binary fractal fracture network (3D-BFFN) model, J. Geophys. Res.-SOLID EARTH, 112(B12203), DOI: <https://doi.org/10.1029/2006JB004670>
- 7) Anovitz, L.M. and Cole, D.R. (2015): Characterization and Analysis of Porosity and Pore Structures, Reviews in Mineralogy & Geochemistry 4, Vol. 80 pp. 61-164, DOI: <http://dx.doi.org/10.2138/rmg.2015.80.04>
- 8) Blunt, J.M., Bijeljic, B., Dong, H., Gharbi, O., Iglauer, S., Mostaghimi, P., Paluszny, A., and Pentland, C. (2013): Pore-scale imaging and modelling, Advances in water resources, Vol.51, pp.197-216, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.003>
- 9) Buades, A., Coll, B., and Morel, J.M. (2005): A non-local algorithm for image denoising, CVPR 2005. IEEE Computer society conference on computer vision and pattern recognition, Volume:2, DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2005.38>
- 10) Buades, A., Coll, B., and Morel, J.M. (2008): Nonlocal image and movie denoising, International journal of computer vision, 76(2), pp.123-139, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11263-007-0052-1>
- 11) Ikeda, S., Nakano, T., and Nakashima, Y. (2000): Three-dimensional study on the interconnection and shape of crystals in a graphic granite by X-ray CT and image analysis, Mineralogical Magazine, Vol. 64(5), pp-945-959, DOI: <https://doi.org/10.1180/002646100549760>
- 12) 中島善人 (2005) : X線CTで岩石中の空隙をイメージングする, 地学雑誌, Vol.114,

No.6, pp.1032-1043, DOI: https://doi.org/10.5026/jgeography.114.6_1032.

- 13) Nakaya, S., Yasumoto, J., Min, P.H., Aoki, H., Kohara, F., Masuda, H., and Masuoka, K. (2018) Hydrochemical behaviour of an underground dammed limestone aquifer in the subtropics, *Hydrological Processes*, 32(23), 3529-3546, DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.13277>
- 14) Wu, X., Long, S., and Li, G.H. (2012): Fractal study on the complexity of limestone surface pore structure, *Advanced materials research*, Vol. 548, pp 275-280, DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.548.275>
- 15) Sok, R.M., Varslot, T., Ghous, A., Latham, S., Sheppard, A.P., and Knackstedt, M.A. (2010) Pore scale characterization of carbonates at multiple scales: Integration of Micro-CT, BSEM, and FIBSEM, *Petrophysics*, Vol. 51, No. 6, Page 379-387, DOI: <http://hdl.handle.net/1885/59024>
- 16) Dong, H. and Blunt, M.J. (2009): Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images, *Physical review E* 80, 036307, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.80.036307>

第5章 琉球石灰岩帯水層中の塩水淡水置換挙動評価のモデル化

5.1. はじめに

フローティング型地下ダムは、環礁島浅部の帯水層（第四紀石灰岩層）に侵入している海水（塩水）を、降雨由来の淡水で置換させることで、島の地下に淡水を貯留する地下ダムである^{1),2)}。淡水の貯留過程において、帯水層の塩淡水境界の位置は深度方向へ遷移するほか、ダム貯留層からの淡水の取水時には深部の海水を引き込まない適切な取水量を設定する必要があるなど、フローティング型地下ダムの運用において、複雑な空隙構造を呈する石灰岩帯水層での淡水と海水のインタラクションを評価できるモデル化手法が必要である。

第3章では、琉球石灰岩を用いた塩水淡水置換の室内トレーサー試験で測定されたカラム出口における塩分濃度変化を、二重空隙モデル^{3),4),5)}を使用した数値シミュレーションによって再現できることを確認した。しかしながら、同二重空隙モデルは亀裂性岩盤を対象としたもので直交亀裂系を仮定している。一方で、X線CTを用いた塩水淡水置換のトレーサー試験における空隙中の濃度低下の可視化結果や空隙構造の三次元可視化結果などより、琉球石灰岩中の空隙構造は、複数の大きな空隙が近接して存在しても連続性が乏しい場合があるなど、大小の空隙が不均質に分布する非常に複雑な空隙構造であることが確認できた（第3章および第4章）。その結果、琉球石灰岩に対して、二重空隙モデルの入力条件である亀裂幅や亀裂間隔などのパラメータを合理的に設定することは困難である上、亀裂部分とマトリックス部分に合理的に浸透率を与えること自体が困難である。したがって、琉球石灰岩のような非常に複雑な空隙構造を持つ第四紀石灰岩で物質移行解析を行うためには、新しい合理的なモデリング手法を確立する必要がある。

近年、コンピュータの演算能力の進歩により、X線CTなどで多孔質体の空隙構造を三次元で抽出して数値解析グリッドとして直接モデル化し、ナビエ・ストークス方程式による流体解析を行う「ポアスケールモデリング」が行われている^{6),7)}。ポアスケールモデリングでは、従来、試験で得られる浸透率などの水理パラメータを、数値シミュレーションによって推定することが可能である。

ここでは、琉球石灰岩コアにおける物質移行を再現可能なモデル化手法の確立を目的に、一般的な地下水解析手法である連続体モデルと近年実施例が多いポアスケールモデルリングを組み合わせた新しいモデリング手法を考案した。すなわち、ローカルモデルとしてナビエ・ストークス方程式を解く「ポアスケールモデリング」と、グローバルモデルとして多孔質媒体におけるダルシーの法則を用いる解析とを組み合わせた方法である。同モデル化手法を3章で実施したX線CTを用いた塩水淡水置換の室内トレーサー試験に適用して再現

解析を行い、試験結果と比較することで、琉球石灰岩のモデル化手法としての適用性を検証した。

5.2. モデル概要

本研究で新しく提案するモデル化の概要を図 5-1 に示す。本モデル化は、解析対象領域の全体を包含する連続体モデルであるグローバルモデルと、解析対象領域の一部分の空隙を直接抽出してポアスケールモデリングを行うローカルモデルの 2 種類のモデル化を組み合わせるモデル化手法である。

グローバルモデルは、全ての解析グリッドを多孔質媒体（連続体）として扱い、ダルシー則を運動方程式とした地下水流動解析である。物質移行解析は同グローバルモデル上での移流拡散方程式を解くことで行われる（ただし、機械的分散（分散長）は考慮しない）。一方、ローカルモデルは、X 線 CT など抽出した空隙を直接解析グリッドとして扱い、ナビエ・ストークス方程式を運動方程式とする流体解析シミュレーションである。ローカルモデルの主目的は、局所領域の透水係数を求めることであり、同モデル上では流体解析シミュレーションのみを行うものとして、物質移行解析は行わない。以降、本モデル化手法について述べる。

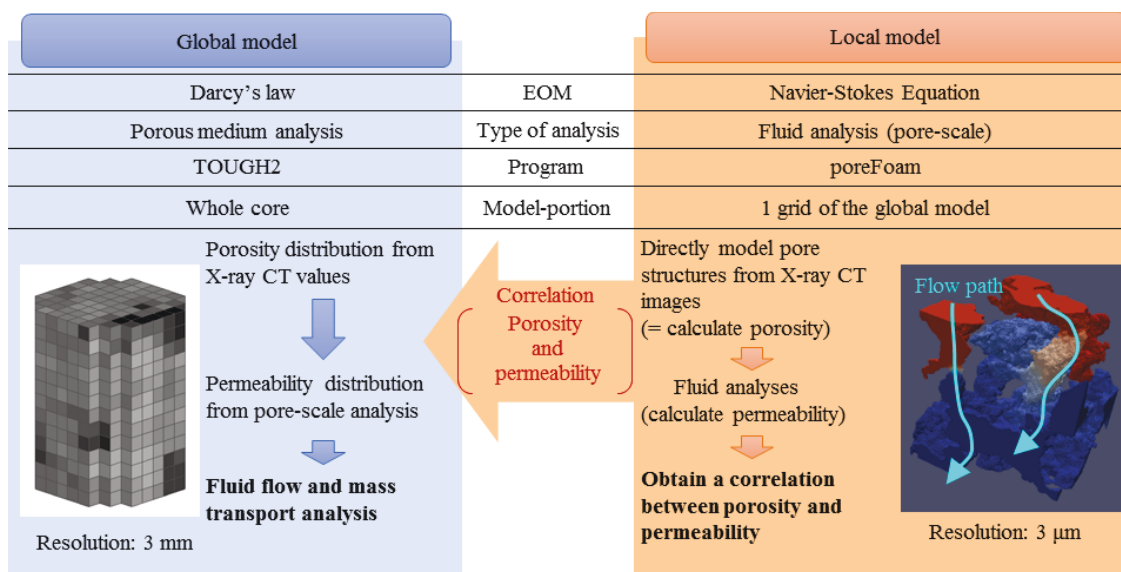


図 5-1 本研究で提案するモデル化手法の概要

5.3. 検討手法

5.3.1. 供試体

X線CTを用いた室内トレーサー試験（第3章を参照）で使用したD50供試体（D50-1）に対して検討を行った。供試体の外観を図5-2に再掲する。供試体は、沖縄県伊江島の地下ダム建設現場から入手した琉球石灰岩のブロックサンプルをコアリングして作成したもので、直径50mm、高さ47mmの円柱供試体である。外観からはcmオーダーの大きな空隙が肉眼で容易に確認できるとともに、比較的緻密な部分も入り組んだ構造であり、非常に複雑な空隙構造を呈する。供試体の基本物性を表5-1に再掲する。空隙率は0.16、浸透率は $5.9 \times 10^{-14} \text{m}^2$ （透水係数で約 $5.9 \times 10^{-7} \text{m/s}$ に相当）である。



図 5-2 D50 供試体（D50-1）の外観（再掲）

表 5-1 D50 円柱状供試体（D50-1）の基本物性

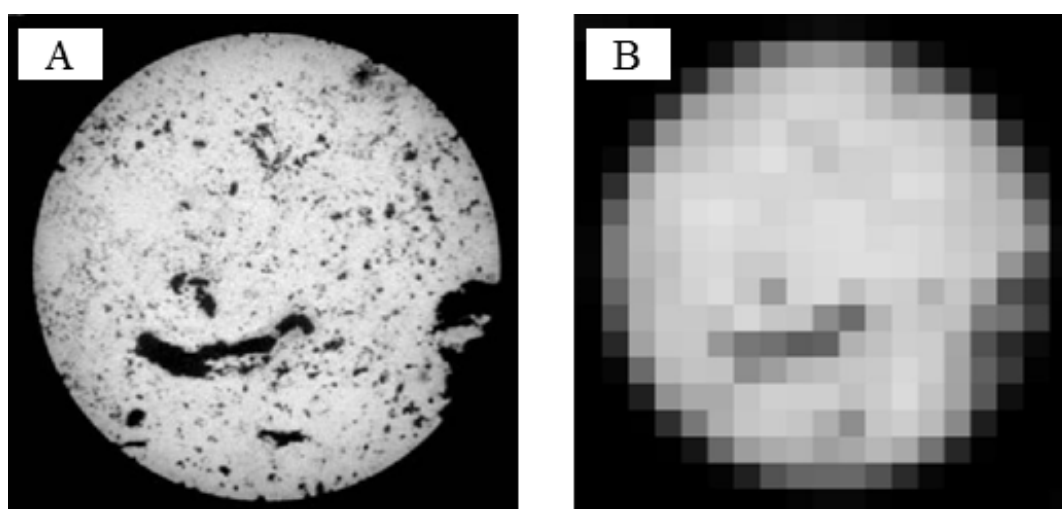
項目	値
直径 [mm]	50
長さ [mm]	47
乾燥密度 [g]	204.04
空隙率	0.16
粒子密度 [Mg/m^3]	2.694
浸透率 [m^2]	5.9×10^{-14}

5.3.2. X線 CT スキャンによるグローバルモデルのメッシュ作成

供試体を蒸留水で十分に洗浄し、110°Cで約 2 日間乾燥させたものを X 線 CT 「inspeXio SMX-225CT (島津製作所)」で撮影した。X 線 CT の撮影条件を表 5-2 に、得られた CT 画像の一例を図 5-3A に示す。CT 画像の解像度は約 55 μm で、空隙部 CT 値は 0、最も高い部分の CT 値は 255 となる 8bit グレースケール画像を「ImageJ」(Schneider 2012)⁸⁾を使用して作成した。図 5-3B には、ImageJ の双一次補間処理で解像度を 3mm まで粗くした CT 画像 (以降、粗値化 CT 画像と呼ぶ) を示す。なお、粗値化画像のボクセル 1 つのサイズがグローバルモデルにおける 1 グリッドのサイズと等しくなる。

表 5-2 X 線 CT 撮影条件

項目	値
X 線管電圧 [kV]	200
X 線管電流 [μA]	160
画素数 [pixel]	1024 × 1024
解像度 [μm]	55



A : オリジナル CT 画像 (解像度 55 μm)

B : 粗値化 CT 画像 (解像度 3mm)

図 5-3 D50 供試体の X 線 CT 画像

粗値化 CT 画像を基にして、グローバルモデルで使用する解析メッシュを作成した。各々のボクセルを解析メッシュの 1 格子として考え、各解析格子には CT 値を与える。解析格子の座標はボクセル中心で与え、コントロールボリュームはボクセル体積から与えた。粗値化 CT 画像から供試体部分を切り出し、グローバルモデルを作成した。なお、本研究では、グ

ローバルモデルの解析メッシュは、CT 画像のノイズの影響（ビームハードニング）を低減するために、供試体外縁部のボクセルを除いた内側のボクセルのみに対して作成した（直径 32 mm、高さ 42mm の円柱）。

解析格子を CT 値に応じて表 5-3 に示す 12 のグループに分割することで、空隙率の不均質性を解析モデルに反映した。なお、粗値化 CT 画像のコア部分で CT 値が 70 未満となるボクセルは存在しなかったため、表に示すように、CT 値が最も小さいグループの CT 値範囲は 70～90 となっている。

単一材料で作られた物体を X 線 CT で撮影した場合、空隙率の減少と X 線減衰率 (CT 値) は直線的に変化することが示されている⁹⁾。ここでは、CT 値と空隙率の間に線形関係があるものと仮定した。各グループの CT 値範囲の上限値をグループの代表 CT 値とし、各グループの代表 CT 値に基づいてグループの各格子に空隙率を割り当てた。例えば、グループ 1 の CT 値範囲は 70～90 であるため、代表 CT 値は 90 となり、CT 値 0 が空隙率 100% で 255 が空隙率 0% と仮定するので、空隙率 0.647 $(=(255-90)/255)$ をグループ 1 の各格子に与えた。

各グループの浸透率は、ローカルモデルでの流体シミュレーション（ポアスケールモデリング、詳細は次節に記す）から浸透率と空隙率の相関式を推定して与えた。

以上より、空隙率と浸透率を各グループの代表 CT 値に基づいて与えるグローバルモデルの解析メッシュを作成した。ローカルモデルの詳細については、次節（5.3.3）で解説する。

表 5-3 グローバルモデルの解析格子のグループ分けと空隙率

グループ番号	解析格子数	CT 値範囲※	代表 CT 値	空隙率
1	1	$70 < x \leq 90$	90	0.647
2	4	$90 < x \leq 110$	110	0.569
3	5	$110 < x \leq 130$	130	0.490
4	5	$130 < x \leq 150$	150	0.412
5	23	$150 < x \leq 170$	170	0.333
6	15	$170 < x \leq 180$	180	0.294
7	34	$180 < x \leq 190$	190	0.255
8	77	$190 < x \leq 200$	200	0.216
9	252	$200 < x \leq 210$	210	0.176
10	561	$210 < x \leq 220$	220	0.137
11	245	$220 < x \leq 230$	230	0.098
12	10	$230 < x \leq 240$	240	0.059

※CT 値が 70 以下と 240 より大きい格子は無し

5.3.3. ローカルモデルによる空隙率—浸透率の相関関係の推定

浸透率と空隙率の相関に関する研究は多く行われているが、それらで提案されている推定式などの適用は、岩種によって空隙形状は様々であるため、推定式は汎用性を持たないことが一般的である。また、コアスケールの供試体に対して数 mm の解像度で区分される不均質モデルを作成しようとする場合、個々の領域の大きさは実試験の実施には小さすぎるため、解析モデルで区分される局所領域での浸透率を室内試験から求めることは困難である。そこで、本研究では、「ポアスケールモデリング^{7),10),11)}」を使用して、従来の試験方法による測定が困難であるような局所領域サイズの浸透率を数値シミュレーションで推定し、空隙率と浸透率の相関関係を求めることでグローバルモデルの各グループに浸透率を与え、コアスケールの供試体に対して数 mm の解像度で区分される不均質モデルを作成した。

第4章で示した D6 供試体を含めた複数の小径コアを D50 供試体からコアリングし、X線 CT 撮影することで、3mm 角の立方体範囲での空隙データを作成し、それらに対してナビエ・ストークス方程式を解く流体シミュレーションを実施した。解析には英国のインペリアル・カレッジ・ロンドンで開発された「poreFoam」^{7),10),11)}を用いた。同プログラムは、積分差分法による流体解析コードとして公開されている「OpenFOAM」¹²⁾をベースに開発されたプログラムである。CT 画像などから作成された空隙部とそれ以外で二値化した三次元ボクセルデータ群を与えることで、ボクセルデータ群から任意範囲で切り出した直方体の向かい合う一対の面の間の浸透率が計算される。主な計算条件として、単相流、非圧縮性流体、層流条件、壁面（空隙面）はノンスリップ条件である。ただし、poreFoam では、空隙面で正確にノンスリップ条件を与えるために、壁面近傍の格子では面中央で表される流速としない工夫を施している。詳細については、参考文献 7)を参照されたい。その他、注意する点として、向かい合う一対の面の間に連続する空間（空隙）が存在しなければ計算を行うことが出来ない（流体が流れない）。

ローカルモデルの空隙ボクセルの割合は有効空隙率であり、空隙率より小さい。一方、CT 値は空隙率との相関である。したがって、空隙ボクセルの割合に、MICP 試験で得られる本解像度（3 μ m）以下の空隙率を加えることで、空隙ボクセルの割合（有効空隙率）を空隙率に補正した。

また、空隙率と浸透率のプロットが得られたとして、その近似式を求めることを考える。円管を流れる流体の流量は、ハーゲン・ポアズイユの法則により次のように表される。

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 \mu L} \quad (5-1)$$

ここで、 Q はパイプ内の流量、 r は円管半径、 Δp は圧力差、 μ は粘性係数、 L は流路長である。管路が一辺 L の立方体を貫通しているとした場合、空隙率を n とすると、立方体の浸透率は以下で表される。

$$k' = \frac{n^2 L^2}{8\mu\pi} \quad (5-2)$$

ここで、 k' は長さ L での浸透率となる。(5-2)式は空隙率 n の二乗となることから、ここでは空隙率と浸透率の相関式としてべき乗則を用いた。これにより、空隙率がゼロとならない限り浸透率はゼロにならない。

以上より、得られた空隙率と浸透性の相関式から、グローバルモデルの空隙率（グループ代表 CT 値から計算）に対する浸透率を与えた。

5.3.4. 室内トレーサー試験の再現解析

空隙率と浸透率を与えたグローバルモデルを用いて、3.3で行った X 線 CT を用いた塩水淡水置換の室内トレーサー試験の再現解析を行い、ここで提案する新しいモデル化手法の適用可能性を検証した。

解析には、米国のローレンス・バークレー研究所が開発した並列計算に適した積分差分法の多成分多相流解析コード「TOUGH2-MP」^{3), 13)}を使用した。解析境界条件は、図 5-4 に示すとおり、試験条件に基づいて (3.3 参照)、モデル下面中央の 1 グリッドと上端面を淡水条件（濃度 0）の圧力固定境界とした。圧力固定の値は、モデル上側から下側に向かって実験と同程度の流量となるように値を設定した。他の境界面は不透水境界条件とした。モデル内の初期濃度は、試験と同様に、密度 1.53Mg/m^3 の塩水（実験において X 線 CT 撮影のために高くしている）が飽和しているものとした。

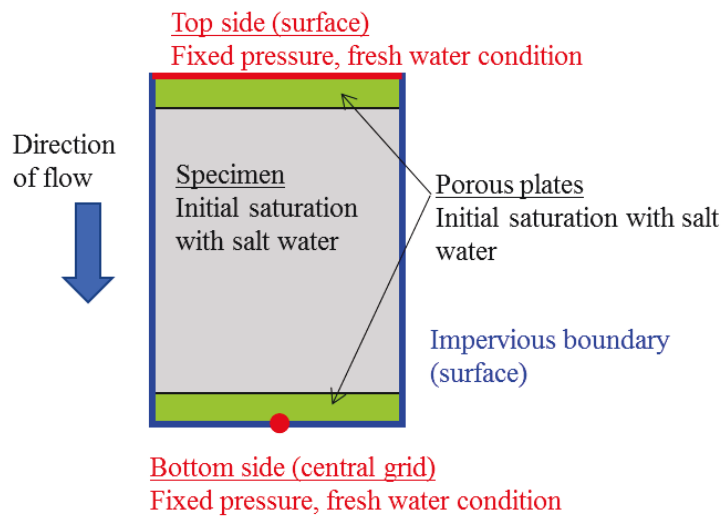


図 5-4 グローバルモデル解析条件概要

5.4. 検討結果

5.4.1. グローバルモデルの空隙率

図 5-5 に、5.3.2 に示した方法でグループ化したモデル（グローバルモデル）を示す。各グリッドの色は、グリッドの属するグループ番号を示す。前述したとおり、各グループにはグループの代表 CT 値に基づいて異なる空隙率が割り当てられており、図ではグループ番号が大きいグループほど割り当てられている空隙率は小さくなる。グローバルモデルの各格子体積は既知であることから、全ての解析格子に対して、割り当てている空隙率から空隙体積を計算し、モデル全体で合算することでモデルの空隙率を計算すると 0.155 と計算された。実験室で測定した D50 コア空隙率は 0.16 であり、ほぼ一致する結果が得られたことから、各グループの代表 CT 値は妥当な範囲であると考ええる。

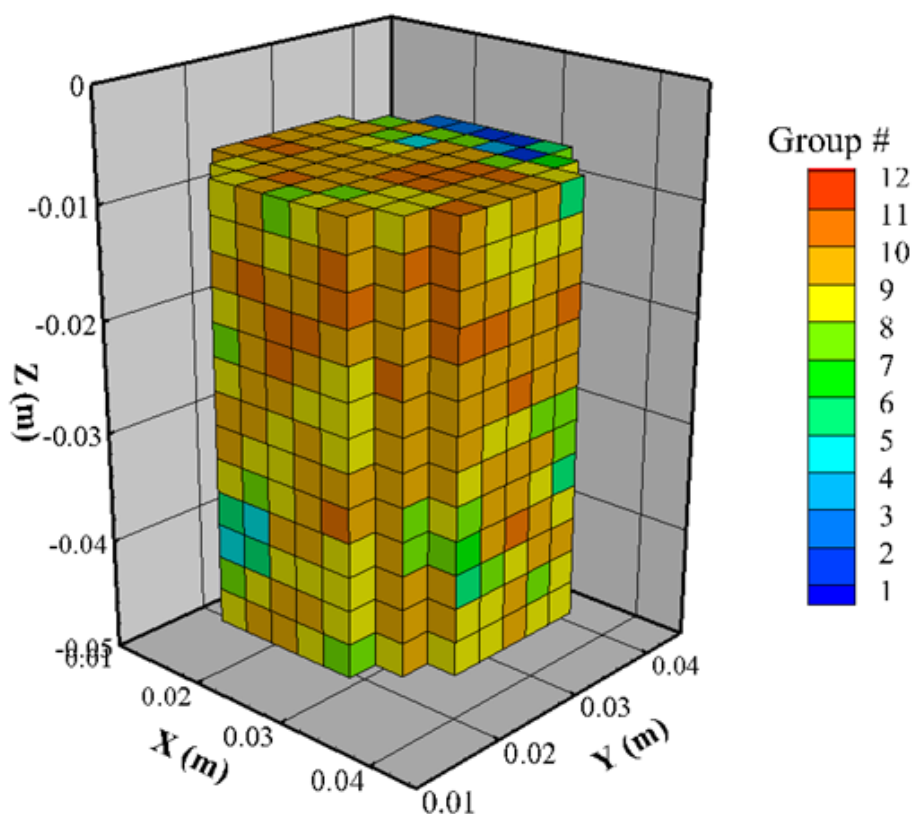


図 5-5 グローバルモデルの解析格子

5.4.2. ローカルモデルによる空隙率—浸透率の相関

D50 供試体から抜き取った小径コアに対して X 線 CT 撮影を行い、1 辺 3mm 角の立方体領域に含まれる三次元空隙データを 13 セット取得した。取得した三次元空隙データのうち、供試体の長軸方向の二つの面の間で空隙部分のボクセルが連続するデータ数が 10 セットとなり、それらに対して 5.3.3 に示すポアスケールモデリングによる流体解析を行った。解析結果のプロットを図 5-6 に示す。空隙率と浸透率の間には一定の相関関係が見られるが、同程度の空隙率に対して浸透率が 1 桁程度変化する結果も見られる。また、前述したとおり、図 5-6 に示すプロットは、モデルの両端面の間で空隙格子の連続性が確保されている場合の値に限定される結果である。すなわち、空隙率が約 0.1 以下では、本解像度ではモデル端面間の空隙格子の連続性が形成されなかったためデータが欠損しており、実際には解像度以下の空隙で連結することで非常に小さい浸透率である可能性が考えられる。

ここでは、空隙率と浸透率にべき乗則の関係が低空隙率で成り立つと仮定し、図 5-6 のプロットに対してべき乗則による回帰曲線を作成した。同回帰曲線を用いて、グローバルモデルの各グループの代表空隙率に対する浸透率を計算してモデルに与えた。

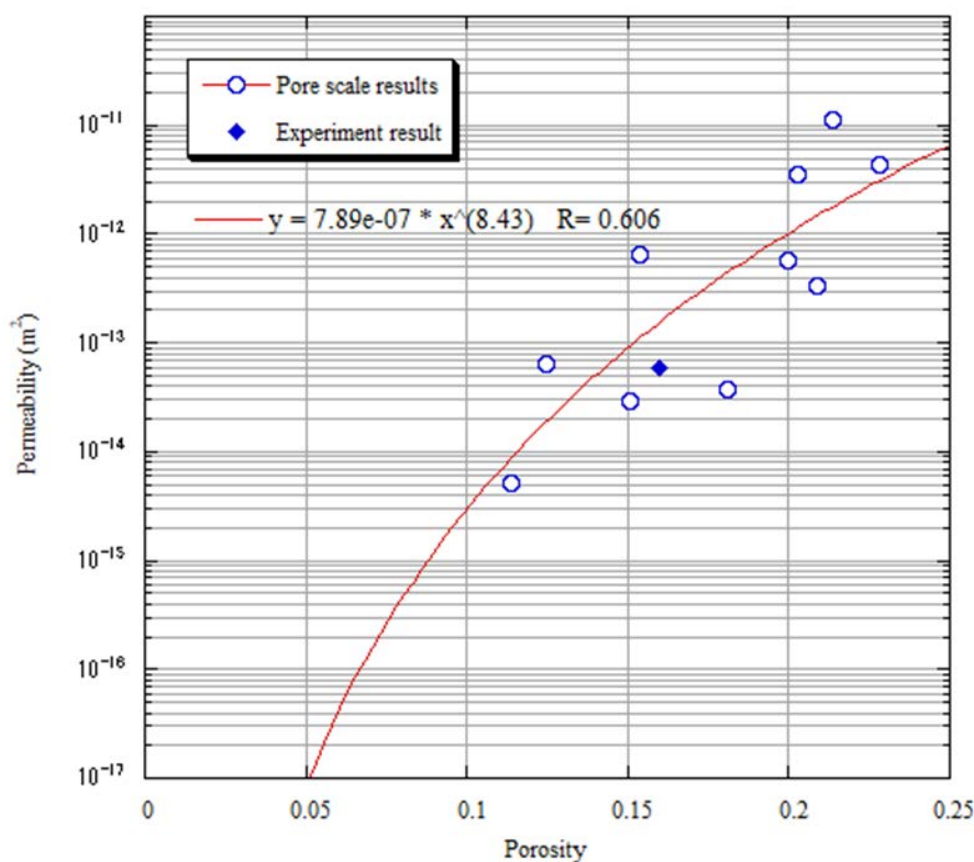


図 5-6 ローカルモデルによる計算結果

5.4.3. 室内トレーサー試験の再現解析結果

(1) 解析ケース

図 5-6 では、空隙率が 0.1 程度以下の場合、ローカルモデルの両端面の間の空隙格子の連続性は、いずれのサンプルでも得られず、空隙率が約 0.1 以下の部分の空隙率と浸透率の関係については十分なデータが得られなかった。したがって、グローバルモデルにおける空隙率約 0.1 以下の 3 グループ（グループ番号：10、11、12）の浸透率を変えた 3 ケースと、モデル全体に平均浸透率を与えた 1 ケースの全 4 ケースでの検討を行った。

表 5-4 に各計算ケースの空隙率と浸透率を示す。ケース 1 では、空隙スケールモデリングから得られた空隙率と浸透率の相関関係をそのまま各グループの浸透率に適用させた場合である。ケース 2 は、グループ 11（空隙率 0.098）の浸透率がケース 1 よりも小さいと仮定し、グループ 12（空隙率 0.059）の浸透率（ $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ ）をグループ 11 の浸透率に与えた場合である。ケース 3 は、グループ 11 に加えてグループ 10（空隙率 0.137）の浸透率も小さいと仮定し、グループ 12 の浸透率をグループ 11 と 10 の浸透率に与えた場合である。さらに、平均的な多孔質媒体モデルによる結果と比較するために、全ての解析格子の空隙率と浸透率を試験で得られた平均値として与えたケース 0 を実施した。

図 5-7 に各ケースの浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域を示す。付録 D の図 D-1～図 D-6 に各ケースの浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域を示したモデル図を示す。

表 5-4 各計算ケースでのグループ毎の空隙率と浸透率

グループ番号	空隙率	浸透率 [m^2]		
		ケース 1	ケース 2	ケース 3
1	0.647	1.99×10^{-8}	1.99×10^{-8}	1.99×10^{-8}
2	0.569	6.71×10^{-9}	6.71×10^{-9}	6.71×10^{-9}
3	0.490	1.93×10^{-9}	1.93×10^{-9}	1.93×10^{-9}
4	0.412	4.44×10^{-10}	4.44×10^{-10}	4.44×10^{-10}
5	0.333	7.51×10^{-11}	7.51×10^{-11}	7.51×10^{-11}
6	0.294	2.62×10^{-11}	2.62×10^{-11}	2.62×10^{-11}
7	0.255	7.87×10^{-12}	7.87×10^{-12}	7.87×10^{-12}
8	0.216	1.93×10^{-12}	1.93×10^{-12}	1.93×10^{-12}
9	0.176	3.57×10^{-13}	3.57×10^{-13}	3.57×10^{-13}
10	0.137	4.31×10^{-14}	4.31×10^{-14}	3.46×10^{-17}
11	0.098	2.54×10^{-15}	3.46×10^{-17}	3.46×10^{-17}
12	0.059	3.46×10^{-17}	3.46×10^{-17}	3.46×10^{-17}

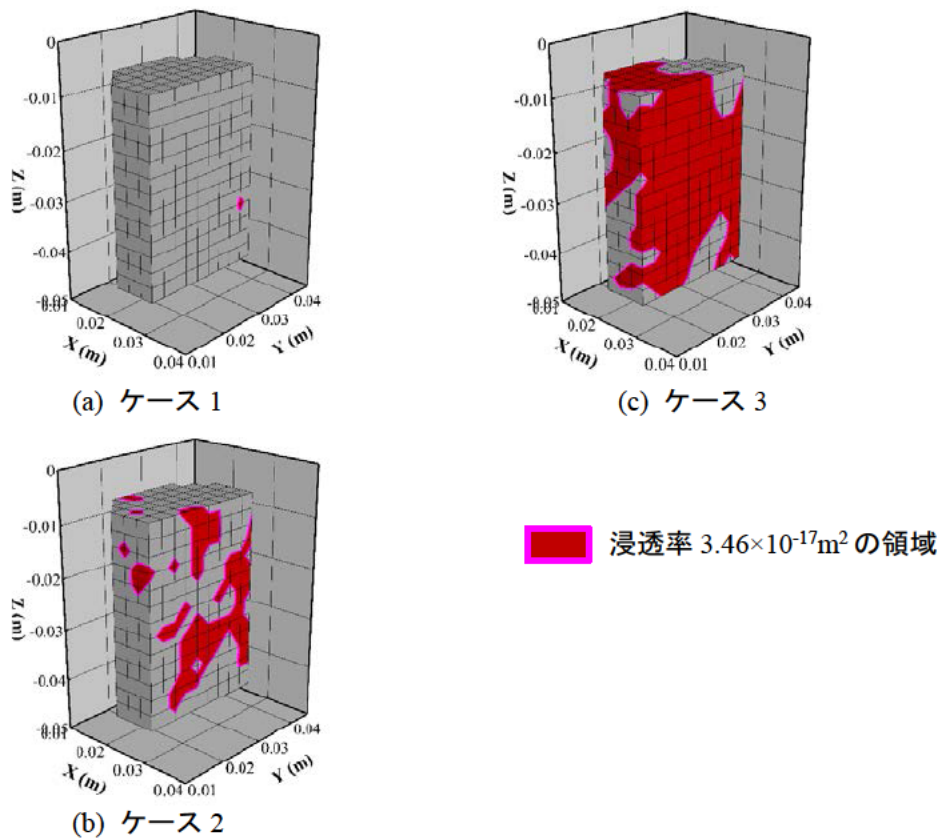


図 5-7 グローバルモデルにおける浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域

(2) モデル全体での浸透率

グローバルモデル全体での浸透率を、上下境界の圧力差と下部境界節点での流量から計算した。グローバルモデルの浸透率は、ケース 1 で $1.2 \times 10^{-13} \text{m}^2$ 、ケース 2 で $1.1 \times 10^{-13} \text{m}^2$ 、ケース 3 で $2.8 \times 10^{-14} \text{m}^2$ と計算された。室内試験で測定された浸透率 $5.9 \times 10^{-14} \text{m}^2$ と比較すると、ケース 2 で測定値の約 2 倍、ケース 3 で測定値の約半分の値を示した。

(3) トレーサー濃度変化

図 5-8 は、各ケースのモデル下部境界節点直上格子における相対濃度（初期濃度を 1.0 とした濃度）変化を示す。図の X 軸は累積流入量を供試体の空隙体積で除した値（PV）を示す。なお、実験初期は試験装置上部に設けたポラスプレート部を流れるため、PV のプロットはマイナスとなっている。菱形のプロットは、実験で測定された濃度を示し、試験開始初期に急激な濃度低下を示すが、その後、濃度低減の傾向は緩やかになるテーリング挙動を示す。

図より、均質モデルのケース 0 では、濃度低下の遅延は生じない計算結果が得られた。一

方、ケース 1~3 では、濃度低下の遅延（テーリング）が生じ、ケース 1 では緩やかな濃度低下遅延であるが、ケース 2 と 3 では濃度低下の遅延は強くなり、試験での測定結果とほぼ同じ濃度低減挙動となる計算結果が得られた。

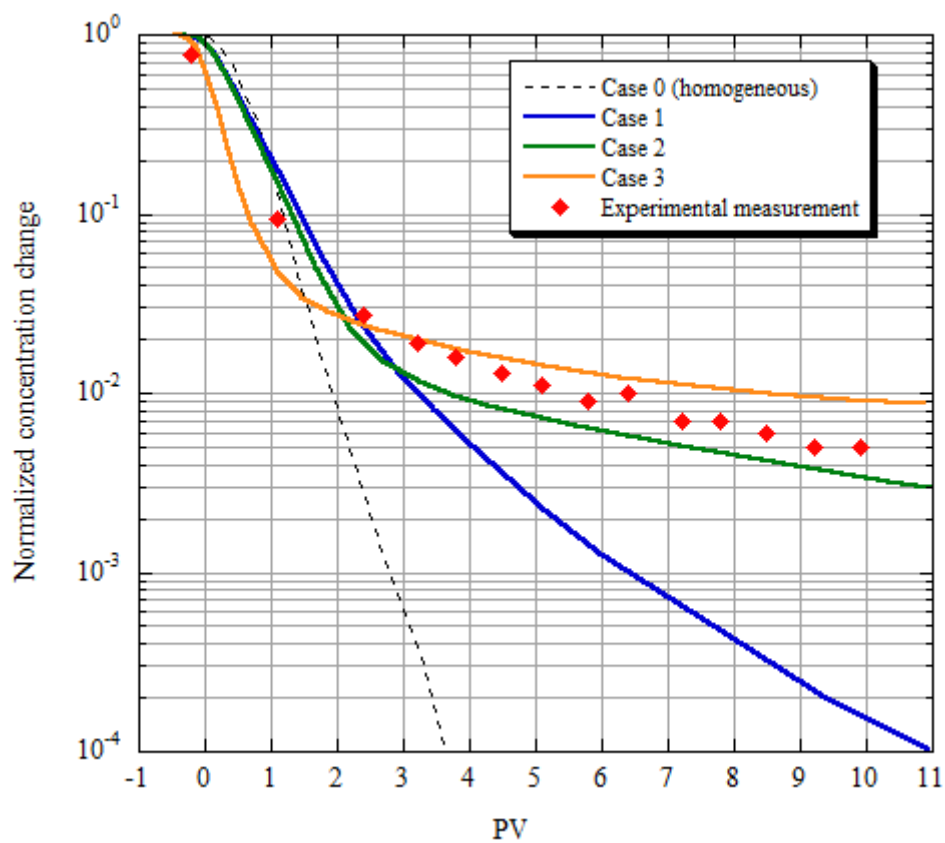


図 5-8 モデル出口での初期濃度に対する相対濃度変化

5.5. 考察

5.5.1. 琉球石灰岩の低空隙率部分の局所浸透率

数値シミュレーションのケース 0 からケース 4 の初期濃度に対する相対濃度のモデル内の分布を図 5-9 に示す。図の各ケースの表示時刻は、ケース 0 が 0.78PV、ケース 1 が 2.3PV、ケース 2 が 2.2PV、ケース 3 が 2.2PV の場合である。マゼンタ色線で囲まれた部分は、図 5-7 で示した浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域である。浸透率が $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ のグループはケースごとに異なるため、マゼンタ色線で囲まれた部分はケースごとに異なる。付録 E の図 E-1～図 E-12 には各ケースの時間毎の相対濃度の分布図を示す。

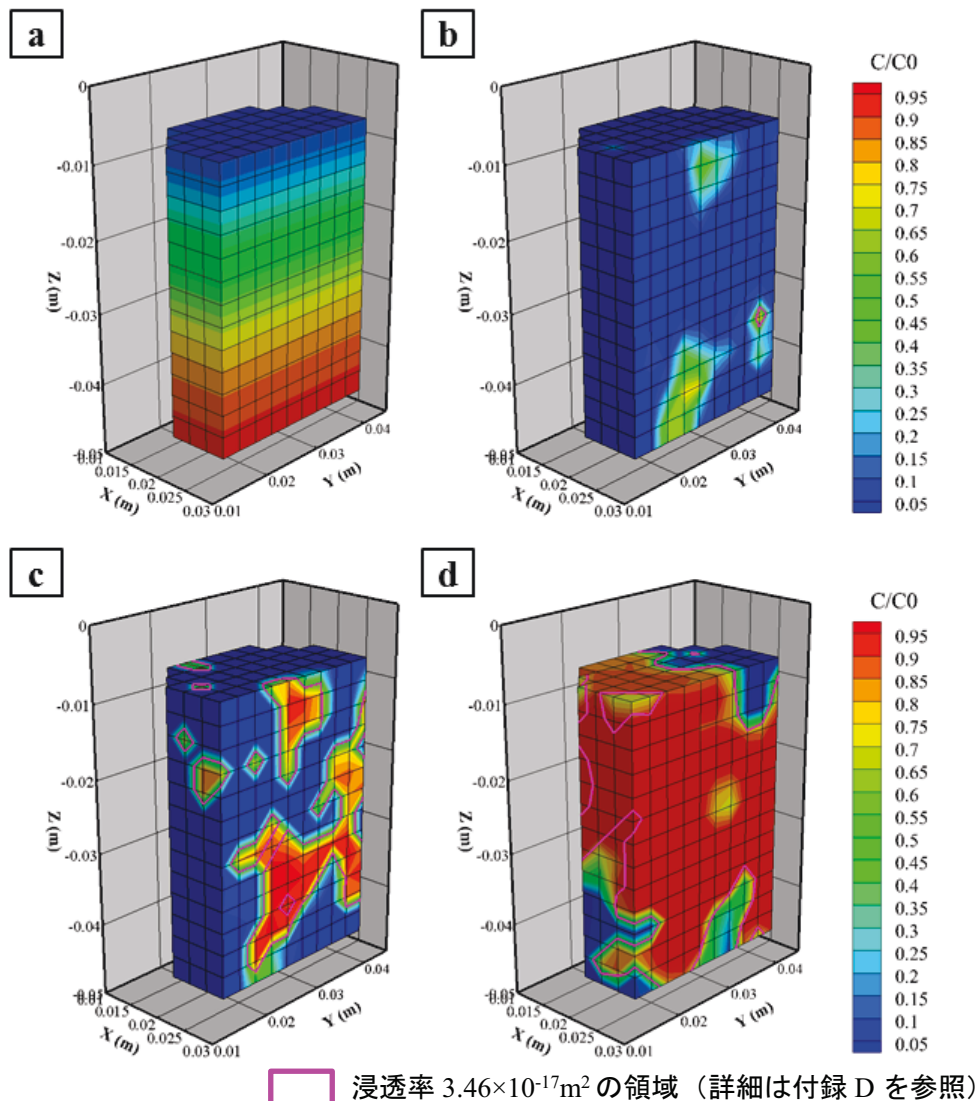


図 5-9 各ケースの相対濃度分布（グローバルモデル）。(a) ケース 0 (PV=約 0.05)、(b) ケース 1 (PV=約 2.3)、(c) ケース 2 (PV=約 2.2)、(d) ケース 3 (PV=約 2.2)。

ケース 1 では、モデル全体で計算された浸透率は $1.2 \times 10^{-13} \text{m}^2$ であり、試験測定値よりも 2 倍程度高い。ケース 2 とケース 3 では、モデル全体で計算した浸透率は、ケース 2 で $1.1 \times 10^{-13} \text{m}^2$ 、ケース 3 で $2.8 \times 10^{-14} \text{m}^2$ となった。ケース 2 で計算された浸透率はケース 1 と同様に試験値の 2 倍程度、ケース 3 で計算された浸透率は試験値の 1/2 程度である。ケース 2 では実測の 2 倍程度の浸透率となり過大評価で、ケース 3 では実測の 1/2 程度の浸透率となり過小評価であるが、0.5~2 倍程度でいずれのケースもモデル全体の浸透率に概ね近い値が得られた。

ケース 2 では、空隙率が 0.098 以下（グループ 11、12）の部分の浸透率を $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ に設定し、ケース 3 では、空隙率が 0.137 以下（グループ 10、11、12）の部分で $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ に設定した。濃度変化はケース 1 では実験値から大きく外れ、ケース 2 と 3 で同程度の挙動を示すことから、本研究で用いた琉球石灰岩は、空隙率 0.1 程度以下の部分の浸透率が、図 5-6 に示した浸透率と空隙率の回帰曲線による推定値よりも低いことが考えられる。

以上より、ケース 1、2 では、空隙率の小さい部分（ここでは約 0.1 以下）の浸透率を実際よりも大きい値を与えていることが考えられる。すなわち、図 5-6 で空隙率が 0.1 程度以下の部分の浸透率が欠落しているため相関式がやや高くなっているが、実際には空隙率が 0.1 付近で低くなるような近似曲線になる可能性が考えられる。緻密な石灰岩の浸透率を測定した過去の研究事例では、空隙率が 0.1 未満の石灰岩の浸透率は 0.1mD（ $\approx 1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ ）未満であると報告されており¹⁴⁾、上記の低空隙率部分の浸透率の推察は妥当であると考えられる。本琉球石灰岩の低空隙率部分の浸透率を検証するためには、空隙スケールモデリングによる低空隙率部分の浸透性の合理的な結果を得るために重要であり、ナノフォーカス X 線 CT や FIB-SEM などによって空隙をさらに細かい解像度で抽出して検討する方法が考えられる。

5.5.2. 琉球石灰岩帯水層の物質移行特性とモデル適用性

図 5-9 より、ケース 0 では、濃度コンターはほぼ層状となり、モデル内に局所的に塩分残留が生じる領域はなく、ピストンフローに近い流れとなった。一方で、ケース 1、2、3 の全てのケースで、透水性の低い部分、つまり $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の低浸透率の領域に高い塩分濃度が残る領域が見られた。ケース 1 では、ほぼモデル内の濃度が低下しているが、マゼンタ色線で囲まれた部分の一部はある程度の濃度が残留している。図 5-8 でケース 1 の PV=2 付近の濃度に注目すると、他のケースよりわずかに高い程度で大きな違いは生じていないが、その後は濃度低下し続ける傾向を示し、実験結果と大きく外れる挙動を示した。ケース 1 では、空隙率が 0.059 以下のグループの浸透率として $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ を設定しており、低浸透率

のグループ 12 からの拡散によって、モデル排出部での濃度低下の遅延に影響を与えると考えられたが、拡散する量（グループ 12 の空隙体積）が小さいために、試験後半においても濃度低下が進行したと思われる。

一方、ケース 2、ケース 3 のシミュレーションでは、ケース 1 と同様にマゼンタ色線で囲まれた部分の濃度が残留している。図 5-8 でケース 2 と 3 の PV=2.2 付近の濃度に注目すると、ケース 1 と同様に両ケースとも実験結果と整合するような急激な濃度低下が表れている。しかし、その後の濃度低下挙動は、ケース 2、3 とともにケース 1 とは大きく異なり、試験結果と同様の濃度低下の遅延が生じた。この原因として、図 5-9 に示すように、塩分濃度が残留する領域がケース 1 よりも増加している。その結果、ケース 2、3 では、試験後半における拡散による物質移行量がケース 1 よりも多くなり、出口側の濃度低下に与える影響がケース 1 よりも大きく表れたと考えられる。そして、残留濃度範囲が大きく表れたケース 3 の方が、出口側の濃度低下に与える影響がケース 2 よりも大きくなったと考えられる。

以上より、ケース 1 では比較的全体的に移流による物質移動が生じ、ケース 2 および 3 では、浸透率が高い（空隙率が高い）部分で移流が支配的な流れが生じながら低浸透率部分からの拡散の影響を受けるような二重空隙的な物質移行が生じたと考えられる。

各ケースのモデル内流速に対して、次式で定義されるペクレ数 Pe を計算した。

$$Pe = \frac{L|v|}{D_m} \quad (5-3)$$

ここで、 L は有効長、 v は実流速、 D_m は分子拡散係数である。ここでは、グローバルモデルのグリッドサイズ 3 mm を L の値に使用した。 v は解析格子の実流速として計算した。 D_m には実験で用いたトレーサーがヨウ化カリウム水溶液であることからヨウ素イオンの値である $1.9 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ を与えた¹⁵⁾。

図 5-10 に、グループ毎に計算したペクレ数の平均を示す。ケース 1 では浸透率の低い部分のグループ 12 のみでペクレ数が 1.0 未満となり、他のグループでは 1.0 を超える結果となった。これは、モデル全体（グループ 12 以外）が移流支配であることを意味する。一方、ケース 2 では浸透率の低いグループ 11 と 12 でペクレ数が 1.0 未満となり、他の部分は 1.0 以上となった。ケース 3 においても、同様に、浸透率の低いグループ 10、11、12 でペクレ数が 1.0 未満となり、他の部分では 1.0 を超える結果となった。

ペクレ数が 1.0 未満のグループは、いずれの場合も浸透率の低いグループのみに限定されている。さらに、浸透率の高いグループのペクレ数は、いずれの場合もほとんど変化してい

ない。浸透率の低いグループと他のグループとの間のペクレ数の差は、ケース1のグループ11とグループ12で1桁を超える程度で、ケース2と3では2オーダーを超えるまで差が大きくなる。これは、浸透率の分布が極端に変化しているため、移流の大部分は浸透率が高い部分で生じていることを示唆する。すなわち、ケース2、3では選択的なフローパスが生じる二重空隙的な流れ場が生じていることが考えられる。その結果、通水初期の急激な濃度低下（主流路部分での濃度低下）とその後の濃度低下遅延（低浸透部からの拡散による影響）が生じたと考えられる。

上記の結果より、琉球石灰岩中の物質移行メカニズムとして、二重空隙のような選択的なフローパスと拡散支配部分が混在するものであると推察された。そして、その濃度低下挙動を再現する不均質連続体モデルを、ポアスケールモデリングと連続体モデルを組み合わせることで合理的に作成することができることが示された。

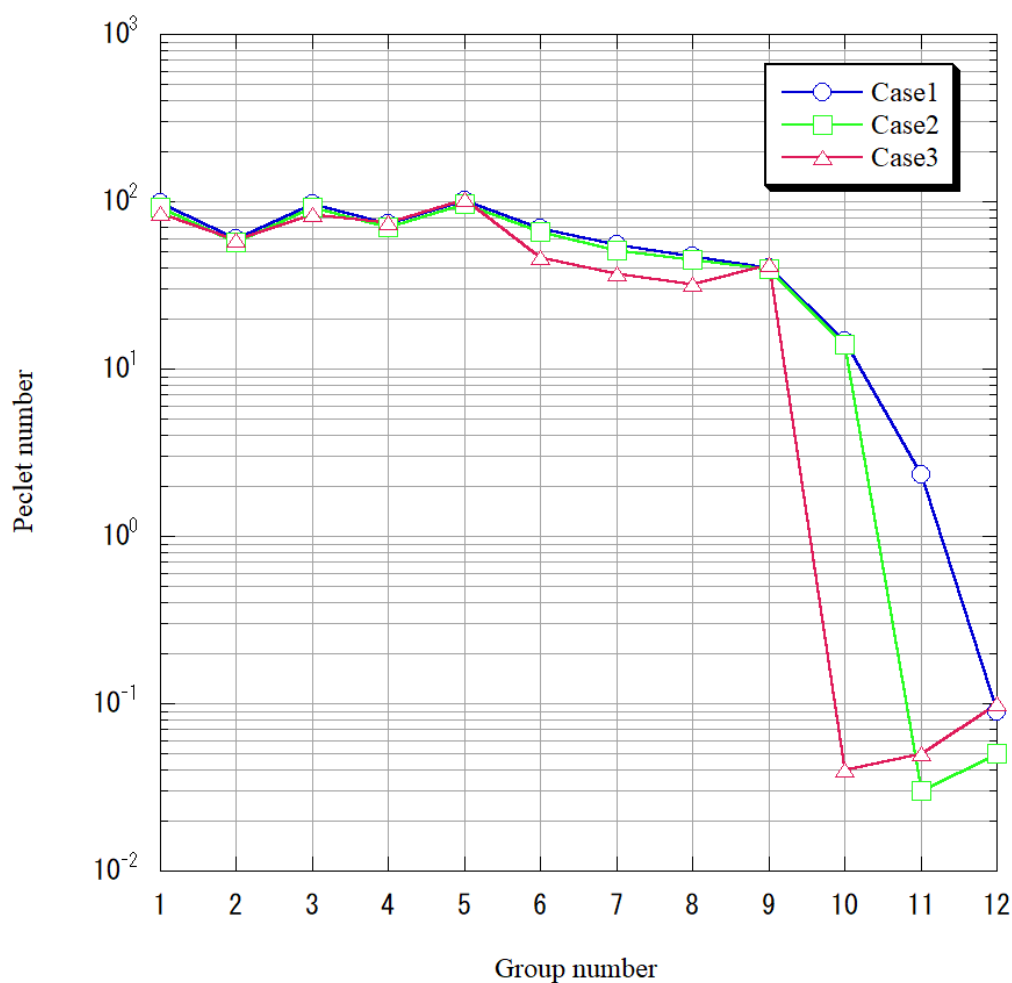


図 5-10 グループ毎に計算したペクレ数の平均

5.6. 5章のまとめ

琉球石灰岩のように空隙率の分布が広い岩石の物質移行を詳細に分析する方法論として、一般的な地下水解析手法である連続体モデルと近年実施例が多いポアスケールモデルリングを組み合わせた新しいモデリング手法を提案し、解析結果を過去の室内試験データと比較することで、モデルの有効性について確認した。

モデルで計算された空隙率と浸透率は、いずれも室内試験で測定された空隙率と浸透率と同様の値となった。また、X線CT画像と数値解析から、局所領域の浸透率を評価できることが分かった。また、提案されたモデリング手法を用いた数値シミュレーション結果から、琉球石灰岩中の液相での物質移行におけるテーリングの主な原因は、同石灰岩は移流が卓越する主要な空隙部分と、拡散が支配的なマトリックス部分が混在する二重空隙的な物質移行挙動によるものと考えられた。そして、その物質移行挙動を同モデリング手法によって再現できることを確認した。

5.7. 5章参考文献

- 1) 農林水産省農村振興局企画部資源課 内閣府沖縄総合事務局農林水産部土地改良課 (2008) : 淡水レンズを活用した水源開発を目指して「淡水レンズ開発調査」「淡水レンズ強化技術実証調査」調査成果の概要.
- 2) Furukawa, H. and Kuroda, T. (2011): The underground dam: a new concept in water resource development to meet the challenges of natural disaster & climate change, Kaichosha. ISBN: 9784874158241.
- 3) Pruess, K., Oldenburg, C., and Moridis, G. (1999): TOUGH2 user's guide. Version 2.0, Report, LBNL-43134.
- 4) Pruess, K. and Narasimhan, T.N. (1982): On Fluid Reserves and the Production of Superheated Steam from Fractured, Vapor-Dominated Geothermal Reservoirs, Journal Geophysical Research, 87, B11, pp.9329-9339, DOI: <https://doi.org/10.1029/JB087iB11p09329>.
- 5) Pruess, K. and Narasimhan, T.N. (1985): A Practical Method for Modeling Fluid and Heat Flow in Fractured Porous Media, Society of Petroleum Engineers Journal, 25, No.1, pp.14-26, DOI: <https://doi.org/10.2118/10509-PA>.
- 6) Blunt, M.J., Bijeljic, B., Dong, H., Gharbi, O., Iglauer, S., Mostaghimi, P., Paluszny, A., and Pentland, C. (2013) Pore-scale imaging and modelling, Advances in water resources, Vol.51, pp.197-216, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.003>.
- 7) Mostaghimi, P., Blunt, M.J., and Bijeljic, B. (2013): Computations of Absolute Permeability on Micro-CT Images, Mathematical Geosciences, 45, pp.103-125, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11004-012-9431-4>.
- 8) Schneider, C.A., Rasband, W.S., and Eliceiri, K.W. (2012): NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis, Nature Methods 9, 671-675.
- 9) 菊池喜昭, 水谷崇亮, 永留健, 梶俊郎 (2006) : マイクロフォーカス X 線 CT スキャナ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.
- 10) Bijeljic, B., Mostaghimi, P., and Blunt, M.J. (2013): Insights into non-Fickian solute transport in carbonates, Water Resources Research, 49, pp. 2714-2728, DOI: <https://doi.org/10.1002/wrcr.20238>
- 11) Bijeljic, B., Raeini, A., Mostaghimi, P., and Blunt, M.J. (2013): Prediction of non-Fickian solute transport in different classes of porous media using direct simulation on pore-scale images, Physical Review E, vol.87, 013011, DOI: <https://doi.org/10.1103/physreve.87.013011>
- 12) OpenFOAM Foundation: OpenFOAM User Guide, <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/>.
- 13) Zhang, K., Wu, Y., and Pruess, K. (2008): User's guide for TOUGH2-MP - A Massive Parallel Version of the TOUGH2 Code, Report, LBNL-315E.

- 14) Rashid, F., Glover, P.W.J., Lorinczi, P., Collier, R., and Lawrence, J. (2015): Porosity and permeability of tight carbonate reservoir rocks in the north of Iraq, Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 133, pp. 147-161, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.05.009>.
- 15) Grathwohl, P. (1998): Diffusion in Natural Porous media, Contaminant Transport, Sorption/Desorption and Dissolution Kinetics, Kluwer Academic Publishers, Boston.

第6章 結論

サンゴ礁の低平な島々からなる島嶼国は、地球温暖化の影響を強く受けることが予想されており、淡水資源を安定的に確保できる技術開発が求められている。このような背景の下、農林水産省と沖縄総合事務局は、離島における新しい淡水資源の確保技術として、フローティング型地下ダムを考案している。フローティング型地下ダムは、止水壁を島の帯水層の途中まで、水平方向に周状に閉合するように構築することで、止水壁を建設した深度付近まで淡水レンズの厚さを増大させる技術である。したがって、フローティング型地下ダムでは、海水で満たされた帯水層を、上方からの淡水（雨水浸透）で置換することで淡水を貯留する。

一方、環礁島の帯水層は第四紀石灰岩に属し、降雨による溶解や続成作用（化学風化、圧密・膠着・再結晶など）によって、大小さまざまな大きさの空隙が不均質に分布する空隙構造を呈する。一般に、空隙の大きさが均等でなく、粗い空隙と微細な空隙が発達しているような地盤における物質移行の特徴として、トレーサー試験などにおける濃度破過曲線での急激な濃度変化とその後の緩やかな濃度変化（テーリング）が生じることが過去の研究で示されている。したがって、フローティング型地下ダムにおける淡水貯留過程においても、帯水層の塩水がスムーズに淡水に置換しない（濃度低下が進行しない）可能性がある。また、フローティング型地下ダムが実際に建設された事例は世界でもまだ無い上に、前述したように同地下ダムが従来の地下ダムとは異なる淡水貯留メカニズムであることから、複雑な空隙構造を有する第四紀石灰岩層における塩淡界面挙動を予測評価する方法の確立は重要である。

本研究では、環礁島の帯水層を形成する第四紀石灰岩層として琉球石灰岩を利用し、空隙が塩水飽和した状態から上方からの淡水供給によってどのような濃度変化を示すか室内トレーサー試験を実施して調査し、その濃度変化を数値シミュレーションで再現するための新しいモデル化手法の確立を目的とした。

1章では、本研究の背景として、離島における淡水資源の現状を示すとともに、その対策として考案されているフローティング型地下ダムを概説し、本研究の目的と構成を示した。

2章では、環礁島の水文地質に関する既往研究をレビューし、環礁島帯水層における物質移行に関する課題や特徴を整理した。そして、環礁島帯水層の石灰岩層と同じ第四紀石灰岩に属する琉球石灰岩の水理地質パラメータに関する既往研究を調査した。また、本研究で提案するモデル化に関係する地下水解析手法の概要と課題について整理した。その結果、

- ・ 琉球石灰岩の力学特性に関しては、ボーリング調査のコアを用いた一軸圧縮強度と空隙率など、比較的多くの調査が行われている
 - ・ 透水係数に関しては原位置試験によるものがほとんどであり、室内試験による詳細な検討を行っている事例はほとんど見られない
 - ・ 第四紀石灰岩に対して、室内試験等により物質移行メカニズムを詳細に調査した事例はほとんど見られない上、モデル化手法を検討した事例もほとんど見られない
- ことが分かった。以上により、本研究の位置付けを明確に示した。

3章では、琉球石灰岩コアを用いた塩水淡水置換の室内トレーサー試験を実施し、フローティング型地下ダム淡水貯留の過程での濃度低下傾向などの基本データを取得した。また、X線CTを用いた同様の塩水淡水置換の室内トレーサー試験を実施し、淡水貯留の過程における空隙内の濃度低下傾向を可視化することで、琉球石灰岩中の塩水淡水置換のメカニズム（特にテーリング原因）について考察した。また、亀裂性岩盤が主な対象である二重空隙モデルによる同試験結果（下流側濃度変化）の再現解析を試みた。

その結果、琉球石灰岩中の塩水淡水置換過程においては、空間的に独立性の高い空隙に残留する塩水によってテーリングが生じている可能性を示すとともに、それらを再現する合理的なモデル化手法が必要であることを明らかにした。

4章では、大きさの異なる琉球石灰岩供試体をX線CTで撮影し、同岩石の空隙特性について評価した。また、数値モデル化を念頭に、空隙体積と空隙表面積が維持される単純化された空隙形状について検討した。

その結果、第四紀の琉球石灰岩の空隙は、広いサイズ範囲で空隙体積と空隙表面積の頻度分布でバイナリフラクタルの特性を有することが示された（空隙体積で12オーダー、空隙表面積で10オーダー）。また、空隙クラスターの体積に応じて大きさを変える小球の集合体で空隙クラスターをモデル化し、空隙クラスターの形状の複雑さの程度を表す新しいパラメータを導入することで、実際の空隙クラスターの表面積と体積の両方の分布とよく一致する空隙クラスター分布を作成できる結果が得られた。

5章では、空隙サイズが広く分布する琉球石灰岩コアに対して、一般的な地下水解析手法である連続体モデルと、近年実施例が増加しているポアスケールモデリングを組み合わせた新しいモデル化手法を提案し、実際の琉球石灰岩コアに対して同モデルを適用させ、室内トレーサー試験結果の再現解析を行うことでモデルの妥当性について検証した。

その結果、提案したモデル化手法で計算された空隙率と浸透率は、いずれも室内試験で測定された空隙率と浸透率と同様の値を示した。また、試験で得られた下流側排水中のトレーサー濃度の経時変化についても、同モデル化手法で概ね再現できることを確認した。数値シミュレーション結果より、琉球石灰岩中の液相での物質移行におけるテーリングの主な原因は、同石灰岩は移流が卓越する主要な空隙部分と、拡散が支配的なマトリックス部分が混在する二重空隙的な物質移行挙動によると考えられた。

今後の主な課題として、以下が挙げられる。

- ・ ナノフォーカス X 線 CT や FIB-SEM など、マイクロフォーカス X 線 CT の解像度よりも細かい解像度で空隙構造を観察することで、モデル化の精度を向上させる
- ・ その他の岩石試料に対して本モデル化手法を適用させ、モデルの汎用性向上を図る
- ・ グローバルモデルの作成では、造影剤を使用するなどによって、モデル作成の精度向上を図る
- ・ 淡水貯留の際の塩水部への淡水浸透だけでなく、淡水資源の揚水利用による塩水侵入やその淡水浸透と塩水侵入の繰り返しの影響評価方法を検討する

謝辞

信州大学工学部中屋眞司教授には、本学社会人博士課程への入学から本論文の完成まで、終始にわたり多大なるご指導及びご助言を頂きました。特に、本研究のオリジナリティ部分の抽出、論文の構成、海外ジャーナルへの投稿に際してのご指導は、民間研究者として歩んでいく上で大変に有益となるものでした。この場をお借りして、心より感謝の意を表します。

信州大学工学部の梅崎建夫教授、吉谷純一教授、河村隆准教授、東京大学大学院新領域創成科学研究科の徳永朋祥教授には、本論文の審査をお引き受けいただき、貴重なお時間を割いて御指導いただきました。本審査会でいただいたご意見は、本研究に関する今後の課題として大変貴重なものでした。ここに厚く御礼申し上げます。

海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所の水谷崇亮氏、平井壮氏（当時在籍）の両氏には、本文第3章の試験に際して、同研究所所有のX線CT装置の利用をご快諾いただいたとともに、試験計画、X線CT装置のオペレーション、評価方法等、多大なる御協力ならびに御助言を頂きました。心より厚く御礼申し上げます。

本文第5章のモデル化と評価に際して、Imperial College LondonのBranko Bijeljic氏、Qingyang Lin氏、Ali Q. Raeni氏、Martin J. Blunt氏には、小職の客員研究員としての留学を受け入れていただいたとともに、X線CT装置のオペレーション、解析プログラムの使用等、多大なるご指導およびご協力をいただきました。また、同大学のGraham Nash氏、Norman Nicholls氏の両氏には、試験の実施に際してご協力を頂きました。深く感謝いたします。

大成建設株式会社の長島一郎氏、丸屋剛氏、青木智幸氏、山本肇氏、熊本創氏をはじめとする職場の皆様には、博士課程への進学をご理解いただくとともに様々なご配慮を頂きました。特に、山本肇氏には、本研究を進めて行く上での貴重なご意見を多く頂きました。心より御礼申し上げます。また、元大成建設株式会社社員の今村聡氏には、本研究テーマである琉球石灰岩サンプルを現場から取り寄せていただき、本研究の契機となるご助言を頂きました。心から感謝の意を表します。

大学で同じ中屋研究室に所属していた小原史也氏（現、北海道ガス株式会社）、高田遼吾氏の両氏には、小職が頻繁に大学へ通えない環境において、多忙にも関わらず、学内での対応をしていただきました。心より御礼申し上げます。

最後に、常に応援してくれた両親、進学への理解と勉強時間を作ってくれた妻の聖子、一緒に遊ぶ時間が減っても我慢してくれた二人の子供の百香と凜太郎に心より感謝します。

令和3年3月
増岡 健太郎

付録

A) 琉球石灰岩基質部の密度試験結果

JIS A 1202 JGS T 111		土粒子の密度試験(測定)		
調査件名 琉球石灰岩		試験年月日 2011年 5月 16日		
		試験者 半田 佳正		
試料番号(深さ)				
ピクノメーター Na		41	69	93
(試料+蒸留水+ピクノメーター)の質量 m_b g		154.886	164.216	142.893
m_b をはかったときの内容物の温度 T °C		20.5	20.5	20.5
T °Cにおける蒸留水の密度 $\rho_w(T)$ g/cm ³		0.99810	0.99810	0.99810
温度 T °Cの蒸留水を満たしたときの(蒸留水+ピクノメーター)質量 m_a g		144.775	153.918	133.261
試料の	容器 Na	267	268	270
	(炉乾燥試料+容器)質量 g	120.952	118.807	113.334
炉乾燥質量	容器質量 g	104.922	102.450	98.008
	m_s g	16.030	16.357	15.326
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		2.703	2.694	2.686
平均値 ρ_s g/cm ³		2.694		
試料番号(深さ)				
ピクノメーター Na				
(試料+蒸留水+ピクノメーター)の質量 m_b g				
m_b をはかったときの内容物の温度 T °C				
T °Cにおける蒸留水の密度 $\rho_w(T)$ g/cm ³				
温度 T °Cの蒸留水を満たしたときの(蒸留水+ピクノメーター)質量 m_a g				
試料の	容器 Na			
	(炉乾燥試料+容器)質量 g			
炉乾燥質量	容器質量 g			
	m_s g			
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³				
平均値 ρ_s g/cm ³				
試料番号(深さ)				
ピクノメーター Na				
(試料+蒸留水+ピクノメーター)の質量 m_b g				
m_b をはかったときの内容物の温度 T °C				
T °Cにおける蒸留水の密度 $\rho_w(T)$ g/cm ³				
温度 T °Cの蒸留水を満たしたときの(蒸留水+ピクノメーター)質量 m_a g				
試料の	容器 Na			
	(炉乾燥試料+容器)質量 g			
炉乾燥質量	容器質量 g			
	m_s g			
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³				
平均値 ρ_s g/cm ³				
特記事項 ジョークラッシャーで粉砕後、9.5mm以上を取り除いた試料 煮沸:約4h		1) ピクノメーターの検定結果から求める。 $\rho_s = \frac{m_s}{m_s + (m_a - m_b)} \rho_w(T)$		

図 A-1 琉球石灰岩基質部の密度試験結果

B) 琉球石灰岩供試体の外観写真



図 B-1 D100-1 外観写真 (直径 100mm)



図 B-2 D100-2 外観写真 (直径 100mm)



図 B-3 D100-3 外觀写真 (直径 100mm)



図 B-4 D100-4 外觀写真 (直径 100mm)



図 B-5 D100-5 外觀写真 (直径 100mm)



図 B-6 D100-6 外觀写真 (直径 100mm)



図 B-7 D100-7 外觀写真 (直径 100mm)



図 B-8 D100-8 外觀写真 (直径 100mm)



図 B-9 D50-1 (X線 CT 塩淡水置換試験に使用) 外観写真 (直径 50mm)



図 B-10 D50-2 外観写真 (直径 50mm)

C) 琉球石灰岩供試体の X 線 CT 画像

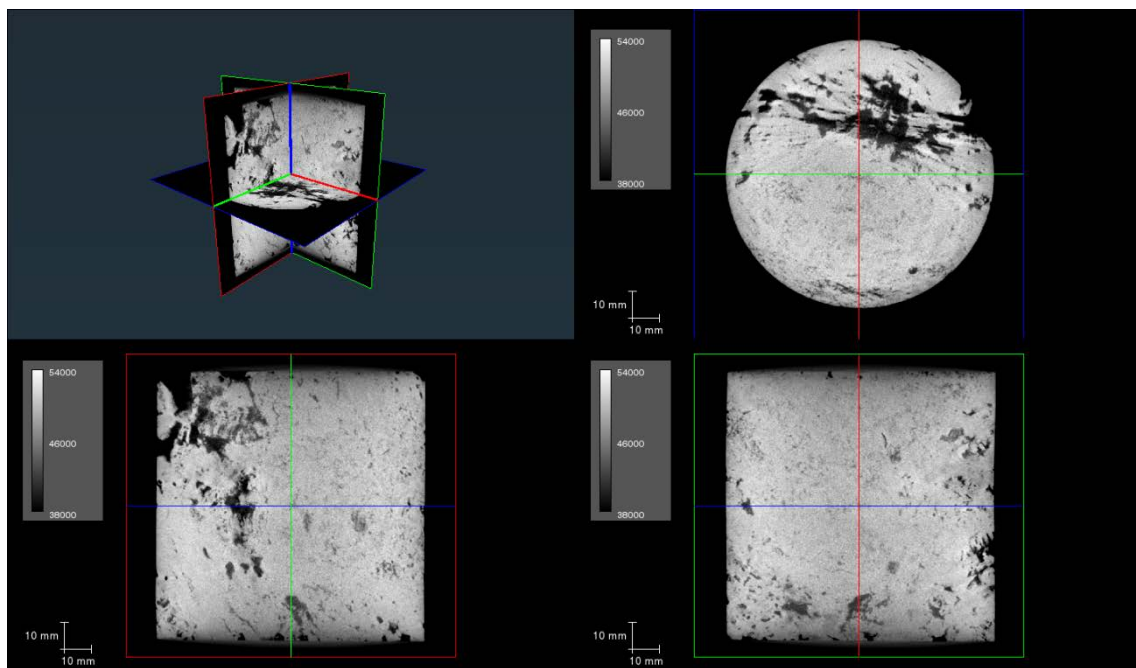


図 C-1 D100-1 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 $119\mu\text{m}$)

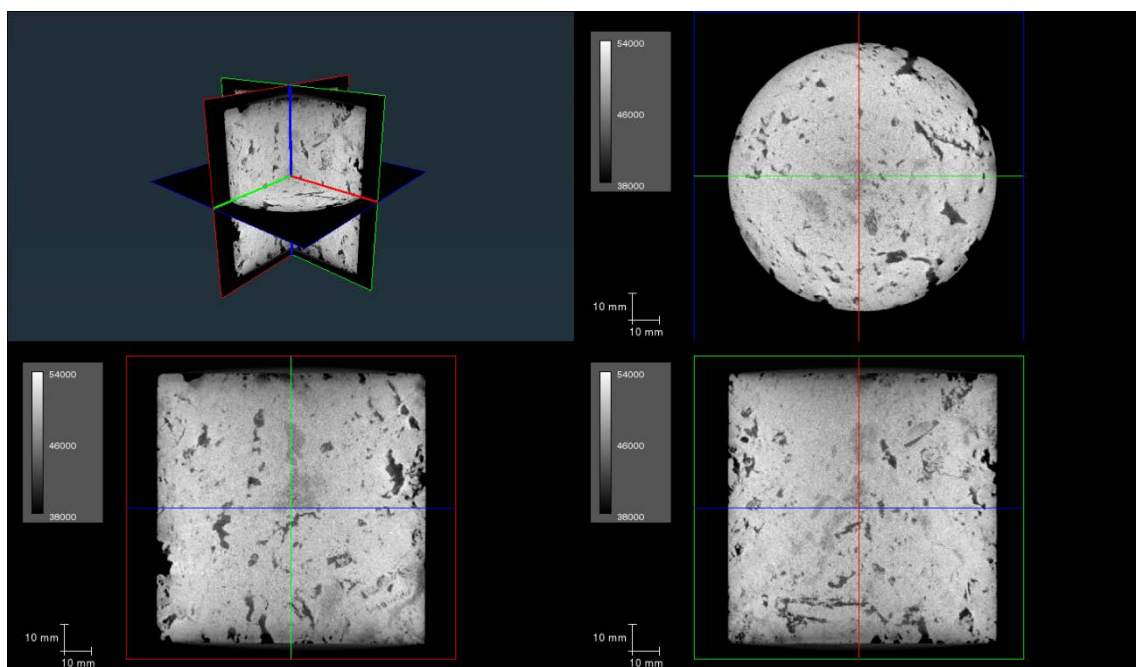


図 C-2 D100-2 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 $119\mu\text{m}$)

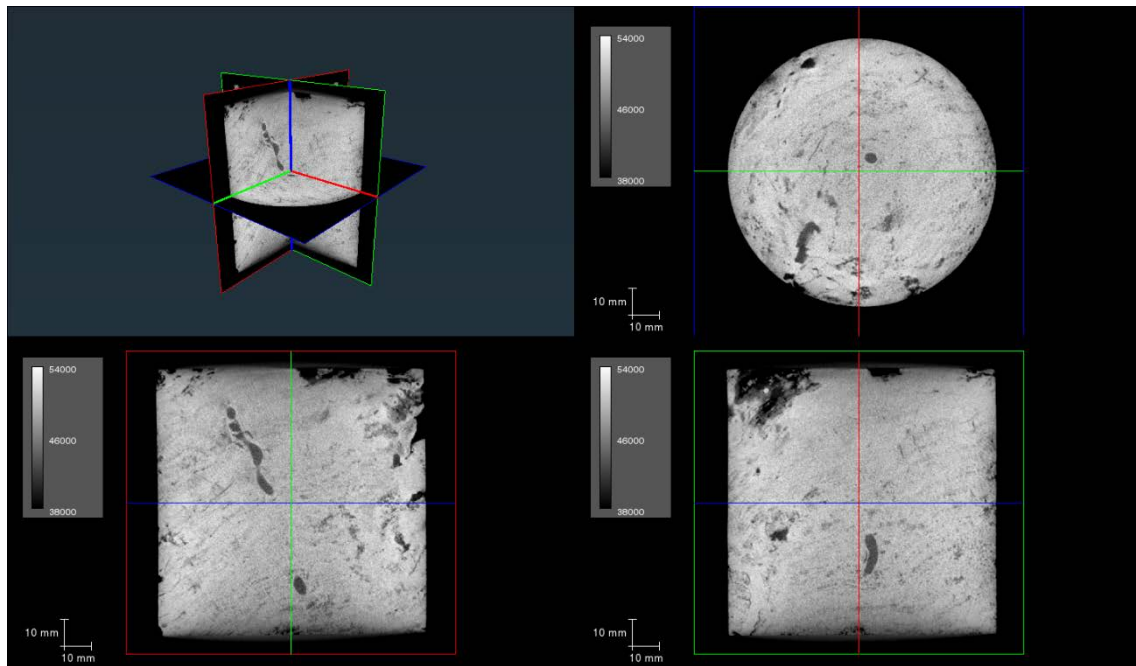


図 C-3 D100-3 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 119 μ m)

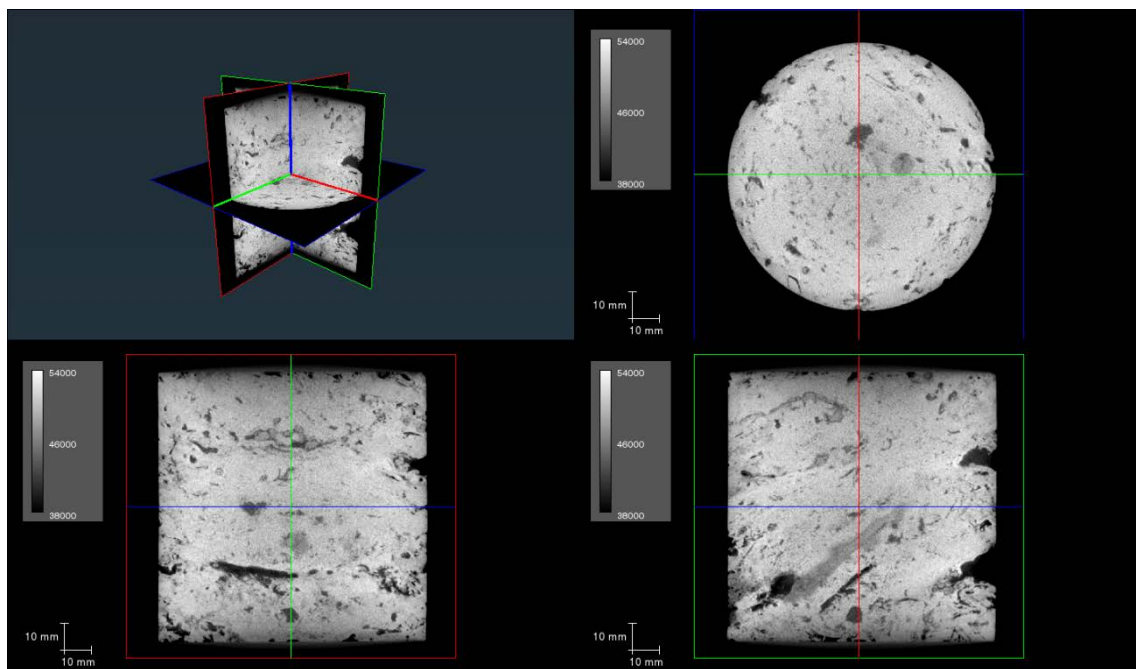


図 C-4 D100-4 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 119 μ m)

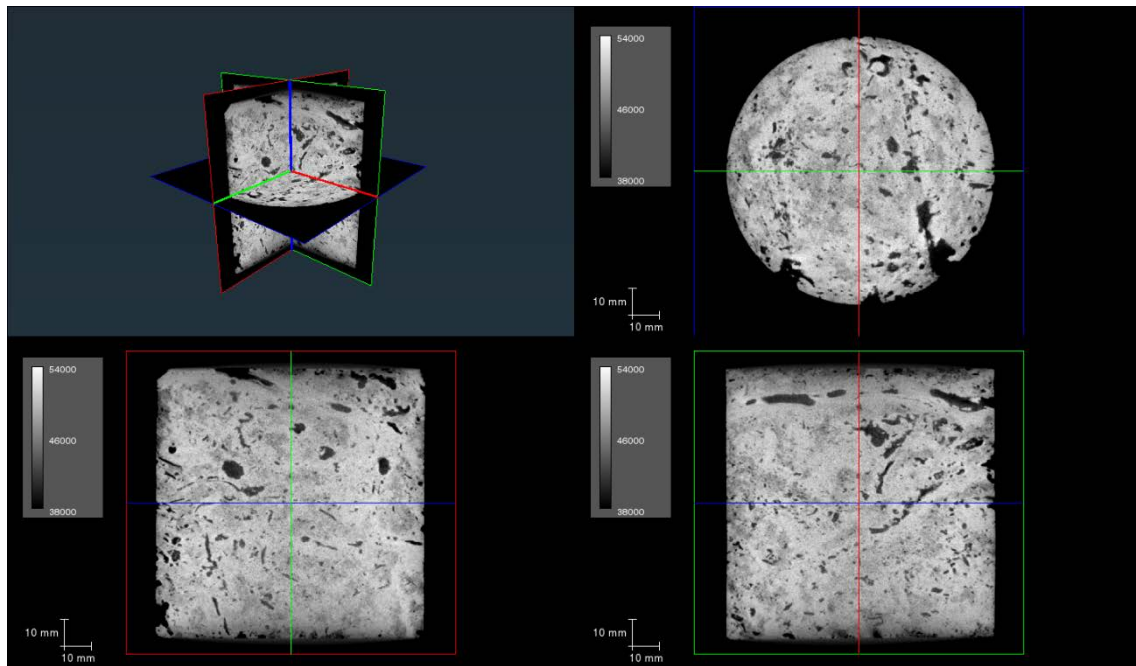


図 C-5 D100-5 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 119 μ m)

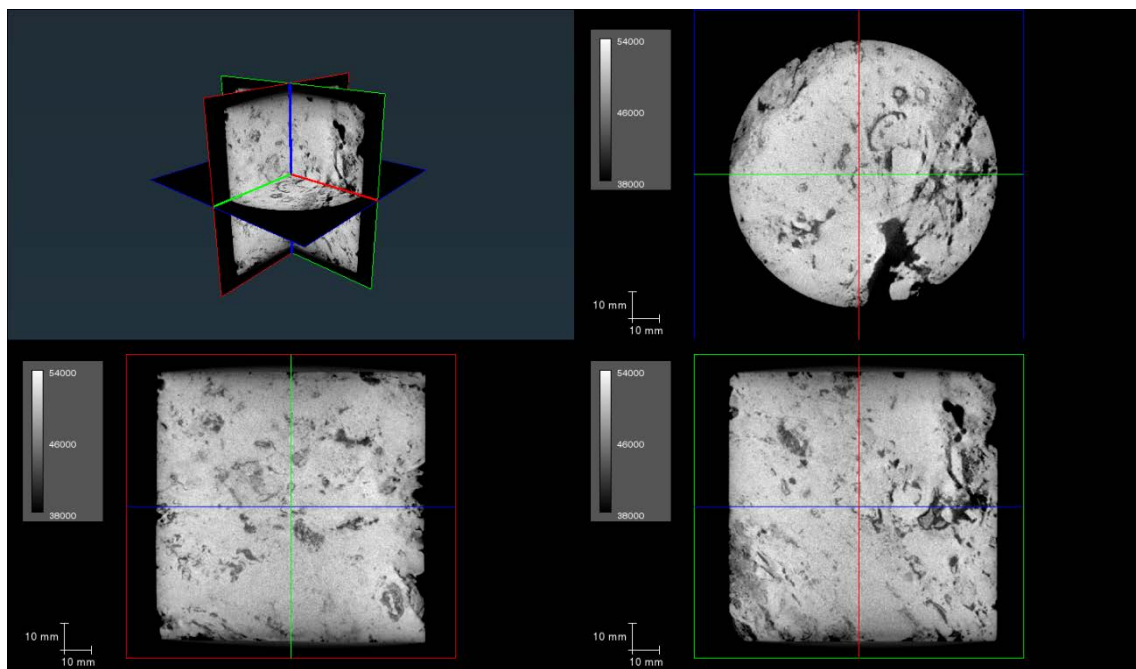


図 C-6 D100-6 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 119 μ m)

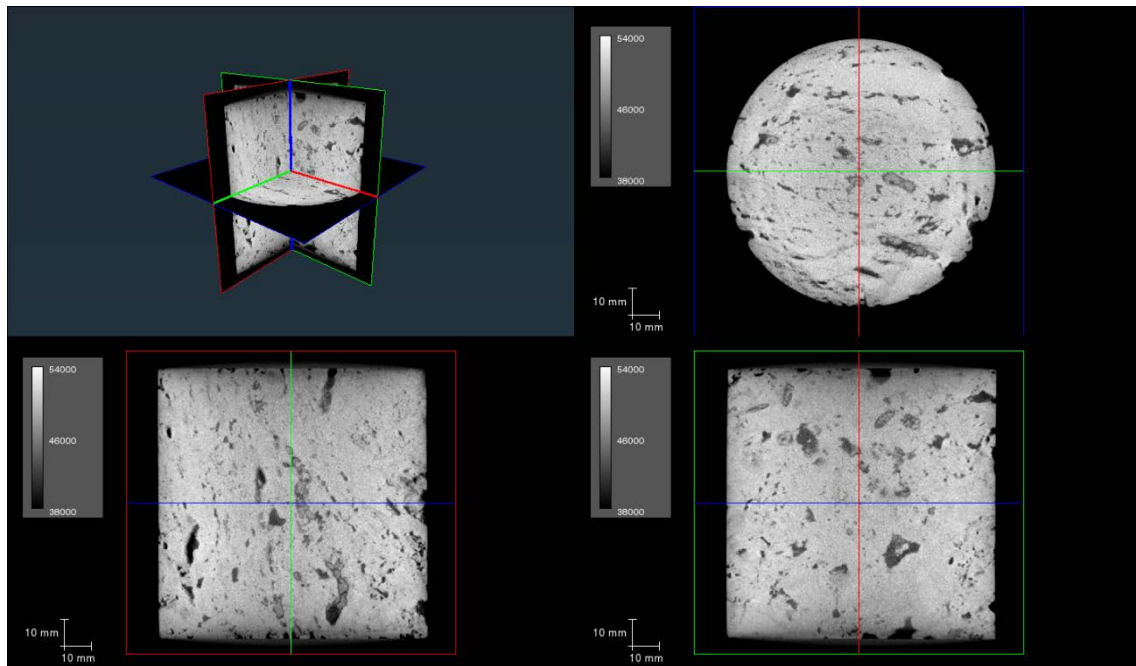


図 C-7 D100-7 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 119 μ m)

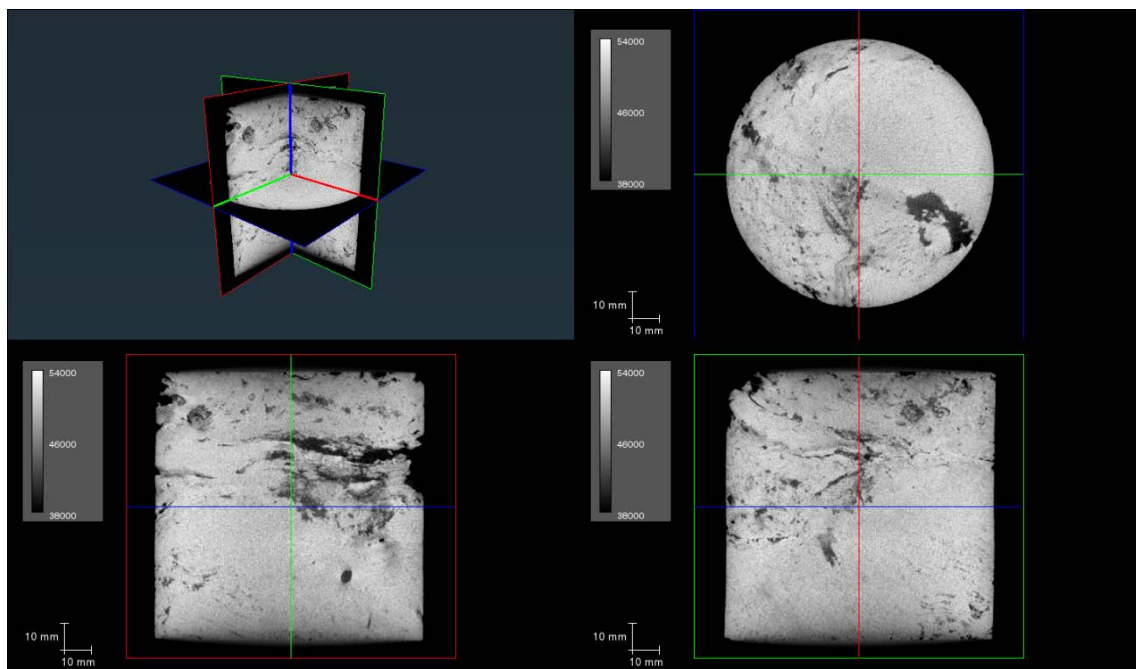


図 C-8 D100-8 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 119 μ m)

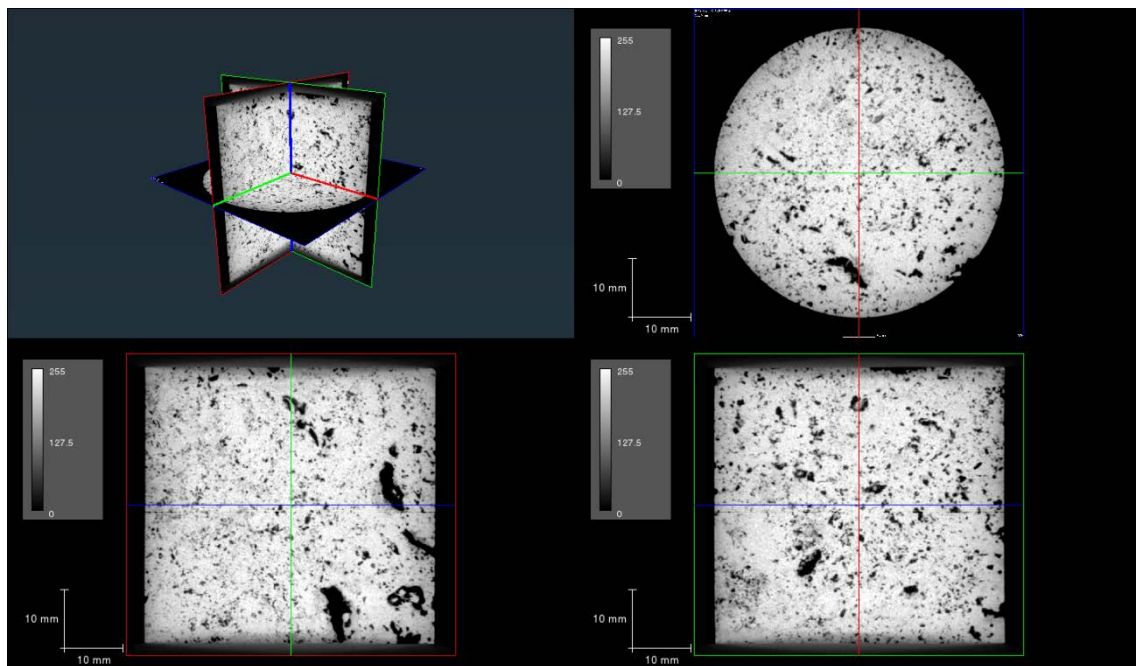


図 C-9 D50-1 (X線 CT 塩淡水置換試験に使用) 供試体の
X線 CT 画像例 (解像度 55 μ m)

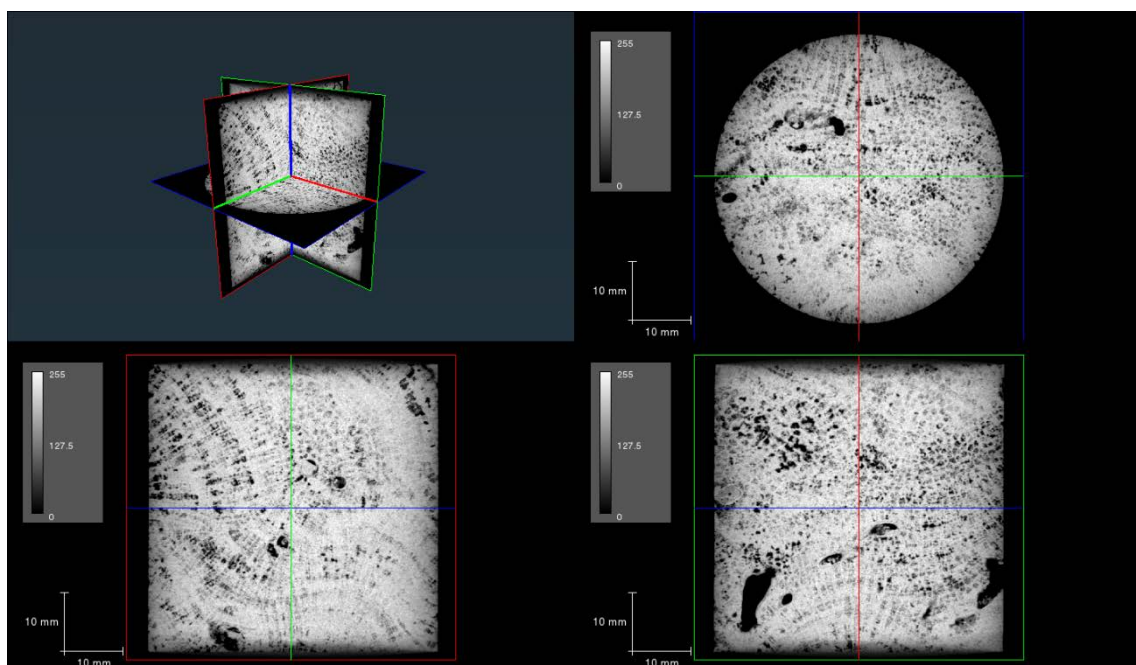


図 C-10 D50-2 供試体の X線 CT 画像例 (解像度 55 μ m)

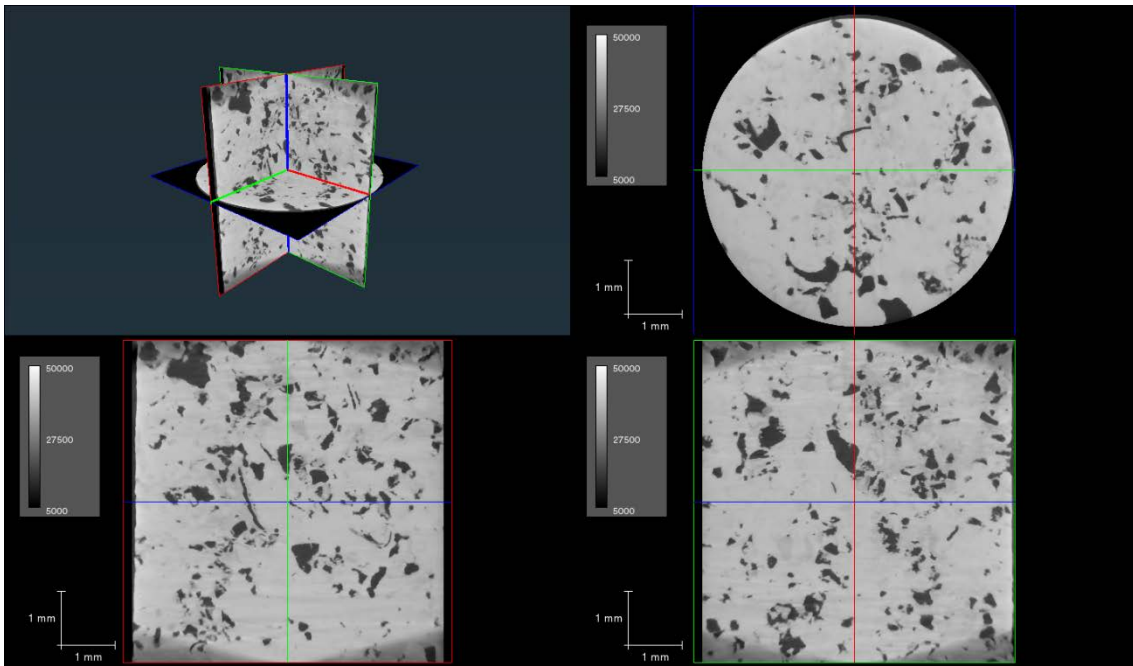


図 C-11 D6-1 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 3 μ m)

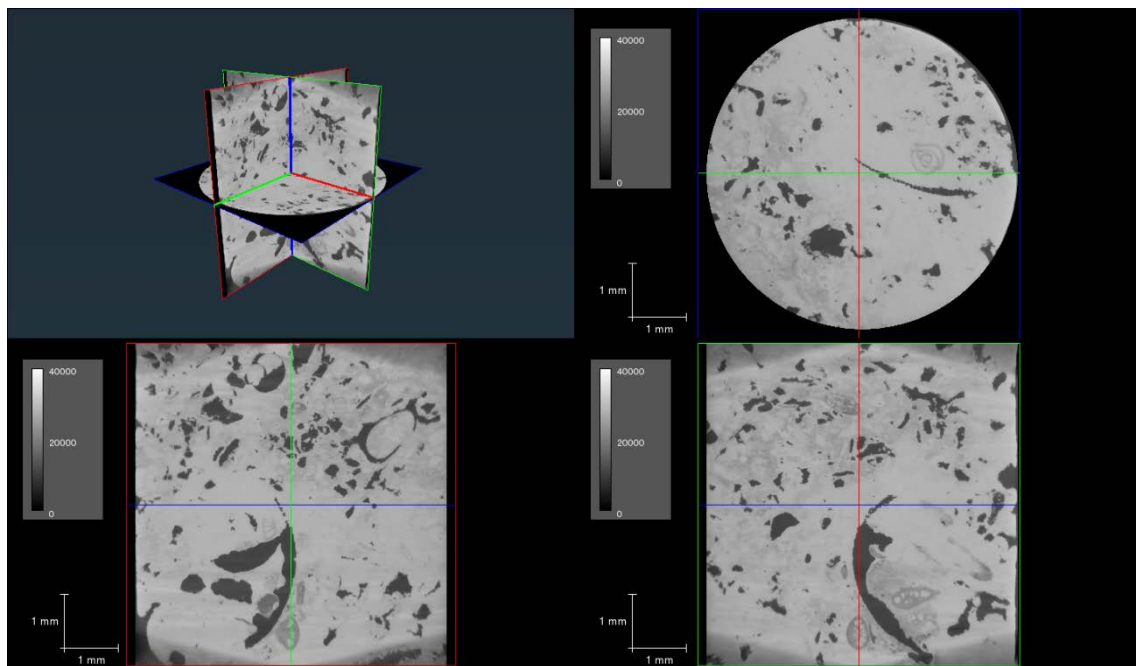


図 C-12 D6-2 供試体の X 線 CT 画像例 (1) (解像度 $3\mu\text{m}$)

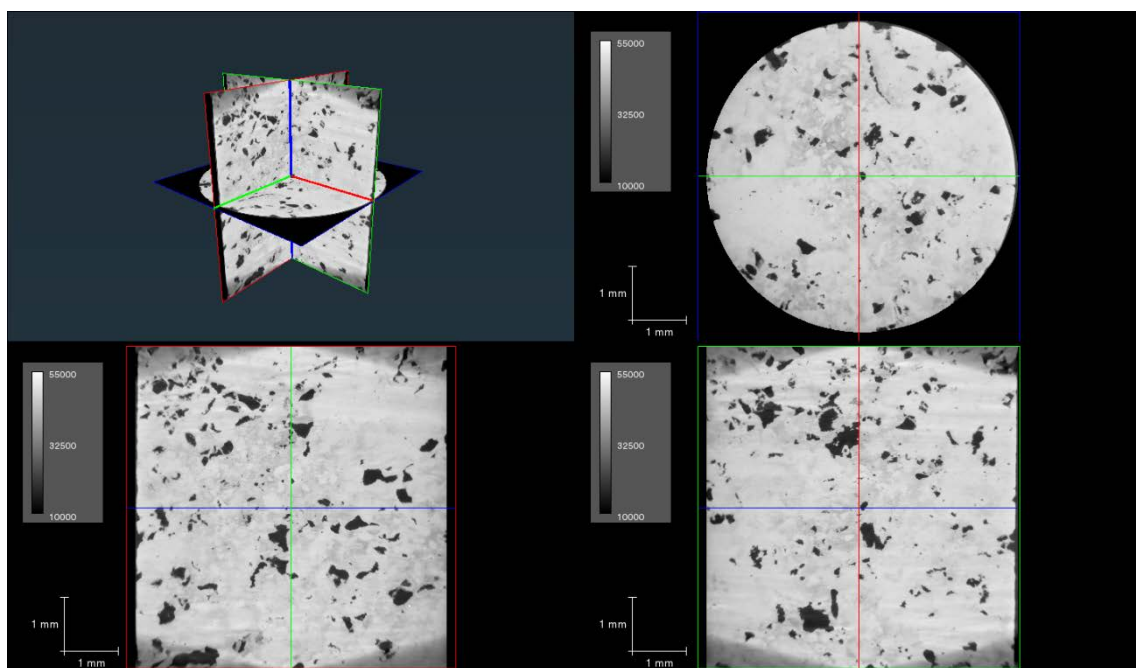


図 C-13 D6-2 供試体の X 線 CT 画像例 (2) (解像度 $3\mu\text{m}$)

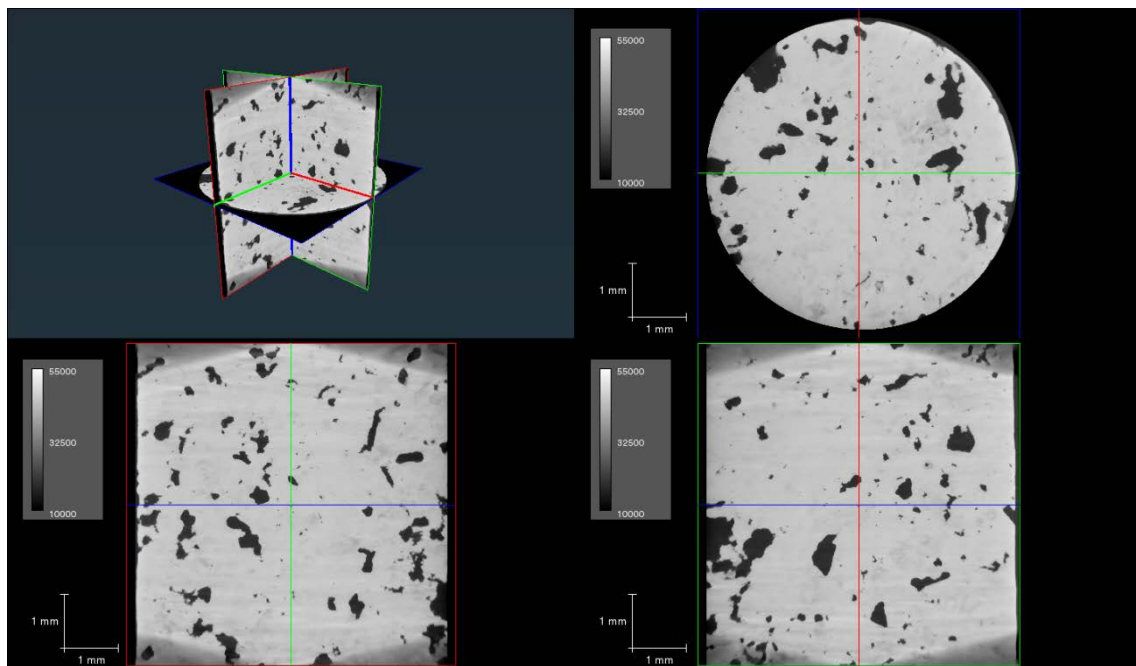


図 C-14 D6-3 供試体の X 線 CT 画像例 (1) (解像度 $3\mu\text{m}$)

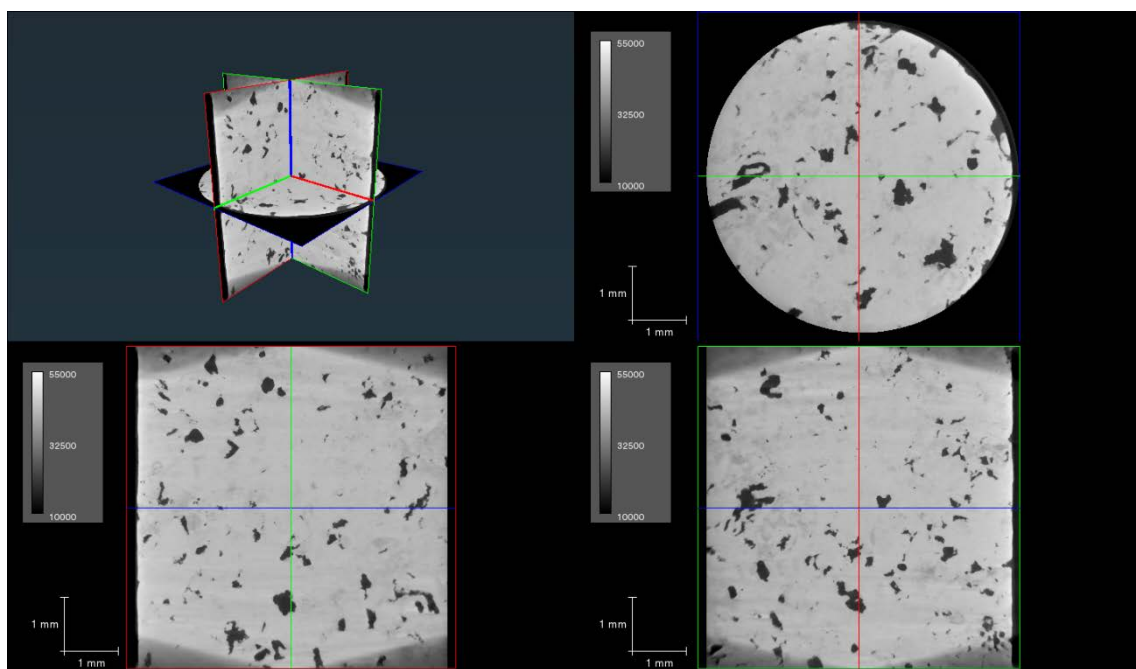


図 C-15 D6-3 供試体の X 線 CT 画像例 (2) (解像度 $3\mu\text{m}$)

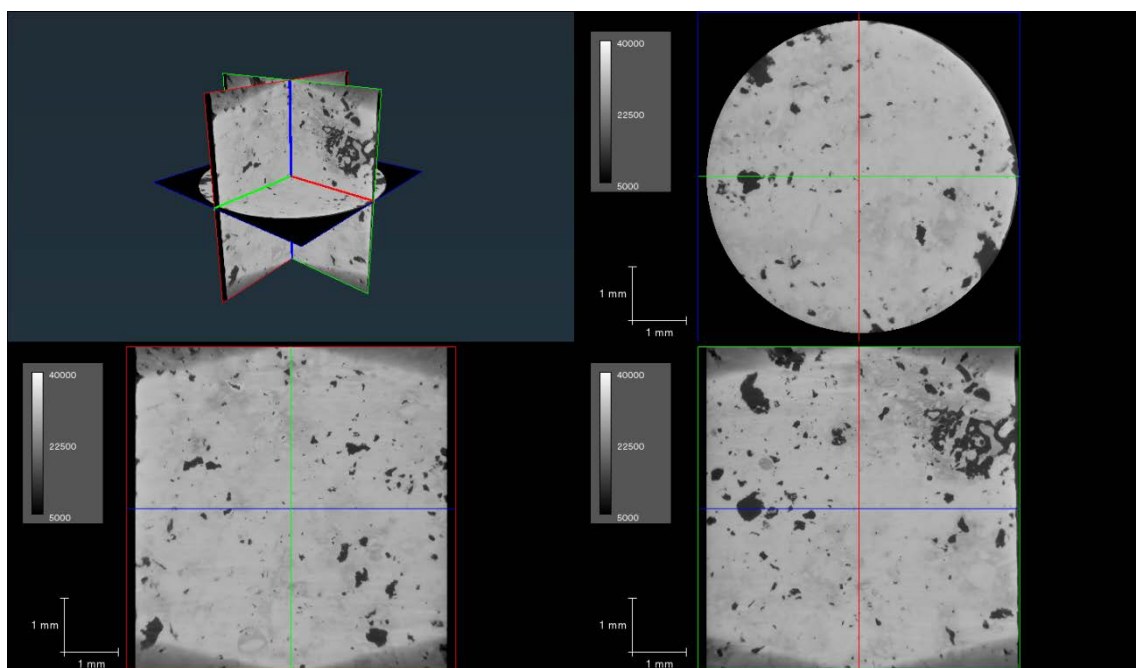


図 C-16 D6-4 供試体の X 線 CT 画像例 (1) (解像度 $3\mu\text{m}$)

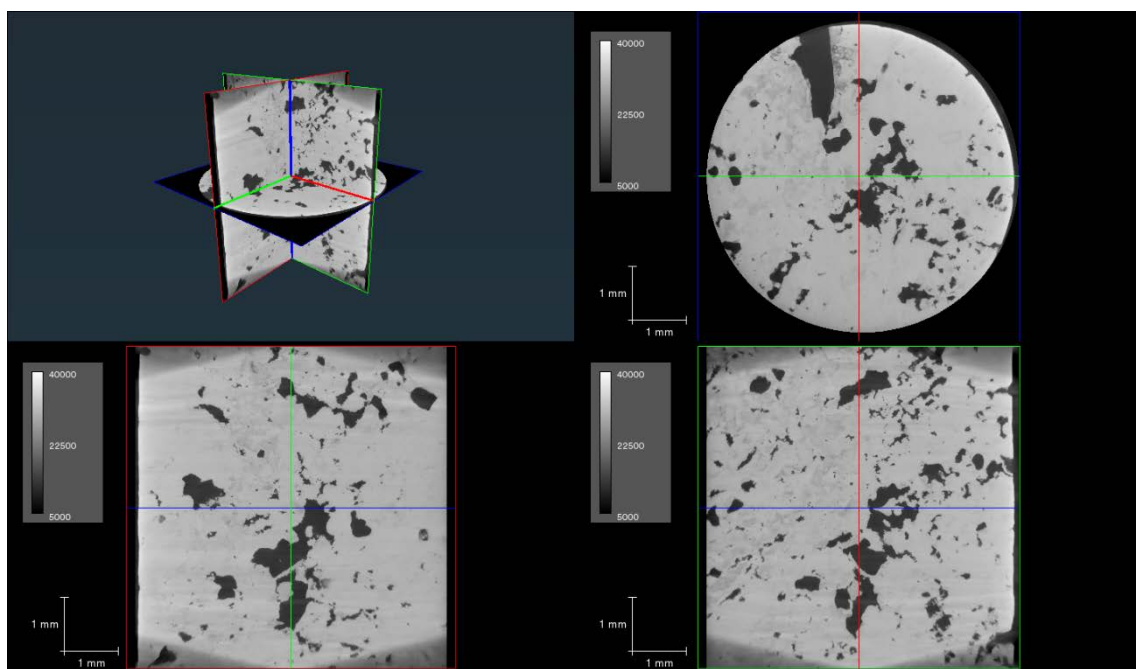


図 C-17 D6-4 供試体の X 線 CT 画像例 (2) (解像度 $3\mu\text{m}$)

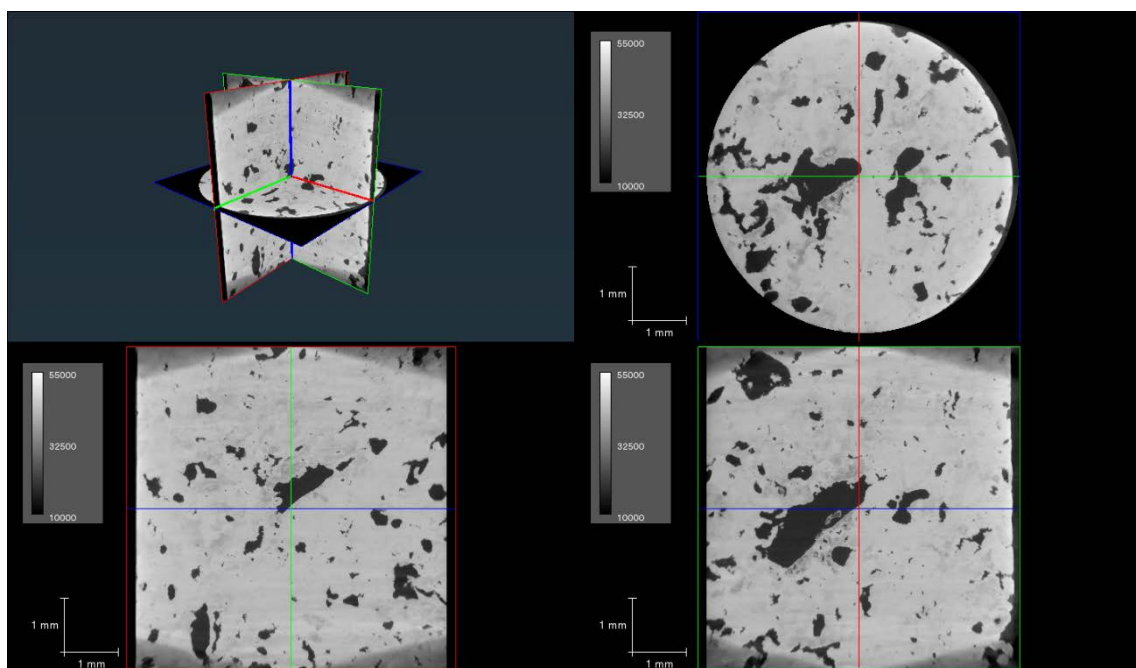


図 C-18 D6-5 供試体の X 線 CT 画像例 (解像度 3 μ m)

D) グローバルモデルにおける浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域

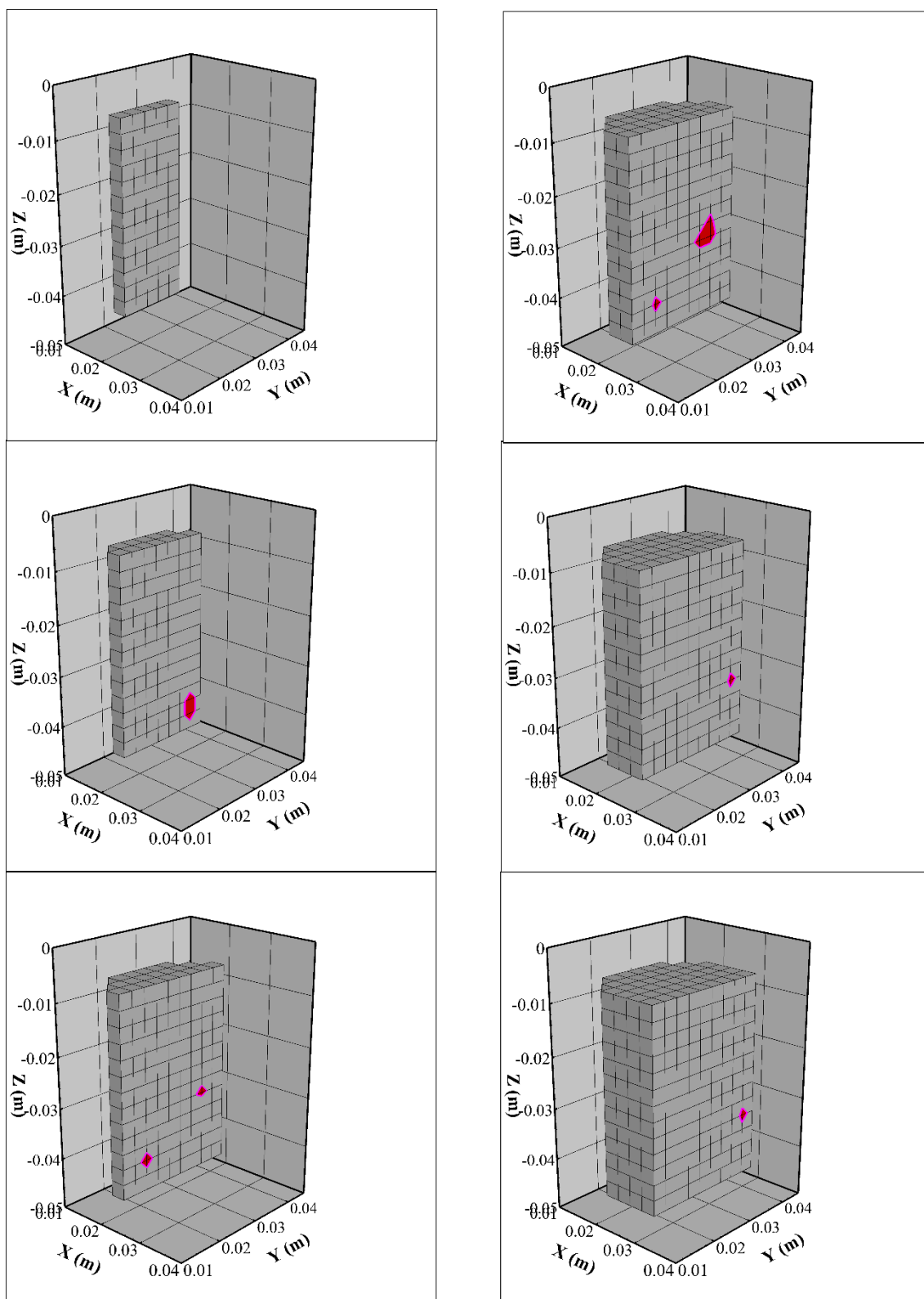


図 D-1 グローバルモデルのケース 1 の各 YZ 断面での浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域 (1)

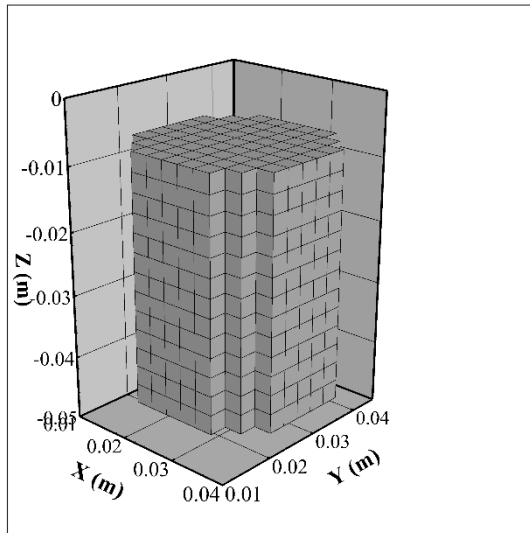
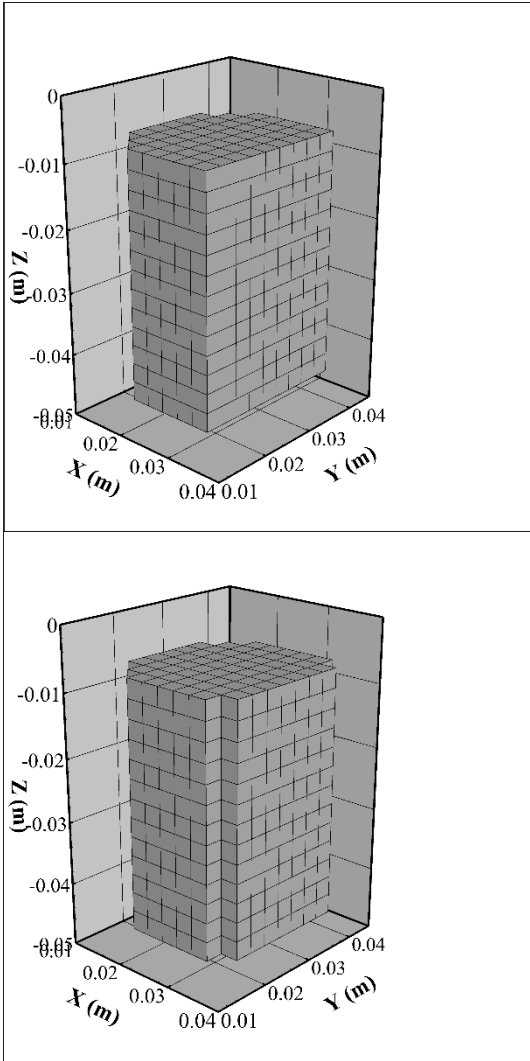


図 D-2 グローバルモデルのケース 1 の各 YZ 断面での浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域 (2)

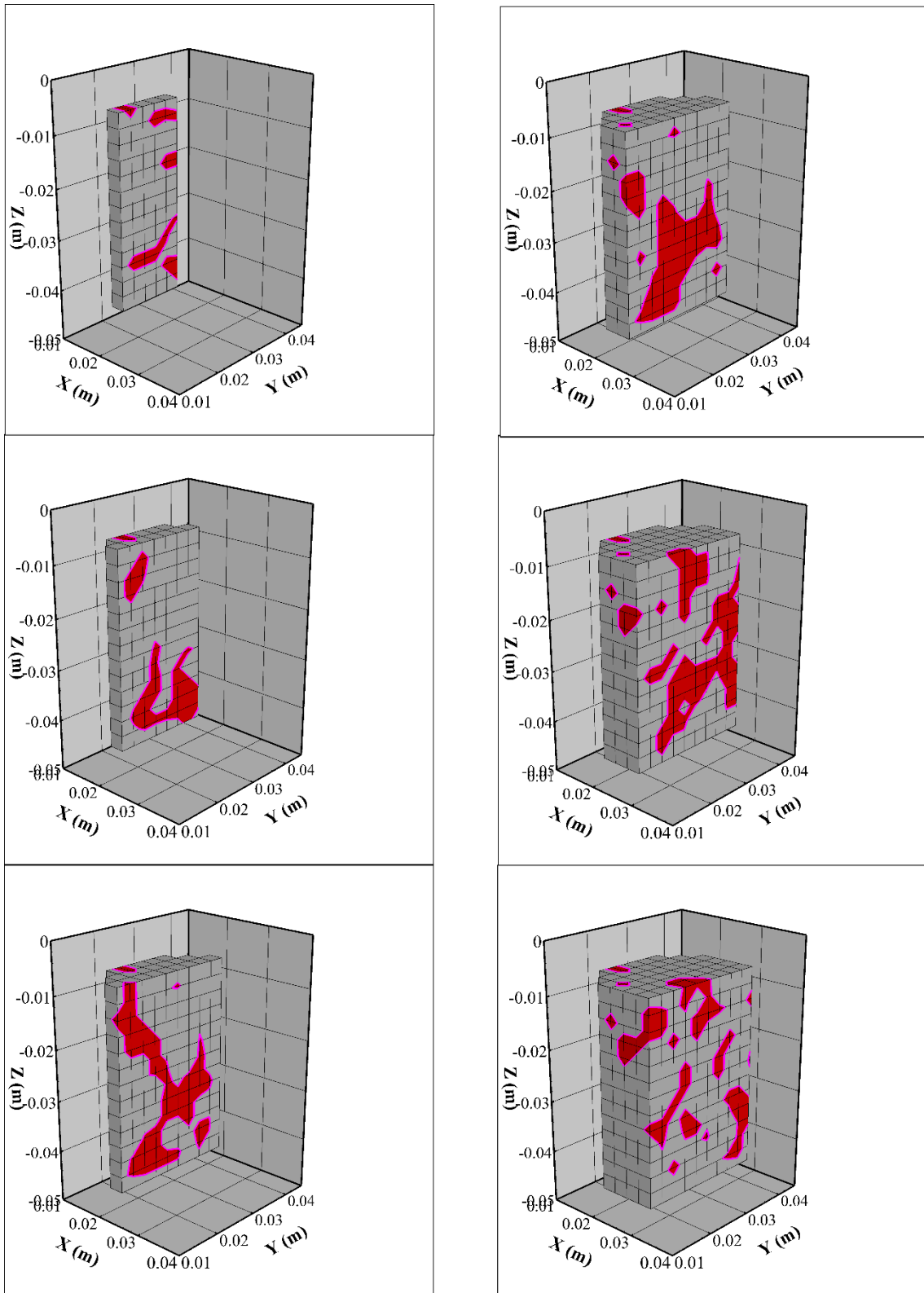


図 D-3 グローバルモデルのケース 2 の各 YZ 断面での浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域 (1)

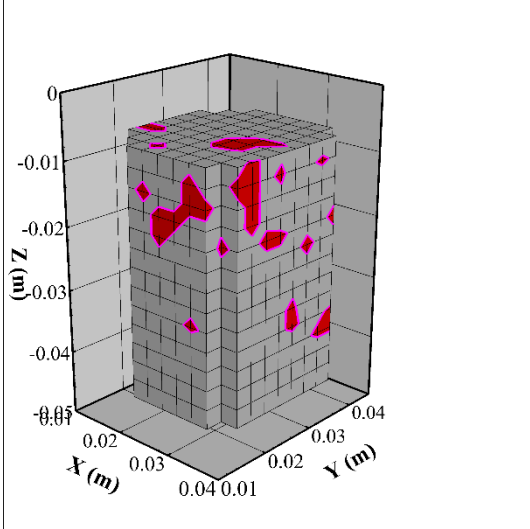
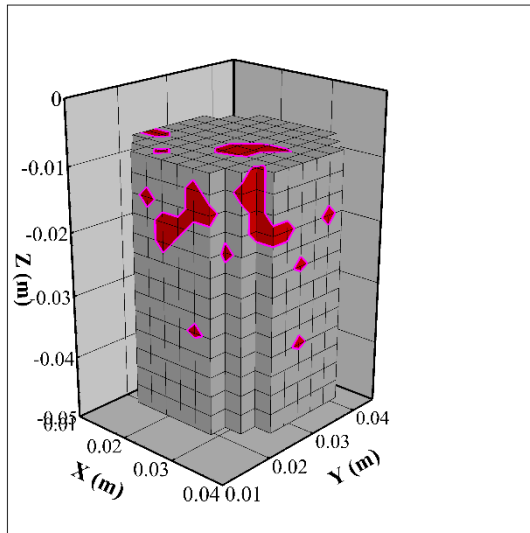
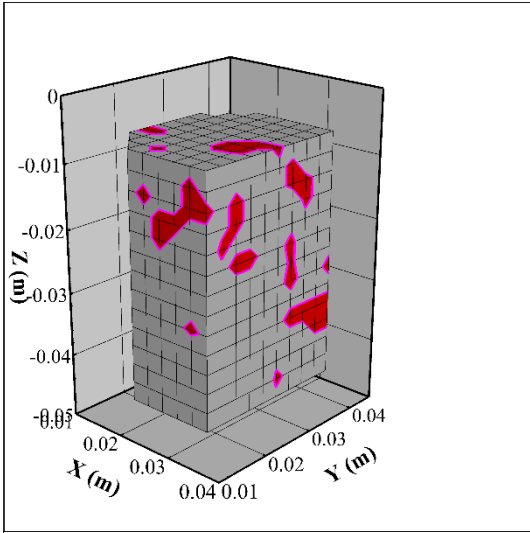


図 D-4 グローバルモデルのケース 2 の各 YZ 断面での浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域 (2)

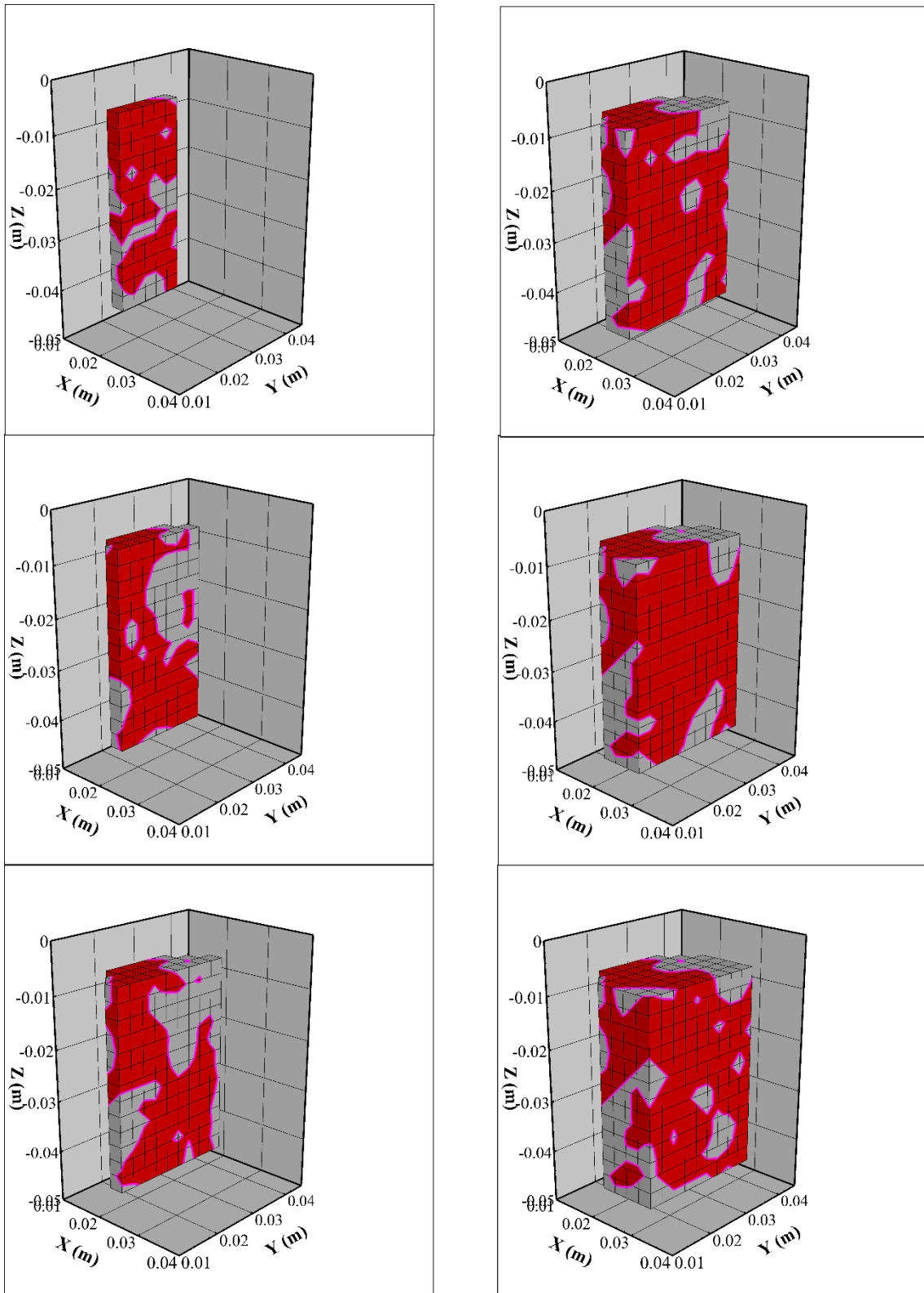


図 D-5 グローバルモデルのケース 3 の各 YZ 断面での浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域 (1)

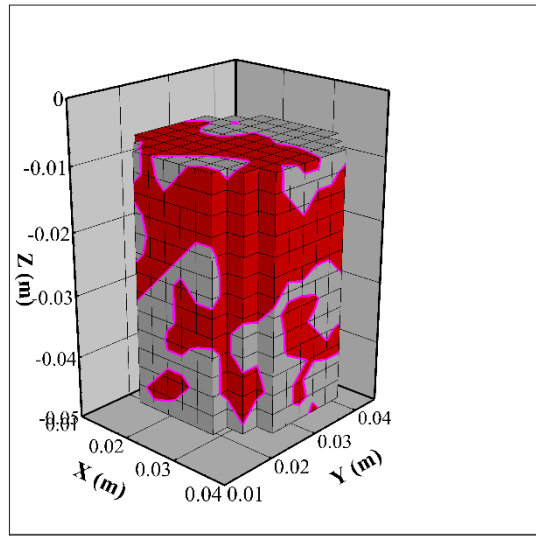
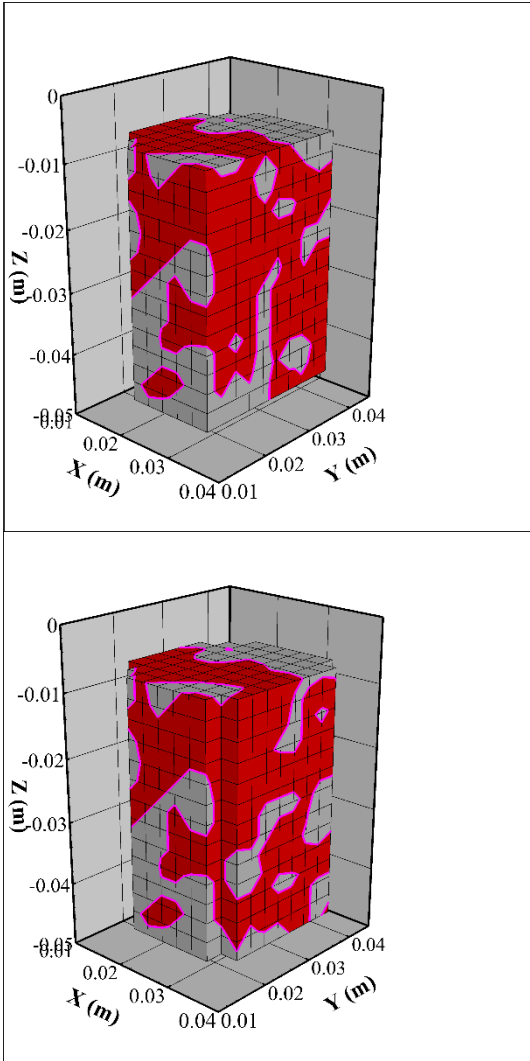


図 D-6 グローバルモデルのケース 3 の各 YZ 断面での浸透率 $3.46 \times 10^{-17} \text{m}^2$ の領域 (2)

E) 塩淡水置換トレーサー試験の再現解析でのモデル内の相対濃度分布

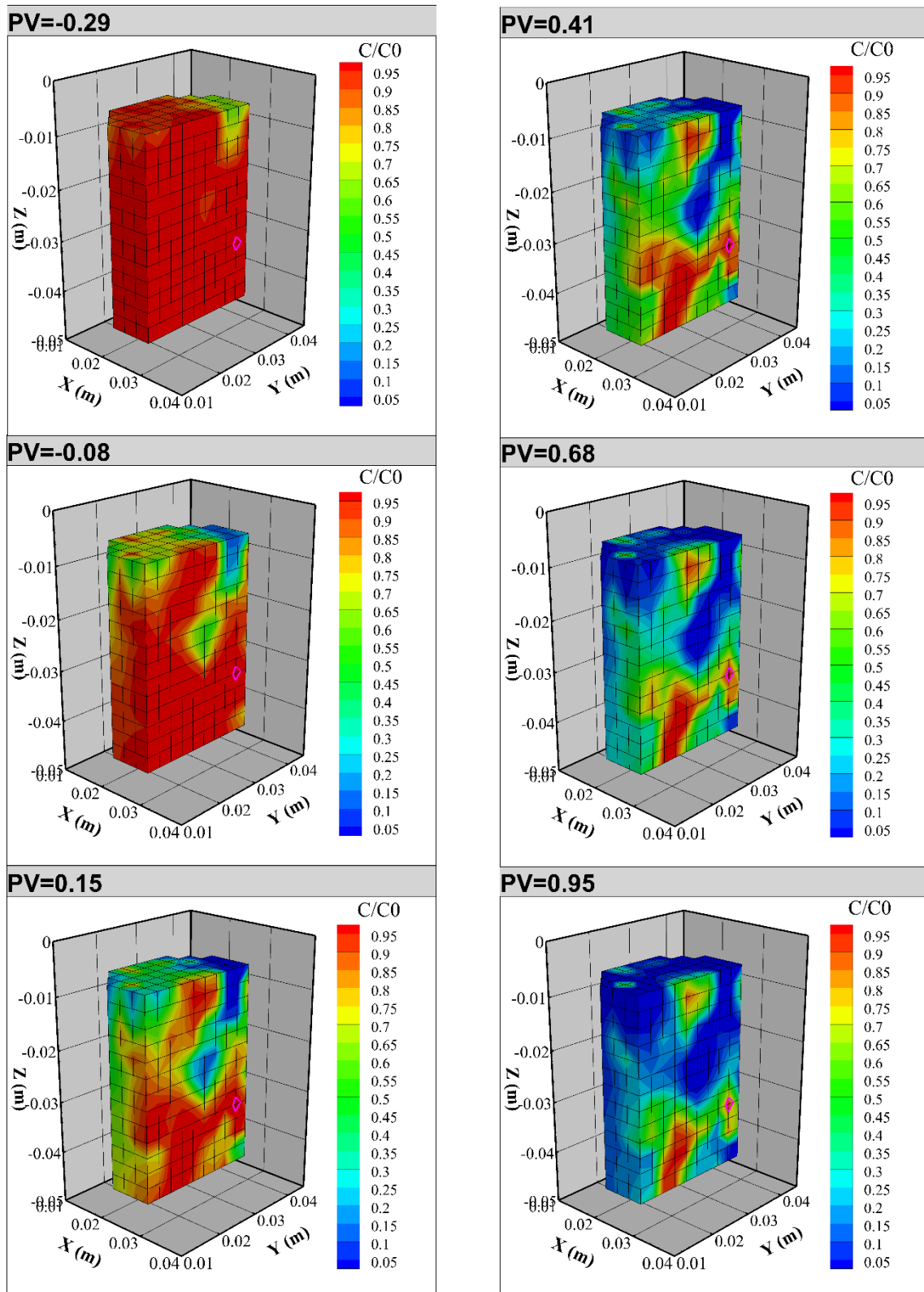


図 E-1 再現解析ケース 1 におけるモデル内の相対濃度分布 (1)

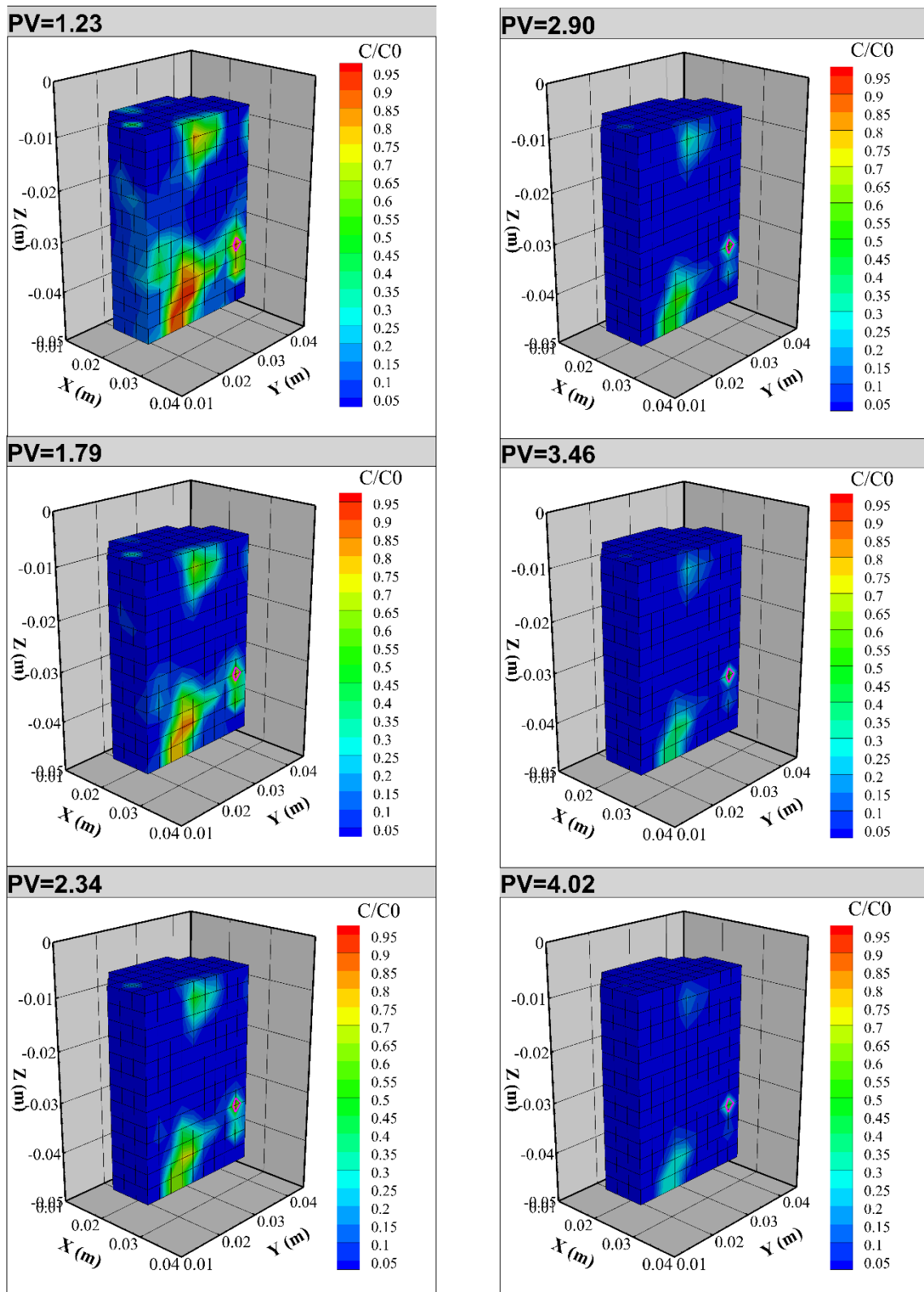


図 E-2 再現解析ケース 1 におけるモデル内の相対濃度分布 (2)

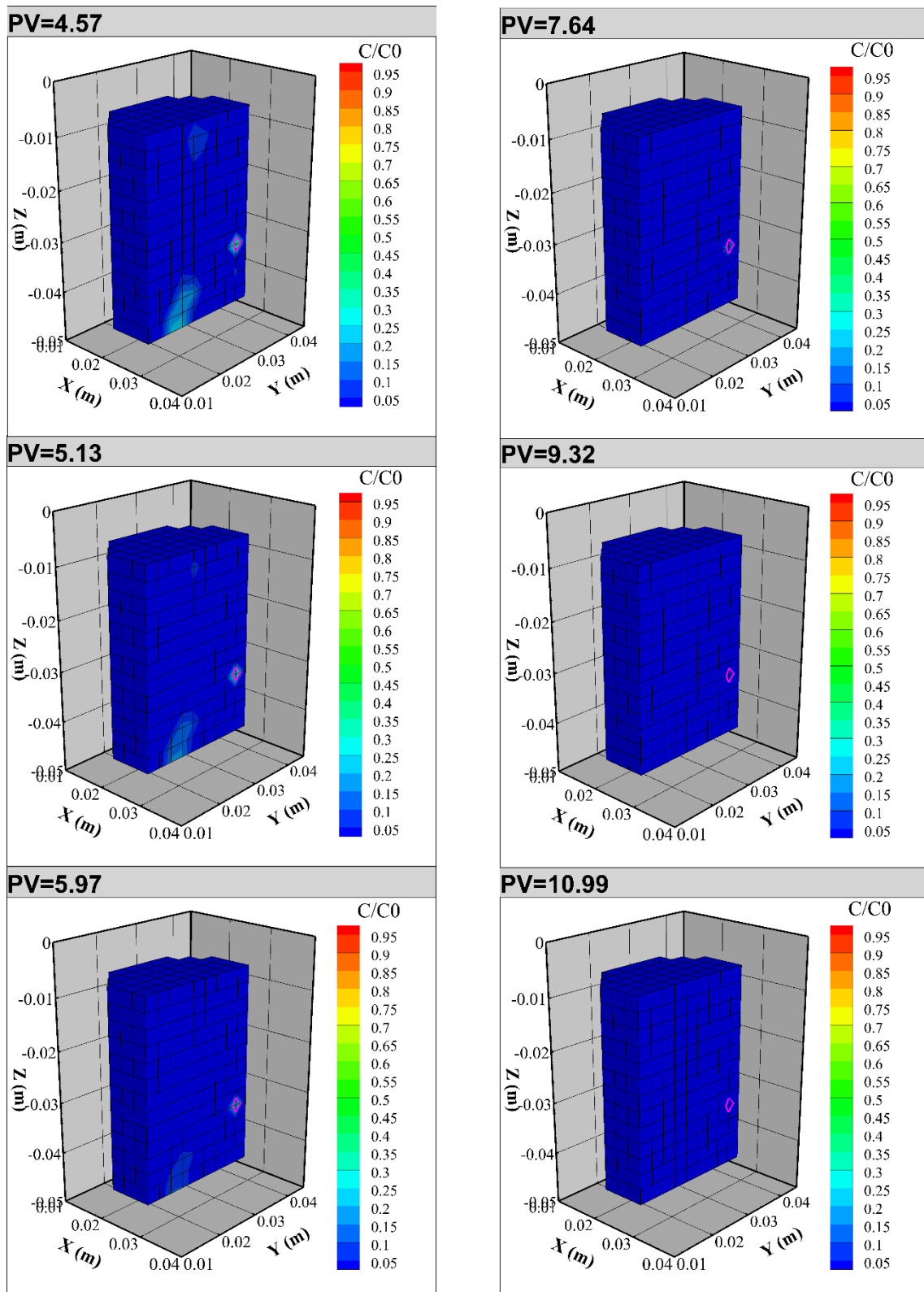


図 E-3 再現解析ケース 1 におけるモデル内の相対濃度分布 (3)

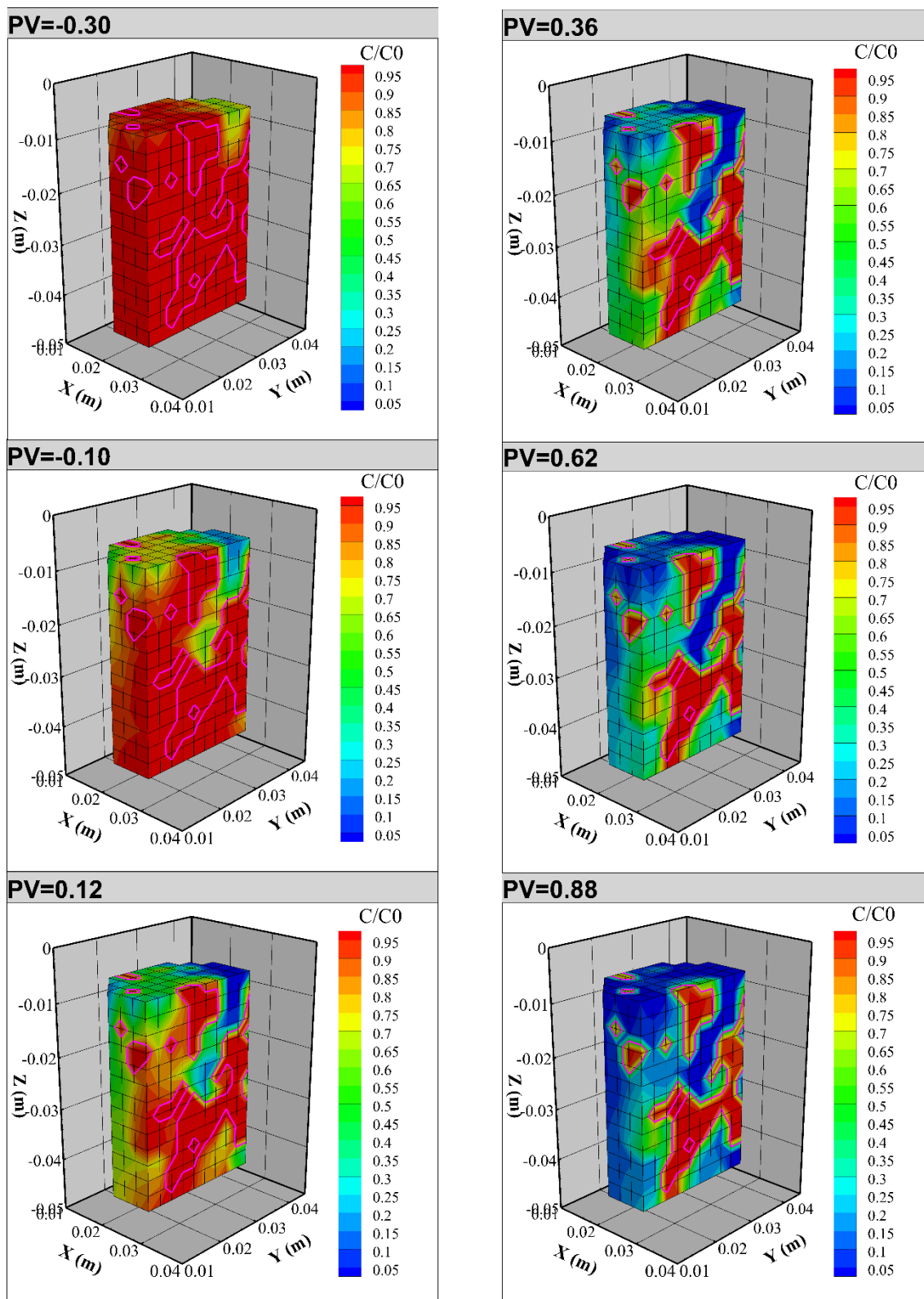


図 E-4 再現解析ケース 2 におけるモデル内の相対濃度分布 (1)

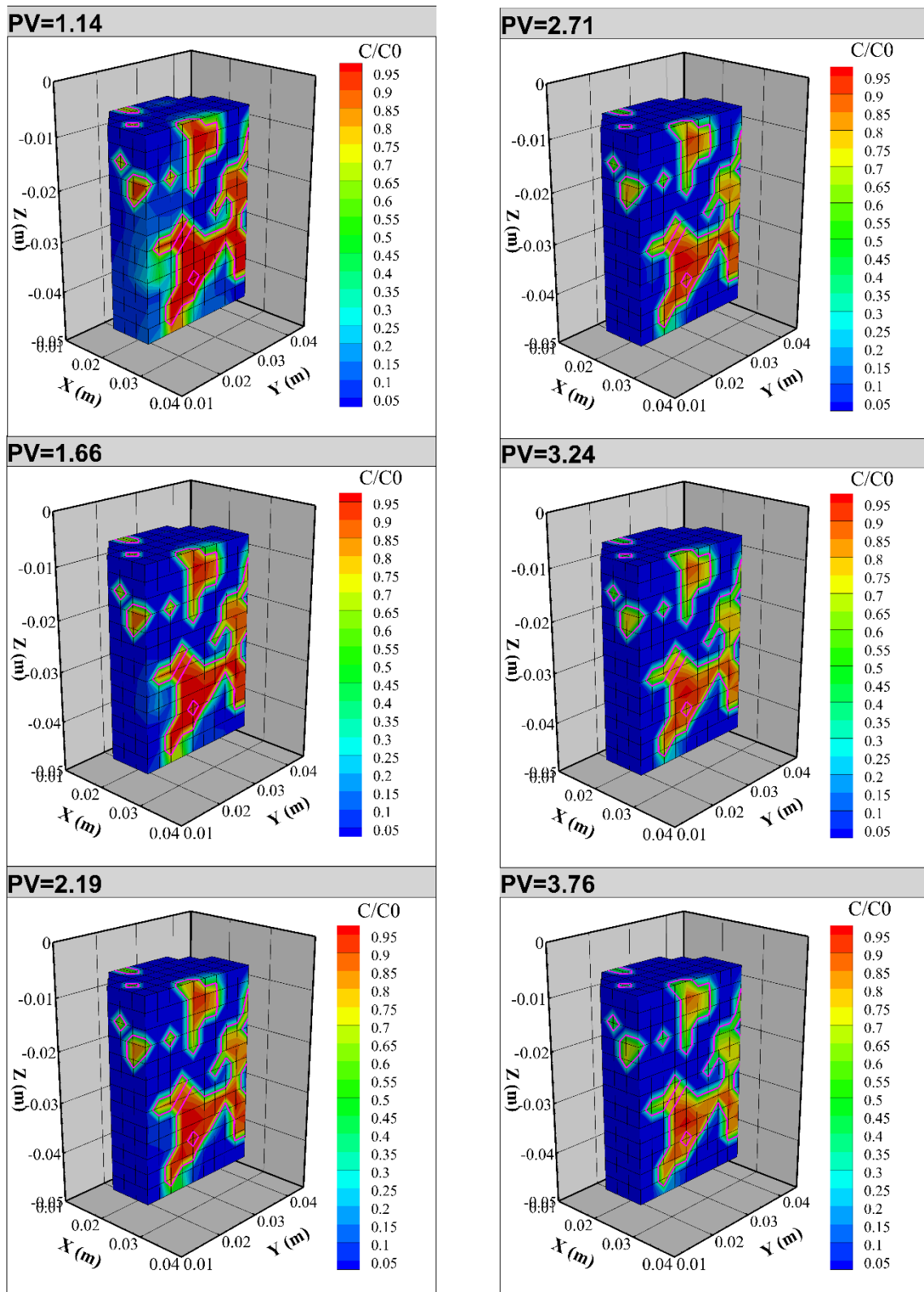


図 E-5 再現解析ケース 2 におけるモデル内の相対濃度分布 (2)

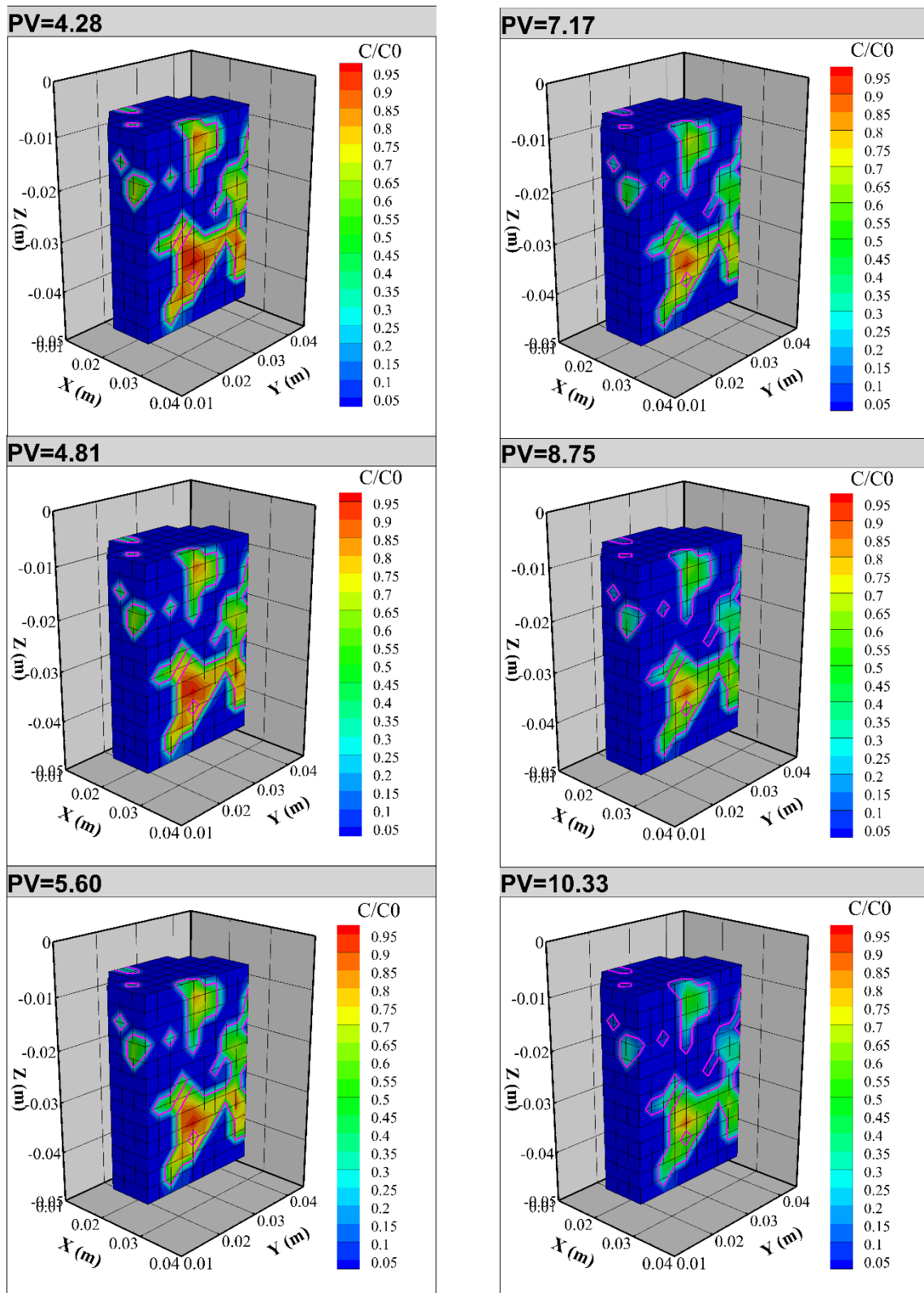


図 E-6 再現解析ケース 2 におけるモデル内の相対濃度分布 (3)

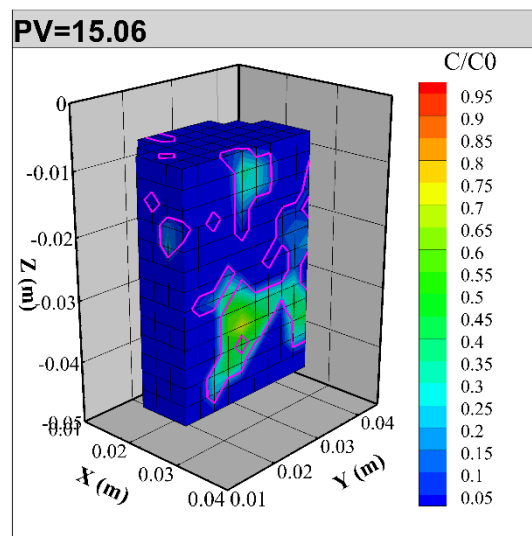
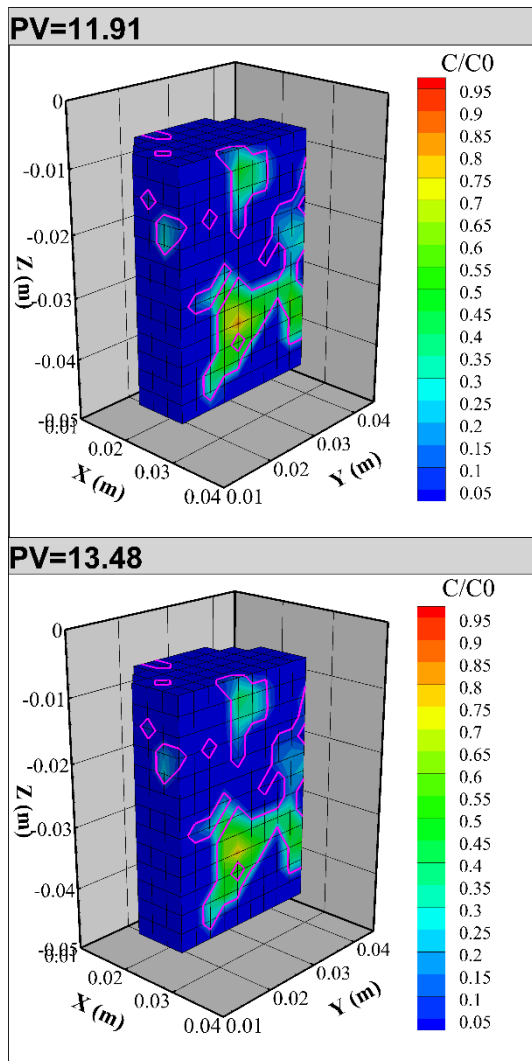


図 E-7 再現解析ケース 2 におけるモデル内の相対濃度分布 (4)

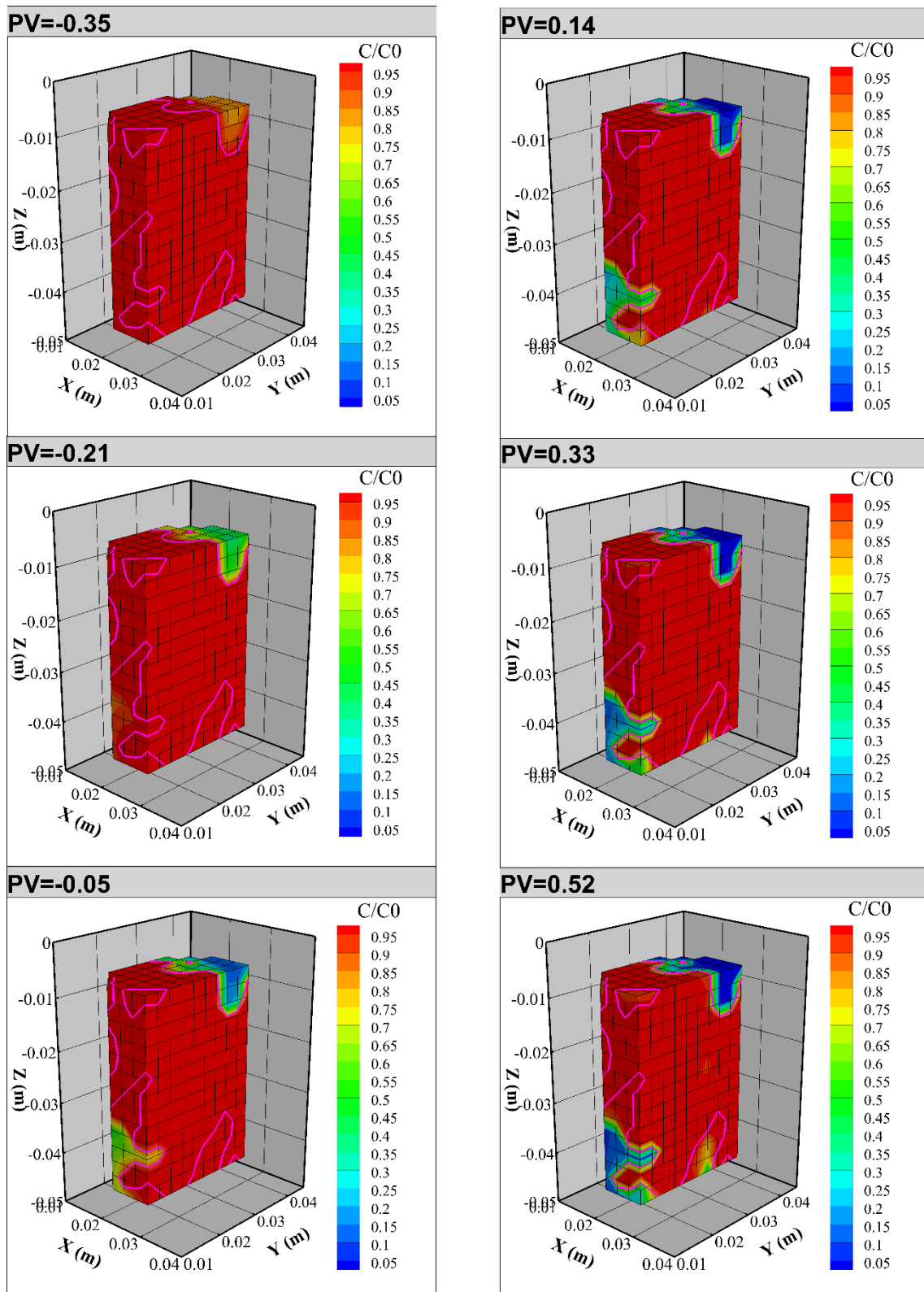


図 E-8 再現解析ケース 3 におけるモデル内の相対濃度分布 (1)

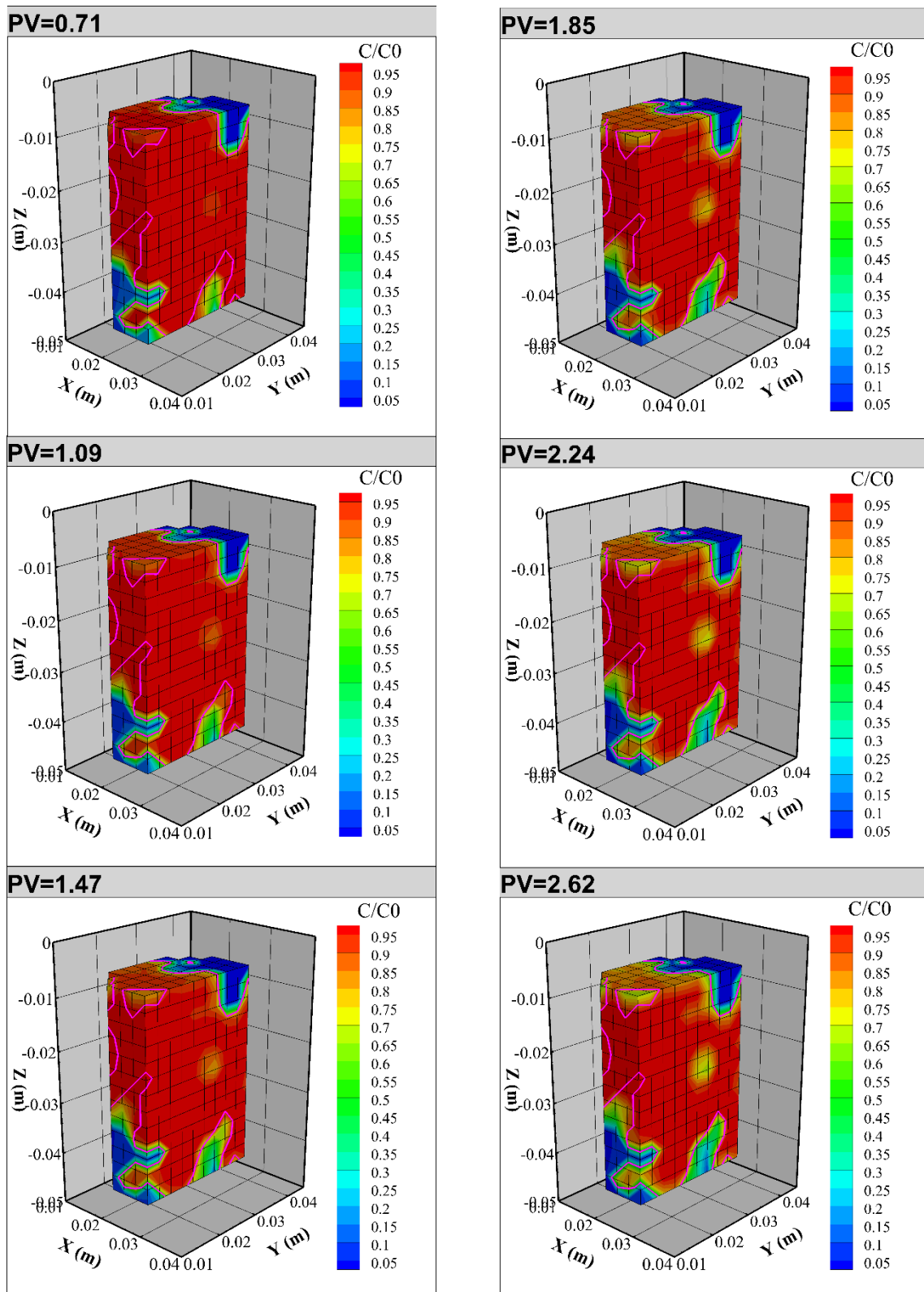


図 E-9 再現解析ケース 3 におけるモデル内の相対濃度分布 (2)

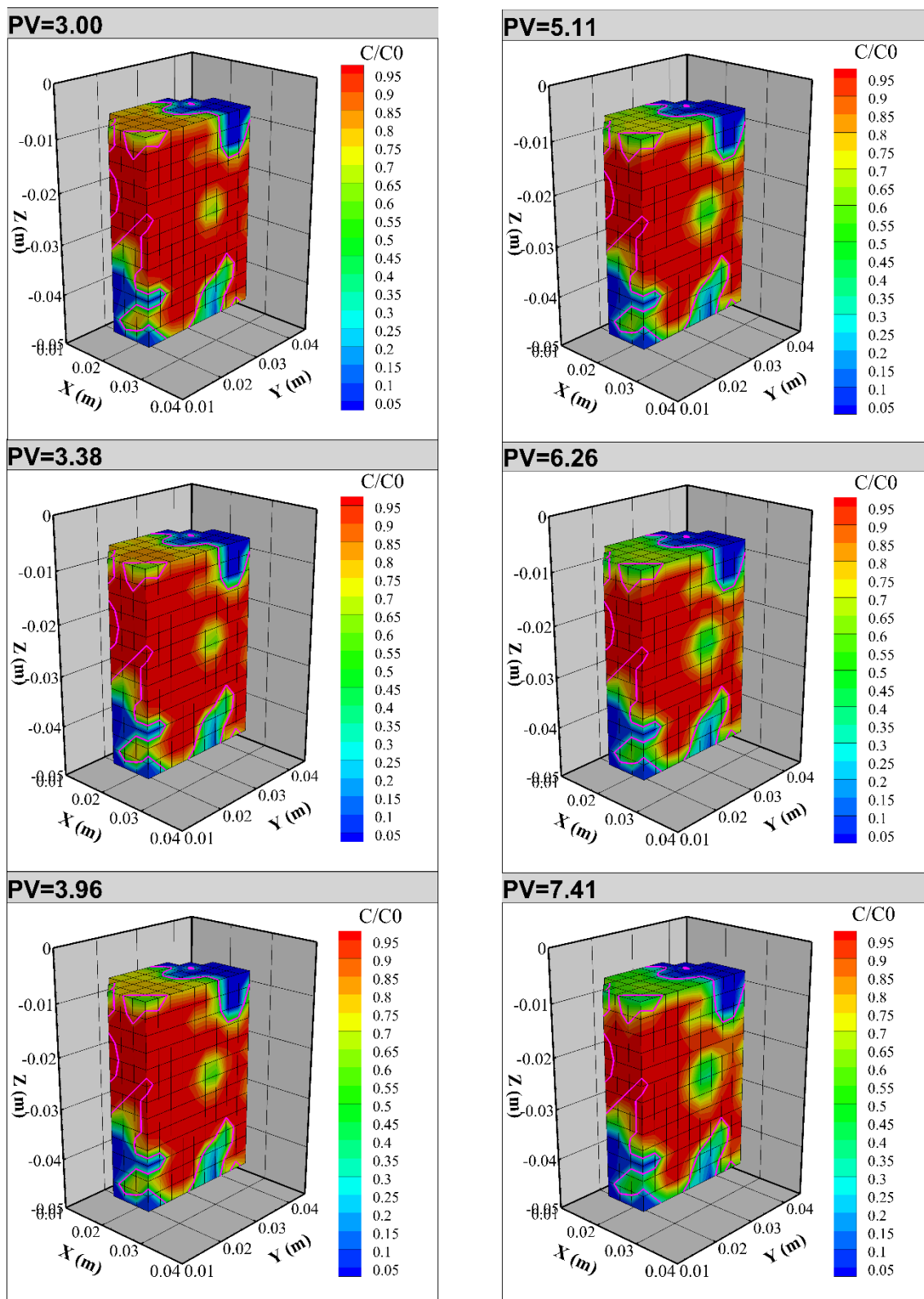


図 E-10 再現解析ケース 3 におけるモデル内の相対濃度分布 (3)

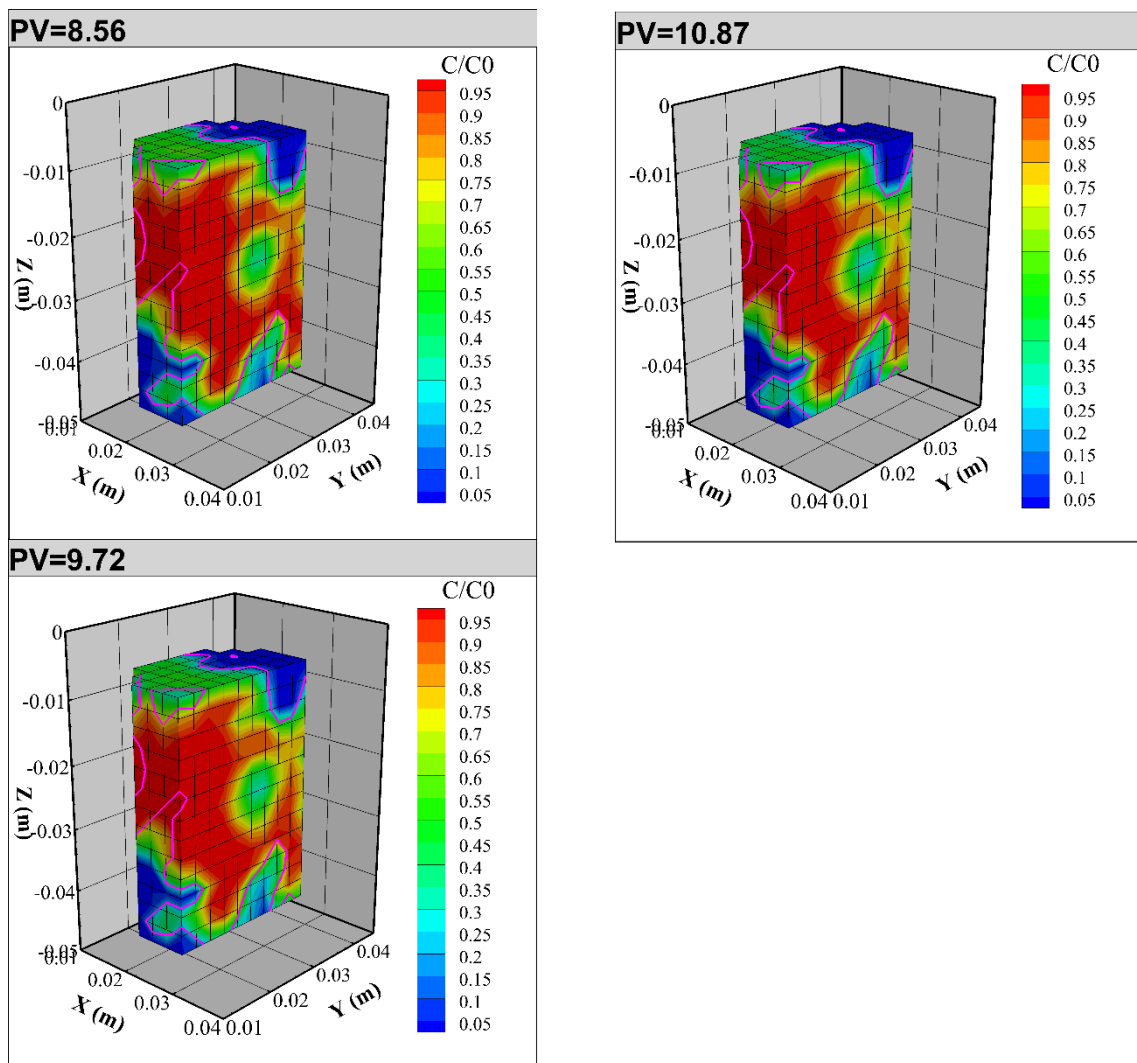


図 E-11 再現解析ケース 3 におけるモデル内の相対濃度分布 (4)

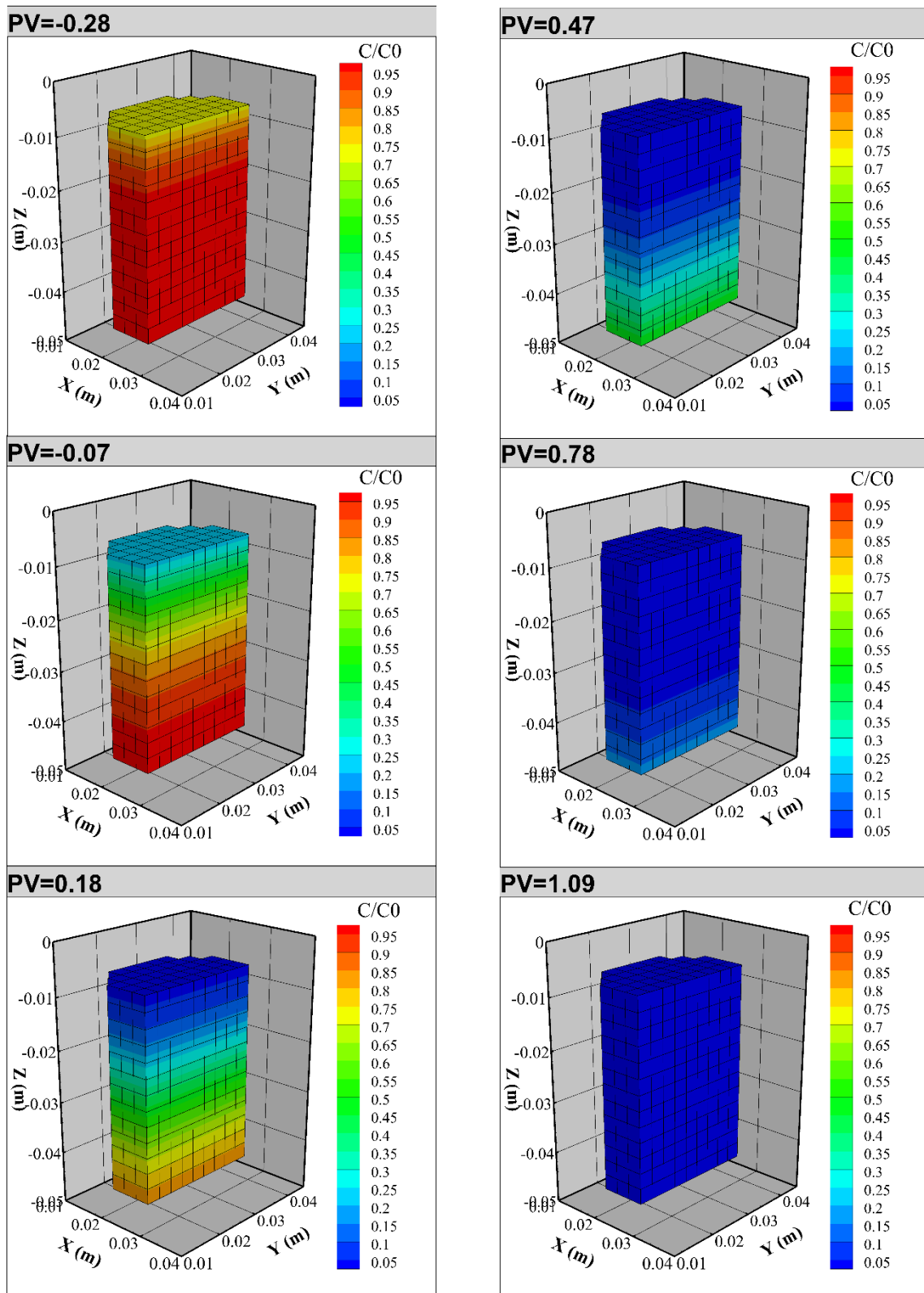


図 E-12 再現解析ケース 0 におけるモデル内の相対濃度分布

F) クラスターラベリングプログラム

```

program labeling_dryct

!*****
!*****
!*****      Pore Cluster Labeling      *****
!*****      from binarized text images  *****
!*****
!*****      Developed by K.Masuoka      *****
!*****
!*****
!*****
!*****
!*****
!
! The users of this program should contact with K.Masuoka when
! any problems take place with the program.
!
! E-mail address: msoknt00@pub.taisei.co.jp
!
parameter (mnel=1050) ! X,Y dimension
parameter (mnelz=1500) ! Z dimension
parameter (mnp=500000)

implicit real*8(a-h,o-z)
implicit integer(i-n)

character*400 tecvar
character(len=64) :: fext
character(len=64) :: fn
character*4 nkk

real*4 x(mnel,mnel,mnel),y(mnel,mnel,mnel),z(mnel,mnel,mnel)
integer n_elem(mnel,mnel,mnelz)
integer n_tabl(20000000),l_list(20000000),n_cone(20000000)
integer ncount1(mnp),ncount2(mnp)

real*4 ele_area(mnp),eb_area(mnp),ec_area(mnp),area(mnp),b_area(mnp),c_area(mnp)
real*4 sumx(mnp),sumy(mnp),sumz(mnp),avx(mnp),avy(mnp),avz(mnp)

real*4 dlc,orad,dpix,cx,cy
real*4 xmax,xmin,ymax,ymin,maxx,minx,maxy,miny,maxz,minz
!

open(11,file='debug01',status='unknown')
open(12,file='debug02',status='unknown')
open(20,file='newXCT',status='unknown')

```

```
open(21,file='tecb.dat',status='unknown')
open(30,file='labe_list',status='unknown')
open(31,file='poro_list',status='unknown')
open(40,file='cone_list',status='unknown')
open(90,file='tec.dat',status='unknown')

1000 Format(500i8)
tecvar='Variables=X,Y,Z,MAT'
dpix=0.000119 ! [m] = voxel resolution

fext='.txt' ! 読み込む CT 画像ファイルの拡張子(テキストイメージにする)

num_x=500 ! X 方向ボクセル数(適宜変更)
num_y=500 ! Y 方向ボクセル数(適宜変更)
num_z=0 ! fixed.

!-----
!--- Specimen information

orad=0.048 ! [m](対象とする半径(円柱中心))
xmax=-100
xmin=100
ymax=-100
ymin=100

!*****
!*****

!***** READING XCT FILES *****
!----- reading input files, text ct-images

write(6,*)'reading X-CT files ...'

do ks=236,735 ! 読み込むイメージファイル名の番号

if(ks.lt.10) then
  write(nkk,'(i1.1)') ks
  fn='000'//trim(nkk)//fext
  write(6,'(a)') fn
  open(unit=10,file=fn,status='old')
elseif(ks.ge.10.and.ks.lt.100) then
  write(nkk,'(i2.2)') ks
  fn='00'//trim(nkk)//fext
  write(6,'(a)') fn
  open(unit=10,file=fn,status='old')
elseif(ks.ge.100.and.ks.lt.1000) then
  write(nkk,'(i3.3)') ks
```

```

fn='0'//trim(nkk)//fext
write(6,'(a)') fn
open(unit=10,file=fn,status='old')
elseif(ks.ge.1000) then
write(nkk,'(i4.4)') ks
fn=trim(nkk)//fext
write(6,'(a)') fn
open(unit=10,file=fn,status='old')
endif

num_z=num_z+1
k=num_z
do j=1,num_y
read(10,* ,end=101) (n_elem(i,j,k),i=1,num_x)
enddo
101 continue

enddo

close(10)

write(6,*) 'num_z= ',num_z
write(6,*) 'dpix= ',dpix
write(6,*) 'orad= ',orad

!----- assign coordinates

do k=1,num_z
do j=1,num_y
do i=1,num_x
x(i,j,k)=i*dpix
y(i,j,k)=j*dpix*(-1.0)
z(i,j,k)=k*dpix*(-1.0)
if(n_elem(i,j,k).eq.255) then ! Initialization for two value file. 255 = pore part
n_elem(i,j,k)=2
else
n_elem(i,j,k)=0 ! Initialization for two value file. 0 = matrix part
end if
enddo
enddo
enddo

!----- find center coordinate (垂直な円柱供試体を仮定)

```

```

do k=1,num_z
  do j=1,num_y
    do i=1,num_x
      if(n_elem(i,j,k).eq.0) then
        if(x(i,j,k).gt.xmax) then
          xmax=x(i,j,k)
        endif
        if(x(i,j,k).lt.xmin) then
          xmin=x(i,j,k)
        endif
        if(y(i,j,k).gt.ymax) then
          ymax=y(i,j,k)
        endif
        if(y(i,j,k).lt.ymin) then
          ymin=y(i,j,k)
        endif
      endif
    enddo
  enddo
enddo

cx=(xmax+xmin)*0.5
cy=(ymax+ymin)*0.5
write(6,*) 'xmax=',xmax,' xmin=',xmin
write(6,*) 'ymax=',ymax,' ymin=',ymin
write(6,*) 'cx=',cx,' cy=',cy

```

!--- numbering, mark "1" for the grids out of the specimen
! (計算領域外側のボクセルに 1 を入力)

```

do k=1,num_z
  do j=1,num_y
    do i=1,num_x

      dlc=(((x(i,j,k)-cx)**2)+((y(i,j,k)-cy)**2))**0.5

      if(dlc.gt.orad) then
        n_elem(i,j,k)=1
      endif

    enddo
  enddo
enddo

```

!*****


```

***** LABELING *****
*****
!!   n_elem:格子番号
!!       0:基質
!!       1:領域外
!!       2:空隙(最初)
!!   nn_max = the maximum number of labeling
!!   n_tabl = 使用する空隙クラスターの番号(1 は計算領域外側)
!
!
!-----
!----- 1st process, labeling along to x direction
!-----

write(6,*)'Labeling pore ... X direction'

nn=3 !ラベリング番号を 4 から始める
nn_max=0

do k=1,num_z
  do j=1,num_y
    do i=1,num_x

      ii=i-1   ! 1つ前を呼ぶ変数を指定

!       (計算領域外の時、1を設定)
      if(n_elem(i,j,k).eq.1) then
        n_tabl(1)=1
        go to 100
      endif

!       (X=1で空隙ボクセルの場合)
場合
      if(n_elem(i,j,k).ne.0.and.n_elem(i,j,k).ne.1.and.i.eq.1) then !基質および外側でもない
        nn=nn+1
        if(nn_max.lt.nn) then ! "nn_max"(ラベリング番号の最大値)の更新
          nn_max=nn !新しいラベリング番号の設定
        endif
        n_elem(i,j,k)=nn ! "n_elem"の更新(ラベリング番号に更新)
        n_tabl(nn)=nn   ! "n_tabl"の更新(使用するラベリング番号の記録)
        go to 100
      endif

!       (X>1で空隙ボクセルの場合)
      if(n_elem(i,j,k).ne.0.and.n_elem(i,j,k).ne.1.and.i.ge.2) then

        if(n_elem(ii,j,k).eq.0.or.n_elem(ii,j,k).eq.1) then !X方向の一つ前が基質または範
          囲外の時

```

```

nn=nn+1 !新しいラベリング番号の設定
if(nn_max.lt.nn) then
  nn_max=nn
endif
n_elem(ij,k)=nn ! "n_elem"の更新(ラベリング番号の設定)
n_tabl(nn)=nn ! "n_tabl"の更新(使用するラベリング番号の記録)
go to 100

else !X方向の一つ前が空隙の時、一つ前と同番号を付ける
  n_elem(ij,k)=n_elem(ij,k)
  go to 100
endif
endif

100 continue

enddo
enddo
enddo

write(6,*) 'nn_max=',nn_max

!-----
!----- 2nd process, labeling along to xy direction
!-----

write(6,*)'Labeling pore ... XY direction.'

do k=1,num_z
write(6,*) '2nd process, z=',k

do j=2,num_y !Y方向の連結を考えているので、Yは2から開始
do i=1,num_x

  jj=j-1 !一つ前のYのフラグを指定

  nyy1=n_elem(ij,k) ! 探索中のYでのラベリング番号
  nyy2=n_elem(ij,k) ! 一つ前のYでのラベリング番号

! (計算領域外の時、1を設定)
if(nyy1.eq.0.or.nyy1.eq.1) then
  go to 110

! (空隙の時)
else

```

```

!      -- nyy1 is same to nyy2 (1つ前のYと同じテーブル番号であれば飛ばす)
      if(n_tabl(nyy1).eq.n_tabl(nyy2)) then
        go to 110
      endif
!      -- when nyy2 is pore grids, nyy2 is renumbered to nyy1 (1つ前のYのテーブル
番号を更新)
      if(nyy2.ne.0.and.nyy2.ne.1) then
        n_tablx=n_tabl(nyy2)      ! 変更前の値を仮に保存
        n_tabl(nyy2)=n_tabl(nyy1) ! 1つ前のYのテーブル番号を更新

!$omp parallel do
        do l=2,nn_max
          if(n_tabl(l).eq.n_tablx) then ! その他の同じテーブル番号を更新
            n_tabl(l)=n_tabl(nyy1)
          endif
        enddo
!$omp end parallel do

      endif
    endif

110    continue

      enddo
    enddo
  enddo

!-----
!----- 3rd process, labeling along to xyz direction
!-----

write(6,*)'Labeling pore ... XYZ direction.'

write(*,*) 'nn_max= ',nn_max

do k=2,num_z !Z方向の連結を考えているので、Zは2から開始
write(6,*) '3rd process, z=',k
  do j=1,num_y
    do i=1,num_x

      kk=k-1    ! 1つ前のZのフラグを指定

      nzz1=n_elem(i,j,k)    ! 探査中のZでのラベリング番号
      nzz2=n_elem(i,j,kk)  ! 1つ前のZでのラベリング番号

!      (計算領域外の時、1を設定)
      if(nzz1.eq.0.or.nzz1.eq.1) then

```

```

        go to 120

!      (空隙の時)
      else
!      -- nzz1 is same to nzz2 (1つ前のZと同じテーブル番号であれば飛ばす)
        if(n_tabl(nzz1).eq.n_tabl(nzz2)) then
          go to 120
        endif
!      -- when nzz2 is pore grids, nzz2 is renumbered to nzz1 (1つ前のZのテーブル
番号を更新)
        if(nzz2.ne.0.and.nzz2.ne.1) then
          n_tablx=n_tabl(nzz2)      ! 変更前の値を仮に保存
          n_tabl(nzz2)=n_tabl(nzz1) ! 1つ前のZのテーブル番号を更新

!$omp parallel do
          do l=2,nn_max
            if(n_tabl(l).eq.n_tablx) then ! その他の同じテーブル番号を更新
              n_tabl(l)=n_tabl(nzz1)
            endif
          enddo
!$omp end parallel do

        endif
      endif

120    continue

      enddo
    enddo
  enddo

!***** OUTPUT *****

!---output newXCT
  write(6,*)'outputing newXCT ...'

  do k=1,num_z
    do j=1,num_y
      write(20,1000) (n_tabl(n_elem(i,j,k)),i=1,num_x)
    enddo
  enddo

```

```

!---output block type for tecplot
  write(6,*)'outputing block type for tecplot ...'

  nex=num_x
  ney=num_y
  nez=num_z
  nex2=nex+1
  ney2=ney+1
  nez2=nez+1
  write(21,*) tecvar
  write(21,'(a,3(a,I5),a)') 'ZONE SOLUTIONTIME = 0', I= 'nez2,&
&
      ' J= 'ney2,' K= 'nex2,' DATAPACKING=BLOCK,
ZONETYPE=ORDERED, VARLOCATION=(4=CELLCENTERED)'

!---X
  i=0

  xnew=0.0
  do i=1,nex2
    if(i.ne.1) then
      xnew=xnew+dpix
    endif
    do j=1,ney2
      do k=1,nez2
        write(21,'(E12.5)') xnew
      enddo
    enddo
  enddo

!---Y
  i=0

  do i=1,nex2
    ynew=0.0
    do j=1,ney2
      if(j.ne.1) then
        ynew=ynew+dpix
      endif
      do k=1,nez2
        write(21,'(E12.5)') ynew
      enddo
    enddo
  enddo

```

```

!---Z
  i=0

  do i=1,nex2
    do j=1,ney2
      znew=0
      do k=1,nez2
        if(k.ne.1) then
          znew=znew-dpix
        endif
        write(21,'(E12.5)') znew
      enddo
    enddo
  enddo

!---MA
  do i=1,nex
    do j=1,ney
      do k=1,nez
        write(21,"(i8)") n_tabl(n_elem(i,j,k))
      enddo
    enddo
  enddo

!      go to 999

!***** Check connectivity between upper and lower face
write(6,*)'Checking connectivity ...'

nc=0

do i=2,nn_max      ! 0 は基質、1 は外側のために、2 からスタート
  ncc1=0
  ncc2=0

  !$omp parallel do private(k)
  do j=1,num_x
    do k=1,num_y
      if(ncc1.eq.0.and.n_tabl(i).eq.n_tabl(n_elem(j,k,1))) then !上端(z=1)に i=X でのテーブ
ル番号があるか確認
        ncc1=1
      endif
    enddo
  enddo

```

```

        if(ncc2.eq.0.and.n_tabl(i).eq.n_tabl(n_elem(j,k,num_z))) then !下端(z=num_z)にi=Xで
のテーブル番号があるか確認
            ncc2=1
            endif
        enddo
    enddo
!$omp end parallel do

if(ncc1.eq.1.and.ncc2.eq.1) then !上端と下端で i=X のテーブル番号がある場合
    nc=nc+1
    n_cone(nc)=n_tabl(i)

    if(nc.ne.0) then
        do j=1,nc-1
            if(n_tabl(i).eq.n_cone(j)) then
                go to 140 ! 既に同じテーブル番号を登録している場合は飛ばす
            endif
        enddo
    endif

    write(40,"(i8,a,i8,a,i8)") n_tabl(i), nc=',nc,' i=' ,i
endif

140  continue

enddo

!*****
!***** OUTPUT labeling summary
!*****

!使用されているテーブル番号を, 1~nn_max までで探査
write(6,*)'Summaryzing pore information ...'

num_l=0

!  --重複してテーブル番号を登録しないように探査(ii の設定)
do i=1,nn_max
    ii=i-1
    do j=1,ii
        if(n_tabl(i).eq.n_tabl(j)) then !同じテーブル番号は不要なので飛ばす
            go to 130
        endif
    enddo
    num_l=num_l+1
    l_list(num_l)=n_tabl(i)
130  continue

```

```

        enddo

        write(30,"(a30,i8)") 'THE NUM. of POROSITY LABELING = ',num_l

! 一前で探査した, 使用されているテーブル番号の格子数をカウント・出力
!$omp parallel do private(j,k,l)
do i=1,num_l
    ncount1(i)=0

    do l=1,num_z
        do k=1,num_y
            do j=1,num_x

                if(n_tabl(n_elem(j,k,l)).eq.l_list(i)) then !テーブル番号毎に全グリッドで探査
                    ncount1(i)=ncount1(i)+1
                endif

            enddo
        enddo
    enddo

    write(30,"(i8,i20)") l_list(i),ncount1(i)

enddo
!$omp end parallel do

!***** Cal. surface area *****
write(6,*)'Calculating pore surface area ...'

!$omp parallel do private(i,j,k,ne,i1,i2,j1,j2,k1,k2,maxx,minx,maxy,miny,maxz,minz)

do l=1,num_l
    ncount2(l)=0
    ele_area(l)=0
    eb_area(l)=0
    ec_area(l)=0
    avx(l)=0
    avy(l)=0
    avz(l)=0
    area(l)=0
    b_area(l)=0
    c_area(l)=0
    sumx(l)=0
    sumy(l)=0
    sumz(l)=0

```



```

maxx=-100
minx=100
maxy=-100
miny=100
maxz=-100
minz=100

do k=1,num_z
  do j=1,num_y
    do i=1,num_x

      ne=n_elem(i,j,k)
      i1=i-1
      i2=i+1
      j1=j-1
      j2=j+1
      k1=k-1
      k2=k+1

      if(n_tabl(ne).eq.l_list(l)) then
        ncount2(l)=ncount2(l)+1

!      -- inside
      if(i.ne.1.and.n_elem(i1,j,k).eq.0) then
        area(l)=area(l)+dpix**2
      endif
      if(i.ne.num_x.and.n_elem(i2,j,k).eq.0) then
        area(l)=area(l)+dpix**2
      endif
      if(j.ne.1.and.n_elem(i,j1,k).eq.0) then
        area(l)=area(l)+dpix**2
      endif
      if(j.ne.num_y.and.n_elem(i,j2,k).eq.0) then
        area(l)=area(l)+dpix**2
      endif
      if(k.ne.1.and.n_elem(i,j,k1).eq.0) then
        area(l)=area(l)+dpix**2
      endif
      if(k.ne.num_z.and.n_elem(i,j,k2).eq.0) then
        area(l)=area(l)+dpix**2
      endif

!      -- side edge
      if(i.ne.1.and.n_elem(i1,j,k).eq.1) then
        b_area(l)=b_area(l)+dpix**2
      endif
    enddo
  enddo
enddo

```

```

        if(i.ne.num_x.and.n_elem(i2,j,k).eq.1) then
            b_area(l)=b_area(l)+dpix**2
        endif
        if(j.ne.1.and.n_elem(i,j1,k).eq.1) then
            b_area(l)=b_area(l)+dpix**2
        endif
        if(j.ne.num_y.and.n_elem(i,j2,k).eq.1) then
            b_area(l)=b_area(l)+dpix**2
        endif
!
        -- top or bottom
        if(k.eq.1.or.k.eq.num_z) then
            c_area(l)=c_area(l)+dpix**2
        endif

        sumx(l)=sumx(l)+x(i,j,k)
        sumy(l)=sumy(l)+y(i,j,k)
        sumz(l)=sumz(l)+z(i,j,k)

        if(x(i,j,k).gt.maxx) then
            maxx=x(i,j,k)
        endif
        if(x(i,j,k).lt.minx) then
            minx=x(i,j,k)
        endif
        if(y(i,j,k).gt.maxy) then
            maxy=y(i,j,k)
        endif
        if(y(i,j,k).lt.miny) then
            miny=y(i,j,k)
        endif
        if(z(i,j,k).gt.maxz) then
            maxz=z(i,j,k)
        endif
        if(z(i,j,k).lt.minz) then
            minz=z(i,j,k)
        endif

        endif

        enddo
    enddo
enddo

ele_area(l)=area(l)
eb_area(l)=b_area(l)
ec_area(l)=c_area(l)
avx(l)=sumx(l)/ncount2(l)

```

```

    avy(l)=sumy(l)/ncount2(l)
    avz(l)=sumz(l)/ncount2(l)
    write(31,'(3(a,i15),12(a,e12.5))' 'l= ',l,' ncount= ',ncount2(l),' ntabl= ',l_list(l),&
        ' area= ',ele_area(l),' b_area= ',eb_area(l),'
c_area= ',ec_area(l),&
        ' avx= ',avx(l),' avy= ',avy(l),' avz= ',avz(l),&
        ' maxX= ',maxx,' minX= ',minx,' maxY= ',maxy,'
minY= ',miny,&
        ' maxZ= ',maxz,' minZ= ',minz

    enddo
!$omp end parallel do

!***** OUTPUT for "tec.dat" *****
    write(6,*)'Outputing tec.dat ...'

    tecvar='Variables=X,Y,Z,MAT' !eos7R

    write(90,"(a50)") tecvar
    write(90,*) 'ZONE I= ',num_x,' J= ',num_y,' K= ',num_z
!
    do k=1,num_z
        do j=1,num_y
            do i=1,num_x
                write(90,"(3(1x,E12.5),1x,i6)") x(i,j,k),y(i,j,k),z(i,j,k),n_tabl(n_elem(i,j,k))
            enddo
        enddo
    enddo
!

!*****
!*****

    999 continue

    end program labeling_dryct

```