

博士論文の内容の要旨

氏名	増岡 健太郎
学位名	博士（工学）
学位授与年月日	2021年3月20日
論文題目	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

(博士論文の内容の要旨)

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。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、フローティ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。