

令和 6 年 5 月 9 日現在

機関番号：16301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20602

研究課題名（和文）琉球石灰岩内部の物質輸送現象の解明とモデリング手法の確立

研究課題名（英文）Measuring and modeling solute transport in Ryukyu limestone

研究代表者

倉澤 智樹（Kurasawa, Tomoki）

愛媛大学・農学研究科・助教

研究者番号：90961201

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では実験やX線CTと流体・物質輸送解析を連携した高解像度モデリングによって、琉球石灰岩内部の地下水流動特性や物質輸送現象の定量化・モデル化を図った。60個の石灰岩サンプルを対象にX線CTによる間隙構造解析を実施し、間隙率と間隙の連結性を示す連結確率との相関性に加え、フラクタル性を明らかにした。また、間隙モデル内部での流動シミュレーションによって、石灰岩内部に速度スケールの大幅に異なる地下水流動経路が混在していることを確認した。さらに、シミュレーション結果から取得した流量情報から地下水の通りやすさを示す透水係数を算出すると、流動方向に大きく依存する、つまり異方性を示すことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地下ダム貯留域を構築する琉球石灰岩の地下水流動や物質輸送特性を理解することは、地下ダムにおける地下水質の管理にとって根幹を成す。本研究では、X線CTによる琉球石灰岩の間隙構造解析によって、地下水の流動経路となる間隙のフラクタル性や連結性を定量化することに成功した。また、構築した間隙モデル内部での流動シミュレーションによって、地下水流動経路の混在性に加え、地下水の通りやすさを示す透水係数の異方性を明らかにした。これらの成果は、琉球石灰岩の地下水流動や物質輸送特性の理解を前進させるとともに、モデル化への一助となると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, flow and transport characteristics in Ryukyu limestone were evaluated by experiments, X-ray CT and numerical modeling. Pore structure analysis of 60 limestone samples by X-ray CT revealed fractal characteristics as well as a correlation between porosity and connection probability, which indicates the degree of connectivity of pores. Flow simulations of the pore model showed that flow paths with significantly different velocity scales are intermingled within the limestone. Furthermore, the hydraulic conductivity was calculated from the flow rate information obtained from the simulation results, and was found to be highly dependent on the direction of flow, i.e., it was anisotropic.

研究分野：農業工学

キーワード：地下ダム 琉球石灰岩 X線CT 間隙構造 フラクタル 連結確率 透水係数 間隙率

### 1. 研究開始当初の背景

南西諸島に分布する琉球石灰岩は大きな間隙を持ち、地下水貯留能力に優れているため、海水侵入を阻止しつつ、地下水を貯める「地下ダム」の貯水域に利用されている。現在、我が国では10基以上の地下ダムが運用されているとともに、新規ダム事業も進展しており、今後も島嶼地域の農業生産活動の要を担うと期待される。一方、地下ダムを運用する上で、最もセンシティブな問題の一つに貯水域の水質悪化がある。農地から水質負荷物質がダム貯留域に流入すると、ダム止水壁に阻害され滞留する可能性がある。この実態解明や将来予測シミュレータの開発は喫緊の課題であり、その根幹を成す琉球石灰岩内部での地下水流動特性や物質輸送現象の理解とモデリング手法の確立が求められる。

### 2. 研究の目的

上述の背景を基に、本研究では実験や X 線 CT スキャンと流体・物質輸送解析を連携した高解像度シミュレーションによって、琉球石灰岩内部の地下水流動特性や物質輸送現象の定量化・モデル化を図った。

### 3. 研究の方法

本研究では、X 線 CT による間隙構造解析と間隙内部での高解像度シミュレーション、フィールド試験による琉球石灰岩帯水層の地下水流動特性の評価、の2点に軸足を置いて研究を前進させてきた。

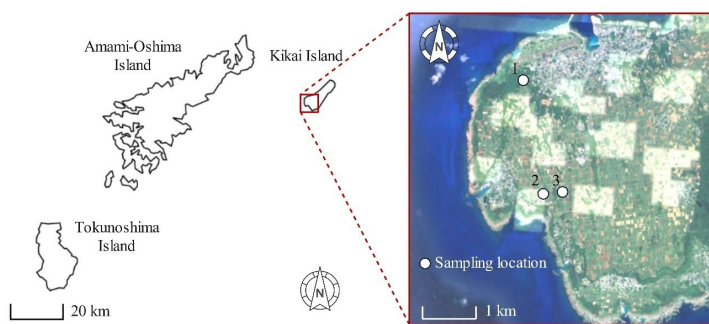


図1 コア取得地点

#### X 線 CT による間隙構造解析と間隙内部での高解像度シミュレーション

本研究で使用した琉球石灰岩サンプルは、鹿児島県喜界島の地下ダム建設予定地付近で採取された。図1に取得した3地点の場所を示す。これらのコアを対象に高知大学海洋コア国際研究所が保有する医療用 X 線 CT とマイクロ X 線 CT により、CT 画像群を取得した。具体的には、医療用 X 線 CT により水平方向に 108  $\mu\text{m}$ 、鉛直方向に 500  $\mu\text{m}$  の解像度で 60 サンプルの CT データを、マイクロ X 線 CT により全方向に対して 55.5  $\mu\text{m}$  の解像度で一つのサンプルの CT データを得た。医療用 X 線 CT により取得した相対的に低解像度の CT データは、間隙構造特性の評価に供した。間隙構造特性の評価手順を図2に示す。まず、石灰岩サンプルの表面は掘削や輸送の影響で傷や割れが存在したため、CT 画像のうち中心の1辺 29.2 mm の正方形部分のみを抽出した。その後、大津の方法で2値化処理し、岩石と間隙部分に区別した。次に、間隙クラスターを分析することで間隙同士のつながり状況を確認した。ここで、間隙のつながりについては、間隙ボクセル同士が面で接触している場合に限る、つながっていると判定した。その後、図2に示す間隙クラスターの3D情報を利用して、

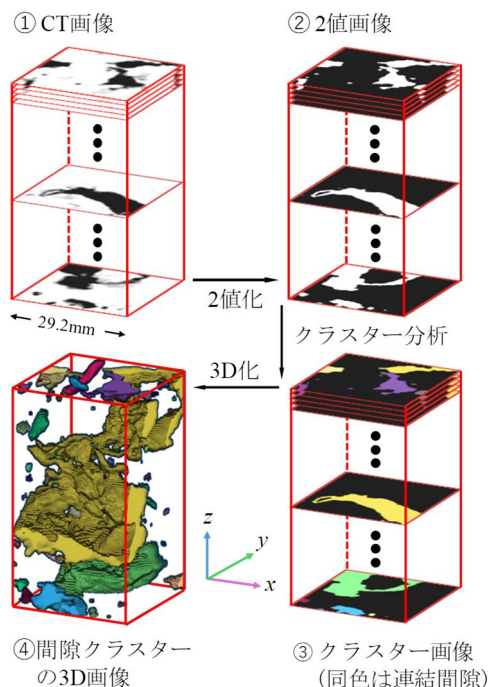


図2 間隙構造の解析手順

間隙率 $\theta$ ，間隙の連結性を示す連結確率 $P_c$ を推定した<sup>1)</sup>。

$$\theta = \frac{n_p}{n} \quad (1)$$

$$P_c = \frac{\sum_i n_i(n_i - 1)}{\sum_i n_i \{(\sum_i n_i) - 1\}} \cong \frac{\sum_i n_i^2}{(\sum_i n_i)^2} \quad (2)$$

ここで， $n$  は全ボクセル数， $n_p$  は間隙ボクセル数， $n_i$  は  $i$  番目クラスターに存在するボクセル数である。また，フラクタル特性を評価するため，Box Counting 法を適用した。この方法では対象領域に幅 $\delta$ のボックスを想定し，その間の隙ボクセルの数 $N$ をカウントする。その後， $\delta$ と $N$ の関係を次式にフィッティングさせ，フラクタル特性を評価する。

$$\log N(\delta) = D \log\left(\frac{1}{\delta}\right) + \alpha \quad (3)$$

ここで， $\alpha$ は定数， $D$ は直線の傾きであり，フラクタル次元を示す。

また，マイクロ X 線 CT によって取得した相対的に高解像度なデータ（全方向に対して 55.5  $\mu\text{m}$ ）を用いて，図 2 と類似の方法により 1 辺 4.44 mm の立方体領域の間隙を解像度 55.5  $\mu\text{m}$  でモデル化し，非圧縮性粘性流れを解析した。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (5)$$

ここで， $\mathbf{u}$ は流速ベクトル， $\rho$ は水の密度， $t$ は時間， $P$ は圧力， $\mu$ は水の粘性係数である。また，圧力勾配方向を変更し， $x, y, z$  ( $x$  と  $y$  は水平， $z$  は鉛直方向) の 3 軸方向に対する透水係数 $K$ を次式で評価した。

$$K = \frac{\rho g Q L}{\Delta P A} \quad (6)$$

ここで， $g$ は重力加速度， $Q$ は流量， $L$ は対象領域の 1 辺の長さ， $A$ は対象領域の断面積， $\Delta P$ は圧力差である。

#### フィールド試験による琉球石灰岩帯水層の地下水流動特性の評価

対象フィールドは沖縄本島南部に位置するギーザ地下ダムの帯水層である。本サイトでは複数の観測孔が設けられており，そのうち 6 地点を対象に地下水流動特性を評価した。なお，本試験では機動性の高さに優れた単孔式希釈試験を用いた。まず，所定量の NaCl (塩化ナトリウム) を入れた滲出性の繊維パックを 1 m おきにロープに取り付けた。その後，ロープを試験孔内に投入し，上下方向に振り動かした。所定時間の経過後，ロープを観測孔から取り出し，繊維パック内の NaCl が溶出したことを確認した後，速やかに複数の深さ地点に電気伝導度ロガー (Onset 社製 HOBO U24-002) を設置し，NaCl 濃度が時間経過ごとに低下する状況を捕捉した。データ回収後に次式に示す解析解にフィッティングさせることで，見かけの地下水流速の大きさ  $|v_a|$  を推定した。

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -\left(\frac{2|v_a|}{\pi R}\right)t \quad (7)$$

ここで， $C$ は NaCl 濃度， $t$ は経過時間， $C_0$ は $t = 0$ のときの NaCl 濃度， $R$ は観測孔の半径である。一方，観測孔の存在は，周辺地下水の流線を歪曲させるため，孔内を通過する平均断面流速は，周辺地下水の流速に比べて高い推定値となる。この点を補正するため，補正係数  $\alpha$  を導入し，地下水流速の大きさ  $|v|$  を決定した。

$$|v| = \frac{|v_a|}{\alpha} \quad (8)$$

本研究では，補正係数として最も一般的に適用される  $\alpha = 2^2$  を採用した。

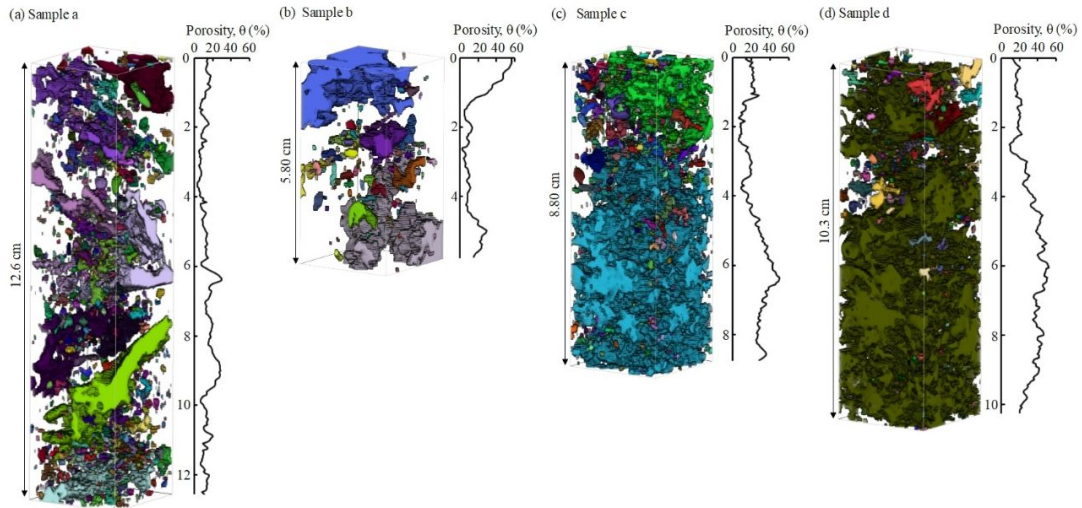


図3 サンプル a,b,c,d のクラスター分布

#### 4. 研究成果

##### X線CTによる間隙構造解析と間隙内部での高解像度シミュレーション

図3に60サンプルのうち、代表的なサンプルのクラスター分布を示す。また、図4に60コアの間隙率と連結確率の関係を示す。なお、図3に示すサンプル a,b,c,d の間隙率と連結確率のデータは、図4に色の異なるプロットで示している。図4の間隙率の平均は23.95%であり、本研究と同一のフィールドを対象とした先行研究<sup>3)</sup>と類似した結果であった。また、 $\theta$ と $P_c$ の相関係数 $r$ は0.751であり、間隙率と間隙の連結性は密接にしていることが確認された。この点を考察するため、間隙率の異なる4つのサンプル(a,b,c,d)のクラスター分布(図3)をみると、間隙率の高いサンプルほど最大体積を有する間隙クラスターの支配性が高い傾向にあることがわかる。単一の大きな間隙が支配的であると、式(2)で計算される連結確率も高く推定され、結果的に、間隙率と連結確率との間に相関関係があったと考えられる。次に、Box Counting 法によるフィッティング結果の一例を図5に示す。この図から、 $R^2 = 0.9958$ であり、データが良好にフィッティングしている。これと同様に、医療用CTで取得した60データの全てで $\log N(\delta)$ と $\log(1/\delta)$ は線形関係を示し、 $R^2$ も0.98を上回ったため、琉球石灰岩の間隙はフラクタル構造であると判断できる。次に、数値解析によって得られた圧力と流速分布の例を図6に示す。ここでは、 $y$ 軸方向に $\Delta P = 3$  Paの圧力差をかけた結果を示す。圧力と流速の分布を見ると、速度スケールの大幅に異なる地下水流動経路が混在していることが確認できる。また、式(6)で算出した $x$ 、 $y$ 、 $z$ 軸方向に対する透水係数はそれぞれ $9.837 \times 10^{-4}$  cm/s、 $3.589 \times 10^{-2}$  cm/s、 $4.517 \times 10^{-1}$  cm/sであり、最大で3オーダーもの差異が生じている。この結果から、琉球石灰岩の透水係数は強い異方性を示すことがわかった。

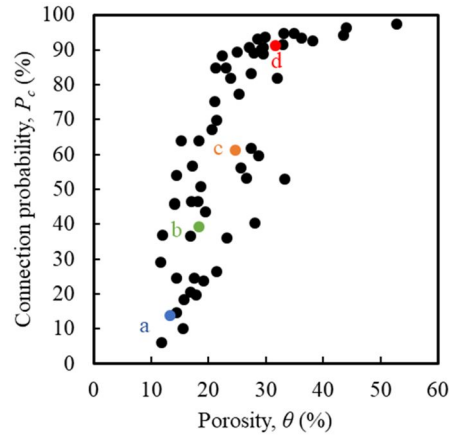


図4 間隙率 $\theta$ と連結確率 $P_c$ の関係

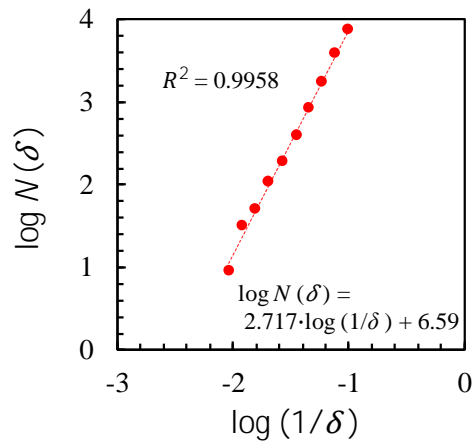


図5 Box counting によるフィッティングの一例

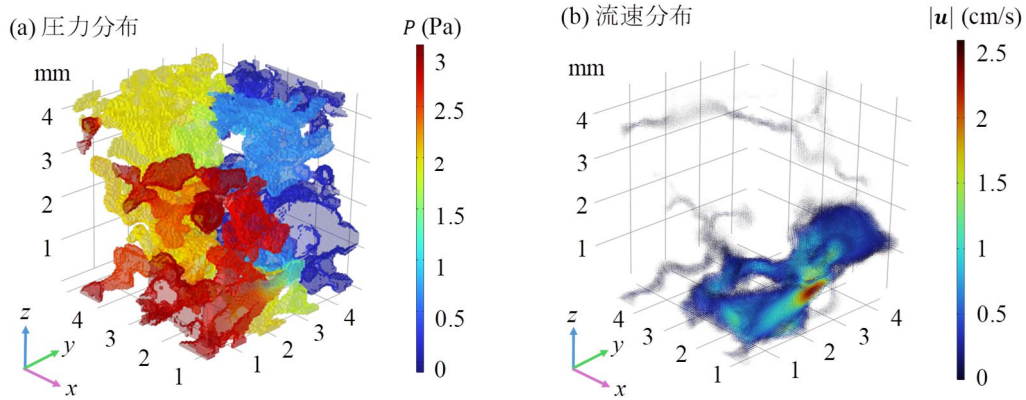


図6 間隙モデルでの数値計算結果

フィールド試験による琉球石灰岩帯水層の地下水流動特性の評価

フィールドでの単孔式希釈試験から取得された経過時間に対する濃度希釈状況の一例を図7に示す。相対濃度の自然対数値 $\ln(C/C_0)$ は時間経過とともに線形的に低下しており、式(7)に良好にフィッティングしている。なお、当該データから計算された地下水流速の大きさ $|v|$ は $1.026 \times 10^{-4}$  cm/s となった。この要領に沿って、各観測孔において深さ方向に複数の流速データを取得した。その結果の一例を図8に示す。この図から、流速が深さに応じて低下する傾向にあることがわかる。この観測孔以外についても、流速が深さに依存しており、このことは琉球石灰岩が透水係数の不均質性を有することを示す。また、当該計測結果は、ギーザ地下ダムの水循環モデリングのキャリブレーションデータとして活用されている。

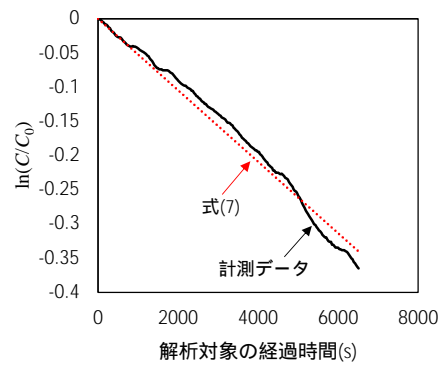


図7 経過時間に対する濃度希釈状況の一例

引用文献

- 1) Jarvis, N., Larsbo, M., Koestel, J., 2017. Connectivity and percolation of structural pore networks in a cultivated silt loam soil quantified by X-ray tomography. Geoderma. 287, 71–79.
- 2) Pitrak, M., Mares, S., Kobr, M., 2007. A simple borehole dilution technique in measuring horizontal ground water flow. Groundwater. 45(1), 89-92.
- 3) 倉澤智樹・高橋仁太郎・前野一稀・鈴木麻里子・井上一哉, 2022. 琉球石灰岩帯水層を対象とした地下水流速と間隙率の評価. 地下水学会誌. 64(2), 189–200.

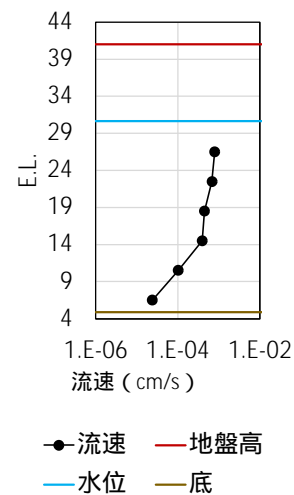


図8 深さ方向に対する流速分布例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kurasawa Tomoki, Takahashi Yoshitaro, Suzuki Mariko, Inoue Kazuya	4. 巻 234
2. 論文標題 Laboratory flushing tests of dissolved contaminants in heterogeneous porous media with low-conductivity zones	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Water, Air, & Soil Pollution	6. 最初と最後の頁 240
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11270-023-06236-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 倉澤智樹, 高橋仁太郎, 井上一哉
2. 発表標題 ラポレベルにおける多孔質媒体内の密度流の定量評価
3. 学会等名 日本地下水学会2023年春季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 倉澤智樹, 小林範之
2. 発表標題 X線CTを利用した琉球石灰岩の間隙評価
3. 学会等名 地盤工学会四国支部令和5年度技術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 澤野陽介, 田原康博, 榎みちる, 松田大樹, 辻本卓郎, 野崎真司, 新城竜一, 宋科翰, 倉澤智樹, 中屋真司, 松岡走, 上原望笑, Ban H, N. Razafindrabe, 安元純
2. 発表標題 沖縄県八重瀬町慶座地下ダム流域を対象とした不均質な透水性を考慮した水循環モデリング
3. 学会等名 日本地下水学会2023年秋季講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

愛媛大学 農学部 地域防災学研究室  
<https://www.lab-emp.com/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------