

# X線CTによる琉球石灰岩の間隙構造と地下水の流動特性の評価 Evaluation of Pore and Flow Characteristics of Ryukyu Limestone Using X-ray CT

○倉澤智樹\*・小川凐人\*\*・小林範之\*

Tomoki KURASAWA, Nagito OGAWA, Noriyuki KOBAYASHI

## 1 はじめに

南西諸島では多孔質な琉球石灰岩が広く分布しているため、地下水の貯水効率が良く、地下に止水壁を設け地下水を貯める地下ダムが開発されている。一方、ダム貯留域では、施肥や農薬散布による汚染物質の滞留が報告されており<sup>1)</sup>、この実態解明に当たって、石灰岩内部の物質輸送特性の理解が重要である。本研究では輸送特性の基礎的な知見を得るため、X線CTと数値解析を連携し、石灰岩の間隙構造と地下水の流動特性を評価した。

## 2 間隙構造の評価

表1の条件で石灰岩コアをX線CTにより撮影した。このうち、医療用CTで取得した60データを利用して、図1の手順により間隙構造を解析した。まず、CT画像のうち1辺29.2mmの正方形部分を大津の方法で2値化し、岩石と間隙部分に区別した。次に、間隙クラスターを分析し、間隙同士のつながり状況を確認した。その後、図1④の間隙クラスターの3D情報を利用して、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>2)</sup>。

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

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<sup>3)</sup>。この方法では対象領域に幅 $\delta$ のボックスを想定し、その中の間隙ボクセルの数 $N$ 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。

$$\log N(\delta) = D \log(1/\delta) + \alpha \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$ は定数、 $D$ はフラクタル次元を示す。

## 3 数値解析による流動特性の評価

表1に示すマイクロCTの高解像度データを使って、図1と類似の方法により1辺4.44mmの立方体領域の間隙を解像度55.5 $\mu$ mでモデル化し、非

表1 X線CTによる撮影の概要  
Conditions of X-ray CT imaging

	医療用X線CT	マイクロX線CT
コア数	60個	1個
解像度※	$x, y: 108 \mu\text{m}$ $z: 500 \mu\text{m}$	$x, y, z: 55.5 \mu\text{m}$
用途	間隙構造の評価	流動特性の評価

※  $x, y$ は水平方向、 $z$ は鉛直方向を示す。

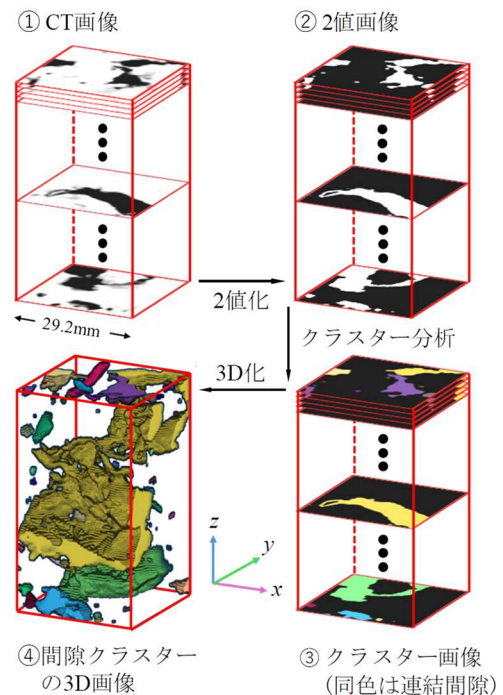


図1 間隙構造の解析手順  
The workflow of pore structure analysis

\* 愛媛大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Ehime University

\*\* 広島県庁 Hiroshima Prefectural Office

圧縮性粘性流れを解析した<sup>4)</sup>。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (3)$$

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、 $x, y, z$ の3軸方向に対する透水係数 $K$ を次式で評価した<sup>4)</sup>。

$$K = \frac{\rho g Q L}{\Delta P A} \quad (4)$$

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

#### 4 結果と考察

図2に60コアの間隙率と連結確率の関係を示す。間隙率の平均は23.95%であり、先行研究と類似した結果であった<sup>5)</sup>。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関係していることが確認された。Box Counting法によるフィッティング結果の一例である図3を見ると、 $R^2 = 0.9958$ 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4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、上流から下流にかけて極めて選択的な流路を流れていることが確認できる。また、式(4)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。

#### 5 おわりに

X線CTにより琉球石灰岩の間隙構造と地下水の流動特性を評価した。間隙構造の評価では間隙率と連結確率との相関性に加え、フラクタル特性を確認した。また、間隙モデルにかかる数値解析で、石灰岩内部の選択的な流動特性と透水係数の異方性を明らかにした。

参考文献：1) Fang et. al., *Sci. Total Environ.*, 838, 155903, 2022. 2) Jarvis et. al., *Geoderma*, 287, pp. 71–79, 2017. 3) Jiménez et. al., *J. Biomed. Inform.*, 51, pp. 176–190, 2014. 4) Bijeljic et. al., *Water Resour. Res.*, 49, pp. 2714–2728, 2013. 5) 倉澤ら, 地下水学会誌, 64, pp. 189–200, 2022.

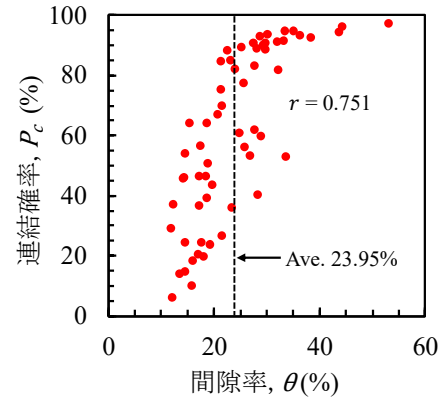


図2 間隙率 $\theta$ と連結確率 $P_c$ の関係  
The relationship between  $\theta$  and  $P_c$

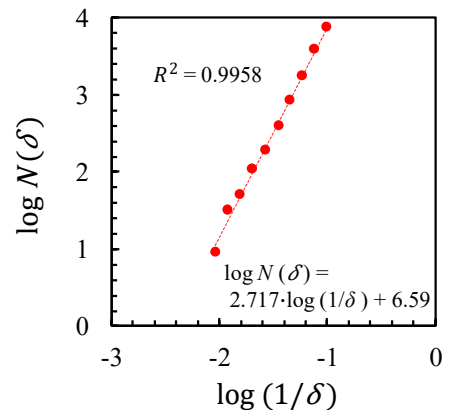


図3 Box Counting 結果の一例  
An example of box counting results

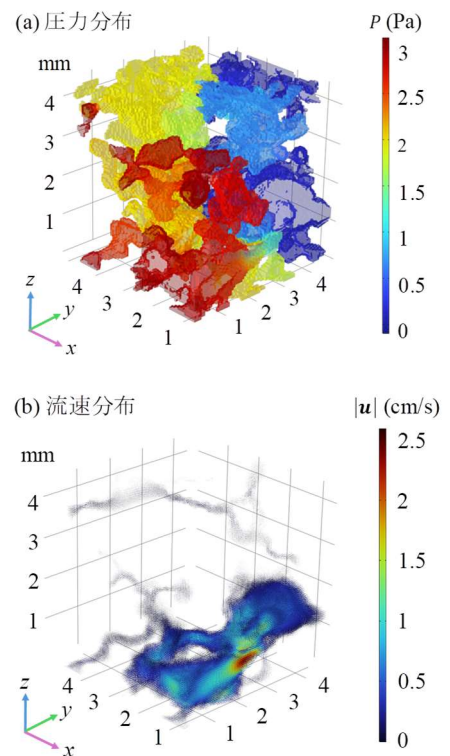


図4 数値解析の結果  
The results of numerical simulation