

深層学習による石灰岩の間隙率推定 Porosity estimation of limestone using deep learning

井上一哉*・○牧野桃子*・寺本祐大*・鈴木麻里子*
Kazuya Inoue, Momoko Makino, Yuta Teramoto and Mariko Suzuki

1. 緒論

南西諸島島嶼部の地層は多孔質で高透水性の石灰岩にて構成されている。石灰岩は地下ダムの帯水層を成し、石灰岩の間隙率は貯水量を左右する重要な因子であるため、地下ダムの設計において間隙率の調査は不可欠である。間隙率を迅速かつ効率的に計測する手法は無い点を踏まえ、本研究では、深層学習による間隙率の推定システムを開発した。

2. 深層学習

本研究では、石灰岩は喜界島と宮古島の地下ダムサイトにて得られたボーリングコア中の408試料を用いた。コアと試料の一例を図1に示す。重力排水にて計測した試料の間隙率 n を正解値とし、図2に示す畳み込みニューラルネットワーク(以下、CNNと称す)にて石灰岩の間隙率を推定した。CNNではまず、多層にわたる中間層を順伝播することで、畳み込み演算と入力画像の特徴抽出を達成した後、特徴量ベクトルの内積和を計算して推定間隙率 n_p を得る。その後逆伝播にて n と n_p の誤差を最小にするように重みを更新してモデルを構築する¹⁾。本研究では、推定値と正解値の差について $\pm 3\%$ を許容範囲として正解率を算出し、推定システムの性能指標とした。

3. 石灰岩の表面のみを入力情報とする推定

本研究では石灰岩試料の側面画像を入力値として用いた。側面図は試料を回転台の上に乗せて12方向から撮影した後、各画像にて30度の円周範囲を切り取り、横結合して作成した。当該ケースをCase-Iと称し、CNNによる推定値と測定値の関係を図3に示す。 $\pm 3\%$ の範囲に収まらない試料が散見され、表1に示すように相関係数は0.494、正解率は58.1%である。そこで、推定システムの精度向上を目的として、試料の表面情報をより深く学習させるためにボックスカウ

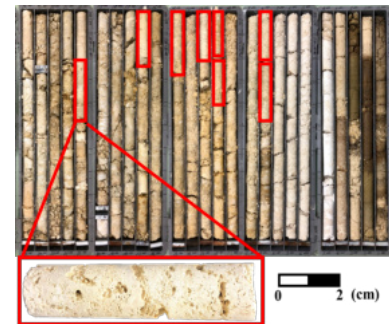


図1：石灰岩のボーリングコア
Fig. 1 : Limestone borehole cores

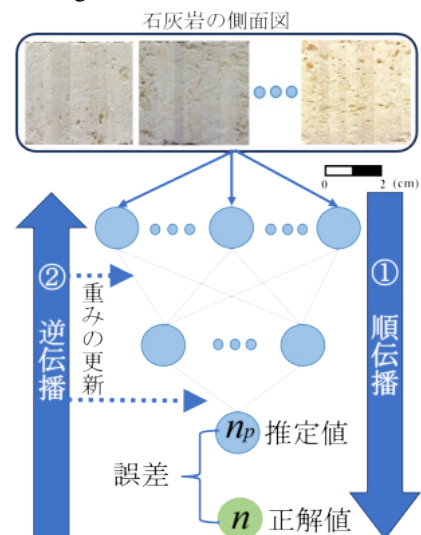


図2：CNNの流れ
Fig. 2 : CNN sequence

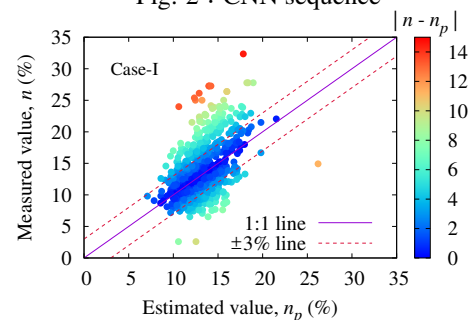


図3：Case-Iの推定結果
Fig. 3 : Estimation results for Case-I

* 神戸大学大学院農学研究科 : Graduate School of Agricultural Science, Kobe University.

ント法²⁾にて求めたフラクタル次元を入力値に加え、Case-IFとして推定した。推定結果は表1に示すように、相関係数は0.580、正解率は60.1%であり、Case-Iと比べて相関係数と正解率は少し上昇した。この点は学習情報としてのフラクタル次元の効果を示している。

4. 密度を入力情報とする推定

試料全体の特徴を学習に反映させるため、試料の乾燥密度を入力情報として追加するケースを試みた。それぞれCase-IDとCase-IFDと称する。表1に示すように、Case-IDは最良の結果になり、図4には推定値と測定値の関係を示す。乾燥密度はフラクタル次元よりも精度向上に寄与する情報と言える。

他方、Case-IFDはCase-IDよりも劣る結果となった。この点を考察するため、乾燥密度とフラクタル次元の関係を散布図、ならびに、ヒストグラムとして図5にプロットする。両者の相関は極めて低く、相関の低い2つの情報を同時に入力値とすると、CNNの学習能力を低下させる要因になると推察される。

図4のCase-IDにおいて、十分な精度で推定できていない試料を考察すべく、推定誤差の大きい試料とその画像を図6に示す。図には正解値と推定値を併記している。まず、図6(a)~(d)のように、大きな凹みをもつ試料は正解と離れた推定値になる傾向がある。これは学習に用いるサンプル数の少なさに伴う学習不足が要因である。次に、図6(e)と(f)のように、表面に溝が少ない試料は画像としての特徴がなく、推定しにくい試料と考えられる。したがって、凹みや凹凸の数を定量化して入力値に加えることで精度向上を期待できる。

5. 結論

本研究では、深層学習による石灰岩の間隙率推定システムを開発した。側面図に加えてフラクタル次元や乾燥密度を入力情報として加えると推定精度はある程度向上した。また、入力値同士の相関を考慮することは重要であることを示した。

参考文献：1) Hageong L. et al., *Communi. Stat. Appli.*, 26(19), 2019. 2) 本田勝也：フラクタル, 朝倉書店, p.44-45, 2002.

謝辞：本研究は、(一社)土地改良建設協会「2023年度国営事業地区等フィールド調査学生支援事業」による支援を受けました。

表1：各ケースにおける相関係数と正解率の対応
Table 1 : Correlation coefficients and percentage of correct answers in each case

| ケース名 | 相関係数 | 正解率 (%) |
|----------|-------|---------|
| Case-I | 0.494 | 58.1 |
| Case-IF | 0.580 | 60.1 |
| Case-ID | 0.677 | 64.7 |
| Case-IFD | 0.671 | 62.3 |

ケース名にて、Iは画像、Fはフラクタル、Dは乾燥密度を表す

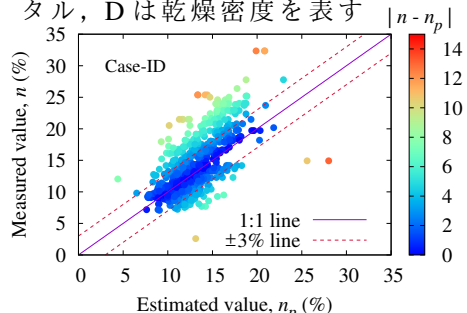


図4：Case-IDの推定結果

Fig. 4 : Estimation results for Case-ID

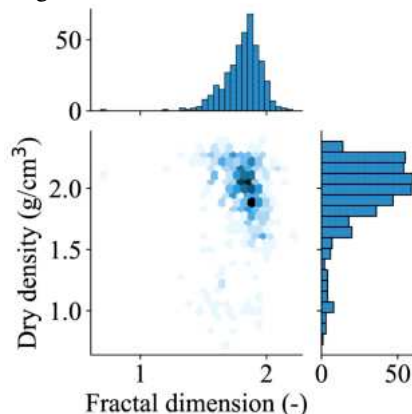


図5：乾燥密度とフラクタル次元の関係
Fig. 5 : Relationship between dry density and fractal dimension

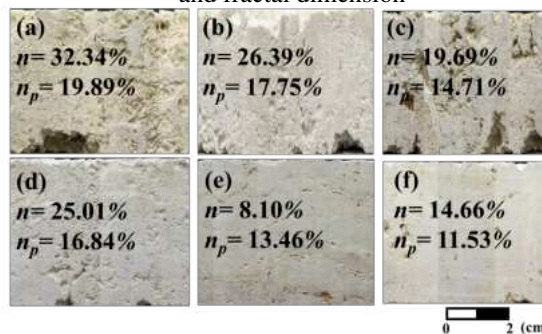


図6：推定誤差の大きい石灰岩に対する推定結果
Fig. 6 : Estimation results for limestone with large estimation errors