

打音検査の定量化手法に関する実験的考察

リテックエンジニアリング 正会員 ○新保 弘
法政大学 正会員 溝渕 利明
東海大学 尾関 智子
J-POWER 設計コンサルタント 正会員 野嶋 潤一郎

1. 目的

打音検査における健全欠陥の判定は検査技術者の技量に依存するところが多い。これを高い精度で定量化することは、今後の担い手不足解消のための点検の自動化や機械化に必須である。本稿では機械学習による打音検査の定量化手法を提案・検証し、そこで得られた打音の特性について考察する。

2. 定量化手法

打音検査の定量化は古くから検討されている¹⁾が、一般の機械学習技術の応用により、データ駆動による手法も様々な手法が検討されている²⁾。図-1 左に健全部と欠陥部の複数打音をウェーブレット変換し、これを平均したスカログラムの一例を示す。これより、欠陥部は健全部に比べ、相対的に低い周波数領域に長い時間大きな応答が現れる傾向が認められる。筆者らはこの傾向に着目し、スカログラムを画像分類の機械学習手法の一種である CNN (Convolutional Neural Network) により分類する手法を提案している³⁾。本稿ではさらに図-2 に示すように、学習済みの CNN の特徴抽出器部分のみ

を利用し、出力された特徴ベクトルの傾向から健全欠陥を分類する方法について検討した。

学習中の CNN は大量の教師画像で正解が得られるようにネットワークの重みを調整する。学習を終えた CNN は分類層の前でその画像の特徴を示す特徴ベクトルを出力する。分類層は特徴ベクトルと正解の関係を与えるが、特定サイトで学習した分類層は条件の異なるサイトで得られた打音の分類精度が劣る傾向にある。

教師データから得られた特徴ベクトルを図-1 右に示す。特徴ベクトルの次元数は任意のパラメータであるが、ここでは 4 とした。今回の CNN 特徴抽出器では健全打音では 1・4 次元が大きく、欠陥打音では 2・3 次元が大きくなる傾向にある。この CNN 特徴抽出器を用いてテストサイトの健全打音から健全打音の特徴ベクトルの多次元ガウス分布を作成し、この健全ガウス分布とテスト打音のマハラノビス距離を健全性の指標とする。マハラノビス距離は図-3 に示すような母集団の統計的な傾向を加味した距離である。図中 p と q は原点からは同じユークリッド距離であるが、マハラノビス距離は母集団の傾向に近い q の方がより小さくなる。

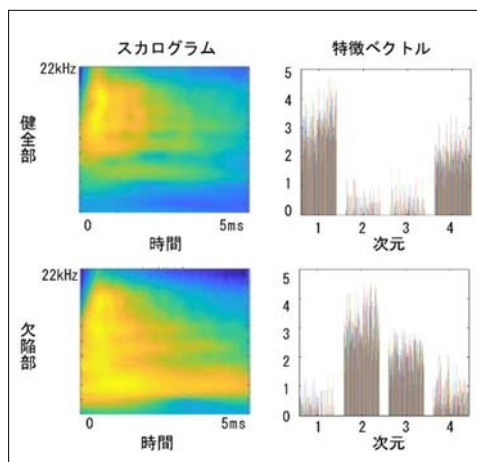


図-1 打音の平均スカログラムと各打音の特徴ベクトルの一例

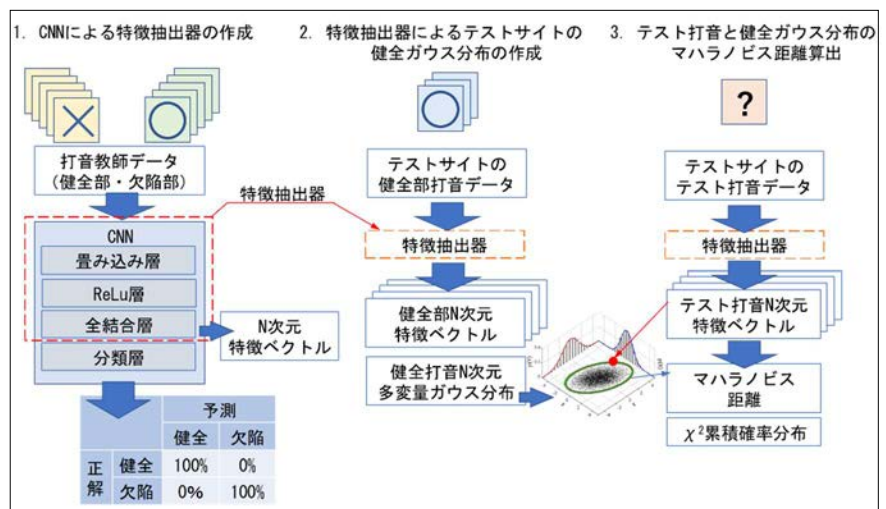


図-2 提案手法のフロー

キーワード 打音検査, スカログラム, 機械学習, CNN, 特徴抽出器, マハラノビス距離

連絡先 〒107-0052 東京都港区赤坂 6-4-2

リテックエンジニアリング株式会社 TEL03-6229-6853

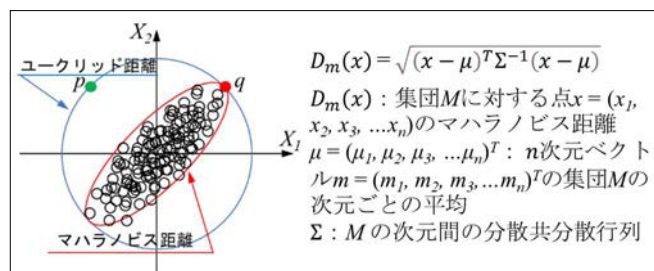


図-3 マハラノビス距離

3. 検証

異なる3サイト(I:著しく塩害劣化が進んだ構造物, N:様々な劣化度が混在した構造物群, S:比較的軽微な劣化の構造物群)で打音から明瞭に識別できる健全部・欠陥部の打音を採取し、Iサイトのデータを教師データとして作成したCNN特徴抽出器により、NサイトとSサイトの打音を本手法により分類した。

打音はデジタルレコーダー (Zoom 社 H6) の付属マイクにより打診ハンマーによる打音を打撃位置から10cm程度の距離で、サンプリング周波数44.1kHz、量子化ビット数16で採取した。データの预处理として、打撃開始から5msの波形を、Amor波を既定関数としてウェーブレット変換し、得られたスカログラムを28pixel×28pixelのグレースケール画像としてCNNに与えた。

健全152、欠陥159の打音データのうち学習から留保した約25%の検証データによる分類精度は100%で、学習曲線から過学習の傾向は見られなかった。

4. 結果と考察

Iサイトデータから作成したCNN特徴抽出器にNサイトとSサイトの健全打音を与えて得られた特徴ベクトル群に基づいて、NサイトとSサイトの健全打音ガウス分布を作成し、この健全ガウス分布から各打音のマハラノビス距離を求めた。図-4上段に全打音のマハラノビス距離のヒストグラムを示す。図中青は健全打音、橙は欠陥打音を示す。データが重なった部分が濁っ

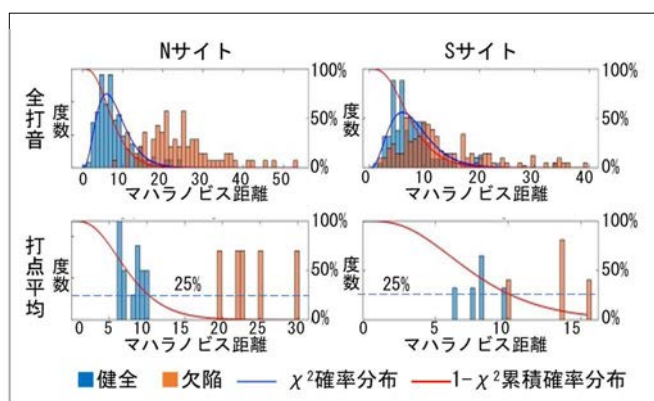


図-4 マハラノビス距離分布

た色になっている。マハラノビス距離が小さいほど健全打音のガウス分布に近いことを示すが、Nサイトでは比較的健全と欠陥が分離しているのに対し、Sサイトでは健全と欠陥が錯綜していることが分かる。そこで打撃位置ごとにマハラノビス距離を平均した場合のヒストグラムを下段に示す。これを見るとNサイトはもとより、Sサイトにおいても健全と欠陥はよく分離できている。欠陥部は健全部に比べ構造が不均質で打撃応答がバラつくため、データ平均が有効と考えられる。

一方、あるデータがガウス分布に従う場合、その二乗和は χ^2 二乗分布に従うことが知られている。図-4に青線示したカイ二乗分布は健全データのヒストグラムと概ね一致していることから、マハラノビス距離は χ^2 二乗分布に従うと考えられ、その累積分布で健全と欠陥の境界値を与えることが可能と考えられる。図-4下段に見るように、今回の検討の範囲ではその閾値はマハラノビス距離で10前後、 $1 - \chi^2$ 二乗累積確率分布で25%を健全欠陥の境界とみなすことができる。

提案手法により、打音の健全性を定量的かつ汎化性能をもって評価できる可能性を示した。本手法では異なるサイトでの適用にあたり少数の健全打音が得られれば現地の特性を簡便に反映できるため、計算負荷の高いオンライン学習等の機械学習の再実施が不要である点で現場適用性が高いと言える。本手法の精度向上に向けては、特徴抽出器の性能向上、特徴ベクトルの次元数やCNNのハイパーパラメータを含めた最適化などに検討の余地があると考えられる。また欠陥部の打音のばらつきに着目した分類手法の改良も考えられる。

謝辞：本研究に当たりデータ収集でご協力いただいた名古屋大学・中村光教授、八千代エンジニアリング・伊藤均様に感謝申し上げます。

参考文献：

- 1) 例えば、鎌田、浅野、国枝、六郷：コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用、土木学会論文集 No. 704, V-55, pp. 66-79, 2002.
- 2) 例えば、竹谷、佐々木、范、伊藤：時間・周波数領域の特徴量評価とニューラルネットワークを用いた打音法の感度向上と効率化、AI・データサイエンス論文集、2巻, J2号, p. 721-732, 2021.
- 3) 新保、溝渕、尾関、野嶋：打音探査への機械学習の適用に関する検討、土木情報学シンポジウム講演集、Vol.45, pp. 61-65, 2020.9