

## AI を用いた打音法におけるセンシング方法の検討

### Study on sensing method for impact sound method using AI

#### キーワード

非破壊検査, 浮き・剥離, 打音法

黒田 千歳\*, 歌川 紀之\*, 瀬谷 正巳\*

#### 研究概要

コンクリート構造物の打音検査を客観的かつ効率よく実施するため、機械学習の手法を用いて標準欠陥模擬試験体の打音データを学習し、実構造物の判定に用いるシステムを開発してきた。このシステムを用いて、空洞欠陥のある試験体について、ハンマーによる打音を3種類のセンシング方法（コンクリート表面のフード付きマイクロフォン、空中に配置されたマイクロフォン、および振動計）で得られたデータに対し、複数の機械学習手法を用いて欠陥、健全の識別の比較を行った。

#### 1 はじめに

著者らは、コンクリート構造物の打音検査が客観的に、かつより効率よく行えるように、何種類かの大きさ、深さの空洞が埋め込まれた欠陥模擬試験体で得られる打音のデータと機械学習の技術を用いた打音法の開発を進めてきた。その概要については4), 5)に述べている。

測定に用いた打音検査システム(写真-1)は、インパクトハンマーとフード付きマイクロフォンを用いて、マイクロフォンを測定するコンクリート構造物の表面に密着させ取得した音を用いて欠陥または健全の判定を行うものであるが、一般的に打撃音を用いて自動判定するようなシステムではフード付きマイクは用いられておらず、空中で取得した音が用いられているようである。そこで、ここではマイクを構造物の表面に密着させず、距離を変えて取得した場合の空中音を用いて機械学習の手法である自己組織化マップ<sup>1)</sup>(Self-Organizing Map, SOM)により標準欠陥模擬試験体の欠陥・健全の種類にどのような差異が生ずるのか確認を行った。SOMによる判定では、実際の構造物で健全と考えられる打撃点が、学習した欠陥模擬試験体の小さい欠陥や深い欠陥と判定されることがあるが、欠陥と健全の区別については、SOMと同様に機械学習の手法であるサポートベクターマシン<sup>2)</sup>(support-vector machine, SVM)と多層パーセプトロン<sup>3)</sup>(Multilayer perceptron, MLP)を用いて判定した方が適切な場合があるのでその結果も合わせて示す。

また比較のため、もう一つの方法として加速度計で測定した振動を用いて学習を行った場合の判定結果も示す。



写真-1 マルチ打音システム (A: インパクトハンマー, B: フード付きマイクロフォン, C: A/Dコンバータ, D: 測定PC)

#### 2 学習と判定を行う欠陥模擬試験体

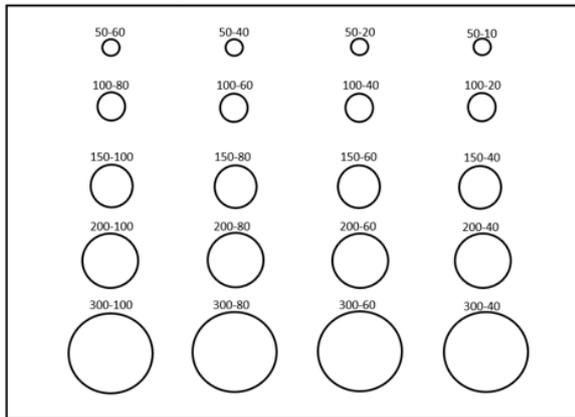
欠陥模擬試験体は、写真-2に示す横幅2m、高さ1.5m、厚さ0.3mのコンクリート躯体に円形空洞として25mm厚さの発泡スチロールが埋め込まれたもので、空洞の直径(50, 100, 150, 200, 300mm)と深さ(10, 20, 40, 60, 80, 100mm)の組み合わせは図-1に示すように21種類あるが、欠陥試験体の右上の直径50mm、深さ10mmの欠陥は破損して空洞が露出しているため使用せず、学習するものは欠陥19種類、健全1種類の合計20種類とする。マイクロフォンまたは加速度計での測定により得られた波形より、FFTで求めた24kHz程度までの周波数の512個の振幅の値を機械学習の入力ベクトルとする。

\* 技術センター 土木研究部



写真-2 欠陥模擬試験体

円形空洞Φ-d (大きさ-深さ)



2000×1500×300(mm)



図-1 欠陥種類 直径(mm)-深さ(mm)

### 3 センシング方法

比較したセンシング方法は写真-3に示す4通りである。



写真-3 センシング方法

1. フード付きマイクを打撃面に密着して測定 (通常の打音検査方法)
2. マイクを打撃面から2cm 程度離し、打撃面に向けて測定
3. マイクを打撃面から30cm 程度離し、打撃面に向けずに測定
4. 加速度計により加速度を測定

### 4 異なるセンシング方法によるデータによる判定結果

次に、上記4種類のセンシングを用いて欠陥模擬試験体の各欠陥と健全をそれぞれ100回打撃して測定した結果より、各欠陥と健全の打撃からランダムに選んだ80個のデータを SOM で学習し、残りの20個について判定した結果を示す。

表-1~4の左側の表には、左に打撃した欠陥と健全の種類、上に判定された種類が欠陥の直径、深さ順に記入されている。表の数値はそれぞれ該当した個数である。色付けした対角部が正確に判定されたもので、対角部近くは大きさと深さが正解に近いものとなっている。SOM で学習したデータの欠陥と健全の種別を SVM と MLP で学習して同様に残りの20個について判定した結果も右側に合わせて示している。

表-1 フード付きマイクを打撃面に密着して測定（通常の打音検査方法）

| data\pred | 50-20 | 50-40 | 50-60 | 100-20 | 100-40 | 100-60 | 100-80 | 150-40 | 150-60 | 150-80 | 150-100 | 200-40 | 200-60 | 200-80 | 200-100 | 300-40 | 300-60 | 300-80 | 300-100 | health |
|-----------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|
| 50-20     | 19    |       | 1     |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 50-40     |       | 20    |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 50-60     |       |       | 20    |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 100-20    |       |       |       | 20     |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 100-40    |       |       |       |        | 19     | 1      |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 100-60    |       |       |       |        |        | 17     | 3      |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 100-80    |       |       | 1     |        |        |        | 19     |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 150-40    |       |       |       |        |        |        |        | 18     |        |        | 2       |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 150-60    |       |       | 1     |        |        |        |        |        | 19     |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 150-80    |       |       |       |        |        |        |        |        |        | 19     |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 150-100   |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        | 20      |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 200-40    |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         | 19     |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 200-60    |       |       |       |        |        |        |        |        | 1      |        |         |        | 17     | 2      |         |        | 1      |        |         |        |
| 200-80    |       |       |       |        |        |        |        |        | 1      |        |         |        |        | 19     |         |        |        |        |         |        |
| 200-100   |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        | 20      |        |        |        |         |        |
| 300-40    |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         | 20     |        |        |         |        |
| 300-60    |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        | 20     |        |         |        |
| 300-80    |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        | 20     |         |        |
| 300-100   |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        | 20      |        |
| health    |       |       |       |        |        |        | 3      |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         | 17     |

| SVM |    | MLP |    |
|-----|----|-----|----|
| 欠陥  | 健全 | 欠陥  | 健全 |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 0   | 20 | 0   | 20 |

表-2 マイクを打撃面から 2cm 程度離し，打撃面に向けて測定

| data\pred | 50-20 | 50-40 | 50-60 | 100-20 | 100-40 | 100-60 | 100-80 | 150-40 | 150-60 | 150-80 | 150-100 | 200-40 | 200-60 | 200-80 | 200-100 | 300-40 | 300-60 | 300-80 | 300-100 | health |
|-----------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|
| 50-20     | 14    | 6     |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 50-40     | 1     | 19    |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 50-60     |       | 9     | 10    |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         | 1      |
| 100-20    |       |       |       | 20     |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 100-40    |       |       |       |        | 18     |        |        |        |        |        | 1       |        |        |        |         |        |        |        |         | 1      |
| 100-60    |       |       |       |        |        | 18     | 2      |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 100-80    |       |       |       |        |        |        | 20     |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 150-40    |       |       |       |        |        |        |        | 20     |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 150-60    |       |       |       |        |        |        |        |        | 20     |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 150-80    |       |       |       |        |        |        |        |        |        | 20     |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 150-100   |       | 2     |       |        |        |        |        |        |        |        | 18      |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 200-40    |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         | 20     |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 200-60    |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        | 20     |        |         |        |        |        |         |        |
| 200-80    |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        | 20     |         |        |        |        |         |        |
| 200-100   |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        | 20      |        |        |        |         |        |
| 300-40    |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         | 20     |        |        |         |        |
| 300-60    |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        | 20     |        |         |        |
| 300-80    |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        | 20     |         |        |
| 300-100   |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        | 20      |        |
| health    |       | 4     | 3     |        |        |        |        |        |        |        | 2       |        |        |        |         |        |        |        |         | 11     |

| SVM |    | MLP |    |
|-----|----|-----|----|
| 欠陥  | 健全 | 欠陥  | 健全 |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 1   | 19 | 0   | 20 |

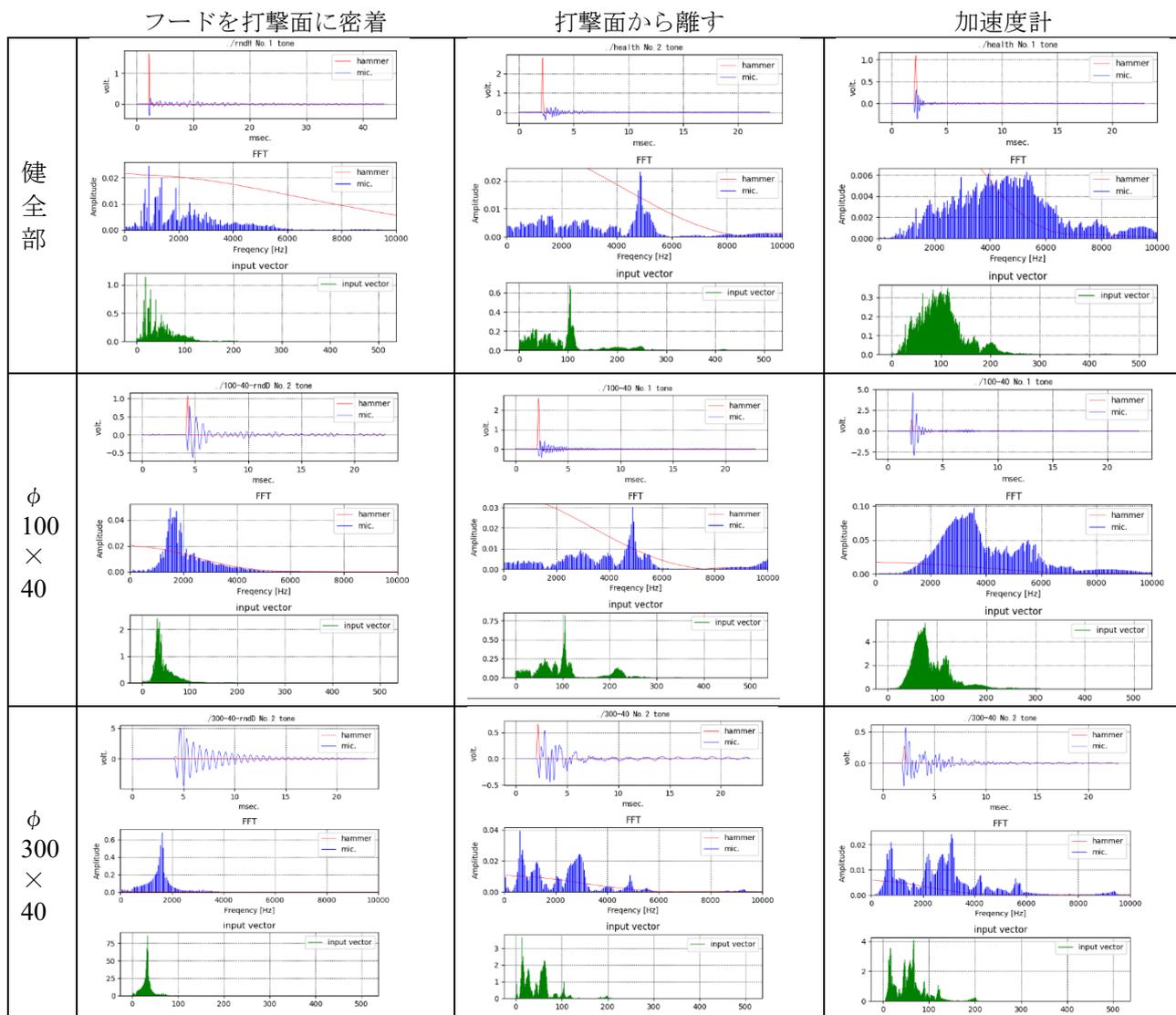
表-3 マイクを打撃面から 30cm 程度離し，打撃面に向けずに測定

| data\pred | 50-20 | 50-40 | 50-60 | 100-20 | 100-40 | 100-60 | 100-80 | 150-40 | 150-60 | 150-80 | 150-100 | 200-40 | 200-60 | 200-80 | 200-100 | 300-40 | 300-60 | 300-80 | 300-100 | health |
|-----------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|
| 50-20     | 4     | 9     | 2     |        |        | 2      | 3      |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 50-40     | 2     | 15    | 3     |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 50-60     |       | 1     | 17    |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 100-20    |       | 4     |       | 11     | 1      | 1      | 1      |        |        |        | 2       |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 100-40    |       | 2     | 2     |        | 8      | 5      | 2      |        |        |        | 1       |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 100-60    |       |       |       |        |        | 14     | 4      |        |        |        | 2       |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 100-80    | 1     |       |       |        | 2      | 4      | 11     |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         | 2      |
| 150-40    | 2     |       | 1     |        |        |        |        | 17     |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 150-60    |       |       |       |        | 1      |        |        |        | 19     |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 150-80    |       |       |       | 2      | 2      | 1      | 2      |        |        | 12     | 1       |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 150-100   |       |       |       |        | 3      | 5      | 3      |        |        |        | 6       |        |        |        | 3       |        |        |        |         |        |
| 200-40    |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         | 20     |        |        |         |        |        |        |         |        |
| 200-60    |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        | 20     |        |         |        |        |        |         |        |
| 200-80    |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        | 19     |         |        |        |        |         |        |
| 200-100   | 1     | 1     | 2     |        |        | 1      |        |        |        |        |         |        |        |        | 15      |        |        |        |         |        |
| 300-40    |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         | 20     |        |        |         |        |
| 300-60    |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        | 20     |        |         |        |
| 300-80    |       | 1     |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        | 19     |         |        |
| 300-100   |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        | 20      |        |
| health    |       |       |       | 2      | 5      | 2      |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |         | 11     |

| SVM |    | MLP |    |
|-----|----|-----|----|
| 欠陥  | 健全 | 欠陥  | 健全 |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 20  | 0  | 20  | 0  |
| 13  | 7  | 1   | 19 |



表-5 打撃波形の例



参考文献

- 1) Tevno Kohonen, "Self-Organizing Map (Second Edition)," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995.
- 2) Comparing support vector machines with Gaussian kernels to radial basis function classifiers, IEEE Trans. Signal Processing, Vol.45, No.11, pp. 2758-2765, 1997.
- 3) Rosenblatt, Frank, "Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms", Washington DC: Spartan Books, 1961.
- 4) 黒田千歳, 歌川紀之, 安永守利: 複数の機械学習の手法を用いた打音診断, 佐藤工業研究所報, No.46, pp.18-25, 2021.
- 5) 黒田千歳, 歌川紀之, 安永守利: 複数の機械学習の手法を用いた打音診断 (その2), 佐藤工業技報, No.47, pp.21-26, 2022.