

論文 異常検知手法によるレーザー打音データの評価

新保 弘*1・長谷川 登*2・中村 光*3・溝渕 利明*4

要旨: レーザー打音システムはコンクリート表面に極短時間のレーザーを照射することで衝撃を与え、その応答を取得することにより、遠隔・非接触・自動で打音検査を可能とする技術である。機械学習による打音検査の定量化手法として、画像化した打撃音を CNN(Convolutional Neural Network)により抽出した特徴量をもとに、異常検知によりその欠陥度を評価する手法は、通常のハンマー打音については定量評価とその汎化性能が確認されている。本稿では本手法のレーザー打音システムへの適用性について実験的に検討した。その結果、レーザー打音についても欠陥度合の定量評価が可能であることを示した。

キーワード: 打音検査, レーザー打音, 機械学習, CNN, 異常検知, マハラノビス距離

1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理が重要となる中で、技術者の経験的な判断に依存する打音検査を自動化・機械化するニーズは高い。ここでは打音データの定量的分類手法について、現在実用開発中のレーザー打音システムへの適用性について検討した。

打音検査の定量化についてはこれまでもハンマーなどによる物理的な打音のメカニズムに基づく検討や機械学習による方法が検討されている。メカニズムに基づく検討としては、表層欠陥の大きさと深さが打音波形の最大振幅や周波数分布に与える影響についての検討などが行われている^{1,2)}。機械学習を用いる試みについては、周波数領域で分割した応答スペクトルを特徴量として SOM(Self-Organizing Map)を適用する方法³⁾、STFT(Short-Time Fourier Transform)によるスペクトログラムを含む様々な特徴量を用いたニューラルネットワークにより対象や周辺環境の変化に対応する方法^{4,5)}などが検討されている。

機械学習に関しては、教師なし学習によれば汎化的な分類が可能であるが、求める精度によっては分類に相当な数の現地データを取得する必要があるため実用に課

題が残る。教師あり学習によれば教師データに対する分類精度は確保できるが、条件の異なるサイトではテストデータを用いてネットワークをリアルタイムで更新するような方法⁶⁾が必要となる。

筆者らは、コンクリート部材に対するハンマー打音を時間-周波数関係で画像化したデータの CNN(Convolutional Neural Network)による画像分類手法による分類⁷⁾、また画像化した打音の分類で学習した CNN を特徴抽出器として利用し、得られた特徴量に異常検知手法を適用することでハンマー打音を定量的に分類評価する方法⁸⁾について検討を進めている。本稿ではこの異常検知による手法のレーザー打音システムへの適用性について実験的に検討する。

2. レーザー打音システム

図-1 にレーザー打音検査装置の概要を示す^{9,10,11)}。本方式では、ハンマーによる打撃の代わりに高強度のパルスレーザー(波長 1,064 nm, 1J, 10 Hz, Nd:YAG レーザー)をコンクリート表面に集光し、光のエネルギーを運動エネルギー(微粒子の吹き出し)に変換することで表面に振動を発生させる。レーザーが照射されたコンクリート

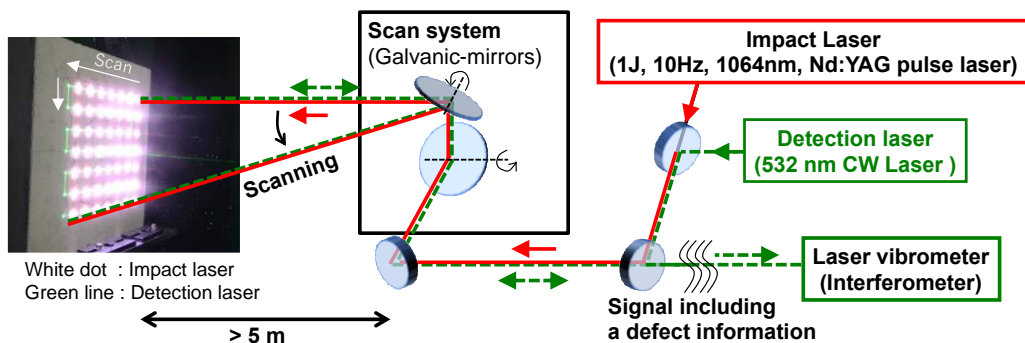


図-1 レーザー打音検査装置の概要

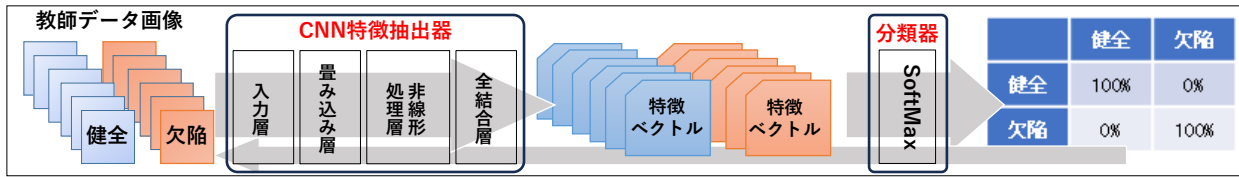
*1 リテックエンジニアリング 技術本部 工博 (正会員)

*2 量子科学技術研究開発機構 量子技術基盤研究部門 関西光量子科学研究所 工博

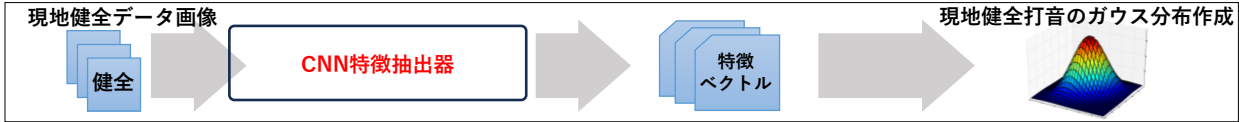
*3 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

*4 法政大学大学院 都市環境デザイン工学専攻 教授 工博 (正会員)

STEP 1 : CNN特徴抽出器の作成



STEP 2 : 現地健全打音データ特徴ベクトルの多次元ガウス分布の作成



STEP 3 : 健全ガウス分布と現地テストデータのマハラノビス距離の算出

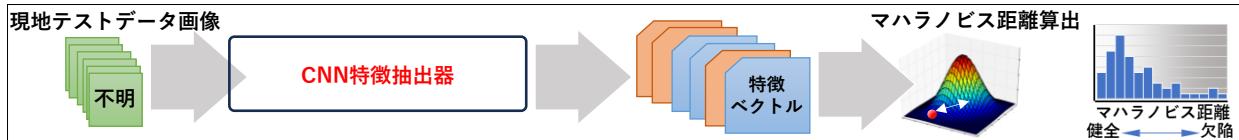


図-2 本手法のフロー

表面には照射痕が残るが、その凹みは1照射当たり数 μ m程度でありコンクリートの物性には影響を与えない。

表面の振動は、連続発振(CW)レーザー(波長532nm)を用いた干渉計により計測する。振動する壁にCWレーザーを照射すると、反射または散乱したレーザー光の周波数がドップラーシフトによって変調され、レーザー周波数の変調から表面振動の測定が可能となる(=レーザードップラー振動計)。遠方のコンクリートから十分な散乱強度を得るために、コンクリート表面の水に吸収されない波長532nmの高出力(1W)Nd:YVO₄レーザーを検出レーザーとして使用した。このシステムは、5m以上離れたコンクリート表面のサブミクロンスケールの振動を計測することが可能である。

2つのレーザー光を用いたスキャンは、ガルバノスキャナーを用いてコンクリート上で格子状に行う。スキャン間隔は任意に設定可能であり、1回の計測で検査可能な範囲は装置と5m離れている場合で約500mm四方である。仮に50mm間隔で500mm四方を計測した場合、121点の計測となり、所要時間は36秒(S/Nの向上のため1点につき3回計測)となる。

レーザーによる表面振動により得られたコンクリート表面の1点の振動応答データはハンマー打撃とマイクロフォンにより得られる音響データ、いわゆる打音データとは異なるものであるが、打撃点から生じた振動が内部伝搬し、内部の構造に応じて表面の振動応答(音)が変化するというメカニズムは共通であるため、コンクリート内部の状態を推定できる可能性がある。その意味で、ここではコンクリートへのレーザー照射による表面振動応答をレーザー打音と呼び、そのデータの検討を行う。

3. 異常検知手法による打音データの評価

データサイエンスにおける異常検知手法とは正常なデータ群と特徴の異なるデータを検出する技術である。コンクリートの打音検査では検査技師が現場の健全部のハンマー打音を比較参考にしながら欠陥部を判別しているが、この作業は異常検知の一種であるとも見なせる。異常検知の精度を高めるには、求める分類に適した特徴量を抽出、算定することが重要となる。

本手法のフローを図-2に示す。コンクリートの打音の特徴量抽出には様々な方法が考えられるが、ここでは波形を時間-周波数関係に変換することで画像化し、画像の分類に有効なCNNにより打音データの特徴抽出器を作成する。図-3上段にあるサイトでのコンクリートの健全部と欠陥部の5msのハンマー打音をウェーブレット変換し、複数データでの平均的なイメージの例を示す。ハンマーによる打音では、一般に欠陥部の打音は健全部に比べ周波数が低く長い時間続く傾向が見られる。

本手法ではまずSTEP1として、多数の健全打音と欠陥打音の教師データにより打音分類のCNN特徴抽出器を

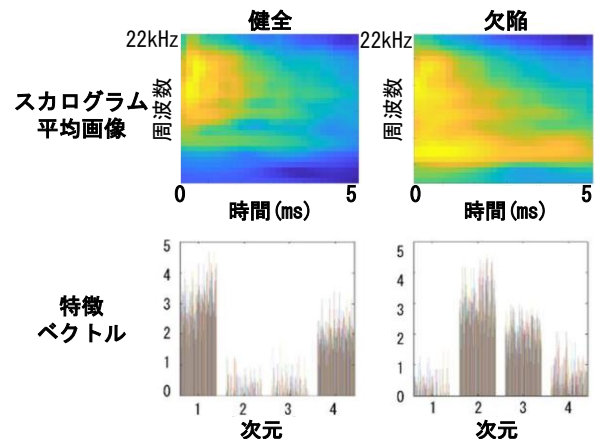


図-3 画像化平均したハンマー打音と特徴ベクトル

作成する。STEP2として、テストサイトから複数の健全全部打音を採取し、この特徴抽出器で健全全部打音の特徴ベクトルを求め、その多次元ガウス分布をフィッティングする。STEP3としてテスト打音の特徴ベクトルを算出し、以下に述べる、健全全部の多次元ガウス分布からの多次元データにおける次元間の相関関係を考慮した距離であるマハラノビス距離を算出する。このマハラノビス距離が小さいほど健全全部打音に近い特徴を持ち、大きくなると健全全部とは異なる特徴を持った打音である、すなわち欠陥部である可能性が高いと言える。

マハラノビス距離は多次元の集団に対して、多次元の任意の点の集団の相関関係を考慮した距離を与えるものである。一般に n 次元のベクトル $m = (m_1, m_2, m_3, \dots, m_n)^T$ が成す集団 M について、その次元ごとの平均を $\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n)^T$ 、次元間の分散共分散行列を Σ とした時、ある点 $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ の集団 M に対するマハラノビス距離 $D_m(x)$ は式(1)で表される。

$$D_m(x) = \sqrt{(x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)} \quad (1)$$

ここに Σ^{-1} は逆分散共分散行列である。

ハンマー打音のCNNで作成した特徴量抽出器から得られた4次元の特徴量の一例を図-3下段に示す。この例では健全打音では第1, 第4次元、欠陥打音では第2, 第3次元に大きな値が出る傾向にあることがわかる。この特徴量の傾向はランダム性を持つCNNの学習に依存するものであり、次元に物理的な意味はない。

本手法によれば、計算負荷の高いネットワークの再学習等を行うことなくサイト条件に応じた分類ができること、健全欠陥の評価が定量的に算出できるため実用性が高いと考えられる。これまで著者らは、本手法によりサイト特性に依存しない汎化的なハンマー打音の分類が可能であることを示した⁷⁾。本稿では本手法のレーザー打音検査技術への適用性を検討する。

4. 試験体

今回の検討で用いた4体の試験体A,B,C,Dの概要を図-4に示す。コンクリート試験体には腐食膨張する鉄筋を模擬するため、軸方向の一定区間にスリットを与えたステンレスチューブ(φ9.5mm~23mm)を配置して打設した。コンクリート硬化後にチューブ内に静的破砕剤を入れることにより、チューブの拘束力がないスリット部から破砕材の膨張圧が直接コンクリートに作用し、コンクリートに内部ひび割れを導入することができる¹²⁾。同じ構造寸法のC,D試験体には補強筋を配置することで、下面方向へのひび割れの進展制御を行った。試験体

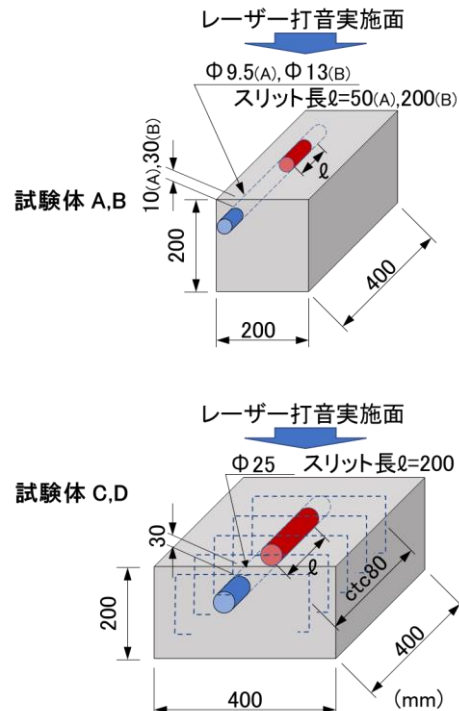


図-4 試験体の概要

表-1 試験体コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				Ad (%)
			W	C	S	G	
25	56.5	43.1	168	298	760	1024	2.98

コンクリートの配合を表-1に示す。実験時の圧縮強度は約40N/mm²、弾性係数は約31N/mm²であった。

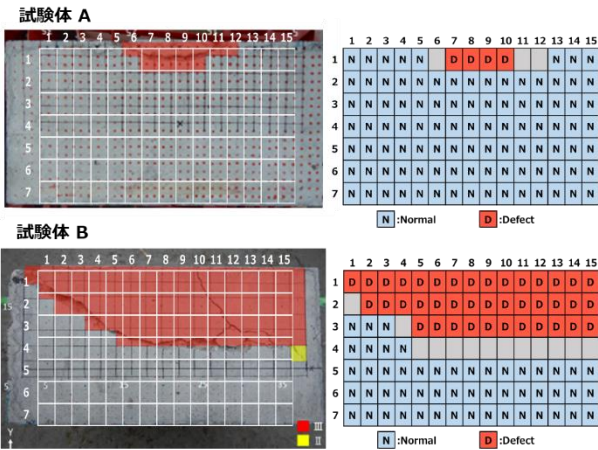
ここではA,B試験体から得られた振動応答を教師データ、C,D試験体から得られたものをテストデータとした。実験ではレーザー打音システムにより約5.9m離れた位置から同じ位置を3回加振して、一か所あたり3波の振動波形データを取得した。

5. CNNによる機械学習

A,B試験体での教師データの採取位置を図-5に示す。教師データのラベルは人によるハンマー打音検査の結果を採用し、健全と欠陥が混在する部分(教師データ採取位置図のグレー部分)は排除した。なお人によるハンマー打音検査の位置(試験体写真の赤と黄のハッチング)とレーザー加振の位置(写真上の白いマス)はそれぞれ別のグリッドで実施しているため一致していない。

CNNの学習では学習データの25%以上を検証データとして学習に用いず、学習過程において検証精度の推移をモニターすることにより過学習となっていないことを確認した。

レーザー加振の振動応答はサンプリング周波数100kHzで12ミリ秒の速度波形を時間積分して変位波形



人による打音検査結果 教師データの採取位置
図-5 教師データの採取位置

に変換した上で、Amor 波形によるウェーブレット変換で 28pixel×28pixel のスカログラム画像に変換した。教師データとして与えた健全部と欠陥部でのレーザー加振一回の応答振幅波形とこれをウェーブレット変換により画像化した例を図-6 に、また与えた教師データの健全部と欠陥部ごとに多数の画像を平均化後に正規化した平均画像を図-7 に示す。

図-6 に示す 1 データの波形やそのスカログラム画像では健全部と欠陥部の波形や画像に明確な差が見えにくいですが、図-7 を見ると、欠陥部には周波数領域の中心付近に長い時間のエリアが認められる。

ここで用いた CNN のネットワーク構成を図-8 に示す。CNN は 3 層の畳み込み処理とバッチ正規化を行う比較的単純な構成とした。CNN のランダム性による特徴抽出器の性能のばらつきの影響を緩和するため、同一の教

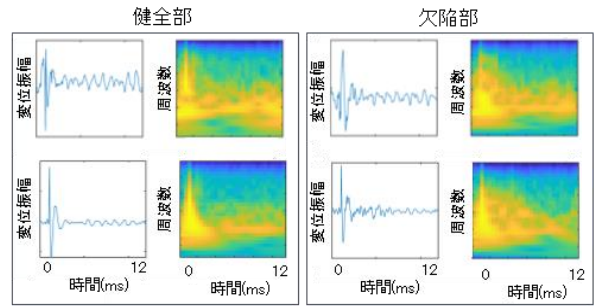


図-6 健全部・欠陥部単音の波形とスカログラム

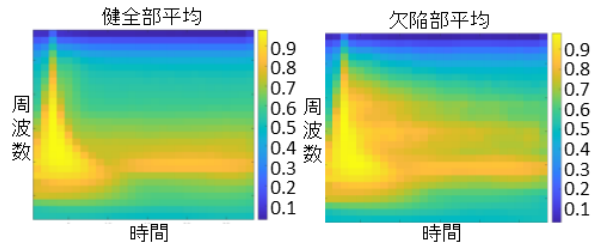


図-7 教師データの平均スカログラム



図-8 CNN のネットワーク構成

師データを用いた CNN の学習は 10 回行った。いずれも CNN は最終的に 90%~95%程度の精度で検証データの分類が可能であった。マハラノビス距離は 10 個の特徴抽出器で得られた値を平均して評価した。

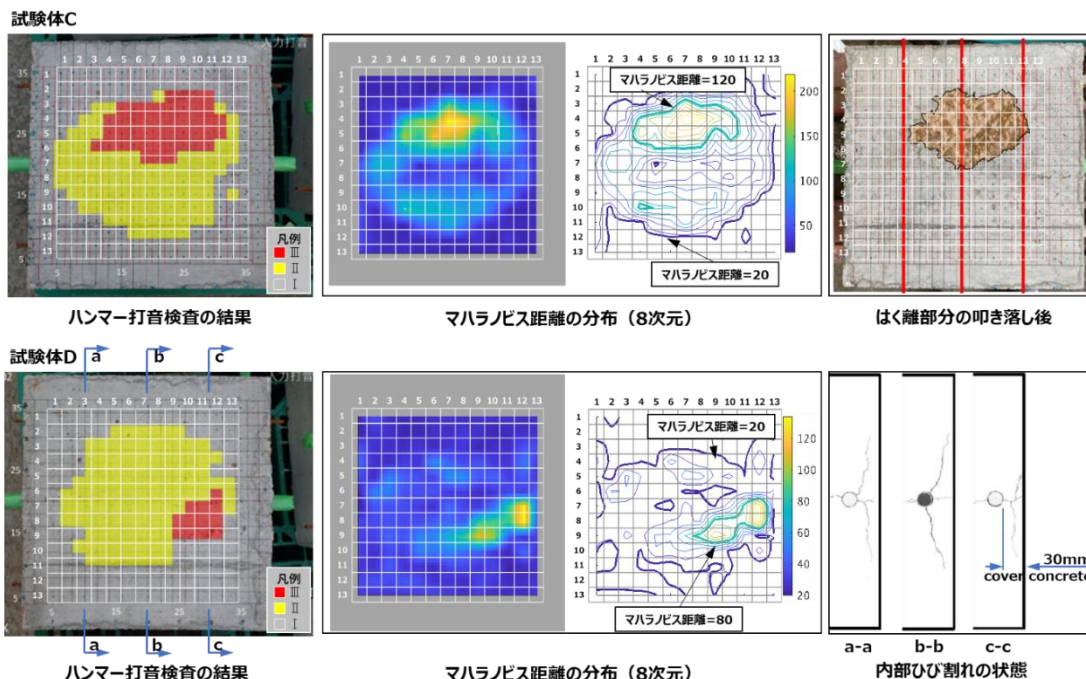


図-9 テスト試験体の打音検査結果、マハラノビス距離の分布と試験体観察状況

6. テストデータの分類

テストデータとして用いた試験体C,Dのハンマー打音検査結果と本手法により算出した8次元の特徴ベクトルによるマハラノビス距離の分布（1箇所あたり3打音の平均値）、あわせて試験後に計測した試験体内部の状況を図-9に示す。

テストデータの処理手順としては、まずC,D試験体の健全部各15か所から1波形ずつ計30の波形からその特徴ベクトルを算出し、それらにフィットする多次元ガウス分布を作成する。続いてテストデータの特徴ベクトルを算出し、ガウス分布とのマハラノビス距離を求める。

試験体Cはデータ取得後に剥離コンクリートの叩き落としを行った。また試験体Dは図-9に示すa-a, b-b, c-cの3ラインで切断して内部ひび割れの状態を観察した。

試験体Cの結果を見ると、ハンマー打音検査で健全度Ⅲ（赤）と判定されたエリアは叩き落してかぶりコンクリートが剥離したエリアと一致している。このエリアは8次元のマハラノビス距離で概ね120以上と判定される領域と一致している。剥離部分の最大厚さ（深さ）は鉄筋かぶりに相当する30mm程度であった。

試験体Dでは図-9中、中央右付近のエリアが健全度Ⅲと判定されており、これはマハラノビス距離で80以上と評価された位置と概ね一致している。切断面c-cの観察からこの位置はかぶり厚さの半分≒15mm程度の位置にひび割れが発生している。一方、a-a断面とb-b断面では鉄筋位置（縦軸7付近）ではマハラノビス距離は20前後、試験体側面に向かって薄く剥離している部分（縦軸5および9付近）では40程度の値が見られる。これは鉄筋付近ではひび割れ深さが30mmと比較的深いため健全部との応答差が小さく、ひび割れが表層に近づいた領域で応答の違いが大きくなっていることが検出できたものと推定できる。なお切断した試験体断面の観察によれば、この範囲には幅0~2.5mmのひび割れが観察された。

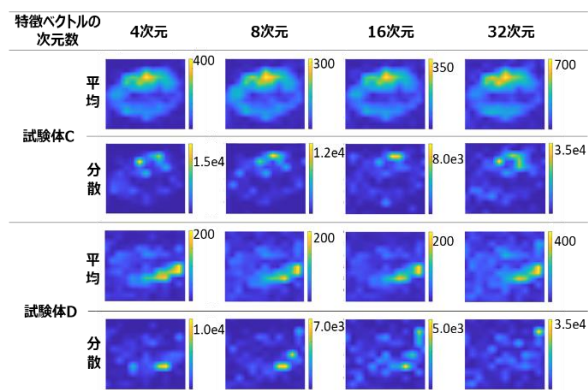


図-10 特徴ベクトルの次元数ごとのマハラノビス距離の平均と分散の分布

7. 考察

7.1 特徴ベクトルの次元数の影響

ハンマー打音を対象とした検討では、特徴ベクトルの次元数を上げた場合、マハラノビス距離の分散によっても欠陥部の分類が可能となる傾向があった⁸⁾。仮に特徴ベクトルの次元数を上げることによって同じ打点でのマハラノビス距離の分散のみによって欠陥の分類ができるとすれば、分散の算出にはマハラノビス距離算出の基本となる現地での健全データ（のガウス分布）の影響は小さいと考えられるため、健全打音のリファレンスとして既にある学習データの健全打音データを用いてマハラノビス距離を算出することで、現地での健全データの採取が不要となる可能性もある。

レーザー打音において特徴ベクトルの次元数を増やした場合のマハラノビス距離の平均値と分散の分布を図-10に示す。これを見ると、マハラノビス距離の平均値分布は打音検査の欠陥分布とよく一致しているが、分散分布は平均値分布よりも健全領域と欠陥部領域の違いが不明瞭であり、マハラノビス距離の分散分布が欠陥部分を明確に示す傾向は認められなかった。これは人によるハンマー打音では欠陥部ではハンマーの当たり方と内部ひび割れの位置関係が微妙に変化することで打音に微妙なばらつきが生じるため打撃ごとのマハラノビス距離にもばらつきが生じると考えられるのに対し、現状のレーザー打音システムは同じ場所を同じ強度で正確にレーザー加振しているため、応答のバラつきが出にくいことが原因として推定できる。これは例えば、レーザー照射の位置や強度にばらつきを与えることなど、システムの制御により改善できる可能性があると考えられる。

7.2 マハラノビス距離の閾値

母集団の各次元がそれぞれ正規分布に従う場合、マハラノビス距離はカイ二乗分布に従うことが知られている。ハンマー打音についての既往検討の範囲では、特徴ベクトルの次元数によらず、健全部と欠陥部の閾値はカイ二乗分布の相補累積確率分布で25%前後となっていた。自由度8のカイ二乗分布の相補累積確率分布25%はマハラノビス距離で10程度となる。仮に10を閾値とすると今回の結果では試験体全面が欠陥と評価されることになる。図-9ではハンマー打音で健全度Ⅱ（黄色）の境界はマハラノビス距離20のコンターラインと概ね一致し、ハンマー打音と同等の評価が得られた。これより、レーザー打音によるデータの閾値はハンマー打音検査の場合とは異なるものと考えられるが、レーザー打音における閾値を適切に設定することでハンマー打音検査と同等の精度で欠陥の検出できる可能性があると考えられる。

7.3 レーザー打音による欠陥の検出深さ

今回の実験結果によれば、鉄筋近くで欠陥がやや深く鉄筋かぶり 30mm 程度となる領域ではマハラノビス距離は小さくなるが、閾値を 20 程度とすることでその領域を含みハンマー打音と同等の領域を欠陥と評価することができた。

ハンマー打音においても欠陥が深くなると健全部の打音との差異が小さくなり、欠陥の検出が難しくなる傾向と同様である。レーザー打音ではコンクリート表面をレーザーにより振動を発生させ時間が 10 ナノ秒と極めて短時間であり、1 回の打撃で与えるエネルギーの大きさが 1J と非常に小さい。より深い欠陥の検出を考える場合、より大きな振動エネルギーを与えるため、レーザー出力向上や応答に応じた打撃タイミングの調整などによっても改善可能と考えられる。

8. まとめ

今回の実験の範囲について、以下の結果が得られた。

1) 本手法によりレーザー打音システムによる振動応答を評価した場合、閾値を適切に設定することにより、人によるハンマー打音検査とほぼ同等の評価結果を得ることが可能と考えられる。

2) 同一箇所での複数回のレーザー打音によるマハラノビス距離の分散により内部欠陥を評価する方法による評価は困難であった。これは、複数回の加振の位置や強度が均質であることが原因と考えられる。

3) 本手法によって、今回の試験体の最大の欠陥深さである 30mm 程度を含む領域まで欠陥の検出が確認できた。レーザー出力を向上させることや、同一箇所への打撃回数、位置やタイミングの調整などにより加振エネルギーを増強することでより深い欠陥を検出できる可能性があると考えられる。

4) 閾値は打音対象やレーザー加振の物理的な特性にも影響されると考えられるため、異なる条件でのデータの分析を行うことなどにより、適切なマハラノビス距離の閾値について検討することが必要である。

謝辞

本検討にあたり、東海大学・尾関智子教授、J-POWER 設計コンサルタント・野嶋潤一郎博士、建設技術研究所・戸本悟史氏、フォトンラボ・坂本勝哉氏にご指導並びにデータ提供をいただきましたことを感謝いたします。

参考文献

1) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 国枝稔, 六郷恵哲: 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) Nicholas J. CARINO : Impact Echo: The Fundamentals, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), September 15 - 17, 2015.
- 3) 園田佳巨, 川端健太, 別府万寿博, 福井雄気: 打音データを用いたコンクリート内部欠陥の評価に関する基礎的考察土木学会構造工学論文集 Vol.57A, 2011.
- 4) 江本久雄, 馬場那仰, 浅野寛元, 長瀬大和: AI 手法による打音検査の浮き判定の検討, AI・データサイエンス論文集, 2020, 1 巻, J1 号, p. 514-521, 2020.
- 5) 竹谷晃一, 佐々木栄一, 范書舒, 伊藤裕一: 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.
- 6) Jiaying, Y., Kobayashi, T., Iwata, M., Tsuda, H. and Murakawa, M, Computerized Hammer Sounding Interpretation for Concrete Assessment with Online Machine Learning, Sensors18(3).833-, 2018.
- 7) 新保弘, 溝渕利明, 野嶋潤一郎, 打音探査への機械学習の適用に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41. No.1, pp.1829-1834, 2019.
- 8) 新保弘, 尾関智子, 溝渕利明, 野嶋潤一郎: 機械学習による打音検査の汎化手法について, AI・データサイエンス論文集, 2023, 4 巻, 3 号, p. 337-343, 2023.
- 9) Hasegawa, N., Nishikino, M., Okada, H., Kondo, S., Kitamura, T., Abe, M., Masuzoe, K. and Kogure, S. (2020). "Demonstration of High-Speed Laser Hammering System for the Lining Concrete Inspection", ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC2020 and 46th General Assembly Kuala Lumpur, Malaysia 11-17, 653-656 September 2020.
- 10) Sakamoto, K., Kogure, S., Nishikino, M., Okada, H., Kondo, S., Kitamura, T. and Hasegawa, N. "Social implementation of the technologies for the infrastructure inspection using high-power lasers, -Laser Hammering System-", Optical alliance, Vol.32, No.12, 38-43, 2021.
- 11) Hasegawa, N., Okada, H., Kondo, S., Kitamura, T., Nishikino, M., Sakamoto, K. and Kogure, S. "Current Status and Social Implementation of the Laser Hammering System for Remote Inspection of Defects in Tunnel Lining Concrete", Journal of The Society of Instrument and Control Engineers, Vol.60, No.11, 765-769, 2021.
- 12) 中村光, 戸本悟史, 松永輝, 杉山風雅, 三浦泰人, 辻健斗: 静的破砕剤による各種形態と損傷度を有する模擬腐食ひび割れの生成法の提案, 構造工学論文集, 69A, pp.718-733, 2023.3