

コンクリート壁面の健全性診断

ドライアイスを用いたコンクリート壁面診断システム

板倉 賢一

コンクリート壁面の診断にドライアイスペレットの衝突音を用いるシステムを開発し、基礎実験および現場実験を行ってきた。コンクリート面の奥に空隙がある場合、衝突音の周波数スペクトルにその大きさ等に応じた卓越周波数が現れる。これを的確に検出するためのハードウェアと、AIを用いた診断ソフトウェアを開発した。基礎実験の結果および経済性も考慮して診断対象単位領域を定め、そこへ衝突させるペレットの量やマイクロフォンとの位置関係などを検討して、ハードウェアを製作した。また、単位領域の健全性診断では衝突音のスペクトル包絡と主成分分析の固有ベクトルをAIへの入力データとすることで、高い正答率を得ることができた。

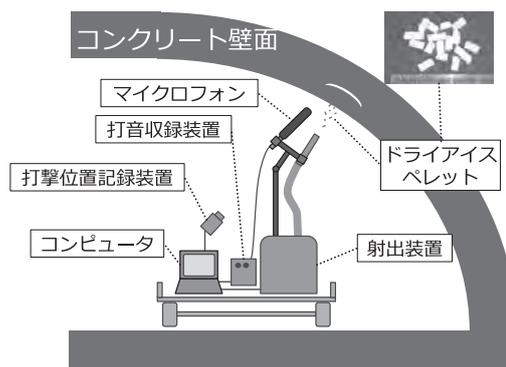
キーワード：コンクリート壁面診断，ドライアイス，ドライアイスペレット，衝突音，スペクトル包絡，AI，RNN，画像マッチング

1. はじめに

(1) 背景

わが国の高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の多くは耐用年数を過ぎ、その健全性の点検が各地で行われている。2020年度の国土交通省による健全性点検実施数に関する資料では、道路施設としての橋梁の場合は、管理施設数726,461件に対して点検実施数は121,547件（点検実施率約17%）である。トンネルの場合は、同様に11,350件に対して1,748件（点検実施率は約15%）に過ぎない。このように点検がなかなか進まない原因としては、低コストで高精度な検査手法が確立されていないことが挙げられる。超音波法や電磁波レーダー法は精度が高いが診断に時間を要し、赤外線法は広域を対象にできるが精度が低い¹⁾。そのため、広域を対象にできる手法を用いてスクリーニングを行い、最終的に熟練者が行う打音法で詳細検証を行う事になる。打音法とは、スクリーニングで欠陥のある可能性が高い箇所を絞り、その周辺をハンマーで打撃し聴音評価する方法で、熟練技術と診断に時間を要するが、現在最も確実な方法とされている。

本研究開発では、この打音法の欠点であるハンマー打撃の熟練性と労力、評価の客観性、コストおよび診断速度を改善すべく、ドライアイスペレットをコンクリート壁面に衝突させ、その衝突音をAI（Artificial Intelligence：人工知）により診断するシステムの構



図一 1 コンクリート壁面診断システムの概念図

築を目指している。図一1は、システムの概念図である。トンネルを対象にした例であるが、ドライアイスペレットの射出装置と指向性マイクロフォン、衝突音記録解析用PC、衝突位置を記録するカメラ等をトラックに搭載し、移動しながら診断を行う。ドライアイスペレットを用いる利点としては、

- 1) 固体の衝突のため液体や気体に比較してエネルギーの伝達効率が良い。
- 2) 昇華して周囲を汚さず、片付けが不要である。
- 3) 電気配線等があっても濡らすことがない。
- 4) コンクリート壁面の洗浄効果が期待できる。
- 5) ドライアイスペレットのオンサイト供給が可能である。
- 6) オンサイトでペレット直径や長さの設定が可能である。

などが上げられる。また、欠点としては液化炭酸ガスが高価であることや、円筒形以外の形状成型が難しい点などが上げられる。

以下には、これまで開発したプロトタイプシステムのハードウェアおよびソフトウェア、室内基礎実験とトンネル現場試験の結果について紹介する。

2. 診断システム

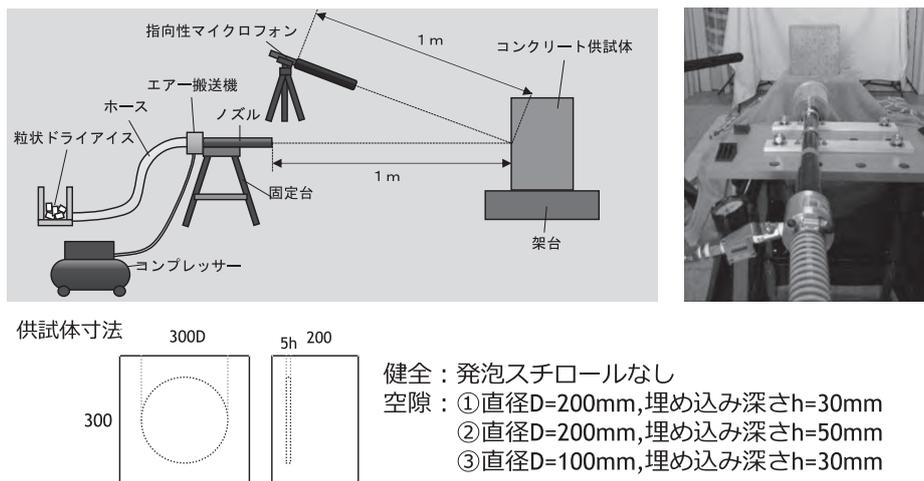
(1) 基礎実験

診断システムの開発に当たっては、種々の大きさのセラミック球やドライアイスペレットをコンクリート供試体に衝突させる基礎実験を事前に行った^{2), 3)}。図一2は、実験システムとコンクリート供試体の一例である。ドライアイスペレット等を真空搬送装置であるLine Vac (EXAIR社製)により一定量吸い込み、ノズルから供試体へ射出する。その際の衝突音を指向性

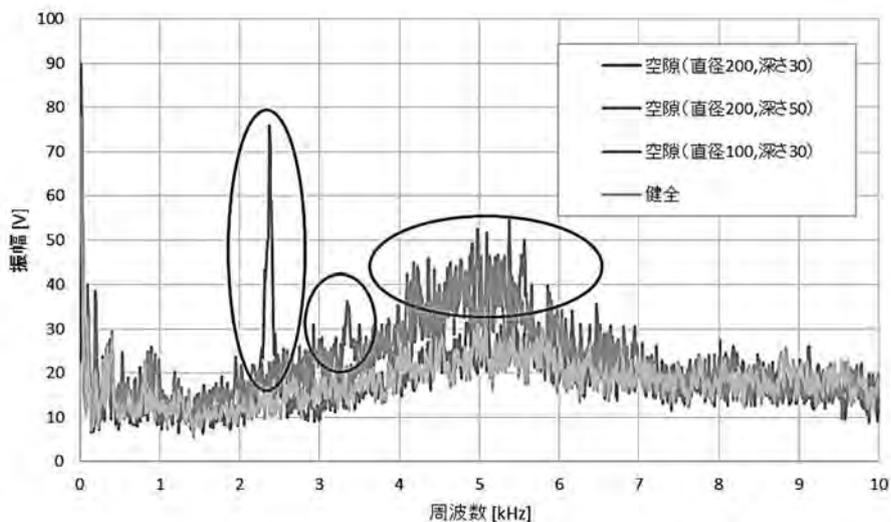
マイクロフォン (Audio-Technica 製, BP4071L) で検出し、プリアンプ (ART 社製, Tubemp Project Series) で増幅したのち、AD変換器 (Data Translation 社製, DT9837B, 分解能: 24 bit, サンプリング周波数: 最大 105.4 kHz) を介してパーソナルコンピュータに取り込んだ。計測時のサンプリング周波数は 40 kHz で、記録長は 200 k ワードである。

コンクリート供試体としては、欠陥のないものと、内部に欠陥を模した円盤状発泡スチロールを埋め込んだものを用いて実験を行った。欠陥のある供試体は、円盤状発泡スチロールの直径や厚さ、表面からの深さを変えた数種の供試体を用意した。図一3は、健全なものも含め4種類の供試体に対するドライアイスペレット衝突音の振幅周波数スペクトルである。健全な供試体に比較して、特定の周波数帯域が卓越する結果を得た。これらの基礎実験で得られた結果をまとめると、

1) 衝突音の卓越周波数は、供試体内に欠陥がある場



図一2 ドライアイスペレット衝突実験システムと供試体形状



図一3 ドライアイスペレットの衝突音の振幅周波数スペクトル

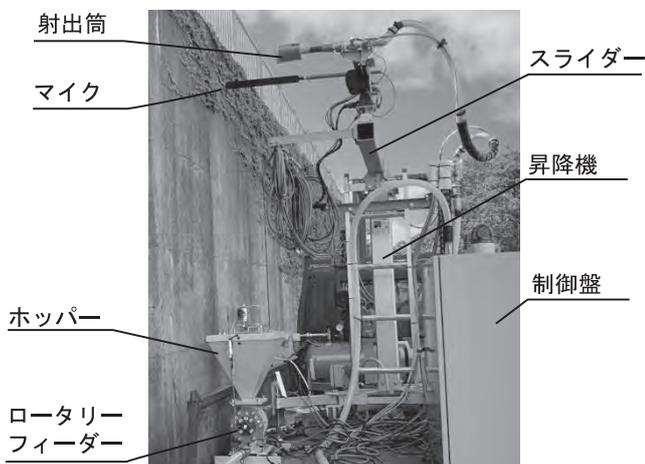
合と無い場合で大きく異なった。

- 2) 欠陥がある場合の卓越周波数は、欠陥部分の円盤たわみ振動⁴⁾から得られる周波数とほぼ一致した。従って、欠陥の位置がコンクリート表面に近い場合には、衝突音の卓越周波数に着目して欠陥の有無を推定できる。
- 3) 衝突させるセラミックス球やドライアイスペレットの質量はその卓越周波数には影響せず、質量が増すと音圧レベルが高くなることを確認した。
- 4) 音響計測システムにおいて、衝突箇所からマイクロフォンを遠ざけると距離減衰はあるものの、卓越周波数には変化が見られなかった。
- 5) 衝突させるセラミックス球やドライアイスペレットの個数を増しても、卓越周波数には影響せず、個数に応じて音圧レベルが高くなることがわかった。ただし、射出の条件により最適な個数がある。

(2) ハードウェア (プロトタイプ機)

上述の基礎実験の結果を踏まえて、トラックに搭載可能なプロトタイプ診断装置を製作した。写真一1は装置のパーツを示しており、写真二は装置をトラックに搭載し、ボックスカルバートの診断を行っている状況を示している。写真一のホッパーにドライアイスペレットを入れると、フィーダーにより一定量(約20g)のドライアイスペレットが射出筒からコンクリート壁面に打ち付けられる。同時に、衝突音の記録が始まる。衝突音の記録システムは、基礎実験と同じ装置で、記録条件も同じである。

射出筒は4自由度を有し、水平回転角は左右15度、俯角15度、仰角90度まで可能である。また、スライダの可動幅は2.0m、昇降機の昇降高さは2.6mである。射出範囲は横2.0m×縦2.6mで、現在は射出筒とコンクリート壁面の距離を0.8~1.3mとし、一



写真一1 診断装置の構成



写真二 診断装置の全体

回の射出で15cm四方を診断単位としている。マイクロフォンの先端位置は、ドライアイスペレットが衝突する診断単位面の中心と一定の距離と角度を保つよう制御される。

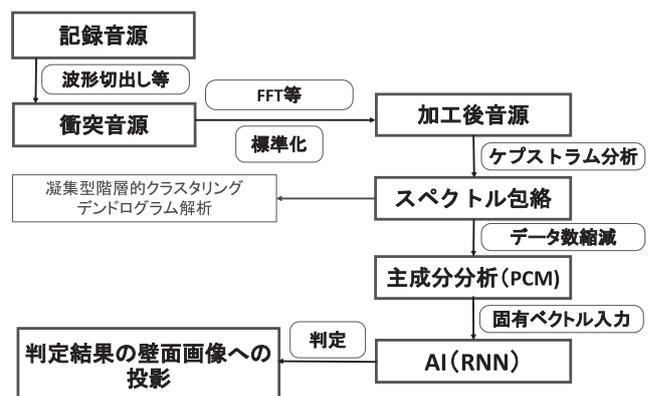
実際の診断では、PCから制御装置に診断単位領域をもとに診断対象領域の範囲を指定すると、全自動で射出筒の移動、Line Vacを用いたドライアイスペレットの射出、衝突音の記録が連続してできるようになっている。

(3) AIを用いたソフトウェア

これまでに、上記ハードウェアで記録された衝突音から欠陥の有無を判別する診断ソフトウェアとして、周波数解析を中心に種々の方法を検討してきた^{5), 6)}。以下に紹介する診断方法は最新の方法で、ハードウェアの制御プログラムとの連携ができていないため、現状ではオフラインの診断になる。

(a) 健全性の判定

図一4は、コンクリート壁面の健全性診断判定のための衝突音解析手順である。AD変換器を介してPC内に記録された音源から衝突音を切り出し、ケプスト



図一4 衝突音の解析手順

ラム分析によりスペクトル包絡を求める。スペクトル包絡のデータ数を縮減するために、主成分分析を行いその固有ベクトルをAI (RNN : Recurrent Neural Network) への入力データとした。

図-5は、マイクロフォンにより検出された波形から衝突音のスペクトル包絡を求めるまでの過程を表している。主成分分析の次元数は、判別の正答率が飽和する値として20を採用した。これがRNNの入力層ノード数になる。隠れ層は3層(それぞれのノード数は、128, 64, 16である)で、出力層のノード数は2である。学習過程では、健全な個所の衝突音と欠陥のある個所の衝突音、テストデータをランダムに抽出して学習用データセットをつくり、学習とテストを繰り返す。その中で最大の正答率を得た学習結果を用いて、未知の衝突音の判別を行った。図-6は、この学習過程と判別過程を表している。

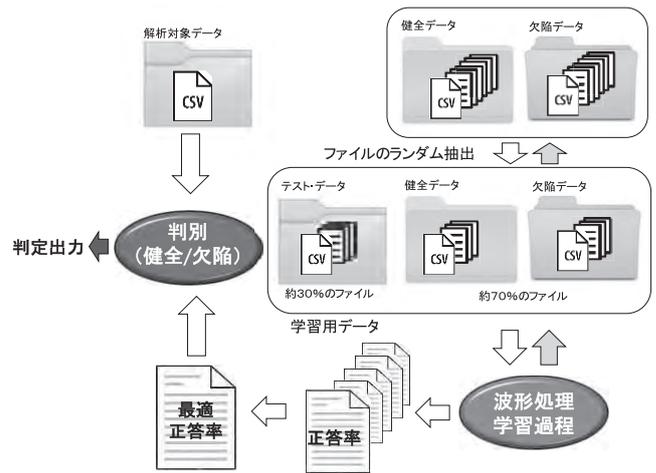


図-6 RNNの学習過程と判別

(b) 射出位置の自動取得と判定表示

15 cm 四方の診断単位領域の位置座標を診断システムのカメラ画像から自動的に求め、診断結果を合わせて表示するソフトウェアを作成した。図-7は、診断ソフトウェアのインタフェース画面である。事前に診断対象領域のコンクリート壁面画像(トンネルの場合は展開画像)を用意しておく。図-7の場合は、高さ1.6 m、長さ4.6 mのトンネル壁面画像の一部である。この全体画像の中から、診断単位領域のカメラ画像に相当する位置を画像マッチング手法により抽出する。図中の枠が検出位置で、その個所は健全と診断

されている。

3. 実験結果

(1) 大型供試体実験

図-8は、屋外実験用のコンクリート供試体である。1 m×0.6 m×0.2 mの右側に直径0.2 m、厚さ5 mmの発泡スチロール円盤を埋め込んでいる。写真-3のように供試体を吊り下げ、健全な個所と欠陥を想定した空隙個所にドライアイスペレットを衝突させる実験を行った。この実験ではドライアイスペレットの直径は9 mmとし、長さや製造メーカーの異なるペレットを用いている。表-1は、ペレットの長さが5 mmから

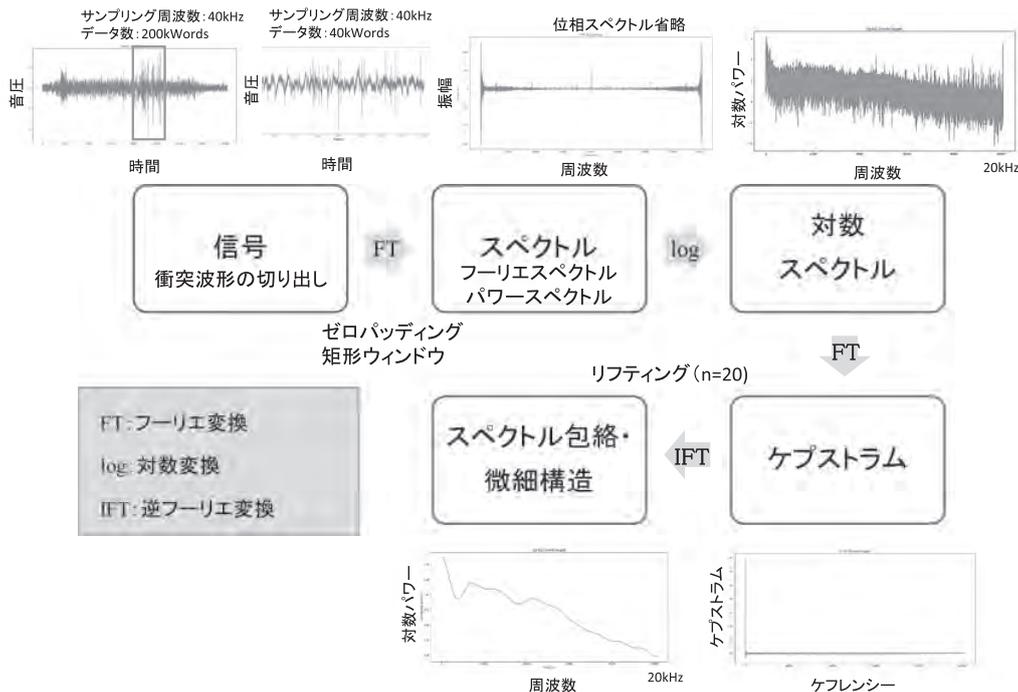
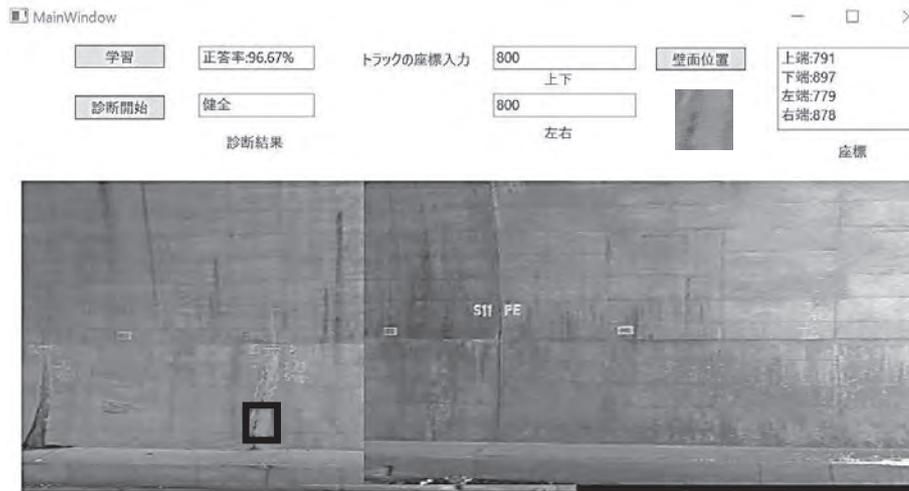
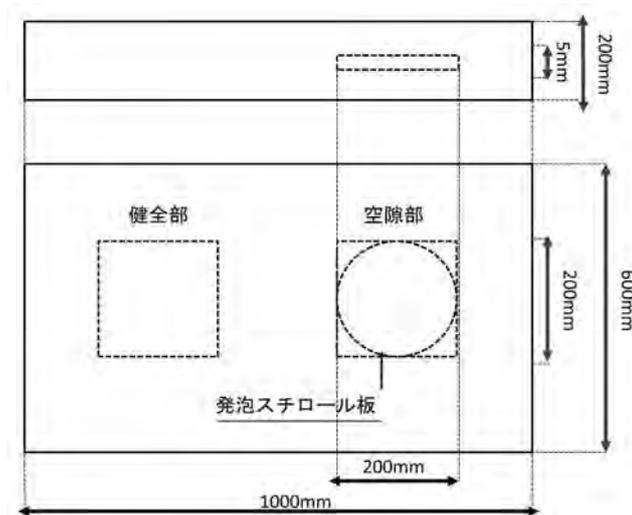


図-5 衝突信号からスペクトル包絡を求める手順



図一七 診断ソフトウェアのインターフェース



図一八 大型供試体の形状

表一 ドライアイスの条件を変えた大型供試体実験の結果

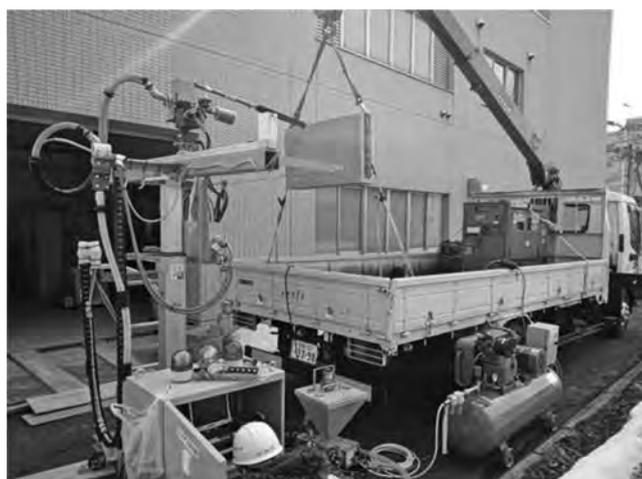
製造メーカー	長さ	健全/欠陥	データ数	正答率 (%)
A社製	均一	健全	26	100
		欠陥	33	
	不均一(1)	健全	63	92
		欠陥	65	
不均一(2)	健全	36	83	
	欠陥	54		
B社製	均一	健全	69	96
		欠陥	59	

とあるが、実験を行った日が異なるため分けた。また同表には、それぞれのデータセットからランダムに80%のデータを学習用に抽出し、残りの20%のデータでRNNによる判別を行った場合の正答率を示している。

この実験の結果、ドライアイスペレットの長さはより均一の方が正答率が高く、診断に好ましいことがわかった。

(2) 現場実験

写真一4は、北海道のFトンネル内で行った現場実験の様子である。使用した診断システムおよび条件は、大型供試体実験の場合と同じである。使用したドライアイスペレットは、直径9mmで長さが5mmから30mmの不均一な市販品である。打音検査で健全とは判断しにくい箇所と、健全な個所に分け、それぞれ19個の衝突音データを用いてRNNによる判別テストを行った。上述の大型供試体実験での学習データを用いて現場データの判別を試みたが、結果は得られなかった。そこで新たに現場データで学習を行い判別したところ、92%の正答率を得た。現場ごとに、既知のデータを用いて学習する必要があることがわかった。



写真一三 大型供試体を用いた実験の様子

30mmと不均一な場合、5mmから12mmでより均一な場合、異なるメーカーの不均一な場合に分け、それぞれの条件で取得した衝突音の記録数を示している。ペレット長さが不均一の場合の結果が(1)(2)



写真—4 実際のトンネル現場での診断の様子

た。この現場実験では、供試体実験と異なり欠陥の有無が不明な個所もあるため、現場における確実なデータを用いて学習すれば、より高い正答率が期待できよう。

4. 今後の計画

現在、本システムを用いた現場実験データの蓄積を進めている。同時に、開発したソフトウェアを用いてリアルタイム診断と表示ができるよう調整中である。また、写真—5に示すオンサイトでのドライアイスペレタイザーの組み込みも検討中である。この装置は液化炭酸ガスボンベからドライアイスを作り、押し出し成型で均一なペレットをフィーダーに供給可能であ



写真—5 オンサイト・ドライアイスペレット供給装置

る。これにより、診断精度の向上が期待できる。

5. おわりに

コンクリート壁面の健全性診断に、ドライアイスペレットの衝突音を利用するハードウェアとソフトウェアについて述べた。現場実験データが少なく評価が十分にできてはいないが、改善を重ねてきたことにより着実に実用化に近づいている。オンサイトペレタイザーを搭載した2号機が完成した場合には、診断精度の向上のみならず高速壁面診断が可能になると考える。これにより、コンクリート構造物の点検が進み、コンクリート片の剥離事故などが無くなることを期待したい。

謝 辞

本診断手法は、(株)メイセイ・エンジニアリングと室蘭工業大学との共同研究として始まり、共同で特許(特許第6847415：構造物の検査方法及び検査システム)を取得することができた。また、ドライアイスペレットの最適化およびオンサイトペレタイザーの作製は、エア・ウォーター(株)との共同研究で実現した。関係各位に、この場で厚くお礼申し上げます。

JCMA

《参考文献》

- 1) 魚本健人：コンクリート構造物の非破壊検査，森北出版，1990。
- 2) 田中秀典，小針憲司，板倉賢一，山崎剛嗣：音響計測によるコンクリート壁面高速診断システムの開発，室蘭工業大学地域共同研究開発センター研究報告，No.26，pp39-45，2016。
- 3) 田中秀典，小針憲司，板倉賢一，畑山喬紀：音響計測によるコンクリート壁面高速診断システムの開発（第2報），室蘭工業大学地域共同研究開発センター研究報告，No.27，pp5-9，2017。
- 4) 近藤恭平：振動論，培風館，1999。
- 5) Hidenori Tanaka, Kenji Kohari and Ken-ichi Itakura：Acoustic Diagnosis System for Deteriorated Concrete Walls, Joint Seminar on Environmental Science and Disaster Mitigation Research 2018 (JSED2018), P-B-32, Muroran, pp155-156, 2018.3.2。
- 6) 田中秀典，小針憲司，板倉賢一：ドライアイスによるコンクリート内部の健全性診断システム(DDSD)の開発，第33回日本道路会議予稿集，2019年11月7日。

〔筆者紹介〕

板倉 賢一（いたくら けんいち）
室蘭工業大学大学院
特任教授，名誉教授

