論文　ウェーブレット変換による打音スペクトル画像のパターン認識による欠陥評価

橋本　勝文[*1]・塩谷　智基[*2]・川瀬　良司[*3]・佐光　正和[*4]

要旨：異なる欠陥性状を模擬した供試体から得られる打音波形に対するフーリエ変換による周波数解析およびウェーブレット変換による時間-周波数スペクトルによる評価を行った。また，時間-周波数スペクトルを二値化画像処理することで得られる画像のパターン認識を複素自己回帰モデルおよびPARCOR係数に基づく手法により実施した。その結果，コンクリート内部の欠陥深さに対する的確な判定結果を出力できた。

キーワード：打音法，ウェーブレット変換，二値化画像，パターン認識

1.　はじめに

コンクリート構造物の品質および健全性評価においては，劣化や内部の欠陥・損傷を把握するための手法が用いられている。一般に適用される打音法は，コンクリート表面をハンマーで打撃した際に発生する音で表層部の欠陥の有無を判断する簡便な手法である。しかしながら，技術者の経験不足により，評価に迷うケースが多々ある。社会基盤施設を構成するコンクリート構造物の適切な維持管理体系が求められる中，客観的・定量的かつ簡便に構造物全体の健全性を評価できる手法の開発を推し進め，汎用的に社会的に実装できるシステムを構築することが急務である。

そのため，コンクリートの物性あるいは劣化程度を客観的かつ定量的に評価する非破壊試験および評価方法に関する研究が広く推し進められているところである[1), 2)]。一般に打音法では，フーリエ変換による打撃音の波形解析により，卓越周波数ならびに振幅に着目することや音圧の最大値あるいは継続時間により欠陥の有無や損傷程度を定量的に把握するための検討がなされている[3), 4)]。一方，時系列に基づく周波数解析を行うことを目的としてウェーブレット変換による波形解析を用いた検討においては，打音データに対する時間－周波数解析の有用性が述べられている研究事例がいくつかあり，特にたわみの発生する薄い構造物背面の空隙・空洞を対象とした調査[5)]やシールド工法によるトンネル覆工内部のグラウト充填不足箇所の検出[6)]には効果的であることが示されている。また，ウェーブレット変換により得られる二次元平面上にマッピングされるスカログラムから，コンター面積の大きさで健全度指数を表現する方法が提案されている[7)]。

これまでに，著者らは，熟練した点検技術者の能力を可視化することで，打音法における実務上の経験則を汎用的かつ定量的な情報とするための新たな知見を見出すことを目的とした研究報告を行っている[8)]。その結果，劣化模擬供試体から取得できる打音波形のフーリエ変換による周波数スペクトル解析に加え，ウェーブレット変換による詳細な情報に基づく時間－周波数スペクトルの二値化処理を行うことで，明確に変状を判別できる可能性を確認している[9)]。

本論文では，異なる欠陥深さを有する模擬供試体の打音波形に対してウェーブレット変換を行い，時間-周波数スペクトルの二値化処理画像のパターン認識アルゴリズムを適用することで，打音波形から欠陥深さの評価結果を自動的に出力することを試みた。

2.　二値化処理画像のパターン認識

画像（図形の形）などの平面曲線の認識のためには，後述するように，平面曲線の自然な記述（不変特徴抽出）法としての複素自己回帰モデルおよび PARCOR 係数に基づく手法が提案されている[10), 11)]。現在では様々な分野において画像のパターン認識（識別）技術は利用されており，防犯や医療，工業等において幅広く活用されている。

2．1 複素自己回帰モデル

平面図形の輪郭線（平面曲線）を追跡して得られる点列を（x_j, y_j）（j=0, 1, 2, …，N-1）とし，その複素表現を $z_j=x_j+iy_j$ とする。輪郭点を m 個前までの輪郭点の線形結合で近似する m 次の複素自己回帰モデルを式(1)のように定義する。このとき，第 m 次の複素自己回帰係数とは，輪郭点 z_j が直前の m 個の点 z_{j-1}, z_{j-2}…の線形結合で示されると仮定したとき，誤差を最小にするような係数 a_1, a_2…a_m のことである。

*1　京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻　特定講師　正会員
*2　京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻　特定教授　正会員
*3　株式会社構研エンジニアリング　常務取締役　正会員
*4　株式会社構研エンジニアリング　防災施設部　次長　非会員

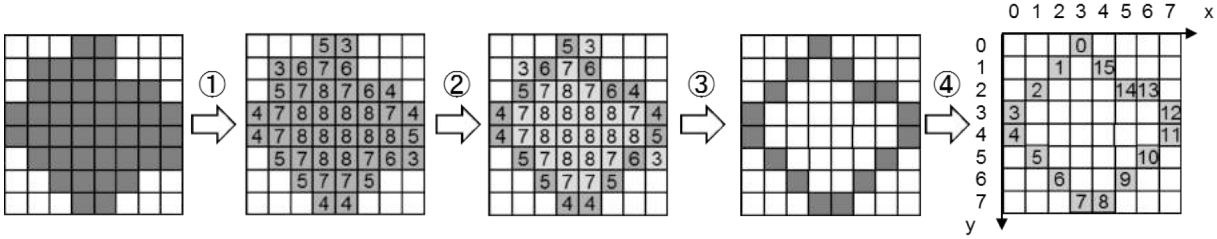


図-1　画像の輪郭線を得るまでの流れ

$$\hat{z}_j = \sum_{k=a}^{m} a_k z_{j-k} \qquad (1)$$

	x	y				x		y
点0	3	0	→	点0	=	3	+	0 i
点1	2	1	→	点1	=	2	+	1 i
点2	1	2	→	点2	=	1	+	2 i
点3	0	3	→	点3	=	0	+	3 i
点4	0	4	→	点4	=	0	+	4 i
点5	1	5	→	点5	=	1	+	5 i
点6	2	6	→	点6	=	2	+	6 i
点7	3	7	→	点7	=	3	+	7 i
点8	4	7	→	点8	=	4	+	7 i
点9	5	6	→	点9	=	5	+	6 i
点10	6	5	→	点10	=	6	+	5 i
点11	7	4	→	点11	=	7	+	4 i
点12	7	3	→	点12	=	7	+	3 i
点13	6	2	→	点13	=	6	+	2 i
点14	5	2	→	点14	=	5	+	2 i
点15	4	1	→	点15	=	4	+	1 i

図-2　輪郭線を形成する点 xy 座標の複素表現

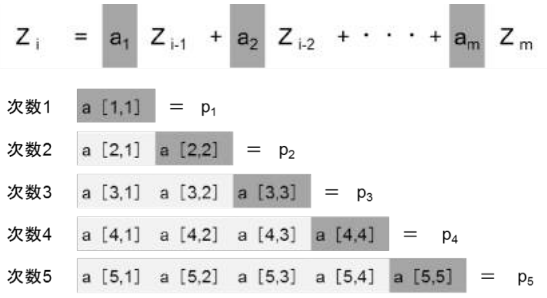


図-3　複素自己回帰係数と複素 PARCOR 係数

2．2 PARCOR 係数

PARCOR とは，Partial Auto Correlation Coefficients の略語であり，部分自己相関係数とも呼ばれる。ここでは，上記の二値化処理画像を輪郭点列として記述するために，実数値列に対する実 PARCOR 係数を複素数値列の場合に拡張することによって，複素 PARCOR 係数を定義する。実数値列に対する m 次の実 PARCOR 係数は，順方向および逆方向の（m-1）次実自己回帰モデルによる予測誤差の相互相関係数として定義される。そこで，m 次の複素 PARCOR 係数 p_m を順方向および逆方向の（m-1）次の複素自己回帰モデルにおる予測誤差の複素相互相関係数として定義する。以上より，第 m 次の複素 PARCOR 係数 p_m とは，第 m 次の複素自己回帰係数の a_m と等価である。

2．3 パターン認識と学習および出力

図-1 に画像の輪郭線を得るまでの流れを示す。打音波形に対してウェーブレット変換を行い，時間-周波数スペクトルの二値化処理画像において，手順 1：画像データの白黒（0・1）テキスト画像の黒（=1）の部分について，手順 2：隣接する 8 マスに 1（黒）のマスが幾つあるかを数え，このうち，手順 3：4～6 のマスを残すことで輪郭を抽出した後に，手順 4：任意のマスを始点として座標を（この場合，点 0～点 15 まで）取り出す。以上の作業で得た輪郭線を形成する点 xy 座標を**図-2** に示すように複素表現で記述する。

上述したように，第 m 次の複素 PARCOR 係数 p_m とは，第 m 次の複素自己回帰係数の a_m と等価であるため，m=5 とした場合を例として**図-3** に示すように，a[1,1]，a[2,2]，a[3,3]，a[4,4]および a[5,5]をすべて埋めれば，複素 PARCOR 係数 p_1，p_2，p_3，p_4 および p_5 を求めたことになる。なお，m 次の複素自己回帰係数について，一般的には m が多いほど正確な判定ができること，m 次の複素自己相関関数は m 個あること，次数が異なれば、係数の値はすべて異なることに留意する必要がある。

以上で得られた複素 PARCOR 係数 p_m を他の画像の複素 PARCOR 係数と比較し，一番近い（誤差に常和の最も少ない）画像として認識する。本論文では，任意の欠陥箇所での 10 回の打音波形に対して得られる 10 個の二値化処理画像を教師画像として算出される第 m 次の実数部および虚部の PARCOR 係数の平均値を学習データに用いている。なお，打音波形から得られる時間-周波数スペクトルの二値化処理後の各教師画像の 01（白黒）テキストデータ（320×320 ピクセル）は，ウェーブレット係数（時間：0～10 ms および周波数：0～10 kHz）の最大値の上位 20%を示す箇所を 1（黒）としている。これにより，学習した 10 回の打音波形とは異なる 3 回の打音波形から得られる未学習の判定画像の複素 PARCOR 係数

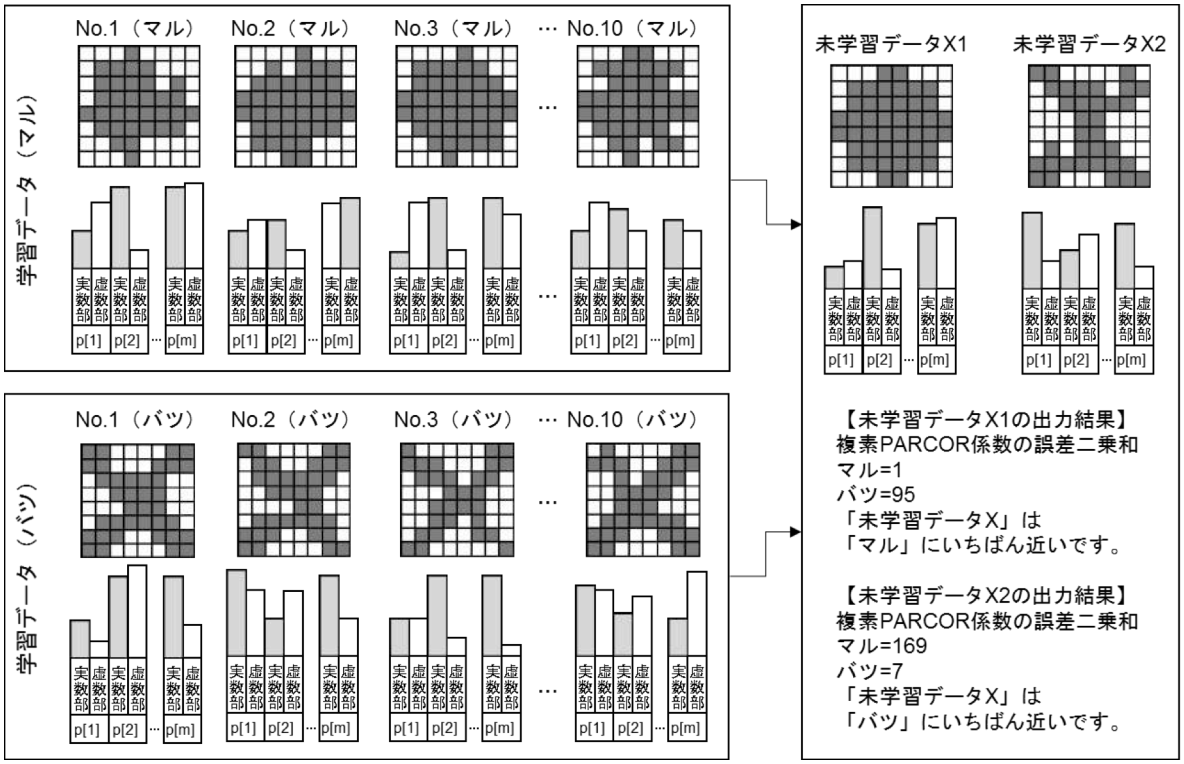


図-4　画像のパターン認識の概要

を教師画像（学習データ）の複素 PARCOR 係数との誤差二乗和が最小となるものを判定結果（欠陥深さ）として出力する。**図-4** にパターン認識の概要を示す。

3.　模擬供試体の打撃実験

3. 1 供試体の概要

欠陥を模擬した鉄筋コンクリート供試体（以下，模擬供試体，縦 1000 mm×横 1000 mm×高さ 200 mm）を作製した。**図-5** および**表-1** に模擬供試体の概要および埋設物の条件を示す。図中の×印は打音箇所を示す。擬似欠陥は，厚さ 30 mm の発泡スチロールを所定の寸法に加工したものである。型枠内に埋設物および鉄筋（D16）を配置し，**表-2** に示す配合およびフレッシュ性状を有するコンクリートの打込みを行った。なお，ここで示す結果は供試体の作製から 28 カ月間にわたり北海道旭川市に曝露した後に打音検査（2015 年 10 月実施）を行ったものである。

3. 2 打音法と波形解析

打音検査用ハンマーを用いて一定の頻度(約 2 回／秒)で 10 回打撃（n（=10）個の波形サンプル）し，励起された音波を市販のタブレット端末により収集した。なお，サンプリングレートは 44.1 kHz，マイクの周波数特性は 20～20,000 Hz である。

音声データの振幅波形を高速フーリエ変換（以下，フーリエ変換)により周波数スペクトルを分析した。なお，各データにおいてスペクトル強度の最大値に対する正規

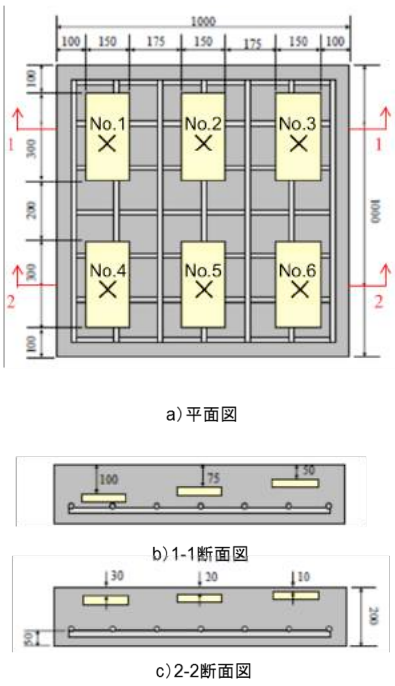


図-5　模擬供試体の概要

表-1　模擬供試体の埋設物

記号	埋設物までの深さ	埋設物	
		種類	寸法
①	100mm	発泡スチロール	縦：300mm 横：150mm 厚さ：30mm
②	75mm		
③	50mm		
④	30mm		
⑤	20mm		
⑥	10mm		

表-2　コンクリートの配合およびフレッシュ性状試験結果

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
		W	C	S	G	ad			
49.6	41.4	157	317	746	1063	3.17	13	5.9	19

S：陸砂，G：陸砂利（max. 25mm），ad：AE 減水剤

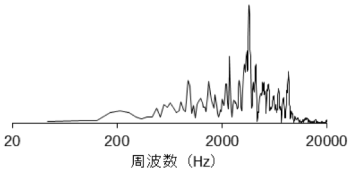


図-6　健全部の周波数スペクトル（FFT）

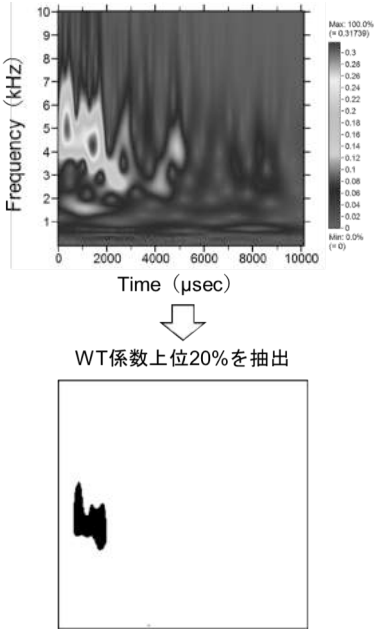


図-7　時間-周波数スペクトルと二値化画像

化処理を施した。すなわち，各周波数スペクトルにおける振幅の最大値を 1 として，0～1 の範囲となるように周波数スペクトルを表示することで，各測定箇所におけるスペクトル形状の違いを抽出した。同様に，振幅波形を Gabor 関数を用いてウェーブレット変換 [12]することで，時間-周波数を軸として表される二次元平面上にマッピングされるスカログラム（ウェーブレット係数のコンター図）を得た。

ここで，図-6 および図-7 には，健全部において得られた周波数スペクトルおよび時間-周波数スペクトルをそれぞれ示す。また，図-7 にはウェーブレット係数が上位 20%となる領域を黒色で抽出した各教師画像の 01（白黒）テキストデータ（320×320 ピクセル）を示す。これより，ウェーブレット変換により得られる情報により，フーリエ変換では捉えられない時間的な周波数の変化を観察できることがわかる。

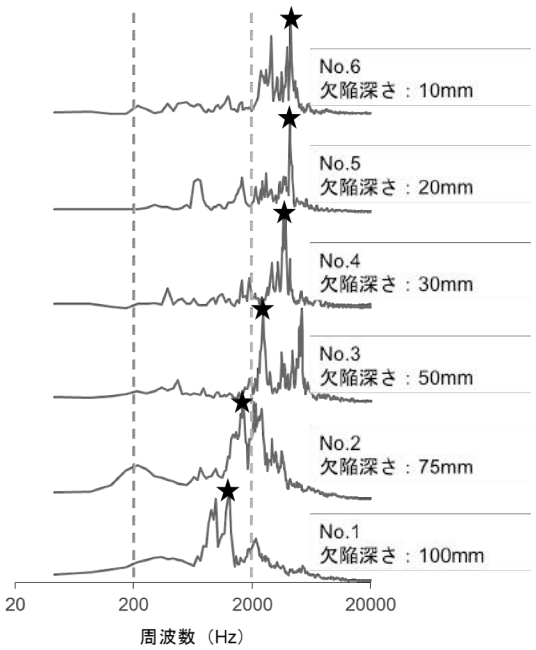


図-8　模擬供試体の打音波形の周波数スペクトル

4.　実験結果および考察

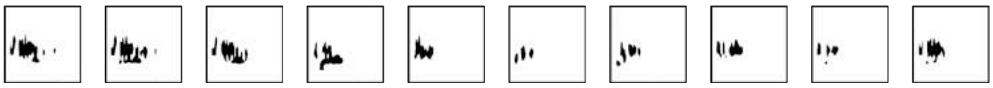
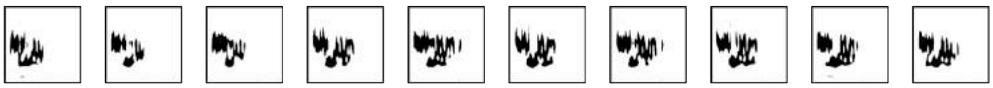
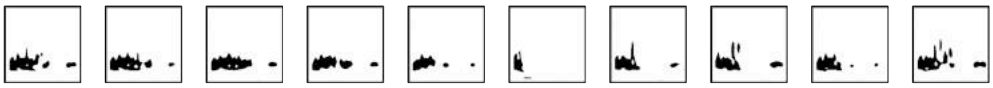
4．1 周波数スペクトル（フーリエ変換）

図-8 に模擬供試体の周波数スペクトルを示す。No.1，No.2，No.3，No.4，No.5，No.6 の順に発泡スチロールの埋設深度（欠陥深度）が深くなっている。これより，欠陥深度とピーク周波数の関係について，欠陥深度が浅くなるにつれて，ピーク周波数が低周波へシフトしていることがわかる。しかしながら，既往の検討において，欠陥深さに対する評価手法として，50mm 以深の欠陥を有する場合に，周波数スペクトル（FFT）の定量的な違いが不明確であり，欠陥の有無を定量的に判定することは難しいことがわかっている [9]。

4．2 時間－周波数スペクトル（ウェーブレット変換）

ウェーブレット変換による時間-周波数スペクトルにおいては，ウェーブレット係数が二次元（時間－周波数）平面上にマッピングされるスカログラムが得られる。そもそも，ウェーブレット変換とは，与えられた入力の波形を表現するために小さい波（mother wavelet）を様々な加工を加える（拡大縮小や平行移動を適用する）ことで，表現しようとする周波数解析の 1 つの手法であり，ウェーブレット係数とは mother wavelet との相似性の強さを示す量である [13]。

表-3　二値化画像（教師画像）の学習データ

欠陥深さ（mm）	打音法による判断	二値化画像
健全	○ 容易	
100	× 困難	
75	× 困難	
50	△ 不明	
30	○ 容易	
20	○ 容易	
10	○ 容易	

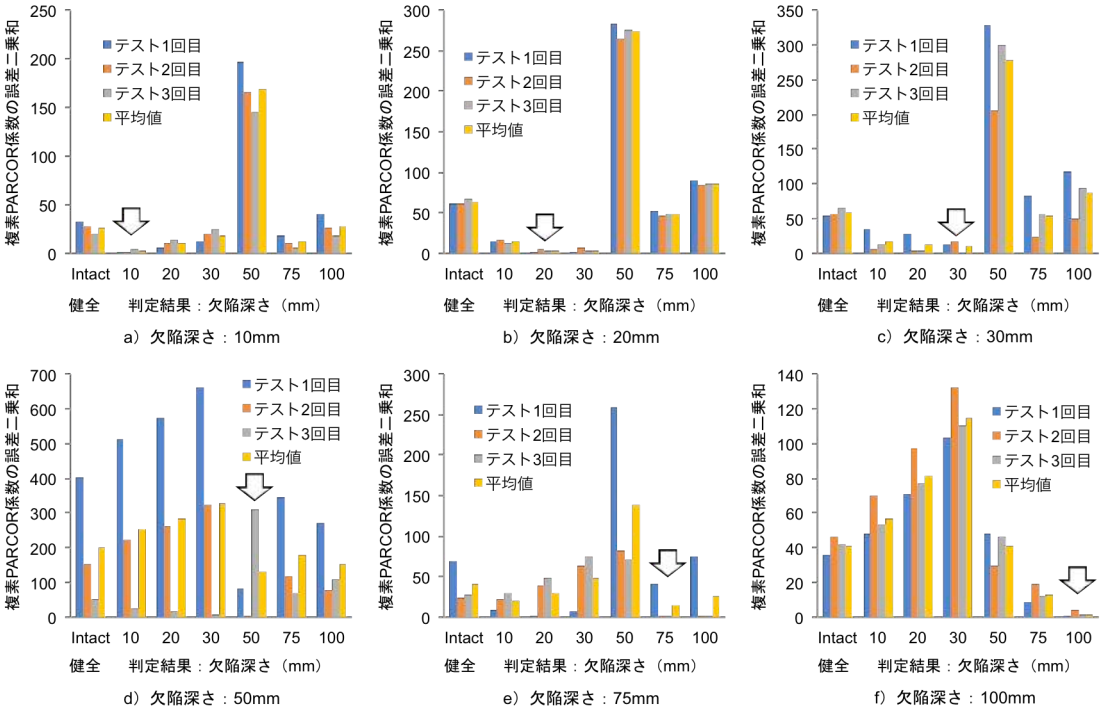


図-9　欠陥深さ毎の複素 PARCOR 係数の誤差二乗和

既往の検討において，発泡スチロールの埋設深度（欠陥深度）が深くなっている場合，ウェーブレット係数が大きな値を示す領域は 3,000 Hz～5,000 Hz の周波数帯においては 10,000μ 秒～15,000μ 秒まで継続するようになるだけでなく，2,000 Hz 以下の低周波域においても 5,000μ 秒まで発達した後に欠陥深度が最も浅い場合には 15,000μ 秒以上まで継続することがわかっている [9]。

4．3 欠陥深さ毎の二値化処理画像

上述したウェーブレット変換による時間-周波数スペクトルの二値化処理を施す際，教師画像（学習データ）としての特徴を欠陥深さによる二値化処理画像（n=10）を表-3 に示す。なお，10 kHz 以上および 10,000μ 秒以上の領域においては，ウェーブレット係数が上位 20%となる領域は抽出されなかった。また，コンクリート診断士

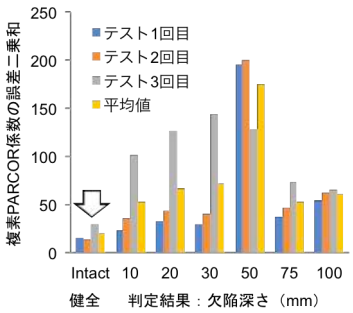


図-10　健全部での複素 PARCOR 係数の誤差二乗和

等の資格を有する熟練技術者による打音法を用いた健全度評価も実施した。この結果では，欠陥深さ 30 mm 以浅では異常音を検知したものの，欠陥深さ 50 mm 以深では異常音を検知できなかった。**表-3** にも示されるように，欠陥深さ 50 mm 以深の場合の二値化処理画像が結果として輪郭パターン類似している結果になっていると考えられ，熟練技術者でも打撃音の差を聞き分けることが困難であったことと一致する。**表-3** には，複数名の上記技術者の総合判断の結果（「打音法による判断」）を示している。

4．4 学習データに基づく欠陥深さの判定結果の出力

表-3 に示した学習データ（n=10）に基づく未学習データ (n=3) を用いた欠陥深さの各判定結果を複素 PARCOR 係数の誤差二乗和として出力した結果を**図-9** および**図-10** に示す。これより，いずれの欠陥深さに対しても実際に得られた学習データとの複素 PARCOR 係数の誤差二乗和が最小となっており，本論文で示した時間-周波数スペクトルの二値化処理画像のパターン認識アルゴリズムが的確な判定結果（図中矢印）を示していることがわかる。

5.　まとめ

打音波形のウェーブレット変換による時間-周波数スペクトルの二値化処理画像のパターン認識アルゴリズムにより，欠陥深さに対する的確な判定結果を出力できた。

謝辞

本論文は，一般社団法人近畿建設協会ならびに一般財団法人防災研究協会の研究助成により得られた成果をとりまとめたものである。

参考文献

1) 岩崎俊樹，内田慎哉，鎌田敏郎，岩野聡史，周波数分析方法の違いが衝撃弾性波法によるコンクリートの版厚推定に与える影響に関する基礎検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp. 1780-1785，2012.
2) 塩谷智基，大澤智，高田雄大，弾性波の周波数応答特性による不均質材料の損傷評価に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.14，pp.337-342，2014.
3) 岡田清，六車熙編：コンクリート・ハンドブック，朝倉書店，1981
4) 魚本健人，伊東良浩，打音法によるコンクリートの非破壊検査, コンクリート工学論文集, Vol.7, No.1, pp.143-152，1996.
5) 秋山哲治，清宮理，北澤荘介，内藤英晴，合成部材でのコンクリート充填性検査としての打音法の適用性，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1733-1738，2003.
6) 山田裕志，川端健太，園田佳巨，コンクリート構造物の打音検査に関する時間－周波数解析を用いた基礎的研究，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.65-66，2010.
7) 鈴木文大，ウェーブレット変換による打音調査と適用例, 技術 e-フォーラム 2003 さいたま, 論文 No.33, 2003.
8) Aggelis D.G., Shiotani T. and Kasai K., Evaluation of Grouting in Tunnel Lining Using Impact-Echo, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol.23, pp.629-639, 2008.
9) 橋本勝文，福山智子，金侖美，牛渡裕二，佐光正和，大塚裕太，劣化模擬供試体の打音検査における音響データの基礎解析，平成 27 年度土木学会北海道支部論文報告集，第 72 号，E-4，2016.
10) 橋本勝文，福山智子，金侖美，牛渡裕二，佐光正和，打音時の可聴音響データのスペクトル解析による検査技術の定量，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 16 巻，pp.101-106，2016.
11) 栗田多喜夫，関田巌，大津展之，複素自己回帰モデルに基づく輪郭形状間の距離，電子情報通信学会論文誌，Vol.73，D-II，No.9，pp.1493-1503，1990.
12) 栗田多喜夫，大津展之，関田巌，複素自己回帰係数および複素 PARCOR 係数の高速計算法, D-497, 1989.
13) Suzuki H., Kinjo T., Hayashi Y., Takemoto M. and Ono K., Appendix by Hayashi Y., Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals, *Journal of Acoustic Emission*, Vol.14, No.2, pp. 69-84, 1996.
14) 中野宏毅，山本鎮男，吉田靖夫著，ウェーブレットによる信号処理と画像処理, 共立出版, pp.1-89, 1999.