論文　自己組織化マップによる打音データの評価に関する基礎的研究

鈴木　理絵[*1]・中村　光[*2]・三浦　泰人[*3]・多田　祐希[*4]

要旨：本研究では，打撃で得られる加速度データから空洞の有無ならびに空洞情報を定量的に把握する方法として，自己組織化マップの適用性について検討した。検討は，供試体諸元，空洞条件ならびに打撃力を変化させた複数の供試体の打音データを用いて行った。その結果，入力値として周波数スペクトル平均値，加速度波形平均値を用いることで，空洞を検出するだけでなく，空洞情報の把握もある程度可能であることが分かった。

キーワード：非破壊検査，打音法，自己組織化マップ，周波数特性，加速度応答，鋼球落下，衝撃弾性波

1. 緒言

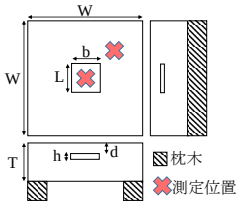
コンクリートの非破壊検査の一般的な方法として，打音検査が挙げられる。打音検査は，目視では確認不可能なコンクリート内部の欠陥の有無を判別でき，特別な検査機器を必要とせず比較的容易に行うことが可能であるが，検査を行う人の経験に依るところが大きく，定量的な評価手法であるとは言えない。そのため，打撃により生じる弾性波を利用してコンクリート内部の空洞やひび割れを定量的に評価する研究がいくつか行われている。例えば，鎌田ら [1)]は，加速度応答の最大振幅値比や減衰特性，周波数分布，スペクトルピーク値など，様々な指標を用いて空洞の定量的評価を行っている。また，振幅値や周波数を直接確認するのではなく，自己組織化マップなどの学習型アルゴリズムで欠陥の判定を試みた研究も行われている。例えば，園田ら [2)]は周波数スペクトルを入力データとし，自己組織化マップを用いることで良好な劣化診断を行えることを，野内ら [3)]は園田らと同様の手法を用いて空洞の深さや広さがある程度判定可能であることを示している。これらの既往の研究は，いずれも同じ形状の供試体(あるいは一つの供試体)の健全部，欠陥部で実験を行ったものであり，供試体の形状や強度が異なる場合の検討は行われていない。また，打撃力が常に一定となるようにインパルスハンマーなどを用いて衝撃荷重を制御したものや，複数回の打撃の平均値を用いたものがほとんどである。しかし，実際の打音検査において同一の点を複数回打撃することや衝撃荷重を制御することは困難である。また，一つの実構造物中でも強度などの力学特性や，部材厚さなどの断面諸元の差など，不可避の影響因子が存在する。

そこで，本研究では，このような要因の影響を含む実験データから，空洞部を検出できる可能性を模索することを目的として，様々な供試体諸元や空洞条件を持つ供試体を対象とし，鋼球落下によって異なる打撃力で得られた加速度応答（本研究で打音データと呼ぶ）を自己組織化マップへ適用し，空洞有無の判別を行った。さらに，自己組織化マップへの入力データとして周波数スペクトル平均値と加速度波形平均値の二種類の指標を用いることで，空洞情報の把握を試みた。

2. 鋼球打撃実験の概要

2.1 実験供試体概要

実験供試体の概要を**図－1** および**表－1** に示す。様々な条件の供試体および空洞を比較するため，供試体寸法 600×600×200mm ，圧縮強度 40MPa, 空洞寸法 100×100×10mm，空洞埋設深さ 30mm の供試体を基本供試体（Basic）とした。なお，供試体中央に発砲スチロールを埋設することで空洞を模擬した。



図－1　供試体概要

表－1　供試体概要

供試体名称		供試体寸法			空洞条件			
		幅・長さ W (mm)	厚さ T (mm)	強度 f'c (MPa)	幅 b (mm)	長さ L (mm)	厚さ h (mm)	深さ d (mm)
B (Basic)		600	200	40	100	100	10	30
空洞条件	d50	600	200	不明	100	100	10	50
	d100	600	200	不明	100	100	10	100
	h20	600	200	不明	100	100	20	30
	b200	600	200	不明	200	200	10	30
	b50	600	200	40	50	200	10	30
供試体諸元	W400	400	200	40	100	100	10	30
	T100	600	100	40	100	100	10	30
	T400	600	400	40	100	100	10	30
	fc37	600	200	37	100	100	10	30
	fc60	600	200	60	100	100	10	30
	fc69	600	200	69	100	100	10	30

*1 名古屋大学大学院　工学研究科社会基盤工学専攻　(学生会員)
*2 名古屋大学大学院　工学研究科社会基盤工学専攻　教授　博士（工）　(正会員)
*3 名古屋大学大学院　工学研究科社会基盤工学専攻　助教　博士（工）　(正会員)
*4 技建開発株式会社　計測技術課　(正会員)

空洞条件による加速度応答の違いを確認するため，供試体寸法は基本供試体と同一とし，空洞条件のみを変更したものを作製した。空洞深さを 50，100mm に変更した供試体名称をそれぞれ d50，d100 とした。空洞厚さを 20mm に厚くしたものを h20，空洞面積を大きくするため空洞の長さおよび幅を 200mm に変更したものを b200 とした。さらに，空洞形状による違いを確認するため，空洞の幅を 50mm, 長さを 200mm に変更した長方形の空洞を有する供試体名称を b50 とした。ここで，b50 の空洞面積は基本供試体と同一である。

また，供試体諸元による加速度応答の違いを確認するため，基本供試体と同様に深さ 30mm の位置に 100×100×10mm の空洞を埋設し，供試体の幅・長さ，厚さ，強度を変更したものを作製した。供試体の幅および長さを 400mm に小さくしたものを W400，供試体厚さを 100，400mm に変更したものを T100，T400 とした。また，強度による違いも確認するため，圧縮強度を 37, 60, 69MPa にしたものをそれぞれ fc37，fc60，fc69 とした。なお，作製から一年以上経過している供試体に関しては強度不明とした。

以上の計 12 体の供試体を用い，鋼球打撃実験を行った。

2.2 測定方法

計測は 0.001～20kHz の測定周波数範囲においてフラットな感度を有する加速度計を，**図－1** に示すように，供試体中央（空洞部）および供試体端部から W/4 ずつ離れた位置（健全部）に設置して行った。加速度計と供試体は両面テープで接触状態を一定とし，加速度計が衝撃を感知してから 0.02 秒までの波形を 2048 点で記録した。衝撃は基本供試体の厚さが 200mm であることを考慮し，NDIS[4)]を参考として径 20mm の鋼球を自由落下させることで与えた。鋼球落下位置は加速度計から 3cm 離れた位置とした。打撃力のばらつきによる加速度応答の違いを検討するため，一打撃点につき高さ 10cm から鋼球落下を 3 回，高さ 5，10，15cm から鋼球落下を 1 回ずつ行った。なお，空洞条件のみを変更した供試体の健全部の条件が基本供試体の健全部の条件と同一であることから，空洞条件のみを変更した供試体の健全部の応答は基本供試体と相違のないものとみなし，計測を行っていない。

2.3 加速度波形および周波数スペクトルの基本特性

落下高さ 10cm の鋼球打撃によって得られた加速度波形ならびに周波数スペクトルの例を**図－2** に示す。

(1) 基本供試体

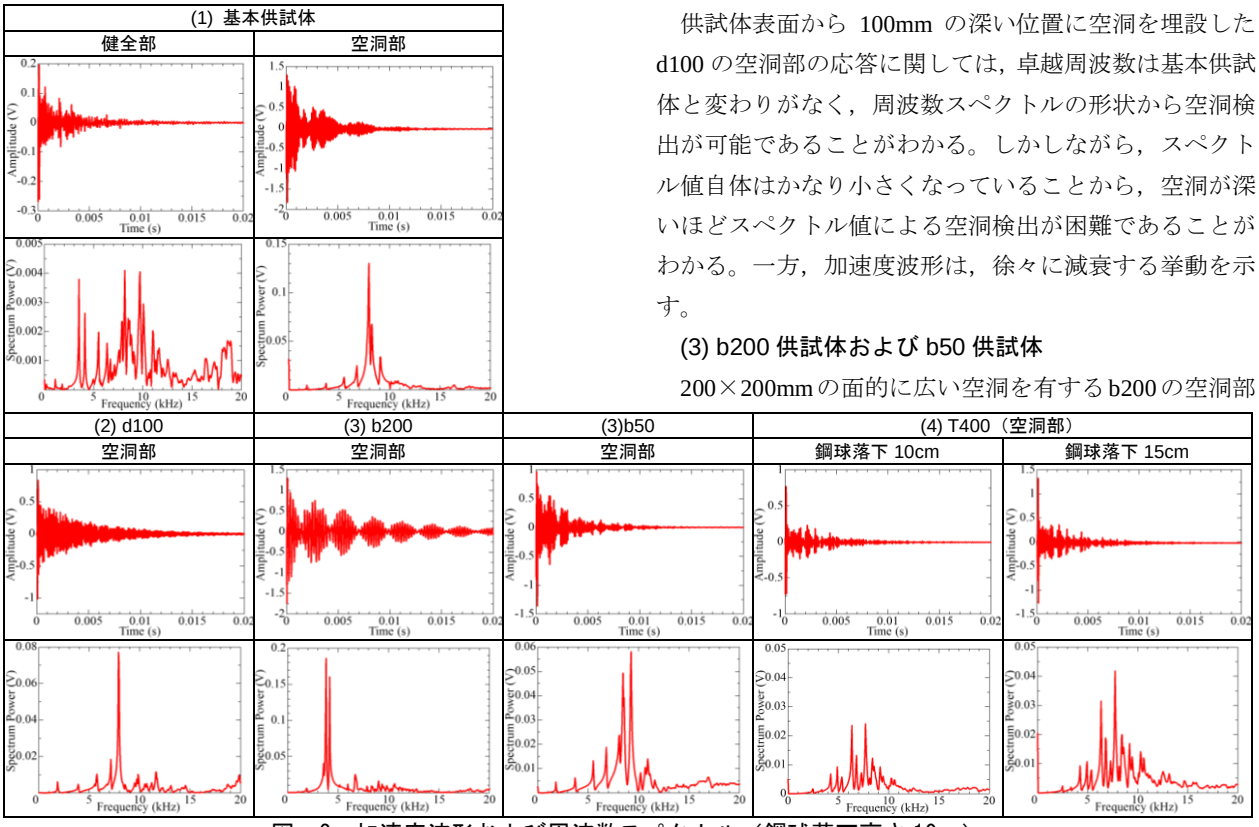
健全部では複数の卓越周波数が存在していることに対し，空洞部では 8kHz 付近のみに明らかな卓越が見られる。このことから，明確な卓越周波数を有することが，空洞の検出に有用であることがわかる。また，空洞部の応答は，加速度波形，周波数スペクトルのいずれにおいても，健全部の応答よりもかなり大きな値となっている。打撃による振幅値とスペクトル値は空洞部と健全部で大きく異なることから，空洞の有無の判断が可能である。

(2) d100 供試体

供試体表面から 100mm の深い位置に空洞を埋設した d100 の空洞部の応答に関しては，卓越周波数は基本供試体と変わりがなく，周波数スペクトルの形状から空洞検出が可能であることがわかる。しかしながら，スペクトル値自体はかなり小さくなっていることから，空洞が深いほどスペクトル値による空洞検出が困難であることがわかる。一方，加速度波形は，徐々に減衰する挙動を示す。

(3) b200 供試体および b50 供試体

200×200mm の面的に広い空洞を有する b200 の空洞部



図－2　加速度波形および周波数スペクトル（鋼球落下高さ 10cm）

の周波数スペクトルに関して，卓越周波数は基本供試体の空洞部が 8kHz 付近であることに対し，4kHz 付近まで低下している。これは，鋼球落下によって生じる振動が空洞上部のコンクリートのたわみ振動であることから，空洞面積が大きくなるほど周期が長くなり，周波数が低下したものと考えられる。また，空洞が 50×200mm の長方形である b50 では，2 つの卓越する周波数が見られる。これは，空洞の長さによって決定するたわみ振動の周期と，幅によって決定するたわみ振動の周期が異なるためであると考えられる。ここで，b50 のように，複数の卓越周波数を有することは，健全部の周波数スペクトルの形状と類似性が高くなることに注意が必要である。一方，加速度波形は顕著なうなり振動を示している。

(4) T400 供試体

供試体が厚い T400 の空洞部の周波数スペクトルでは，広範囲の周波数帯に複数の卓越周波数が存在し，スペクトル値自体も空洞部のデータの中では比較的小さいことから，周波数スペクトルの形状や値が健全部に近いものとなっている。加速度波形は初期値において急激に加速度が小さくなる挙動を示す。また，打撃力を強くする（鋼球落下高さ 15cm）ことで，振幅値やスペクトル値が大きくなることが確認できる。周波数スペクトルにおいて，8kHz 付近の卓越周波数が，落下高さ 10cm の場合は 6kHz 付近の卓越周波数と大差ないスペクトル値をとっていることに対し，落下高さ 15cm の場合は 8kHz 付近の卓越周波数が 6kHz 付近の卓越周波数よりも大きく卓越している。このことは，打撃力を強くすることで当然全ての周波数帯のスペクトル値が大きくなるが，周波数帯によってスペクトル値の増加の割合が異なることを示している。したがって，供試体が厚い場合には，打撃力を強くすることによって，周波数スペクトルによって比較的空洞が検出しやすくなることを示唆している。

3. 自己組織化マップ（SOM）

3.1 アルゴリズム

自己組織化マップ（Self-Organizing Maps，以下 SOM）とは，Kohonen によって開発された大脳皮質の神経機能をモデル化したニューラルネットワークである [5]。SOM は階層型ニューラルネットワークの一つであり，多次元データの類似性を 2 次元データに可視化する手法である。

本研究では，Viscovery SOMine 7.0 を用いて SOM を作成した。野内ら [3]のパラメータ設定を参考にして，ノード数 1000，テンション（近傍半径）0.5，クラスタ手法は凝集性のあるクラスタを算出する SOM-Ward に設定した。

3.2 入力データ

本研究では加速度応答の振幅，減衰，周波数特性を考慮するため，ある時刻，もしくは周波数の帯で細分化した加速度波形と周波数スペクトルの平均値を入力データとし，SOM による検討をそれぞれで行った。

(1) 周波数スペクトル平均値

周波数分布の特徴を数値化するため，加速度応答を高速フーリエ変換することで得られたスペクトル値を 200Hz ごとに平均したものを周波数スペクトル平均値とした。0～20kHz のデータを用い，100 次元とした。周波数軸に沿ったスペクトル値の大きさおよび周波数スペクトルの形状をそれぞれクラスタリングの判断材料とするため，得られたスペクトル値をそのまま平均したオリジナルデータと，平均値の総和が 1 となるように正規化した正規化データの 2 種類のデータを用いた。

(2) 加速度波形平均値

加速度応答の振幅値の時刻歴変化による分類を行うため，振幅値の絶対値を 0.001 秒ごとに平均したものを加速度応答平均値とした。0.02 秒までの平均値を用い，20 次元のデータとした。なお，振幅値の変化が指標となるため，波形の減衰情報も含むことになる。周波数スペクトル平均値と同様に，時間軸に沿った振幅値の大きさ，加速度波形の形状（減衰）をそれぞれクラスタリングの判断材料とするため，記録した加速度応答からそのまま平均値を算出したオリジナルデータと，平均値の総和が 1 となる正規化データを用いた。

3.3 出力データ

SOM の一例として，周波数スペクトル平均値を入力値として作成した**図－4** を取り上げる。本章では，出力データの基本的な見方を確認するものとし，空洞条件や供試体条件に関する詳細な検討については後述する。

本研究では一打撃点につき高さ 10cm から鋼球落下を 3 回行った一定の打撃力のデータを入力した SOM と，高さ 5，10，15cm から鋼球落下を 1 回ずつ行い，打撃力を変化させたデータを入力した SOM を作成した。打撃力一定の SOM において，供試体名称の末尾にある c，n がそれぞれ空洞部，健全部のデータを示している。打撃力が変動する場合について，末尾の記号は S が鋼球落下高さ 5cm，M が 10cm，L が 15cm を意味している。また，分類の見やすさのため，基本供試体の空洞部（Bc）は緑色，供試体条件が異なるものの空洞条件が同一（寸法 100×100×10mm，埋設深さ 30mm）の供試体の空洞部は青色，供試体条件が同一（寸法 600×600×200mm）で空洞条件が異なる供試体の空洞部は紫色の文字でそれぞれ色分けした。

クラスタリングは入力データの類似性に基づいて行われることから，各クラスタには空洞情報が紐づいていない。クラスタ数やマップの縦横比は，入力データが最適にクラスタリングされ二次元データに可視化されるように決定される。また，SOM は縦軸，横軸の意味を有し

ていないが，各クラスタ内において，より類似性の高いデータはより近い距離に配置される。

4. 鋼球打撃実験による空洞情報評価

4.1 周波数スペクトル平均値による評価

図－4 に，周波数スペクトル平均値のオリジナルデータと正規化データを入力値として作成した SOM を示す。上段の打撃力一定の場合および下段の打撃力が異なる場合についてそれぞれ考察を行う。

(1) 打撃力一定の場合の評価

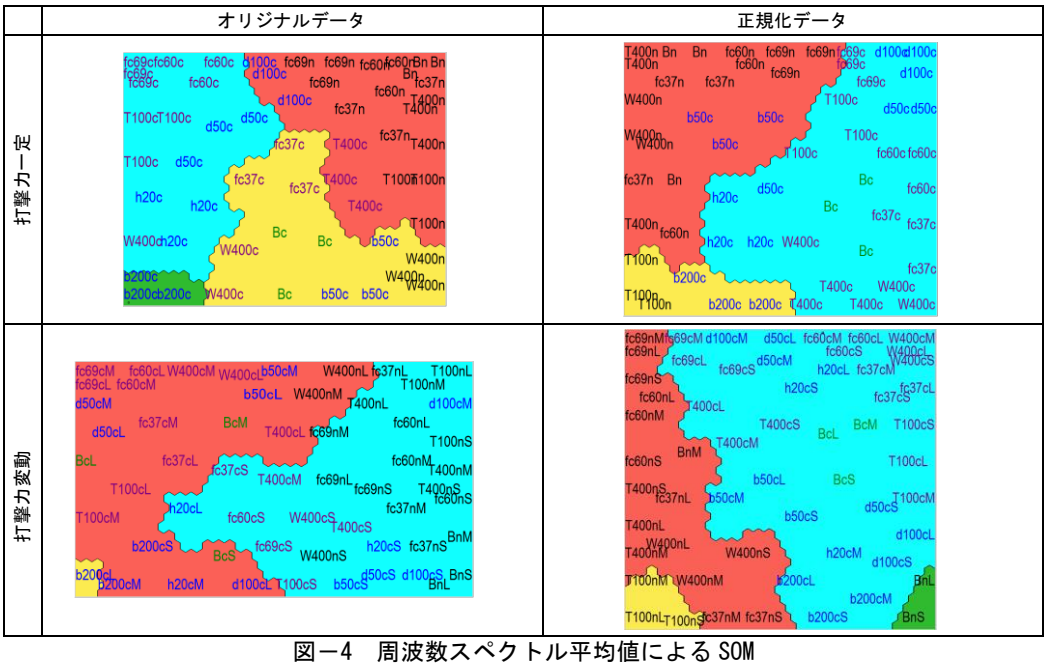
打撃力一定のオリジナルデータの SOM において，黄，青，緑色のクラスタには空洞部のデータが集中している。しかし，d100 および T400 供試体の空洞部のデータは，健全部のデータが集中している赤色のクラスタに分類されている。これは，空洞が深い場合（d100c）や供試体が厚い場合（T400c）は空洞検出に大きな打撃力が必要であるため，健全部であると誤判定されたと考えられる。また，黄色と青色の分類には空洞や供試体条件の相関は見られないが，緑色のクラスタには面的に広い空洞（b200c）の打撃データのみが存在している。このことは，周波数スペクトルの大きさに関して，空洞面積が空洞厚さや深さよりもかなり大きく影響していることを示している。一方で，正規化データでは，打撃力による差がなくなるため，空洞深さや供試体厚さが大きい場合に空洞が検出されないといった問題は解消され，青色のクラスタにほとんどの空洞部のデータが分類されている。しかし，空洞の面積や形状が異なる空洞部のデータ（b50c，b200c）は健全部と同じクラスタに分類されている。b50c に関しては，**図－2** において，広がりある周波数スペクトルを示すことから，健全部が集中するクラスタに分類された可能性が考えられる。b200c に関しては，**図－2** において 4kHz 付近の卓越する周期が，供試体が薄い場合（T100）の健全部における複数の卓越周波数のうちの一つと重なったため，T100 の健全部（T100n）と同じクラスタに分類された可能性が考えられる。なお，強度の異なる供試体については特定の傾向が得られなかった。これは強度によるデータの差が供試体諸元や空洞条件によるデータの差に比べ小さいためであると考えられる。

(2) 打撃力が異なる場合の評価

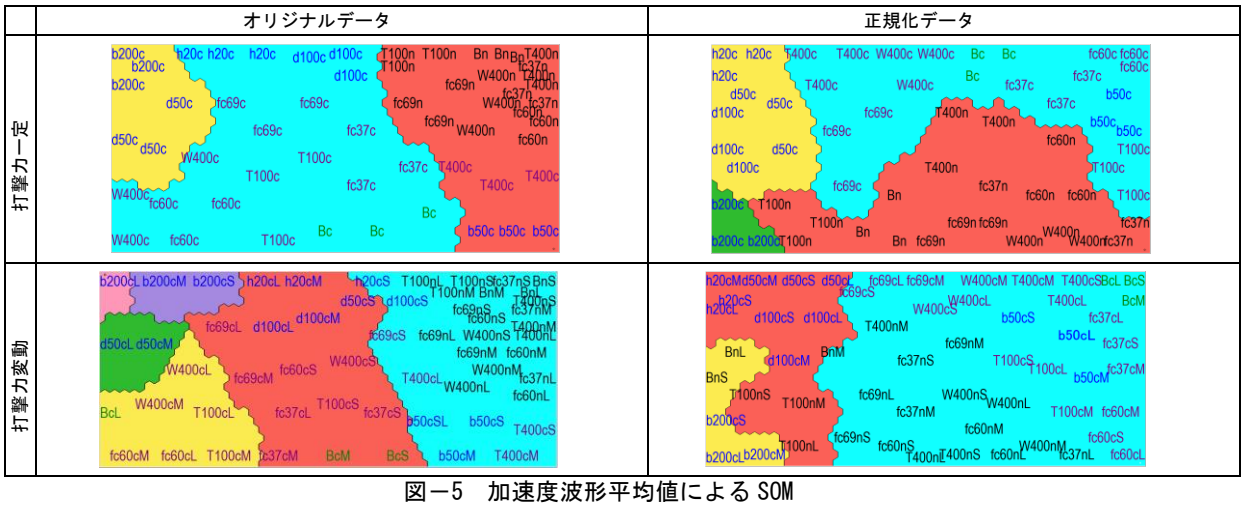
打撃力が異なる場合のオリジナルデータでは，空洞部や健全部のクラスタリングが上手く行えていないことが確認できる。打撃力によって卓越する周波数の変化はないものの，そのスペクトル値は大きく異なってしまったためであると考えられる。また，T400cL と d100cL は空洞部のデータのみが存在する赤色のクラスタに分類されていることから，空洞が深い場合や供試体が厚い場合は空洞検出に大きな打撃力が必要であることが，ここでも確認できる。一方で，正規化データにおいては青色のクラスタに空洞部のデータが全て存在しており，正規化することによって打撃力が異なっても空洞の検出が可能であることがわかった。しかし，正規化データの SOM では空洞条件に関する情報が得られない。これは，**図－2** の T400 で確認した，打撃力によって基本的な周波数特性は変化しないものの卓越周波数の卓越強度が変化してしまうということがどの空洞に対しても当てはまるためであると考えられる。

4.2 加速度波形平均値による評価

図－5 に，加速度波形平均値のオリジナルデータと正規化データを入力値とした SOM を示す。



図－4　周波数スペクトル平均値による SOM



図－5　加速度波形平均値による SOM

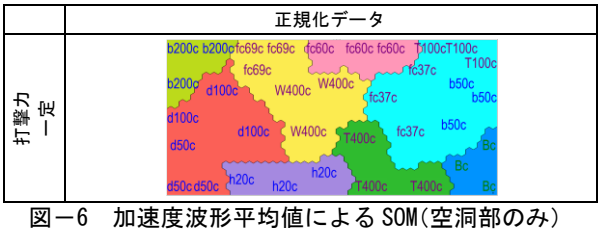
(1) 打撃力一定の場合の評価

打撃力一定のオリジナルデータでは，赤色のクラスタに健全部のデータが集中しているが，供試体が厚い場合（T400c）と空洞形状が異なる場合（b50c）の空洞部も含まれている。**図－2** において，T400c および b50c は周波数スペクトルにおいて複数の卓越周波数を有していることから，加速度波形の形状からは確認ができないものの，健全部と同様に，T400c および b50c の加速度波形が他の空洞よりも比較的複数の周期の波を有しているため，健全部と誤判定されたものと考えられる。一方，正規化データの SOM では，赤色のクラスタに健全部のみのデータが存在し，オリジナルデータよりも精度良く空洞検出が行われていることが確認できる。さらに，紫色の文字で表されている供試体条件は異なるものの空洞条件が同一のデータ（寸法 100×100×10mm，埋設深さ 30mm）が全て青色のクラスタに分類されており，黄色のクラスタには空洞深さ，空洞厚さが異なるデータが分類されている。このことは，正規化された加速度応答平均値を入力データとすることによって，供試体条件にかかわらず，空洞の深さや厚さ情報が同程度であるかを判断できる可能性を示している。但し，b50 の空洞部のデータに関しては，空洞条件が異なるにも関わらず青色のクラスタに分類されており，空洞の幅や長さが異なっていても面積が同一の場合には，同じ空洞条件であると分類されてしまうことに注意が必要である。

(2) 打撃力が異なる場合の評価

一方，打撃力が異なる場合はオリジナルデータ，正規化データどちらも空洞の有無の判断が上手く行えていない。このことから，打撃力が一定でない場合，加速度波形平均値の SOM に対する入力データとしての適用性は低いことがわかった。

ここで，本研究においては空洞部と健全部が最も良好に分類できた，打撃力が一定の場合の加速度波形平均値の正規化データについて，より詳細な検討を行った。**図－6** に，空洞部のみ加速度波形平均値の正規化データを SOM に適用したものを示す。**図－5** においては供試体厚さ方向に関する空洞条件（埋設深さ，空洞厚さ）が異なるデータが一つのクラスタに分類されていたが，**図－6** ではさらに，埋設深さが異なる d50c と d100c のデータが赤色のクラスタに，空洞厚さが大きい h20c のデータが紫色のクラスタに分類されている。このように，全てのデータを用いて空洞部と健全部の判定を第一スクリーニングとして行った上で，空洞部のみのデータで SOM を作成することによって，より詳細に空洞情報を把握できる可能性が示された。



図－6　加速度波形平均値による SOM（空洞部のみ）

5. SOM を用いた空洞情報評価

周波数スペクトル平均値および加速度平均値のオリジナルデータ，正規化データはそれぞれが振幅値や周波数の特性を捉え，健全部と空洞部の判断がある程度可能であることが示された。そこで，本研究において適用可能な，SOM を用いた空洞情報把握の手法を提案する。なお，今回は打撃力を一定とした場合に適用するものとする。手順概要を**図－7** に，具体的手順を以下に示す。

A)　空洞部か健全部か不明である複数の鋼球打撃による加速度応答について，加速度波形平均値の正規化データを入力値とし，SOM による空洞検出を行う。本研究の実験結果では，健全部のデータは全て一つのクラスタに分類されたことから，空洞部有無の判定が比較的良好に行えるものと考えられる。さらに，空洞部のデータに関して，広い空洞（b200c），厚さ方向の空洞情報が異なる空洞（d50c, d100c, h20c），

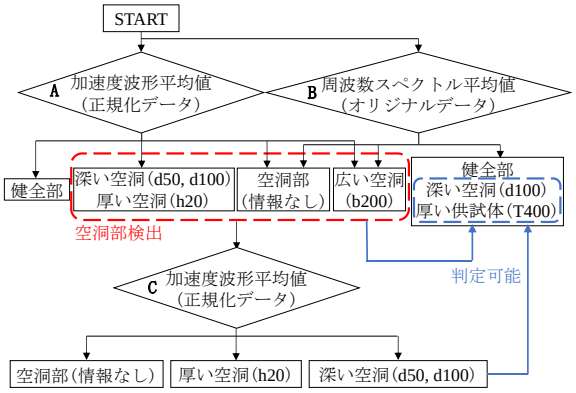
その他の空洞へ分類が可能である。

B) 同様に，空洞部と健全部のデータが混ざっている複数のデータに関して，周波数スペクトル平均値のオリジナルデータを入力値として SOM を適用する。出力結果は，健全部，深い位置に存在する空洞（d100c），供試体が厚い場合の空洞（T400c）が一つのクラスタに分類された。しかし，A において空洞部に対応するデータが判別できているとすると，深い位置に存在する空洞もしくは供試体が厚い場合の空洞が判別できる。また，この手順においても広い空洞（b200c）はその他の空洞部や健全部と別のクラスタとして分類されるため，A と共通してその他の空洞部のデータと類似していないと判定された空洞は，面積が広い可能性がある。

C) 次に，A で検出された空洞部のデータのみに対して，再度加速度波形平均値の正規化データを入力値として SOM を適用する。A では厚さ方向の空洞情報が異なる空洞（d50c，d100c，h20c）が一つのクラスタに分類されていたが，空洞部のみのデータを SOM に適用することで，深い位置の空洞（d50c，d100c）と厚い空洞（h20c）が別でクラスタリングされる。さらに，B において深い位置に存在する空洞と供試体が厚い場合の空洞が判別できていなかったが，今回の結果と照らしあわせることで，深い位置に存在する空洞であるか供試体が厚い場合の空洞であるかの判別が可能となる。

以上の手順によって，本研究で用いた空洞情報は検出・分類が可能である。出力される SOM の各クラスタには空洞情報が紐づいていないことから，どのクラスタが健全部にあたるかを知るためには，いくつかのデータに関して加速度応答波形や周波数スペクトルを直接確認する必要がある。

この手順は打撃力が一定である場合に適用可能であり，打撃力が一定でない場合は，4 章で確認した通り，空洞有無の判断にとどまることに注意が必要である。また，本研究においては加速度波形を 20 次元に，周波数スペクトルを 100 次元に分割した値を入力データに用いたが，この分割数を変えることによっても捉えられる特徴が変化し，これに伴って出力される SOM も変わるため，今後，より詳細な検討が必要である。



図－7　空洞情報判定手順概要

6. 結言

本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) 本研究では，鋼球打撃実験において，打音データの周波数スペクトル平均値，加速度波形平均値のオリジナルデータ，正規化データを入力値とした自己組織化マップを作成した。それぞれの指標は加速度応答の減衰特性，振幅値特性，周波数特性を捉えることがわかった。

(2) 本研究の範囲内において，周波数スペクトル平均値および加速度波形平均値どちらの指標を入力値とした場合でも，打撃力が一定であれば，SOM によって空洞の検出・分類がある程度可能であることがわかった。

(3) 異なる打撃力の複数のデータが存在している場合，オリジナルデータと正規化データどちらに関しても，加速度波形平均値を入力値とした SOM では空洞の検出が困難であり，周波数スペクトル平均値を入力値とした SOM では空洞の検出にとどまった。

(4) 複数の指標による SOM を用いて提案した手法で空洞情報評価を行うことで，本研究での実験データに関しては空洞情報の検出・把握が可能である。ただし，今回示した手順については，対象データにより異なる可能性が高く，その一般化は今後の課題である。

参考文献

1) 鎌田敏郎，淺野雅則，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.65-79, 2002.5

2) 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，構造工学論文集，Vol.57A, pp.802-811, 2011.3

3) 野内彩可，村上祐貴，井山徹郎，池田富士雄：打撃による加振特性を考慮した周波数応答関数に基づくコンクリート内部の欠陥評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp.2133-2138, 2016.6

4) 日本非破壊検査協会：NDIS 2426-2 コンクリートの非破壊試験―弾性波法―第 2 部：衝撃弾性波法，pp.9-12, 2014

5) T.コホネン：自己組織化マップ，シュプリンガー・ジャパン，2005