画像処理と音響処理の融合による打音検査*

山下 淳 *1, 原 隆浩 *1,2, 金子 透 *1

Hammering Test with Image and Sound Signal Processing

Atsushi YAMASHITA^{*1}, Takahiro HARA^{*1,2} and Toru KANEKO^{*1}

*1 Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University.
*2 Mitsubishi Electric.

In this paper, we propose a new method for a hammering test by using image and sound signal processing techniques. A method for discriminating a property of an object with the use of generated sound when striking it with a hammer is called a hammering test. However, this method depends on human experience and skills. In addition, if we perform this test over a wide area of objects, it is required to manually record hammering positions one by one. Therefore, this paper proposes a hammering test system consisting of two video cameras that can acquire image and sound signals of a hammering scene. The shape of the object is measured by the image signal processing from the result of 3-D measurement of each hammering position, and the thickness or material of the object is estimated by the sound signal processing in time and frequency domains.

The validity of proposed method is shown through experiments.

Key Words: Image processing, Sound signal processing, Hammering test, Stereo measurement, FFT

1. 序 論

本研究では,検査対象を叩きながら観察することで, 物体の形状や位置など目に見える性質(以降,可視部 情報と呼ぶ)と,物体の内部構造や材質の違いなど目 に見えない性質(不可視部情報)を同時に計測する手 法を提案する⁽¹⁾.

一般的に,可視部情報の計測を行う場合には,カメ ラなどの視覚センサから得られる映像信号を用いるこ とが有効である.それに対して,不可視部情報を視覚 センサで計測することは困難であるため,音響信号が 利用されることが多い.具体的には,物体を叩いてそ の音の違いを聞き分けることで厚薄や材質の違い,欠 陥の有無などを調べることができる.このように物体 を叩いたときに発生する音を判別して検査する方法を 打音検査法と呼び,発生した音を打音という.

打音検査法には非破壊で簡易的に行えるといった長 所があり,目で見ることが不可能な部位の検査におい て音を利用した打音検査法は非常に有効な方法の1つ である⁽²⁾.人間は聴覚によりさまざまな現象における 発生音の振幅や周波数などを記憶し,これと対比する ことができる.よってさまざまな判断を行うことがで き,打音検査が可能となる.しかし人間による打音検 査は経験や感覚に基づいて行われており,個人差もあ るため客観性に欠けるといった問題点もある.そこで この問題点を克服するために打音を数値的に解析し検 討する必要がある.

打音の数値的解析については,コンクリート構造物 の安全性の維持は重要であるため⁽³⁾,コンクリートの 打音検査に関する研究^{(4)~(8)}が数多く提案されている. 鋼球をコンクリートに落下させる基礎実験や FEM に よる解析を用いた研究^{(5)~(7)}では打音の基本特性を調 べているが,温度や湿度などの変化により打音が変化 するため,様々な環境で不可視部情報を正確に推定す ることは困難である.実際の検査においては,欠陥の 可能性がある部分,つまり打音が他の部分と異なる部 分を抽出することが重要である.そこで,実験時の環 境に応じて,打音の違いを定量的に分類することが重 要となる.

打音検査以外には,超音波を用いて可視部のひび割 れ深さを検出する研究^{(9)~(13)}も行われている.しかし, あらかじめ可視部のひび割れを検出している付近に対 して送受両探触子を接触させて検査を行う必要がある. 従って,打音検査と比較すると,広範囲にわたり作業

^{* 2004}年6月20日日本機械学会ロボティクス・メカトロ ニクス講演会'04にて講演(ベストプレゼンテ・ション 表彰受賞), 原稿受付2005年6月23日

^{*1} 静岡大学工学部機械工学科 (〒 432-8561 静岡県浜松市城 北 3-5-1)

^{*2} 三菱電機 Email: yamashita@ieee.org



Fig. 1 Overview of hammering test.

を行う場合の手間が非常に大きい.

また,構造物の接合部に損傷が存在すると剛性が変化したわみが生じるため,画像処理によってたわみ角を求めることで損傷検知を行う研究⁽¹⁴⁾も行われているが,たわみが発生しない場所での検査は困難である.

一方,トンネルなど覆エコンクリートの検査では, 打音検査に加えて目視検査を行う必要がある⁽⁸⁾.さら に,打音検査をある面積にわたって実施する場合,そ の検査結果の分布を知るために,どの位置を叩いたか など打音位置を記録する必要がある.その具体的な方 法としては,例えば検査領域に目盛をつける,物差を あてるなどして位置情報を読み取る方法が考えられる. しかし,これらの作業は大きな手間を必要とし,検査 の効率化のための1つの問題点となる.そこで画像処 理を用いて外部形状や打音位置を計測することができ れば,目視検査も自動的に行うことができると同時に, 全打音データをその位置情報と共に簡単に記録するこ とが可能となる.しかし,これまで打音検査に対して 画像処理を同時に組み込んだ試みはあまりなされてい ない.

そこで本研究では,画像信号と音響信号を同時に取 得し処理を行う打音検査法を提案する.本手法に必要 な機材は図1に示すように,検査対象物体を叩くハン マー(人間が叩くものとする)と2台のビデオカメラ であり,ビデオカメラは画像(映像)信号と音響信号 を同期させて記録することができる.

本研究では,取得した信号を用い,画像処理と音響 処理を融合した打音検査を行うことで,可視部情報と 不可視部情報を同時に計測することを目的とする.具 体的には,画像処理と音響処理の融合により,音響だ けを用いた従来の打音検査では検出不可能であった空 間情報を含めた材質などの相違を識別することが可能 となる.また,複数台のカメラを用いて計測を行う場 合には一般的にカメラ間の同期を取る必要があるが, 本研究では打音の瞬間を音響処理により検出すること で,同期装置を用いずにカメラ間の画像・音響信号の 同期を取ることが可能である.更に,例えば画像では 見えない部分の形状情報を音響により識別するなど, 音響信号により画像信号の不足分を補うことなどが可 能となる.

具体的な処理としては,任意の環境において打音の 違いを定量的に分類するために,その環境で実際に検 査の前に対象を叩いて事前処理を行い,その結果を用 いることとする.また,打音位置は2台のカメラを用 いたステレオ計測により求める.

2. 打 音 検 査 手 順

本手法は以下に示すように大きくわけて2つの処理 から構成される.

- 事前処理
 - 1. 音響処理
 - 2. クラスタリング
 - 3. 判別マップの作成
- 打音検査
 - 1. 音響処理による不可視部情報の計測
 - 2. 画像処理による可視部情報の計測
 - 3. 打音検査結果の統合・提示

事前処理では判別マップを作成することを目的とす る.ここで判別マップとは,音響処理で得られる特徴 量を用いて,例えば厚薄や材質などの不可視部情報の 違いを表現する図のことである.この判別マップは打 音検査に先だって部材の厚薄や材質の代表的と思われ る部分からサンプル点を収集して作成しておき,打音 検査で不可視部情報を判別する際に用いる.

打音検査では実際の打音の様子を撮影し,音響処理 と判別マップから不可視部情報を計測する.また画像 処理では可視部情報の3次元情報を計測する.この2 つの結果を統合して打音検査の結果を示す.

3. 事 前 処 理

まず事前処理として判別マップを作成する.判別マッ プは検査対象物体の代表的部分を事前に叩き音響信号 を取得した上で,以下に示す各処理を行い作成する.

3.1 音響処理 音響処理では外部からは見えな い部材の厚みや材質などに関する不可視部情報を取得 する.不可視部情報の変化による打音の違いを定量的 に評価するため,時間領域と周波数領域の両面から解 析した特徴量を利用する.本節では時間領域と周波数 領域それぞれの処理法について説明する.

3·1·1 時間領域における処理法 時間領域における処理では,音波の減衰指数を特徴量として利用する.まず,音が鳴り始める時間 *T_s*を見つける必要がある.そこで振幅が急激に大きくなった時間を *T_s* と定



Fig. 2 An example of raw sound wave and its approximation curve.

義し,以下の条件を満たす時間 t を T_s と見なす.

$$|y(t+\Delta t)| - |y(t)| > L_1,$$
 (1)

$$\left|\frac{y(t+\Delta t)}{y(t)}\right| > L_2,\tag{2}$$

ただし, y(t) は時間 t における振幅, Δt は微小時間, L_1 , L_2 はそれぞれ閾値である.

減衰時間は室内音響学では一般に振幅が 60dB 減少 するまでの時間, すなわち振幅が 1/1000 まで減少す るまでの時間として定義されている.しかし, 屋外環 境など雑音が多数存在する条件の下では, 雑音が大き すぎるためこの定義を打音解析に適用することは困難 である.

そこで音波の減衰について,微小時間におけるy(t)の絶対値の平均を表す $\bar{y}(t)$ を考え,次の方程式によって表せると仮定する.

$$\overline{\mathbf{y}}(t) = C \times e^{-B(t-T_s)},\tag{3}$$

ただし, $t > T_s$ である.

実際のデータに対して最小2乗法を利用することで, 上式右辺の指数 B を求め,得られた指数 B を以後の 音響処理過程で減衰指数として利用する(図2).

3.1.2 周波数領域における処理 周波数領域に おける処理では,周波数スペクトルを得るために高速 フーリエ変換(FFT)を用いる.スペクトル分布を比 較するために,周波数の平均値 *f* からの広がりを表す 周波数特徴量 *V*_f を以下の式により求める(図3).

$$V_f = \frac{1}{A_s} \sqrt{\sum_{i=1}^{N} A_i^2 (f_i - \overline{f})^2},$$
 (4)

ただし,

$$\overline{f} = \sum_{i=1}^{N} \frac{f_i A_i^2}{A_s^2},\tag{5}$$

$$A_s^2 = \sum_{i=1}^N A_i^2,$$
 (6)



Fig. 3 An example of frequency spectrum with FFT.



Fig. 4 Example of clustering in B- V_f diagram.

であり, *f_i* は *i* 番目の周波数, *A_i* は *i* 番目の周波数成 分の振幅, *N* はデータ数である.

3.2 クラスタリング 打音検査においては,厚 さや材質などが他の部分と異なる部分を抽出すること が重要である.そこで,不可視部情報のグループ分け を行う.各打音の音響信号に対して 3.1 の処理により 減衰指数 B と周波数特徴量 V_f を求めることができる. そこで横軸を B,縦軸を V_f として各値をプロットし た B-V_f 図を作成する.その後,プロットされた各点 に対してクラスタリング処理を行い,不可視部情報を グループ分けする.

ここで,打音検査を行う前にはグループ数は分から ないことが想定される.そこで,クラスタ数が可変で あるという特徴を持つ ISODATA 法⁽¹⁵⁾と呼ばれるクラ スタリング手法を用いてグループ分けを行う.本研究 では,自動クラスタリング用に従来手法を変更した ISODATA法⁽¹⁶⁾をベースにして,筆者らが改良し文献 ⁽¹⁷⁾で用いた ISODATA 法を使用した.

ここでは,厚さや材質などn種類の異なる性質を 持った場所(不可視部情報)において,*B-V_f*図に厚薄 の違いに応じたグループをn個作成しそのグループの 中心位置を求める処理を行う(図4).

3.3 判別マップの作成 判別マップは不可視部 情報を判別するために事前に作成する.クラスタリン グ処理により各グループの中心位置が求まるので,こ の各中心位置に不可視部情報の違いを表す値を与える. 本研究ではこの値として厚さや材質の違いを直感的に



Fig. 5 Example of discrimination map.

提示するため色の違いを与えることとする.3.2 で作成した B-V_f 図全体をこの色の違いで表せるように,各クラスタ中心位置との距離関係から線形変化させた色の値を設定する.このように B-V_f 図全体の座標において色の値が与えられた図を判別マップと呼ぶことにする(図5).

4. 打 音 検 查

検査対象物の表面を叩くことにより,打音点の位置 とその打音点の不可視部情報を順次取得する.

具体的な処理の手順は,以下の通りである.まず, 検査対象物を叩いた様子を撮影した動画(画像と音響 の合成信号)のうち音響信号を利用し,それぞれのカ メラで撮影した動画での打音の瞬間を検出する.音響 処理については,打音の瞬間から音が減衰するまでの 信号を用いて特徴量を計算する.画像処理については, 打音の瞬間において2台のカメラから得られるステレ オ画像を用いて,ハンマーの位置の3次元計測を行い, その結果を利用して検査対象物の表面の3次元座標を 求める.一方,音響処理によって求めた特徴量に応じ た色を判別マップから求め,得られた3次元座標に色 の情報を付加する.

同様の処理を各打音の瞬間毎に行い,最終的にすべ ての結果を統合して,色が付いた3次元形状表示によ り検査対象物の可視部情報と不可視部情報を提示する.

4.1 音響処理による不可視部情報の計測 各打 音点において 3.1 の音響処理による特徴量 B および V_f を計算し,この結果と判別マップとを対応させてその 色の値を読み取ることで対象物体の任意部分における 不可視部情報を色情報として表現する.

4.2 画像処理による可視部情報の計測 検査対象物の打音点特定・立体形状復元を行うためには,打 音位置の3次元情報を計測する必要がある.本研究で は2台のカメラを用いたステレオビジョンにより3次 元情報計測を行う.具体的には打音検査を行う際に用 いるハンマーの3次元情報を利用する.ハンマーには 位置・姿勢の計測が容易となるように特徴となるマー





Fig. 7 Extraction of the hammer from images.





(a) Acquired image. (b) Enlarged image of hammer.Fig. 8 Extraction of hammer's marks.

クを数ヶ所に付着しておく.ハンマーの3次元位置・ 姿勢を計測することにより,叩いた瞬間にハンマー自 身によって隠れてしまう検査対象物体の表面の3次元 位置情報を得ることができる.ここでは,両側面に2 箇所ずつ,頭面に1箇所マーク(マーク間の位置関係 は既知)の付いたハンマーを用いる(図6).また,検 査対象物にハンマーが接触した瞬間には,対象物表面 に対してハンマーが垂直となるように叩くこととする. 従って,打音の瞬間のハンマーの姿勢と打点での対象 物表面の法線ベクトルは等しいものとする.

まず音響処理により音の鳴り始める時間 T_sを求め, 時間 T_sにおける画像を動画像から抽出する.ここで, 2 台のカメラにおいてそれぞれ時間 T_sを求めることに より対象物を叩いた瞬間の画像を正確に同定すること ができるため,カメラ間の同期信号は必要ない.

画像からハンマーのマークを抽出する方法は以下の 通りである.まず,ハンマーなど動物体が写っていな い画像と時間 T_sにおける画像の差分処理を行うこと で,ハンマーのみを抽出できる(図7).この差分画像 に対して2値化,膨張収縮,ラベリングの処理を施す ことで画像上のハンマーのマークを抽出する(図8).

2台のカメラから得られる画像それぞれについて上 記の処理を行い,画像における各マークの位置を抽出





Fig. 10 Object with curved surfaces.

する.2枚の画像間で対応するマーク同士の視差を求 めることで,3角測量の原理により各マークの3次元 座標を求めることができる(図9).最終的に,各マー クの位置関係を用いることにより,打音点の3次元座 標およびその位置での対象物表面の法線ベクトルを求 めることが可能である.

4.3 打音検査結果の統合・提示 打音点の位置 情報については,得られた3次元空間中の点群に対し て形状復元を行う.ここでは,点群が平面を構成する 場合には平面当てはめを行い,平面でない場合には3 角パッチを用いて形状を表現する.表面が曲面の物体 を計測し,表現した結果の例を図10に示す.

また,検査対象物体全体の厚薄や材質を表現するために,近傍4打音点の厚さや材質などを表す色の値から補間法を用いて各打音点間の領域の色の値を求める. 具体的には,近傍4点で生成する4角形において,それぞれ縦横M分割しM2個の4角形を生成する.このM2個の4角形を平面上の点とみなして線形補間法をあてはめる.

最終的に,形状計測結果(形)と厚薄や材質判別結 果(色)を融合した検査結果表示を行う.OpenGLを 用いて結果の描画を行うことにより,裏側からを除く 任意方向からの検査結果の表示することが可能である.



5. 実 験

音響信号と画像信号を容易に抽出できるよう,ディ ジタルビデオカメラを用いて打音検査の撮影を行った. また,ハンマーを用いて検査対象物の表面に対して垂 直方向から同程度の力で叩くことで打音検査を行った.

計算機に取り込むデータについては,映像信号は画 像サイズ 720 × 480pixel,フレーム数 30frame/s,音 響信号はサンプリング周波数 44.1kHz,チャンネル数 1(モノラル録音),ビット数 16 ビットと設定した.

5.1 厚薄判別 図11 に示す木板の上部から撮影 を行い,物体の厚薄判定の検証を行った.木板の厚さ は3段階で構成されており,不可視部領域における厚 い部分(クラスタ1)を312mm,可視部領域における 厚い部分(クラスタ2)を47mm,薄い部分(クラス タ3)を12mmとした.

それぞれの厚さにおける打音波形の例を図 12 に, FFT による周波数スペクトルの例を図 13 に示す.た だし,FFT を行う際にはハニング窓を利用し,周波数 特徴量 V_f は特に変化をもった周波数分布が見られる 100Hz から 1KHz までの周波数帯で計算した.厚薄の 違いで打音波形および周波数分布に違いがあることが 分かる.具体的には,木板の厚さが薄い箇所ほど音波 の減衰が早いなどの相違により,3段階の厚さを分類 可能であった.

また,クラスタリング処理により生成された判別マッ プを図14に示す.ここで,クラスタ1はイエロー,ク ラスタ2はシアン,クラスタ3はマゼンダとした.

各打音点における木板の厚薄を調べた結果を図 15 に示す.木板のうち4隅の支柱で囲まれた4角形の内 部を7×8点について各点数回ずつ叩き,不可視部情 報の厚さ(色の値)を決定した.また,可視部情報で ある打点の3次元位置は,画像処理によって抽出され たハンマーの位置をもとにステレオ計測により求めた.

打音点以外の検査対象物表面の3次元位置および色 を示した結果を図16に示す.図16(a)は線形補間によ り表面を形成した結果,図16(b)は実際の検査対象物



Fig. 12 Examples of raw sound wave (vertical axis: amplitude, horizontal axis: time).

体の様子である.

3次元形状および厚さの計測結果は,実際の値とほ ぼ一致しており,良好な結果が得られた.

5.2 材質判別 材質判別に用いた実験対象を図 17 に示す.用いた材質は,木,発泡スチロール,プラ スチック,コルクの4種類であり,これら4種類の材 質を接着した.また材質の違いについては,外観検査 などを組み合わせて検査する場合を想定すると,画像 によって色から判別できる恐れがあるため,実験時に は全体を白く覆い撮影を行った.なお,音響処理に影 響を与えないように,非常に薄い紙を用いて対象物を 覆った.更に,白い紙で覆う際に正確に上面の高さを 一致させて固定し,4種類の物体の境界面で高さのず れや隙間がないようにした.

厚薄判別の場合と同様,4種類の材質を事前に叩い た結果を用いて作成した判別マップを図18に示す.こ こで,木をクラスタ1(マゼンダ),発泡スチロール をクラスタ2(イエロー),プラスチックをクラスタ3 (シアン),コルクをクラスタ4(ブルー)とした.こ



Fig. 13 Examples of frequency spectrum with FFT (vertical axis: amplitude, horizontal axis: frequency).



Fig. 14 Discrimination map I.



Fig. 15 3-D positions and colors of each hammering point I.





Fig. 18 Discrimination map II.



Fig. 19 3-D positions and colors of each hammering point II.

の判別マップより,実験で用いた4種類の材質は特徴 量 B および V_f によって分類可能であることが分かる.

次に,検査対象物を6×6点ハンマーで叩き,画像 処理を用いて打点の3次元座標値を求めた後,それぞ れの打点の不可視部情報である材質(色)の相違を音 響処理によって判別した結果を図19に示す.また,補 間を用いて検査対象物全体の形状と材質を求めた結果 を図20に示す.

本来は平らであるはずの検査対象物の表面形状が, 画像処理の誤差により多少凹凸した形状に計測された ことや,材質の境界付近でイエローとブルーが交じり 合ってグリーンに見えてしまうなど多少の誤差はある ものの,厚薄判別の場合と同様に3次元形状および材 質の計測結果は実際の値とほぼ一致したと考えられる.



5.3 考察 計算時間については, Pentium IV 1.6GHzの計算機を用いた場合,打音点1箇所につき, 音響処理による不可視部領域の情報推定および画像処 理による3次元位置算出に平均2.3s必要であった.実 際の作業では2.3s以内に2箇所以上の場所を叩くこ とは難しいため,リアルタイム処理に問題はないと考 えられる.ただし,この計算時間に事前の判別マップ 作成に必要な時間は含まれていない.

3次元計測の精度に関しては,実験を行った状況で は1画素あたりの分解能が1.06mmであったことに対 して最大2~4画素分の誤差が発生したが,ほぼ正確に 形状計測を行うことができた.誤差の原因については, キャリブレーションの精度とステレオ画像間のマッチ ング精度の影響であると考えられる.特に,打音の瞬 間の画像が多少ぶれている場合があり,このぶれが最 大の誤差を生む主な要因であったと考えられる.また, 各打音点の3次元座標から線形補間して形状を決定し ているため,各打音点間の間隔や対象物の形状によっ ては,4画素分以上の形状計測誤差が発生する可能性 もある.

音響処理による判定(クラスタリング)結果に関しては,全打点のうち約96%の打点において正しいクラスタに属すると判別できた.なお,判定を間違った箇所は厚さや材質が変化する場所付近であった.これらの打点については,判別マップ上では2種類のクラスタの境界付近にプロットされており,色で表現した場合には大幅に異なった色となることはなかった.

また,叩く強さと音響処理における特徴量の関係に ついて調べるため,強・中・弱・微弱の4段階の叩き 方で同じ厚さ・材質の場所を叩いて実験を行った.そ の結果,雑音のレベルが打音と比較して相対的に大き くなる微弱以外の条件では,ほぼ同程度の特徴量の値 となった(表1).これは,例えば(3)式におけるCは 音の強さに応じて変化することに対して,採用した2 種類の特徴量はいずれも音の強さに影響を受けにくい 特徴量であるためである.

Table 1 Hammering power and parameter B,
--

	Strong	Medium	Weak	Faint
В	42.8	39.3	42.3	34.5
V_f	183	169	167	159

6. 結 論

本研究ではビデオカメラを用いて,音響処理と画像 処理を融合させた自動打音検査法ついて提案した.画 像処理では,ハンマーの3次元形状を計測することで 可視部情報である物体の形状計測を行った.音響処理 では,減衰指数と周波数分布の2つの特徴量を用いて 木板の不可視部の厚薄や材質などの不可視部情報を推 定した.また,検証実験により本手法の有効性を確認 することができた.

本研究で提案した手法の利点をまとめると以下の通 りである.

- 音響処理による不可視部情報の計測に加え,画像 処理を用いることにより従来の打音検査では計 測することができなかった物体形状と位置を把握 可能
- 一般的なビデオカメラ2台以外には,特別な機器 を新たに導入する必要なし
- 音が鳴り始める時間を2台のカメラでそれぞれ求めることにより,カメラ間で同期を取る必要なし
- ハンマーの位置を計測しているため、テクスチャのない表面を持つ対象物の3次元形状も計測可能
- 5. 打音検査結果を定量的かつ簡便に保存可能
- 6. 色を用いることで直感的に人間に情報を提示可能

また,今回の実験ではほぼ一定距離間隔で対象物を 叩いたが,他の場所と特徴が異なった場所を発見した 場合には人間にその場所をより詳細に叩くように指定 することにより,検査の精度を向上させることも可能 であると考えられる.

なお,本研究では画像処理と音響処理を融合するこ との有効性は検証できたが,画像処理および音響処理 自体については今後更に改善の余地があると思われる. 具体的には,音響処理で用いる特徴量を増やす,クラ スタリングに適した特徴量を統計的手法などにより自 動的に求める,FFTの代わりにWavelet変換を用いる などして音響処理の精度を向上させることや,ステレ オ計測の精度を向上させることが必要である.また, 検査項目を厚薄や材質のほかにも欠陥などに拡張する ことなども今度の課題として挙げられる.更に,色表 示の結果に閾値処理を施すことによって自動的に欠陥 部分のみを検出した結果を出すことなども今後の展望 として考えられる. 文

- (1)山下淳,原隆浩,金子透,三浦憲二郎:"打音検査における画像処理と音響処理の融合",日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集,2A1-L2-11, pp.1-4,(2004)
- (2) M. J. Sansalon and W. B. Streett: *Impact-Echo*, Bullbrier Press, Ithaca, New York (1997)
- (3) 岩瀬 昭雄: "コンクリート構造物の欠陥の非破壊検知診断法",日本音響学会誌,57-10, pp.668-674 (2001)
- (4) C. Cheng and M. Sansalone: "The Impact-Echo Response of Concrete Plates Containg De-Laminations: Numerial, Experiential and Field Studies", *Materials and Structures*, 26, pp.274–285 (1993)
- (5) 伊東 良浩, 魚本 健人: "ひび割れを有する鉄筋コンク リート梁の打撃音", 土木学会論文集, **35**-564, pp.169– 176 (1997)
- (6) 淺野 雅則, 鎌田 敏郎, 国枝 稔, 六郷 恵哲: "コンクリート 内部欠陥の寸法および深さと打音特定値の定量的関係", コンクリート工学年次論文集, 23-1, pp.589–594 (2001)
- (7) 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, 55-704, pp.65–79 (2002)
- (8) 榎本 秀明, 稲川 敏春, 鈴木 文大, 松林 弘智, 千鳥 雅由: "トンネル履工コンクリートを対象とした打音評価手 法",物理探査学会第 104 回学術講演論文集, pp.65-69 (2001)
- (9) O. R. Gericke: "Determination of the Geometry of Hidden Defects by Ultrasonic Pulse Analysis Testing", *Journal of Acoustic Society of America*, **35**, pp.364–368 (1963)
- (10) 山口 哲夫: "超音波法によるコンクリートひび割れ深さの測定", 非破壊検査, **47**-9, pp.636-641 (1998)
- (11) T. Hirata and T. Uomoto: "Detection of Ultrasonic Pulse Echo through Steel Bar in Concrete Crack Depth Measurement", *Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2000*, pp.383–390 (2000)
- (12) N. Kato, N. Saeki, Y. Tanigawa, K. Kato, T. Kawai and Y. Murata: "Evaluation of Deterioration and Specification of Defect of RC Structure by Natural Potential and External Impact-Acoustic Methods", *Materials Science Research International*, **7**-2, pp.138–146 (2001)
- (13) 吉田 秀典, 高橋 恵介, 堺 孝司, 山下 英俊: "コンクリートの超音波伝播に関する数値解析的研究", コンクリート工学年次論文集, 24-1, pp.1461–1466, (2002)
- (14) 川合 忠雄, 伊藤 正称, 池田 直人: "画像処理を用いた構造物の損傷検知", 日本機械学会論文集(C編), 67-653, pp.17-22 (2001)
- (15) G. H. Ball and D. J. Hall: ISODATA Novel Method of Data Analysis and Pattern Classification, Stanford Research Institute (1965)
- (16) 高橋 圭子, 阿部 圭一: "ISODATA クラスタリング法を 用いたカラー画像の領域分割", 電子情報通信学会論文 誌 *D-II*, **J82-D-II**-4, pp.751–762 (1999)
- (17) 加藤 進,山下 淳,金子 透: "ステレオカメラを用いた 気泡ノイズにロバストな水中環境観測",情報処理学会 *CVIM* 研究会資料, 2004-40, pp.117–124 (2004)