

画像・音響処理を用いた打音検査

原 隆浩 山下 淳 金子 透 三浦 憲二郎

静岡大学工学部機械工学科

見ることができない場所の物理的構造に関する情報を取得する場合には音を利用することは有効であり、ハンマーで物体を叩きその発生音の違いを利用する検査法を打音検査法という。この方法は非破壊で簡易的に検査が行えるといった長所が挙げられるが、人間が行った場合経験や技術に依存するなどの問題点がある。また、この検査をある面積に亘って実施しその結果の分布を調べるためには、どの位置を叩いたかなど検査位置を記録する必要がある。本論文ではこれらの問題を解決するために、音の違いを定量的に判別する音響処理と叩いた位置を三次元的に特定する画像処理を行い、この2つの処理結果を融合した打音検査法を提案する。また、検証実験により提案手法の有効性を示す。

1. 緒言

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ひとつである。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。しかし打音検査は人間の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。

打音検査の研究例としては、トンネルなど覆工コンクリートのひび割れの有無について打音を用いて解析的に検査を行う研究[1]~[4]があり、これらの研究はコンクリートを対象として行われている。また、ひび割れ部と正常部の違いを評価しているだけのものが多く、実際に打音検査を行って具体的に厚さやひび割れなどの不可視部情報の推定を行っているものが少ない。他には、超音波を用いて可視部のひび割れ深さを検出する研究[5][6]も行われている。

また、打音検査をある面積に亘って実施する場合、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、検査の効率を上げる上での1つの問題点となる。そこで画像処理を用いて打音位置を特定することができれば、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できる。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。本手法に必要なツールはFig.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）、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。打音による検査項目には材質、厚さ、欠陥（空隙、ひび割れ）などが挙げられるが、本研究では厚薄判別を例にして、その原理と実験結果について述べる。音響処理では打音の違いを時間領域と周波数領域の両面から処理を行うことで、材料表面からは観測不能な厚薄を計測する。

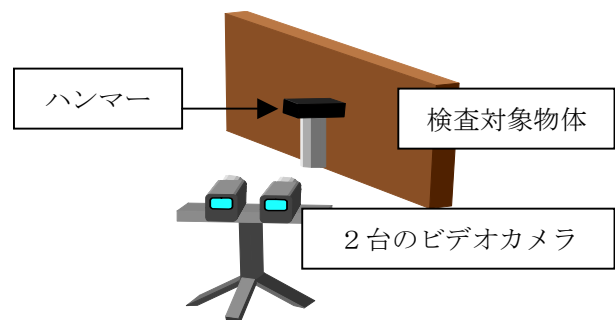


Fig.1 本手法の概観

画像処理ではハンマー形状や対象物体表面の三次元形状をステレオビジョンにより計測する。以下、提案手法における画像処理と音響処理の原理について説明し、検証実験により本研究の有効性を示す。

2. 処理手順

本手法はFig.2に示すように大きくわけて2つの処理から構成される。

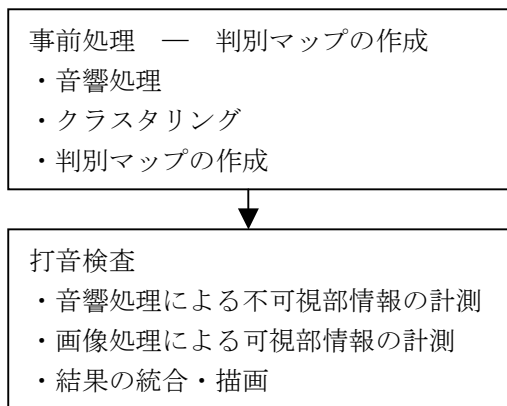


Fig.2 提案手法の処理手順

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てて部材の厚薄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ときに用いる。

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三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。

2.1 事前処理 — 判別マップの作成

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。

(i) 音響処理

音響処理では外部からは見えない部材の厚み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。

・時間領域における処理法

時間領域における処理では、音波の減衰時間の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 と定義し、次の方程式を満たす時間 t を T_s と見なす。

$$\begin{cases} |y(t + \Delta t)| - |y(t)| > M \\ \left| \frac{y(t + \Delta t)}{y(t)} \right| > N \end{cases} \quad (1)$$

ここで、

$y(t)$: 時間 t における振幅

Δt : 微小時間

M, N : 閾値

である。

減衰時間は室内音響学では振幅が 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、打音解析においてこの定義では雑音が大きすぎるため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。

$$\bar{y}(t) \cong C \times e^{-B(t-T_s)} \quad (t > T_s) \quad (2)$$

実際のデータに対して最小二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時間特徴量として利用する。実際の例を Fig.3 に示す。

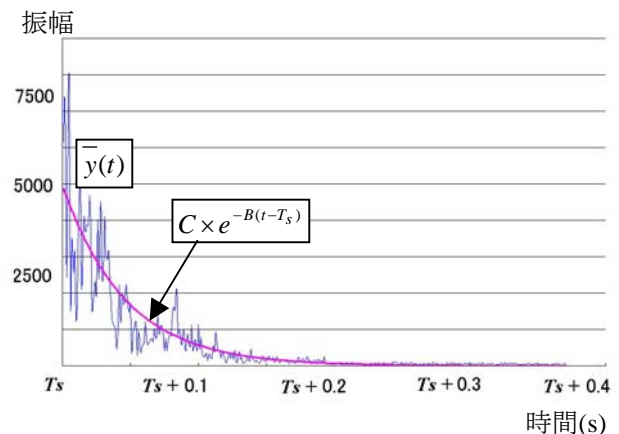


Fig.3 実際の音波における近似曲線の例

・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、周波数の広がり を考慮した周波数特徴量 V_f を式 (3) から求める (Fig.4)。

$$V_f = \frac{1}{A_s} \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} \{ (f_i - \bar{f})^2 \times A_i^2 \}} \quad (3)$$

ここで

$$\bar{f} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{f_i A_i^2}{A_s^2}$$

$$A_s^2 = \sum_{i=0}^{n-1} A_i^2$$

f_i : i 番目の周波数

A_i : i 番目の周波数成分の振幅

n : データ数

である。

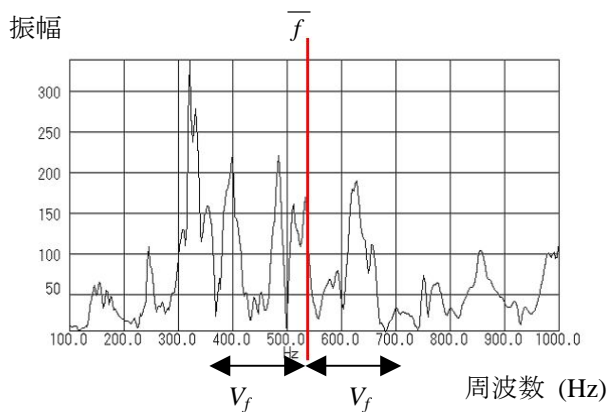


Fig.4 周波数特徴量の模式図

(ii) クラスタリング

クラスタリング処理では不可視部情報をグループ分けすることを目的とする。各打音の音響信号に対

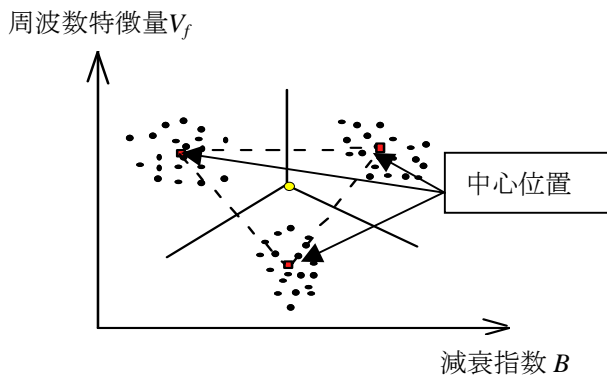


Fig.5 B - V_f 図及びクラスタリング処理の例

して(i)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。具体的には、 n 段階の厚薄の違いをもった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。 $n=3$ としてクラスタリング処理した例をFig.5に示す。

(iii) 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。本論文ではこの値として厚さや材質の違いを直感的に提示するため色の違いを与えることとする。(ii)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。例をFig.6に示す。

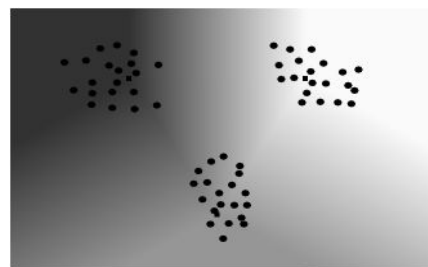


Fig.6 判別マップの例

2.2 打音検査

(i) 音響処理による不可視部情報の計測

各打音点において2.1節(i)の音響処理による B および V_f の特徴量を計算し、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。

(ii) 画像処理による可視部情報の計測

検査対象物の立体形状を復元するためには三次元情報を計測する必要がある。ここではステレオビジョンによる三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三次元情報を利用する。ハンマーには位置姿勢を計測しやすいように特徴となるマークを数ヶ所につける。ハンマーの三

次元位置，姿勢を計測することにより，検査対象物体のハンマーに叩かれている表面の位置情報を得ることができる。

ここでは前提条件として，キャリブレーションされた固定ステレオカメラと特徴点間の位置関係が既知であるハンマーを用いる．またカメラ固定という前提から事前に背景画像を作成しておく．

まず音響処理により時間 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．本手法では二眼ステレオ法を用いるため，それぞれの動画像において時間 T_s を求めることで別視点からの2枚の画像を取得可能となる．背景差分法を用いることでハンマーなどの動物体のみを抽出できる．この差分画像に対して二値化，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特徴点座標を決定する．これにより各特徴点の世界座標を得る．また，ハンマーにおける特徴点の位置関係は既知であるため，ハンマーが実際に叩いている場所の世界座標を取得することができる．

(iii) 検査対象物体全体の描画

検査対象物体全体の厚薄を表現するために，近傍4打音点の厚さ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補間する．

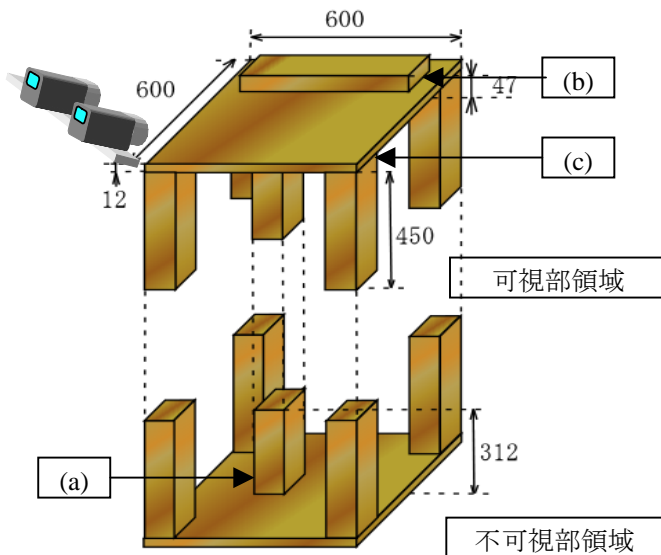


Fig.7 実験対象

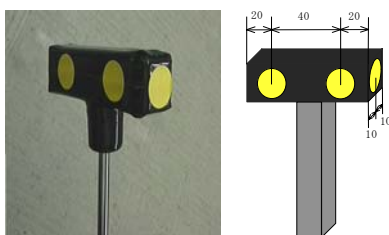


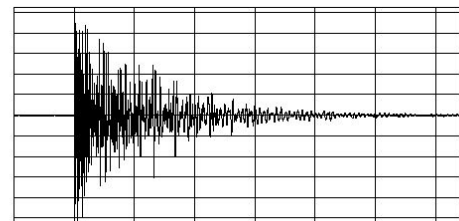
Fig.8 実験で用いたハンマー

3. 実験及び結果

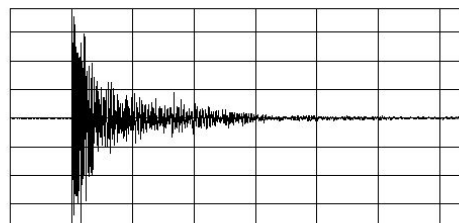
実験においては音響信号と画像信号を容易に抽出できるように，デジタルビデオカメラを用いた．デジタルビデオカメラで撮影しながら，厚薄のある木製の板を同じ程度の力でハンマーを用いて叩き，パソコンに取り込む．パソコンに取り込まれたデータは混合信号で保存され，このファイルを音響信号ファイルと映像信号ファイルとに分割する．ここで音響信号ファイルの情報は以下のように設定した．

- ・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

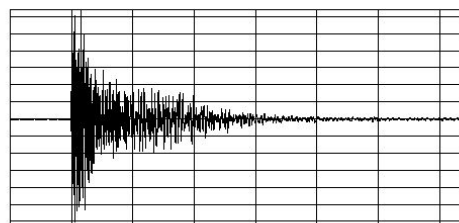
実験対象は Fig.7 に示すような木板であり，上部から撮影を行った．本研究では不可視部情報は厚薄のみを対象とし計測を行った．木板の大きさは 600mm × 600mm であり，厚さは3段階で構成されており，不可視部領域における厚い部分(a)を 312mm，可視部領域における厚い部分(b)を 47mm，薄い部分(c)を 12mm とした．ハンマーは Fig.8 に示すように両側面に2つずつ，頭面に1つマークのついたハンマーを用いた．



(a) 不可視部領域が厚い場合の例



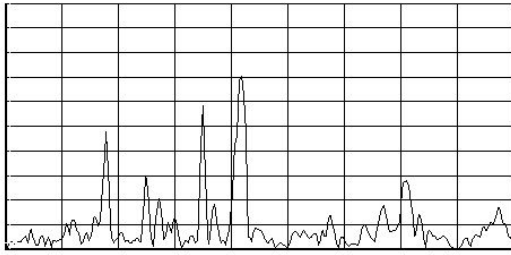
(b) 可視部領域が厚い場合の例



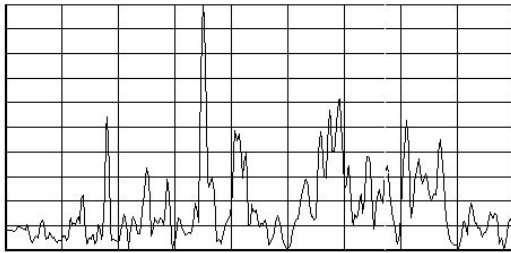
(c) 薄い場合の例

Fig.9 打音波形

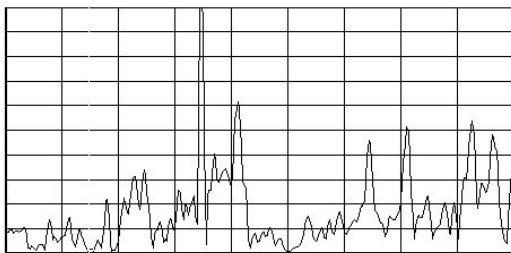
横軸：時間， 縦軸：リニア表示の振幅



(a) 不可視部領域が厚い場合の例



(b) 可視部領域が厚い場合の例



(c) 薄い場合の例

横軸：周波数， 縦軸：リニア表示の振幅

Fig.10 FFTによる周波数スペクトル

Fig.9に打音波形を示す. 記録時間は0.372sである. 図より厚薄の違いで波形に違いがあることがわかる. またFig.10にFFTによる周波数スペクトルを示す. 但し, FFTを行う際にはハニング窓を利用した. また, そのデータサイズは16384(=2¹⁴)バイトとした. こちらも図より三者に周波数分布の違いがあることがわかる. なお, 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.

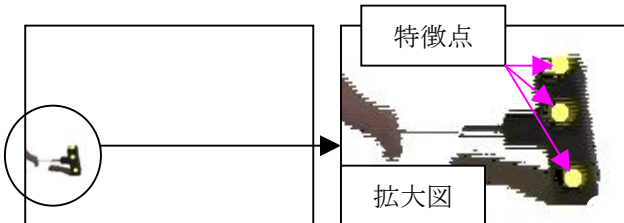
Fig.11に特徴点を特定した結果例を示す. (a)は処理前の画像, (a)に対し背景差分を行った上で二値化処理, 膨張収縮処理, ラベリング処理を行い特徴点の位置を特定した画像が(b)となる.

また, クラスタリング処理を通じて生成された判別マップをFig.12に示す. ここで評価値は色の濃淡で表すこととした. クラス1は不可視部領域における厚い部分, クラス2は可視部領域における厚い部分, クラス3は薄い部分とした. クラスタリングではISODATA法[7]を用いた.

Fig.12で得られた判別マップを用いて, 各点における木板の厚薄を調べた. 木板を7×8点について各点数回ずつ叩き, 各処理により不可視部情報の厚さ(色の値)を決定した. その結果, 各点それぞれの厚薄情報を濃度を用いて提示することができた(Fig.13). Fig.13において下部の点群が可視部領域の薄い部分(薄灰色の点), 上部の点群が可視部領域の厚い部分(灰色の点), 下部の点群のうち中心部にある黒点が不可視部領域の厚い部分をそれぞれ表している.



(a)取得画像



(b)特徴点を特定した画像

Fig.11 特徴点を特定した結果例

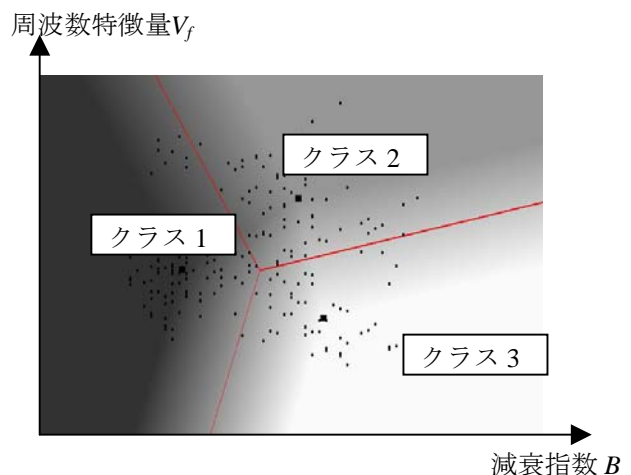


Fig.12 作成した判別マップ

打音点の位置情報については、得られた三次元空間中の点群に対して平面当てはめを行う。これにより各打音点が複数の面上の点としてグループ分けされ、このグループ毎に線形補間法を行う。近傍4点で生成する四角形において、それぞれ縦横 N 分割し N^2 個の四角形を生成する。この N^2 個の四角形を平面状の点とみなして線形補間法をあてはめる。本実験では分割数 N を50とした。以上の処理により Fig.14のような結果が得られた。(a)は線形補間により表面

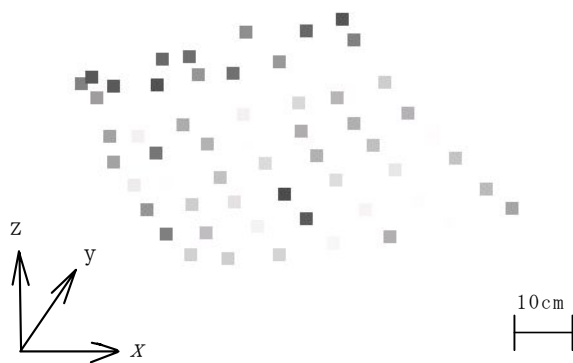
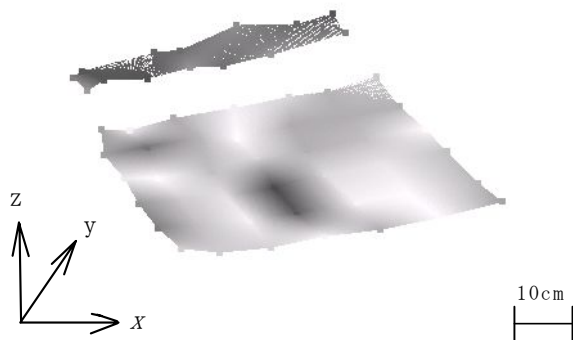


Fig.13 各点の三次元位置と濃淡による厚薄情報 (座標系はワールド座標系)



(a) 提案手法における実験結果

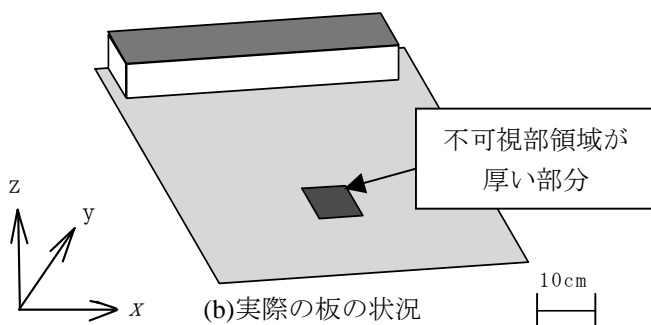


Fig.14 木板全体の厚薄分布について

を形成した様子で(b)は実際の検査対象物体の様子である。

本手法で板の厚薄を推定した結果と、実際の厚薄とを比較するとほぼ同位置であり、良好な結果が得られた。

4. 結言

本論文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について提案した。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を推定した。また画像処理ではハンマーの三次元形状を計測することで打音位置の三次元計測を行った。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。

今後の課題としては、本手法の検査項目を厚薄から材質、欠陥などに拡張し、これらの項目が様々な材質や形状のものに適用できるようにすることが挙げられる。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 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, Vol.35, No.564, pp.169-176 (1997).
- [3] 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, Vol.55, No.704, pp.65-79 (2002).
- [4] T. Hirata, 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).
- [5] 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, Vol.47, No.9, pp.636-641(1998).
- [6] N. Kato, N. Saeki, Y. Tanigawa, K. Kato, T. Kawai, Y. Murata: “Evaluation of Deterioration and Specification of Defect of RC Structure by Natural Potential and External Impact-Acoustic Methods”, Materials Science Research International, Vol.7, No.2, pp.138-146 (2001).
- [7] 田村秀行, “コンピュータ画像処理入門”, 総研出版, pp153-160(1985).