

反響のある実環境における、打撃音による  
ヘルスマニタリング技術の開発に関する研究

山崎 憲 (電気電子工学科)

霜山 竜一 (電気電子工学科)

まえがき

地震による建造物の倒壊やトンネル壁面の崩落事故を防ぐため、建造物の経年変化による損傷や欠陥箇所を診断する信頼性の高い技術の確立が望まれている。欠陥箇所の診断には様々な方法が提案されている<sup>1)</sup>。表面の打撃音から物体内部の状態を推定する検査法(打音法)は、非破壊で比較的簡単に実施できる利点があり、農産物の品質や施工後のコンクリート内部の空洞や亀裂の有無など、多くの検査に用いられている。打音法は、物質定数、形状、境界条件等に拘わらず、比較的良好に物体内部の欠陥の検出が可能であるが、人の聴覚と経験に依存する主観的判断に基づいており、検査に人手と時間を要するうえ、慣れや疲れなどにより検出精度が低下する。打撃音には欠陥に関する情報が含まれており、人は音質の違いを聞き分けて欠陥を検出しているものと考えられる。

筆者らは、人が打撃音の音質の違いを判定するメカニズムを解明し打音検査を機械化することを目的として、木板の裏面に設けた貫通しない孔や張り合わせた木板の内部に設けた人工的な欠陥と、木板表面の複数箇所を打撃した際に生じる音圧分布の関係について調査した。その結果、特定の周波数において欠陥部周辺で音圧分布に顕著な変化の生ずることを報告した<sup>2)3)</sup>。コンクリート壁等の建造物は一般に実環境で検査される。その際、周囲の反射物による反響や周囲の雑音が音圧測定に顕著な影響を与え、音質の違いを判定するうえで重大な障害となる可能性がある。

本報では、反響のある実環境で打撃音の音質を判定する方法を開発するために音源方向の定位について検討した。計測された音圧の位相差値に対して、推定可能な全ての音源方向を求め、得られた音源推定方向の周波数特性から周波数軸に平行な方向(音源方向が周波数に依存しない)をハフ変換<sup>4)</sup>により抽出した。反響のある室内に、それぞれ高

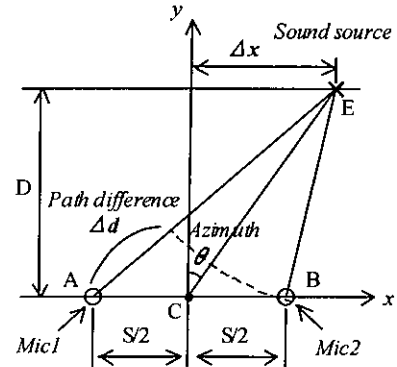


Fig.1 Sound localization model

音域用と低音域用スピーカのみを単独で駆動した2個のスピーカを設置し、両スピーカの水平面内方向を同時に推定した。さらに、録音されたコンクリート壁面の打撃音を再生信号としてスピーカの方向を推定した。いずれの例も高精度で音源の方向が検出可能なことを示す。

定式化

Fig.1 に示すように音源とマイクロホン(Mic1, Mic2)を配置する。2 個のマイクロホンで計測される直接音の行路差と位相差をそれぞれ  $\Delta d$ 、 $\Delta \phi$  とおくと

$$\Delta \phi = \frac{\Delta d}{c} f \times 360 \text{ (deg.)} \quad (1)$$

となる。ただし  $c$  は音速、 $f$  は周波数である。一般的に位相差は多義性と云われる性質を有する。

$$\Delta \phi = \Delta \phi + 360n \quad (2)$$

ただし  $n$  は整数である。式(2)を式(1)に代入して変形すれば

$$\Delta d = \frac{c(\Delta \phi + 360n)}{360f} \quad (3)$$

を得る。式(3)は、一つの位相差値について行路差

$\Delta d$ , つまり音の方向が整数  $n$  の値に応じて複数想定されるため, 位相差から音源方向を求めると定位が曖昧になることを意味する。

式(4)の *error* を数値的に最小化する  $\Delta x$  を用いて, 式(5)から音源方向  $\theta$  が求められる。

$$\text{error} = \left| \Delta d - \overline{AE} + \overline{BE} \right| \quad (4)$$

$$\theta = \frac{360}{2\pi} \arctan\left(\frac{\Delta x}{D}\right) \quad (5)$$

各音源方向における距離  $D$  に対する行路差の依存性を Fig.2 に示す。距離  $D$  がマイクロホン間隔  $S$  と比べて十分遠ければ行路差と音源方向はほぼ一対一で対応することが分かる。音源とマイクロホン間の距離  $D$  は一般に未知数であるが, 式(5)の  $D$  には  $D \gg S$  (マイクロホン間隔  $S$ ) である任意の値を代入すればよい。

### 推定アルゴリズム

Fig.3 に方向推定のためのアルゴリズムを示す。2CH の音響信号の時間平均されたクロススペクトルを求める。式(3)において, 周波数  $f$  で計測された位相差  $\Delta\phi$  について, 整数  $n$  ( $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) に対する推定可能な全ての行路差  $\Delta d_n$  を算出し, 行路差に対応する音源方向  $\theta_n$  を式(4), (5)から求める。計測された全ての位相差値に対して上記処理を行い, 推定音源方向に関する周波数特性を求める。

次に推定音源方向の周波数特性から周波数軸に平行な方向(音源方向が周波数に依存しない)を以下のハフ変換<sup>3)</sup>により抽出する。1個の2次元データ  $(X_i, Y_i)$  ( $i=1, 2, \dots, l$ ) に対して式(6)の変換を施す。

$$c = -X_i m + Y_i \quad (6)$$

この場合,  $X_i$  は周波数,  $Y_i$  は推定音源方向に対応する。 $m=0$  で  $c$  について累積度数を調べ, 度数値の比較的大きくなる音源方向を求める。

### 結果

#### a) 反響のある室内における音の方向推定

室内の中央に, それぞれ高音域用と低音域用スピーカからなる2個のスピーカを設置し, 両スピーカから放射される音の水平面内方向を同時に推定した。2個のスピーカはマイクロホン対( $S=20\text{cm}$ )から

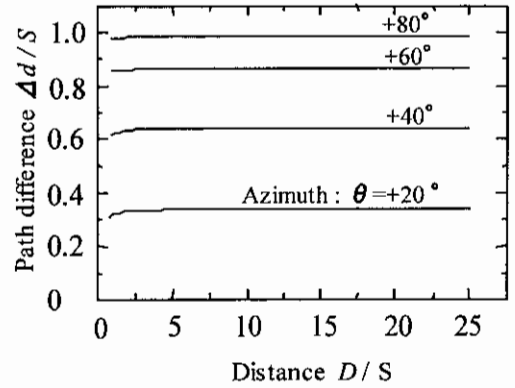


Fig.2 Path difference dependency on the distance between source and sensors

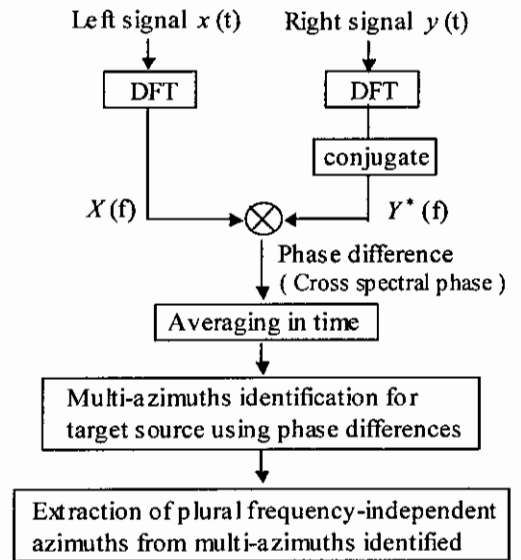


Fig.3 Algorithm for sound localization

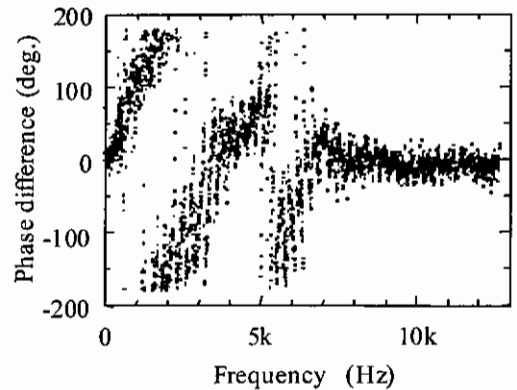
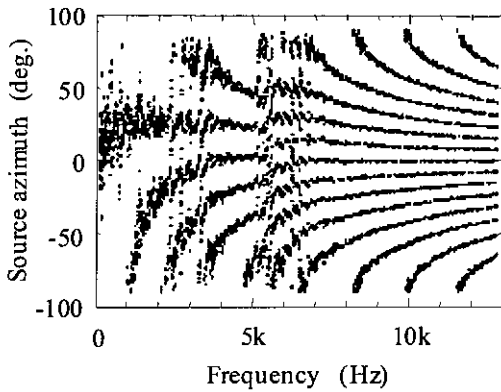
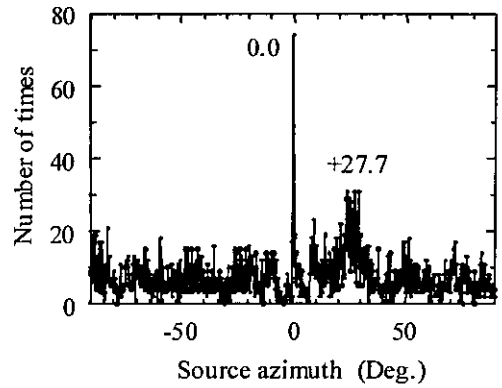


Fig.4 Measured phase difference spectrum of white noise from two speakers



**Fig.5 Multi-azimuths spectra identified for two speakers**



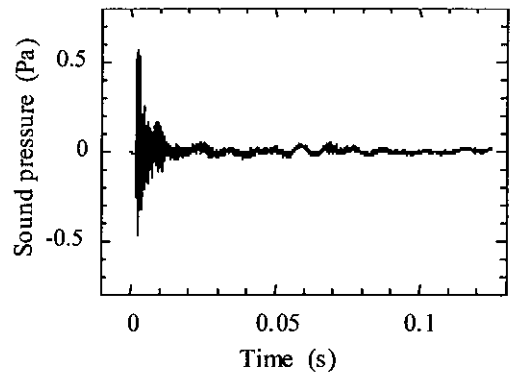
**Fig.6 Number of times distribution for two speakers(True azimuths : 0°, +27° )**

1m(=D)離れた位置に設置した。高音域用スピーカは0°方向、低音域用スピーカは+27°方向にある。壁面にはコンクリートが露出しているため室内の反響は大きい。1フレーム500msのハンギング窓を用い、オーバーラップ75%で連続的に計測された10回分を平均してクロススペクトルを求めた。再生信号にホワイトノイズを用いて計測された位相差スペクトルをFig.4に示す。データの密に集まった部分が線状に分布する様子が分かる。位相差スペクトルの傾きは約5kHzを境に急変している。計測された位相差から推定可能な音源方向の周波数特性を±90°の範囲でFig.5に示す。推定音源方向の周波数特性は、真の音源では方向が変わらないため周波数軸に平行となり、仮想的音源の方向は周波数軸に対し傾く。周波数特性は約5kHz以下では約+30°方向、約7kHz以上では約0°方向で周波数軸に対してほぼ平行である。推定音源方向は4kHz以下で周波数が低いほど、反射音の影響と考えられるばらつきが見られる。推定音源方向の度数分布をFig.6に示す。推定方向の度数分布は0.0°と+27.7°方向にピークがある。度数分布の各ピークの方法は、低音域用スピーカの方法と約+0.7°の誤差があり、高音域用スピーカとはほぼ正確に一致している。高音域では、音の伝播に伴う減衰が大きく反射音による影響を受けにくいいため、正確な方向推定が可能になるものと考えられる。

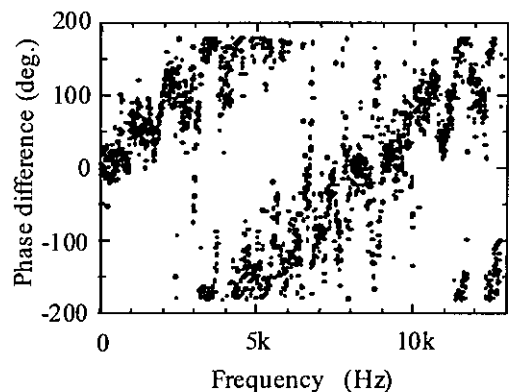
**b) 打撃音の方向推定**

打撃音のような継続時間の短い音の方向推定について検討した。打音検査では通常、数回打撃を繰り返した後に良否の判定されることが多い。そこでコンクリート壁面をハンマーで繰り返

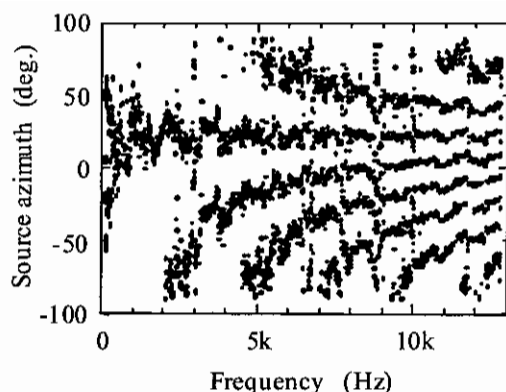
し打撃した際に発生する音を、壁面から1m離れた位置で測定しテープレコーダに録音した。底面に反射板を有する無響箱内で、2WAYバスレフ型スピーカから打撃音を再生し、スピーカの水平面内方向を推定した。スピーカはマイクロホン対(S=10cm)から距離66cm(=D)離れた位置に設置



**Fig.7 A time response of tapping sound on concrete wall**



**Fig.8 Measured phase difference spectrum of tapping sound on concrete wall**



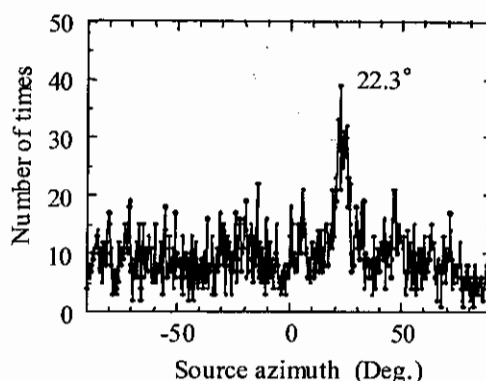
**Fig.9 Multi-azimuths spectra identified for tapping sound**

した。信号の立ち上がりでトリガをかけ、1フレーム 128ms のハニング窓を用いて計測された 5 回分のデータを平均してクロススペクトルを求めた。打撃音の時間波形と、対応する位相差スペクトルを Fig.7, Fig.8 に示す。時間波形は約 20ms でほぼ減衰している。位相差スペクトルは Fig.4 と同様にデータの密に集まった部分が線状に分布する様子が分かる。計測された位相差から推定可能な音源方向を Fig.9 に  $\pm 90^\circ$  の範囲で示す。推定される音源方向の周波数特性は、スピーカの方向である約  $+25^\circ$  方向で周波数軸に対してほぼ平行である。推定音源方向の度数分布を Fig.10 に示す。推定方向の度数分布は  $+22.3^\circ$  方向にピークがある。度数分布に見られるピーク  $+22.3^\circ$  方向はスピーカの方向と約  $-1.7^\circ$  の誤差がある。本アルゴリズムでは打撃音のような継続時間の短い音でも音源の方向が比較的高精度に推定可能なことが分かる。

#### おわりに

計測された音圧の位相差値に対して、推定可能な全ての音源方向を求め、得られた音源推定方向の周波数特性から周波数軸に平行な方向(音源方向が周波数に依存しない)をハフ変換により抽出した。反響のある室内に 2WAY バスレフ型スピーカの、それぞれ高音域用、低音域用スピーカのみを単独で駆動した2個のスピーカを設置し、両スピーカの水平面内方向を同時に推定した。さらに、録音されたコンクリート壁面の打撃音を再生信号としてスピーカの方向を推定した。

その結果、次のような結論が得られた。



**Fig.10 Number of times distribution for tapping sound (True azimuth :  $+24^\circ$  )**

- (1) 推定音源方向の周波数特性は、真の音源では周波数軸に平行となり、仮想的音源の方向は周波数軸に対し傾く
- (2) 推定音源方向の周波数特性から周波数軸に平行な方向を抽出することによって、反響のある室内でも2個のスピーカの方向が同時に推定できる(誤差  $2^\circ$  程度)
- (3) 打撃音のような継続時間の短い音でも比較的高精度に音源の方向が推定可能

今後は、本アルゴリズムを2次元に拡張し、反響のある実環境において打撃箇所近傍から放射される音のみを選択的に抽出し音質評価を行う検査システムを構築する予定である。

#### 参考文献

- 1) 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 (2001) 668-674
- 2) R.Shimoyama and K.Yamazaki「Nondestructive acoustic detection of material discontinuities by hammering on the surface」Proc., 7<sup>th</sup> WESTPRAC, (2000) 349-352
- 3) R.Shimoyama and K.Yamazaki「The acoustic location detection of the defects in in-homogeneous material by tapping on the surface」Proc. 17<sup>th</sup> Int. Cong. Acoust., Vol.II, Measurement methods of acoustic properties of materials, (2001) 38-39
- 4) 安居院、中嶋「画像情報処理」森北出版、(2000) 115-119