

# 複数の指向性マイクロホンを用いた音源方向の推定に関する基礎的検討

日大生産工(院) 渡邊 尚樹  
日大生産工 山崎 憲

## 1. はじめに

近年、家電製品やオフィス機器、建設機械などから発生する騒音に関心が高まっており、我々の生活環境において不快な音環境の改善を図るためには騒音源の特定が必要となっている<sup>1)</sup>。また音源位置の推定は騒音源に限らず、音源の対象を人や動物に代えた場合は対象物の追跡や異常検出、車に対象を代えた場合は道路交通の無人監視システムなど、測定の対象物を代えることで無人システムの幅広い利用が可能となることが考えられる。これらの音源位置推定の方法として音響インテンシティ測定法による測定が広く用いられている。

従来の音響インテンシティ測定システムは測定の原理上、次のような問題点が挙げられる<sup>2) 3)</sup>。

音圧と粒子速度の積は、単位面積当たりのパワーに等しいため、距離による減衰が大きい。マイクロホン間位相が測定のバイアス誤差となり、測定可能な下限周波数が制限される。マイクロホン間距離によって、測定可能な上限周波数が制限される。

精密なシステムなため、インテンシティプロブのシステム自体が非常に高価である。

これらの問題点が解決できれば、より実用的になりさらに広い範囲での利用が可能となることが考えられる。

そこで今回、マイクロホン間隔や位相差などによらず音源方向を推定するため、羽入らによって新たに提案された、マイクの指向特性によって音源方向の推定が可能な二乗音圧差分法による測

定法<sup>4)</sup>を用いて、基礎的検討を行った。

## 2. 原理

### 2.1 二乗音圧差分による測定法

現在主流となっているインテンシティ測定には、無指向性マイクロホンを用いており、以下のような定義式に基づいて測定される。

$$I = pv \quad \dots (1)$$

$p$  は音圧、 $v$  は空気の振動によって移動する粒子速度である。粒子速度はマイク間隔と音圧の勾配から求められるため、マイク間距離や位相差による影響が大きい。本実験では、このような原理的に生じる問題点を解決するため、単一指向性マイクロホンを 180 度反対向きに組み合わせ、マイク間の指向特性の違いを利用して方向情報を得る、二乗音圧差分による測定を行う。以下にその測定法について述べる。

簡単化のため、まずは 1 次元音場(x 軸)で考える。x 軸の進行方向と後退方向に音波が伝搬しているとした場合、1 次元平面波による干渉音場における瞬時音圧  $p$  と瞬時粒子速度  $v$  の関係は、次式のように表される。

$$v^+ = p^+ / (\rho c) \quad v^- = -p^- / (\rho c) \quad \dots (2)$$

$$v = v^+ + v^- \quad \dots (3)$$

$$p = p^+ + p^- \quad \dots (4)$$

ただし、肩付きの記号は x 軸についてプラスは進行方向、マイナスは後退方向に伝搬する成分を表す。これらの式を(1)式に代入すると瞬時音響インテンシティが(5)式のように導くことができる<sup>2)</sup>。

$$\begin{aligned}
 I(t) &= (p^+ + p^-)(v^+ + v^-) \\
 &= (p^+ + p^-)(p^+ - p^-)/(\rho c) \\
 &= [(p^+)^2 - (p^-)^2]/(\rho c) \quad \dots (5)
 \end{aligned}$$

このように音圧そのものはスカラー量であるが、伝搬方向の二乗音圧差分が分かれば粒子速度を測定することなくインテンシティが測定でき、方向の推定も可能となる。この(5)式は1次元で考えた場合であるが、3次元に拡張するためには、x、y、z軸についてそれぞれの独立成分を測定すればよい。それぞれの独立成分を求めるには直交成分に分解することが必要となるため、ここで単一指向性マイクロホンの直交成分の分解について以下に説明する。

## 2.2 単一指向性マイクロホンの直交成分分解

単一指向性マイクロホンは図1のように無指向性マイクロホンと双指向性マイクロホンを組み合わせたものであるため、音圧振幅の次元で指向特性  $m(\theta)$  は  $m(\theta) = A + B \cos \theta$  のように表すことができる<sup>5)</sup>。このマイクロホンを0度と180度の180度反対向きにおいた場合の二乗音圧の次元における感度差は、

$$\begin{aligned}
 m^2(\theta) - m^2(\theta - \pi) &= (A + B \cos \theta)^2 - (A - B \cos \theta)^2 \\
 &= 4AB \cos \theta \quad \dots (6)
 \end{aligned}$$

と表すことができる。同様に90度 270度においては、

$$\begin{aligned}
 m^2(\theta - \pi/2) - m^2(\theta - 3\pi/4) &= 4AB \sin \theta \quad \dots (7)
 \end{aligned}$$

cos関数とsin関数は互いに直交関係になることから、90度ずらした反対向きのマイク間の感度差を求めることは、直交成分に分解することと等しくなる。

以上のように90度ずらした反対向きのマイク間の感度差を求めることで、直交成分に分解することができるため、二乗音圧の差分はそのまま独立成分となる<sup>4)</sup>。

## 2.3 複数音源の音源方向推定

本実験の測定には複数の単一指向性マイクロホンを用いてマイク間の指向特性の情報に基づき測定したため、複数の音源が互いに干渉し合っていないければ、音源ごとに違った音圧変動がみられる。このことを利用することで、複数の音源がある場合でもそれぞれの音圧を測定すると、音源方向の推定が可能となる。

## 3. マイクロホンのシステム及び実験方法

### 3.1 マイクロホンのシステム

音源方向を推定するためのマイクロホンシステムとして、2次元直交座標軸の中心に単一指向性マイクロホンを向かい合わせた、図2のような簡易的なマイクロホンシステムを用いた。また、対向させたマイク間隔はそれぞれ3cmとした。

### 3.2 実験方法

#### 3.2.1 1音源の場合の音源方向推定

測定は周囲からの影響をできる限り少なくするために無響室を使用した。音波は発振器から正弦波信号を増幅器により増幅させ、音源へ供給して発生させた。音源には開口部1.8cmのドライバユニットを使用し、マイクロホンシステムの中心との距離を図3のように0.5mとした。

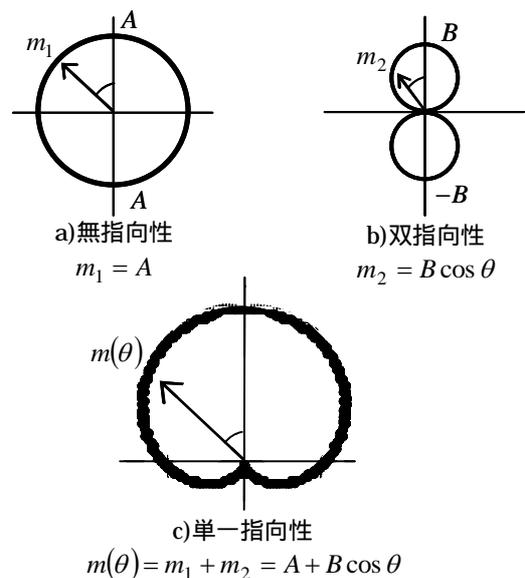


図1 単一指向性マイクロホンの指向特性

音源を水平方向に 10 度ずつ回転させ、36 方向について各  $c/h$  の周波数ごとのエネルギーを求め、(5)式に基づく二乗音圧差分による方法を用いて音源方向を推定した。また、測定では周波数、音圧レベルを変化させ、それぞれの場合の推定角度を求め、検討を行った。

### 3.2.1 2 音源の場合の音源方向推定

2 音源の場合の音源方向の推定として、1 つの音源を固定し、もう 1 方の音源の角度を変化させて音源方向の推定を行った。図 4 のように水平方向 0 度方向に固定音源を設置し、移動音源は 30 度から 330 度まで 15 度ずつ回転させ、20 方向について測定を行った。また、固定音源の周波数は 1kHz、移動音源の周波数は 2kHz とし、マイクロホンシステムとの距離はそれぞれ 0.5m とした。

## 4. 実験結果

### 4.1 マイクロホンシステムの指向特性

図 5 にマイクロホンの指向特性の例を示す。指向性マイクロホンを向かい合わせ、図のような指向特性の違いから各軸の成分を分解する。

### 4.2 1 音源の場合の音源方向の推定

図 6 に音源が 1 つの場合の周波数に対する測定誤差を示す。この測定誤差は、各周波数において 36 方向の測定を行い、それぞれの測定誤差の平均値をとったものである。この結果より 4kHz までの測定では平均誤差が 5 度以内と音源方向の推定がほぼできていることが考えられる。しかし 5kHz になると平均誤差が 6 度以上となり 5kHz 以下の周波数と比較すると多少大きくなった。また、音圧レベルを 40、50、60dB と変化させた場合にもあまり変化がなかったことから、音の大きさによる違いが見られず、小さな音に対しても測定が可能であることが考えられる。

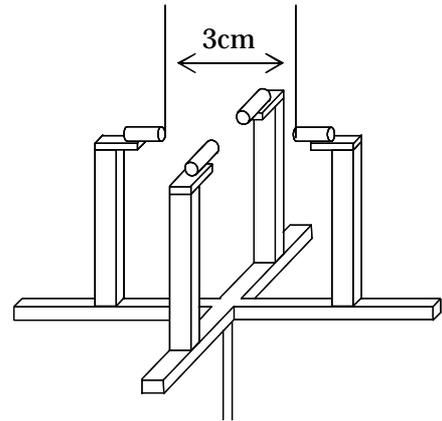


図 2 マイクロホンシステム構成図

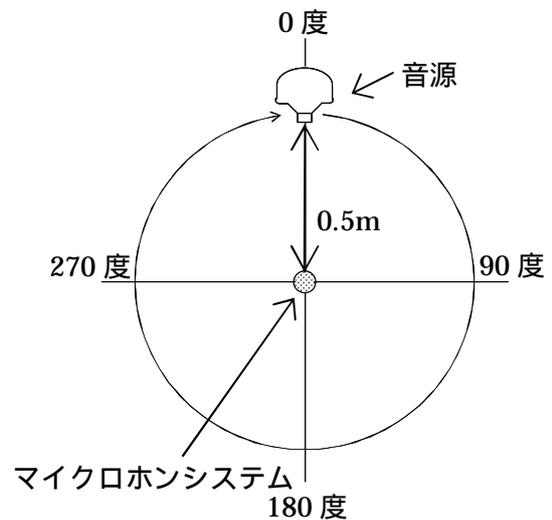


図 3 1 音源の場合の測定図

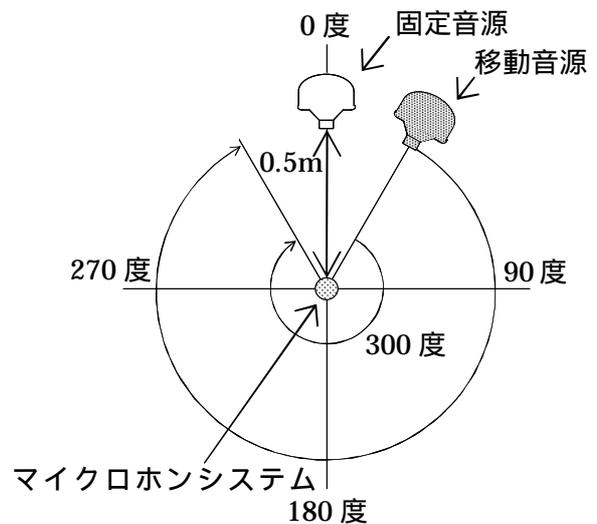


図 4 2 音源の場合の測定図

#### 4.2 2音源の場合の音源方向の推定

図7に音源が2つの場合の音源の設置角度に対する推定角度を示す。この図より、固定音源と移動音源とが互いに干渉していない場合、2つの音源方向の推定が可能であることが分かった。また、この結果より音源が複数になった場合でも同様のことが考えられる。

#### 5. まとめ

今回は、粒子速度を求めずに音源方向の推定を行うため、マイクの指向特性の差によって測定を行う二乗音圧差分法を用いた音源方向の推定を検討した。

結果より、音源が1つの場合、音源方向の推定は平均誤差5度前後での測定が可能であり、音圧レベルの変化による影響もあまりないことが分かった。また、音源を2つとした場合においても、それぞれの音源からの音が干渉し合わなければ音源の分離、方向の推定が可能であることが分かった。

今後は、音源方向に加え、音源までの距離の推定を検討し、音源同定を行うことを検討していく。

#### 参考文献

- 1) 吉住夏輝、中村健太郎、上羽貞行「手持ちマイクロホンによる音場可視化システム」 日本音響学会誌 62巻3号、pp.282-289(2006)
- 2) F.J.Fahy[著]、橘秀樹[訳] 「サウンドインテンシティ:理論と応用」 オーム社 (1998)
- 3) 「音響インテンシティ」 Bruel & kjaer
- 4) 羽入敏樹、星和磨、関口克明 「音場の方向情報のフーリエ級数展開に基づくインテンシティ計測法」 日本音響学会講演論文集 pp.721-722(2006)
- 5) 伊藤毅 「音響工学原論 下巻」 コロナ社 pp.490-491(1978)

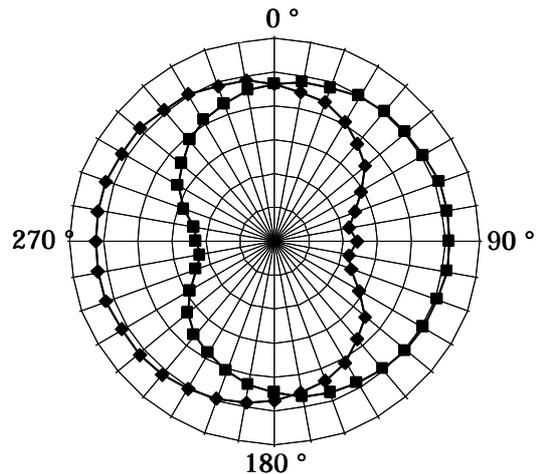


図5 マイクロホンの指向特性例(0.5kHz)

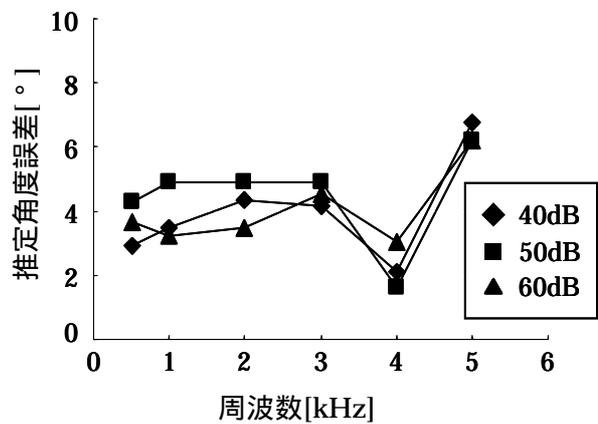


図6 周波数に対する推定角度誤差

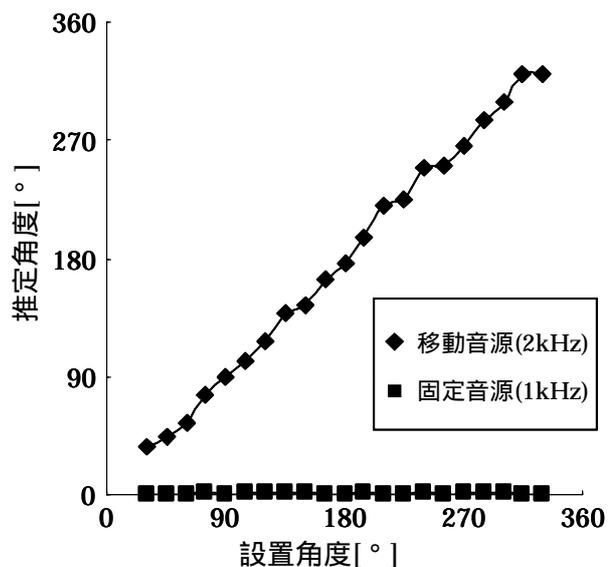


図7 2音源の場合の設置角度に対する推定角度[°]