

## マイクロホンプローブの実効受音位置\*

雄本信哉\*<sup>1</sup> 鈴木英男\*<sup>2</sup> 金光陽一\*<sup>1</sup> 松田浩一\*<sup>1</sup>

**【要旨】** 本論文ではマイクロホンプローブ自身が音場に与える影響について境界要素法を用いて解析している。マイクロホンプローブのモデルとした円筒の周りの音場を解析し、受音面に作用する平均音圧の位相を波数で除した値である「実効受音位置」 $S_p$ が、周波数、入射角度によってどのように変化するかを計算している。その結果、実効受音位置は低周波数ではほぼ一定の値をとり、その値は入射角度の余弦に比例することなどを明らかにしている。更に、反射波が存在する音場については、平均音圧の絶対値に基づく「実効受音位置」 $S_m$ を新たに定義し、位相に基づく「実効受音位置」 $S_p$ との関係を明らかにしている。

**キーワード** 音場解析, 境界要素法, マイクロホンプローブ, 実効受音位置

Sound field analysis, Boundary element method, Microphone probe, Equivalent sensing position

### 1. 緒 論

音場の精密な測定用として用いられるマイクロホンは小型で高性能であることが要求され、その直径が1/2インチ、1/4インチといったものが多い。このように小型のマイクロホンではあるが、一般的に測定時には、同一直径のプリアンプの先端に結合した形で用いられることが多く、直径が1/2インチの場合で全体の軸方向の長さは少なくとも数十mm程度になる(なお、厳密には、マイクロホン及びプリアンプは区別して呼称すべきであるが、本論文においては両者を常に一体として解析するため、あえて区別せず、その呼称として以下「マイクロホンプローブ」もしくは単に「プローブ」を用いることとする)。音場を測定するために、たとえそれが小型であるとはいえ、本来存在しなかったマイクロホンプローブを挿入することは、音場に対して何等かの影響(乱れ)を与える。マイクロホンプローブによって測定される結果はマイクロホンプローブそのものの影響を含めた形でのみ得られるものであり、厳密に言えば、測定者が本来必要としている(マイクロホンプローブが存在しない)音場の情報とは異なり、必然的に誤差を含んだものとなる。その誤差のために、測定結果は測定者が本来必要な位置における音場の情報ではなく、異なる位置の情

報であることが考えられる。

本論文ではこのようなマイクロホンプローブの音場に与える影響を3次元境界要素法を用いて解析し、その影響がどの程度であるかを「実効受音位置」という指標により明らかにすることを目的としている。この「実効受音位置」を明らかにすることで、以下に示すような問題に対して、従来より誤差の少ない解析が可能となることが期待できる。

1 **相互校正法** 相互校正法によりマイクロホンの感度の校正を行う際、通常は小容量の容器を用いるが、自由音場内で感度校正を行うことも検討されており、この場合、音源と受音点の距離を正確に知る必要がある。

2 **音響管による音響インピーダンス測定** ISO-10534-1及びISO-10534-2で規定された二つの方法のうち、後者の方法(定在波法)では、音響管の中で、マイクロホンを移動し、音圧が極小となる位置から、試料の音響インピーダンスを算出する。この場合、音圧の極小位置を正確に測定することが必要である。

著者らは、すでに二つのマイクロホンを対向して用いる音響インテンシティ測定用のマイクロホンプローブを対象として受音面に働く力の周波数応答及びプローブ周りの音圧分布に関して実験及び解析を行っており[1,2]、同様の解析は、寺尾ら[3,4]によっても行われているが、本論文では一般的な音場の音圧測定用の単一のマイクロホンプローブを対象として境界要素法による解析を行う。

### 2. 境界要素法による解析

円筒による平面音波の回折問題に対して境界要素法

\* Equivalent sensing position of a microphone probe, by Shinya Kijimoto, Hideo Suzukj, Yoichi Kanemitsu and Koichi Matsuda.

\*<sup>1</sup> 九州大学大学院工学研究院

\*<sup>2</sup> 千葉工業大学情報ネットワーク学科

(問合先: 雄本信哉 e-mail: kiji@mech.kyushu-u.ac.jp)

(2000年11月9日受付, 2001年4月25日採録決定)

による解析の精度が十分であることは、すでに行った著者らの実験結果と解析結果の比較[1,2]により確認されているので、本論文においても解析手法として境界要素法を用いる。

本論文ではマイクロホンプローブのモデルとして直径1/2インチ (=12.7 mm)、軸方向長さ100 mmの円筒を対象とする。境界要素解析にはこの円筒を円周方向に20分割、軸方向に30分割した、682 節点、760 要素のモデル (モデル A) を用いる。円筒の底面は3 角形、側面は4 角形の線形要素でそれぞれ分割する。Fig.1 にモデル A の境界要素分割を示す。音場の回折を解析するために、本論文では、「音場合成法」を用いる。「音場合成法」は剛な表面を持つ物体による回折現象の解析に適した方法で、次のように、四つのステップで行われる。

1. 音場内に物体の境界表面を仮想的に想定し、(仮想)境界面上の各節点における、粒子速度を計算する。
2. 粒子速度の境界法線方向成分を求め、更にその符号を反転させる。
3. 物体表面の節点に2.で求めた粒子速度を境界条件として与え、境界要素法によって音場を計算する。
4. 元の音場と3.で求めた音場を合成する。

上記の手順を踏むことで、物体表面ではその法線方向の粒子速度が結果的に常に0となるため、剛表面の境界条件を満足する。

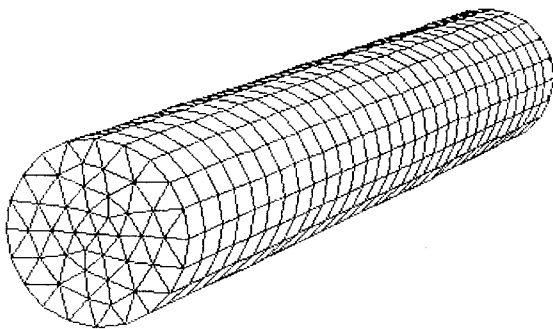


Fig.1 境界要素分割 (モデル A)

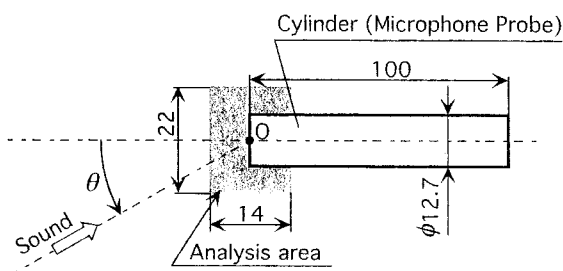


Fig.2 解析空間

以下の解析では、マイクロホンプローブモデル (円筒) の底面の一つを受音面と定義し、解析対象周波数は可聴周波数帯域 (20 Hz-20 kHz) の7周波数 (20, 100, 1 k, 4 k, 10 k, 16 k, 20 kHz) とする。また、Fig. 2 に示すように、音の入射角度  $\theta$  として受音面の正面入射に当たる0度のほか30度、60度、90度及び180度の場合についても解析し、入射角度の影響についても検討する。

更に、0度及び180度で対向して入射する二つの進行波によって形成される音場に対する影響についても解析を行う。

なお、本論文では、簡単のため、受音面を含め円筒表面のすべてを剛表面と仮定して解析を行っている。

### 3. 解析結果

#### 3.1 位相分布

まずマイクロホンプローブを挿入することで音場がどの程度影響を受けるかを知るために、プローブ付近の音圧の位相の分布を計算する。位相は次式に示すように波数  $k$  で正規化する。

$$(\phi - \phi_0)/k \tag{1}$$

ただし、 $\phi$  はプローブ周りの音圧の位相、 $\phi_0$  はプローブがない場合の点Oの位置の音圧の位相である。正面入射 (0度) の場合について式(1)によって正規化した音圧の位相の分布 (コンタ図) を Fig.3 に示す。この正規化の結果は距離の次元を持つ量となり、これは、プローブを音場に挿入することにより生ずる音場の位相の乱れが、距離に換算するとどの程度であるかを表す値となっている。

Fig.3 の各小図はそれぞれの図の上部に記した周波数における分布を示しており、図中の数字の単位は mm である。各図で表示した範囲は、Fig.2 で影を付けて表した解析範囲に相当し、プローブの軸方向に14 mm、直交する方向に12 mm である。図中黒丸で示した点が、受音面の中心点Oであり、各図の右上の矩形はプローブの前方部分を表している。図中0 mmの曲線は、プローブがない場合に、点Oを通る曲線 (実際には、プローブがない場合は直線) であり、本来測定しようとしている位置、すなわち、(仮想) 受音面位置に相当すると考えられる。

このことから、Fig.3 より、4 kHz 程度までの低周波数域では、プローブで測定される情報は、プローブが実際に存在する位置の本来の情報より、若干位相が進んだ情報であることが分かる。また、周波数が4 kHz から高くなるにつれて、0 mmを示す曲線がプローブ後方から前方へ向かって受音面に近づいていることから、このずれは、周波数が高くなるにつれて小さ

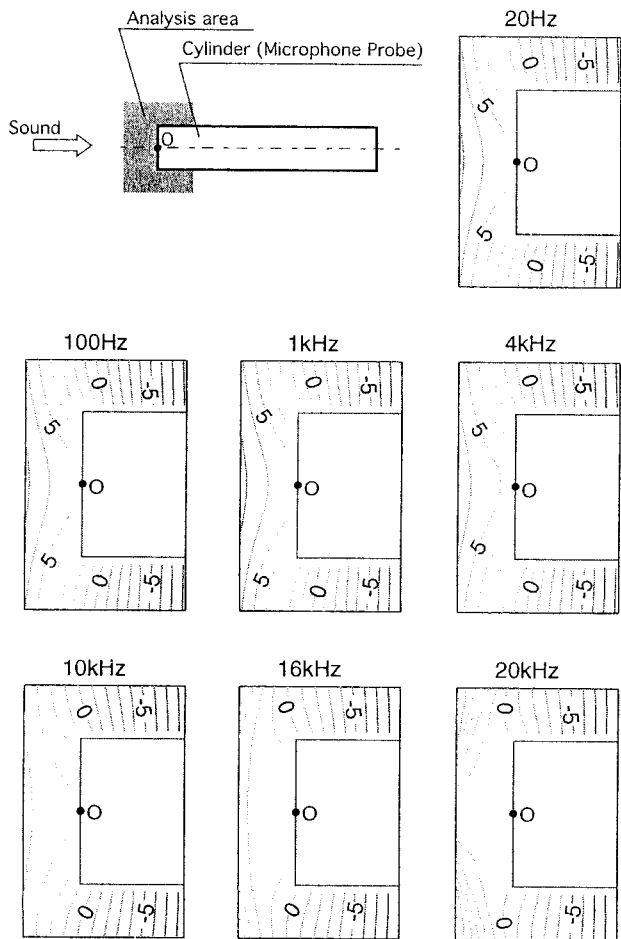


Fig. 3 位相分布

くなることも分かる。

3.2 実効受音位置

次に、実際に測定される音圧が、元の音圧に対してどの程度ずれているかを知るために、受音面に作用する平均音圧に着目する。実際のプローブでは、音圧を受けた受音面が変形し、受音面と背極板との間の容量が微量変化する。プローブの出力は、この微小容量の変化に比例するため、正確には、受音面の変形を考慮する必要があるが、本論文では、簡単のため、受音面に作用する平均音圧が、出力に比例すると仮定して解析を行う。

境界要素法によって得られた受音面上の各節点の音圧と、各境界要素の面積の積を受音面全体にわたって足し合わせて受音面に働く力を求め、これを受音面の面積で除して平均音圧とする。得られた平均音圧の位相を式(1)と同様に、プローブがないときの基準値  $\phi_0$  及び波数  $k$  によって正規化する。本論文では、この正規化の結果が距離の次元を持ち、実効的な受音面位置の情報を与えることから、これを実効受音位置 ( $S_p$ ) と表記する。下付きの p は、この実効受音位置が位相 (phase) をもとに計算されることを表してい

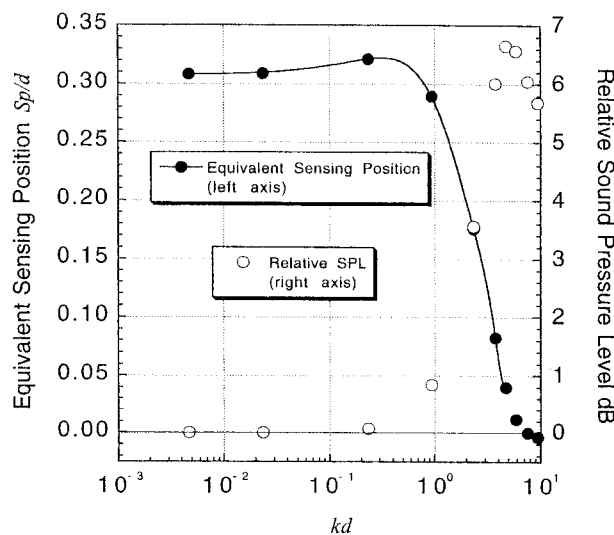


Fig. 4 実効受音位置

る。実効受音位置  $S_p$  は以下の式で表される。

$$S_p = (\phi_p - \phi_0) / k \tag{2}$$

ここで、 $\phi_p$  は受音面に作用する平均音圧の位相である。

Fig. 4 に実効受音位置の周波数特性を示す。ここで、実効受音位置は、プローブの直径のみに依存し、軸方向長さには影響されないと仮定し、Fig. 4 では、実効受音位置 (縦軸) は  $S_p/d$ 、周波数 (横軸) は  $kd$  ( $k$  は波数) と、いずれもプローブの直径  $d$  (単位 m) で無次元化して表示している。

Fig. 4 から低周波数域では実効受音位置はほぼ一定の値 0.3 (直径  $d=12.7$  mm のプローブに対して約 3.9 mm) をとっているが、高周波数域では実効受音位置が周波数が高くなると共に次第に小さくなり、0 付近に収束していることが分かる。ただし、Fig. 4 の結果のうち高周波数側の 3 周波数点 ( $d=12.7$  mm のときの、25 kHz, 32 kHz, 40 kHz) の解析については Fig. 1 のモデル A では解析精度が不十分であることが予想されるため、更に細かい分割の解析モデル B (1,330 節点, 1,456 要素) を用いている。Fig. 4 に示した曲線は、解析結果を  $0.001 < kd < 4$  の範囲で 5 次

$$\frac{S_p}{d} = a_0 + a_1 kd + a_2 (kd)^2 + a_3 (kd)^3 + a_4 (kd)^4 + a_5 (kd)^5 \tag{3}$$

によって最小 2 乗近似したものである。式(3)の係数  $a_0 \sim a_5$  を Table 1 に示す。Fig. 4 では、実効受音位置 (左縦軸) と共に、受音面に働く力を受音面の面積で除した平均音圧についても、右側の縦軸で示している。音圧は、平面進行波の音圧を基準とした相対音圧で示しており、低周波数域においては、ほぼ基準音圧

に等しく、高周波数域で音圧が上昇することが確認できる。この結果は、文献[5]の回折係数とその傾向がほぼ一致しており、妥当なものであることが分かる。

3.3 入射角度の影響

実効受信位置が入射角度によってどのように変化するかを調べるために、入射角度  $\theta$  が 30 度、60 度、90 度及び 180 度の場合について解析を行った。

Fig.5~Fig.8 は Fig.3 と同様に音圧位相の分布を正規化してコンタ図に表現したもので、入射角度  $\theta$  が 30 度、60 度、90 度、180 度の結果である。これらの図より 4 kHz 以下の低周波数域では、波面は音の進行方向に対してほぼ直角であるため、低周波数域では実効受信位置が入射角度の余弦に比例することが予想される。

**Table 1** 近似式の係数  $\times 10^{-3}$

$a_0$	307.64
$a_1$	102.16
$a_2$	-205.93
$a_3$	100.15
$a_4$	-21.520
$a_5$	1.7024

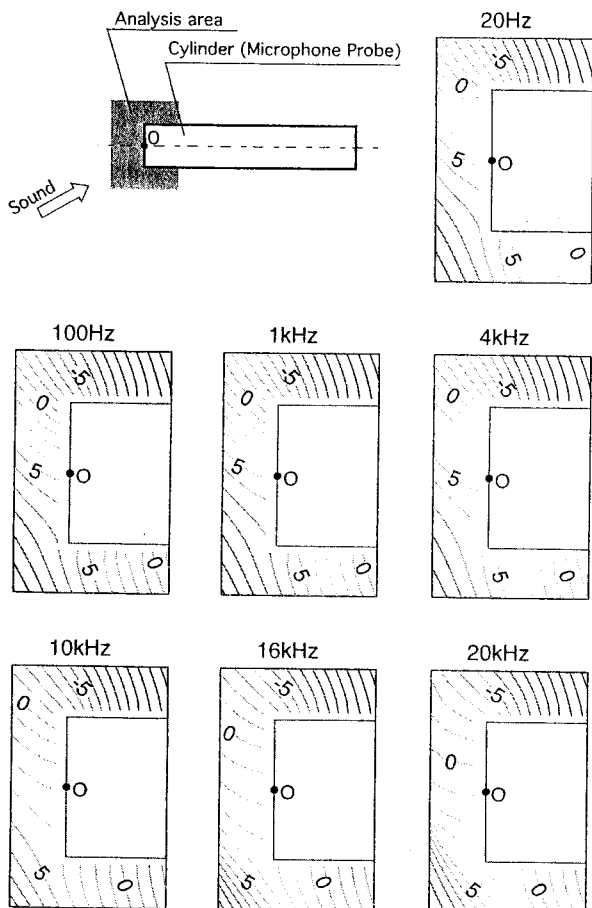


Fig. 5 位相分布 (入射角度 30 度)

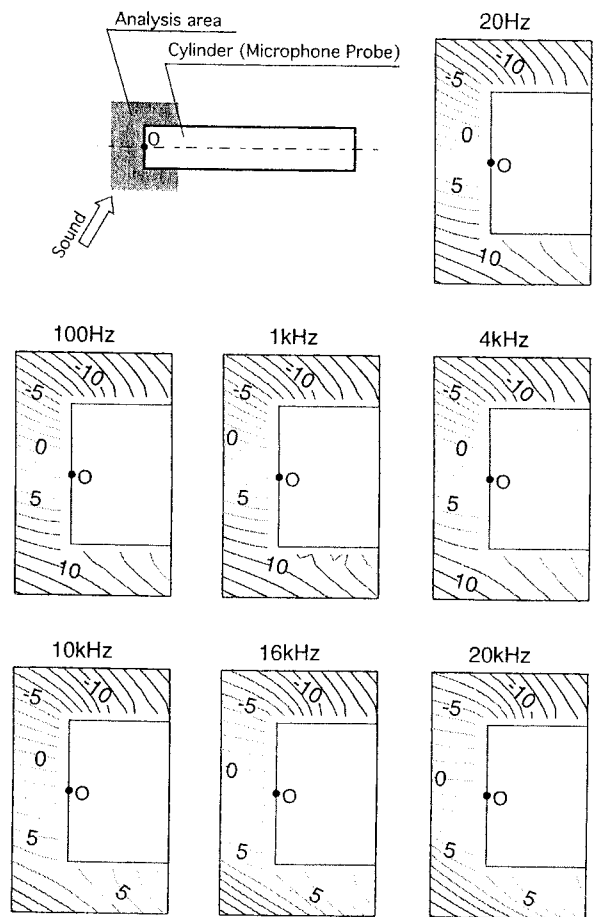


Fig. 6 位相分布 (入射角度 60 度)

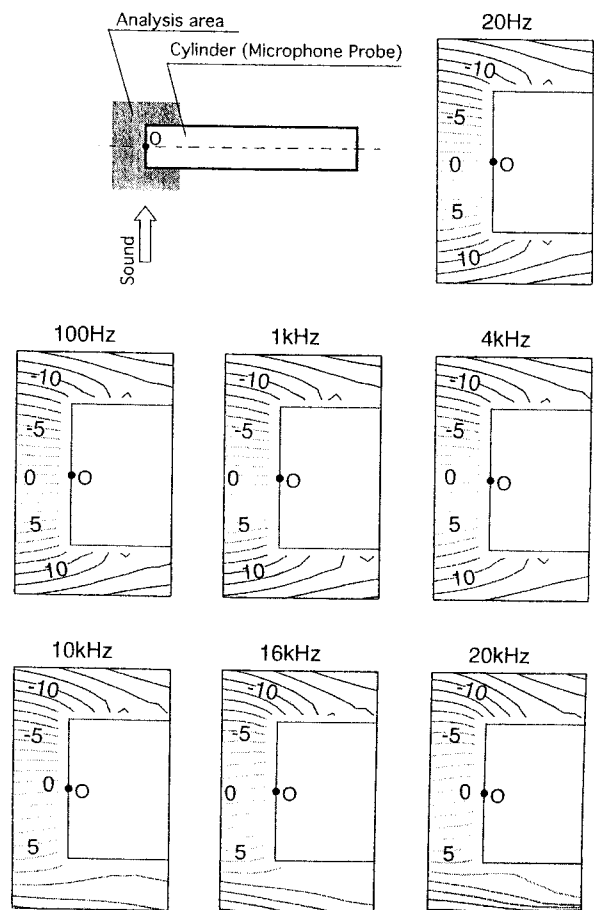


Fig. 7 位相分布 (入射角度 90 度)

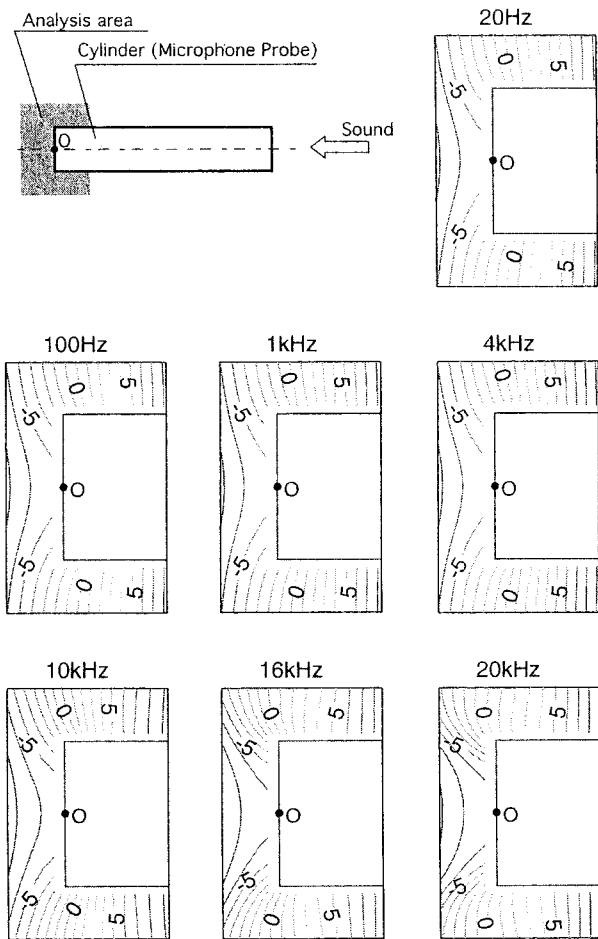


Fig. 8 位相分布 (入射角度 180 度)

入射, 90 度入射, 180 度入射の解析結果である。また, 図中の実線は式 (3) による多項式補間, 及び, その値に入射角度の余弦, すなわち  $\cos 30^\circ$ ,  $\cos 60^\circ$ ,  $\cos 180^\circ$  を乗じたものである (90 度入射については, 余弦が 0 であるので, 省略した)。この図より実効受音位置がほぼ一定の低周波数域では, 実効受音位置は入射角度の余弦に比例していることが確認できる。また, 高周波数域においては, この入射角度の影響はあまり見られないことも分かる。

プローブの背面から入射する 180 度入射の場合, 低周波数域では, 入射角度の余弦に比例して  $-0.3$  程度 (直径  $d=12.7$  mm に対して約  $-3.9$  mm) となっている。正面入射の結果に対して, 符号が逆になっているが, これは, 正面入射と背面入射では音源がプローブに対して反対方向に位置しており, 音波の進行方向が逆になっているためであり, 実効受音位置は, 常に受音面の前方 (正面入射時の音源の方向) にあることに留意する必要がある。すなわち, 低周波数帯域においては, 正面入射と背面入射の実効受音位置は, 音場内で, ほぼ同一の位置にある。

また, 高周波数帯域で実効受音位置が 0 付近に収束せず, むしろ負の方向に更に小さく, すなわち音源から遠ざかる結果となっている。これは, 音波がプローブ背面から入射する際, 受音面へ到達するために回り込まなければならないことによって生ずる時間的な遅れの影響が, 高周波数で顕著に現れるためであると考えられる。

### 3.4 入射波及び反射波で形成される 1 次元音場中の解析

平面波がマイクロプローブの前後から同時に入射する場合についても解析を行った。この解析は, 音響管内部で反射波の存在する音場の測定をモデル化したものである。音響管を用いた垂直入射吸音率  $\alpha$  の測定と同様の方法で音響インピーダンスの測定をする場合, 音圧が極小となる位置を知る必要があり, この際の測定誤差を見積もることを目的としている (Fig. 10 参照)。

また, 前節までの解析のように, 一つの進行波のみによる音場については, 位相は距離によって線形に変化するため, 式 (2) で実効受音位置を評価することができるが, 反射波が存在する音場では, 位相変化は非線形となる。特に, 反射波と入射波の振幅が等しい場合には完全な定在波となり, 位相は 0 又は 180 度のいずれかになる。このことから, 反射波の存在する音場については式 (2) で実効受音位置を評価することはできない。そのため, マイクロプローブの位置を変化させ, その位置に対して, 受音面全面に働く平均音

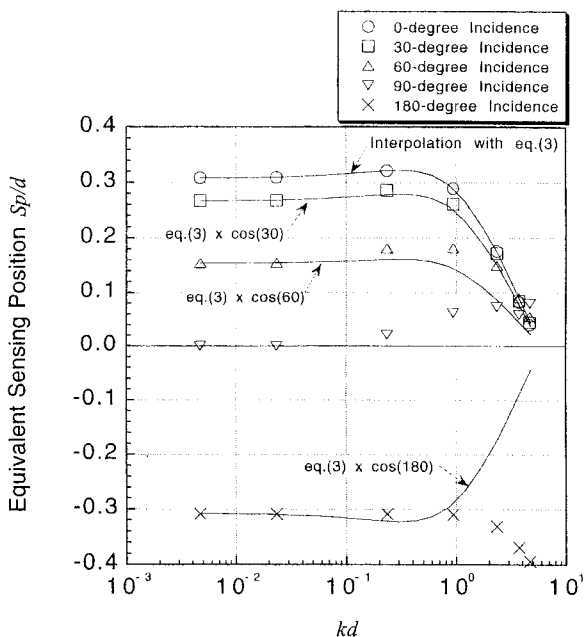


Fig. 9 入射角度による実効受音位置の変化

これを確認するために音の入射角度を変えた場合の実効受音位置を計算し, Fig. 4 と同様に周波数に対して表示したものを Fig. 9 に示す。図中の印 (○, □, △, ▽, ×) はそれぞれ, 正面入射, 30 度入射, 60 度

圧を求め、その平均音圧が極小となる位置を探す方法で解析を行う。

プローブ背面から入射する平面波の音圧に対して、正面 (Fig.10 の試料の方向) から入射する音圧 (反射波) を  $1/\sqrt{5}$ ,  $1/\sqrt{2}$ ,  $2/\sqrt{5}$ , 1 とした場合 (それぞれ試料の吸音率  $\alpha$  が 0.8, 0.5, 0.2, 0 に相当) に受音面に働く平均音圧をマイクロホンプローブの軸方向移動量  $x$  に対して求めた結果の一例 (直径 12.7 mm のプローブの 1 kHz 及び 4 kHz での結果) を Fig.11 及び Fig.12 に示す。両図において、縦軸は受音面に働く音圧レベルを、横軸はマイクロホンプローブの位置  $x$  を直径  $d$  で無次元化して示している。横軸の 0 はマイクロホンプローブ挿入前の音圧極小となる位置であり、 $x$  は Fig.10 において試料から受音面へ向かう方向を正とする。Fig.11 及び Fig.12 に示すように、反射波の存在する音場においても、進行波のみの音場のときと同様に、プローブの影響により、真の音圧極小の位置と受音面に作用する音圧が極小となる位置にずれが生じている。反射波が存在する音場における実効受音位置を、「平均音圧が極小となる位置を基準としたときの真の音圧極小位置」と定義する。式(2)で定義される実効受音位置  $S_p$  と区別するために、この実効受音位置を  $S_m$  と表記する。下付きの m

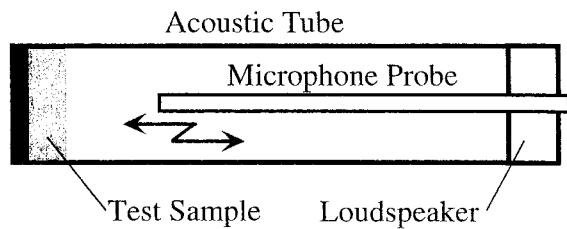


Fig.10 音響管を用いた測定モデル

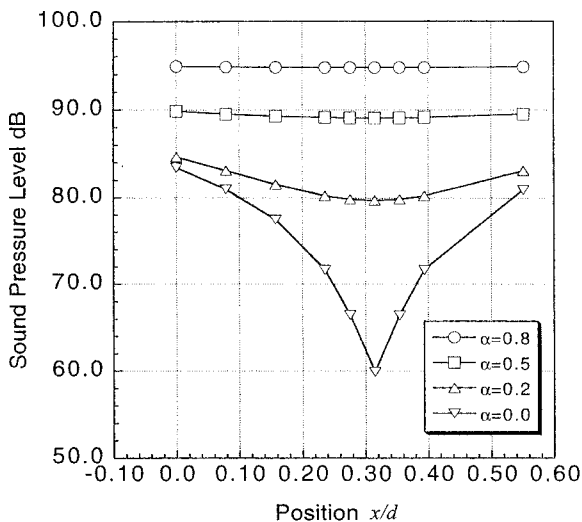


Fig.11 反射波の存在する音場における受音面平均音圧 (直径 12.7 mm, 1 kHz)

は音圧の振幅 (magnitude) の頭文字で、この実効受音位置が音圧の振幅から求められることを意味する。

Fig.11 及び Fig.12 から分かるように、真の音圧極小位置に対して、平均音圧が極小となる位置はプラス側であるので、実効受音位置  $S_m$  は、実効受音位置  $S_p$  と同様に受音面の前方に位置することになる。

Fig.11, Fig.12 の結果を曲線で近似し、極小となる位置  $S_m$  を求める。これを、そのほかの周波数についても計算し、0度入射の進行波の  $S_p$  と比較したものを Fig.13 に示す。図は縦軸、横軸ともに、直径  $d$  で無次元化している。この図より、低周波数域 ( $kd < 1$ ,  $d=12.7$  mm に対して約 4 kHz 以下) において、二つの異なる定義による実効受音位置  $S_p$  及び  $S_m$  が、ほぼ等しい値であることが分かる。

この理由は、入射波と反射波それぞれの影響の重ね合わせの結果として以下のように説明される。

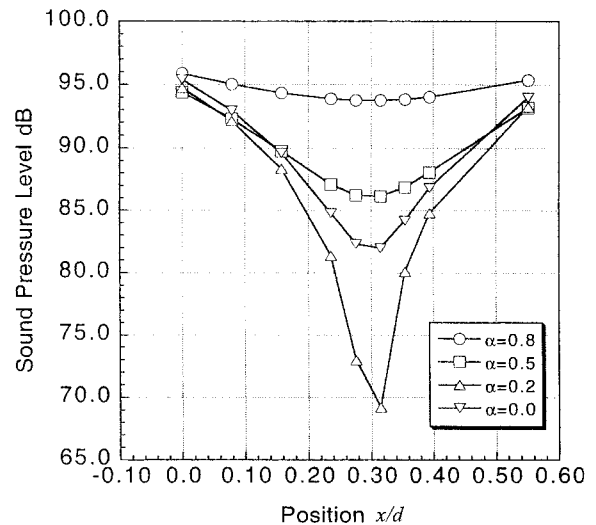


Fig.12 反射波の存在する音場における受音面平均音圧 (直径 12.7 mm, 4 kHz)

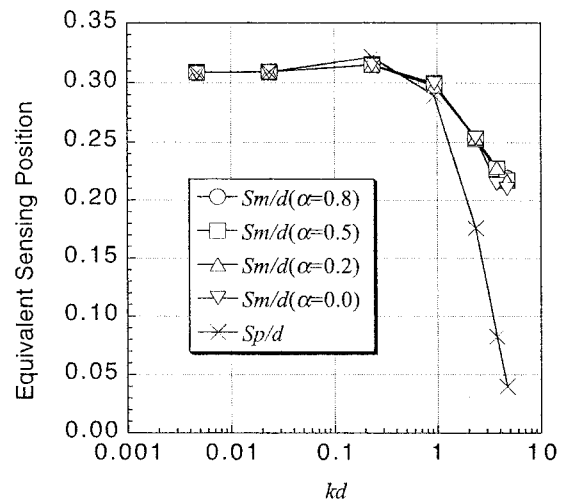


Fig.13 反射波の存在する音場における実効受音位置

正面及び背面入射のそれぞれの  $S_p$  は、式(2)より

$$S_p(0) = (\phi_p(0) - \phi_0(0))/k \quad (4)$$

$$S_p(180) = (\phi_p(180) - \phi_0(180))/k \quad (5)$$

となる。ここで、( )内の数値は入射角度である。今プローブがないときの正面、背面入射による合成音場の音圧極小位置を座標原点  $x=0$  とし、プローブ正面から背面へ向かう方向を  $x$  軸の正の方向とする。プローブを  $x$  軸に沿って移動させるとき、受音面に作用する、正面、背面入射のそれぞれによる平均音圧は変化しないため、合成音場の平均音圧が極小となる位置は、正面及び背面入射の音圧の絶対値には依らず、その位相にのみ影響を受ける。すなわち、正面及び背面入射の音圧が逆位相となる位置が、平均音圧の極小位置である。

式(4)及び式(5)で、プローブの基準位置  $x=0$  において音圧極小であることから  $\phi_0(0)$  及び  $\phi_0(180)$  の差は  $\pm\pi$  (逆位相) である。

$$\phi_0(0) - \phi_0(180) = \pm\pi \quad (6)$$

プローブの位置を  $x$  だけ移動させると、正面の音源に対しては遠ざかり、背面の音源に対しては近づくことになるので、その位相ずれはそれぞれ  $-kx$  及び  $kx$  である。基準位置での正面及び背面入射の平均音圧の位相は、 $\phi_p(0)$  及び  $\phi_p(180)$  であるので、プローブ位置  $x$  での両者の位相差は、

$$(\phi_p(0) - kx) - (\phi_p(180) + kx) \quad (7)$$

である。プローブ位置が  $x=S_m$  のとき受音面に作用する平均音圧が極小となり、すなわち、上式で表される位相差が  $\pm\pi$  (逆位相) であるので、

$$(\phi_p(0) - kS_m) - (\phi_p(180) + kS_m) = \pm\pi \quad (8)$$

となる。式(8)に式(4)、(5)、(6)を代入し、複号が同順であることに注意すると、

$$S_m = \frac{S_p(0) - S_p(180)}{2} \quad (9)$$

である。式(9)及び Fig.9 より、低周波数領域では  $S_p(0) \approx -S_p(180)$  であるので、 $S_m \approx S_p(0) (\approx -S_p(180))$  となることが分かる。

また、解析した全周波数範囲にわたって  $S_m$  は吸音率  $\alpha$  には影響を受けないことも分かった。

Fig.11, Fig.12 を比較すると、最小音圧を与える吸音率が、1 kHz のときは  $\alpha=0.0$  であるのに対し、4 kHz では  $\alpha=0.2$  となっており、完全反射の極小値より、若干の吸音がある場合の極小値の方が小さくなるという結果が得られている。このような逆転現象は、本論文で解析したプローブ直径  $d=12.7$  mm のものについては、4 kHz 程度以上の周波数で受音面に働く平均音圧が、正面入射と背面入射とで異なってい

ることが原因であり、プローブ径を小さくすれば、この逆転する周波数はより高い周波数側へ移動すると考えられる。

#### 4. 結 論

本論文では、進行波のみの音場及び、進行波と反射波が存在する音場について、基準音圧との位相差から算出するもの ( $S_p$ ) 及び平均音圧が極小となる位置から算出するもの ( $S_m$ ) という二つの異なる定義による実効受音位置を提案し、その値を、境界要素法によって解析し、以下の結論を得た。

進行波のみの音場について

1. 実効受音位置  $S_p$  は周波数及び入射角度に影響を受ける。
2. 実効受音位置  $S_p$  は低周波数域ではほぼ一定で、直径 12.7 mm のプローブで正面入射の場合約 3.9 mm となる。また、その値は入射角度の余弦に比例する。
3. 非常に高い周波数域では入射角度が 90 度より小さい場合、実効受音位置  $S_p$  はほぼ 0 となる。

反射波が存在する音場について

4. 実効受音位置  $S_m$  は、低周波数域ではほぼ一定であり、この値は、正面入射の  $S_p$  と一致する。
5. 実効受音位置  $S_m$  の吸音率による違いはほとんどない。

マイクロホンの受音面は実際には完全な剛壁面ではないので、今後、インピーダンスを持つ境界とした場合についても解析を行い、本論文の結果と比較・検討を行う予定である。

なお、本論文の計算結果については、文献[5]との比較によりその妥当性がある程度確認したが、更に実験による検証を計画している。ただし、実験においては測定誤差の混入が避けられず、高精度の解析は困難であることが予想される。

#### 文 献

- [1] 雉本信哉, 川浦淳一, 鈴木英男, 下嶋 浩, “マイクロホンプローブまわりの音場の拡散,” 日本機械学会ダイナミクスとデザインにおけるコンピュータと計算力学シンポジウム講論集, No. 910-39 (II), 1-5 (1991).
- [2] S. Kijimoto, H. Suzuki and S. Oguro, “Diffraction of sound by two finite-length cascade cylinders,” J. Acoust. Soc. Jpn. (E) **19**, 269-273 (1998).
- [3] 寺尾道仁, 関根秀久, “インテンシティ測定におけるペアマイクロホン自体の散乱の影響について,” 音講論集, 479-480 (1980.10).
- [4] 寺尾道仁, 関根秀久, “ペアマイクロホンプローブの自由音場補正について,” 日本騒音制御工学会技術発表会講論集, 333-336 (1990.10).
- [5] 川村雅恭, 電気音響工学概論 (昭晃堂, 東京, 1971).