

拡散音場開口からの音の放射について

久保田 喜八郎
田原 靖彦

§ 1 はじめに

音が十分に拡散しているような室の開口面を透して屋外へ放射される音の指向特性は幾何音響学の立場から考えると、開口面の法線方向とこれに角度 θ をなす方向の単位面積あたりの放射エネルギーをそれぞれ J_0 , J_θ とおけば、 $J_\theta = J_0 \cos\theta$ で表現できる。¹⁾

本文は、この表現によって予測される開口面周辺の音圧レベル分布が実情と合うかどうか実験で調べた結果をまとめたものである。

§ 2. 開口面からの音響放射特性とパワーレベル

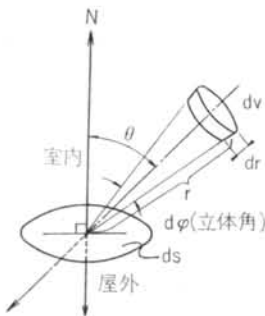
2.1 指向特性の誘導

図一1において、室内では E というエネルギー密度で音が一様になっているとすると、 ds 面の法線に対して θ 方向にある微小体積 dv から ds 面へ入射する音のエネルギー I_θ は、

$$I_\theta = ds \cdot \cos\theta \cdot E \cdot dv / 4\pi r^2 \quad \dots(1)$$

で表わされる。微小体積 dv は図を参考すれば $r^2 d\varphi \cdot dv$ で表現できるから式(1)は、

$$I_\theta = E \cdot \cos\theta \cdot ds \cdot d\varphi \cdot dv / 4\pi \quad \dots(2)$$



図一1 指向特性の誘导图

のように変形できる。

ここで ds 面を開口面とし、音がここを透過するときエネルギー損失を生じないものとするれば、幾何音響学には入射エネルギー I_θ が開口面から屋外の θ 方向へ放射される音のエネルギーそのものと考えられることから、単位面積・単位立体角・単位時間あたりの θ 方向への放射エネルギー J_θ は、音速を C として、

$$J_\theta = \frac{1}{ds \cdot d\varphi} \int_{c_0}^{c_0+C} I_\theta dv = \frac{EC \cos\theta}{4\pi} \quad \dots(3)$$

で与えられる。

開口面の法線方向の放射エネルギー J_0 は上式で $\theta=0$ とおけば、

$$J_0 = \frac{EC}{4\pi} \quad \dots(4)$$

となる。

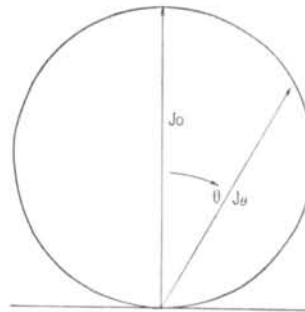
式(4)を式(3)に代入することによって

$$J_\theta = J_0 \cos\theta \quad \dots(5)$$

の関係が得られ、これが開口面から屋外へ放射される音の指向性を表わす。

3.2 室内の音の強さのレベルと開口面の放射パワーレベルとの関係

式(5)で表わされる指向性を図示すると図一2のようになる。



図一2 開口面の放射指向特性

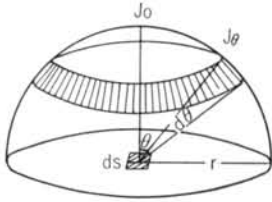


図-3 放射パワーの算出図

開口面の単位面積あたりの放射パワー W は、図-3を参照すれば、

$$W = \int_0^{\pi/2} J_0 \cdot 2\pi \sin\theta \, d\theta \quad \dots(6)$$

と書くことができる。

これに式(5)を代入すると、

$$W = \pi J_0 \int_0^{\pi/2} 2\cos\theta \sin\theta \, d\theta = \pi J_0 \quad \dots(7)$$

となり、さらに式(4)を用いて、

$$W = EC/4 \quad \dots(8)$$

が得られる。

式(8)で E , C を MKS 単位で表わすことにし、次のような式で両辺の対数をとれば、

$$\begin{aligned} 10\log_{10} \frac{W}{10^{-12}} &= 10\log_{10} \frac{EC}{10^{-12}} \cdot \frac{1}{4} \\ &= 10\log_{10} \frac{EC}{10^{-12}} - 6 \text{ dB} \quad \dots(9) \end{aligned}$$

となる。音響工学上の定義では、左辺はパワーレベル、右辺の第1項は、室内の音の強さのレベルを表わしている。

式(9)から解るように、開口面の単位面積あたりの放射パワーレベルは室内の音の強さのレベルよりも 6 dB 低い値で与えられる。

§ 4. 屋外での音の強さのレベル

屋外での音の強さを予測するとき、開口面は微小な面状音源の集まりであり、また屋外でのエネルギー密度は各微小面音源からの距離の2乗に反比例して低減するという仮定を設ける。

図-4において、開口面の中心に原点をおく座標を設け、開口面上 (x, y) の位置に $dx \cdot dy$ なる微小面をとる。

一方、屋外の任意の位置 P の座標を (x_0, y_0, z_0) とすると、微小面から P 点までの距離は、

$$\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2}$$

であるから、 P 点でのエネルギー密度 E_p は、音速を C

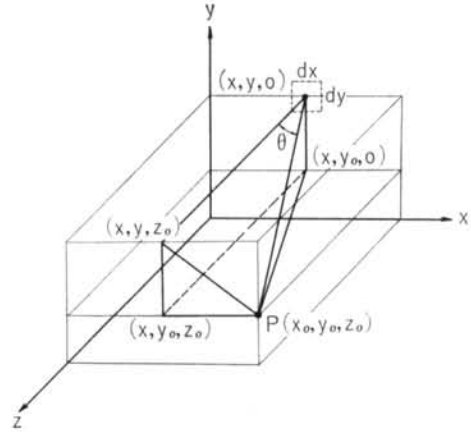


図-4 微小面音源と受音点 P との位置関係として、

$$E_p = \frac{4}{C} \int_0^a \int_0^b \frac{J_\theta}{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2} dx dy \quad \dots(10)$$

で表わされ、式(5), (6)を用いて変形すれば、

$$E_p = \frac{4W}{C\pi} \int_0^a \int_0^b \frac{\cos\theta}{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2} dx dy \quad \dots(11)$$

となる。 $\cos\theta$ は図-4を参照すれば、

$$\cos\theta = \frac{z_0}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2}}$$

と表わされるから式(11)は、

$$E_p = \frac{4W}{C\pi} \int_0^a \int_0^b \frac{z_0}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2]^{3/2}} dx dy \quad \dots(12)$$

となる。

式(10)から、 P 点での音の強さのレベル (SIL) は、

$$\begin{aligned} SIL &= 10\log_{10} \frac{CE_p}{10^{-12}} = 10\log_{10} \frac{W}{10^{-12}} \\ &+ 10\log_{10} \int_0^a \int_0^b \frac{z_0}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2]^{3/2}} dx dy \\ &+ 10\log_{10} \frac{4}{\pi} \text{ dB} \quad \dots(13) \end{aligned}$$

で表わされる。上式の第1項は開口面のパワーレベルを表わす。また、第2項は一般には数値積分によって求めることになるが、 P 点が開口面の中心軸 (Z 軸) 上にあるときには、定積分が実行できる。式(13)で $x_0 = y_0 = 0$ とおいて、

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{4W}{C\pi} \int_0^a \int_0^b \frac{z_0}{(x^2 + y^2 + z_0^2)^{3/2}} dx dy \\ &= \frac{4W}{C\pi} \tan^{-1} \frac{ab}{z_0 \sqrt{z_0^2 + a^2 + b^2}} \quad \dots(14) \end{aligned}$$

である。

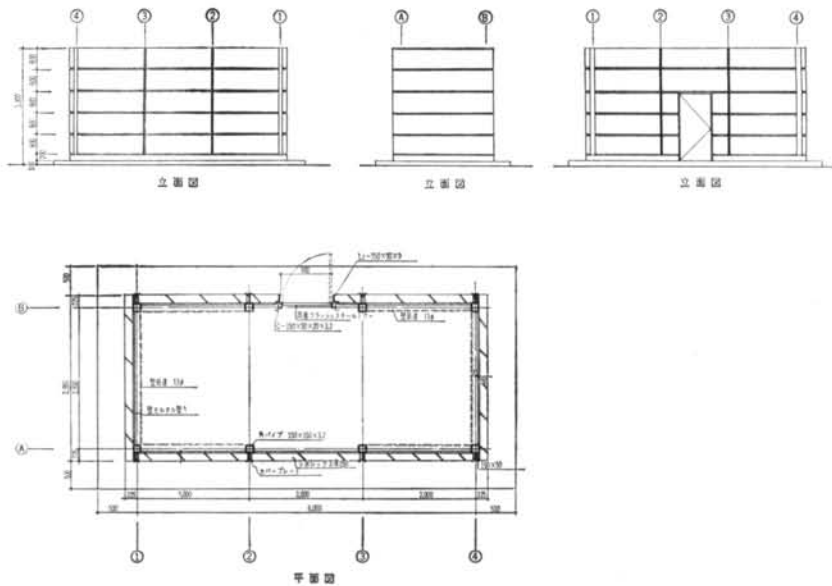


図-5 音源室

式(4)から開口面内でのエネルギー密度は、 $z_0=0$ とおけば、

$$E_p = 2W/C \quad \dots (5)$$

となり、この式を音の強さのレベルを表す式に換えると、

$$SIL = 10 \log_{10} \frac{CE_p}{10^{-12}} = 10 \log_{10} \frac{W}{10^{-12}} + 3 \text{ dB} \quad \dots (6)$$

になる。式(9)を用いて音源室内と開口面内での音の強さのレベルの関係は、

$$SIL(\text{開口面内}) = SIL(\text{音源室内}) - 3 \text{ dB} \quad \dots (7)$$

である。つまり開口面内での音の強さのレベルは音源室内のそれより 3 dB だけ低い値となる。

なお、 $z_0=0$ としてもエネルギー密度 E_p が確定値をもつのが式(5)の指向性を導入したときの特徴で、無指向性として扱おうと無限大になり確定しない。注1)

注1) 簡単にするため直径 D の円形状の面音源を考え中心軸上でのエネルギー密度を求めると、

$$E_p = \frac{W}{C} \log_e \left\{ 1 + \left(\frac{D}{2Z} \right)^2 \right\}^{3/2}$$

となる。 $Z \rightarrow 0$ とすると E_p は ∞ に向かって確定値をもたない。

§ 5 実験装置および実験方法

5.1 実験装置

実験装置は音が十分に拡散しているような音場と開口面を得るための音源室、屋外での音圧レベル分布を連続的に測定するためのマイクロホン支持装置とその自動走行装置、音の発振・受振を行なうための音響測定装置から構成されている。

(1) 音源室について

音源室は図-5に示す規模の鉄骨を軸組とする軽量コンクリート版造で、この周辺に自由音場（音波の進行を妨げたり反射を生ずるような障害物がない空間）を得るため屋外に設置されている。規模は実用的な音の周波数範囲や建設費、また今後に予定されている実験計画などを勘案して決められている。

音源室内にできるだけ均一な音の強さの音場を得る意図で、2個のスピーカーから実験音を出すとともに、壁面にハードボード製の拡散板を装着している。

(2) 開口について

開口はこの外部周辺に完全な自由音場を得るため音源室の屋根面に設け、本報の実験では $6.0 \times 2.5 (\text{m}^2)$ の屋根面全体を開口としている。

(3) マイクロホン支持装置および自動走行装置

図-6に示す位置に高さが約18mの鋼管製のマスト4本を建て、音源室を挟んで対向する2本のマスト間に平行な2本の鋼線を張り、これに4輪の台車を架けてある。台車はシンクロナスモーターを用いた駆動装置と水

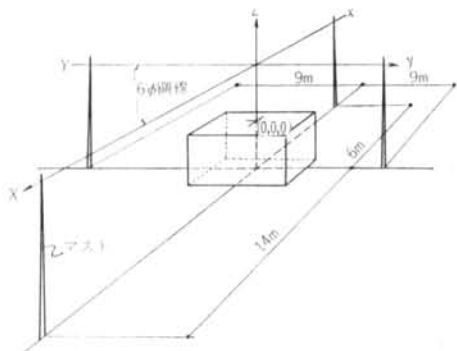


図-6 マイクロホン支持装置と測定線
音源装置

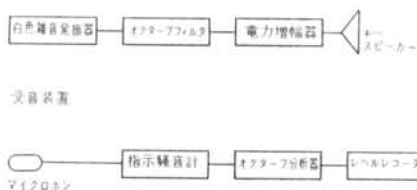


図-7 音響機器のブロックダイアグラム

糸で結びつけられ、鋼線上を毎秒20cmの速度で走行する。この台車にマイクロホンを取付けることによって音圧レベル分布を連続的に測定する。

鋼線はマイクロホンとそのコードや台車等の重量によるたわみが開口面から測定線までの高さの10%以内になるように張力を調整して張られている。測定線からのずれが10%のとき、音圧レベルに表われる誤差は0.9dBと推定され、この程度ならば測定上支障がない誤差である。また、台車の走行速度のむらや走行による鋼線のゆれも測定に支障がない程度である。

台車の走行による発生音は、車輪をゴム製にすることによって極力小さくするように努めた。

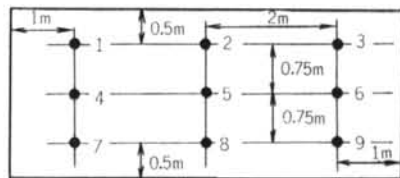
(4) 音響機器について

音の発生装置と受信装置のブロックダイアグラムを図-7に示す。

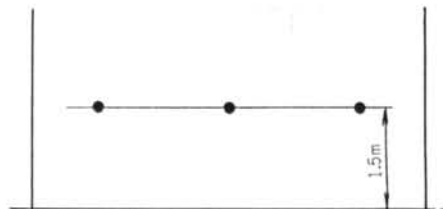
5.2 実験方法

(1) 音圧レベル分布の測定位置

屋外での音圧レベル分布の測定位置は図-6に示すように、開口面に平行なX、Yの2方向と開口面の中心を通る垂直なZ方向の線上である。X、Yの2方向での測定線の高さは開口面の位置を原点にとり、0.5m、1.0m、2.0m、4.0m、8.0mの5種類で、水平方向の測定距離範囲は開口面の中心を原点としてX=0~8m、Y=0~8mである。Z軸上では0~12mの範囲で測定を実施

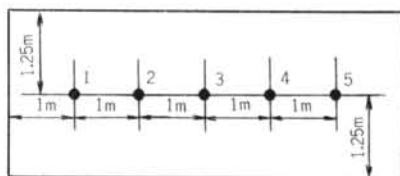


平面位置

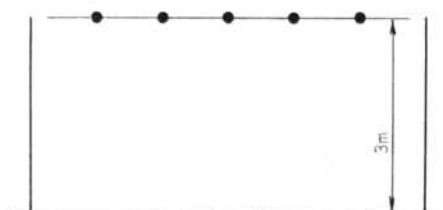


断面位置

図-8.1 音源室内音圧レベルの測定点の位置



平面位置



断面位置

図-8.2 開口面内音圧レベルの測定点の位置

した。

(2) 試験音

実験に使用した音は、中心周波数が250、500、1000、2000、4000 (Hz) の6種のオクターブ帯域雑音である。

(3) 測定方法

音源室内に設置した2個のスピーカーを図-7に示した音源装置によって同位相で駆動し、オクターブ帯域雑音を発生させ、床から1.5mの高さの平面内に図-8.2で示すような9点を選び音圧レベルを測定する。一方、屋外の各測定線上での音圧レベル分布はマイクロホンの移動に対応して高速度レベルレコーダーの記録紙上に自記記録される。

§ 6. 実験結果

音源室内と開口面内の音圧レベルのそれぞれの測定結果を表-1, 表-2にかかげる。屋外でのX, Y, Zの3方向それぞれにおける音圧レベル分布の測定結果を図-9~図-11に示す。これらの図の音圧レベルを表わす軸では式(13)のパワーレベルを0dB, つまり式(9)を参照し

中心周波数(Hz)	測定点									平均
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
250	99	98	101	99	94	98	101	99	100	98.8
500	93	92	90	93	89	93	90	91	94	95.1
1000	92	91	92	92	90	92	92	90	92	91.4
2000	93	90	92	92	91	92	92	91	93	91.7
4000	82	80	81	80	80	80	81	81	81	80.6

表-1 音源室内の音圧レベル(dB)

て音源室内の音圧レベル^{注2)}の平均値より6dBだけ小さい値を0dBにおきかえて表わしている。

注2) §4では音の大きさを「音の強さのレベル」で表わし議論しているが、実験では「音圧レベル」を観測している。両者は厳密には標準状態における平面波の音についてのみ等しい値をとるが、実用的には平面波以外の音についても等しいとして扱っても支障はない。

中心周波数(Hz)	測定点					平均
	1	2	3	4	5	
250	93	95	96	95	94	94.6
500	89	89	91	88	88	89.0
1000	87	87	88	87	86	87.0
2000	87	86	87	86	88	86.8
4000	78	77	78	76	78	77.4

表-2 開口面内の音圧レベル(dB)

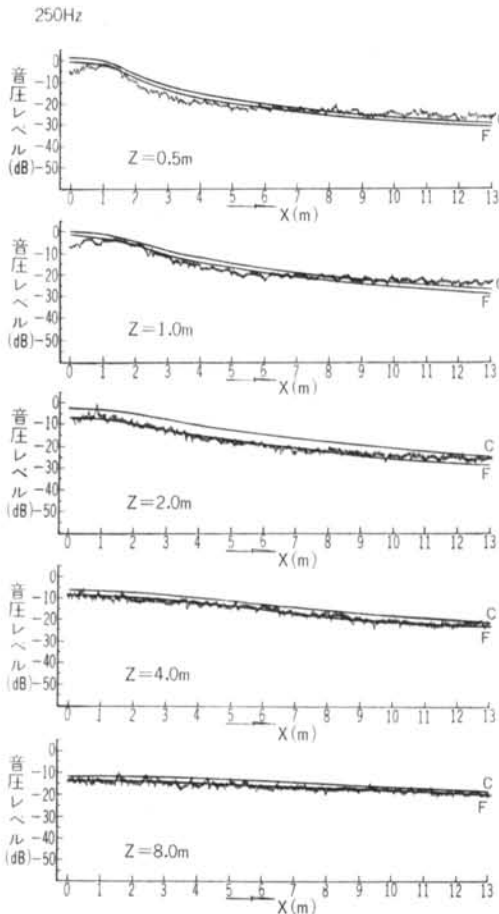


図-9.1 X方向の音圧レベル分布 $f=250\text{Hz}$

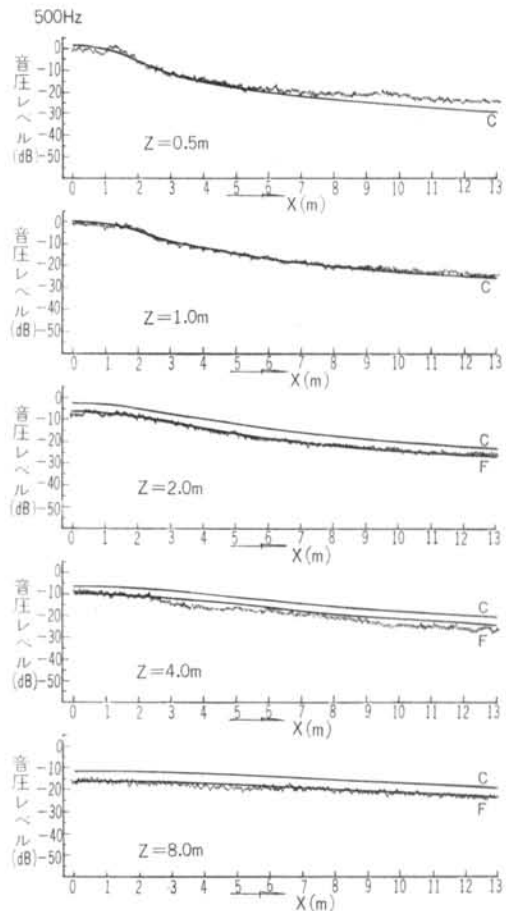


図-9.2 X方向の音圧レベル分布 $f=500\text{Hz}$

1KHz

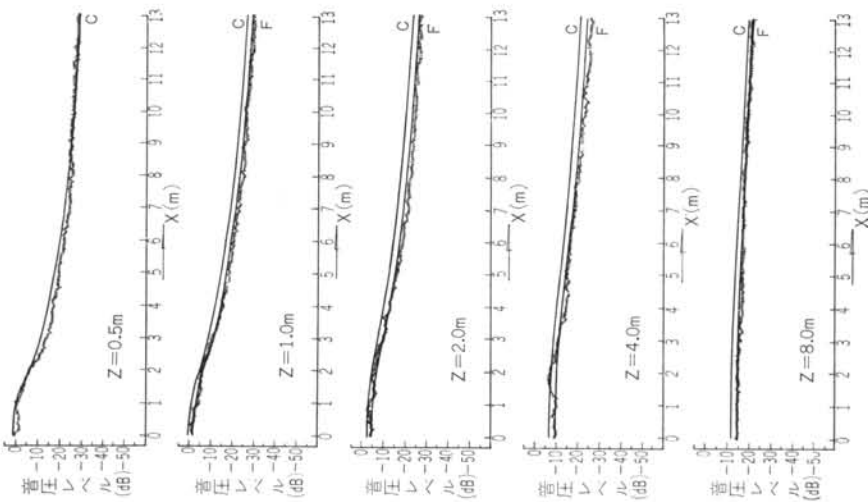


図-9.3 X方向の音圧レベル分布 $f=1000\text{Hz}$

2KHz

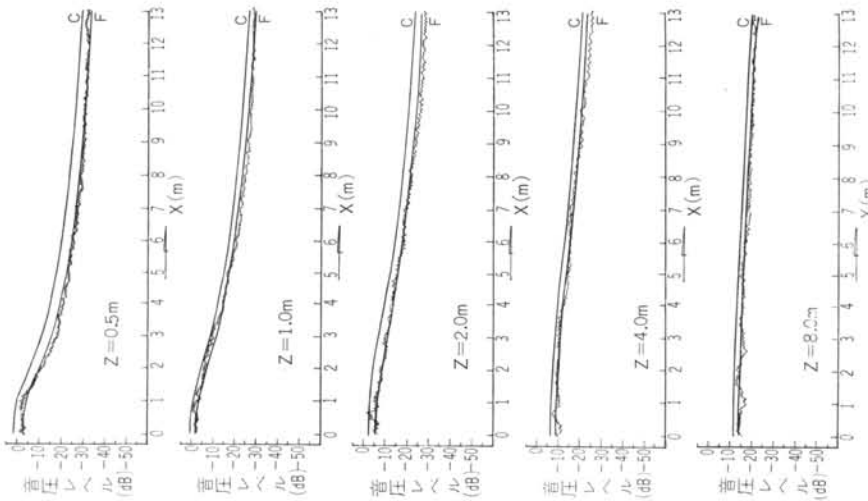


図-9.4 X方向の音圧レベル分布 $f=2000\text{Hz}$

4KHz

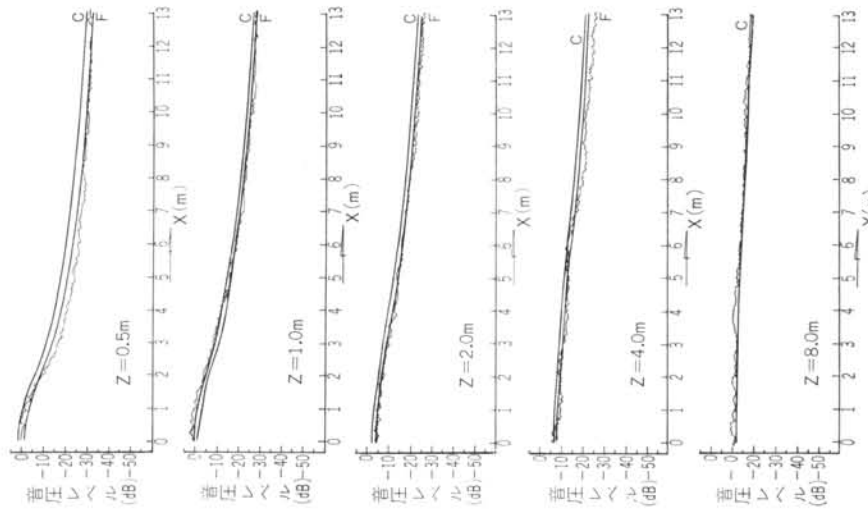
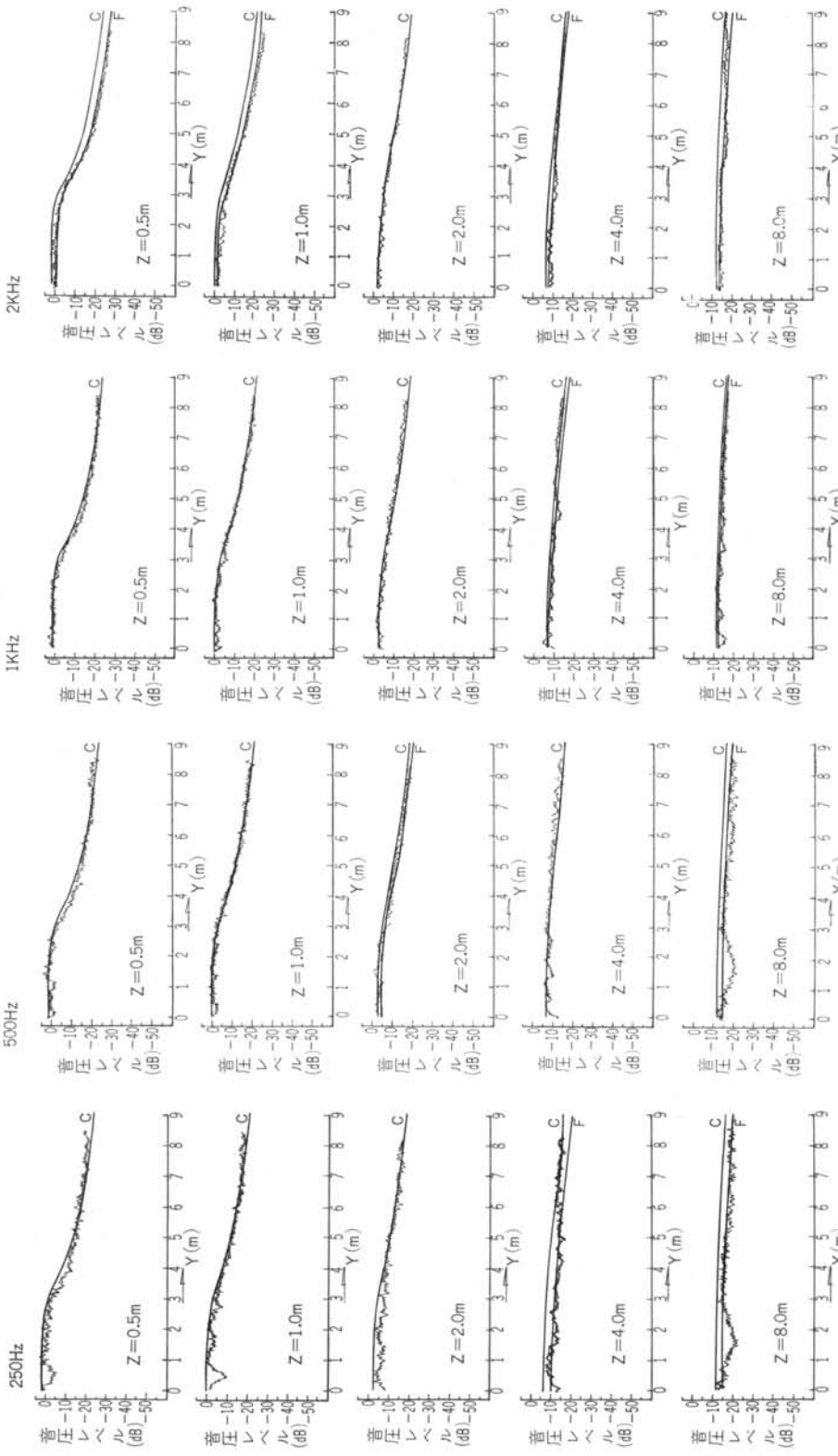


図-9.5 X方向の音圧レベル分布 $f=4000\text{Hz}$



図一10.1 Y方向の音圧レベル分布
 $f=250\text{Hz}$

図一10.2 Y方向の音圧レベル分布
 $f=500\text{Hz}$

図一10.3 Y方向の音圧レベル分布
 $f=1000\text{Hz}$

図一10.4 Y方向の音圧レベル分布
 $f=2000\text{Hz}$

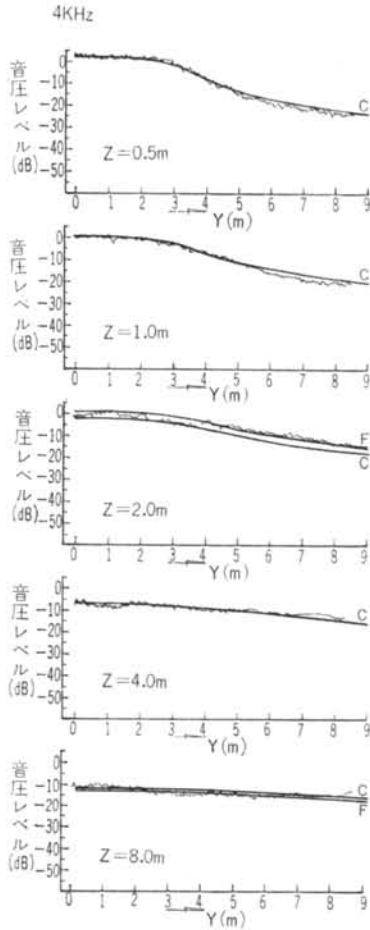


図-10.5 Y方向の音圧レベル分布 $f=4000\text{Hz}$

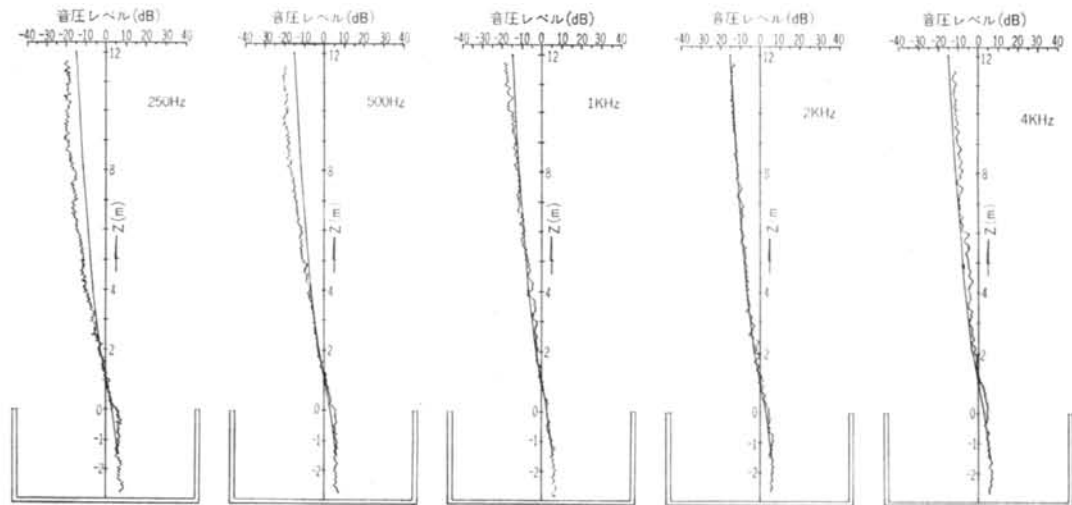


図-11 Z方向の音圧レベル分布

§ 7. 考 察

7.1 開口面の音響放射指向特性

式(4)が表わす開口面中心軸（Z軸）上での音圧レベル分布を示すと図-12のようになる。この図によれば、開口面から6m以上離れた範囲では、距離が2倍になるごとに6dBずつ低減している。このことは、開口面から6m以上離れば、開口面全体を点音源とみなしても差支えないということを意味している。

そこで、開口面の中心を原点とする半径6mの半円周上の音圧レベルを実験結果から読みとって図示すると図-13のようになる。この図で音圧レベルは音源室内の平均音圧レベルを0dBとして表示してある。

図に式(5)で表わされる指向性と無指向性としたときの指向特性を記入し実験値との対応をみると、予測した指向特性に必ずしも精度よく一致はしていないが、角度の大きい方向にみられるように無指向性として取扱うよりも近似が良いといえよう。

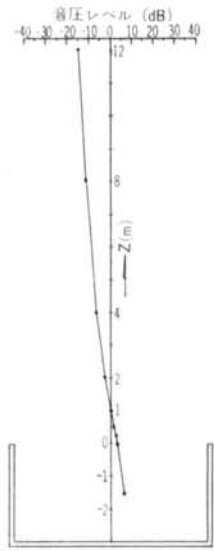


図-12 Z軸上の音圧レベル分布の予測

7.2 開口面周辺の音圧レベル分布

実験を行なった短辺・長辺がそれぞれ2.5m, 6.0mの

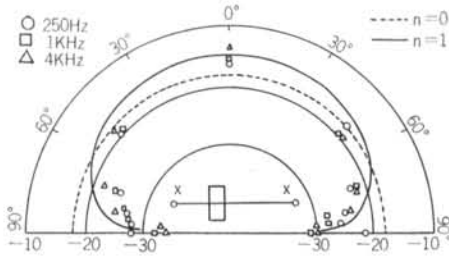


図-13.1 X方向の指向特性

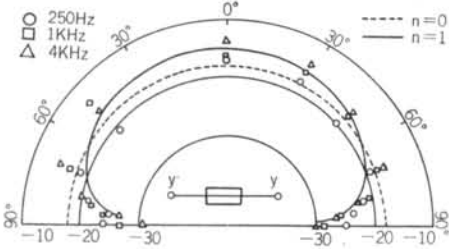


図-13.2 Y方向の指向特性

矩形開口面について、式(3)から予測したX方向とY方向の各測定線における音圧レベル分布を示すと図-14のようになる。これらの図の音圧レベルを表わす軸ではパワーレベルを0dBにして表示してある。

図-9～図-11に示した実験結果にこの予測した音圧レベル分布を実線(C)で記入し、比較してみると、分布曲線の形の上では極めて良い対応を示している。しかし、式(9)、式(3)で表現される音源室内の音圧レベルとの定量的対応については良く一致している結果もあるが、ずれている結果もある。このずれが実験値の精度からみて問題であるかどうかを知るため、X方向とY方向とについて予測値を実験値に合うように平行移動させた分布曲線を実線(F)で表わし、実線(C)との差を求めてみると表-3となり、実験値は予測値より低めに得られており、その差はX方向においてやや大きい。この表のデータから標準偏差を求めてみるとX方向では1.35、Yでは1.40となっており、両者ともそろった値が得られているので、この実験の精度がこの程度のばらつきをもっているものであると考へ、表の周波数別に求まる平均値をもとにして実験値と予測値とが等しいという仮説を5%の有意水準でt検定してみると、表の下端にみられるように、X方向では棄却されY方向では棄却されないという判定になる。つまり、Y方向では実験値と予測値とが一致したとみても差支えないが、X方向についてはそうはいえないということの意味している。

したがって、X方向の実験には予測値よりも低めの音圧レベルを与えるような何か特別な理由があるものと予

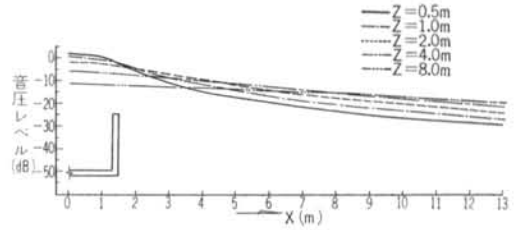


図-14.1 X方向の高さ別の音圧レベル分布

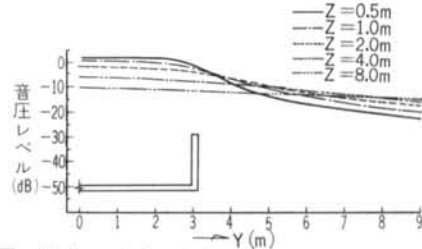


図-14.2 Y方向の高さ別の音圧レベル分布

		測定線の高さ Z(m)					平均値
		0.5	1.0	2.0	4.0	8.0	
中心周波数 (Hz)	250	-2.5	-1.9	-4.5	-2.5	-2.5	-2.78
	500	0	0	-3.8	-3.4	-5.0	-2.44
	1000	0	-1.9	-2.3	-2.9	-2.6	-1.94
	2000	-4.4	-2.4	-3.0	-2.5	-2.5	-2.96
	4000	-3.1	-1.4	-1.4	-1.3	0	-1.44

平均値 -2.31dB, 標準偏差 1.35

$$|0 - (-2.31)| < t(4, 0.05) \times \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} = 1.75$$

$$\hat{\sigma} = 1.38 \quad n = 5 \quad t(4, 0.05) = 2.776$$

表-3.1 実験値と予測値との差 (X方向) (dB)

		測定線の高さ Z(m)					平均値
		0.5	1.0	2.0	4.0	8.0	
中心周波数 (Hz)	250	0	0	0	-3.5	-3.0	1.30
	500	0	0	-2.0	0	-3.0	1.00
	1000	0	0	0	-1.0	-1.0	0.40
	2000	-2.5	-2.5	0	-1.5	-2.0	1.70
	4000	0	0	+3.0	0	-1.4	-0.32

平均値 -0.816dB, 標準偏差 1.40

$$|0 - (-0.816)| < t(4, 0.05) \times \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} = 1.78$$

$$\hat{\sigma} = 1.43 \quad n = 5 \quad t(4, 0.05) = 2.776$$

表-3.2 実験値と予測値との差 (Y方向) (dB)

想される。X方向とY方向とでは開口面が矩形であるので、その短辺方向か長辺方向かという相異があり、理由の1つとして開口面の形状による影響が考えられる。また、形状に絡んで音源室内での音の拡散状態の良否も大

きな影響をもっているとも考えられるので、今後の実験で再度検討したい。

なお、X方向における予測値とのずれから、誤差を設けて実用に供するとすれば $MAX(2.31 \pm 1.72) \div 4 \text{dB}$ の誤差を見込む必要がある。

7.3 音源室内と開口面内の音圧レベル差

§4で述べたように音源室内と開口面内の音圧レベルの差は理論上3dBである。

実験結果の表一1と表一2から周波数別に平均値を求めると表一4のようになり、音圧レベル差は平均的にみて3.88dBで予測値より0.88dB大きい。前項と同様に5%の有意水準でt検定を行なってみると予測値との差はとくに意味のあるものでなく、また実用的にも問題ないと考えられるので、理論は正しいといえよう。

§ 8. まとめ

音が拡散しているとみなされる室の開口から屋外へ放射される音の指向特性について幾何音響学的に導びいた

$$J_{\theta} = J_0 \cos \theta$$

の表現が実情に合うかどうか実験によって確めた。

中心周波数(Hz)	250	500	1000	2000	4000	平均
音源室内音圧(dB)	98.8	91.7	91.4	91.7	80.6	90.84
開口面内音圧(dB)	94.6	89.0	87.0	86.8	77.4	86.96
レベル差	4.2	2.7	4.4	4.9	3.2	3.88

$$(3.88-3) < t(4, 0.05) \times \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} = 1.12$$

$$\hat{\sigma} = 0.90 \quad t(4, 0.05) = 2.776 \quad n = 5$$

表一4 音源室内と開口面内の音圧レベル差 (dB)

実験結果によれば、開口面周辺の音圧レベル分布の実測値は、上式を用いた予想値よりもやや低めの値になっているが、定性的には良好な対応を示している。また、上式の表現を用いることによって、室内の音圧レベルと屋外の音圧レベルとの関係も的確に把握することができ

る。したがって、定量的対応において4dBというやや大きい誤差を見込まねばならないが、上式を用いた推定方式は実情に則していると考えられる。

なお、定量的対応については再実験によって検討する予定である。

おわりに、この実験に協力をいただいた東洋大学工学部建築学科の安岡正人助教授、同大学院生の新鍋秀幸氏に謝意を表す。

<参考文献>

- 1) 久我新一：*拡散音場の壁の円孔およびスリットが外部自由空間に対して示す音響指向特性と透過損失について* 日本音響学会誌 第15巻, 4号(1959)