

振動円板から放射される騒音の予測(第2報)

福田基一*・小嶋直哉*・生駒勝啓**

On the Estimation of the Noise Emitted by the Vibration of a Circular Plate (2nd Report)

Motokazu FUKUDA, Naoya KOJIMA and Katsuhiro IKOMA

Abstract

Modern-day life is such that machines, equipment, and humans must function properly in mechanical vibration and acoustic noise environments.

In addition to damage incurred directly, vibration may also result in the generation of undesirable acoustic noise, and the reduction of vibration may reduce noise level. So, it is important to make clear the problems concerning with the relation of vibration and noise.

In the previous report, a method for rough estimation of the noise level by the radiation factor K was described.

This report describes in detail the relation between the vibration of a circular plate clamped at the edge and the noise originated by the surface vibration.

Assuming that the circular plate is consisted of many minute elements and each of them vibrates as a simple harmonic motion in an infinite baffle, then the sound pressure level at a point away from the plate surface is obtained by summing up all the sound pressure radiated from each minute sources. The values of the over-all sound pressure level calculated by this method have been found in good agreement with those obtained from the experiments.

1. まえがき

現代生活においては、機械や装置や人間は、振動や騒音という環境の中でそれぞれ機能を果たすことを余儀なくされている。

振動は騒音の発生の原因となり、振動の低減は騒音を低減することになる。このことから、振動と騒音の関係を明らかにすることは、いま重要な課題の一つとなっている。

本研究は、各種機械や装置やエンジンプロックやカバーなどから放射される騒音を予測するための一段階として、板の振動とそれによって発生する騒音の関係について解析を行ったものである。

前報¹⁾においては、円形振動板の振動加速度レベルのオーバーオール値が、Fig. 8 (a) に示すように中心方向に向かって増加する基本モードで振動している場

合について解析を行い、放射係数 K によって 1/3 オクターブバンドにおける振動加速度から放射騒音の概略値を予測する研究を行った。

本報では、円形振動板を微小要素から成る音源の集合と考え、各々の微小音源が無限大バツフル中で放射する騒音のベクトル和を求め、振動板全体から放射される騒音の音圧レベルを算出した。また、振動板の主な共振周波数について調査した振動モードと、各周波数において計算された音圧レベルの分布状態について検討を行った。

2. 理論的考察

無限大バツフル中で微小面積 ds が、振動速度振幅 u でピストン振動 $ue^{j\omega t}$ を行っているものとするれば、媒質を排除する体積速度 $Ue^{j\omega t}$ は次式で表わされる。

$$Ue^{j\omega t} = u ds e^{j\omega t} \quad (1)$$

ここで微小部分 ds が体積速度 $Ue^{j\omega t}$ の呼吸運動を行う半球であるとする。この場合に形成される音場

* 機械工学科

** 大学院機械工学専攻

は、バッフルを取り除き鏡像音源を導入することによって、容易に算出できることが知られている²⁾。

自由空間において、体積速度 $U_1 e^{j\omega t}$ である呼吸球の半径を a とすれば、中心から距離 r の位置での速度ポテンシャル ϕ は、波動方程式より積分定数を A として次式で示される。

$$\phi = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (2)$$

ただし ω は角周波数、 k は波長定数 ($\omega/C, C$: 音速) である。

ここで球の表面の振動速度と、表面に接している媒質粒子の速度とが連続であるという境界条件より A は次式で表わされる。

$$A = \frac{U_1}{4\pi r} \cdot \frac{e^{jka}}{1 + jka} \quad (3)$$

振動板の面積 ds が十分小さいものであれば、近似的に ds は媒質を排除する体積速度 $U e^{j\omega t}$ を持つ点音源と考えることができる。この場合、音場空間が無限大バッフル上方の半自由空間であることから、 U_1 は $2U$ となり、速度ポテンシャル ϕ は式(3)において $a \rightarrow 0$ とすることより次式となる。

$$\phi = \frac{U}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (4)$$

いま、円形振動板をこれらの微小振動板の集合と考え、それぞれの放射音から全体の音圧レベルおよび音圧レベル分布を求める方法について考察する。

円形振動板を $M \times N$ の微小要素に分割し、それぞれの微小要素を無限大バッフル中でピストン振動をしている微小音源と考えれば、各要素を近似的に点音源とみなすことによって式(4)より速度ポテンシャルを求めることができる。したがって振動板全体から放射される騒音は、各要素から放射される騒音のベクトル和として表わされ、振動板上方における任意の位置での音圧レベルを算出することが可能となる³⁾。

Fig. 1 は $M \times N$ に微小分割された円形振動板を示すものである。この場合、第 JK 微小要素が形成する速度ポテンシャル $\Delta\phi_{JK}$ は式(4)より次のように与えられる。

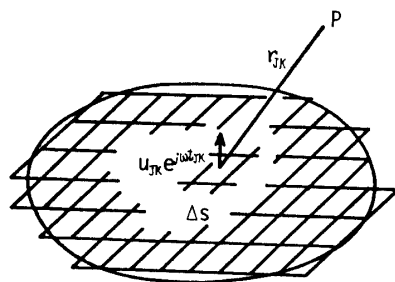


Fig. 1 Circular plate divided into $M \times N$ mesh

$$\Delta\phi_{JK} = \frac{U_{JK}}{2\pi r_{JK}} e^{j(\omega t_{JK} - kr_{JK})} \quad (5)$$

さらにその微小要素の速度振幅を u_{JK} 、面積を Δs とすれば $\Delta\phi_{JK}$ は次式で表わされる。

$$\Delta\phi_{JK} = \frac{u_{JK} \Delta s}{2\pi r_{JK}} e^{j(\omega t_{JK} - kr_{JK})} \quad (6)$$

また振動板全体の速度ポテンシャル ϕ は、各微小要素の速度ポテンシャル $\Delta\phi_{JK}$ の総和として次式で表わされる。

$$\phi = \sum_{J=1}^M \sum_{K=1}^N \Delta\phi_{JK} \quad (7)$$

一方、音圧 p は媒質である空気の密度を ρ とすれば、

$$p = j\rho\omega\phi \quad (8)$$

ここで p の共役複素成分を \bar{p} で表わせば、音圧レベル SPL は基準値を p_0 ($2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$) として次式により算出することができる。

$$\begin{aligned} \text{SPL} &= 10 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{p \cdot \bar{p}}{2}} / p_0 \right)^2 \\ &= 20 \log_{10} \left(\frac{\rho\omega}{2\pi} \cdot \frac{\Delta s}{\sqrt{2}} \right. \\ &\quad \times \left[\left\{ \sum_{J=1}^M \sum_{K=1}^N \frac{u_{JK}}{r_{JK}} \cos(\omega t_{JK} - kr_{JK}) \right\}^2 \right. \\ &\quad \left. \left. + \left\{ \sum_{J=1}^M \sum_{K=1}^N \frac{u_{JK}}{r_{JK}} \sin(\omega t_{JK} - kr_{JK}) \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right) \quad (9) \end{aligned}$$

3. 実験装置と実験方法

本研究に用いた実験装置の概略を Fig. 2 に示す。振動板は厚さ 4.5mm、直径 390mm の円形鋼板を使用し、これを外径 390mm、内径 300mm の止め輪(厚さ

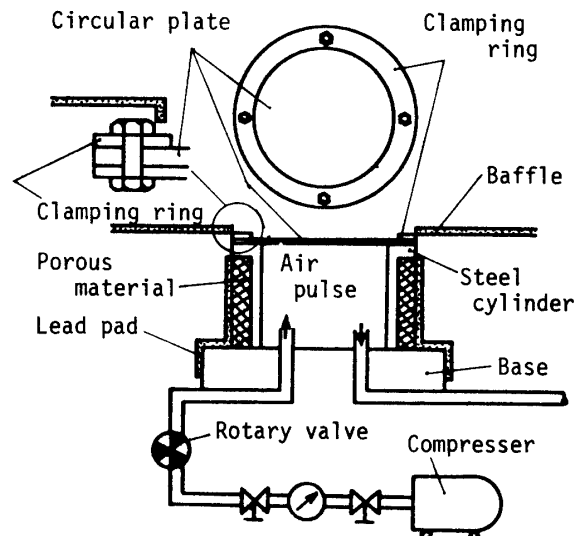


Fig. 2 Experimental apparatus

2.3mmの鋼板)で定盤に固定された鋼板円筒(側壁9mm)にボルトで4点支持した。騒音放射面は円形振動板のうち止め輪を装着した部分を除いたものとし、止め輪、円筒側壁、定盤などは鉛で遮蔽し、それらからの放射音の影響が無いようにした。また、振動板の周辺には厚さ2mmの鉛板のバッフルを設置し、振動板以外から放射される騒音の回り込みを防止するとともに、解析の際には無限大バッフル中の振動板という条件が適用できるように配慮した。

一方、振動板に作用する加振力としては、実験室(防音無響室)外のコンプレッサから供給された1atgの圧縮空気を、回転スリット円板で100Hzの空気パルスとし、定盤の下方より供給した。また、円筒内の空気は内径40mmのパイプにより室外に排出した。

振動板上の各周波数における振動加速度の測定には、2個の圧電型振動ピックアップ(RION PV-09A)を使用し、一方は位相差を求めるための基準地点で固定し、他方は振動板上の任意の位置に移動させ、振動計(RION VM-21A)で増幅し、それぞれをデータレコーダ(SONY QR-4215)で記録した。

また騒音の測定はFig.3に示すように、振動板の上方におけるNo.1~No.20の各位置にマイクロホン(B&K Type 4145)を設置し、マイクロホンアンプ(B&K Type 2603)を通した後、同上のデータレコーダで記録した。

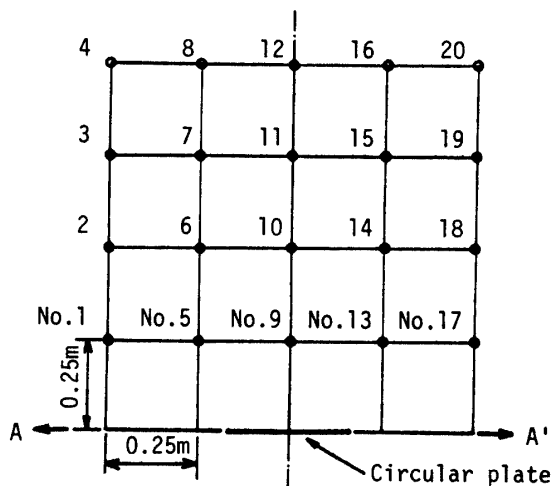


Fig. 3 Measurement points of radiated noise

なお振動加速度の校正には、振動計の内蔵発振器(20Hz, 60dB. re. $10^{-2}m/s^2$)を、また騒音の校正にはピストンホン(B&K Type 4220, 250 Hz, 124 dB, re. $2 \times 10^{-5} Pa$)をそれぞれ使用した。

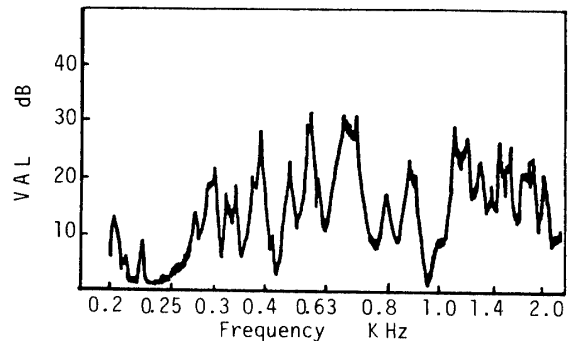
振動板上において、位相の基準位置と任意点の相対位相差の測定にあたっては、データレコーダに記録された振動加速度の信号を帯域幅1%のフィルタ(B&K

Type 1612)とシンクロスコープ(IWATSU MS-5019A)を用いた。また振動加速度レベルは、フィルタを通しレベルレコーダ(B&K Type 2305)を用いて測定した。

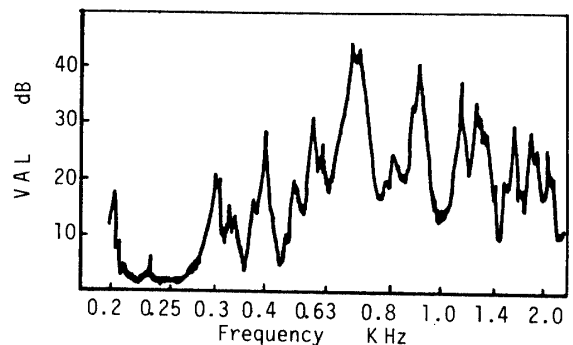
4. 解析過程

空間の任意の一点における音圧レベル SPL (re. $2 \times 10^{-5} Pa$) は任意の周波数に関して算出可能であるが、騒音の予測という見地からすれば、騒音発生に大きな影響を与える周波数成分についてのみ解析を進めれば十分であると考えられる。なお u_{JK} は、実験により求めた振動加速度振幅 α_{JK} から、 $\alpha_{JK}/j\omega$ として算出した。

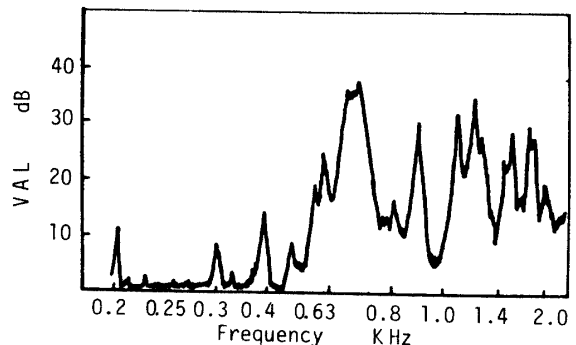
Fig. 4 は振動板の各位置における振動加速度レベル



(a) Center of the plate



(b) Middle point between center and edge



(c) Edge of the plate

Fig. 4 Frequency characteristics of VAL at each point

VAL (re. 10^{-2}m/s^2) の周波数特性の一例を示すものである。図において、(a)は振動板の中心付近、(b)は振動板の中心と固定端の中間付近、また(c)は振動板の固定端付近での測定結果である。図より、振動加速度レベルの各ピーク値は、測定位置によって著しく異なっていることが認められる。このことから、振動板の上方に形成される音場は振動モードにより大きく影響を受け、音圧レベルの分布は各周波数で複雑な形状となっているものと考えられる。

VAL のスペクトルにおいて、特に鋭いピークを示す共振周波数は Fig. 4 よりほぼ見当をつけることができる。したがって以後は、これらの周波数成分について解析を進めた。

本実験において、解析過程を要約すると次のようになる。

- (1) 振動板の振動加速度レベルの周波数特性よりも共振周波数を見出す。
- (2) 共振時の振動モードを調査するとともに、各部の振動加速度レベルと相対位相差を求める。
- (3) 各共振周波数の音圧レベルの分布状態を計算する。

なお計算には、山口大学電子計算機室 FACOM 230-28 を利用した。

5. 振動板の分割数が計算精度に及ぼす影響

振動板を微小要素に分割する際、微小要素の面積の大きさが全体の放射音の計算精度にかなりの影響を与えることが予想される。そこでまず、本実験で使用した円形振動板について、微小要素の大きさを変化させ、それぞれの場合において算出された音圧レベルの値から、振動板の分割数を決定することとする。

Table. 1 は円形振動板の分割数を変化させた場合に、振動板全体から放射される音圧レベルの計算の一例を示している。なお、音圧レベルの計算は振動板の中心上方 1m の位置で行った。また分割数の表示において、 12×12 は円形振動板の直交する 2 直径をそれぞれ 12 等分していることを示している。この場合、1 つの微小要素の面積は円形振動板の直径が 300mm であることより、 $625\text{mm}^2 (25\text{mm} \times 25\text{mm})$ となっている。ここで、分割数によって音圧レベルの計算値に差違を生じるのは、実際の振動モードをどの程度正確に記述できているかによるものと考えられる。

Table. 1 の結果より、400Hz の周波数成分については分割を粗くしても計算精度はあまり低下せず、最も分割の細かい 12×12 分割から最も粗い 4×4 分割までの

Table. 1 Number of divisions and calculated SPL
Sound pressure level at 1m from the surface(dB)

Divisions	400 Hz	694 Hz	890 Hz
12×12	45.1	39.3	37.8
10×10	45.2	38.6	37.5
6×6	44.4	41.1	35.2
4×4	45.6	45.4	37.5

計算値の差は 0.7dB 以内となっている。これに対して 694Hz の成分では 6×6 よりも分割を粗くした場合、急激に計算精度が悪化し、 4×4 分割ではさらに計算精度が低下している。したがって、この振動モードにおいては、 10×10 分割以上の細かい分割を行う必要があるものと考えられる。また、さらに周波数の高い 890Hz のモードでは、 10×10 分割の段階から 6×6 分割の段階に移ったときに、計算結果に 2.3dB の差が生じている。このことから、音圧レベルを正確に予測するのに必要な最小の分割数を決定するためには、より細かな分割による結果から判断することが必要であると考えられるが、以後の計算においては、すべて 12×12 分割を採用することとする。

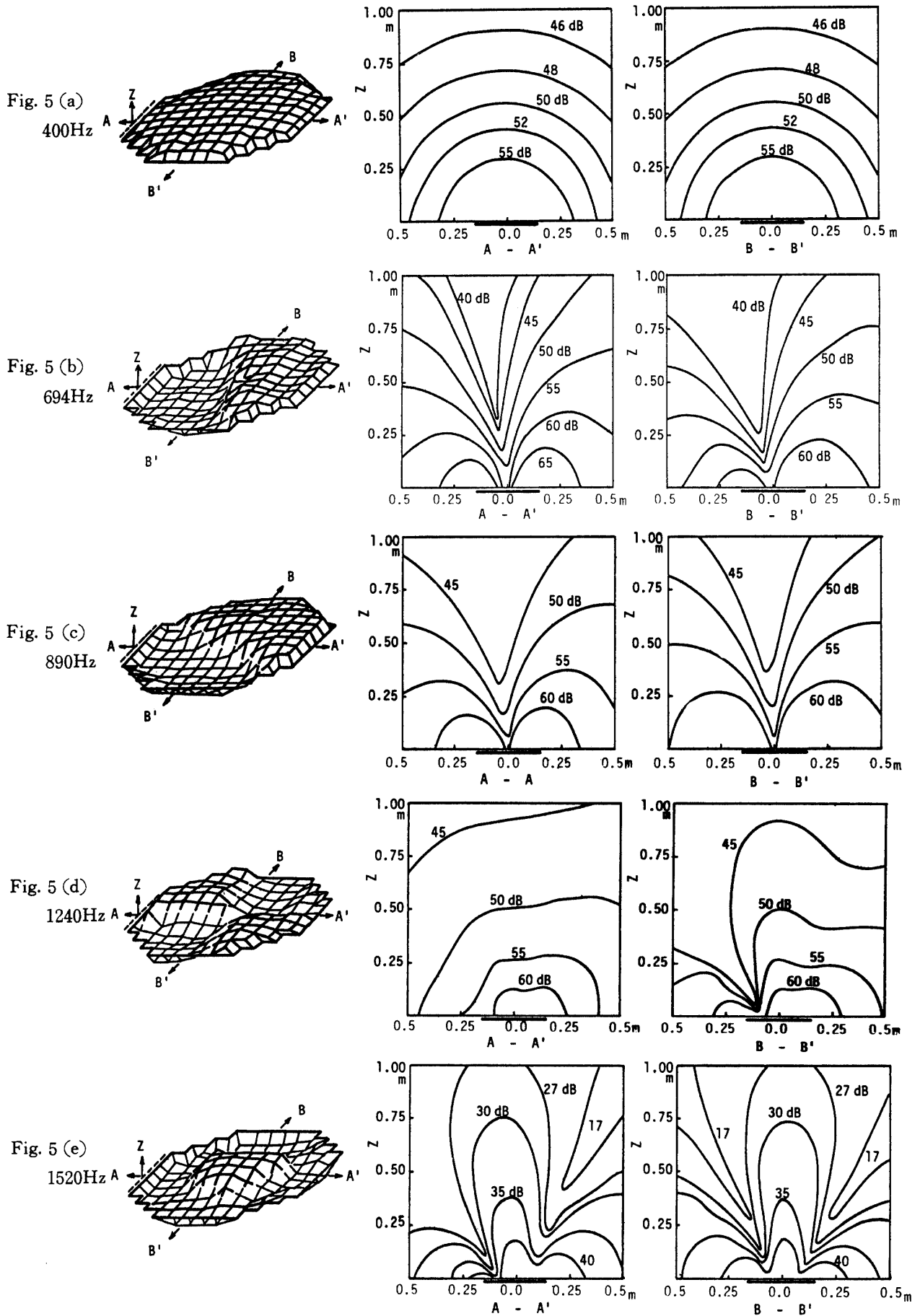
6. 各周波数における振動モードと音圧分布

Fig. 5 は、本実験で用いた円形振動板の主な共振周波数の振動モードと、放射音の音圧レベル分布の計算結果を示すものである。音圧レベル分布は振動板の A-A' を通る垂直断面と、B-B' を通る垂直断面とについて表示してある。

400Hz の振動モードは、中央が腹となる基本モードとなっており、この場合、振動板の上方に形成される音場において、音波は半球面状に伝搬していることが認められる。

一方、694Hz と 890Hz の振動成分はほぼ同じ振動モードを示しており、これらの振動モードによって形成される音場も傾向が似ていることがわかる。すなわち、振動板の中心上方付近で音圧レベルの著しい低下が生じており、断面が変わってもほぼ同様な傾向が認められる。これは節の前後において、逆位相で振動する部分かなりの面積におよんでおり、しかもそれらの面積がほぼ等しいため、節の上方付近では逆位相の音圧が加算され、互に相殺し合うことによって音圧レベルが低下するものと考えられる。

このようなことから、音圧レベルの大きさは、振動



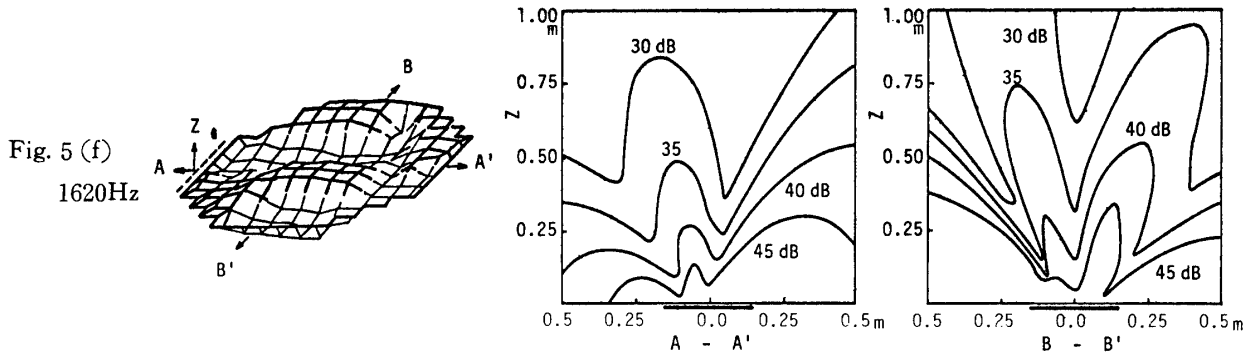


Fig. 5 Vibration mode shape and SPL distribution at each frequency

加速度レベルの大きさに必ずしも対応するとは限らず、音圧レベルも観測する位置によって著しく異なった値を示すことが推定される。また、高周波数になるほど振動モードは複雑となり、それによって発生する音場も複雑なものとなる。

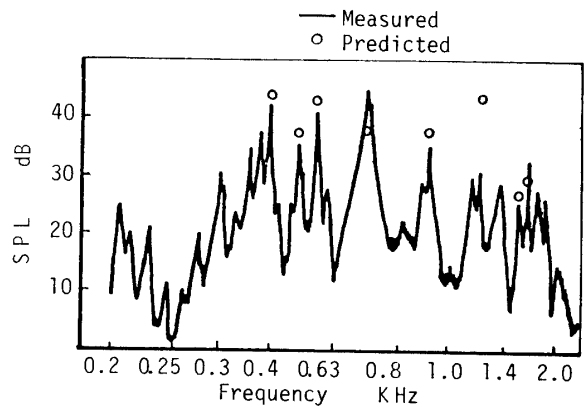
このことは振動面と放射音との関係を複雑にし、騒音問題の解決を困難にしている一要因であるが、このような計算方法を用いることにより、複雑な音場を推定でき、測定点において最も寄与する騒音の大きさや成分について解析を進めることが可能と思われる。

7. 各周波数における音圧レベルの計算値と実測値との比較

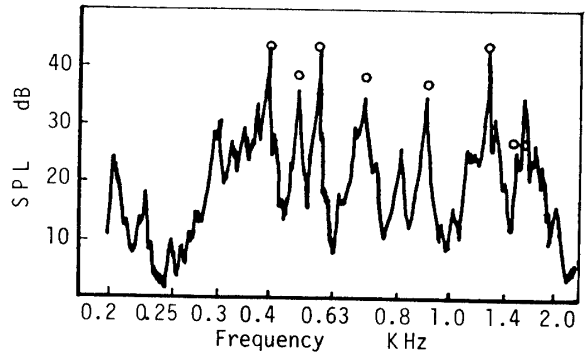
Fig. 6は振動板上方の各位置における音圧レベルの周波数特性を示すものである。(a), (b) および (c) は Fig. 3の No. 6 No. 12 および No. 16の各位置における音圧レベルであり、実測値は実線で示し、主な共振周波数についての計算値は○印で示している。

図より、400Hz, 500Hz および 585Hzの各周波数の SPL の実測値は測定位置によって大差は認められず、計算値も同様の傾向を示していることがわかる。これは前述のように、これらの周波数における振動モードが、中央を腹とする基本モードとなっており、音場に極端な偏りが認められないためである。また、実測値と計算値の差は3dB以内となっており、良好な対応を示している。

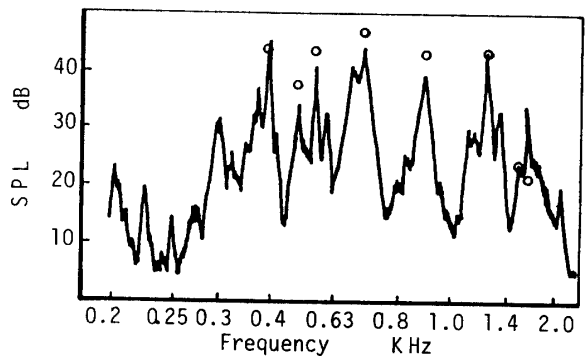
一方、694Hzと894Hzの周波数成分において、SPLの実測値は測定位置によって大幅に変化しており、振動モードの節のほぼ上方である(b)は(a)および(c)と比較してかなりのレベルの低下が顕著に現われている。なお、890HzでのSPLの実測値が(a)と(b)において大差がみられないのは、実際の振動モードが非対称であるためと考えられるが、このことは放射音の計算値からも確認することができる。



(a) Measurement point No.8



(b) Measurement point No.12



(c) Measurement point No.16

Fig. 6 Comparison between measured and predicted SPL

また、1240Hz以上の周波数成分についても SLPの実測値は測定位置によって変化し、それぞれの周波数における振動モードが音圧レベル分布に大きな影響を与えているものと考えられる。

なお、音場はこのように非常に複雑な形状をしており、音圧レベル分布の詳細な調査に際しては、マイクロホンの選択、あるいは実験条件について若干の問題があったものと考えられる。

8. 放射騒音のオーバーオール分布に関する検討

放射騒音のオーバーオール(O.A)はあらゆる周波数成分を含んでいるが、この中で共振周波数が寄与する割合はきわめて大きなものとなっている。

ここでは、主な共振周波数の放射騒音を合成したレベル値を近似的にO.A値とし、その分布形状と実測値とを比較することにする。

Table. 2は実測によるO.A値と計算によるO.A値との比較を示しており、測定位置を示す番号はFig. 3の各位置に対応している。

この結果より、計算値と実測値は良好な対応を示していることが認められ、主な共振周波数成分の SPLを合成してもある程度O.A値を予測することが可能と考えられる。

次にO.A値の分布について調査を行った。まず実測値によるO.A値の分布については、各位置で測定したO.A値が、それぞれ対数的に減衰するものと考え、内挿法によって推定した。また計算によるO.A分布は、主な共振周波数成分の合成で求められ、実験と計算による分布を比較しFig. 7に示している。

図よりO.A分布の形状は、計算値、実測値ともに振動板の中央で音圧レベルの低下がみられ、良好な対応

Table. 2 Comparison between predicted and measured over-all SPL

No.	Predicted (dB)	Measured (dB)	No.	Predicted (dB)	Measured (dB)
1	61.0	64.5	11	52.7	53.5
2	57.6	61.5	12	50.3	51.5
3	54.2	58.0	13	65.0	65.0
4	51.2	53.5	14	59.5	58.0
5	61.2	65.0	15	55.5	53.0
6	56.0	58.5	16	52.5	52.5
7	52.7	53.5	17	62.1	62.5
8	50.3	52.5	18	59.4	60.0
9	61.2	62.5	19	56.5	55.5
10	56.0	57.0	20	53.8	53.0

を示している。このことは、音圧レベルにおいて、O.A値の中で694 Hzや890 Hzの周波数成分がかなり大きな割合を占めているため、O.A値の分布状態にもその影響が現われたものと考えられる。

一方、Fig.8は振動板表面の振動加速度レベル VALのO.A値の分布状態を示したものである。(a)は前報で報告したように、加振力と円形振動板の支持条件が本報とは異なっており、中央部でのレベルが高くなっていることがわかる¹⁾⁴⁾。また、(b)は本実験の場合のO.A分布を示している。このことから、VALのO.A値の分布は実験条件によって大幅に変化することが認められる。

いま、音圧レベルと振動加速度レベルのそれぞれのO.A分布から両者の関係を調べることにする。この場

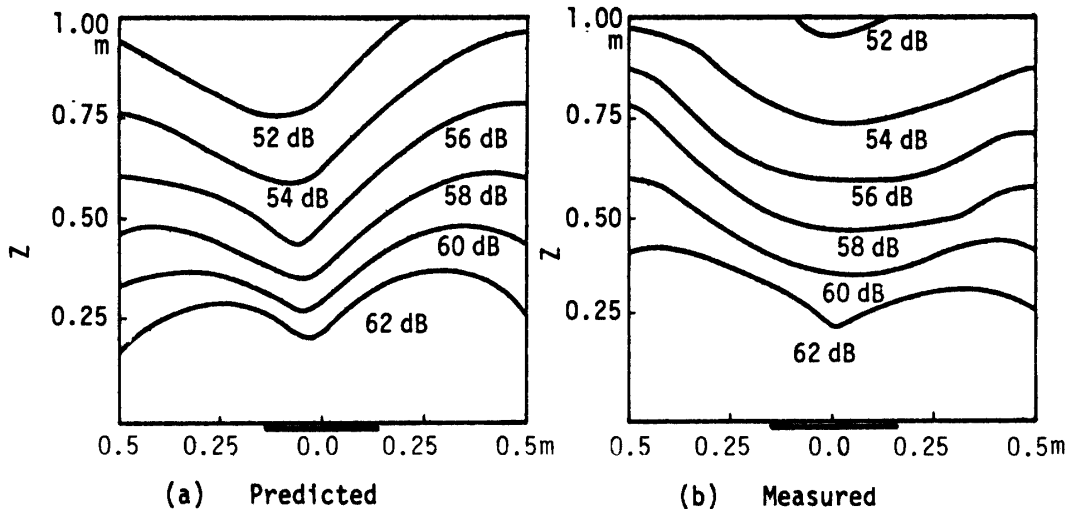


Fig. 7 Comparison between predicted and measured over-all SPL distribution (A-A' section)

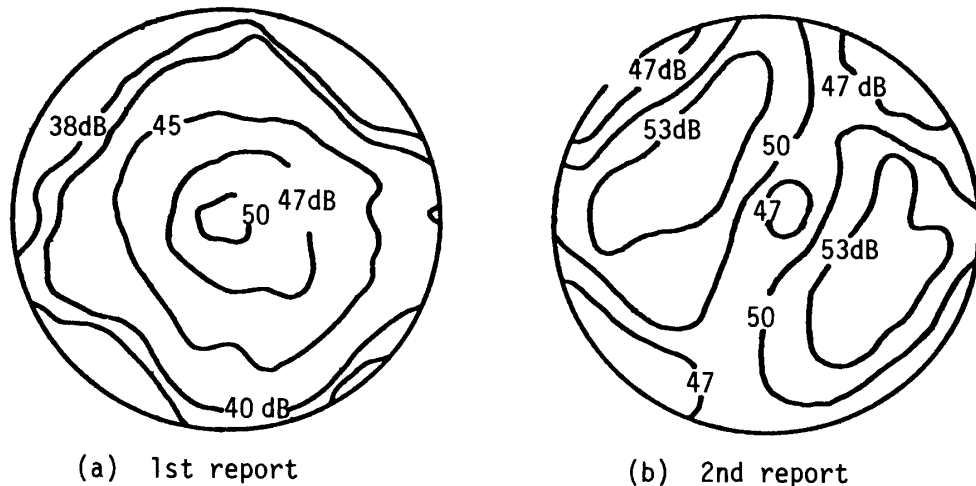


Fig. 8 Over-all VAL distribution on the circular plate

合，振動加速度レベル VAL の O. A 値の分布は Fig. 8 (b) に示すように，振動板の中心付近でレベルの低下がみられ，音圧レベルの O. A 値の分布とよく対応していることがわかる。したがって，振動加速度レベルの O. A 値の分布から，音圧レベル O. A 値の分布の形状については，ある程度推定することができる。さらに，分布している音圧レベルの O. A 値の大きさについては，本計算方法を用いることによってある程度予測できることが明らかとなった。

9. まとめ

振動板が微小騒音源の集合であるという考えに基づいて，円形振動板の振動と放射音との関係について解析を行った結果，次のことが明らかとなった。

- (1) 振動板を微小要素に分割し音圧レベルを予測する際，周波数が高くなるにつれて要素面積を小さくする必要があり，要素面積を 625mm^2 とした場合，騒音の予測値と実測値は $200\sim 2000\text{ Hz}$ の周波数範囲において良好な対応を示した。
- (2) 放射音の音圧レベル分布は，それぞれの周波数において振動モードと密接な関係を持っている。

また，高周波数になるにつれて振動モードおよび放射音分布はともに複雑な形状となる。

- (3) 振動加速度の主な共振周波数成分から，各周波数について算出した音圧レベルを合成し，放射音の O. A 値の予測を行った場合，予測値と実測値は良好な対応を示し，O. A 値の分布形状および音圧レベルをある程度予測することができた。

最後に，本研究を行うにあたって，和泉晴夫助手ならびに実験に協力された大淵秀治君をはじめ昭和52年度卒論生諸兄に感謝の意を表する。

なお研究費の一部として，昭和52年度文部省科学研究費（試験研究(1) 代表者：福田基一）を使用させていただいた。

参考文献

- 1) 福田基一，和泉晴夫：山口大学工学部研究報告，28，97-104 (1977)
- 2) 早坂寿雄，吉川昭吉郎：音響振動論，丸善 (1974)
- 3) K. Ochiai : Simple Model Technique for Better Understanding of Diesel Engine Vibration and Noise, SAE 750834
- 4) 福田基一，他2名：日本機械学会論文集，44，377(1978)
(昭和53年4月15日 受理)