

## 霧中号角の音響性能について

藤井 忍\* 小黒英男\* 原野勝博\*

## On the Acoustic Performance of Fog Horn

By

Shinobu Fujii, Hideo Oguro and Katsuhiko Harano

The acoustic performance of fog horn for ship should be decided not only on sound propagation over ocean, but also on masking of surrounding noise. As a result of acoustic tests of the actual fog horn, we found it desirable to improve these.

From these points of view, the study was done on several specimens. The results of the experiments, the followings were made clear;

- (1) The basic frequency of vibration plate in lied type fog horn is calculated by formula (4).
- (2) Sound power level is calculated by formula (15).
- (3) The acoustic performance of fog horn can be increased more than 20 dB by effective horn.

## 1. 緒言

霧中号角は、海上衝突予防法などに従って使用され、船舶設備規程および漁船特殊規程により船舶に設備することが、義務づけられている。

その性能については、手動により連続6秒以上、信号音の到達距離1海里と規定されているだけで、信号音の周波数、指向性等の音響性能については、まったく規定されていない。

信号音の伝搬状態については、当所において行なった海上実験の結果、ならびに諸外国の文献から、音源からの距離による信号音の減衰は、大気の状態に支配され、球状拡散計算値よりも多いことが明らかとなった。

これは、音の伝搬媒質となる大気の垂直方向の風速勾配、風向、温度および湿度の勾配によるもので、風上方向側では計算値よりも30 dB以上もの超過減衰を生じている。

また、信号音を聴取する側の環境騒音によるマスキング作用を考慮に入れると、可聴距離1海里に対する信号音の最適周波数は、500~1000 Hz であることが判明した。この様な見地から、霧中号角に関する適切な性能基準の資料を得ることが海難防止上重要なこと

であると考え、まず現在使用されている各種の霧中号角の音響出力、周波数特性等の音響性能を検討するための試験を行なった。

その結果、可聴距離1海里を満足するためには、一部のサイレン型号角を除いて音響出力の不足が明らかとなったので、音響出力の増大を計り系統的に試作した9種類のリードについての音響性能試験を行なった。またこれと併行して、回転板形の音響変換器を試作し、その音響性能試験を行なったので併せて報告する。

## 2. 記号

本文中の数式に使用する記号は次の通りである。

$A$	断面積 ( $\text{cm}^2$ )
$D$	音源からの距離 (m)
$E$	ヤング率 ( $\text{kg/cm}^2$ )
$I$	断面2次モーメント ( $\text{cm}^4$ )
$L_D$	距離 $D$ における音圧レベル (dB)
$N$	羽根の枚数
$PWL$	音響出力レベル (dB)
$R$	流体抵抗
$S$	ホーンの、のどの面積 ( $\text{cm}^2$ )

\* 艦装部

- $S_0$  ホーンの口の面積 (cm<sup>2</sup>)
- $V$  流量 (cm<sup>3</sup>/s)
- $W$  音響出力 (Watt)
- $W_0$  基準音響出力 (Watt)
- $a$  開口面積 (cm<sup>2</sup>)
- $C$  音速 (cm/s)
- $C_0$  0°C, 1 気圧の大気中の音速 (cm/s)
- $d$  管の直径 (cm)
- $fc$  遮断周波数 (Hz)
- $f_0$  基本周波数 (Hz)
- $f_r$  共鳴周波数 (Hz)
- $g$  重力の加速度 (≒980 cm/s<sup>2</sup>)
- $k$   $2\pi f/C$
- $l$  振動板の実効長 (cm)
- $l'$  ホーン長さ (cm)
- $n$  動力軸の回転数 (1/min)
- $n'$  動力軸の回転比  $\left(\frac{\text{サイレン軸の回転数}}{\text{動力軸の回転数}}\right)$
- $r$  ホーン口の半径 (cm)
- $v$  管内流速 (cm/s)
- $v'$  空気の粒子速度 (cm/s)
- $x$  ホーン頂点から口までの軸距離 (cm)
- $\gamma$  流体の密度 (kg/cm<sup>3</sup>)
- $\Delta p$  流体の上昇圧力 (kg/cm<sup>2</sup>)
- $\eta$  音響変換効率
- $\theta$  温度 (°C)
- $\lambda$  固有値 (片持ちばりのとき 1.875)
- $\rho$  密度 (g/cm<sup>3</sup>)

3. 現用各種号角の音響性能試験

3.1 供試号角

現用の霧中号角には次の2種類がある。

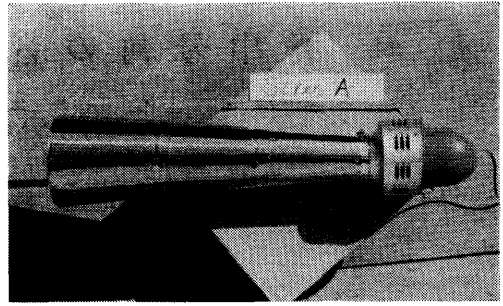


Photo. 1

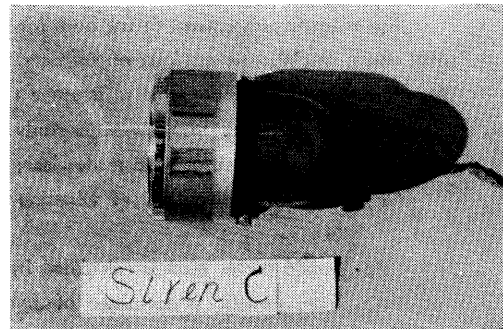


Photo. 2

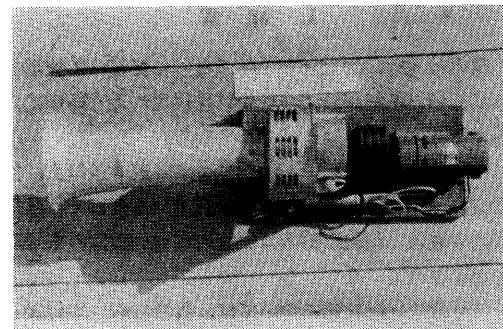


Photo. 3

Table 1 供試号角の概要

記号	形式	翼数	$f_0$ (Hz)	ホーン				備考
				形状	長さ (mm)	口の直径 (mm)	$f_r$ (Hz)	
A	サイレン形	8	360	円錐	600	180	240	T形翼
B	"	6	350	"	390	145	347	"
C	"	8	260	—	—	—	—	流線翼
D	"	8	340	変形円錐	280	205	504	T形翼
E	リード形	—	265	円錐	470	90	345	

- (1) サイレン形号角
- (2) リード形号角

供試号角の概要を Table. 1 および Photo 1~3 に示す。

### 3.2 試験方法

供試号角は手動式のため発音が一律でなく計測が困難である。そのためにサイレン形号角は、手動時の基準回転速度を得られるようにモーター駆動に改造した。周波数特性および音響出力は、当部の残響室地下の半無響室，交通安全部の無響室ならびに当部の屋上で測定した。測定状態を Photo. 4 に示す。

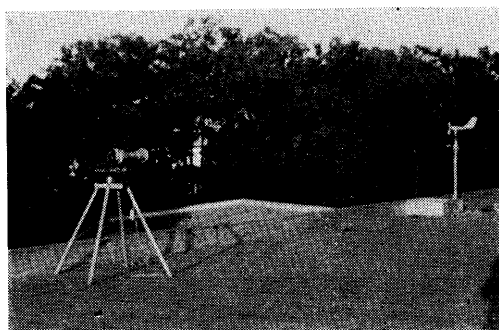


Photo. 4

### 3.3 計測結果とその検討

#### 3.3.1 音響出力

音源の音響出力レベル (PWL) は、次式で算出される。

$$PWL = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0} \dots\dots\dots (1)$$

各号角の音源は、充分離れた距離では、点音源とみなすことができるから、音源からの距離による信号音の PWL と音圧レベルとの関係は、次式で表わすことができる。

$$L_D = PWL - 20 \log_{10} D - 11 \dots\dots\dots (2)$$

したがって音圧レベル  $L_D$  を測定すれば、(2) 式から

Table 2 標準状態の PWL (dB)

号角	A	B	C	D	E
0, A	106	109	104	123	115
$f_r$	97	107	82	116	115
$2f_r$	102	96	95	120	105
$3f_r$	92	96	100	106	95

逆に各号角の PWL を求め得る。

各号角の標準状態における音響出力レベルを Table 2 に示す。表中の号角 E の値は、12 個の同一形式のリードの試験結果の最大値である。同図から号角 D が他のサイレン形号角と比較して大きな値を示しているのは、ローターの直径が 1.2 倍あるためである。

#### 3.3.2 周波数特性

サイレン形号角およびリード型号角の基本測波数  $f_0$  は、次式で求められる。

サイレン形号角

$$f_0 = n \cdot n' \cdot N / 60 \dots\dots\dots (3)$$

リード形号角

$$f_0 = \frac{\lambda^2}{2\pi l^2} \cdot \sqrt{\frac{E I g}{\rho \cdot A}} \dots\dots\dots (4)$$

各号角の周波数分析結果を Fig. 1~4 に示す。号角 D と E はホーンを装着したときのスペクトルである。

号角 A, B 共に  $f_0, 2f_0$  の音圧レベルが、約 15 dB ホーン装着により上昇する。1000 Hz 以上の成分は、駆動用モーターおよびギア等の機械音である。

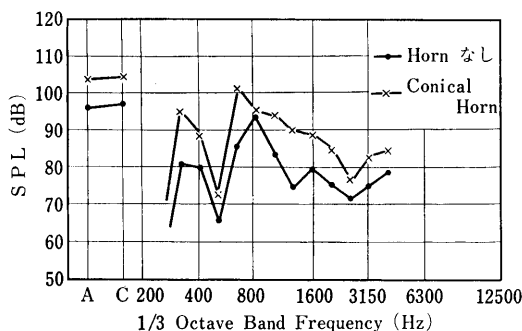


Fig. 1 号角 A の音響スペクトル

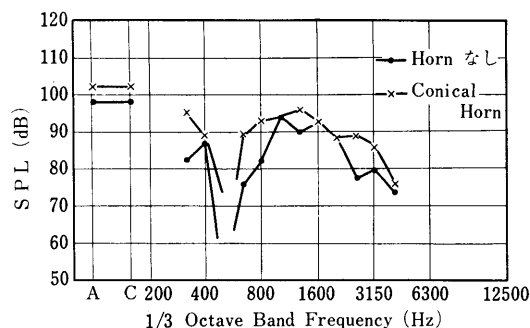


Fig. 2 号角 B の音響スペクトル

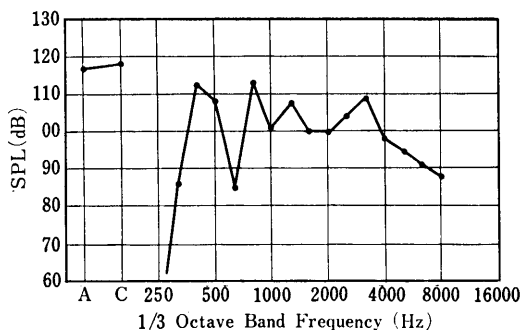


Fig. 3 号角 D の音響スペクトル

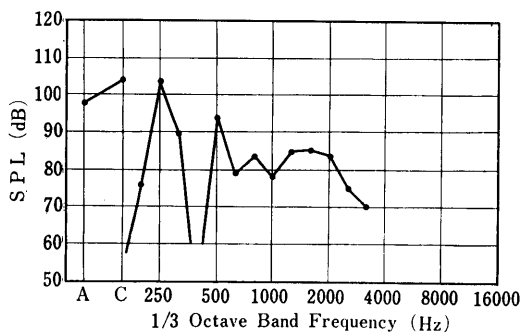


Fig. 4 号角 E の音響スペクトル

3.3.3 ホーン効果

号角にホーンを装着した時のホーンの音響効率  $\eta$  は次式で求められる。

Conical Horn の  $\eta$

$$\eta = k^2 x^2 / (1 + k^2 x^2) \dots\dots\dots (5)$$

Exponential Horn の  $\eta$

$$\eta = \sqrt{1 - \left(\frac{m}{2k}\right)^2} \dots\dots (6) \text{ 但し, } S = S_0 e^{mx}$$

効率  $\eta$  は, Fig. 5 に示すように, 無次元数  $kx$  の増

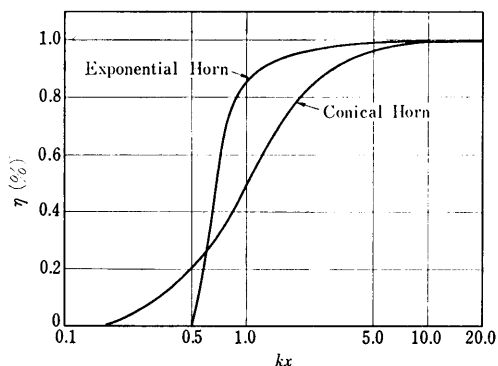


Fig. 5 Horn の効率

加にともなって増すから一つのホーンでは, 周波数が高くなる程効率が良くなる。また一般に Conical Horn の共鳴周波数は次の (7) 式で与えられ, Exponential Horn の遮断周波数  $f_c$  (Fig. 5 のように効率  $\eta$  が急激に減少する曲線となりこの周波数以下では,  $\eta$  がほとんど 0 になってしまうのでこの時の周波数を遮断周波数という) は, (8) 式で計算し得る。

$$f_r = \frac{C_0}{2(l' + 0.583r)} \times \sqrt{1 + \frac{\theta}{273.2}} \dots\dots (7)$$

$$f_c = \frac{mC_0}{4\pi} \times \sqrt{1 + \frac{\theta}{273.2}} \dots\dots\dots (8)$$

これらの計算式から各ホーンの  $f_r$  および  $f_c$  を求

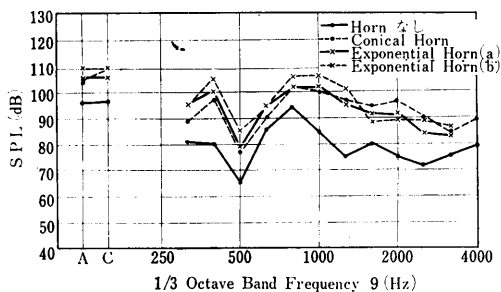


Fig. 6 Horn の装着による音響スペクトル

Table 3 Horn の寸法

Exp Horn	のどの直径 (cm)	口の直径 (cm)	長さ (cm)	$f_c$ (Hz)
a	15	38	28	229
b	17	52	38	221

めたのを Table 1, 3, 5 に示した。Fig. 6 は, 号角 A に, Conical Horn と Table 3 に示す 2 種類の Exponential Horn を装着した時の音響スペクトルである。

この結果は, 一つの号角に各種のホーンを装着すると, 基本周波数の音圧レベルが 10 dB 以上増加し, また, Conical Horn より Exponential Horn の方が更に数 dB 効果が増すことを示している。これは, Fig. 5 の効率  $\eta$  の差によるものである。有限長のホーンは, 一種の共鳴管とみなし得るからホーンの口における音響反射抵抗により共鳴現象を生じる。従ってこの共鳴周波数を号角の基本周波数に合致させれば最大の効果が得られよう。供試号角は両者が合致していないので, これらの合致により更に効率を増加し得ると考えられる。

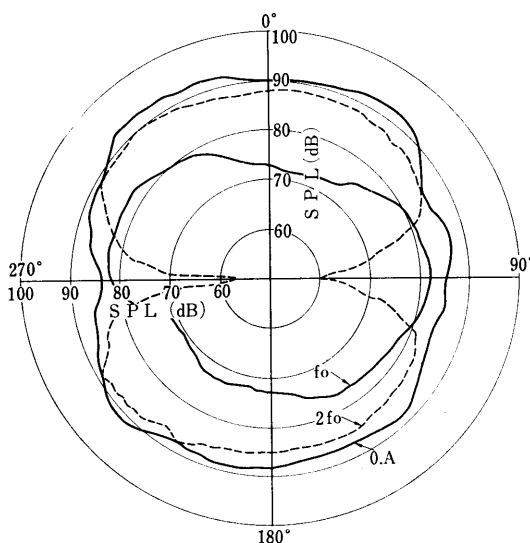


Fig. 7 指向曲線

### 3.3.4 指向性

代表的な号角の指向曲線を Fig. 7 に示す。またサイレン形号角 *A* を当部屋上において反射等のない様留意して、各距離における指向特性を測定したのが Fig. 8 である。指向曲線から明らかなように、号角から聴取点までの距離が近いと指向性が強くであるが、10 m 近くなるとほとんど指向性をもたなくなる。これはサイレン形号角の場合ホーンの開口部と流出空気のシャッター部の 2 個所が音源となるためである。このような場合はホーンの軸に対し、90°、270° 方向に強い指向性を持つ。音源間の間隔に比較し、聴取距離が充分大きくなれば、両者は同一音源とみなされるようになる。

### 3.3.5 供試号角の可聴距離

現用霧中号角の音響出力レベルから (2) 式を用いて受音側の音圧レベル  $L_D$  を算出し、受音点側の騒音のためのマスキング効果を約 40 dB として、信号音の可聴距離を示したのが Fig. 9 の○である。図中の細線 2 本は、受音点側の騒音の大小を考えた  $\pm 10$  dB の線である。この結果、可聴距離を 1 海里と限定すれば、号角 *D* を除いていずれも音響出力レベルが不足していることが明らか

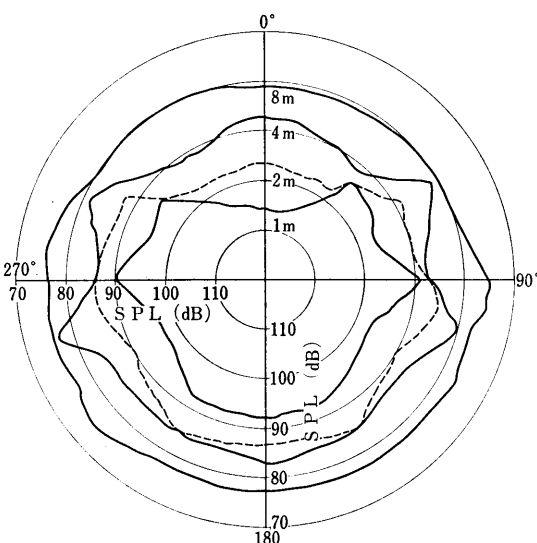


Fig. 8 指向曲線

となった。

## 4. 試作音響変換器の音響性能

現用号角の試験結果から、号角の音響性能を向上する必要が認められた。性能の向上は、サイレン形号角では開閉部の径を大きくすることにより可能であると考えられるが、リード形号角では、リード部寸法と、リード部の空気圧に左右されるものと考えられるので、これらの関係を究明するため、主としてリード形の性能向上試験を行なうこととし、リードを試作して

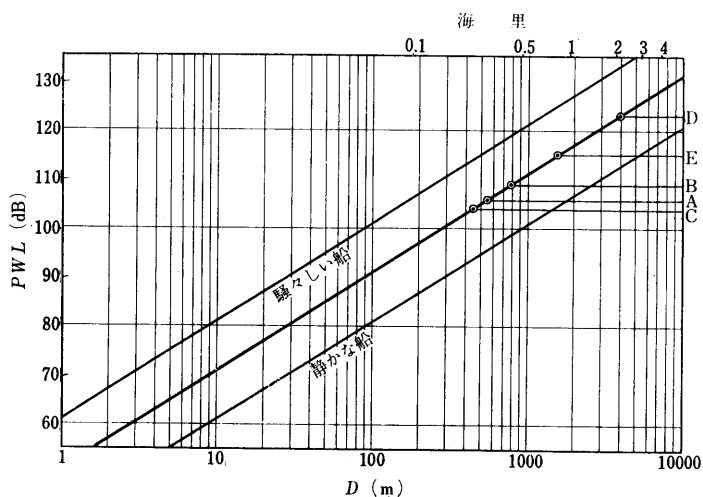


Fig. 9 可聴距離曲線

その音響性能試験を行なった。また更に大きな音響出力を得るために、回転板形の音響変換器を試作し、その音響性能を究明することとした。

4.1 試作音響変換器の設計

4.1.1 リード形音響変換器

リード形号角の変換部を、Fig. 10 に示す。変換部の振動板は、圧縮空気の流出により振動し、空気の流

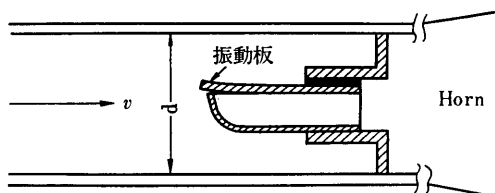


Fig. 10 リード形号角の概要

れを断続的に閉じて音を発生する。この時の管内の供給空気流量  $V$  は次式で求められるから、

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \times v \approx 7.1 v \dots\dots\dots (7)$$

振動板の静止開口面積を  $a$  とすれば、開口面から流出する空気の流出速度  $v'$  は、

$$v' = V/a \approx 7.1 v/a \dots\dots\dots (8)$$

となり発生音の音響出力  $W$  は

$$W = \eta \cdot \rho \cdot C \cdot v'^2 \cdot a \times 10^{-7} \dots\dots\dots (9)$$

で表わされるようになる。(9) 式に (8) 式を代入し  $\eta = 1.0$  と仮定すれば、

$$W = 2.06 \times 10^{-4} v^2/a \dots\dots\dots (10)$$

となり (1) 式により次式を得る。

$$PWL = 20 \log_{10} v - 10 \log_{10} a + 83 \dots\dots\dots (11)$$

また  $v$  を  $v'$  とすると (11) 式は (12) 式に変形される。

$$PWL = 20 \log_{10} v' + 10 \log_{10} a + 66 \dots\dots\dots (12)$$

一方振動板を通過する流体抵抗  $R$  は、

$$\Delta p = R(\gamma v'^2/2g) = 6.62 \times 10^{-10} v'^2 R \dots\dots\dots (13)$$

で表わされるから

$$v'^2 = 1.5 \times 10^9 \Delta p/R \dots\dots\dots (14)$$

となり (12) 式は、

$$PWL = 10 \log_{10} \Delta p - 10 \log_{10} R + 10 \log_{10} a + 158 \dots\dots\dots (15)$$

と置き換えられる。10 log<sub>10</sub>  $R$  の値は、現用リード 12 個の試験結果の平均で、42 dB となった。この値を (15) 式に代入すれば、次の実用式を得る。

$$PWL = 10 \log_{10} \Delta p + 10 \log_{10} a + 116 \dots\dots\dots (16)$$

従って所要の  $PWL$  に対して、 $\Delta p$  および  $a$  が決定し得る。(16) 式により、信号音が 1 海里到達するため

Table 4 試作振動板の寸法

リード No.	長さ (mm)	幅 (mm)	厚さ (mm)	$f_0$ (Hz)
1	69.7	15	2.0	193
2	"	20	"	228
3	"	25	"	224
4	"	30	"	228
5	60.5	20	1.5	234
6	84.5	"	3.0	202
7	98.6	"	4.0	193
8	52.6	"	1.5	400
9	37.2	"	"	400

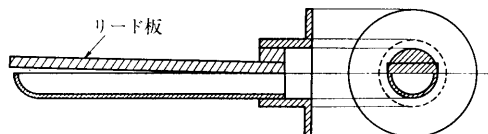


Fig. 11 振動板形変換器

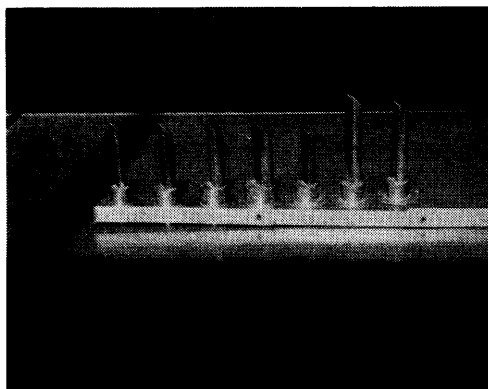


Photo. 5

の所要  $PWL$  を 118 dB として、リード形音響変換器の設計を行なった。また、振動板の共振周波数  $f_0$  は、片持ち梁の計算式 (4) で行なった。試作振動板の寸法を Table 4 に、変換器の組立図を Fig. 11 および Photo. 5 に示す。

4.1.2 回転板形音響変換器

この変換器は、固定板と回転板に設けた小孔を、回転板を回転することにより開閉し、供給空気を断続的に放出して音波に変換する小型の音響発生器である。Fig. 12 に変換器の組立図を、Photo. 6 に変換器を示

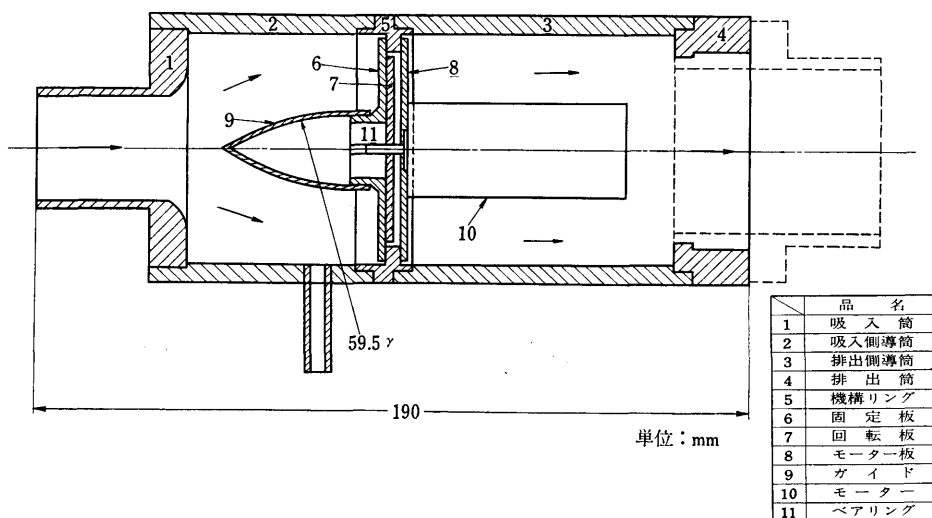


Fig. 12 回転板形音響変換器組立図

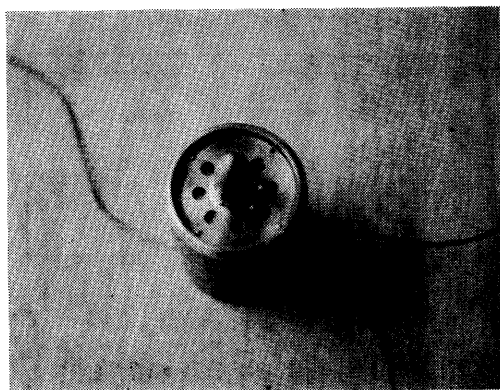


Photo. 6

す。回転板は、DC マイクロモーター（出力 2 Watt、定格電圧 12 V）を直結し、電圧制御により 80~650 Hz の基本周波数を任意に得られるように設計した。変換部の小孔の形は、丸型と 1/5 の開口面積をもつスリット型の 2 種類とした。

#### 4.2 試験方法

圧縮空気を減圧弁と小型タンクを経て、当部残響室地下の半無響室に設置した変換器へ供給した。発生音は、変換器およびホーンの開口端より軸上 1m の点でコンデンサ、マイクロフォンを用いて測定した。測定は、変換器単独の場合、Conical Horn, Exponential Horn を装着した場合で行なった。使用したホーンの寸法を Table 5 に示す。

Table 5 Horn の寸法

形 状	Conical	Exponential
のどの直径 (mm)	50	22
口の直径 (mm)	110	510
長 さ (mm)	530	1230
$f_0, f_c$ (Hz)	298	144

#### 4.3 試験結果とその検討

##### 4.3.1 リード形音響変換器

###### a) 振動板の共振周波数

動電形加振器により、各試作リードの振動板の共振周波数を求めた結果、Table 4 の右端の値を得た。この値は、片持ち梁の計算式から求めた値と 3% の誤差にすぎない。従って、振動板の共振周波数は、片持ち梁の基本振動数計算式で算出してよい。

###### b) 音響出力

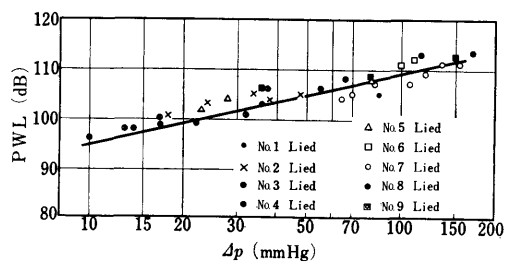
Fig. 13  $\Delta p$ -PWL 曲線

Fig. 13 は、供給空気によるリード部の圧力増加  $\Delta p$  に対する音響出力 ( $PWL$ ) 曲線である。各実験値は、(15) 式の計算曲線に  $\pm 3$  dB 範囲で一致する。 $PWL$  は、圧力増加  $\Delta p$  が 2 倍になるごとに 3dB 上昇する。また (15) 式に実験値を代入して  $10 \log_{10} R$  の値を求めると約 42 dB となり設計時に設定した値に等しい。従って、(15) 式は、(16) 式の実用式に変形し得る。

試作した 9 個の振動板に各種ホーンを装着した時と装着しない時の最高  $PWL$  を Table 6 に示す。

Table 6 最高  $PWL$  (dB)

リード No.	Horn なし	Conical Horn	Exponential Horn
1	113	117	123
2	110	116	124
3	121	126	131
4	117	125	134
5	111	116	126
6	113	120	126
7	110	118	130
8	116	129	—
9	113	129	—

c) 周波数特性

Fig. 14 は、リード部圧力増加  $\Delta p$  がほぼ等しいときの各変換器の音響スペクトルである。200 Hz band の基本周波数とその倍音の音圧レベルは、(15) 式のとおり開口面積  $a$  の増加とともに増大する。800~1000 Hz band に最大の音圧レベルを生じたのは、発音部か

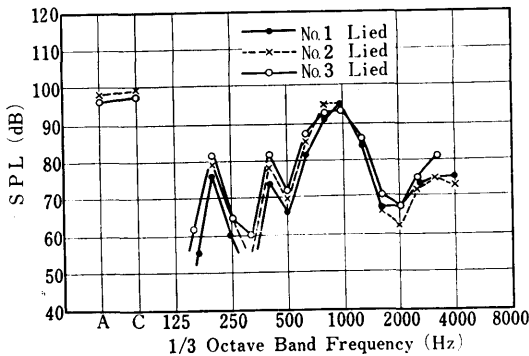


Fig. 14 振動板形変換器の音響スペクトル

ら開口端までのホーン効果と基本周波数の 4~5 倍音の共鳴作用によるものと考えられる。

d) ホーン効果

Fig. 15 は、号角の先端に各種のホーンを装着した場合とホーンのない場合の音響スペクトルの比較を示すものである。図からホーンの  $f_r$  および  $f_c$  の影響を受けてスペクトルが変化していくことが分る。各ホ

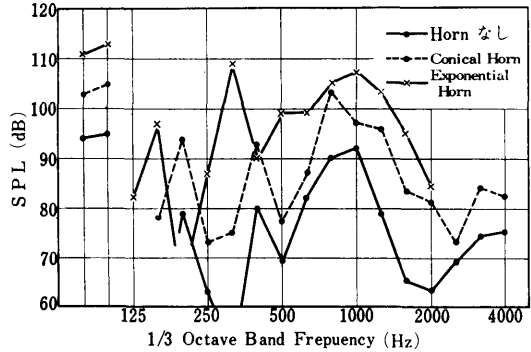


Fig. 15 Horn 装着時の音響スペクトル

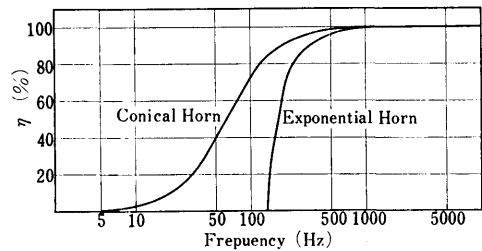


Fig. 16 Horn の効率

ーンの音響効率は、計算上 Fig. 16 に示す通りであるが、実際には、ホーンの開口部付近で音波の反射があるため音響インピーダンス特性が変化する。ホーン開口部の直径が大きくなると特性曲線がいく分なめらかになる。この現象は、ホーンに同一音圧レベルを加えて音響インピーダンスの変化を調べた結果明らかとなった。

4.3.2 回転板形変換器

a) 音響出力

供給する空気の流量が一定の時、入力電圧に対する基本周波数は、直流モーターを使用しているため直線的に比例し、かつ基本周波数に対する音響出力レベルは、Fig. 17 の通りである。基本周波数が低いと変換器開口部における音響効率が小さいので、 $PWL$  が小さい。Conical Horn を装着するとホーンによる音響効率の増加により  $PWL$  がホーンなしに比較し増加す



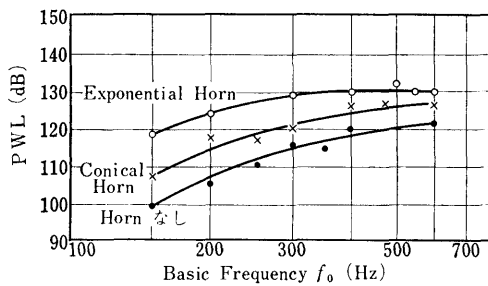
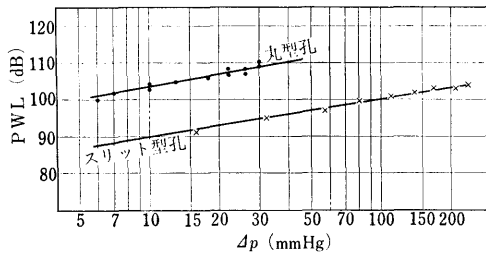


Fig. 17 回転板形変換器の音響出力

Fig. 18  $\Delta p$ -PWL 曲線

る。Exponential Horn の場合には、低周波でより大きな効率増加を得た。このときのレベル増加は、Conical Horn については 5 dB. Exponential Horn は約 10 dB である。Fig. 18 は、リード圧力増加  $\Delta p$  と音響出力レベルの関係を示すもので、この実験曲線は、 $\Delta p$  が 2 倍になるときに  $PWL$  は 3 dB 増加し、(15) 式に合致する。開口面積が小さいスリット孔型では、孔部の流体抵抗が増加したため、一定空気量に対する  $\Delta p$  の増加を生じたが、開口面積の縮小による音圧レベルの低下と、乱流損失と考えられる効率低下により、(15)式の計算値よりもレベルが減少した。

#### b) 周波数特性

Fig. 19 は、3 種類の回転速度における発生音の音

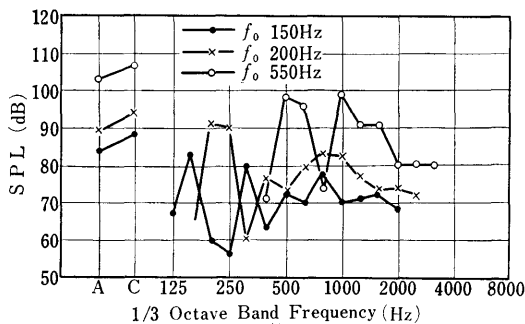


Fig. 19 回転板形変換器の音響スペクトル

響スペクトルである。いずれのスペクトルも基本周波数音と、その倍音とが大きなレベルを示し、発生音の主成分をなしている。高周波成分の音は、空気の流出音と考えられる。

#### c) ホーン効果

各種ホーンを装着した時の発生音の音響スペクトルの比較を、Fig. 20 に示した。ホーンに装着により、4.3.a). d) 同様、最大 20 dB のレベル増加が得られた。

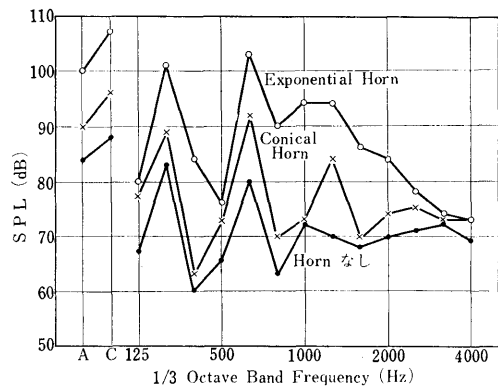


Fig. 20 Horn 装着時の音響スペクトル

## 5. 結 び

以上現用号角と試作号角についての音響性能について述べた。現用号角は、一部を除き音響出力を若干増加する必要があろう。試作のリード形号角の音響試験の結果。

a) 音響出力はリード部の圧力増加  $\Delta p$  と、開口部の面積  $a$  の対数に比例する。

b) 変換部の振動板の基本周波数は、(4) 式に固有値  $\lambda=1.875$  を採用して算出し得る。

c) ホーンを装着することにより、音圧レベルを、20 dB 程度増加することが可能である。

d) 現用号角でも、更に供給空気圧を増し、ホーンの効率を高めれば、音響出力を増大することができる。

また、回転板形音響変換器は、供給空気圧の増大により、大きな  $PWL$  を得ることができ、電圧変化により、基本周波数を自由に变化し得るから、特殊な形式の汽笛として使用することが可能である。

以上霧中号角の音響性能について述べた。この結果が現用号角の性能向上に幾分でも役立てば、幸であ

る。終りに、本試験研究に御協力頂いた日本船燈株式会社、矢萩工業株式会社、矢萩研究所の各位に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 霧中号角について(1)現用号角の音響特性, 船舶技
- 2) 霧中号角について(2)霧中号角の音響性能について, 船舶技研, 研究発表会講演概要, 第 13 回, 昭和 44 年 5 月。
- 3) 音響工学(上) Harry F. Olson.