

# 論文 ホーンの音響特性シミュレーション\*

## Acoustic Simulation of Horn

林 俊男 太田輝暁 片桐 誠 平 等  
 Toshio HAYASI Teruaki OHTA Makoto KATAGIRI Hitoshi TAIRA

It is necessary to improve the efficiency of sound pressure to make a horn more compact and lightweight. Denso established a simulation approach comprising the following two segments : a vibration model in which a diaphragm and vibrator are integrated and an acoustic model covering all fields both inside and outside of horn. With this method, the best suited vibration characteristics can be materialized, and sound pressure efficiency has improved by 40% while downsized 15% compared with the existing products.

Key Words : Acoustic, Simulation, Horn

### 1. まえがき

自動車用警告器（以下ホーンと称す）は、車や歩行者に警告を発する装置として長い歴史があるが、それは他製品と同様小型軽量化の歴史でもあった。今後さらに厳しくなると予想される小型軽量化のニーズへの対応には大幅な音圧効率向上が必要である。それには、主たる発音体であるダイヤフラムアッセンブリ（以下ダイヤフラム ASSY と略す）の音圧効率を向上させなければならない。しかし、従来の設計手法では、部品単品での共振周波数しか計算出来ずダイヤフラム ASSY の音響特性の最適設計が不可能であった。本研究ではダイヤフラム ASSY の音響特性を高精度で求めるため振動とホーン内外の音場全てを連結させたシミュレーション手法を開発、音圧増幅のメカニズム解明により、従来品に比べ40%の音圧効率の向上により目標とするホーンの小型化を達成した。

### 2. 背景及び開発の目標

ホーンに対するユーザーのニーズとしては、小型軽量化、低コスト、音色の高級化があげられ、中でも小型化に関する動向を見ると Fig. 1 のようになる。これより、ニーズに対応するためには外径で15%（投影面積で30%）の小型化を実現することが必要である。

そこで、開発の目標を、現状の音圧出力（SPL）の維持（EC 認証適合）、かつ外径で15%小型化とした。Fig. 2 はこの目標を音圧効率（音圧/投影面積）で表

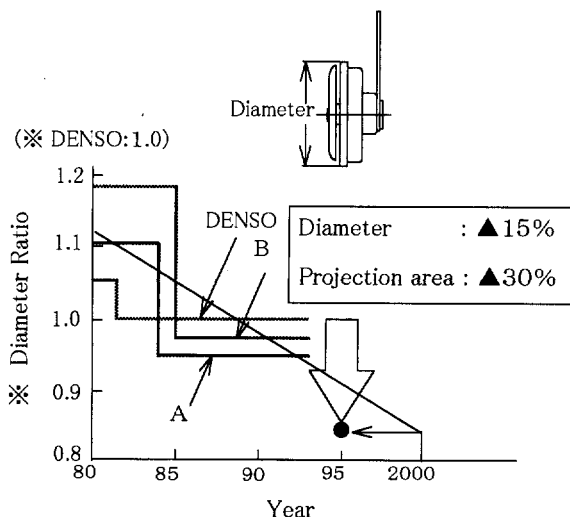


Fig. 1 Trend of Downsizing

わし、他社品（A, B, C 社）及び当社従来品と比較したものである。これより、目標達成のためには、従来品比40%の大幅な音圧効率の向上が必要であることがわかる。

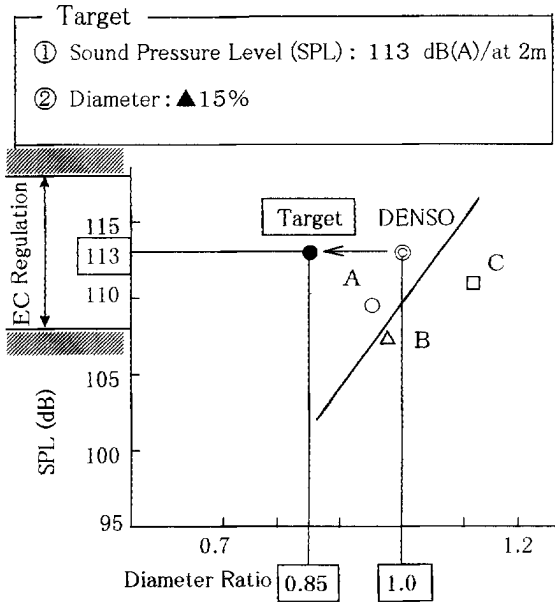
### 3. ホーンの音響構造

#### 3.1 ホーンの発音メカニズム

ホーンの基本構造を Fig. 3 に示す。ホーンはダイヤフラム、パイプレータ、ムービングボルトからなるダイヤフラム ASSY と、吸引力を発生するコイル、図3では省略してあるが、コイルに流れる電流を断続する電気回路、及びこれらを固定し磁気回路を形成するハウジングより構成される。

次にホーンの発音原理を Fig. 4 に示す。コイルに通

\* 1997年9月9日受付



SPL Efficiency  
(SPL/Projection area)  
 $2.2 \times 10^{-3}$  (Pa/mm<sup>2</sup>)

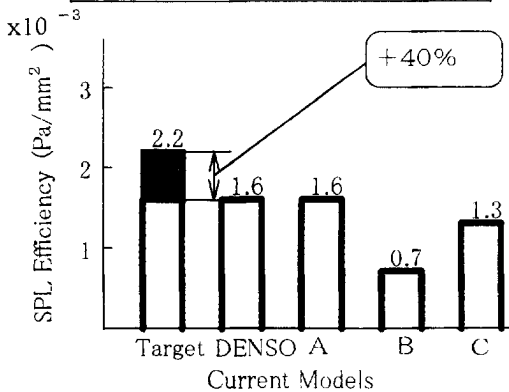


Fig. 2 Target of Development

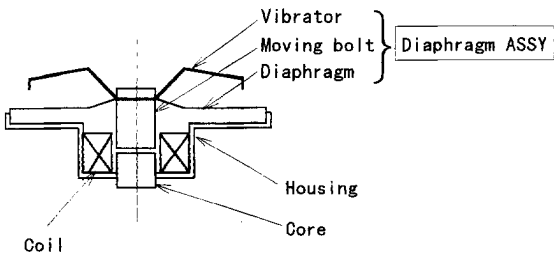


Fig. 3 Configuration of Horn

電するとダイヤフラム ASSY が吸引され、ムービングボルトがハウジングに固定されたコアと衝突する。これにより基本周波数（電流の断続周波数）の整数倍の

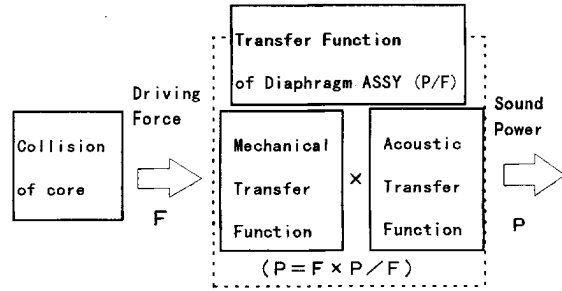


Fig. 4 Sounding Mechanism of Horn

衝撃力が生じ、ダイヤフラム ASSY を振動させ、音が生じるのである。ここで、ダイヤフラム ASSY に作用する加振力を振動に変換する効率を表わしたものが振動伝達関数であり、その振動を音に変換する効率を表わしたものが音響伝達関数である。両者の積をダイヤフラム ASSY 伝達関数と呼ぶ。

### 3・2 周波数特性とダイヤフラム ASSY 伝達関数の関係

Fig. 5 はホーンの吹鳴音圧周波数特性を示したものである。衝突によって生じる基本周波数( $f_0$ )の整数倍の加振力成分の大きさは周波数に関係なく一定であるため、吹鳴音圧成分の大きさはダイヤフラム ASSY 伝達関数により決まり、音圧向上のためにはこの伝達関数のレベルを向上させることが必要である。

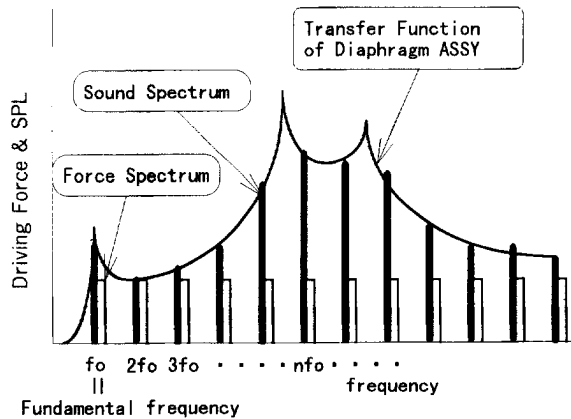


Fig. 5 Frequency Characteristic of Horn

## 4. 研究の目的

### 4・1 従来の設計手法の問題点

Fig. 6 に従来の設計手法の手順を示す。従来の音響特性の設計は、ダイヤフラム、バイブレータ単品の共振周波数計算のみで、音圧は実際に試作してみないとわからない状況にあり、数多くの試作評価を繰り返していた。この最大の原因は設計段階でダイヤフラム

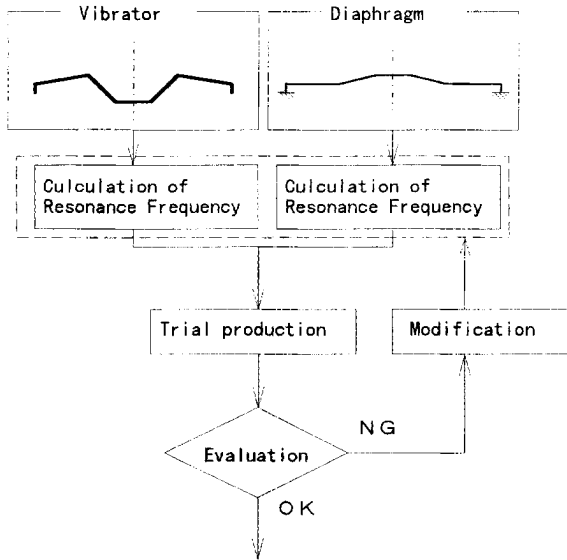


Fig. 6 Conventional Designing Method

ASSYの伝達関数を予測できないことにある。

Fig. 7は単品とダイヤフラム ASSYの伝達関数を測定した結果である。これより、単品よりもダイヤラム ASSYの音圧の方が高い、即ち増幅効果があることがわかる。(図中斜線部)ホーンの音圧を制御するには、この増幅効果を正確に知る必要がある、その為にはダイヤフラム ASSYの伝達関数を予測できる手法が不可欠である。

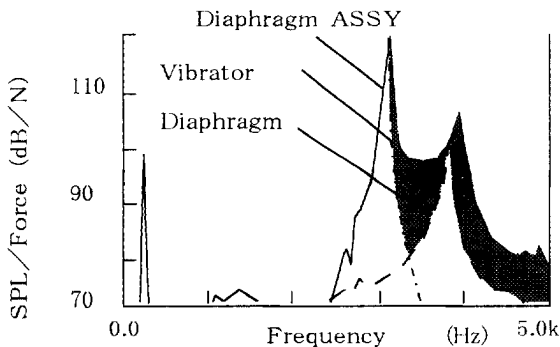


Fig. 7 Transfer Function of Diaphragm ASSY

#### 4・2 研究の目的と課題

そこで、研究の目的として、ダイヤフラム ASSY伝達関数を高精度で求められるシミュレーション手法を開発し、それを最適設計に適用して目標である音圧効率が40%向上を実現することとした。研究の課題としては次の2項目があり以下検討内容について詳細に述べる。

- (1) ダイヤフラム ASSYの振動解析モデル
- (2) 振動、音響伝達関数の高精度計算

### 5. シミュレーション手法の開発

#### 5・1 モデルの検討

ダイヤフラム ASSYの振動特性を正確に計算するには、ダイヤフラム ASSYを構成するダイヤフラム、パイプレータ、ムービングボルトの形状を正確に表現するモデルを検討する必要がある。計算モデルとしては①シェル、②ソリッド、③シェル+ソリッドが考えられ、各々の計算精度を比較した結果を Fig. 8に示す。形状を板で表現するシェルは、ダイヤフラム、パイプレータのような薄板構造に対する精度は高いが、ムービングボルトに対しては集中質量として扱うため精度が低い。一方、形状を塊で表現するソリッドは、ムービングボルトのような剛体に対しては現実と同じ分布質量として扱えるため精度は高いが、薄板構造に対しては曲げ剛性の計算精度が低く、シェルと同程度の精度を得るにはより多くの要素数が必要になり、そこで最適なモデルとして、ダイヤフラム、パイプレータはシェルで、ムービングボルトはソリッドで表現するハイブリッドモデルを採用した。

		Shell	Solid	Shell + Solid
Accuracy	Diaphragm	○	×	○
	Vibrator	○	×	○
	Moving Bolt	×	○	○

Fig. 8 Accuracy of Models

#### 5・2 計算手法の検討

##### 5・2・1 計算の狙い

ホーンの振動と音響伝達関数を高精度で計算する最大の課題は、ダイヤフラム ASSYの振動によって生じる音をいかに正確に求めるかである。ダイヤフラム ASSYの振動により生じる音は、Fig. 9に示す如く、次の2つの音からなっている。

- ① パイプレータからの直接放射音
- ② パイプレータ、ダイヤフラム間内部空間からの放射音

しかし、従来、この2つの音を一括して解くことは不可能であった。そこで、2つの音を合成して計算す

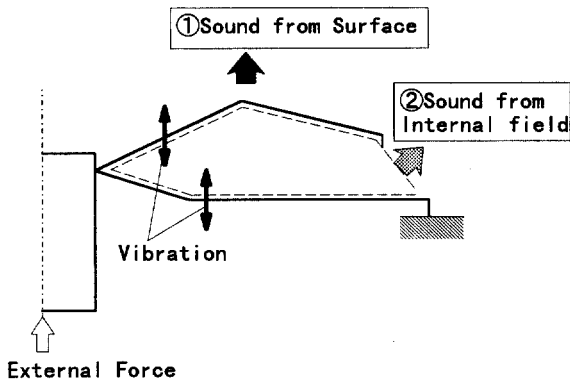


Fig. 9 Acoustic Model of Horn

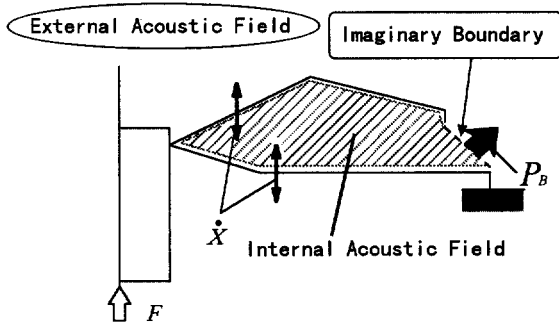


Fig. 10 Separation of Acoustic Fields

る新しい手法を検討した。

5・2・2 仮想境界による音場の分割

ホーンにより形成される音場を計算するために、音場を内部、外部に分割し計算をすることを考案した。

それには2つの音場のインターフェースを設定する必要がある。そこでFig. 10の様な仮想境界(空気の壁)を考え、そこで音圧の受け渡しをすることとした。仮想境界は、計算モデル上空気のインピーダンスをもつシェル要素で表現する<sup>2)</sup>。

5・2・3 計算方法

計算の流れをFig. 11に示す。運動方程式(1)を解くことによって振動速度  $\dot{X}$  を求め、これを内部音場を求める波動方程式(2)に代入、仮想境界音圧  $P_B$  が

$$[M]\{\dot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\} \quad \dots\dots(1)$$

$$\nabla^2\{P\} + \kappa\{P\} = \rho c\{\dot{X}\} \quad \dots\dots(2)$$

$$\nabla^2\{P\} + \kappa\{P\} = \rho c\{\dot{X}\} + P_B \quad \dots\dots(3)$$

[ ] ; Coefficient Matrix  
 $\{X\}$  ; Displacement {F} ; Force {P} ; Sound Pressure  
 $\kappa$  ; (Frequency / Sound Speed)<sup>2</sup>  
 $\rho$  ; Density of Air  $c$  ; Sound Speed

Fig. 11 Calculation Flow

得られる。次に、この  $P_B$  と式(1)によって得られたパイプの振動速度  $\dot{X}$  を外部音場を求める波動方程式(3)に代入し空間の任意点の音圧が求められる。尚、各方程式の解法として、①はFEM(有限要素法)、②③はBEM(境界要素法)<sup>3)</sup>を採用した。以上で、ダイヤフラム ASSY の振動と、内外の音場全てを考慮した伝達関数シミュレーションを構築することが出来た。

5・3 シミュレーション結果の検証

シミュレーションの精度を検証するため、Fig. 12のモデルにて伝達関数の計算を行った。Fig. 13は前方2mにおける音圧の計算値と実験値を比較したもので

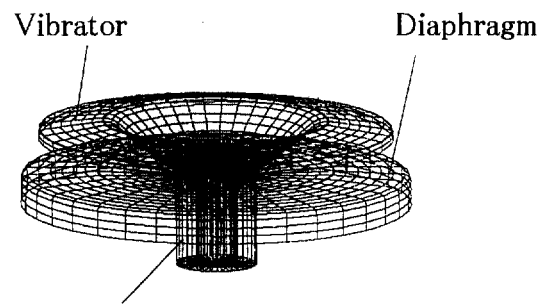


Fig. 12 Simulation Model

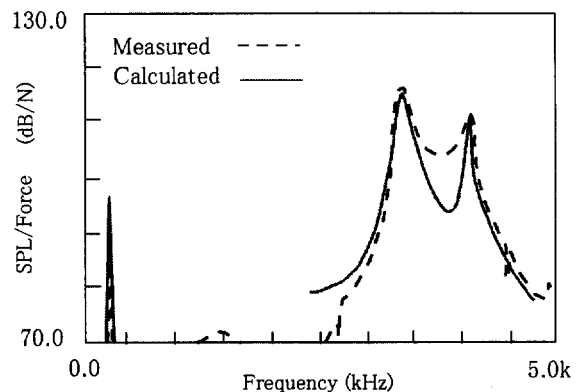


Fig. 13 Results of Simulation

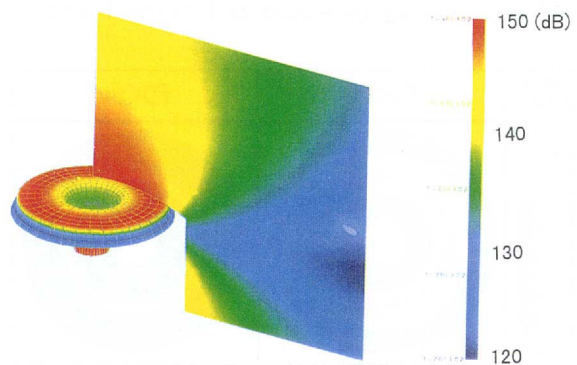


Fig. 14 Contour Chart of SPL

あり、実験値と計算値はよく一致している。これにより、シミュレーションの精度を検証することが出来た。Fig. 14 は放射音の音圧分布を表わしたものであり、ホーンの指向性をよく表わしている。

## 6. 最適設計への適用

### 6・1 音圧効率向上の方策検討

音圧効率向上の方策としては、①ダイヤフラム、パイプレータ単品の音響効率向上②ダイヤフラム ASSY の増幅率向上が考えられる。ここで、①の単品での音響効率向上については、従来から進めて来ているので、今回は、②のダイヤフラム ASSY の増幅率向上について検討する。即ち、単品だけでは決まらないダイヤフラム ASSY の増幅効果に対し、開発したシミュレーション手法を用いて最適化を図ることとした。

fig. 15 はダイヤフラム ASSY の 2 つの共振点 ( $f_v$ ; パイプレータ,  $f_D$ ; ダイヤフラム)位置が異なる場合の伝達関数(音圧/加振力)計算結果である。 $f_v < f_D$  の場合は、単品に対し、 $f_D$  点のレベルが増幅されているが、 $f_D < f_v$  の場合はレベルが減衰し低い増幅率しか得られていない。即ち、 $f_v$ ,  $f_D$  の相対位置によりダイヤフラム ASSY の増幅率が変化している。

Fig. 16 は、上記の共振点構成での  $f_D$  点におけるダ

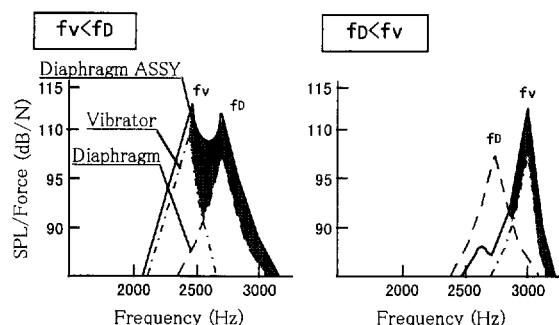


Fig. 15 Simulation Result of Transfer Function

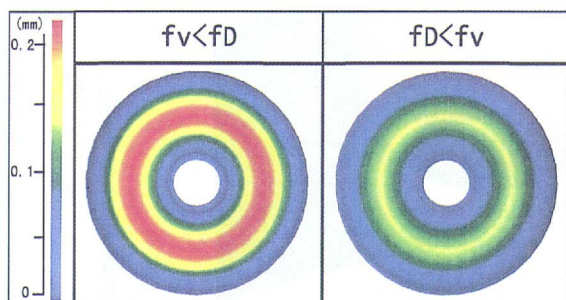


Fig. 16 Amplitude of Diaphragm

イヤフラムの振幅を計算した結果である。これより、パイプレータ共振点の位置によりダイヤフラムの振幅に顕著な差があることが確認された。

つまり、ダイヤフラム ASSY の音圧増幅率変化の原因は、パイプレータ共振点の位置によるダイヤフラムの振幅変化と考えられ、以下原因を追求した。

### 6・2 ダイヤフラム ASSY 増幅率変化のメカニズム解析

#### 6・2・1 振動応答解析

まず、現象を捉えやすくするためにダイヤフラム ASSY を構成する 3 部品の最大振幅点を抽出し、Fig. 17 に示すような 3 自由度のモデルで解析することとした。最終的に求めたいのは、加振力に対するダイヤフラムの伝達関数  $H_D = X_D/F$  であるが、図 17 の形(3 自由度)では、伝達系の中でパイプレータとダイヤフラムが一体となっているため、各々の全体系に対する影響を解析することが出来ない。

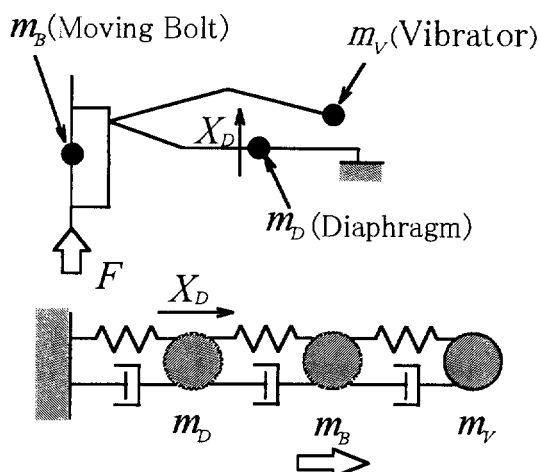


Fig. 17 Vibration Model

#### 6・2・2 振動伝達系の分解

そこで、Fig. 18 のように振動伝達系をパイプレータとムービングボルトが支配する第 1 ステップ (2 自由

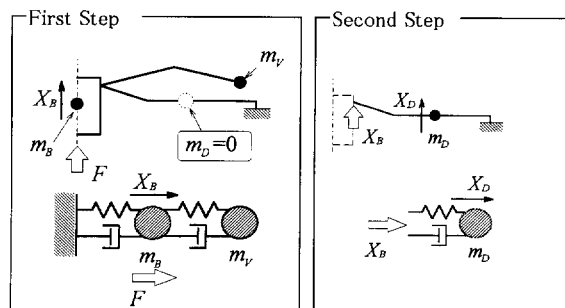


Fig. 18 Separation of Vibration Model

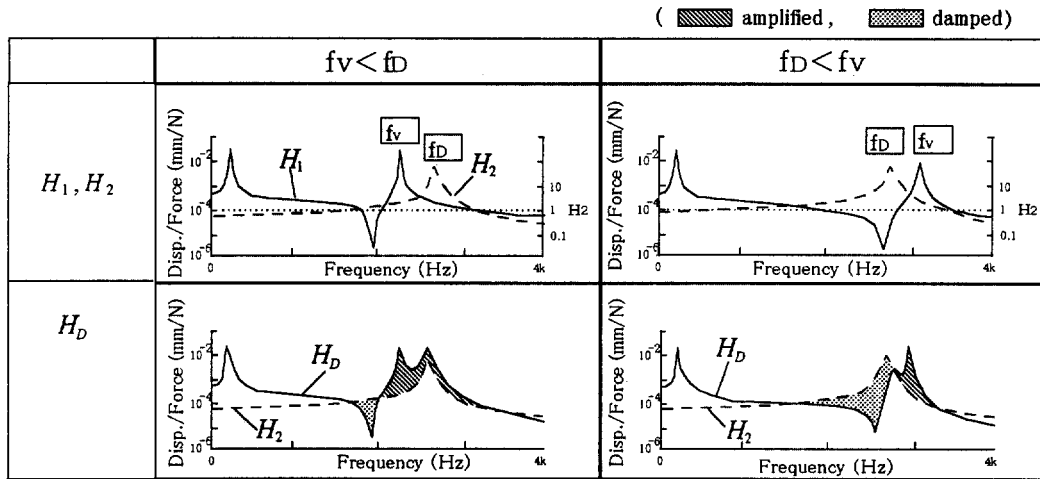


Fig. 19 Resonance Frequency and Transfer Function

度)とダイヤフラムが支配する第2ステップ(1自由度)に分解し、各伝達関数  $H_1, H_2$  を次のように定義することを考案した。

$$(H_D = X_D / F = H_1 \times H_2)$$

- $H_1 = X_B / F$ ; ダイヤフラムの質量を0とした時の加振力に対するムービングボルトの変位(ダイヤフラムの質量は他に比べて充分小さいと考えられる)
- $H_2 = X_D / X_B$ ; ムービングボルトの変位に対するダイヤフラムの変位

6・2・3 増幅率変化のメカニズム

Fig. 19は  $f_v$  と  $f_D$  の構成の違いによる、伝達関数  $H_1, H_2$  と  $H_D$  の関係を表わしたものである。これより  $f_v < f_D$  の場合ピーク付近の増幅領域に  $H_2$  のピークがあるため、それらの積である  $H_D$  が増幅され、逆に  $f_D < f_v$  の場合、 $H_1$  の反共振による減衰領域に  $H_2$  のピークがあるため、 $H_D$  は打ち消しあう形となって減衰されることがわかる。これが増幅率変化のメカニズムであり、増幅効果を得るには  $f_v < f_D$  の構成にする必要があることが明確になった。

7. 設計への展開

7・1 設計手法

これまでの検討結果を音圧を最大にするための最適設計に展開した実施例を以下に述べる。Fig. 20は開発したシミュレーションによる設計手法の流れを示したものである。ここで、ダイヤフラム ASSY の共振周波数の設定は、前記の結果より  $f_v < f_D$  とする。これにより網羅的に水準を振る必要がなくなり、設計業務の効率が向上した。尚、計算により求めた伝達関数から音圧を求めるために必要な加振力は従来品の実験値を使

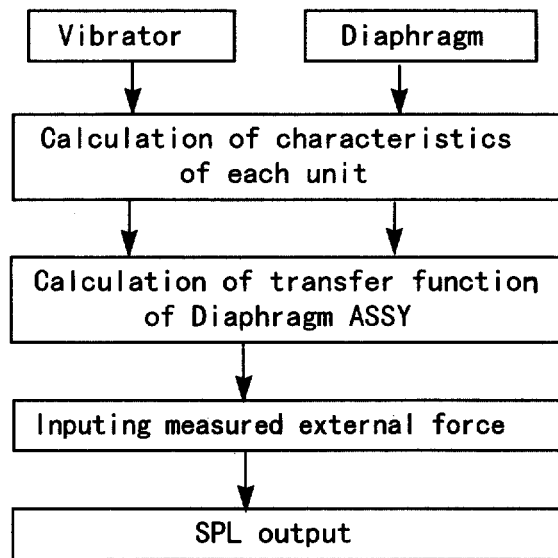
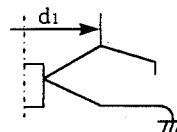


Fig. 20 Developed Designing Method



- Resonance frequency of vibrator
- Resonance frequency of diaphragm

d1	SPL (dB(A)/at 2m)				Peak frequency (Hz)		
	105	110	113	115	2500	3000	3500
26	■				●	○	
28	■				●	○	
30	■				●	○	
32	■					○	●

Fig. 21 Calculation Result of SPL

用できる。

7・2 音圧計算結果

バイブレータの形状により  $f_v$  の最適水準を求めた結果、 $f_v=2650$  Hz において、目標音圧 113 dB を達成した。(Fig. 21)

7・3 実機での評価

前記の設計結果をもとに開発したホーンの性能を評価した結果を Fig. 22 に示す。開発品は、目標の音圧効

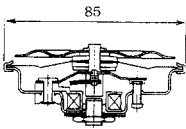
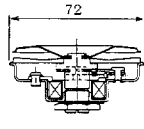
	Current	Developed
Dimensions		
SPL (dB/(A)/at2m)	113	113
SPL Efficiency (Pa/mm <sup>2</sup> )	$1.6 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-3}$ (+40%)

Fig. 22 Evaluation Result of Products

率 (+40%) を達成することにより、従来品と同等の音圧と、外径で 15% の小型化を実現できた。

8. おわりに

- (1) ホーンの音圧を決定するダイヤフラム ASSY 伝達関数の高精度シミュレーション手法を開発した。
- (2) シミュレーション手法を設計に展開することにより、目標とする音圧効率を達成し、従来品に対し大幅に小型化したホーンを実現した。

＜参 考 文 献＞

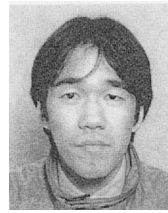
- 1) 加川幸男：“有限要素法による振動，音響工学/基礎と応用”
- 2) 加川幸男：“開領域問題のための有限要素法”
- 3) C. A. プレビア：“境界要素法入門”



＜著 者＞



林 俊男 (はやし としお)  
機能品技術部  
盗難防止用コンポーネントの開発，設計に従事



片桐 誠 (かたぎり まこと)  
技術電算部企画  
技術電算システムの企画および適用化業務に従事



太田 輝暁 (おおた てるあき)  
機能品技術部  
VSV の設計に従事



平 等 (たいら ひとし)  
技術電算部理論解析  
数値流れ解析業務に従事