# 3節円モード段つき円形振動板の電気 構造 音響連成解析\*

日大生産工(院)〇池澤弘貴 日大生産工 大塚哲郎

## 1 はじめに

筆者らは強力空中超音波音源として 28kHz 用 3節円モード段つき円形振動板の設計を行ってき た<sup>[1]</sup>。3節円モード段つき円形振動板の設計には COMSOL 社製 Multiphysics を使用し、これま では構造 音響連成解析により設計していたが、 本報告ではより詳細な設計をするために電気 構 造 音響連成解析を行ったので報告する。

2 3節円モード段つき円形振動板

Fig.1 に解析対象である3節円モード段つき円 形振動板の外観を示す。3節円モード段つき円形 振動板は、径方向の振動を抑制するために、2節 円モード段つき円形振動板の外径部の厚さを増 しフランジをとりつけた音源である。これは2節 円モードの振幅分布に着目し外周凸部が径方向 に大きく振動することによる径方向への音圧分 布の影響を抑制し、前方へより強力な超音波を 伝搬させるためである。

また同一径のピストン音源に比べ、より強力 な超音波音圧を放射でき指向性に優れるという 特徴を持ち、2節円モード段付き円形振動板に比 べ、加工しにくいが遠方まで強い音圧を放射で きるという特徴を持つ。



Fig. 1 Stepped circular vibrating plate with 3 nodal circle mode.

#### 3 電気-構造 音響連成解析

電気-構造 音響連成解析を行う利点として、ト ランデューサの電気入力と出力音圧が実験的に 求めることができるので、設計を行う際に実際 のデータを元に解析をすることができる点にあ る。これまでの解析方法である構造 音響連成解 析では、入力としてホーンの下面に荷重を加え て加振させ、音圧を計算していた。しかし加振 面の荷重を実際に測定するのは難しく、入力と して数値的に取り扱うのは現実的ではなかった。 したがってトランデューサの解析を行い、電気入 力に対する音場を計算する電気-構造 音響連成 解析を行うことで、より詳細な音源の設計を可 能とすると考えた。

今回用いる汎用工学シミュレーションソフト ウエア COMSOL Multiphysics では、どの分野 の問題でも内部では数学の境界問題に還元され、 設定条件より変換された共通形式のデータが受 け渡される。本報告では"圧電軸対象"、"軸対象 応力-ひずみ"、"圧力音響"のモデルを組み合わせ ることで電気-構造 音響連成解析を行う。"圧電 軸対象"ではトランデューサの入力電圧に対する 圧電セラミックスのひずみを得られ、"軸対象 応 力-ひずみ"では入力電圧によって加振された音源 の振幅分布が得られ、その振幅分布を用いて"圧 力音響"により音場が解析される。

#### 4 圧電方程式

圧電体に加えた応力 T および電界 E は、生じ た電気変位 D および歪 S との関係において圧電 方程式によって書き表される。圧電体に応力 T が加わると、応力と一次関係にある歪 S との間 には、T=  $c \cdot S(c$  はスティフネス) あるいは、S=  $s \cdot T(s$  はコンプライアンス) の関係が成り立つ。

物質の電極間に電界 E を加えると物質には歪 Sが生じる。これを逆電圧効果といい、E と S と の間には S=dE の関係が成り立つ。また誘導体 として見た場合、電界 E 電気変位 D との間には D=  $\epsilon E(\epsilon$  は誘電率)の関係が成り立つ。したがっ てこれらの関係をまとめたものを圧電方程式と いい。特に今回解析で用いる e 形式は次式のよう に表される。

$$T_i = c_{ij}{}^E S_j - e_{mi} E_m \tag{1}$$

$$D_n = e_{n\,i}S_i + \epsilon_{nm}{}^S E_m \tag{2}$$

<sup>\*</sup>Electric-Structural-Acoustic coupled analysis of stepped circular vibrating plate at 3 nodal circle mode. by Koki IKEZAWA, Tetsuro OTSUKA (College of Indust. Tech., Nihon University)





- 6 モデル定義
- 6.1 圧電軸対象

Fig.3 に振動子の"圧電軸対象"モデルを示す。 着色部は圧電セラミックスで材質はチタン酸ジ ルコン酸鉛(PZT-4)である。圧電セラミック スは4層からなりそれぞれ厚み方向へ分極させ て加振させる。解析方法はe形式の圧電方程式 (1),(2)式を解くことで圧電セラミックスの歪を 算出した。



Fig. 3 Transducer model.

圧電セラミック材料(PZT-4)の各定数は弾性 マトリックスを c [GPa]、圧電カップリングマト リックスを e [c/m<sup>2</sup>]、誘電率を  $\epsilon$  [F/m] として、 圧電方程式の e 形式のパラメータとして式 (3) ~ (5)の通りである。 境界条件は構造力学の境界条件として圧電セ ラミックスの上面と下面に 0.05 MPa の圧力を加 える。トランデューサとしてボルト締めのラン ジュバン振動子を用いていることから、内方向 への圧力を与えボルト締めを表現している。

静電界境界条件として 4 層からなるセラミックスの層ごとに分極するように、下面のセラミックスから接地、 $V_{in}$ 、接地、 $V_{in}$ と境界条件を与える。ここで  $V_{in}$  は入力電圧であり  $10 \sim 40V$  まで変化させて解析を行った。



$$\epsilon = \begin{bmatrix} 1.2 & 0 & 0\\ 0 & 1.3 & 0\\ 0 & 0 & 1.3 \end{bmatrix} \times 10^{-8}$$
(5)

#### 6.2 軸対象 応力-ひずみ

Fig.4 にホーンと3節円モード段つき円形振動 板の"軸対象応力-ひずみ"モデルを示す。着色部 は音源を構成するジュラルミンを表す。ジュラル ミンの各定数は Table1 の通りである。

ホーンと振動板の設計周波数は 28kHz でホー ンの振幅拡大率 M = 4.97 である。また 3 節円 モード段つき円形振動板は、振幅分布より段と 節の位置が一致するように調整し設計してある。

境界条件は、拘束のない自由条件で行い、荷 重として"圧力音響"モデルにより求まる圧力を フィードバックして連成を行う。

このモデルについて固有値解析を行うことで、 音源の共振周波数である 28.3kHz と得られ、こ のパラメータを用いて周波数応答を計算する。そ の際、トランデューサに電気入力を加え、得られ たひずみをホーンで増幅させ振動板の振幅分布 を解析する。

 Table 1
 Structural analysis constant

Young's modulus [GPa]	71.5
Poisson's ratio	0.335
density $[kg/m^3]$	2790



Fig. 4 Structural analysis model.

# 6.3 圧力音響

Fig.5 に解析空間の"圧力音響"モデルを示す。 音響解析を行う空間は Fig.5 の着色部であり、材 質は空気で構成されている。空気の各定数は Table2 の通りである。

境界条件として、音源との境界では音源の加 速度とジュラルミンの境界インピーダンスのパ ラメータを与えている。これは音源の加速度を用 いて放射音圧を計算するので、"軸対象 応力-ひ ずみ"モデルで求まった振動板およびホーンの加 速度をパラメータとして与えることで連成を行 う。また計算領域の境界は、空気の音響インピー ダンスを与えており反射のない自由空間として 設定している。

Table 2Acoustic analysis constant

sound velocity in air [m/s]	343
air density $[kg/m^3]$	1.25
sound velocity in duralumin [m/s]	5062
duralumin density $[kg/m^3]$	2790



Fig. 5 Acoustic analysis model.

7 アドミタンスループ

Fig.6 に音源全体のアドミタンス特性を示 す。アドミタンスの測定には周波数特性分析器 (FRA5022)を使用し、音響負荷のない無負荷時 で各定数を測定した。



Fig. 6 Free admittance loops.

## 8 振幅分布

Fig.7 にトランデューサの入力電圧を 10~40V までスイープさせたときの振幅分布を示す。各電 圧ともに節と段の位置が一致していることがわ かる。



Fig. 7 Vibrational distribution.

## 中心軸上音圧分布

トランデューサの入力電圧を 10~40V までス イープさせたときの中心軸上音圧分布の結果を Fig.8 に示す。Fig.8 より音圧の最大値の位置に 注目すると、各電圧ともに 11mm 付近で音圧の 最大値が来てることがわかり、とくに 40V 入力 時には 165[dB] と高い音圧が得られることが分 かった。



Fig. 8 Sound pressure distribution along the center axis of the field.

# 10 音圧分布

Fig.9 に音圧分布を示す。上の図は音圧分布の 絶対値表示で強いビーム状の超音波が放射され ていることが確認できる。また下の図は位相表 示で振動板の段によって隣り合う超音波の位相 が揃い、ピストン音源のような平面波が放射さ れているのが確認できる。





Fig. 9 Soound pressure distribution.

## 11 指向特性

Fig.10 に 3 節円モード段つ き円形振動板の指 向特性を示す。-3dB 角は 5[deg] となり、鋭い指 向性を有する。



Fig. 10 Directional characteristics.

#### 12 まとめ

筆者らは強力空中超音波音源として 28kHz 用 3節円モード段つき円形振動板の設計を行ってき た。これまでの解析方法である構造 音響連成 解析では、入力としてホーンの下面に荷重を加 えて加振させ、音圧を計算していた。よって加振 面の荷重を実際に測定するのは難しく、入力と して数値的に取り扱うのは現実的ではなかった。 しかし本報告の電気-構造 音響連成解析を行う ≥ことで、トランデューサの入力に対する出力の 音圧を数値的に求めることができる。このこと から実験より求めたトランデューサの電気入力 と出力音圧のデータを元に設計を行うことが期 待できる。したがってトランデューサの解析を行 い、電気入力に対する音場を計算する電気 構造 音響連成解析を行うことで、より詳細な音源の 設計を可能とすると考えた。今後の課題として、 電気-構造 音響連成解析を設計に利用するため こ、より実測値に近い結果が得られる解析を行 う必要がある。

#### 参考文献

- [1] 池澤,大塚,3節円モード段つき円形振動板の 音響特性について,音響論(秋),3-4-8,2010.
- [2] 根岸,池澤,大塚,段つき円形振動板の構造-音
   響連成解析による超音波音場の計算,音響論
   (春),3-Q-12,2010.
- [3] 田中哲郎, 岡崎清, 一之瀬昇, 圧電セラミック 材料, 学献社,(1974),pp.11-36
- [4] 楠本慶二, 圧電セラミックス、強誘電体読 本,pp5-52.