

平面スピーカ振動膜の開発

Development of a Diaphragm for Planar Acoustic Converting Apparatus

西村 健*
Takeshi Nishimura

飯塚健児*²
Kenji Iizuka

米原秀春*
Hideharu Yonehara

境 克敏*³
Katsutoshi Sakai

山根基宏*³
Motohiro Yamane

概要 液晶TV、自動車などの薄型軽量化のニーズに対応した、スピーカの厚みが1 cm以下という超薄型平面スピーカ向けの振動膜を開発した。振動膜は、渦巻き状のボイスコイルがフィルム基材の両面全面に形成されたものであり、静磁界解析を用いた回路設計技術により高音質の音響特性を実現した。また、振動膜を構成するフィルム基材、銅コイル、エッジの材料物性と形状から、低音域の再生帯域を固有値シミュレーションで予測する帯域設計技術の開発により、100 Hzで65 dB以上の低音再生を達成した。本振動膜を用いた平面スピーカは、平面状の振動膜の全面で駆動力が発生するため、面音源として平面波を放射し、位相が平坦で鋭い指向性を有する。更に、従来のコーン形スピーカのように紙を使っていないため耐熱・耐湿性に優れ、水中駆動も可能であるとともに、個々のサウンドセルが小さいためにハウリングが生じにくいという際立った特徴を有する。

1. はじめに

マルチメディアの進展に伴い、情報が高速に処理されその伝達量は飛躍的に増大しているが、情報がヒトに伝わる段階で、情報は最終的に画像（視覚）と音声（聴覚）に変換される。また、情報端末のモバイル化が進む中、情報端末はより小型、軽量、薄型化が深化、高度化しつつあり、とどまることがない。画像表示装置に関しては液晶やプラズマディスプレイパネルに見られるように、フラットパネル化が急激な伸長を遂げている一方で、音声変換装置に関しては従来型のコーン形スピーカが主流であり、自動車や情報家電の分野でニーズの強い薄型軽量化への対応が十分でない。

そこで本開発では、液晶TVなどの薄型情報端末への搭載を目的とした、スピーカの厚みが1 cm以下という超薄型平面スピーカに最適な振動膜の開発を行い、実用化に成功したので報告する。

2. 平面スピーカ振動膜の開発コンセプト

開発対象の振動膜を用いるスピーカは、導電形で多点駆動方式に分類される平板形スピーカであり、ガムーゾン形と呼ばれる超薄型の平面スピーカである¹⁾。この平面スピーカは、従来型のコーン形スピーカに比べて厚みが1 cm以下の超薄型かつ軽量であり、部品点数が少なく構造が極めて単純である。一方、

新規な構造のため振動膜の材質や信頼性に関して、従来の設計技術を適用しにくいという問題があり、平面スピーカに特有の評価技術を開発する必要がある。しかも、超薄型という形状からの制約により、振動膜を構成する樹脂や銅の材料特性を最大限活用したり、2次元的な銅の回路形状を極限に近い状態まで最適化することが求められる。

2.1 平面スピーカの構造と動作原理

平面スピーカの構造と動作原理を図1に模式的に示す²⁾。平面スピーカは外枠を兼ねる平板状のヨークに永久磁石がN極S極交互に配置され、フレキシブルプリント回路（FPC）で形成されたボイスコイル付振動膜は、エッジによって永久磁石の磁極面から一定の距離に柔軟に支持されている³⁾。

動作原理は式1に示すように、磁束密度 B の磁界を通過する

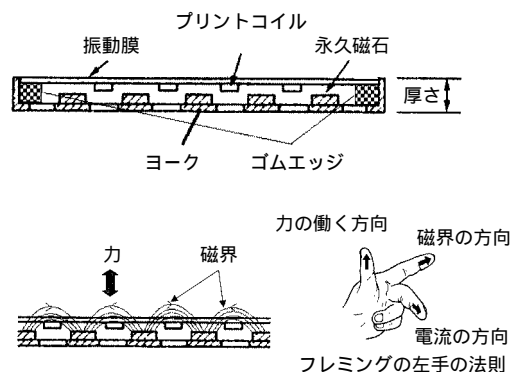


図1 平面スピーカの構造と動作原理
The fundamentals and the structure of flat speaker

* 環境・エネルギー研究所 部品・実装技術開発部

²⁾ 環境・エネルギー研究所 有機分析室

³⁾ エレクトロニクス・コンポーネント事業部 電子部品部 技術課

長さ l のボイスコイルに、電気信号の音声電流 I が流れると、電磁作用の原理に従ってボイスコイルに駆動力 F が発生し、駆動力の方向はフレミングの左手の法則に従う。

$$F = lIB \quad (1)$$

ボイスコイルが全面に形成された振動膜は、回路に流れる電流変化に比例してピストン運動を行い、空気が振動して音圧が発生する。つぎに搭載対象の平面スピーカと、開発目標の振動膜の仕様を示す。

型名	: FFS-0212 (セル数: 2 × 12 セル)
外形寸法	: 40 × 160 × 8 (H) mm
最低共振周波数	: 160 Hz ± 20 %
実効周波数帯域	: f_0 - 20 kHz ± 20 %
出力音圧レベル	: 82 ± 3 dB/W/m
定格入力	: 7.5 W, 耐入力: 15 W (A), 質量: 87 g

開発目標の振動膜

公称インピーダンス	: 6 Ω ± 10 % 以内
連続負荷試験	: JIS 96 h, 15 ~ 25 (8 W ホワイトノイズ)
耐湿試験	: 40 90 ~ 95 %, 96 h (8 W ホワイトノイズ)
動作温度範囲試験	: 50 96 h (8 W ホワイトノイズ)
動作温度範囲試験	: - 10 96 h (8 W ホワイトノイズ)
FPCとしての外観	: コイル内ゆりみ 0.1 mm 以下
その他	は JPCA DG02-1997/IPC-6202 に準拠すること

2.2 材料設計

開発目標の振動膜は、図2に示すように、2 × 12の配列で24個の渦巻き状の回路が樹脂基材の両面に形成されたFPC基板であり、スピーカ本体とは弾力性のあるエッジを介して糊付け固定されている。

スピーカ振動膜に要求される特性は、1) 再生周波数帯域が広く、音圧特性が平坦であること、2) 位相特性が平坦でひずみが少ないこと、3) 異常音や固有音がないこと、4) 耐熱、耐寒性など耐環境性に優れること、5) 経時変化が少なく、耐久性に優れ、断線しないことなどが挙げられる。

外形寸法が40 × 160 × 8 mmという細型かつ超薄型の平面スピーカでは、従来の常識から判断すると、中高音域の再生は比較的容易であるが、低音域の再生はおのずと限界が予想される。100 Hzの低音再生が可能になれば低音専用のウーハーが不要になり、1種類のスピーカで全帯域がカバーできる。このことから、平面スピーカの低音再生能力は液晶TVの薄型設計に大

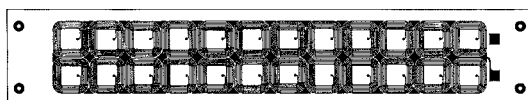


図2 振動膜の回路形状
A voice-coil drawing of a diaphragm

きな意義を持つ。本開発では、100 Hzで65 dB以上の再生能力を持つということも一つの目標である。

一般的に、低音域の特性は低音共振周波数 f_0 の値と密接に関係し、 f_0 は以下の関係式で与えられる。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{M}} \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

s : 振動系の支持部分のスティフネス

M : 振動系の等価質量

式2より、 f_0 の値を小さくするには、振動系の等価質量 M を大きくして、振動系の支持部分のスティフネス s を下げる方向に設計変更を行えばよいことが期待できる。ところが、振動系の等価質量 M を大きくすることは、振動膜基材を厚くしたり、銅コイルの重量を増やすことになるが、現実的には質量を大きくすると立上り特性が悪くなったり作動エネルギーが低下する。また、銅コイルはインピーダンス設定とプリント回路の製法上の制約があり、自由に重量を変更することが困難である。一般的に、 f_0 の調節は支持部分となるエッジの形状やヤング率などの材料物性を変更することで行う。

更に、低音域の特性は共振の先鋭度 Q_0 にも依存し、 Q_0 は主に振動膜の材料物性で決まる。一方、振動膜のフィルム基材には銅コイルから発生するジュール熱が直接伝わるため、高い耐熱性、耐湿性が要求されるとともに、振動特性上の理由から非弾性率(E/ρ)や内部損失($\tan \delta$)の高い材料が望ましい。

3. シミュレーションによる材料設計と振動特性

3.1 静磁場解析

振動膜の音響性能を評価するには、実際に平面スピーカを組み立てて性能評価を行う必要があるため、試作評価の効率化を図る目的で、シミュレーションによる設計検討を行った。

第1段階として、回路設計は静磁場解析により決定した。その手順は、ヨーク上の磁石の配列から磁束密度の高い領域を求め、銅コイルが最適に配置されるように、振動膜上の2次元的な配線スペースを求めた。また、端子間のインピーダンスを6 Ωに設定する必要性から、銅コイルの長さや断面積が求められ、最終的にエッチングに最適なめっき厚みと回路間隔を決定した。図3に回路設計の前提とした静磁場解析の一例を示す。磁界の方向は磁束密度の相対強度で表示した。

図1の平面スピーカの動作原理に示したように、本開発の振動膜は永久磁石の磁極面に平行方向の磁束を利用するため、銅

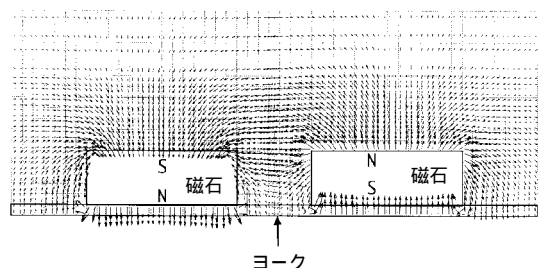


図3 静磁場解析の結果
The results of magneto static analysis

コイルは水平磁束密度の高い領域に最も長く配置するように設計した。

3.2 振動モード解析及び固有値解析

3.2.1 解析の方法

第2段階として、振動膜を構成する材料物性と部材の形状から振動特性や音響特性を予測することを目的に、日本マーク株式会社製の MARC プログラムを用いて、有限要素法による振動解析を行った。基本方程式は次式で表される。

$$(K - \omega^2 M)\phi = 0 \quad (3)$$

K : 剛性マトリックス

M : 質量マトリックス

ω : 固有値 (周波数)

ϕ : 固有ベクトル

2 × 12型振動膜の座標系は、銅コイル、フィルム基材、エッジの3種の部材に対して、表1に示す物性値及び座標系で近似した。文献値にないフィルム基材のヤング率は、引張り試験から求めた実測値を用いた。

3.2.2 振動モード解析

式3の解として得られる固有ベクトルは変位ベクトルを表しており、物理的には2 × 12型振動膜の振動モードを意味している。固有ベクトルより求めた振動モード解析の結果を図4に示す。振動モード1では振動膜中央部が振動の腹となり、振幅は振動膜中央部が最大となる。振動モード2では振動膜中央部が振動の節となり、振幅は0となる。振動モード3では振動膜の長手方向が3個の区画に分割し、2ヵ所に振動の節と3ヵ所に振動の腹が存在する。振動のモード数が増えるにしたがって振動膜は小さな区画に分割し、振動の自由度が増す。

3.2.3 固有値解析による低音領域における再生帯域の検討

固有値解析では、振動膜を構成する材料物性と部材の形状を

変数としてシミュレーションを行った。さまざまな前提条件に対して、3式より得られる固有値より固有振動数を求めた。振動数の最も低い固有振動が1次の振動モードに該当し、低音領域の再生帯域と密接に関係する f_0 に対応する。

振動膜をスピーカ本体に固定するエッジのヤング率と、固有振動数との関係を図5に示す。固有振動数はすべての振動モードに対して、エッジのヤング率が増加するにしたがって増加する傾向が得られた。この結果は、式2に示す振動膜の支持部分のスティフネス s が増加して f_0 が増加する予想と一致する。したがって、低音領域における再生帯域を広げる手段として、エッジ材料をヤング率の小さい部材に変更すること、すなわちゴムや発泡体などのより柔らかい材料に変更すれば良いことが示唆された。

振動膜の重さと固有振動数の関係を調べる目的で、振動膜の見かけ密度 (コイルとフィルムの平均値) と固有振動数の関係を図6に示す。図6では、銅コイルとフィルム基材からなる振動膜の重量変化を、密度の変化と近似して解析した。振動膜の重量が増加するにしたがって、固有振動数は低周波数側にシフトする結果が得られた。この結果は、式2から予想される、振動系の等価質量 M が増加すると f_0 は小さくなるという予測結果と一致する。したがって、低音側の再生帯域を広げる (f_0 を下げる) には、銅量を増やしたりフィルム基材を厚くするなどして、振動膜の重量を増加させるような設計変更を行えば良いことが示唆された。

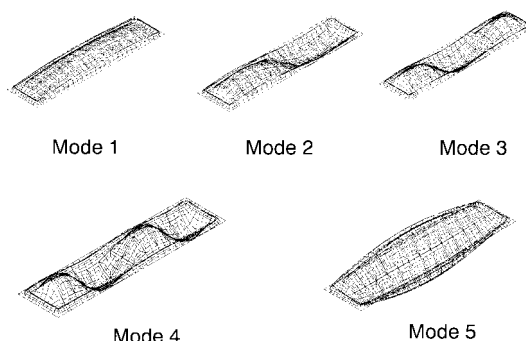


図4 有限要素法による平面スピーカ振動膜の振動解析
The vibration analysis of a diaphragm for flat speaker by the finite element method

表1 振動膜部材の物性値と座標系

Material characteristics and co-ordinate system

	銅コイル	フィルム 基材	エッジ (硬)	エッジ (軟)
ヤング率 [Pa]	1.35×10^{11}	4.35×10^9	2.00×10^8	2.00×10^8
ポアソン比	0.33	0.47	0.40	0.40
密度 [kg/m ³]	6.10×10^3	1.40×10^3	9.60×10^2	4.80×10^2
厚さ [m]	5.6×10^{-5}	8.5×10^{-5}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}

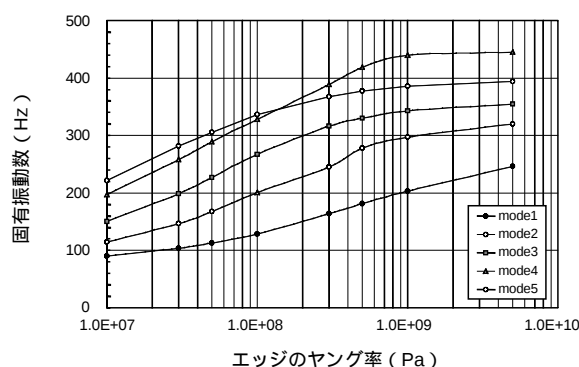
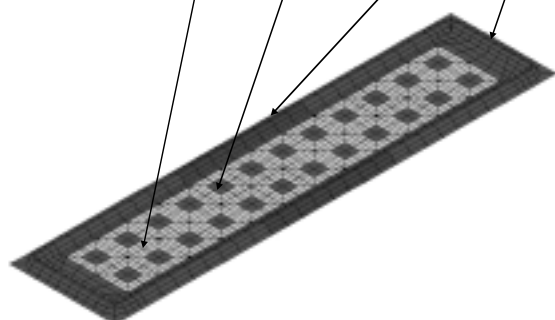


図5 固有振動数に対するエッジのヤング率の影響
Effect of Young's-modulus of edge on the eigenfrequencies

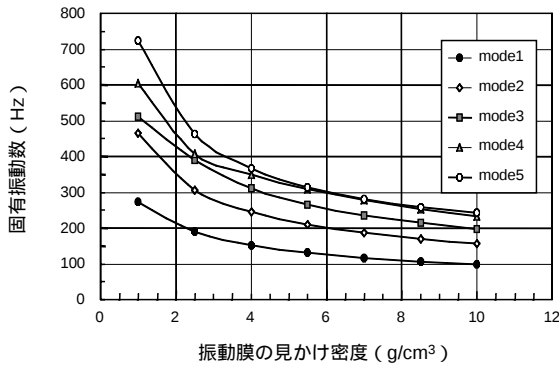


図6 固有振動数に対する振動膜の重さの影響
Effect of density of diaphragm on the eigenfrequencies

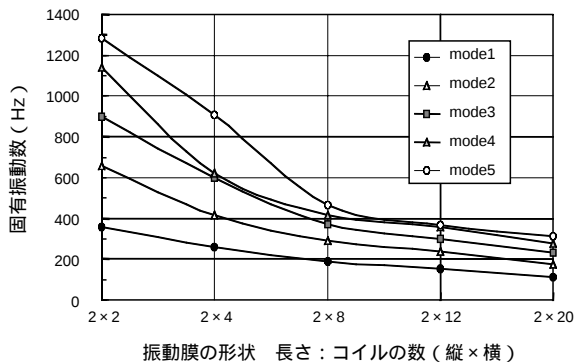


図7 固有振動数に対する振動膜の形状（長さ）の影響
Effect of length of diaphragm on the eigenfrequencies

更に、振動膜の外形状と固有振動数の関係を検討した。エッジ材料や振動膜の材料が同一で、磁石の配列数（ $2 \times n$ ）に依存して長手方向の外形状サイズが異なる場合の固有振動数の関係を図7に示す。長手方向の磁石配列が2, 4, 8, 12, 20と多くなるにしたがって、固有振動数が低周波数側にシフトする結果が得られた。この結果は、長手方向のサイズが大きいくほど低音の再生帯域が広がることを意味しており、従来からのスピーカの経験則と一致している。

このように、スピーカ振動膜の重要特性である再生周波数帯域に関して、材料設計や形状設計の段階からシミュレーションによって予測する技術が確立できたことは、試作数の削減につながり、今後開発予定の 2×2 型、 3×4 型、 4×4 型、 4×12 型振動膜などの、開発期間の短縮化が期待できる。

4. 結果及び考察

4.1 周波数特性

本開発の 2×12 型の振動膜は、耐熱性の樹脂フィルムを基材とした両面銅張積層板を用いて、サブトラクティブ法で試作した。音圧周波数特性やインピーダンスなどの音響特性は、スピーカをJIS C 5532に規定の標準パフルに装着して、エタニ電機株式会社製のASA-2システムを用いて測定した。

図8に振動膜のフィルム基材の厚み $50 \mu\text{m}$ は共通で、3種類のエッジ材料を用いたときの音圧周波数特性を示す。試作した振動膜はエッジの材質にかかわらず、 200 Hz から 20 kHz の広

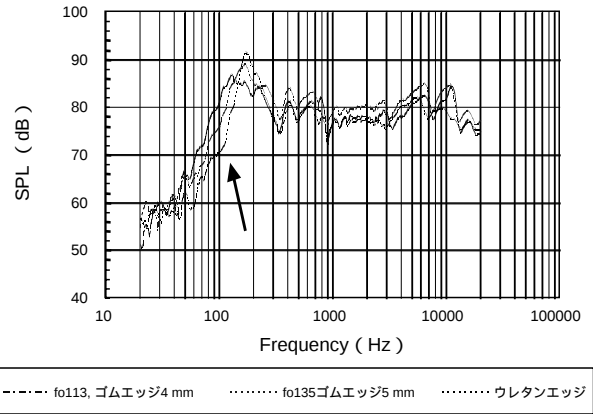


図8 音圧周波数特性（ 0.5 W , 50 cm ）
Sound pressure levels as a function of frequency

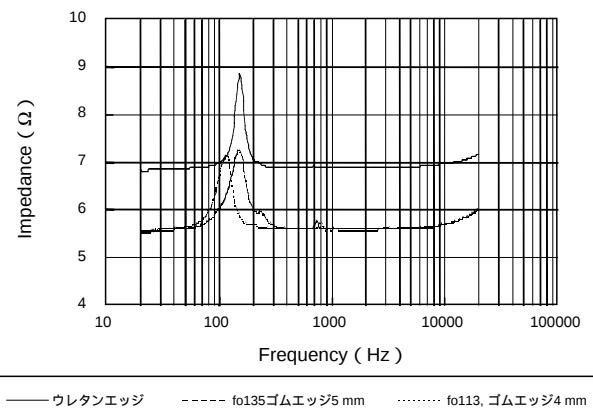


図9 インピーダンス特性（ 0.5 W , 50 cm ）
Impedance as a function of frequency

範囲の周波数にわたってほぼ平坦な音圧特性が得られた。ところが、図中（↑）のように、 200 Hz 以下の低音領域に関しては、エッジ材料による差異が顕著に現れた。

図9に、図8と同じ振動膜におけるインピーダンス測定の結果を示す。ウレタンエッジを用いた平面スピーカの f_0 は 163 Hz 、 5 mm と 4 mm 厚の発泡ゴムを圧縮したエッジを用いた平面スピーカの f_0 は、それぞれ 135 Hz と 113 Hz であった。これら3種の振動膜は、エッジ以外のフィルム基材や銅コイルは同一であるから、 f_0 の違いはエッジ材料の物性に起因しているものと考えられる。このように、低音領域における再生帯域は、図5に示したシミュレーション結果から予測されるように、エッジ材料のステイフネスをコントロールすることで設計可能になることが確認できた。

以上のように、音響特性の改善を目指して振動膜部材の物性や形状を変化させて振動膜を試作するとともに、シミュレーションによる特性の再現を並行させて検討した。その結果、 2×12 型における振動膜の回路形状とエッジ部材の改良により（詳細は省略）、 100 Hz で 65 dB 以上の音圧を達成した。更に、固有振動数のシミュレーションにより、 f_0 や再生帯域の傾向を予測する帯域設計技術の開発により、異なる形状の振動膜に対して特性を予測することが可能になった。

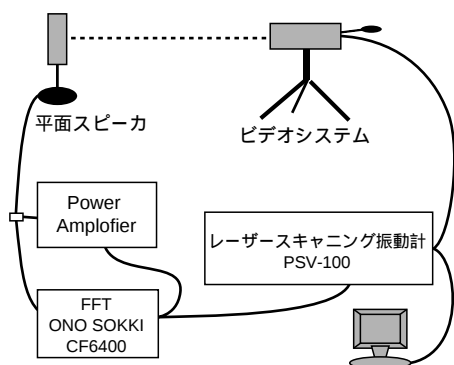


図10 振動測定装置の概要
Schematic illustration of apparatus for the vibration measurement

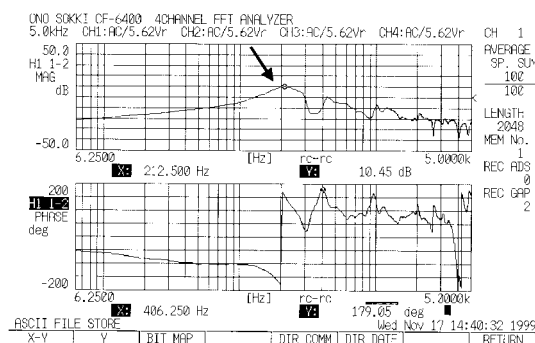


図11 周波数応答関数
Frequency response function

4.2 振動特性

4.2.1 振動測定システム

本開発の振動膜は、プリント回路で形成されたボイスコイルが振動膜として一体的に振動するため、従来のコーン形スピーカでは問題にならなかったような、断線しない振動膜の信頼性の確立が要請された。振動膜の振動特性を把握する目的で、スキャニングレーザードップラー振動測定システム（独国 ポリテック社製 PSV-100）を用いた振動モード測定を行った。測定システムの概要を図10に示す。

周波数応答関数の測定は、振動する平面スピーカ振動膜の中央部にレーザー光を当て、反射されるレーザー光のドップラー効果から速度の情報を電圧に変換して周波数解析を行った。レーザースキャニング振動計測では、振動膜の全面にわたる8×32ポイントの位置にレーザー光を当て、時間で同期させて位相の情報を得るとともに周波数解析を行った。

4.2.2 周波数応答関数

図11に2×12型振動膜における周波数応答関数の測定例を示す。周波数応答関数の最大値となるピーク周波数は、ほぼ f_0 近傍に観測されたが、図12に示すようにピーク周波数は入力電圧に依存する結果が得られた。これは、エッジによって柔軟に拘束された振動膜において、入力電圧に依存してひずみや分割振動などの非線型現象が生じたためと考えられる。

4.2.3 振動膜の変位測定

入力電圧に依存して生じると考えられる非線型現象を直接的

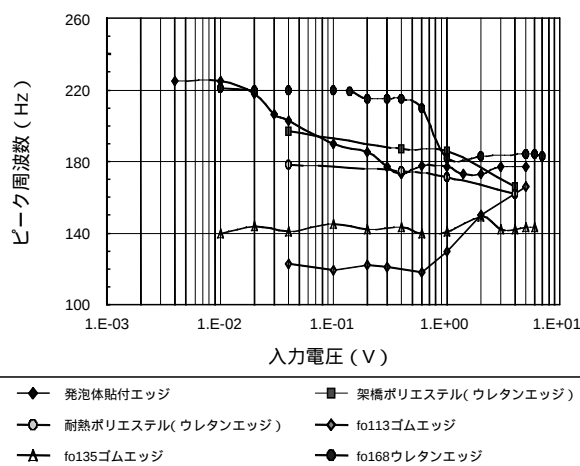


図12 周波数応答関数のピーク周波数と入力電圧の関係
Relationship between the maximum frequency of frequency response function and the terminal voltage

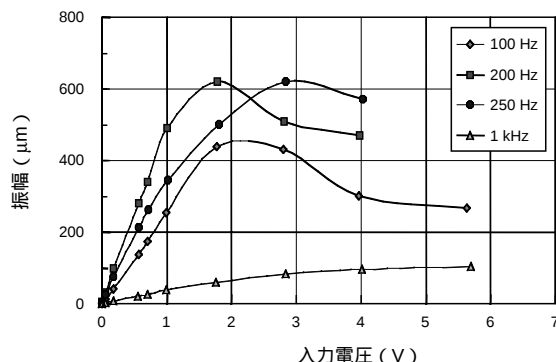


図13 振動膜中心部の振幅と入力電圧の関係
Relationship between the amplitude of diaphragm and the terminal voltage

に観察するために、振動膜の変位と入力電圧の関係を超高精度レーザー変位計（株式会社キーエンス製LC-2430）を用いて測定した。図13に2×12型振動膜の中心部における最大振幅と入力電圧との関係を示す。最大振幅は入力周波数に依存するとともに、測定場所によって大きく変化することが観察された。200 Hzにおける最大振幅は、電圧の増加にしたがって増加するが、2 V近傍で最大値を示し、それ以上の電圧では振幅がわずかに減少した。同様の傾向は、100 Hzや250 Hzの低周波数の入力で観察された。これは、低い電圧における主な振動モードは、振動の腹が中心部に存在するモード1と考えられるが、入力電圧が高くなるにしたがって振動膜の中央部分に振動の節となるモード2の成分が増加して、モード1とモード2が合成されるために振幅が減少したためと考えられる。これらの実験結果は、入力電圧による非線型現象の一例と考えられる。

4.2.4 振動モード測定

図14に f_0 近傍の周波数で入力したときの、位相 - 90度における振動モード測定を示す。図14の振動モードは、振動膜の全面にわたって位相が一致しており、図4のシミュレーションによるモード1に対応していることが分かる。

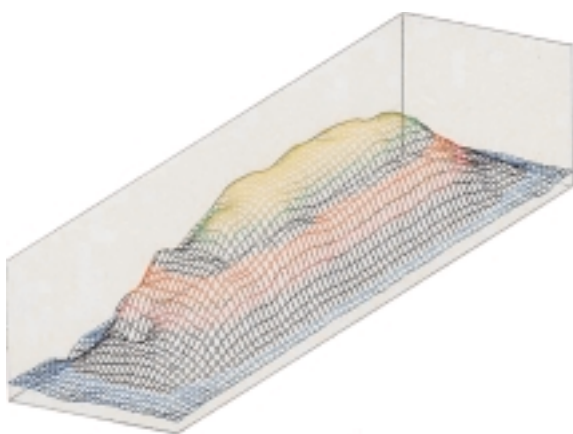


図14 振動測定（ケースⅠ）
Measurement of vibration (case I)

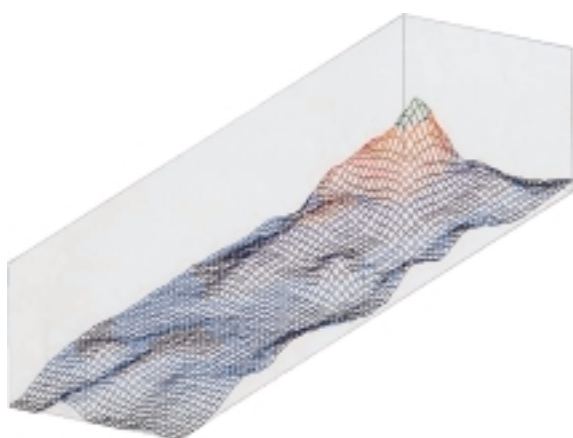


図15 振動測定（ケースⅡ）
Measurement of vibration (case II)

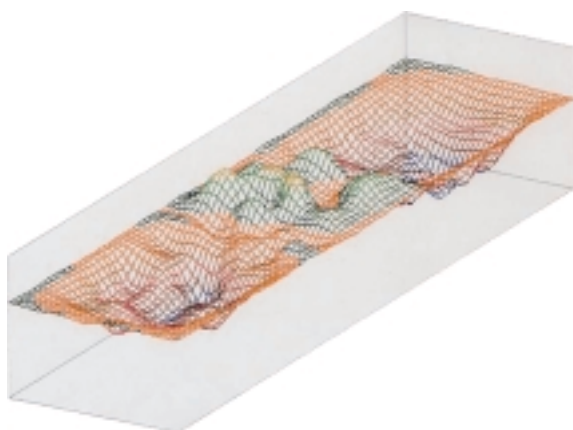


図16 振動測定（ケースⅢ）
Measurement of vibration (case III)

また、振動膜で反射されるレーザー光の周波数分析を行ったところ、入力電圧が大きくなると、入力周波数の2倍音、3倍音に相当する周波数成分が観測された。これは、 f_0 の周波数で入力したときにモード1のほか、ひずみなどによってモード2及びモード3が混在していることを意味している。上記図13に

示したように、最大振幅が2 V近傍で最大値を示す実験結果も同じ理由に基づく。

更に、複数の振動モードが混在していると考えられる測定事例を図15及び図16に示す。図15及び図16の主な振動成分は、それぞれモード2及びモード3と考えられる⁴⁾。

4.2.5 平面スピーカ振動膜の特徴

平面スピーカ振動膜の振動挙動は、レーザードップラー振動計測で直接測定した、図14に代表されるような、平面状の振動膜全体が平行ピストン運動を行っていると考えられる。これは、振動膜の全面にボイスコイルが形成されているため、平面スピーカは面音源として作用していると考えられる。したがって、平面スピーカの特徴は位相が平坦で鋭い指向性が期待される。実際にスピーカの性能を確認したところ、上記予想のほかに、個々のサウンドセルが小さいためにハウリングが生じにくいことや、耐水性が高く水中駆動が可能である等の特徴が判明した。

4.3 信頼性試験結果

通常のスピーカに要求される2.1に記載の信頼性試験を実施したところ、すべての条件で問題のないことを確認した。

5. おわりに

スピーカの厚みが1 cm以下という、超薄型平面スピーカに適用する2×12型の振動膜の開発を行った。

- (1) 静磁場解析により、ヨーク上の磁石配列から磁束密度の高い領域を求め、振動膜上の2次元的な配線スペースを求めるとい、音響特性に優れる最適な回路設計技術を確認した。
- (2) 振動膜をモデルとした固有振動数のシミュレーションを行った結果、周波数特性の実測値と固有振動数との間に相関関係が得られることを確認した。これより、低音域の再生帯域を材料物性値と外形サイズの値から予測する帯域設計技術を開発した。
- (3) レーザードップラー振動計測を用いた振動モード解析を行い、平面スピーカの特徴である全面駆動性（面音源）と位相の平坦性を確認した。

以上により、低音領域の再生帯域及びスピーカに要求される信頼性試験をすべて満足する振動膜を開発し、量産化に至った。

最後に、平面スピーカ振動膜の開発にあたり、株式会社エフ・ピーエスの宮崎俊郁氏及び堀昌司氏に回路設計や部品提供の御協力を頂きました。この場を借りて、心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 佐伯多門:スピーカ&エンクロージャー百科, 誠文堂新光社(1999), 52.
- 2) 国際公開WO99/03304号公報
- 3) 堀昌司:マルチセルフラットスピーカーとは, JAS journal, 40巻, 3号, (2000) 13-16.
- 4) 田中信雄:平板振動と放射音, 騒音制御, 22巻, 5号, (1998) 243-247.