

# 圧電高分子膜による軽量遮音パネルの研究開発

研究代表者 山本 貢平（財団法人小林理学研究所 所長）

## 1. はじめに

従来遮音の目的には、鉄やコンクリートなどの質量の大きい材料が用いられている。本研究はポリフッ化ビニリデン（PVDF）と呼ばれる軽くて薄い圧電性高分子フィルムに、負性容量回路と呼ばれる簡単な電気回路を接続した、新しい遮音技術の開発を目的としている。この技術が実用されれば自動車、航空機、新幹線など交通機関の車内騒音の低減と軽量化による省エネ（CO<sub>2</sub> 排出の抑制）の両立を図ることが出来る。また、楽器演奏のための防音室の軽量化と普及が期待されるだけでなく、木造建築、集合住宅の室内の静寂化が期待される。

## 2. 音響管を用いた基礎検討

### 2-1. 曲率を与えた膜による遮音

Mokry 等の理論解析<sup>1)</sup>によれば、湾曲フィルムの音響インピーダンス  $Z$  は、

$$|Z| = \left| \frac{Y}{\omega R^2} - \omega \rho h \right| \quad (1)$$

となる。 $Y$ : 弾性率,  $h$ : 厚さ,  $R$ : 曲率半径,  $\rho$ : 密度,  $\omega$ : 角周波数である。また透過損失の周波数依存性は次式で与えられる。

$$TL = 10 \log_{10} \left[ 1 + \frac{Z^2}{(2c_0 \rho_0)^2} \right] \quad (2)$$

上式によれば、湾曲フィルムの透過損失は高周波（ $\omega$ 大）では  $\rho$  に比例して質量則に従い増加する。しかし低周波（ $\omega$ 小）では弾性率  $Y$  に比例し、周波数に反比例する。したがって周波数が低くなるとともに、透過損失が増加することが予想される。

音響管を用いて平板フィルム膜と湾曲フィルムの垂直入射損失を比較した。図1に厚さ 28 $\mu$ m の平板 PVDF フィルムと湾曲フィルムの透過損失を示す<sup>2)</sup>。平板フィルムの透過損失が低周波では小さく、1kHz 以上で周波数の上昇とともに増加するのに対して、湾曲フィルムの透過損失は低周波になるにつれて著しく増加した。この実験結果は理論式の予測と対応する。

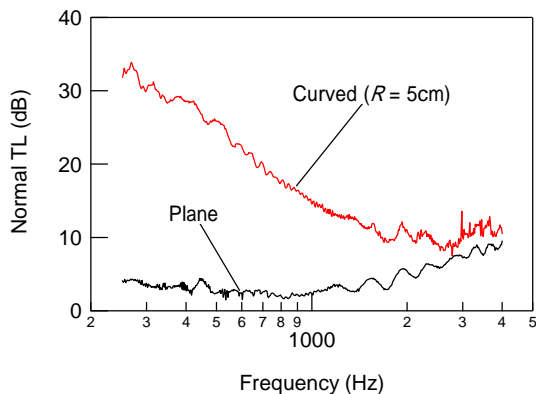


図1 平板フィルムと湾曲フィルムの垂直入射透過損失の周波数依存性

### 2-2. 負性容量回路による膜の弾性率制御

圧電性は応力や歪みの機械エネルギーを、電圧や電荷の電気エネルギーに変換する性質およびその逆の性質である。伊達等は圧電材料の見かけの弾性率を、図2に示す負性容量回路によって電氣的に制御できることを見いだした<sup>3)</sup>。

この方法を湾曲した圧電フィルムに適用すると、さらに遮音効率を増加させることが出来る。湾曲フィルムに音が入射すると振動が起こり、併せてフィルムの面内伸縮振動が生じる。フィルムの両面の電極間には圧電効果のため交流電圧が発生する。この電圧を負性容量回路で増幅し帰還すれば、逆圧電効果により音による振動に対し逆位相の伸縮振動を生じ、音による振動を打ち消すことが出来る。

図3のように音響管の一端に負性容量回路を結合した曲率半径  $R$  の湾曲 PVDF フィルムを取り付け、帰還電圧に対する透過音レベル変化を測定した。図4に示すように透過音レベルは帰還電圧の増加とともに減少し、極小値を経て増加した。これはフィルムの振動振幅が極小値を示し、見かけの弾性率が極大値を示すことと対応する。管内の音圧は 90dB なので  $R$  が小さい場合には最大 50dB の遮断が得られた。

我々は圧電方程式の解析から、フィルムの通常の弾性率  $Y^E$  と見かけの弾性率  $Y$  の比を与える次式を導いた<sup>4)</sup>。

$$\frac{Y^E}{Y} = 1 - \frac{V}{V_c} = 1 - \frac{k^2}{1 + \alpha} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{C'}{C_s'} (1 - i \tan \delta) \quad (4)$$

ここで、 $V$ : 帰還電圧,  $V_c$ : 弾性率が極大を示す電

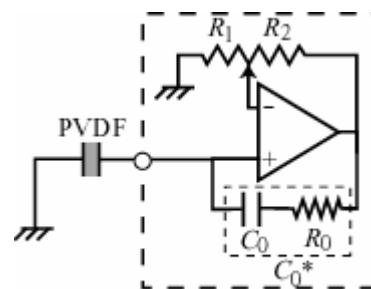


図2 負性容量回路

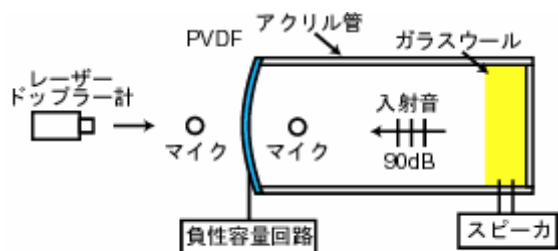


図3 音響管を用いた測定装置

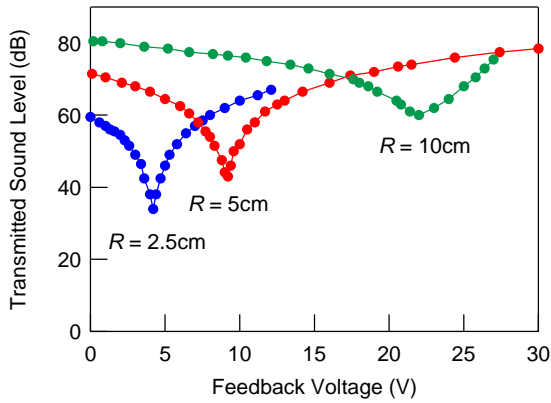


図4 透過音レベルのフィードバック電圧依存性

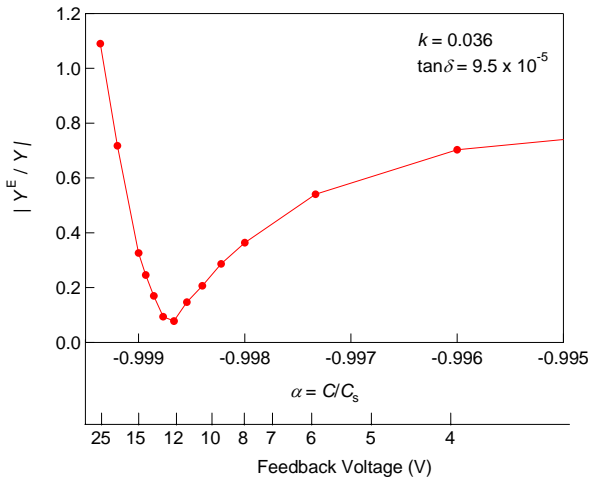


図5 弾性コンプライアンスの容量比依存性

圧,  $k$ : 電気機械結合係数,  $C$ : 回路のキャパシタンス,  $C_s$ : フィルムのキャパシタンス,  $\tan\delta$ :  $C$  と  $C_s$  の位相差である.

図5に厚さ  $110\mu\text{m}$   $R = 5\text{cm}$  のフィルムについて, 振動振幅に比例する  $Y^E / Y$  の絶対値を  $\alpha$  および帰還電圧  $V$  に対してプロットした. 実験値を式(3), (4)の理論曲線と一致させて,  $k = 0.036$ ,  $\tan\delta = 9.5 \times 10^{-5}$  が得られた.

フィルムの遮音性能制御に対して  $\tan\delta$  は重要な因子である.  $\tan\delta$  が大きいと図5に示す曲線の極小値が上がり, 遮音効果は減少する. 極小値を下げ, 十分な遮音効果を得るためには  $\tan\delta$  を  $10^{-4}$  以下にすることが必要である. これは回路に対する厳しい条件となる.

式(3), (4)はフィルムの振動振幅に比例する弾性率の変化がフィードバック電圧  $V$  に比例すること, 電気機械結合係数  $k$  および回路の容量  $C$  と膜の電氣的容量  $C_s$  の位相差  $\tan\delta$  に依存することを示す.

以上の結果は  $1\text{kHz}$  の単一周波数での結果である.  $1\text{kHz}$  で  $\tan\delta$  が最小になるように回路を調整した状態では, 測定周波数が  $1\text{kHz}$  から変化すると  $\tan\delta$  の値が増加して遮音効率が悪くなる. 図6に  $600\text{Hz}$  から  $1.4\text{kHz}$  の帯域での透過損失を示す.  $1\text{kHz}$  の透過損失は回路制御のない場合で  $25\text{dB}$  である. 制御がある場合は  $80\text{dB}$  に近い透過損失が得られているが, その前後の  $900\text{Hz} \sim 1.1\text{kHz}$  では約  $10\text{dB}$  にすぎない. 広い周波数範囲で  $\tan\delta = 0$  の条件を満たすために,

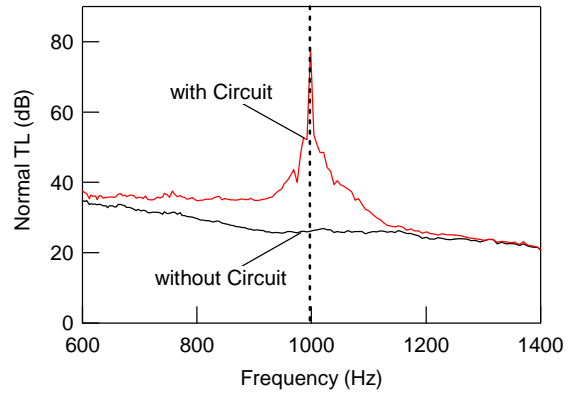


図6 負性容量回路を接続したPVDFの透過損失

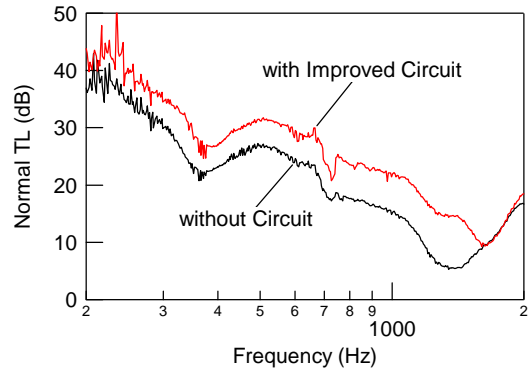


図7 透過損失の広帯域制御

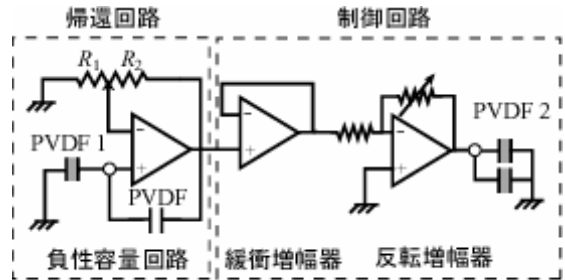


図8 制御回路

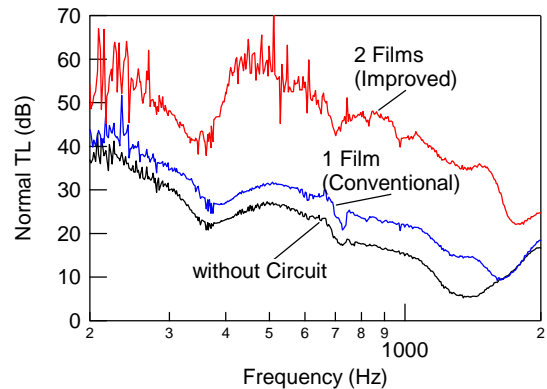


図9 フィルムの2重化による透過損失の向上

回路の中の容量素子に PVDF フィルムを用いた. その場合の透過損失の周波数特性を図7に示す.  $200\text{Hz} \sim 1.5\text{kHz}$  の範囲で透過損失は一様に約  $7\text{dB}$  増加した.

この段階で遮音効率をさらに向上させるため, アクティブノイズコントロールの概念を導入し, 前面

のフィルムの背後に湾曲した PVDF フィルムアクチュエータを新たに設けた。図 8 のように負性容量回路に反転増幅器を結合し、その出力をアクチュエータに加え、前面のフィルムを透過した音をさらに遮断する工夫を行った。その結果を図 9 に示す。200Hz ~ 1.5kHz の範囲にわたり 30dB 程度の遮音性能の向上が得られた<sup>5)</sup>。

### 3. 20cmx30cm サイズ小型パネルの開発

音響管による基礎研究結果をもとに 20cm x 30cm サイズの小型遮音パネルの開発を行った。9 種類のパネルを試作し、ISO15186<sup>6)</sup>に準拠したインテンシティ音響透過損失測定によって遮音性能を評価した。

試作したパネルのうち、回路制御を加えたときの透過損失の増加が最も大きいパネル構造を図 10 に示す。このパネルの特徴は、2重に積層し接着した PVDF フィルムを 2 組用いていること、それぞれの積層フィルムの周囲をアルミ枠で固定し、間にウレタンフォームを装填してフィルムをドーム型としたことである。このパネルに図 8 に示した制御回路を結合し、片側の積層フィルムを負性容量回路によって、もう一方のフィルムを増幅器によって制御した。

図 11 に、パネルの音響インテンシティ透過損失の周波数特性を示す。回路制御がない場合の透過損失は 300Hz で極小値を示した。回路制御を加えると透過損失は最大約 15dB 増加し、2kHz 以下では系全体の透過損失は 30dB 付近でほぼ一定となった。

制御電圧については、負性容量回路では ±2V 以下、増幅器では ±10V 以下で制御可能となった。従来の

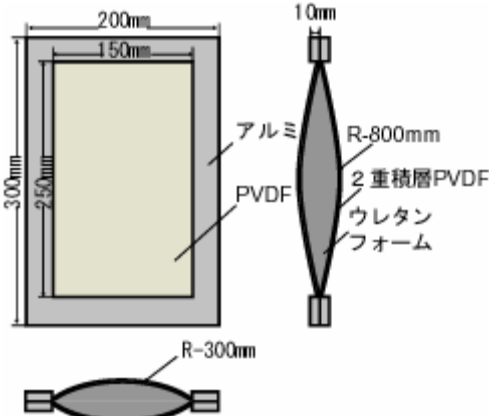


図 10 2重積層膜を用いた小型パネル

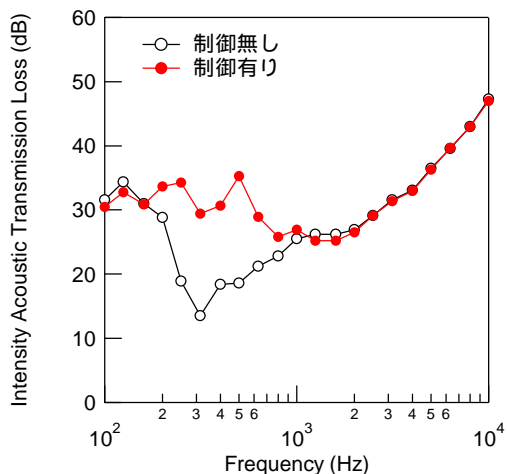


図 11 小型パネルの音響インテンシティ透過損失

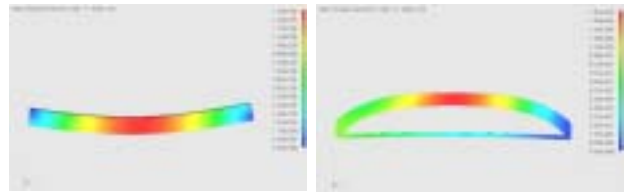


図 12 矩形ハリとアーチ形ハリの変位計算結果



図 13 大型枠の共振周波数計算結果

圧電材料を用いた騒音・振動制御技術では 100V 以上の電圧を必要とする。従来技術に比べ制御電圧が大幅に低減されたため、汎用素子を用いることが可能である。

### 4. 大型パネルの開発

1370mm x 1560mm (面積約 2m<sup>2</sup>) の大型パネルを作成し評価した。大型パネルを設計するに当たり、前述の小型パネル 30 組を 2 次元に配列する構造とした。この構造を実現するため、小型パネルを配列し固定するための大型枠を設計、製作した。

目標の遮音性能を達成するため、大型枠に求められる変位量を求めた。周波数 100Hz、音圧レベル 100dB のときの音圧は 2N/m<sup>2</sup>、変位は 7.69μm である。40dB の遮音能力を満たす、パネルの許容される変位量は 1/100 の 76.9nm である。

ここでは複数の枠で大型枠を作成することとした。そこで図 12 に示す矩形型とアーチ型のハリについて、コンピュータシミュレーションにより等価分布加重に対する変位量を求めた。その結果、厚さ 1cm、幅 1.37m、高さ 20cm の矩形枠で許容される変位量が得られ、アーチ型の枠ではさらに 10 倍の強度が得られた。

アーチ型の枠を用いれば矩形型の枠に比べて 1/10 の質量で同強度の枠が得られる。しかしながら、このような構造の枠を無垢材で作成することは困難である。そこで、今回は矩形枠を用いて大型枠を作成した。なお、材質は軽量化と高強度を図るためジュラルミンとした。

大型枠のたわみ共振周波数をコンピュータシミュ

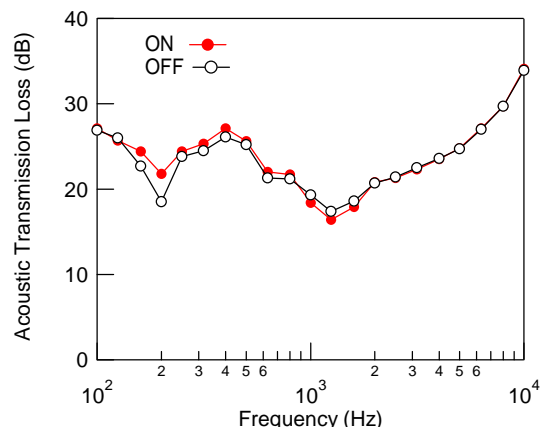


図 14 大型パネルの音響透過損失

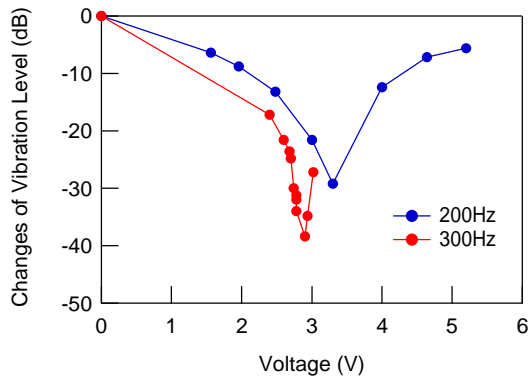


図 1 5 回路によるフィルムの変位制御

レーションによって予測した。図 1 3 にその結果を示す。1 次の共振周波数は 136Hz および 154Hz となった。

日本工業規格 JIS A 1416<sup>7)</sup> に準じ、大型パネルの音響透過損失を測定した。測定に当たり、厚さ 15cm のコンクリート製カセットに開口部を設け、大型パネルを取り付けた。

図 1 4 に大型パネルの音響透過損失を周波数に対して示す。回路制御による透過損失の増加はおよそ 100Hz から 1kHz の周波数範囲でみられたが、その差は最大で 5dB 程度であった。

改めて大型パネルを構成する小型パネルの回路制御効果を調べるため、PVDF フィルム表面に小型加速度センサを取り付け、回路の制御に対するフィルムの振動振幅の変化を調べた。図 1 5 に 200Hz および 300Hz の単一周波数に対する結果を示す。制御幅は最大で -30dB ~ -40dB に達することが確認された。

したがって、大型パネルを構成する 30 個のパネルについて制御周波数帯域を限定し、かつフィルムの電気的特性、機械的特性のばらつきを補正するように回路を最適化する必要がある。

## 5. 非電気制御型パネルの開発

本研究で開発したパネルの特徴は、軽くて柔らかいプラスチック薄膜に電気エネルギーを加え、音によるフィルムの弾性変形を減少させることにある。本研究では、プラスチック薄膜と電気回路の組み合わせの代わりに、圧電性を持たない汎用の硬質プラスチックプレートを用いたパネルの遮音性能についても検討した。

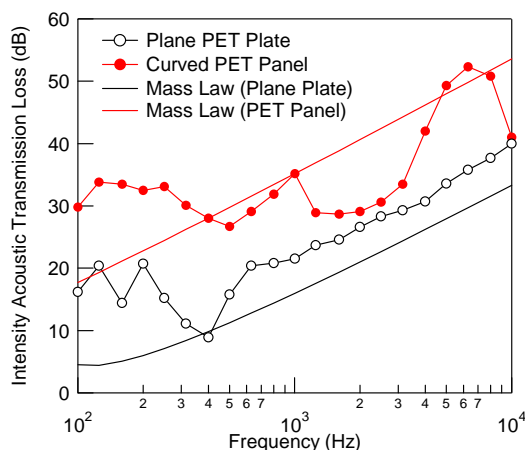


図 1 6 湾曲PETパネルとPET平板のインテンシティ透過損失

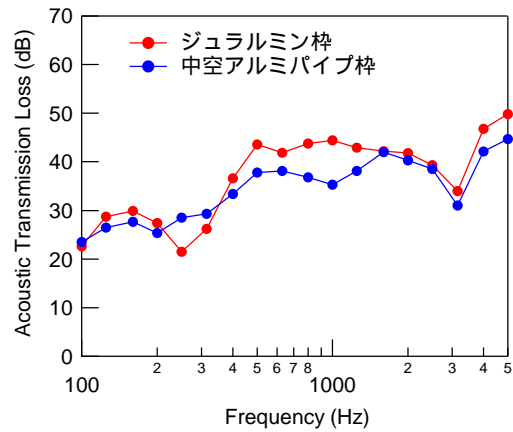


図 1 7 大型PETパネルの音響透過損失

図 1 0 に示した小型パネルの PVDF を、ドーム状に成形した厚さ 1.5mm のポリエチレンテレフタレート (PET) に置き換え、ウレタンフォームを除いた硬質プラスチックパネルを作成した。

パネルのインテンシティ透過損失と平板の PET プレートの結果をランダム入射条件で求めた質量則の計算結果と併せて図 1 6 に示す。PET パネルの透過損失は、平板と比べると 500Hz 以下では透過損失の減少がみられず 30dB でほぼ一定となり、また質量則に基づく予測よりも最大 10dB 大きい値を示した。

先に述べた大型パネルと同様の、小型パネルを 30 個配列した大型パネルを作成した。大型パネルの音響透過損失を図 1 7 に示す。ここでは、ジュラルミン製の枠と軽量な中空アルミパイプ製枠についても検討した。いずれの枠を用いた場合でも、透過損失は 20dB 以上となった。ジュラルミン枠を用いると透過損失は中空アルミパイプを用いた場合に比べ 5dB~10dB 上回ったが、300Hz 付近では逆に下回った。

## 6. 総括

### 6 - 1. 電気制御型遮音パネルの開発

2m<sup>2</sup> の大型遮音パネルを制作する本研究の主目的は失敗に終わった。この失敗の最大の理由は A4 サイズの小型パネルの基礎研究が十分でなかったことである。

音響管実験に面積約 20cm<sup>2</sup> のフィルムでは十分な基礎研究が行われ<sup>8)</sup>、遮音効率を支配するパラメータが、電気機械結合係数  $k$  およびフィルムのキャパシタンス  $C_s$  と回路のキャパシタンス  $C$  の位相差  $\tan\delta$  であること、位相差を  $10^{-4}$  以下になるように回路の位相調整を行うことが十分な遮音効果を得るために必要であることが結論された。

この知見に基づき小型パネルの試作を行ったが、図 1 1 のように回路を広い周波数範囲で調整したとき、100Hz ~ 1kHz の範囲で最大 15dB 程度の遮音効果が得られた。

時間的余裕がないために、この段階で、実用化にはより大きな面積が必要であるため 2m<sup>2</sup> の大型パネルの製作に踏み切り、さらに測定結果の信頼性を得るために音響透過損失の本格的測定にとりかかった。大型パネルの強度計算と設計のために予想以上の時間を必要とした。現状で最善と考えられる小型パネル 30 個を手製で作り、大型パネルを完成し、残響室を用いた精度の高い測定を行った。再現性のある測定から、大型パネルでの回路による効果は誤差の

範囲にとどまることが確認された。

この研究の遂行を通して今後の研究及び応用に対する数多くのノウハウとアイデアが得られた。まず、遮音壁のような大面積の遮音材料に応用するためには取り付け枠に大きな強度と重量が要求される。したがって圧電高分子フィルムと回路のみによる大型パネルを作ることは現実的ではない。むしろ A4 サイズ程度の面積のパネルを従来の遮音材料と組み合わせ、単位面積あたりの軽量化や遮音効率の向上を図ることが実用的価値につながると考えられる。航空機の窓程度の面積ならば、遮音の向上や制御には十分の可能性がある。また、ヘッドホンのような小面積の遮音にも十分実現性がある。

小型パネルの研究には多くの課題と可能性が残されている。第一は機械的構造の改良、第二は電気回路の改良、第三は遮音以外への応用である。

機械的構造で最も重要なのは、音を受けるフィルムの形状である。湾曲形、球形、曲率半径の大小などにはまだ改良の余地がある。

圧電フィルムとして、電気機械結合係数  $k$  のより大きい材料を用いれば、同じ条件でも遮音効率は向上する。今回は汎用されていて入手し易い PVDF を用いた。PVDF 系共重合体や PZT ファイバーと高分子のコンポジット材料は PVDF フィルムよりも  $k$  が数倍大きい場合もあり有望である。

電気回路について重要な点は負性容量回路の改良である。前述のように圧電フィルムと回路の位相特性を一致させることが必要である。単一周波数で調整した場合には十分な遮音効果が得られている。したがって、サイレン音、モーター音などの一定周波数の遮音あるいは音量調節は容易に実現できる。しかし、広い周波数の遮音には、圧電フィルムと回路の位相の一致を広い周波数で実現することが要求される。これは、市販の演算増幅器（オペアンプ）では極めて困難であり、この問題が今回の研究課題失敗の最大の原因であった。今後はデジタル演算などを利用し、回路の位相特性の周波数特性をいかに制御するかが、広帯域周波数の遮音を実現するキーポイントである。

現在入手可能なオペアンプを用いる場合には、有効な周波数範囲を限定し、遮音周波数の異なる回路を付加したフィルムを組み合わせ、広い周波数をカバーすることが一つの解決策である。また、オペアンプの位相変化は 100Hz 以下では小さくなるので、遮音対象の周波数を低周波に限定すれば、湾曲フィルムだけの遮音能力が低周波ほど向上する効果とあいまって、従来にない低周波遮音デバイスを製作する可能性がある。

音響管による小面積のフィルムでは、透過損失と同時に吸音率の制御も可能であることが見いだされている。適当な面積の吸音板の製作は遮音とは異なる応用分野であり、任意の周波数での吸音率制御の可能性もある。また本研究の原理は圧電材料に共通であり、圧電セラミックスや圧電単結晶の弾性制御にも同様に用いられる。従って、圧電セラミック板による振動伝達の制御が可能であり、すでに初期の実験結果が得られている。空気中での音響伝搬と同時に固体中の振動伝搬の制御は極めて重要な課題である。振動制御の場合にも本研究で得られた理論解析や実験的ノウハウが役立つと考えられる。

## 6 - 2 . 非電気制御型遮音パネルの開発

PVDF を用いた基礎研究の経過で、湾曲したプラスチックのフィルムあるいは板を用いるだけで低周波での遮音に有効であることが見いだされた。また、理論的にも湾曲したプラスチック板が、平板のプラスチック板と異なる遮音特性を持つこと、特に低周波になるほど遮音効果が向上することが明らかになった。本研究では、プラスチックとして最も汎用され廉価なポリエチレンテレフタレート (PET) の湾曲板を用いて、A4 サイズのパネルで 100Hz - 1kHz で 30dB の透過損失が再現性よく得られた。また 2 m<sup>2</sup> の大型パネルでも同様の結果を得ることが出来た。PET パネルは PVDF よりも低コストであり、かつ容易に制作できる。さらに、この場合には電気回路はまったく必要が無い。本研究の結果から、低周波全体にわたって遮音効果を得るには、PET 系が有用であることが明らかになった。従来困難であった 100Hz 以下の低周波遮音への実用化が強く期待される。PET 系の場合にも既存材料との補完的利用が現場での開発に有効であると考えられる。われわれの研究はそのための基本的理論と実験データを提供するものである。

## 7 . 学会発表

1. "Acoustic Barrier using Elasticity Control of Piezoelectric Polymer Films" and "Sound Barrier Panels using Piezoelectric Polymer Films", The 18<sup>th</sup> International Congress on Acoustics (ICA 2004, Kyoto, Japan)
2. "Sound Shielding of Piezoelectric PVDF Panel", Inter Noise 2004 (Prague, Czech Republic)
3. "Elasticity Control of Curved Piezoelectric Polymer Films", Proceedings of ICAPD 7 (2004).

## 参考文献

- 1) P. Mokry, E. Fukada and K. Yamamoto, *J. Appl. Phys.*, **94**, 789 (2003).
- 2) H. Kodama, T. Okubo, K. Kimura, K. Yamamoto, M. Date and E. Fukada, "Sound Shielding of Piezoelectric PVDF Panel", Proceeding of Inter-noise 2004, PP-2.
- 3) M. Date, M. Kutani and S. Sakai, *J. Appl. Phys.*, **87**, 863 (2000).
- 4) E. Fukada, M. Date, H. Kodama and Y. Oikawa, "Elasticity Control of Curved Piezoelectric Polymer Films", Proceedings of ICAPD 7, (Liberec, Czech Republic 2004).
- 5) 児玉秀和ら「圧電性高分子フィルムによる遮音について」, 日本音響学会講演論文集, 2003 年 3 月, 929.
- 6) ISO 15186: Acoustics - Measurement of sound insulation in building and of building elements using sound intensity - Part 1: Laboratory conditions.
- 7) JIS A 1416 「実験室における建築部材の空気音遮断性能の測定方法」.
- 8) E. Fukada, M. Date, K. Kimura, T. Okubo, H. Kodama, P. Mokry and K. Yamamoto, "Sound Isolation by Piezoelectric Polymer Films Connected to Negative Capacitance Circuits", *IEEE Trans., Dielectr. Electr. Insul.*, **11**, 328, (2004).