

## 204 負性容量回路を結合した圧電材料の遮音および防振性能について

## Sound-insulation and Vibration-isolating Efficiency of Piezoelectric Materials with Negative Capacitance Circuits

○大久保 朝直 木村 和則 山本 貢平 深田 栄一 (小林理研)

児玉 秀和 伊達 宗宏 (リオン)

Tomonao OKUBO, Kazunori KIMURA, Kohei YAMAMOTO, Eiichi FUKADA,

Kobayasi Institute of Physical Research, 3-20-41 Higashi-motomachi, Kokubunji, Tokyo

Hidekazu KODAMA, Munehiro DATE, Rion Co., Ltd.

This paper investigates the sound-insulation and vibration-isolating efficiency of the piezoelectric films and ceramics connected with the electrical circuit to control their elasticity. Normal incident transmission loss of polyvinylidene fluoride (PVDF) films is measured before and after coupling the negative capacitance circuit which makes the films harden, and similar experiments are carried out to examine vibration transmissibility of PZT ceramic plates with the circuit which makes the ceramics soften. Results indicate that each circuit has the ability to improve sound- and vibration-shielding efficiency of the film and the ceramic. The efficiency is noticeably improved by 15 dB for the film and by 30 dB for the ceramics approximately at frequencies where the equivalent electrical impedance of the circuit matches that of the materials. Magnitude of the improvement is controlled arbitrarily by adjusting the output voltage from the negative capacitance circuit.

**Keywords:** Piezoelectric materials, Elasticity, Negative Capacitance Circuit, Sound Insulation, Vibration Isolating

## 1. はじめに

負性容量を実現する電気回路を圧電材料に結合することにより、材料の弾性率を制御できることが明らかになっている<sup>[1]</sup>。本研究ではこれを応用し、音波の入射に対する圧電性ポリマーフィルムの音響透過特性を制御する手法、および振動伝搬経路に挿入された圧電セラミックの振動伝達特性を制御する手法について検討する。

## 2. 圧電材料と負性容量回路

本研究では、Fig. 1のような構成の回路を用いて圧電材料の弾性率の制御を試みる。正電位の印加に対する動作を例にあげると、通常のコンデンサからは負電荷が流出する(極板に正電荷が蓄えられる)が、この回路からは正電荷が流出する。一連の動作があたかも負の容量を持つコンデンサのようであることから、本研

究ではこの回路を負性容量回路と呼んでいる<sup>[1]</sup>。圧電材料の弾性率を増加させる回路をFig. 1(a)に示す。材料に応力がかかると、歪みが生じると同時に、正圧電効果により電位が生じる。電位が例えば正である場合、回路から正電荷が流れ出す。この電荷は材料内の分極を弱める方向にはたらき、逆圧電効果により歪みが減少する。その結果、応力と歪みの比で定義される見かけの弾性率は増加する。つまり、回路の付加によって材料を硬くすることができる。Fig. 1(b)は逆に圧電材料の弾性率を減少させる回路である。回路は電荷の入力に対して材料の歪みを増加させるように電位を出力する、つまり材料を軟らかくする作用を持つ。どちらの回路も、回路内の抵抗や容量を変化させることにより弾性率の制御の強度を任意に調整することができる。

## 3. 圧電フィルムを用いた遮音構造

Fig. 2の構造を持つ試料の遮音性能について検討する。両面に電極を蒸着したポリフッ化ビニリデン(PVDF)フィルムを、後述の測定系で用いる内径 43 mm のアクリル管の内部に設置する。その際、フィルムの周辺を管の断面に挟んで支持する。断面には銅リングを設け、フィルム表面の電極と回路を媒介する。フィルムに曲率を持たせると圧電効果が効率よく現れるため、管の内壁に固定した金網とフィルムの間にウレタンフォームを挿入し、その反発力によってフィルムの曲面を保持する。この構造に対して音波

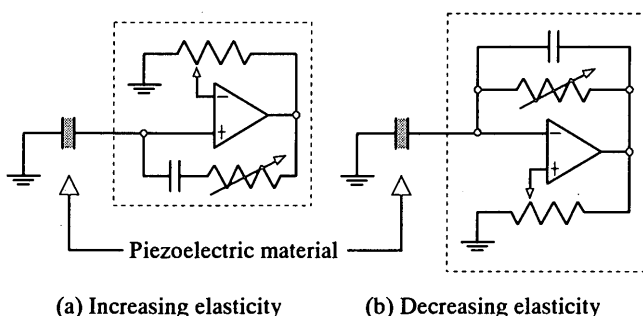


Fig. 1. Negative capacitance circuits connected with piezoelectric materials.

が入射する場合、フィルムが非常に薄く、背後のウレタンフォームと金網も音響的にほぼ透明であるため、構造全体が持つ遮音性能は小さい。ここで、負性容量回路の結合によりフィルムの弾性率を増加させ、遮音性能を向上させる方法について考える。フィルムは音波の入射によって駆動され、膜面方向に伸びと応力が生じる。すると、膜面方向の力学系と膜の厚さ方向の電気系との間に現れる圧電効果、いわゆる 3-1 方向の圧電性により、電極間の厚さ方向に電位が生じる。この電位を負性容量回路 Fig. 1(a)への入力とし、回路の動作によって膜面方向のフィルムの伸びを減少(弾性率を増加)させる。その結果、音波の進行方向に生じるフィルムの変位も減少し、音波の透過が抑制される。

**3.1 垂直入射透過損失の測定** フィルムに垂直に入射する音波に対する透過損失を測定し、遮音構造の性能を評価する。伝達関数から材料表面の垂直入射インピーダンスを算出する方法<sup>[2]</sup>を拡張し、材料の垂直入射透過損失を測定する方法について考える。Fig. 3のように、平面波伝搬が仮定できる管内に測定対象

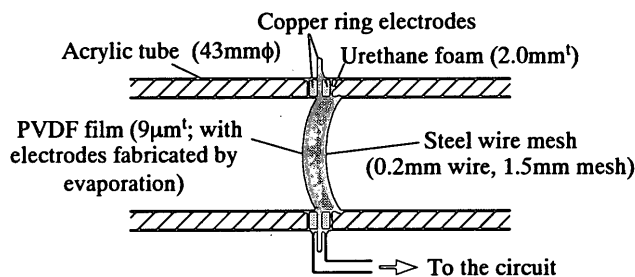


Fig. 2. Cross-section of the sound-shielding structure, with piezoelectric film supported by urethane foam and steel mesh.

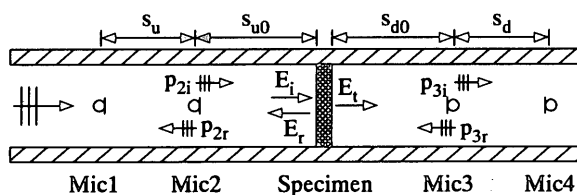


Fig. 3. Transfer function technique for measuring normal incidence transmission loss.

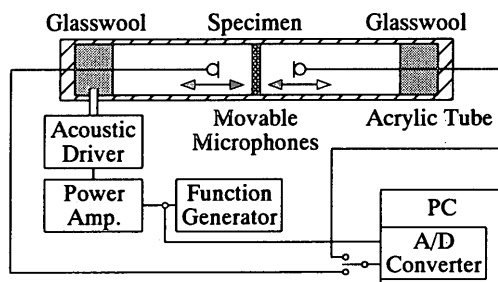


Fig. 4. Measurement system of normal incidence transmission loss using transfer function technique.

となる試料を挿入し、試料をはさむ計 4 点にマイクロホンを設置する。試料に平面波が入射すると、反射によって上→下流方向および下→上流方向の進行波が生じる。このとき、両方向の進行波の合成音場から上→下流方向の進行波だけを抽出した音場に関するマイク 2 および 3 の間の伝達関数  $H_i$  は

$$H_i = \frac{p_{3i}}{p_{2i}} = \frac{\sin ks_u}{\sin ks_d} \cdot \frac{e^{jks_d} - H_{34}}{e^{jks_u} - H_{12}} \cdot e^{jks_u} H_{12} H_{23} \quad (1)$$

と表される。ただし、 $H_{12}$ 、 $H_{23}$ 、 $H_{34}$  は両方向の進行波の合成音場に関するマイク 1 と 2、2 と 3、3 と 4 の間の伝達関数、 $k$  は波数である。 $H_i$  からマイクと試料表面の間の距離による影響を除去し、試料の透過損失

$$TL = 10 \log \frac{1}{E_t/E_i} = 10 \log \frac{1}{|e^{jk(s_{u0}+s_{d0})} \cdot H_i|^2} \text{ [dB]} \quad (2)$$

を算出することができる。実験に用いた測定系を Fig. 4 に示す。試料とマイクの距離や管の内径などは、インピーダンス測定について記述された規格<sup>[4]</sup>に準じて設定した。アクリル管内に試料を挿入し、上下流のマイクを移動させながら、音源信号から各マイク位置までの伝達関数を測定する。測定結果はすべて音源信号を基準とした伝達関数になっているため、それらを互いに除することによりマイク位置間の伝達関数  $H_{12}$ 、 $H_{23}$ 、 $H_{34}$  を算出することができる。これらの伝達関数を上式に代入し、TL を算出する。測定の際、マイク位置は  $s_u = s_d = s$  となるように選び、 $\sin ks$  の項による  $H_i$  の発散を避ける。また、十分な測定精度が得られる周波数範囲はマイク間隔に依存するため、同一の試料に対して数種類のマイク間隔で測定を行ない、各間隔が許容する周波数範囲のデータをつなぎ合わせて測定結果とする。

**3.2 負性容量回路による遮音性能の向上** 弾性率を増加させる負性容量回路 Fig. 1(a)を圧電フィルムに結合し、透過損失の変化について検討する。630 Hz および 1 kHz で効果が現れるように回路を調整し、かつ回路が発振してフィルム自体から音の放射が始まることのない範囲で最大の電圧が出力されるように調整した。測定結果を Fig. 5 に示す。有効な周波数範囲は狭いものの、回路の結合によって透過損失が非常に大きく向上していることがわかる。回路の結合前に比べ、フィルムを透過する音エネルギーが 10dB 以上減少していることになる。フィルムの弾性率の増加が透過音を抑制しているものと考えられる。一方、制御目標よりやや高い周波数で透過損失の低下が見られるが、原因については現在検討中である。次に、負性容量回路の出力電圧と透過損失の関係について検討する。Fig. 5 の最大効果の状態から回路の出力電圧を段階的に減少させた場合の透過損失の変化を

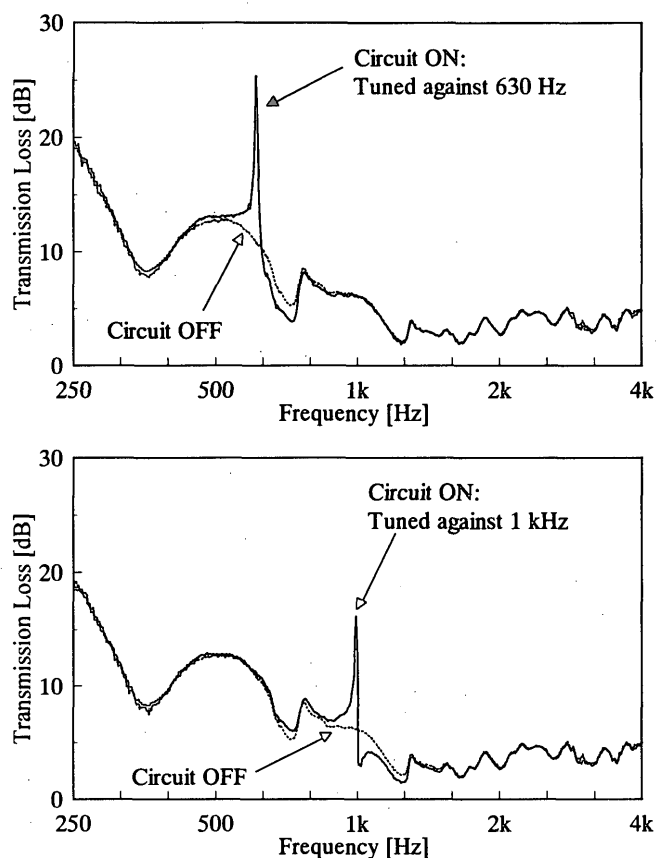


Fig. 5. Improvement in transmission loss by negative capacitance circuit; target frequency is set at 630 Hz and 1 kHz respectively.

Fig. 6 に示す。制御目標周波数の周辺だけを拡大して図に示している。回路の出力の大きさに応じて、透過損失の向上量が変化していることがわかる。フィルムの弾性率が回路の出力に対応して変化するためであると考えられる。ただし、ここでいう「最大効果」は今回用いた回路を構成する部品の仕様による限界であり、原理的な限界ではない。また、制御目標より高い周波数に現れていた透過損失の低下は、回路の出力が減少するにつれて現れなくなっていくこともわかった。最後に、回路の制御目標周波数の変化が透過損失に反映されるかどうか検討する。制御目標を 1/3 オクターブ間隔で移動しながら回路を調整し、透過損失を測定した結果を Fig. 7 に示す。図中に記された周波数は、効果のピークの周波数ではなく制御目標周波数を表している。結果から、向上量に差はあるものの、それぞれの制御目標に対応した周波数の近辺で透過損失が向上しているといえる。Fig. 6 および Fig. 7 の結果を総合すると、フィルムの透過損失の向上の度合、および向上が現れる周波数は、回路の設定と対応しているといえる。換言すれば、回路を調整することによって、フィルムの遮音性能を任意に制御することが可能になっているといえよう。

#### 4. 圧電セラミックを用いた防振構造

Fig. 8 のような構造を持つ試料の防振性能について検討する。

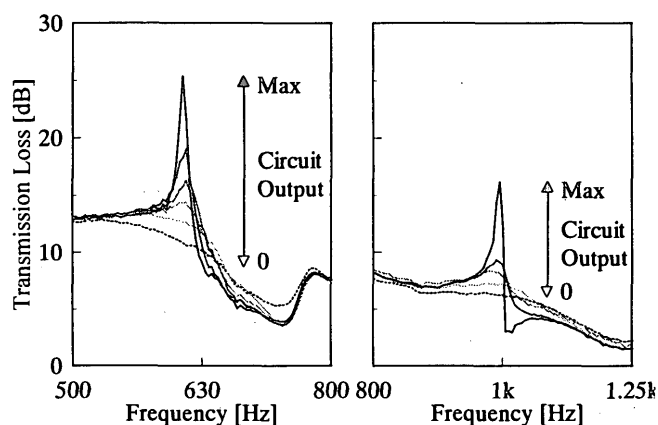


Fig. 6. Change in the improvement as a function of output voltage of the negative capacitance circuit.

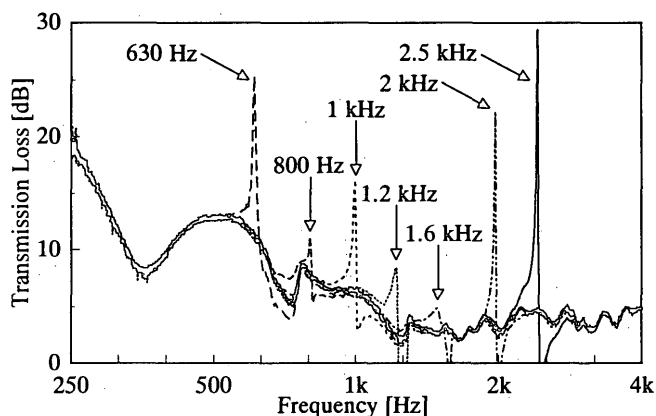


Fig. 7. Change in the improvement as a function of target frequency of the negative capacitance circuit.

代表的な圧電セラミックである  $\text{PZT}(\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3)$  を積層して用いた。回路に接続する電極となる銅板をはさみながら、面積  $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 、厚さ  $2\text{mm}$  の PZT を 5 枚積層する。銅板は両面とも PZT に接して、2 枚の PZT に共通の電極となる。そのため、PZT は極性の向きが一枚ごとに入れ替わる形で積層されている。また、振動体と接触する部分を絶縁するため、積層構造の両端には圧電性を持たないセラミックを貼り合わせた。最終的に、合計 7 枚のセラミックを貼り合わせた厚さ約  $15\text{mm}$  (銅板含む) の防振構造になる。この構造を防振材料として振動の伝搬経路に挿入する場合を想定し、負性容量回路の結合によって防振性能を向上させる方法について考える。この構造に振動を加えると、セラミックの厚さ方向に歪みおよび応力が生じる。すると、厚さ方向の力学系と電気系の間に現れる圧電効果、いわゆる 1-1 方向の圧電性により、防振構造の電極に電荷が生じる。この電荷は負性容量回路 Fig. 1(b) への入力となり、回路の作用によって厚さ方向の歪みが増加(弾性率が減少)する。その結果、セラミックの上下面に生じる応力も減少し、振動伝搬が抑制される。

##### 4.1 振動伝達特性の測定

Fig. 9 のような測定系を用い、防振性

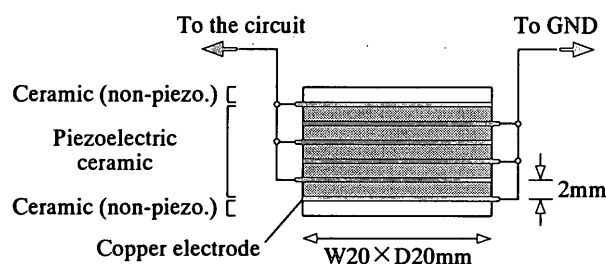


Fig. 8. Cross-section of vibration isolating structure with multi-layered piezoelectric ceramic.

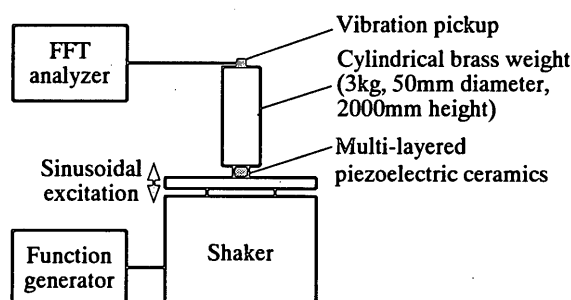


Fig. 9. Measurement system of vibration transmission ratio.

能の変化を測定する。加振台の上に圧電セラミックを載せ、さらに、直径50mm、高さ200mm、質量3kgの真鍮製円柱を載せる。加振台から正弦振動を与え、質量の上に設置した加速度ピックアップにより振動加速度レベルを測定する。予備実験を行なった結果、負性容量回路を結合しない状態で、この振動系は800Hz前後で共振を示すことがわかった。

**4.2 負性容量回路による防振性能の向上** 上記の防振構造に負性容量回路を結合し、振動伝達特性の変化について検討する。前節の圧電フィルムによる遮音の場合には弾性率を増加させる回路を用いたが、防振の場合には弾性率を減少させる回路Fig. 1(b)を用いる。回路をFig. 8の圧電セラミックに結合し、2.5kHzおよび3kHz付近で効果が現れるように、かつ回路と圧電セラミックを結合した系が発振しないように回路を調整する。回路の結合によるピックアップ位置の振動加速度レベルの変化をFig. 10に示す。グラフの振動加速度レベルの値は、相対値として示す。また、振動系の共振は800Hz付近で生じるので、Fig. 10のグラフは共振より高い周波数領域における実験結果となる。フィルムによる遮音の場合と同様、有効な周波数範囲はそれほど広くないものの、振動伝達率は大きく低下していることがわかる。回路結合前に比べて、振動加速度レベルが30dB近く減少している。また、フィルムによる遮音の場合には回路が有効な周波数範囲の近辺に遮音性能の低下が現れていたが、防振構造の場合にはそのような性能低下は見られないこともわかった。この傾向の違いについては、フィルムとセラミックという材料の違いによるもの

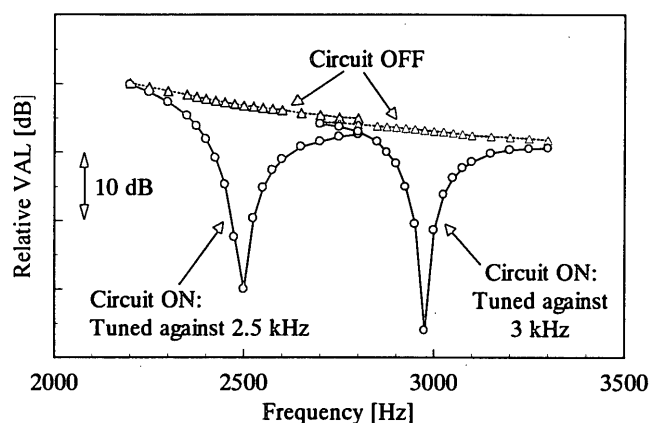


Fig. 10. Improvement in vibration transmission ratio by the negative capacitance circuit.

なのか、結合する回路の種類の違いによるものなのか、現在検討中である。

## 5. まとめ

圧電フィルムを用いた遮音構造、および圧電セラミックを用いた防振構造について、負性容量回路の結合によりそれらの性能を制御する手法に関する検討を行なった。実験の結果、負性容量の作用により材料の見かけの弾性率が変化し、それにもなつて遮音あるいは防振性能が向上することが明らかになった。性能が向上する周波数帯域幅は広くはないものの、効果が現れる周波数および性能の変化幅は結合する回路の設定次第で調整可能であることがわかった。つまり、圧電材料の遮音および防振性能に任意の周波数特性を持たせることができるという可能性が示されたといえる。また、遮音構造においては制御目標よりやや高い周波数で性能が低下してしまう一方、防振構造においてこの性能低下は現れない。今後の検討課題として、実用性を考えると、遮音および防振の両方について有効な周波数範囲の拡張が望まれる。圧電材料の変更や負性容量回路の改良などにより現在検討中である。また、本報告では音源や振動源に正弦振動を用いたが、上記の有効周波数の拡張が実現されしだい、広帯域雑音に対する効果についても検討する予定である。さらに、フィルムを用いた構造においては、遮音性能の低下が現れる原因、回路により弾性率を減少させた場合の音響特性の変化などについて、検討の余地が残されている。

## 参考文献

- [1] M. Date et al., J. Appl. Phys., 87, 863-868 (2000).
- [2] 大久保他, 音講論, 2000年9月, 673-674.
- [3] J. Y. Chung et al., J. Acoust. Soc. Am., 68, 907-913 (1980).
- [4] ISO 10534-2 (1998).