

213 圧電性高分子フィルムによる遮音・吸音

Sound Reflection and Absorption by Piezoelectric Polymer Films

○児玉 秀和 大久保 朝直 木村 和則 山本 貢平 深田 栄一 伊達 宗宏 (小林理研)

Hidekazu KODAMA, Tomonao OKUBO, Kazunori KIMURA, Kouhei YAMAMOTO, Eiichi FUKADA
and Munehiro DATE,

Kobayasi Institute of Physical Research, 3-20-41 Higashi-motomachi, Kokubunji, Tokyo 185-0022.

Sound reflection and absorption by piezoelectric polymer films connected with negative capacitance circuits were studied. Normal acoustic transmission loss and normal acoustic absorption coefficient of PVDF films were determined by the acoustic tube measurements. When the circuit H, which hardens the films, was connected to the film, transmission loss was increased and absorption coefficient was slightly decreased. When the circuit S, which softens the films, was connected to the film, transmission loss was decreased and absorption coefficient was slightly decreased. Transmission loss of the film connected with an improved circuit H, in which a PVDF condenser was installed, increased 5dB in the frequency range of 200Hz to 1.3kHz. A prototype of sound reflection unit, which combines the second PVDF film, was made. Transmission loss of the unit increased 20~35dB over a frequency range from 200Hz to 1.6kHz.

Key Words : Polyvinylidene Fluoride, negative capacitance circuit, Sound Reflection, Sound Absorption

1. はじめに

我々は、圧電体の弾性率が負性容量で大きく変化させることが可能であることから、圧電体の遮音性能および防振性能の電氣的制御について検討している。これまで、圧電性高分子フィルムの遮音性能制御および圧電性セラミックの防振性能制御について、単一周波数の音や振動に対して選択的に弾性率を変化させ、遮音・防振するだけでなく、広い周波数帯域にわたり遮音・防振制御が可能であることを報告した¹⁾。本研究では、圧電高分子フィルムによる遮音について知見を深めるため、まず負性容量による圧電体の弾性率および弾性損失の制御を、圧電体の電氣的損失の影響を含めて検討し、負性容量を結合した圧電性高分子フィルムの遮音性能および吸音性能について検討した。さらに、フィルムの遮音性能の高性能化について報告する。

2. 負性容量による複素弾性率制御

粘性(弾性損失)を含む圧電体の複素弾性率を

$$Y^* = Y' + iY'' \quad (1)$$

で表す。Y'は実部、Y''は虚部で弾性損失である。圧電体に容量を付加すると、圧電体の弾性率Y*は

$$Y^* = Y_0^* / \{1 - k^2 / (1 + C^*/C_s^*)\} \quad (2)$$

となる。Y₀*は電極間を短絡したときの圧電体の複素弾性率、kは圧電体の電気機械結合係数である。C*は圧電体に付加した負性容量の複素容量、C_s*は圧電体の複素容量で、式(3)に示すように複素容量の実部成分C', C'_sと、損失係数tanδ, tanδ_sで表される。

$$C^* = C'(1 - i \tan \delta), C_s^* = C'_s(1 - i \tan \delta_s) \quad (3)$$

ただし、C' ≤ 0, tanδ ≥ 0である。容量比C*/C_s*を複素数α* = α' - iα''とおき、式(2)に代入すると、容量を付加した圧電体の複素弾性率が電氣的損失を含むα*の関数で得られる。

$$Y^* = Y_0^* / \{1 - k^2 / (1 + \alpha^*)\} \quad (4)$$

α'およびα''は

$$\alpha' = (C'/C'_s) \{ (1 + \tan \delta \cdot \tan \delta_s) / (1 + \tan^2 \delta_s) \} \\ \alpha'' = (C'/C'_s) \{ (\tan \delta - \tan \delta_s) / (1 + \tan^2 \delta_s) \} \quad (5)$$

である。さらにβ* = 1 / {1 - k² / (1 + α*)} = β' + iβ''とおくと、式(4)より圧電体の複素弾性率Y*はY₀*とβ*で表される。

$$Y^* = Y_0^* \cdot \beta^* \quad (6)$$

したがって、式(6)より、圧電体の弾性率Y'および弾性損失Y''は、

$$Y' = Y_0' \beta' - Y_0'' \beta'', Y'' = Y_0' \beta'' + Y_0'' \beta' \quad (7)$$

となる。β'およびβ''は、

$$\beta' = \{ (\alpha' + 1)^2 - k^2 (\alpha' + 1) + \alpha''^2 \} / \{ (\alpha' - k^2 + 1)^2 + \alpha''^2 \} \\ \beta'' = k^2 \alpha''^2 / \{ (\alpha' - k^2 + 1)^2 + \alpha''^2 \} \quad (8)$$

である。

さて、圧電体に付加した負性容量と圧電体の間で、電氣的損失係数を一致させると、式(5)よりα' = C'/C'_s, α'' = 0となり、これを式(8)に代入すると、β' = 1 / {1 - k² / (1 + α')}, β'' = 0となる。さらに、式(7)に代入すると圧電体の弾性率Y'および弾性損失Y''は次式で表される。

$$Y' = Y_0' / \{1 - k^2 / (1 + \alpha')\} \\ Y'' = Y_0'' / \{1 - k^2 / (1 + \alpha')\} \quad (9)$$

上式は、負性容量と圧電体の電氣的損失係数を一致させると、圧電体の弾性率および弾性損失は複素容量の実部の比に依存することを示す。Fig. 1に式(9)より求めた、弾性率Y'/Y₀'および弾性損失Y''/Y₀''のα'依存性を示す。ここではk = 0.05とした。弾性率、弾性損失は、いずれもα'を0から減少するにつれて増加し、α' = -(1 - k²)で∞となった。一方、α'を-∞から増加するにつれて弾性率および弾性損失は減少し、α' = -1で0となり、-1 < α' < -(1 - k²)では負性領域となった。

次にα'を一定とし、電氣的損失が変化したときの弾性率および

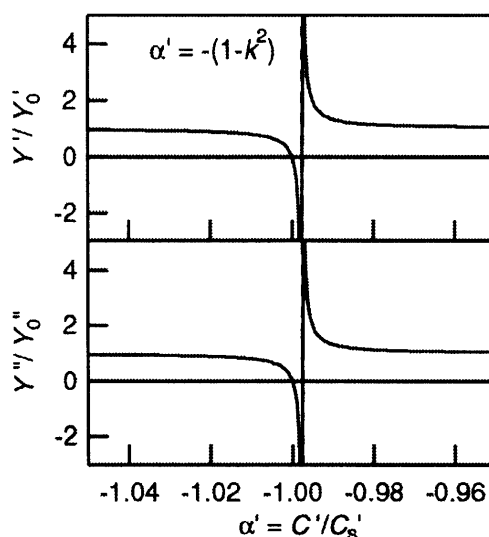


Fig. 1. α' dependence of Y'/Y₀' and Y''/Y₀'' at tanδ = tanδ_s

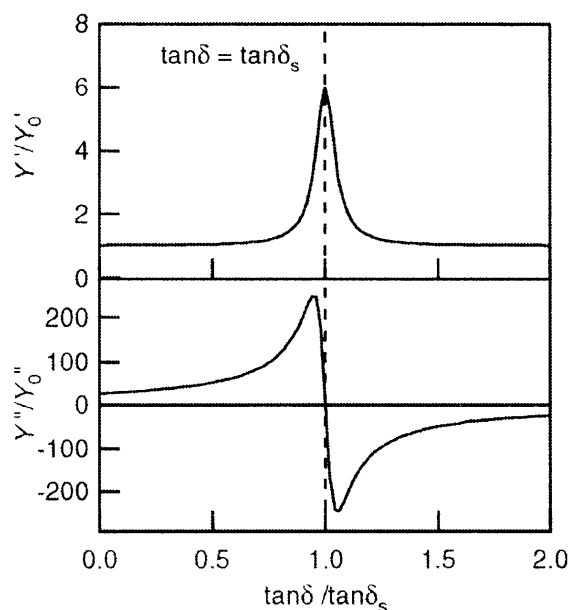


Fig. 2. $\tan\delta/\tan\delta_s$ dependence of Y'/Y_0' and Y''/Y_0'' at $\alpha' = -0.995$

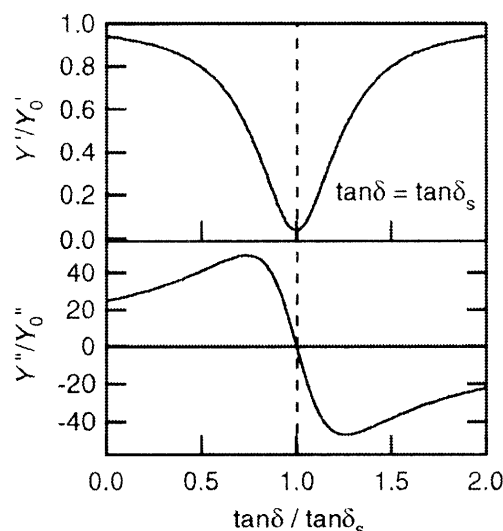


Fig. 3. $\tan\delta/\tan\delta_s$ dependence of Y'/Y_0' and Y''/Y_0'' at $\alpha' = -1.0001$

弾性損失の変化を検討した。Fig. 2 および Fig. 3 に弾性率および弾性損失を、負性容量の損失係数と圧電体の電気的損失係数の比 $\tan\delta/\tan\delta_s$ に対して示す。破線は $\tan\delta = \tan\delta_s$ を示す。Fig. 2 は $\alpha' = -0.997$ としたときの結果、Fig. 3 は $\alpha' = -1.0001$ としたときの結果である。いずれも $k = 0.05$ 、圧電体の機械的損失係数 $\tan\delta_m = Y''_0/Y_0 = 0.01$ とした。

Fig. 2 より $\alpha' \approx -(1 - k^2)$ とした場合、 $\tan\delta = \tan\delta_s$ のときに弾性率は増加した。それに対して、弾性損失は $\tan\delta < \tan\delta_s$ のときに増加し、 $\tan\delta > \tan\delta_s$ のとき減少した。

Fig. 3 より $\alpha' \approx -1$ とした場合、 $\tan\delta = \tan\delta_s$ のとき弾性率は減少した。弾性損失は、Fig. 2 に示す結果と同様に、 $\tan\delta < \tan\delta_s$ のときに増加し、 $\tan\delta > \tan\delta_s$ のとき減少した。

3. 負性容量を結合した PVDF の遮音・吸音測定

本研究では、試料として代表的な圧電性高分子フィルムとして知られているポリフッ化ビニリデン (PVDF) フィルムを用いた。フィルムの両面に電極を蒸着し、Fig. 4 に示す2種類の負性容量回路を結合した。フィルムの容量を C_s^* 、回路の容量を C^* とすると、Circuit H の動作範囲は $0 \leq |C^*|/|C_s^*| \leq 1$ 、Circuit S の動作範囲は $1 \leq |C^*|/|C_s^*| \leq \infty$ である。Circuit H はフィルム

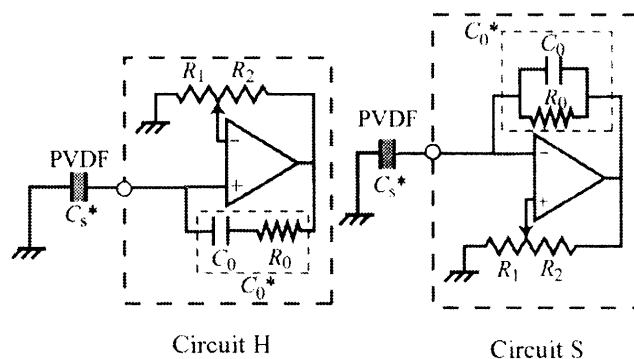


Fig. 4. Negative capacitance circuits.

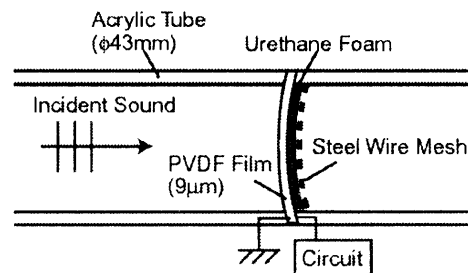


Fig. 5. Configuration of the sample installed in an acoustic tube experiment system.

の弾性率を上げることができ、Circuit S は弾性率を下げるができる。いずれの回路とも、回路の複素容量 C^* は次式で与えられる。

$$C^* = -(R_2/R_1)C_0'(1 - i\tan\delta_0) \quad (10)$$

ここで、 C_0' は C_0^* の実部成分、 $\tan\delta_0$ は C_0^* の損失係数である。回路の損失係数は $\tan\delta_0$ で表される。また、抵抗 R_2 と R_1 を可変とすれば、回路の容量の実部を変えることが可能となる。

Circuit H では C_0^* をコンデンサー C_0 と抵抗 R_0 の直列とし、Circuit S では C_0 と R_0 の並列とした。損失係数 $\tan\delta_0$ は、Circuit H では $\tan\delta_0 = 2\pi f C_0 R_0$ となり、周波数に比例する。Circuit S では $\tan\delta_0 = 1/(2\pi f C_0 R_0)$ となり、周波数に反比例する。なお、PVDF フィルムの電気的損失係数 $\tan\delta_s$ は 100Hz から 10kHz にかけて 0.01 でほぼ一定である。

Fig. 5 に示すように、フィルムを直径 43mm の円柱状の音響管に挿入し、音響管法によりフィルムの垂直入射損失を測定した。フィルムは、ウレタンフォームおよび金属メッシュでドーム状に成形するように成形され、音圧で面内の伸縮振動を生じる。このモードの電気機械結合係数は $k_{31} = 0.056$ である。垂直入射吸音率を測定する場合には、メッシュの背後に粘土層およびアクリル板を設け剛壁とした。

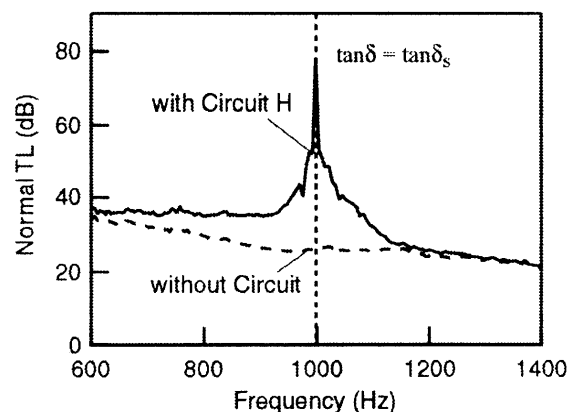


Fig. 6. Frequency dependence of Normal TL of PVDF with circuit H

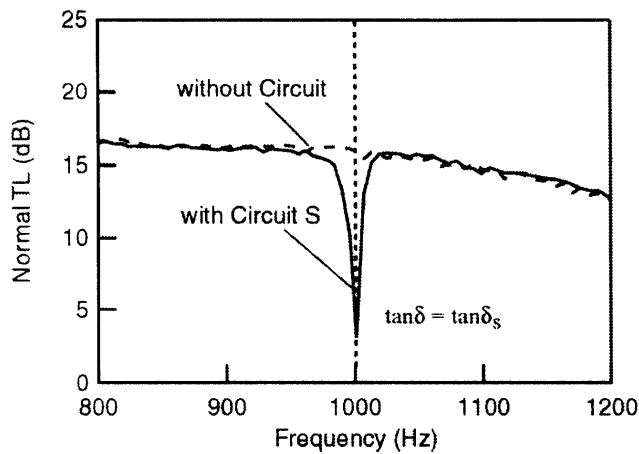


Fig. 7. Frequency dependence of Normal TL of PVDF with circuit S.

4. 負性容量回路を結合した PVDF の透音・吸音

Circuit H を結合した PVDF フィルムの透過損失の周波数依存性を Fig. 6 に、Circuit S を結合したフィルムの透過損失の周波数特性を Fig. 7 に示す。いずれも、回路を結合しないフィルムの透過損失を破線で併せて示す。ここでは、1kHz で Circuit H, Circuit S の損失係数 $\tan\delta$ をフィルムの電氣的損失係数 $\tan\delta_s$ と一致させた。フィルムの透過損失は、Circuit H を結合すると、回路とフィルムの損失係数が一致する 1kHz で増大しピークを示した。一方、Circuit S を結合すると、透過損失は回路とフィルムの損失係数が一致する 1kHz で減少した。

次に Circuit H を結合した PVDF フィルムの吸音率の周波数依存性を Fig. 8 に、Circuit S を結合したフィルムの吸音率を Fig. 9 に示す。ここでも、回路を結合しないフィルムの吸音率を破線で併せて示す。ここでは、Circuit H については 1kHz で、Circuit S については 750Hz で、損失係数 $\tan\delta$ をフィルムの電氣的損失係数 $\tan\delta_s$ と一致させた。いずれも PVDF の吸音率は、透過損失と異なり、回路とフィルムの損失係数を一致させた周波数では変化が見られなかった。Circuit H を結合した場合、吸音率は透過損失を一致させた周波数より高周波側で減少した。一方、Circuit S を結合した場合、吸音率は透過損失を一致させた周波数より低周波側で減少した。

Mokry 等は湾曲させたフィルムの透過損失と吸音率を、フィルムの面内の弾性率および弾性損失と関連づけた^[4]。それによると、フィルムの透過損失 TL および吸音率 α は次式で表される。

$$TL = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \frac{Y''}{\omega \xi} + \frac{Y'^2 + (Y' - \rho \omega^2 R^2)^2}{(2\omega \xi)^2} \right\} \quad (11)$$

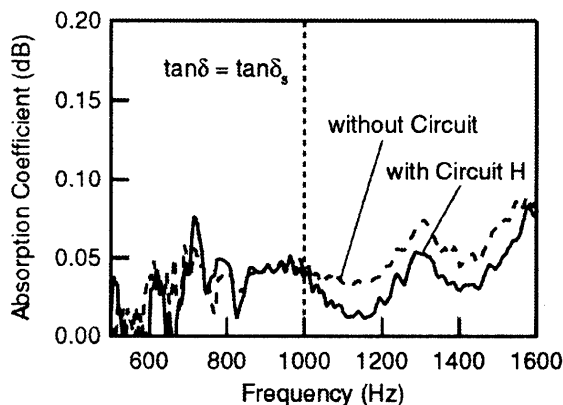


Fig. 8. Frequency dependence of absorption coefficient of PVDF with circuit H.

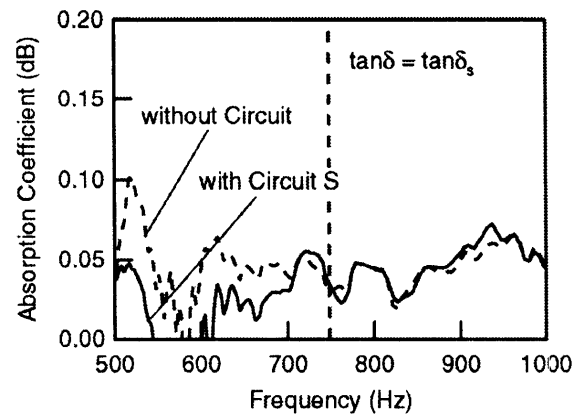


Fig. 9. Frequency dependence of absorption coefficient of PVDF with circuit S.

$$\alpha = \frac{4\xi\omega Y''}{(Y' - \rho\omega^2 R^2)^2 + (Y'' + \omega\xi)^2} \quad (12)$$

ただし、

$$\xi = \rho_0 c_0 R_2 / h \quad (13)$$

である。ここで、 ω は角周波数、 ρ は膜の密度、 h は膜の厚さ、 R は膜の曲率半径、 ρ_0 は空気密度、 c_0 は空気音速である。先に、負性容量を結合すると圧電体の弾性率および弾性損失を制御できることを述べた。Mokry 等の理論より負性容量によって、圧電体の透過損失および吸音率を変化させることができる。本研究では、負性容量回路を結合した PVDF について、透過損失および吸音率が回路によって変化するを示した。

5. PVDF フィルムの透音性能の高性能化

PVDF フィルムに Circuit H を結合すると、フィルムと回路の損失係数が一致した周波数で、透過損失を大幅に増加させること

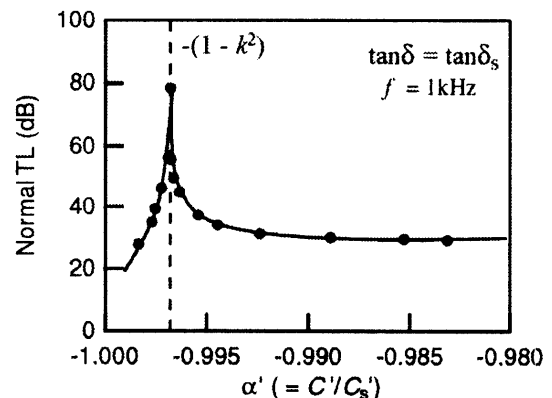


Fig. 10. Plots of Normal TL of PVDF with negative capacitance circuit H against α' at $\tan\delta = \tan\delta_s$

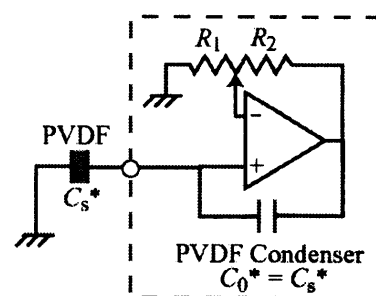


Fig. 11. Improved negative capacitance circuit H.

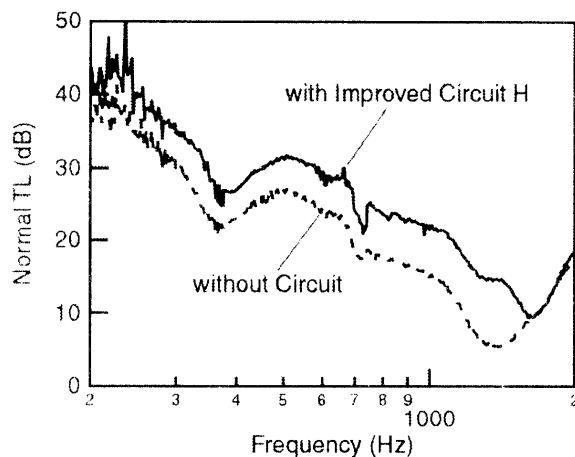


Fig. 12. Frequency dependence of Normal TL of the sample with the improved circuit H in which PVDF condenser is used as C_0 .

が可能であることを述べた。そこで、本研究ではCircuit Hを結合したフィルムについて、遮音性能の高性能化について検討した。

まず、1kHzで回路とフィルムの電気的損失係数を一致させ、1kHzでの透過損失を $\alpha' (= C'/C_0')$ に対して調べた。その結果をFig. 10に示す。透過損失は α' に依存し、 $\alpha' = -(1 - k^2)$ のとき最大となった。このときの変化幅は50dBに達した。これは、先に述べた損失係数を一致させた負性容量による、圧電体の弾性率変化と対応する。

回路の損失係数とPVDFの電気的損失係数を広い周波数帯域にわたり一致させれば、その周波数帯域でフィルムの遮音性能制御が可能となると考えられる。そこで、Circuit Hについて、Fig. 11に示すように C_0 の部位にPVDFコンデンサーを導入した。コンデンサーを構成するPVDFは音響管に挿入されたフィルムと同じものとした。負性容量回路の損失係数はコンデンサー C_0 の損失係数と対応するので、PVDFコンデンサーを C_0 に用いれば、周波数に依らず容易に音響管に挿入されたPVDFフィルムの電気的損失係数と一致させることが出来る。PVDFコンデンサーを

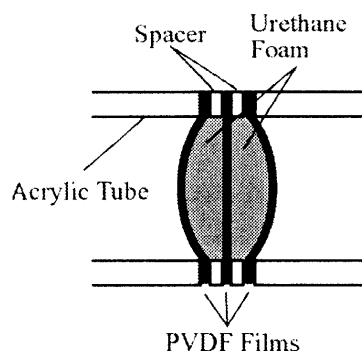


Fig. 13. Configuration of sound reflection unit which consists of three PVDF films

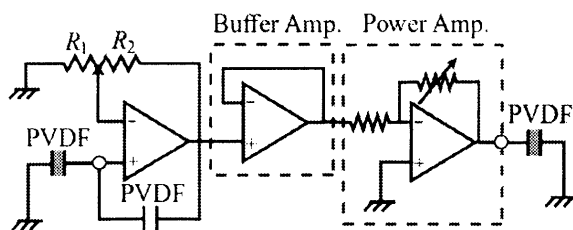


Fig. 14. Configuration of circuits which operate sound reflection unit shown in Fig. 13

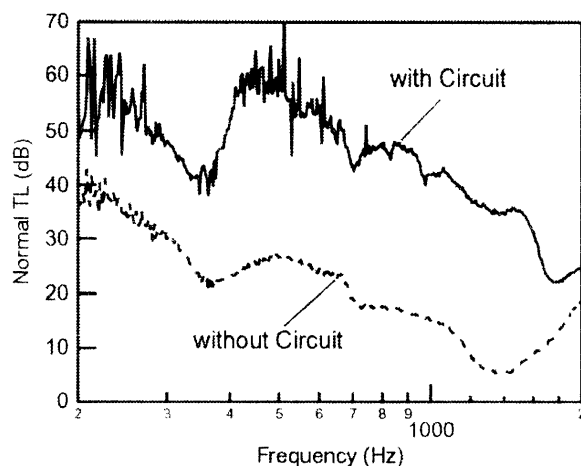


Fig. 15. Frequency dependence of Normal TL of the sound reflection unit which consists of curved two PVDF films and one plane PVDF film.

用いたCircuit Hを結合したPVDFフィルムの透過損失をFig. 12に示す。回路を付加することによって、フィルムの透過損失は200Hzから1.3kHzにかけて一様に5dB増加した。さらなる性能向上を図るため、PVDFフィルムの多重化を行った。フィルムの背後に新たにドーム状に成形されたフィルムを配置し、透過音によるフィルムの歪みを電気的に制御することによって、音のさらなる遮断を試みた。

本研究ではFig. 13に示す3枚のPVDFフィルムおよびフィルムで封入されたウレタンフォームで構成されたユニットを作成した。両端に設置された2枚のフィルムは、封入されたウレタンフォームの反発力によってドーム状に成形される。ユニット中央に挿入されたフィルムは平板で、遮音性能はほとんど無い。

ドーム状に成形された両端のフィルムの一端にはCircuit Hを結合した。もう一方のフィルムには、Circuit Hより出力される帰還電圧を増幅して印加するよう、Fig. 14に示すようにCircuit Hを構成する演算増幅器の出力端子に、緩衝増幅器および電圧増幅器を介して接続した。また、ユニット中央にある平板状のフィルムには、回路を構成する演算増幅器の(+)入力端子と出力端子間に接続し、回路を構成するコンデンサー C_0 とした。

作成したユニットの透過損失をFig. 15に示す。回路による制御を行うことによってユニットの透過損失は、200Hzから1.6kHzにかけて20～35dB増加した。このように、フィルムの多重化は負性容量回路を結合したPVDFフィルムの遮音性能を向上する上で、簡単かつ有効な手法といえる。

6. まとめ

負性容量による圧電体の弾性率および弾性損失の制御と、負性容量による圧電性高分子フィルムの遮音性能および吸音性能について検討するとともに、負性容量を結合した圧電性高分子フィルムの遮音性能の高性能化について検討した。圧電体に負性容量を結合すると、弾性率だけでなく弾性損失を変えられることが見出された。負性容量回路を結合したPVDFフィルムについて、垂直入射透過損失および垂直入射吸音率を測定した。フィルムの透過損失は、回路とフィルムの電気的損失係数が一致した周波数で増加又は減少した。フィルムの吸音率は、損失係数が一致した周波数近傍でわずかに減少した。フィルムの遮音性能の高性能化として、PVDFコンデンサーを負性容量回路に導入した。その結果、透過損失は200Hzから1.3kHzにかけて一様に5dB増加した。さらにフィルムを多重化することで、透過損失は200Hzから1.6kHzにかけて20～35dB増加した。

7. 参考文献

- [1] 大久保他, 音講論, 2001年10月, 799(2001).
- [2] P. Mokry et. Al., Submitted to *J. Appl. Phys.*