PZT 圧電セラミックスによる振動吸収

徐 用教**・宮山 勝・柳田博明*

東京大学先端科学技術研究センター, 153 東京都目黒区駒場 4-6-1

*東京大学工学部工業化学科, 113 東京都文京区本郷 7-3-1

**三星コーニング(株), 730-340 韓国慶北亀尾市侍美洞 580

Vibration Absorption of PZT Piezoelectric Ceramics

Yonggyo SEO**, Masaru MIYAYAMA and Hiroaki YANAGIDA*

Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153

*Department of Industrial Chemistry, Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

**R & D Center, Gumi Plant, SamSung Corning Co., Ltd., 580, Simi-dong Gumi-city, Kyoung sang buk-do, Korea 730-340

[Received June 7, 1993; Accepted November 16, 1993]

Recently, sound and mechanical vibration are becoming important problems in our life. In order to absorb vibrations, the input vibration energy has to be transformed into other kind of energy which can be emitted out to the surrounding easily. Piezoelectric ceramics have a function of transforming mechanical energy into electric energy by changes in the direction of the spontaneous polarization. Mechanical input vibration of 1 kHz was produced continuously by the actuator. The electric charge produced by the piezoelectric effect was measured in open state (both electrodes are not connected to anywhere), short state (both electrodes are connected each other) and ground state (one or both electrodes are connected to the ground). Then, the vibration absorption characteristics were measured. They showed very large values at the ground state. The transformation of vibration energy into electric charge by the piezoelectric effect was identified by observing the maximum charge at the resonant frequency. The produced electric charge and vibration absorption increased with the increase in electromechanical coupling factor and piezoelectric coefficient. In case of the internal insertion of electrode such as multilayer ceramics, however, elastic and dielectric losses compensated the contribution of piezoelectric coefficient and electromechanical coupling factor to the production of electric charge and gave a low charge and a low vibration absorption efficiency.

Key-words : Piezoelectric effect, PZT ceramic, Vibration absorption, Ground, Electromechanical coupling factor

1. 緒 言

近年, 機械的振動やそれにより生ずる騒音の吸収は快適な生活環境を維持する上で益々重要になっている。振動が吸収されるには, 入力された振動エネルギーが他のエネルギーに変換され消失されなければならない。現在, 吸振, 制振材料として, ゴムやプラスチックなどの高分子系材料や磁性合金及び硬度の異なる材料の複合材などが用いられている。それらの材料では, 高分子系は粘弾性を, 金属系は内部摩擦やすべり摩擦を利用して振動エネルギーを熱エ

ネルギーに変換し, その熱を放出することにより振動吸収が行われている。

圧電性セラミックスは, 機械的エネルギーを電氣的エネルギーに変換できるため, 何らかの手段で電気エネルギーを放出できればより効率的な吸振特性が期待される。最近, 電氣的エネルギーを消費させるために外部抵抗を接続する方法や, 適度な導電性を持つポリマーと複合体にする方法が内野らにより報告されている^{1)~4)}。適度な大きさの接続抵抗により電気エネルギーがジュール熱として消費され, 振動の減衰が速くなるという結果が出されている。大きな吸振特性のためには, より大きな電気機械結合係数を示す状態で圧電体を用い, また電気エネルギーを効率良く消失させることが重要だと考えられる。

そこで, 本研究では PZT 系圧電体のペレットに縦振動モードで定常的に振動を加え, 圧電体の両面の電極を開放, 短絡, アースさせた場合の吸振特性を調べた。

2. 実験方法

圧電効果による振動の吸収を測定するために三つの試料を使った。試料は三つとも緻密なチタン酸ジルコン酸鉛である。まず試料 A は厚さ 6 mm で直径 10 mm の厚いペレットで, 試料 B は厚さ 1 mm で直径 40 mm の薄いペレットである。試料 C は幅と長さが 5 mm で厚さが 10 mm の 100 層重ねた積層体のチタン酸ジルコン酸鉛である。試料 A と試料 B は積水化成工業から, 試料 C は日立金属から供給された。

振動を加えた場合に発生した電荷を図 1 の装置と回路で測定した。電極を設けた試料は圧電アクチュエータと加速度センサの間に挟まれて, バネによって 500 gf の力で加圧固定されている。電氣的絶縁体のアクリルが試料とアクチュエータ及びセンサとバネの間に挟まれている。アクチュエータで機械的振動を 1 kHz で連続的に加えた。入力振動は直径 10 mm で厚さ 10 mm の PZT 圧電セラミックスのアクチュエータを用いて 1 kV の交流電圧をかけて振動させた^{5), 6)}。このアクチュエータ用の PZT 圧電セラミックスも積水化成工業から供給された。試料を通過し

Fig. 1. Schematic drawing of (a) the equipment to measure the vibration absorption and (b) the circuit to measure the electric charge in the open state.

た振動は100 mV/重の感度を持つ加速度センサで測定し、FFT アナライザで分析された。

吸振時に、試料の内部で熱エネルギーに変わって放出される要因となる誘電体損失と弾性損失を測定した。電流が電圧に対して生じる位相の遅れである誘電体損失 $\tan \delta_e$ はインピーダンスアナライザ (YHP4192A) で測定した。歪が応力に対して生じる位相の遅れである弾性損失 $\tan \delta_m$ は、共振周波数 f_r と1 kHzの静電容量 C_1 と共振抵抗 R_1 を測定して $\tan \delta_m = 2\pi f_r C_1 R_1$ の式によって計算された。

振動は試料電極をオープンした状態（どこへも接続しない状態）、ショートした状態（両電極を接続した状態）及び片側あるいは両側の電極をアースした状態で測定した。リード線は機械的応力が掛からないように0.1 mmの細いニッケル線を使った。振動吸収量はオープン状態での振動量 (a_0) により、ショート及びアース状態での振動量 (a_1) の変化を、 $A = -100(a_1 - a_0)/a_0$ の式で規格化した。

図1の装置で振動が加えられると入力振動の機械的エネルギーは試料の圧電効果によって電荷を発生し、電気的エネルギーに変わる^{7),8)}。ここで、共振周波数で加振した場合に発生電荷が多くなると推測される。それで、共振周波数での発生電荷量のピークを確認するために、直径10 mm、厚さ10 mmのPZT圧電セラミックス（アクチュ

エータで使われているセラミックスと同じもの）を使って発生する電荷量を測定した。共振周波数は134.8 kHzであった。共振周波数を高電圧電源が使える10 kHzまで、おもり170 gを付けることで移動させた。おもりは鉄を利用した。共振周波数はインピーダンスアナライザのYHP4192Aで測定されたインピーダンス曲線の極小点にした。おもりを変えながら共振周波数を測定しておもりの重さを決めた。それから図1の装置で振動の周波数を変えながら試料に発生する電荷量を測定して、共振周波数で電荷のピークを観察した。図1の回路のように機械的振動が加えられて試料の表面で発生した電荷は、並列に接続した1 μ Fのコンデンサの両端の電圧から計算した^{9),10)}。

3. 結果及び考察

表1に各試料の物性定数及び1 kHzの振動で発生した電荷を示す。試料Cでは、圧電歪定数、電気機械結合係数がほかの試料よりも大きい、弾性損失、誘電体損失も大きな値となっている。発生電荷は、各試料で大きな差はないが、試料Bで一番大きく、次に試料A、試料Cの順となった。

圧電体に周期的な応力が加えられた場合に発生する電荷は、その周波数が圧電体の共振周波数に一致するとき最大となる。自作した装置で発生した電荷が振動エネルギーの圧電効果により変換されたものであることを確認するため、次のような測定を行った。

圧縮型圧電セラミックスの共振周波数 f_r は、次式で表すことができる¹¹⁾。

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{ES}{mt}} \quad (\text{Hz})$$

ただし m : おもりの質量 (kg), S : 圧電素子の断面積 (m^2), t : 同厚さ (m), E : 同ヤング率 (N/m^2)。

直径10 mm、厚さ10 mmのPZT圧電セラミックスを使って発生する電荷量を測定した。第一共振周波数である、厚さ方向の共振周波数は134.8 kHzであった。共振周波数はおもりを付けることによって低くなる。図2は試料に170 gのおもりを付けたときのインピーダンス曲線である。共振周波数は約10 kHzになった。その後、共振周波数の付近で加振した場合に発生する電荷量を測定した。図3は共振周波数の付近で測定された電荷量を示している。電荷量は共振周波数で最大値を示している。この結果から図1の装置で試料の表面で発生する電荷量は、振動エネ

Table 1. The Electric Charge and the Electric Properties of the Lead Zirconate Titanate Ceramics

	Sample A	Sample B	Sample C
Electric charge Q(nC)	0.39	0.43	0.37
Piezoelectric strain coefficient d(pC/N)	187	270	1930
Electromechanical coupling factor k_t (%)	43.3	53.1	74.0
Mechanical loss $\tan \delta_m$ (%)	7.7	10.6	103
Electric loss $\tan \delta_e$ (%)	0.2	1.5	2.46
Impedance Z(k Ω)	1241	7.06	0.279

Fig. 2. The decrease of the resonant frequency with the applied mass.

Fig. 3. The maximum value of the electric charge at the resonant frequency.

Fig. 4. The normalized vibration absorption ratio of the each state in the lead zirconate titanate ceramics.

ルギーが圧電効果によって変換されたものであることが確認された。

図4には試料A, B, Cの各状態でオープン状態の値を基準とした振動吸収率を示している。ここで, upper状態では上だけ, under状態では下だけ, both状態では上と下が実験室の配電盤のアース端子とつながっている。ショート状態ではいずれの試料でも振動吸収はほとんど見られなかった。一方, アース状態では40~60%という大きな振動吸収が見られた。振動吸収率は試料Bが最も大きく, B, A, Cの順序となった。圧電セラミックスに機械的振動

が加えられた場合, 圧電効果により試料両端に電荷が発生する。オープン状態では圧電効果により発生した電荷は外部に放出されず残り, 分極の変化を妨げる。したがって圧電効果はすぐ起こらなくなる。ショート状態では試料とリード線が閉回路を構成しているけれども試料のインピーダンスがあるので電荷の流れは制限される。したがって試料の表面の電荷は残るのでオープン状態と同じく分極の変化が抑えられて圧電効果はほとんど起こらなくなる。エネルギーは試料の内部でも消費されるがリード線でも消費される。それでアースするとアースのリード線はとても長いのでエネルギーの消費量は非常に多くなることを示す。リード線はとても広い表面積を持つために電荷が逃げて, 電荷が圧電効果を妨げる現象も起こらないし, 消費されるエネルギーが大きくなるので非常に高い吸振率が得られる。特に両端アースした場合にはショート用のリード線とアース用のリード線を持つことになる。キルヒホッフの電流に関する法則 ($I = I_1 + I_2$, I : +電荷が発生する電極からの電流, I_1 : 反対側の電極に流れる電流, I_2 : アース側に流れる電流) のように流れる電荷はショートとアースの効果をあわせ持つことができるので吸振率が高くなる。

3種類の試料の間で, 図4に示したアース状態での振動吸収率の大きさの順序と, 表1に示した開放状態での発生電荷の大きさの順序に一致が見られた。このことは発生電荷の大きいほど, エネルギー損失が大きく, 高い振動吸収率となることを示している。発生電荷量は圧電歪定数と電気機械結合係数が大きな圧電体で大きいはずであるが¹²⁾, それらがともに大きな試料Cでも発生電荷はほかの試料と大きな差はない。これは試料Cの大きな誘電体損失と弾性損失及び小さなインピーダンスが影響したものと考えられる。

外力 $f = F_0 \sin \omega t$ により, 圧電体の上面に変位 $x_1 = X_1 \sin \omega t$ の振動が生じ, 下面に変位

$$x = B \sin(\omega t - \phi) \quad (\phi: \text{位相の遅れ}, B: \text{振幅})$$

の振動が起こるとする。弾性抵抗係数を r とすると振動の変形に対する抵抗力は

$$F_1 = -r \frac{dx}{dt}$$

になる。

電氣的エネルギー損失がない場合, 外力 $f = F_0 \sin \omega t$ により下面で $x = B \sin(\omega t - \phi)$ の振動が定常的に起こる。

dt という時間に質量 m が距離 dx 動くとする, その間に, 外力のする仕事 dW は

$$\begin{aligned} dW &= f dx \\ &= F_0 \sin \omega t \cdot \omega B \sin(\omega t - \phi) dt \end{aligned}$$

になる。

1周期の間の仕事 W は

$$\begin{aligned} W &= \int_0^T dW \\ &= BF_0 \int_0^{2\pi} \cos(\omega t - \phi) \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \pi BF_0 \sin \phi \end{aligned}$$

ここで、弾性抵抗係数を r 、スティフネスを s とすると

$$\begin{aligned}\sin^2 \phi &= \frac{\tan^2 \phi}{1 + \tan^2 \phi} \\ &= \frac{r^2 \omega^2}{(s - m\omega^2) + r^2 \omega^2} \\ &= \frac{B^2 r^2 \omega^2}{F_0^2}\end{aligned}$$

ϕ は $0 \leq \phi \leq \pi$ 、したがって $\sin \phi > 0$ であるから

$$\sin \phi = \frac{Br\omega}{F_0}$$

になる¹³⁾。したがって

$$W = \pi \omega r B^2 \quad (1)$$

一方、 dt という時間で機械的抵抗のする仕事は¹³⁾

$$\begin{aligned}dW_d &= -r \frac{dx}{dt} dt \\ &= -r \omega^2 B^2 \cos^2 (\omega t - \phi) dt \\ W_d &= -r \omega^2 B^2 \int_0^T \cos^2 (\omega t - \phi) dt \\ &= -\pi r \omega B^2 \quad (2)\end{aligned}$$

したがって、 $W_d = -W$ となる。このように、定常的な強制振動の場合、圧電体の弾性抵抗により消費する分だけ、外力からの仕事が使われ、振動が維持される。

次に、電気的エネルギー損失がある場合（発生電荷をアースで逃がす場合）、その時の下面の振動を $x' = B' \sin(\omega t - \phi')$ とする。外力のする仕事 W は(1)式と等しく

$$W = \pi \omega r B^2 \quad (3)$$

抵抗のする仕事 W_d' （機械的エネルギー損失）は(2)式により

$$W_d' = -\pi r \omega B'^2 \quad (4)$$

になる。

圧電性による電気的エネルギー (W_E) は、振動系（圧電材料）が持つ力学的エネルギー (W_M) に依存する。電気的エネルギーと機械的エネルギーは

$$W_E = W_M \times k_t^2 \quad (k_t: \text{電気機械結合係数})$$

の関係がある。機械的エネルギーは

$$\begin{aligned}W_M &= mv^2/2 + sx'^2/2 \quad (v: \text{速度}) \\ &= (m\omega^2 B'^2/2) \cos^2 (\omega t - \phi') \\ &\quad + (sB'^2/2) \sin^2 (\omega t - \phi') \\ &= mB'^2(s/m + \omega^2)/4 \\ &\quad - \{mB'^2(s/m - \omega^2)/4\} \cos(2\omega t - 2\phi')\end{aligned}$$

になる¹³⁾。

1 周期 ($\omega t \rightarrow 0 \sim 2\pi$) の平均では、右項は 0 になる。したがって

$$W_M = mB'^2(s/m + \omega^2)/4$$

となり、 W_E は

$$W_E = mB'^2(s/m + \omega^2)k_t^2/4 \quad (5)$$

になる。電気エネルギーがすべて消失する時の定常振動下においては

$$W + W_d' - W_E = 0$$

となるので、(3)(4)(5)式より

$$\pi \omega r B^2 = \{\pi r \omega + (s + m\omega^2)k_t^2/4\} B'^2$$

したがって

$$\begin{aligned}\frac{B'}{B} &= \sqrt{\frac{\pi r \omega}{\pi r \omega + (s + m\omega^2)k_t^2/4}} \\ &= \sqrt{1 - \frac{(s + m\omega^2)k_t^2/4}{\pi r \omega + (s + m\omega^2)k_t^2/4}} \quad (6)\end{aligned}$$

この式は、電気エネルギーの損失により振動の振幅が小さくなることを示している。本研究では振動を加速度で評価しているため、電気的エネルギー損失がない場合とある場合の加速度の比 a'/a で表すと、次のようになる。電気的エネルギー損失がない場合の加速度 a は

$$\begin{aligned}a &= \frac{d^2x}{dt^2} \\ &= -\omega^2 x \\ &= -\omega^2 B \sin(\omega t - \phi)\end{aligned}$$

となり、電気的エネルギー損失がある場合の加速度 a' は

$$\begin{aligned}a' &= \frac{d^2x'}{dt^2} \\ &= -\omega^2 x' \\ &= -\omega^2 B' \sin(\omega t - \phi')\end{aligned}$$

のようになる。

したがって(6)式より

$$\begin{aligned}\frac{a'}{a} &= \frac{B' \sin(\omega t - \phi')}{B \sin(\omega t - \phi)} \\ &= \sqrt{1 - \frac{(s + m\omega^2)k_t^2/4}{\pi r \omega + (s + m\omega^2)k_t^2/4}} \cdot \frac{\sin(\omega t - \phi')}{\sin(\omega t - \phi)} \quad (7)\end{aligned}$$

になる。ここで、 $\sin(\omega t - \phi')/\sin(\omega t - \phi)$ は 1 周期の平均なら 1 になる。これより k_t が大なら a'/a は小となる。 k_t が 0 なら $a'/a = 1$ になる。

(7)式の r は弾性損失の大きさに対応する。図 4 に示したように試料 C が k_t が大きいにもかかわらずアース状態の振動吸収率が他の試料より小さいのは(7)式で r が、すなわち弾性損失が大きいとと考えられる。試料 C では振動による機械的損失が大きく、電気エネルギーの放出の効果が小さい (a が小さく a'/a が大きくなる) ことを示している。

4. 総 括

3 種の PZT 圧電セラミックス（厚さの異なる単板状試料及び積層体試料）について、1 kHz の定常的な機械的振動下における縦方向の発生電荷及び振動吸収特性を調べた結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 振動により試料両端に電荷が発生した。厚さの薄い単板試料でもっとも大きな電荷の発生が観測された。積層体では、圧電歪定数と電気機械結合係数が大きいにもかかわらず測定された電荷は小さい値であった。これは弾性損失と誘電体損失が大きいとと考えられる。

(2) 電極を短絡すると振動の吸収はほとんど見られなかったけれども、アースさせると 40~60% の大きな振動吸収率が観測された。

(3) 振動吸収率は、オープン状態での発生電荷量が

きな試料で高くなるという相関が得られた。

(4) 電気エネルギーが消失される場合の振動吸収を示す式を導いた。電気機械結合係数が大きく、弾性損失が小さい圧電体でアースによる振動吸収率が高くなることが示され、実験結果と定性的に一致した。

謝 辞 測定用試料を頂いた積水化成工業(株)及び日立金属(株)に感謝の意を表します。

(1993年4月日本セラミックス協会年会にて発表)

文 献

- 1) 内野研二, 石井孝明, セラミックス論文誌, **96**, 863-67 (1988).
- 2) 鈴木洋二, 内野研二, 合田 憲, 住田雅夫, R. E. ニューナム, A. R. ラマチャンドラン, セラミックス論文誌, **99**, 1135-37 (1991).
- 3) M. Sumita, H. Gohda, S. Asai, K. Miyasaka, A. Furuta, Y. Suzuki and K. Uchino, *Macromol. Chem., Rapid Commun.*, **12**, 657 (1991).
- 4) N. W. Hagood and A. Von Flotow, *J. Sound Vib.*, **146**, 243 (1991).
- 5) Y. Masuda and A. Baba, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Suppl. **26-2**, 132-35 (1987).
- 6) K. Uchino, T. Hirose and A. M. Varaprasad, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Suppl. **26-2**, 167-70 (1987).
- 7) W. Heywang and H. Thomann, *Ann. Rev. Mater. Sci.*, **14**, 27-47 (1984).
- 8) N. A. Schmidt, *Ferroelectrics*, **31**, 105-12 (1981).
- 9) 日本化学会編, “機能性セラミックスの設計”, 学会出版センター (1982) p. 82.
- 10) M. M. Berkens and T. K. Kwaiataal, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **16**, 516-21 (1983).
- 11) 電子材料工業会, “圧電セラミックスとその応用”, 電波新聞社 (1974) p. 192.
- 12) “IRE standards on piezoelectric crystals, 1961,” *Proc. IRE*, Vol. **49**, 1161-69, July (1961).
- 13) 小橋 豊, “音と音波”, 裳華房 (1989) p. 41.