圧電セラミックスを用いた機械的ダンパー

内野 研二・石井 孝明

(上智大学理工学部物理学科, 102 東京都千代田区紀尾井町 7-1)

Mechanical Damper Using Piezoelectric Ceramics

Kenji UCHINO and Takaaki ISHII

(Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Sophia University, 7-1, Kioi-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102)

A piezoelectric ceramic mechanical damper with a controllable damping factor has been developed. Mechanical vibration energy is transformed through the piezoelectric effect into electrical energy which is dissipated through an external resistance. A significant variation in damping factor is realized when the external resistance is changed.

[Received March 15, 1988; Accepted April 26, 1988]

Key-words : Mechanical damper, Piezoelectric ceramics

1. 緒 言

機械や素子の振動,騒音を防止することは大切であり,超精密加工機,超精密位置決め機構等の防振には多くの注意が払われている。防振対策として最も効果のある方法は,振動源を断つことであるが,完全に振動の発生を抑え込むことは不可能で,他の方法を併用することが一般になされている。それらには,弾性懸架による防振や振動を熱にして吸収する方法がある。後者の例で,振動を熱に変える機構を材料自身に持たせたものとして,制振鋼(トランカロイ)が既に知られている¹⁾。この物質は応力と歪みとの関係に履歴現象があるので,振動するたびに熱としてエネルギーを消費するために振動がすばやく減衰する。しかしながら,このような普通の減衰器(ダンパー)では,例えば,ある時は防振し,またある時は振動させたいというときには不便である。それには,ダンパーにおいて,ダンピングの時定数を可変にすることが必要である。

著者らは既に,圧電アクチュエーター素子のパルス駆動において,オーバーシュートやリングングの防止について,適当な条件で電界を印加すればこれらの問題は避けられることを報告した²⁾。本研究では,このパルス駆動の一つの応用的な流れとして,逆の効果を利用し,機械的ダンパーの試作を行った。外部から電界をかけることを行わず,外乱によって生じた振動を,圧電セラミックスの圧電効果を利用して電気的エネルギーに変換し,それを抵抗で熱エネルギーとして消費することで振動の減衰をさせることを行った。ダンピングの時定数は,セラミックスに接続する抵抗を変化させることで電気的に行うことができる。

2. 原 理

ダンパーの制振の原理を,圧電セラミックス単板の横効果で説明する。圧電セラミックス単板(図1(a))に外力が加わった場合,圧電効果により電荷が発生する(図1(b))。だから外力が取り除かれた後の残留振動で,端子には振動に応じた交番電圧が発生する³⁾⁻⁵⁾。この端子間に抵抗を接続し,現れた電荷を流して熱として消費する(図1(c))。接続する抵抗の値が極端に大きなものであったなら,回路にはほとんど電流が流れずエネル

Fig. 1 (a) Structure of single plate, (b) piezoelectric effect, and (c) external resistor connected.

ギーの消費は少ない。また、抵抗の値が極端に小さいものでは電流はたくさん流れるが、抵抗が小さいためこの場合もエネルギーの消費は少ない。よって、どちらの場合も振動はなかなか収まらない。しかし、どこかにエネルギー消費が最大になる最適な抵抗値のあることが予想される。発生するジュール熱が最大になれば、それは即振動エネルギー消費最大となり、最も制振効果が大きくないと考えられる。

共振点近傍において圧電セラミックスに抵抗を接続したときの等価回路を図2に示す。圧電セラミックスの振動によって発生する交番電圧（角周波数 ω ）は仮想的に外部電源として $V(t)$ とおき、それが外付けした抵抗の両端にかかっている。回路のインピーダンス Z は次のように表される。

$$Z = R + \frac{1}{i\omega C_d + \frac{1}{R' + i\omega L + \frac{1}{i\omega C_p}}} \quad (1)$$

共振周波数では、 $\omega^2 = 1/LC_p$ において次を得る。

$$Z = R + \frac{1}{\frac{1}{R'} + i\omega C_d} \quad (2)$$

$$|Z|^2 = \left\{ R + \frac{R'}{1 + (\omega C_d R')^2} \right\}^2 + \left\{ \frac{\omega C_d R'^2}{1 + (\omega C_d R')^2} \right\}^2 \quad (3)$$

抵抗 R の消費するジュール熱 W は $V = V_0 \cdot R/Z$ に気をつけると、

$$W = \frac{V_0^2 R}{\left\{ R + \frac{R'}{1 + (\omega C_d R')^2} \right\}^2 + \left\{ \frac{\omega C_d R'^2}{1 + (\omega C_d R')^2} \right\}^2} \quad (4)$$

と表される。

(4) 式が極大値をとるのは、

$$R = \sqrt{\left\{ \frac{R'}{1 + (\omega C_d R')^2} \right\}^2 + \left\{ \frac{\omega C_d R'^2}{1 + (\omega C_d R')^2} \right\}^2} \quad (5)$$

の時である。

(5) 式を (4) 式に代入すると次のようになる。

Fig. 2. Equivalent circuit of piezoelectric ceramics with external resistor.

$$W = \frac{V_0^2}{\frac{2R'}{\sqrt{1 + (\omega C_d R')^2}} \left\{ 1 + \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega C_d R')^2}} \right\}} \quad (6)$$

(5) 式は、接続抵抗 R をセラミックスのもつインピーダンスと等しくすれば消費エネルギーが最大になることを示している。そのときの回路全体の抵抗は $2R$ となり、 R の消費エネルギーは誘起された電気的エネルギーの半分になる。

つまり、抵抗を接続することで振動で誘起された電気エネルギーを熱エネルギーに変換する効率は最大 50 % であることがわかった。

3. 実験方法

振動する物体と圧電セラミックスを組み合わせたものとして代表的なものには、弾性体の両側に薄い圧電セラミックス板 2 枚を貼りつけた圧電バイモルフ素子がある (図3)^{6), 7)}。本研究ではこのバイモルフを用いて圧電ダンパーの実験を行った。

まず実験に使用したバイモルフ 2 種類について、寸法と諸定数を表1にまとめた。ここに示した寸法は万力で

Table 1. Characteristics of bimorphs.

	BIMORPH 1	BIMORPH 2
Q_n	3.0	10.0
k	0.28	0.27
LENGTH [mm]	25	37
WIDTH	16	13
THICKNESS	0.5	0.5
RESONANCE FREQUENCY	294 Hz	193 Hz

Fig. 3. Construction of bimorph.

Fig. 4. Mechanical vibration measuring system.

クランプした部分以外を測ったものである。バイモルフのアドミタンス特性及び諸定数の測定は、万力でクランプして行った。測定はYHPの4129Aインピーダンス・アナライザを用いて行い、コンピューター処理によってコール・コール・プロットをとり諸定数の算出を行っている。実験のブロックダイアグラムを図4に示す。バイモルフに変位を与える外力には、ボイスコイル方式のパルス駆動モーターを使用している。発振器の矩形波出力を増幅してパルス駆動モーターに供給する。モーターは出力を取り出す軸が前後に変位し、バイモルフを押したり離したりしている。離れたときに残留振動が起る。

残留振動の変位を測定するのは渦電流を利用した非接触変位センサー（カーマン，SDP-2300）を使用した。センサー出力は増幅され、オシロスコープに記憶される。オシロスコープのトリガー信号は発振器から取り入れている。

バイモルフの残留振動の減衰を評価する方法は、振動のピーク座標を最小自乗法で近似し、時定数を求めることとした。

4. 結果及び考察

4.1 測定結果

バイモルフ1を用いて行った先端変位振動の測定結果は図5に示したようになった。回路をショートしてもオープンにしてもエネルギーの消費は少ないため余り減衰していないことがわかる。6.6 k Ω の抵抗をつないだときのセンサー出力で80 ms以降はほとんどノイズ信号である。

これらの減衰振動の時定数と、接続した外部抵抗との関係を図6に示した。8 k Ω 付近に極小値をとることが

Fig. 5. Change of ringing associated with resistor change.

グラフから読み取れる。

バイモルフ2についても同様に測定を行った（図7，図8）。20 k Ω 付近で極小値を持つことが認められる。

4.2 原理と対応

共振周波数の時のバイモルフのインピーダンスをYHP 4192 Aで測定するとバイモルフ1は約8 k Ω ，バイモルフ2は約20 k Ω であった。（5）式より，バイモルフのインピーダンスと接続した抵抗の値が等しくなったときに最大の効果が得られると考えられる。図6，図8のグラフを見てみると，それぞれ予想した値の近傍で最も制振効果が大きいことがわかり，実験と理論がよく一致していると考えられよう。

4.3 減衰の評価

生じる電気的エネルギー U_e は，電気機械結合係数 k と，機械的エネルギー U_m を使って表すことができる。

Fig. 6. Relation between damping time constant and external resistor.

Fig. 7. Change of ringing associated with resistor change.

$$U_E = U_M \times k^2 \quad (7)$$

本研究の圧電ダンパーは抵抗 R を接続することで電氣的エネルギーを熱エネルギーに変換するが、その効率は最大 50 % であることは既に 2 章原理で説明した。よって、振動の機械的エネルギーはそれの $k^2/2$ 倍が熱エネルギーとなって消費されるので、1 回振動するたびに振動のエネルギーは $(1 - k^2/2)$ 倍になる。振幅の 2 乗がエネルギーなので 1 回振動するたびに振幅は $\sqrt{1 - k^2/2}$ 倍になる。そして共振周期を T_0 とすれば t 秒間に $2t/T_0$ 回振動するので t 秒後の振幅は

$$\left(1 - \frac{k^2}{2}\right)^{t/T_0}$$

となる。

したがって残留振動の周期を T_0 とし、 t 秒後の振動の振幅の減衰を式で表すと次のようになる。

$$\left(1 - \frac{k^2}{2}\right)^{t/T_0} = e^{-t/\tau} \quad (8)$$

Fig. 8. Relation between damping time constant and external resistor.

Fig. 9. Ringing of bimorph 1 ($R=6.6 \text{ k}\Omega$).

これより、振動減衰の時定数 τ を与える関係式として、

$$\tau = -\frac{T_0}{\ln(1 - k^2/2)} \quad (9)$$

を得る。ここでバイモルフ 1 の測定結果を用いて減衰の時定数を考察する。

$k=0.28$, $T_0=3.4 \text{ ms}$ を代入すると、 $\tau=85 \text{ ms}$ となる。この τ は実験の約 40 ms に比較するとかなり大きい。それは以上の取り扱いで、バイモルフが理想的に Q_M がきわめて大きな状態で全く損失がないものとしたためである。実際は機械的損失を伴うので、その減衰の時定数をショートしたときの時定数 $\tau_s=102 \text{ ms}$ で代用する。すると全体の振動は次の式のように表される。

$$e^{-t/\tau_{\text{total}}} = e^{-t/\tau_s} \times e^{-t/\tau}$$

したがって

$$\frac{1}{\tau_{\text{total}}} = \frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau} \quad (10)$$

を得ることができ、各々の時定数の関係は (10) 式で与えられることがわかった。

$\tau_s=102 \text{ ms}$, $\tau=85 \text{ ms}$ を代入すると、 $\tau_{\text{total}}=46 \text{ ms}$ となり、図 9 に示されたとおりであることがわかり、実験と一致していると考えられる。

5. 総 括

圧電セラミックスをダンパーに応用することを試みて、生じた電荷を熱エネルギーに変換するために抵抗を持続し、減衰の時定数と抵抗の値との関係を調べた結果、以下の事が明らかになった。

(1) 圧電セラミックスは制振に非常に有効であることが確認された。

(2) 制振の度合 (ダンピング時定数) を、接続する抵抗を変えることにより連続的に変化させられることがわかった。

(3) 制振の原理を簡単な数式を用いて説明し、最大の効果を得られる抵抗の値を予測して実験結果との一致を見ることができた。

(4) 更に電気機械結合係数 k の値を用いることでどの程度の振動の減衰が得られるかを予測して実験結果との一致を見ることができた。

(8) 式よりわかるように、一般に減衰定数 τ を小さくするには、 T_0 を小さく k を大きくする必要がある。本実験で用いたバイモルフは屈曲の振動モードを用いるタイプで、同じ形状の圧電素子の中では最も条件の悪いものである。横振動モード (k_{31}) あるいは縦振動モード (k_{33}) 素子を利用すれば、より振動の減衰は速めることができる。

文 献

- 1) 牛腸嶺男, 金子洪太郎, 応用物理, 51, 1396-97 (1982).
- 2) S. Sugiyama and K. Uchino, "Pulse Driven Method of

- Piezoelectric Actuators," ISAF '86 Proceedings of the Sixth IEEE, (1986) pp.637-40
- 3) 神保泰雄, 古川英一, "工業振動学演習", 学献社 (1964).
 - 4) K. Uchino, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **65**, 647-52(1986).
 - 5) 内野研二, "圧電/電歪アクチュエータ", 森北出版 (1986).
 - 6) K. Uchino, S. Nomura, L.E. Cross, R.E. Newnham and S.J. Jang, *J. Mater. Sci.*, **16**, 569 (1981).
 - 7) K. Uchino and S. Nomura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20** [Suppl. 4], 225 (1981).
-