

## ER 流体を用いた拮抗形ベローズダンパによる アクティブ振動制御

### Active Vibration Control using an Antagonized Bellows Damper filled with ER Fluid

○伊藤 浩也 (山形大院) 中野 政身 (山形大工)

*Kouya ITO and Masami NAKANO*  
Dept. of Mechanical Systems Engineering, Yamagata University

キーワード : ダンパ(Damper), 振動制御(Vibration Control), ER 流体(Electrorheological Fluid), 非線形フィードバック制御(Nonlinear Feedback Control), ダンパ形状(Damper Configuration), 振動振幅(Vibration Amplitude)

連絡先 : 〒992 米沢市城南 4-3-16 山形大学工学部機械システム工学科中野研究室  
中野政身, Tel.:(0238)26-3248, Fax.:(0238)26-3248, E-mail: nakano@mnaka.yz.yamagata-u.ac.jp

#### 1. 緒言

ER 流体が電場の作用のもとで粘性が可逆的に変化する特性をもつことから, 可変減衰ダンパとして用い振動制御へ応用する試みがなされてきている<sup>(1)~(3)</sup>. しかし, そのほとんどの場合が, ダンパへの入力電圧と発生する制動力との間に強い非線形性が存在するのにもかかわらず, 電圧の大きさによってダンパの減衰特性(減衰係数)を可変するという考えに基づいているため, 制振特性が強い非線形性を呈し制御しにくい欠点がある. ER 流体の持つ本来の特性を見極めた上での振動制御への応用が望まれるところである.

絶縁性の油を分散媒とし外部電場の作用のもとで大きな分極の可能な粒子を分散させた分散系 ER 流体では, 一般に電場によって降伏せん断

力が変化するビンガム流体としての挙動を示す<sup>(4)</sup>. 本研究では, 電極間を流れる ER 流体の降伏せん断応力(圧力降下)の基礎特性を実験的に求め, その結果に基づいてその特性を十分に活かした ER アクティブダンパの構築とその振動制御への応用について数値シミュレーションによって検討してきている<sup>(6)~(8)</sup>. さらにメタルベローズからなる2つの伸縮液室を円筒電極群からなる ER バルブで連結した構造を持つ拮抗形 ER ダンパを試作し, 種々の制御方法におけるダンピング特性や除振制御特性について実験的に検討し, 振動物体の絶対速度の絶対値の平方根をフィードバックすることにより振動周波数や振幅に依存しない良好な特性がえられることを示している<sup>(9)</sup>. ここでは, 入力振幅やダンパの形状パラメータの変化などに対するダンピング特性や除振制御特性の変化について実験的に検

討した結果を提示する。

## 2. 実験装置及び実験方法

2.1 試作 ER ダンパ 試作した ER ダンパは、図 1 に示すように両端にメタルベローズと受圧板からなる伸縮する液室を持ち、その間に円筒形状の電極群(電極長  $L_e=25$  mm, 電極間隔  $h=0.5$  mm, 総流路断面積  $A_v=4.1$  cm<sup>2</sup>)からなる ER バルブを配置して両液室を連結する完全密閉型の構造となっている。今回はダンパの形状変化に対する特性変化を調べるために有効断面積  $A_0$  が 22.7 cm<sup>2</sup> ( $A_0/A_v=5.6$ ) と 11.3 cm<sup>2</sup> ( $A_0/A_v=2.8$ ) の 2 種類のベローズを用いた。

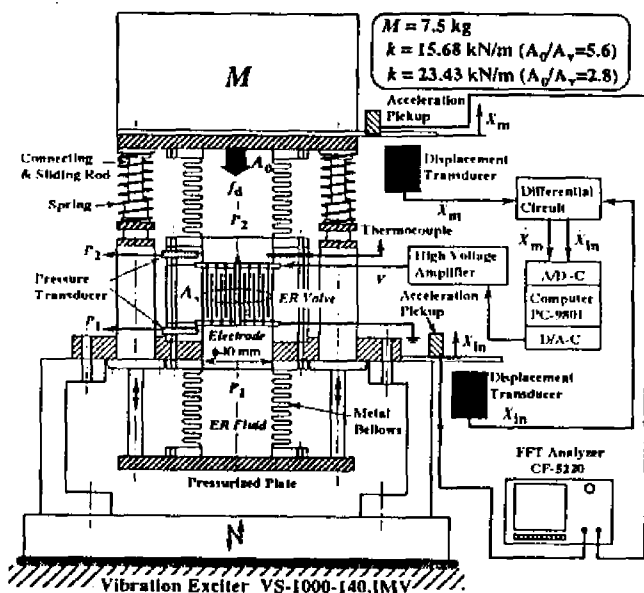


Fig.1 A-single-degree-of-freedom-base excited vibration system using an antagonized ER damper and its control system

2.2 実験方法 実験では、各種の電圧印加方法の違いによる ER ダンパのダンピング性能や一自由度振動系の除振性能について検討している。ダンピング性能の試験は、ER バルブケーシング支持台を固定し動電型加振機を用いて受圧板に強制変位を加え、その際の ER ダンパ両

液室内の圧力  $P_1$ ,  $P_2$  を半導体圧力センサで測定し減衰力  $f_d=A_0(P_1-P_2)$  を求め評価している。また、除振性能の実験は、図 1 に示すように摺動ロッド部にバネを装着し上部の受圧板にマスを搭載することによってバネ・マス・ER ダンパからなる一自由度振動系を構成し、振動系の支持台を動電型加振機に設置し支持台を加振して行う。その際の支持台及び振動体  $M$  の変位は渦電流式非接触変位計によって測定し、その速度は変位計の出力を微分回路を通すことによって求めている。これらの信号は AD 変換器によってコンピュータに取り込まれ、所定の処理後 DA 変換器から出力され高電圧増幅器を介して ER ダンパに印加される。また、支持台及び振動体  $M$  の加速度を加速度ピックアップによって測定し、それらの信号より振動の伝達関数を FFT アナライザによって求め、その振幅比より振動の伝達率を求めて除振性能を評価している。

## 3. 供試 ER 流体の特性と ER バルブ間の定常的圧力降下

3.1 供試 ER 流体の ER 効果 ER ダンパの制動油として、スルホン化重合体(NSP)の微粒子(平均粒子径  $5\mu\text{m}$ , 含水率 2wt%) を 10cst のシリコンオイルに分散させた粒子分散系 ER 流体(TX-ER2067, 日本触媒製)を用いた。分散粒子体積分率は 20vol% である。

この ER 流体の ER 効果によって誘起される降伏せん断応力  $\tau_{ER}$  の電極間平均流速  $U$  と電場強度  $E$  に対する変化特性を図 2 に示す。これは、定速で駆動されるピストンとシリンダからなる液体駆動部と間隙  $h=0.8\text{mm}$ , 幅  $B=10\text{mm}$ , 長さ  $L_e=10\text{mm}$  の矩形断面の電極間流路をもつ基本

的な ER バルブとからなる定流量型 ER 特性測定装置<sup>(5)</sup>を用いて実験的に求めたものである。降伏せん断応力は  $\tau_{ER}[\text{kPa}]$  は流速  $U$  が增大するにつれて指数的に低下し十分流速が高くなるとある一定値に収束する傾向を示し、式(1)の近似式<sup>(5)</sup>で表される。

$$\tau_{ER}(E,U) = \alpha_r E^2 - (\alpha_r E^2 - \gamma_r E^2)(1 - e^{-\beta(E)U})$$

$$\alpha_r = 0.0771, \quad \gamma_r = 0.0182, \quad \beta(E) = 0.0874/E^2$$

.....(1)

図2にはこの近似曲線も併記しているが、全体的なレベルに若干の違いが認められる程度で総じて ER 特性をよく表しているといえる。

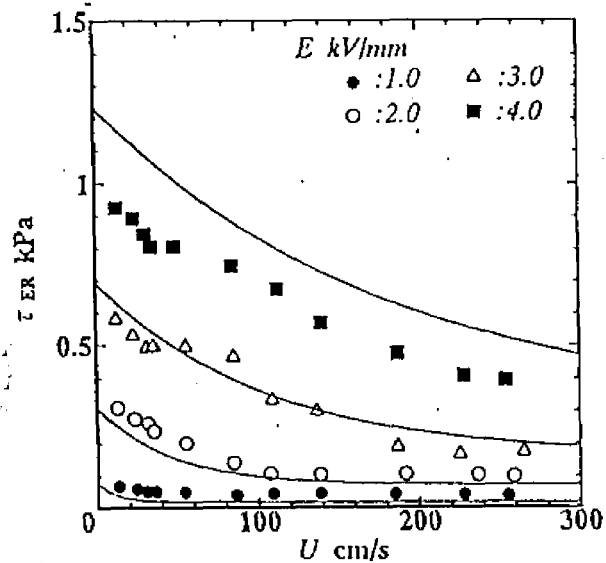


Fig.2 Changes of yield stress  $\tau_{ER}$  with mean flow velocity  $U$  and electric field strength  $E$ , and the approximate curves

3. 2 ER バルブ間の定常的圧力降下 ER バルブ電極間の定常的な全圧力降下  $\Delta P_1$  は式(2)のように表せる<sup>(6)</sup>。

$$\Delta P_1 = \Delta P_n + \Delta P_{e0} + \Delta P_{ER} = \Delta P_0 + \Delta P_{ER} \quad \dots \dots (2)$$

$$\Delta P_{e0} = (12\mu Lc/h^2)U \quad \dots \dots (3)$$

$$\Delta P_{ER} = (3Le/h)\tau_{ER} \quad \dots \dots (4)$$

ここで、 $\Delta P_n$  は電極流入部などの電極部以外での圧力損失、 $\Delta P_{e0}$  は無電場時のニュートン粘性(粘度  $\mu$ )による電極部での圧力降下、 $\Delta P_{ER}$  は ER 効果による圧力降下成分を表す。したがって、

$\Delta P_0 = \Delta P_n + \Delta P_{e0}$  は電場を印加しないときのニュートン粘性による ER バルブ間の全圧力降下となる。

#### 4. ER ダンパのダンピング特性

図3と4には、ER ダンパへの二通りの電圧印加方法の場合についてそのダンピング性能の違いを示す。各図(a)は、受圧板を振幅 1mm、周波数  $f=5\text{Hz}$  で正弦波状に加振した時の減衰力  $f_d$  を測定した両液室内圧力  $P_1, P_2$  から求めて、受圧板変位  $x$  に対して描いたヒステリシスループである。また、各図(b), (c)にはそのループ面積から求めた本一自由度振動系の減衰比  $\zeta$  の振動周波数  $f$  と振幅  $x_0$  に対する変化を示す。

4. 1 定電圧印加 [図3] 定電圧印加の下では、減衰力  $f_d$  はダンパの動く方向が変わる時にその方向が反転しその大きさも急激に変化し電場強度  $E$  によって決まるほぼ一定のレベルを示し、そのダンパ変位  $x$  に対するヒステリシスループは概略矩形をしている。しかし、ダンパの運動方向反転後の加速過程直後に減衰力の突出したピークが認められそのピークに至る過程において弾性的な特性が現れるのが特徴である。総じて、ヒステリシスループはクーロン摩擦ダンパのものと類似した特性を示す。ER ダンパの減衰比  $\zeta$  は振動周波数  $f$  及び振幅  $x_0$  の増大に伴い急激に低下する特性を持ち、振動周波数及び振幅に対して強い非線形性を呈することがわかる。また、 $A_0/A_v=5.6$  のものと  $A_0/A_v=2.8$  を比較すると、受圧面積  $A_0$  が半分になったためにダンパが発生する減衰力  $f_d$  が半分になっている。さらに減衰比  $\zeta$  が半分以下になっているのは、受圧面積が異なるのに加え、ペローズのパネ定

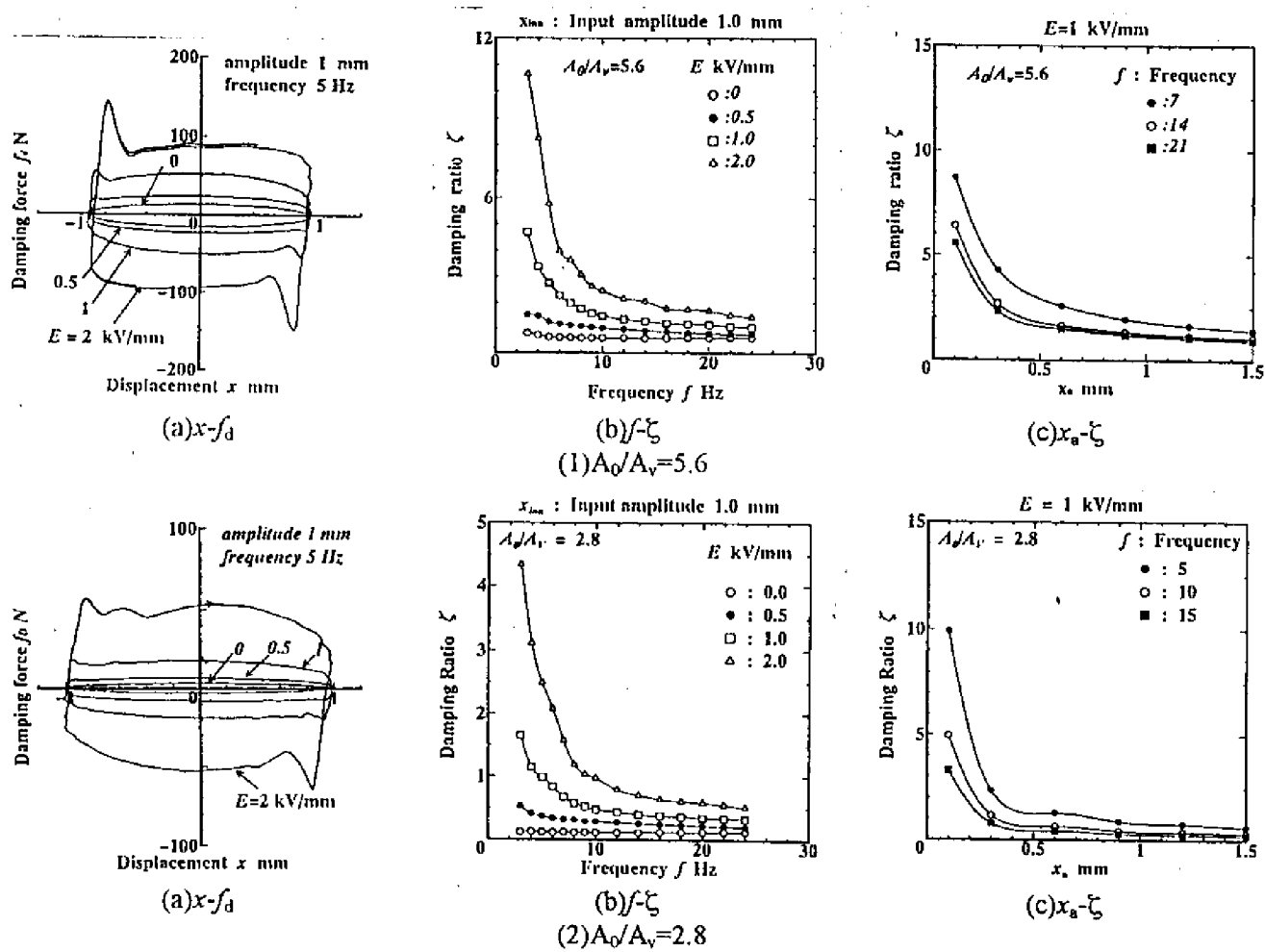


Fig.3 Damping characteristics if the ER damper under a constant input voltage

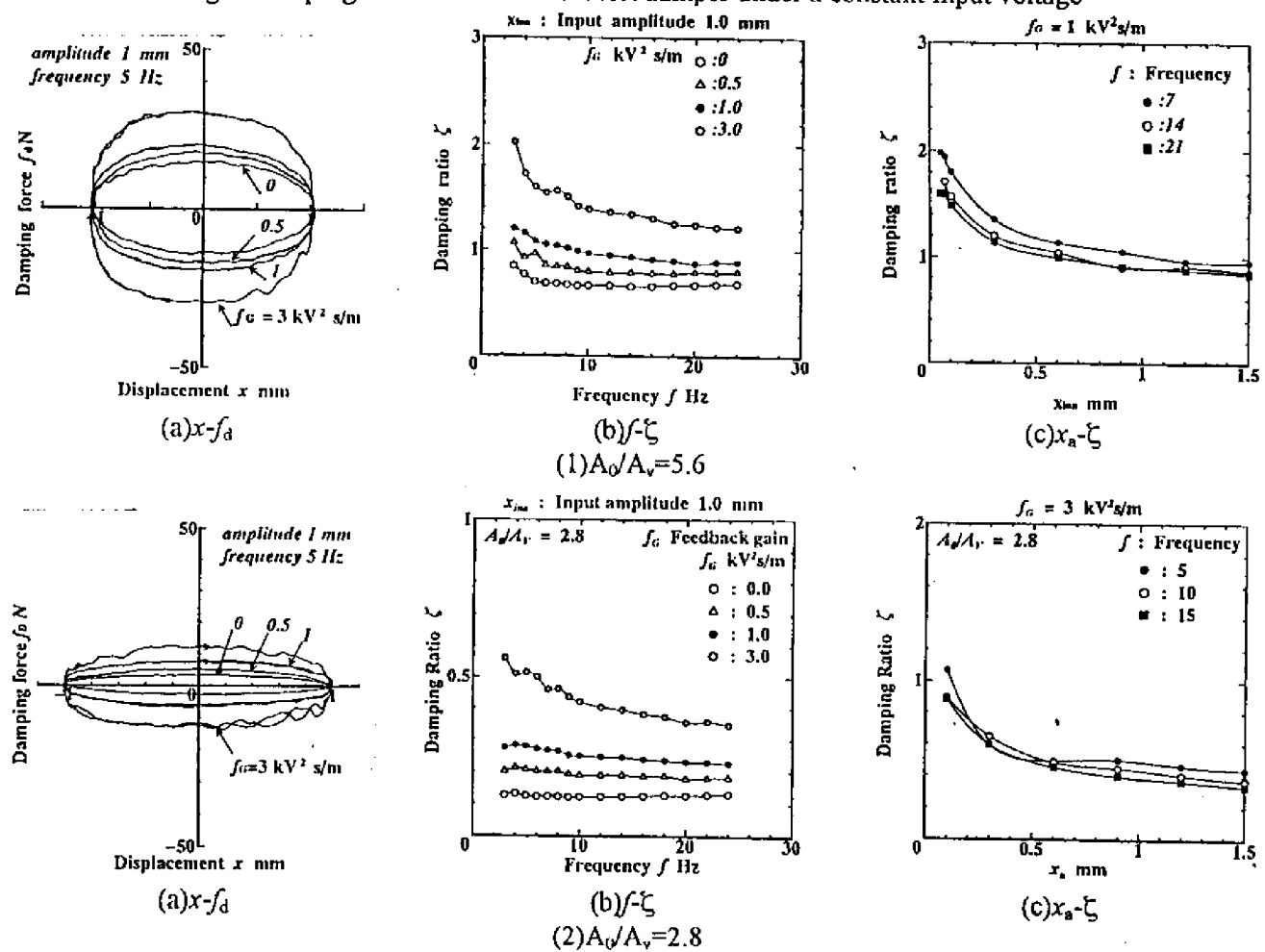


Fig.4 Damping characteristics if the ER damper under the feedback of square root of voltage proportional to relative damper velocity

数が増大しているためである。

4. 2. 受圧板の相対速度に比例した電圧の絶対値の平方根を印加 [図4] 図2に示す流体の特性を考慮して受圧板の相対速度の絶対値の平方根をフィードバックした場合、減衰力 $f_d$ は変位に対して連続的に変化するヒステリシスループを描き、ほぼ楕円に近い形状を呈し、減衰比 $\zeta$ は振動周波数や振幅に強い依存性を示さず、図5に示すようにフィードバックゲイン $f_G$ によってほぼ線形的に減衰比が可変な粘性ダンパが構築できる<sup>(6)</sup>。また、断面積比が異なる場合のダンピング特性は、定電圧印加時と同様に $f_d$ と $\zeta$ がほぼ半分になるが、いずれの場合も $\zeta$ は周波数や振幅に対してほぼ一定値をとり、線形性を呈している。

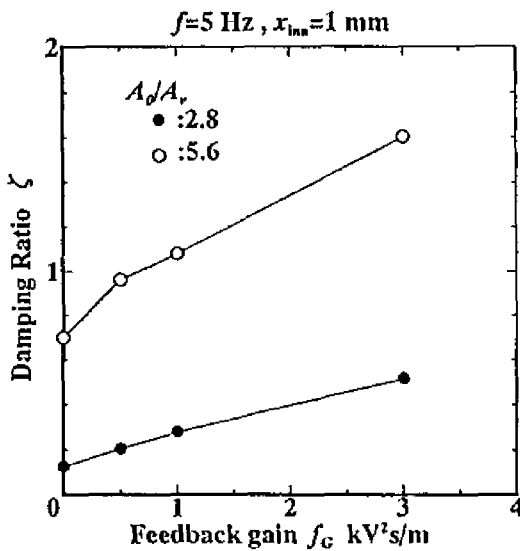


Fig.5 Changes of damping ratio with feedback gain under the square root of voltage proportional to relative damper velocity

## 5. ER ダンパによる振動制御

5. 1 ER ダンパを用いた一自由度振動系の解析 ER 流体の非圧縮性を仮定し、電場入力に対しては準定常的に応答するものとし ER 流体の動的な粘弾性効果は考慮しないで ER ダンパの発生する減衰力 $f_d$ を解析する。ER バルブ

内の流体慣性と式(2)の定常的全圧力降下 $\Delta P_l$ を考慮すると、両液室間の圧力差 $P_1-P_2$ から ER ダンパの発生する減衰力 $f_d$ は次のように与えられる。

$$f_d = A_0(P_1 - P_2) = A_0 \left\{ \frac{m}{A_v} \frac{dU}{dt} + \Delta P_l(E, U) \right\} \dots \dots (5)$$

ここで、 $m$  : ER バルブ通路内流体の全質量 ( $=\rho l A_v$ ),  $A_v$  : ER バルブ通路の総断面積,  $l$  : ER バルブ通路の長さ,  $\rho$  : ER 流体の密度,  $U$  : 電極間流速[cm/s],  $E$  : 電場強度[kV/mm]( $=V/h$ ,  $V$  : 入力電圧,  $h$  : 電極間間隙),  $A_0$  : 受圧板の受圧面積である。

また、ダンパの相対変位 $x$ と電極流速 $U$ との関係は連続の式から次式のように得られる。

$$U = \frac{A_0}{A_v} \frac{dx}{dt}, \quad \frac{dU}{dt} = \frac{A_0}{A_v} \frac{d^2x}{dt^2} \dots \dots (6)$$

図1の一自由度振動系の運動方程式は式(7)のように与えられ、ER ダンパの減衰力 $f_d$ に関する式(5), (6)とから数値シミュレーションによってその応答を求める。

$$M \frac{d^2x_m}{dt^2} + f_d \left( E, \frac{dx}{dt}, \frac{d^2x}{dt^2} \right) + k(x_m - x_{in}) = 0 \dots \dots (7)$$

ここで、 $M(=7.5\text{kg})$ ,  $x_m$  : 振動体の質量と変位,  $x_{in}$  : 基礎の変位,  $x(=x_m-x_{in})$  : ダンパの相対変位,  $k(15.68\{A_0/A_v=5.6\}, 23.43\{A_0/A_v=2.8\} \text{ kN/m})$  : バネ定数, である。なお、この振動系の固有振動数 $f_n$ はそれぞれ  $7.5\text{Hz}\{A_0/A_v=5.6\}, 9.0\text{Hz}\{A_0/A_v=2.8\}$  となる。

除振性能は基礎が正弦波状 $[x_{in}=x_{ina}\sin(2\pi ft)]$ に変動する際の振動体への振動伝達率 ( $=x_{in}$ の振幅 $x_{ina}$ )の振動数 $f$ に対する変化によって評価す

る。図6と7では二通りの ER ダンパへの電圧印加法の場合についてシミュレーションと実験による除振特性を比較してある。図6は定電圧印加，図7は振動物体の絶対速度の絶対値の平方根をフィードバックした場合のもので，断面積比  $A_0/A_v$  が 5.6 と 2.8 の場合についての振動伝達率の周波数  $f$  及び振幅  $x_a$  に対する変化を示している。

5.1 定電圧印加 [図6] ER ダンパに一定の電圧  $V$  を印加した場合，電場強度  $E$  を増大するにつれて共振振動数付近の帯域では著しい除振効果が認められるが，伝達率は 1 以下には低下しない。一方，約 10Hz より高い周波数帯域では  $E$  の増大に伴い逆に伝達率が上昇して 1 程度の値をとるようになる。  $A_0/A_v$  を小さくした場合には，ニュートン粘性による減衰力が小

さくなるため，無電場時に共振周波数域で伝達率が高く，高い周波数領域では低くなっている。電場強度  $E$  の増大に伴い高い周波数帯域では  $A_0/A_v=5.6$  の場合と同様に伝達率の上昇が見られるが，その上昇の程度は小さくなる。また振幅に対しては振幅の大きさによってその除振特性は大きく異なり，除振特性は振幅依存性を示し制御しがたい欠点がある。シミュレーションにおいてもほぼ同じような傾向を示しており，以上のような除振特性はクーロン摩擦ダンパを用いた場合のものと同様である。

5.2 マスの絶対速度の絶対値の平方根のフィードバック

(1) 入力振幅  $x_{in}=1.0\text{mm}$  [図7]  $f=10\text{Hz}$  以上の高い振動数域での伝達率をほとんど変化させることなく共振振動数帯域での伝達率を 1 以

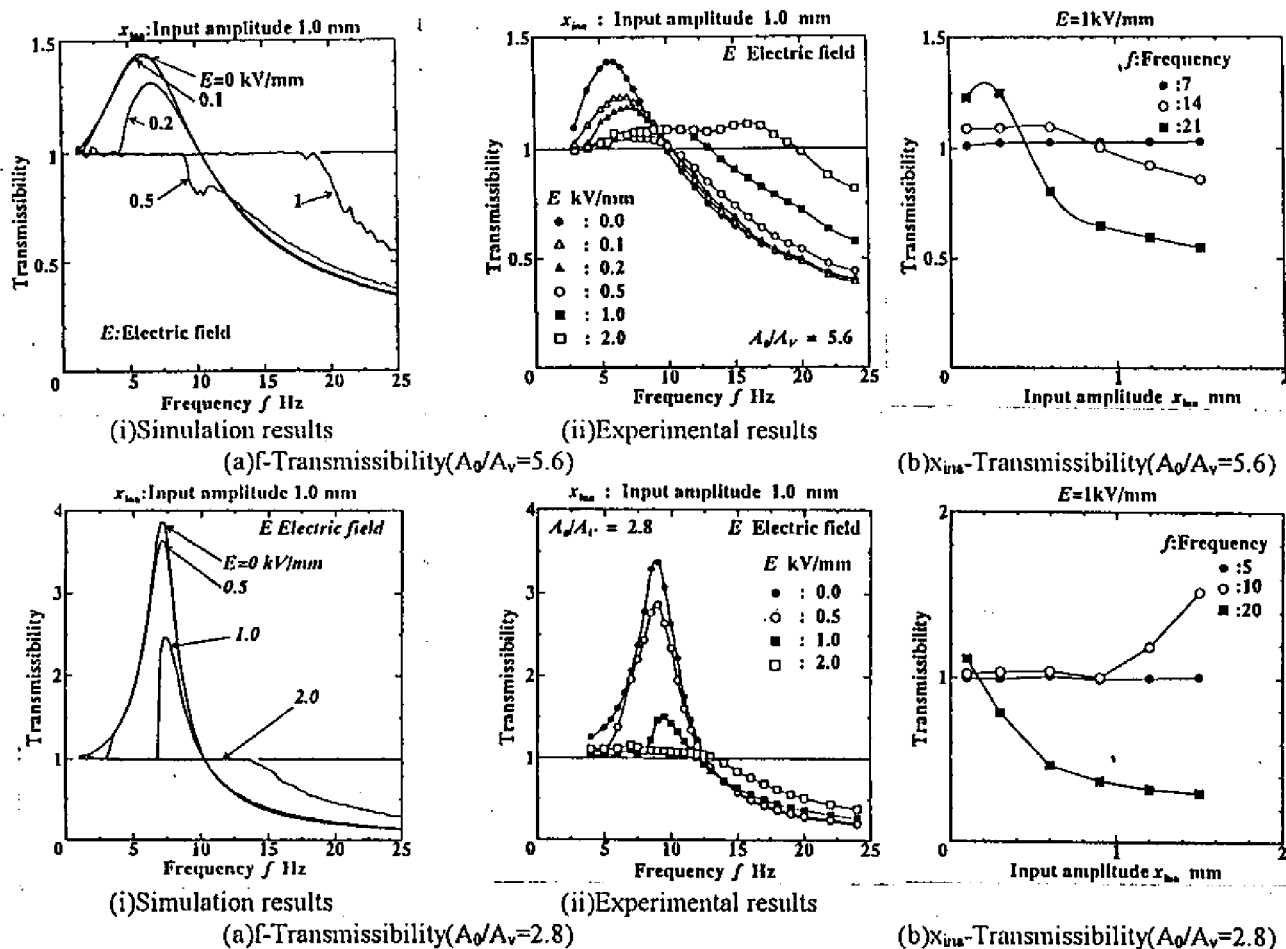


Fig.6 Changes of transmissibility with excitation frequency and amplitude of foundation, when a constant voltage is applied to ER damper

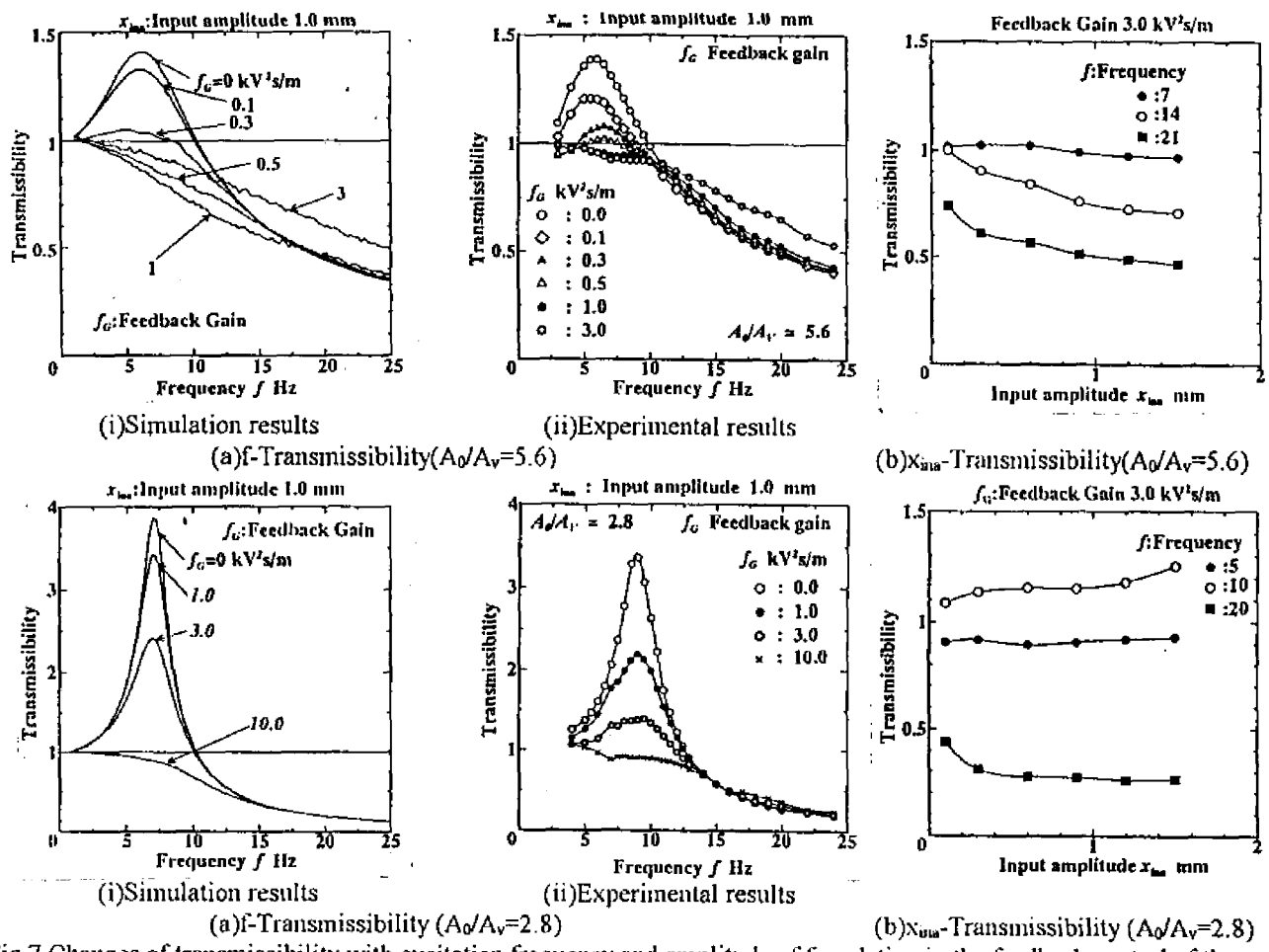


Fig.7 Changes of transmissibility with excitation frequency and amplitude of foundation, in the feedback control of the square root of voltage proportional to absolute mass velocity

下に低下させることができ種々のアクチュエータを使ったアクティブ制御と同等の顕著な除振性能が得られるが、 $f_0$  が大きすぎると逆に伝達率が上昇するようになる。また  $A_0/A_v$  を小さくすることにより、共振周波数域での伝達率をより低くすることができ、また  $f_0$  を増大しても高周波数域で伝達率がほとんど上昇することなく、より良好な特性が得られる。シミュレーションと比較すると、ゲインの増大に対する伝達率の低下の割合が若干異なるものの、全般的に傾向がよく一致している。さらに入力振幅に対しても速度フィードバック信号の絶対値の平方根を入力しているため非線形フィードバックによる制御系の線形化が図られ、顕著な振幅依存性が認められず良好な除振特性を呈する。

(2) 入力振幅  $x_{in}=0.1\text{mm}$  [図8] ER ダン

パを除振テーブルなどで使用する場合、振動は主に微小振幅である場合が多い。微小振幅で加振した場合には、振動物体の絶対速度の絶対値の平方根をフィードバックした場合でも共振周波数域でも伝達率が1以下に下がらず、高い周波数領域ではフィードバックゲインの増大に伴い伝達率が1付近まで上昇し、定電圧を印加した時と同様摩擦ダンパのような特性を示す。

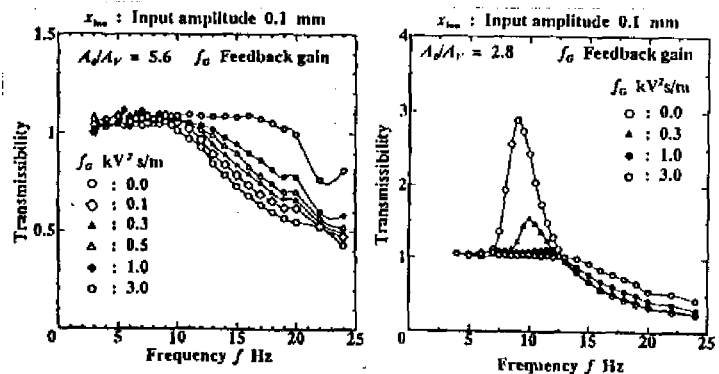


Fig.8 Changes of transmissibility with excitation frequency of foundation, in the feedback control of the square root of voltage proportional to absolute mass velocity

$A_0/A_v=5.6$  においてその傾向は強く、 $A_0/A_v=2.8$ の方が比較的良好な特性を示している。これは微小入力振幅下ではダンパの減衰力に対する摺動ロッド部の摩擦力の割合が、大きな振幅を入力したときと比較して大きくなっていることと、ERバルブ部内でのER流体の歪が非常に小さいためにER流体の弾性的な特性<sup>(10)</sup>が現れてきていることによるためと考えられる。

## 6. 結言

試作ERダンパのダンピング特性とその振動制御への応用について実験的に検討し、次のような成果が得られた。

(1) 定電圧印加時の試作ERダンパのダンピング特性はクーロン摩擦ダンパのものに類似しており、振動周波数や振幅への強い依存性を示し非線形特性が著しい。それによる除振性能は、印加電圧の増大に伴い共振振動数領域では効果が著しく伝達率は1程度まで低下するが、逆に高い振動周波数域では除振性能が劣化し伝達率が1程度まで上昇する。

(2) ER効果によって可変な減衰力は入力電圧の二乗に比例して変化することから速度の平方根をフィードバックした場合、振動周波数や振幅に依存せず、フィードバックゲイン $f_G$ によって減衰比が変えられるほぼ線形的な可変減衰ダンパが構築できる。

(3) 振動体の絶対速度を検出しその速度に比例した電圧の絶対値の平方根をERダンパへの印加電圧にすることにより、全振動周波数域にわたって伝達率が1以下に低下する顕著な除振性能が得られ、種々のアクチュエータを用いたアクティブ振動制御法の場合とほぼ同等の除

振効果が期待できる。

(3) 断面積比 $A_0/A_v$ を小さくすることにより、除振性能をさらに向上することができた。このことからダンパを設計する際、ダンパ自体の持つニュートン粘性による減衰力を小さくなるよう考慮する必要がある。

(4) 極端に微小な入力振幅での除振特性は、摺動ロッド部の摩擦やER流体の弾性的特性の影響から摩擦ダンパのような特性になった。この問題については今後改良していきたい。

本研究の一部は、平成7、8年度文部省科学研究費(試験研究B, No. 07555395)の補助によって行われた。記して謝意を表す。

## 参考文献

- (1) Stanway R., ほか2名, Insti. Mech. Eng., No. C382/034(1989), 547
- (2) 森下, ほか2名, 機論(C編), 56, 524(1990), 78
- (3) Petek N., SAE Paper No. 920275(1992), 67.
- (4) Klass D.L. and Martinek T.W., J. Appl. Phys., 38(1967)67.
- (5) 中野政身, 米川琢哉: ERダンパモデルにおける分散系ER流体の圧力応答, 機論(B編), 61, 581(1995), 166
- (6) 中野政身, 米川琢哉: ERアクティブダンパを用いた振動制御, 機構論, No. 940-10, (1994), 250
- (7) Nakano M., Proc. of 2nd. Int. Conf. on Motion & Vibration Control, (1994), 800.
- (8) 中野政身, 米川琢哉: 分散系ER流体を用いたアクティブダンパとその除振制御への応用, 機論(C編), 62, 593(1996), 33
- (9) 中野政身, ほか4名: 分散系ER流体を用いたアクティブダンパと振動制御(試作ダンパによる検討), 機構論, No. 95-8 I(1995), 233
- (10) 中野政身, ほか4名: 分散系ER流体の二次元流路内振動流の動的粘弾性特性, 機講論,