動吸振器型エネルギー回生ダンパの研究*

米村 淳一^{*1}, 金 尚 洙^{*1}, 三上 均^{*2}
永井 文秀^{*3}, 岡田 養二^{*3}

Regenerative Control of Active Mass Type Vibration Damper

Jun-ichi YONEMURA, Sang-Soo KIM, Hitoshi MIKAMI,
Bunshu NAGAI and Yohji OKADA

Active vibration damper have been gradually used to reduce vibration drastically and adaptively. One of the main defects is to require a big amount of energy. This paper proposes an active mass type regenerative damper. Vibration energy is converted into electric power and stored in the electric battery. But the damper has nonlinear characteristics with dead zone. For low speed motion, passive or active control algorithms are applied to the same actuator to achieve good damping performance. This idea is applied to a dynamic absorber system which is composed of electrodynamic actuator and spring. The system is simulated on a computer and a simple experiment is performed. The results are showing that the system has better performance than the pure passive damper and the energy is regenerated.

Key Words: Damping, Vibration Control, Energy Regeneration, Dynamic Absorber, Control Device, Mechatronics, Simulation

1 はじめに

機械や構造物の振動は、その性能や寿命、安全性に影響を与えるだけでなく、騒音問題や、人に与える不快感など機械のおかれた環境や構造物自身の性能にまで影響を及ぼす。これらの振動に対する制振法として、3つの制振法がある。固定面を用いた制振法は、最も簡単に制振力を発生することが出来るが、実際は固定面となるものが無い場合が多い。また支持構造物を用いた制振法は、簡単に支持構造物を構築出来ない場合が多い。よって、補助質量の反力を利用し、任意の場所に設置できる制振法が有効である。その代表的構成例として動吸振器がある⁽¹⁾。

一方、アクチュエータを使用し、外部からエネルギーを供給してフィードバック制御を行い、振動をアクティブに制御する能動型ダンパの研究が盛んに行われている。受動型は、構造が簡単で安価にでき、外部からエネルギーを供給する必要がないといった利点があるが、十分な減衰が得られるとは限らず、使用する系の特性変化によって減衰効果がきわめて悪化する欠点がある。能動型は、受動型に比べ大きな制振効果が得られ、パラメータ変動の影響も受けにくいという利点があ

る。しかし、構造が複雑になり、システムが不安定になる危険性を持つこと、外部から大きなエネルギーを供給する必要があることなどの問題点がある。中でもエネルギーの問題は、制振性能を上げようとすればするほど深刻になってくる。この問題を解決するため、直動DCモータにより減衰を与えながら、振動のエネルギーを電気エネルギーに変換してバッテリーへと回生する、エネルギー回生ダンパが提案された⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

そこで本研究では、このエネルギー回生ダンパを動吸振器を用いた制振装置へ応用することを提案する。エネルギー回生ダンパは非線形な不感帯特性を持つので、エネルギー回生・パッシブ/アクティブ併用制御を行い、制振特性およびエネルギー回生特性をシミュレーションにより検討する。エネルギー回生ダンパは、きわめて性能の良いアクチュエータを必要とする。本論文では、高性能リニアDCモータを開発し、エネルギー回生ダンパへ応用した。簡単な実験装置でエネルギー回生が可能かどうか実験したところ、補助質量の動きの拡大効果もあり、実際にエネルギーが回生でき、かつ有効に減衰を加えることができたので報告する。

2 エネルギー回生動吸振器

2.1 エネルギー回生ダンパ 使用する直動DCモータを理想アクチュエータと考えると、力と電流、電圧と速度が

* 原稿受付 1998年5月15日。

^{*1} 学生員, 茨城大学大学院 (☎ 316-8511 日立市中成沢町 4-12-1)。^{*2} 住友特殊金属(株)山崎製作所 (☎ 618-0013 大阪府三島郡島本町江川 2-15-17)。^{*3} 正員, 茨城大学工学部。

E-mail: okada@mech.ibaraki.ac.jp

Table 1 The symbols and their values

M	: Main mass	4.85[kg]
K	: Main stiffness	19809[N/m]
ω_n	: Natural frequency = $\sqrt{\frac{k}{m}}$	63.9[rad/s]
μ	: Mass ratio	0.1746
m	: Damper mass	0.8468[kg]
k	: Damper stiffness	2510.5[N/m]
ζ_{opt}	: Optimal damping ratio	0.2363
ψ	: Actuator constant	25[N/A = Vs/m]
R	: Resistance	4.3[Ω]
e_b	: Battery voltage	1.20[V]
e_F	: Voltage drop in diode	0.6[V]
e_{Fb}	: $e_b + e_F$	[V]
x	: Disp. of structure	[m]
x_d	: Disp. of damper	[m]

Actuator/Generator

Fig. 1 Electrodynmamic regenerative circuit

Fig. 2 Damping characteristics

次の関係を持つ⁽⁶⁾。

$$f_d = \psi i \quad e = \psi v \quad (1)$$

これに倍電圧充電回路を図1のように用い、振動エネルギーを電気エネルギーとして回生する。

振動によってアクチュエータが速度 v [m/s] で動かされ e [V] の電圧を発生したとき、 e がバッテリー電圧 e_b [V] とダイオードの順方向電圧 e_F [V] の和 e_{Fb} [V] より低いとき、

$$|e| = \psi v < e_{Fb} \quad (2)$$

回路に回生電流は流れず、アクチュエータは抵抗力を発生しない。そして $|e| > e_{Fb}$ ($|v| > e_{Fb}/\psi$) のとき電流 i がバッテリー

Fig. 3 Dynamic absorber system

へと流れ、アクチュエータは

$$f_d = \psi i = \frac{\psi}{R}(\psi v - e_{Fb}) \quad (3)$$

の抵抗力を発生し、振動のエネルギーはバッテリーに回生される。このときのダンパの動く速度と抵抗力の関係を示すと図2のようになり、エネルギー回生ダンパは $\frac{e_{Fb}}{\psi} > v > -\frac{e_{Fb}}{\psi}$ の領域で抵抗力が得られない不感帯のある非線形な減衰特性を持つ。また、 $|e| > e_{Fb}$ ($|v| > e_{Fb}/\psi$) のとき回生エネルギー W [W] は

$$\begin{aligned} W &= e_b \times i = \frac{\psi}{R}(\psi v - e_{Fb})v - Ri^2 - e_F i \\ &= f_d v - Ri^2 - e_F i \end{aligned} \quad (4)$$

となる。このことは、回生されるエネルギーは、アクチュエータ（ジェネレータ）に加わる力学的エネルギーから、回生回路全体の電気抵抗による損失及びダイオードでの電圧降下による損失を引いたものとなる。

なお、回生回路ではなく電気抵抗 R' [Ω] のみをアクチュエータに接続した場合、抵抗には $i = e/R'$ の電流が流れ、アクチュエータの発生する抵抗力は

$$f_d = \psi i = \frac{\psi^2}{R'} v \quad (5)$$

で図2中の点線となり、減衰係数 $\frac{\psi^2}{R'}$ の線形なダンパと同じ働きをする。ただし R' にはアクチュエータの内部抵抗も含めるとする。

2.2 動吸振器型制振装置 前節で述べたエネルギー回生ダンパを、図3に示すような動吸振器に用いることを考える。系の運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_d + f_d + k(x_d - x) &= 0 \\ M\ddot{x} + Kx - f_d + k(x - x_d) &= f \end{aligned} \quad (6)$$

回生ダンパで発生する減衰力 f_d は

$$\begin{aligned} f_d &= \frac{\psi^2}{R} v - \frac{\psi}{R} e_{Fb} & v > \frac{e_{Fb}}{\psi} \\ f_d &= 0.0 & \frac{e_{Fb}}{\psi} > v > -\frac{e_{Fb}}{\psi} \\ f_d &= \frac{\psi^2}{R} v + \frac{\psi}{R} e_{Fb} & v < -\frac{e_{Fb}}{\psi} \end{aligned} \quad (7)$$

となる(ただし、 $v = \dot{x}_d - \dot{x}$)。また、回生エネルギーは

$$\begin{aligned} W &= \frac{\psi}{R}(\psi v - e_{Fb})v - Ri^2 - e_{Fi} \quad v > \frac{e_{Fb}}{\psi} \\ W &= 0.0 \quad \frac{e_{Fb}}{\psi} > v > -\frac{e_{Fb}}{\psi} \\ W &= \frac{\psi}{R}(\psi v + e_{Fb})v - Ri^2 - e_{Fi} \quad v < -\frac{e_{Fb}}{\psi} \end{aligned} \quad (8)$$

となる。すなわち、強制外力 f に励起される動吸振器の速度 $\dot{x}_d$ と制振対象の速度 $\dot{x}$ との相対速度 v が大きいときは、エネルギー回生ダンパは振動のエネルギーを回生して減衰力を発生させる。しかし、相対速度が小さいときは不感帯となりエネルギー回生は行われず、減衰力は発生しないことを示す。

3 シミュレーション

エネルギー回生ダンパは非線形特性を持つので、数値シミュレーションでエネルギー回生動吸振器の性能を評価する。また、不感帯内部をパッシブに制御した場合、およびアクティブに制御した場合も比較する。シミュレーションは式(6)と式(7)で表される非線形微分方程式を、ルンゲ・クッタ4次法を用いて、Borland-Cでプログラムした。シミュレーションで用いた係数は、後述する実験装置の特性値に合わせて表1のように決めた。ここで、動吸振器の質量、ばね定数と最適減衰率は、デンハルトクの動吸振器理論より求めた。また、エネルギー回生ダンパの回生効率と制振性能に重要な影響を与える、アクチュエータによる等価減衰率を次式で定める⁽⁴⁾。

$$\zeta_{eq} = \frac{\psi^2/R}{2\sqrt{mk}} \quad (9)$$

この減衰率が最適減衰となるように抵抗値を選びたいが、エネルギー回生の面から見ると抵抗は小さい程よい。

制振対象への入力 $f = F_0 \sin \omega t$ の強制外力とした。この大きさによってエネルギー回生が行われるようになる周波数域が変わり、系の特性を評価するのに適当であると思われるので、 F_0 をシミュレーションのパラメータとした。また計算は各周波数ごとに80周期分計算し、定常状態になっているものとして応答振幅、回生エネルギーを求めた。

3.1 エネルギー回生制振 まず不感帯のある減衰特性がどのように問題となるかを確かめるために、エネルギー回生動作のみの場合を計算した。計算結果の周波数応答を図4に示す。強制外力は $F_0=30.0[\text{N}]$ 、 $F_0=10.0[\text{N}]$ 、 $F_0=1.0[\text{N}]$ 、 $F_0=0.1[\text{N}]$ の各場合についてシミュレーションを行った。上の図は応答振幅、下の図は回生エネルギーを示している。Passiveとした細曲線は、最適調整された通常の線形なダンパを使用した時の応答を比較のために示した。

この図より外力が大きいたときは、共振周波数付近でエネルギーが回生されアクチュエータに大きい電流が流れ、系に減衰を与えている。しかし、エネルギー回生時の等価減衰率が1.55

Fig. 4 Frequency response of simulation with regenerative control

Fig. 5 Damping characteristics of regenerative and passive control

となっているため、過減衰となり、完全パッシブより応答特性は悪くなっている。外力が小さいときはすべての周波数域において不感帯となり減衰力が働かないため、 $F_0=0.1[\text{N}]$ においては高い共振が現れ、無減衰 $\zeta=0$ のときの動吸振器の応答となっている。これより動吸振器にエネルギー回生ダンパを用いた場合、微小外力ではエネルギー回生されず、またエネルギー回生は応答のピークにおいて最も多く行なわれることが分かる。

3.2 エネルギー回生・パッシブ制振 エネルギー回生動作のみでは、入力の小さな応答に対し鋭い共振が現れる。そこで、不感帯においてはアクチュエータの出力端子に抵抗を接続し、アクチュエータをパッシブに動作させることを考える。すなわち、速度の遅いパッシブ動作時には、最適減衰率を与える抵抗値 $R'=28.2[\Omega]$ をアクチュエータに接続する。このときダンパの減衰特性は図5のようになる。このような

Fig. 6 Frequency response of simulation with regenerative and passive control

切り替えを行った場合、減衰力 f_d は

$$\begin{aligned} f_d &= \frac{\psi^2}{R}v - \frac{\psi}{R}e_{Fb} \quad v > \frac{e_{Fb}}{\psi} \\ f_d &= \frac{\psi^2}{R}v \quad \frac{e_{Fb}}{\psi} > v > -\frac{e_{Fb}}{\psi} \\ f_d &= \frac{\psi^2}{R}v + \frac{\psi}{R}e_{Fb} \quad v < -\frac{e_{Fb}}{\psi} \end{aligned} \quad (10)$$

となる(ただし、 $v = \dot{x}_d - \dot{x}$)。これより微小振動時にはパッシブな減衰により共振ピークを抑え、大きな振動に対してはエネルギーを回生して振動を減衰させるエネルギー回生制振装置を構成できる。このときの計算結果の周波数応答を図6に示す。図の配置、各曲線の意味は図4と同じで、正弦波状外力を加え、定常応答を求め、完全パッシブの曲線と比較している。

図をみると、 $F_0=30.0$ [N]、 $F_0=10.0$ [N]の大きい外力のときはエネルギー回生動作のみと同じになっている。この場合も、エネルギー回生時の等価減衰率が1.55となっているため、過減衰となっていて、完全パッシブより応答特性は悪くなっている。微小外力時はすべての周波数域でパッシブ減衰となり、最適減衰となる抵抗によってエネルギーが消費されることで、鋭い共振ピークは抑制され良好な特性を示している。

3.3 エネルギー回生・アクティブ制振 高い減衰が要求される場合、エネルギー回生ダンパでもアクティブ制御によって高性能化することが必要となる。この場合は、不感帯にアクティブ制振を使う。このとき、アクティブ制御の問題点の1つとしてエネルギーの消費があるが、回生した振動のエネルギーを用いれば外部から大きなエネルギーを供給せずにすむ

Fig. 7 Frequency response of simulation with regenerative and active control

と考えられる。このアクティブ制御で発生させる制御力を

$$f_d = -K_x x - K_v \dot{x} - K_{x_d} x_d - K_{v_d} \dot{x}_d \quad (11)$$

とする。アクティブ制御により消費するエネルギーは、電流駆動型パワーアンプ出力端の電圧と電流から、

$$\begin{aligned} W &= -e \times i \\ &= -Ri^2 + \psi(\dot{x}_d - \dot{x})i \\ &= -Ri^2 + (\dot{x}_d - \dot{x})(-K_x x - K_v \dot{x} - K_{x_d} x_d - K_{v_d} \dot{x}_d) \\ &= \left\{ -\frac{R}{\psi^2}(-K_x x - K_v \dot{x} - K_{x_d} x_d - K_{v_d} \dot{x}_d) + (\dot{x}_d - \dot{x}) \right\} \\ &\quad \times (-K_x x - K_v \dot{x} - K_{x_d} x_d - K_{v_d} \dot{x}_d) \end{aligned} \quad (12)$$

となる。この式より、アクティブ制御で発生させる制御力がパッシブ動作の時に発生する制御力よりも小さいとき、または同じ時にはエネルギー消費はなく、それ以上になって初めてエネルギーを消費する。アクティブ制御時のフィードバックゲイン $\mathbf{K}=[K_x, K_v, K_{x_d}, K_{v_d}]$ は最適レギュレータ理論より、

$$\mathbf{K} = [7653.9 \quad 27.0 \quad -191.8 \quad -46.3] \quad (13)$$

と決めた。このときの計算結果の周波数応答を図7に示す。図の配置、各曲線の意味は図4、6と同じで、正弦波状外力を加え、定常応答を求め、完全パッシブの曲線と比較している。

図より、外力が大きいときはエネルギー回生動作のみとほぼ同じ応答となり、エネルギー回生されているが、この場合も、エネルギー回生時の等価減衰率が1.55となっているため、過減衰となっていて、完全パッシブより応答特性は悪くなっている。

Fig. 8 Diagram of the experimental setup

Fig. 9 Schematic of improved linear DC motor

る。また外力が小さいときは、アクティブに制振されて、最適調整されたパッシブなダンパを用いた場合より応答が良くなっていることが分かる。回生エネルギーを見ると、多くのエネルギーを供給する必要がある共振周波数付近では、エネルギー回生が行われることにより、全体としてエネルギー消費は抑えられていることが分かる。

4 実験

前章のシミュレーション結果を検証するために、実験装置を制作し実験を行った。

4.1 実験装置 制作した実験装置の概略を図8に、特性値を表1に示す。エネルギー回生ダンパには直動モータであるボイスコイルモータを使用している。エネルギー回生ダンパには、性能の良いアクチュエータが要求される⁽⁴⁾。今までは市販のリニアモータ(住友特金、LV-10)を使用してきたが、これの永久磁石を図9に示すように増加し、アクチュエータ係数を3倍程度大きくした。当初はコイルボビンをアルミ合金で作製したため、 $\zeta_{R=\infty} = 0.188$ の粘性減衰率が存在していた⁽⁷⁾。今回使用するモータは、ボビンをポリエーテル・エーテル・ケトン樹脂に変更したので、 $\zeta_{R=\infty} = 0.0213$ と低く抑さ

Fig. 10 Diagram of the control system

えることができ、アクチュエータの性能を十分に発揮できた。装置は2本のガイドにより水平方向に一自由度で拘束しており、図中両端のコの字型の壁が基礎にあたり、中心にあるMが制振対象となっている。またその左側に制振対象にバネkでつながれた補助質量mがあり、動吸振器となっている。制振対象Mの右側には加振器として用いるもう一つのアクチュエータ(LV-10)があり、これにより系に任意の正弦波状の強制外力を加えることができる。制振対象及び補助質量の変位測定用にレーザ式変位センサが、また制振対象及び補助質量の速度測定用に速度センサがそれぞれ取り付けられている。回生用バッテリーには単三型Ni-Cdバッテリーを使用する。

制御回路を図10に示す。各センサ出力はADボードを介してデジタルコンピュータに取り込まれる。そしてリレーのON-OFF、アンプへの指令値をコンピュータで計算して出力する。リレーは、ON時の抵抗のきわめて小さいPhoto MOSリレーを用いている。パワーアンプは電流駆動型であり、コンピュータからの指令値通りの電流をボイスコイルモータに流し、制御力を発生させる。回生回路はダイオードによる整流ではなく、図のようなリレーを指令時刻にON-OFFさせることで実現し、ダイオードによる電圧降下をなくし、ダンパの動く速度がより遅いときから回生が可能となるようにしている。

4.2 制振実験 エネルギー回生動作のみの場合とエネルギー回生・パッシブ制振、エネルギー回生・アクティブ制振の場合の実験を行った。エネルギー回生制振装置は制御則のため切り替えがあるので、系の周波数応答は一定周波数にて加振し、定常状態になったところで応答変位及び回生エネルギーを測定し、これを周波数を変えていながら、系の制振性能・エネルギー回生特性を検討する。回生エネルギーはボイスコイルモータに流れる電流と、その両端の電圧を測定し、それらを掛け

Fig. 11 Frequency response of experiment with regenerative control

合わせてワット数を計算し、それを平均して求めた。

エネルギー回生動作のみさせた場合、周波数応答の実験結果を図11に示す。上が振幅、下が回生エネルギーを表している。エネルギー回生時の等価減衰率は $\zeta_{eq}=1.55$ であり、不感帯速度は $\frac{v_{th}}{\psi}=0.0504$ [m/s]となっている。強制外力は $F_0=15.0$ [N], $F_0=10.0$ [N], $F_0=5.0$ [N], $F_0=1.0$ [N]の各場合について実験し、共振点付近では0.5 [Hz] 刻みの周波数で測定した。測定点は図中に点で示している。周波数応答のグラフより、 $F_0=15.0$ [N] と $F_0=10.0$ [N] に対しては共振ピーク付近でエネルギーが回生されている。 $F_0=1.0$ [N] においてはすべての周波数で不感帯となるため、減衰力が働かず高い共振ピークが現れている。

次に、エネルギー回生・パッシブ制振の場合、実験結果の周波数応答を図12に示す。上が振幅、下が回生エネルギーを表している。エネルギー回生時の等価減衰率は $\zeta_{eq}=1.55$ であり、パッシブ動作時の等価減衰率は $\zeta_{eq}=0.2443$ とした。回生エネルギーはエネルギー回生動作のみの場合とほとんど変わらないが、微小外力 $F_0=1$ [N] のときは、共振ピークがパッシブな減衰によって押さえられていることが分かる。

次に、エネルギー回生・アクティブ制振の場合、実験結果の周波数応答を図13に示す。上が振幅、下が回生エネルギーを表している。エネルギー回生時の等価減衰率は $\zeta_{eq}=1.55$ であり、フィードバックゲインはシミュレーションと同じ値を用いた。エネルギー回生のみの場合と比べると、 $F_0=1.0$ [N] の微小外力でアクティブな制振により共振が押さえられていることが分かる。

Fig. 12 Frequency response of experiment with regenerative and passive control

また回生エネルギーをみると、不感帯ではアクティブな制振によりエネルギーが消費されているが、 $F_0=15.0$ [N] と $F_0=10.0$ [N] においては共振点付近で回生エネルギーがアクティブ制御により消費されるエネルギーを上回ることが測定できた。

5 結論

エネルギー回生ダンパを動吸振器を用いた制振装置に応用し、シミュレーションおよび実験を行って次のことが分かった。

- 補助質量の反力を利用する動吸振器の大きな動きが、エネルギーを回生するには有効であることが分かった。
- エネルギー回生ダンパは強力なアクチュエータを必要とするが、永久磁石の性能向上もあり、ボイスコイル型リニアDCモータで十分な性能のものが作れた。これを使った装置を制作し、実験でもエネルギーを回生できることが確認できた。
- 系への大きな外力に対しては、振動のエネルギーを回生することができたが、エネルギー回生時の等価減衰率が過減衰となり、良好な減衰を得ることはできなかった。
- 微小外力に対しては、不感帯によってエネルギー回生できず減衰力が得られないため、鋭い共振ピークを持つ。これを、パッシブ併用制御/アクティブ併用制御を行うことによって、共振ピークを十分に押さえることが出来た。

Fig. 13 Frequency response of experiment with regenerative and active control

今後はリレー制御方法や昇圧回生回路の検討を行い、より良好な減衰特性とより良いエネルギー回生特性の向上を図る予定である。また外力の大きな場合の過減衰問題も、解決をはかる。

参考文献

- (1) 背戸一登；機論 51-472C,(1985), 3165-3171
- (2) 岡田, 岩田, 機講論 No.940-26(II),(1994), 477-482
- (3) 須田, ほか 2 名, 機論 63-613C,(1997), 3038-3044
- (4) 原田, ほか 2 名, 機論 62-604C,(1996), 4513-4519
- (5) 永井, ほか 3 名, 機論 63-611C,(1997), 2237-2242
- (6) 岡田, 長坂, サーボアクチュエータとその制御, コロナ社,(1985)
- (7) 米村, ほか 2 名, 機講論 No.97-10-1,(1997), 173-176