

# エネルギー回生ダンパを用いたサスペンションの研究

A New Approach to Suspension System with Energy Regenerative Damper

須 田 義 大\*・椎 葉 太 一\*

Yoshihiro SUDA and Taichi SHIIBA

## 1. 緒 言

近年, 振動制御に関して, アクチュエータを用いて振動を抑制するアクティブ制御の研究が盛んである. アクティブ制御はパッシブ制御では不可能であった大幅な振動絶縁性能の改善を実現させるが, 同時にいくつかの問題点を含んでいる. その一つは, 従来のパッシブ制御では不要であったエネルギー供給が必要なことである. 省エネルギーの観点から考えると必ずしも好ましくない. さらに, 制御の際の演算やアクチュエータなどの応答性が原因で制御に時間遅れが生じてしまうために, 高周波振動に対して, エネルギー消費が増大するにも関わらず振動絶縁性能が劣化するという点も挙げられる.

パッシブなシステムでの振動絶縁におけるダンパは振動のエネルギーを熱エネルギーに変換し, 放出することで振動のエネルギーを減少させて振動を抑えている. このとき, 熱に変換されたエネルギーは全く有効利用もされずに放出される.

筆者らは以上の点に着目し, ダンパで変換されている振動エネルギーを利用可能な形に変換することができれば, ダンパは振動減衰の役割を担いつつ, 同時にエネルギーソースの役目を果たす優れたシステムとなる可能性があることを指摘し, またそのようなエネルギー回生ダンパシステムを実現するデバイスの一つの候補として直流モータの利用を提案した<sup>1)</sup>.

本研究では, 実際にエネルギー回生ダンパを試作し, その制振特性, 並びにエネルギー特性について実験により検討を行った. さらに, 先に述べたアクティブ制御が抱える問題点を解決する方法として, アクティブ制御とエネルギー回生ダンパシステムを組み合わせた新しいハイブリッドサスペンションシステムを提案し, 検討した.

## 2. エネルギー回生ダンパ

### 2.1 エネルギー回生ダンパの特性

本研究では, エネルギー回生ダンパの一例として直流モータを用い, 振動エネルギーを電気エネルギーに変換することを想定している. 直流モータによるエネルギー回生ダンパは,  $r$  をモータの内部抵抗,  $L$  をモータ回路のインダクタンス,  $I$  を回路を流れる電流,  $E_c$  を回路に生じる誘導起電力とした回路で表わされる. また生じた誘導起電力は, モータ外部の抵抗  $R$  により消費させるものとする. この直流モータの回転軸に回転数  $N$  を与えたとき, 回転軸に発生するトルクは

$$T = -\frac{K_t \cdot K_e}{r + R} \alpha^2 N \quad (1)$$

となる<sup>1)</sup>. ここで,  $K_t$ ,  $K_e$  はそれぞれモータのトルク定数, 誘起電圧定数である. また,  $\alpha$  はモータの減速比である. この式から, このモータのダンパとしての指数, すなわちダンパ定数は次のように定められる.

$$c^* = \frac{K_t \cdot K_e}{r + R} \alpha^2 \quad (2)$$

また, 外部抵抗  $R$  において消費される回生エネルギーは

$$W_R = \frac{R}{r + R} \cdot \frac{K_e}{K_t} \cdot c^* \cdot N^2 \quad (3)$$

となる. ここで, 一般にトルク定数と誘起電圧定数の比はモータによらず一定であることが知られている. (3)式より, エネルギー回生の効率を向上させるには, 外部抵抗を内部抵抗と比較して大きく取ればよいことがわかる. しかし, 外部抵抗の値を大きくすると, (2)式よりダンパ定数の値は小さくなってしまふことがわかる. 外部抵抗の値を大きくしても十分なダンパ性能を維持するためには減速比を大きくすればよいのだが, 減速比を大きくすることは回転部分の慣性質量の増加や摩擦の影響の増加を意味する. 実際のエ

\*東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

エネルギー回生ダンパの設計においては、これらの条件を考慮する必要がある。

2.2 実験による検討

本節では、実験によるエネルギー回生ダンパの検討結果を示す。実験装置は Fig. 1 に示すような 1 自由度系であり、ラックピニオン機構により直線方向の変位をモータの回転運動に変換する。また、実験装置の特性値は、 $m=8.0 \text{ kg}$ 、 $k=784 \text{ N/m}$  であり、固有振動数は  $1.58 \text{ Hz}$  である。この実験装置に様々な周波数の正弦波状外乱を加え、エネルギー回生ダンパの特性を調べた。

Fig. 2 にエネルギー回生ダンパによるばね上質量の振動伝達率の変化を示す。共振点付近の振動伝達率が減少していることにより、エネルギー回生ダンパのダンパ効果が示される。(2)式から理論的に導かれるダンパ定数と、実験結果より同定されるダンパ定数とを比較すると、理論では  $99.44 \text{ Ns/m}$  に対して、実験では、 $110 \text{ Ns/m}$  が得られほぼ一致した。

また、エネルギー回生の効率を Fig. 3 に示す。今回の実験においては、回生されるエネルギーをモータ外部につけた電気抵抗で消費させることによりエネルギー回生の効率を調

べた。今回の実験では、モータの内部抵抗と外部の抵抗の値の比は、(3)式中の係数の形で表わすと

$$\frac{R}{r+R} = 0.243 = 24.3\% \quad (4)$$

であった。従って、エネルギー回生の効率は理論的にこの値を越えることはない。また、エネルギー回生効率は外乱の振動数が大きくなるに従い悪化しているが、これは外乱の振幅が振動数の増加に伴い小さくなるためである。

3. アクティブ・エネルギー回生ハイブリッドサスペンション

3.1 新しい振動制御方式の提案

アクティブ制御の問題点に対処するために、以下に示すように外乱の周波数に応じて制御方式を切り替える、アクティブ・エネルギー回生ハイブリッドサスペンションを提案する<sup>1), 2)</sup>。

1. 系が低周波で振動している場合、アクティブ制御により系の振動を制御する。アクティブ制御により高い制振効果が得られる。
2. 系の振動が高周波のとき、アクティブ制御は行わず、パッシブ要素のみで系の振動を押しさえる。このとき、エネルギー回生ダンパにより振動のエネルギーを回生する。回生されたエネルギーはアクチュエータに必要なエネルギー

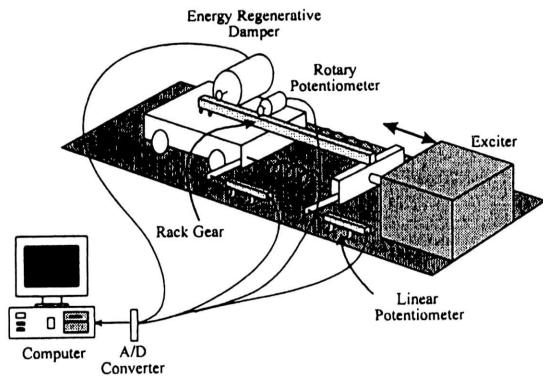


Fig. 1: One D.O.F. Experimental Equipment

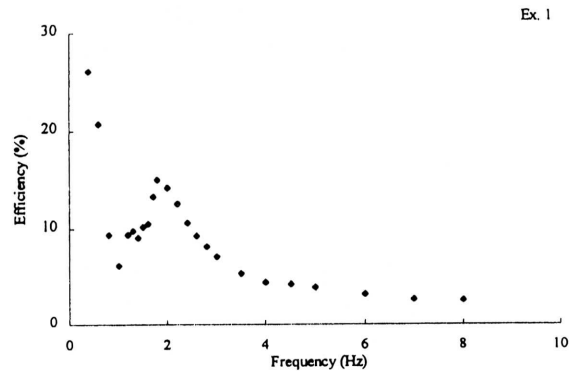


Fig. 3: Efficiency of Energy Regeneration

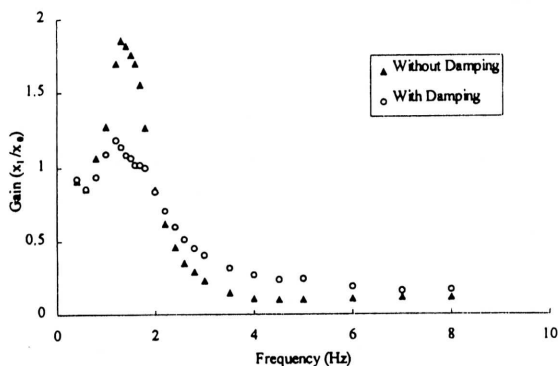


Fig. 2: Vibration Transmissibilities-Frequency Response

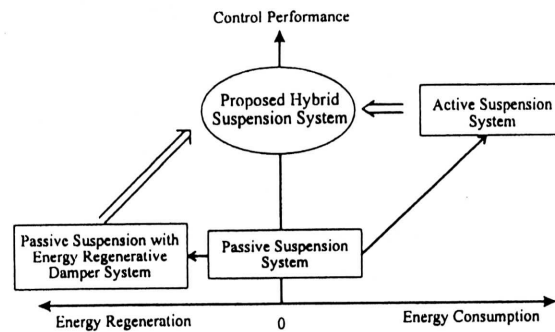


Fig. 4: Concept of Proposed Hybrid Suspension System

ギとして利用する.

このサスペンションのコンセプトを Fig. 4 に示す. 提案するサスペンションはアクティブ制御と同程度の高い制振性能を持ちつつ, トータルで見るとパッシブ制御と同様にエネルギー供給の必要のないシステムを目指している.

### 3.2 シミュレーションによる評価

前節で提案したアクティブ・エネルギー回生ハイブリッドサスペンションの制振特性並びにエネルギーの特性についてシミュレーションにより検討する. シミュレーションモデルは Fig. 5 に示す 2 自由度系である. このサスペンションのばね上共振点が低周波に, ばね下共振点が高周波となるように構造系のパラメータを定め, ばね上にアクティブ制御を, ばね下系にエネルギー回生ダンパによるパッシブ制御をそれぞれ用いるという考えに立って, 周波数分離制御を目指している. シミュレーションのパラメータは,  $m_1 = 3.2 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 9.0 \text{ kg}$ ,  $k_1 = 784 \text{ N/m}$ ,  $k_2 = 392 \text{ N/m}$ ,  $C_1 = 150 \text{ Ns/m}$ ,  $C_2 = 10 \text{ Ns/m}$  であり, これは後に示す小型の実験装置のパラメータと同じである. アクチュエータには直流サーボモータを用いる. また, 今回のシミュレーションでは, 実際の外乱の条件を適用するため, 入力は自動車の振動における路面の不整を想定した周波数特性<sup>3)</sup>を仮定した.

アクティブ制御には最適制御理論を用いた. この系の状態方程式は以下のように表わされる.

$$\dot{X} = AX + Bu + wX_0 \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_1 + k_2}{m_1} & \frac{c_1 + c_2}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} & \frac{Kt \cdot \alpha}{m_1 \cdot \frac{d}{2}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_2}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & -\frac{c_2}{m_2} & \frac{Kt \cdot \alpha}{m_2 \cdot \frac{d}{2}} \\ 0 & \frac{Ke \cdot \alpha}{\pi d \cdot L} & 0 & -\frac{Ke \cdot \alpha}{\pi d \cdot L} & -\frac{r}{L} \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_2 \\ I \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}, \quad w = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{k_1}{m_1} & \frac{c_1}{m_1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad X_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ \dot{x}_0 \end{bmatrix}$$

ここで,  $d$  はアクチュエータの直流モータに取り付けられ

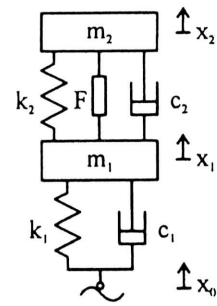


Fig. 5: Two D.O.F. Simulation Model

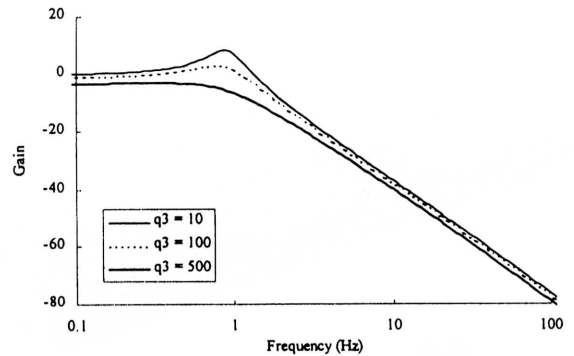


Fig. 6: Vibration Transmissibility-Frequency Response of Sprung Mass

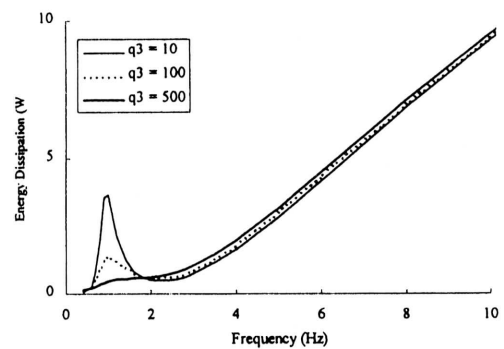


Fig. 7: Energy Dissipation in Damper

るピニオンギアの直径である. 評価関数は次の式で示される. Riccati 方程式を解くことにより評価関数を最小にするフィードバックゲインが決定される.

$$J = \int_0^{\infty} (q_1 x_1^2 + q_2 \dot{x}_1^2 + q_3 x_2^2 + q_4 \dot{x}_2^2 + u^2) dt \quad (6)$$

Fig. 6 は重み指数  $q_3$  によるばね上系の振動伝達率の変化を示したものである. この値を大きく取ることにより高い制振特性が得られるが, アクティブ制御に必要なエネルギーもまた大きくなる.

次に, Fig. 7 にエネルギー回生ダンパで回生される振動エ

研 究 速 報

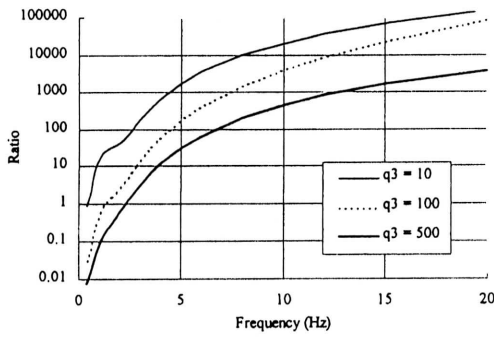


Fig. 8: Comparison between Dissipated and Consumed Energy

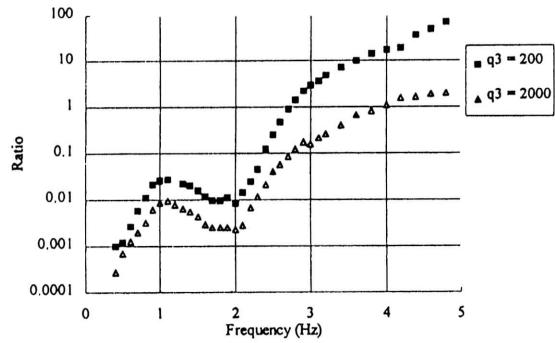


Fig. 11: Comparison of Energy Regeneration and Energy Consumption in Experiments

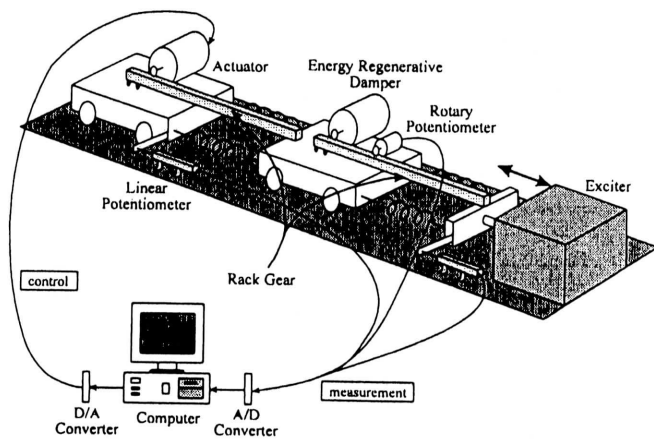


Fig. 9: Two D.O.F. Experimental Equipment

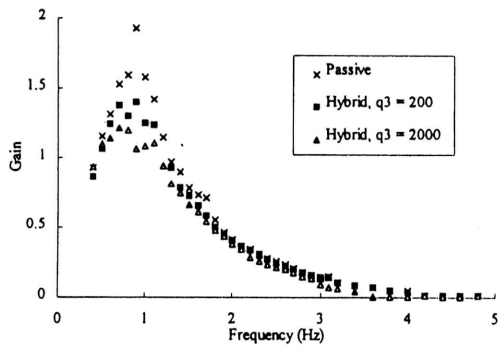


Fig. 10: Vibration Transmissibility-Frequency Response

エネルギーを示す。これをアクチュエータにおける消費エネルギーと比較すると Fig. 8 になる。これは振動エネルギーと消費エネルギーの比を取ったものであり、この値が1より大きいとき、ダンパにおいて再生され得るエネルギーはアクティブ制御に必要なエネルギーを上回る。

3.3 実験による検討

アクティブ・エネルギー再生ハイブリッドサスペンション

の実験装置を Fig. 9 に示す。この実験装置を用いて振動伝達率並びにエネルギー消費，エネルギー回生の特性を調べた。Fig. 10 はばね上系の振動伝達率に対する重み指数の影響を示したものである。また、実際に再生されたエネルギーとアクチュエータにおいて消費されたエネルギーの比を取ったものが Fig. 11 である。実験においても、周波数が高い領域で再生エネルギーがアクティブ制御で消費されるエネルギーを上回ることが示された。

4. 結 論

本研究をまとめると以下のようなになる。

1. 直流モータを用いて振動のエネルギーを再生するエネルギー再生ダンパを実現した。また、その特性をモータのパラメータを用いて理論的に整理し、実用に際しての指標を与えた。
2. 実験によりエネルギー再生ダンパの特性を調べた。結果は理論値とほぼ一致した。
3. アクティブ・エネルギー再生ハイブリッドサスペンションが高い制振性能を持ち、同時にエネルギー再生ダンパによりアクティブ制御に必要なエネルギーを供給できる可能性をシミュレーション並びに実験により示した。

なお、本研究の一部は財団法人マツダ財団の研究助成金を使用した。感謝します。(1995年4月14日受理)

参 考 文 献

- 1) 須田・椎葉, エネルギー再生ダンパシステムの研究, 日本機械学会, 第6回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム講演論文集, 940-26, (1994), 485.
- 2) 須田・椎葉, アクティブ・エネルギー再生ハイブリッドサスペンションの研究, 日本機械学会, 第3回交通・物流部門大会講演論文集, 940-57, (1994), 312.
- 3) カヤバ工業株式会社編, 自動車のサスペンション, 山海堂