Akita University

増磁および減磁効果によるハイブリッド磁気ダンパの研究*

砂子田　勝昭*1，松 岡　太 一*2，銭 谷　政 紀*3

Study on Hybrid Magnetic Damper with Effect of Magnetization and Demagnetization

Katsuaki SUNAKODA*4, Taichi MATSUOKA and Masaki ZENIYA

*4 Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University,
1-1 Tegata Gakuen-machi, Akita-shi, Akita, 010-8502 Japan

In this paper, the authors propose a new type hybrid damper with effect of magnetization and demagnetization. The damper consists of a ball screw, electromagnets, rare-earth magnets, and a conductive disk. The core of the electromagnet is combined with the rare-earth magnet. It is called a hybrid electromagnet. The damper has a controllable damping force that is magnetized in case of positive magnetic fields created by the electromagnet, otherwise demagnetized in case of negative one. The validity of the damper is to utilize by a fail-safe mechanism at a time when electric power is lost under the device malfunction. In order to investigate the resisting force characteristics of the damper, the vibration tests are carried out. The test damper has a function of increasing and decreasing magnetic flux density from a neutral position. The experimental results well agree with the theoretical results. Next, to estimate the damping effects of the damper, a one-degree-of-freedom system which is connected to the damper is proposed here. The simulations of seismic response under a semiacitve control based on Linear Quadratic Regulator are calculated, and the damping effects of the damper are confirmed numerically.

Key Words: Damping, Vibration Control, Vibration Control Device, Demagnetization, Magnetization, Hybrid Damper, Hybrid Electromagnet

1. 緒　　言

近年，制御分野の発展が著しく，ハード分野およびソフト分野とも拡充されてきている．高速輸送や精密機器および医療分野においても，地震動のみに限らず，車体振動，配管振動，風や微振動に至る様々な振動を対象としたアクティブダンパやセミアクティブダンパが多数開発されている．セミアクティブダンパは，受動的要素（例えばばね定数や減衰係数）を変更でき，省エネルギで大きな制振効果が得られ，安定性にも優れているが，それらの多くは受動的要素を中立状態から正方向，または負方向の一方向に変化させることしかできなかった．また，制御機器の不具合などで制振効果が失われないように，フェイルセイフ機能は重要な要素である．受動的要素を中立状態から正・負両方向に可変することができれば，中立では最低限の性能を保証し，大地震などで大きな力が必要な場合は抵抗力を増して，逆に免震のように柔軟性をもたせたい場合には，抵抗力をあまり発生させないようにすることができる．受動的要素は様々あるが，最近になって希土類磁石の保持力が向上したことで，磁気減衰がよく使われるようになった．磁気減衰の特長は，典型的な速度比例型の抵抗力特性をもち，非接触で利用できることで，メンテナンス性にも優れ，温度依存や経年劣化がほとんどなく，使用環境が幅広い．これまでに数多くの研究がなされており，背戸らは磁気減衰を用いた動吸振器を開発し(1)，長屋ら・浅見らは磁気ダンパの開発や減衰特性の解析としてよく知られている(2)~(4)．大亦らは希土類磁石と電磁石を利用したてこ式やボールねじ式磁気ダンパを開発し，その制振効果を実証した(5)(6)．これら多くの磁気ダンパはどれも減衰係数を増加させるのみであった．

そこで本研究では，永久磁石と電磁石を組合わせたハイブリッド電磁石を用いることによって，磁界の強弱を制御して，可変の磁気減衰力を得る新しいタイプのハイブリッド磁気ダンパを開発した(7)．ハイブリッド電磁石とは，通常の電磁石コア部に強磁性体と希土

* 原稿受付 2007 年 7 月 27 日．
*1正員，フェロー，秋田大学工学資源学部（〒010-8502　秋田市手形学園町 1-1）．
*2正員，秋田大学工学資源学部．
*3東北電力（〒980-8550 仙台市青葉区本町 1-7-1）．
E-mail : sunakoda@ipc.akita-u.ac.jp

類磁石を併設することで，コイル電流を希土類磁石の磁界と同じ方向に加えると希土類磁石の磁界との相乗効果により磁界が強まり，その逆方向には相殺されて弱まる．これによって導体円板に働く制動トルクを，希土類磁石のみの中立状態から増加または減少方向に制御することが可能である．また，コイル電流を流さなくても磁界を発生するため，パッシブ磁気ダンパとしてフェイルセイフ機能をもつという特長がある．背戸らが抵抗力を増減できるＭＲダンパの研究を行っているが[8]，磁気ダンパとしては初めての試みであると思われる．本装置を開発し，抵抗力測定実験を行い，その原理と理論を確かめた．次に，本装置の構造物に対する振動抑制効果を確かめるために，一自由度振動モデルを用い，最適レギュレータを規範としたセミアクティブ制御をダンパに適用した場合の地震応答シミュレーションを行った．

2. ハイブリッド磁気ダンパの構造

2･1　構造　本研究で提案するハイブリッド磁気ダンパの構造を図１に，諸元を表１に示す．本装置はピストン，シリンダ，ボールねじ，ベアリング，カップリング，導体円板およびハイブリッド電磁石から成る．ハイブリッド電磁石は図２に示すように，電磁石コア部に強磁性体（電磁軟鉄）と希土類磁石を組合わせた構造である．コイルの電流が励磁方向に流れると希土類磁石の磁場と同じ向きに電磁石の磁界が発生するために，その相乗効果により磁場が強められる．一方，コイルに逆向きの電流が流れると，希土類磁石の磁界を打ち消す方向に電磁石の磁界が作用するため，希土類磁石単体の場合よりも磁場が弱められる．したがって，従来の電磁石に比べて，増磁および減磁効果を併せもつことが本ハイブリッド電磁石の特長である．軸端に取付けられた導体円板がハイブリッド電磁石の隙間で回転することによって，円板には渦電流による制動トルクが発生する．このトルクは磁束密度の二乗に比例するため，ハイブリッド電磁石の増磁および減磁効果によって中立状態から増加・減少させることが可能となる．

2･2　抵抗力特性　ロッドエンド間の相対的な並進変位を u とすると，ボールねじ軸の回転角θは

$$\theta = 2\pi u / L \qquad \cdots\cdots(1)$$

で表される．ここでLはボールねじのリードである．導体円板には，ハイブリッド電磁石の磁束を横切ることによって制動トルクT_Dが発生する．そのトルクは，磁石の個数n，磁束上の周速度に比例して働く減衰力，およびボールねじ軸中心から磁石中心までの距離eの積となり，長屋らの式から

$$T_D = n \times \left\{ \frac{B(i)^2 \pi r^2 h}{\rho} C_0 \times e\dot{\theta} \right\} \times e \qquad \cdots\cdots(2)$$

で表される[2][4]．ここで，$B(i)$は導体円板に働く平均磁束密度でコイル電流iの関数となり，rは磁石半径，hおよびρは導体円板の厚さと密度，C_0は導体円板と磁束形状から算出される無次元形状係数である．

一方，導体円板が回転することにより生じる慣性トルクT_Iは，

$$T_I = I \frac{d^2\theta}{dt^2} \qquad \cdots\cdots(3)$$

となる．ここで，I は導体円板およびボールねじ軸を

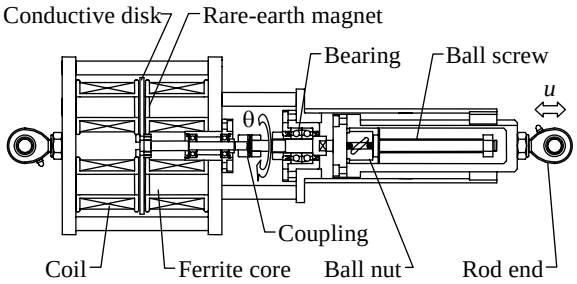


Fig. 1　Construction of the test hybrid damper

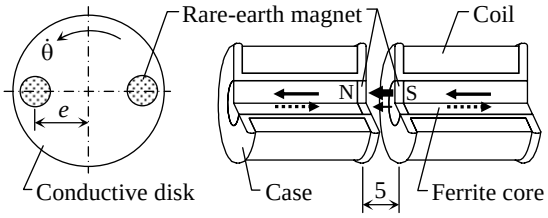


Fig. 2　Details of the hybrid electromagnet

Table 1　Design parameters of the test hybrid damper

Ball screw	Lead	L	4 mm
	Diameter		10 mm
	Rotary efficiency	η	0.94
	Stroke		±38 mm
Rare-earth magnet	Material		Nd-Fe-B
	Radius	r	7.5 mm
	Thickness		3 mm
	Number	n	2 pieces
Electromagnet	Ferrite core		SUYB0
	Wire diameter		0.3 mm
	Wind number		2500 turns
Conductive disk	Material		A1070
	Thickness	h	3 mm
	Moment of inertia	I	8.13×10^{-5} kgm^2
	Resistivity	ρ	2.67×10^{-8} Ωm
	Distance to axis	e	40 mm
	Shape factor	C_0	0.398

併せた慣性モーメントである．ボールねじ軸に平行に働く力，すなわちダンパの抵抗力Fとボールねじ軸に生じる回転トルクT（$= T_D + T_I$）は，機構学的に次式で表される．

$$F = \frac{1}{\eta}\left(\frac{2\pi}{L}\right)T \qquad \cdots\cdots(4)$$

ここで，ηはボールねじの逆作動変換効率を示す．したがって，本ハイブリッドダンパの全抵抗力 F は式(1)～(4)より次式で表される．

$$F = \frac{1}{\eta}\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2\left\{I\ddot{u} + ne^2\frac{B(i)^2\pi r^2 h}{\rho}C_0\dot{u}\right\} \quad \cdots(5)$$

ここで，加速度項および速度項の係数をそれぞれ等価慣性質量m_e，減衰係数c_dとする．

2･3　磁束密度特性　図２に示すようにハイブリッド電磁石を二個正面合わせにし，その空隙を 5 mm に固定したときの中点における平均磁束密度を測定した．実験は，コイルに加える電流 i を–1.0～1.0 A まで変化させて行い，ガウスメータープローブの位置を磁束中心と磁石端の二カ所における磁束密度を測定し，それらの値を平均化した．また磁場解析は，軸対称二次元モデル･無限境界要素を用いた有限要素法 ANSYS によって行った．最大および最小電流時における磁力線の解析結果を図３に示す．図３より，ハイブリッド電磁石の電流の励磁方向によって増磁効果（磁力線が密）および減磁効果（粗）が表れていることがわかる．空隙間中点での磁束密度測定結果を，厳密には一次関数ではないが磁場解析から得られた直線近似解と併せて図４に示し，その近似解を次式に示す．

$$B = 0.206\,i + 0.465 \qquad [\mathrm{T}] \qquad \cdots\cdots(6)$$

図４より，磁束密度は–1.0～1.0 A の範囲では，電流とほぼ比例関係にあり，0 A 時の中立状態から増減させることが可能である．また，実験結果と解析結果がほぼ一致しており，解析は妥当であると思われる．

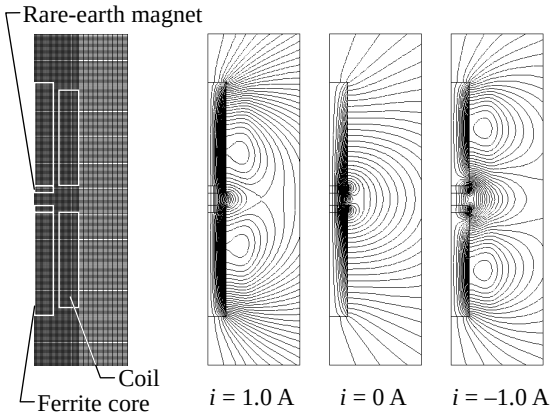


Fig. 3　Magnetic field analytical results

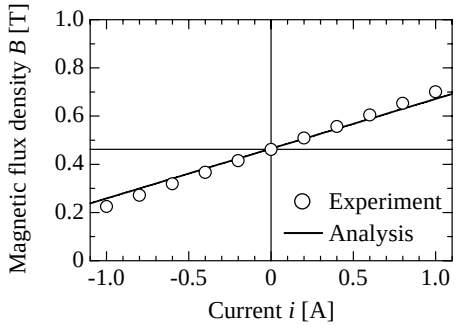


Fig. 4　Magnetic flux density of the hybrid magnet

3. 抵抗力測定実験

3･1　実験装置　図５に示すように，本ハイブリッド磁気ダンパの一端を加振機に，他端をロードセルを介して固定壁に取付け，振幅 10 mm，周波数 0.2～1.0 Hz まで変化させたときの力と変位の関係を測定した．その際，ハイブリッド電磁石には直流電源から電流を –1.0～1.0 A に変化させた．変位は差動型変位計を用いて AD 変換した後パーソナルコンピュータに取込んだ．

3･2　実験結果　周波数を五種類，コイル電流を三種類に変化させた場合の実験値および計算値をまとめて図６(a)に，周波数を 0.8 Hz，電流を 1.0 A一定にしてハイブリッド電磁石の個数を 1～4 個に変えた場合を図６(b)に示す．なお，計算値は式(5)から得られた値である．図６(a)から，本ハイブリッド磁気ダンパの抵抗力特性は，速度比例型のだ円で示されている．また，コイル電流の大きさに比例して，磁気減衰力は 0 Aの中立状態から増減していることがわかる．図６(b)から，ハイブリッド電磁石の個数に比例して減衰力が増加することがわかる．各電流時における磁気減衰係数c_dと電流iの関係を，式(5)および(6)から得られる計算値と併せて図７に示し，その計算式は次式で表される．

$$c_d = 2.82\times10^3 i^2 + 1.27\times10^4 i + 1.44\times10^4 \qquad [\mathrm{Ns/m}] \qquad \cdots\cdots(7)$$

図７より，実験値と計算値の誤差は，おもに摩擦抵抗やボールねじの逆変換効率の変化が考えられる．電

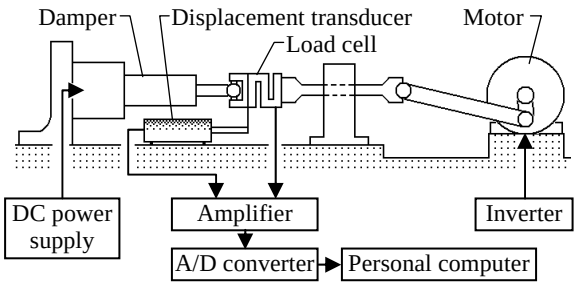


Fig. 5　Experimental apparatus

流が 1.0 A および–1.0 A 時において誤差が大きいのは，電磁石の磁化した場合における導体円板内の電流密度が増加，および減少するため，二対の磁界による渦電流の相互作用が増大または低下したと考えられる．本実験の範囲内では実験値と理論値は概ね一致しており，理論式の有効性が確認された．

4. 地震応答シミュレーション

4･1　解析モデル　本ダンパの特長である増磁および減磁効果による制振効果を確かめるために，図８に示す一自由度振動モデルに本装置を取付けた場合を想定し，地震応答シミュレーションを行った．パラメータは実在する実験モデルを参考にし，その諸元を表２に示す．基礎部に水平方向に入力外乱 z が作用したときの主質量の絶対加速度および基礎との相対変位を検討した．一自由度振動モデルの運動方程式は次式で表される．

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{z}) + k(x - z) + F = 0 \qquad \cdots\cdots(8)$$

ここで, F は式(5)で与えられるダンパの抵抗力である．式(8)を状態空間方程式で書き直すと

$$\dot{U} = [A]U + [B]\Delta + [C]\ddot{z} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

となる．ここで，Δは慣性力を含むダンパが発生する制御入力，A，B，C はシステム行列，入力行列，外乱行列で以下のように表される．

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k/m & -c/m \end{bmatrix}, \quad [B] = \begin{bmatrix} 0 \\ -1/m \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & -1 \end{bmatrix}^T, \quad U = \begin{bmatrix} u & \dot{u} \end{bmatrix}^T \qquad \cdots\cdots(10)$$

4･2　制御手法　ハイブリッド電磁石の電流制御手法は，最適レギュレータを規範としたセミアクティブ制御手法を用い, 二次形式の評価関数Jを以下に示す[(9)(10)].

$$J = \int_0^\infty (q_1 u^2 + q_2 \ddot{x}^2 + q_3 \Delta^2)dt \qquad \cdots\cdots(11)$$

ここで，q_1，q_2，q_3はそれぞれ相対変位，絶対加速度，制御入力に対する重み係数である．式(11)を状態変数表示すると

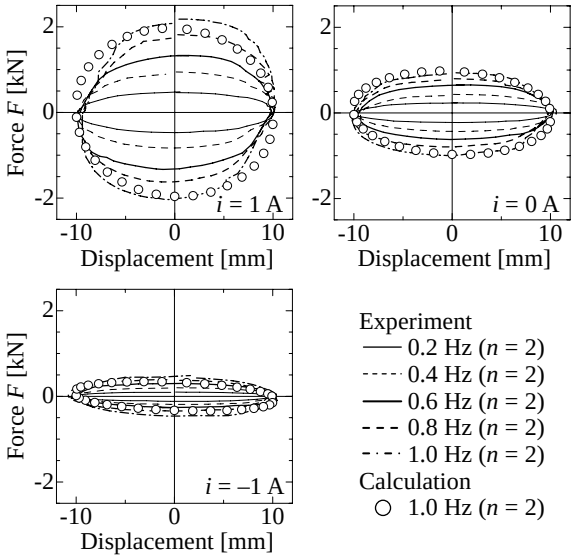
$$J = \int_0^\infty (U^T QU + 2U^T S\Delta + R\Delta^2)dt \qquad \cdots\cdots(12)$$

となり，ここで Q，R，S は以下のように表される．

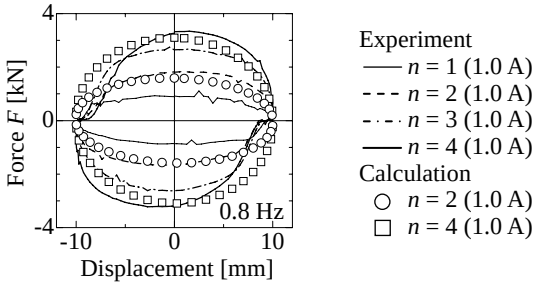
$$[Q] = \begin{bmatrix} q_1 + q_2 k^2/m^2 & q_2 kc/m^2 \\ q_2 kc/m^2 & q_2 c^2/m^2 \end{bmatrix}$$

$$R = q_3 + \frac{q_2}{m^2}, \quad [S] = \begin{bmatrix} q_2 k/m^2 \\ q_2 c/m^2 \end{bmatrix} \qquad \cdots\cdots(13)$$

振動エネルギを小さくしようとする要求と，制御エ



(a) Effects of current and frequency



(b) Effect of piece number

Fig. 6　Resisting force characteristics

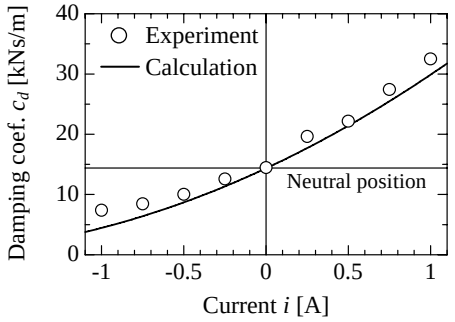


Fig. 7　Current and damping coefficient

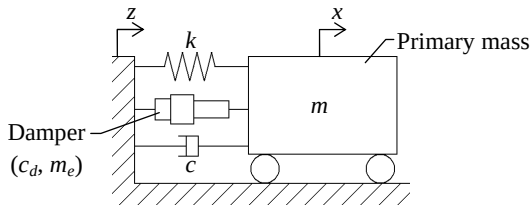


Fig. 8　Analytical model of 1DOF system

Table 2　Design parameters of 1DOF system

Primary mass	m	6000 kg
Stiffness	k	236.9 kN/m
Damping coefficient	c	226.2 kNs/m

ネルギを小さくしようとする要求は相反関係にあり，二次形式の和で与えることで，全エネルギを最小にする最適な制御力が求められる．その制御入力Δを求めると

$$\Delta = -KU = -R^{-1}(S^T + B^T P)U \qquad \cdots\cdots(14)$$

となり，K はフィードバックゲイン，P は次式のリカッチ型代数方程式の正定対称解である．

$$P(A - BR^{-1}S^T) + (A - BR^{-1}S^T)P - PBR^{-1}B^T P + Q - SR^{-1}S^T = 0 \qquad \cdots(15)$$

アクティブ制御を仮定した最適な抵抗力を，可能な限り本ダンパの制御力と等しくなるような方法をとる．抵抗力は相対速度と同方向へは加力できないため，以下の切換え条件が必要となる[11]．

$$F = \begin{cases} \Delta & (\Delta\dot{u} > 0) \\ 0 & (\Delta\dot{u} \le 0) \end{cases} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(16)$$

磁束密度は常に正値なので，式(5)，(6)，(16)よりハイブリッド電磁石のコイル電流は以下の式となる．

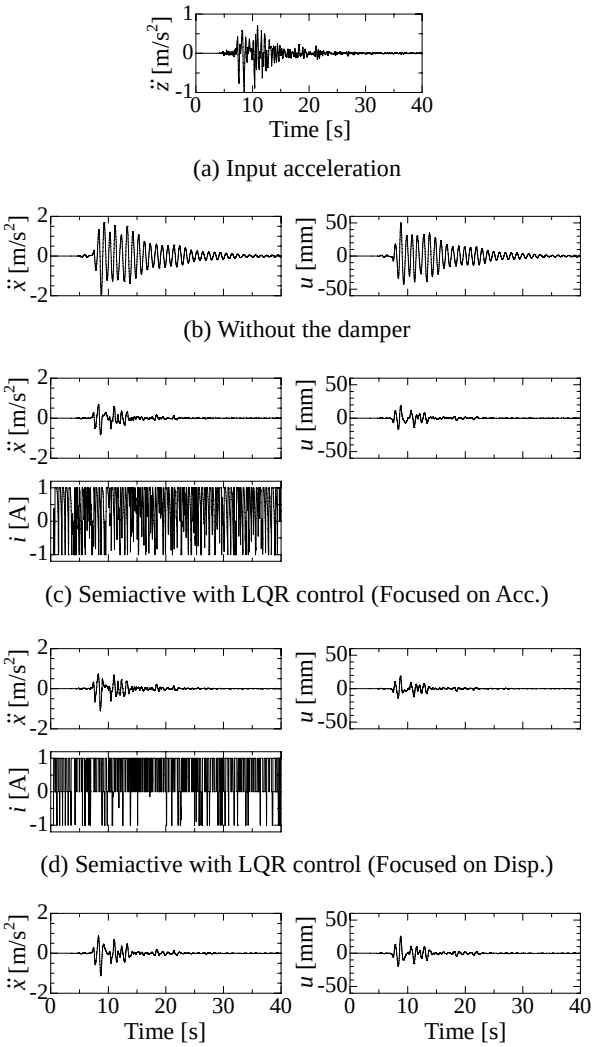
$$i = \left(\frac{L}{2\pi re}\sqrt{\frac{\eta\rho(\Delta - m_e\ddot{u})}{C_0 n\pi h\dot{u}}} - 0.465 \right)\frac{1}{0.206} \qquad \cdots\cdots(17)$$

ここで，コイル電流は以下のように決定される．

$$i = \begin{cases} i & (\Delta - m_e\ddot{u})/\dot{u} > 0) \\ 0 & (\Delta - m_e\ddot{u})/\dot{u} \le 0) \end{cases} \qquad \cdots\cdots(18)$$

数値計算は，制御時において絶対加速度の収束を重視した場合（q_1，q_2，q_3 = 1，4，10^{-7}），相対変位の収束を重視した場合（q_1，q_2，$q_3 = 10^7$，1，10^{-7}）の二通り，および比較のために非制御時のパッシブダンパ（i = 0 A）のそれぞれについて，主質量の絶対加速度，相対変位，およびコイル電流を計算した．なお，数値計算はMatlabを用い，各重み係数は試行錯誤によって定めた．本報では，減衰係数変更による時間遅れ等は考慮していない．

4･3　解析結果　計算に用いた地震波は，日本建築センターBCJ-L2 模擬波，十勝沖地震（1968）八戸港NS成分，兵庫県南部地震（1995）神戸海洋気象台NS成分，および宮城県沖地震（1978）東北大学NS成分の四種類で，それぞれ最大加速度を 1 m/s^{2}に基準化した波形である．これらの波形を，基礎部に水平方向に入力した場合の計算結果の最大値を表３に，応答波形の一例を図９に示す．表３より，本ダンパを取付けた場合，相対変位重視の最適制御時ではダンパを取付けない場合に比べて相対変位は 2/5～1/5 程度に低減し，加速度重視の制御時では絶対加速度は 2/5～1/4 程度に低減していることがわかる．また，セミアクティブ制御はパッシブダンパの場合と比較しても概ね良好な結果となっているが，パッシブダンパでもフェイルセイ



(a) Input acceleration

(b) Without the damper

(c) Semiactive with LQR control (Focused on Acc.)

(d) Semiactive with LQR control (Focused on Disp.)

(e) Passive damper (i = 0 A)

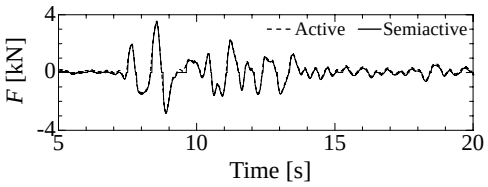
Fig. 9　Seismic response waves (JMA Kobe)

Table 3　Maximum values of seismic responses

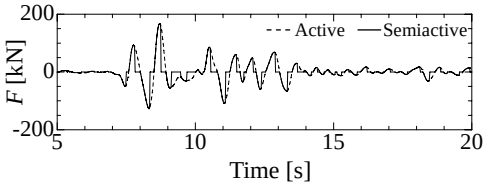
Input acceleration wave	BCJ-L2		Hachinohe NS		JMA Kobe NS		Tohoku NS	
	Acc.	Disp.	Acc.	Disp.	Acc.	Disp.	Acc.	Disp.
Without the damper	2.26	57.2	1.88	47.5	1.98	50.1	4.22	107
With the damper LQR control (Acc.)	0.83	20.9	0.82	19.8	0.83	19.0	1.04	26.4
With the damper LQR control (Disp.)	0.90	15.8	0.98	17.9	1.11	18.8	1.26	21.2
With the passive damper (i = 0 A)	0.82	19.7	1.03	23.4	1.13	25.7	1.38	31.4

(Acc.: m/s^2, Disp.: mm)

Akita University



(a) Semiactive with LQR control (Focused on Acc.)



(b) Semiactive with LQR control (Focused on Disp.)

Fig. 10　Optimum forces of active and semiactive

フ機能としてある程度の低減効果が保証されている．

図 10 に, 本来出力されるべき最適なアクティブ制御力，および本装置を用いたセミアクティブ制御力との比較を示す．図 10 より，(b)の相対変位を重視した場合のセミアクティブ制御では実現不可能な制御力の割合が，(a)の加速度重視制御時に比べて多いことがわかる．このことから，一自由度振動モデルに最適レギュレータによるセミアクティブ制御を用いた場合，本ダンパは絶対加速度重視の制御の方が振動抑制により効果的であり，消費電力の観点からも有効であると考えられる．

5. 結　　言

本研究では，増磁および減磁効果をもつハイブリッド磁気ダンパを開発し，その抵抗力特性を実験と理論から確かめた．また，その制振効果を数値計算によって検討した．主な結果を以下に示す．

1. 電磁石コア部に強磁性体および希土類磁石を併設したハイブリッド電磁石によって，基準磁場から増磁および減磁できる．また，磁束密度測定実験により，有限要素法による磁場解析結果とほぼ一致した実験結果が得られた．
2. 磁気減衰力はコイル電流の二乗に比例し，電磁石を希土類磁石の磁化方向に励磁すると，希土類磁石単体の場合に比べて大きな減衰係数が得られ，逆に励磁すると減衰係数は低下する．
3. 一自由度振動モデルを用いた地震応答シミュレーションの結果，非制御時に比べてセミアクティブ制御時は，絶対加速度および相対変位を最大 20% 低減し, かつ消費電力を抑えることが可能である．
4. コイル電流を制御することによって，ハイブリッドダンパとして機能する．また，制御機器が機能しない場合でも，ある程度の減衰効果をもつパッシブダンパとして動作することから，フェイルセイフ機能を有しているといえる．

文　　献

(1) Seto, K., Vibration Control Method Using Magnetic Damping, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 56, No. 525 (1990), pp. 1079−1086.
(2) Nagaya, K. and Kojima, H., On a Magnatic Damper Consisting of a Circular Magnetic Flux and a Conductor of Arbitrary Shape, *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 106 (1984), pp. 46−51.
(3) Nagaya, K. and Sekiguchi H., Analysis on The Magnetic Damper with Opposite Poles by Tunes, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 57, No. 544 (1991), pp. 3800−3805.
(4) Asami, T. and Hosokawa, Y., A Practical Expression for Design of a Magnetic Damper (Improvement of the Convergence in the Nagaya-Kojima Expression), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 61, No. 582 (1995), pp. 587−590.
(5) Ohmata, K., et al., Characteristics of Ball Screw Type Dampers with Magnetic Damping, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 51, No. 471 (1985), pp. 3034−3038.
(6) Matsuoka, T., et al., A Study on an Elastically Supporting Method for Magnetic Dampers with Force Magnifying Mechanisms, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 72, No. 716 (2006), pp. 1056−1063.
(7) Sunakoda, K., et al., Study on Hybrid Magnetic Damper with Effects of Demagnetization, *JSME, Proc. Dynamics and Design Conference 2006*, No. 413 CD-ROM (2006-9), 6p.
(8) Tanaka, T., et al., Semi-active Control Strategy with Nonlinear Predictive Control and Development of MR Damper with Expanded Variable Damping Region, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 72, No. 714 (2006), pp. 340−346.
(9) Hiwatashi, T., et al., Semi-Active Base-Isolation System by MR Damper Utilizing Optimal Regulator Theory, *AIJ, Journal of Structural and Construction Engineering*, No. 567, (2003), pp. 47−54.
(10) Ichihara, H., et al., Bilinear Control of a Single-Degree-of -Freedom Isolation System by a Hybrid Magnetic Damper Using Rare-Earth Magnets and Electromagnets, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 68, No. 674 (2002), pp. 2949−2955.
(11) Karnopp, D., et al., Vibration Control Using Semi-active Force Generator, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 96 (1974), pp. 619−626.