

## 電磁共振ダンパによる振動制御\*

井上剛志\*<sup>1</sup>, 石田幸男\*<sup>1</sup>, 角正貴\*<sup>2</sup>

## Vibration Control using Electro-Magnetic Resonant Shunt Damper

Tsuyoshi INOUE\*<sup>3</sup>, Yukio ISHIDA and Masaki SUMI<sup>\*3</sup> Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

Voice coil motor has a property to convert the mechanical energy to electrical energy and vice versa. In this study, an electro-magnetic resonant shunt damper, consists of a voice coil motor with electric resonant shunt circuit, is proposed. The optimal design of the shunt circuit is obtained theoretically for this electro-magnetic resonant shunt damper. Further, the effect of uncertain errors of the different elements of the electro-magnetic resonant shunt damper is also investigated. The applicability of the theoretical findings for the proposed damper is justified by the experimental analysis.

**Key Words:** Vibration Control, Passive Damping, Dynamic Vibration Absorber, Resonance Circuit, Voice Coil Motor

## 1. 序 論

機械や構造物の振動を抑制する目的で、これまで様々なパッシブダンパが研究されている。そして、最近では、機械振動をエネルギー源として捉え、振動エネルギーを電気エネルギーに変換してエネルギーを消散することによりダンピング効果をあたえるものが各種考案されている。たとえば、圧電素子を用いた電気-機械エネルギー変換を用いたパッシブ制振などが報告されており<sup>(1)-(2)</sup>、Hagoodら<sup>(1)</sup>は、シャント回路にLR回路を用い、そのチューニングに動吸振器の定点理論<sup>(3)</sup>を用いている。高木らは<sup>(2)</sup>ピエゾ素子のシャント回路(外部に接続した電気回路)のモデル化誤差の影響を軽減するため、構造化特異値を用いたパラメータ設計手法を提案している。また、他にも、メカトロダンパ<sup>(4)</sup>や、ボイスコイルモータなどで変換した電気エネルギーをバッテリーやコンデンサに蓄えてアクティブ制振に用いるエネルギー回生ダンパ<sup>(5)-(7)</sup>に関する研究が行われている。

本研究では、ボイスコイルモータを用いたパッシブ制振に注目する。特に、ボイスコイルモータのシャント回路として電気共振回路を構築し、その電気共振回路の共振点を制振対象の機械構造物の共振点と同調さ

せ、機械構造物の振動を最も効率よく低減する電磁共振ダンパを提案する。この分野では、最近、Behrensら<sup>(8)</sup>がボイスコイルモータなどの電磁エネルギー変換器の一般的なシャント回路について調べ、その1例としてシャント回路にコンデンサを組み込んだ電磁ダンパを考え、数値的にシャント回路の抵抗値のチューニング条件を検証している。しかし、シャント回路のコンデンサや抵抗の最適設計式は導出されていない。そこで、本研究では、動吸振器の定点理論<sup>(3)</sup>を元に、電磁共振ダンパの構成素子の最適条件式を理論的に導出することを目的とする。そして、各素子の誤差の影響を理論解析により調べる。また、実験により、提案した電磁共振ダンパの有効性を確認する。

## 2. 電磁共振ダンパのモデルと運動方程式

一自由度強制振動系に、本論文で提案する電磁共振ダンパを設置した図1のようなモデルを考える。

この電磁共振ダンパでは、制振対象の機械構造物の振動を、電磁エネルギー変換器により誘導起電力に変換する。ここでは、電磁エネルギー変換器として、ボイスコイルモータ(VCM)を用いる。ボイスコイルモータの可動部の速度を $v$ とすると、ボイスコイルモータの誘導起電力 $e_m$ は、次式となる。

$$\left. \begin{aligned} e_m &= NBl\dot{x} \\ &= \phi\dot{x} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

\* 原稿受付 2003年11月20日。

<sup>\*1</sup> 正員。名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻(☎464-8603 名古屋市千種区不老町)。<sup>\*2</sup> 松下電器産業(株)モータ社情報モータ事業部(☎689-3541 米子市二本木)。

E-mail: inoue@nuem.nagoya-u.ac.jp

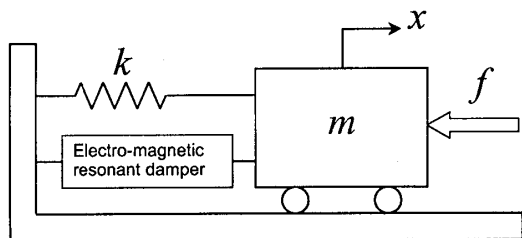
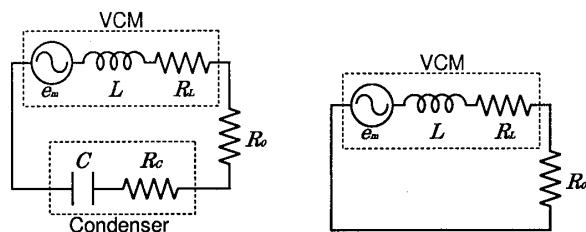


Fig. 1 1 degree-of-freedom theoretical model



(a) R-C series shunt circuit (b) R shunt circuit

Fig. 2 electric shunt circuit of damper

ここで、電磁アクチュエータ係数  $\phi = NBl$  を導入した。式中の  $N$  は磁石の磁束が通過するコイルの磁束有効巻数、 $B_0$  は磁石の公称磁束密度、 $\alpha$  はボイスコイルモータの磁束漏れや渦電流などの損失を考慮した磁束効率、 $B = \alpha B_0$  は有効磁束密度、 $l$  はコイル巻きの導線長さである。

一方、電流  $i$  が流れるとき、ボイスコイルモータにはローレンツ力  $f_m = \phi i$  が働く。このローレンツ力  $f_m$  の向きは、コイルの運動方向  $v$  と反対の方向である。この制振力として作用する力  $f_m$  はコイルに流れる電流  $i$  に比例するので、できるだけ大きな電流  $i$  を得るために、内部抵抗  $R_L$  をもつコイルインダクタンス  $L$  に対するシャント回路として、図2(a)に示すように、コンデンサ  $C$  (コンデンサの内部抵抗  $R_C$ ) と抵抗  $R_0$  を直列に接続した共振回路を構成する。これら三つの抵抗  $R_0, R_C, R_L$  の合成抵抗を  $R$  とする。そして、これらのパラメータ  $L, R, C$  を調節して電気回路の共振周波数を制振対象である機械系の共振周波数に同調させることにより、制振対象が共振するときの振動エネルギーを最も効率よく電気回路に取り込み、回路に流れる電流を増幅する。そして同時に、回路に流れる電流が最も増幅されたとき、この増幅された電流はボイスコイルモータ部で大きな減衰力を作り、結果として、電気回路の共振を利用した効率の良い振動低減が実現できると考える。回路を流れる電流を  $i$  とすると、電圧平衡式は次式で示される。

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = \phi \dot{x} \quad (2)$$

Table 1 Analytical parameter

$m$	1.04 kg	$k$	5314 N/m
$N_0$	420 turns	$N$	250 turns
$\alpha$	0.48	$B_0$	1.335 T
$\phi$	7.05	$l$	0.044 m
$L_0$	14.04 mH	$F$	1.5 N

また、比較のために、図2(b)に示すように、シャント回路にコンデンサ  $C$  を用いず抵抗  $R$  のみを接続して、電気回路の共振を利用しない場合の電気系の支配方程式を示す。

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \phi \dot{x} \quad (3)$$

図1の系を支配する方程式は、機械系の支配方程式(運動方程式)と電気回路の支配方程式から成り立つ。

図1の運動方程式は、周期的外力  $f = Fe^{j\omega t}$  とローレンツ力  $f_m = \phi i$  が働くとする、次式となる。

$$m\ddot{x} + kx + \phi i = Fe^{j\omega t} \quad (4)$$

ここで、 $m$  は質量、 $k$  はばね定数、 $F$  は外力振幅、 $\omega$  は励振周波数である。

### 3. 理論解析

**3.1 共振回路を利用しないダンパの最適設計** シャント回路にコンデンサ  $C$  を用いない場合の解析解を、式(3),(4)を連立させて解く。表1に、以降の理論解析に用いた各パラメータ値をまとめる。機械系の変位  $x$ 、電気系の電流  $i$  を  $x = \bar{X}e^{j\omega t}$ 、 $i = \bar{I}e^{j\omega t}$  のようにおく。ここで、 $\bar{X}$ 、 $\bar{I}$  はそれぞれ変位と電流の複素振幅を表す。これらの式を式(3),(4)に代入し、 $\bar{X}$ 、 $\bar{I}$  について整理する。そして、 $\bar{X}$ 、 $\bar{I}$  のそれぞれの振幅  $|\bar{X}| = X$ 、 $|\bar{I}| = I$  とおくと次式を得る。ここで、 $G(\omega) = k - \omega^2 m$  とする。

$$\left. \begin{aligned} X^2 &= F^2 \frac{R^2 + (\omega L)^2}{G^2 R^2 + (G\omega L + \omega\phi^2)^2} \\ I^2 &= F^2 \frac{(\omega\phi)^2}{G^2 R^2 + (G\omega L + \omega\phi^2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(5)を用いて、共振曲線を描くと図3のようになり、抵抗  $R$  の値によらず曲線がその点を通る定点  $S$  が存在する。この特性は、フードダンパ<sup>(3)</sup>に類似している。このときの抵抗の最適設計を、以下に示す無次元量を導入することにより、無次元系として行う。

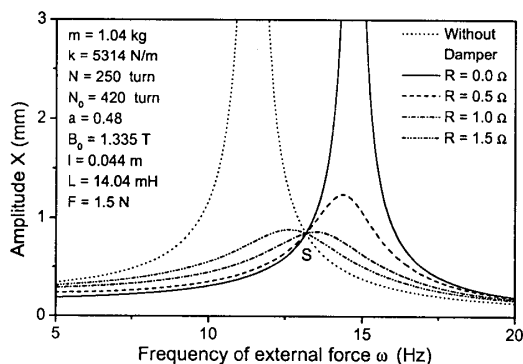
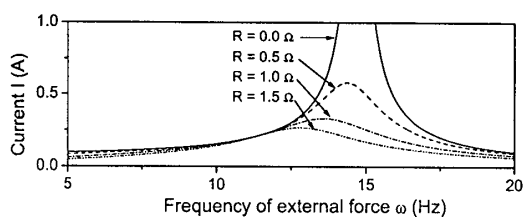
(a) Resonance curve of amplitude  $X$ (b) Resonance curve of current  $I$ 

Fig. 3 Resonance curve in the case of the electromagnetic shunt damper without electric resonance circuit

$$\text{静たわみ} : X_{st} = F/k$$

$$\text{振幅比} : X_n = X/X_{st}$$

$$\text{主系 (機械系) の固有振動数} : \omega_0 = \sqrt{k/m}$$

$$\text{強制振動数比} : \lambda = \omega/\omega_0$$

$$\text{減衰比} : \zeta = R/(2L\omega_0)$$

$$\text{電磁連成係数} : \psi = \frac{\phi^2}{mL\omega_0^2}$$

これらの無次元量を用いると、式(5)の無次元振幅  $X_n^2$  を表す式は次式となる。

$$X_n^2 = \frac{(2\zeta)^2 + \lambda^2}{(1 - \lambda^2)^2 (2\zeta)^2 + \lambda^2 \{ (1 - \lambda^2) + \psi \}^2} \quad (6)$$

定点 S の周波数  $\lambda_S^2$  は、抵抗  $R=0$ ,  $R=\infty$  の場合の振幅  $X$  を等置することにより、つぎのように得られる。

$$\lambda_S = \sqrt{\frac{2 + \psi}{2}} \quad (7)$$

つぎに、点 S において振幅  $X$  が極大値をとる条件から  $\partial X_n^2 / \partial \lambda^2 |_{\lambda=\lambda_S} = 0$  から最適抵抗  $\zeta_{opt}$  を求めると次式となる。

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{2 + \psi}{8}} \quad (8)$$

$$X_{nmax} = 2 \frac{1}{\psi} \quad (9)$$

これらの定点の周波数、最適減衰、およびこの最適抵抗値を用いたときの共振曲線の最大振幅 (定点 S の

振幅) を有次元で表すと、次式となる。

$$\omega_S = \sqrt{\frac{2kL + \phi^2}{2mL}} \quad (10)$$

$$R_{opt} = \sqrt{\frac{2kL + \phi^2}{2mL}} L = \omega_S L \quad (11)$$

$$X_{max} = F \frac{2L}{\phi^2} \quad (12)$$

### 3.2 電磁共振ダンパの最適設計

シャント回路にコンデンサ  $C$  を用いた電気共振回路を利用した場合の解析解を、式(2), (4)から求める。

変位  $x$ , 電流  $i$  を前節と同様に仮定し、式(2), (4)に代入して  $\bar{X}$ ,  $\bar{I}$  のそれぞれの振幅  $|\bar{X}| = X$ ,  $|\bar{I}| = I$  について解くと次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} X^2 &= F^2 \frac{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}{G^2 R^2 + \left\{ G \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) + \omega \phi^2 \right\}^2} \\ I^2 &= F^2 \frac{(\omega \phi)^2}{G^2 R^2 + \left\{ G \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) + \omega \phi^2 \right\}^2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

電磁共振ダンパの最適設計を、以下に示す無次元量を導入することにより、無次元系として行う。

$$\text{静たわみ} \quad X_{st} = F/k$$

$$\text{振幅比} \quad X_n = X/X_{st}$$

$$\text{主系 (機械系) の固有振動数} \quad \omega_0 = \sqrt{k/m}$$

$$\text{電磁共振ダンパの固有振動数} \quad \omega_d = \sqrt{1/(LC)}$$

$$\text{強制振動数比} \quad \lambda = \omega/\omega_0$$

$$\text{固有振動数比} \quad \gamma = \omega_d/\omega_0$$

$$\text{減衰比} \quad \zeta = R/(2L\omega_d)$$

$$\text{電磁連成係数} \quad \psi = \frac{\phi^2}{mL\omega_0^2}$$

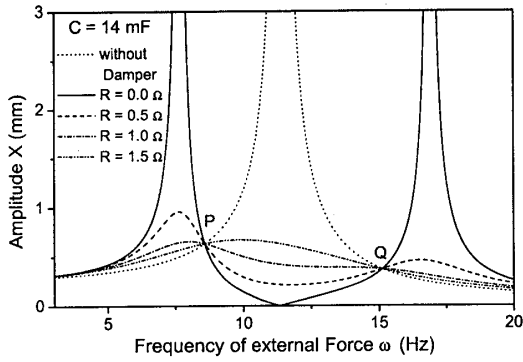
これらの無次元量を用いると、無次元振幅  $X_n^2$  は次式で表される。

$$X_n^2 = \frac{(2\zeta\gamma\lambda)^2 + (\lambda^2 - \gamma^2)^2}{(1 - \lambda^2)^2 (2\zeta\gamma\lambda)^2 + \{ (1 - \lambda^2)(\gamma^2 - \lambda^2) - \psi\lambda^2 \}^2} \quad (14)$$

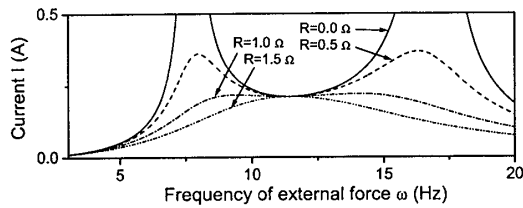
### 3.3 定点の導出

式(14)をもとに、電磁共振ダンパの最適設計を考える。まず、機械系の固有振動数  $\omega_0$  と電気系の固有振動数  $\omega_d$  を一致させる静電容量を持つコンデンサ  $C = m/(kL)$  を電気回路に導入し、電気抵抗  $R$  を適当に変化させたときの共振曲線を図4に示す。図4(a)から、電気抵抗  $R$  の値が変化しても曲線は点 P, Q を必ず通ることがわかる。

定点 P, Q における励振周波数  $\lambda_P, \lambda_Q$  を求める。式(14)で電磁共振ダンパの抵抗を  $\zeta = 0$ ,  $\zeta = \infty$  と



(a) Resonance curve of amplitude X



(b) Resonance curve of current I

Fig. 4 Influence of R on the resonance curve of the electro-magnetic resonant shunt damper

おくと次式となる.

$$\left. \begin{aligned} X_n^2|_{\zeta=0} &= \frac{(\lambda^2 - \gamma^2)^2}{\{(1 - \lambda^2)(\gamma^2 - \lambda^2) - \psi\lambda^2\}^2} \\ X_n^2|_{\zeta=\infty} &= \frac{1}{(1 - \lambda^2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

これらの値を等しいとおくことにより, その定点 P, Q の周波数  $\lambda_P^2, \lambda_Q^2$  を求めると, つぎのように得られる.

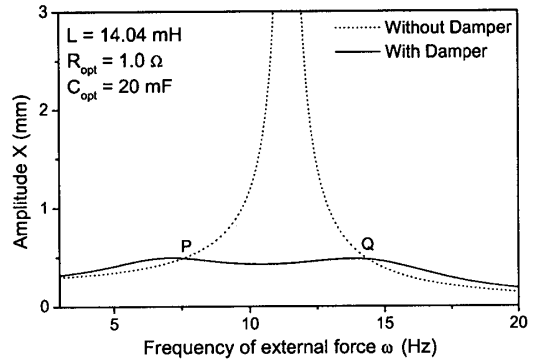
$$\left. \begin{aligned} \lambda_P^2 &= \frac{(2 + 2\gamma^2 + \psi) - \sqrt{(2 + 2\gamma^2 + \psi)^2 - 16\gamma^2}}{4} \\ \lambda_Q^2 &= \frac{(2 + 2\gamma^2 + \psi) + \sqrt{(2 + 2\gamma^2 + \psi)^2 - 16\gamma^2}}{4} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

この定点 P, Q の周波数を有次元で表すと, 次式となる.

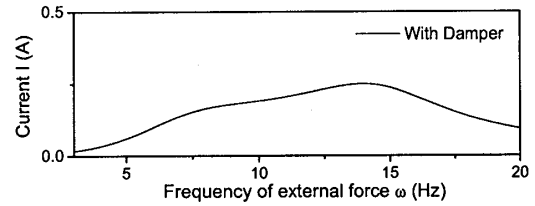
$$\left\{ \begin{aligned} \omega_P^2 &= \frac{A - \sqrt{16mkLC - A^2}}{4mLC} \\ \omega_Q^2 &= \frac{A + \sqrt{16mkLC - A^2}}{4mLC} \end{aligned} \right. \quad (17)$$

ここで, 記号  $A = 2m + 2kLC + \phi^2 C$  を用いた.

**3.4 最適同調条件について** 動吸振器の定点理論における最適同調条件と最適減衰条件を応用して, 電磁共振ダンパの最適パラメータ式を導出する. まず, 最適同調条件を満たすために, 定点 P, Q における  $X_{nP}^2, X_{nQ}^2$  が等しいときの最適なパラメータを求める. 式 (15) の  $\zeta = \infty$  の式に, 式 (16) を代入したものを等置することにより, 最適同調条件を満たす最適パ



(a) Resonance curve of amplitude X



(b) Resonance curve of current I

Fig. 5 Resonance curve in the case of the electro-magnetic resonant shunt damper (Case of the optimal designed parameter)

ラメータ  $\gamma_{opt}$  を定める式が, つぎのように得られる.

$$\gamma_{opt} = \sqrt{\frac{2 - \psi}{2}} \quad (18)$$

この最適値を有次元で表すと, 最適静電容量  $C_{opt}$  がつぎのように与えられる.

$$C_{opt} = \frac{2m}{2kL - \phi^2} \quad (19)$$

**3.5 最適減衰条件について** 定点 P, Q それぞれにおいて振幅 X が最大値を取るような最適な電気抵抗 R の条件を求めるために, 定点 P ( $\lambda = \lambda_P$ ) と定点 Q ( $\lambda = \lambda_Q$ ) のそれぞれにおいて, 共振曲線の傾きが 0 になるような最適減衰  $\zeta_P, \zeta_Q$  を求める. ここでは, 共振曲線の傾きの代わりに, 次式を満足する最適減衰  $\zeta$  を求めることを考える<sup>(3)</sup>.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial X_n^2}{\partial \lambda^2} \Big|_{\lambda=\lambda_P} &= 0, & \frac{\partial X_n^2}{\partial \lambda^2} \Big|_{\lambda=\lambda_Q} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式 (20) を式 (14) を考慮して計算すると, 点 P と点 Q のそれぞれにおいて勾配が 0 になる条件式を得る. この式に, 式 (15) の第 2 式を代入して整理<sup>(3)</sup>することにより, 最適減衰  $\zeta$  に関する次式を得る.

$$\zeta^2 = -\frac{\gamma^2}{4\lambda^2} + \frac{(2\lambda^2 - 1)(2\lambda^2 - \psi)}{4\lambda^2(\lambda^2 - 1)} - \frac{\{\lambda^4 + \psi(2 + \psi) - \lambda^2(1 + 3\psi)\}}{4\gamma^2(\lambda^2 - 1)} \quad (21)$$

最適同調条件式 (18) を考慮して整理すると、最適減衰条件として次式を得る。

$$\zeta_P = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(6 + \sqrt{2\psi})\psi}{2(2-\psi)}}, \quad \zeta_Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(6 - \sqrt{2\psi})\psi}{2(2-\psi)}} \quad (22)$$

この最適減衰を表す式 (22) を有次元で表すと、それぞれの定点に関する最適抵抗  $R_P$ ,  $R_Q$  がつぎのように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} R_P &= \frac{\phi}{2} \sqrt{\frac{L}{m} (6 + \sqrt{\frac{2}{kL}\phi})}, \\ R_Q &= \frac{\phi}{2} \sqrt{\frac{L}{m} (6 - \sqrt{\frac{2}{kL}\phi})} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

この平均を最適電気抵抗  $R_{opt} = (R_P + R_Q)/2$  とする。

表 1 の系において、式 (19) と (23) から、最適静電容量  $C_{opt} = 20$  mF と最適電気抵抗  $R_{opt} = 1.0$   $\Omega$  が求まり、これをシャント回路に組み込んだ電磁共振ダンパを用いた場合の共振曲線は図 5 のようになる。定点  $P$ ,  $Q$  の振幅が等しく、かつ、その付近で振幅が最大となり、最大振幅  $X_{max}$  が抑制されている。このときの最大振幅は振幅比の形  $X_{nmax}$  および有次元の形  $X_{max}$  でそれぞれ次式で表される。

$$X_{nmax} = \sqrt{\frac{2}{\psi}} \quad (24)$$

$$X_{max} = F \sqrt{\frac{2L}{k\phi^2}} \quad (25)$$

この最適設計により、式 (9) と式 (24) の比較から、 $2-\psi$  が正であるならば、コンデンサを加えた共振回路を利用することによって制振効果を向上することができる。

#### 4. 各種パラメータの影響

前節で示した電磁共振ダンパの制振特性が、ダンパを構成する抵抗  $R$ , コイル  $L$ , コンデンサ  $C$  などの電気素子の誤差や温度特性の影響により、どの程度悪化するかを調べる必要がある。そこで、各パラメータについて、解析により得られた最適値から変動がある場合の制振特性の変化を調べる。

**4.1 電磁アクチュエータ係数  $\phi$  の影響** 電磁アクチュエータ係数  $\phi$  が制振効果に与える影響を図 6 に示す。縦軸は振幅  $X$  と最適時の振幅  $X_{opt}$  の比を表しており、 $\phi$  が設計値  $\phi_0$  より小さくなると制振効果は単調に小さくなる。一方、 $\phi$  が設計値  $\phi_0$  より大きい場合は制振性能はあまり悪化しない。よって、 $\phi$  が設計値  $\phi_0$  より小さくならないことが重要であり、そのために、たとえば、適当な磁石の磁束密度  $B_0$  の

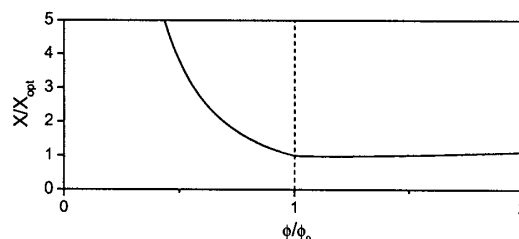


Fig. 6 Effect of damper coefficient  $\phi$

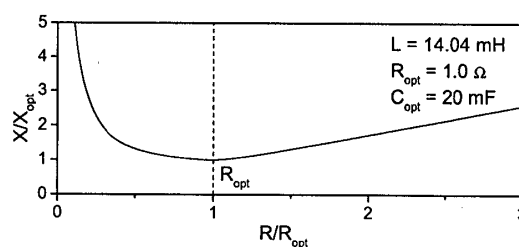


Fig. 7 Influence of the error of resistance  $R$

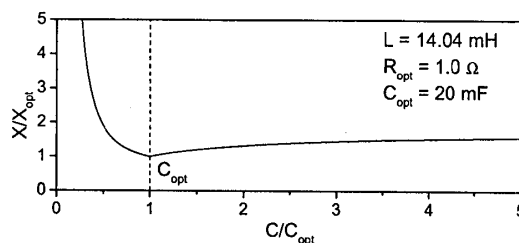


Fig. 8 Influence of error of the capacitance  $C$

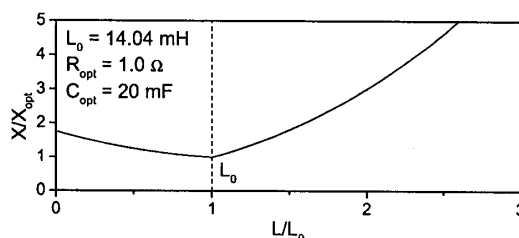


Fig. 9 Influence of the error of inductance  $L$

選択, ボイスコイルモータの形状の決定, 磁路の漏れパーミアンスの計算や実測値との同定などによる有効磁束密度  $B = \alpha B_0$  の正確な測定などが重要になる。

**4.2 電気抵抗の変動の影響** 最適設計された電磁共振ダンパにおいて、電気抵抗の誤差がある場合の制振効果への影響を図 7 に示す。横軸は、最適抵抗値  $R_{opt}$  で無次元化してある。図 7 から、たとえば制振時の最大振幅を最適状態から 2 割程度の増加に抑えようとすると、電気抵抗の変動幅は  $\pm 40\%$  くらい許容される。

**4.3 コンデンサのキャパシタンス誤差の影響** コンデンサの誤差がどれほど制振効果に影響を与えるかを解析した結果を図 8 に示す。実際の静電容量  $C$  が

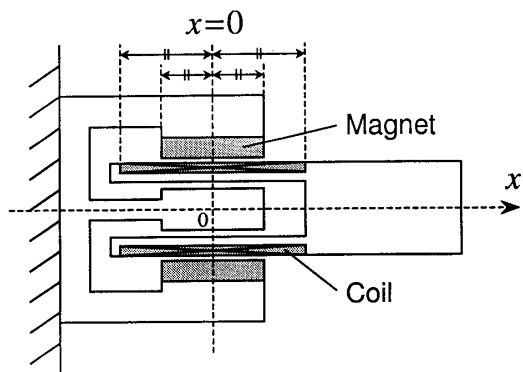


Fig. 10 Setup of the voice coil motor (Experiment)

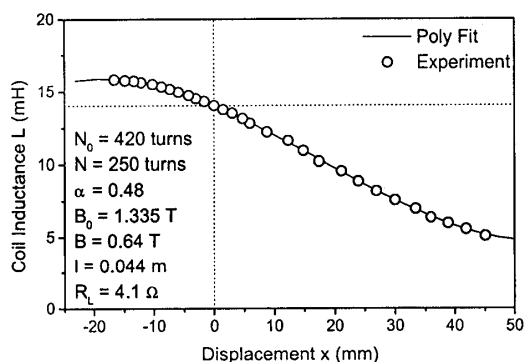


Fig. 11 Variation of the inductance of the voice coil motor (Experiment)

最適静電容量  $C_{opt}$  よりも小さい場合には制振効果が著しく悪化することがわかる。一方で、静電容量  $C$  が最適静電容量  $C_{opt}$  より大きい場合には、そのずれが制振効果に与える影響は小さい。よって、設計段階で計算される最適静電容量よりも若干大きな容量を導入することによって、誤差による制振効果の大きな悪化は防ぐことができる。

**4.4 コイルのインダクタンスの変動の影響** コイルのインダクタンスは、コイルの形状、巻数、導線の材質、太さなどによって変化する。設計段階におけるコイルのインダクタンスの予測値と実際値との誤差が、電磁共振ダンパの制振効果にどれほど影響を与えるかを調べた結果を図9に示す。解析に用いたインダクタンス値は  $L_0 = 14.0$  mH であるが、 $L$  がその値より例えば  $\pm 50\%$  程度の範囲内であれば、振動効果への影響は比較的少ないことがわかる。

**4.5 振動変位によるインダクタンス変動の影響** 本研究で用いるボイスコイルモータでは、可動コイル部の位置によりインダクタンス  $L$  が変化する。そのインダクタンス変動が制振効果に与える影響につい

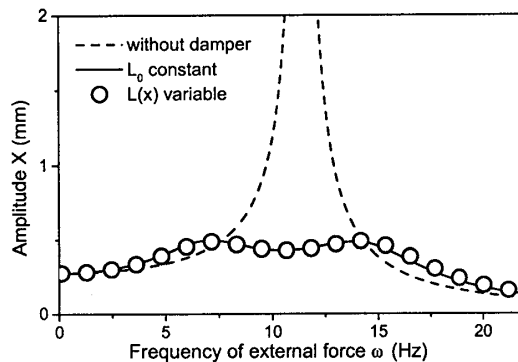


Fig. 12 Influence of the variation of inductance

て調べる。図10に示すように、振動中心をコイルの中心と磁石の中心を合わせた位置とし、この座標を原点とする。LCRメータを用いて、作製したボイスコイルモータの振動中心  $x = 0$  付近の可動量  $x$  に対してのインダクタンス  $L(x)$  を計測した結果を図11に示す。このように、ボイスコイルモータ可動部の運動によりコイルのインダクタンスが変化する。図11中の実線は、最小二乗近似した次式(26)の三次の近似曲線を表している。

$$\begin{aligned}
 L(x) &= L_0 + L_1x + L_2x^2 + L_3x^3 \\
 \left. \begin{aligned}
 L_0 &= 14.04 \text{ mH} \\
 L_1 &= -0.17 \text{ mH/mm} \\
 L_2 &= 5.85 \times 10^{-5} \text{ mH/mm}^2 \\
 L_3 &= -3.09 \times 10^{-3} \text{ mH/mm}^3
 \end{aligned} \right\} \quad (26)
 \end{aligned}$$

この式(26)を用い、インダクタンスの位置に関する変化の影響を調べた結果を図12に示す。実線はインダクタンスが一定であるとした場合の式(13)から得られる応答曲線を示し、○印のプロットはインダクタンスが式(26)のように変動するときの式(2),(4)のシミュレーション結果を示す。振幅  $X=1$  mm 程度の範囲内ではインダクタンスの位置に関する変化量が小さいため、制振特性にはほとんど影響を与えないことがわかる。

## 5. 実験

**5.1 実験装置** 振動実験装置を図13に示す。直動ベアリングで1方向に運動を固定した質量の一端をコイルばねで支持した1自由度系に加振器を取り付け、ファンクションジェネレータとアンプにより、この1自由度系を正弦加振する。電磁共振ダンパのエネルギー変換部としてボイスコイルモータを設置し、そのシャント回路として電気抵抗  $R$ 、コンデンサ  $C$ 、電流計を直列に接続した共振回路を構成する。

Table 2 Parameters of experimental system I

$m$	0.97 kg	$k$	5314 N/m
$c$	0.8 N·s/m	$N_0$	320 turns
$N$	250 turns	$\alpha$	0.48
$B_0$	1.335 T	$\phi$	7.05
$l$	0.044 m	$R$	3.1 $\Omega$
$L$	8.4 mH	$C$	1.0 F
$R_{opt}$	0.8 $\Omega$	$C_{opt}$	50 mF

Table 3 Parameters of experimental system II

$m$	0.854 kg	$k$	4678 N/m
$c$	0.66 N·s/m	$N$	250 turns
$L$	0.3564 H	$\phi$	5.72
$R$	4.1 $\Omega$	$R_0$	1.2 $\Omega$
$C$	0.5186 mF	$C_{RLC_{opt}}$	0.517 mF
$R_{RLC_{opt}}$	4.52 $\Omega$	$R_{RL_{opt}}$	26.5 $\Omega$

機械構造物の振動は、一般に、比較的低周波の固有振動数であるので、電気共振周波数  $\sqrt{1/LC}$  を低周波に設定する必要がある。実験装置 I では、その要求の実現に向けて大容量コンデンサを用いた。実験装置 I の各要素のパラメータを表 2 に示す。一方、実験装置 II では、電子インダクタ<sup>(2)(9)</sup>を作成することにより大きなインダクタンス値  $L$  を実現し、その要求を満たした。実験装置 II の各要素のパラメータを表 3 に示す。

**5.2 制振実験結果** 装置 I を用いた実験結果を図 14 に示す。図 14(a) 中の ○ および ● は電磁共振ダンパを設置しない場合と設置した場合の最大振幅を示し、図 14(b) 中の ● は電磁共振ダンパを設置した場合のシャント回路の最大電流値の実験結果を示す。また、点線および実線は、実験装置のパラメータのときの式 (13) から得られる理論解であり、実験結果と非常に良く一致している。

理論解析で得られる最適設計パラメータ値  $C_{opt}, R_{opt}$  を用いた場合の応答曲線を図中に破線で重ねて示す。

実験装置 I では、最適電気抵抗  $R_{opt}$  の要求値がダンパのボイスコイル部の抵抗値よりも小さいため、理論解析で得られた最適設計を実現できていない。しかし、制振により最大振幅 0.7 mm と抑制することができ、その有効性を確認することができたことや、実験結果と解析結果が十分に一致していることから、電磁共振ダンパのモデル化が正しいことは確認できる。

インダクタンス  $L$  が小さいコイルと大容量コンデ

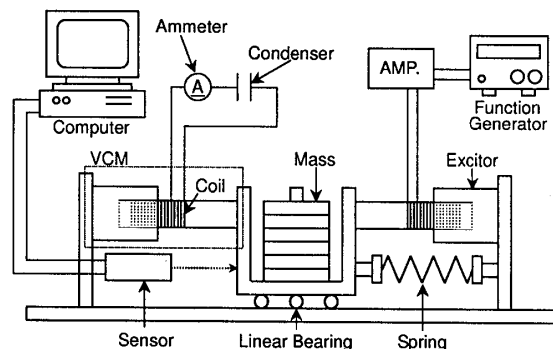


Fig. 13 Experimental apparatus

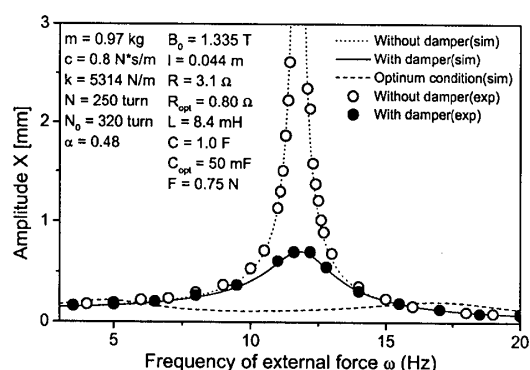
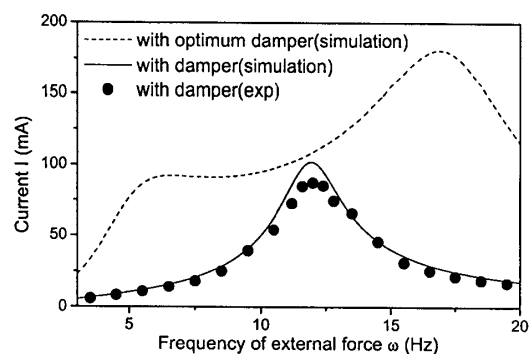
(a) Resonance curve of amplitude  $X$ (b) Resonance curve of current  $I$ 

Fig. 14 Resonance curve (Experiment)

ンサ  $C$  を用いたこの実験装置 I のような場合には、式 (23) からわかるように最適電気抵抗  $R_{opt}$  が小さくなる傾向がある。この場合には、ボイスコイルモータの磁石の磁束密度  $B$  やコイルの有効巻数  $N$  など増やしたり、コイルの形状を工夫して  $\alpha$  を大きくすることにより、電磁アクチュエータ係数  $\phi$  を大きくする必要がある。

つぎに、電子インダクタ  $L$  を用いて大きなインダクタンス  $L$  を実現した実験装置 II のパラメータを表 3 に示す。この電子インダクタを用いて大きな  $L$  の値を実現すると、最適抵抗値  $R_{opt}$  を実験装置 I の場合に比べて大きくすることができ、実験装置 II の場合

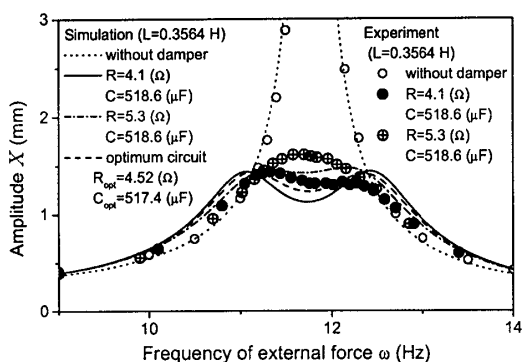
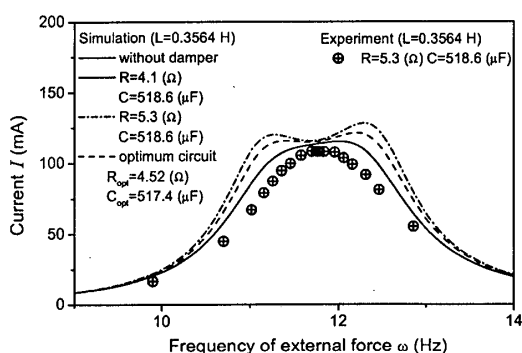
(a) Resonance curve of amplitude  $X$ (b) Resonance curve of current  $I$ 

Fig. 15 Resonance curve (Experiment)

は  $R_{opt}=4.52$   $\Omega$  となる。得られた  $C_{opt}$ ,  $R_{opt}$  をほぼ実現して行った実験結果を図 15 に ● および ⊕ で示す。⊕ はシャント回路中の電流を測定するためにシャント回路に電流計を直列に接続した場合であり、得られた電流値を図 15(b) に示す。例えば図 15(a) の  $R=4.1$   $\Omega$  の場合を見ると、● で示す実験結果が実線の理論結果にかなり対応しており、最適設計時の制振特性が実験によって確認できた。

この装置 I と装置 II の結果から、最適同調・最適減衰の実現については、とくに最適電気抵抗  $R_{opt}$  の実現の観点から見ると、最適式 (23) からインダクタンス  $L$  を大きくするほど容易になることがわかる。また、電磁アクチュエータ係数  $\phi$  も大きいほどよい。

一方、制振時の最大振幅を小さくしたい要求からは、式 (25) から、電磁アクチュエータ係数  $\phi$  は大きいほどよいが、インダクタンス  $L$  が大きくなると最大振幅値が大きくなる傾向にあるため、インダクタンス  $L$  をできるだけ小さくすることが要求される。

したがって、本研究で提案する電磁共振ダンパの制振性能を高めるためには、電磁アクチュエータ係数  $\phi$  は大きいほどよく、最適同調・最適減衰のための最適電気抵抗  $R_{opt}$  が実現可能な範囲でできる限り小さなインダクタンス  $L$  の値を選定することが重要である。

なお、電磁共振シャントダンパの有用性を確認するために、実験装置 II の電子インダクタを用いた場合の最適 RL シャント回路 (式 (11) より最適抵抗  $R_{opt}=26.5$   $\Omega$ ) についても実験した。この最適 RL シャント回路を用いた制振時の最大振幅は理論解析および実験共に  $X=7.5$  mm 程度になり、図 15 で示した最適電磁共振シャントダンパの方がより制振できることを確認した。

## 6. 結 論

以上に述べてきた解析、実験の結果から本研究では次のような結論を得た。

1. 電磁アクチュエータにより振動エネルギーを電気エネルギーに変換し、電気共振回路により電流を増幅することによる、電磁共振ダンパによる振動制御システムを提案した。
2. 電磁共振ダンパの最適設計方法を提案し、最適同調条件と最適減衰条件を満足するための最適パラメータの設計式を導出した。
3. 実験により、電磁共振ダンパのモデル化の妥当性を確認し、最適設計時に制振特性に関する理論解析の妥当性を確認した。
4. 理論解析と実験により、通常の RL シャントダンパに対する電磁共振ダンパの有効性を示した。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、実験装置の製作にあたりご協力いただいた青山正樹技官に謝意を表します。

## 文 献

- (1) Hagood, N.W. and Von Flotow, A, *J. Sound Vib.*, 142-6(1991), pp243-268.
- (2) 高木・他 4 名, 機論 C, 69-688, (2003), pp3183-3190.
- (3) 長松・他, *ダイナミクスハンドブック*, 朝倉書店 (1993)
- (4) *振動のダンピング技術*, 日本機械学会編, 養賢堂 (1998)
- (5) 永井・他 3 名, 機論 C 63-611 (1997), pp2337-2242.
- (6) 須田・他 2 名, 機論 C 63-613 (1997), pp3038-3038.
- (7) 米村・他 2 名, 機論 C 65-632(1999), pp1374-1380.
- (8) Behrens, S et al., *Proc. of the IEEE/ASME Int. Conf. on AIM 2003* (2003), pp1145-1150.
- (9) Hollkamp, J.J., *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 5, (1994), pp49-57.