形状記憶合金を用いた動吸振器に関する研究* (履歴減衰のモデル化について)

日 野 順 市^{*1}, 稲 井 新^{*2}
高 木 均^{*1}, 芳 村 敏 夫^{*1}

A Study of Dynamic Mass Damper with Shape Memory Alloy (Modelling for Hysteretic Damping)

Junichi HINO^{*3}, Arata INAI,
Hitoshi TAKAGI and Toshio YOSHIMURA

^{*3} Department of Mechanical Engineering, The University of Tokushima,
2-1 Minamijosanjima, Tokushima-shi, Tokushima, 770-8506 Japan

The shape-memory alloy and the super-elastic alloy have the attenuation characteristic by hysteresis and the temperature dependence characteristic of the rigidity. Use of the shape-memory alloy as the vibration control material is often thought by using these characteristics. In this research, the super-elastic alloy is used for a material of the dynamic vibration absorber. The hysteretic characteristic of super elastic alloy is described by the Preisach-type model. The Preisach operator was developed to model hysteresis in magnetism. The super-elastic alloy has the hysteresis characteristic and the temperature dependence characteristic of the rigidity. The vibration controlling effect is verified by the experiment and the simulation by controlling temperature.

Key Words: Dynamics Absorber, SMA, Super-elasticity, Hysteresis Characteristic, Preisach model

1. 緒 言

形状記憶・超弾性合金(SMA)⁽¹⁾⁽²⁾は、近年多くの工業製品に用いられているが、その特性として比較的大きなヒステリシス特性を持つため、ひずみエネルギーを蓄積することにより振動や衝撃のエネルギーを吸収し緩和することに優れている^{(3)~(5)}。また、動吸振器は構造物の振動を抑制する制振装置の一つとして広く用いられている。動吸振器⁽⁶⁾には、アクティブ形、セミアクティブ形、パッシブ形のものがあるが、制振効果という点からはアクティブ形のものが優れているが、パッシブ形のものの長所としては、コストおよび耐久性などの優れた点が存在する。

ここでは、超弾性材料の減衰特性に加え温度依存性に着目し、これらの特性を利用した動吸振器の制作を行う。動吸振器は補助質量とばねおよびダンパの総合的な効果により、主振動系の振動を制御するものである。動吸振器に用いられるダンパは減衰が大きければ良いというものではなく、主振動系との関係により適

切な大きさが存在する。超弾性材料の減衰特性は、一般的な鋼などに比べると大きい、油圧ダンパや高分子材料に比べると大きいとはいえない。したがって、動吸振器のばね・ダンパ部に超弾性材料によるばねを用いた動吸振器を提案する。また、SMAの履歴特性を発揮させるために、ある程度の初期ひずみを与える必要があると考えられるので、コイル状のSMAばねに予荷重を加えて用いた。

本研究での動吸振器の設計には、超弾性材料の履歴特性を表すことが求められる。ここでは、磁性材料のヒステリシス特性を表すためのモデルであるPreisachモデル⁽⁵⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾を用いて、温度変化する場合の超弾性ばねの履歴特性を表し、動吸振器の動特性を表すことを目的とする。作成した動吸振器モデルについて、温度依存特性を考慮して、周波数応答および時刻歴応答を求め、計算値と実験値の比較を行う。これにより、Preisachモデルによるモデル化の妥当性および形状記憶合金の温度を変化させる⁽⁹⁾ことによる制振の効果について考察する。

2. Preisach モデルによる SMA 特性同定

Preisach モデルは元々磁性材料のヒステリシス挙動を模擬するためのモデルである⁽⁷⁾⁽⁸⁾。しかし、あら

* 原稿受付 2004 年 11 月 1 日。

^{*1} 正員、徳島大学工学部(☎770-8506 徳島市南常三島町 2-1)。

^{*2} 学生員、徳島大学大学院工学研究科。

E-mail: hino@me.tokushima-u.ac.jp

ゆるヒステリシス系に十分適用できるため、ここでは動吸振器に使用される SMA ばねのヒステリシス特性模擬のために用いる⁽⁶⁾。実験で得られた SMA ばねのヒステリシスループを図 1 に示す。Preisach モデルで用いられる Preisach 関数は、形状記憶合金(超弾性)特有の相転移(FOT: First Order Transition)により生じるヒステリシスシステムを表し、実験データ(FOT data points)から決定する。一般に、Preisach 関数は

$$f_{SMA}(x) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) H_{\alpha, \beta}[\delta(x)] d\alpha d\beta \quad \cdots (1)$$

で表される。ここで、 $\mu(\alpha, \beta)$ は重み関数であり、 $H_{\alpha, \beta}[\delta(x)]$ はヒステリシスリレー演算子である⁽⁵⁾⁽⁷⁾。 α および β は図 1 で示されるように、それぞれ伸び(変位増加 UP)側・縮み(変位減少 DOWN)側の変位を示す。

式(1)の $H_{\alpha, \beta}[\delta(x)]$ は 0 または 1 の値のみを持つので、式(1)は以下のように書き換えられる⁽⁸⁾。

$$F(\alpha_1, \beta_1) = \iint_{T(\alpha_1, \beta_1)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad \cdots (2)$$

ここでは、SMA ばねが、初期ひずみのない状態から α_1 まで伸ばされ、 β_1 まで縮められたときのヒステリシスループを示し、それに対応する α - β ダイアグラムが図 2 に示される。図中の矢印は、 α 軸に平行なものが伸び側、 β 軸に平行なものが縮み側を表している。灰色の部分にはヒステリシス特性を表すリレー演算子を含む領域を表す。式(2)をさらに簡略化した表記

Fig. 1 Hysteretic characteristics of SMA

Fig. 2 Schematic of identification input

$$F(\alpha_N, \beta_{N-1})_{UP} = f_{\alpha_N \beta_{N-1}} - f_{\alpha_{N-1} \beta_{N-1}} \quad \cdots (3)$$

$$F(\alpha_N, \beta_N)_{DOWN} = f_{\alpha_N \beta_{N-1}} - f_{\alpha_N \beta_N} \quad \cdots (4)$$

により、SMA ばねの復元力 f_{SMA} を表すものとする。ここで、 N はばねの伸縮の回数を表している。

また、実験により得られた SMA ばねのヒステリシスループの一例を図 3 に示す。これを模式的に描いたものが、図 1 である。Preisach モデルで用いられる Preisach 関数は、形状記憶合金(超弾性)特有の相転移(FOT)により生じるヒステリシス特性を表し、容易に図 1 の実験データ(FOT data points⁽⁶⁾)から決定できる。すなわち、SMA ばねの復元力は式(3)、(4)により表される。ここで、図 2 の特性を Preisach 関数で描かれる FOT 曲面として明確化したものを図 4 に示す。SMA ばねによる力 f_{SMA} は、Preisach 関数を用いて

$$f_{SMA}(x)_{UP} = \sum_{k=1}^N [F(\alpha_k, \beta_{k-1}) - F(\alpha_k, \beta_k)] + F(x, \beta_N) \quad \cdots (5)$$

$$f_{SMA}(x)_{DOWN} = \sum_{k=1}^{N-1} [F(\alpha_k, \beta_{k-1}) - F(\alpha_k, \beta_k)] + F(\alpha_N, \beta_{N-1}) - F(\alpha_N, x) \quad \cdots (6)$$

として求められる。ここで、 k はヒステリシスループのサイクル数を表す。式(5)、(6)は、 N 回めまでの

Fig. 3 Spring force of super-elasticity material for displacement

Fig. 4 Experimental FOT curves data

累積を表している。また、SMA ばねのばね剛性は、図4のFOT曲面の伸び方向の傾きであると考えられる。すなわち、伸び側では

$$k_{\text{SMA}}(x)_{\text{UP}} = (F(\alpha_i, \beta_N) - F(\alpha_{i-1}, \beta_N)) / (\alpha_i - \alpha_{i-1}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $\{\alpha_{i-1}, \alpha_i | \alpha_{i-1} \leq x < \alpha_i\}$ である。縮み側では

$$k_{\text{SMA}}(x)_{\text{DOWN}} = -(F(\alpha_N, \beta_j) - F(\alpha_N, \beta_{j-1})) / (\beta_j - \beta_{j-1}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $\{\beta_{j-1}, \beta_j | \beta_{j-1} \leq x < \beta_j\}$ である。

次に、SMA のヒステリシス特性が温度依存性を持つことはよく知られている。ここでは、温度による剛性の変化に着目する。本研究においては、SMA の温度調整により動吸振器のばね定数を変化させることにより、制振効果の調整を行うことから、温度によるSMA の特性変化についても考慮する。すなわち、ある温度におけるSMA のばね剛性は、いくつかの温度でのFOT曲線データを作成し、それらのデータを補間することにより求める。

3. 動吸振器のモデル化

動吸振器付き構造物の解析モデルを図5に示すように、特定モードで振動する構造物を1自由度系でモデル化した2自由度システムとする。ただし構造物の減衰は小さいと仮定し減衰要素は考慮しない。実験モデルの制作の都合上、動吸振器は左右両側からばねで支えられているものと仮定する。

図1に見られるように、振動によりSMA ばねにひずみが生じる場合、SMA ばねの伸び側と縮み側によってその特性が変化する。したがって、図5の動吸振器部に使用される左右のSMA ばねのパラメータは異なるものと考えられるので、それぞれ $k_L^{\text{SMA}}, k_R^{\text{SMA}}$ とする。また、この2自由度モデルにおいて、ばね剛性 k_{SMA} と非線形ばね力 f_{SMA} (以下、添字 SMA は省略) は1階部と2階部の相対変位に依存するため、 m_2 左右のばねの相対変位を

Fig. 5 Dynamic absorber model with SMA

$$X_L = (x_1 - x_2) + X_{\text{strain}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$X_R = (x_1 - x_2) - X_{\text{strain}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

とおく。ただし、 $X_{L,R}$ は初期ひずみ X_{strain} を含む。

$X_{L,R}$ を Preisach モデルへ適用することにより、SMA ばね剛性と非線形ばね力を得る。したがって、この2自由度モデルの運動方程式は

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + f(X_L)_L + f(X_R)_R = F_0 \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - f(X_L)_L - f(X_R)_R = 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。

この運動方程式の解法には直接数値積分法を用いる。ここでは、反復計算を含む線形加速度法を用いる⁽¹⁰⁾。逐次積分の刻み時間を Δt とすると、線形加速度法では時刻 $t + \Delta t$ における平衡方程式を逐次計算することで、各時刻での加速度・速度・変位を求める方法である。上述の運動方程式を行列・ベクトル形式に書き直した非線形増分式は

$$\mathbf{M}^{t+\Delta t} \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}^{t+\Delta t} \dot{\mathbf{U}} + {}^{t+\Delta t} \mathbf{K} \Delta \mathbf{U} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - {}^t \mathbf{F} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、変位増分を $\Delta \mathbf{U} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{U} - {}^t \mathbf{U}$ としている。 $\mathbf{M}$ は質量行列、 $\mathbf{C}$ は減衰行列、 $\mathbf{R}$ は外力を示し、 ${}^t \mathbf{F}$ はSMA による非線形力 $f(X_{L,R})_{L,R}$ を表す。 ${}^{t+\Delta t} \mathbf{K}$ は変位増分に対するSMA ばねの接線剛性行列である。すなわち、

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k(X_L)_L + k(X_R)_R & \\ & -k(X_L)_L - k(X_R)_R \\ & & k(X_L)_L + k(X_R)_R \end{bmatrix}$$

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{U} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad {}^{t+\Delta t} \mathbf{R} = \begin{bmatrix} F_0 \sin \omega(t + \Delta t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^t \mathbf{F} = \begin{bmatrix} f(X_L)_L + f(X_R)_R \\ -f(X_L)_L - f(X_R)_R \end{bmatrix}$$

非線形増分式(13)より

$$\Delta \mathbf{U} = \bar{\mathbf{K}}^{-1} {}^{t+\Delta t} \bar{\mathbf{R}} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$\bar{\mathbf{K}}$: 実効剛性、 $\bar{\mathbf{R}}$: 実効荷重 ($\bar{\mathbf{K}}, \bar{\mathbf{R}}$ は非線形成分を含む) である。以下の式より解を得る。

$${}^{t+\Delta t} \ddot{\mathbf{U}} = a_1 \Delta \mathbf{U} + a_2 \dot{\mathbf{U}} + a_3 \ddot{\mathbf{U}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$${}^{t+\Delta t} \dot{\mathbf{U}} = {}^t \dot{\mathbf{U}} + a_4 ({}^{t+\Delta t} \dot{\mathbf{U}} + {}^t \dot{\mathbf{U}}) \quad \dots\dots\dots (16)$$

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{U} = {}^t \mathbf{U} + \Delta \mathbf{U} \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここで、 $a_1 \sim a_4$ の式は線形加速度法において定められた定数である。ここで、非線形成分を含むため

$$\bar{\mathbf{K}} \delta \mathbf{U}^{(i)} = \mathbf{R}_{t+\Delta t} - \mathbf{F}_{t+\Delta t}^{(i-1)} - \mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t}^{(i)} - \mathbf{C} \dot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t}^{(i)} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\Delta \mathbf{U}^{(i+1)} = \Delta \mathbf{U}^{(i)} + \delta \mathbf{U}^{(i)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

ただし, (i) は各時刻での反復回数を表す。さらに式 (18) を使って各時間で運動方程式が平衡な状態になるまで, すなわち δU が微小になるまで反復する。

4. 実 験

本研究では, シミュレーションおよび実験により, 超弾性合金の温度を制御することにより, 動吸振器の超弾性合金ばねの剛性を変化させて構造物の振動を抑制できるかを検証する。

図 6 には実験装置の概略を示している。従来は超弾性合金を線材として利用していた。すなわち, 曲げ変形をする棒ばねとして用いていた。本研究においては, 振動吸収エネルギーを増大させる目的と SMA ばねに初期ひずみを与えることが容易であるためコイル状にしたものを用いることにした。コイル状の SMA ばねは, 形状未記憶の超弾性合金を熱処理することにより作成した。ここで作成されたコイル状の SMA ばねを動吸振器部のばねとして用いた。また, SMA ば

ねの温度制御は通電加熱により温度を変化させた⁽⁹⁾。質量の振動はレーザ変位計(KEYENCE LB-080)により測定する。主質量系に取付けた小形加振器に 0.12 kg の質量を振動させて加振力を与えた。また, 加速度計により質量の加速度を測定した。

まず, 動吸振器部の 1 自由度系のみを考慮する。SMA ばねに通電加熱を行い, 温度変化によるばね定数の変化を測定する。次に, 主振動系を含めた 2 自由度を考える。SMA ばね部の温度変化による振幅倍率を測定する。ある温度に対する振幅倍率の極大点における強制振動の周波数により加振した際の主振動系の時刻歴応答を測定し, SMA ばねを温度変化させたときの時刻歴応答と温度を測定する。シミュレーションにおいては, 線形加速度法を用い, 刻み時間は $\Delta t = 0.005$ s で 40 秒間行う。外力は正弦波として与えた。実験装置の各パラメータは表 1 に示す。ここで, X_{strain} は実験装置の SMA ばねに与えた初期伸びを示す。

また, シミュレーションで使用する SMA ばねの特性を調べる必要がある。使用する SMA ばねのヒステリシス特性を Preisach モデルにより同定する。図 7 に SMA ばねの荷重-伸び関係を実験により求めた。ここでは, 20°C および 70°C のときのヒステリシス

Table 1 Experimental parameters

m_1	m_2	k_1	X_{strain}
2.68[kg]	0.58[kg]	3936.0[N/m]	0.038[m]

Fig. 6 Experimental apparatus

Fig. 7 Hysteretic loop of SMA

Fig. 8 FOT curves data at 70°C

Fig. 9 Interpolation of FOT curves

ループを示す。温度によるこ配の違いと伸び側と縮み側の経路の差が確認できる。この荷重-伸び関係より FOT 曲面を作成する。20°C および 70°C で FOT 曲面が、それぞれ図 4 および図 8 に示される。ここで、温度により変化する FOT 曲面の特性を線形補間することにより、温度により変化する SMA の特性変化に対応する。

図 9 は違った温度により得られる FOT 曲面データを用いることにより、測定した温度以外のヒステリシス特性を求めるための補間について示した。ある温度での FOT 曲面を $FOT^{(1)}$ とし、それとは違う温度では $FOT^{(2)}$ とする。各面上において、得られた α , β を囲む四つのデータ点を頂点とした平面を考える。各平面上で、 α , β に対応する点、 $F(\alpha, \beta, T_1)$ および $F(\alpha, \beta, T_2)$ を求め、さらに温度に比例するように線形補間して $F(\alpha, \beta, T)$ を求める。

図 10 は、SMA ばねに初期ひずみを与えた際にも特性を表せるかどうかを調べるために、ばねの伸びを完全に戻さずに伸縮させた際の荷重-伸び関係を示している。Preisach モデルによるヒステリシスループは、実験により得られた荷重-伸び関係を表していることがわかる。この結果から初期ひずみを与えた場合も特性を表すことが確認できた。また、大ループ内の小ループについても一致していることから、ばねのひずみが小さい場合にも特性が表せていると考えられる。このことから、一度実験を行い FOT 曲面が作成できれば、測定した範囲内のひずみには対応できるものと考えられる。

5. 結果および考察

動吸振器を含む 2 自由度系において、主振動系の加振器により励振し、主質量の振幅倍率を測定することにより、動吸振器の特性を調べた。SMA ばねを 20°C、

50°C および 70°C と変化させた場合の主振動系の振幅倍率を図 11(a) に示す。温度の上昇とともにばね剛性が大きくなるので、振幅倍率のピークが高周波数側へシフトしていることがわかる。図 11(b) は、シミュレーションによる結果である。シミュレーションおよび実験の振幅倍率を比較すると、ピーク値は実験値のほうが大きくなっているが、ピークの振動数および温度上昇にしたがいピーク位置がシフトしていく傾向は同様であることがわかる。これらの要因は、SMA ばねの温度変化によるばね剛性の変化のため動吸振器の動特性が変わるためである。

実験値と計算値の周波数応答の比較では、ピーク位置に関してはほぼ傾向が一致しているように見えるが、ピークの大きさについては両者の間には差が見られる。振動数の低いピーク (約 30 rad/s) では実験値のほうが振幅倍率が大きく、振動数の高いピーク (約 50 rad/s) では計算値のほうが大きくなっている。これは、両者の間の履歴減衰に差があることを示している。Preisach モデルによる同定を行う際に求めた荷重-伸び関係についての問題点を考えると、モデル化をするために求めるヒステリシスループのばねの変形量は十分大きな変形を与えて測定したが、実際に振動している際の変形量が小さいため、実験で得られたヒステリシスループ内部の小ループでしか変形していな

Fig. 10 Comparison of experimental and preisach model hysteretic loop at 20°C

(a) Experiment

(b) Simulation

Fig. 11 Amplitude of frequency response function

いものと考えられる。すなわち、FOT 曲面の一部しか用いていないと考えられる。FOT 曲面は、測定したデータ点から格子状の点を選び、その間は線形補間しているため、小ループのみの変形では精度が不足していたため、実験値との差が出たのではないと思われる。

SMA ばねの温度を変化させた際の主質量部の変位応答を以下に示す。図 12(a)は SMA ばねの温度の変化を測定したものである。室温の影響を受けにくくするために SMA ばねの初期温度を約 33°C として、主質量に 30.63 rad/s で加振力を加えた。その際、図 11 の周波数応答から、主質量は共振のピークとなっていることがわかる。また、図 12(b)からも振動応答が大きくなっていることがわかる。30 秒少し前から通電量を増し SMA の温度を上昇させると、それに伴い振

幅が減少していることがわかる。80 秒の時点で、温度はおおよそ 79°C になった。そのときの振幅が小さくなっており、SMA ばねの温度上昇により共振のピークが高周波側に移動したためと考えられる。図 12(c)は同条件でのシミュレーション結果を示している。シミュレーションでは、時刻 0 秒での初期条件を変位および速度とも零としているために、始めは振動が成長しているが 10 秒には振幅は定常状態に達している。ここでは実験値の振幅よりも大きくなっているが、これは温度が低いとこでは、低い振動数のピーク高について両者の差は比較的小さいため、振幅の大きさが逆転したのではないかとと思われる。

次に SMA ばねの温度を加熱状態から冷却した場合の応答変位を測定した。図 13(a)および(b)に、それぞれ SMA ばねの温度変化と主質量の振動振幅の実験

Fig. 12

Fig. 13

値を示す。図 13(c) は同条件でのシミュレーション結果である。実験結果は、SMA ばねの初期温度は約 78°C で、26 秒あたりから加熱を中止し自然冷却させた状態での温度変化であり、80 秒時には約 28°C まで下がった。主質量系の振幅については、始め加振振動数 31.73 rad/s で共振していたが、温度が下がることにより共振点をはずれ振幅が減少していくことがわかる。シミュレーションにおいては、加熱時と同様に時刻 0 秒において初期条件を変位および速度を零としているため、振動が成長するのに時間がかかっているが、およそ 15 秒後には振幅は実験値よりも大きくなっている。時刻 26 秒から温度を下けているが、実験に比べて振幅の減少が速いことがわかる。また、振動波形も温度変化に比例して減少していることがわかる。一方、実験値ではいったん振幅が減衰した後、若干増加しているように見える。振動波形も小さくなるような現象も見られる。

SMA ばねの温度は、熱電対を用いて一つのばねの表面の一点を測定している。本実験装置では複数の SMA ばねを組合わせて用いているので、過渡的な温度変動に対しては、ばね全体を代表していない可能性もあると思われる。特に、加熱時よりも冷却時のほうが、温度変化後の実験値とシミュレーション値の間の応答に差が見られる。これは、加熱時は通電加熱のため SMA ばね全体が同時に熱せられるが、冷却時には室温中での自然空冷となるので、場所による違いなど生じるためであると考えられる。現在は、温度調整は手動で変化させている。温度制御を加えることにより、通電加熱を行う際の温度上昇についての応答はもっと早くできると考えられるが、冷却については、図 13(a) は温度変化開始以後、全く通電を行っていない状態での変化を示しているため、現在の装置では温度の下降速度を今以上に速くすることは困難であると思われる。図 11(a), (b) の周波数応答からわかるように、SMA ばねの減衰については、期待していたよりは小さく、共振点のピーク値が大きいことが問題となる。この解決法として、一つは迅速に共振点を移動させること、すなわち温度変化を高速に行うこと。もう一つは、使用する温度範囲では超弾性特性を持たない減衰要素としてのみ働く SMA を組合わせて利用することが考えられる。

6. 結 言

本研究は、形状記憶合金の超弾性特性を利用した動吸振器について考察した。形状記憶合金には、ヒステリシス特性に加え温度依存性が存在するので、磁性材料のヒステリシス挙動を模擬するためのモデルである Preisach モデルについて、温度による特性変化に対応可能であるような改良をした Preisach モデルを提案した。SMA ばねの荷重-伸び関係を実験により求め、数種の温度での FOT 曲面を作成することにより、温度依存性を持つヒステリシス特性がモデル化できる。振幅倍率および時刻歴について、実験とシミュレーションにより比較したが、提案したモデルは SMA ばねの特性を十分再現できている。

今後は温度制御を加えることにより、SMA ばね特性の変化をより速くすること、および提案したモデルを用いて動吸振器の設計を行うことが課題である。

文 献

- (1) 田中喜久昭・戸伏壽昭・宮崎修一, 形状記憶合金の機械的性質, (1993), 7-61, 養賢堂。
- (2) 戸伏壽昭・ほか 3 名, 形状記憶材料とその応用, (2004), 25-63, コロナ社。
- (3) Lagoudas, D. C., Khan, M. M. and Mayes, J. J., Modelling of Shape Memory Alloy Springs for Passive Vibration Isolation, *Proc. IMECE'01*, (2001), 201, New York.
- (4) 山下義隆・増田新・曾根彰, 形状記憶合金ワイヤを用いた免震装置, D & D 2003 講演論文集, (2003-9), 103.
- (5) Khan, M. M. and Lagoudas, D. C., Modelling of Shape Memory Alloy pseudoelastic spring elements using Preisach model for passive vibration isolation, *Proc. 9th SPIE Smartstructures/NDE Modelling, Signal Processing and Control 2002*, (2002), 336-347, San Diego.
- (6) 芳村敏夫・横山隆・日野順市, 基礎振動工学, (1992), 60, 共立出版。
- (7) Yu, Y., Xiao, Z., Naganathan, N. and Dukkipati, R. V., Preisach Modelling of Hysteresis for Piezoceramic Actuator System, *JSME Int. J.*, Ser. C, 44-2 (2001), 553-560.
- (8) 鈴木孝明・松本英治, 拡張 Preisach モデルを用いた磁気力学的構成式の定式化(強磁性体の応力磁化効果), 機論, 69-687, A (2003), 1649-1656.
- (9) 朱玉田・ほか 4 名, 形状記憶合金の自己感知・過熱防止加熱法, 計測自動制御学会論文集, 40-3 (2004), 287-292.
- (10) 藤川猛・ほか 4 名(日本機械学会編), 数値積分法の基礎と応用, (2003), 87, コロナ社。