ひずみ速度の影響を考慮した多孔質形状記憶合金の
構成式モデリング*都 井 裕^{*1}, 崔 大 坤^{*2}Constitutive Modeling of Porous Shape Memory Alloys
Considering Strain Rate EffectYutaka TOI^{*3} and Daegon CHOI^{*3} Institute of Industrial Science, The University of Tokyo,
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

The existing one-dimensional constitutive model for shape memory alloys is extended to take into account the porosity and the strain rate effect by using the internal state variables representing the porosity and the martensite volume fraction. The proposed constitutive equation is applied to the simulations for the quasi-static and the dynamic behaviors of dense and porous shape memory alloys at various temperatures and strain rates. The calculated results are compared with the uniaxial test results for dense and porous NiTi alloys to illustrate the validity of the present constitutive modeling. It is expected that the finite element program implementing the proposed constitutive equation will be a powerful tool to predict the mechanical behaviors of various porous shape memory alloy devices.

Key Words: Computational Mechanics, Structural Analysis, Constitutive Modeling, Strain Rate, Porous Shape Memory Alloy, Superelasticity

1. 序

21 世紀の材料研究開発では、人間に優しく、信頼性が高く、省資源、省エネルギーなどを具現化しうるインテリジェント材料への期待が膨らんでいる。さまざまな材料の中でも形状記憶合金(shape memory alloys: SMA)は、自ら環境の変化を感じるセンサ機能、環境の変化に対応して適切な行動を起こすアクチュエータ機能や制御機能を有する材料としてこれまでさまざまな用途開発が行われ、実用化されている。軽量かつ良好な生体適合性のため、宇宙航空分野と医学用の骨インプラントへの応用も可能である⁽¹⁾。これらの応用において形状記憶合金が有する形状記憶効果(shape memory effect)と超弾性(superelasticity)の二つの機能が広範囲に利用されている反面、形状記憶合金の高いエネルギー散逸能力についてはわずかな研究しか行われていない。形状記憶合金のエネルギー吸収能に加えて、多孔質形状記憶合金(porous shape memory alloys)は動的荷重に対する高い比減衰能力

をもち、多孔度のこう配を有する形状記憶合金の製作もできる長所を有する⁽²⁾。多くの可能性を有する多孔質形状記憶合金素子の設計と開発の効率化および合理化のためには、計算による力学的挙動予測が不可欠である。多孔質形状記憶合金の構成式モデルとして、Nemat-Nasser ら⁽³⁾と Entchev ら⁽⁴⁾による微視的物理的アプローチに基づく定式化がある。

本研究では、巨視的現象論的アプローチによる基本構成式モデルとして形状記憶合金に対する著者ら⁽⁵⁾の一次元構成方程式を選択する。この構成方程式を多孔度とひずみ速度の影響を考慮したモデルに拡張し、Zhao ら⁽¹⁾、Nemat-Nasser ら⁽³⁾⁽⁶⁾の実験結果と比較することにより本構成式モデルの妥当性を検証する。

以下、2 章では多孔質形状記憶合金の構成方程式の定式化、3 章では密な SMA と多孔質 SMA を用いて行われた準静的および動的計算結果と実験結果との比較について述べる。最後の 4 章は結論である。

2. 多孔質形状記憶合金の構成方程式

2・1 静的構成方程式 本研究で対象とする形状記憶合金の力学的性質を図 1 に模式的に示す。図 1(a)は超弾性(実線矢印)および形状記憶効果挙動(破線矢印)であり、図 1(b)は変態臨界応力と温度の関係

* 原稿受付 2006 年 12 月 28 日。

^{*1} 正員、フェロー、東京大学生産技術研究所(〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)。^{*2} 正員、東京大学大学院工学系研究科。

E-mail: toi@iis.u-tokyo.ac.jp

である。図中の σ は応力, ε はひずみ, T は温度, σ_f^{cr} と σ_s^{cr} はマルテンサイト変態終了および開始臨界応力, C_M と C_A は温度に対する変態臨界応力の傾き, M_f と M_s はマルテンサイト変態終了および開始温度, A_s と A_f はオーステナイト変態開始および終了温度である。図 1(b) において A_f よりも高い一定温度で応力を増加し再び除荷すれば, 図 1(a) に示すような超弾性挙動が発現する。

一般に形状記憶合金の一次元の応力-ひずみ関係は次式により記述される。

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \Omega \cdot \xi_s + \theta \cdot T \quad (1)$$

ここに, ξ_s は応力誘起によるマルテンサイト体積率, E は縦弾性係数, Ω は変態係数, θ は熱弾性係数であり, 下添字 0 は初期値を表す。

最大残留ひずみを ε_L とすると, Ω は以下のように表される。

$$\Omega = -\varepsilon_L E \quad (2)$$

縦弾性係数 E は, マルテンサイト体積率 ξ の関数

(a) Superelastic behavior and shape memory effect

(b) Critical stresses for transformations vs. temperature

Fig. 1 Mechanical properties of shape memory alloys

として次のように表される。

$$E = E_a + \xi(E_m - E_a) \quad (3)$$

ここに, E_m はマルテンサイト相, E_a はオーステナイト相の縦弾性係数である。温度誘起によるマルテンサイト体積率を ξ_T とすると, 全マルテンサイト体積率 ξ は

$$\xi = \xi_s + \xi_T \quad (4)$$

と表される。 ξ , ξ_s および ξ_T は温度 T と応力 σ の関数である。

Drucker-Prager 形の相当応力は次のように表される。

$$\sigma^{DP} = \sigma_e + 3\beta p \quad (5)$$

ここに, σ_e は von Mises の相当応力, β は材料定数, p は静水圧であり,

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (6)$$

と表される。本論文の数値例では, Auricchio と Taylor⁽⁷⁾ による $\beta=0.15$ を用いている。本研究では単軸応力状態のみを扱っており, 多孔質形状記憶合金の超弾性挙動が軸方向垂直応力 σ_z のみに支配されると仮定すると, 相当応力として次式が用いられる。

$$\sigma^{DP} = |\sigma_z| + 3\beta\sigma_z \quad (7)$$

多孔度(porosity)を考慮するため, Zhao ら⁽¹⁾ に従い, 多孔度 f を用いることにする。

$$0 \leq f \leq 1 \quad (8)$$

多孔度を考慮すると, 縦弾性係数, 変態係数, Drucker-Prager 形の相当応力は次のように表される。

$$\bar{E} = E(1 - \eta_E f) \quad (9)$$

$$\bar{\Omega} = -\varepsilon_L \bar{E} = -\varepsilon_L E(1 - \eta_E f) \quad (10)$$

$$\bar{\sigma}^{DP} = \frac{\sigma^{DP}}{1-f} = \frac{|\sigma_z| + 3\beta\sigma_z}{1-f} \quad (11)$$

ここに, η_E は材料定数であり, $(\bar{\quad})$ は多孔度を考慮した係数を意味する。本論文の数値例では, Toi と Kiyosue⁽⁸⁾ を参照して $\eta_E=3$ を用いている。したがって, 式(1)は以下のように書き直すことができる。

$$\sigma = \bar{E} \cdot \varepsilon + \bar{\Omega} \cdot \xi_s + \theta \cdot T \quad (12)$$

式(11)を形状記憶合金の ξ , ξ_s および ξ_T の発展方程式⁽⁵⁾に導入することにより, マルテンサイト相への変態過程およびオーステナイト相への変態過程に対する以下の発展方程式が得られる。すなわち,

(i) マルテンサイト相への変態過程

$T > M_s$ および $\sigma_s^{cr}(1+\beta) + C_M(1+\beta)(T-M_s) < \bar{\sigma}^{DP} < \sigma_f^{cr}(1+\beta) + C_M(1+\beta)(T-M_s)$ の場合:

$$\xi_s = \frac{1-\xi_{s0}}{2} \cos \left\{ \frac{\pi}{(\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr})} \left[\frac{\bar{\sigma}^{DP}}{(1+\beta)} - \sigma_f^{cr} \right] \right\}$$

$$-C_M(T-M_s)\Bigg] + \frac{1+\xi_{s0}}{2} \dots\dots\dots (13)$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1-\xi_{s0}} (\xi_s - \xi_{s0}) \dots\dots\dots (14)$$

$T < M_s$ および $\sigma_s^{cr}(1+\beta) < \bar{\sigma}^{DP} < \sigma_f^{cr}(1+\beta)$ の場合：

$$\xi_s = \frac{1-\xi_{s0}}{2} \cos\left\{\frac{\pi}{(\sigma_s^{cr}-\sigma_f^{cr})}\left[\frac{\bar{\sigma}^{DP}}{(1+\beta)} - \sigma_f^{cr}\right]\right\} + \frac{1+\xi_{s0}}{2} \dots\dots\dots (15)$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1-\xi_{s0}} (\xi_s - \xi_{s0}) + \Delta T_\varepsilon \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 $M_f < T < M_s$ および $T < T_0$ の場合には

$$\Delta T_\varepsilon = \frac{1-\xi_{T0}}{2} \{1 + \cos[a_M(T-M_f)]\} \dots\dots\dots (17)$$

その他の場合は

$$\Delta T_\varepsilon = 0 \dots\dots\dots (18)$$

(ii) オーステナイト相への変態過程

$T > A_s$ および $C_A(1+\beta)(T-A_f) < \bar{\sigma}^{DP} < C_A(1+\beta)(T-A_s)$ ：

$$\xi = \frac{\xi_0}{2} \left\{1 + \cos\left[a_A\left(T-A_s - \frac{\bar{\sigma}^{DP}}{C_A(1+\beta)}\right)\right]\right\} \dots\dots\dots (19)$$

$$\xi_s = \xi_{s0} - \frac{\xi_{s0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi) \dots\dots\dots (20)$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi) \dots\dots\dots (21)$$

ここに、 a_M と a_A は次式のように定義される。

$$a_M = \frac{\pi}{M_s - M_f}, \quad a_A = \frac{\pi}{A_f - A_s} \dots\dots\dots (22)$$

2.2 ひずみ速度の影響を考慮した構成方程式

本節では、ひずみ速度の影響を考慮した多孔質形状記憶合金の構成方程式について述べる。ひずみ速度は次のように定義する。

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} \dots\dots\dots (23)$$

以下では、次の符号関数を用いる。

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} +1, & \text{if } x > 0 \\ 0, & \text{if } x = 0 \\ -1, & \text{if } x < 0 \end{cases} \dots\dots\dots (24)$$

一般的な多孔質形状記憶合金の応力-ひずみ関係式(12)を時間に関して微分すると、以下のように表される。

$$\dot{\sigma} = \dot{E} \cdot \varepsilon + E \cdot \dot{\varepsilon} + \dot{Q} \cdot \xi_s + \dot{Q} \cdot \xi_s + \theta \cdot \dot{T} \dots\dots\dots (25)$$

また、多孔度を考慮した縦弾性係数と変態係数の式(9)、(10)を時間に関して微分すると、以下のように表される。

$$\dot{E} = \dot{E}(1-\eta_{ef}) = \dot{\xi}(E_m - E_a)(1-\eta_{ef}) \dots\dots\dots (26)$$

$$\dot{Q} = -\varepsilon_L \dot{E} = -\varepsilon_L \dot{\xi}(E_m - E_a)(1-\eta_{ef}) \dots\dots\dots (27)$$

式(25)に、数値時間積分のためのオイラー公式(Euler's formula)を適用すると、以下のように書き直すことができる。

$$\sigma_{n+1} - \sigma_n = \bar{E}_n \Delta \varepsilon_n + \Delta t_n \{ \dot{E}_n \varepsilon_n + \text{sign}(\sigma_n) \dot{Q}_n \xi_{sn} + \text{sign}(\sigma_n) \dot{Q} \xi_{sn} + \text{sign}(\sigma_n) \theta \dot{T}_n \} \dots\dots\dots (28)$$

ひずみ速度の影響を考慮するため、マルテンサイト相への変態過程およびオーステナイト相への変態過程における発展方程式(13)～(22)を以下のように拡張する。この拡張は形式的に、ひずみ速度の影響を考慮したマイクロクラッキング脆性固体の構成式モデルを参照している⁽⁹⁾。マルテンサイト体積率の時間変化率に関する発展方程式は、粘塑性流れ則⁽¹⁰⁾と形式的に類似している。

(i) マルテンサイト相への変態過程

$T > M_s$ の場合：

$$\textcircled{1} \quad \bar{\sigma}^{DP} \leq \sigma_s^{cr}(1+\beta) + C_M(1+\beta)(T-M_s) : \xi = 0 \dots\dots\dots (29)$$

$$\dot{\xi} = 0 \dots\dots\dots (30)$$

$\textcircled{2} \quad \xi < 1$ および $\bar{\sigma}^{DP} > \sigma_{MS1}(\xi)$ ：

$$\dot{\xi}_s = \frac{1}{\eta} \left\{ \frac{\bar{\sigma}^{DP}}{\sigma_{MS1}(\xi_s)} - 1 \right\}^\gamma \dots\dots\dots (31)$$

$$\dot{\xi} = \frac{1}{\eta} \left\{ \frac{\bar{\sigma}^{DP}}{\sigma_{MS1}(\xi)} - 1 \right\}^\gamma \dots\dots\dots (32)$$

ここに、 η は粘性係数、 γ は材料定数であり、 $\sigma_{MS1}(\xi)$ と $\sigma_{MS1}(\xi_s)$ は次式のように定義される。

$$\sigma_{MS1}(\xi) = (1+\beta) \left[\sigma_f^{cr} + C_M(T-M_s) + \frac{(\sigma_s^{cr}-\sigma_f^{cr})}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{2\xi-\xi_0-1}{1-\xi_0} \right) \right] \dots\dots\dots (33)$$

$$\sigma_{MS1}(\xi_s) = (1+\beta) \left[\sigma_f^{cr} + C_M(T-M_s) + \frac{(\sigma_s^{cr}-\sigma_f^{cr})}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{2\xi_s-\xi_{s0}-1}{1-\xi_{s0}} \right) \right] \dots\dots\dots (34)$$

$\textcircled{3} \quad \xi \geq 1$ ：

$$\xi = 1 \dots\dots\dots (35)$$

$$\dot{\xi} = 0 \dots\dots\dots (36)$$

$T < M_s$ の場合：

$\textcircled{1} \quad \bar{\sigma}^{DP} \leq \sigma_s^{cr}(1+\beta)$ ：

$$\xi = 0 \dots\dots\dots (29)$$

$$\dot{\xi} = 0 \dots\dots\dots (30)$$

$\textcircled{2} \quad \xi < 1$ および $\bar{\sigma}^{DP} > \sigma_{MS2}(\xi)$ ：

$$\dot{\xi}_s = \frac{1}{\eta} \left\{ \frac{\bar{\sigma}^{DP}}{\sigma_{MS2}(\xi_s)} - 1 \right\}^\gamma \dots\dots\dots (37)$$

$$\dot{\xi} = \frac{1}{\eta} \left\{ \frac{\bar{\sigma}^{DP}}{\sigma_{MS2}(\xi)} - 1 \right\}^\gamma \dots\dots\dots (38)$$

ここに、 $\sigma_{MS2}(\xi)$ と $\sigma_{MS2}(\xi_s)$ は次式のように定義され

る。

$$\sigma_{MS2}(\xi) = (1 + \beta) \left[\sigma_f^{cr} + \frac{(\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr})}{\pi} \times \cos^{-1} \left(\frac{2\xi - \xi_0 - 1 - 2\Delta T_k}{1 - \xi_0} \right) \right] \quad (39)$$

$$\sigma_{MS2}(\xi_s) = (1 + \beta) \left[\sigma_f^{cr} + \frac{(\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr})}{\pi} \times \cos^{-1} \left(\frac{2\xi_s - \xi_{s0} - 1}{1 - \xi_{s0}} \right) \right] \quad (40)$$

③ $\xi \geq 1$:

$$\xi = 1 \quad (35)$$

$$\xi = 0 \quad (36)$$

(ii) オーステナイト相への変態過程

$T > A_s$ の場合 :

① $\bar{\sigma}^{DP} \geq C_A(1 + \beta)(T - A_s)$:

$$\xi = 1 \quad (29)$$

$$\xi = 0 \quad (30)$$

② $\xi < 1$ および $\bar{\sigma}^{DP} < \sigma_{AS}(\xi)$:

$$\dot{\xi}_s = \frac{1}{\eta} \left\{ \frac{\bar{\sigma}^{DP}}{\sigma_{AS}(\xi_s)} - 1 \right\}^\gamma \quad (41)$$

$$\dot{\xi} = \frac{1}{\eta} \left\{ \frac{\bar{\sigma}^{DP}}{\sigma_{AS}(\xi)} - 1 \right\}^\gamma \quad (42)$$

ここに, $\sigma_{AS}(\xi)$ と $\sigma_{AS}(\xi_s)$ は次式のように定義される。

$$\sigma_{AS}(\xi) = C_A(1 + \beta) \left[T - A_s - \frac{1}{a_A} \cos^{-1} \left(\frac{2\xi - 1}{\xi_0} \right) \right] \quad (43)$$

$$\sigma_{AS}(\xi_s) = C_A(1 + \beta) \left[T - A_s - \frac{1}{a_A} \cos^{-1} \left(\frac{2\xi_s - 1}{\xi_{s0}} \right) \right] \quad (44)$$

Table 1 Material constants of NiTi dense SMAs [50.9 Ni-49.1 Ti (at.%)]

Modulus	E_s (MPa)	75000
	E_m (MPa)	53000
	θ (MPa/°C)	0.55
	β	0.15
Transformation temperatures	A_s (°C)	23.88
	A_f (°C)	43.12
	M_s (°C)	36.05
	M_f (°C)	23.09
Maximum residual strain	ε_{res}	0.023

Table 2 Critical transformation stresses

	Dense SMAs	Porous SMAs
σ_{Ms} (MPa)	-252	-187
σ_{Mf} (MPa)	-1212	-1161
σ_{As} (MPa)	-684	-465
σ_{Af} (MPa)	-95	-87

③ $\xi \leq 0$:

$$\xi = 0 \quad (35)$$

$$\xi = 0 \quad (36)$$

形状記憶合金の高速変形時のひずみ速度依存性には、マルテンサイト変態時の変形に伴う発熱および潜熱に起因する温度上昇により、マルテンサイト変態臨界応力が上昇することが関係している⁽⁶⁾。本節で誘導したひずみ速度依存形の構成方程式は、これらの臨界応力上昇効果を含む高速変形時の材料挙動を、定性的に類似しているマクロ粘塑性理論の数学的形式を借りて表現した現象論的な定式化であり、材料定数の増加も最小限に抑えられている。なお定式化中の温度 T には、上述の温度上昇は含まれない。

3. 計算結果

3.1 多孔質形状記憶合金の静的挙動計算 本節では、密な SMA [50.9 Ni-49.1 Ti (at.%)] および 13% 多孔質 SMA [50.9 Ni-49.1 Ti (at.%)] を対象に行った静的計算結果を Zhao ら⁽¹⁾ の実験結果と比較した。圧縮計算における温度条件は、実験結果に合わせてオーステナイト変態終了温度 (A_f) より高い 58°C

Fig. 2 Compressive stress-strain curves of dense SMAs at 58°C

Fig. 3 Compressive stress-strain curves of 13% porosity SMAs at 58°C

とした。

計算に用いた材料定数を表1に示す。また、マルテンサイト変態臨界応力とオーステナイト変態臨界応力を表2に示す。実験と同様に、ひずみが0.0458に達するまで変形させた。表中の符号“－”は圧縮応力を表す。2種類の試験片に対する計算結果を図2と図3に示す。図2は密なSMA(Dense SMAs)の応力-ひずみ関係、図3は13%多孔質SMA(13% Porosity SMAs)の応力-ひずみ関係である。

応力によりマルテンサイト変態が誘起され、かつ除荷過程で逆変態が完了するため、完全な超弾性挙動が発現する。負荷直後の剛性はオーステナイト相の剛性、除荷直後の剛性はマルテンサイト相の剛性であり、後者の値のほうが小さい。また、多孔質SMAにおける剛性の絶対値は密なSMAより小さい。

総体的に本構成式モデルにより、密なSMAと13%多孔質SMAの静的超弾性挙動が良好に同定されており、本構成式における多孔性のモデリングがほぼ妥当であることがわかる。

Table 3 Material constants of NiTi dense SMAs for low strain rates [50.4 Ni-49.6 Ti(at.%)]

Modulus	E_s (MPa)	35000
	E_m (MPa)	43000
	θ (MPa/°C)	0.55
	β	0.15
	η (sec)	0.15
	γ	4.0
Critical transformation stresses	σ_{Ms} (MPa)	-200
	σ_{Mf} (MPa)	-315
	σ_{As} (MPa)	9
	σ_{Af} (MPa)	32
Maximum residual strain	ε_{rs}	0.052

Fig. 4 Quasi-static stress-strain curves of dense SMAs at a constant temperature of 23°C and the indicated strain rates

3.2 形状記憶合金の準静的挙動および動的挙動計算

本節では、密なSMA [50.4 Ni-49.6 Ti(at.%)]を対象に行った準静的および動的計算結果をNemat-Nasserら⁽⁶⁾の実験結果と比較した。温度条件は常温(23°C)であり、これはオーステナイト変態終了温度(A_f)と一致する。

準静的計算に用いた材料定数を表3に示す。図4には、4種類(1/s, 10⁻¹/s, 10⁻²/s, 10⁻⁴/s)の比較的低いひずみ速度における密なSMAの応力-ひずみ関係に関する計算結果を、実験結果と比較して示す。実験では応力誘起マルテンサイト変態の最中における加工硬化率および除荷後の残留ひずみの大きさにひずみ速度依存性があることが観察されるが、それらの現象が本構成式モデルにより定性的には良好に再現されているが、応力-ひずみ曲線の形状には改良の余地がある。

動的計算に用いた材料定数を表4に示す。図5には、4種類(1080/s, 610/s, 570/s, 330/s)の高ひずみ速度下における密なSMAの応力-ひずみ関係に関する計算結果を、実験結果と比較して示す。総体的に計

Table 4 Material constants of NiTi dense SMAs for high strain rates [50.4 Ni-49.6 Ti(at.%)]

Modulus	E_s (MPa)	40000
	E_m (MPa)	50000
	θ (MPa/°C)	0.55
	β	0.15
	η (sec)	1.8×10 ⁻⁵
	γ	1
Critical transformation stresses	σ_{Ms} (MPa)	-240
	σ_{Mf} (MPa)	-677
	σ_{As} (MPa)	-445
	σ_{Af} (MPa)	10
Maximum residual strain	ε_{rs}	0.05

Fig. 5 Dynamic stress-strain curves of dense SMAs at a constant temperature of 23°C and the indicated strain rates

算結果は実験結果と良好に対応しているが、高速変形に対して同定された材料定数(表4)は、低速変形時の材料定数(表3)と若干異なっており、本構成式モデルにおける材料定数に、さらにひずみ速度依存性が残ることも示唆される。

3.3 多孔質形状記憶合金の準静的挙動および動的挙動計算 本節では、12%多孔質 SMA [49.1 Ni-50.9 Ti(at.%)] に対して圧縮計算を行い、準静的および動的計算結果を Nemat-Nasser ら⁽³⁾の実験結果と比較した。計算に用いた材料定数を表5に示す。準静的計算と動的計算に用いた材料定数は同じである。

準静的計算におけるひずみ速度は 0.001/s である。計算および実験による応力-ひずみ曲線を図6~8に示す。

Table 5 Material constants of 12% porosity SMAs [49.1 Ni-50.9 Ti(at.%)]

Modulus	E_a (MPa)	70000
	E_m (MPa)	30000
	Θ (MPa/°C)	0.55
	C_M (MPa/°C)	4.0
	C_A (MPa/°C)	4.0
	β	0.15
	η (sec)	1.8×10^{-5}
Critical stresses	σ_s^σ (MPa)	0.0
	σ_f^σ (MPa)	500.0
Transformation temperatures	A_f (°C)	13
	A_s (°C)	23.8
	M_s (°C)	-20.0
	M_f (°C)	-46.0
Maximum residual strain	ϵ_{res}	0.09

Fig. 6 Quasi-static stress-strain curves of 12% porosity SMAs at a constant temperature of 23°C and a strain rate of 0.001/s

まず図6は、温度条件がオーステナイト変態終了温度(A_f)とほぼ同じ 23°C の場合の応力-ひずみ関係である。この場合は、ほぼオーステナイト相に戻り、残留ひずみが残らない。すなわち、完全な超弾性挙動を示す。

図7は、温度条件がオーステナイト変態開始温度(A_s)より低い 0°C の場合の応力-ひずみ関係であり、除荷後に大きな残留ひずみが残る。実験結果においては、除荷後にマルテンサイト相とオーステナイト相が混在するように見えるが、これは試験片の材料特性のばらつきによる実験誤差と判断される。

図8は、温度条件がマルテンサイト変態開始温度(M_s)とほぼ同じ -20°C の場合の応力-ひずみ関係である。この場合は、負荷直後からマルテンサイト相への変態が始まり、除荷後に大きな残留ひずみが残る。

Fig. 7 Quasi-static stress-strain curves of 12% porosity SMAs at a constant temperature of 0°C and a strain rate of 0.001/s

Fig. 8 Quasi-static stress-strain curves of 12% porosity SMAs at a constant temperature of -20°C and a strain rate of 0.001/s

Fig. 9 Dynamic stress-strain curves of 12% porosity SMAs at a constant temperature of 23°C and a strain rate of 1 040/s

Fig. 10 Dynamic stress-strain curves of 12% porosity SMAs at a constant temperature of 23°C and a strain rate of 1 300/s

図6～8に示した準静的計算による応力-ひずみ曲線は総体的に実験結果と良好に対応している。

動的計算における温度条件は、実験結果に対応する常温(23°C)である。2種類の高ひずみ速度(1 040/s, 1 300/s)下における応力-ひずみ曲線の計算結果を、実験結果と比較して図9と図10に示す。温度条件がオーステナイト変態終了温度(A_f)とほぼ同じ23°Cであるので、大部分がオーステナイト相に戻り、残留ひずみがほとんど残らない超弾性挙動を示す。高速変形実験を厳密に一定速度で実施するのは困難であり、このことが計算と実験の若干の相違の一因と考えられるが、総体的には両者は良好に対応している。

3・4 総合的考察 3・1節, 3・2節, 3・3節で材料同定を行った形状記憶合金は成分と製造法が異なり、異なる材質を有する⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁶⁾。したがって、表1～5に示

すように異なった材料定数を有する結果となる。これらの材料定数のうち、表1と表5および本文中に記載の変態温度、表1と表5に記載の弾性係数は文献(1)(3)(6)からの引用であり、他の材料定数は2・2節で提案した構成方程式と文献の材料試験結果とが整合するように決定している。

本構成式モデルは、多孔度、温度、ひずみ速度の影響を考慮しており、3・1節では多孔度、3・2節ではひずみ速度、3・3節では多孔度、温度、ひずみ速度の影響に関して、本構成式モデルと材料試験結果が良好に対応することが確認され、提案した構成方程式の妥当性と一般性が、ほぼ実証されたと考えられる。また、本研究で同定した構成式モデルは、類似した材質の形状記憶合金より成る機械部品、構造体の有限要素解析にただちに適用可能である。

4. 結 論

本研究では、ひずみ速度の影響を考慮した多孔質形状記憶合金の力学的挙動予測のため、多孔質形状記憶合金の準静的および動的挙動に対する内部状態変数表示の構成方程式を定式化した。すなわち、形状記憶合金に対する著者ら⁽⁶⁾の一次元構成方程式を、多孔性とひずみ速度の影響を考慮して拡張した。

この構成式モデルを、さまざまなひずみ速度および温度条件下における多孔質形状記憶合金材料の準静的および動的単軸圧縮挙動のシミュレーションに適用し、計算結果を実験結果と比較することにより、提案した構成式モデリングの有用性を実証した。

本構成式モデルは、多孔質形状記憶合金の準静的および動的挙動予測に対する計算モデルとして十分な実用性を有していると考えられるが、今後は実験結果との比較によるいっそうの精度向上を図るとともに、有限要素法などを通じ、機械部品、構造体への応用を進めたい。

文 献

- (1) Zhao, Y. et al., Compression Behavior of Porous NiTi Shape Memory Alloy, *Acta Materialia*, Vol. 53 (2005), pp. 337-343.
- (2) Lagoudas, D. C. et al., Fabrication, Modeling and Characterization of Porous Shape Memory Alloys, *Proceedings of SPIE*, Vol. 4333 (2001-7), pp. 141-150.
- (3) Nemat-Nasser, S. et al., Experimental Characterization and Micromechanical Modeling of Superelastic Response of a Porous NiTi Shape-Memory Alloy, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 53 (2005), pp. 2320-2346.
- (4) Entchev, P. B. and Lagoudas, D. C., Modeling of Transformation-Induced Plasticity and its Effect on the

- Behavior of Porous Shape Memory Alloys. Part II: Porous SMA Response, *Mechanics of Material*, Vol. 36 (2004), pp. 893-913.
- (5) Toi, Y. et al., Finite Element Analysis of Superelastic, Large Deformation Behavior of Shape Memory Alloy Helical Springs, *Computers and Structures*, Vol. 82 (2004), pp. 1685-1693.
- (6) Nemat-Nasser, S. et al., High Strain-Rate, Small Strain Response of a NiTi Shape Memory Alloy, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 127 (2005), pp. 83-89.
- (7) Auricchio, F. and Taylor, R. L., Shape-Memory Alloys: Modelling and Numerical Simulations of the Finite-Strain Superelastic Behavior, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 143 (1997), pp. 175-194.
- (8) Toi, Y. and Kiyosue, T., Three-Dimensional Mesomechanical Analysis of Brittle Solids Containing Microinclusions, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 61, No. 582 (1995), pp. 447-453.
- (9) Toi, Y. and Atluri, S. N., Finite Element Analysis of Static and Dynamic Fracture of Brittle Microcracking Solids, Part 1: Formulation and Simple Numerical Examples, *International Journal of Plasticity*, Vol. 6 (1990), pp. 169-188.
- (10) Owen, D. R. J. and Hinton, E., *Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice*, (1980), p. 285, Pineridge Press Limited.