316 ステンレス鋼の高温繰返し変形に対する非弾性構成式の定式化* (第2報, 広い温度範囲への適用性の検討)

大見 泰明^{*1}, 田中英一^{*2}, 村上 澄男^{*2}

Formulation of Constitutive Models for Cyclic Deformation of Type 316 Stainless Steel at High Temperature (2nd Report, Applicability to Wide Range of Temperature)

Yasuaki OHMI, Eiichi TANAKA and Sumio MURAKAMI

Applicability of the elaborated constitutive equations of cyclic plasticity proposed by the present authors is discussed in detail. New evolution equations of non linear kinematic hardening of the viscoplastic constitutive models developed in the previous paper with special emphasis on the characteristic expansion of the kinematic hardening range observed in the cyclic hardening of type 316s stainless steel at 400°C to 500°C were employed. The predictions of the proposed constitutive equations were compared with the corresponding experimental results of cyclic plasticity for various temperatures and loading conditions. The proposed constitutive equations were found to describe accurately the proportional and non proportional cyclic behavior, in particular the effects of strain amplitude histories, for a wide range of temperatures from room temperature to 700°C.

Key Words: Constitutive Equation, Inelasticity, Plasticity, Cyclic Loading, Non proportional Loading

1. 緒 言

高温機器に広く用いられている 316 ステンレス鋼の繰返し変形を記述する構成式を定式化するために, 前報⁽¹⁾にて, 著者らは室温から 700°Cまでの比例および非比例繰返し変形試験結果の詳細な解析に基づいて, Chaboche 形粘塑性構成式とその硬化変数について検討した。その結果, 316 ステンレス鋼の比例繰返し試験では, 移動硬化変数の変動範囲の拡大が繰返し硬化の大部分を占め, したがって, 移動硬化変数の発展式を定式化するにはこれを考慮する必要があることを示した。これに対して, 非比例負荷ではこの機構以上に等方硬化変数の発達が優勢となり, 著者らが既報⁽²⁾で提案した非比例性を表す内部状態変数を用いた等方硬化変数の発展式と組み合わせることにより精度よく記述できること, さらに, 500°C近傍において顕著となる比例負荷と非比例負荷の硬化速度の差は, 移動硬化変数の変動範囲の発達速度と等方硬化変数の発達速度との違いとして捉えることができることを明らかにした。また, 負荷振幅変動履歴依存性についても, 繰返し

変形の途中でひずみ振幅を増大させた場合には, 移動硬化変数の変動範囲は新たな目標値に向かって拡大を続けるが, 一方, ひずみ振幅を減少させた場合にはひずみ振幅に対応した変動範囲に瞬間的に変化した後には回復を示さないことを明らかにした。さらに, これらの知見に基づいて定式化した粘塑性構成式の有効性を検証するため, 著者らによるいくつかの代表的な繰返し変形試験結果⁽³⁾⁽⁴⁾とこの構成式による計算結果との比較を行い, 精度よい記述が可能であることを示した。

しかしながら, 前報⁽¹⁾では移動硬化変数の変動範囲の発達が著しく大きいために既報⁽⁵⁾⁽⁶⁾で提案した構成式の修正を必要とする 400°C~500°C近傍の実験結果を代表的事例として取り上げ, 新たに提案した構成式の有効性を検証したにすぎない。本研究の目的は, 温度によって硬化機構が異なり, 複雑な温度依存性を示す 316 ステンレス鋼の繰返し変形挙動を幅広い温度範囲に対して記述するための構成式を検討することである。そこで, この論文では, 前報⁽¹⁾で定式化した粘塑性繰返し構成式を用いて室温から 700°Cまでの比例および非比例繰返し変形挙動を計算した結果を, 著者らによる試験結果と比較し, その適用性を検討する。

* 原稿受付 1995 年 1 月 19 日。

^{*1} 正員, 名古屋大学大学院, トヨタ自動車(株)。

^{*2} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)。

2. 構成式の適用性の検討

構成式の適用性の検討に先立ち、前報⁽¹⁾では十分に記述できなかった材料定数と材料関数の同定方法について以下に述べる。

2・1 材料定数と材料関数の同定方法 本構成式に含まれる材料定数は $n, K, k, C_{01}, C_{02}, C_{03}, d_{HK}, d_{SK}, C_{RK}, d_{HI}, d_{SI}, C_{RI}, C_c, r_y$ と a_1, a_2, a_3 の初期値 a_{01}, a_{02}, a_{03} の17個であり、材料関数は $a_{H1}(R), a_{H2}(R), a_{H3}(R), q_P(R), q_N(R)$ の5個である。

本論文の構成式の基礎とする修正 Chaboche 形⁽⁷⁾ 構成式の材料定数の同定方法については、既報⁽⁶⁾に詳細に述べられているので、共通の部分はその概要を述べるに留め、以下では、おもに本研究で変更を加えた移動硬化変数の発展式に関する材料定数と材料関数、および、その影響を受ける等方硬化変数の発展式に関する材料定数と材料関数の同定方法を中心に説明する。

まず K, n は既報⁽⁶⁾より、非弾性ひずみ速度の異なる数種類の単軸単調負荷試験から定めることができ、また、 k は応力-非弾性ひずみ曲線の非弾性ひずみが零のときの応力値から定められる。

次に、移動硬化変数の発展式に関連した材料定数を同定する方法について述べる。本研究の構成式は、単軸繰返し変形試験に対して、

$$S^+ = X^+ + Q + k + K\dot{P}^{1/n} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$S^- = X^- - Q - k - K\dot{P}^{1/n} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と書くことができる。ここで S^+, S^- はそれぞれ $\dot{P} > 0$ および $\dot{P} < 0$ の場合の応力経路、 X^+, X^- は対応する移動硬化変数の経路を示す。なお、繰返し硬化が飽和した状態では a_i は変化しないから、前報⁽¹⁾の式(22)～(24)を積分することにより移動硬化変数の挙動の解析解として、

$$X^+ = \sum_{i=1}^3 a_{si} \left[1 - \frac{\exp(-c_{0i}P)}{\cosh(c_{0i}\Delta P/2)} \right] \text{ when } \dot{P} > 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$X^- = - \sum_{i=1}^3 a_{si} \left[1 - \frac{\exp(c_{0i}P)}{\cosh(c_{0i}\Delta P/2)} \right] \text{ when } \dot{P} < 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

を得る。ここで、 a_{si} は移動硬化変数の変動範囲を規定する変数 a_i の飽和値、 c_{0i} は移動硬化の非線形性を表す定数、 $\Delta P/2$ は飽和状態における非弾性ひずみ振幅である。一方、単軸繰返し変形試験から得た応力-非弾性ひずみ線図の直線部分より、 $2(Q + k + K\dot{P}^{1/n})$ の値を知ることができる。また、 $\dot{P}$ の値も実験から既知であるから、 Q の値を知ることができる。なお、飽和状

態における Q の値は、飽和状態に達するまでに応力-非弾性ひずみ線図の弾性変形領域が拡大した量として読み取ることでもできる。したがって、式(1)～(4)を飽和状態の応力-非弾性ひずみ線図に当てはめることにより、 a_{s1}, a_{s2}, a_{s3} および C_{01}, C_{02}, C_{03} を求めることができる。一方、 a_i の初期値 a_{01}, a_{02}, a_{03} についても、繰返し変形開始直後の応力-非弾性ひずみ線図を用いて同様の方法により決定することが可能である。すなわち、本来1サイクル中の a_i の値は P の変化とともに若干変化することが考えられるが、 a_i の発達速度は X_i の変化に比べて極めて遅いので、前報⁽¹⁾の式(22)～(24)の積分において定数として扱っても問題はなく、 X^+, X^- の挙動に対して上式と同様な解を得る。したがって、繰返し硬化飽和状態の場合と同様な方法を用いて a_{01}, a_{02}, a_{03} を定めることが可能となる。なお、316 ステンレス鋼の各温度での実験結果に対してこれらの材料定数を検討した結果、 C_{01}, C_{02}, C_{03} についてはいずれの温度でも初期サイクルから飽和状態に至るまで変化しないものとして扱ってもよいことがわかった。

さて、本構成式では、移動硬化変数の変動範囲の目標値は、ひずみ振幅依存性をもつものとして材料関数 $a_{H1}(R), a_{H2}(R), a_{H3}(R)$ により規定している。すなわち、処女材に対する一定振幅単軸繰返し変形試験の場合を考えると、前報⁽¹⁾の式(25)～(33)は、

$$\dot{a}_i = d_{HK}(a_{Hi} - a_i)\dot{P}, i=1, 2, 3 \quad \dots\dots\dots (5)$$

と書くことができる。ただし、非弾性ひずみの変化に伴い R が変化するので、 $a_{Hi}(R)$ の値も刻々変化するために解析的に $a_{Hi}(R)$ を求めることは困難である。そこで、ひずみ振幅の異なる数種の単軸繰返し変形試験結果からそれぞれの非弾性ひずみ振幅 $\Delta P/2$ に対応する a_{s1}, a_{s2}, a_{s3} を求め、 R の代わりに $\Delta P/2$ を用いた近似により、次の関数形として与える材料関数 $a_{Hi}(R)$ の各係数を仮に定める。

$$a_{si}|_{\Delta P/2} \cong a_{Hi}(\Delta P/2) \\ = A_{i1}\Delta P/2 + A_{i2}\{1 - \exp(A_{i3}\Delta P/2)\}, i=1, 2, 3 \quad \dots\dots\dots (6)$$

これにより計算を行った結果が実験結果をよく表すように各係数を再度調整すれば比較的容易に $a_{Hi}(R)$ を定めることができる。なお、 a_i の発達速度を表す定数 d_{HK} については、計算結果が前報⁽¹⁾の図3に示すような移動硬化変数の変動範囲-累積非弾性ひずみ関係をよく表すように定めればよい。

次に、等方硬化変数に関する材料定数の同定方法について述べる。まず、比例繰返し変形に対する等方硬化変数の目標値を与える材料関数 $q_P(R)$ の同定方法

について考察する。単軸繰返し負荷の初期サイクルから飽和状態までの等方硬化変数の増大量 δQ は、応力-非弾性ひずみ線図の変化より読み取ることができる。そこで、ひずみ振幅の異なる数種類の単軸繰返し変形試験結果から等方硬化変数の増大量 δQ を求め、 R の代わりに $\Delta P/2$ を用いて、次の関数形として与える材料関数 $q_P(R)$ の各係数を推定することができる。

$$\begin{aligned}\delta Q &\cong q_P(\Delta P/2) \\ &= Q_{P1}\Delta P/2 + Q_{P2}\{1 - \exp(-Q_{P3}\Delta P/2)\} \cdots (7)\end{aligned}$$

ただし、上式で定めた各係数は、本来刻々と変化する R の代わりに $\Delta P/2$ を用いた推定値であるので、これにより定めた材料関数で計算を行った結果が実験結果をよく表すように再度調整する必要がある。

次に、非比例性が最大となったときの等方硬化変数の大きさを定める材料関数 $q_N(R)$ の同定方法を示す。のために、円形経路負荷で繰返し硬化が飽和した状態を考える。このときの応力振幅値は既報⁽⁶⁾と同様な計算によって、

$$\begin{aligned}(\Delta S/2)^2 &= \left[\sum_{i=1}^3 \frac{a_{Si}c_{0i}\Delta P/2}{1+(c_{0i}\Delta P/2)^2} \right]^2 \\ &+ \left[Q_H + k + K\dot{P}^{1/n} + \sum_{i=1}^3 \frac{a_{Si}(c_{0i}\Delta P/2)^2}{1+(c_{0i}\Delta P/2)^2} \right]^2 \\ &\cdots \cdots \cdots (8)\end{aligned}$$

と表される。ここで、 $\Delta S/2$ 、 $\Delta P/2$ 、 $\dot{P}$ は実験から知ることができ、また、 a_{Si} 、 c_{0i} 、 n 、 K 、 k はすでに定めたので、上式によって円形経路繰返し負荷の飽和状態での Q の値を知ることができる。さらに、飽和状態での R と $\bar{A}$ はそれぞれ $\Delta P/2$ と $1/\sqrt{2}$ にほぼ等しいから⁽⁶⁾、前報⁽¹⁾の式(11)は、

$$\begin{aligned}Q_H &= 1/\sqrt{2} [q_N(\Delta P/2) - q_P(\Delta P/2)] + q_P(\Delta P/2) \\ &\cdots \cdots \cdots (9)\end{aligned}$$

と書くことができる。ここで、材料関数 $q_P(R)$ は単軸繰返し試験の結果からすでに定めており、 Q_H も上記によって既知であることから、 $q_N(\Delta P/2)$ の値を求めることができる。そこで、ひずみ振幅の異なる数種の円形経路繰返し変形試験の結果に対して同様な検討を行うことによって、次の関数形として与える $q_N(R)$ の各係数を決定することができる。

$$\begin{aligned}q_N(\Delta P/2) &= Q_{N1}\Delta P/2 + Q_{N2}\{1 - \exp(-Q_{N3}\Delta P/2)\} \\ &\cdots \cdots \cdots (10)\end{aligned}$$

なお、等方硬化変数の発達速度を規定する定数 d_{HI} は、計算結果が円形経路繰返し負荷における応力振幅-累積非弾性ひずみ関係をよく表すように決定する。

次に、ひずみ振幅変動履歴依存性に関わる材料定数の同定方法について述べる。等方硬化変数の履歴依存性の程度を示す定数 C_{RI} については、円形経路繰返し負荷の途中でひずみ振幅を減少させたときの繰返し軟化の目標値が前報⁽¹⁾の式(15)で与えられることから、次式によって定めることができる。

$$C_{RI} = \frac{Q_L - Q_H}{Q_{MAX} - Q_H} \cdots \cdots \cdots (11)$$

ここで、 $Q_L - Q_H$ は先行履歴がある場合とない場合の飽和応力振幅値の差であり、 $Q_{MAX} - Q_H$ はひずみ振幅の大きな先行繰返し負荷とひずみ振幅の小さな後続繰返し負荷をともに処女材に与えた場合の飽和応力振幅値の差から読み取ることができる。なお、等方硬化変数の回復速度を表す定数 d_{SI} は円形経路繰返し変形試験においてひずみ振幅を減少させた場合の応力振幅-累積非弾性ひずみ関係を計算結果がよく表すように調整する。

一方、移動硬化変数の変動範囲の負荷振幅履歴依存性を示す定数 C_{RK} については、ひずみ振幅変動履歴がある場合の a_i の目標値が前報⁽¹⁾の式(28)~(30)で与えられるから、単軸繰返し変形試験の途中でひずみ振幅を減少させた場合の実験結果から次のようにして C_{RK} を求めることができる。まず、硬化または軟化が安定した状態での移動硬化変数の変動範囲の大きさは、式(3)と式(4)から、

$$\Delta X = 2 \sum_{i=1}^3 [a_{Si} \tanh(c_{0i}\Delta P/2)] \cdots \cdots \cdots (12)$$

と表すことができる。ここで、 a_{Si} は硬化または軟化が安定した状態での a_i の値であり、 $\Delta P/2$ はそのときの非弾性ひずみ振幅である。したがって、ひずみ振幅履歴依存性がないとした場合の移動硬化変数の変動振幅の回復量 $\delta(\Delta X)_{RC}$ と実際にひずみ振幅履歴依存性がある場合の先行履歴の残留量 $\delta(\Delta X)_{RM}$ との比は、次式により求めることができる。

$$\begin{aligned}\frac{\delta(\Delta X)_{RM}}{\delta(\Delta X)_{RC}} &= \frac{\sum_{i=1}^3 [a_{Li} \tanh(c_{0i}\Delta P_2/2)] - \sum_{i=1}^3 [a_{Hi} \tanh(c_{0i}\Delta P_2/2)]}{\sum_{i=1}^3 [a_{MAXi} \tanh(c_{0i}\Delta P_2/2)] - \sum_{i=1}^3 [a_{Hi} \tanh(c_{0i}\Delta P_2/2)]} = \frac{\sum_{i=1}^3 [(a_{Li} - a_{Hi}) \tanh(c_{0i}\Delta P_2/2)]}{\sum_{i=1}^3 [(a_{MAXi} - a_{Hi}) \tanh(c_{0i}\Delta P_2/2)]} \\ &\cdots \cdots \cdots (13)\end{aligned}$$

上式の各項の関係を図1に示す。ここで、 $\Delta P_1/2$ と $\Delta P_2/2$ はそれぞれ先行繰返し負荷の飽和状態での非弾性ひずみ

振幅と後続繰返し負荷の安定後の非弾性ひずみ振幅値である。また、 a_{Li} は負荷履歴を受けた場合の a_i の目標値、 a_{Hi} は処女材に対する目標値、 a_{MAXi} は過去における最大値である。一方、前報⁽¹⁾の式(28)～(30)の各式の両辺にそれぞれ $\tanh(c_{0i}\Delta P_i/2)$ を乗じて辺々の和をとり、 c_{RK} について解くと式(13)の右辺と同一の式を得る。すなわち、

$$C_{RK} = \frac{\delta(\Delta X)_{RM}}{\delta(\Delta X)_{RC}} \dots\dots\dots (14)$$

である。したがって、 $\delta(\Delta X)_{RC}$ と $\delta(\Delta X)_{RM}$ の値を前報⁽¹⁾の図8のような単軸繰返し負荷途中でひずみ振幅を減少させた場合の移動硬化変数の変動範囲-累積非弾性ひずみ関係から読み取ることによって c_{RK} を求めることができる。また、移動硬化変数の変動範囲の回復速度を規定する d_{SK} は計算結果がこれらの実験結果をよく表すように決定すればよい。

最後に、材料定数 r_y と C_c については、既報⁽⁶⁾と同様に、それぞれ、平均ひずみが零でない非対称な単軸繰返し負荷試験および十字経路等の C_c の大きさが反映されやすい負荷経路の繰返し変形試験から決定することができる。著者らによる実験結果に基づいて、材料定数および材料関数を同定した結果を表1に示す。

2・2 各温度における繰返し硬化挙動の計算精度

図2から図9に各温度での単軸および円形経路繰返し

変形試験での応力振幅の飽和過程とそれぞれの温度における単軸負荷の応力-ひずみ線図または円形経路負荷に対する応力経路を示す。400℃での単軸繰返し変形試験では、前報⁽¹⁾で示した500℃の場合と同様に移動硬化変数の変動範囲が著しく発達していることが図4(b)より読み取れるが、この挙動は今回提案した移動硬化変数の発展式の導入により精度よく記述できていることがわかる。また、他の温度での単軸繰返し試験

Table 1 Summary of identification

Coeff.	Unit	Temperature °C					
		R.T.	200	400	500	600	700
E	MPa	192000	184000	171000	163000	154000	148000
G	MPa	78000	72000	66000	62000	58000	54000
ν	MPa	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
k	MPa	75	65	59	55	40	30
K	MPa	92	72	49	38	27	16
n		8.0	8.2	9.3	9.6	10	13
a_{01}	MPa	100	65	62	60	65	65
a_{02}	MPa	65	45	25	25	27	20
a_{03}	MPa	35	20	40	40	18	16
C_{01}		1600	1500	1300	1800	3700	4000
C_{02}		500	400	400	500	500	300
C_{03}		50	50	100	100	100	100
r_y		40	50	90	100	480	600
d_{HK}		30.0	8.0	3.0	4.0	17.0	90.0
d_{SK}		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C_{RK}		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
d_{HI}		8.5	12.0	12.0	15.0	15.0	70.0
d_{SI}		3.5	5.0	0.0	0.0	6.9	10.0
C_{RI}		0.4	0.4	1.0	1.0	0.4	0.4
C_c		200	200	200	200	200	100
A_{11}	MPa	2500	4000	10000	8000	8000	2200
A_{12}	MPa	105	70	75	100	98	90
A_{13}		-6000	-3500	-6000	-4000	-4000	-3000
A_{21}	MPa	2500	4000	9000	14000	8000	1800
A_{22}	MPa	70	50	60	60	58	30
A_{23}		-6000	-3500	-6000	-2000	-5000	-3000
A_{31}	MPa	2500	1600	6000	7500	8000	1800
A_{32}	MPa	37	25	47	52	38	23
A_{33}		-6000	-4500	-5000	-2000	-5000	-3000
Q_{P1}	MPa	7500	5000	5000	5000	5000	5000
Q_{P2}	MPa	20	30	25	23	24	10
Q_{P3}		-4000	-4000	-2000	-2000	-2000	-2000
Q_{N1}	MPa	71300	25000	20000	9000	23000	24000
Q_{N2}	MPa	150	250	260	210	110	120
Q_{N3}		-3000	-1750	-1200	-1800	-1900	-200

Fig. 1 Analysis of behavior of kinematic hardening range

(a) Stress amplitude

(b) Experiment

(c) Calculation

Fig. 2 Comparison of calculations with experiments of tension-compression cycles at 200°C

Fig. 3 Comparison of calculations with experiments of circular cycles at 200°C

Fig. 4 Comparison of calculations with experiments of tension-compression cycles at 400°C

Fig. 5 Comparison of calculations with experiments of circular cycles at 400°C

Fig. 6 Comparison of calculations with experiments of tension-compression cycles at 600°C

Fig. 7 Comparison of calculations with experiments of circular cycles at 600°C

Fig. 8 Comparison of calculations with experiments of tension-compression cycles at 700°C

Fig. 9 Comparison of calculations with experiments of circular cycles at 700°C

Fig. 10 Comparison of calculations with experiments of cruciform cycles

Fig. 11 Comparison of calculations with experiments of various loading paths

に対しても極めてよい記述精度が得られた。また、円形経路繰返し試験に対しても、移動硬化変数の変動範囲の発達が著しい400°C~500°Cを含めていずれの温度でも精度よい計算結果を得ている。これは、移動硬化変数の発達が著しい温度領域においても非比例性は等方硬化変数の拡大にのみ影響を与えると仮定し、発達の著しい移動硬化変数の変動範囲と非比例性による等方硬化変数の発達の和によってこの温度領域の非比例負荷繰返し硬化を記述する本構成式の定式化の妥当性を示すものと判断できる。

さらに、十字経路繰返し負荷の記述精度について以

(a) Amplitude increase tests

(b) Amplitude decrease tests

Fig. 12 Comparison of calculations with experiments of amplitude increase/decrease tests at room temperature

(a) Amplitude increase tests

(b) Amplitude decrease tests

Fig. 13 Comparison of calculations with experiments of amplitude increase/decrease tests at 200°C

(a) Amplitude increase tests

(b) Amplitude decrease tests

Fig. 14 Comparison of calculations with experiments of amplitude increase/decrease tests at 600°C

下に検討する。図10(a)には500°Cから700°Cにおける十字経路繰返し変形試験に対する計算結果と実験結果を比較して示す。また、図10(b), (c)には500°Cの場合の応力経路の計算結果と実験結果を比較して示す。これらの図より、十字経路負荷の場合も計算結果は実験結果をよく記述できていることがわかる。また、図11には500°Cにおける十字経路負荷の繰返し硬化挙動を同じ温度での円形経路負荷と単軸繰返し負荷の場合と比較する。十字経路負荷の実験結果は、応力振幅値および硬化速度ともに円形経路負荷と単軸繰返し負荷の中間に位置するが、計算結果はこれを定量的によく再現している。このことは、既報⁽²⁾で提案し、本構成式に採用した非比例性を表す内部変数の発展式、すなわち、前報⁽¹⁾の式(8)~(10)が十字経路の非比例性を適切に記述していることを示すとともに、さらに本論文で非比例性の効果は等方硬化変数の拡大にのみ影響を与え、移動硬化変数の変動範囲の発達には関わらないと仮定したこと、および等方硬化変数の発達速度と移動硬化変数の変動範囲の発達速度は独立なものとして定式化したことの妥当性を示すものであると判断できる。

2.3 負荷振幅履歴依存性の記述精度の検討 図12~14に繰返し変形試験の途中でひずみ振幅を変動させた場合の計算結果を、著者らによる実験結果と比較する。前報⁽¹⁾ですでに報告した400°Cの場合と併せて、広い温度範囲に対して比例および非比例繰返し変形試験における負荷振幅履歴依存性を精度よく記述できることが確認できる。これらの結果は、室温の場合に対して既報⁽²⁾で提案した等方硬化変数の発展式に加え、ひずみ振幅変動後に移動硬化変数の変動範囲も

新たな目標値に向かって発達または回復するとした本論文の移動硬化変数の発展式が、高温下での繰返し変形挙動を記述する上で有効であることを示すものであると判断できる。

3. 結 言

本論文では、前報⁽¹⁾で提案した移動硬化変数の発展式とそれを組み込んだ修正Chaboche形構成式を、室温から700°Cまでの幅広い温度領域での比例および非比例繰返し変形へ適用し、その妥当性を検討した。その結果得られたおもな知見は以下のとおりである。

(1) 本構成式は、単軸繰返し変形および円形経路繰返し変形挙動を室温から700°Cまでの幅広い温度範囲に対してよい精度で記述する。

(2) 円形経路、十字経路、単軸負荷の検討から、非比例性が等方硬化変数の発達にのみ影響を与えたとした仮定に基づく定式化の妥当性を確認した。

(3) 移動硬化変数の変動範囲がひずみ振幅変動後に新たな目標値に向かって発達あるいは回復するとした発展式を採用することにより、ひずみ振幅変動履歴依存性の精度よい記述が可能である。

文 献

- (1) 大見・田中・村上, 機論, 61-590, A(1995), 2206.
- (2) 田中・奥地, 機論, 54-504, A(1988), 1588.
- (3) 村上・河井・青木・大見, 機論, 53-495, A(1987), 2077.
- (4) 村上・河井・大見, 機論, 54-501, A(1988), 1131.
- (5) 田中・竹内, 機論, 57-543, A(1991), 2767.
- (6) Tanaka, E., *Eur. J. Mech., A/Solids*, 13-2, (1994), 155.
- (7) Chaboche, J. L. and Rousselier, G., *Trans. ASME, J. Press. Vessel Technol.*, 105-2(1983), 153.