

## ハステロイ XR の 900°C での定常および非定常多軸応力クリープ\*

大野 信 忠<sup>\*1</sup>, 村上 澄 男<sup>\*2</sup>  
服 部 満<sup>\*3</sup>, 武 藤 康<sup>\*4</sup>Creep of Hastelloy XR in Steady and Nonsteady Multiaxial  
Stress States at 900°CNobutada OHNO, Sumio MURAKAMI,  
Mitsuru HATTORI, and Yasushi MUTOH

Creep of Hastelloy XR in steady and nonsteady multiaxial stress states was investigated experimentally by use of thin-walled tubular specimens at 900°C in air. The following stress conditions were applied to the specimens; (I) four kinds of combined constant tension-torsion, and (II) three kinds of constant tension superposed to cyclically reversed torsion. It was observed that, while only secondary creep prevails under steady stress conditions because of the very high test temperature, cyclically reversed torsion induces marked increase of creep strain rate (i.e., cyclic softening). However, this cyclic softening phenomenon was found to become less noticeable with increase of superposed constant tension. Moreover, the validity of Mises' flow rule was ascertained except just after nonproportional changes of stress state.

**Key Words:** Creep, Hastelloy XR, Ni base Alloy, Stress Reversal, Multiaxial Stress, Cyclic Softening, Constitutive Equation

## 1. 緒 言

日本原子力研究所は高温工学試験研究炉を開発中である。この炉の安全性と信頼性を確保するための一つの重要な設計上の要件は、高温配管の内部断熱構造物や中間熱交換器の伝熱管および管板などの構造寿命を的確に把握することである。これらの高温構造物の材料としてはニッケル基耐熱合金であるハステロイ XR(ハステロイ X の改良材)が用いられるが、最高温度 950°C、最高応力(熱応力) 50~60 MPa という設計条件は耐熱合金にとっても極めて厳しい条件である<sup>(1)</sup>。このため、従来主として行われてきた弾性解析による評価では所定の構造寿命を保証することは不可能であり、非弾性解析を実施し、これに基づく評価を行う必要が生じる。

上述のような極めて高温での非弾性解析を行うためには、ハステロイ XR のクリープ構成式が必要であるが、この材料の高温クリープについての研究は、従来

ほとんど単軸一定荷重下で行われてきた<sup>(2)(3)</sup>。このため、定常および非定常多軸応力のもとでのクリープ変形挙動を明らかにし、それを支配する硬化則および流れ則を検討した研究は数少なく、ハステロイ X に関する浜中らの研究<sup>(4)</sup>が見られるにすぎない。しかし彼らの研究は、むしろ異方硬化形クリープポテンシャルに基づくクリープ構成式の定式化を目的としており、ハステロイ X の非定常多軸クリープに対する検討はほとんど行っていない。なお鶴戸口ら<sup>(5)</sup>は、一定内圧負荷および周期的内圧負荷のもとでのハステロイ X 円管のクリープ試験結果を報告している。

高温工学試験研究炉機器が使用される温度範囲は、800~950°Cである。ハステロイ XR の単軸一定荷重クリープ曲線を観察すると、750°C以上では遷移クリープが極めて小さく、900°Cではまったく見られない<sup>(2)(3)</sup>。このような傾向は、高温での Ni 基合金に見られる共通の特徴であり、遷移クリープが顕著に観察される通常のクリープとは異なる微視的変形機構によるものと考えられる<sup>(6)</sup>。したがって、800~950°Cでのハステロイ XR の多軸クリープ構成式の定式化のためには、まずそのクリープ変形特性を実験によって明らかにする必要がある。特に、上に述べたような単軸一定荷重クリープで観察されたクリープ硬化特性を定

\* 昭和 62 年 4 月 1 日 第 64 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 61 年 9 月 24 日。

\*1 正員、豊橋技術科学大学(〒440 豊橋市天伯町霞雀ヶ丘 1-1)。

\*2 正員、名古屋大学工学部(〒464 名古屋市中千種区不老町)。

\*3 正員、日本ガイシ(株)(〒467 名古屋市長徳区須田町 2-56)。

\*4 正員、日本原子力研究所(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)。

表 1 機械的性質

Tension test at R.T.			Hardness HRB	ASTM grain size number	Creep rupture test 900°C, 51MPa	
0.2% offset yield stress MPa	Tensile strength MPa	Elongation %			Rupture time hr	Elongation %
332	709	54.8	81.5	4	187	76

常および非定常多軸応力のもとで検討することは、興味ある問題である。

本研究では、ハステロイ XR の薄肉円管試験片を用い、試験温度 900°C で、一定引張り-一定ねじり組合せ応力、および一定引張り-繰返し反転ねじり組合せ応力クリープ試験を行い、このような定常および非定常多軸応力のもとでの硬化則および流れ則について検討する。

2. 応力および変形状態の表示

薄肉円管に軸方向引張応力  $\sigma$  とねじり応力  $\tau$  が作用する場合の応力状態は、便宜的に応力ベクトル

$$\sigma = \sqrt{3} \tau e_1 + \sigma_2 \dots\dots\dots (1)$$

によって表示できる。ここで  $e_1$  と  $e_2$  は、正規直交基底ベクトルであり、それぞれ単純ねじり応力状態および単軸引張応力状態を表す。上式の応力ベクトルの方向は、後出の図 2 (a) に示すように、単純ねじり応力の座標軸から測った角度

$$\theta = \tan^{-1}(\sigma/\sqrt{3} \tau) \dots\dots\dots (2)$$

により表すことにする。

一方、クリープひずみ速度に対しては、クリープひずみ速度ベクトル

$$\dot{\epsilon}^c = (\dot{\gamma}^c/\sqrt{3}) e_1 + \dot{\epsilon}^c e_2 \dots\dots\dots (3)$$

を導入できる。ここで  $\dot{\epsilon}^c$  と  $\dot{\gamma}^c$  は、それぞれ薄肉円管の軸方向引張クリープひずみと (工学的) ねじりクリープひずみである。また ( ) は、時間  $t$  に関する微分を示す。

なお、Mises の相当応力  $\sigma_e$  および相当クリープひずみ速度  $\dot{\epsilon}_e^c$  は、それぞれ式 (1), (3) のベクトルの大きさに等しい。すなわち、 $\sigma_e = |\sigma|$ ,  $\dot{\epsilon}_e^c = |\dot{\epsilon}^c|$  である。また、偏差応力テンソルとクリープひずみ速度テンソルの共線性は、応力ベクトル  $\sigma$  とクリープひずみ速度ベクトル  $\dot{\epsilon}^c$  の共線性にほかならない。

3. 試験片および試験装置

試験片は、ハステロイ XR の鍛造丸棒 (直径 32 mm, 長さ 1 m) から機械加工した内径 19 mm, 外径 21 mm, つば間長さ 50 mm の薄肉円管試験片である。その形状を図 1 に示す。また、試験片材料の機械的性質およ

表 2 化学成分 (重量%)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Co	Mo
0.07	0.92	0.28	<0.005	0.00	21.75	<0.05	9.19

W	Fe	B	Al	Ti	N	Ni
0.47	18.13	0.00	<0.05	<0.05	0.002	Bal.

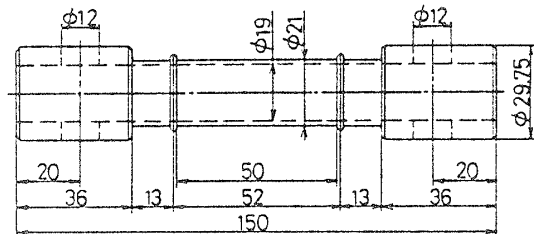


図 1 薄肉円管試験片

び化学成分を、それぞれ表 1 におよび表 2 に示す。

試験機は、島津製作所と共同開発した引張り-ねじり組合せ負荷クリープ試験機<sup>(7)</sup>であり、本研究にはこの試験機 2 台を用いた。

4. 試験条件および内容

試験温度は 900 ± 1.5°C であり、試験片表面に取付けた 2 組の白金-白金ロジウム熱電対により測定した。なお、試験温度への昇温時間および試験開始前の均熱時間は、それぞれ約 2 h および約 16 h とした。

本研究で行った試験は、表 3 に示す 7 種類の大気中クリープ試験であり、その内訳は次のとおりである。

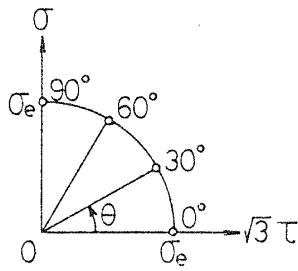
(I) 一定引張り-一定ねじり組合せ応力クリープ試験 (I-1~4)

(II) 一定引張り-繰返し反転ねじり組合せ応力クリープ試験 (II-1~3)

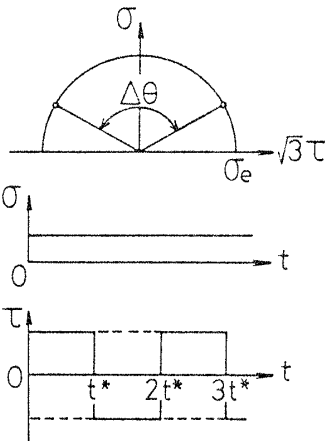
相当応力は、いずれの試験においても  $\sigma_e = 35$  MPa で一定である。したがって試験 (I) の応力状態は、図 2 (a) に示すような半径  $\sigma_e$  の円周上の点として表される。一方、試験 (II) では、図 2 (b) に示すように、半径  $\sigma_e$  の円周上にある二つの応力状態が時間  $t^*$  ごとに交替する。ここで  $t^*$  は、ねじり応力の反転時間を示し、本試験では  $t^* = 168$  h である。また図中の角度  $\Delta\theta$  は、

表 3 試験内容

	Test No.	Equivalent stress	Direction of stress	Change of stress direction	Test time (hr)	Time of stress reversal
		$\sigma_e$ (MPa)	$\theta$ (deg)	$\Delta\theta$ (deg)		$t^*$ (hr)
Combined constant tension-torsion	I-1	35	0	-	840, 1008	-
	I-2	35	30	-	1008	-
	I-3	35	60	-	1008	-
	I-4	35	90	-	1008	-
Combined constant tension and cyclic reversed torsion	II-1	35	0, 130	180	2688	168
	II-2	35	15, 165	150	1344	168
	II-3	35	30, 150	120	2688	168



(a) 試験 I-1~4 ( $\sigma_e=35$  MPa)



(b) 試験 II-1~3 ( $t^*=168$  h,  $\sigma_e=35$  MPa)

図 2 試験応力状態

ねじり応力の反転に伴う、応力ベクトル  $\sigma$  の方向の変化を表す。

試験本数は、各試験 1 本であるが、試験 I-1 については 2 本行った。試験時間は、試験 I では 1000 h を標準とした。一方試験 II では、応力の繰返し反転数の影響を見るため、試験時間はそれより長くし、特に試験 II-1 と II-3 は 2688 h 行った。

なお本研究では、試験片の軸方向伸びに応じて引張荷重およびねじり荷重を減らし、真応力が一定となるようにした。

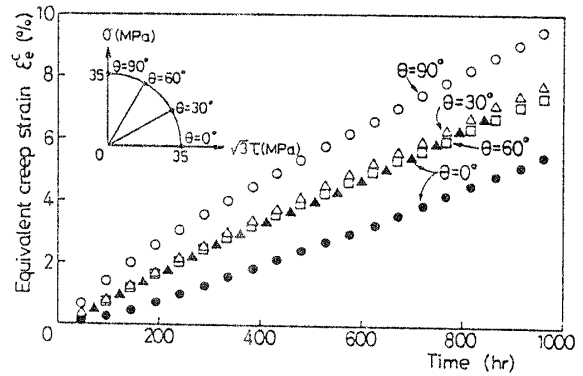


図 3 相当クリープひずみの時間変化 (試験 I-1~4)

### 5. 試験結果および検討

5.1 一定引張り-一定ねじり組合せ応力クリープ  
 試験 I-1~4 で得られた相当クリープひずみの時間変化を、図 3 に示す。図 3 から、 $\theta=90^\circ$  の引張クリープ (記号○) では遷移クリープが見られるが、それはわずかであり、したがって緒言で述べた単軸一定荷重クリープの傾向と同様であることがわかる。一方、 $\theta=0^\circ$  のねじりクリープ (記号●) では、負荷直後に若干の加速クリープが見られる。また、同一時間での相当クリープひずみ量を比べると、 $\theta$  が小さいほど、すなわち単軸引張応力状態よりもねじり応力状態の方がクリープひずみが小さい傾向にある。 $\theta$  に依存するこれらの現象の原因としては、材料の初期異方性などの影響が考えられるが、実験データのばらつきもあり、本試験の結果だけによっては断定できない。

クリープ速度テンソルと偏差応力テンソルの共線性、すなわちクリープ速度ベクトル  $\dot{\epsilon}^c$  と応力ベクトル  $\sigma$  の共線性を調べるため、試験 I-2, 3 におけるクリープひずみベクトル  $\epsilon^c$  の変化をプロットすると、図 4 のようになる。図 4 中の直線は、これらの試験における応力ベクトルの方向 ( $\theta=30, 60^\circ$ ) を示し、Mises の流れ則を仮定した場合のクリープひずみ軌跡である。図に見られるように、応力ベクトルの方向を

示す直線とクリープひずみベクトルの方向を示すデータ点とはよく一致しており、したがってクリープ速度テンソルと偏差応力テンソルの共線性が精度良く成り立つことがわかる。

なお、本論文には報告しないが、相当応力  $\sigma_e = 30$  MPa についても試験 I-1~4 と同様な試験を行い、図 3 および 4 とほとんど同じ結果を得ている。

**5.2 一定引張り-繰返し反転ねじり組合せ応力クリープ** 試験 II-1~3 によって得られたクリープひずみの、応力反転数 6 回までの時間変化を図 5 および図 6 (a), (b) に示す。

まず、一定引張応力  $\sigma = 0$  の場合、すなわち繰返し反転ねじり応力クリープ試験 II-1 の結果 (図 5) について検討する。図 5 から、クリープ速度が応力反転後増加し、これによってクリープひずみ範囲がしだいに大きくなっていくことがわかる。このようなクリープ速度の増加は、応力反転後特に約 50 h の間において顕著であるが、クリープ速度は、その後しだいに減少し、ある値に近づいている。しかしクリープ速度は、初期負荷 ( $t = 0 \sim 168$  h) のもとでの値までは減少していない。なお、このような応力反転の効果は、ハステロイ X の単軸引張り-圧縮クリープ試験 (900°C, 相当応力 39.2 MPa, 反転時間 50 h, 反転回数 6 回) <sup>(4)</sup> の結果と同様な傾向である。

上に述べたように、繰返し応力反転によってハステロイ XR は繰返し軟化する。試験 II-1 におけるクリープひずみ範囲の変化を応力反転数の関数としてプロットすると (図 7 の記号  $\Delta$ )、クリープひずみ範囲は、反転数 5 回まで急激に増大し約 3 倍程度になるが、その後はゆるやかに増大することがわかる。すなわち、応力の繰返し反転に伴う材料軟化は、初期の数サイクル

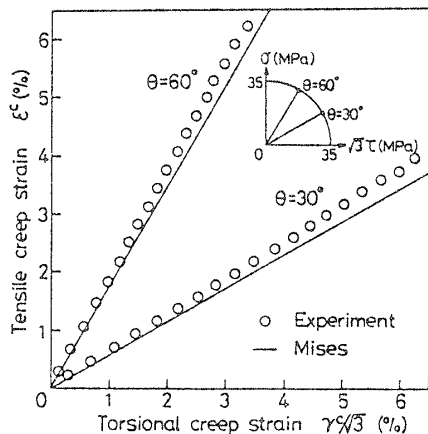


図 4 偏差応力テンソルとクリープ速度テンソルの共線性 (試験 I-2, 3)

において特に顕著に進行する。このような傾向は、ハステロイ XR に対する高温設計を、単軸一定応力クリープ試験の結果だけに基づいて行うことの危険性を意味する。

次に、一定引張応力が重畳されている場合を議論する。まず図 6 (a) の  $\Delta\theta = 150^\circ$  の場合、ねじりクリープひずみ範囲は、ねじり応力の反転数の増加とともに大きくなっており、一定引張応力を重畳しなかった場合 (図 5) と似た傾向である。しかし、前者におけるねじりクリープひずみ範囲の増加は、後者に比べて少し

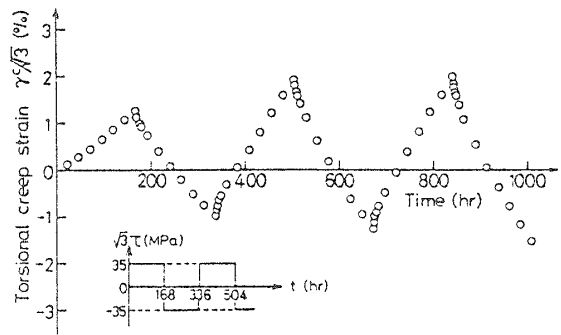
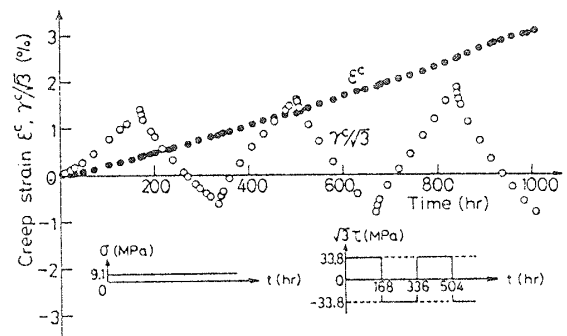
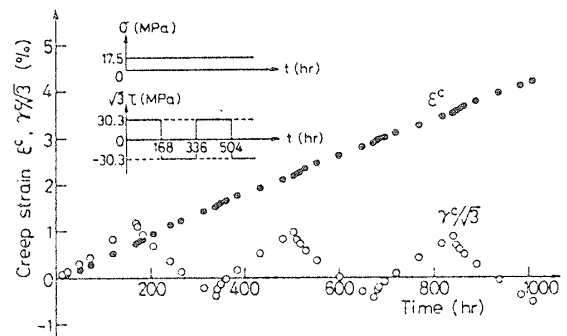


図 5 繰返し反転ねじり応力クリープ試験 II-1 におけるクリープひずみの時間変化



(a)  $\Delta\theta = 150^\circ$  (試験 II-2)



(b)  $\Delta\theta = 120^\circ$  (試験 II-3)

図 6 一定引張り-繰返し反転ねじり組合せ応力クリープ試験におけるクリープひずみの時間変化

小さい。一方、 $\Delta\theta=120^\circ$ のクリープでは、重畳する一定引張応力は $\Delta\theta=150^\circ$ の場合に比べて約2倍であるが、変動ねじり応力振幅は約10%小さいだけである。それにもかかわらず、図6(b)に見られるように、 $\Delta\theta=120^\circ$ のクリープにおけるクリープひずみ速度の増加はねじり応力反転直後に限られており、この結果ねじり応力の反転はクリープひずみ範囲の変化に対してほとんど影響していない(図7の記号○)。したがって、 $\Delta\theta=120^\circ$ の場合には、ねじり応力の反転による材料軟化はないといえる。

図8は、試験II-1~3における累積クリープひずみの変化を、一定応力クリープ試験I-2の結果と比較した図である。図8からも、重畳する一定引張応力の値が増し、これによって応力方向変化角 $\Delta\theta$ が減少すると、ねじり応力の繰返し反転による材料軟化は顕著で

なくなることがわかる。特に $\Delta\theta=120^\circ$ のクリープでは、ねじり応力の反転に伴う材料軟化は応力反転直後に限られ、全体としてはクリープひずみ速度はほぼ一定である。

最後に図9(a),(b)は、それぞれ試験II-2およびII-3におけるクリープひずみベクトルの軌跡を示す。図9中の実線は、Misesの流れ則とクリープひずみ速度一定を仮定した場合のクリープひずみ軌跡である。したがって、この実線の方法は応力ベクトルの方向にほかならない。ただし、この場合のクリープひずみ速度としては、最初の応力反転の直前での値を用いてある。

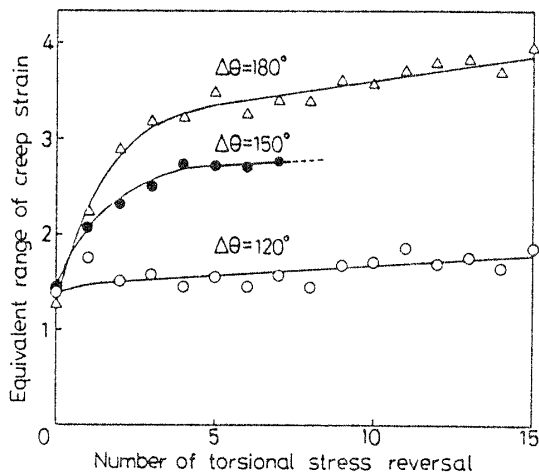


図7 試験II-1~3においてねじり応力反転後、次のねじり応力反転までに生じた相当クリープひずみ量(相当クリープひずみ範囲)の変化

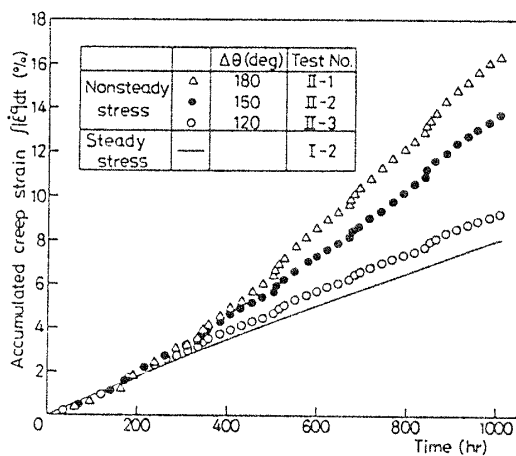
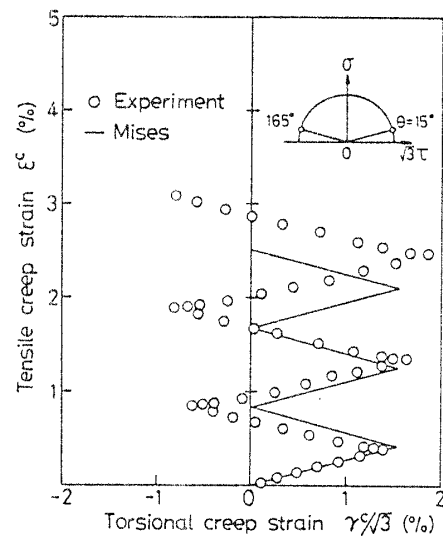
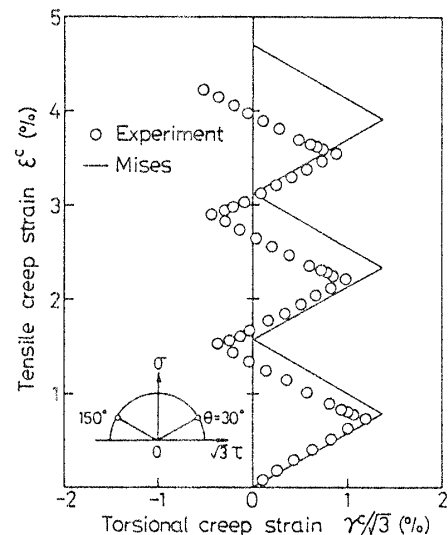


図8 累積相当クリープひずみに及ぼす応力方向変化角 $\Delta\theta$ の影響



(a)  $\Delta\theta=150^\circ$ (試験II-2)



(b)  $\Delta\theta=120^\circ$ (試験II-3)

図9 一定引張り-繰返し反転ねじり組合せ応力クリープ試験におけるクリープひずみベクトルの軌跡

すでに図4において、定常多軸応力クリープでは、Misesの流れ則、すなわちクリープ速度ベクトルと応力ベクトルの共線性が精度良く成り立つことを確かめた。一方、図9(a), (b)に示した非定常多軸応力クリープでは、実験データのクリープひずみ軌跡の接線方向は、ねじり応力の反転後しばらくの間、実線で示した応力ベクトルの方向からずれている。この傾向は、特に $\Delta\theta=150^\circ$ の場合に顕著である。しかし全体としては、プロットした実験データと実線との比較からわかるように、Misesの流れ則はこの場合もかなり良い近似である。

## 6. 結 論

本研究では、900°CでのハステロイXRの定常および非定常多軸応力クリープの特性を、薄肉円管試験片に軸方向引張応力とねじり応力を作用させることにより調べた。この結果、次のことが明らかとなった。

(1) 応力符号の繰返し反転は、クリープ速度の増加をもたらす、材料を軟化させる。このような繰返し軟化は、初期の数サイクルで急激に進行する。

(2) 一定引張り-繰返し反転ねじり組合せ応力クリープでは、一定引張応力の増加に伴って、応力方向

変化角が減少すると、上に述べたような繰返し軟化は小さくなる。特に、応力方向変化角 $120^\circ$ のクリープでは、応力反転直後を除けば、クリープひずみ速度はほぼ一定であった。

(3) 流れ則に関しては、定常多軸応力クリープではMises則が精度良く成り立つ。また、一定引張り-繰返し反転ねじり組合せ応力下での非定常多軸応力クリープでも、ねじり応力反転直後を除けば、Mises則は良い近似である。

終わりに、本研究の遂行にあたり有意義なご討論をいただいた日本原子力研究所の滝塚貴和、西口磯春両氏に謝意を表す。

## 文 献

- (1) 馬場・ほか7名, *JAERI-M*, 85-182, (昭60), 日本原子力研究所.
- (2) 鈴木・武藤, *機論*, 49-439, A(昭58), 293.
- (3) 横井・ほか4名, *JAERI-M*, 83-138, (昭58), 日本原子力研究所.
- (4) 浜中・ほか2名, *機論*, 47-424, A(昭56), 1354.
- (5) Udoguchi, T., ほか2名, (ed. Chang, T. Y. and Krempl, E.) *PVP-PB-028*, ASME, (1978), 71.
- (6) Dyson, B. F. and McLean, M., *Acta Met.*, 31-1 (1983), 17.
- (7) 大野・ほか2名, *機論*, 49-446, A(昭58), 1200.