

# クリープ・塑性が相互に作用する 条件下における高温二軸のラチェット変形

山浦 寿幸\*<sup>1</sup>・小畑 清和\*<sup>1</sup>

## Biaxial Ratcheting at Elevated Temperature under Interaction of Creep and Plasticity

Hisayuki Yamaura\*<sup>1</sup> and Kiyokazu Kobatake\*<sup>1</sup>

Biaxial ratchet deformation at elevated temperature under the interaction of creep and plasticity has experimentally been investigated with 316FR stainless steel. The experiments were conducted at 650°C, under the biaxial loading of a combination of steady shear stress by torsion and cyclic push-pull straining. It has been found that slower cyclic strain rate and larger steady stress result in the larger accumulation of ratchet strain. The former rate dependency might be attributed to the effect of creep. Some experimental data analyses are made to investigate fundamental characteristics of the deformation.

### 1 緒 言

定常応力が作用する金属材料に塑性変形をともなう繰り返しひずみが重畳作用した場合に、定常応力の負荷方向に進行性の永久変形が生じる現象はメカニカルラチェット変形と呼ばれる。従来、原子力機器の構造設計基準として、指導的役割を果たしてきた ASME の Boiler and Pressure Vessel Code Section III では、以下の形式の破損を防止することを設計基準として挙げている。

- (1)短期の過大荷重による延性破壊の防止
- (2)長期荷重によるクリープ破損の防止
- (3)過大な変形、ひずみの防止
- (4)ラチェットによる進行性過大変形の防止
- (5)クリープ疲労型破損の防止

(6)短期荷重による座屈の防止

(7)長期荷重によるクリープ座屈の防止

この(4)に示されるラチェットによる進行性の過大変形の防止は、高速増殖実証炉の液面熱ラチェット問題に関連して、非弾性変形の繰り返しを考慮する必要がある高温機器の設計上、重要な課題となっている。

さて、金属材料の変形現象を連続体の力学として巨視的塑性力学で取り扱う場合に、最も問題となる課題の一つとして材料非線形性が挙げられる。これは、固体の変形を支配する方程式のなかで構成方程式のみが非線形の場合<sup>1)</sup>をいい、比例限を越えて以降、変形挙動がそれ以前の負荷履歴に著しく依存しながら複雑に進行していく現象である。この材料非線形性の問題は、構成方程式の問題として取り扱うことができる一方、高温においては、時間非依存の塑

水産大学校研究業績 第1551号, 1996年6月20日受付.

Contribution from National Fisheries University, No. 1551. Received Jun. 20, 1996.

\*<sup>1</sup> 水産大学校機関学機械工学第一講座 (Laboratory of Mechanical Engineering I, Department of Marine Engineering).

性変形による材料非線形性に加えて、時間依存変形として知られるクリープ変形による材料非線形性をも考慮しなければならなくなる。それだけ、高温における非弾性構造強度解析は、困難かつ複雑である。

繰り返しひずみによる金属材料の挙動は、主に疲労現象として古くから多くの研究がなされているが、これに定常応力をつけ加えた場合の研究は、それに比べて多くはない。とくに、高温におけるラチェット変形に関する研究の例<sup>2)</sup>は少なく、その変形挙動については不明な点が多い。具体的には、繰り返しにとまらラチェットひずみの累積速度の時間的变化率や、ラチェットひずみにたいする繰り返しひずみ速度依存性、繰り返しひずみ範囲依存性、定常応力依存性、および負荷履歴効果など知られていない点がいくつかある。

本研究で行ったメカニカルラチェット試験の負荷モードは、降伏応力の数十%程度のねじりの定常せん断応力と軸全ひずみ範囲1%付近の繰り返し引張・圧縮ひずみの重畳負荷であり、これらをパラメトリックに変化させるとともに、三種類の軸ひずみ速度について試験を行った。本研究では、この負荷モードでのラチェットひずみにたいする繰

り返し軸ひずみ速度(以下、軸ひずみ速度  $\epsilon_{axis}$  と略記する)依存性、軸全ひずみ範囲(以下、軸ひずみ範囲  $\epsilon_{lr}$  と略記する)依存性およびねじりの定常せん断応力(以下、定常せん断応力  $\sqrt{3}\tau$  と略記する)依存性を実験的に解析し、その挙動を定性的に論じた。

## 2 実験方法

### 2.1 供試材および試験片

供試材は、JIS G 4304 で規格されたオーステナイト系ステンレス鋼である SUS316-FRを用いた。これは高速増殖実証炉の一次冷却系における主要構造用材として開発された金属材料であり、高温でのクリープ強度を高めることを目的として、その成分は SUS316 と比べると炭素含有量が減らされ窒素含有量が増されている。本研究では、1,050°C で30min保持後水冷し、溶体化熱処理を施した肉厚50mmの圧延板材から、試験片の軸方向が圧延方向と一致するように機械加工して試験片を採取した。供試材の化学成分を Table 1 に、機械的性質を Table 2 に示す。試験片は外径16.4mm、

Table 1 Chemical Compositions of SUS316-FR  
UNIT [wt%]

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
0.01	0.59	0.84	0.026	0.003	0.26	11.19
Cr	Mo	V	T.Al	As	N	Ti
16.87	2.23	0.08	0.007	0.004	0.08	0.00
Co	B	O	Tel			
0.06	0.06	0.0037	0.09			

Table 2 Mechanical Properties of SUS316-FR

Property		0.2%Y.S.	U.T.S.	E.L.
Temperature		[MPa]	[MPa]	[%]
Room Temp.	20 [°C]	265	573	63
Elevated Temp.	550 [°C]	127	420	43

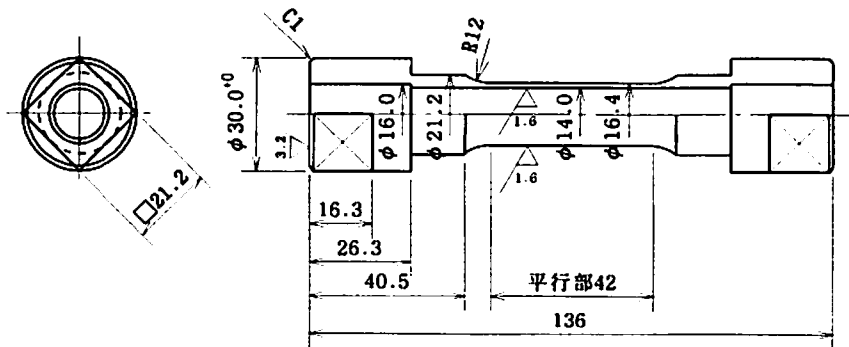


Fig. 1 Dimension of Test Specimen

内径14.0mmの薄肉中空円筒で、標点距離は30.0mmである。なお、試験部の表面粗さは内外面ともに中心線平均粗さで1.6μm以下に仕上げている。

Fig. 1に試験片の形状を示す。

2.2 実験装置

実験装置には、東京大学工学部で開発した軸力とねじりを重畳負荷できる二軸クリープ疲労試験機を用いた。軸負荷用とねじり負荷用の各油圧アクチュエータは、独立した電気・油圧サーボシステムで制御され、それぞれ個別に任意の大きさの負荷を加えることができる。

試験片の加熱には赤外線加熱反射炉を用い、温度はクロメル・アルメル熱電対により測定した。試験片の温度分布は、標点間中央部を650℃に加熱したときに、標点上が最も低温になり650-15℃であった。また、このときの試験片周方向における温度分布は均一であった。

Fig. 2は本試験のために試作した変位計である。これは、試験片の変動する軸変位とねじり角とをそれぞれリアルタイムに測定し、その測定値をフィードバック信号として、試験片の軸変位とねじり角とを同時に制御することを可能にしている。変位計の支点にはユニバーサルジョイントを用いており、軸方向とねじり方向の各々にたいして、軸変

位とねじり変位との相互干渉を生じないことがその特徴である。また、それぞれの変位の測定には、非接触で距離を測定でき、かつ重量が軽くて感度が高い渦電流式変位センサを採用した。一方、軸荷重とトルクは各々ゲージ型ロードセルとトルクセルにより測定される。軸荷重、トルク、軸変位、ねじり角の測定値はパーソナルコンピュータに記憶され、後の解析に利用された。

2.3 試験条件

高速増殖実証炉においては、ノズルや溶接部などの部材形状の不連続部が局所的に塑性ひずみの繰返しを受け、その周囲に存在する弾性域によって変位が拘束される結果、ひずみ制御に近い負荷を受ける。そのため、低サイクル疲労の研究ではひずみ制御試験が一般的であり、本研究も高温低サイクル疲労問題の範疇に含まれるので、繰返し負荷はひずみ制御とした。

本研究のメカニカルラチェット試験では、試験片の標点間中央部を試験温度650℃に保ち、大気中において、一定トルクを負荷した軸ねじりの状態で、軸方向繰返し負荷の引張・圧縮ひずみ試験を行った。なお、この温度はクリープ変形が顕著に現れる温度領域<sup>9)</sup>であり、繰返し負荷のひずみ波形は、ひずみ完全両振りの対称三角波とした。

ラチェット挙動の基礎的なデータを得るために、軸ひずみ速度、軸ひずみ範囲および定常せん断応力を試験のパラメータとして、それらを試験の最初から最後まで一定に保った負荷モードで試験を行い、定常応力としてはトルク制御によってねじりのせん断応力を、繰返し負荷としては標点間の軸変位制御によって引張・圧縮ひずみを加えた。ここで、クリープの影響を調べるために軸ひずみ速度は $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-5} s^{-1}$ の三種類、十分な塑性ひずみを生ずるように軸ひずみ範囲は標点距離にたいして0.01、0.02の二種類および弾性範囲内の応力となるように定常せん断応力は24.5、49.0、73.5 MPaの三種類に選んだ。測定対象は、軸変位 $\delta$ 、軸荷重 $P$ 、ねじり変位 $r$ 、トルク $T$ および時間 $t$ であり、測定量からひずみおよび応力への換算は以下の式にしたがった。

まず、軸変位 $\epsilon_{axis}$ 、ねじりの工学せん断ひずみ $\gamma$ および軸応力 $\sigma_{axis}$ については、次式で示される。

$$\epsilon_{axis} = \delta / l \dots\dots\dots(1)$$

$$\gamma = r_0 \theta / l \dots\dots\dots(2)$$

$$\sigma_{axis} = P / S \dots\dots\dots(3)$$

一方、トルク $T$ とねじりのせん断応力 $\tau$ との関係は、次式で示される。

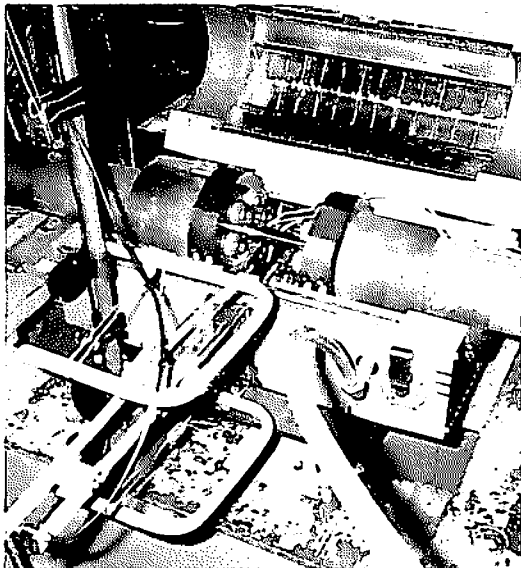


Fig. 2 Appearance of Displacement Meter

$$T = 2\pi r (r_1^3 - r_2^3) / 3 \dots\dots\dots(4)$$

上式より、ねじりのせん断応力 $\tau$ は次式で表される。

$$\tau = 3T / 2\pi (r_1^3 - r_2^3) \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $l$ は試験部の標点距離、 $r_1$ は試験部の外半径、 $r_2$ は試験部の内半径、 $r_0$ は試験部の平均半径、 $S$ は試験部の断面積である。

また、単軸引張・圧縮試験での垂直応力に試験結果を合わせるために相当応力を用いたが、供試材が延性材料であることからMisesの降伏条件を採用し、相当応力 $\sigma_{eq}$ を次式で定義した。

$$\sigma_{eq} = (\sigma^2 + 3\tau^2)^{1/2} \dots\dots\dots(6)$$

これより、定常せん断応力には $\sqrt{3}\tau$ を、累積相当塑性ひずみ(累積ラチェットひずみ)には $\gamma_r / \sqrt{3}$ を用いた。ここに、 $\gamma_r$ はラチェットひずみの累積値を工学せん断ひずみで表したものである。

Table 3に試験条件をまとめて示す。

### 3 試験結果および考察

#### 3.1 累積ラチェットひずみと繰返し数との関係

##### 3.1.1 軸ひずみ速度の影響

軸ひずみ範囲0.01での試験結果を、定常せん断応力ごとに整理したグラフの一例をFig. 3, 4にノーマルスケールで、Fig. 5に両対数スケールで示す。ここで、図中の実線は全データを繰返し数のべき乗関数で最小二乗近似した累積ラチェットひずみのグラフ(以下、近似曲線と呼ぶ)であり、以後の実線についてもまた同様である。また、Fig. 6に示した繰返しひずみ硬化挙動のグラフにおいて、最大・最小応力が飽和値に達した時点をもって、遷移状態と定常状態との境界と判断した。以後、同様にしてこの境界を決定した。

ノーマルスケールでは、いずれの定常せん断応力においてもラチェット変形の進行は軸ひずみ速度依存性を示し、低軸ひずみ速度ほど累積ラチェットひずみの進行速度が大きいことがわかる。また、その進行の様子は繰返しの初期に累積ラチェットひずみが大きく、繰返しが進むにつれて鈍化していき、やがてグラフは直線に近づく。これは、塑性ひずみの進行にともなって加工硬化がすすむためと考えられる。なお、クリープの影響が比較的小さいと考えられる軸ひずみ速度が $10^{-3}$ および $10^{-4} s^{-1}$ の場合には、近似曲線で累積ラチェットひずみをよく表現でき、Fig. 3, 4の

Table 3 Experimental Conditions

Axial Strain Range $\epsilon$ $\tau$	Axial Cyclic Strain Rate $\dot{\epsilon}$ axis[ $s^{-1}$ ]	Torsional Steady Shear Stress $\sqrt{3}\tau$ [MPa]
0.01	$10^{-3}$	24.5
		49.0
		73.5
	$10^{-4}$	24.5
		49.0
		73.5
	$10^{-5}$	24.5
		49.0
		73.5
0.02	$10^{-3}$	24.5
		73.5
	$10^{-4}$	24.5
		73.5
	$10^{-5}$	24.5
		73.5

全てのグラフが、クリープ曲線での三次クリープ領域を除いた挙動に類似していることは注目に値する。

両対数スケールでは、いずれの定常せん断応力においても、上述の定常状態と考えられる約20サイクル以後ではグラフの傾きがほぼ平行になり、このサイクル以降では累積ラチェットひずみの進行速度が等しいことがわかる。軸ひずみ速度が $10^{-3} s^{-1}$ の場合には、このグラフを一直線で近似するよりは遷移域と定常域とに分離して、二直線で近似する方がより実際に近いようである。これは、軸ひずみ速度が小さくなり、クリープの影響が顕著に現れ始めたためと考えられる。

軸ひずみ範囲0.02での試験結果を、定常応力ごとに整理したグラフの一例をFig. 7, 8にノーマルスケールで示す。Fig. 7において、各データを同一の繰返し数で比較すると、繰返しが進むにつれてデータよりも近似曲線の方が大きな値を示すようになり、両者の誤差が顕著になる。Fig. 3との比較より、これは軸ひずみ範囲の影響と考えられ、軸ひずみ範囲が大きいかほど繰返しにともなって累積ラチェットひずみの進行速度が鈍化することがわかる。Fig. 8は定常せん断応力が73.5MPaの場合であるが、累積ラチェ

ットひずみの進行速度が軸ひずみ速度に関係なくほぼ同一になっている。これを Fig. 7 と比較すると、この試験条件

では、定常せん断応力が累積ラチェットひずみにたいして支配的であることがわかる。

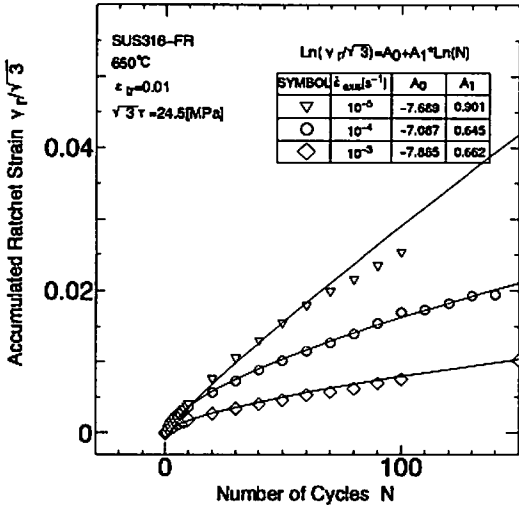


Fig. 3 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Number of Cycles

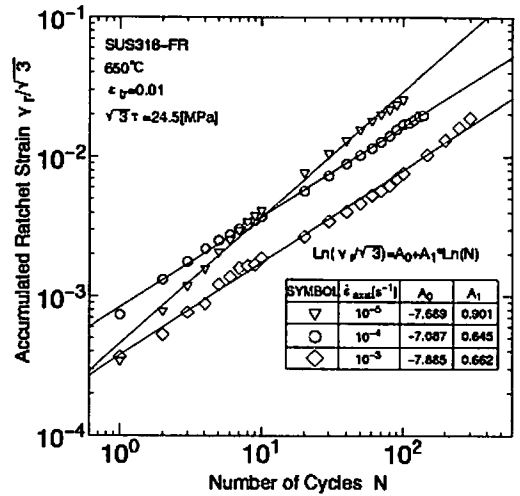


Fig. 5 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Number of Cycles

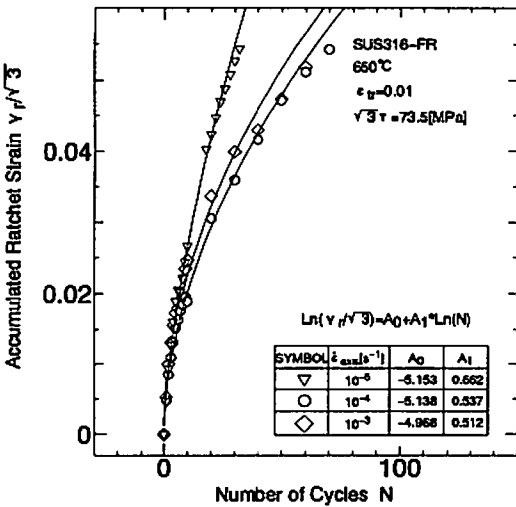


Fig. 4 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Number of Cycles

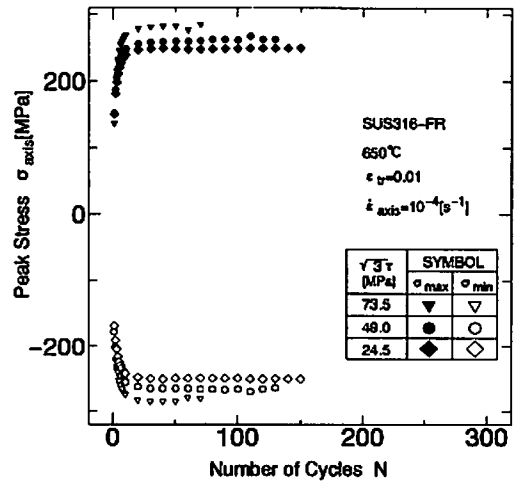


Fig. 6 Cyclic Strain Hardening Behavior

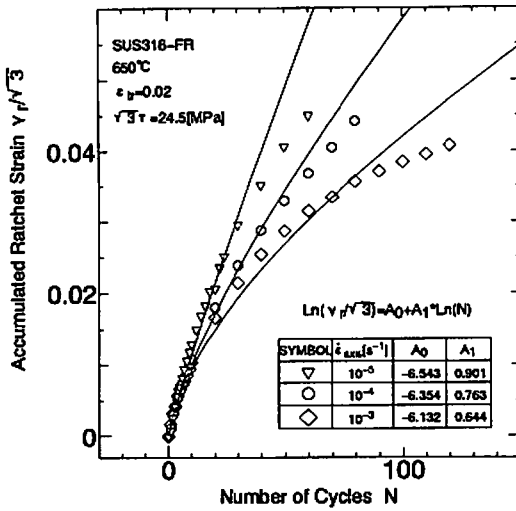


Fig. 7 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Number of Cycles

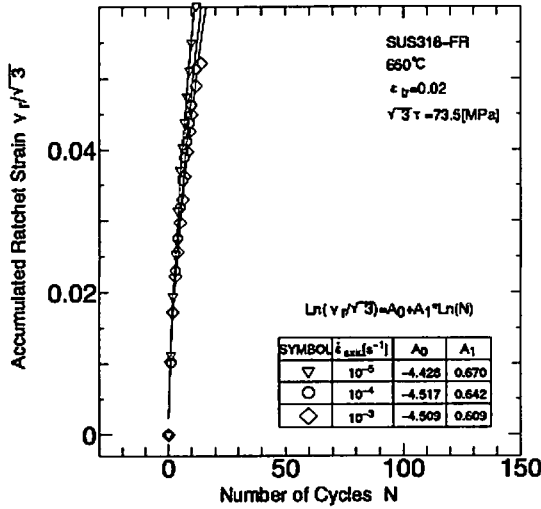


Fig. 8 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Number of Cycles

### 3.1.2 軸ひずみ範囲の影響

軸ひずみ速度 $10^{-3} s^{-1}$ での試験結果を、定常せん断応力ごとに整理したグラフの一例をFig. 9, 10にノーマルスケールで示す。いずれの定常せん断応力においてもラチェット変形の進行は軸ひずみ範囲依存性を示し、軸ひずみ範囲が大きくなると累積ラチェットひずみの進行速度も大きくなることわかる。また、Fig. 9とFig. 10との比較より、

定常せん断応力が大きくなると累積ラチェットひずみの進行速度も大きくなることわかる。

軸ひずみ速度 $10^{-3} s^{-1}$ 、定常せん断応力24.5MPaでの試験結果をFig. 11にノーマルスケールで示す。傾向は軸ひずみ速度 $10^{-3} s^{-1}$ の場合と同様である。Fig. 9とFig. 11との比較より、いずれの軸ひずみ範囲においても軸ひずみ速度が小さくなるほど累積ラチェットひずみの進行速度が大きくなることもわかる。

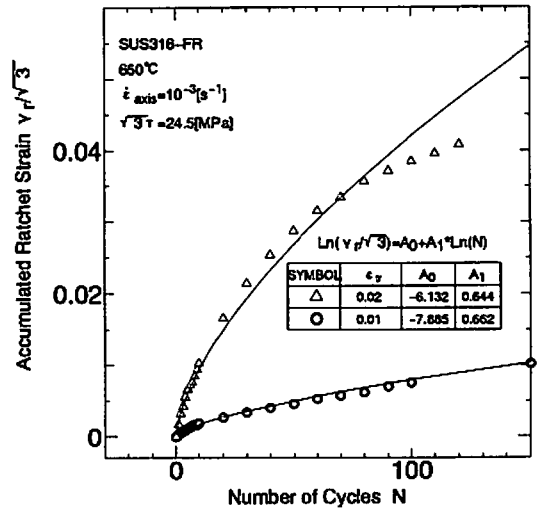


Fig. 9 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Number of Cycles

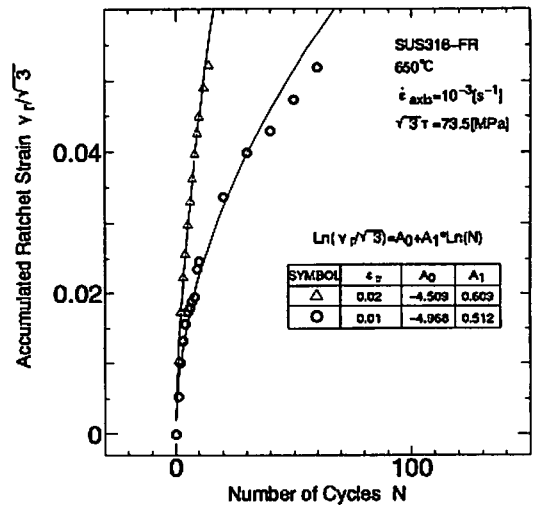


Fig. 10 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Number of Cycles

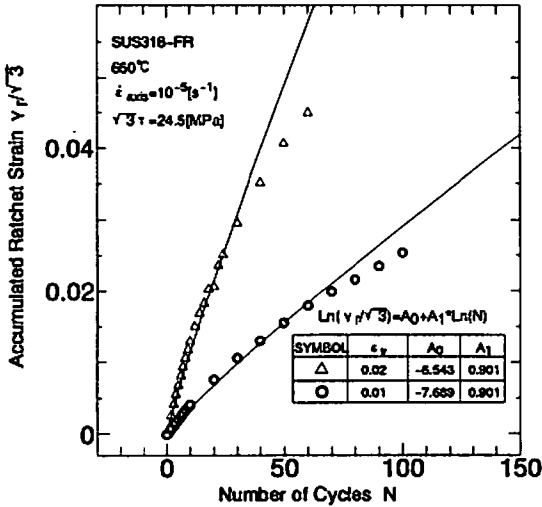


Fig. 11 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Number Cycles

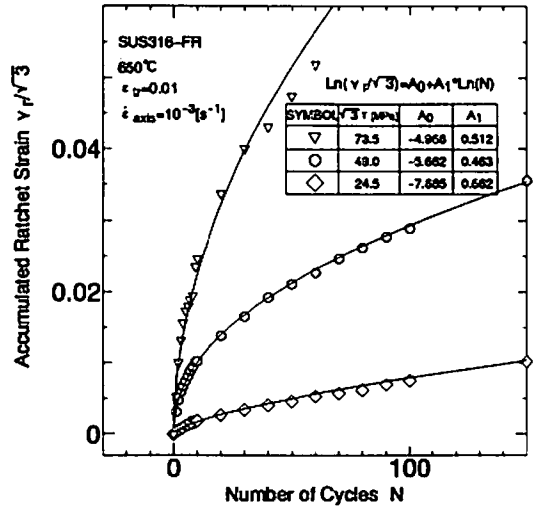


Fig. 12 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Number of Cycles

### 3.1.3 定常せん断応力の影響

軸ひずみ範囲0.01での試験結果を、軸ひずみ速度ごとに整理したグラフの一例を Fig. 12, 13にノーマルスケールで示す。いずれの軸ひずみ速度においてもラチェット変形の進行は定常せん断応力依存性を示し、定常せん断応力が大きくなるほど累積ラチェットひずみの進行速度が大きくなることわかる。また、Fig. 12とFig. 13との比較より、軸ひずみ範囲および定常せん断応力が同一であっても、軸ひずみ速度が小さくなるほど累積ラチェットひずみの進行速度が大きくなることわかる。

軸ひずみ範囲0.02での試験結果を、軸ひずみ速度ごとに整理したグラフの一例をFig. 14, 15にノーマルスケールで示す。傾向は軸ひずみ範囲0.01の場合と同様である。ここで、Fig. 12と Fig. 14を比較すると、24.5 MPaのように定常せん断応力が小さい場合には、累積ラチェットひずみにたいする軸ひずみ範囲の影響がとくに大きくなることわかる。このことはFig. 13と Fig. 15との比較においてもまた同様である。

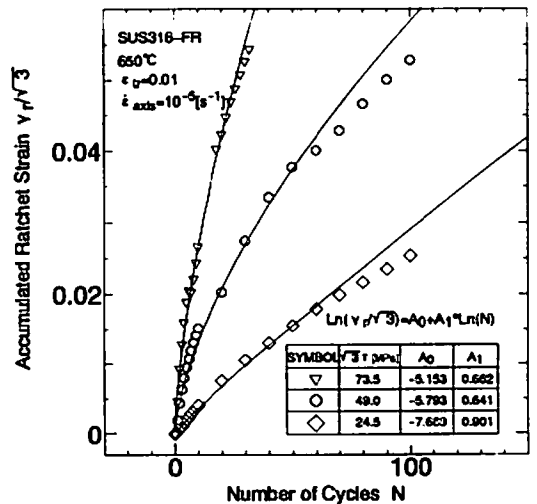


Fig. 13 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Number of Cycles

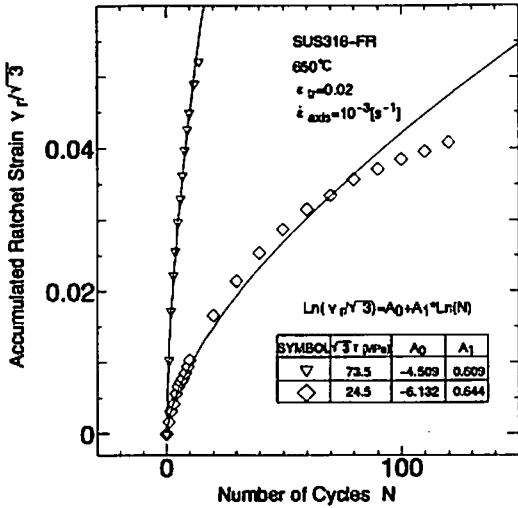


Fig. 14 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Number of Cycles

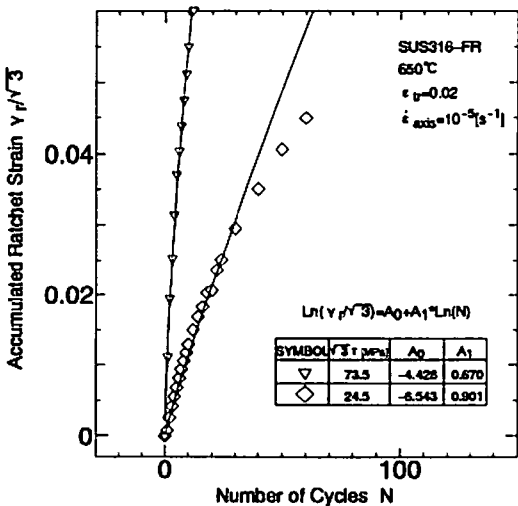


Fig. 15 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Number of Cycles

### 3.2 累積ラチェットひずみと軸ひずみ速度との関係

軸ひずみ範囲0.01での試験結果を、繰返し数をパラメータとして定常せん断応力ごとに整理したグラフの一例を Fig. 16, 17に両対数スケールで示す。いずれのグラフにおいても、各データは同一の繰返し数ではほぼ同一の直線上に載っており、累積ラチェットひずみは軸ひずみ速度のべき乗の関数で表現できることがわかる。また、Fig. 16と Fig. 17を比較すると、同一の繰返し数では定常せん断応力が大きくなるとグラフの傾きも大きくなることわかる。Fig. 16では、繰返し数が大きくなるにつれてグラフの傾きが小さくなるが、定常状態と考えられる約20サイクル以後では傾きはほぼ同一である。Fig. 17においては、いずれの繰返し数でも軸ひずみ速度に無関係に傾きが0になっている。これは、定常せん断応力が大きくなると、累積ラチェットひずみが  $A_0$  だけの関数として決定されることを意味している。ここに、 $A_0$  は繰返し数、軸ひずみ範囲および温度の関数と考えられる。

軸ひずみ範囲0.02での試験結果を、繰返し数をパラメータとして定常せん断応力ごとに整理したグラフの一例を Fig. 18, 19に両対数スケールで示す。傾向は軸ひずみ範囲0.01の場合と同様である。Fig. 16と Fig. 18を比較すると、同一の繰返し数では軸ひずみ範囲が大きくなるとグラフの傾きは小さくなっている。ただし、Fig. 19においてはグ

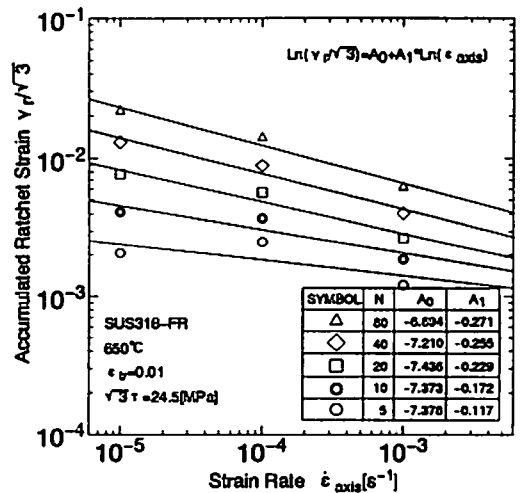


Fig. 16 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Strain Rate



ラフの傾きがほぼ同一であることから、繰り返し数が小さい範囲ではあっても、累積ラチェットひずみの進行速度が

大きいために既に定常状態になっていることが予想される。

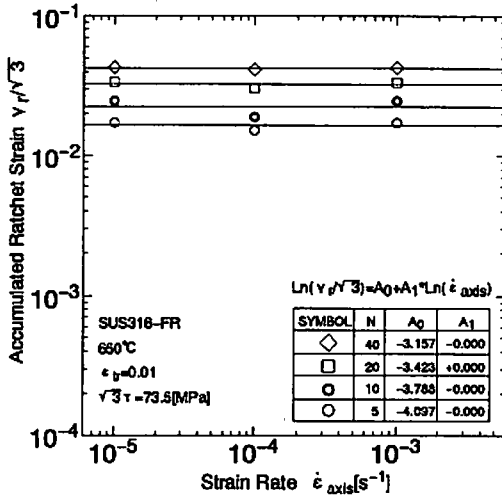


Fig. 17 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Strain Rate

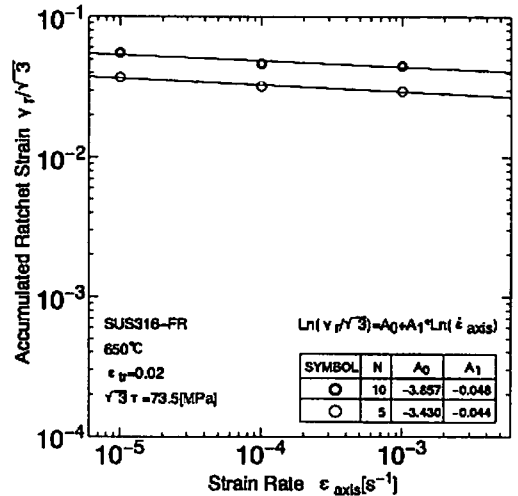


Fig. 19 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Strain Rate

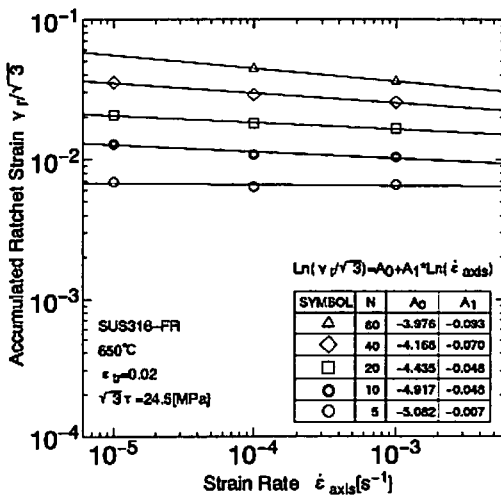


Fig. 18 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Strain Rate

### 3.3 累積ラチェットひずみと軸ひずみ範囲との関係

軸ひずみ速度  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  の試験結果を、繰り返し数をパラメータとして定常せん断応力ごとに整理したグラフの一例を Fig. 20, 21に両対数スケールで示す。軸ひずみ範囲が0.005での実験データが欠如しているため正確ではないが、いずれのグラフにおいても、各データは同一の繰り返し数ではほぼ同一の直線上に載ることが予想される。したがって、累積ラチェットひずみは軸ひずみ範囲のべき乗の関数で表現できると考えられる。Fig. 20では、繰り返し数に無関係にグラフの傾きはほぼ一定であるが、Fig. 21では、繰り返し数が大きくなるとグラフの傾きも大きくなっている。

軸ひずみ速度  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  の試験結果を、繰り返し数をパラメータとして定常せん断応力ごとに整理したグラフの一例を Fig. 22, 23に両対数スケールで示す。Fig. 22では、繰り返し数が大きくなるにつれてグラフの傾きが小さくなるが、定常状態と考えられる約20サイクル以後ではほぼ一定である。また、Fig. 23では、繰り返し数が大きくなるにつれてグラフの傾きが大きくなっている。

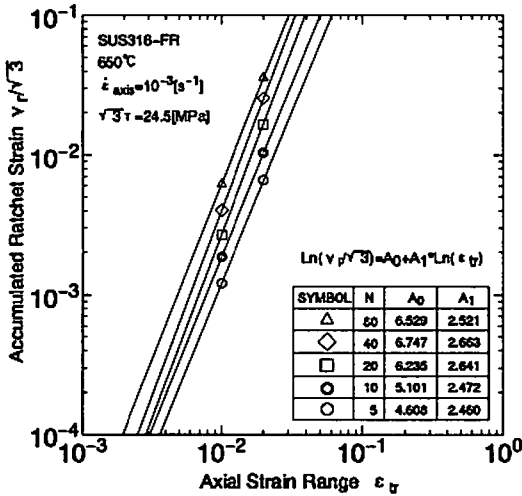


Fig. 20 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Axial Strain Range

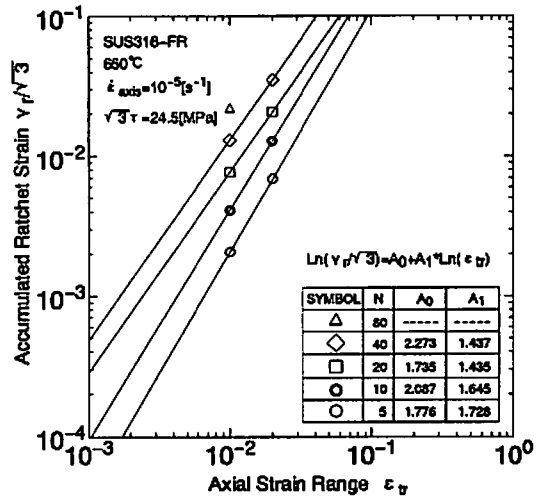


Fig. 22 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Axial Strain Range

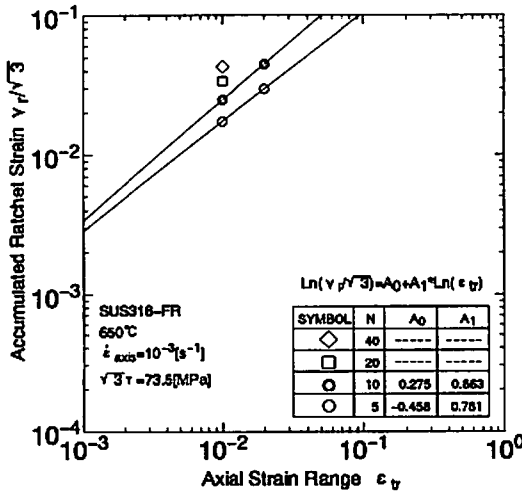


Fig. 21 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Axial Strain Range

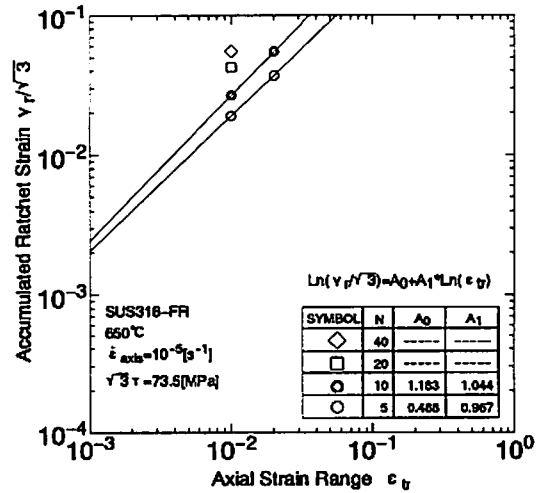


Fig. 23 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Axial Strain Range

3.4 累積ラチェットひずみと定常せん断応力との関係

軸ひずみ範囲0.01での試験結果を、繰り返し数をパラメータとして軸ひずみ速度ごとに整理したグラフの一例をFig. 24, 25に両対数スケールで示す。いずれのグラフにおいても、各データは同一の繰り返し数ではほぼ同一の直線上に載っており、累積ラチェットひずみは定常せん断応力のべき乗の関数で表現できることがわかる。また、いずれのグラフにおいても、繰り返し数が大きくなるにつれてグラフの傾きが小さくなっており、定常状態と考えられる約20サイクル以後でも一定にはなっていない。Fig. 24とFig. 25から、同一の繰り返し数で両グラフの傾きを比較すると、各繰り返し数にたいしていずれもFig. 25の方が小さくなっている。

軸ひずみ範囲0.02での試験結果は、定常せん断応力が49.0 MPaでのデータが欠如しているので省略する。

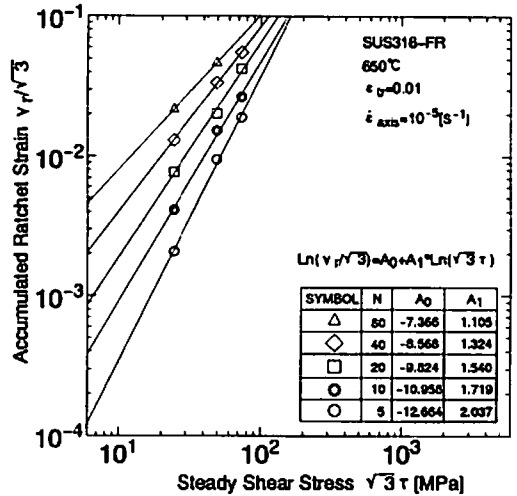


Fig. 25 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Steady Shear Stress

4 結 言

本研究は、650°C、大気中で、高速増殖実証炉に用いられるステンレス鋼 SUS316-FR に軸ねじりの定常せん断応力と軸方向繰り返し引張・圧縮ひずみを重畳負荷した試験を行い、負荷ひずみの速度を系統的に変化させて、発生するラチェットひずみに負荷ひずみ速度がどのような影響を与えるかを調査し、定性的にその挙動を論じた。その際、負荷ひずみの全振幅、定常せん断応力もパラメトリックに変化させた。

本研究によって得られた知見は次のとおりである。

- (1) 繰り返し軸ひずみの全振幅とねじりの定常せん断応力が同一であっても、繰り返し軸ひずみ速度が低下するにつれて、累積ラチェットひずみは増加する。
- (2) 累積ラチェットひずみ-繰り返し数のグラフは、クリープ曲線によく似た挙動を示す。とくに、繰り返し軸ひずみ速度が遅い場合、軸全ひずみ範囲が大きい場合および定常せん断応力が大きい場合には、繰り返しが進むにつれて累積ラチェットひずみの進行速度の鈍化が顕著になり、その挙動は二直線モデルで近似した方がより適切である。
- (3) 累積ラチェットひずみの繰り返し軸ひずみ速度、軸全ひずみ範囲およびねじりの定常せん断応力にたいする依存性は、すべてべき関数で近似できる。

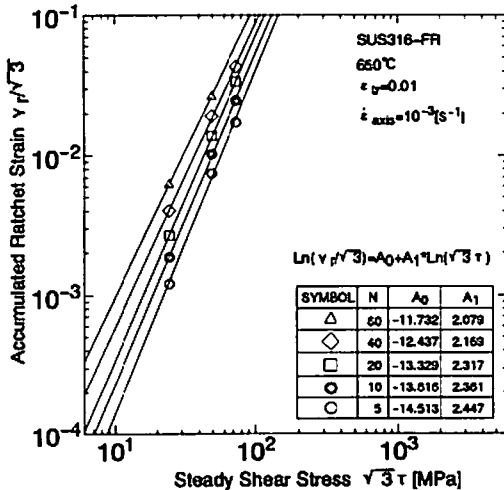


Fig. 24 Relation of Accumulated Ratchet Strain vs. Steady Shear Stress

## 5 今後の展望

高速増殖実証炉では、一次冷却系の冷却剤として液体ナトリウムが用いられるが、原子炉出口でのその温度は550℃以上に達する。しかも、原型炉とは異なって、液体ナトリウムの液面が変動する設計となっているため、液位変動にともなう熱衝撃によって液面近傍に大きなひずみが発生する。現在、上述のひずみ発生メカニズムは熱ラチェット変形として知られており、これに起因する機器の破壊を未然に防止するために、ひずみを制限する設計基準の策定がなされている。

さて、高温設備の設計に際しては、弾塑性クリープ応力解析が行われるが、その結果の信頼性を左右する最大の課題の一つに、非弾性構成方程式における塑性とクリープの相互作用がある。この現象は、クリープまたは塑性の予変形が、後続する塑性またはクリープの変形挙動に影響をおよぼすものであり、クリープ塑性相互作用と呼ばれている。この現象は、ラチェット挙動として知られる進行性変形の累積挙動に顕著に現れるが、実験および理論的展開からこの種の統一型非弾性構成方程式を開発し、変形量を精確に予測する技術の開発が望まれている。

次報以降は、欠損データの採取とともに、ラチェットひずみを定量的に解析し、これを弾塑性構成方程式、弾塑性クリープ構成方程式および統一型弾塑性構成方程式による解析に反映する。具体的には、弾塑性構成方程式としては等方硬化則、移動硬化則および複合硬化則について、クリープ弾塑性構成方程式としては分離型構成方程式について、および統一型弾塑性構成方程式としてはChaboche ModelやMiller Model等について高温二軸ラチェット変形のプログラムを開発し、その表現能力について実験結果と対比して検討する。

## 謝 辞

本研究は、著者のひとりが平成5年9月から平成6年3月まで東京大学工学部機械工学科に国内留学し、朝田泰英教授の御指導のもとに遂行した研究の一部をまとめたものである。朝田泰英教授ならびに石川明克技術官をはじめとする同大学研究室の皆様には、この場をお借りし厚く御礼申し上げます。また、研究の機会を与えていただき、種々ご援助を賜りました江副党助教授、小林克登助手に深謝する。

## 文 献

- 1) 日本機械学会編：固体力学—基礎と応用—，初版，オーム社，東京，1987，p.215.
- 2) 鶴戸口，朝田，三橋，広江：機論(A)，42(359)，1982(1976)。
- 3) 鶴戸口，朝田，三橋，広江：機論(A)，42(359)，1993(1976)。
- 4) 山下，石川，中村，朝田：機論論(II)，940-10，798-800 (1994)。
- 5) 山下，新田，中村，朝田：機論論，940-37，140-141 (1994)。
- 6) 日本溶接協会：高速炉構造用 SUS316 の評価研究 (その 1) 最終報告書，平成3年2月。