

# SUS304の塑性クリープ挙動試験

## 成 果 報 告 書 (構造材料試験 84-5)

1985年4月



三 菱 重 工 業 株 式 会 社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた範囲の関係者に配布するものです。したがって、その取扱いには充分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。

動力炉・核燃料開発事業団  
計画管理部技術情報室

本資料についての問合せは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13  
動力炉・核燃料開発事業団  
技術管理部 技術情報室

配布限定  
SJ222 85-01  
1985年4月

SUS 304 の塑性クリープ挙動試験<sup>\*</sup>  
(構造材料試験 84-5)

遠藤忠良<sup>\*\*\*</sup>, 西田 隆<sup>\*\*\*</sup>  
佐近淑郎<sup>\*\*\*</sup>, 服部孝博<sup>\*\*\*</sup>  
古藤広之<sup>\*\*\*</sup>

要旨

本研究では、高速炉用構造材料の代表として SUS 304 鋼を探りあげて高温単軸条件下の非弾性挙動に関し、実験的検討を行った。

試験は引張、クリープ及び各種の繰返しリラクセーションと繰返しクリープで、550°Cで実施した。

実験結果をクリープひずみ式を用いて解析し、硬化則等の検討を行った。その結果以下の知見が得られた。

- (1) 単調応力ひずみ挙動 ( $\epsilon < 10\%$ ) に及ぼすひずみ速度の影響は  $\epsilon = 1.67 \times 10^{-4} \sim 5.56 (\%/\text{sec})$  の範囲では認められなかった。
- (2) 繰返し硬化の影響により、その直後のクリープ特性は処女材特性に比べ硬化することがわかった。
- (3) 逆降伏を伴わない変動クリープ及びリラクセーションは累積ひずみ硬化則によるクリープ解析で推定可能である。しかし、逆方向の塑性負荷を与えることによりそれまでのひずみ硬化はある程度回復することがわかった。

---

\* 本報告は、三菱重工業株式会社が動力炉・核燃料開発事業団殿の委託により実施した試験の成果である。

\*\* 三菱重工業株式会社高砂研究所

NOT FOR PUBLICATION  
SJ 222 85-01  
April, 1985

The Plastic - Creep Interaction Behavior Tests of SUS304 Steel\*

Tadayoshi Endo\*\*, Takashi Nishida\*\*  
Toshio Sakon\*\*, Takahiro Hattori\*\*  
Hiroyuki Koto\*\*

Abstract

Experimental study on the inelastic behavior of SUS304 steel was performed under uniaxial condition at elevated temperature.

Tensile creep, cyclic relaxation and cyclic creep tests were performed at 550°C.

Tests results were compared each other with respect to the effect of the plastic-creep interaction on the cyclic inelastic stress-strain behaviors.

Following characteristics were observed in this study.

- (1) Strain rate effect on the monotonic stress-strain behavior ( $\epsilon < 10\%$ ) was not observed in the strain rate range from  $1.67 \times 10^{-4}$  (%/sec) to 5.56 (%/sec).
- (2) The prior cyclic hardening reduced the strain rate in the subsequent creep.
- (3) The muti-step creep and relaxation behavior without reversed plastic yielding could be estimated by the classical creep strain hardening law. However, the creep hardening recovered partially by the plastic stress reversal.

---

\* This work performed under contract between Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp. and Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

\*\* Takasago Technical Institute of Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

## 目 次

	ページ
1. まえがき .....	1
2. 試験研究の概要 .....	2
2.1 試験研究の範囲 .....	2
2.2 試験研究結果の概要 .....	2
3. 供 試 材 .....	5
4. 試 験 方 法 .....	8
4.1 試験片採取位置 .....	8
4.2 試 験 片 .....	8
4.3 試験機の仕様 .....	8
4.4 試 験 方 法 .....	8
5. 試 験 結 果 .....	15
5.1 引張試験 .....	15
5.2 クリープ試験 .....	15
5.3 繰返しリラクセーション試験 .....	15
5.4 繰返しクリープ試験 .....	16
6. 考 察 .....	42
6.1 繰返し硬化がその後のクリープ特性に及ぼす影響 .....	42
6.2 変動クリープ及びリラクセーション .....	43
6.3 クリープが塑性挙動に及ぼす影響 .....	43
7. ま と め .....	50
8. 謝 辞 .....	51
9. 参 考 文 献 .....	52

表 リ ス ト

	ページ
表 2.1 試験条件一覧表	3, 4
Table 2.1 Test conditions	
表 3.1 SUS 304 鋼板材 (40t) の製造仕様概要	6
Table 3.1 Summary of manufacturing specifications of SUS304 steel plate (40t)	
表 3.2 SUS 304 鋼板材 (40t) の確性試験結果	7
Table 3.2 Certified material properties of SUS304 steel plate (40t)	
表 4.1 a) 試験機仕様	10
Table 4.1 a) Specifications of testing machine and apparatus	
表 4.1 b) 試験機仕様	11
Table 4.1 b) Specifications of testing machine and apparatus	
表 4.1 c) 試験機仕様	12
Table 4.1 c) Specifications of testing machine and apparatus	
表 5.1 引張試験結果, SUS 304 鋼, 550°C	18
Table 5.1 Results of tensile tests of SUS304 at 550°C	
表 5.2 クリープ試験結果, SUS 304 鋼, 550°C	19
Table 5.2 Results of creep tests of SUS304 at 550°C	

表 5. 3 a) 繰返しリラクセーション(試験1,2)試験結果, SUS 304, 550°C ----- 20

Table 5.3 a) Results of cyclic relaxation tests  
(Test No.1, 2) of SUS304 at 550°C

表 5. 3 b) 繰返しリラクセーション(試験3,4)試験結果, SUS 304, 550°C ----- 21

Table 5.3 b) Results of cyclic relaxation tests  
(Test No.3, 4) of SUS304 at 550°C

表 5. 3 c) 繰返しリラクセーション(試験5,6)試験結果, SUS 304, 550°C ----- 22

Table 5.3 c) Results of cyclic relaxation tests  
(Test No.5, 6) of SUS304 at 550°C

表 5. 4 a) 繰返しクリープ(試験1,2)試験結果, SUS 304, 550°C ----- 23

Table 5.4 a) Results of cyclic creep tests  
(Test No.1, 2) of SUS304 at 550°C

表 5. 4 b) 繰返しクリープ(試験3,4)試験結果, SUS 304, 550°C ----- 24

Table 5.4 b) Results of cyclic creep tests  
(Test No.3, 4) of SUS304 at 550°C

表 5. 4 c) 繰返しクリープ(試験5,6)試験結果, SUS 304, 550°C ----- 25

Table 5.4 c) Results of cyclic creep tests  
(Test No.5, 6) of SUS304 at 550°C

## 図 リ ス ト

		ページ
図 4.1	試験片採取位置	13
Fig. 4.1	Sampling location of test specimen	
図 4.2	試験片形状	14
Fig. 4.2	Dimension of test specimen	
図 5.1	引張試験結果, SUS 304, 550°C	26
Fig. 5.1	Results of tensile tests of SUS304 at 550°C	
図 5.2	クリープ試験結果とクリープひずみ式の比較, SUS 304, 550°C	27
Fig. 5.2	Comparison of creep data with creep strain equation of SUS304 at 550°C	
図 5.3	繰返しリラクセーション(試験1)試験結果, SUS 304, 550°C	28
Fig. 5.3	Results of cyclic relaxation (Test No.1) of SUS304 at 550°C	
図 5.4	繰返しリラクセーション(試験1)試験結果, SUS 304, 550°C	29
Fig. 5.4	Results of cyclic relaxation (Test No.1) of SUS304 at 550°C	
図 5.5	繰返しリラクセーション(試験2)試験結果, SUS 304, 550°C	30
Fig. 5.5	Results of cyclic relaxation (Test No.2) of SUS304 at 550°C	
図 5.6	繰返しリラクセーション(試験2)試験結果, SUS 304, 550°C	31
Fig. 5.6	Results of cyclic relaxation (Test No.2) of SUS304 at 550°C	
図 5.7	繰返しリラクセーション(試験3)試験結果, SUS 304, 550°C	32
Fig. 5.7	Results of cyclic relaxation (Test No.3) of SUS304 at 550°C	

図 5.8	繰返しリラクセーション(試験4)試験結果, SUS 304, 550°C	33
Fig. 5.8	Results of cyclic relaxation (Test No.4) of SUS304 at 550°C	
図 5.9	繰返しリラクセーション(試験5)試験結果, SUS 304, 550°C	34
Fig. 5.9	Results of cyclic relaxation (Test No.5) of SUS304 at 550°C	
図 5.10	繰返しリラクセーション(試験6)試験結果, SUS 304, 550°C	35
Fig. 5.10	Results of cyclic relaxation (Test No.6) of SUS304 at 550°C	
図 5.11	繰返しクリープ(試験1)試験結果, SUS 304, 550°C	36
Fig. 5.11	Results of cyclic creep (Test No.1) of SUS304 at 550°C	
図 5.12	繰返しクリープ(試験2)試験結果, SUS 304, 550°C	37
Fig. 5.12	Results of cyclic creep (Test No.2) of SUS304 at 550°C	
図 5.13	繰返しクリープ(試験3)試験結果, SUS 304, 550°C	38
Fig. 5.13	Results of cyclic creep (Test No.3) of SUS304 at 550°C	
図 5.14	繰返しクリープ(試験4)試験結果, SUS 304, 550°C	39
Fig. 5.14	Results of cyclic creep (Test No.4) of SUS304 at 550°C	
図 5.15	繰返しクリープ(試験5)試験結果, SUS 304, 550°C	40
Fig. 5.15	Results of cyclic creep (Test No.5) of SUS304 at 550°C	
図 5.16	繰返しクリープ(試験6)試験結果, SUS 304, 550°C	41
Fig. 5.16	Results of cyclic creep (Test No.6) of SUS304 at 550°C	

図 6.1	塑性繰返し中の応力と非弾性ひずみの関係, SUS 304, 550°C	45
Fig. 6.1	Relation between stress and inelastic strain during plastic cycling of SUS304 at 550°C	
図 6.2 a)	繰返しリラクセーション(試験 1, 2)における応力と非弾性ひずみの関係, SUS 304, 550°C	46
Fig. 6.2 a)	Relation between stress and inelastic strain during cyclic relaxation (Test No.1, 2) of SUS304 at 550°C	
図 6.2 b)	繰返しリラクセーション(試験 5, 6)における応力と非弾性ひずみの関係, SUS 304, 550°C	47
Fig. 6.2 b)	Relation between stress and inelastic strain during cyclic relaxation (Test No.5, 6) of SUS304 at 550°C	
図 6.2 c)	繰返しクリープ(試験 1, 2)における応力と非弾性ひずみの関係, SUS 304, 550°C	48
Fig. 6.2 c)	Relation between stress and inelastic strain during cyclic creep (Test No.1, 2) of SUS304 at 550°C	
図 6.2 d)	繰返しクリープ(試験 5, 6)における応力と非弾性ひずみの関係, SUS 304, 550°C	49
Fig. 6.2 d)	Relation between stress and inelastic strain during cyclic creep (Test No.5, 6) of SUS304 at 550°C	

## 1. まえがき

高速炉の設計において、構造部材の応力ひずみ挙動を的確に予想するための非弾性解析手法の開発研究が進められている。非弾性解析においては、応力ひずみ関係など材料性質の表示式及び硬化則、流れ則などの精度、妥当性が重要な位置を占める。これらに関し ORNL などから種々提案がなされているが未だ検証が十分でないのが現状である。

本研究においては、構成式、硬化則の検証試験として先に実施した試験に引続いて、SUS 304鋼の単軸状態における塑性・クリープ相互作用に関する挙動試験を行ない、塑性クリープ相互作用に対する非弾性解析用構成式を作成するためのベースデータを集積することを目的とする。<sup>(1)(2)(3)</sup>

## 2. 試験研究の概要

### 2.1 試験研究の範囲

本研究では、供試材としてSUS304鋼を用い、550°Cにおいて引張・クリープ及び塑性・クリープ挙動試験を単軸条件下で行ない塑性とクリープの相互作用に関する実験的検討を行った。塑性・クリープ挙動試験としては各種の繰返しリラクセーション及び繰返しクリープ試験を行った。

試験条件の概要を表2.1に示す。

### 2.2 試験研究結果の概要

#### (1) 単調応力ひずみ挙動に及ぼすひずみ速度効果

SUS304鋼の55°Cにおける各種ひずみ速度( $\dot{\epsilon} = 1.67 \times 10^{-4} \sim 5.56 \%/\text{sec}$ )での引張試験の結果、単調応力ひずみ挙動に及ぼすひずみ速度効果は、10%以下のひずみ領域ではほとんど認められなかった。

#### (2) 塑性ひずみの繰返しがその後のクリープ特性に及ぼす影響

塑性ひずみの繰返しの影響により、その後のクリープ特性は処女材クリープ特性に比べ硬化し、遷移・定常クリープ速度共に低下することがわかった。

但し、その後クリープを含む繰返しを与えると次第に回復し、処女材のクリープ特性に近づく。

#### (3) 変動クリープ及びリラクセーション

塑性反転(逆降伏)を伴わない変動クリープ及びリラクセーション挙動は、通常のクリープひずみ硬化則が成り立つが、逆降伏直後にそれまでのクリープひずみ硬化は消失し、処女材のクリープ特性に戻るようである。

#### (4) クリープ変形がその後の塑性挙動に及ぼす影響

塑性ひずみの繰返しの途中でクリープ変形を与えた場合、クリープ直後の塑性変形ではクリープがない場合に比べ塑性変形しやすくなるが、次の塑性反転によりその影響は消失する。

表 2.1 試験条件一覧表

Table 2.1 Test conditions

試験 項目	引張	クリープ	繰返しリラクセーション ( $\dot{\varepsilon} = 0.1\%/\text{sec}$ )					
			試験 1	試験 2	試験 3	試験 4	試験 5	試験 6
温 度	550°C							
試験条件	$\dot{\varepsilon}$ (%/sec)	$\sigma$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	1) $\Delta\varepsilon$ (%) = 1.0	1) $\Delta\varepsilon$ (%) = 1.0	1) $\Delta\sigma$ (kgf/mm <sup>2</sup> ) = 28	1) $\Delta\sigma$ (kgf/mm <sup>2</sup> ) = 28	1) $\Delta\varepsilon$ (%) = 1.5	1) $\Delta\varepsilon$ (%) = 1.5
	1) 5.56	1) 10	Δt (h) = 1.0	Δt (h) = 1.0			ΔN = 100	ΔN = 100
	2) 0.8	2) 14	N = 10	N = 10	$\sigma_0$ (kgf/mm <sup>2</sup> ) = ±14	$\sigma_0$ (kgf/mm <sup>2</sup> ) = ±14	$\sigma_0$ (kgf/mm <sup>2</sup> ) = ±24	$\sigma_0$ (kgf/mm <sup>2</sup> ) = ±24
	3) 0.1	3) 18	2) $\Delta\varepsilon$ (%) = 1.5	2) $\Delta\varepsilon$ (%) = 1.5				
	4) $8.3 \times 10^{-3}$	4) 22	Δt <sub>H</sub> (h) = 1.0	Δt <sub>H</sub> (h) = 1.5	Δt <sub>H</sub> (h) = 1.0	Δt <sub>H</sub> (h) = 1.0	Δt <sub>H</sub> (h) = 1.0	Δt <sub>H</sub> (h) = 1.0
	5) $1.5 \times 10^{-3}$	5) 24	N = 10	N = 10	N = 10	N = 10	$\varepsilon_x$ (%) = -0.75	N = 10
	6) $1.67 \times 10^{-4}$	6) 28					N = 10	
$\sim 1000\text{h}$								
試験本数	6	6	2	2	1	1	1	1

表 2.1 続き  
Table 2.1 Continued

試験 項目	繰返しクリープ ( $\dot{\epsilon} = 0.1\%/\text{sec}$ )					
	試験 1	試験 2	試験 3	試験 4	試験 5	試験 6
試験温度	550°C					
試験条件	1) $\Delta\epsilon (\%) = 1.5$ $\sigma_1 (\text{kgt/mm}^2) = 10$ $\sigma_2 (\text{kgt/mm}^2) = 14$ $\Delta t_H(\text{h}) = 1.0$ $N = 10$	1) $\Delta\epsilon (\%) = 1.5$ $\sigma_1 (\text{kgt/mm}^2) = \pm 10$ $\sigma_2 (\text{kgt/mm}^2) = \pm 14$ $\Delta t_H(\text{h}) = 1.0$ $N = 10$	1) $\Delta\epsilon (\%) = 1.5$ $\Delta N = 100$ $\sigma_1 (\text{kgt/mm}^2) = 18$ $\sigma_2 (\text{kgt/mm}^2) = 24$ $\Delta t_H(\text{h}) = 1.0$ $N = 10$	1) $\Delta\epsilon (\%) = 1.5$ $\Delta N = 100$ $\sigma_1 (\text{kgt/mm}^2) = \pm 18$ $\sigma_2 (\text{kgt/mm}^2) = \pm 24$ $\Delta t_H(\text{h}) = 1.0$ $N = 10$	1) $\Delta\epsilon (\%) = 1.5$ $\Delta N = 100$ $\sigma_H (\text{kgt/mm}^2) = 24$ $\varepsilon_r (\%) = -0.75$ $\Delta t_H(\text{h}) = 50$ $N = 10$	1) $\Delta\epsilon (\%) = 1.5$ $\Delta N = 100$ $\Delta\sigma (\text{kgt/mm}^2) = 48$ $\sigma_H (\text{kgt/mm}^2) = \pm 24$ $\Delta t_H(\text{h}) = 50$ $N = 8$
試験本数	1	1	1	1	1	1

### 3. 供 試 材

40 mm 厚さの SUS 304 热間圧延鋼材を使用した。SUS 304 鋼板の製造仕様の概要を表 3.1 に示す。また、本材の化学成分分析結果、热処理結果、機械的性質およびその他の試験検査結果をまとめて表 3.2 に示す。

表 3.1 SUS 304 鋼板材 (40t) の製造仕様概要

Table 3.1 Summary of manufacturing specifications  
of SUS304 steel plate (40t)

項目	内 容																								
適用規格	<p>1. JISG4304-1977 「熱間圧延ステンレス鋼板」</p> <p>2. 通産省告示501号—昭和55年10月 「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」</p>																								
製 造	<p>1. 製造方式：電気炉製鋼後、真空脱ガス処理を行った鋼塊を熱間圧延方式により製造</p> <p>2. 热 处 理：JISG4304による固溶化熱処理 1,010~1,150°C水冷</p>																								
品質管理	<p>1. 化学成分(とりべ分析値, %)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th><th>Si</th><th>Mn</th><th>P</th><th>S</th><th>Ni</th><th>Cr</th><th>Co</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.04 0.08</td><td>≤1.00</td><td>≤2.00</td><td>&lt;0.040</td><td>≤0.030</td><td>8.00 10.50</td><td>18.00 20.00</td><td>≤0.25</td></tr> </tbody> </table> <p>2. 機械的性質</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>0.2%耐力 (kg/mm<sup>2</sup>)</th><th>引張強さ (kg/mm<sup>2</sup>)</th><th>伸び (%)</th><th>ブリネル硬さ (H<sub>B</sub>)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>≥21</td><td>≥53</td><td>≥40</td><td>≤187</td></tr> </tbody> </table>	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	0.04 0.08	≤1.00	≤2.00	<0.040	≤0.030	8.00 10.50	18.00 20.00	≤0.25	0.2%耐力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	ブリネル硬さ (H <sub>B</sub> )	≥21	≥53	≥40	≤187
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co																		
0.04 0.08	≤1.00	≤2.00	<0.040	≤0.030	8.00 10.50	18.00 20.00	≤0.25																		
0.2%耐力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	ブリネル硬さ (H <sub>B</sub> )																						
≥21	≥53	≥40	≤187																						
試験および 検査方法	<p>1. とりべ分析: JISG1253</p> <p>2. 製品分析: JISG1211~G1217およびJISG1222</p> <p>3. 引張試験: JISZ2241, G0567</p> <p>4. 硬さ試験: JISZ2243</p> <p>5. 超音波探傷試験: 通産省告示第501号 垂直法による100%走査</p>																								

表 3.2 SUS 304 鋼板材 (40t) の確性試験結果

Table 3.2 Certified material properties of SUS304 steel plate (40t)

## (1) 化学成分

(%)

項目	成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
規格値 レードル分析		$\leq 0.08$	$\leq 1.00$	$\leq 2.00$	$\leq 0.04$	$\leq 0.030$	8.00 /10.50	18.00 /20.00
分析値	レードル分析	0.05	0.59	0.87	0.027	0.003	8.98	18.47
	チェック分析	0.05	0.60	0.87	0.026	0.002	8.94	18.59

(注) JIS G4304 热間圧延ステンレス鋼板, SUS 304 HP 担当

## (2) 製造条件

溶解加工 熱処理	電気炉溶解 (30 ton), 真空強制脱酸, 鋼塊圧延比 160, 厚板圧延比 7, (热間圧延), 1100°C×48 分, 水冷
-------------	---

## (3) 機械試験結果

試験 項目	引張試験			かたさ試験	
	0.2%耐力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	$H_B$	
規格	$\geq 21$	$\geq 53$	$\geq 40$		$\leq 187$
試験 結果	室温	23	64	63	135
	550°C	12	39	40	

## (4) その他の試験調査結果

結晶粒度	外観検査	寸法検査	超温波探傷試験
4.5	良	良	良

## 4. 試験方法

### 4.1 試験片採取位置

試験片の採取要領を図4.1に示す。試験片は試験片軸が圧延方向と平行になる様採取した。

### 4.2 試験片

試験片形状を図4.2に示す。

引張及びクリープ試験にはそれぞれ図4.2 1), 2)の試験片を使用した。

また、各種の繰返しリラクセーション及び繰返しクリープ試験には図4.2 3)の試験片を用いた。

### 4.3 試験機の仕様

用いた試験機の仕様を表4.1 a) ~ c)に示す。

### 4.4 試験方法

試験方法の概略は次の通りであるが、その他の事項についてはFBR金属材料試験実施要領書<sup>(4)</sup>に従った。

#### (1) 引張試験

ひずみ速度が $0.1\%/\text{sec}$ と $8.3 \times 10^{-3}\%/\text{sec}$ の2本についてはつば間のひずみ速度の制御により試験を行ったが、それ以外のひずみ速度のものについては、クロスヘッド間の変位速度が一定となるよう行い、その結果得られたつば間の変位速度からひずみ速度を求めた。

#### (2) クリープ試験

クリープ試験法はほぼJIS Z-2271に定められた通りであるので、ここでは詳細は省く。

#### (3) 塑性クリープ挙動試験

各種繰返しリラクセーション及び繰返しクリープ試験は表4.1 c)に示す疲労試験機を用いて実施した。

試験条件は表2.1に示す通りであり、応力ひずみ変動部は全て $\dot{\epsilon} =$

0.1%/secのひずみ速度となるよう標点間制御を行った。繰返しクリープ試験では所定の保持応力に達した時、ひずみ制御から応力制御へ切換え、所定時間のクリープを行った後、再びひずみ制御に切換えて試験を行った。

これらの試験はコンピュータ付疲労試験機を用いてコンピュータにより試験の制御を行うとともに、ヒステリシスループデータ及び保持中挙動データのロッピディスクへの格納記憶を行ない、その後のデータ処理解析に用いた。

表 4.1 a) 試験機仕様

Table 4.1 a) Specifications of testing machine and apparatus

## 引張試験機

項目	試験機No.	EM001
1. 試験機本体		
1) 形式		インストロン型引張試験機
2) 最大負荷容量		10 ton
3) クロスヘッド昇降速度		0.005~50.0mm/min
2. 加熱装置		
1) 形式		縦割型管状炉
2) 使用温度		~800°C
3) 発熱体		ニクロム線，3回路
4) 容量		6 KW
3. 温度調節装置		
1) 形式		S C R 比例制御
2) 設定範囲		~800°C
3) 温度調節精度		±2°C
4) 温度検出器		白金抵抗体
4. 温度測定記録装置		
1) 温度記録計		アナログ打点式
5. 伸び測定記録装置		
1) 形式		つば間の伸び計測方式
2) 伸び計		L V D T
3) 伸び記録計		X-Y-T形

表 4.1 b) 試験機仕様

Table 4.1 b) Specifications of testing machine and apparatus

クリープ破断試験機

項目	試験機No FMPO6 ~ FMP10
1. 試験機本体	縦型単てこ荷重式 3 ton 1 : 10 Inco. 713C 0 kg
2. 加熱装置	縦割型管状炉 ~800°C カンタル線，3回路 3 KW
3. 温度調節装置	S C R 比例制御方式 0~1,330°C ±2°C 以内 白金抵抗体
4. 温度測定記録計	アナログ打点式（デジタルプリント式） 13% PR, 0.5φ
5. 伸び測定記録装置	つば間の伸び計測方式 アームショルダー型 目盛： ① 0.001, ストローク： 5 mm ② { 0.01, ストローク： 30 mm ③ 5段切換式： 0~1, 0~2.5, 0~5, 0~10, 0~25 mm
6. その他の	P N C 貸与機

表 4.1 c) 試験機仕様

Table 4.1 c) Specifications of testing machine and apparatus

疲労試験機

項目	試験機No	HMP 01
1. 試験機本体		
1) 形式	電気油圧 サーボ形閉回路制御方式	
2) 動的最大負荷容量	± 25 ton	
3) 油圧加振器	± 25 ton, ストローク ± 50mm	
4) チャック	ネジ式	
2. 制御装置		
1) 形式	コンピュータコントロール	
2) 制御量	荷重, ひずみ, 変位	
3) 波 数	正弦波, 三角波, 台形波, 任意波形	
4) 周波数	~ 1 Hz	
3. 加熱装置		
1) 形式	高周波誘導加熱方式 (100KHz)	
2) 使用温度	~ 1,000°C	
3) 容量	10 KW	
4. 温度調節装置		
1) 形式	SCR PID 制御	
2) 設定範囲	~ 1,000°C	
3) 温度調節精度	± 5 °C 以内 (G. L. 内)	
4) 温度検出器	13% PR 熱電対	
5. 温度測定記録装置		
1) 温度記録計	アナログペン書き式	
2) 温度指示計	デジタル式	
6. 伸び測定記録装置		
1) 形式	L V D T { 軸方向 : GL = 25 mm 径方向 : d = 10 mm	
2) 伸び記録計	X - Y - T 形 デジタルタイプアウト	
7. その他の	P N C 貸与機	

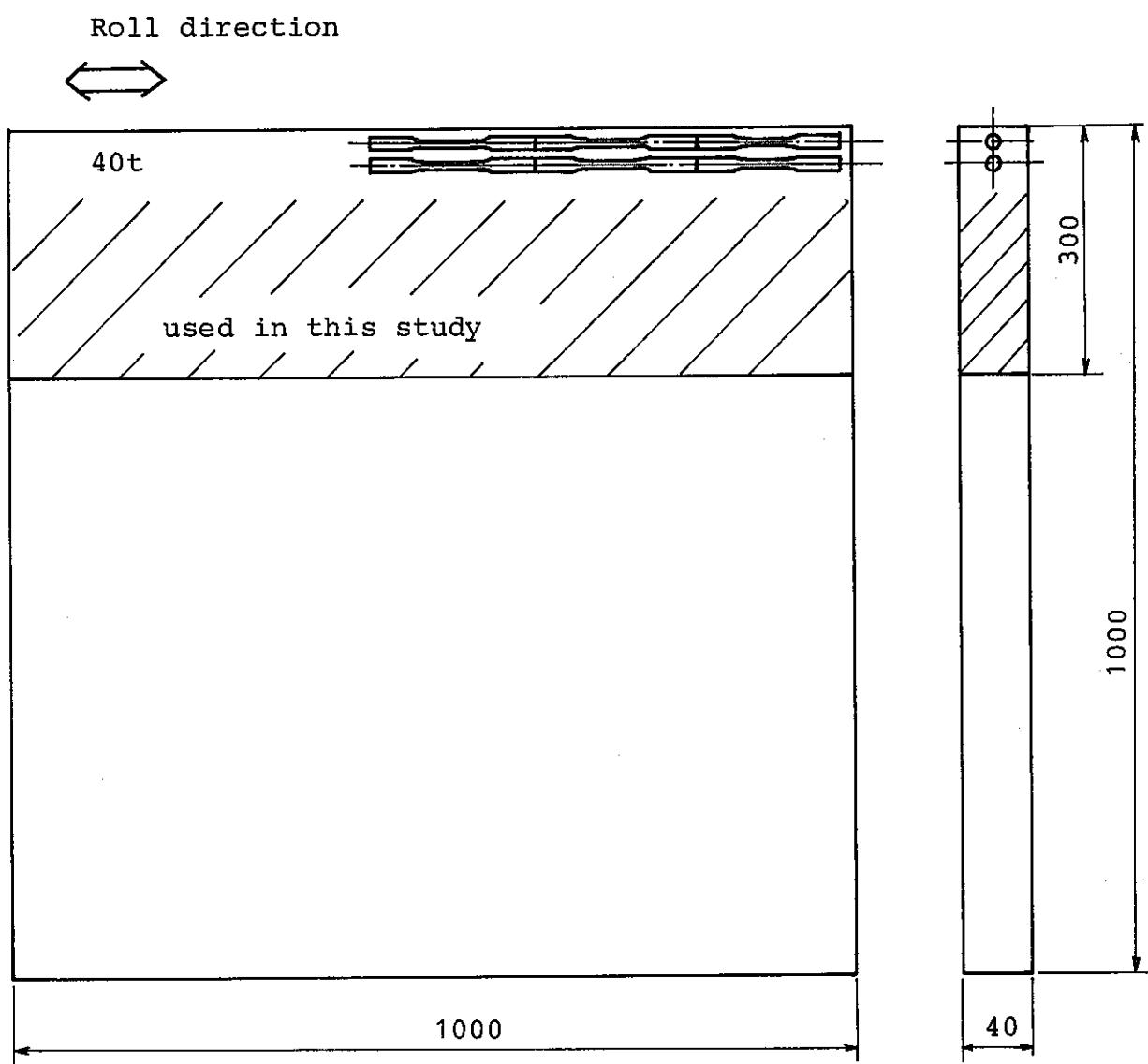
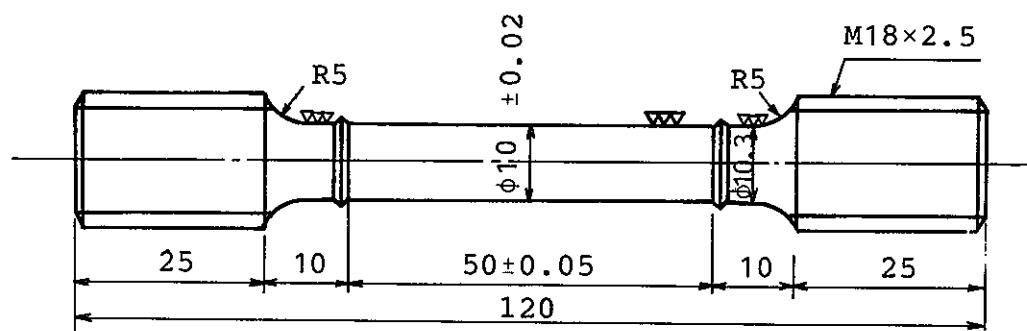


図 4.1

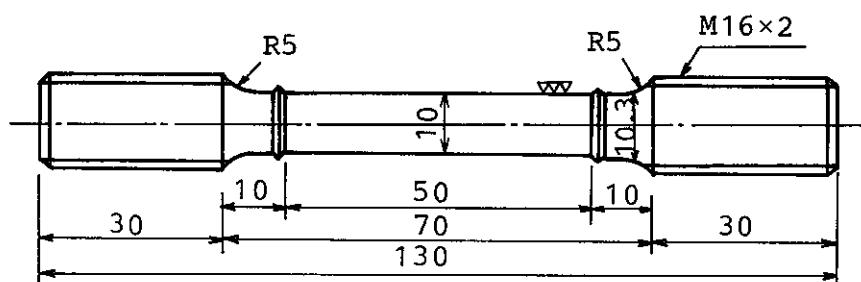
試験片採取位置

Fig. 4.1

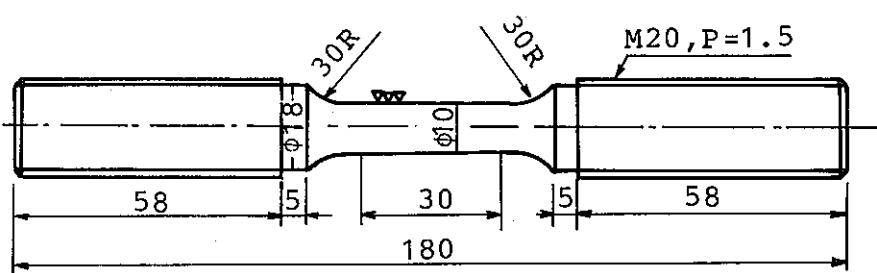
Sampling location of test specimen



1) 引張試験片



2) クリープ試験片



3) 塑性クリープ拳動試験片

図 4.2 試験片形状

Fig. 4.2 Dimension of test specimen

## 5. 試験結果

### 5.1 引張試験

引張試験結果を表 5.1 及び図 5.1 に示す。

図 5.1 a) は横軸のひずみを 10 %まで示し、図 5.1 b) は 0 ~ 2 %までを拡大して示している。この図から SUS 304 鋼 550 °C の単軸応力ひずみ挙動に及ぼすひずみ速度の影響は  $\dot{\epsilon} = 1.67 \times 10^{-4} \sim 5.56 \%/\text{sec}$  の範囲ではほとんど認められないことがわかる。

一方、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼、600 °C では低ひずみ速度になるにつれ、変形中に生ずるクリープひずみにより応力が低下することが報告されている。<sup>(5)</sup> SUS 304 鋼、550 °C ではこのクリープ効果と動的ひずみ時効が相殺して変形挙動に及ぼすひずみ速度の影響がみかけ上認められなかったと考えることもできる。

### 5.2 クリープ試験

クリープ試験結果を表 5.2 及び図 5.2 に示す。

この結果、クリープひずみ式を次式で表わされる Norton - Bailey 型で近似した。

$$\epsilon_c (\text{mm/mm}) = 4.51 \times 10^{-8} \sigma^{3.19} t^{0.415} + 4.41 \times 10^{-17} \sigma^{9.10} t \quad \dots \dots \quad (5.1)$$

このクリープひずみ式を実験結果と比較して図 5.2 に示す。

なお、図中には「5.4 繰返しクリープ試験」で得られたクリープデータ ( $\sigma = 10 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $t \leq 1 \text{ h}$ ) を併記している。

### 5.3 繰返しリラクセーション試験

表 2.1 に示したように、6 種類の繰返しリラクセーション試験（試験 1 ~ 試験 6）を実施した。このうち、試験 1, 試験 2 については各々 2 種類のひずみ範囲で行った。得られたヒステリシスループ及びひずみ保持中のリラクセーション曲線を図 5.3 ~ 5.10 に示す。また、リラクセーション中の応力値を表 5.3 に示す。

図 5.3 ~ 5.6 の(b)図中の実線は、各サイクルのひずみ保持開始時の応力

を初期応力として、(5.1)式を用いてひずみ硬化則により計算したリラクセーション曲線を示している。すなわち、この計算では、前サイクルまでのクリープひずみ履歴の有無は考慮していない。各図からわかるように、繰返し硬化が進むにつれ、計算値の方が緩和がやや大きくなる傾向があるが、大きな差ではないので、全般に計算値と実験値は大略一致すると考えてよかろう。

図5.7、5.8のリラクセーション中に再負荷を含む試験（試験3、試験4）における同様の計算結果も実験値とほぼ一致している。この場合、各サイクルの引張又は圧縮側の3段のリラクセーションを連続したクリープ変形と見なしてひずみ硬化則を適用し、塑性反転により逆降伏する度に処女材に戻ると仮定した。

また、図5.9、5.10は100回の塑性ひずみ繰返しを与えた後に上記と同様の3段リラクセーションを含む繰返しを与えた場合（試験5、試験6）の結果である。この場合も、試験3、4と同じ方法で計算したリラクセーション曲線を実線で示しているが、これらは実験値とよく一致している。

なお、図5.7(b)～5.10(b)においては、リラクセーション挙動の繰返し数依存性は認められなかった。

#### 5.4 繰返しクリープ試験

表2.1に示したように6種類の繰返しクリープ試験（試験1～試験6）を実施した。得られたヒステリシスループ及び応力保持中のクリープ曲線を図5.11～5.16に示す。また、応力保持中のひずみ値を表5.4に示す。

図5.11～5.15の(b)図及び図5.16の(b), (c)図は応力保持開始時のひずみを原点( $\epsilon_c = 0$ )としたクリープひずみを示している。ただし、図5.11～5.14では引張側又は圧縮側に2段の応力保持を与えているため、1段目と2段目のクリープひずみの累積値を示している。

なお、圧縮側応力保持中のクリープひずみは絶対値で表示している。

図5.11～5.14の(b)図の実線及び一点鎖線は、(5.1)式を用いてひずみ硬化則により計算したクリープ曲線を、破線は時間硬化則により計算

したクリープ曲線を示している。この時、実線及び破線は繰返しリラクセーションの場合と同様に、塑性反転により逆降伏する度に処女材に戻ると仮定して計算した。

また、逆降伏の有無にかかわらず、クリープひずみ硬化を累積させた時、最終的には定常ループの計算になり、この場合の結果を一点鎖線で示している。

図 5.11, 5.12 は引張側又は圧縮側に 2 段の応力保持を含む繰返しクリープ試験（試験 1, 試験 2）の結果である。(b) 図からわかるように、クリープひずみが比較的小さな領域であり、初期ひずみのとり方によっても実験結果が左右されることを考えれば、各サイクル毎のクリープひずみの生じ方にあまり大きな差異はないと言えよう。

また、これらの実験結果は上述の方法による逆降伏時に処女材に戻ると考えたひずみ硬化則の計算結果（実線）に近いようである。

図 5.13, 5.14 は 100 回の塑性ひずみ繰返しを与えた後に上記と同様の 2 段クリープを含む繰返しを与えた場合（試験 3, 試験 4）の結果である。この場合も(b) 図に試験 1, 2 と同じ方法で計算したクリープ曲線を併記しているが、実験結果は逆降伏の毎に処女材に戻るとしたひずみ硬化則の計算結果（実線）に近く、また実験結果の繰返し数依存は認められなかった。

図 5.15, 5.16 は 100 回の塑性ひずみ繰返しを与えた後に引張側又は圧縮側に 50 h の応力保持を含む繰返しクリープ試験（試験 5, 試験 6）の結果である。図 5.15 (b), 図 5.16 (b)(c) には「5.2 クリープ試験結果」の処女材クリープデータを星印で示すとともに処女材の定常クリープ速度に相当する勾配も併記している。

また、(5.1) 式のクリープ曲線を実線で示している。

これらの図から塑性ひずみ繰返しを与えた直後 ( $N = 101$ ) のクリープデータは予繰返しのない処女材データに比べ、かなりクリープひずみが生じにくくなっているが、その後 50 h 応力保持を含む繰返しを与えることにより ( $N = 101 \sim 108$ )、次第にクリープひずみが生じやすくなり、処女材データに近づいていくようである。

表 5.1 引張試験結果, SUS 304 鋼, 550 °C

Table 5.1 Results of tensile tests of SUS304 at 550°C

温 度		550°C											
ひずみ速度 (%/sec)		$1.67 \times 10^{-4}$		$1.51 \times 10^{-3}$		$8.33 \times 10^{-3}$		0.10		0.80		5.56	
真ひずみ	真応力	$\epsilon$	$\sigma$	$\epsilon$	$\sigma$	$\epsilon$	$\sigma$	$\epsilon$	$\sigma$	$\epsilon$	$\sigma$	$\epsilon$	$\sigma$
< 単位 >	0.004	3.8	0.043	6.4	0.010	5.0	0.010	4.1	0.029	4.8	0.033	4.3	
	0.013	4.9	0.139	11.4	0.026	7.5	0.026	6.2	0.055	8.3	0.236	10.0	
	0.020	6.1	0.236	12.7	0.042	8.8	0.042	8.1	0.102	10.1	0.537	13.3	
	0.033	7.3	0.418	14.0	0.059	9.7	0.060	9.3	0.182	11.5	0.914	14.3	
	0.047	8.6	0.795	15.2	0.085	10.4	0.082	10.1	0.240	12.0	1.302	15.6	
	0.063	9.6	1.324	16.1	0.105	11.1	0.094	10.6	0.321	12.6	2.717	18.8	
	0.094	10.7	2.046	18.1	0.212	12.2	0.108	10.9	0.459	13.4	4.488	22.4	
	0.134	11.4	2.794	19.6	0.318	12.9	0.149	11.5	0.735	14.4	6.352	26.0	
	0.191	12.2	4.361	22.9	0.446	13.5	0.199	12.0	1.130	15.1	7.938	28.6	
	0.316	13.2	5.92	25.6	0.506	13.8	0.323	12.9	1.598	15.6	8.764	29.7	
	0.459	14.1	7.46	28.2	0.745	14.5	0.421	13.4	2.139	16.6			
	0.678	14.6	8.98	30.6	1.059	15.4	0.58	14.0	2.910	18.3			
	1.138	15.9			2.018	17.8	1.155	15.7	3.676	19.9			
	2.806	20.4			3.114	20.2	1.995	17.8	4.549	21.5			
	3.525	22.1			3.955	22.0	3.077	20.2	5.188	22.9			
	4.31	23.5			5.198	24.5	4.085	22.7	5.935	24.2			
	5.172	24.6			5.831	25.5	5.697	26.1	6.715	25.6			
	5.877	25.7			7.215	28.2	6.569	28.0	7.415	26.8			
	7.253	28.1			8.349	30.3	7.822	30.0	8.183	28.0			
	8.475	29.8			9.064	31.5	9.117	32.1	8.909	29.2			

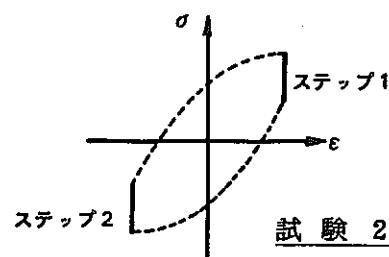
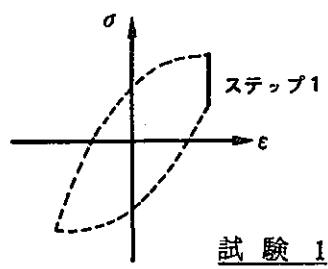
表 5.2 クリープ試験結果, SUS 304 鋼, 550 °C

Table 5.2 Results of creep tests of SUS304 at 550°C

温度 (°C)	550					
	10	14	18	22	24	28
応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )						
瞬間ひずみ (%)	0.095	0.498	2.133	4.519	6.013	8.7
定常クリープ ひずみ速度 (%/h)	<6.5×10 <sup>-5</sup>	<1.23×10 <sup>-4</sup>	<5.7×10 <sup>-4</sup>	5.42×10 <sup>-3</sup>	1.21×10 <sup>-2</sup>	4.67×10 <sup>-2</sup>
時間 (h)	クリープひずみ (%)					
	0.5	-	-	0.023	0.075	0.09
1	-	-	0.029	0.078	0.112	0.38
2	-	-	0.033	0.092	0.141	0.41
3	-	-	0.037	0.102	0.170	0.45
5	0.0085	-	0.047	0.126	0.22	0.51
10	0.0101	0.034	0.070	0.188	0.38	0.76
20	0.014	0.040	0.101	0.29	0.63	1.50
30	0.016	0.046	0.135	0.44	0.89	2.18
50	0.022	0.057	0.189	0.72	1.33	3.2
100	0.032	0.088	0.31	1.23	2.17	5.5
200	0.045	0.145	0.51	1.89	3.45	12.7
300	0.055	0.185	0.68	2.43	4.65	-
500	0.074	0.245	0.93	3.53	7.25	-
1000		0.34	1.31	6.5	-	-

表 5.3 a) 線返しリラクセーション(試験1,2)試験結果, SUS 304, 550°C

Table 5.3 a) Results of cyclic relaxation tests (Test No.1, 2) of SUS304 at 550°C

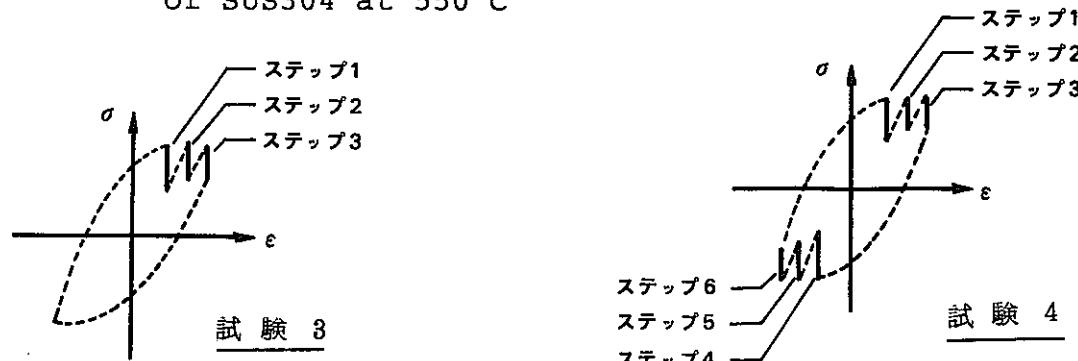


試験	ひずみ範囲 $\Delta\epsilon$ (%)	繰返し回数	*ステップ	ひずみ保持中の応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )											
				ひずみ保持中の時間 (min)											
				0	1	2	3	5	7	10	20	30	40	50	60
1	1.0	1	1	13.9	12.5	12.6	12.7	12.4	12.3	12.2	12.4	12.5	12.4	12.0	12.5
				16.7	15.6	15.4	15.3	15.4	15.2	15.6	15.4	14.8	15.1	14.7	14.8
				18.3	16.5	16.7	16.5	16.4	16.4	16.3	16.4	16.2	16.2	16.0	16.4
				20.6	18.9	18.7	18.7	18.5	18.3	18.2	18.2	18.2	17.8	17.7	17.1
				21.8	20.2	20.0	20.0	19.8	19.5	19.6	19.4	19.1	19.1	18.7	18.5
				23.1	21.5	21.1	20.9	20.4	20.8	20.3	20.0	19.9	19.5	19.4	19.1
	1.5	1	1	14.6	13.7	13.7	13.1	13.2	13.2	13.3	13.1	13.2	13.3	13.0	13.0
				18.7	17.4	16.8	17.1	16.8	16.9	16.4	16.8	16.3	15.9	16.0	16.1
				21.4	19.7	19.2	19.2	19.2	18.9	19.0	18.8	18.1	18.1	17.9	17.9
				24.5	22.1	21.7	22.0	21.5	21.3	21.3	20.8	20.2	19.9	20.0	19.4
				25.9	23.4	23.1	23.0	22.6	22.3	21.7	21.0	20.8	20.3	20.1	19.9
				26.9	24.6	23.9	23.6	23.0	22.9	22.5	21.3	21.0	20.8	20.5	20.4
2	1.0	1	1	14.1	13.1	12.9	13.1	12.8	12.9	12.8	12.9	12.4	12.8	12.9	12.9
			2	-15.5	-13.8	-13.2	-13.5	-13.5	-13.1	-13.0	-13.1	-13.2	-12.7	-12.6	-12.7
		2	1	17.0	15.3	15.3	15.4	15.5	15.1	15.2	15.0	14.8	14.8	14.6	15.0
			2	-17.6	-15.3	-15.5	-15.3	-14.9	-14.9	-14.8	-14.7	-14.6	-14.7	-14.7	-14.1
		3	1	18.9	17.4	17.1	16.9	16.6	16.7	17.0	16.4	16.5	15.9	16.5	15.5
			2	-18.9	-16.5	-16.5	-15.9	-15.9	-16.2	-15.8	-15.5	-15.5	-15.4	-15.5	-15.2
		5	1	21.2	19.6	19.3	19.3	19.2	18.8	18.7	18.2	18.3	17.8	17.5	17.5
			2	-20.9	-18.2	-17.9	-17.9	-17.6	-17.5	-17.4	-17.0	-16.4	-16.5	-16.4	-16.2
		7	1	22.6	20.7	20.3	20.2	19.8	19.8	19.3	19.0	18.7	18.5	18.3	17.9
			2	-22.1	-19.3	-19.2	-19.0	-18.7	-18.4	-18.2	-17.8	-17.4	-17.2	-17.1	-16.9
		10	1	23.8	21.5	21.1	21.1	20.7	20.6	20.2	19.5	19.2	18.8	18.7	18.5
			2	-23.1	-20.3	-19.8	-19.5	-19.2	-18.9	-18.4	-18.1	-17.6	-17.8	-16.9	-16.9
	1.5	1	1	14.5	13.6	13.5	13.2	13.1	13.3	13.2	12.8	13.4	12.9	12.9	13.0
			2	-16.9	-14.3	-14.5	-14.3	-14.2	-14.1	-14.0	-13.9	-13.7	-13.5	-13.5	-13.4
		2	1	19.3	18.0	17.6	17.8	17.5	17.3	17.5	16.9	17.0	16.7	16.6	16.3
			2	-20.1	-17.2	-17.4	-17.3	-17.0	-16.5	-16.7	-16.6	-16.0	-16.3	-15.9	-15.7
		3	1	22.2	20.0	19.8	19.8	19.7	19.3	19.5	19.0	18.8	18.4	18.6	18.2
			2	-22.3	-19.1	-18.9	-18.4	-18.3	-18.4	-18.2	-18.0	-17.9	-17.5	-17.4	-16.9
		5	1	25.1	21.9	21.9	21.6	21.2	21.2	21.0	20.6	20.1	19.5	19.5	19.3
			2	-24.6	-21.0	-20.3	-20.4	-19.8	-19.9	-19.4	-18.7	-18.3	-18.2	-17.9	-17.6
		7	1	26.3	23.5	22.7	22.7	21.9	21.9	21.9	21.0	20.6	20.2	19.7	19.9
			2	-25.5	-21.5	-21.3	-20.7	-20.6	-20.4	-20.2	-19.6	-19.0	-18.5	-18.4	-18.0
		10	1	27.0	24.1	23.4	23.4	23.1	22.5	22.3	21.4	20.9	20.8	20.4	20.2
			2	-26.4	-22.3	-22.0	-21.6	-21.2	-20.9	-20.3	-19.5	-19.2	-19.0	-18.5	-18.4

\* ステップ1 :  $\epsilon_H = \Delta\epsilon/2$ ステップ2 :  $\epsilon_H = -\Delta\epsilon/2$  $\epsilon_H$  : 保持ひずみ (%)

表 5.3 b) 繰返しリラクセーション(試験3,4)試験結果, SUS304, 550°C

Table 5.3 b) Results of cyclic relaxation tests (Test No.3, 4) of SUS304 at 550°C

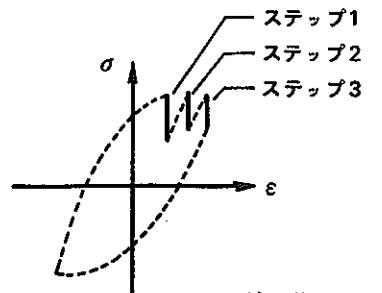


試験	応力範囲 $\Delta\sigma$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	繰返し回数	*ステップ	ひずみ保持中の応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )									
				保持中時間 (min)									
				0	1	2	3	5	7	10	20	30	60
3	28.0	1	1	14.0	13.2	13.5	12.9	13.1	12.9	13.1	12.4	12.1	11.6
			2	14.0	14.0	14.0	13.8	13.6	13.8	13.8	13.8	13.7	13.7
			3	14.2	14.3	14.1	14.1	14.1	13.7	13.9	14.2	13.8	14.0
		2	1	14.0	13.8	14.1	13.9	13.7	13.6	13.9	13.5	14.1	13.5
			2	14.1	14.6	13.9	14.1	14.4	14.2	13.6	14.1	14.0	14.2
			3	14.2	14.4	14.6	14.7	14.4	14.5	14.4	14.2	14.4	14.1
		5	1	14.1	13.6	13.0	13.3	13.2	13.4	13.4	13.3	13.4	13.3
			2	14.0	13.8	14.0	14.0	13.9	13.8	13.7	14.1	14.0	13.5
			3	14.0	13.8	14.1	13.9	13.9	14.2	13.7	13.8	13.9	13.7
		10	1	14.0	12.9	12.7	13.1	12.8	13.2	13.2	13.1	12.8	12.7
			2	14.0	13.8	13.8	13.5	13.7	13.8	13.8	13.6	14.0	13.2
			3	14.1	14.0	14.1	14.1	13.8	14.2	14.0	13.7	13.4	13.9
4	28.0	1	1	13.9	12.7	12.5	12.6	12.5	12.6	12.4	12.7	12.8	13.2
			2	14.1	12.9	13.2	13.1	13.0	13.0	12.9	12.9	12.9	13.2
			3	14.1	11.6	11.5	11.5	11.5	11.6	11.7	11.7	11.5	11.5
			4	-14.0	-11.7	-12.0	-11.8	-11.7	-11.7	-11.6	-11.5	-11.5	-11.5
			5	-14.0	-13.0	-12.9	-12.9	-12.8	-12.8	-12.9	-12.7	-12.9	-13.1
			6	-14.0	-13.2	-13.1	-13.2	-13.3	-13.3	-13.2	-13.3	-13.3	-13.5
		2	1	13.9	11.9	11.9	11.9	11.7	11.8	11.8	11.6	11.5	11.2
			2	13.9	14.2	14.2	14.1	14.0	14.1	14.0	13.5	13.7	13.5
			3	14.3	12.3	12.3	12.3	12.4	12.3	12.2	11.9	11.7	11.8
			4	-14.0	-12.2	-12.2	-12.0	-12.0	-11.9	-12.0	-12.1	-12.3	-12.0
			5	-14.0	-13.2	-13.0	-13.0	-13.4	-13.2	-13.1	-13.3	-13.2	-13.0
			6	-14.0	-13.2	-13.4	-13.3	-13.6	-13.4	-13.2	-12.8	-13.2	-12.9
		5	1	13.9	12.1	11.9	12.0	11.9	12.1	11.7	11.8	12.2	12.0
			2	13.9	14.3	14.3	14.3	14.3	14.2	14.2	14.1	13.9	13.5
			3	14.3	14.3	14.1	14.1	14.1	14.1	14.0	13.9	13.9	14.0
			4	-14.0	-11.5	-11.5	-11.1	-11.2	-11.1	-11.0	-10.6	-10.6	-10.7
			5	-14.0	-12.7	-13.1	-12.9	-13.1	-13.2	-13.2	-12.9	-13.1	-13.1
			6	-14.0	-13.0	-13.0	-13.2	-13.0	-13.1	-13.2	-13.1	-12.9	-12.7
		10	1	13.9	12.2	12.2	11.8	12.3	12.2	12.1	11.8	11.5	11.0
			2	13.9	14.2	14.1	14.1	14.2	14.1	13.9	13.7	13.5	13.3
			3	14.0	14.4	14.5	14.5	14.4	14.2	14.1	13.9	13.7	13.5
			4	-14.0	-11.7	-11.8	-11.6	-11.4	-11.5	-11.3	-11.4	-11.1	-11.1
			5	-14.0	-13.2	-13.1	-13.1	-13.1	-12.9	-13.0	-12.9	-12.7	-12.8
			6	-14.0	-13.5	-13.5	-13.4	-13.2	-13.3	-13.4	-13.3	-13.2	-13.1

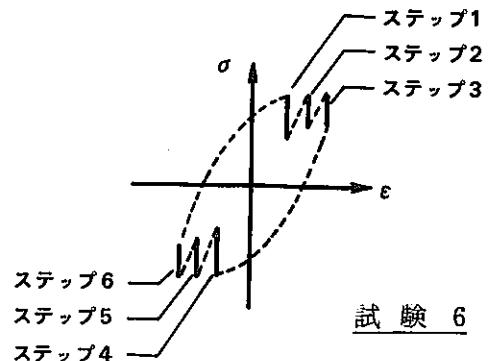
\*ステップ1~3 :  $\sigma_0 = 14.0$  $\sigma_0$ : 保持開始応力 (kgf/mm<sup>2</sup>)ステップ4~6 :  $\sigma_0 = -14.0$

表 5.3 c) 繰返しリラクセーション(試験5, 6)試験結果, SUS 304, 550°C

Table 5.3 c) Results of cyclic relaxation tests (Test No.5, 6) of SUS304 at 550°C



試験 5



試験 6

試験 ひずみ 範囲 $\Delta\varepsilon$ (%)	予繰返し(N=100)			繰返しリラクセーション												
	最終 サイクル (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\Delta\sigma$	$\sigma_t$	$\sigma_c$	繰返し 回数	* ステップ	ひずみ保持中の応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )									
							保持中時間 (min)									
					0	1	2	3	5	7	10	20	30	60		
5	1.51	63.5	31.3	-32.2	101	1	23.9	20.7	20.3	20.0	20.0	19.9	19.8	19.3	18.8	18.4
						2	23.9	23.6	23.1	23.3	22.8	22.4	22.1	21.7	21.2	20.2
						3	24.1	23.9	23.4	23.7	23.1	23.1	22.7	22.2	21.2	20.6
					102	1	23.9	21.6	21.4	21.0	20.8	20.9	20.6	20.5	20.0	19.4
						2	24.2	24.1	23.9	23.6	23.4	23.2	23.0	22.5	22.0	21.1
						3	23.9	24.4	24.1	23.9	23.6	23.5	23.4	22.6	22.1	21.5
					105	1	24.0	21.8	21.6	21.6	21.4	21.4	21.2	20.8	20.7	19.8
						2	24.0	24.2	24.1	24.0	23.7	23.5	23.3	22.7	22.2	21.4
						3	24.1	24.2	24.2	23.7	23.8	23.6	23.5	23.0	22.5	21.8
					110	1	23.9	21.5	21.4	21.5	21.4	21.0	20.8	20.5	20.1	19.7
						2	23.9	24.4	24.2	24.2	23.6	23.3	23.4	22.8	22.3	21.4
						3	24.0	24.6	24.3	24.2	23.8	23.6	23.4	22.9	22.5	21.8
6	1.51	65.4	32.0	-33.4	101	1	24.0	21.6	21.1	20.8	20.6	20.1	20.0	19.3	18.7	17.7
						2	24.0	23.4	23.1	22.9	22.7	22.5	21.9	21.3	20.8	19.8
						3	24.2	23.7	23.5	23.3	23.1	23.0	22.5	21.9	21.5	20.6
						4	-24.1	-21.7	-21.0	-20.4	-20.4	-19.9	-19.5	-18.8	-18.4	-17.4
						5	-24.1	-23.9	-23.5	-23.4	-23.2	-23.0	-22.7	-22.1	-21.6	-20.7
						6	-24.1	-24.4	-24.1	-24.0	-23.8	-23.9	-23.4	-22.8	-22.5	-21.7
					102	1	24.0	21.7	21.1	20.9	20.5	20.2	20.0	19.2	18.7	18.0
						2	24.0	23.1	23.0	22.8	22.6	22.5	22.3	21.5	21.2	20.4
						3	24.1	23.3	23.3	23.1	22.8	22.7	22.6	22.3	21.7	21.0
						4	-24.0	-21.8	-21.2	-21.1	-20.7	-20.3	-20.1	-19.3	-18.8	-18.1
						5	-24.2	-23.9	-23.5	-23.4	-23.1	-22.9	-22.9	-22.2	-21.6	-20.9
						6	-24.1	-23.9	-23.7	-23.7	-23.6	-23.4	-23.3	-22.9	-22.4	-21.7
					105	1	24.0	21.9	21.6	21.2	20.8	20.7	20.3	19.7	19.3	18.7
						2	24.0	23.5	23.4	23.1	22.8	22.6	22.4	21.9	21.6	20.4
						3	24.1	23.9	23.6	23.4	23.0	23.0	22.9	22.2	21.9	21.2
						4	-24.0	-21.7	-21.4	-21.2	-20.8	-20.6	-20.2	-19.6	-19.2	-18.6
						5	-24.1	-23.9	-23.7	-23.4	-23.2	-23.0	-22.5	-22.2	-21.7	-20.8
						6	-24.0	-24.0	-23.9	-23.6	-23.6	-23.4	-23.1	-22.8	-22.2	-21.6
					110	1	24.0	21.8	21.3	21.1	20.9	20.6	20.2	19.7	19.2	18.0
						2	24.1	23.4	23.2	22.9	22.6	22.6	22.3	21.7	21.3	20.6
						3	24.0	23.6	23.4	23.3	23.3	23.0	22.8	22.0	21.6	21.1
						4	-24.1	-21.8	-21.2	-21.2	-20.7	-20.4	-20.2	-19.6	-19.2	-18.4
						5	-24.1	-23.6	-23.4	-23.1	-23.0	-23.0	-22.8	-22.1	-21.6	-21.1
						6	-24.0	-23.9	-23.7	-23.6	-23.3	-23.4	-22.9	-22.4	-21.9	-21.2

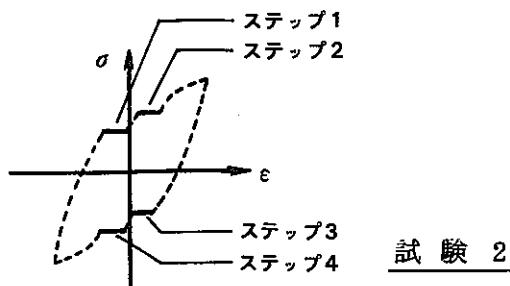
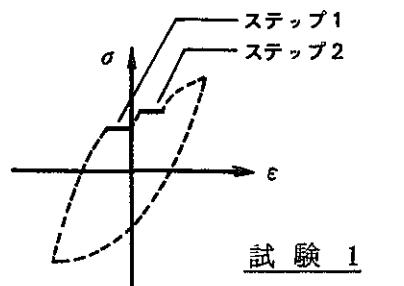
ステップ 1~3 :  $\sigma_0 = 24.0$

ステップ 42.6 :  $a = 34.2$

$\sigma_0$  : 保持開始応力 ( $\text{kgf/mm}^2$ )

表 5.4 a) 繰返しクリープ(試験 1, 2)試験結果, SUS 304, 550°C

Table 5.4 a) Results of cyclic creep tests (Test No.1, 2) of SUS304 at 550°C

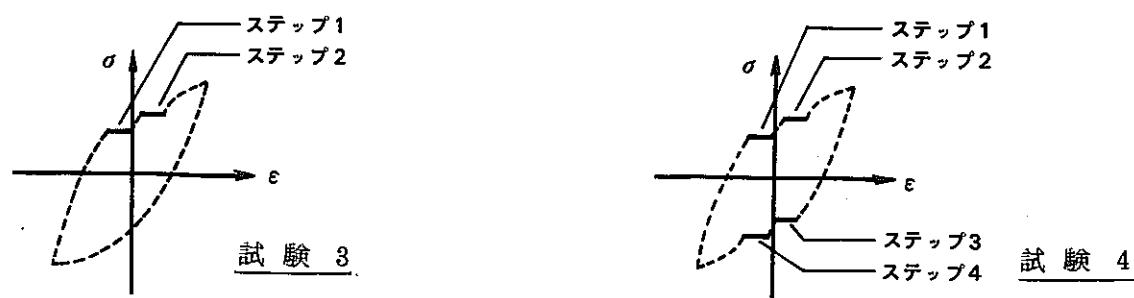


試験	ひずみ範囲 $\Delta\epsilon$ (%)	繰返し回数	*ステップ	応力保持中のひずみ (%)									
				保持中時間 (min)									
				0	1	2	3	5	7	10	20	30	60
1	1.5	1	1	0.109	0.113	0.114	0.114	0.112	0.115	0.113	0.114	0.112	0.117
			2	0.499	0.504	0.505	0.502	0.505	0.505	0.505	0.507	0.509	0.508
		2	1	-0.509	-0.506	-0.505	-0.505	-0.504	-0.503	-0.504	-0.505	-0.505	-0.504
			2	-0.430	-0.424	-0.422	-0.423	-0.421	-0.419	-0.419	-0.415	-0.417	-0.410
		3	1	-0.488	-0.485	-0.486	-0.485	-0.486	-0.482	-0.485	-0.482	-0.481	-0.481
			2	-0.448	-0.442	-0.441	-0.440	-0.438	-0.440	-0.437	-0.435	-0.433	-0.430
		5	1	-0.466	-0.463	-0.463	-0.463	-0.462	-0.461	-0.458	-0.458	-0.460	-0.456
			2	-0.428	-0.426	-0.427	-0.416	-0.423	-0.425	-0.420	-0.419	-0.416	-0.411
		7	1	-0.458	-0.457	-0.453	-0.455	-0.454	-0.453	-0.453	-0.449	-0.448	-0.445
			2	-0.419	-0.418	-0.415	-0.414	-0.413	-0.413	-0.415	-0.409	-0.406	-0.400
		10	1	-0.449	-0.446	-0.446	-0.445	-0.443	-0.441	-0.441	-0.442	-0.441	-0.437
			2	-0.410	-0.408	-0.409	-0.405	-0.408	-0.406	-0.405	-0.402	-0.396	-0.394
2	1.5	1	1	0.089	0.095	0.096	0.097	0.098	0.096	0.098	0.100	0.101	0.102
			2	0.509	0.511	0.512	0.512	0.512	0.514	0.515	0.514	0.517	0.518
			3	0.454	0.450	0.451	0.450	0.448	0.447	0.446	0.447	0.447	0.445
			4	-0.070	-0.077	-0.077	-0.078	-0.077	-0.080	-0.080	-0.080	-0.085	-0.089
		2	1	-0.508	-0.506	-0.504	-0.504	-0.503	-0.506	-0.504	-0.503	-0.504	-0.499
			2	-0.439	-0.427	-0.424	-0.424	-0.421	-0.424	-0.421	-0.419	-0.417	-0.413
			3	0.440	0.435	0.436	0.434	0.433	0.435	0.433	0.434	0.434	0.431
			4	0.366	0.360	0.360	0.358	0.356	0.353	0.353	0.348	0.345	0.338
		3	1	-0.491	-0.487	-0.487	-0.487	-0.486	-0.486	-0.484	-0.485	-0.483	-0.483
			2	-0.453	-0.447	-0.446	-0.446	-0.444	-0.442	-0.440	-0.439	-0.435	-0.432
			3	0.435	0.431	0.430	0.430	0.430	0.429	0.427	0.427	0.426	0.423
			4	0.391	0.387	0.383	0.385	0.381	0.379	0.381	0.376	0.371	0.366
		5	1	-0.475	-0.472	-0.470	-0.469	-0.469	-0.468	-0.465	-0.466	-0.466	-0.461
			2	-0.433	-0.432	-0.430	-0.431	-0.429	-0.429	-0.426	-0.424	-0.422	-0.419
			3	0.431	0.426	0.424	0.424	0.422	0.422	0.419	0.417	0.417	0.412
			4	0.387	0.384	0.382	0.382	0.378	0.379	0.377	0.372	0.370	0.363
		7	1	-0.469	-0.466	-0.462	-0.462	-0.460	-0.461	-0.457	-0.459	-0.454	-0.454
			2	-0.427	-0.425	-0.426	-0.423	-0.424	-0.423	-0.420	-0.418	-0.416	-0.409
			3	0.429	0.421	0.421	0.420	0.418	0.416	0.419	0.413	0.413	0.409
			4	0.383	0.380	0.379	0.379	0.377	0.375	0.375	0.367	0.367	0.360
		10	1	-0.464	-0.460	-0.460	-0.457	-0.457	-0.458	-0.455	-0.452	-0.452	-0.447
			2	-0.423	-0.421	-0.420	-0.421	-0.420	-0.417	-0.416	-0.414	-0.413	-0.407
			3	0.423	0.418	0.415	0.413	0.414	0.412	0.413	0.409	0.409	0.404
			4	0.377	0.376	0.374	0.374	0.371	0.372	0.369	0.367	0.362	0.357

\* ステップ 1 :  $\sigma_H = 10.0$ ステップ 2 :  $\sigma_H = 14.0$  $\sigma_H$  : 保持応力 ( $\text{kgf/mm}^2$ )ステップ 3 :  $\sigma_H = -10.0$ ステップ 4 :  $\sigma_H = -14.0$

表 5.4 b) 繰返しクリープ(試験3,4)試験結果、SUS304, 550°C

Table 5.4 b) Results of cyclic creep tests (Test No.3, 4) of SUS304 at 550°C



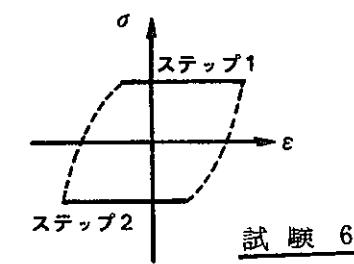
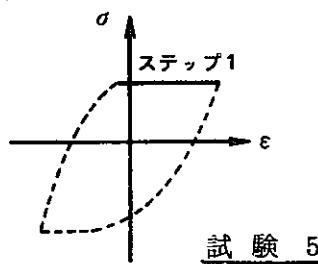
試験	ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$ (%)	予繰返し (N=100)			繰返しクリープ											
		最終 (kgf/mm <sup>2</sup> )			繰返し回数	*ステップ	応力保持中のひずみ (%)									
		サイクル					保持中時間 (min)									
		$\Delta\sigma$	$\sigma_t$	$\sigma_c$			0	1	2	3	5	7	10	20	30	60
3	1.51	63.3	31.2	-32.1	101	1	-0.293	-0.278	-0.274	-0.272	-0.270	-0.273	-0.267	-0.264	-0.261	-0.252
						2	-0.171	-0.151	-0.147	-0.142	-0.134	-0.134	-0.123	-0.109	-0.095	-0.067
					102	1	-0.285	-0.272	-0.273	-0.272	-0.271	-0.268	-0.268	-0.264	-0.259	-0.254
						2	-0.177	-0.156	-0.149	-0.147	-0.142	-0.135	-0.130	-0.116	-0.104	-0.074
					103	1	-0.276	-0.264	-0.258	-0.263	-0.258	-0.253	-0.253	-0.252	-0.250	-0.244
						2	-0.170	-0.151	-0.147	-0.140	-0.135	-0.129	-0.122	-0.103	-0.094	-0.067
					105	1	-0.278	-0.264	-0.264	-0.261	-0.259	-0.259	-0.256	-0.253	-0.251	-0.243
						2	-0.159	-0.143	-0.138	-0.135	-0.128	-0.121	-0.116	-0.100	-0.088	-0.056
					107	1	-0.273	-0.261	-0.258	-0.259	-0.257	-0.259	-0.256	-0.249	-0.249	-0.244
						2	-0.162	-0.144	-0.140	-0.131	-0.128	-0.121	-0.116	-0.102	-0.090	-0.061
					110	1	-0.271	-0.261	-0.257	-0.254	-0.257	-0.252	-0.254	-0.249	-0.245	-0.239
						2	-0.158	-0.144	-0.135	-0.132	-0.129	-0.121	-0.114	-0.100	-0.088	-0.061
4	1.51	62.9	30.8	-32.1	101	1	-0.273	-0.249	-0.243	-0.240	-0.240	-0.236	-0.233	-0.226	-0.225	-0.217
						2	-0.132	-0.101	-0.101	-0.091	-0.082	-0.076	-0.066	-0.047	-0.033	-0.002
						3	0.287	0.261	0.260	0.260	0.258	0.252	0.251	0.244	0.239	0.231
						4	0.155	0.135	0.127	0.121	0.117	0.111	0.103	0.087	0.075	0.045
					102	1	-0.266	-0.239	-0.236	-0.233	-0.231	-0.227	-0.227	-0.227	-0.222	-0.210
						2	-0.113	-0.083	-0.076	-0.068	-0.056	-0.050	-0.043	-0.022	-0.008	0.026
						3	0.268	0.247	0.247	0.242	0.240	0.239	0.242	0.237	0.232	0.222
						4	0.121	0.103	0.096	0.091	0.082	0.080	0.067	0.054	0.040	0.011
					103	1	-0.264	-0.238	-0.237	-0.234	-0.232	-0.230	-0.230	-0.225	-0.220	-0.209
						2	-0.091	-0.056	-0.048	-0.043	-0.034	-0.023	-0.016	0.002	0.021	0.059
						3	0.261	0.245	0.244	0.236	0.237	0.234	0.236	0.234	0.227	0.215
						4	0.113	0.090	0.084	0.076	0.068	0.059	0.057	0.040	0.027	-0.007
					105	1	-0.264	-0.240	-0.239	-0.236	-0.233	-0.231	-0.229	-0.224	-0.222	-0.213
						2	-0.075	-0.043	-0.035	-0.029	-0.019	-0.015	0.000	0.014	0.034	0.070
						3	0.266	0.247	0.243	0.243	0.244	0.244	0.243	0.237	0.233	0.025
						4	0.121	0.101	0.094	0.089	0.082	0.077	0.072	0.050	0.038	0.005
					107	1	-0.253	-0.230	-0.223	-0.222	-0.219	-0.220	-0.217	-0.218	-0.211	-0.202
						2	-0.061	-0.033	-0.025	-0.020	-0.015	-0.006	0.004	0.020	0.035	0.070
						3	0.264	0.245	0.242	0.238	0.239	0.242	0.237	0.233	0.232	0.220
						4	0.130	0.111	0.101	0.101	0.094	0.083	0.084	0.063	0.053	0.028
					110	1	-0.247	-0.226	-0.225	-0.222	-0.223	-0.217	-0.218	-0.212	-0.203	-0.199
						2	-0.055	-0.028	-0.020	-0.013	-0.006	0.009	0.013	0.033	0.050	0.087
						3	0.254	0.229	0.232	0.229	0.225	0.225	0.224	0.220	0.222	0.208
						4	0.122	0.098	0.094	0.087	0.076	0.075	0.066	0.048	0.038	0.004

\* ステップ1 :  $\sigma_H = 18.0$    ステップ2 :  $\sigma_H = 24.0$   
 ステップ3 :  $\sigma_H = -18.0$    ステップ4 :  $\sigma_H = -24.0$

$\sigma_H$  : 保持应力 ( $\text{kgf/mm}^2$ )

表 5.4 c) 繰返しクリープ(試験 5, 6) 試験結果, SUS 304, 550°C

Table 5.4 c) Results of cyclic creep tests (Test No.5, 6) of SUS304 at 550°C



試験	ひずみ範囲 $\Delta\epsilon$ (%)	予 繰 返 し (N=100)			繰 返 し ク リ 一 プ																			
		最終サイクル (kgf/mm <sup>2</sup> )			繰返し 回数	* ステップ	応力保持中のひずみ (%)																	
		応力範囲					引張ピーク		圧縮ピーク		保 持 中 時 間 (min)													
		$\Delta\sigma$	$\sigma_t$	$\sigma_c$			0	1	2	3	5	10	30	60	120	180	300	600	1800	3000				
5	1.51	65.4	32.2	-33.2	101 102 103 105 107 110	1	-0.147	-0.123	-0.119	-0.115	-0.111	-0.104	-0.084	-0.057	-0.021	0.008	0.057	0.133	0.348	0.539				
							0.023	0.039	0.043	0.043	0.043	0.055	0.070	0.086	0.106	0.129	0.168	0.242	0.463	0.676				
							0.059	0.074	0.078	0.086	0.086	0.094	0.102	0.117	0.145	0.164	0.199	0.277	0.528	0.766				
							0.082	0.106	0.106	0.106	0.113	0.121	0.139	0.158	0.182	0.199	0.242	0.328	0.590	0.842				
							0.094	0.119	0.125	0.127	0.129	0.133	0.150	0.168	0.195	0.227	0.270	0.358	0.641	0.907				
							0.098	0.125	0.129	0.129	0.133	0.141	0.160	0.184	0.229	0.258	0.313	0.430	0.811	1.180				
6	1.52	65.8	32.3	-33.5	101	1	-0.156	-0.137	-0.137	-0.127	-0.127	-0.122	-0.098	-0.078	-0.049	-0.029	0.010	0.078	0.239	0.347				
							-0.205	-0.234	-0.234	-0.234	-0.249	-0.259	-0.278	-0.293	-0.322	-0.342	-0.371	-0.430	-0.567	-0.674				
					102	2	0.000	0.005	0.005	0.015	0.020	0.029	0.044	0.073	0.093	0.122	0.166	0.244	0.454	0.606				
							-0.147	-0.156	-0.166	-0.161	-0.171	-0.181	-0.200	-0.215	-0.244	-0.278	-0.308	-0.386	-0.572	-0.728				
					103	1	0.000	0.024	0.029	0.029	0.029	0.039	0.054	0.083	0.117	0.147	0.191	0.274	0.513	0.713				
							-0.059	-0.088	-0.103	-0.103	-0.112	-0.122	-0.127	-0.156	-0.186	-0.210	-0.259	-0.337	-0.552	-0.699				
					105	1	-0.054	-0.029	-0.029	-0.034	-0.020	-0.010	0.010	0.039	0.078	0.107	0.156	0.244	0.532	0.747				
							-0.024	0.044	-0.054	-0.054	-0.059	-0.073	-0.088	-0.107	-0.151	-0.176	-0.234	-0.322	-0.581	-0.762				
					108	1	0.147	0.161	0.176	0.176	0.186	0.195	0.225	0.249	0.308	0.342	0.420	0.552	0.957	1.295				
							0.581	0.547	0.547	0.547	0.537	0.528	0.498	0.464	0.430	0.386	0.332	0.205	-0.112	-0.347				

\* ステップ 1 :  $\sigma_H = 24.0$ ステップ 2 :  $\sigma_H = -24.0$  $\sigma_H$  : 保 持 応 力 (kgf/mm<sup>2</sup>)

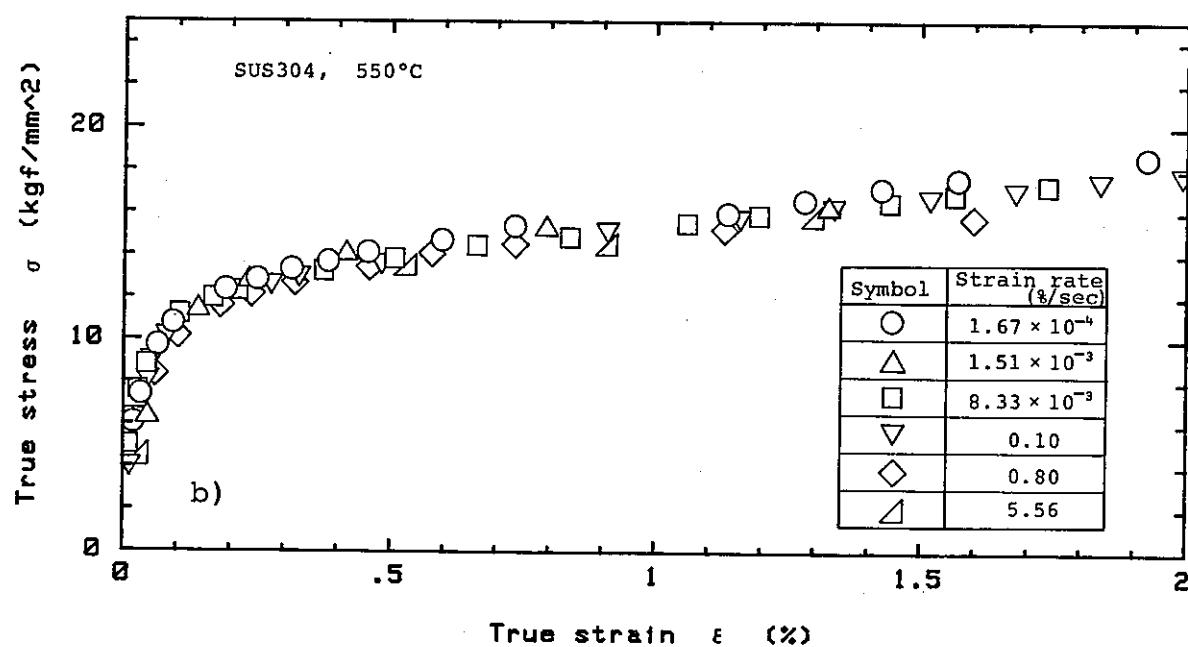
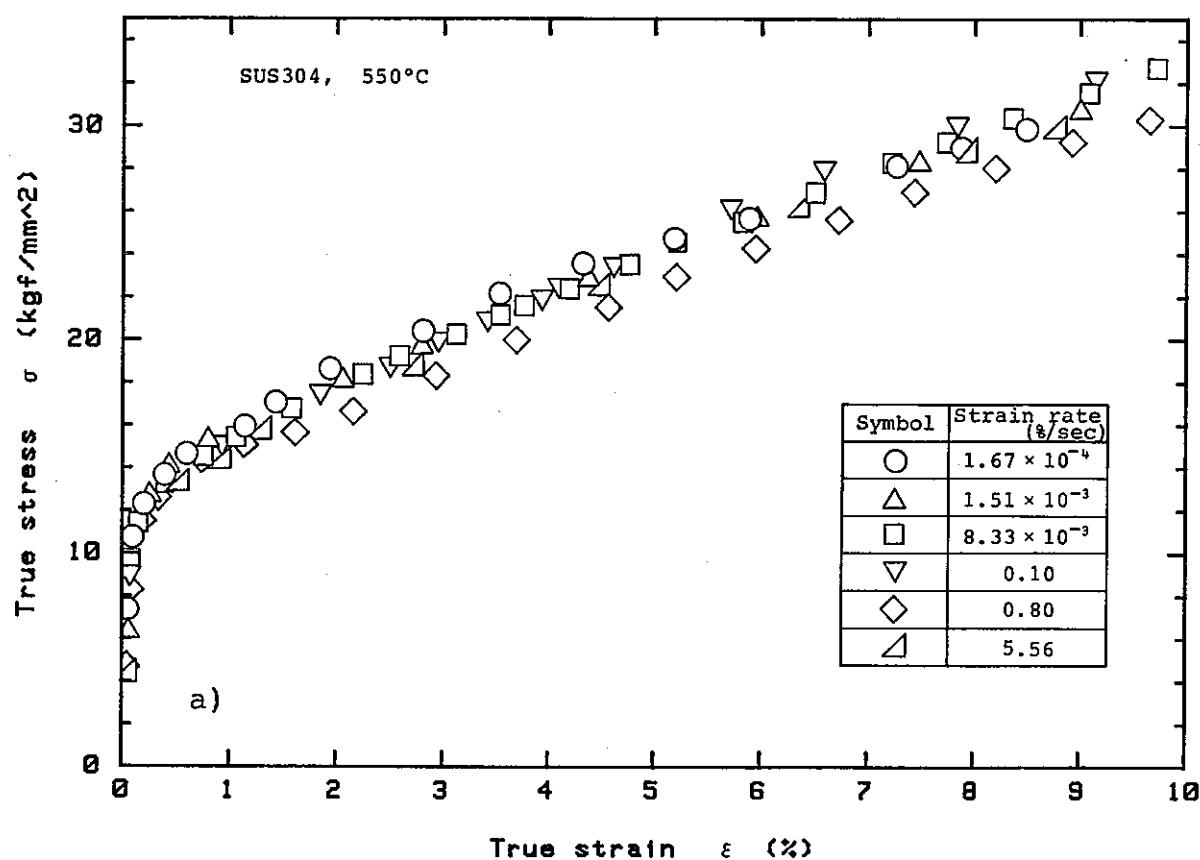


図 5.1 引張試験結果，SUS304, 550°C

Fig. 5.1 Results of tensile tests of SUS304 at 550°C

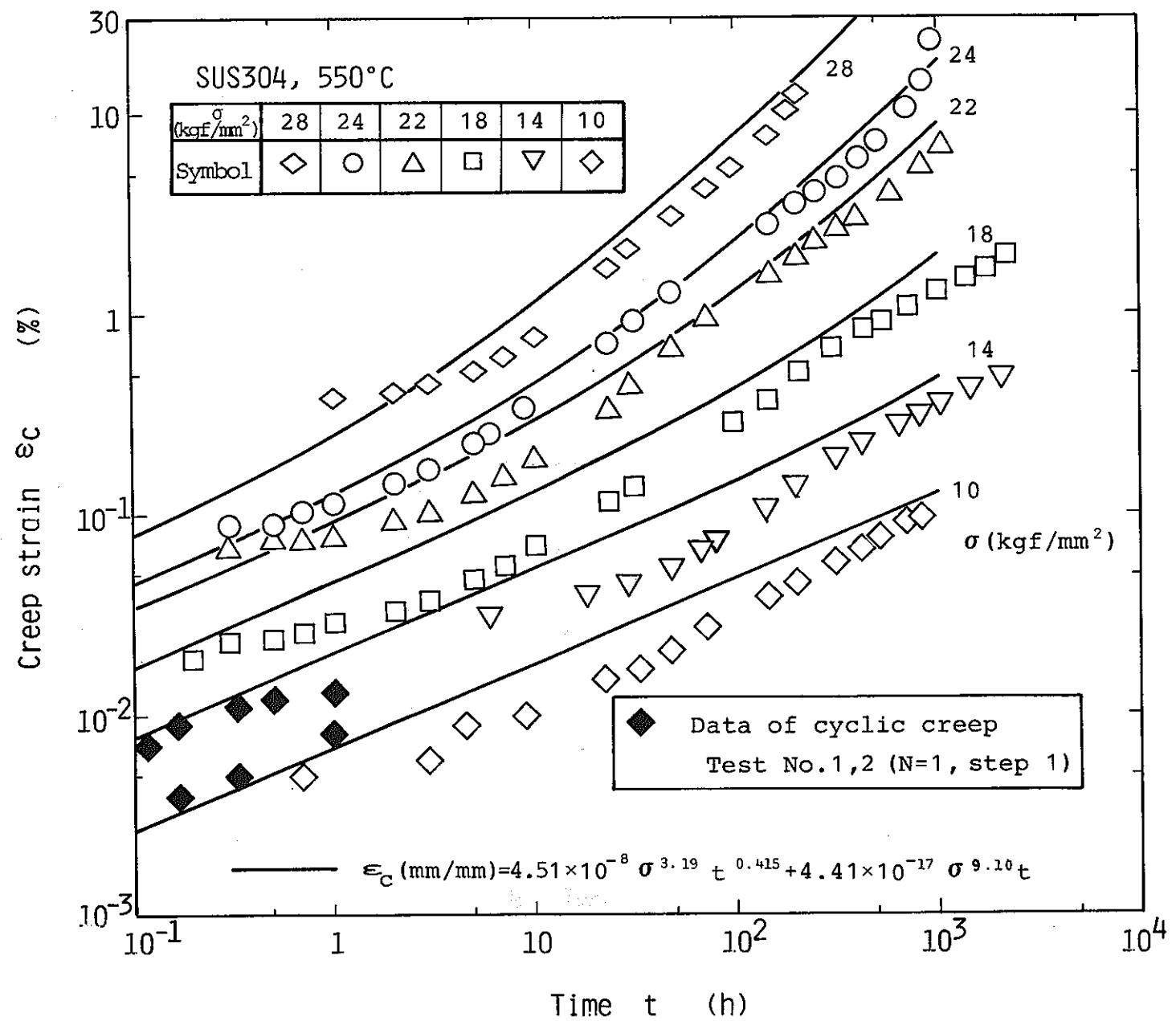
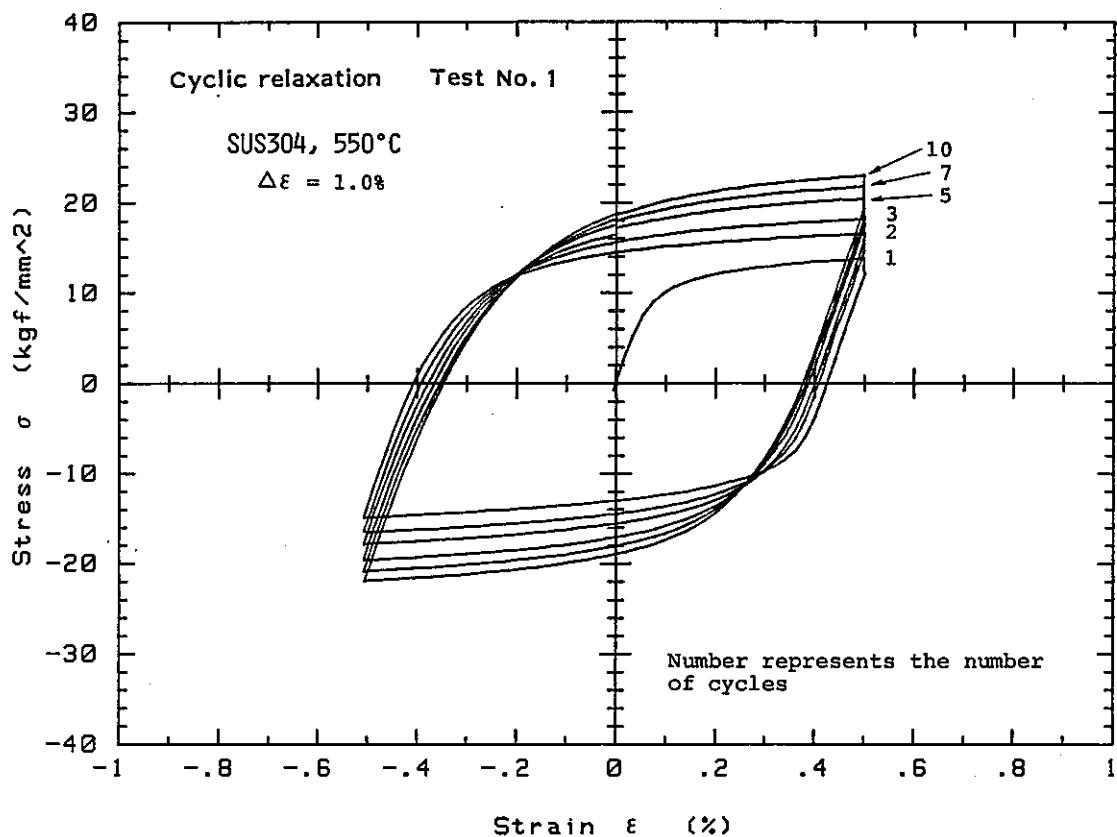


図 5.2

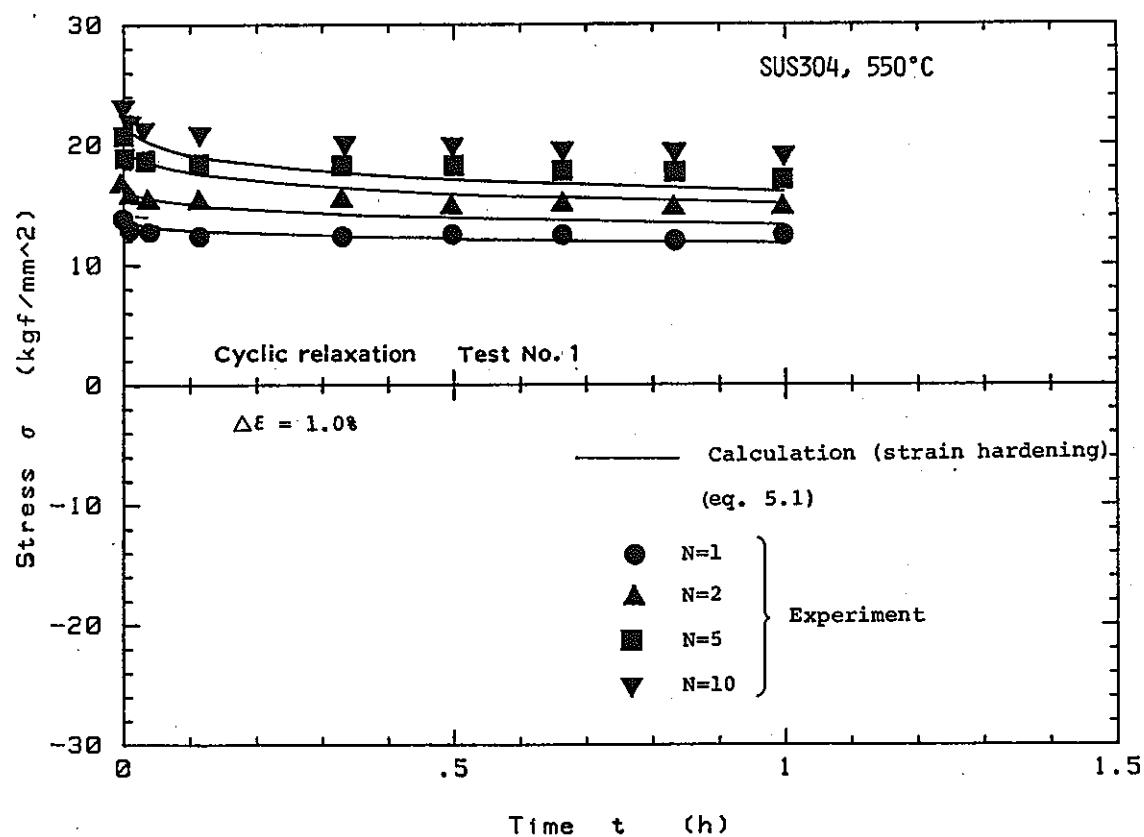
クリープ試験結果とクリープひずみ式の比較, SUS304, 550°C

Fig. 5.2

Comparison of creep data with creep strain equation of SUS304 at 550°C



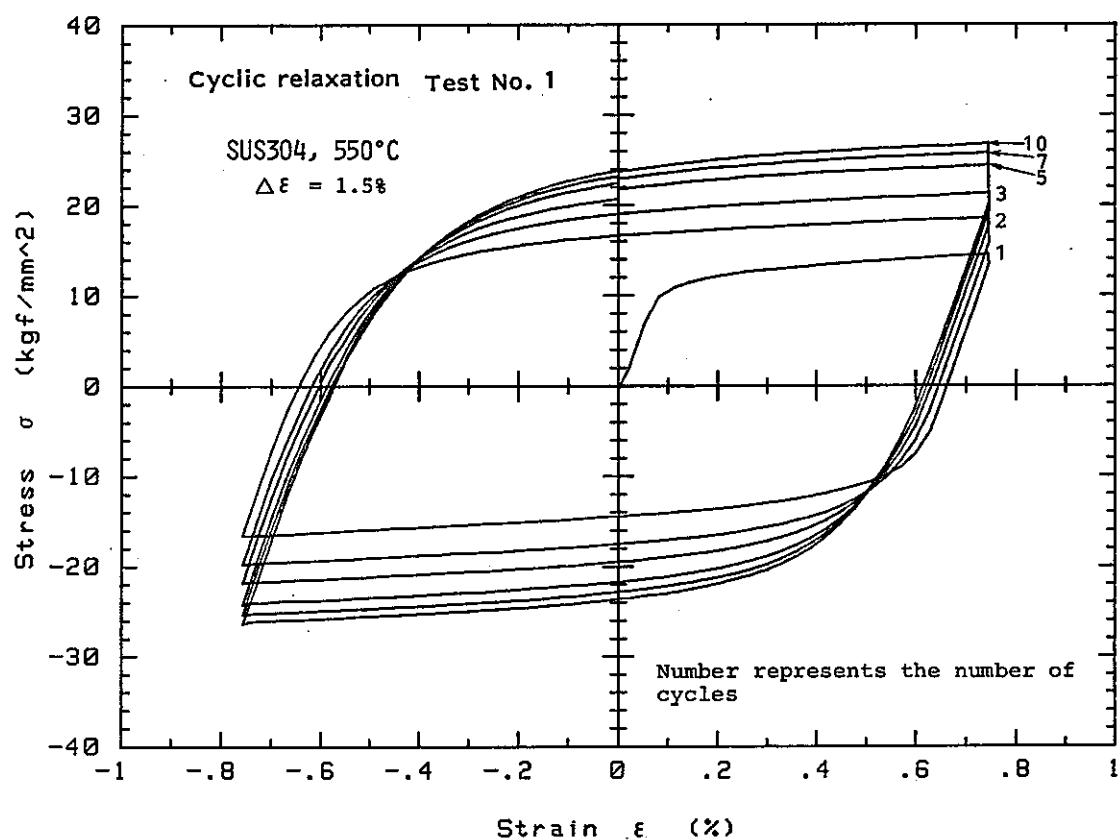
a) Hysteresis loop behavior



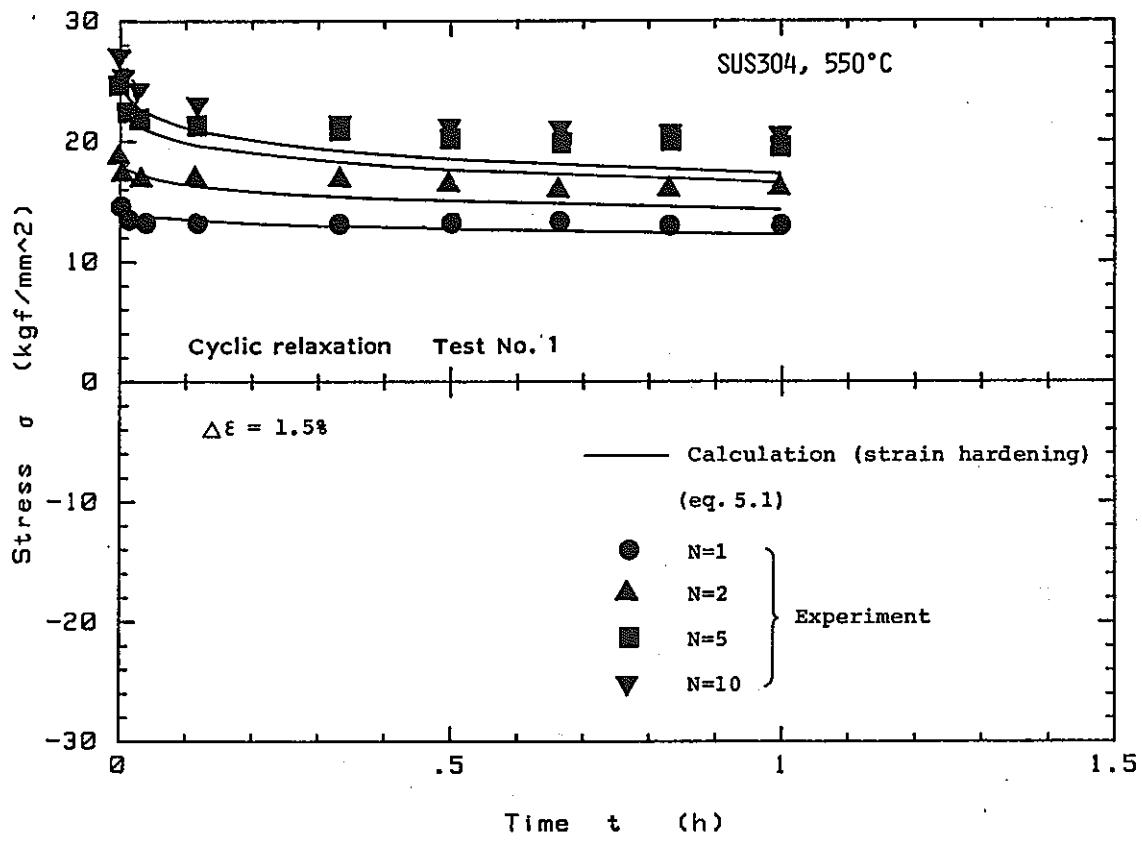
b) Relaxation behavior

図 5.3 繰返しリラクセーション(試験1)試験結果, SUS 304, 550 °C

Fig. 5.3 Results of cyclic relaxation (Test No.1) of SUS304 at 550°C



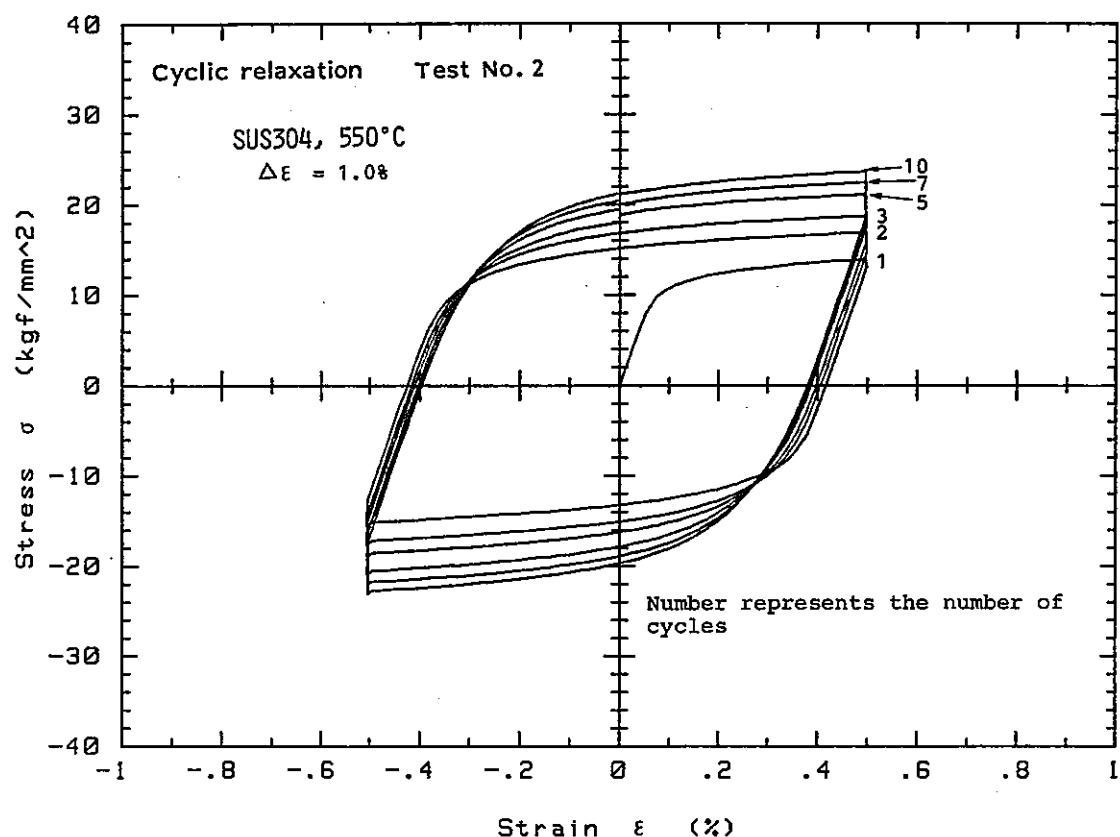
a) Hysteresis loop behavior



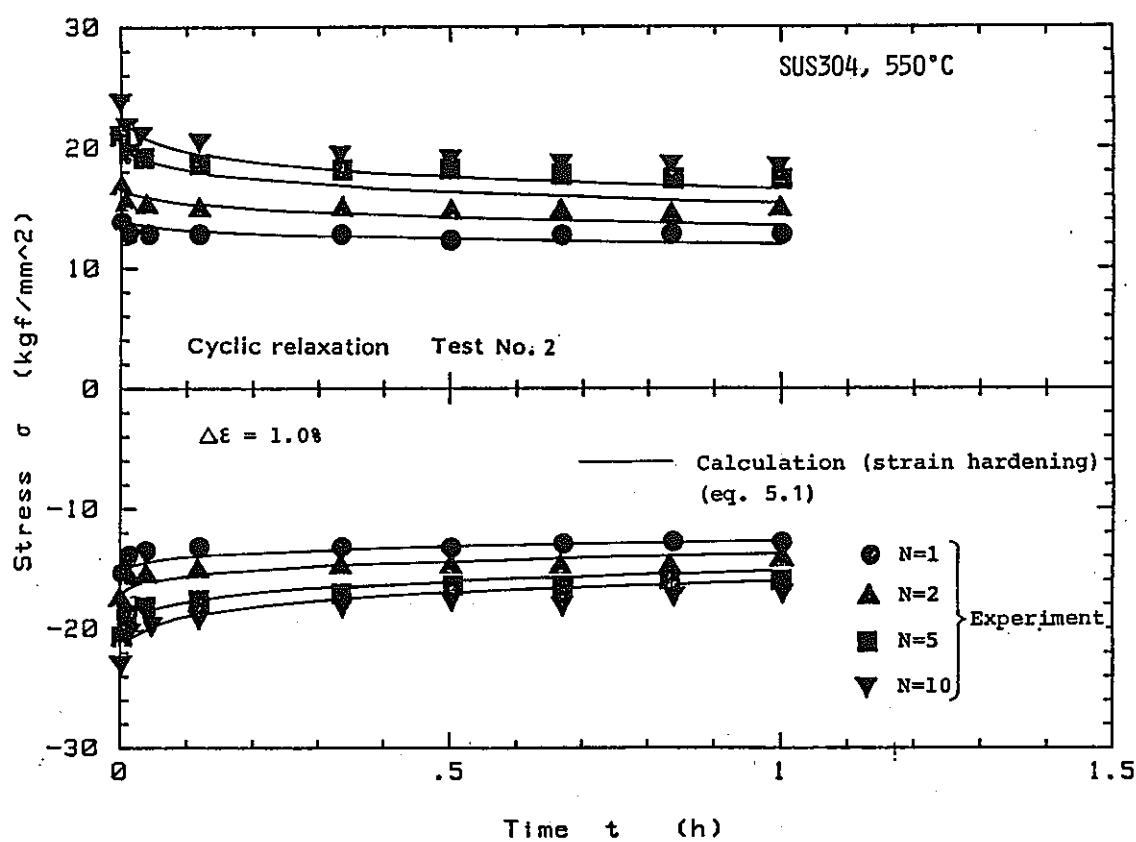
b) Relaxation behavior

図 5.4 繰返しリラクセーション(試験1)試験結果, SUS 304, 550 °C

Fig. 5.4 Results of cyclic relaxation (Test No.1) of SUS304 at 550°C

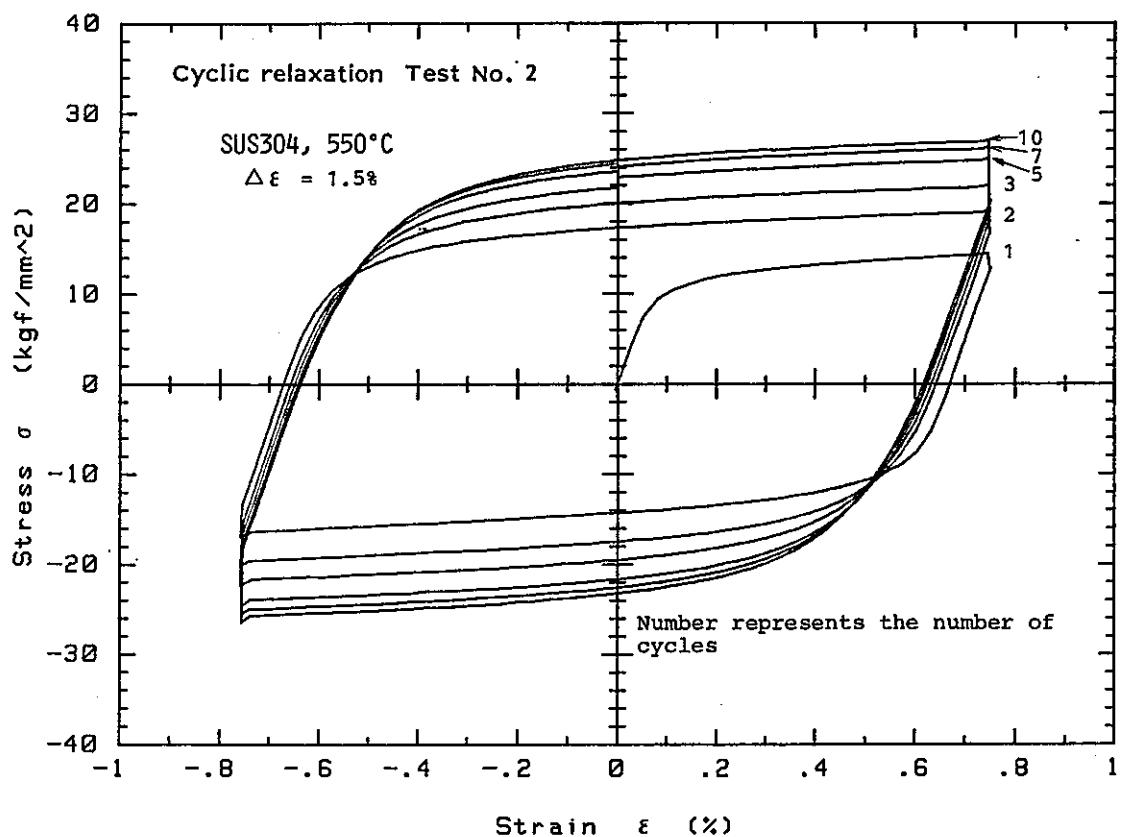


a) Hysteresis loop behavior

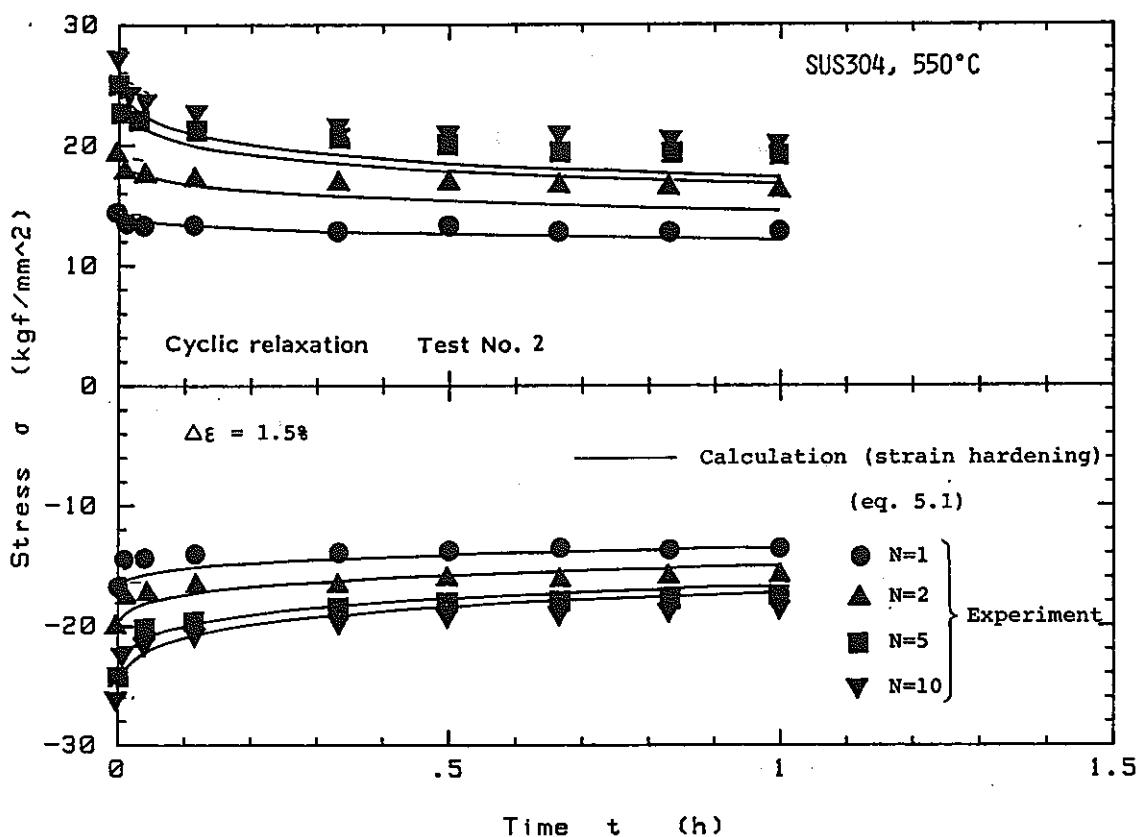


b) Relaxation behavior

図 5.5 繰返しリラクセーション(試験2)試験結果, SUS 304, 550 °C  
Fig. 5.5 Results of cyclic relaxation (Test No.2)  
of SUS304 at 550°C



a) Hysteresis loop behavior



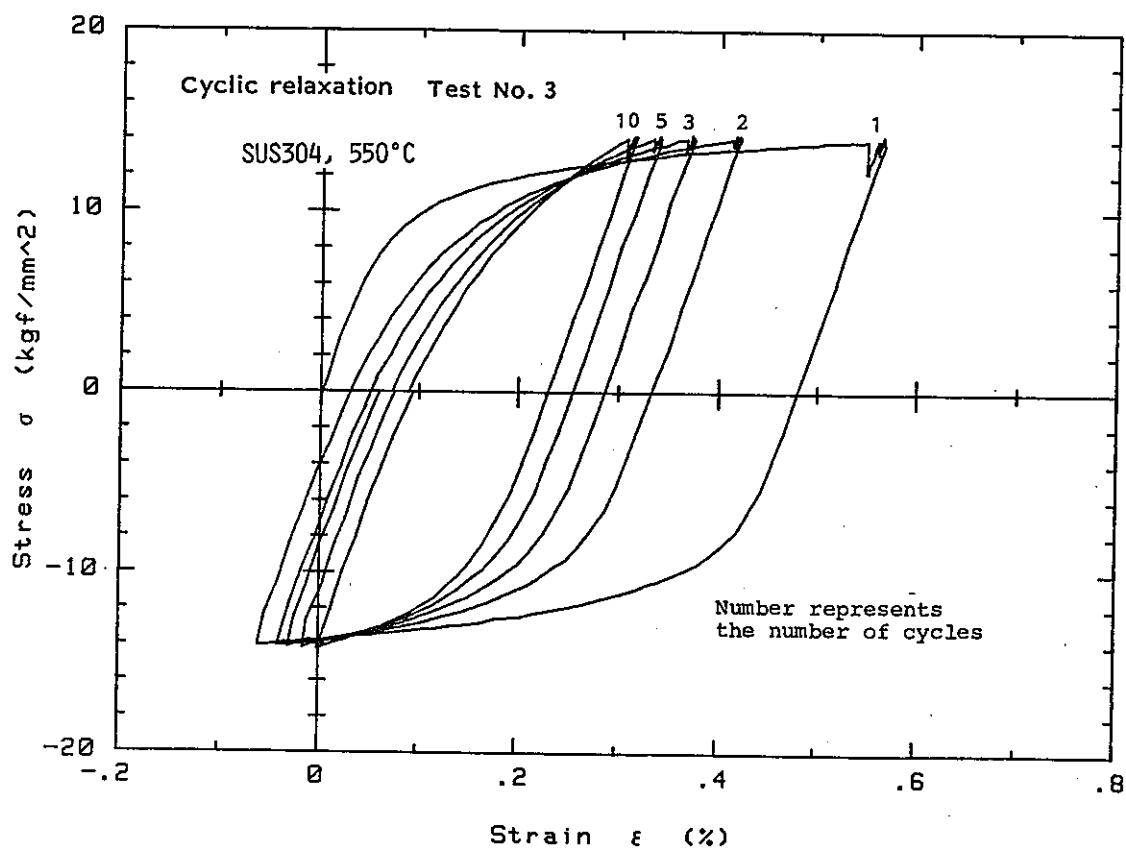
b) Relaxation behavior

図 5.6

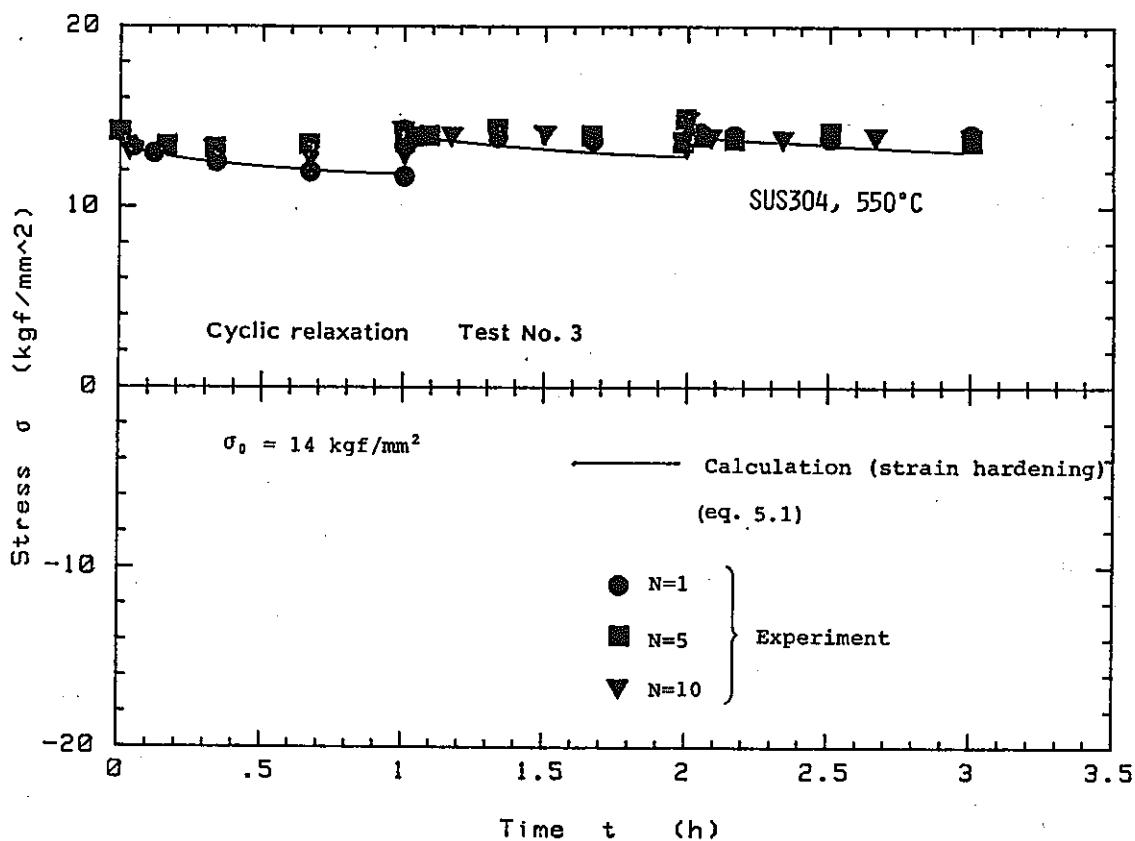
繰返しリラクセーション(試験2)試験結果, SUS 304, 550°C

Fig. 5.6

Results of cyclic relaxation (Test No. 2)  
of SUS304 at 550°C



a) Hysteresis loop behavior



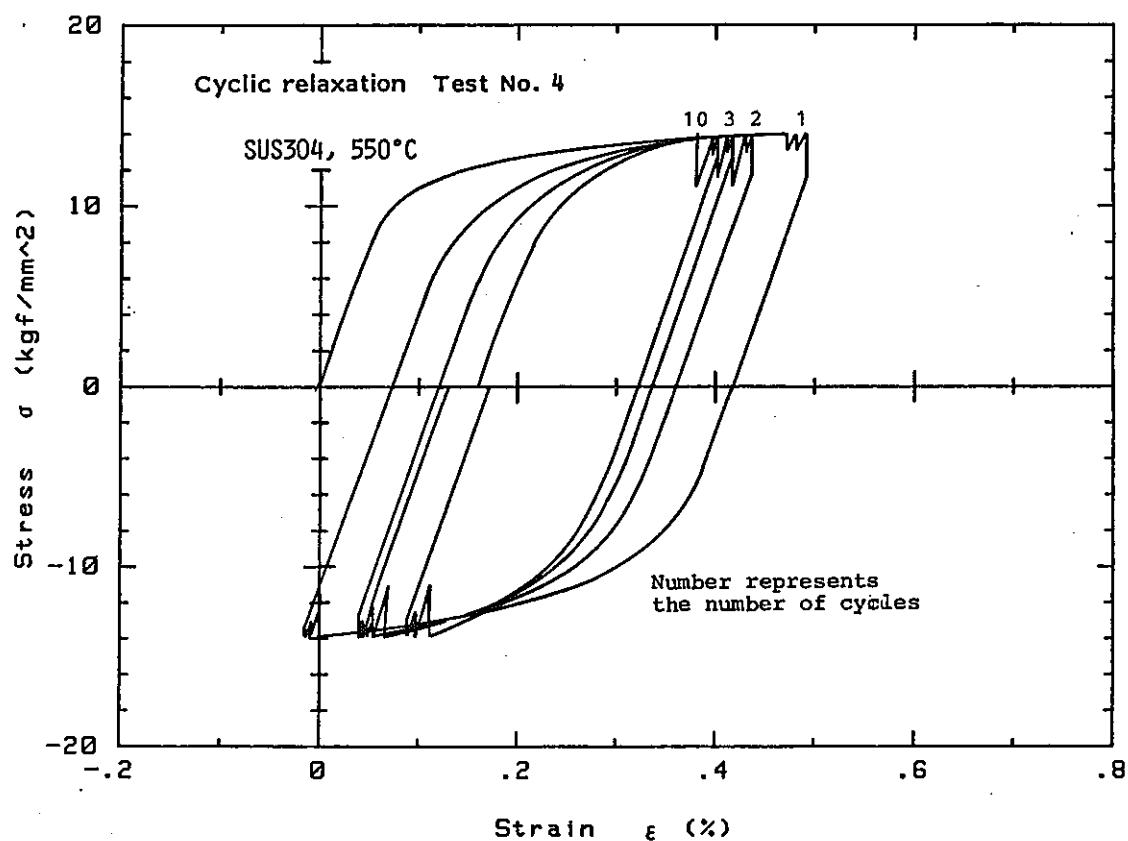
b) Relaxation behavior

図 5.7

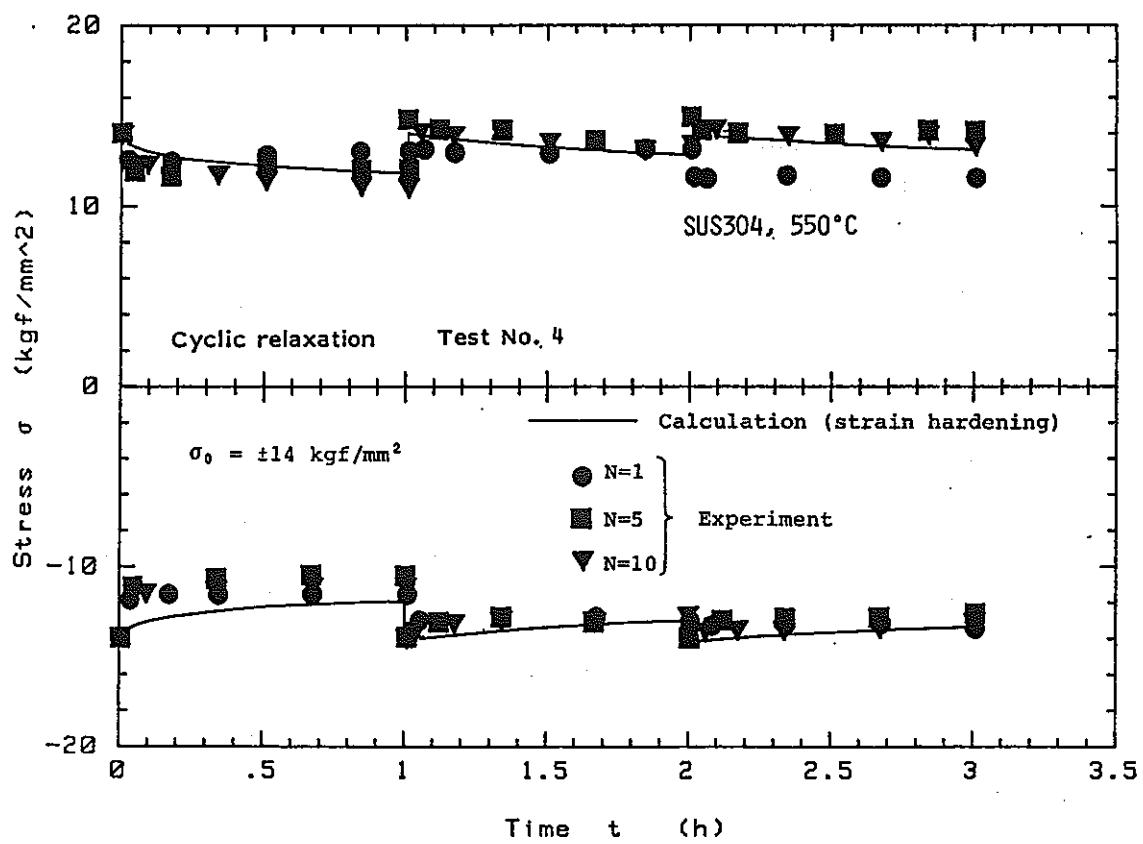
繰返しリラクセーション(試験3)試験結果, SUS 304, 550°C

Fig. 5.7

Results of cyclic relaxation (Test No. 3)  
of SUS304 at 550°C



a) Hysteresis loop behavior



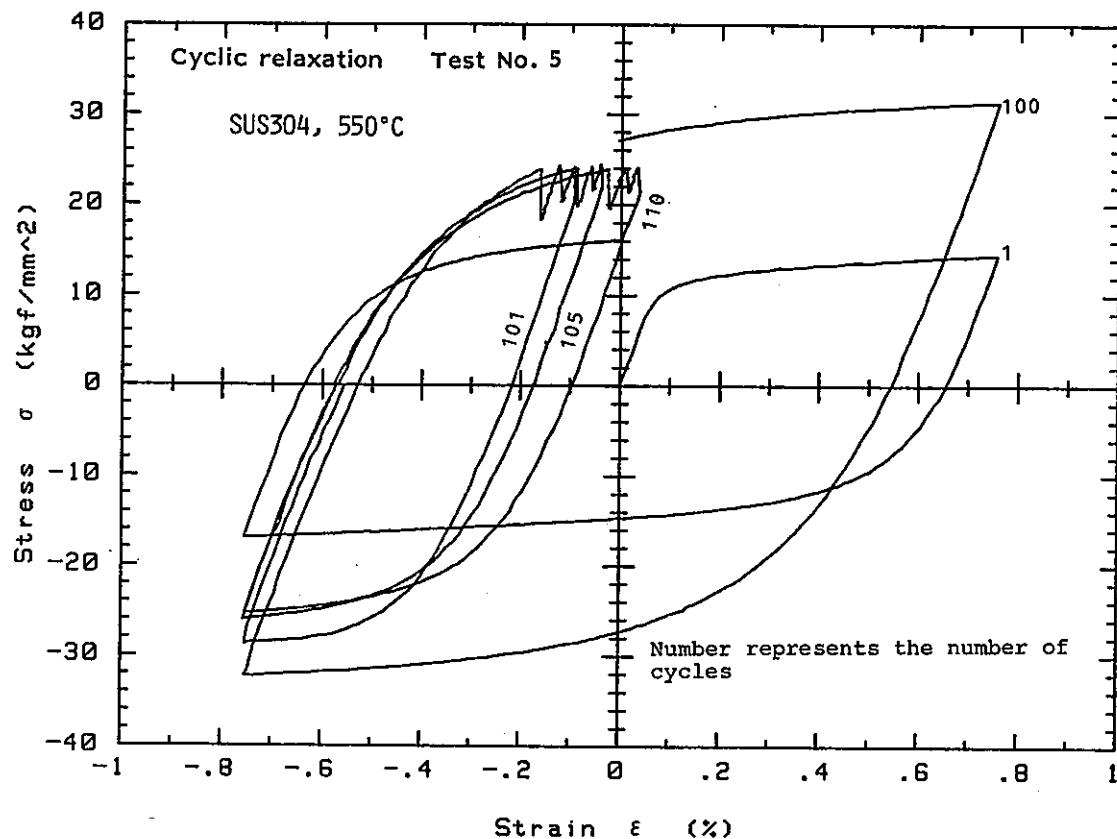
b) Relaxation behavior

図 5.8

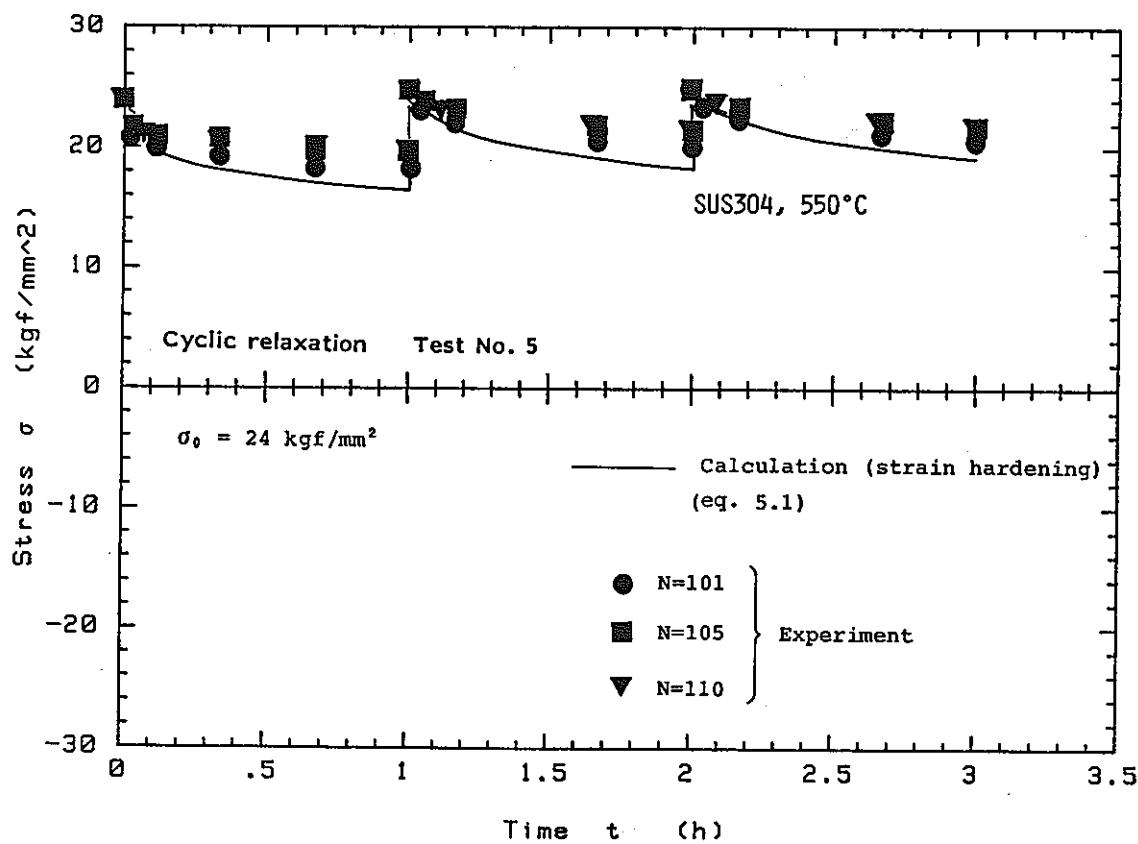
繰返しリラクセーション(試験4)試験結果, SUS 304, 550°C

Fig. 5.8

Results of cyclic relaxation (Test No.4)  
of SUS304 at 550°C



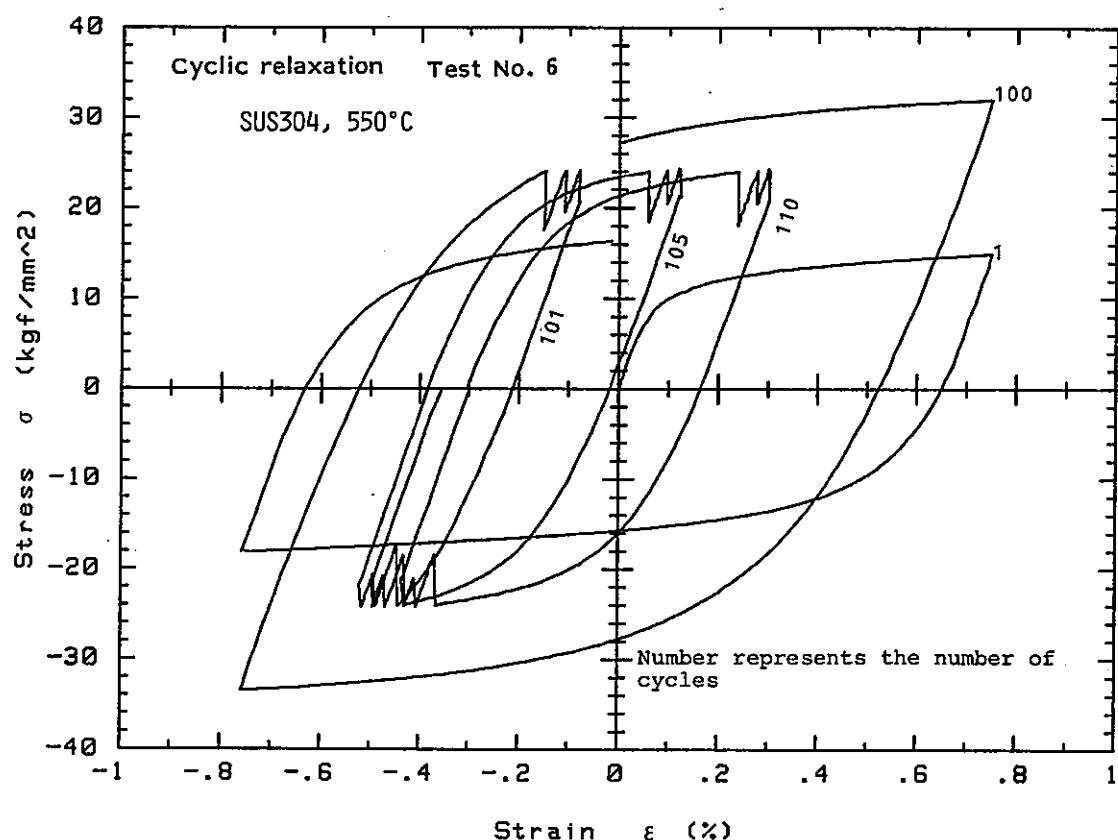
a) Hysteresis loop behavior



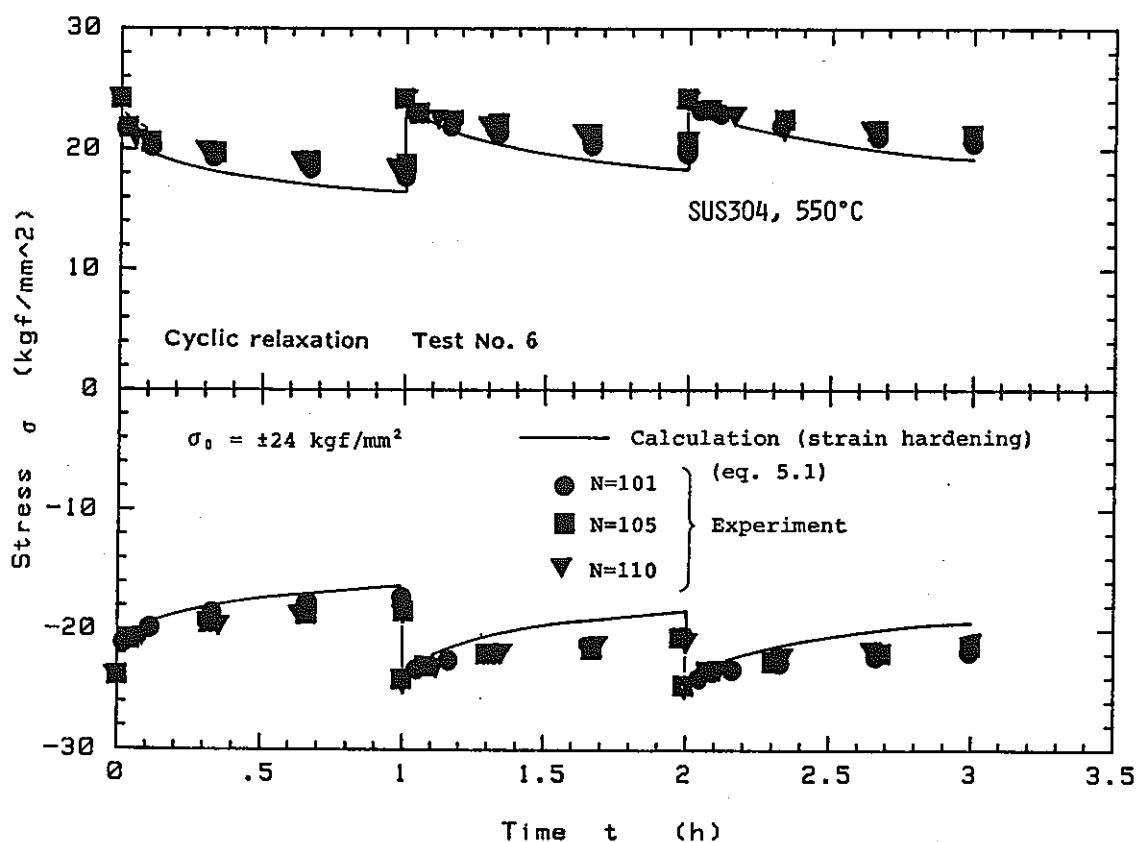
b) Relaxation behavior

図 5.9 繰返しリラクセーション(試験 5 )試験結果, SUS 304, 550°C

Fig. 5.9 Results of cyclic relaxation (Test No.5) of SUS304 at 550°C



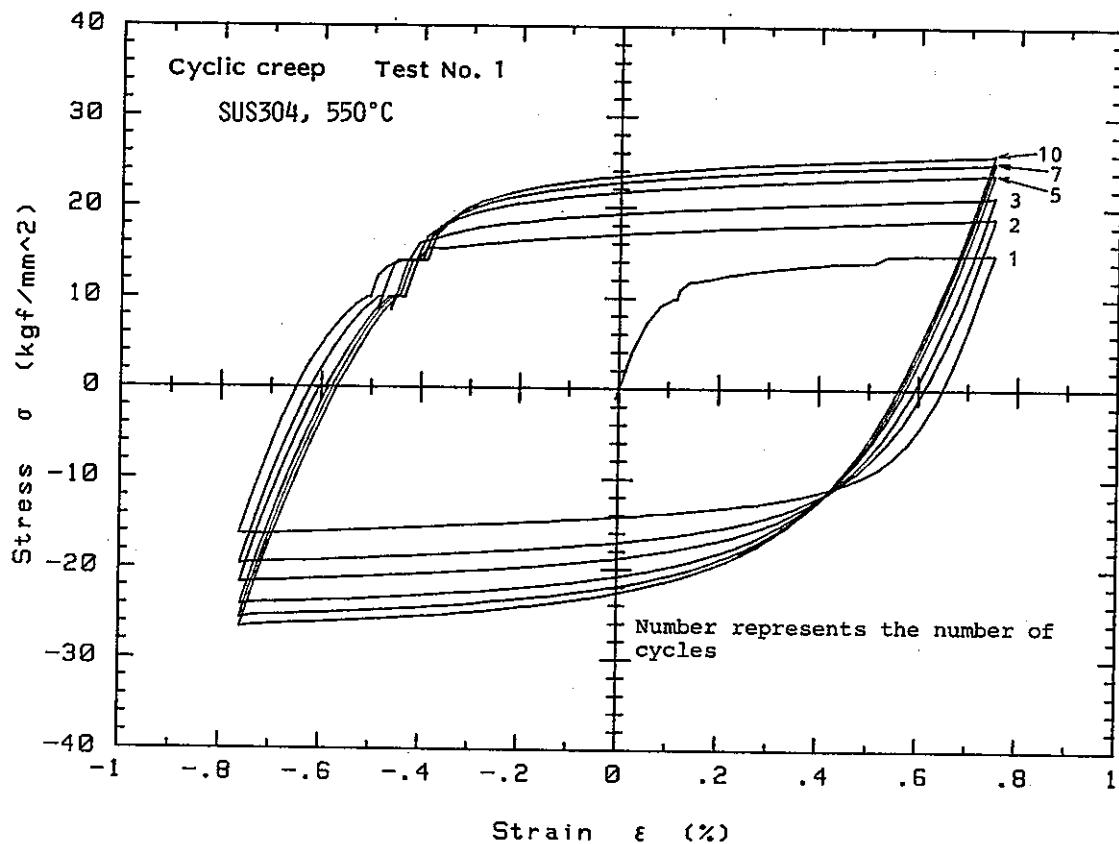
a) Hysteresis loop behavior



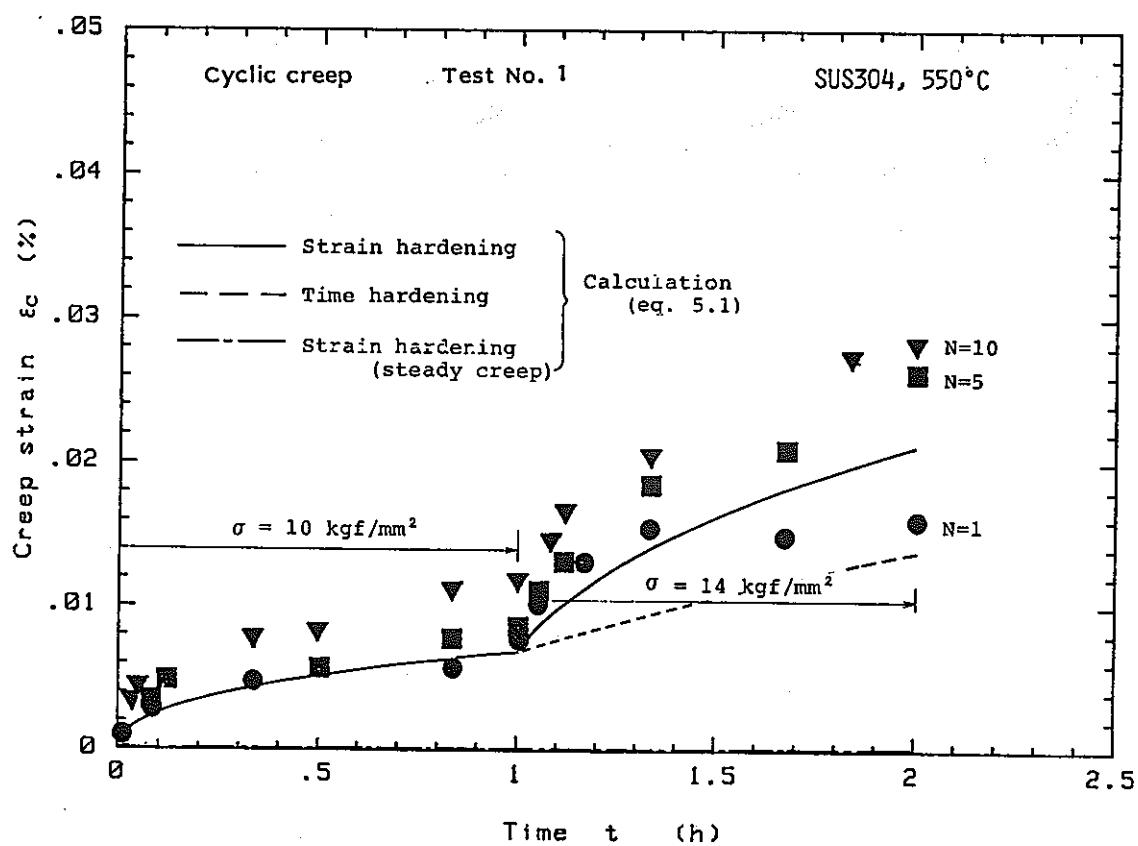
b) Relaxation behavior

図 5.10 繰返しリラクセーション(試験 6)試験結果, SUS 304, 550 °C

Fig. 5.10 Results of cyclic relaxation (Test No.6) of SUS304 at 550°C



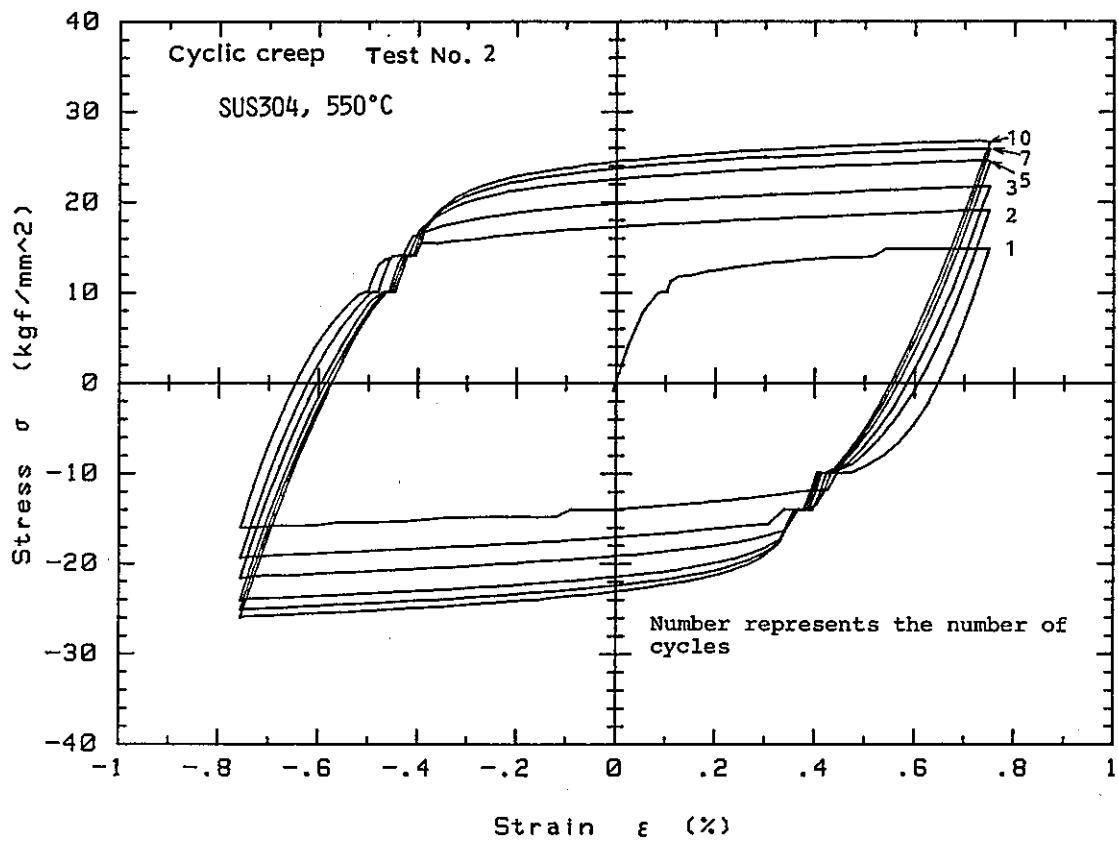
a) Hysteresis loop behavior



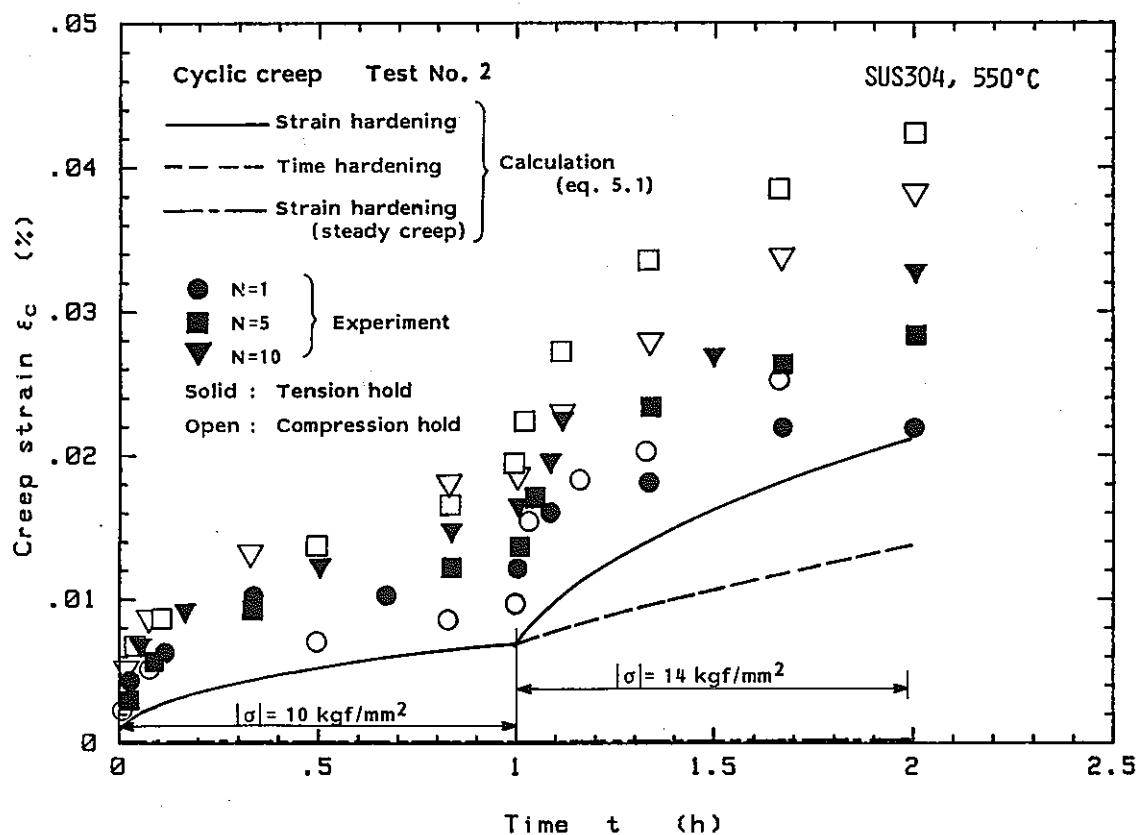
b) Creep behavior

図 5.11 繰返しクリープ(試験 1) 試験結果, SUS 304, 550°C

Fig. 5.11 Results of cyclic creep (Test No.1) of SUS304 at 550°C



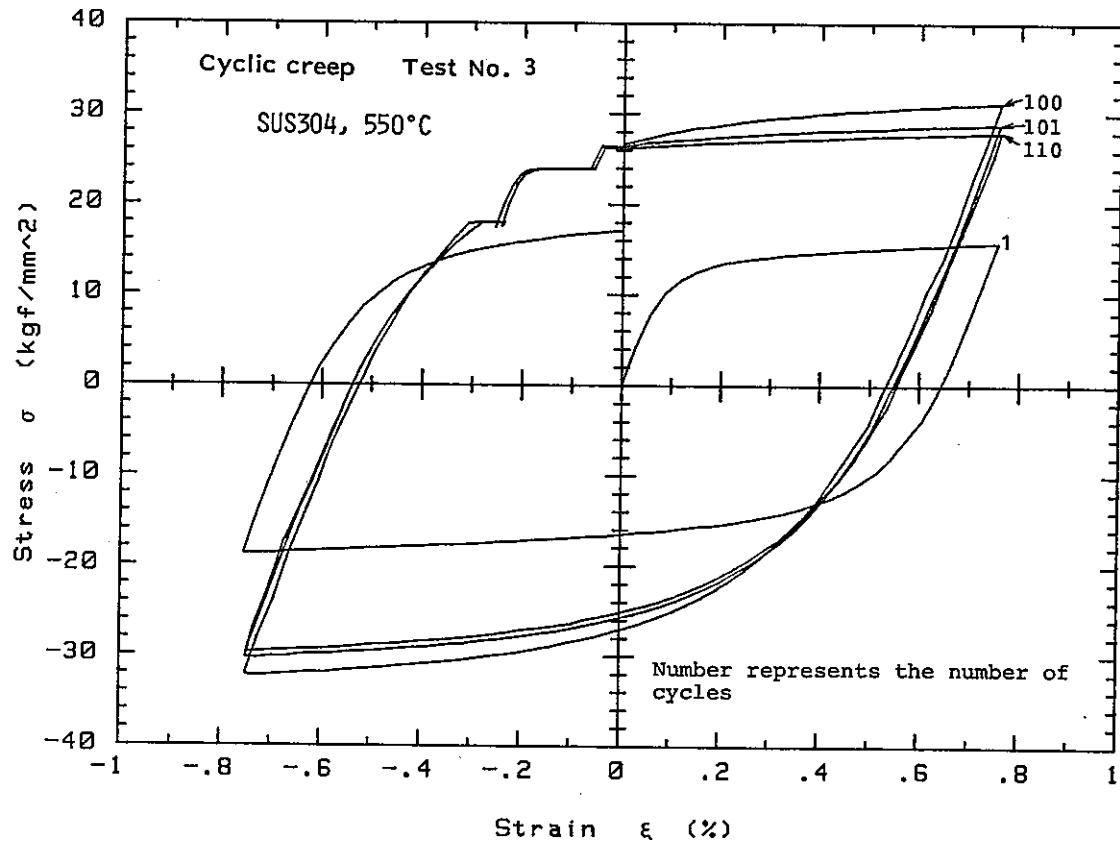
a) Hysteresis loop behavior



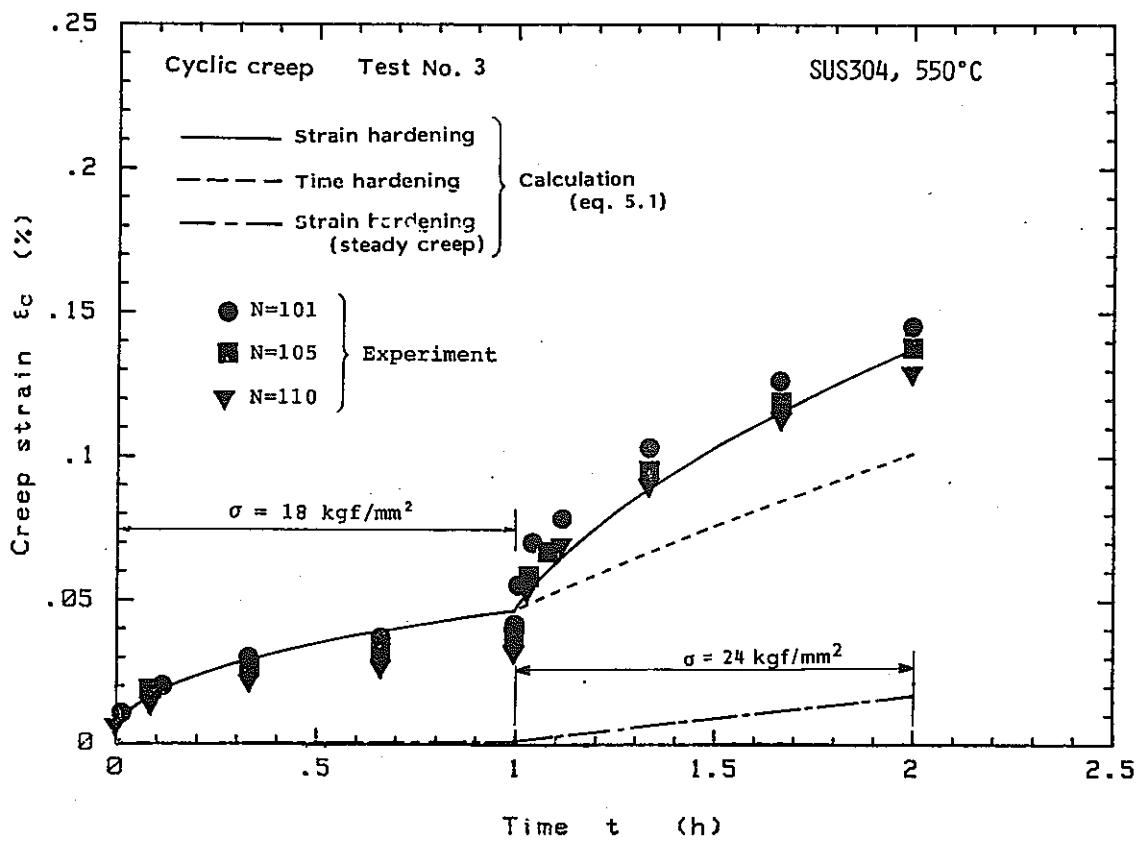
b) Creep behavior

図 5.12 繰返しクリープ(試験2)試験結果, SUS 304, 550°C

Fig. 5.12 Results of cyclic creep (Test No. 2) of SUS304 at 550°C



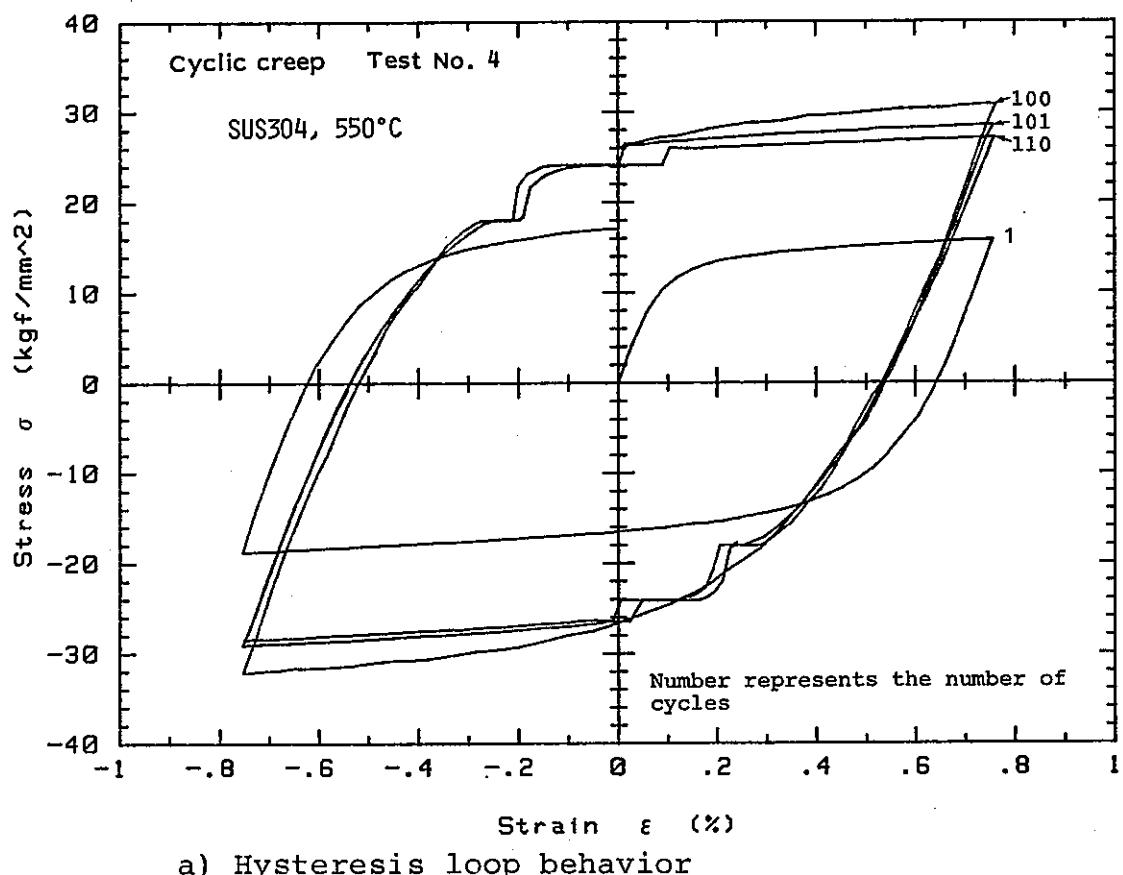
a) Hysteresis loop behavior



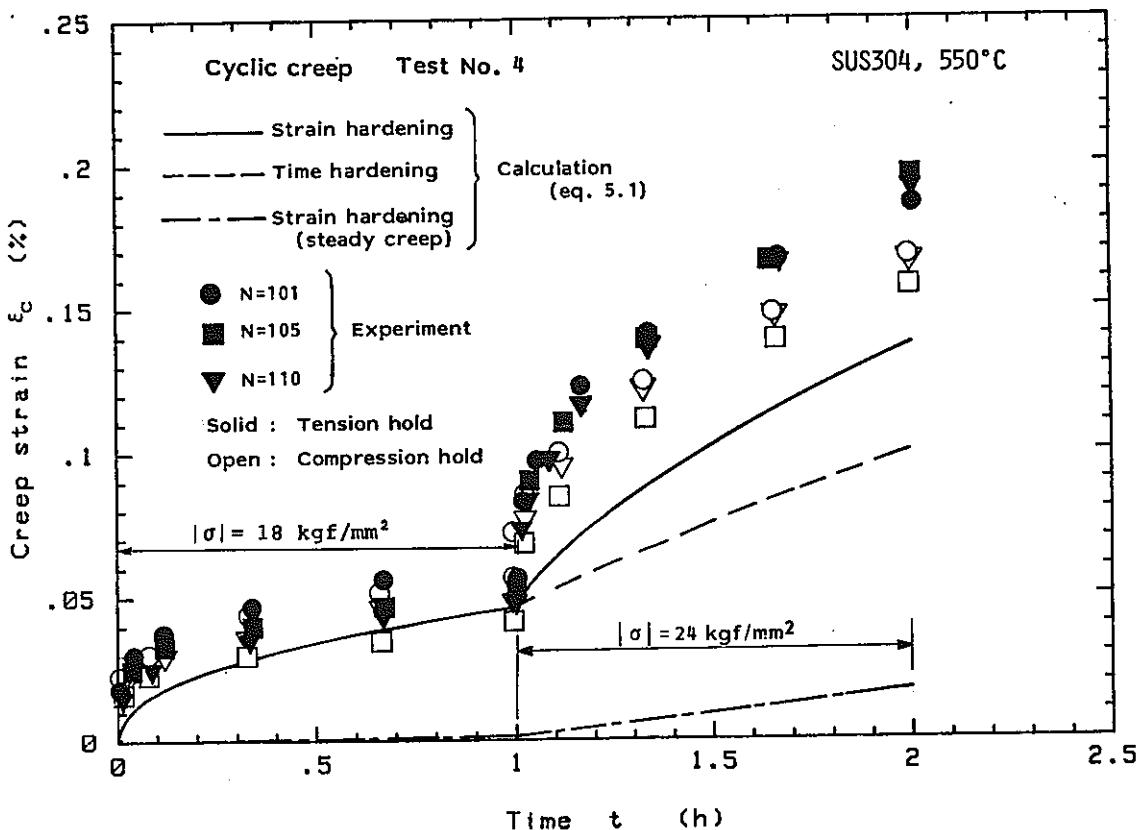
b) Creep behavior

図 5.13 繰返しクリープ(試験3)試験結果, SUS 304, 550°C

Fig. 5.13 Results of cyclic creep (Test No.3) of SUS304 at 550°C

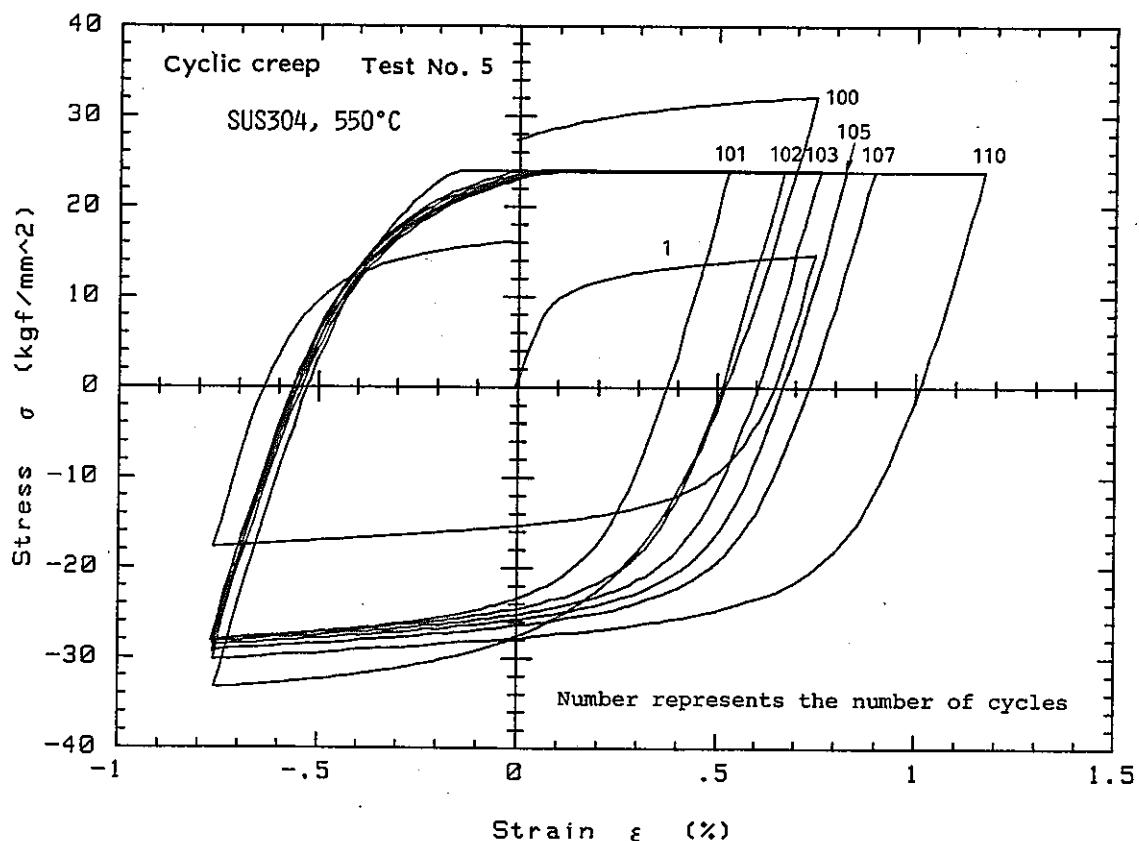


a) Hysteresis loop behavior

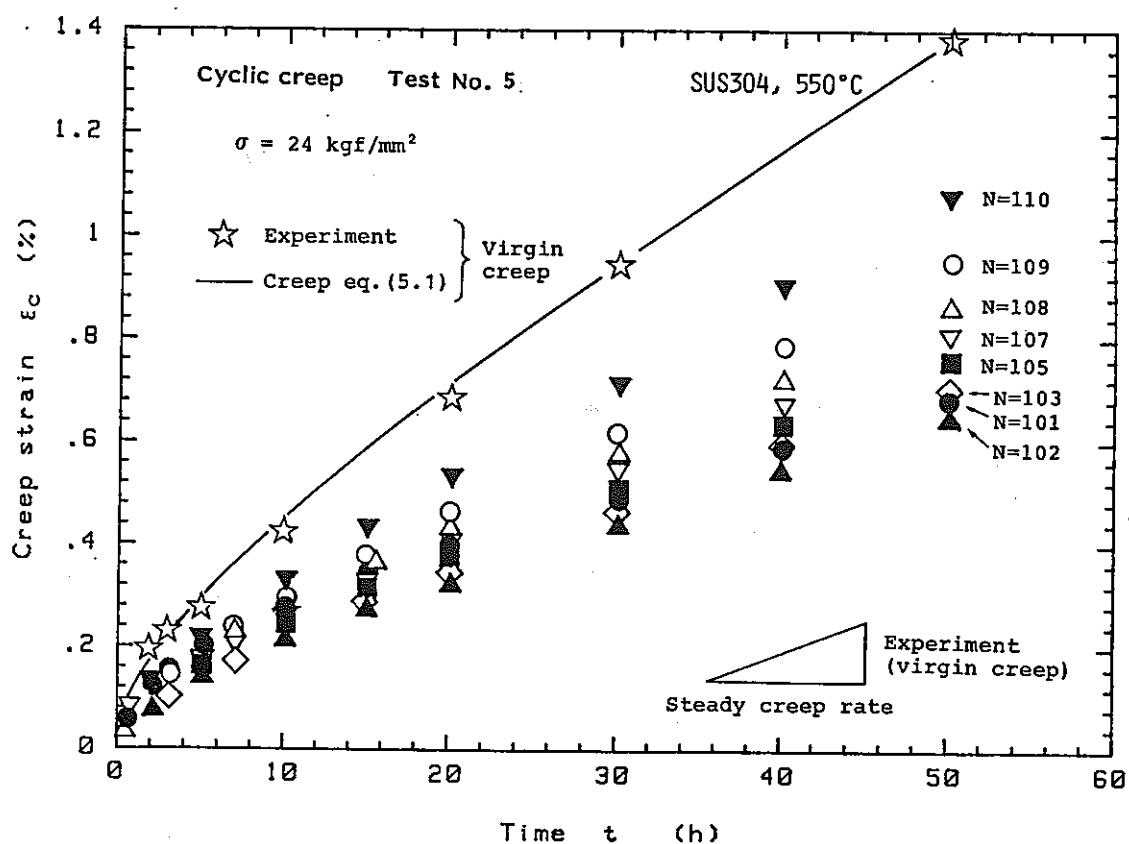


b) Creep behavior

図 5.14 繰返しクリープ(試験4)試験結果, SUS 304, 550°C  
Fig. 5.14 Results of cyclic creep (Test No.4) of SUS304 at 550°C



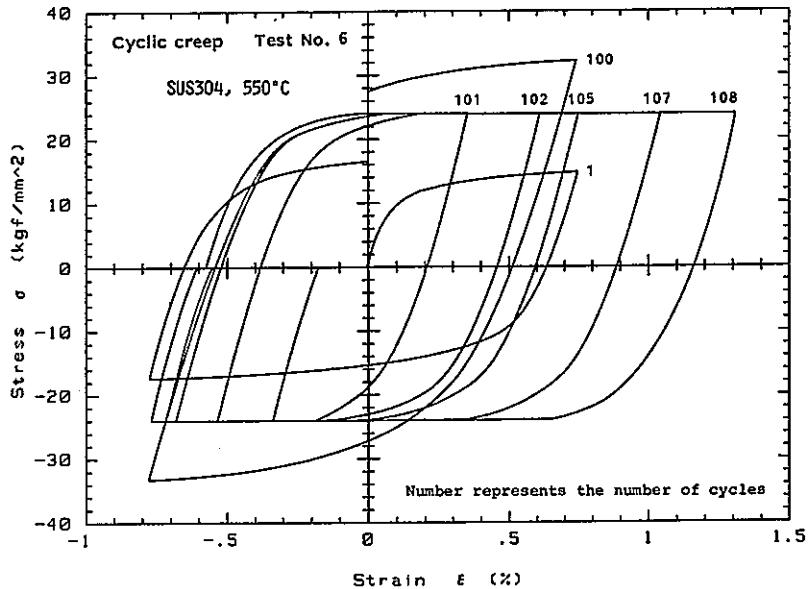
a) Hysteresis loop behavior



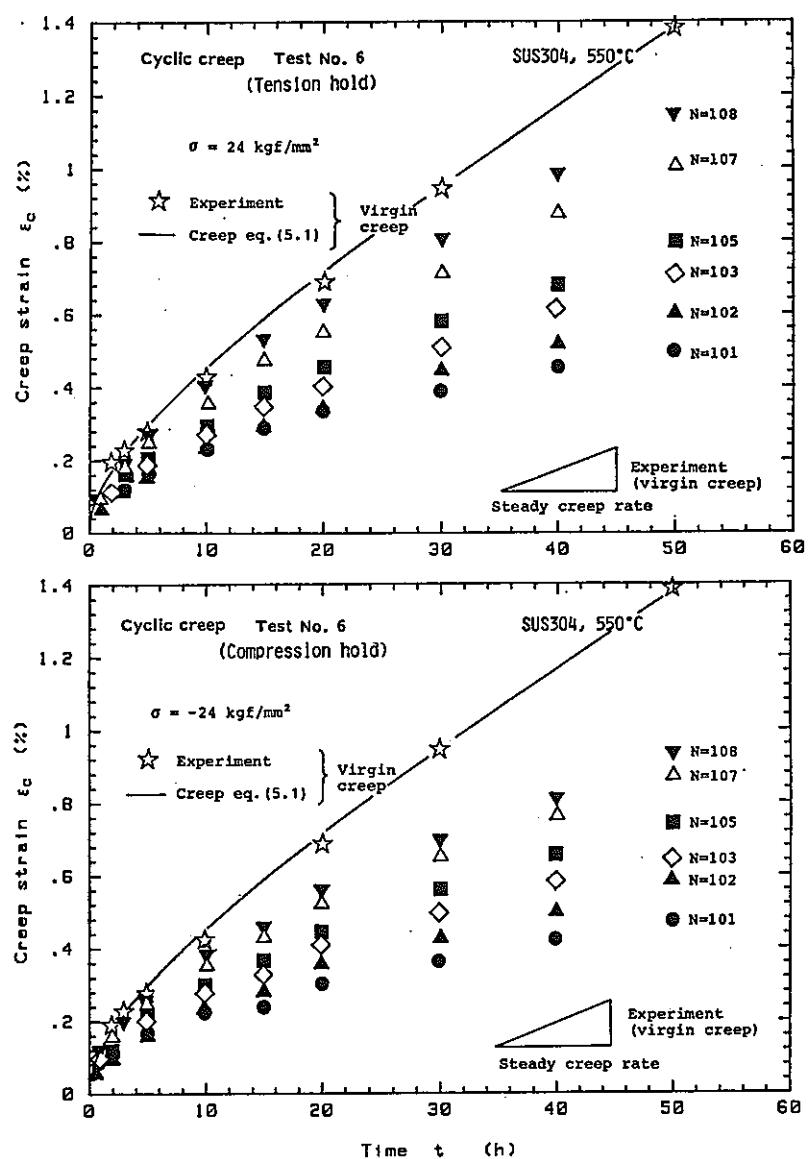
b) Creep behavior

図 5.15 繰返しクリープ(試験5)試験結果, SUS304, 550°C

Fig. 5.15 Results of cyclic creep (Test No.5) of SUS304 at 550°C



a) Hysteresis loop behavior



b) Creep behavior

図 5.16 繰返しクリープ(試験6)試験結果, SUS 304, 550°C

Fig. 5.16 Results of cyclic creep (Test No.6) of SUS304 at 550°C

## 6. 考 察

### 6.1 繰返し硬化がその後のクリープ特性に及ぼす影響

「5.4 繰返しクリープ試験」(試験5, 試験6)で述べたように、繰返し硬化をうけた直後では、処女材クリープに比べ、クリープ速度が低下するようである。またこれらのデータは処女材の定常クリープ速度の傾きに比べても小さくなる傾向がある。すなわち、繰返し硬化の影響は遷移クリープ域のみならず、定常クリープ速度にも及ぶようである。ただし、その後、クリープを含む繰返しを与えると次第に回復し、処女材特性に近づくようである。

一方、「5.3 繰返しリラクセーション試験」(試験5, 試験6)及び「5.4 繰返しクリープ試験」(試験3, 試験4)では、予繰返し硬化後のクリープ又はリラクセーション挙動は、予繰返しの影響を考慮しない(5.1)式を用いた計算とよく一致していることを述べた。しかし、繰返しリラクセーション試験5, 6の予繰返し直後の3段のリラクセーションで生ずるクリープひずみは緩和応力量から見積ると、0.09%以下であり、繰返しクリープ試験3, 4の場合も2段のクリープひずみの累積量は0.2%以下である。上述の繰返しクリープ試験5, 6で示した図5.15(b), 図5.16(b)(c)から、この程度のクリープひずみ量では予繰返し硬化による影響が明確ではないことがわかる。

したがって、繰返しリラクセーション試験5, 6及び繰返しクリープ試験3, 4では、クリープひずみ量がわずかであったため、予繰返し硬化の影響が明確でなかったものと考えられる。

以上の知見をまとめると、以下のようになる。

- (i) 塑性ひずみの繰返しによる硬化を与えると、クリープ変形は生じにくくなる。
- (ii) ただし、 $\varepsilon_c < 0.2\%$ の小クリープひずみ域では、この現象は顕著でない。
- (iii) 塑性繰返し硬化後、クリープ変形を含む両振り繰返しを数～10サイ

クル與えると、ほぼ処女材のクリープ特性に回復する。

したがって、クリープを含む塑性繰返しを考えた場合、塑性繰返しによるクリープ硬化（変形抵抗の増大）は無視して差しつかえないと思われる。

なお(Ⅲ)の現象が単なるクリープ変形中の熱軟化によるものか、クリープの途中で与えた塑性反転（逆降伏）によるものかは、現状では明確でない。

## 6.2 変動クリープ及びリラクセーション

繰返しリラクセーション試験3～6の引張側又は圧縮側の3段のリラクセーション挙動及び繰返しクリープ試験1～4の引張側又は圧縮側の2段のクリープ挙動は、5.3及び5.4で述べたように(5.1)式を用いて、ひずみ硬化則を適用した計算によりほぼ推定可能であった。したがって、逆降伏を伴わない変動クリープ及びリラクセーション挙動は、通常のクリープひずみ硬化則でよいと思われる。

一方、5.3、5.4で述べたように繰返しリラクセーション試験1～6及び繰返しクリープ試験1～4の逆降伏後のクリープ及びリラクセーション挙動は、塑性反転により逆降伏する毎に処女材に戻ると仮定してひずみ硬化則を用いたクリープ計算によりほぼ推定可能であった。

以上のことから、塑性反転（逆降伏）を伴わない変動クリープ及びリラクセーション挙動は、通常のクリープひずみ硬化が成り立ち、逆降伏直後にそれまでのクリープひずみ硬化が消失し、処女材のクリープ特性に戻ると考えるのが妥当のようである。

## 6.3 クリープが塑性挙動に及ぼす影響

図6は、引張側又は圧縮側の塑性変形中の応力と非弾性ひずみの関係を示したものである。応力 $\tilde{\sigma}$ とひずみ $\tilde{\epsilon}$ は図中のヒステリシスループで示すように考えた。なお非弾性ひずみは $\tilde{\epsilon}_{in} = \tilde{\epsilon} - \tilde{\sigma}/E$  ( $E = 15700 \text{ kg/mm}^2$ )により求めている。

(3)

図 6.1 は前回報告した同一チャージ材の塑性繰返し試験 ( $\Delta \epsilon = 1.5\%$ ) の結果で、クリープ又はリラクセーションの影響がない塑性変形挙動である。この図から、応力  $\tilde{\sigma}$  と非弾性ひずみ  $\tilde{\epsilon}_{in}$  の関係は、両対数グラフ上で、やや凸の曲線で、この曲線の形状を保ちながら、繰返し硬化に伴い、応力方向に平行移動していることがわかる。

図 6.2 は今回実施した繰返しリラクセーション及び繰返しクリープについて図 6.1 と同様の方法で整理した結果の例である。

各図とも引張側のみの保持試験と、それと対応する引・圧両側に保持を有する試験の結果を実線および破線で示している。またこれらと比較するため上述の図 6.1 の結果 ( $N = 1, 10$ ) を一点鎖線で示している。なお、数字は繰返し数を表わしている。

これらの図から、応力保持、ひずみ保持にかかわらず、クリープ変形直後の塑性変形中の  $\log \tilde{\sigma}$  と  $\log \tilde{\epsilon}_{in}$  の傾きは、保持のない場合に比べ小さくなることがわかる。すなわち、クリープ直後の塑性挙動は、クリープのない場合に比べ塑性変形しやすくなるようである。

しかし、引張側のみの保持を与えた繰返し試験の引張変形挙動の傾きは、保持のない繰返し挙動の傾きにはば一致しており、一度塑性反転を与えると  $\log \tilde{\sigma}$  と  $\log \tilde{\epsilon}_{in}$  の傾きは、保持のない場合の傾きに一致するようである。

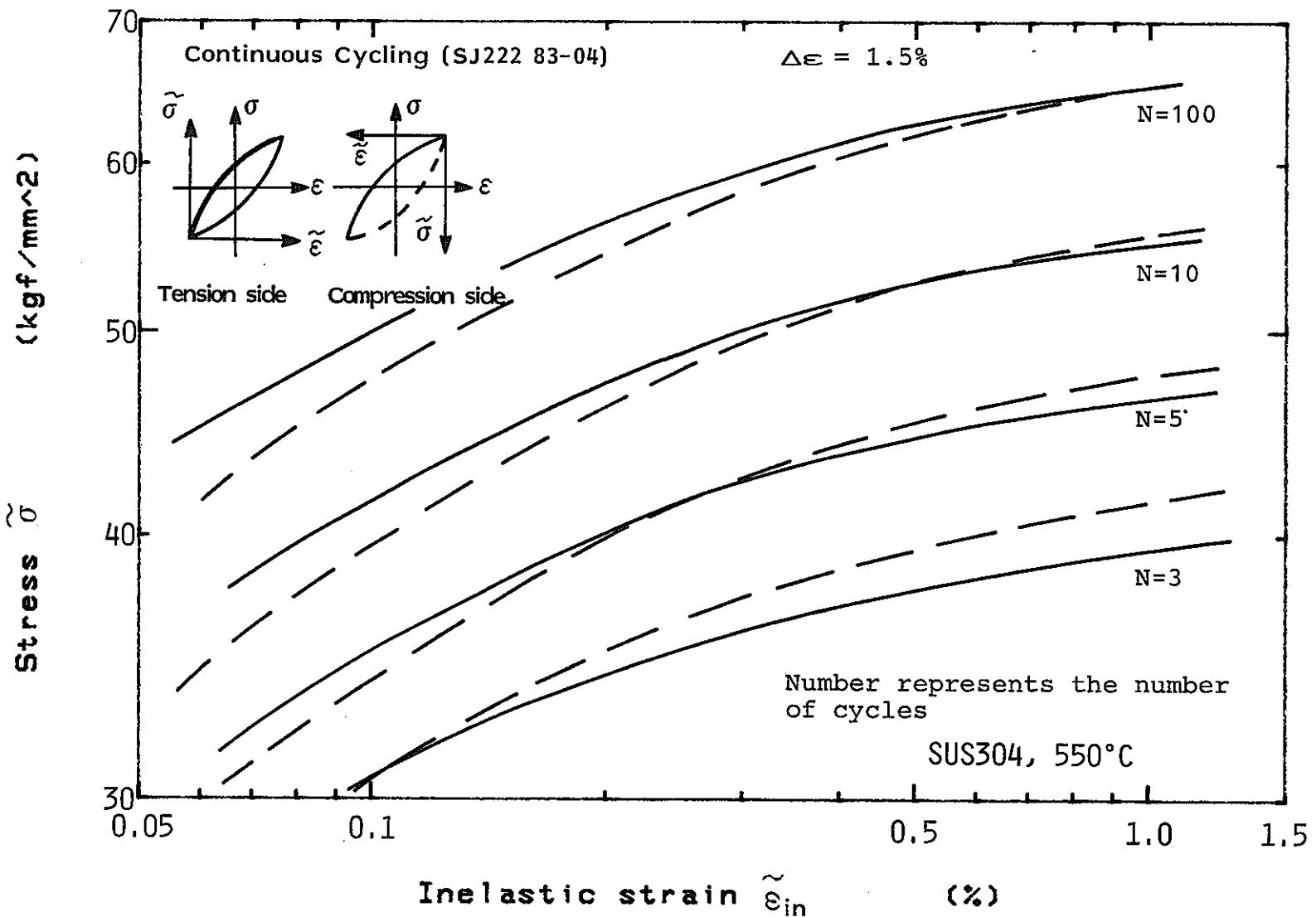


図 6.1

塑性繰返し中の応力と非弾性ひずみの関係, SUS 304, 550°C

Fig. 6.1

Relation between stress and inelastic strain during plastic cycling of SUS304 at 550°C

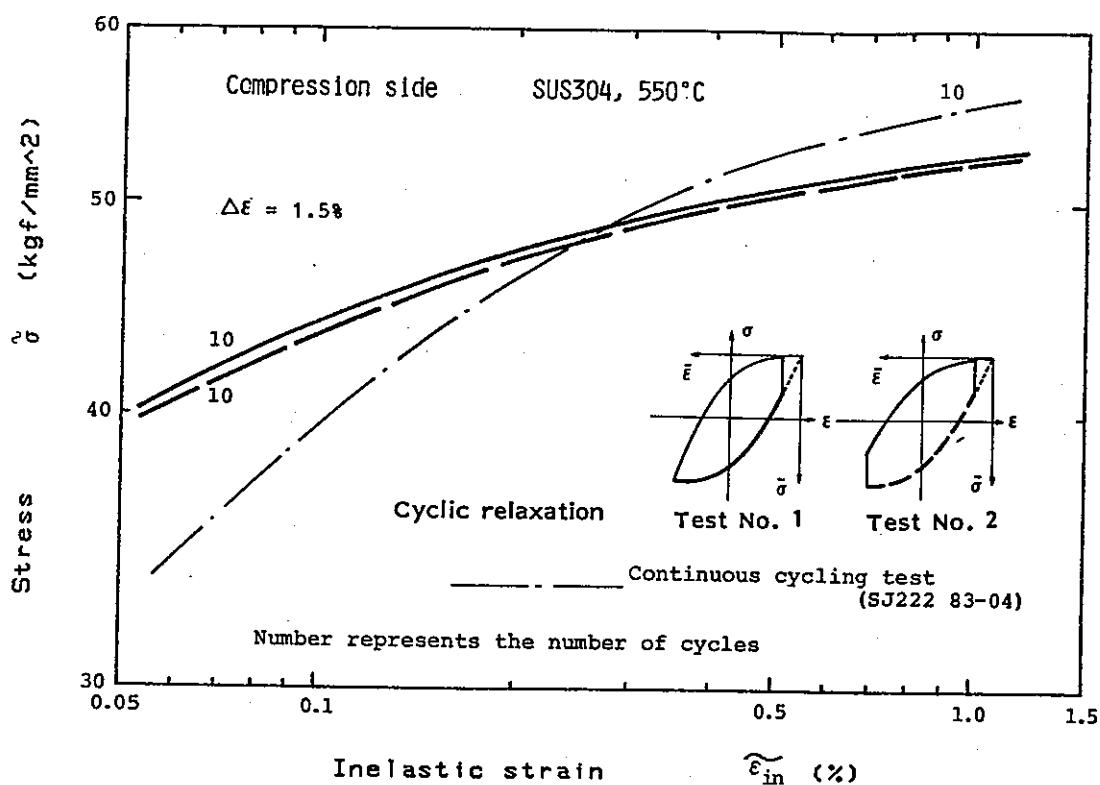
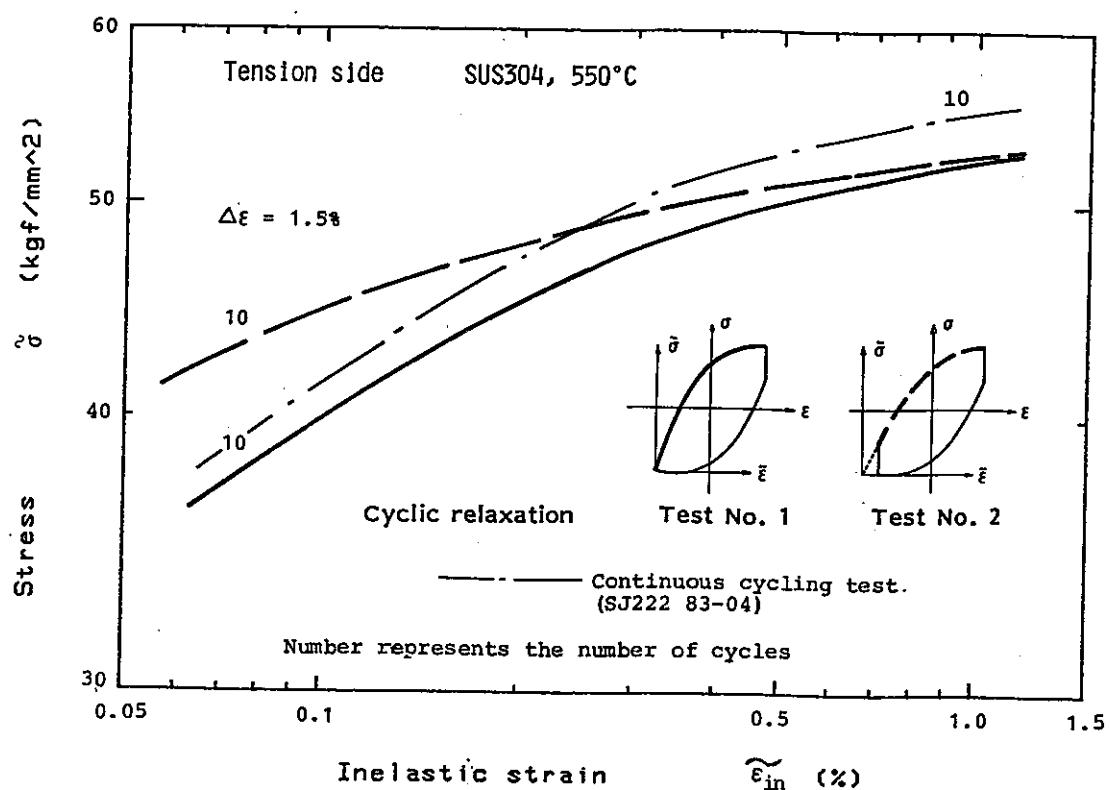


図 6.2 a) 線返しリラクセーション(試験1, 2)における応力と非弾性ひずみの関係, SUS 304, 550°C

Fig. 6.2 a) Relation between stress and inelastic strain during cyclic relaxation (Test No.1, 2) of SUS304 at 550°C

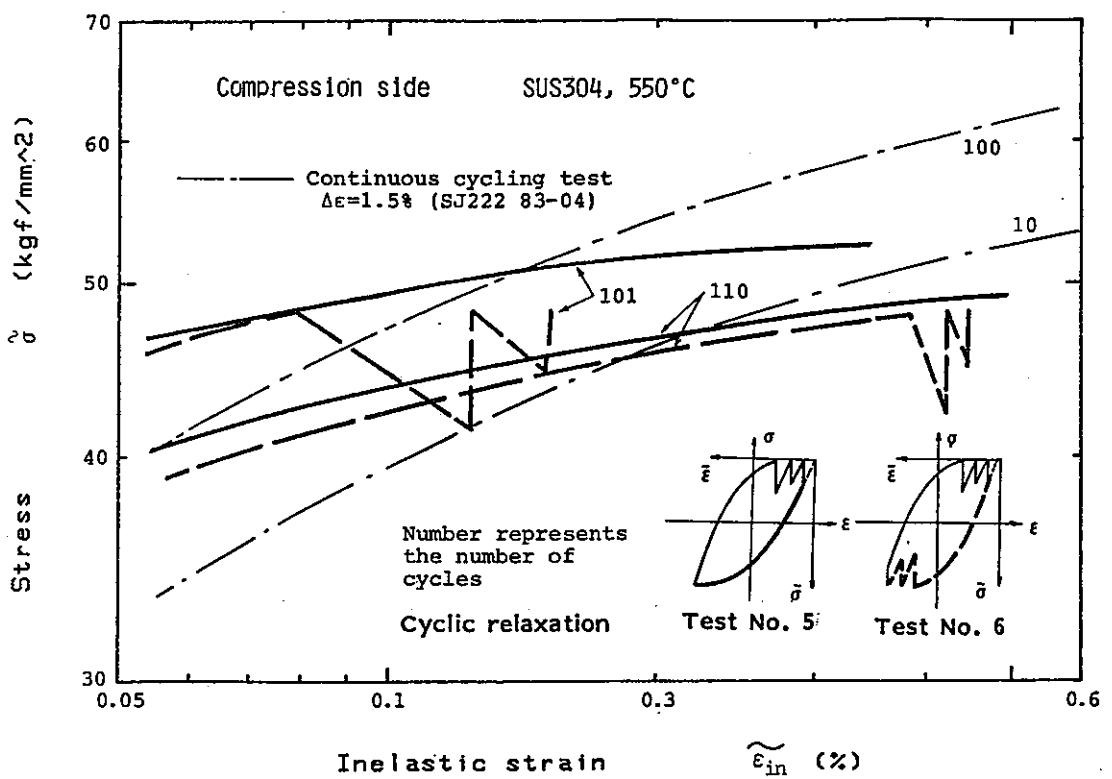
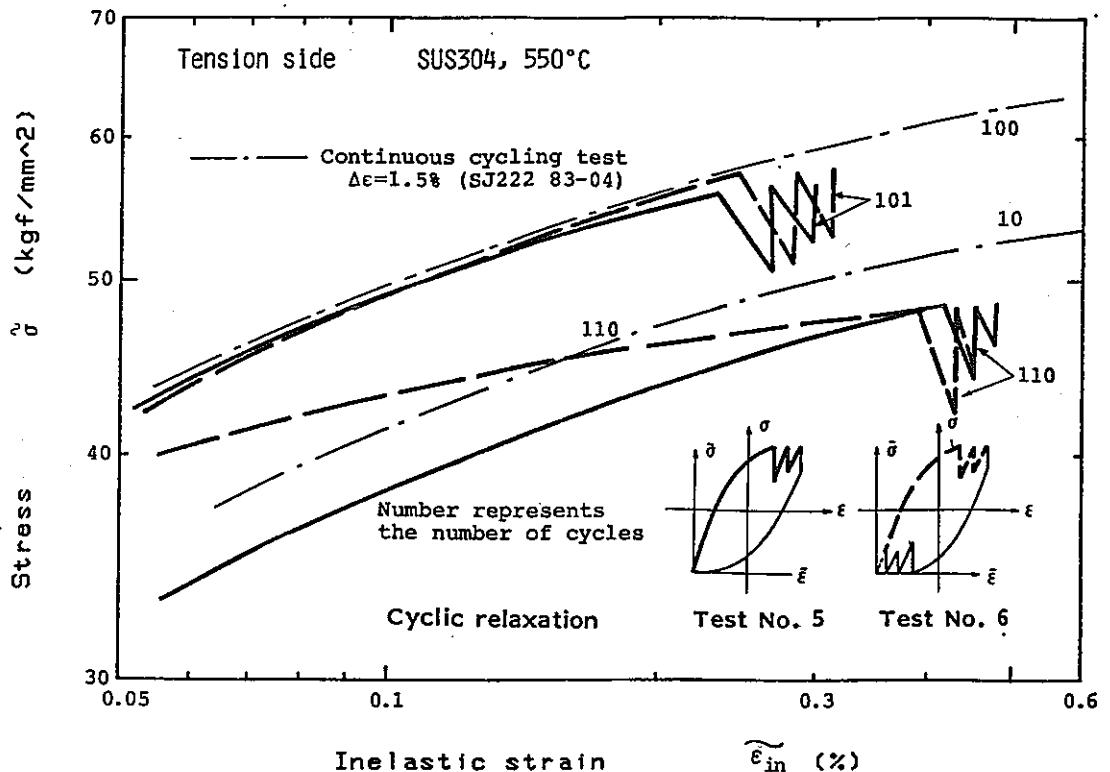


図 6.2 b) 繰返しリラクセーション(試験 5, 6)における応力と非弾性ひずみの関係, SUS 304, 550 °C

Fig. 6.2 b) Relation between stress and inelastic strain during cyclic relaxation (Test No.5, 6) of SUS304 at 550°C

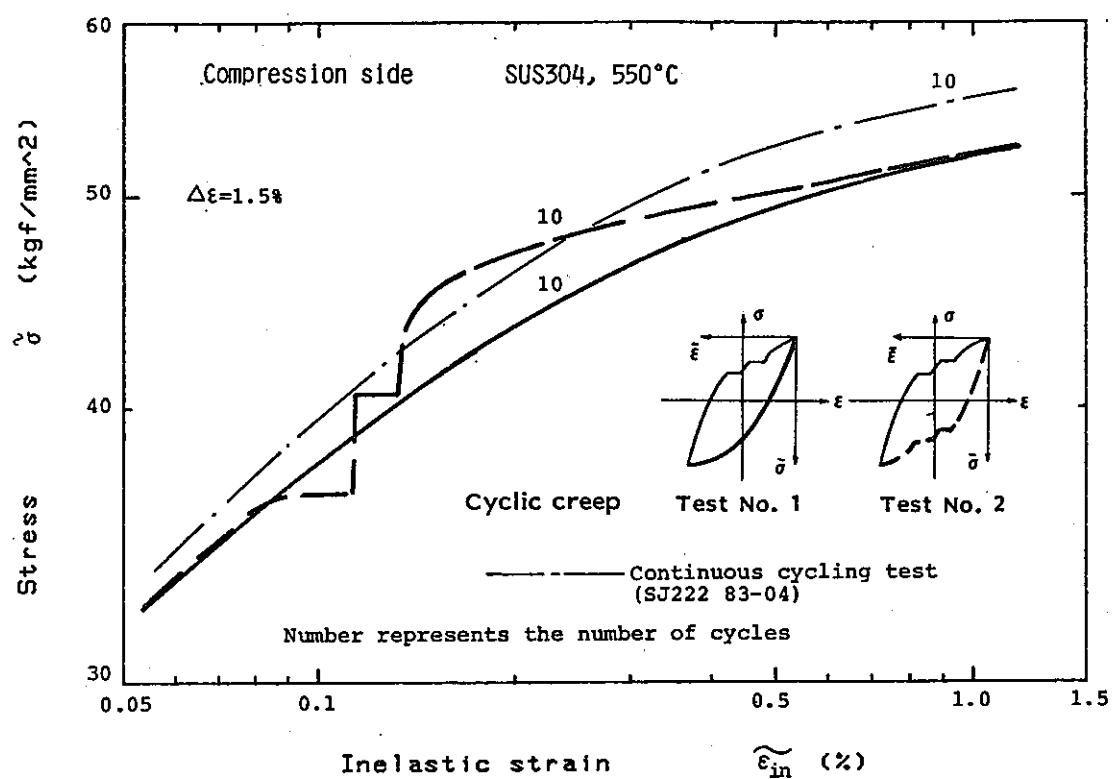
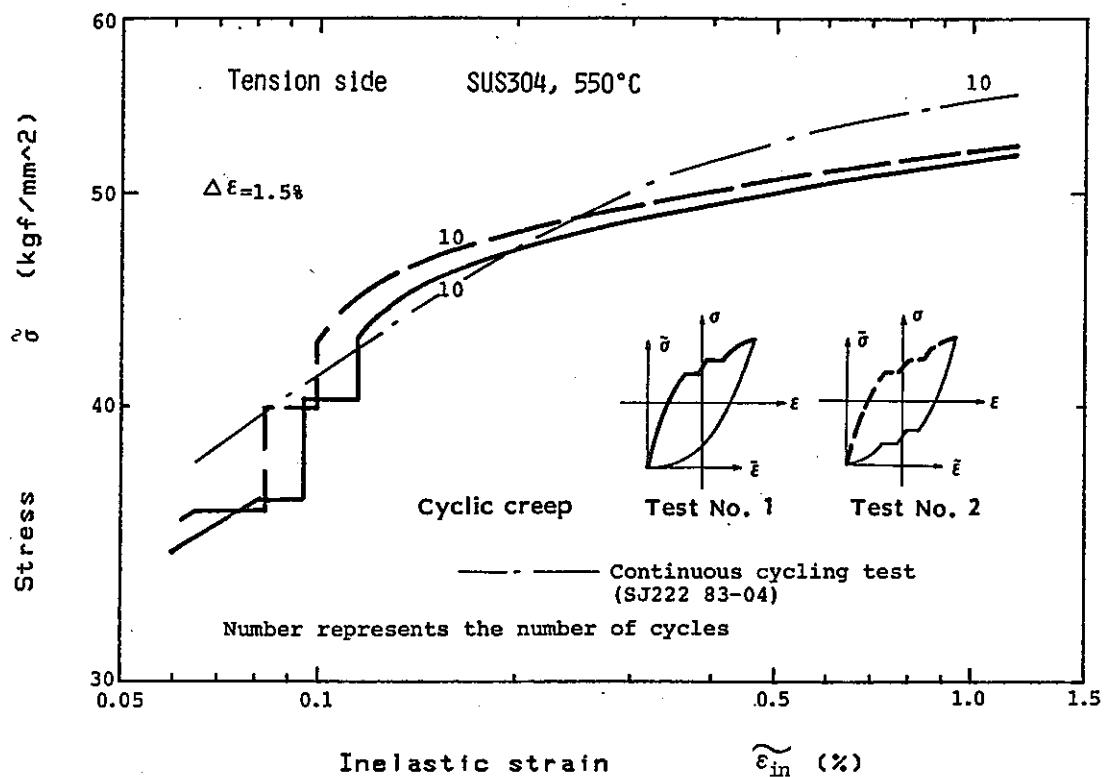


図 6.2 c) 繰返しクリープ(試験 1, 2)における応力と非弾性ひずみの関係, SUS 304, 550°C

Fig. 6.2 c) Relation between stress and inelastic strain during cyclic creep (Test No.1, 2) of SUS304 at 550°C

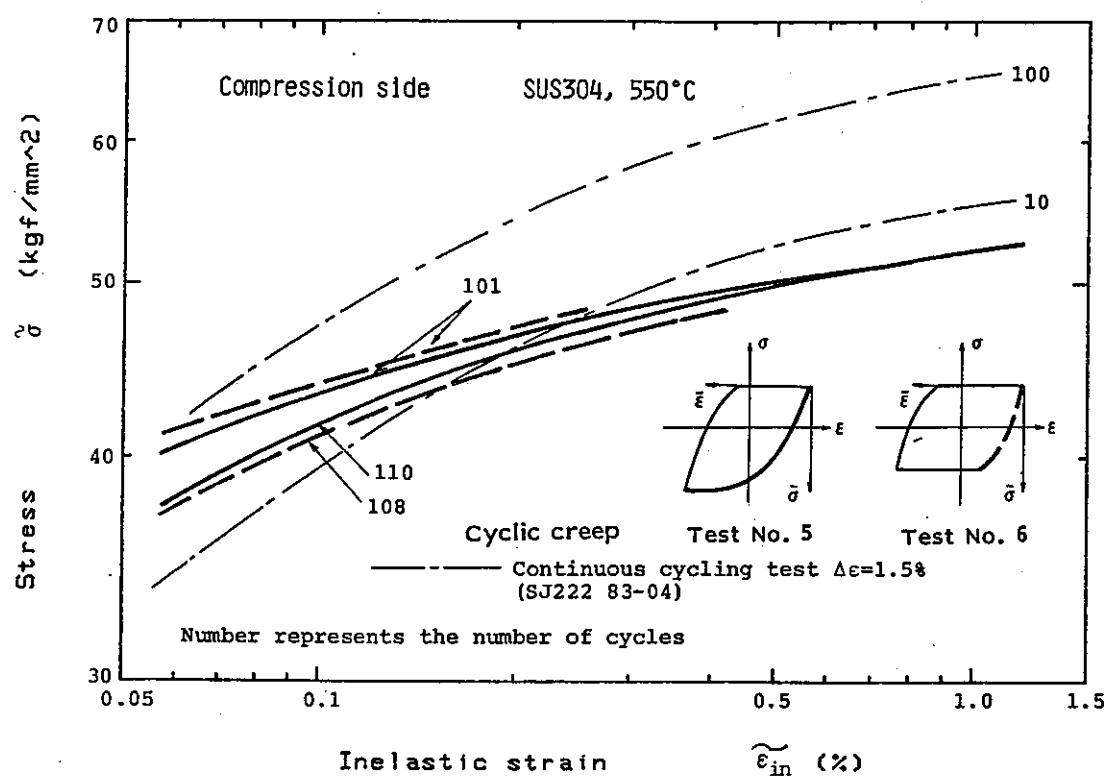
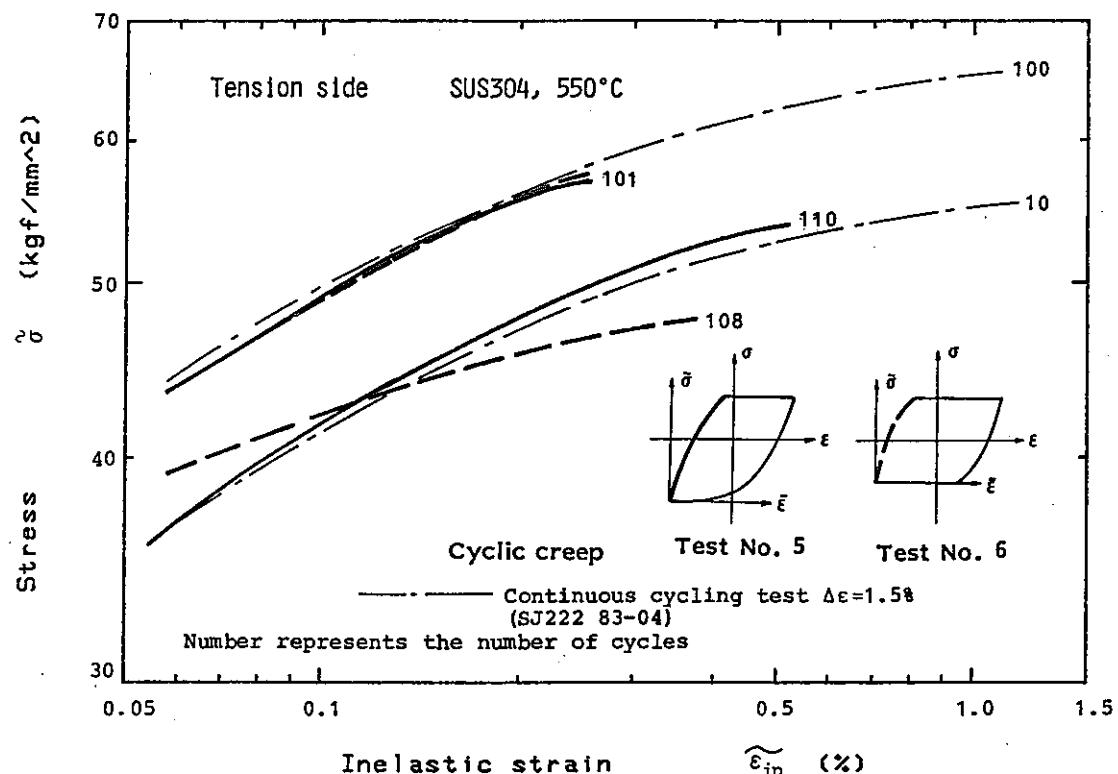


図 6.2 d) 繰返しクリープ(試験 5, 6)における応力と非弾性ひずみの関係, SUS 304, 550°C

Fig. 6.2 d) Relation between stress and inelastic strain during cyclic creep (Test No.5, 6) of SUS304 at 550°C

## 7. まとめ

以上、高温単軸条件下の塑性クリープ挙動試験を行ない、SUS304鋼の非弾性挙動に関し実験的検討を行なった。試験は引張、クリープ及び各種の繰返しリラクセーションと繰返しクリープで550°Cで実施した。

実験結果をクリープひずみ式を用いて解析し、硬化則等の検討を行なった。その結果、以下の知見が得られた。

### (1) 単調応力ひずみ挙動に及ぼすひずみ速度の影響

各種ひずみ速度 ( $\dot{\epsilon} = 1.67 \times 10^{-4} \sim 5.56\%/\text{sec}$ ) の引張試験の結果、単調応力ひずみ挙動 ( $\epsilon < 10\%$ ) に及ぼすひずみ速度の影響はほとんど認められなかった。

### (2) 繰返し硬化がその後のクリープ特性に及ぼす影響

繰返し塑性硬化の影響によりクリープ特性は処女材クリープ特性に比べ硬化し、遷移・定常クリープ速度共に、低下することがわかった。ただし、その後クリープを含む繰返しを与えると次第に回復し、処女材クリープ特性に近づく。

### (3) 変動クリープ及びリラクセーション

塑性反転(逆降伏)を伴わない変動クリープ及びリラクセーション挙動は、通常のクリープひずみ硬化則が成り立つが、逆降伏直後にそれまでのクリープひずみ硬化は消失し、処女材のクリープ特性に戻るようである。

### (4) クリープがその後の塑性挙動に及ぼす影響

塑性ひずみの繰返しの途中でクリープ変形を与えた場合、クリープ直後の塑性変形では、クリープがない場合に比べ、塑性変形しやすくなるが、次の塑性反転によりその影響は消失する。

## 8. 謝　　辞

この試験研究の実施に当っては、動力炉・核燃料開発事業団、FBR開発本部構造材料グループ及びナトリウム材料開発室の関係各位、KOM連絡会関係各位に多大の御指導・御教示を頂きました。ここに記して感謝いたします。

## 9. 参考文献

- (1) 遠藤 他 : 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼およびSUS 304 鋼の非弾性挙動試験,  
SJ 222 81-11 (1981)
- (2) 遠藤 他 : 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼およびSUS 304 鋼の単軸繰返し挙動  
試験(Ⅱ),  
SJ 222 82-08 (1982)
- (3) 遠藤 他 : 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼とステンレス鋼の単軸非弾性特性確認試験,  
SJ 222 83-04 (1983)
- (4) FBR 金属材料試験実施要領書, N 241 77-03, 1977
- (5) 井上 他 : 塑性-クリープ相互作用下の非弾性構成式の評価とベン  
チマーク問題の解析 - 中間報告 -,  
日本材料学会 高温強度部門委員会 非弾性解析法調査作  
業グループ (1984)

## FBR 金属材料試験計画表

## FBR Metallic Materials Test Planning Sheet

No. \_\_\_\_\_

昭和 年 月 日  
Date:

所属名 Affiliation	承認 Approved by	審査 Reviewed by	作成 Prepared by
三菱重工業㈱			

 提案計画 Proposed Plan 合意した計画 Approved Plan 実行した計画 Accomplished Plan分類番号  
No. III-1 7

No.	項目 Item	内容説明 Descriptions					
1	試験題目 Subject	SUS 304 の塑性クリープ挙動試験					
2	試験目的 Objective	高温単軸条件下における塑性クリープ相互作用に対する非弾性解析法確立のための裏付けとなるべく実験的検討を行なう。					
3	試験概要 Contents	各種ひずみ速度の引張試験、クリープ試験、各種の繰返しリラクセーション及び繰返しクリープ試験を行ない、塑性クリープ相互作用の実験的検討を行なう。					
4	対象機器 Objective Component	FBR 機器全般					
5	試験材料 Materials	材料名 Name	製造種別 Production Form	寸法他 Size(thickness and others)			
		SUS 304 鋼 (A7)	板材	40 t			
6	環境 Environment	<input checked="" type="checkbox"/> 大気中 In Air <input type="checkbox"/> 静止Na中 In Stagnant Sodium <input type="checkbox"/> 流動Na中 In Flowing Sodium	<input type="checkbox"/> アルゴン中 In Ar <input type="checkbox"/> 惰性中 In N <sub>2</sub> <input type="checkbox"/> ヘリウム中 In He	<input type="checkbox"/> 真空中 In Vacuum <input type="checkbox"/> その他 Others	( )		
7	試験名 Type of Test パラメータ Parameter	<input checked="" type="checkbox"/> 引張試験 Tensile Test <input type="checkbox"/> 高速引張試験 High Speed Tensile Test	<input type="checkbox"/> クリープ試験 Creep Test	<input type="checkbox"/> 低サイクル疲れ試験 Fatigue Test <input type="checkbox"/> クリープ-疲れ試験 Creep-Fatigue Test	<input type="checkbox"/> リラクセーション試験 Relaxation Test <input type="checkbox"/> その他 Others (塑性クリープ挙動)		
	材料チャージ数 No. of Material Charges	1	1		1		
	温度レベル数 No. of Temp. Levels	1	1		1		
	応力レベル数 No. of Stress Levels		6				
	ひずみ範囲レベル数 No. of Strain Range Levels						
	ひずみ速度レベル数 No. of Strain Rate Levels	6			1		
	保持時間数 No. of Hold Time Levels						
	反復回数 No. of Repetition	1	1		1		
	試験片枚数 Total No. of Test Specimens	6	6		14*		
8	試験内容 Test Parameters	<input type="checkbox"/> Fracture Test <input checked="" type="checkbox"/> Stress-Strain Curve	<input type="checkbox"/> Fracture Test <input type="checkbox"/> Stress-Strain Curve	<input type="checkbox"/> Rupture Test <input checked="" type="checkbox"/> Creep Curve <input type="checkbox"/> Internal Pressure Creep	<input type="checkbox"/> Life <input type="checkbox"/> Notched Cyclic Stress-Strain Curve <input type="checkbox"/> Crack Behavior <input type="checkbox"/> Rotating Bending <input type="checkbox"/> Plane Bending	<input type="checkbox"/> Relaxation Stress <input type="checkbox"/> Relaxation Curve	<input checked="" type="checkbox"/> 単軸材質力学 <input type="checkbox"/> 多軸材質力学 <input type="checkbox"/> 複雑拘束試験 <input type="checkbox"/> 構造物挙動試験 <input type="checkbox"/> 衝撃試験 <input type="checkbox"/> 樹脂試験 <input type="checkbox"/> 硬さ試験 <input type="checkbox"/> 密度試験 <input type="checkbox"/> 腐食試験 <input type="checkbox"/> 光学顕微鏡観察 <input type="checkbox"/> 透過型電子顕微鏡 TEM <input type="checkbox"/> 扫描型電子顕微鏡 SEM <input type="checkbox"/> 微小部分析 EIMMA <input type="checkbox"/> その他 Others
	条件 Test Conditions	Temp. 550°C Strain Rate $1.67 \times 10^{-4}$ $\sim 5.56\%/\text{sec}$	Temp. Strain Rate	Temp. 550°C Stress $10 \sim 28 \text{kgf/mm}^2$ Time $\sim 1000 \text{h}$	Strain Range Strain Rate Load Duration	Temp. Strain Time	
9	使用試験機台数 No. of Testing Machines	1	5				1
10	試験期間(年/月) Time Schedule(Year/Month)	59/10 ~ 60/4	( / ) ~ ( / )	59/10 ~ 60/4	( / ) ~ ( / )	( / ) ~ ( / )	59/10 ~ 60/4
11	試験実施場所 Test Laboratory	三菱重工高砂研		三菱重工高砂研			三菱重工高砂研
12	備考 Remarks	* 各種繰返しリラクセーション及びクリープ試験の総本数					