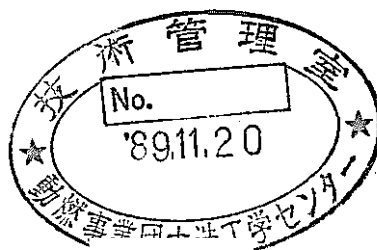


SUS304溶接継手の高温強度試験 (Ⅲ) 及びMod. 9Cr-1Mo鋼鍛造材の高温強度 試験 (Ⅰ)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)



1988年4月

株式会社 日立製作所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1988年4月

SUS304溶接継手の高温強度試験(Ⅲ)*
及びMod.9Cr-1Mo鋼鍛造材の高温強度試験(Ⅰ)*

(代表研究者)

福田嘉男**，福井寛***，祐川正之***

中川幸雄****，

要 旨

高速原型炉及び大型炉設計に必要な溶接部及び鍛造材のデータを得る目的で、オーステナイト系ステンレス鋼SUS304の溶接継手及びMod.9Cr-1Mo鋼鍛造材の高温強度試験を実施した。

溶接継手試験は昨年引き続きSUS304板材(40t)及びSUS304鍛造材(350t)を母材とする溶接継手を用いた。また、母材試験はMod.9Cr-1Mo鋼鍛造材(550t)を用いた。

SUS304鍛造材と板材の溶接継手についてはクリープ試験、曲げ場クリープ疲労試験を、さらに308全溶接金属についてはクリープ試験を実施した。

Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材については、引張試験、クリープ試験及び疲労試験を実施した。

これらの試験を実施した結果、以下の結言を得た。

- (1) 308全溶接金属及びSUS304鍛造材-板材溶接継手のクリープ強度は動燃事業団“高速原型炉高温構造設計指針・材料強度基準等”の許容応力を満足する。
- (2) SUS304鍛造材-板材の溶接継手の曲げ場クリープ疲労強度は軸応力場でのクリープ疲労試験より500℃では若干大きく、550℃ではかなり大きい。
- (3) Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材の引張、クリープ及び疲労強度は、母材の表面と中央部で有意差はなく動燃事業団“材料強度基準等(暫定値)”を満足する。

* 本報告は、株式会社日立製作所が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号 : 620D007

事業団担当者: 二瓶勲(大洗工学センタ機器構造開発部 材料開発室)

** (株) 日立製作所 機械研究所

*** (株) 日立製作所 日立研究所

**** (株) 日立製作所 日立工場

April, 1988

Strength Tests of SUS 304 Stainless Steel Weld Joint at Elevated Temperature(II)
and Strength Tests of Mod. 9Cr-1Mo Forging Steel at Elevated Temperature (I)*

Yoshio Fukuda**, Yutaka Fukui***,
Yukio Nakagawa****, Masayuki Sukekawa***

Abstract

Strength tests of SUS304 stainless steel welded joint and Mod. 9Cr-1Mo forging base metal at elevated temperature were carried out for the purpose of getting data needed for Prototype Fast Breeder Reactor and Demonstration plant.

Same as last year's, examined materials were welded joints of SUS304 plate (40t) and SUS304 forging (350t). For base metal test, Mod. 9Cr-1Mo forging (550t) were applied.

Creep test, bending creep and fatigue test of welded joint of SUS304 plate and SUS304 forging, and creep test of weld metal were carried out. Tensile test, creep test and fatigue test of Mod. 9Cr-1Mo forging were carried out.

Results of these tests are as follows.

- (1) 308 weld metal and welded joint of 304 plate and forging show that their creep strength are higher than those of Material Strength Standard, PNC.
- (2) Bending creep fatigue strength of welded joint of plate and forging are a little higher than those strength on axial load at 500°C and are a considerable higher than those at 500°C.
- (3) Tensile strength, creep strength and fatigue strength of Mod. 9Cr-1Mo forging steel are same as Material Strength Standard, PNC (preliminary) And there are no significant difference between two data of surface and middle of forging.

* Work performed by Hitachi Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison: Isao Nihei

(Materials Development Section Systems and Components
Division Oarai Engineering Center)

** Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

*** Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

****Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

S U S 3 0 4 溶接継手の高温強度試験（Ⅲ）及び
Mod.9 Cr－1 Mo鋼鍛造材の高温強度試験（Ⅰ）

目 次

要 旨	i
目 次	iii
表リスト	v
図リスト	viii
写真リスト	x iv
1. 緒 言	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	4
3.1 供試材の仕様	4
3.2 供試材の製造プロセス及び試験結果	9
3.3 溶接継手の製作方法	16
4. 試験方法	18
4.1 試験片採取方法	18
4.2 試験片形状寸法	18
4.3 試験機仕様	22
4.4 試 験 方 法	27
4.4.1 引張試験	27
4.4.2 クリープ試験	27
4.4.3 低サイクル疲労試験	27
4.4.4 曲げ場クリープ疲労試験	28

5. 試験結果	30
5.1 SUS304 鍛造材と板材のTIG溶接継手	30
5.1.1 クリープ破断試験	30
5.1.2 曲げ場クリープ疲労試験	30
5.2 308系溶接金属	54
5.2.1 クリープ試験	54
5.3 Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材	64
5.3.1 引張試験	64
5.3.2 クリープ試験	64
5.3.3 低サイクル疲労試験	64
6. 考 察	86
6.1 SUS304 溶接継手	86
6.1.1 クリープ破断特性	86
6.1.2 曲げ場クリープ疲労特性	86
6.2 Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材	98
6.2.1 引張特性	98
6.2.2 クリープ特性	98
6.2.3 疲労特性	99
7. 結 言	100
8. 参考文献	101
謝 辞	103

表リスト (1)

表2.1	試験研究範囲一覧表	3
Table 2.1	Content of present tests	3
表3.1	S U S 3 0 4 板材の製造寸法	5
Table 3.1	Manufacturing sizes of SUS304 plate	5
表3.2	S U S 3 0 4 板材の製造仕様概要	5
Table 3.2	Summary of manufacturing specifications for SUS304 plate	5
表3.3	S U S 3 0 4 鍛造材の製造寸法	6
Table 3.3	Manufacturing sizes of SUS304 forging	6
表3.4	S U S 3 0 4 鍛造材 (350t) 製造仕様概要	6
Table 3.4	Summary of manufacturing specifcations for SUS304 forging (350t)	6
表3.5	S U S 3 0 4 の溶接材料	7
Table 3.5	Weld metal for SUS304	7
表3.6	S U S 3 0 4 用ワイヤの製造仕様	7
Table 3.6	Manufacturing specifications of welding metal for SUS304	7
表3.7	Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材の製造寸法	8
Table 3.7	Manufacturing sizes of Mod.9Cr-1Mo forging	8
表3.8	Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材 (550t) の製造仕様概要	8
Table 3.8	Summary of manufacturing specifications for Mod.9Cr-1Mo forging	8
表3.9	S U S 3 0 4 板材 (40t) 製造工程	10
Table 3.9	Manufacturing process of SUS304 plate (40t)	10
表3.10	S U S 3 0 4 板材 (40t) の確性試験結果	11
Table 3.10	Certification test results of SUS304 plate (40t)	11

表リスト (2)

表3.11	S U S 3 0 4 鍛造材の製造工程	12
Table 3.11	Manufacturing process of SUS304 forging	12
表3.12	S U S 3 0 4 鍛造材の確性試験結果	13
Table 3.12	Certification test results of SUS304 forging	13
表3.13	溶接材料の確性試験結果 (T G S - 3 0 8 N)	14
Table 3.13	Certification test results of weld metal (TGS-308N)	14
表3.14	Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材の確性試験結果	15
Table 3.14	Certification test results of Mod.9Cr-1Mo forging	15
表3.15	溶接施行条件	17
Table 3.15	Welding condition	17
表4.1	クリープ試験機の仕様	23
Table 4.1	Specification of creep testing machine	23
表4.2	低サイクル疲労試験機の仕様	24
Table 4.2	Specification of low-cycle fatigue testing machine	24
表4.3	曲げ場クリープ疲労試験機仕様	25
Table 4.3	Specification of creep fatigue testing machine in bending condition	25

表リスト (3)

表5.1.1	SUS304板-SUS304鍛造材溶接継手のクリープ破断試験結果	32
Table 5.1.1	Results of creep rupture test of SUS304 plate-SUS304 forging welded joint	32
表5.1.2	SUS304溶接継手の曲げ疲労及び曲げクリープ疲労試験結果	33
Table 5.1.2	Results of bending creep-fatigue test on SUS304 welded joints	33
表5.2.1	308溶接金属のクリープ試験結果	55
Table 5.2.1	Results of creep test of 308 weld metal	55
表5.3.1	Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材の引張試験結果 (表面)	65
Table 5.3.1	Results of tensile test of Mod.9Cr-1Mo forging (Surface)	65
表5.3.2	Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材の引張試験結果 (中央)	66
Table 5.3.2	Results of tensile test of Mod.9Cr-1Mo forging (Center)	66
表5.3.3	Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材のクリープ試験結果	67
Table 5.3.3	Results of creep test of Mod.9Cr-1Mo forging	67
表5.3.4	Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材の高温低サイクル疲労試験結果	68
Table 5.3.4	Results of low-cycle fatigue test on Mod.9Cr-1Mo forging	68

図リスト (1)

図4.1	Mod.9Cr-1Mo 鋼鍛造材切り出し方法	19
Table 4.1	Sampling method of section for Mod.9Cr-1Mo forging	19
図4.2	引張及びクリープ試験片形状・寸法	20
Table 4.2	Shape and size fo tensile and creep specimen	20
図4.3	疲労試験片 (Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材)	21
Table 4.3	Fatigue specimen (Mod.9Cr-1Mo forging)	21
図4.4	板曲げ試験片形状寸法	21
Table 4.4	Shape and size of fatigue test speciman for bending load ...	21
図4.5	曲げ場クリープ疲労試験装置の概要	26
Table 4.5	Schematic view of the test eguipment for creep	26
	fatigue test in bending condition	
図4.6	曲げ場クリープ疲労試験片形状	26
Table 4.6	Configuration of specimen for creep fatigue test	26
	in bending condition	

図リスト (2)

図4.7	変位センサ取付位置図	29
Fig.4.7	Position of strain gage	29
図4.8	変位センサの特性	29
Fig.4.8	Linearity and gauge factor of L-type LLC strain gauge	29
図5.1.1	応力とクリープ破断時間の関係	34
	(SUS304板-SUS304鍛造材溶接継手)	
Fig.5.1.1	Strees vs creep rupture time	34
	(SUS304 plate - SUS304 forging welded joint)	
図5.1.2	繰返しに伴う公称曲げ応力の変化挙動 (550℃, $t_H=0$)	35
Fig.5.1.2	Cyclic behavior of nominal bending strees (550℃, $t_H=0$) ...	35
図5.1.3	繰返しに伴う公称曲げ応力の変化挙動 (550℃, $t_H=30$ 分)	36
Fig.5.1.3	Cyclic behavior of nominal bending strees	36
	(500℃, $t_H=30$ min)	
図5.1.4	繰返しに伴う公称曲げ応力の変化挙動 (550℃, $t_H=0$)	37
Fig.5.1.4	Cyclic behavior of nominal bending strees (500℃, $t_H=0$) ...	37
図5.1.5	繰返しに伴う公称曲げ応力の変化挙動 (500℃, $t_H=30$ 分)	38
Fig.5.1.5	Cyclic behavior of nominal bending strees	38
	(500℃, $t_H=30$ min)	
図5.1.6(a)	負荷荷重のリラクセーション挙動 (500℃, $\Delta \epsilon_t=1.0\%$)	39
Fig.5.1.6(a)	Relaxation behavior of applied load (500℃, $\Delta \epsilon_t=1.0\%$) ...	39
図5.1.6(b)	負荷荷重のリラクセーション挙動	40
Fig.5.1.6(b)	Relaxation behavior of applied load (500℃, $\Delta \epsilon_t=0.7\%$) ...	40
図5.1.6(c)	負荷荷重のリラクセーション挙動	41
Fig.5.1.6(c)	Relaxation behavior of applied load (500℃, $\Delta \epsilon_t=0.5\%$) ...	41
図5.1.7(a)	負荷荷重のリラクセーション挙動	42
Fig.5.1.7(a)	Relaxation behavior of applied load (550℃, $\Delta \epsilon_t=1.0\%$) ...	42

図リスト (3)

図5.1.7(b)	負荷荷重のリラクセーション挙動	43
Fig.5.1.7(b)	Relaxation behavior of applied load (550°C, $\Delta \epsilon_t = 0.7\%$)	43
図5.1.7(c)-1	負荷荷重のリラクセーション挙動	44
Fig.5.1.7(c)-1	Relaxation behavior of applied load (550°C, $\Delta \epsilon_t = 0.5\%$)	44
図5.1.7(c)-2	負荷荷重のリラクセーション挙動	45
Fig.5.1.7(c)-2	Relaxation behavior of applied load (550°C, $\Delta \epsilon_t = 0.5\%$)	45
図5.2.1	クリープ曲線 (308 溶接金属)	56
Fig.5.2.1	Creep curve (308 weld metal)	56
図5.2.2	クリープ曲線 (308 溶接金属)	57
Fig.5.2.2	Creep curve (308 weld metal)	57
図5.2.3	クリープ曲線 (308 溶接金属)	58
Fig.5.2.3	Creep curve (308 weld metal)	58
図5.2.4	クリープ曲線 (308 溶接金属)	59
Fig.5.2.4	Creep curve (308 weld metal)	59
図5.2.5	応力とクリープ破断時間の関係 (308 溶接金属)	60
Fig.5.2.5	Stress vs. repture time (308 weld metal)	60
図5.2.6	応力と定常クリープ速度の関係 (308 溶接金属)	61
Fig.5.2.6	Stress vs. steady state creep rate (308 weld metal)	61
図5.2.7	破断伸びと破断時間の関係 (308 溶接金属)	62
Fig.5.2.7	Fracture elongation vs. rupture time (308 weld metal)	62
図5.2.8	絞りと破断時間の関係 (308 溶接金属)	62
Fig.5.2.8	Reduction of area vs. rupture time (308 weld metal)	62
図5.3.1	Mod.9Cr-1Mo 鋼鍛造材 (550mm) 引張強さ	69
Fig.5.3.1	Variation of tensile strength with temperature of Mod.9Cr-1Mo forging (550mm)	69

図リスト (4)

図5.3.2	Mod.9Cr-1Mo 鋼鍛造材 (550mm) の0.2%耐力	70
Fig.5.3.2	Variation of yield strength with temperature of Mod.9Cr-1Mo forging (550mm)	70
図5.3.3	Mod.9Cr-1Mo 鋼鍛造材 (550mm) の破断伸びと絞り	71
Fig.5.3.3	Variation of elongation and reduction of area with temperature of Mod.9Cr-1Mo forging (550mm)	71
図5.3.4	クリープ曲線 (9Cr-1Mo 鋼鍛造材)	72
Fig.5.3.4	Creep curve (9Cr-1Mo forging)	72
図5.3.5	クリープ曲線 (9Cr-1Mo 鋼鍛造材)	73
Fig.5.3.5	Creep curve (9Cr-1Mo forging)	73
図5.3.6	クリープ曲線 (9Cr-1Mo 鋼鍛造材)	74
Fig.5.3.6	Creep curve (9Cr-1Mo forging)	74
図5.3.7	クリープ曲線 (9Cr-1Mo 鋼鍛造材)	75
Fig.5.3.7	Creep curve (9Cr-1Mo forging)	75
図5.3.8	応力とクリープ破断時間の関係 (Mod.9Cr-1Mo 鋼鍛造材)	76
Fig.5.3.8	Stress vs. creep rupture time (Mod.9Cr-1Mo forging)	76
図5.3.9	応力と定常クリープ速度の関係 (Mod.9Cr-1Mo 鋼鍛造材)	77
Fig.5.3.9	Stress vs. steady state creep rate (Mod.9Cr-1Mo forging) ...	77
図5.3.10	破断伸びと破断時間の関係 (Mod.9Cr-1Mo 鋼鍛造材)	78
Fig.5.3.10	Fracture elongation vs. rupture time	78
	(Mod.9Cr-1Mo forging)	
図5.3.11	絞りと破断時間の関係 (Mod.9Cr-1Mo 鋼鍛造材)	78
Fig.5.3.11	Reduction of area vs. rupture time	78
	(Mod.9Cr-1Mo forging)	
図5.3.12	繰返しに伴う応力範囲の挙動 (Mod.9Cr-1Mo)	79
Fig.5.3.12	Cyclic behavior of stress range (Mod.9Cr-1Mo)	79

図リスト (5)

図5.3.13	Mod.9Cr-1Mo 鋼鍛造材の低サイクル強度	80
Fig.5.3.13	Fatigue strength of Mod.9Cr-1Mo forging	80
図6.1	ストローク保持中の継手部のひずみの挙動 (500℃)	89
Fig.6.1	Strain behavior on welded joint during stroke-holding (500℃)	89
図6.2	ストローク保持中の継手部のひずみの挙動 (550℃)	90
Fig.6.2	Strain behavior on welded joint during stroke-holding (550℃)	90
図6.3	曲げ応力下の繰返し応力-ひずみの関係	91
Fig.6.3	Cyclic stress-strain relation under cyclic bending loading	91
図6.4	曲げ応力場のクリープ疲労き裂発生状況	92
Fig.6.4	Appearance of creep-fatigue crack on welded joint under bending stress ...	92
図6.5(a)	溶接継手の縦方向ひずみ分布 (TP Na K0-16)	93
Fig.6.5(a)	Transverse distribution of longitudinal strain of welded joint (TP Na K0-16)	93
図6.5(b)	継手の縦方向ひずみ分布 (TP Na K0-17)	94
Fig.6.5(b)	Transverse distribution of longitudinal strain of welded joint (TP Na K0-17)	94
図6.6(a)	溶接継手部の局部ひずみ範囲の繰返し特性	95
	(横継手、 $t_H=30\text{min}$)	
Fig.6.6(a)	Cyclic behavior of local strain range on welded joint (lateral welded joint, $t_H=30\text{min}$)	95
図6.6(b)	溶接金属内のひずみ範囲の挙動	96
Fig.6.6(b)	Cyclic behavior of local strain ranre on weld metal	96

図リスト (6)

図6.7	溶接継手の曲げクリープ疲労強度	97
Fig.6.7	Creep-fatigue strength of welded joint under bending load	97

写真リスト (1)

写真5.1.1	SUS304板-SUS304鍛造材溶接継手のクリープ 46	
	破断試験後の外観	
Photo 5.1.1	Appearance after creep rupture test of 46	
	SUS304 plate - SUS304	
	forging welded joint	
写真5.1.2	板曲げ疲労試験後の試験片外観 (500℃, t _H =0) 47	
Photo 5.1.2	Appearance after bending fatigue tests (500℃, t _H =0) 47	
写真5.1.3	板曲げ疲労試験後の試験片外観 (550℃, t _H =30分) 48	
Photo 5.1.3	Appearance after bending fatigue tests (550℃, t _H =30min) ... 48	
写真5.1.4	板曲げ疲労試験後の試験片外観 (550℃, t _H =0) 49	
Photo 5.1.4	Appearance after bending fatigue tests (550℃, t _H =0) 49	
写真5.1.5	板曲げ疲労試験後の試験片外観 (550℃, t _H =30分) 52	
Photo 5.1.5	Appearance after bending fatigue tests (550℃, t _H =30min) ... 52	
写真5.2.1	308溶接金属のクリープ試験後の外観 63	
Photo 5.2.1	Appearance after creep test of 308 welded metal 63	
写真5.3.1	Mod.9Cr-1Mo 鋼鍛造材の静的引張試験後の外観 81	
Photo 5.3.1	Appearance after tensile test of Mod.9Cr-1Mo forging 81	
写真5.3.2	Mod.9Cr-1Mo 鋼鍛造材の静的引張試験後の外観 82	
Photo 5.3.2	Appearance after tensile test of Mod.9Cr-1Mo forging 82	
写真5.3.3	クリープ試験後の試験片外観 83	
Photo 5.3.3	Appearance after creep tests 83	
写真5.3.4	疲労試験後の試験片外観 (表面近傍) 84	
Photo 5.3.4	Appearance after fatigue tests (Surface) 84	
写真5.3.5	疲労試験後の試験片外観 (中央部) 85	
Photo 5.3.5	Appearance after fatigue tests (Center) 85	

1. 緒 言

高速増殖炉の構造設計をするに当って、現状では動力炉・核燃料事業団「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」¹⁾又は、ASME Code Case N-47²⁾に準拠した高温構造設計を実施しなければならず、このためには使用する材料の高温における材料データを十分整備する必要があった。

このような観点から、動力炉、核燃料開発事業団は52年度から国内原子力プラントメーカーと協力し、国産材の各種材料特性を取得するため一連の材料試験を実施している^{3), 4), 5)}。この研究の一貫として(株)日立製作所はSUS316板とSUS304伝熱管の母材、SUS316板とSUS304鍛造材との溶接継手、SUS304伝熱管及びSUS321伝熱管の溶接継手の高温引張試験、クリープ試験及び高温疲労試験、SUS321鍛造材(新チャージ材)及び伝熱管のクリープ試験及び高温低サイクル試験、SUS321伝熱管予ひずみ材の引張試験及び低サイクル疲労試験、インコネル718棒材の高温高サイクル疲労試験、SUS321鍛造材についての切欠き低サイクル疲労試験、クリープ損傷材の低サイクル疲労試験及び疲労損傷材のクリープ試験を52～59年度に実施してきた^{6), 7), 8), 12), 13), 14), 15)}。

本報告書は60年度¹⁶⁾、61年度¹⁷⁾に実施したSUS304の溶接継手のクリープ試験及び曲げ場疲労試験及びクリープ疲労試験及び308全溶接金属のクリープ試験の結果について記述したものである。

さらに、本年度より開始したMod.9Cr-1Mo鋼鍛造材について、引張試験、クリープ試験及び疲労試験を実施した結果を示す。

2. 試験研究の概要

2.1 試験研究の範囲

本研究においては、SUS304用TIG溶接材料による溶接金属のクリープ試験、SUS304板材とSUS304鍛造材溶接継手のクリープ試験、曲げ場クリープ疲労試験、及びMod.9Cr-1Mo鋼鍛造材の引張試験、クリープ試験、疲労試験を実施した。

これらの試験条件の詳細を表2.1に示した。

2.2 試験研究結果の概要

2.2.1 SUS308全溶接金属及びSUS304鍛造材－板材溶接継手

- (1) クリープ強度は、動燃事業団“高速原型高温構造設計指針・材料強度基準等”の許容応力を満足する。
- (2) SUS304鍛造材－板材の溶接継手の曲げ場クリープ疲労強度は軸応力場でのクリープ疲労強度より500℃では若干大きく、550℃ではかなり大きい。

2.2.2 Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材

- (1) 引張試験、クリープ試験及び疲労強度は、母材の表面と中央部で有意な差はなく、動燃事業団“材料強度基準等（暫定値）”を満足する。

表 2.1 試験研究範囲一覧表
Table 2.1 Content of present tests

供 試 材		試 験 項 目	温 度 (℃)	負 荷 条 件 応力 σ (kg/mm ²), ひずみ範囲 $\Delta \epsilon t$ (%)	目 標 破 断 時 間 t_r (h)	試験片数	備 考
種 類	溶接材料						
308 TIG 全 溶 接 金 属	1 種 (TGS308N)	ク リ ー プ 試 験	500	$\sigma = 26, 24$	6000*, 12000*	2	
			550	$\sigma = 18, 17$	6000*, 12000*	2	
SUS304溶接継手 (板-鍛造材)	1 種 (TGS308N)	ク リ ー プ	500	$\sigma = 26, 24$	6000*, 12000*	2	
		破 断 試 験	550	$\sigma = 18, 17$	6000*, 12000*	2	
		曲げ場クリープ	500	$\Delta \epsilon t = 0.7, 0.5$	(30分保持) *	2	
		疲 労 試 験	550	$\Delta \epsilon t = 0.7, 0.5$	(30分保持) *	2	
Mod. 9 Cr-1 Mo (鍛造材・母材)	—	引 張 試 験	室 温 400, 450 500, 550 600	—	—	24	表面: 12 中央: 12
	—	ク リ ー プ 試 験	550	$\sigma = 22, 21, 20$	500, 1000, 3000	6	表面: 3 中央: 3
	—	疲 労 試 験	550	$\Delta \epsilon t = 1.2, 1.0, 0.7,$ 0.5, 0.4	(ひずみ速度 0.1 %/sec)	10	表面: 3 中央: 5

* 昭和61年度からの継続試験

3. 供 試 材

3.1 供試材の仕様

(1) SUS304 板材

SUS304 板材は表3.1に示す寸法のものを使用した。この板材は、JIS G4304「熱間圧延ステンレス鋼板」によるものであり、表3.2に示す製造仕様により製作されたものである。

(2) SUS304 鍛造材

SUS304 鍛造材は、表3.3に示す寸法のものを使用した。この鍛造材は表3.4に示す製造仕様により製作されたものである。

(3) 溶接材料

SUS304用溶接材料は表3.5に示すものを使用した。ワイヤの製造仕様を表3.6に示す。

(4) Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材

Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材は、表3.7に示す寸法のものを使用した。この鍛造材は表3.8に示す製造仕様により製作されたものである。

表 3.1 SUS304 板材の製造寸法

Table 3.1 Manufacturing sizes of SUS304 plate

鋼 種 の 名 称	寸 法
SUS304 40t 板材	40t×1000ℓ×1000ℓ

表 3.2 SUS304 板材の製造仕様概要

Table 3.2 Summary of manufacturing specifications
for SUS304 plate

項 目	内 容																								
適用規格	1. J I S G 4 3 0 4 - 1 9 7 2 「熱間圧延ステンレス鋼板」 2. 通産省告示501号-昭和45年9月 「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」																								
製 造	1. 製造方式：電気炉溶製鋼塊の熱間圧延 2. 熱 処 理：J I S G 4 3 0 4 による固溶化熱処理 1,010～1,150℃水冷																								
品質規格	1. 化学成分（とりべ分析値 %） <table><tr><td>C</td><td>Si</td><td>Mn</td><td>P</td><td>S</td><td>Ni</td><td>Cr</td><td>Co</td></tr><tr><td>≤0.08</td><td>≤1.00</td><td>≤2.00</td><td>≤0.04</td><td>≤0.03</td><td>8.00 5 10.50</td><td>18.00 5 20.00</td><td>≤0.25</td></tr></table> 2. 機械的性質 <table><tr><td>0.2%耐力 (kg/mm²)</td><td>引 張 強 さ (kg/mm²)</td><td>伸 び (%)</td><td>ブリネル硬さ (HB)</td></tr><tr><td>≥21</td><td>≥53</td><td>≥40</td><td>≤187</td></tr></table>	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.03	8.00 5 10.50	18.00 5 20.00	≤0.25	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引 張 強 さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	ブリネル硬さ (HB)	≥21	≥53	≥40	≤187
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co																		
≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.03	8.00 5 10.50	18.00 5 20.00	≤0.25																		
0.2%耐力 (kg/mm ²)	引 張 強 さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	ブリネル硬さ (HB)																						
≥21	≥53	≥40	≤187																						
試験及び 検査方法	1. と り べ 分 析：J I S G 1 2 5 3 (Co) 2. 製 品 分 析：J I S G 1 2 1 1 ~ G 1 2 1 8 (Co) 3. 引 張 試 験：J I S Z 2 2 4 1, G 0 5 6 7 4. 硬 さ 試 験：J I S Z 2 2 4 3 5. 超音波深傷試験：通産省告示第501号, 7条 垂直法による100%走査																								

表 3.3 SUS304 鍛造材の製造寸法

Table 3.3 Manufacturing sizes of SUS304 forging

鋼 種 の 名 称	寸 法
SUS304 350t鍛造材	350t×1000w×1000d

表 3.4 SUS304 鍛造材(350t) の製造仕様概要

Table 3.4 Summary of manufacturing specifications
for SUS304 forging

項 目	内 容						
適用規格	1. J I S G 3 2 1 4 - 1 9 7 7 「高温圧力容器部品用ステンレス鋼鍛鋼品」 2. 通産省告示5 0 1 号 - 昭和4 5 年 9 月 「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準を定める告示」						
製 造	1. 製 式：電気炉製鋼 2. 熱 処 理：J I S G 3 2 1 4 による固溶化熱処理 1 0 4 0 ~ 1 1 5 0 ℃ × 7 hrs min						
品質規格	1. 化学成分（とりべ分析値%）						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr Co
	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.040	≤ 0.030	8.00 } 11.00	18.00 } 20.00 ≤ 0.25
	Cu, As, Sn, V, Al, B, Nb, Ta, N及びOについても分析結果を報告すること						
	2. 機械的性質						
	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	ブリネル硬さ (HB)		
≥ 2 1	≥ 4 9	≥ 4 5	≥ 5 0	≤ 1 8 7			
試験及び 検査方法	1. と り べ 分 析：J I S G 1 2 5 3 2. 製 品 分 析：J I S G 1 2 1 1 ~ G 1 2 1 7 3. 引 張 試 験：J I S Z 2 2 4 1 , 4. 硬 さ 試 験：J I S Z 2 2 4 3 or J I S Z 2 2 4 5 5. 結 晶 粒 度 試 験：J I S G 0 5 5 1 6. 超音波深傷試験：通産省告示第5 0 1 号 , 7 条 ASME Sect. II SA - 3 8 8 7. 液体浸透探傷試験：通産省告示第5 0 1 号 , 1 1 条 8. 非金属介在物試験：J I S G 0 5 5 5						

表 3.5 SUS304 の溶接材料

Table 3.5 Weld metal for SUS304

溶 接 方 法	溶 接 材 料 銘 柄	メ ー カ 名
自 動 T I G	T G S - 3 0 8 N	(株) 神 戸 製 鋼 所

表 3.6 SUS304 用ワイヤの製造仕様

Table 3.6 Manufacfuring specifications of welding wire for SUS304

(1) 化 学 成 分 (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
≤ 0.08	≤ 0.60	1.00~2.50	≤ 0.030	≤ 0.030	9.00~11.00	18.50~22.00

(2) 機 械 的 性 質

0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)
—	≥ 56	≥ 35	—

表 3.7 Mod.9 Cr-1 Mo鋼鍛造材の製造寸法

Table 3.7 Manufacturing sizes of Mod.9Cr-1Mo forging

鋼 種 の 名 称	寸 法
Mod.9 Cr-1 Mo 550t鍛造材	520t×520W×845ℓ

表 3.8 Mod.9 Cr-1 Mo鋼鍛造材 (550t) の製造仕様概要

Table 3.8 Summary of manufacturing specifications for
Mod.9Cr-1Mo forging

(1) 化 学 成 分 (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Al
0.08	0.20	0.30				8.00	0.85	0.18	0.06	
{	{	{	≤	≤	≤	{	{	{	{	≤
0.12	0.50	0.50	0.020	0.010	.40	9.00	1.05	0.25	0.10	0.040

(2) 機 械 的 性 質

降 伏 点	引 張 強 さ	伸 び	絞 り
kgf/mm ²	kgf/mm ²	%	%
≥42	≥60	≥15	≥40

3.2 供試材の製造プロセス及び試験結果

(1) SUS304 板材

製造プロセスを表3.9に示す。また、化学成分分析結果、引張試験結果及びその他の試験結果を表3.10に示す。

(2) SUS304 鍛造材

製造プロセスを表3.11に示す。また、化学成分分析結果、熱処理結果、引張試験結果及びその他の試験結果を表3.12に示す。

(3) 溶接材料

溶接材料の確性試験結果を表3.13に示す。

(4) Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材

化学成分分析結果、熱処理結果、引張試験結果及びその他の試験結果を表3.14に示す。

表3.9 SUS304板材(40t)製造工程

Table 3.9 Manufacturing process of SUS304 plate

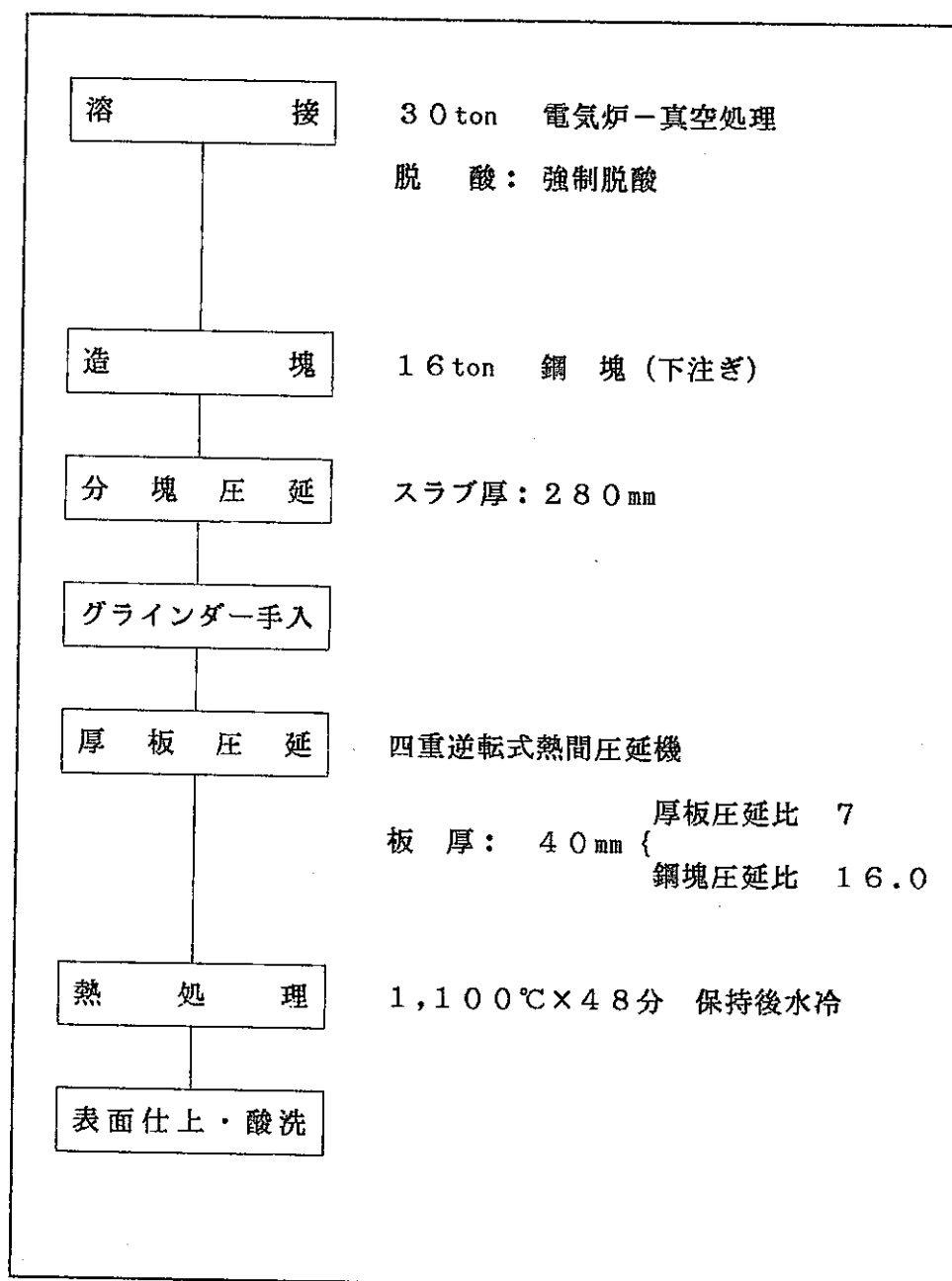


表 3.10 SUS304 板材 (40t) の確性試験結果

Table 3.10 Certification test results of SUS304 plate (40t)

(a) 分析試験結果 (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co
0.05	0.59	0.87	0.027	0.003	8.98	18.47	0.12

(b) 熱 処 理 結 果

1,100℃×48min → W.Q.

(c) 引張試験結果

	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	リネ硬さ (HB)
R.T.	23.0	64.0	63.0	—	135
550℃	12.0	39.0	40.0	—	—

(d) その他の試験結果

結晶粒度	液体浸透探傷 (PT)	超音波探傷 (UT)	外観検査 (VT)	寸法検査 (DT)
4.5	Good	Good	Good	Good

表3.11 SUS304鍛造材の製造工程
Table 3.11 Manufacturing process of SUS304 forging

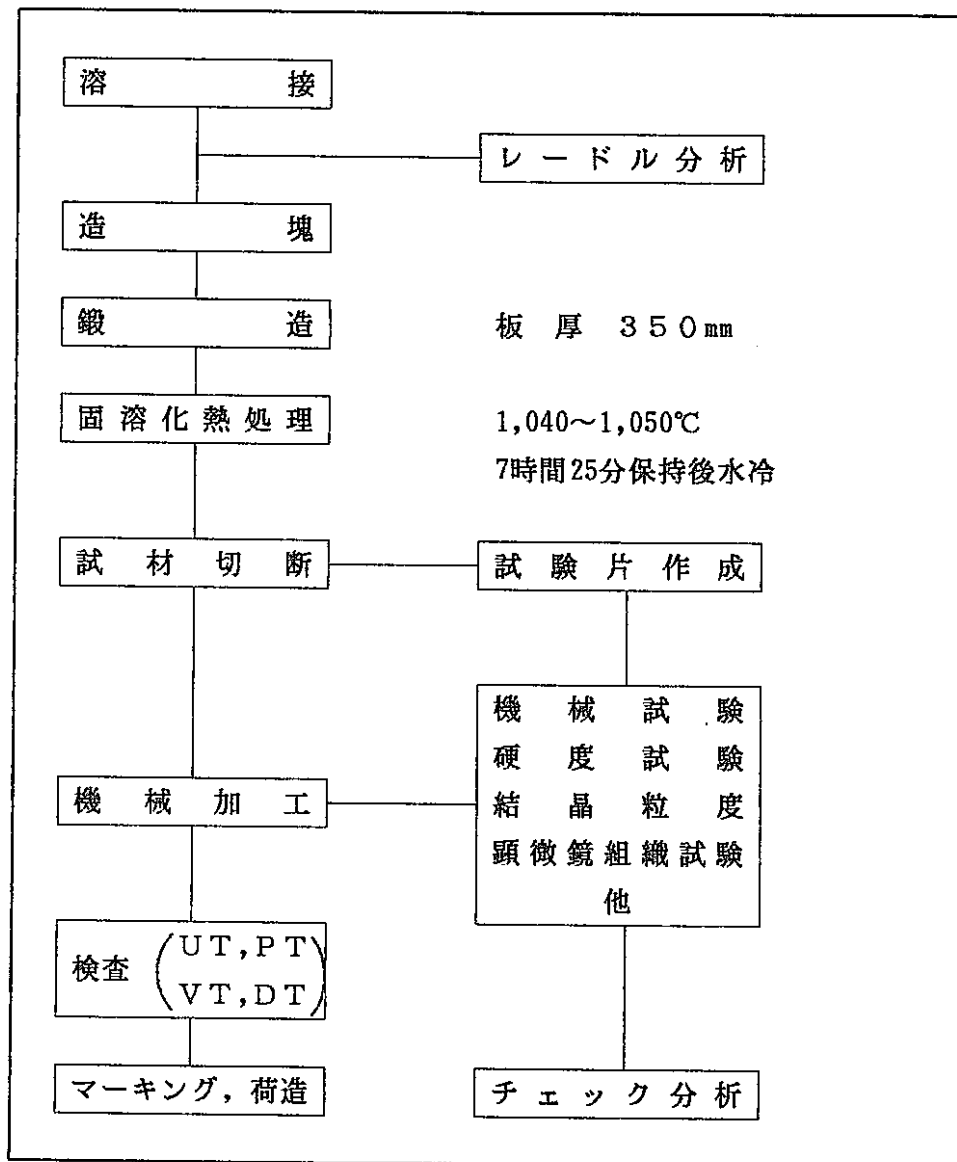


表 3.12 SUS304 鍛造材の確性試験結果

Table.3.12 Certification test results of SUS304 forging

(a) 分析試験結果

(wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co
規格値	0.04 ~0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.03	8.00 ~11.00	18.00 ~20.00	≤0.25
レードル 分析値	0.068	0.55	1.49	0.021	0.004	9.40	18.56	0.04
チェック 分析値	0.069	0.53	1.47	0.021	0.003	9.29	18.27	0.05

(b) 熱処理結果

1,040~1,050℃×7hr25min → W.Q.

(c) 機械試験結果

	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	ブリネル硬さ (HB)
R.T.	23.2	53.6	76.7	80.6	143
550℃	11.0	36.4	43.7	78.8	—

(d) その他の試験結果

結 晶 粒 度	非金属介在物	液体浸透探傷	超 音 波 探 傷	外観・寸法検査
2.6	0.0416	Good	Good	Good

表 3.13 溶接材料の確性試験結果 (TGS-308N)

Table 3.13 Certification test results of weld metal (TGS-308N)

(i) SUS304用ワイヤの化学成分仕様及び分析結果

		化 学 成 分 (%)						
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
仕 機	TGS-308N	≦0.08	≦0.60	1.00~2.50	≦0.030	≦0.030	9.00~11.00	18.50~22.00
	TGS-308N	0.058	0.41	1.48	0.003	0.002	10.43	19.81

(ii) SUS304溶接金属の化学成分仕様及び分析結果

		化 学 成 分 (%)							フェライト ナンバ
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	FN
仕 様	TGS-308N	≦0.08	≦0.60	≦2.50	≦0.040	≦0.030	9.00 ~11.00	18.00 ~21.00	—
	TGS-308N	0.06	0.46	1.42	0.009	0.007	10.10	19.27	8

表 3.14 Mod.9 Cr-1 Mo 鋼鍛造材の確性試験結果

Table 3.14 Certification test results of Mod.9 Cr-1 Mo forging

(a) 分析試験結果

(wt %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Al
規格値	0.80 0.12	0.20 0.50	0.30 0.50	≤ 0.020	≤ 0.010	≤ 0.40	8.00 9.00	0.85 1.05	0.18 0.25	0.06 0.10	≥ 0.040
レードル 分析値	0.096	0.25	0.38	0.016	0.002	0.18	8.88	0.98	0.20	0.070	0.005
チェック 分析値	0.094	0.23	0.37	0.015	0.001	0.18	8.82	0.97	0.20	0.066	0.004

(b) 熱処理結果

1040℃ W.Q. . . . 770℃ A.C.

(c) 機械試験結果

試験項目 規格 試験片符号	引 張 試 験					カタサ試験	衝 撃 試 験
	直 径	降 伏 点	引張強さ	伸 び	絞 り	ビッカース	Vノッチ シャルピー0℃ kg・m以上
	mm	kg/mm ²	kg/mm ²	%	%		
—	—	以上 42	以上 60	以上 15	以上 40	参 考	参 考
板厚の0/4L方向	10.0	45.1	63.7	25	72	---	---
板厚の1/4L方向	10.0	44.5	63.7	26	72	192	18.8, 19.6, 18.5
板厚の1/4Z方向	10.0	44.9	64.3	24	72	---	17.7, 16.8, 16.3
板厚の2/4L方向	10.0	44.5	63.7	24	71	---	---
板厚の2/4Z方向	10.0	44.7	64.0	25	70	---	---
板厚の3/4L方向	10.0	43.2	64.3	28	73	---	---

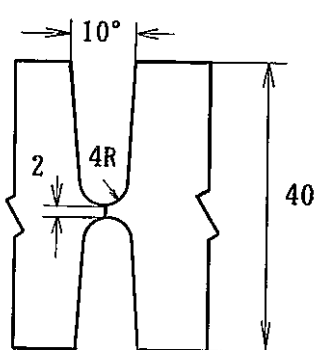
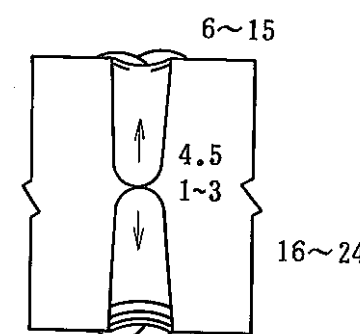
3.3 溶接継手の製作方法

表3.15に308全溶接金属クリープ試験に適用する継手の溶接施工条件を示す。

溶接法は、タングステンイナートガス溶接（TIG）であり、狭開先形状を用いている。

上記の溶接条件により製作した溶接継手及び溶接金属の溶接金属部は通常のデンドライト組織を示し、また、有害な欠陥は認められなかった。

表 3.15 溶接施行条件
Table 3.15 Welding condition

溶接姿勢	開先形状と積層状	パス数	溶 接 条 件					
			溶接電流 (A)	溶接電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)	ワイヤ加熱条件 (A × V)	ワイヤ加熱長さ (mm)	パス間温度 (℃)
下向姿勢	(開先形状) 	1 ・ 4	240 } 250	10 } 12	7.5	—	—	150 以下
	(積層法) 	2~17 ・ 18~30	240 } 250	10 } 12	10.0 } 12.6	20~30 × 1.5~2.0	100	

4. 試験方法

4.1 試験片採取方法

308全溶接金属のクリープ試験片は、試験片の軸方向が溶接ビード方向と一致し、かつ、試験片のつかみ部以外は全て溶接金属になるように採取した。

SUS304板とSUS304鍛造材の溶接継手のクリープ試験片、及び曲げ場クリープ疲労試験片は、試験片軸方向が溶接方向と直角方向となるようにし、溶接金属部が試験片平行部の中心に位置するように採取した。

Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材の引張試験片、クリープ試験片及び疲労試験片は、試験片軸方向が鍛造方向と直角方向となるように採取した。鍛造材の切し出し方法は図4.1に示した。

4.2 試験片形状・寸法

308全溶接金属、SUS304溶接継手のクリープ試験片及びMod.9Cr-1Mo鋼鍛造材の引張試験片、クリープ試験片は、全て直径6mmで標点間距離30mmの中実丸棒試験片を用いた。詳細は図4.2に示す。

疲労試験に使用した疲労試験片は、直径10mmで、平行部30mmの中実丸棒試験片を用いた。詳細は図4.3に示す。

曲げ場でのクリープ疲労試験に使用した板曲げ試験片は試験部の板厚が18～20mm、平行部が0～40mmで板幅は100mmである。試験片の詳細を図4.4に示した。

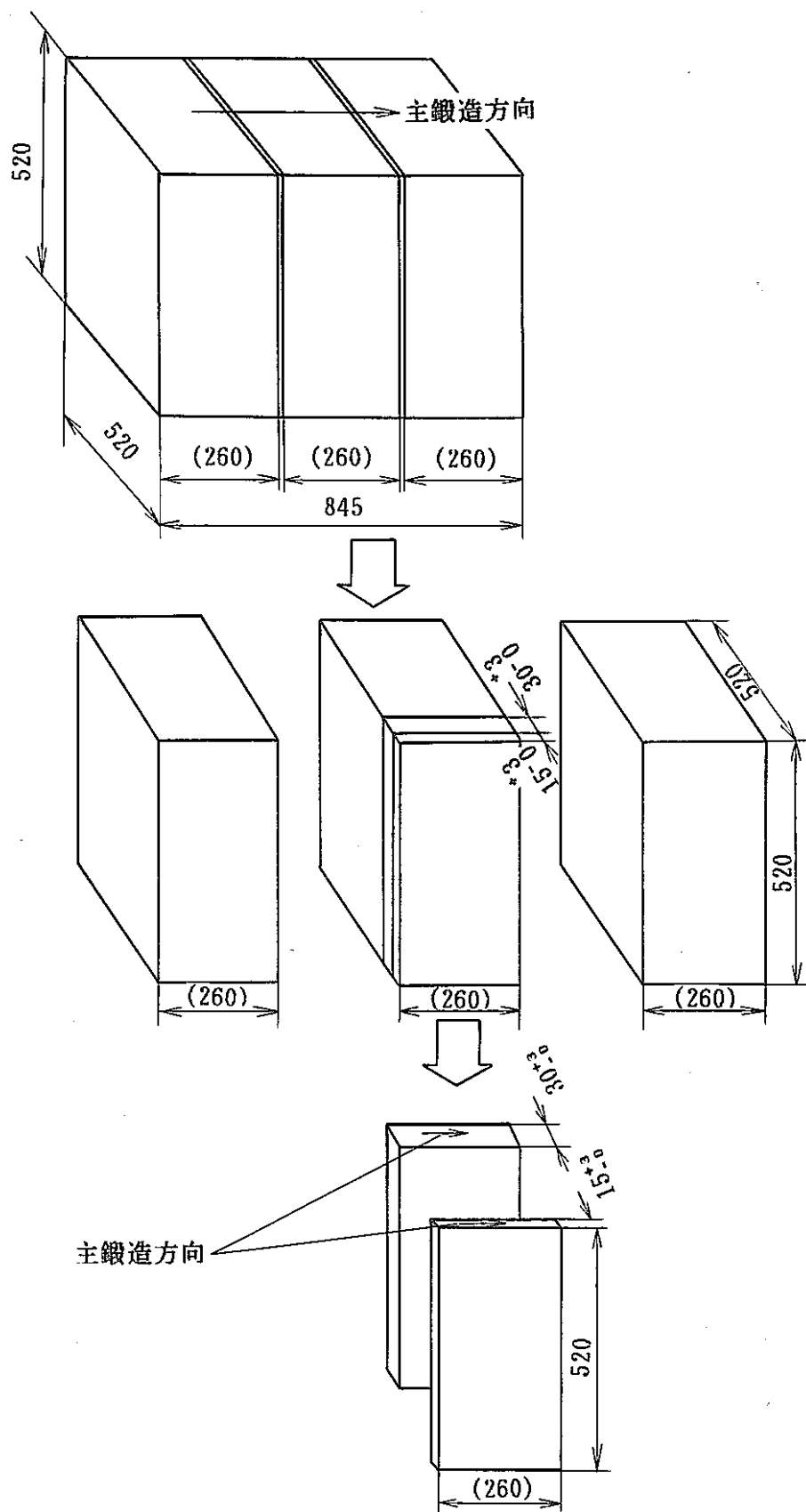
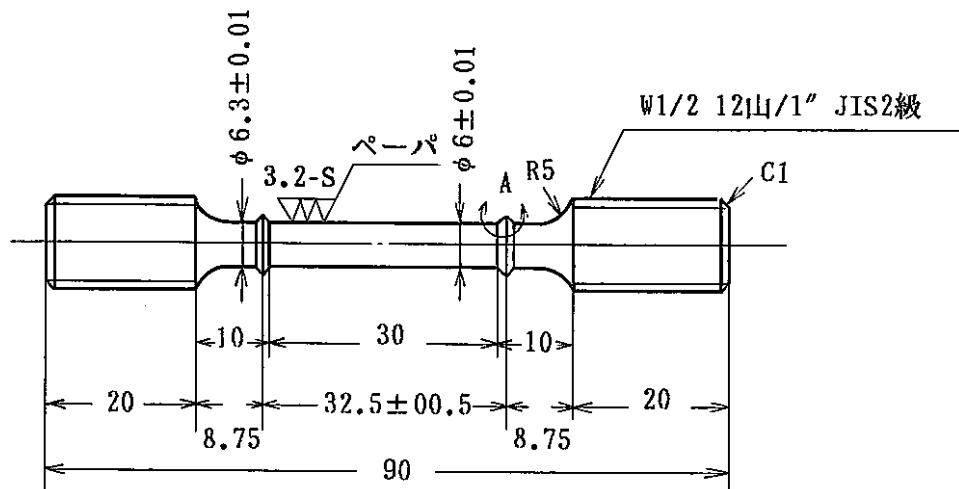
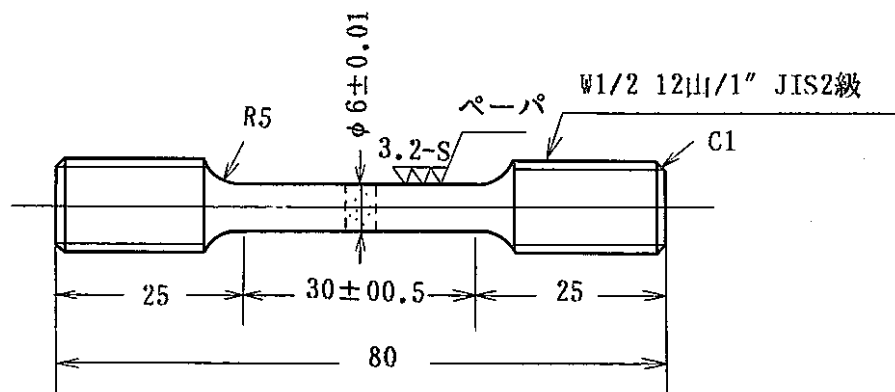


図 4.1 Mod.9 Cr-1 Mo鋼鍛造材切り出し方法
 Fig 4.1 Sampling method of section for Mod.9 Cr-1 Mo forging



(a) 引張及びクリープ試験片 (SUS308全溶接金属・Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材)

(a) Tensile and creep test specimen (SUS308 weld metal,
Mod.9Cr-1Mo forging)



(b) クリープ試験片 (SUS304溶接継手)

(b) Creep test specimen (SUS304 weld joint)

図4.2 引張及びクリープ試験片形状・寸法

Fig 4.2 Shape and size of tensile and creep specimen

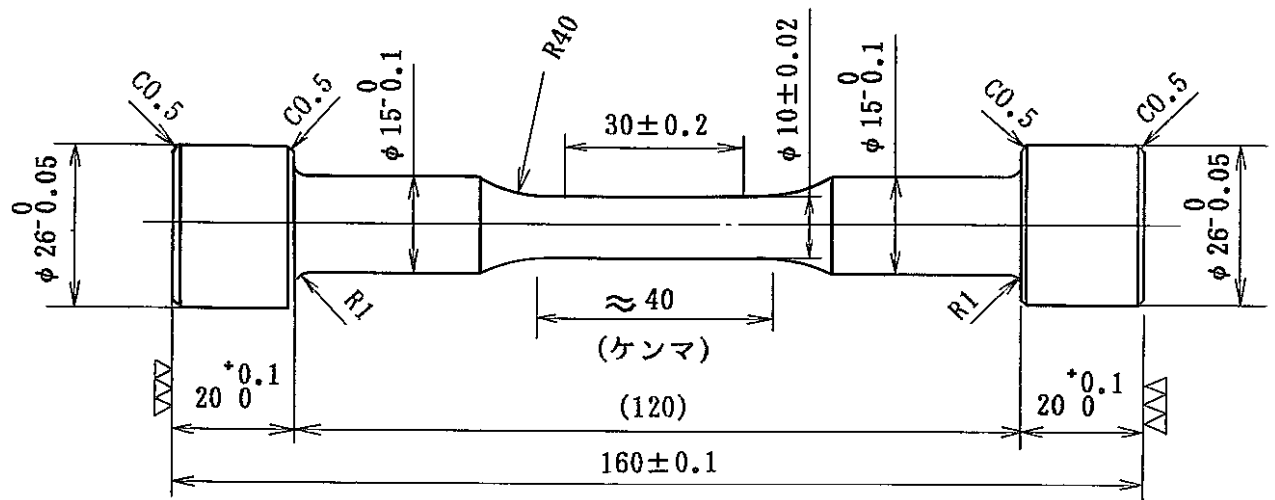
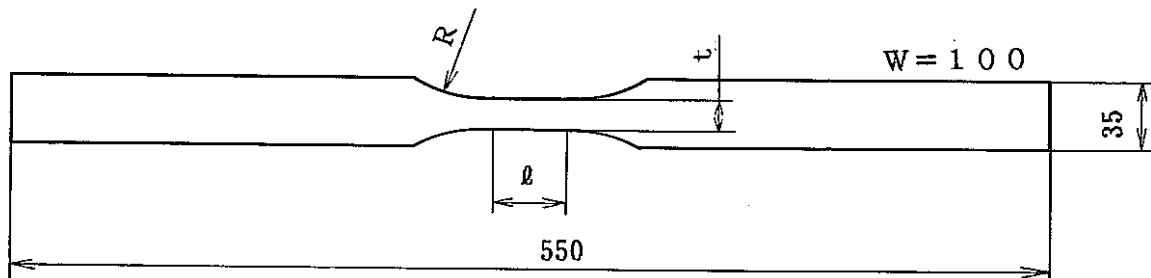


図4.3 疲労試験片 (Mod.9 Cr-1 Mo鋼鍛造材)
Fig.4.3 Fatigue test specimen (Mod.9 Cr-1 Mo forging)



	ℓ	R	t
Type I	40	100	20
Type II	30	15	20
Type III	30	100	19
Type IV	0	200	18

図4.4 板曲げ試験片形状・寸法
Fig 4.4 Shape and size of fatigue test specimen for bending load

4.3 試験機仕様

クリープ試験機、疲労試験機及び曲げ場クリープ疲労試験装置についての詳細な仕様を表4.1～4.3に示す。

クリープ試験機は、JIS Z 2271 (1978)「金属材料の引張クリープ試験方法」及びJIS Z 2272 (1978)「金属材料の引張クリープ破断試験方法」に適合するものである。本試験研究では、最大負荷容量3ton、最高使用温度850℃及び1100℃、変位測定はダイヤルゲージ及びDTF検出方式のものを使用した。試験片の加熱は上中下3分割方式の電気炉によるもので、標点間内3点の温度計測を行い、上中下個々に調節可能なものである。

低サイクル疲労試験機は電気油圧サーボ疲労試験機であり、加熱は高周波誘導加熱である。

曲げ場クリープ疲労試験機は、電気油圧サーボ疲労試験機で、最大負荷容量は±10tonであり、試験体の加熱には最高使用温度が800℃の電気炉を用いた。図4.5及び図4.6に試験装置の概略図及び曲げモーメント負荷用アームを取付けた試験片を示す。

表4.1 クリープ試験機の仕様

Table 4.1 Specification of creep testing machine

	仕 様	社 内 試 験 機	貸 与 試 験 機
1	試験機本体 1) 形 式 2) 最大負荷容量 3) レバー比 4) フロット及びチャック 5) 重 錘	東京衡機製 C-3型 3 0 0 0 kg 1 : 2 0 ネジ式M11/16in(S816鋼製) 合 計 1 5 0 kg	東京衡機製 C-4型 3 0 0 0 kg 1 : 2 0 ネジ式M18 (C鋼製)
2	加熱装置 1) 形 式 2) 使用温度 3) 発 熱 体 4) 容 量	C-3L型 (縦割型) MAX 850℃ ニ ク ロ ム 線 3 kW	FC-13型 (縦割型) MAX 1,100℃ カンタル A1相当 5 kW
3	温度調節装置 1) 形 式 2) 設定範囲 3) 温度調節精度 4) 温度検出器 5) 電 源	RID型 100~1100℃ ±1℃ 白金抵抗線測温器 AC 100V 50Hz	SCR比例制御型 100~1100℃ ±2℃ PR熱電対 AC 100V 50Hz
4	温度測定記録装置 1) 温度記録計 2) 補償導線 3) 熱 電 対	日立製VKP-35型 PR用 Pt-PtRh	日立製VKP-36型 PR用 Pt-PtRh
5	伸び測定記録装置 1) 形 式 2) 変位検出用治具 3) ダイヤルゲージ 4) 変位検出器 5) 伸び記録計 6) デジタルプリンター	GL間の伸びを測定する方 式アームショルダー型 目盛0.01、ストローク10mm _____ _____ _____	GL間の伸びを測定する方 式アームショルダー型 目盛0.01、ストローク10mm 差動変圧器 横河電機製YODAC-80TYPEI 横河電機製YODAC-80TYPEI _____
6	付帯設備	_____	_____

表4.2 低サイクル疲労試験機の仕様

Table 4.2 Specification of low-cycle fatigue machine

	仕 様	貸 与 試 験 機 HH002	貸 与 試 験 機 HH003
1	試験機本体 1) ロードフレーム 2) ロードセル 3) 油圧加振器 4) サーボバルブ 5) グリップ	E20形(±20ton) EFL(37.5/±25)SPKT形 2-63-3-4(ストローク±25mm) 76-005形 スプリットフランジ形	型式3111.1 (±25ton) 型式661.23B-01 型式204.71 (±75mm) 型式252-23 (19ℓ/min) スプリットフランジ形
2	加熱装置 1) 加熱方式 2) 温度コントローラ 3) 温度記録計	高周波誘導加熱 (10kW) SCR点弧角度制御 2ペン記録計	高周波誘導加熱 (10kW) SCR位相制御 EU-100型、1ペン記録(千野製)
3	コンピュータ制御記録装置 1) プロセッサ 2) 補助記憶装置 3) インターフェース 4) 周辺機器 5) アナログ制御部 6) 記録計	なし。指令はプログラムフ ァンクション・ジェネレータ アラムユニット コントロールユニット X-Y記録計、2ペン記録計	型式PDP11/04 2.8Kワード フロッピディスク、512Kワード 型式433(ハードウェアセグメントジェネレータ) 型式4010グラフィックディスプレイユニット) 型式631ハードコピーユニット
4	伸び計 1) 軸伸び計 2) 径伸び計	差動トランス形 ひずみゲージ形	型式632.51C-01(ひずみゲージ型) 型式632.61C-02(ひずみゲージ型)
5	油圧供給源 1) 油圧ポンプ 2) 油圧ポンプ	QF-40(210kg/cm ² , 42ℓ/min) 高圧ゴムホース	型式506-01(210kg/mm ² 95ℓ/min) 高圧ゴムホース
6	特殊装置	強制冷却装置	

表4.3 曲げ場クリープ疲労試験機の仕様

Table 4.3 Specification of creep fatigue teating machine
in bending condition

項 目	仕 様
1. 試験機本体 1) 制御方式 2) 最大負荷荷重 3) シリンダーストローク	油圧サーボ ± 1 0 ton ± 2 5 mm
2. 加熱装置 1) 加熱方式 2) 温度制御方式 3) 最高使用温度 4) ヒータ容量	箱型電気炉 P I D方式 8 0 0℃ 2 kW (2 分割)
3. 変形計測器 1) 容量型変位計 2) たわみ測定器	特 製 G . L = mm ダイヤルゲージ型変位計

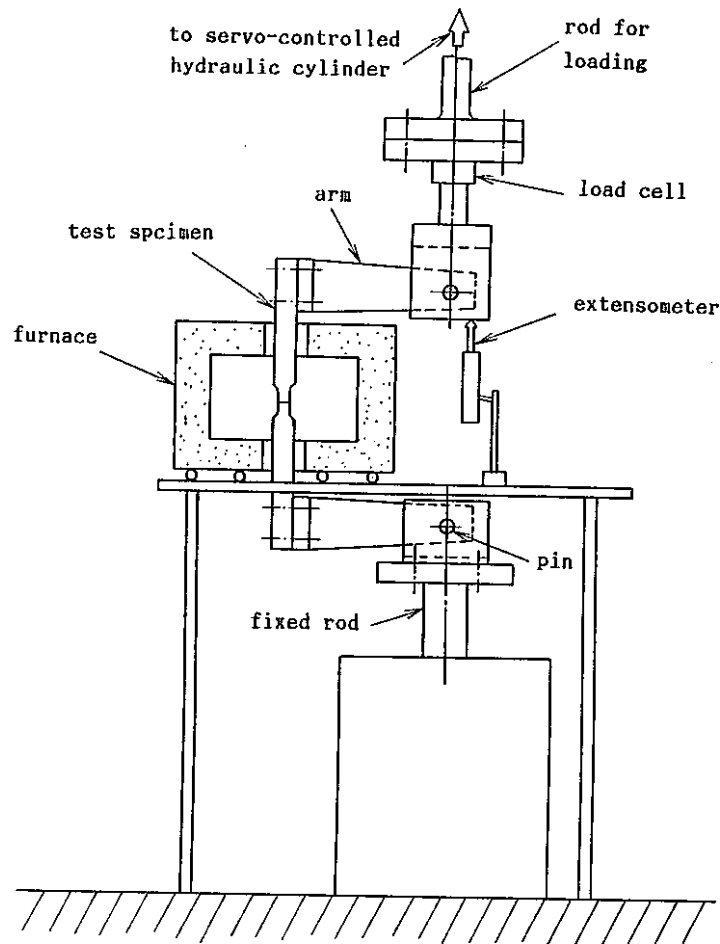


図4.5 曲げ場クリープ疲労試験装置の概要
Fig.4.5 Schematic view of the test arrangements
for creep fatigue test in bending condition

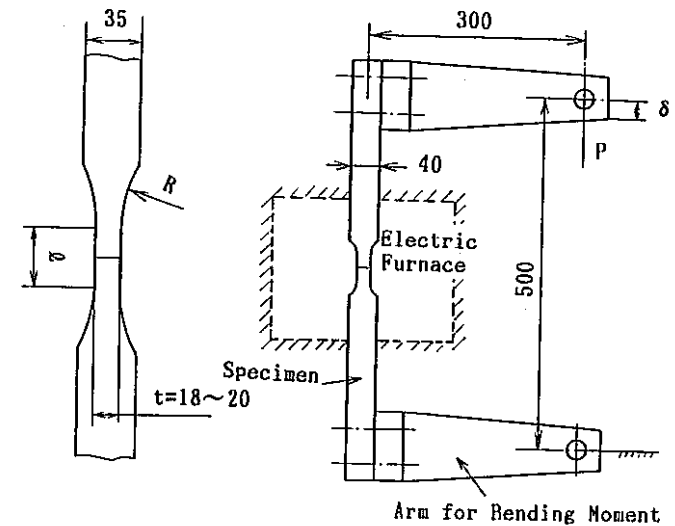


図4.6 曲げ場クリープ疲労試験片形状
Fig.4.6 Configuration of specimen for creep
fatigue test in bending condition

4.4 試験方法

4.4.1 引張試験

引張試験は、JIS B 7721 (1973)「引張試験機」及びJIS G 0567 (1978)「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」に基づいた。

4.4.2 クリープ試験

クリープ試験は、JIS Z 2271 (1978)「金属材料の引張クリープ試験方法」及びJIS Z 2272 (1978)「合属材料の引張クリープ破断試験方法」を基本とし、「FBR金属材料試験実施要領書」に準じた。

4.4.3 低サイクル疲労試験

試験はすべて変位制御の低サイクル疲労試験とした。変位は試験片の平行部のG.L.間の軸方向変位を変位検出器(HH003試験機ではひずみゲージ型、G.L.=25mm、HH002試験機では差動変圧器型、G.L.=20mm)で検出し、これを原形状中心に両振になるよう三角波の制御を行った。試験中の変位及び荷重を2ペンレコーダにより連絡記録し、また変位と荷重の関係(塑性変形に対してはヒステリシスループを描く)をX-Yレコーダにより随時記録した。ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は $10^{-3} \cdot \text{sec}^{-1}$ である。

試験温度は高速原型炉構造材料試験の基本温度である550℃で実施した。温度は高周波加熱により試験片中央部が所定の温度になるように制御した。同一試験を通して温度変動は±2℃以内であった。繰返しは試験片が完全破断するまで実施し、破断寿命は荷重が定常状態の3/4に減少した時点と定義した。

4.4.4 曲げ場クリープ疲労試験

曲げ場クリープ疲労試験は、試験片中央部に(株)日立製作所が独自に開発したゲージ長10mmの変位センサを図4.7に示すようにスポット溶接で取付け、ゲージ長間の平均ひずみ範囲がそれぞれ所定の1.0%、0.7%及び0.5%になるように図4.5で示した試験機のストロークを制御した。繰返しにより検定ひずみが多少(制御値の1%以内)変化した時点で手動にてストロークの微調を行った。参考のために開発した変位センサーの特性を図4.8に示した。

ひずみ速度は試験機の性能上変化させることができずひずみ範囲 $\Delta \epsilon = 1\%$ の場合 $0.1\% s^{-1}$ 、 0.7% の場合 $0.07\% s^{-1}$ 及び 0.5% の場合 $0.05\% s^{-1}$ となった。

試験温度はゲージ長 (20 mm) を含みその上下 10 mm、すなわち 40 mm 間の温度を一定するように制御した。この場合ゲージ長間の温度のばらつきは $\pm 3^{\circ}C$ 以内であった。

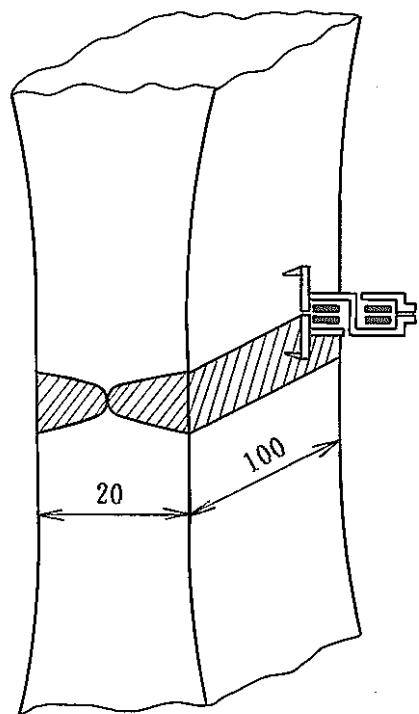
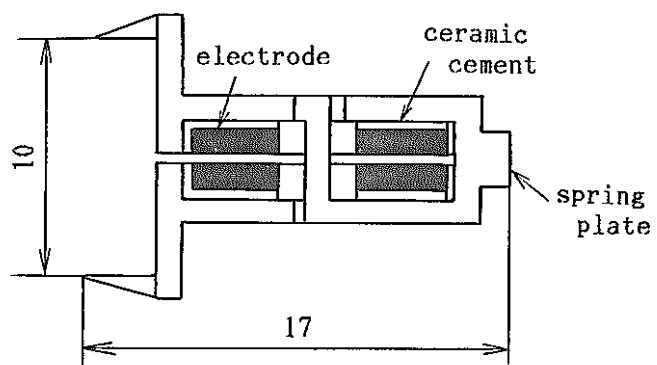


図4.7 変位センサ取付位置図
Fig.4.7 Position of strain gauge

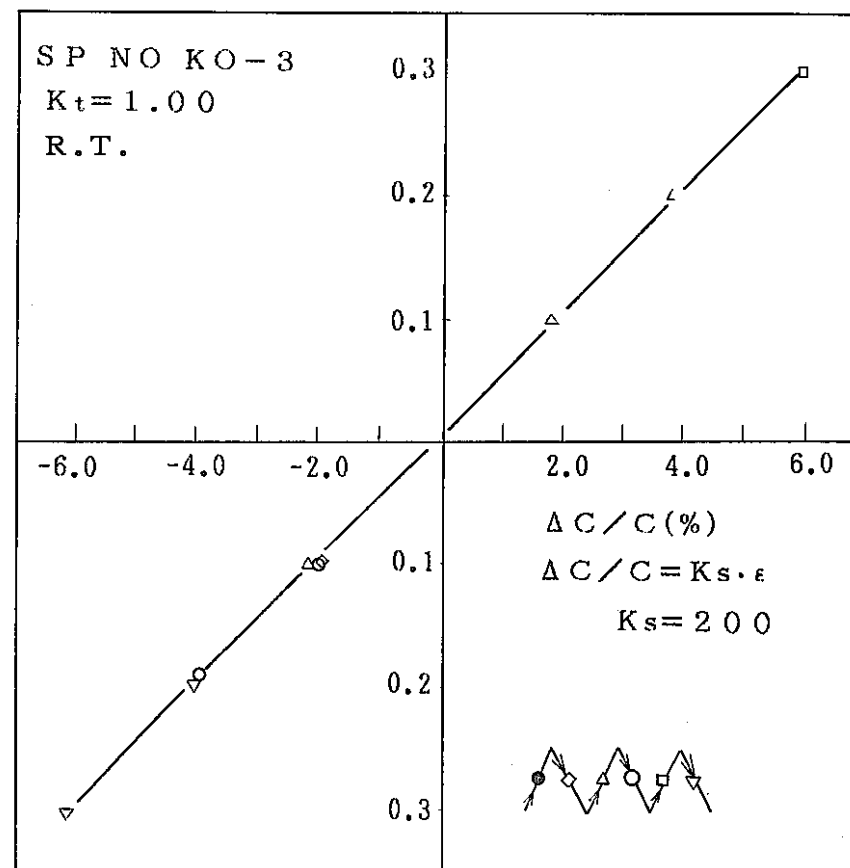


図4.8 変位センサの特性
Fig.4.8 Linearity and gauge factor of
L-type LLC strain gauge

5. 試験結果

5.1 SUS304鍛造材と板材のTIG溶接継手

5.1.1 クリープ破断試験

表5.1.1は試験結果を示す。図5.1.1は応力とクリープ破断時間の関係を示す。500℃、550℃ともにクリープ破断強度は原型炉材料強度基準値を満足している。

写真5.1.1はクリープ破断試験後の試験片外観を示す。

5.1.2 曲げ場クリープ疲労試験

平板曲げ疲労及びクリープ・疲労試験結果の一覧表を60年度及び61年度実施分も含めて表5.1.2に示した。平板曲げ試験におけるひずみ $\Delta \epsilon_t$ は図4.7に示した特製のひずみセンサで測定した値である。 $\Delta \epsilon_p$ はひずみと曲げモーメントのヒステリシスループからモーメントが零になる点のループ幅から求めた値である。 $\Delta \epsilon_e$ は $\Delta \epsilon_t - \Delta \epsilon_p$ の値である。破断寿命 N_f は引張あるいは圧縮荷重が定常状態の3/4になった時点として求めた。所定の高温試験は N_f まで実施し、以降は室温で分離するまで繰返し荷重を繰返した。変位保持試験（クリープ疲労試験と呼ぶ）では変位保持中のクリープによるひずみ増大分を見込んで変位保持後のひずみが所定のひずみになるように制御したため繰返し数により多小（1～2%）制御ひずみ範囲にばらきがある。

表5.1.2中の N_f 欄の数値に*を付けて示した寿命はG.L.外の母材部から破断したものであり、その時点で試験部き裂が発生しているかどうかを破断位置欄に示した。

図5.1.2～5.1.5は繰返し試験中の公称曲げ応力の変化の様子を示したものである。荷重点から見て外側（ひずみを測定した側の応力が引張り応力となる状態を公称応力の正符号とする。）を引張り側とする。実際にはピン間には圧縮荷重がかかった場合に引張り側が引張り応力状態となる。このように定義した場合圧縮側の公称応力が若干大きくなっている。

クリープ疲労試験におけるシリンダストロークの30分一定保持中の負荷荷重のリラクセーション挙動を図5.1.6（500℃）及び図5.1.7（550℃）

に示した。

破断後の外観写真及び破面を写真5.1.2～5.1.5に示した。破面写真の黒い部分が高温試験中にき裂が進展した部分に相当し、白い部分は室温でのき裂進展領域に対応する。板幅中央にて高温き裂進展領域が深くなっている。またクリープ疲労試験では圧縮応力保持側に比べ引張り応力保持側が明らかにき裂進展領域が大きいことが分る。

表5.1.1 SUS304板-SUS304鍛造材溶接継手のクリープ破断試験結果

Table 5.1.1 Results of creep rupture test of SUS304 plate-SUS304 forging welded joint

試験温度 (°C)	試験片 番号	応力 σ (kgf/mm ²)	破断時間 tr (h)	破断位置
500	W-1*	31	964.9	溶接金属
	W-2*	27.5	3763.9	"
	W-3	26	5654.6	"
	W-4	24	11124.6	"
550	W-5*	22	1031.0	"
	W-6*	19.5	2213.7	"
	W-7	18	4784.2	"
	W-8	17	6002.7	"

* 前年度実施分

表 5.1.2 SUS304 溶接継手の曲げ疲労及び曲げクリープ・疲労試験結果
Table 5.1.2 Results of bending fatigue and creep-fatigue test on SUS304 welded joints

温 度	tH	Strain Range			$\Delta \sigma$ (kgf/mm ²)	Nf (cycles)	T P No.及び形状		破 断 位 置	実 年 施 度
		$\Delta \epsilon_t(\%)$	$\Delta \epsilon_p$	$\Delta \epsilon_e$			T P No.	Type		
500℃	0	1.0	0.49	0.51	97.4	*1100	K0-10	IV	母材部、溶金部き裂	61
		0.7	0.23	0.47	78.0	*3200	K0-11	III	母材部	61
		0.5	0.11	0.39	74.5	*8600	K0- 7	IV	母材部、溶金部き裂	61
	30	1.0	0.5	0.5	88.4	*851	K0- 6	II	母材部、溶金部き裂	61
		0.7	0.26	0.44	86.2	1911	K0-12	IV	溶金及び境界部	61~62
		0.5	0.12	0.38	82.9	2445	K0-14	IV	溶金及び境界部	61~62
550℃	0	1.0	0.52	0.48	86.3	1120	K0- 3	I	溶金部	60
		1.0	0.51	0.49	78.1	1740	K0-15	IV	溶金部	61
		0.7	0.27	0.43	71.9	3050	K0- 4	I	溶金部	60
		0.7	0.29	0.41	68.0	*1063	K0-18	I	母材部、溶金部き裂	
		0.7	0.25	0.45	77.3	3286	K0-16	IV	溶金部	61
		0.5	0.175	0.325	67.5	*4343	K0- 8	I	母材R部	
		0.5	0.133	0.367	66.9	5650	K0-19	IV	溶金部	61
	30	1.0	—	—	104.0	115	K0- 1	I	溶金部	60
		1.0	0.48	0.52	77.9	514	K0- 5	II	溶金部	61
		0.7	—	—	84.4	290	K0- 2	I	溶金部	60
		0.7	0.34	0.36	71.3	1089	K0- 9	III	溶金部	61~62
		0.5	0.13	0.37	77.0	891	K0-13	IV	溶金部	61~62
		0.5	0.15	0.35	72.8	1680	K0-17	IV	溶金部	

Type I ; t=20, R=100, $\ell=40$, Type II ; t=20, R=15, $\ell=30$, Type III ; t=19, R=100, $\ell=30$

Type IV ; t=18, R=200, $\ell=0$

* G.L.外破断

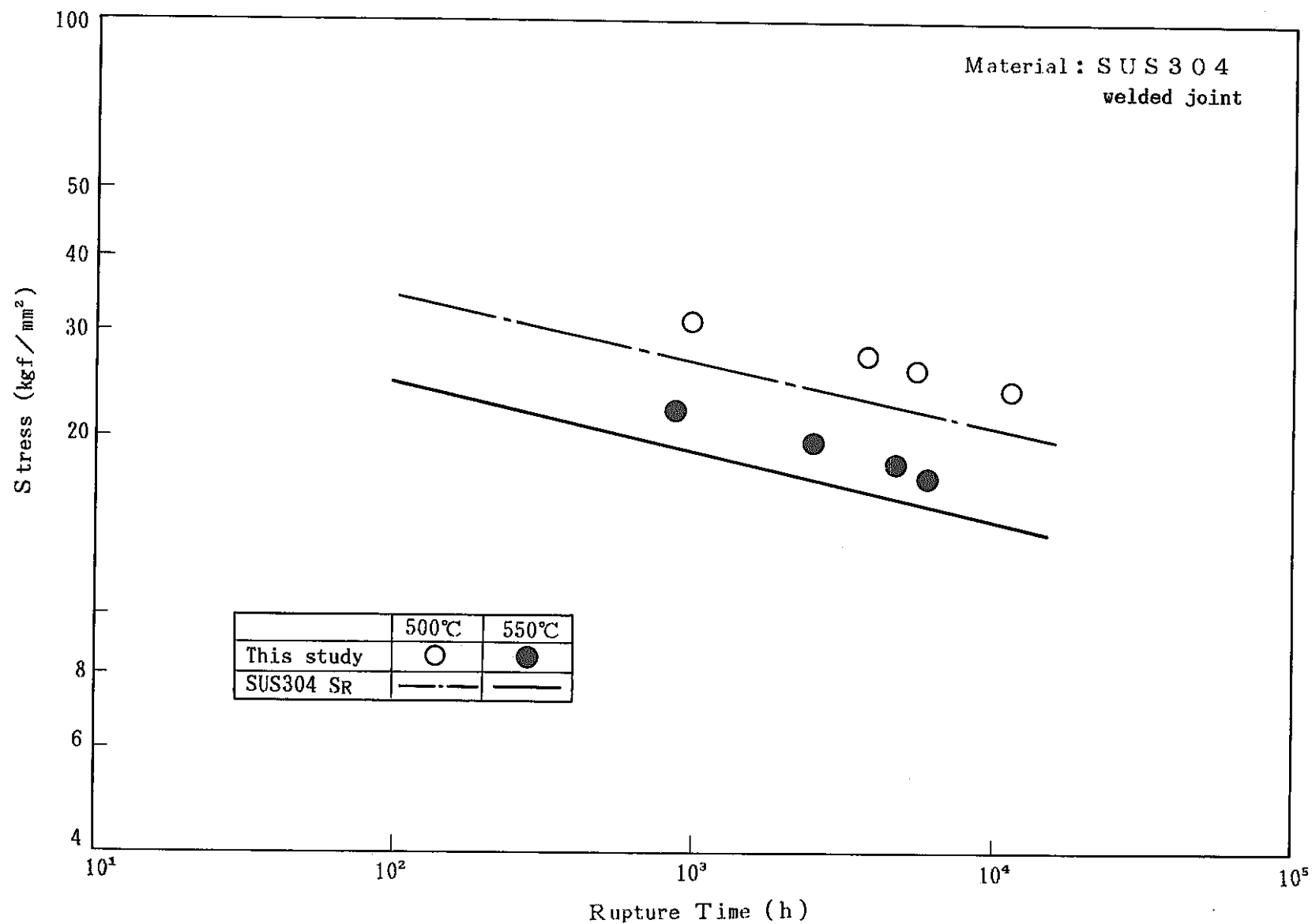


図5.1.1 応力とクリープ破断時間の関係 (SUS 304 板-SUS 304 鍛造材溶接継手)
Fig.5.1.1 Stress vs creep rupture time (SUS 304 plate-SUS 304 forging welded joint)

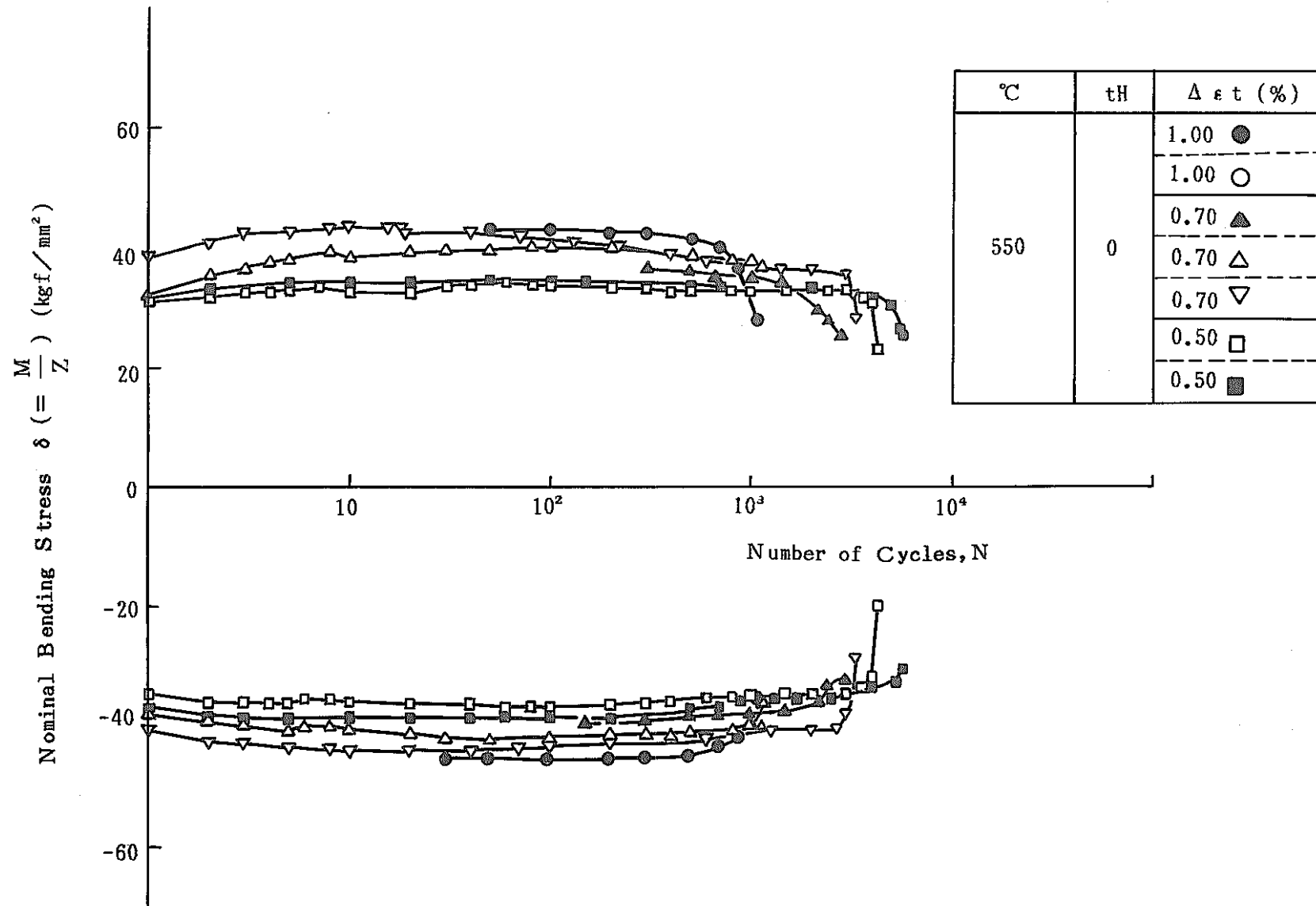


図5.1.2 繰返しに伴う公称曲げ応力の変化挙動 (550°C, tH=0)
 Fig.5.1.2 Cyclic behavior of nominal bending stresses (550°C, tH=0)

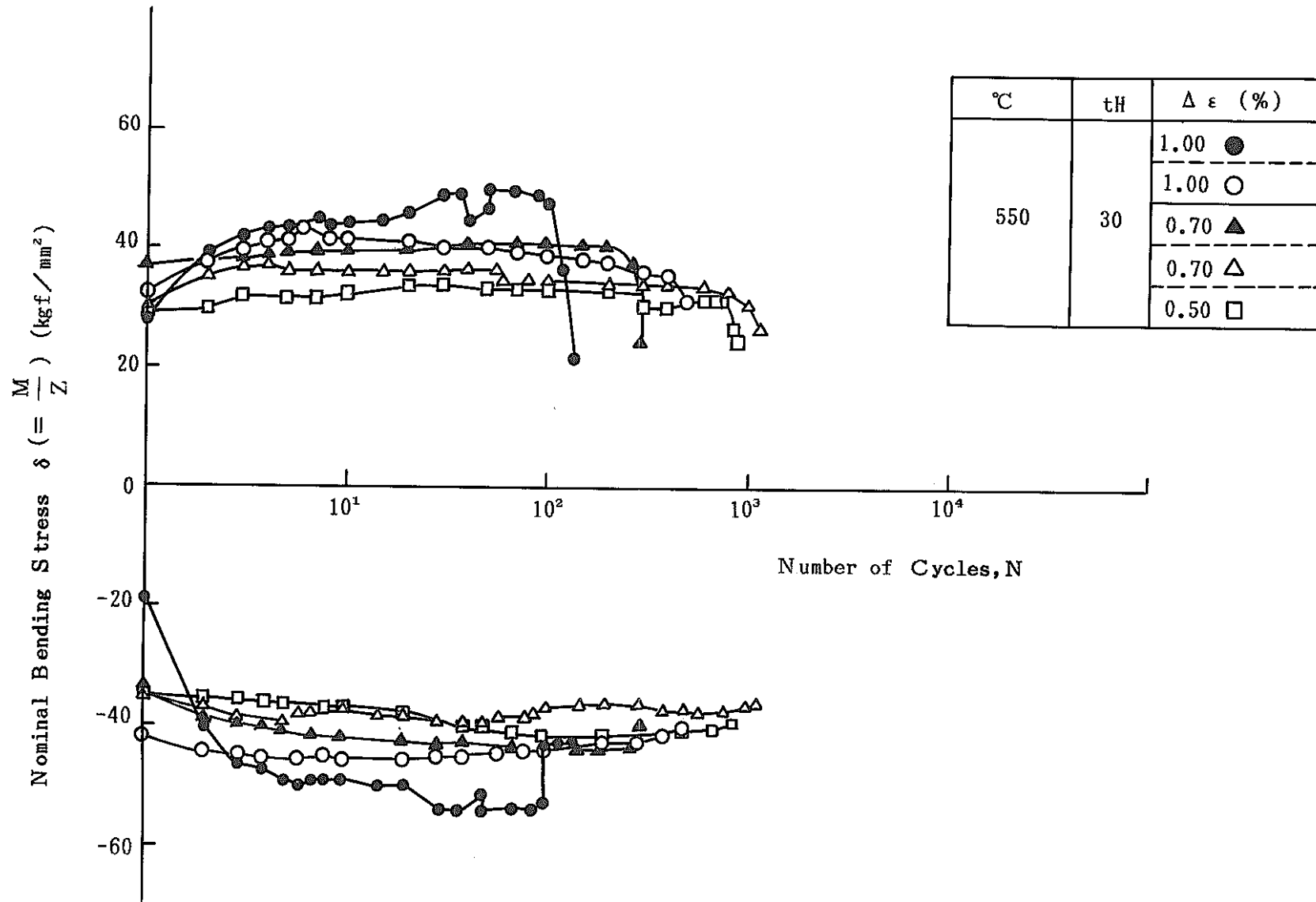


図5.1.3 繰返しに伴う公称曲げ応力の変化挙動 (550℃, tH=30分)

Fig.5.1.3 Cyclic behavior of nominal bending stresses (550℃, tH=30min)

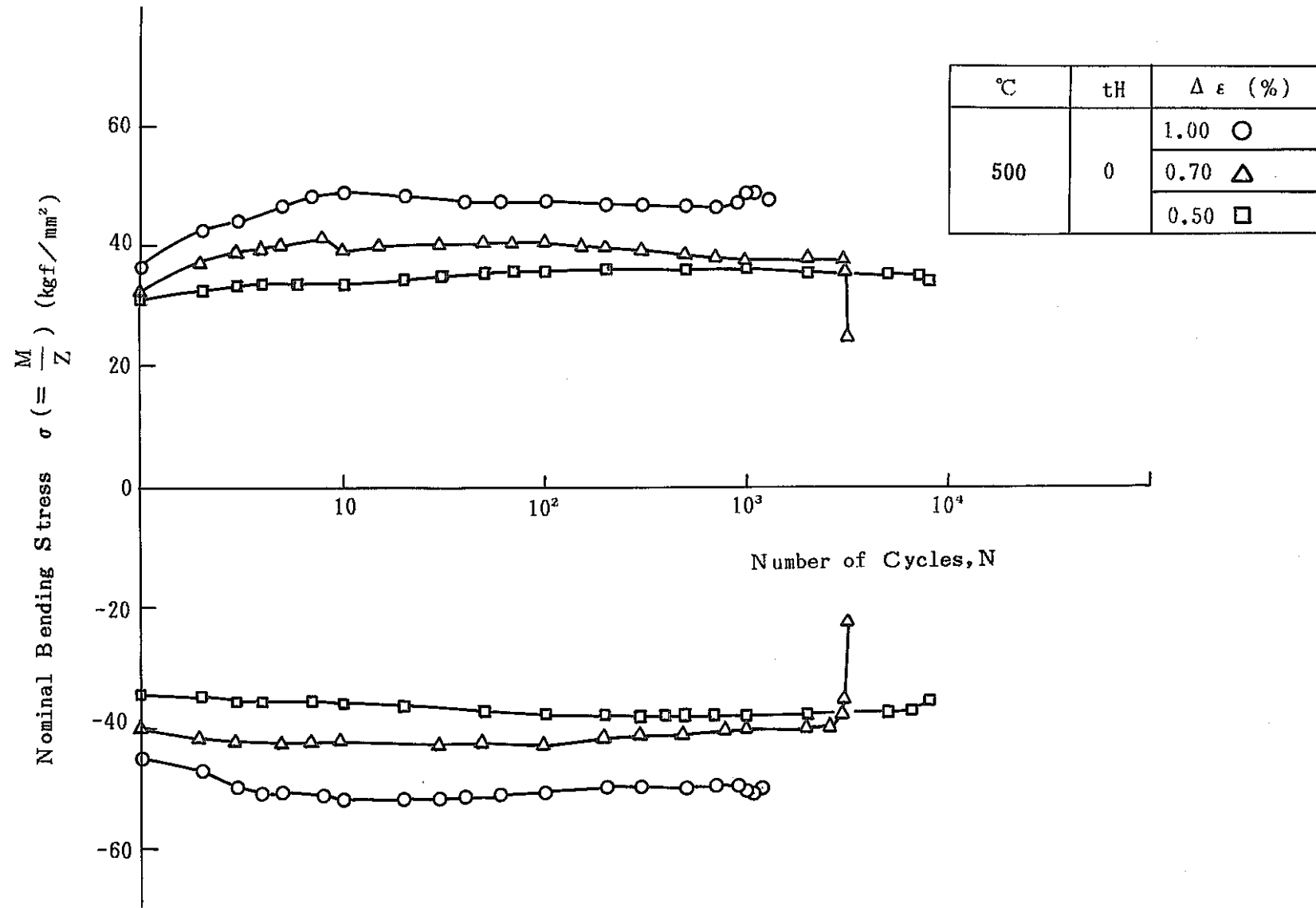


図5.1.4 繰返しに伴う公称曲げ応力の変化挙動 (500°C, tH=0)
 Fig.5.1.4 Cyclic behavior of nominal bending stresses (500°C, tH=0)

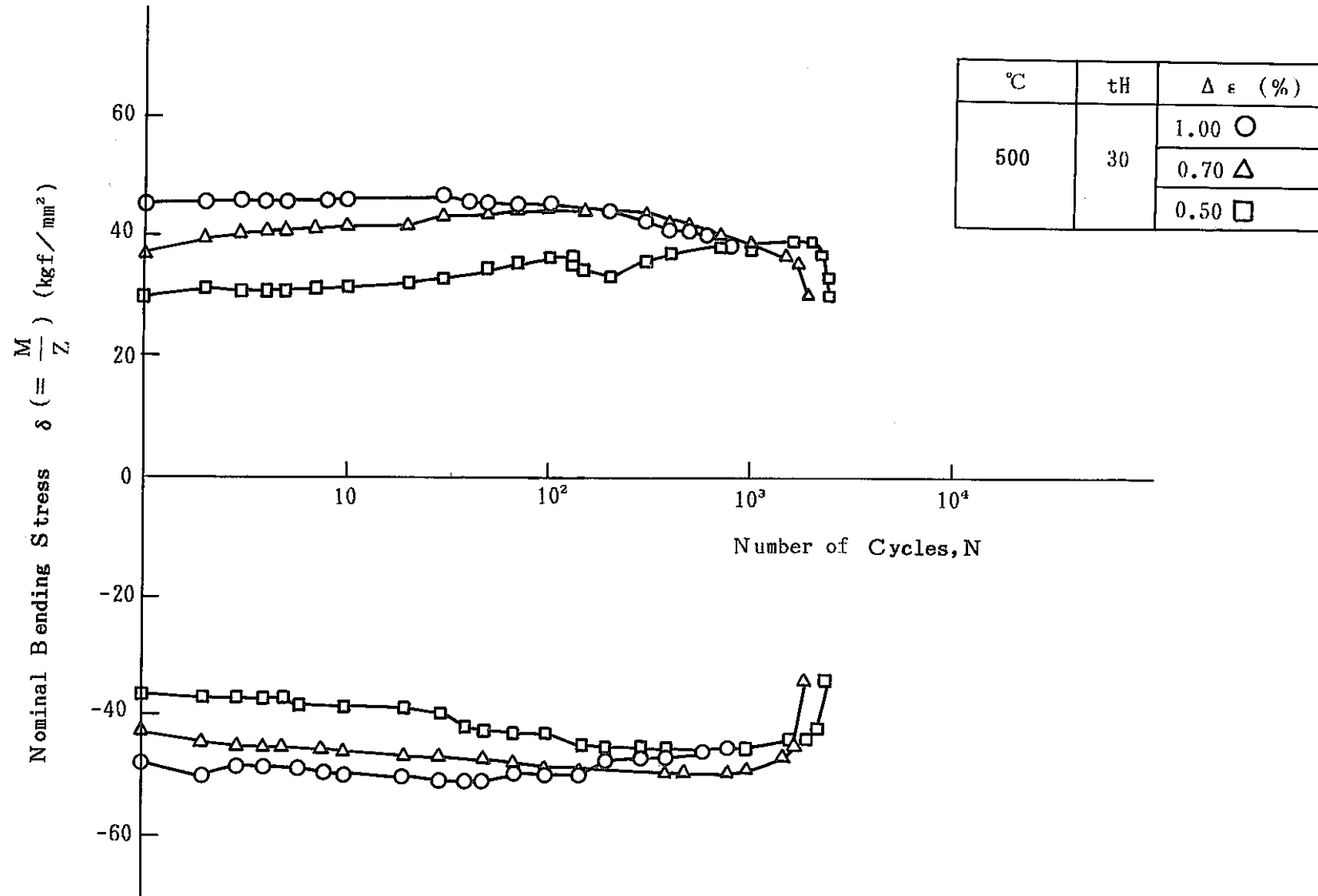


図5.1.5 繰返しに伴う公称曲げ応力の変化挙動 (500°C, tH=30分)

Fig.5.1.5 Cyclic behavior of nominal bending stresses (500°C, tH=30min)

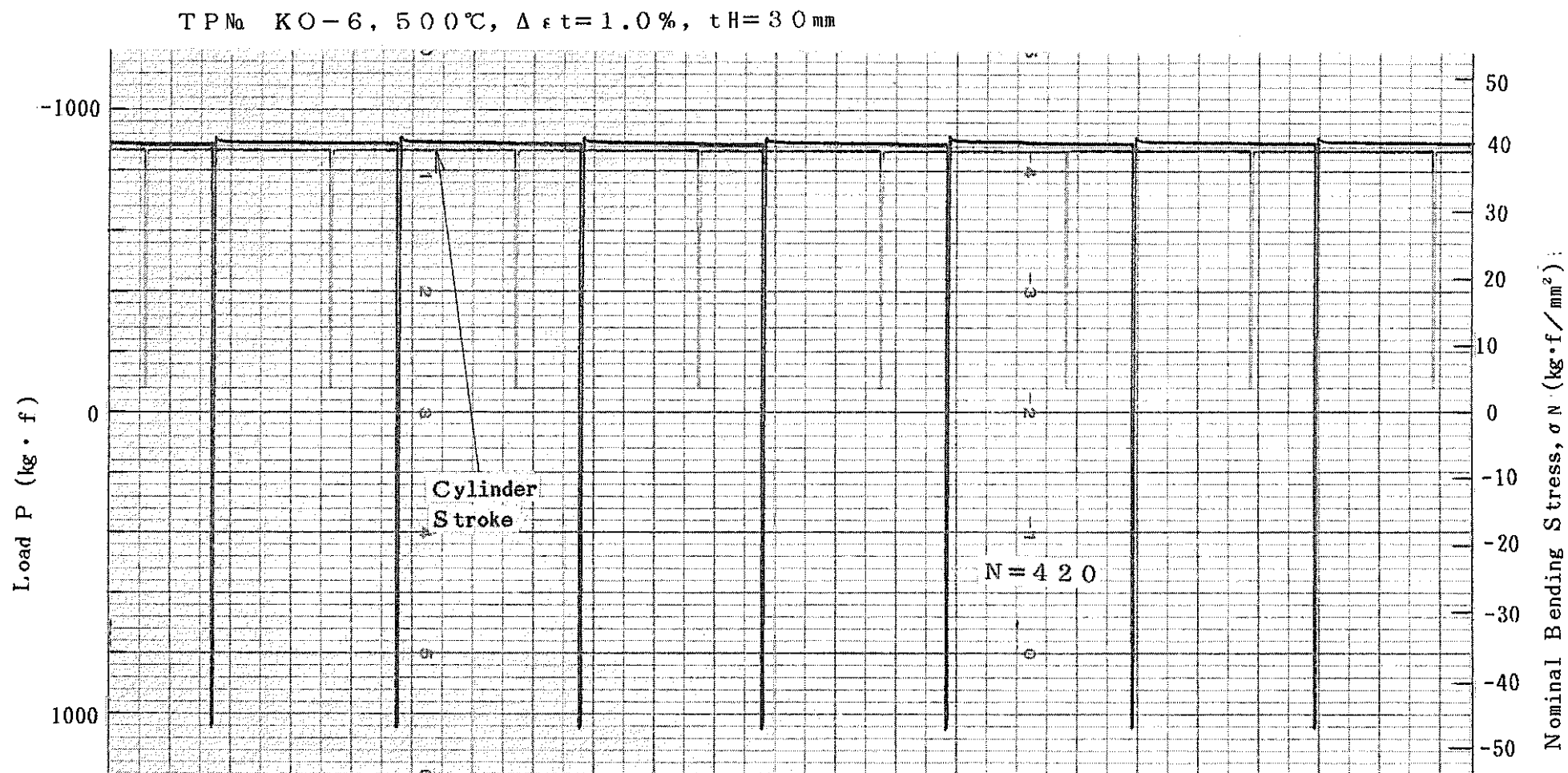


図5.1.6 (a) 負荷荷重のリラクセーション挙動 (500°C, $\Delta \epsilon_t = 1.0\%$)
 Fig.5.1.6 (a) Relaxation behavior of applied load (500°C, $\Delta \epsilon_t = 1.0\%$)

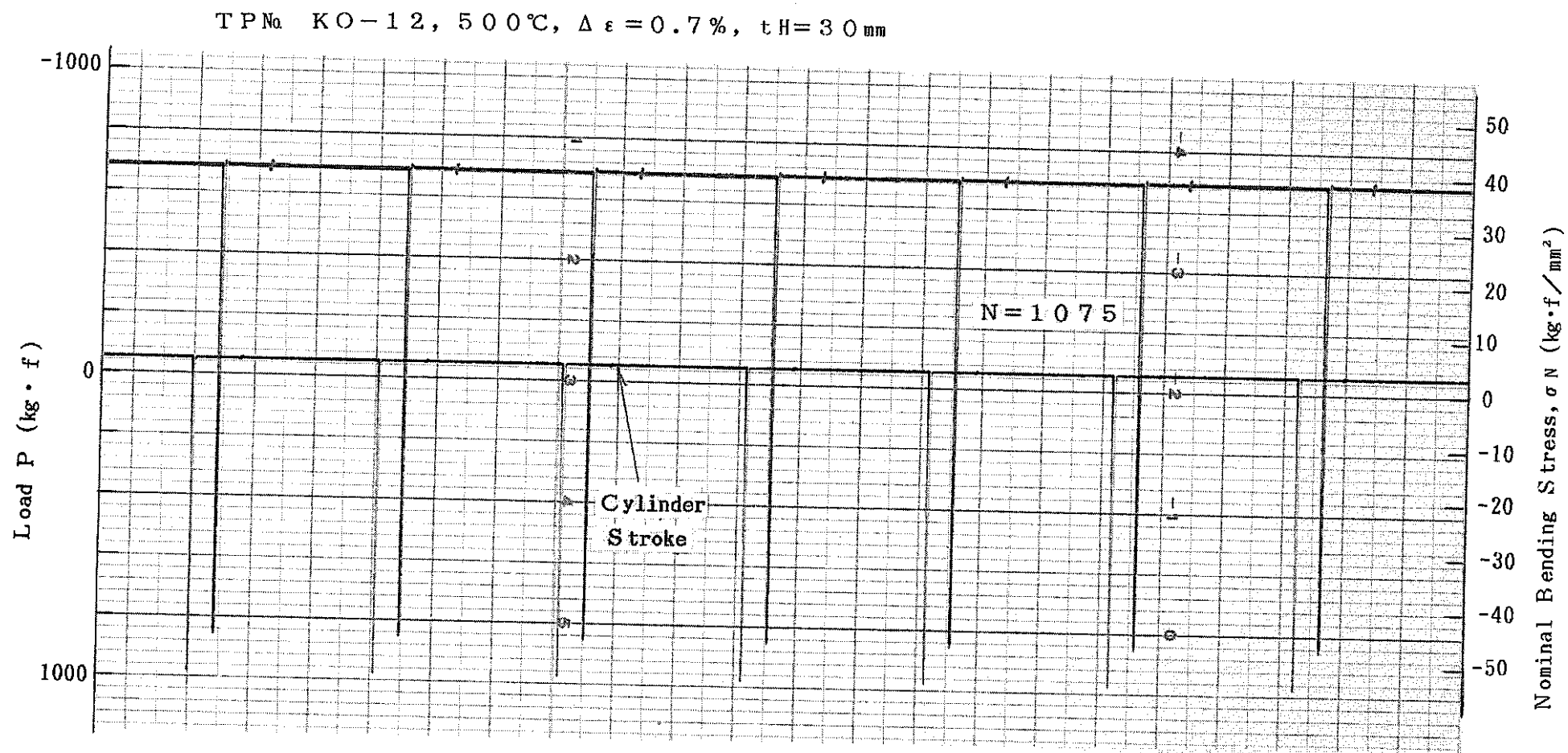


図 5.1.6 (b) 負荷荷重のリラクセーション挙動
 Fig. 5.1.6 (b) Relaxation behavior of applied load (500°C, $\Delta \epsilon_t = 0.7\%$)

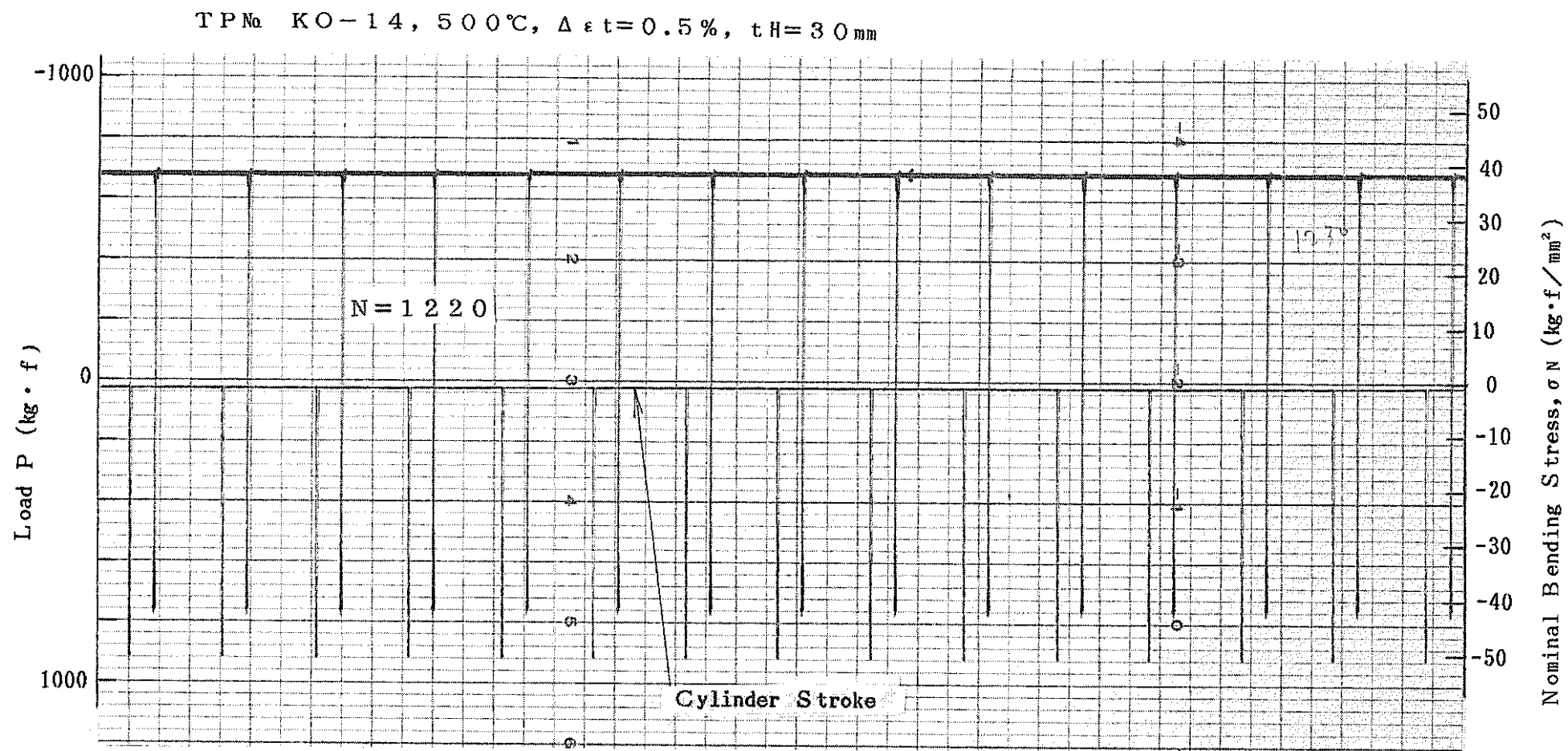


図5.1.6 (c) 負荷荷重のリラクセーション挙動
 Fig.5.1.6 (c) Relaxation behavior of applied load (500°C, $\Delta \epsilon t = 0.5\%$)

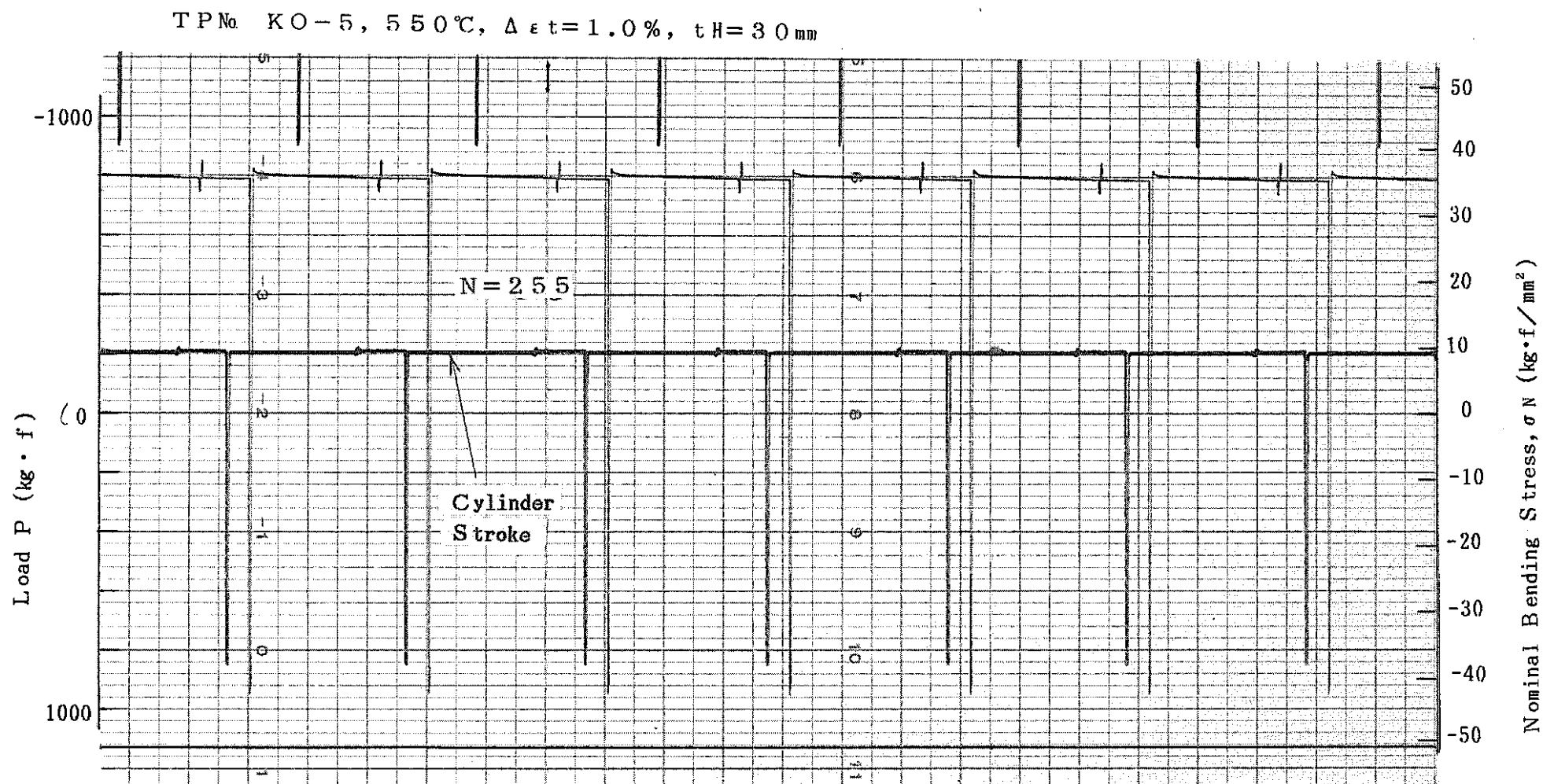


図5.1.7 (a) 負荷荷重のリラクセーション挙動
 Fig.5.1.7 (a) Relaxation behavior of applied load (550°C, $\Delta \epsilon t = 1.0\%$)

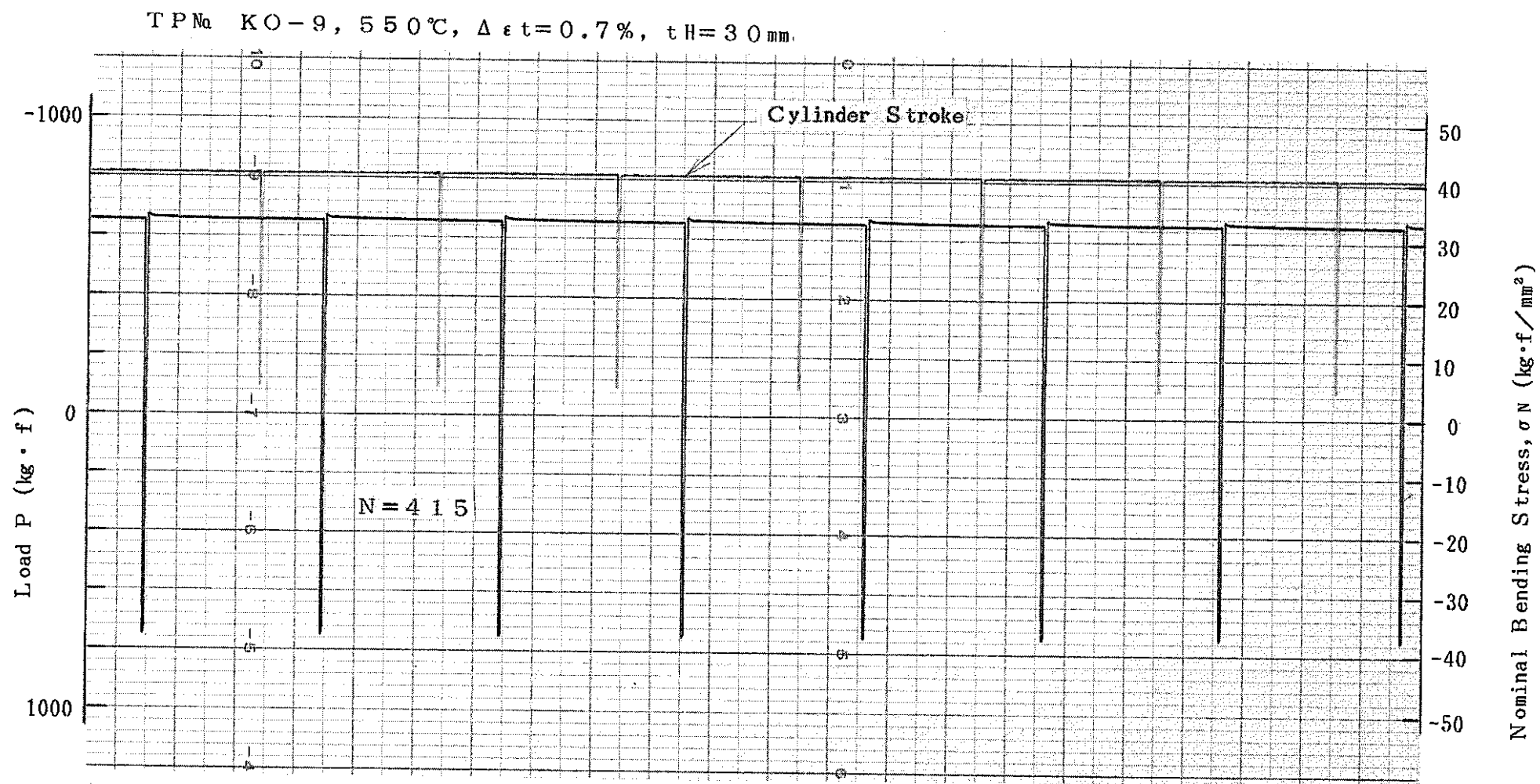


図5.1.7 (b) 負荷荷重のリラクセーション挙動
Fig.5.1.7 (b) Relaxation behavior of applied load (550°C, $\Delta \epsilon_t = 0.7\%$)

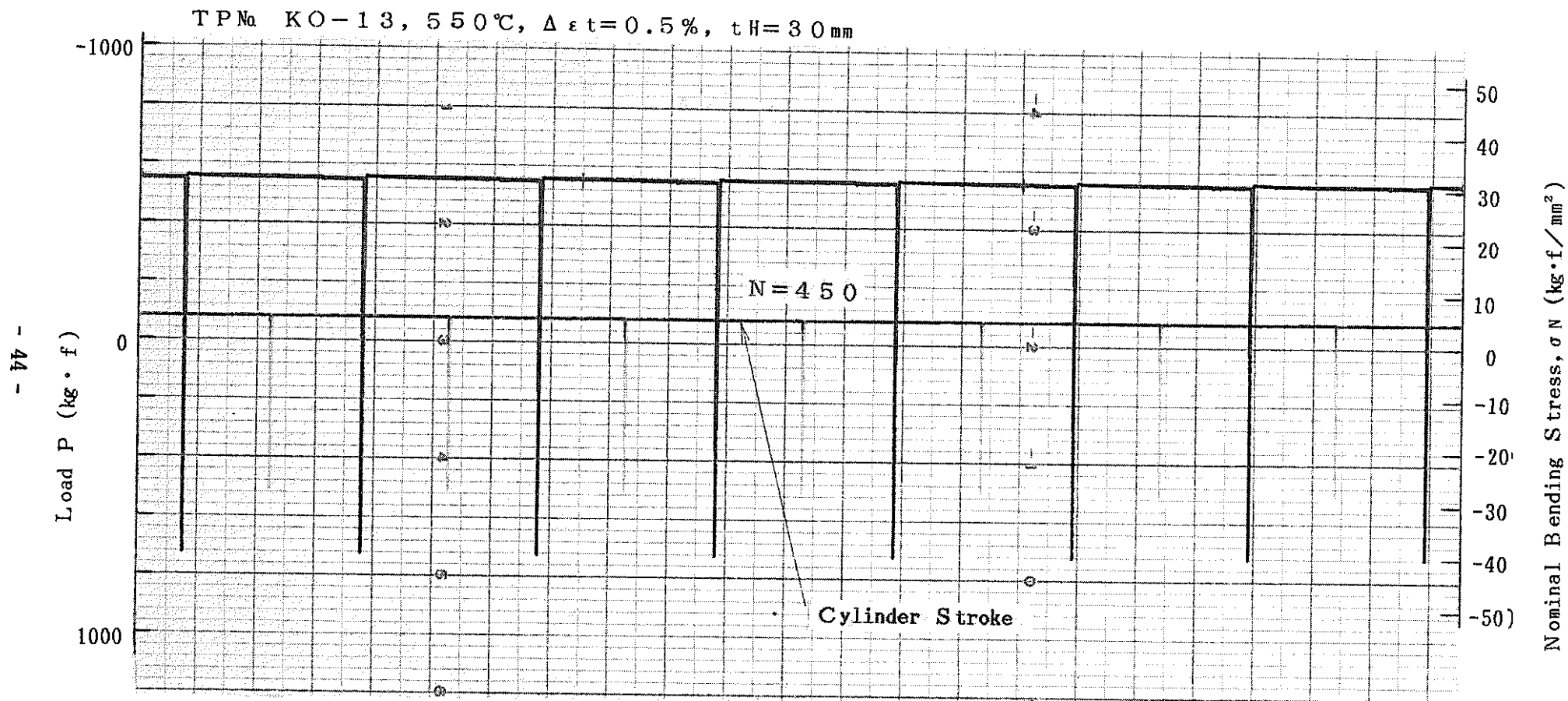


図5.1.7 (c) - 1 負荷荷重のリラクセーション挙動

Fig.5.1.7 (c) - 1 Relaxation behavior of applied load (550°C, $\Delta \epsilon t = 0.5\%$)

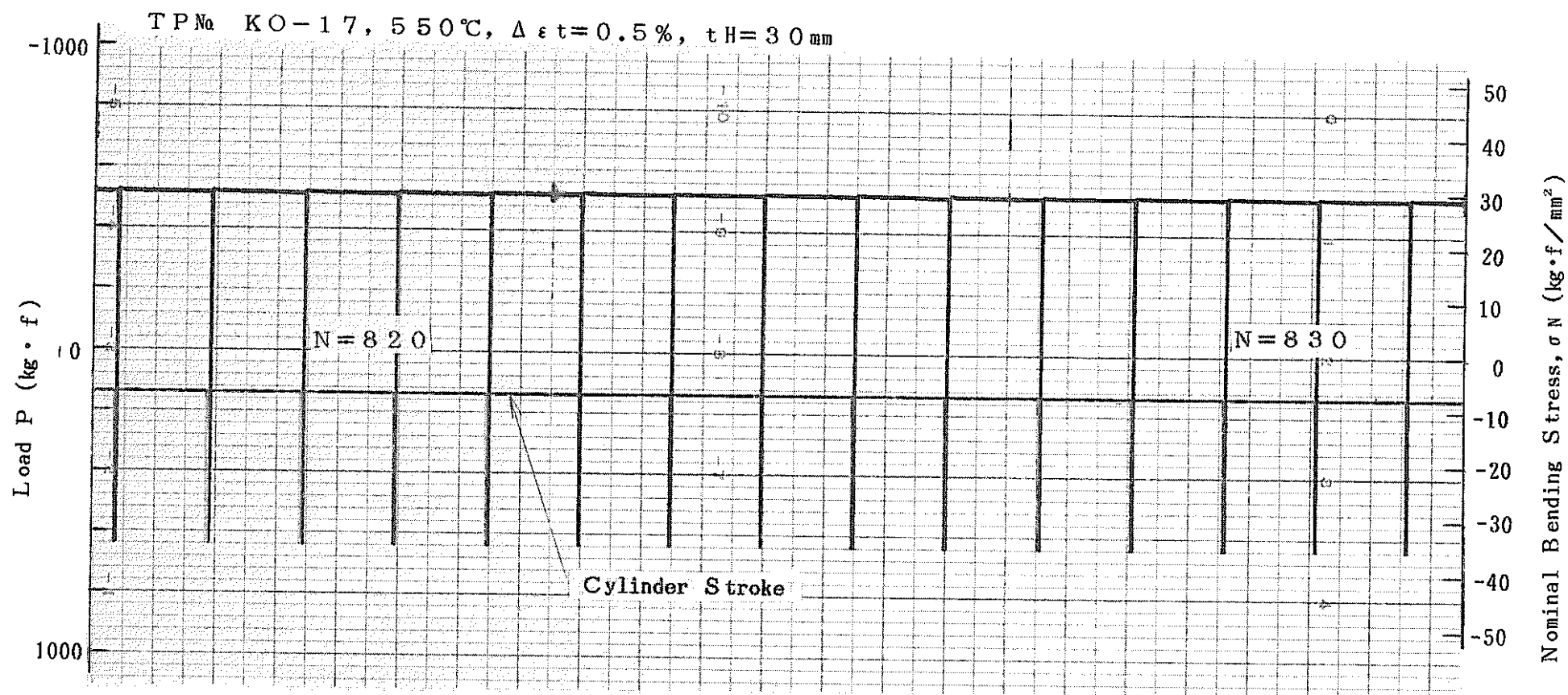


図 5.1.7 (c) - 2 負荷荷重のリラクセーション挙動
 Fig. 5.1.7 (c) - 2 Relaxation behavior of applied load (550°C, $\Delta \epsilon t = 0.5\%$)

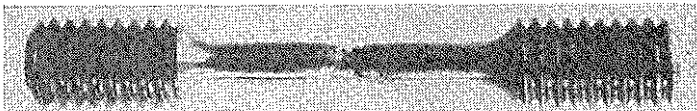
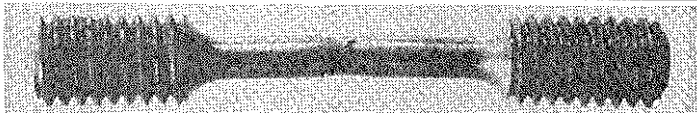
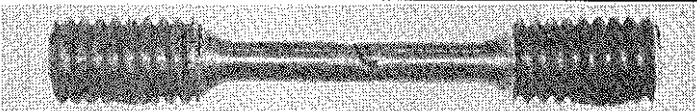
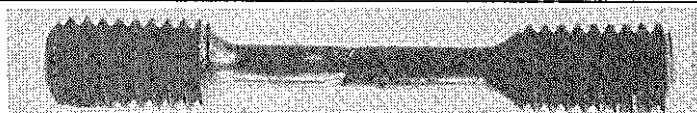
材 料	試験温度 (℃)	試験片番号	応 力 (kgf/mm ²)	破断時間 (h)	0 50 100
SUS304板 -SUS304 鍛 造 材 の 溶 接 継 手	500	W-1	31	964.9	
		W-2	27.5	3763.9	
		W-3	26	5654.6	
		W-4	24	11124.6	
	550	W-5	22	1031.0	
		W-6	19.5	2213.7	
		W-7	18	4784.2	
		W-8	17	6002.7	

写真5.1.1 SUS304板-SUS304鍛造材溶接継手のクリープ破断試験後の外観

Photo 5.1.1 Appearance after creep rupture test of SUS304 plate-SUS304
forging welded joint

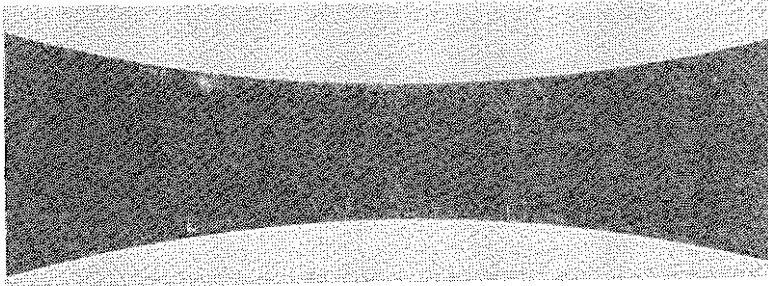
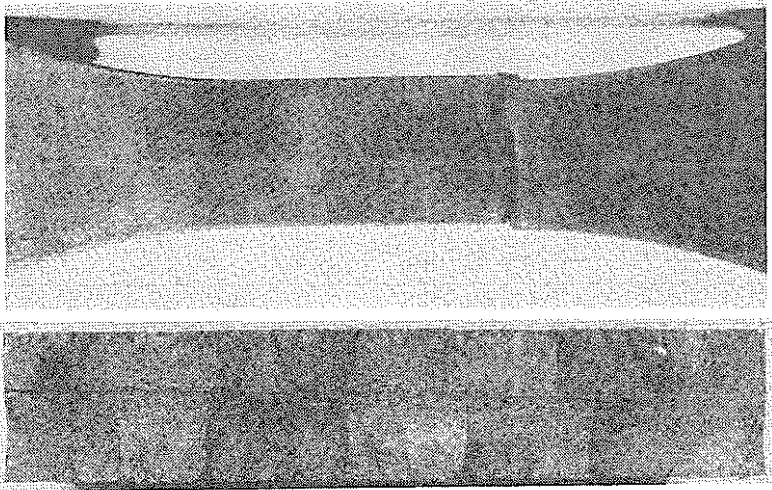
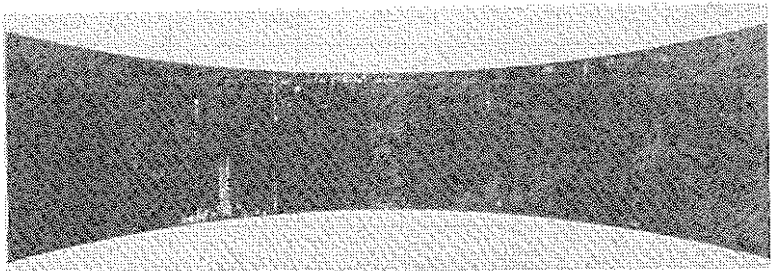
試験温度 (°C)	保持時間 (t _H)	試験片 No.	全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_t$ (%)	破断寿命 N _f (Cycle)	
500	0	K0-10	1.0	1100 母材部 大きな き裂	
500	0	K0-11	0.7	3200 母材部 破断	
500	0	K0-7	0.5	8600 母材部 にき裂	

写真5.1.2 板曲げ疲労試験後の試験片外観 (500°C, t_H=0)

Photo.5.1.2 Appearance after bending fatigue tests (500°C, t_H=0)

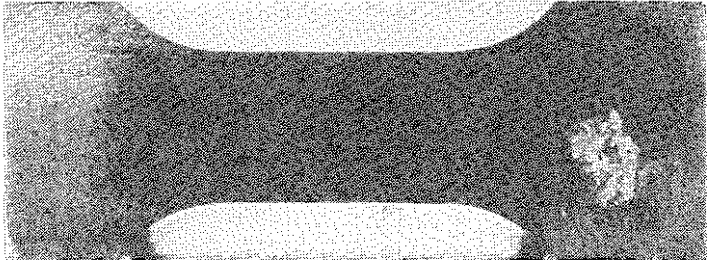
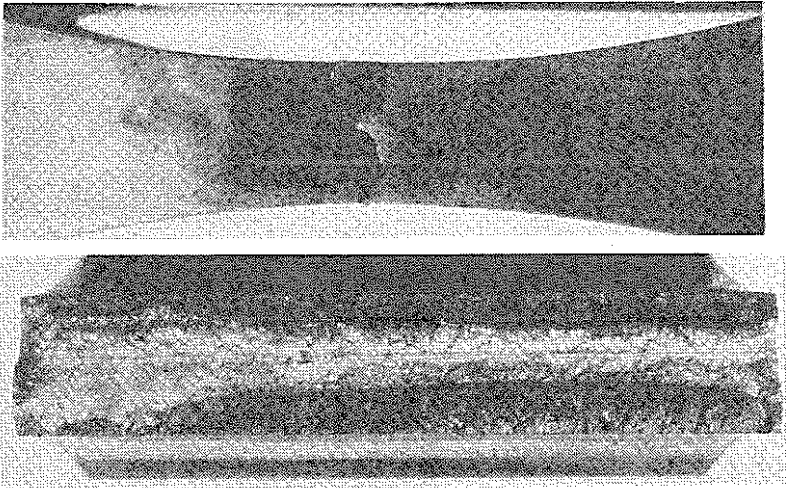
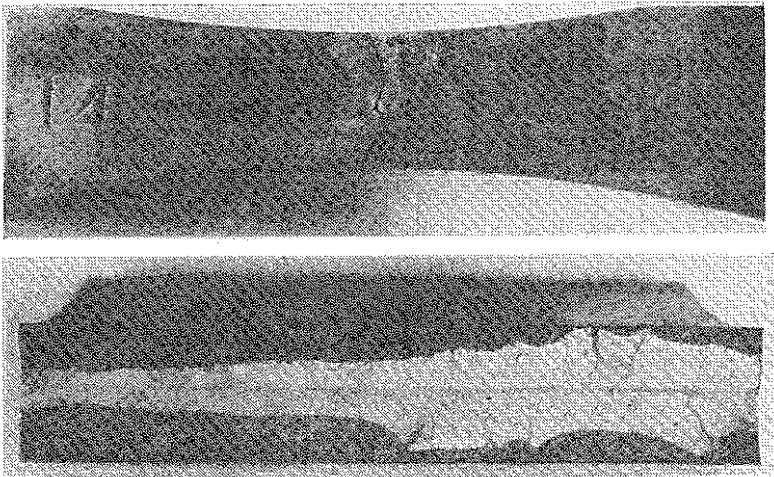
試験温度 (°C)	保持時間 (t _H)	試験片No	全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon t$ (%)	破断寿命 N _f (Cycle)	
500	30	K0-6	1.0	851	
500	30	K0-12	0.7	1911	
500	30	K0-14	0.5	2445	

写真5.1.3 板曲げ疲労試験後の試験片外観 (500°C, t_H=30分)

Photo.5.1.3 Appearance after bending fatigue tests (500°C, t_H=30min)

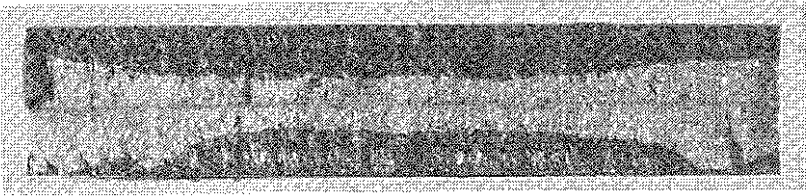
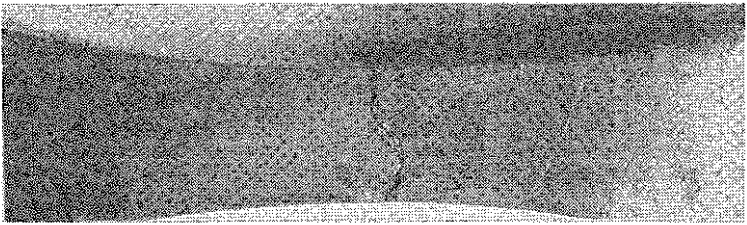
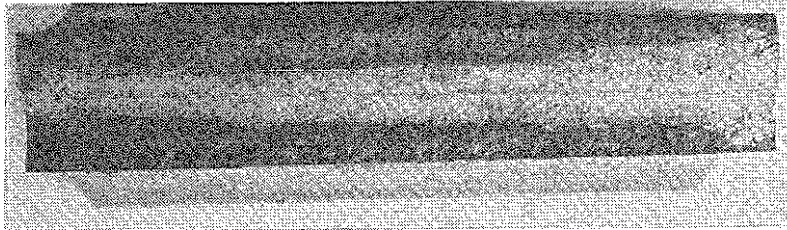
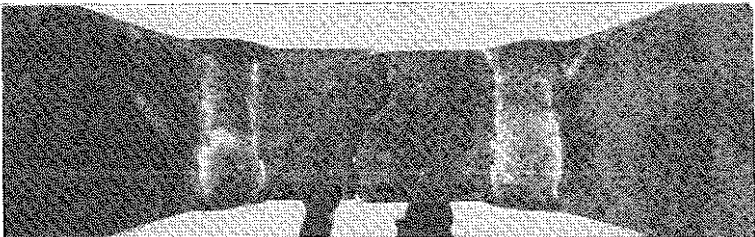
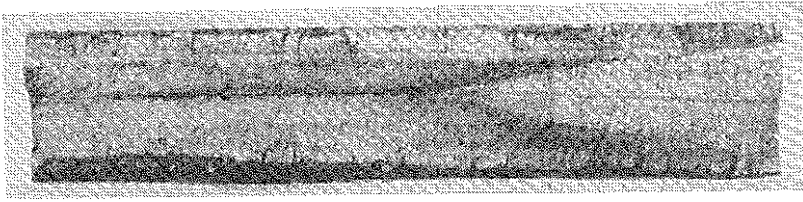
試験温度 (°C)	保持時間 (t _H)	試験片No.	全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon t$ (%)	破断寿命 N _f (Cycle)	
550	0	K0-3	1.0	1120	
550	0	K0-15	1.0	1740	 
550	0	K0-4	0.7	3050	 

写真5.1.4 板曲げクリープ疲労試験後の試験片外観 (550°C, t_H=0)

Photo.5.1.4 Appearance after bending fatigue tests (550°C, t_H=0)

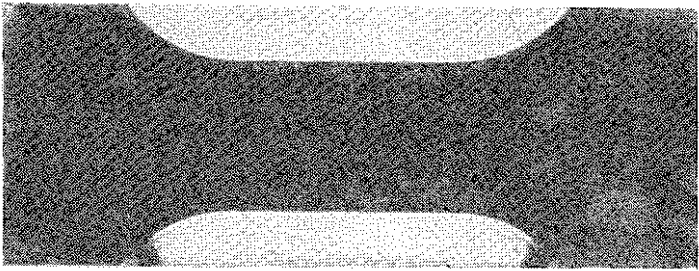
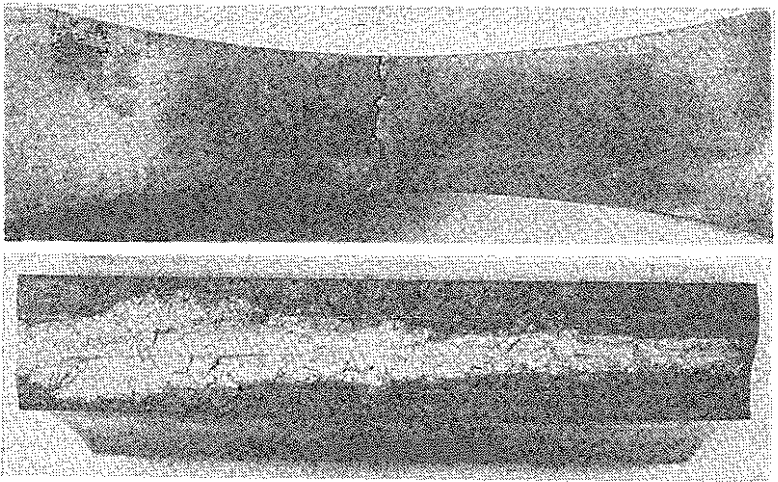
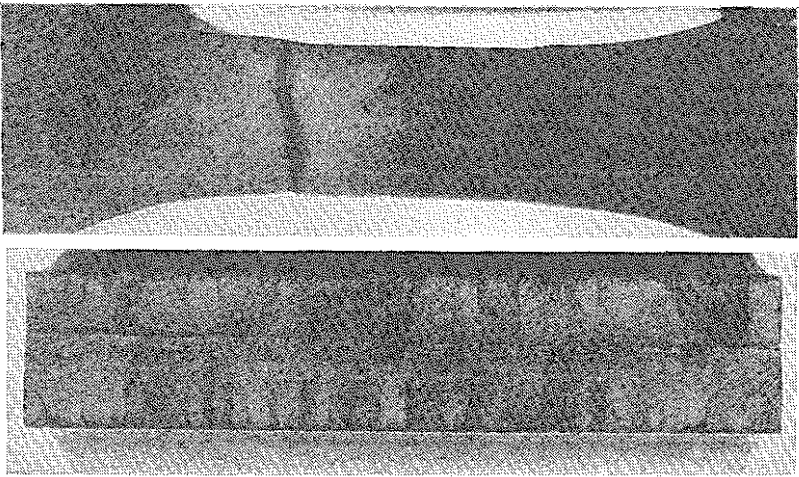
試験温度 (°C)	保持時間 (t H)	試験片No.	全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon t (\%)$	破断寿命 Nf (Cycle)	
550	0	K0-18	0.7	1063 母材R部にき裂発生	
550	0	K0-16	0.7	3286	
550	0	K0-8	0.5	4343	

写真5.1.4 板曲げ疲労試験後の試験片外観 (つづき)

Photo.5.1.4 Appearance after bending fatigue tests (continued)

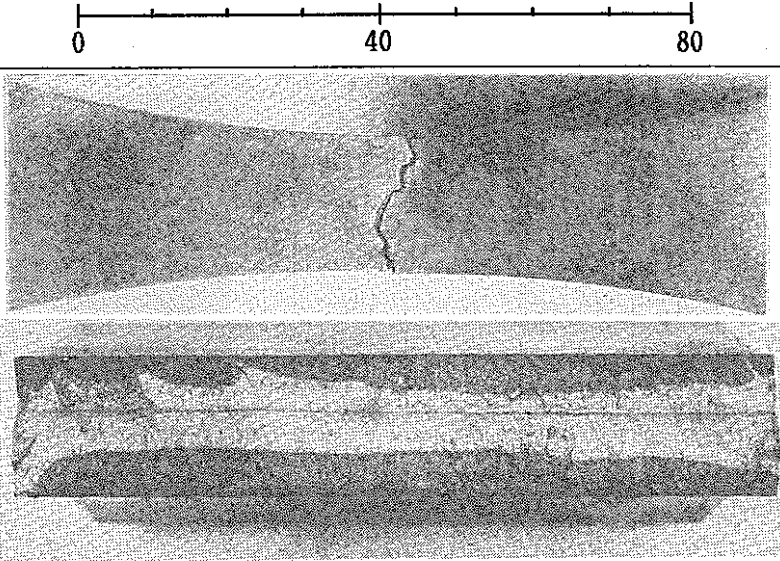
試験 温度 (°C)	保持 時間 (t _H)	試験片 No.	全ひずみ 範囲 $\Delta \epsilon_t$ (%)	破断寿命 N _f (Cycle)	
550	0	K0-19	0.5	5650	

写真5.1.4 板曲げ疲労試験後の試験片外観 (つづき)

Photo.5.1.4 Appearance after bending fatigue tests (continued)

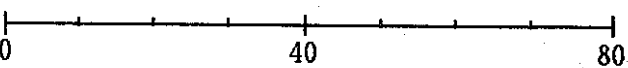
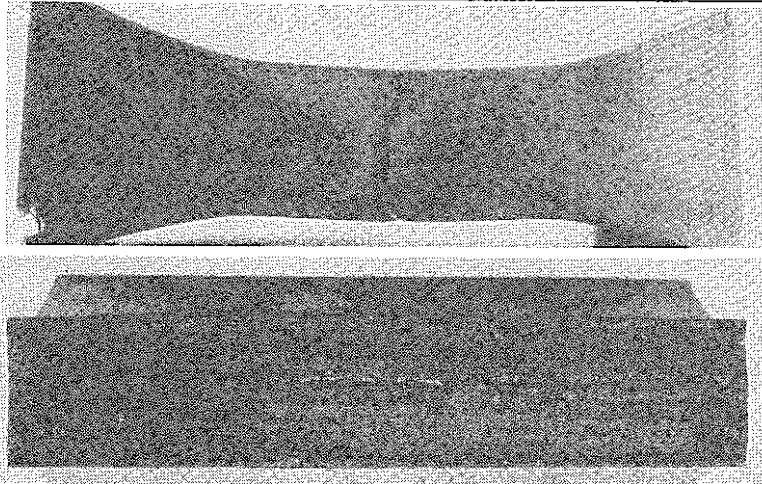
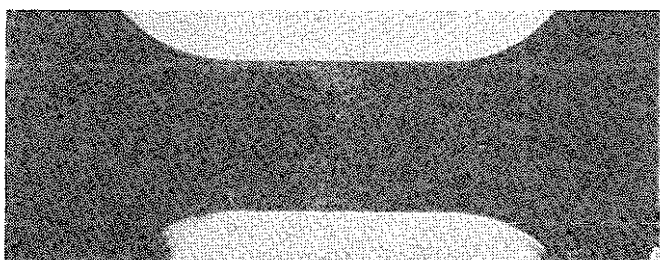
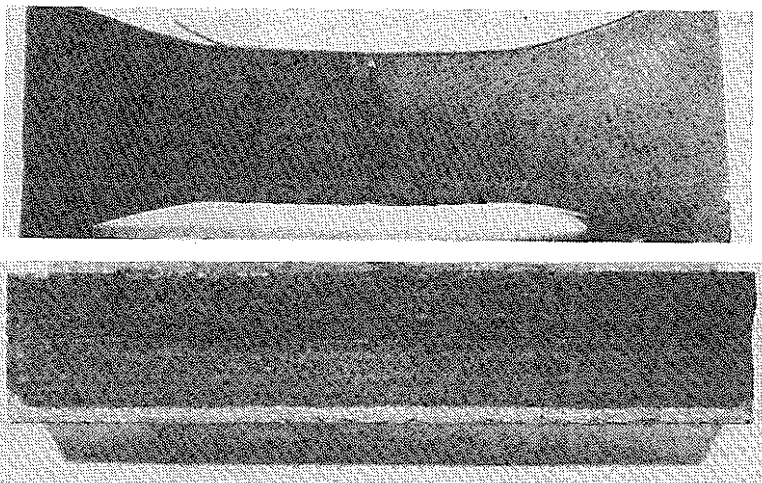
試験温度 (°C)	保持時間 (t _H)	試験片 No.	全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_t$ (%)	破断寿命 N _f (Cycle)		
550	30	K0-1	1.0			
550	30	K0-5	1.0	514		
550	30	K0-2	0.7			

写真5.1.5 板曲げ疲労試験後の試験片外観 (550°C, t_H=30分)

Photo.5.1.5 Appearance after bending fatigue tests (550°C, t_H=30min)

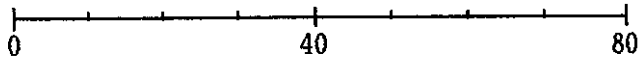
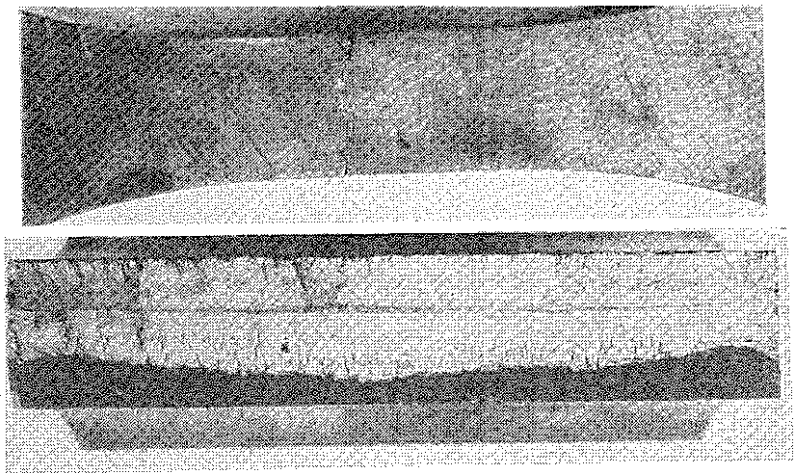
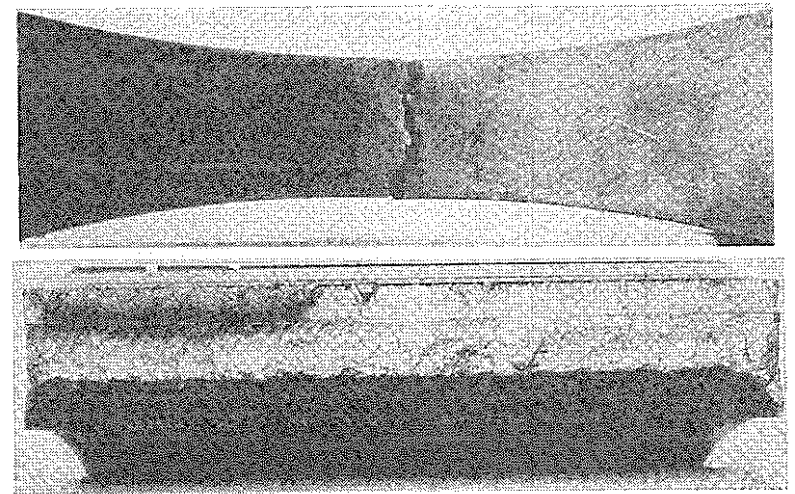
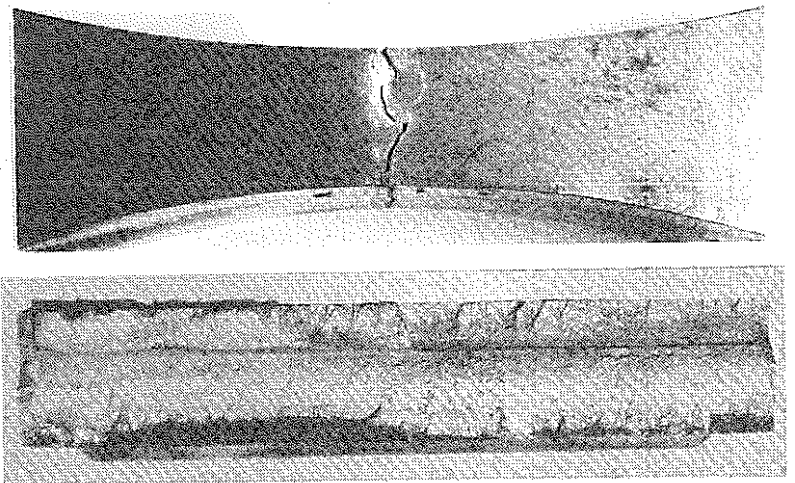
試験温度 (°C)	保持時間 (t _H)	試験片 No.	全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_t$ (%)	破断寿命 N _f (Cycle)		
550	30	K0-9	0.7	1089		
550	30	K0-13	0.5	891		
550	30	K0-17	0.5	1680		

写真5.1.5 板曲げ疲労試験後の試験片外観 (つづき)

Photo.5.1.5 Appearance after bending fatigue tests (continued)

5.2 308系溶接金属

5.2.1 クリープ試験

表5.2.1は試験結果を示す。図5.2.1～図5.2.4はクリープ曲線を示す。図5.2.5は応力とクリープ破断時間の関係を示す。500℃，550℃ともに原型炉材料強度基準による母材のSR値を上廻っている。図5.2.6は応力と定常クリープ速度の関係を示す。

図5.2.7及び図5.2.8は破断伸び、絞りとクリープ破断時間の関係を示す。

写真5.2.1はクリープ試験後の試験片外観を示す。

表5.2.1 溶接金属のクリープ試験結果

Table 5.2.1 Results of creep test of 308 welded metal

試験温度 (°C)	試験片号	応力 σ (kgf/mm ²)	破断時間 t_r (%)	伸び δ (%)	絞り ϕ (%)	破断位置	瞬間 ひずみ ϵ_0 (%)	一次クリー プひずみ ϵ_1 (%)	二次クリー プ開始時間 t_2 (h)	定常クリー プ速度 ϵ_5 (%/h)	三次クリー プ開始ひずみ $\epsilon_1 + \epsilon_2$ (%)	三次クリー プ開始時間 t_3 (h)
500	D-1*	31	358.8	22.3	51.0	B	0.430	2.000	106.0	2.600×10^{-2}	5.750	244.0
	D-2*	27.5	1851.6	15.7	17.6	B	0.260	1.010	680.0	2.300×10^{-3}	3.150	1100.0
	D-3	26	3557.2	12.7	15.8	A	0.223	1.650	1260.0	1.725×10^{-3}	3.400	2150.0
	D-4	24	>12800			試験中						
550	D-5*	22	611.3	18.0	26.3	B	0.210	2.400	305.0	1.962×10^{-2}	5.300	450.0
	D-6*	19.5	1565.7	9.3	6.7	A	0.180	0.350	360.0	7.333×10^{-4}	1.050	940.0
	D-7	18	2822.0	15.8	8.2	B	0.160	0.400	1100.0	4.433×10^{-4}	1.050	1980.0
	D-8	17	5750.3	7.7	6.4	A	0.147	0.350	2100.0	1.125×10^{-4}	1.000	5210.0

* 前年度実施分

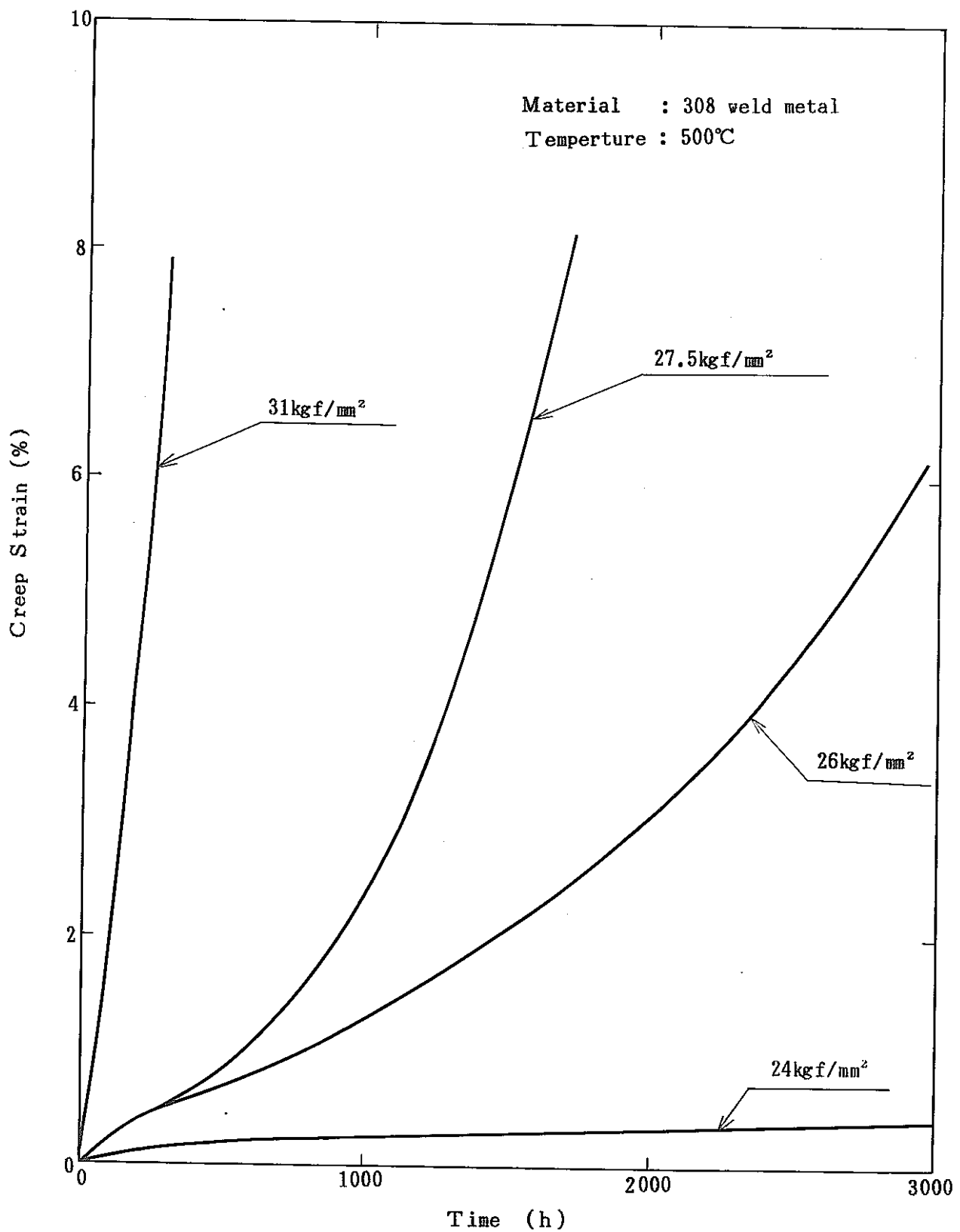


図 5.2.1 クリープ曲線 (308 溶接金属)
Fig 5.2.1 Creep curve (308 weld metal)

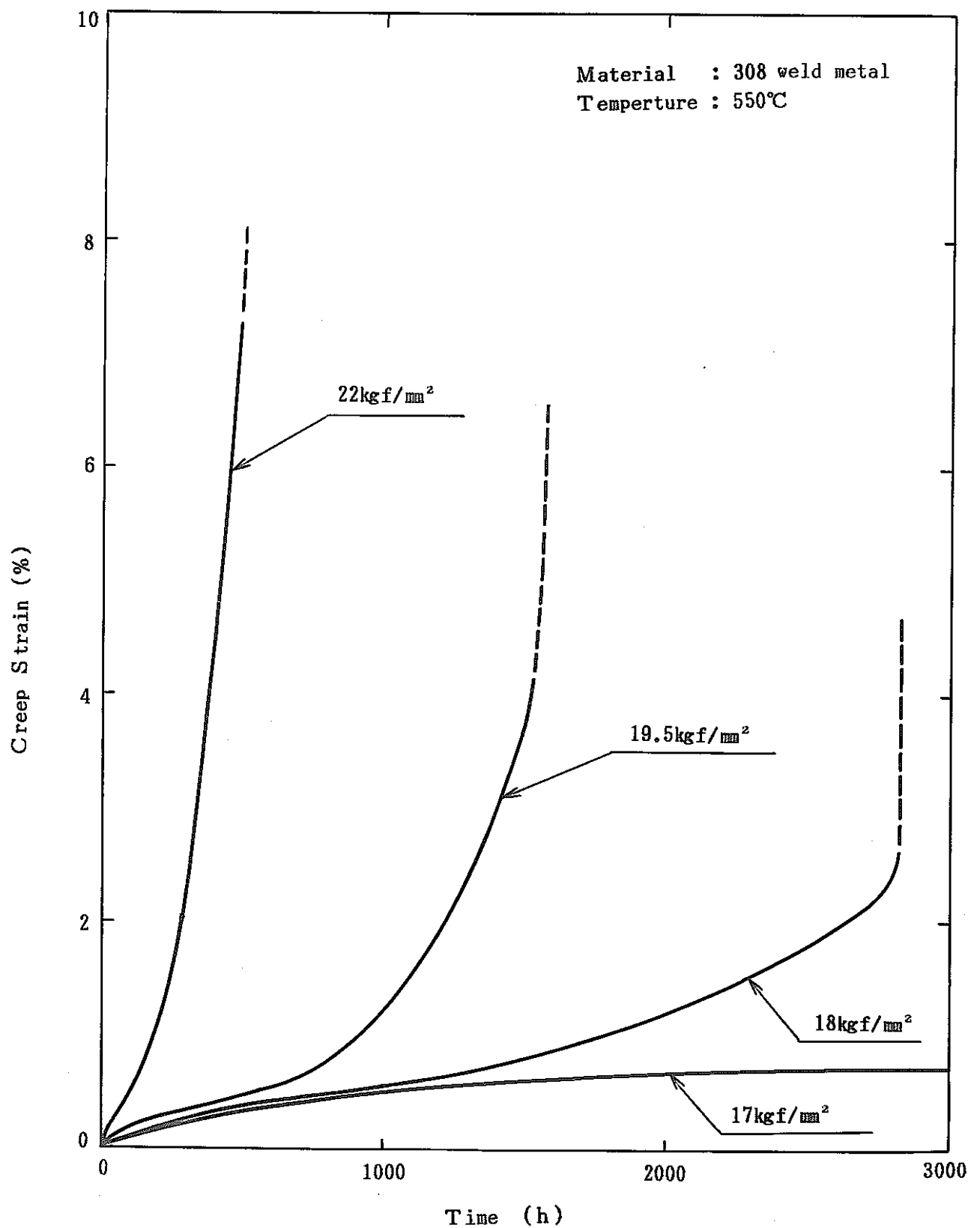


図 5.2.2 クリープ曲線 (308 溶接金属)
Fig 5.2.2 Creep curve (308 weld metal)

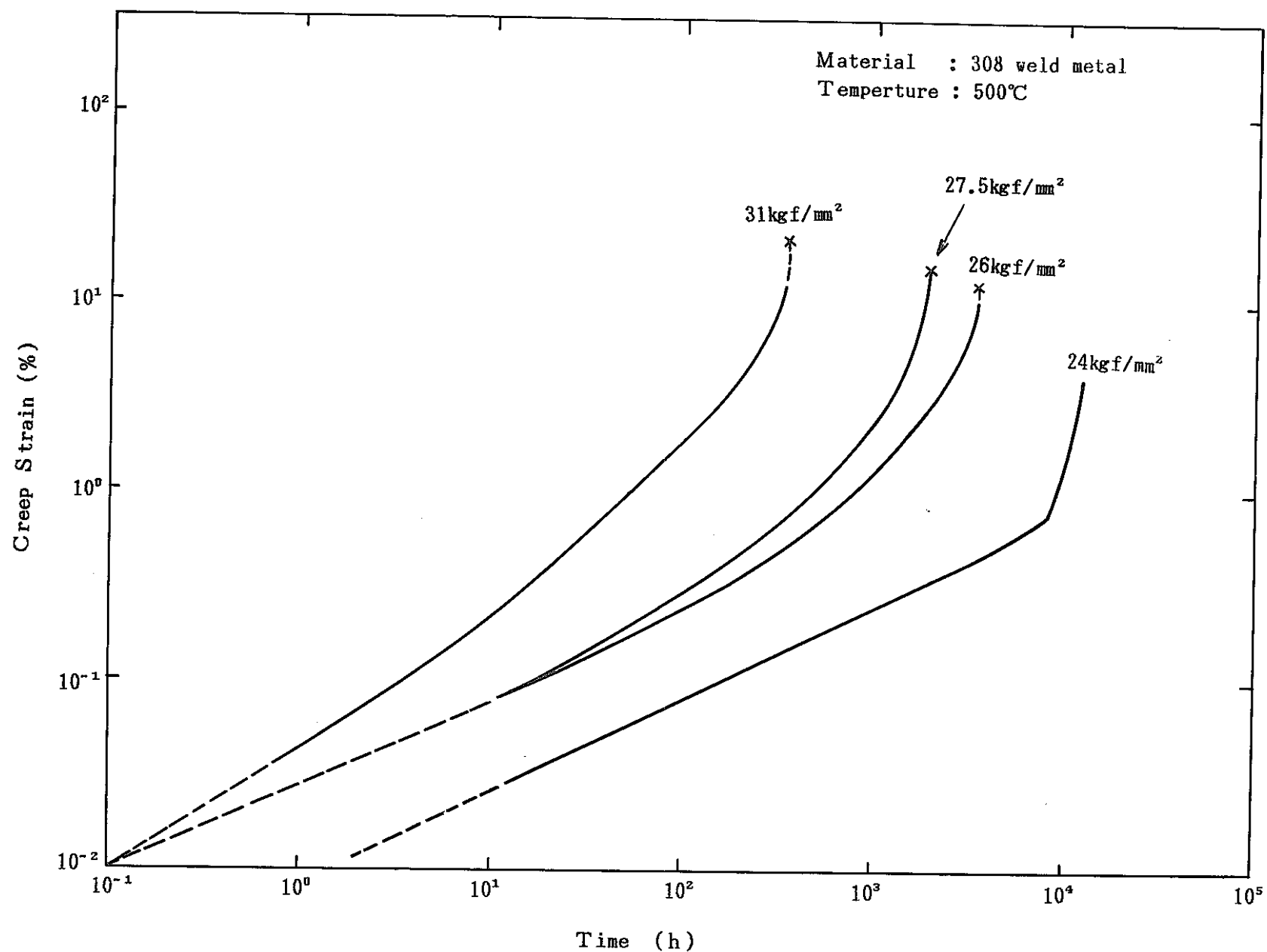


図 5.2.3 クリープ曲線 (308 溶接金属)

Fig 5.2.3 Creep curve (308 weld metal)

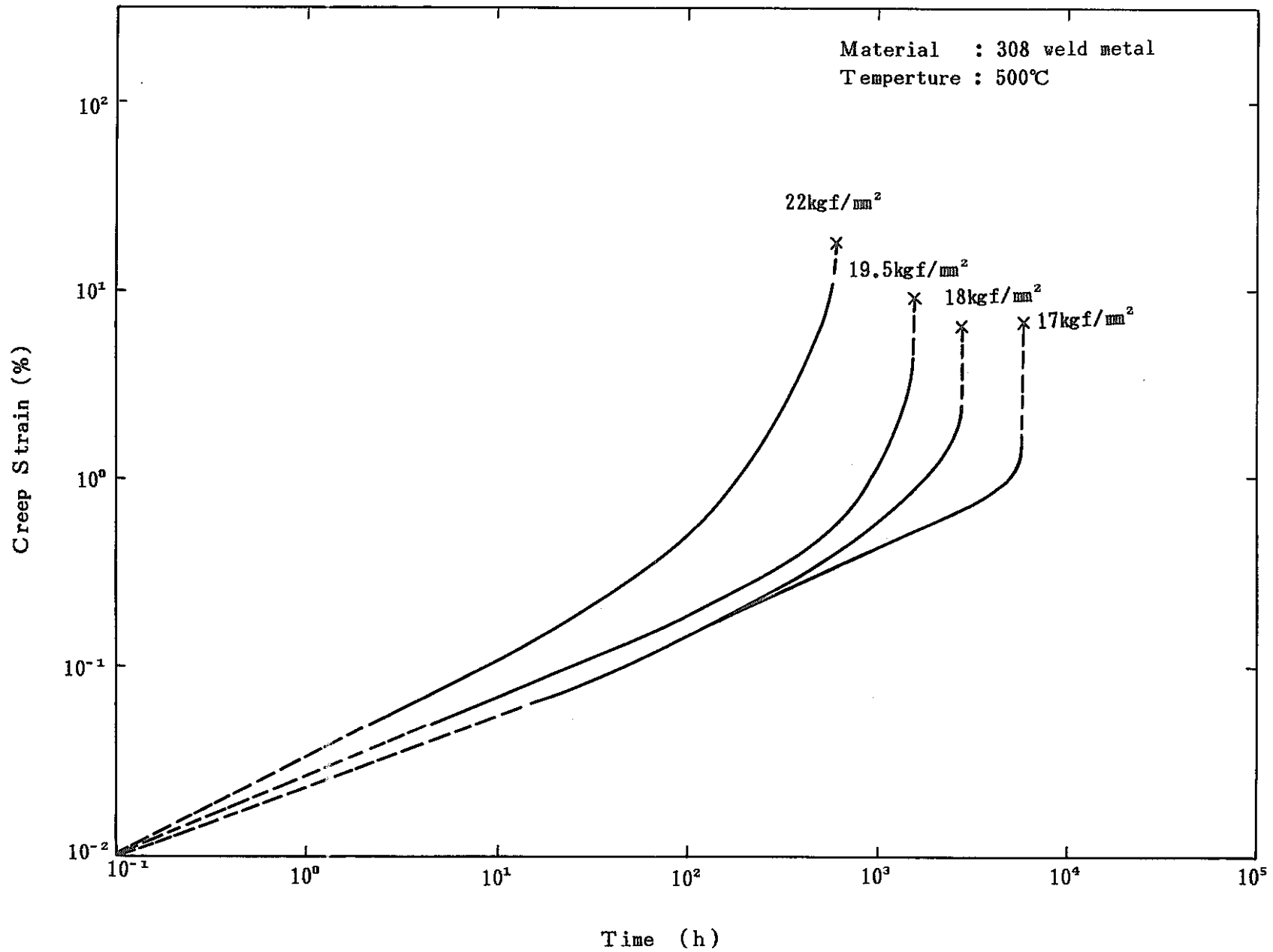


図 5.2.4 クリープ曲線 (308 溶接金属)

Fig 5.2.4. Creep curve (308 weld metal)

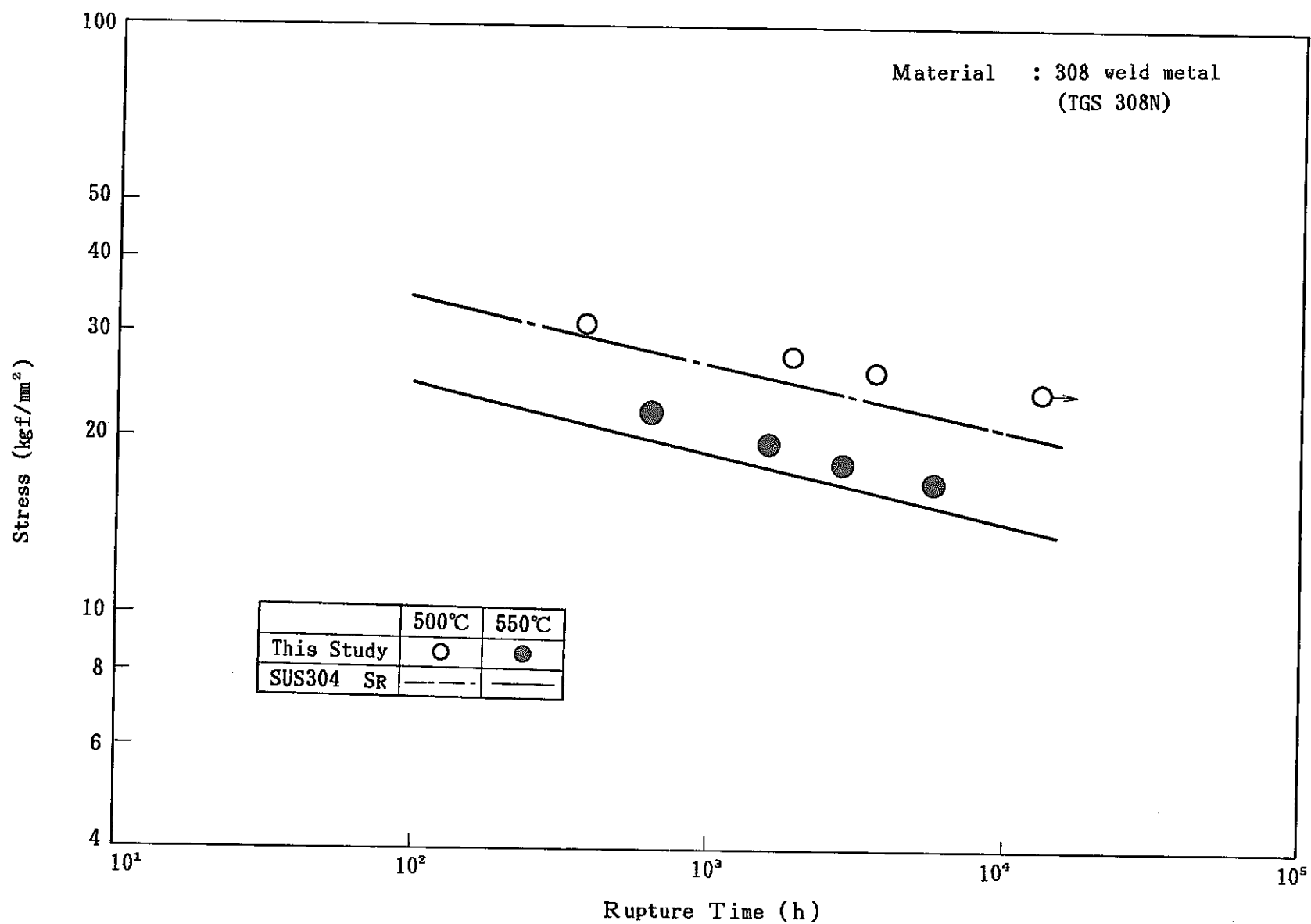


図5.2.5 応力とクリープ破断時間の関係(308溶接金属)
Fig 5.2.5 Creep curve (308 weld metal)

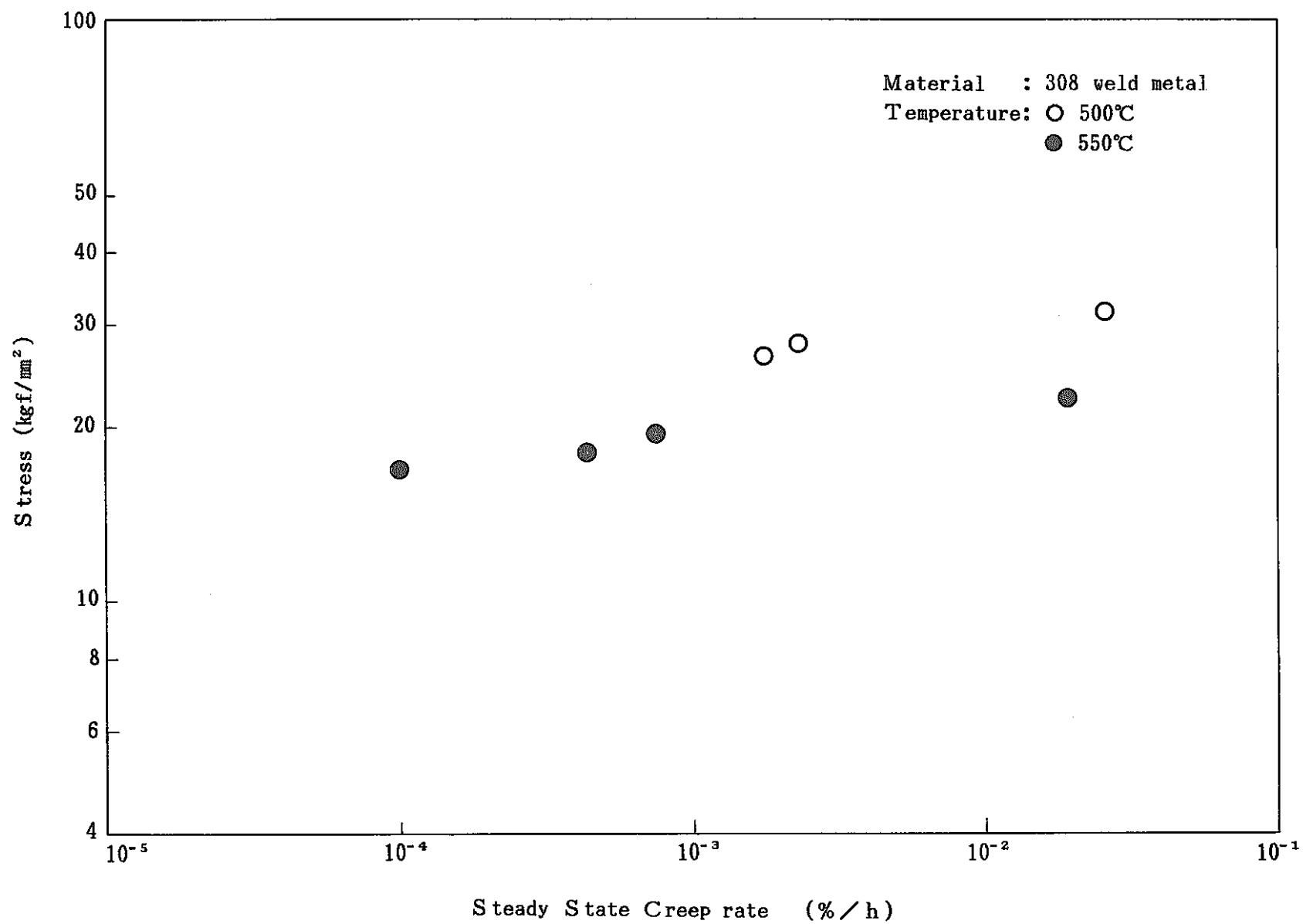


図 5.2.6 応力と定常クリープ速度の関係 (308 溶接金属)
Fig 5.2.6 Stress vs steady state creep rate(308 weld metal)

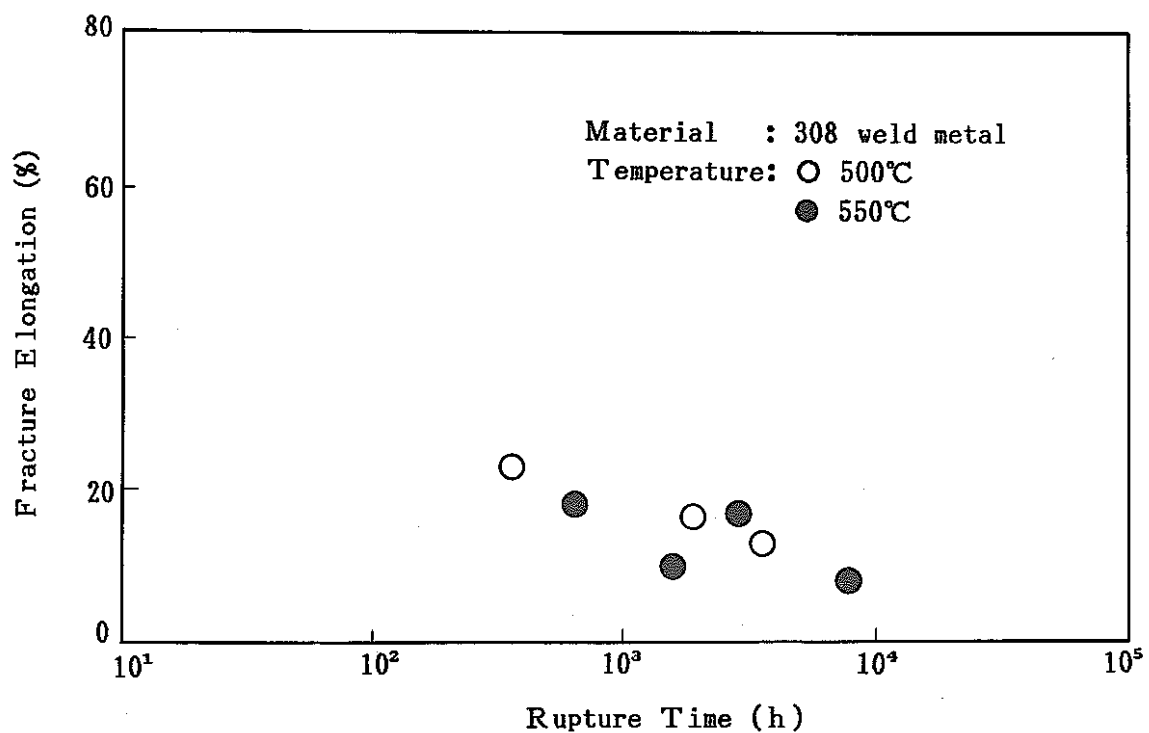


図 5.2.7 破断伸びと破断時間の関係 (308 溶接金属)

Fig 5.2.7 Fracture elongation vs. rupture time (308 weld metal)

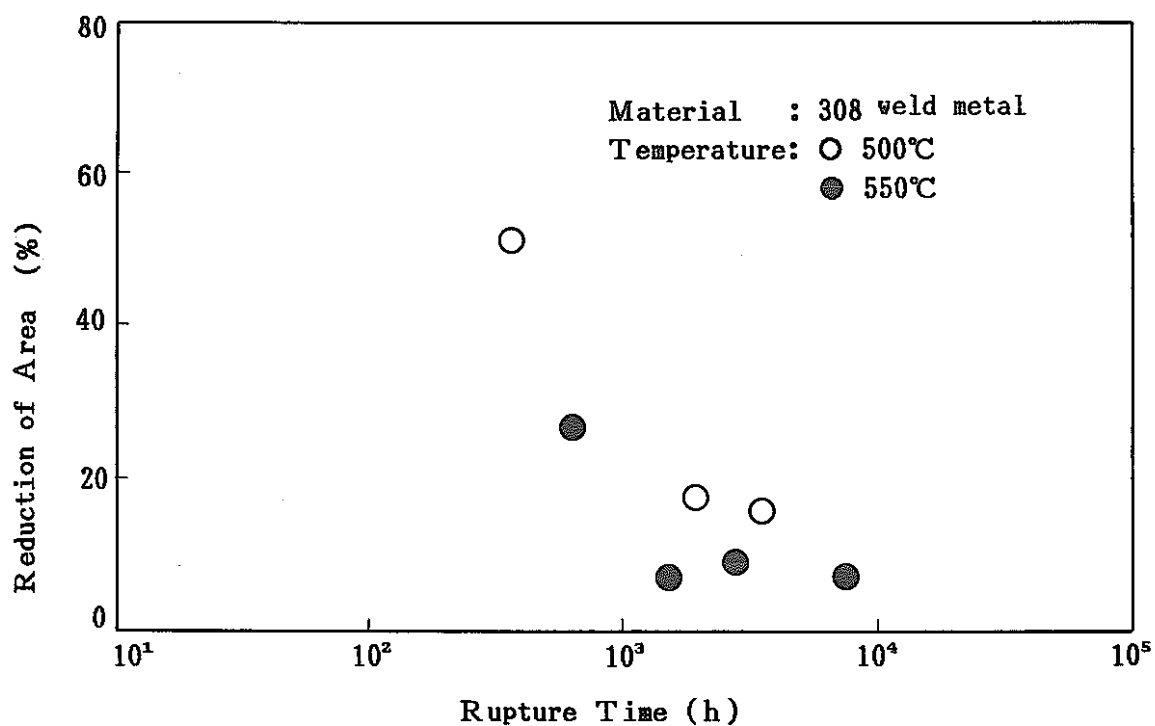


図 5.2.8 絞りと破断時間の関係 (308 溶接金属)

Fig 5.2.8 Reduction of area vs. rupture time (308 welded metal)

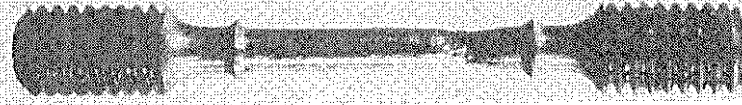
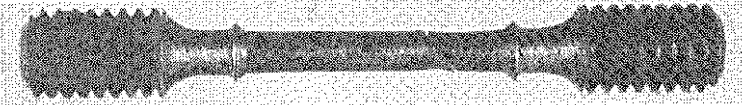
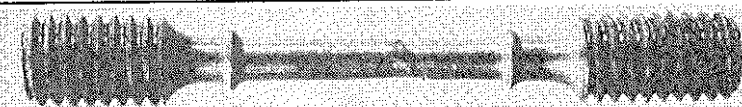
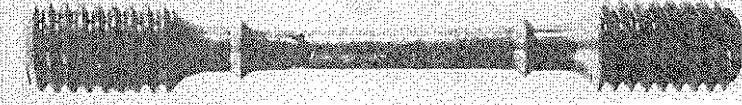
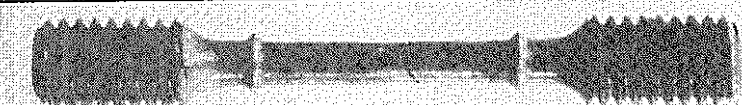
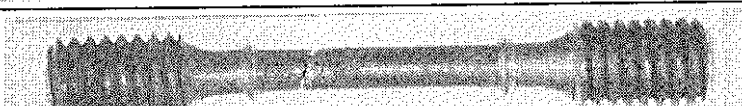
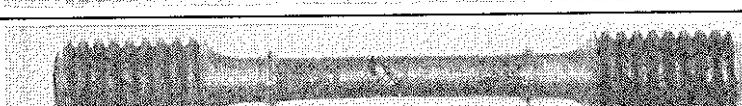
材 料	試験温度 (℃)	試験片番号	応 力 (kgf/mm ²)	破断時間 (h)	0 50 100	
						
308 溶接金属	500	D-1	31	358.8		
		D-2	27.5	1851.6		
		D-3	26	3557.2		
		D-4	24	試験中		
	550	D-5	22	611.3		
		D-6	19.5	1565.7		
		D-7	18	2822.0		
		D-8	17	5750.3		

写真5.2.1 308溶接金属のクリープ試験後の外観
 Photo 5.2.1 Appearance after creep test of 308 weld metal

5.3 Mod. 9 Cr-1 Mo 鋼鍛造材

5.3.1 引張試験

表 5.3.1 及び表 5.3.2 は試験結果を示す。表 5.3.1 は肉厚 550 mm の表面近傍、また表 5.3.2 は肉厚中央部の結果を示す。図 5.3.1 ~ 図 5.3.3 は引張強度、0.2 % 耐力及び伸び、絞りと試験温度の関係を示す。

写真 5.3.1 及び写真 5.3.2 は引張試験後の試験片外観を示す。

5.3.2 クリープ試験

表 5.3.3 は 550 °C クリープ試験結果を示す。図 5.3.4 ~ 図 5.3.7 はクリープ曲線を示す。図 5.3.8 は応力とクリープ破断時間の関係を示す。クリープ破断強度は暫定強度基準値を満足している。また、図 5.3.9 は応力と定常クリープ速度の関係を示す。図 5.3.10 ~ 図 5.3.11 は破断伸び、絞りと破断時間の関係を示す。

写真 5.3.3 は試験後の試験片外観を示す。

5.3.3 低サイクル疲労試験

Mod. 9 Cr-1 Mo 鋼の表層近傍及び中央近傍から採取した 2 系列の試験片について実施した低サイクル疲労試験結果を表 5.3.4 にまとめて示した。

$\Delta \epsilon_t$ 、 $\Delta \epsilon_p$ 、 $\Delta \epsilon_e$ 及び $\Delta \sigma$ は破断寿命 N_f の 1/2 の近傍で採取した応力-ひずみ関係のヒステリシスループより通常の方法で求めた。

Mod. 9 Cr-1 Mo 鋼鍛造材の繰返しに伴う応力範囲の挙動を図 5.3.12 に示した。外表面近傍及び中央部で有意な差はなく $\Delta \epsilon_t$ に関係なく繰返し加工軟化の挙動を示す。

全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_t$ 及び応力範囲 $\Delta \sigma$ と N_f の関係を図 5.3.13 に示した。外表面と内部とで有意な強度差はなく、板材の強度とほぼ同じであることが分る。

破断後の試験片外観及び破面写真を写真 5.3.4 及び 5.3.5 に示した。破面の黒い部分は高温試験で進展したき裂に相当する。

表5.3.1 Mod. 9Cr-1Mo鋼鍛造材の引張試験結果（表面）

Table 5.3.1 Results of tensile test of Mod.9Cr-1Mo forging (Surface)

試験 温度 (°C)	試験片 番号	工 学 的 特 性					最高荷重点での特性	
		0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ (kgf/mm ²)	引張強さ σ_B (kgf/mm ²)	破断伸び δ (%)	絞 り ϕ (%)	破断位置	真 応 力 σ^* (kgf/mm ²)	真ひずみ ϵ^* (%)
R.T	L-4	43.1	62.3	28.7	70.6	A	70.39	12.21
R.T	L-5	43.0	62.0	28.3	71.5	A	70.01	12.21
400	L-6	35.5	48.3	22.3	73.2	A	52.98	9.24
400	L-7	37.1	48.2	21.0	72.5	A	52.57	8.68
450	L-8	34.6	46.8	23.0	75.0	A	51.75	9.20
450	L-9	34.7	46.7	23.3	74.2	A	51.51	9.17
500	L-10	32.8	42.9	29.0	77.4	A	46.63	8.35
500	L-11	32.1	43.1	27.0	76.7	A	46.83	8.30
550	L-12	30.2	37.6	28.0	86.0	A	39.79	5.65
550	L-13	29.4	37.1	31.0	86.0	A	39.46	6.16
600	L-14	25.2	31.0	37.7	90.0	A	32.14	3.61
600	L-15	24.7	31.1	44.3	91.0	A	32.23	3.59

表5.3.2 Mod. 9Cr-1Mo鋼鍛造材の引張試験結果 (中央)

Table 5.3.2 Results of tensile test of Mod.9Cr-1Mo forging (Center)

試験 温度 (℃)	試験片 番号	工 学 的 特 性					最高荷重点での特性	
		0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ (kgf/mm ²)	引張強さ σ_B (kgf/mm ²)	破断伸び δ (%)	絞 り ϕ (%)	破断位置	真 応 力 σ^* (kgf/mm ²)	真ひずみ ϵ^* (%)
RT	M-4	44.3	63.1	29.7	69.7	A	71.91	13.07
RT	M-5	43.8	63.0	29.7	68.9	A	71.80	13.07
400	M-6	36.5	48.7	20.7	73.3	A	53.08	8.61
400	M-7	35.8	48.6	21.3	73.2	A	52.97	8.62
450	M-8	36.0	47.2	23.7	73.3	A	51.44	9.46
450	M-9	35.8	47.0	24.0	74.2	A	51.33	9.46
500	M-10	33.4	43.3	28.0	78.3	A	46.91	8.00
500	M-11	34.3	43.3	27.0	77.4	A	46.93	8.05
550	M-12	29.7	37.3	32.7	85.3	A	39.66	6.15
550	M-13	30.1	37.1	30.0	84.0	A	39.32	5.82
600	M-14	25.3	31.1	43.3	91.5	A	32.24	3.59
600	M-15	25.6	30.9	36.0	91.0	A	31.93	3.28

表5.3.3 Mod. 9Cr-1Mo鋼鍛造材のクリープ試験結果

Table 5.3.3 Results of creep test of Mod.9Cr-1Mo forging

位置	試験温度 (°C)	試験片 番号	応力 σ (kgf/mm ²)	破断時間 tr (h)	伸び δ (%)	絞り ϕ (%)	破断位置	瞬間 ひずみ ϵ_0 (%)	一次クリー プひずみ ϵ_1 (%)	二次クリー プ開始時間 t ₂ (h)	定常クリー プ速度 ϵ_5 (%/h)	三次クリー プ開始ひずみ $\epsilon_1 + \epsilon_2$ (%)	三次クリー プ開始時間 t ₃ (h)
表面	550	L-1	22	513.0	32.3	84.0	A	0.200	1.075	70.0	7.286×10 ⁻³	2.500	270.0
		L-2	21	1044.7	34.0	84.0	B	0.150	1.000	115.0	3.567×10 ⁻³	2.900	590.0
		L-3	20	>1000			試験中						
中央	550	M-1	22	584.6	31.0	84.0	A	0.170	1.125	95.0	7.071×10 ⁻³	2.850	340.0
		M-2	21	976.4	29.7	87.7	A	0.150	1.050	140.0	4.267×10 ⁻³	3.350	630.0
		M-3	20	>1000			試験中						

表5.3.4 Mod 9Cr-1Mo 鋼鍛造材の高温低サイクル疲労試験結果
Table 5.3.4 Results of low-cycle fatigue test on Mod.9Cr-1Mo forging

		Strain Range			$\Delta \sigma$ (kg/mm ²)	N _f (cycles)	T P No	備 考
		$\Delta \epsilon_t$	$\Delta \epsilon_p$	$\Delta \epsilon_e$				
外表面	550℃	1.2	0.91	0.29	55.8	1122	S-3	②
		1.0	0.72	0.28	53.7	1704	S-1	①
		0.7	0.41	0.39	49.0	2545	S-18	②
		0.5	0.225	0.275	49.9	5300	S-17	②
		0.4	0.149	0.251	46.6	9300	S-2	①
		0.4	0.174	0.226	—	—	S-16	① 中 断
中央部	550℃	1.2	0.90	0.30	52.5	1069	S-9	②
		1.0	0.72	0.28	55.9	1330	S-7	②
		0.7	0.41	0.29	52.2	2452	S-12	②
		0.5	0.242	0.258	50.0	7180	S-11	②
		0.4	0.165	0.235	43.7	26815	S-8	①
		0.4	0.160	0.240	46.5	57732	S-10	①

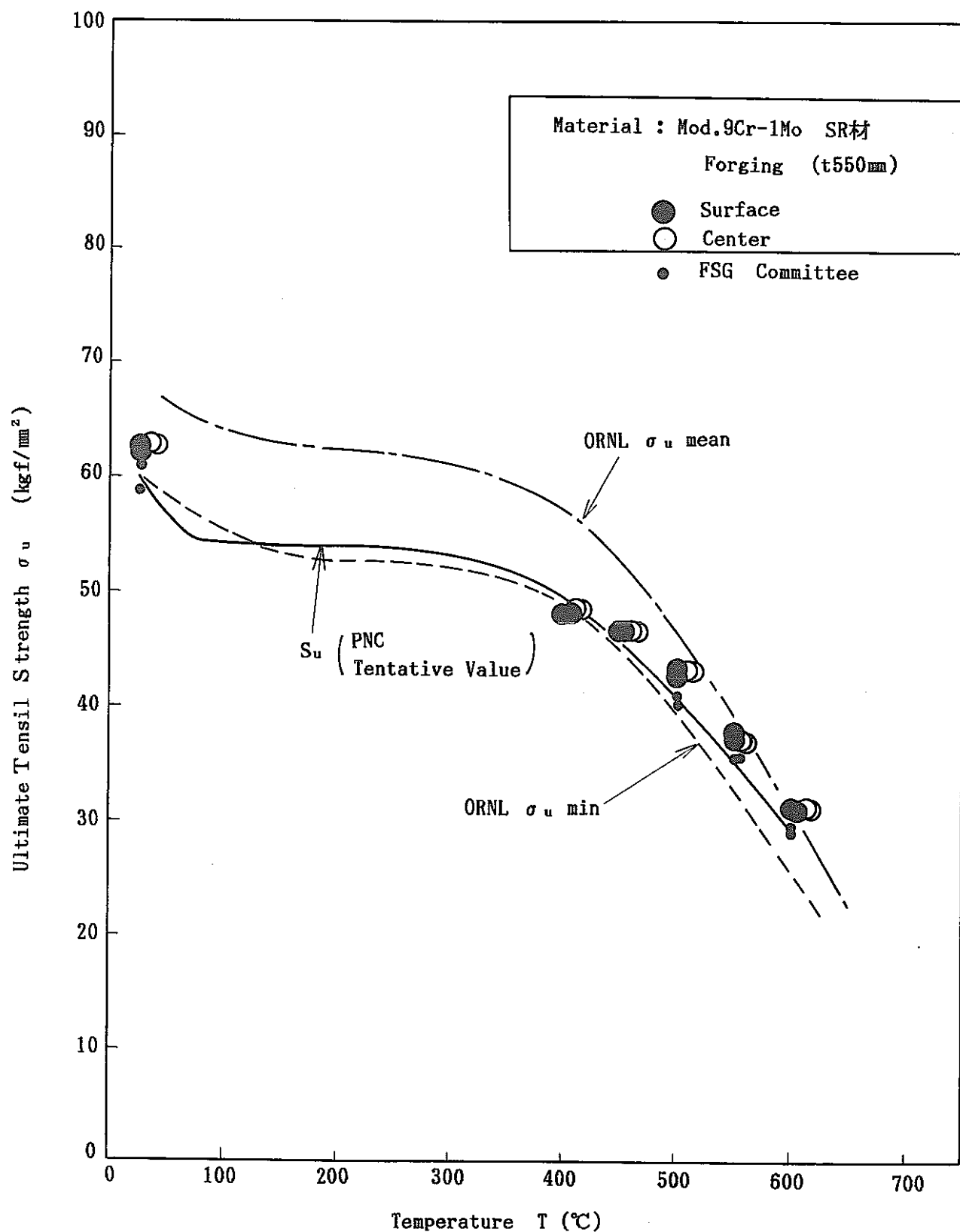


図 5.3.1 Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材(t550mm)の引張強さ
Fig.5.3.1 Variation of tensile strength with temperature of
Mod.9Cr-1Mo forging (t550mm)

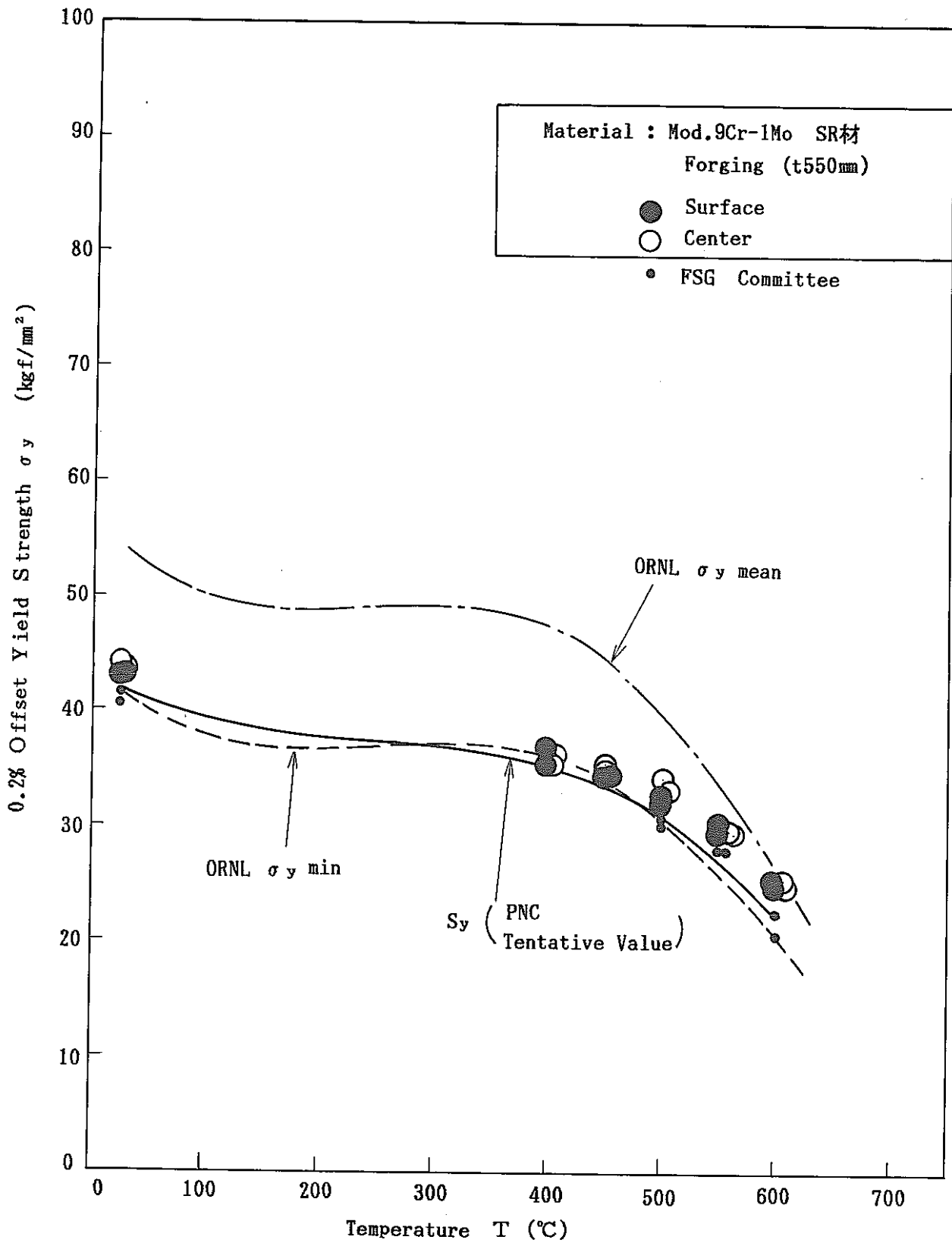


図5.3.2 Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材(t550mm)の0.2%耐力
Fig.5.3.2 Variation of yield strength with temperature of
Mod.9Cr-1Mo forging (t550mm)

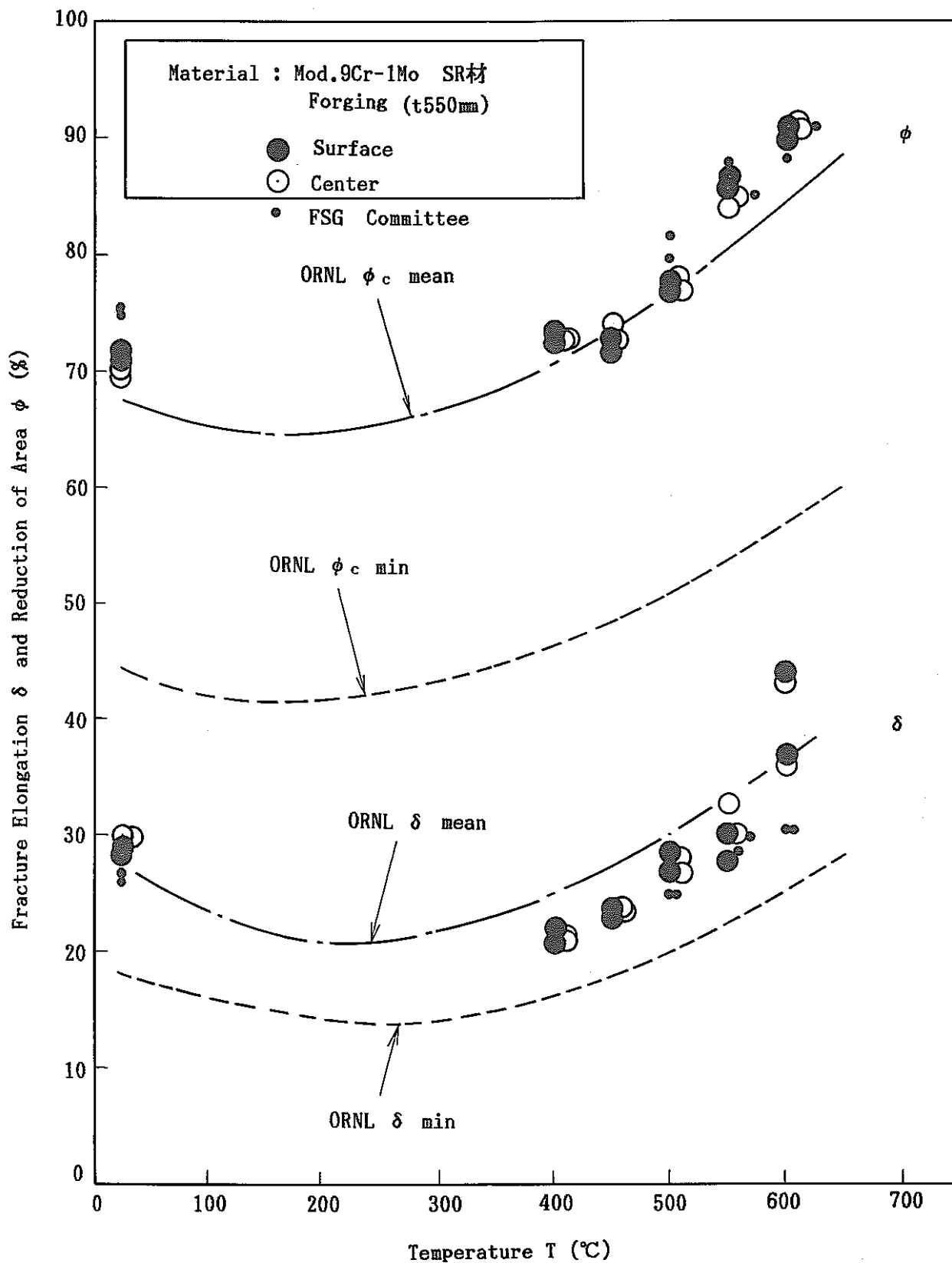


図5.3.3 Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材(t550mm)の破断伸びと絞り

Fig.5.3.3 Variation of elongation and reduction of area with temperature of Mod.9Cr-1Mo forging (t550mm)

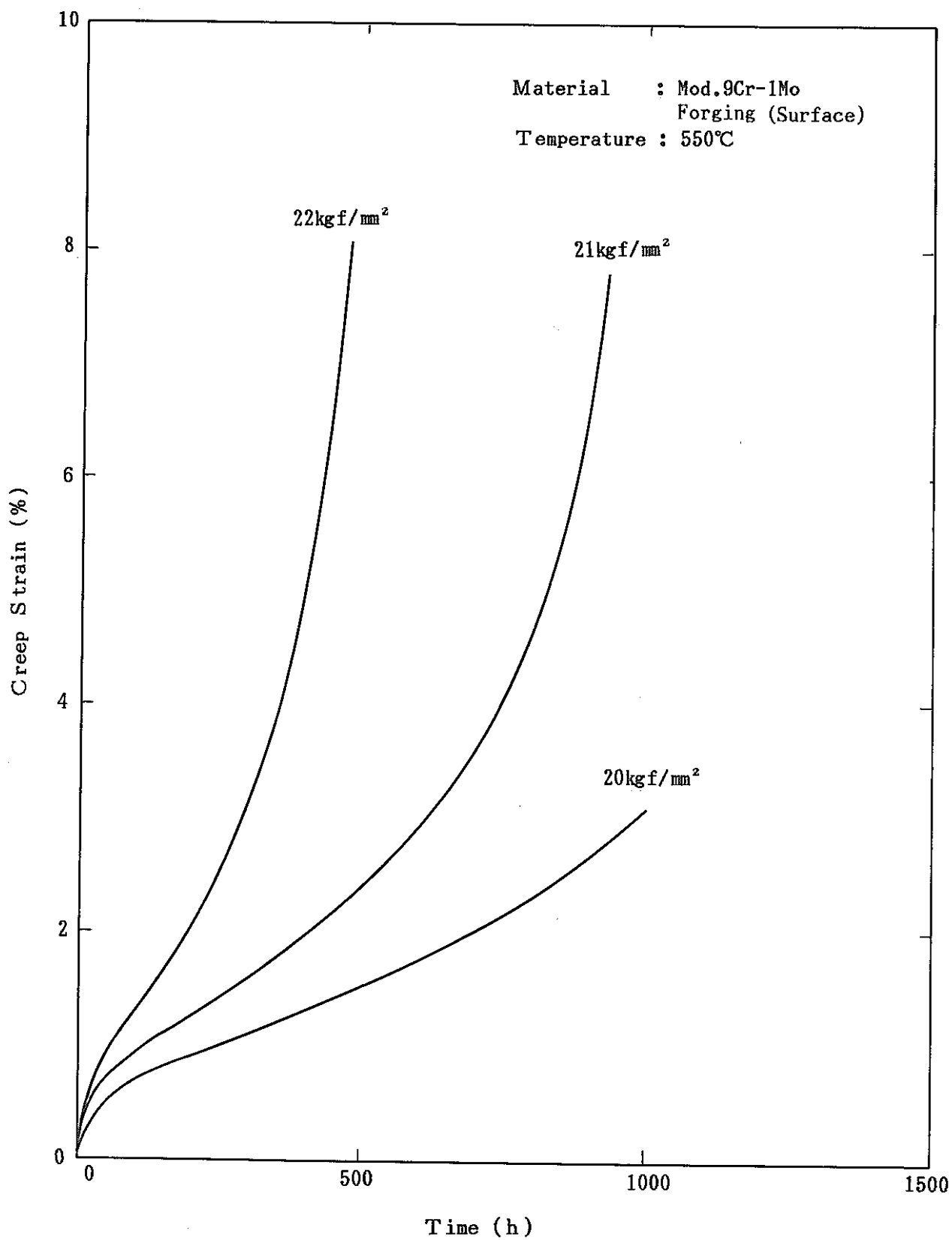


図5.3.4 クリープ曲線 (Mod.9Cr-1Mo 鋼鍛造材)

Fig 5.3.4 Creep curve (Mod.9Cr-1Mo forging)

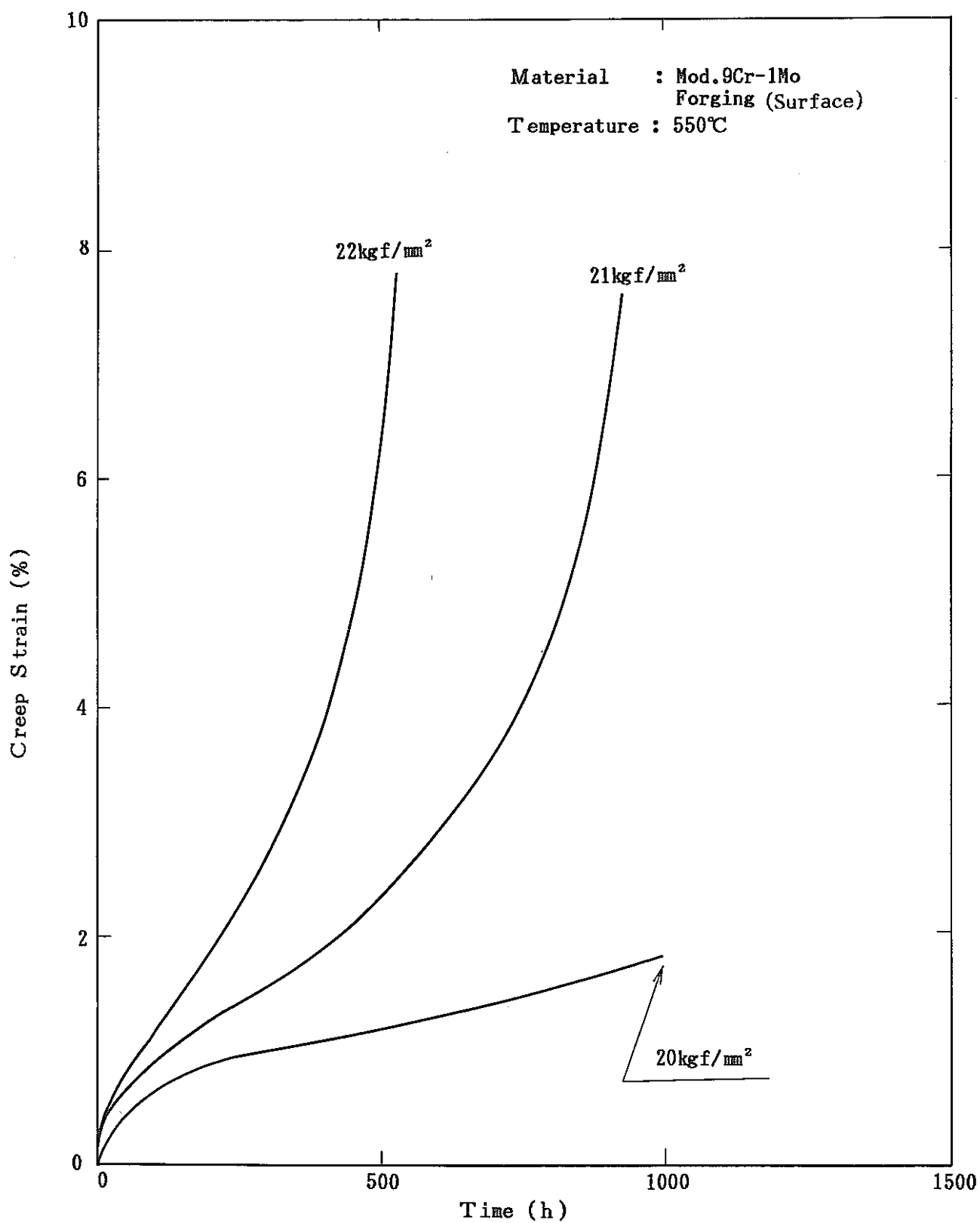


図5.3.5 クリープ曲線 (Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材)

Fig 5.3.5 Creep curve (Mod.9Cr-1Mo forging)

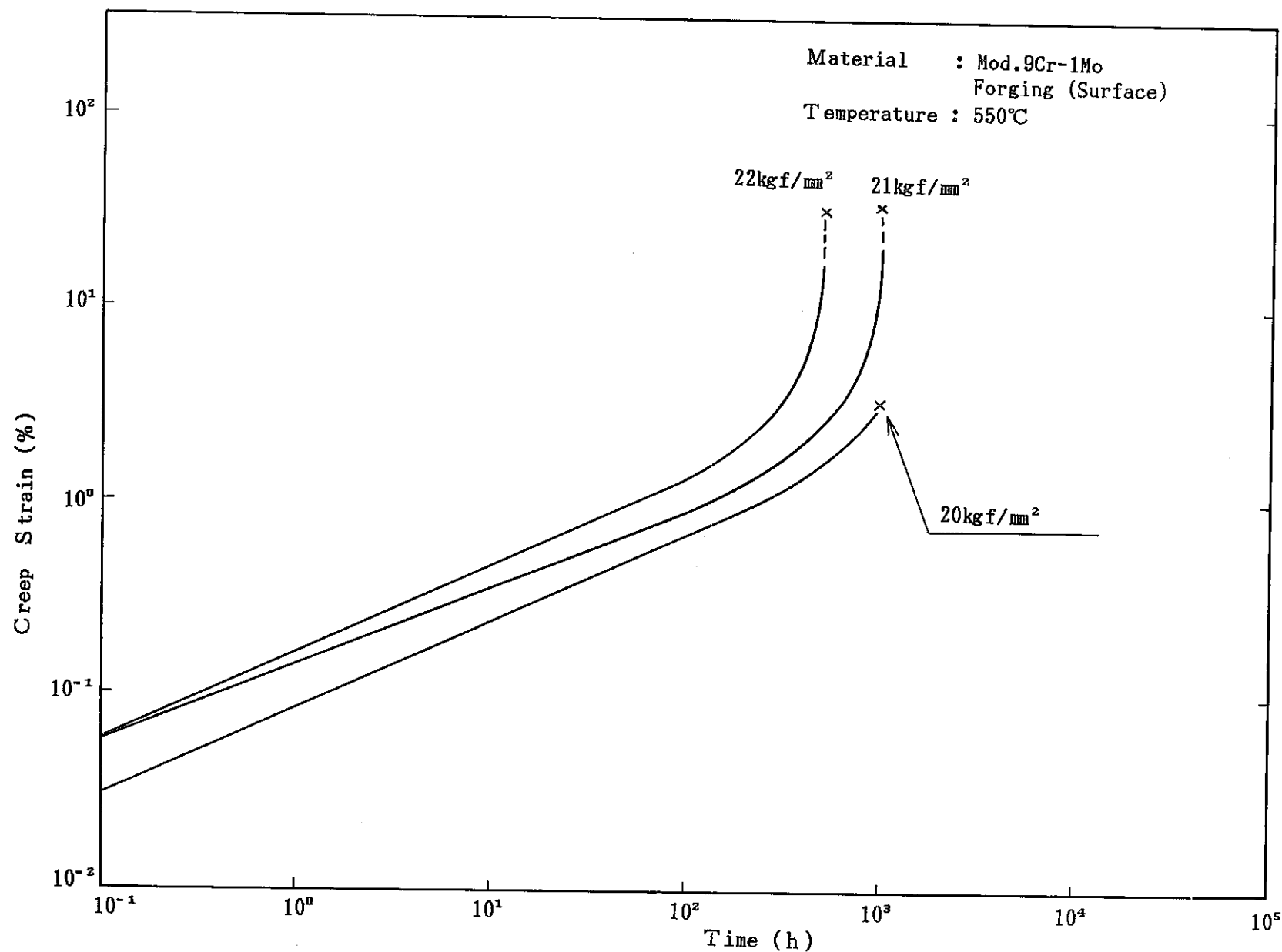


図 5.3.6 クリープ曲線 (Mod.9Cr-1Mo 鋼鍛造材)
Fig 5.3.6 Creep curve (Mod.9Cr-1Mo forging)

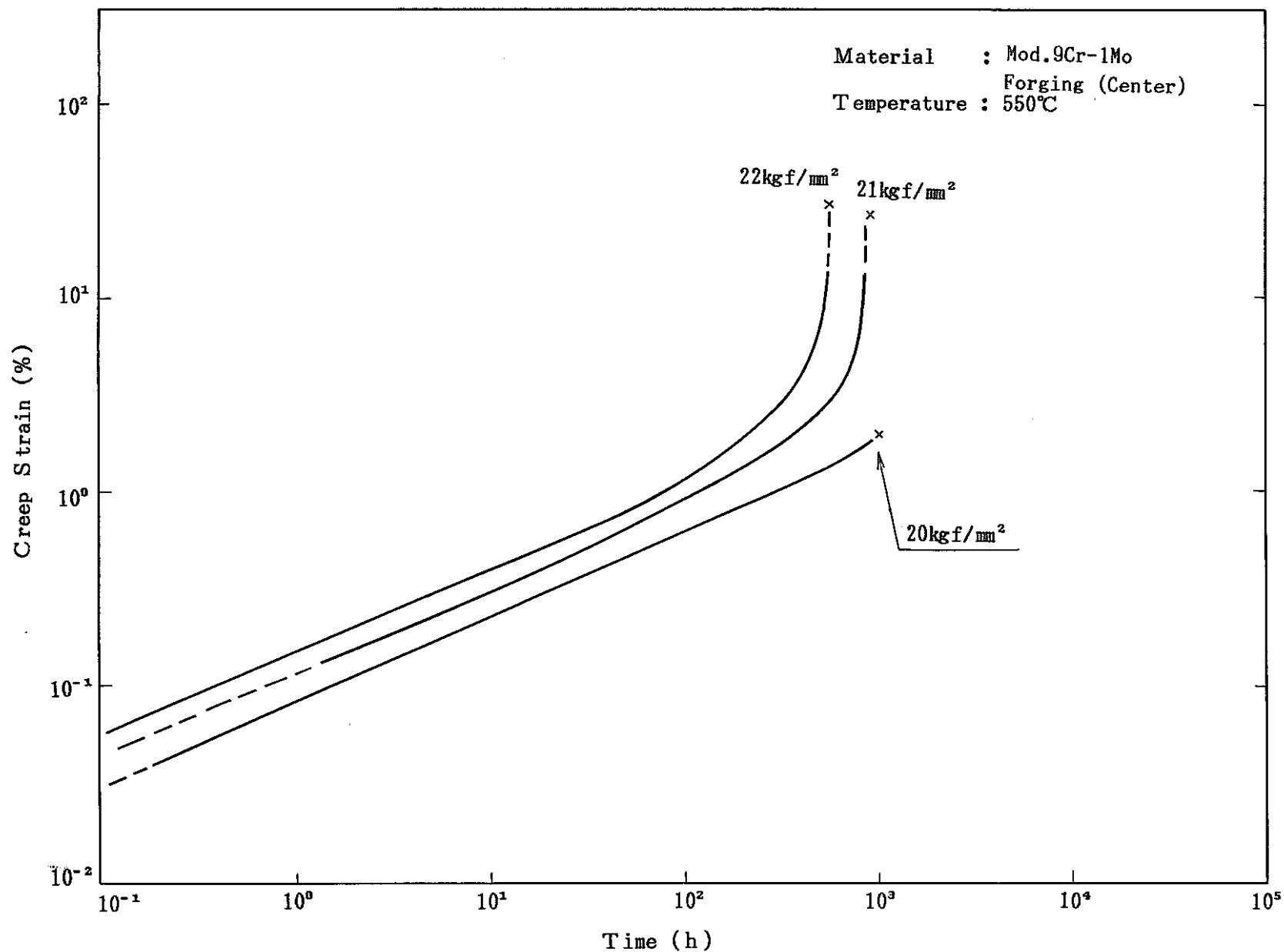


図5.3.7 クリープ曲線 (Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材)
Fig 5.3.7 Creep curve (Mod.9Cr-1Mo forging)

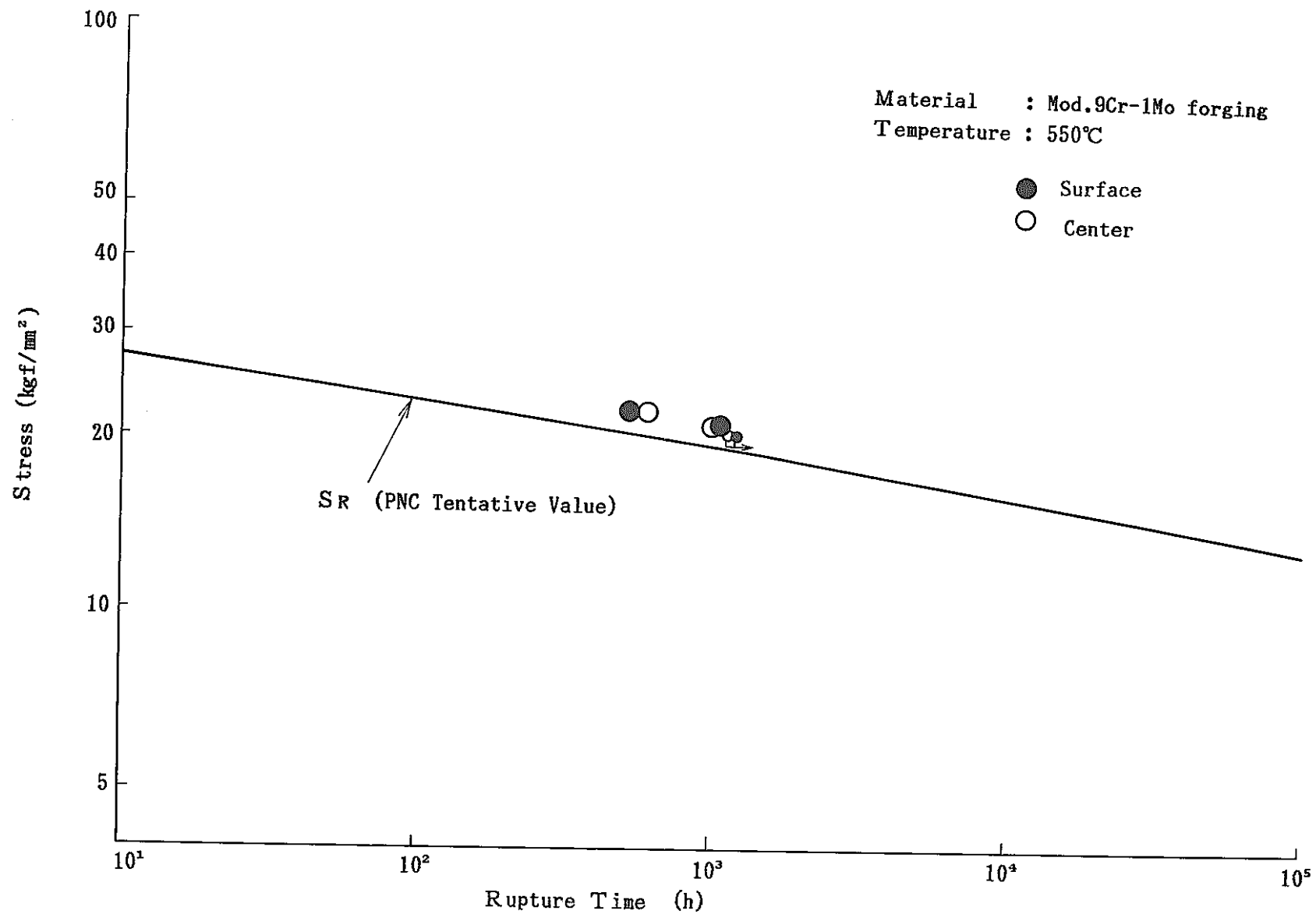


図5.3.8 応力とクリープ破断時間の関係 (Mod.9Cr-1Mo 鋼鍛造材)
Fig 5.3.8 Stress creep time (Mod.9Cr-1Mo forging)

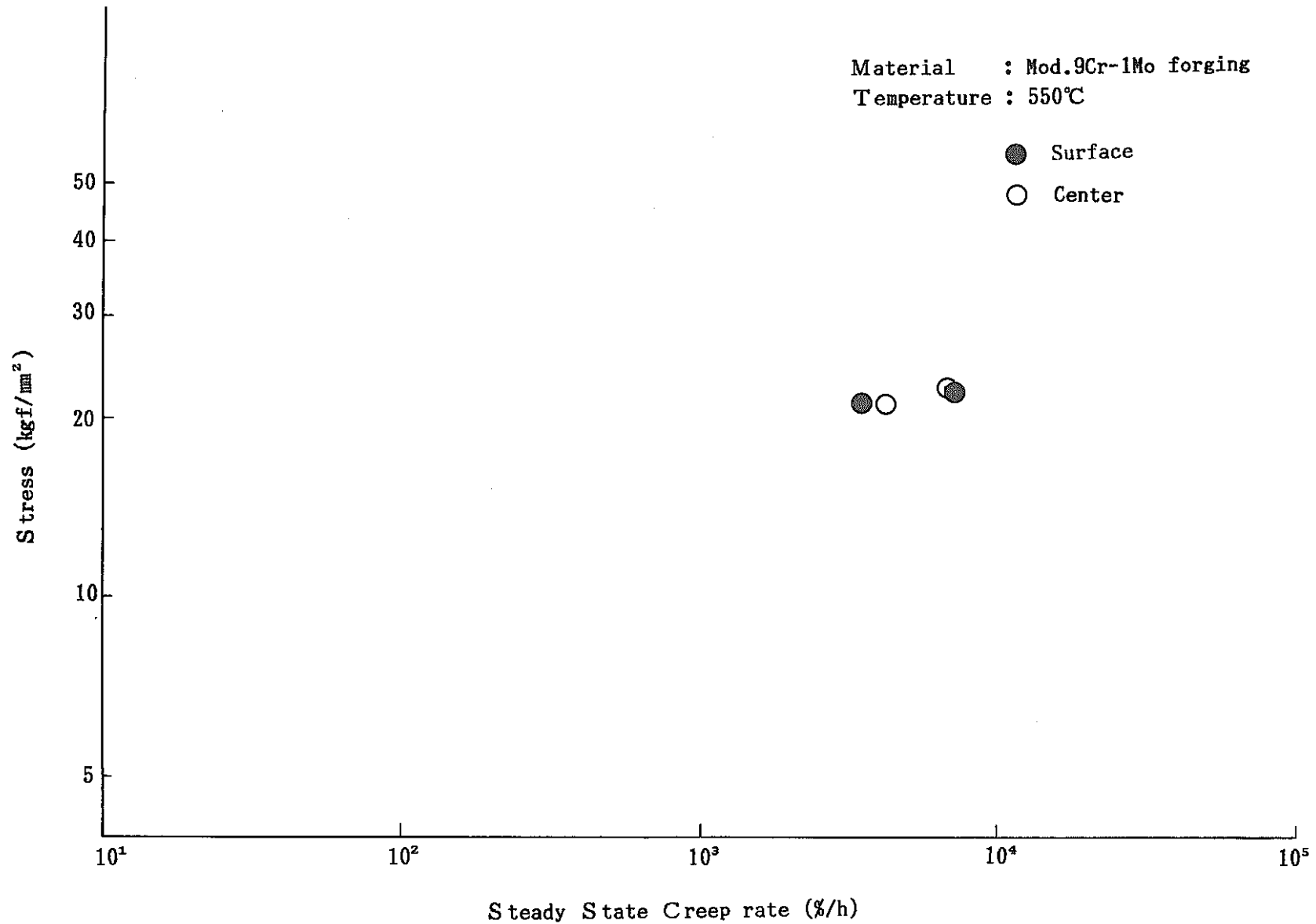


図5.3.9 応力と定常クリープ速度の関係 (Mod.9 Cr-1 Mo 鋼鍛造材)

Fig 5.3.9 Stress vs steady state creep rate (Mod.9Cr-1Mo forging)

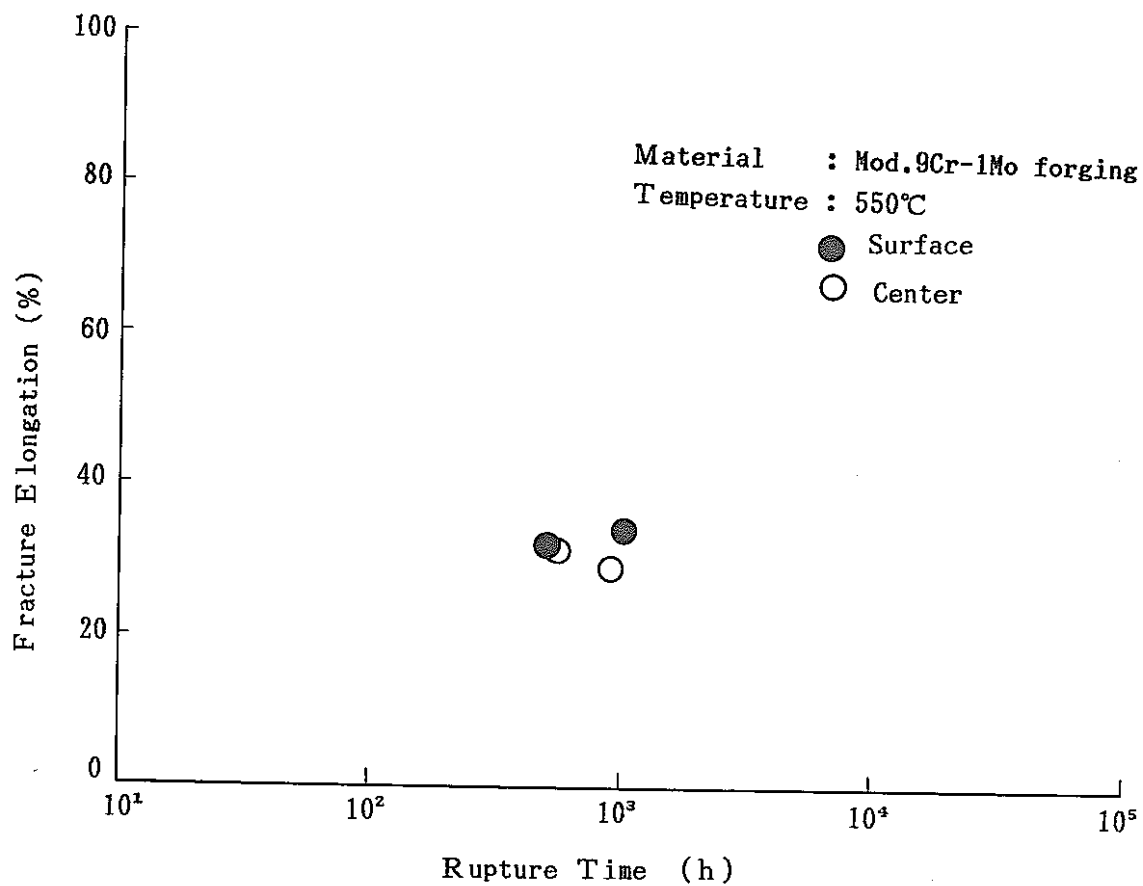


図 5.3.10 破断伸びと破断時間の関係 (Mod.9 Cr-1 Mo 鋼鍛造材)
 Fig 5.3.10 Fracture elongation vs. rupture time
 (Mod.9Cr-1Mo forging)

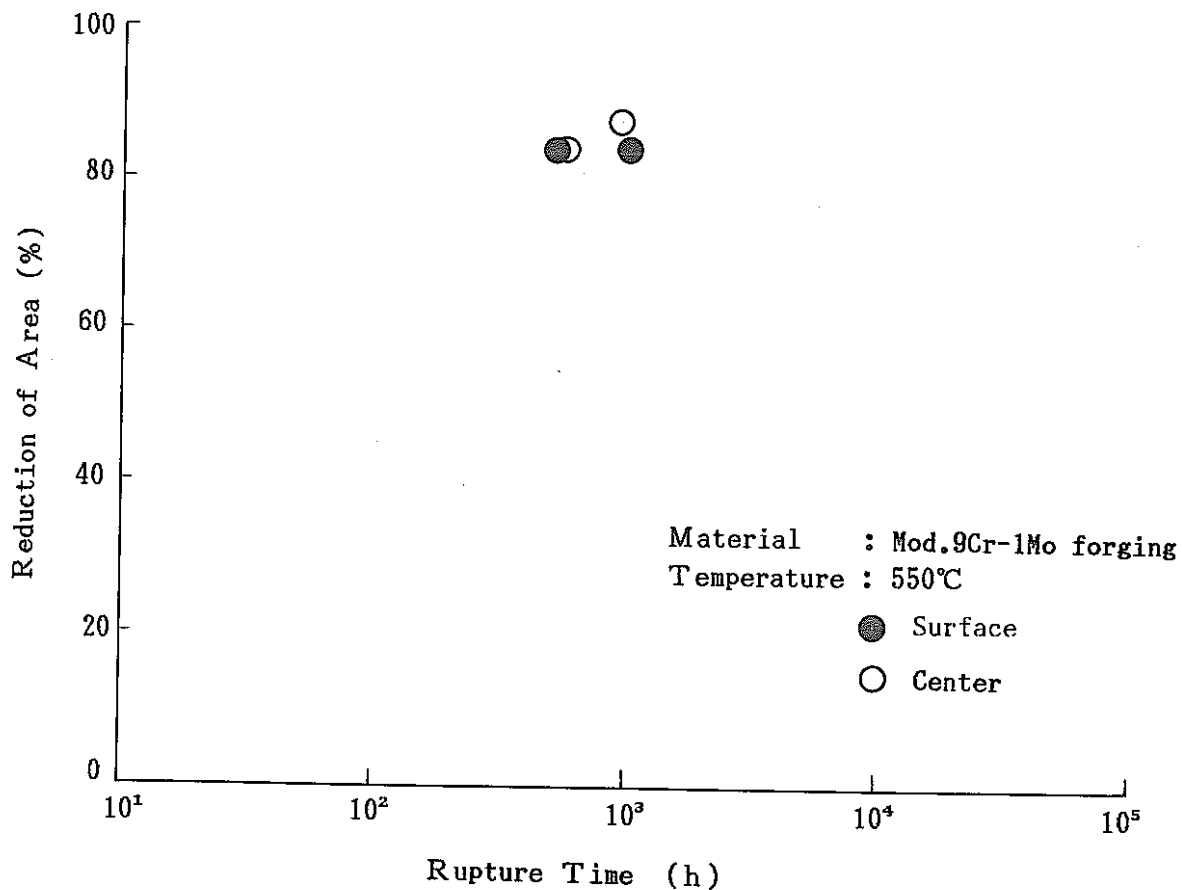


図 5.3.11 絞りと破断時間の関係 (Mod.9 Cr-1 Mo 鋼鍛造材)
 Fig 5.3.11 Reduction of area vs. rupture time
 (Mod.9Cr-1Mo forging)

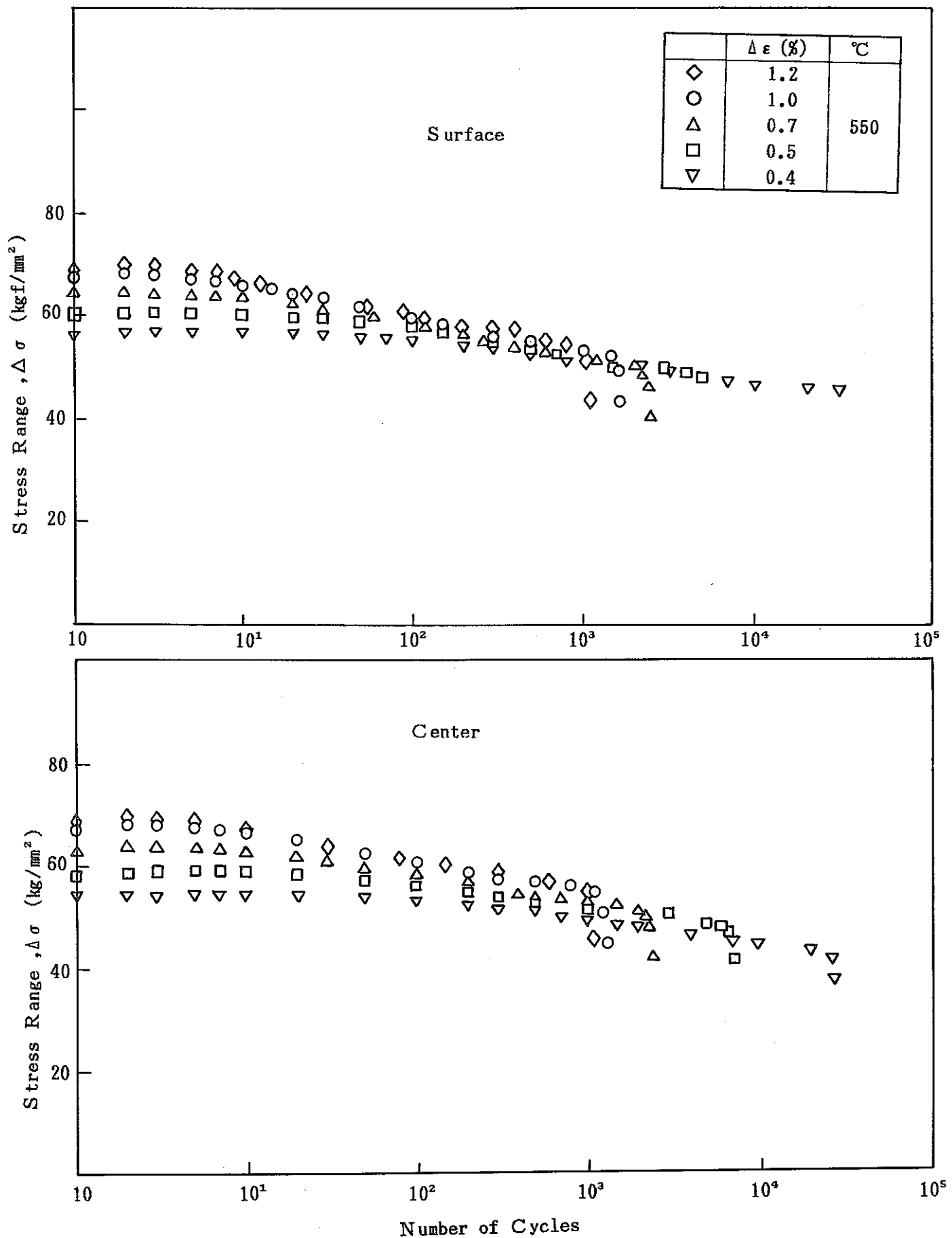


図 5.3.12 繰返しに伴う応力範囲の挙動 (Mod.9 Cr-1 Mo 鋼鍛造材)
 Fig 5.3.12 Cyclic behavior of stress range (Mod.9 Cr-1 Mo forging)

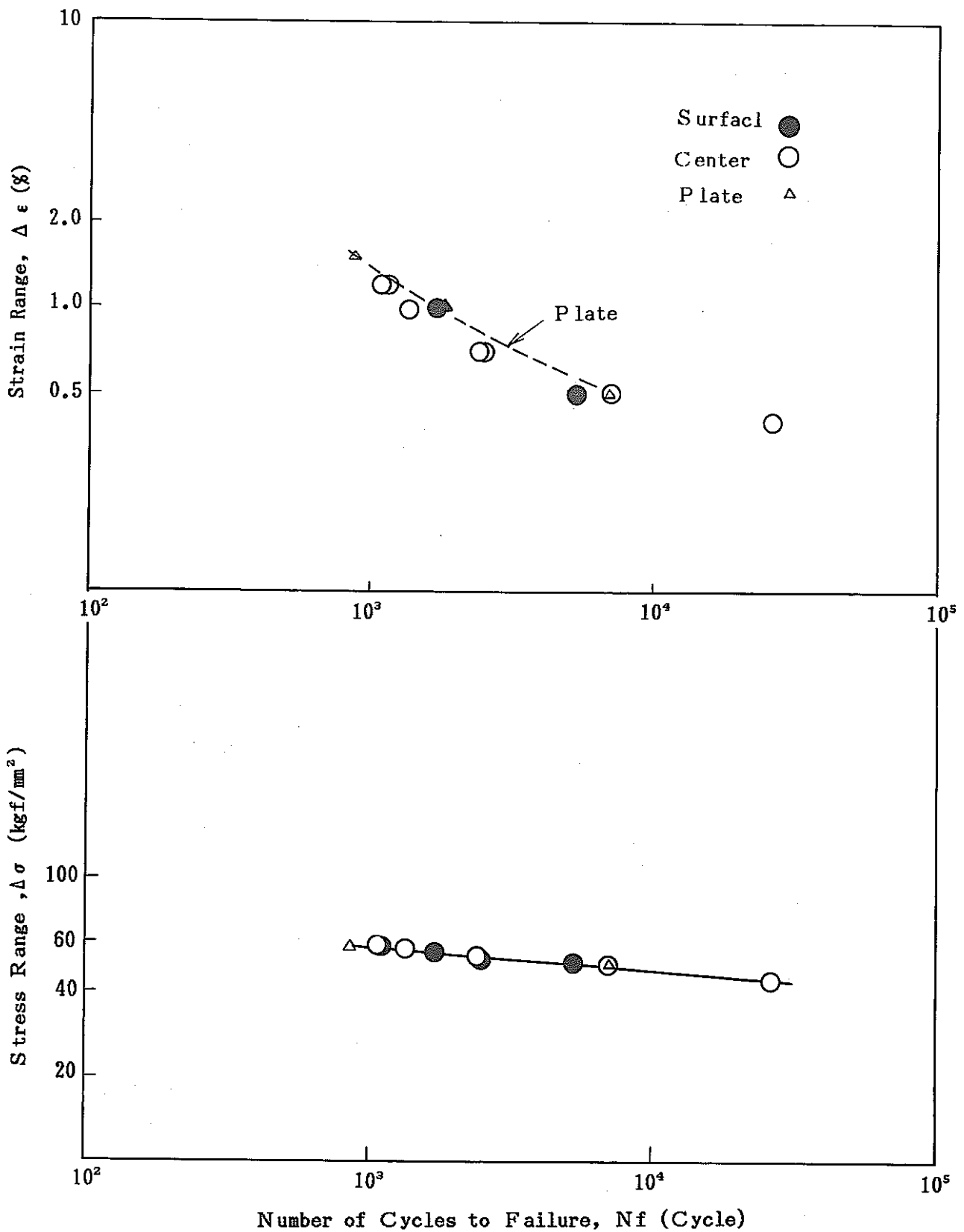


図5.3.13 Mod.9 Cr-1 Mo 鍛造材の低サイクル強度

Fig 5.3.13 Fatigue strength of Mod.9 Cr-1 Mo forging

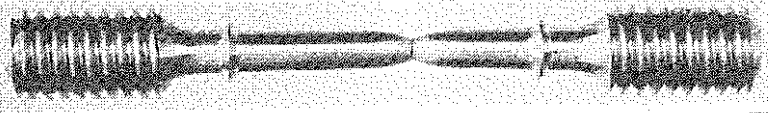
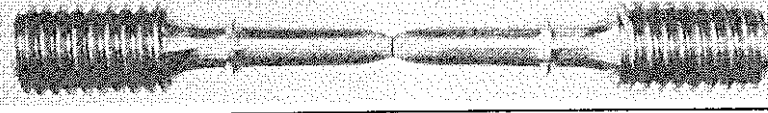
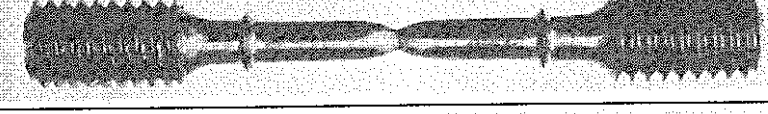
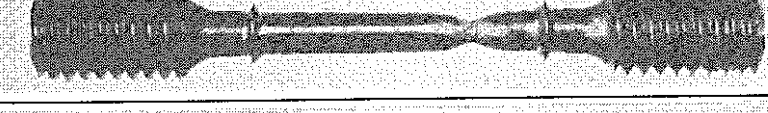
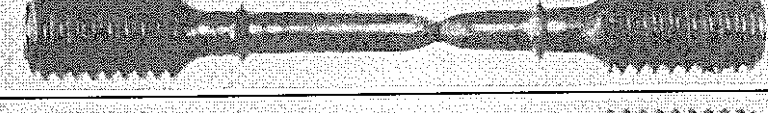
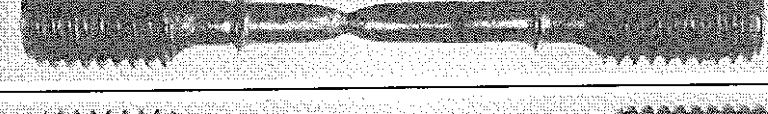
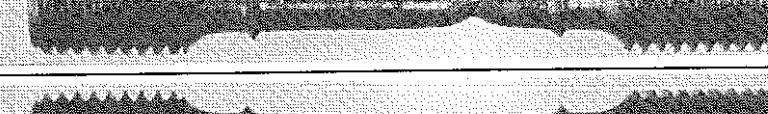
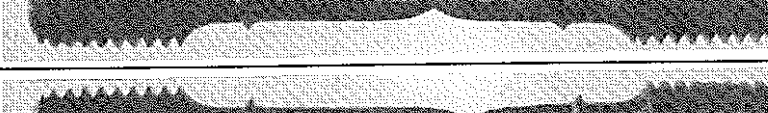
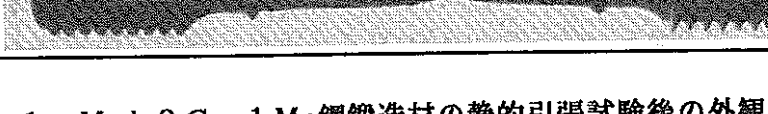
試験温度 (℃)	試験片番号	⑩ 11 12 13 14 15 16 17 18 19 ⑳
RT	L-4	
RT	L-5	
400	L-6	
400	L-7	
450	L-8	
450	L-9	
500	L-10	
500	L-11	
550	L-12	
550	L-13	
600	L-14	
600	L-15	

写真5.3.1 Mod.9 Cr-1 Mo鋼鍛造材の静的引張試験後の外観
 Photo 5.3.1 Appearance after tensile test of Mod.9 Cr-1 Mo forging

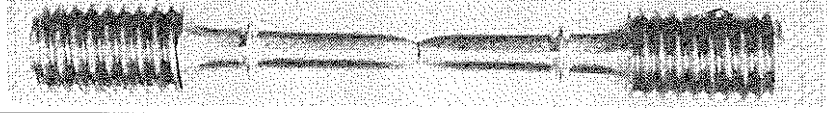
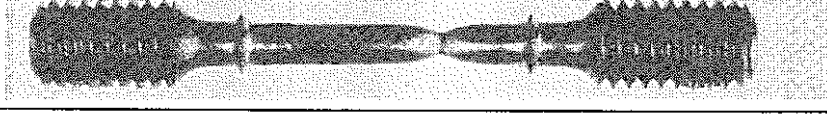
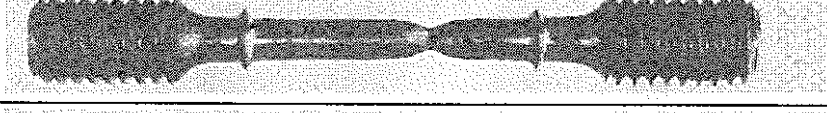
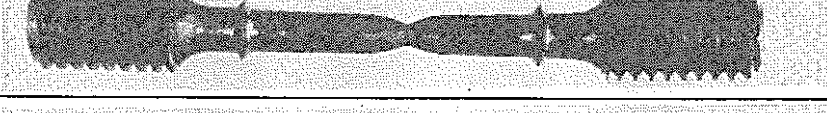
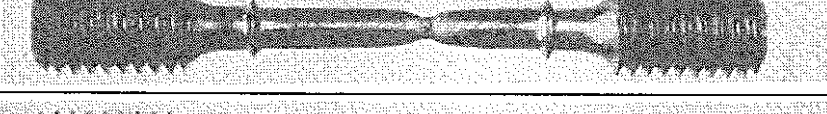
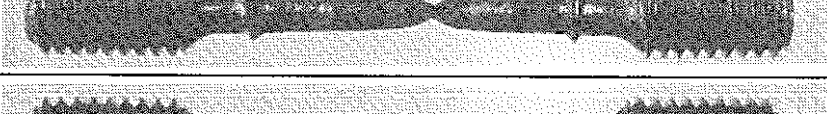
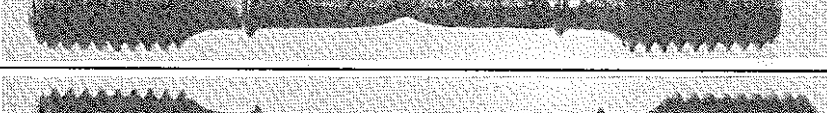
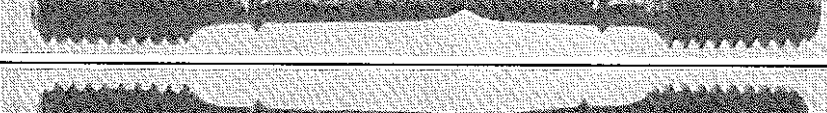
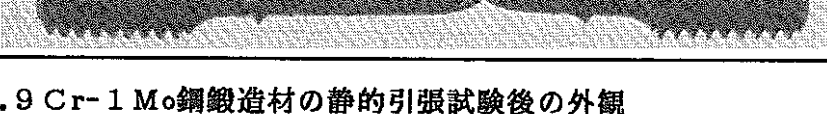
試験温度 (℃)	試験片番号	⑩ 11 12 13 14 15 16 17 18 19 ⑪
RT	M-4	
RT	M-5	
400	M-6	
400	M-7	
450	M-8	
450	M-9	
500	M-10	
500	M-11	
550	M-12	
550	M-13	
600	M-14	
600	M-15	

写真5.3.2 Mod.9 Cr-1 Mo鋼鍛造材の静的引張試験後の外観

Photo 5.3.2 Appearance after tensile test of Mod.9 Cr-1 Mo forging

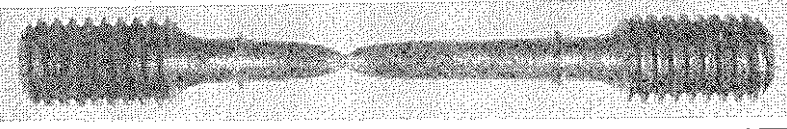
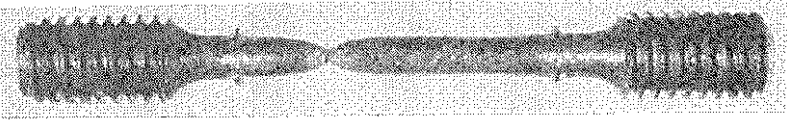
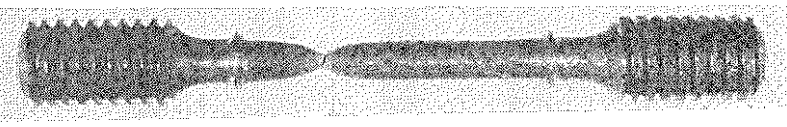
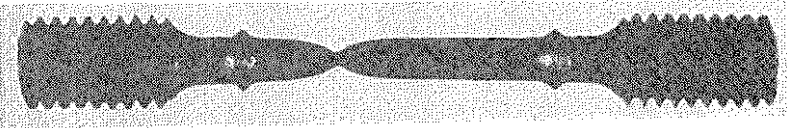
位 置	試験温度 (°C)	試験片番号	応 力 (kgf/mm ²)	破断時間 (h)	0 50 100 
表 面	500	L-1	22	513.0	
		L-2	21	1044.7	
中 央	550	M-3	22	584.6	
		M-4	21	976.4	

写真5.3.3 Mod.9Cr-1Mo 鋼鍛造材のクリープ試験後の外観

Photo 5.3.3 Appearance after creep test of Mod. 9Cr-1Mo forging

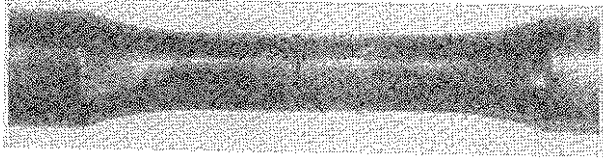
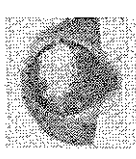
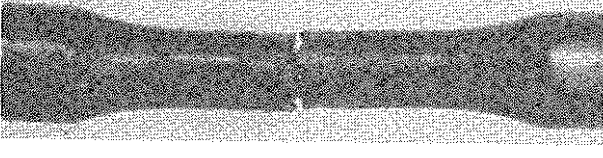
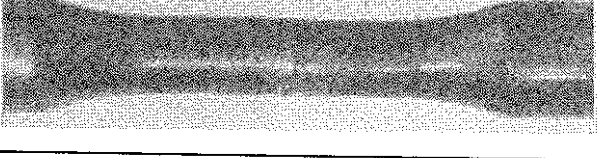
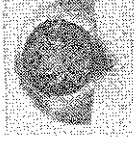
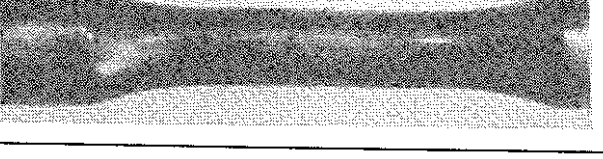
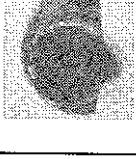
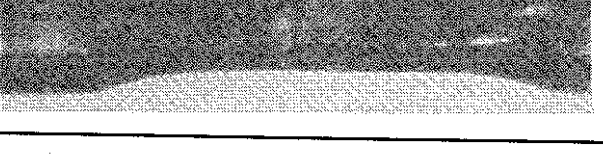
試験温度 (°C)	試験片No.	全ひずみ 範囲 $\Delta \epsilon_t$ (%)	破断寿命 Nf (Cycle)	0 40 80	破 面
550	S-3	1.2	1122		
550	S-1	1.0	1704		
550	S-18	0.7	2545		
550	S-17	0.5	5300		
550	S-2	0.4	9300		

写真5.3.4 疲労試験後の試験片外観（表面近傍）

Photo.5.3.4 Appearance after fatigue tests

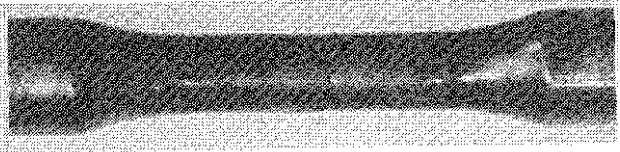
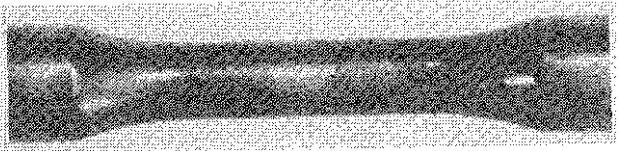
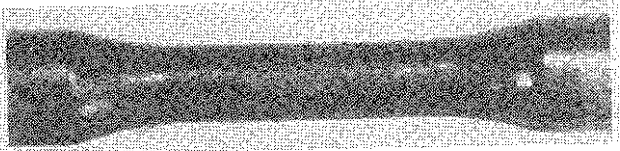
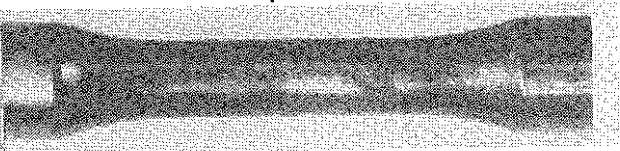
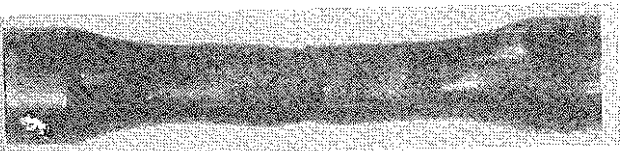
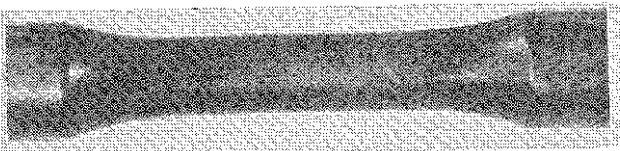
試 験 温 度 (°C)	試験片No	全ひずみ 範 囲 $\Delta \epsilon t(\%)$	破断寿命 Nf (Cycle)	0 40 80	破 面
550	S-9	1.2	1069		
550	S-7	1.0	1330		
550	S-12	0.7	2452		
550	S-11	0.5	7180		
550	S-8	0.4	26815		
550	S-10	0.4	57732		

写真5.3.5 疲労試験後の試験片外観（中央部）

Photo.5.3.5 Appearance after fatigue tests

6. 考 察

6.1 SUS304 溶接継手

6.1.1 クリープ破断特性

図5.1.1にSUS304板とSUS304鍛造材とのTIG溶接継手の試験結果を示したが、溶接継手のクリープ破断強度は500℃、550℃ともに、原型炉材料強度基準値SRは満足している。500℃、550℃ともに約6000時間（得られた試験結果の範囲）より短時間での破断位置は、全て溶接金属部であった。このことは、5.2節に示した308溶接金属のクリープ破断強度と溶接継手のクリープ破断強度とがほぼ同じ値を示している事と一致している。

6.1.2 曲げ場クリープ・疲労特性

(1) ストローク保持中の荷重のリラクセーション特性

定常時 ($N_f/2$ 近傍) の30分間のストローク保持中の荷重のリラクセーション特性を図5.1.6及び5.1.7に示した。図5.1.6 (a)、(b) 及び (c) はそれぞれ500℃ の $\Delta \varepsilon = 1.0\%$ 、 0.7% 及び 0.5% 、図5.1.7 (a)、(b) 及び (c) はそれぞれ550℃の $\Delta \varepsilon = 1.0\%$ 、 0.7% 及び 0.5% の場合である。丸棒軸力変位制御の場合のリラクセーション曲線に比べ本試験片の荷重のリラクセーション量は明らかに小さい。これは図4.3に示した試験装置の図より明かなように試験装置のコンプライアンスが大きいこと及び板厚方向の応力勾配のためと思われる。

これより本試験はシリングストロークの一定制御試験であるが、試験部から見ると荷重制御とひずみ制御の中間的な制御になっている。550℃と500℃の特性と比較すると容易に推定されるように550℃のリラクセーション量が大きいことが分る。

(2) ストローク保持中のクリープ変形の挙動

荷重のリラクセーション挙動から分るように本試験は荷重制御とひずみ制御の中間的制御である。従ってストローク保持中にひずみが増加することが予想される。

図6.1及び図6.2に $\Delta \epsilon = 1.0\%$ 、 $T = 500^{\circ}\text{C}$ 及び 550°C のストローク保持中のひずみの変化挙動を示した。30分間のストローク保持中のクリープひずみは 500°C 及び 550°C でそれぞれ約 0.008% 及び 0.014% で制御値(0.5%)の約 1.6% 及び 3% となっており、 500°C でのクリープひずみは 550°C の約 $1/2$ となっている。

(3) 繰返し応力-ひずみの関係

曲げ応力下では塑性領域での応力値を測定するのは非常に難しい。そこで応力-ひずみ関係の特徴を考察するため便宜上応力値としては曲げモーメントから弾性解析で計算される以下に示す公称曲げ応力 σ_N を使用した。

$$\begin{aligned}\sigma &= M / Z & M &= P \cdot L \\ Z &= 1 / 6 \cdot t^2 \cdot W\end{aligned}$$

ここに P ；負荷荷重、 L ($= 300$)；試験片板厚中央から荷重線までの垂直距離、 t ；板厚、 W ；板幅。

公称曲げ応力振幅 $\Delta \sigma / 2$ とひずみ振幅 $\Delta \epsilon / 2$ の関係を図6.3に示した。保持時間 t_H の $\Delta \sigma / 2 - \Delta \epsilon / 2$ 関係への影響は 500°C において若干現われるようである。 550°C では t_H の影響はほとんど現われないようである。

(4) 溶接金属部近傍のひずみ分布

曲げクリープ疲労試験を中断しマイクロき裂の分布をレプリカ法により観察した結果を図6.4に示した。図からマイクロき裂は一様に発生するのではなくある領域に選択的に発生することが分った。そこで溶接近傍のひずみ分布を測定しその原因を明らかにした。室温でのひずみ分布の計測結果を図6.5に示した。溶接金属内でもひずみ分布があり、最大ひずみの発生位置でき裂が多く発生すると思われるので新たに $GL = 2\text{mm}$ の変位センサーを開発し、高温試験中の局部ひずみ $\Delta \epsilon_{\text{local}}$ の挙動を計測した。その結果を図6.6 (a)に示した。ま

た参考のため前年度実施した $t_H = 0$ の場合の例を図 6.6 (b) に示した。 $t_H = 0$ の場合、 $\Delta \varepsilon_{local}$ は繰返し初期においては制御ひずみ $\Delta \varepsilon_{GL}$ よりかなり小さい (1.0 % に対して 0.84 %) が繰返しが進行するに伴い $N = 100$ 回で約 1.08 % になり、制御値より大きいひずみが繰返されていることが分る。その後この値は $N = 600$ 回程度まで安定的に繰返され、その後徐々に大きくなり $N = 1000$ 回のころから加速度的に増大する。他の実験からき裂を狭む局部ひずみの挙動はほぼこれと同じ挙動となり、 $GL = 2 \text{ mm}$ にき裂が発生したことが容量に推察される。き裂の大きさは、上記実験の類推から $N = 700$ 回で表面長さで $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$ (深さで $0.05 \sim 0.15 \text{ mm}$)、 $N = 1100$ 回で 1 mm 程度のき裂が発生していると考えられる。 $t_H = 30$ 分の図 6.6 (a) の場合、 $\Delta \varepsilon_{local}$ は徐々に増大し安定時に繰返される範囲は $N \approx 150 \sim 300$ と狭く、繰返し加工軟化が終了した時点からまもなくき裂が発生したことが推察される。その後き裂はほぼ一定速度で進展する様子がうかがえる。この場合 $N_f = 1680$ であり、全寿命の約 80 % がき裂進展過程によるものであり、破壊力学的継手強度評価法も今後検討する価値のあるテーマである。

(5) 曲げ・クリープ・疲労強度と軸力クリープ・疲労強度の比較

曲げクリープ・疲労試験結果を軸力のクリープ・疲労強度と比較して図 6.7 に示した。図中 * を付けたデータは 60 年度に得られたデータを $\Delta \sigma / 2$ から図 6.3 を利用して $\Delta \varepsilon$ を推定してプロットしたものである。保持時間 $t_H = 0$ の場合には 500°C と 550°C では有意な強度差はなく 550°C の軸力強度と大差がない。 $t_H = 30$ 分の強度は試験温度により明らかな差が見られる。すなわち 550°C の強度は 500°C の強度に比べ明らかに小さい。また軸力強度との差はクリープ効果が大きくなると推定される 550°C において著しく、曲げクリープ・疲労寿命は約 2 倍となることが明らかとなった。しかし、板曲げクリープ・疲労試験片の寿命の定義あるいは試験応力にさらされる領域の大きさ等を考慮した考察が必要であり、今後さらに詳細な検討を継続する必要がある。

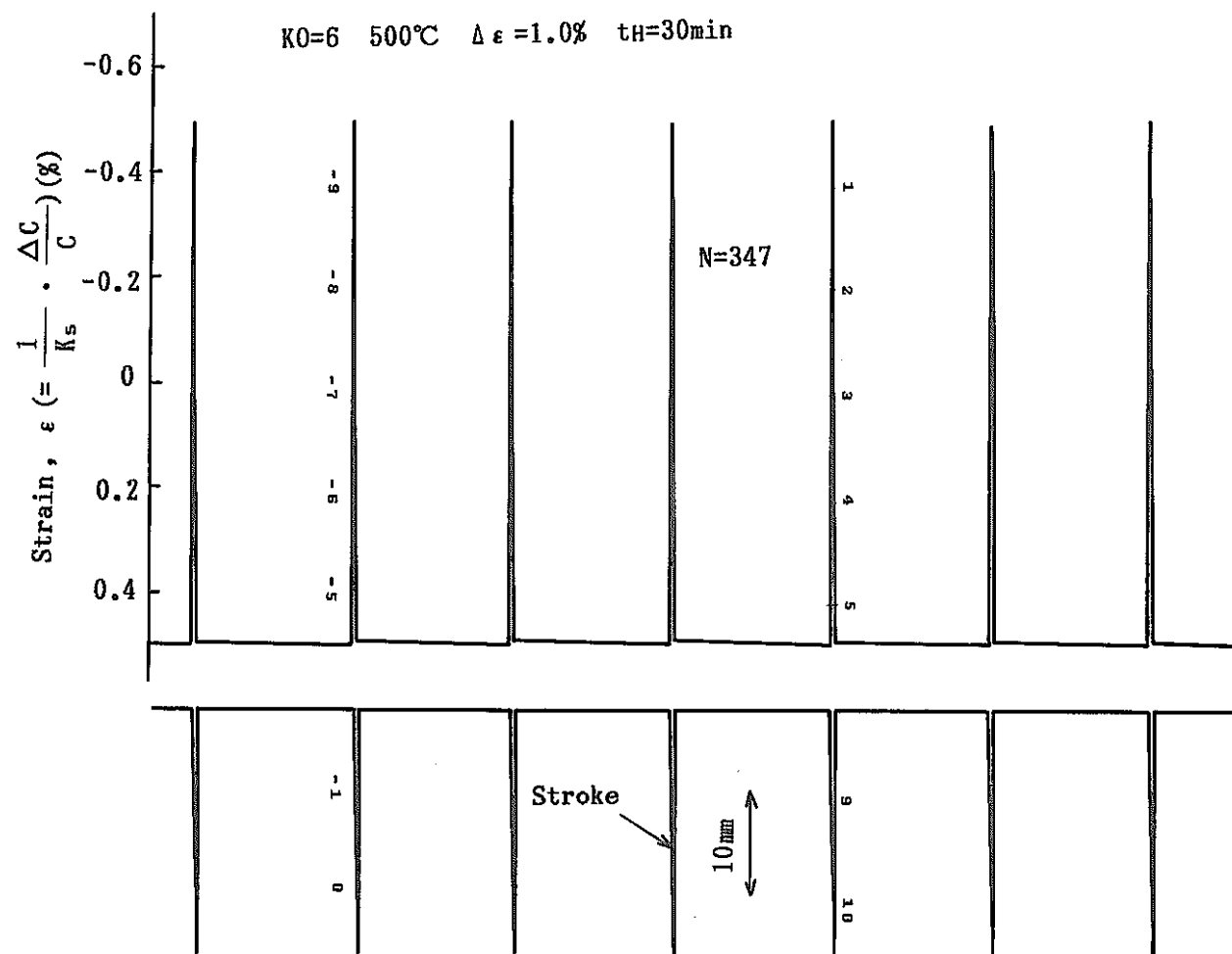


図6.1 ストローク保持中の継手部のひずみの挙動 (500℃)

Fig.6.1 Strain behavior on welded joint during stroke-holding (500℃)

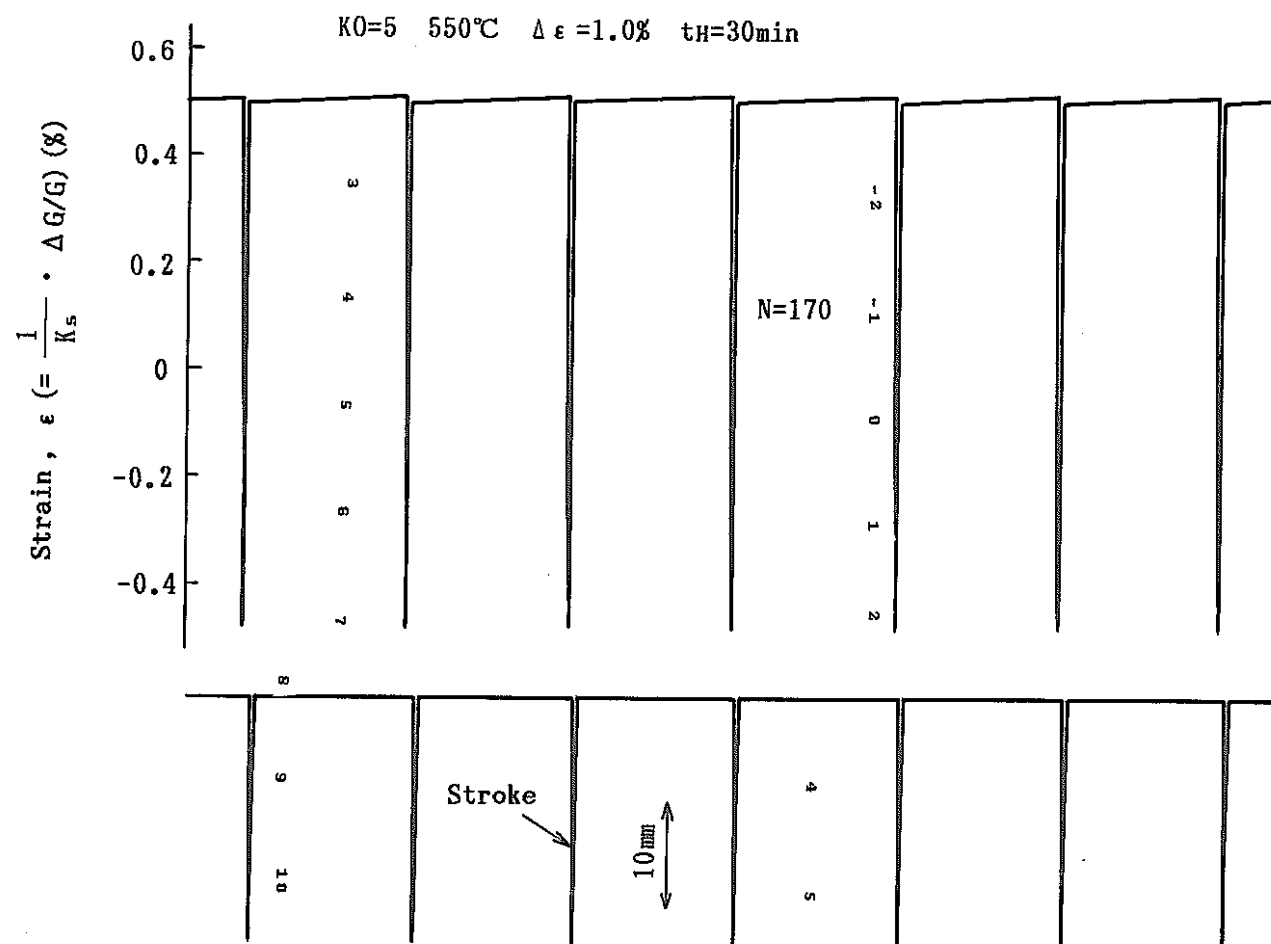


図6.2 ストローク保持中の継手部のひずみの挙動 (550°C)

Fig.6.2 Strain behavior on welded joint during stroke-holding (550°C)

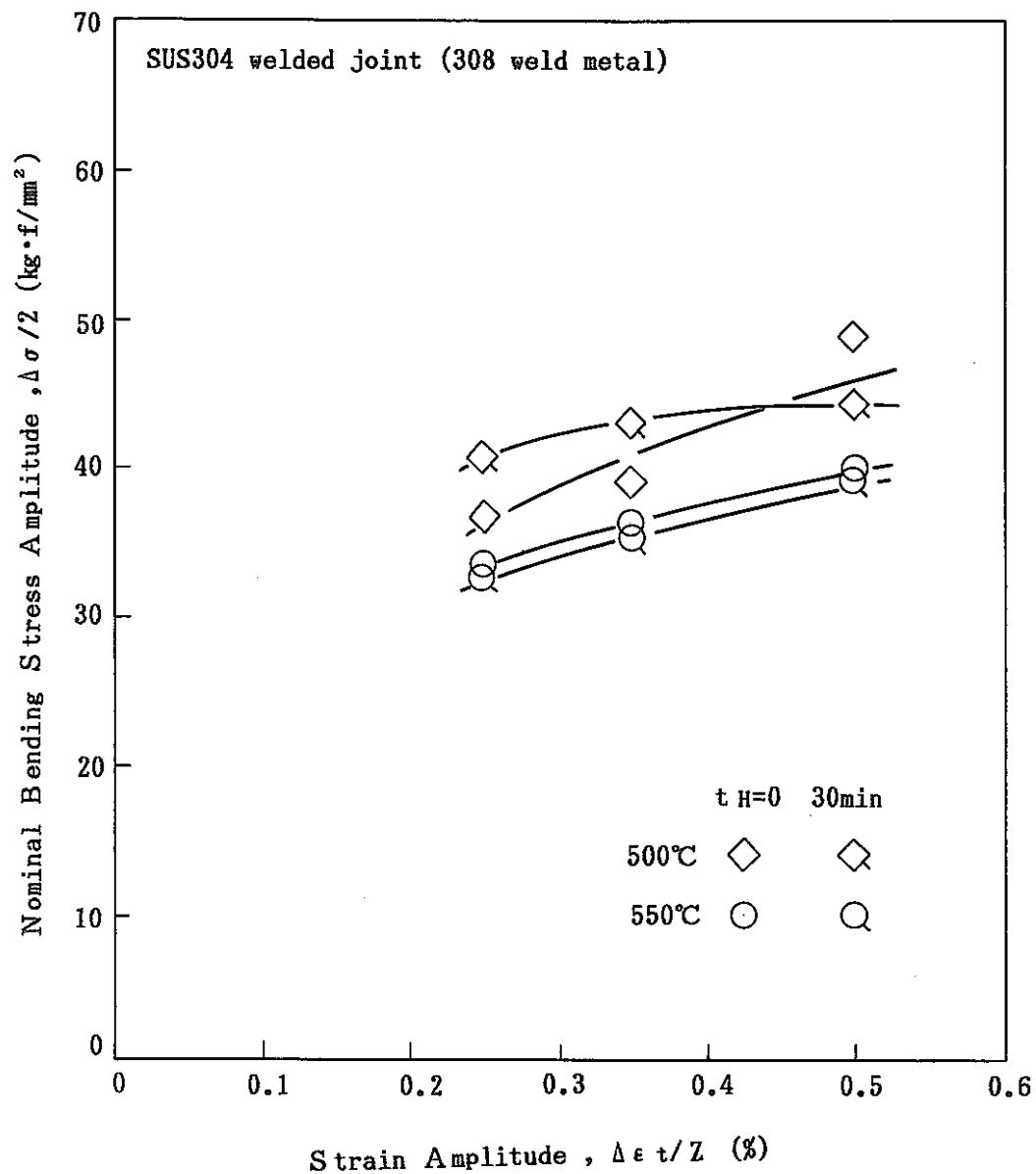


図6.3 曲げ応力下の繰返し応力-ひずみの関係

Fig.6.3 Cyclic stress-strain relation under cyclic bending loading

K0-6, 500°C , $\Delta \epsilon = 1.0\%$, $t_H = 30\text{min}$, $N = 820$

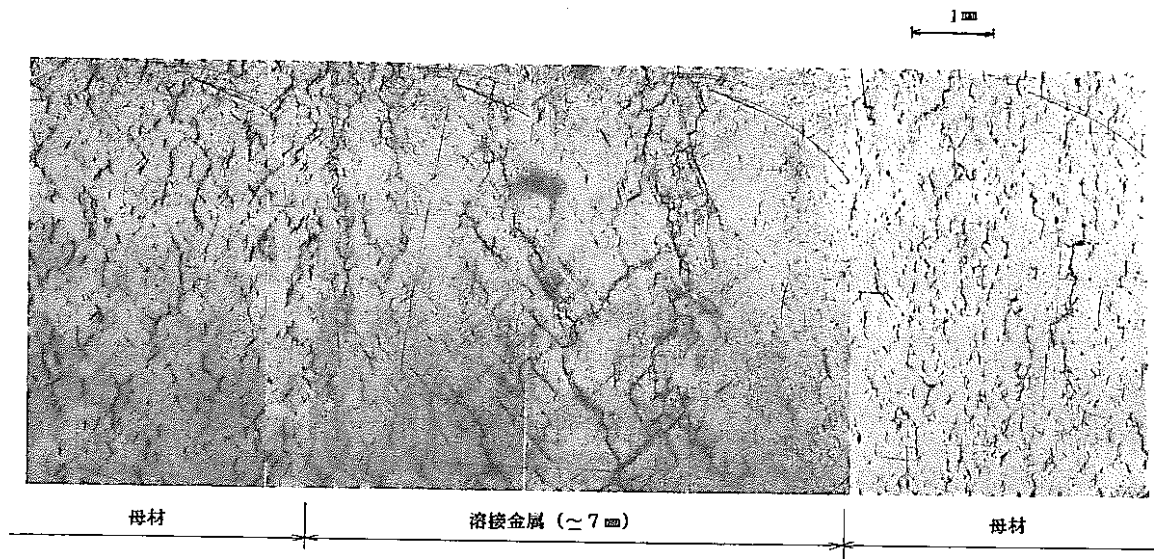


図 6.4 曲げ応力場のクリープ疲労き裂発生状況
Fig.6.4 Appearance of creep-fatigue crack
on welded joint under bending stress

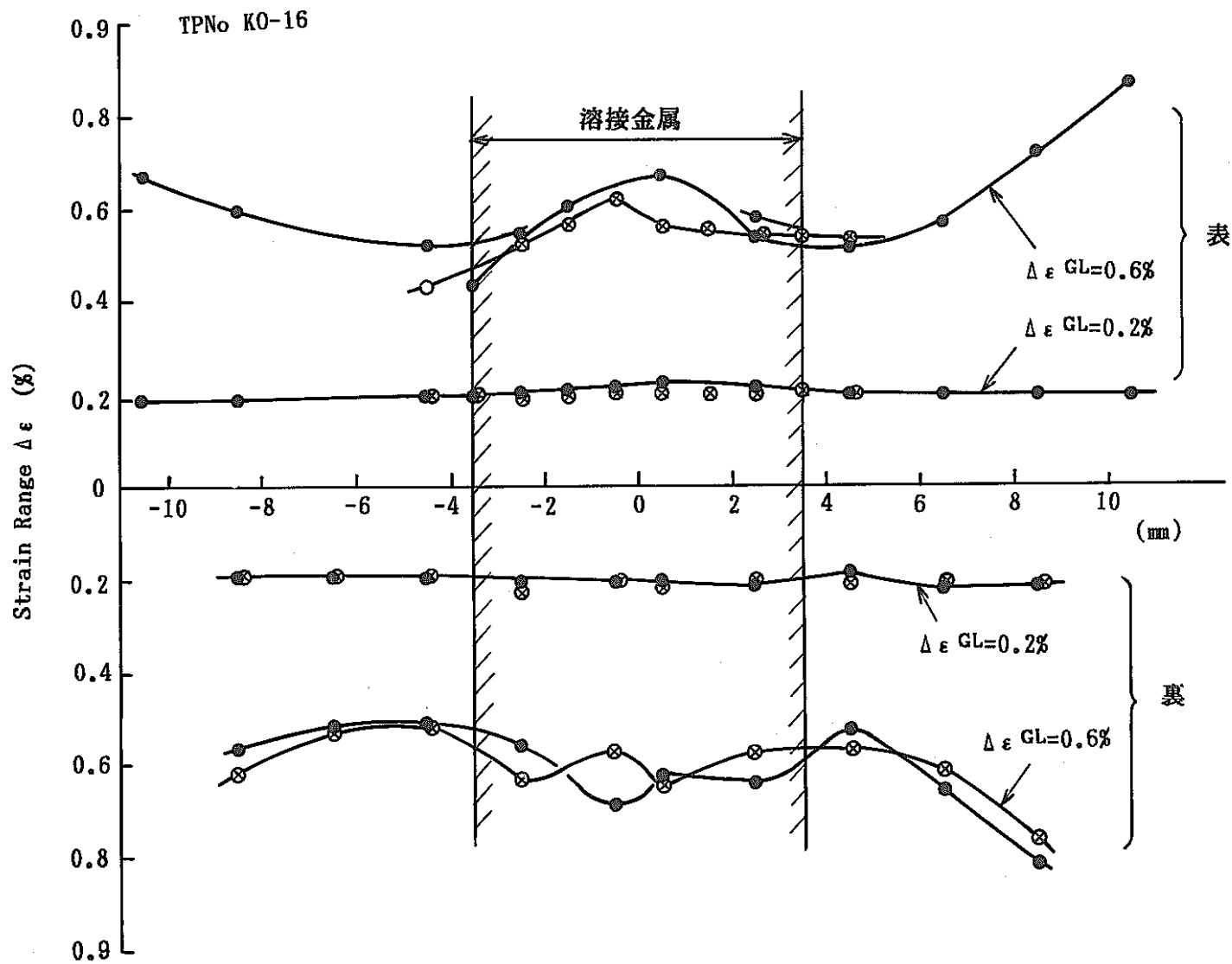


図 6.5 (a) 溶接継手の縦方向ひずみ分布 (TPNO KO-16)
 Fig.6.5(a) Transverse distribution of longitudinal strain of welded joint (TPNo K0-16)

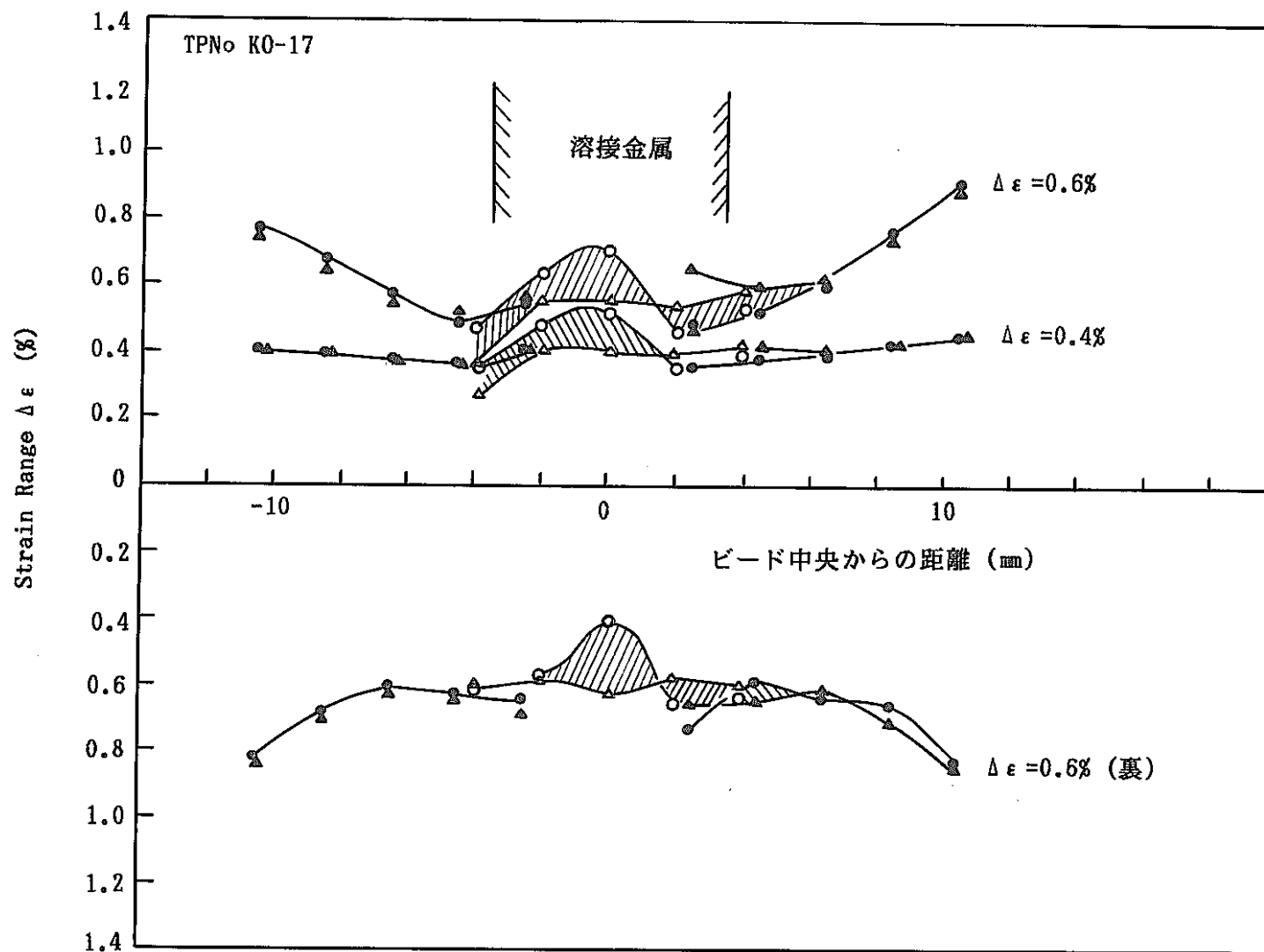


図6.5(b) 継手の縦方向ひずみ分布 (TPN0 K0-17)

Fig.6.5(b) Transverse distribution of longitudinal strain of welded joint (TPN0 K0-17)

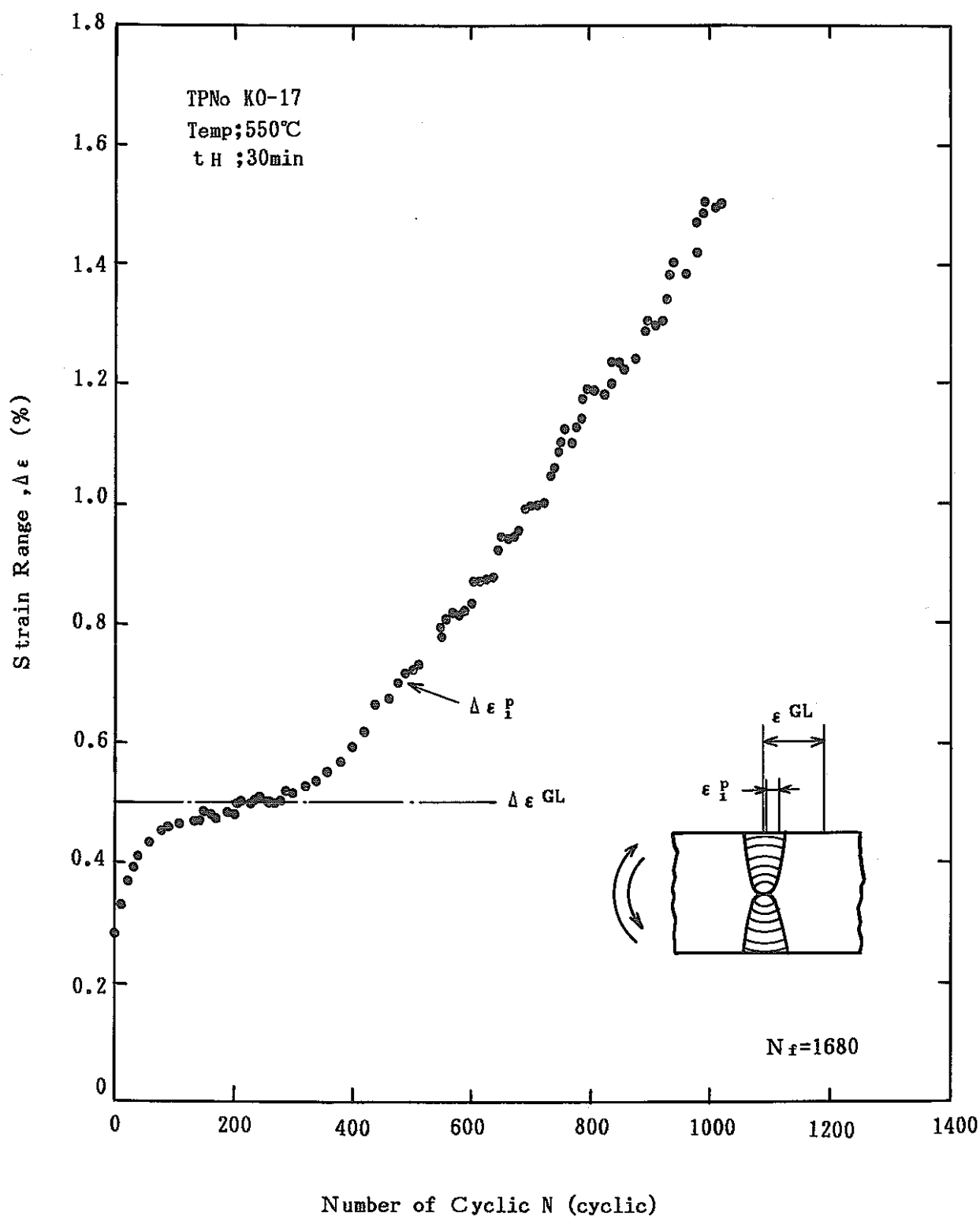


図6.6(a) 溶接継手部の局部ひずみ範囲の繰返し特性(横継手, $t_H=30$ 分)
Fig.6.6(a) Cyclic behavior of local strain range on welded joint
(lateral weld joint, $t_H=30$ min)

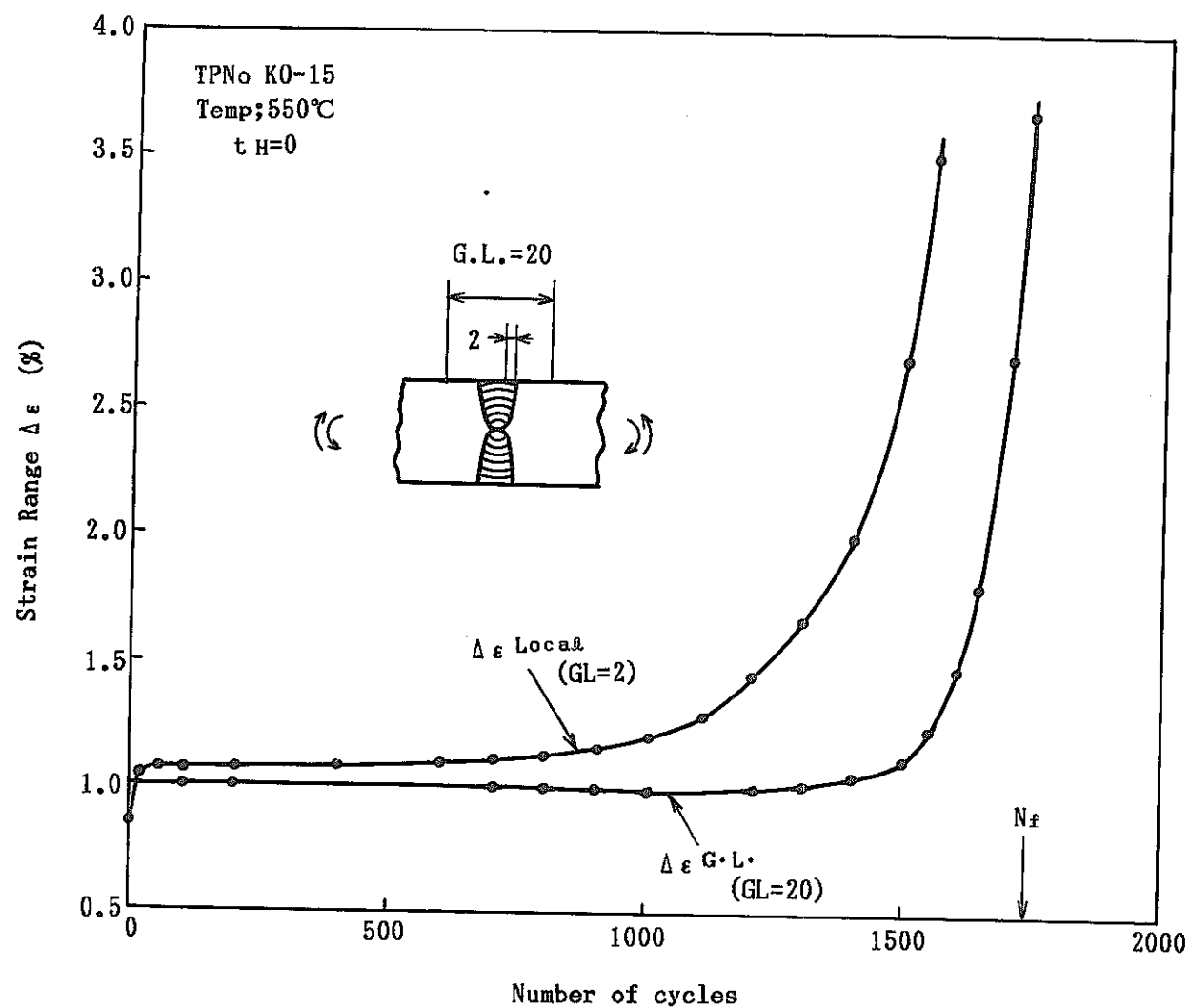


図 6.6 (b) 溶接金属内のひずみ範囲の挙動

Fig.6.6(b) Cyclic behavior of local strain range on welded joint

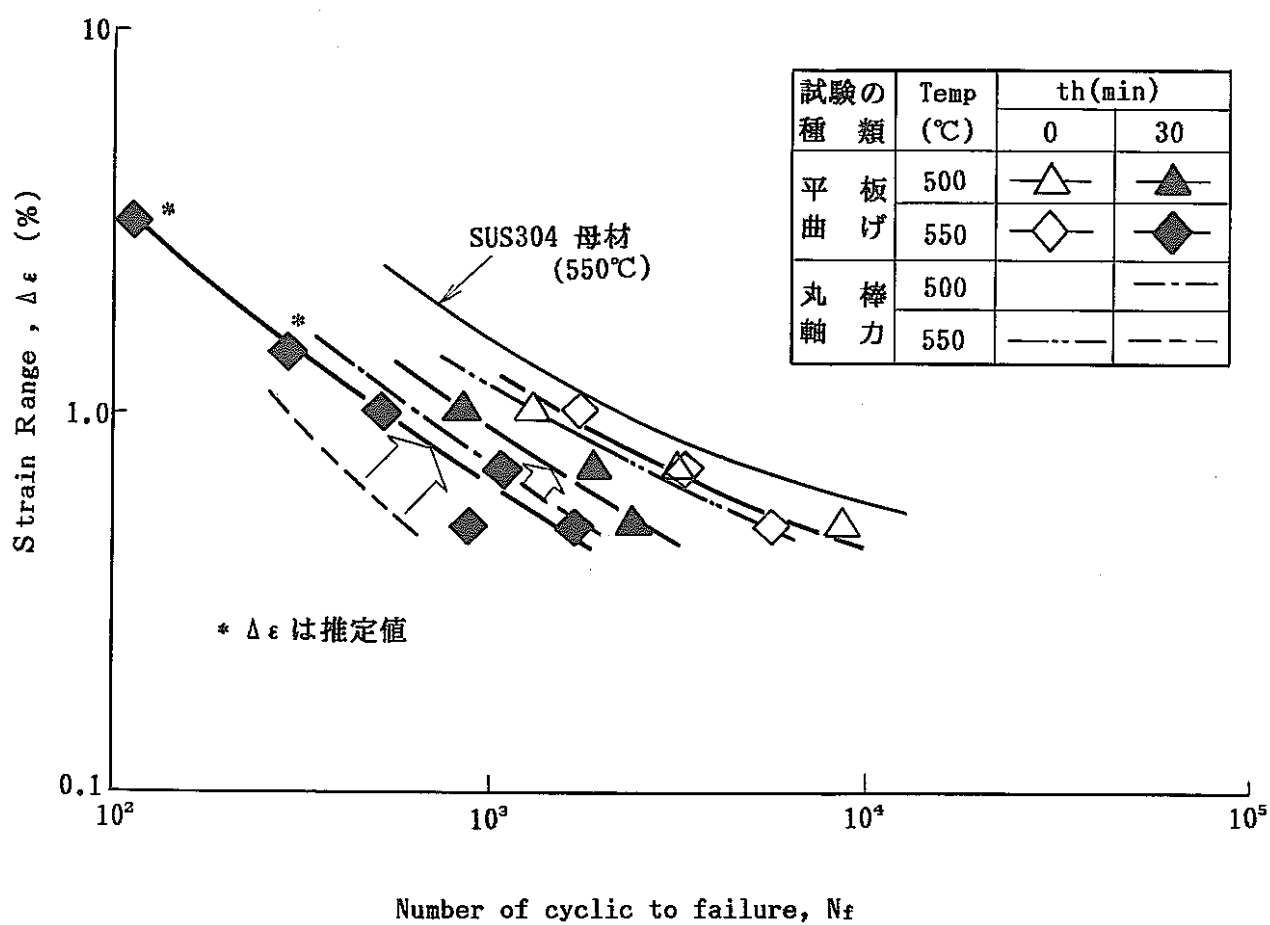


図6.7 溶接継手の曲げクリープ疲労強度

Fig.6.7 Creep-fatigue strength of welded joint under bending load

6.2 Mod.9 Cr-1Mo 鋼鍛造材

6.2.1 引張特性

図5.3.1~図5.3.3の引張強度、0.2%耐力、伸び、絞りと温度の関係線図には、ORNLデータの最小値、平均値をも記した。また引張強度、0.2%耐力には、動燃事業団の暫定値をも記した。これらと本試験結果を比較すると、引張強度、0.2%耐力は両者ともORNL dataの最小値及び暫定値とほぼ同等の値を示している。一方、伸び、絞りはORNLデータの平均値に近い値を示している。しかしながら、ORNLデータ及び暫定値設定データは、管や板等のデータが主対象で、本試験にて対象とした550mm厚さの様な厚肉部材は含まれていないと考えられ、この点を考慮した検討を今後行う事が必要と思われる。

図5.3.1~図5.3.3には、FSG小委員会による本試験にて対象とした肉厚(550mm)と同じ肉厚の鍛造材の結果をも記した。本試験結果とFSG小委員会との結果は、強度、伸び・絞りとも同等の値を示した。

以上の点より、550mm厚さの鍛造材の強度は、従来の板、管より低目の値となり、板、管のデータベースの下限近傍にあるものと思われる。

また、550mm厚さの表面近傍と中央部とでは、強度、延性(伸び、絞り)とも全く差は見られず、肉厚方向に均一な特性を有していることが推察される。

6.2.2 クリープ特性

厚さ550mmの厚肉鍛造材において、肉厚中央部と表面でのクリープ破断特性に有意差は見られなかった。これは、引張強度特性にも現われており、Mod.9 Cr-1Moは550mmと極厚になっても、厚さ方向の強度差の無い製品を作りうる材料である事を示している。

また、クリープ破断強度については、現在示されている暫定値を上まわる値を示している。一方、この暫定値が板や管等の肉厚の小さいものをベースに設定されたものと考えたと今回の550mmの厚肉鍛造材の強度は、薄肉材と比べ、低目になる事が予想される。この点については、熱処理条件等の材料製造方法の検討等を今後行う必要がある。

6.2.3 疲 勞 特 性

(1) 繰返し応力範囲の特性

Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材は繰返しに伴い繰返し軟化挙動を示すことが図5.3.12から明らかになった。この挙動はひずみ範囲 $\Delta \epsilon$ の値により異なるため定量的なことはいえないが、応力集中部でのひずみ集中などを評価する場合に重要な要因となるため今後各温度での切欠き部のひずみ挙動試験及びクリープ・疲労試験等を系統立てて実施する必要があると思われる。

(2) 低サイクル疲労強度

鍛造材の外表面及び中央部から採取した試験片の低サイクル疲労強度と他機関で実施した板材の強度と比較して図5.3.13に示した。図より板材と鍛造材との間に有意な強度差は認められなかった。

7. 結 言

- 1) SUS308全溶接金属とSUS304板-鍛造材溶接継手のクリープ破断強度は同等であり、継手の破断位置は全て溶接金属部であった。
- 2) SUS304全溶接金属とSUS304板-鍛造材溶接継手の応力-破断時間線図の勾配は同じであり、その勾配は母材よりは小さい。
即ち、短時間側では母材のクリープ破断強度を下まわるが、長時間に移行するにつれて母材値に近づく傾向を示す。現状でのデータを外挿すると $2 \sim 3 \times 10^4$ 時間程度で母材と溶接継手のクリープ破断強度は同等となりそうである。
- 3) 軸力応力場と曲げ応力場での連続サイクル疲労強度の差はほとんどない。しかし、30分保持のクリープ疲労強度に関しては曲げ応力場の方が寿命が増大する。
- 4) 550℃、30分保持のクリープ疲労寿命は、軸力及び曲げ応力場で連続サイクル寿命のそれぞれ18%及び28%である。
- 5) 曲げ応力場では500℃、30分保持のクリープ疲労寿命は550℃の場合に比べかなり大きく、連続サイクル疲労寿命に近い値となるようである。
- 6) Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造材の引張、クリープ及び疲労強度は、母材の表面と中央部で有意差はなく動燃事業団“材料強度基準等（暫定値）”を満足する。
- 7) Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造母材の引張試験データは、ORNLデータのミニマム値を上まわっている。
- 8) Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造母材の引張試験データは、高温度（500，550℃）でORNL平均値と同等である。
- 9) Mod.9Cr-1Mo鋼鍛造母材の550℃疲労強度は板材の強度と同等である。

8. 参 考 文 献

- 1) 動力炉・核燃料開発事業団：高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針：
PNC N241 84-08 (1) (昭和59-9)
- 2) “ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec.Ⅲ, Case N47” ASME, 1979
- 3) 動力炉・核燃料開発事業団「高速原型炉用候補構造材料試験昭和52年成果報告書
(構造材料試験77-2~4, 77-6~11)」PNC SN241 79-33, 1979年11月
- 4) 動力炉・核燃料開発事業団「高速増殖炉用構造材料試験昭和53年度成果報告書
(構造材料試験78-2~4, 78-6~10)」PNC SN241 80-2, 昭和55年3月
- 5) 動力炉・核燃料開発事業団「高速増殖炉用構造材料試験昭和54年度成果報告書
(構造材料試験79-1~8)」PNC SN241 81-06, 昭和56年3月
- 6) (株)日立製作所「SUS316の高温強度試験(構造材料試験77-3)」PNC SJ202 78-28,
1978年9月
- 7) (株)日立製作所「SUS316, 304鋼の母材及び溶接継手の高温強度試験(構造材料試験
78-3)」PNC SJ202 79-25, 1979年9月
1978年9月
- 8) (株)日立製作所「SUS316, 304鋼の高温強度試験(構造材料試験79-2)」PNC SJ202
80-27, 1980年8月
- 9) 高温構造安全技術研究組合「高温構造変形挙動試験」昭和54年度動力炉・核燃料開発
事業団委託研究報告書, 昭和55年8月
- 10) 動力炉・核燃料開発事業団「高速原型炉高温構造設計方針・材料強度基準等」
PNC N241 84-08 (1) (昭和59-9)
- 11) “ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec.Ⅲ” ASME, 1971
- 12) (株)日立製作所「SUS321伝熱管溶接継手の高温強度試験(構造材料試験81-2)」
PNC SJ202 82-16, 1982年3月
- 13) (株)日立製作所「SUS321伝熱管及び鍛造材並びにインコネル棒材の高温強度試験
(構造材料試験, 83-2)」PNC SJ202 84-14, 1984年9月
- 14) 川崎重工(株)「SUS321鋼鍛造材の高温強度試験及び2 1/4Cr-1Mo鋼のクリープ・ク
リープ疲労試験(構造材料試験 80-4)」, PNC SJ213 81-08, 1981年7月

15) (株)日立製作所「SUS321伝熱管及び鍛造材の高温強度試験(構造材料試験,84-2)」

PNC SJ202 85-02,1985年4月

16) (株)日立製作所「SUS304溶接継手の高温強度試験」PNC SJ2124 86-004,1986年2月

17) (株)日立製作所「SUS304溶接継手の高温強度試験(Ⅱ)」

PNC SJ2124 87-002,1987年1月

謝 辞

この試験研究の実施に当っては、動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター機器構造開発部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。