

本資料は1998年 9 月28 日付けで
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

分置

SUS321鍛造材及びインコネル母材の 高温強度試験

(構造材料試験 82-2)



1983年 4 月

株式会社 日立製作所

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)



配 布 限 定
T&J 202 83-04
1983年 4月

SUS321 鍛造材及びインコネル母材の高温強度試験*

(構造材料試験 82-2)

(代表研究者)

福田嘉男** , 桐原誠信***, 祐川正之***

住川雅晴****, 中川幸雄****

要 旨

高速原型炉の設計に必要な材料データを得る目的で、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS321 及びインコネル718 の高温強度試験を実施した。

供試材は次の4種である。SUS321 鍛造材 (350 t) , SUS321 伝熱管 (φ 31.8 × 3.5 t) 母材及び予ひずみ材、及びインコネル718 棒材 (φ 100) である。

SUS321 鍛造材はクリープ試験と低サイクル疲労試験、SUS321 伝熱管 (φ 31.8 × 3.5 t) 母材はクリープ試験と低サイクル疲労試験を、SUS321 伝熱管予ひずみ材は引張試験と低サイクル試験を実施した。また、インコネル718 棒材は高サイクル疲労試験を実施した。

SUS321 伝熱管予ひずみ材の引張試験の結果、RT~600℃の温度範囲にわたっ

* 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: 570D028

事業団担当者: 加納茂機 (高速増殖炉開発本部構造材料Gr)

** (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

て、0.2%耐力及び引張強さ共に動燃事業団“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。

SUS321鍛造材の500℃及び550℃のクリープ試験の結果、クリープ強度が原型炉の許容応力を満足する。

SUS321伝熱管母材の550℃のクリープ試験の結果も、クリープ強度が原型炉の許容応力を満足する。

430℃、500℃及び550℃でのSUS321伝熱管母材及び500℃、550℃及び600℃でのSUS321鍛造材の低サイクル疲労試験結果、伝熱管材は鍛造材に比較して若干強度が小さい。またひずみ保持による疲労寿命の減少は550℃で認められるが、500℃以下ではほとんど現われない。いずれの強度も原型炉及びASME Code Case N-47の疲労設計線図に比べ十分安全側にあることが明らかとなった。



NOT FOR PUBLICATION

T&J 202 83-04

April, 1983

Strength Tests of SUS 321 Stainless Steel Forging
and Inconel Bar at Elevated Temperature*

Yoshio Fukuda**, Seishin Kirihara***, Masayuki Sukekawa***

Yukio Nakagawa****, Masaharu Sumikawa****

Abstract

Strength tests of SUS321 stainless steel and Inconel 718 at elevated temperature were carried out for the purpose of getting data of materials needed to design for Prototype Fast Breeder Reactor.

Examined materials were four kinds. Specifications of these materials were as follows.

- (1) SUS321 forging (350t)
- (2) SUS321 heat exchanger tube (ϕ 31.8 \times 3.5t)
- (3) SUS321 pre-strained heat exchanger tube (ϕ 31.8 \times 3.5t)
- (4) Inconel 718 bar (ϕ 100)

Kind of test were as follows.

* Work performed by Hitachi Ltd. under contract with Power Reactor and Nucleat Fuer Development Corporation.

PNC Liaison: Sigeki Kanou

(Structural Material Group Fast Breeder Reactor Development
Project)

** Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd.

*** Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.

**** Hitachi Works, Hitachi Ltd.

Tensile test on (3)

Creep test on (1) and(2)

Low-cycle fatigue test on (1),(2) and (3)

High-cycle fatigue test on (4)

Results of tensile test on SUS321 pre-strained heat exchanger tube at RT~600°C show taht 0.2% offset yield strength and ultimate tensile strength are higher compared with Material Strength Standaed of PNC.

Results of creep test on SUS321 forging at 500°C and 550°C and SUS321 heat exchanger tube at 550°C show that creep strengths are a little higher compared with Material Strength Standard of PNC.

Results of low-cycle fatugue tests on SUS321 heat exchanger tube at 430°C, 500°C and 550°C, SUS321 heat exchager tube pre-strained at 500°C and SUS321 forging at 500°C, 550°C and 600°C, show that low-cycle fatigue strength of SUS321 heat exchanger tube are a little lower than that of SUS321 forging, and low-cycle fatigue strength of pre-strained tube (3) are equal to taht of virgin tube (2).

Strain hold time has an effect on fatigue strength and reduces fatigue lines of SUS321 heat exchanger tube at 550°C but not below-500°C.

These fatigue strength of the matelial (1),(2) and (3) are higher comperad with Material Strength Standards, PNC and ASME code case N47.

SUS321 鍛造材及びインコネル母材の高温強度試験

(構造材料試験 82-2)

株式会社 日立製作所

目 次

要 旨	i
Abstract	iii
表 リ ス ト	vii
図 リ ス ト	xi
写真リスト	xix
1. 諸 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	5
3.1 供試材の仕様	5
4. 試験方法	22
4.1 試験片採取方法	22
4.2 試験片形状寸法	22
4.3 試験機仕様	23
4.4 試験方法	23
4.4.1 引張試験	23
4.4.2 クリープ試験	24
4.4.3 低サイクル疲労試験	24
4.4.4 高サイクル疲労試験	24

5. 試験結果	36
5.1 SUS321伝熱管 ($\phi 31.8 \times 3.5$ t) 予加工材	36
5.1.1 引張試験結果	36
5.1.2 低サイクル疲労試験結果	36
5.2 SUS321伝熱管 ($\phi 31.8 \times 3.5$ t) 母材	37
5.2.1 クリープ試験結果	37
5.3 SUS321鍛造材 (350 t)	37
5.3.1 クリープ試験結果	37
5.3.2 低サイクル疲労試験結果	38
5.4 インコネル718棒材 ($\phi 100$)	38
5.4.1 高サイクル疲労試験結果	38
6. 考 察	97
6.1 引張特性	97
6.2 クリープ特性	99
6.3 低サイクル疲労特性	100
7. 結 言	132
8. 参考文献	133
9. 謝 辞	134

表 リ ス ト

表 2.1	試験研究の範囲一覧表	4
Table.2.1	Contents of present tests	4
表 3.1	S U S 3 2 1 伝熱管の製造寸法	5
Table.3.1	Manufacturing sizes of SUS321 tubes	5
表 3.2	S U S 3 2 1 伝熱管 (φ 3 1.8 × 3.5 t) の製造仕様概要	7
Table.3.2	Summary of manufacturing specification for SUS321 tube (φ 3 1.8 × 3.5 t)	7
表 3.3	S U S 3 2 1 鍛造材の製造寸法	5
Table.3.3	Manufacturing sizzs of SUS321 forging	5
表 3.4	S U S 3 2 1 鍛造材の製造仕様概要	9
Table.3.4	Snmmary of manufacturing specifications for SUS321 forging	9
表 3.5	インコネル 7 1 8 棒材の製造寸法	6
Table.3.5	Manufacturing sizes of In 718 bar steel	6
表 3.6	インコネル 7 1 8 棒材の製造仕様概要	10
Table.3.6	Summary of manufacturing specifications for In 718 bar steel	10
表 3.7	S U S 3 2 1 伝熱管 (φ 3 1.8 × 3.5 t) の製造工程	13
Table.3.7	Manufacturing process for SUS321 tube (φ 31.8×3.5 t)	13
表 3.8	S U S 3 2 1 伝熱管 (φ 3 1.8 × 3.5 t) の確性試験結果	14
Table.3.8	Certification teat results of SUS321 tube (φ 3 1.8 × 3.5 t)	14
表 3.9	S U S 3 2 1 伝熱管の試験・検査結果一覧表	15
Table.3.9	Certifird test and examination results of SUS321 tube	15
表 3.10	S U S 3 2 1 鍛造材の製造工程	16
Table.3.10	Manufacutring process of SUS321 forging	16

表 3.1.1	SUS321 鍛造材の確性試験結果	17
Table.3.11	Cerification test results of SUS321 forging	17
表 3.1.2	インコネル 718 棒材の製造工程	18
Table.3.12	Manufacturing process of In 718 bar steel	18
表 3.1.3	インコネル 718 棒材の確性試験結果	19
Table.3.13	Cerification test results of In 718 bar steel	19
表 4.1	引張試験機の仕様	32
Table.4.1	Specification of tensile testing machine	32
表 4.2	クリープ試験機の仕様	33
Table.4.2	Specification of creep testing machine	33
表 4.3	低サイクル疲労試験機の仕様	34
Table.4.3	Specification of low-cycle fatigue testing machine	34
表 4.4	高サイクル疲労試験機の仕様	35
Table.4.4	Specification of high-cycle fatigue testing machine	35
表 5.1	高温引張試験結果 (SUS321 伝熱管、3% 予ひずみ材)	39
Table.5.1	Results of high temperature tensile test (SUS321 3% pre-strained tube)	39
表 5.2	高温引張試験結果 (SUS321 伝熱管、5% 予ひずみ材)	40
Table.5.2	Results of high temperature tensile test (SUS321 5% pre-strained tube)	40
表 5.3	真応力と真ひずみの関係 (SUS321 伝熱管、3% 予ひずみ材)	41
Table.5.3	True stress vs. True strain (SUS321 3% pre-strained tube)	41
表 5.4	真応力と真ひずみの関係 (SUS321 伝熱管、3% 予ひずみ材)	42
Table.5.4	True stress vs. True strain (SUS321 3% pre-strained tube)	42

表 5.5	真応力と真ひずみの関係 (SUS321 伝熱管、5%予ひずみ材)	43
Table.5.5	True stress vs. True strain (SUS321 5% pre-strained tube)	43
表 5.6	真応力と真ひずみの関係 (SUS321 伝熱管、5%予ひずみ材)	44
Table.5.6	True stress vs. True strain (SUS321 5% pre-strained tube)	44
表 5.7	SUS321 伝熱管予ひずみ材の高温低サイクル疲労試験結果 ...	45
Table.5.7	Results of low-cycle fatigue test on SUS321 pre-strain tube	45
表 5.8	SUS321 伝熱管のクリープ試験結果	46
Table.5.8	Results of creep test on SUS321 tube	46
表 5.9	SUS321 伝熱管の高温低サイクル疲労試験結果	47
Table.5.9	Results of low-cycle fatigue test on SUS321 tube	47
表 5.10	クリープ試験結果	48
Table.5.10	Results of creep test	48
表 5.11	SUS321 鍛造材の高温低サイクル疲労試験結果	49
Table.5.11	Results of low-cycle fatigue test on SUS321 forging	49
表 5.12	クリープ損傷試験結果	50
Table.5.12	Results of test for producing crept materials	50
表 5.13	インコネル718 棒材高温高サイクル疲労試験結果	51
Table.5.13	Results of hith-cycle fatigue test on In 718 bar steel at elevated temperature	51
表 6.1	試験値より求めた弾塑性パラメータ (SUS321 伝熱管、 3%予ひずみ材)	104
Table.6.1	Elastic-plastic parameter calculated from test value (SUS321 3% pre-strained tube)	104

表 6.2	試験値より求めた弾塑性パラメータ (SUS321 伝熱管、 5% 予ひずみ材)	105
Table.6.2	Elastic-plastic parameter calculated from test value (SUS321 5% pre-strained tube)	105
表 6.3	SUS321 伝熱管 (3% 予ひずみ材) の弾塑性応力- ひずみ関係式	106
Table.6.3	Elastic-plastic stress-strain relationship for SUS321 tube (3% pre-strained)	106
表 6.4	SUS321 伝熱管 (5% 予ひずみ材) の弾塑性応力- ひずみ関係式	107
Table.6.4	Elastic-plastic stress-strain relationship for SUS321 tube (5% pre-strained)	107
表 6.5	SUS321 伝熱管 (3% 予ひずみ材) の弾塑性応力- ひずみ関係式のパラメータ値	108
Table.6.5	Parameter value of elastic-plastic stress-strain relationship for SUS321 tube (3% pre-strained)	108
表 6.6	SUS321 伝熱管 (5% 予ひずみ材) の弾塑性応力- ひずみ関係式のパラメータ値	108
Table.6.6	Parameter value of elastic-plastic stress-strain relationship for SUS321 tube (5% pre-strained)	108
表 6.7	SUS321 伝熱管及び鍛造材のクリープ及び疲労損傷	109
Table.6.7	Damage fractions of creep and fatigue for SUS321 tube and forging	109

図 リ ス ト

図 4.1	S U S 3 2 1 鍛造材の試験片採取位置	25
Fig.4.1	Sampling position of test specimen of SUS321 forging	25
図 4.2	インコネル 7 1 8 棒材高サイクル疲労試験片の採取位置	26
Fig.4.2	Sampling position of high-cycle fatigue test specimen of In 718 bar steel	26
図 4.3	クリープ試験片の形状寸法 (S U S 3 2 1 伝熱管母材)	27
Fig.4.3	Shape and size of creep test specimen(SUS321 tube)	27
図 4.4	クリープ試験片の形状寸法 (ϕ 1 0 丸棒)	28
Fig.4.4	Shape and size of creep test specimen(ϕ 10 solid bar)	28
図 4.5	S U S 3 2 1 伝熱管疲労試験片形状寸法	29
Fig.4.5	Shape and size of fatigue test specimen of SUS321 tube	29
図 4.6	S U S 3 2 1 鍛造材の疲労試験片の形状寸法	30
Fig.4.6	Shape and size of fatigue test specimen of SUS321 forging	30
図 4.7	インコネル 7 1 8 棒材高サイクル疲労試験片の形状寸法	31
Fig.4.7	Shape and size of high-cycle fatigue test specimen of In 718 bar steel	31
図 5.1	真応力と真ひずみの関係 (S U S 3 2 1 伝熱管 - 3 % 予ひずみ材)	52
Fig.5.1	True stress vs. true strain (SUS321-3% pre-strained tube)	52
図 5.2	真応力と真ひずみの関係 (S U S 3 2 1 伝熱管 - 5 % 予ひずみ材)	53
Fig.5.2	True stress vs. true strain (SUS321-5% pre-strained tube)	53

図 5.3	0.2% 耐力、引張強さと真破断応力 (SUS321 伝熱管-予ひずみ材)	54
Fig.5.3	0.2% offset yield strength, ultimate tensile strength and true fracture strength (SUS321 pre-strained tube)	54
図 5.4	破断伸びと絞り (SUS321 伝熱管-予ひずみ材)	55
Fig.5.4	Fracture elongation and reduction of area (SUS321 pre-strained tube)	55
図 5.5	真一様伸びと真破断延性 (SUS321 伝熱管、予ひずみ材)	56
Fig.5.5	True uniform elongation and true fracture ductility (SUS321 pre-strained tube)	56
図 5.6	SUS321 伝熱管 3% 予ひずみ材の繰返しに伴う応力範囲の 挙動 (T=550°C, t _H =0min)	57
Fig.5.6	Cyclic behavior of stress range for SUS321 3% pre-strained tube (T=550°C, t _H =0min)	57
図 5.7	SUS321 伝熱管 5% 予ひずみ材の繰返しに伴う応力範囲の 挙動 (T=550°C, t _H =0min)	58
Fig.5.7	Cyclic behavior of stress range for SUS321 5% pre-strained tube (T=550°C, t _H =0min)	58
図 5.8	クリープ曲線 (SUS321 伝熱管)	59
Fig.5.8	Creep curve (SUS321 tube)	59
図 5.9	クリープ曲線 (SUS321 伝熱管)	60
Fig.5.9	Creep curve (SUS321 tube)	60
図 5.10	応力と定常クリープ速度の関係 (SUS321 伝熱管)	61
Fig.5.10	Stress vs. steady (secondary) creep rate (SUS321 tube)	61
図 5.11	応力とクリープ破断時間の関係 (SUS321 伝熱管)	62
Fig.5.11	Stress vs. creep rupture time (SUS321 tube)	62
図 5.12	破断伸びと破断時間の関係 (SUS321 伝熱管)	63
Fig.5.12	Fracture elongation vs. rupture time (SUS321 tube)	63

図5.13	絞りと破断時間の関係 (SUS321 伝熱管)	63
Fig.5.13	Reduction of area vs. rupture time (SUS321 tube)	63
図5.14	SUS321 伝熱管の繰返しに伴う応力範囲の挙動 ($T=500^{\circ}\text{C}$, $t_H=0\text{min}$)	64
Fig.5.14	Cyclic behavior of stresses range for SUS321 tube ($T=500^{\circ}\text{C}$, $t_H=0\text{min}$)	64
図5.15	SUS321 伝熱管の繰返しに伴う応力範囲の挙動 ($T=500^{\circ}\text{C}$, $t_H=0\text{min}$)	65
Fig.5.15	Cyclic behavior of stresses range for SUS321 tube ($T=500^{\circ}\text{C}$, $t_H=0\text{min}$)	65
図5.16	SUS321 伝熱管の繰返しに伴う応力範囲の挙動 ($T=430^{\circ}\text{C}$, 500°C , 550°C , $t_H=10\text{min}$)	66
Fig.5.16	Cyclic behavior of stresses range for SUS321 tube ($T=430^{\circ}\text{C}$, 500°C , 550°C , $t_H=10\text{min}$)	66
図5.17	SUS321 伝熱管の繰返しに伴う応力範囲の挙動 ($T=500^{\circ}\text{C}$, 550°C , $t_H=60\text{min}$)	67
Fig.5.17	Cyclic behavior of stresses range for SUS321 tube ($T=500^{\circ}\text{C}$, 550°C , $t_H=60\text{min}$)	67
図5.18	クリープ曲線 (SUS321 鍛造材-350t) (1)	68
Fig.5.18	Creep curve (SUS321 forging-350t) (1)	68
図5.19	クリープ曲線 (SUS321 鍛造材-350t) (2)	69
Fig.5.19	Creep curve (SUS321 forging-350t) (2)	69
図5.20	クリープ曲線 (SUS321 鍛造材-350t) (3)	70
Fig.5.20	Creep curve (SUS321 forging-350t) (3)	70
図5.21	クリープ曲線 (SUS321 鍛造材-350t) (4)	71
Fig.5.21	Creep curve (SUS321 forging-350t) (4)	71
図5.22	クリープ曲線 (SUS321 鍛造材-350t) (5)	72
Fig.5.22	Creep curve (SUS321 forging-350t) (5)	72

図 5.23	SUS321 鍛造材の応力と定常クリープ速度の関係	73
Fig.5.23	Stress vs. steady (secondary) creep rate for SUS321 forging	73
図 5.24	SUS321 鍛造材のクリープ破断強度	74
Fig.5.24	Stress vs. creep rupture time for SUS321 forging	74
図 5.25	破断伸びと破断時間の関係 (SUSF321-350t)	75
Fig.5.25	Fracture elongation vs. rupture time (SUSF321-350t)	75
図 5.26	絞りと破断時間の関係 (SUSF321-350t)	75
Fig.5.26	Reduction of area vs. rupture time (SUSF321-350t)	75
図 5.27	繰返しに伴う応力範囲の挙動 ($T=500^{\circ}\text{C}$, 550°C , $t_H=0\text{min}$)	76
Fig.5.27	Cyclic behavior of stresses range ($T=500^{\circ}\text{C}$, 550°C , $t_H=0\text{min}$)	76
図 5.28	繰返しに伴う応力範囲の挙動 ($T=600^{\circ}\text{C}$, $t_H=0\text{min}$)	77
Fig.5.28	Cyclic behavior of stresses range ($T=600^{\circ}\text{C}$, $t_H=0\text{min}$)	77
図 5.29	繰返しに伴う応力範囲の挙動 ($T=500^{\circ}\text{C}$, 550°C , $t_H=10\text{min}$)	78
Fig.5.29	Cyclic behavior of stresses range ($T=500^{\circ}\text{C}$, 550°C , $t_H=10\text{min}$)	78
図 5.30	繰返しに伴う応力範囲の挙動 ($T=500^{\circ}\text{C}$, 550°C , $t_H=60\text{min}$)	79
Fig.5.30	Cyclic behavior of stresses range ($T=500^{\circ}\text{C}$, 550°C , $t_H=60\text{min}$)	79
図 6.1	0.2% 耐力と引張強度比の温度依存性	110
Fig.6.1	Temperature dependence of the ratio of 0.2% proof stresses to ultimate tensile strength	110

図 6.2	真破断応力比の温度依存性	110
Fig.6.2	Temperature dependence of the true fracture stress ratio.....	110
図 6.3	0.2%耐力比の温度依存性	111
Fig.6.3	Temperature dependence of 0.2% offset yield strength ratio	111
図 6.4	引張強さ比の温度依存性	111
Fig.6.4	Temperature dependence of ultimate tensile strength ratio	111
図 6.5	弾塑性パラメタ E の温度依存性	112
Fig.6.5	Temperature dependence of elastic-plastic parameter E	112
図 6.6	弾塑性パラメタ σ_p , σ_y の温度依存性	113
Fig.6.6	Temperature dependence of elastic-plastic parameter σ_p and σ_y	113
図 6.7	弾塑性パラメタ m, k の温度依存性	114
Fig.6.7	Temperature dependence of elastic-plastic parameter m and k	114
図 6.8	第 3 期クリープ開始時間と破断時間の関係 (SUS321 鍛造材)	115
Fig.6.8	Relation between time to tertiary creep and rupture time (SUS321 forging)	115
図 6.9	SUS321 伝熱管予ひずみ材の低サイクル疲労強度と 設計疲労線図との比較	116
Fig.6.9	Comparison of low-cycle fatigue strength with design fatigue curve of SUS321 pre-strain tube	116
図 6.10	SUS321 伝熱管予ひずみ材の繰返し応力-ひずみ曲線	117
Fig.6.10	Cyclic stress-strain curves for SUS321 pre-strained tube.....	117

図 6.1 1	S U S 3 2 1 伝熱管の低サイクル疲労強度と設計疲労線図 の比較 (4 3 0 °C)	118
Fig.6.11	Comparison of low-cycle fatigue strength with design fatigue curve for SUS321 tube at 430°C	118
図 6.1 2	S U S 3 2 1 伝熱管の低サイクル疲労強度と設計疲労線図の比較 (5 0 0 °C. $t_H=0, 10, 60$ min)	119
Fig.6.12	Comparison of low-cycle fatigue strength with design fatigue curve for SUS321 tube at 500°C ($t_H=0, 10, 60$ min)	119
図 6.1 3	S U S 3 2 1 伝熱管の低サイクル疲労強度と設計疲労線図の比較 (5 5 0 °C. $t_H=0, 10, 60$ min)	120
Fig.6.13	Comparison of low-cycle fatigue strength with design fatigue curve for SUS321 tube at 550°C ($t_H=0, 10, 60$ min)	120
図 6.1 4	S U S 3 2 1 伝熱管の繰返し応力-ひずみ曲線に及ぼす保持時間 の影響 (5 0 0 °C 及び 5 5 0 °C)	121
Fig.6.14	Effect of hold time on cyclic stress-strain curve for SUS321 tube at 500°C and 550°C	121
図 6.1 5	S U S 3 2 1 鍛造材の低サイクル疲労強度と設計疲労線図の比較 (5 0 0 °C, 5 5 0 °C, 6 0 0 °C)	122
Fig.6.15	Comparison of low-cycle fatigue strength with design fatigue curve for SUS321 forging at 500°C, 550°C, and 600°C	122
図 6.1 6	S U S 3 2 1 鍛造材の繰返し応力-ひずみ曲線 (5 0 0 °C, 5 5 0 °C 及び 6 0 0 °C)	123
Fig.6.16	Cyclic stress-strain curves for SUS321 forging at 500°C, 550°C and 600°C	123

図6.17	SUS321 鍛造材の低サイクル疲労強度と設計疲労線図の比較 (500℃, $t_H=0, 10, 60$ min)	124
Fig.6.17	Comparison of low-cycle fatigue strength with design fatigue curve for SUS321 forging at 500℃ ($t_H=0,10,60$ min)	124
図6.18	SUS321 鍛造材の低サイクル疲労強度と設計線図の比較 (550℃, $t_H=0, 10, 60$ min)	125
Fig.6.18	Comparison of low-cycle fatigue strength with design fatigue curves for SUS321 forging at 550℃ ($t_H=0,10$ and 60min)	125
図6.19	SUS321 鍛造材の繰返し応力-ひずみ曲線に及ぼす 保持時間の影響 (500℃及び550℃)	126
Fig.6.19	Effect of hold time on cyclic stress strain curve for SUS321 forging at 500℃ and 550℃	126
図6.20	SUS321 伝熱管繰返しリラクゼーション曲線 (430℃, 500℃及び550℃)	127
Fig.6.20	Cyclic relaxation curves of SUS321 tube at 430℃, 500℃ and 550℃	127
図6.21	SUS321 鍛造材の繰返しリラクゼーション曲線 (500℃及び550℃)	128
Fig.6.21	Cyclic relaxation curves of SUS321 forging at 500℃ and 550℃	128
図6.22	クリープ損傷計算に使用した応力とクリープ破断時間の関係	129
Fig.6.22	Relation between stress and creep rupture time for creep damage calculation	129
図6.23	SUS321 伝熱管及び鍛造材の累積損傷和	130
Fig.6.23	Damage fractions for SUS321 tube and forging	130

図6.24	インコネル718棒材の高温高サイクル疲労強度	131
Fig.6.24	Elevated temperature high-cycle fatigue strength of IN 718 bar steel	131

写真リスト

写真3.1	SUS321 伝熱管の顕微鏡組織	20
Photo.3.1	Micro-structures for SUS321 tube	20
写真3.2	SUS321 鍛造材の顕微鏡組織	21
Photo.3.2	Micro-structures for SUS321 forging	21
写真5.1	破断後の引張試験片外観(SUS321 伝熱管、予ひずみ材)	80
Photo.5.1	Appearance after tensile test (SUS321 pre-strained tube).....	80
写真5.2	疲労試験後の試験片外観(SUS321 伝熱管、予ひずみ材)	81
Photo.5.2	Appearance after fatigue test (SUS321 pre-strained tube).....	81
写真5.3	破断後のクリープ試験片外観 (SUS321 伝熱管)	83
Photo.5.3	Appearance after creep test (SUS321 tube)	83
写真5.4	疲労試験後の試験片外観 (SUS321 伝熱管)	84
Photo.5.4	Appearance after fatigue test (SUS321 tube)	84
写真5.5	破断後のクリープ試験片外観 (SUS321 鍛造材, 500℃)	89
Photo.5.5	Appearance after creep test at 500°C (SUS321 forging)	89
写真5.6	破断後のクリープ試験片外観 (SUS321 鍛造材, 550℃)	90
Photo.5.6	Appearance after creep test at 550°C (SUS321 forging)	90
写真5.7	疲労試験後の試験片外観 (SUS321 鍛造材)	91
Photo.5.7	Appearance after fatigue test (SUS321 forging)	91
写真5.8	クリープ損傷試後の疲労試験片外観 (SUS321 鍛造材)	94
Photo.5.8	Appearance after creep damage tests (SUS321 forging)	94
写真5.9	高サイクル疲労試験後の試験片外観 (インコネル718 棒材) ...	95
Photo.5.9	Appearance after high-cycle fatigue test (IN718 bar steel) ...	95

1. 諸 言

高温で使用される材料の基本的強度に関するデータは、例えば高速原型炉など、使用する温度を限定すると極めて少ない。また、温度がクリープ領域になると温度が材料強度に及ぼす影響は大きくなり、従って高温側の強度を外挿して求めることは困難である。

一方、原子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」又は、ASME Code Case N-47¹⁾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が十分備っていることが必要であるが、国産材料の強度データは未だ少ないのが現状である。

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。

この研究の一環として(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を52年度～56年度に実施してきた。本報告書は57年度に実施した、SUS321鍛造材(新チャージ)のクリープ試験及び低サイクル疲労試験、SUS321伝熱管のクリープ試験及び低サイクル疲労試験、SUS321伝熱管の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棒材の高サイクル疲労試験結果について記述したものである。

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、SUS321鍛造材（新チャージ）のクリープ試験及び低サイクル疲労試験、管径31.8mmφ、管肉厚3.5mmのSUS321伝熱管のクリープ試験及び低サイクル疲労試験（10分変位保持を含む）、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及びインコネル718棒材の高サイクル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 引張試験

SUS321伝熱管（φ31.8×3.5t）の3%及び5%予ひずみ材の引張試験の結果、RT～600℃の温度範囲にわたって、0.2%耐力及び引張強さ共に“高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準等”（以下“原型炉材料強度基準”と略す）の許容応力値を満足する。

2.2.2 クリープ特性

- (1) SUS321鍛造材（350t）の500℃、550℃クリープ強度は“原型炉材料強度基準”の許容応力値を十分満足する。
- (2) SUS321伝熱管（φ31.8×3.5t）の550℃クリープ強度は“原型炉材料強度基準”の許容応力値を満足する。

2.2.3 低サイクル疲労特性

- (1) SUS321伝熱管材（φ31.8×3.5t）予ひずみ材の550℃での低サイクル疲労試験の結果は、図6.9に示すごとく予ひずみの疲労強度に及ぼす影響がほとんどみられない。
- (2) SUS321伝熱管材（φ31.8×3.5t）の430℃、500℃及び550℃ひずみ保持低サイクル疲労試験（保持時間 $t_H=10$ 分）の結果は図6.11に示すごとく、430℃ではひずみ保持による寿命低下はなく、500℃、550℃と温度が高くなるに従い、ひずみ保持による寿命低下の割合が大き

なる。また $\Delta \epsilon t$ の小さい領域でひずみ保持による疲労寿命低下の割合が大きくなる傾向になる。

- (3) SUS321 鍛造材の500℃及び550℃でのひずみ保持低サイクル疲労強度は500℃では連続サイクルの寿命とほぼ同じ値となった。

ひずみ保持の影響は550℃で現われ、ひずみ範囲の小さい領域で大きくなる傾向にある。

- (4) SUS321 伝熱管及び鍛造材の低サイクル疲労強度は、図6.12, 図6.13, 図6.15に示すように“原型炉材料強度基準”及びASME C.C.N-47の疲労設計線図と比較し十分安全側になることが明らかとなった。

表 2.1 試験研究の範囲一覽表
Table. 2.1 Content of present tests

供試材	試験項目	温度 (°C)	負荷条件 応力 σ (kg/mm ²), ひずみ範囲 $\Delta \epsilon t$ (%)	目標破断時間又は破断寿命 (時間) (回)	試験片 総数
SUS321 鍛造材 (350t)	クリープ試験	500	$\sigma = 37, 36, 35, 33$	$10^3, 10^4$ 時間	10
	クリープ損傷	550	$\sigma = 34, 32, 28, (26), 25, 21$	100, 300, 1000, 3000, 10^4 時間	15
		500	$\sigma = 35$	0, 500, 1000, 1500, 2000 時間	
		550	$\sigma = 26$	" "	
低サイクル疲労 試験	500	tH=0(3本), tH=10min(3本), tH=1h(1本)	100 ~ 2000 回	20	
	550	tH=0(3本), tH=10min(3本), tH=1h(2本)	" "		
	600	tH=0(5本)	" "		
SUS321 伝熱管 ($\phi 31.8 \times 3.5t$)	クリープ試験	550	$\sigma = 30$	6000 時間	1
	低サイクル疲労 試験	430	tH=10min, $\Delta \epsilon t = 1.4, 1.0\%$	500 ~ 2000 回	23
		500	tH=0(2本), tH=10min(3本), tH=1h(1本)	200 ~ 20000 回	
		550	tH=0(3本), tH=10min(2本), tH=1h(2本)	" "	
SUS321 伝熱管 ($\phi 31.8 \times 3.5t$) 予びずみ材	引張試験	$\alpha = 3\%$ 及び 5% , R.T., 100, 200, 300, 350 400, 450, 500, 550, 600		-	40
	低サイクル疲労 試験	550	$\alpha = 3\%$, $\Delta \epsilon t = 0.4 \sim 1.4\%$ (5本) $\alpha = 5\%$, $\Delta \epsilon t = 0.4 \sim 1.4\%$ (5本)	200 ~ 20000 回 " "	10
インコネル718 棒材 ($\phi 100$)	高サイクル疲労 試験	R.T.	$\sigma_a = 20$	10^5	18
		600	$\sigma_a = 45, 48, 50, 57$	$10^5 \sim 10^7$ 回	
			$= 35$	10^7 回	
			$= 25, 27, 30, 40, 57$	$10^5 \sim 10^7$ 回	
			$= 23, 26$	10^7 回	
650	$= 28, 30$	$10^5 \sim 10^7$ 回			

3. 供試材

3.1 供試材の仕様

(1) SUS321伝熱管

SUS321伝熱管は表3.1に示す寸法のものを使用した。この伝熱管は、JIS G3463「ボイラ、熱交換器用ステンレス鋼管」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るものを使用した。

表3.1 SUS321伝熱管の製造寸法

Table.3.1 Manufacturing sizes of SUS321 tube

鋼種の名称	寸法
SUS321-φ31.8×3.5t伝熱管	φ31.8×3.5t×12000ℓ

(2) SUS321鍛造材

SUS321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を使用した。

表3.3 SUS321鍛造材の製造寸法

Table. 3.3 Manufacturing sizes of SUS321 forging

鋼種の名称	寸法
SUS321 350t鍛造材	350t×1000w×1000ℓ

(3) インコネル718棒材

インコネル718合金は、表3.5に示す寸法のものを使用した。

このインコネル718合金は、表3.6に示す製造仕様により製作されたものを使用した。

表 3.5 インコネル718棒材の製造寸法

Table. 3.5 Manufacturing sizes of In 718 bar steel

鋼 種 の 名 称	寸法及び形状許容差
インコネル718棒材	$\phi 100 \begin{matrix} +5 \\ -0 \end{matrix} \times 1000 \begin{matrix} +10 \\ -0 \end{matrix} \ell$

表 3.2 SUS321 伝熱管 (φ 31.8 × 3.5 t) の製造仕様概要

Table. 3.2 Summary of manufacturing specifications for SUS321 tube (φ 31.8 × 3.5 t)

項 目	内 容																																											
適用規格	1. J I S G 3 4 6 3 - 1 9 7 6「ボイラ・熱交換器用ステンレス鋼鋼管」 2. 火力発電技術協会発行「通産省告示第 5 0 1 号に対する改訂案」 第 3 章 第 2 種 容 器 3. A S M E Code Case N - 4 7 (1 5 9 2 - 1 1)																																											
製 造	1. 製造方法：管は電気炉製鋼後真空脱ガス処理を行った鋼塊より原管を 製作し、更に冷間加工により継目なしに製造。 2. 熱 処 理：J I S G 3 4 6 3 に 基 づ く 固 溶 化 熱 処 理 ただし、加熱温度は 1,100 ~ 1,180℃ を目標とし、 水冷却する。																																											
品 質	1. 化学成分 (レドール分析値, %) <table border="1" data-bbox="326 1070 1241 1267"> <thead> <tr> <th>種 類</th> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Ni</th> <th>Cr</th> <th>Ti</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SUS321</td> <td>0.04</td> <td rowspan="2">≤ 0.75</td> <td rowspan="2">≤ 2.00</td> <td rowspan="2">≤ 0.03</td> <td rowspan="2">≤ 0.03</td> <td>9.00</td> <td>17.00</td> <td>4 × C</td> </tr> <tr> <td>HTB</td> <td>0.10</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> </tr> </tbody> </table> 2. 機械的性質 <table border="1" data-bbox="326 1326 1241 1523"> <thead> <tr> <th>鋼 類</th> <th>0.2% 耐力 (kg/mm²)</th> <th>引張強さ (kg/mm²)</th> <th>伸 び (%)</th> <th>ブリネル硬さ (HB)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SUS321 HTB</td> <td>≥ 21</td> <td>≥ 53</td> <td>≥ 35</td> <td>≤ 200</td> </tr> </tbody> </table> 3. 表面仕上：管の内外面は仕上良好で、有害な欠陥がないもの。 内外表面…… 1 2 S 程度 4. 寸法及び形状許容差 (単位：mm) <table border="1" data-bbox="326 1711 1241 1908"> <thead> <tr> <th>寸 法</th> <th>外 径</th> <th>肉 厚</th> <th>長 さ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">31.8⁰・D × 3.5t × 12,000 ℓ</td> <td rowspan="2">± 0.15</td> <td>+ 2 0 %</td> <td>+ 1 0</td> </tr> <tr> <td>- 0</td> <td>- 0</td> </tr> </tbody> </table> 5. 補 修 溶接による欠陥部の補修は不可	種 類	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti	SUS321	0.04	≤ 0.75	≤ 2.00	≤ 0.03	≤ 0.03	9.00	17.00	4 × C	HTB	0.10	~	~	~	鋼 類	0.2% 耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	ブリネル硬さ (HB)	SUS321 HTB	≥ 21	≥ 53	≥ 35	≤ 200	寸 法	外 径	肉 厚	長 さ	31.8 ⁰ ・D × 3.5t × 12,000 ℓ	± 0.15	+ 2 0 %	+ 1 0	- 0	- 0
種 類	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti																																				
SUS321	0.04	≤ 0.75	≤ 2.00	≤ 0.03	≤ 0.03	9.00	17.00	4 × C																																				
HTB	0.10					~	~	~																																				
鋼 類	0.2% 耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	ブリネル硬さ (HB)																																								
SUS321 HTB	≥ 21	≥ 53	≥ 35	≤ 200																																								
寸 法	外 径	肉 厚	長 さ																																									
31.8 ⁰ ・D × 3.5t × 12,000 ℓ	± 0.15	+ 2 0 %	+ 1 0																																									
		- 0	- 0																																									

表3.2 SUS321伝熱管(φ31.8×3.5t)の製造仕様概要(続き)

Table. 3.2 Summary of manufacturing specifications for SUS321 tube
(31.8 O.D×3.5t)(continued)

項 目	内 容
試験及び 検査方法	1. とりべ分析:CoはJIS G 1253による 2. 製品分析:CoはJIS G 1211~1218による また許容変動範囲はAISI規格による 3. 引張試験:JIS Z 2241 4. 高温引張試験:JIS G 0567 550℃ 5. 硬さ試験:JIS Z 2244 6. へん平試験:JIS G 3463 7. 押しひろげ試験:JIS G 3463 8. 超音波探傷試験:斜角法:火力発電技術協会発行「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(案)」の第7章第2種管によ る 9. 液体浸透探傷試験:通産省告示501号,第11条による 10. 外観検査:管全数 全表面 目視検査 11. 寸法形状検査:JIS G 3463 12. 非金属介在物試験:JIS G 0555 13. 結晶粒度試験:JIS G 0551 14. 水圧試験:JIS G 3463

表 3.4 SUS321 鍛造材の製造仕様概要

Table. 3.4 Summary of manufacturing specifications for SUS321 forging

項 目	内 容																										
適用規格	1. 通産省告示501号「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」第1種容器に係わる事項、昭和45年9月発行 2. JIS G 3214-1977「高温圧力容器部品用ステンレス鋼鍛鋼品」 3. ASME Code case N-47																										
製 造	1. 製造方式；弧光式塩基性電気炉溶製鋼塊後鍛造 2. 熱 処 理；1020～1120℃×Min.7hrs水冷																										
品 質	1. 光学成分（とりべ分析値，%） <table border="1" data-bbox="326 891 1273 1088"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Ni</th> <th>Cr</th> <th>Ti</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.04 ～0.08</td> <td>≤1.00</td> <td>≤2.00</td> <td>≤0.04</td> <td>≤0.03</td> <td>9.00 ～13.00</td> <td>17.00 ～20.00</td> <td>≥5xC%</td> </tr> </tbody> </table> 2. 機械的性質 <table border="1" data-bbox="326 1146 1273 1344"> <thead> <tr> <th>鋼 類</th> <th>0.2%耐力 (kg/mm²)</th> <th>引張強さ (kg/mm²)</th> <th>伸 び (%)</th> <th>ブリネル硬さ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SUS321 F321</td> <td>≥12</td> <td>≥49</td> <td>≥45</td> <td>≤187</td> </tr> </tbody> </table>	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti	0.04 ～0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.03	9.00 ～13.00	17.00 ～20.00	≥5xC%	鋼 類	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	ブリネル硬さ	SUS321 F321	≥12	≥49	≥45	≤187
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti																				
0.04 ～0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.03	9.00 ～13.00	17.00 ～20.00	≥5xC%																				
鋼 類	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	ブリネル硬さ																							
SUS321 F321	≥12	≥49	≥45	≤187																							
試験及び 検 査	1. とりべ分析 ; JIS G 1211 2. 製品分析 ; JIS G 1211 3. 引張試験（室温） ; JIS Z 2241 4. 高温引張試験 ; JIS G 0567 5. 硬さ試験 ; JIS Z 2243 6. 結晶粒度測定 ; JIS G 0551 7. 非金属介在物試験 ; JIS G 0555 8. 寸法検査 ; JIS G 4305 9. 外観検査 ; 鋼板全数全表面目視検査 10. 超音波探傷試験 ; 通産省告示501号 ASME sect. II SA-388																										

表 3.6 インコネル 718 棒材の製造仕様概要

Table. 3.6 Summary of manufacturing specifications for In718 bar steel

項目	内容																																		
適用規格	1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. III 「SA637-Grade 718」 2. 通産商告示第 501 号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準 (昭和 55 年 10 月発行)」																																		
製造	1. 製造方式 ; 2. 熱処理 : 溶体化処理 927~1010℃×0.5 h 以上 → 油冷 時効硬化処理 718℃×8 h → 炉冷 → 621℃ → 空冷 (時効硬化処理合計 18 h r)																																		
品質	1. 化学成分 (とりべ分析値%) <table border="1" data-bbox="377 1016 1307 1413"> <thead> <tr> <th>Ni</th> <th>Cr</th> <th>Nb+Ta</th> <th>Mo</th> <th>Ti</th> <th>Al</th> <th>Co</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50.00</td> <td>17.00</td> <td>4.75</td> <td>2.80</td> <td>0.65</td> <td>0.20</td> <td rowspan="2">≤1.00</td> </tr> <tr> <td>~55.0</td> <td>~21.00</td> <td>+5.50</td> <td>~3.30</td> <td>~1.15</td> <td>~0.80</td> </tr> <tr> <th>C</th> <th>Mn</th> <th>Si</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>B</th> <th>Cu</th> </tr> <tr> <td>≤0.08</td> <td>≤0.35</td> <td>≤0.35</td> <td>≤0.015</td> <td>≤0.015</td> <td>≤0.006</td> <td>≤0.30</td> </tr> </tbody> </table>	Ni	Cr	Nb+Ta	Mo	Ti	Al	Co	50.00	17.00	4.75	2.80	0.65	0.20	≤1.00	~55.0	~21.00	+5.50	~3.30	~1.15	~0.80	C	Mn	Si	P	S	B	Cu	≤0.08	≤0.35	≤0.35	≤0.015	≤0.015	≤0.006	≤0.30
Ni	Cr	Nb+Ta	Mo	Ti	Al	Co																													
50.00	17.00	4.75	2.80	0.65	0.20	≤1.00																													
~55.0	~21.00	+5.50	~3.30	~1.15	~0.80																														
C	Mn	Si	P	S	B	Cu																													
≤0.08	≤0.35	≤0.35	≤0.015	≤0.015	≤0.006	≤0.30																													
	2. 機械的性質 <table border="1" data-bbox="371 1469 1303 1731"> <thead> <tr> <th>試験条件</th> <th>0.2%耐力 (kg/mm²)</th> <th>引張強さ (kg/mm²)</th> <th>伸び (%)</th> <th>硬さ (Hs)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>室温</td> <td><105.5</td> <td><130.1</td> <td><12</td> <td><331</td> </tr> <tr> <td>650℃*</td> <td><87.5</td> <td><101.5</td> <td><12</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">*目標値とする。</p>	試験条件	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	硬さ (Hs)	室温	<105.5	<130.1	<12	<331	650℃*	<87.5	<101.5	<12	-																			
試験条件	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	硬さ (Hs)																															
室温	<105.5	<130.1	<12	<331																															
650℃*	<87.5	<101.5	<12	-																															
	3. クリープラプチャー強度 <table border="1" data-bbox="366 1850 1194 1984"> <thead> <tr> <th>試験温度</th> <th>応力(kg/mm²)</th> <th>破断時間(hr)</th> <th>伸び (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>649℃</td> <td>70.3</td> <td>>23</td> <td>>5</td> </tr> </tbody> </table>	試験温度	応力(kg/mm ²)	破断時間(hr)	伸び (%)	649℃	70.3	>23	>5																										
試験温度	応力(kg/mm ²)	破断時間(hr)	伸び (%)																																
649℃	70.3	>23	>5																																

表 3.6 インコネル 718 棒材の製造仕様概要 (続き)

Table. 3.6 Summary of manufacturing specifications for In 718 bar steel
(continued)

項 目	内 容
品 質	<p>4. 表面仕上</p> <p>使用上有害な欠陥のないものとする。</p> <p>5. 補 修</p> <p>溶接による欠陥部の補修は不可とする。</p>
試 験 及 び 検 査	<p>以下に規定する試験及び検査は、製造工程の中で実施すること。</p> <p>1. とりべ分析及び製品分析</p> <p>同一溶鋼毎にとりべ分析試料及び製品分析を採取し分析すること。</p> <p>2. 常温及び高温引張試験</p> <p>同一溶鋼毎、熱処理、ロット毎に、棒材の長手方向に試験片を採取して試験を実施する。</p> <p>3. クリープラプチャー試験</p> <p>同一溶鋼毎、熱処理、ロット毎に、棒材の長手方向に試験片を採取して試験を実施する。</p> <p>4. 硬さ試験</p> <p>引張試験片採取位置近傍より、硬さ試験片を採取し、硬さ試験を行う。</p> <p>5. 結晶粒度測定</p> <p>引張試験片近傍より、結晶粒度試験片を採取し、結晶粒度を測定する。測定結果は、倍率×100の写真と、共に報告する。</p> <p>6. 非金属介在部試験</p> <p>引張試験片採取位置近傍より試験片を採取し、非金属介在部を測定する。</p> <p>また、結果は、倍率×400の写真(典型的視野1枚)と共に報告するものとする。</p>

表 3.6 インコネル 718 棒材の製造仕様概要 (続き)

Table. 3.6 Summary of manufacturing specifications for In 718 bar steel
(continued)

項 目	内 容
試験及び 検 査	<p>7. 超音波探傷検査 (UT)</p> <p>棒材全数について外周表面より通産省告示第501号、第5条、第6条により超音波探傷試験を行いこれに適合するものとする。</p> <p>8. 液体浸透探傷検査 (PT)</p> <p>棒材全数の全表面について通産省告示第501号、第12条により液体浸透探傷検査を行いこれに適合するものとする。</p> <p>9. 外観、寸法、形状検査 (DT)</p> <p>棒材全数について目視検査を行うものとする。また、寸法測定を行い定められた公差内にあることとする。</p>
表 示	<p>棒材表面の端部に下記事項の表示を行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・鋼種 (種類の記号) ・溶鋼番号又は検査番号 ・製造社名、あるいは商標
報 告	<p>棒材納入時に下記報告書を提出する。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 検査証明書 (化学成分、機械的性質、結晶粒度、硬さ、非金属介在物他、本仕様書に要求ある事項) 2. 超音波探傷記録書 3. 液体浸透探傷記録書 4. 熱処理条件記録書

表 3.7 SUS321 伝熱管 ($\phi 31.8 \times 3.5 t$) の製造工程

Table. 3.7 Manufacturing process for SUS321 tube($\phi 31.8 \times 3.5 t$)

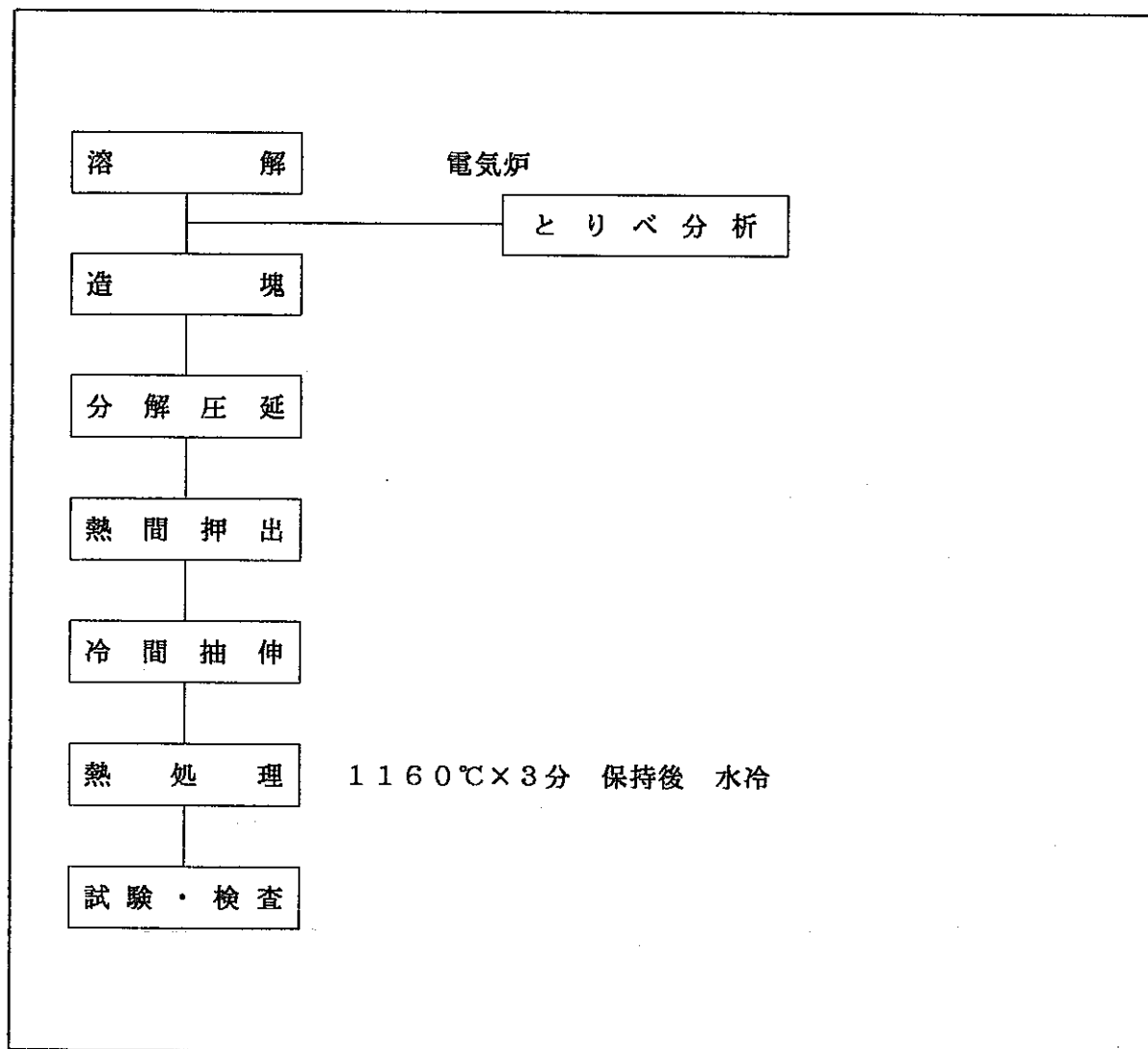


表 3.8 SUS321 伝熱管 (φ 31.8 × 3.5 t) の確性試験結果

Table. 3.8 Certification test results of SUS321 tube(φ 31.5 × 3.5t)

(a) 分析結果

(W t %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti
規 格 値	0.04 ~0.10	≤ 0.75	≤ 2.00	≤ 0.030	≤ 0.030	9.00 ~13.00	17.00 ~19.00	5×C ~0.60
レードル分析値	0.08	0.57	1.50	0.025	0.004	11.60	17.55	0.43
チェック分析値	0.08	0.56	1.48	0.023	0.004	11.45	17.60	0.41

(b) 熱処理結果

1,160°C × 3 min → W.Q.

(c) 機械的性質

	常 温				550°C		
	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	ビッカース 硬 さ (HV)	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)
規 格	≥ 21	≥ 53	≥ 35	≤ 200	—	—	—
試験結果	25	58	71	153	15	45	36

(d) その他の試験結果

結晶粒度	非金属 介在物	耐圧試験	へん平 試 験	押ひろげ 試 験	超 音 波 探傷試験	液体浸透 探傷試験	外観検査	寸法検査
6.0	0.20	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
6.5		(300kg/cm ²)						

表 3.9 SUS 3 2 1 伝熱管の試験・検査結果一覧表

Table. 3.9 Certified test and examination results of SUS321 tubes

No	試験項目	試験方法及び試験結果																		
		SUS 3 2 1 φ 3 1.8 × 3.5 t																		
1	外観・寸法検査	特に欠陥なし 合格																		
2	液体浸透探傷試験	1. 探傷液 1) 浸透液：Super-check P-T 2) 浸透液：Super-check D-T 3) 浸透液：Super-check R-T 2. 探傷条件 1) 探傷温度：16℃ 2) 浸透時間：20分 3) 現像時間：10～20分 3. 試験結果 有害欠陥指示なし 合格																		
3	超音波探傷試験	1. 探傷条件 1) 探傷感度：B1/F.S.=80% (内面) 2) 探傷器：UM-731 90% (外面) 3) 周波数：5MHz 4) 探触法：水浸法 斜角45° 5) 接触媒質：水 6) 表面状況：仕上げ面 2. 試験結果 有害な欠陥指示なく 合格																		
4	結晶粒度測定試験	1. 測定方法 JIS G 0 5 5 1 2. 測定結果 A G S : 6.6, 6.8																		
5	非金属介在物	1. 測定方法 2. 測定結果 (%) <table border="1" style="margin-left: 40px;"> <thead> <tr> <th></th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>0.023</td> <td>0.015</td> <td>0.038</td> <td>0.076</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0.023</td> <td>0.021</td> <td>0.033</td> <td>0.077</td> </tr> </tbody> </table>					A	B	C	計		0.023	0.015	0.038	0.076		0.023	0.021	0.033	0.077
	A	B	C	計																
	0.023	0.015	0.038	0.076																
	0.023	0.021	0.033	0.077																
6	平偏試験	1. 方法 JIS G 3 4 6 3 2. 結果 合格																		
7	押しひろげ試験	1. 方法 JIS G 3 4 6 3 2. 結果 合格																		
8	耐圧試験	1. 方法 JIS G 3 4 6 3 (圧力340kg/cm ²) 2. 結果 合格																		

表3.10 SUS321鍛造材の製造工程

Table. 3.10 Manufacturing process of SUS321 forging

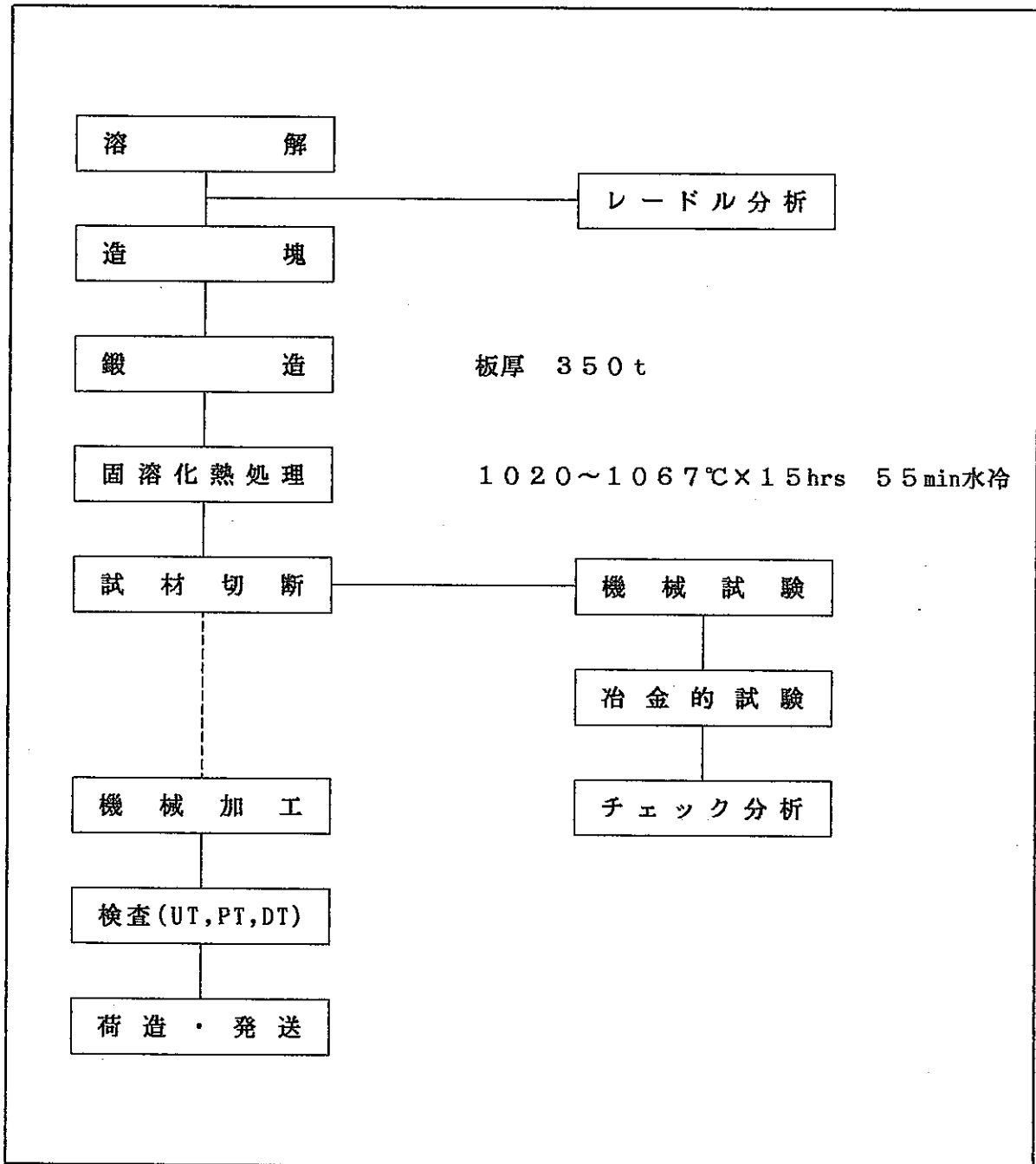


表 3.11 SUS321 鍛造材の確性試験結果

Table. 3.11 Certification test results of SUS321 forging

(a) 分析試験結果

(W t %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti
仕 様	0.04 ~0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.03	9.00 ~13.00	17.00 ~20.00	≥5×C
レ ー ド ル	0.065	0.82	1.62	0.24	0.06	11.33	19.28	0.52
チ ェ ッ ク	0.065	0.81	1.61	0.23	0.07	11.26	19.44	0.53

(b) 熱処理結果

保 持 温 度	保 持 時 間	冷 却 方 法
1020~1067℃	15hrs55min	水 冷

(c) 機械試験結果

温 度	0.2耐力(kg/m ²)	引張強さ(kg/m ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	硬 さ (HB)
	≥21*	≥49*	≥45*	≥50*	≤187*
R T	28.0	56.3	56.0	68.6	159
550℃	19.0	38.6	34.5	71.9	-

* J I S G 3 2 1 4 , S U S F 3 2 1 の室温における規定値である。

(d) その他

結 晶 粒 度	非金属介在物試験	外 観 検 査	寸 法 検 査	超 音 波 探 傷 試 験
3.5	良	良	良	良

表 3.12 インコネル718棒材の製造工程

Table. 3.12 Manufacturing process of In 718 bar steel

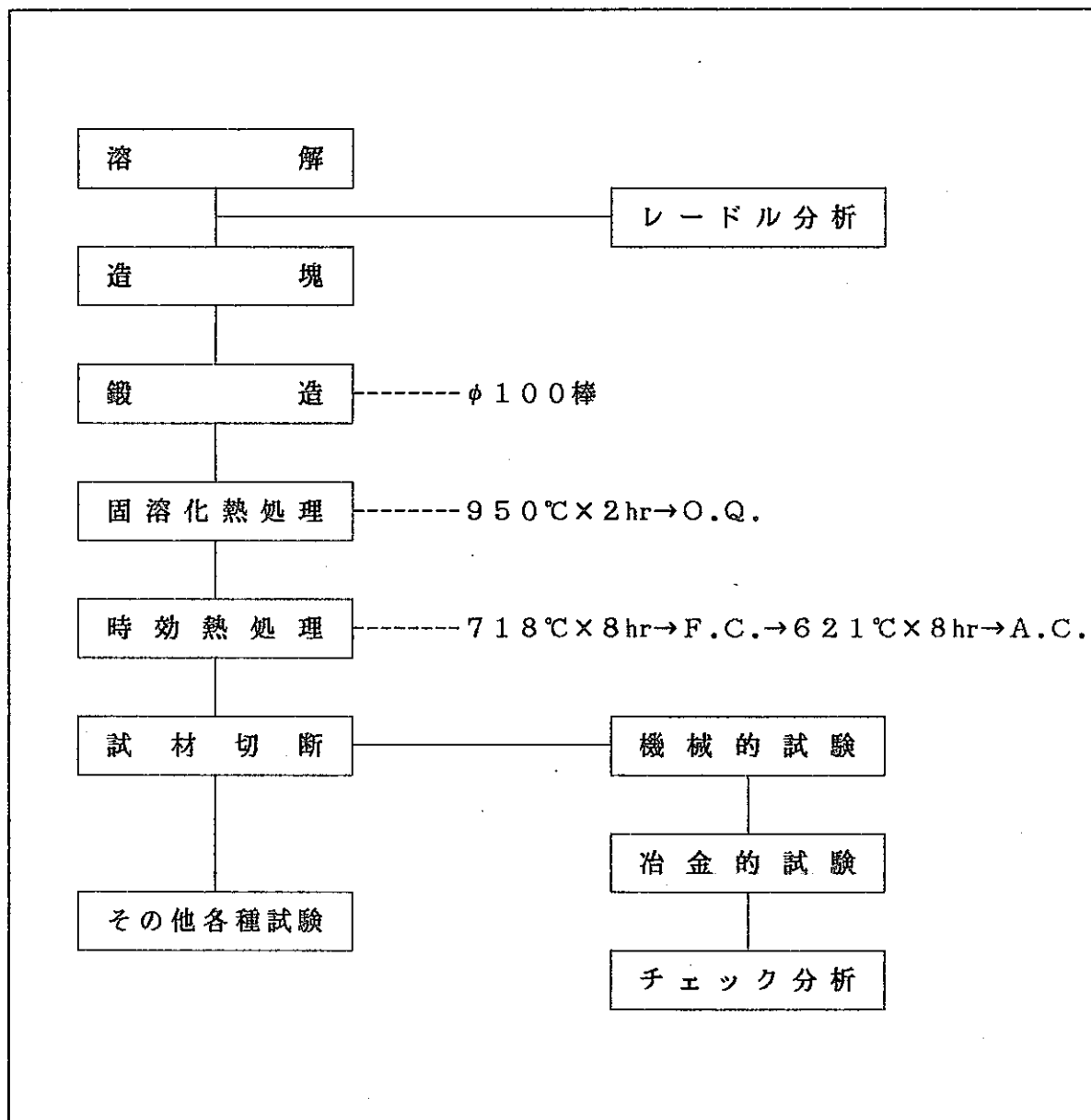


表 3.13 インコネル 718 棒材の確性試験結果

Table. 3.13 Certification test results of In 718 bar steel

a) 分析結果

(Wt %)

化学成分 分析値	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
規格値	≤ 0.08	≤ 0.35	≤ 0.35	≤ 0.015	≤ 0.015	50.00 ~55.00	17.00 ~21.00	≤ 0.30
リード分析値	0.05	0.09	0.03	0.004	0.005	53.36	18.01	0.01
チェック分析値	0.04	0.11	0.03	0.003	0.004	53.17	18.09	0.01
化学分析 分析値	Mo	Co	Al	Ti	Nb+Ta	B	Fe	-
規格値	2.80 ~3.30	≤ 1.00	0.20 ~0.80	0.65 ~1.15	4.75 ~5.50	≤ 0.006	Bal.	-
リード分析値	3.10	0.07	0.66	1.01	5.26	0.004	Bal.	-
チェック分析値	3.09	0.08	0.70	1.02	5.23	0.004	Bal.	-

b) 熱処理結果

Step 1. 固溶体化処理 950℃×2hr→O.Q.

Step 2. 時効処理 (I) 718℃×8hr→F.C.

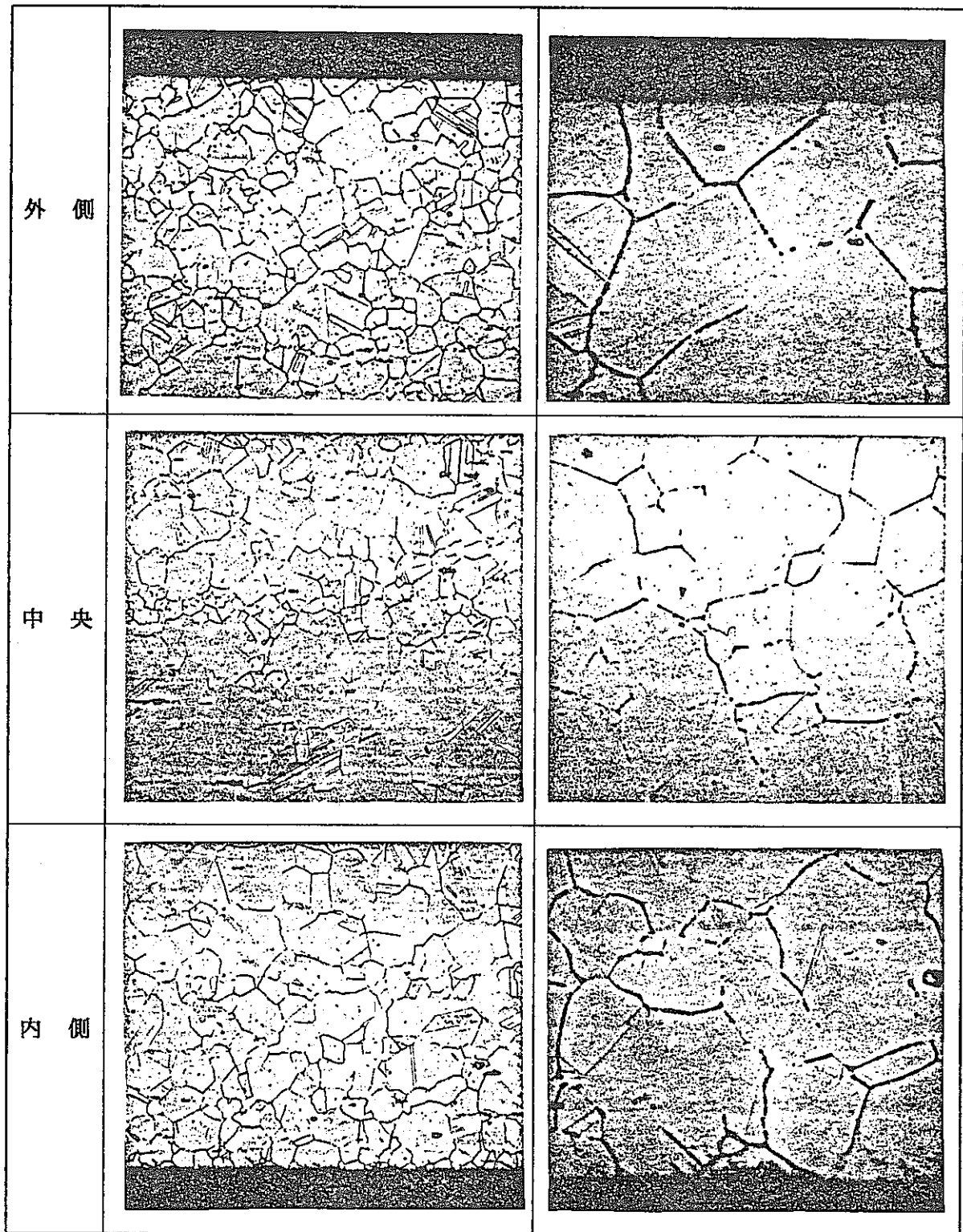
Step 3. 時効処理 (II) 621℃×8hr→A.C.

c) 機械的性質

	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	硬さ (HB)	クリープ強度 (hr, kg/mm ²)
規格値 (室温)	≥ 105.5	≥ 130.1	≥ 12	-	≥ 331	at 650℃ σ = 70.3
室温試験値	112.9	141.8	16.2	24.0	415	tr = 68.7 伸び 6.4%
650℃試験値	97.5	113.8	25.6	22.6	-	絞り 23.0%

d) その他の試験結果

結晶粒度	非金属介在物	超音波探傷試験	液体浸透 探傷試験	外観検査	寸法検査
5~6	0.01	Good	Good	Good	Good



(×100)

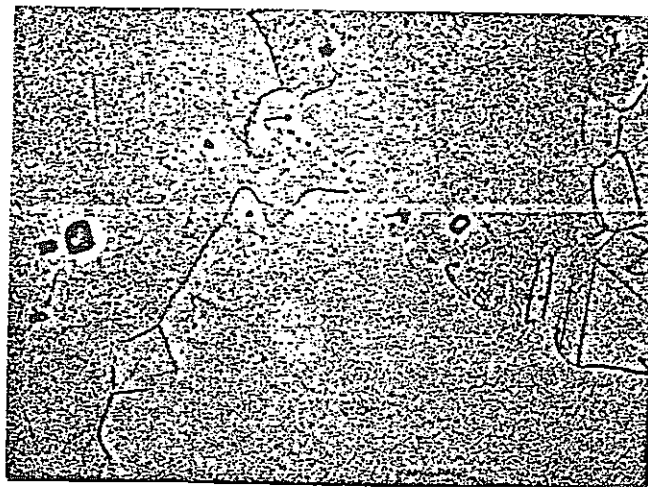
(×400)

写真3.1 SUS321伝熱管の顕微鏡組織

Photo. 3.1 Micro-structures for SUS321 tube



(×100)



(×400)

写真3.2 SUS321鍛造材の顕微鏡組織

Photo. 3.2 Micro-structures for SUS321 forging

4. 試験方法

4.1 試験片採取方法

SUS321伝熱管($\phi 31.8 \times 3.5$ t)母材の予ひずみ付与試験片は、管を縦方向に2分割したのち、試験片平行部幅6mm \times 3.5t(公称寸法) \times 標点間距離30の試験片を採取した。SUS321伝熱管($\phi 31.8 \times 3.5$ t)母材のクリープ試験片は予ひずみ付与試験片と同様の採取法により作製した。

SUS321鍛造材のクリープ試験片は、350t \times 1000w \times 1000L供試材より、主鍛造方向に $\phi 10 \times GL50$ 試験片を採取した。採取位置は1/4t部である。採取位置及び方向は図4.1に示すとおりである。また、SUS321鍛造材のクリープ損傷試験片についても同様の位置、方向より採取した。

インコネル718棒材の高サイクル疲労試験片は、 $\phi 100 \times 1000$ L供試材より、長手方向に $\phi 8 \times GL25$ 試験片を採取した。採取位置は図4.2に示す通りである。

4.2 試験片形状寸法

SUS321伝熱管($\phi 31.8 \times 3.5$ t)母材の予ひずみ付与試験片及びクリープ試験片は同一形状寸法のものを用いた。平行部寸法は幅6mm \times 厚さ3.5mm(素材厚さのまま)である。詳細は図4.3に示す。予ひずみ付与後の引張試験片は、予ひずみ付与により変化した平行部形状を原形状とし試験に供した。

SUS321鍛造材(350t)母材のクリープ試験片は $\phi 10 \times GL50$ 平行部をもった図4.4に示す形状寸法のものを使用した。

SUS321鍛造材(350t)母材のクリープ損傷試験片は疲労試験片と同一のものを使用した。

SUS321伝熱管の低サイクル疲労試験は図4.5に示す伝熱管そのままの形状寸法の試験片を使用した。

SUS321鍛造材の低サイクル疲労試験片は $\phi 10$ 、平行部25の図4.6に示す形状寸法のものを使用した。

インコネル718棒材の高サイクル疲労試験片は $\phi 8 \times GL25$ の平行部をもった

図4.7に示す形状寸法のものを使用した。試験部の表面性状は鏡面研磨（粗さ $R_a \doteq 5 \mu\text{m}$ ）、中仕上（ $R_a \doteq 25 \mu\text{m}$ ）、荒仕上（ $R_a \doteq 50 \mu\text{m}$ 及び $100 \mu\text{m}$ ）及び微小き裂材（き裂深さ $100 \sim 200 \mu\text{m}$ ）の5種類である。

4.3 試験機仕様

引張試験機は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適合するもので、本試験研究では、最大負荷容量50 ton、最高使用温度 1100°C 、クロスヘッド昇降速度範囲 $0.005 \sim 500 \text{mm}/\text{min}$ 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個々に調節可能のものである。

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3 ton、最高使用温度 850°C 及び 1100°C 、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。

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。

各試験機についての詳細な仕様を表4.1～4.3に示した。

4.4 試験方法

4.4.1 引張試験

室温及び高温引張試験はJIS Z 2241 (1977)「金属材料引張試験方法」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」を基本とし、「FBR金属材料試験実施要領書」(52-5)に準じた。

さらに本試験研究では、特に以下の方法を付加した。

(1) 負荷方法

標点間の公称全ひずみ 1.0% に達するので標点間公称ひずみ速度は、 $0.3\%/\text{min}$ とし、この区間は標点間公称ひずみ速度を直接制御する方法を採取した。

標点間公称ひずみが 1.0% を越えた後は、上下つかみ部間の相対変位速度制御

に切り換えGL50試験片平行部で7.5%/minの速度とした。

(2) 伸び測定及び記録

標点間公称ひずみが1.2～1.5%に達するまでは差動変圧器で測定した標点間公称全ひずみと荷重の関係を記録し、以降は上下つかみ部間の相対変位量と荷重の関係を記録した。

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)「金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(伝熱管の疲労試験ではひずみゲージ型、G.L.=25mm、その他の試験では差動変圧器型、G.L.=20mm)で検出し、これを原形状中心に両振り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続記録し、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℃を中心に、その前後500℃及び600℃の3条件で速施した。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に減少した時点で定義した。

4.4.4 高サイクル疲労試験

インコネル718棒材の高温高サイクル疲労試験は、表4.4に示す試験機を用い、荷重制御の軸力を繰返し、破壊に至るまでの繰返し数を求めた。応力比は-1を主体として一部0の試験を行った。

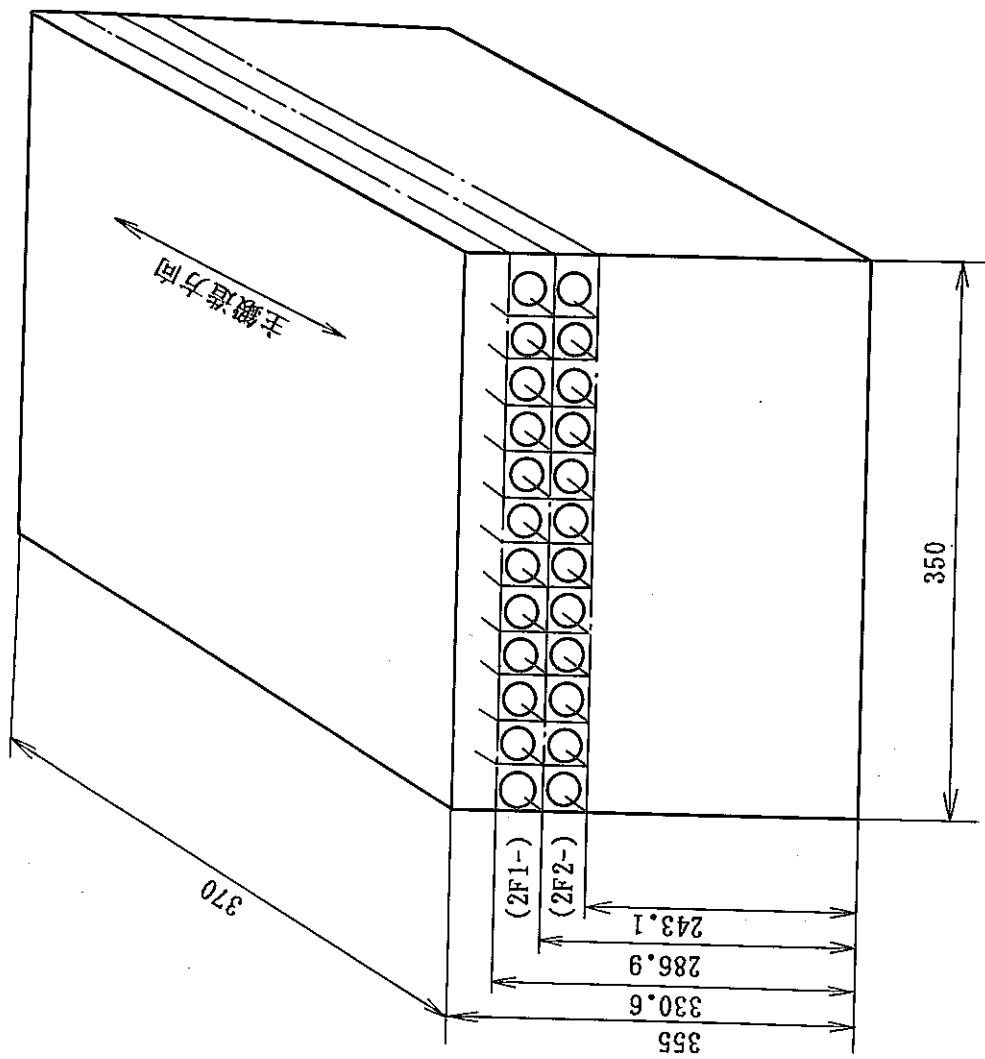


図4.1 SUS321鍛造材の試験片採取位置

Fig. 4.1 Sampling position of test specimen of SUS321 forging

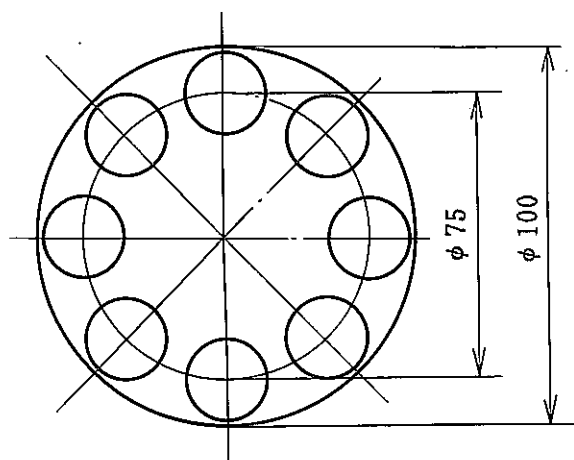
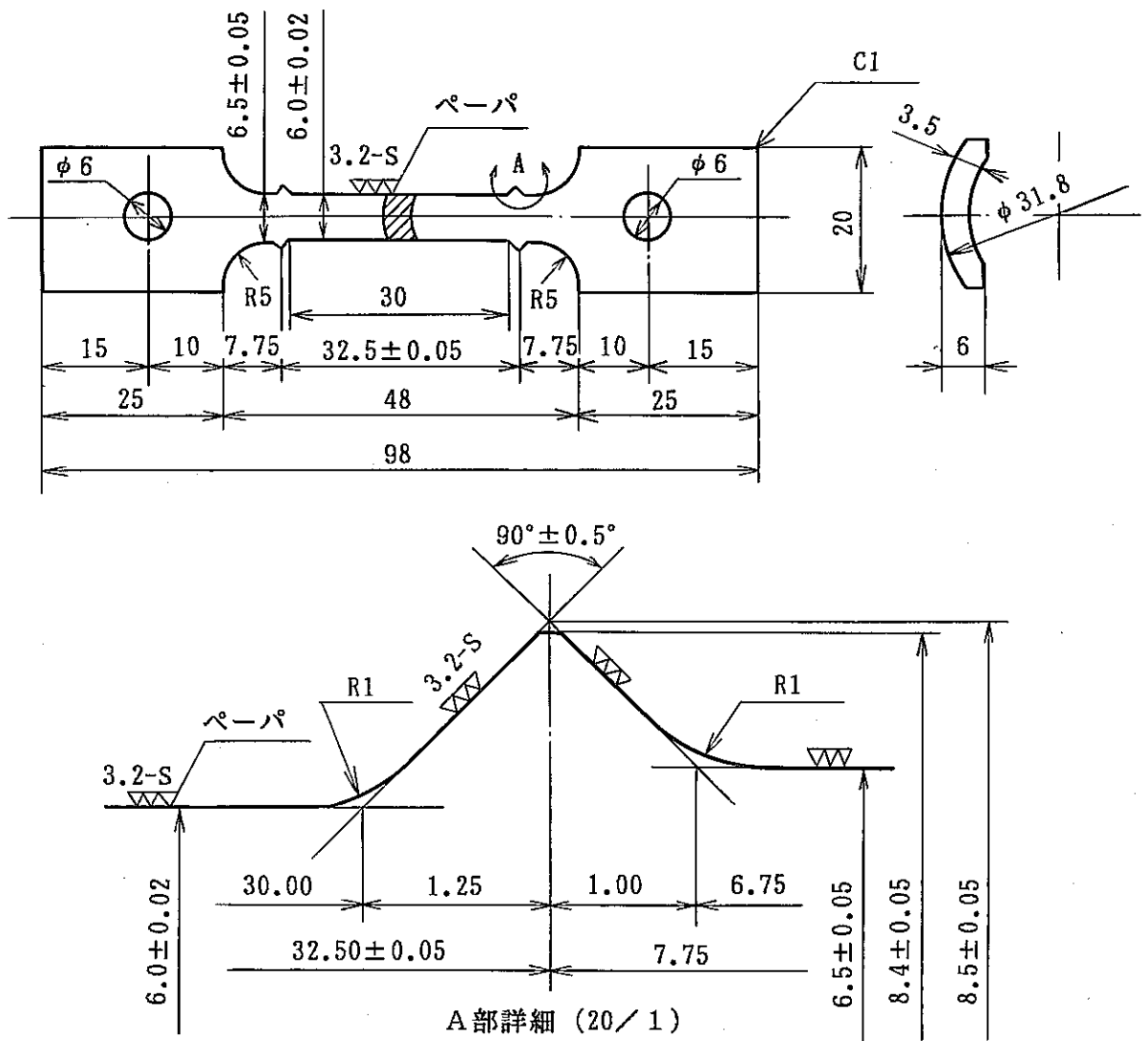


図4.2 インコネル718棒材高サイクル疲労試験片の採取位置

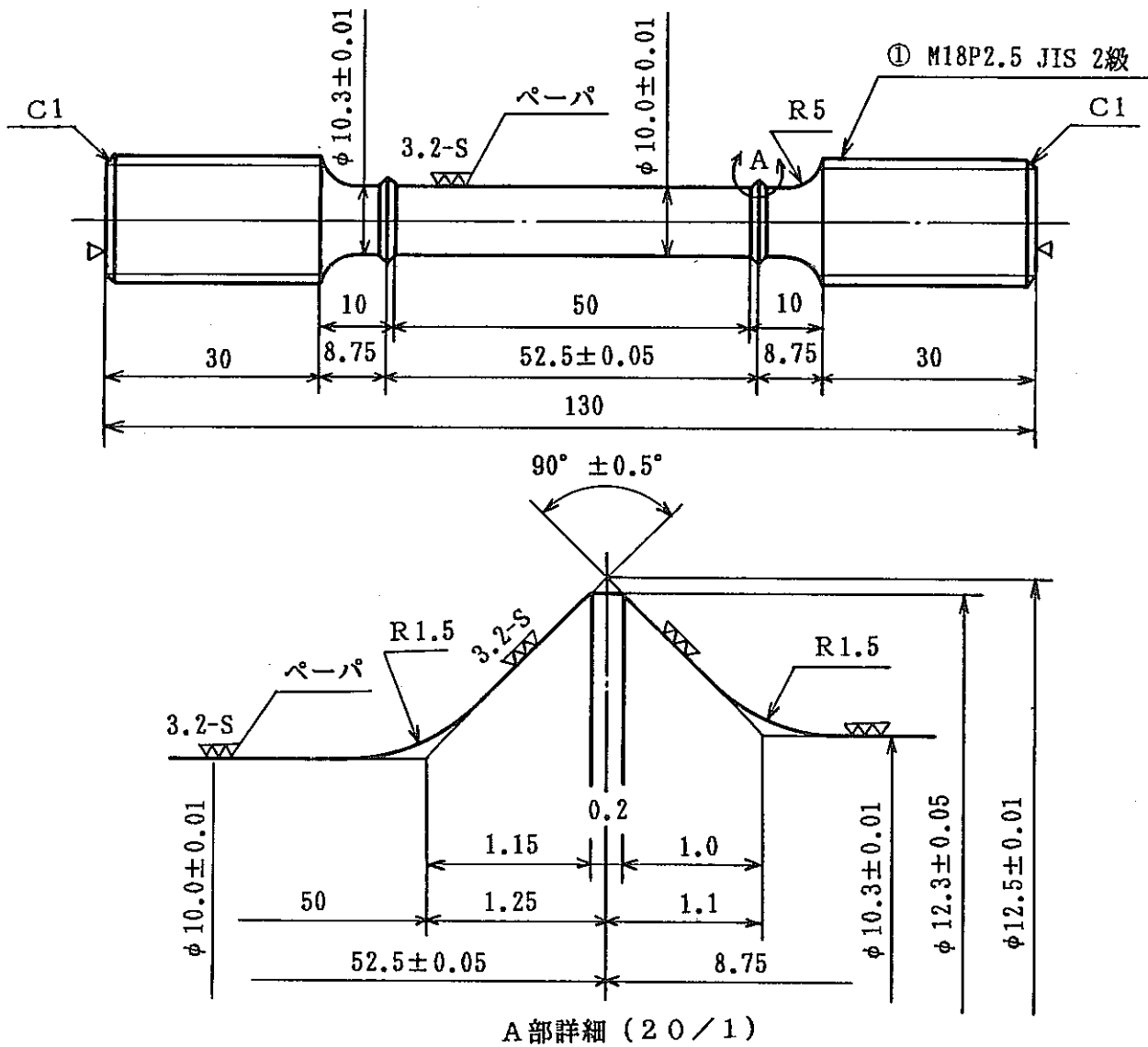
Fig. 4.2 Sampling position of high-cycle fatigue test specimen of In 718 bar steel



試験材料	試験
SUS321伝熱管 (φ31.8×3.51)	引張試験、 クリープ試験

図4.3 クリープ試験片の形状寸法 (SUS321伝熱管)

Fig. 4.3 Shape and size of creep test specimen (SUS321 tube)



試験材料	試験
SUS321 鍛造材 (350 t) 母材	クリープ試験

図4.4 クリープ試験片形状寸法 (φ10 丸棒)

Fig.4.4 Shape and size of creep test specimen

(φ10 solid bar)

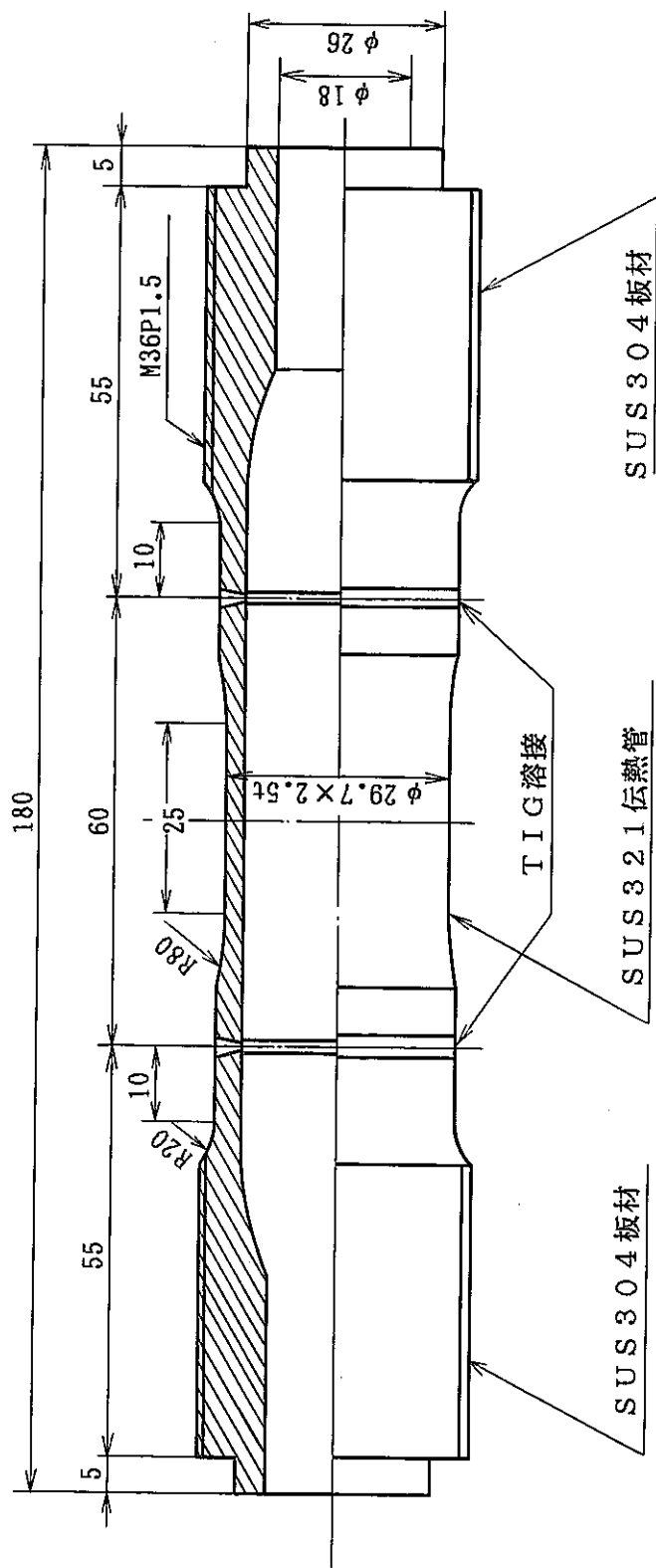


圖 4.5 SUS321 伝熱管疲労試験片形状

Fig. 4.5 Shape and size of fatigue test specimen of SUS321 tube

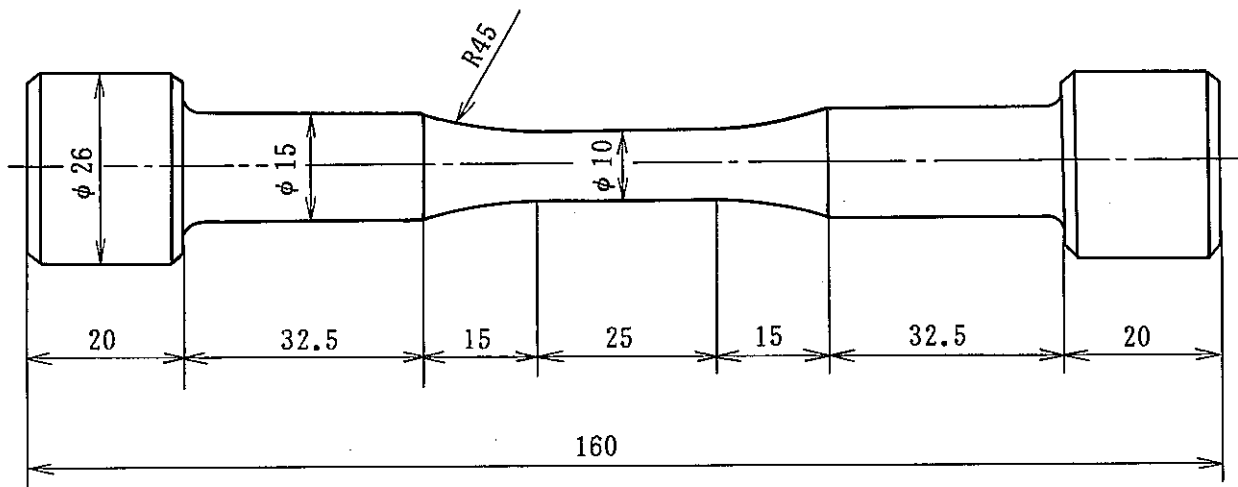


図4.6 SUS321鍛造材の疲労試験片の形状寸法

Fig. 4.6 Shape and size of fatigue test specimen of SUS321 forging

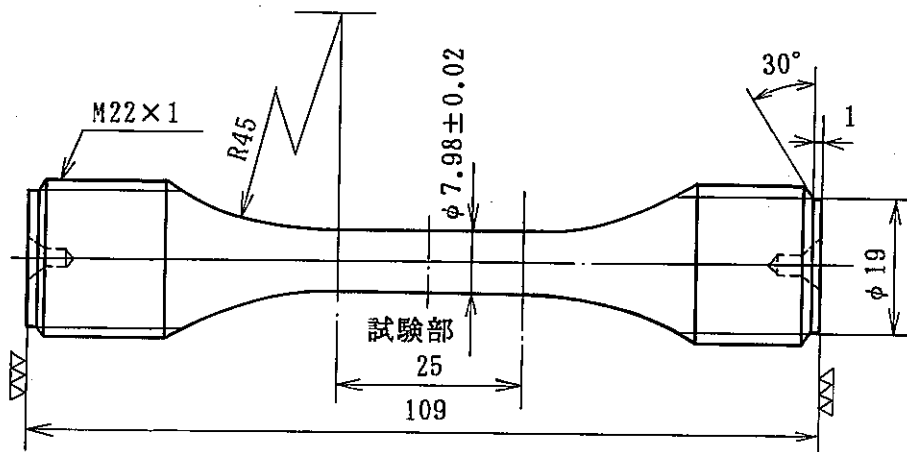


図4.7 インコネル718棒材高サイクル疲労試験片の形状寸法

Fig. 4.7 Shape and size of high-cycle fatigue test specimen of In 718 bar steel

表4.1 引張試験機の仕様

Table. 4.1 Specification of tensile testing machine

仕 様		社 内 試 験 機
1	試験機本体	
	1) 形 式	島津製 IS-10T型
	2) 最大負荷容量	10 ton
	3) クロスヘッド昇降速度	0.005~500 mm/min
	4) 負荷速度	-
2	加熱装置	
	1) 形 式	縦割型筒状炉
	2) 使用温度	MAX. 1100℃
	3) 発熱体	カンタル線
	4) 容 量	2.5 kW
3	温度調節装置	
	1) 形 式	SCR比例制御
	2) 設定範囲	MAX. 1100℃
	3) 温度調節精度	±1℃
4	温度側定記録装置	
	1) 温度記録計	YEW ERB 6-30M-23型
	2) 伸び測定装置	DTF(DS-80 ₂ -L型)

表4.2 クリープ試験機の仕様

Table.4.2 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	東京衡機製 C-3型	東京衡機製 C-4型
	2) 最大負荷容量	3000kg	3000kg
	3) レバー比	1:20	1:20
	4) フレット及びチャック	ネジ式W11/16in(S816鋼製)	ネジ式M18(C鋼)
	5) 重 錘	合計 150kg	
2	加熱装置		
	1) 形 式	C-3L型(縦割型)	FC-13型(縦割型)
	2) 使用温度	MAX 850℃	MAX 1,100℃
	3) 発 熱 体	ニクロム線	カンタルAI相当
	4) 容 量	3kW	5kW
3	温度調節装置		
	1) 形 状	PID型	SCR比例制御型
	2) 設定範囲	100~1100℃	300~1100℃
	3) 温度調節精度	±1℃	±2℃
	4) 温度検出器	白金抵抗線測温器	PR熱電対
	5) 電 源	AC100V 50Hz	AC100V 50Hz
4	温度測定記録装置		
	1) 温度記録計	日立製VKP-35型	日立製VKP-36型
	2) 補償導線	PR用	PR用
	3) 熱電対	Pt-PtRh	Pt-PtRh
5	伸び測定記録装置		
	1) 形 式	GL間の伸びを測定する方	GL間の伸びを測定する方
	2) 変位検出用治具	式アームシヨルダー型	式アームシヨルダー型
	3) ダイアルゲージ	目盛0.01, ストローク10mm	目盛0.01, ストローク10mm
	4) 変位検出器	—	差動変圧器
	5) 伸び記録計	—	横河電機製YODAC-80TYPEI
	6) フィットプリンター	—	同 上
	付帯設備	—	—

表4.3 低サイクル疲労試験機の仕様

Table.4.3 Specification of low-cycle fatigue testing 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	E20形 (±20 ton)	型式 3111.1 (±25 ton)
	2) ロードセル	FEL(37.5±25)SPKT形	型式 661.23B-01
	3) 油圧加振器	2-63-3-4(ストローク±25mm)	型式 204.71 (±75mm)
	4) サーボバルブ	76-005形	型式 252-23(19ℓ/min)
	5) グリップ	スプリットフランジ形	スプリットフランジ型
2	加熱装置		
	1) 加熱方式	高周波誘導加熱(10kW)	高周波誘導加熱(10kW)
	2) 温度コントローラ	SCR点弧角度制御	SCR位相制御
	3) 温度記録計	2ペン記録計	EU-100型, 1ペン記録(千線)
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	なし。指令はプログラムフ	型式 PDP11/04
	3) インターフェース	アクション・ジェネレータ	2.8Kワード
	4) 周辺機器	アラームユニット	型433(ハードウェアセグメントジェネレータ)
	5) アナログ制御部	コントロールユニット	型式 4010グラフィクスプレーユニット
	6) 記録計	X-Y記録計、2ペン記録計	型式 631ハードコピーユニット
4	伸び計		
	1) 軸伸び計	差動トランス形	型式 632.51C-01(ひずみゲージ型)
	2) 径伸び計	ひずみゲージ形	型式 632.61C-02(ひずみゲージ型)
5	油圧供給源		
	1) 油圧ポンプ	QF-40(210kg/cm ² , 42ℓ/min)	型式506-01(210kg/m ² , 9.5/min)
	2) 油圧ホース	高圧ゴムホース	高圧ゴムホース
6	特殊装置	強制冷却装置	

表4.4 高サイクル疲労試験機の仕様

Table. 4.4 Specification of high-cycle fatigue testing machine

仕 様		社 内 試 験 機
1	試験機本体	
	1) 形 式	東京衡機製電磁共振型 バイプロフォー
	2) 最大負荷容量	10 ton
2	3) 繰返し速度	110~150 Hz
	加熱装置	
	1) 形 式	横割筒形治具
	2) 使用温度	MAX 700℃
3	3) 発 熱 体	マイクロヒータ (ニクロム線)
	4) 容 量	600W
	温度調節装置	
	1) 形 式	リレー式
	2) 設定範囲	R.T. ~ 1000℃
	3) 温度調節精度	± 3℃

5. 試験結果

5.1 SUS321伝熱管 ($\phi 31.8 \times 3.5$ t) 予ひずみ材

5.1.1 予ひずみ材の引張試験結果

表5.1及び表5.2に試験結果を示す。図5.1は3%予ひずみ材の真全ひずみ3%までの真応力-真ひずみ関係を、図5.2は5%予ひずみ材の真全ひずみ3%までの真応力-真ひずみ関係を示す。

表5.3～表5.6は同関係を数値で示す。

図5.3は表5.1及び表5.2に示す0.2%耐力、引張強さ及び真破断応力の温度依存性を示し、図5.4は破断伸び、絞りの温度依存性を示す。図5.5は真破断延性及び真一様伸びの温度依存性を示す。

0.2%耐力及び引張強さともに、各試験温度における原型炉材料強度基準の S_y 、 S_u 値を上まわっている。

写真5.1は、引張試験後の試験片外観を示す。

破断位置は、表5.1及び表5.2にも示すごとく大部分の試験片がA部破断である。

5.1.2 予ひずみ材の低サイクル疲労試験結果

表5.7に試験結果の一覧表を示す。比較的低いひずみ範囲の試験ではG.L.外で破断した試験片が多い。しかし、G.L.内にもき裂が発生しており、破断寿命はG.L.外が破断するまでの繰返し数に若干割増した値となることが推定される。またこの表のひずみ範囲 $\Delta \epsilon_t$ と破断寿命 N_f の関係を図6.9に示した。

図5.6及び図5.7はそれぞれ3%及び5%予ひずみ材の繰返しに伴う応力範囲 $\Delta \sigma$ の変化を示したものである。ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_t$ が小さい場合には3%予ひずみ材の方が5%予ひずみ材に比べ冷間加工度が小さいため応力範囲が小さい。しかし、 $\Delta \epsilon_t$ が大きい場合、繰返し数が小さい領域では予ひずみの影響が現われるが、繰返しが進むにつれ、繰返し加工硬化が現われ、3%材と5%材の間に差は見られない。

写真5.2は疲労試験後の試験片外観を示す。STS-26, 2TS-34,

2TS-32及び2TS-35はG.L.外破断である。

5.2 SUS321伝熱管 ($\phi 31.8 \times 3.5$ t) 母材

5.2.1 クリープ試験結果

表5.8は試験結果を示す。図5.8及び図5.9はクリープ曲線を示す。図5.10は応力と定常クリープ速度の関係を示し、図5.11は応力とクリープ破断時間の関係を示す。550℃試験値は原型炉材料強度基準のSR値 ($\alpha_R=10$) を十分上まわる。

図5.12は破断伸びとクリープ破断時間の関係を示し、図5.13は絞りとクリープ破断時間の関係を示す。破断位置が伸び検出用ツバのルート部であるため破断伸び・絞りともに低い値を示す。

写真5.3は破断後のクリープ試験片外観を示す。

5.2.2 低サイクル疲労試験結果

表5.9にSUS321伝熱管 ($\phi 31.8 \times 3.5$ t) 母材の低サイクル疲労試験結果をまとめて示す。試験温度430℃の場合には保持時間 $t_H=10$ 分、500℃及び550℃の場合には $t_H=0, 10, 60$ 分である。

500℃でひずみ保持時間 $t_H=0$ 分の場合ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_t=0.5\%$ 以下で、また430℃では $t_H=10$ 分の場合、 $\Delta \epsilon_t=1.0\%$ でG.L.外破断となった。 $\Delta \epsilon_t$ と N_f の関係は図6.11～図6.13に示した。 $t_H=0$ の繰返し応力範囲の挙動を500℃及び550℃の場合につきそれぞれ図5.14及び図5.15に示した。また $t_H=10$ 分及び $t_H=60$ 分の場合につき繰返し応力範囲の挙動をそれぞれ図5.16及び図5.17に示した。ひずみ保持時間がある場合には温度が高い方が $\Delta \sigma$ が大きい挙動を示す。

写真5.4は疲労試験後の試験片外観を示す。

5.3 SUS321鍛造材 (350 t)

5.3.1 クリープ試験結果

表5.10は試験結果を示す。図5.18～図5.22はクリープ曲線を示す。

図5.23は応力と定常クリープ速度の関係を示し、図5.24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

SUS304材のSR値を上まわる。

図5.25は破断伸びとクリープ破断時間の関係を示し、図5.26は絞りとクリープ破断時間の関係を示す。550℃における破断伸び絞りはおよそ10⁴時間までに30%以上の値を有している。

写真5.5及び写真5.6は破断後のクリープ試験片外観を示す。

5.3.2 低サイクル疲労試験結果

SUS321鍛造材母材の低サイクル疲労試験結果を表5.11にまとめて示す。500℃及び550℃ではひずみ保持時間 t_H を0, 10分及び60分とした。600℃では $t_H=0$ のみの試験を実施した。

試験結果のうち $\Delta \epsilon_t$ と N_f の関係を図6.15, 図6.17, 図6.18に示した。図5.27～図5.30は応力範囲 $\Delta \sigma$ の繰返し挙動を示したものである。 $t_H=0$ 分の場合、 $\Delta \epsilon_t=0.4\%$ では $\Delta \sigma$ に及ぼす試験温度の影響は少ない。 $\Delta \epsilon_t$ が1%以上では550℃の $\Delta \sigma$ が一番大きく、550℃, 600℃の順に小さくなる。 $t_H=10$ 分の場合、 $\Delta \epsilon_t=0.8\%$, 1.0%及び1.4%のいずれの $\Delta \epsilon_t$ に対してもほぼ同じ $\Delta \sigma$ となっている。

写真5.7は低サイクル疲労後の試験片の外観及び破面のマクロ写真である。

5.3.3 クリープ損傷試験

表5.12は試験結果を示す。

試験応力は目標破断時間2000時間としたものであるが、500℃については低め、550℃については高めの設定となった。破断時間に対する損傷率は目標通りである。

写真5.8は試験後のクリープ損傷試験片外観を示す。

5.4 インコネル718棒材

5.4.1 高サイクル疲労試験

表5.13にインコネル718棒材の高温高サイクル疲労試験結果を示す。また、写真5.9には試験片及び破面の外観写真を示す。鏡面研磨材と中仕上材は内部の粗大結晶粒を起点としているが、荒仕上材と微小き裂材では加工傷やき裂を起点としている。

表5.1 引張試験結果 (SUS321 伝熱管3%予ひずみ材)

Table. 5.1 Results of tensile test (SUS321 3% pre-strained tube)

試験材料	試験温度 (°C)	試験片番号 (EH-)	工学的特性						真の特性		
			0.2% 耐力 (kgf/cm ²)	引張 強さ (kgf/cm ²)	一様 伸び (%)	破断 伸び (%)	絞り (%)	破断 位置	真破断 応力 (kgf/cm ²)	真一様 伸び (%)	真破断 延性 (%)
SUS321 伝熱管 (φ31.8 ×3.5t) 3% 予ひず み材	RT	301	34.2	64.3	54.0	61.2	76.1	A	181.1	43.2	143.1
		302	35.2	62.2	54.0	61.5	76.5	"	167.9	43.2	144.8
	100	303	28.8	51.1	41.0	47.2	79.9	"	158.5	34.4	160.5
		304	30.2	52.2	41.0	49.7	78.6	"	152.8	34.4	154.2
	200	305	26.8	48.0	34.0	40.5	70.9	"	112.4	29.3	123.4
		306	27.6	48.6	33.0	39.5	70.8	"	112.2	28.5	123.1
	300	307	25.6	48.0	33.0	37.5	66.4	"	101.1	28.5	109.1
		308	27.9	48.7	32.5	37.1	64.5	"	100.3	28.1	103.6
	350	309	26.5	49.1	34.5	39.2	60.4	"	90.9	29.6	92.6
		310	25.8	49.1	33.0	38.0	57.6	"	86.2	28.5	85.8
	400	311	24.8	48.7	32.0	36.1	62.1	"	97.5	27.8	97.0
		312	24.2	49.0	33.0	36.6	55.3	"	86.2	28.5	80.5
	450	313	24.5	48.5	32.0	36.6	57.6	"	89.0	27.8	85.8
		314	24.8	48.9	34.0	39.0	56.0	"	85.9	29.3	82.1
	500	315	24.0	47.2	33.0	36.6	60.0	"	89.1	28.5	91.6
		316	22.7	47.2	33.5	37.7	65.3	B	84.1	28.9	82.8
	550	317	23.1	46.7	32.0	36.1	56.3	A	83.6	27.8	82.8
		318	23.9	45.9	33.5	38.0	47.4	"	81.0	28.9	85.3
	600	319	22.0	44.8	31.0	34.8	54.8	"	72.6	27.0	79.4
		320	22.9	45.8	33.0	36.4	57.3	"	82.7	28.5	85.1

表5.2 引張試験結果 (SUS321 伝熱管5%予ひずみ材)

Table. 5.2 Results of tensile test (SUS321 5% pre-strained tube)

試験材料	試験温度 (°C)	試験片番号 (EH-)	工学的特性						真の特性		
			0.2% 耐力 (kgf/m ²)	引張強さ (kgf/m ²)	一様伸び (%)	破断伸び (%)	絞り (%)	破断位置	真破断応力 (kgf/m ²)	真一様伸び (%)	真破断延性 (%)
SUS321 伝熱管 (φ31.8 ×3.5t) 5% 予ひず み材	RT	501	37.8	63.2	52.0	59.4	79.4	A	200.2	41.9	158.0
		502	37.8	62.1	52.0	60.0	77.4	"	181.3	41.9	148.7
	100	503	35.1	53.4	35.0	42.9	73.3	"	140.6	30.0	132.1
		504	34.1	52.3	34.8	42.2	76.7	"	142.0	29.9	145.7
	200	505	31.9	49.0	29.5	35.7	74.8	"	124.9	25.9	137.8
		506	33.0	49.8	30.0	36.0	70.6	"	111.6	26.2	122.4
	300	507	30.6	49.7	30.0	34.1	65.0	"	106.7	26.2	105.0
		508	31.2	49.7	29.0	33.2	60.7	"	92.4	25.5	93.4
	350	509	30.4	50.4	30.5	35.9	59.0	"	91.3	26.6	89.2
		510	30.0	50.5	29.0	33.5	57.2	"	92.1	25.5	84.9
	400	511	29.3	50.5	30.0	34.3	60.4	"	99.2	26.2	92.6
		512	28.8	50.0	30.0	33.8	60.0	"	92.4	26.2	91.6
	450	513	28.8	49.3	31.5	35.2	54.0	B	84.4	27.4	77.7
		514	30.5	49.9	29.6	34.3	56.0	A	84.6	25.9	82.1
	500	515	28.3	48.5	30.0	33.5	57.0	"	88.2	26.2	84.4
		516	28.6	48.3	31.0	35.2	57.3	"	85.7	27.0	85.1
	550	517	28.6	48.2	30.0	34.4	53.4	"	80.0	26.2	76.4
		518	29.0	48.0	30.5	34.9	55.3	"	82.5	26.6	80.5
	600	519	27.3	46.1	30.0	35.1	55.9	"	77.9	26.2	81.9
		520	27.9	46.4	27.5	31.7	55.0	"	80.5	24.3	79.9

表5.3 真応力と真ひずみの関係 (SUS321伝熱管、3%予ひずみ材)

Table. 5.3 True stress vs. true strain (SUS321, 3% pre-strained tube)

ε t	σ										
	20°C		100°C		200°C		300°C		350°C		
	EH-301	EH-302	EH-303	EH-304	EH-305	EH-306	EH-307	EH-308	EH-309	EH-310	
0.10	14.66			14.91	13.75	13.82	15.24	14.48			
0.15	21.03	19.31	20.01	21.29	20.09	19.82	19.87	20.45	20.39	21.58	
0.20	26.15	24.43	24.33	26.29	23.76	23.64	22.82	23.84	24.08	23.96	
0.25	30.70	29.46	27.02	29.20	25.48	25.63	24.34	26.32	25.47	24.97	
0.30	32.63	32.37	28.07	30.02	26.37	26.73	25.09	27.19	26.10	25.50	
0.35	33.54	33.94	28.51	30.17	26.69	27.45	25.66	27.73	26.34	25.81	
0.40	34.09	34.85	28.87	30.28	26.92	27.77	25.98	28.00	26.53	25.95	
0.45	34.60	35.31	29.15	30.42	27.06	28.09	26.16	28.15	26.63	26.01	
0.50	34.93	35.46	29.29	30.62	27.30	28.24	26.44	28.20	26.69	26.11	
0.60	35.28	35.63	29.54	30.87	27.41	28.57	26.64	28.36	26.90	26.44	
0.70	35.44	35.71	29.74	31.04	27.66	28.65	26.71	28.69	27.19	26.68	
0.80	35.57	35.79	29.94	31.34	27.91	28.98	27.08	28.94	27.44	27.06	
0.90	35.78	36.00	30.15	31.41	28.15	29.28	27.20	29.19	27.60	27.17	
1.00	35.91	36.26	30.39	31.58	28.31	29.35	27.27	29.43	27.94	27.42	
1.49	36.85	37.43	31.03	32.50	29.56	30.60	28.14	30.37	28.89	28.43	
1.98	37.94	38.12	31.97	33.34	30.51	31.56	28.94	31.27	29.93	29.36	
2.96	39.68	39.95	33.43	35.05	32.11	33.31	30.65	33.26	31.73	31.11	
3.92	41.22	41.63	35.15	36.68	33.78	34.76	32.43	34.71	33.60	33.07	
4.88	43.02	43.47	36.84	38.20	35.43	36.25	33.96	36.22	35.23	34.65	
5.83	44.70	44.87	38.33	39.74	36.79	37.89	35.56	37.76	36.55	36.08	
6.77	46.07	46.48	39.89	41.31	38.16	39.27	36.96	39.22	38.13	37.48	
7.70	47.70	47.78	41.29	42.65	39.55	40.63	38.56	40.57	39.63	39.09	
8.62	49.11	49.23	42.84	44.02	41.01	41.91	39.95	41.88	41.01	40.62	
9.53	50.68	50.71	44.04	45.74	42.25	43.31	41.41	43.36	42.55	41.85	
11.33	53.59	53.37	46.53	47.97	44.63	45.76	43.90	45.89	45.11	44.64	
13.10	56.32	55.99	49.28	48.42	47.12	48.22	46.36	48.43	47.43	47.40	
14.84	59.26	58.41	51.84	53.19	49.36	50.33	48.92	50.83	50.01	49.73	
16.55	61.80	60.94	54.10	55.53	51.50	52.64	51.04	52.98	52.23	52.11	
18.23	64.34	63.19	56.21	57.37	53.57	54.59	53.25	55.07	54.39	54.44	
19.89	66.88	65.60	58.30	59.42	55.48	56.51	55.24	56.89	56.32	56.45	
21.51	69.35	67.88	60.59	61.38	57.20	58.25	57.00	58.62	58.45	58.50	
23.11	71.87	70.09	62.27	63.10	58.94	59.90	58.96	60.27	60.01	60.21	
24.69	74.09	72.34	63.81	64.79	60.55	61.52	60.44	61.62	61.76	62.04	
26.24	76.40	74.51	65.37	66.43	61.85	62.94	61.84	63.14	63.24	63.46	
27.76	78.51	76.71	66.77	67.81	63.25	64.20	63.19	64.17	64.45	64.61	
29.27	80.77	78.70	68.07	69.13	64.26	65.17	63.74	64.10	65.84	65.64	
30.75	82.94	80.78	69.38	70.47	64.81	64.66	58.82	57.54	65.62	65.75	
32.21	85.02	82.76	70.58	71.75	62.15	58.49			60.96		
33.65	87.00	84.58	71.60	72.85	51.45						
35.07	89.06	86.55	72.02	73.89							
36.46	90.95	88.41	70.24	74.49							
37.84	92.54	90.02	62.23	73.70							
39.20	94.47	91.78		68.66							
40.55	96.07	93.15									
41.87	97.76	94.53									
43.18	99.05	95.84									
44.47	100.26	96.88									
45.74	99.23	96.16									
47.00	89.70	88.51									
*	ε t	0.089	0.141	0.107	0.091	0.085	0.093	0.079	0.100	0.115	0.100
	σ	13.55	18.87	15.08	13.35	12.00	13.12	12.95	14.48	16.62	16.09
**	ε t	43.18	43.18	34.36	34.36	29.27	28.52	28.52	28.14	29.64	28.52
	σ	99.05	95.84	72.12	73.56	64.26	64.68	63.84	64.59	66.08	65.33
***	ε t	47.75	47.93	38.66	40.35	34.00	33.29	31.85	31.55	33.07	32.21
	σ	69.76	63.71	46.90	48.94	45.94	45.72	46.73	48.83	50.09	50.54

注) * : 比例限特性, ** : 最高荷重点特性, *** : 破断点特性

ε t : True total strain (%), σ : True Stress (kgf/mm²)

表5.4 真応力と真ひずみの関係 (SUS321伝熱管、3%予ひずみ材)

Table. 5.4 True stress vs true strain (SUS321, 3% Pre-strained tube)

ϵt	σ										
	400°C		450°C		500°C		550°C		600°C		
	EH-311	EH-312	EH-313	EH-314	EH-315	EH-316	EH-317	EH-318	EH-319	EH-320	
0.10				12.64	14.88	15.09	16.82	17.69	16.63	13.56	
0.15		14.78	20.08	17.98	19.27	19.00	19.75	21.16	19.40	18.29	
0.20	19.26	18.70	23.03	21.42	21.69	20.62	21.46	22.72	20.59	20.67	
0.25	21.99	21.02	23.91	23.06	22.71	21.71	22.46	23.55	21.26	21.66	
0.30	23.76	22.20	24.22	24.11	23.42	22.38	23.15	23.78	21.97	22.39	
0.35	24.61	23.43	24.58	24.62	24.05	22.87	23.61	24.05	22.38	22.80	
0.40	24.80	23.88	24.68	24.91	24.28	23.40	23.85	24.20	22.96	23.22	
0.45	24.95	24.37	24.82	25.06	24.55	23.63	24.08	24.29	23.10	23.50	
0.50	25.05	24.56	24.88	25.34	24.74	23.95	24.23	24.39	23.34	23.64	
0.60	25.38	25.02	25.08	25.55	25.21	24.14	24.48	24.63	23.75	24.11	
0.70	25.54	25.18	25.32	25.80	25.36	24.43	24.82	25.96	24.13	24.36	
0.80	25.87	25.38	25.65	26.10	25.70	24.72	25.03	25.20	24.24	24.61	
0.90	26.12	25.75	26.02	26.21	25.94	25.09	25.32	22.45	24.53	24.72	
1.00	26.50	25.91	26.13	26.56	26.06	25.29	25.57	25.69	24.73	24.75	
1.49	27.30	27.10	27.36	27.65	27.07	25.94	26.29	26.39	25.43	25.46	
1.98	28.19	28.34	28.59	28.71	27.88	26.95	27.20	27.40	26.23	26.27	
2.96	30.05	30.09	30.34	30.43	29.64	28.69	29.22	29.26	28.15	28.22	
3.92	32.31	32.05	32.07	32.51	31.29	30.55	31.13	30.85	29.92	29.89	
4.88	33.63	33.64	33.51	33.86	32.97	32.30	32.70	32.14	31.45	31.58	
5.83	35.30	35.43	35.20	35.52	34.53	33.66	34.34	33.82	33.05	33.29	
6.77	36.85	36.60	36.69	36.92	35.93	35.23	35.72	35.20	34.43	34.61	
7.70	38.52	38.21	37.96	38.39	37.69	36.73	37.17	36.55	35.89	36.09	
8.62	39.65	39.65	39.39	39.82	38.99	38.39	38.49	37.97	37.42	37.39	
9.53	41.02	41.06	40.80	40.98	40.31	39.79	40.08	39.36	38.72	39.21	
11.33	43.88	43.90	43.62	43.60	42.85	42.45	42.81	41.91	41.58	41.91	
13.10	46.47	46.51	46.12	46.28	45.51	45.09	45.37	44.38	44.02	44.34	
14.84	48.86	49.09	48.53	49.08	47.58	47.74	47.72	46.76	46.06	46.51	
16.55	51.51	51.48	50.89	51.36	50.05	49.84	50.13	49.09	48.50	48.68	
18.23	53.70	53.65	53.10	53.59	52.10	51.95	52.16	51.11	50.43	50.79	
19.89	55.94	55.87	55.40	55.85	54.04	54.07	53.85	53.02	52.28	52.89	
21.51	58.11	57.86	57.49	58.06	55.74	55.92	55.74	54.74	53.95	54.58	
23.11	59.87	59.50	59.23	59.73	57.57	57.59	57.48	56.38	55.37	56.14	
24.69	61.50	61.56	61.00	61.49	59.22	59.33	59.08	57.89	56.98	57.77	
26.24	63.20	63.37	62.51	63.04	60.82	60.99	60.47	59.13	58.21	59.08	
27.76	64.29	64.52	63.99	64.54	62.05	62.22	61.70	60.44	58.59	60.28	
29.27	63.20	64.74	63.57	65.58	62.69	63.16	61.43	61.41	53.50	60.24	
30.75	54.48	58.44	57.07	65.82	55.99	61.27	52.72	59.51		53.02	
32.21				60.25							
*	ϵt	0.163	0.147	0.132	0.097	0.077	0.075	0.064	0.080	0.061	0.087
	σ	16.48	14.13	18.35	12.42	12.03	11.92	12.91	12.94	12.03	12.26
**	ϵt	27.76	28.52	27.76	29.27	28.52	28.89	27.76	28.89	27.00	28.52
	σ	64.29	65.18	64.04	65.58	62.81	63.04	61.70	61.29	58.72	60.91
***	ϵt	30.82	31.19	31.19	32.93	31.19	31.19	30.82	32.21	29.86	31.04
	σ	50.16	52.65	51.55	52.54	48.68	50.59	49.71	47.60	44.21	48.19

注) * : 比例限特性, ** : 最高荷重点特性, *** : 破断点特性

ϵt : True total strain (%), σ : True Stress (kg f / mm²)

表5.5 真応力と真ひずみの関係 (SUS321伝熱管、5%予ひずみ材)

Table. 5.5 True stress vs. true strain (SUS321, 5% pre-strained tube)

ε t	σ										
	20°C		100°C		200°C		300°C		350°C		
	EH-501	EH-502	EH-503	EH-504	EH-505	EH-506	EH-507	EH-508	EH-509	EH-510	
0.15	21.80						22.21	23.65	21.14	19.87	
0.20	27.92		23.81	21.57	21.53	20.64	26.76	27.46	25.47	24.14	
0.25	33.31	27.07	28.33	25.87	26.05	24.9	28.59	29.62	27.89	26.87	
0.30	36.31	31.88	31.58	29.56	29.09	27.93	29.51	30.52	29.22	28.40	
0.35	37.16	35.18	33.64	33.21	29.55	30.21	30.20	31.08	30.01	29.19	
0.40	37.73	36.57	34.49	33.22	31.55	31.59	30.67	31.36	30.44	29.90	
0.45	37.93	37.28	35.04	33.68	31.88	32.52	31.05	31.69	30.77	30.37	
0.50	38.04	37.80	35.42	34.14	32.22	32.99	31.39	31.79	30.83	31.85	
0.60	38.13	38.16	35.58	34.44	32.47	33.48	31.64	32.05	31.23	31.48	
0.70	38.21	38.29	35.71	34.65	32.78	33.74	31.86	32.13	31.49	31.74	
0.80	38.53	38.55	36.01	34.91	32.90	34.14	32.07	32.52	31.61	31.91	
0.90	38.66	38.73	36.31	35.17	33.07	34.26	32.38	32.60	32.01	32.12	
1.00	38.88	38.86	36.48	35.34	33.33	34.48	32.46	32.76	32.13	32.39	
1.49	69.91	39.88	37.43	35.87	34.18	35.15	33.31	33.69	32.89	33.25	
1.98	40.81	40.54	38.29	36.68	34.85	35.93	34.16	34.54	33.70	34.25	
2.96	42.39	42.16	39.80	38.17	36.35	37.54	35.90	36.39	35.25	35.81	
3.92	44.04	44.09	41.47	40.06	38.11	38.99	37.61	37.91	37.05	37.64	
4.88	45.62	45.61	42.89	41.60	39.56	40.55	39.11	39.53	38.74	39.35	
5.83	47.12	47.20	44.47	42.79	40.65	41.99	40.35	40.90	40.07	40.69	
6.77	48.54	48.72	45.83	44.28	42.00	43.50	41.55	42.15	41.42	41.96	
7.70	49.89	50.31	47.22	45.88	43.36	44.89	43.02	43.55	42.89	43.44	
8.62	51.60	51.61	48.52	47.03	44.59	46.14	44.40	44.93	44.18	44.94	
9.53	52.93	52.84	49.79	48.48	45.89	47.31	45.70	46.07	45.50	46.11	
11.33	55.33	55.59	52.43	50.80	48.09	49.59	48.31	48.66	48.09	48.74	
13.10	57.99	58.29	54.77	53.11	50.48	51.66	50.72	51.15	50.50	51.18	
14.84	60.60	60.63	57.01	55.42	52.46	53.83	52.92	53.29	52.81	53.56	
16.55	63.27	63.02	59.04	57.68	54.38	55.83	54.96	55.42	54.95	55.73	
18.23	65.44	65.35	60.94	59.56	56.16	57.59	56.97	57.48	57.19	57.72	
19.89	67.87	67.21	62.77	61.41	58.03	59.43	58.75	59.25	59.25	59.69	
21.51	70.18	69.33	64.51	63.19	59.82	61.08	60.33	60.83	60.95	61.35	
23.11	72.29	71.71	66.21	64.76	61.18	62.63	61.88	62.32	62.62	63.92	
24.69	74.67	73.73	67.83	66.35	62.44	63.74	63.44	63.48	63.96	64.50	
26.24	76.85	75.77	69.12	67.56	63.71	64.80	64.61	63.72	65.49	65.39	
27.76	78.94	77.71	70.42	68.89	63.80	64.72	61.84	58.11	65.96	60.95	
29.27	80.94	79.62	71.60	70.06	58.92	61.03			62.95		
30.75	82.95	81.62	72.67	70.98							
32.21	84.74	83.32	73.13	70.62							
33.65	86.68	85.10	71.28	67.02							
35.07	88.50	86.83	62.71	55.76							
36.46	90.28	88.51									
37.84	91.93	90.08									
39.20	93.33	91.65									
40.55	94.73	93.02									
41.87	96.13	94.33									
43.18	97.04	95.36									
44.47	95.65	94.47									
45.74	85.80	88.06									
*	ε t	0.138	0.197	0.183	0.160	0.180	0.159	0.137	0.107	0.112	0.133
*	σ	20.65	21.81	22.12	17.68	21.53	17.00	20.98	17.84	17.04	18.35
**	ε t	41.87	41.87	30.01	29.86	25.85	26.24	26.24	25.46	26.62	25.46
**	σ	96.13	94.33	72.14	70.47	63.46	64.80	64.61	64.09	65.74	65.18
***	ε t	46.62	47.00	35.70	35.21	30.53	30.75	29.34	28.67	30.67	28.89
***	σ	65.74	65.57	63.64	47.05	42.71	44.64	50.07	48.37	50.88	52.59

注) * : 比例限特性, ** : 最高荷重点特性, *** : 破断点特性

ε t : True total strain (%) , σ : True Stress (kgf/mm²)

表5.6 真応力と真ひずみの関係 (SUS321 伝熱管、5%予ひずみ材)

Table. 5.6 True stress vs. true strain (SUS321, 5% pre-strained tube)

ε t	σ										
	400°C		450°C		500°C		550°C		600°C		
	EH-501	EH-502	EH-503	EH-504	EH-505	EH-506	EH-507	EH-508	EH-509	EH-510	
0.15	21.31	23.12	18.56								
0.20	25.54	26.27	23.66	25.61	21.66	21.99	25.34	25.23	23.22	23.82	
0.25	27.58	27.54	26.33	28.24	24.90	24.58	27.17	27.03	25.32	25.97	
0.30	28.59	28.46	27.62	29.40	26.29	26.24	27.86	28.39	26.45	27.01	
0.35	29.23	28.79	28.12	30.01	27.00	27.37	28.37	28.72	26.91	27.65	
0.40	29.65	29.20	28.80	30.35	27.71	28.18	28.57	29.00	27.19	27.88	
0.45	29.98	29.62	29.04	30.64	28.32	28.69	28.81	29.11	27.51	28.12	
0.50	30.13	29.73	29.19	30.75	28.66	29.01	28.96	29.21	27.79	28.36	
0.60	30.43	29.94	29.57	31.01	28.96	29.44	29.08	29.38	28.22	28.83	
0.70	30.55	30.06	29.96	31.13	29.18	28.74	29.33	29.63	28.34	29.09	
0.80	30.95	30.45	30.16	31.39	29.39	30.08	29.59	29.89	28.59	29.25	
0.90	31.07	30.57	30.50	31.66	29.61	30.20	29.85	30.14	29.02	29.59	
1.00	31.28	30.78	30.76	31.92	29.73	30.32	30.11	30.44	29.18	29.85	
1.49	32.48	31.62	31.58	32.59	30.34	30.97	30.94	31.23	30.09	30.62	
1.98	33.42	32.60	32.55	33.40	31.43	31.66	31.79	31.93	30.97	31.41	
2.96	35.13	34.39	34.00	35.29	32.92	33.25	33.26	33.35	32.41	33.18	
3.92	36.88	36.13	35.48	36.92	34.58	34.96	34.76	34.88	34.25	34.66	
4.88	38.31	37.60	36.98	38.47	36.22	36.46	36.42	36.39	35.60	36.16	
5.83	39.96	39.20	38.50	40.01	37.78	38.07	38.20	37.92	36.88	37.59	
6.77	41.21	39.20	40.05	41.41	39.27	39.38	39.38	39.48	38.41	38.89	
7.70	42.80	40.67	41.37	42.79	40.48	40.85	40.63	41.00	39.73	40.31	
8.62	44.08	42.26	42.72	44.18	42.01	42.20	41.99	42.16	41.06	41.65	
9.53	45.67	43.48	44.08	45.39	43.15	43.41	43.47	43.29	42.32	43.06	
11.33	48.26	44.87	46.86	47.96	45.84	45.84	46.18	45.98	44.82	45.69	
13.10	50.65	47.64	49.21	50.28	48.65	48.07	48.81	48.43	47.14	47.87	
14.84	53.00	49.87	51.61	52.65	50.95	50.41	50.97	50.63	48.99	50.00	
16.55	55.35	52.10	54.06	54.86	53.46	52.59	53.03	52.72	50.99	51.91	
18.23	58.71	54.37	56.03	57.05	55.19	54.70	55.17	54.74	52.92	53.59	
19.89	59.30	56.64	57.88	58.84	57.12	56.70	56.75	56.47	54.39	55.46	
21.51	61.22	58.78	59.54	60.71	58.91	58.18	58.24	57.95	55.94	57.03	
23.11	62.94	60.58	61.17	62.21	60.44	59.73	29.98	59.44	57.40	58.23	
24.69	64.52	62.18	62.71	63.61	61.81	61.19	61.45	60.85	58.71	59.04	
26.24	65.46	63.68	63.97	64.78	63.08	62.55	52.70	62.20	59.92	56.32	
27.76	64.16	64.97	64.96	64.39	60.71	63.39	62.60	62.75	59.96		
29.27	55.63	62.42	60.62	53.70		59.00	55.68	56.81	53.63		
*	ε t	0.100	0.100	0.148	0.153	0.160	0.150	0.150	0.172	0.150	0.153
	σ	15.05	16.82	18.48	20.09	18.43	17.76	19.90	22.98	18.86	20.03
**	ε t	26.24	26.24	27.38	25.93	26.24	27.00	26.24	26.62	26.24	24.29
	σ	65.64	64.97	64.77	64.77	63.08	63.32	32.70	62.62	59.92	59.20
***	ε t	29.49	29.12	30.16	29.49	28.89	30.16	29.57	29.94	30.08	27.54
	σ	52.74	49.48	52.51	50.01	50.65	49.46	50.08	49.77	46.40	47.69

注) *: 比例限特性, **: 最高荷重点特性, ***: 破断点特性

ε t : True total strain (%), σ : True Stress (kgf/mm²)

表5.7 SUS321伝熱管予ひずみ材の高温低サイクル疲労試験結果

Table. 5.7 Results of low-cycle fatigue test on SUS321 pre-strained tube

試験片番号	予ひずみ度	保持時間 (min)	ひずみ範囲 (%)			応力範囲 $\Delta \sigma$ (kgf/mm ²)	破断寿命 Nf (回)	備考
			$\Delta \epsilon t$	$\Delta \epsilon p$	$\Delta \epsilon e$			
2TS-25	5%	0	1.4	0.865	0.535	83.5	316	
2TS-29			1.0	0.52	0.48	74.5	1196	
2TS-28			0.7	0.285	0.415	64.4	3646	G.L.内外で破断
2TS-27			0.5	0.105	0.395	62.4	8347	
2TS-26	3%	0	0.4	0.053	0.347	54.9	>21063	G.L.外破断、き裂有
2TS-33			1.4	0.87	0.53	81.3	388	
2TS-31			1.0	0.50	0.50	72.4	990	
2TS-34			0.7	0.275	0.425	63.4	>3125	G.L.外破断、き裂有
2TS-32			0.5	0.145	0.355	56.6	>7572	G.L.外破断、き裂有
2TS-35			0.4	0.055	0.345	52.7	>32148	G.L.外破断、き裂有

* 試験温度：550℃、ひずみ速度：0.1%/sec

表5.8 SUS321伝熱管のクリープ試験結果
Table.5.8 Results of creep test on SUS321 tube

材料	SUS321HTB		素材形状寸法		φ31.8×3.5t×ℓ		熱処理		1160°CWQ		
			Heat No	A991703			材料製造者	住友金属工業			
		化学成分 (wt%)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	溶接方法		---	
0.08	0.56	1.48	0.023	0.004	17.60	11.45	0.41	試験片形状	W6×t3.5×GL30		
温度 (°C)	試験片番号	応力 (kgf/mm ²)	破断時間 (h)	破断伸び (%)	絞り (%)	破断位置 ※	瞬間ひずみ (%)	クリープひずみ (%)	規定クリープ開始時間 (h)	定常クリープ速度 (%/h)	
550	B-36	30	6776.5	7.5	12.3	C	7.34	第1期 0.04	第2期 1000	4.133×10 ⁻⁵	
								第3期 -	第3期 6776		

※: J I S Z 2 2 4 1

表5.9 SUS321伝熱管の高温低サイクル疲労試験結果
 Table. 5.9 Results of low-cycle fatigue test on SUS321 tube

試験片番号	試験温度 (°C)	保持時間 (min)	ひずみ範囲 (%)			応力範囲 (kgf/mm ²)	破断寿命 (回)	備考
			$\Delta \epsilon t$	$\Delta \epsilon P$	$\Delta \epsilon e$			
2T-17	430	10	1.4	0.89	0.51	82.3	1275	
2T-18			1.0	0.65	0.435	69.4	>3274	G.L.外破断,微小き裂有り
2T-21			1.4	0.87	0.53	84.2	798	
2T-19	500	0	1.0	0.55	0.45	68.0	1911	
2T-20			0.7	0.38	0.32	58.7	5716	
2T-22			0.5	0.19	0.31	52.8	>20602	G.L.外破断,微小き裂有り
2T-23			0.4	0.11	0.29	48.1	>30652	G.L.外破断,微小き裂有り
2T-24			0.4	0.12	0.28	48.9	>29774	G.L.外破断,微小き裂有り
2T-12			1.4	0.895	0.505	88.7	594	
2T-11	10	10	1.0	0.503	0.497	80.1	1055	
2T-10			0.7	0.263	0.437	75.3	16851	
2T-15			1.4	0.841	0.559	91.5	463	
2T-06	550	0	1.4	0.89	0.51	80.2	436	
2T-02			1.0	0.52	0.48	73.4	983	G.L.外破断,微小き裂有り
2T-04			0.7	0.29	0.41	46.7	3104	
2T-05			0.5	0.14	0.36	56.5	10253	
2T-03			0.4	0.078	0.322	49.8	48331	G.L.外破断,微小き裂有り
2T-01			1.4	1.02	0.38	91.1	171	
2T-07	10	10	1.0	0.51	0.49	83.8	426	
2T-08			0.7	0.255	0.445	72.0	513	
2T-09			0.7	0.26	0.44	75.3	370	
2T-13	60	60	1.4	0.875	0.525	87.7	86	
2T-14			1.0	0.492	0.508	81.0	144	

表 5.10 クリープ試験結果

Table.5.10 Results of creep test

材 料	SUS321 鍛造材		素材形状寸法		350t×350φ×370φ		熱 処 理		1020-1067°C, 15hr55min, WQ				
			Heat No	80L95-1			材料製造者		日本製鋼所				
化 学 成 分 (wt%)													
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti						
0.065	0.81	1.61	0.023	0.007	19.44	11.26	0.53						
温 度 (°C)	試験片 番号	応 力 (kgf/mm ²)	破 断 時 間 (h)	破 断 伸 び (%)	絞 り (%)	破 断 位 置 ※	瞬 間 ひずみ (%)	ク リ ー プ ひ ず み (%)			定 常 ク リ ー プ 速 度 (%/h)		
								第 1 期	第 2 期	第 3 期			
500	FH008	37	1301.8	27.2	44.5	B	15.56	0.24	0.71	10.69	170	695	7.333×10 ⁻⁴
	FH001	36	5426.3	19.2	27.6	A	9.98	0.06	0.66	8.50	600	3800	1.253×10 ⁻⁴
	FH009	35	3916.9	25.5	36.6	A	12.45	0.08	0.38	12.59	150	2300	8.000×10 ⁻⁵
	FH002	33	(>8600)				5.24	0.25	0.30		500	7100	1.600×10 ⁻⁵
550	FH003	34	116.6	40.2	58.4	A	12.04	0.35	2.55	25.26	20	63	3.740×10 ⁻²
	FH004	32	239.0	35.4	53.6	B	10.06	0.36	1.49	23.49	35	128	9.987×10 ⁻³
	FH005	28	871.5	37.4	45.1	A	5.52	0.73	0.51	30.64	100	347	9.067×10 ⁻⁴
	FH010	26	1653.7	39.7	39.2	A	4.07	0.39	0.51	34.73	60	625	4.933×10 ⁻⁴
	FH006	25	2307.2	36.2	38.3	A	2.84	0.37	0.53	32.46	210	920	3.600×10 ⁻⁴
	FH007	21	8688.4	34.0	38.4	A	0.99	0.17	0.37	32.47	60	1670	1.000×10 ⁻⁴

(>) : 試験継続中 (経過時間) * : J I S Z 2 2 4 1

表5.1.1 SUS321 鍛造材の高温低サイクル疲労試験結果

Table. 5.11 Results of low-cycle fatigue test on SUS321 forging

試験片番号	試験温度 (°C)	保持時間 (min)	ひずみ範囲 (%)			応力範囲 $\Delta \sigma$ (kgf/mm ²)	破断寿命 N _f (回)	備考
			$\Delta \epsilon t$	$\Delta \epsilon P$	$\Delta \epsilon e$			
2F2-20	500	0	1.6	1.16	0.44		779	
2F2-9			0.7	0.375	0.325	45.3	6231	
2F2-8			0.4	0.165	0.235	37.9	>30206	T.C.溶接部から破断
2F2-4			1.4	0.95	0.45	65.4	1305	
2F2-2	500	10	1.0	0.59	0.41	56.7	2691	
2F2-18			0.8	0.48	0.32	50.2	3676	
2F2-19	550	60	1.6	1.18	0.42	64.4	448	
2F2-15			1.4	0.99	0.41	61.0	955	
2F2-16			1.0	0.645	0.355	55.4	2282	
2F2-17			0.4	0.16	0.24	38.6	39230	
2F2-3	550	10	1.4	0.99	0.41	63.0	548	
2F2-1			1.0	0.63	0.37	57.7	719	
2F2-7			0.8	0.47	0.33	50.9	1545	
2F2-5			1.4	1.01	0.39	63.8	247	
2F2-6	600	60	1.0	0.65	0.35	56.1	382	
2F2-10			1.4	0.99	0.41	55.7	717	
2F2-11			1.0	0.63	0.37	51.0	1451	
2F2-12			0.7	0.36	0.34	49.0	2808	
2F2-13	600	0	0.5	0.21	0.29	42.8	7858	
2F2-14			0.4	0.14	0.26	41.4	63558	

表 5.12 クリープ損傷試験結果

Table. 5.12 Results of test for producing crept materials

試験温度	試験応力 (kg f / mm ²)	目標損傷時間 (t / t _r)			破断時間 t _r (h)
		1 / 4	2 / 4	3 / 4	
500℃	35	985h	1954h	2956h	3916.9
		0.251	0.499	0.755	
550℃	26	305h	827h	1255h	1653.9
		0.302	0.500	0.759	
		431h	836h	1303h	
		0.261	0.505	0.788	

(注) 上段：損傷試験時間 (h)

下段：損傷率 (t / t_r)

表5.13 インコネル718棒材の高温高サイクル疲労試験結果

Table. 5.13 Results of high-cycle fatigue test on In 718 bar steel at elevated temperature

No	試験片 No	表面性状	温度 (°C)	応力比 $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$	応力振幅 σ_a [kg f/mm ²]	繰返し数 N ($\times 10^3$)	備 考
1	A-1	鏡面研磨	600	-1	57.0	51	破 壊
2	A-2				50.0	934	破 壊
3	A-3				48.0	933	破 壊
4	A-4				45.0	742	破 壊
5	A-5				45.0	636	破 壊
6	2-1	中仕上	600	-1	35.0	7436	破 壊
7	1-4	荒仕上	600	-1	57.0	24	破 壊
8	1-1				40.0	117	破 壊
9	1-2				30.0	427	破 壊
10	1-5				27.0	13500	破壊せず
11	1-3		25.0	12000	破壊せず		
12	0-2		0	30.0	168	破 壊	
13	1-6		650	-1	30.0	663	破 壊
14	1-7	650	-1	28.0	13500	破壊せず	
15	V-1	微小き裂	600	-1	23.0	11000	破壊せず
16					26.0	12500	破壊せず
17			R.T.	0	20.0	166	破 壊
18			V-2	600	0	15.5	75

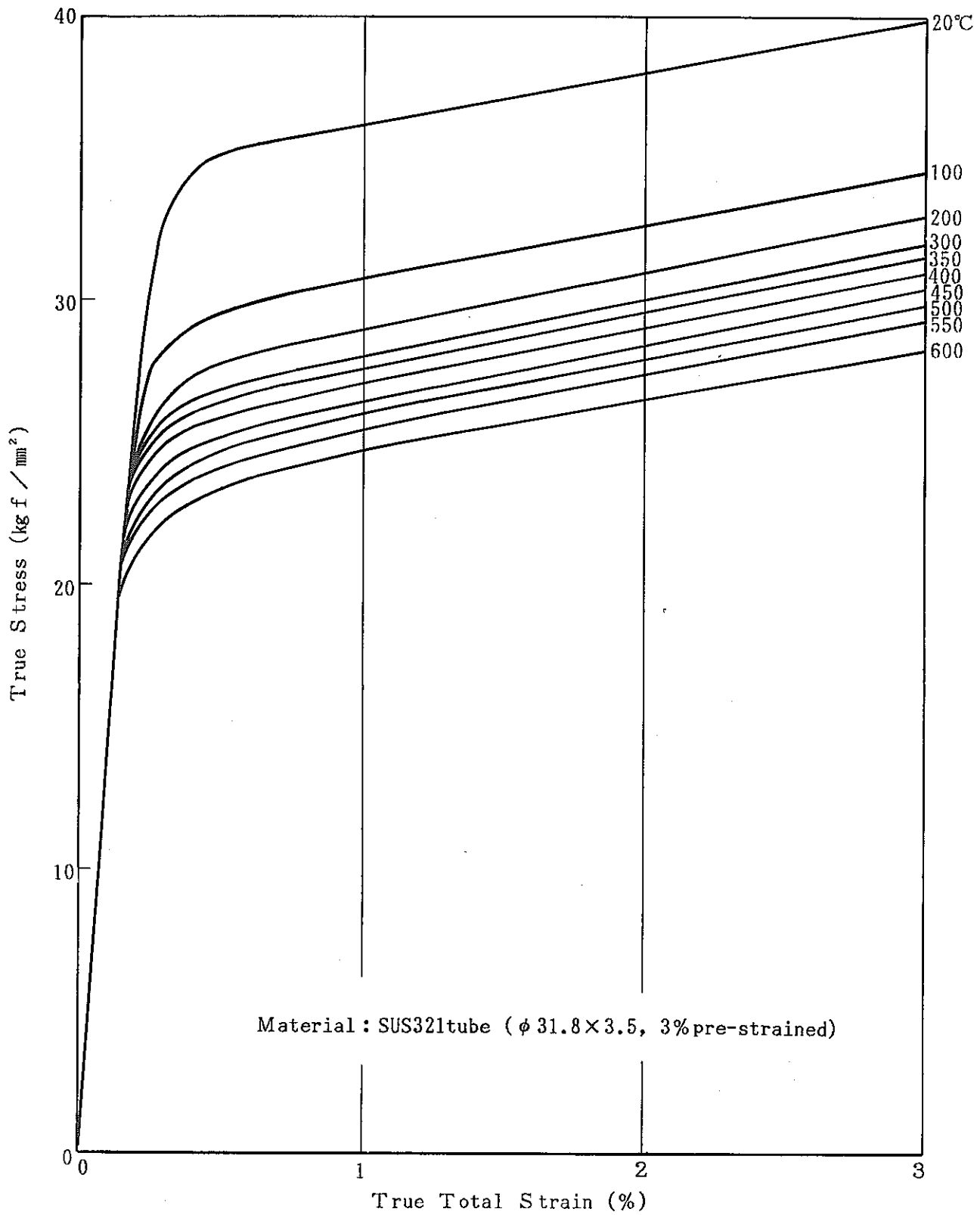


図 5.1 真応力と真ひずみの関係 (SUS321伝熱管 $\phi 31.8 \times 3.5$ t, 3%予ひずみ材)

Fig. 5.1 True stress vs true strain (SUS321, 3% pre-strained tube)

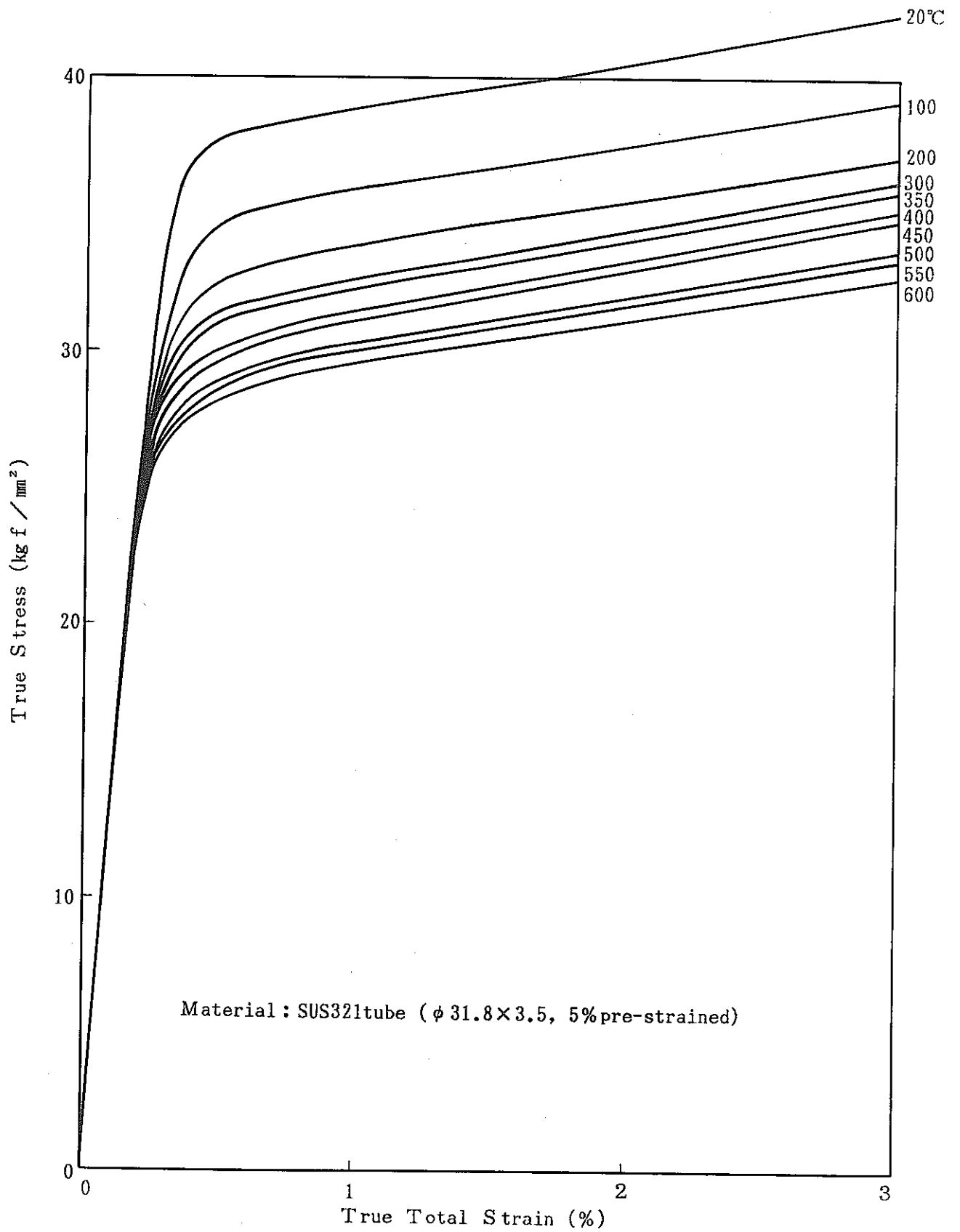


図 5.2 真応力と真ひずみの関係 (SUS321伝熱管, 5%予ひずみ材)

Fig. 5.2 True stress vs true strain (SUS321, 5% pre-strained tube)

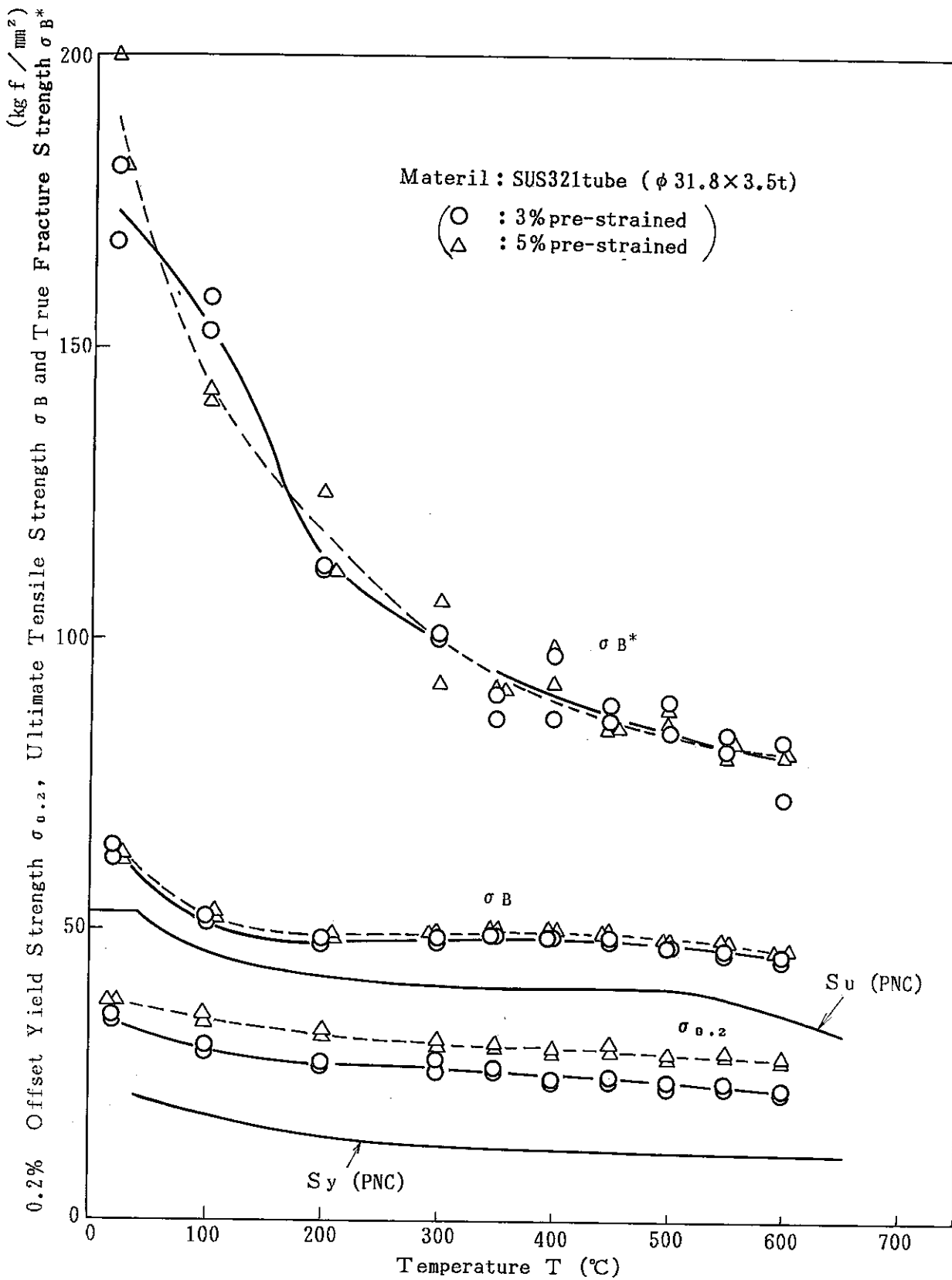


図5.3 0.2%耐力、引張強さと真破断応力 (SUS321伝熱管, 予ひずみ材)

Fig. 5.3 0.2% Offset yield strength, ultimate tensile strength and true fracture strength (SUS321 pre-strained tube)

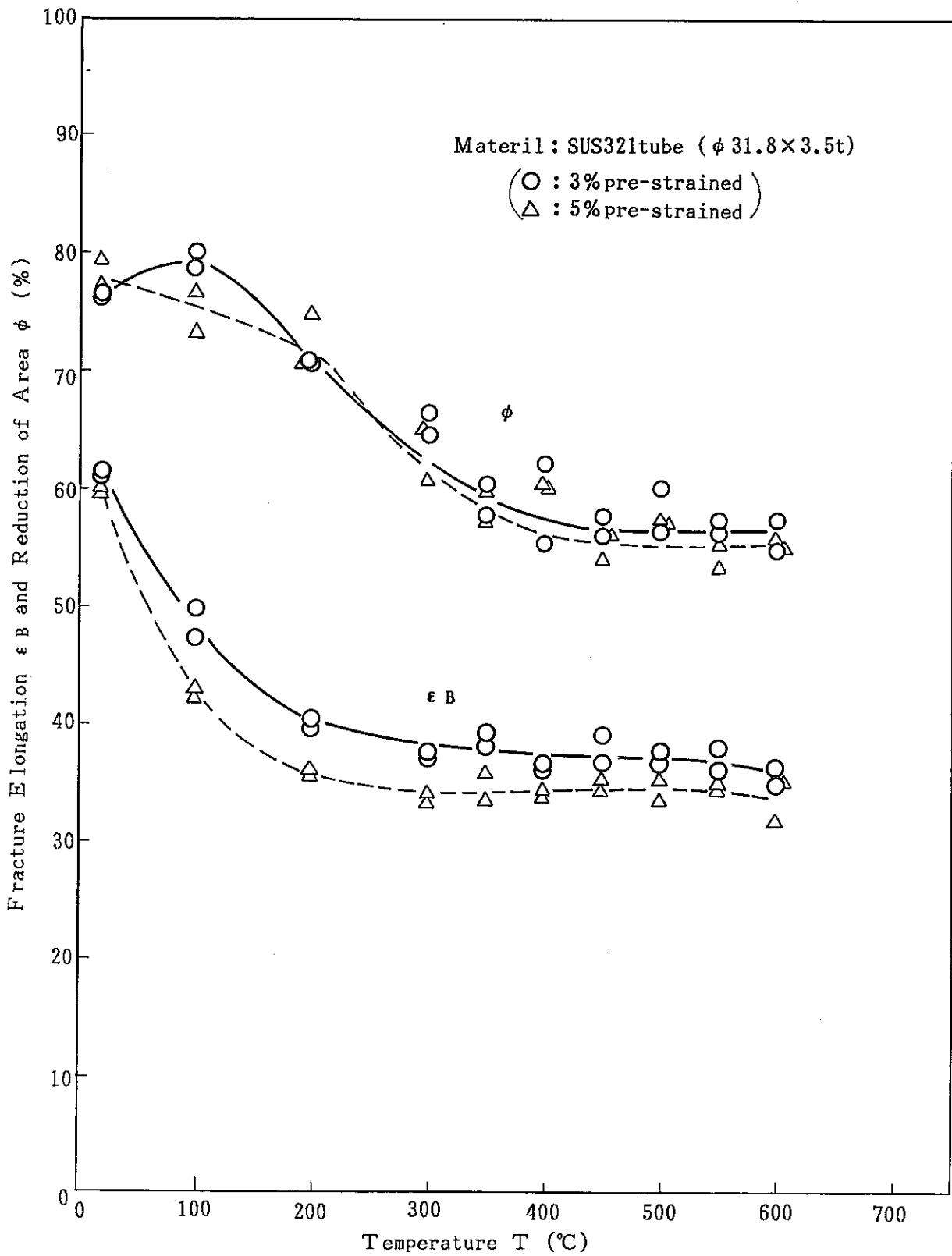


図5.4 破断伸びと絞り (SUS321伝熱管、予ひずみ材)

Fig. 5.4 Fracture elongation and reduction of area (SUS321 prt-strained tube)

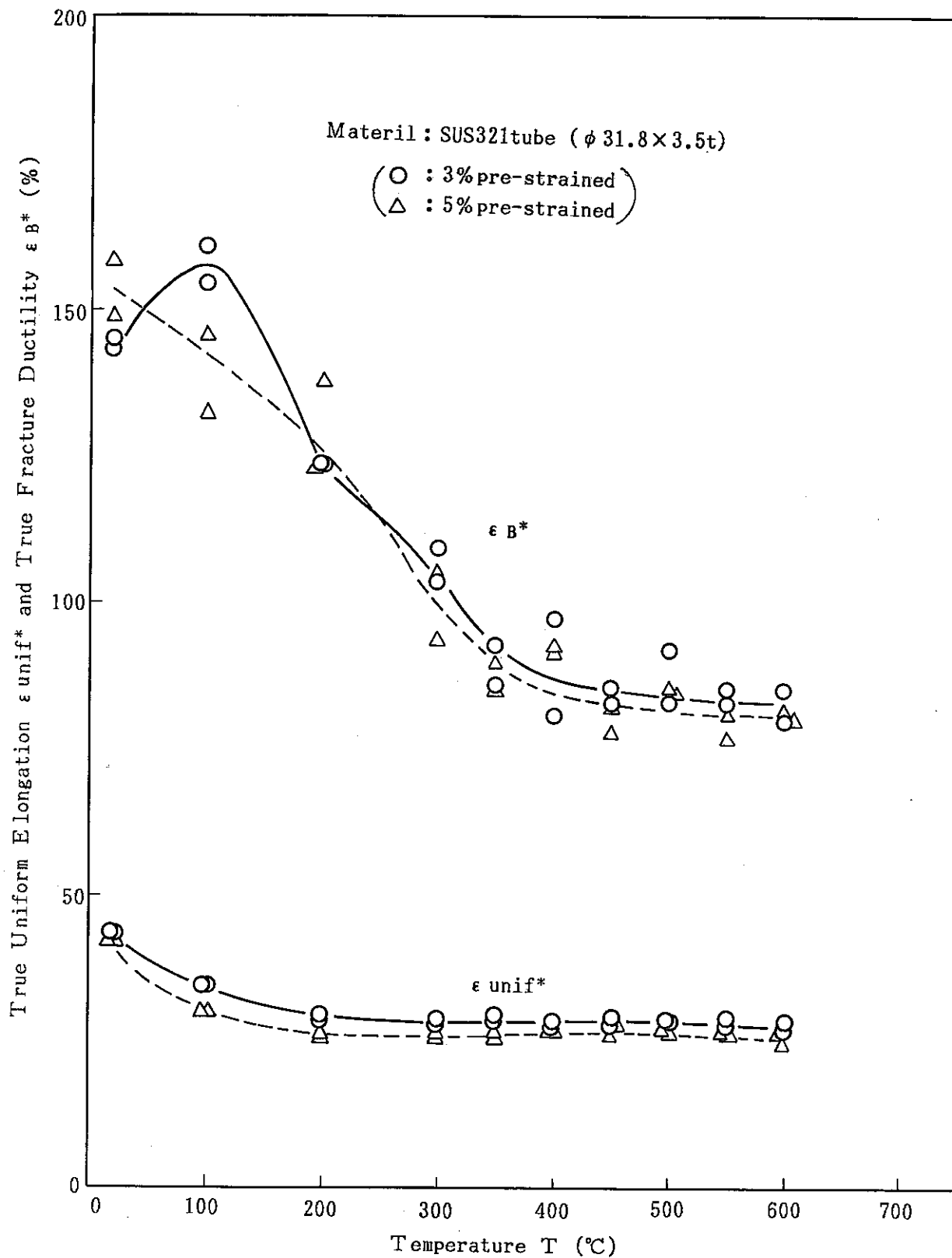


図5.5 真一様伸びと真破断延性 (SUS321伝熱管、予ひずみ材)

Fig. 5.5 True uniform elongation and true fracture ductility
(SUS321 pre-strained tube)

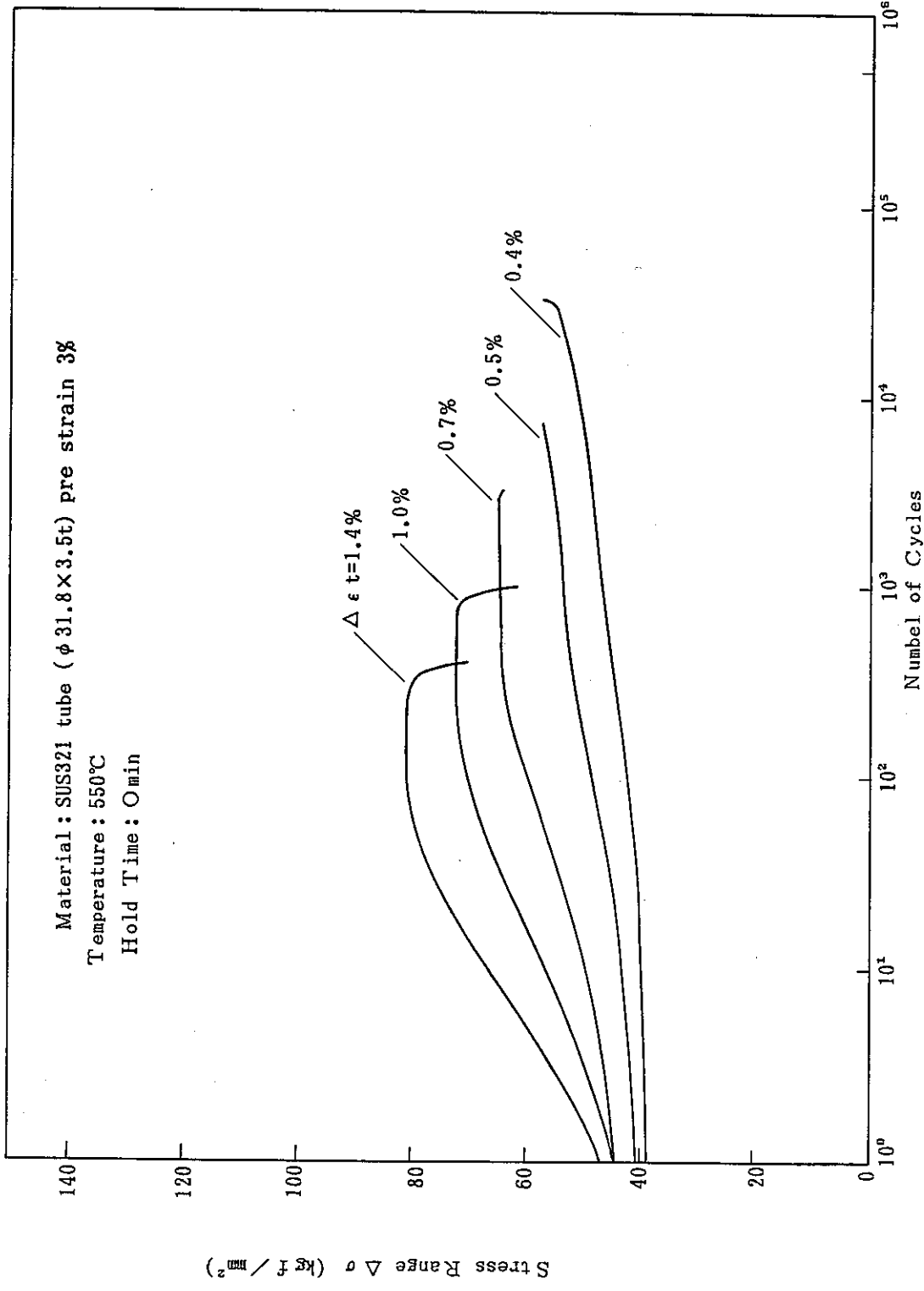


図5.6 SUS321伝熱管3%予ひずみ材の繰返しに伴う応力範囲の挙動 (T=550°C, t_H=0min)

Fig. 5.6 Cyclic behavior of stress range for SUS321 3% pre-strained tube (T=550°C, t_H=0min)

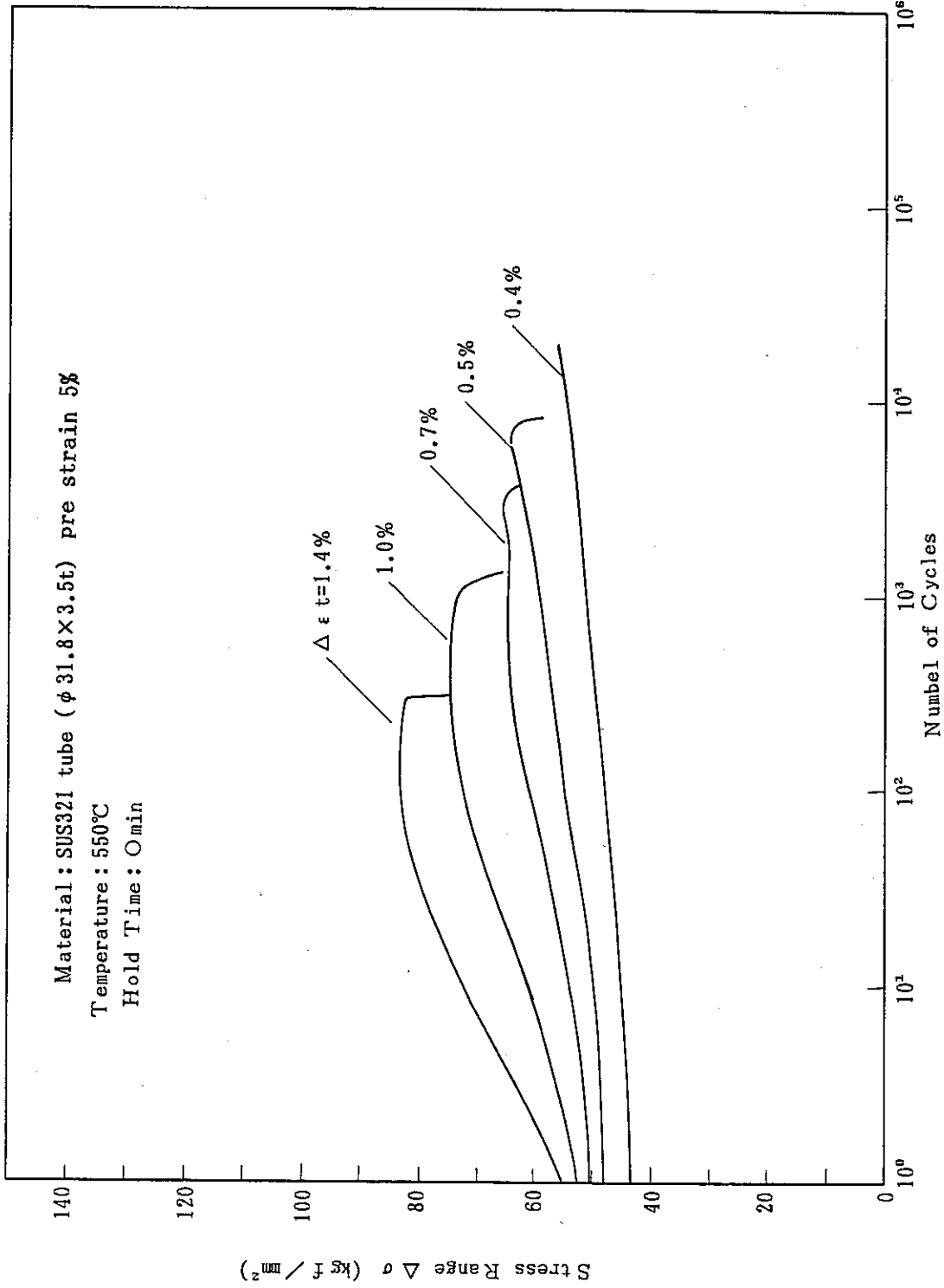


図5.7 SUS321伝熱管5%予ひずみ材の繰返しに伴う応力範囲の挙動 ($T = 550^\circ\text{C}$, $t_H = 0 \text{ min}$)
 Fig. 5.7 Cyclic behavior of stress range for SUS321 5% pre-strained tube ($T=550^\circ\text{C}$, $t_H=0 \text{ min}$)

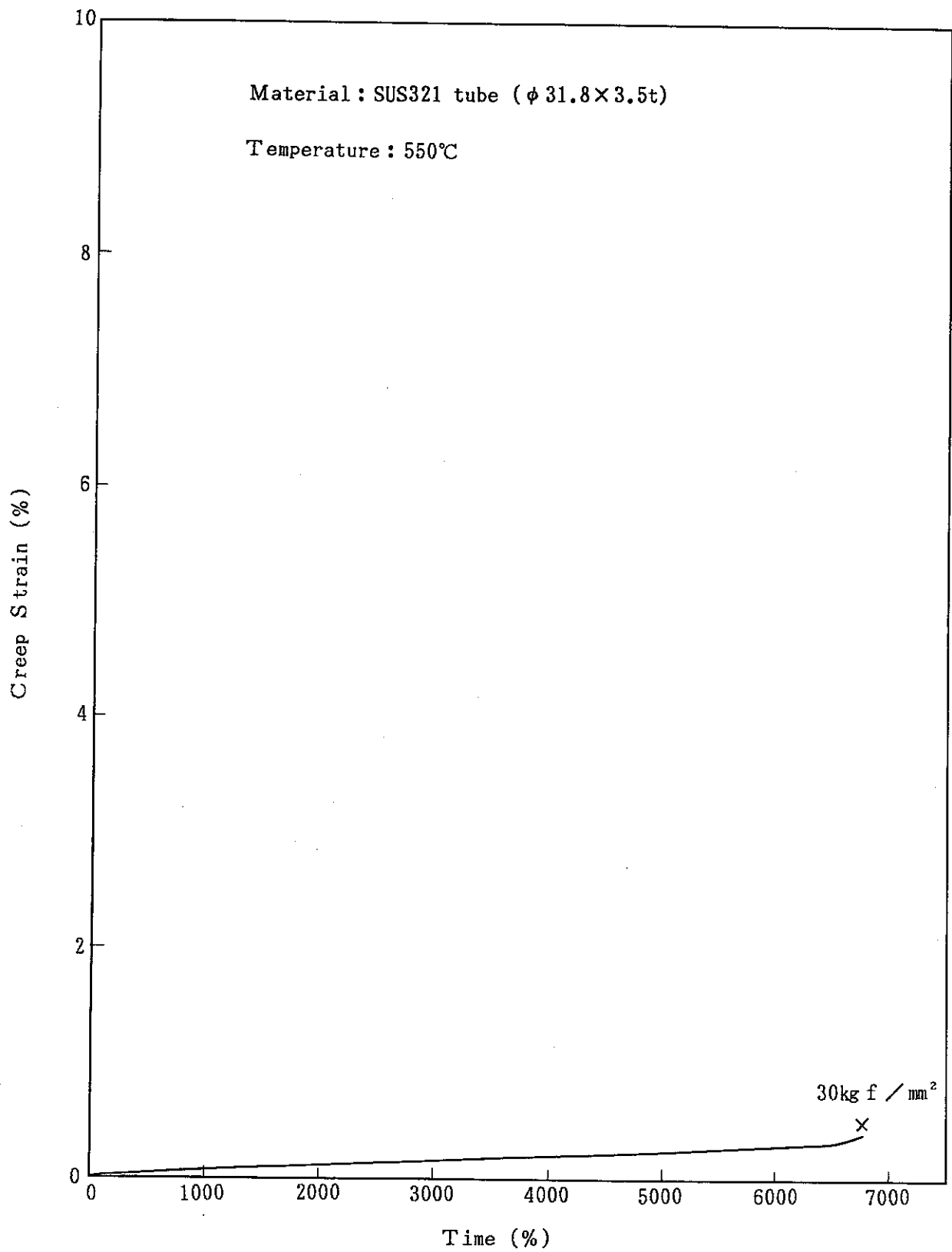


図 5.8 クリープ曲線 (SUS321 伝熱管)

Fig. 5.8 Creep curve (SUS321 tube)

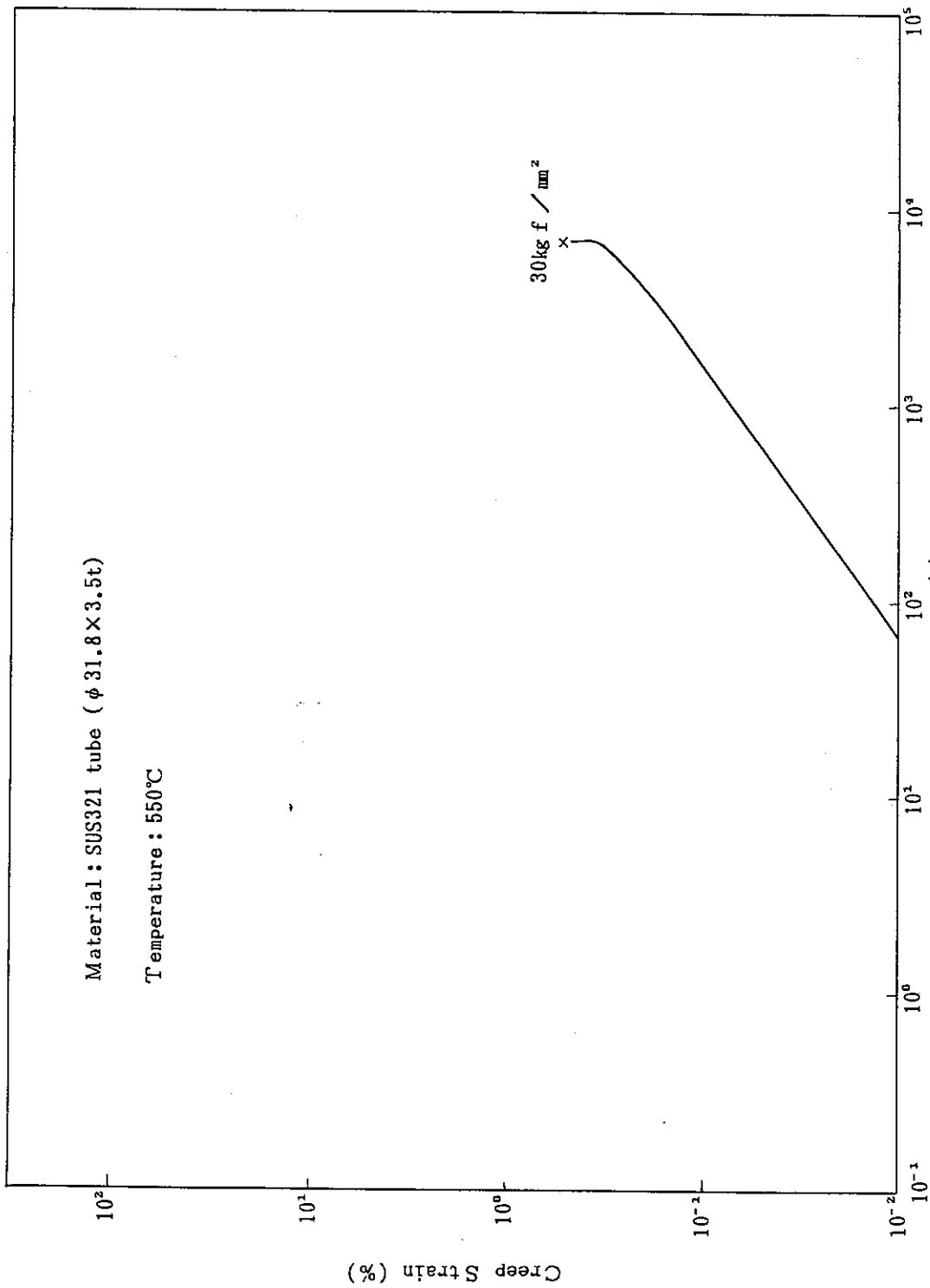


図5.9 クリーブ曲線 (SUS321伝熱管)

Fig. 5.9 Creep curve (SUS321 tube)

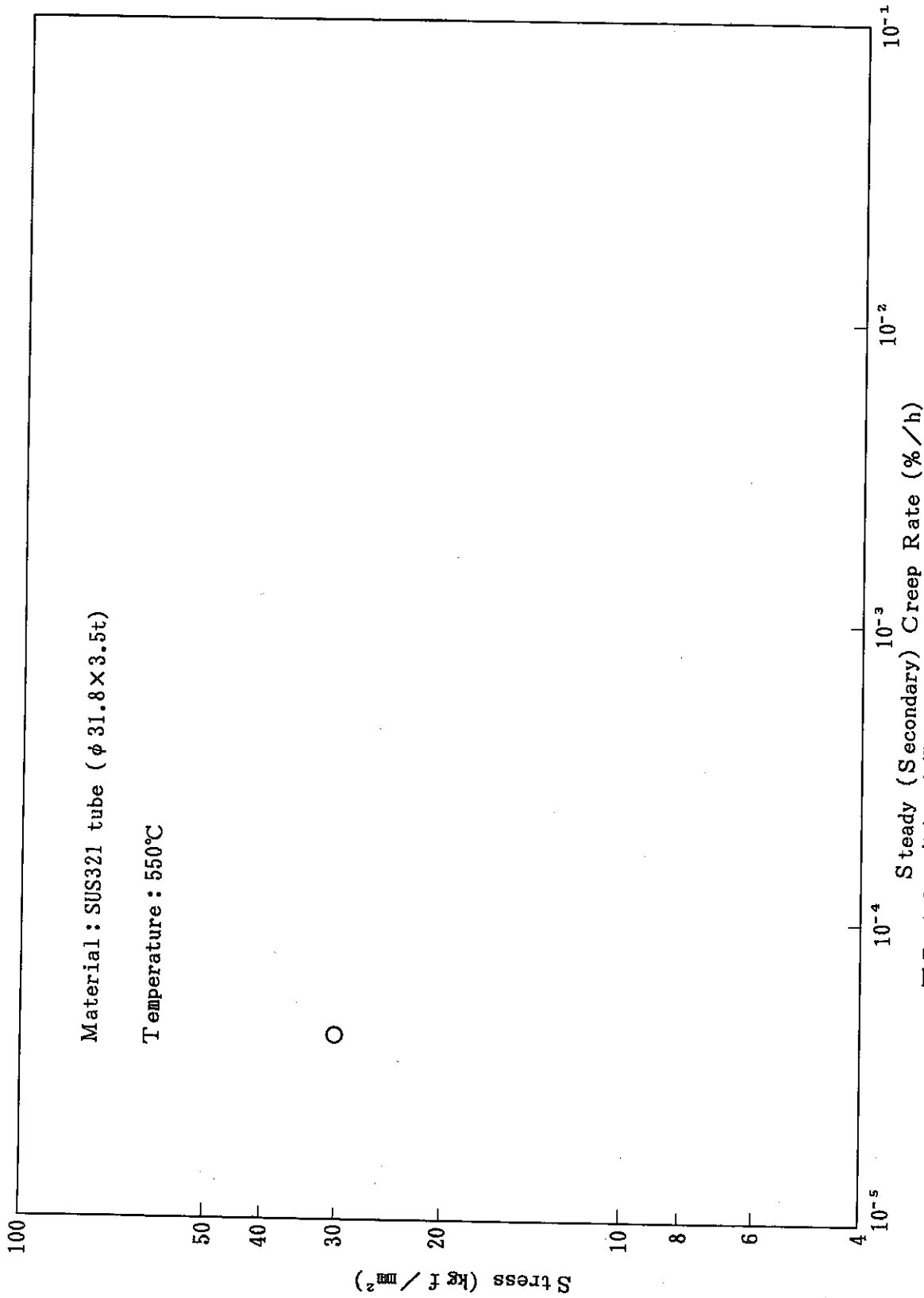


図5.10 応力と定常クリープ速度の関係 (SUS321 伝熱管)

Fig. 5.10 Stress vs. steady (secondary) creep rate (SUS321 tube)

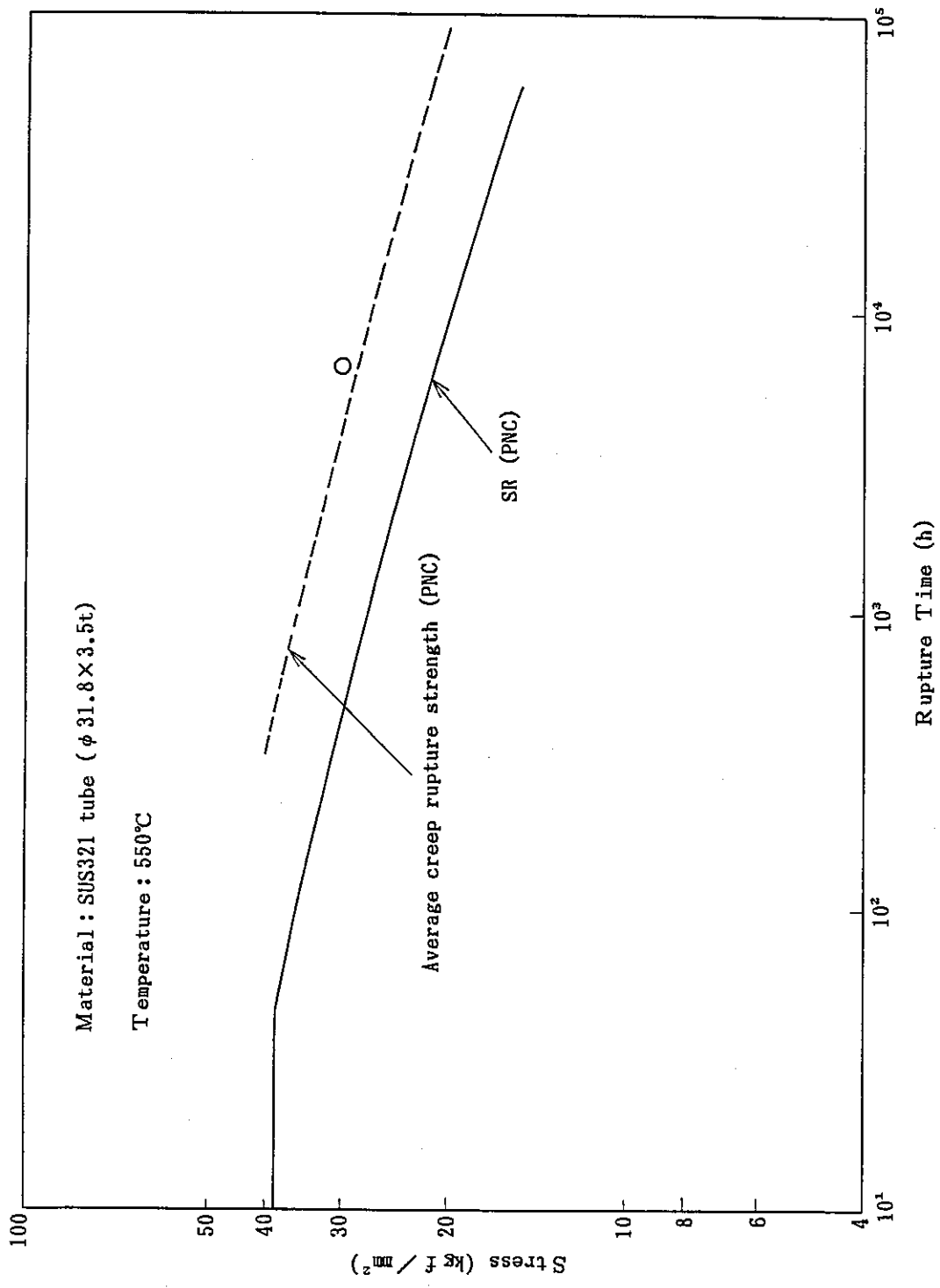


図 5.11 応力とクリープ破断時間の関係 (SUS321 伝熱管)
 Fig. 5.11 Stress vs. creep rupture time (SUS321 tube)

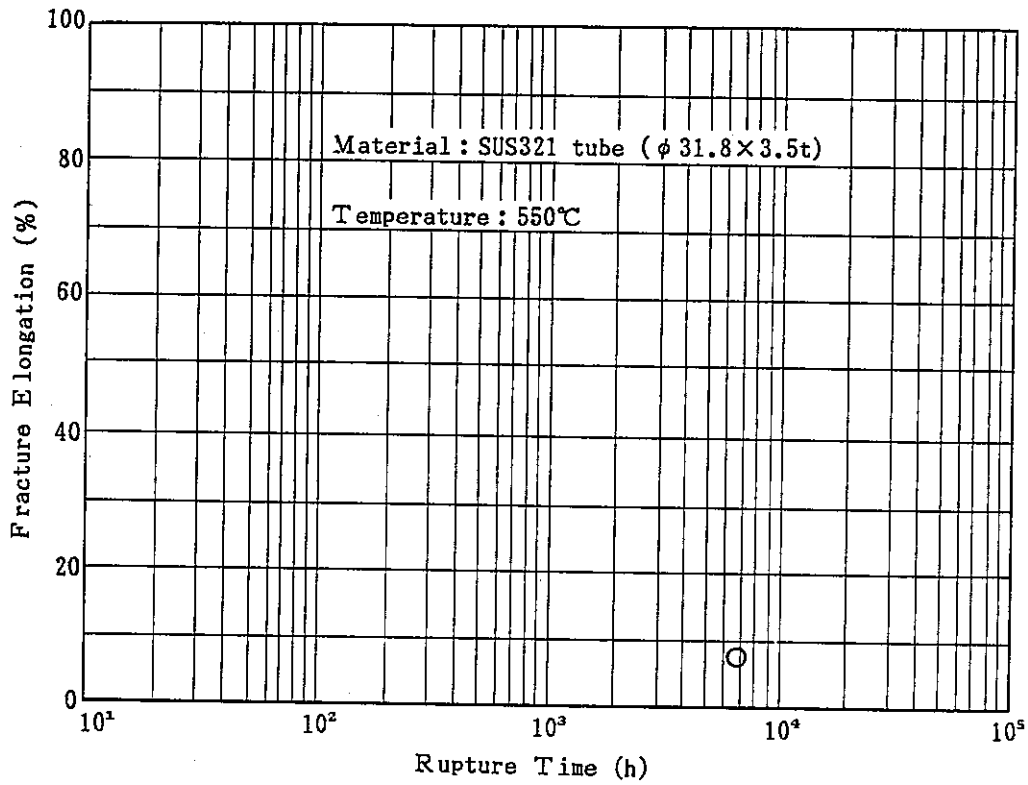


図 5.12 破断伸びと破断時間の関係 (SUS321 伝熱管)

Fig. 5.12 Fracture elongation vs. rupture time (SUS321 tube)

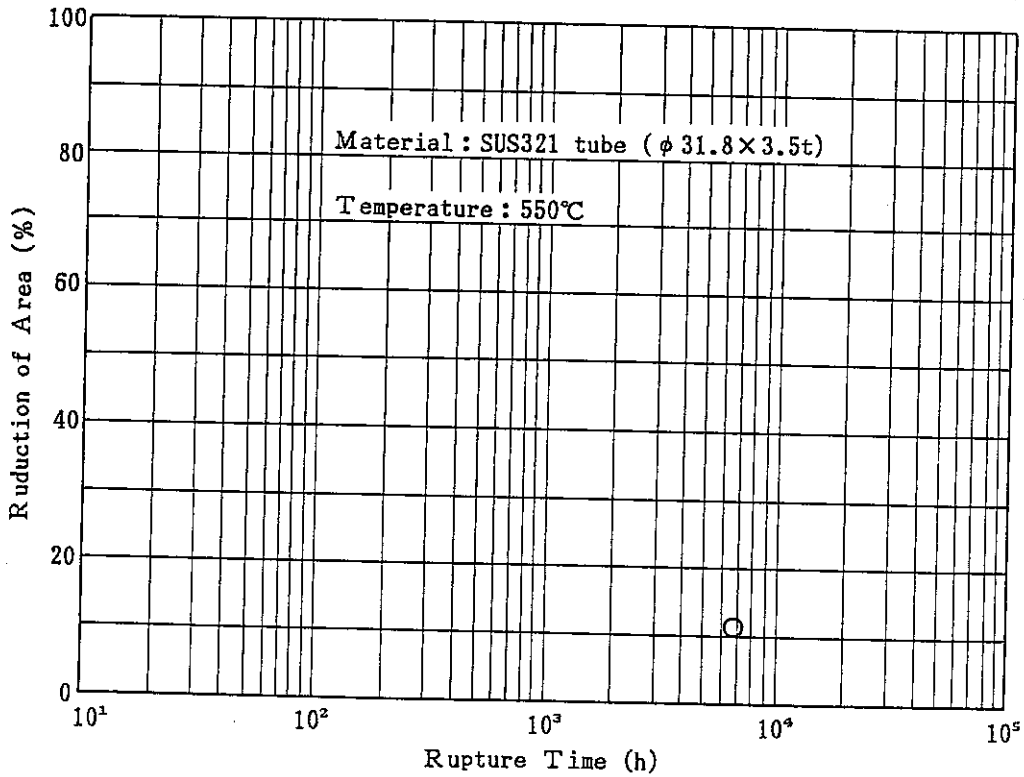


図 5.13 絞りと破断時間の関係 (SUS321 伝熱管)

Fig. 5.13 Reduction of area vs. rupture time (SUS321 tube)

Material : SUS321 tube ($\phi 31.8 \times 3.5t$)

Temperature : 550°C

Hold Time : 0min

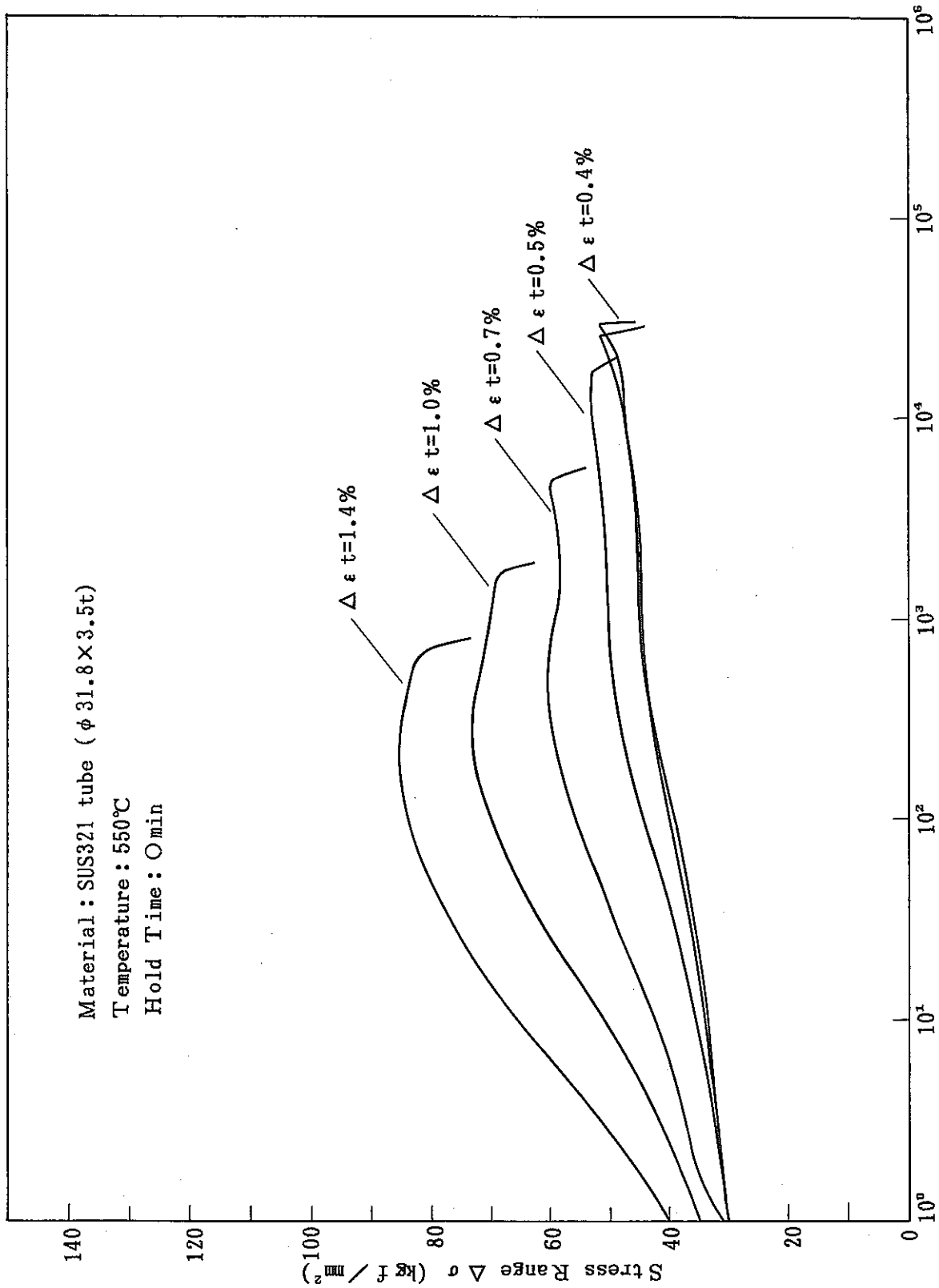


図 5.14 SUS321 伝熱管の繰返しに伴う応力範囲の挙動 (T=500°C, t_H=0min)

Fig. 5.14 Cyclic behavior of stress range for SUS321 tube (T=500°C, t_H=0min)

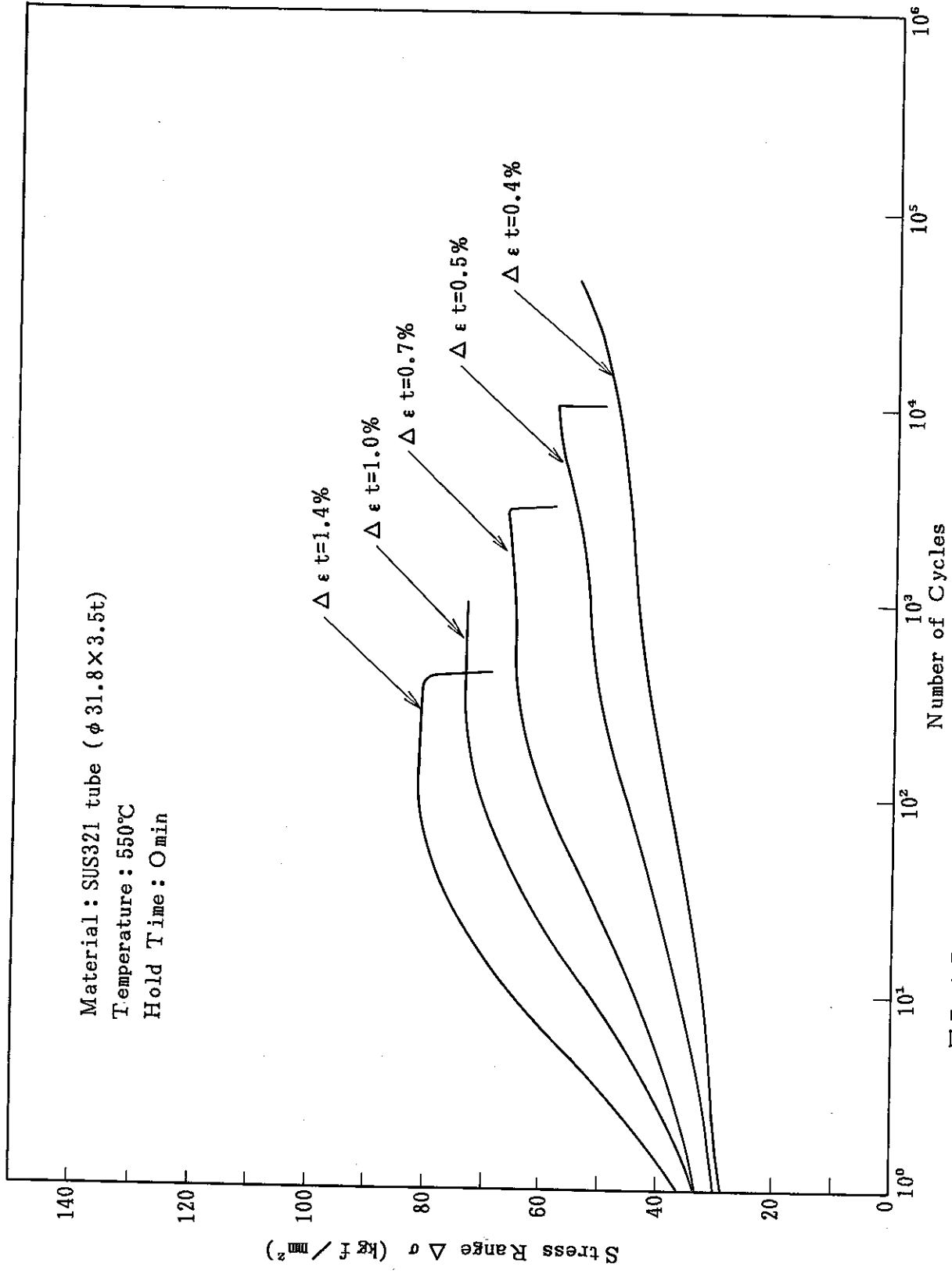


図5.15 SUS321伝熱管の繰返しに伴う応力範囲の挙動 ($T = 550^\circ\text{C}$, $t_H = 0\text{min}$)
 Fig. 5.15 Cyclic behavior of stress range for SUS321 tube ($T = 550^\circ\text{C}$, $t_H = 0\text{min}$)

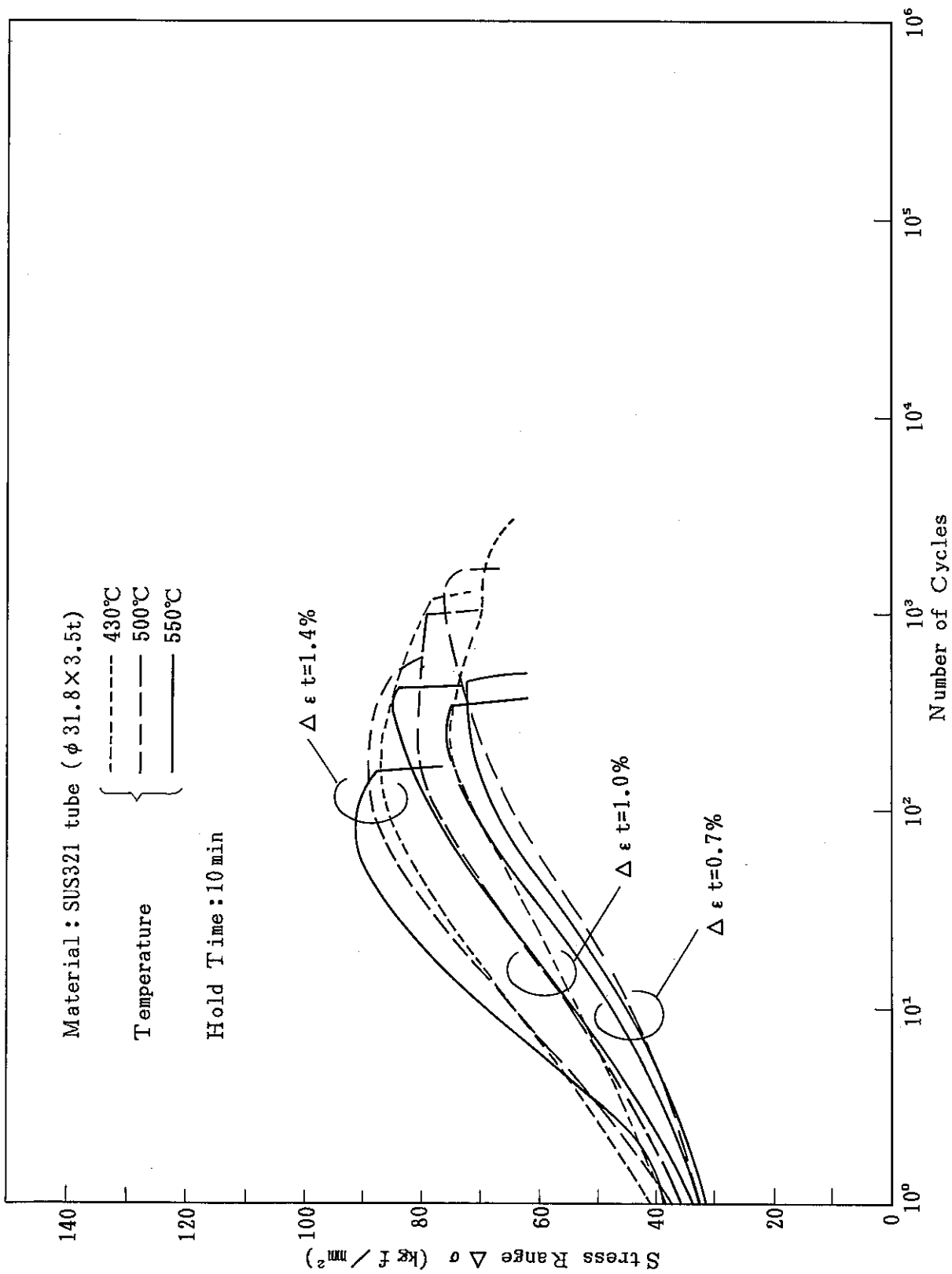


図5.16 SUS321伝熱管の繰返しに伴う応力範囲の挙動 ($T=430^\circ\text{C}$, 500°C , 550°C , $t_H=10\text{min}$)

Fig. 5.16 Cyclic behavior of stress range for SUS321 tube ($T=430^\circ\text{C}$, 500°C , 550°C , $t_H=10\text{min}$)

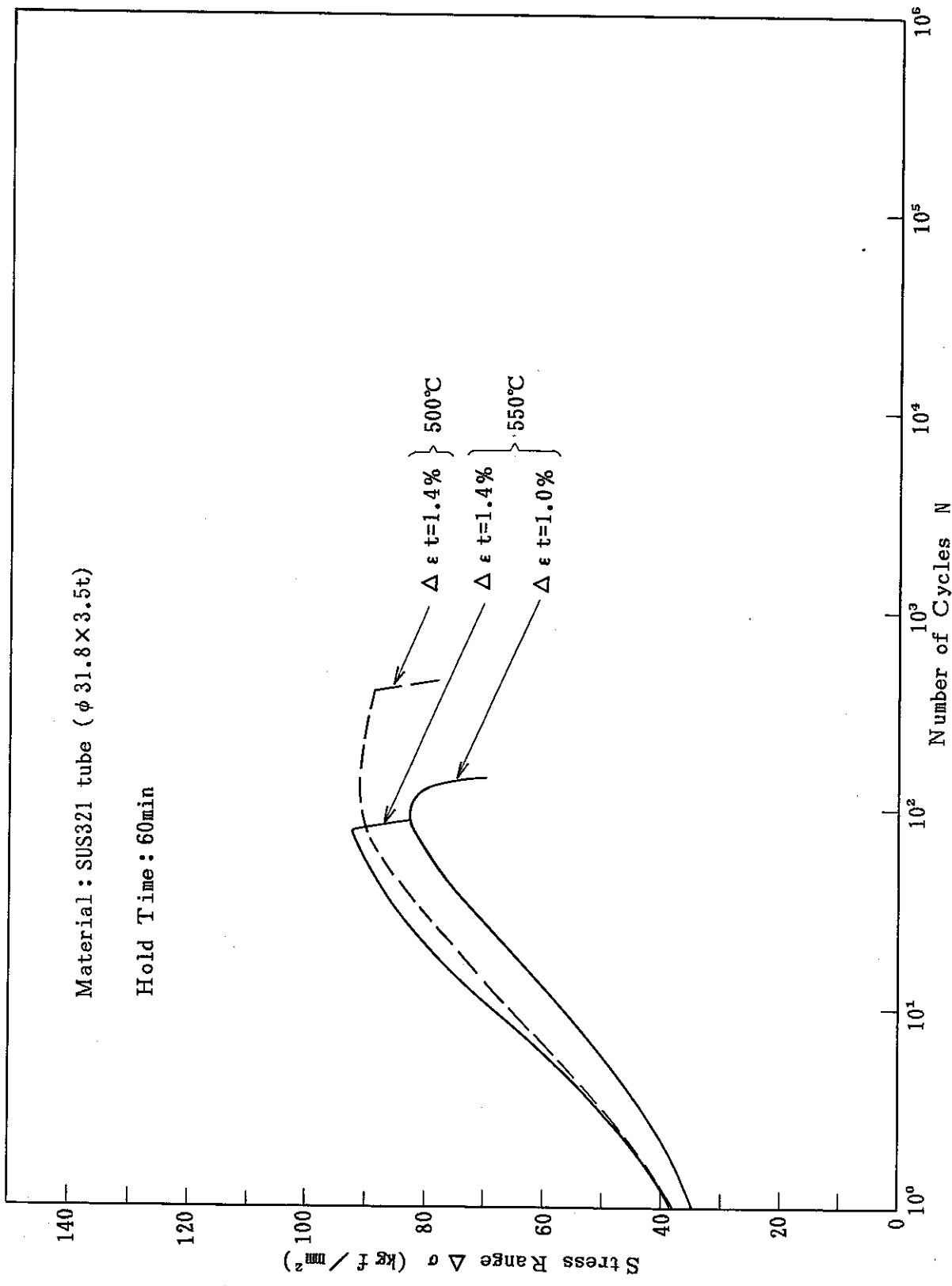


図 5.17 SUS321 伝熱管の繰返しに伴う応力範囲の挙動 ($T = 500^\circ C$, $550^\circ C$, $t_H = 60 min$)
 Fig. 5.17 Cyclic behavior of stress range for SUS321 tube ($T = 500^\circ C$, $550^\circ C$, $t_H = 60 min$)

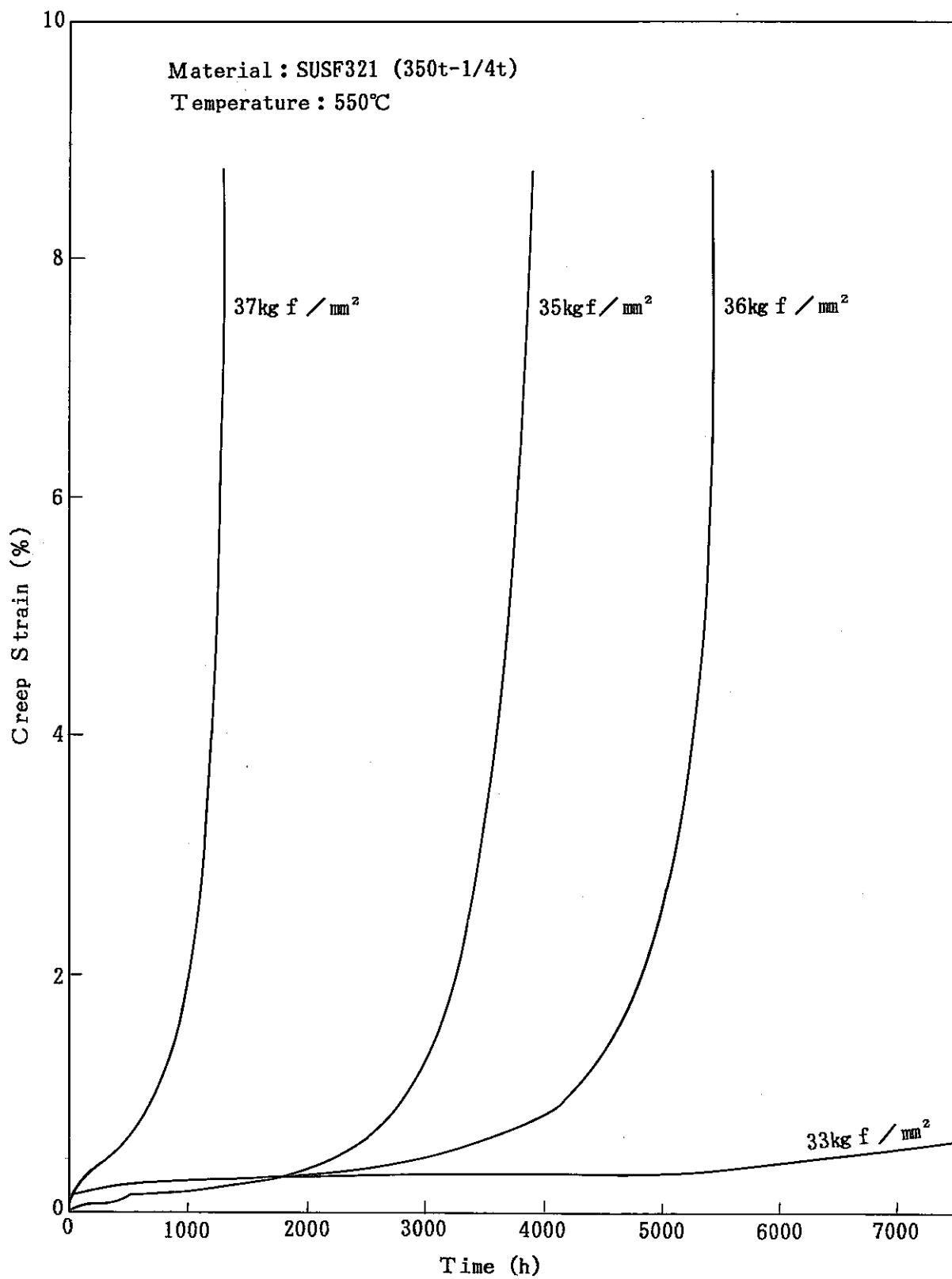


図5.18 クリープ曲線 (SUS321鍛造材-350t) (1)

Fig. 5.18 Creep curve (SUS321 forging-350t)(1)

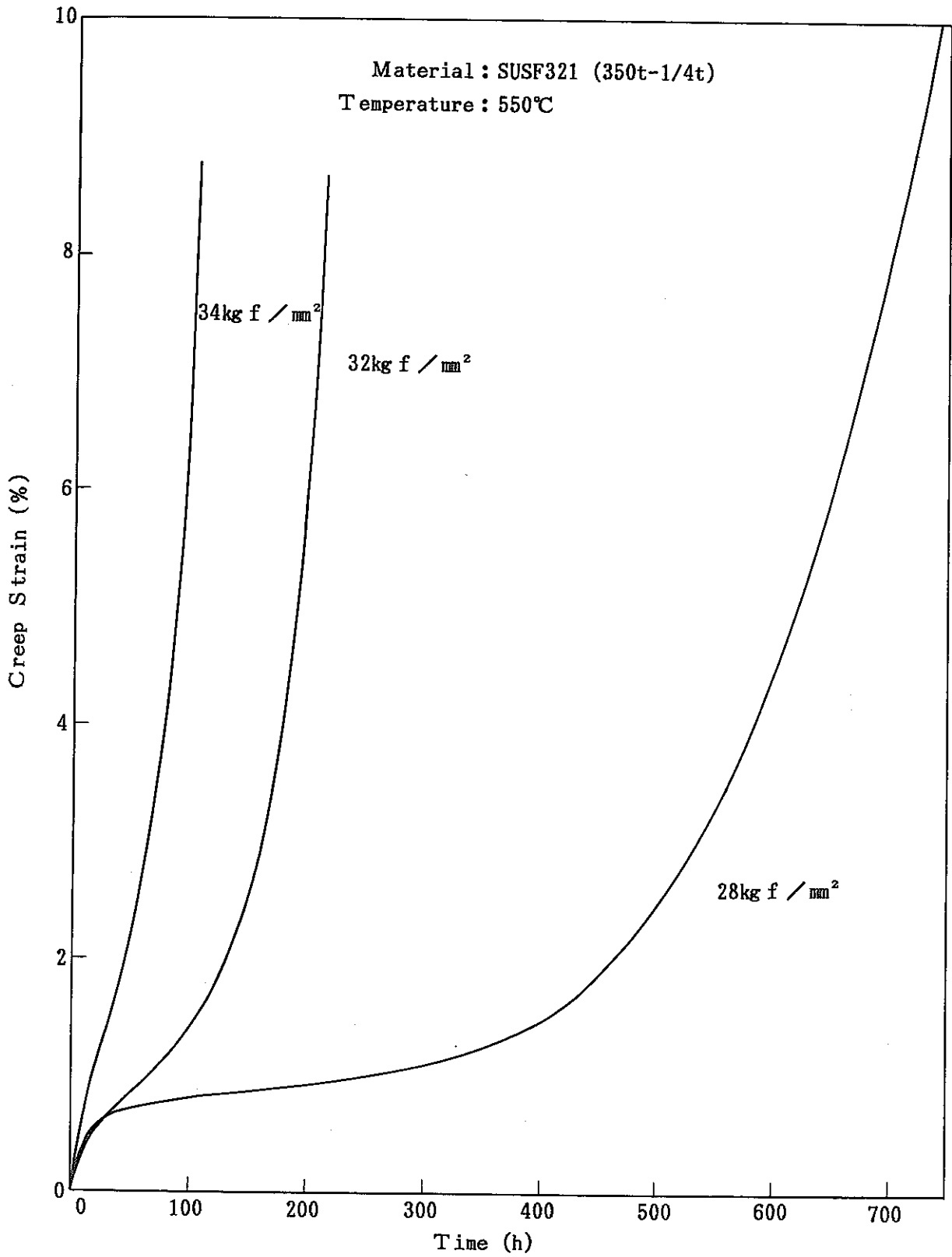


図 5.19 クリープ曲線 (SUS321 鍛造材-350t) (2)

Fig. 5.19 Creep curve (SUS321 forging-350t)(2)

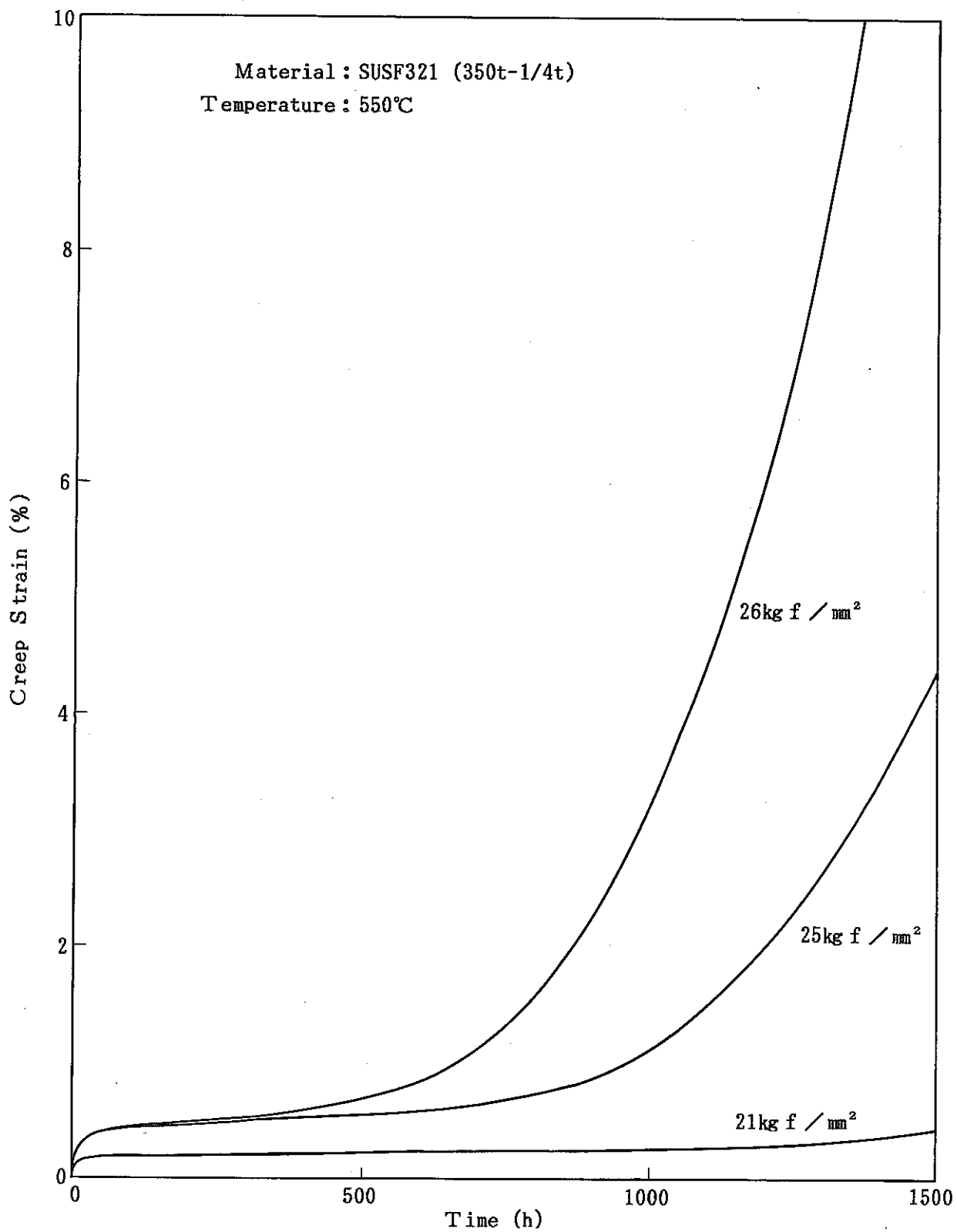


図5.20 クリープ曲線 (SUS321鍛造材-350t) (3)

Fig. 5.20 Creep curve (SUS321 forging-350t)(3)

Material : SUSF321 (350t-1/4t)

Temperature : 550°C

35kg f / mm²
31kg f / mm²
30kg f / mm²
33kg f / mm²

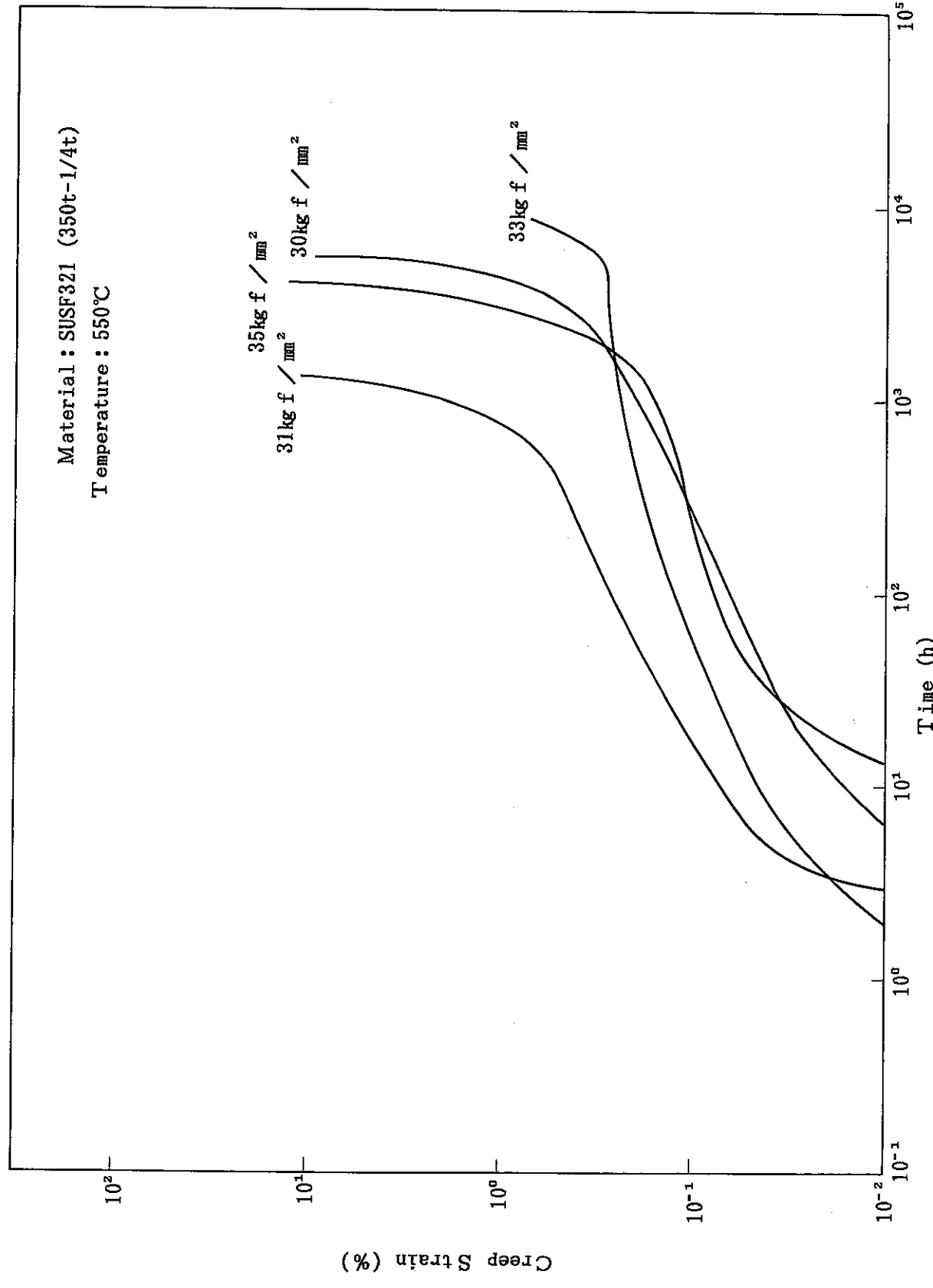


図5.21 クリープ曲線 (SUS321 鍛造材 - 350 t) (4)

Fig. 5.21 Creep curve (SUS321 forging - 350t)(4)

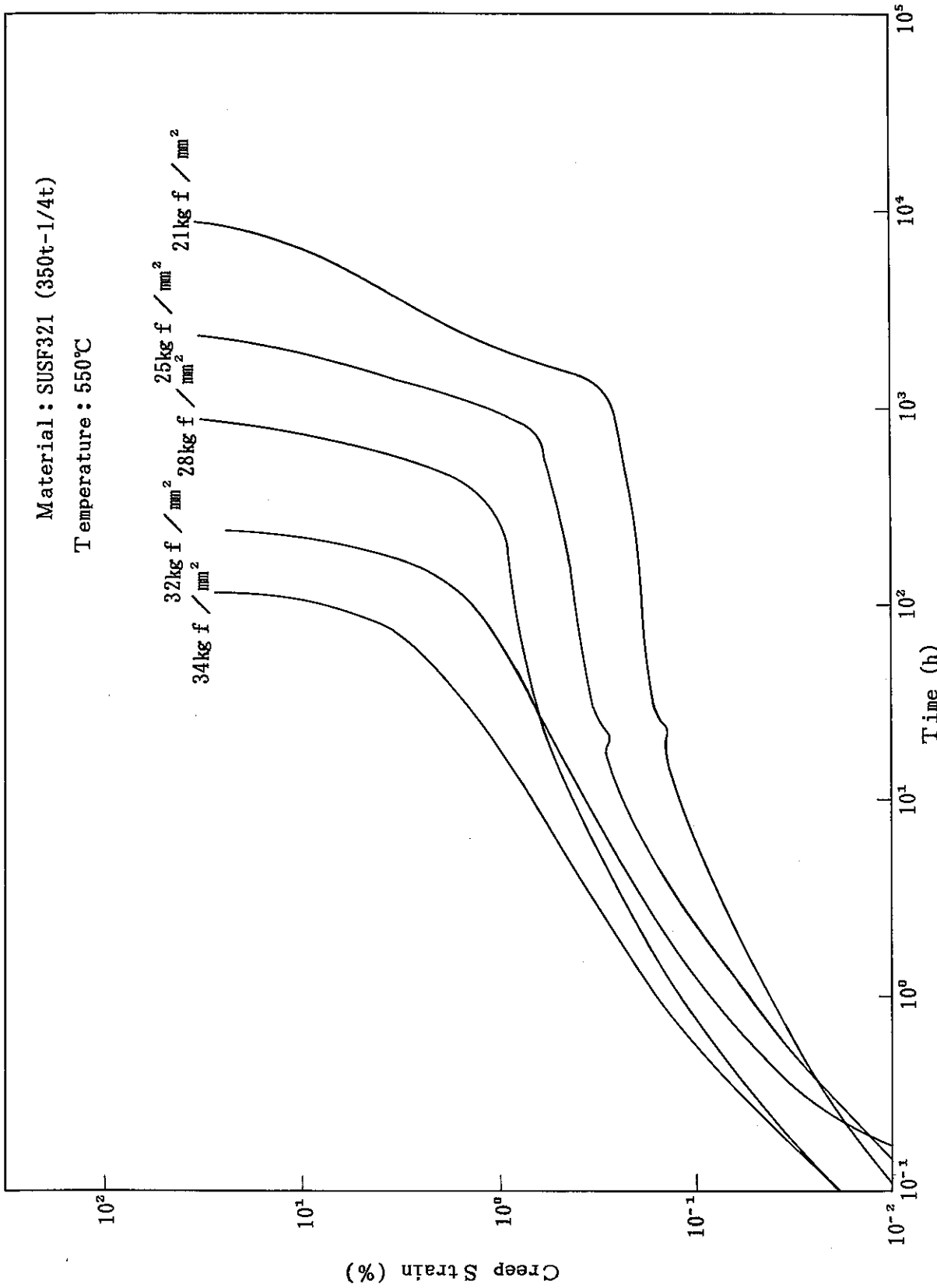


図5.22 クリープ曲線 (SUS321 鍛造材 - 350t) (5)

Fig. 5.22 Creep curve (SUS321 forging -350t) (5)

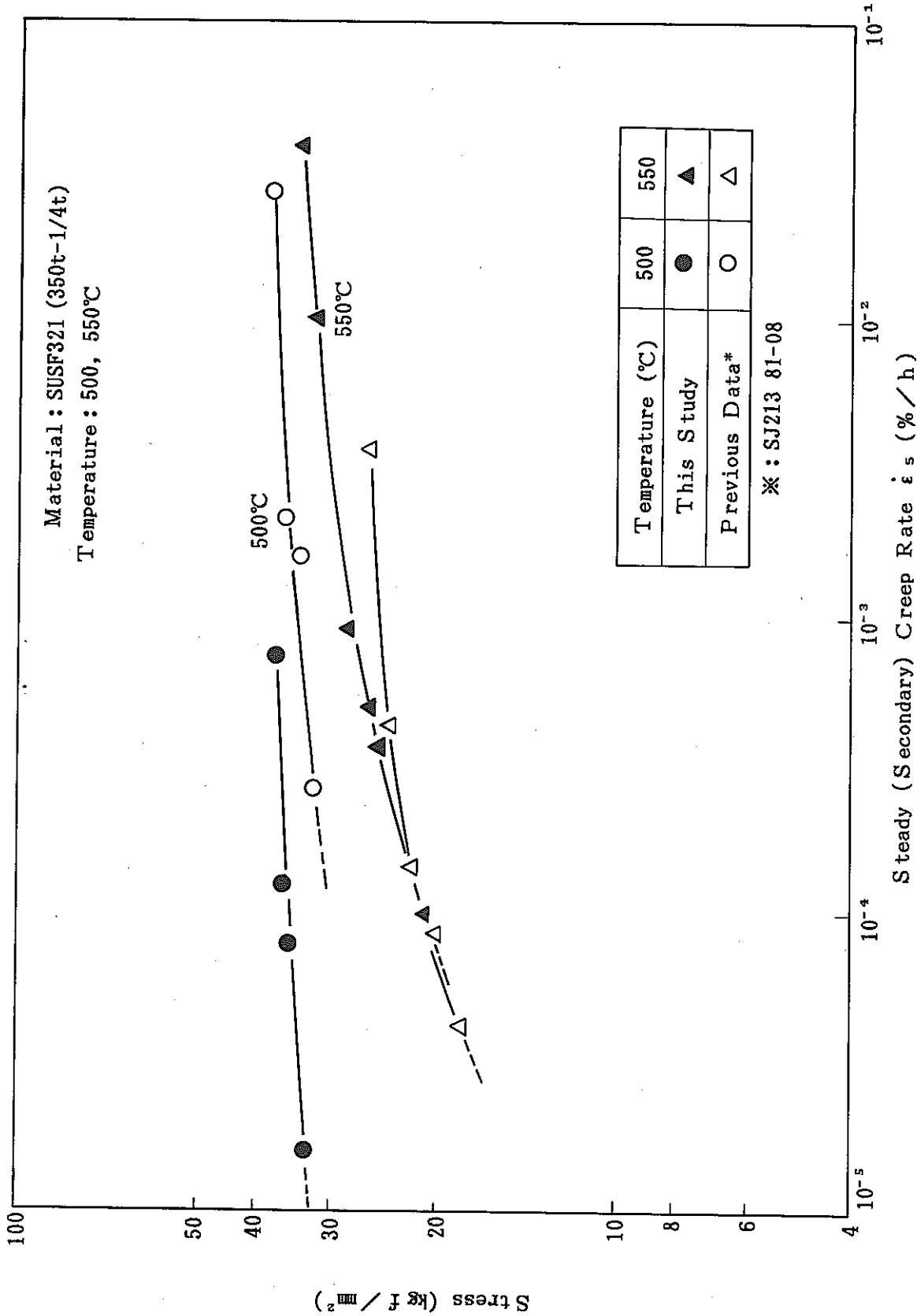


図 5.23 SUS321 鍛造材の応力と定常クリープ速度の関係

Fig. 5.23 Stress vs. steady (secondary) creep rate for SUS321 forging

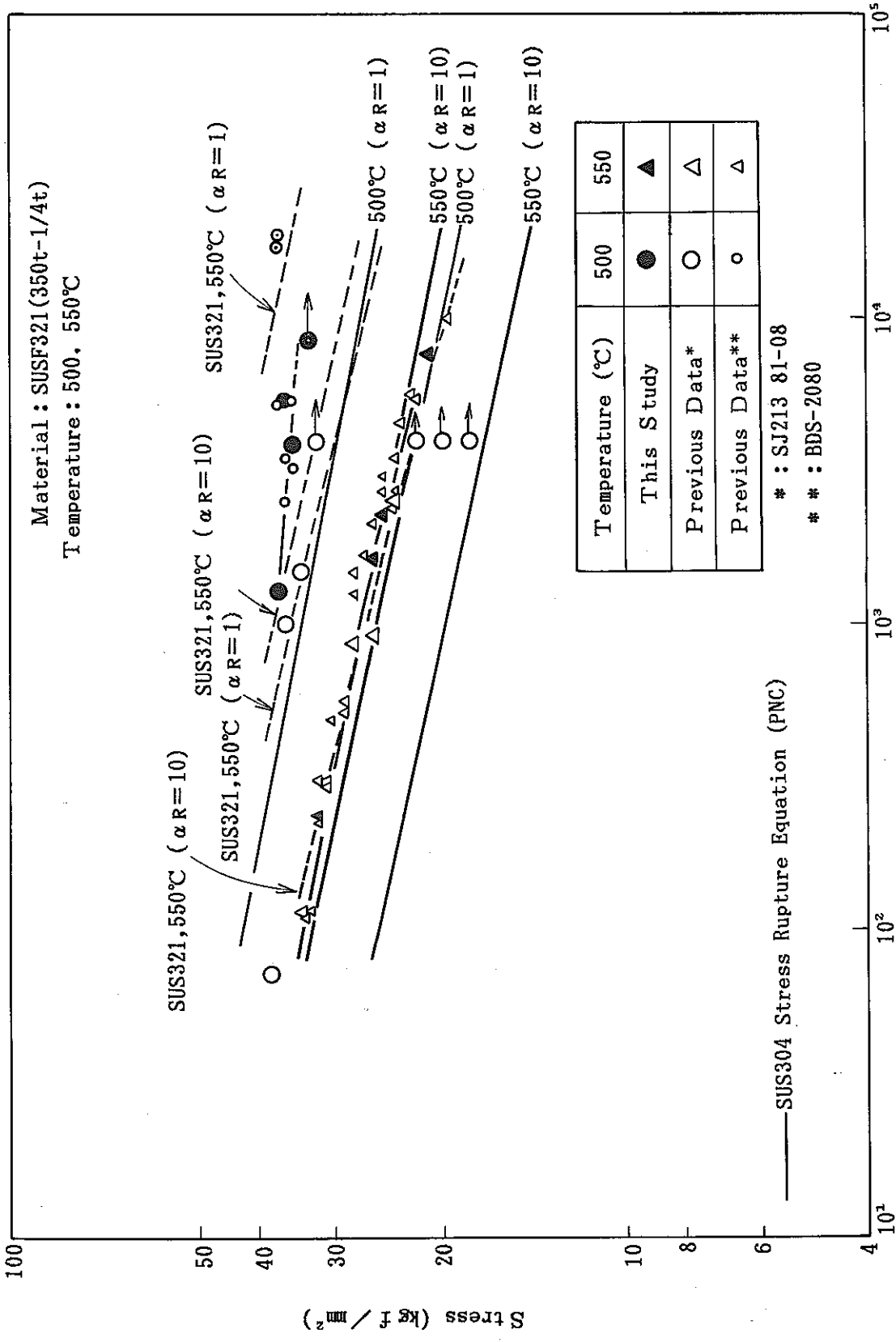


図 5.24 SUS321 鍛造材のクリープ破断強度

Fig. 5.24 Stress vs. creep rupture time for SUS321 forging

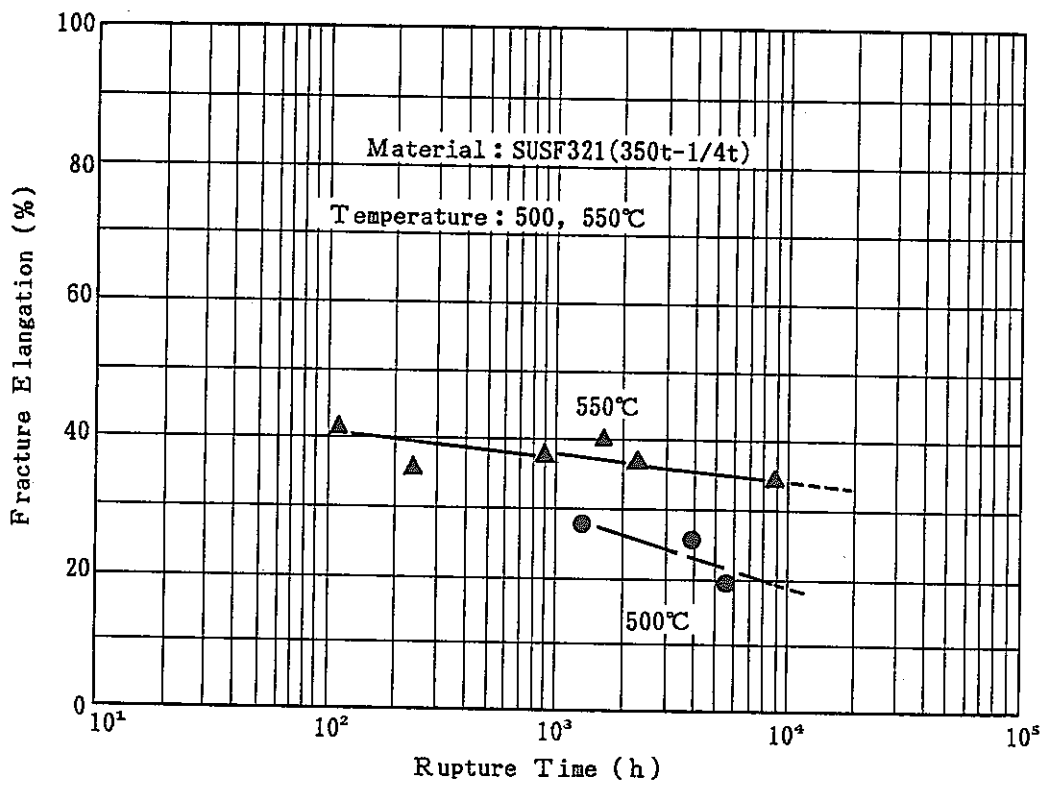


図 5.25 破断伸びと破断時間の関係 (SUSF321-350t)

Fig. 5.25 Fracture elongation vs. rupture time (SUSF321-350t)

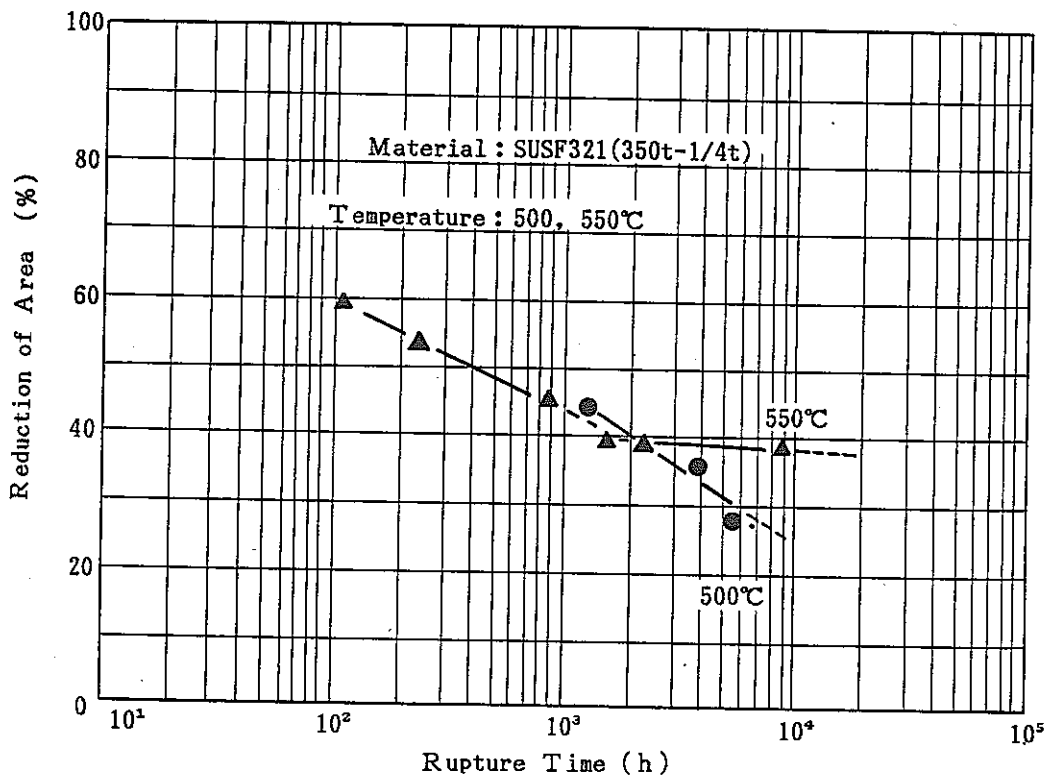


図 5.26 絞りと破断時間の関係 (SUSF321-350t)

Fig. 5.26 Reduction of area vs. rupture time (SUSF321-350t)

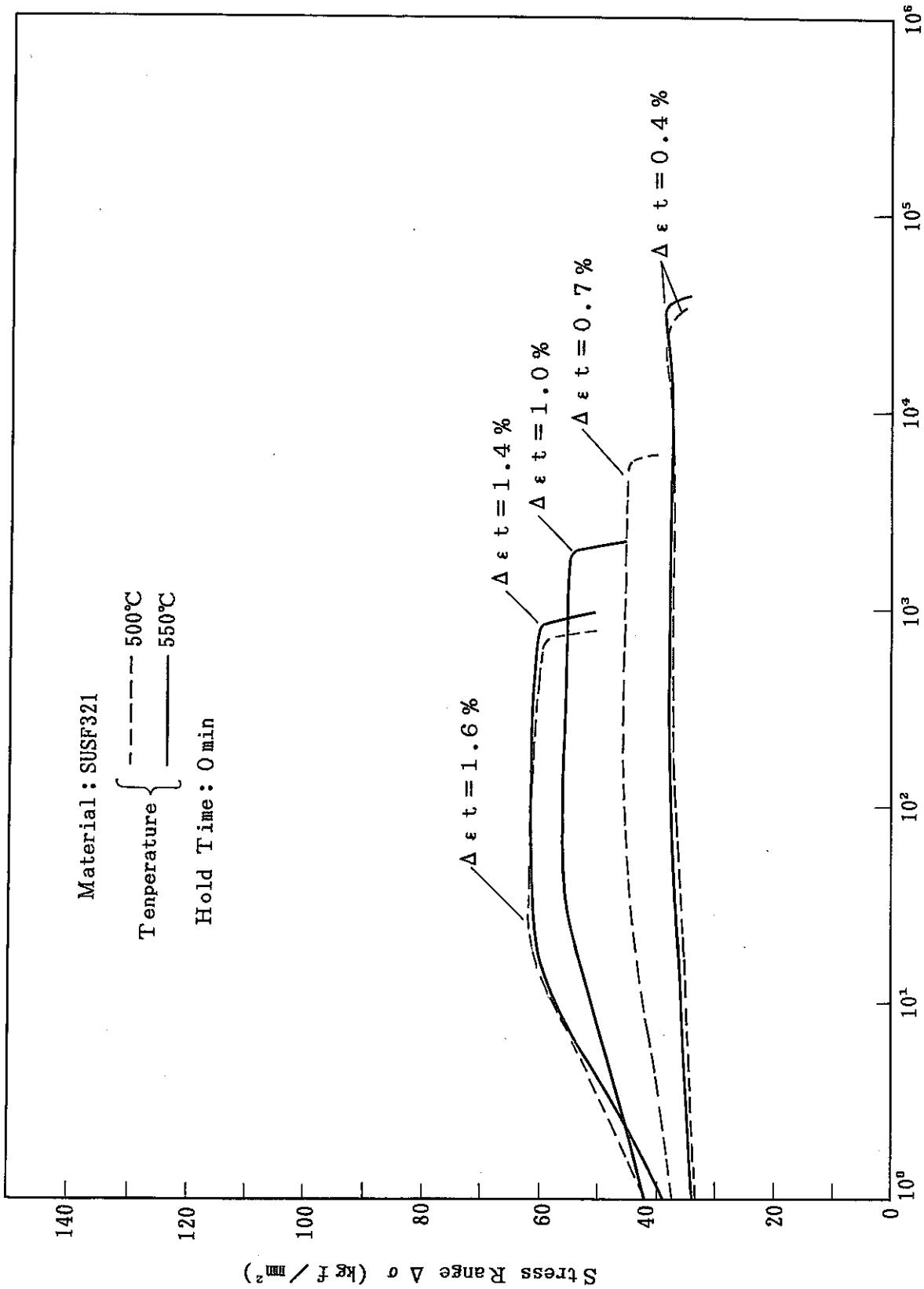


図5.27 繰返しに伴う応力範囲の挙動 ($T = 500^{\circ}\text{C}$, 550°C , $t_H = 0 \text{ min}$)

Fig. 5.27 Cyclic behavior of stress range ($T = 500^{\circ}\text{C}$, 550°C , $t_H = 0 \text{ min}$)

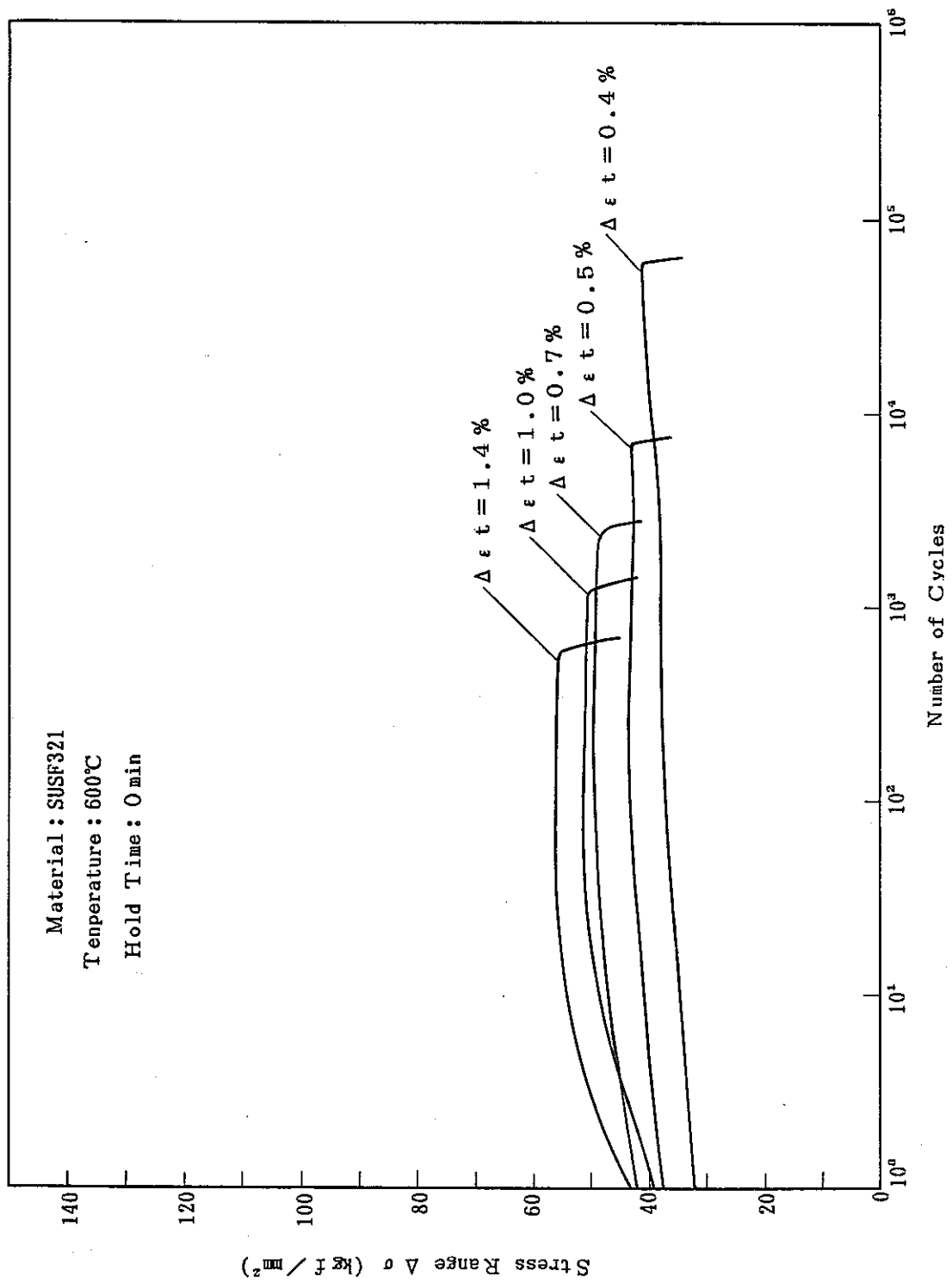


図5.28 繰返しに伴う応力範囲の挙動 (T = 600°C, t_H = 0min)
 Fig. 2.28 Cyclic behavior of stress range (600°C, t_H = 0min)

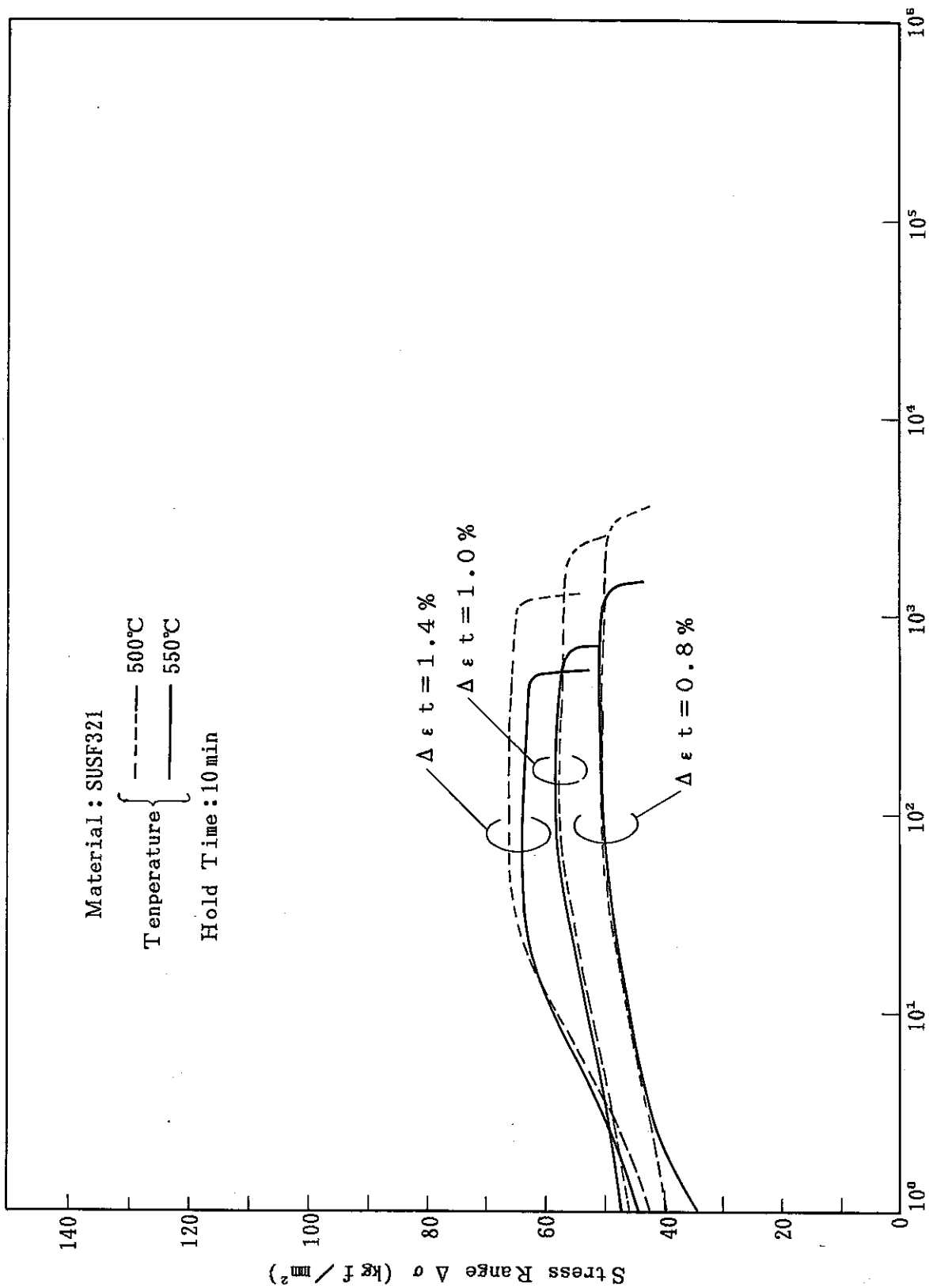


図 5.29 繰返しに伴う応力範囲の挙動 (T = 500°C, 550°C, t_H = 10 min)

Fig. 5.29 Cyclic behavior of stress range (T = 500°C, 550°C, t_H = 10 min)

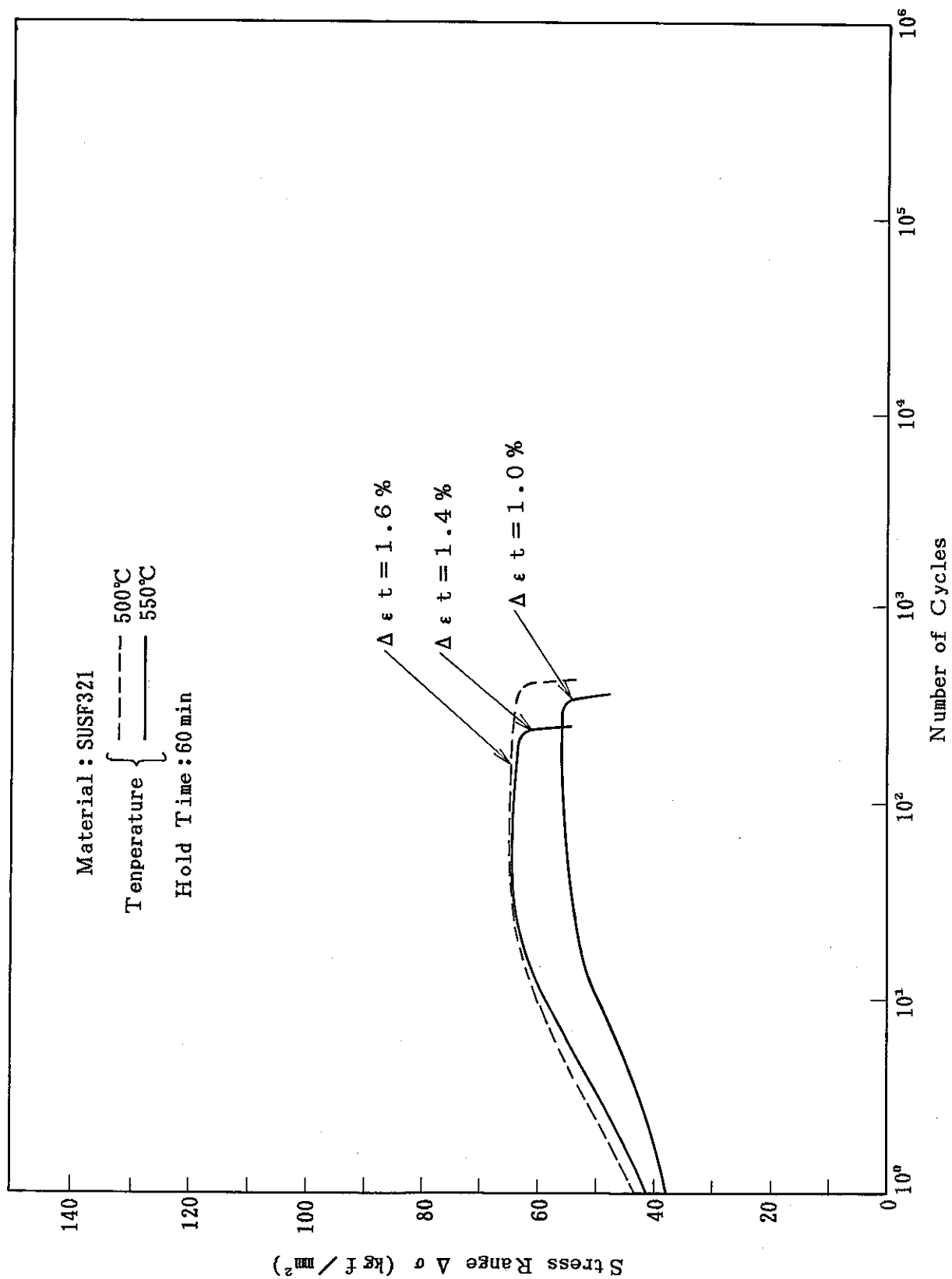


図5.30 繰返しに伴う応力範囲の挙動 (T = 500°C, 550°C, t_H = 60 min)

Fig. 5.30 Cyclic behavior of stress range (T = 500°C, 550°C, t_H = 60 min)

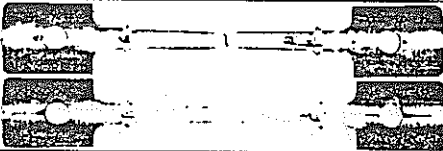
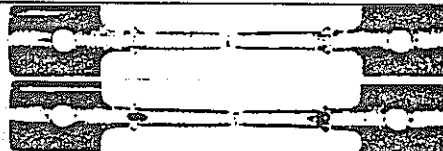
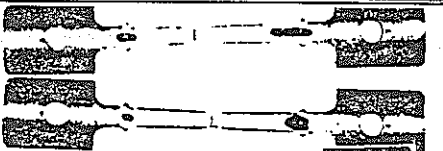
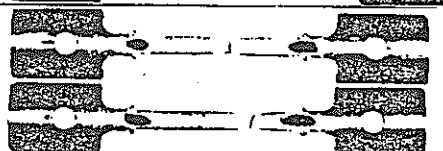
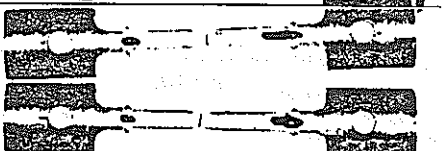
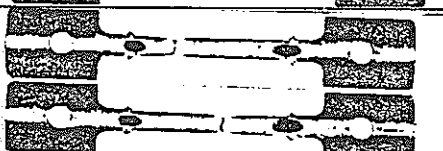
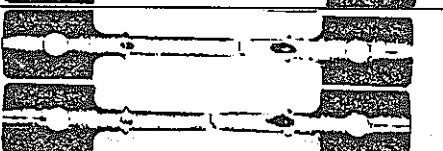
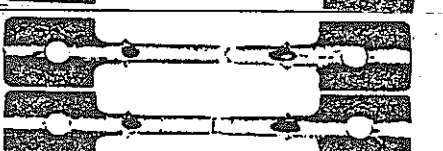
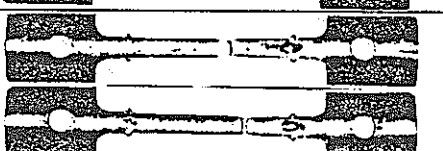
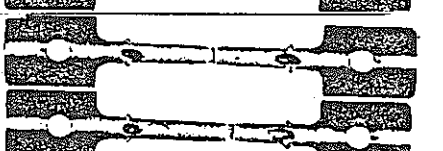
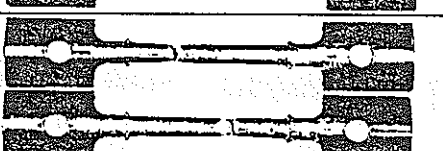
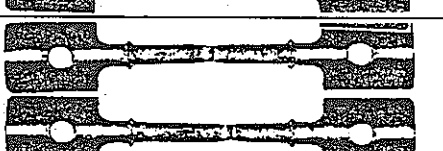
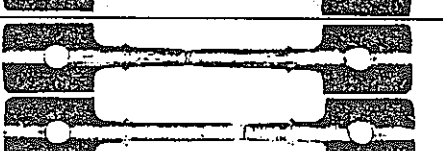
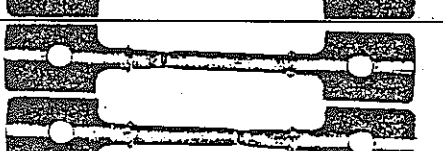
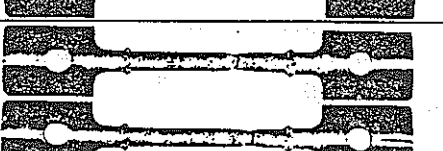
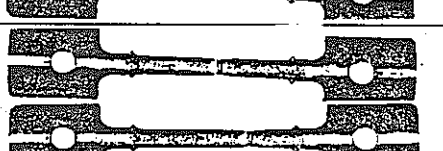
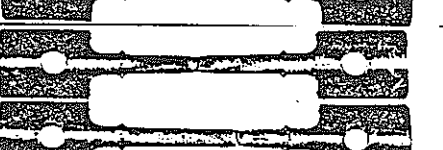
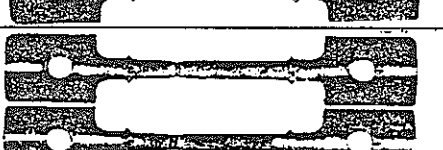
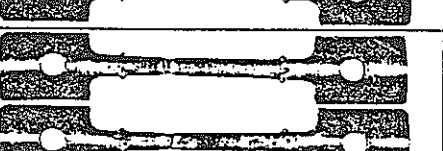
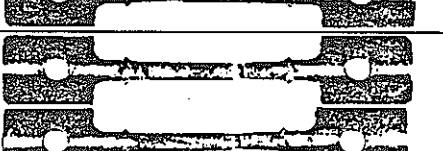
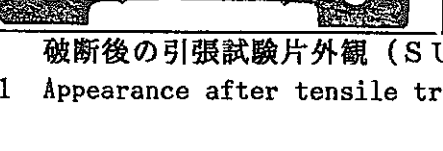
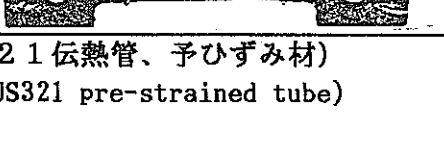




試験温度 (°C)	3%予ひずみ材			5%予ひずみ材			
	No.	0	50	100(mm)	No.	0	50
R.T.	301			501			
	302			502			
100	303			503			
	304			504			
200	305			505			
	306			506			
300	307			507			
	308			508			
350	309			509			
	310			510			
400	311			511			
	312			512			
450	313			513			
	314			514			
500	315			515			
	316			516			
550	317			517			
	318			518			
600	319			519			
	320			520			

写真5.1 破断後の引張試験片外観 (SUS321伝熱管、予ひずみ材)
 Photo. 5.1 Appearance after tensile test (SUS321 pre-strained tube)

試験番号 No	TH (min)	$\Delta \epsilon_t$ (%)	N_f	0 50 100 150				
33	0	1.4	388					
31	0	1.0	990					
34	0	0.7	> 3125					
32	0	0.5	> 7272					
35	0	0.4	> 32148					
温 度	550		材 料	SUS321伝熱管、予ひずみ3%				

写真5.2 疲労試験後の試験片外観 (SUS321伝熱管、予ひずみ材)

Photo.5.2 Appearance after fatigue test (SUS321 pre-strained tube)

試験番号 No	TH (min)	$\Delta \epsilon_t$ (%)	N_f	0 50 100 150				
25	0	1.4	316					
29	0	1.0	1196					
28	0	0.7	> 3646					
27	0	0.5	> 8347					
26	0	0.4	> 21063					
温 度	550		材 料	SUS321伝熱管、予ひずみ5%				

写真5.2 疲労試験後の試験片外観 (SUS321伝熱管、予ひずみ材) (つづき)

Photo.5.2 Appearance after fatigue test (SUS321 pre-strained tube)(continued)

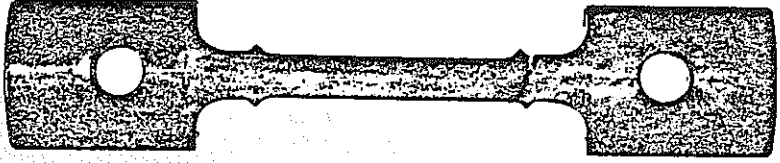
試験 温度	試験片 番号	応力 (kg f/mm ²)	破断時間 (h)	0 50 100 (mm)
550°C	B36	30.0	6776.5	

写真5.3 破断後のクリープ試験片外観 (SUS321伝熱管)

Photo.5.3 Appearance after creep test (SUS321 tube)

試験番号 No	TH (min)	$\Delta \epsilon_t$ (%)	N _f	0 50 100 150			
21	0	1.4	798				
19	0	1.0	1911				
20	0	0.7	> 5716				
22	0	0.5	> 20602				
23	0	0.4	> 30652				
24	0	0.4	> 29774				
温 度		550		材 料		SUS321伝熱管材	

写真5.4 疲労試験後の試験片外観 (SUS321伝熱管)

Photo.5.4 Appearance after fatigue test (SUS321 tube)

試験番号 No	TH (min)	$\Delta \epsilon t$ (%)	N _f	0 50 100 150			
6	0	1.4	436				
2	0	1.0	983				
4	0	0.7	3104				
5	0	0.5	10253				
3	0	0.4	48331				
温 度	550		材 料	SUS321 伝熱管材			

写真5.4 疲労試験後の試験片外観 (SUS321伝熱管) (つづき)

Photo.5.4 Appearance after fatigue test (SUS321 tube)(continued)

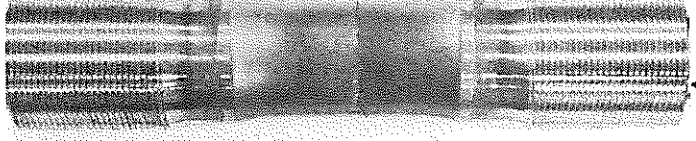

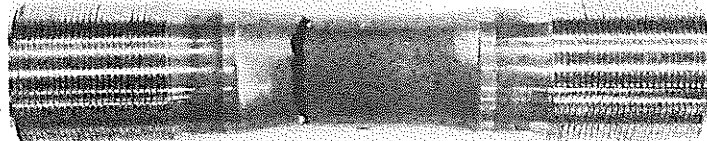

試験番号 No	TH (min)	$\Delta \epsilon_t$ (%)	N_f	0 50 100 150	
					
17	10	1.4	1275		
18	10	1.0	> 3274		
温 度	430		材 料	SUS321伝熱管材	

写真5.4 疲労試験後の試験片外観 (SUS321伝熱管) (つづき)

Photo.5.4 Appearance after fatigue test (SUS321 tube)(continoud)

試験番号 No	TH (min)	$\Delta \epsilon_t$ (%)	N_f	0 50 100 150	
12	10	1.4	594		
11	10	1.0	1055		
10	10	0.7	1685		
15	60	1.4	463		
温 度	500		材 料	SUS321伝熱管材	

写真5.4 疲労試験後の試験片外観 (SUS321伝熱管) (つづき)

Photo.5.4 Appearance after fatigue test (SUS321 tube)(continued)


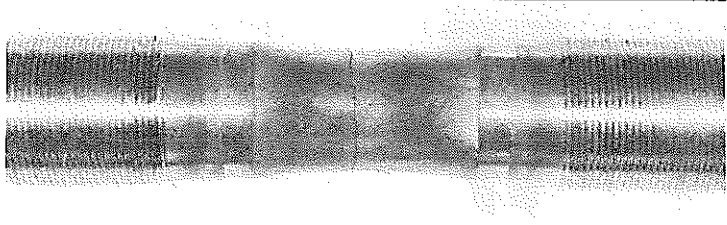
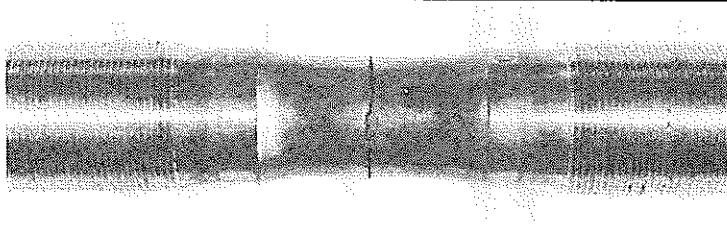
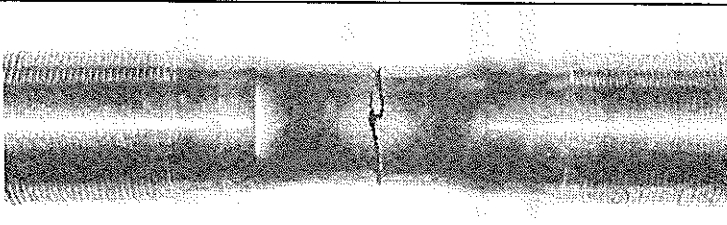
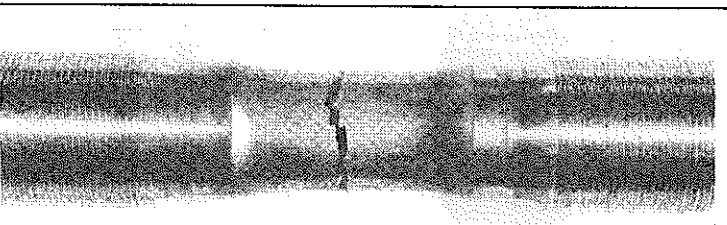
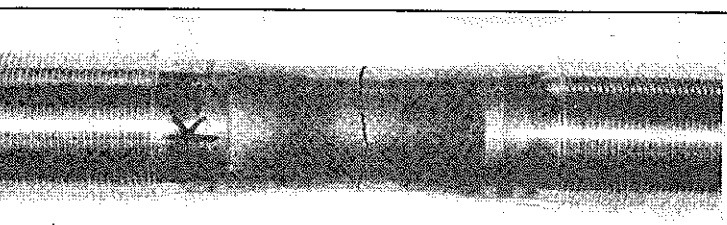
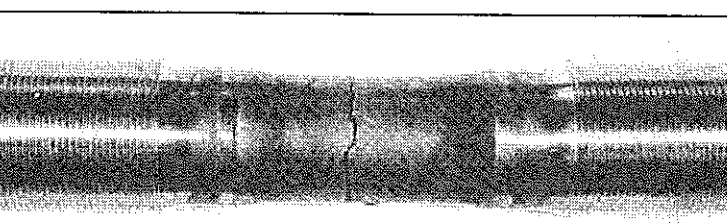
試験番号 No	TH (min)	$\Delta \epsilon t$ (%)	N _f	0 50 100 150	
					
1	10	1.4	171		
7	10	1.0	426		
8	10	0.7	513		
9	10	0.7	370		
13	10	0.7	86		
14	60	1.0	144		
温度		550		材 料	
				SUS321伝熱管	

写真5.4 疲労試験後の試験片外観 (SUS321伝熱管) (つづき)

Photo.5.4 Appearance after fatigue test (SUS321 tube)(continued)

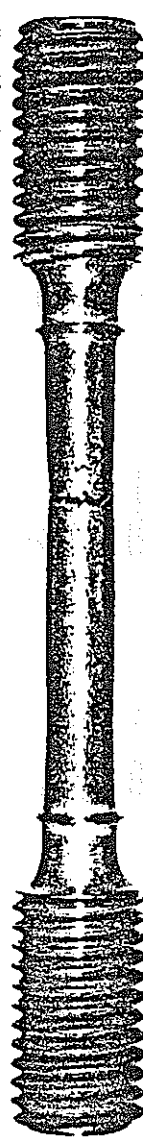
試験温度	試験番号	試験片号	応力 (kgf/mm ²)	破断時間 (h)	0 50 100 150 (mm)
500°C	FH001		36.0	5426.3	
	FH002		33.0		

写真5.5 破断後のクリープ試験片外觀 (SUS321鍛造材500°C)

Photo.5.5 Appearance after creep tests at 500°C (SUS321 forging)

試験温度	試験番号	試験片号	応力 (kgf/mm ²)	破断時間 (h)
550°C	FH003		34.0	116.6
	FH004		32.0	239.0
	FH005		28.0	871.5
	FH006		25.0	2307.2
	FH007		21.0	8688.4

写真5.6 破断後のクリープ試験片外観 (SUS321鍛造材, 550°C)

Photo.5.6 Appearance after creep tests at 550°C (SUS321 forging)

試験番号 No	TH (min)	$\Delta \epsilon t$ (%)	N _f	0 50 100 150				0 10	
20	0	1.6	779						
9	0	0.7	6231						
8	0	0.4	> 30206						
4	10	1.4	1305						
2	10	1.0	2691						
18	10	0.8	3676						
19	60	1.6	448						
温 度		500℃		材 料		SUS321 鍛造材			

写真5.7 疲労試験後の試験片外観 (SUS321鍛造材)

Photo.5.7 Appearance after fatigue test (SUS321 forging)

試験番号 No	TH (min)	$\Delta \epsilon t$ (%)	N_f	0 50 100 150 0 10	
15	0	1.4	955		
16	0	1.0	2282		
17	0	0.4	39230		
3	10	1.4	548		
1	10	1.0	719		
7	10	0.8	1545		
5	60	1.4	247		
6	60	1.0	382		
温度	550°C		材 料	SUS321鍛造材	

写真5.7 疲労試験後の試験片外観 (SUS321鍛造材) (つづき)

Photo.5.7 Appearance after fatigue test (SUS321 forging) (continued)

試験番号 No	T _H (min)	Δε _t (%)	N _f	0 50 100 150				0 10	
10	0	1.4	717						
11	0	1.0	1451						
12	0	0.7	2808						
13	0	0.5	7858						
14	0	0.4	63558						
温 度		600℃		材 料		SUS321鍛造材			

写真5.7 疲労試験後の試験片外観 (SUS321鍛造材) (つづき)

Photo.5.7 Appearance after fatigue test (SUS321 forging) (continued)

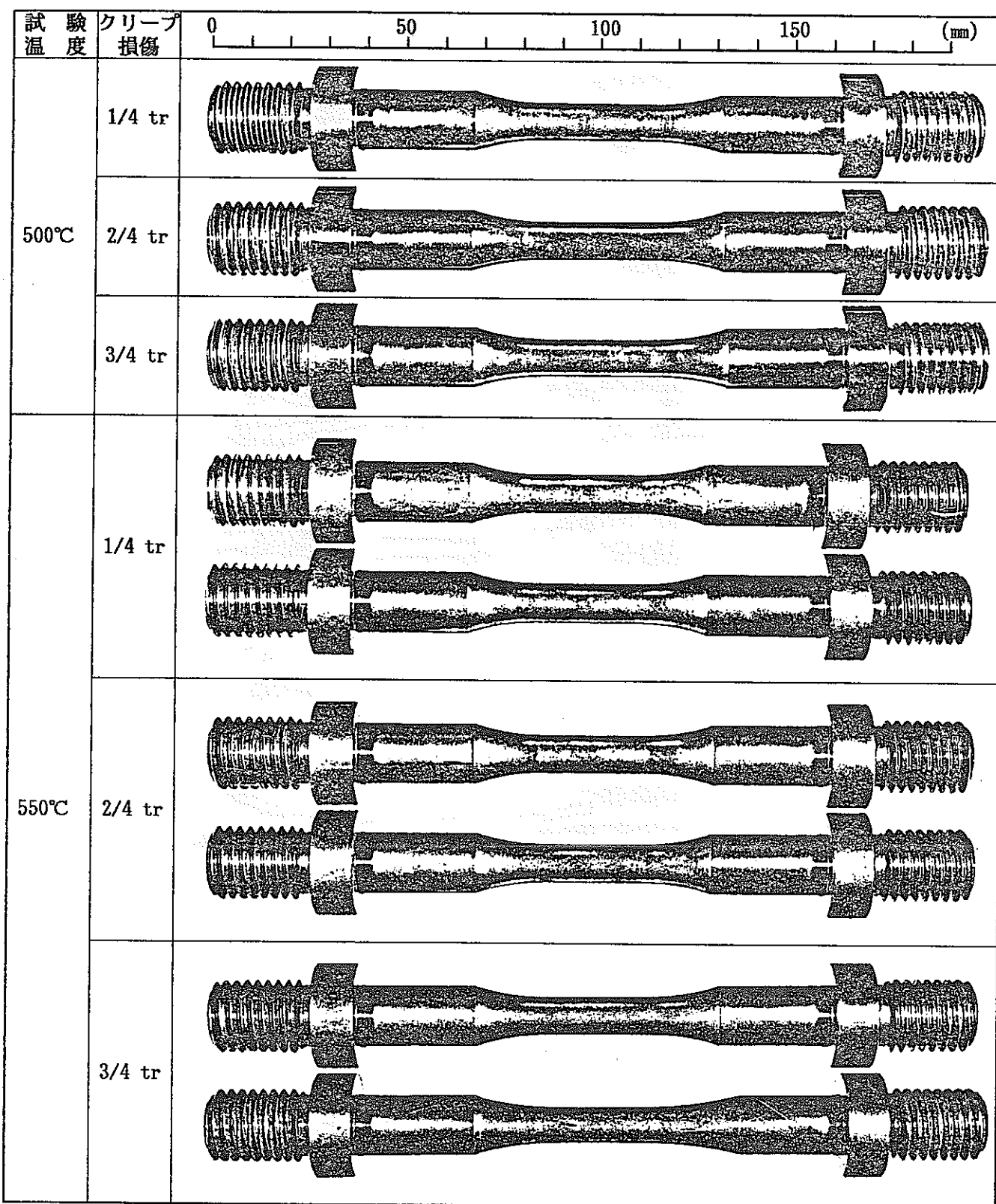


写真5.8 クリープ損傷試験後の疲労試験片外観 (SUS321鍛造材)

Photo. 5.8 Appearance after creep damage tests (SUS321 forging)

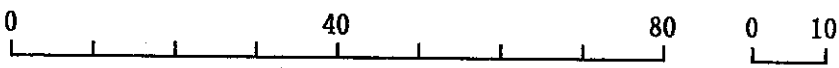
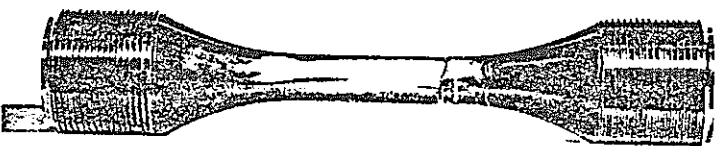

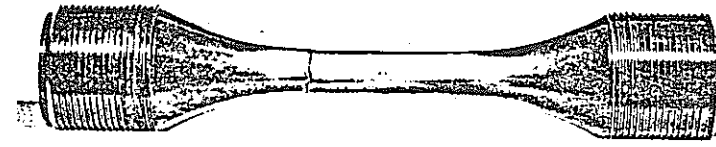

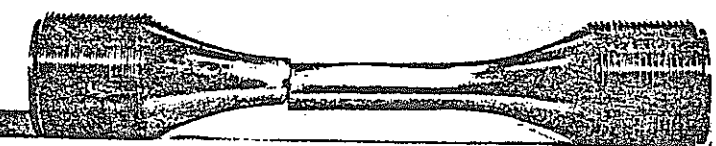

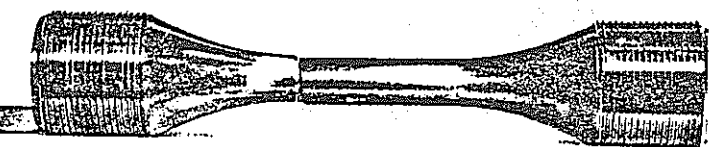

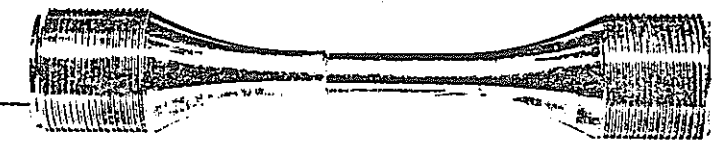

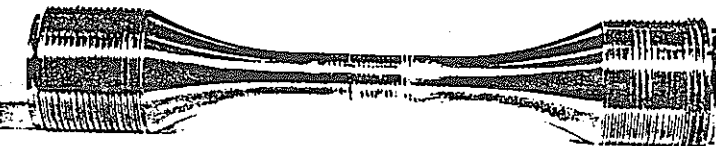

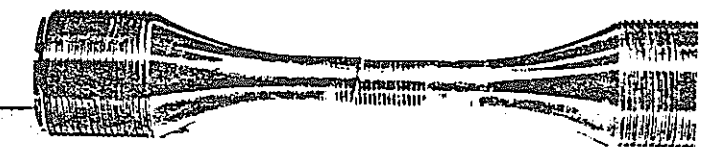

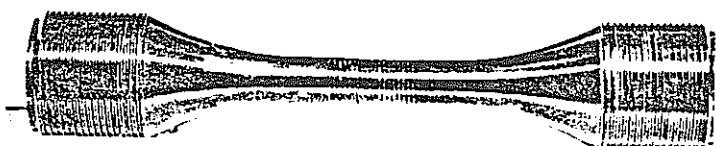

試験片 No	表面性状		
A-1	鏡面研磨		
A-2	"		
A-3	"		
A-4	"		
2-1	中仕上		
1-4	荒仕上		
1-1	"		
1-2	"		

写真5.9 高サイクル疲労試験後の試験片の外観 (インコネル718棒材)
 Photo.5.9 Appearance after high-cycle fatigue test (In 718 bar steel)

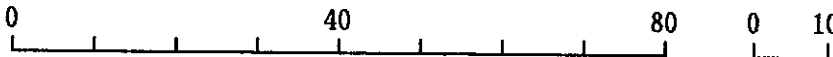
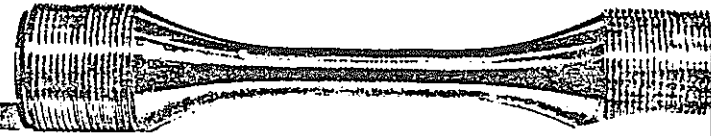
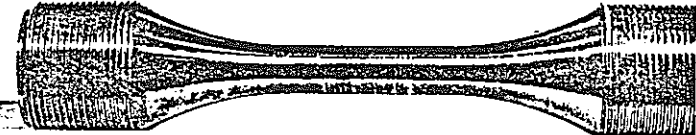
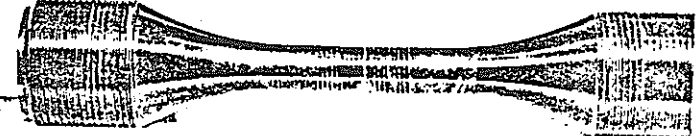

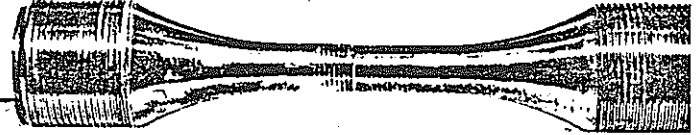

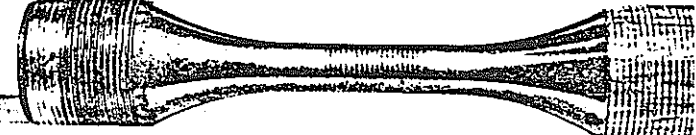
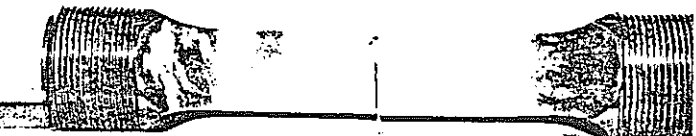

試験片 No.	表面性状		
1-5	荒仕上		
1-3	"		
0-2	"		
1-6	"		
1-7	"		
V-1	微小き裂		

写真5.9 高サイクル疲労試験後の試験片の外観 (インコネル718棒材) (つづき)
 Photo.5.9 Appearance after high-cycle fatigue tests (In 718 bar steel) (continued)

6. 考 察

6.1 引張特性

6.1.1 SUS321 伝熱管 ($\phi 31.8 \times 3.5$ t) 予ひずみ材の機械的特性

図5.3に示した0.2%耐力、引張強さ及び真破断応力の温度依存性には、原型炉材料強度基準による S_y 、 S_u の値を示したが、室温～600℃の温度範囲においては、0.2%耐力及び引張強さとも基準値 S_y 、 S_u 値を十分上まわる強度を示す。

0.2%耐力値及び引張強さの温度依存性の傾向は、基準値 S_y 、 S_u の温度依存性と同様の傾向をみせる。

また、予ひずみ量の強度に対する影響については、0.2%耐力及び引張強さとも3%予ひずみ材よりも5%予ひずみ材の方が高強度を示し、特に0.2%耐力値にその傾向が顕著にみられる。

真破断応力値における予ひずみ量の影響は明瞭でない。

一方、図5.4の破断伸びについては、強度の場合とは逆に予ひずみ量の少ない方(3%予ひずみ材)が高い延性を示し、図5.5の真一様伸び場合も同様の予ひずみ量の影響を示す。

絞り及び真破断延性においては300℃以上の温度でわずかに3%予ひずみ材の方が高い値を示す傾向がみられる。

図6.1は0.2%耐力と引張強度の比($\sigma_{0.2}/\sigma_B$)の温度依存性を示す。

$\sigma_{0.2}/\sigma_B$ は400℃付近で最小値を示し、3%予ひずみ材については、温度上昇によっても変化がほとんどみられず、5%予ひずみ材はゆるやかに上昇し、550～600℃で飽和する傾向を示す。

図6.2～図6.4は各試験温度値と室温での値との真破断応力比、0.2%耐力比及び引張強さの比の温度依存性を示す。

真破断応力比(図6.2)は試験温度の上昇と共に低下し、300～600℃の間ではほぼ直線的に低下している。

予ひずみ量による影響は、5%予ひずみ材の方が全試験温度領域にわたって低

下が大きく、3%予ひずみ材との差はほぼ全温度域で一定である。

0.2%耐力比(図6.3)は真破断応力の場合と同様に試験温度の上昇に伴って低下するが、真破断応力比よりも更にゆるやかに低下する。また、3%予ひずみ材の方が温度上昇に伴う低下量が大きく、5%予ひずみ材との差が約0.07と全試験温度にわたって一定である。

引張強さ比(図6.4)の変化は、0.85~0.7の範囲にあり、温度依存性が小さい。100℃から低下し200~300℃の範囲に極小がみられ、350~400℃において極大を示し、再び低下する。また、3%予ひずみ材の方が低下度が大きい。3%予ひずみ材と5%予ひずみ材の差は0.2%耐力比に比べて小さいが各温度における3%予ひずみ材と5%予ひずみ材の差はほぼ一定である。

6.1.2 SUS321伝熱管(φ31.8×3.5t)予ひずみ材の応力-ひずみ関係式

表6.1及び表6.2は第5章の応力-ひずみ関係(表5.3~表5.6)より求めた弾塑性パラメータであり、3%予ひずみ材及び5%予ひずみ材について示した。

関係式は下記に示すLudwikのものを用いた。

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma - \sigma_p}{K} \right)^{1/m}$$

ここで、Eは縦弾性係数、 σ_p 、m、Kは温度依存の材料定数である。表6.1及び表6.2に示す。m、Kは全ひずみ量0.2~3.0%の範囲より一次式近似により算出したものである。

図6.5~図6.7は各材料定数E、 σ_p 、 σ_y 、m、Kの温度依存性を示す。図中には300℃以上のデータについての平均的傾向を示す実線(3%予ひずみ材)及び点線(5%予ひずみ材)を記入した。また原型炉材料強度基準による各値についても図中に併記した。予ひずみを付与したことによる影響で σ_p 、 σ_y は基準値より高い値を示し、m、Kは低い値を示している。

縦弾性係数Eの値は引張試験における応力-ひずみ曲線により求めた見かけの値である。図6.5より明らかなように非常にばらつきが大きく温度依存性すら明確にみるできない。図中の実線及び点線は実験結果の荷重-ひずみ曲線(

チャート紙)を検討し、曲線のばらつき及び試験片に対する予ひずみ付与量のばらつき等を考慮して描いたものである。

図6.6に示す σ_y 、 σ_p の温度依存性については、縦弾性係数Eのばらつきの影響より σ_p の方がばらつきが大きい。

一方、 σ_y については温度依存性が明確に見られる。 σ_y の300~600℃における値は、原型炉材料強度基準値が約14~12kgf/mm²であるのに対して、3%予ひずみ材は約26.7~22.7kgf/mm²、5%予ひずみ材が約31.0~27.6kgf/mm²の値を示し、およそ1.8倍(3%予ひずみ材)~2.2倍(5%予ひずみ材)の高い値を示した。

図6.7に示すm、Kの温度依存性は σ_y 、 σ_p に比べてばらつきが大きい。mの値は300℃以上では温度上昇と共に高い値を示しているのが見られ、さらに3%予ひずみ材より5%予ひずみ材の方が全般に高い係数値を示す。

原型炉材料強度基準値が315℃以上で0.3一定と温度依存性が示されていないのに比較して本実験材は温度が高くなるとmが大きくなる。すなわち300~600℃間の値は、3%予ひずみ材は約0.13~0.16、5%予ひずみ材は約0.16~0.19の値を示した。

また、Kの温度依存性については、データのばらつきが比較的多いが300~600℃の間でわずかに低下しているものと見られる。

表6.3及び表6.4は、以上のような結果(表6.1,表6.2,図6.5~図6.7)から得られたパラメータ値をもとに温度の一次関数として求めた平均関係式を示すものである。

適用温度範囲は300~600℃、ひずみ範囲は0.2~3.0%である。表6.5及び表6.6は前表(表6.3及び表6.4)の係数より算出した各温度におけるパラメータ値を示した。

6.2 クリープ特性

6.2.1 SUS321伝熱管($\phi 31.8 \times 3.5$ t)母材

図5.11に示した応力とクリープ破断時間の関係をみると、本研究で実施した550℃における実験値は原型炉材料強度基準によるSR値を十分満足する。また、

同基準による平均クリープ破断強さ ($\alpha_R=1$) をも上まわり、十分な強度を有している。

6.2.2 SUS321 鍛造材 (350 t)

図5.24に示した応力とクリープ破断時間の関係を見ると、本研究で得られた500℃及び550℃強度は、SUS304の原型炉材料強度基準値 S_R を十分満足すると共に、同基準による平均強度をも上まわっている。しかしながら、SUS321の原型炉材料強度基準値に対しては、500℃、550℃データとも同基準値平均強度を下まわり、 S_R 値に対しては同等か同等以上の強度を示す。

すなわち、短時間側では基準値 S_R を下まわる傾向を示すが、1000時間以上の長時間ではほぼ同等か同等以上の値を示す傾向がみられる。

図6.8は第3期クリープ開始時間と破断時間の関係を示す。

SUS321 鍛造材 (350 t) 母材の t_o/t_r (第3期クリープ開始時間/破断時間) は約0.47である。SUS304 (伝熱管及び鍛造材) が約0.6であったのに対し、かなり低い値を示している。このことは図5.18～図5.19に示したクリープ曲線にもみられるように、第3期曲線の立ち上がりがかかなり早い時期にはじまり、第3期クリープ変形量が大きいことにも現われている。

SUS321 伝熱管 (図5.8及び図5.9) に比べて、 t_o/t_r に大きな差が生じるものと思われる。

6.3 低サイクル疲労特性

6.3.1 SUS321 伝熱管 ($\phi 31.8 \times 3.5$ t) 予ひずみ材の低サイクル疲労強度

予ひずみ α の影響を明らかにするため $\alpha=0$ 、 $\alpha=3.0\%$ 及び 5.0% のひずみを室温で付加した材料につき550℃での低サイクル疲労試験を実施した結果を図6.9にまとめて示した。 $\alpha=3.0\%$ 及び 5.0% の間には疲労強度の差は見られず処女材 ($\alpha=0$) に比べ、低ひずみ領域で予ひずみ材が若干強度が低下する傾向にあるが高ひずみ領域では予ひずみの影響は認められない。低ひずみ領域におけるこの若干の予ひずみの影響は繰返し応力特性にも現われ、低ひずみ領域では予ひずみによる加工硬化の影響が最終まで残り、処女材に比べ大きい応力範囲となっている。応力振幅 $\Delta\sigma/2$ とひずみ振幅 $\Delta\varepsilon/2$ の関係を繰返し数 $N=$

50と $N = N_f / 2$ は場合について図6.10に示した。

$N = N_f / 2$ での $\Delta \sigma / 2$ と $\Delta \varepsilon / 2$ の関係は加工度によってあまり変化しない。

6.3.2 SUS321伝熱管 ($\phi 31.8 \times 3.5 t$) のひずみ保持低サイクル疲労強度

図6.11には430℃でのひずみ保持低サイクル疲労強度を示した。ひずみ保持無しのデータは無が、500℃と425℃の設計線図の類推から推定した425℃の保持なしの強度と比較して10分間の保持時間 t_H による寿命低下は認められない。図6.12は500℃での試験結果を示したもので $t_H = 10$ 分の場合では明らかな寿命の低下が認められる。またこの寿命低下の割合は低ひずみ範囲領域で大きい。図6.13は550℃の場合であるが、ひずみ保持時間の影響はさらに著しくあり、 $t_H = 1$ 時間で疲労寿命は約15%に減少する。

繰返し応力-ひずみ線図に及ぼすひずみ保持時間 t_H の影響を図6.14に示した。500℃の場合、 t_H が大きくなるにつれ、応力振幅は大きくなり、ひずみ時効が著しい。600℃の場合、 $t_H = 10$ 分と60分とで応力振動に大きな違いはないが、 $t_H = 0$ の場合に比べ顕著な応力振幅の増加が見られる。また $t_H = 60$ 分の応力振幅が $t_H = 10$ 分の値より若干低いのは破壊寿命 N_f が小さいため、応力振幅を求めた繰返し数である $N_f / 2$ が小さいためである。

6.3.3 SUS321鍛造材のひずみ保持低サイクル疲労強度試験

ひずみ保持試験に先立ち、600℃での連続サイクル試験を実施し、その結果を図6.15に示した。500℃と550℃とでは強度に有意差は認められないが、600℃では中間ひずみ領域で明らかに疲労強度が小さくなる。しかし、低ひずみ領域では500、550℃及び600℃で疲労強度差はなくなるようである。また繰返し応力-ひずみの関係を図6.16に示したが、500℃と550℃とで若干550℃の方が応力値が大きくなる傾向にあるが差は小さい。600℃では低ひずみ領域で500℃及び550℃より応力値が大きく、大ひずみ領域で逆に応力値は小さくなる。

ひずみ保持低サイクル疲労試験の結果を図6.17及び図6.18に示した。

ひずみ保持による低サイクル疲労寿命の低下は500℃の試験において $t_H =$

10分ではほとんど認められなかった。t_H=60分の場合、破断寿命が約1/2に減少する。しかし、550℃ではひずみ保持の影響は顕著に現われ、t_H=10分の場合で約1/3~1/2の減少、t_H=60分の場合で約1/7~1/4に減少する。これらの低下率をSUS321伝熱管の場合と比較すると、500℃において鍛造材の低下率は小さいが、550℃ではほぼ同じ低下率となっている。ひずみ保持時間t_Hの繰返し応力-ひずみ線図の影響を図6.19に示したが、500℃ではt_Hが10分及び60分存在することにより応力振幅は大きくなり、550℃ではt_Hの影響はほとんど現われない。この現象も伝熱管の場合と若干異なる。

6.3.4 クリープ疲労損傷和

SUS321伝熱管及び鍛造材のひずみ保持中の応力緩和特性を求め図6.20及び6.21に示した。初期応力及び緩和応力は繰返しによって変化するので代表値としてN=N_f/2での値を求めた。図より430℃では応力緩和はほとんど起きないが、550℃はひずみ保持の初期に明らかな応力緩和が起きる。クリープ損傷を計算するに当ってはこの緩和曲線を保持時間1~2分、5分、10分、30分で分割し、その間一定応力が負荷していると仮定した。またクリープ破断曲線は図6.22に示した以下の関係を使用した。

$$\begin{array}{l}
 \text{伝熱管} \left\{ \begin{array}{ll} \sigma = 90.77 \times t R^{-0.0912} & \text{at } 500^{\circ}\text{C} \\ \sigma = 50.47 \times t R^{-0.05499} & \text{at } 550^{\circ}\text{C} \end{array} \right. \\
 \text{鍛造材} \left\{ \begin{array}{ll} \sigma = 51.13 \times t R^{-0.04272} & \text{at } 500^{\circ}\text{C} \\ \sigma = 61.52 \times t R^{-0.1188} & \text{at } 550^{\circ}\text{C} \end{array} \right.
 \end{array}$$

このとき1サイクル当りのクリープ損傷を以下のように示した。

$$\phi_C = \sum_i \frac{t_i}{t_{R_i}}$$

ϕ_C : 1サイクル当りのクリープ損傷

t_i : i番目のステップの保持時間

t_{R_i} : i番目のステップの初期応力に対応するクリープ破断応力

以上の方法でクリープ損傷を求め、疲労損傷とともに表6.7にまとめて示した。

また、この結果を図6.23に示した。この結果、前述の方法で求められるクリープ損傷はクリープ疲労が重畳するときの強度評価法の一つである線形損傷則には適していないように思われる。

6.3.5 インコネル718棒材の高温高サイクル疲労強度

図6.24にインコネル718棒材の疲労試験結果を応力振幅と破断繰返し数の関係で示す。鏡面研磨材、中仕上材ともに内部の粗大結晶粒を起点としているため、同一のS-N線図を示すと考えられる。すなわち、25S程度の表面あらかは、この材料の場合、疲労強度に影響しないと考えられる。約100Sの荒仕上材に比して、約0.1mmの微小き裂材は強度低下しないようである。これらは加工傷やき裂を起点に破壊に至っていることから明らかなように、鏡面研磨材や中仕上材よりも疲労強度は低い。

なお、この鏡面研磨材や中仕上材の疲労強度は、結晶粒をより細かくした圧延材の値よりも低い。

荒仕上材では650℃においても疲労試験を実施したが、600℃の結果と大差ない強度を示している。

表 6.1 試験値より求めた弾塑性パラメータ (SUS321 伝熱管、3%予ひずみ材)
 Table. 6.1 Elastic-plastic parameter calculated from tested value
 (SUS321 3% pre-strained tube)

試験材料	試験温度 (°C)	試験片番号 (EH-)	見かけの弾性係数 E (kgf/mm ²)	比例限相当真応力 σ_p (kgf/mm ²)	0.2%対力真応力 σ_f (kgf/mm ²)	加工硬化に関する材料定数 m	強度に関する材料定数 K (kgf/mm ²)
SUS321 伝熱管 3% 予ひずみ 材	20	301	15200	13.55	34.32	0.11913	41.17
		302	13400	18.78	35.40	0.18592	45.73
	100	303	14100	15.08	28.96	0.1894	27.85
		304	14700	13.35	30.28	0.08223	27.94
	200	305	14100	12.00	26.92	0.10156	27.53
		306	14100	13.12	27.77	0.12457	30.72
	300	307	16400	12.95	25.66	0.12679	27.06
		308	14500	14.48	27.96	0.12546	28.22
	350	309	14400	16.62	26.57	0.13517	22.42
		310	16100	16.09	25.86	0.14199	23.06
	400	311	10100	16.48	24.90	0.22579	31.72
		312	9600	14.13	24.33	0.18528	31.73
	450	313	13900	18.35	24.58	0.19429	20.91
		314	12800	12.42	24.91	0.13440	27.92
	500	315	15600	12.03	24.13	0.14172	28.29
		316	16000	11.92	22.82	0.16000	29.00
	550	317	20200	12.91	23.15	0.16333	27.89
		318	16200	12.94	24.00	0.11686	22.73
600	319	19600	12.03	22.11	0.17055	28.81	
	320	14100	12.26	23.03	0.14350	25.57	

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma - \sigma_p}{E} \right)^{1/m}$$

注) m, Kは、 $\epsilon : 0.2 \sim 3.0\%$ の範囲より算出

表6.2 試験値より求めた弾塑性パラメータ (SUS321 伝熱管、5%予ひずみ材)

Table. 6.2 Elastic-plastic parameter calculated from tested value

(SUS321 5% pre-strained tube)

試験材料	試験温度 (°C)	試験片番号 (EH-)	見かけの弾性係数 E (kgf/mm ²)	比例限相当真応力 σ_p (kgf/mm ²)	0.2%対力真応力 σ_f (kgf/mm ²)	加工硬化に関する材料定数 m	強度に関する材料定数 K (kgf/mm ²)
SUS321 伝熱管 (ϕ 31.8 × 3.5 t) 5% 予ひずみ 材	20	501	14900	20.65	37.98	0.14600	39.14
		502	11100	21.81	38.00	0.16346	40.79
	100	503	12100	22.12	35.28	0.28134	63.40
		504	11000	17.68	34.28	0.20827	52.61
	200	505	11900	21.53	32.05	0.21049	34.17
		506	10700	17.00	33.13	0.23257	58.35
	300	507	15300	20.98	30.67	0.17846	28.11
		508	16600	17.84	31.31	0.12218	27.79
	350	509	15200	17.04	30.53	0.14393	30.94
		510	13800	18.35	30.13	0.20232	38.47
	400	511	15000	15.05	29.42	0.12338	30.43
		512	16800	16.82	28.92	0.13015	26.80
	450	513	12500	18.48	28.94	0.17351	29.35
		514	13100	20.19	30.59	0.14031	24.15
	500	515	11500	18.43	28.41	0.22614	35.83
		516	11800	17.76	28.73	0.21633	37.30
	550	517	13300	19.90	28.71	0.14066	20.74
		518	13300	22.98	29.10	0.23842	24.65
	600	519	12600	18.86	27.37	0.19390	27.25
		520	13100	20.03	28.02	0.21222	28.24

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma - \sigma_p}{E} \right)^{1/m}$$

注) m, Kは、 ϵ : 0.2~3.0%の範囲より算出

表6.3 SUS321伝熱管(3%予ひずみ材)の弾塑性応力-ひずみ関係式
 Table. 6.3 Elastic-plastic stress-straining relationship for SUS321 tube
 (3% pre-strained)

パラメータ	関係式(300~600℃)
E (kgf/mm ²)	$1.866 \times 10^4 - 9.367 \cdot T$
σ_p (kgf/mm ²)	$6.468 + 2.658 \times 10^{-1} \cdot \sigma_y$
σ_y (kgf/mm ²)	$30.600 - 1.317 \times 10^{-2} \cdot T$
m	$0.094 + 1.067 \times 10^{-4} \cdot T$
K (kgf/mm ²)	$28.300 - 3.000 \times 10^{-3} \cdot T$

1) $\sigma \leq \sigma_p$ のとき

$$t = \frac{\sigma}{E}$$

2) $\sigma \geq \sigma_p$ のとき

$$t = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma - \sigma_p}{K} \right)^{1/m}$$

関係式適用範囲

温度 T: 300~600℃

ひずみ速度: $3 \times 10^{-3} \sim 7.5 \times 10^{-2}$ mm/mm/min

ϵ : $2 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^2$ mm/mm

表6.4 SUS321伝熱管(5%予ひずみ材)の弾塑性応力-ひずみ関係式

Table. 6.4 Elastic-plastic stress-straining relationship for SUS321 tube
(5% pre-strained)

パラメータ	関係式 (300~600℃)
E (kgf/mm ²)	$1.835 \times 10^4 - 9.366 \cdot T$
σ_p (kgf/mm ²)	$17.776 + 5.884 \times 10^{-2} \cdot \sigma_y$
σ_y (kgf/mm ²)	$34.400 - 1.133 \times 10^{-2} \cdot T$
m	$0.126 + 1.133 \times 10^{-4} \cdot T$
K (kgf/mm ²)	$30.100 - 3.333 \times 10^{-3} \cdot T$

1) $\sigma \leq \sigma_p$ のとき

$$t = \frac{\sigma}{E}$$

2) $\sigma \geq \sigma_p$ のとき

$$t = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma - \sigma_p}{K} \right)^{1/m}$$

関係式適用範囲

温度 T: 300~600℃

ひずみ速度: $3 \times 10^{-3} \sim 7.5 \times 10^{-2}$ mm/mm/min

ϵ : $2 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^2$ mm/mm

表 6.5 SUS321 伝熱管 ($\phi 31.8 \times 3.5$ t, 3%予ひずみ材)
の弾塑性応力-ひずみ関係式のパラメータ値

Table. 6.5 Parameter value of elastic-plastic stress-strain relationship
for SUS321 tube (3% pre-strained)

温 度 (°C)	E (kg f / mm ²)	σ_p (kg f / mm ²)	σ_y (kg f / mm ²)	m	K (kg f / mm ²)
300	15850	13.55	26.65	0.1260	27.40
350	15382	13.38	25.99	0.1314	27.25
400	14913	13.20	25.33	0.1367	27.10
450	14445	13.03	24.67	0.1420	26.95
500	13977	12.85	24.02	0.1474	26.80
550	13508	12.68	23.36	0.1527	26.65
600	13039	12.50	22.70	0.1580	26.50

表 6.6 SUS321 伝熱管 (5%予ひずみ材) の弾塑性応力-ひずみ関係式の
パラメータ値

Table. 6.5 Parameter value of elastic-plastic stress-strain relationship
for SUS321 tube (5% pre-strained)

温 度 (°C)	E (kg f / mm ²)	σ_p (kg f / mm ²)	σ_y (kg f / mm ²)	m	K (kg f / mm ²)
300	15540	19.60	31.00	0.1600	29.10
350	15072	19.57	30.44	0.1657	28.93
400	14604	19.53	29.87	0.1713	28.77
450	14135	19.50	29.30	0.1770	28.60
500	13667	19.47	28.74	0.1827	28.43
550	13199	19.43	28.17	0.1883	28.27
600	12730	19.40	27.60	0.1940	28.10

表6.7 SUS321伝熱管及び鍛造材のクリープ疲労損傷

Table. 6.7 Damage fractions of creep and fatigue for SUS321 tube and forging

材	料	温 度 (°C)	保 持 時 間 t_H (分)	ひ ず み 範 囲 $\Delta \epsilon_t$ (%)	破 断 寿 命 N_f (回)	$\sum_i \frac{\Delta t_i}{TR_i}$	ク リ ー プ 損 傷 $\Phi_C = N_f \cdot \sum_i$	疲 勞 損 傷 $\Phi_f = N_f / N_{f0}$	損 傷 和 $\Phi = \Phi_C + \Phi_f$
SUS321 伝熱管	500	10	60	1.4	594	4.08×10^{-5}	0.024	0.743	0.767
				1.0	1055	1.51×10^{-5}	0.016	0.555	0.571
				0.7	1685	1.09×10^{-5}	0.018	0.306	0.324
		10	60	1.4	1685	2.176×10^{-4}	0.103	0.578	0.681
				1.4	171	3.76×10^{-3}	0.643	0.397	1.040
				1.0	426	1.66×10^{-3}	0.707	0.426	1.133
SUS321 鍛造材	550	10	60	0.7	513	6.78×10^{-5}	0.035	0.165	0.200
				0.7	370	6.78×10^{-5}	0.025	0.119	0.144
				1.4	86	1.53×10^{-2}	1.316	0.200	1.516
		60	60	1.0	144	3.02×10^{-3}	0.435	0.144	0.579
				1.4	1305	1.17×10^{-5}	0.001	1.254	1.255
				1.0	2691	$< 10^{-7}$	0.000	1.170	1.170
SUS321 鍛造材	500	10	60	0.8	2676	$< 10^{-7}$	0.000	0.919	0.919
				1.6	448	2.00×10^{-6}	0.001	0.574	1.575
				1.4	548	2.134×10^{-5}	0.116	0.535	0.648
		60	60	1.0	719	9.07×10^{-5}	0.065	0.312	0.377
				0.8	1545	1.89×10^{-5}	0.029	0.396	0.425
				1.4	247	2.448×10^{-4}	0.060	0.239	0.299
60	60	1.0	382	1.285×10^{-4}	0.049	0.166	0.215		

Nf0: 連続サイクル疲労寿命

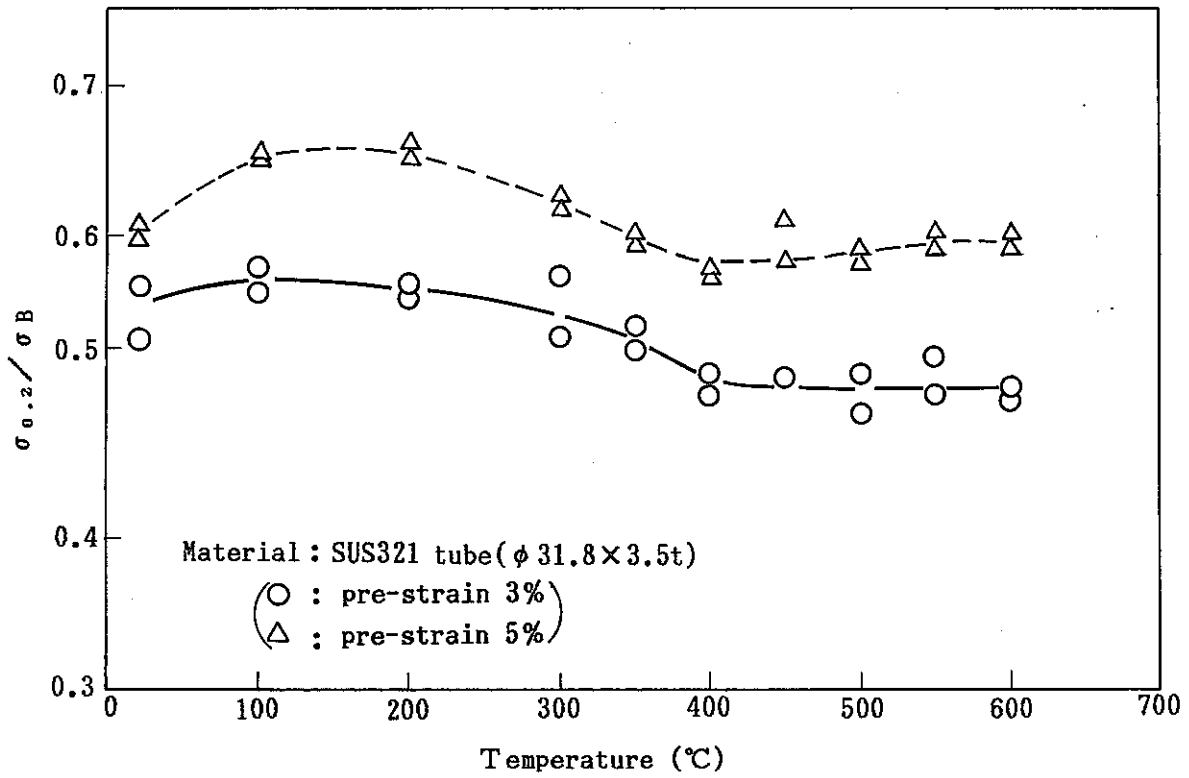


図 6.1 0.2%耐力と引張強度比の温度依存性

Fig. 6.1 Temperature dependence of ratio of 0.2% proof stress to ultimate tensile strength

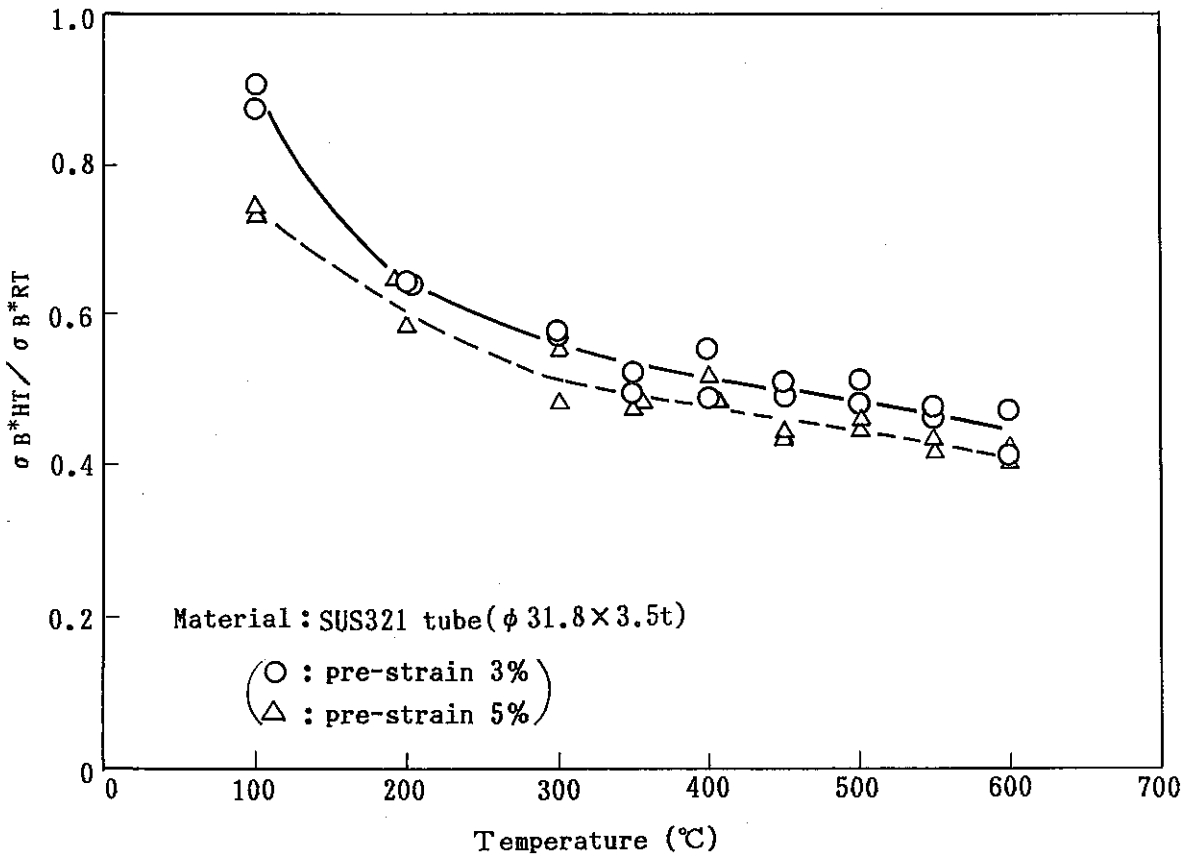


図 6.2 真破断応力比の温度依存性

Fig. 6.2 Temperature dependence of true fracture stress ratio

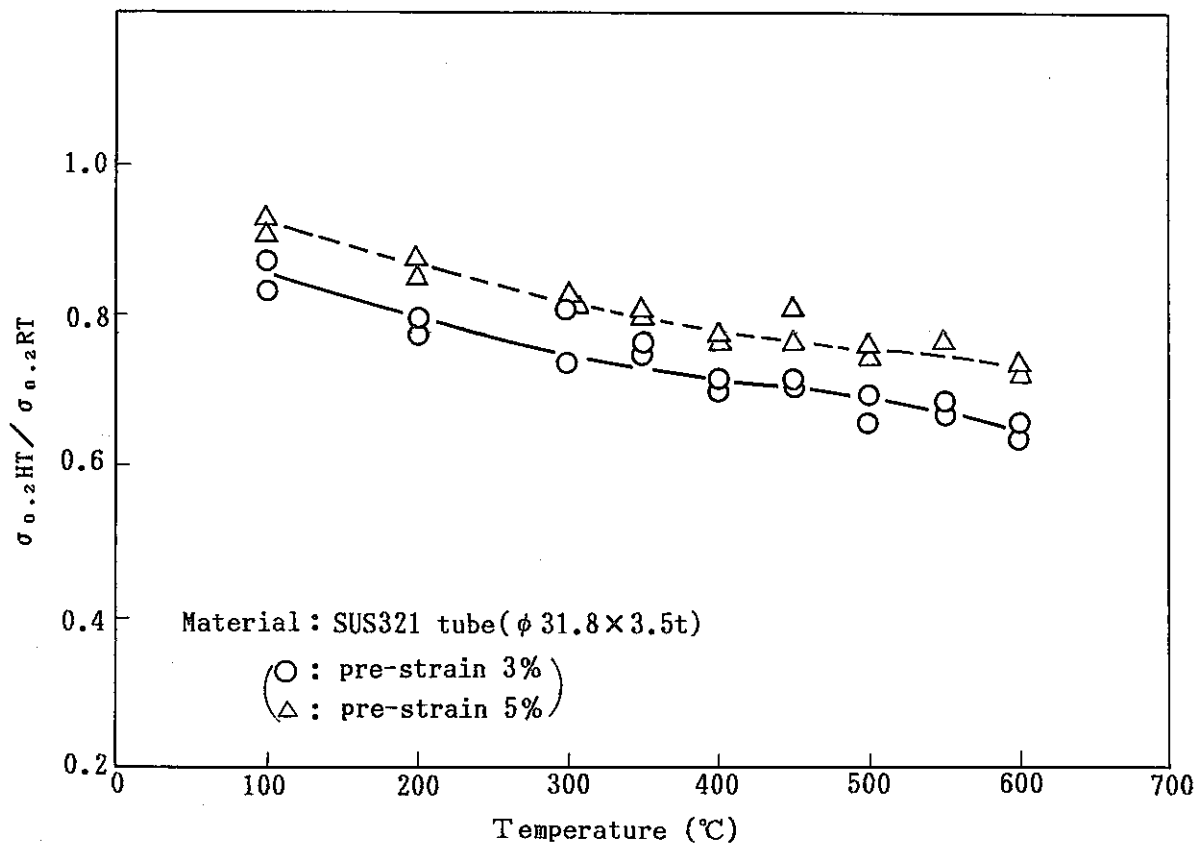


図 6.3 0.2%耐力比の温度依存性

Fig. 6.3 Temperature dependence of 0.2% offset yield strength ratio

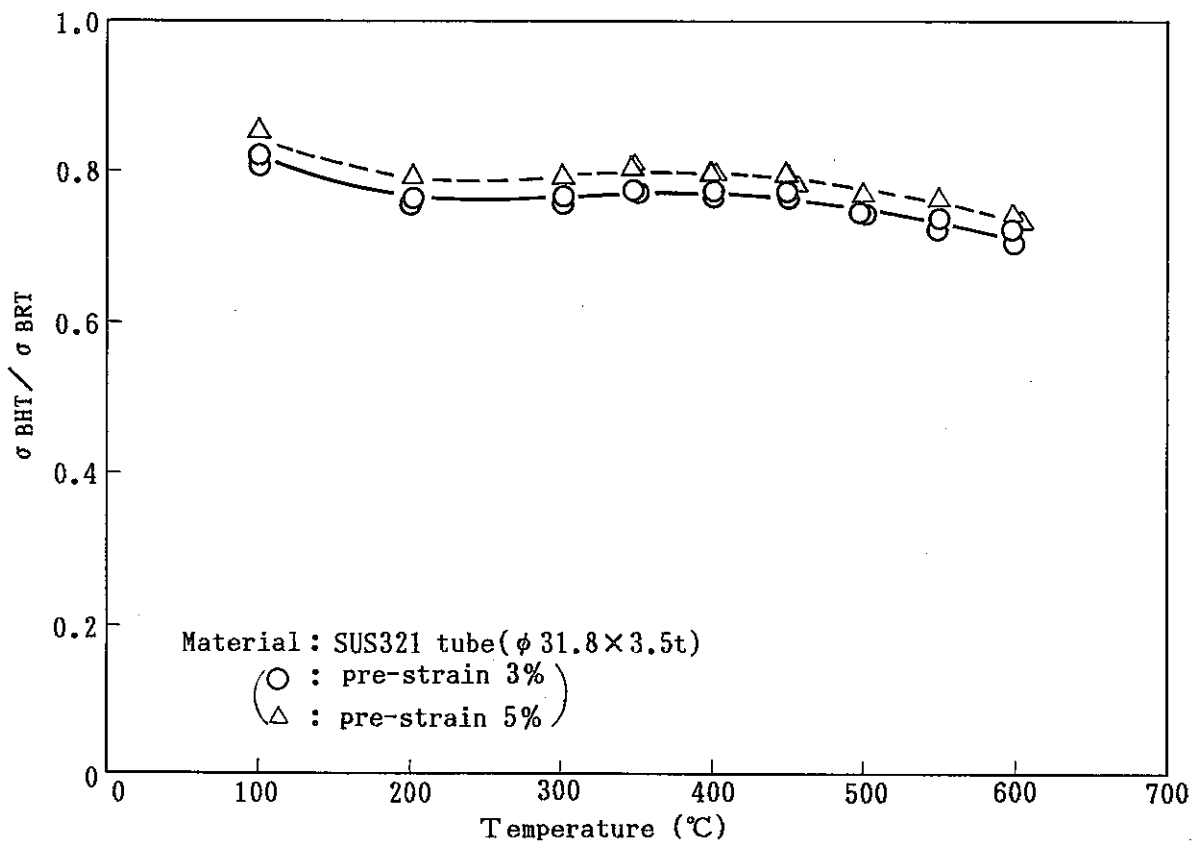


図 6.4 引張強さ比の温度依存性

Fig. 6.4 Temperature dependence of ultimate tensile strength ratio

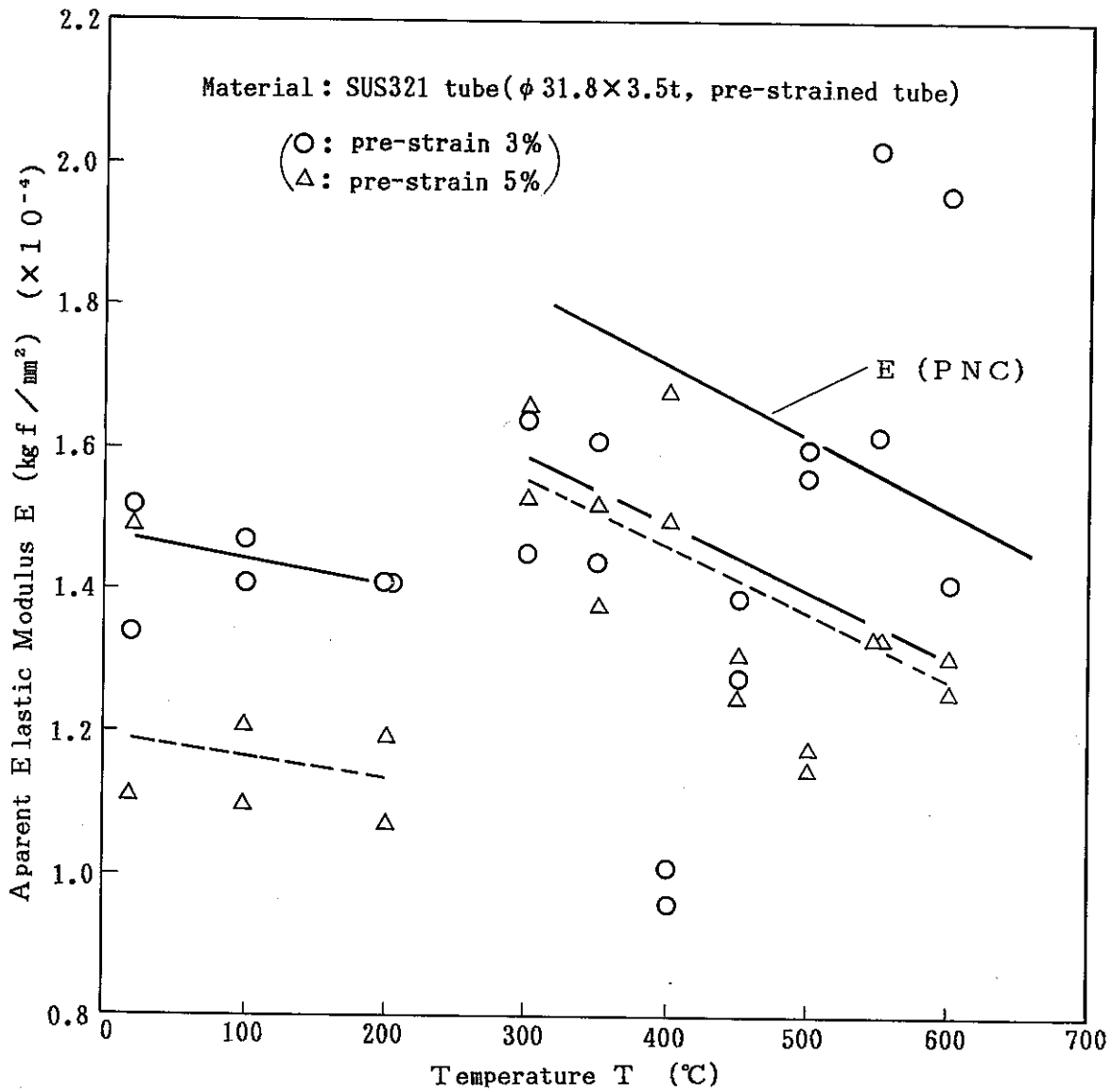


図 6.5 弾塑性パラメータ E の温度依存性

Fig. 6.5 Temperature dependence of elatic-plastic parameter E

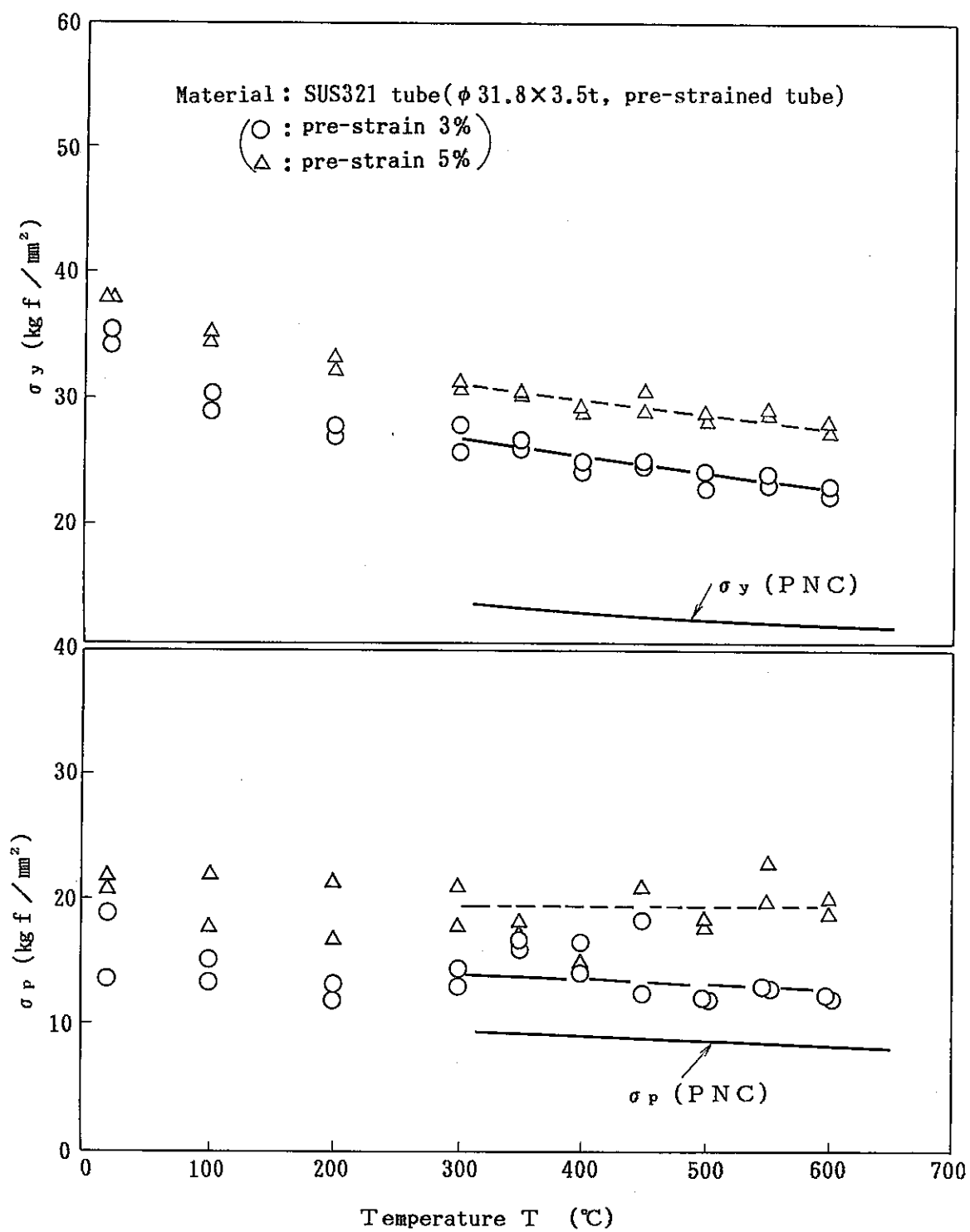


図 6.6 弾塑性パラメータ σ_p , σ_y の温度依存性

Fig. 6.6 Temperature dependence of elastic-plastic parameter σ_p , σ_y

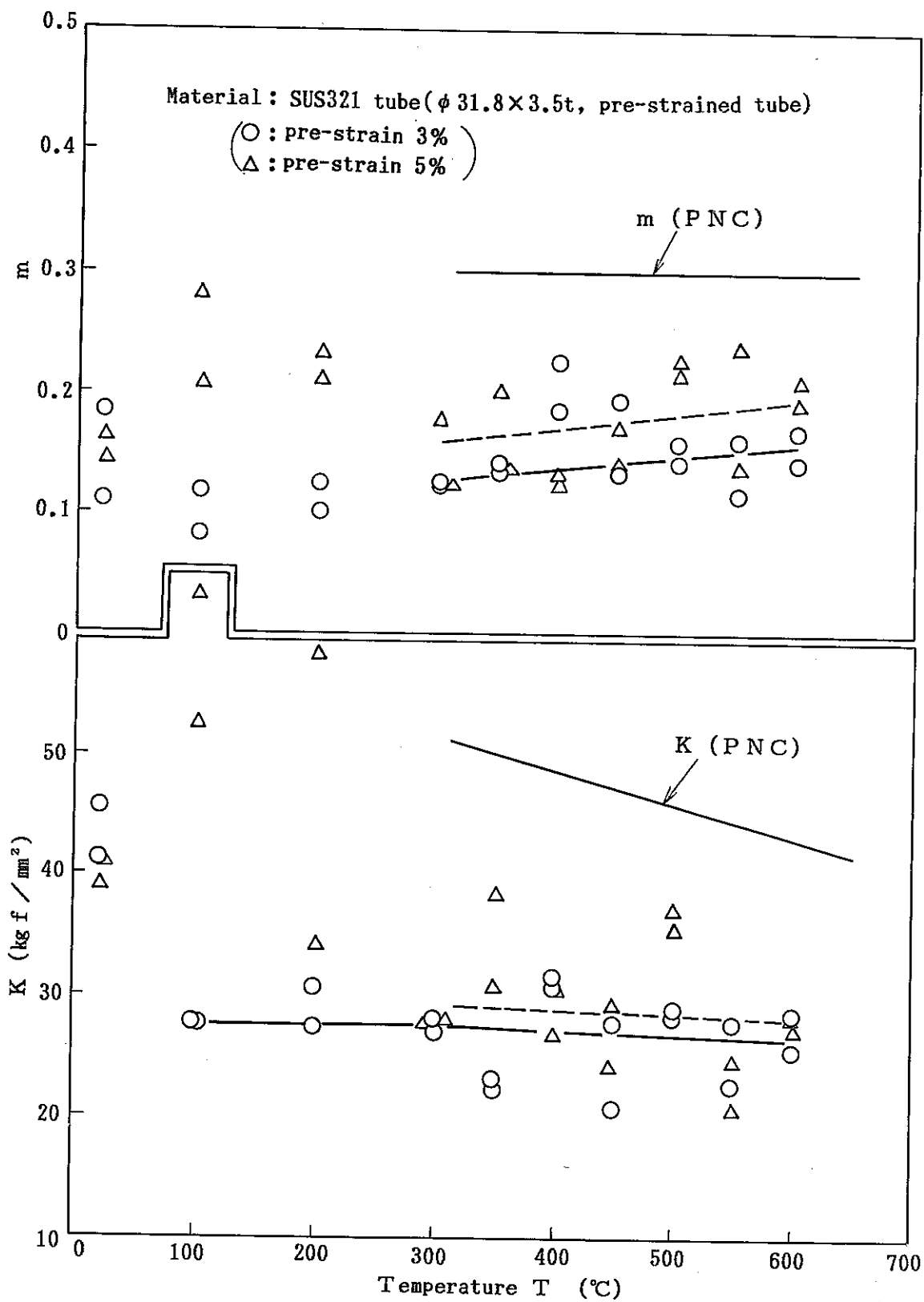


図 6.7 弾塑性パラメータ m , K の温度依存性

Fig. 6.7 Temperature dependence of elastic-plastic parameter m , K

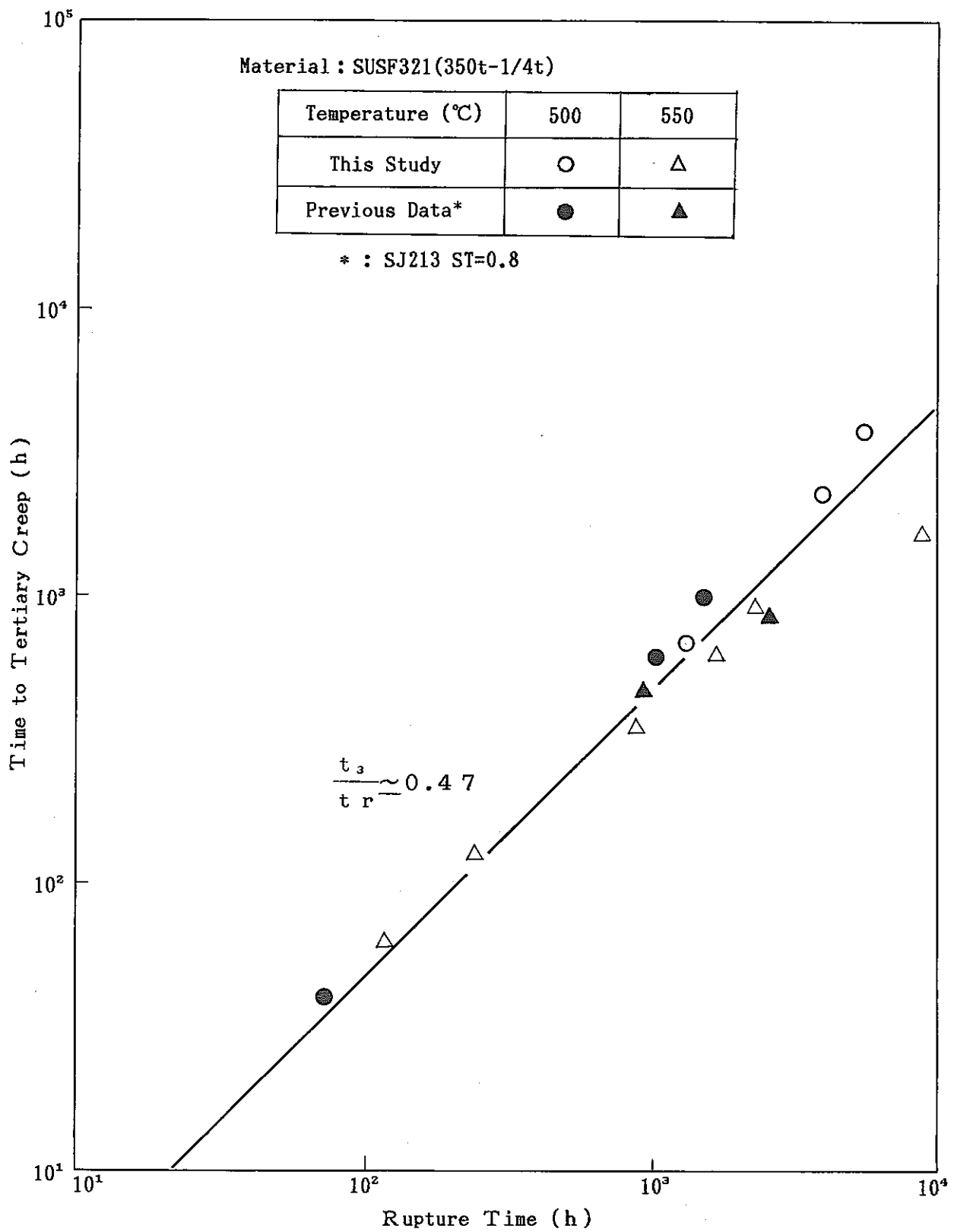


図 6.8 第 3 期クリープ開始時間と破断時間の関係 (SUS321 鍛造材)

Fig. 6.8 Relation between time to tertiary creep and rupture time

(SUS321 forging)

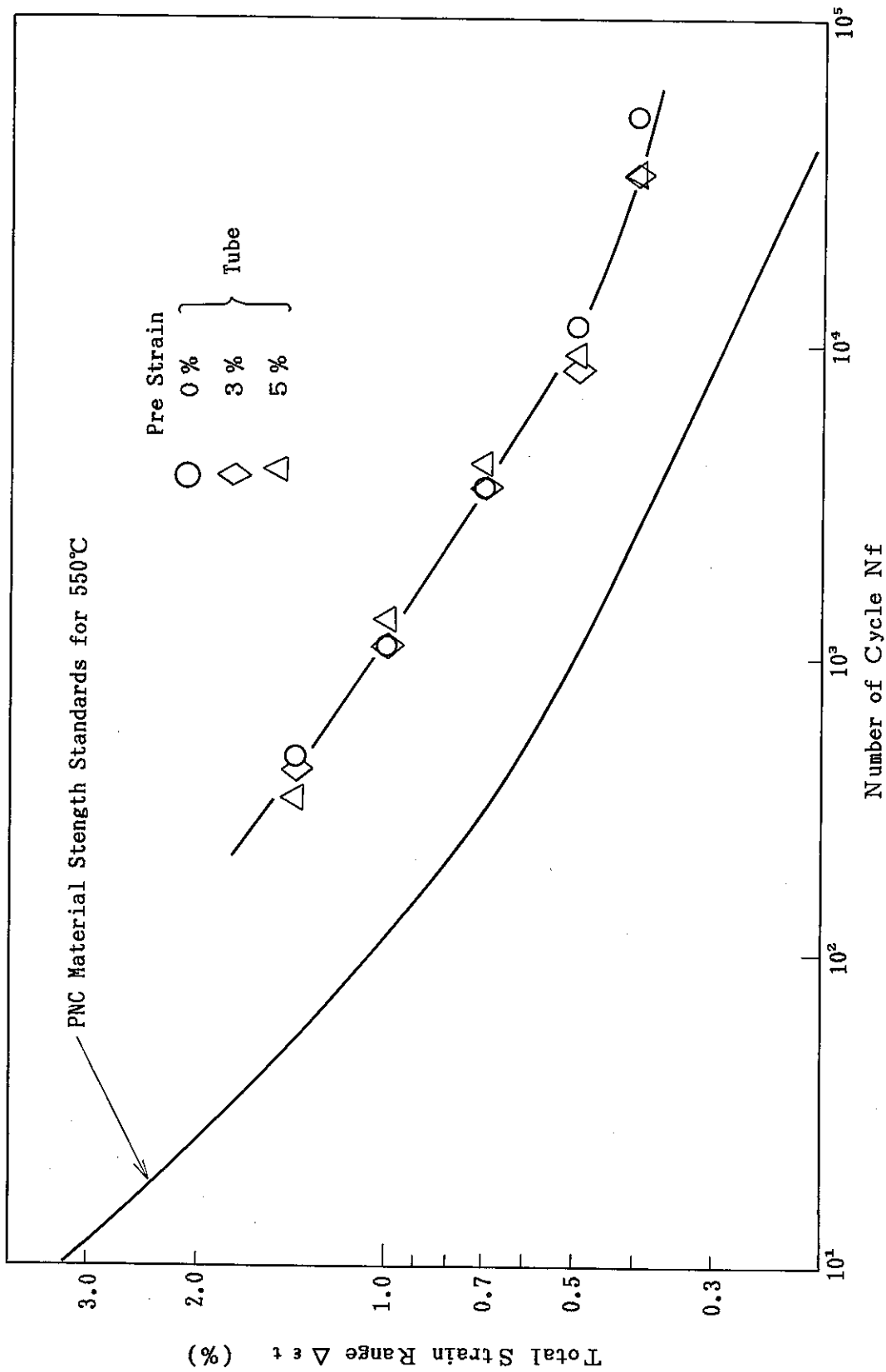


図 6.9 SUS321 伝熱管予ひずみ材の低サイクル疲労強度と設計疲労線図と比較

Fig. 6.9 Comparison of low-cycle fatigue strength with design fatigue curve of SUS321 pre-strained tube.

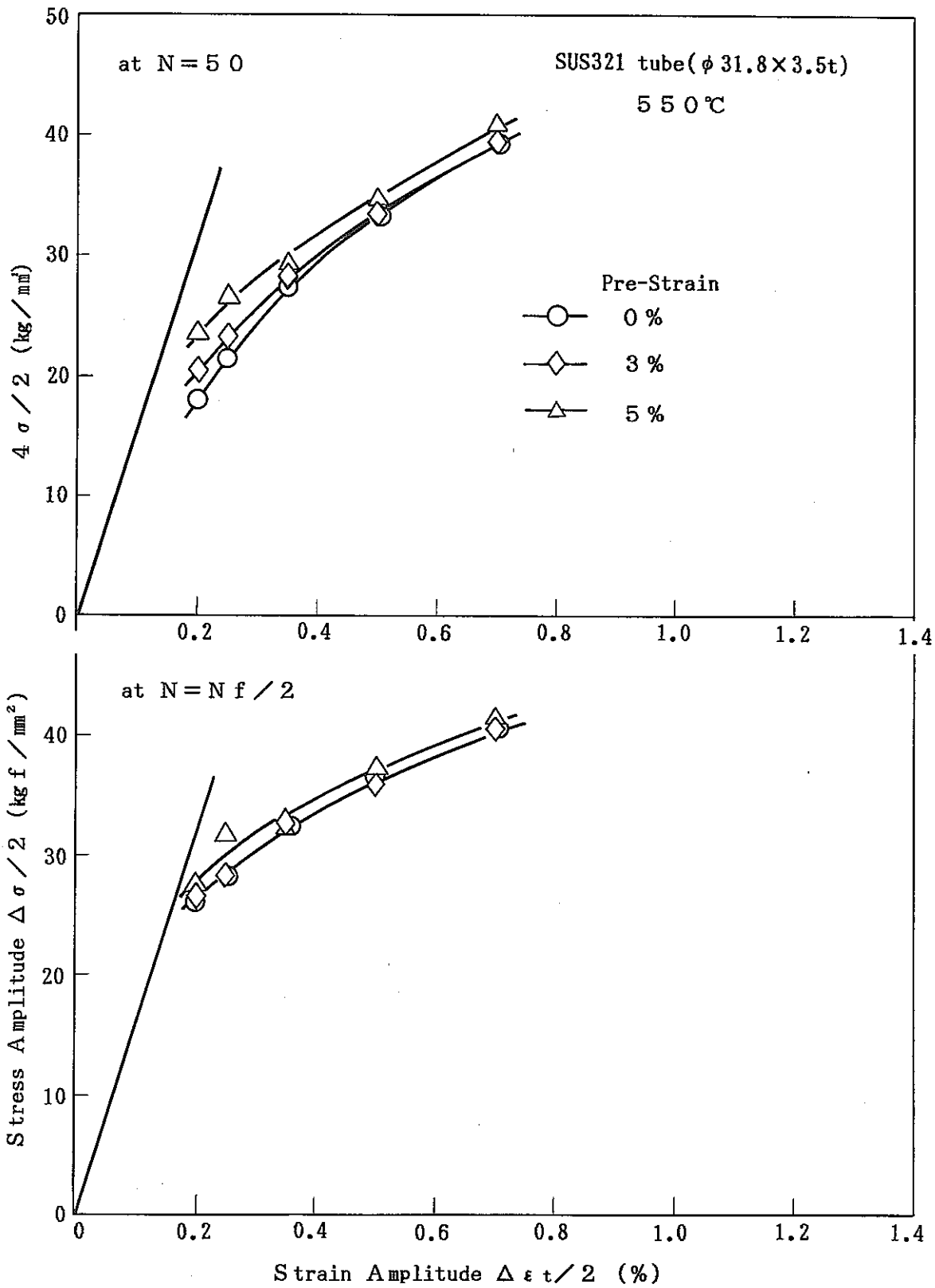


図 6.10 SUS321 伝熱管予ひずみ材の繰返し応力-ひずみ曲線

Fig. 6.10 Cyclic stress-strain curves for SUS321 pre-strained tube

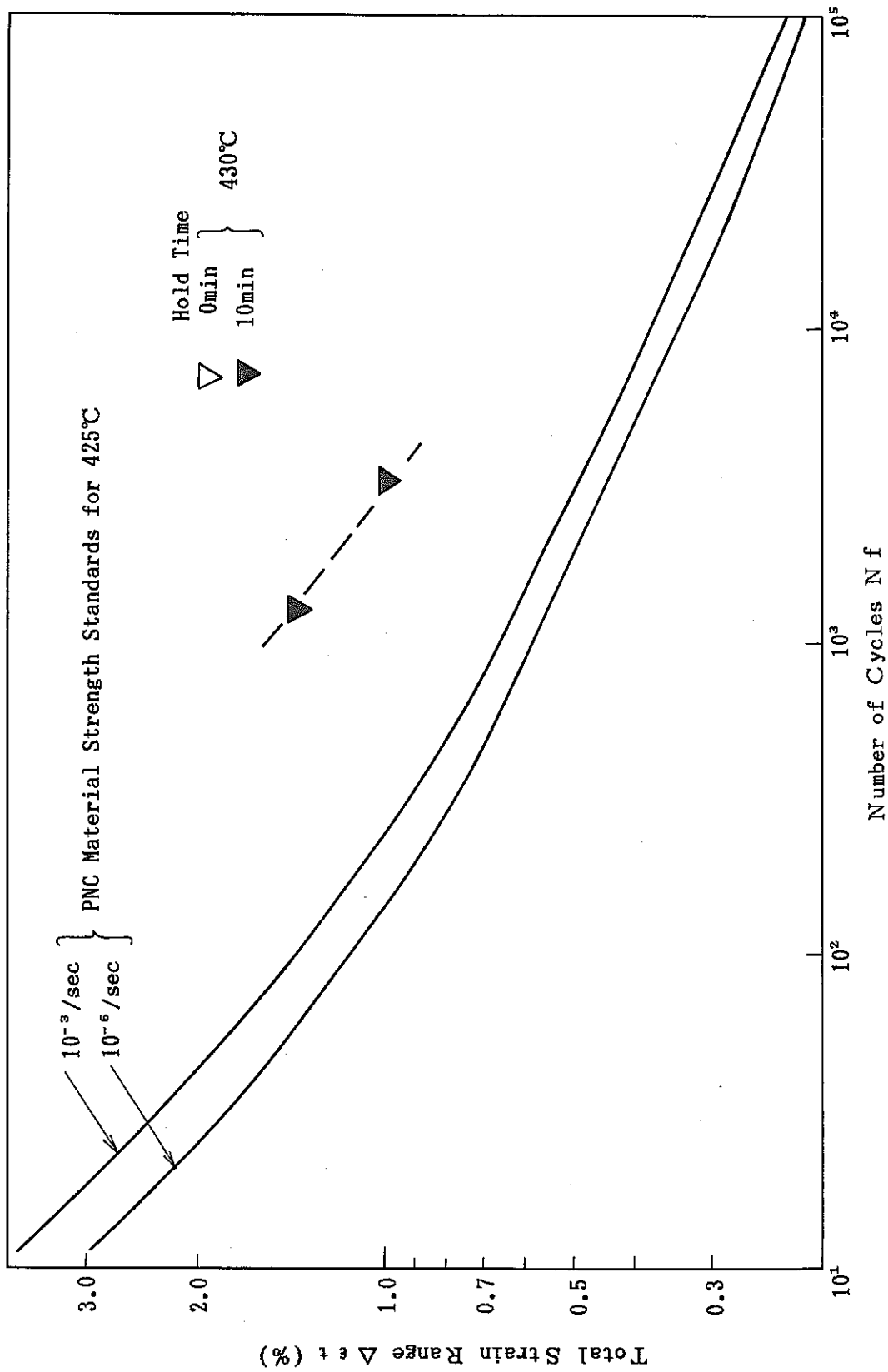


図 6.11 SUS321 伝熱管の低サイクル疲労強度と設計疲労線図の比較 (430°C)

Fig. 6.11 Comparison of low-cycle fatigue strength with design fatigue curve for SUS321 tube at 430°C

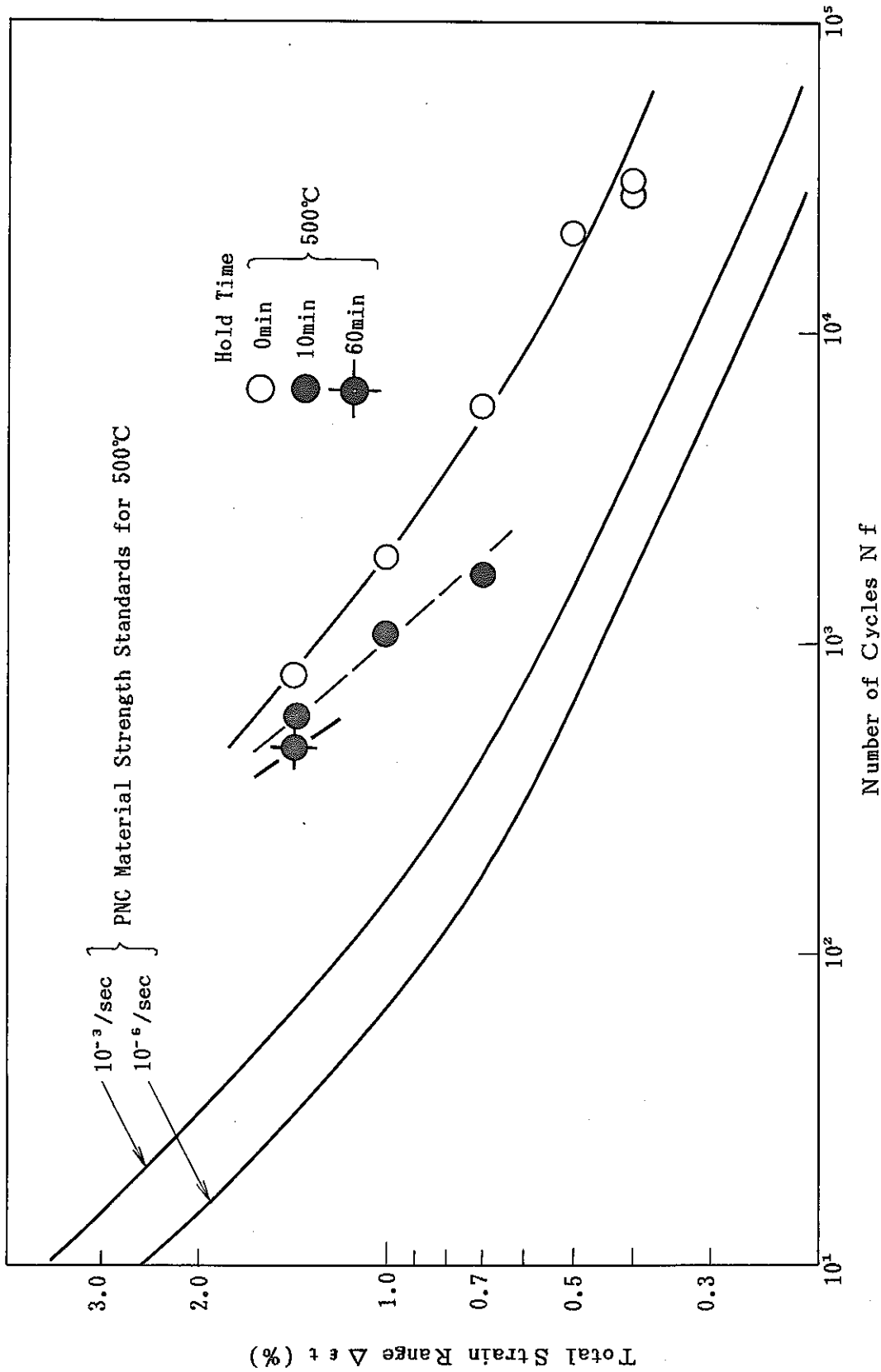


図6.12 SUS321伝熱管の低サイクル疲労強度と設計疲労線図の比較 (500°C, $t_H=0, 10, 60$ min)

Fig. 6.12 Comparison of low-cycle fatigue strength with desing fatigue curve for SUS321 tube at 500°C ($t_H=0, 10, 60$ min)

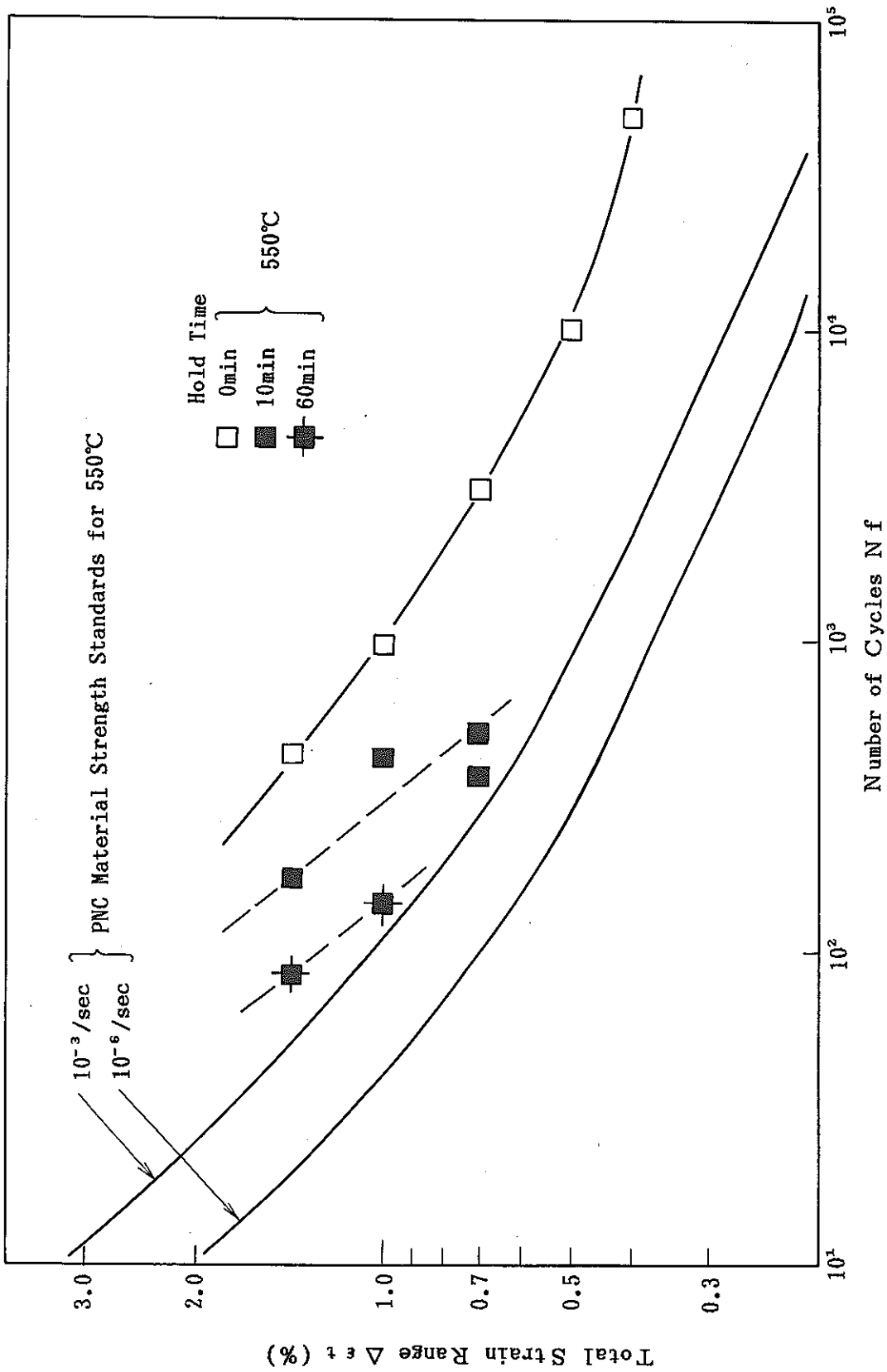


図6.13 SUS321伝熱管の低サイクル疲労強度と設計疲労線図の比較 (550°C, $t_H=0, 10, 60$ min)

Fig. 6.13 Comparison of low-cycle fatigue strength with design fatigue curve for SUS321 tube at 550°C ($t_H=0, 10, 60$ min)

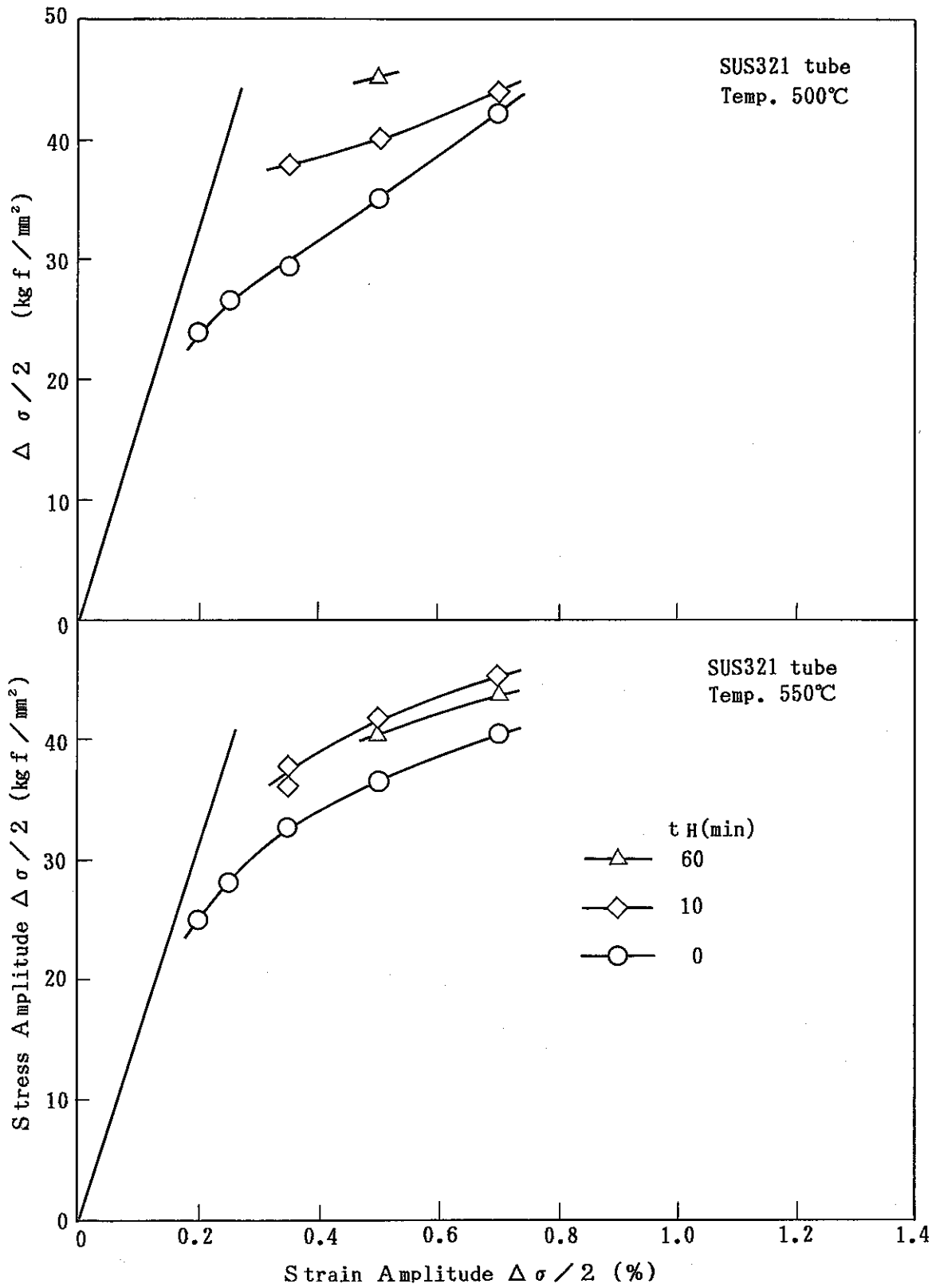


図 6.14 SUS321 伝熱管の繰返し応力-ひずみ曲線に及ぼす保持時間
(500°C及び550°C)

Fig. 6.14 Effect of hold time on cyclic stress-strain curves for SUS321 tube
at 500°C and 550°C

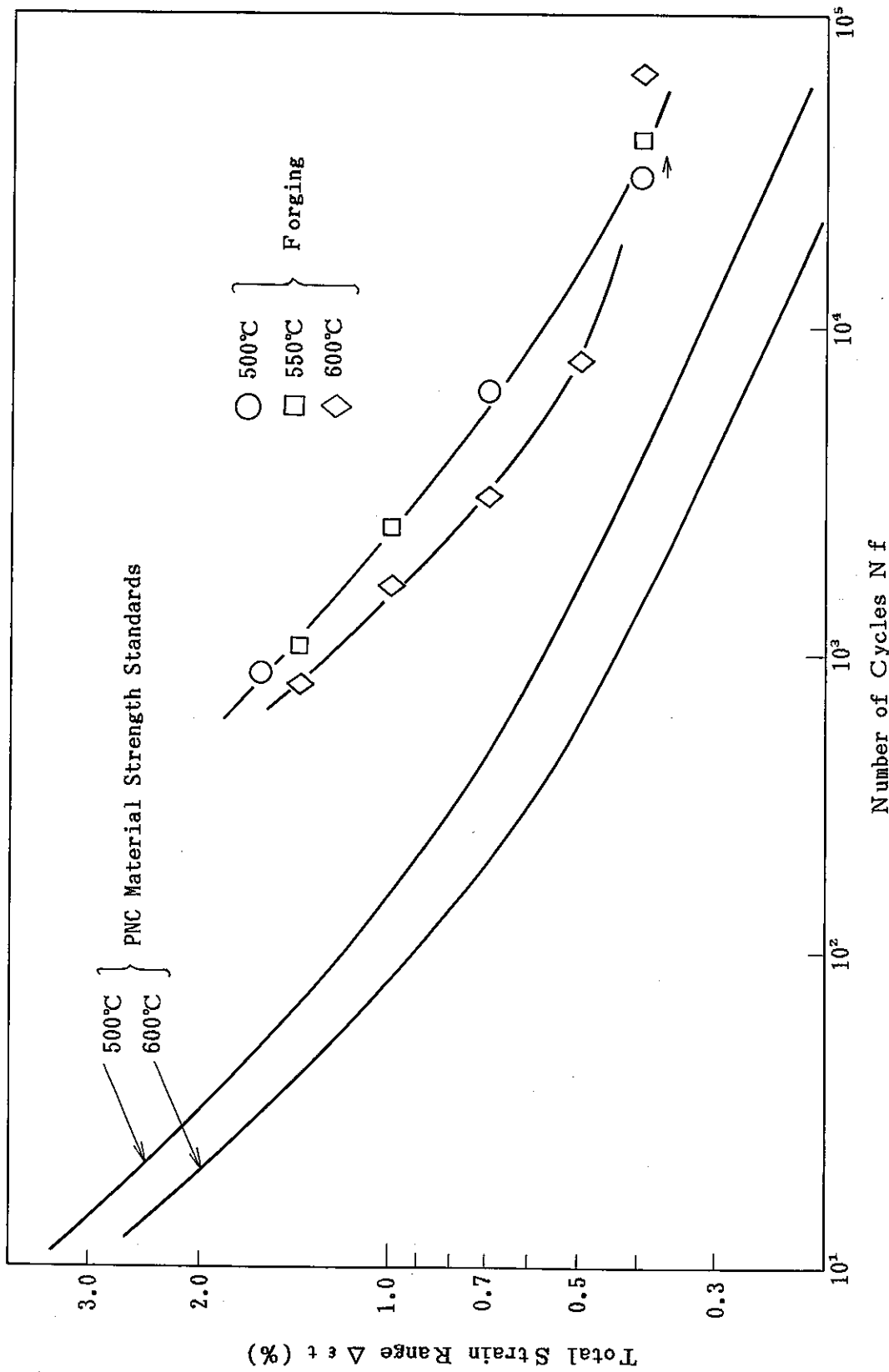


図 6.15 SUS321 鍛造材の低サイクル疲労強度と設計疲労線図の比較 (500, 550 and 600°C)

Fig. 6.15 Comparison of low-cycle fatigue strength with desing fatigue curves for SUS321 forging at 500°C, 550°C and 600°C

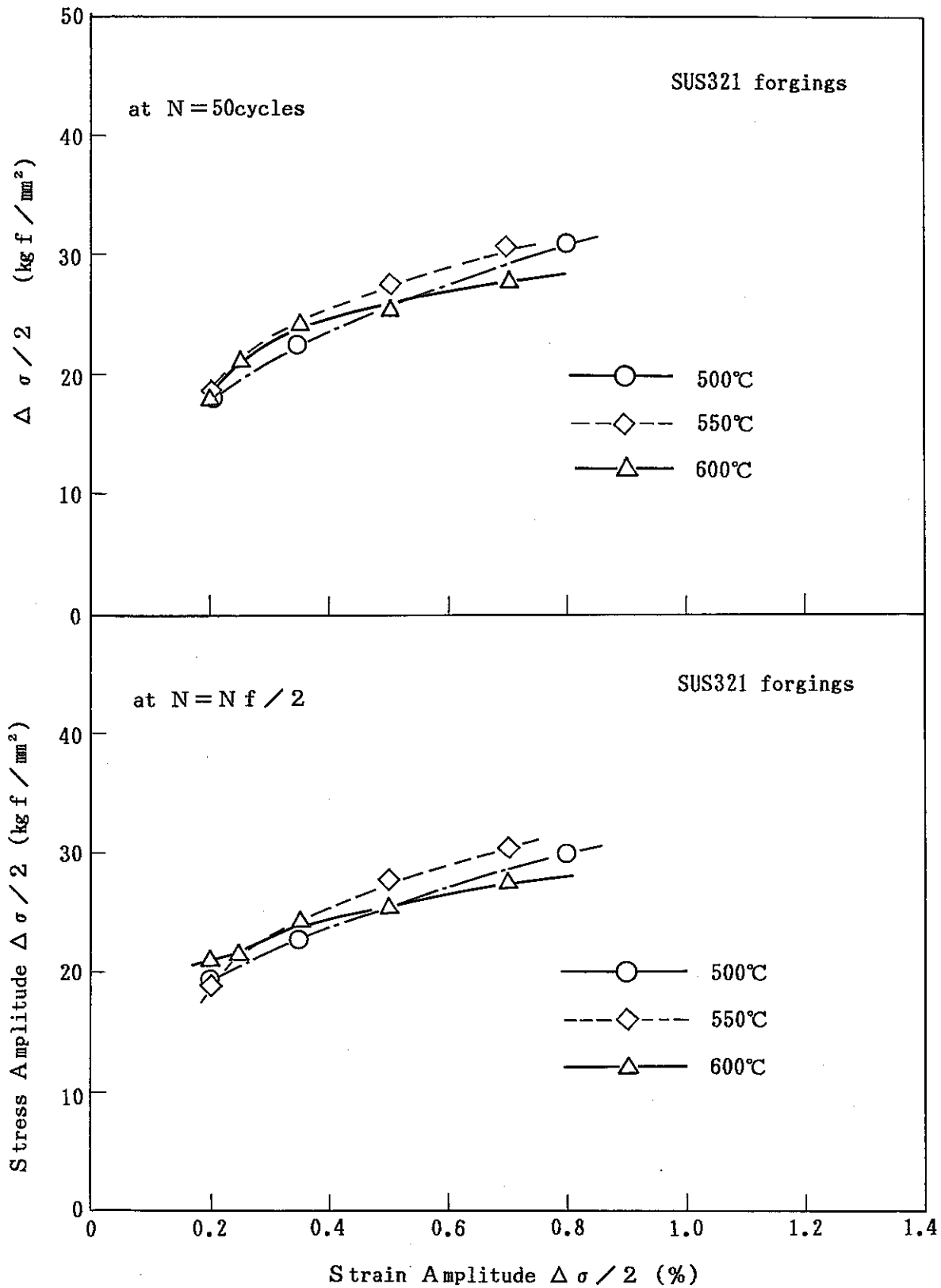


図 6.16 SUS321 鍛造材の繰返し応力-ひずみ曲線
(500°C, 550°C及び600°C)

Fig. 6.16 Cyclic stress-strain curves for SUS321 forging at 500°C ,550°C and 600°C

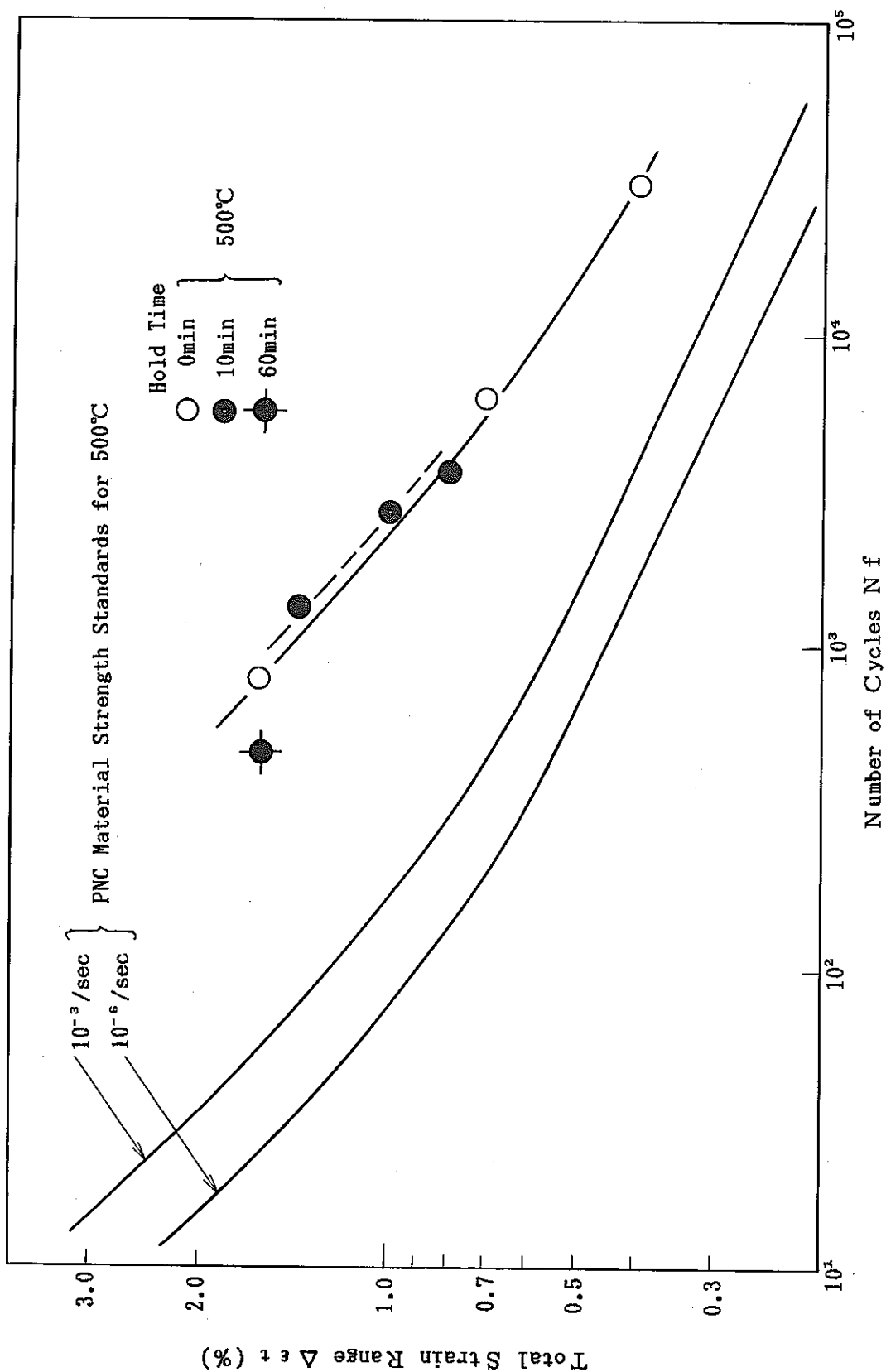


図6.17 SUS321鍛造材の低サイクル疲労強度と設計疲労線図の比較 (500°C, t_H=0, 10, 60min)
 Fig. 6.17 Comparison of low-cycle fatigue strength with design fatigue curves for SUS321 forging at 500°C
 (t_H=0, 10 and 60min)

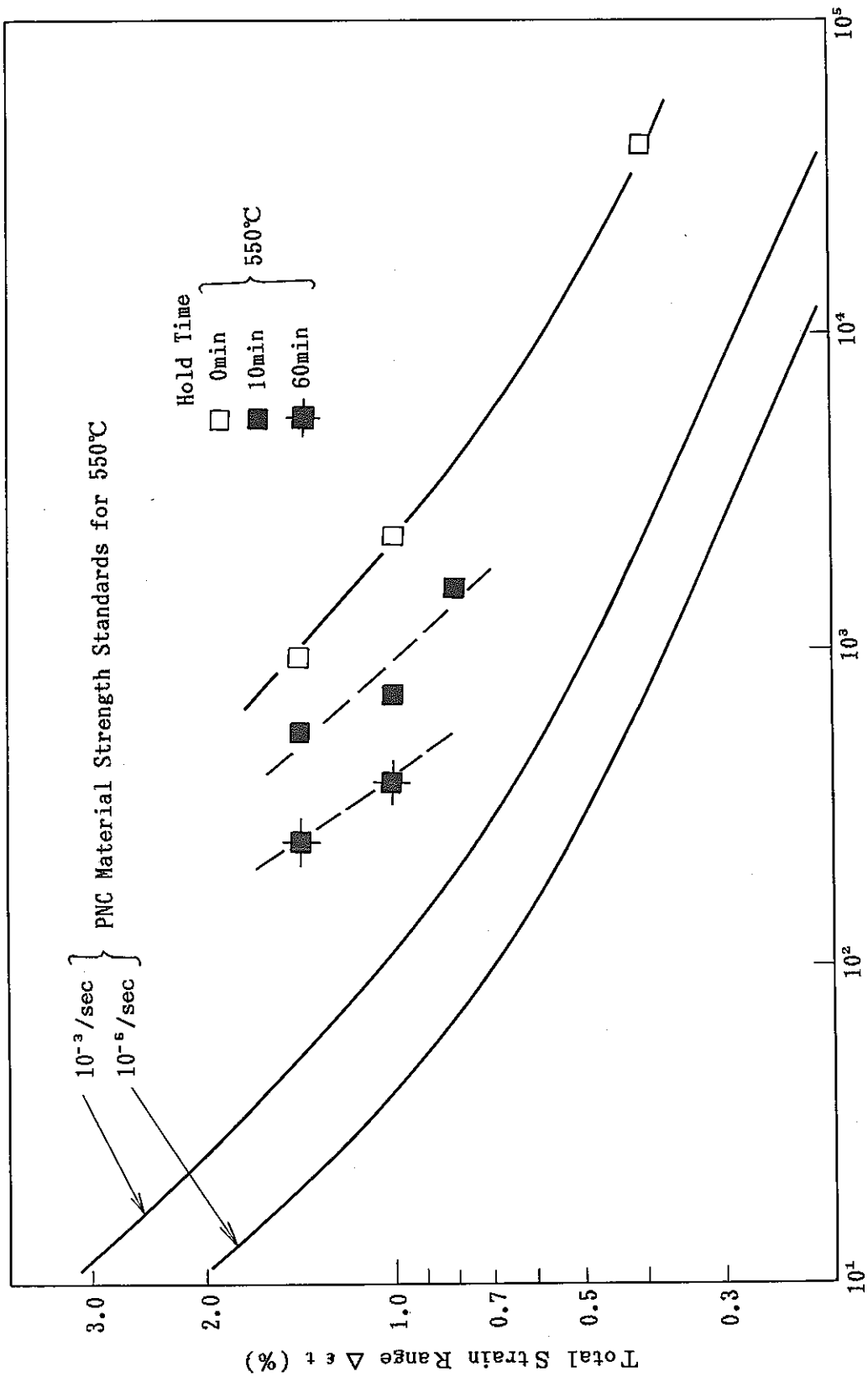


図 6.18 SUS321 鍛造材の低サイクル疲労強度と設計線図の比較 (550°C, $t_H=0, 10, 60$ min)

Fig. 6.18 Comparison of low-cycle fatigue strength with desig fatigue curves for SUS321 forging at 600°C
($t_H=0, 10$ and 60min)

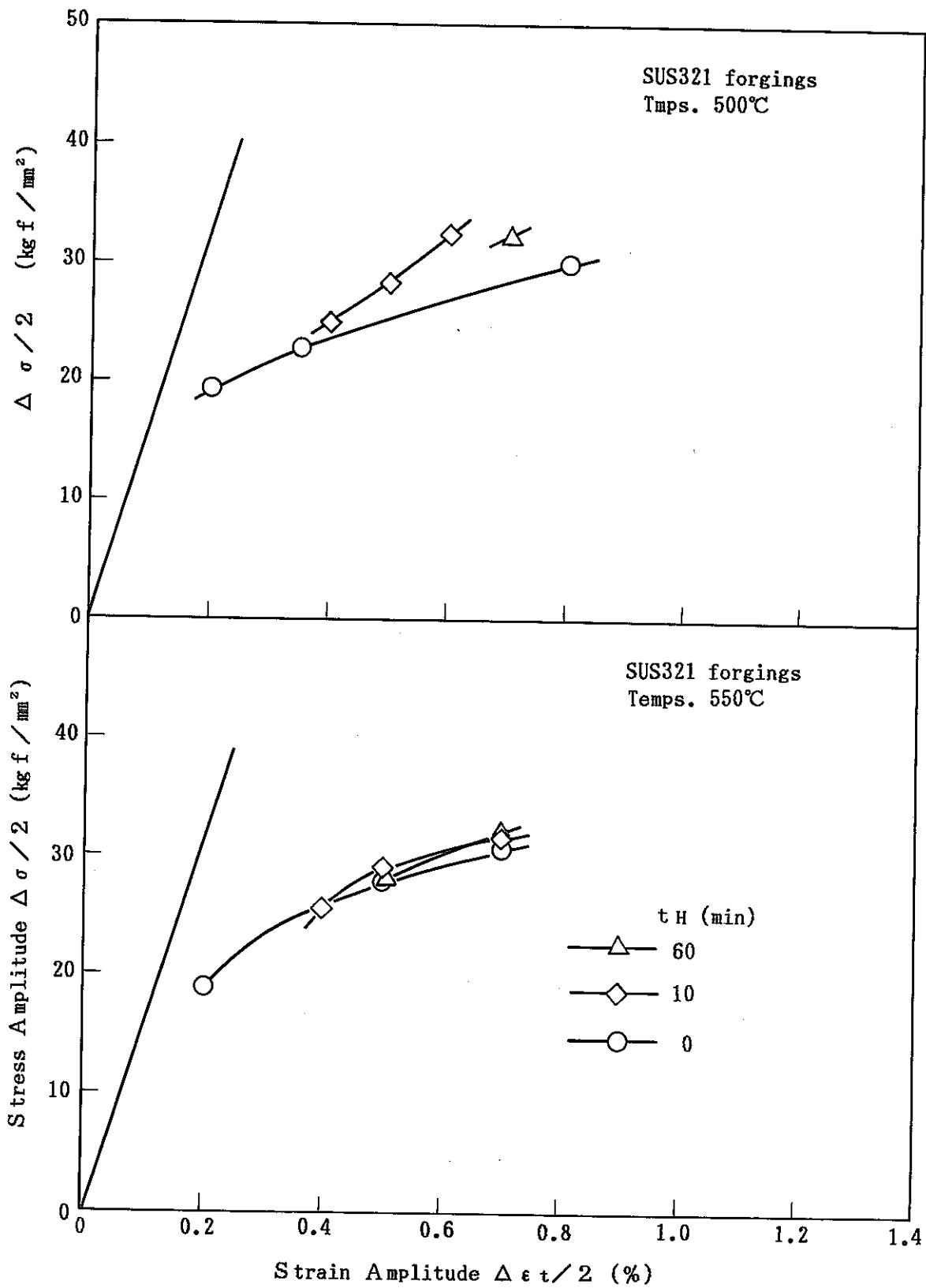


図 6.19 SUS321 鍛造材の繰返し応力-ひずみ曲線に及ぼす保持時間の影響
(500℃及び550℃)

Fig. 6.19 Effect of hold time on cyclic stress-strain curve

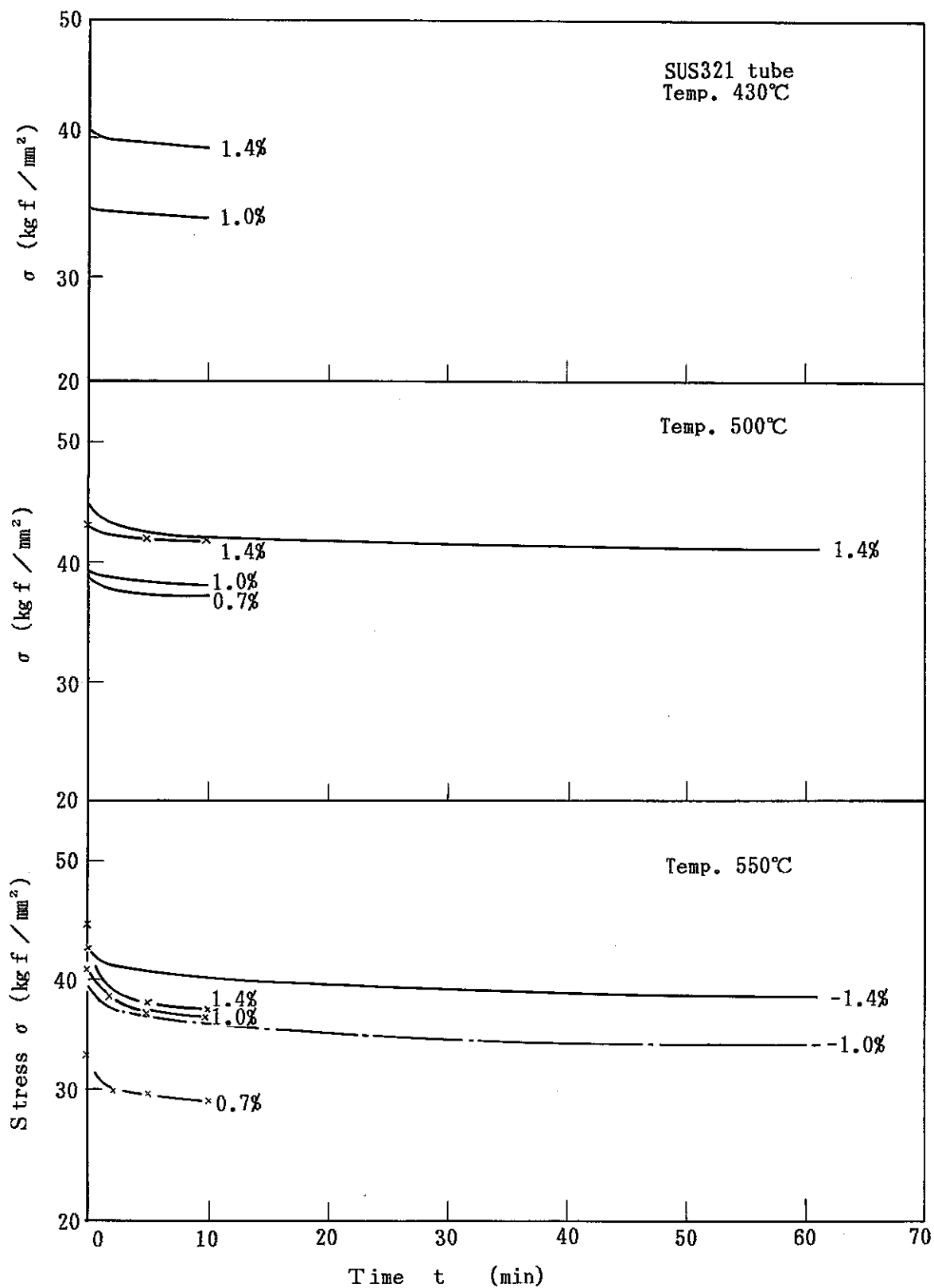


図 6.20 SUS321 伝熱管の繰返しリラクセーション曲線
(430°C, 500°C及び550°C)

Fig. 6.20 Cyclic relaxation curve of SUS321 tube at 430°C, 500°C and 550°C

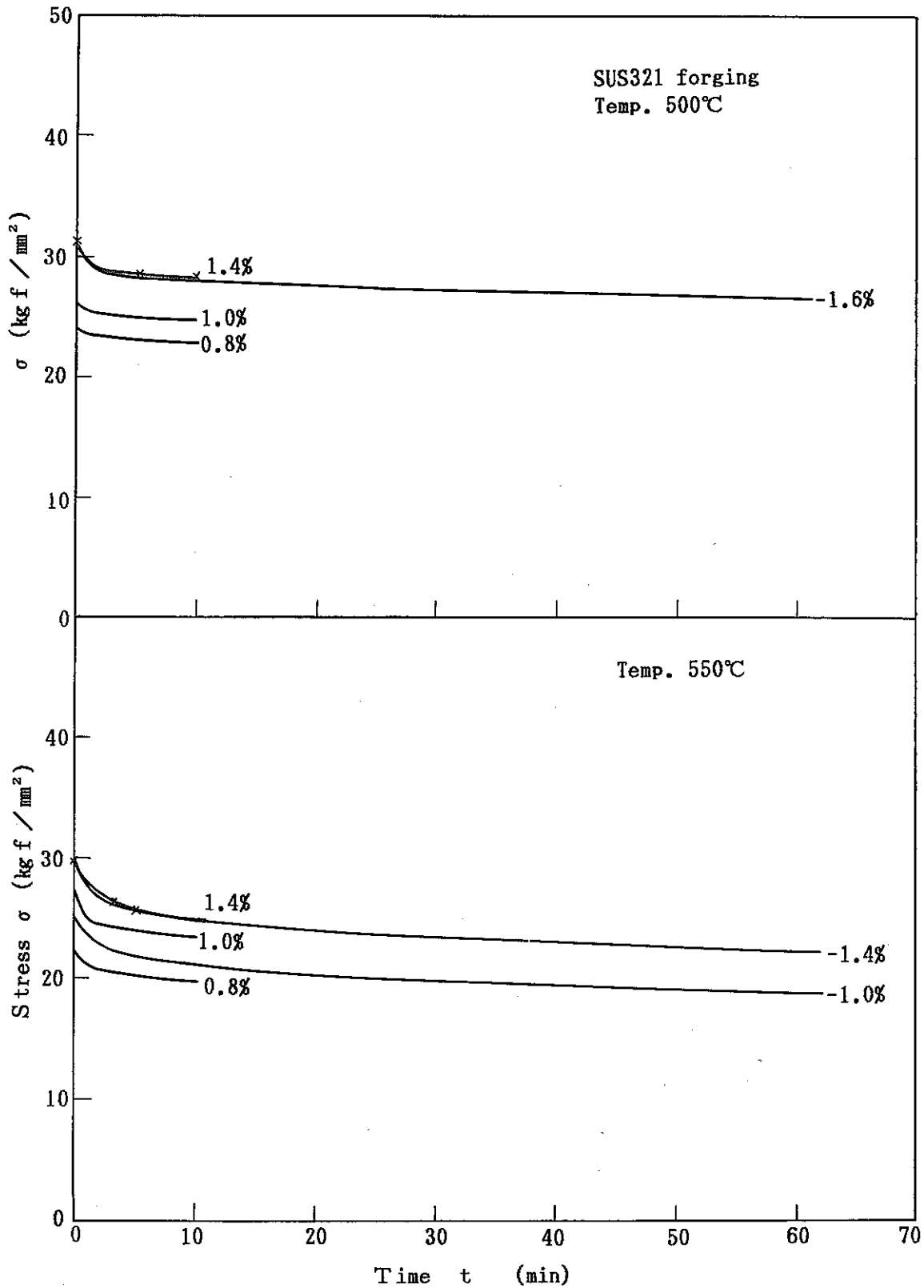


図6.21 SUS321鍛造材の繰返しリラクゼーション曲線
(500°C, 及び550°C)

Fig. 6.21 Cyclic relaxation curves of SUS321 forging at 500°C and 550°C

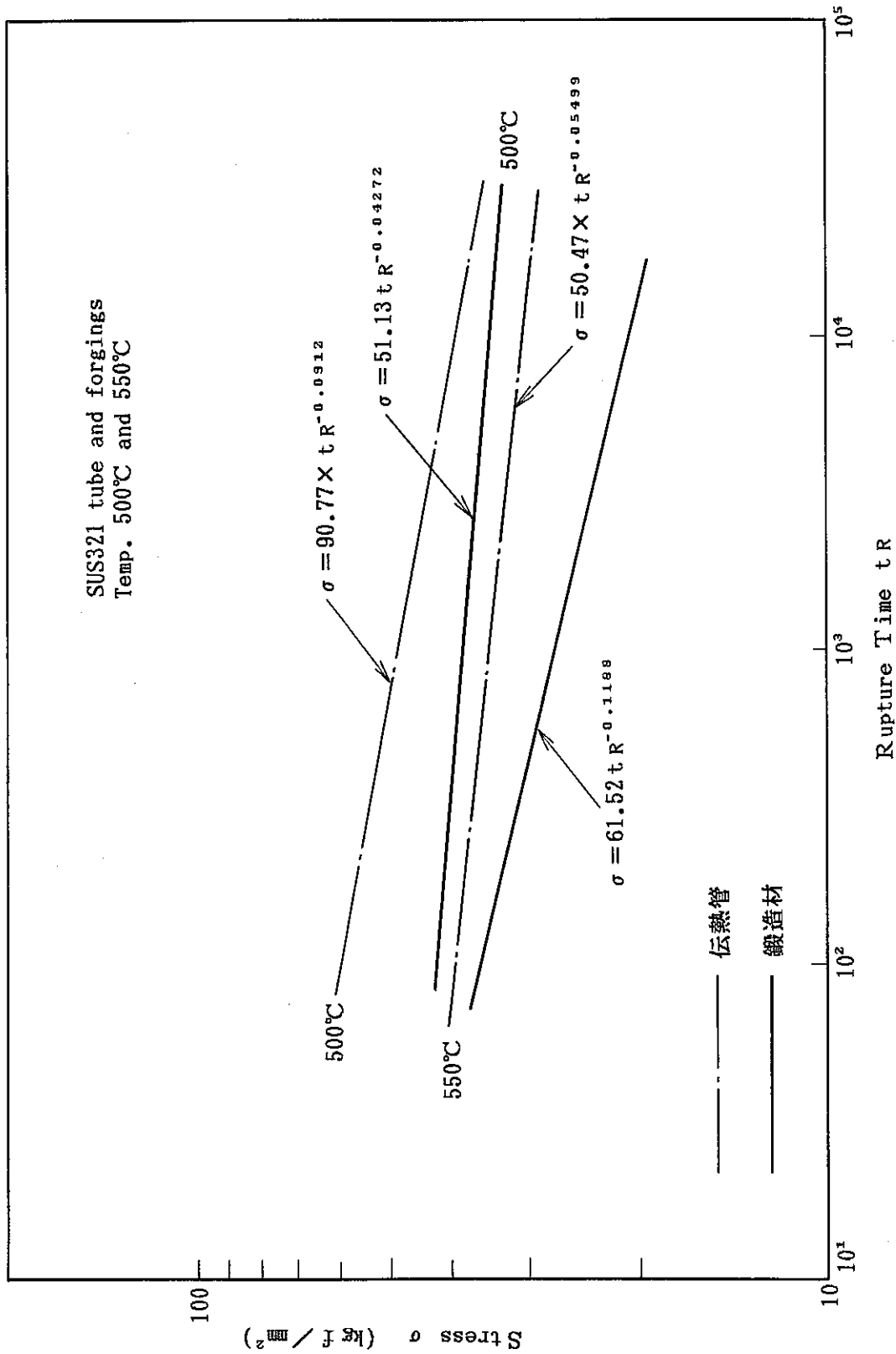


図 6.2.2 クリープ損傷の計算に使用した応力とクリープ破断時間の関係

Fig. 6.2.2 Relation between stress and creep rupture time for creep damage calculation

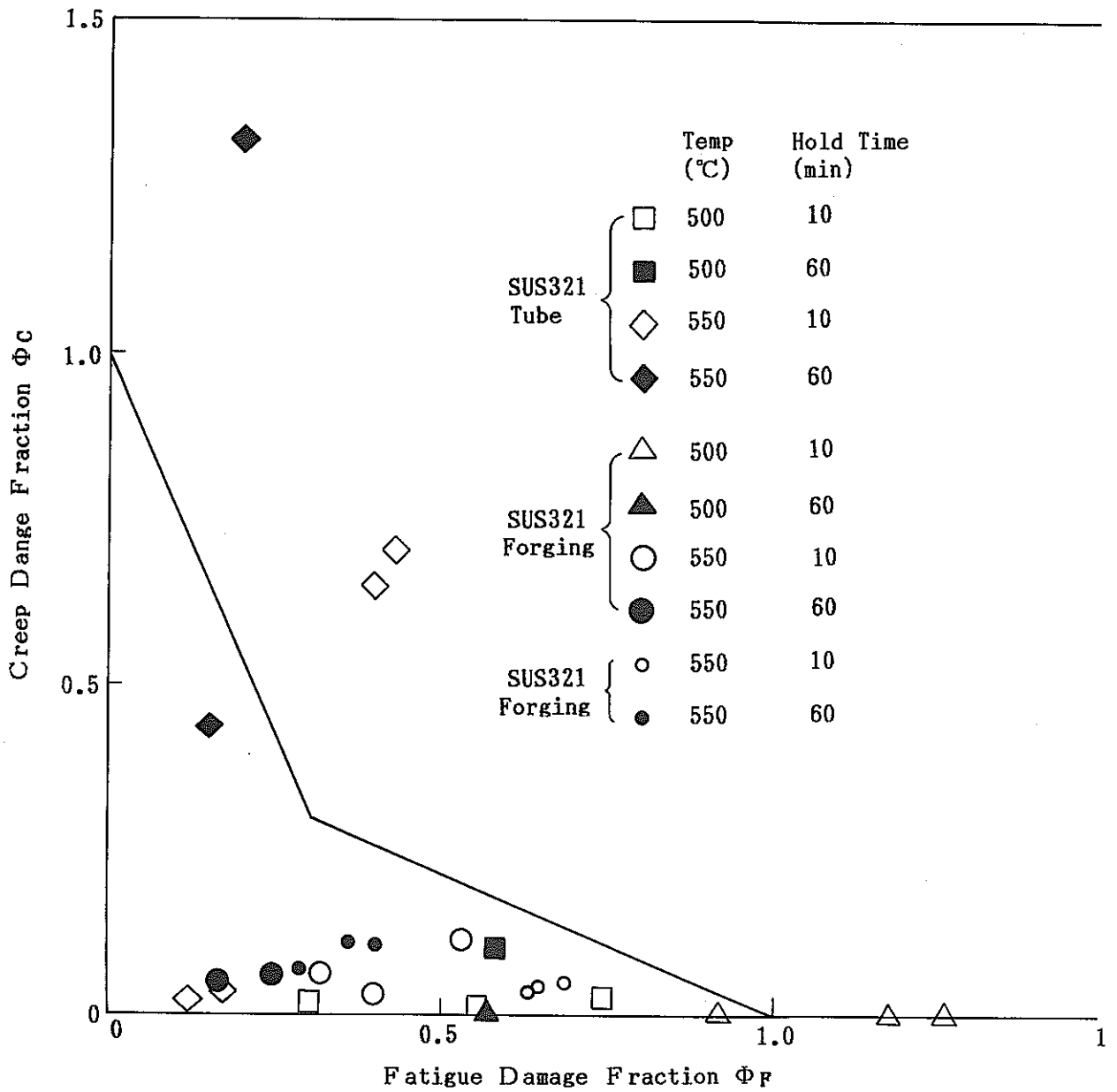


図 6.23 SUS321 伝熱管及び鍛造材の累積損傷和
 Fig. 6.23 Damage fractions for SUS321 tube and forging

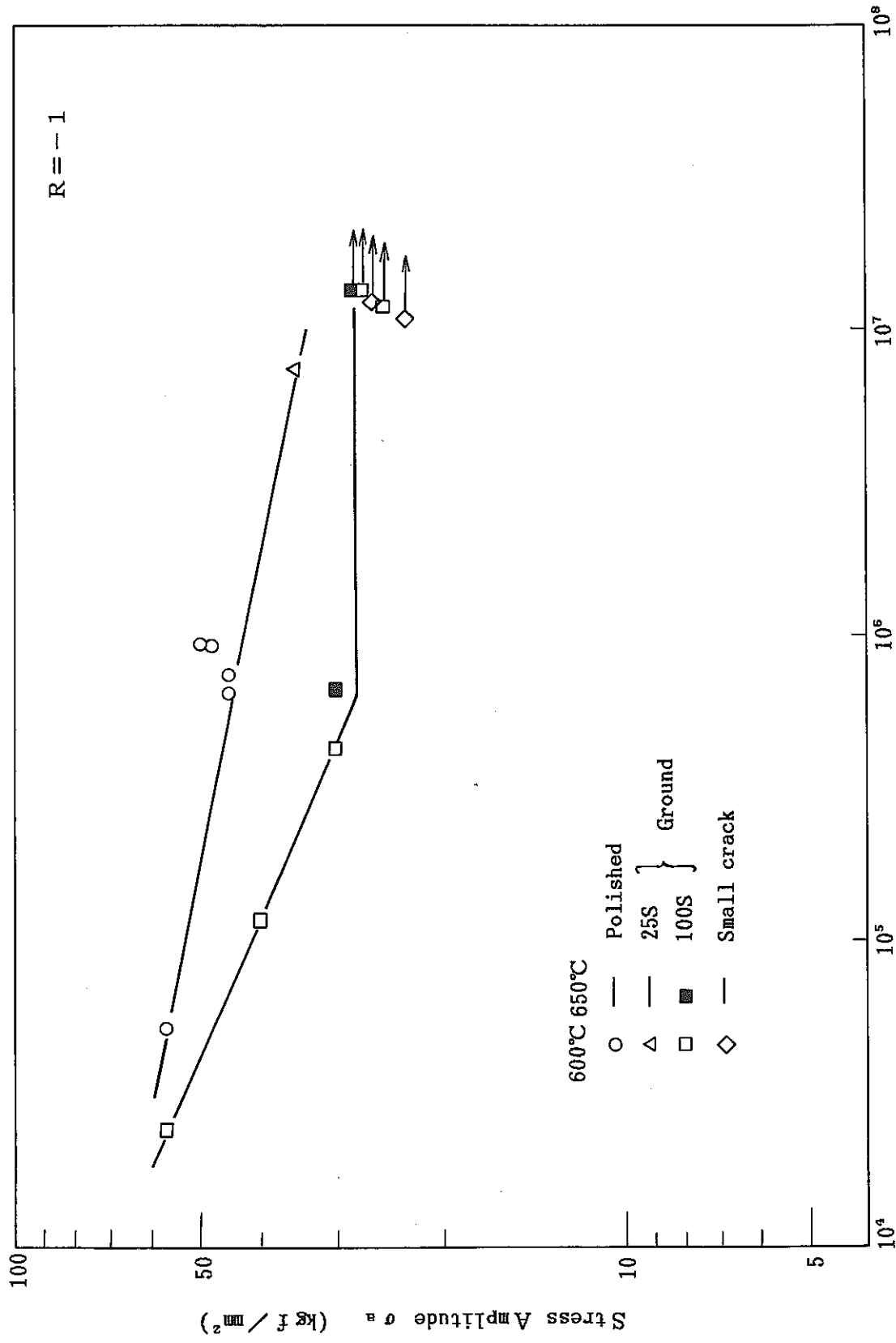


図6.24 インコネル718棒材の高温高サイクル疲労強度
 Fig. 6.24 Elevated temperature high-cycle fatigue strength of In 718 bar steel

7. 諸 言

- (1) SUS321伝熱管 ($\phi 31.8 \times 3.5$ t) の3%及び5%予ひずみ材の引張強さ、0.2%耐力はRT~600℃の温度範囲にわたって原型炉材料強度基準値 S_u , S_y を十分満足する。
- (2) SUS321伝熱管 ($\phi 31.8 \times 3.5$ t) の550℃クリープ強度は原型炉材料強度基準値 S_R を十分満足する。
- (3) SUS321鍛造材 (350 t) 1/4 t部の500℃, 550℃クリープ強度は原型炉材料強度基準値 S_R を満足する。
- (4) SUS321鍛造材 (350 t) 1/4 t部の500℃, 550℃における、第3期クリープ開始時間と破断時間の比はおよそ0.5である。
- (5) SUS231伝熱管 ($\phi 31.8 \times 3.5$ t) 予ひずみ材の550℃での低サイクル疲労強度は処女材の疲労強度とほぼ同じである。
- (6) SUS321伝熱管 ($\phi 31.8 \times 3.5$ t) の低サイクル疲労寿命に及ぼすひずみ保持の影響は430℃では現われず、500℃から550℃に温度が増大するにつれて大きくなる。また、ひずみ範囲の小さい領域でひずみ保持の影響は大きくなる傾向にある。
- (7) SUS321鍛造材の低サイクル疲労寿命に及ぼすひずみ保持の影響は500℃まで現われない。550℃でのひずみ保持の影響はひずみ範囲の小さい領域で大きくなる傾向にある。
- (8) インコネル718棒材の高サイクル疲労強度は従来材に比べ若干低いようである。

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」昭和56年11月
- 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温度強度試験（構造材料試験78-3）」PNC SJ202 79-25, 1979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」昭和56年11月
- 11) “ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec.Ⅲ” ASME, 1971
- 12) (株)日立製作所「SUS321鋼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

9. 謝 辞

この試験研究の実施に当っては、動力炉・核燃料開発事業団のFBR開発本部構造材料グループの関係各位、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。