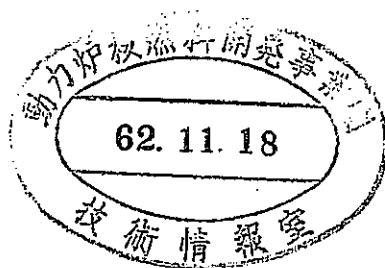


本資料は1998年9月28日付けで
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

SUS321鋼のピーク応力に対する緩和損傷係数の
評価試験並びに各種高温試験報告書

(構造材料試験 82-7)

1983年4月



株式会社 日立製作所
バブコック日立株式会社

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 83-05

1983年4月28日

SUS321 鋼のピーク応力に対する緩和損傷係数の 評価試験並びに各種高温試験*

(構造材料試験 82-7)

代表研究者

西岡 章夫	佐々木 武	木村 征二
竹之下正隆	車地 隆治	野坂 忠志
住川 雅晴	中川 幸雄	

要 旨

高速増殖原型炉の設計に必要な材料の各種特性を明らかにする目的で、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 及び SUS321 鋼母材の高温強度特性を検討した。

供試材は、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼板、SUS321 鋼伝熱管及び鍛造材の母材である。試験項目としては、クリープ疲労、引張、低サイクル疲労及びリラクセーション試験を実施し、次のことを明らかにした。

SUS321 鋼鍛造材について、ピーク応力に対するクリープ損傷係数の解析方法の妥当性を実験によつて検証した。また、SUS321 鋼伝熱管の 5,000 時間時効材の諸特性は 2,000 時間時効材と著しい差は認められないことを明らかにした。

$2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼板材については、 $1,000^\circ\text{C}$ までの超高温度域での静的引張強度及び変形特性を明らかにした。

* 本報告書は、株式会社日立製作所及びバブコック日立株式会社が動力炉・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。

** バブコック日立株式会社 呉研究所

*** バブコック日立株式会社 呉工場

**** 株式会社 日立製作所 日立工場



NOT FOR PUBLICATION

T&J 202 83-05

Apr. 28, 1983

Evaluation Test of Creep Damage During Relaxation of Peak Stress
for SUS 321 Stainless Steel and Various High Temperature Tests

Akio Nishioka**, Takeshi Sasaki***

Seiji Kimura**, Masataka Takenoshita***

Takaharu Kurumaji**, Tadashi Nosaka**

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

Abstract

High temperature strength properties were investigated for 2%Cr-1Mo steel and SUS 321 stainless steel in order to clarify each properties that is required for design of Fast Breeder Reactor.

Test materials are 2%Cr-1Mo steel plate and SUS 321 stainless steel tube and forging.

Test items are creep-fatigue interaction test, tensile test, low cycle fatigue test and relaxation test.

Propriety of analysis method of creep damage factor for peak stress are verified for SUS 321 stainless steel forging.

Each properties of material aged during 5,000h are not remarkably different with material aged during 2,000h.

As for 2%Cr-1Mo steel plate, tensile properties and deformation Properties up to 1,000°C were clarified.

* Work performed under contracts between Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp., Hitachi Ltd. and Babcock Hitachi K.K.

** Kure Reserach Laboratory, Babcock Hitachi K.K.

*** Kure Works, Babcock Hitachi K.K.

**** Hitachi Works, Hitachi Ltd.

SUS321鋼のピーク応力に対する緩和損傷係数の
評価試験並びに各種高温試験

(構造材料試験 82-7)

目 次

要 旨	I
Abstract	II
表リスト	V
図リスト	VIII
写真リスト	XIII
1. 緒 言	1
2. 試験研究の概要	2
2.1 試験研究の範囲	2
2.2 試験研究結果の概要	2
3. 供試材	5
3.1 2¼Cr-1Mo 鋼板材	5
3.2 SUS321 鋼伝熱管材	5
3.3 SUS321 鋼鍛造材	5
4. 試験方法	19
4.1 試験片採取法	19
4.2 試験片形状寸法	19
4.3 試験機仕様	25
4.4 試験方法	30
4.4.1 引張試験	30
4.4.2 低サイクル疲労試験機	30
4.4.3 組織観察試験	30
4.4.4 衝撃試験	30
4.4.5 リラクセーション試験	30
4.4.6 クリープ疲労及びクリープ破断試験	30

5.	試験結果並びに考察	32
5.1	2¼Cr-1Mo 鋼板材の超高温特性	32
5.1.1	超高温引張試験結果	32
5.2	SUS321 伝熱管時効材の特性	49
5.2.1	組織観察結果	49
5.2.2	引張試験結果	49
5.2.3	低サイクル疲労試験結果	49
5.2.4	衝撃試験結果	50
5.3	SUS321 鋼鍛造材の高温特性	68
5.3.1	リラクセーション試験結果	68
5.4	SUS321 鋼鍛造材の緩和クリープ損傷特性	77
5.4.1	緩和クリープ損傷評価試験結果	77
6.	結 言	85
7.	謝 辞	85
8.	参考文献	86
9.	FBR金属材料試験計画表	87
10.	付 録	91
10.1	SUS304 鋼板と鍛造の溶接継手のクリープ	92
10.2	SUS321 鋼伝熱管と鍛造の溶接継手のクリープ破断試験結果	95

表 リ ス ト (1)

第2章

	表	2.1	試験研究の範囲一覧表	4
	Table	2.1	Schedule of Present Tests	

第3章

	表	3.1	2¼Cr-1Mo 鋼板材 (30t) の製造仕様概要	6
	Table	3.1	Summary of Manufacturing Specifications for 2¼Cr-1Mo Steel Plate (30t)	

	表	3.2	2¼Cr-1Mo 鋼板材 (30t) の確性試験結果	9
	Table	3.2	Certification Test Results for 2¼Cr-1Mo Steel Plate (30t)	

	表	3.3	SUS321 鋼伝熱管材 (31.8 ^{OD} × 3.5t) の製造仕様概要 ...	10
	Table	3.3	Summary of Manufacturing Specifications for SUS321 Stainless Steel Tube (31.8 ^{OD} × 3.5t)	

	表	3.4	SUS321 鋼伝熱管材 (31.8 ^{OD} × 3.5t) の確性試験結果	13
	Table	3.4	Certification Test Results for SUS321 Stainless Steel Tube (31.8 ^{OD} × 3.5t)	

	表	3.5	SUS321 鋼鍛造材 (350t) の製造仕様概要	14
	Table	3.5	Summary of Manufacturing Specifications for SUS321 Stainless Steel Forging (350t)	

	表	3.6	SUS321 鋼鍛造材 (350t) の確性試験結果	16
	Table	3.6	Certification Test Results for SUS321 Stainless Steel Forging (350t)	

表 リ ス ト (2)

第4章

表	4.4	引張試験機の仕様	26
Table	4.4	Specification of Tensile Testing Machine	
表	4.5	疲労試験機の仕様	27
Table	4.5	Specification of Fatigue Testing Machine	
表	4.6	リラクセーション試験機の仕様	28
Table	4.6	Specification of Relaxation Testing Machine	
表	4.7	クリープ試験機の仕様	29
Table	4.7	Specification of Creep Testing Machine	

第5章

表	5.1	2¼Cr-1Mo 鋼板材の引張試験結果	33
Table	5.1	Results of Tensile Tests for 2¼Cr-1Mo Steel Plate	
表	5.2	SUS321 鋼伝熱管時効材の引張試験結果	53
Table	5.2	Results of Tensile Tests for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube	
表	5.3	SUS321 鋼伝熱管時効材の低サイクル疲労試験結果	63
Table	5.3	Results of Low Cycle Fatigue Tests for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube	
表	5.4	SUS321 鋼伝熱管時効材の衝撃試験結果	67
Table	5.4	Results of Impact Tests for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube	

表 リ ス ト (3)

表	5.5	SUS321鋼鍛造のリラクセーション試験結果	69
Table	5.5	Results of Relaxation Tests for SUS321 Stainless Steel Forging	
表	5.6	SUS321鋼鍛造の低サイクル疲労試験結果	78
Table	5.6	Results of Low Cycle Fatigue Tests for SUS321 Stainless Steel Forging	
表	5.7	クリープ損傷係数評価のための試験条件	82
Table	5.7	Test Conditions for Estimation of Creep Damage	
表	5.8	クリープ緩和損傷量に関する計算値と実験値との比較	88
Table	5.8	Comparison between Calculated and Experimented Value for Creep Damage	
第9章			
表	9	FBR金属材料試験計画表	87
Table	9	FBR Metallic Materials Test Planning Sheet	
第10章			
表	10.1	SUS304鋼板と鍛造の溶接継手のクリープ破断試験結果	92
Table	10.1	Results of Creep Rupture Tests for Welded Joint of SUS304 Stainless Steel Plate and Forging	
表	10.2	SUS321鋼伝熱管と鍛造の溶接継手のクリープ試験結果	95
Table	10.2	Results of Creep Rupture Tests for Welded Joint of SUS321 Stainless Steel Tube and Forging	

図 リ ス ト (1)

第3章

図	3.1	2¼Cr-1Mo 鋼板材 (30t) の製造工程	8
Fig.	3.1	Manufacturing Process for 2¼Cr-1Mo Steel Plate (30t)	
図	3.2	SUS321 鋼伝熱管材 (31.8 ^{OD} × 3.5t) の製造工程	12
Fig.	3.2	Manufacturing Process for SUS321 Stainless Steel Tube (31.8 ^{OD} × 3.5t)	
図	3.3	SUS321 鋼鍛造材 (350t) の製造工程	15
Fig.	3.3	Manufacturing Process for SUS321 Stainless Steel Forging (350t)	

第4章

図	4.1	2¼Cr-1Mo 鋼板材からの試験片採取方法	20
Fig.	4.1	Sampling Method of Test Specimens from 2¼Cr-1Mo Steel Plate	
図	4.2	SUS321 鋼伝熱管からの試験片採取方法	20
Fig.	4.2	Sampling Method of Test Specimens from SUS321 Stainless Steel Tube	
図	4.3	SUS321 鋼鍛造材からの試験片採取方法	21
Fig.	4.3	Sampling Method of Test Specimens from SUS321 Stainless Steel Forging	
図	4.4	試験片の形状寸法	22
Fig.	4.4	Shape and Size of Test Specimens	

図 リ ス ト (2)

第5章

図	5.1	2¼Cr-1Mo 鋼板材の静的引張強度	35
Fig.	5.1	Variation of Yield and Tensile Strength with Temperature for 2¼Cr-1Mo Steel Plate	
図	5.2	2¼Cr-1Mo 鋼板材の静的引張延性	36
Fig.	5.2	Variation of Elongation and Reduction of Area with Temperature for 2¼Cr-1Mo Steel Plate	
図	5.3	2¼Cr-1Mo 鋼板材の応力-ひずみ線図	37
Fig.	5.3	True Stress-True Strain Curves for 2¼Cr-1Mo Steel Plate	
図	5.4	SUS321 鋼伝熱管時効材の0.2%耐力と引張強さ	54
Fig.	5.4	Variation of Yield and Tensile Strength with Temperature for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube	
図	5.5	SUS321 鋼伝熱管時効材の破断伸びと絞り	55
Fig.	5.5	Variation of Elongation and Reduction of Area with Temperature for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube	
図	5.6	SUS321 鋼伝熱管時効材の耐力及び引張強さの温度依存性	56
Fig.	5.6	Variation of Yield and Tensile Strength Ratio with Temperature for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube	

図 リ ス ト (3)

図	5.7	SUS321 鋼伝熱管時効材の真応力-真ひずみ線図	57
Fig.	5.7	True Stress and True Strain Relation for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube	
図	5.8	SUS321 鋼伝熱管時効材の低サイクル疲労強度	64
Fig.	5.8	Estimation of Low Cycle Fatigue Strength for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube	
図	5.9	SUS321 鋼伝熱管時効材の疲労試験における応力の変化	65
Fig.	5.9	Cyclic Behavior of Stress Range for Aged Material of SUS321 Stainless Steel Tube	
図	5.10	SUS321 鋼鍛造材の 500℃におけるリラクセーション特性	70
Fig.	5.10	Stress Relaxation Curves at 500℃ for SUS321 Stainless Steel Forging	
図	5.11	SUS321 鋼鍛造材の 550℃におけるリラクセーション特性	72
Fig.	5.11	Stress Relaxation Curves at 550℃ for SUS321 Stainless Steel Forging	
図	5.12	SUS321 鋼鍛造材の 500℃におけるリラクセーション特性	74
Fig.	5.12	Stress Relaxation Curves at 500℃ for SUS321 Stainless Steel Forging	
図	5.13	SUS321 鋼鍛造材の 550℃におけるリラクセーション特性	75
Fig.	5.13	Stress Relaxation Curves at 550℃ for SUS321 Stainless Steel Forging	

図 リ ス ト (4)

図 5.14 SUS321 鋼鍛造材の低サイクル疲労強度 79
Fig. 5.14 Estimation of Low Cycle Fatigue Strength of
SUS321 Stainless Steel Forging

図 5.15 SUS321 鋼鍛造材の疲労試験における応力の変化 80
Fig. 5.15 Cyclic Behavior of Stress Range of SUS321
Stainless Steel Forging

第 10 章

図 10.1 SUS304 鋼板と鍛造の溶接継手のクリープ破断強度 93
Fig. 10.1 Estimation of Creep Rupture Strength for
Welded Joint of SUS304 Stainless Steel Plate
and Forging

図 10.2 SUS304 鋼板と鍛造の溶接継手のクリープ破断伸び 94
Fig. 10.2 Fracture Elongation on Creep Tests for Welded
Joint of SUS304 Stainless Steel Plate and
Forging

図 10.3 SUS304 鋼板と鍛造の溶接継手のクリープ破断絞り 94
Fig. 10.3 Reduction of Area on Creep Tests for Welded
Joint of SUS304 Stainless Plate and Forging

図 10.4 SUS321 鋼伝熱管と鍛造の溶接継手のクリープ破断強度
(550℃) 96
Fig. 10.4 Estimation of Creep Rupture Strength for
Welded Joint of SUS321 Stainless Steel Tube
and Forging (550℃)

図 リ ス ト (5)

- 図 10.5 SUS321 鋼伝熱管と鍛造の溶接継手のクリープ破断伸び ... 97
Fig. 10.5 Fracture Elongation on Creep Tests for Welded
Joint of SUS321 Stainless Steel Plate and
Forging
- 図 10.6 SUS321 鋼伝熱管と鍛造の溶接継手のクリープ破断絞り ... 97
Fig. 10.6 Reduction of Area on Creep Tests for Welded
Joint of SUS321 Stainless Steel Plate and
Forging

写真リスト (1)

第3章

- 写真 3.1 2¼Cr-1Mo 鋼板材の顕微鏡組織 17
Photo. 3.1 Microstructures for 2¼Cr-1Mo Steel Plate
- 写真 3.2 SUS321 鋼伝熱管の顕微鏡組織 18
Photo. 3.2 Microstructures for SUS321 Stainless Steel Tube
- 写真 3.3 SUS321 鋼鍛造材の顕微鏡組織 17
Photo. 3.3 Microstructures for SUS321 Stainless Steel Forging

第5章

- 写真 5.1 2¼Cr-1Mo 鋼板材の静的引張試験後の外観 47
Photo. 5.1 Appearance After Tensile Tests for 2¼Cr-1Mo Steel Plate.
- 写真 5.2 SUS321 鋼伝熱管のマイクロ組織 51
Photo. 5.2 Microstructures for SUS321 Stainless Steel Tube
- 写真 5.3 SUS321 鋼伝熱管時効材の引張試験片の外観 62
Photo. 5.3 Appearance after Tensile Tests for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube
- 写真 5.4 SUS321 鋼伝熱管時効材の低サイクル疲労試験片の外観 66
Photo. 5.4 Appearance after Low-Cycle Fatigue Tests for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube
- 写真 5.5 SUS321 鋼鍛造材の低サイクル疲労試験片の外観 81
Photo. 5.5 Appearance after Low Cycle Fatigue Tests for SUS321 Stainless Steel Forging

写 真 リ ス ト (2)

第 5 章

写真	5.6	SUS321 鋼鍛造材のクリープ疲労試験片の外観	84
Photo.	5.6	Appearance after Creep-Fatigue Tests for SUS321 Stainless Steel Forging	

1. 緒 言

高速増殖炉においては、厳しい運転条件を考慮して、高度な安全性確保と合理的な設計が要求されているため、構造物各部に適確な材料を選定するとともに、それら材料に対して種々の高温特性の検討がなされてきた。その結果、蒸気発生器用材料としてSUS321並びに $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼等が候補材としてあげられると同時に、詳細設計に必要な各種材料特性の把握が重要な課題とされた。

こうした背景の基で、動力炉・核燃料開発事業団を中心に、高速原型炉“もんじゅ”に使用される国産材に対する各種材料特性を取得する一連の試験研究が計画され、信頼性の高い材料特性の整備が進められている。

本報告書は、こうした一連の試験研究プロジェクトの一環として、蒸気発生器候補材料であるSUS321、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼に対する各種高温特性試験から得た材料の強度及び変形に関する各種特性を、在来データ及び動力炉・核燃料開発事業団による高速原型炉高温構造¹⁾に対する設計方針並びに強度基準等^{2) 3)}との対応検討した結果について述べたものである。

2. 試験研究の概要

2.1 試験研究の範囲

試験は SUS321 及び 2¼Cr-1Mo 鋼について実施した。

試験内容は多岐にわたるが、各項目及び試験条件の詳細を表 2.1 に示す。

2¼Cr-1Mo 鋼については、以前からシリーズ的に試験研究を進めてきたが、^{4)~8)}今回は、超高温域における静的引張特性について検討した。

SUS321 鋼については、伝熱管の 5,000 時間時効材の各種特性並びに鍛造材の応力緩和特性について検討した。また、鍛造材を対象にして、クリープ緩和損傷評価法の検証のための試験を実施した。

2.2 試験研究結果概要

(1) 2¼Cr-1Mo 鋼板材の超高温特性

室温並びに 600 ~ 1,000 °C における静的引張試験を実施し、従来検討されていなかった超高温域での引張特性を明らかにした。その結果、各特性は在来データ特性の延長上にあり、在来供試材と異なる Heat 及び板厚による特性差は認められなかった。

(2) SUS321 鋼伝熱管時効材の特性

550 °C で 5,000 時間単純時効処理した材料について組織、引張、低サイクル疲労及び衝撃試験を行い、特性の変化を調べた。先の 2,000 時間時効材に比べて組織的には粒界析出物の球状粗大化がやや生じているが、著しい変化はみられない。

引張強度は、0.2 %耐力はほとんど変化なく高温側の引張強さがわずかに低下する。

低サイクル疲労は受入れ母材及び 2,000 時間時効材とほぼ同等で強度的な変化は認められない。また、靱性においてはわずかに衝撃値の低下がみられるが、それでも、まだ十分な靱性を有している。

(3) SUS321 鋼鍛造材の高温特性

500 及び 550 °C でひずみ 0.2 及び 0.3 %、2,000 時間までのリラクセーション特性を検討した。

いずれの条件においても、大きな応力緩和はみられず、先の高ひずみ条件による特性と同じ傾向の緩和挙動を示した。

また、クリープ構成式によるリラクセーション計算値と実験値とは必ずしも一致

せず、特に長時間側挙動の計算による評価には課題が残る。

(4) SUS321 鋼鍛造材の緩和クリープ損傷特性

ピーク応力に対する緩和損傷係数の妥当性を検討するため、SUS321 鋼鍛造材を対象に 550℃で、ひずみ保持を有する疲労試験によつて緩和クリープ損傷を与え、その後、残存クリープ強度をクリープ破断試験で評価した。その結果、設計方針による損傷係数解析手法には十分安全裕度があることを検証した。

表 2.1 試験研究の範囲一覧表

Table 2.1 Schedule of Present Tests

No.	供試材及び試験項目	試験温度 (°C)	負荷ひずみ (%)	ひずみ保持時間 (h)	負荷応力 (kg/mm ²)	目標試験時間 (h)	試験繰返し数	試験片総数
1	2¼Cr-1Mo鋼 板材の超高温特 性試験	R.T, 600, 650 700, 750, 800 850, 900, 950 1000	-	-	-	-	2	20
2	SUS321鋼 伝熱管時効材の 特性試験 (5,000時間 時効)	R.T	-	-	-	-	1	1
		R.T	-	-	-	-	1	3
		R.T, 450, 500 550, 600	-	-	-	-	2	10
3	SUS321鋼 鍛造材の高温特 性試験	550	2.0, 1.5 1.0, 0.8, 0.6	-	-	-	1	5
		500 550	0.2 0.2, 0.3	-	-	-	2,000	3
4	SUS321鋼 鍛造材の緩和ク リープ損傷評価 試験	550	0.7, 1.0, 1.5	0, 1, 5, 10, 20	-	-	1	14
			-	-	22.5 ~26	~2,000	1	

3. 供 試 材

各供試材とそれらの製造仕様，製造法及び確性試験結果は次の通りである。

3.1 2¼Cr-1Mo 鋼板材

本供試材は前年度の研究に使用したものと同一 Heat 材であり，その製造仕様を表 3.1 に，本仕様に基づく製造工程を図 3.1 に示す。

また，化学分析結果，熱処理結果，機械試験結果及びその他の試験検査結果をまとめ，表 3.2 に示すが，試験結果はいずれも規格値を満足している。なお，本供試材は強度を上げる目的で焼ならし時に 30℃/分以上の冷却速度を目標としたファン空冷を実施した。

上記供試材受入時の顕微鏡組織を写真 3.1 に示す。

本試験研究用試験片は，実機製作時における溶接後の応力除去焼鈍を考慮した特性を検討する必要性から上記素材に 715±5℃×8.4 時間の焼なまし処理（以後 S R と記す）を施した後採取した。

3.2 SUS321 鋼伝熱管材

本供試材は前年度の研究に使用したものと同一 Heat 材であり，その製造仕様を表 3.3 に，また，本仕様に基づく製造工程を図 3.2 に示す。

化学分析結果，機械的性質及びその他の試験結果を含む確性試験を表 3.4 に示すがいずれも規格値を満足している。なお，供試材受入時の顕微鏡組織を写真 3.2 に示す。

3.3 SUS321 鋼鍛造材

本供試材は以前の研究に使用したものと同一 Heat 材であり，その製造仕様を表 3.5 に，また本仕様に基づく製造工程を図 3.3 に示す。

化学分析結果，機械的性質及びその他の試験結果を含む確性試験を表 3.6 に示すが，いずれも規格値を満足している。なお，供試材受入時 ¼^t部の顕微鏡組織を写真 3.3 に示す。

表 3.1 2¼Cr-1Mo 鋼板材 (30t) の製造仕様概要

Table 3.1 Summary of Manufacturing Specifications for 2¼Cr-1Mo Steel Plate (30t)

項 目	内 容																																																								
適用規格	1. JIS G 4109-1976年「ボイラ及び圧力容器用クロムモリブデン鋼鋼板」 2. 通産省告示第501号-昭和45年9月「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準を定める告示」 3. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. II, Sec. III-1974年並びに1975年Summer Addenda迄																																																								
製 造	1. 製造方式：塩基性電気炉溶製鋼塊の熱間処理 2. 熱 処 理：焼ならし：920~950°C×Min.1時間→ファン冷却 焼もどし：680~710°C×Min.1時間→空冷																																																								
品 質	1. 化学成分 (%) <table border="1" data-bbox="365 1137 1318 1368"> <thead> <tr> <th></th> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Cr</th> <th>Mo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>レードル分析</td> <td>≤0.15</td> <td>≤0.50</td> <td>0.30/0.60</td> <td>≤0.035</td> <td>≤0.035</td> <td>2.00/2.50</td> <td>0.90/1.10</td> </tr> <tr> <td>チェック分析</td> <td>≤0.15</td> <td>≤0.50</td> <td>0.27/0.63</td> <td>≤0.035</td> <td>≤0.035</td> <td>1.88/2.62</td> <td>0.85/1.15</td> </tr> <tr> <td>製品目標</td> <td>≤0.12</td> <td>0.20</td> <td>0.55</td> <td>≤0.015</td> <td>≤0.015</td> <td>2.40</td> <td>1.05</td> </tr> </tbody> </table> 2. 機械的性質* <table border="1" data-bbox="393 1467 1110 1966"> <thead> <tr> <th colspan="2">項 目</th> <th>基 準</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">引張試験 (室温)</td> <td>0.2%耐力</td> <td>≥32 kg/mm²</td> </tr> <tr> <td>引張強さ</td> <td>53~70 kg/mm²</td> </tr> <tr> <td>伸 び</td> <td>≥18%</td> </tr> <tr> <td>絞 り</td> <td>≥45%</td> </tr> <tr> <td colspan="2">曲 げ 試 験</td> <td>外表面に割れなし</td> </tr> <tr> <td colspan="2">落 重 試 験</td> <td>+8°Cで破断しない</td> </tr> <tr> <td colspan="2">衝 撃 試 験</td> <td>参考用 (遷移曲線作成)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">高温引張試験 (470°C)</td> <td>参考用</td> </tr> </tbody> </table> * 720±20°C×8.4時間以上の熱処理後試験実施		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	レードル分析	≤0.15	≤0.50	0.30/0.60	≤0.035	≤0.035	2.00/2.50	0.90/1.10	チェック分析	≤0.15	≤0.50	0.27/0.63	≤0.035	≤0.035	1.88/2.62	0.85/1.15	製品目標	≤0.12	0.20	0.55	≤0.015	≤0.015	2.40	1.05	項 目		基 準	引張試験 (室温)	0.2%耐力	≥32 kg/mm ²	引張強さ	53~70 kg/mm ²	伸 び	≥18%	絞 り	≥45%	曲 げ 試 験		外表面に割れなし	落 重 試 験		+8°Cで破断しない	衝 撃 試 験		参考用 (遷移曲線作成)	高温引張試験 (470°C)		参考用
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo																																																		
レードル分析	≤0.15	≤0.50	0.30/0.60	≤0.035	≤0.035	2.00/2.50	0.90/1.10																																																		
チェック分析	≤0.15	≤0.50	0.27/0.63	≤0.035	≤0.035	1.88/2.62	0.85/1.15																																																		
製品目標	≤0.12	0.20	0.55	≤0.015	≤0.015	2.40	1.05																																																		
項 目		基 準																																																							
引張試験 (室温)	0.2%耐力	≥32 kg/mm ²																																																							
	引張強さ	53~70 kg/mm ²																																																							
	伸 び	≥18%																																																							
	絞 り	≥45%																																																							
曲 げ 試 験		外表面に割れなし																																																							
落 重 試 験		+8°Cで破断しない																																																							
衝 撃 試 験		参考用 (遷移曲線作成)																																																							
高温引張試験 (470°C)		参考用																																																							

表 3.1 2¼Cr-1Mo 鋼板材 (30t) の製造仕様概要 (続き)

Table 3.1 Summary of Manufacturing Specifications for
2¼Cr-1Mo Steel Plate (30t) (continued)

項 目	内 容
試験及び 検査方法	1. レードル分析 JIS G 1253
	2. チェック分析 JIS G 1253
	3. 引張試験 JIS Z 2241 (常温引張) JIS G 0567 (高温引張)
	4. 曲げ試験 JIS Z 2248
	5. 落重試験 ASTM E 208
	6. 衝撃試験 ASME SA370 及び SA20
	7. 外観検査 JIS G 3193
	8. 寸法検査 JIS G 4109
	9. 超音波探傷試験 通産省告示第 501 号 7 条

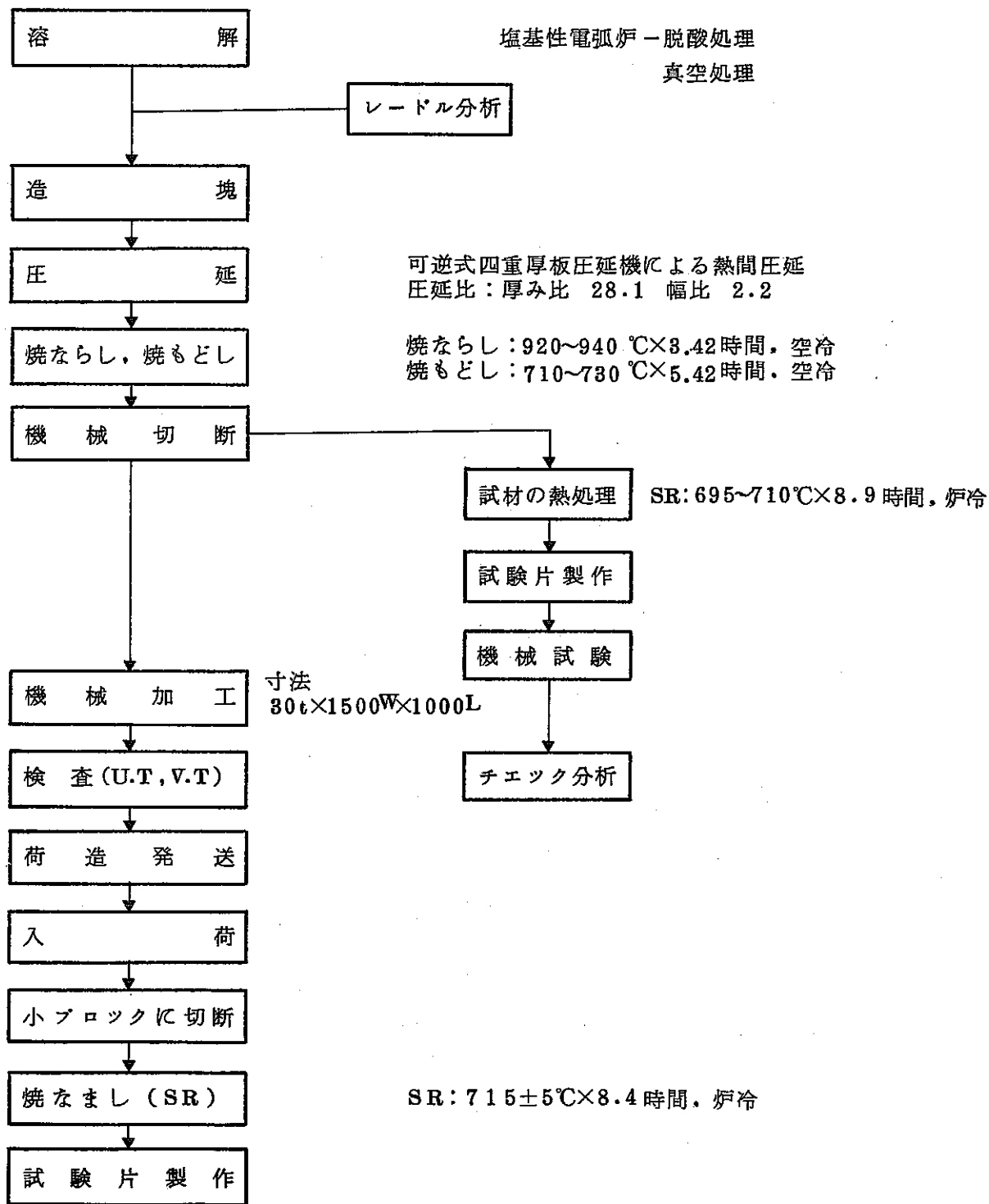


図 3.1 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼板材 (30t) の製造工程.
Fig. 3.1 Manufacturing Process for 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel Plate (30t)

表 3.2 2¼Cr-1Mo 鋼板材 (30t) の確性試験結果

Table 3.2 Certification Test Results for 2¼Cr-1Mo Steel Plate (30t)

(Heat No. 81C625-3-1, PNC No. D-7)

(a) 分析試験結果 (wt %)

		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
規格値	リード	≤0.15	≤0.50	0.30 ~0.60	≤0.035	≤0.035		2.00 ~2.50	0.90 ~1.10
	チェック	≤0.15	≤0.50	0.27 ~0.63	≤0.035	≤0.035		1.88 ~2.62	0.85 ~1.15
分析値	リード	0.15	0.27	0.55	0.010	0.005		2.39	0.99
	チェック	0.15	0.28	0.55	0.011	0.005	0.14	2.38	0.98

		V	Al	Nb	Ti	B	Pb	As	Sn
分析値	チェック	0.010	0.022	0.005	0.005	0.0002	0.0003	0.005	0.009

		Sb	N	O	Cu	Ta
分析値	チェック	0.0016	0.0103	0.0019	0.07	0.005

(b) 熱処理結果

熱処理	焼ならし			焼もどし		
	温度(°C)	保持時間	冷却法	温度(°C)	保持時間	冷却法
要求値			冷却			空冷
熱処理結果	920/940	3.42 h	空冷	710/730	5.42 h	空冷

(c) 機械試験結果*

		引張試験				曲げ試験
		0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	
規格		≥32	53/70	≥18.0	≥45.0	割れなし
試験結果	R.T	46.8	65.4	28.5	66.8	割れなし
	475°C (参考)	37.3	48.2	20.0	68.6	—

* 695 ~ 710 °C × 8.92 時間の SR 熱処理後試験実施

(d) その他の試験検査結果

	外観検査	寸法検査	超音波探傷	結晶粒度
試験結果	合格	合格	合格	

表 3.3 SUS321 鋼伝熱管材 (31.8O.D×3.5t) の製造仕様概要

Table 3.3 Summary of Manufacturing Specifications for
SUS321 Stainless Steel Tube (31.8^{O.D}×3.5t)

項 目	内 容																																													
適用規格	1. JIS G3463-1976「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501号に対する改訂案」 第3章第2種容器 3. ASME Code Case N-47 (1592-11)																																													
製 造	1. 製造方法：管は電気炉製鋼後真空脱ガス処理を行つ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：JIS G3463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="382 1124 1361 1281"> <thead> <tr> <th>鋼 種</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>≤0.75</td> <td>≤2.00</td> <td>≤0.03</td> <td>≤0.03</td> <td>9.00</td> <td>17.00</td> <td>4XC</td> </tr> <tr> <td>HTB</td> <td>0.10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>13.00</td> <td>19.00</td> <td>0.60</td> </tr> </tbody> </table> 2. 機械的性質 <table border="1" data-bbox="382 1366 1326 1523"> <thead> <tr> <th>鋼 種</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……12S程度 4. 寸法及び形状許容差 (単位：mm) <table border="1" data-bbox="382 1756 1244 1912"> <thead> <tr> <th>寸 法</th> <th>外 径</th> <th>肉 厚</th> <th>長 さ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>31.8^{O.D}×3.5t×12,000ℓ</td> <td>±0.15</td> <td>+20% - 0</td> <td>+10 - 0</td> </tr> </tbody> </table> 5. 補 修 溶接による欠陥部の補修は不可	鋼 種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti	SUS321	0.04	≤0.75	≤2.00	≤0.03	≤0.03	9.00	17.00	4XC	HTB	0.10					13.00	19.00	0.60	鋼 種	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 ^{O.D} ×3.5t×12,000ℓ	±0.15	+20% - 0	+10 - 0
鋼 種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti																																						
SUS321	0.04	≤0.75	≤2.00	≤0.03	≤0.03	9.00	17.00	4XC																																						
HTB	0.10					13.00	19.00	0.60																																						
鋼 種	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 ^{O.D} ×3.5t×12,000ℓ	±0.15	+20% - 0	+10 - 0																																											

表 3.3 SUS321 鋼伝熱管材 (31.8^{O.D}×3.5t) の製造仕様概要 (続き)

Table 3.3 Summary of Manufacturing Specifications for SUS321
Stainless Steel Tube (31.8^{O.D}×3.5t) (continued)

項 目	内 容
試験及び 検査方法	<ol style="list-style-type: none"> 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

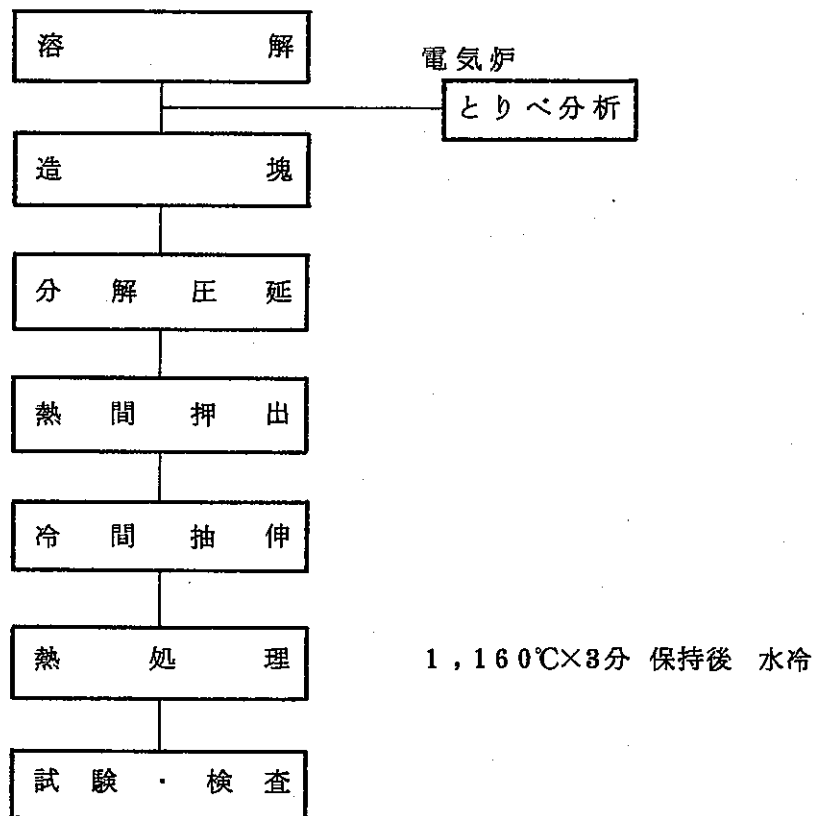


図 3.2 SUS321 鋼伝熱管材 (31.8^{O.D}×3.5t) の製造工程
 Fig. 3.2 Manufacturing Process for SUS321 Stainless Steel Tube (31.8^{O.D}×3.5t)

表 3.4 SUS321 鋼伝熱管材 (31.8O.D×3.5t) の確性試験結果

Table 3.4 Certification Test Results for SUS321 Stainless Steel Tube (31.8O.D×3.5t)

(Heat No.A991703, PNC NoC-5)

(a) 分析試験結果 (wt%)

		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
分析値	レードル	0.08	0.57	1.50	0.025	0.004	11.60	17.55	0.43
	チェック	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分 → W.Q.

(c) 機械試験結果

	R · T ·				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	へん平	押しひそげ	超音波 探 傷	液体浸透 探 傷	外観検査	寸法検査
6.0 6.5	0.20	Good (300kg/mm ²)	Good	Good	Good	Good	Good	Good

表 3.5 SUS321 鋼鍛造材 (350t) の製造仕様概要

Table 3.5 Summary of Manufacturing Specifications for
SUS321 Stainless Steel Forging (350t)

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 G3214-1977 「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：1,020~1,150℃×Min. 7時間保持後水冷																												
品 質	1. 化学成分（とりべ分析値，％） <table border="1" data-bbox="376 936 1324 1108"> <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 } / 0.10</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>≥5×C%</td> </tr> </tbody> </table> 2. 機械的性質 <table border="1" data-bbox="376 1209 1324 1377"> <thead> <tr> <th>鋼 種</th> <th>0.2%耐力 (kg/mm²)</th> <th>引張強さ (kg/mm²)</th> <th>伸 び (%)</th> <th>絞 り (%)</th> <th>ブリネル硬さ (HB)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SUS F 321</td> <td>≥21</td> <td>≥49</td> <td>≥45</td> <td>≥50</td> <td>≤187</td> </tr> </tbody> </table>	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti	0.04 } / 0.10	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.03	9.00 } / 13.00	17.00 } / 20.00	≥5×C%	鋼 種	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	ブリネル硬さ (HB)	SUS F 321	≥21	≥49	≥45	≥50	≤187
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti																						
0.04 } / 0.10	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.03	9.00 } / 13.00	17.00 } / 20.00	≥5×C%																						
鋼 種	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	ブリネル硬さ (HB)																								
SUS F 321	≥21	≥49	≥45	≥50	≤187																								
試験及び 検査方法	1. と り べ 分 析：JIS G1253 2. 製 品 分 析：JIS G1253 3. 引張試験（室温）：JIS Z2241 4. 高温引張試験：JIS G0567 5. 硬 さ 試 験：JIS Z2243 6. 結 晶 粒 度 試 験：JIS G0551 7. 非金属介在物試験：JIS G0555 8. 寸 法 検 査：JIS G4305 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																												

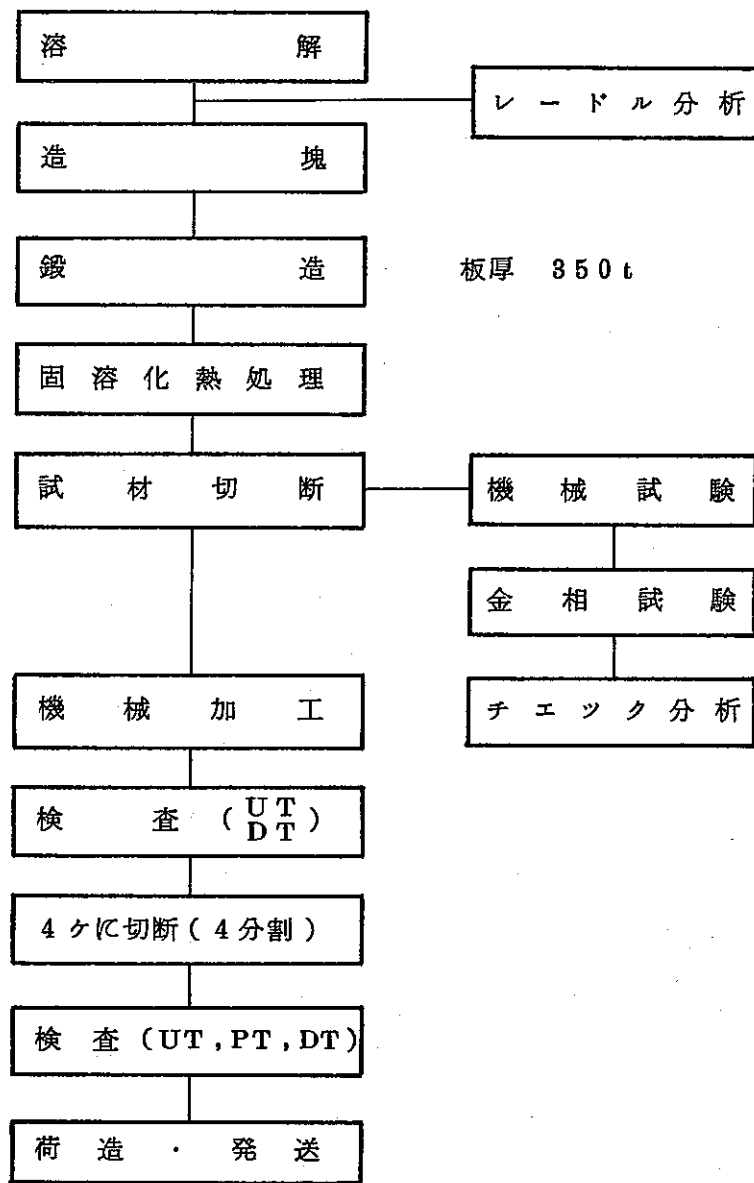


図 3.3 SUS321 鋼鍛造材 (350t) の製造工程

Fig. 3.3 Manufacturing Process for SUS321

Stainless Steel Forging (350t)

表 3.6 SUS321 鋼鍛造材 (350t) の確性試験結果

Table 3.6 Certification Test Results for SUS321

Stainless Steel Forging (350t)

(Heat No. 80L95-1-3, PNC No. C-6)

(a) 分析試験結果 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti
規格値	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 分 値	0.065	0.82	1.62	0.024	0.006	11.33	19.28	0.52
チエック 分 析 値	0.065	0.81	1.61	0.023	0.007	11.26	19.44	0.53

(b) 熱処理結果

1,020 ~ 1,067°C × 15時間55分 → W.Q.

(c) 機械試験結果

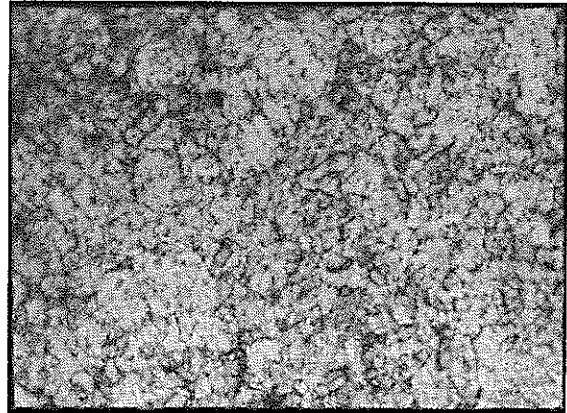
	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	硬 さ (HB)
	>21	>49	>45	>50	<180
R.T.	28.0	56.3	56.0	68.6	159
550°C	19.0	38.6	34.5	71.9	—

(d) その他の試験結果

結晶粒度	非金属介在物	超音波探傷	液体浸透探傷	外観・寸法検査
3.2	0.0591	Good	Good	Good



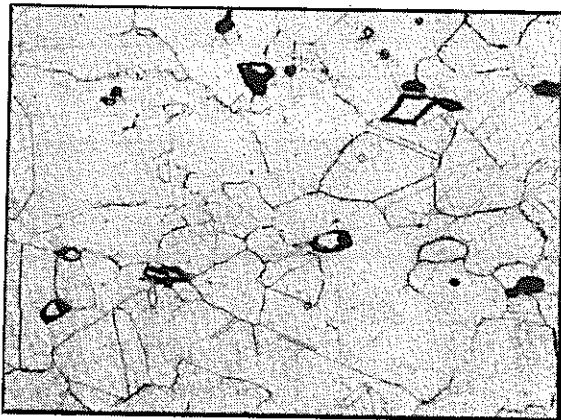
(×100)



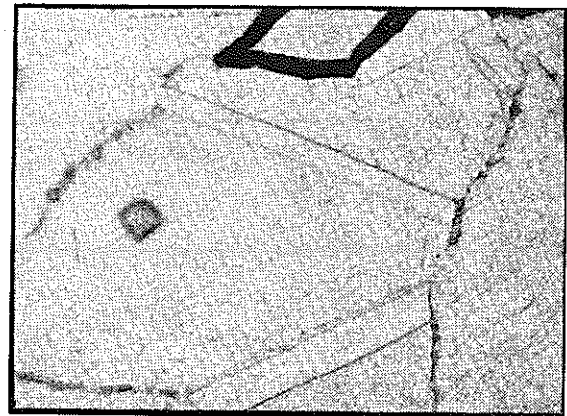
(×400)

写真 3.1 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼板材の顕微鏡組織

Photo. 3.1 Microstructures for 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel Plate



(×100)



(×400)

写真 3.3 SUS321 鋼鍛造材の顕微鏡組織

Photo. 3.3 Microstructures for SUS321 Stainless Steel Forging

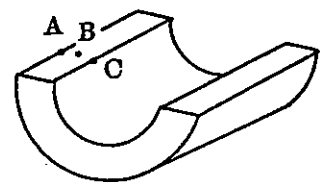
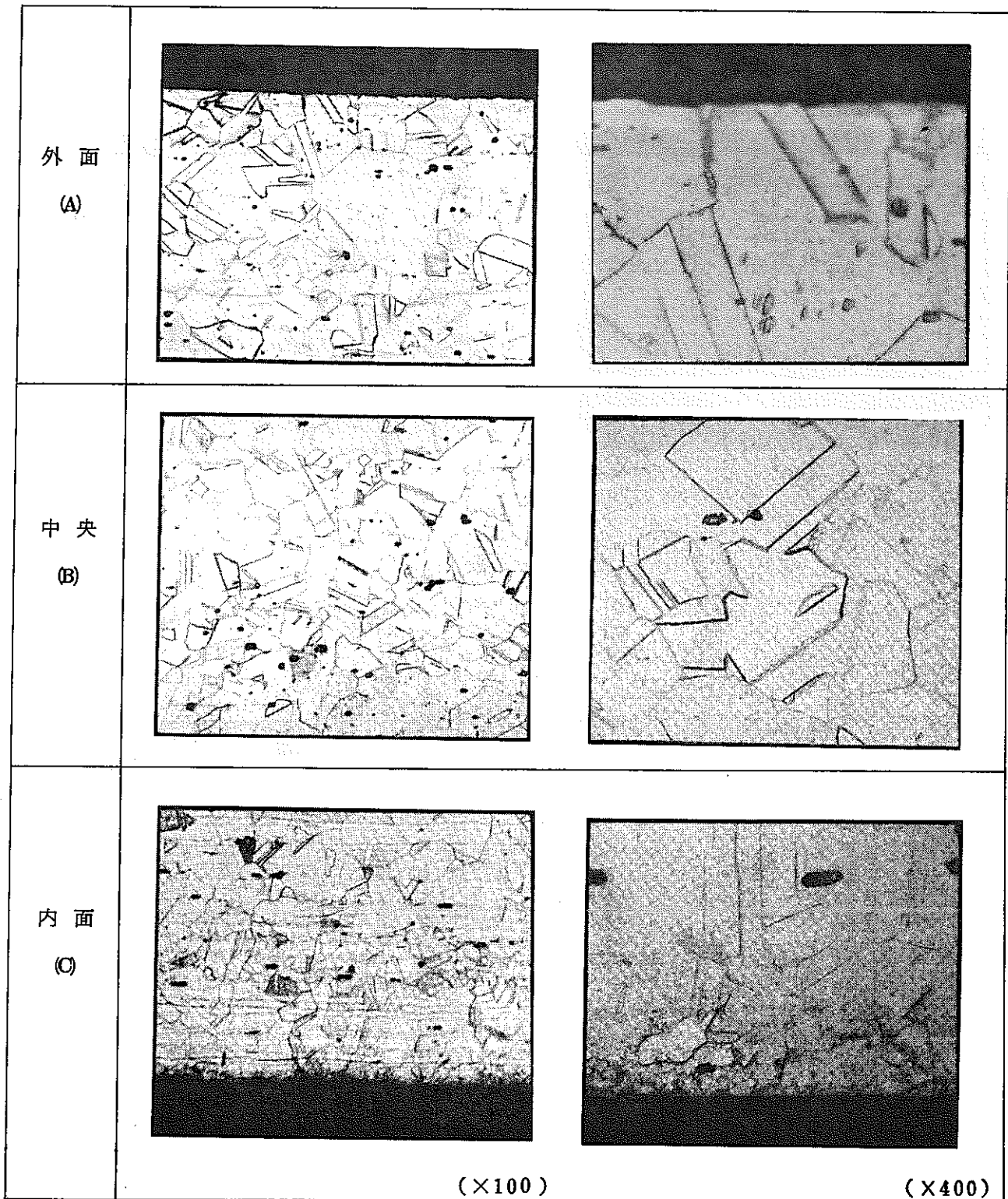


写真 3.2 SUS321 鋼伝熱管の顕微鏡組織

Photo.3.2 Microstructures for SUS321 Stainless Steel Tube

4. 試験方法

4.1 試験片採取法

(a) 2¼Cr-1Mo 鋼板材

3.1 節に示した材料を使用し、図 4.1 に示すように、試験片軸方向が板の最終圧延方向に一致するよう、板厚中央部から採取した。

(b) SUS321 鋼伝熱管時効材

3.2 節に示した受入母材を供試材とし、これを長さ約 120 mm に切断し、大気中電気炉で 550 °C × 5,000 時間単純時効した。その後、図 4.2 に示すように、1 部の試料は後述する引張、衝撃試験片用として円周方向 4 分割して円弧状の試験片に、また、他のものは疲労試験片用として円筒状のままチャック部の加工を行った。

(c) SUS321 鋼鍛造材

3.3 節に示した材料を供試材とした。図 4.3 に試験片の採取位置を示すが、¼t 部から主鍛造方向に平行に採取した。

4.2 試験片形状寸法

図 4.4 は各試験片の形状寸法を示す。いずれも「FBR 金属材料実施要領書」及び関連 JIS に準じている。

引張試験片は、直径 10 mm、GL 50 mm の平滑型 (2¼Cr-1Mo 板材) と幅 6 mm、GL 30 mm の短冊状 (SUS321 時効材) の 2 種類を使用した。

SUS321 時効材の低サイクル疲労試験片は、外径 28.2 mm、肉厚 2 mm、GL 20 mm の管状管型を使用した。また、衝撃試験片は素材管肉厚が薄いため、幅 10 mm、厚さは原厚 (3.5 mm) の 2 mm V ノッチ形状とした。

SUS321 鍛造材のリラクセーション試験片は直径 8 mm、GL 10 mm の平滑型試験片を使用した。

SUS321 鍛造材のクリープ緩和損傷評価試験では、図 4.4 (f) に示すように、直径 10 mm、GL 20 mm の平滑型試験片によつて、クリープ疲労試験を行った後、図 4.4 (g) に示す形状に再加工し、クリープ破断試験を実施した。なお、この場合、疲労試験時の試験片 GL 間表面には何ら加工を加えず、そのままクリープ破断試験に供した。

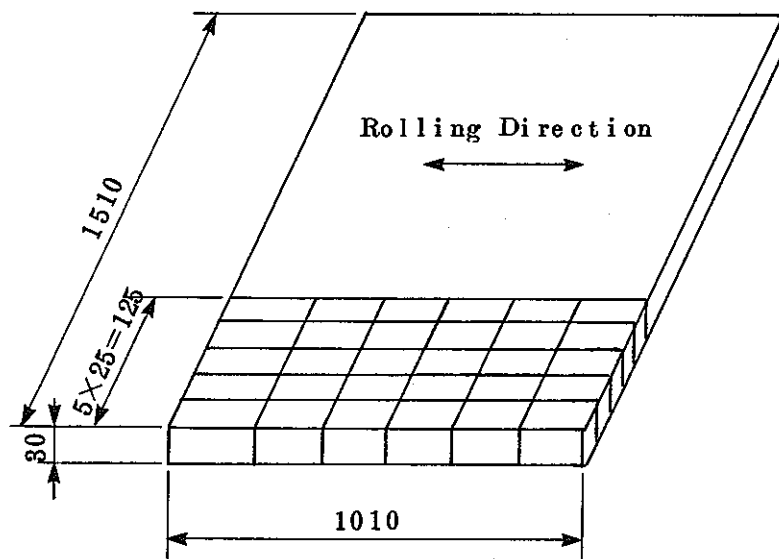


図 4.1 2 1/4Cr-1Mo 鋼板材からの試験片採取方法

Fig.4.1 Sampling Method of Test Specimens from 2 1/4Cr-1Mo Steel Plate

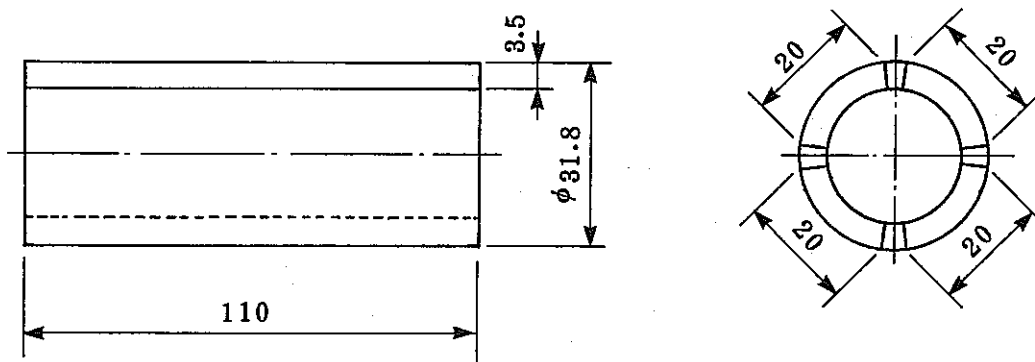


図 4.2 SUS321 鋼伝熱管からの試験片採取方法

Fig.4.2 Sampling Method of Test Specimens from SUS321 Stainless Steel Tube

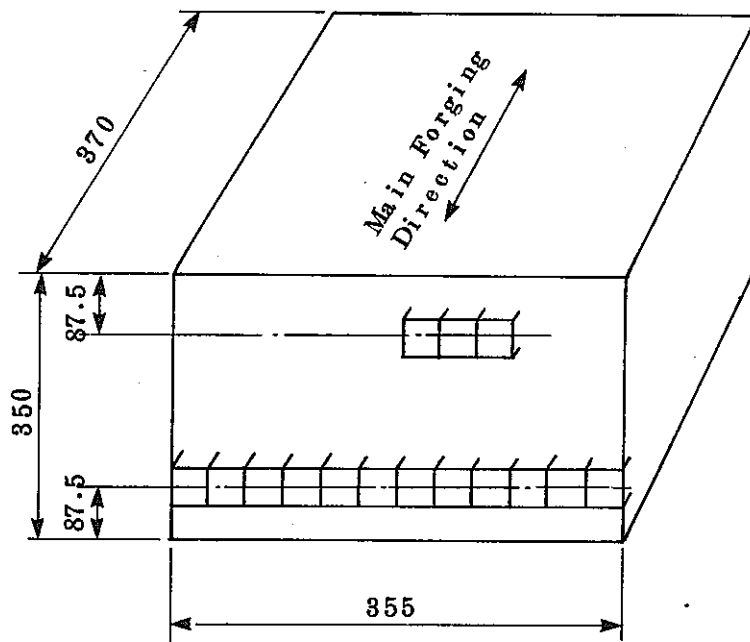
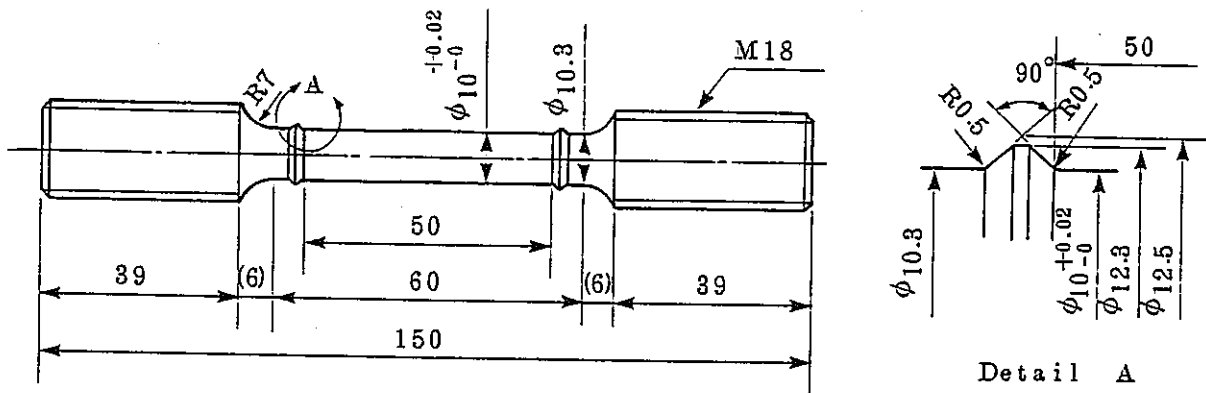
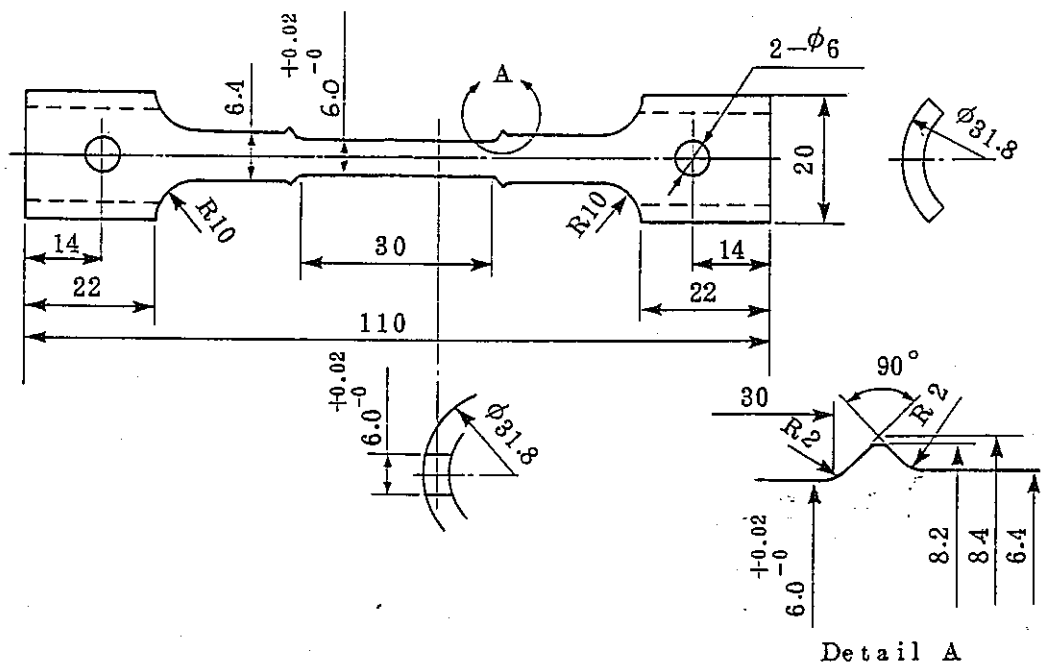


図 4.3 SUS321 鋼鍛造材からの試験片採取方法

Fig. 4.3 Sampling Method of Test Specimens from SUS321 Stainless Steel Forging

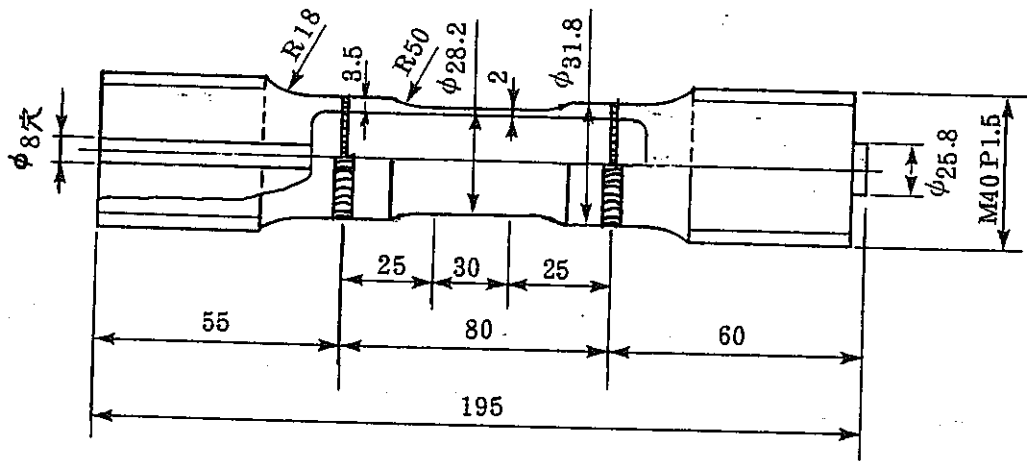


(a) Tensile Test Specimen
(for 2 1/4Cr-1Mo Plate)

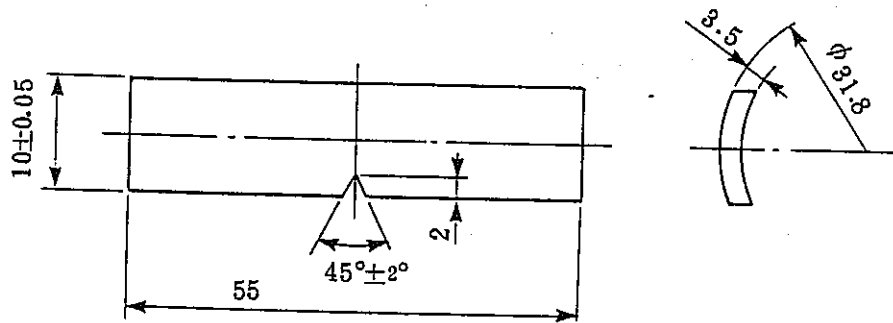


(b) Tensile Test Specimen
(for Aging Material of SUS321 Tube)

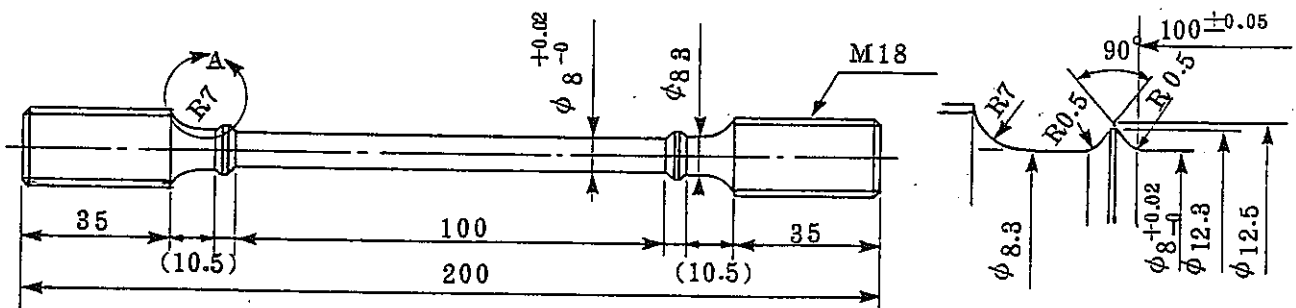
図 4.4 試験片の形状寸法
Fig. 4.4 Shape and Size of Test Specimen



(c) Fatigue Test Specimen
(for Aging Material of SUS321 Tube)



(d) Impact Test Specimen
(for Aging Material of SUS321 Tube)

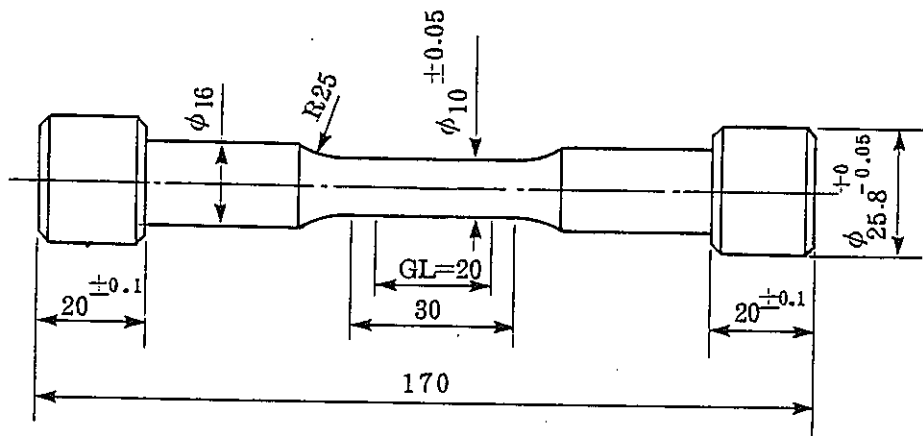


(e) Relaxation Test Specimen
(for SUS321 Forging)

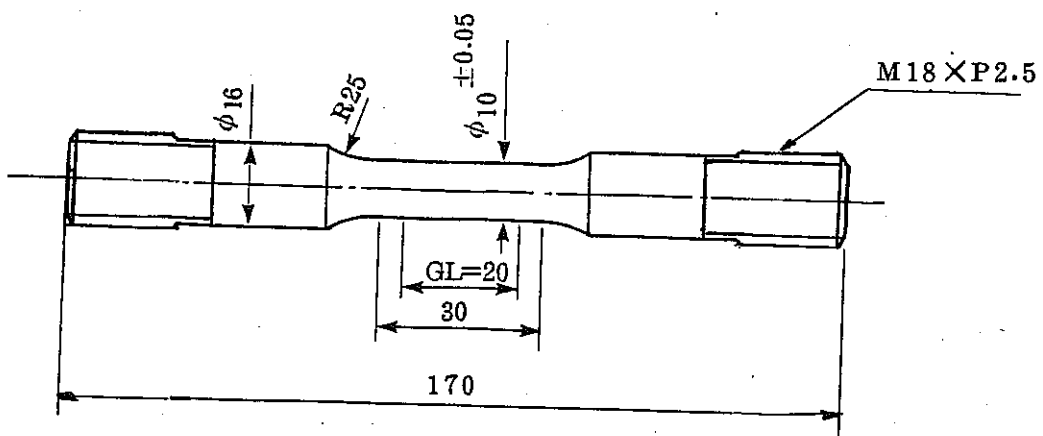
Detail A

図 4.4 試験片の形状寸法 (続き)

Fig. 4.4 Shape and Size of Test Specimens (continued)



(f) Creep Fatigue Interaction Test Specimen
(for SUS321 Forging)



(g) Creep Test Specimen
(for SUS321 Forging)

図 4.4 試験片の形状寸法 (続き)

Fig. 4.4 Shape and Size of Test Specimens (continued)

4.3 試験機仕様

表 4.4 ~ 4.7 は、本研究に使用した各試験機の主な仕様を示す。

引張試験機は、JIS B 7721 (1978) 「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、最大負荷容量 10 ton、最高使用温度 1,100 °C、クロスベッド昇降速度 0.005 ~ 500 mm/min 標点間定速ひずみ制御装置付きのものを用いた。

試験片の加熱は縦割型円筒状電気炉により、上中下三分割方式で、個々に温度調節可能なものである。

疲労試験機は、荷重容量 ±10 ton の電気油圧サーボ式で、制御すべきひずみ値、ひずみ速度、波形等は全て付属のコンピュータで処理する機能を有し、また、試験中得られるデータ類は、X-T 及び X-Y 記録形に表示すると同時に、コンピュータで換算して CRT ディスプレイ又はプリンタにデジタル値として OUTPUT するシステムを有している。

リラクセーション試験機は、JIS Z 2276 (1975) 「金属材料の引張リラクセーション試験方法」に適合するもので、試験片標点間伸びを検出して送錘移動によつて伸びを一定に制御する形式のものである。

最大容量 3 ton、加熱は電気炉で上中下三分割制御式である。

試験片の伸び、送錘の移動量（荷重変化）はペン式、温度については打点式の記録計にて記録した。なお、試験の精度を上げるため、試験機は雰囲気の変動を ±0.5 °C 以内に制御可能な恒温室内に設置した。

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。本研究では、最大負荷容量 2 ton 及び 3 ton の二種類のものを使用したがいずれもレバー負荷方式である。

表 4.4 引張試験機の仕様

Table 4.4 Specifications of Tensile Testing Machine

仕 様	試験機 No.
	貸 与 試 験 機
	EB021
1. 試験機本体	
1) 型 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
2. 加熱装置	
1) 型 式	縦割型円筒状電気炉
2) 使用温度範囲	150 ~ 1100℃
3) 発 熱 体	カンタル線 3分割
4) 容 量	100V 5kW
3. 制御装置	
1) ひずみ制御	標点間定速ひずみ制御方式
2) 温度制御	SCRによる連続比例制御方式
3) 温度検出と精度	炉 内……白金測温抵抗体 試験片……白金-白金ロジウム熱電対 いずれも±3℃以下(150~600℃において)
4. 測定記録装置	
1) 温度測定記録装置	横河製デジタルサーモメータ 日立製打点式温度記録計
2) 伸び測定装置	島津製DTF平均値方式
3) 伸び, 荷重記録装置	島津製電子管式自動平衡 X-T-Y記録計

表 4.5 疲労試験機の仕様

Table 4.5 Specifications of Fatigue Testing Machine

試験機 No. 仕様	貸与試験機 HB061
1. 試験機本体	
(1) 型式	島津製, 電気油圧サーボシステム EA10型
(2) ロードセル	SH-10T 動的±10 ton 静的±15 ton
(3) 油圧加振器	210 kg/cm ² , 10 ℓ/min
	動的±10 ton 静的±15 ton
2. 加熱装置	
(1) 型式	富士電子製 10 kW高周波加熱装置
(2) 温度制御	比例積分演算制御
(3) 温度分布	±5℃
3. コンピュータ制御装置部	
(1) 中央処理装置	4300 b型, 記憶容量24Kワード
(2) 補助記憶装置	YD-740型フロッピディスク 128Kワード×2
(3) インターフェース	4931型 アナログ入力 8 ch
	アナログ出力 2 ch
(4) 周辺機器	沖電気製 8000型タイプライター
	テクトロニクス製 4006-1型グラフィックターミナル
	テクトロニクス製 4631型ハードコピー
4. 記録装置	
(1) X-T記録計	横河電機製 3056-31型 3ペン
(2) X-Y記録計	横河電機製 3036-11型 1ペン
5. 伸び計	
(1) 軸伸び計	EXT-A-20-10型 GL=20 mm
(2) 径伸び計	EXT-D-10-0.5型 D=10 mm

表 4.6 リラクゼーション試験機の仕様

Table 4.6 Specifications of Relaxation Testing Machine

試験機 No. 仕 様	貸 与 試 験 機
	GB051
1. 試験機本体	
(1) 型 式	東伸工業製 RX-30型
(2) 最大負荷容量	3000 kg
(3) レバ ー 比	1 : 20
(4) 荷 重 精 度	± 0.5 %
(5) 送 錘 速 度	Max. 約 50 sec./フロストロック
2. 伸び検出・制御装置	
(1) 型 式	G.L間伸びを検出し、送錘移動により伸びを一定にする形式
(2) 変位検出器	差動変圧器（感度 0.2 μm 以下、範囲 0 ~ 3 mm）
(3) ひずみ設定器	設定範囲 0 ~ 3 mm
(4) 記 録 計	電子式自動平衡型 3 ペン式
3. 加熱装置	
(1) 型 式	縦割型円筒状電気炉
(2) 使用温度	Max. 850℃
(3) 発 熱 体	カンタル線
(4) 容 量	3 kW
(5) 電 源	100 V, 60 Hz
4. 温度調節装置	
(1) 型 式	SCR 比例制御式
(2) 設 定 範 囲	0 ~ 1200℃
(3) 温度調節精度	± 2℃
(4) 温度検出器	白金測温抵抗体
(5) 定電圧装置	摺動型 SS-25/C（出力 100V ± 2% 以内）
5. 温度測定記録装置	
(1) 温度記録計	電子式自動平衡型（6 打点式）
(2) 熱 電 対	φ 0.5 白金-白金ロジウム

表 4.7 クリープ試験機の仕様

Table 4.7 Specifications of Creep Testing Machine

仕 様	貸 与 試 験 機	
	FB031~035	FB036~040
1. 試験機本体	東伸工業製	
(1) 型 式	PT-20型	PR-30型
(2) 最大負荷容量	2000 kg	3000 kg
(3) レバ - 比	1 : 10	
(4) プルロッド・チャック	ネジ式 (インコネル718C製)	
2. 加熱装置	縦割型円筒状電気炉	
(1) 型 式	Max. 850 °C	
(2) 使用温度	カンタル線	
(3) 発熱体	3 kW	
(4) 容量	AC 100V, 60 Hz	
(5) 電源		
3. 温度調節装置	SCR比例制御式	
(1) 型 式	0 ~ 1200 °C	
(2) 設定範囲	± 2 °C	
(3) 温度調節精度	白金測温抵抗体 白金熱電対	
(4) 温度検出器		
4. 温度測定記録装置	0~1000°C目盛 (24打点式)	
(1) 温度記録計	φ 0.5 白金-白金ロジウム	
(2) 熱電対		
5. 伸び測定記録装置	G.L間の伸び測定方式	
(1) 型 式	アームシヨルダ型	
(2) 変位検出用治具	目盛 0.01 mm, ストローク 50 mm	
(3) ダイヤルゲージ	差動変圧器 (範囲 0 ~ 20 mm)	
(4) 変位検出器	6 打点式	
(5) 伸び記録計	横河電機製 3873-01型	
(6) デジタルプリンタ		

4.4 試験方法

4.4.1 引張試験

静的引張試験は、前述の試験片を使用し、JIS Z 2241、G0567を基本とし「FBR金属材料試験実施要領書」に準拠して行つた。

試験は、標点間の公称全ひずみが約1%に達するまで標点間公称ひずみ速度を0.3%/min、それ以後は 7.5 ± 2.5 %/minになるように制御した。試験中、X-T-Y記録計上に荷重と標点間公称ひずみを記録し、これ以後は荷重と時間（クロスヘッド間の変位）の関係を記録した。

4.4.2 低サイクル疲労試験機

管状試験片（SUS321伝熱管時効母材）を使用した低サイクル疲労においては、軸方向ひずみ測定によるひずみ制御で試験した。

試験条件として、ひずみ速度は0.1%/sec、ひずみ波形は三角波としたが、これら制御は全てコンピュータで設定している。なお、試験にあたっては、0.3mm ϕ のPR熱電対を抵抗溶接し、G.L間の温度が所定温度になるよう制御した。昇温後約20min保持した後試験を開始し、破断繰返し数は引張側の応力が定常時の $\frac{3}{4}$ に低下した時の回数とした。

4.4.3 組織観察試験

本試験は時効材に対するもので、受入材との比較で100倍及び400倍の光学顕微鏡で観察した。

4.4.4 衝撃試験

本試験は時効材に対するもので、2mmVノッチシャルピー試験を各々3本を室温において試験し、その平均値で検討した。

4.4.5 リラクセーション試験

リラクセーション試験は、JIS Z 2276を基本とし、「FBR金属材料試験実施要領書」に準拠して行つた。

ひずみは、試験片標点間の変位が一定になるよう差動トランスで検出制御し、試験中の荷重の変化は送錘の移動量で測定した。温度は打点式記録計、制御ひずみ及び荷重はX-Yレコーダにて記録した。

4.4.6 クリープ疲労及びクリープ破断試験

クリープ緩和損傷評価のための試験では、図4.4(f)に示した試験片を用い、まず、ひずみ保持を有するいわゆるクリープ疲労試験を実施する。この場合のひずみ速度は0.1%/secで、ひずみ波形は引張側でひずみ保持する台形波とした。その他の試験方法は4.4.2項と同様の方法によつた。こうした方法である程度の

疲労及びクリープの損傷を与えた後、一担試験を中断して、図 4.4 (g)に示す形状に試験片を再加工し、次にクリープ破断試験によつて残余クリープ損傷を与えた。この場合の試験方法は通常実施されるクリープ破断試験方法によるものである。

5. 試験結果並びに考察

5.1 2¼Cr-1Mo 鋼板材の超高温特性

本鋼種の各種高温特性については、以前から数多くの検討を進めてきたが、^{4)~8)}いずれも 600℃ 以下を対象にした試験であつた。

今回は Na-水反応を考慮した場合の超高温領域での材料特性のうち、基本となる静的引張特性について検討を加えた。

5.1.1 超高温引張試験結果

図 4.4 (a)に示した試験片を用い、室温並びに 600℃ から 1,000℃ までの温度域における静的引張試験を実施した。

表 5.1 にその結果をまとめて示す。また、図 5.1 に各温度における強度について、在来の板材に対するデータと比較対応させて示した。今回の供試材は、以前の供試材と Heat が異なり、板厚も 30t と厚くなつてはいるが、高温域における 0.2%耐力並びに引張強さとも、在来のデータの延長上の特性を示すことから、Heat、板厚による差はなく、同等の特性を有しているといえる。なお、850℃ 近傍で不自然な強度変化がみられるが、これは、材料の変態挙動に関係しているものとする。

同じく、図 5.2 には各温度における破断伸び並びに絞り特性を示しているが、強度と同様に在来データとの差はほとんどないこと、また、前述した 850℃ 近傍での変化挙動が著しい点などの特徴が明らかである。

図 5.3 (a)~(j)には、各温度における応力-ひずみ挙動(各条件とも 2本のデータ)を示しているが、試験手法上全ひずみが約 1%までとそれ以後では引張ひずみ速度を変えているため、 $\epsilon^* \approx 1.0\%$ で線図の変曲点が生じ、こうした挙動は高温になるほど著しくなつてはいる。

試験片の破断状況は、写真 5.1 にその全数を示しているが、いずれも A 部破断であり特異な現象は認められない。

表 5.1 2¼Cr-1Mo 鋼板材の引張試験結果

Table 5.1 Results of Tensile Tests for 2¼Cr-1Mo Steel Plate

材 料	2¼Cr-1Mo 鋼板材	熱 処 理	920~940°C×3.42h Nor.
材料製造者	(株) 日本製鋼所		710~730°C×5.42h Tem.
素材寸法	30t×1500W-1000ℓ	試験雰囲気	大 気 中
溶接方法	—	試験場所	パプコック日立(株) 呉研究所

区 分		化学成分 (Wt%)						
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
要求値	レードル	0.15	0.50	0.30 ~0.60	0.35	0.35	2.00 ~2.50	0.90~1.10
	チェック	0.15	0.50	0.27 ~0.63	0.35	0.35	1.88 ~2.62	0.85~1.15
分析値	レードル	0.15	0.27	0.55	0.10	0.05	2.39	0.99
	チェック	0.15	0.28	0.55	0.11	0.07	2.41	1.00

(Heat No. 81C625-3-1 PNC NoD-7)

試 験 条 件			工 学 的 特 性					
試験温度 (°C)	初期のひ ずみ速度 (%/min)	試験片 番 号	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	破断伸び (%)	絞 り (%)	見かけの 弾性係数 (kg/mm ²)	破断位置
R. T	0.3	EB-711	42.4	60.1	26.6	74.9	21.15×10 ³	A
	"	"-712	42.8	61.2	27.5	74.4	22.55×10 ³	"
600	"	"-713	24.8	30.5	34.0	90.5	15.87×10 ³	"
	"	"-714	25.1	30.9	32.6	90.0	18.21×10 ³	"
650	"	"-715	18.2	25.7	48.6	94.7	12.51×10 ³	"
	"	"-716	19.0	26.0	46.8	94.2	11.11×10 ³	"
700	"	"-717	11.7	20.1	53.0	95.9	9.09×10 ³	"
	"	"-718	11.6	20.1	47.2	95.0	9.53×10 ³	"
750	"	"-719	6.1	13.5	60.1	98.1	6.29×10 ³	"
	0.3	"-720	6.2	13.5	64.6	98.2	7.13×10 ³	A

表 5.1 2¼Cr-1Mo 鋼板材の引張試験結果(続き)

Table 5.1 Results of Tensile Tests for 2¼Cr-1Mo Steel Plate(Continue)

試験条件			工学的特性					
試験温度 (°C)	初期のひ ずみ速度 (%/min)	試験片 番号	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	破断伸び (%)	絞 り (%)	見かけの 弾性係数 (kg/mm ²)	破断位置
800	0.3	EB-721	3.2	8.3	73.2	94.5	5.09×10 ³	A
	"	"-722	3.6	8.5	75.8	95.3	4.72×10 ³	"
850	"	"-723	4.7	9.7	72.8	91.2	4.11×10 ³	"
	"	"-724	4.4	9.3	84.8	83.2	4.72×10 ³	"
900	"	"-725	3.9	8.0	76.8	92.4	4.45×10 ³	"
	"	"-726	3.9	7.9	76.6	90.2	5.85×10 ³	"
950	"	"-727	3.0	6.0	78.0	75.0	3.94×10 ³	"
	"	"-728	3.1	6.1	77.0	75.6	4.08×10 ³	"
1000	"	"-729	2.3	4.7	87.6	69.2	2.29×10 ³	"
	0.3	EB-730	2.3	4.6	79.2	68.3	3.32×10 ³	A

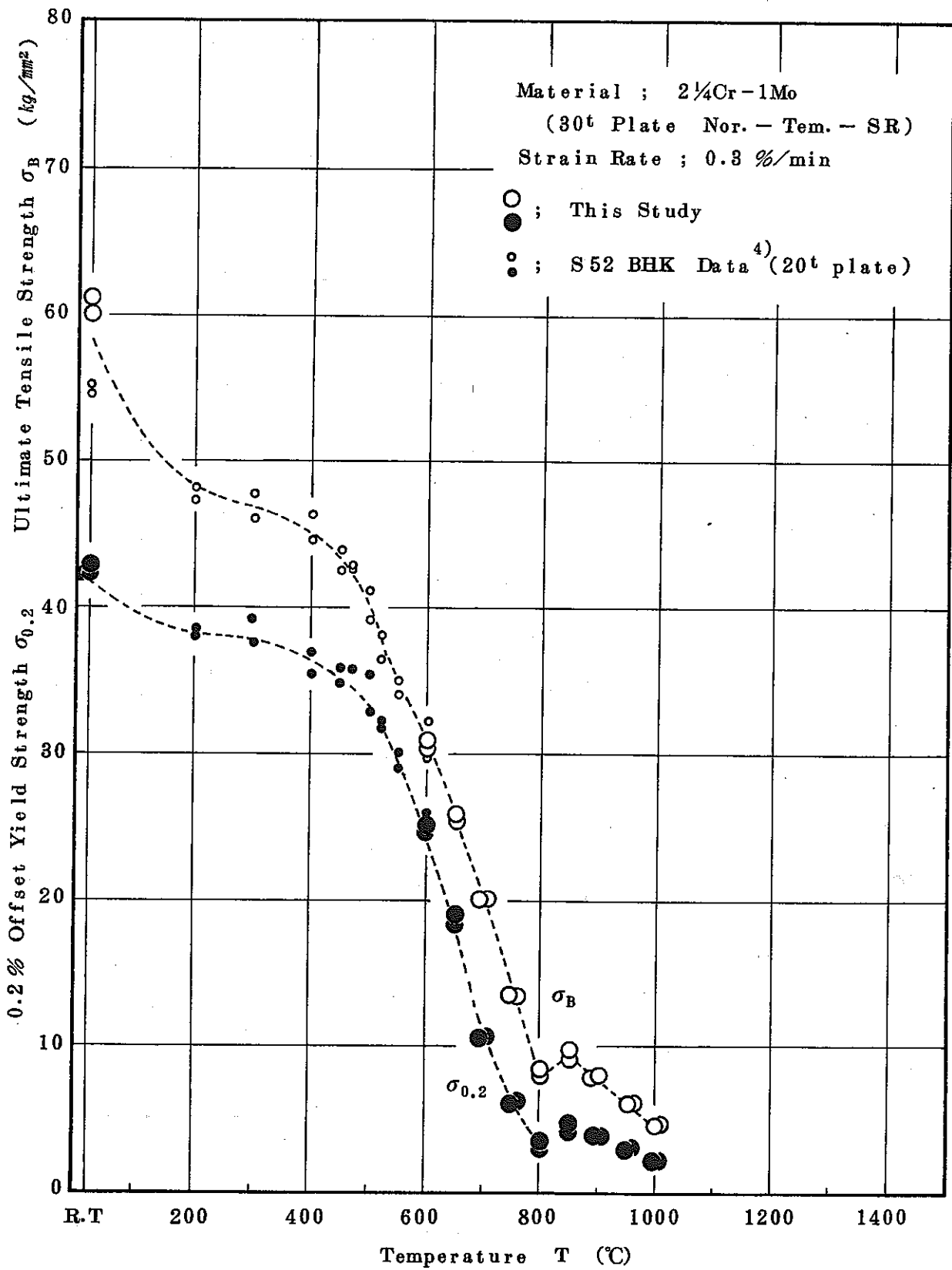


図 5.1 2¼Cr-1Mo 鋼 板材の静的引張強度
 Fig. 5.1 Variation of Yield and Tensile Strength with Temperature for 2¼Cr-1Mo Steel Plate

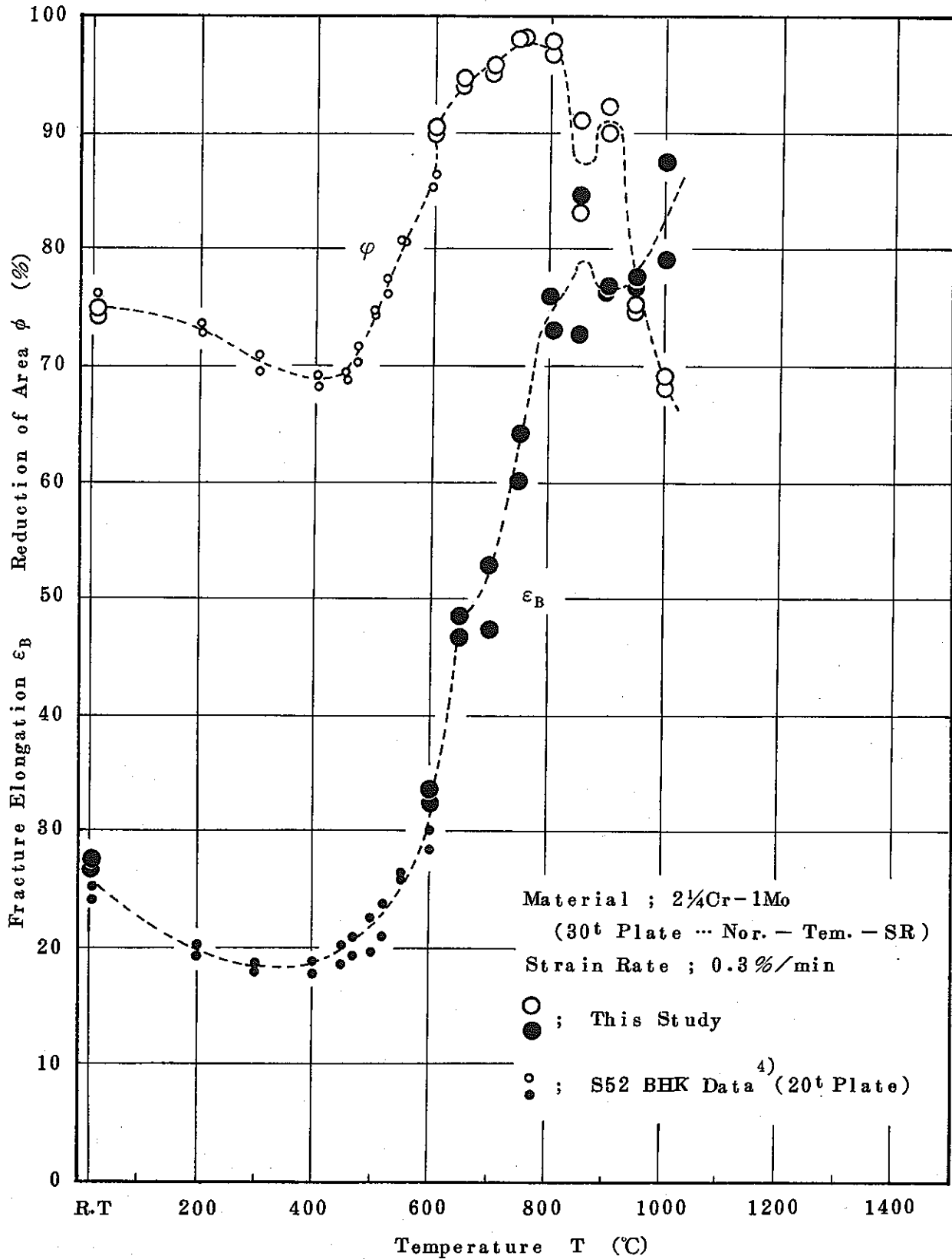


図 5.2 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼板材の静的引張延性

Fig. 5.2 Variation of Elongation and Reduction of Area with Temperature for 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel Plate

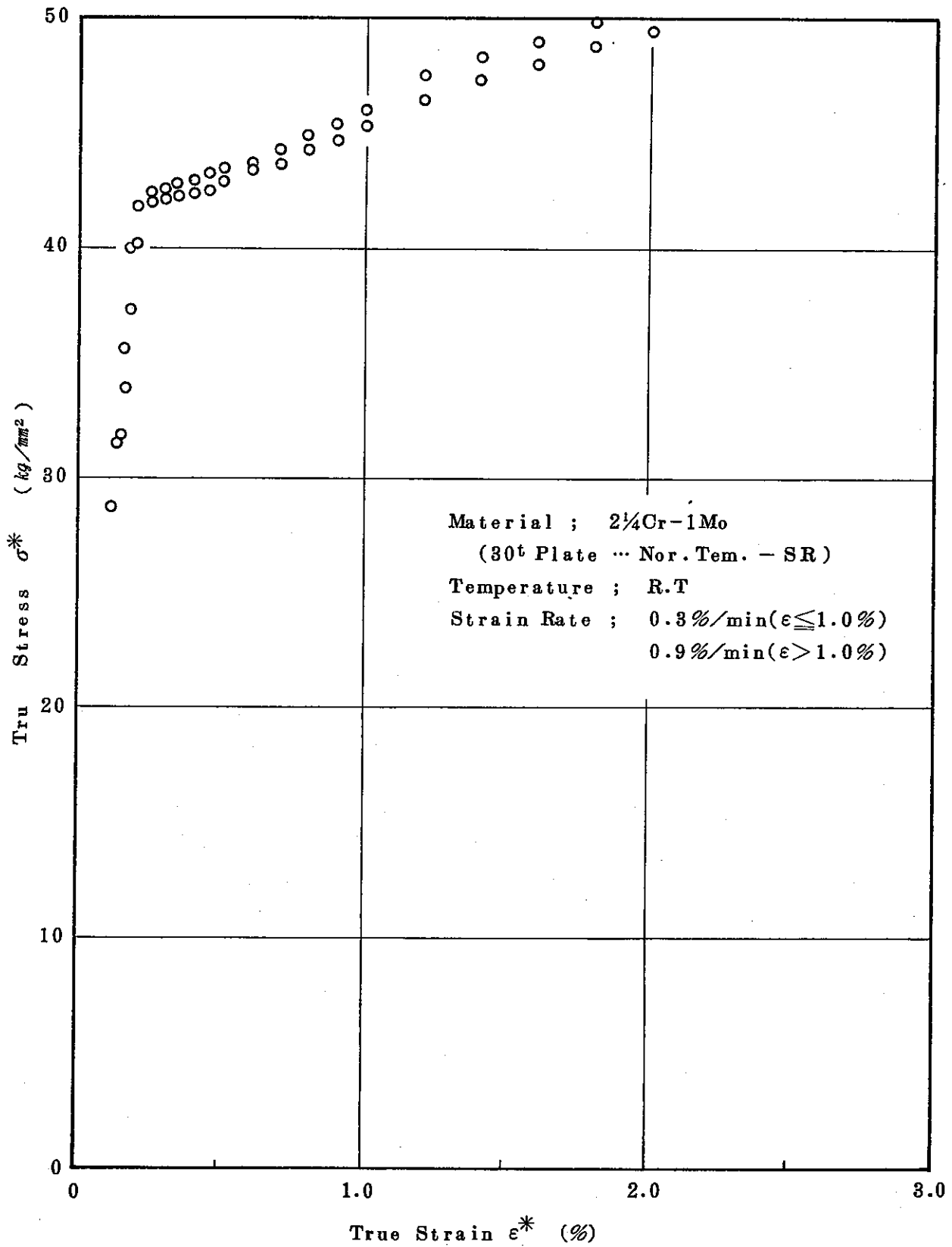


図 5.3(a) 2¼Cr-1Mo 鋼板材の応力-ひずみ線図

Fig. 5.3(a) True Stress-True Strain Curves for 2¼Cr-1Mo Steel Plate

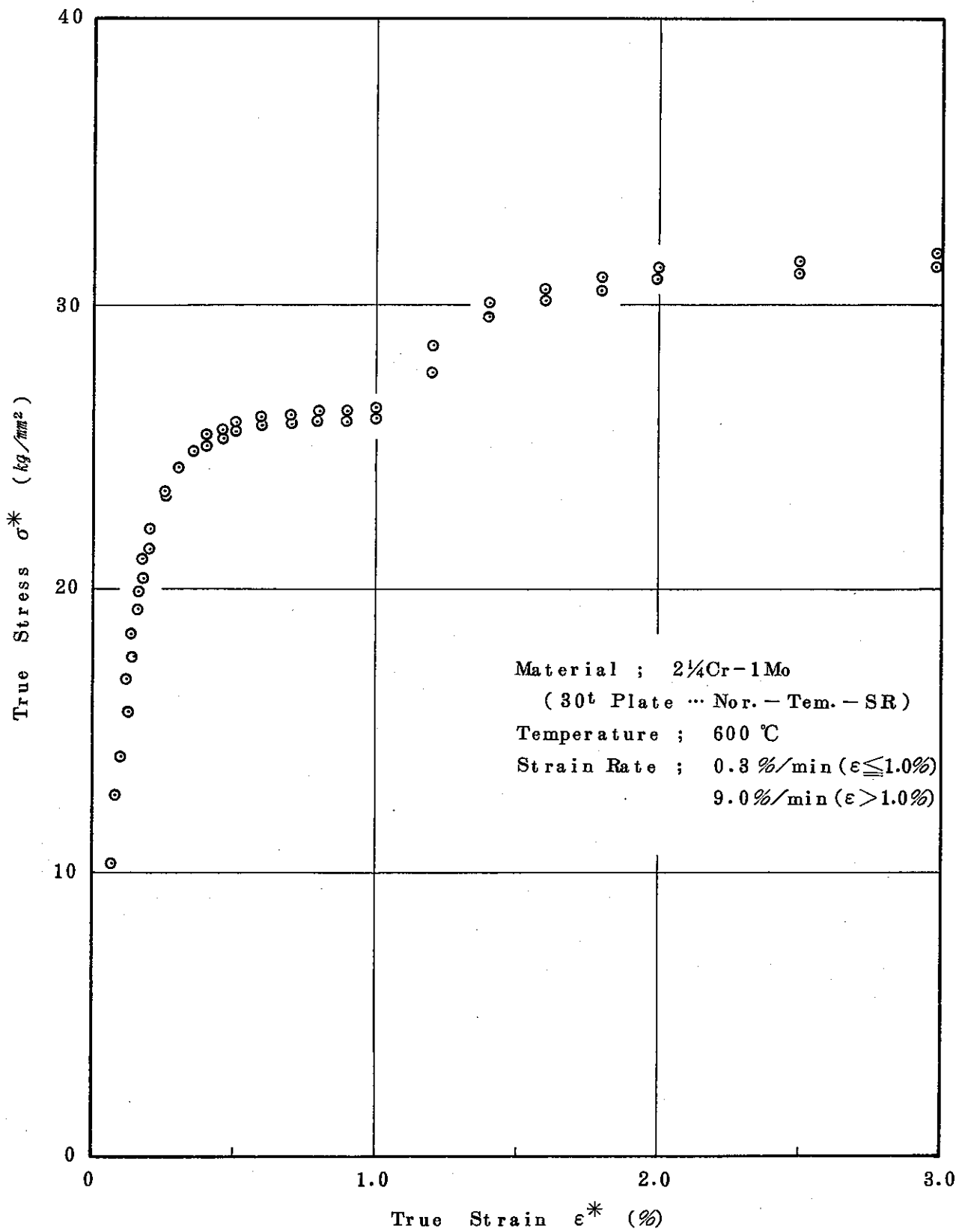


図 5.3 (b) 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼板材の応力-ひずみ線図

Fig. 5.3 (b) True Stress-True Strain Curves for 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel Plate

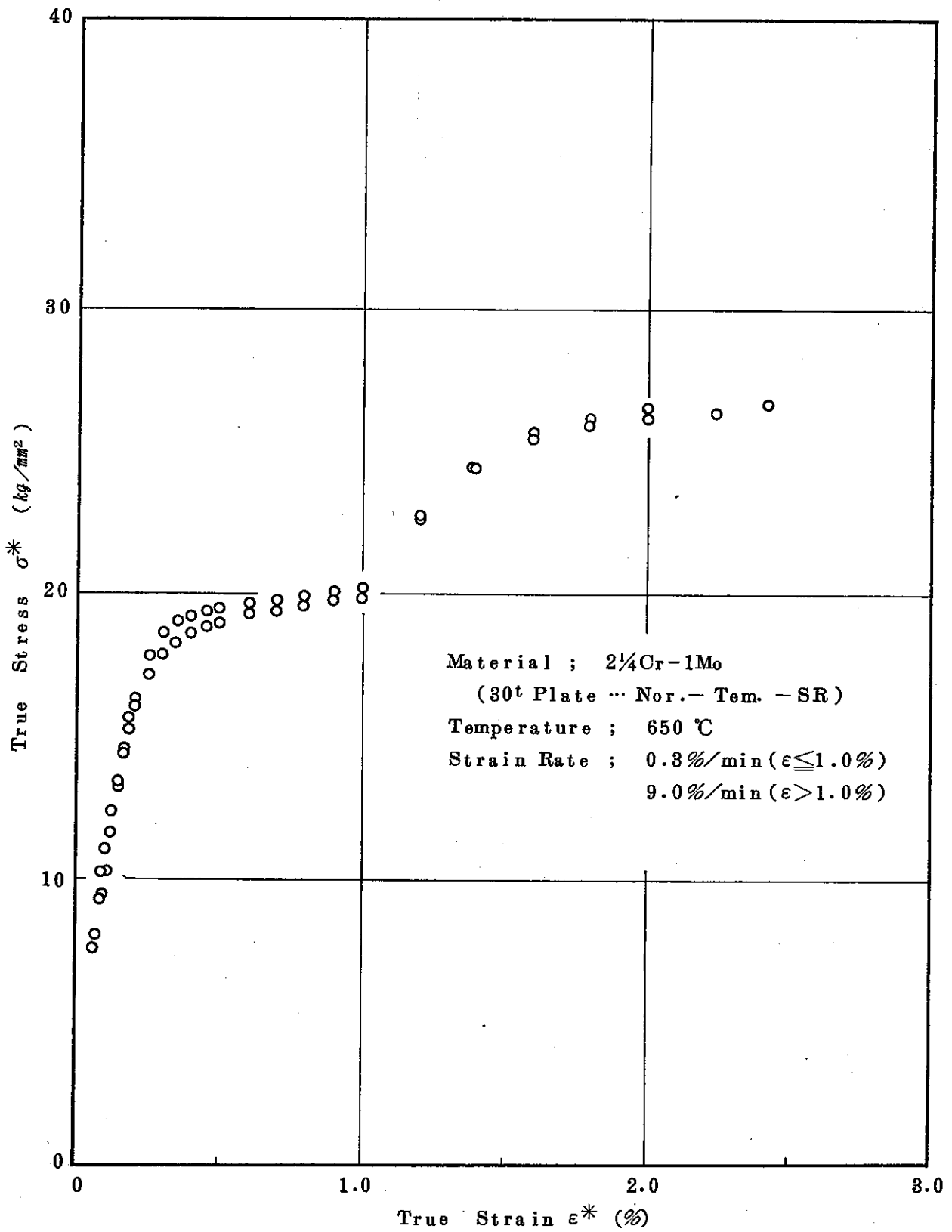


図 5.3 (c) 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼板材の応力-ひずみ線図

Fig. 5.3(c) True Stress-True Strain Curves for 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel Plate

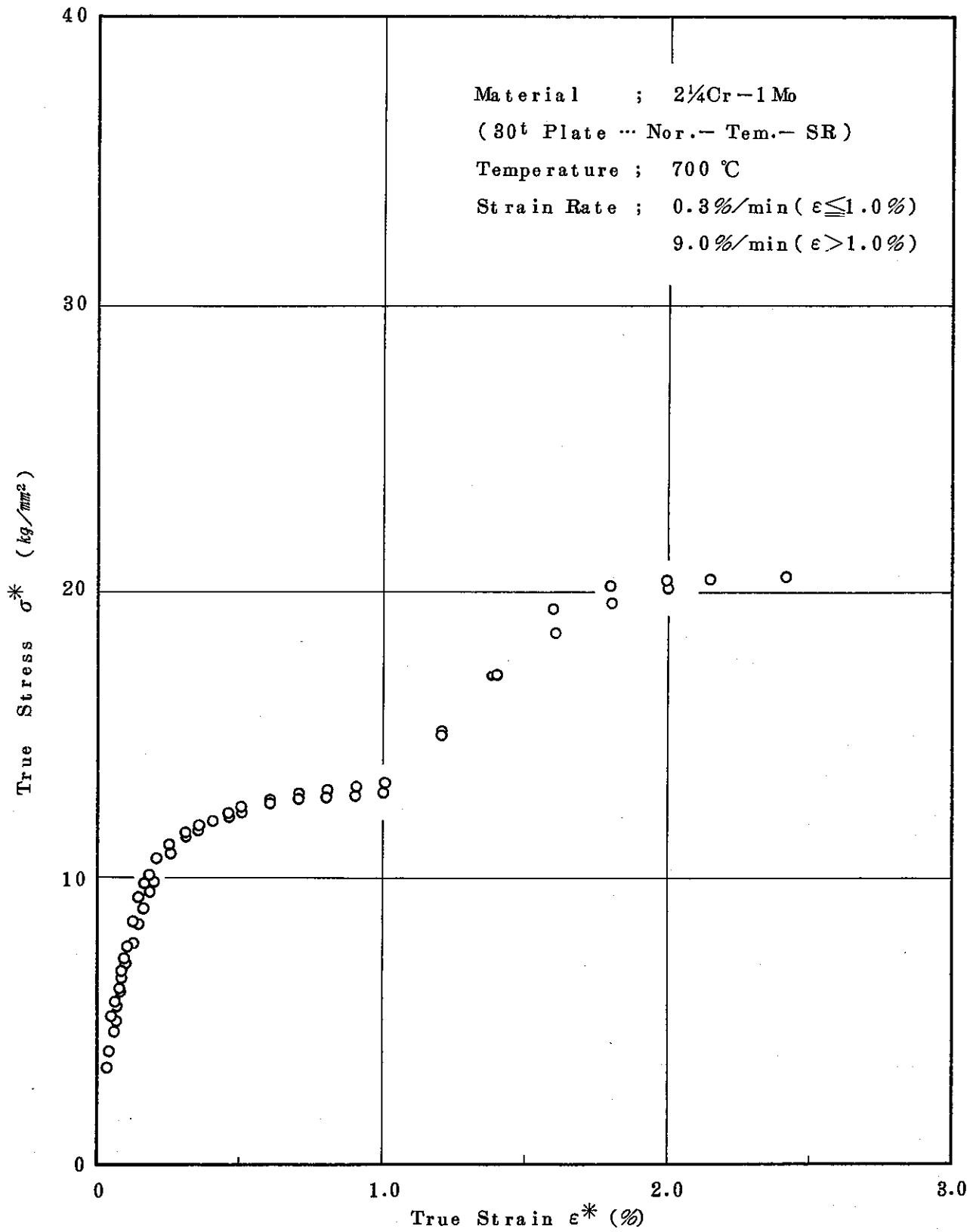


図 5.3 (d) 2¼Cr-1Mo 鋼板材の応力-ひずみ線図

Fig.5.3 (d) True Stress - True Strain Curves for 2¼Cr-1Mo Steel Plate

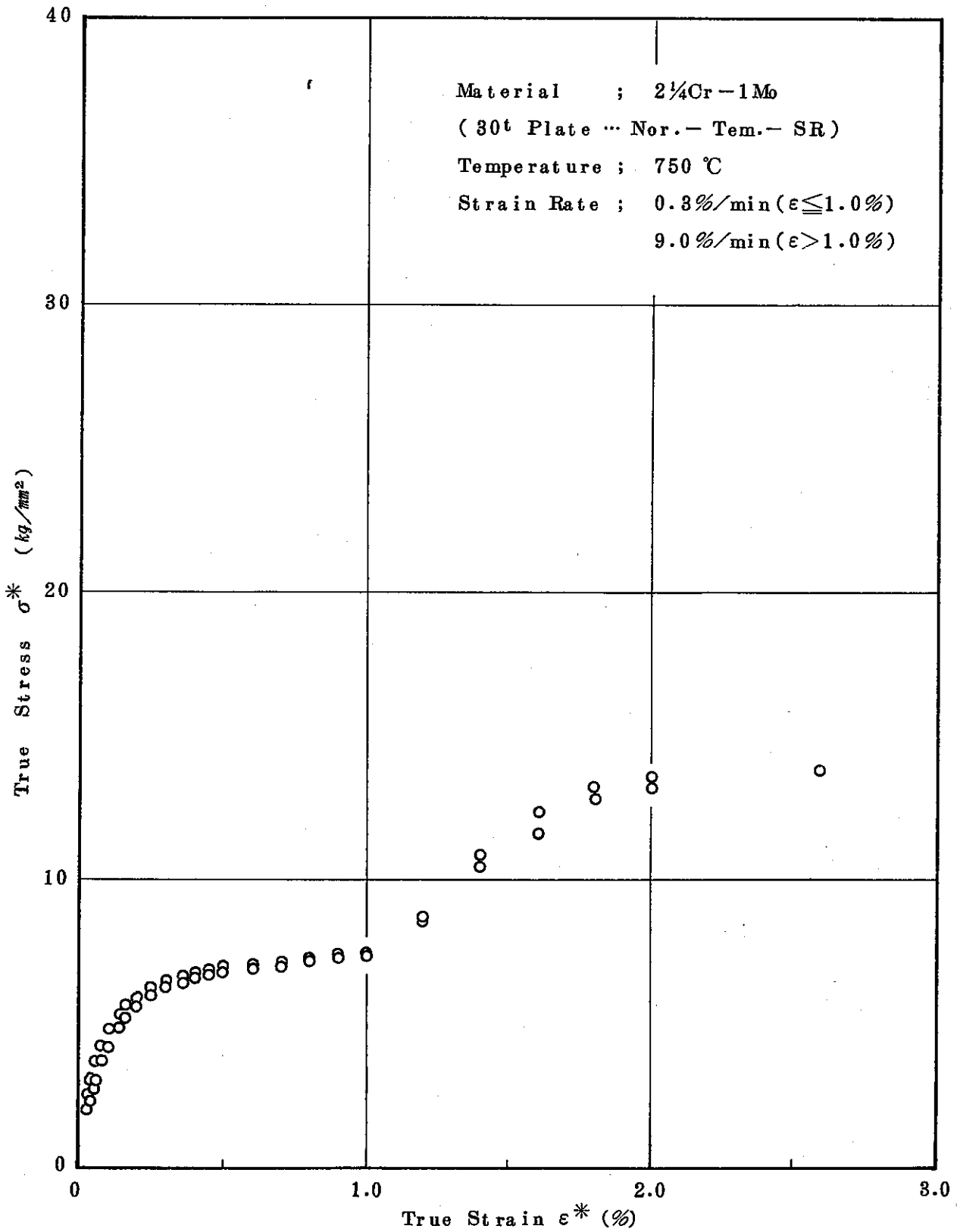


図 5.3 (e) 2 1/4Cr-1Mo 鋼板材の応力-ひずみ線図

Fig.5.3 (e) True Stress - True Strain Curves for 2 1/4Cr-1Mo Steel Plate

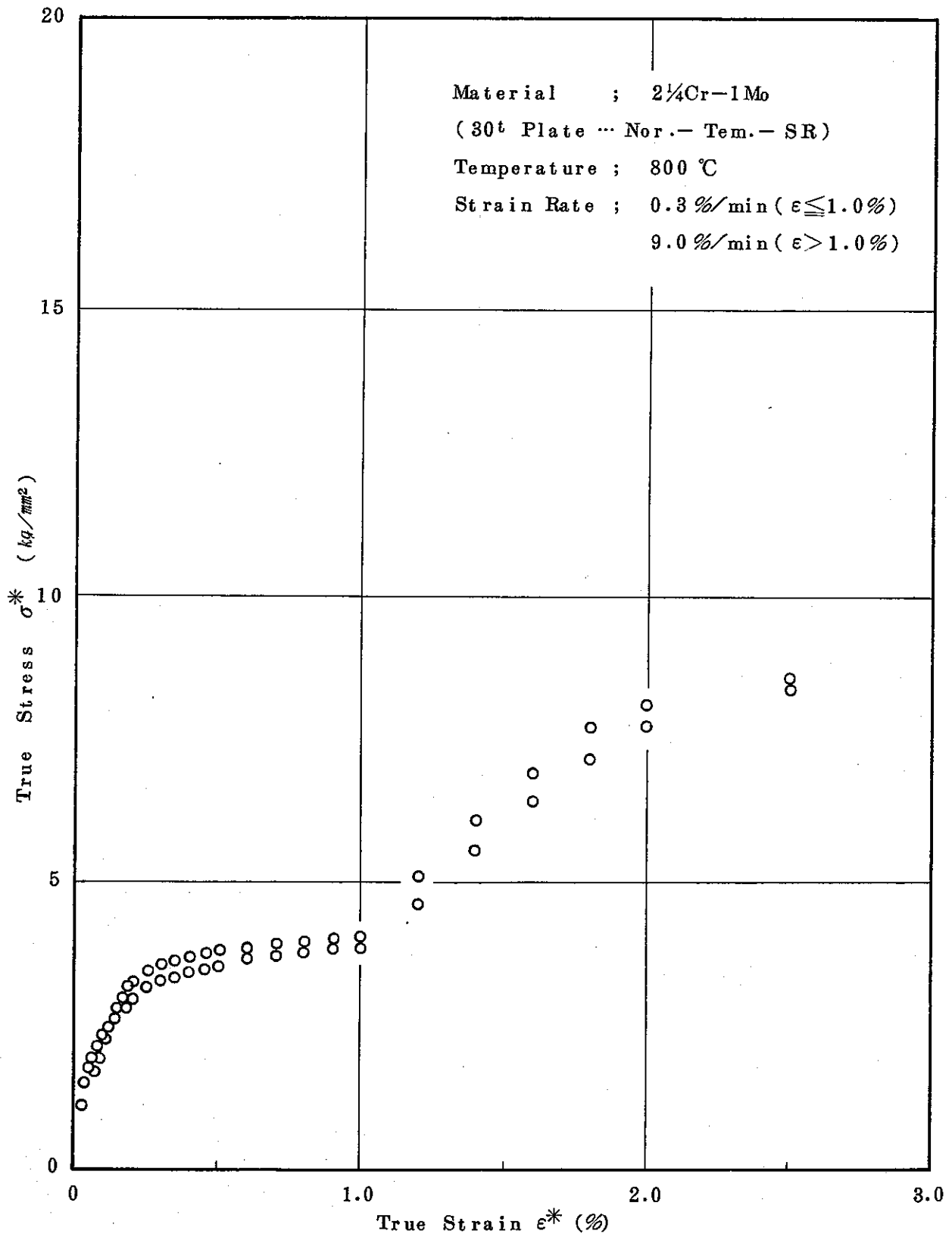


図 5.3 (f) 2¼Cr-1Mo 鋼板材の応力-ひずみ線図

Fig.5.3 (f) True Stress - True Strain Curves for 2¼Cr-1Mo Steel Plate

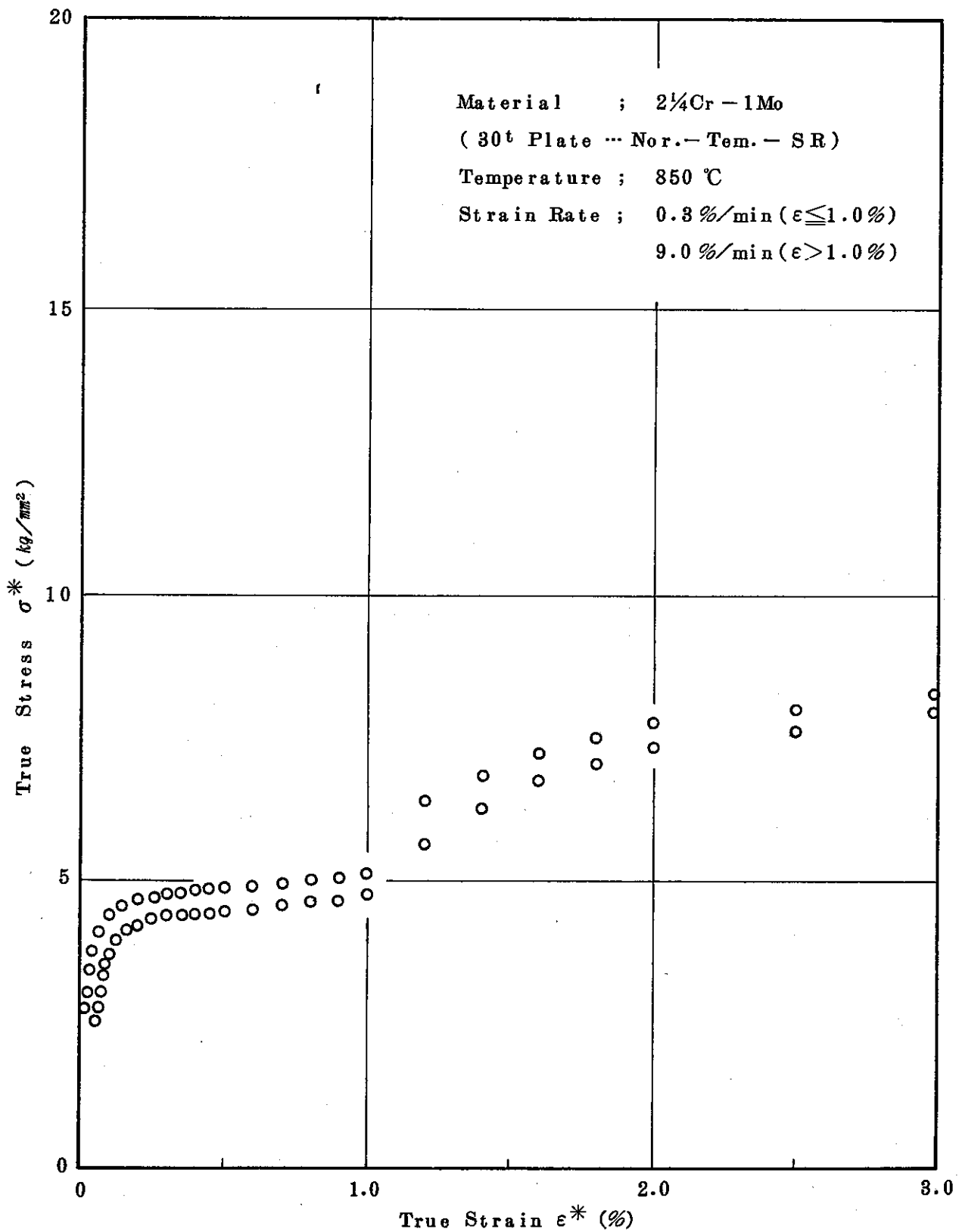


図 5.3 (g) 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼板材の応力-ひずみ線図

Fig.5.3 (g) True Stress - True Strain Curves for 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel Plate

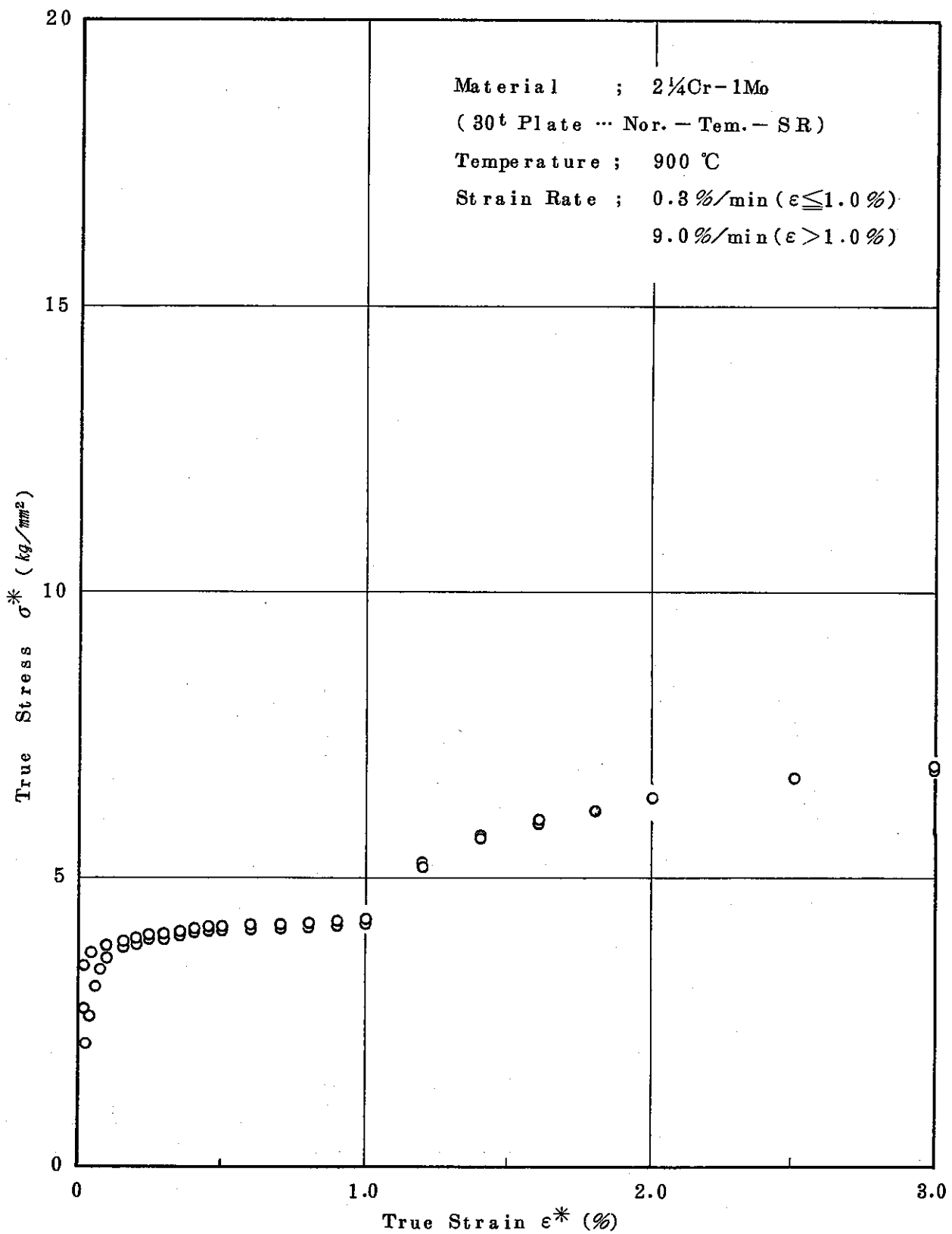


図 5.3 (h) 2 1/4Cr-1Mo鋼板材の応力-ひずみ線図
 Fig. 5.3 (h) True Stress - True Strain Curves for 2 1/4Cr-1Mo Steel Plate

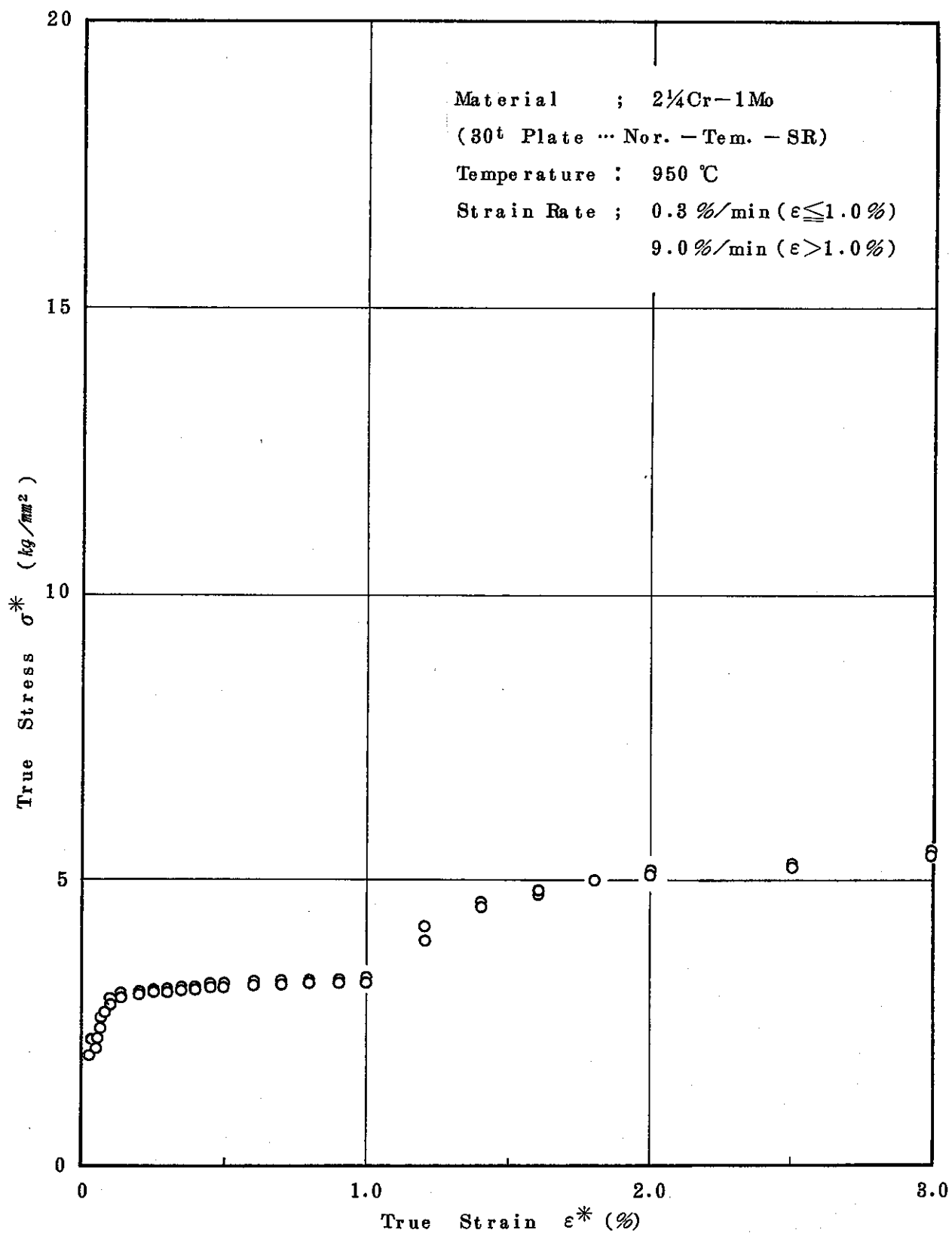


図 5.3 (i) 2 1/4Cr-1Mo 鋼板材の応力-ひずみ線図

Fig. 5.3 (i) True Stress-True Strain Curves for 2 1/4Cr-1Mo Steel Plate

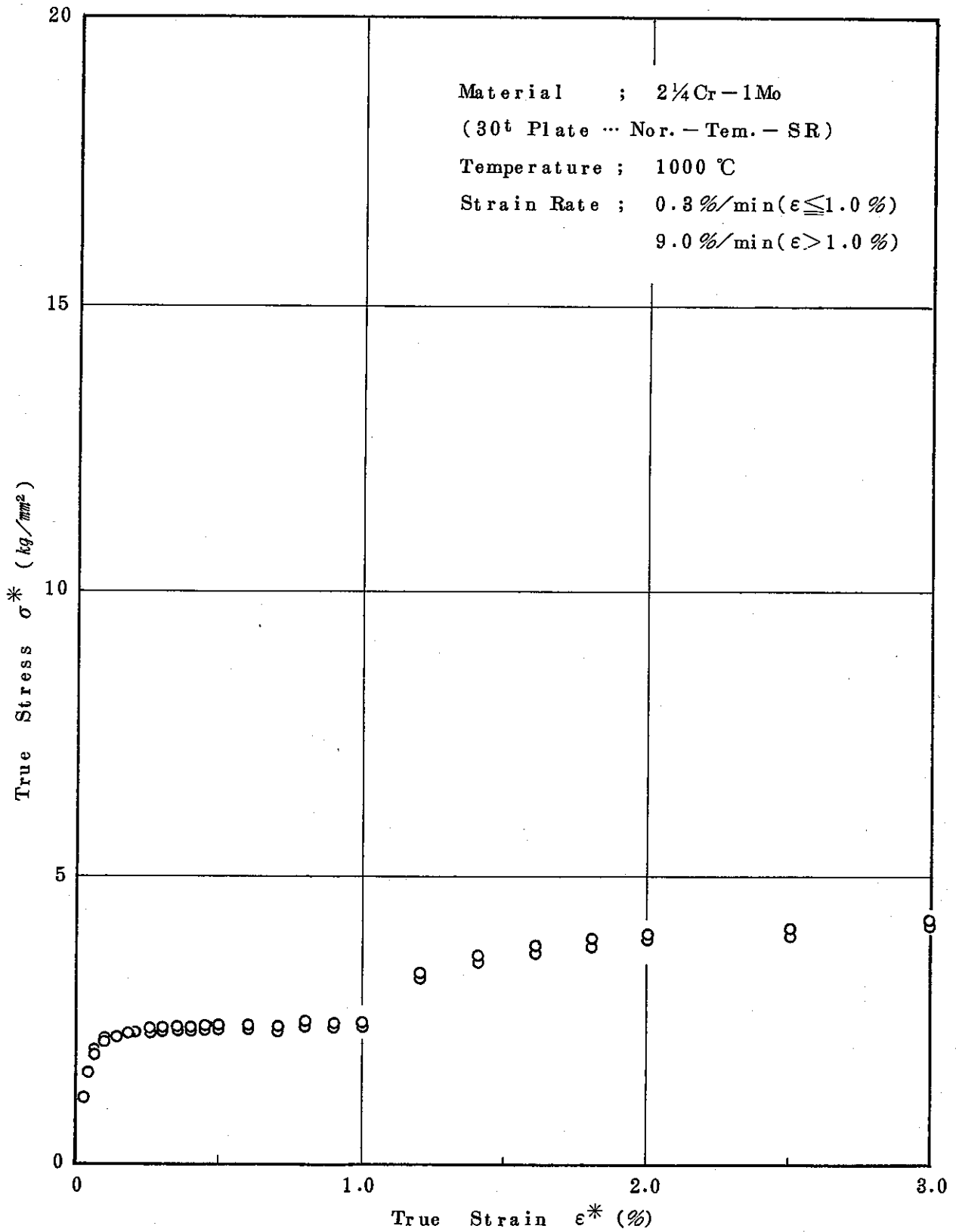


図 5.3 (j) 2 1/4Cr-1Mo 鋼板材の応力-ひずみ線図

Fig.5.3 (j) True Stress-True Strain Curves for 2 1/4Cr-1Mo Steel Plate

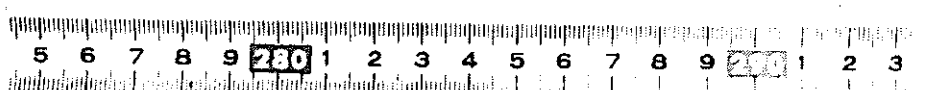
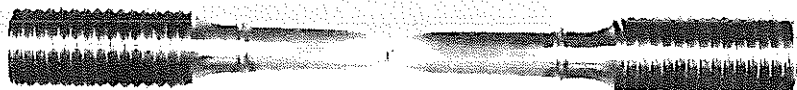

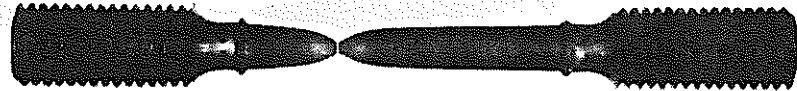
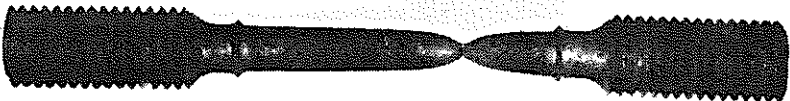



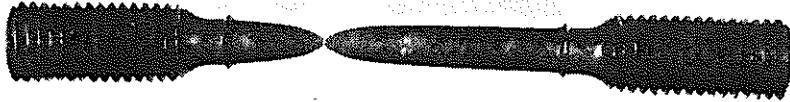


試験温度 (°C)	試験片 No.	
R.T	EB-711	
	EB-712	
600	EB-713	
	EB-714	
650	EB-715	
	EB-716	
700	EB-717	
	EB-718	
750	EB-719	
	EB-720	

写真 5.1 2¼Cr - 1Mo 鋼 板 材 の 静 的 引 張 試 験 後 の 外 観
 Photo 5.1 Appearance After Tensile Tests for 2¼Cr-1Mo Steel Plate











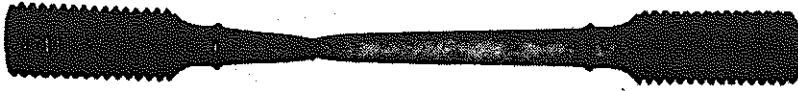
試験温度 (°C)	試験片 No.	
800	EB-721	
	EB-722	
850	EB-723	
	EB-724	
900	EB-725	
	EB-726	
950	EB-727	
	EB-728	
1000	EB-729	
	EB-730	

写真 5.1 2¼Cr-1Mo 鋼板材の静的引張試験後の外観(続き)
 Photo.5.1 Appearance After Tensile Tests for 2¼Cr-1Mo Steel Plate (continue)

5.2 SUS321 鋼伝熱管時効材の特性

実機運転中の熱履歴による材料特性の変化を検討するため、素材を 550℃で 2,000、5,000 及び 10,000 時間単純時効して、各種特性を受入れ時の特性と比較検討することにした。

前報⁴⁾では 2,000 時間時効材の結果を示したが、今回はさらに長時間の 5,000 時間時効材について、下記試験を実施し、前報の結果との対応で検討した。

5.2.1 組織観察試験結果

5,000 時間時効した伝熱管について、その外面、中央及び内面側 3ヶ所を光学顕微鏡で観察し、受入材及び 2,000 時間時効材の組織と対比させて、写真 5.2 に示した。

組織的には、2,000 時間時効材と比較して、粒界の炭化物がやや球状粗大化しつつあり、いわゆる過時効領域に入っていることがうかがえる。しかし、著しい組織変化は認められない。

5.2.2 引張試験結果

図 4.4 (b)に示した形状の試験片を用いて、室温及び 450～600℃で引張試験を実施した。

表 5.2 にその結果を、また、図 5.4～5.6 には、各温度における強度、延性を在来のデータ⁴⁾(受入れ及び 2,000 時間時効)と比較して示す。

0.2%耐力は 2,000 時間時効材の特性とほとんど差がなく、引張強さにおいて、高温側でわずかに強度低下している程度である。

また、延性については、破断伸びは変化なく、絞りのわずかな低下がみられる。

図 5.7 は、応力-ひずみ特性について同じく以前の結果と比較して示しているが、いずれの条件でも 2,000 時間時効材とほぼ同等の挙動を示し、著しい特性の変化は認められない。

写真 5.3 は試験片の破断状況を示す。

5.2.3 低サイクル疲労試験結果

図 4.4 (c)に示した中空円筒状の試験片を用いて、550℃の低サイクル疲労強度を検討した。なお、試験片は素材寸法のまま時効した後、標点間部分を外面側のみ約 1.5 mm 削除し肉厚を薄くしている。

表 5.3 に試験結果をまとめて示す。また、図 5.8 には今回の結果と以前の研究結果^{8) 10) 11)}(受入れ材及び 2,000 時間時効材)と比較して示した。同じ Heat の受入

れ材及び 2,000 時間 時効材の特性と比較して、低ひずみ側でやや短寿命となるが、バラツキを考えるとほとんど強度上の変化はないものと考える。

なお、同図には材料強度基準^{1) 2)}による平均破断寿命線図並びに設計線図も付記しているが、試験データは平均値よりやや低寿命に位置している。これは、試験片形状が円筒状であることにも大きな要因があるものと考えられる。しかし、設計線図に対しては約 10 倍の裕度があり、強度上は十分である。

図 5.9 は試験中の応力変化を示す。また、写真 5.4 は試験片の破断状況を示すが、いずれも特異な破断は認められない。

5.2.4 衝撃試験結果

図 4.9 (d)に示した 2 mm V ノッチ形状の試験片を用いて衝撃試験を実施したが、本試験は板厚が 3.5 mm と非常に薄い試験片を用いているため、あくまでも参考試験として取扱いたい。

表 5.4 は、先に実施した受入材及び 2,000 時間 時効材との比較材で試験結果を示すが、今回の 5,000 時間 時効材はわずかに靱性が低下しつつある。それでもまだ高い衝撃値を示していることから特に問題とは考えられない。

以上の結果から、5,000 時間 時効熱処理後も著しい特性の変化は認められず、2,000 時間 時効材と同等の特性を有することが明らかとなった。

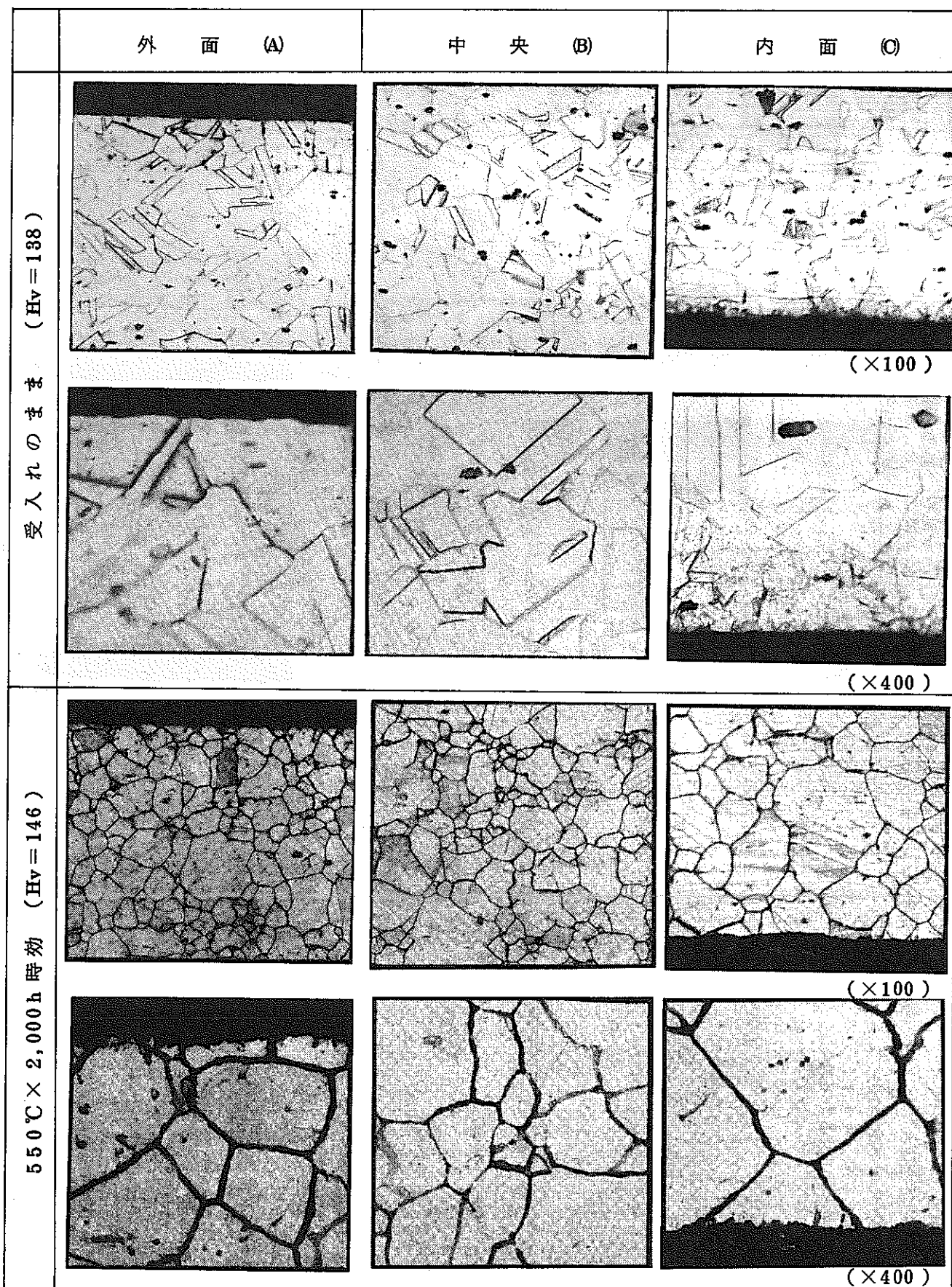
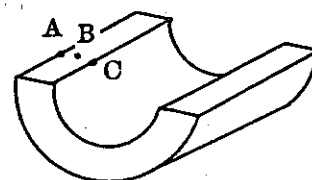


写真 5.2 SUS321 鋼伝熱管のマイクロ組織
 Fig. 5.2 Microstructures for SUS321
 Stainless Steel Tube



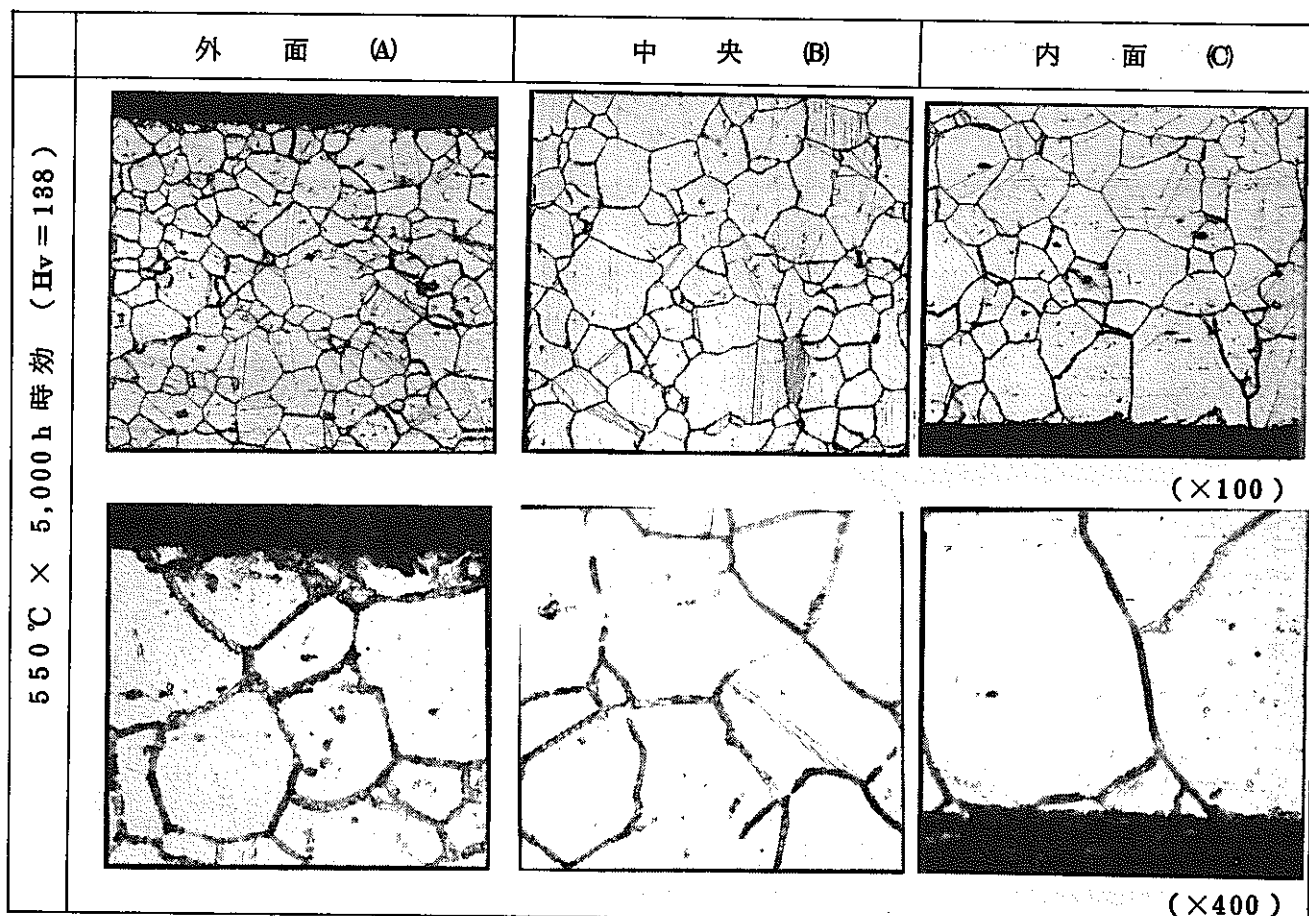


写真 5.2 SUS321 鋼伝熱管のマイクロ組織 (続き)
 Fig. 5.2 Microstructures for SUS321
 Stainless Steel Tube (Continue)

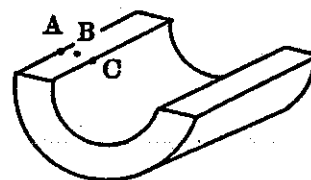


表 5.2 SUS321 鋼伝熱管時効材の引張試験結果

Table 5.2 Results of Tensile Tests for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube

供試材	SUS321 鋼 伝熱管の溶接継手	熱処理	1,160℃×3min W.Q
素材製造者	住友金属工業(株)	時効処理	550℃×5,000h
素材寸法	31.8 ^{OD} ×3.5t-12,000ℓ	試験片形状	3.5t×6W 短冊状

		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti
要求値	レードル	0.04 ~0.10	≤0.75	≤2.00	≤0.030	≤0.030	9.00 ~13.00	17.00 ~19.00	4×C% ~0.6
分析値	レードル	0.08	0.57	1.50	0.025	0.004	11.60	17.55	0.43
	チェック	0.08	0.56	1.48	0.023	0.004	11.45	17.0	0.41

(Heat No. A991703 PNC Material No. C-5)

試験温度 (℃)	試験片 No.	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ ※ (kg/mm ²)	引張強さ σ_B (kg/mm ²)	破断伸び ϵ_B ※ (%)	絞り ϕ ※ (%)	見かけの弾性係数 E ※ (×10 ⁸ kg/mm ²)	破断位置
R.T	EB-701	27.1	61.2	61.4	76.8	16.75	A
	"-702	28.6	60.2	62.0	77.1	18.66	"
450	"-703	20.0	48.9	38.7	57.6	12.13	"
	"-704	20.8	48.9	37.8	56.3	14.91	"
500	"-705	18.8	47.1	34.8	58.4	11.66	"
	"-706	19.4	47.7	35.2	57.6	16.20	"
550	"-707	18.6	45.5	34.7	53.8	14.07	"
	"-708	18.8	45.9	34.3	50.7	12.69	"
600	"-709	18.8	42.6	34.6	54.9	13.85	"
	EB-710	19.1	42.9	33.9	53.6	11.62	A

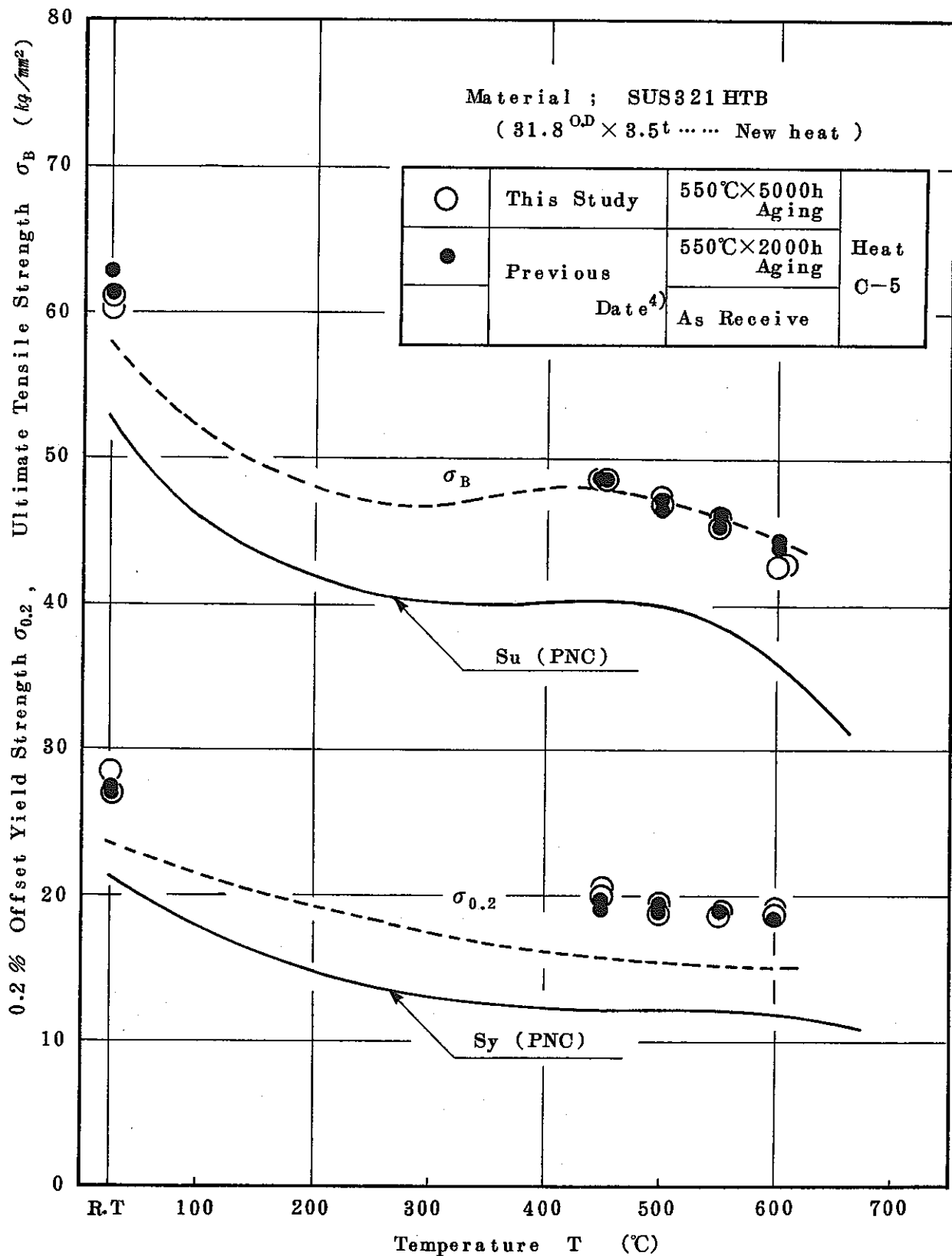


図 5.4 SUS321鋼伝熱管時効材の0.2%耐力と引張強さ

Fig. 5.4 Variation of Yield and Tensile Strength with Temperature for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube

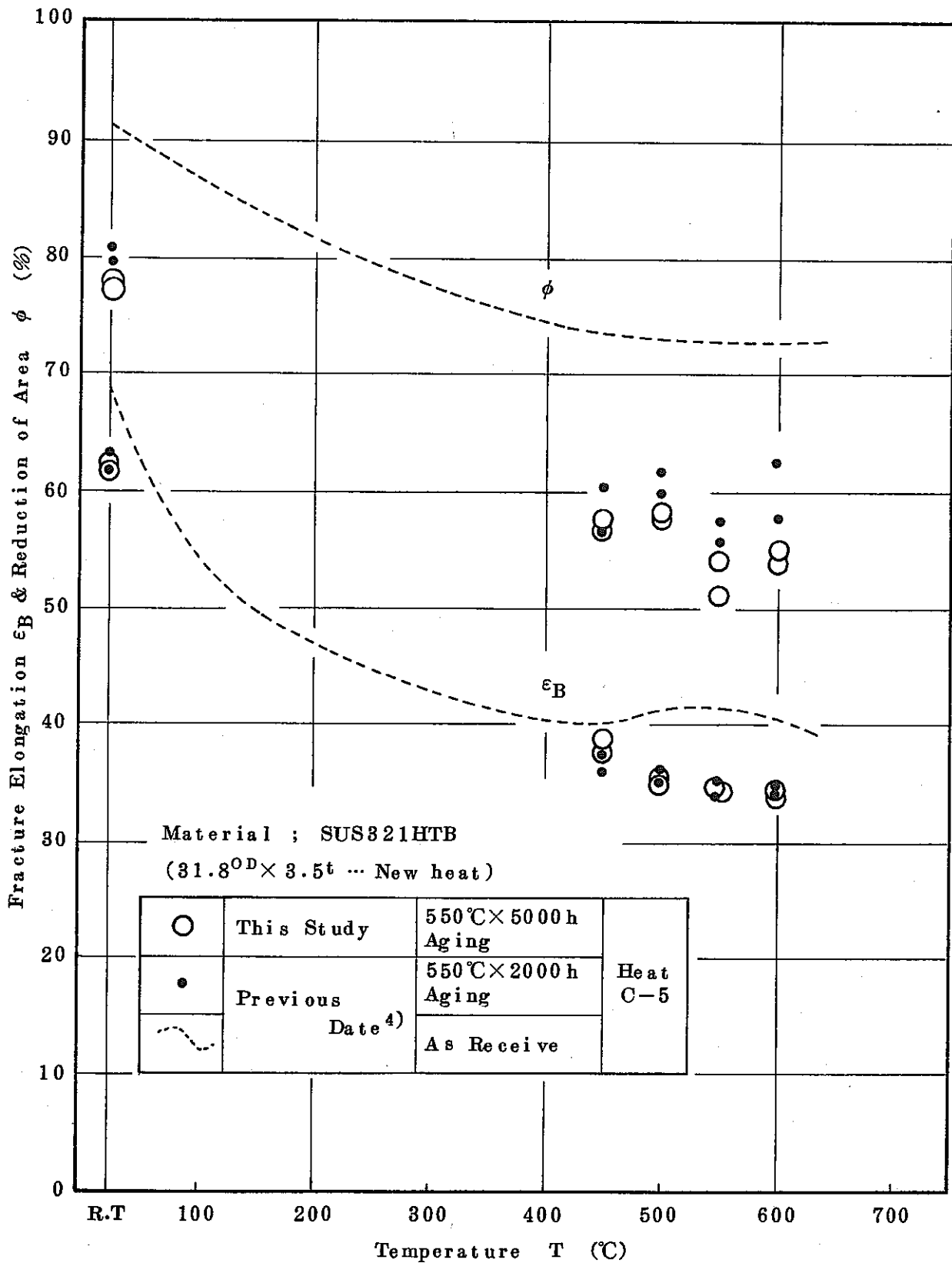


図 5.5 SUS321 鋼伝熱管時効材の破断伸びと絞り

Fig.5.5 Variation of Elongation and Reduction of Area with Temperature for Aging Material of SUS321 Stainless Steel

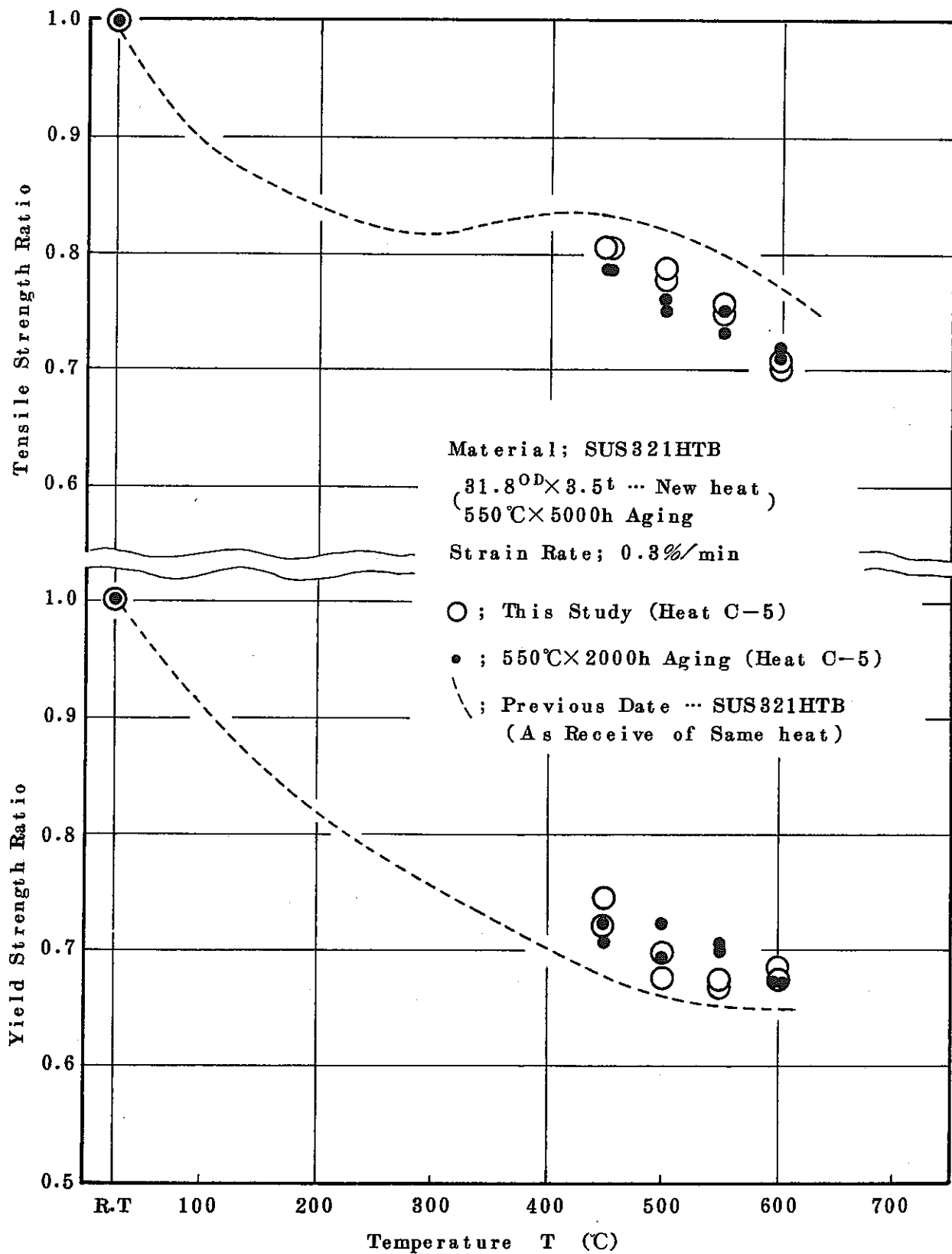


図 5.6 SUS321鋼伝熱管時効材の耐力及び引張強さの温度依存性
 Fig.5.6 Variation of Yield and Tensile Strength Ratio with Temperature for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube

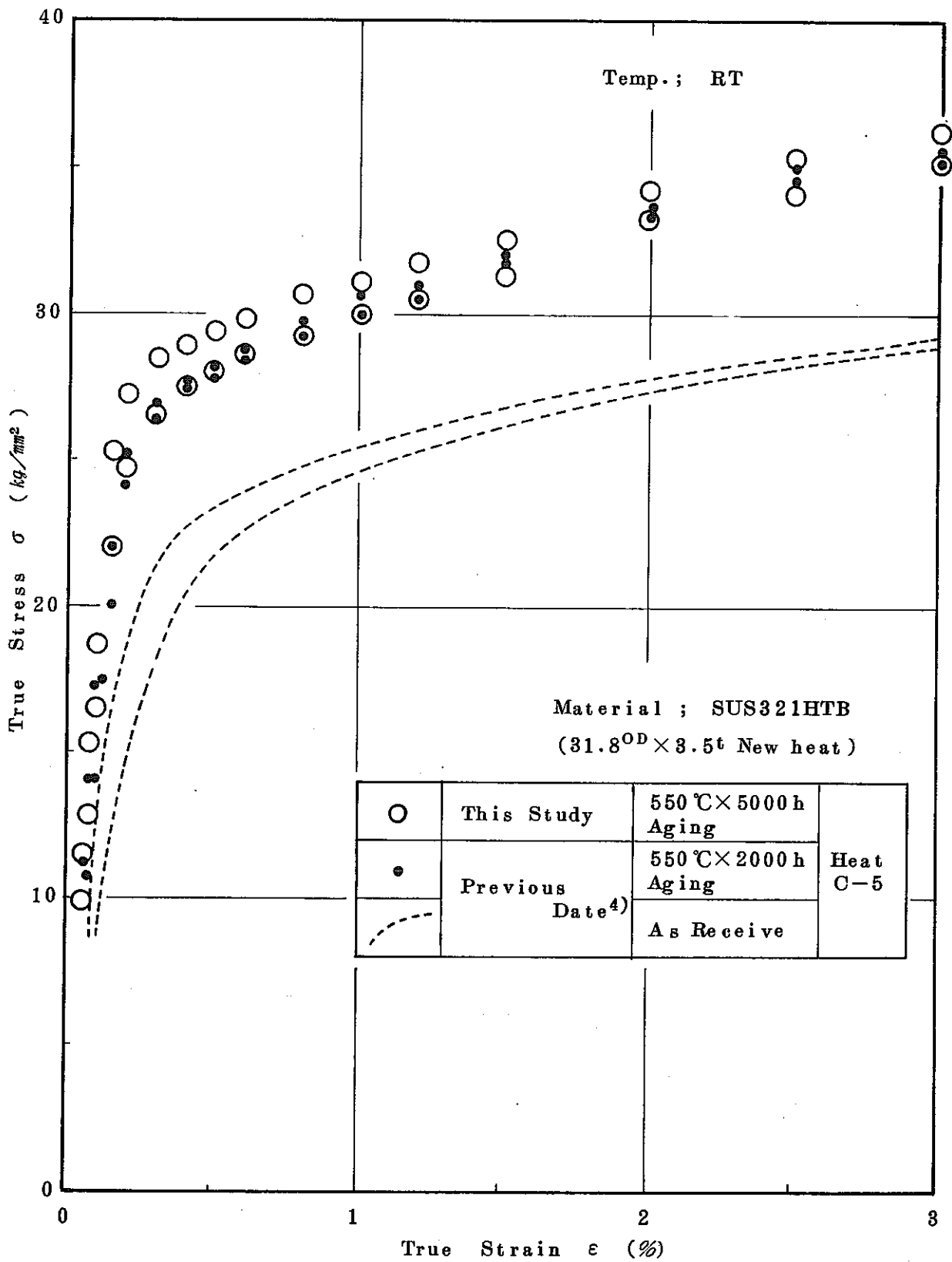


図 5.7(a) SUS321 鋼伝熱管時効材の真応力-真ひずみ線図

Fig. 5.7(a) True Stress and True Strain Relation for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube

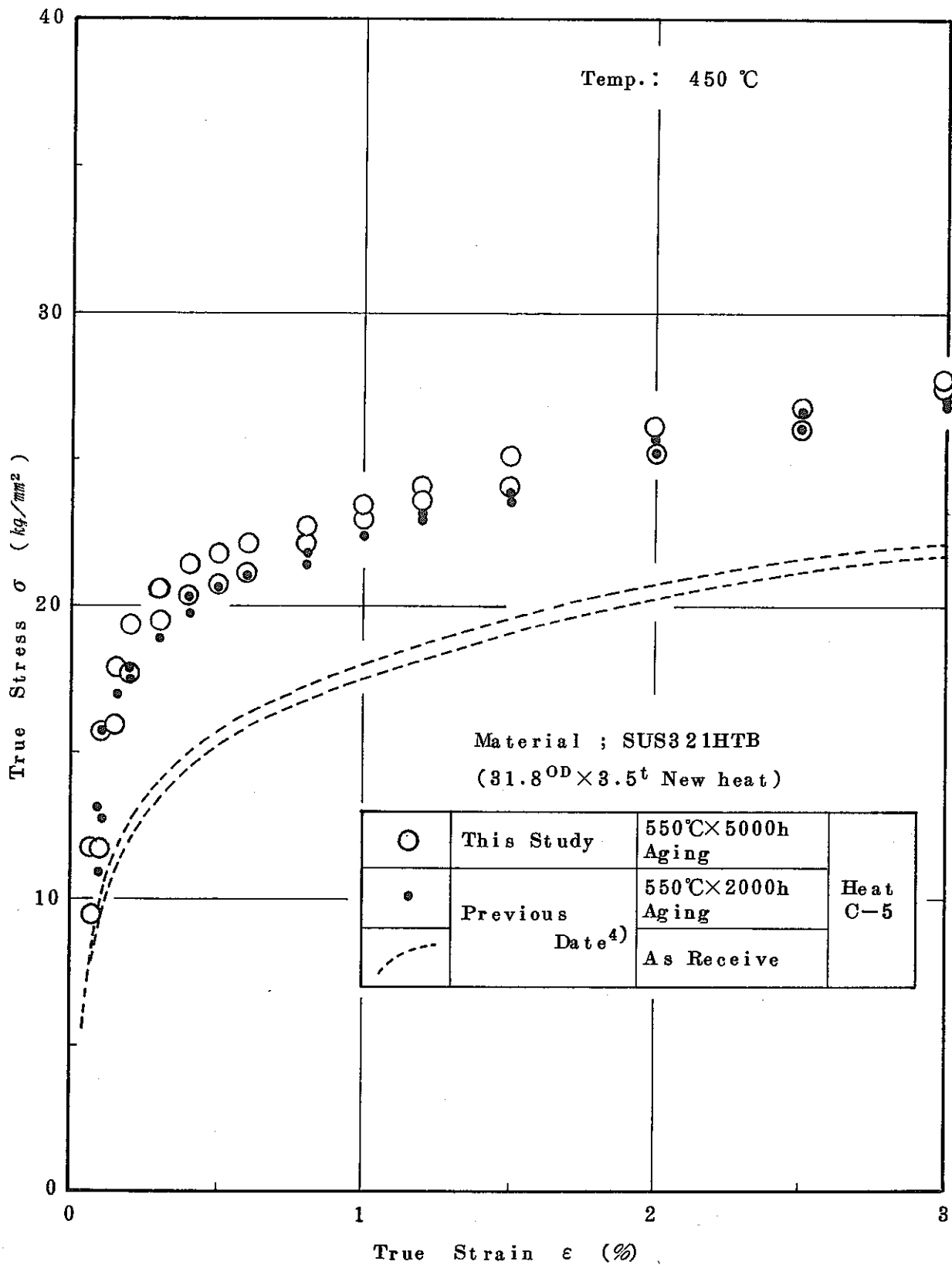


図 5.7(b) SUS321鋼伝熱管時効材の真応力-真ひずみ線図(続き)

Fig.5.7(b) True Stress and True Strain Relation for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube (continue)

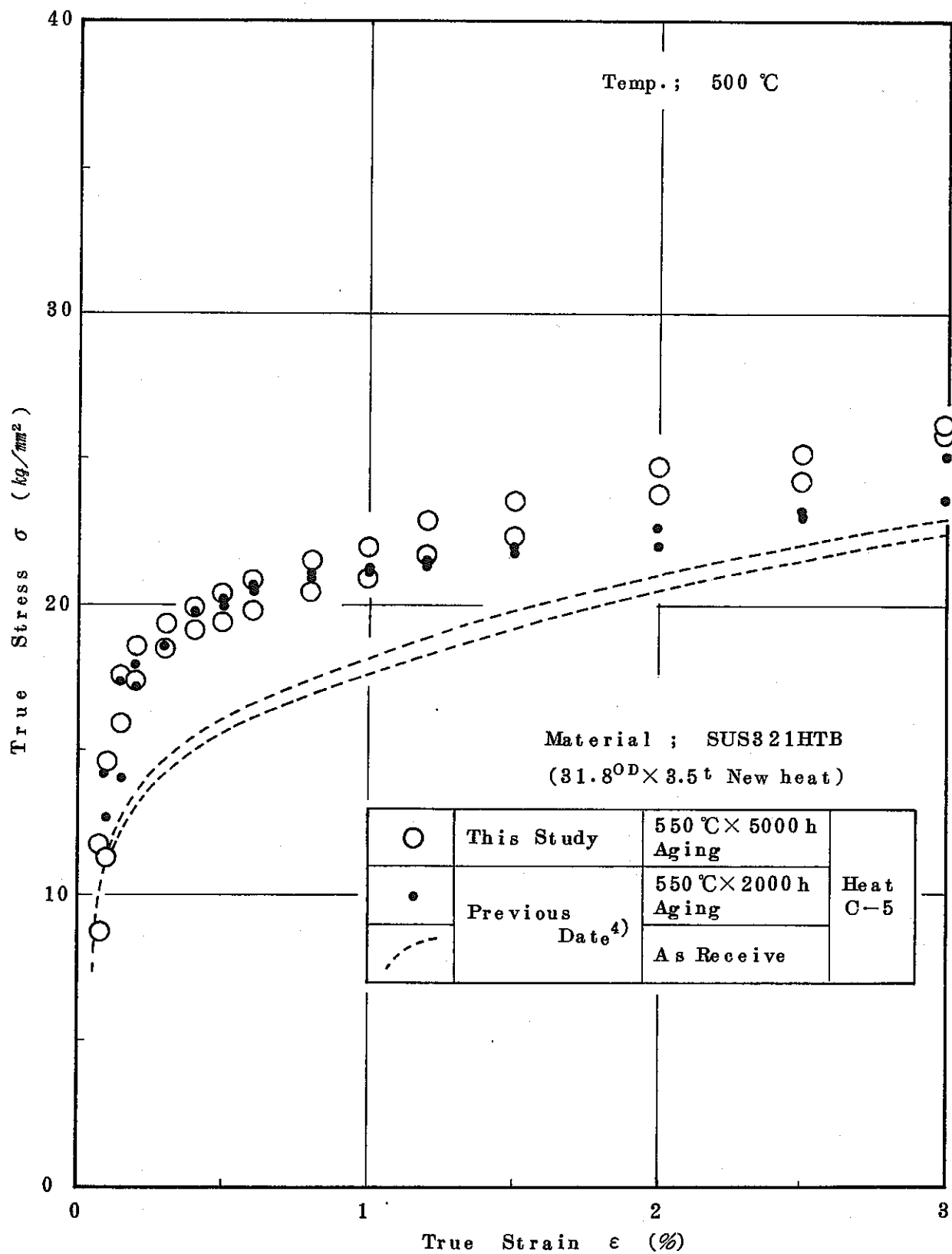


図 5.7(c) SUS321 鋼伝熱管時効材の真応力-真ひずみ線図 (続き)

Fig. 5.7(c) True Stress and True Strain Relation for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube (continue)

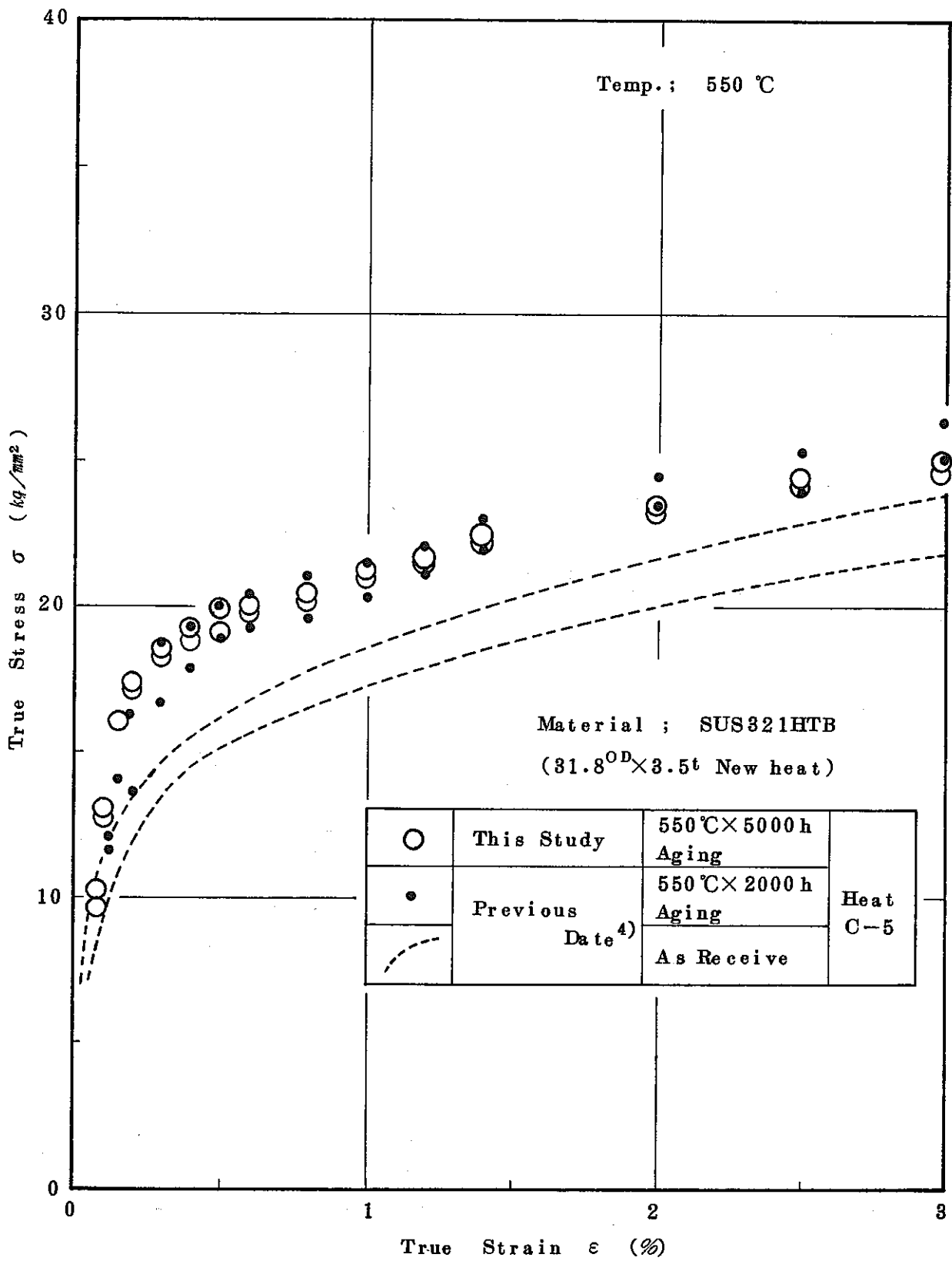


図 5.7(d) SUS321 伝熱管時効材の真応力-真ひずみ線図 (続き)

Fig.5.7(d) True Stress and True Strain Relation for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube (continue)

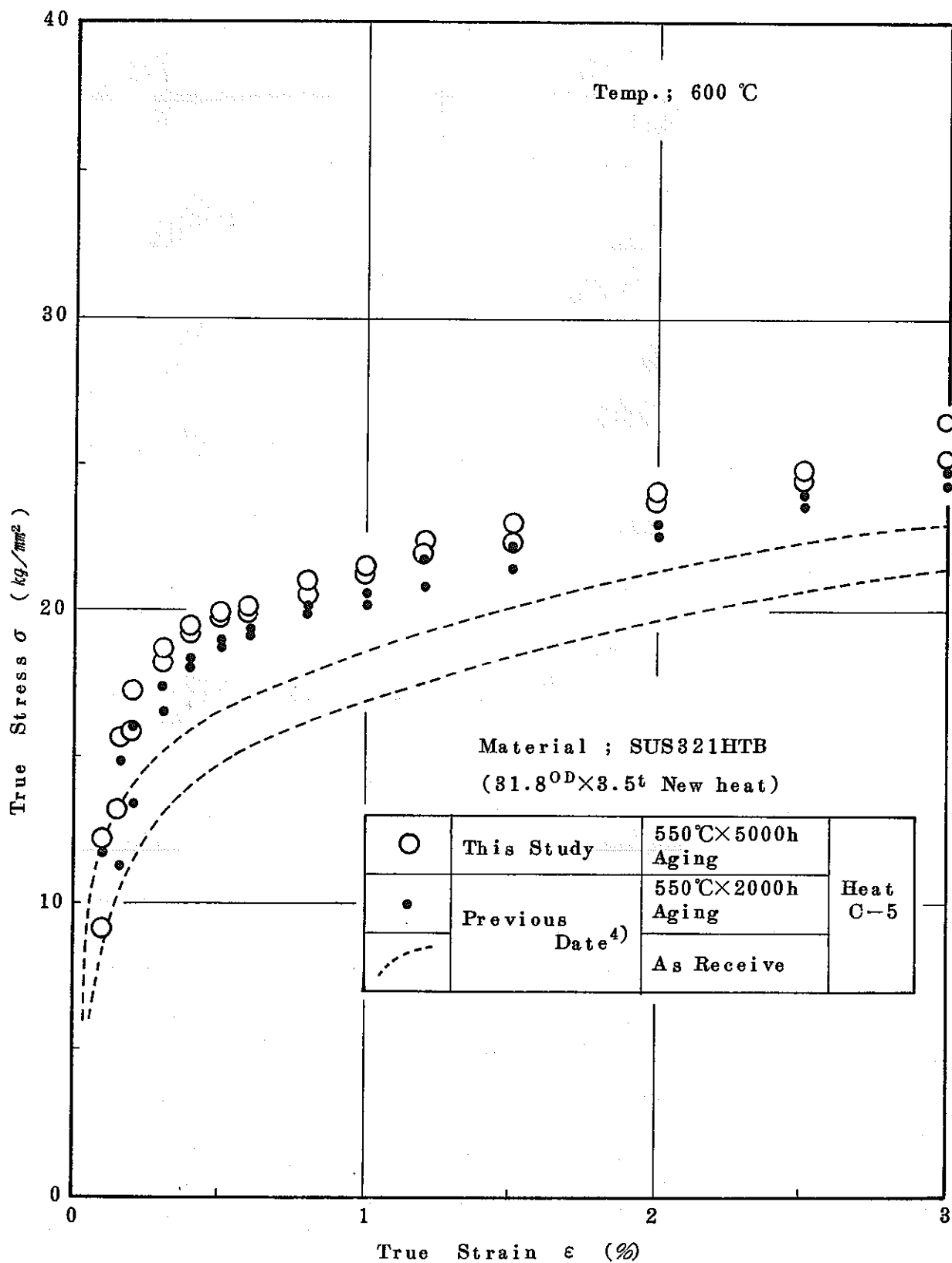


図 5.7(e) SUS321 鋼伝熱管時効材の真応力-真ひずみ線図 (続き)

Fig.5.7(e) True Stress and True Strain Relation for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube (continue)


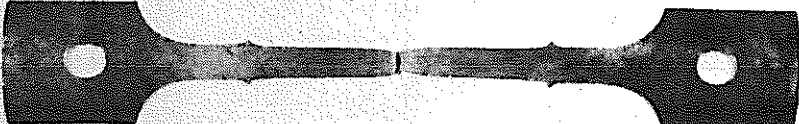
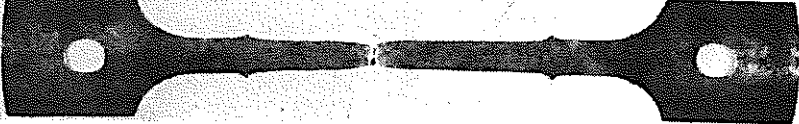
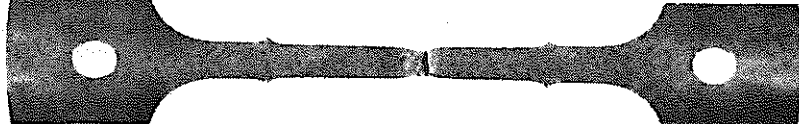



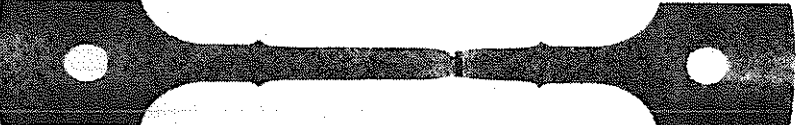



試験温度 (°C)	試験片 No.	
R.T	EB-701	
	EB-702	
450	EB-703	
	EB-704	
500	EB-705	
	EB-706	
550	EB-707	
	EB-708	
600	EB-709	
	EB-710	

写真 5.3 SUS321 伝熱管時効材の引張試験片の外観
 Photo. 5.3 Appearance after Tensile Tests for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube

表 5.3 SUS321 鋼伝熱管時効材の低サイクル疲労試験結果

Table 5.3 Result of Low Cycle Fatigue Tests for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube

供試材	SUS321 鋼 伝熱管の溶接継手	熱処理	1,160℃×3 min W.Q
素材製造者	住友金属工業株式会社	時効処理	550℃×5,000 h
素材寸法	31.8 ^{0.D} ×3.5 ^t -12,000 ^ℓ	試験片形状	φ28.2×2 ^t 管状型

		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti
要求値	レードル	0.04 ~0.10	≤0.75	≤2.00	≤0.030	≤0.030	9.00 ~13.00	17.00 ~19.00	4×C% ~0.6
分析値	レードル	0.08	0.57	1.50	0.025	0.004	11.60	17.55	0.43
	チェック	0.08	0.56	1.48	0.023	0.004	11.45	17.60	0.41

(Heat No. A991703 PNC Material No. C-5)

試験温度 (℃)	試験片 No.	ひずみ 速度 (%/s)	ひずみ範囲 (%)		破断寿命 N _f (cycle)	定常応力* (kg/mm ²)	
			Δε _t	Δε _p *		σ _{max}	σ _{min}
550	HB-741	0.1	0.50	0.180	7,430	22.9	23.1
	HB-742		0.80	0.385	1,902	29.6	30.4
	HB-743		1.00	0.526	1,188	33.0	33.9
	HB-744		1.50	0.958	352	37.4	38.7
	HB-745		2.00	1.387	131	39.1	40.2

*: 1/2 N_f における値

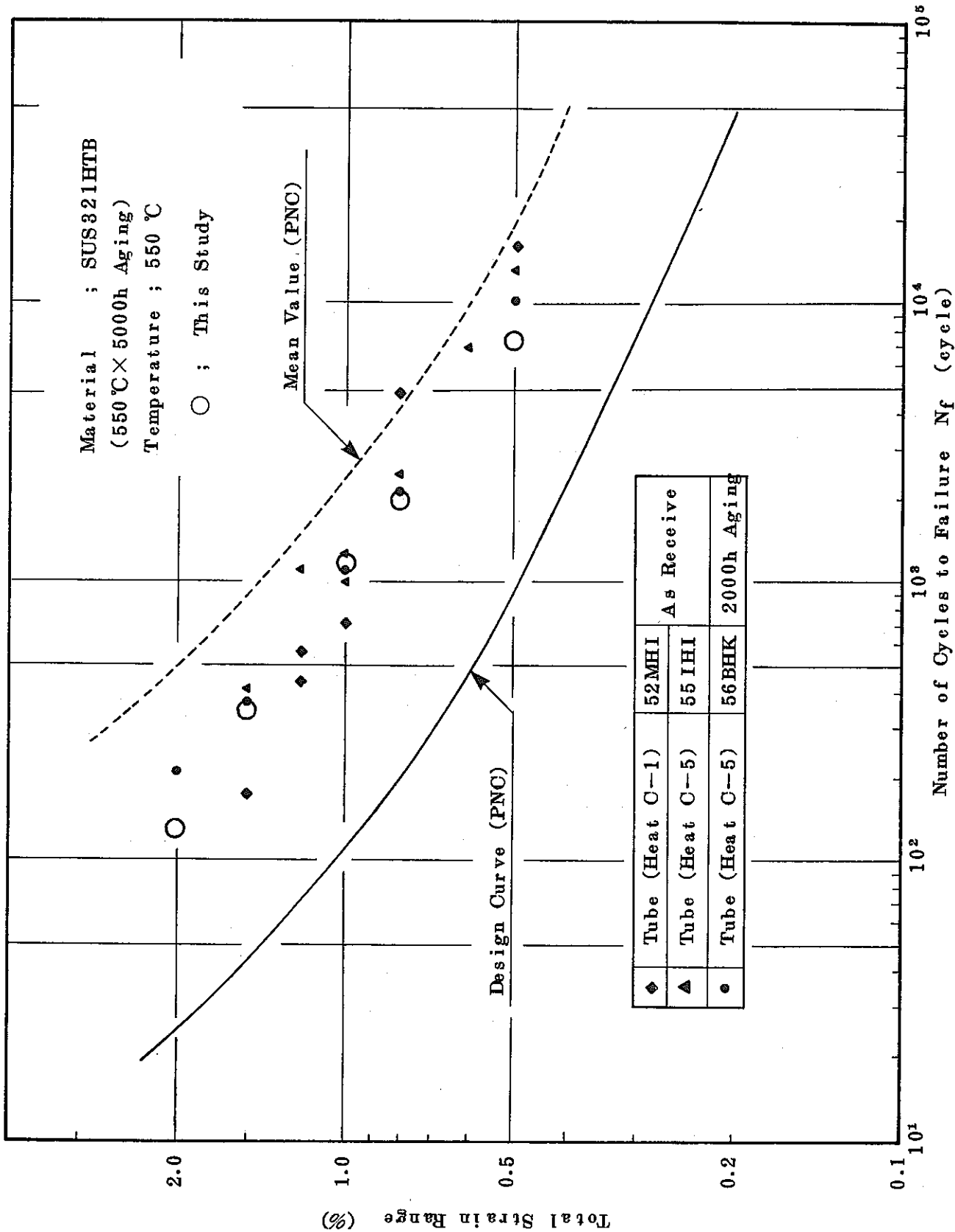


図 5.8 SUS321 鋼伝熱管時効材の低サイクル疲労強度
Fig.5.8 Estimation of Low-Cycle Fatigue Strength for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube

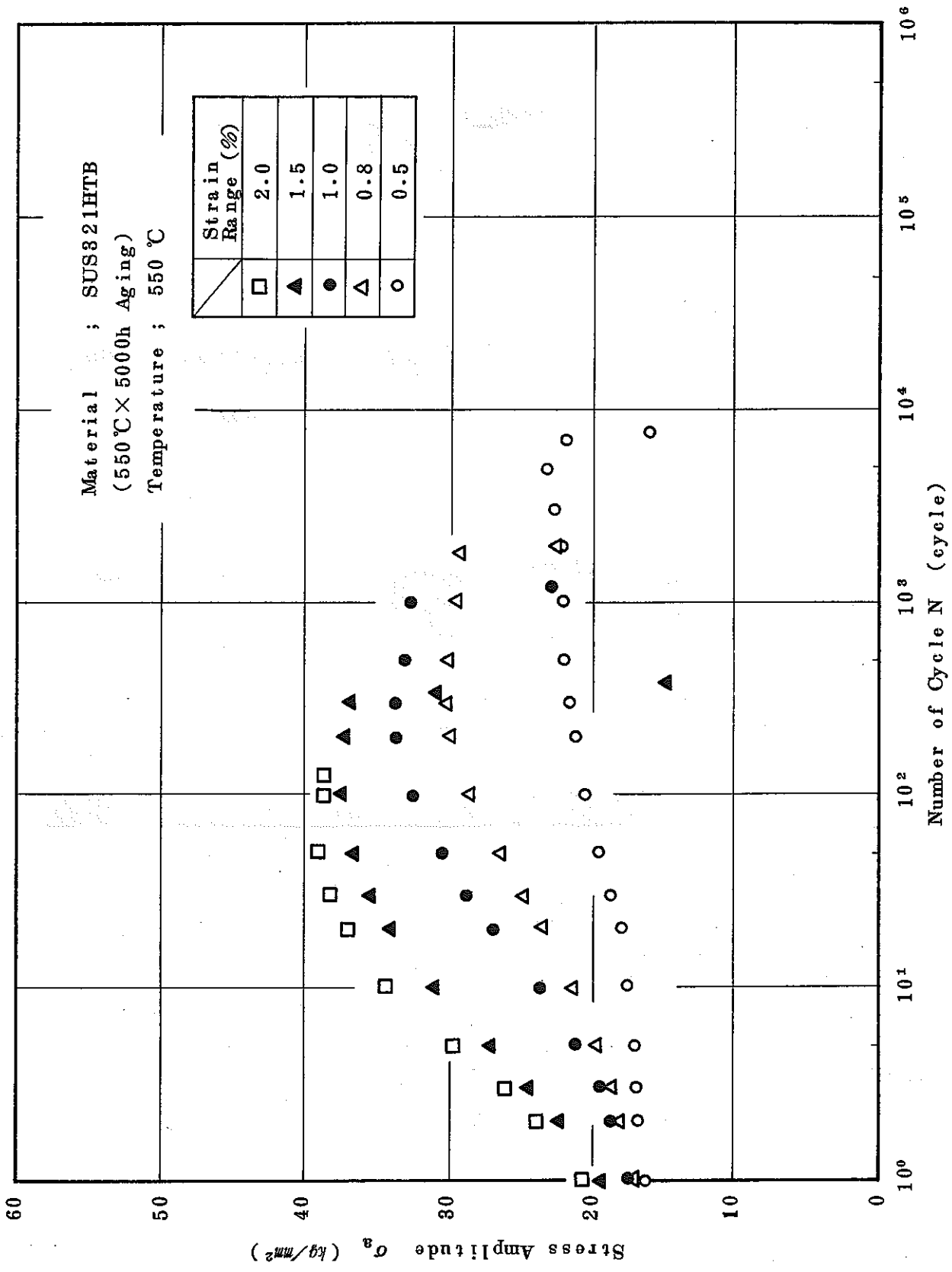


図 5.9 SUS321 鋼伝熱管時効材の疲労試験における応力の変化
Fig.5.9 Cyclic Behavior of Stress Range for Aged Material of SUS321 Stainless Steel Tube


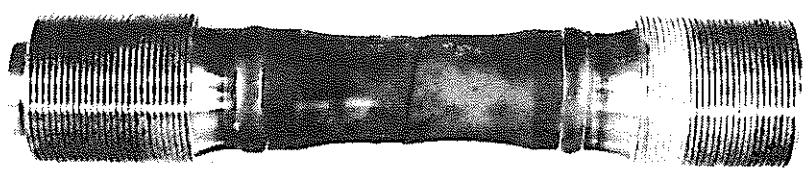
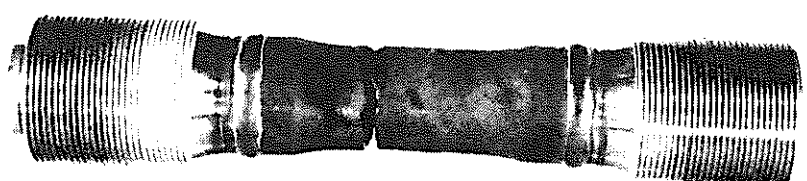
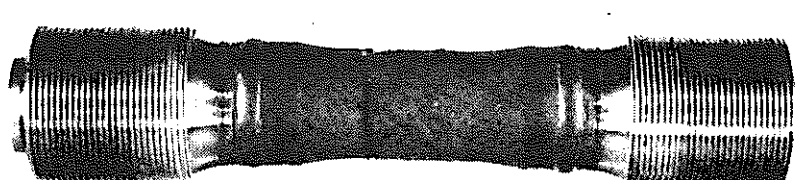
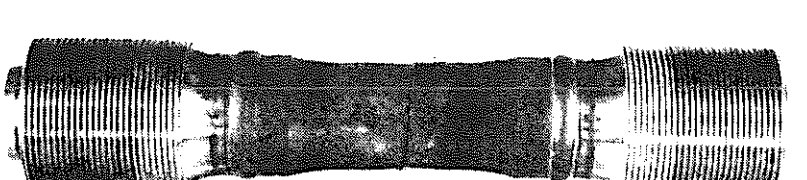
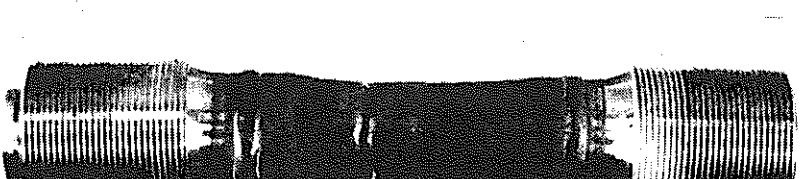
試験温度 (°C)	試験片 No.	全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_t$ (%)	破断寿命 N_f (cycle)	
550	HB-741	0.50	7,340	
	HB-742	0.80	1,902	
	HB-743	1.00	1,188	
	HB-744	1.50	352	
	HB-745	2.00	131	

写真 5.4 SUS321 伝熱管時効材の低サイクル疲労試験片の外観

Photo. 5.4 Appearance after Low-Cycle Fatigue Tests for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube

表 5.4 SUS321 鋼伝熱管時効材の衝撃試験結果

Table 5.4 Results of Impact Tests for Aging Material of SUS321 Stainless Steel Tube

供 試 材	受入れのまま	550℃×2,000h 時 効 材	550℃×5,000h 時 効 材
結 果	19.8	15.6	14.3
	19.7	15.6	14.3
	18.8	15.4	14.0
平 均 値	19.4 (kg/mm ²)	15.5 (kg/mm ²)	14.2 (kg/mm ²)

供 試 材： SUS321 鋼伝熱管 (Heat C-5)

受入れ材

時 効 材 (550℃×2,000h)

(550℃×5,000h)

試験片形状： 3.5t×10W (2mm Vノッチシャルピー)

5.3 SUS321 鋼鍛造材の高温特性

5.3.1 リラクセーション試験結果

図 4.4 (e)に示した形状の試験片を用いて、550 及び 550℃、負荷ひずみ 0.2 ~ 0.3% の条件で 2,000 時間目標のリラクセーション試験を実施した。

表 5.5 は、各条件について、経過時間ごとのリラクセーション挙動をまとめて示した。ここで、550℃、0.3% 条件の試験は現在試験継続中である。また、図 5.10 (a)及び 5.11 (a)には、試験開始後短時間の、(b)には全試験時間を通しての応力の変化挙動を図示した。また、それぞれの図には、前報による結果も併記しているが、これらとほぼ同傾向の緩和特性を示し、低ひずみ条件での特異性はない。

また、図 5.12 及び図 5.13 では、今回の試験結果とクリープ構成方程式から算出したリラクセーション計算値との対応を示している。ここで、計算値は、SUS321 及び SUS304 に対するクリープ式両者を用い、また、時間係数 α_R は便宜上 3.0 による値を採用した。

こうした比較によると、実験値と計算値は必ずしも一致せず、特に長時間側の特性評価においては問題があると考えられる。

表 5.5 SUS321 鋼鍛造のリラクセーション試験結果

Table 5.5 Results of Relaxation Tests for SUS321 Stainless Steel Forging

供試材	SUS321 鋼鍛造材	熱処理	1,020~1,067°C×15.92h W.Q
素材製造者	(株) 日本製鋼所	試験片形状	φ8-GL100 平滑型
素材寸法	350 ^t ×750 ^W -1,000 ^ℓ		

		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti
要求値	レードル	0.04 ~0.10	≤2.00	≤0.04	≤0.03	≤0.03	9.00 ~13.00	17.00 ~20.00	≥5×C%
分析値	レードル	0.065	0.82	1.62	0.024	0.006	11.33	19.28	0.52
	チェック	0.065	0.81	1.61	0.023	0.007	11.26	19.44	0.53

(Heat No 80L95-1-3 PNC Material No C-6)

試験温度 (°C)		500	550	
試験片 No.		GB-731	GB-732	GB-733
負荷ひずみ (%)		0.2	0.2	0.3
実試験時間 (h)		2,000	2,000	2,222
規定時間での 残留応力 (kg/mm ²)	0	17.3	16.1	16.8
	0.01(0.6min)	17.2	16.0	16.7
	0.02(1.2 ")	17.2	15.8	16.7
	0.05(3.0 ")	17.0	15.7	16.5
	0.10(6.0 ")	16.9	15.6	16.4
	0.20(12.0 ")	16.7	15.6	16.2
	0.50(30.0 ")	16.4	15.4	16.2
	1.0	16.1	15.2	16.1
	2.0	15.7	14.9	15.8
	5.0	15.2	14.6	15.4
	10.0	14.7	14.3	15.1
	20.0	14.2	14.0	14.8
	50.0	14.1	13.3	14.5
	100.0	13.9	13.1	14.2
	200.0	13.8	12.9	13.9
	500.0	13.7	12.7	13.6
	1000.0	13.6	12.6	13.4
	1500.0	13.5	12.6	13.3
2000.0	13.5	12.5	13.2	
終了時		13.5	12.5	13.1

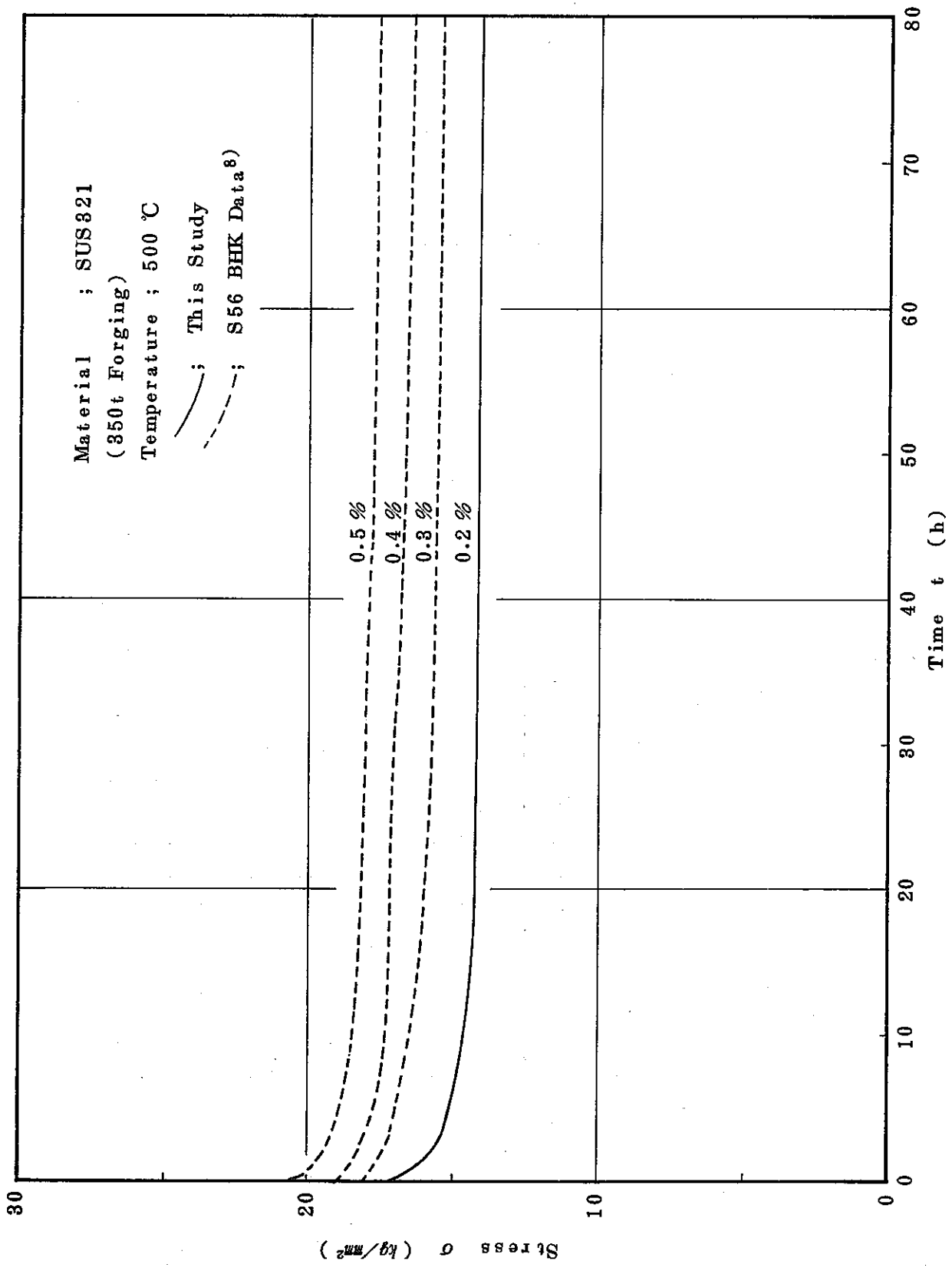


図 5.10(a) SUS321 鋼鍛造材の 500 °C におけるリラクゼーション特性
Fig.5.10(a) Stress Relaxation Curves at 500 °C for SUS321 Stainless Steel Forging (Short Time)

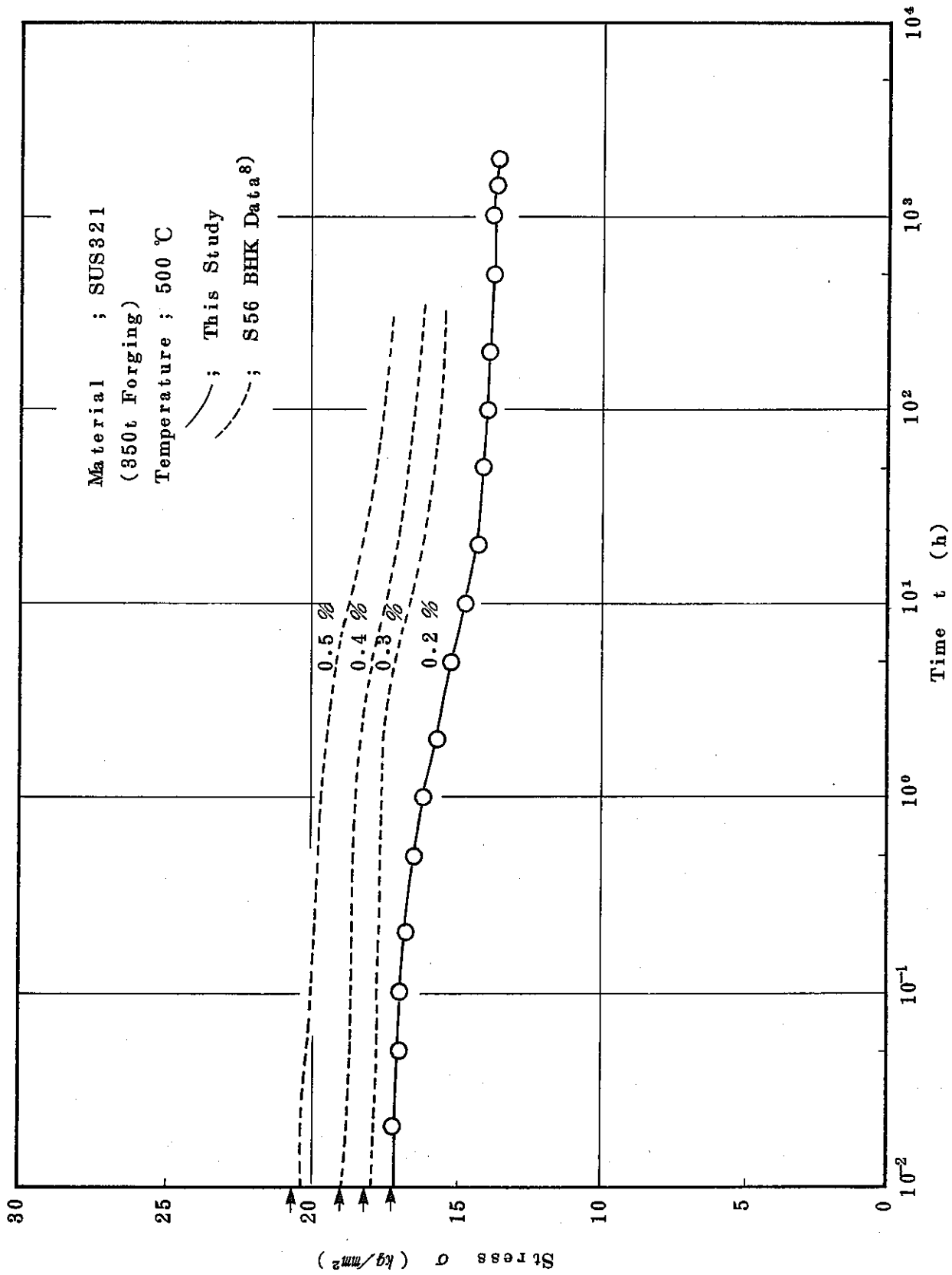


図 5.10 (b) SUS321 鋼鍛造材の 500 °C におけるリラクゼーション特性
Fig.5.10 (b) Stress Relaxation Curve at 500 °C for SUS321 Stainless Steel Forging (Long Time)

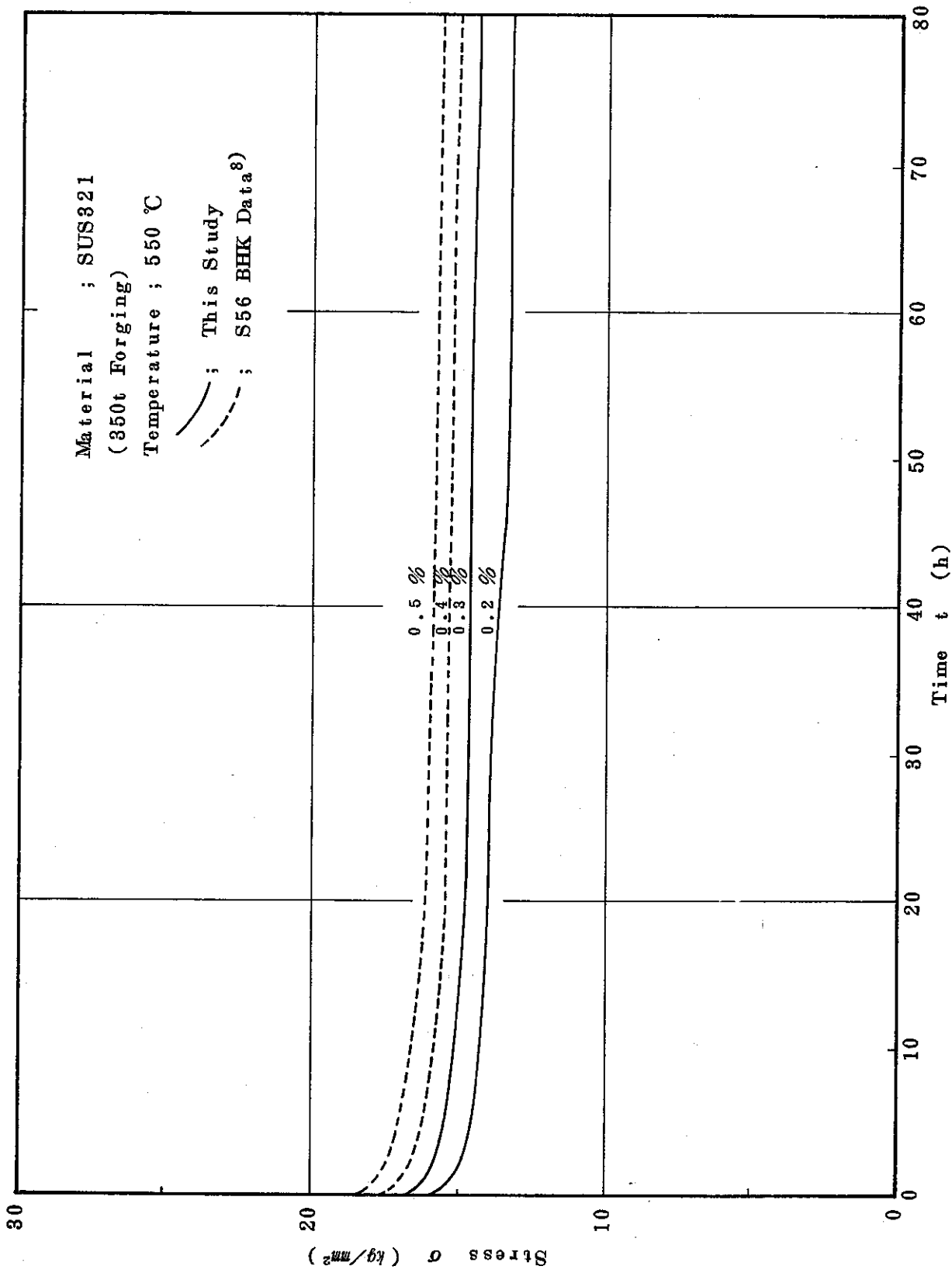


図 5.11(a) SUS321 鋼鍛造材の 550 °C におけるリラクゼーション特性

Fig-5.11(a) Stress Relaxation Curves at 550 °C for SUS321 Stainless Steel Forging (short Time)

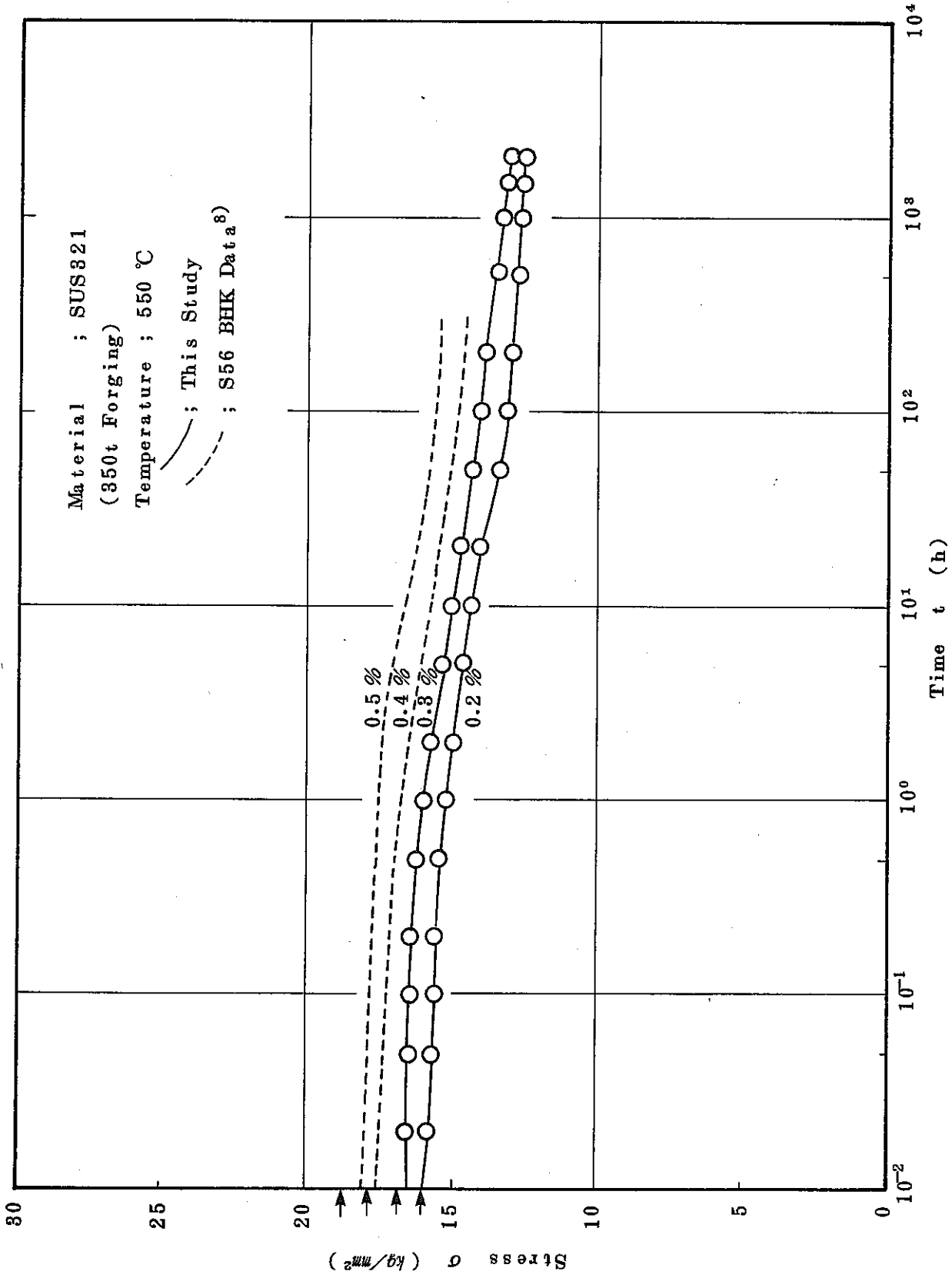


図 5.11(b) SUS321 鋼鍛造材の 550 °C におけるリラクゼーション特性

Fig. 5.11(b) Stress Relaxation Curve at 550 °C for SUS321 Stainless Steel Forging (Long Time)

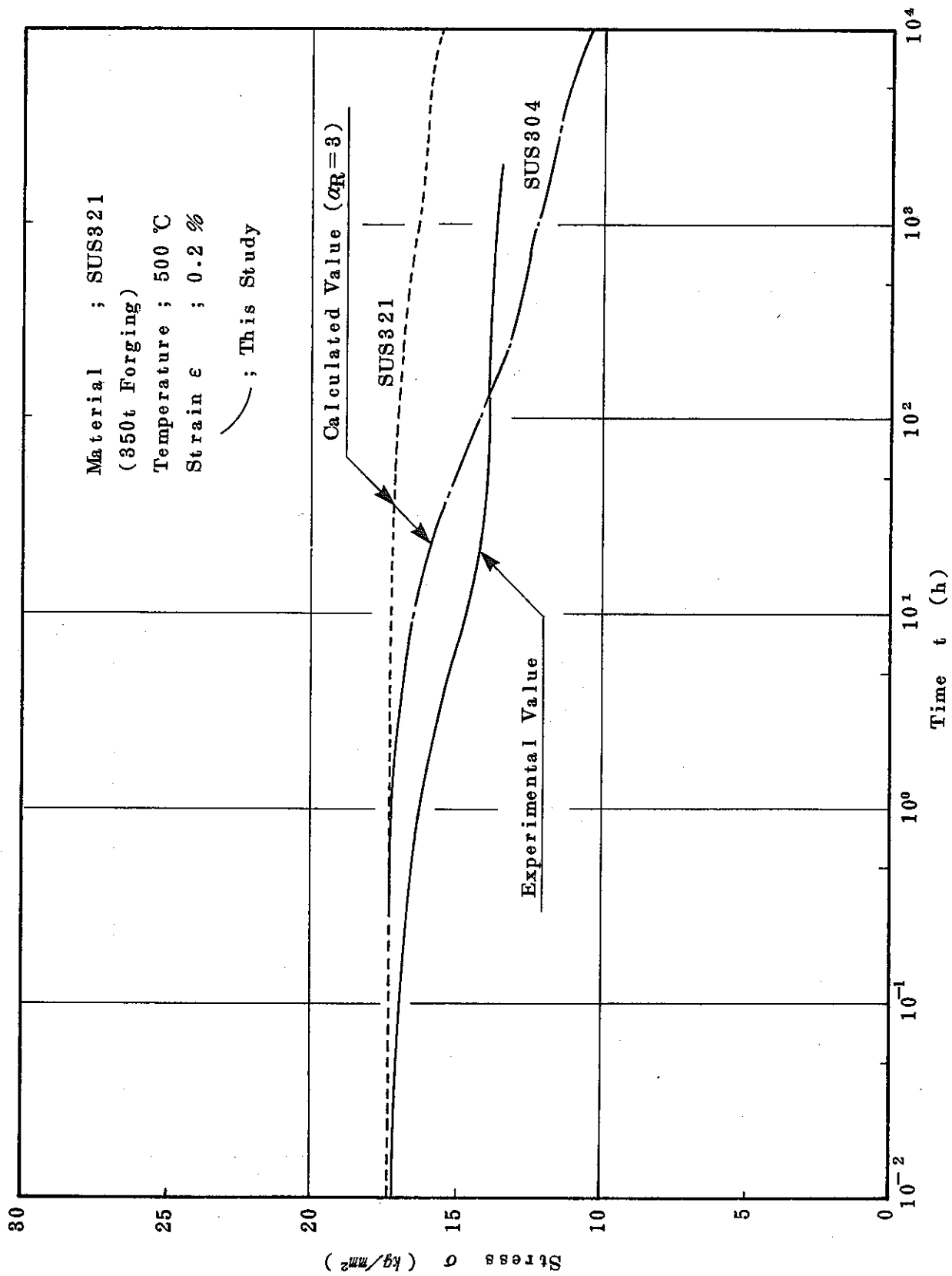


図 5.12 SUS321 鋼鍛造材の 500 °C におけるリラクゼーション特性

Fig.5.12 Stress Relaxation Curves at 500 °C for SUS321 Stainless Steel Forging

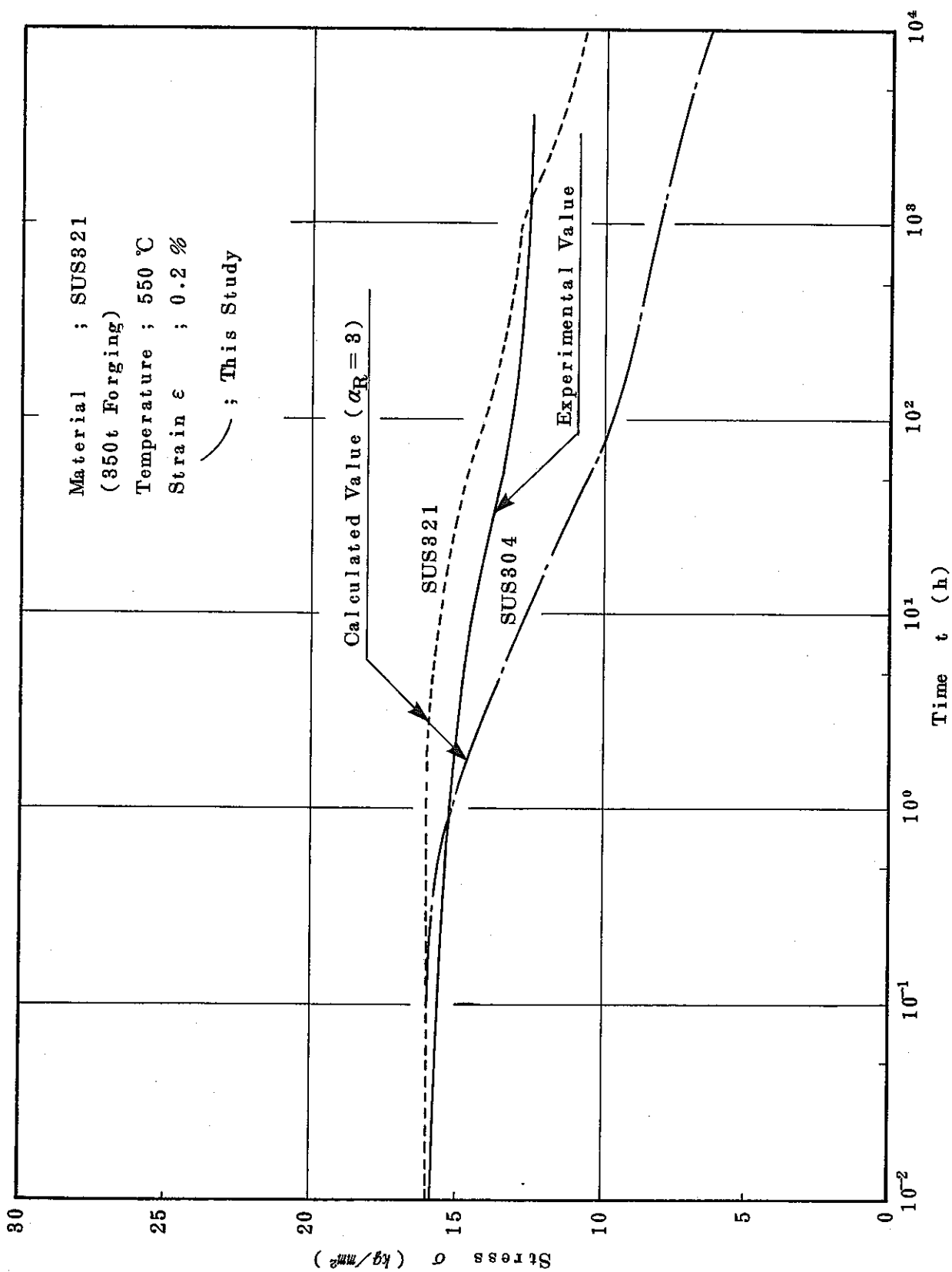


図 5.13(a) SUS321 鋼鍛造材の 550 °C におけるリラクセーション特性
Fig. 5.13(a) Stress Relaxation Curves at 550 °C for SUS321 Stainless Steel Forging

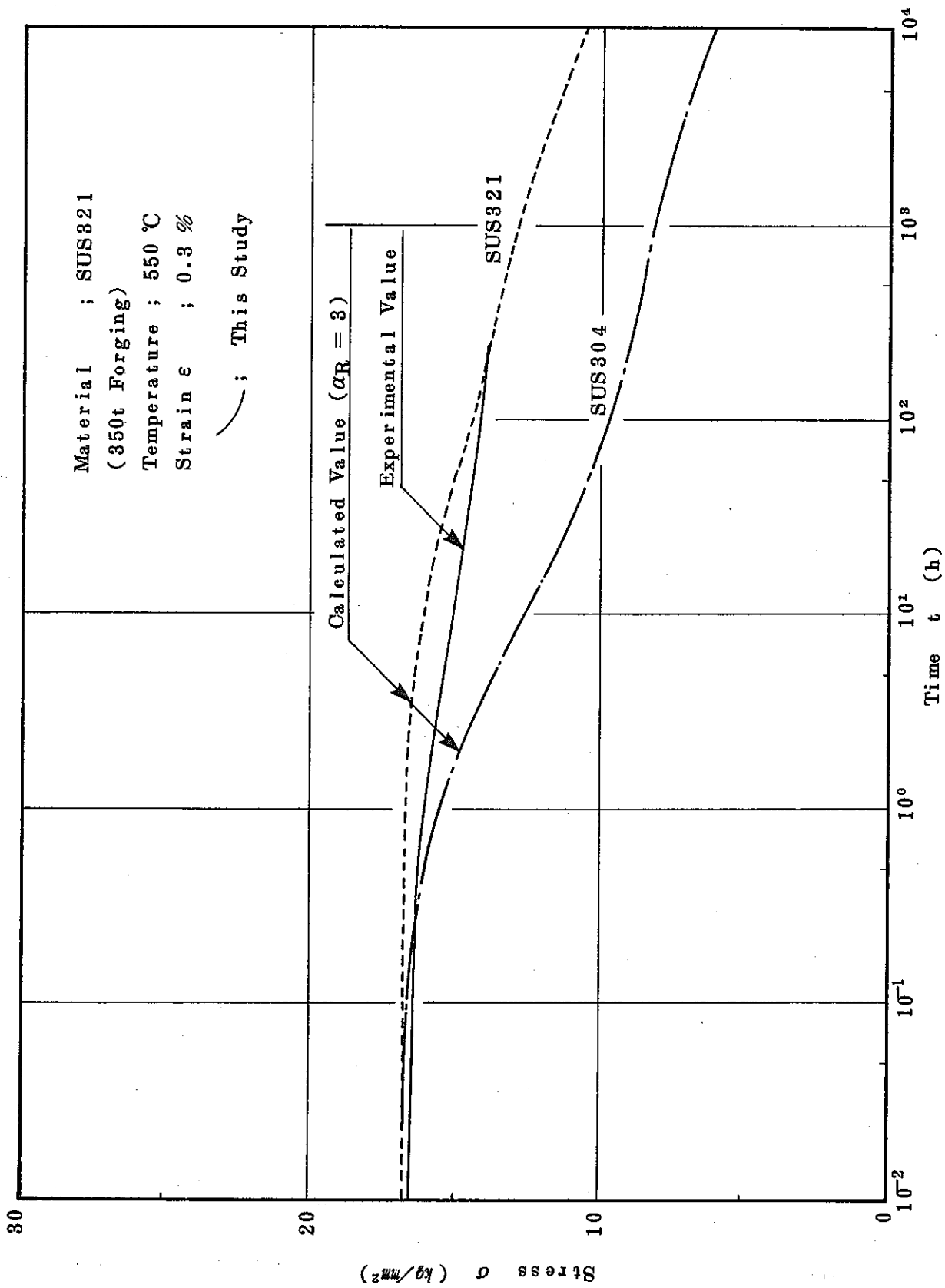


図 5.13 (b) SUS321 鋼鍛造材の 550 °C におけるリラクセーション特性

Fig. 5.13 (b) Stress Relaxation Curves at 550 °C for SUS321 Stainless Steel Forging

5.4 SUS321 鋼鍛造材の緩和クリープ損傷特性

5.4.1 緩和クリープ損傷評価試験結果

検討の方法としては、ひずみ保持を有する疲労試験とクリープ破断試験の組合せによつて各損傷量を求め、これと解析手法によつて求まる損傷量との対応で評価することにした。

評価試験に先立ち、後述する疲労損傷量を求めるため、ひずみ保持なしのいわゆる三角波による疲労試験を実施した。

表 5.6、図 5.14 及び図 5.15、写真 5.5 等はその結果をまとめたものであるが、いずれの条件においても在来のデータと同等の特性を有することを確認した。

次に、実際の評価試験の手順並びに試験条件を表 5.7 に示すが、その手順としては、まず、それぞれの供試材を十分加工硬化させるため、ひずみ保持なしの条件で、疲労試験を行つた。この場合の繰返しサイクル数としては表 5.6 に示した破断サイクル数の $1/10$ サイクル数を与えた。

その後、1～20 時間のひずみ保持を有する疲労試験(30～100 サイクル)によつて疲労及びクリープ損傷を与え、残余寿命をクリープ破断試験で消費する方法を採用した。

こうした試験方法によるそれぞれの疲労損傷、クリープ損傷結果について、表 5.7 にまとめて示した。

一方、設計方針における解析手法によつて緩和クリープ損傷量を求めて表 5.8 に示した。なお、同表には、前述した実験において、ひずみ保持中の応力緩和データ(実験データ)から求めたクリープ損傷量(表 5.7 における D_0 値)も併記したが、 D^{**} 解析手法による値は実験値よりかなり安全側の評価を与えることが明らかで、その比は約 4～20 倍となる。

表 5.6 SUS321 鋼鍛造の低サイクル疲労試験結果
 Table 5.6 Result of Low Cycle Fatigue Tests for SUS321 Stainless Steel Forging

供試材	SUS321 鋼鍛造材	熱処理	1,020~1,067°C×15.92h W.Q
素材製造者	(株) 日本製鋼所	試験片形状	φ10-GL20
素材寸法	350 ^t ×750 ^W -1,000 ^ℓ		

		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti
要求値	レードル	0.04 ~0.10	≤2.00	≤0.04	≤0.03	≤0.03	9.00 ~13.00	17.00 ~20.00	≥5×C%
分析値	レードル	0.065	0.82	1.62	0.024	0.006	11.33	19.28	0.52
	チェック	0.065	0.81	1.61	0.023	0.007	11.26	19.44	0.53

(Heat No 80L95-1-3 PNC Material No C-6)

試験温度 (°C)	試験片 No	ひずみ速度 (%/s)	ひずみ範囲 (%)		破断寿命 N _f (cycle)	定常応力* (kg/mm ²)	
			Δε _t	Δε _p *		σ _{max}	σ _{min}
550	HB-751	0.1	0.70	0.359	6,520	22.0	22.2
	HB-755		1.00	0.600	2,610	26.9	27.3
	HB-760		1.50	1.038	706	31.4	32.4

*: 1/2 N_f における値

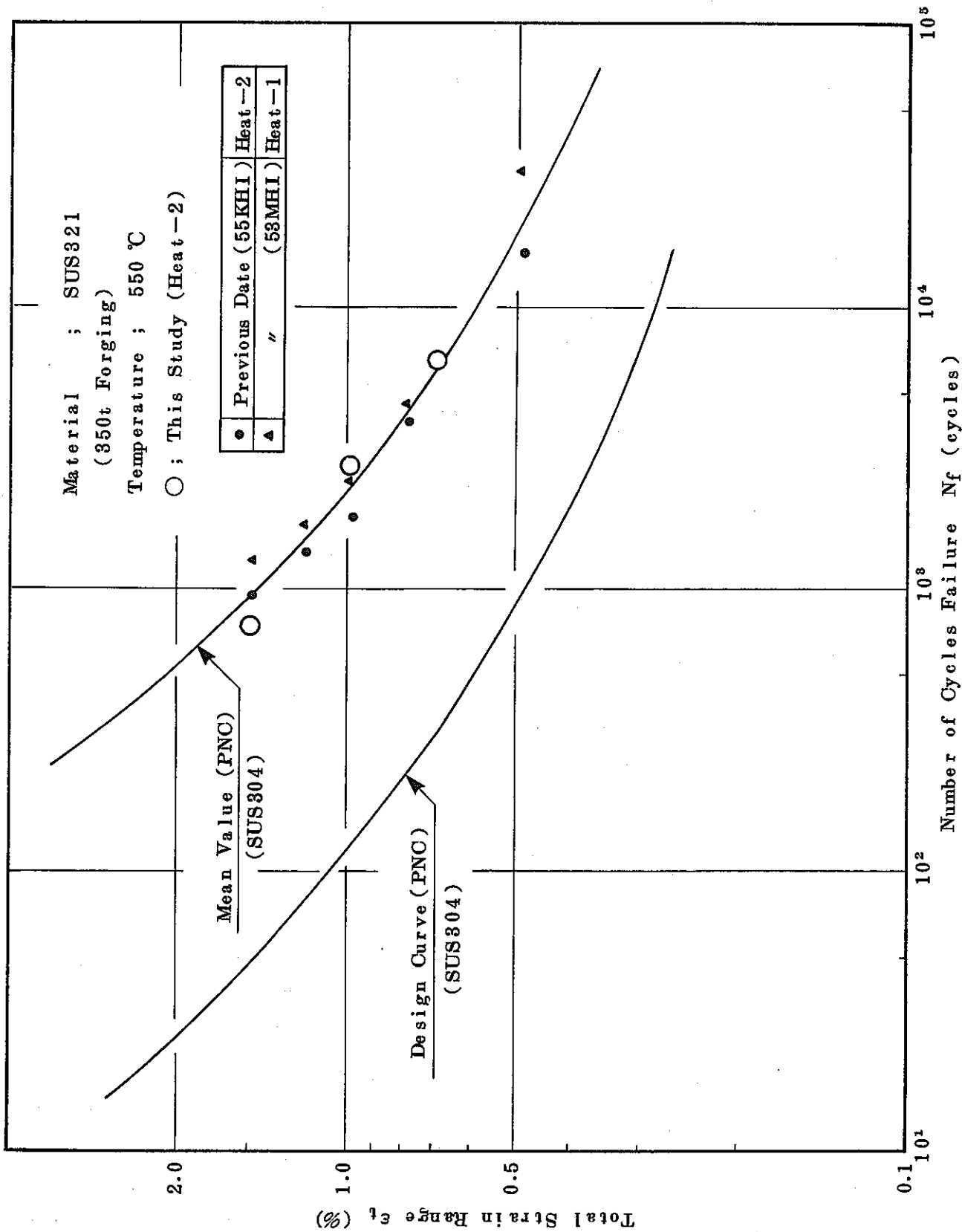


図 5.14 SUS321 鋼鍛造材の低サイクル疲労強度
 Fig.5.14 Estimation of Low-Cycle Fatigue Strength of SUS321 Stainless Steel Forging

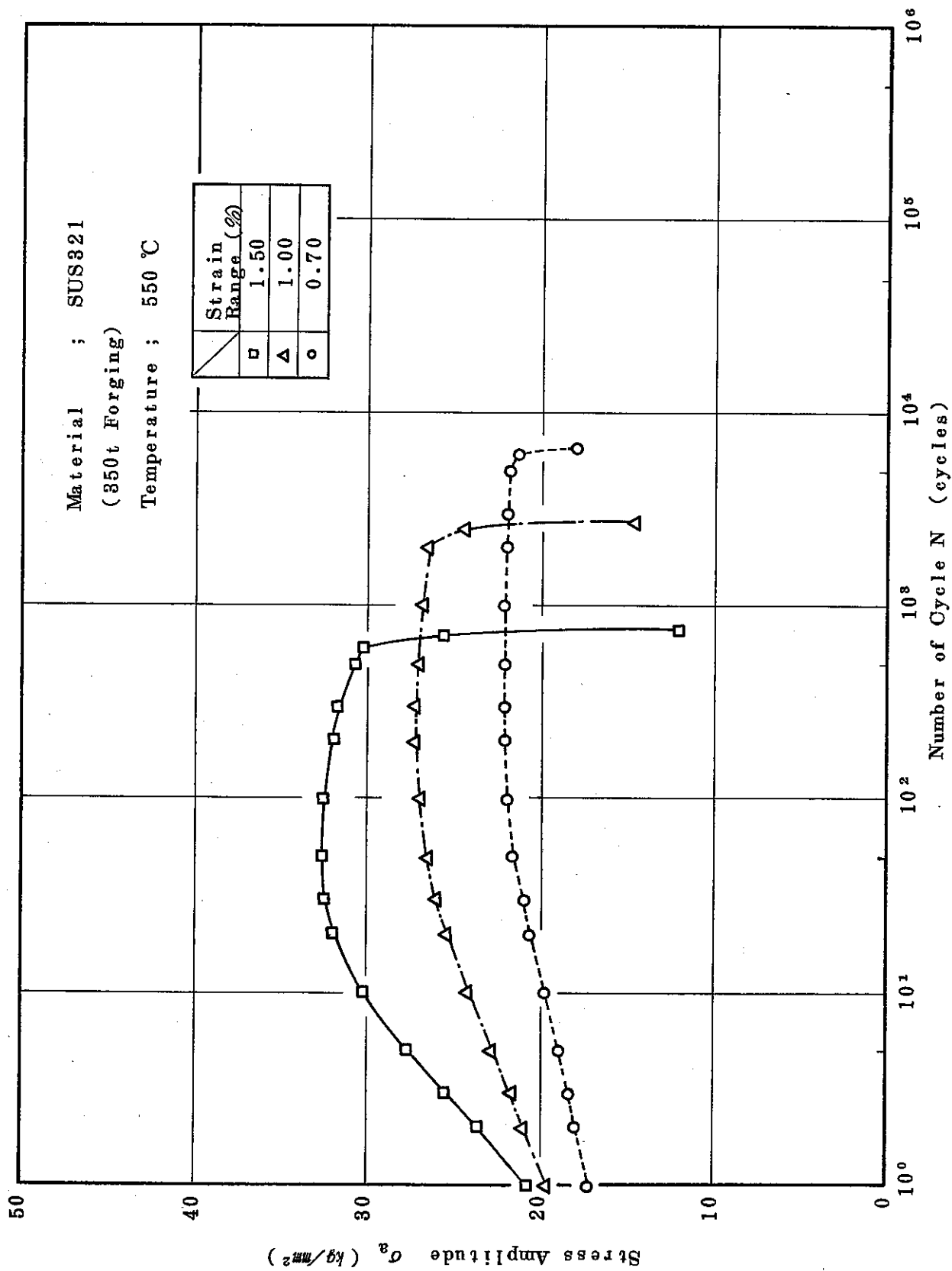


図 5.15 SUS321 鋼鍛造材の疲労試験における応力の変化
Fig. 5.15 Cyclic Behavior of Stress Range of SUS321 Stainless Steel Forging



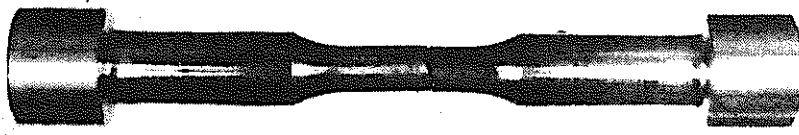
試験温度 (°C)	試験片 No.	全ひずみ 範囲 $\Delta \epsilon t$ (%)	破断 寿命 N_f (Cycle)	3 4 5 6 7 8 9 230 1 2 3 4 5 6 7 8 9 240 1 2																			
				550	HB-751	0.70	6,520																
HB-755	1.00	2,610																					
HB-760	1.50	706																					

写真 5.5 SUS321 鋼鍛造の低サイクル疲労試験片の外観

Photo. 5.5 Appearance after Low-Cycle Fatigue Tests for SUS321 Stainless Steel Forging

表 5.7 クリープ損傷係数評価のための試験条件と結果

Table 5.7 Test Conditions for Estimation of Creep Damage

温度 (°C)	$\Delta \varepsilon$ (%)	N_1	t_h (h)	N_2	D_{f1} (N_1/N_f)	D_{f2} (N_2/N_f)	D_f $(D_{f1}+D_{f2})$	D_c' $(\int \frac{t}{t_R})$	σ_0	t_{r1}	t_r	D_c'' $(\frac{t_r}{t_{r1}})$	D_c $(D_c'+D_c'')$	D (D_c+D_f)
550	0.7 $(N_f=6520)$	652	1	100	0.1	0.015	0.115	0.006	25	1650	1029.2	0.624	0.630	0.745
			5	70	"	0.011	0.111	0.015	0.038	23	3800	3205	0.843	0.858
		261	10	50	"	0.0076	0.108	0.038	22.5	4600	3206	0.697	0.735	0.843
			1	100	"	0.038	0.138	0.023	25	1650	1383.6	0.839	0.862	1.00
		70	5	70	"	0.027	0.127	0.038	23	3800	1898.4	0.499	0.537	0.664
			10	50	"	0.019	0.119	0.057	22.5	4600	2432	0.529	0.586	0.705
	1.5 $(N_f=706)$	70	20	30	"	0.011	0.111	0.054	24.5	3800	1085	0.286	0.340	0.451
			1	100	"	0.142	0.242	0.030	25	1650	448.3	0.272	0.302	0.544
		2400	5	70	"	0.099	0.199	0.075	26	1100	478.9	0.435	0.510	0.709
			10	50	"	0.071	0.171	0.082	24	2400	992.4	0.414	0.496	0.667
		675	20	30	0.1	0.042	0.142	0.072	24	2400	675	0.281	0.353	0.495

N_f : 三角波による破断寿命 (表 5.6) D_c : クリープ損傷
 N_1 : 加工硬化を与えるサイクル数 $= \frac{N_f}{10}$ σ_0 : クリープ負荷応力

t_h : ひずみ保持時間 t_{r1} : σ_0 に対するクリープ破断時間 (未損傷材)

N_2 : ひずみ保持サイクル数 t_r : 損傷材の残余クリープ破断時間

D_f : 疲労損傷

表 5.8 クリーブ緩和損傷量に関する計算値と実験値との比較

Table 5.8 Comparison between Calculated and Experimented Value for Creep Damage

温 度 (°C)		550														
ひずみ範囲 (%)		1.5					1.0					0.7				
ひずみ保持時間(h)		1	5	10	20	1	5	10	20	1	5	10	20	1	5	10
N		100	70	50	30	100	70	50	30	100	70	50	30	100	70	50
$D_{ep} = D^{**} \times N$		0.628	0.576	0.448	0.287	0.380	0.377	0.294	0.185	0.116	0.150	0.120	0.085	0.007	0.024	0.035
D_{c1}		0.007	0.024	0.035	0.042	0.007	0.024	0.035	0.042	0.007	0.024	0.035	0.042	0.007	0.024	0.035
$D_c = D_{ep} + D_{c1}$		0.635	0.600	0.483	0.329	0.387	0.401	0.329	0.227	0.123	0.174	0.155	0.116	0.006	0.015	0.038
実験データから求めた D_c (実)		0.080	0.075	0.082	0.072	0.023	0.038	0.057	0.054	0.006	0.015	0.038	0.006	0.015	0.038	
D_c / D_c (実)		21.2	8.0	5.9	4.6	16.8	10.6	5.8	4.2	20.5	11.6	4.1	20.5	11.6	4.1	

N: ひずみ保持試験サイクル数 $Sg' = 14.55 \text{ kg/mm}^2$

$$D_c (\text{実}) = \int \frac{dt}{t_R} \times N$$






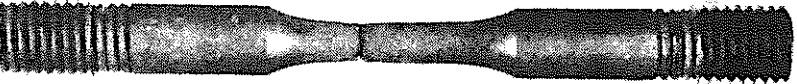






試験温度 (°C)	試験片 No.	
550	HB-752	
	HB-753	
	HB-754	
	HB-756	
	HB-757	
	HB-758	
	HB-759	
	HB-761	
	HB-762	
	HB-763	
	HB-764	

写真 5.6 SUS 321 鋼鍛造材のクリープ疲労試験片の外観
 Photo. 5.6 SUS 321 Stainless Steel Forging

6. 結 言

高速増殖原型炉の、主として蒸気発生器を対象とし、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 及び SUS321 鋼の母材並びに時効材について、引張、低サイクル疲労、リラクセーション、並びにクリープ緩和損傷評価のための試験を実施し、各材の高温特性を検討した。

その結果、強度及び変形特性に関する諸特性及び各種構成式との対応性を明らかにするとともに、設計方針におけるクリープ緩和損傷評価法は十分安全側の評価を与えることを検証し、よつて、これら材料は高速炉用材料として、すぐれた特性を有することを実証した。

7. 謝 辞

本研究に関する基本計画は、動力炉・核燃料開発事業団が中心で立案され、試験の計画及び実施推進に際しては、同事業団大洗工学センタ高速炉機器開発部厚母栄夫部長をはじめ、同ナトリウム材料開発室吉利 室長、二瓶勲室長代理、和田雄作氏、並びに FBR 開発本部構造材料グループ加納茂機グループリーダー、江端誠氏、その外同事業団の多くの関係者の方々、更に KOM 連絡会関係各位に多大な御指導、御教授をいただきました。

ここに感謝の意を表します。

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56-11）
- (2) 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56-11）
- (3) 動力炉・核燃料開発事業団：同上解説書（昭56-6）
- (4) 動力炉・核燃料開発事業団…パブコック日立株式会社：高速原型炉用候補構造材料試験，昭和52年度成果報告書… $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼板材及び鍛造材の高温強度試験報告書：PNC-SN241 79-33 … PNC-SJ202 78-33（昭54-11）
- (5) 動力炉・核燃料開発事業団…パブコック日立株式会社：高速増殖炉用構造材料試験，昭和53年度成果報告書… $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼及びSUS316鋼の高温強度試験報告書：PNC-SN241 80-02 … PNC-SJ299 79-11（昭55-3）
- (6) 動力炉・核燃料開発事業団…パブコック日立株式会社：高速増殖炉用構造材料試験，昭和54年度成果報告書… $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼母材継手材の高温強度試験報告書：PNC-SN241 80-06 … PNC-SJ202 80-22（昭56-3）
- (7) 動力炉・核燃料開発事業団…パブコック日立株式会社： $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼板材，鍛造材及びSUS321鋼伝熱管の高温強度試験，昭和55年度成果報告書：PNC-SJ202 81-13（昭57-8）
- (8) 動力炉・核燃料開発事業団…パブコック日立株式会社：SUS304，SUS321及び $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の高温強度試験，昭和56年度成果報告書：PNC-SJ 202 82-17（昭57-3）
- (9) 動力炉・核燃料開発事業団：FBR金属材料試験実施要領書：PNC-N 241 77-03（昭52-5）
- (10) 動力炉・核燃料開発事業団…三菱重工業株式会社：高速原型炉用候補構造材料試験，昭和52年度成果報告書…SUS321板材溶接金属部の引張及びクリープ試験：PNC-SN241 79-33 … PNC-SJ222 78-14（昭54-11）
- (11) 動力炉・核燃料開発事業団…石川島播磨重工業株式会社：高速原型炉用候補構造材料試験，昭和55年度成果報告書…平均ひずみ疲労試験およびSUS321鋼の高温強度試験：PNC-SJ218 81-04（昭55-8）

表 9.1
Table 9.1

FBR 金属材料試験計画表

FBR Metallic Materials Test Planning Sheet

No. 1/4

昭和 58 年 3 月 31 日
Date: May. 31. 1988

所属名 Affiliation	承認 Approved by	審査 Reviewed by	作成 Prepared by
パブコック日立 株式会社	西岡	佐々木	木村

- 提案計画 Proposed Plan
 合意した計画 Approved Plan
 完了した計画 Accomplished Plan

分類番号 No.	I - 7						
No.	項目 Item	内容説明 Descriptions					
1	試験題目 Subject	材料の超高温強度試験					
2	試験目的 Objective						
3	試験概要 Contents	超高温における引張試験					
4	対象機器 Objective Component	蒸気発生器					
5	試験材料 Materials	材料名 Name 2 1/4 Cr-1Mo	製造種別 Production Form 板材	寸法他 Size (thickness and others) 30t x 1500W - 1000φ (Mat. No. D-7)			
6	試験環境 Environment	<input type="checkbox"/> 大気中 In Air <input type="checkbox"/> 静止Na中 In Stagnant Sodium <input type="checkbox"/> 流動Na中 In Flowing Sodium	<input type="checkbox"/> アルゴン中 In Ar <input type="checkbox"/> 窒素中 In N ₂ <input type="checkbox"/> ヘリウム中 In He	<input type="checkbox"/> 真空中 In Vacuum <input type="checkbox"/> その他 Others			
7	試験名 Type of Test	引張試験 Tensile Test	高速引張試験 High Speed Tensile Test	クリープ試験 Creep Test	低サイクル疲労試験 Fatigue Test	リラクゼーション試験 Relaxation Test	その他 Others
	パラメータ Parameter				<input type="checkbox"/> Creep-Fatigue Test		
	材料チャージ数 No. of Material Charges	1					
	温度レベル数 No. of Temp. Levels	10					
	応力レベル数 No. of Stress Levels						
	ひずみ範囲レベル数 No. of Strain Range Levels						
	ひずみ速度レベル数 No. of Strain Rate Levels	1					
	保持時間数 No. of Hold Time Levels						
	反復回数 No. of Repetition	2					
	試験片総数 Total No. of Test Specimens	20					
8	試験内容 Test Parameters	<input type="checkbox"/> Fracture Test <input type="checkbox"/> Stress-Strain Curve	<input type="checkbox"/> Fracture Test <input type="checkbox"/> Stress-Strain Curve	<input type="checkbox"/> Rupture Test <input type="checkbox"/> Creep Curve <input type="checkbox"/> Internal Pressure Creep	<input type="checkbox"/> Life <input type="checkbox"/> Cyclic Stress-Strain Curve <input type="checkbox"/> Crack Behavior <input type="checkbox"/> Rotating Bending <input type="checkbox"/> Plane Bending	<input type="checkbox"/> Notched <input type="checkbox"/> Relaxation Stress <input type="checkbox"/> Relaxation Curve	<input type="checkbox"/> 単軸材料挙動 Uniaxial Material Behavior <input type="checkbox"/> 多軸材料挙動 Multiaxial Material Behavior <input type="checkbox"/> 構造物挙動試験 Structural Component Behavior Test <input type="checkbox"/> 衝撃試験 Impact Test <input type="checkbox"/> 硬さ試験 Hardness Test <input type="checkbox"/> 腐食試験 Corrosion Test <input type="checkbox"/> 光学顕微鏡観察 Optical Microscopy <input type="checkbox"/> 透過型電子顕微鏡 TEM <input type="checkbox"/> 走査型電子顕微鏡 SEM <input type="checkbox"/> 微小部 X線分析 EPMA <input type="checkbox"/> その他 Others
	試験条件 Test Conditions	Temp. B.T. 600 650, 700, 750, 800 850, 900, 950, 1000 Strain Rate 0.3%/min	Temp. Strain Rate	Temp. Stress Time	Temp. Strain Range Strain Rate Load Duration	Temp. Strain Time	
9	使用試験機台数 No. of Testing Machines	1					
10	試験期間(年/月) Time Schedule (Year/Month)	(57/4) ~ (58/3)					
11	試験実施場所 Test Laboratory	パブコック日立株式会社 研究部					
12	備考 Remarks						

表 9.2 FBR 金属材料試験計画表

No. 2/4

Table 9.2 FBR Metallic Materials Test Planning Sheet

昭和 58 年 3 月 31 日
Date: May. 31, 1983

所属名 Affiliation	承認 Approved by	審査 Reviewed by	作成 Prepared by
パプコック日立 株式会社	西岡	佐々木	木村

- 提案計画 Proposed Plan
 合意した計画 Approved Plan
 完了した計画 Accomplished Plan

分類番号 No.	S	T	E	P	II	内容説明 Descriptions		
1	試	験	迎	日		SUS321 鋼伝熱管時効材の高温強度試験 ※1		
2	試	験	目	的		組織観察, 衝撃試験, 引張試験, 低サイクル疲労試験		
3	試	験	概	要				
4	対	象	機	器		高速増殖炉蒸気発生器		
5	試	験	材	料		材料名 Name SUS321 鋼	製造種別 Production Form 伝熱管	寸法他 Size (thickness and others) 31.8 ^{OD} × 3.5t - 12,000 ℓ
6	試	験	環	境		<input checked="" type="checkbox"/> 大気中 In Air <input checked="" type="checkbox"/> 静止 Na 中 In Stagnant Sodium <input checked="" type="checkbox"/> 流動 Na 中 In Flowing Sodium <input type="checkbox"/> アルゴン中 In Ar <input type="checkbox"/> 窒素中 In N ₂ <input type="checkbox"/> ヘリウム中 In He <input type="checkbox"/> 真空中 In Vacuum <input type="checkbox"/> その他 Others		
7	試験名 Type of Test	引張試験 Tensile Test	高速引張試験 High Speed Tensile Test	クリープ試験 Creep Test	低サイクル疲労試験 Fatigue Test Creep-Fatigue Test	リラクゼーション試験 Relaxation Test	その他の Others (組織) (衝撃)	
パラメータ Parameter	材料チー No. of Material Charges	1			1		2	2
温度レ No. of Temp. Levels	5				1		1	1
応力レ No. of Stress Levels								
ひずみ範囲レ No. of Strain Range Levels					5			
ひずみ速度レ No. of Strain Rate Levels	1				1			
保持時間 No. of Hold Time Levels					1			
反復回 No. of Repetition	2				1		1	3
試験試片数 Total No. of Test Specimens	10				5		2	6
試験条件 Test Parameters	Fracture Test <input type="checkbox"/> Stress-Strain Curve Temp. RT, 450, 500, 550, 600 °C Strain Rate 0.8%/min	Fracture Test <input type="checkbox"/> Stress-Strain Curve Temp. Strain Rate	Rupture Test <input type="checkbox"/> Creep Curve <input type="checkbox"/> Internal Pressure <input type="checkbox"/> Creep Temp. Stress Time	<input type="checkbox"/> Life <input type="checkbox"/> Cyclic Stress-Strain Curve <input type="checkbox"/> Crack Behavior <input type="checkbox"/> Rotating Bending <input type="checkbox"/> Plane Bending Temp. 550 °C Strain Range 2.0, 1.5, 1.0, 0.8, 0.5 % Strain Rate 0.1%/min Load Duration	<input type="checkbox"/> Relaxation Stress <input type="checkbox"/> Relaxation Curve Temp. Strain Time	単軸材料挙動 Uniaxial Material Behavior 多軸材料挙動 Multiaxial Material Behavior <input type="checkbox"/> 構造物挙動試験 Structural Component Behavior Test <input checked="" type="checkbox"/> 衝撃試験 Impact Test <input type="checkbox"/> 硬さ試験 Hardness Test <input type="checkbox"/> 腐食試験 Corrosion Test <input checked="" type="checkbox"/> 光学顕微鏡観察 Optical Microscopy <input type="checkbox"/> 透過型電子顕微鏡 TEM <input type="checkbox"/> 走査型電子顕微鏡 SEM <input type="checkbox"/> 微小部 X 線分析 EPMA <input type="checkbox"/> その他 Others		
9	使用試験機台数 No. of Testing Machines	1			1			
10	試験期間(年/月) Time Schedule (Year/Month)	57/4 ~ (58/3)			57/4 ~ (58/3)			57/4 ~ (58/3)
11	試験実施場所 Test Laboratory	パプコック日立 株式会社			パプコック日立 株式会社			パプコック日立 株式会社
12	備考 Remarks	※1: 550 °C × 5,000h 時効						

表 9.3

FBR 金属材料試験計画表

No. 3/4

Table 9.3 FBR Metallic Materials Test Planning Sheet

昭和 58 年 8 月 31 日
Date: May. 31. 1988

所属名 Affiliation	承認 Approved by	審査 Reviewed by	作成 Prepared by
パプコック日立 株式会社	西岡	佐々木	木村

- 提案計画 Proposed Plan
- 合意した計画 Approved Plan
- 完了した計画 Accomplished Plan

分類番号 No.	I - 3						
No.	項 Item	内容説明 Descriptions					
1	試 験 題 Subject	極厚鍛造材の材料強度確認試験					
2	試 験 目 的 Objective	極厚鍛造材の基本材料データを取得し、材料基準の適用並びに変形挙動記述の妥当性を検討する。					
3	試 験 内 容 Contents	リラクセーション試験					
4	試 験 機 器 Objective Component	蒸気発生器					
5	試 験 材 料 Materials	材料名 Name SUS 321	製造種別 Production Form 鍛 造 材	寸法他 Size (thickness and others) 350 ^t × 750 ^w - 1000 ^l (Mat. No. C-6)			
6	試 験 環 境 Environment	<input checked="" type="checkbox"/> 大気中 In Air <input type="checkbox"/> 静止Na中 In Stagnant Sodium <input type="checkbox"/> 流動Na中 In Flowing Sodium	<input type="checkbox"/> アルゴン中 In Ar <input type="checkbox"/> 窒素中 In N ₂ <input type="checkbox"/> ヘリウム中 In He	<input type="checkbox"/> 真空中 In Vacuum <input type="checkbox"/> その他 Others			
7	試験名 Type of Test	引 張 試 験 Tensile Test	高 速 引 張 試 験 High Speed Tensile Test	フ リ ー プ 試 験 Creep Test	疲 勞 試 験 Fatigue Test	リ ラ ク セ ー シ ョ ン 試 験 Relaxation Test	其 他 Others
	パラメータ Parameter				<input type="checkbox"/> Fatigue Test <input type="checkbox"/> Creep-Fatigue Test		
	材料チャージ数 No. of Material Charges					1	
	温度レベル数 No. of Temp. Levels					2	
	応力レベル数 No. of Stress Levels						
	ひずみ範囲レベル数 No. of Strain Range Levels						
	ひずみ速度レベル数 No. of Strain Rate Levels						
	保持時間数 No. of Hold Time Levels						
反 復 回 数 No. of Repetition						1	
試験片総数 Total No. of Test Specimens		8					
8	試験条件 Test Conditions	Fracture Test	Fracture Test	Rupture Test Creep Curve	Life Cyclic Stress-Strain Curve	Relaxation Stress	<input type="checkbox"/> 単軸材料挙動 Uniaxial Material Behavior <input type="checkbox"/> 多軸材料挙動 Multiaxial Material Behavior <input type="checkbox"/> 構造物挙動試験 Structural Component Behavior Test <input type="checkbox"/> 衝撃試験 Impact Test <input type="checkbox"/> 硬さ試験 Hardness Test <input type="checkbox"/> 腐食試験 Corrosion Test <input type="checkbox"/> 光学顕微鏡観察 Optical Microscopy <input type="checkbox"/> 透過型電子顕微鏡 TEM <input type="checkbox"/> 走査型電子顕微鏡 SEM <input type="checkbox"/> 微小部 X線分析 EPMA <input type="checkbox"/> その他 Others
		Stress-Strain Curve	Stress-Strain Curve	Internal Pressure Creep	Crack Behavior Rotating Bending Plane Bending	Relaxation Curve	
		Temp.	Temp.	Temp.	Temp.	Temp.	
		Strain Rate	Strain Rate	Stress Time	Strain Range Strain Rate Load Duration	500, 550 °C Strain 0.2, 0.3 % Time 2,000 h	
9	使用試験機台数 No. of Testing Machines	1					
10	試験期間(年/月) Time Schedule (Year/Month)	57/4 ~ 58/8					
11	試験実施場所 Test Laboratory	パプコック日立 研究所					
12	備考 Remarks						

表 9.4 FBR 金属材料試験計画表
Table 9.4 FBR Metallic Materials Test Planning Sheet

No. 4/4

昭和 58 年 8 月 31 日
Date: May 31, 1983

所属名 Affiliation	承認 Approved by	審査 Reviewed by	作成 Prepared by
パプコック日立 株式会社	西岡	佐々木	木村

- 提案計画 Proposed Plan
 合意した計画 Approved Plan
 完了した計画 Accomplished Plan

分類番号 No.	IV - 6						
No.	項目 Item	内容説明 Descriptions					
1	試験題目 Subject	ピーク応力に対する緩和クリープ損傷係数 D^{**} の評価試験(1) (SUS321)					
2	試験目的 Objective	高温構造設計指針では、ピーク応力に対する緩和クリープ損傷係数 D^{**} を解析によつて求めている。そこでこの解析方法の安全性を実験によつて検証する。					
3	試験概要 Contents	定ひずみ範囲の繰返し試験で最初に 1/10 程度の疲労損傷を与えて材料を十分硬化させた後に、ある回数の D^{**} を与え、その後残存クリープ寿命をクリープ試験で求める。					
4	対象機器 Objective Component	蒸気発生器					
5	試験材料 Materials	材料名 Name SUS321	製造種別 Production Form 鍛造材	寸法他 Size (thickness and others) 350t×750w-1000φ (Mat. No. C-6)			
6	雰囲気 Environment	<input checked="" type="checkbox"/> 大気中 In Air <input type="checkbox"/> 静止Na中 In Stagnant Sodium <input type="checkbox"/> 流動Na中 In Flowing Sodium	<input type="checkbox"/> アルゴン中 In Ar <input type="checkbox"/> 窒素中 In N ₂ <input type="checkbox"/> ヘリウム中 In He	<input type="checkbox"/> 真空中 In Vacuum <input type="checkbox"/> その他 Others			
7	試験名 Type of Test	引張試験 Tensile Test	高速引張試験 High Speed Tensile Test	クリープ試験 Creep Test	低サイクル破れ試験 Fatigue Test Creep-Fatigue Test	リラクゼーション試験 Relaxation Test	その他 Others
	パラメータ Parameter						
	材料チャージ数 No. of Material Charges			1	1		
	温度レベル数 No. of Temp. Levels			1	1		
	応力レベル数 No. of Stress Levels			8			
	ひずみ範囲レベル数 No. of Strain Range Levels						
	ひずみ速度レベル数 No. of Strain Rate Levels				1		
	保持時間数 No. of Hold Time Levels				4~5		
	反復回数 No. of Repetition			1	1		
	前処理条件			3~4			
	試験片総数 Total No. of Test Specimens			11	14		
8	試験内容 Test Parameters	破断試験 Fracture Test Stress-Strain Curve	破断試験 Fracture Test Stress-Strain Curve	破断試験 Rupture Test クリープ曲線 Creep Curve 内部圧力 Internal Pressure クリープ Creep	Life Notched Cyclic Stress-Strain Curve Crack Behavior Rotating Bending Plane Bending	Relaxation Stress Relaxation Curve	単軸材料挙動 Uniaxial Material Behavior 多軸材料挙動 Multiaxial Material Behavior 構造物挙動試験 Structural Component Behavior Test 衝撃試験 Impact Test 硬さ試験 Hardness Test 腐食試験 Corrosion Test 光学顕微鏡観察 Optical Microscopy 透過型電子顕微鏡 TEM 走査型電子顕微鏡 SEM 微小X線分析 EPMA その他 Others
	試験条件 Test Conditions	Temp. Strain Rate	Temp. Strain Rate	Temp. 550 °C Stress Time 1,000~2,000 h 目標	Temp. 550 °C Strain Range 0.7, 1.0, 1.5% Strain Rate 0.1 %/sec Load Duration 1, 5, 10, 20h 目標 (基本特性として) 0h も追加	Temp. Strain Time	
9	使用試験機台数 No. of Testing Machines						
10	試験期間(年/月) Time Schedule Year/Month	57/4~58/3 57/4~58/3					
11	試験実施場所 Test Laboratory	パプコック日立株式会社 研究部 研究部					
12	備考 Remarks						

10. 付 録

本章では、昭和56年度の成果報告書⁸⁾において、試験進行中と記し、途中経過を報告した下記の試験について、その後の結果を追記した。

10.1 SUS304鋼板と鍛造の溶接継手のクリーブ破断試験結果

表10.1 中太線で囲った部分(試験片番号FB-648)が、前年度の報告書では試験継続中となっていたもので、参考のため既報告の特性も併せて示した。

図10.1はクリーブ破断強度について示しているが、図中●印で表わしたものが、今回新たに示したデータであり、既データの直線延長上に位置している。また、図10.2及び図10.3は破断伸び及び絞りについて示しているが、(図中●印)溶接継手であることと、板母材部で破断していることから参考値としたい。

10.2 SUS321鋼伝熱管と鍛造の溶接継手のクリーブ破断試験結果

同様に表10.2並びに図10.4～図10.6では前年度において、試験継続中としていたクリーブ破断強度並びに延性について、それぞれ最終的な結果を示した。

表 10.1 SUS304 鋼板と鍛造の溶接継手のクリープ破断試験結果

Table 10.1 Results of Creep Rupture Tests for Welded Joint of SUS304 Stainless Steel Plate and Forging

供試材	SUS304 鋼 板と鍛造の溶接継手	熱処理	板 : 1,100°C×0.8h W.Q 鍛造 : 1,040~1,050°C×7.4h W.Q
素材製造者	板 : 新日本製鉄㈱ 鍛造 : ㈱日本製鋼所	溶接方法	被覆アーク溶接
素材寸法	板 : 40t×2,000W-1,000ℓ 鍛造 : 350t×750W-1,000ℓ	試験片形状	3.5t×6W 短冊状

区分		化学成分(%)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co
板	要求値	レードル	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.03	8.00 ~10.5	18.00 ~20.00	≤0.25
	分析値	レードル	0.05	0.59	1.02	0.028	0.008	9.11	18.35	0.07
		チェック	0.05	0.58	1.00	0.028	0.007	9.10	18.45	0.07
鍛造	要求値	レードル	0.04 ≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.03	8.00 ~11.00	18.00 ~20.00	≤0.25
	分析値	レードル	0.06	0.83	1.47	0.021	0.010	10.38	19.67	0.06
		チェック	0.08	0.78	1.49	0.019	0.008	10.40	19.64	0.07

(板 : Heat No. D4656 PNC Material No. A-4)
 (鍛造 : Heat No. 77A430-1-1 PNC Material No. A-2)

試験温度 (°C)	試験片番号	負荷応力 (kg/mm ²)	破断時間 (h)	破断伸び (%)	※ ※ 絞り (%)	破断位置
500	FB-641	40	99.8	25.0	60.1	板, 母材
	FB-642	35	865.2	17.8	25.6	鍛造, 母材
	FB-643	33	1,231.4	16.6	50.1	板, 母材
	FB-644	31	2,265	16.4	49.4	"
550	FB-645	27	319.8	19.8	57.9	板, 母材
	FB-646	24	1,356.2	23.6	61.6	"
	FB-647	21	4,269	22.7	58.0	"
	FB-648	19	8,980.1	13.9	54.5	"

※ : 参考値

データ追加

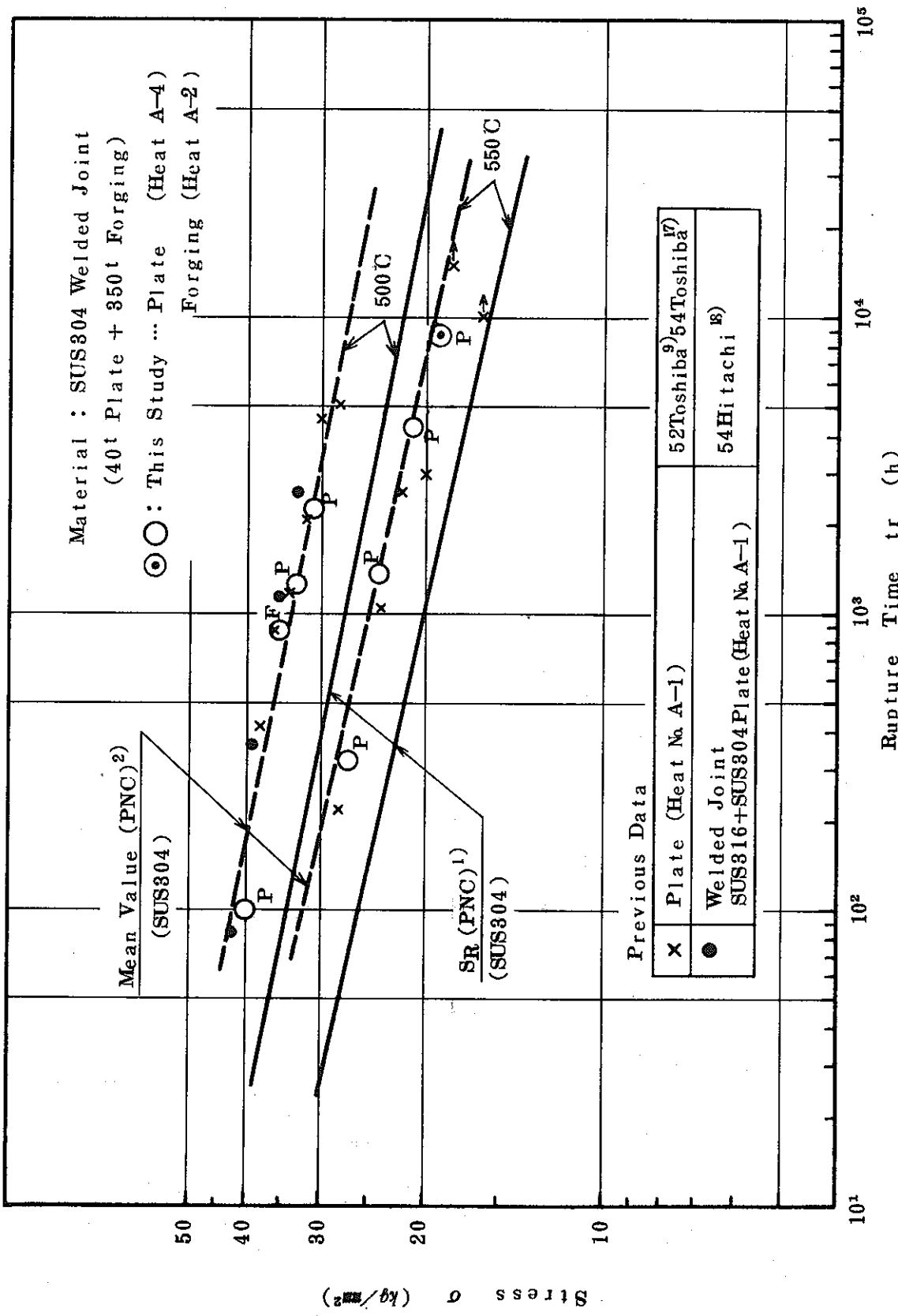


図 10.1 SUS304 鋼板と鍛造の溶接継手のクリープ破断強度
Fig. 10.1 Estimation of Creep Rupture Strength for Welded Joint
of SUS304 Stainless Steel Plate and Forging

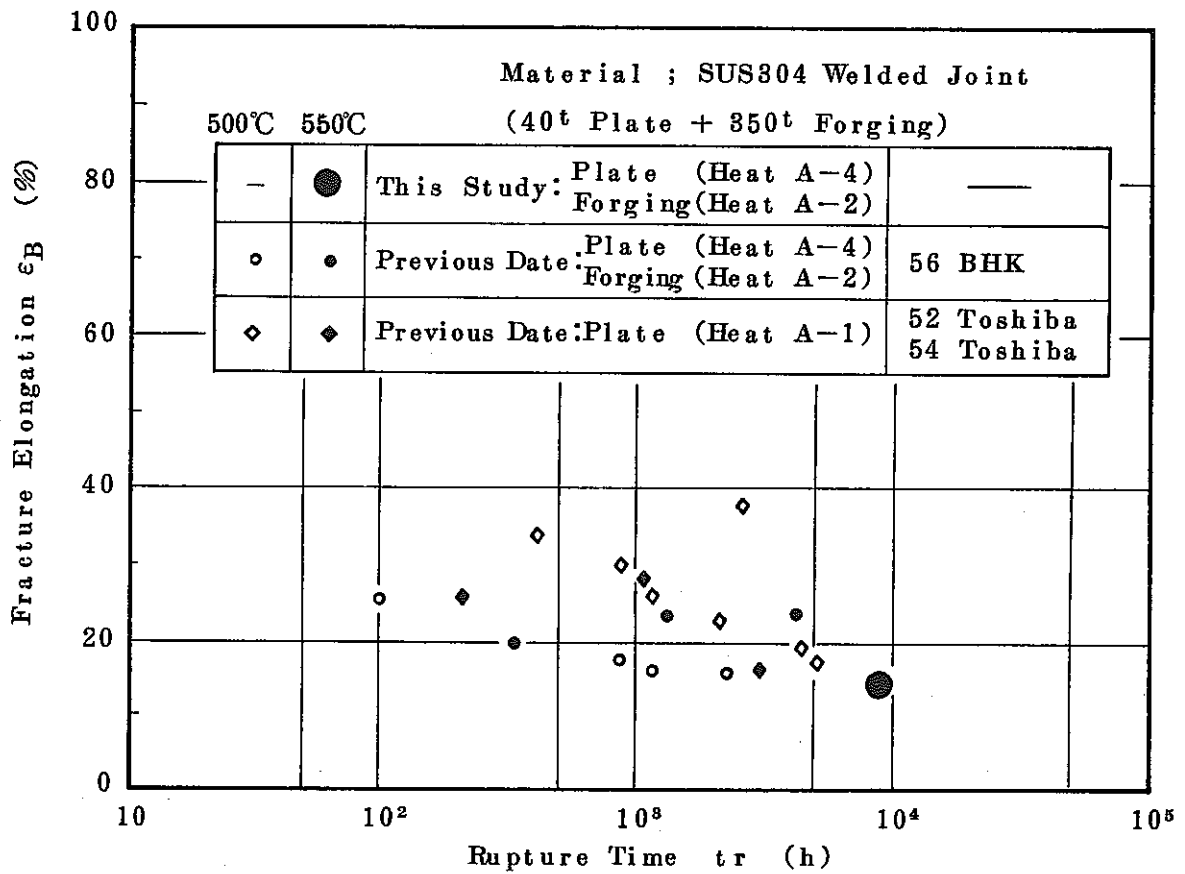


図 10.2 SUS304 鋼板と鍛造の溶接継手のクリープ破断伸び
Fig.10.2 Fracture Elongation on Creep Tests for Welded Joint of SUS304 Stainless Steel Plate and Forging

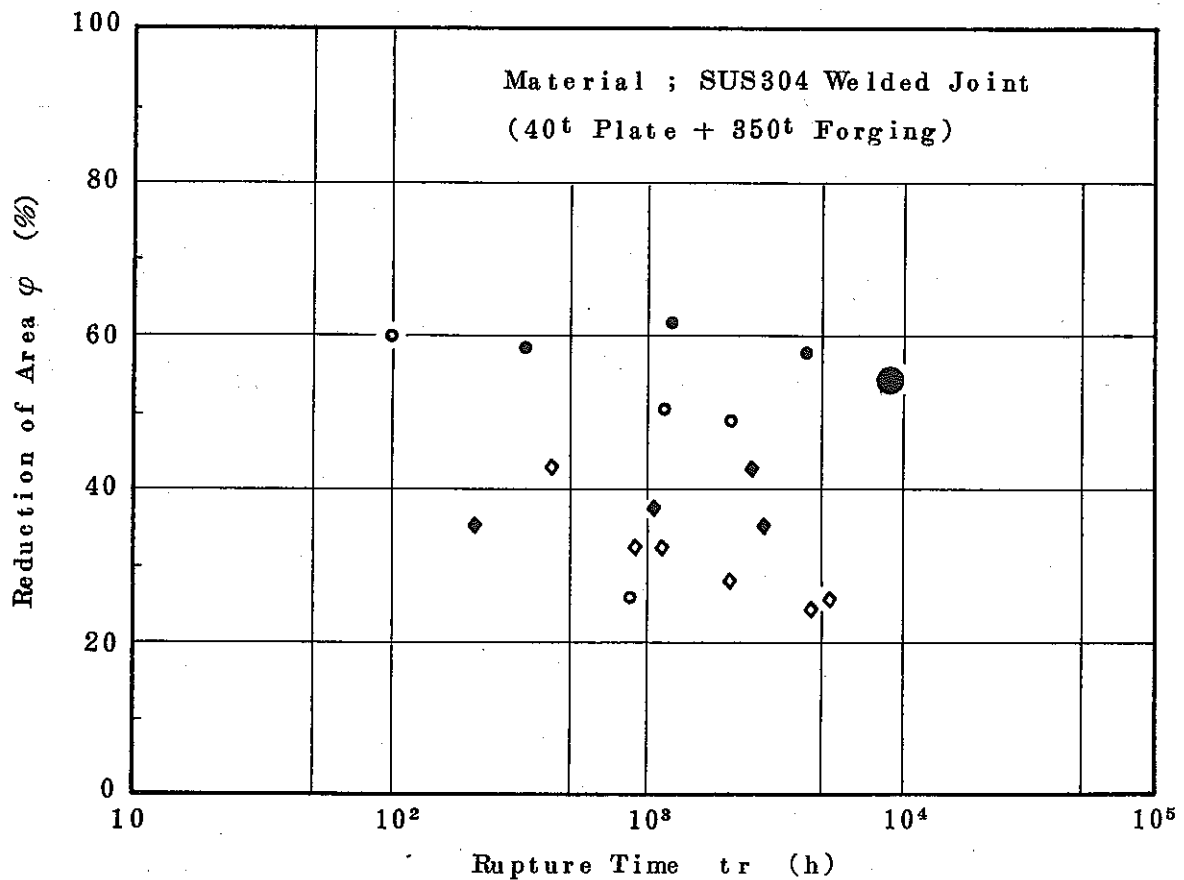


図 10.3 SUS304 鋼板と鍛造の溶接継手のクリープ破断絞り
Fig.10.3 Reduction of Area on Creep Tests for Welded Joint of SUS304 Stainless Steel Plate and Forging

表 10.2 SUS321 鋼伝熱管と鍛造の溶接継手のクリープ試験結果

Table 10.2 Result of Creep Rupture Tests for Welded Joint of SUS321 Stainless Steel Tube and Forging

供試材	SUS321 鋼 伝熱管と鍛造の溶接継手	熱処理	伝熱管：1,160℃×3min W.Q. 鍛造：1,020~1,067℃×1592h W.Q.
素材製造者	伝熱管：住友金属工業(株) 鍛造：(株)日本製鋼所	溶接方法	内面自動TIG溶接
素材寸法	伝熱管：318 ^{OD} ×3.5 ^t -12,000 ^ℓ 鍛造：350 ^t ×750 ^W -1,000 ^ℓ	試験片形状	3.5 ^t ×6 ^W 短冊状

			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti
伝熱管	要求値	リード	0.04 ~0.10	≤0.75	≤2.00	≤0.030	≤0.030	9.00 ~13.00	17.00 ~19.00	4×C% ~0.60
	分析値	リード	0.08	0.57	1.50	0.025	0.004	11.60	17.55	0.43
		チェック	0.08	0.56	1.48	0.023	0.004	11.45	17.60	0.41
鍛造	要求値	リード	0.04 ~0.10	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	9.00 ~13.00	17.00 ~20.00	≥5×C%
	分析値	リード	0.065	0.82	1.62	0.024	0.006	11.33	19.28	0.52
		チェック	0.065	0.81	1.61	0.023	0.007	11.26	19.44	0.53

(伝熱管： Heat No. A991703 …… PNC Material No. C-5)
 (鍛造： Heat No. 80L95-1-3 …… PNC Material No. C-6)

試験温度 (℃)	試験片番号 No.	負荷応力 (kg/mm ²)	破断時間 (h)	破断伸び [※] (%)	絞 [※] (%)	破断位置
500	FB-651	41	798.6	25.0	35.9	溶着部
	FB-652	39	890.1	23.3	23.2	伝熱管母材
	FB-653	36	3,226	16.3	26.0	〃
	FB-654	35	1,920	17.3	25.2	〃
550	FB-655	33	151.7	19.3	35.2	溶着部
	FB-656	28	1,279.8	17.0	24.3	鍛造熱影響部
	FB-657	25	2,915	16.6	23.4	鍛造熱影響部
	FB-658	23	6,845.8	13.3	17.3	〃

※： 参考値

データ追加

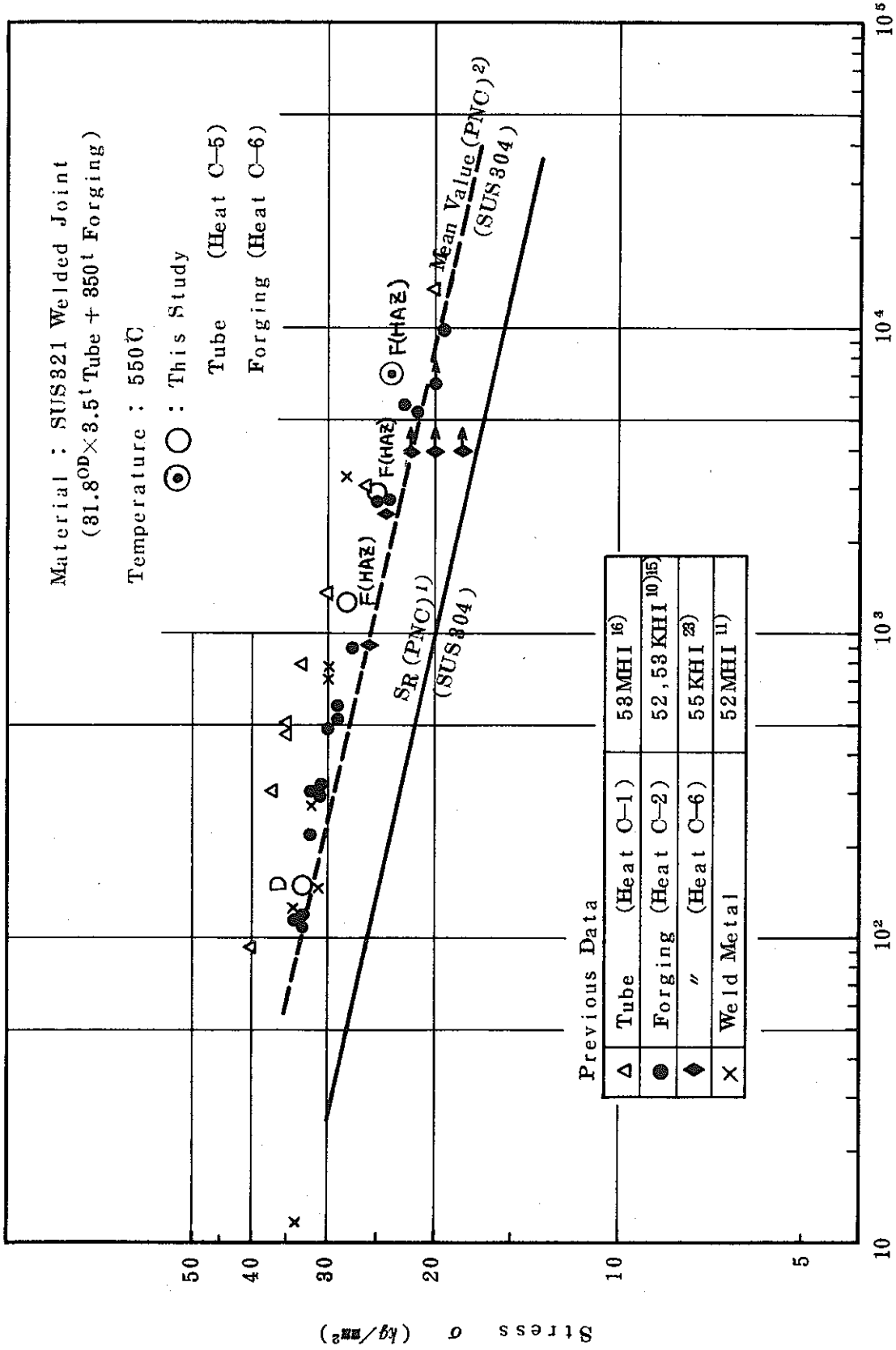


図 10.4 SUS321 鋼伝熱管と鍛造の溶接継手のクリープ破断強度 (550°C)
 Fig. 10.4 Estimation of Creep Rupture Strength for Welded Joint of SUS304 Stainless Steel Tube and Forging (550°C)

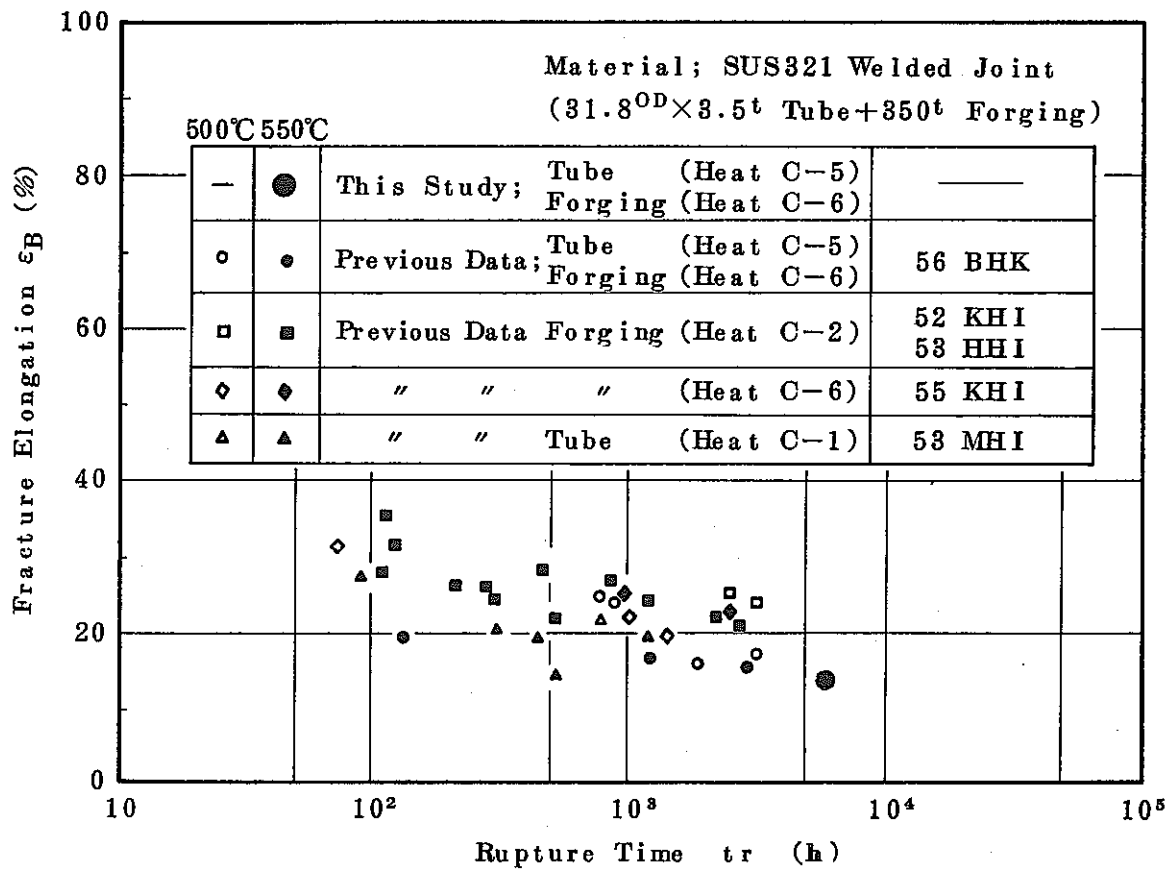


図 10.5 SUS321 鋼伝熱管と鍛造の溶接継手のクリープ破断伸び
Fig.10.5 Fracture Elongation on Creep Tests for Welded Joint of SUS321 Stainless Steel Plate and Forging

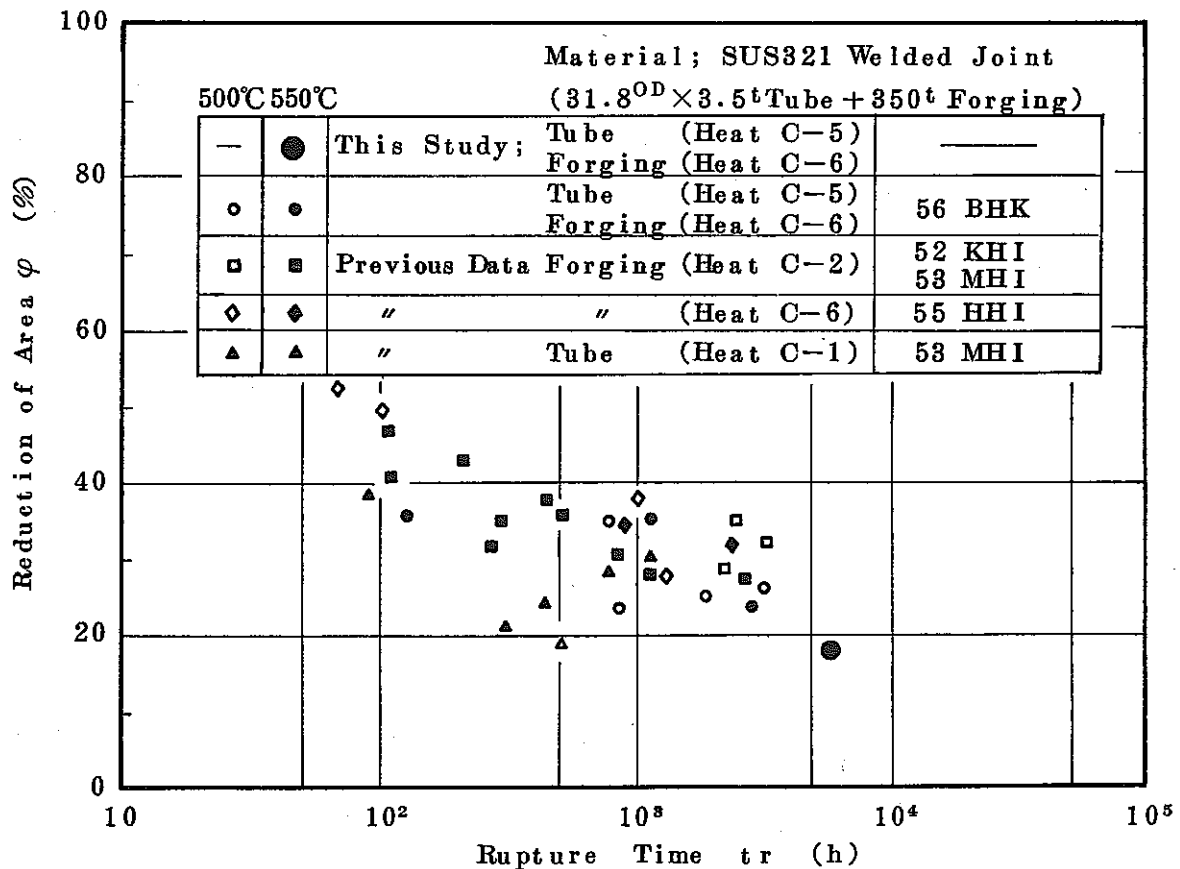


図 10.6 SUS321 鋼伝熱管と鍛造の溶接継手のクリープ破断絞り
Fig.10.6 Reduction of Area on Creep Tests for Welded Joint of SUS321 Stainless Steel Plate and Forging