

本資料は2001年 7月 31日付で
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

SUS 304板材およびインコネル718 板材の高温強度試験

報 告 書

(構造材料試験 82-3)

1983年3月



富士電機製造株式会社

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
PNC 78J203 83-03
1983年 3月 31日

SUS 304 鋼板材 および インコネル 718 板材の高温強度試験*

(構造材料試験 82-3)

仲 西 恒 雄 **
山 下 满 男 **
北 見 彰 **

要 旨

本研究の目的は、高速原型炉「もんじゅ」の主要構造材料である SUS 304 鋼のリラクセーションデータの拡充、および低サイクル疲労強度に及ぼすひずみ波形効果について調べること、およびインコネル 718 材の低サイクル疲労強度を明らかにすることである。

供試材は、SUS 304 鋼は板厚 40mm の熱間圧延鋼板、インコネル 718 材は板厚 20mm の熱間圧延材である。

SUS 304 鋼板材の 600°C におけるリラクセーション特性は、従来 500°C、550°C で見られたような著しい初期応力緩和およびその後一時的に緩和速度が 0° となるような現象は生ぜず、初期応力緩和は比較的緩やかであり、かつ安定することなく残留応力は低下し続ける。また、短時間側ではクリープひずみ式による記述は難しいが、長時間側では時間係数 $\alpha_R = 1$ の計算結果とほぼ一致する。

SUS 304 鋼の 550°C における対称三角波（ひずみ速度 0.01%/s）および鋸歯状波（引張方向ひずみ速度 0.005%/s、圧縮方向ひずみ速度 1%/s）の疲労寿命を比較すると、鋸歯状波の疲労寿命は三角波より 30% 程短くなつた。

インコネル 718 板材の 500°C、550°C における低サイクル疲労強度は、500°C では全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_t = 0.9\%$ で、550°C では $\Delta\epsilon_t = 0.8\%$ でそれぞれほぼ疲労限となつた。

* 本報告書は、富士電機製造株式会社が動力炉・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。

** 株式会社 富士電機総合研究所 基礎研究所



NOT FOR PUBLICATION
PNC SJ203 83 - 03
March, 31, 1983

Strength Tests of Type 304 Stainless Steels and Inconel 718 at Elevated Temperature *

Tsuneo Nakanishi **
Mitsuo Yamashita **
Akira Kitami **

Abstract

The purpose of this work is to obtain long-term stress relaxation data widely and to clear the effect of controlled strain wave form on the low-cycle fatigue strength at elevated temperature of Type 304 stainless steels which is expected to use widely as structural material for the prototype LMFBR "Monju", and to evaluate the low cycle fatigue strength at elevated temperature of Inconel 718.

Tested Type 304 stainless steels are hot rolled plate of 40mm thickness, and tested Inconel 718 is hot rolled plate of 40mm thickness.

The residual stress of Type 304 plate in the relaxation test at 600°C was continuously decreased with test duration. And the relaxation behaviore in long time was nearly equal to the curve calculated from creep-strain formula ($\alpha_R=1$).

The low cycle fatigue lives under strain wave form of slow (strain rate 0.005%/s) - fast (strain rate 1%/s) at 550°C of Type 304 plate reduced by 30% as compared with those under symmetric triangular wave form (strain rate 0.01%/s).

The low cycle fatigue limits at 500°C and 550°C of Inconel 718 was about total strain range 0.9% and 0.8% respectively.

* Work performed by Fuji Electric Co., Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

** Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd.
Material Research Laboratory.

目 次

要 表 図 写 真	リ ス ト リ ス ト リ ス ト	旨	I IV VI XI
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		6
3.1	SUS 304 鋼板材の仕様および確性試験検査結果		6
3.2	インコネル 718 板材の仕様および確性試験検査結果		6
4.	試 験 方 法		1 3
4.1	試験片採取方法および試験片		1 3
4.2	試験機仕様		1 3
4.3	試験方法		1 4
4.3.1	リラクセーション試験方法		1 4
4.3.2	低サイクル疲労試験方法		1 4
4.3.3	引張試験方法		1 4
4.3.4	金属組織および破面観察		1 5
5.	試 験 結 果		2 4
5.1	SUS 304 鋼板材のリラクセーション試験結果 および考察		2 4
5.2	SUS 304 鋼板材の低サイクル疲労強度に及ぼす ひずみ波形効果		3 3
5.2.1	ひずみ速度依存性試験結果		3 3
5.2.2	ひずみ波形効果試験結果		4 1
5.2.3	金属組織および破面観察結果		5 3
5.3	インコネル 718 板材の高温強度試験結果		6 1
5.3.1	引張試験結果		6 1
5.3.2	低サイクル疲労試験結果		7 5
5.3.3	金属組織および破面観察結果		7 7
6.	結 言		9 2
7.	謝 辞		9 2
	参 考 文 献		9 3
付	録 FBR 金属材料試験計画表		9 4
	57年度 支給物件保管状況		9 7

表 リ ス ト (1)

表 2.1 : 試験研究範囲一覧	-----	5
Table 2.1 : Schedule of Present Test		
表 3.1 : 熱間圧延オーステナイトステンレス 鋼板製造仕様概要	-----	7
Table 3.1 : Summary of Manufacturing Specifications of SUS 304 Plate		
表 3.2 : SUS 304 鋼板材の確性試験結果 (D 4656, A 4 材)	-----	9
Table 3.2 : Certified Test Results of SUS 304 Plate (D 4656, A 4 Material)		
表 3.3 : SUS 304 鋼板材の確性試験結果 (N 9482, A 7 材)	-----	10
Table 3.3 : Certified Test Results of SUS 304 Plate (N 9482, A 7 Material)		
表 3.4 : インコネル 718 板材の製造仕様概要	-----	11
Table 3.4 : Summary of Manufacturing Specifications of INCONEL 718 Plate		
表 3.5 : インコネル 718 板材の確性試験結果 (N 1933, E 1 材)	-----	12
Table 3.5 : Certified Test Results of INCONEL 718 Plate (N 1933, E 1 Material)		
表 4.1 : 試験機仕様 (リラクセーション試験機, 疲労試験機, 引張試験機)	-----	16
Table 4.1 : Specifications of Relaxation, Fatigue, and Tensile Test Machines		
表 5.1 : SUS 304 鋼板材の 600°C における リラクセーション試験結果	-----	26
Table 5.1 : Relaxation Test Results of SUS 304 Plate at 600°C		
表 5.2 : SUS 304 鋼板材の 550°C における 低サイクル疲労試験結果	-----	43
Table 5.2 : Low Cycle Fatigue Test Results of SUS 304 Plate at 550°C		

表 リ ス ト (2)

表 5 . 3 : インコネル 718 板材の引張試験結果 -----	6 3
Table 5 . 3 : Tensile Test Results of INCONEL 718 Plate	
表 5 . 4 : インコネル 718 板材の真応力と 真ひずみの関係 -----	6 5
Table 5 . 4 : True Stress versus True Strain Relations of INCONEL 718 Plate	
表 5 . 5 : インコネル 718 板材の低サイクル 疲労試験結果 -----	8 2
Table 5 . 5 : Low Cycle Fatigue Test Results of INCONEL 718 Plate	

図　り　ス　ト　　(1)

- 図 3.1 : 熱間圧延ステンレス鋼板の
製造工程 ----- 8
Fig. 3.1 : Manufacturing Process of
SUS 304 Plate
- 図 4.1 : SUS 304 鋼板材のリラクセーション
試験片採取方法 ----- 20
Fig. 4.1 : Sampling Method of Relaxation
Test Specimens of SUS 304 Plate
- 図 4.2 : SUS 304 鋼板材の疲労試験片採取方法 ----- 21
Fig. 4.2 : Sampling Method of Low Cycle
Fatigue Test Specimens of SUS 304
Plate
- 図 4.3 : インコネル 718 板材引張試験片
採取方法 ----- 22
Fig. 4.3 : Sampling Method of Tensile Test
Specimens of INCONEL 718 Plate
- 図 4.4 : インコネル 718 板材疲労試験片
採取方法 ----- 23
Fig. 4.4 : Sampling Method of Low Cycle Fatigue
Test Specimens of INCONEL 718 Plate
- 図 5.1 : SUS 304 鋼板材の 600°C における
リラクセーション曲線(1) ----- 27
Fig. 5.1 : Stress Relaxation Curves at 600°C
for SUS 304 Plate (1)
- 図 5.2 : SUS 304 鋼板材の 600°C における
リラクセーション曲線 (2) ----- 28
Fig. 5.2 : Stress Relaxation Curves at 600°C
for SUS 304 Plate (2)
- 図 5.3 : クリープひずみ式による評価 (1) ----- 29
Fig. 5.3 : Stress Relaxation Curves Calculated
from Creep Strain Formula (1)
- 図 5.4 : クリープひずみ式による評価 (2) ----- 30
Fig. 5.4 : Stress Relaxation Curves Calculated
From Creep Strain Formula (2)

図　リ　ス　ト　(2)

- 図 5.5 : クリープひずみ式による評価 (3) ----- 3 1
 Fig. 5.5 : Stress Relaxation Curves Calculated from Creep Strain Formula (3)
- 図 5.6 : クリープひずみ式による評価 (4) ----- 3 2
 Fig. 5.6 : Stress Relaxation Curves Calculated from Creep Strain Formula (4)
- 図 5.7 : ひずみ速度依存性試験方法 ----- 3 6
 Fig. 5.7 : Strain Rate Dependence Testing Methods
- 図 5.8 : ひずみ速度依存性試験結果 (1) ----- 3 7
 Fig. 5.8 : Strain Rate Dependence of Stress Range (1)
- 図 5.9 : ひずみ速度依存性試験結果 (2) ----- 3 8
 Fig. 5.9 : Strain Rate Dependence of Stress Range (2)
- 図 5.10 : ひずみ速度とヒステリシスループの関係 (1) ----- 3 9
 Fig. 5.10 : Effect of Strain Rate on Stress—Strain Hysteresis Loop (1)
- 図 5.11 : ひずみ速度とヒステリシスループの関係 (2) ----- 4 0
 Fig. 5.11 : Effect of Strain Rate on Stress—Strain Hysteresis Loop (2)
- 図 5.12 : SUS 304 鋼板材の 550°C における低サイクル疲労試験結果 (対称三角波および鋸歯状波) ----- 4 5
 Fig. 5.12 : Low Cycle Fatigue Test Results of SUS 304 Plate at 550°C (Triangular wave and Slow—Fast wave)
- 図 5.13 : SUS 304 鋼板材の 550°C における破損繰返し数 N_f と破損時間 t_f との関係 ----- 4 6
 Fig. 5.13 : Relation between Number of Cycle to Failure N_f and Time to Failure t_f for SUS 304 Plate at 550°C

- 図 5.14 : SUS 304 鋼板材の 550°C における
低サイクル疲労試験繰返しサイクルに
伴う応力変化 ----- 4 7
- Fig. 5.14 : Stress Changes during Reversed
Strain Cycling of SUS 304 Plate
at 550°C
- 図 5.15 : 低サイクル疲労試験における
ヒステリシスループ ($\Delta\varepsilon_t$ 0.5%) ----- 4 8
- Fig. 5.15 : The Stress—Strain Hysterisis
Loops in Reversed Strain Cycling
($\Delta\varepsilon_t$ 0.5%)
- 図 5.16 : 低サイクル疲労試験における
ヒステリシスループ ($\Delta\varepsilon_t$ 1.0%) ----- 4 9
- Fig. 5.16 : The Stress—Strain Hysterisis
Loops in Reversed Strain Cycling
($\Delta\varepsilon_t$ 1.0%)
- 図 5.17 : 低サイクル疲労試験における
ヒステリシスループ ($\Delta\varepsilon_t$ 1.5%) ----- 5 0
- Fig. 5.17 : The Stress—Strain Hysterisis
Loops in Reversed Strain Cycling
($\Delta\varepsilon_t$ 1.5%)
- 図 5.18 : 繰返しサイクルに伴う塑性ひずみ
範囲の変化 ----- 5 1
- Fig. 5.18 : Changes of Plastic Strain Range
During Reversed Strain Cycling of
SUS 304 Plate at 550°C
- 図 5.19 : SUS 304 鋼板材の 550°C における
低サイクル疲労試験結果と動燃事業団
基準値との比較 ----- 5 2
- Fig. 5.19 : Relation between Present Fatigue
Test Results of SUS 304 Plate at
550°C and Design Fatigue Curves of
PNC Material Strength Standards
- 図 5.20 : インコネル 718 板材の引張強度に
及ぼす試験温度の影響 ----- 6 8
- Fig. 5.20 : Effect of Elevated Test Temperature
on Tensile Properties of INCONEL 718
Plate

図 リ ス ト (4)

- 図 5.21 : インコネル 718 板材の降伏比の
試験温度による変化 ----- 6 9
Fig. 5.21 : Variation of Ratio of Yield
Strength to Tensile Strength
with Temperature for INCONEL
718 Plate
- 図 5.22 : インコネル 718 板材の延性に
及ぼす試験温度の影響 (1) ----- 7 0
Fig. 5.22 : Effect of Test Temperature on
Tensile Ductilities of
INCONEL 718 Plate (1)
- 図 5.23 : インコネル 718 板材の延性に
及ぼす試験温度の影響 (2) ----- 7 1
Fig. 5.23 : Effect of Test Temperature on
Tensile Ductilities of
INCONEL 718 Plate (2)
- 図 5.24 : インコネル 718 板材の延性に
及ぼす試験温度の影響 (3) ----- 7 2
Fig. 5.24 : Effect of Test Temperature on
Tensile Ductilities of
INCONEL 718 Plate (3)
- 図 5.25 : インコネル 718 板材の真応力—
真ひずみ曲線 ----- 7 3
Fig. 5.25 : True Stress—True Strain Curves
at Room and Elevated Temperatures
for INCONEL 718 Plate
- 図 5.26 : インコネル 718 板材の 500°C および
550°C における低サイクル疲労試験結果 ----- 8 4
Fig. 5.26 : Low Cycle Fatigue Test Results of
INCONEL 718 Plate at 500°C and 550°C
- 図 5.27 : インコネル 718 板材の低サイクル
疲労試験結果と文献値との比較 ----- 8 5
Fig. 5.27 : Comparison between Present Low
Cycle Fatigue Test Results and
Other Experimental data of
INCONEL 718 Plate

図 リ ス ト (5)

- 図 5.28 : インコネル 718 板材の 500°C における低サイクル疲労試験繰返しサイクルに伴う応力変化 ----- 8 6
 Fig. 5.28 : Stress Changes during Reversed Strain Cycling of INCONEL 718 Plate at 500°C
- 図 5.29 : インコネル 718 板材の 550°C における低サイクル疲労試験繰返しサイクルに伴う応力変化 ----- 8 7
 Fig. 5.29 : Stress Changes during Reversed Strain Cycling of INCONEL 718 Plate at 550°C
- 図 5.30 : インコネル 718 板材の 500°C における低サイクル疲労試験繰返しサイクルに伴う塑性ひずみ範囲の変化 ----- 8 8
 Fig. 5.30 : Changes of Plastic Strain Range during Reversed Strain Cycling of INCONEL 718 Plate at 500°C
- 図 5.31 : インコネル 718 板材の 550°C における低サイクル疲労試験繰返しサイクルに伴う塑性ひずみ範囲の変化 ----- 8 9
 Fig. 5.31 : Changes of Plastic Strain Range during Reversed Strain Cycling of INCONEL 718 Plate at 550°C
- 図 5.32 : インコネル 718 板材の動的応力—ひずみ曲線 ----- 9 0
 Fig. 5.32 : Cyclic Stress—Strain Curves of INCONEL 718 Plate
- 図 5.33 : インコネル 718 板材の 500°C および 550°C における破損繰返し数 N_f と 破損時間 t_f との関係 ----- 9 1
 Fig. 5.33 : Relation between Number of Cycle to Failure N_f and Time to Failure t_f for INCONEL 718 Plate at 500°C and 550°C

写 真 リ ス ト (1)

- 写 真 5 . 1 : SUS 304 鋼板材の 550°C における
低サイクル疲労試験後の外観 ----- 5 4
Photo. 5 . 1 : Appearance after Low Cycle
Fatigue Test for SUS 304 Plate
at 550°C
- 写 真 5 . 2 : SUS 304 鋼板材の 550°C における
低サイクル疲労試験後の金属組織
(対称三角波) ----- 5 5
Photo. 5 . 2 : Microstructures after Low Cycle
Fatigue Test at 550°C for
SUS 304 Plate
(Triangular wave)
- 写 真 5 . 3 : SUS 304 鋼板材の 550°C における
低サイクル疲労試験後の金属組織
(鋸歯状波) ----- 5 6
Photo. 5 . 3 : Microstructures after Low Cycle
Fatigue Test at 550°C for
SUS 304 Plate
(Slow—Fast wave)
- 写 真 5 . 4 : SUS 304 鋼板材の 550°C における
低サイクル疲労試験後の疲労破面
(対称三角波 $\Delta\epsilon_t = 0.5\%$) ----- 5 7
Photo. 5 . 4 : SEM Fractographs of Fatigue
Fracture Surface at 550°C for
SUS 304 Plate
(Triangular wave $\Delta\epsilon_t = 0.5\%$)
- 写 真 5 . 5 : SUS 304 鋼板材の 550°C における
低サイクル疲労試験後の疲労破面
(対称三角波 $\Delta\epsilon_t = 1.0\%$) ----- 5 8
Photo. 5 . 5 : SEM Fractographs of Fatigue
Fracture Surface at 550°C for
SUS 304 Plate
(Triangular wave $\Delta\epsilon_t = 1.0\%$)
- 写 真 5 . 6 : SUS 304 鋼板材の 550°C における
低サイクル疲労試験後の疲労破面
(鋸歯状波 $\Delta\epsilon_t = 0.5\%$) ----- 5 9
Photo. 5 . 6 : SEM Fractographs of Fatigue
Fracture Surface at 550°C for
SUS 304 Plate
(Slow—Fast wave $\Delta\epsilon_t = 0.5\%$)

写 真 リ ス ト (2)

- 写 真 5 . 7 : SUS 304 鋼板材の 550°C における
低サイクル疲労試験後の疲労破面
(鋸歯状波 $\Delta\epsilon_t = 1.0\%$) ----- 6 0
- Photo. 5 . 7 : SEM Fractographs of Fatigue
Fracture Surface at 550°C for
SUS 304 Plate
(Slow-Fast wave $\Delta\epsilon_t = 1.0\%$)
- 写 真 5 . 8 : インコネル 718 板材の 高温引張
試験後の試験片外観 ----- 7 4
- Photo. 5 . 8 : Appearance after Tensile Test
for INCONEL 718 Plate
- 写 真 5 . 9 : インコネル 718 板材の 500°C, 550°C
における低サイクル疲労試験後の
試験片外観 ----- 7 8
- Photo. 5 . 9 : Appearance after Low Cycle Fatigue
Test at 500°C, 550°C for INCONEL
718 Plate
- 写 真 5 . 10 : インコネル 718 板材の 500°C, 550°C
における低サイクル疲労試験後の
金属組織 ($\Delta\epsilon_t = 1.5\%$) ----- 7 9
- Photo. 5 . 10 : Microstructures after Low Cycle
Fatigue Test at 500°C, 550°C for
INCONEL 718 Plate ($\Delta\epsilon_t = 1.5\%$)
- 写 真 5 . 11 : インコネル 718 板材の 500°C における
低サイクル疲労試験後の
疲労破面 ($\Delta\epsilon_t = 1.5\%$) ----- 8 0
- Photo. 5 . 11 : SEM Fractographs of Fatigue
Fracture Surface at 500°C for
INCONEL 718 Plate ($\Delta\epsilon_t = 1.5\%$)
- 写 真 5 . 12 : インコネル 718 板材の 550°C における
低サイクル疲労試験後の
疲労破面 ($\Delta\epsilon_t = 1.5\%$) ----- 8 1
- Photo. 5 . 12 : SEM Fractographs of Fatigue
Fracture Surface at 550°C for
INCONEL 718 Plate ($\Delta\epsilon_t = 1.5\%$)

1. 緒 言

高速原型炉「もんじゅ」の高温構造設計法の開発を目指し、動力炉・核燃料開発事業団では、昭和52年度から一連の大気中構造材料試験を実施しており、蓄積された国産材データをもとにして、高温構造機器の強度設計基準への反映が積極的になされている。

高速炉の運転温度は、通常 500°C 以上の高温となるため、高速炉構造材料は、クリープ等の非弾性挙動を示すようになる。

従って、合理的で信頼性の高い設計法を確立するためには、使用材料のクリープ強度、リラクセーション、低サイクル疲労などの特性を明らかにするとともに、これらデータを充実させ、クリープひずみ式、クリープ疲労損傷評価法などの改善をはかり、実験と解析両面から非弾性挙動を把握しておく必要がある。

本報告書では、高速炉の主要構造材料である SUS 304 鋼のリラクセーション試験結果および高温低サイクル疲労強度に及ぼすひずみ波形効果試験結果および高温ですぐれた強度特性を有するインコネル 718 の低サイクル疲労試験結果を報告する。

2. 試験研究の概要

2.1 試験研究の範囲

試験は、熱間圧延オーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 鋼板材板厚 40mm (SN244 81-01 高速原型炉構造材料試験用供試材料一覧 A 4 材、A 7 材) およびインコネル 718 板材板厚 20mm (SN244 81-01 E 1 材) の二種類の試験材について実施した。

本年度のテーマは、SUS 304 鋼板材リラクセーションデータの拡充、SUS 304 鋼板材の低サイクル疲労強度に及ぼすひずみ波形効果試験、およびインコネル 718 板材の低サイクル疲労強度試験である。

試験内容の詳細を「表 2.1」に示す。

SUS 304 鋼板材のリラクセーション試験は 600°C で実施した。

SUS 304 鋼板材のひずみ波形効果試験は、550°C における繰返しサイクルに伴う発生応力のひずみ速度依存性試験および対称三角波、鋸歯状波 (Slow-Fast) の低サイクル疲労試験である。

また、インコネル 718 板材については、500°C、550°C ひずみ速度 0.1%/sec. の低サイクル疲労試験である。また補足試験として疲労試験片の採取方向と同じ圧延方向の高温引張試験も実施した。

この他に、低サイクル疲労試験後の金属組織観察と破断面の走査型電子顕微鏡による観察も行なった。

2.2 試験結果の概要

(1) SUS 304 鋼板材のリラクセーション試験

a) 600°C 全ひずみ 0.2%、0.5% のリラクセーション試験結果を既に実施している 500°C、550°C のものと比較すると、500°C 550°C の場合には、リラクセーション試験開始直後初期応力緩和が生じた後、一旦安定し、その後再び応力緩和し続けるが、600°Cにおいては、初期応力緩和は、500°C、550°C ほど大きくなく比較的緩やかであり、かつ初期応力緩和後も安定することなく残留応力は低下した。また残留応力レベルについては、短時間側では、試験

温度間の差異は明瞭に現われなかつたが、10時間以降の長時間側で残留応力レベルは $500 \rightarrow 550 \rightarrow 600^{\circ}\text{C}$ と低くなり、明らかに温度依存性が認められた。

b) 600°C 全ひずみ 0.2% , 0.5% のリラクセーション試験結果を、クリープひずみ式による計算結果と比較すると、短時間側ではクリープひずみ式による記述は難しいが、長時間側では時間係数 $\alpha_R = 1$ の計算結果とほぼ一致する。

(2) SUS 304 鋼板材の低サイクル疲労強度に及ぼすひずみ波形効果

a) 発生応力のひずみ速度依存性を 550°C で調べたところ、実施したひずみ速度範囲 $\dot{\epsilon} = 0.001 \sim 1 \%/\text{sec.}$ では、 $\dot{\epsilon}$ の大きい方が応力が小さいという負のひずみ速度依存性を示した。但し繰返しサイクル中の定常応力は $\dot{\epsilon} = 0.01 \%/\text{sec.}$ 付近で最大値を示し $\dot{\epsilon} > 0.01 \%/\text{sec.}$ では、負のひずみ速度依存性、 $\dot{\epsilon} < 0.01 \%/\text{sec.}$ では正のひずみ速度依存性を示した。

b) 550°C にて、ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0.01 \%/\text{sec.}$ の対称三角波および引張方向ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0.005 \%/\text{sec.} \rightarrow$ 圧縮方向ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 1.0 \%/\text{sec.}$ の鋸歯状波の低サイクル疲労試験を実施した結果、鋸歯状波の疲労寿命は、三角波に比較して $70 \sim 85\%$ に低下した。

(3) インコネル 718 板材の高温強度試験

a) 高温引張強度（圧延方向）は、今回低サイクル疲労試験を実施した 500 , 550°C 付近では、既に得ている圧延方向に対して垂直方向の試験結果と強度、延性ともにほぼ同等である。また米国データと比較すると、強度はそのデータバンドの上限に、延性は下限近傍に位置する。

b) 500°C , 550°C における低サイクル疲労強度は、 500°C では全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_t = 0.9\%$ で 550°C では $\Delta\varepsilon_t = 0.8\%$ でそれぞれほぼ疲労限となつた。

表 2.1 : 試験研究範囲一覧
Table 2.1 : Schedule of Present Test

テーマ	供試材 及び 試験片採取位置	試験項目	試験温度 °C	ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ %/sec	ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_t$ (%)	負荷 ひずみ ϵ_t (%)	保持 時間 (H)	試験片 員 数
SUS 304 鋼板材の リラクセーション	SUS 304 鋼板材 板厚 40mm (A 4 材) $\frac{1}{4}t$ 内層	リラク セーショ ン試験	** 550 600	- -	- -	0.2 0.2, 0.5	2000 2000	1 3
SUS 304 鋼板材の 低サイクル疲労強 度に及ぼすひずみ 波形効果	SUS 304 鋼板材 板厚 40mm (A 7 材) $\frac{1}{2}t$ 内層	疲労試験	550	0.001 ~ 1.0 0.01 0.005 & 1.0	1.0 0.5, 0.8, 1.0 1.2, 1.5	- -	- -	2 10
インコネル 718 の高温強度試験	インコネル 718 板厚 20mm (E 1 材 Heat No. N-1933 $\frac{1}{2}t$ 内層	引張試験 疲労試験	** RT, 450 500, 550 600, 650 500 550	0.3%/min. 0.1	- - 0.9, 1.0, 1.2 1.5 0.8, 0.9, 1.0 1.2, 1.5	- - -	- -	15 4 5

* SN244 81-01 高速原型炉構造材料試験用の供試材料一覧に従った材料の識別記号である。

** 自主研究

3. 供 試 材

3.1 SUS 304 鋼板材の仕様および確性試験検査結果

熱間圧延オーステナイトステンレス鋼 SUS 304 鋼板材の製造仕様概要を「表 3.1」に示す。

リラクセーション試験に供した SUS 304 鋼板材の製造工程を「図 3.1」に、また、その確性試験検査結果（製品分析値、室温と 500°C における引張性質、結晶粒度、液体浸透探傷、超音波探傷など）を「表 3.2」に示す。

低サイクル疲労強度に及ぼすひずみ波形効果試験に用いた供試材は別チャージ材であり、その確性試験検査結果を同様に「表 3.3」に示す。

いずれの供試材も規格値を満足している。

3.2 インコネル 718 板材の仕様および確性試験検査結果

インコネル 718 板材の製造仕様概要を「表 3.4」に示す。

供試材の確性試験検査結果を「表 3.5」に示す。

表 3.1 : 熱間圧延ステンレス鋼板製造仕様概要

Table 3.1 : Summary of Manufacturing Specifications
of SUS 304 Plate

項目	内 容																								
適用規格	1. JIS G4304—1972 「熱間圧延ステンレス鋼板」 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」																								
製 造	1. 製造方式 : 電気炉溶製鋼塊の熱間圧延 2. 热処理 : JIS G4304 による固溶化熱処理 $1010^{\circ}\text{C} \sim 1150^{\circ}\text{C}$ 水冷																								
品 質 管 理	1. 化学成分 (とりべ分析値 Wt %) <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>C</th><th>Si</th><th>Mn</th><th>P</th><th>S</th><th>Ni</th><th>Cr</th><th>Co</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>≤ 0.08</td><td>≤ 1.00</td><td>≤ 2.00</td><td>≤ 0.04</td><td>≤ 0.03</td><td>8.00 ~ 10.50</td><td>18.00 ~ 20.00</td><td>≤ 0.25</td></tr> </tbody> </table> 2. 機械的性質 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <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>≥ 21</td><td>≥ 53</td><td>≥ 40</td><td>≤ 187</td></tr> </tbody> </table>	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.04	≤ 0.03	8.00 ~ 10.50	18.00 ~ 20.00	≤ 0.25	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	ブリネル 硬さ (HB)	≥ 21	≥ 53	≥ 40	≤ 187
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co																		
≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.04	≤ 0.03	8.00 ~ 10.50	18.00 ~ 20.00	≤ 0.25																		
0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	ブリネル 硬さ (HB)																						
≥ 21	≥ 53	≥ 40	≤ 187																						
試 験 及び 検査方法	1. とりべ分析 : なし 2. 製品分析 : JIS G1211～G1218 3. 引張試験 : JIS Z2241、G0567 4. 硬さ試験 : JIS Z2243 5. 超音波探傷試験 : 通産省告示第501号 1条 垂直法による 100%走査																								

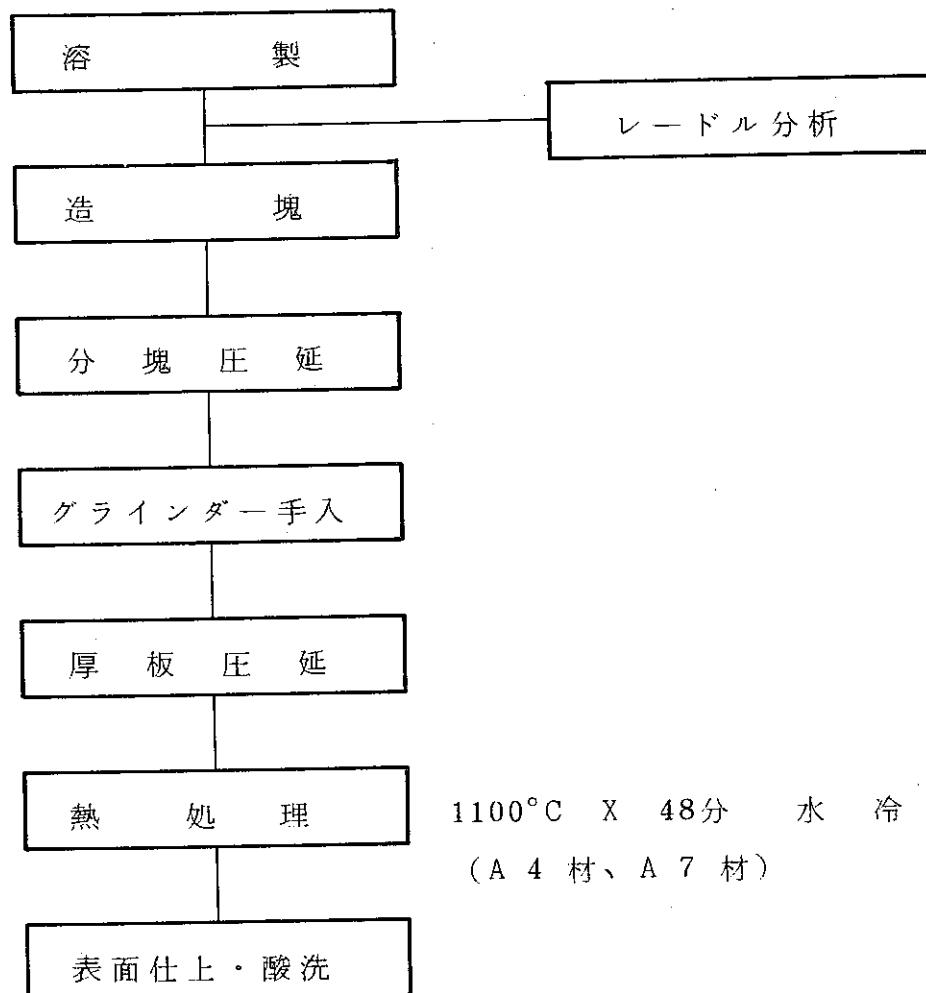


図 3.1 : 热間圧延ステンレス鋼板の製造工程

Fig. 3.1 : Manufacturing Process of SUS 304 Plate

表 3.2 : SUS 304 鋼板材の確性試験結果

Table 3.2 : Certified Test Results of SUS 304 Plate

a) 製品分析試験結果 (Wt %) D 4656 A 4 材

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co
要 求 値	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.04	≤ 0.03	8.00 ~ 10.50	18.00 ~ 20.00	≤ 0.25
分 析 値	0.05	0.58	1.00	0.028	0.003	9.10	18.45	0.07

b) 熱処理結果

1100°C X 48 分 水冷

c) 機械試験結果

項 目	0.2% 耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	ブリネル 硬 さ (HB)
要 求 値	≥ 21	≥ 53	≥ 40	≤ 187
室 溫 試 験	23.0	62.0	61.0	139
500°C 試 験	13.8	39.0	40.0	-

d) その他の試験結果

結 晶 粒 度	液体浸透探傷	超音波探傷	外観・寸法検査
5.0	Good	Good	Good

表 3.3 : SUS 304 鋼板材の確性試験結果

Table 3.3 : Certified Test Results of SUS 304 Plate

a) 製品分析試験結果 (Wt %) N 9482 A 7 材

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co
要求 値	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.04	≤ 0.03	8.00 ~ 10.50	18.00 ~ 20.00	≤ 0.25
分析 値	0.05	0.60	0.87	0.026	0.002	8.94	18.59	0.12

b) 热処理結果

1100°C X 48 分 水 冷

c) 機械試験結果

項目	0.2% 耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	ブリネル 硬さ (HB)
要求 値	≥ 21	≥ 53	≥ 40	≤ 187
室温試験	23.0	64.0	63.0	135
550°C 試験	12.0	39.0	40.0	-

d) その他の試験結果

結晶粒度	液体浸透探傷	超音波探傷	外観・寸法検査
A.G.S. 4.5	Acceptable	Good	Good

表 3.4 : インコネル 718 板材の製造仕様概要
 Table 3.4 : Summary of Manufacturing Specifications
 of INCONEL 718 Plate

項目	内 容																																															
適用規格 (参考)	1. AMS (Aerospace Material Specification) 5596C、5597																																															
製 造	1. 製造方式 : 真空アーク溶製インゴットの熱間圧延 2. 热処理 : AMS による固溶化及び時効熱処理																																															
品 質 管 理	<p>1. 化学成分 (とりべ分析値 %)</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td><i>C</i></td><td>≤ 0.08</td> <td><i>Cu</i></td><td>≤ 0.30</td> </tr> <tr> <td><i>Si</i></td><td>≤ 0.35</td> <td><i>Co</i></td><td>≤ 1.00</td> </tr> <tr> <td><i>Mn</i></td><td>≤ 0.35</td> <td><i>Ti</i></td><td>$0.65 \sim 1.15$</td> </tr> <tr> <td><i>P</i></td><td>≤ 0.015</td> <td><i>Nb + Ta</i></td><td>$4.75 \sim 5.50$</td> </tr> <tr> <td><i>S</i></td><td>≤ 0.015</td> <td><i>B</i></td><td>≤ 0.006</td> </tr> <tr> <td><i>Ni</i></td><td>$50.00 \sim 55.00$</td> <td><i>Al</i></td><td>$0.20 \sim 0.80$</td> </tr> <tr> <td><i>Cr</i></td><td>$17.00 \sim 21.00$</td> <td><i>Fe</i></td><td>bal</td> </tr> <tr> <td><i>Mo</i></td><td>$2.80 \sim 3.30$</td> <td></td><td></td> </tr> </tbody> </table> <p>2. 機械的性質</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>温 度</th> <th>0.2%耐力 (kg/mm²)</th> <th>引張強さ (kg/mm²)</th> <th>伸び (%)</th> <th>硬さ (HRc)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R.T</td> <td>≥ 100.0</td> <td>≥ 126.0</td> <td>≥ 10.0</td> <td>≥ 36</td> </tr> <tr> <td>650°C</td> <td>≥ 83.6</td> <td>≥ 98.0</td> <td>≥ 10.0</td> <td>≥ 36</td> </tr> </tbody> </table>	<i>C</i>	≤ 0.08	<i>Cu</i>	≤ 0.30	<i>Si</i>	≤ 0.35	<i>Co</i>	≤ 1.00	<i>Mn</i>	≤ 0.35	<i>Ti</i>	$0.65 \sim 1.15$	<i>P</i>	≤ 0.015	<i>Nb + Ta</i>	$4.75 \sim 5.50$	<i>S</i>	≤ 0.015	<i>B</i>	≤ 0.006	<i>Ni</i>	$50.00 \sim 55.00$	<i>Al</i>	$0.20 \sim 0.80$	<i>Cr</i>	$17.00 \sim 21.00$	<i>Fe</i>	bal	<i>Mo</i>	$2.80 \sim 3.30$			温 度	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	硬さ (HRc)	R.T	≥ 100.0	≥ 126.0	≥ 10.0	≥ 36	650°C	≥ 83.6	≥ 98.0	≥ 10.0	≥ 36
<i>C</i>	≤ 0.08	<i>Cu</i>	≤ 0.30																																													
<i>Si</i>	≤ 0.35	<i>Co</i>	≤ 1.00																																													
<i>Mn</i>	≤ 0.35	<i>Ti</i>	$0.65 \sim 1.15$																																													
<i>P</i>	≤ 0.015	<i>Nb + Ta</i>	$4.75 \sim 5.50$																																													
<i>S</i>	≤ 0.015	<i>B</i>	≤ 0.006																																													
<i>Ni</i>	$50.00 \sim 55.00$	<i>Al</i>	$0.20 \sim 0.80$																																													
<i>Cr</i>	$17.00 \sim 21.00$	<i>Fe</i>	bal																																													
<i>Mo</i>	$2.80 \sim 3.30$																																															
温 度	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	硬さ (HRc)																																												
R.T	≥ 100.0	≥ 126.0	≥ 10.0	≥ 36																																												
650°C	≥ 83.6	≥ 98.0	≥ 10.0	≥ 36																																												
試 験 及 び 検査方法	<p>1. とりべ分析 : JIS G1253</p> <p>2. 製品分析 : JIS G1211~G1218</p> <p>3. 引張試験 : JIS Z2241、G4304</p> <p>4. 硬さ試験 : JIS Z2243</p> <p>5. 超音波探傷試験 : 通産省告示第501号、7条</p>																																															

表 3.5 : インコネル 718 板材の確性試験結果

Table 3.5 : Certified Test Results of
INCONEL 718 Plate

a) 分析試験結果 (Wt %) N 1933 E 1 材

分析項目	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>
Ladle	0.048	0.15	0.06	0.006	0.007	53.70	18.60	2.92
Check	0.050	0.20	0.06	0.006	0.008	54.00	18.20	2.93
分析項目	<i>Cu</i>	<i>Co</i>	<i>Ti</i>	<i>Nb+Ta</i>	<i>B</i>	<i>Al</i>	<i>Fe</i>	—
Ladle	0.037	0.13	1.02	5.16	0.003	0.48	bal	—
Check	0.022	0.11	1.05	5.28	0.003	0.49	bal	—

b) 熱処理結果

980°C X 1h 水冷 → 718°C X 8h 炉冷 →
 621°C X 8h 空冷

c) 機械試験結果

温 度	0.2% 耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	硬さ (HRc)
R.T	112.9	135.9	22.4	42.0
	109.3	131.3	20.0	
650°C	97.0	109.3	22.2	41.3 参考値
	98.3	111.7	26.7	

d) その他の試験結果

超音波探傷	外観検査	平担度
良	良	良

4. 試験方法

4.1 試験片採取方法 および 試験片

SUS 304 鋼板材のリラクセーション試験片の採取位置と試験片形状を「図 4.1」に示す。試験片長手方向が圧延方向と一致するように採取した。試験片は、平行部直径 10mm^ϕ 、標点間距離 100mm の突起付中実丸棒試験片である。

SUS 304 鋼板材の低サイクル疲労試験片の採取位置と試験片形状を「図 4.2」に示す。試験片長手方向が圧延方向と一致するように採取し、その形状は、平行部直径 10mm^ϕ 、平行部長さ 40mm の中実丸棒試験片である。

インコネル 718 板材の引張試験片 および 低サイクル疲労試験片の採取位置と試験片形状をそれぞれ「図 4.3, 4.4」に示す。いずれも試験片長手方向が圧延方向と一致するように採取した。引張試験片は、平行部直径 8mm^ϕ 、標点間距離 50mm である。また疲労試験片は、平行部直径 6mm^ϕ 、平行部長さ 32mm の中実丸棒試験片である。

4.2 試験機仕様

使用した、リラクセーション試験機、疲労試験機 および 引張試験機の仕様を「表 4.1 a) ~d)」に示す。

リラクセーション試験機は、テコ荷重式であり、試験片標点間伸びを検出し、送錐移動によって伸びを一定に制御している。荷重容量は、3 Ton および 5 Ton である。試験片の伸び、送錐の移動量（荷重変化）は、短時間側においてはペン式記録計で、長時間側においては打点式記録計で記録した。温度は試験中常時測定しているまた、周囲温度変化が、ひずみ検出部分に及ぼす影響をできるだけ避けるため風防構造になっている。

疲労試験機は、荷重容量 10 Ton の電気油圧サーボ制御試験機である。試験片の温度変化を防止するため、やはり風防構造となっている。

引張試験機は、クロスヘッドねじ駆動の荷重容量 10 Ton のインストロン試験機である。

4.3 試験方法

4.3.1 リラクセーション試験方法

リラクセーション試験は、JIS Z2276 「金属材料の引張リラクセーション試験方法」および FBR 金属材料試験実施要領書¹⁾に準拠して行った。目標設定ひずみに達するまでの初期負荷時間は 1.5~2.7 分である。目標設定ひずみに達すると同時にリラクセーション試験を開始した。

4.3.2 低サイクル疲労試験方法

低サイクル疲労試験は、FBR 金属材料試験実施要領書¹⁾に準拠して行った。

SUS 304 鋼板材、インコネル 718 板材のいずれも、標点間距離 25mm の軸方向ひずみ制御で行っている。

試験中の温度は、試験片の中央部 およびその上下 12.5mm の計 3ヶ所に 0.3mm^ϕ の PR 热電対をガラスウールのひもで固定し測定した。そして中央部が目標試験温度となるように制御した。

試験片の破損繰返し数 N_f は、引張側最大荷重が $3/4$ に低下したときの繰返し数 $N_{2.5}$ とした。比較のため最大荷重に到達したときの繰返し数 N_0 と荷重が 5% 低下したときの繰返し数 N_5 などの疲労寿命値も求めた。

また、全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_t$ 中の塑性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_p$ はヒステリシスカーブより求めた。

4.3.3 引張試験方法

高温引張試験は、JIS G0567 および FBR 金属材料試験実施要領書¹⁾に準拠して行った。（但し、試験片形状は、標点間距離が、6.25 D となっている）荷重一伸び線図は、試験機付属の X-Y 記録計にも記録されるが、標点間伸びのより精度を得るために、さらに動ひずみ測定器も併用した。初期ひずみ速度は $0.3\%/\text{min.}$ で

行い、全ひずみが 1.2~1.5% の時点でクロスヘッド速度を切換える。その後は、ひずみ速度を 10%/min.とした。

4.3.4 金属組織 および破面観察

SUS 304 鋼板材、インコネル 718 板材両者の低サイクル疲労試験後の破断面近傍の断面ミクロ組織の観察 および疲労破面の走査型電子顕微鏡による観察を行った。使用した走査型電子顕微鏡は、日本電子製 JSM-U3 である。

表 4.1 : 試験機仕様（リラクセーション試験機、疲労試験機
引張試験機）

Table 4.1 : Specifications of Relaxation, Fatigue and
Tensile Test Machines

a) リラクセーション試験機

試験機No. 項目	G F 0 0 1 動燃貸与（前川試験機）	G F 0 0 2 動燃貸与（東伸試験機）
1. 試験機本体		
(1) 形式	二重テコ式重錘型	堅形二重テコ荷重式 移動重錘型
(2) 最大負荷容量	3 Ton (レバー比 1:100)	5 Ton (レバー比 1:50)
(3) 初荷重	0 kg	0 kg
2. 加熱装置		
(1) 形式	管状堅形開閉式	管状堅形開閉式
(2) 使用温度	max. 900°C	max. 900°C
(3) 発熱部	カンタル線 3 回路	カンタル線 3 回路
(4) 容量	7 KW	4.5 KW
3. 温度調節装置		
(1) 形式	SCR PID 制御方式	SCR PID 制御方式
(2) 設定範囲	100 ~ 900°C	100 ~ 900°C
(3) 温度調節精度	± 2°C 以内	± 2°C 以内
(4) 温度検出器	C A 熱電対	Pt 抵抗
4. 温度測定 記録装置	ペン式、打点式 温度記録計	ペン式、打点式 温度記録計
5. 伸び、荷重測定 記録装置		
(1) 形式	つば間の伸び計測方式 (デジタル式)	デジタルリニアゲージ による標点間測定方式
(2) 伸び計	差動変圧器	デジタルリニアゲージ
(3) 伸び、荷重 記録計	X - T 形 3 ペン式	X - T 形 3 ペン式

b) 疲労試験機

項目 試験機 No.	H F 0 0 1 動燃貸与装置
1. 試験機本体	<p>(1) 形式 (1) 電気油圧サーボ閉回路制御方式</p> <p>(2) ロードセル (2) 定格 20 Ton</p> <p>(3) 油圧加振器 (3) 動的 10 Ton、ストローク ± 25mm</p> <p>(4) 油圧ユニット (4) 圧力 210 kg/cm² 36 l/min</p>
2. 制御装置	<p>(1) 形式 (1) デジタル式プログラムランプ ジェネレーター (16 ビット分解能)</p> <p>(2) 制御量 (2) 荷重、標点間変位</p>
3. 加熱装置	<p>(1) 形式 (1) SCR 制御方式 10 KW 高周波誘導加熱方式 (300 KHZ)</p> <p>(2) 設定温度範囲 (2) 50 ~ 1000°C</p> <p>(3) 制御精度 (3) 1 % 温度分布 ± 5°C 以内</p> <p>(4) 温度検出器 (4) 13 % PR 热電対</p>
4. 記録装置	<p>(1) 4 ペンレコーダ (温度、変位、荷重)</p> <p>(2) X-Y-T レコーダ (変位、荷重)</p>
5. 伸び計	<p>(1) 軸伸び計 (ストレンゲージ方式)</p> <p>(2) 径伸び計</p>
6. その他	(1) 試験片観察装置

c) 疲労試験機

項目	試験機 No H F 0 0 2 動燃貸与装置
1. 試験機本体	<p>(1) 形式 電気油圧サーボ閉回路制御方式</p> <p>(2) ロードセル 定格 20 Ton</p> <p>(3) 油圧加振器 動的 10 Ton、ストローク ±25mm</p> <p>(4) 油圧ユニット 圧力 210 kg/cm², 18 l/min.</p>
2. コンピュータ制御記録装置	<p>(1) U-300 容量 : 64 K バイト</p> <p>(2) コンソールタイプライター 807 A 600字/分</p> <p>(3) シリアルプリンター F 883</p> <p>(4) 磁気ディスク PF 608 A 10 M バイト</p> <p>(5) グラフィックディスプレイ</p> <p>(6) デジタルファンクション ジェネレータ (荷重、伸び、変位)</p>
3. 加熱装置	<p>(1) 形式 SCR 制御方式 10 KW 高周波誘導加熱方式 (300 KHZ)</p> <p>(2) 設定温度範囲 50 ~ 1000°C</p> <p>(3) 制御精度 1 %, 温度分布 ± 5°C 以内</p> <p>(4) 温度検出器 13 % PR 热電対</p>
4. 記録装置	<p>(1) 4 ペンレコーダ (温度、変位、荷重)</p> <p>(2) X-Y レコーダ (変位、荷重)</p>
5. 伸び計	<p>(1) 軸伸び計 (ストレインゲージ方式)</p> <p>(2) 径伸び計</p>

d) 引張試験機

項目 試験機No	E F 0 0 1 社内試験機
1. 試験機本体	<p>(1) 形式 (1) インストロン製 // / 5型</p> <p>(2) 最大負荷量 (2) 10 Ton</p> <p>(3) クロスヘッド昇降速度 (3) 0.005 ~ 500mm/min</p>
2. 加熱装置	<p>(1) 形式 (1) 東京衡機製 管状堅形開閉式</p> <p>(2) 使用温度範囲 (2) 100 ~ 900°C max 1000°C</p> <p>(3) 発熱体 (3) カンタル線 500 W X 3分割巻</p> <p>(4) 容量 (4) 3.0 KW</p>
3. 温度調節装置	<p>(1) 形式 (1) 東京衡機製 CF-14型</p> <p>(2) 温度範囲 (2) 100 ~ 900°C</p> <p>(3) 温度調節精度 (3) ± 2°C</p>
4. 測定記録装置	<p>(1) 温度記録装置 (1) 大倉電気製 3ペンレコーダ</p> <p>(2) Takeda Riken ミニマルチ TR 6355</p> <p>(2) 伸び測定装置 (1) インストロン製 A 69-1033 ストレインゲージクリップ方式</p> <p>(2) 新興通信製 動ひずみ計 DS-6001</p> <p>(3) Midori Precisions 製 LP-50 F</p> <p>(4) 理化電機製 X-Y レコーダ RW-101</p> <p>(5) トリオ製 オシロスコープ CO-1303 A</p>

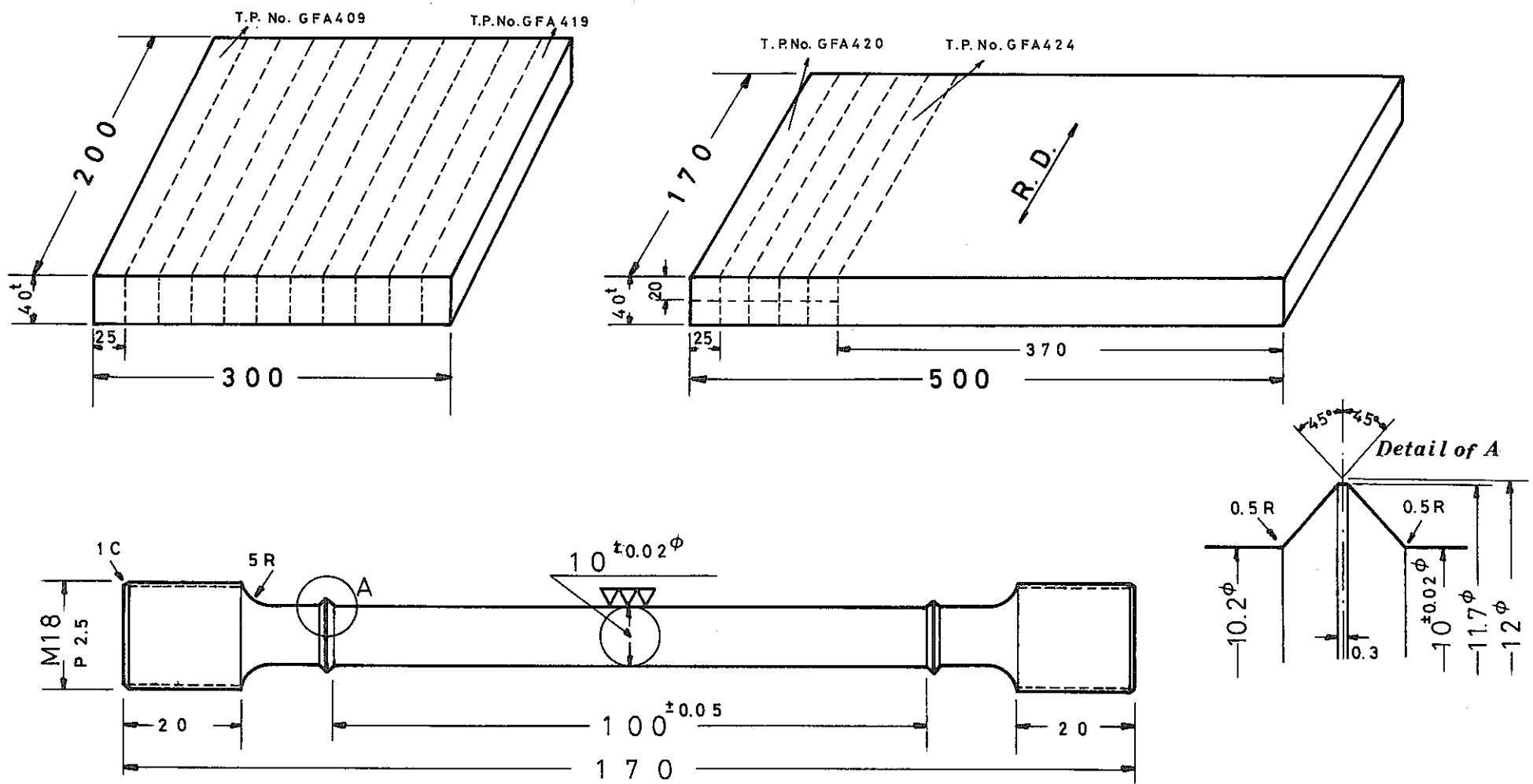


図 4.1 : SUS 304 鋼板材のリラクセーション試験片採取方法 (A 4 材)

Fig. 4.1 : Sampling Method of Relaxation Test Specimens
of SUS 304 Plate (A 4 Material)

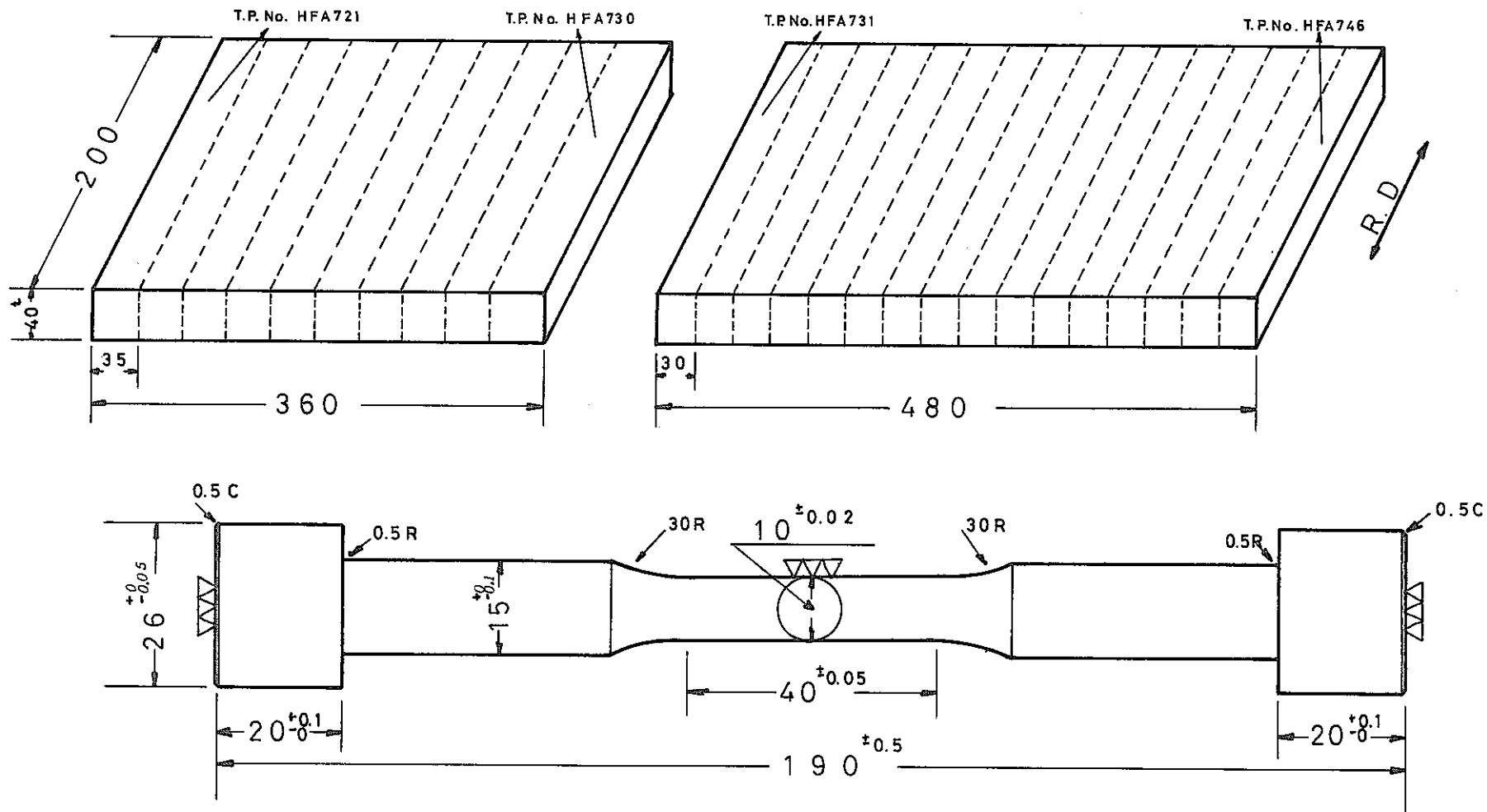


図 4.2 : SUS 304 鋼板材の疲労試験片採取方法 (A7 材)

Fig. 4.2 : Sampling Method of Low Cycle Fatigue Test Specimens of SUS 304 Plate (A7 Material)

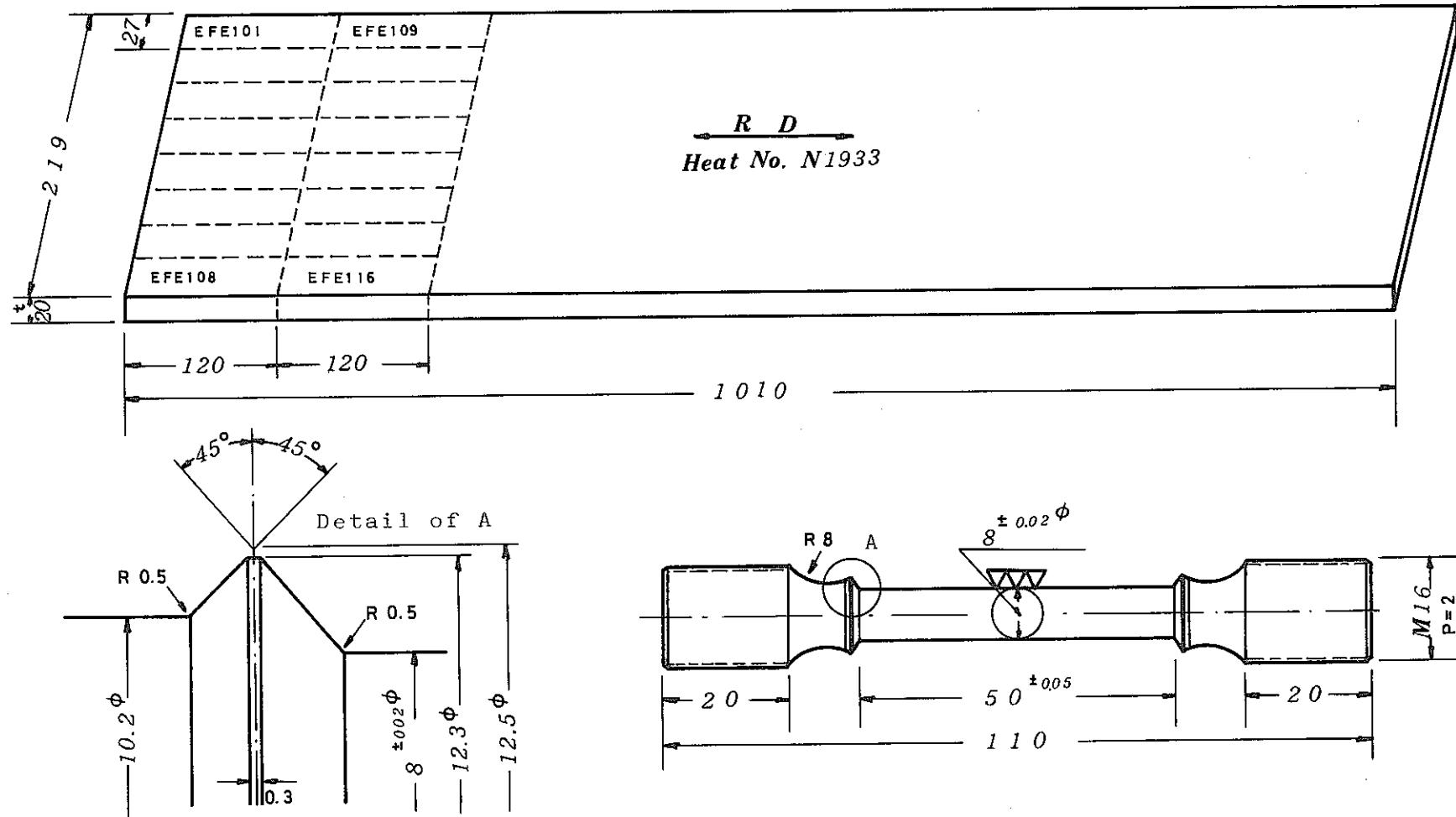


図 4.3 : インコネル 718 板材の引張試験片採取方法 (E 1 材)

Fig. 4.3 : Sampling Method of Tensile Test Specimens of
INCONEL 718 Plate (E 1 Material)

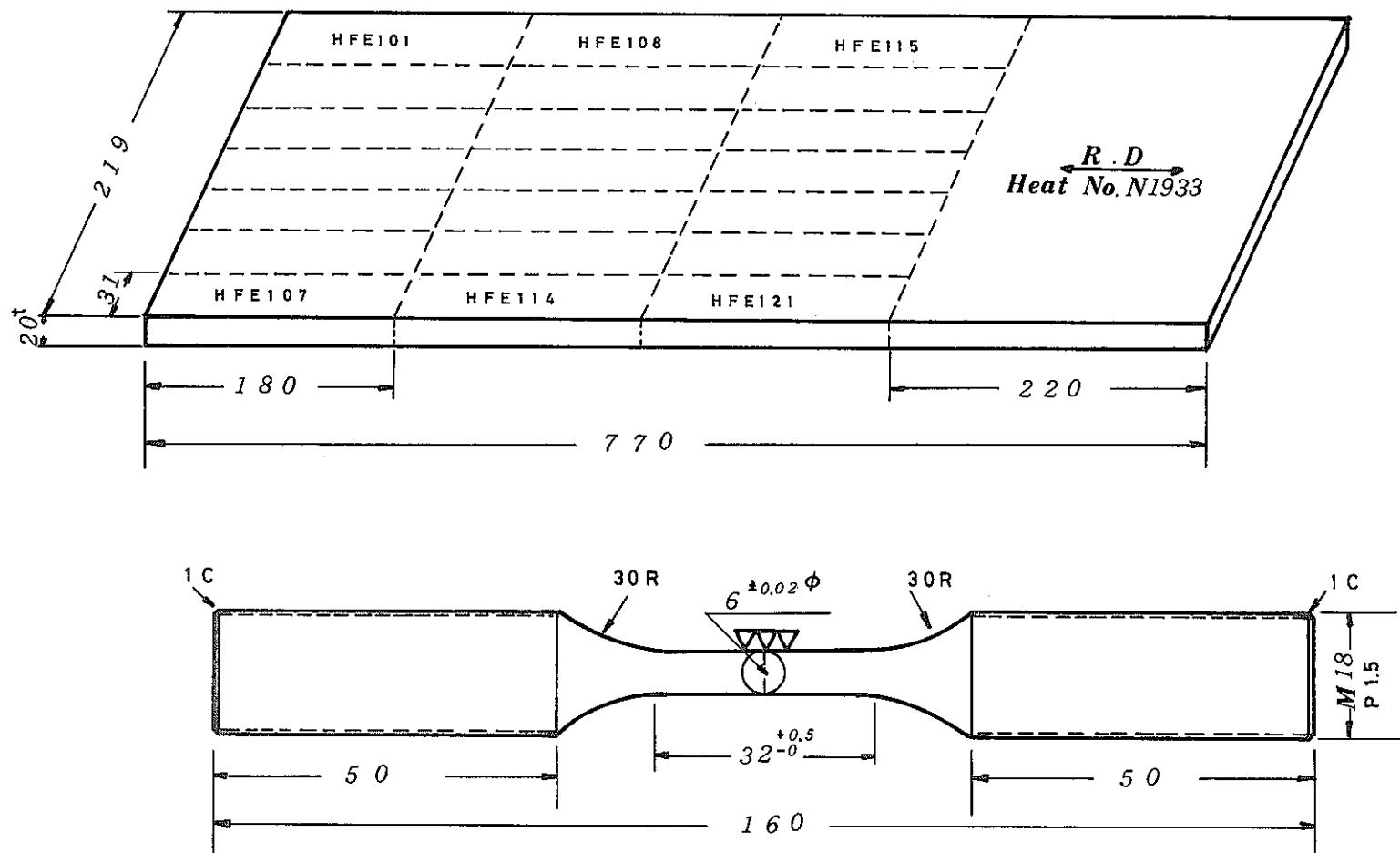


図 4.4 : インコネル 718 板材の疲労試験片採取方法 (E 1 材)

Fig. 4.4 : Sampling Method of Low Cycle Fatigue Test Specimens of INCONEL 718 Plate (E 1 Material)

5. 試験結果

5.1 SUS 304 鋼板材のリラクセーション試験結果および考察

600°Cにおける全ひずみレベル 0.2, 0.5% のリラクセーション試験を 2000 時間まで実施した。得られた結果を「表 5.1, 図 5.1 ~ 図 5.2」に示す。

「図 5.1」は、全ひずみ 0.2% のリラクセーション試験結果である。同図には、既に得ている 500°C, 550°C の全ひずみ 0.2% 試験結果を併記している。⁹⁾ なお、550°C, 0.2% のデータは、他試験条件のものと比べて低下しすぎていると思われたので今回再試験を行った。その結果も同図に併記している。今回の結果は、1~2 kg/mm² 程高目となっている。

600°Cにおける二本の試験結果は、初期応力値に若干差が生じたため、短時間側では残留応力に差が認められるが、長時間側ではほぼ一致している。

「図 5.2」は、全ひずみ 0.5% のリラクセーション試験結果である。同図にもやはり、既に得ている 500°C, 550°C の全ひずみ 0.5% 試験結果を併記している。

「図 5.1, 図 5.2」において、500°C, 550°C のリラクセーション挙動と 600°C のものを比較すると、短時間側と長時間側でそれぞれ次の特徴が認められる。

- (1) 短時間では、500, 550°C の場合には、リラクセーション試験開始直後初期応力緩和が生じ、約 0.1 時間経過後、一旦安定し、その後再び応力緩和し続けるが、600°C の場合には初期応力緩和は 500, 550°C ほど著しくなく、比較的緩やかであり、かつ初期応力緩和後も安定することなく残留応力は低下し続ける。
- (2) 長時間側では、500, 550°C の場合よりむしろ 600°C の方が緩和勾配は緩やかとなっている。このため 2000 時間付近では、550°C と 600°C は同程度の応力値となっている。長時間側での応力緩和勾配の相違は、組織変化の差に起因しているものと考えられる。

次に、今回得られた 600°C におけるリラクセーション特性のクリープひずみ構成式による記述性について検討した結果を述べる。

動燃事業団提案のクリープひずみ式³⁾を用いて算出したリラクセーション曲線と各試験結果を比較したものを「図 5.3～図 5.6」に示す。

ヤング率は、日本機械学会 Eppic⁴⁾のデータを用い、ひずみ硬化則で計算した。時間係数 $\alpha_R = 1$ とし、また、初期応力値は、実験で所定ひずみ設定時に得られる値を採用した。

「図 5.3」は、全ひずみ 0.2% の結果で、試験時間を対数で整理したもの、「図 5.4」は、これを真数で整理したものである。

「図 5.5、図 5.6」は、全ひずみ 0.5% の結果を同様に整理したものである。

これらの図より、短時間側においては、クリープひずみ式による記述は難しいが、長時間側（100 時間以降）では、評価可能であることがわかる。なお、同図には、参考のため、動燃事業団材料強度基準値⁵⁾ Sr 値も併記している。

表 5.1 : SUS 304 鋼板材の 600°C における
リラクセーション試験結果

Table 5.1 : Relaxation Test Results of SUS 304 Plate
at 600°C (D 4656 A 4 材)

材 料	素 材 (mm)	試 験 露 囲 気
SUS 304 鋼板材	40t X 2000 X 1000	大 気 中
材料製造者	試 験 場 所	
新日本製鉄・八幡	株式会社 富士電機総合研究所	

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co
要求値	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.03	8.00 ~10.50	18.00 ~20.00	≤0.25
製品分析	0.05	0.58	1.00	0.028	0.003	9.10	18.45	0.07

試 験 溫 度 °C		6 0 0 °C		
試 験 片 番 号		GFA412	GFA427	GFA419
初期ひずみ (%)		0.2000	0.2005	0.4995
試 験 時 間 (Hrs)		2033	2000	2034
規 定 時 間 で の 残 留 応 力 kg/mm ²	初期応力	13.5	12.3	13.8
	(Hr) 0.01	12.7	11.4	13.3
	0.02	12.3	10.8	13.1
	0.03	12.1	10.5	13.0
	0.05	11.9	10.3	12.8
	0.07	11.8	10.1	12.8
	0.10	11.7	10.0	12.6
	0.20	11.5	9.8	12.2
	0.30	11.3	9.6	11.8
	0.50	11.1	9.4	11.4
	0.70	11.0	9.3	11.1
	1.00	10.8	9.1	10.8
	2.00	10.4	8.8	10.0
	3.00	10.2	8.7	9.6
	5.00	9.8	8.4	9.1
	7.00	9.5	8.3	8.7
	10.00	9.2	8.1	8.4
	20.00	8.6	7.8	7.7
	30.00	8.3	7.6	7.4
	50.00	7.8	7.3	7.0
	70.00	7.6	7.1	6.7
	100.00	7.2	7.0	6.5
	200.00	6.7	6.6	6.2
	300.00	6.3	6.3	6.0
	500.00	5.9	6.0	5.8
	700.00	5.6	5.8	5.7
	1000.00	5.2	5.6	5.6
	2000.00	4.4	5.0	5.4
	Final	4.4	5.0	5.4

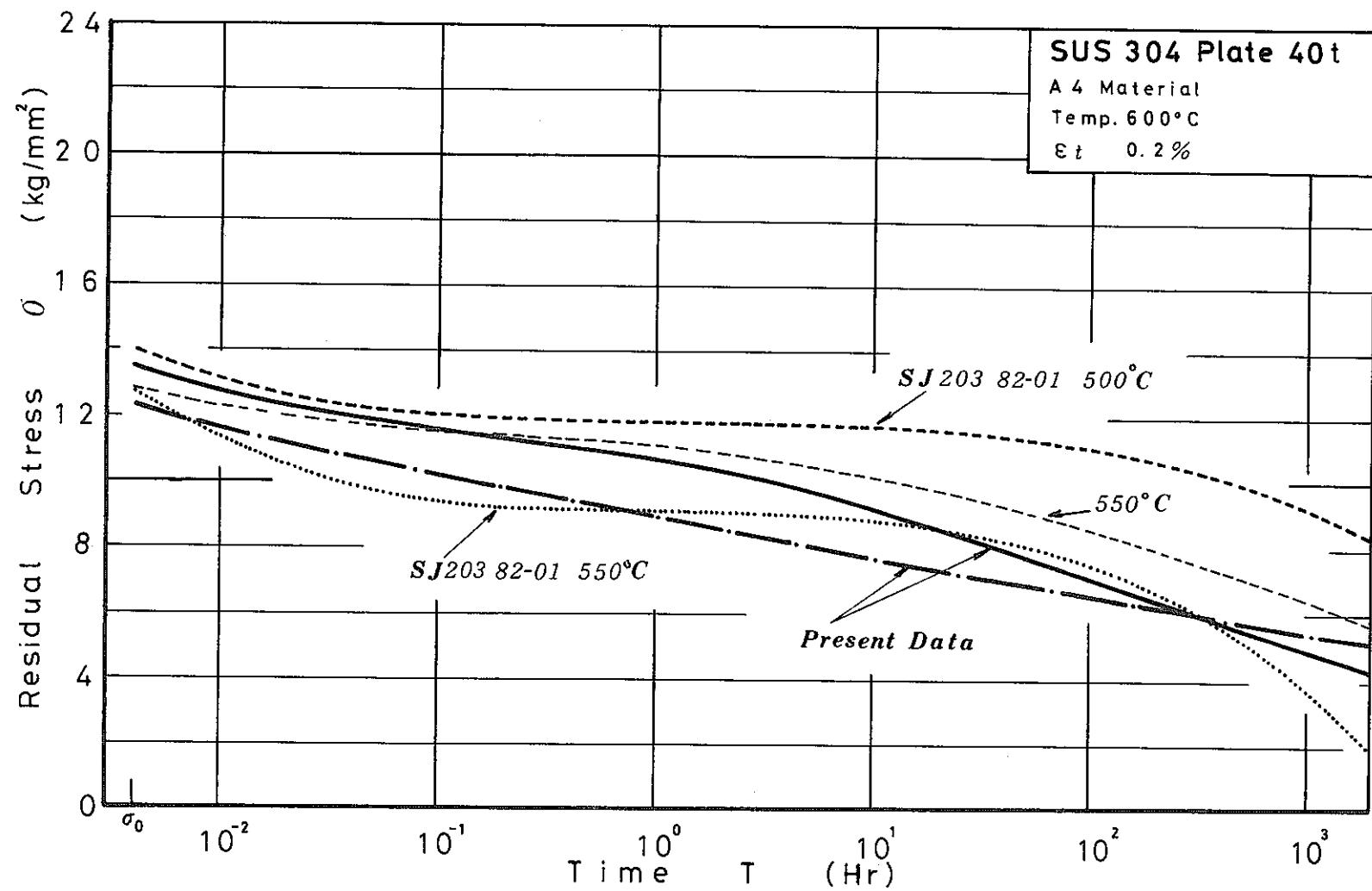


図 5 . 1 : SUS 304 鋼板材の 600°C におけるリラクセーション曲線 (1)

Fig. 5 . 1 : Stress Relaxation Curves at 600°C for SUS 304 Plate (1)

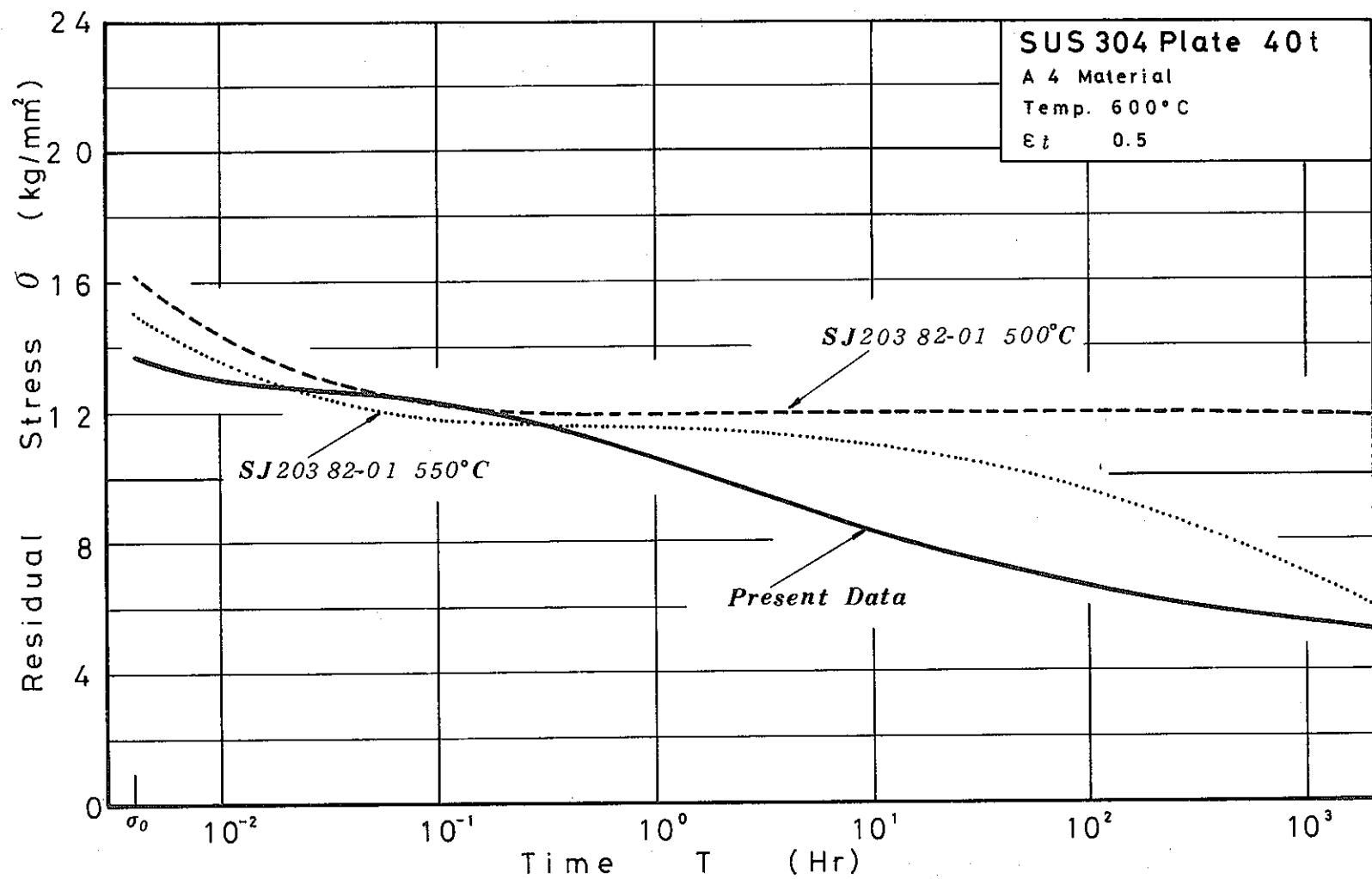


図 5.2 : SUS 304 鋼板材の 600°C におけるリラクセーション曲線 (2)

Fig. 5.2 : Stress Relaxation Curves at 600°C for SUS 304 Plate (2)

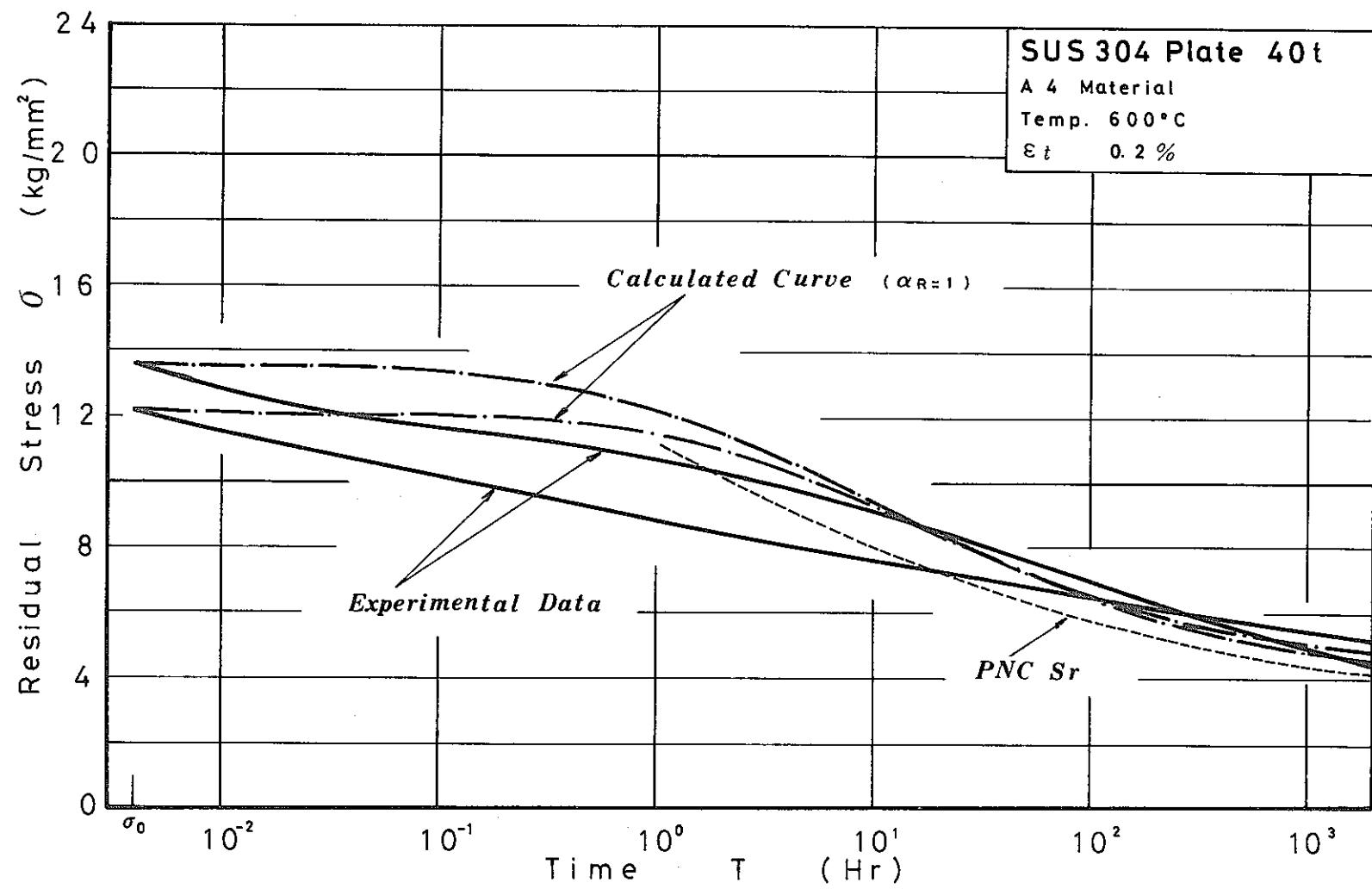


図 5.3 : クリープひずみ式による評価 (1)

Fig. 5.3 : Stress Relaxation Curves Calculated from Creep Strain Formula (1)

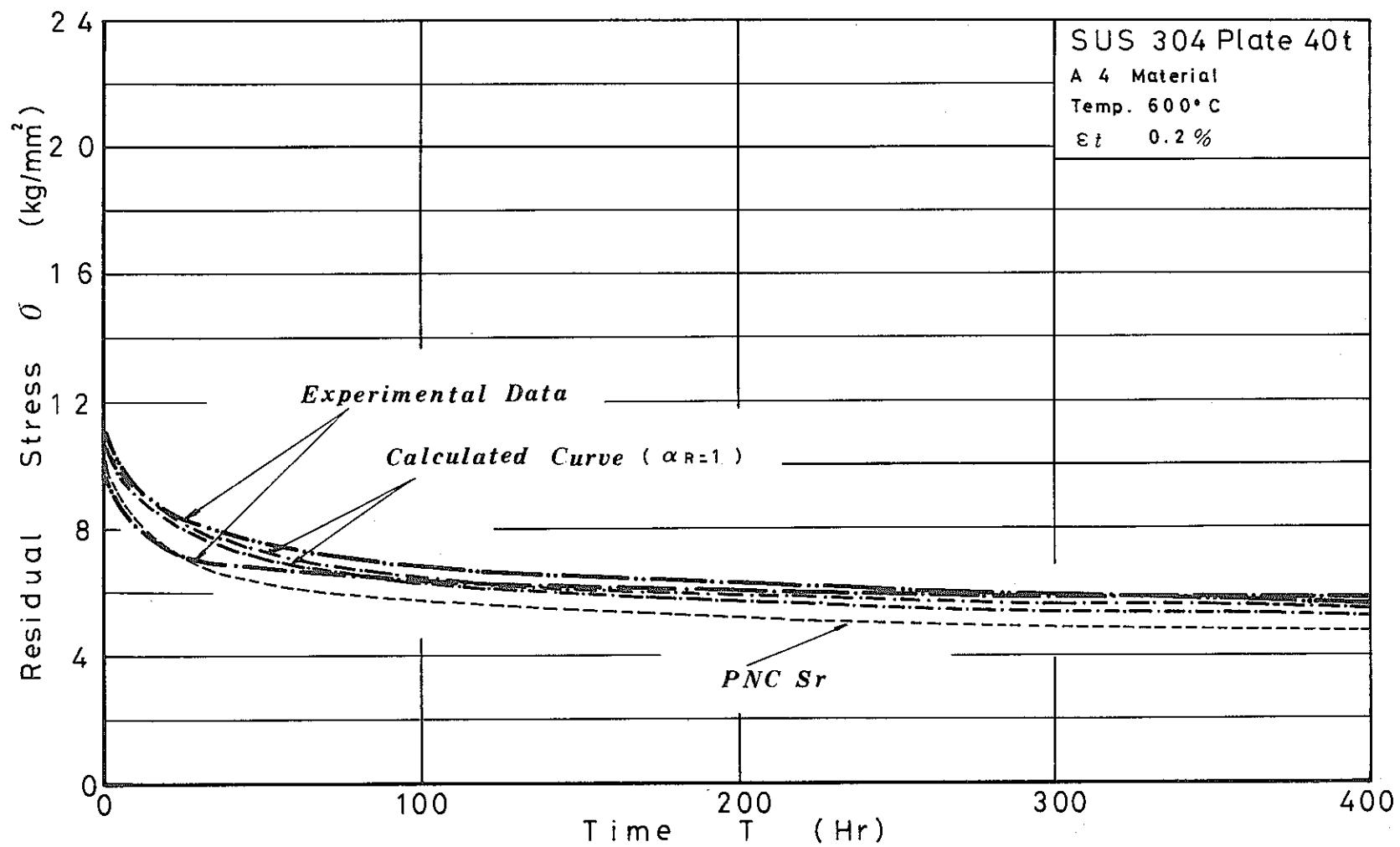


図 5.4 : クリープひずみ式による評価 (2)

Fig. 5.4 : Stress Relaxation Curves Calculated from Creep Strain Formula (2)

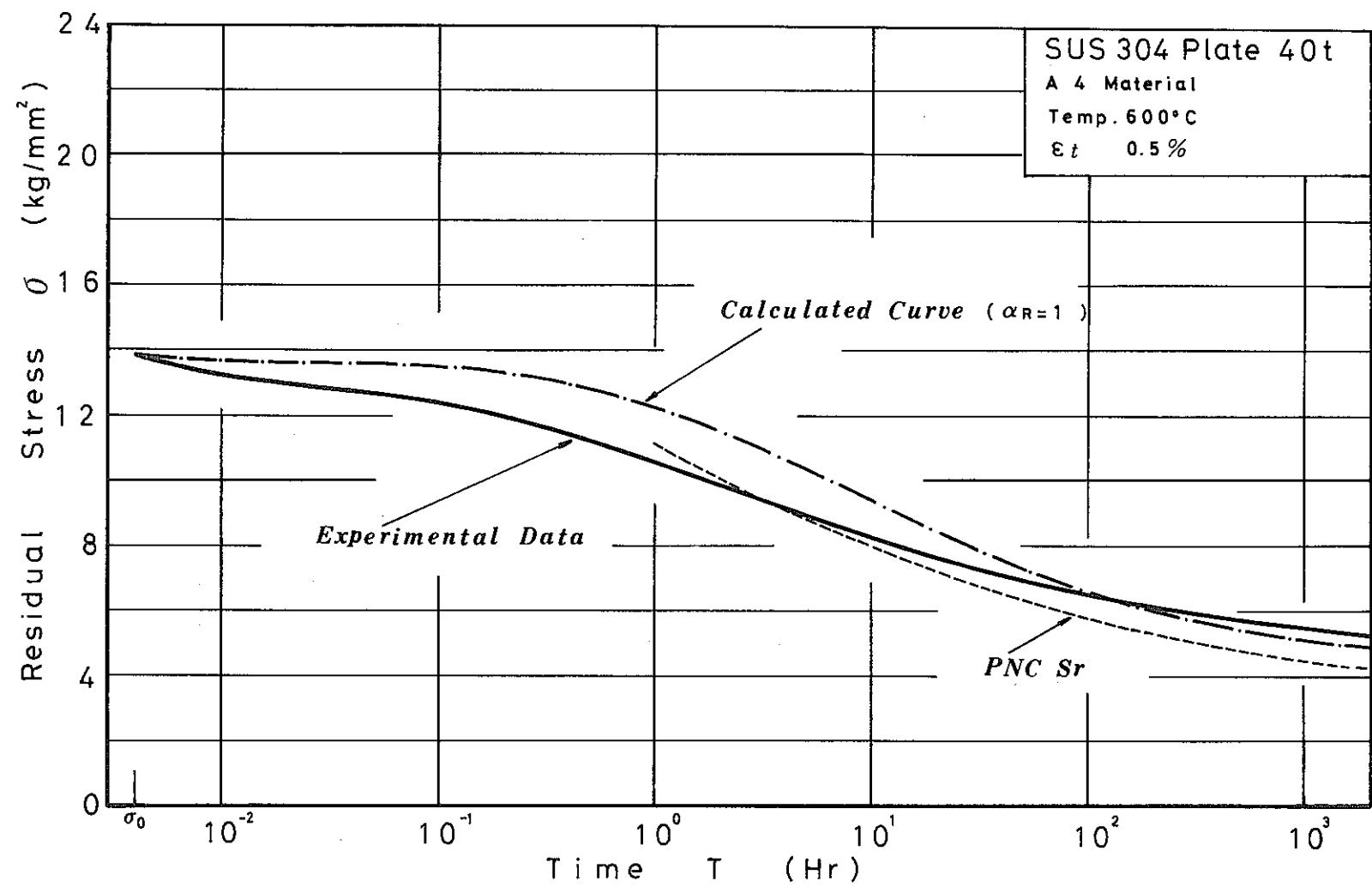


図 5 . 5 : クリープひずみ式による評価 (3)

Fig. 5 . 5 : Stress Relaxation Curves Calculated from Creep Strain Formula (3)

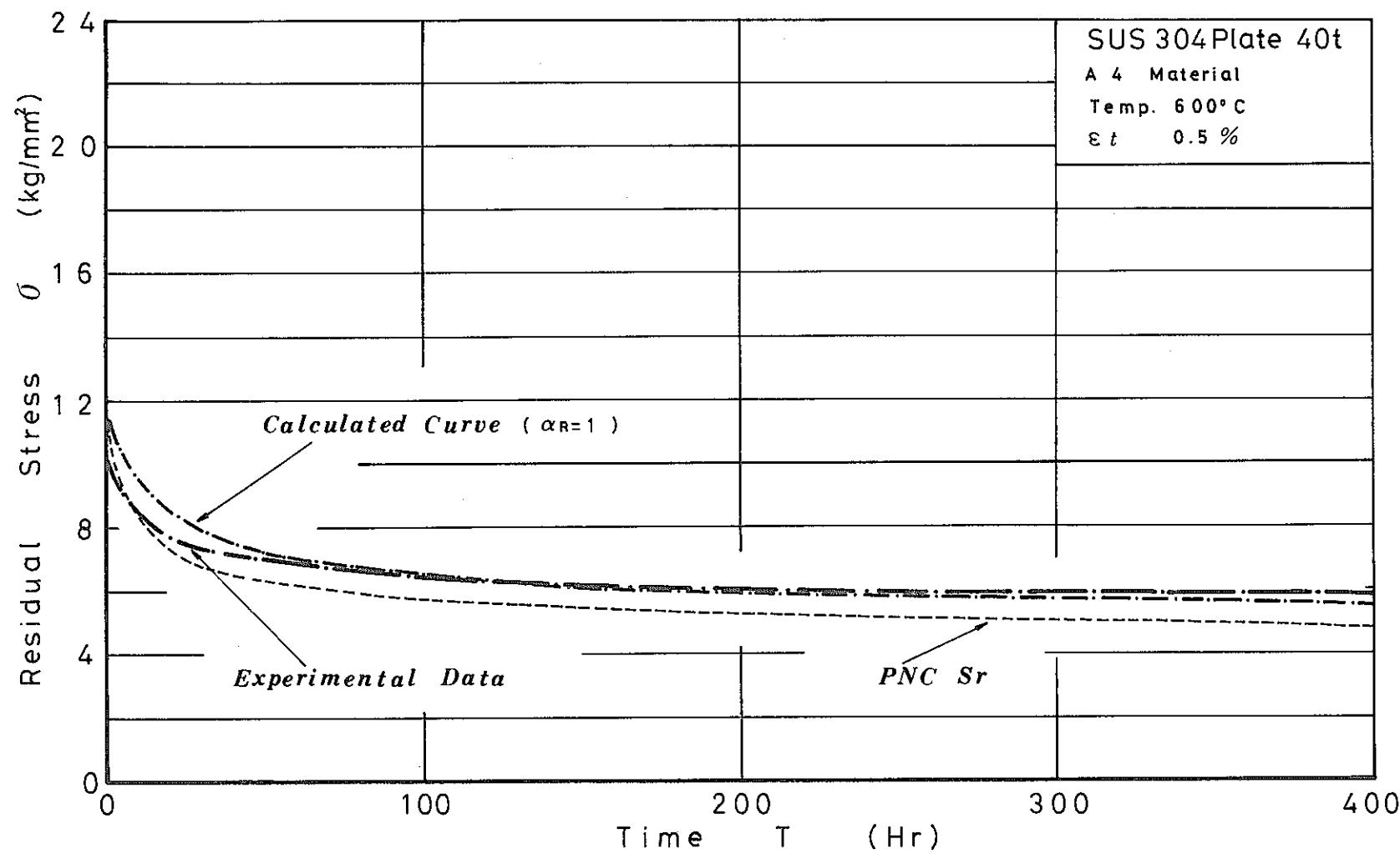


図 5.6 : クリープひずみ式による評価 (4)

Fig. 5.6 : Stress Relaxation Curves Calculated from Creep Strain Formula (4)

5.2 SUS 304 鋼板材の低サイクル疲労強度に及ぼすひずみ波形効果

5.2.1 ひずみ速度依存性試験結果

SUS 304 鋼は、高温下での低サイクル疲労試験においては、動的ひずみ時効が生じるために、クリープによる軟化よりも、動的ひずみ時効による硬化が大きく現われることがある。

このような動的ひずみ時効は、低サイクル疲労寿命に影響を及ぼす。動的ひずみ時効が生じる温度範囲、ひずみ速度範囲については、ある程度明らかにされているが^{6) 7)}それらによると、高速原型炉「もんじゅ」における使用温度 538°C 付近は、動的ひずみ時効が生じやすい温度領域である。通常行われている、ひずみ波形効果試験は、低サイクル疲労寿命に及ぼすクリープ損傷の影響を主目的としているので、従って SUS 304 鋼に関する試験も、クリープ効果が支配的となる 650~700°C 近傍のものが多い。

そこで、SUS 304 鋼の実用温度域 550°C 付近でのひずみ波形効果試験を進めるにあたって、まず、ひずみ速度と発生応力との関係について調べることにした。

ひずみ速度依存性試験は、次のようにして行った。

全ひずみ範囲は $\Delta\epsilon_t = 1\%$ で固定し「図 5.7 a) b)」に示す二通りの方法で、ひずみ速度を変化させた。

第一の方法は、最初に標準的なひずみ速度 0.1%/s. で 40 Cycle 繰返して、加工硬化させた後、ひずみ速度を 1%/s. に上げ、40 Cycle 繰返し、その後ひずみ速度を順次 0.3%/s. \Rightarrow 0.1%/s. \Rightarrow ... \Rightarrow 0.001%/s. と漸減させ各ひずみ速度で 40 Cycle 繰返した。そして最後に再び変形履歴の影響の有無を確認するため 0.1%/s. に戻し、40 Cycle 繰返した。各ひずみ速度の切換えは、ひずみ "0" の点（図中 (a) の A点）に達する直前で行った。また各ひずみ速度 40 Cycle 目の応力を定常応力とした。

第二の方法は、第一の方法だけでは、ひずみ速度変化が、一方向であり、ひずみ速度依存性に変形履歴の影響を含んでいると考えられ

たので、逆にひずみ速度を $0.001\%/\text{s}$ から、順次 $1\%/\text{s}$ まで漸増させた。各ひずみ速度で同じく 40 Cycle 繰返し、また、最初の $0.1\%/\text{s}$ 40 Cycle 最後の $0.1\%/\text{s}$ 40 Cycle も同様に実施した。「図 5.7 (b)」

両試験の結果得られた各ひずみ速度での 1 Cycle 目（切換え直後）および 40 Cycle 目（定常応力）の応力範囲をプロットしたのが「図 5.8, 図 5.9」である。

「図 5.8」は、ひずみ速度漸減の場合「図 5.9」は、ひずみ速度漸増の場合である。図中○印は、ひずみ速度切換え直後 1 Cycle 目の応力範囲を、●印は、40 Cycle 後の定常応力範囲を表わす。すなわち、 $\circ \Rightarrow \bullet$ の応力変化は、40 Cycle に伴う繰返し硬化あるいは軟化を表わす。

「図 5.8」と「図 5.9」では「図 5.8」の方が全体的に応力レベルは高目に位置しているが、これは、最初の $0.1\%/\text{s}$ 40 Cycle 後の応力値にも差があるので、データのバラツキと思われる。「図 5.8」（ひずみ速度漸減）「図 5.9」（ひずみ速度漸増）両者の応力範囲の変化状況を比較すると、ひずみ速度漸減の方が勾配が大きく、ひずみ速度漸増は緩やかである。この差異は变形履歴によるものと考えられる。

「図 5.8」および「図 5.9」より、ひずみ速度依存性に関する知見として次のことがいえる。

- (1) 定常応力範囲 (●印) は、ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0.01\%/\text{s}$ で最大値を示し $\dot{\epsilon} > 0.01\%/\text{s}$ では、負のひずみ速度依存性 ($\dot{\epsilon}$ 増大とともに定常応力範囲が減少) $\dot{\epsilon} < 0.01\%/\text{s}$ では、正のひずみ速度依存性 ($\dot{\epsilon}$ 増大とともに定常応力範囲が増大) を示す。
- (2) 変形履歴の影響が小さく真のひずみ速度依存に近い、定常応力 \Rightarrow ひずみ速度切換え直後の応力変化をみると、今回実施した全ひずみ速度範囲 ($\dot{\epsilon} = 0.001\%/\text{s} \sim 1\%/\text{s}$) にわたって、負のひずみ速度依存性を示している。すなわち、クリープ効果を正確に把握するためには、 $\dot{\epsilon} < 0.001\%/\text{s}$ でさらに確認する必要がある。

次に、ひずみ速度漸減試験 および ひずみ速度漸増試験におけるひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 1.0, 0.1, 0.001\% / \text{s.}$ での定常状態での応力—ひずみヒステリシスループを「図 5.10 ~ 5.11」に示す。

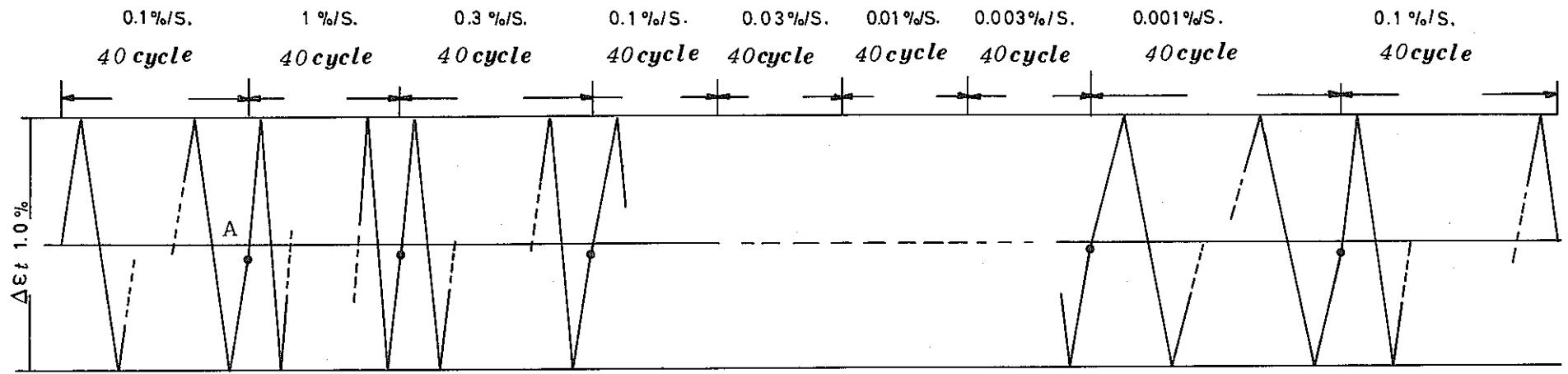
$\dot{\epsilon} = 1\% / \text{s.}$ のものより、 $\dot{\epsilon} = 0.001\% / \text{s.}$ の方が応力は高く、また、ヒステリシスループのエネルギーも大きい。

高温低サイクル疲労に及ぼすひずみ波形の影響を評価する方法として、ひずみ範囲分割法があり、SUS 304 鋼についても、動的ひずみ時効の小さい 650, 700°C 近傍での妥当性について検討がなされている。⁸⁾⁹⁾しかし、550°C では、上述のように動的ひずみ時効が生じるため、ひずみ速度 1% / s ~ 0.001% / s. では、負のひずみ速度依存性となり、ひずみ範囲分割法におけるクリープひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{cp}, \Delta\epsilon_{pc}$ を得ることはできない。

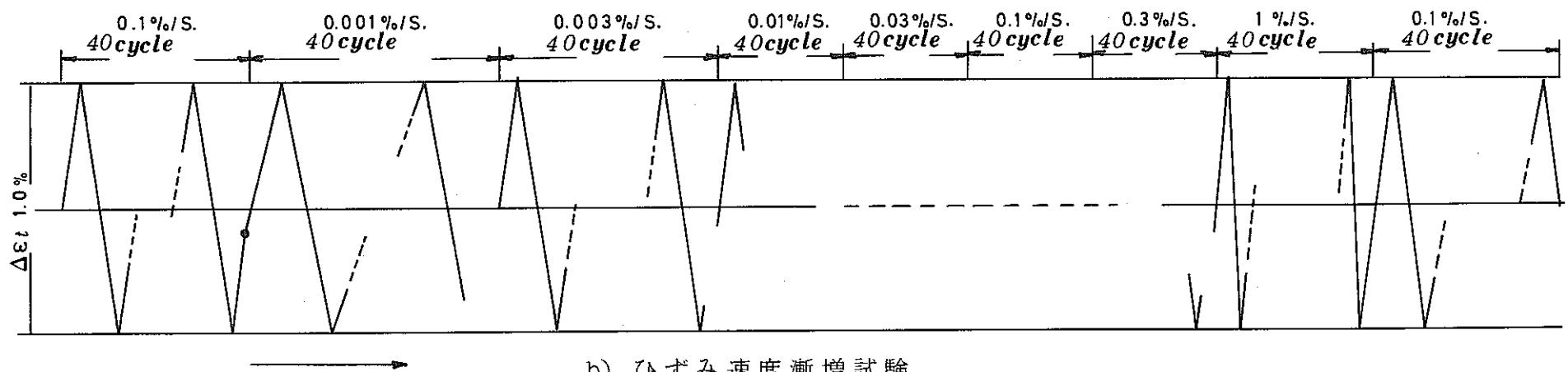
550°C にて、クリープによる損傷を主体としたひずみ波形効果試験を実施するには、ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0.001\% / \text{s.}$ 以下を含む波形で行わなければならない。しかしこのためにはかなり長時間の試験が必要となってくる。

そこで、本研究では、ひずみ波形効果試験として、既に低サイクル疲労寿命に及ぼすひずみ速度効果試験として得られているひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0.01\% / \text{s.}$ の対称三角波を基準とし、これと同一周期を有する鋸歯状波（引張方向ひずみ速度 0.005% / s. \Rightarrow 圧縮方向ひずみ速度 1% / s. および 引張方向ひずみ速度 1% / s. \Rightarrow 圧縮方向ひずみ速度 0.005% / s.）においてどの程度疲労寿命が低下するかという点に主眼をおくことにした。

本報告書では、対称三角波 および Slow ($\dot{\epsilon} = 0.005\% / \text{s.}$) — Fast ($\dot{\epsilon} = 1\% / \text{s.}$) 鋸歯状波の試験結果について述べる。



a) ひずみ速度漸減試験



b) ひずみ速度漸増試験

図 5 . 7 : ひずみ速度依存性試験方法

Fig. 5 . 7 : Strain Rate Dependence Testing Methods

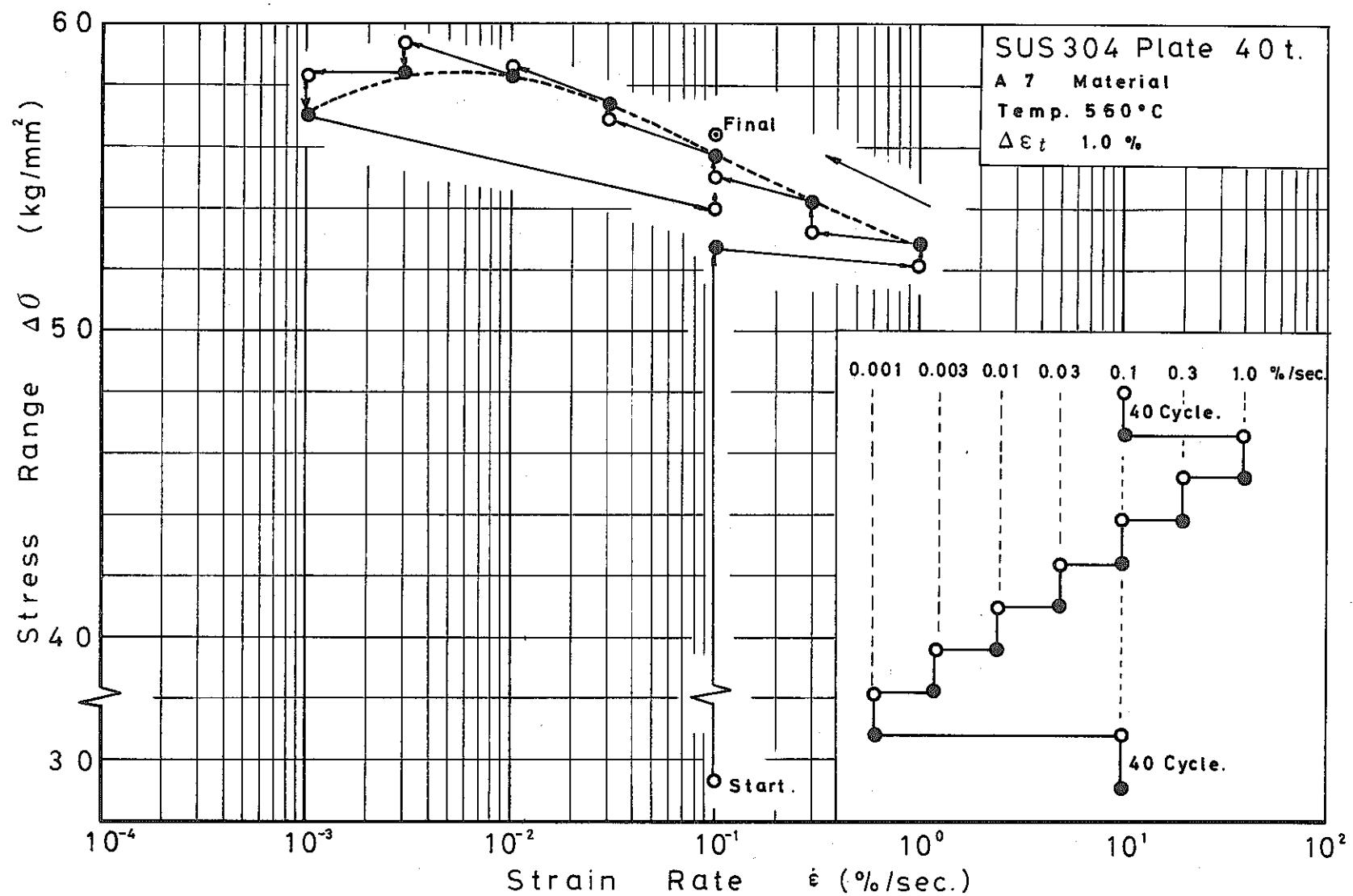


図 5.8 : ひずみ速度依存性試験結果 (1)
 (ひずみ速度漸減試験)

Fig. 5.8 : Strain Rate Dependence of Stress Range (1)

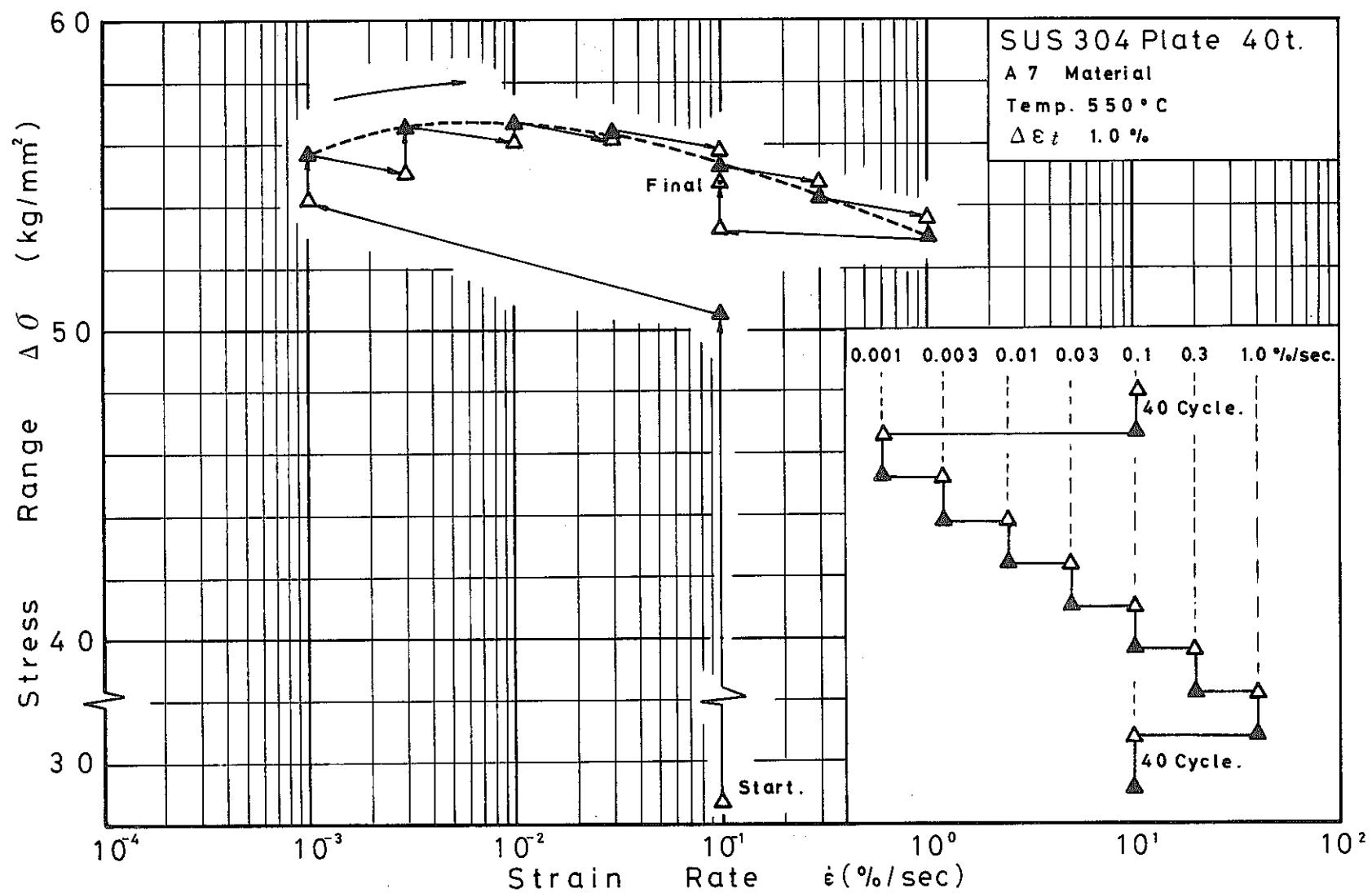


図 5.9 : ひずみ速度依存性試験結果 (2)
(ひずみ速度漸増試験)

Fig. 5.9 : Strain Rate Dependence of Stress Range (2)

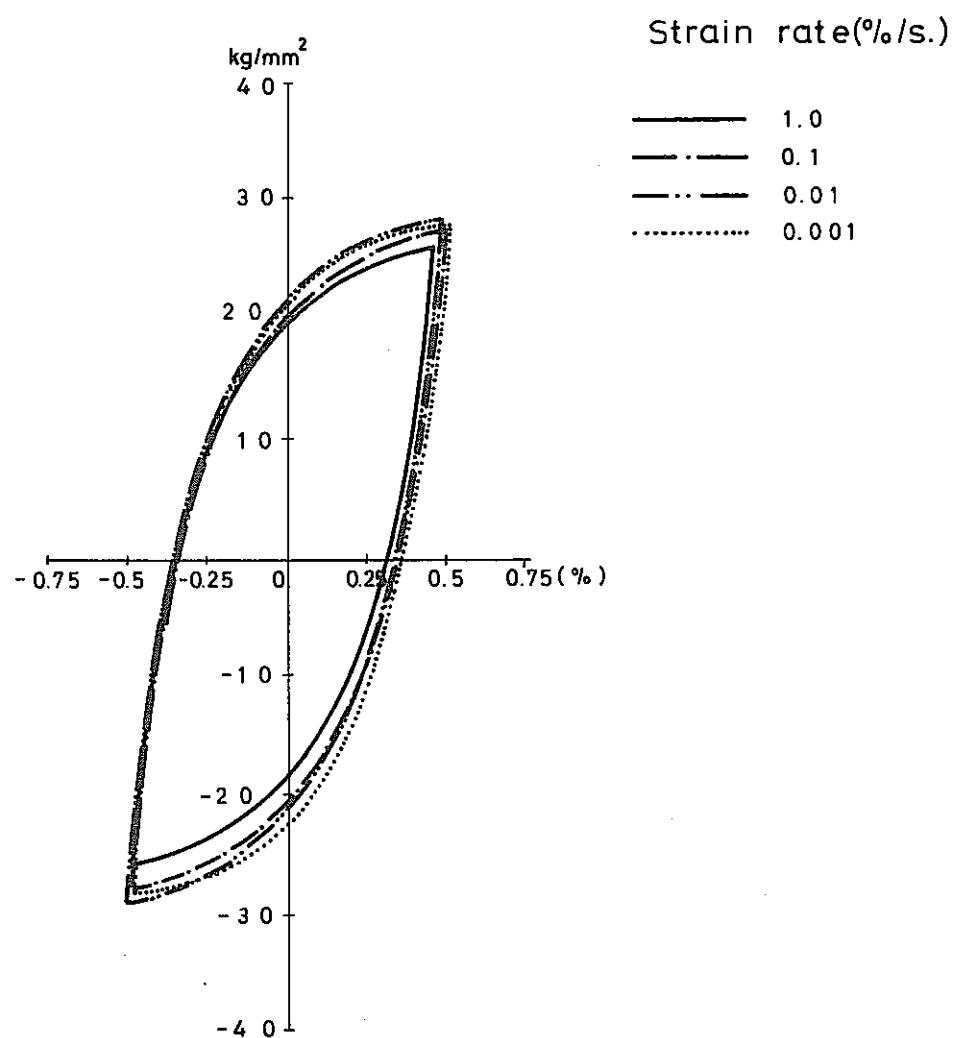


図 5・10 : ひずみ速度とヒステリシスループの関係 (1)
(ひずみ速度漸減試験)

Fig. 5・10 : Effect of Strain Rate on Stress—Strain Hysterisis Loop (1)

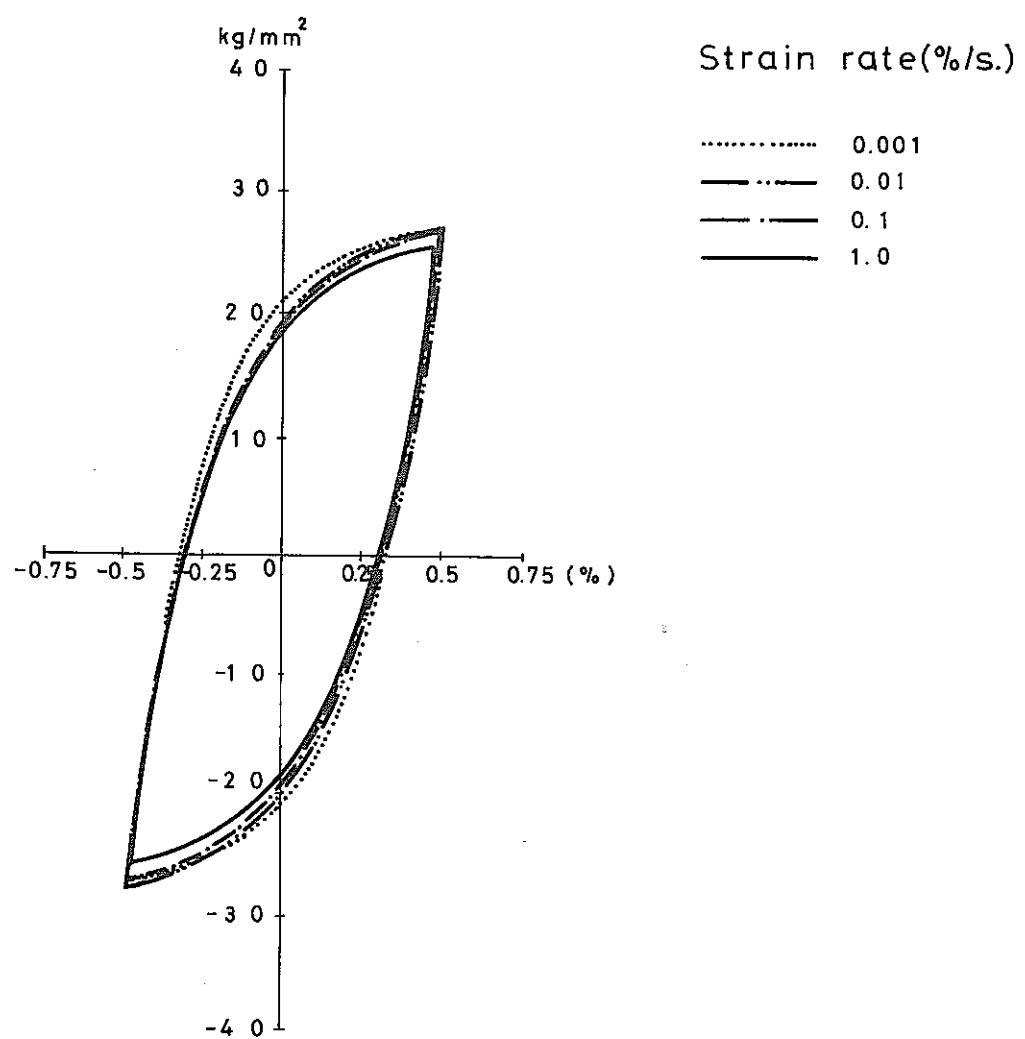


図 5.11 : ひずみ速度とヒステリシスループの関係 (2)
(ひずみ速度漸増試験)

Fig. 5.11 : Effect of Strain Rate on Stress—Strain Hysteresis Loop (2)

5.2.2 ひずみ波形効果試験結果

550°Cにおける対称三角波(ひずみ速度 0.01%/s)および鋸歯状波(引張方向ひずみ速度 0.005%/s ⇔ 圧縮方向ひずみ速度 1%/s)の低サイクル疲労試験結果を「表 5.2」および「図 5.12 ~ 図 5.19」に示す。

(1) ひずみ範囲と破損繰返し数の関係

対称三角波、鋸歯状波の全ひずみ範囲($\Delta\varepsilon_t$)、弾性ひずみ範囲($\Delta\varepsilon_e$)、および塑性ひずみ範囲($\Delta\varepsilon_p$)と破損繰返し数 N_f の関係を「図 5.12」に示す。また、破損繰返し数 N_f と破損時間 t_f との関係を「図 5.13」に示す。

鋸歯状波の疲労寿命は、三角波に比べて、全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_t = 0.8 \sim 1.5\%$ では約 70% に、 $\Delta\varepsilon_t = 0.5\%$ では、約 85% に低下している。ひずみレベルの小さい方が寿命低下度合は少ない。

三角波、鋸歯状波両試験における全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_t$ 中の塑性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_p$ の占める比率を比較すると、鋸歯状波の方が、 $\Delta\varepsilon_p$ がわずかながら大きい。

(2) 繰返しサイクルに伴う応力変化

三角波、鋸歯状波各試験における繰返しサイクルに伴う応力変化を「図 5.14」に示す。

いずれの試験条件についても、サイクル繰返しとともに硬化している。三角波と鋸歯状波の両試験を比較すると、引張側はほぼ同レベルであるが、圧縮側では、三角波の方が鋸歯状波より明らかに応力値は大きい。この傾向は、ひずみレベルの小さい方が著しい。これは、引張 ⇔ 圧縮過程では、鋸歯状波のひずみ速度 $\dot{\varepsilon} = 1\%/s$ の方が、三角波($\dot{\varepsilon} = 0.01\%/s$)より大きく、また、そのひずみ速度差も大きいために、動的ひずみ時効による負のひずみ速度依存性が顕著に現われたものである。

三角波、鋸歯状波それぞれの全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_t = 0.5, 1.0, 1.5\%$ 試験における 30 サイクル、 $1/2 N_f$ でのヒステリシスループを「図 5.15」($\Delta\varepsilon_t = 0.5\%$)、「図 5.16」($\Delta\varepsilon_t = 1.0\%$)、「図 5.17」($\Delta\varepsilon_t = 1.5\%$)に示す。

動的ひずみ時効と密接な関係のあるセレーション現象は、いずれの試験条件においても、初期の数サイクルにて、ごくわずか観察されたのみで 10 サイクル以降では認められなかった。

(3) 繰返しサイクルに伴う塑性ひずみ範囲の変化

三角波、鋸歯状波の繰返しサイクルに伴う塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_p$ 変化を「図 5.18」に示す。

いずれのひずみレベルのものについても、繰返しサイクルとともに $\Delta\epsilon_p$ は減少している。これは前述の繰返しに伴う応力変化と対応する。

三角波と鋸歯状波を比較すると、鋸歯状波の方が、塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_p$ は、わずかながら大きい傾向がある。この $\Delta\epsilon_p$ の差は、主として、圧縮 \Rightarrow 引張過程で生じており、鋸歯状波の方が圧縮側ピーク応力が小さく、また動的ひずみ時効による立上り勾配が大きいことに起因している。

(4) 破損繰返し数の動燃事業団基準値⁵⁾との比較

得られた対称三角波、鋸歯状波の疲労試験結果を動燃事業団 SUS 304 鋼許容ひずみ範囲線図 (B) (ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 10^6$) と比較したものを「図 5.19」に示す。

今回の三角波試験結果は、最適疲労曲線より長寿命側に位置している。

鋸歯状波試験結果は、最適疲労曲線にほぼ一致しており、 $\dot{\epsilon} = 10^6$ の三角波疲労寿命に、相当していることがわかる。

表 5.2 : SUS 304 鋼板材の低サイクル疲労試験結果 (1/2)

Table 5.2 : Low Cycle Fatigue Test Results of SUS 304 Plate at 550°C (1/2)

材 料	SUS 304 鋼板材	試 験 霧 囲 気	大 気 中	試 験 場 所	株式会社 富士電機総合研究所
-----	-------------	-----------	-------	---------	----------------

(Wt %)

材料製造者	素材形状寸法	化 学 成 分	C	S i	Mn	P	S	Ni	Cr	Co
新日本製鉄 八幡	40t X 1000 X 1000mm N 9482 A 7 材	要求最小値						8.00	18.00	
		要求最大値	0.08	1.00	2.00	0.04	0.03	10.50	20.00	0.25
		とりべ分析値	0.05	0.59	0.87	0.027	0.003	8.98	18.47	0.12
		製品分析値	0.05	0.60	0.87	0.026	0.002	8.94	18.59	0.12

a) 対称三角波

試 験 温 度 °C	ひずみ 速 度 %/sec	試 験 片 番 号	ひ ズ ミ 範 囲			疲 劳 寿 命			破 損 時 間	定 常 応 力 kg/mm ²	
			$\Delta \varepsilon_t$	$\Delta \varepsilon_e$	$\Delta \varepsilon_p$	N_0	N_5	N_{25}		H_r	σ_{max}
550	0.01	HFA739	0.500	0.288	0.212	4603	9950	10061	279.47	21.33	21.20
		HFA731	0.800	0.352	0.448	1354	2170	2260	100.44	25.55	25.14
		HFA733	1.000	0.395	0.605	149	999	1059	58.83	27.07	28.14
		HFA736	1.200	0.420	0.780	73	632	912	60.80	28.28	28.48
		HFA734	1.500	0.462	1.038	42	332	502	41.83	29.28	29.39

 N_0 : 最大荷重に到達した回数 N_5 : 最大荷重から 5% 荷重低下した回数 N_{25} : 破損回数 (25% 荷重低下)

表 5.2 : SUS 304 鋼板材の低サイクル疲労試験結果 (2/2)

Table 5.2 : Low Cycle Fatigue Test Results of SUS 304 Plate at 550°C (2/2)

b) 鋸歯状波

(N 9482 A 7 材)

試験度 °C	ひずみ 速度 %/sec	試験片 番号	ひずみ範囲			疲労寿命			破損時 間	定常応力 kg/mm²	
			$\Delta \epsilon_t$	$\Delta \epsilon_e$	$\Delta \epsilon_p$	N_0	N_5	N_{25}		$\sigma_{max.}$	$\sigma_{min.}$
550	0.005 & 1.000	HFA740	0.500	0.276	0.224	7693	8660	8711	122.20	20.67	19.33
		HFA732	0.800	0.340	0.460	252	1334	1368	61.10	25.51	23.83
		HFA725	1.000	0.343	0.657	76	712	726	40.54	26.82	25.55
		HFA738	1.200	0.384	0.816	44	437	499	33.43	28.62	27.75
		HFA735	1.500	0.429	1.071	36	239	270	22.61	29.50	28.89

 N_0 : 最大荷重に到達した回数 N_5 : 最大荷重から 5% 荷重低下した回数 N_{25} : 破損回数 (25% 荷重低下)

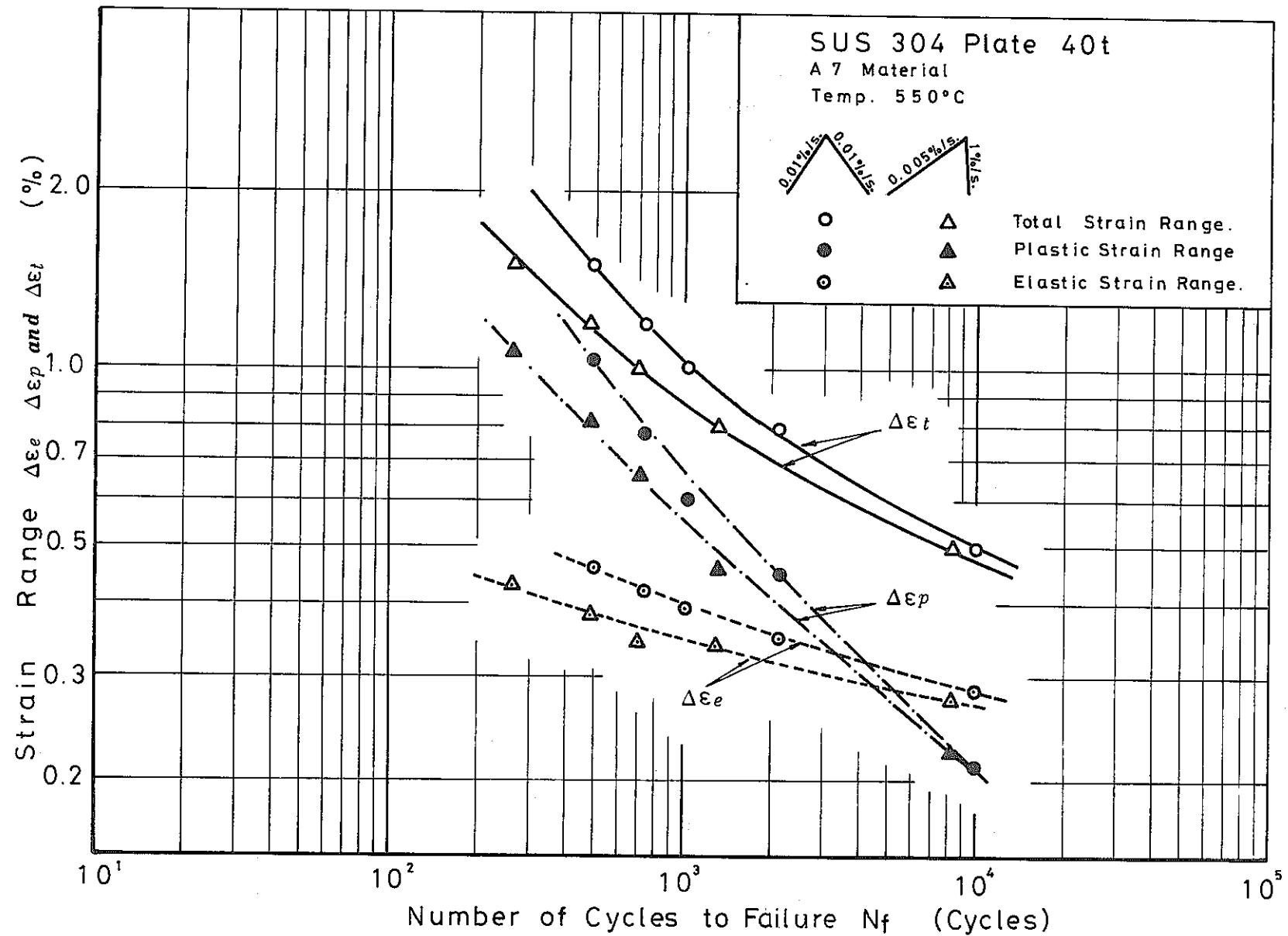


図 5.12 : SUS 304 鋼板材の 550°C における低サイクル疲労試験結果
(対称三角波および鋸歯状波)

Fig. 5.12 : Low Cycle Fatigue Test Results of SUS 304 Plate at 550°C
(Triangular wave and Slow-Fast wave)

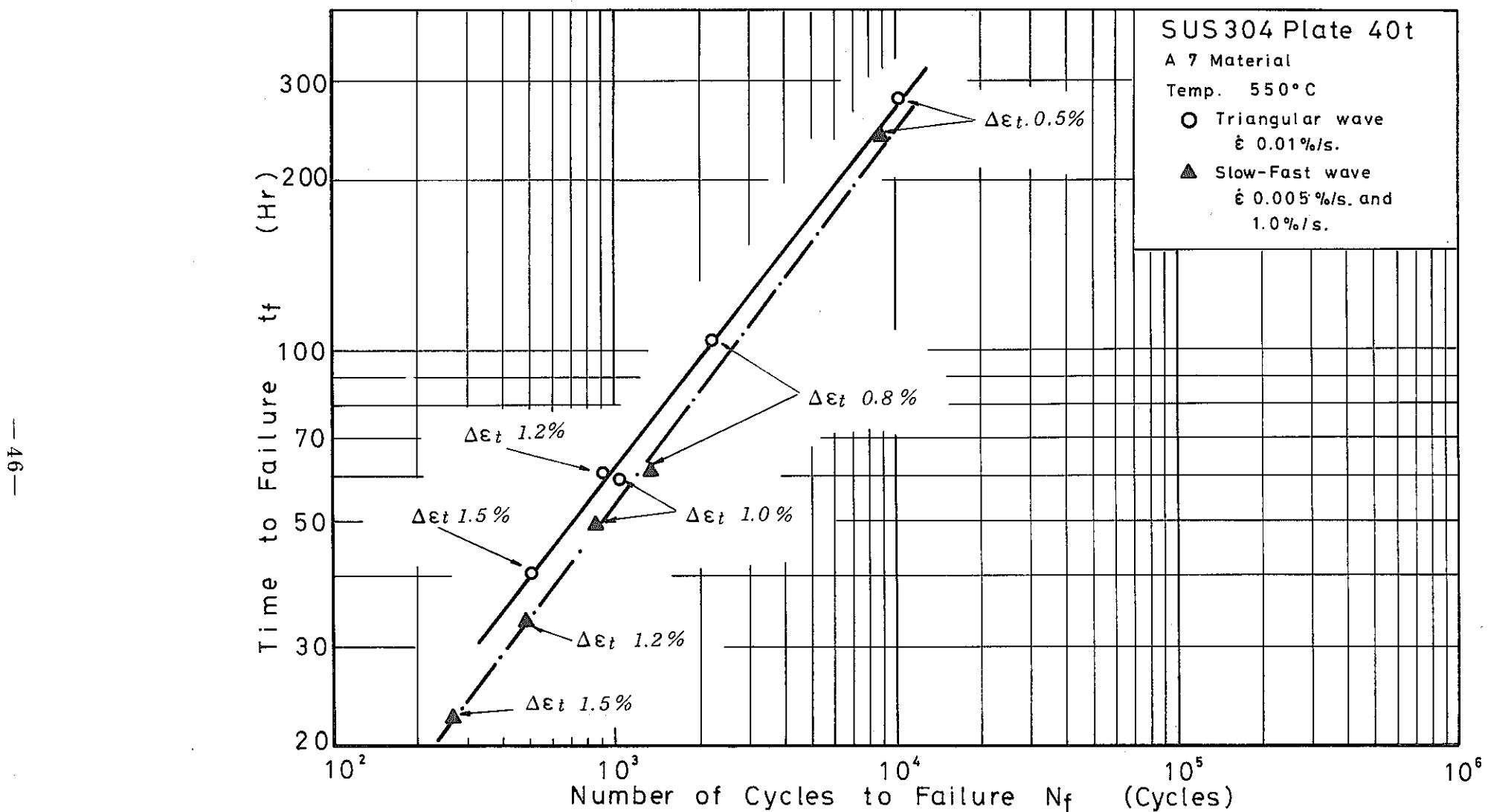


図 5.13 : SUS 304 鋼板材の 550°C における破損繰返し数 N_f と破損時間 t_f との関係

Fig. 5.13 : Relation between Number of Cycle to Failure N_f and Time to Failure t_f for SUS 304 Plate at 550°C

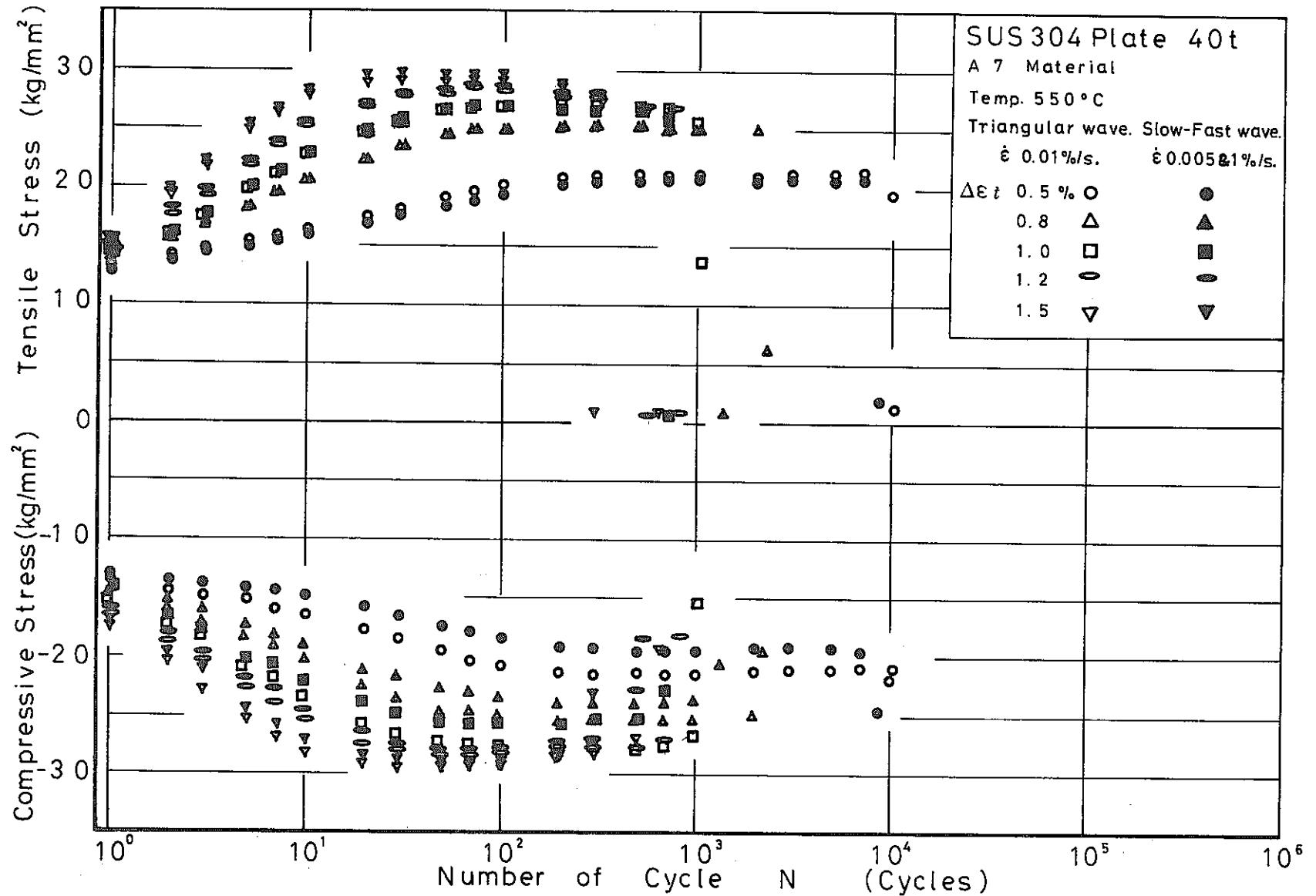


図 5.14 : SUS 304 鋼板材の 550°C における低サイクル疲労試験繰返しサイクルに伴う応力変化

Fig. 5.14 : Stress Changes during Reversed Strain Cycling of SUS 304 Plate at 550°C

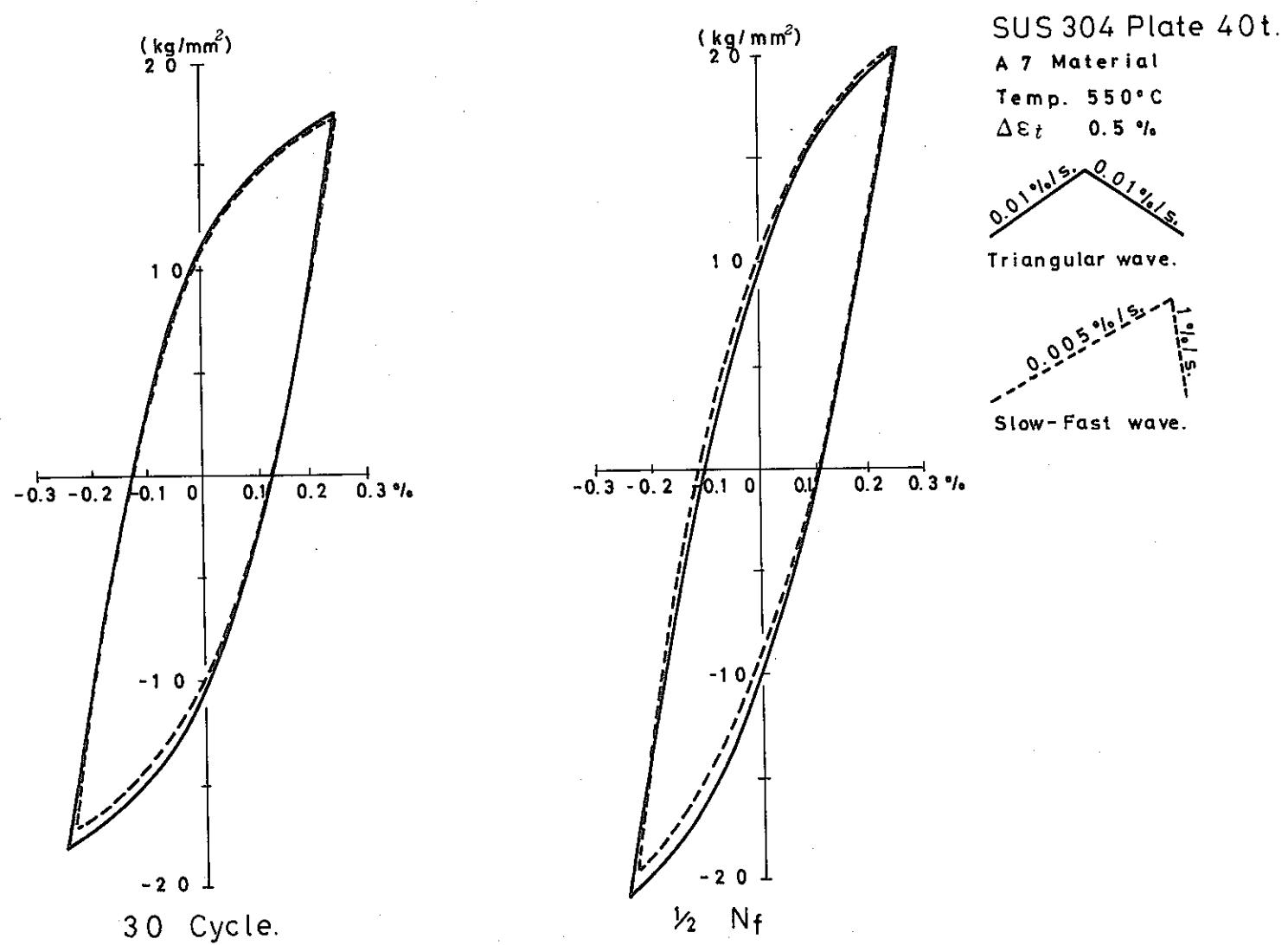


図 5.15 : SUS 304 鋼板材の低サイクル疲労試験 (550°C, $\Delta\epsilon_t = 0.5\%$) における
ヒステリシスループ

Fig. 5.15 : The Stress—Strain Hysteresis Loops in Reversed Strain Cycling
of SUS 304 Plate (550°C, $\Delta\epsilon_t = 0.5\%$)

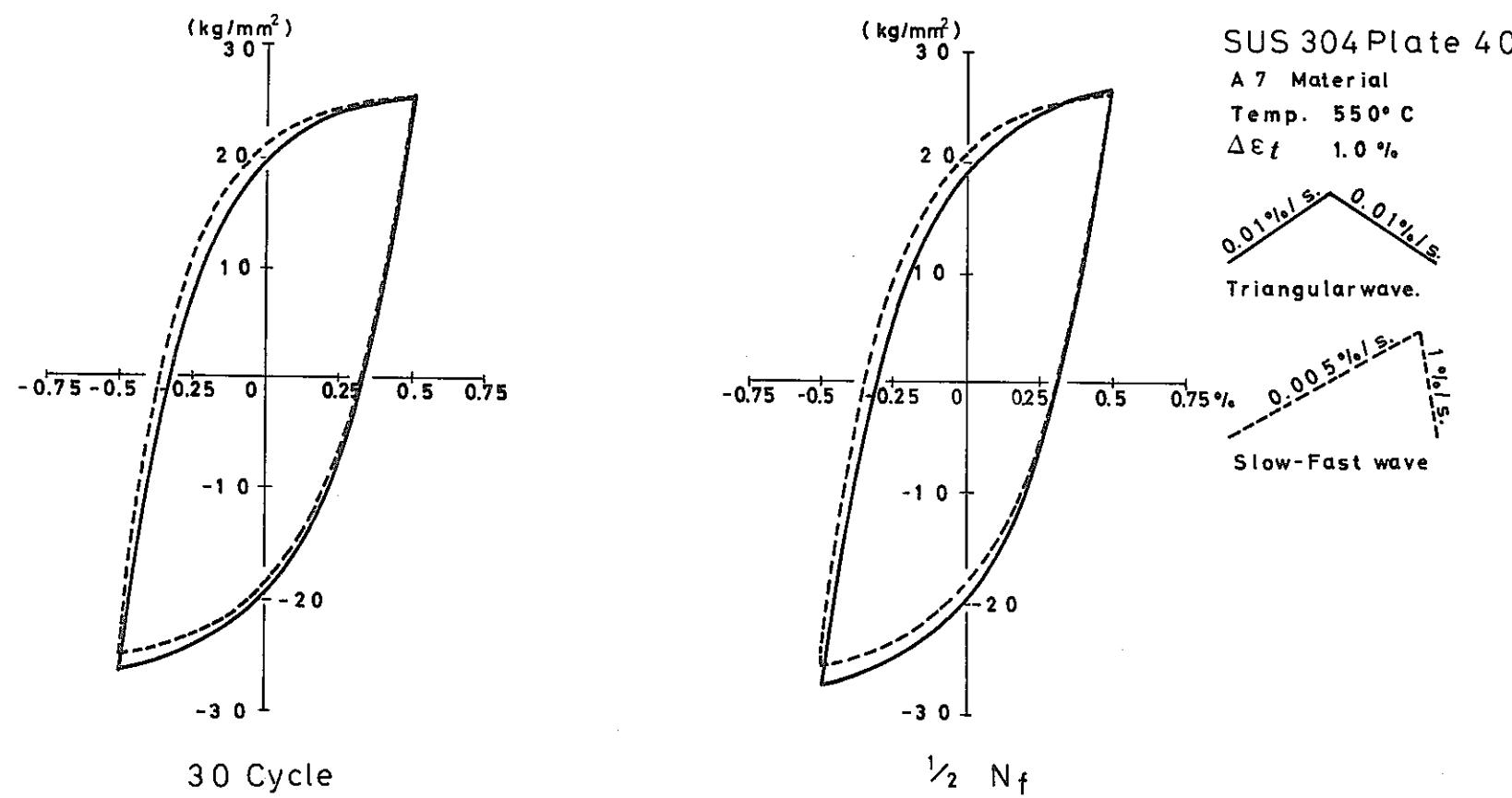
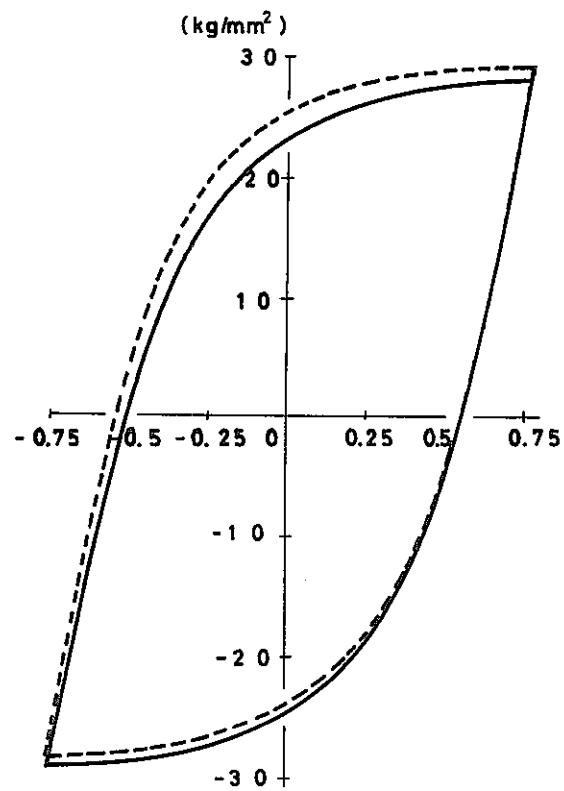


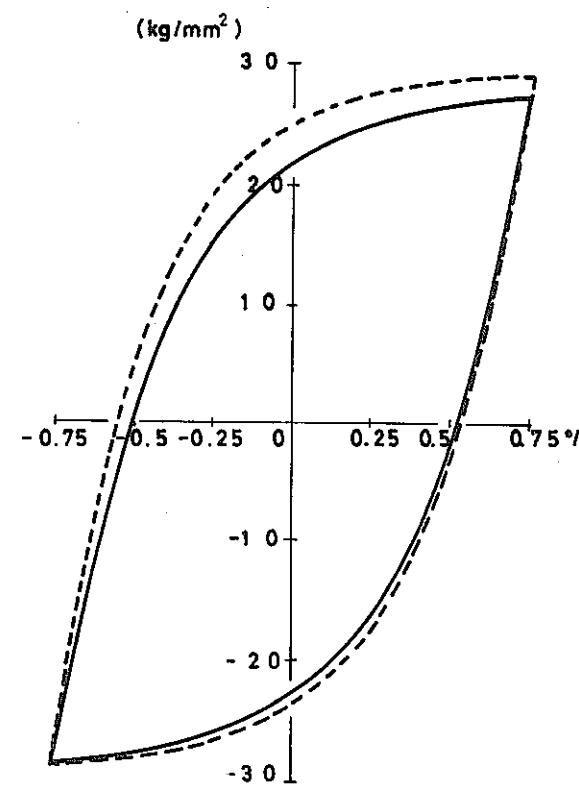
図 5.16 : SUS 304 鋼板材の低サイクル疲労試験 (550°C , $\Delta\varepsilon_t = 1.0\%$) における
ヒステリシスループ

Fig. 5.16 : The Stress—Strain Hysterisis Loops in Reversed Strain Cycling
of SUS 304 Plate (550°C , $\Delta\varepsilon_t = 1.0\%$)

—



30 Cycle



$\frac{1}{2} N_f$

SUS 304 Plate 40t.

A 7 Material

Temp. 550 °C

$\Delta \epsilon_t = 1.5\%$

0.01% / S.
0.01% / S.
Triangular wave.

0.005% / S.
0.005% / S.
Slow-Fast wave

図 5.17 : SUS 304 鋼板材の低サイクル疲労試験 (550°C , $\Delta\epsilon_t = 1.5\%$) における
ヒステリシスループ

Fig. 5.17 : The Stress-Strain Hysterisis Loops in Reversed Strain Cycling
of SUS 304 Plate (550°C , $\Delta\epsilon_t = 1.5\%$)

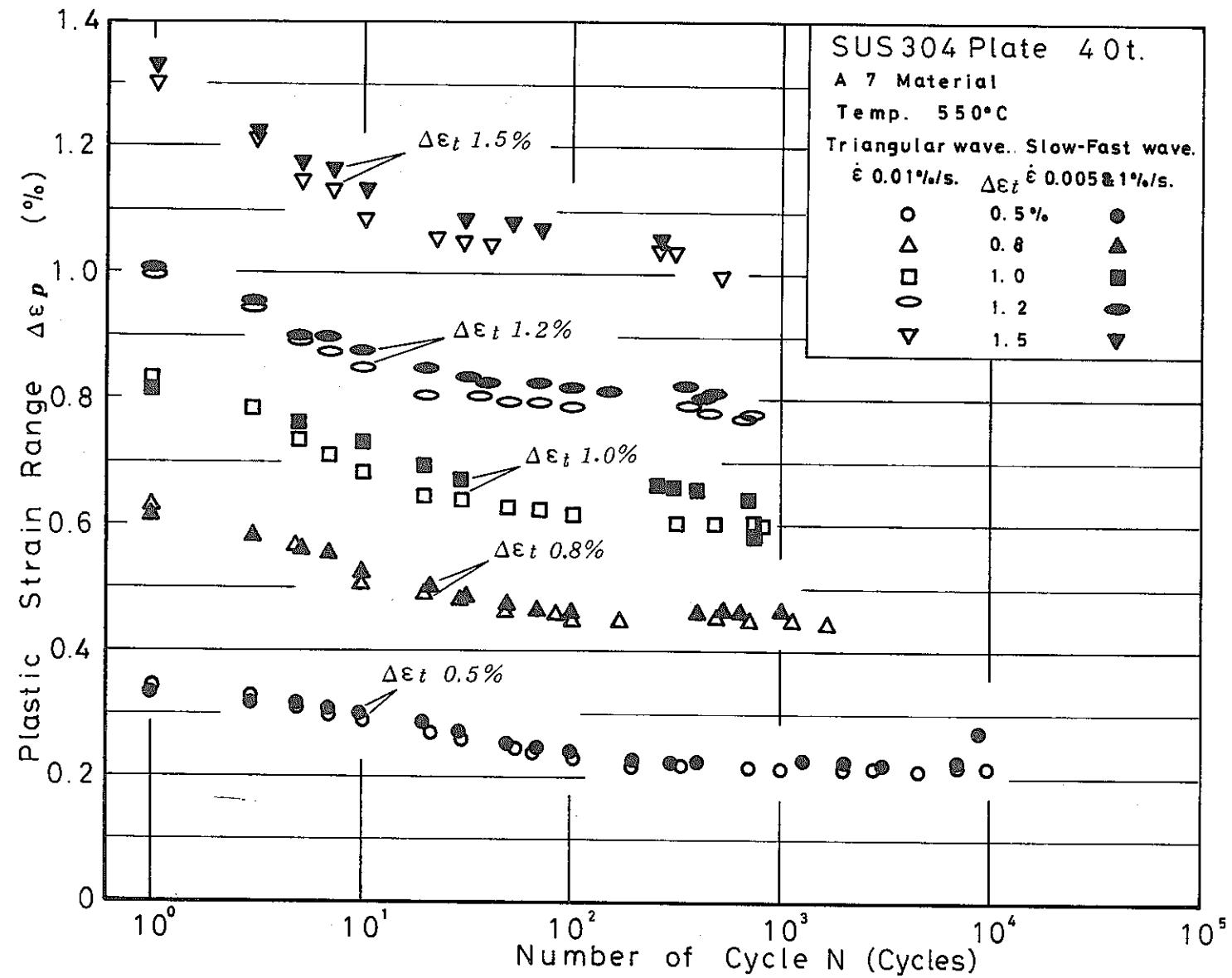


図 5.18 : SUS 304 鋼板材の 550°C における繰返しサイクルに伴う塑性ひずみ範囲の変化

Fig. 5.18 : Changes of Plastic Strain Range During Reversed Strain Cycling of SUS 304 Plate at 550°C

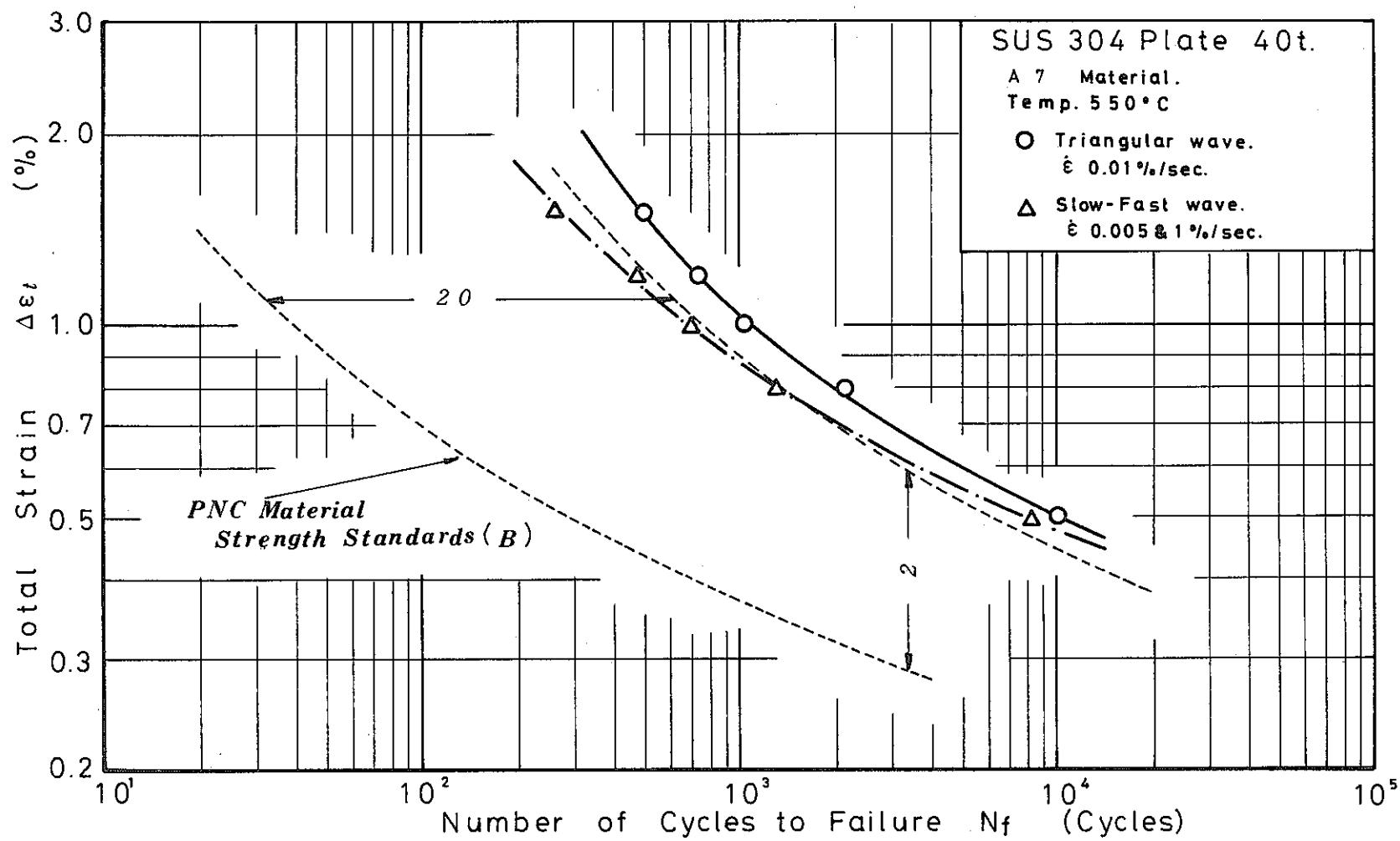


図 5.19 : SUS 304 鋼板材の 550°C における低サイクル疲労試験結果と動燃事業団基準値との比較

Fig. 5.19 : Relation between Present Fatigue Test Results of SUS 304 Plate at 550°C and Design Fatigue Curves of PNC Material Strength Standards

5.2.3 金属組織 および 破面観察結果

今回実施した、三角波 および 鋸歎波低サイクル疲労試験全破断試験片の外観を「写真 5.1」に示す。

また、それら試験片のうち、三角波、鋸歎波試験それぞれの全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_t = 0.5\%, 1.0\%$ の破断試験片について、破断面近傍のミクロ組織 および 破面観察を行った。

三角波のミクロ組織を「写真 5.2」に、鋸歎波のそれを「写真 5.3」に示す。いずれにおいても、圧延方向に沿ってフェライトが観察される。三角波、鋸歎波両者間に有意差は認められず、同じような組織である。

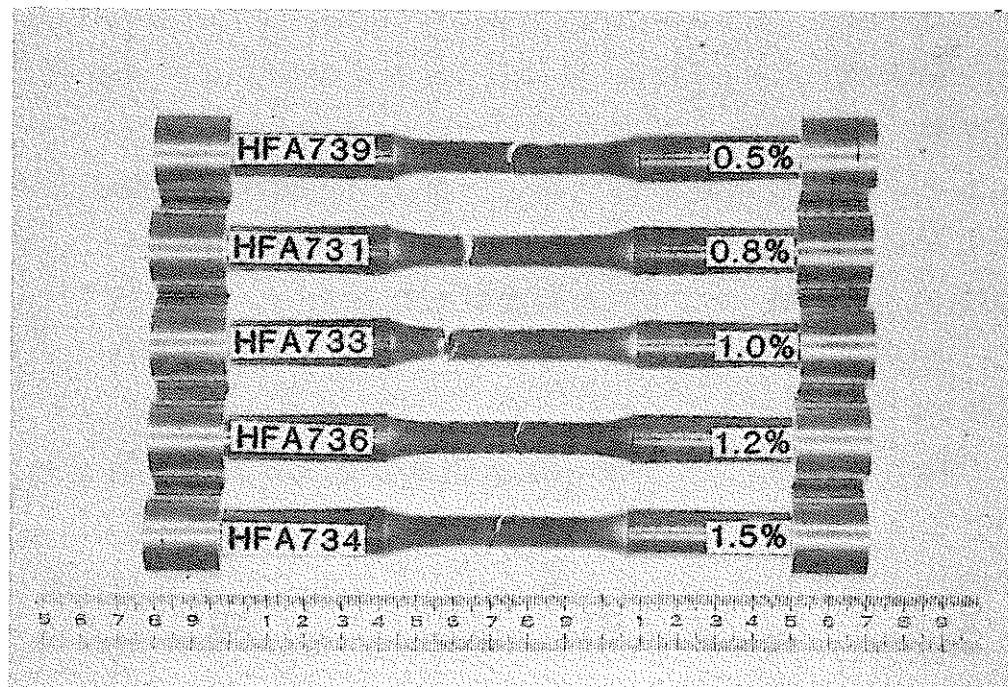
写真は、腐食させたものであるが、腐食前の状態でもやはり差は認められなかつた。また、いずれにおいても、破断面ごく近傍では粒界にミクロポイド、ミクロき裂が観察される。

走査型電子顕微鏡により破面を観察した結果が「写真 5.4～写真 5.7」である。き裂発生点近傍は酸化膜で覆われている。

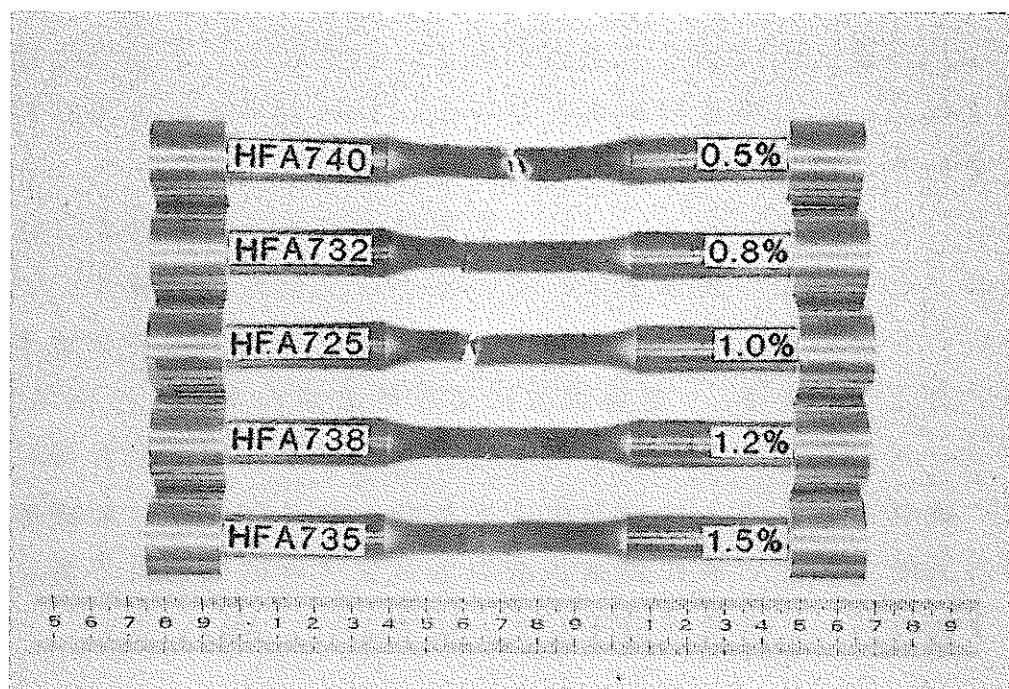
これら破面には次の共通点がある。いずれも、き裂発生は粒内破壊で生じ、その後粒界破壊となるが、1mm 以上進むと再び粒内破壊に変わり、最終破断にかけて、明瞭なストライエーションが観察される。ストライエーションは、粒界破面においても観察される。

このように類似の破面を呈しているが、三角波の試験片と鋸歎波のものを詳細に比較してみると、鋸歎波の方が粒界破壊が、若干多いことがわかる。鋸歎波にて粒界破壊が多くなった主要因は、クリープ効果によるためと考えられる。ひずみ時効の影響については、繰返しサイクル中の発生応力挙動、およびミクロ組織観察結果から判断すると、特に鋸歎波の方がひずみ時効が粒界脆化をもたらす程進行し、寿命が低下したとは考えにくい。

a) 対称三角波



b) 鋸歯状波



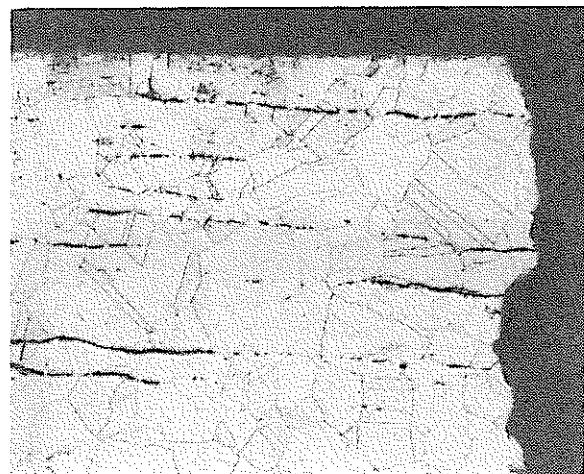
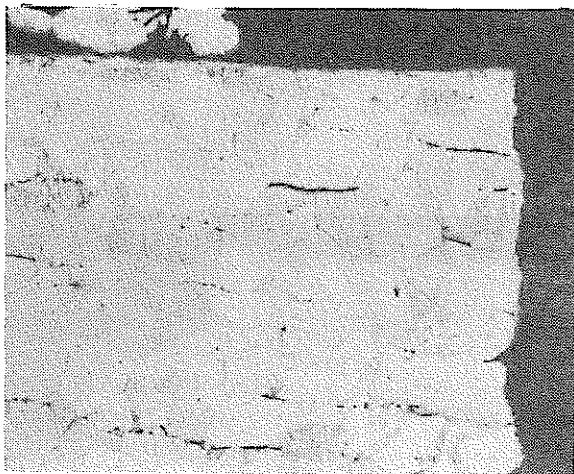
写 真 5 . 1 : SUS 304 鋼板材の 550°C における低サイクル
疲労試験後の外観

Photo 5 . 1 : Appearance after Low Cycle Fatigue Test for
SUS 304 Plate at 550°C

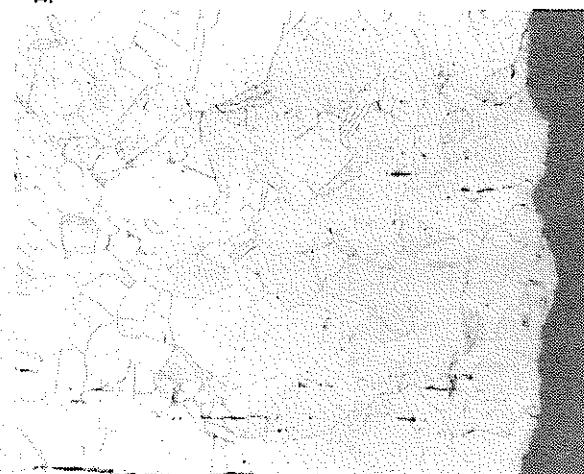
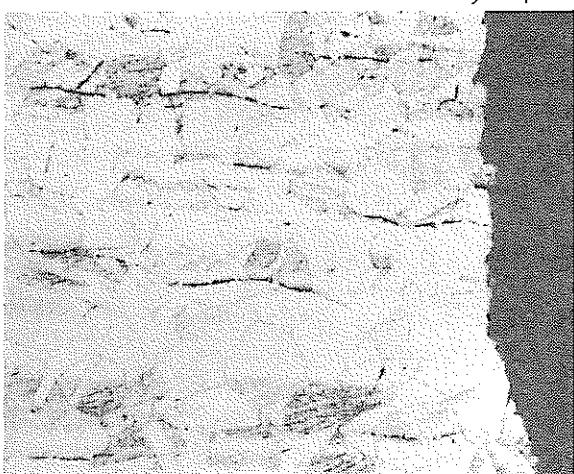
全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_t$ 0.5%
ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 0.01%/s.

全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_t$ 1.0%
ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 0.01%/s.

a) き裂発生近傍



b) 中央部



100 μm

写真 5.2 : SUS 304 鋼板材の 550°C における低サイクル疲労試験後の金属組織 (対称三角波)

Photo. 5.2 : Microstructures after Low Cycle Fatigue Test at 550°C for SUS 304 Plate (Triangular wave)

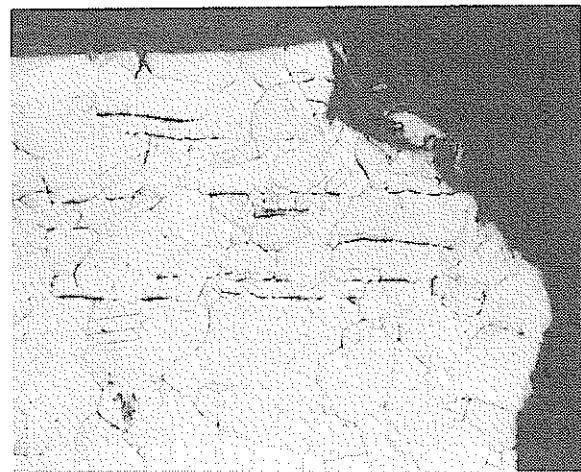
全ひずみ範囲 : 0.5%

ひずみ速度 : 0.005% / s.
⇒ 1.0% / s.

全ひずみ範囲 : 1.0%

ひずみ速度 : 0.005% / s.
⇒ 1.0% / s.

a) き裂発生近傍



b) 中央部

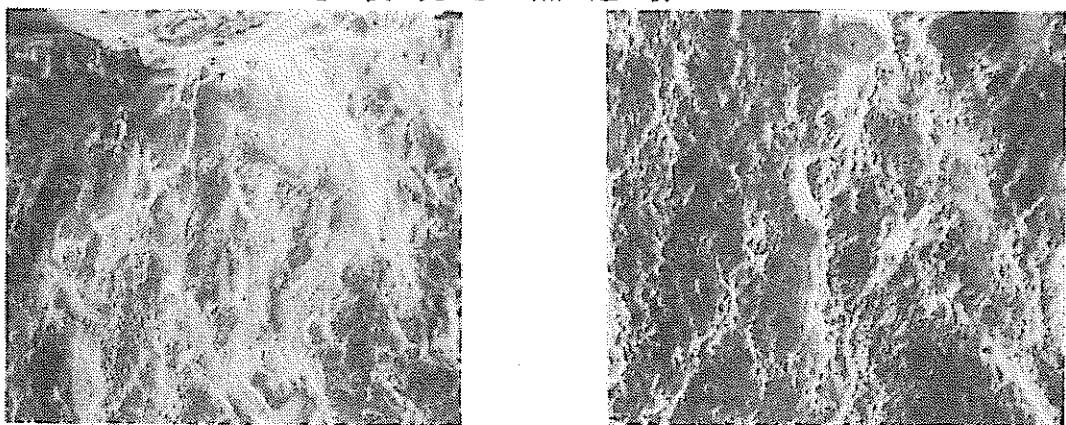


100 μ m

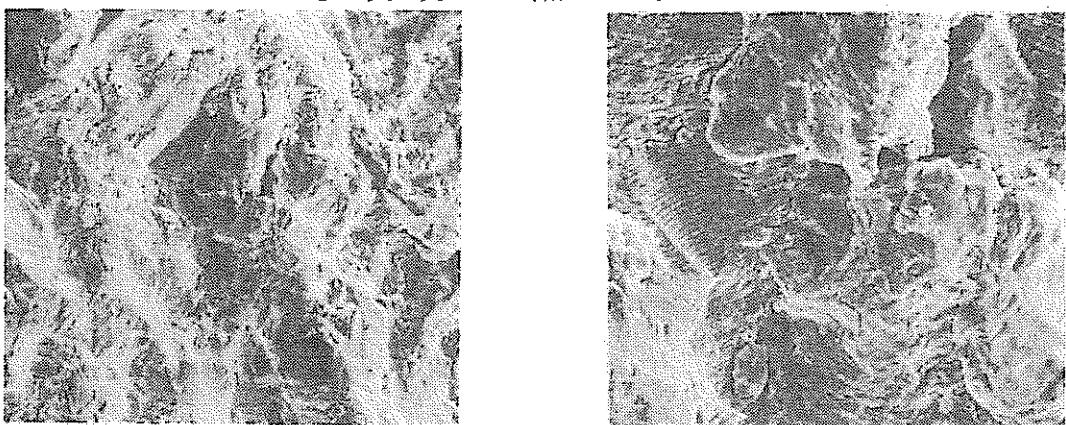
写 真 5 . 3 : SUS 304 鋼板材の 550°C における低サイクル疲労試験後の金属組織 (鋸歯状波)

Photo. 5 . 3 : Microstructures after Low Cycle Fatigue Test at 550°C for SUS 304 Plate
(Slow—Fast wave)

き裂発生点近傍



き裂発生点から1mm



最終破断部

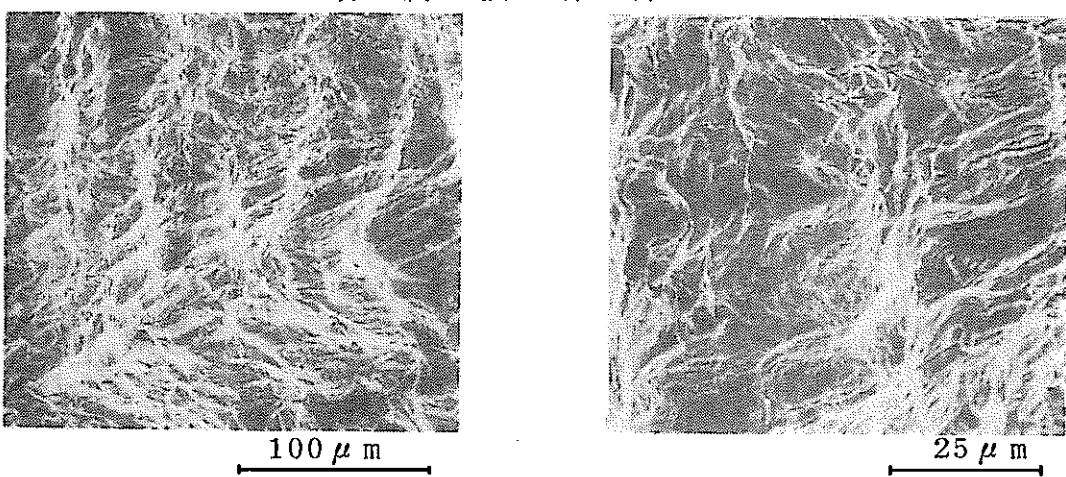
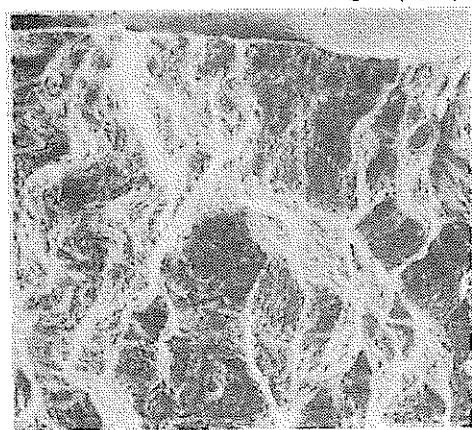
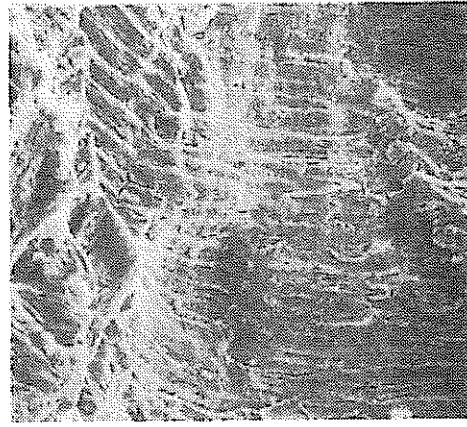
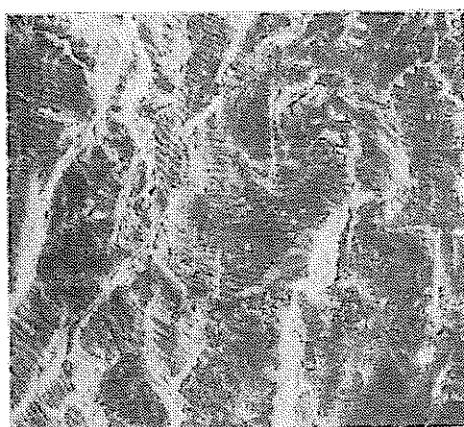


写真 5.4 : SUS 304 鋼板材の 550°C における低サイクル
疲労試験後の疲労破面 (対称三角波 $\Delta\varepsilon_t = 0.5\%$)
Photo. 5.4 : SEM Fractographs of Fatigue Fracture Surface
at 550°C for SUS 304 Plate
(Triangular wave $\Delta\varepsilon_t = 0.5\%$)

き裂発生点近傍



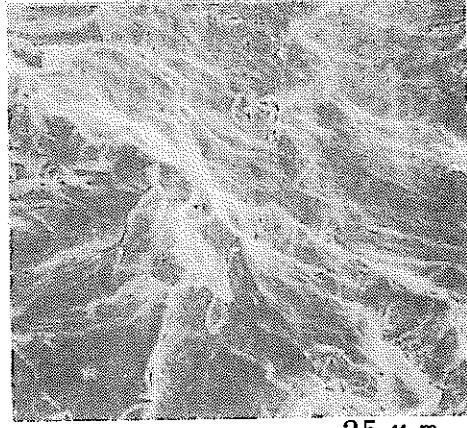
き裂発生点から1mm



最終破断部



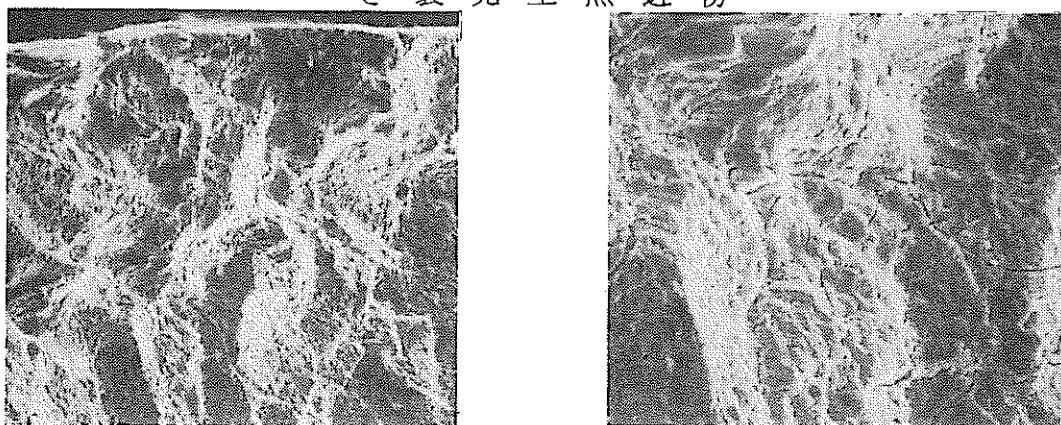
100 μ m



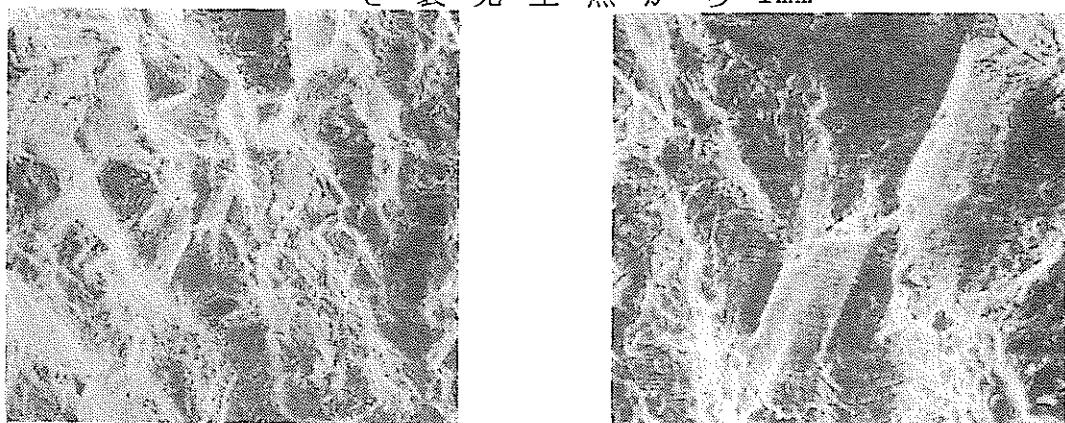
25 μ m

写真 5.5 : SUS 304 鋼板材の 550°C における低サイクル
疲労試験後の疲労破面 (対称三角波 $\Delta\varepsilon_t = 1.0\%$)
Photo. 5.5 : SEM Fractographs of Fatigue Fracture Surface
at 550°C for SUS 304 Plate
(Triangular wave $\Delta\varepsilon_t = 1.0\%$)

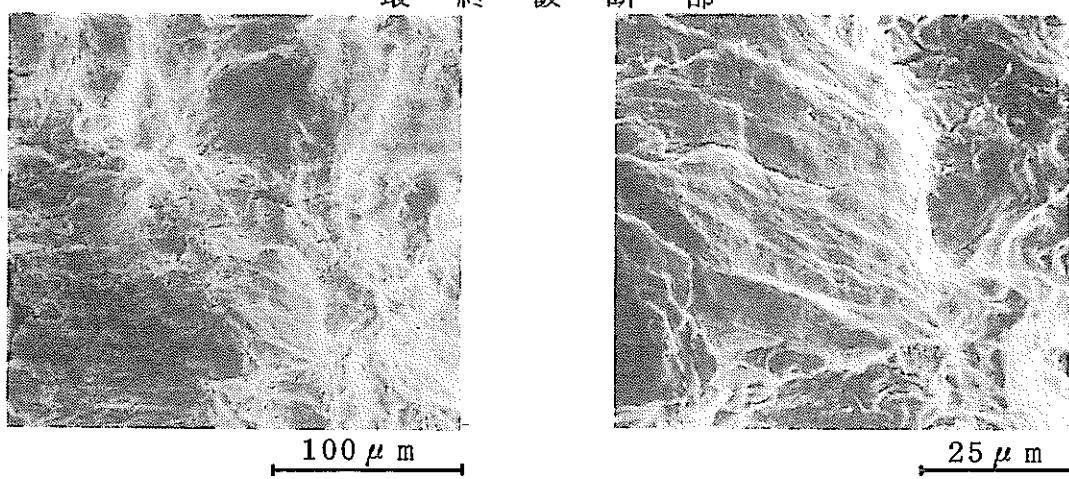
き裂発生点近傍



き裂発生点から 1mm



最終破断部

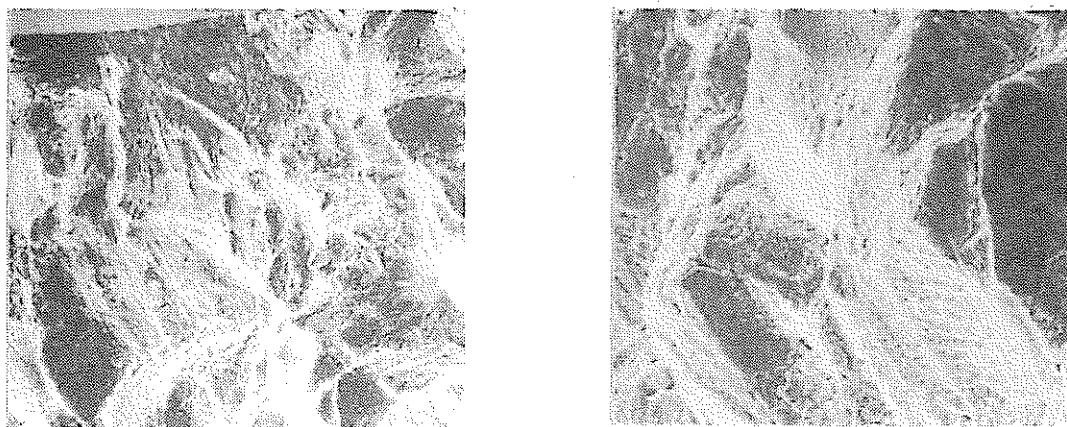


$100 \mu\text{m}$

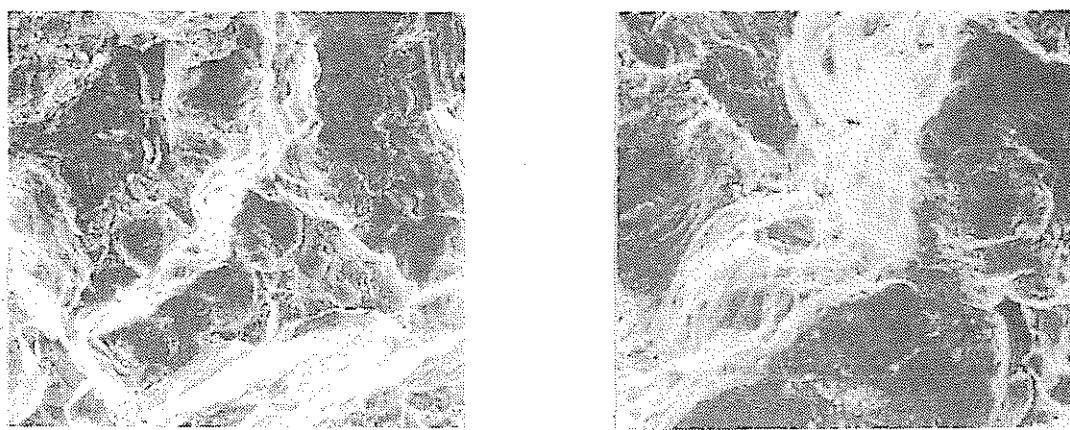
$25 \mu\text{m}$

写真 5.6 : SUS 304 鋼板材の 550°C における低サイクル
疲労試験後の疲労破面 (鋸歯状波 $\Delta\varepsilon_t = 0.5\%$)
Photo. 5.6 : SEM Fractographs of Fatigue Fracture Surface
at 550°C for SUS 304 Plate
(Slow-Fast wave $\Delta\varepsilon_t = 0.5\%$)

き裂発生点近傍



き裂発生点から1mm



最終破断部

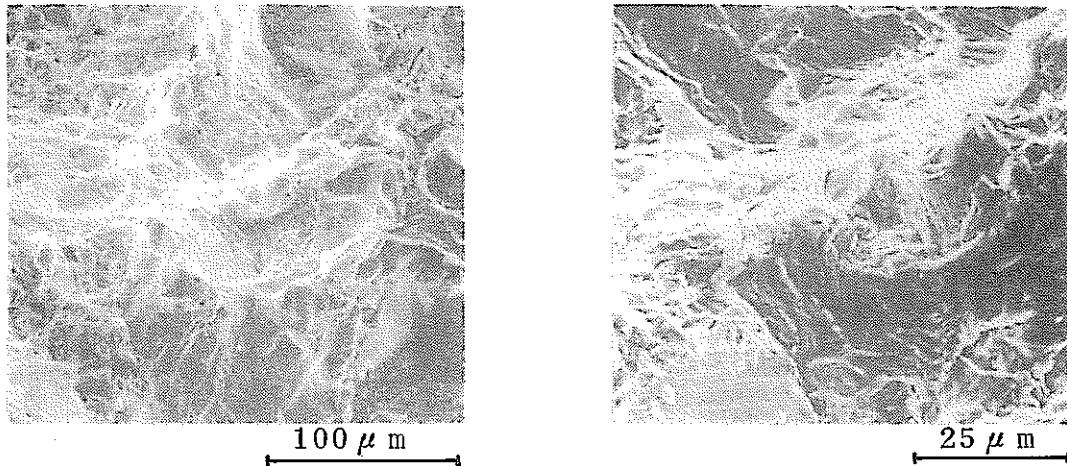


写真 5.7 : SUS 304 鋼板材の 550°C における低サイクル
疲労試験後の疲労破面 (鋸歯状波 $\Delta\varepsilon_t = 1.0\%$)
Photo. 5.7 : SEM Fractographs of Fatigue Fracture Surface
at 550°C for SUS 304 Plate
(Slow-Fast wave $\Delta\varepsilon_t = 1.0\%$)

5.3 インコネル 718 板材の高温強度試験結果

5.3.1 引張試験結果

インコネル 718 板材の高温引張試験結果を「表 5.3」に示す。0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ 、引張強さ σ_B および 真破断応力 σ_f^* の試験温度依存性を「図 5.20」に示す。同図には、米国のデータ (TREE-1254, G.E. Korth¹⁰⁾) および既に別チャージ材で得られているデータ^{11) 12)} を併記している。これらデータは、いずれも今回の供試材 (N-1933) と同一熱処理 (AMS, 5596C) が施されている。米国データの多くは本試験の試験片と同じく圧延方向より採取した試験片によるものであるが、別チャージ材データは、一部を除いて圧延方向に対して垂直に採取した試験片によるデータである。

降伏比 ($\sigma_{0.2} / \sigma_B$) の温度依存性を「図 5.21」に示す。また、延性指標 (破断伸び δ , 4D 伸び ϵ_{4D} , 一様伸び ϵ_{unif} , 絞り φ , 真一様伸び ϵ_{unif}^* , 真破断延性 ϵ_f^*) の温度依存性を「図 5.22～図 5.24」に示す。いずれの図にも別チャージ材のデータを併記している。 ϵ_{4D} , φ については、米国データとも比較した。(米国データは、試験片上 4D の破断伸び値である。従って、米国データとは、4D 伸び ϵ_{4D} で比較した) 「図 5.20～図 5.24」を見て、次のことがいえる。

今回の試験結果 (圧延方向) を、別チャージ材の垂直方向データと比較すると、500°C までは両者は、強度、延性ともに同等 (但し絞り φ は今回の試験結果の方が大きい) であるが、600°C 以上では、今回の試験結果の方が強度はやや低く、伸び、絞りは明らかに大きく延性的となっている。これは、別チャージ材の圧延方向データを見ると、やはり延性については同様な傾向が認められるので採取方向に原因しているものと考えられる。

次に、米国データ (0.2% 耐力、引張強さ、伸び、いずれも圧延方向 および 垂直方向を含むデータバンドで示している) と比較する。

KOM 取得データを、米国データと比較すると、0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ 引張強さ σ_B については、総じて、米国データバンドの上限付近

に位置している。破断伸びについては、450～550°C では、KOM 取得データは、米国データバンドの下限付近か、もしくはやや低目に位置しており、600°C 以上では、米国データと同レベルとなっている。今回低サイクル疲労試験を実施した試験温度 500, 550°C においては、強度的には、米国データ並みであるが、延性が同等もしくはやや低目の結果となっている。

今回取得した各試験温度における引張の真応力—真ひずみの関係を「表 5.4」に、また、真応力—真ひずみ曲線を「図 5.25」に示す。全ひずみ 1.2% 付近でクロスヘッド速度を切換えている。最後に、引張試験破断後の試験片外観を「写真 5.8」に示す。

表 5.3 : インコネル 718 板材の引張試験結果 (1/2)

Table 5.3 : Tensile Test Results of INCONEL 718 Plate (1/2)

材料	インコネル 718	試験雰囲気	大気中	試験場所	富士電機総合研究所
----	--------------	-------	-----	------	-----------

材料製造者	素材形状寸法	化学成分	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
東京芝浦 電気株式 会社	20t X 200 X 1000 N 1933 E 1 材 mm	要求最小値						17.00	50.00
		要求最大値	0.080	0.35	0.35	0.015	0.015	21.00	55.00
		とりべ分析値	0.048	0.06	0.15	0.006	0.007	18.60	53.70
		製品分析値	0.050	0.06	0.20	0.006	0.008	18.20	54.00

化学成分	F e	T i	A l	M o	N b + T a	C o	C u	B
要求最小値		0.65	0.20	2.80	4.75			
要求最大値	Bal.	1.15	0.80	3.30	5.50	1.00	0.300	0.006
とりべ分析値	Bal.	1.02	0.48	2.92	5.16	0.13	0.037	0.003
製品分析値	Bal.	1.05	0.49	2.93	5.28	0.11	0.022	0.003

ひずみ速度 %/min.	試験片 採取位置	試験温度 °C	試験片 番号	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置
0.3	1/2 t 板厚部	20	EFE101	114.5	142.4	16.3	39.9	A
			EFE102	113.0	143.1	16.7	29.8	A
		450	EFE103	106.2	129.9	13.7	30.0	B
			EFE104	110.5	131.3	14.1	23.5	A
			EFE105	103.8	129.1	16.1	32.0	A

表 5.3 : インコネル 718 板材の引張試験結果 (2/2)

Table 5.3 : Tensile Test Results of INCONEL 718 Plate (2/2)

ひずみ速度 %/min.	試験片 採取位置	試験温度 °C	試験片 番号	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置 JIS Z2241
0.3	$\frac{1}{2}t$ 板厚部	500	EFE106	100.5	128.0	15.3	32.1	B
			EFE107	107.9	132.4	13.9	27.8	A
			EFE108	107.8	131.2	12.0	23.5	B
		550	EFE109	101.5	127.4	14.3	32.0	A
			EFE110	102.9	128.4	12.6	29.8	A
			EFE111	99.8	125.1	12.7	30.0	A
		600	EFE112	106.5	125.2	17.2	36.0	A
			EFE113	96.4	117.3	21.6	41.9	A
		650	EFE114	86.9	108.3	26.9	56.1	A
			EFE115	92.3	111.9	23.5	52.7	A

表 5.4 : インコネル 718 板材の真応力と真ひずみの関係 (1/3)

Table 5.4 : True Stress versus True Strain Relations of INCONEL 718 Plate (1/3)

(N 1933 E 1 材)

R . T		4 5 0 °C									
EFE101		EFE102		EFE103		EFE104		EFE105			
ε^*	σ^*										
0.02	3.63	0.02	4.05	0.02	3.55	0.02	3.44	0.02	3.76		
0.05	9.32	0.05	10.82	0.05	8.46	0.05	8.20	0.05	8.90		
0.10	19.06	0.10	21.58	0.10	16.81	0.10	16.80	0.10	18.09		
0.15	28.92	0.15	32.24	0.15	24.88	0.15	24.85	0.15	27.26		
0.20	37.81	0.20	43.11	0.20	33.34	0.20	32.77	0.20	36.13		
0.30	57.34	0.30	64.74	0.30	50.13	0.30	50.17	0.30	53.72		
0.40	76.98	0.40	85.67	0.40	66.60	0.40	66.15	0.40	71.90		
0.50	95.88	0.50	102.24	0.50	83.45	0.50	82.04	0.50	88.52		
0.60	108.52	0.60	109.96	0.60	96.34	0.60	95.66	0.60	97.61		
0.80	115.58	0.80	115.00	0.80	105.90	0.80	109.51	0.80	105.27		
1.00	118.18	1.00	117.78	1.00	110.39	1.00	114.10	1.00	109.04		
1.19	120.41	1.19	119.74	1.19	113.27	1.19	116.97	1.19	111.75		
1.49	123.71	-	-	1.49	117.00	1.49	117.58	1.49	115.39		
1.98	126.49	-	-	1.98	120.26	1.98	121.33	1.98	118.24		
2.47	128.90	-	-	2.47	121.22	2.47	123.04	2.47	120.20		
2.96	131.58	-	-	2.96	123.33	2.96	125.74	2.96	122.47		
4.88	139.67	-	-	4.88	126.77	4.88	132.28	4.88	129.93		
9.53	154.03	-	-	9.53	140.48	9.53	143.07	9.53	141.81		
13.98	163.40	-	-	13.59	148.99	11.05	147.02	11.86	145.52		
14.61	164.53	-	-	-	-	-	-	-	-		

 ε^* : True Strain (%) σ^* : True Stress (kg/mm²)

表 5.4 : インコネル 718 板材の真応力と真ひずみの関係 (2/3)

Table 5.4 : True Stress versus True Strain Relations of INCONEL 718 Plate (2/3)

500 °C						550 °C					
EFE106		EFE107		EFE108		EFE109		EFE110		EFE111	
ε^*	σ^*										
0.02	3.36	0.02	2.93	0.02	2.98	0.02	3.08	0.02	3.22	0.02	3.05
0.05	8.57	0.05	7.97	0.05	7.86	0.05	8.07	0.05	7.89	0.05	8.44
0.10	16.96	0.10	16.15	0.10	16.03	0.10	16.45	0.10	15.99	0.10	16.92
0.15	25.71	0.15	24.43	0.15	24.32	0.15	24.88	0.15	23.88	0.15	25.58
0.20	34.45	0.20	32.59	0.20	32.63	0.20	32.94	0.20	32.04	0.20	33.75
0.30	51.90	0.30	49.33	0.30	48.78	0.30	49.34	0.30	47.92	0.30	51.17
0.40	69.12	0.40	65.71	0.40	65.00	0.40	65.88	0.40	63.92	0.40	67.87
0.50	82.93	0.50	81.31	0.50	80.95	0.50	81.95	0.50	78.44	0.50	84.15
0.60	93.80	0.60	95.07	0.60	94.63	0.60	93.41	0.60	89.93	0.60	93.23
0.80	101.62	0.80	107.37	0.80	107.04	0.80	102.00	0.80	102.22	0.80	100.93
1.00	105.71	1.00	111.73	1.00	111.34	1.00	106.20	1.00	107.00	1.00	105.38
1.19	108.59	1.19	114.47	1.19	114.53	1.19	109.25	1.19	110.39	1.19	108.35
1.49	111.60	1.49	118.87	1.49	116.80	1.49	111.00	1.49	113.66	1.49	110.29
1.98	116.00	1.98	121.38	1.98	119.90	1.98	117.27	1.98	118.94	1.98	113.89
2.47	116.66	2.47	123.63	2.47	121.48	2.47	119.70	2.47	121.41	2.47	117.02
2.96	120.11	2.96	125.54	2.96	123.76	2.96	121.48	2.96	123.58	2.96	119.27
4.88	127.67	4.88	131.83	4.88	130.67	4.88	124.96	4.88	129.55	4.88	125.69
9.53	139.60	9.53	143.99	9.53	143.31	9.53	139.70	9.53	141.15	9.53	137.58
11.55	143.51	11.20	148.32	9.96	144.96	10.45	141.19	9.69	141.47	10.13	138.40

 ε^* : True Strain (%) σ^* : True Stress (kg/mm²)

表 5.4 : インコネル 718 板材の真応力と真ひずみの関係 (3/3)

Table 5.4 : True Stress versus True Strain Relations of INCONEL 718 Plate (3/3)

6 0 0 °C				6 5 0 °C			
EFE112		EFE113		EFE114		EFE115	
ε^*	σ^*	ε^*	σ^*	ε^*	σ^*	ε^*	σ^*
0.02	3.62	0.02	3.17	0.02	3.12	0.02	2.58
0.05	7.99	0.05	7.78	0.05	7.61	0.05	6.93
0.10	15.82	0.10	15.61	0.10	15.56	0.10	14.25
0.15	23.87	0.15	22.98	0.15	22.88	0.15	21.36
0.20	31.78	0.20	30.73	0.20	30.50	0.20	28.37
0.30	47.20	0.30	45.65	0.30	45.53	0.30	42.62
0.40	63.01	0.40	61.26	0.40	60.60	0.40	57.02
0.50	78.77	0.50	76.24	0.50	72.72	0.50	71.31
0.60	92.87	0.60	86.32	0.60	80.33	0.60	81.70
0.80	105.27	0.80	96.27	0.80	88.22	0.80	91.65
1.00	110.11	1.00	100.70	1.00	91.30	1.00	95.51
1.19	113.08	1.19	103.36	1.19	92.44	1.19	97.12
1.49	116.89	1.49	109.85	1.49	100.61	1.49	105.53
1.98	119.57	1.98	112.48	1.98	106.69	1.98	110.65
2.47	121.61	2.47	114.57	2.47	108.99	2.47	112.56
2.96	123.45	2.96	116.54	2.96	110.36	2.96	113.92
4.88	129.41	4.88	121.91	4.88	113.58	4.88	117.33
9.53	137.59	7.82	126.65	5.04	113.92	5.13	117.87
10.00	138.24	-	-	-	-	-	-

 ε^* : True Strain (%) σ^* : True Stress (kg/mm²)

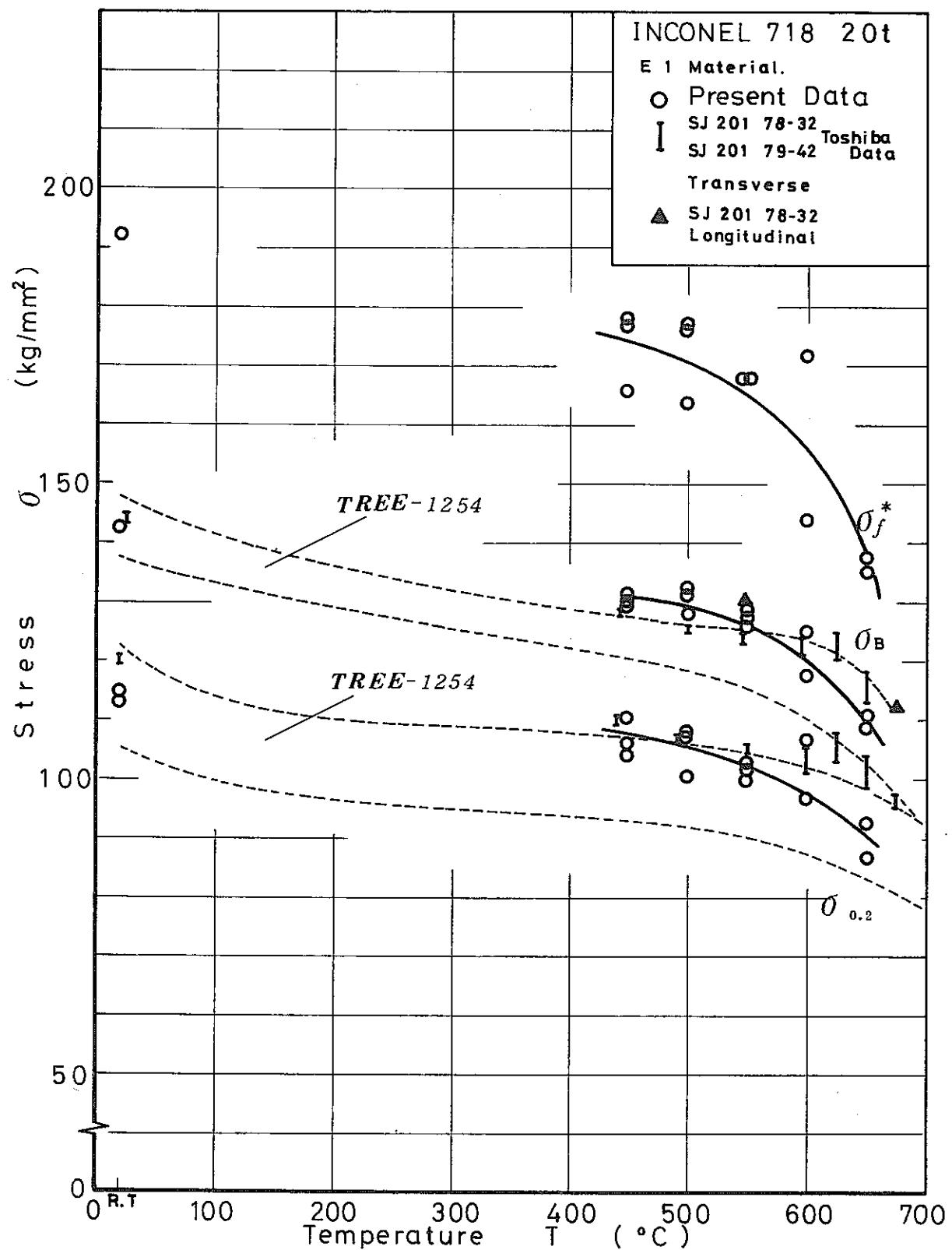


図 5.20 : インコネル 718 板材の引張強度に及ぼす試験温度の影響

Fig. 5.20 : Effect of Elevated Test Temperature on Tensile Properties of INCONEL 718 Plate

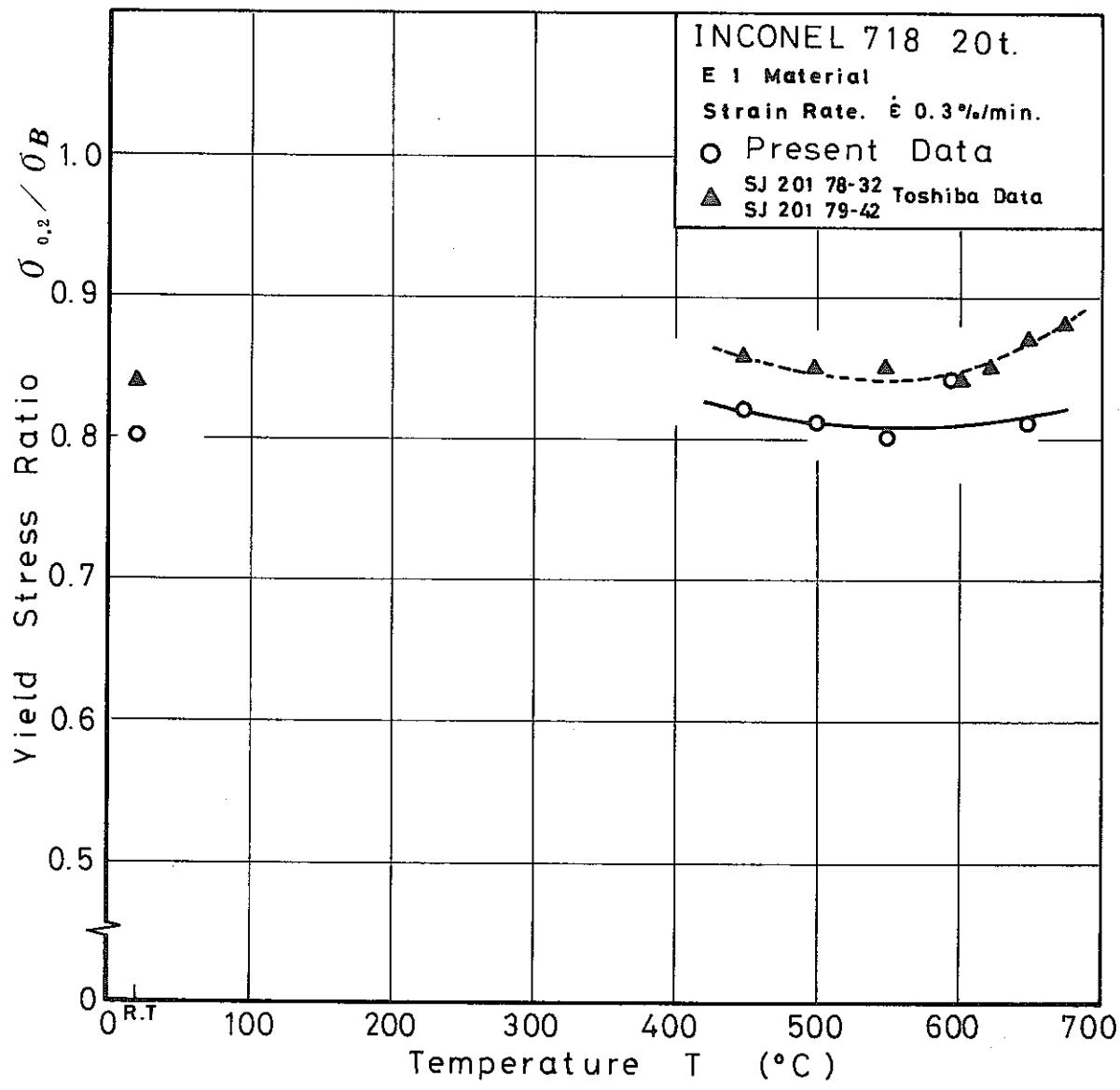
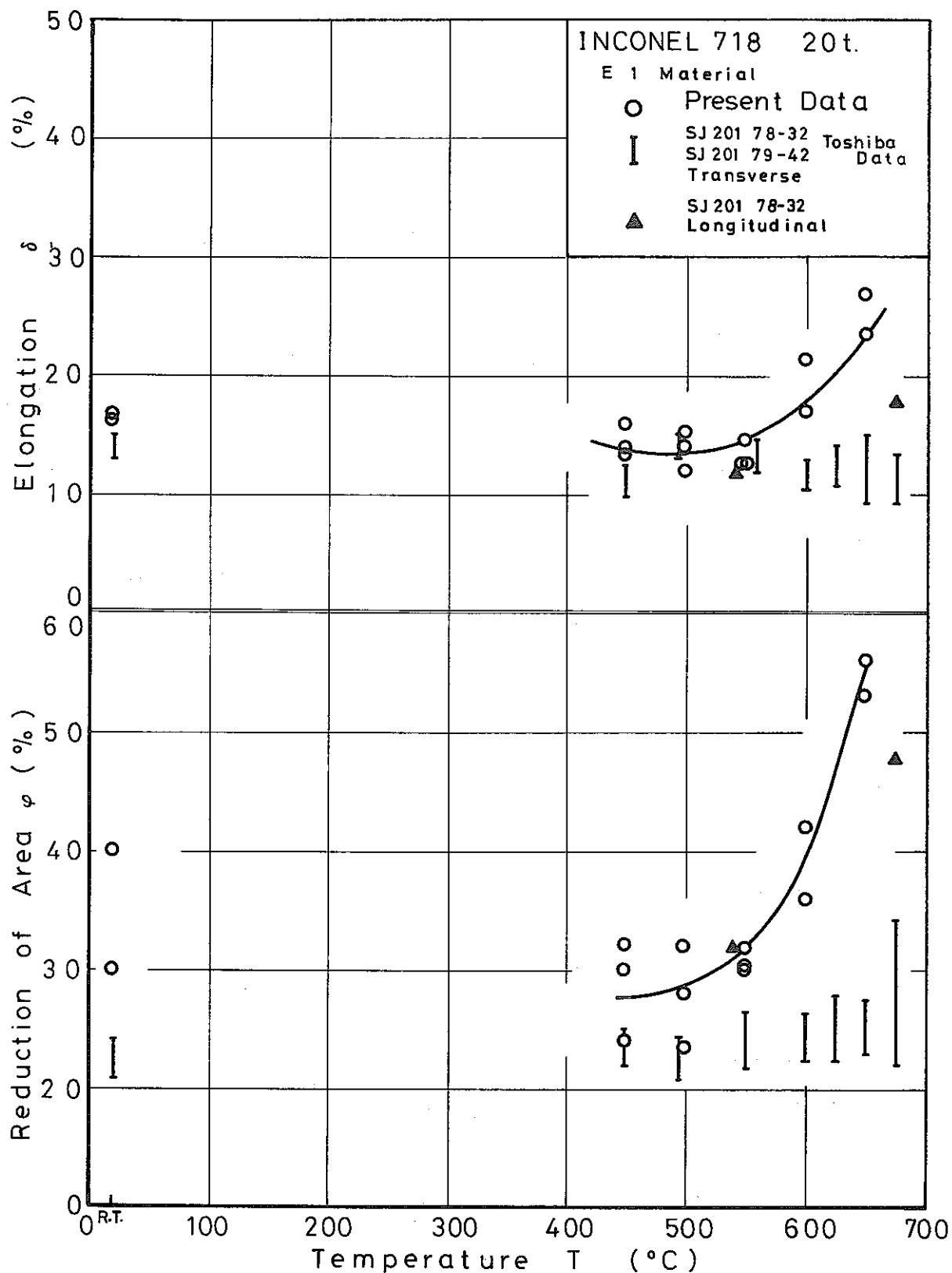


図 5.21 : インコネル 718 板材の降伏比の試験温度による変化

Fig. 5.21 : Variation of Ratio of Yield Strength to Tensile Strength with Temperature for INCONEL 718 Plate



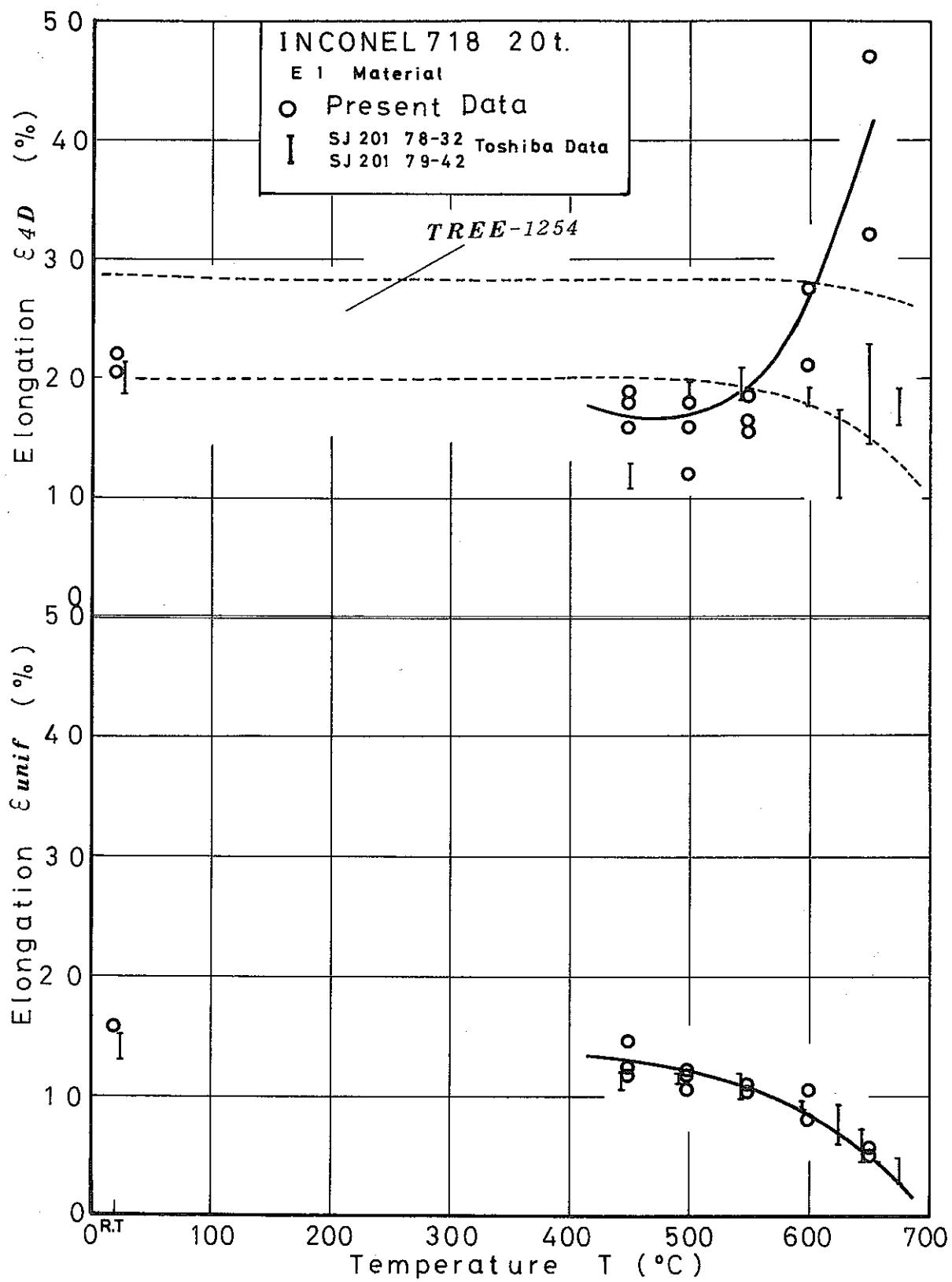


図 5.23 : インコネル 718 板材の延性に及ぼす試験温度の影響 (2)

Fig. 5.23 : Effect of Test Temperature on Tensile Ductilities of INCONEL 718 Plate (2)

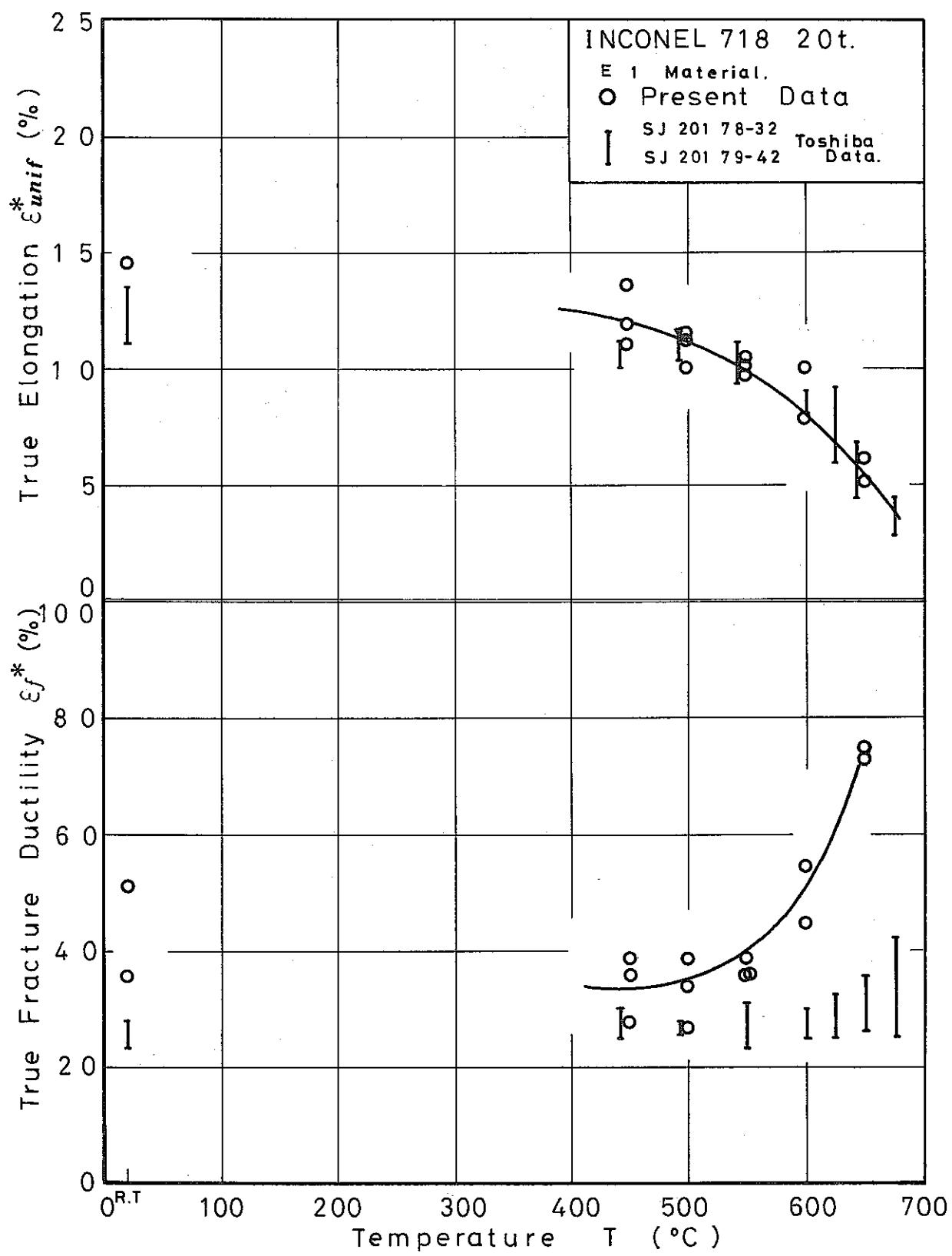


図 5.24 : インコネル 718 板材の延性に及ぼす試験温度の影響 (3)

Fig. 5.24 : Effect of Test Temperature on Tensile Ductilities of INCONEL 718 Plate (3)

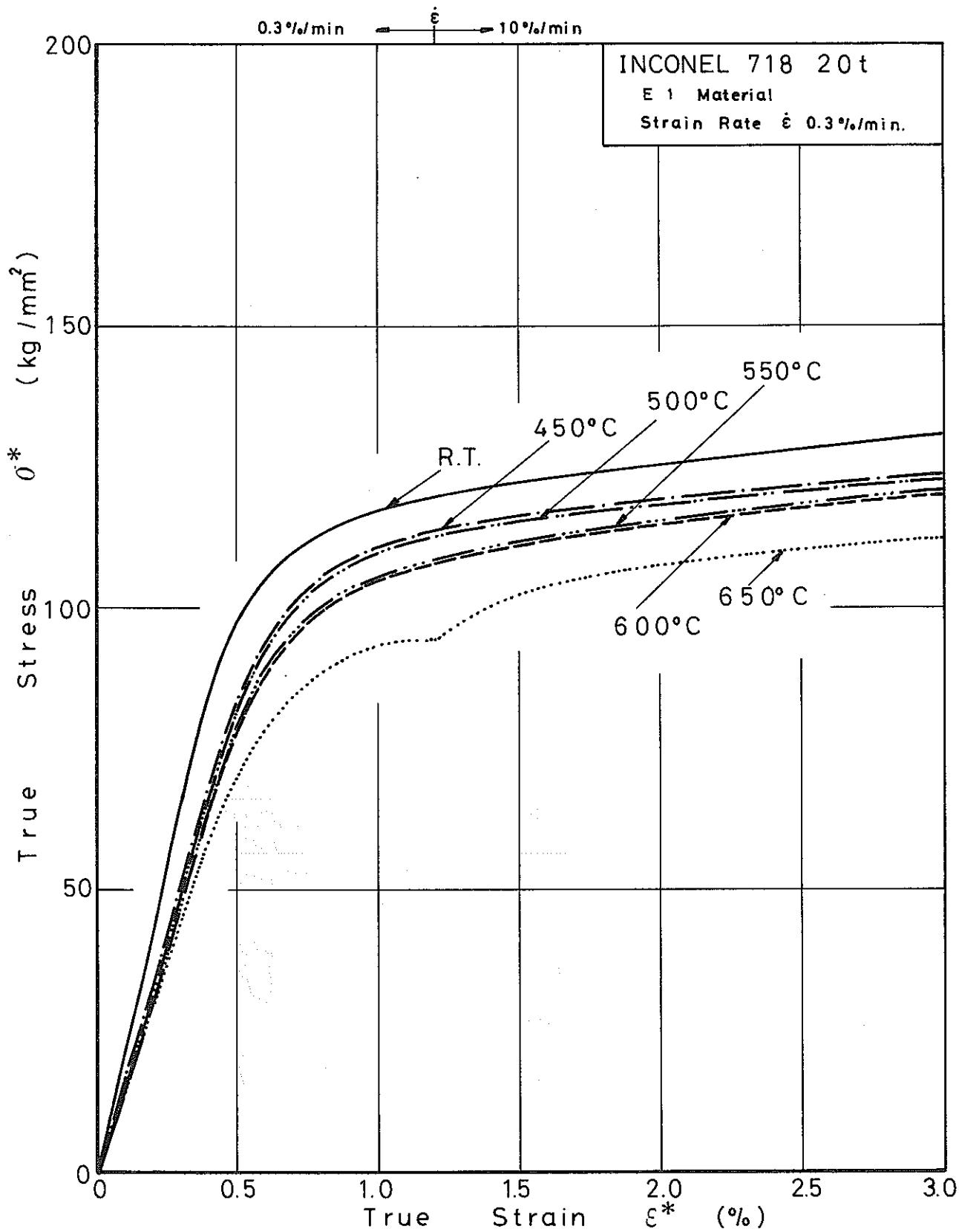
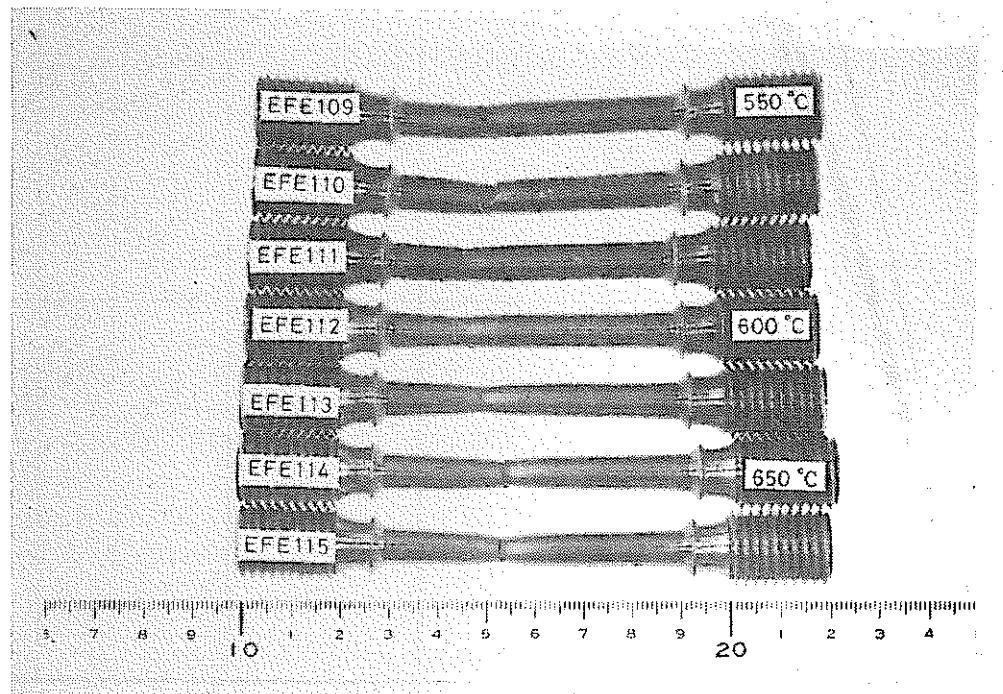
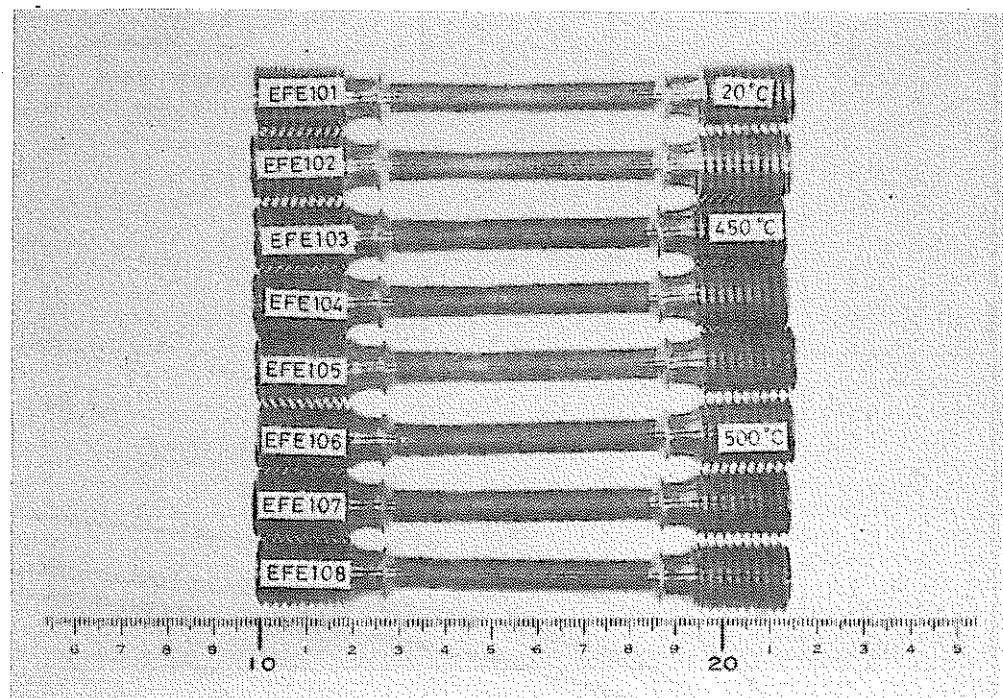


図 5.25 : インコネル 718 板材の真応力—真ひずみ曲線

Fig. 5.25 : True Stress—True Strain Curves at Room and Elevated Temperatures for INCONEL 718 Plate



写 真 5 . 8 : インコネル 718 板材の高温引張試験後の試験片外観

Photo. 5 . 8 : Appearance after Tensile Test for INCONEL 718 Plate

5.3.2 低サイクル疲労試験結果

500, 550°C における低サイクル疲労試験結果の一覧を「表 5.5」に示す。以下その結果について説明する。

(1) ひずみ範囲と破損繰返し数の関係

500, 550°C 各試験温度において得られた全ひずみ範囲 ($\Delta\varepsilon_t$)、弾性ひずみ範囲 ($\Delta\varepsilon_e$) および塑性ひずみ範囲 ($\Delta\varepsilon_p$) と破損繰返し数 (N_f) の関係を「図 5.26」に示す。

全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_t$ ~ 破損繰返し数 N_f 曲線の勾配が緩やかで破断寿命の全ひずみ範囲依存性が大きい。500°C では $\Delta\varepsilon_t = 0.9\%$ で 550°C では、 $\Delta\varepsilon_t = 0.8\%$ でそれぞれほぼ疲労限となっている。

全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_t$ 中に占める弾性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_e$ 、塑性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_p$ を見ると、 $\Delta\varepsilon_e$ の占める割合がかなり大きく、 $\Delta\varepsilon_t = 1\%$ で $\Delta\varepsilon_e$ は 90% 以上、疲労限付近では 95% 以上となっており、ほとんど弾性領域の繰返し試験に近くなる。

今回得た全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_t$ ~ 破損繰返し数 (N_f) の関係を、既に得られている 600, 650°C 試験結果¹³⁾ (今回と同じく圧延方向より試験片を採取している) と米国データ (TREE-1254, G.E.Korth) (試験温度 427°C, 593°C) と比較したものを「図 5.27」に示す。

KOM データ (500~650°C) は、狭いバンド内にあり、500°C と 650°C を比べても全ひずみ範囲で 0.2% 程度の差である。しかし 500°C ⇄ 650°C と温度が高くなるとともに破断寿命が短くなる傾向は明らかに認められる。500°C と 650°C の破断寿命を比べると $\Delta\varepsilon_t \sim N_f$ 曲線の勾配が緩やかなこともあり、500°C の方が 1 オーダー程長くなっている。

KOM データを米国データと比較すると、長寿命側 (破損繰返し数 10^4 サイクル以上) では同等であるが、短寿命側 (10^4 サイクル以下) では、KOM データは米国データより強度は低い。この差異が生じた要因として a) 今回の供試材は、5.3.1 項で述べたように延性がやや低目である。b) 米国データは、試験片形状が砂時計型試験片である。c) 米国データは、ひずみ速度が 0.4%/s. である。などが考えられなくもないが、明確な理由はわからない。

(2) 繰返しサイクルに伴う応力変化

500°C, 550°C 各試験温度における繰返しサイクルに伴う応力範囲の変化状況をそれぞれ「図 5.28, 図 5.29」に示す。

インコネル 718 板材は、繰返しサイクルに伴って加工軟化する。500°C では、550°C の場合より繰返し加工軟化は、比較的少ない。末破断である $\Delta\epsilon_t = 0.9\%$ においては、軟化傾向はほとんど生じていない。

550°C の場合には、500°C より繰返し加工軟化量は大きくなる。ひずみレベルの小さい、末破断の $\Delta\epsilon_t = 0.8\%$ でも、ごくわずかであるが軟化は生じている。

繰返し加工軟化は、繰返しサイクルに伴う塑性ひずみの変化からもうかがい知ることができる。500°C, 550°C における塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_p$ の変化状況を「図 5.30, 図 5.31」に示す。繰返しサイクルとともに $\Delta\epsilon_p$ は増加しており、550°C の方が増加量は大きい。 $500°C, \Delta\epsilon_t = 0.9\%$ では $\Delta\epsilon_p$ は、ほとんど増加していない。

(3) 動的応力一ひずみ曲線

$\frac{1}{2}N_f$ 近傍における全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_t$ と応力範囲 $\Delta\sigma$ の関係から求めた動的応力一ひずみ曲線を「図 5.32」に示す。

同図には、5.3.1 項の単調応力一ひずみ曲線 および既に得ている 600°C, 650°C の動的応力一ひずみ曲線を併記している。(動的応力一ひずみ曲線が 500, 550, 600, 650°C 全て、圧延方向試験片で得たものなので単調応力一ひずみ曲線についても、今回の圧延方向試験片データを引用した)

インコネル 718 は、繰返し加工軟化していることがよくわかる。550°C~650°C 各温度における動的応力一ひずみ曲線には、相互に明瞭な有意差は認め難いが、高温になるほど、やや応力レベルが低くなる傾向はある。

(4) 破損繰返し数と破損時間との関係

500°C, 550°C における破損繰返し数 N_f と破損時間 t_f の関係をプロットしたものが「図 5.33」である。

500°C, 550°C 各直線は、わずかずれているが、ほぼ同じ直線上に位置している。

5.3.3. 金属組織 および 破面観察結果

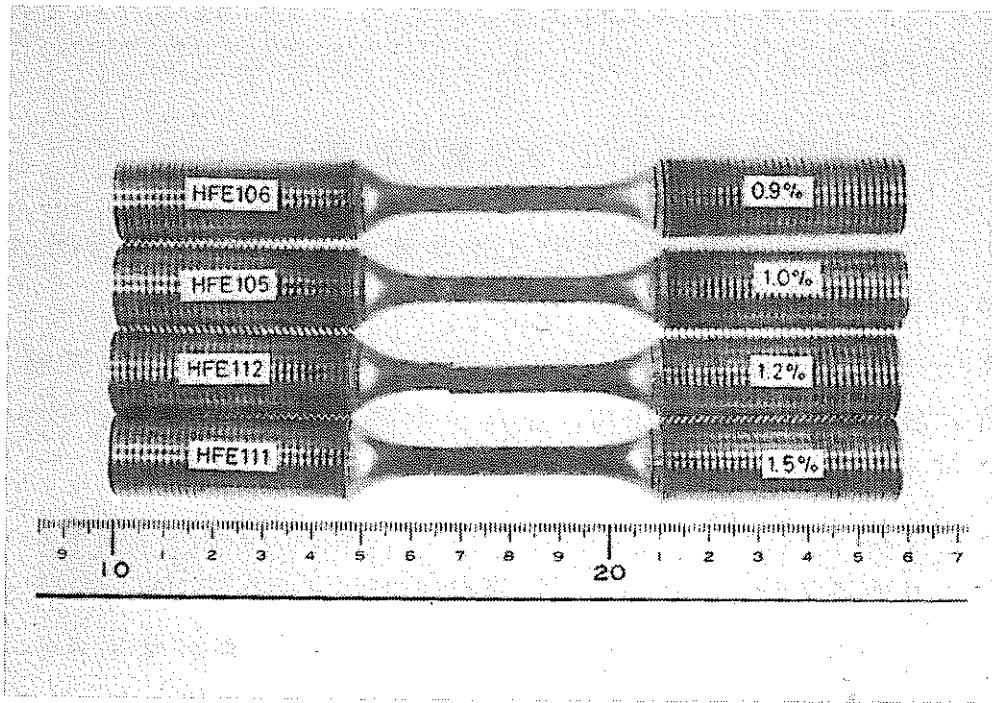
インコネル 718 板材の低サイクル疲労試験破断試験片の外観を「写真 5.9」に示す。

溶体化処理状態 および 時効処理後の低サイクル疲労試験を行った破断試験片 (500°C, 550°C, 全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_t = 1.5\%$) の破断面近傍のミクロ組織を「写真 5.10」に示す。

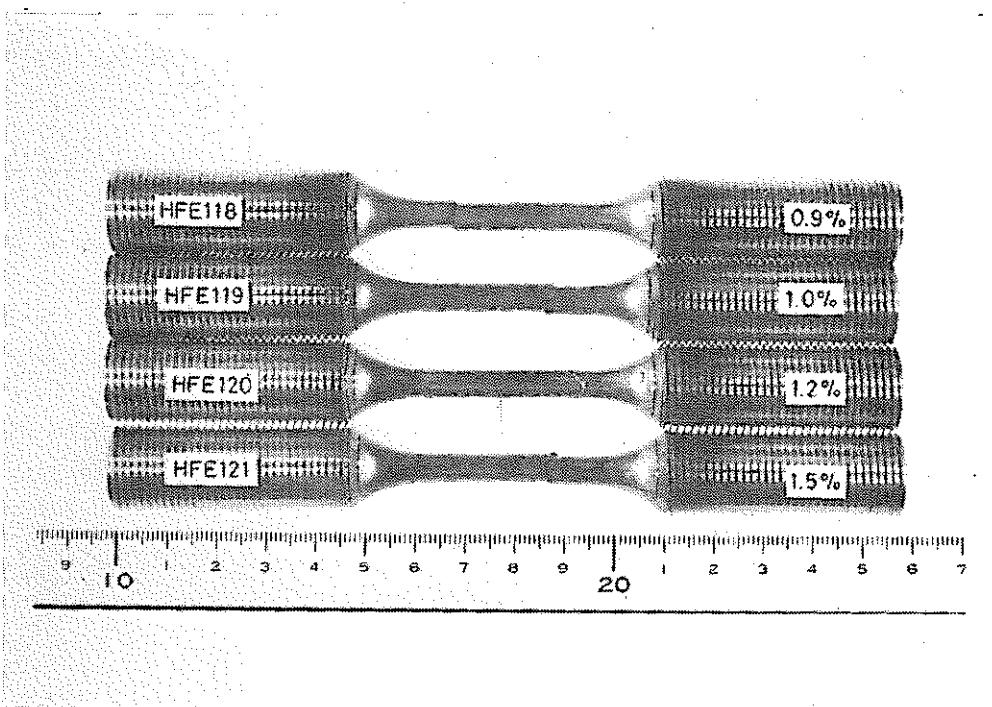
破断試験片 (500°C, 550°C, 全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_t = 1.5\%$) の疲労破面を「写真 5.11 ~ 5.12」に示す。

いずれの温度においても、粒内破壊である。き裂発生点から中央部にかけては、延性的な疲労破面を呈しており、一部ストライエーションが観察される。

Test Temperature 500°C



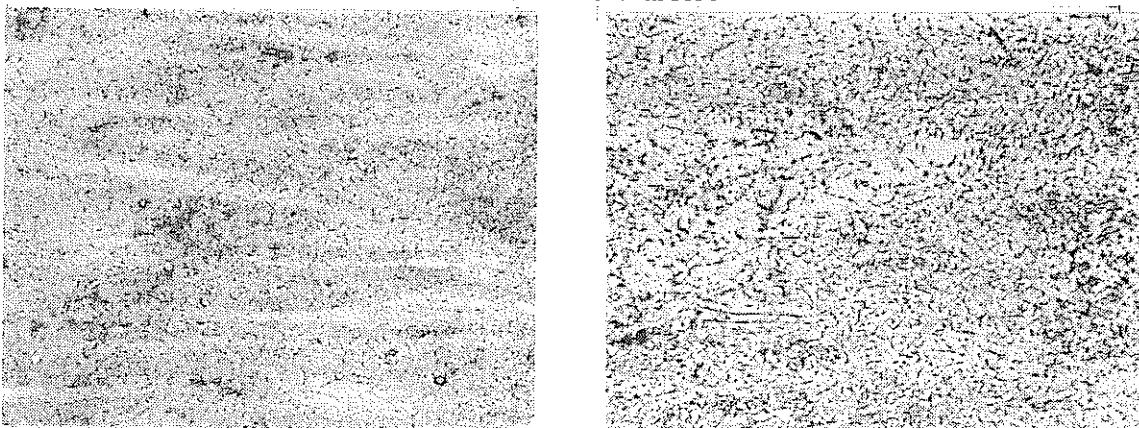
Test Temperature 550°C



写 真 5.9 : インコネル 718 板材の 500°C, 550°C における
低サイクル疲労試験後の試験片外観

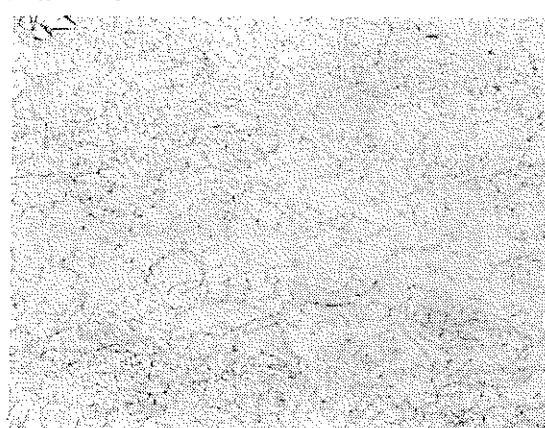
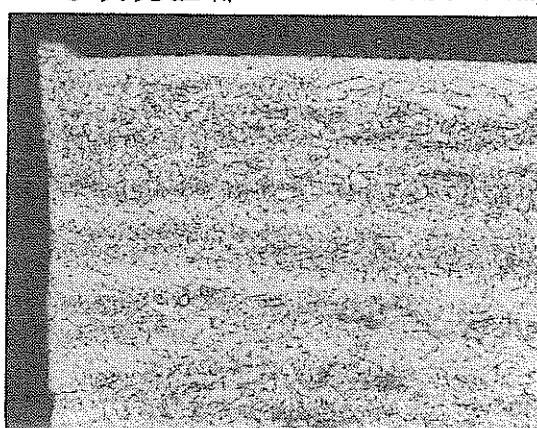
Photo. 5.9 : Appearance after Low Cycle Fatigue Test at
500°C, 550°C for INCONEL 718 Plate

Solution Treatment



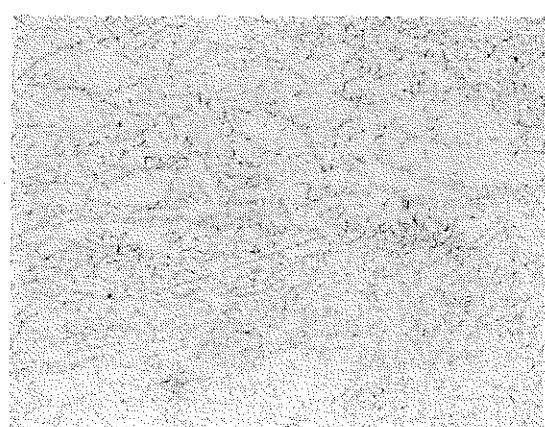
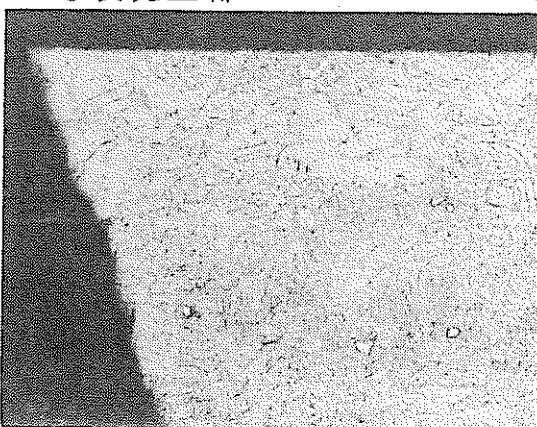
き裂発生部

Test Temperature 500°C



き裂発生部

Test Temperature 550°C

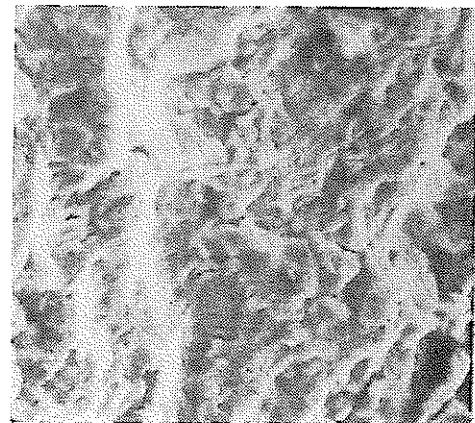
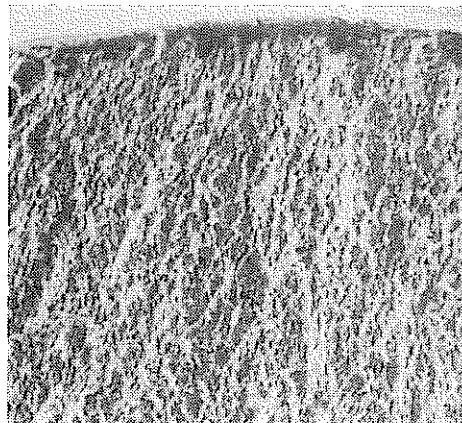


$75 \mu\text{m}$

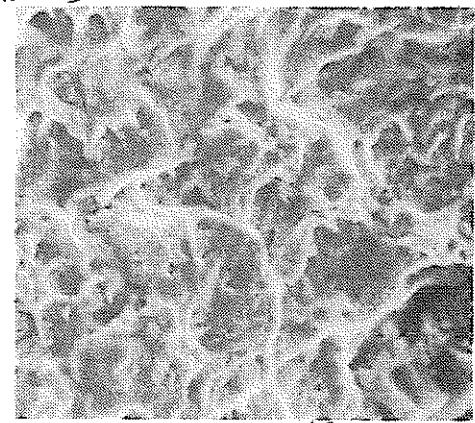
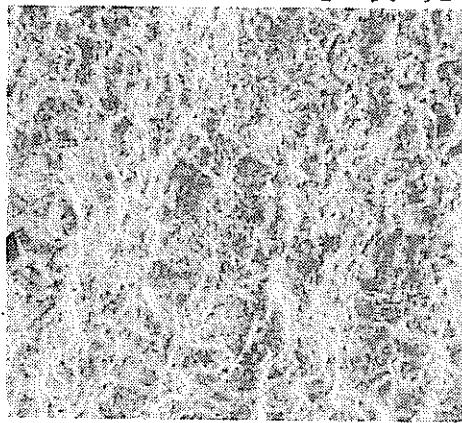
$30 \mu\text{m}$

写 真 5.10 : インコネル 718 板材の 500°C, 550°C における
低サイクル疲労試験後の金属組織 ($\Delta\varepsilon_t = 1.5\%$)
Photo. 5.10 : Microstructures after Low Cycle Fatigue Test
at 500°C, 550°C for INCONEL 718 Plate
($\Delta\varepsilon_t = 1.5\%$)

き裂発生点近傍

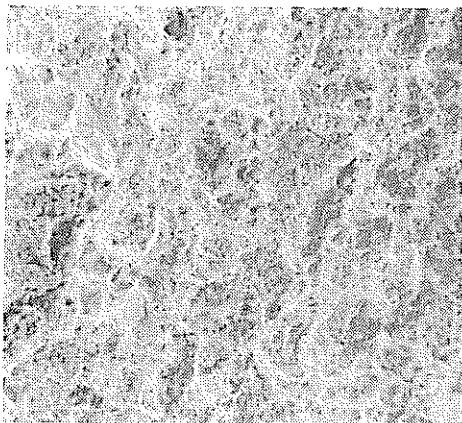


き裂発生点から1mm

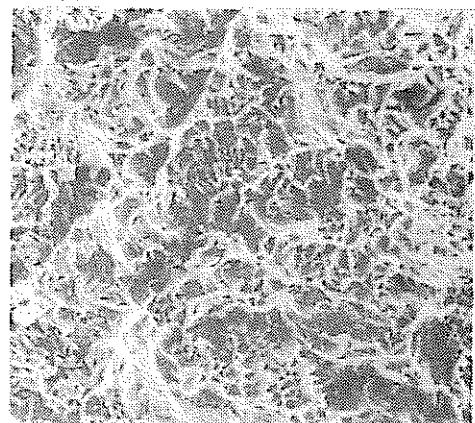


$10 \mu\text{m}$

最終破断部



$100 \mu\text{m}$

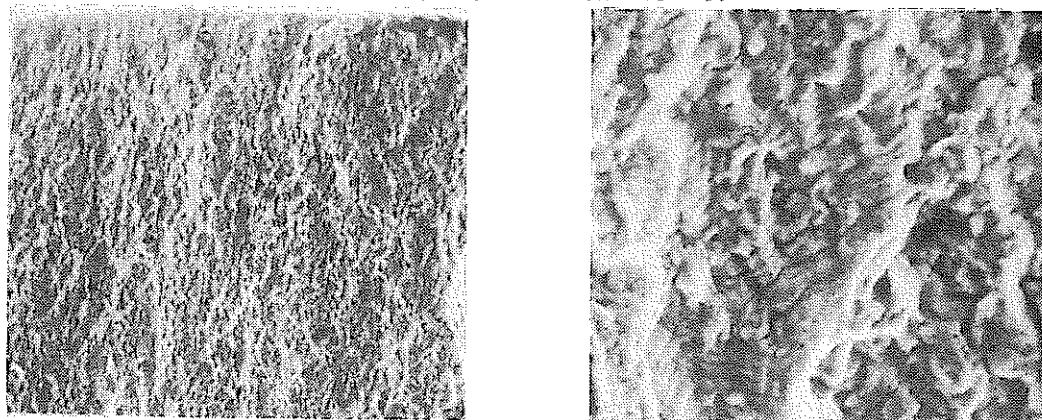


$25 \mu\text{m}$

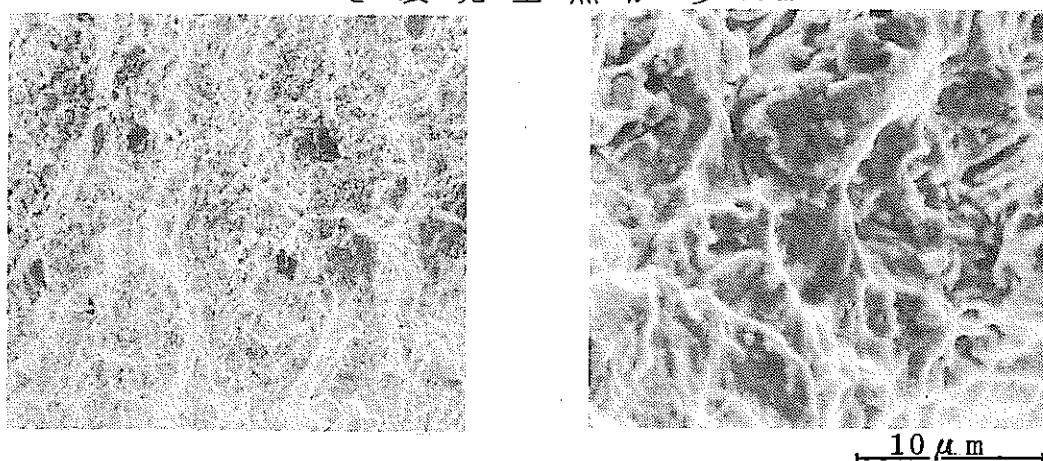
写真 5.11 : インコネル 718 板材の 500°C における低サイクル疲労試験後の疲労破面 ($\Delta\varepsilon_t = 1.5\%$)

Photo. 5.11 : SEM Fractographs of Fatigue Fracture Surface at 500°C for INCONEL 718 Plate ($\Delta\varepsilon_t = 1.5\%$)

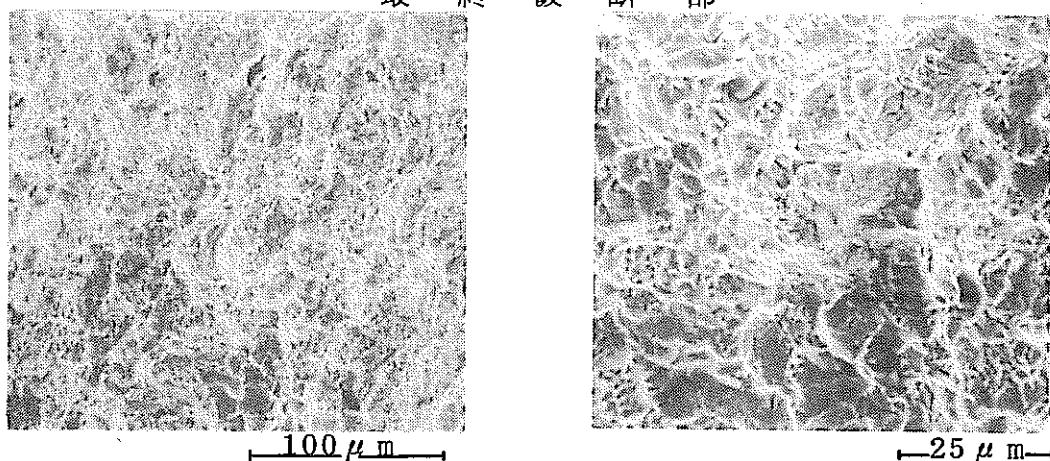
き裂発生点近傍



き裂発生点から 1mm



最終破断部



写 真 5.12 : インコネル 718 板材の 550°C における低サイクル疲労試験後の疲労破面 ($\Delta\epsilon_t = 1.5\%$)

Photo. 5.12 : SEM Fractographs of Fatigue Fracture Surface at 550°C for INCONEL 718 Plate ($\Delta\epsilon_t = 1.5\%$)

表 5.5 : インコネル 718 板材の低サイクル疲労試験結果 (1/2)

Table 5.5 : Low Cycle Fatigue Test Results of INCONEL 718 Plate (1/2)

材料	インコネル 718	試験雰囲気	大気中	試験場所	富士電機総合研究所
----	--------------	-------	-----	------	-----------

材料製造者	素材形状寸法	化学成分	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Fe
東京芝蒲 電気株式 会社	20t X 219 X 1010mm N 1933 E 1 材	要求最小値						17.00	50.00	
		要求最大値	0.080	0.35	0.35	0.015	0.015	21.00	55.00	Bal.
		とりべ分析値	0.048	0.06	0.15	0.006	0.007	18.60	53.70	Bal.
		製品分析値	0.050	0.06	0.20	0.006	0.008	18.20	54.00	Bal.

化学成分	Ti	Al	Mo	Nb + Ta	Co	Cu	B
要求最小値	0.65	0.20	2.80	4.75			
要求最大値	1.15	0.80	3.30	5.50	1.00	0.300	0.006
とりべ分析値	1.02	0.48	2.92	5.16	0.13	0.037	0.003
製品分析値	1.05	0.49	2.93	5.28	0.11	0.022	0.003

試験 温 度 °C	ひずみ 速 度 %/sec	試験片 番 号	ひずみ範囲			疲労寿命			破損 時 間	定常応力 kg/mm²	
			$\Delta \varepsilon_t$	$\Delta \varepsilon_e$	$\Delta \varepsilon_p$	N_0	N_5	N_{25}		$\sigma_{max.}$	$\sigma_{min.}$
500	0.1	HFE106	0.9	0.873	0.027	300000*			1500.00	67.46	62.66
		HFE105	1.0	0.904	0.096	2302	17807	17835	99.08	59.98	69.93
		HFE112	1.2	1.014	0.186	1	7010	7022	46.81	59.64	81.01
		HFE111	1.5	1.096	0.404	10	890	890	7.42	79.26	89.51

 N_0 : 最大荷重に到達した回数 N_5 : 最大荷重から 5% 荷重低下した回数 N_{25} : 破損回数 (25% 荷重低下)

* : 未破断

表 5.5 : インコネル 718 板材の低サイクル疲労試験結果 (2/2)

Table 5.5 : Low Cycle Fatigue Test Results of INCONEL 718 Plate (2/2)

試験 温度 °C	ひずみ 速度 %/sec	試験片 番号	ひずみ範囲			疲労寿命			破損 時間	定常応力 kg/mm ²	
			$\Delta\varepsilon_t$	$\Delta\varepsilon_e$	$\Delta\varepsilon_p$	N_0	N_5	N_{25}		$\bar{\sigma}_{max.}$	$\bar{\sigma}_{min.}$
550	0.1	HFE115	0.8	0.753	0.047	134075*			595.90	60.76	60.76
		HFE118	0.9	0.840	0.060	5000	33944	34116	170.58	49.10	69.21
		HFE119	1.0	0.886	0.114	5000	15403	16875	93.75	59.05	72.23
		HFE120	1.2	0.963	0.237	1	4830	4857	32.38	54.17	75.12
		HFE121	1.5	1.074	0.426	1	452	524	4.37	57.49	80.06

 N_0 : 最大荷重に到達した回数 N_5 : 最大荷重から 5% 荷重低下した回数 N_{25} : 破損回数 (25% 荷重低下)

* : 未破断

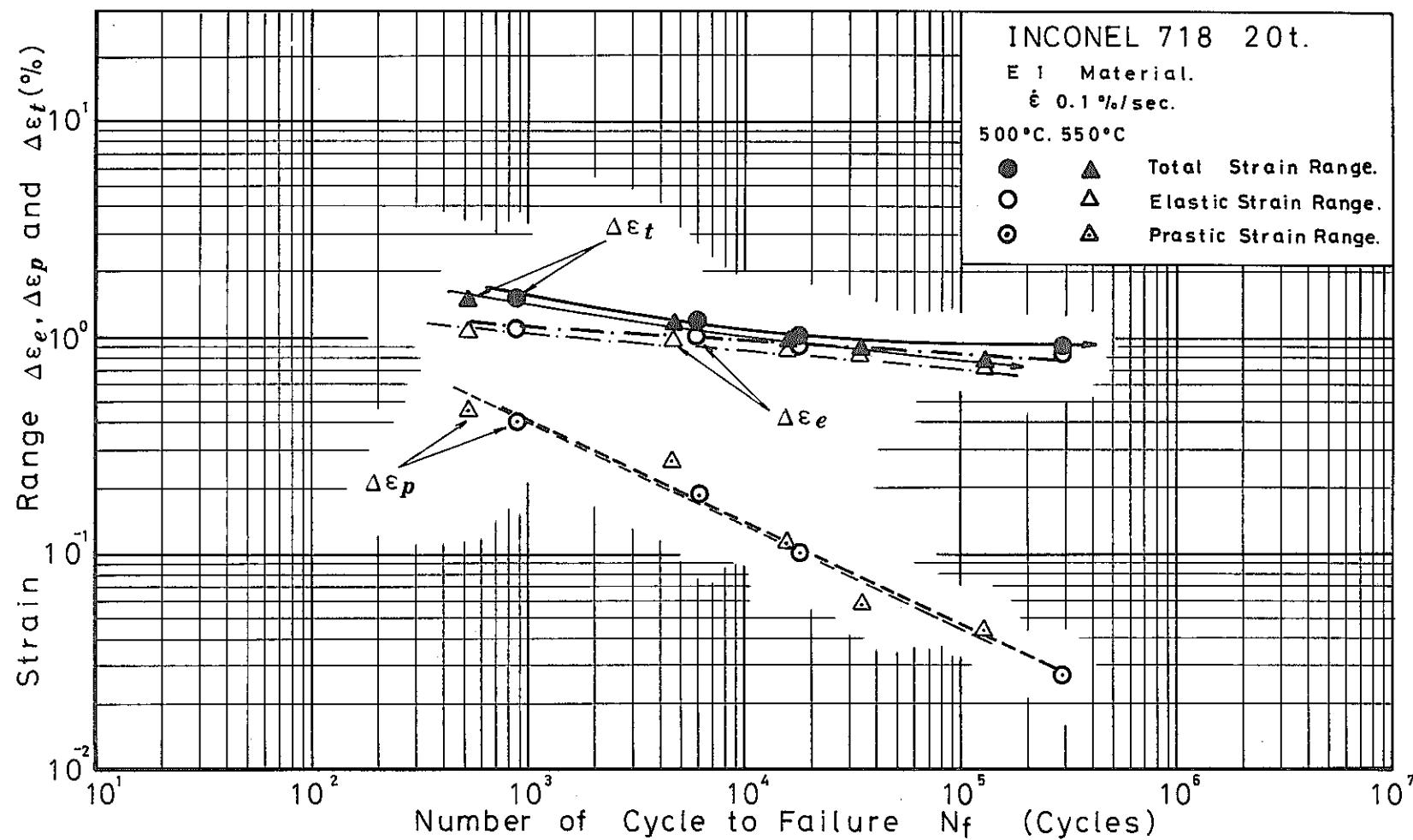


図 5.26 : インコネル 718 板材の 500°C および 550°C における低サイクル
疲労試験結果

Fig. 5.26 : Low Cycle Fatigue Test Results of INCONEL 718 Plate
at 500°C and 550°C

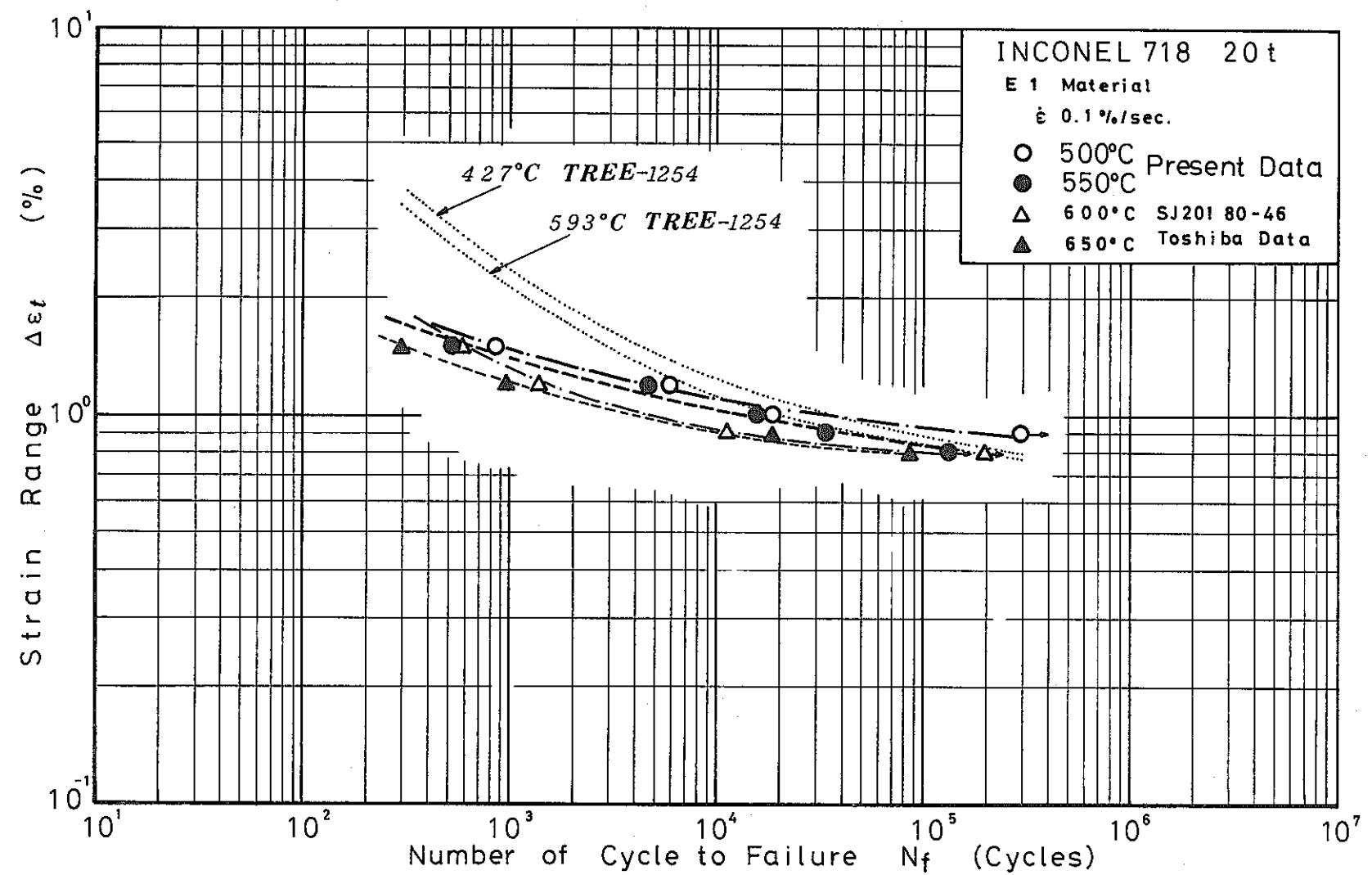


図 5.27 : インコネル 718 板材の低サイクル疲労試験結果と文献値との比較

Fig. 5.27 : Comparison between Present Low Cycle Fatigue Test Results and Other Experimental data of INCONEL 718 Plate

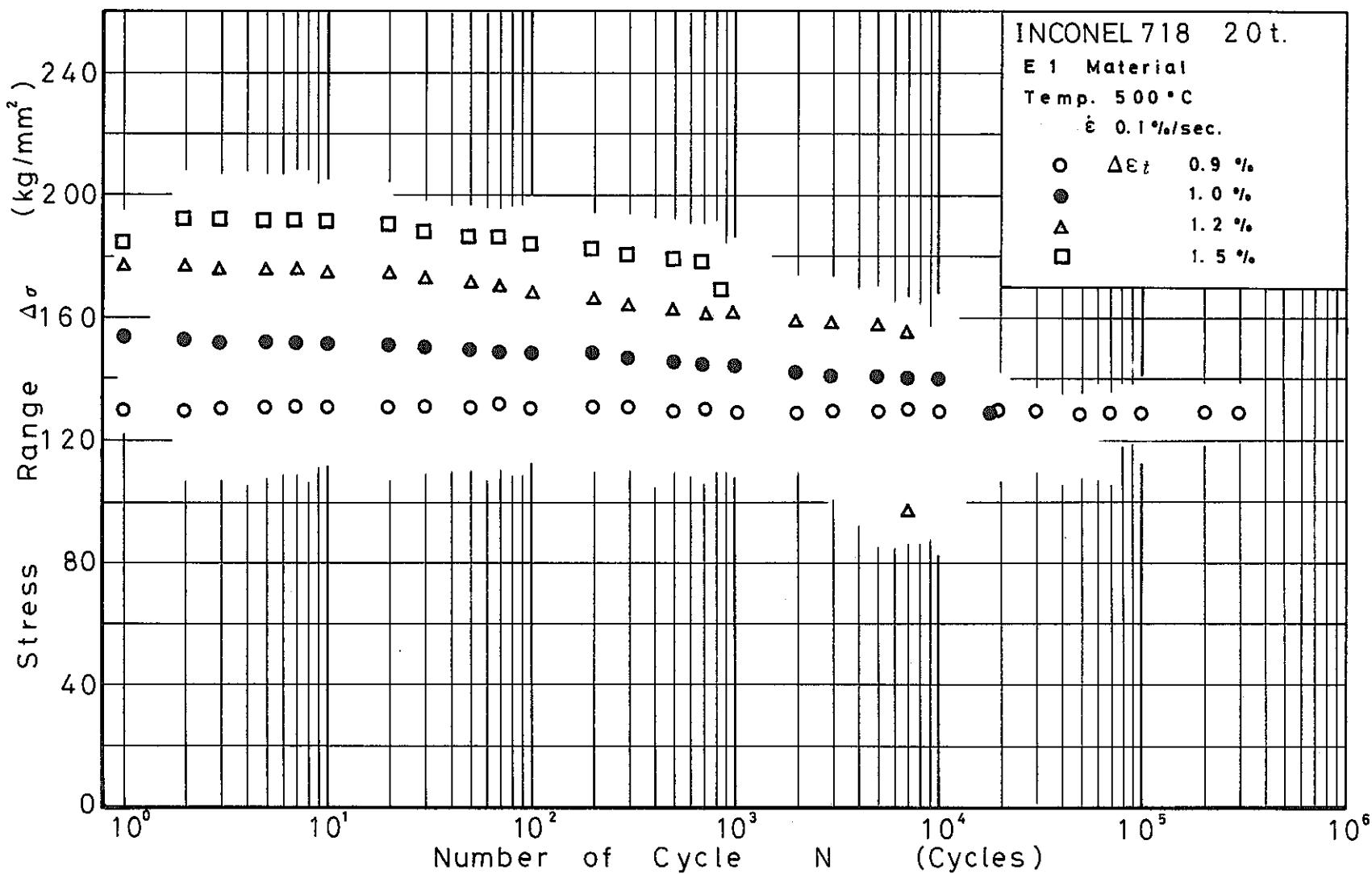


図 5.28 : インコネル 718 板材の 500°C における低サイクル疲労試験
繰返しサイクルに伴う応力変化

Fig. 5.28 : Stress Changes during Reversed Strain Cycling of
INCONEL 718 Plate at 500°C

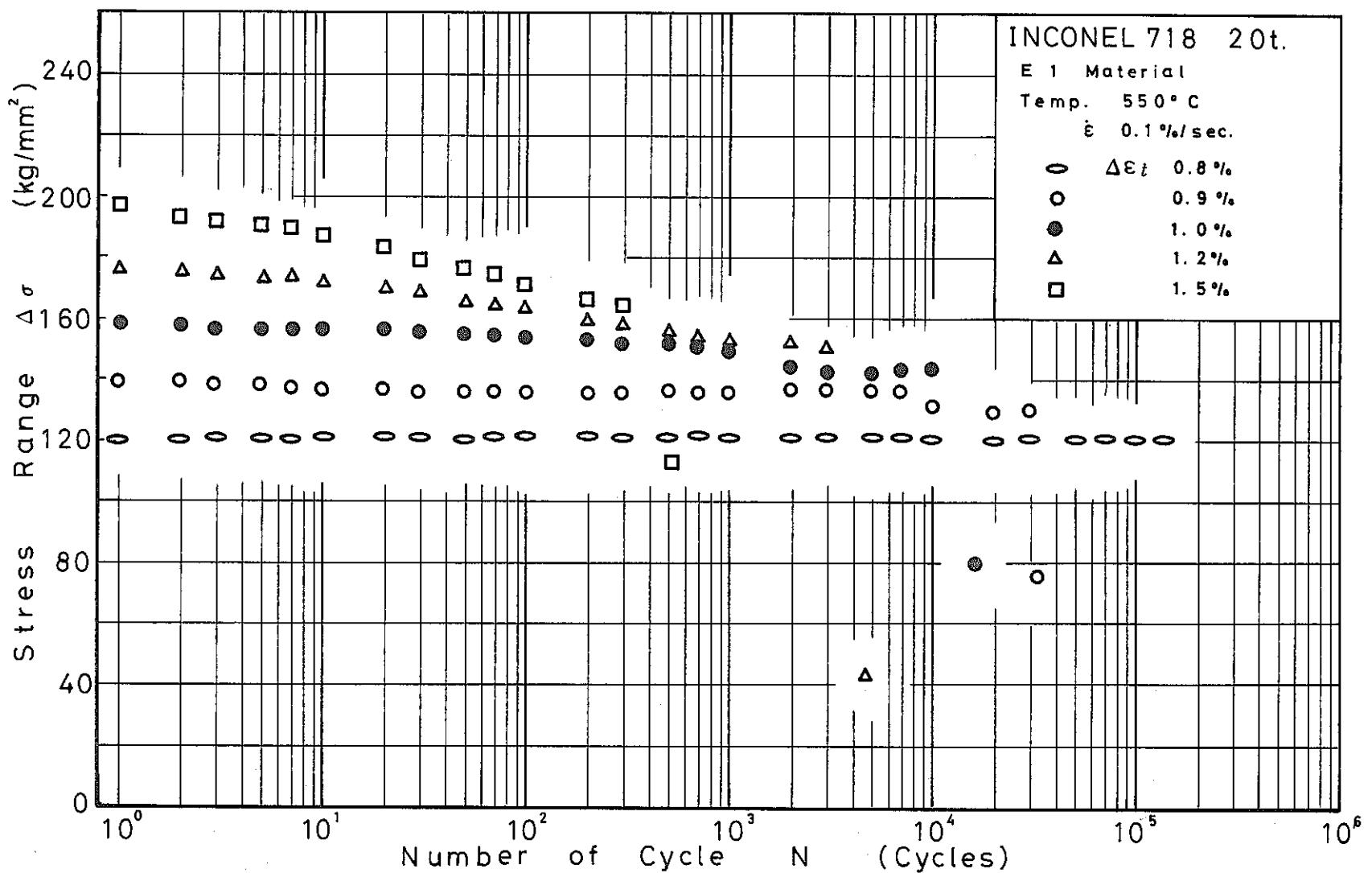


図 5.29 : インコネル 718 板材の 550°C における低サイクル疲労試験
繰返しサイクルに伴う応力変化

Fig. 5.29 : Stress Changes during Reversed Strain Cycling of
INCONEL 718 Plate at 550°C

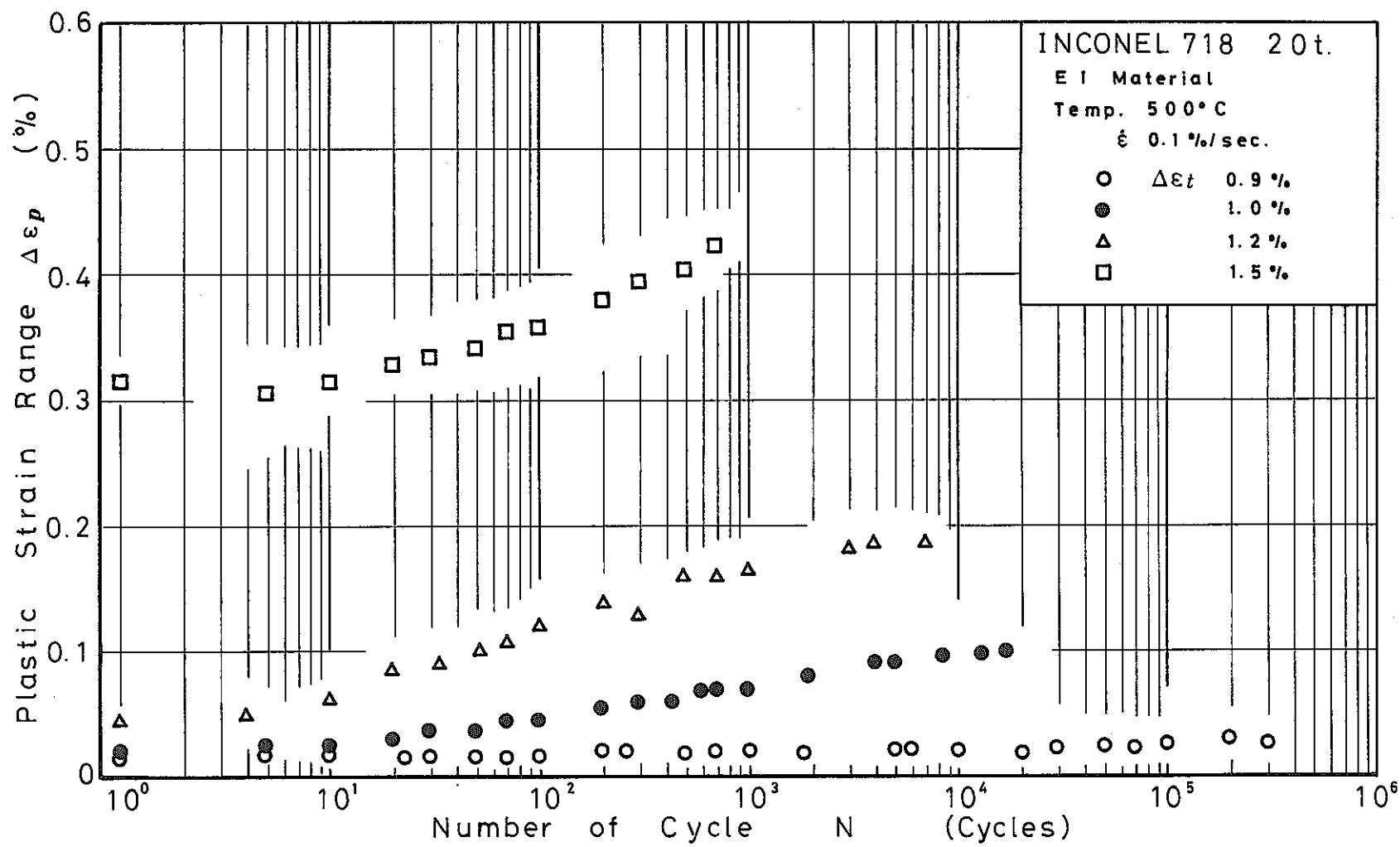


図 5.30 : インコネル 718 板材の 500°C における低サイクル疲労試験繰返しサイクルに伴う塑性ひずみ範囲の変化

Fig. 5.30 : Changes of Plastic Strain Range during Reversed Strain Cycling of INCONEL 718 Plate at 500°C

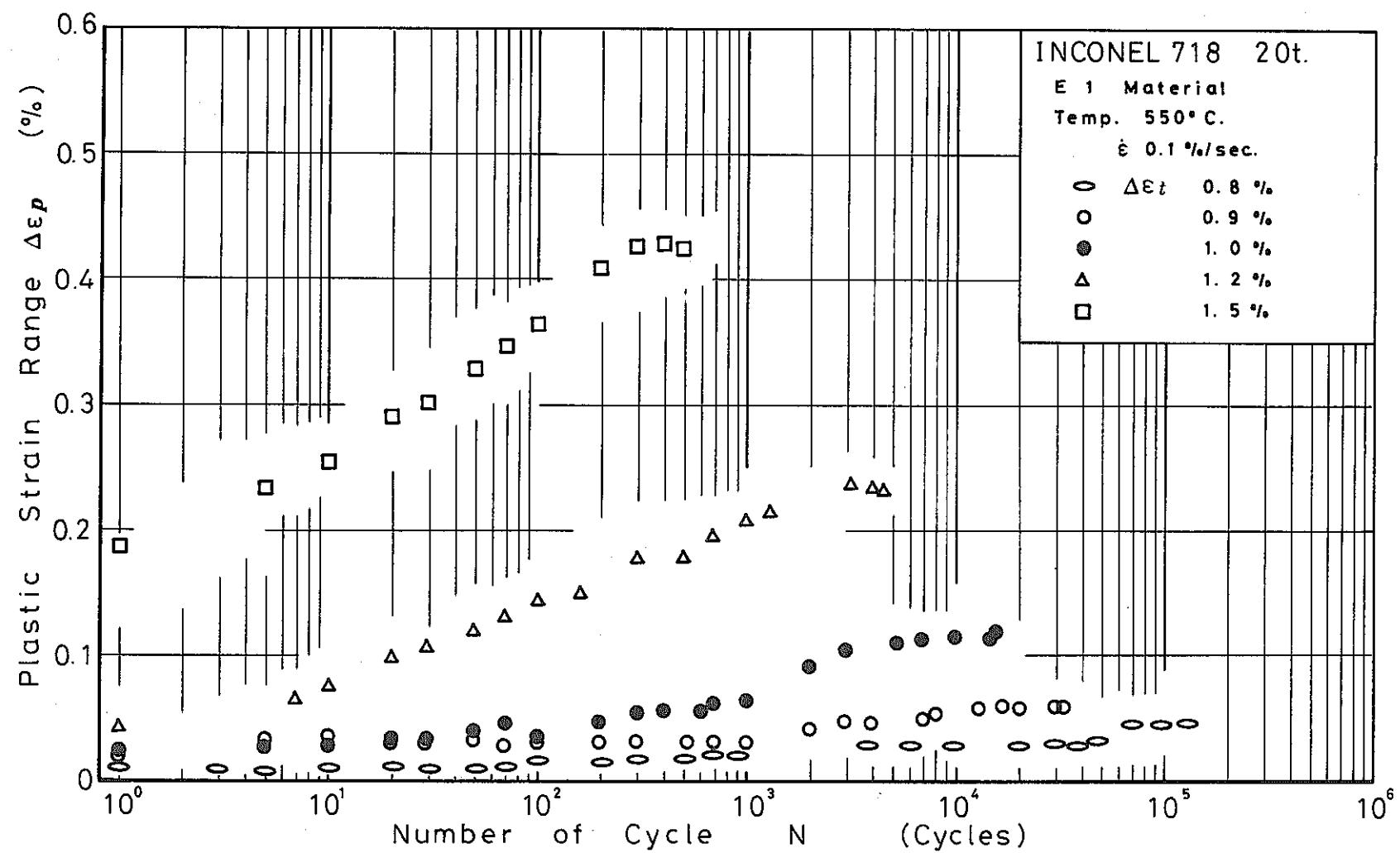


図 5.31 : インコネル 718 板材の 550°C における低サイクル疲労試験繰返しサイクルに伴う塑性ひずみ範囲の変化

Fig. 5.31 : Changes of Plastic Strain Range during Reversed Strain Cycling of INCONEL 718 Plate at 550°C

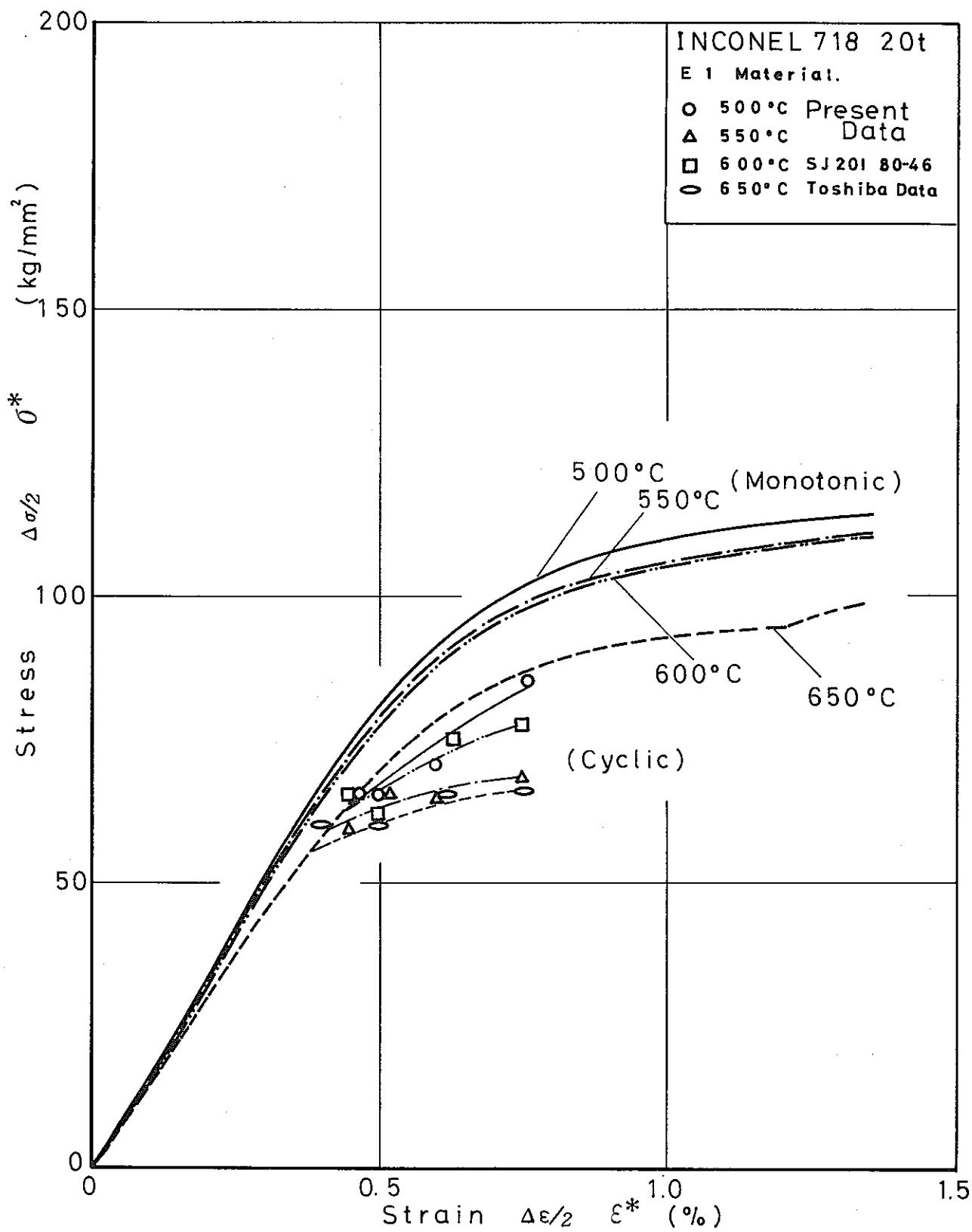


図 5.32 : インコネル 718 板材の動的応力一ひずみ曲線

Fig. 5.32 : Cyclic Stress—Strain Curves of INCONEL 718 Plate

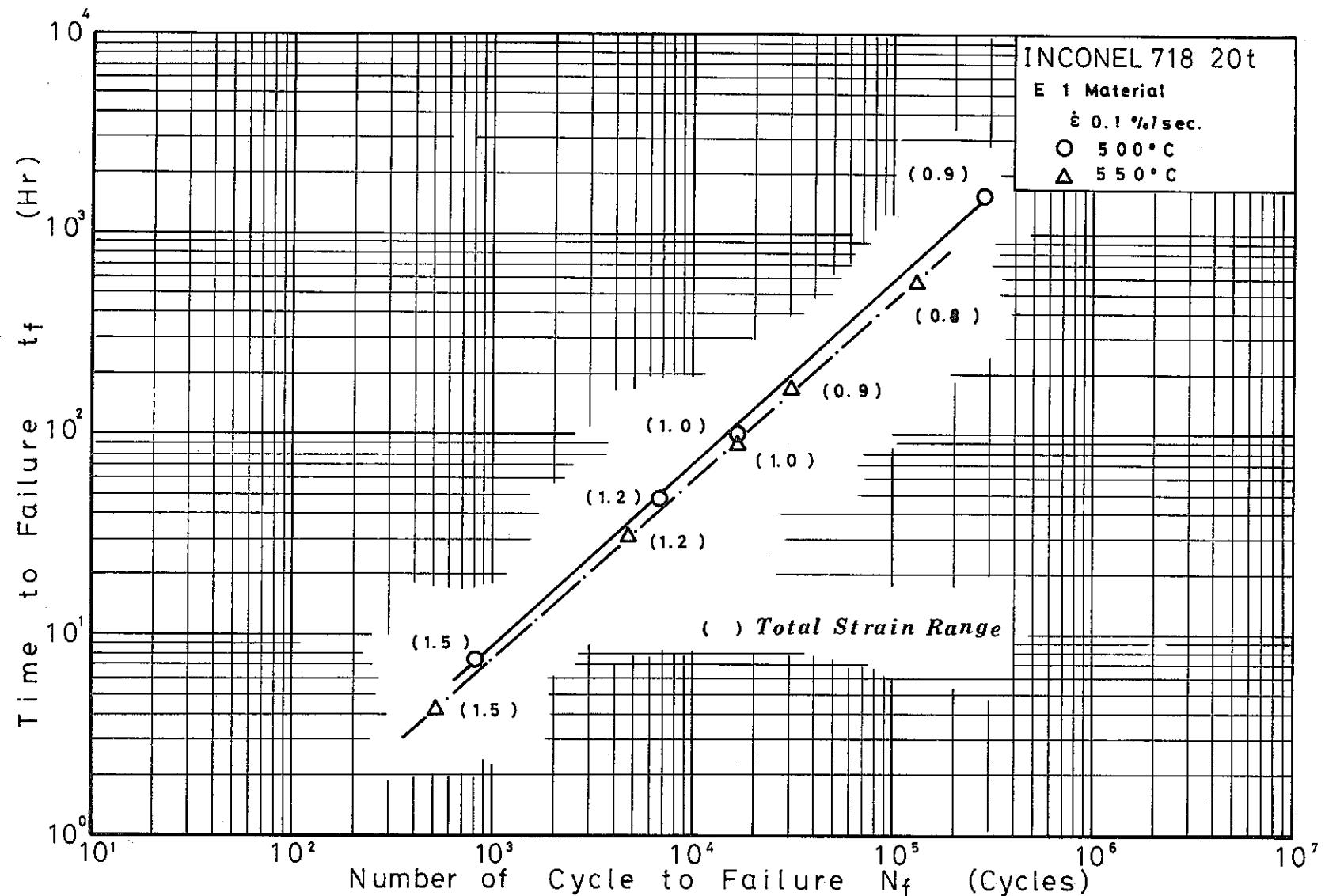


図 5.33 : インコネル 718 板材の 500°C および 550°C における破損繰返し数 N_f と破損時間 t_f との関係

Fig. 5.33 : Relation between Number of Cycle to Failure N_f and Time to Failure t_f for INCONEL 718 Plate at 500°C and 550°C

6. 結 言

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 鋼板材について、
600°C リラクセーション試験、550°C 低サイクル疲労ひずみ波形
効果試験、および インコネル 718 板材について高温引張、500
550°C の低サイクル疲労試験を行った結果、次の結論を得た。

(1) SUS 304 鋼板材の 600°C リラクセーション試験

600°C 全ひずみ 0.2%, 0.5% のリラクセーション試験結果を既に実施している 500°C, 550°C のものと比較すると、短時間側では、試験温度の差異は明瞭でないが、長時間側（10 時間以降）にて残留応力レベルは 500°C \Rightarrow 550°C \Rightarrow 600°C と低くなっている。

600°C 全ひずみ 0.2%, 0.5% のリラクセーション試験結果をクリープひずみ式による計算結果と比較すると、短時間側では、クリープひずみ式による記述は難しいが、長時間側では時間係数 $\alpha_R = 1$ の計算結果とほぼ一致する。

(2) SUS 304 鋼板材の低サイクル疲労強度に及ぼすひずみ波形効果

550°C にてひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0.01\% / \text{s}$ の対称三角波 および引張方向ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0.005\% / \text{s} \Rightarrow$ 圧縮方向ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 1.0\% / \text{s}$ の鋸歯状波の低サイクル疲労試験を実施したところ、鋸歯状波の疲労寿命は三角波に比較して 70~85% に低下した。

(3) インコネル 718 板材の高温強度試験

500°C, 550°C における低サイクル疲労強度は、500°C では全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_t = 0.9\%$ で、550°C では $\Delta\epsilon_t = 0.8\%$ でそれぞれほぼ疲労限となつた。

7. 謝 辞

この試験研究の実施にあたり、御指導、御教示を頂いた動力炉・核燃料開発事業団高速炉開発本部構造材料グループ および KOM 連絡会の関係各位に、深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) FBR 金属材料試験実施要領書 N241 79-32
- (2) 構造材料試験 81-3 報告書 SJ203 82-01
(富士電機製造株式会社)
- (3) 高速原型炉高温第1種機器の構造設計指針の解説(案)
(昭和56-6) 動燃事業団
- (4) 非弾性構造解析法の実用化に関する研究(I)
日本機械学会(1977)
- (5) 高速原型炉高温構造設計指針 材料強度基準等(案)
(昭和55-9) 動燃事業団
- (6) 津崎他 日本学術振興会 耐熱金属材料委員会研修報告
Vol 22, No. 2, P. 143
- (7) 日本鉄鋼協会 高温強度研究委員会「ひずみ範囲分割による
18Cr-8Ni 鋼の高温低サイクル疲労特性の検討」
- (8) 平 修二他 材料 Vol 27, No. 296(昭和53年) P. 434
- (9) 平川 賢爾他 鉄と鋼 (1979) No. 7 P. 184
- (10) G.E. KORTH et al. TREE-1254, Status Report of Physical
and Mechanical Test Data of Alloy 718
- (11) 構造材料試験 77-2 報告書 SJ201 78-32
(東京芝浦電気株式会社)
- (12) 構造材料試験 78-2 報告書 SJ201 79-42
(東京芝浦電気株式会社)
- (13) 構造材料試験 79-1 報告書 SJ201 80-46
(東京芝浦電気株式会社)

FBR金属材料試験計画表

FBR Metallic Materials Test Planning Sheet

No.

昭和58年3月31日
Date:

所 職 名 Affiliation	承 認 Approved by	審 査 Reviewed by	作 成 Prepared by
富士電機 製造株式会社	仲西	山下	北見

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 - 10

No.	項目 Item	内容 説明 Descriptions					
1	試験題目 Subject	応力緩和データの拡充					
2	試験目的 Objective	SUS 304の長時間応力緩和特性を明らかにし、同時にクリープひずみ式による応力緩和挙動の記述性を確認する。					
3	試験概要 Contents	長時間リラクセーション試験					
4	対象機器 Objective Component	高速炉機器一般					
5	試験材料 Materials	材料名 Name SUS 304	製造種別 Production Form 板材	寸法他 Size (thickness and others) 40 t			
6	環境 Environment	大気中 In Air 静止Na中 In Stagnant Sodium 流動Na中 In Flowing Sodium	アルゴン中 In Ar 窒素中 In N ₂ ヘリウム中 In He	真空中 In Vacuum その他 Others ()			
7	試験名 Type of Test パラメーター Parameter	引張試験 Tensile Test	高速引張試験 High Speed Tensile Test	クリープ試験 Creep Test	低サイクル疲れ試験 Fatigue Test クリープ-疲れ試験 Creep-Fatigue Test	リラクセーション試験 Relaxation Test その他 Others ()	
	材料チャージ数 No. of Material Charges				1		
	温度レベル数 No. of Temp. Levels				1		
	応力レベル数 No. of Stress Levels				2		
	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				1		
	反復回数 No. of Repetition				2		
	採取位置						
	試験片総数 Total No. of Test Specimens				3		
8	試験内容 Test Parameters	<input type="checkbox"/> Fracture Test <input type="checkbox"/> Stress-Strain Curve <small>チェック 条件 Test Conditions</small>	<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 <input type="checkbox"/> Creep 	<input type="checkbox"/> Life <input type="checkbox"/> Notched <input type="checkbox"/> Cycle Stress-Strain Curve <input type="checkbox"/> Crack Behavior <input type="checkbox"/> Rotating Bending <input type="checkbox"/> Plane Bending 	<input checked="" type="checkbox"/> Relaxation Stress <input checked="" 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 ()
9	使用試験機台数 No. of Testing Machines						2台年
10	試験期間(年/月) Time Schedule (Year/Month)	(/)~(/)	(/)~(/)	(/)~(/)	(/)~(/)	(57/4)~(58/3)	(/)~(/)
11	試験実施場所 Test Laboratory						富士電機総研
12	備考 Remarks						

FBR金属材料試験計画表

FBR Metallic Materials Test Planning Sheet

No.

昭和58年3月31日
Date:

所 属 名 Affiliation	承 認 Approved by	審 査 Reviewed by	作 成 Prepared by
富士電機 製造株式会社	仲西	山下	北見

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 - 12

No.	項目 Item	内容説明 Descriptions					
1	試験題目 Subject	疲労強度に及ぼすひずみ波形効果					
2	試験目的 Objective	現行設計では、主に三角波による定ひずみ振幅低サイクル疲労試験結果を用いて設計疲労線図を求めている。一方、構造機器が受けるひずみ波形は一定ではない。そこで両者の相関性について検討する。					
3	試験概要 Contents	数種類のひずみ波形による低サイクル疲労試験を実施し、ひずみ波形の疲労強度に及ぼす影響について調べる。					
4	対象機器 Objective Component	高速炉機器一般					
5	試験材料 Materials	材料名 Name SUS 304	製造種別 Production Form 板材	寸法他 Size (thickness and others) 40 t			
6	環境 気 Environment	<input checked="" type="checkbox"/> 大気中 In Air <input type="checkbox"/> 静止Na中 In Stagnant Sodium <input type="checkbox"/> 流动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 パラメーター Parameter	引張試験 Tensile Test	高速引張試験 High Speed Tensile Test	クリープ試験 Creep Test	低サイクル疲れ試験 Fatigue Test <input checked="" type="checkbox"/> Creep-Fatigue Test	リラクセーション試験 Relaxation Test ()	
	材料チャージ数 No. of Material Charges				1		
	温度レベル数 No. of Temp. Levels						
	応力レベル数 No. of Stress Levels						
	ひずみ(範囲)レベル数 No. of Strain(Range)Levels				5		
	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		
	採取位置						
	試験片総数 Total No. of Test Specimens						
8	試験内容 Test Parameters チェック用 条件 Test Conditions	<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 checked="" type="checkbox"/> Cycle Stress-Strain Curve <input type="checkbox"/> Crack Behavior <input type="checkbox"/> Rotating Bending <input type="checkbox"/> Plane Bending	<input type="checkbox"/> Relaxation Stress <input type="checkbox"/> Relaxation Curve	<input type="checkbox"/> 單軸材料挙動 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 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 checked="" 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台年		
10	試験期間(年/月) Time Schedule (Year/Month)	(/)~(/)	(/)~(/)	(/)~(/)	(57/4)~(58/3)	(/)~(/)	
11	試験実施場所 Test Laboratory				富士電機総研		
12	備考 Remarks						

FBR金属材料試験計画表

FBR Metallic Materials Test Planning Sheet

No.

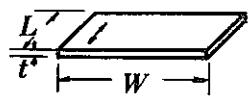
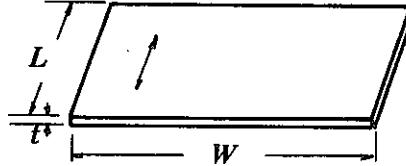
昭和58年3月31日
Date:

所属 Affiliation	承認 Approved by	審査 Reviewed by	作成 Prepared by
富士電機 製造株式会社	仲西	山下	北見

提案計画 Proposed Plan回答した計画 Approved Plan完了した計画 Accomplished Plan分類番号
No. I - 1

項 目 Item		内 容 説 明 Descriptions					
1	試験題目 Subject	インコネル718板材の材料試験					
2	試験目的 Objective	FBR材料としての有用性を材料強度面から評価するとともに、設計用材料データを取得し、材料強度基準等の検討を行なう					
3	試験概要 Contents	低サイクル疲労試験					
4	対象機器 Objective Component	炉心上部機構					
5	試験材料 Materials	材料名 Name インコネル718	製造種別 Production Form 板 材	寸法他 Size (thickness and others) 20 t			
6	環境 Environment	<input checked="" type="checkbox"/> 大気中 In Air <input type="checkbox"/> 静止Na中 In Stagnant Sodium <input type="checkbox"/> 流動Na中 In Flowing Sodium	<input type="checkbox"/> アルゴン中 In Ar <input type="checkbox"/> 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 パラメーター Parameter	引張試験 Tensile Test	高速引張試験 High Speed Tensile Test	クリープ試験 Creep Test	低サイクル疲れ試験 <input checked="" type="checkbox"/> Fatigue Test <input type="checkbox"/> Creep-Fatigue Test	リラクセーション試験 Relaxation Test	その他 Others ()
	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				5		
	ひずみ(範囲)レベル数 No. of Strain(Range)Levels				1		
	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		
	採取位置 Sampling Position						
	試験片总数 Total No. of Test Specimens				10		
8	試験内容 Test Parameters チェック Check	<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 checked="" type="checkbox"/> Life <input checked="" type="checkbox"/> Notched Cycle Stress-Strain Curve <input type="checkbox"/> Crack Behavior <input type="checkbox"/> Rotating Bending <input type="checkbox"/> Plane Bending	<input type="checkbox"/> Relaxation Stress <input type="checkbox"/> Relaxation Curve	<input 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 ()
	条件 Test Conditions	Temp. Strain Rate	Temp. Strain Rate	Temp. Stress Time	Temp. 500, 550°C Strain Range 0.8, 0.9, 1.0 1.2, 1.5% Strain Rate 0.1%/sec Load Duration	Temp. Strain Time	
9	使用試験機台数 No. of Testing Machines				1台年		
10	試験期間(年/月) Time Schedule (Year/Month)	(/)~(/)	(/)~(/)	(/)~(/)	(57/4)~(58/3)	(/)~(/)	(/)~(/)
11	試験実施場所 Test Laboratory				富士電機総研		
12	備考 Remarks						

付 錄 : 57 年度支給物件保管状況

材 料	寸 法 形 状	S N 244 81-01 Material No.
SUS 304 鋼板材	40t X 370W X 170L 	A 4
	40t X 540W X 200L 	A 7
	40t X 1030W X 600L 	
インコネル 718 板材	20t X 220W X 220L 	E 1

Material No. Heat No.

A 4 ----- D 4 6 5 6

A 7 ----- N 9 4 8 2

E 1 ----- N 1 9 3 3