

TJ 259 176-01

2

区 分 変 更	
変更理由	≡
決議年月日	平成 13 年 7 月 31 日

高速炉構造材料照射に伴う 試験研究 (その4)

——第2回熱履歴試験の結果——

(昭和49年度動力炉・核燃料開発事業団委託研究)

昭和51年2月28日

日 本 学 術 振 興 会
原子炉材料第122委員会
ステンレス鋼照射小委員会

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、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)

目 次

要 旨

Abstract

1.	試 験 研 究 の 概 要	4
2.	熱 履 歴 付 与 試 験	6
3.	熱 履 歴 後 試 験 結 果	9

高速炉構造材料照射に伴う試験研究（その4）

（実施期間：昭和49年7月2日～昭和51年2月28日）

要 旨

本試験研究は動力炉・核燃料開発事業団が実施している高速炉構造用国産ステンレス鋼の第2回JMTR照射試験（70M-61P）に伴う熱履歴試験を実施し、照射後試験の評価基準を与えるものである。

照射に付された試験片と同一の材料から採取した試験片に対して照射温度を模擬した熱履歴を真空中において与えた後、引張試験、疲れ試験およびシャルピー試験を実施し、熱履歴のみによるこれらの材料特性の変化を明らかにした。

昭和51年2月

日本学術振興会第122委員会
ステンレス鋼照射小委員会
主査 藤 村 理 人

本試験研究は動力炉・核燃料開発事業団の委託により、日本学術振興会が行なったものである。

Experimental study Associated to Irradiation
of FBR Structural Material (No 4)

Abstract

The study presents one of the bases to evaluate the results of the post-irradiation tests to conduct the thermal control tests related to the second JMTR irradiation (70M-61P) of the domestic austenitic stainless steels for the structural material of the FBR performed by Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

The thermal control specimens were given the temperature history which simulated that of the irradiation temperature in vacuum by the electrical furnace, and then the tensile, fatigue and Charpy impact tests were performed. The changes of the material properties caused by the thermal history were investigated.

February, 1976

T. Fujimura
Chairman,
Subcommittee on Irradiation
of Stainless Steel

1. 試験研究の概要

1.1 目的

高速炉炉容器材などの構造材料の中性子照射による材質変化に関して、これらの部材の候補材料とされている国産オーステナイトステンレス鋼の基礎的な確性試験を実施する。

1.2 内容

高速炉構造材料第2回JMTR照射（70M-61P）の照射試験片の製作と同時に同一材料から製作しておいた熱履歴用試験片について、以下の事項を実施した。

- (1) 第2回照射の温度履歴データに基づき、等価な熱履歴を付与した。
- (2) 熱履歴を付与した引張試験片、疲れ試験片およびシャルピー試験片に関して第2回照射後試験に対応する熱履歴後試験をおこない、照射後試験結果の評価基準を与えた。

1.3 試験研究組織

本試験研究は日本学術振興会原子炉材料第122委員会のもとに設置したステンレス鋼照射小委員会（表1.1）が実施した。

表 1.1 ステンレス鋼照射小委員会名簿

122委員会 前委員長	早稲田大学教授	長谷川 正 義
委員長	東京大学教授	三 島 良 績
主 査	高温構造安全技術研究組合 事務局 局長	藤 村 理 人
幹 事	動燃事業団 FBR開発本部 副主任研究員	岡 林 邦 夫
幹 事	日本原子力研究所 東海研究所 構造強度研究室研究員	中 島 伸 也
委 員	東京大学教授	井 形 直 弘
委 員	大阪大学教授	山 根 寿 巳
委 員	動燃事業団 FBR開発本部 副本部長	市 野 市 郎
委 員	日本原子力研究所 東海研究所 材料工学研究室長	近 藤 達 男
委 員	日本原子力研究所 大洗研究所 材料試験炉部 照射第1課長	松 永 朔 朗
委 員	川崎製鉄㈱ 技術研究所 物理研究室 主任研究員	小 野 寛
委 員	㈱神戸製鋼所 中央研究所 次長	永 井 信 行
委 員	新日本製鉄㈱ 技術開発部 副部長	大 岡 耕 之
委 員	基礎研究所 副部長 研究員	谷 野 満
委 員	日新製鋼㈱ 開発総括部 部長	青 山 芳 正
委 員	日本ステンレス㈱ 直江津製造所 研究部 主任研究員	斉 藤 喜 一
委 員	日本冶金工業㈱ 川崎製造所 研究部長	深 瀬 幸 重
委 員	三菱原子力工業㈱ 開 発 部 高速炉燃料課長	本 田 裕
委 員	動燃事業団 大洗工学センター 照射材料試験室長	鈴 木 和 久

2. 熱履歴付与試験

熱履歴付与試験は次の要領でおこなった。

- (1) 動燃事業団から提供された 70M-61P キャプセルの JMTR 照射中の温度計測記録紙を基に熱履歴付与条件を設定した。条件設定に当っては使用電気炉と JMTR の昇温および降温速度の差異は無視した。また JMTR における温度記録の中で 300 °C 以下での温度変化は無視した。JMTR の各サイクル中に生じた原子炉停止に伴う温度低下は、同一時間経過後実施した。
- (2) 各試験片は、図 2.1 に示すキャプセルに分割して装入した。キャプセルは真空ポンプで吸引し、約 10^{-3} torr にて封じた。
- (3) キャプセルを大小 4 個の電気炉に入れ、熱履歴を付与した。その温度履歴はほぼ図 2.2 に破線で示すとおりである。昇温に関しては、大型電気炉の場合入電後約 3 時間、小型電気炉では入電後約 1 時間にて 550 °C に到達した。各設定温度に達した時刻より図 2.2 に示す保持時間の間、温度を保持し、次いで電気炉を OFF とした。

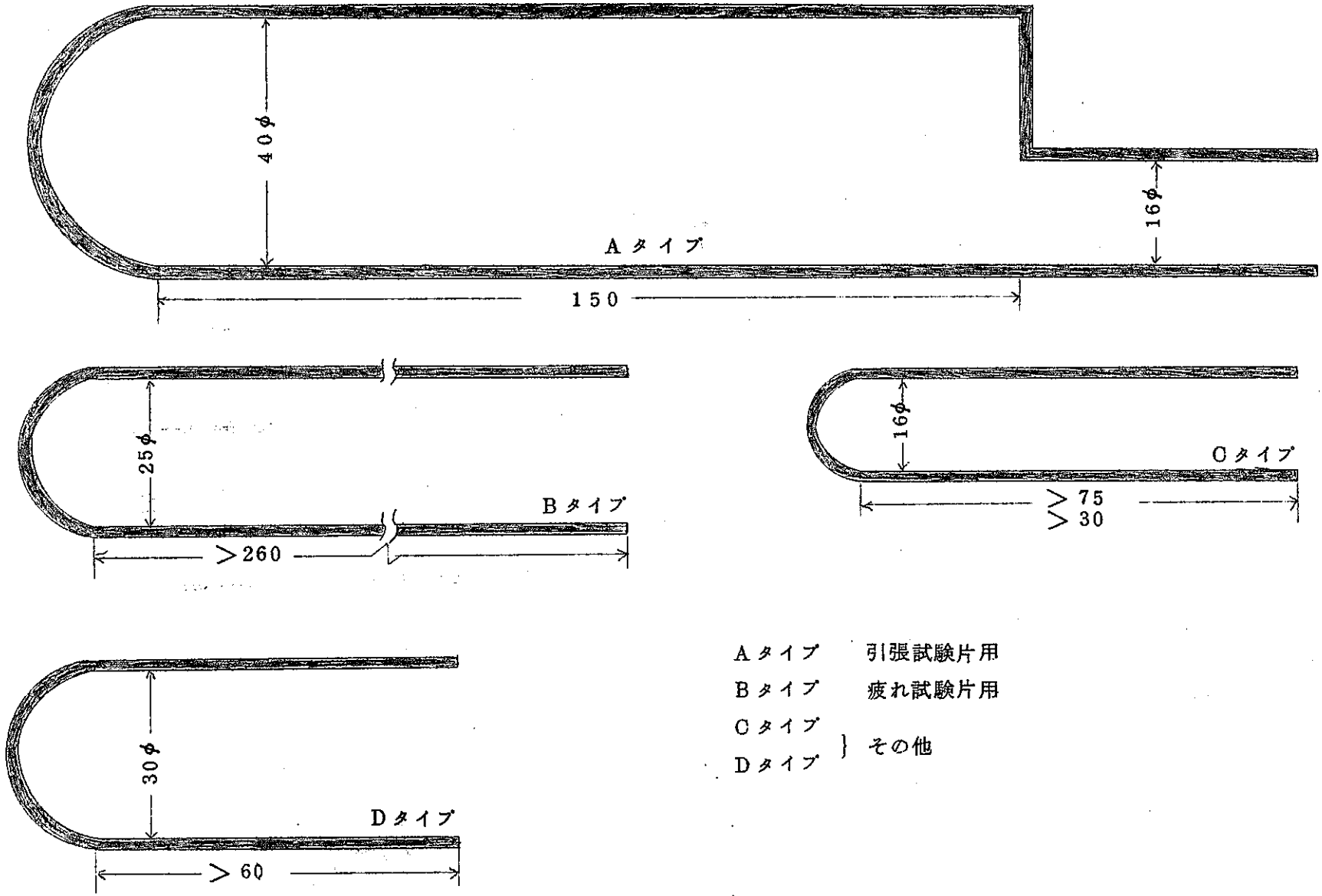


図 2.1 熱履歴付与キャプセル (石英製) (70M-61P)

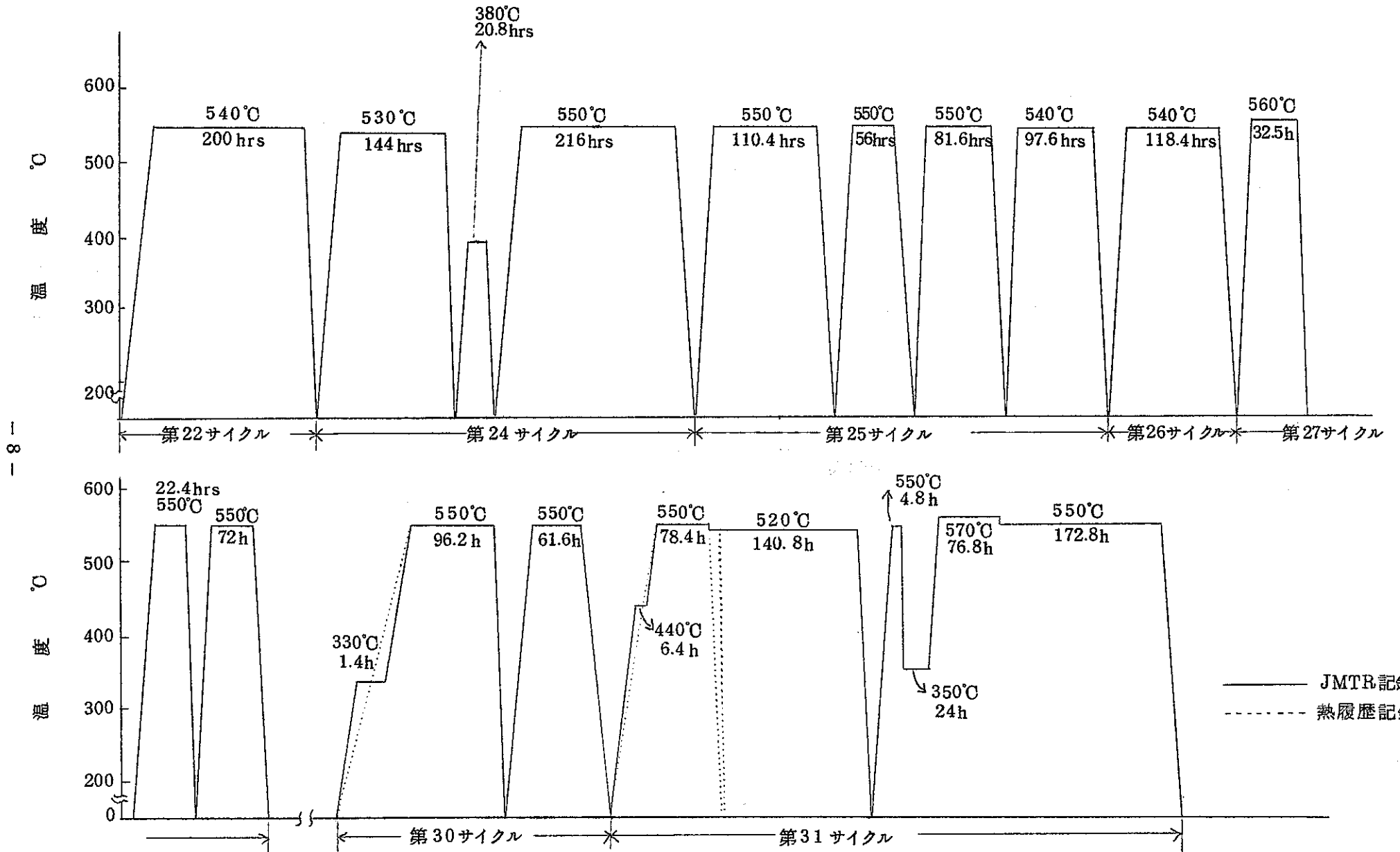


図 2. 2 熱履歴曲線 (70M-61P)

3. 熱履歷後試驗結果

照射熱履歴を付与した SUS304 ステンレス鋼の引張および衝撃試験結果
(才2次照射試験)

昭和51年2月25日

川崎製鉄株式会社
技術研究所

1. 目的 SUS304ステンレス鋼の機械的性質におよぼす中性子照射の効果を調べるために、まず照射熱履歴の影響を明らかにする。

2. 試験方法

1) 供試材 供試材の化学組成を表1に示す。供試材には試験片加工後照射熱履歴再現熱処理(530°-560°、小委員会資料No.170参照)が施されている。

2) 試験項目および試験条件

1) 引張試験 試験片の形状・寸法を図1に、試験条件を表2に示す。試験機は島津製IS-10Tオートグラフを使用した。

2) 衝撃試験 JIS4号11-7サイズ試験片(2mmVノック、厚み5mm)を用い、常温(25°)および550°で試験し、繰返しは2とした。

3. 試験結果

常温および高温引張試験結果を表3および4に、衝撃試験結果を表5に、いずれも溶体化材についての結果(小委員会資料No.23および107から転載)とともに示す。また550°における引張特性の歪速度依存性を図2に示す。結果をまとめると以下の通りである。

1) 熱履歴を付与することにより、常温では引張強さがやや増加し、それに対応して伸びがやや増加する。これは炭化物の析出による基地のオーステナイトの不安定化に起因すると考えられる。

2) 550°では0.2%耐力、引張強さとも試験した歪速度の範囲内では熱履歴の影響を受けないが、伸びおよび絞りほ熱履歴を付与することにより歪速度依存性が小さくなる結果、歪速度が大きい場合はやや低下する。

3) 常温、550°いずれの温度でも、熱履歴を付与することにより衝撃値はやや低下する。

以上

表1 供試材の化学組成 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Co	Al	Ti	B	Nb	N	O
0.056	0.55	1.54	0.024	0.008	18.40	9.45	0.094	0.077	0.24	0.006	0.017	0.003	0.003	0.18	0.007

表2 引張試験条件

試験温度 (°C)	クロスヘッド速度 (mm/min)			
	0.05	0.10	0.15	0.25
常温 (25°C)	—	2本	—	—
550	2本	—	2本	2本

記録 0~0.5mmまではF.S. 0.5mmの差動トランスで伸び記録。
0.5mm以降は時間記録。ただし常温試験では他の記録計に於り0mmより時間記録も行なった。

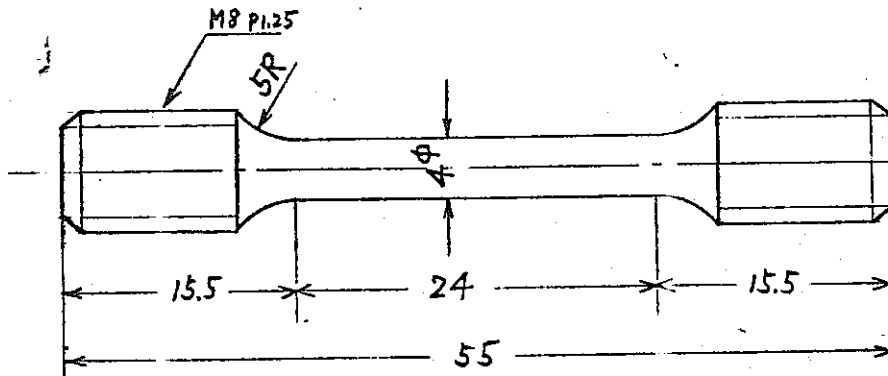


図1 引張試験片

表3 常温引張試験結果

試片 No.	クロスヘッド速度 (mm/min)	歪速度 [*] (%/min)	0.2%耐力 (Kg/mm ²)		引張強さ (Kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	処理
			1.	2 ^{**}				
A-1	0.1	0.32	23.8	24.9	67.5	76	74	熱履歴付与
A-4	0.1	0.31	24.4	25.5	68.2	76	72	
4B-1	0.1	0.36	24.5	25.0	65.8	74	—	溶体化 ^{***}
4B-2	0.1	0.34	24.8	26.2	65.9	73	—	

* 0.2%耐力近傍での歪速度
** 荷重-時間(変位)曲線の0.048mm永久伸びにおける応力 (G.L.=24mmと0.2%)
*** 小委員会資料 No.23より転載

表4 高温引張試験結果 (550℃)

試片 No.	加す速度 (mm/min)	歪速度実績* (%/min)	0.2%耐力 (Kg/mm ²)	引張強さ (Kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	処理
A-9	0.05	0.17	15.4	38.8	34	57	熱履歴 付与
A-11	0.05	0.20	15.6	38.1	24	54	
A-5	0.15	0.46	15.0	39.4	34	56	
A-6	0.15	0.44	14.7	40.1	34	53	
A-2	0.25	0.87	15.1	40.3	36	64	
A-10	0.25	0.83	14.8	38.2	35	55	
4A-1	0.05	0.16	14.7	37.9	36	50	* 溶体化
4A-2	0.05	0.19	14.4	38.1	36	52	
4A-3	0.15	0.47	14.8	38.9	41	61	
4A-4	0.15	0.51	14.1	38.9	38	64	
4A-5	0.25	0.84	14.6	39.5	44	69	
4A-6	0.25	0.66	14.4	38.0	35	64	

* 0.2%耐力近傍での歪速度
** 小委員会資料 No107 より転載

表5 シャルピ-衝撃試験結果 (2mm Vノッチ 11.7サイズ)

試片 No.	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (Kg·m)	衝撃値 (Kg/cm ²)	延性破面率 (%)	処理
1	25	9.87	23.7	100	熱履歴付与
2	25	8.68	21.7	100	
3	550	7.47	18.7	100	
4	550	8.47	21.2	100	
1	25	9.32	23.3	100	* 溶体化
2	25	10.23	25.6	100	
3	350	8.69	21.7	100	
4	550	8.69	21.7	100	

* 小委員会資料 No107 より転載

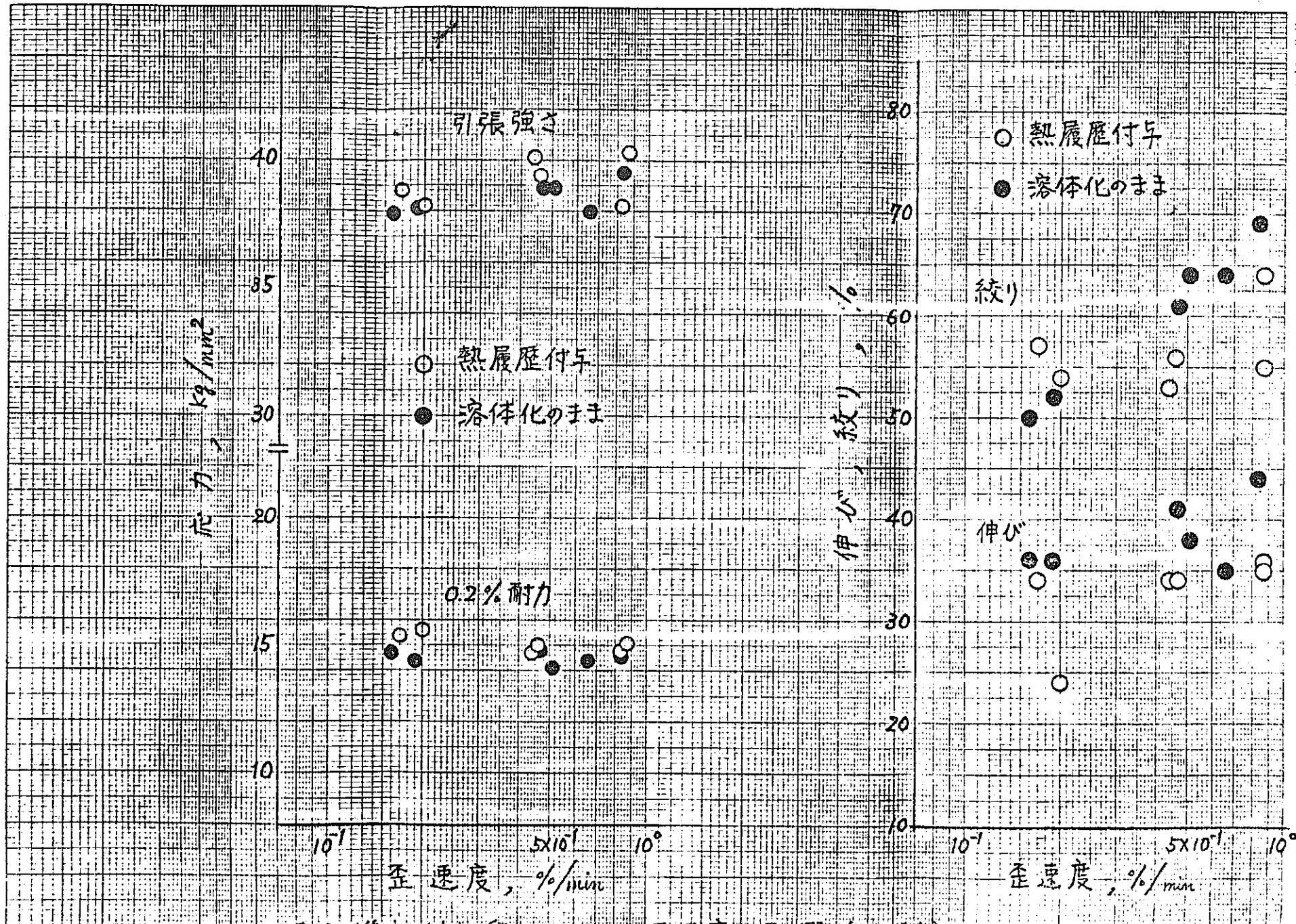


図2 機械的性質におよぼす歪速度の影響 (530°C)

鉄板 122 委員会
ステンレス鋼照射小委員会資料

昭和 47 年度 研究 131

高炉用 SUS 304L ステンレス鋼の照射試験

(熱履歴照射後の引張試験結果)

昭和 51 年 2 月 25 日

日本ステンレス株式会社 直江津製造所

B

第2次照射試験計画方案

試験テーマ	高速炉用304Lタイプステンレス鋼の照射試験		
研究責任者	藤 藤 喜 一	所 属	日本ステンレス株式会社 直江津製造所研究部
担 当 者	高 橋 幸 久	所 属	同 上

研究内容

- 1 供試材 材質：タイプ304L(Ⅱ仕上)
寸法：20×1000×2000mm
- 2 試験内容 照射前及び照射後の常温並びに高温引張試験を下表の通り行なう。
尚照射後試験については、別に準備した引張試験片に照射時と同一熱履歴を与えた後、同様の常温並びに高温引張試験をも実施し照射後試験と比較する。

試験の種類 試験項目	常 温 試 験			高 温 試 験		
	試験片	数 量	試験条件	試験片	数 量	試験条件
照射前引張試験	動態仕様書による (G・L20% 4φ)	2本	クロスヘッド スピ-F0.1 mm/min	動態仕様書による (G・L20% 4φ未付)	150℃、 550℃ 各2本 計2本	クロスヘッド スピ-F0.1mm/min
照射後引張試験	"	照射量低、 高 各1本 計 2本	"	"	照射量低、 高 各2本 計 4本 (450℃ 550℃ 各2本)	"
熱履歴後引張試験	2本	"	"	"	450℃ 550℃ 各2本 計 4本	"

成 果 目 標

タイプ 304L材の常温並びに高温引張性質に及ぼす照射の影響が明らかにされる。

1. 研究計画

1) 研究テーマ ; 高速炉用 SUS 304L ステンレス鋼の照射試験

2) 研究責任者 ; 斎藤喜一 日本ステンレス株式会社直江津製造所 研究部

担当者 ; 高橋孝久 日本ステンレス株式会社直江津製造所 斎藤氏の

3) 研究内容

a) 目的

SUS 304L ステンレス鋼の、照射前後 および 照射材と同様の熱履歴を
 未だ非照射材の、三種の試験光 について 常温 および 高温 短時間
 引張試験、および その他 二種の試験を行ひ、照射の影響を明ら
 かにする。

b) 供試材

SUS 304L、同熱処理材 (1100°C × 45分 保持後水冷)、20mm厚
 定期正延焼鈍試験品

表 1 供試 SUS 304L 材の化学組成, %

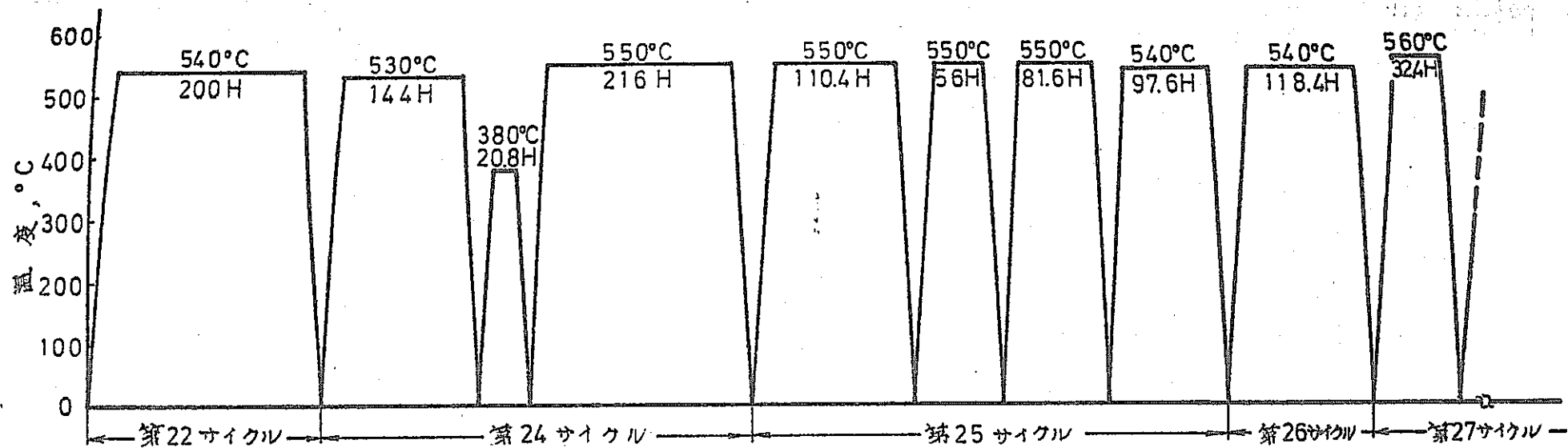
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Co	B	N	O
化学 分析値	0.015	0.40	1.45	0.015	0.014	19.19	11.61	0.02	0.05	0.27	nil	0.018	0.017

c) 試験項目 および 試験光数

表 2 試験項目 および 試験光数, 本

	非照射	熱履歴後	照射
常温引張試験	2 *	2 *	Low 1
			High 1
高温引張試験	450°C 2 *	2 *	Low 1
			High 1
	550°C 2 *	2 *	Low 1
			High 1
顕微鏡試験	1		
硬度試験	1		
分析試験	C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Mo, Cu, Co, B, N, O		

* 繰り返す 2本



—— 70M-61P, JMTR 温度記録
 —— 再臨検履歴温度記録

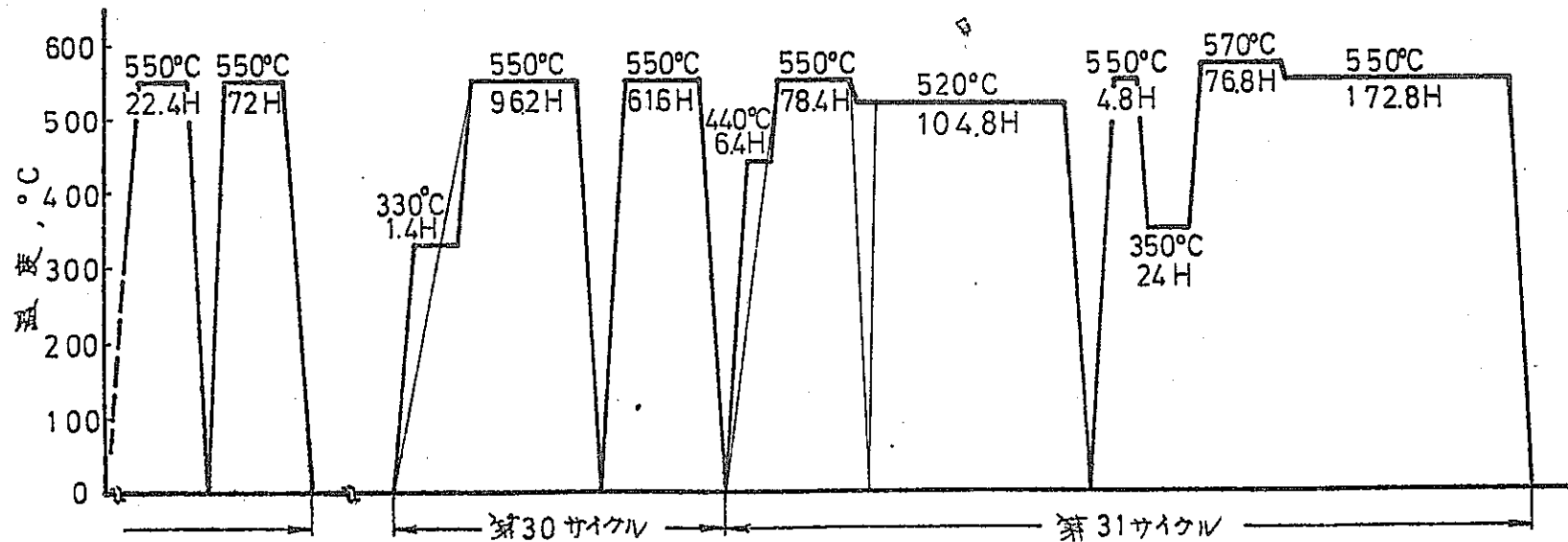


図 2

70M-61P キャパセル の 実際 熱履歴 と 再臨検履歴

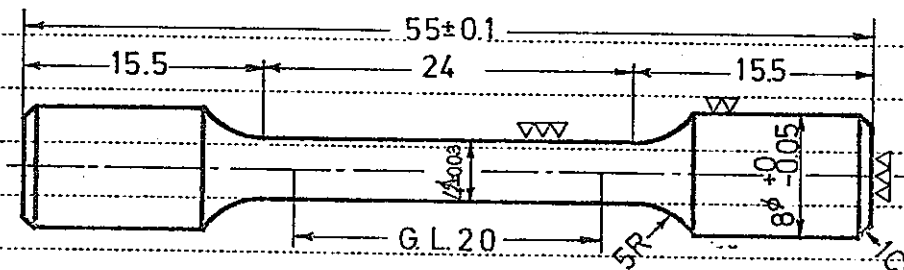
d) 期待される成果目標

i) SUS304L ステンレス鋼に関する、照射前後の常温・高温の機械的性質を比較することにより、照射の影響が明らかになる。

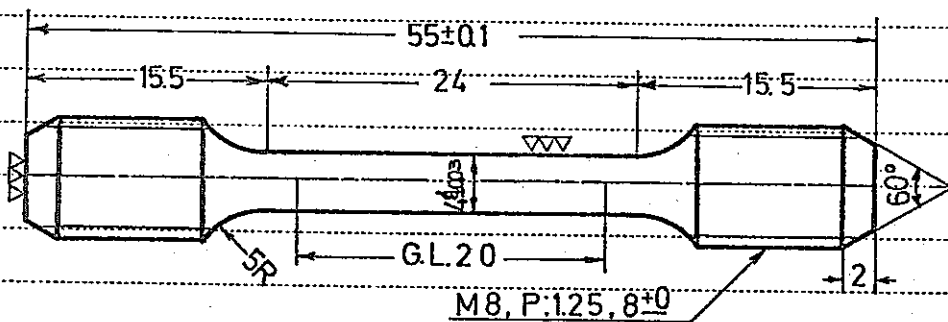
ii) 炉外で照射時と同様な熱履歴を与え、熱履歴による常温ならびに高温の機械的性質を比較することにより、熱履歴の影響が明らかになる。

2 試験方法

1) 試験片 本試験に用いる試験片は、本小委員会規定の不行部径 $4.0\phi_{min}$ 、全長 $20mm$ の図1に示した形状のものである。



(a) 常温試験用



(b) 高温試験用

図1 供試引張試験片の形状と寸法 (2/1)

2) 熱履歴 2-1) 上述の試験片を石英キャプセル中に封入し、TOM-61P キャプセルの設った炉に同様の再現熱履歴を上記試験片に与える。試験片に与える再現熱履歴をTOM-61Pキャプセルの設った実際の熱履歴と比べ、図2に示す。

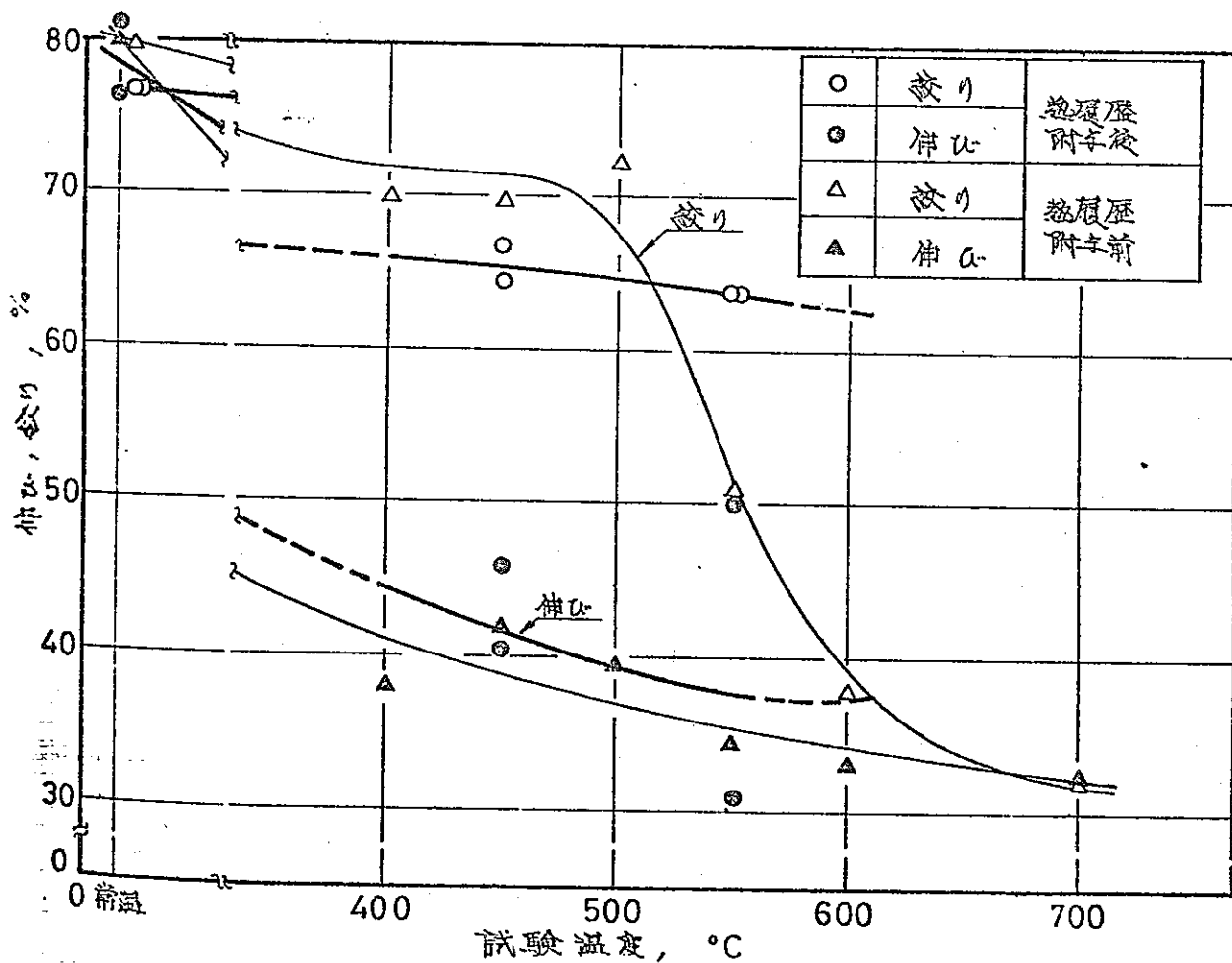
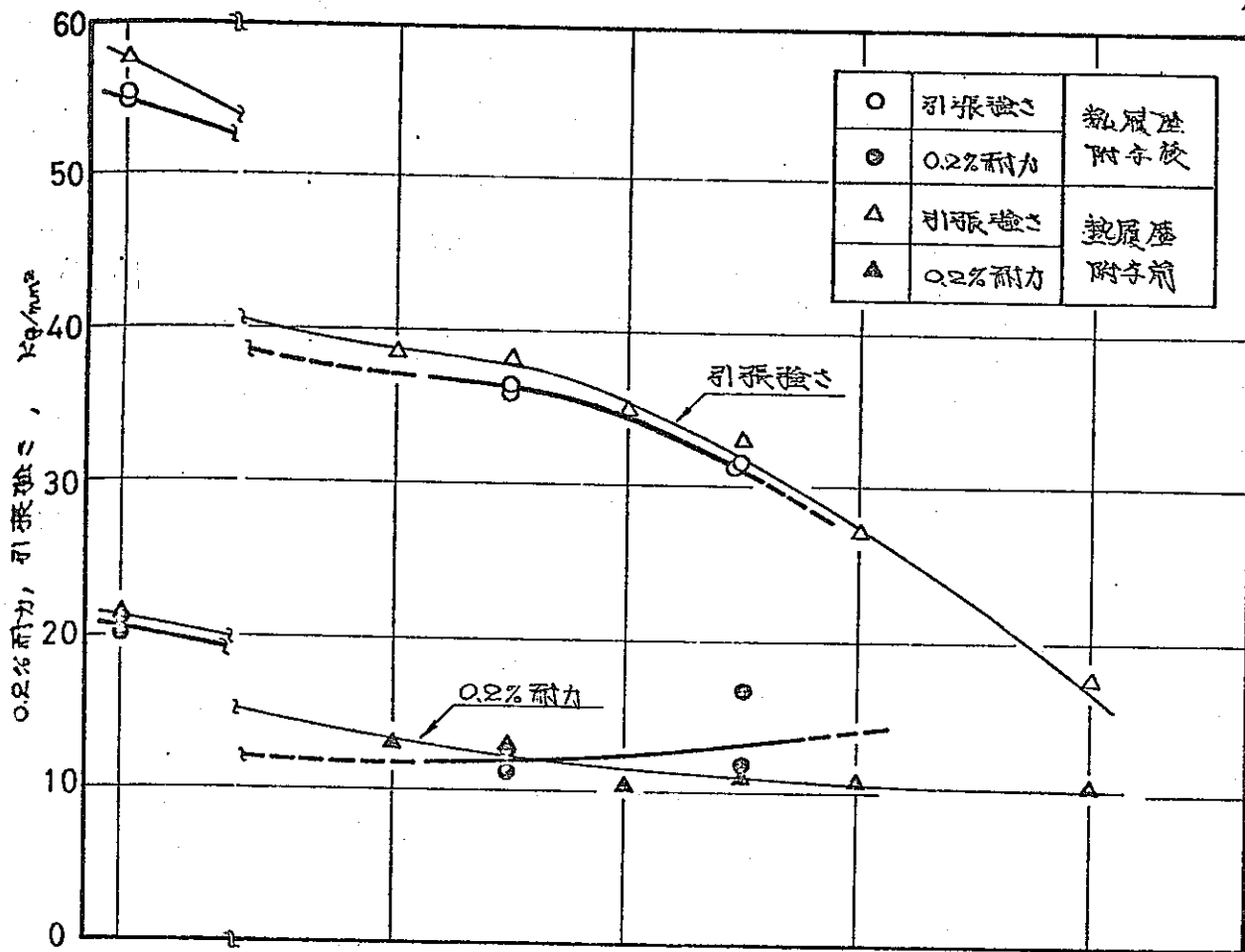


図 5 4φ 試験片による引張試験結果 (引張速度; クロスヘッドスピード 0.1 mm/min.)

3) 試験条件 熱履歴を附与した後、試験片を日本委員会規定の至速度、
 0.1mm/min. (クロスヘッドスピード)にて破断まで引張り、0.2%耐力、引張
 強さ、破断伸びおよび破断伸びを求めた。試験温度ならびに試験
 数は表2に示したごとくで、常温、450°Cおよび550°Cにて各2回
 試である。

3 試験結果および考察

熱履歴を附与した試料の常温ならびに高温引張試験の結果を、熱履歴
 附与前の結果と一併に表3に示した。また、図5には表3の結果を
 熱履歴附与前の試験結果と併せて図示した。

表3 4φ試験片による熱履歴附与前後の常温ならびに高温引張試験結果

	試験温度, °C	0.2%耐力, kg/mm ²	引張強さ, kg/mm ²	伸び, %	伸び, %
熱 歴 史 附 与 後	常 温	21.8	55.4	77.0	77.4
	"	20.2	54.8	81.5	77.4
	450	12.9	35.7	46.0	64.0
	"	11.7	36.6	40.5	66.9
	550	12.2	32.0	50.0	64.0
	"	17.2	31.7	31.0	64.0
熱 歴 史 附 与 前	常 温	21.3	57.4	80.0	79.7
	400	13.5	38.3	38.0	69.8
	450	13.0	38.2	42.0	69.7
	500	10.5	34.9	39.5	72.4
	550	11.0	32.9	34.5	51.0
	600	10.8	26.7	33.0	38.0
	700	10.6	17.5	32.5	31.8

表3 および図5にみられるよう、熱履歴附与により常温の引張強さは
 0.2%耐力、引張強さ、伸びおよび伸びととも熱履歴附与前より若干低い値を
 示す。この傾向は450°Cおよび550°Cにおけるとほぼ同様であるが、
 0.2%耐力および伸びは逆に増加の傾向がみられる。また伸びは、450°Cでは
 熱履歴附与前より低い値になり、常温におけると同様の傾向があるが、550°Cにお
 ける熱履歴附与前にみられるような伸びの急激な低下の傾向はみられず、450°Cに

おける、ほぼ同じ値を保っている。

以上述べたように高温における延性が、熱履歴を附与することにより向上するとの現象は、既に報告した SUS 304 の場合⁽¹⁾ にも観察されており、これは同一機構に起因しているようである。これらの機構としては、現在のところ未だ明らかではないが、例えば炭化物の較位上への析出による較位の格納の阻止効果、或いは炭化物析出により Matrix 中の C 濃度が減少し、延性が向上することなどが考えられる。

4. 結果のまとめ

- 1) 0.2% 耐力は高温において、引張強さに、伸びにおおむね釣りこむと共に熱履歴附与前に較べ若干低い値を示す。
- 2) 0.2% 耐力は高温において、試験温度の上昇とともに増加する傾向を示す。
- 3) 引張強さは高温において、熱履歴附与前同様、試験温度の上昇とともに減少する傾向を示すか、その値は高温では熱履歴附与前とほぼ一致している。
- 4) 伸びは高温において熱履歴附与前より若干高い値を示すようである。
- 5) 絞り係は 450°C においては、熱履歴附与前より低い値を示すが、650°C では 450°C とほぼ同じ値を示し、熱履歴附与前より高い値がある。

参 考 文 献

(1) 日本ステンレス協会、高速炉構造材料選取に供する試験研究(2003)、昭和49年4月30日

70M-61P 熱履歴試与後試験結果

1976. 2. 24

(株) 神戸製鋼所 中央研究所

1. 目的

SUS304 銅板の母材および溶接金属部に対する中性子照射の低サイクル疲労特性に及ぼす影響を把握する為に、中性子照射と同一の熱履歴を賦与した試料について、疲労特性を調べ、照射後試験データ解析の基礎資料を得る事を目的とした。

2. 供試材料

2.1 母材

新日本製鉄(株)から提供された SUS 304 銅板を母材として使用した。この母材の化学成分をオ1表に、また照射前および熱履歴賦与後の機械的性質をオ2表に示した。

2.2 溶接金属

使用した溶接材料は(株)神戸製鋼所製の US-308 (フラックス PFS-1) の 4mmφ ワイヤで、その化学成分をオ3表に、また、照射前および熱履歴賦与後の機械的性質をオ4表に示した。

2.3 溶接施工

上記母材および溶接材料を用いて(株)神戸製鋼所にてサブマージーク溶接法にて溶接を実施した。その時の開先形状をオ1図に、溶接順位をオ2図に、溶接条件をオ5表に示した。

3. 試験結果

3.1 かたさ分布

溶接方向と直角に板厚の1/2の部分のビッカース硬さを測定した。測定結果を照射前の結果と合わせてオ3図に示した。なお、試験機、試験条件は、以下のとおりである。

試験機 ; 珪石製 AVK 型 ビッカース硬度計

試験条件 ; 荷重 (10 kg) 荷重負荷時間 (30 秒)

3.2 引張試験結果

溶接部の引張試験^片の採取要領をオ4図に示した。また試験片寸法、形状をオ5図に示した。使用した試験機および試験条件は以下のとおりである。

試験機： オートグラフ IS-5000 (島津製作所製)

試験条件 歪速度 $5.2 \times 10^{-3} / \text{min}$ (破断まで同一速度)

ゲージ長さ 22 mm

温度 R.T および $550^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ (保持時間 10分)

試験結果を母材についてはオス表、溶接部についてはオ4表に、照射前試験結果とともに示した。

3.3 シャルピー衝撃試験

シャルピー試験片採取要領をオ6図に示した。また試験片形状、寸法をオ7図に示した。

使用した試験機および試験条件以下のとおりである。

試験機： 5kg-m シャルピー衝撃試験機 (関西科学機器製作所製)

試験条件： 温度 R.T および $550^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ (保持時間 20分)

試験結果をオ6表に、照射前試験結果とともに示した。

3.4 室温疲労試験結果

溶接部、ボルト部の試験片採取要領をオ8図に、試験片形状、寸法をオ9図に示した。

使用した試験機および試験条件は以下のとおりである。

試験機： 自社製油圧式10トン低サイクル疲労試験機

荷重検出 ストレンゲージ式ロードセル (引張-圧縮)

伸び検出 軸歪と差動トランス式歪計にて検出

歪制御法 リミットスイッチ付変位計にてON, OFF制御

繰り返し速度 2~6 cpm

試験結果をオ7表に示した。なお亀裂発生繰り返し数(N_c)は

オ10図に示した引張荷重-繰り返し数を求め引張荷重が低下しはじめる繰り返し数として求

めた。また破断繰り返し数 (N_f) はオ10図の亀裂発生繰り返し数の $\frac{1}{2}$ すなわち $\frac{1}{2} N_c$ に
対応する引張荷重を求め、引張荷重がその $\frac{1}{2}$ になる繰り返し数として求めた。

オ11図に全歪振巾 (弾性歪振巾 + 塑性歪振巾) と破断繰り返し数の関係を、照射前
結果とともに示した。なお試験片形状 (オ9図) から明らかであるように、歪を測定する
試験片領域は同一径ではない。そこで検出される歪は正しいものではない。したがって
オ12図に示した歪測定領域が同一径の試験片を用いて歪を補正する必要がある。

すなわち、歪補正用試験片を用いて公称応力-公称歪曲線を求める。この結果をオ14
図に示した。次に試験片 (オ9図) の歪測定領域内のR部を10分割して、10分割
面それぞれの応力を計算してオ14図の公称応力-公称歪線図から歪を求めR部領域
の全歪を算出し、差動トランスで検出した歪からR部歪を除いて平行部の歪を求めた。

4 試験結果の検討

熱履歴賦与後の機械的性質を他の公表されたデータと比較する為に今回の熱履歴がすべて550°Cで行われたものとし、その相当時間を次の方法で算出した。

今 T_1 という温度(°K) に t_1 時間保持したとすると 550°C に換算すると

$$T_1 (20 + \log t_1) = (550 + 273) (20 + \log t_{eq})$$

を定まる相当時間 t_{eq} が求まる。このようにして今回の熱履歴を550°Cとするとその相当時間は1322hrとなる。この相当時間を用いてパラメータPを計算すると

$$P = T (20 + \log t_{eq}) = 823 (20 + \log 1322) = 19.03 \times 10^3$$

また今回使用した溶接金属のフェライト量を Schaeffles の状態図から求めると

次のようになる。

$$Ni \text{ equivalent} = 11.7 \%$$

$$Cr \text{ equivalent} = 20.5 \%$$

$$\text{フェライト量} = \sim 9 \%$$

これらの値を用いて試験結果を他のデータと比較検討する。

4.1 硬さ測定結果の検討

第3図に示すように溶接金属部、熱影響部とも熱履歴により低下している。一方溶接部からどのくらい離れた部分の母材の硬さは、溶接部と同等か、少し増加する傾向がみられる。

溶接金属の熱履歴による硬さ変化をパラメータPによる整理したデータ⁽¹⁾上にプロットし第15図に示した。熱履歴とともに硬さが低下し、その減少割合も今回の結果とほぼ一致する。

4.2 引張試験結果の検討

母材は熱履歴により、室温では0.2%耐力、引張強さとも増加する。一方550°Cでは耐力は増加するが引張強さは低下している。伸びは室温、550°Cとも熱履歴により低下する。

第16図、第17図に溶接金属の熱履歴による室温および550°Cの引張特性の変化を文献⁽¹⁾データとともに示した。室温、550°Cとも熱履歴により0.2%耐力は低下する。引張強さは

あり大きな変化はみられない。伸びは室温、550°Cとも熱履歴により低下する。

機械的性質の長時間加熱による変化は溶接金属のフェライト量に依存するので、文献(1)のデータから同程度のフェライト量を含むものについて比較している。

4.3 シンク-衝撃特性測定結果の検討

Fig. 18に吸収エネルギーの熱履歴による変化を文献(1)データとともに示した。吸収エネルギーの熱履歴による低下は溶接金属のフェライト量に大きく依存する事が知られている。また熱履歴により吸収エネルギーの低下は、フェライトが炭化物とオーステナイト又はオーステナイト相に変化する事によるフェライト量の低下が原因とされている。今回の試験結果も室温、550°Cともに熱履歴により吸収エネルギーは低下しているがフェライト量の減少によるものと思われる。

4.4 低サイクル疲労試験結果の検討

溶接金属は熱履歴により疲労寿命はあまり変化はない。ボルト部は高温側、低温側とも熱履歴により劣化する。特に低温側で劣化の程度が大きいようである。

今回の試験結果をASME CodeのCase 1592-2 (1975)の全歪振中E_{tr}による設計曲線と比較して、照射前結果とともにFig. 19に示した。溶接金属、ボルト部

ともSUS304母材の設計曲線と上回っている。10⁷サイクルのところまで設計曲線と比較すると溶接材料は寿命比は5.0、ひずみ比は1.8 (照射前はそれぞれ4.5および1.6)、ボルトでは寿命比は6.3、ひずみ比は1.9 (照射前はそれぞれ10.3および2.3)となっている。

参考文献 (1) 「高速炉構造用ステンレス鋼の溶接施工に関する研究(II)」

日本溶接協会原研委員会 FRW 小委員会 (昭和47年)

表 SUS304 鋼母材の化学成分 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
神鋼分析	0.046	0.57	1.00	0.028	0.005	9.05	18.52
新日鉄分析	0.05	0.57	0.94	0.026	0.005	8.85	18.4

Mo	Cu	Co	B	Al	N (*)	O (*)
0.13	0.11	0.20	0.0005	0.002	261	41
—	—	—	—	—	—	—

(*) ppm.

表 SUS304 鋼母材の機械的性質

	照射前		熱履歴	
	R.T	550	R.T	550
試験温度(°C)	R.T	550	R.T	550
0.2%耐力 (kg/mm ²)	26.9	16.1	29.2 29.3	17.6 19.4
引張強さ (kg/mm ²)	69.8	40.1	71.0 71.6	35.8 37.3
伸び (%)	72.1	43.6	57.0 65.1	39.8 34.1
絞り (%)	74.5	71.5	59.4 57.9	47.6 51.5

表3 溶接金属 US-308 の化学成分

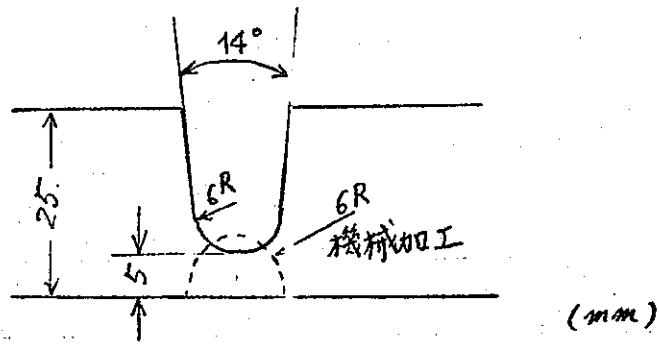
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
溶接金属	0.052	0.60	1.36	0.027	0.011	9.48	19.48

Mo	Cu	Co	B	Al	N (*)	O (*)
0.10	0.076	0.266	0.0008	0.004	302	940

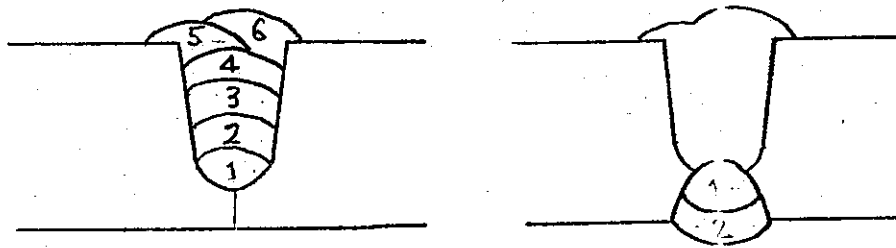
(*) ppm

表4 溶接材料 US-308 の機械的性質

試験温度(°C)	照射前				熱履歴			
	R.T		550		R.T		550	
0.2%耐力(kg/mm^2)	42.2	43.5	30.0	28.6	35.7	36.0	26.3	23.9
引張強さ(kg/mm^2)	66.3	67.8	38.8	37.7	65.7	64.4	35.2	33.7
伸び(%)	41.6	39.7	22.7	18.4	37.6	34.1	14.6	16.2
絞り(%)	66.0	57.5	50.5	49.8	47.4	36.2	36.9	41.1



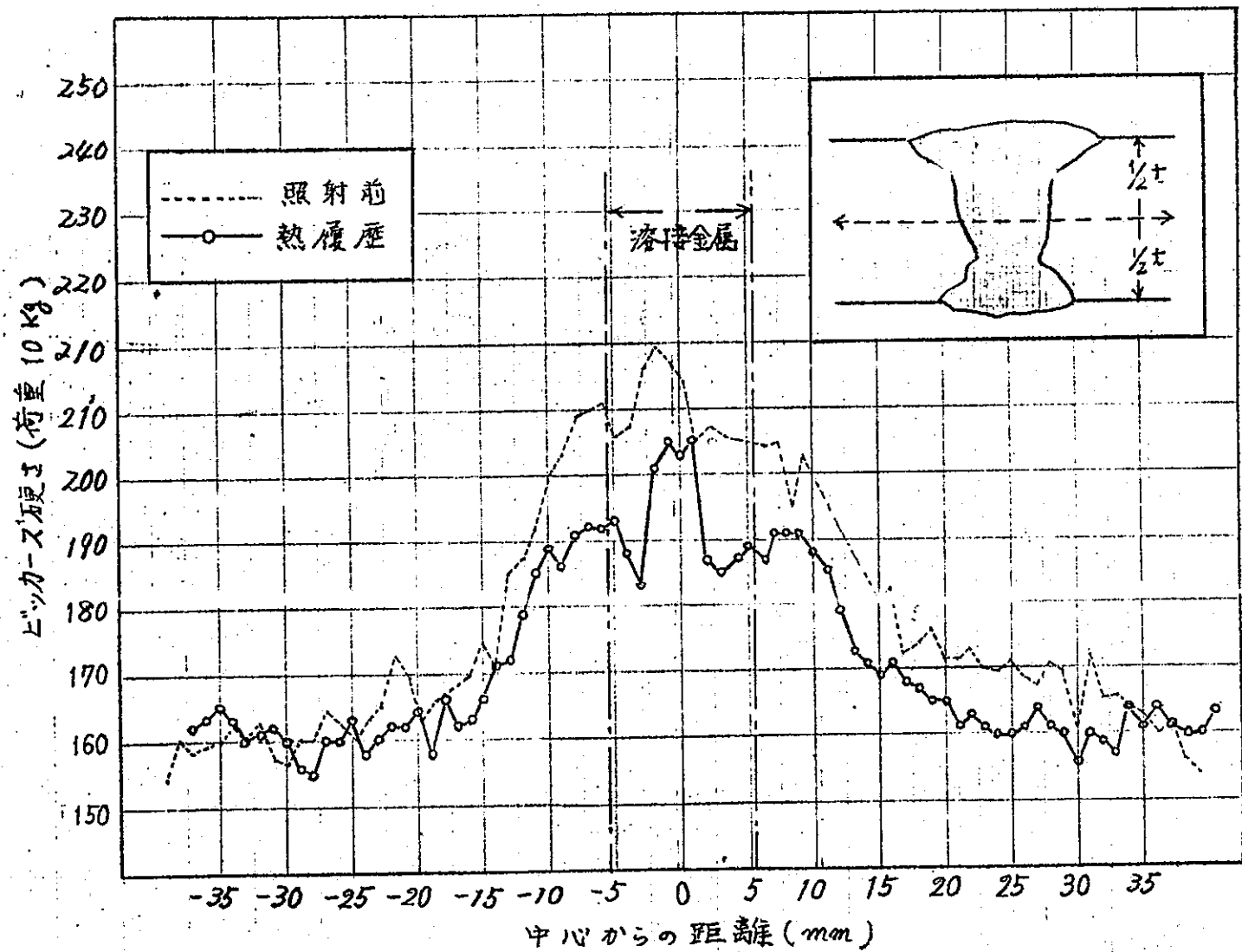
第1図 開孔形状



第2図 溶接順位

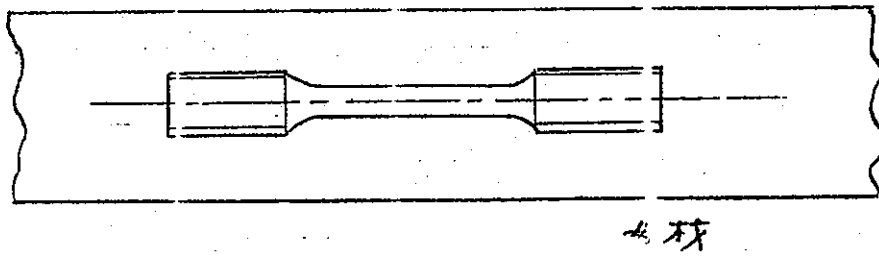
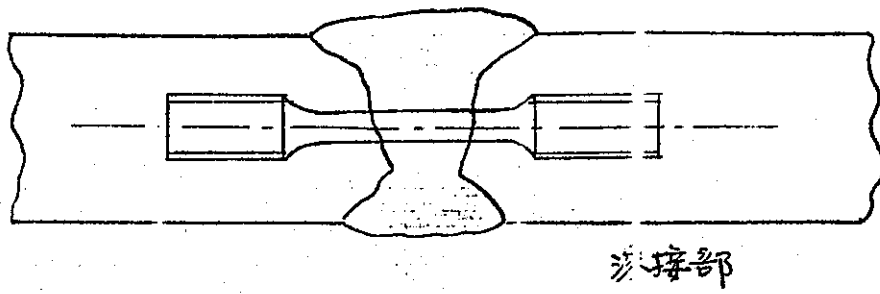
第5表 溶接条件

	パス	電流 × 電圧 × 速度	備考
表	1	370A × 32V × 30 cm/min	予熱・後熱なし パス間温度
	2~6	450A × 33V × 30 cm/min	
裏	1	450A × 32V × 30 cm/min	150°C 以下
	2	450A × 35V × 35 cm/min	

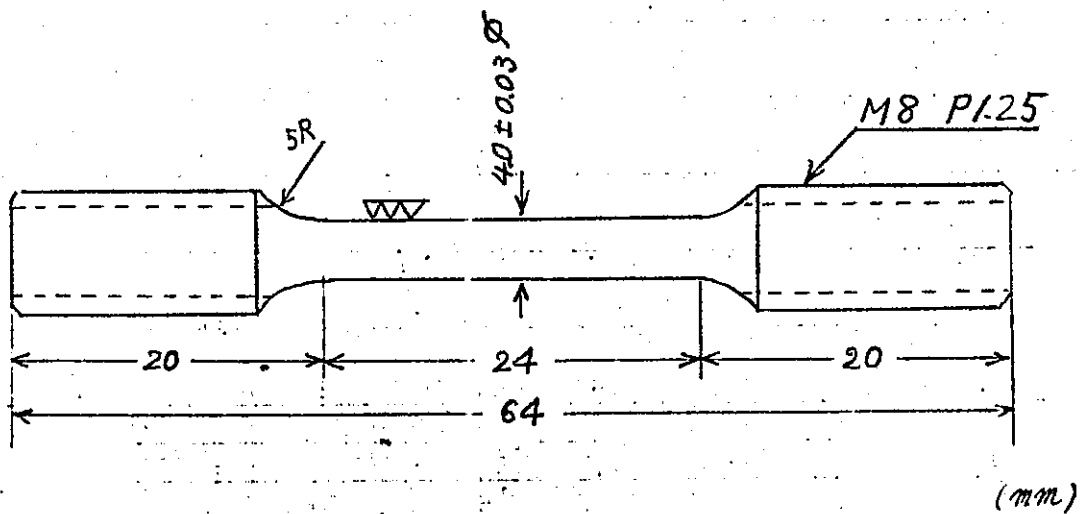


オ3図 ビッカース硬度測定結果

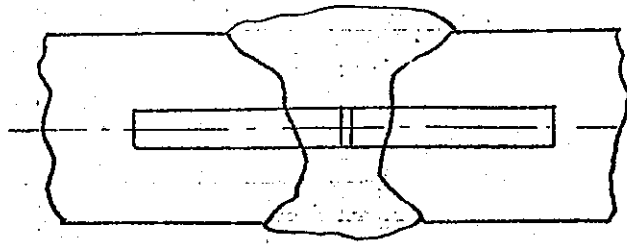
60



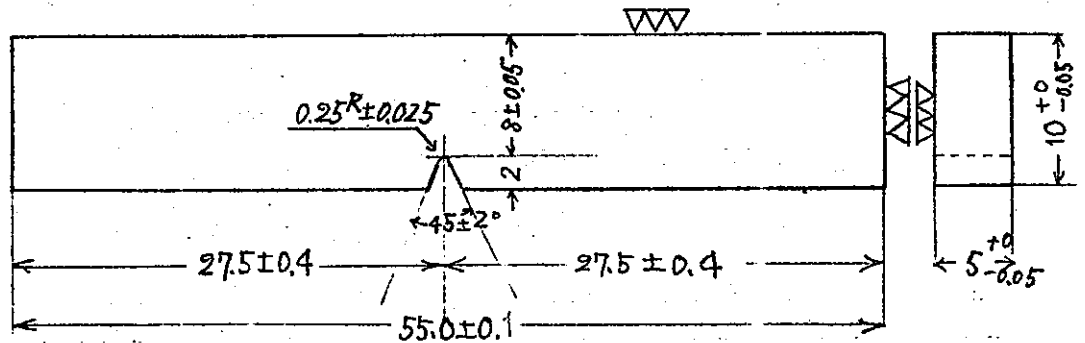
第4図 引張試験片採取要領



第5図 引張試験片形状および寸法



オ6図 シャルピ-衝撃試験片採取要領

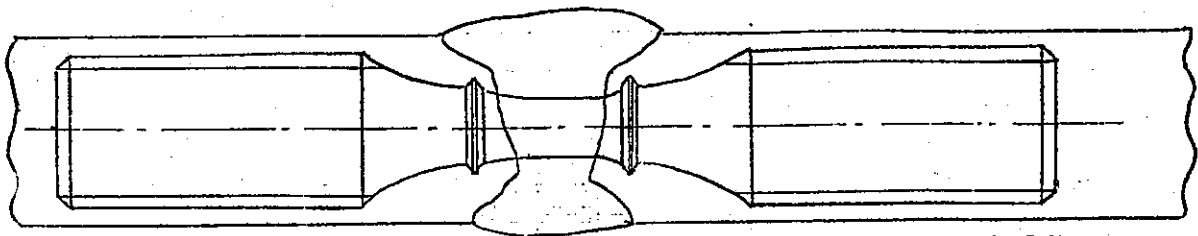


(mm)

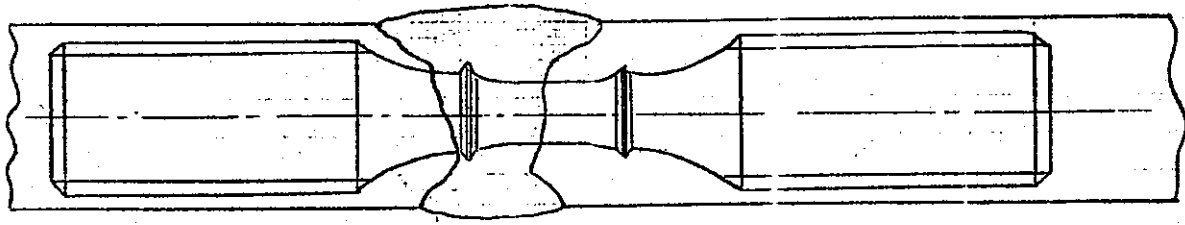
オ7図 シャルピ-衝撃試験片形状および寸法

オ6表 溶接金属 US-308 の衝撃試験結果

	照 射 前			熱 履 歴		
	R.T	550		R.T	550	
試験温度(°C)	R.T	550		R.T	550	
衝撃値(KJ/m^2)	10.9 10.8	10.8 11.0 12.5		7.7 8.6	7.8 8.5 8.8	

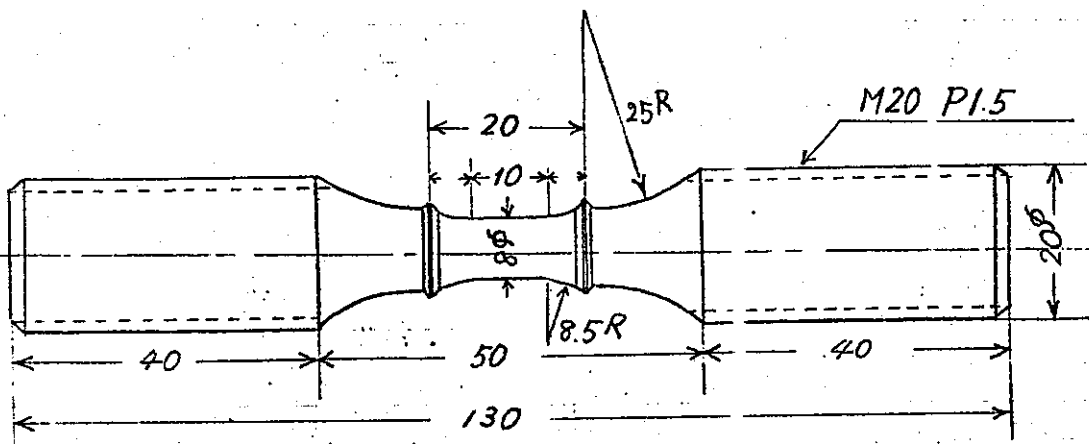


溶接部



ボルト部

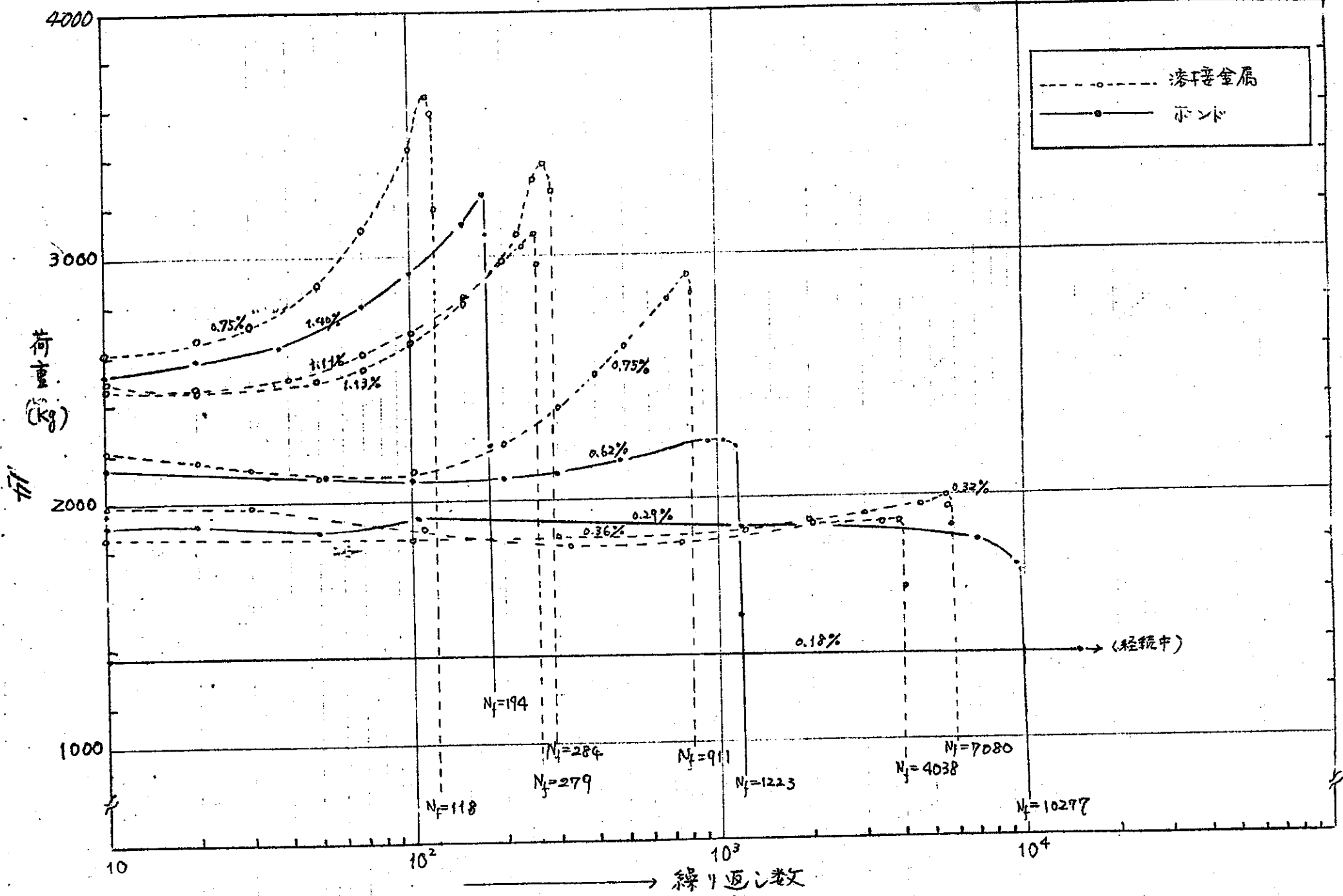
才8回 疲労試験片採取要領



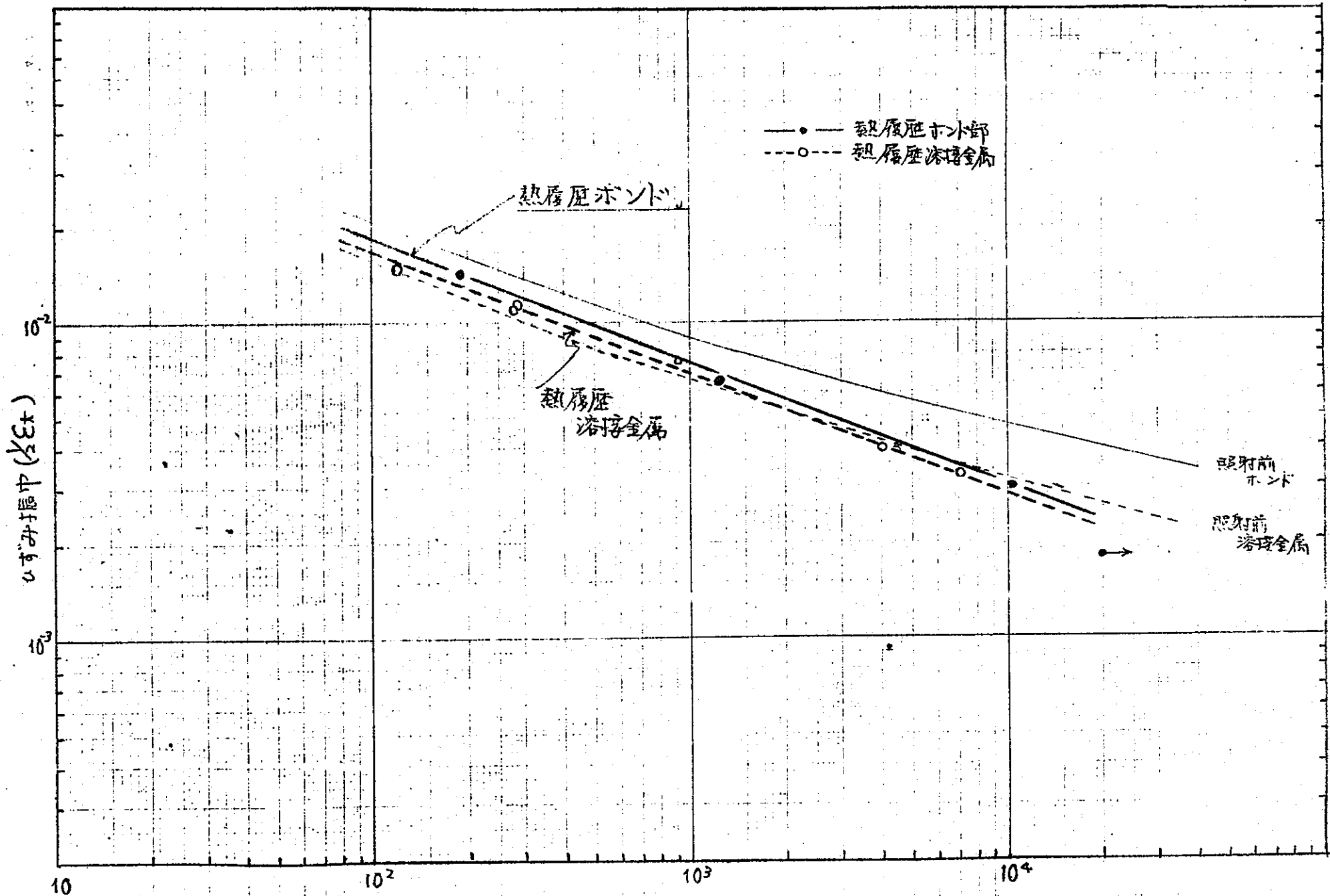
才9回 疲労試験片形状と寸法

表 熱履歴後低サイクル疲労試験結果

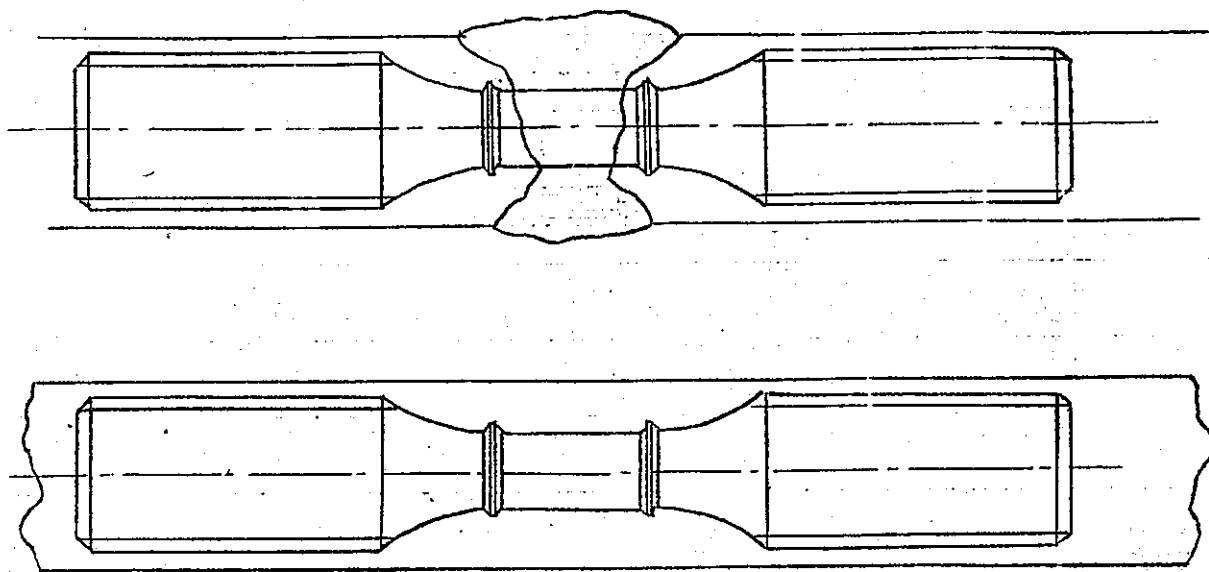
	歪 張 中 ($\frac{1}{2} \epsilon_t \times 10^2$)		亀裂発生 繰り返し数	破断繰り 返し数 (N_f)
	補正前	補正後		
溶接金属	0.54	0.75	790	911
	1.07	1.49	115	118
	0.79	1.11	274	279
	0.81	1.13	255	284
	0.26	0.36	3835	4038
	0.23	0.32	6521	7080
ボルト	0.83	1.40	170	194
	0.42	0.62	1055	1223
	0.20	0.29	9250	10277
	0.12	0.18	経脱中	経脱中



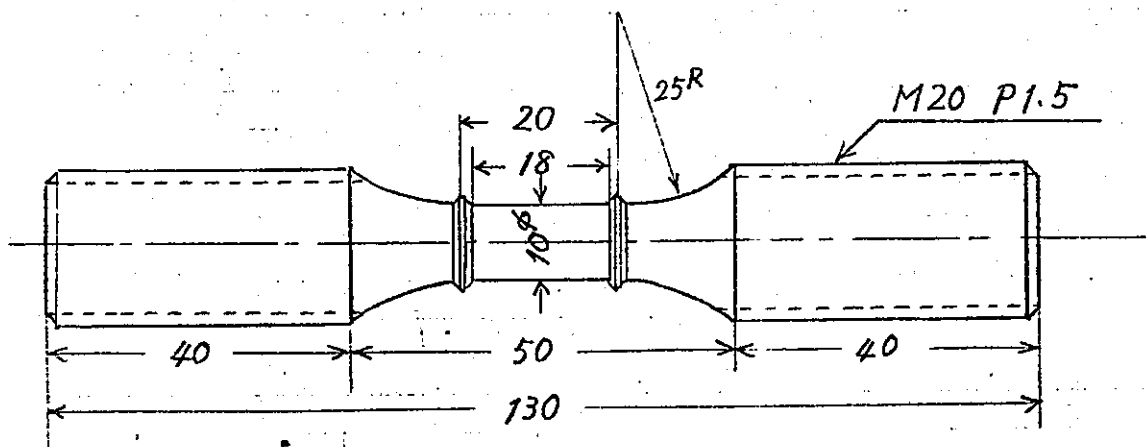
才10図 引張荷重と繰り返し数の関係



破断繰り返し数 (N_f)
 ナット 中央振中と破断繰り返し数の関係



才12圖 歪補正用試験片採取要領



才13圖 歪補正用試験片形状および寸法

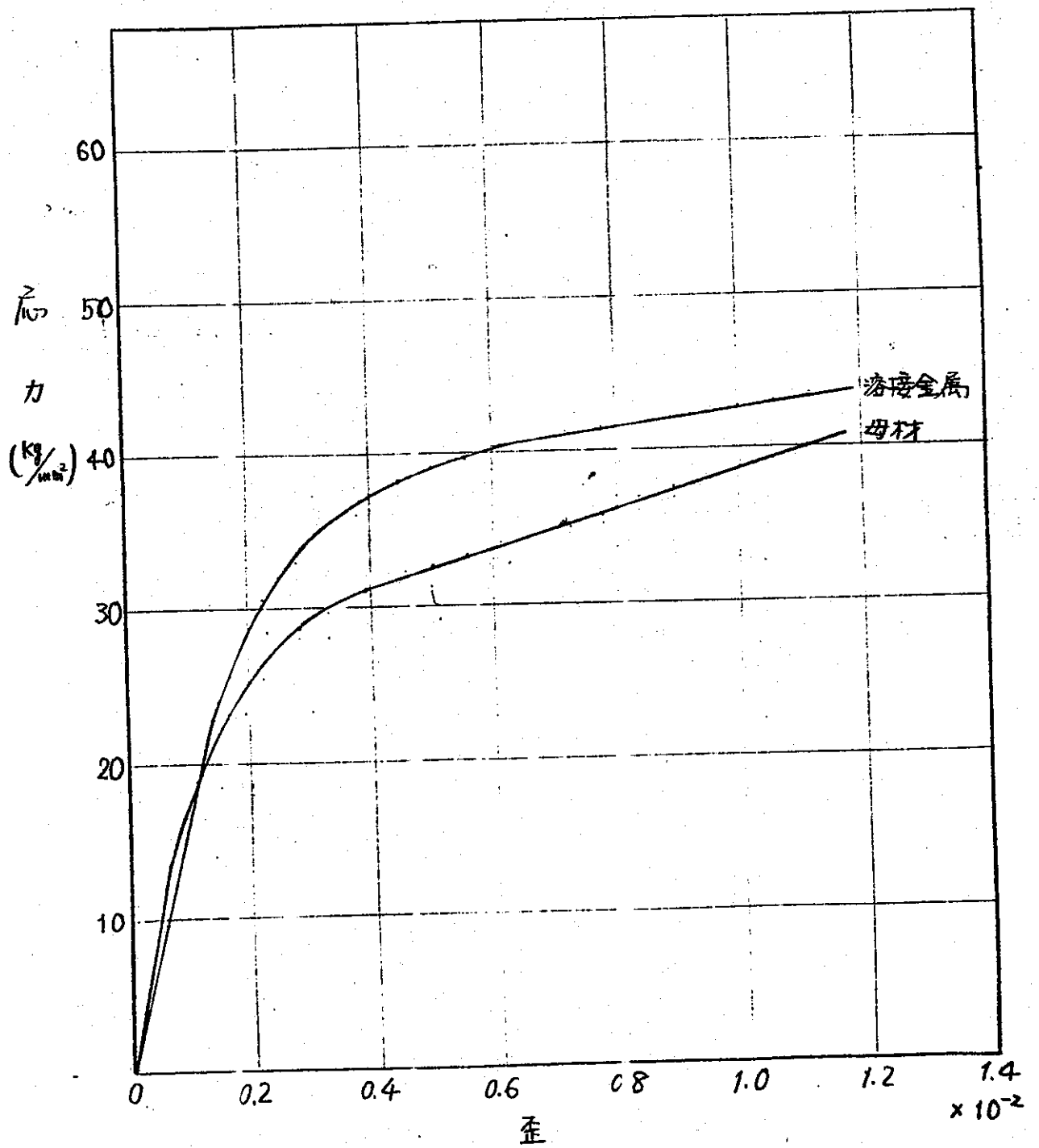
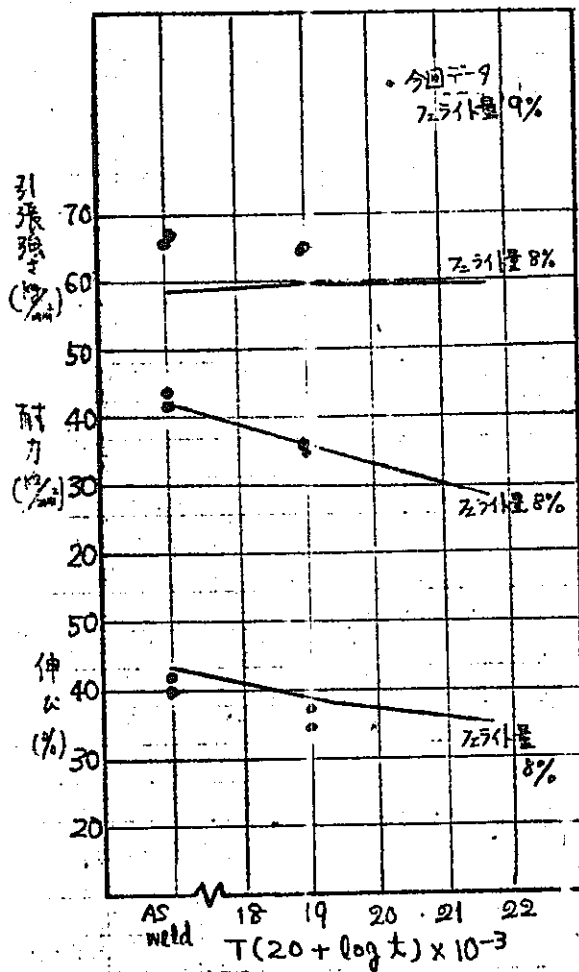
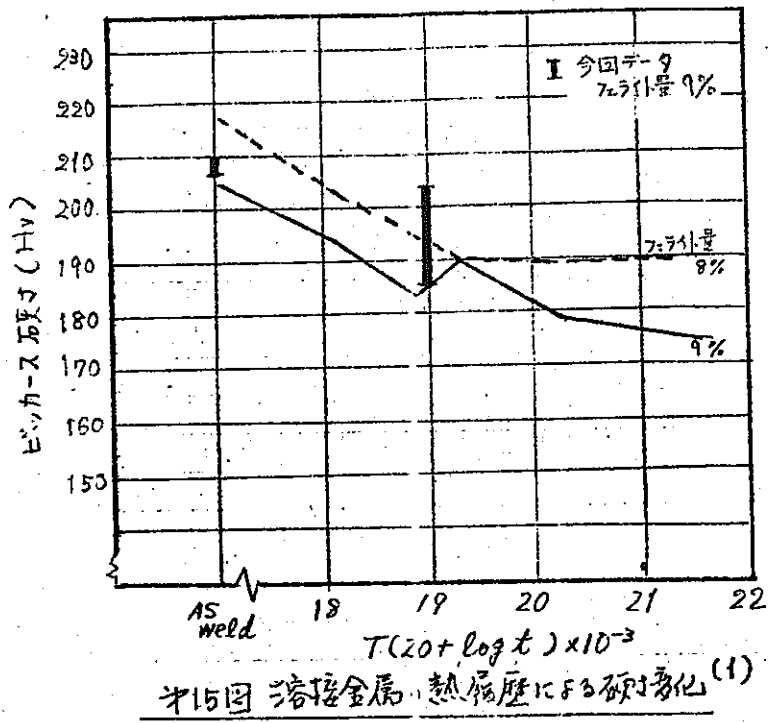
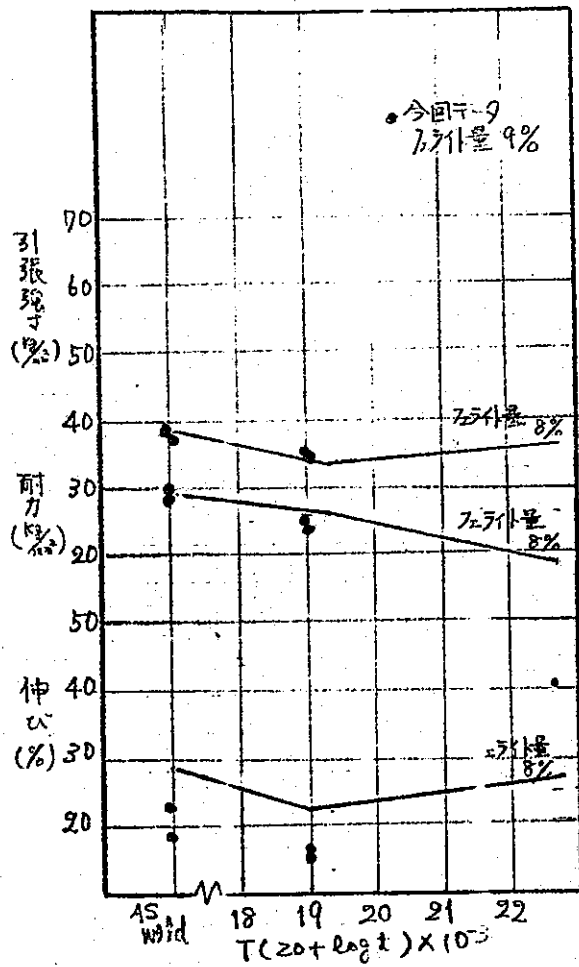
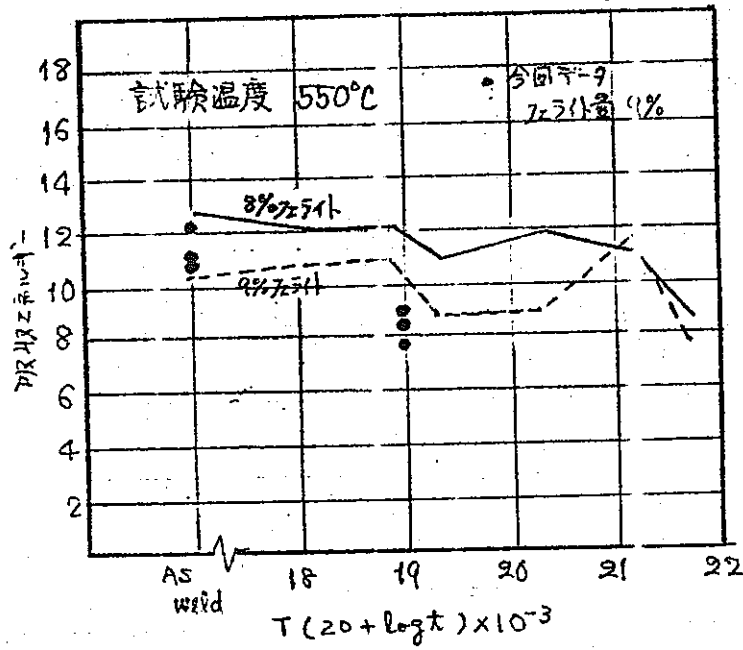
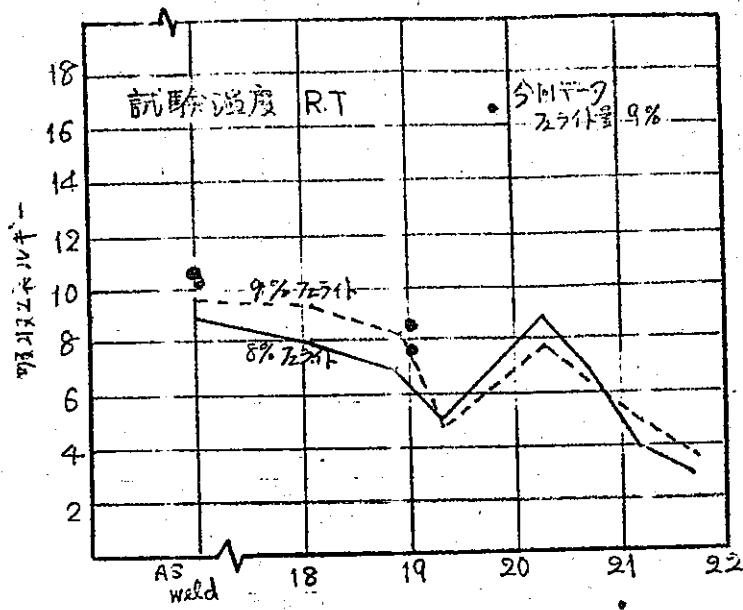


图14 歪補正用公称应力-公称应变关系图

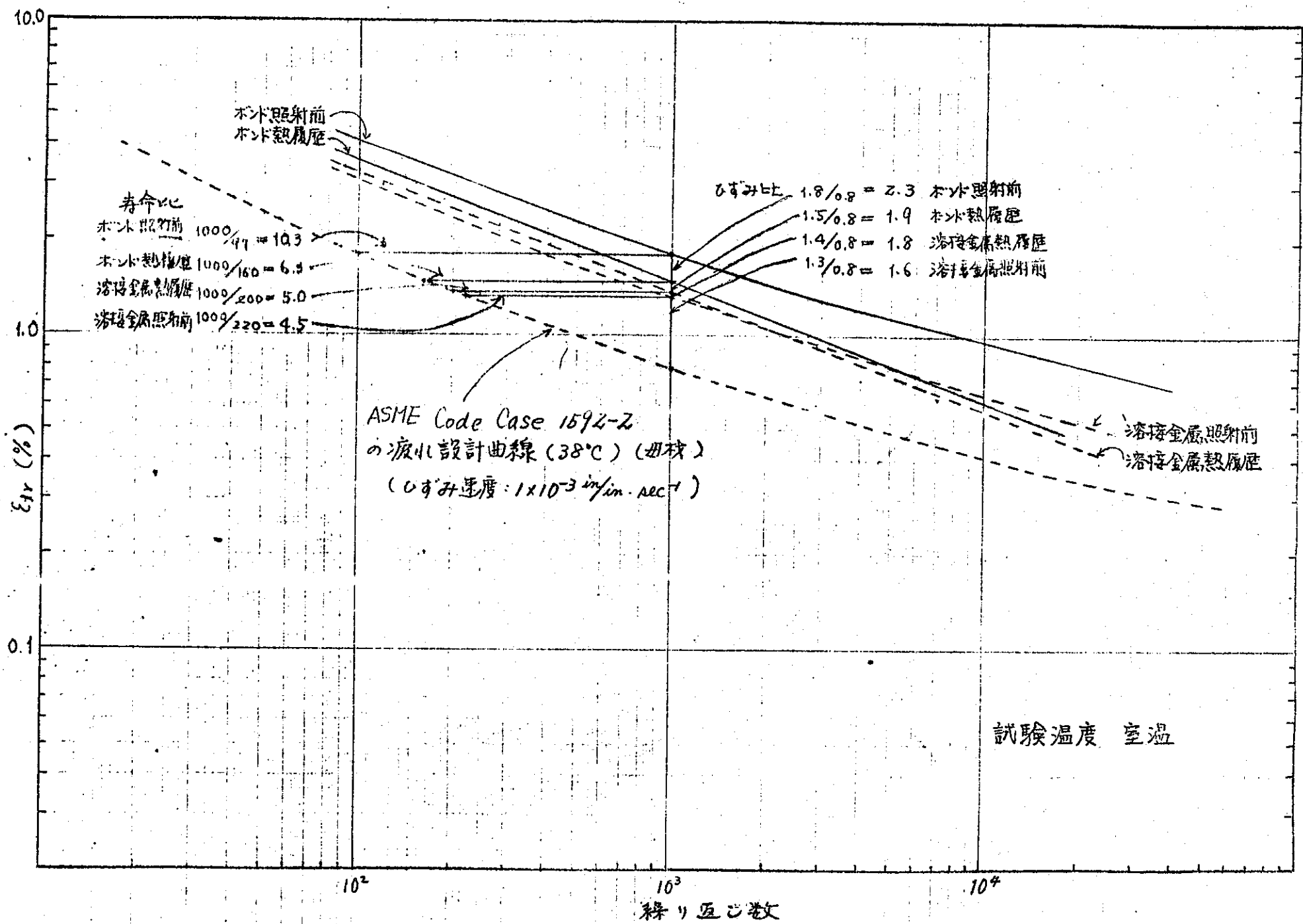




才17回 溶接金属の熱履歴に於て550°C引張特性の変化(1)



※18図 シャルピー衝撃特性値の熱履歴による変化(1)



才19回 溶接金属、ホント部 破れ曲線の ASME 設計曲線との比較

304 Ti および 304 TiNb 特殊加工熱処理材の耐照射脆化性の検討 (非照射熱履歴付与材の試験結果)

昭和51年2月25日
日本冶金工業(株)

研究責任者	近藤 達男	日本原子力研究所
	前田 太郎	日新製鋼(株)
担当者	前田 太郎	"
	中島 南	日本原子力研究所

1. 供試材

1) 鋼種

304 Ti 304 TiNb

2) 化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti	Nb+Ta	B	N
304 Ti	0.036	0.82	1.78	0.011	0.017	12.86	18.25	0.17	Ti	0.0002	0.027
304 TiNb	0.061	0.78	1.84	0.011	0.010	12.80	18.19	0.25	0.14	0.0002	0.031

3) 特殊加工熱処理

供試材は熱履歴付与前に下記の様な特殊加工熱処理を施されています。

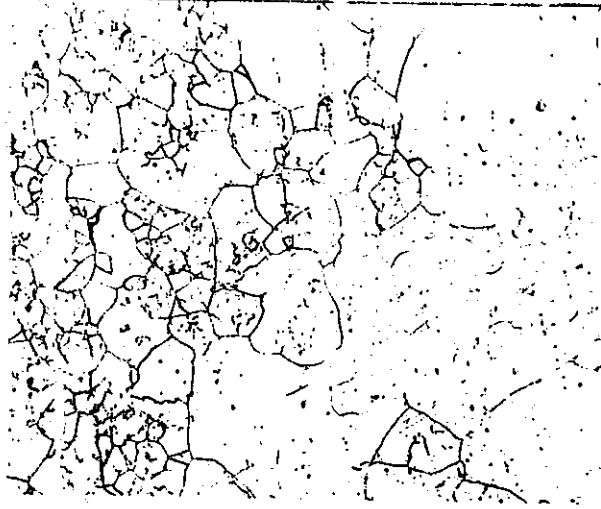
記号	熱処理、加工熱処理
ST	窒体化処理 (115°C/1hr WQ)
SPT	ST+AG (850°C x 24hr WQ 時効処理)
	ST+CW (80%-軸: 張歪付与: 常温) + AIT (850°C/24hr WQ)

2. 試験項目

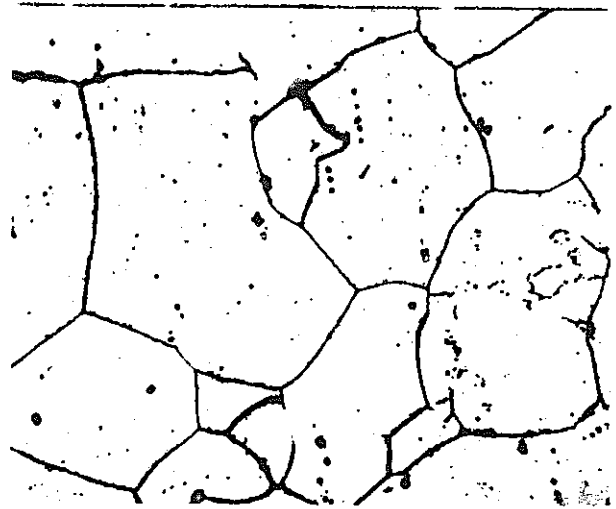
- 1) 光学顕微鏡組織
- 2) 高温引張試験 硬さ
- 3) シアル比衛等試験

3. 試験結果

- 1) 光学顕微鏡組織



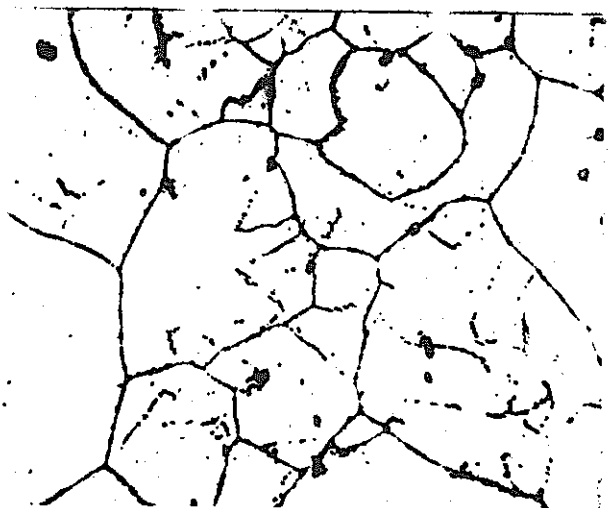
1) 304T2 ST x100



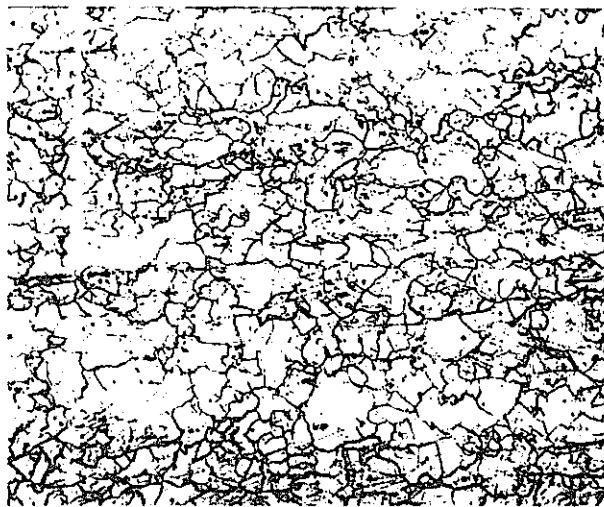
2) 同左 x400



3) 304T2 SPT 0% x100



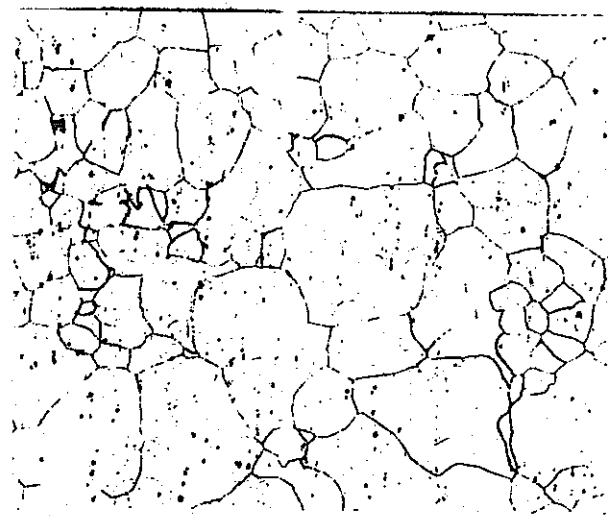
4) 同左 x400



5) 304T2 SP 30% x100



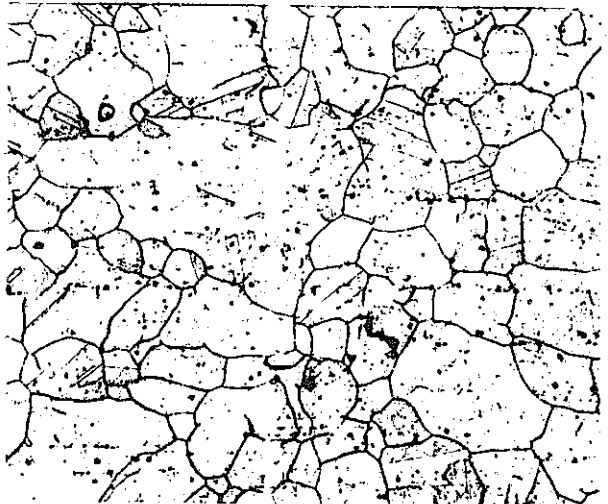
6) 同左 x400



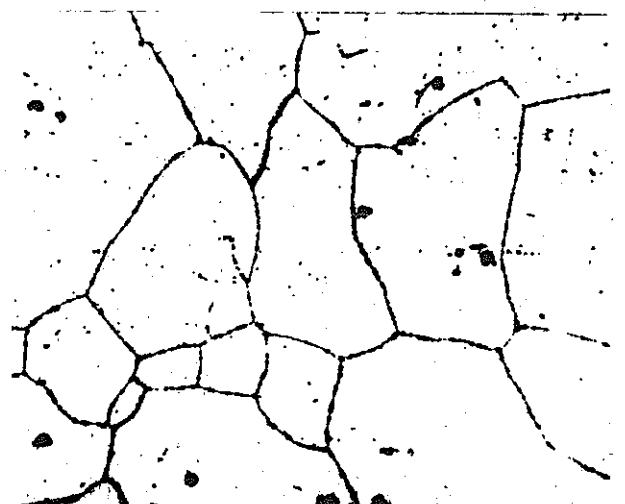
7) 304TiNb ST x100



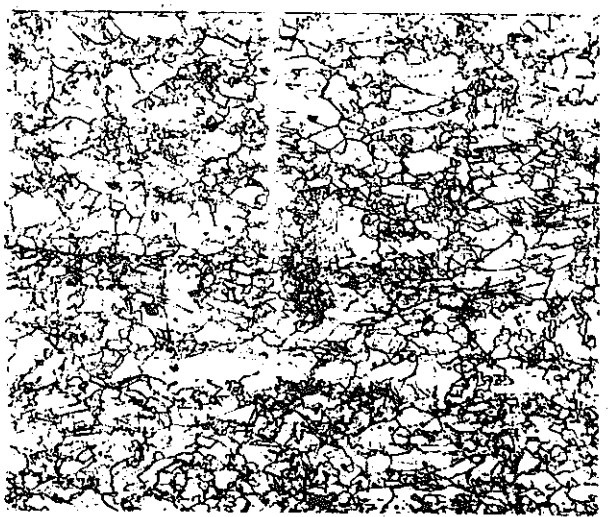
8) 同左 x400



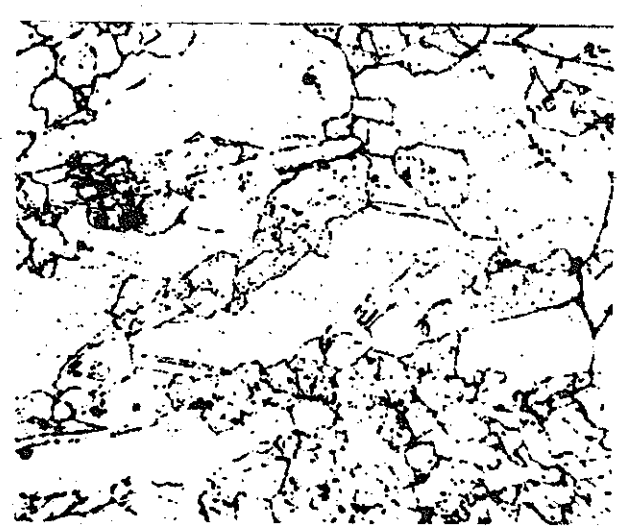
9) 304TiNb SPT 0% x100



10) 同左 x400



11) 304TiNb SPT 30% x100



12) 同左 x400

熱履歴付与前では炭化物はTi(C,N), Nb(C,N)の粒内析出が主体であり, SPT30%
 のおで若干粒界へのCr₂₃C₆の析出が認められる程度であるが, 熱履歴付与により
 主に粒界にCr₂₃C₆の析出が起り, 且SPT30%のおでは粒内, 粒界共に析出が1553い,

2) 高温引張試験

高温引張試験結果を表1図に示す。

表1. 高温引張試験結果(500c)

組成	処理	熱履歴 付与前後	機械的性質				
			0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	
304Ti	ST	前	17.5 (17.2)	36.6 (36.2)	28.5 (31.2)	61.0 (57.7)	
			16.9	35.8	33.9	54.4	
		後	10.3 (13.6)	34.4 (35.0)	34.3 (38.3)	65.5 (67.6)	
			16.9	35.5	42.3	69.7	
	SPT	0%	前	13.3 (13.3)	34.7 (34.4)	32.6 (30.5)	71.2 (63.8)
				13.2	34.0	28.3	56.4
			後	11.1 (10.7)	32.3 (32.9)	37.5 (33.3)	72.4 (65.9)
				10.3	33.2	29.0	59.3
		30%	前	16.6 (15.0)	34.3 (34.2)	37.7 (36.3)	65.7 (67.2)
				13.3	34.0	34.8	68.6
			後	13.0 (15.3)	39.9 (40.1)	46.0 (42.4)	72.4 (72.4)
				12.5	40.2	38.8	72.4
304Ti11b	S.T	前	13.6 (14.7)	42.8 (43.2)	30.1 (29.4)	61.1 (60.4)	
			15.8	43.5	28.7	59.7	
		後	13.7 (13.2)	43.3 (42.9)	36.3 (30.6)	62.5 (58.5)	
			12.7	42.4	24.8	54.4	
	SPT	0%	前	15.1 (14.7)	36.2 (35.8)	34.2 (33.3)	67.1 (67.8)
				14.3	35.4	32.4	68.4
			後	13.8 (13.7)	34.4 (34.7)	29.3 (31.3)	65.3 (69.5)
				13.6	35.0	33.3	71.6
		30%	前	26.9 (29.1)	38.6 (39.9)	21.4 (20.3)	68.5 (66.9)
				31.2	41.1	19.1	65.3
			後	30.0 (29.7)	39.4 (40.2)	21.5 (20.2)	64.2 (64.0)
				29.4	41.0	18.8	63.8

○ 304Ti

304TiのST(1150°C/1hrWQ)及びSPT0%(ST+850°C/24hrWQ時効)材では熱履歴付与により0.2%耐力、引張率は低下するがSPT30%(ST+30%-軸引張率付与+850°C/24hrs時効)では増加している。引伸率、絞りもST、SPT0%、SPT30%材とも熱履歴付与により増加している。

○ 304TiNb

ST及びSPT0%では304Tiのそれらと同様に、熱履歴付与によりやや低下の傾向にあるが、SPT30%ではほとんど変わらない。
引伸率、絞りは全体としてやや低下の傾向にあるが、さあめて変化は小さいと言えよう。

熱履歴付与後の304Tiと304TiNb材を比較するとST及びSPT0%処理では304Ti、304TiNb材とも強度レベル(0.2%耐力)はほぼ同様であるが、延性は304Tiの方がすぐれている。

引伸率SPT30%処理では304TiNbの方がやや強度レベル(0.2%耐力)は高いが延性がいちぢるに低下している。

従って強度と延性の最も良い組合せは304Ti SPT30%処理材と言えよう。

3) シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験結果を表2に示す。

表2. シャルピー衝撃試験結果 (吸収エネルギー kJ/m)

試料			試験温度	熱履歴	
組成	処理			付与前	付与後
304Ti	ST		RT	8.14	8.0 (U.B) [*]
	SPT	0%	"	7.85	6.8
		30%	"	7.51	7.0
304TiNb	ST		"	9.07	7.1 (U.B) [*]
	SPT	0%	"	6.63	6.7
		30%	"	6.52	6.2

* U.B 破断なし 各付与前のもの破断の有無は不明である。

熱履歴付与により全体として衝撃値は低下する傾向にあるが、ST処理のものは熱履歴付与前とほぼ同様もしくは若干の低下しか認められず、引伸率SPT0%、及びSPT30%のものは熱履歴付与による低下がやや大きい。

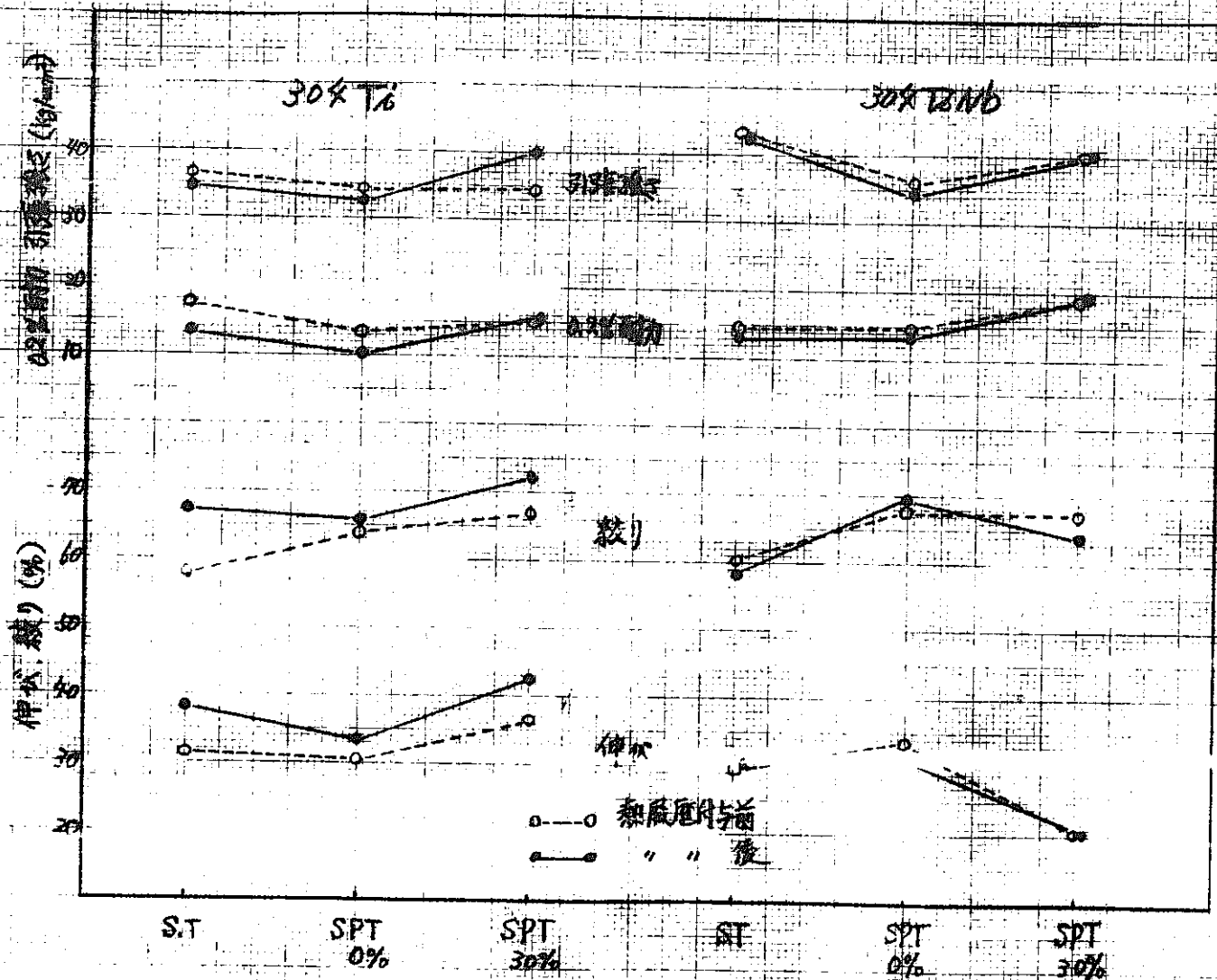


図 1 30% Ti, 30% TiNb 材の高温引張試験結果

304Hタイプステンレス鋼の機械的性質におよぼす照射効果 (非照射熱履歴付与材の試験結果)

昭和51年2月25日

日本冶金工業(株)

研究責任者
担当者

深瀬 幸重
津田 正臣

日本冶金工業(株)川崎製造所 研究部

研究室

1. 供試材

1) 鋼種

Sus 304H 917°

2) 化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Co
304H	0.118	0.80	1.55	0.003	0.011	8.83	18.4%	<0.01	0.004	0.02
	B	Nb	Ti	N	O _{ppm}	H _{ppm}				
	0.0001	<0.001	<0.001	0.013	62	3.4				

3) 製造履歴

実験室溶解 — 溶取 — 鍛造 — 圧取 — 熱処理

15kg

7719

1150~950°C
15×65×2

グライダ-

1080°C 30分 WQ

4) 熱履歴付与

JMTRによる中性子照射温度記号は1673°。非照射材に熱履歴王原研にて付与した。熱履歴付与温度記録はステンレス鋼照射本巻資料(51.1.30. 29-1)に示されている。

2. 非照射熱履歴付与材の試験項目

1) 硬さ

2) 光学顕微鏡組織

3) 引張試験

引張速度 (mm/min)

温度(°C)

常温

0.5

30

20

高温

0.

500, 550, 600

○ 自主試験

4) シェルビレーン試験

速度

高温

500, 550, 600°C

○

3. 非照射熱履歴材の試験結果

1) 硬さ (Hv10)

	非照射固溶化材	熱履歴付与材
304H	156	171

熱履歴付与による炭化物析出のため硬さは上昇している。

2) 光学顕微鏡組織

熱履歴付与材の光学顕微鏡組織を写真1) 2) に示す。

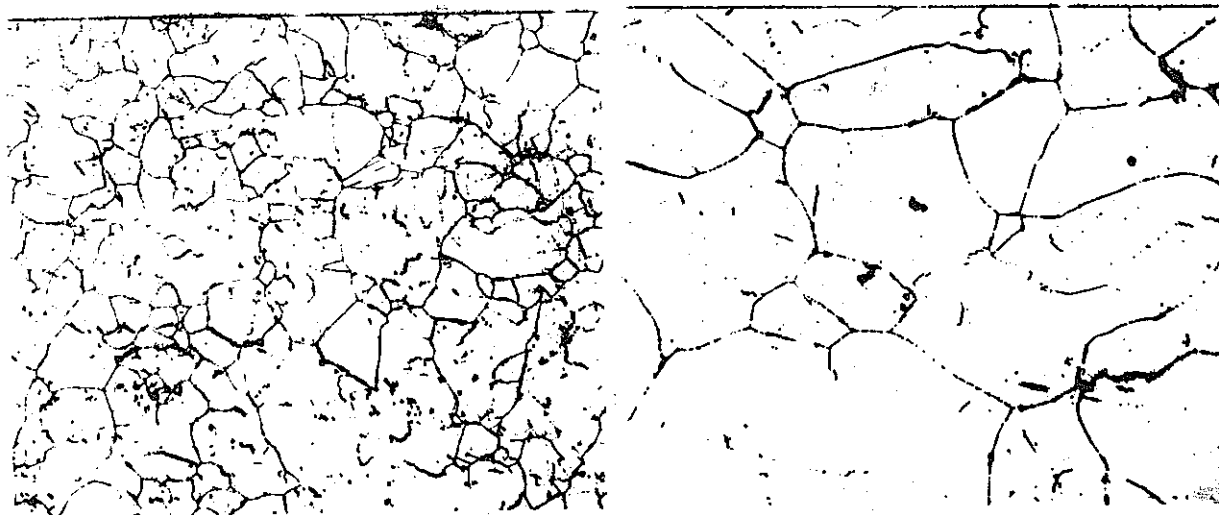


写真1) 熱履歴付与 304H

x100

写真2)

同左

x400

(腐食液：10% シュウ酸電解)

熱履歴を付与することにより炭化物が主として粒界に析出している。

3) 引張試験

① 常温

熱履歴付与した 304H の常温引張試験結果を固溶化材の結果と比較して表1に示す。

表1. 常温引張試験結果

引張速度 (mm./min)	試験片	機械的性質			
		0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
0.1	固溶化材	29.1	22.5	75.0	79.6
0.5	熱履歴材	34.5	71.4	65.5	68.1
	"	35.1	71.5	67.5	62.9
30	固溶化材	31.9	44.7	58.2	77.3
	熱履歴材	39.0	44.3	61.5	71.4
	"	39.0	44.6	57.0	55.5

熱履歴を付与するにともなう 0.2%耐力は115%以上増加し、伸び、絞り及び引張強さはやや低下している。

引張速度が速いほど 0.2%耐力は高、引張強さ、伸び、絞りは小さい。

②. 高温

熱履歴付与後 304H の高温引張試験結果を固溶化の材の結果と比較して表2に示す。

表2. 高温引張試験結果

試験速度 (%)	試験片	機械的性質			
		0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
500	固溶化材	18.3	49.0	48.6	62.3
	熱履歴材	19.2	46.5	40.0	63.6
550	固溶化材	17.5	46.1	48.0	64.9
	" "	16.7	45.5	45.5	62.1
	熱履歴材	18.4	42.3	39.5	55.6
600	" "	17.9	42.8	42.0	54.2
	固溶化材	16.7	38.9	41.0	45.3
	熱履歴材	17.3	36.1	39.3	46.9

熱履歴付与により 0.2%耐力は若干増え、引張強さ、伸び、絞りは低下する。しかし 600℃程度の高温に与ると固溶化材、熱履歴付与の伸び及び絞りの差は小さくなる。

4) シャルピー衝撃試験

熱履歴付与LE 304Hの常温・高温シャルピー衝撃試験結果を固溶化
材の結果と比較して表3に示す。

表3. シャルピー試験結果 (Jm/cm²)

試験温度	固溶化材	熱履歴付与材
R.T	15.6 (16.2)	10.3 (10.1)
	16.8	9.8
500	13.5 (13.9)	8.0 (8.0)
	14.3	—
550	13.3 (13.8)	7.7 (7.9)
	14.3	8.1
600	13.3 (12.3)	7.7 (7.7)
	11.3	—

熱履歴付与により常温・高温のシャルピー衝撃値は1/3以下低下
す。

4. まとめ

中性子照射温度と同様の熱履歴を付与した304H鋼について、硬さ
測定、光学顕微鏡組織観察、常・高温引張試験および常・高温シャルピー
衝撃試験を実施し以下の結果を得た。

- 1). 熱履歴付与により硬さが増加する。
- 2). 炭化物が1/3以下折出する。主として粒界析出である。
- 3). 常温の0.2%耐力は1/3以下増加し、伸び・絞りおよび引張強さは低下
している。引張速度が下まれば0.2%耐力は高く引張強さ、伸び・絞りは小ま
る。
- 4). 高温の0.2%耐力は若干増加し、伸び・絞りおよび引張強さは低下する。
しかし600℃では固溶化材、熱履歴材での伸び・絞りの差は小ま
る。
- 5). 常温・高温のシャルピー衝撃値は1/3以下低下する。

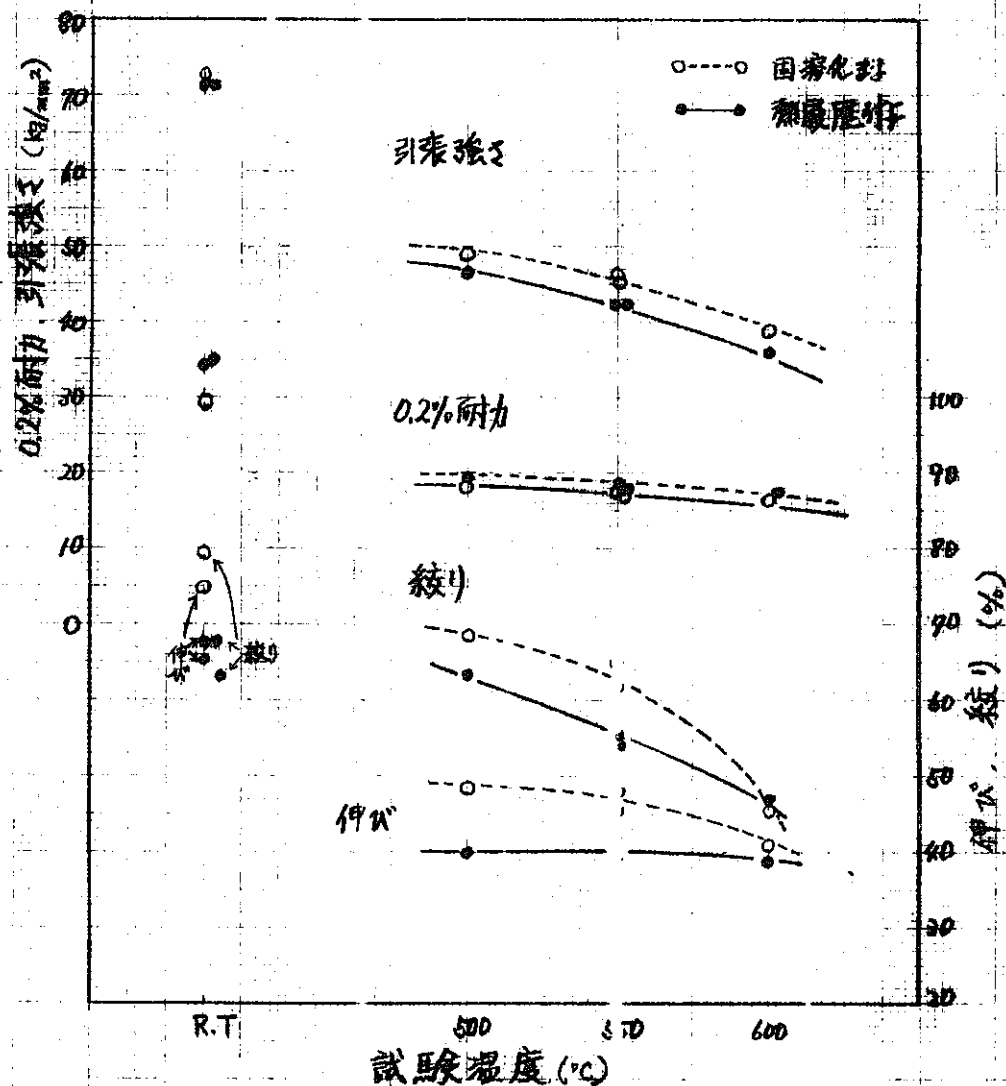


図1 304H鋼の国溶化材及び熱履歴材の引張特性

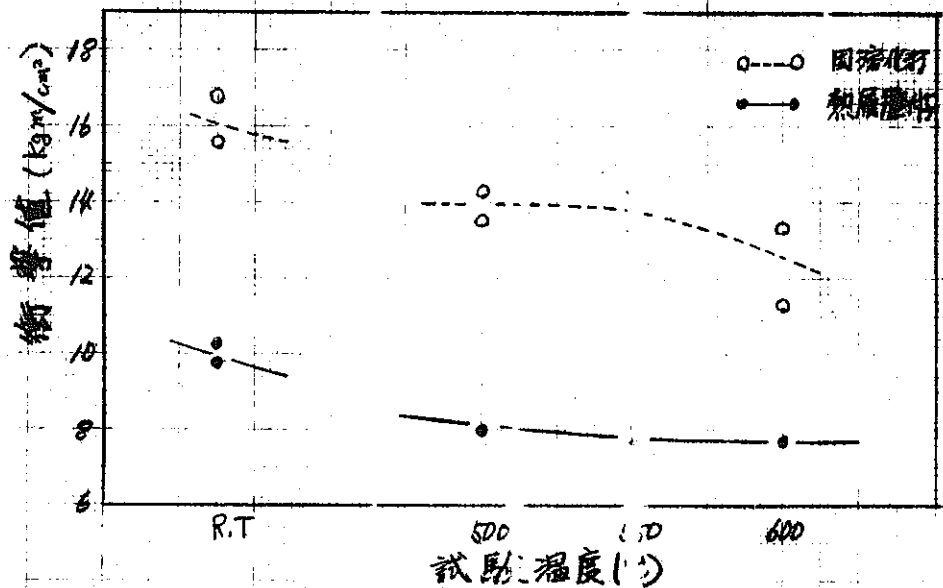


図2 304H鋼の国溶化材及び熱履歴材の衝撃値

304 タイプステンレス鋼の照射に及ぼす冶金学的因子の影響
(非照射熱履歴付テ材の試験結果)

昭和57年2月25日

日本冶金工業(株)

研究責任者 長谷川 正義 早稲田大学理工学部金属材料
担当 甲島 伸也 早稲田大学大学院(現 日本原子力研究所)

1. 供試材

1) 鋼種

Sus 304, 304 B入り, 304H.

2) 化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Co
Sus 304	0.071	0.79	1.63	0.030	0.006	8.91	18.13	0.08	0.06	0.19
B入り 304	0.089	0.68	1.57	0.024	0.010	8.97	18.77	<0.01	0.01	0.10
304H	0.118	0.80	1.55	0.003	0.010	8.83	18.44	<0.01	0.004	0.02
	B	Nb	Ti	N	O ppm	H ppm				
	<1 ppm	0.003	<0.01	0.029	93	6.0				
	0.0101	0.004	<0.01	0.014	116	4.3				
	0.0001	<0.001	<0.001	0.013	62	3.4				

3) 熱処理

熱履歴付と前記各材料は下記の様子熱処理を施してある。

鋼種	熱処理	記号(試験温度)
304H	1050°C x 30分 WQ. + 150°C x 1100hr W.C	A(R.T), B(550°C)
304	1650°C x 30分 WQ + 25% C.W + 900°C 30分 + 650°C x 1100hr W.C	C(R.T)
	1050°C x 30分 WQ + 650°C x 1100hr W.C	D(550°C)
B入り 304	1100°C x 30分 WQ	E(550°C)
	1100°C x 30分 WQ + 800°C 1100hr	F(550°C)

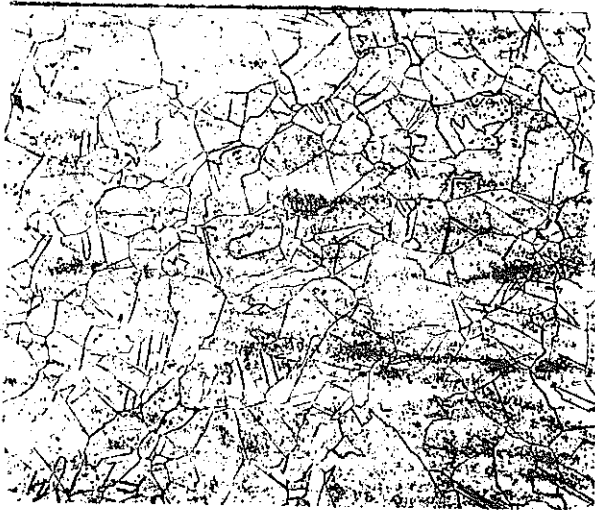
2. 試験項目

- 1) 光学顕微鏡組織
- 2) 常高温引張試験 及び 硬さ測定
- 3) 常温シャルピー試験

3. 試験結果

1) 光学顕微鏡組織

熱履歴付与後の光学顕微鏡組織を写真1~8に示す。



1) 304H 鋼 B: 1050°C 30分
+
650°C 1100hrs X100



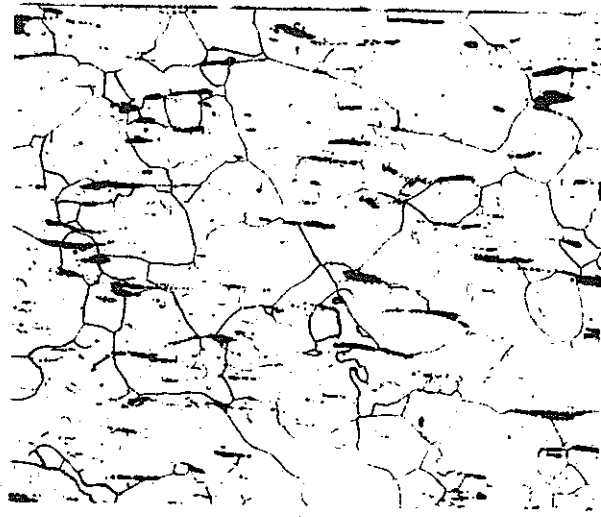
2) 同左 X400



3) 304 鋼 D: 1050°C 30分
+
650°C 1100hrs X100



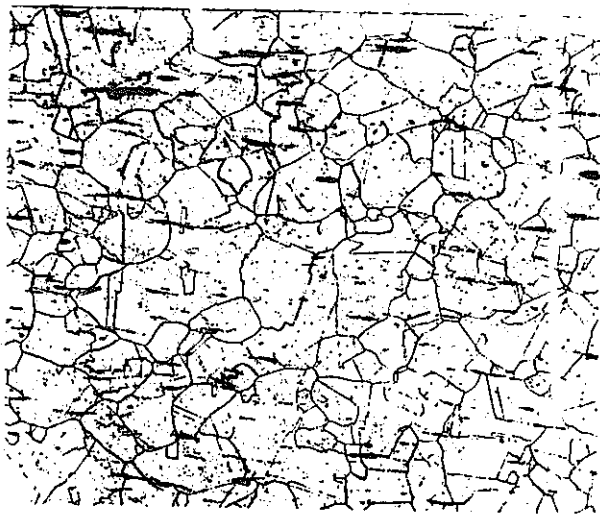
4) 同左 X400



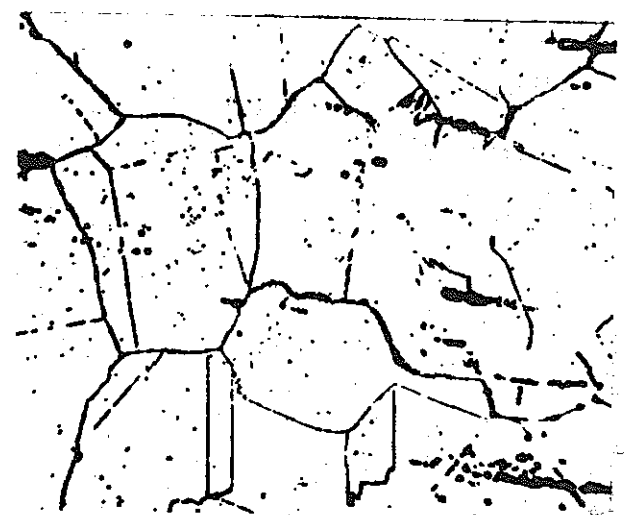
5) Bx304 記号E: 1100°C 30分 x100



6) 同左 x400



7) Bx304 記号F: 1100°C 30分
+ 650°C 1100hrs x100



8) 同左

1100°Cの組織と炭化物の粒内粒界析出が1100°Cの組織より、字表5,6 (Bx304, 1100°C 30分)と際を熱履歴付与前に650°C 1100hrs加熱により炭化物析出処理を受けており、さらに熱履歴付与後も炭化物の析出が行なわれている。また、熱履歴付与での析出は粒界主体であり、光顕組織で認められる粒内析出は主として650°C 1100hrs加熱によるものと考えられる。

2) 常高温引張試験及び硬度

引張試験結果を表1に示す

表1 引張試験結果

鋼種	記号・熱処理	試験温度(℃)	熱履歴前後	機械的性質				
				0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	硬度 HV _{0.05}
304H	A. 1050℃30分 + 650℃1100hr	20	前	26.5	292	53.5	—	—
			後	23.6	271	50.0	55.8	—
	B. " + "	550	前	12.9	38.2	33.5	62.9	—
			後	16.3	34.0	32.8	54.4	173
304	C. 1050℃30分 + 25% C.W. 100℃ 30分 + 650℃1100hr	20	前	28.9	81.6	53.2	—	—
			後	—	18.6	60.0	68.5	—
	D. 1050℃30分 + 650℃1100hr	550	前	10.8	38.9	41.3	57.5	—
			後	11.3	34.5	37.8	57.7	172
BA.04	E. 1100℃30分	550	前	12.4	38.8	35.0	62.5	—
			後	14.0	35.2	43.8	57.7	169
	F. 1100℃30分 + 650℃1100hr	550	前	12.4	36.4	38.3	65.5	—
			後	10.7	32.2	43.8	62.5	170

熱履歴付与後引張強さは全ての鋼種で常高温より大きく低下する。
0.2%耐力、伸び、絞り等は鋼種、試験温度より傾向が異なり、不明確な
点があるが、伸びは熱履歴付与後304Hでは低下、304Bでは増加する。

3) 常温シャルピ

シャルピ衝撃試験結果を表2に示す。

表2 シャルピ衝撃試験結果 (R.T) (PB吸収エネルギー - J)

鋼種	熱履歴付与前	熱履歴付与後	試験片 5x10x55
304H 1050℃30分 + 650℃1100hrs	3.7	3.9 (破断)	
	3.4	3.7 (破断)	

熱履歴付与前後でほとんど吸収エネルギーの変化は無い。



学振 122. ステンレス鋼照射小委員会提出資料

SUS 304 鋼板母材および溶接金属部の
疲れ特性の検討

昭和 51 年 3 月

三菱重工業株式会社技術本部高砂研究所

1. 目的

材料照射試験時の熱履歴を付与した SUS 304 鋼板の母材 および 溶接金属部に対し、室温 および 高温の低サイクル疲れ特性を把握し、照射後試験のデータ解析の基礎資料を得ることを目的とした。

2. 熱履歴材

試験に用いた熱処理材は、前回実施した照射前試験の供試材に JMTR における 70M-61P キャプセルの熱履歴を付与したものである。

供試材の化学成分、溶接施行、引張性質を表1, 2に示し、これに付与された熱履歴条件を図1に示した。

3. 試験要領

SUS 304 鋼板母材については、室温 ($9\sim 15^{\circ}\text{C}$) と 550°C の低サイクル疲れ試験を実施した。

試験には図2に示す最小径 10mm 中の砂時計形試験片を用いた。表3に今回の試験条件を示す。

試験温度 550°C のものは、約 30分均熱を行ない、引張り側から試験をスタートした。

なおひずみの波形は正弦波である。

4. 試験装置

試験装置は、電気油圧サーボ式の 10ton 低サイクル疲れ試験機で表4にその性能を、図3に装置の概略を示す。

ひずみは直径変位を腕でとり出し、差動トランス形ひずみ計を経て変位計でひずみを指示するとともに、サーボ方式

によって シリンダに送る油圧を切替えて、ひずみ制御形の繰返し疲れ試験を行なった。

ヒステリシス ループは、直径変位と軸荷重からの信号をXYレコーダに入れ記録した。

加熱炉は、筒形電気炉で試験片における30mm間の温度差は $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内、時間的溫度変動は $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内であった。

5. 試験結果

室温、高温の低サイクル疲れ試験結果を表5と図5~7にそれぞれ示した。

これら結果における全軸ひずみ範囲(ϵ_{tr})、塑性ひずみ範囲(ϵ_{pr})、弾性ひずみ範囲(ϵ_{er})および応力範囲(σ_r)は、いずれも $N=1/2 N_f$ における値を代表値として示したものである。また、各種のひずみ範囲および応力範囲は次式によって求めた(図4参照)。

全ひずみ範囲

$$\epsilon_{tr} = 2 \ln d_2/d_1 + (1-2\nu) \sigma_r/E$$

弾性ひずみ範囲

$$\epsilon_{er} = \sigma_r/E$$

塑性ひずみ範囲

$$\epsilon_{pr} = \epsilon_{tr} - \epsilon_{er}$$

応力範囲

$$\sigma_r = \frac{P_t}{A_t} + \frac{|P_c|}{A_c}$$

ここに E: ヤング率 室温; $2.0 \times 10^4 \text{ Kg/mm}^2$
 550°C ; $1.6 \times 10^4 \text{ Kg/mm}^2$

ν : ポアソン比 0.28

6. 試験結果の検討

- 1) 母材の室温および 550°C の低サイクル疲れ曲線を照射前(熱履歴付与前)材のそれと比較して図8, 9にそれぞれ示した。これによると, 疲れ寿命 ($N=10^3 \sim 10^4$ 範囲) は室温, 550°C とともに照射前材と同等もしくは若干長い結果であった。

したがって, 今回のような温度曲線(約 550°C の加熱冷却を16回前後繰返し, またその際の加熱時間の総和が約1,800秒である)による熱履歴の疲れ寿命に及ぼす影響はほとんどないものと考えられる。

- 2) 溶接金属の低サイクル疲れ曲線を照射前材のそれと比較して図8, 9にそれぞれ示した。これによると, 熱履歴材の疲れ寿命は, 照射前のものに比べて高ひずみ領域では長く, 低ひずみ領域では同等であった。この傾向は日本溶接協会FRW小委員会*でのデータとも一致している。

このように熱履歴材が高ひずみ領域でよい成績を示す原因は主として熱履歴による機械的, 冶金的性質の変化が影響しているものと考えられるが, 本実験の範囲では明らかでない。

- 3) 応力範囲 σ_r の繰返しによる変化は, 図10~13のとおりである。これによると, 母材の室温と 550°C で試験したものは繰返し硬化を示したが, 溶接金属の 550°C 試験では高ひずみ領域では繰返し硬化を, 低ひずみ領域では繰返し軟化が示された。

溶接金属の低ひずみ領域が繰返し軟化を示したのは, 母材に比べて高い降伏比を有していることが影響したものと考えられる。

なお、これら σ_r の繰返しによる変化は母材、溶接金属とも照射前のそれらとほぼ同じ傾向にあることが認められた。

7. 疲れ設計曲線との比較

今回の試験結果を原子力機器の高温使用基準である ASME Code の Case 1592-2 (1975) の全ひずみ振幅 ϵ_{tr} による疲れ設計曲線と比較すると図13, 14のとおりである。

- 1) これによると、母材の室温における疲れ曲線は、同 Case の疲れ設計曲線を上回っている。この疲れ設計曲線に対する $N=10^3$ の所の寿命比は約14、ひずみ比は2.6で、照射前材の11.8、2.4に比べそれぞれ若干大きい結果である。

なお、これ等のデータは溶接協会 FRW 小委員会のものとほぼ同等であった(図15参照)。

- 2) 母材および溶接金属の 550°C における疲れ曲線は、いずれも同 Case 1592-2 の疲れ設計曲線を上回っている。この疲れ設計曲線に対する $N=10^3$ の所の寿命比は母材=40 (照射前:40)、溶接金属=25 (照射前:8.7) であり、ひずみ比は母材=4.2 (照射前:4.2)、溶接金属=3.3 (照射前:2.1) であった。

なお、これらのデータは溶接協会 FRW 小委員会のものに比べて、母材、溶接金属とも同程度であった(図16, 17参照)。

8. まとめ

JMTRにおける70M-61Pキャプセルによる材料照射試験時の熱履歴を付与したSUS304鋼板の母材および溶接金属部に対して、室温および高温の低サイクル疲れ試験を実施し次の結果を得た：

1) 母材の疲れ寿命を室温と550℃について、それぞれの照射前(熱履歴付与前)のものと比較すると、室温、550℃ともに照射前と同等もしくは若干長い目であった。また、母材の疲れ寿命を室温と550℃で比較すると、両者は同等もしくは前者の方が若干優れている傾向にあった。

2) 溶接金属の550℃における疲れ寿命を照射前のものと比較すると、照射前のものよりかなり長い結果(寿命増大: 寿命比8.7→25, ひずみ比2.1→3.3)であった。

550℃における母材の疲れ寿命と比べた場合、溶接金属のそれは若干低い。

3) 各熱履歴材の疲れ曲線はASME Code Case 1592-2の疲れ設計曲線を上回っており、その安全率(繰返し数 10^3 の場合)は同疲れ設計曲線に対し寿命比で約14~40, 強度比(ひずみ比)で約2.6~4.2であった。

以上母材、溶接金属とも今回付与された熱履歴では疲れ寿命の減少は特に認められなかった。

◆
* 日本溶接協会ほか “高速炉構造用ステンレス鋼の溶接施工に関する研究(Ⅱ)”

昭和47年8月 P.139

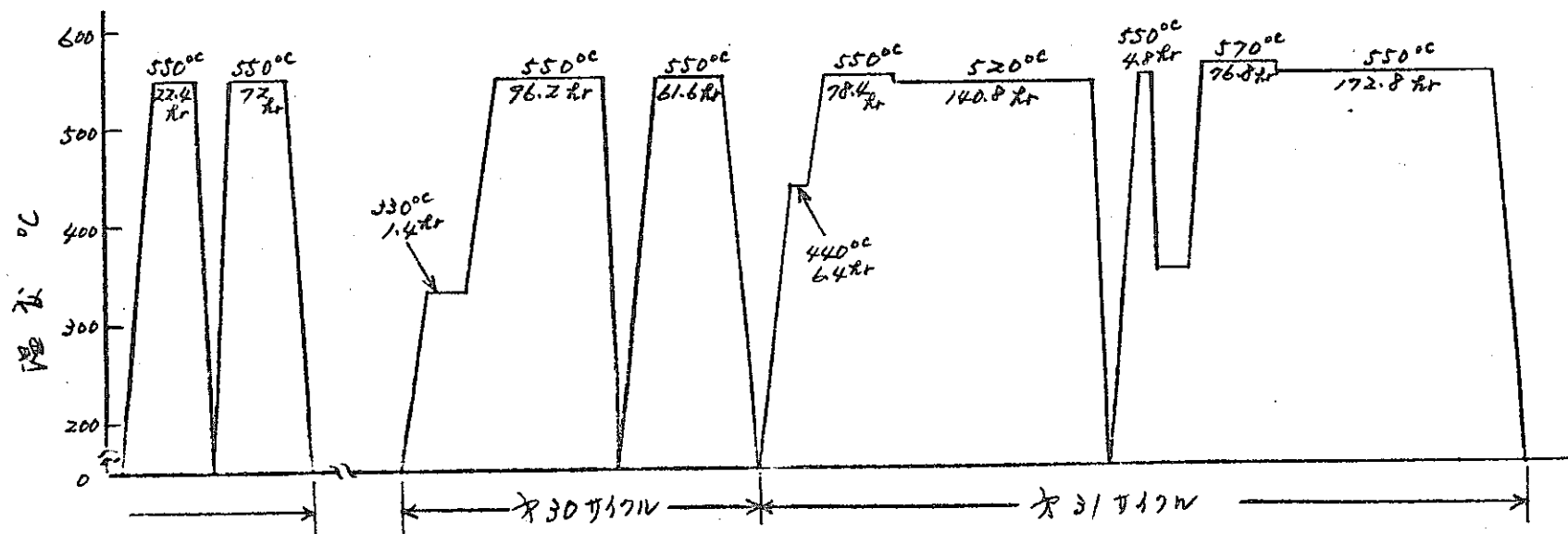
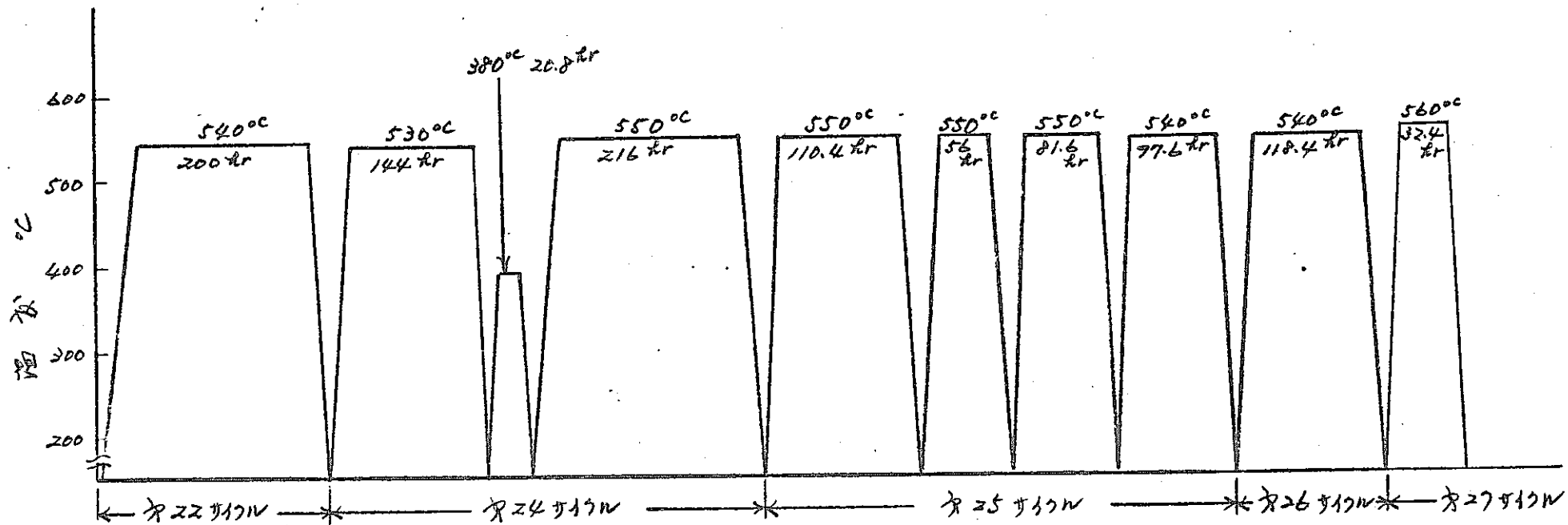
表 1. 川鉄製 SUS304 鋼板の化学成分と引張性質

鋼種	SUS304 (AISI 304 Type)				
板厚	20mm				
熱処理	1050 ^o C 水冷				
化学成分 (%w/w, %)	C : 0.056 Si : 0.55 Mn : 1.54 P : 0.024 S : 0.008	Ni : 9.45 Cr : 18.40 Mo : 0.094 Cu : 0.097 Co : 0.24	Al : 0.006 Ti : 0.017 B : 0.0003 Nb : 0.003 N : 0.018 O : 0.0070		
引張性質	試験片	平行部 4mm ϕ		平行部 10mm ϕ	
	試験温度 (°C)	22~25	550	25	550
	0.2% 耐力 (kg/mm ²)	24.5 24.8	15.3 14.9	22.9	13.8
	引張強さ (kg/mm ²)	65.8 65.9	39.2 40.4	64.1	39.2
	伸び [*] 1 (%)	73.5 73.2	43.6 41.3	81.7	39.8

注) ^{*}1 平行部 4mm ϕ 試験片, G.L. 20mm.
平行部 10mm ϕ 試験片, G.L. 50mm.

表2. 神鋼製溶接金屬部の溶接施工法および化学成分と引張性質.

系	鋼種	SUS 403		
	板厚	25 mm		
	熱処理	1050°C x 13 min 水冷		
	化学成分 (%w/w)	C : 0.046	Ni : 9.05	Al : 0.002
		Si : 0.57	Cr : 18.52	B : 0.0005
		Mn : 1.00	Mo : 0.13	N : 0.0261
P : 0.028		Cu : 0.11	O : 0.0041	
S : 0.005		Co : 0.20		
材	引張性質	採取方向	L 方向	C 方向
		試験温度 (°C)	常温	常温
		耐力 (kg/mm ²)	22.8	26.1
		引張強さ (kg/mm ²)	64.4	66.0
		伸び (L=50mm)(%)	74.6	71.7
		絞り (%)	80.2	74.8
溶接	溶接材料	ワイヤ : US-308 (4.0φ) フラックス : PFS-1 (焼結形)		
	用先形状			
	溶接条件	電流 : 370 ~ 450 A 電圧 : 32 ~ 35 V 速度 : 30 ~ 35 cm/min	予熱温度 : 予 バース温度 : 150°C 以下	
溶接金属の成績	化学成分	C : 0.052	Ni : 9.48	Al : 0.004
		Si : 0.60	Cr : 19.48	B : 0.0008
		Mn : 1.36	Mo : 0.10	N : 0.0302
		P : 0.027	Cu : 0.076	O : 0.0940
		S : 0.011	Co : 0.266	
	引張性質	試験温度 (°C)	常温	
0.2%耐力 (kg/mm ²)		42.2	43.5	30.0 28.6
引張強さ (kg/mm ²)		66.3	67.8	38.8 37.7
伸び (L=50mm)(%)		41.6	39.7	22.7 18.4
絞り (%)		66.0	57.5	50.5 49.8



管振 122 番
 入寸以鋼照別小番
 72.8.15

图 1. JMTR 70M-61P 中 70°C 以下の熱履歴温度変化図

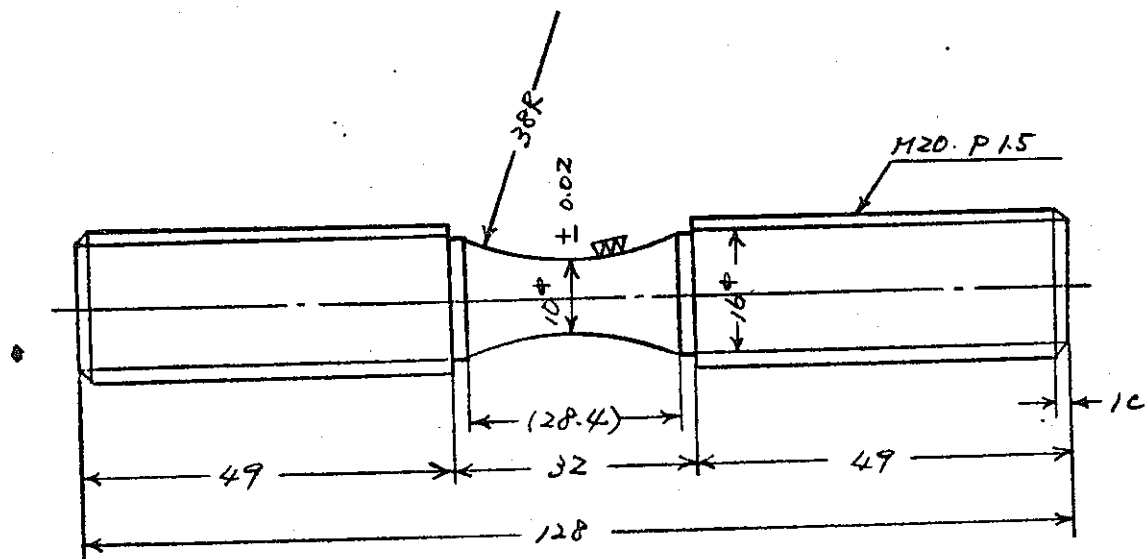


圖 2 倍カクレ痕の試験片の寸法形状 (d = 1.055)

表3 試驗条件

試驗片	砂時計形 (圖1参照)
繰進法	经公寸制御 引張-圧縮
繰進速度	40 P.M
試験温度	母材: 室温, 550°C 溶接金属: 550°C

表4 試験装置能

形式	電気油圧サーボ式
荷重容量	± 10 TON
荷重検出	ストレンゲージ式ロードセル
伸び検出	ストレンゲージ非接触形検出器 (感度1μ)
公寸制御	サーボ方式
加熱炉	ニクロム線 2 分割巻 ~ 800°C ± 3°C 以内
記録計	XYレコーダ (理研電子 F-42)

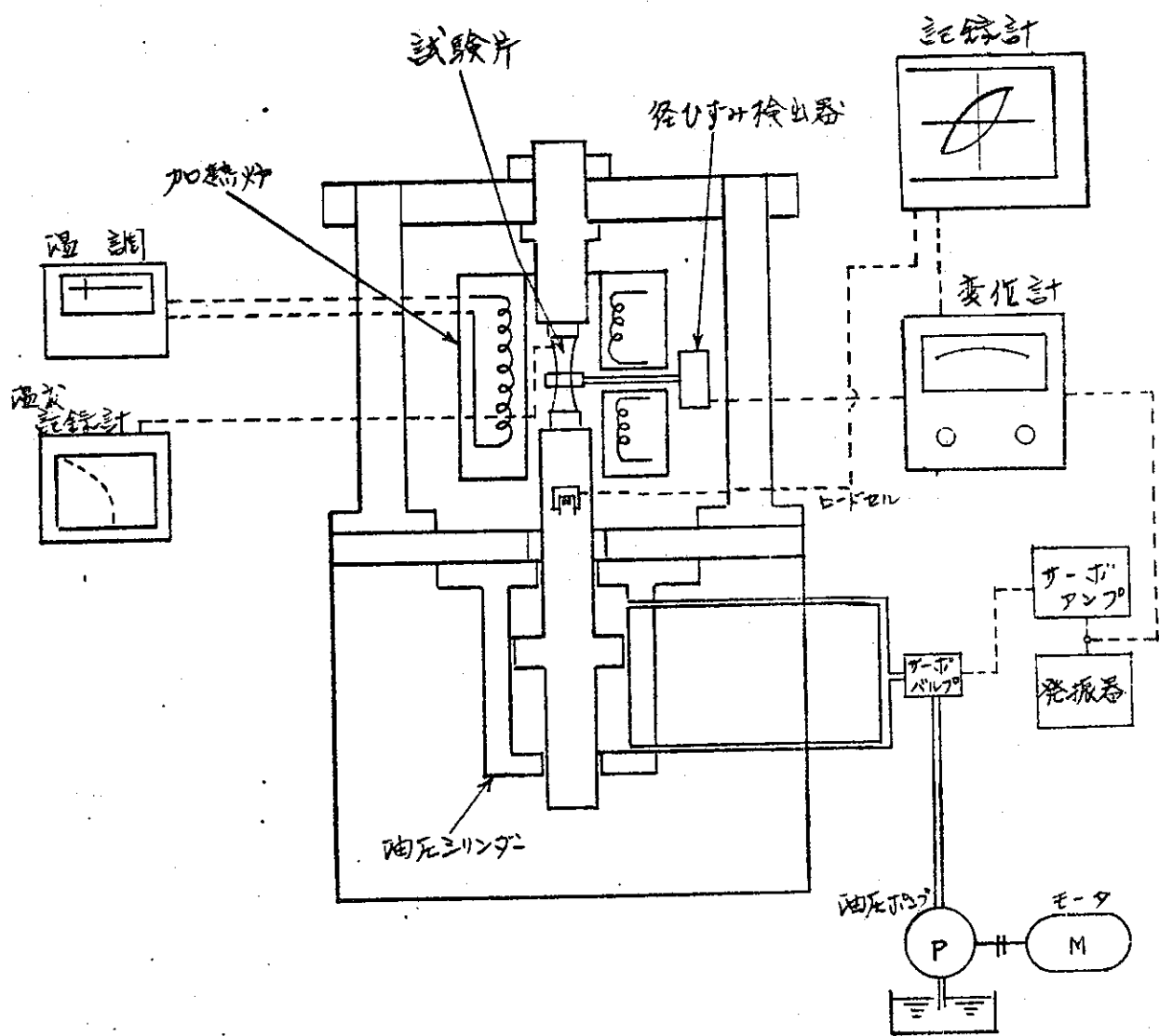


図3 試験装置の概略図

- E_{tr} : 全ひずみ範囲 (%)
- E_{pr} : 塑性ひずみ範囲 (%)
- E_{er} : 弾性ひずみ範囲 (%)
- σ_r : 応力範囲 (Kg/mm^2)
- d_1 : 圧縮側制御直径 (mm)
- d_2 : 引張側制御直径 (mm)
- P_t : 引張最大荷重 (Kg)
- P_c : 圧縮最大荷重 (Kg)
- A_t : 試験片断面積 (引張時) (mm^2)
- A_c : 試験片断面積 (圧縮時) (mm^2)
- Z_{Se} : 等価応力範囲 (Kg/mm^2)

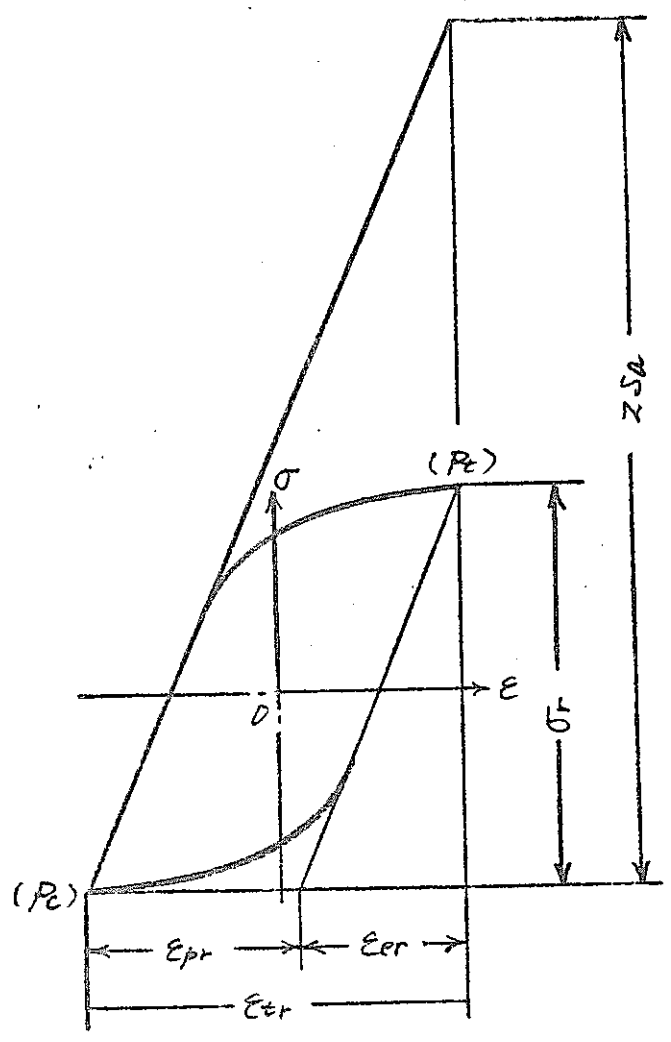
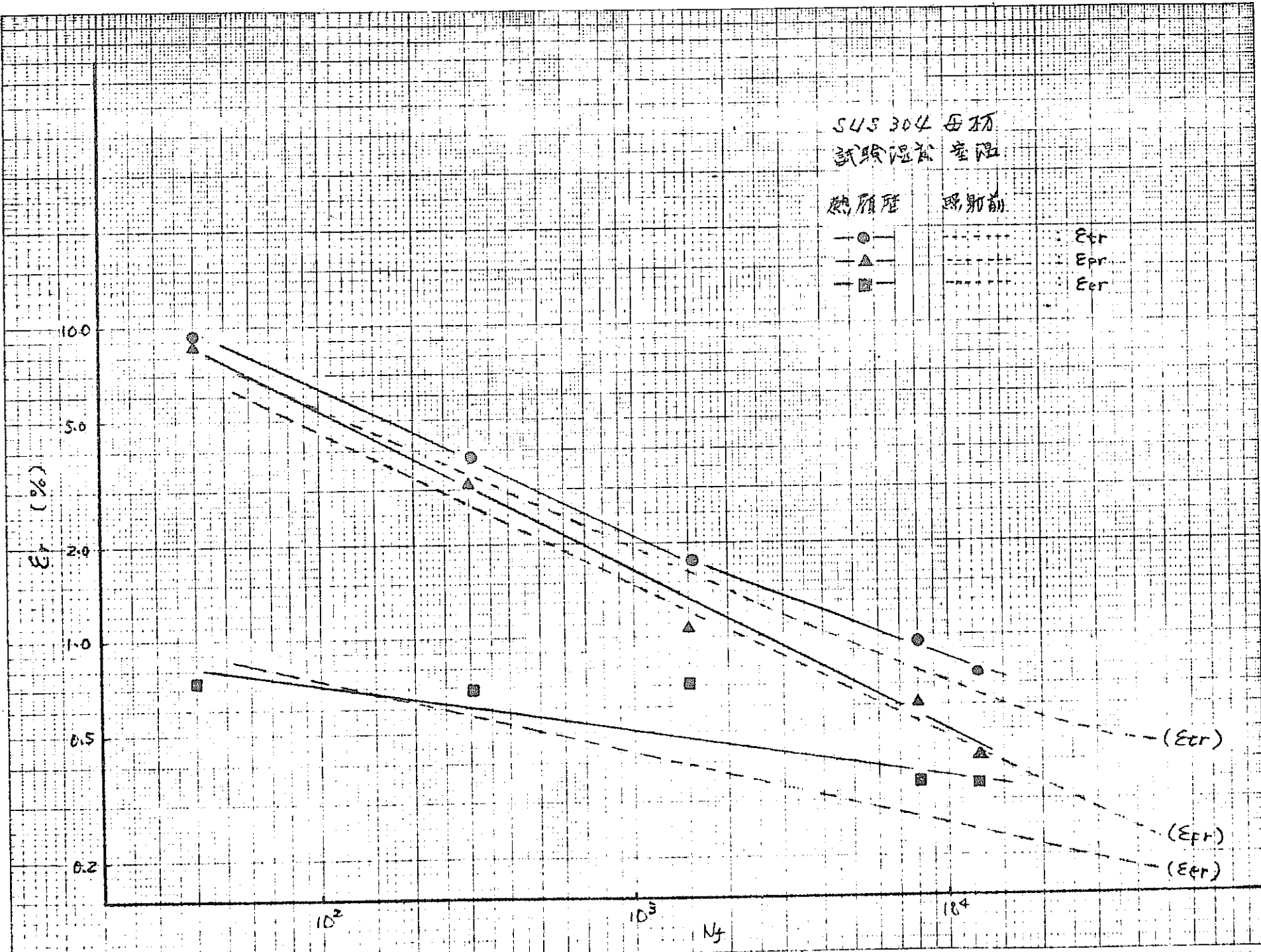
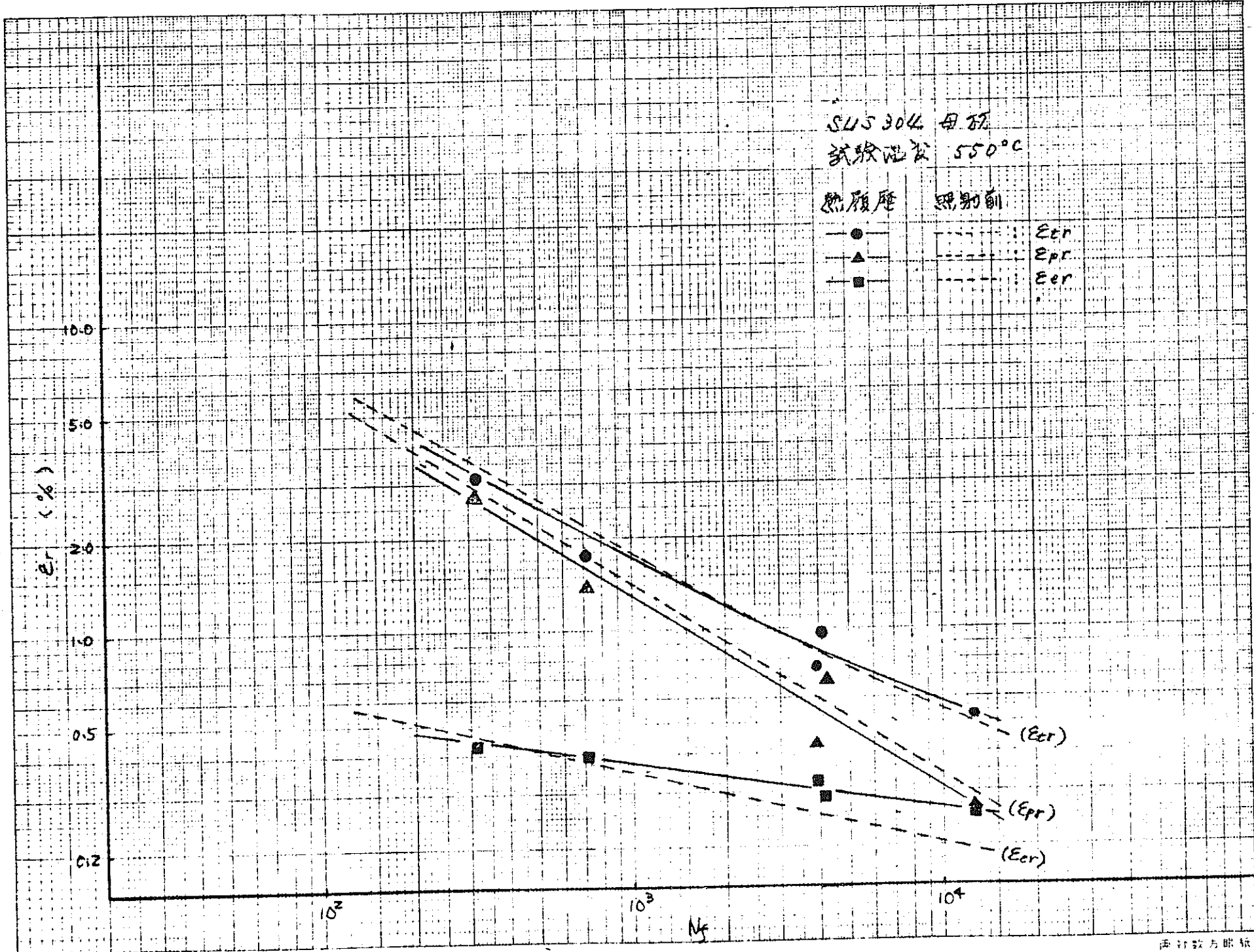


図4 応力-ひずみ範囲図

表5. 低サイクル疲労試験結果 (N=1/2 Nf)

	試験温度 (°C)	全軸応力範囲 E _{tr} (%)	塑性応力範囲 E _{pr} (%)	弾性応力範囲 E _{er} (%)	応力範囲 σ _r (kg/mm ²)	破断繰返数 N _f (cycles)
母材	室温	9.446	8.717	0.729	145.88	40
		3.806	3.115	0.691	138.21	305
		1.776	1.061	0.715	143.12	1550
		0.953	0.612	0.341	68.38	8078
		0.749	0.414	0.335	67.17	12506
	550	3.189	2.758	0.431	68.96	318
		1.775	1.376	0.399	63.90	710
		0.970	0.684	0.286	45.85	4192
		0.743	0.423	0.320	51.39	3908
		0.514	0.264	0.250	40.07	12645
溶接金属	550	2.748	2.407	0.341	54.71	308
		1.139	0.822	0.317	50.76	1456
		0.688	0.396	0.292	46.76	2648
		0.475	0.231	0.244	39.16	5232





JIS A4 1675・250

図 6 寸法範囲と破断繰返数の関係

西村敦夫監製

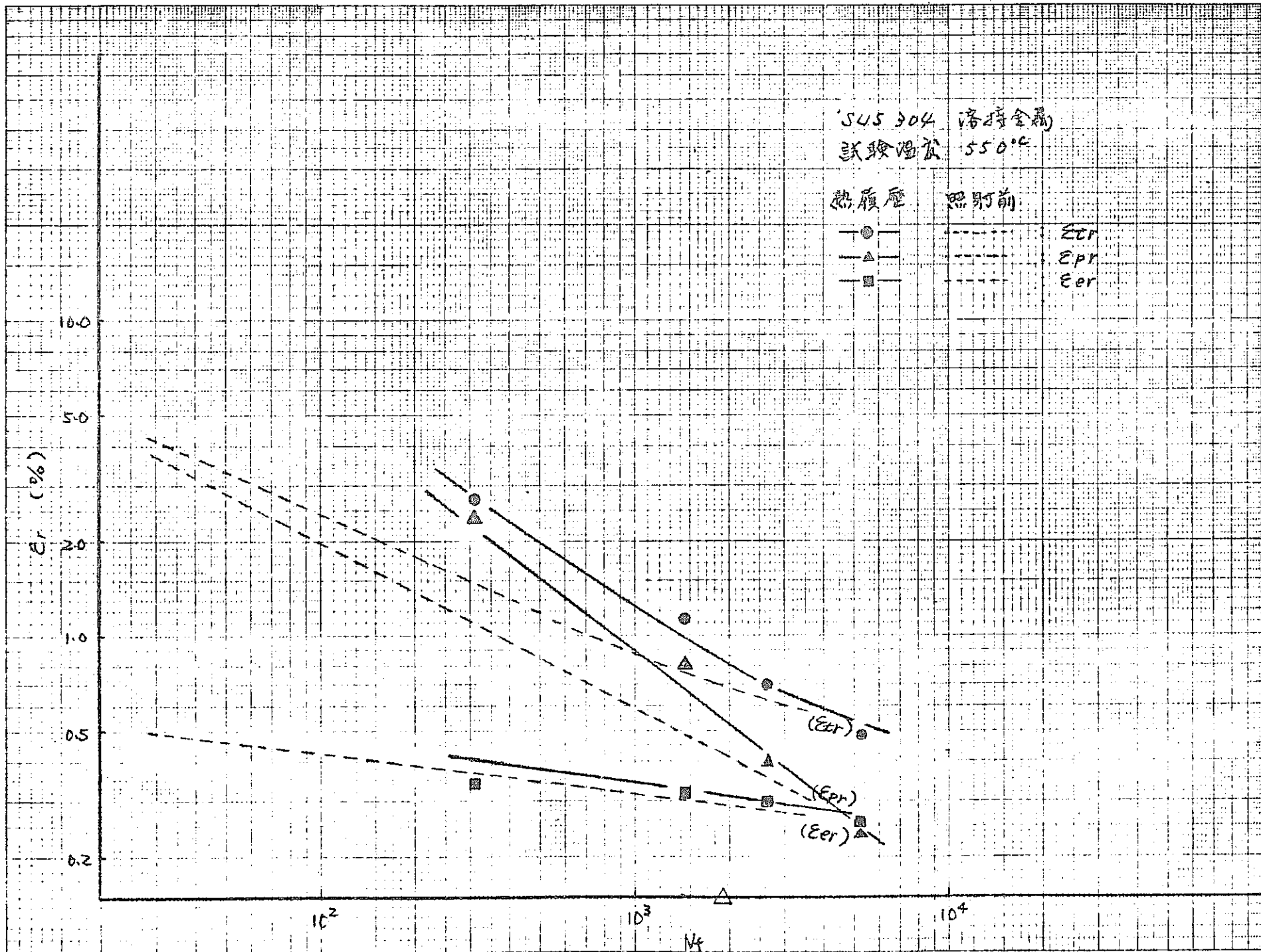
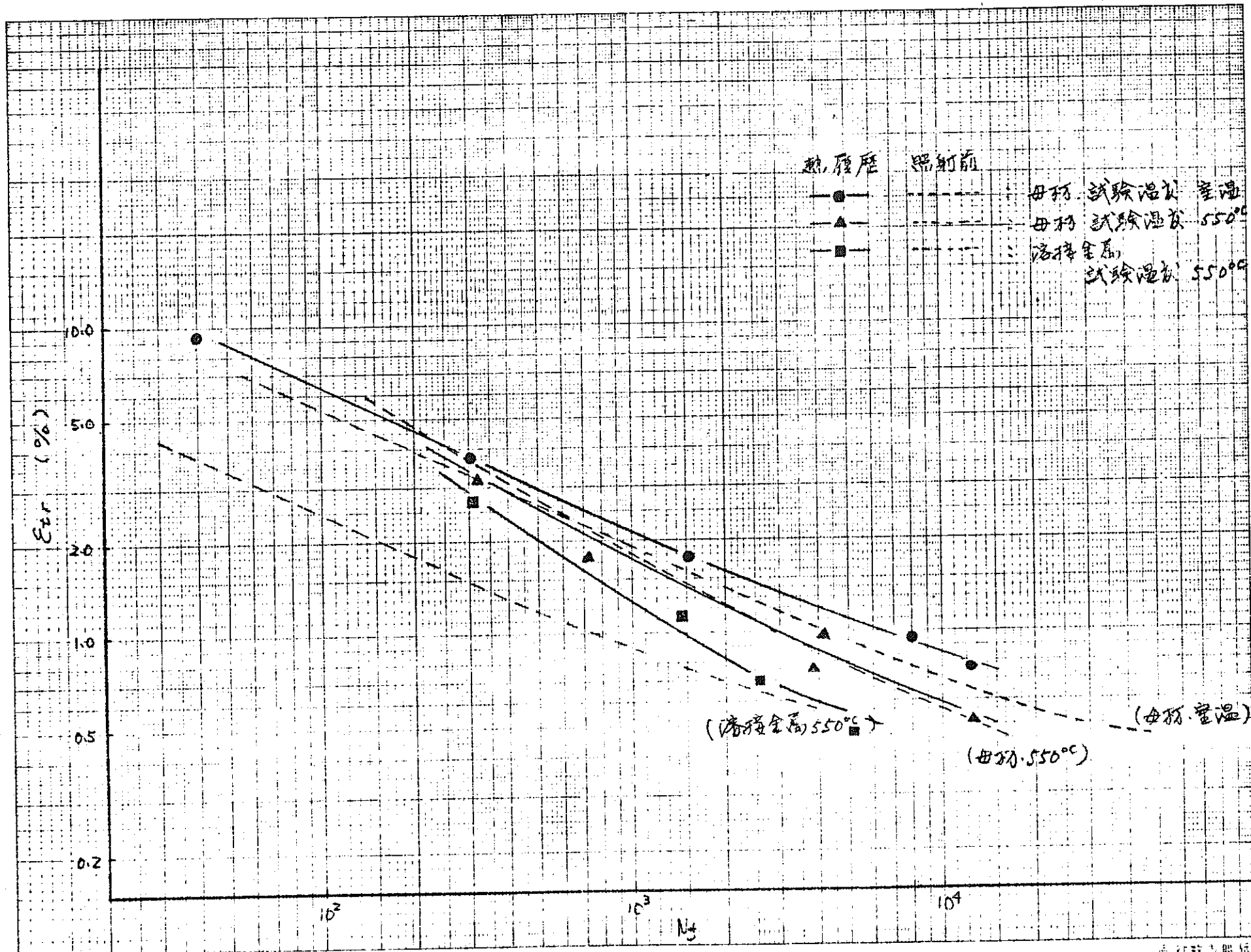


図7 照射前熱履歴との関係



JIS A4 1875-250

(2) 8 SUS304鋼板母材の溶接金属部のE_{4r}-N₂関係

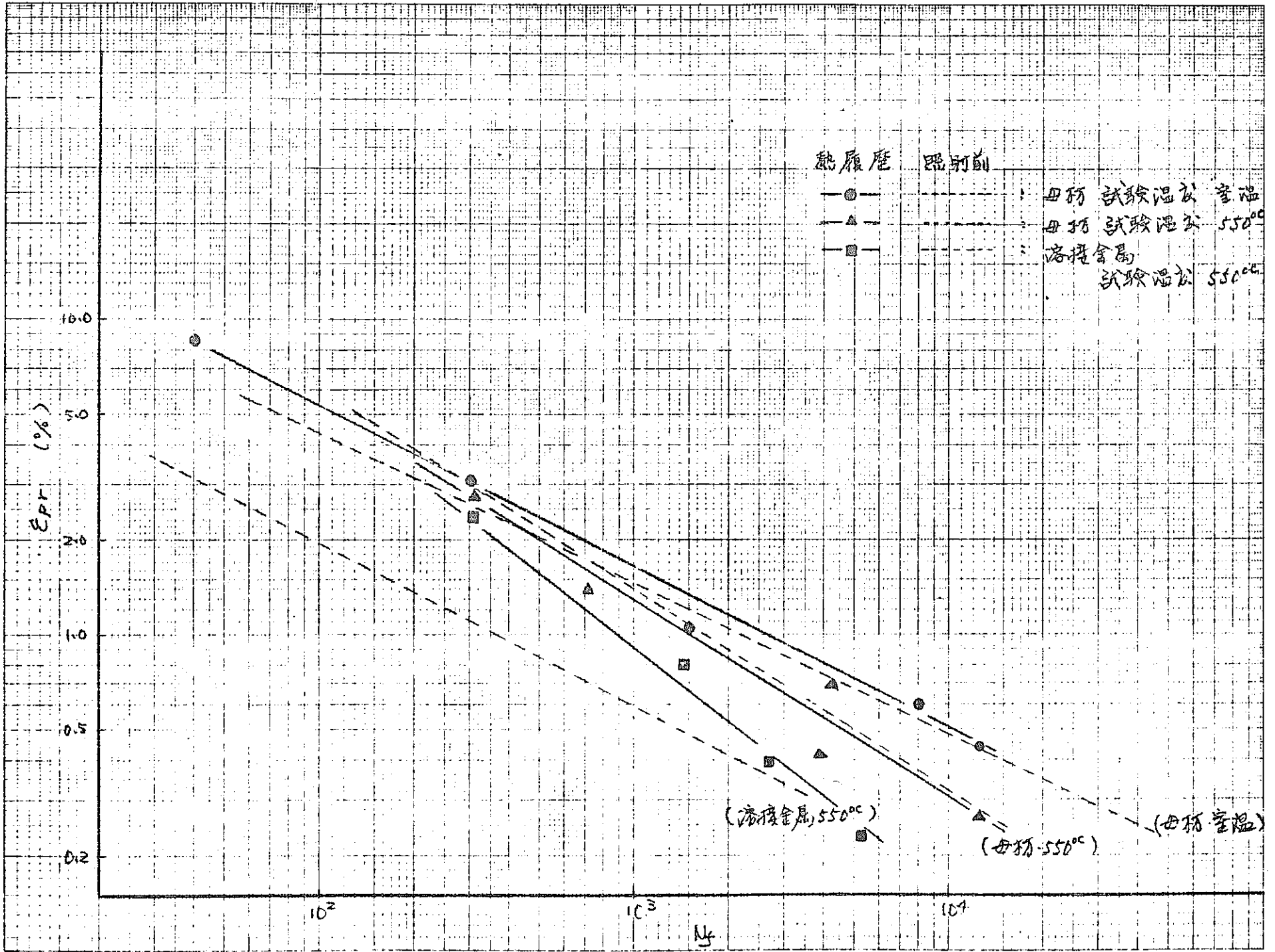


図 9 SUS304鋼板母材および溶接金属部の Epr-Nt 関係

SUS304 母材
試験温度: 室温

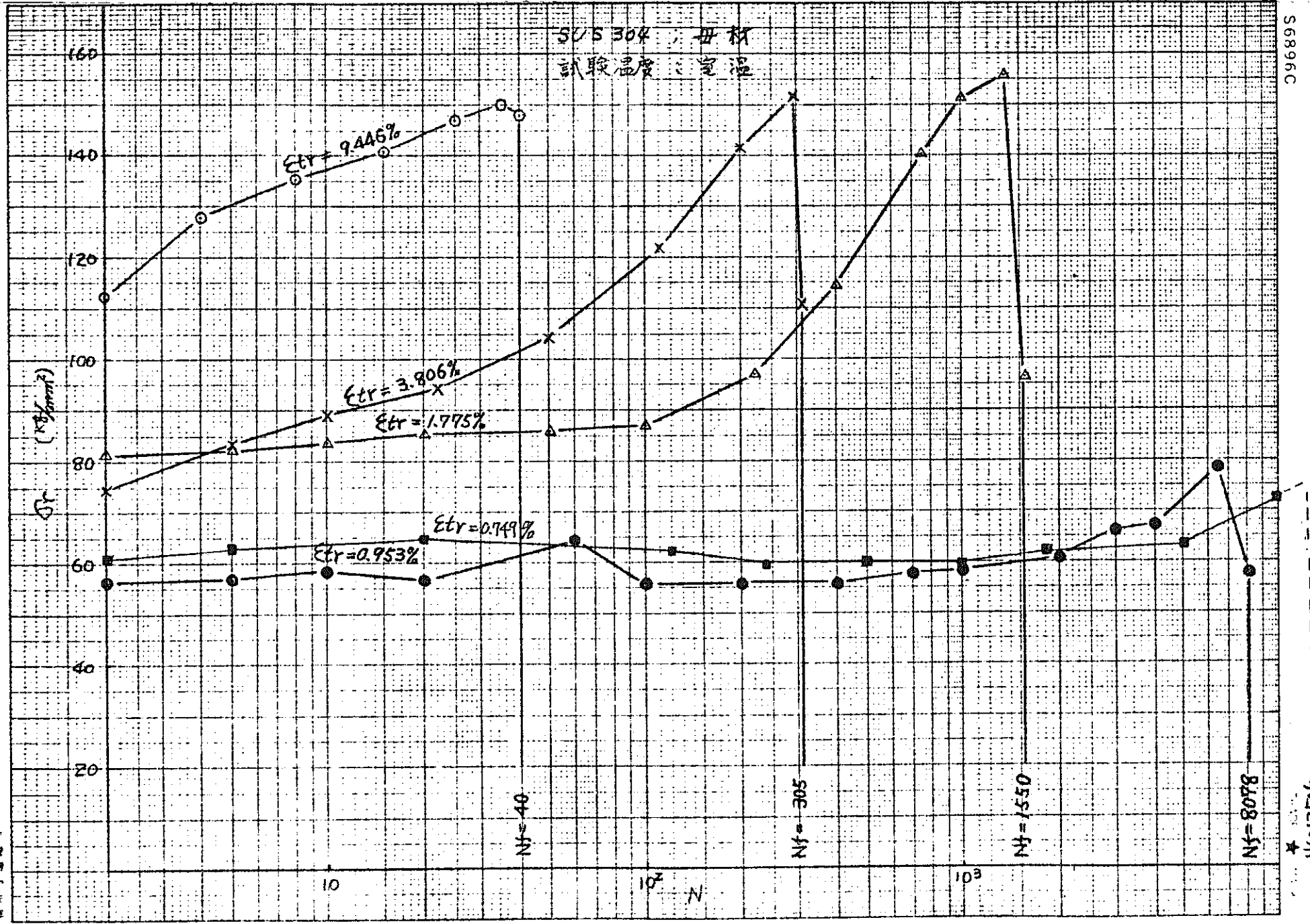


図 10 応力範囲と破断繰返数の関係

JIS A4 SIZE (180mm x 250mm)

S6896C

SUS 304 : 母材
試験温度 : 550°C

σ_r (kg/mm²)

与断点一致

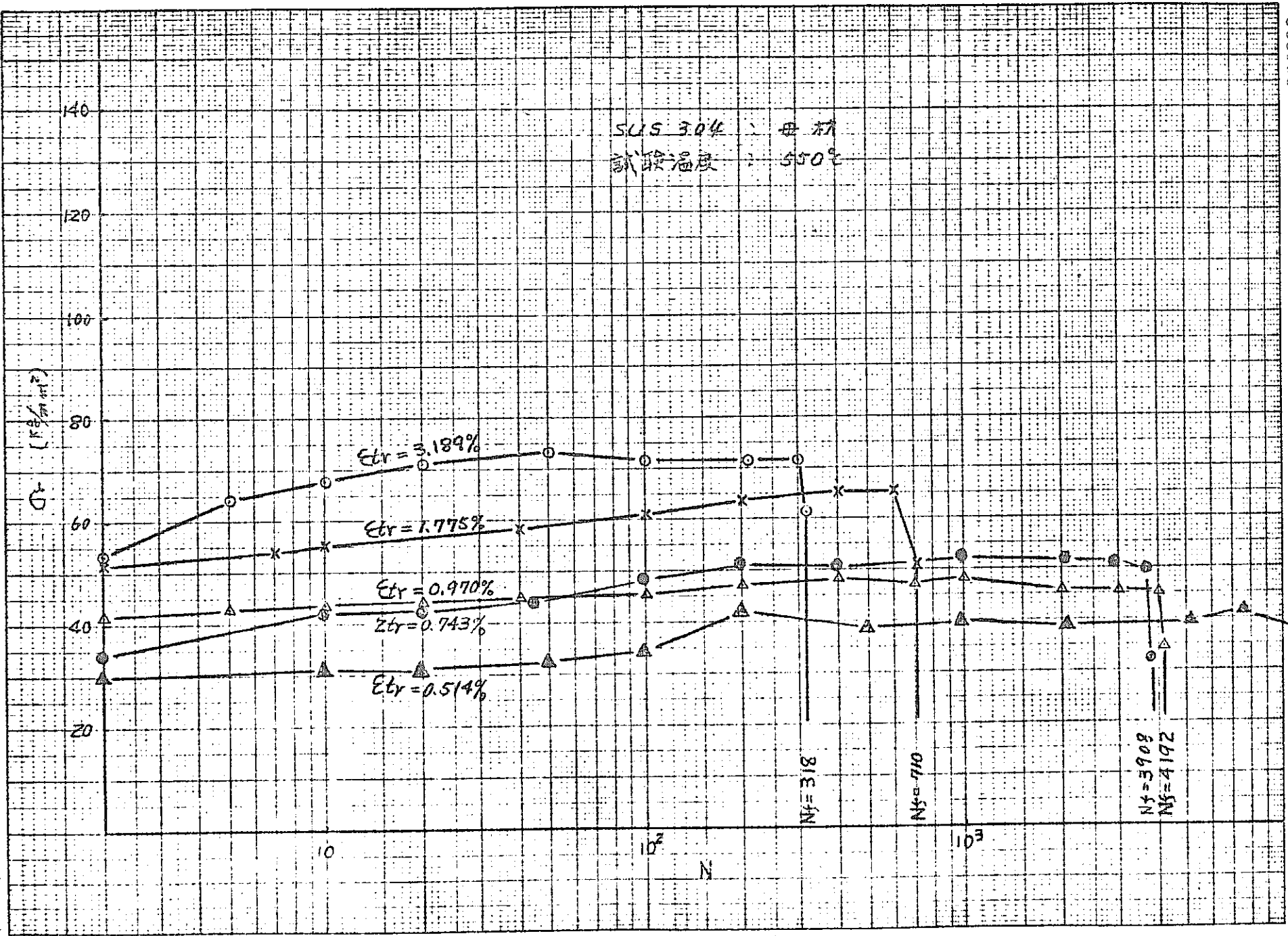


図11 応力範囲と破断繰返数

S4921=4N

SUS 304 : 溶接金属
試験温度 : 550°C

σ_r (kg/mm²)

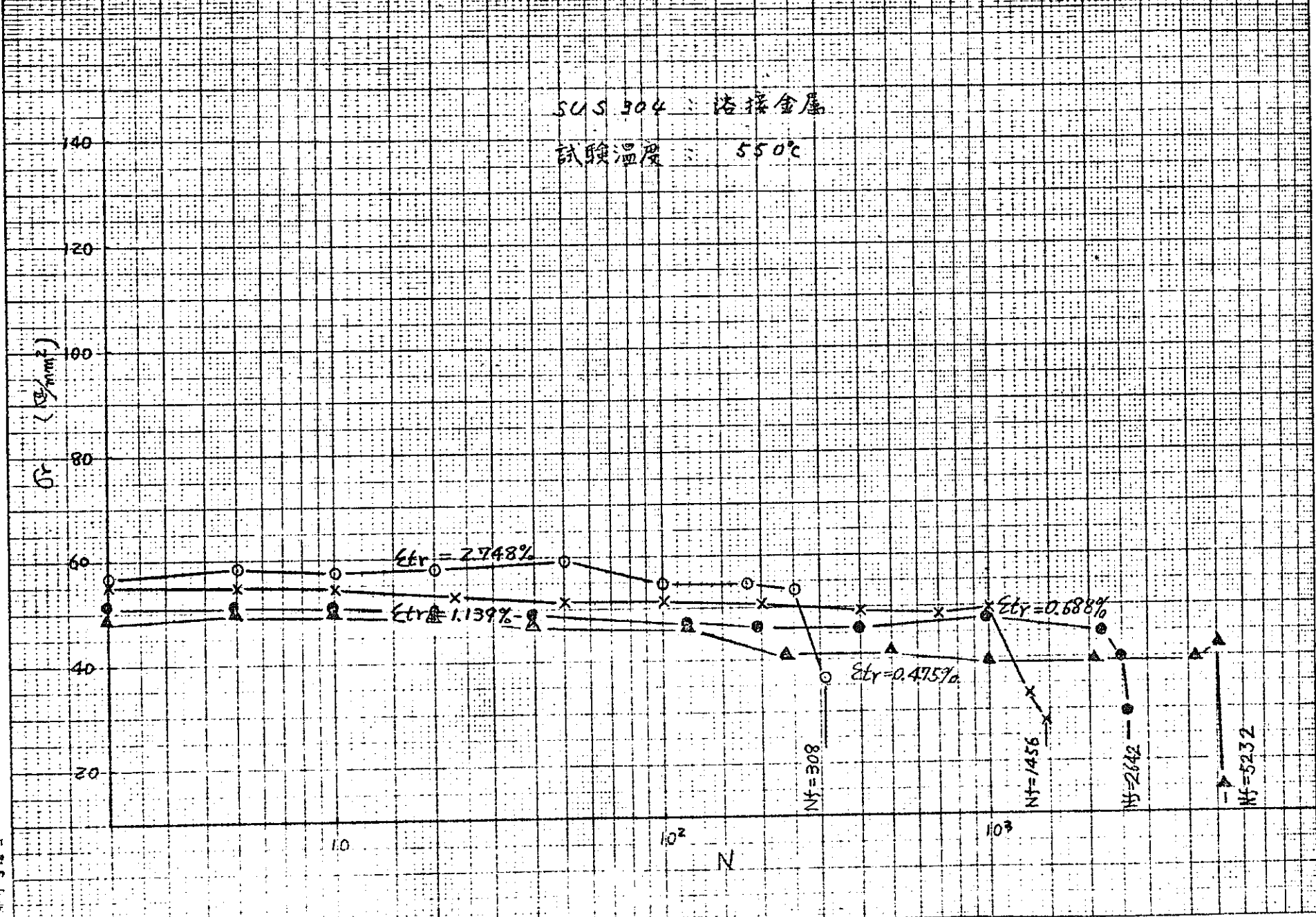


図 12 応力範囲と破断繰返数

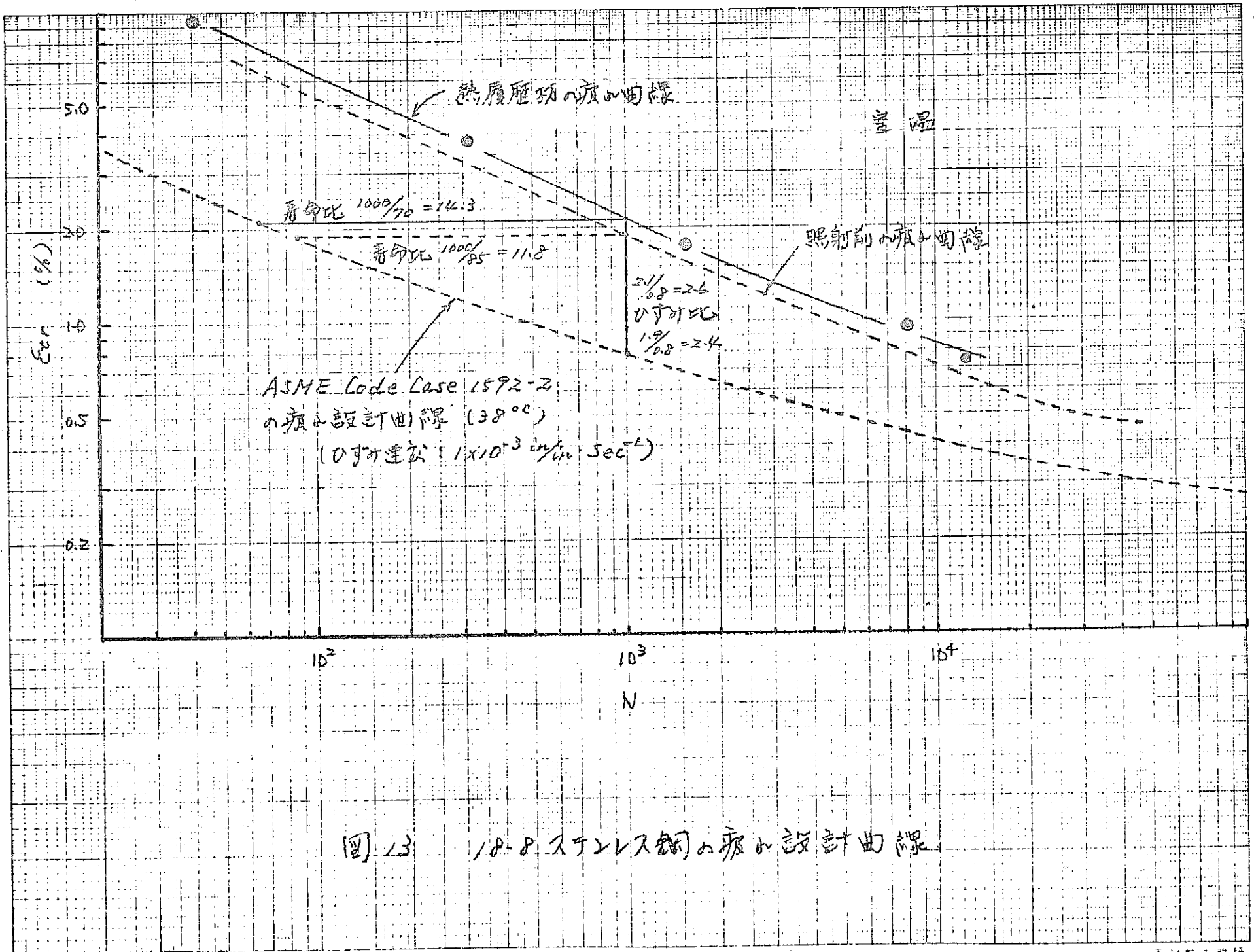


図 13 18-8 ステンレス鋼の疲れ設計曲線

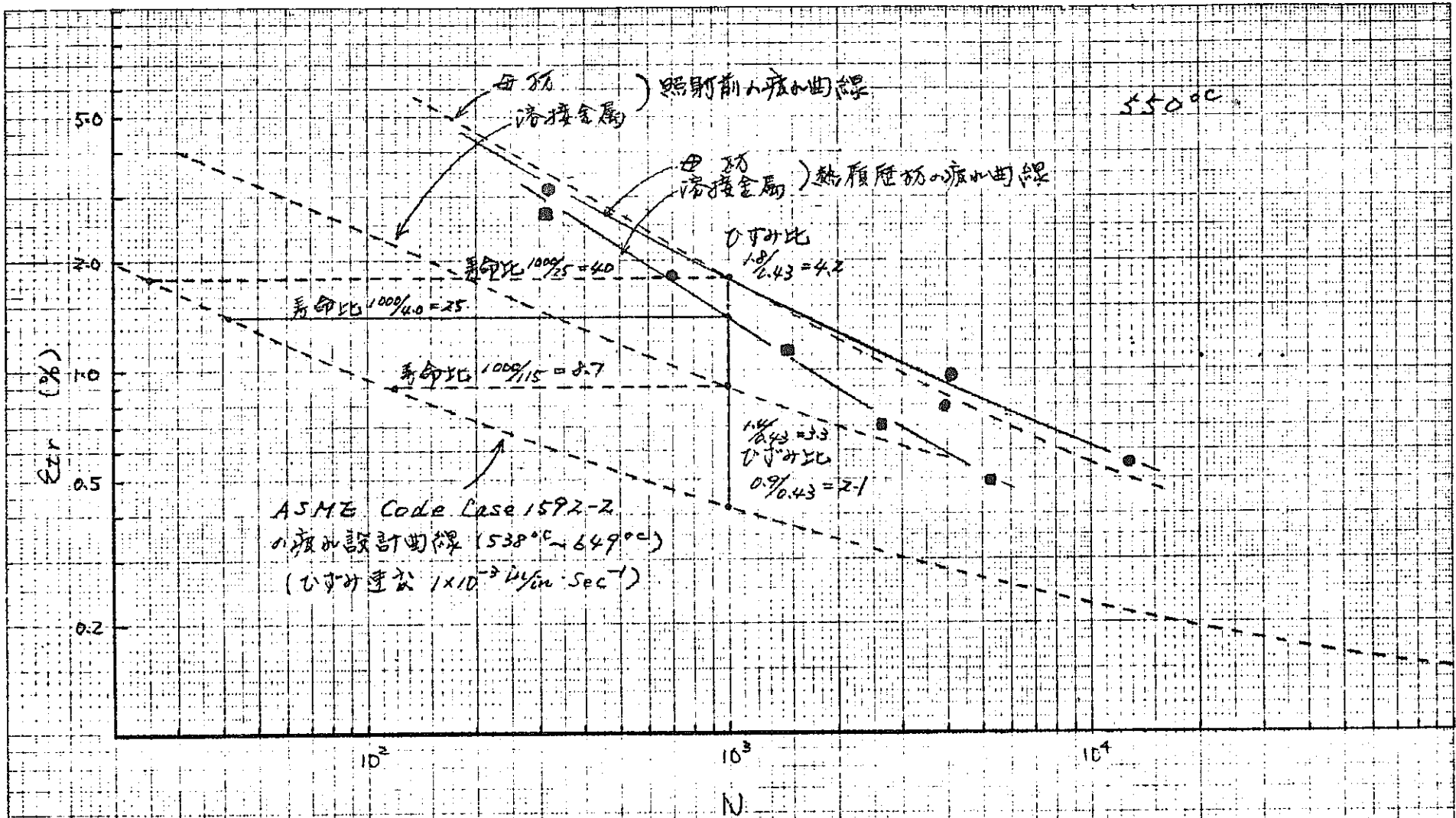


図.14 18-8 ステンレス鋼の疲労設計曲線

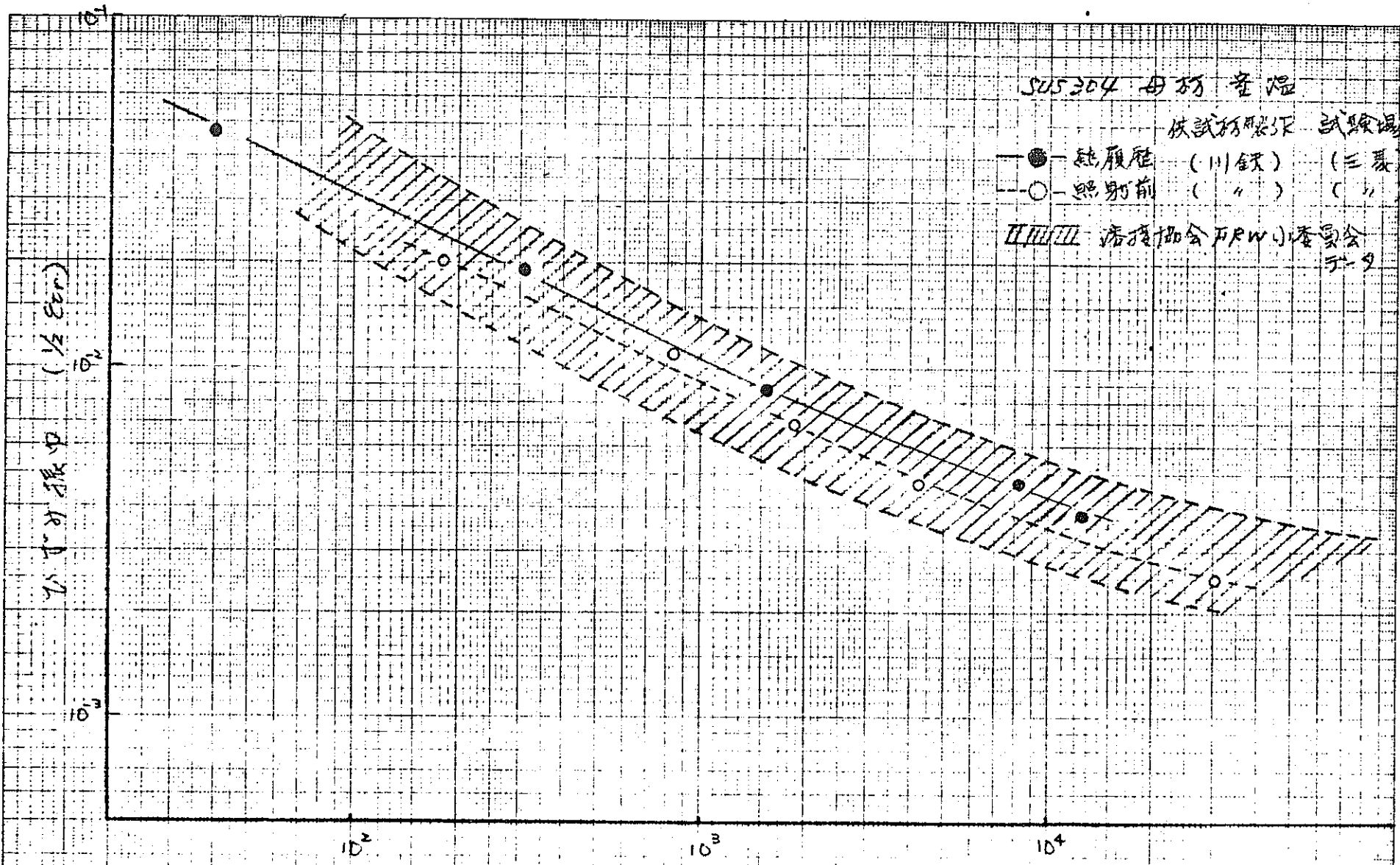


SUS304 母材 常温

依試驗結果 試驗溫度

- 熱履歴 (川鉄) (三菱)
- 照射前 (") (")

||||| 溶接協会 FRW 小委員会 示-9

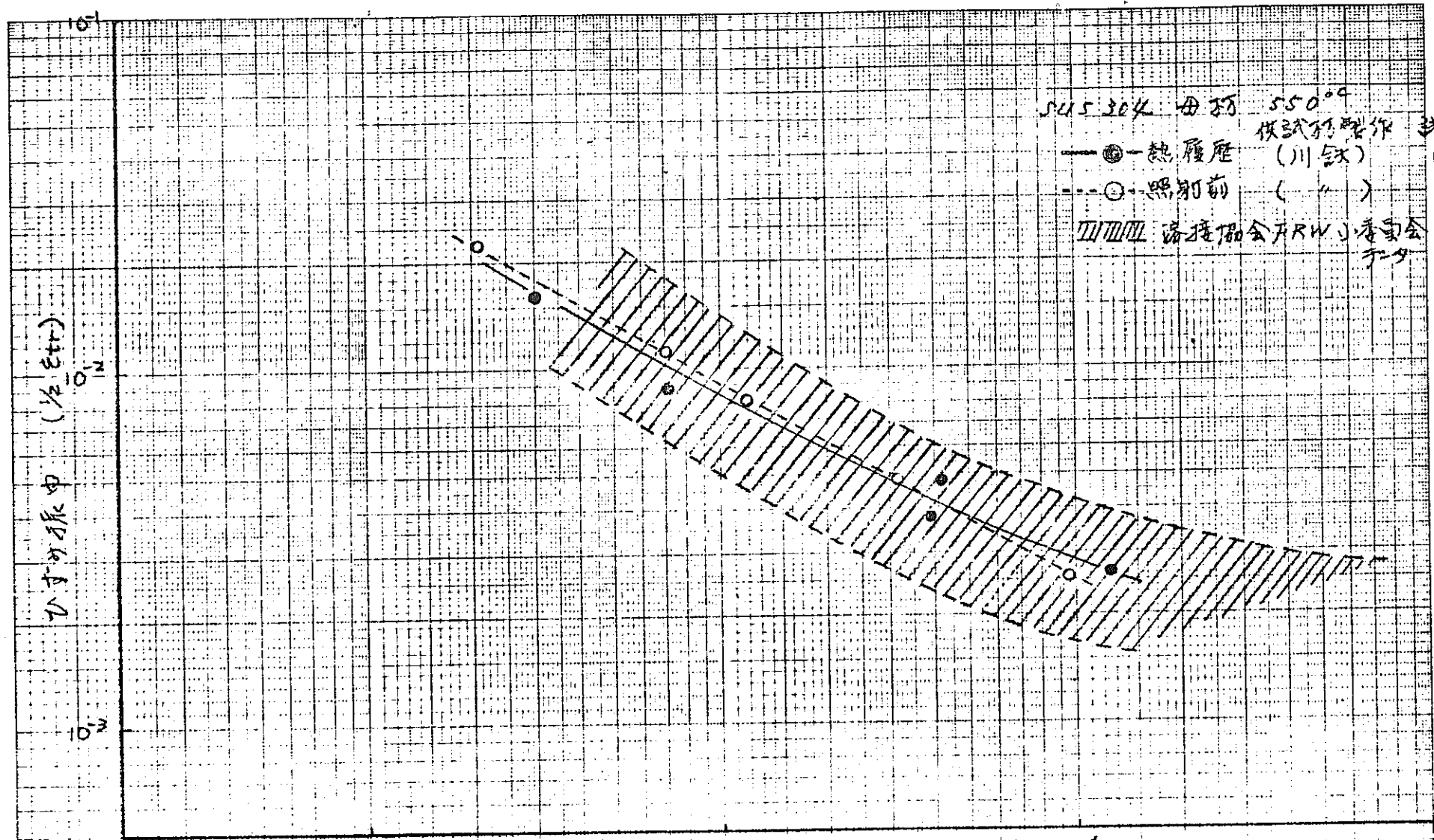


(1/2 E_{tr})
K_I

10² 10³ 10⁴

破断繰返数

図 15 SUS304 母材 常温 1/2 E_{tr} - N 関係



SUS 304 母材 550°C
 ● - 熱履歴 (川鉄) 試験所製作 (三菱)
 ○ - 照射前 (川鉄) (川鉄)
 溶接協会 RWJ 委員会

破断繰返数 (1/2 Etr)

破断繰返数 N_f

図 16 SUS 304 鋼板 母材 550°C の 1/2 Etr - N_f 曲線

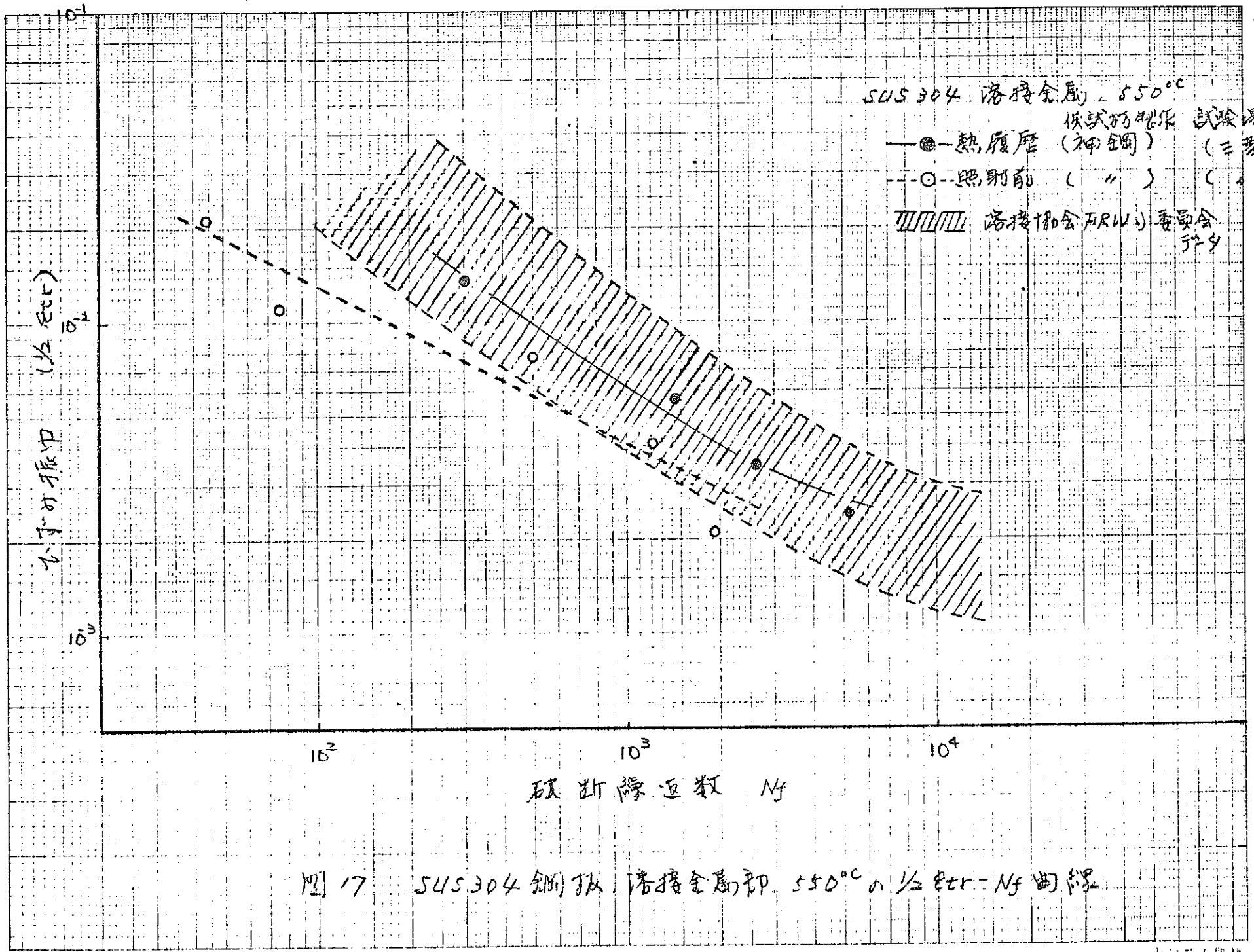


図 17 SUS 304 鋼板 溶接金属部 550°C の 1/2 Str - Nf 曲線

304N タイプステンレス鋼の母材の照射効果に関する研究
(熱履歴材の結果)

1976. 2. 25

新日本製鉄(株)

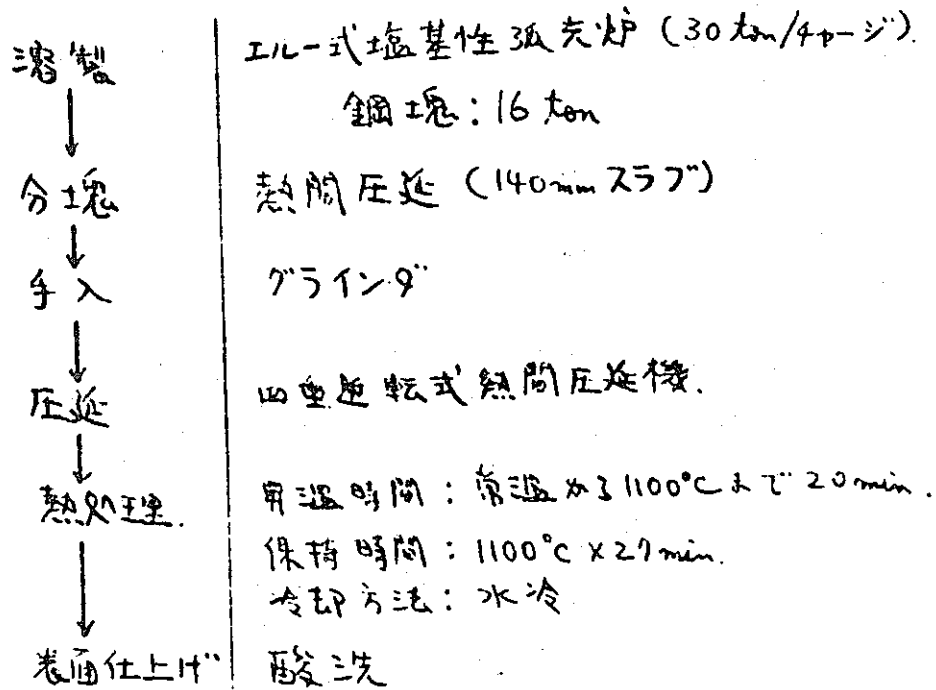
2. 照射前試験および熱履歴後試験

(1) 供試材料

1. 鋼種: YUS304N
2. 鋼番: D93067
3. 板厚: 18mm
4. 供試材の化学成分

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.063	0.63	2.57	0.025	0.007	7.8	18.3
Mo	Cu	Co	Nb	B	N	
0.16	0.027	0.20	0.125	0.0010	0.192	

5. 製造履歴



超音波探傷試験

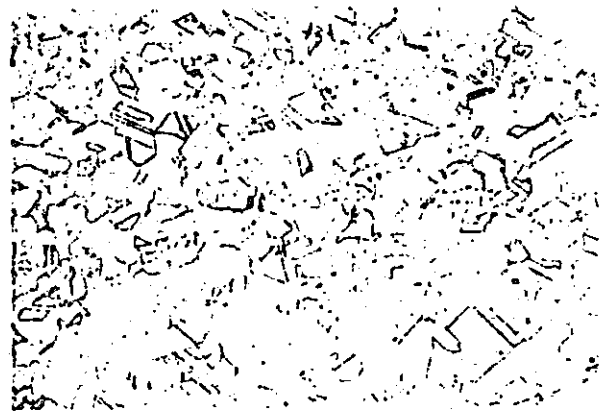
探傷器 : UM721
周波数 : 5M.Hz
探傷結果 : 欠陥波なし

(2). 試験項目.

- 1). 組織観察(矢頭)
- 2). 常温～高温引張試験
- 3). 常温～高温シルビエ試験(照射前のみ)

(3). 試験結果.

- 1). 矢頭組織観察.



X200

2). 常温～高温引張試験.

a). 試験条件

- 温度 : 5水準 (R.T., 450, 500, 550, 600 °C)
- 保持時間 : 15 min
- 引張速度 : 0.5%/min (クロスヘッドスピード: 0.15 mm/min)
- 試験機 : 島津製オートグラフ IS10T
- 試験片 :

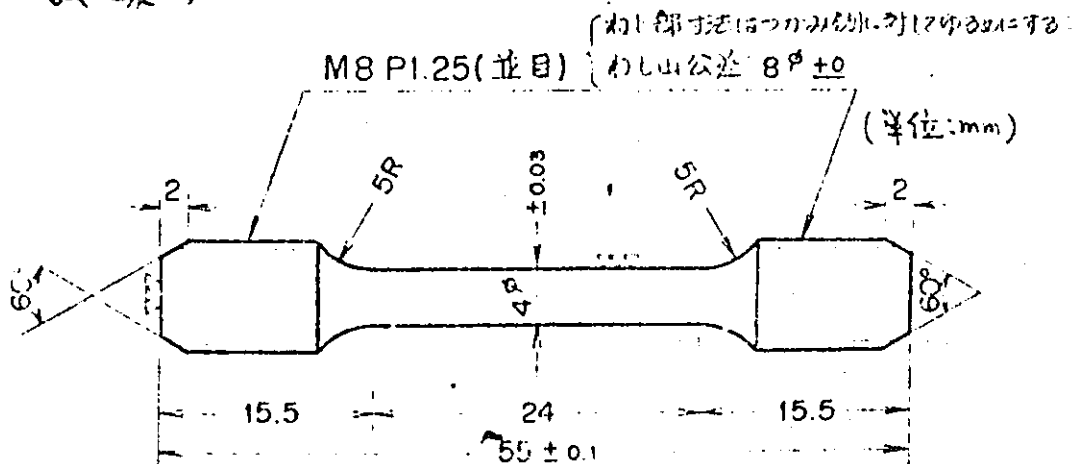


表1. 照射前の引張特性

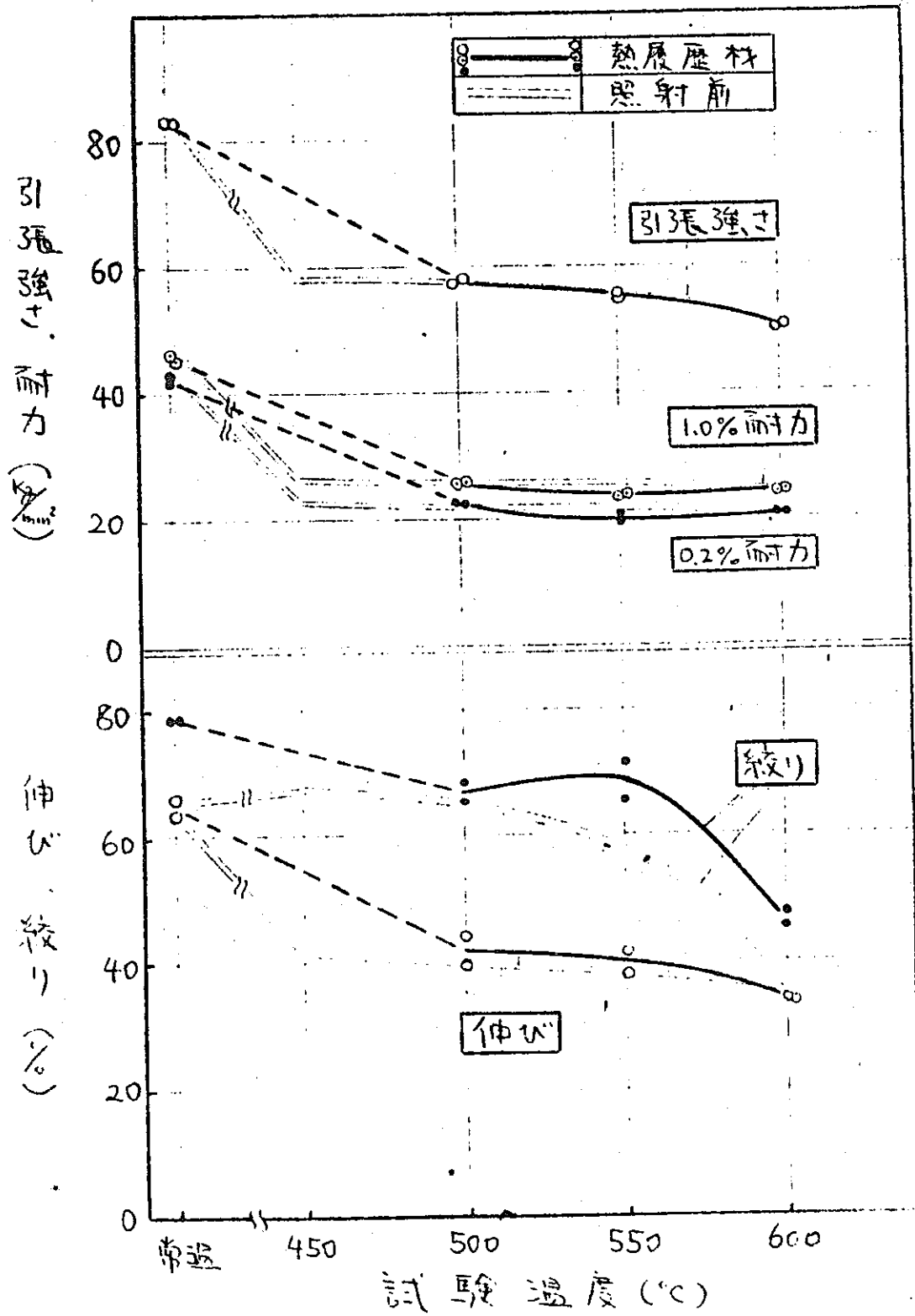
試験温度	0.2%耐力(%)	1.0%耐力(%)	引張強さ(%)	伸び(%)	絞り(%)	破断位置	破断部の変形率(%)
常温 (20°C)	43.5	48.8	84.4	65.5	65.5	A	約5%
	42.2	47.1	84.2	60.0	65.5	"	"
450°C	21.6	25.3	57.8	42.0	67.9	"	C
	23.2	27.3	58.6	41.5	67.6	"	"
500°C	22.4	26.1	57.8	39.5	69.2	"	"
	20.2	24.3	57.2	40.0	61.1	"	"
550°C	21.0	25.2	55.3	37.5	61.2	B	"
	22.2	25.8	55.1	38.5	54.6	A	"
600°C	19.5	23.1	51.1	36.0	39.3	"	"
	20.7	24.9	50.8	35.0	45.6	"	"

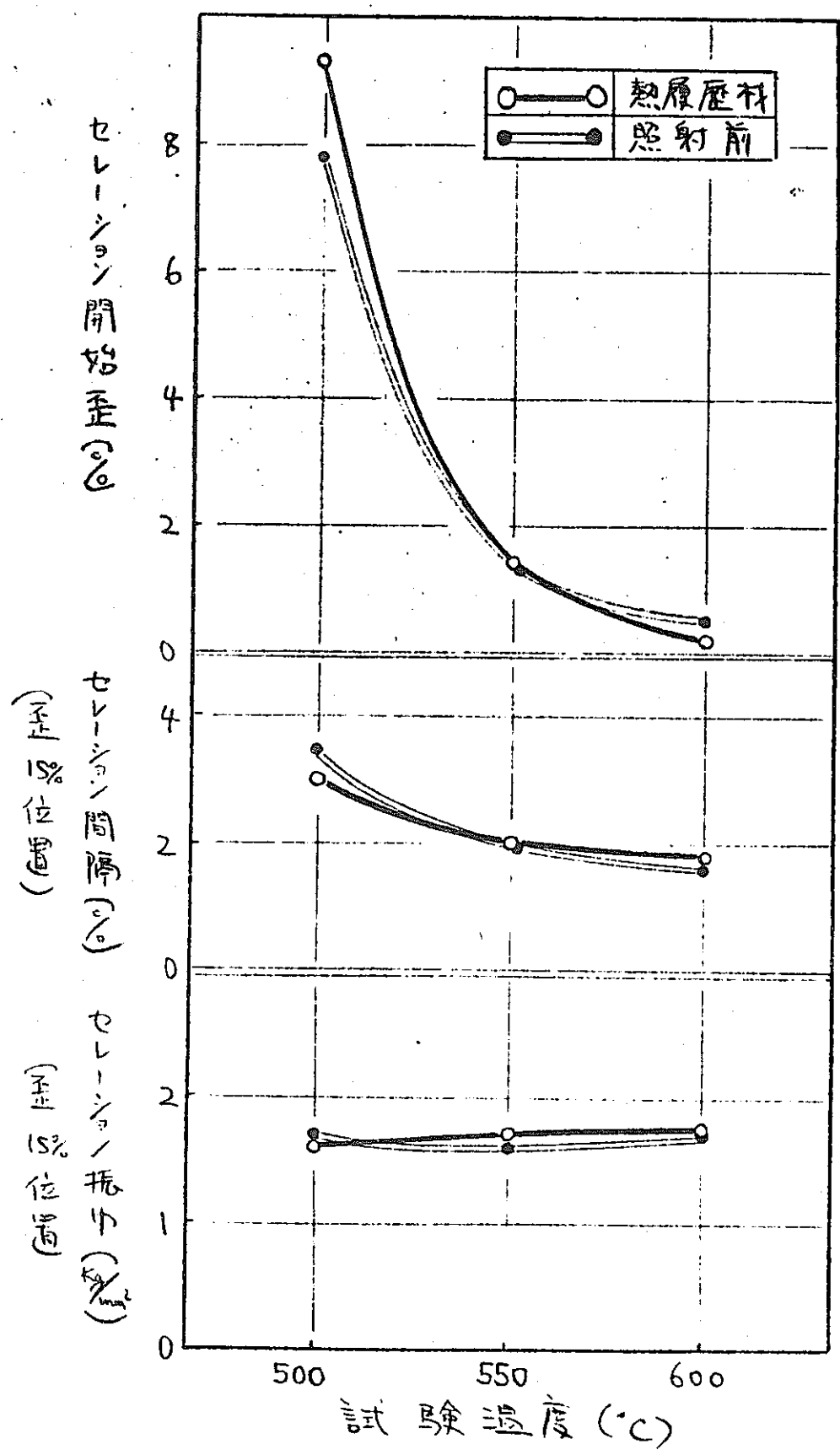
表2. 熱履歴材の引張特性

試験温度	0.2%耐力(%)	1.0%耐力(%)	引張強さ(%)	伸び(%)	絞り(%)	破断位置	
常温 (21°C)	42.8	46.2	83.1	65.8	78.6	A	
	42.0	45.1	82.8	63.3	78.6	"	
500°C	22.3	25.7	58.0	39.6	65.5	"	
	22.5	26.0	57.5	44.2	62.5	"	
550°C	19.6	23.2	55.3	41.7	71.5	B	
	20.4	23.7	54.6	38.2	65.5	A	
600°C	20.6	24.3	50.1	34.2	45.6	"	
	20.5	23.9	50.4	33.8	47.5	"	

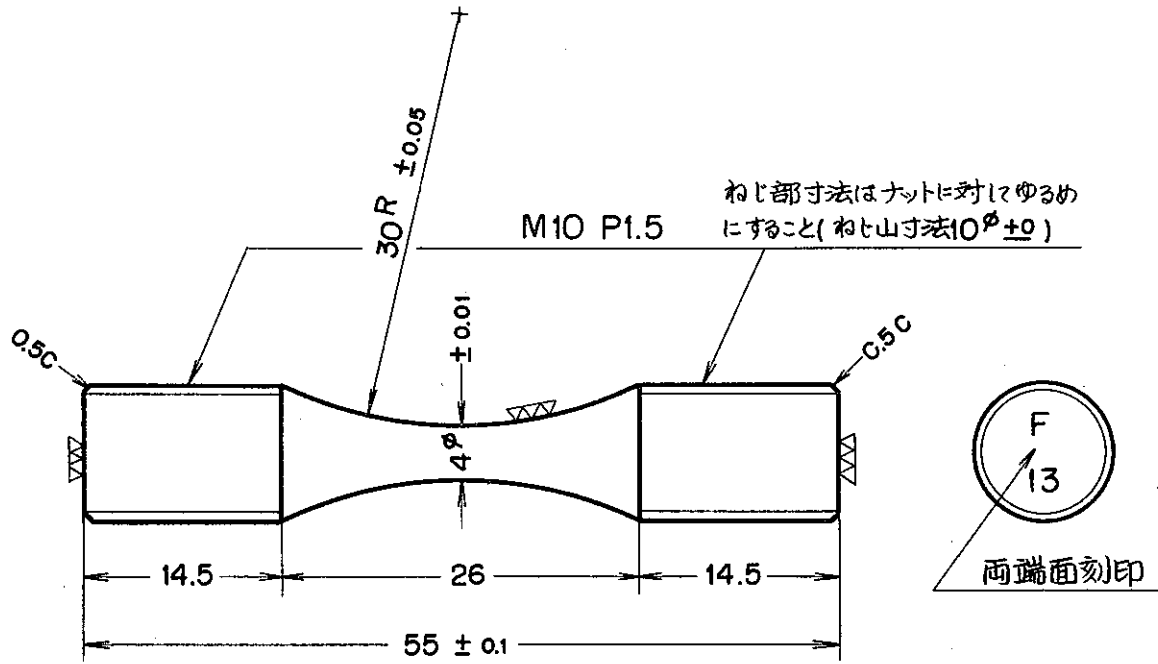
PV.5に照射前と熱履歴後の引張特性を比較して示す。引張強さ、耐力は熱履歴の影響とはほとんど変化しているが、伸び値に対する影響は小さいが、絞りは550、600°C (熱履歴材) の方が10%程大きくなっている。

ヒレーノノ等重かに関し、これは、ヒレーノノ開始直、同時、100°C以下でも熱履歴の影響が認められる。





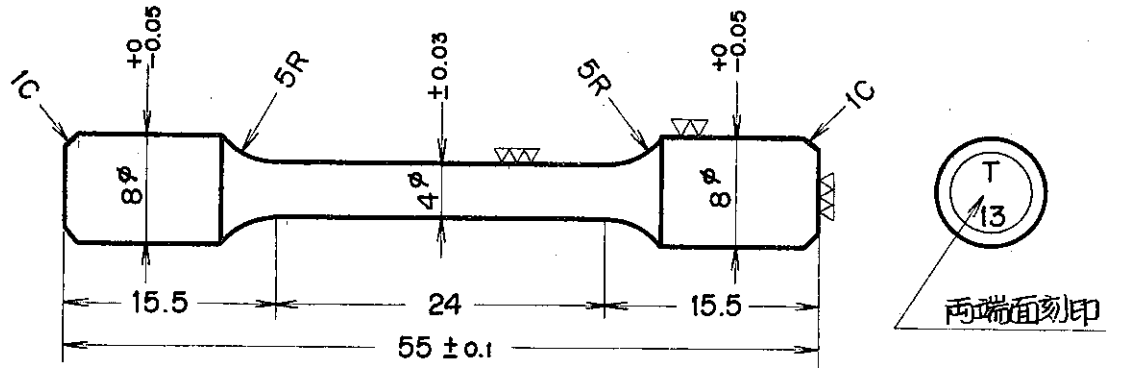
付 録 試 験 片 の 形 状



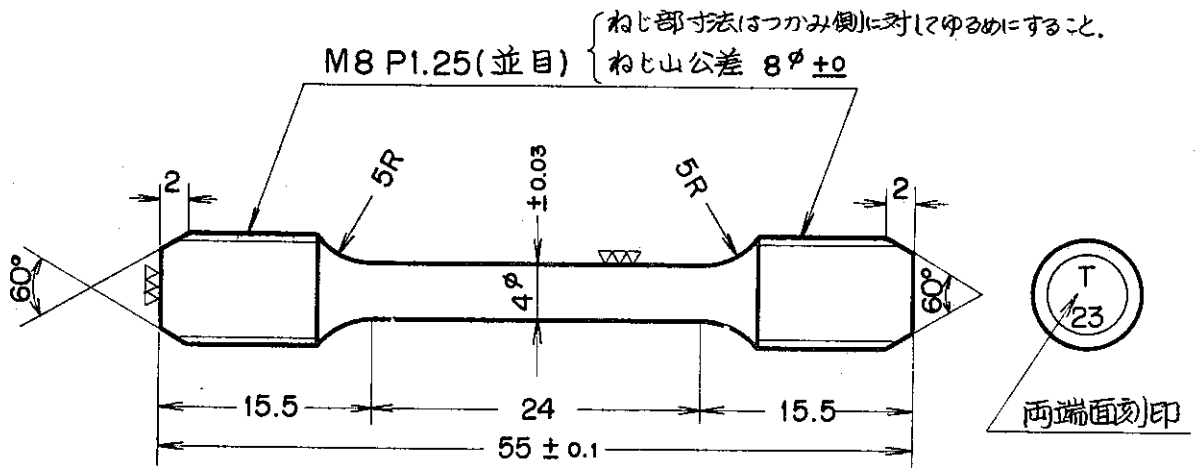
尺度 2/1

単位 mm

図 3 疲れ試験片



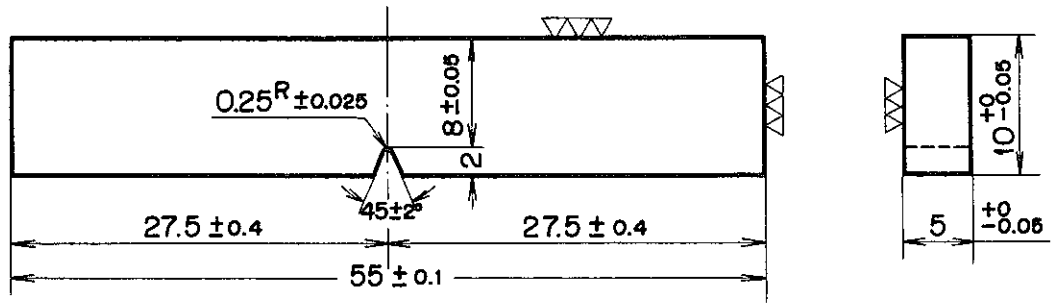
(a) 室温引張試験片



(b) 高温引張試験片

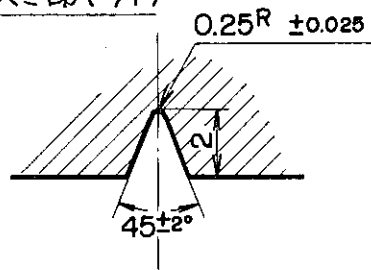
単位 mm
尺度 2/1

図 4 引張試験片



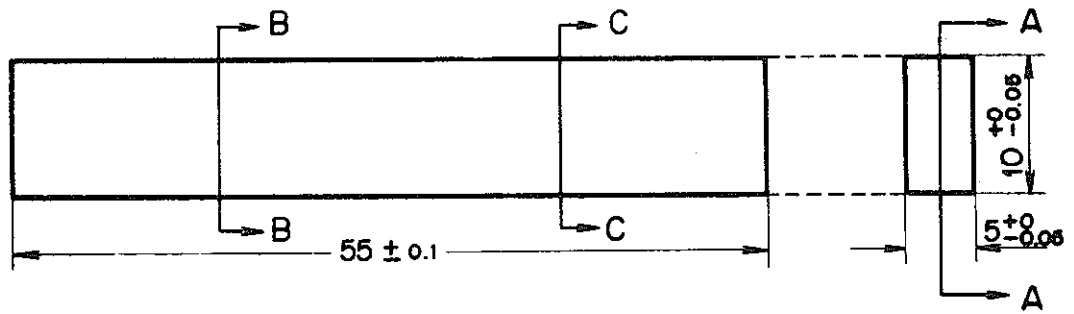
尺度 2/1

切欠き部 (5/1)

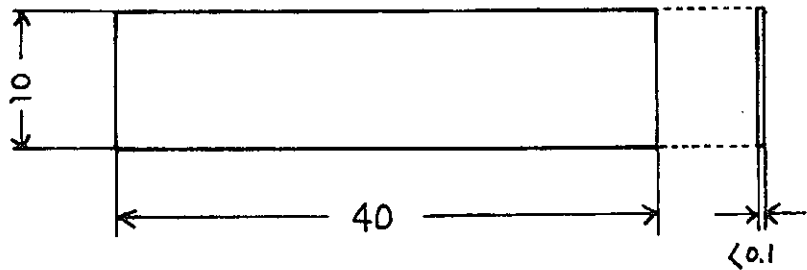


単位 mm

図5 サブサイズシャルピー衝撃試験片



被覆管(直方体)



薄膜試験片

尺度 2/1
単位 mm

図 6 薄膜試験片被覆管(直方体)