

SUS304の高温多軸疲労挙動の検討

(第2報、非比例負荷下におけるクリープ疲労強度の検討)

1990年1月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配布するものです。従って、その取扱いには十分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。

SUS304の高温多軸疲労挙動の検討

(第2報、非比例負荷下におけるクリープ疲労強度の検討)

浅山 泰, 青砥 紀身,
和田 雄作*

要 旨

著者らは前報において、高温構造材料の多軸負荷下における疲労およびクリープ疲労挙動の把握と解明の第一段階として、550℃においてSUS304の軸力-ねじり重畳負荷による高温多軸疲労試験をおこない、(1)非比例負荷下では比例負荷に比較して疲労寿命が1/2～1/3程度に低下すること、(2)この寿命低下はひずみ経路を考慮したMises型の相当ひずみ範囲によりほぼ合理的に評価できることを明らかにした。

本報ではこの第二段階として、比例および非比例負荷下でクリープ疲労試験を行い、次の知見を得た。

- (1) 非比例クリープ疲労下でも比例クリープ疲労に比較してさらに1/2～1/5程度に寿命の低下が生じる。
- (2) 非比例クリープ疲労においても応力緩和は軸力0、せん断応力0の原点に向かって比例的に生じる。
- (3) 非比例クリープ疲労寿命は、相当ひずみ範囲としてひずみ経路を考慮したMises型相当ひずみを用い、ひずみ保持中の応力緩和をMises型の相当応力で評価し、これらに基づき単軸疲労特性、単軸クリープひずみ特性及び単軸クリープ破断特性から疲労損傷、クリープ損傷を求め、これらを線型損傷則に用いることにより工学的にほぼ合理的な評価を行える。

* 機器構造開発部・材料開発室

Evaluation of High Temperature Multiaxial Fatigue Behavior of 304 Steel (2nd Reprint)

Tai Asayama * , Kazumi Aoto *

Yusaku Wada*

Abstract

The authors have conducted a series of axial and torsional biaxial fatigue/creep-fatigue tests with 304 stainless steel at 550 °C and obtained the following conclusions.

- 1) A fatigue life under nonproportional loading reduces to 1/2-1/3 of that under proportional loading.
- 2) The life reduction under nonproportional loading can be accounted for by path-dependent Mises type equivalent strain range.

In this report, the results of creep-fatigue tests under proportional and nonproportional loading are examined. The following results were obtained.

- 1) A creep-fatigue life under nonproportional loading reduces to 1/2-1/5 of that under proportional loading.
- 2) Stress relaxation occurs towards origin proportionally (to the point where axial and torsional loads are zero) even under nonproportional creep-fatigue loading.
- 3) A creep-fatigue life under nonproportional loading can reasonably be evaluated based on the fatigue properties and the creep properties obtained under uniaxial loading conditions, using the path dependent Mises type equivalent strain range and Mises equivalent stress.

* Materials development section, O-arai Engineering Center, PNC

目 次

1.	はじめに	1
2.	多軸疲労／クリープ疲労試験の方法	2
2.1	試験片及び試験装置	2
2.1.1	供試材及び試験片	2
2.1.2	試験装置	2
2.2	試験条件	2
2.2.1	比例負荷試験	2
2.2.2	非比例負荷試験	3
3.	多軸疲労／クリープ疲労試験の結果	8
3.1	多軸疲労／クリープ疲労寿命	8
3.1.1	比例負荷試験	8
3.1.2	非比例負荷試験	8
3.2	応力ひずみ応答の検討	9
3.2.1	繰り返し応力ひずみ関係	9
3.2.2	応力緩和挙動の検討	10
4.	線型損傷則による多軸疲労／クリープ寿命の評価	23
4.1	線型損傷則を適用する上での前提	23
4.2	線型損傷則によるクリープ疲労損傷の評価	24
4.2.1	疲労損傷	24
4.2.2	クリープ損傷	24
4.2.3	多軸疲労／クリープ疲労寿命の予測	25
4.3	線型損傷則による損傷評価における問題点	39
5.	まとめ及び今後の課題	40
5.1	まとめ	40
5.2	今後の課題	40

謝 辞	44
参考文献	45

表リスト

表 2.1	供試材の熱処理と化学成分	4
表 2.2	供試材の機械的性質	4
表 2.3	試験条件一覧表	5
表 3.1	多軸疲労／クリープ疲労試験の結果	11
表 3.2	ひずみ経路を考慮したMises型の相当ひずみ	12
表 3.3	負荷形態による応力緩和量の変化	13
表 4.1	クリープ損傷の計算方法	26
表 4.2	多軸疲労／クリープ疲労損傷評価の結果	27
表 4.3	多軸疲労／クリープ疲労寿命の評価結果	28

図リスト

図 2. 1	試験片の形状および寸法	6
図 2. 2	ひずみ経路の説明図	7
図 3. 1	ひずみ範囲とクリープ疲労寿命の関係 (ASME式相当ひずみ)	14
図 3. 2	ひずみ範囲とクリープ疲労寿命の関係 (経路を考慮した相当ひずみ)	15
図 3. 3	ひずみ範囲と応力範囲の関係 (ASME式相当ひずみ)	16
図 3. 4	ひずみ範囲と応力範囲の関係 (経路を考慮した相当ひずみ)	17
図 3. 5	非比例負荷下の応力経路 (ひずみ保持波)	18
図 3. 6	応力緩和の挙動	19
図 3. 7	応力緩和の挙動	20
図 3. 8	応力緩和の挙動 (Mises型相当応力)	21
図 3. 9	緩和開始応力と応力緩和量の関係	22
図 4. 1	線形則による損傷評価	29
図 4. 2	クリープ疲労寿命評価の結果	34

1. はじめに

大型高温プラントの設計をより合理化するとともにその信頼性の向上を図るためには、供用中の負荷条件下における構造材料のクリープ疲労強度を的確に把握することが重要なポイントとなる。特に大型プラントにおいては、機械負荷と熱負荷の重畳によりひずみの保持を伴う複雑な多軸応力状態が生じる可能性があるため、この点に対する評価法の確立が必要である。これに対し、従来クリープ疲労の研究は主として単軸応力状態で得られた知見に基づいて行われており、これを多軸応力状態へ合理的に拡張するためには、多軸状態で得られた試験データによる検証を行わなければならない。このような観点から、近年多軸応力状態における疲労強度に関する研究が活発となり、比例負荷および非比例負荷状態における疲労強度評価法の提案が行われており^{(1)~(5)}、著者らも前報⁽⁶⁾で多軸疲労寿命の評価法を検討し、相当ひずみ範囲としてASME code流のひずみ範囲にかわり、ひずみ経路を考慮したMises型ひずみ範囲を用いることにより合理的評価が可能となることを示した。しかし、実プラントにおける負荷状態により近いと考えられるひずみ保持を含む多軸クリープ疲労強度に関する研究例は非常に少ない^{(7)~(10)}。特に、最も厳しい強度低下が生じると予想される非比例負荷下におけるクリープ疲労強度に関する報告⁽¹¹⁾はほとんどないのが実状といえる。

本報では、SUS304について比例負荷に加えて非比例負荷下で疲労及びクリープ疲労試験を行い、報告例のほとんどない非比例負荷状態におけるクリープ疲労特性の把握を行った。また、単軸クリープ特性に基づく多軸応力緩和挙動の評価法を検討するとともに線型損傷則による損傷評価を試み、非比例負荷を含む多軸クリープ疲労に対する線型損傷則の適用性を検討した。

2. 多軸疲労／クリープ疲労試験の方法

2.1 試験片及び試験装置

2.1.1 供試材及び試験片

供試材は、SUS304の熱間加工板（A7材）であり、固溶化熱処理を施してある。化学成分を表2.1に、機械的性質を表2.2に示す。

試験片は熱処理後、機械加工により製作した。寸法・形状は図2.1に示す通りであり、厚さ／外径比は0.065である。

2.1.2 試験装置

試験装置は軸力－ねじり重畳負荷型の電気油圧サーボ疲労試験装置である。詳細は前報⁽⁶⁾に示した通りであるのでここでは省略する。

2.2 試験条件

本報では現状ではほとんど報告例のない非比例クリープ疲労試験を主眼としたが、あわせてその他の条件のデータの補強もおこなった。試験条件を前報と併せて以下に述べる。また、試験条件一覧表を表2.3に、ひずみ経路の説明図を図2.2に示す。

2.2.1 比例負荷試験

〔疲労試験〕

前報で、軸力（軸ひずみ範囲 $\Delta \epsilon$ に対する $\Delta \tau$ の比 $\lambda = 0$ ）、純ねじり（ $\lambda = \infty$ ）、比例重畳負荷（ $\lambda = 1.7$ ）の疲労試験（三角波）をASME code型の相当ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{eq}$ （定義は3.2節参照） $= 0.5, 1.0, 1.5\%$ について行った。ひずみ速度は $0.1\% / \text{sec}$ とした。

〔クリープ疲労試験〕

本報では比例重畳負荷（ $\lambda = 1.7$ ）について軸ひずみ引張ピークに保持時間（ $t_h = 1.0 \text{hr}$ ）を設けたクリープ疲労試験を行った。この場合、ひずみ変動部は正弦波とし、公称ひずみ速度（周期の半分をひずみ範囲で割った値）は $0.1\% / \text{sec}$ とした。相当ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{eq}$ は 1.0% とした。

2.2.2 非比例負荷試験

〔疲労試験〕

前報で、非比例疲労試験 ($\lambda = 1.7$, 軸ひずみとねじりひずみの位相差 $\phi = 90^\circ$, 正弦波, 公称ひずみ速度 $0.1\%/sec$) を $\Delta \varepsilon_{\text{eq}} = 1.0\%$ について行った。

本報では上記試験を $\Delta \varepsilon_{\text{eq}} = 0.7, 0.5\%$ についても行った。

実機において炉容器等の主要構造物は主に等二軸負荷を受けると考えられるが、IHX支持スカート・胴接合部のYピース構造が熱過渡負荷を受けた場合には軸応力とクリープ応力が非比例的に負荷されることが考えられる⁽²²⁾。本研究では実機におけるこのような負荷を想定している。

〔クリープ疲労試験〕

本報では、上記非比例負荷疲労試験にひずみ保持を挿入した非比例クリープ疲労試験を行った。ひずみ保持は単軸クリープ疲労において最も厳しい寿命の低下が生じる軸ひずみ引張ピークで軸ひずみとねじりひずみの両方を保持するものとし、保持時間は60分とした。ひずみ変動部は正弦波とした。この試験を $\Delta \varepsilon_{\text{eq}} = 1.0, 0.7\%$ で実施した。

この保持時間、ひずみ範囲、ひずみ速度は、従来の単軸負荷試験の結果との対比が容易になるように、単軸負荷試験の条件を参考に決定した。

表 2.1 供試材の熱処理と化学成分

熱処理 1100℃×48min WQ
 化学成分 wt%

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti	Al	N	Nb+Ta
0.050	0.60	0.87	0.026	0.002	8.94	18.59	0.11	<0.002	0.013	0.019	<0.003

表 2.2 供試材の機械的性質 (室温)

Yield Strength kg/mm ²	Tensile Strength kg/mm ²	Elongation %
21.8	63.6	71.9

表 2.3 試験条件一覧表

公称ひずみ速度 = 0.1% / sec

負荷形態		ひずみ 範囲比	位相差 °	保持時間 min	相当ひずみ範囲* %
単軸	疲労	0	0	0	0.5, 1.0, 1.5
	クリープ疲労			60	(0.5, 1.0, 1.5)
純ねじり	∞	0		0	0.5, 1.0, 1.5
比例	疲労	1.7		0	0.5, 1.0, 1.5
	クリープ疲労			60	<u>1.0</u>
非比例	疲労	1.7		90	0
	クリープ疲労		60	<u>0.7, 1.0</u>	

* 相当ひずみ範囲はASME code型を用いる。定義は3.2節参照。

(1) ひずみ範囲に下線を付けたものが本報にて取得したデータ。

(2) ひずみ範囲にかっこを付けたものは単軸試験機で取得した参考データ。

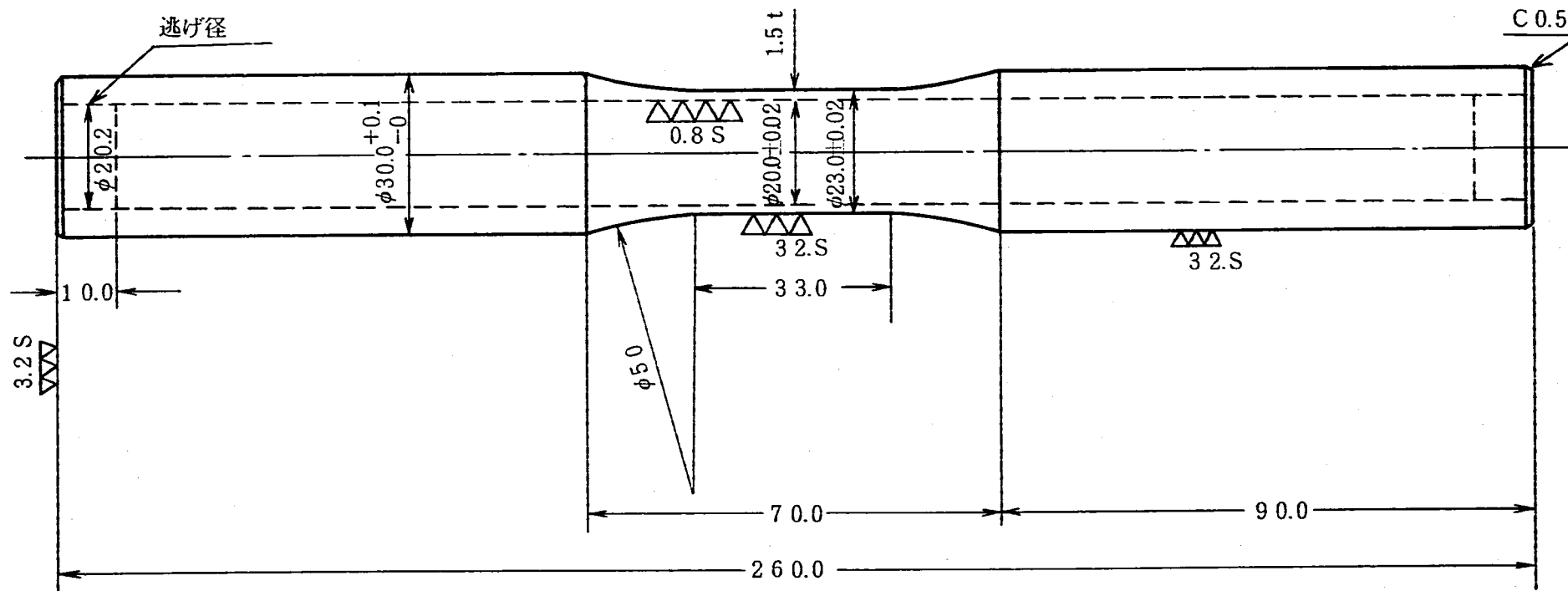


図 2.1 試験片の形状および寸法

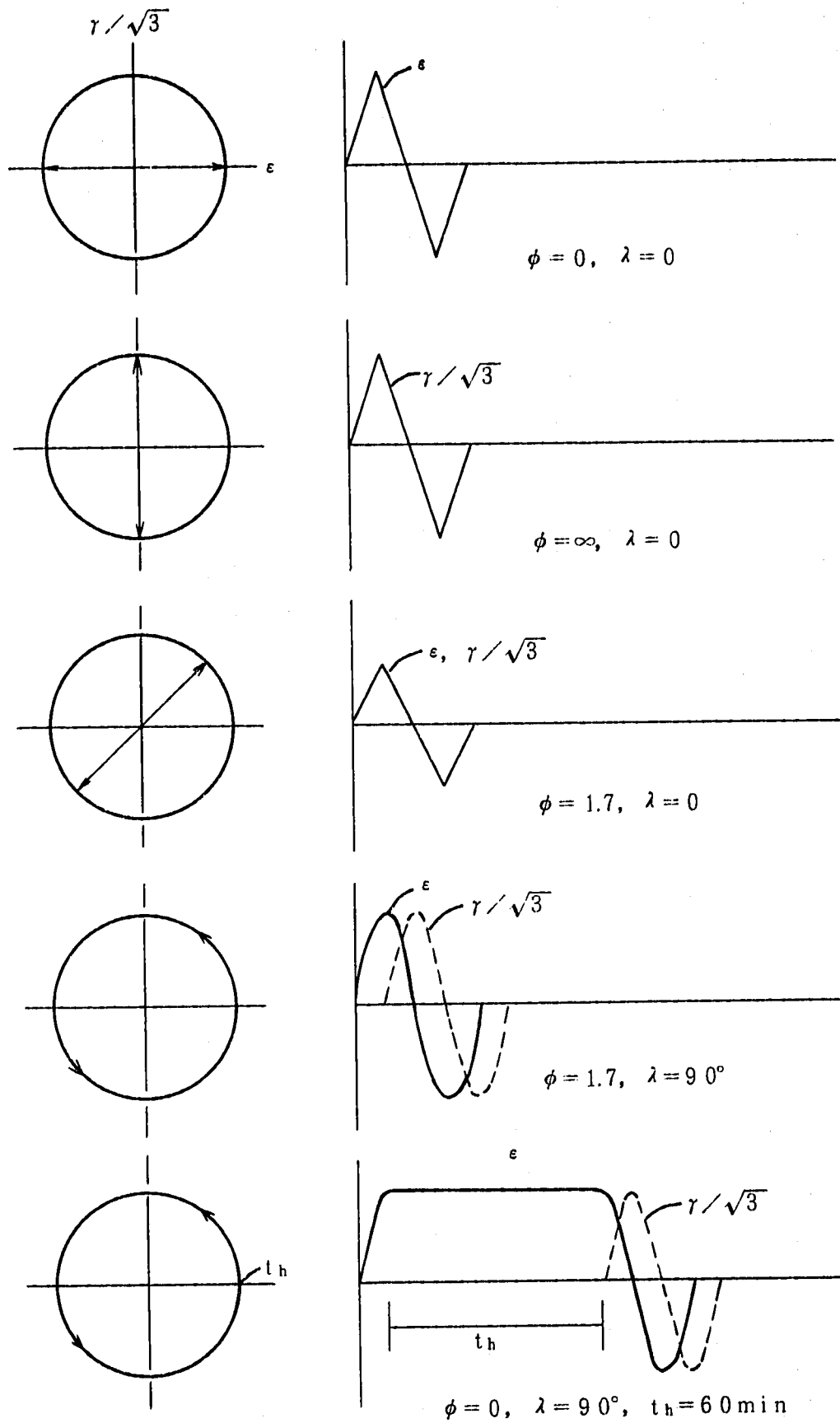


図 2.2 ひずみ経路の説明図

3. 多軸疲労／クリープ疲労試験の結果

3.1 多軸疲労／クリープ疲労寿命

多軸疲労／クリープ疲労試験の結果を表3.1に示す。この結果をASME code型の相当ひずみ範囲で評価した場合を検討する。ASME code型の相当ひずみ範囲と寿命の関係を図3.1に示す。

3.1.1 比例負荷試験

〔クリープ疲労試験〕

比例クリープ疲労寿命（図3.1中■印）は比例疲労寿命（□）に対して約1/3程度に低下することが分かった。この寿命低下の程度は単軸クリープ疲労寿命が単軸疲労寿命に対して低下する割合とほぼ同程度である。疲労条件下で比例負荷（□）が単軸負荷（○）に対して若干長寿命となる分だけ、クリープ疲労条件下でも比例クリープ疲労（■）のほうが単軸クリープ疲労（●）よりも若干長寿命となっている。

3.1.2 非比例負荷試験

〔疲労試験〕

$\Delta \varepsilon_{e,q} = 0.5 \sim 1.0\%$ の範囲では、非比例疲労寿命（▽）の単軸疲労寿命（平均傾向）に対する低下の割合は1/7～1/4程度である。この割合のひずみ範囲に対する依存性は特に観察されない。

〔クリープ疲労試験〕

非比例負荷クリープ疲労試験の結果（▼）より、疲労条件下で最も厳しい寿命低下を示す非比例疲労（▽）にひずみ保持時間を挿入することにより、さらに寿命の低下を生じることが明らかになった。保持時間のない場合に対する寿命低下の割合は、

$\Delta \varepsilon_{e,q} = 0.7 \sim 1.0\%$ の範囲で1/3～1/4程度である。

著者らは前報で、非比例疲労の単軸に対する寿命の低下はASME code型の相当ひずみ範囲に代えてひずみ経路を考慮したMises型の相当ひずみ範囲を用いることにより妥当に評価しうることを示した。非比例クリープ疲労をも含めてひずみ経路を考慮した相当ひずみ範囲で寿命を評価した結果を図3.2に示す。非比例疲労については本報で新たに試験を行ったひずみ範囲を含めて妥当に評価できていることが分かる。非比例クリープ

疲労について、単軸クリープ疲労と統一的に評価すると言う意味ではほぼ妥当な評価であるとも考えられるが、やや短寿命がわにプロットされることが分かる。

3.2 応力ひずみ応答の検討

3.2.1 繰り返し応力ひずみ関係

非比例負荷下では比例負荷下に比較して著しい加工硬化が生じる⁽¹³⁾ことが報告されており、著者らも前報で非比例疲労についてこれを確認した。本報では非比例クリープ疲労を含めて繰り返し応力ひずみ関係を検討した。

図3.3にASME code型の相当ひずみ範囲⁽¹²⁾とMises型の相当応力範囲の関係(半寿命付近)を示す。ASME code型の相当ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{eq}$ の定義は式(3.1)の通りである。

$$\Delta \epsilon_{eq} = \sqrt{\Delta \epsilon^2 + \Delta \tau^2} / 3 \dots\dots\dots (3.1)$$

ただし、 $\Delta \epsilon$ 、 $\Delta \tau$ は軸及びねじりの全ひずみである。Mises型の相当応力の定義は式(3.2)の通りである。

$$\Delta \sigma_{eq} = \sqrt{\Delta \sigma^2 + 3 \Delta \tau^2} \dots\dots\dots (3.2)$$

図3.3により、次の知見が得られる。

- ① 非比例疲労(▽)は比例疲労(□)に比較して著しい硬化を示す。
- ② 非比例クリープ疲労(▼)では非比例疲労(▽)に対して保持軟化を生じる。
- ③ ②の保持軟化は単軸の場合の保持軟化とほぼ同程度である。

前報で、上記①はASME code型の相当ひずみ範囲の代わりにひずみ経路を考慮したMises型の相当ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{plh}$ ⁽¹⁴⁾を用いることにより、疲労寿命同様ほぼ妥当に(単軸特性と統一的に)評価しうることを示した。 $\Delta \epsilon_{plh}$ の定義は式(3.3)の通りである。

$$\Delta \epsilon_{plh} = \int d \epsilon_{eq} \dots\dots\dots (3.3)$$

ただし、 $d \epsilon_{eq}$ はMises型の相当ひずみの増分である。この定義によるひずみ範囲を表3.2に示す。これは非比例負荷の場合である。比例負荷の場合、ASME code型の相当ひずみ範囲と経路を考慮したMises型の相当ひずみ範囲は一致する。非比例クリープ疲労をも含めてひずみ経路を考慮した相当ひずみで評価した結果を図3.4に示す。

これより、非比例負荷については、ひずみ経路を考慮したMises型の相当ひずみ範囲を用いて評価することにより疲労、クリープ疲労とも評価は改善されるが、その改善は必ずしも充分ではないことが分かる。

3.2.2 応力緩和挙動の検討

本項では、非比例クリープ疲労におけるひずみ保持中の応力緩和挙動を検討する。図3.5に応力経路の例を $\Delta \epsilon_{0.9} = 1.0\%$ の例について示す。応力経路もひずみ経路同様ほぼ円形を描くことが分かる。ひずみ保持に対応する応力緩和が第1象限に現れている(図中⇒で示す)。これより、応力経路が円形を描く場合でも応力緩和は原点(軸力0, せん断応力0の点)の点)に向かって比例的に生じると考えてよいことが分かる。この傾向は $\Delta \epsilon_{0.9} = 0.7\%$ についても同様である。非比例および比例クリープ疲労の応力緩和の方向をまとめて図3.6に示す。

$\Delta \epsilon_{0.9} = 1.0\%$ の例についてMises型の相当応力および軸、ねじりの応力緩和挙動を図3.7に示す。また、Mises型の相当応力の緩和挙動を非比例クリープ疲労、比例クリープ疲労、単軸クリープ疲労についてまとめて図3.8に示す。

緩和開始応力と緩和量(緩和開始時の応力と終了時の応力の差)の関係を非比例、比例、単軸クリープ疲労について整理したものを表3.3および図3.9に示す。ひずみ保持時間はすべて60分である。この図より、同一緩和開始応力に対する緩和量は、単軸、比例、非比例の順に小さくなることが分かる。また、この図にはクリープひずみ式から予測した応力緩和量も示してある。単軸負荷に対して応力緩和量が減少するという傾向は、三軸係数T.F.が1を越える領域(等二軸負荷等)では報告されている^{(15)~(16)}が、軸力-ねじり負荷下というT.F.<1の領域でも特に非比例負荷下ではこのような傾向があることが示された。三軸係数T.F.の定義は二軸応力状態では次の通りである。

$$T.F. = \sqrt{2} | \sigma_1 + \sigma_2 | / [(\sigma_2 - \sigma_1)^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2]^{1/2} \dots (3.3)$$

表 3.1 多軸疲労/クリープ疲労試験の結果

試験片No	λ	ϕ (deg)	t_h (min)	$\dot{\epsilon}_{eq}$ (%/sec)	$\Delta \epsilon_{eq}$ (%)	$\Delta \epsilon$ (%)	$\Delta \gamma$ (%)	$\Delta \sigma_{eq}$ (kgf/mm ²)	$\Delta \sigma$ (kgf/mm ²)	$\Delta \tau$ (kgf/mm ²)	N_r (cycles)
MBS6B9	0	0	0	0.1	0.510	0.506		42.3	42.3		6034
MBS6B7					1.009	1.009		56.5	56.5		1339
MBS6B8					1.508	1.508		67.9	67.9		419
HBS616			60	0.1	0.683	0.683		43.3	43.3		1102
HBS516					1.018	1.018		46.9	46.9		507
HBH8B7					1.489	1.489		49.1	49.1		283
MBS6B3	∞	0	0	0.1	0.552		0.877	38.9		22.5	26413
MBS6B4					1.086		1.754	51.2		29.5	2691
MBS6B6					1.561		2.626	59.0		34.1	378
MBS6B0	1.7	0	0	0.1	0.508	0.360	0.622	41.2	30.0	16.3	16031
MBS6A6					1.013	0.715	1.241	54.8	40.0	21.6	2274
MBS6A5					1.514	1.068	1.857	62.1	45.6	24.4	931
MBS8C5			60	0.1	1.000	0.710	1.220	48.8	34.2	20.1	727
MBS8D0	1.7	90	0	0.1	0.700	0.700	1.210	56.2	56.2	32.0	2842
MBS8D1					0.500	0.500	0.866	66.2	66.2	37.2	1386
MBS8D2					1.000	1.010	1.767	72.4	72.4	38.5	312
MBS8C7			60	0.1	0.700	0.700	1.210	58.1	58.1	33.0	294
MBS8C3					1.000	1.000	1.732	64.4	64.4	40.3	164

表 3.2 ひずみ経路を考慮したMises型の相当ひずみ
(非比例負荷, 位相差 90° の場合)

ASME code型の相当ひずみ 範囲	%	ひずみ経路を考慮したMises 型の相当ひずみ範囲	%
	0.5		0.785
	0.7		1.099
	1.0		1.570
	1.5		2.355

表 3.3 負荷形態による応力緩和量の変化

 $\epsilon = 0.1\% / \text{sec}$, $t_h = 60\text{min}$

負 荷 形 態	λ	ϕ (deg)	$\Delta \epsilon_{eq}$ (%)	緩和初期応力 (kgf/mm ²)	応力緩和量 (kgf/mm ²)
単 軸	0	0	0.7	20.7	3.6
			1.0	22.9	5.8
			1.5	25.1	7.5
比例重畳	1.7	0	1.0	24.6	4.6
非比例重畳	1.7	90	0.7	29.4	5.1
			1.0	34.0	7.5

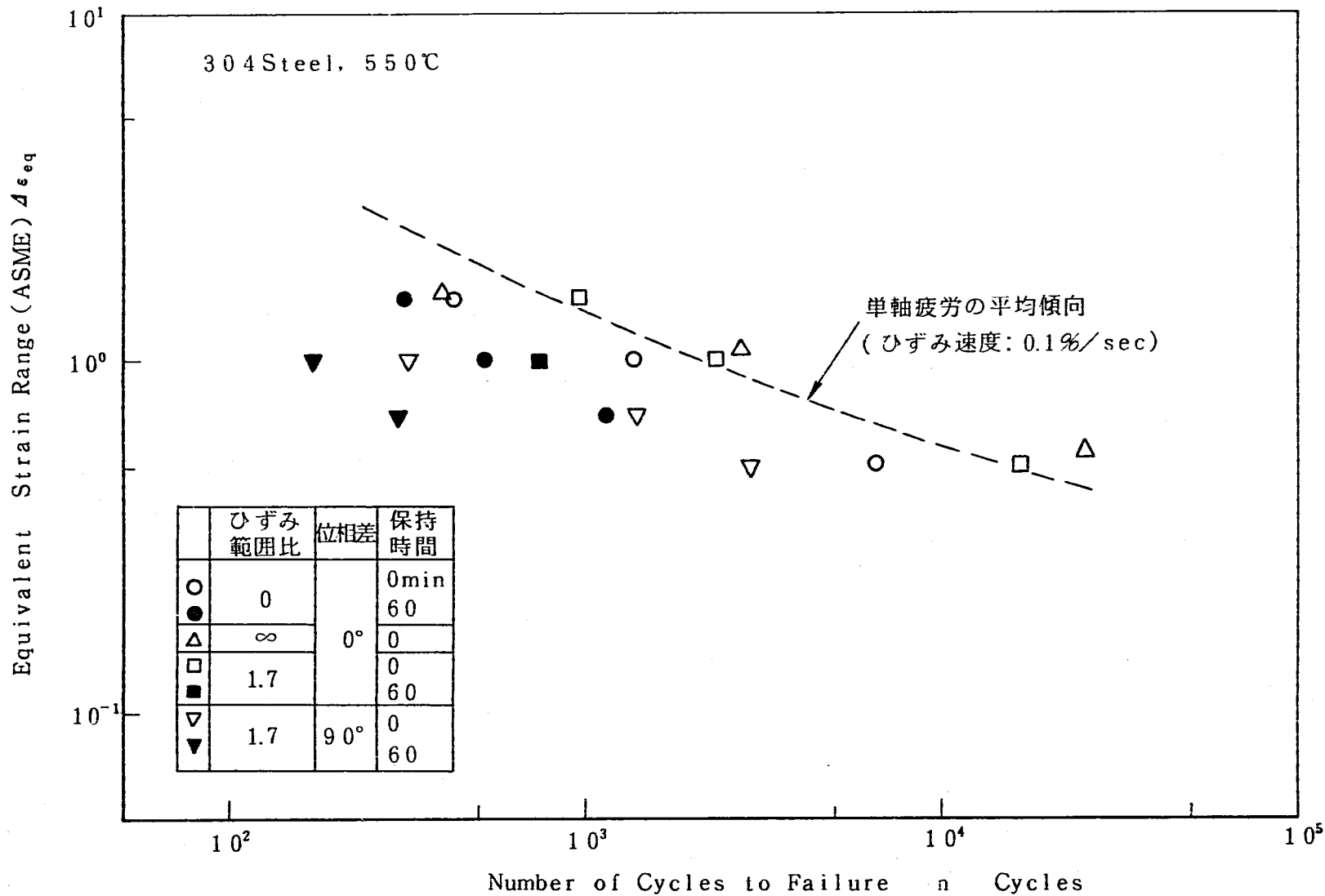


図3.1 ひずみ範囲とクリープ疲労寿命の関係 (ASME式相当ひずみ)

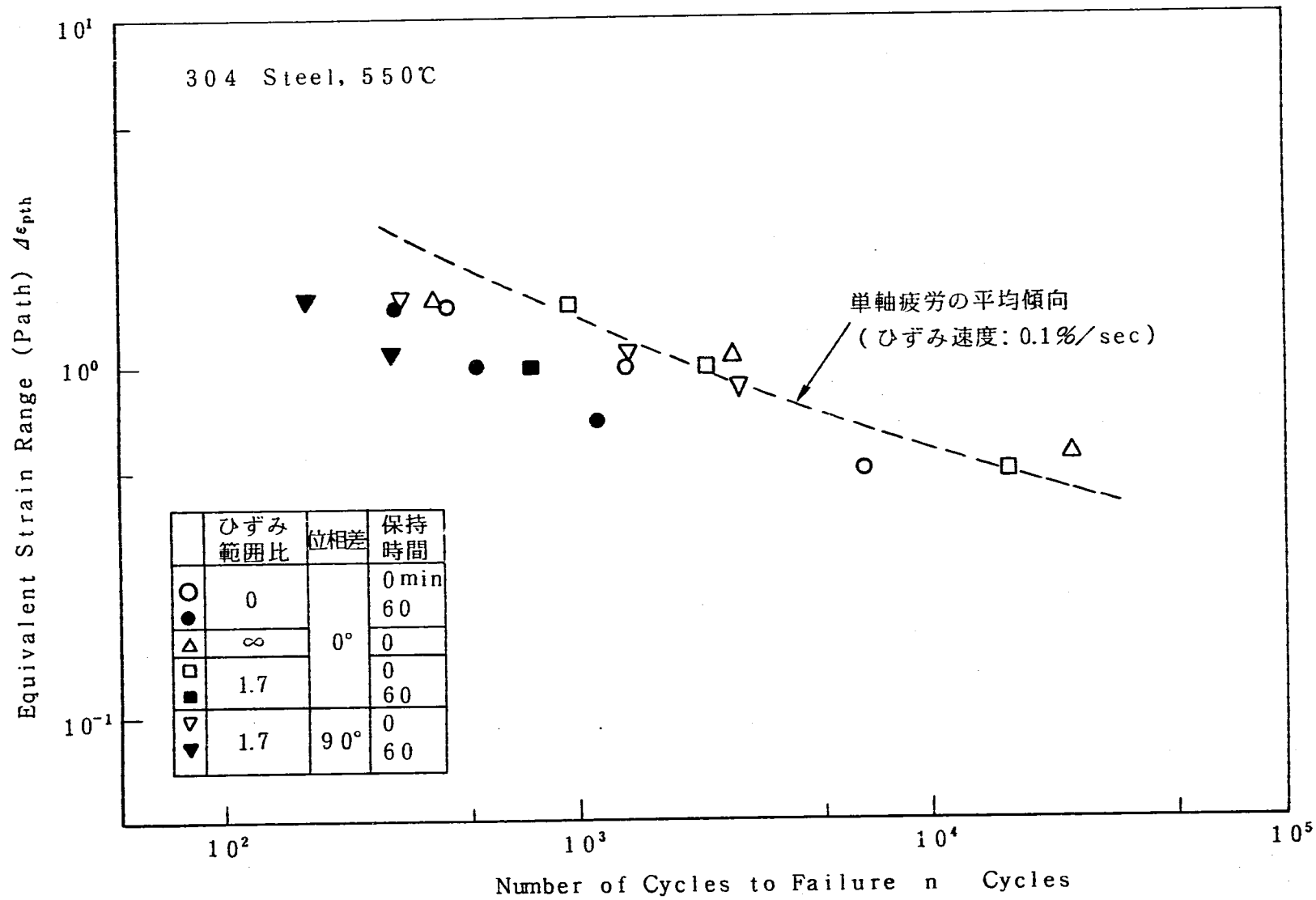


図3.2 ひずみ範囲とクリープ疲労寿命の関係 (経路を考慮した相当ひずみ)

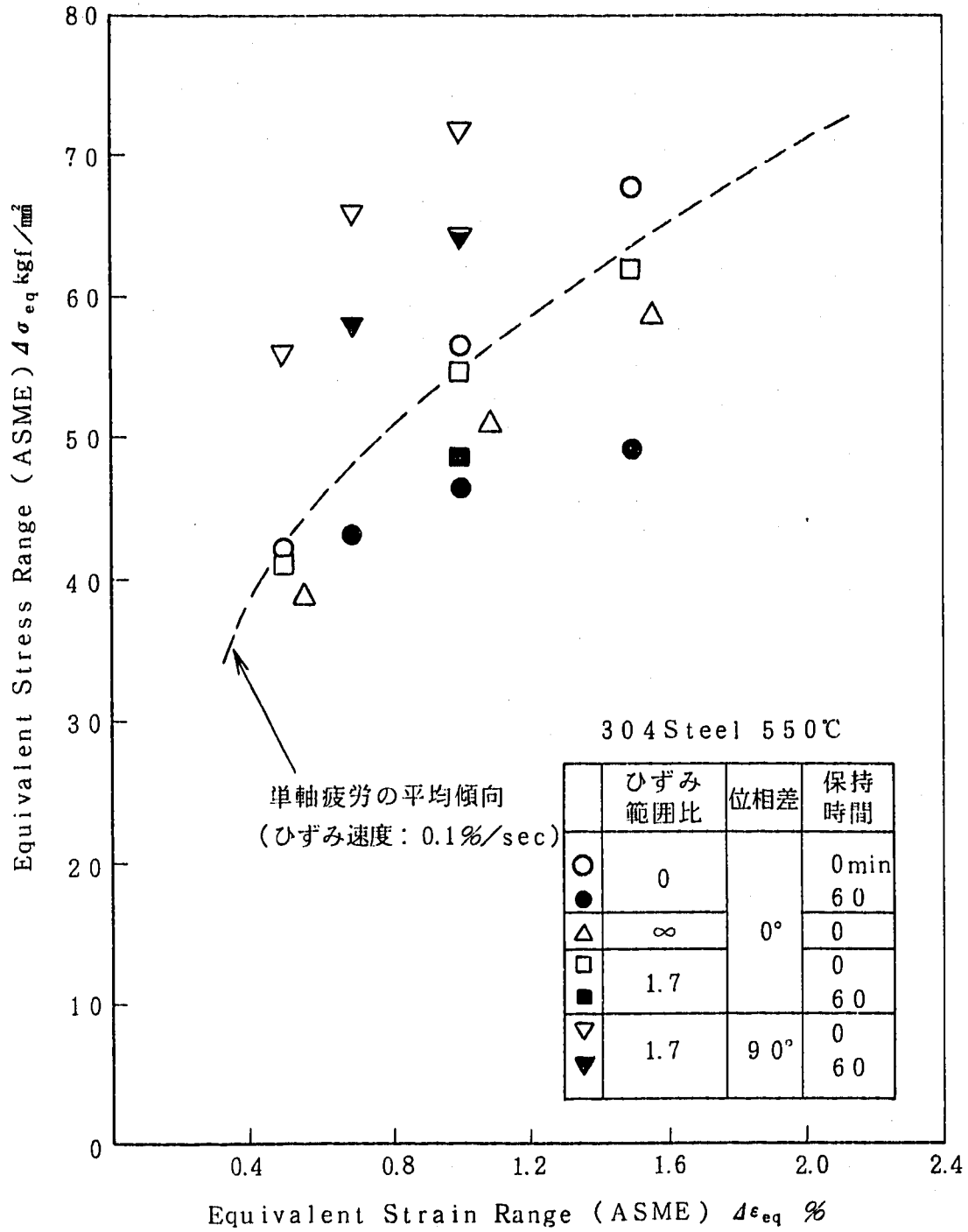


図3.3 ひずみ範囲と応力範囲の関係 (ASME式相当ひずみ)

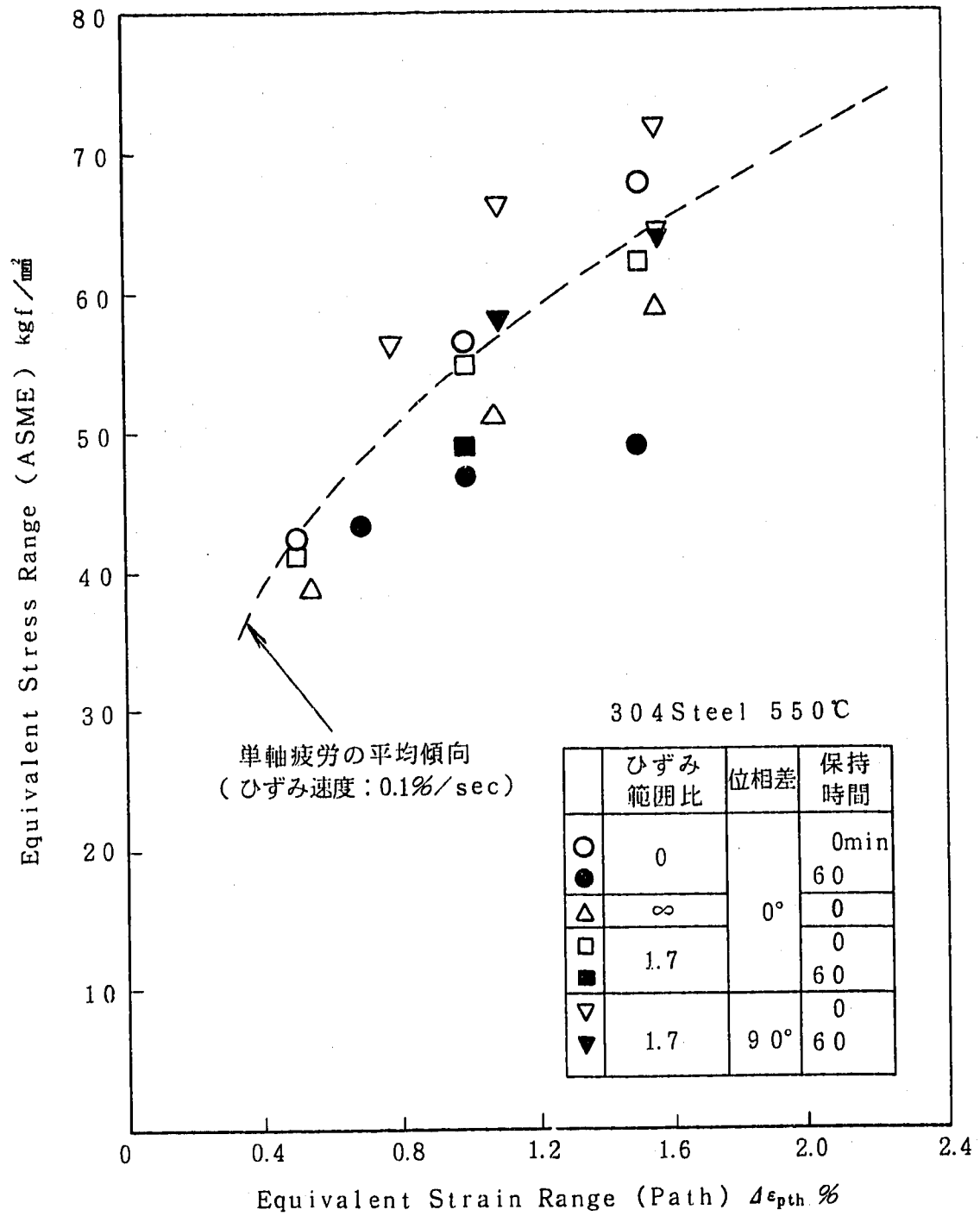


図3.4 ひずみ範囲と応力範囲の関係 (経路を考慮した相当ひずみ)

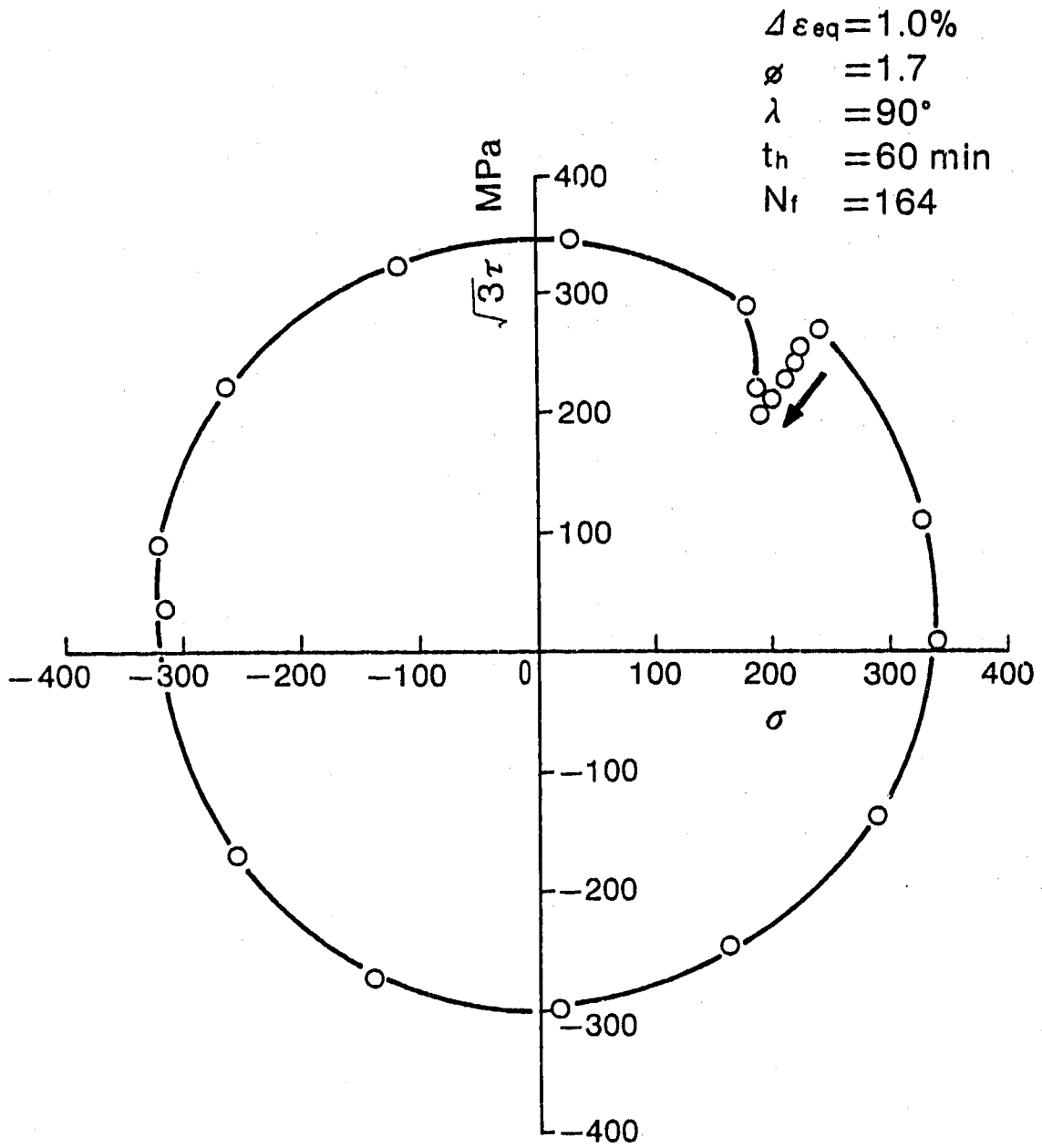


図3.5 非比例負荷下の応力経路 (ひずみ保持波)

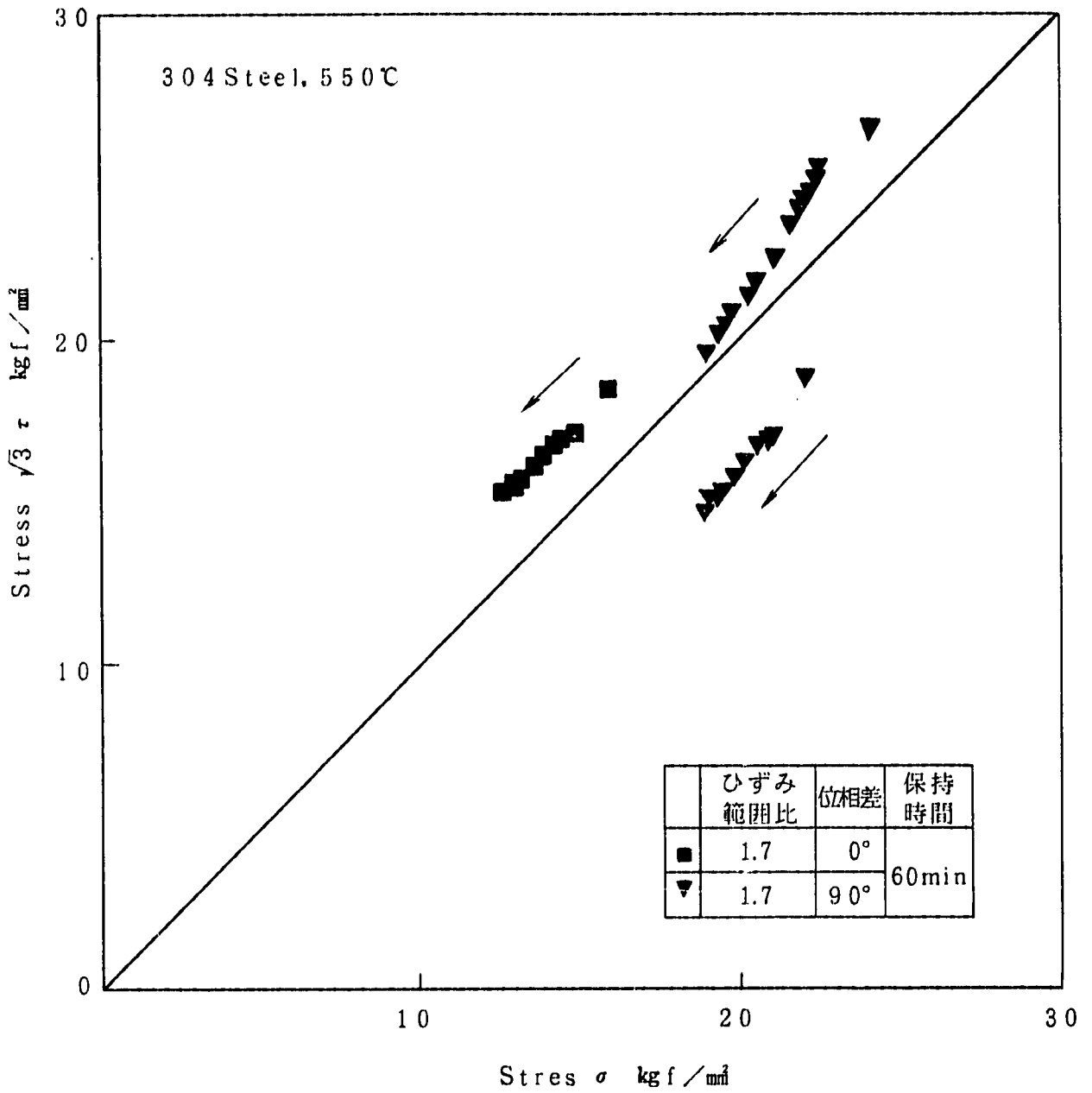


図3.6 応力緩和の挙動

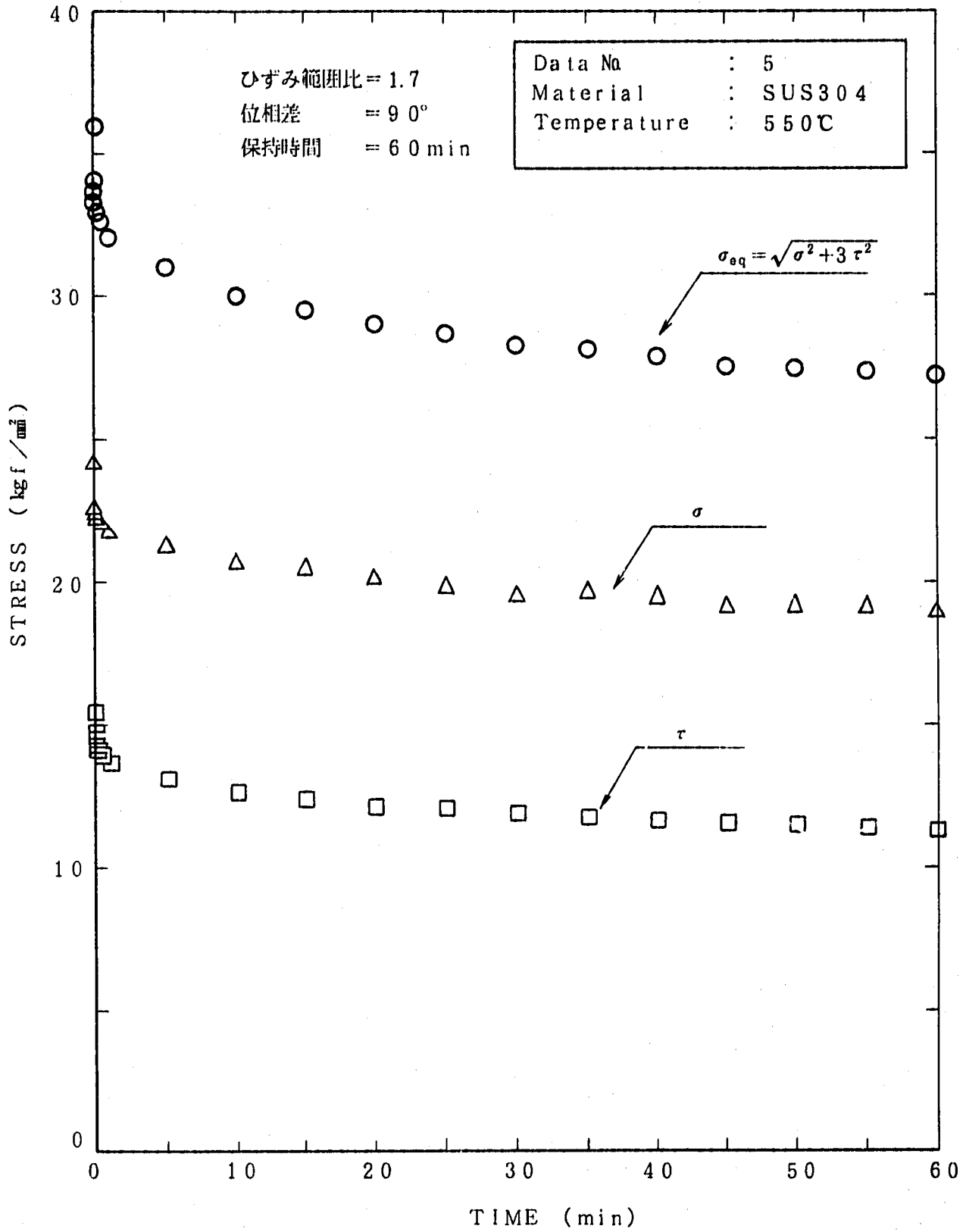


図3.7 応力緩和の挙動

FIG890925

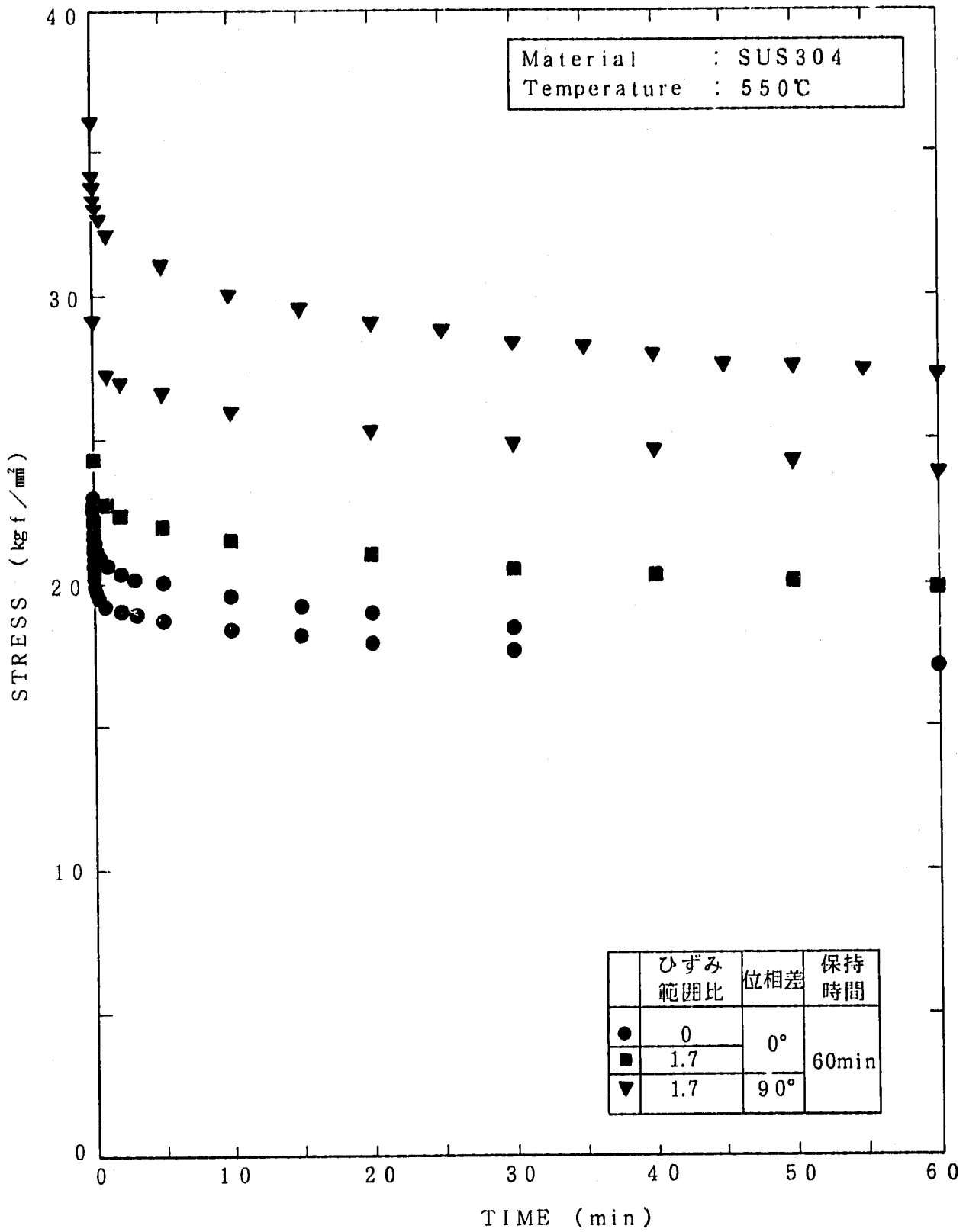


図3.8 応力緩和の挙動 (Mises型相当応力)

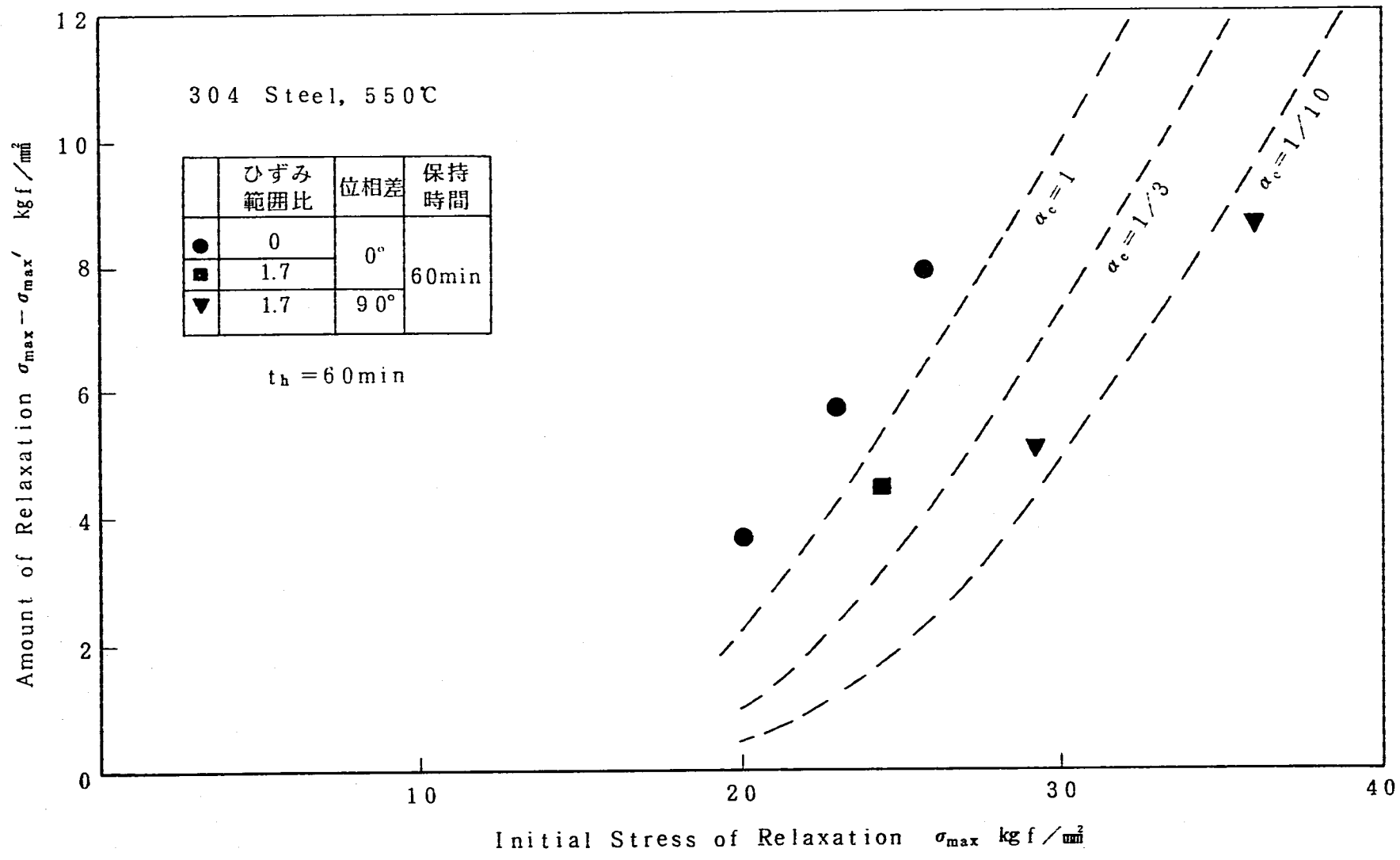


図3.9 緩和開始応力と応力緩和量の関係

4. 線型損傷則による多軸疲労／クリープ寿命の評価

多軸疲労寿命の評価法は多くの研究者によって提案されている。著者らも前報でその代表的なものについていくつか検討し、相当ひずみ範囲の評価にあたってひずみ経路を考慮したMises型の相当ひずみを用いることによって妥当な評価を行えることを示した。本章では、現状では殆ど報告例のないと考えられる非比例クリープ疲労強度の評価法を開発するものとした。

評価法の開発にあたっては、基本的に単軸の材料特性に基き、定数の決定等に特に多軸試験に基づくデータを必要としない方法を開発するものとした。また、現状で最も一般的に用いられている線型損傷則をベースとすることにした。

4.1 線型損傷則を適用する上での前提

線型損傷則を適用する上で次の前提を設ける。

〔疲労損傷〕

- ① 疲労損傷はすべての波形について計算する。
- ② 相当ひずみ範囲はひずみ経路を考慮したMises型の相当ひずみ範囲とする。

1サイクル当たりの疲労損傷 D_r は次のように定義する。

$$D_r = 1 / N_r \quad (4.1)$$

ただし、 N_r は当該相当ひずみ範囲における単軸疲労の平均傾向（BDS材料強度基準で規定されている「最適疲労破損式」）から求める。

〔クリープ損傷〕

- ③ クリープ損傷はひずみ保持時間を有する波形についてのみ計算する。
- ④ 多軸応力緩和中の応力はMises型の相当応力で評価する。
- ⑤ 多軸応力緩和特性は単軸のクリープひずみ特性およびクリープ破断特性で評価できる。

- ⑥ 緩和初期応力は単軸動的応力ひずみ関係から当該相当ひずみ範囲に対応する応力範囲の $1/2$ として求める。（ひずみ範囲はひずみ経路を考慮したMises型の相当ひずみ範囲を用いる。）

1 サイクル当たりのクリープ損傷 D_c は次のように定義する。

$$D_c = \int d t / t_r (\sigma_{eq}) \quad (4.2)$$

ただし、 σ_{eq} は Mises 型の相当応力であり、 t_r は σ_{eq} から単軸クリープ破断特性 (BDS の材料強度基準で規定されている「主クリープ破断関係式」) により求める。

4.2 線型損傷則によるクリープ疲労損傷の評価

4.2.1 疲労損傷

疲労損傷は前項の定義に従いすべてのひずみ波形に対して計算した。

4.2.2 クリープ損傷

非比例、比例、単軸クリープ疲労試験について疲労損傷に加えクリープ損傷を計算した。クリープ損傷の定義は前項に示す通りである。クリープ損傷の計算方法は表 4.1 に示す 5 種類とした。この結果を表 4.2 に示す。またこれを Campbell 線図にプロットしたものを図 4.1 (1)~(5) に示す。ここで α_c はクリープひずみ式における時間係数であり、 α_c を変化させる事により応力緩和速度 (予測値) を変化させることができる。 $\alpha_c = 1$ は単軸に於ける平均傾向を表し、 $\alpha_c = 1/3$ で単軸よりやや硬め (単位時間当たりの応力緩和量が少ない) の特性を表すことになる⁽¹⁷⁾。

・方法 I ----- 緩和初期応力、緩和中の応力とも実験値を用いた場合

非比例負荷はほぼ妥当に評価されているが、その他の場合、特に単軸負荷においてクリープ損傷が非安全側に評価されている。これは、単軸クリープ疲労において緩和初期応力を動的応力ひずみ関係式から決定した場合には、保持軟化による初期応力の低下が考慮されない分だけ初期応力を高めに見積もることになり (動的応力ひずみ関係式は疲労についてのみ定められているため)、結果的にクリープ損傷をほぼ妥当に評価することになるが、初期応力を実験値とした場合にはこの効果が入らないためであると考えられる。

・方法 II ----- 初期応力は実験値とし、緩和中の応力は単軸クリープひずみ特性から

$\alpha_c = 1$ として予測した場合

非比例負荷、比例負荷、単軸負荷ともほぼ統一的に評価されるが、全体的に非安全側の評価となっている。

・方法Ⅲ —— 初期応力は実験値とし、緩和中の応力は単軸クリープひずみ特性から

$\alpha_c = 1/3$ として予測した場合

非比例負荷，比例負荷，単軸負荷ともほぼ統一的に妥当に評価されるが，単軸負荷はやや非安全側に評価されている。

・方法Ⅳ —— 初期応力は動的応力ひずみ関係式からもとめ、緩和中の応力は単軸ク

リープひずみ特性から $\alpha_c = 1$ として予測した場合

非比例負荷，比例負荷，単軸負荷ともほぼ統一的に妥当に評価されるが，非比例負荷はやや非安全側に評価されている。

・方法Ⅴ —— 初期応力は動的応力ひずみ関係式からもとめ、緩和中の応力は単軸ク

リープひずみ特性から $\alpha_c = 1/3$ として予測した場合

非比例負荷，比例負荷，単軸負荷ともほぼ統一的に妥当に評価される。

4.2.3 多軸疲労／クリープ疲労寿命の予測

4.2.1 および4.2.2 で求めた疲労損傷，クリープ損傷に基づき求めた予測寿命を表4.3に示す。また，予測寿命と実測寿命の比較図を図4.2(1)～(5)に示す。図4.2(1)～(5)は表4.1の方法Ⅰ～Ⅴに対応している。損傷評価の場合（図4.1(1)～(5)）と同様，方法Ⅴが最も妥当な評価となっている。

従って，本章の検討により，多軸疲労／クリープ疲労強度の評価は，ひずみ経路を考慮したMises型の相当ひずみ範囲でひずみ範囲を評価し，多軸ひずみ保持中の応力緩和挙動をMises型の相当応力で評価し，単軸材料特性（動的応力ひずみ関係，クリープ破断特性，クリープひずみ特性）に基づき疲労及びクリープ損傷を評価し，これを線型損傷則に適用することにより工学的にほぼ妥当な評価を行えることが分かった。さらにこのとき，高速原型炉第一種機器の高温構造設計方針の材料強度基準で策定されている「動的応力ひずみ式」，「主クリープ破断式」，「クリープひずみ式」を用いる場合には，応力緩和の初期応力を動的応力ひずみ式から相当ひずみ範囲に対応する相当応力範囲の $1/2$ として求め，クリープひずみ式において $\alpha_c = 1/3$ とにおいて応力緩和を評価することによって最適な評価が得られることが分かった。ここで，非比例負荷をも含めてクリープ疲労評価を行う場合に， $= 1/3$ で最適の評価が得られたことは，3.2.2項で指摘したような，多軸負荷下（特に非比例負荷下）において

は、同一の緩和初期応力、緩和時間で比較した場合には、単軸負荷下によりも応力緩和量が減少するという事実を反映したものである。

表 4.1 クリープ損傷の計算方法

方 法	初期応力の決定	緩和挙動の評価
I	実 験 値	実 験 値
II	実 験 値	クリープひずみ式により 予測, $\alpha_c = 1$ とする
III	実 験 値	クリープひずみ式 $\alpha_c = 1/3$
IV	動的応力ひずみ線図に より予測	クリープひずみ式 $\alpha_c = 1$
V	動的応力ひずみ線図に より予測	クリープひずみ式 $\alpha_c = 1/3$

表4.2 多軸疲労/クリープ疲労損傷評価の結果

負荷形態	λ	ϕ (deg)	t_h (min)	$\Delta \epsilon_{eq}$ (%)	D_r	D_c				
						方法 I	方法 II	方法 III	方法 IV	方法 V
単 軸	0	0	0	0.5	0.377					
				1.0	0.657					
				1.5	0.514					
			60	0.7	0.203	0.0640	0.120	0.169	0.276	0.466
				1.0	0.244	0.0453	0.0989	0.157	0.231	0.454
				1.5	0.373	0.0024	0.0499	0.0763	0.244	0.544
純ねじり	∞	0	0	0.5	2.072					
				1.0	1.577					
				1.5	0.499					
比例重畳	1.7	0	0	0.5	0.987					
				1.0	1.127					
				1.5	1.151					
			60	1.0	0.349	0.166	0.190	0.326	0.331	0.651
非比例重畳	1.7	90	0	0.5	0.361					
				0.7	0.837					
				1.0	注 0.513					
			60	0.7	0.178	0.353	0.166	0.344	0.154	0.315
				1.0	0.227	0.714	0.201	0.479	0.145	0.326

表4.3 多軸疲労/クリープ疲労寿命の評価結果

負荷形態	λ	ϕ (deg)	t_n (min)	$\Delta \varepsilon_{eq}$ (%)	実測寿命	予 測 寿 命				
						方法 I	方法 II	方法 III	方法 IV	方法 V
単 軸	0	0	0	0.5	6034	15996				
				1.0	1339	2037				
				1.5	419	816				
			60	0.7	1102	3130	2282	1849	1473	1174
				1.0	507	1452	1069	831	649	496
				1.5	283	804	626	552	323	215
純ねじり	∞	0	0	0.5	24613	11879				
				1.0	2691	1707				
				1.5	378	758				
比例重畳	1.7	0	0	0.5	16031	16244				
				1.0	2274	2017				
				1.5	931	809				
			60	1.0	727	989	918	655	649	496
非比例重畳	1.7	90	0	0.5	2842	3840				
				0.7	1386	1624				
				1.0	312	748				
			60	0.7	294	383	521	388	547	403
				1.0	164	137	245	168	301	198

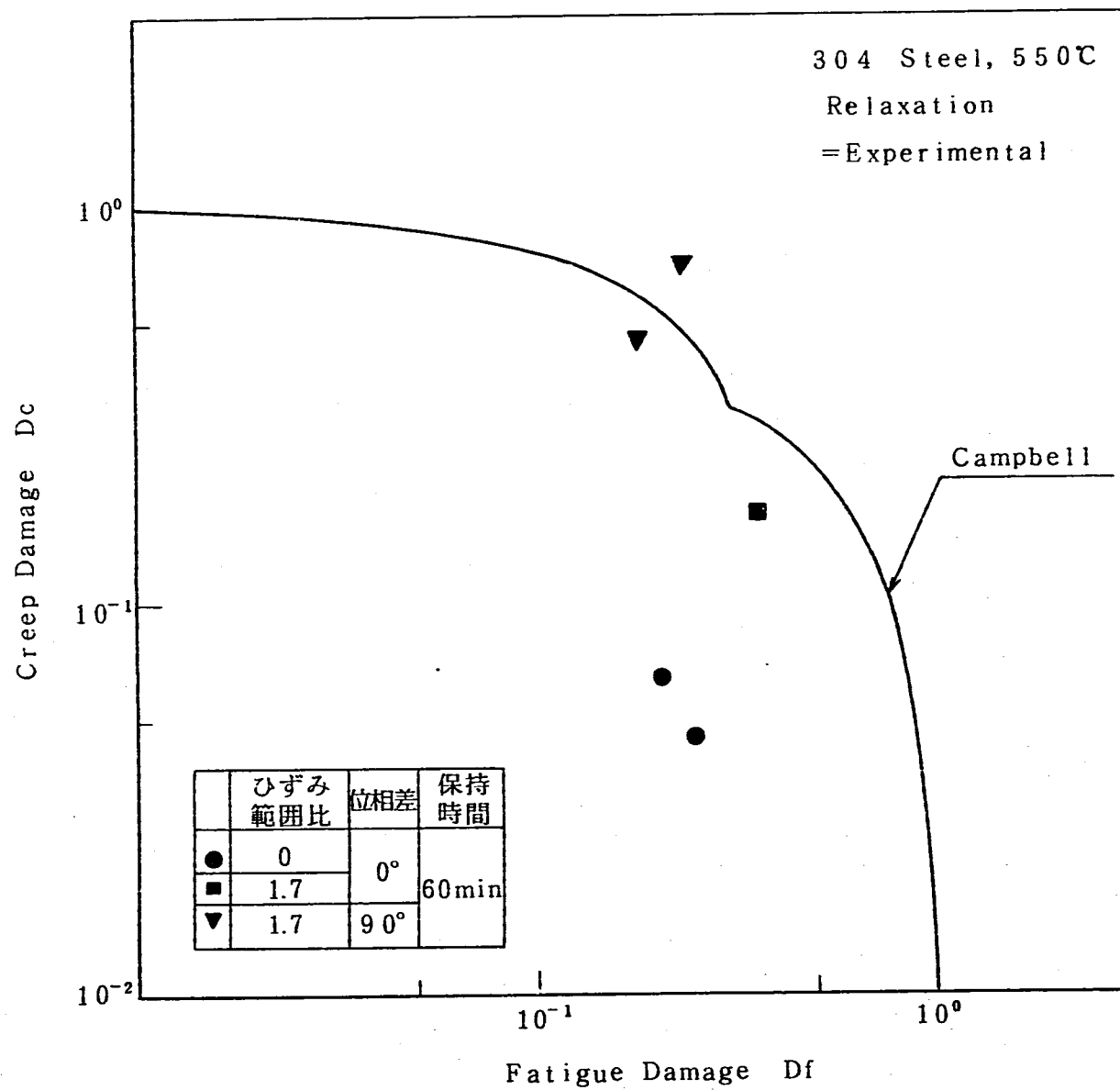


図4.1(a) 線形則による損傷評価

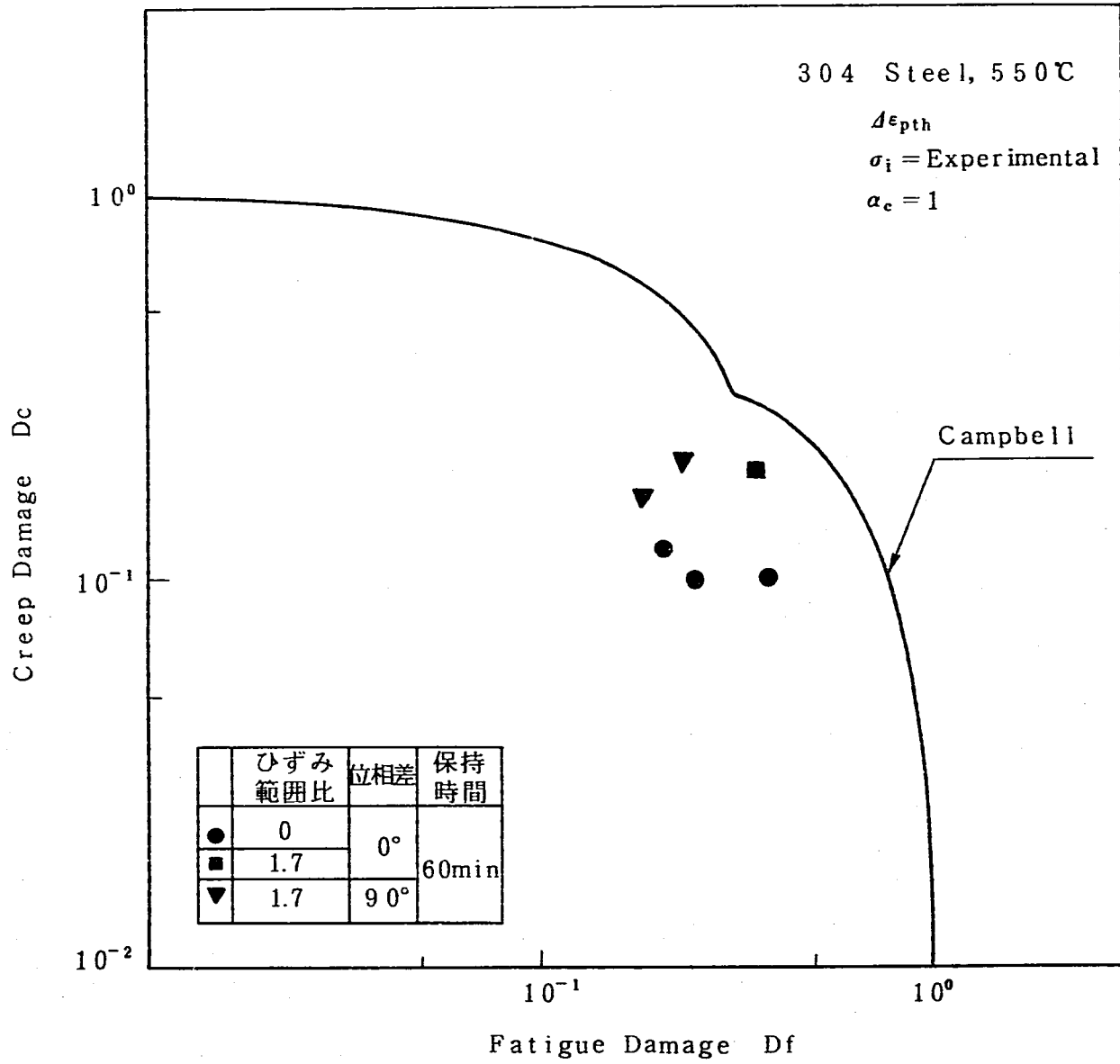


図 4.1 (b) 線形則による損傷評価

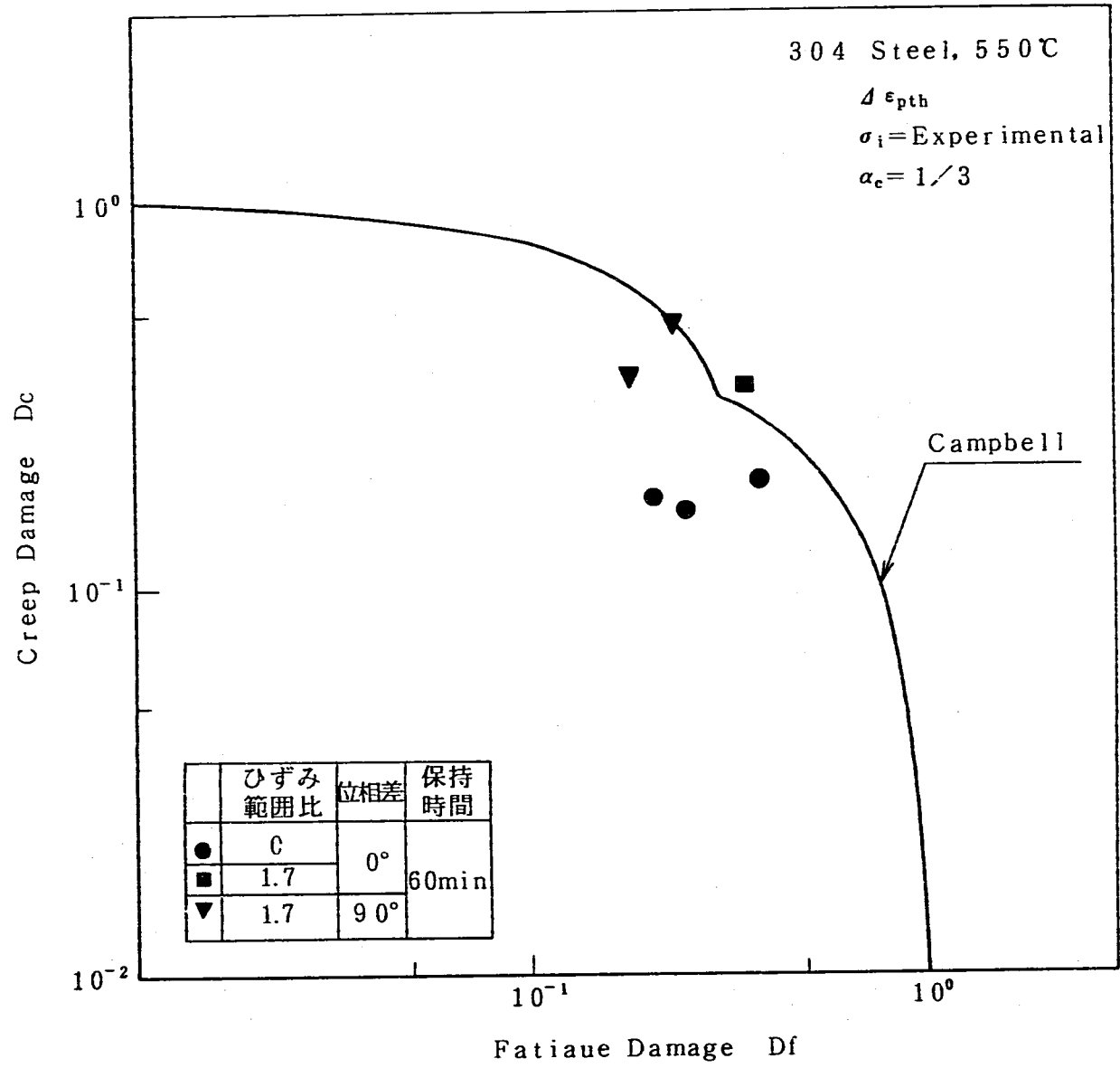


図 4.1 (c) 線形則による損傷評価

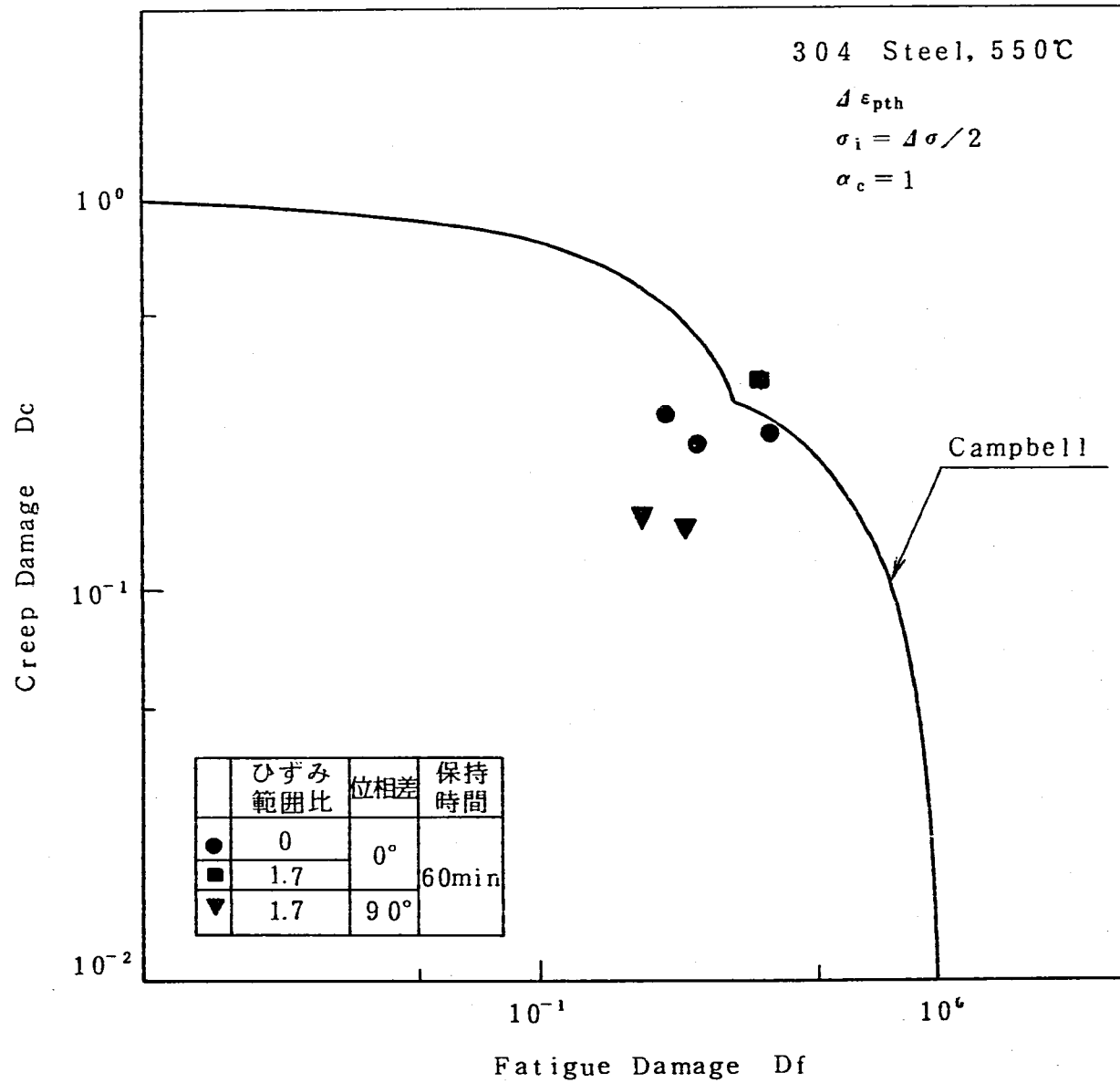


図 4.1 (d) 線形則による損傷評価

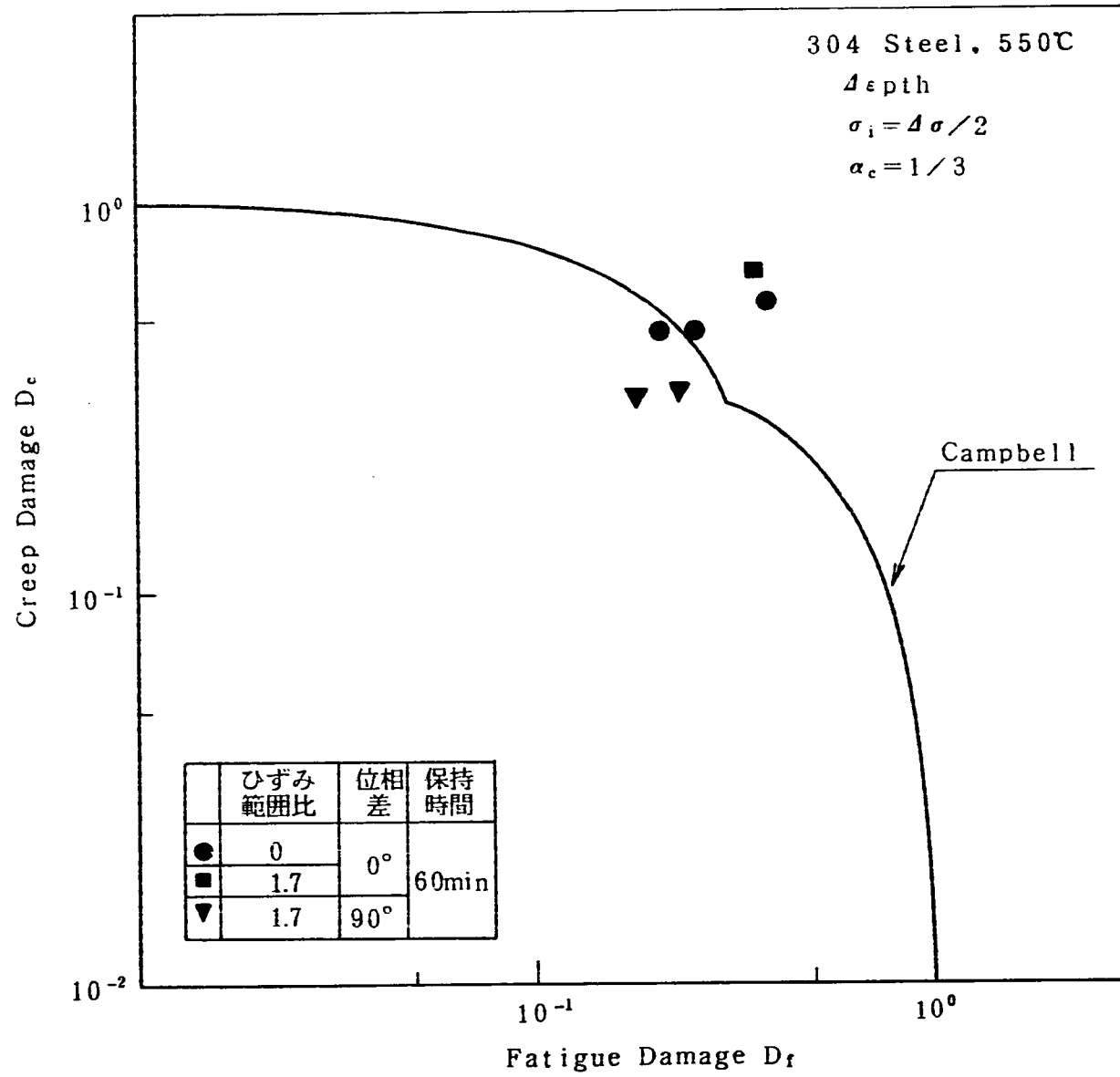


図 4.1 (e) 線形則による損傷評価

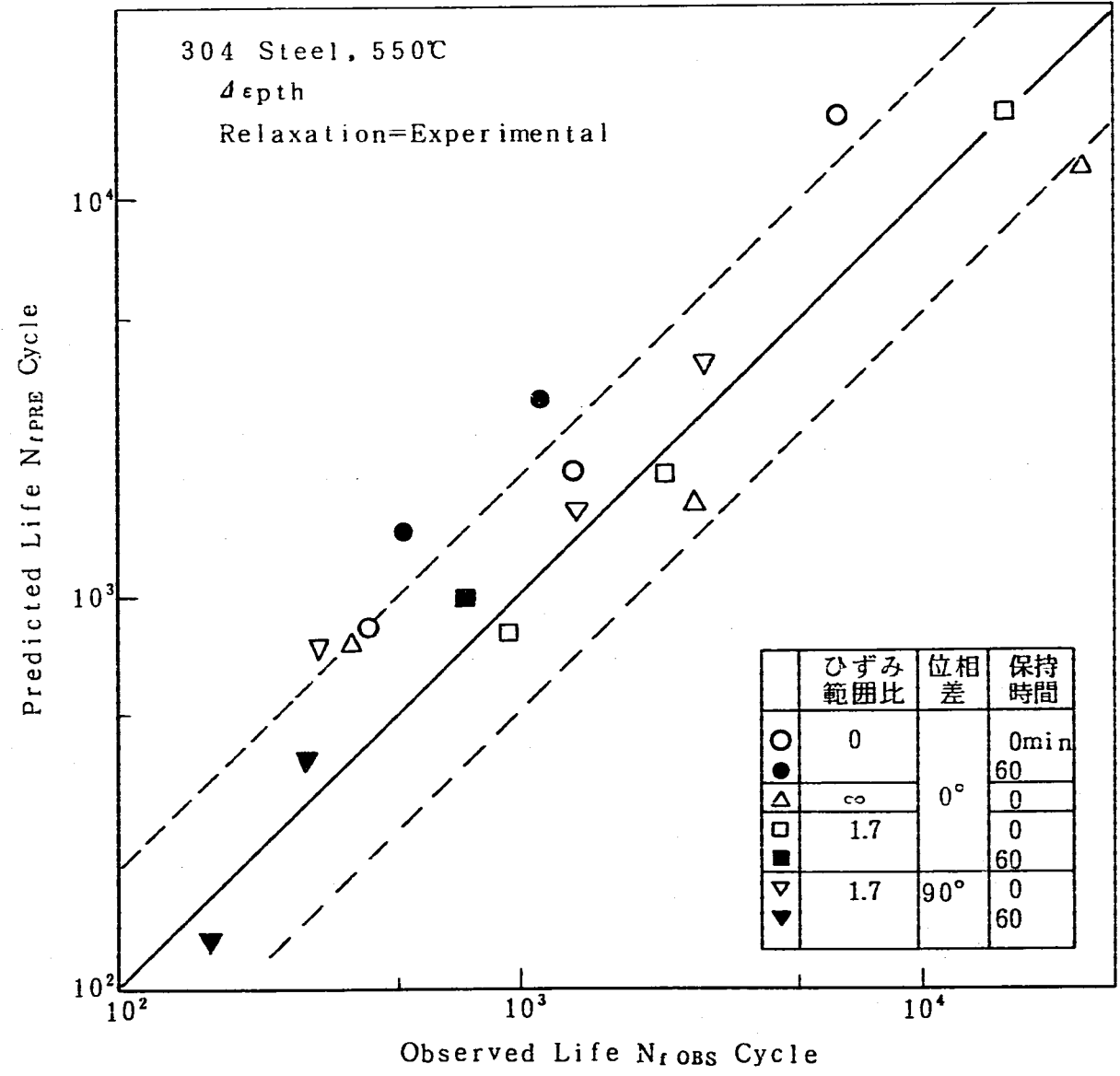


図4.2(a) クリープ疲労寿命評価の結果

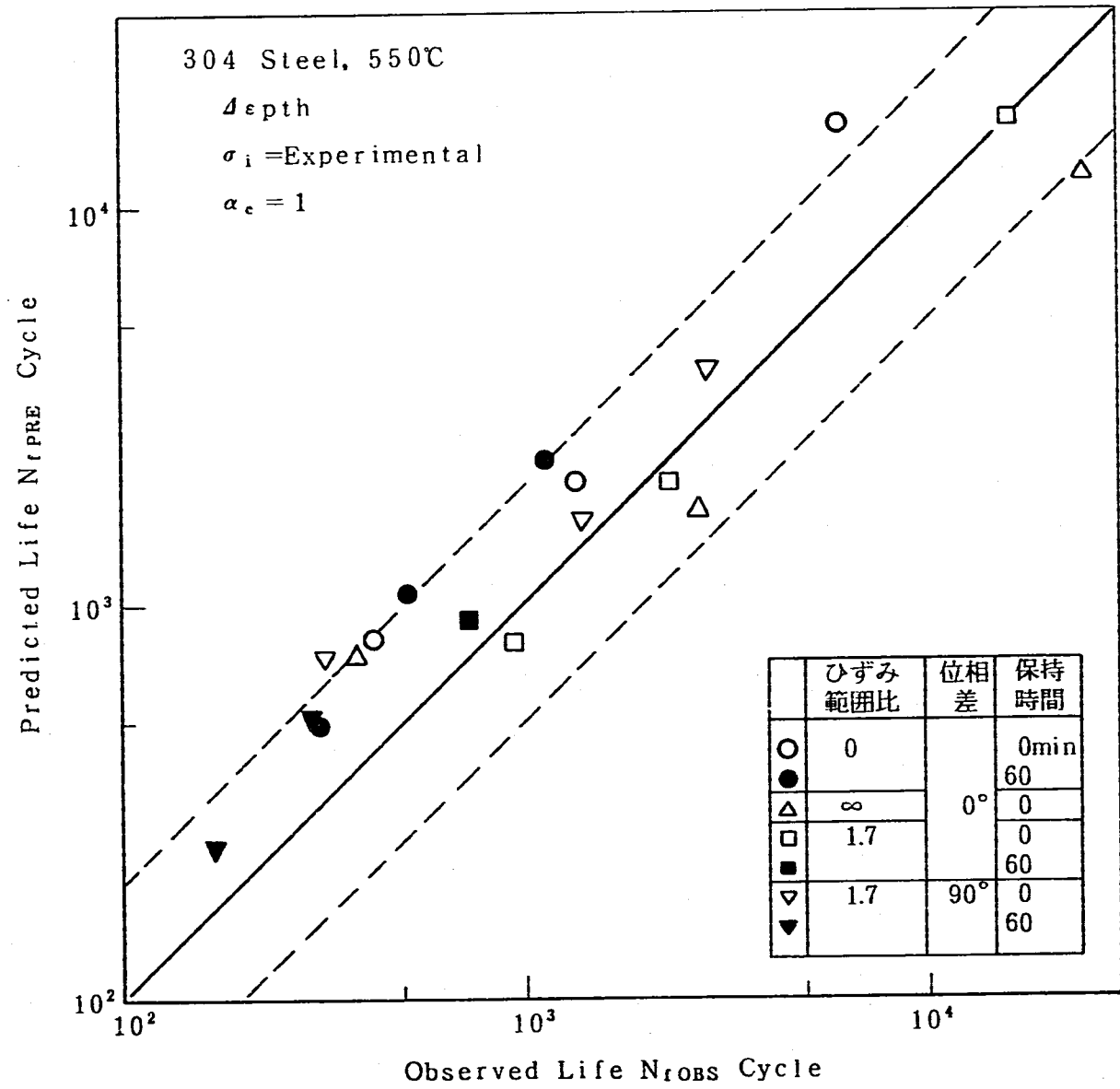


図 4. 2 (b) クリープ疲労寿命評価の結果

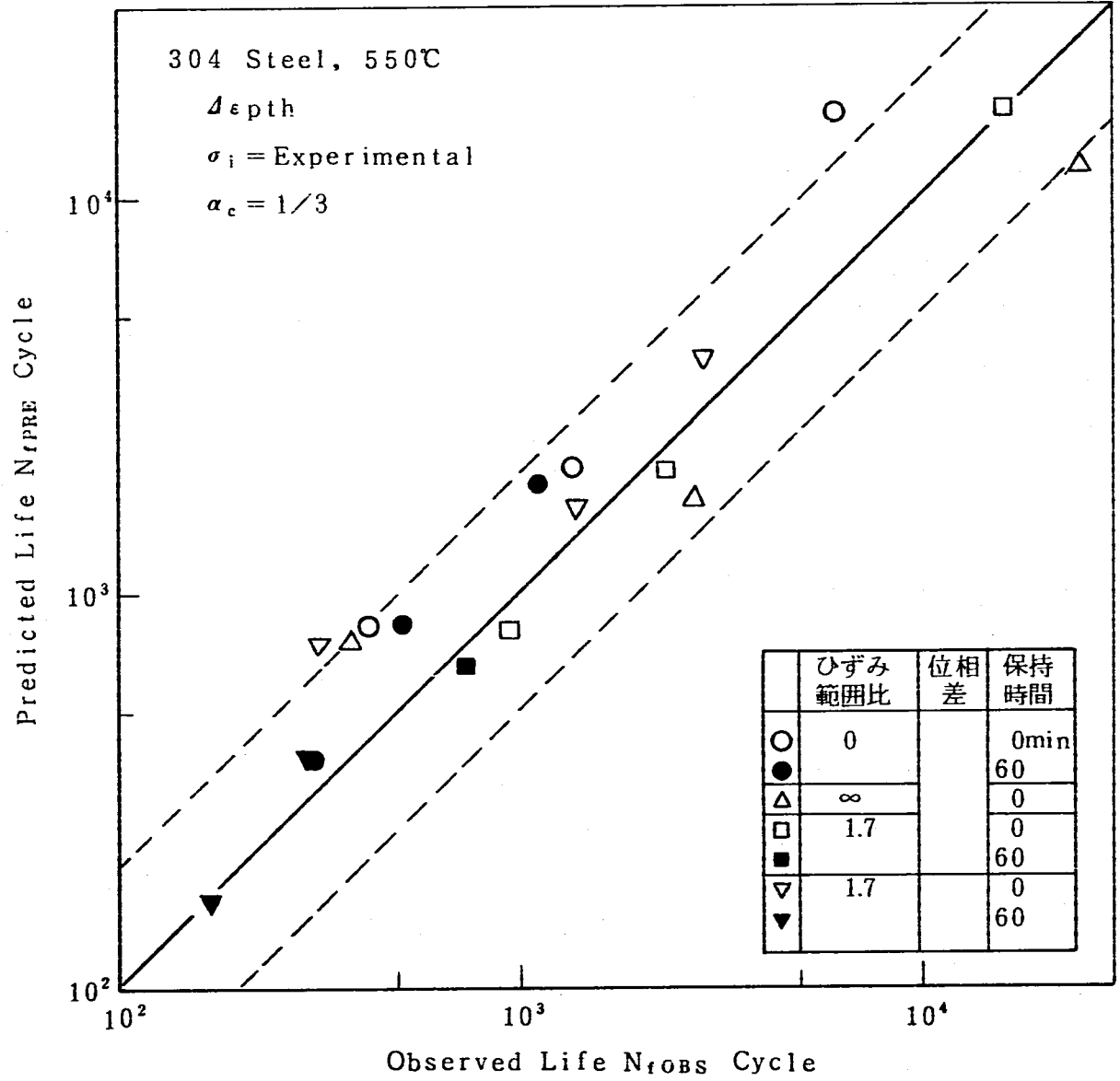


図 4. 2 (c) クリープ疲労寿命評価の結果

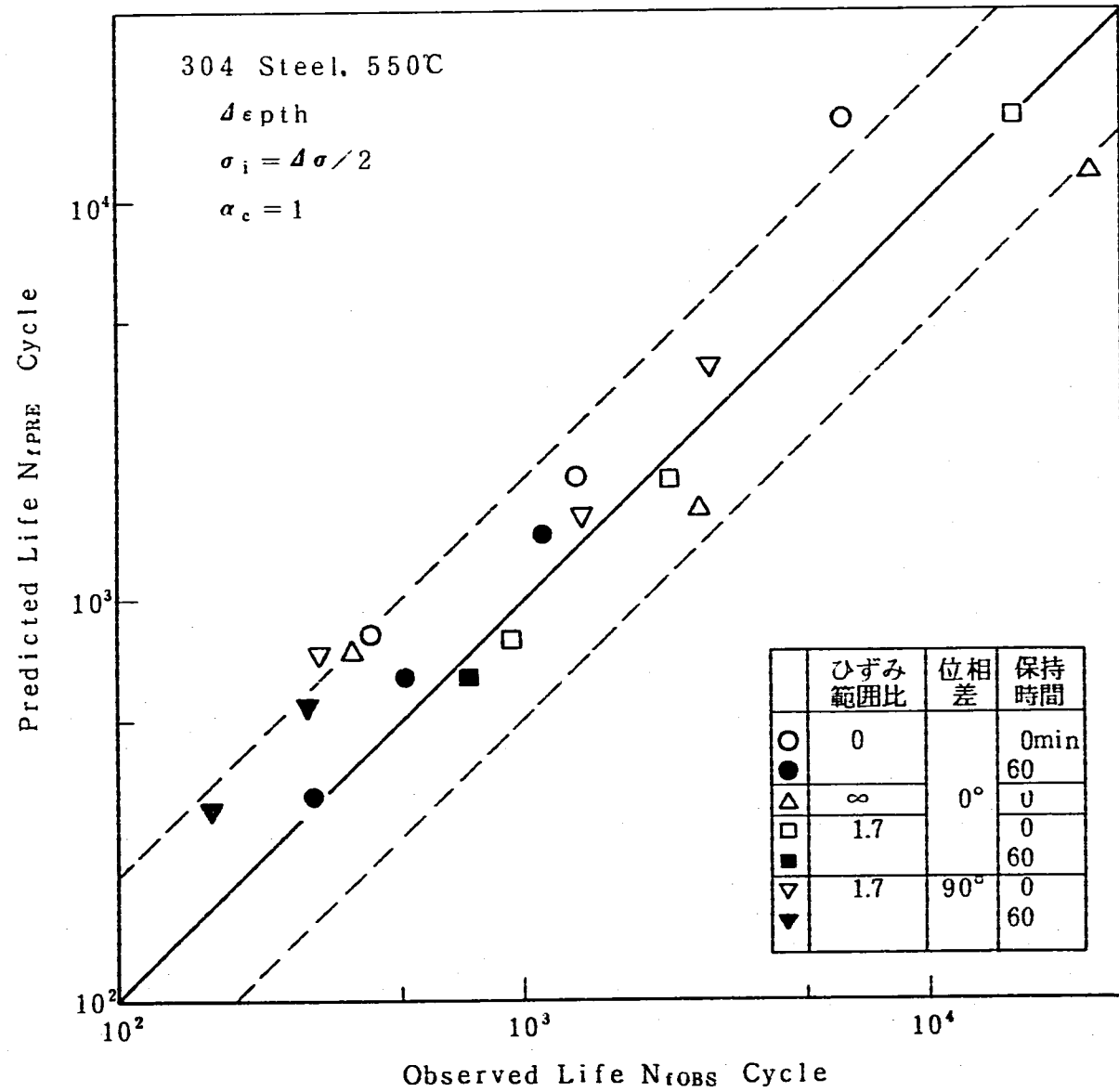


図4.2(d) クリープ疲労寿命評価の結果

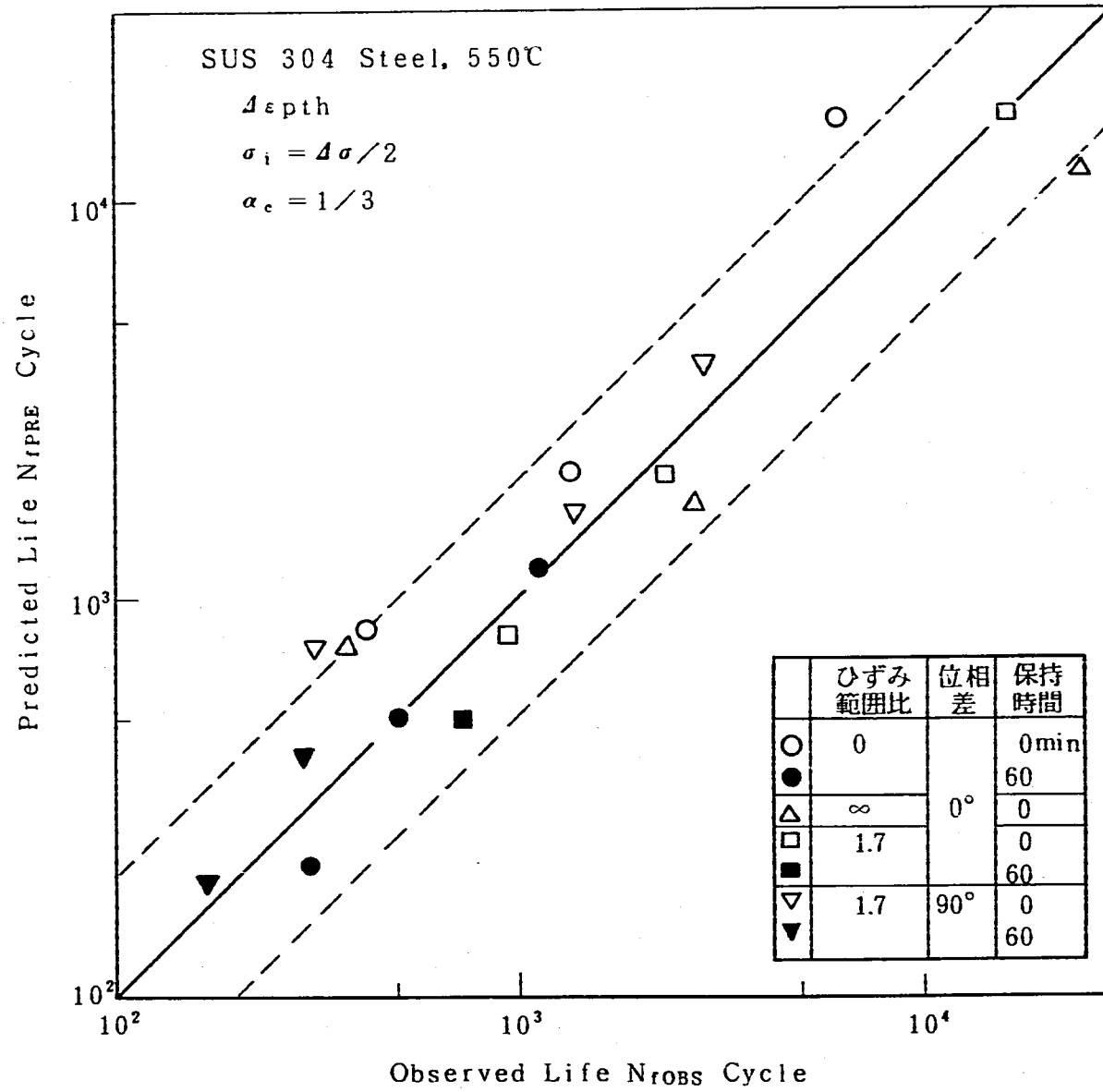


図 4. 2 (e) クリープ疲労寿命評価の結果

4.3 線型損傷則による損傷評価における問題点

ここでは4.2節における損傷計算の結果に基づき、本報で提案した、単軸の材料特性（動的応力ひずみ関係式、主クリープ破断式、クリープひずみ式）を多軸に拡張しこれを線型損傷則に適用する損傷評価法における問題点について若干指摘する。

- ① 単軸クリープ疲労の評価において、緩和初期応力、緩和中の応力ともに実験値を用いた場合に非安全側の評価となる。
- ② 動的応力ひずみ関係式による緩和初期応力の推定値が負荷形態によっては必ずしも妥当ではない（詳細は次章参照）。
- ③ 本報の3.2節で検討したように、負荷形態によって同一の緩和初期応力に対する緩和量が異なるが、単軸クリープひずみ式によって緩和挙動を予測した場合にはこれが反映されない（詳細は次章参照）。

前節で初期応力は動的応力ひずみ関係式からもとめ、緩和中の応力は単軸クリープひずみ特性から $\alpha_c = 1/3$ として予測した場合に負荷形態に係わらず妥当な評価を行いえることを示したが、詳細に検討すると、上記のような問題点を含んでいることに留意し、これらの問題を解決すべく努力しなければならない。詳細については次章5.2「今後の課題」を参照されたい。

5. まとめ及び今後の課題

5.1 まとめ

本報で得られた知見をまとめると以下の通りである。

オーステナイトステンレス鋼SUS304を用いて550℃の軸力-ねじり重畳負荷下で多軸疲労/クリープ疲労試験を行い、以下の知見を得た。本研究では、SUS304をオーステナイト系鋼の代表として位置づけている。本研究の成果は実証炉を含むもんじゅ以降の炉に反映しうると考えられる。

- (1) 非比例クリープ疲労下では非比例疲労に比較してさらに1/2～1/5程度に寿命の低下が生じる。
- (2) 非比例クリープ疲労においても応力緩和は軸力0，せん断応力0の原点に向かって比例的に生じる。
- (3) 非比例クリープ疲労寿命は，相当ひずみ範囲としてひずみ経路を考慮したMises型相当ひずみを用い，ひずみ保持中の応力緩和をMises型の相当応力で評価し，これらに基づき単軸疲労特性，単軸クリープひずみ特性及び単軸クリープ破断特性から疲労損傷，クリープ損傷を求め，これらを線型損傷則に用いることにより，本報告における試験条件範囲に対しては工学的にほぼ合理的な評価を行える。

5.2 今後の課題

今後の課題として次のような点が考えられる。

(1) 緩和初期応力の推定方法の検討

現状では多軸負荷の緩和初期応力の推定を，単軸疲労負荷における動的応力ひずみ関係式に基づいて行っているが，この方法では，負荷条件に依っては必ずしも妥当な推定が得られるとは限らない。

すなわち，負荷形態によって次のようになる。

- | | | |
|---------------------|---|-----------------|
| 単軸疲労，比例重畳疲労 | — | 妥当な評価 |
| 単軸クリープ疲労，比例重畳クリープ疲労 | — | 保守的な評価（保持軟化のため） |

- | | |
|-----------|---------------------------------|
| 非比例疲労 | - 非保守的な評価（非比例負荷による硬化のため） |
| 非比例クリープ疲労 | - 妥当な評価（非比例負荷による硬化と保持軟化が相殺するため） |

この問題を解決するために、非比例負荷下で生じる顕著なひずみ効果をも扱いうる多軸構成式の開発が必要である。現在、多軸疲労／クリープ疲労試験とともに多軸クリープ試験のデータを取得中であり、これを従来の単軸試験の結果と併せて多軸構成式の開発に資する予定である。

(2) 応力緩和挙動の推定方法の検討

現状では多軸負荷下の応力緩和挙動の推定は、単軸クリープ試験により得られたクリープひずみ挙動とひずみ硬化則によって行っている。しかるに本報告（3.2節参照）により、非比例負荷下の応力緩和挙動は単軸負荷下のそれとは異なり、同一の緩和開始応力、緩和時間で比較した場合には、応力緩和量が単軸負荷の場合よりも小さくなる傾向が確認された。従って同一の緩和開始応力、緩和時間で比較した場合には非比例負荷下では比例負荷下と比較してクリープ損傷が大きくなる。これを考慮した損傷評価を行うるためには、(1)の場合と同様に非比例負荷をも扱いうる多軸クリープ構成式の開発が必要である。

(2)と同様、多軸クリープ試験の結果と本試験の結果を併せて多軸構成式の開発を行う予定である。

(3) 低ひずみ範囲におけるクリープ疲労強度の把握

本報告において試験を行ったひずみ範囲は非比例疲労で1.0～0.5%、非比例クリープ疲労の場合で1.0～0.7%であるが、実機の使用条件はさらに低ひずみ範囲である。このため、実機条件に適用すべきクリープ疲労評価法の構築及び検証のためには、さらに低ひずみ範囲（0.3%程度）における非比例疲労／クリープ疲労強度を把握することが必要である。

この強度の把握は試験により行う必要がある。理由は次のとおりである。まず、ひずみ経路を考慮した相当ひずみ範囲が0に近くなり弾性域になっても非比例負荷のような履歴依存効果があるのかどうかを確認しなければならない。また、本試験のよう

に大気中に於けるクリープ疲労試験の結果は、力学的挙動（クリープ疲労）に環境効果（酸化）が重畳したものである。酸化がクリープ疲労強度に及ぼす影響の大きさはひずみ範囲に依存すると考えられる。高ひずみ範囲では、材料表面に形成された酸化被膜の破壊あるいは結晶粒界の選択的酸化が、材料のクリープ疲労寿命の比較的初期に生じるため、環境効果のない場合に対して表面き裂の発生寿命が低下し、（き裂の進展速度も加速され）クリープ疲労寿命が低下する。一方、低ひずみ範囲ではこのような酸化の効果が顕著でないため、クリープ疲労寿命は主として材料内部で生じるクリープ損傷に律速され、き裂の発生寿命が全寿命に占める割合が高ひずみ範囲の場合と比較して大きくなると思われる。このように、クリープ疲労の破壊形態がひずみ範囲に依存するため、高ひずみ範囲で得られた特性を単純に低ひずみ範囲に外挿できるという合理的根拠はない。

現在低ひずみ範囲における非比例疲労／クリープ疲労試験を実施中である。

(4) 低ひずみ範囲における線型損傷則の妥当性の検証

上述の(3)のように、低ひずみ範囲ではき裂の発生メカニズムが異なることが予想されるため、線型損傷則の低ひずみ範囲における成立性を低ひずみのクリープ疲労試験データにより検証することが必要である。

(3)の結果を踏まえ、低ひずみ範囲における線型損傷則の適用性を検討する予定である。

(5) 破面および金相の巨視的及び微視的観察による破壊機構の推察

破面および金相の巨視的及び微視的観察による破壊機構の推察は次の2つ観点から必要である。

- ① 比例負荷と非比例負荷を統一的に評価することの妥当性の検証。本報告では非比例負荷においても比例負荷の場合と同様に、疲労負荷では疲労損傷のみが生じ、クリープ疲労負荷では疲労損傷とクリープ損傷が生じると仮定して損傷評価をおこなった。この妥当性を検証するために、破面および金相の巨視的及び微視的観察による破壊機構の推察を行い、非比例負荷下でも疲労は粒内き裂伝播、クリープ疲労は粒界き裂伝播により破壊していることを確認しておく必要がある。

② 高ひずみ範囲と低ひずみ範囲を統一的に評価することの妥当性の検証。現行の評価法では高ひずみ範囲と低ひずみ範囲を統一的に扱い、いずれの領域でも疲労負荷では疲労損傷のみが生じ、クリープ疲労負荷では疲労損傷とクリープ損傷が生じると仮定して損傷評価を行っているが、低ひずみでは疲労損傷あるいはクリープ損傷のいずれかの寄与が非常に小さく、場合に依っては無視できる可能性がある。このような可能性の確認、またこのような現象が実際に生じるとすればどの程度のひずみ範囲についてなのか等を確認するために、低ひずみ範囲において破面および金相の巨視的及び微視的観察による破壊機構の推察を行う必要がある。

①については現在試験を実施中である。②については③の試験終了を待ち実施する予定である。

(6) 環境効果（酸化）の評価

大気中で系統的に取得されたデータに基づいて、信頼性の高い長時間外挿を行うために、大気による環境効果（酸化）の評価方法の構築が求められている。これはまず既に系統的なデータが取得されている単軸負荷について行われるべきものであるが、単軸負荷について構築されたモデルの多軸負荷（特に非比例負荷）に対する適用性は確認しておく必要があるだろう。（例えば、材料表面あるいはき裂先端で生じる結晶粒界の選択酸化は、負荷応力方向と垂直の粒界で顕著となると考えられるが、非比例負荷では負荷応力の方向が時々刻々変化するため、これに該当する結晶粒界が単軸負荷と比較して多い。このため非比例負荷は比例負荷よりも環境効果に敏感ではないかという推測が成り立つが、これを実測データに基づき確認する必要がある。）

現在単軸負荷下における酸化モデル開発のため文献調査を実施中である。この結果を受け、多軸負荷下におけるモデルの適用性を検討する予定である。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、永田 敬氏を始めとする構造工学室の方々には大変貴重な助言をいただいた。また、東京大学の朝田 泰英教授には極めて有益な指摘を受けた。さらに、本報告書のデータは、材料開発室の材料強度試験グループの小峰 龍司氏および常陽産業㈱の川島 成一氏を始めとする多くの方々の御尽力によって始めて得られたものである。これらの方々に改めて謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Brown, M. W. and Miller, K. J., ASTM STP 770, (1982), 482.
- 2) Takahashi, Y., Ogata, T. and Nitta, A., Trans. of 10th SMiRT, vol L, (1989), 49.
- 3) Fatemi, A. and Socie, D. F., Eng. Mater. Struct. 11-3 (1988), 149.
- 4) McDowell, D. L. and Socie, D. F., ASTM STP 853, (1985), 64.
- 5) Nakamura, T., Ishikawa, T. and Asada, Y., 3rd Int. Conf. on Biaxial/Multiaxial Fatigue, (1989), Stuttgart, FRG
- 6) 浅山, 青砥, 和田, 動力炉・核燃料開発事業団 成果報告書, PNC SN9410 89-100.
- 7) Onami, M., Sakane, M. and Hamada, N., ASTM STP 853, (1985), 622.
- 8) Kandil, F. A., Miller, K. J. and Brown, M.W., ASTM STP 853, (1985), 651.
- 9) 緒方, 新田, 桑原, 日本材料学会 第26回高温強度シンポジウム前刷集, (1988), 70.
- 10) Nakamura, T., Ishikawa, T. and Asada, Y., PVP, vol.172, (1989), 69.
- 11) 浅山, 青砥, 和田, 日本機械学会論文集, 投稿中
- 12) ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Code Case Interpretation N-47-21
- 13) Benallal, A. and Marquis, D., Trans of 9th Int. Conf. on SMiRT, (1987), 385.
- 14) Igrai, T., Kato, H., Wada, H. and Asada, Y., Proc. 9th SMiRT Conf., (1987), 267.
- 15) Severud, L. K., PVP, vol.163, (1989), 1.
- 16) Severud, L. K. and Winkel, B. V., Trans. of 9th Int. Conf. on SMiRT, (1987), 123.
- 17) 動力炉・核燃料開発事業団編, 高速原型炉第一種機器の高温構造設計方針, 1984.
- 18) Wada, Y., Kawakami, Y. and Aoto, K., PVP, vol.123, (1987), 37.
- 19) Aoto, K., Wada, Y. and Komine, R., PVP, vol. 123, (1987), 43.
- 20) Wada, Y., Iwata, K., Aoto, K. and Kawakami, Y., Proc. Int. Conf. on Computational Mechanics, vol.1, (1986), IV-25.

- 21) Yoshitake, A., Wada, Y. and Hirano, M., Proc. Int. Conf. on Creep. (1986),
441.
- 22) PNC SN 9410 90-XXX「クリープ疲労損傷評価に用いる設計係数の策定に係わる解析
第3報 Yピースの解析(1)」, 1990年1月発行予定, 構造工学室