

# SUS304の高温多軸疲労挙動の検討

(第3報、多軸クリープ疲労評価法の一般性の検討)

1990年2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。

## SUS 304 の高温多軸疲労挙動の検討

(第 3 報, 多軸クリープ疲労評価法の一般性の検討)

浅山 泰, 川崎 弘嗣  
和田 雄作\*

### 要 旨

本報では PNC が東芝に委託して行った多軸クリープ疲労試験結果(単軸疲労, 純ねじり疲労, 純ねじりクリープ疲労, 比例重畳疲労, 比例重畳クリープ疲労)を前報までに提案した多軸クリープ疲労評価法に基づき評価した。その結果次の知見を得た。

- (1) PNC の多軸疲労/クリープ疲労試験結果と東芝の多軸疲労/クリープ疲労試験結果はほぼ良好に一致するが, 純ねじり疲労/クリープ疲労については東芝データの方が長寿命となる傾向がある。これは両者におけるヒートの相違が原因ではないかと思われる。
- (2) 純ねじりクリープ疲労においてピークひずみ保持時間を 3 分から 60 分の間で変化させると, クリープ疲労寿命は保持時間の増加とともに低下する。この傾向はひずみ保持時間 60 分ではまだ飽和しているとは言えない。
- (3) 純ねじりクリープ疲労において, 15 分の片側保持に対して, 反対側のピークに 3 分あるいは 15 分の保持時間を設けても, 特に寿命の回復は観察されない。
- (4) PNC データに基づき前報までに提案した多軸クリープ疲労評価法で東芝データを評価すると, 非安全側には factor of 2 程度, 安全側には factor of 5 程度で全体的には保守的に評価することが可能である。

---

\* 機器構造開発部・材料開発室

## Evaluation of High Temperature Multiaxial Fatigue

### Behavior of 304 steel ( 3rd report )

Tai Asayama, Hirotsugu Kawasak  
Yusaku Wada \*

#### Abstract

A series of multiaxial creep-fatigue tests (uniaxial fatigue, pure torsional fatigue, pure torsional creep-fatigue, proportional fatigue, proportional creep-fatigue) was conducted by Toshiba Corporation as a part of a joint study with PNC. The results of the tests were evaluated by the multi-axial creep-fatigue evaluation method which was developed by the authors in the previous report. The following observation were obtained.

- (1) Results of multiaxial creep-fatigue tests obtained by Toshiba Corporation coincide well with those obtained by PNC, except those of pure torsional fatigue/creep-fatigue tests. In the case of pure torsional fatigue/creep-fatigue, Toshiba data showed slightly longer lives.
- (2) Pure torsional creep-fatigue lives reduced as the peak strain hold time increased from 3 minutes to 60 minutes. A longer hold time would have reduced the creep-fatigue lives even more.
- (3) In pure torsional creep-fatigue tests with a peak strain hold of 15 minutes, recovery of life was not observed with an additional strain hold time (from 3 minutes to 15 minutes) at the other strain peak.
- (4) It was shown that the mutiaxial creep-fatigue evalutaion method proposed by the authors could evaluate the Toshiba data conservatively. Life predictions were conservative for a factor of 5 and nonconservative for a factor of 2.

---

\* Materials Developing Section, O-arai Engineering Center.

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 多軸疲労/クリープ疲労試験の方法 .....	2
2.1 試験片および試験装置 .....	2
2.1.1 供試材及び試験片 (PNC) .....	2
2.1.2 試験装置 (PNC) .....	2
2.1.3 供試材および試験片 (東芝) .....	2
2.1.4 試験装置 (東芝) .....	2
2.2 試験条件 .....	2
2.2.1 試験条件 (PNC) .....	2
2.2.2 試験条件 (東芝) .....	2
3. 多軸疲労/クリープ疲労試験の結果 .....	13
3.1 多軸疲労/クリープ疲労寿命 .....	13
3.1.1 全般的傾向 .....	13
3.1.2 PNC データと東芝データの比較 .....	13
3.2 応力ひずみ関係 .....	14
3.3 ひずみ保持時間とクリープ疲労の関係 .....	14
4. 多軸疲労/クリープ疲労寿命の評価 .....	28
4.1 線型損傷則に基づく多軸疲労/クリープ疲労評価法 .....	28
4.2 東芝データの評価 .....	28
4.2.1 疲労損傷 .....	28
4.2.2 クリープ損傷 .....	28
4.2.3 多軸疲労/クリープ疲労寿命の評価 .....	29
4.3 評価結果の検討 .....	30
5. まとめおよび今後の課題 .....	47
5.1 まとめ .....	47
5.2 今後の課題 .....	47
謝 辞 .....	48
参考文献 .....	49

## 表 リ ス ト

表 2.1	供試材の熱処理と化学成分 (PNC)	4
表 2.2	供試材の機械的性質 (PNC)	4
表 2.3	供試材の製造仕様の概要 (東芝)	5
表 2.4	供試材の熱処理と化学成分 (東芝)	6
表 2.5	供試材の機械的性質 (東芝)	6
表 2.6	試験機の仕様 (東芝)	7
表 2.7	多軸疲労/クリープ疲労試験条件一覧表 (PNC)	8
表 2.8 (1)	多軸疲労/クリープ疲労試験条件一覧表 (東芝) (1)	9
表 2.8 (2)	多軸疲労/クリープ疲労試験条件一覧表 (東芝) (2)	10
表 3.1 (1)	多軸疲労/クリープ疲労試験の結果 (東芝) (1)	15
表 3.1 (2)	多軸疲労/クリープ疲労試験の結果 (東芝) (2)	16
表 3.2	多軸疲労/クリープ疲労試験の結果 (PNC)	17
表 4.1	多軸疲労損傷評価の結果	31
表 4.2	多軸疲労/クリープ疲労損傷評価の結果 (実験値ベース)	32
表 4.3	多軸疲労/クリープ疲労損傷評価の結果 (動的応力ひずみ関係式ベース)	33
表 4.4	多軸疲労寿命評価の結果	34
表 4.5	多軸疲労/クリープ疲労寿命評価の結果 (実験値ベース)	35
表 4.6	多軸疲労/クリープ疲労寿命評価の結果 (動的応力ひずみ関係式ベース)	36

## 図 リ ス ト

図 2.1	試験片の形状および寸法 (PNC)	11
図 2.2	試験片の形状および寸法 (東芝)	12
図 3.1	多軸疲労/クリープ疲労試験の結果 (東芝)	18
図 3.2	多軸疲労/クリープ疲労試験の結果 (PNC)	19
図 3.3(1)	PNC データと東芝データの比較 (単軸疲労)	20
図 3.3(2)	PNC データと東芝データの比較 (純ねじり疲労)	21
図 3.3(3)	PNC データと東芝データの比較 (比例重畳疲労)	22
図 3.3(4)	PNC データと東芝データの比較 (純ねじりクリープ疲労)	23
図 3.3(5)	PNC データと東芝データの比較 (比例重畳クリープ疲労)	24
図 3.4	ひずみ範囲と応力範囲の関係 (東芝)	25
図 3.5	ひずみ範囲と応力範囲の関係 (東芝, PNC)	26
図 3.6	ひずみ保持時間とクリープ疲労寿命の関係	27
図 4.1	クリープ疲労損傷の評価	37
図 4.2	クリープ疲労損傷の評価	38
図 4.3	クリープ疲労損傷の評価	39
図 4.4	クリープ疲労損傷の評価	40
図 4.5	クリープ疲労損傷の評価	41
図 4.6	クリープ疲労損傷の評価	42
図 4.7	クリープ疲労寿命の評価結果 (実測値ベース)	43
図 4.8	クリープ疲労寿命の評価結果 (動的応力ひずみ関係式ベース)	44
図 4.9	クリープ疲労寿命の評価結果 (PNC データ)	45
図 4.10	クリープ疲労寿命の評価結果 (動的応力ひずみ関係式ベース, $\alpha_c = 1.0$ )	46

# 1. 緒 言

著者らは、高速増殖炉等の大型高温プラントにおいて、長時間にわたって多軸負荷下でクリープ疲労をうける構造材料の健全性評価法の確立を目的として、多軸クリープ疲労評価法の開発を進めてきた。SUS 304 鋼について 550°C で軸力-ねじり重畳負荷試験を実施し、その結果に基づいて比例疲労/クリープ疲労および最も厳しい負荷条件であるとされる非比例負荷の疲労/クリープ疲労に適用可能な多軸クリープ疲労評価法を提案した<sup>(1) (4)</sup>。本報では、別途外部委託にて実施した比例負の疲労及びクリープ疲労試験結果<sup>(5) (9)</sup>にこの評価法を適用し、評価法の妥当性、一般性を検証することを目的とする。

ここで、著者らの研究により既に明らかになった知見を以下に示す。これらの結果は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 を用いて 550°C の軸力-ねじり重畳負荷下で、薄肉円筒型試験片を用いて多軸疲労/クリープ疲労試験を行った結果得られたものである。

- (1) 比例負荷下での疲労寿命は純ねじり、比例重畳、単軸の順に長寿命となるが、その差はわずかである。また、円筒型試験片の単軸疲労寿命は中実試験片の平均傾向より若干短寿命となる。
- (2) クリープ疲労寿命は、純ねじり、比例重畳、単軸とも、それぞれの疲労寿命に対して低下する。
- (3) 非比例疲労寿命は、比例疲労寿命に比較して  $1/5 \sim 1/6$  に低下する。
- (4) (3)の寿命低下は相当ひずみ範囲としてひずみ経路を考慮した Mises 型の相当ひずみ<sup>(1)</sup>を用いることによりほぼ妥当に評価できる。
- (5) 非比例クリープ疲労下では非比例疲労に比較して  $1/2 \sim 1/5$  程度に寿命の低下が生じる。この結果、試験を行った  $\Delta\epsilon_{eq} = 0.7 \sim 1.0\%$  の範囲では、ASME code 型の相当ひずみ範囲を統一して比較すると、非比例クリープ疲労では単軸疲労に対して寿命が  $1/13 \sim 1/18$  に低下する。
- (6) 非比例クリープ疲労においても応力緩和は軸応力 0、せん断応力 0 の原点に向かって比例的に生じる。
- (7) 比例及び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うことが可能である。



## 2. 多軸疲労／クリープ疲労試験の方法

### 2.1 試験片および試験装置

#### 2.1.1 供試材及び試験片 (PNC)

供試材は、SUS 304 の熱間加工板 (A 7 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 (PNC)

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<sup>(1)</sup>に示した通りであるのでここでは省略する。

#### 2.1.3 供試材および試験片 (東芝)

供試材は SUS 304 鋼棒であり、製造仕様の概要を表 2.3 に示す。溶態化処理を施してある。化学成分を表 2.4 に、機械的性質を表 2.5 に示す。

試験片は 80 φ の供試材より、試験片長手方向が軸方向に平行になるよう採取した。形状は図 2.2 に示す薄肉円筒型試験片 (1100°C, 20 分焼きなまし) である。

#### 2.1.4 試験装置 (東芝)

試験装置は MTS 社製油圧サーボ型材料挙動試験機である。仕様を表 2.6 に示す。

### 2.2 試験条件

#### 2.2.1 試験条件 (PNC)

現在までに行った試験条件の一覧を表 2.7 に示す。純ねじりのクリープ疲労 (試験 No. 10) 以外は前報<sup>(2)</sup>で報告済である。なお、この試験結果に関する詳細解析結果は次報で報告する予定である。

#### 2.2.2 試験条件 (東芝)

試験条件の一覧表を表 2.8 に示す。

比例疲労の全般的傾向を観察するため、単軸、純ねじり、比例重畳 (軸ひずみ範囲  $\Delta\varepsilon$  とねじりひずみ範囲  $\Delta\gamma$  の比  $\lambda = 1.51 \sim 1.81$ , 軸ひずみとねじりひずみの位相差  $\phi = 0^\circ$ ) について Mises 型の相当ひずみにして  $\Delta\varepsilon_{eq} = 0.26 \sim 2.32\%$  の範囲で疲労試験を行った (表 2.8 (1))。

次に純ねじり負荷でひずみ保持時間およびひずみ保持位置の効果を検討するため、片方のひずみピークにひずみ保持時間を設けた波形、片方のひずみピークと他方のひずみピークの両方にひずみ保持時間を設けた波形で試験を行った。片方のひずみピークの保持時間は3分から60分の範囲で変化させた。両方のピークにひずみ保持時間を設けた波形では、片方のピークのひずみ保持時間は15分に固定し、他方のひずみピークのひずみ保持時間を3分および15分とした。

また、比例重畳負荷（ひずみ比=1.73）においてひずみ保持位置効果を検討するため、軸ひずみ引張ピークにひずみ保持を設けた波形および軸ひずみ圧縮ピークにひずみ保持を設けた波形の試験を行った。これらのひずみ保持時間は15分とした。

ひずみ変動部のひずみ速度はすべて0.1% / sec、ひずみ波形は三角波とした。

表2.1 供試材の熱処理と化学成分 (PNC)

熱処理 1,100°C×48 min 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 <sup>2</sup>	Tensile Strength kg/mm <sup>2</sup>	Elongation %
21.8	63.6	71.9

表 2.3 供試材の製造仕様の概要(東芝)

項 目	内 容																									
適用規格	1. JIS 4302-1981「ステンレス鋼棒」 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：電気炉溶製後真空脱ガス処理した鋼塊より熱間圧延 2. 熱 処 理：JISC 4303に基づく固溶化熱処理 1,010～1,150℃ 水冷																									
品質規格	1. 化 学 成 分 (とりべ分析値, %) <table border="1" data-bbox="488 947 1278 1131"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Ni</th> <th>Cr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.04</td> <td rowspan="2">≤1.00</td> <td rowspan="2">≤2.00</td> <td rowspan="2">≤0.04</td> <td rowspan="2">≤0.03</td> <td>8.00</td> <td>18.00</td> </tr> <tr> <td>0.08</td> <td>10.50</td> <td>20.00</td> </tr> </tbody> </table> 2. 機 械 的 性 質 <table border="1" data-bbox="493 1234 1283 1413"> <thead> <tr> <th>0.2%耐力 (kg/mm<sup>2</sup>)</th> <th>引張強さ (kg/mm<sup>2</sup>)</th> <th>伸 び (%)</th> <th>ブリネル硬さ (H<sub>B</sub>)</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	0.04	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.03	8.00	18.00	0.08	10.50	20.00	0.2%耐力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)	ブリネル硬さ (H <sub>B</sub> )	≥21	≥53	≥40	≤187
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr																				
0.04	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.03	8.00	18.00																				
0.08					10.50	20.00																				
0.2%耐力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)	ブリネル硬さ (H <sub>B</sub> )																							
≥21	≥53	≥40	≤187																							
試験および 検査方法	1. と り べ 分 析：Co又はJISG 1253 2. 製 品 分 析：JISG 0321, JISG 1253 3. 引 張 試 験：JISZ 2241, JISG 0567 4. 結 晶 粒 度：JISG 0551 5. 非 金 属 介 在 物：JISG 0555 6. 超 音 波 探 傷：通産省告示第501号, 第7条 7. 液 体 浸 透 探 傷： ” , 第11条																									

表 2.4 供試材の熱処理と化学成分（東芝）

分析試験結果（wt %）

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co
0.04	0.65	1.49	0.034	0.007	8.20	18.23	0.12

熱処理結果

1,060°C × 1 hr → W.Q.

表 2.5 供試材の機械的性質（東芝）

機械試験結果

	0.2%耐力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)	紋 り (%)	ブリネル硬さ (H <sub>B</sub> )
R.T.	28.5	61.9	64.0	76.2	167
550°C	17.3	38.6	27.0	76.6	—

その他の試験結果

結 晶 粒 度	非金属介在物	液体浸透探傷	超音波探傷	外観・寸法検査
3.8	0.038	Good	Good	Good

表 2.6 試験機の仕様 (東芝)

試験機 No 装置名	HT 001 材料挙動試験機		
<u>試験機本体</u> 1) ロードフレーム 2) 油圧加振器  3) サーボバルブ 4) グリップ 5) クロスヘッド 昇降装置 6) ロードセル	MTS社製 1) 4コラム 2) リニア加振器(型式204.63) 最大荷重 ±10 TON 最大変位 ±50 mm ロータリー加振器 (型式214.21) 最大トルク ±115kg-m 最大角変位 ±50° 3) 型式252.23 流量19ℓ/min 4) ボルト締め 5) 油圧シリンダー方式 6) アキシヤル、トーションロード セル(型式660.02A-03) 最大容量 軸方向11.3TON 振り方向 144kg-m	<u>コンピュータ制御装置</u> 1) 形 式 2) 機 能  3) インターフェース  <u>周辺機器装置</u> 1) グラフィック ディスプレイ 2) ハードコピー ユニット	1) デック社製 2) プロセッサ (PDP11/04) 記憶容量 24kワード フレキシブルディスク (RX-11) 記憶容量 256kワード 3) (型式433) 8ch. A/D コンパータ 2ch. D/A コンパータ ハードウェアセグメント ジェネレータ  1) テクトロニクス社製 (型式4010) 2) テクトロニクス社製 (型式4631)
<u>加熱装置</u> 1) 形 式  2) 温度制御装置  3) 温度調節精度	レベル社製 1) インダクションヒーティング (型式T-5-IN) パワー 出力5kW, 出力周波数90 ~400kHz 2) 型式640閉回路方式コント ローラ 3) ±1%	<u>油圧供給源</u> 1) 形 式 2) 能 力  3) 油圧ホース	MTS社製(型式506.02) 吐出量 19ℓ/min 圧 力 210kg 6m(高圧ゴムホース)
<u>測定記録装置</u> 1) 伸び測定装置  2) 応力, ひずみ 記録装置	1) ひずみゲージタイプ 高温軸伸び計(空冷) 高温径伸び計(空冷) 常温軸伸び計 常温径伸び計 2) XYレコーダー(理化電機)		

表2.7 多軸疲労/クリープ疲労試験の条件 (PNC)

試験 No	$\lambda$	$\phi$ (deg)	$t_h$ (min)	$\dot{\epsilon}_{eq}$ (%/sec)	$\Delta \epsilon_{eq}$ (%)	$\Delta \epsilon$ (%)	$\Delta \gamma$ (%)
1	0	0	0	0.1	0.510	0.510	
2					1.009	1.009	
3					1.508	1.508	
4			60		0.683	0.683	
5					1.018	1.018	
6					1.489	1.489	
7	$\infty$	0	0	0.1	0.552		0.877
8					1.086		1.754
9					1.561		2.626
10			60		1.000		1.732
11	1.7	0	0	0.1	0.508	0.360	0.622
12					1.013	0.715	1.241
13					1.514	1.068	1.857
14			60		1.000	0.710	1.220
15	1.7	90	0	0.1	0.700	0.700	1.210
16					0.500	0.500	0.866
17					1.000	1.010	1.767
18			60		0.700	0.700	1.210
19					1.000	1.000	1.732

表2.8(1) 多軸疲労/クリープ疲労試験条件一覧表(1)

位相差 =  $0^\circ$ 、ひずみ速度 = 0.1 %/sec

試験No	$\lambda$	$t_h$ (min)	$\Delta \epsilon_{0.1}$ (%)	$\Delta \epsilon$ (%)	$\Delta \gamma$ (%)
1	0	0	0.26	0.29	
2			0.31	0.34	
3			0.37	0.40	
4			0.64	0.69	
5	$\infty$	0	0.58		1.01
6			0.78		1.34
7			0.96		1.66
8			1.42		2.46
9			2.32		4.01
10	1.63	0	0.35	0.27	0.44
11	1.51		0.48	0.37	0.56
12	1.72		0.59	0.43	0.74
13	1.81		0.73	0.52	0.94



表2. 8(2) 多軸疲労/クリープ疲労試験条件一覧表(2)

位相差 = 0°、ひずみ速度 = 0.1%/sec

試験No	$\lambda$	$t_n$ (min)	$\Delta \epsilon_{0.2}$ (%)	$\Delta \epsilon$ (%)	$\Delta \gamma$ (%)
14	$\infty$	0	0.98		1.70
15		3	1.01		1.75
16		6	0.99		1.71
17		10	0.97		1.68
18		15	0.99		1.72
19		30	0.99		1.72
20		60	1.00		1.73
21		15/3	1.02		1.77
22		15/15	1.02		1.77
23		1.73	0	0.98	0.71
24	15/0		0.99	0.71	1.25
25	0/15		0.98	0.71	1.24

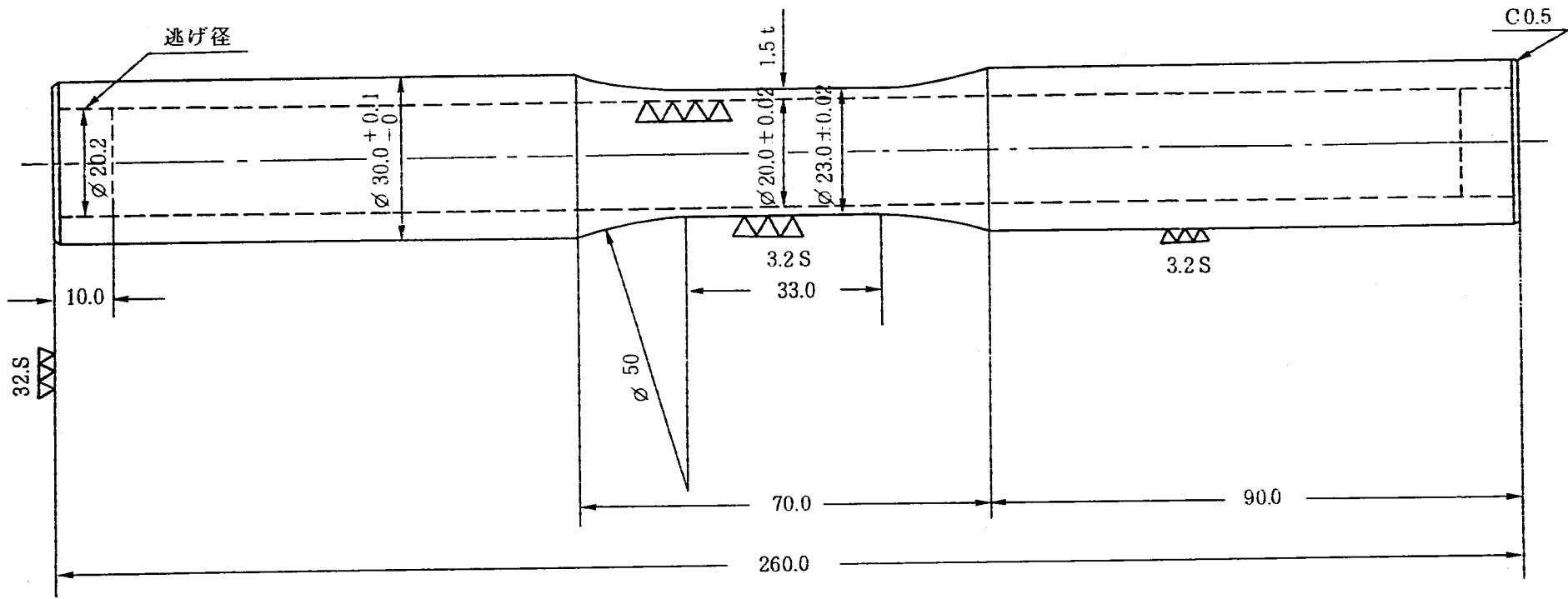


図 2.1 試験片の形状および寸法 (PNC)

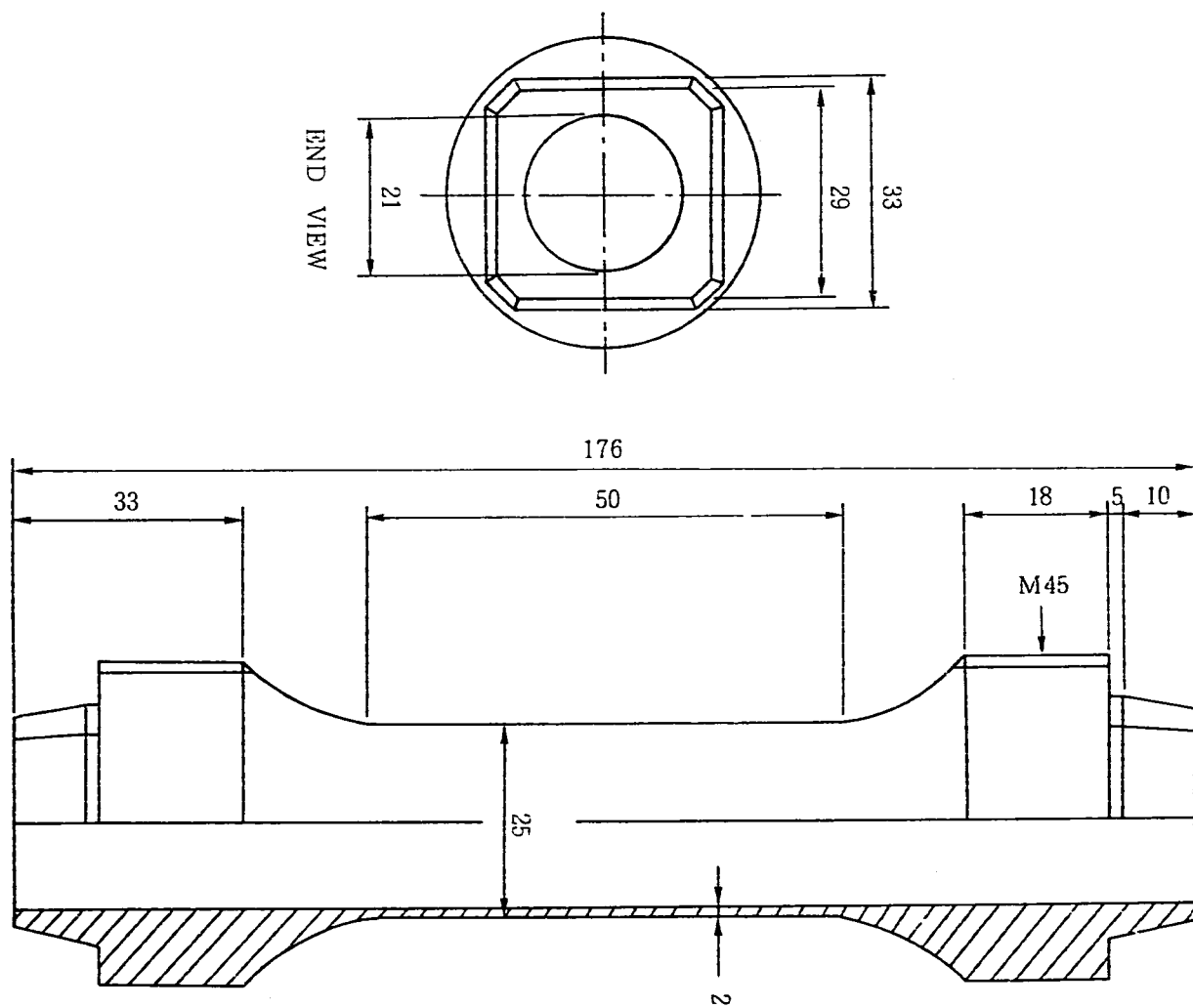


図 2.2 試験片の形状及び寸法 (東芝)

### 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

##### 3.1.1 全般的傾向

多軸疲労／クリープ疲労試験の結果を表 3.1～2，図 3.1～2 に示す。図 3.1～2 は，ASME code で規定されている定義による相当ひずみ範囲（以降 ASME code 型の相当ひずみ範囲という）と破断寿命の関係を示したものである。図 3.1 は東芝委託データ，図 3.2 は PNC データである。いずれの場合も破断寿命は，単軸および重畳負荷では引張最大荷重が定常状態の 3 / 4 に低下したときの繰返し数，純ねじり負荷ではいずれか一方の最大トルクが定常状態の 3 / 4 に低下したときの繰返し数として定義した。

図 3.1 より，疲労寿命は純ねじり（△で示す，ひげなしは PNC データ，ひげ付は東芝データ，以下同様），比例重畳（□），単軸（○）の順に長いことが分かる。また，単軸疲労寿命は図中破線で示した中実試験片による平均傾向（最適疲労線<sup>(10)</sup>よりも若干短寿命となっている。さらに，純ねじり，比例重畳負荷にひずみ保持時間を設けることにより，クリープ疲労寿命が低下することが分かる（純ねじりクリープ疲労を▲，比例重畳クリープ疲労を■で示す）。ただし，この中で純ねじりクリープ疲労の 30 分保持は 60 分保持よりも短寿命となっており，いずれかのデータに実験上何らかの問題があった可能性がある。この点は 3.3 節でも検討する。

図 3.2 から，同様の傾向が読み取れる。

##### 3.1.2 PNC データと東芝データの比較

PNC データと東芝データの整合性を検討するため両者の疲労／クリープ疲労寿命の比較を行った結果を図 3.3 に示す。単軸疲労，純ねじり疲労，比例重畳疲労，純ねじりクリープ疲労，比例重畳クリープ疲労のそれぞれについて図 3.3 (1)～(5) に示す。いずれの図にも，中実試験片による単軸疲労の平均傾向（以下最適疲労曲線と呼ぶ）を破線で示してある。これらを順次検討する。

- (1) 単軸疲労 PNC データと東芝データは良く一致しており，両者とも最適疲労破損曲線よりも若干短寿命となっている。
- (2) 純ねじり疲労 両者とも最適疲労曲線より長寿命となる傾向（PNC データの高ひずみ範囲を除く）は一致しているが，PNC データは東芝データより全般に若干短寿命となっている。
- (3) 比例重畳疲労 両者の傾向は一致しており，疲労寿命は最適疲労曲線と一致している。
- (4) 純ねじりクリープ疲労 PNC データは 60 分保持の一点のみであるが，東芝の 60 分保持と比較すると，若干短寿命となっている。この差は純ねじり疲労における差と同程度である。
- (5) 比例重畳クリープ疲労 PNC データと東芝データではひずみ保持時間が異なるため，直接比較しうるデータはないが，保持時間の増加とともに寿命が減少している様子が分かる。

以上の比較検討より、PNC データと東芝データは概ね良好に一致しているが、純ねじり疲労/クリープ疲労においては PNC データは東芝データに対して全般に若干短寿命となることが分かる。この差異は、PNC で用いた材料と東芝で用いた材料のヒートの差異あるいは製造方法の差異によるのではないかと考えられる。PNC で用いたものは板材 (A7 ヒート) であるが、東芝で用いた材料は棒材 (A8 ヒート) である。

### 3.2 応力ひずみ関係

図 3.4 ~ 5 に相当ひずみ範囲と相当応力範囲の関係を示す。図 3.4 は東芝データであり、図 3.5 は東芝データと PNC データを比較したものである。図中の破線は中実試験片のひずみ速度 0.1% / sec の動的応力ひずみ関係<sup>(10)</sup>である。図 3.4 より東芝データを検討する。単軸疲労、比例重畳疲労は低ひずみ範囲では動的応力ひずみ関係と一致しているが、高ひずみ範囲になるにつれ、動的応力ひずみ関係より高めの応力を示す傾向がある。純ねじり負荷では応力範囲は動的応力ひずみ関係より小さくなる。純ねじり負荷ではひずみ保持時間を設けることにより応力範囲は大きくなっている (保持硬化している) が、比例重畳負荷では応力範囲は小さくなっている (保持軟化している)。

図 3.5 で東芝データと PNC データを比較すると、単軸負荷に関しては傾向が一致しているが、純ねじり、比例重畳負荷では疲労/クリープ疲労ともに PNC データの方が応力範囲が小さくなっている。また、純ねじりクリープ疲労については東芝データは保持硬化していたが、PNC データでは、他の負荷モード同様保持軟化している。この差も PNC と東芝の材料のヒートの差あるいは製造方法の差が原因ではないかと考えられる。

### 3.3 ひずみ保持時間とクリープ疲労の関係

ひずみ保持時間とクリープ疲労強度の関係を図 3.6 に示す。まず純ねじりクリープ疲労についてみると、保持時間の増加とともにクリープ疲労寿命が低下することがわかる。この傾向は、保持時間 60 分でもまだ飽和していないと思われる。この中で、30 分保持は他のデータの傾向と比較して著しい寿命低下を示しており、実験上何らかの問題があった疑いがある。片側 15 分保持と、それに加えて反対側のひずみピークに 3 分あるいは 15 分保持を設けた波形の寿命を比較すると、反対側のひずみピークに 3 分あるいは 15 分保持を設けても寿命の回復は観察されず、むしろわずかではあるが、さらに寿命低下が生じることがわかる。PNC データは東芝データに比較してやや短寿命側にプロットされている。

次に比例重畳クリープ疲労についてはデータが少ないが、純ねじり負荷と同様に保持時間を設けることにより寿命が低下する傾向が観察される。軸ひずみ引張ピーク保持と圧縮ピーク保持を比較すると、圧縮ひずみピーク保持の方がやや長寿命となることが分かる。

表3.1(1) 多軸クリープ疲労試験の結果(東芝)(1)

位相差 =  $0^\circ$ 、ひずみ速度 = 0.1%/sec

試験No	$\lambda$	$t_b$ (min)	$\Delta \varepsilon_{\dots}$ (%)	$\Delta \varepsilon$ (%)	$\Delta \varepsilon_p$ (%)	$\Delta \gamma$ (%)	$\Delta \gamma_p$ (%)	$\Delta \sigma_{\dots}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\Delta \sigma$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\Delta \tau$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$N_f$ (cycles)
1	0	0	0.26	0.29	0.09			(31.4)			250000中断
2			0.31	0.34	0.12			(34.0)			218376
3			0.37	0.40	0.17			(34.8)			23450
4			0.64	0.69	0.37			(50.0)			4353
5	8	0	0.58			1.01	0.54	(39.6)			42765
6			0.78			1.34	0.84	(46.2)			17237
7			0.96			1.66	1.03	(52.0)			7901
8			1.42			2.46	1.71	(60.0)			2398
9			2.32			4.01	3.14	(69.0)			645
10	1.63	0	0.35	0.27	0.11	0.44	0.19	(35.2)			53680
11	1.51		0.48	0.37	0.18	0.56	0.27	(39.0)			20485
12	1.72		0.59	0.43	0.22	0.74	0.38	(46.6)			10017
13	1.81		0.73	0.52	0.29	0.94	0.53	(51.4)			2971

( )内の数字はグラフからの読み取り値

表3.1(2) 多軸クリープ疲労試験の結果(東芝)(2)

位相差 =  $0^\circ$ 、ひずみ速度 = 0.1 %/sec

試験No	$\lambda$	$t_h$ (min)	$\Delta \varepsilon_{eq}$ (%)	$\Delta \varepsilon$ (%)	$\Delta \varepsilon_p$ (%)	$\Delta \gamma$ (%)	$\Delta \gamma_p$ (%)	$\Delta \sigma_{eq}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\Delta \sigma$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\Delta \tau$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$N_f$ (cycles)
14	$\infty$	0	0.98			1.70	1.09	54.7		31.6	5520
15		3	1.01			1.75	1.14	55.3		31.9	4794
16		6	0.99			1.71	1.10	55.3		31.9	4092
17		10	0.97			1.68	1.10	55.6		32.1	3592
18		15	0.99			1.72	1.10	54.6		31.5	3014
19		30	0.99			1.72	1.05	60.4		34.9	867
20		60	1.00			1.73	1.16	54.6		31.5	1921
21		15/3	1.02			1.77	1.26	56.3		32.5	2888
22		15/15	1.02			1.77	1.27	54.0		31.2	2805
23		1.73	0	0.98	0.71	0.44	1.23	0.79	59.33	49.19	19.15
24	15/0		0.99	0.71	0.45	1.25	0.84	56.02	44.58	19.59	1229
25	0/15		0.98	0.71	0.44	1.24	0.82	57.27	45.39	20.16	1514

表3.2 多軸疲労/クリープ疲労試験の結果 (PNC)

試験片No	$\lambda$	$\phi$ (deg)	$t_h$ (min)	$\dot{\epsilon}_{\dots}$ (%/sec)	$\Delta \epsilon_{\dots}$ (%)	$\Delta \epsilon$ (%)	$\Delta \gamma$ (%)	$\Delta \sigma_{\dots}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\Delta \sigma$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\Delta \tau$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$N_f$ (cycles)	
MBS6B9	0	0	0	0.1	0.510	0.506		42.3	42.3		6034	
MBS6B7					1.009	1.009		55.5	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
HBS8B7						1.489	1.489		49.1	49.1		283
MBS6B3	8	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
MBS8D3			60		1.000		1.732	45.7		26.4	1328	
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		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



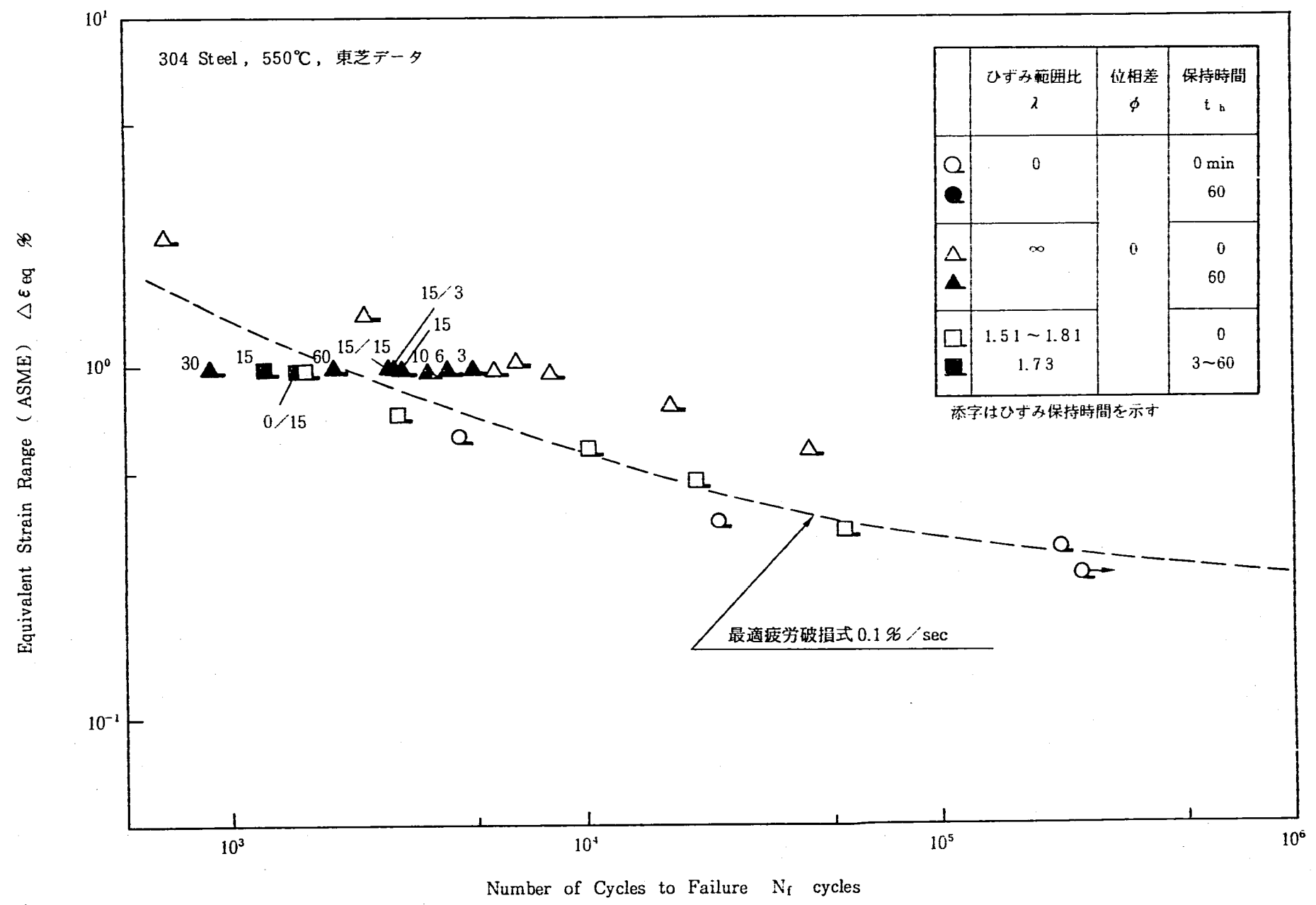


図 3.1 多軸疲労/クリープ疲労試験の結果 (東芝)

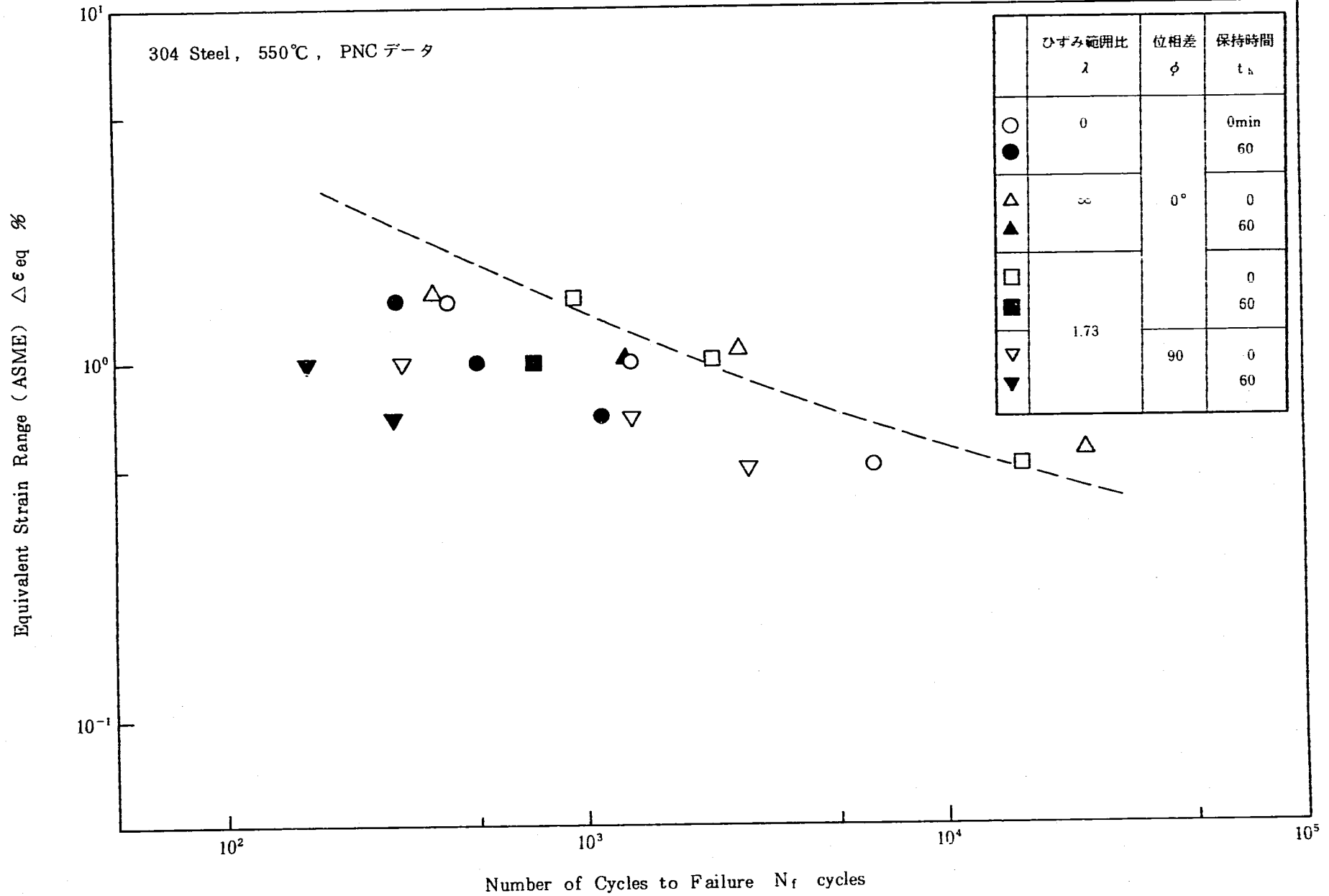


図 3.2 多軸疲労/クリープ疲労試験の結果 (PNC)

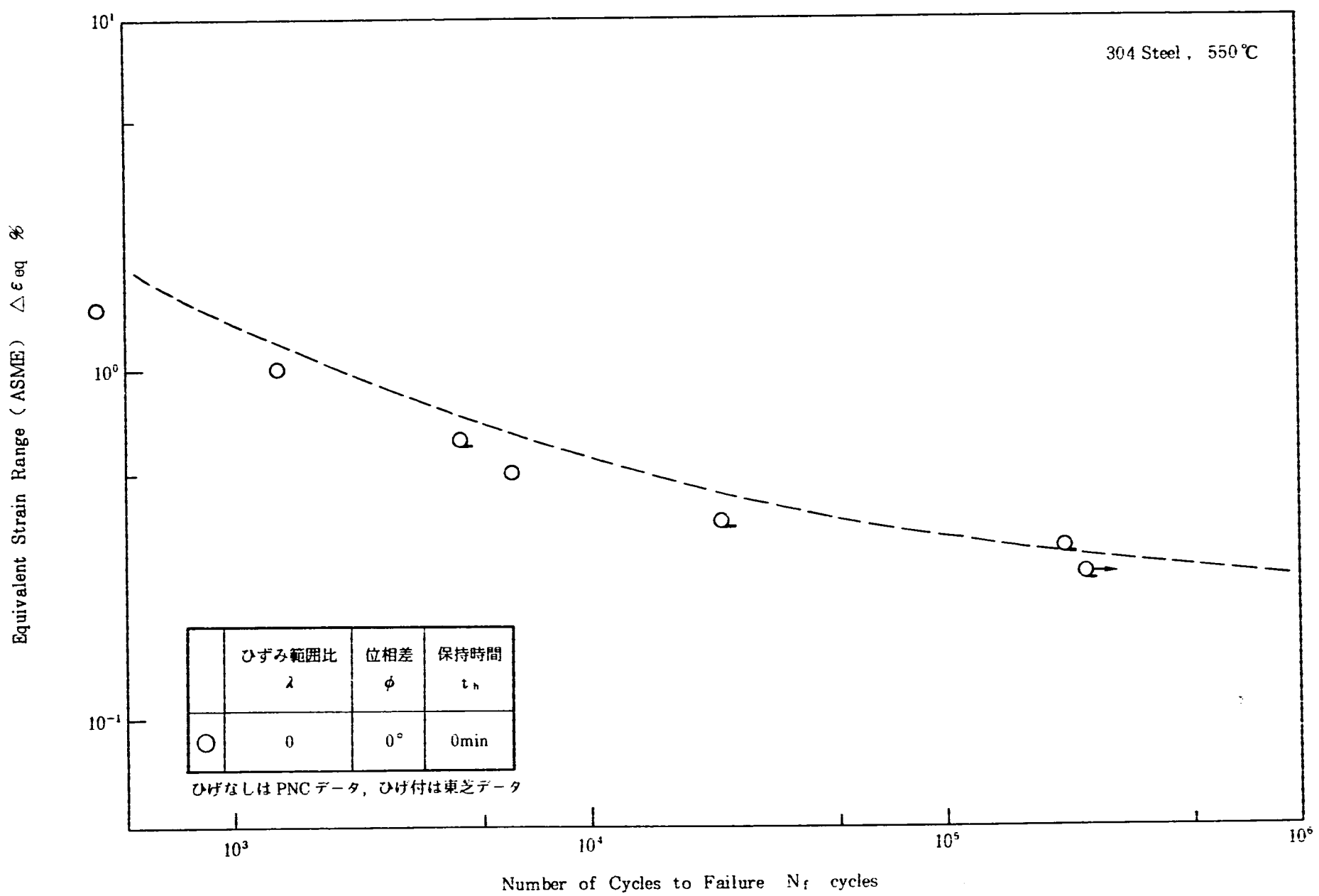


図 3.3(1) PNC データと東芝データの比較 (単軸疲労)

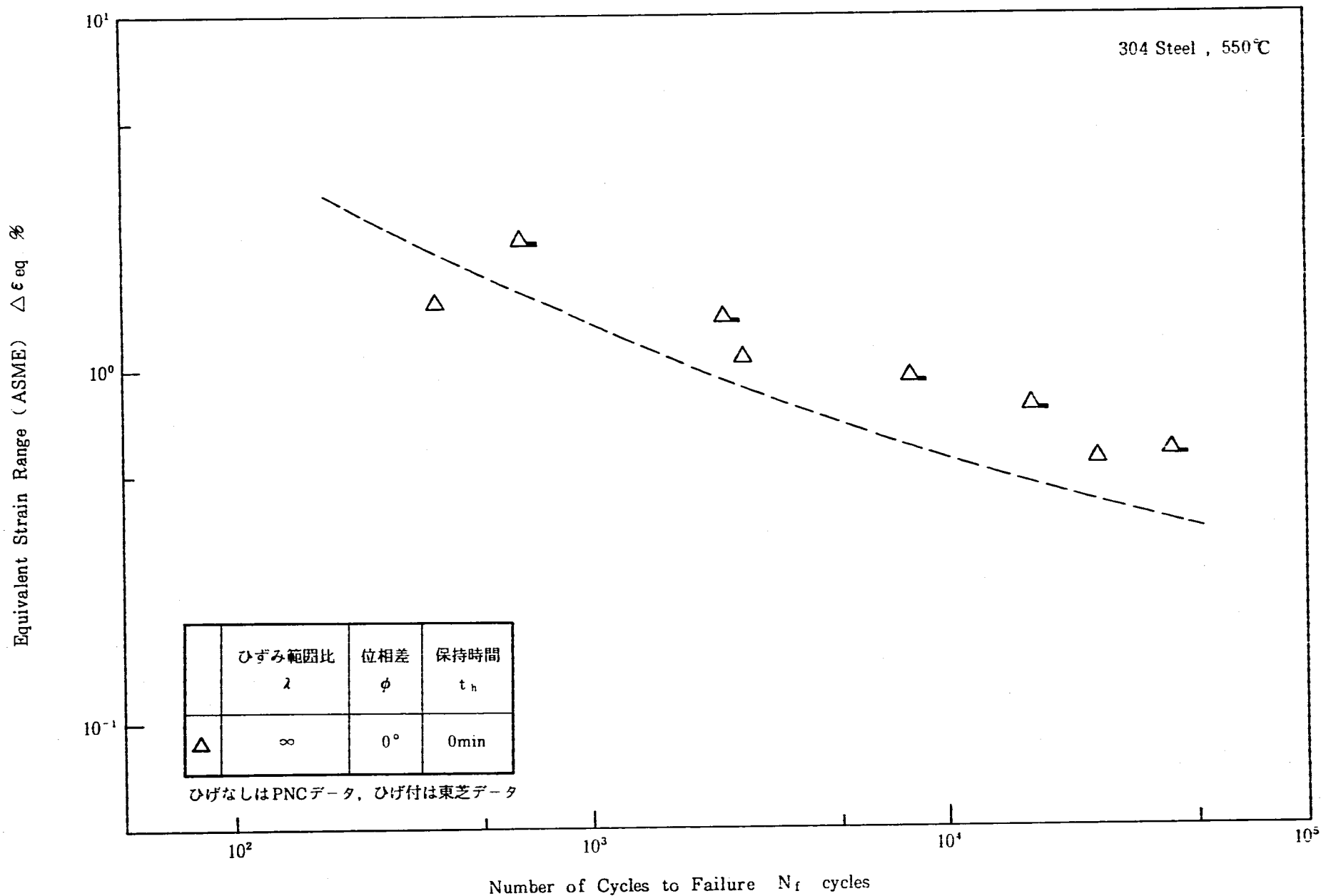


図 3.3(2) PNCデータと東芝データの比較 (純ねじり疲労)

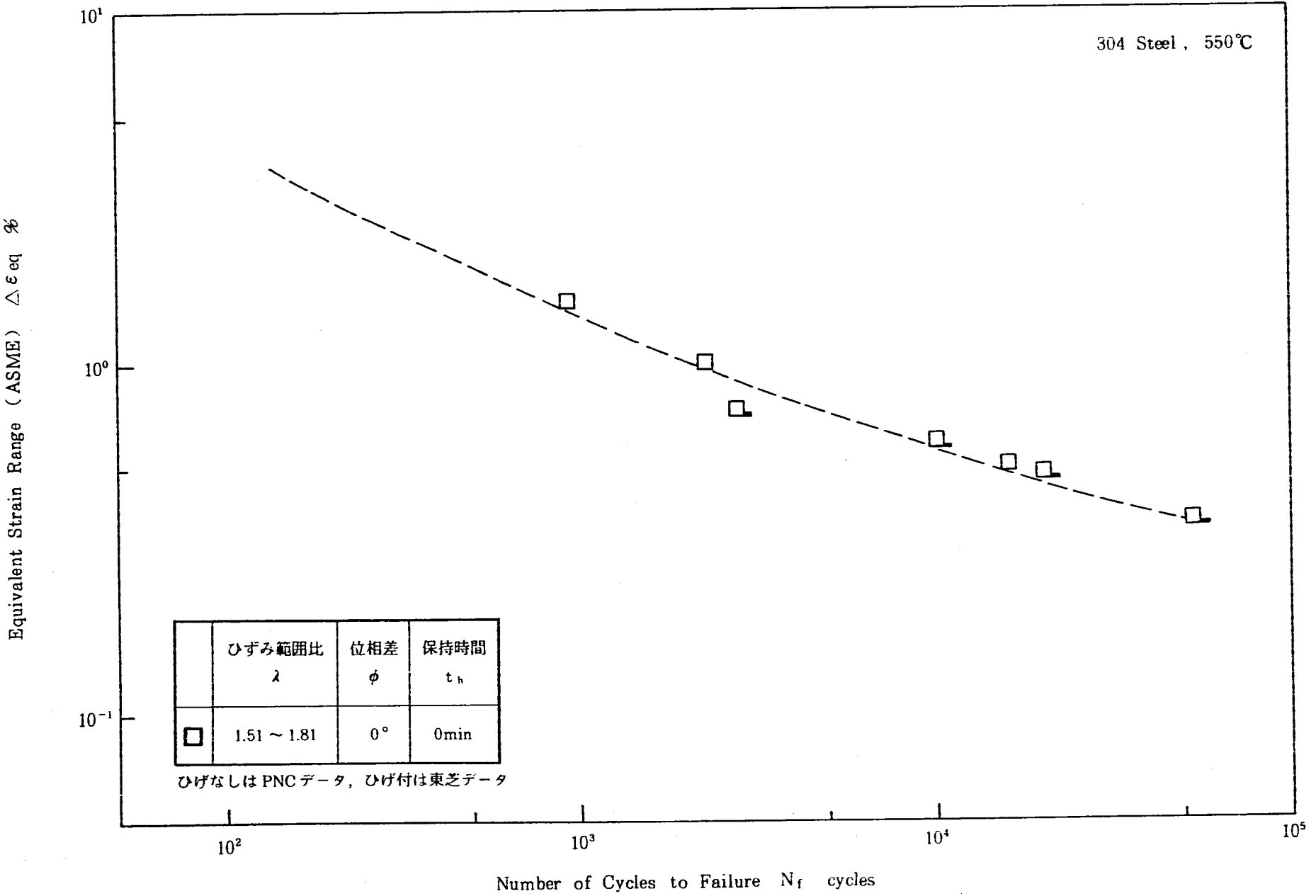


図3.3(3) PNCデータと東芝データの比較(比例重畳疲労)

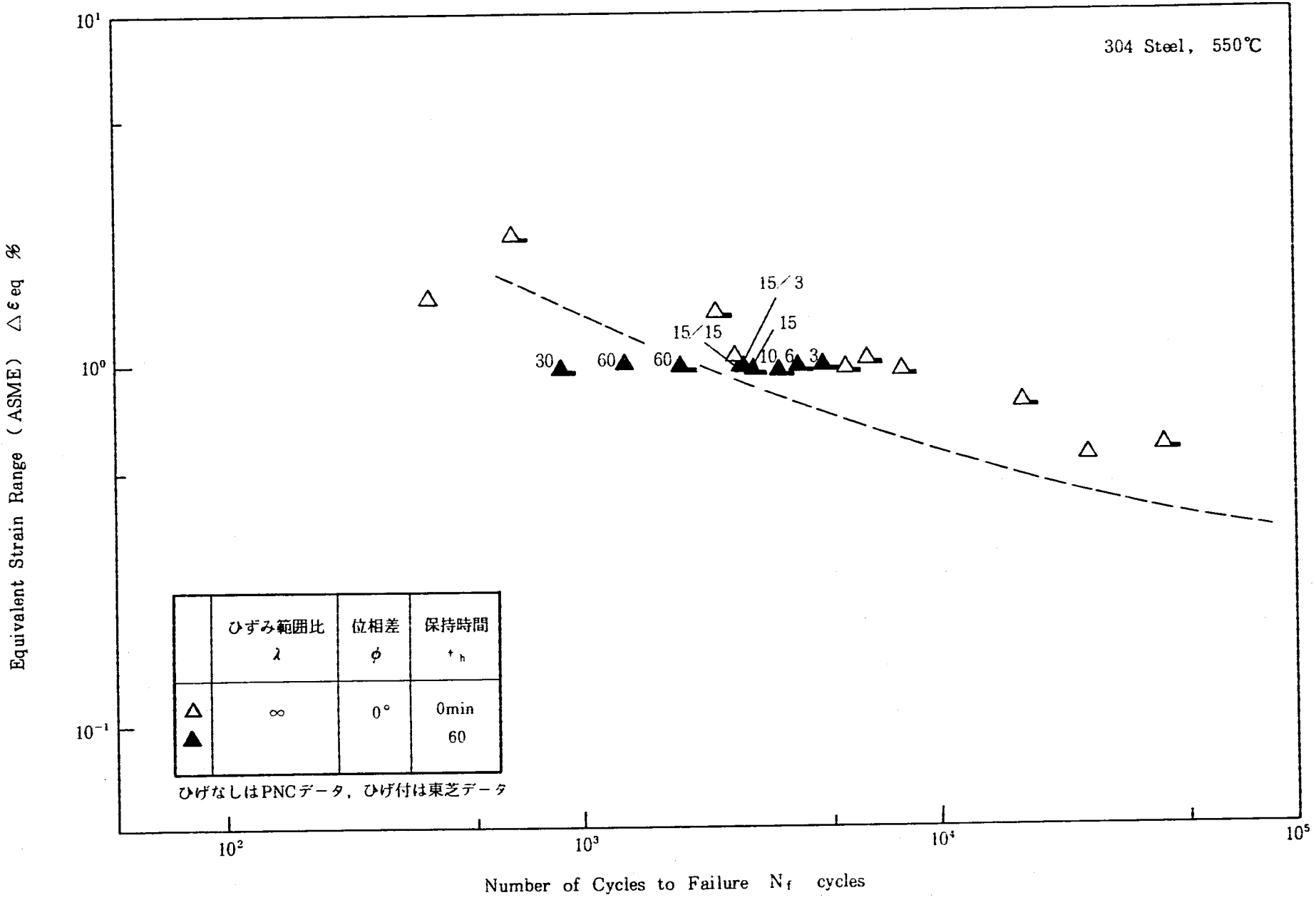


図 3.3 (4) PNCデータと東芝データの比較 (純ねじりクリープ疲労)

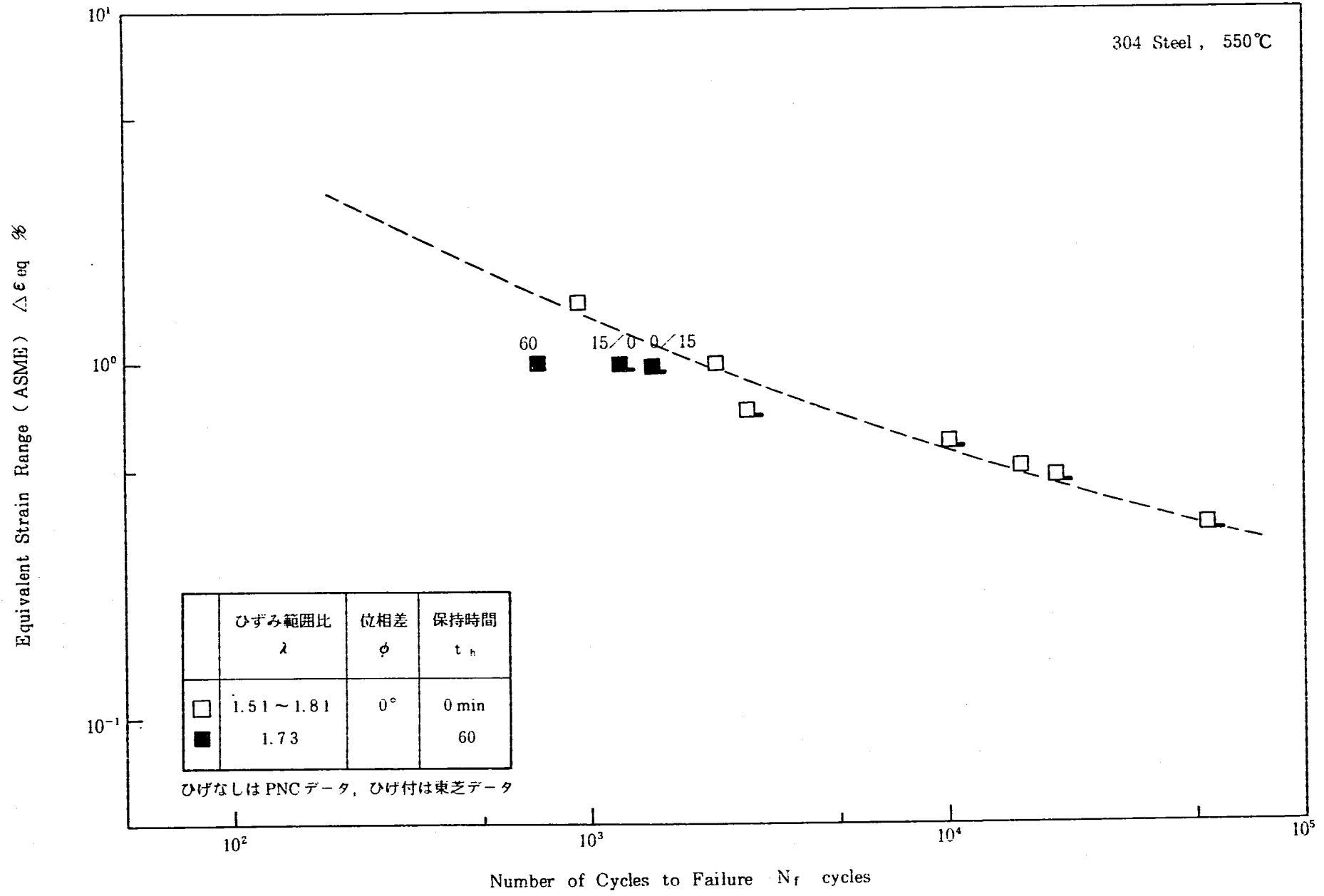


図 3.3(5) PNC データと東芝データの比較 (比例重畳クリープ疲労)

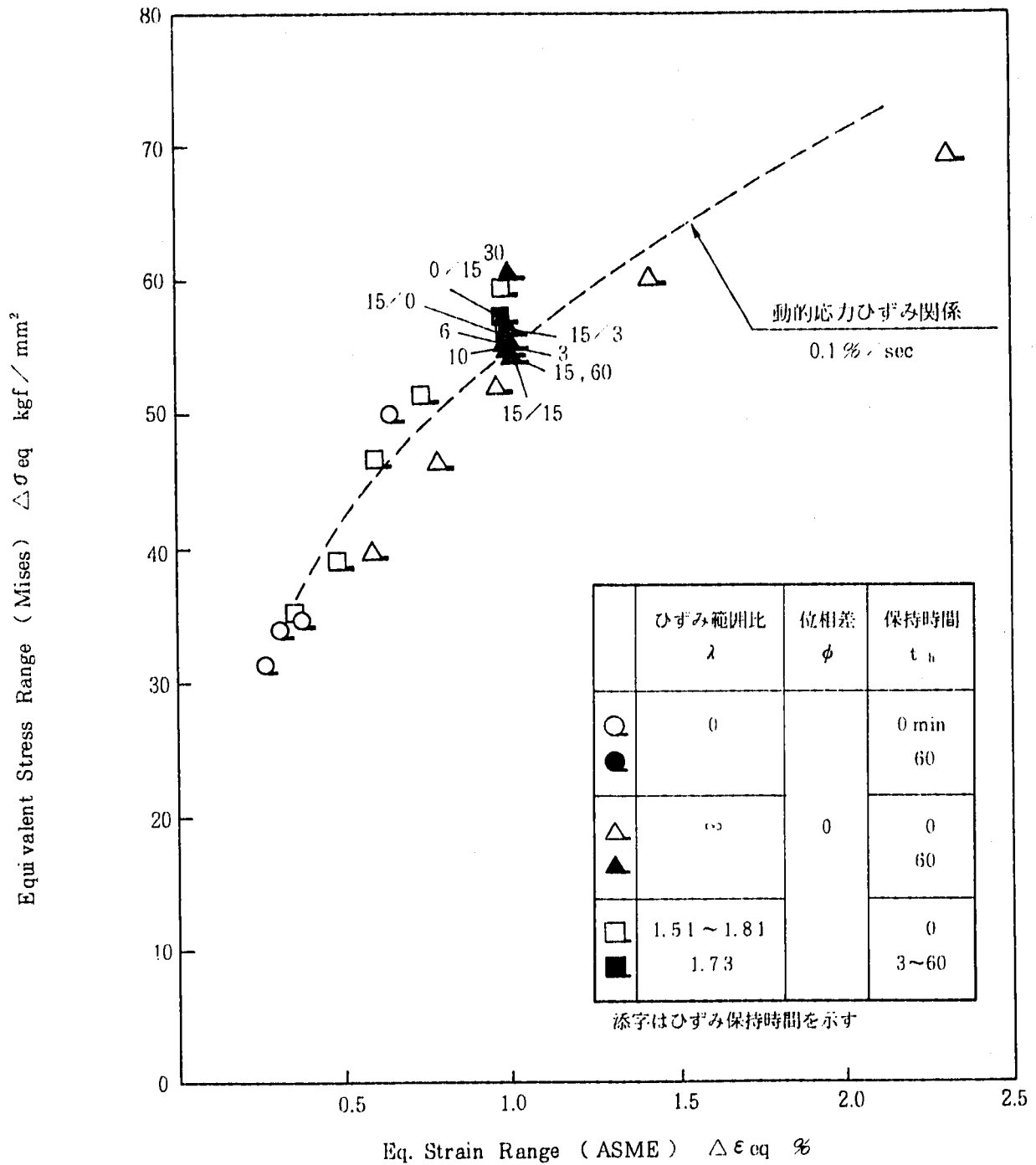


図 3.4 ひずみ範囲と応力範囲の関係 (東芝)



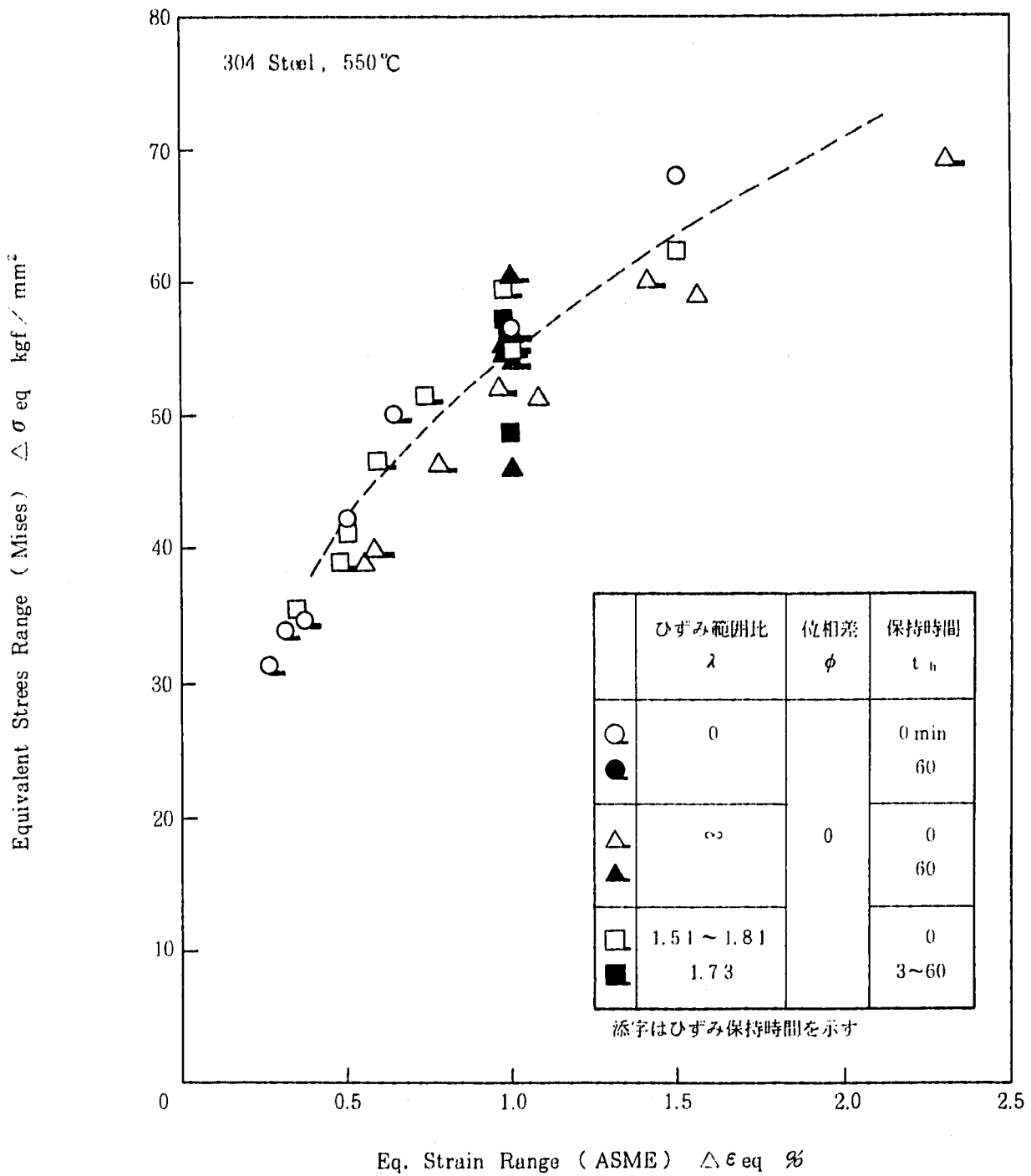


図 3.5 ひずみ範囲と応力範囲の関係 (東芝, PNC)

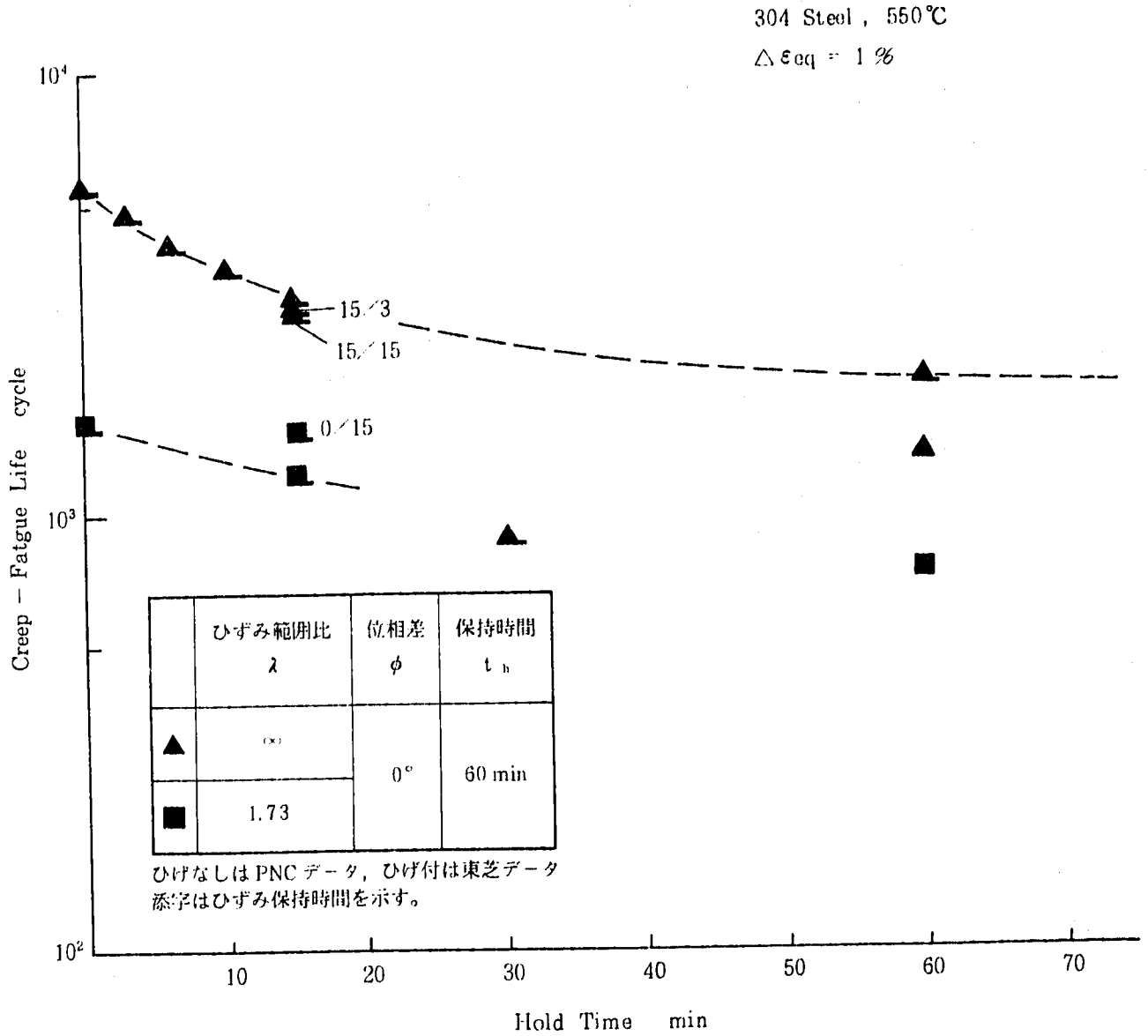


図 3.6 ひずみ保持時間とクリープ疲労寿命の関係

## 4. 多軸疲労／クリープ疲労寿命の評価

### 4.1 線型損傷則に基づく多軸疲労／クリープ疲労評価法

著者が前報までに提案した線型損傷則に基づく多軸疲労／クリープ疲労評価法<sup>(2)(3)</sup>は次のとおりである。この評価法は、比例及び非比例負荷の疲労／クリープ疲労を対象としている。

- (1) 疲労損傷はすべてのひずみ波形について計算する。クリープ損傷はひずみ保持を有するひずみ波形についてのみ計算する。
- (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を用いる。
- (3) 疲労損傷（1 サイクル当たり）の定義は式 4.1 の通りである。

$$D_f = 1 / N_f \quad (4.1)$$

ただし、 $N_f$  は当該相当ひずみ範囲における疲労寿命で、最適疲労破損式（材料強度基準）から求める。

- (4) ひずみ保持における緩和初期応力は動的応力ひずみ関係式から求める（当該相当ひずみ範囲に対する相当応力範囲の 1 / 2 を緩和初期応力とする）。
- (5) 応力緩和中の応力は Mises 型の相当応力  $\sigma_{eq}$  で評価する。
- (6) 応力緩和挙動は単軸クリープひずみ式（材料強度基準）から求める（単軸クリープの応力を相当応力に読み替える）。このとき、係数  $\alpha_c$  は 1 / 3 とする。
- (7) クリープ損傷は式 4.2 で定義する。

$$D_c = \int \dot{\epsilon} dt / t_r(\sigma_{eq}) \quad (4.2)$$

ただし  $t_r(\sigma_{eq})$  は当該相当応力に対応するクリープ破断時間で、主クリープ破断関係式（材料強度基準）から求める。 $t_h$  はひずみ保持時間である。

- (8) 破断クライテリアは Campbell 型とし、 $(D_f, D_c)$  が (0,1.0), (0.3,0.3), (1.0,0) を通る 2 本の直線で定義する。

### 4.2 東芝データの評価

#### 4.2.1 疲労損傷

疲労損傷は前節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

クリープ損傷の計算にあたっては、次の 3 つの方法を用いた。

- ・方法 I ……クリープ損傷は引張ひずみ保持時間（純ねじりの場合は片方のピーク）につい

てのみ求める。

- ・方法Ⅱ……………クリープ損傷は引張ひずみ保持時間（純ねじりの場合は片方のピーク）から圧縮ひずみ保持時間（純ねじりの場合は他方のピーク）を差し引いた時間について求める（負になる場合は0とする）。
- ・方法Ⅲ……………クリープ損傷は引張ひずみ保持時間（片方のピーク）と圧縮ひずみ保持時間（他方のピーク）の両方について求める。

方法Ⅰは引張ピーク（純ねじりの場合は片方のピーク）でのみクリープ損傷が生じるとする考え方である。方法Ⅱは引張ピーク（純ねじりの場合は片方のピーク）で生じたクリープ損傷が圧縮ピーク（他方のピーク）で回復するとする考え方である。方法Ⅲは、いずれのピークでもクリープ損傷が生じるとする考え方である。

また、各方法について応力緩和初期応力を実験値とした場合（実験から求めた応力範囲の1/2を緩和開始応力とする）と、動的応力ひずみ関係式から求めた場合を検討した。損傷評価の結果を表4.1～3に示す。表4.1はひずみ保持のない波形について、表4.2はひずみ保持のある波形に対して緩和開始応力を実験値ベースで求めた場合、表4.3は緩和開始応力を動的応力ひずみ関係式ベースで求めた場合の結果である。なお、東芝データについてはひずみ保持中の応力緩和挙動データがないため、実測応力緩和に基づくクリープ損傷は求めている。

#### 4.2.3 多軸疲労/クリープ疲労寿命の評価

前項までに求めた疲労損傷、クリープ損傷をCampbell線図にプロットした結果を図4.1～6に示す。図4.1～3は緩和初期応力を実験値とした場合の方法Ⅰ～Ⅲによる結果、図4.4～6は緩和初期応力を動的応力ひずみ関係式から求めた場合の方法Ⅰ～Ⅲによる結果である。

損傷評価の結果は初期応力の決定方法、クリープ損傷計算の方法に係わらず同一の傾向となり、これらによる大きな差異は認められない。いずれの場合もねじりクリープ疲労、比例重畳クリープ疲労とも安全側の評価となる。特にねじりクリープ疲労の場合にはその傾向が著しい。ねじりクリープ疲労では、当然のことながら、ひずみ保持時間の増加と共に疲労損傷の割合が減少し、クリープ損傷の割合が増加する傾向が読み取れる。

これらの結果に基づき寿命予測を行った結果を表4.4～6、図4.7～8に示す。また、図4.9に同じ方法によってPNCデータを評価した結果を示す。図4.7、4.8から分かるように、損傷評価の結果同様、寿命予測の結果においても、応力緩和の初期応力の決定方法、クリープ損傷の計算方法の違いによる結果の差異は小さいことが分かる。いずれの場合も、純ねじり疲労、純ねじりクリープ疲労が大きく安全側の評価となっている。全体として、非安全側はfactor of 2程度、安全側はfactor of 5程度の評価となった。

このように評価結果が保守的となる傾向は、ひずみ保持中の応力緩和挙動を評価する際に、係数 $\alpha_c$ （4.1節(6)参照）を1.0としても変化はない。例として係数 $\alpha_c$ を1.0として動的応力ひずみ関

係式に基づき寿命評価を行った結果を図 4.10 に示す。

### 4.3 評価結果の検討

4.2 項で検討したように、前報までに著者らが提案した多軸クリープ疲労評価法で東芝データを検討したところ、純ねじり疲労および純ねじりクリープ疲労についてかなり保守的な (factor of 5 程度) 評価となった。これは、3 章で明らかにしたように、東芝のデータが純ねじり疲労および純ねじりクリープ疲労についてのみ PNC データよりも長寿命となっていたことに起因する。純ねじり負荷においてのみ PNC データと東芝データに寿命の差が見られた原因は 3 章で検討したとおり、試験材料のヒートの違いあるいは製造方法の違いではないかと思われる。

まとめると、前報までに提案した方法で東芝データを評価すると、非安全側には factor of 2 程度、安全側には factor of 5 程度で全体的には保守的に評価できた。これは、本方法の妥当性、一般性を示すものと考えられる。

表4.1 多軸疲労損傷評価の結果 (実験値ベース)

負荷形態	$\lambda$	$\phi$ (deg)	$t_h$ (min)	$\Delta \varepsilon_{eq}$ (%)	$D_f$	$D_c$		
						方法 I	方法 II	方法 III
単軸	0	0	0	0.26	0.284	-	-	-
				0.31	1.02	-	-	-
				0.37	0.330	-	-	-
				0.64	0.606	-	-	-
ねじり	$\infty$	0	0	0.58	2.65	-	-	-
				0.78	4.33	-	-	-
				0.96	3.43	-	-	-
				1.42	2.58	-	-	-
				2.32	1.94	-	-	-
比例重畳	1.63	0	0	0.35	0.548	-	-	-
	1.51			0.48	1.00	-	-	-
	1.72			0.59	1.07	-	-	-
	1.81			0.73	0.618	-	-	-

表4.2 多軸疲労/クリープ疲労損傷評価の結果(実験値ベース)

負荷形態	$\lambda$	$\phi$ (deg)	$t_h$ (min)	$\Delta \varepsilon_{eq}$ (%)	$D_f$	$D_c$		
						方法 I	方法 II	方法 III
ねじり	8	0	0	0.98	2.52	-	-	-
			3	1.01	2.36	0.564	-	-
			6	0.99	1.92	0.871	-	-
			10	0.97	1.60	1.18	-	-
			15	0.99	1.41	1.16	-	-
			30	0.99	0.407	0.880	-	-
			60	1.00	0.922	1.59	-	-
			15/3	1.02	1.46	1.36	1.17	1.75
			15/15	1.02	1.41	1.00	0.00	2.00
比例重畳	1.73	0	0	0.98	0.733	-	-	-
			15/0	0.99	0.576	0.561	-	0.561
			0/15	0.98	0.710	0.796	-	0.796

表4.3 多軸疲労/クリープ疲労損傷評価の結果（動的応力ひずみ関係式ベース）

負荷形態	$\lambda$	$\phi$ (deg)	$t_n$ (min)	$\Delta \varepsilon_{eq}$ (%)	$D_f$	$D_c$		
						方法Ⅰ	方法Ⅱ	方法Ⅲ
ねじり	$\infty$	0	0	0.98	2.52	-	-	-
			3	1.01	2.36	0.543	-	-
			6	0.99	1.92	0.840	-	-
			10	0.97	1.60	1.10	-	-
			15	0.99	1.41	1.23	-	-
			30	0.99	0.407	0.535	-	-
			60	1.00	0.922	1.66	-	-
			15/3	1.02	1.46	1.17	1.01	1.50
			15/15	1.02	1.41	1.14	0.00	2.28
比例重畳	1.73	0	0	0.98	0.733	-	-	-
			15/0	0.99	0.576	0.500	-	0.560
			0/15	0.98	0.710	0.615	-	0.615



表4.4 多軸疲労寿命評価の結果

負荷形態	$\lambda$	$\phi$ (deg)	$t_h$ (min)	$\Delta \varepsilon_{eq}$ (%)	実測寿命	予測寿命		
						方法 I	方法 II	方法 III
単軸	0	0	0	0.26	(>250000)	880173	-	-
				0.31	218376	214780	-	-
				0.37	23450	71076	-	-
				0.64	4353	7180	-	-
ねじり	$\infty$	0	0	0.58	42765	16135	-	-
				0.78	17237	3979	-	-
				0.96	7901	2303	-	-
				1.42	2398	929	-	-
				2.32	645	333	-	-
比例重畳	1.63	0	0	0.35	53680	97883	-	-
	1.51			0.48	20485	20411	-	-
	1.72			0.59	10017	9397	-	-
	1.81			0.73	2971	4806	-	-

表4.5 多軸クリープ疲労寿命評価の結果（実験値ベース）

負荷形態	$\lambda$	$\phi$ (deg)	$t_h$ (min)	$\Delta \epsilon_{eq}$ (%)	実測寿命	予測寿命		
						方法 I	方法 II	方法 III
ねじり	8	0	0	0.98	5520	2188	-	-
			3	1.01	4794	1305	-	-
			6	0.99	4092	1036	-	-
			10	0.97	3592	825	-	-
			15	0.99	3014	731	-	-
			30	0.99	867	473	-	-
			60	1.00	1921	513	-	-
			15/3	1.02	2888	624	688	561
			15/15	1.02	2805	747	1983	529
比例重畳	1.73	0	0	0.98	1605	2188	-	-
			15/0	0.99	1229	652	-	-
			0/15	0.98	1514	2134	-	617

表4.6 多軸クリープ疲労寿命評価の結果（動的応力ひずみ関係式ベース）

負荷形態	$\lambda$	$\phi$ (deg)	$t_n$ (min)	$\Delta \epsilon_{eq}$ (%)	実測寿命	予測寿命		
						方法 I	方法 II	方法 III
ねじり	$\infty$	0	0	0.98	5520	2188	-	-
			3	1.01	4794	1322	-	-
			6	0.99	4092	1055	-	-
			10	0.97	3592	862	-	-
			15	0.99	3014	706	-	-
			30	0.99	867	584	-	-
			60	1.00	1921	505	-	-
			15/3	1.02	2888	689	759	590
			15/15	1.02	2805	689	1983	503
比例重畳	1.73	0	0	0.98	1605	2188	-	-
			15/0	0.99	1229	706	-	-
			0/15	0.98	1514	2134	-	706

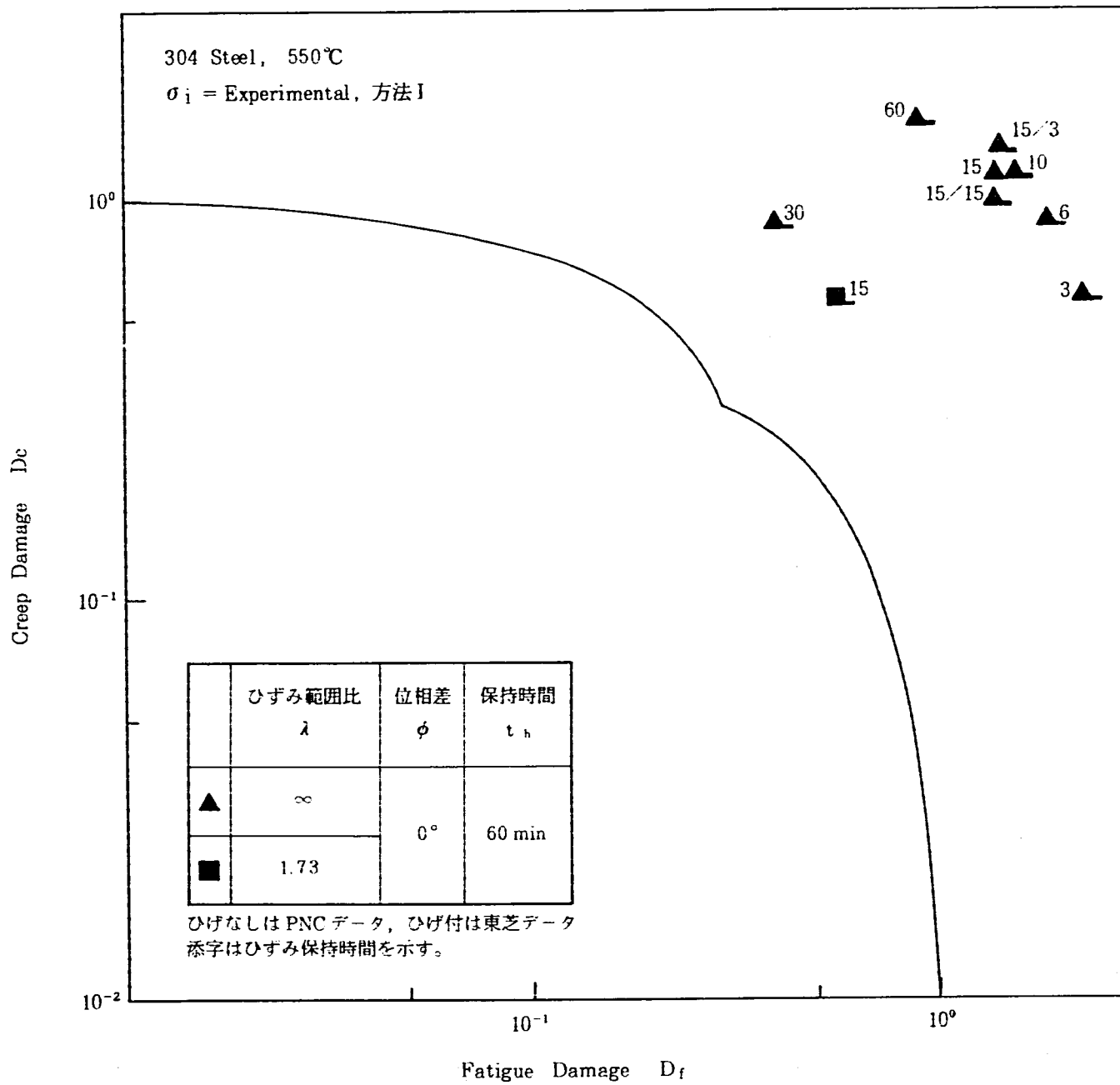


図 4.1 クリープ疲労損傷の評価

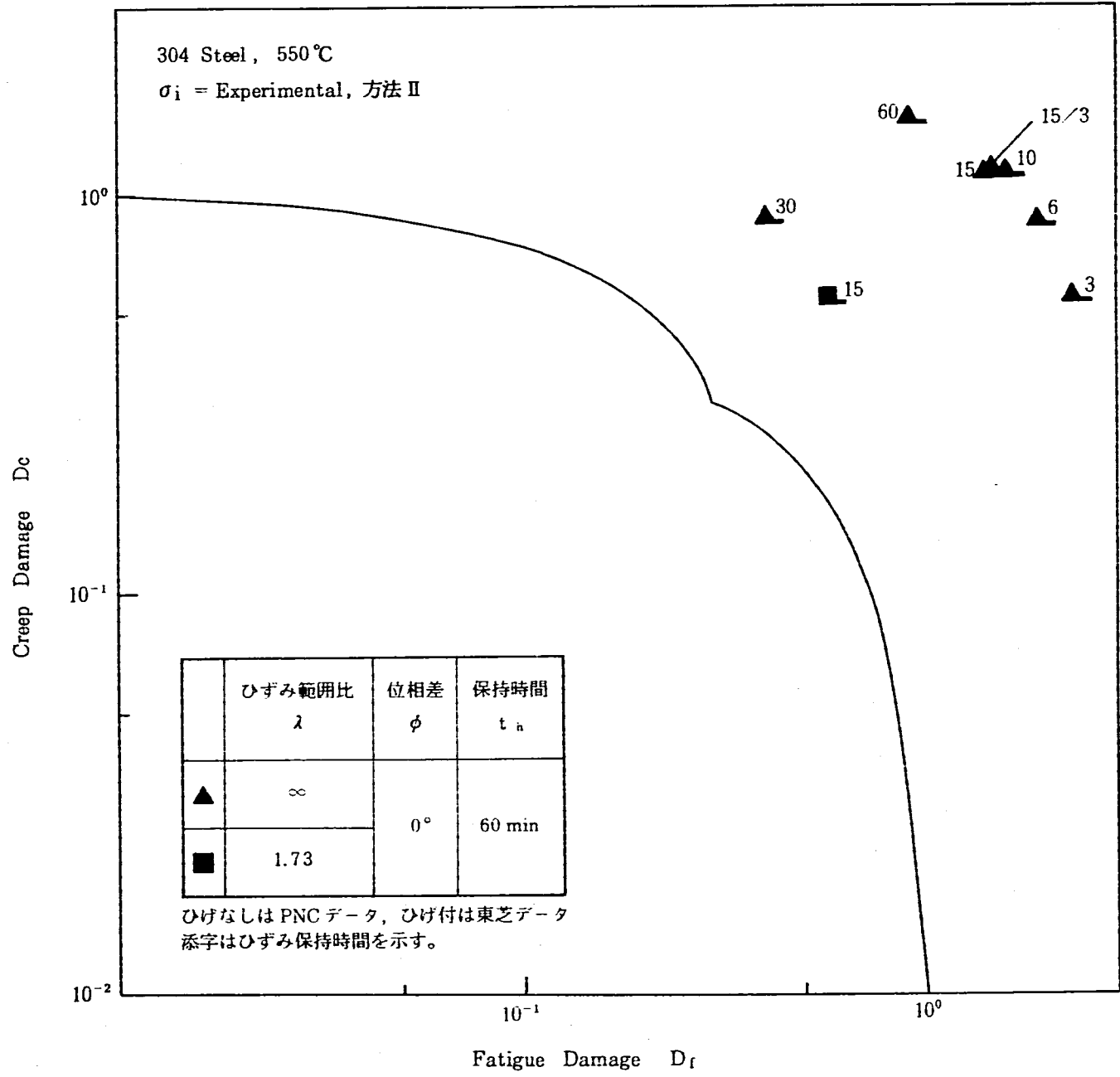


図 4.2 クリープ疲労損傷の評価

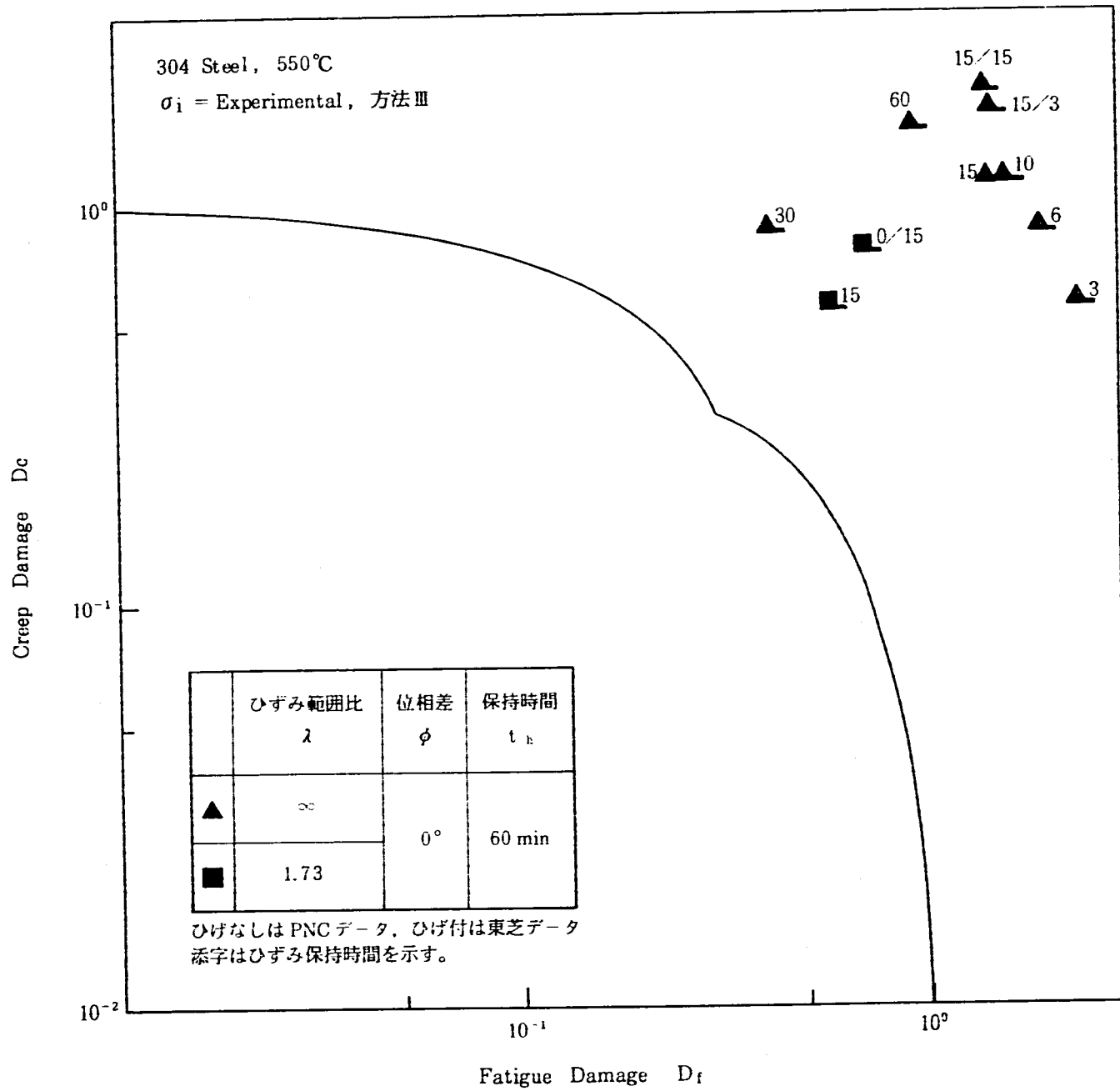


図 4.3 クリープ疲労損傷の評価

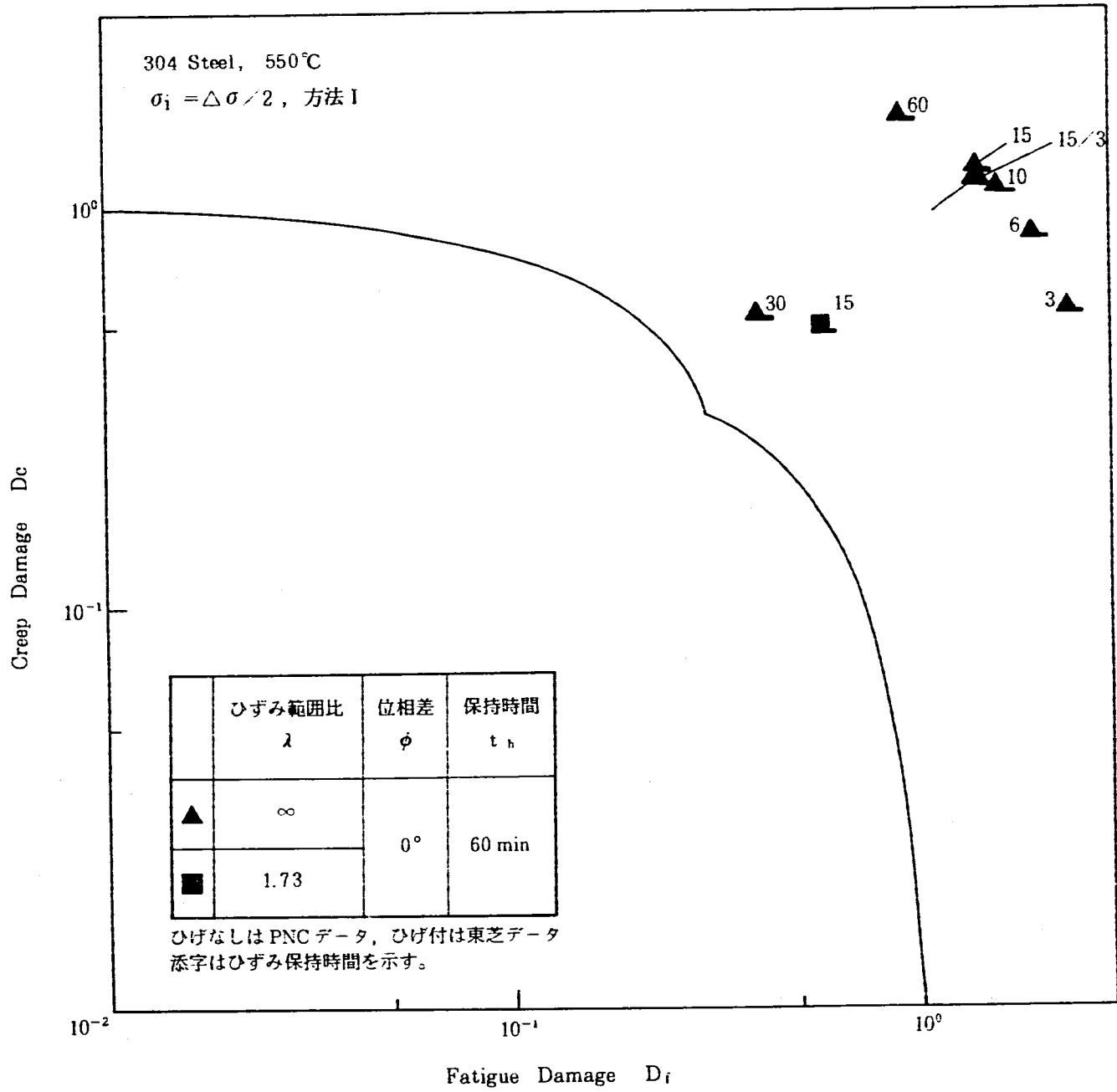


図 4.4 クリープ疲労損傷の評価

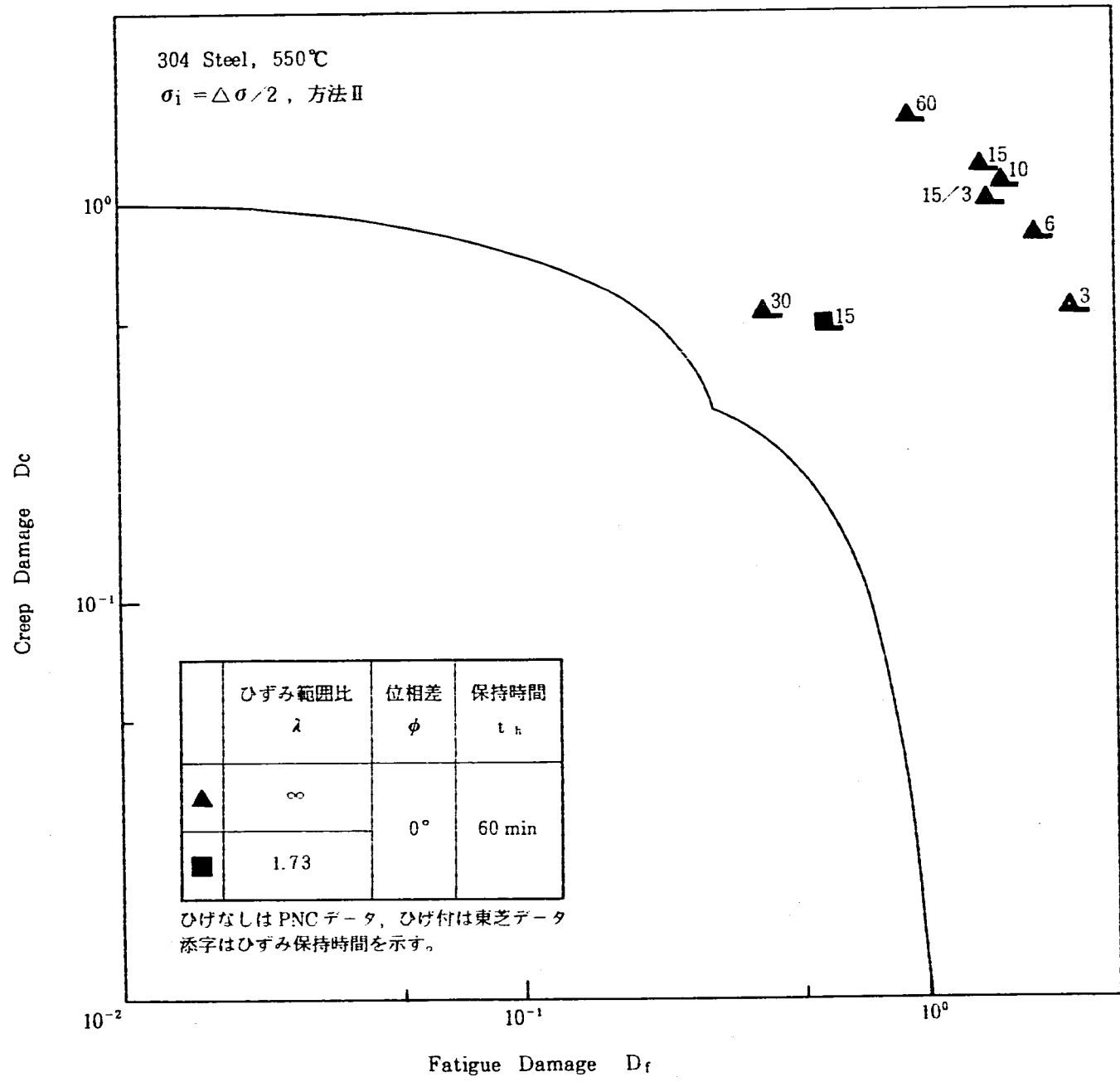


図 4.5 クリープ疲労損傷の評価



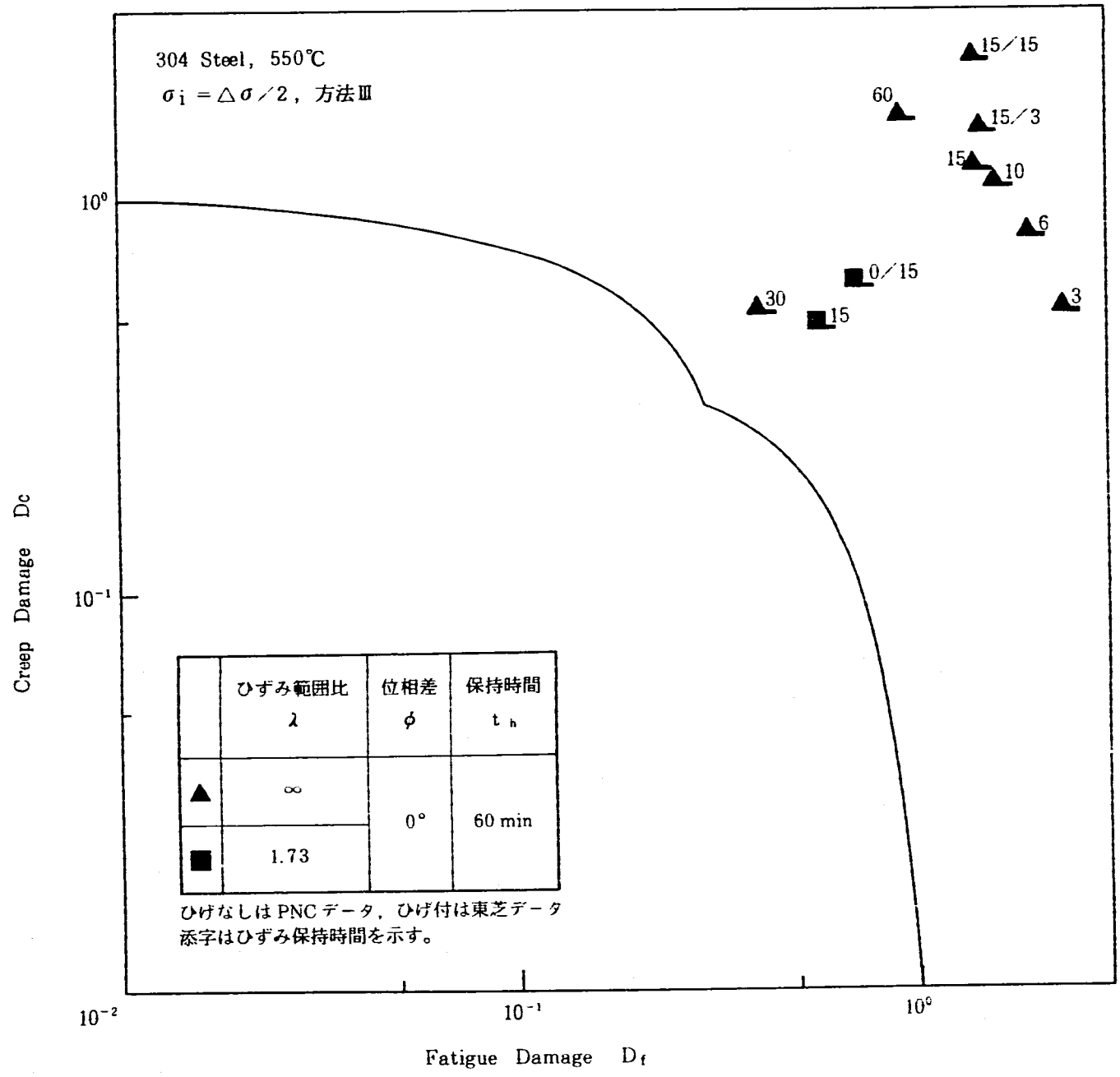


図 4.6 クリープ疲労損傷の評価

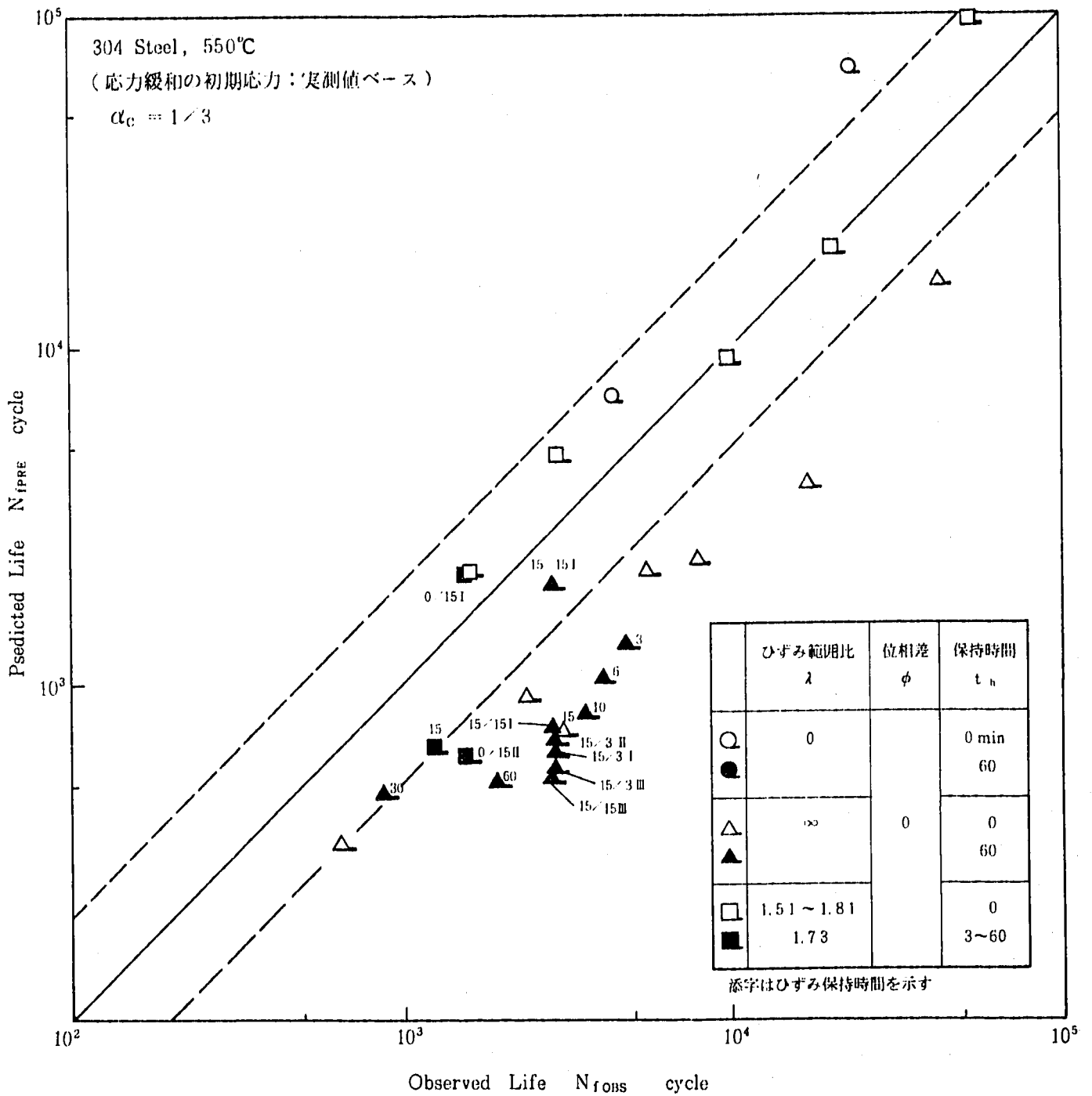


図 4.7 クリープ疲労寿命の評価結果 (実測値ベース)

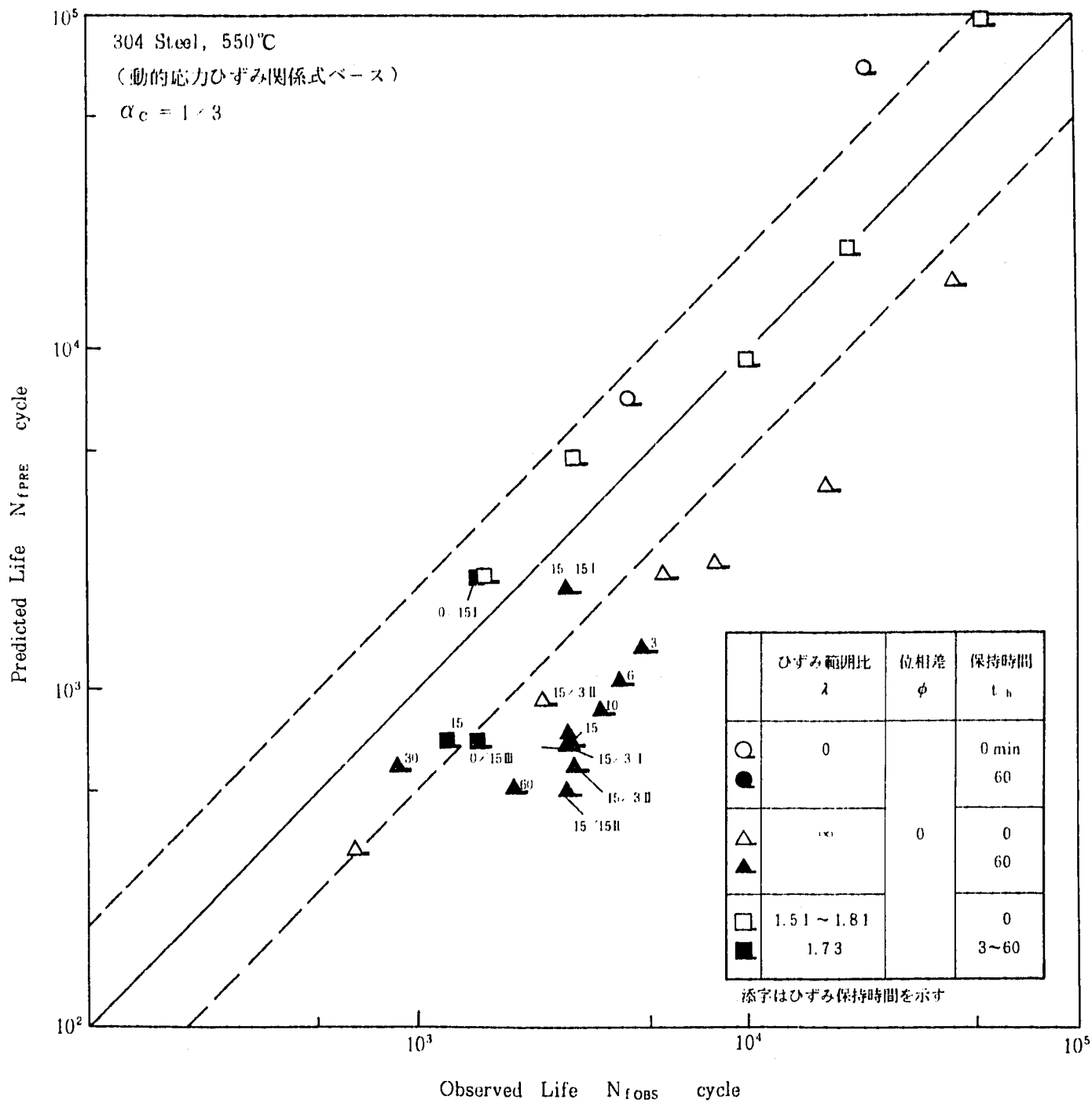


図 4.8 クリープ疲労寿命の評価結果 (動的応力ひずみ関係式ベース)

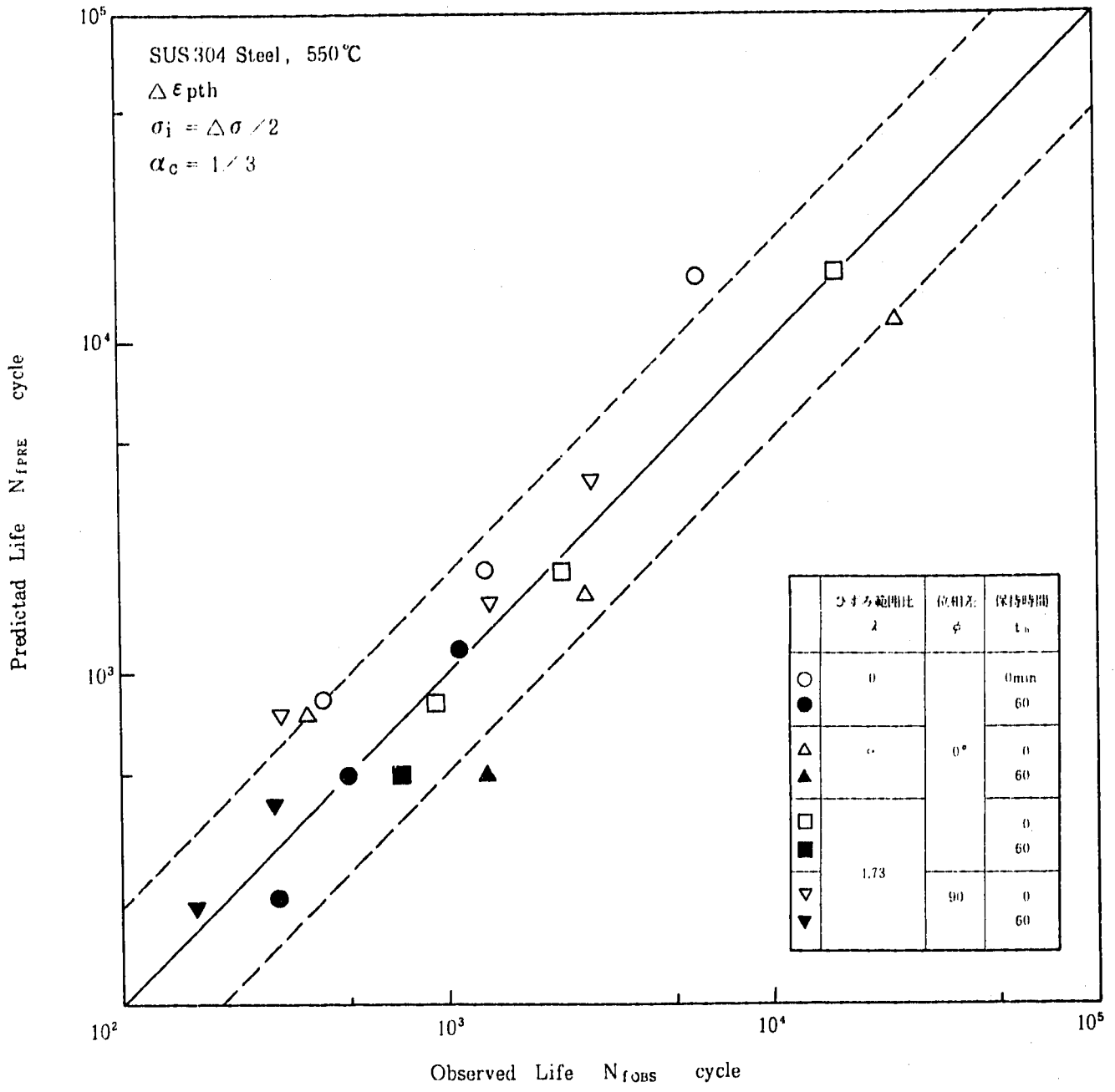


図 4.9 クリープ疲労寿命の評価結果 (PNCデータ)

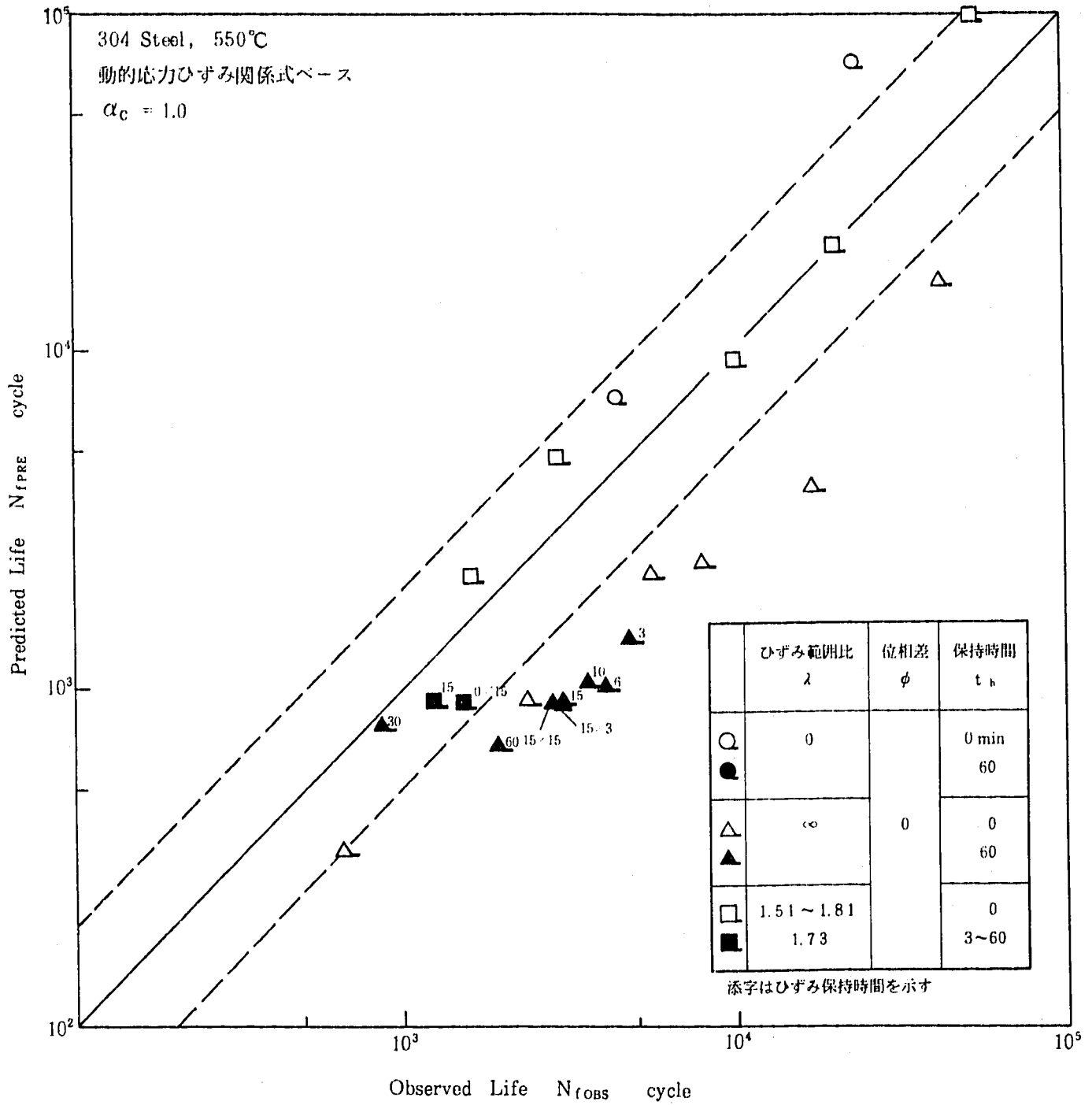


図 4.10 クリープ疲労寿命の評価結果 (動的応力ひずみ関係式ベース,  $\alpha_c = 1.0$ )

## 5. まとめおよび今後の課題

### 5.1 まとめ

本報ではPNCが東芝に委託して行った多軸クリープ疲労試験結果（単軸疲労，純ねじり疲労，純ねじりクリープ疲労，比例重畳疲労，比例重畳クリープ疲労）を前報までに提案した多軸クリープ疲労評価法に基づき評価した結果次の知見を得た。

- (1) PNCの多軸疲労/クリープ疲労試験結果と東芝の多軸疲労/クリープ疲労試験結果はほぼ良好に一致するが，純ねじり疲労/クリープ疲労については東芝データの方が長寿命となる傾向がある。これは両者における試験材料のヒートの相違あるいは製造方法の差異が原因ではないかと思われる。
- (2) 純ねじりクリープ疲労においてピークひずみ保持時間を3分から60分の間で変化させると，クリープ疲労寿命は保持時間の増加とともに低下する。この傾向はひずみ保持時間60分ではまだ飽和しているとは言えない。
- (3) 純ねじりクリープ疲労において，15分の片側保持に対して，反対側のピークに3分あるいは15分の保持時間を設けても，特に寿命の回復は観察されない。
- (4) PNCデータに基づき前報までに提案した多軸クリープ疲労評価法で東芝データを評価すると，非安全側にはfactor of 2程度，安全側にはfactor of 5程度で全体的には保守的に評価することが可能である。

### 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。

- ・材料の製造方法あるいはヒート間の強度のばらつきに対応する方法の検討。
- ・さらに長時間保持を行った場合の強度の検討。

## 謝 辞

本報告書をまとめるに当たり、構造工学室の永田敬主任研究員、谷川雅弘副主任研究員には極めて有益な示唆をいただいた。また、(株)常陽産業の矢口勝巳氏には損傷計算の実務面で協力をいただいた。この場を借りて謝意を表したい。

## 参 考 文 献

- (1) 浅山 他, SUS 304 の高温多軸疲労挙動の検討 (第 1 報, 軸力・ねじり重畳負荷下における疲労挙動の検討), PNC SN 9410 89-100, (1989).
- (2) 浅山 他, SUS 304 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), 発行予定.
- (3) 浅山 他, SUS 304 の軸力・ねじり重畳負荷下における多軸疲労およびクリープ疲労強度, 日本機械学会論文集, 掲載予定.
- (4) 浅山 他, SUS 304 の軸力・ねじり負荷下のクリープ疲労相互作用, 日本材料学会 第 27 回高温強度シンポジウム予稿集, 112.
- (5) 大手 他, 多軸クリープ構成式確認試験 (II) - SUS 304 鋼鍛造材およびインコネル 718 板材のクリープ試験ならびに SUS 304 鋼の多軸疲労試験 -, PNC SJ 201 84-11, (1984).
- (6) 大手 他, 多軸クリープ構成式確認試験 (II) - SUS 304 鋼鍛造材およびインコネル 718 板材のクリープ試験ならびに SUS 304 鋼の多軸疲労試験 -, PNC SJ 201 85-06, (1985).
- (7) 吉沢 他, SUS 304 の多軸クリープ疲労試験 - SUS 304 鋼鍛造材のクリープ試験ならびに SUS 304 鋼の間欠型変動荷重クリープ試験および多軸クリープ疲労試験 -, PNC SJ 2164 86-003, (1986).
- (8) 佐々木 他, SUS 304 の多軸クリープ疲労試験 - SUS 304 鋼鍛造材のクリープ試験ならびに SUS 304 鋼の間欠型変動荷重クリープ試験および多軸クリープ疲労試験 -, PNC SJ 2164 87-002, (1987).
- (9) 佐々木 他, SUS 304 の多軸クリープ疲労試験 - SUS 304 鋼鍛造材のクリープ試験ならびに SUS 304 鋼の間欠型変動荷重クリープ試験および多軸クリープ疲労試験 -, PNC SJ 9164 88-001, (1987).
- (10) 動力が・核燃料開発事業団, 高速原型炉第一種機器の高温構造設計方針, (1984).