

SUS304の高温多軸疲労挙動の検討

(第一報、軸力-ねじり重畳負荷下における疲労挙動の検討)

1989年5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

(第一報、軸力-ねじり重畳負荷下における疲労挙動の検討)

浅山 泰, 青砥 紀身,
和田 雄作, 今津 彰*

要 旨

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行った。この結果、次の結論を得た。

- (1) 非比例負荷下では比例負荷下に比較して $1/2 \sim 1/3$ に疲労寿命が低下する。
- (2) 本試験結果を代表的パラメータであるASME式の相当ひずみ範囲、拡張 Γ -planeによる等価剪断ひずみ範囲、ひずみ経路を考慮したMisesの相当ひずみ範囲により整理比較した結果に基づくと、多軸疲労寿命を記述するパラメータとしてひずみ経路を考慮したMisesの相当ひずみ範囲が有望である。
- (3) 今後、ひずみ経路とひずみ速度が疲労寿命に及ぼす効果を重点的に検討する必要が有る。

* 機器構造開発部・材料開発室

EVALUATION OF HIGH TEMPERATURE MULTIAXIAL FATIGUE BEHAVIOR OF 304 STEEL (FIRST REPORT)

Tai ASAYAMA, Kazumi AOTO,

Yusaku WADA, Akira IMAZU*

Abstract

A series of biaxial fatigue tests were conducted with 304 steel at 550 °C as the first step of a study on an evaluation of elevated temperature multiaxial creep-fatigue behavior of structural materials. The following results were obtained.

- (1) A fatigue life under a nonproportional loading decreased to 1/2 - 1/3 compared with a proportional loading.
- (2) It was shown that an equivalent strain range which is obtained by a strain path integration of Mises type equivalent strain is promising to describe the multiaxial fatigue behavior.
- (3) It was shown that further investigation should be concentrated on an effect of strain path and strain rate upon the multiaxial fatigue behavior.

* Materials Developing Section, O-arai Engineering Center, PNC

目 次

1. はじめに	1
2. 多軸疲労試験の方法と結果	2
2.1 試験片及び試験装置	2
2.1.1 供試材	2
2.1.2 試験片	2
2.1.3 試験装置	2
2.2 試験条件及び試験結果	5
2.2.1 試験条件	5
2.2.2 試験結果	6
3. 試験結果の検討	13
3.1 ひずみパラメータによる疲労試験結果の整理	13
3.1.1 ASME式の相当ひずみ範囲	13
3.1.2 拡張 Γ -planeによる等価剪断ひずみ範囲	15
3.1.3 Misesの相当ひずみをひずみ経路に沿って積分する方法	17
3.1.4 まとめ	17
3.2 現状におけるひずみクライテリアの問題点の検討	30
3.2.1 ASME式の相当ひずみ範囲の問題点	30
3.2.2 応力クライテリアの検討	31
4. まとめ及び今後の検討事項	41
4.1 まとめ	41
4.2 今後の検討事項	41
4.2.1 ひずみ速度効果（周波数効果）の検討	41
4.2.2 環境効果の検討	42
4.2.3 環境効果とひずみ速度効果の相乗作用	42
参考文献	43
謝 辞	44
付 図	45

表リスト

表 2.1	供試材の熱処理と化学成分	3
表 2.2	供試材の機械的性質	3
表 2.3	試験条件	7
表 2.4	多軸疲労試験の結果	12
表 3.1	ひずみパラメータの検討	19
表 3.2	ひずみパラメータによる疲労寿命の予測	20
表 3.3	ASME式の相当ひずみ範囲に対する補正率	21
表 3.4	ASME式の相当応力範囲の検討	33

図リスト

図 2. 1	試験片の形状および寸法	4
図 2. 2	ひずみ負荷経路の概念図	8
図 2. 3	ヒステリシス・ループの例	9
図 2. 4	繰り返しひずみ負荷による応力の変動（軸力）	10
図 2. 5	繰り返しひずみ負荷による応力の変動（ねじり）	11
図 3. 1	ASME式の相当ひずみ範囲による整理	22
図 3. 2	等価剪断ひずみ範囲による疲労寿命の整理	23
図 3. 3	ひずみ経路積分法による疲労寿命の整理	24
図 3. 4	ひずみパラメータによる軸力負荷の寿命評価	25
図 3. 5	ひずみのパラメータによるねじり負荷の寿命評価	26
図 3. 6	ひずみパラメータによる比例重畳負荷の寿命評価	27
図 3. 7	ひずみのパラメータによる非比例重畳負荷の寿命評価	28
図 3. 8	拡張 Γ -plane の概念図	29
図 3. 9	ひずみ経路積分法の概念図	29
図 3. 10	ASME式の相当ひずみ範囲の問題点	34
図 3. 11	ASME式相当ひずみ・相当応力の関係	35
図 3. 12	ASME式相当応力による疲労寿命の整理	36
図 3. 13	ASME式相当応力による軸力負荷の寿命評価	37
図 3. 14	ASME式相当応力によるねじり負荷の寿命評価	38
図 3. 15	ASME式相当応力による比例重畳負荷の寿命評価	39
図 3. 16	ASME式相当応力による非比例重畳負荷の寿命評価	40
図 A. 1	ASME式の相当ひずみ範囲による寿命評価	46
図 A. 2	等価剪断ひずみ範囲による寿命評価	47
図 A. 3	ひずみ経路積分法による寿命評価	48
図 A. 4	ASME式の相当応力範囲による寿命評価	49

1. はじめに

高速炉主要機器では、熱応力と機械的応力の重畳負荷等により、複雑な多軸応力状態が形成される場合があり、その効果が材料強度に与える影響を考慮する必要がある。「高速原型炉第一種機器の高温構造設計方針」では「3.5 クリープ疲労損傷の制限」の中で相当公称ひずみ範囲を定義している。この定義はASMEのCode Case N-47-21における相当ひずみ範囲の定義を踏襲したものであり、基本的にはMises型の相当ひずみであり、比例負荷および非比例負荷の両方を考慮できる定義となっている。一方、最近主として材料試験技術の発達によりひずみ制御の高精度の多軸材料試験が一般化しつつあるが、この中で、ASME式の相当ひずみ範囲が同一の場合でも、非比例負荷の場合には比例負荷と比較して疲労寿命が $1/2 \sim 1/3$ に低下するという報告がなされており、ASME式の相当ひずみは多軸応力状態で必ずしも一般的に保守的な評価を与えるものではないことが指摘されている。この点を明確に把握することは今後の設計基準の信頼性の一層の向上、合理化の一層の推進を行ううえで欠かすことのできないポイントである。

そこで著者らは非比例負荷を含めた任意の負荷経路を統一的に扱うことのできる多軸クリープ・疲労クライテリアを検討することにした。これは、比例負荷、非比例負荷に対してひずみ保持効果等の時間依存の効果も含めた統一的クリープ疲労評価法の開発を目的とするものである。

本報告はこの研究の第一報として、軸力-ねじりの2軸状態で疲労強度に及ぼす非比例負荷の影響を把握し、この結果を現段階で提案されている代表的なパラメータで整理し、有力なパラメータの検討を行うとともに問題点を抽出し、今後高信頼度を有する実用モデルを開発するための基礎を整備する事を目的としている。

試験はSUS304の薄肉円筒を用いて行い、温度は550℃、試験環境は大気中とした。

2. 多軸疲労試験の方法と結果

2.1 試験片及び試験装置

2.1.1 供試材

供試材は、SUS304の熱間加工板（A7材）であり、熱処理を含む加工履歴及び化学成分を表1に、機械的性質を表2に示す。

2.1.2 試験片

試験片は熱処理後、機械加工により製作した。形状は、図1に示す通り、GL部の長さが25mm、外径23mm、厚さ1.5mmの薄肉円筒である。厚さ／外径比は0.065である。

2.1.3 試験装置

試験装置はMTS社製の電気油圧サーボ式引張圧縮-ねじり重畳負荷型疲労試験装置である。使用したひずみ計は、押し当て型のひずみ計でGL間の軸方向変位とねじり角度を同時にかつ独立に検出することができる。加熱は高周波誘導加熱方式により、試験中GL間の温度を設定温度に対し ± 5 ℃以内に保つことが可能である。試験片グリップは油圧式フレットと呼ばれ、8分割されたつかみ治具に合成樹脂系の使い捨て薄膜を被ったもので、試験中にねじりすべりを生じないように工夫されている。試験装置の制御及びデータ収録はパーソナルコンピュータにより行う。

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

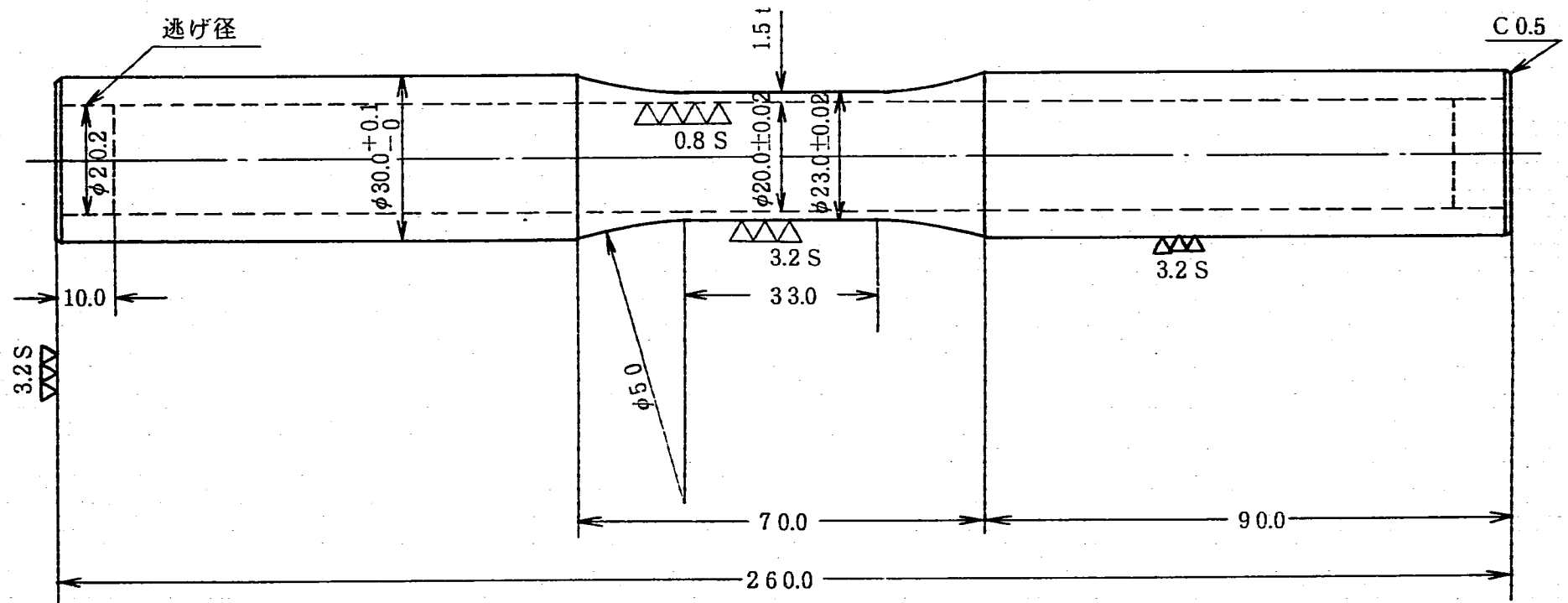


図2.1 試験片の形状および寸法

2.2 試験条件及び試験結果

2.2.1 試験条件

試験は大気環境中で行った。温度は550℃の一定とした。制御はひずみ制御とした。用いたひずみ波形は表2.3に示す通りである。ひずみ波形を設定する際のパラメータとして、

- ① 軸ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_t$
- ② ひずみ範囲比（ねじりひずみ範囲 $\Delta \tau_t$ の軸ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_t$ に対する比、 $\phi = \Delta \tau_t / \Delta \epsilon_t$ ）（注1）
- ③ 位相差（ねじりひずみの軸ひずみに対する位相差 λ ）
- ④ 相当ひずみ速度

を用いた。

ここで、位相差が0のものについては、試験は三角波で行った。位相差のあるものについては、正弦波で行った。正弦波のひずみ速度は、当該波形と周期およびひずみ範囲が同一の試験を三角波で行った場合のひずみ速度として示す。正弦波の場合は実際には試験中にひずみ速度が時々刻々変化していることに注意しなければならない。ひずみ負荷経路の概念図を図2.2に示す。位相差が0の場合にひずみ範囲比が疲労強度に及ぼす影響を検討するために、ひずみ範囲比を0（純粋軸力）、 ∞ （純粋ねじり）、1.7（重畳負荷）に変化させて試験を行った。また、重畳負荷時に、位相差が疲労強度に及ぼす影響を検討するために、軸ひずみとねじりひずみに90°の位相差を設けた波形についても試験を行った。さらに、90°の位相差のもとでのひずみ範囲比の影響を調べるために、 $\lambda = 90^\circ$ 、 $\phi = 1.7, 2.3, 4.4$ について試験を行った。

これに加え、位相差なしの $\phi = \infty, 1.7$ については速度効果（周波数効果）を検討するために、ひずみ速度を一桁ないし二桁変化させた試験を行っている。

（注1） ひずみ範囲比は比例負荷の波形については時々刻々のひずみ比と一致するが、非比例負荷の波形についてはひずみ比が時々刻々変化するため、ひずみ比とひずみ範囲比は通常は等しくないことに注意しなければならない。

なお、本報告書では、位相差のない負荷を比例負荷、位相差のある負荷を非比例負荷とよぶことにする。これは、位相差のない場合には軸とねじりのひずみの比は常に一定であるのに対し、位相差のある場合にはこの比が時々刻々変化するからである。

2.2.2 試験結果

試験結果を表2.4に示す。ここで破断寿命は、軸応力（引張側）またはねじり応力（最初の負荷方向）のいずれかが定常状態の75%に低下した時点の繰返し数と定義する。また、解析の際の代表値としては、半寿命付近で得られた応力ひずみ応答を用いるものとする。

(1) 応力ひずみ応答

ヒステリシス・ループの例を図2.3に示す。図2.3はASME式相当ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{\max} = 1\%$ 、位相差 $\lambda = 90^\circ$ の例であり、半寿命付近で得られたものである。繰返しひずみ負荷に伴う最大、最少応力の変動の例を $\Delta \epsilon_{\max} = 1\%$ について図2.4～2.5に示す。これより、軸応力についてみると（図2.4）、非比例負荷（ $\phi = 1.7$ 、 $\lambda = 90^\circ$ ）では単軸負荷（ $\phi = 1.0$ ）と比較して硬化が激しいが、比例負荷（ $\phi = 1.7$ 、 $\lambda = 0^\circ$ ）では逆に軟化していることが分かる。また、ねじり応力についてみると（図2.5）、軸応力と同様に、非比例負荷では激しく硬化するが、比例負荷では軟化する傾向が読み取れる。最大応力の低下は、非比例負荷で最も早く始まっている。

方向が異なる負荷を比例的に重畳させた場合は軟化傾向を示し、非比例的に重畳させた場合は硬化傾向を示すという応力ひずみ応答の傾向は、多軸における疲労寿命の傾向とも密接に関連していることが予想され、多軸負荷状態における材料挙動を考える上で極めて重要な手掛かりを提供することが予想される。

(2) 多軸疲労寿命

多軸疲労寿命を表2.4にまとめて示す。これに関する検討は第3章で行うものとする。

表 2.3 試験条件

波 形	ひずみ範囲比	位相差	ひずみ速度	ASME式の相当ひずみ範囲	本数
三 角 波	0	0°	0.1%/sec	0.5, 1.0, 1.5%	各 1
	∞			0.5, 1.0, 1.5	各 1
			0.001	1.0	1
			0.1	0.5, 1.0, 1.5	各 1
	1.7		0.001	1.0	1
			1.0	1.0	1
正 弦 波		90	0.1	1.0	1
	2.3		0.1	1.0	2
	4.4		0.1	1.78	1

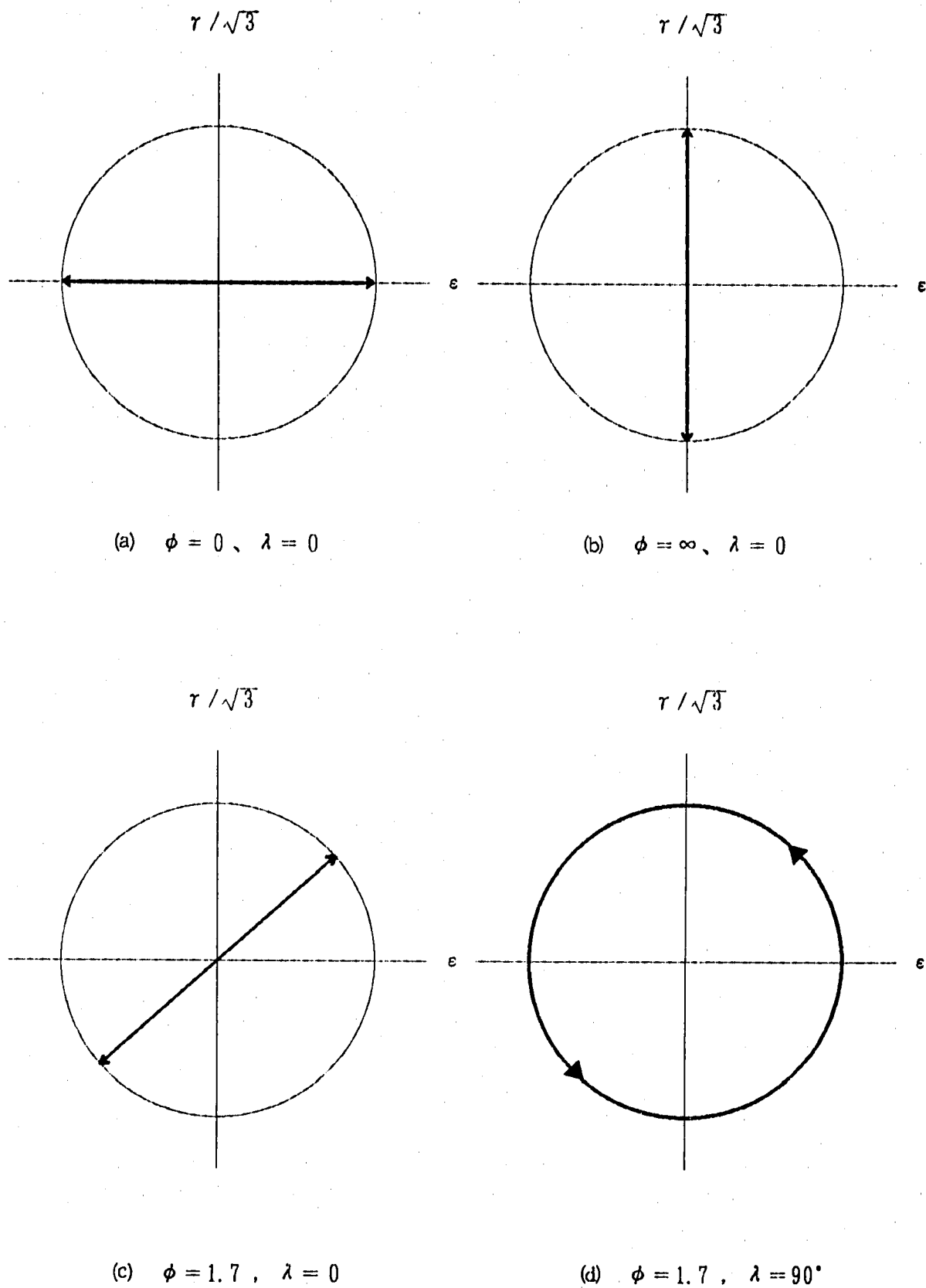


図2.2 ひずみ負荷経路の概念図

T.P.=MBS6C5
 $\Delta \epsilon_{eq} = 1\%$, $N_f = 384$ cycle
 $n = 200$ cycle

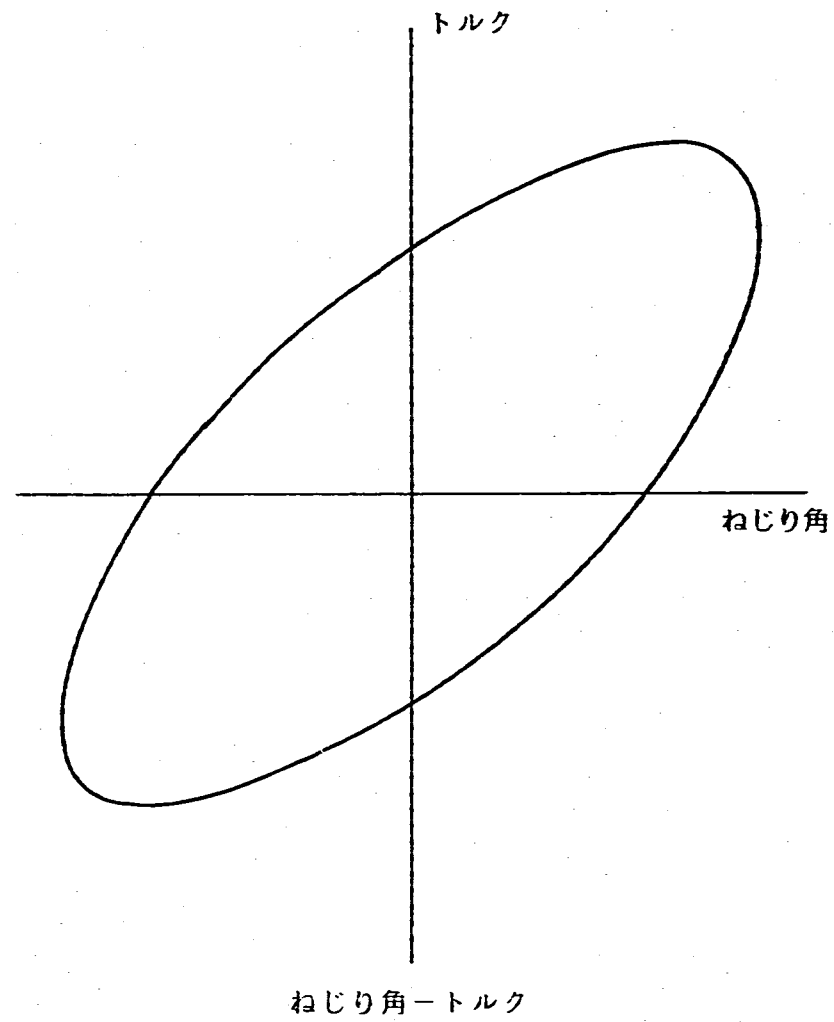
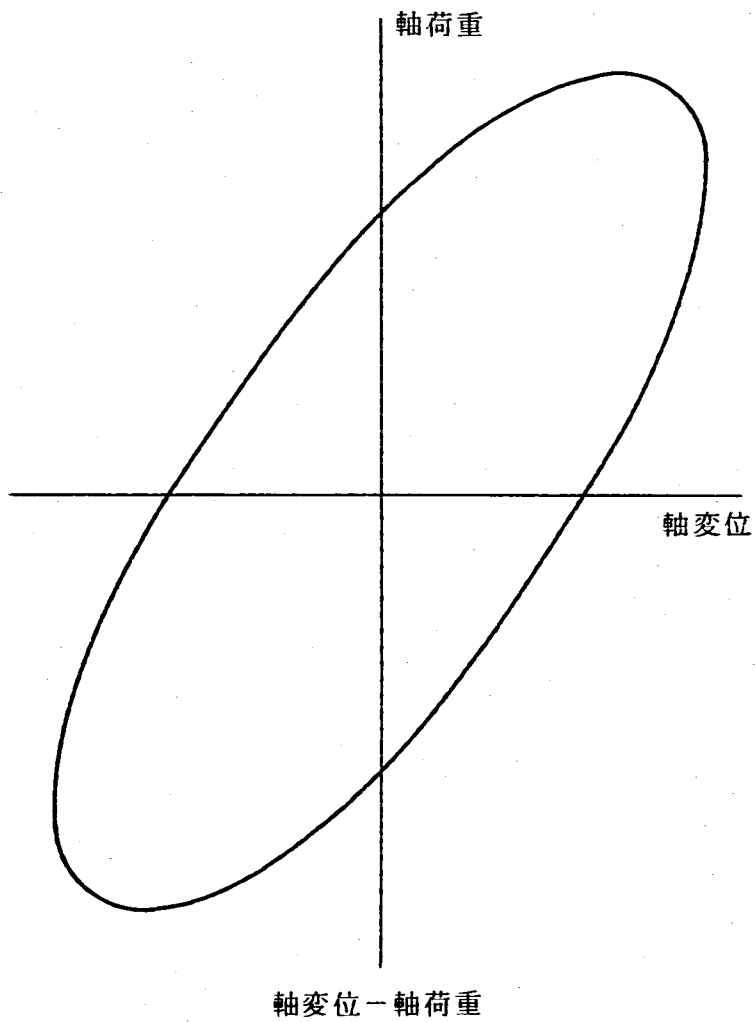


図2.3 ヒステリシス・ループの例

FIG 890412

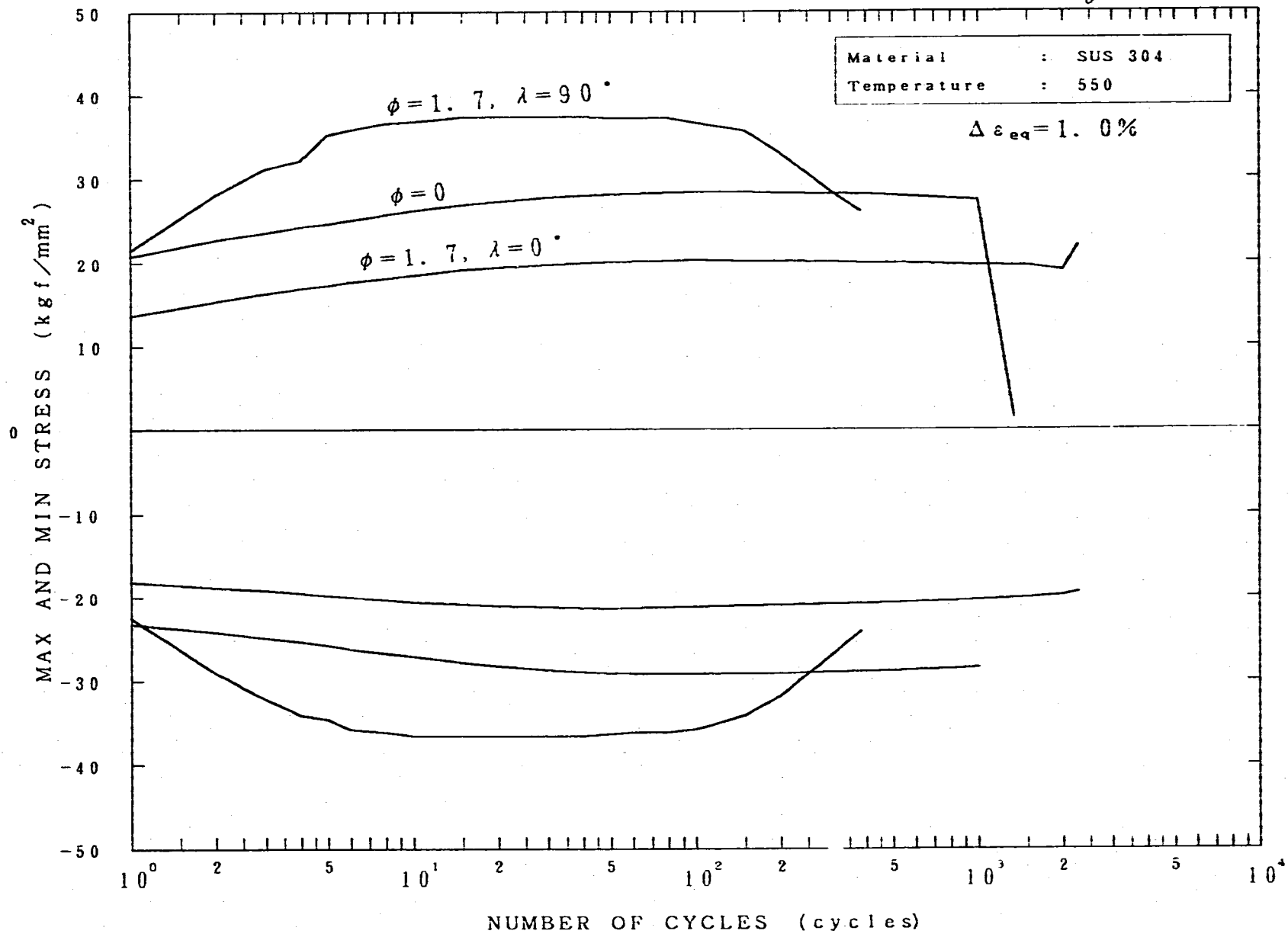


図 2.4 繰り返しひずみ負荷による応力の変動 (軸力)

FIG 890412

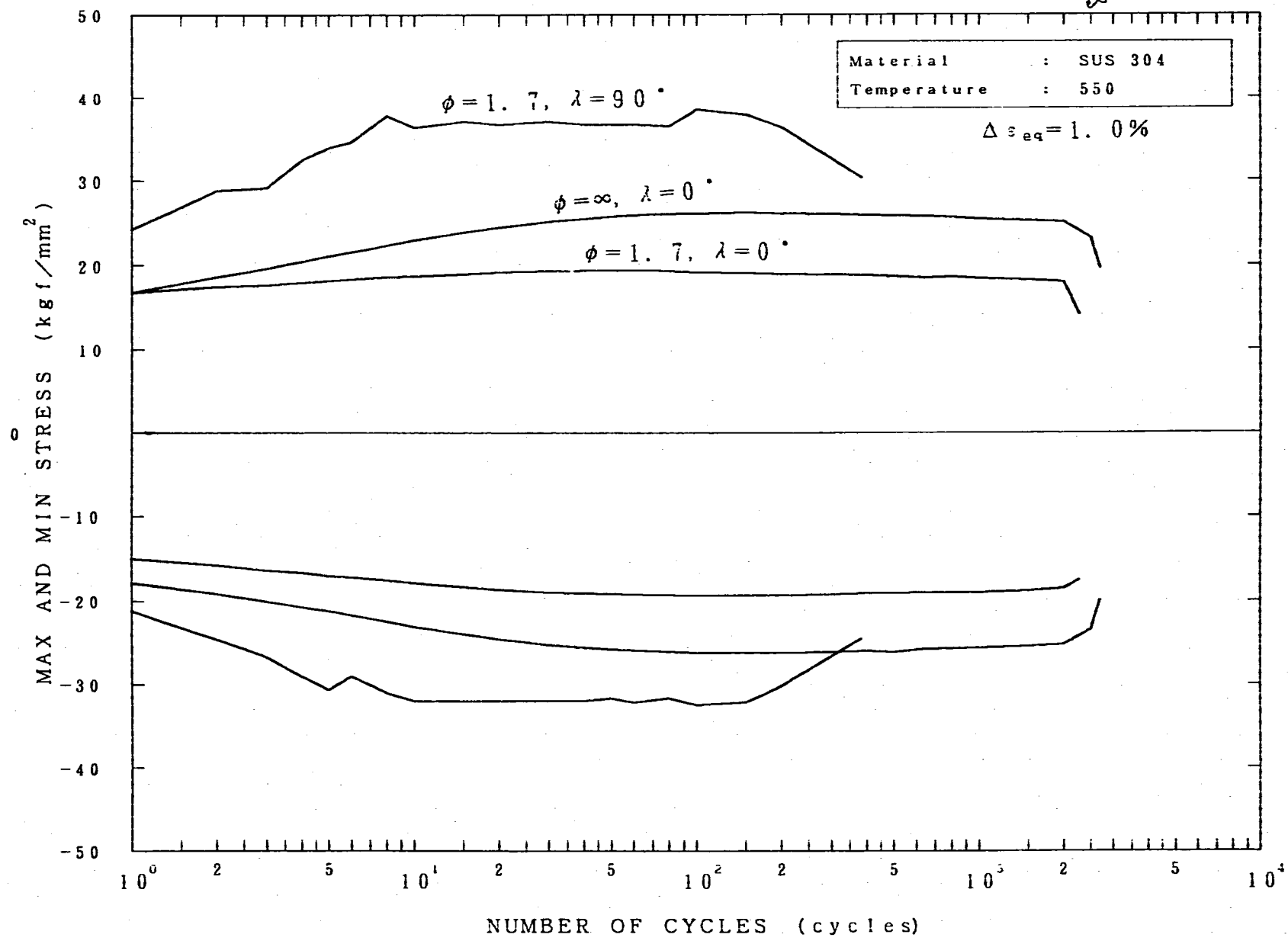


図2.5 繰り返しひずみ負荷による応力の変動 (ねじり)

表 2.4 多軸疲労試験の結果

試験片	ϕ	λ (deg)	$\dot{\epsilon}_{eq}$ (%/sec)	$\Delta \epsilon_{eq}$ (%)	$\Delta \epsilon$ (%)	$\Delta \tau$ (%)	$\Delta \sigma$ (kgf/mm ²)	$\Delta \tau$ (kgf/mm ²)	$\Delta \sigma_{eq}$ (kgf/mm ²)	N_f (cycles)
MBS6B9	0	0	0.1	0.510	0.506		42.3		42.3	6034
6B7				1.009	1.009		56.5		56.5	1339
6B8				1.508	1.508		67.9		67.9	419
6B3	∞		0.1	0.552		0.877		22.5	38.9	24613
6B4				1.086		1.754		29.5	51.2	2691
6B6				1.561		2.626		34.1	59.0	378
6B1	1.7		0.001	1.116		1.752		24.5	45.9	2489
6B0			0.1	0.508	0.360	0.622	30.0	16.3	41.2	16031
6A6				1.013	0.715	1.241	40.0	21.6	54.8	2274
6B5				1.514	1.068	1.857	45.6	24.4	62.1	931
6A8			0.001	1.014	0.718	1.240	34.2	18.4	46.7	918
6A9	1.0		1.003	0.708	1.231	37.5	19.8	50.9	2529	
6C5	1.7	90	0.1 相当	1.000	1.010	1.767	64.8	38.5	64.5	384
6C3	2.3			1.002	0.741	1.736	70.2	37.9	70.2	444
6C4				1.010	0.731	1.749	72.1	40.1	72.1	422
6C8	4.4			1.780	0.700	3.080	71.4	43.8	71.4	130

3. 試験結果の検討

3.1 ひずみパラメータによる疲労試験結果の整理

本項では、多軸疲労試験の結果をいくつかのひずみパラメータで整理・比較することにより有望なパラメータの検討を行い、以後の研究において多軸疲労評価法の実用モデルの開発を行うための基礎の整備の一助とする。

多軸疲労試験の結果の整理法には、既存の単軸におけるクライテリアを拡張して多軸での相当量を計算する方法、エネルギー的なアプローチによる方法、材料の変形挙動を考慮する方法等があるが、一般には、Misesの相当ひずみに代表される「相当量」を用いて単軸の疲労試験結果に結びつけることによって解釈されることが多い。このような方法は、単軸の豊富なデータを活用することにより新たに大量の多軸疲労試験を行うことなく多軸疲労寿命の評価を行うことが可能となる点で有利であると思われる。高温構造設計方針等では、単軸負荷における最適疲労破損式（ひずみ範囲-寿命線図）の定式化が行われていることを考えると、設計手法の確立という観点からは相当ひずみによるアプローチが最も効果的である可能性が高い。

本項では、現在提案されている数多くのパラメータのうち、代表的あるいは比較的特徴的であると考えられるパラメータとして、ASME式の相当ひずみ、拡張 Γ -planeモデルによる等価剪断ひずみ範囲、Misesの相当ひずみをひずみ経路に沿って積分する方法をとりあげ、本試験結果の評価を行った。検討に当たっては、まず各モデルで相当ひずみを計算した。次に相当ひずみを高速原型炉高温構造設計指針の材料強度基準で定められたSUS304鋼の最適疲労破損式に値を代入し、疲労寿命を評価した。各パラメータの計算結果を表3.1に、各パラメータによる疲労寿命の予測結果を表3.2に示す。また、各パラメータによる寿命の整理結果を図3.1～3に示す。さらに、各パラメータによる寿命予測の結果を負荷形態別に図3.4～7に示す。図3.4～7に示すPredicted Lifeとは上述の方法により評価した疲労寿命である。

3.1.1 ASME式の相当ひずみ範囲

まず試験結果を多軸ひずみ状態におけるひずみの記述にあたって一般的に用いられるASME式の相当ひずみ範囲(1)で整理する。ASMEではCode Case N-47-21において疲労

損傷和の算出に用いるべき相当ひずみ範囲をつぎのように定めている。

最初に、完全なサイクルに対しすべてのひずみ成分の履歴を計算する。次に、サイクル中最大あるいは最小となる一つの時点を選ぶ。この時点を選字 i で示す。サイクル中の各時点における各ひずみ成分から時点 i における対応ひずみ成分を差し引くことによりひずみ成分の変化の履歴を計算する。

$$\begin{aligned}\Delta \epsilon_x &= \epsilon_x - \epsilon_{xi} \\ \Delta \epsilon_y &= \epsilon_y - \epsilon_{yi}\end{aligned}\tag{1}$$

等となる。さらに各時点ごとの相当ひずみ範囲を計算する。

$$\begin{aligned}\Delta \epsilon_{eq} &= \frac{\sqrt{2}}{3} \left\{ (\Delta \epsilon_x - \Delta \epsilon_y)^2 + (\Delta \epsilon_y - \Delta \epsilon_z)^2 + (\Delta \epsilon_z - \Delta \epsilon_x)^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sqrt{2}}{3} (\Delta \tau_{xy}^2 + \Delta \tau_{yz}^2 + \Delta \tau_{zx}^2) \right\}^{1/2}\end{aligned}\tag{2}$$

この相当ひずみ範囲の最大値を相当ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{eq}$ として疲労曲線に当てはめる。

式(2)は軸とねじりの2軸状態で各ひずみを次式

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \Delta \epsilon_x \sin \omega t \\ \tau_x &= \Delta \tau_x \sin (\omega t - \lambda)\end{aligned}\tag{3}$$

で与える場合には、

$$\Delta \epsilon_{eq} = \left\{ \Delta \epsilon \left[\sin^2 (\omega t) + \frac{1}{3} \phi^2 \sin^2 (\omega t + \lambda) \right]^{1/2} \right\}_{\max}\tag{4}$$

となる。軸ひずみとねじりひずみに位相差が無い場合には、式(4)は次式となる。

$$\Delta \epsilon_{eq} = \left(\Delta \epsilon^2 + \frac{\Delta \tau^2}{3} \right)^{1/2}\tag{5}$$

ASME式の相当ひずみ範囲と寿命の関係は図3.1に示した通りである。図3.1では、データ全体にややばらつきが見られるものの、次の傾向が読み取れる。まず、ひずみ速度が0.1%/secのものについて検討すると同一のASME式相当ひずみ範囲で比較した場合、比例負荷の場合には、 $\Delta \epsilon_{eq} = 1.5\%$ の場合を例外として単軸負荷(図中○)と比較して純粋ねじり(図中△)の方が長寿命となり、重畳負荷(図中□)はこの中

間に位置する。また、非比例負荷においては、すべて比例負荷に比べて、 $1/2 \sim 1/3$ 程度に寿命が低下しており、位相差が疲労強度を低下させる傾向が示されている。さらに、ASME式のひずみ範囲が1%のものについて非比例負荷の場合のひずみ範囲比 ϕ の影響を比較すると、 $\phi = 2.3$ のほうが、 $\phi = 1.7$ よりも長寿命となっており、ASME式のひずみ範囲が同一の場合には、ひずみ範囲比が大きいほど長寿命となる可能性を示している。

次に、ひずみ速度の効果（比例負荷の場合のみデータ取得）を単軸、純粋ねじりおよび比例負荷の重畳負荷について検討する。ひずみ速度効果は、純粋ねじり負荷の場合にはほとんど現れていない。これに対し、単軸引張圧縮および重畳負荷の場合には、ひずみ速度の低下とともに寿命も低下する傾向が明らかである。

次に寿命評価の結果を図3.4～7に示す。まず比例負荷では、単軸引張圧縮はやや危険側に、ねじり負荷はやや安全側に、重畳負荷はほぼ平均傾向に対応していることが分かる。次に非比例負荷はすべてかなり危険側に評価されている。つまり、ASME式の相当ひずみ範囲ではひずみ範囲比、位相差の影響を含めると必ずしも保守的な評価が出来ないことが分かる。

なお本報では、これ以降の考察の対象を主としてひずみ範囲比の影響と位相差の影響に限定し、速度効果については4章で簡単に触れるにとどめ、速度効果に関する詳細な検討はさらに広範囲のデータを取得した上で今後の課題とするものとする。

3.1.2 拡張 Γ -planeによる等価剪断ひずみ範囲

このモデルは、Brown, Miller(2)が提案したモデルを緒方ら(3)が拡張したものであり、多軸負荷中に生じる最大剪断ひずみ範囲 $\Delta \gamma_{max}$ と、 $\Delta \gamma_{max}$ が生じる方向と法線方向に生じる垂直ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_n$ の2つのパラメタによって決定される等価剪断ひずみ範囲 $\Delta \gamma_{eq}$ によって非比例負荷を含む多軸疲労を評価するものである。非比例負荷においては巨視き裂の生じる方向がすべて最大剪断ひずみ範囲 $\Delta \gamma_{max}$ の生じる方向と一致していることを物理的根拠としている。ただし、比例負荷の場合にはこれは必ずしも成立しておらず、その物理的根拠は必ずしも明白ではない。

最大剪断ひずみ範囲 $\Delta \gamma_{max}$ の生じる方向は軸方向から θ 傾いた面における軸ひずみ ϵ_a および剪断ひずみ γ_a を与える次式(6)に、

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \varepsilon_t (\cos^2 \theta - \nu \sin^2 \theta) - \frac{1}{2} \gamma_t \sin 2\theta \\ \gamma_r &= \gamma_t \cos 2\theta - \varepsilon_t (1 + \nu) \sin 2\theta\end{aligned}\quad (6)$$

次式(7)

$$\begin{aligned}\varepsilon_t &= \Delta \varepsilon_t \sin \omega t \\ \gamma_t &= \Delta \gamma_t \sin (\omega t - \lambda)\end{aligned}\quad (7)$$

を代入して $d\gamma_r / d\theta = 0$ となる θ より求める。 $\phi = \Delta \lambda_t / \Delta \varepsilon_t$ とおけば θ は

$$\tan 4\theta = \frac{2\phi(1+\nu)\cos\theta}{(1+\nu)^2 - \phi^2}\quad (8)$$

として求まる。これを式(6)に代入することにより $\Delta \tau_{max}$, $\Delta \varepsilon_n$ が求まる。このようにして様々なひずみ波形のもとで行われた多軸疲労試験結果について $\Delta \tau_{max}$, $\Delta \varepsilon_n$ を求め、寿命の等しいものについて実験式をあてはめ、等価剪断ひずみ範囲 $\Delta \tau$ を求める。図3.8にこの方法の概念図を示す。図3.8の縦軸は $\Delta \varepsilon_n$ であり、横軸は $\Delta \tau_{max}$ である。等寿命曲線は右下がりの直線と曲線の組合せで表される。等寿命曲線として当てはめられた実験式は次式(9)である。定数値は緒方らの決定した数値である。

$$\begin{aligned}a < 1/3, & \quad (\Delta \tau_{eq})^{2.54} = 25.5 \Delta \varepsilon_n^{2.54} + (\Delta \tau_{max} / 2)^{2.54} \\ a > 1/3, & \quad \Delta \tau_{eq} = 1.04 \Delta \varepsilon_n + \Delta \tau_{max} / 2\end{aligned}\quad (9)$$

ただし、 $a = \Delta \varepsilon_n / (\Delta \tau_{max} / 2)$ である。等価剪断ひずみ範囲 $\Delta \tau$ により寿命を整理した結果を図3.2, 4~7に示す。ばらつきは小さく結果の整理は良好である。

多軸試験結果と等価剪断ひずみ範囲による整理とが良好な対応を示すのは、式(9)における係数を多軸試験結果により定めていることに一つの理由がある。ただし、緒方らの決定した定数値がPNCで採取したデータにも適用できることが確認されたことは注目に値する。また、このアプローチは、非比例負荷における亀裂の発生方向を考慮している等、物理的根拠に基づいた評価法を目指している点で興味深いといえる。しかし反面、複雑な負荷経路を与えられた場合の取り扱いが面倒であること、並びに温度依存性、ひずみ速度依存性、保持時間効果等実際の設計への適用に必要な定数を

定めるために膨大な多軸試験を行わなければならないことを考慮すると、実験データの整理には使用出来ても、設計基準値の基礎とするには問題点が多い。

3.1.3 Misesの相当ひずみをひずみ経路に沿って積分する方法

この方法は、多軸ひずみ平面上に描かれるひずみ経路を積分することによって任意の負荷経路に対応する相当ひずみ $\Delta \epsilon_{p,th}$ を求めるものである。相当ひずみ $\Delta \epsilon_{p,th}$ は次式(10)によって定義される。

$$\Delta \epsilon = \int_a^P d \epsilon_{e,q} \quad (10)$$

ただし P , Q は Mises の相当ひずみの最大値と最小値であり、 $d \epsilon_{e,q}$ は Mises の相当ひずみ増分である。概念図を図 3.9 に示す。この方法は、ASME 式の相当ひずみ範囲の定義において $\Delta \epsilon_x$ 等を $\int \epsilon_x d \epsilon_x$ 等に置き換えたものと考えられる。本報ではこの方法を「ひずみ経路積分法」と呼ぶことにする。

この結果により多軸疲労試験の結果を整理した結果を図 3.3, 4~7 に示す。ASME 式の相当ひずみによる整理と比較して、位相差付の試験結果が安全側に整理されており、全体のばらつきが小さくなり、良好な評価となっていることが分かる。ただし、この方法では、ASME 式の相当ひずみによる整理に比べて改善されるのは、非比例負荷の波形のみであることに注意しなければならない。

この方法は、複雑な負荷経路に対しても一般性を失うことなく適用できる点、定義が比較的簡単で扱いやすい等の利点がある。反面、比例負荷については ASME 式の相当ひずみによる整理と全く同一の結果を与えるため、単軸引張圧縮、ねじり、比例重畳負荷の寿命の差を説明できないこと、ASME 式の相当ひずみと同様、ひずみ経路の長さと同じであれば、異なる負荷経路についても同一の相当ひずみをあたえる点、ひずみ経路の効果と保持時間等の時間依存の効果を混同して評価する恐れがある点 (3.2 節参照) 等、検討の余地が残る。

3.1.4 まとめ

本節では本報で行った多軸疲労試験の結果を現状での代表的パラメータである ASME 式の相当ひずみ範囲および相当応力範囲、拡張 Γ -plane モデルによる等価剪断ひずみ範囲、Mises の相当ひずみをひずみ経路に沿って積分する方法 (ひずみ経路積分法)

によって整理した。この結果、ASME式の相当ひずみは非比例負荷の波形をやや危険側に評価するが、拡張 Γ -planeモデルによる等価剪断ひずみ範囲、ひずみ経路積分法による等価ひずみ範囲による整理はかなり良好な結果を示すことが明らかになった。このうち、拡張 Γ -planeモデルによる方法は、評価結果は良好であるが、実験式の決定に多くの実験が必要になる。また、ひずみ履歴が詳細に既知である場合以外は適用が困難である。このように考えると、本報で検討を行った範囲ではひずみ経路積分法による等価ひずみ範囲による方法が最も有望であると考えられる。ただし、この方法もより一般的な条件に適用するためには前項で指摘した問題をはじめ、さらに詳細な検討が必要であると思われる。表3.3に各種パラメータで計算した相当ひずみ範囲のASME式の相当ひずみ範囲に対する補正率を示す。補正率の最大値は約1.9程度であることが分かる。

表 3.1 ひずみパラメータの検討

試験片	ϕ	λ (deg)	ϵ_{eq} (%/sec)	$\Delta \epsilon_{eq}$ (%)	$\Delta \tau_{eq}$ (%)	$\Delta \epsilon_{pth}$ (%)	
MBS6B9	0	0	0.1	0.510	0.549	0.510	
6B7				1.009	1.096	1.009	
6B8				1.508	1.640	1.508	
6B3	∞		0.1	0.552	0.438	0.552	
6B4				1.086	0.877	1.086	
6B6				1.561	1.313	1.561	
6B1			0.001	1.116	0.876	1.116	
6B0	1.7		0	0.1	0.508	0.485	0.508
6A6					1.013	0.964	1.013
6B5					1.514	1.438	1.514
6A8				0.001	1.014	0.968	1.014
6A9				1.0	1.003	0.954	1.003
6C5	1.7	90	0.1 相当	1.000	1.910	1.570	
6C3	2.3			1.002	1.638	1.372	
6C4				1.010	1.634	1.373	
6C8	4.4			1.780	2.268	2.046	

表 3.2 ひずみパラメータによる疲労寿命の予測

試験片	ϕ	λ (deg)	ϵ_{eq} (%/sec)	実験寿命	Mises の相当 ひずみ	拡張 Γ - plane モデル	ひずみ経路 積分法	
MBS6C9	0	0	0.1	6034	15996	12117	15996	
6B7				1339	2037	1670	2037	
6B8				419	816	682	816	
6B3	∞		0.1	24613	11879	30393	11879	
6B4				2691	1707	2901	1707	
6B6				378	758	1105	758	
6B1			0.001	2489	839	1422	839	
6B0	1.7		0.1	16031	16244	19558	16244	
6A6				2274	2017	2279	2017	
6B5				931	809	904	809	
6A8				0.001	918	1027	1136	1027
6A9				1.0	2529	3009	3434	3009
6C5	1.7	90	0.1	384	2082	496	748	
6C3	2.3			444	2072	684	1002	
6C4				422	2032	687	1001	
6C8	4.4			130	574	349	430	

表 3.3 ASME式の相当ひずみ範囲に対する補正率

試験片	ϕ	λ (deg)	ϵ_{eq} (%/sec)	$\Delta \epsilon_{eq}$ (%)	$\Delta \gamma_{eq}$ (%)	$\Delta \epsilon_{plh}$ (%)	
MBS6B9	0	0	0.1	1.000	1.08	1.00	
6B7					1.09	1.00	
6B8					1.09	1.00	
6B3	∞		0		0.1	0.793	1.00
6B4						0.808	1.00
6B6						0.841	1.00
6B1						0.785	1.00
6B0	1.7		0		0.001	0.955	1.00
6A6						0.952	1.00
6B5						0.950	1.00
6A8						0.955	1.00
6A9						0.951	1.00
6C5	1.7	90	0.1 相当	1.91	1.57		
6C3	2.3			1.63	1.37		
6C4				1.62	1.36		
6C8	4.4			1.27	1.15		

FIG 890412

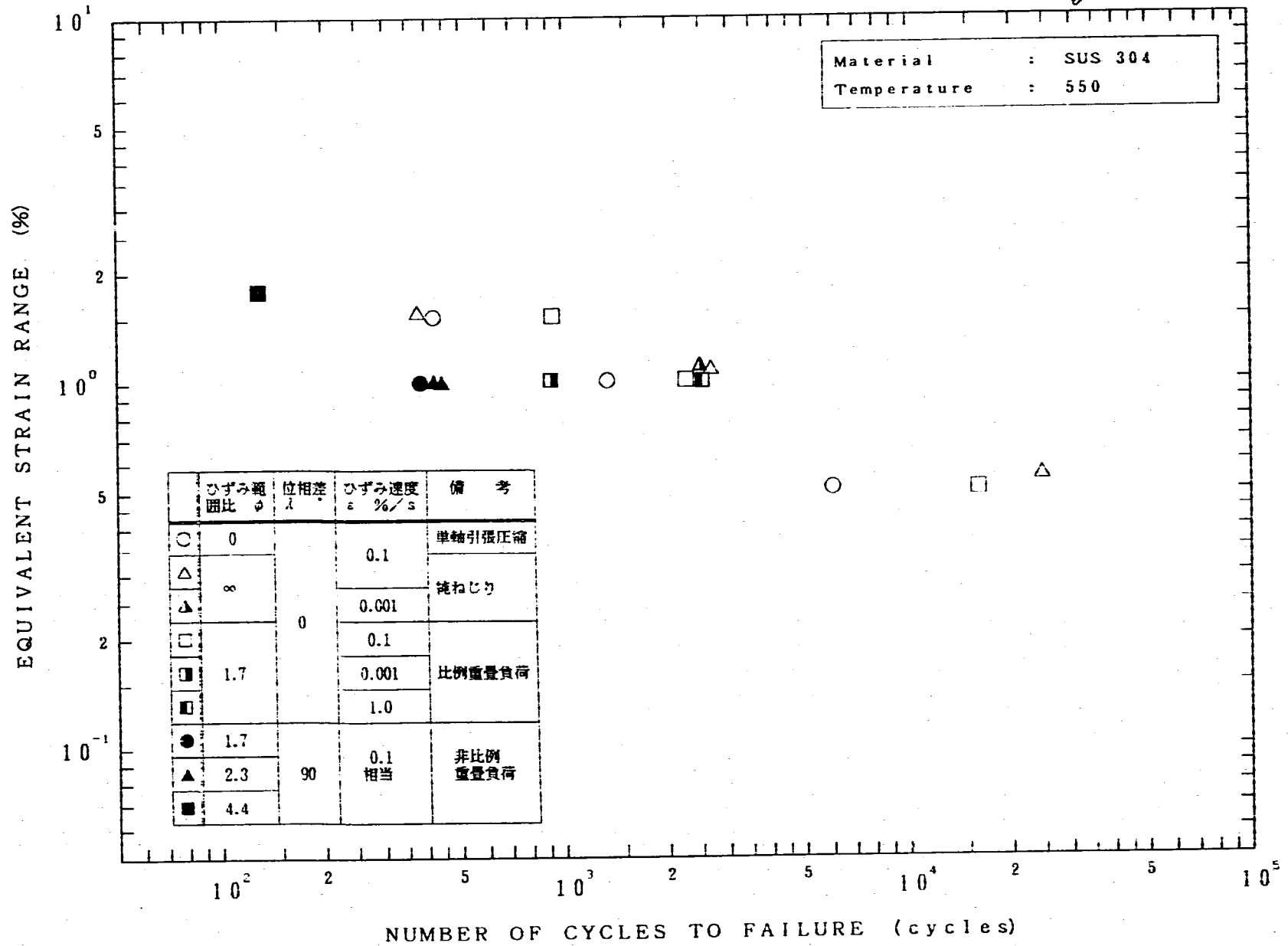


図3.1 ASME式の相当ひずみ範囲による整理

PNC.FIG 890310

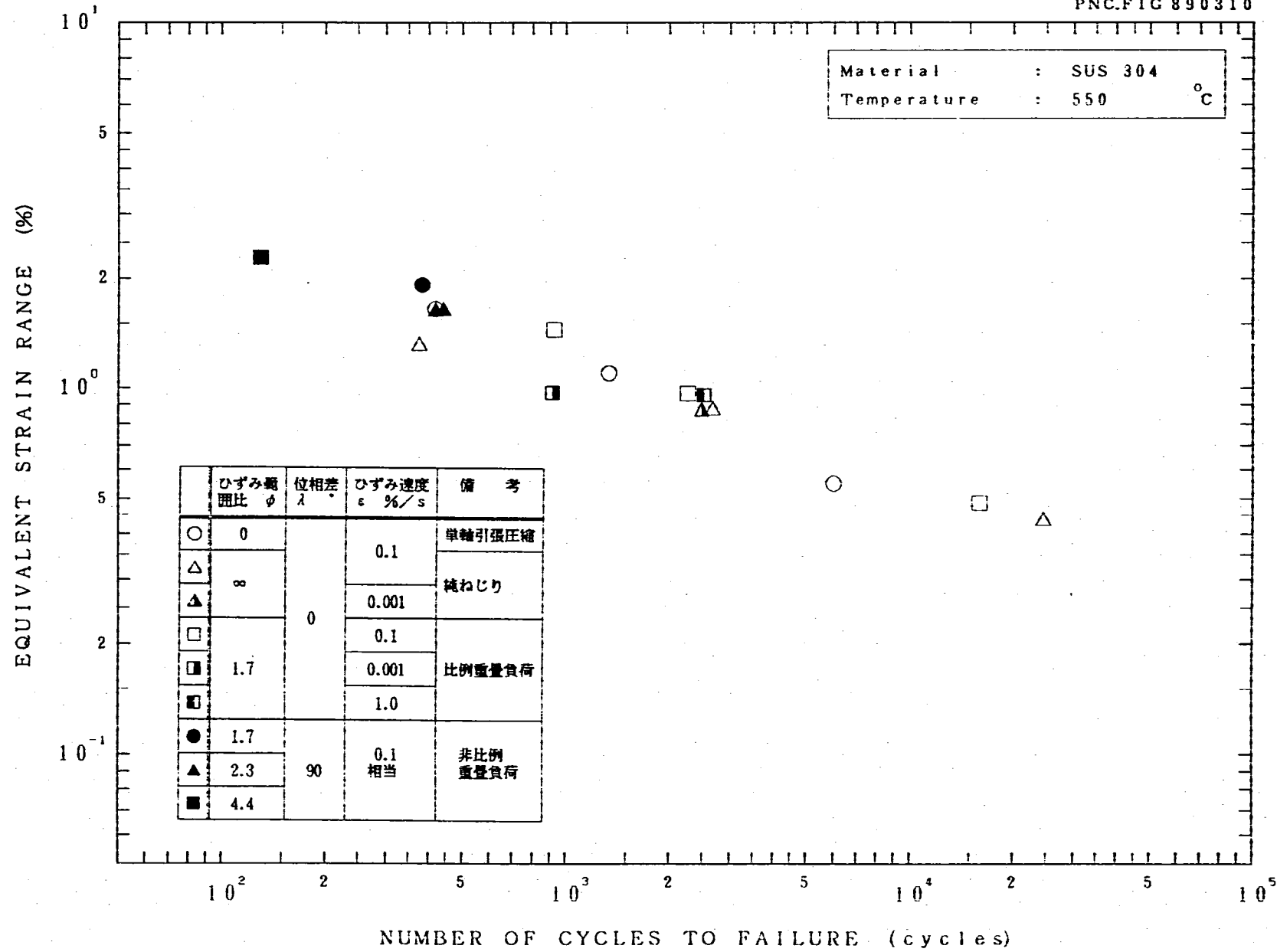


図3.2 等価剪断ひずみ範囲による疲労寿命の整理

PNC.FIG 890310

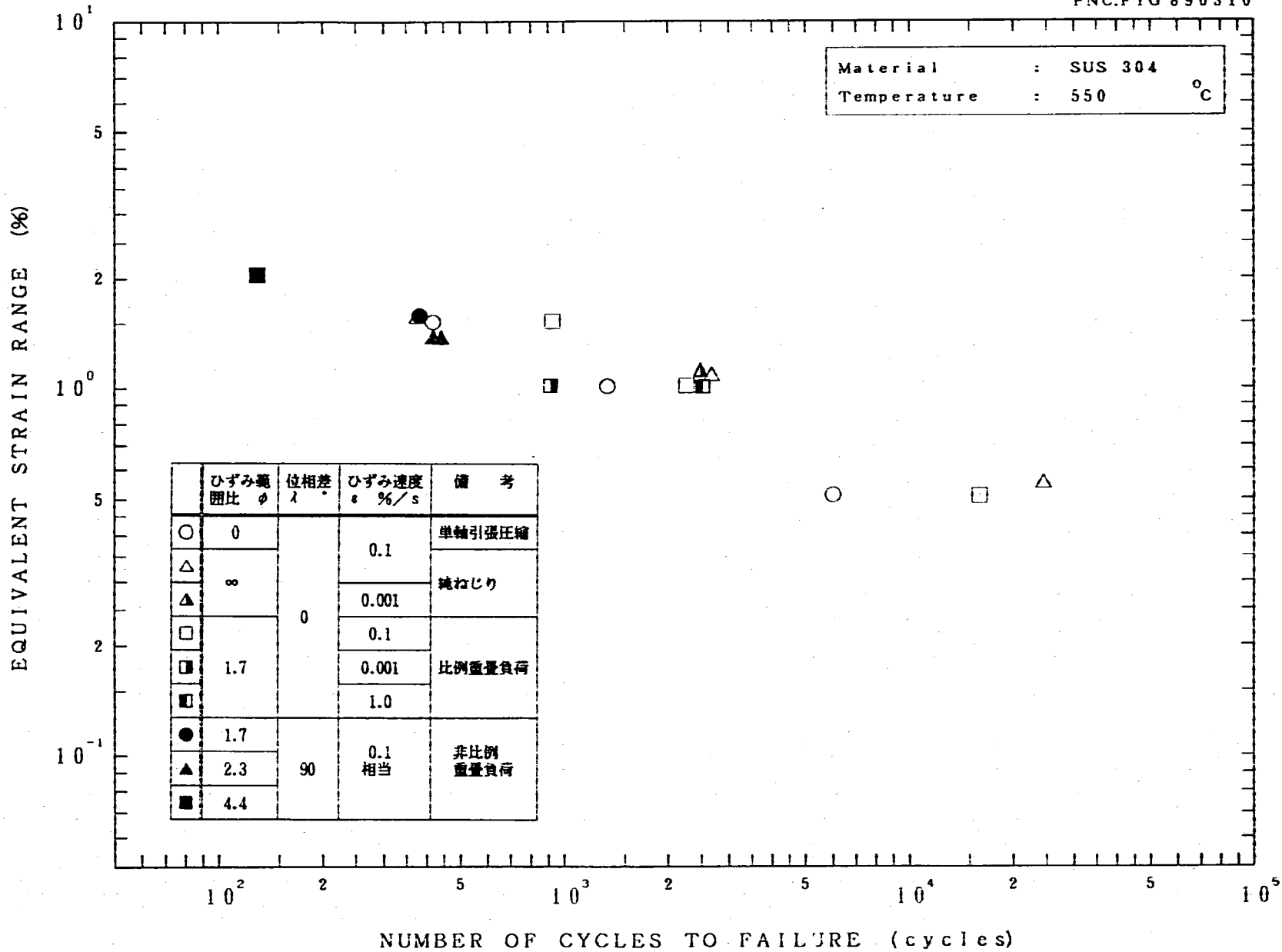


図3.3 ひずみ経路積分法による疲労寿命の整理

FIG 890412

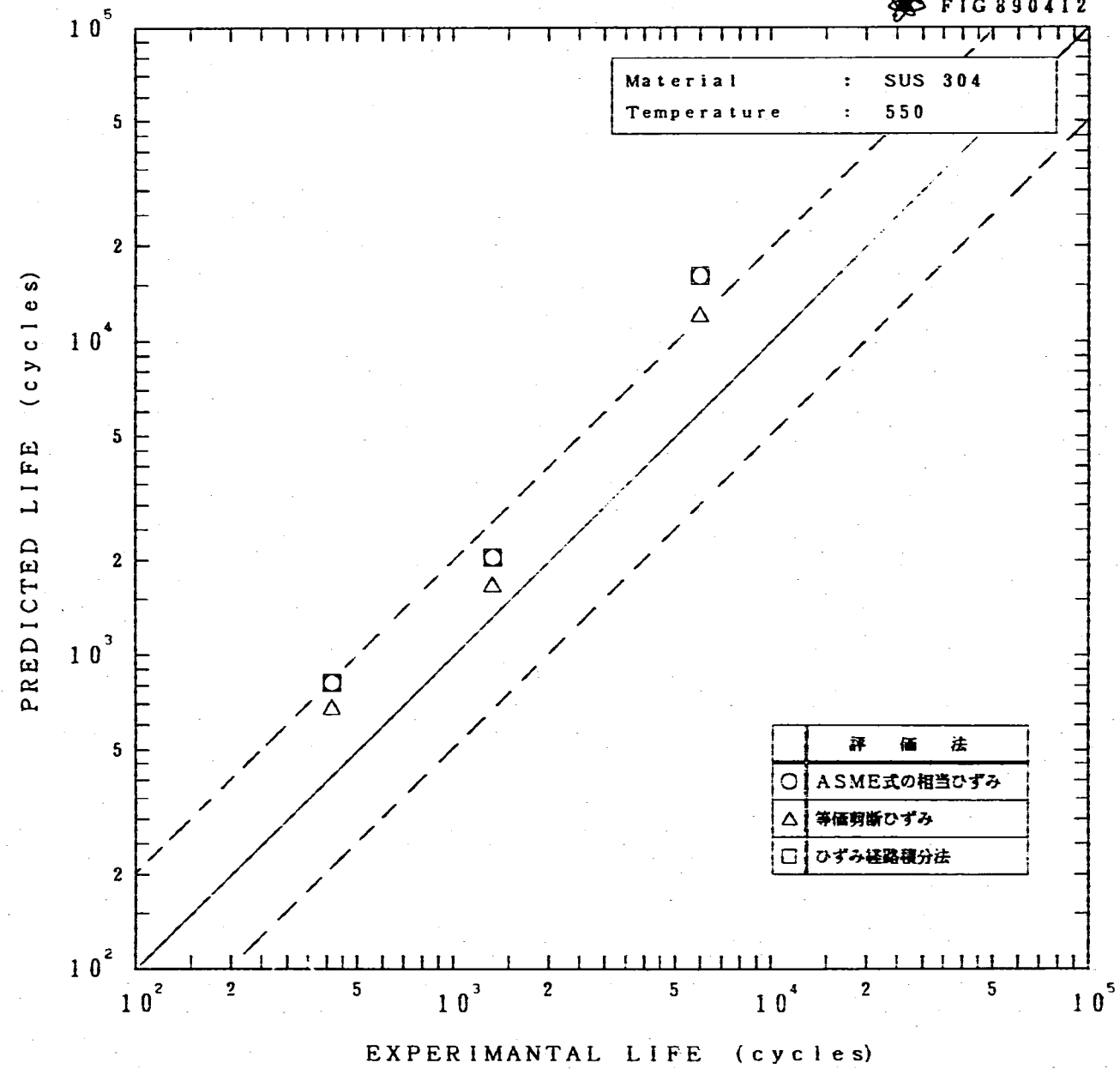


図3.4 ひずみパラメータによる軸力負荷の寿命評価

FIG 890412

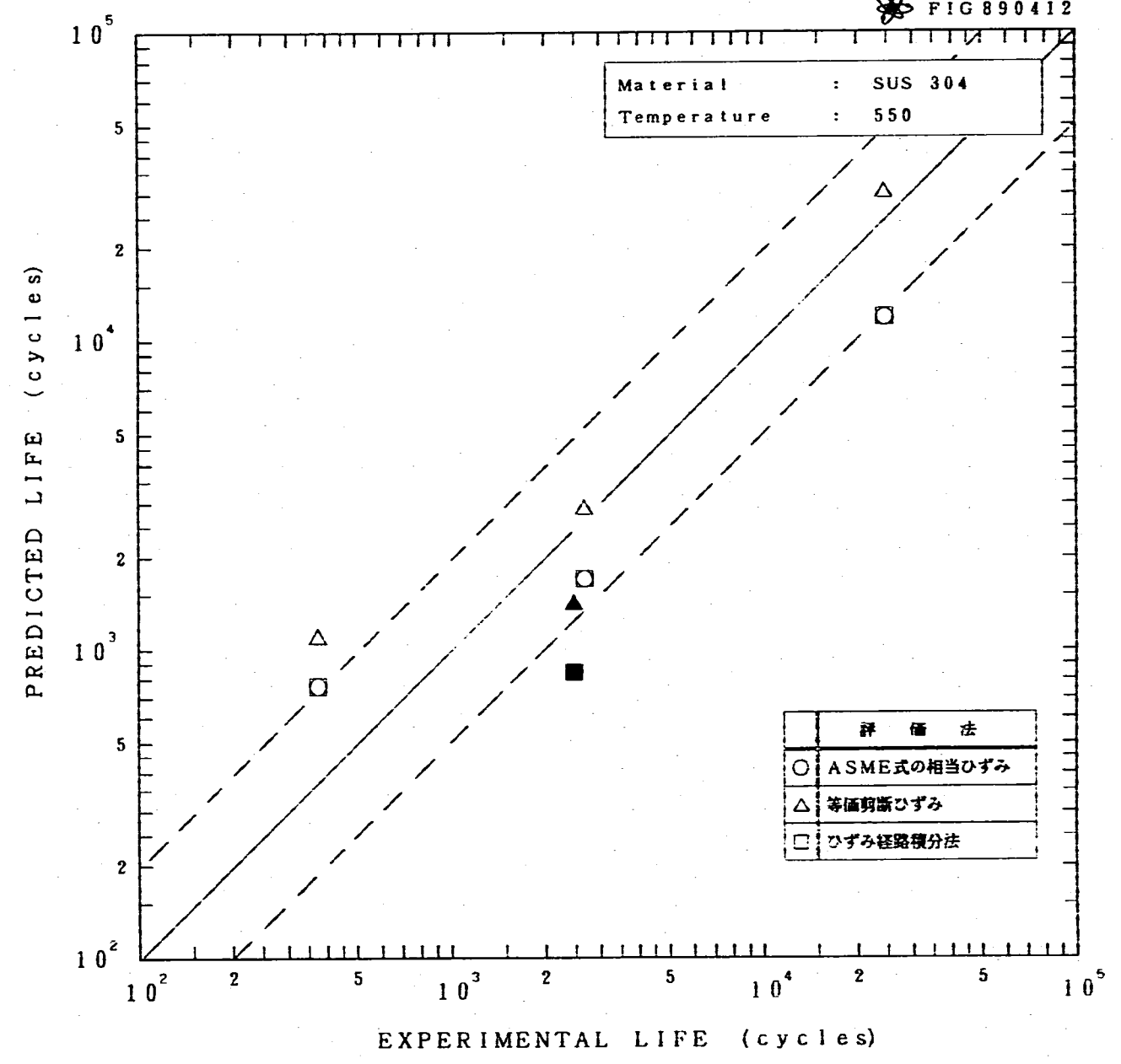


図3.5 ひずみのパラメータによるねじり負荷の寿命評価

FIG 890412

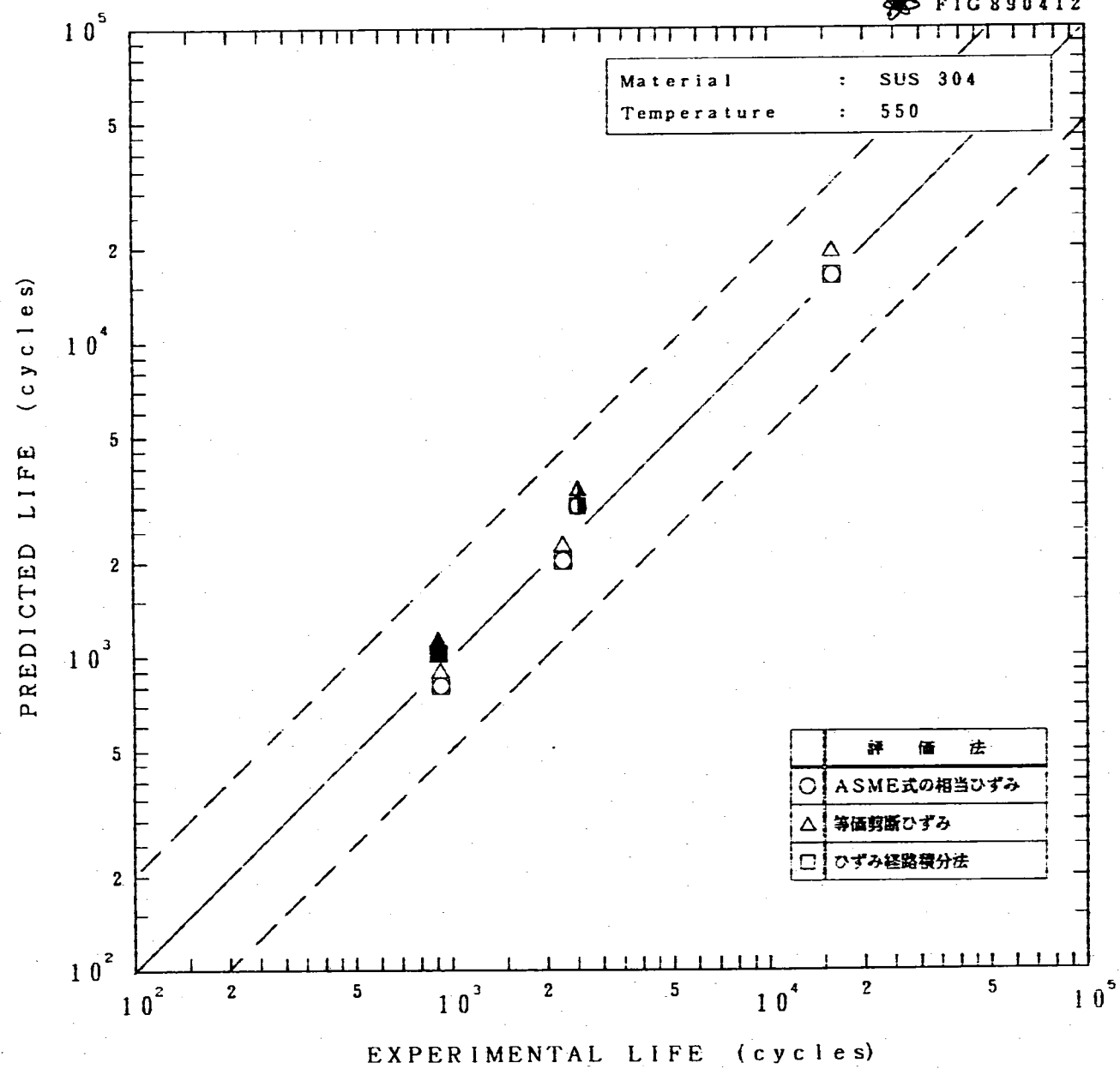


図3.6 ひずみパラメータによる比例重畳負荷の寿命評価

FIG 890412

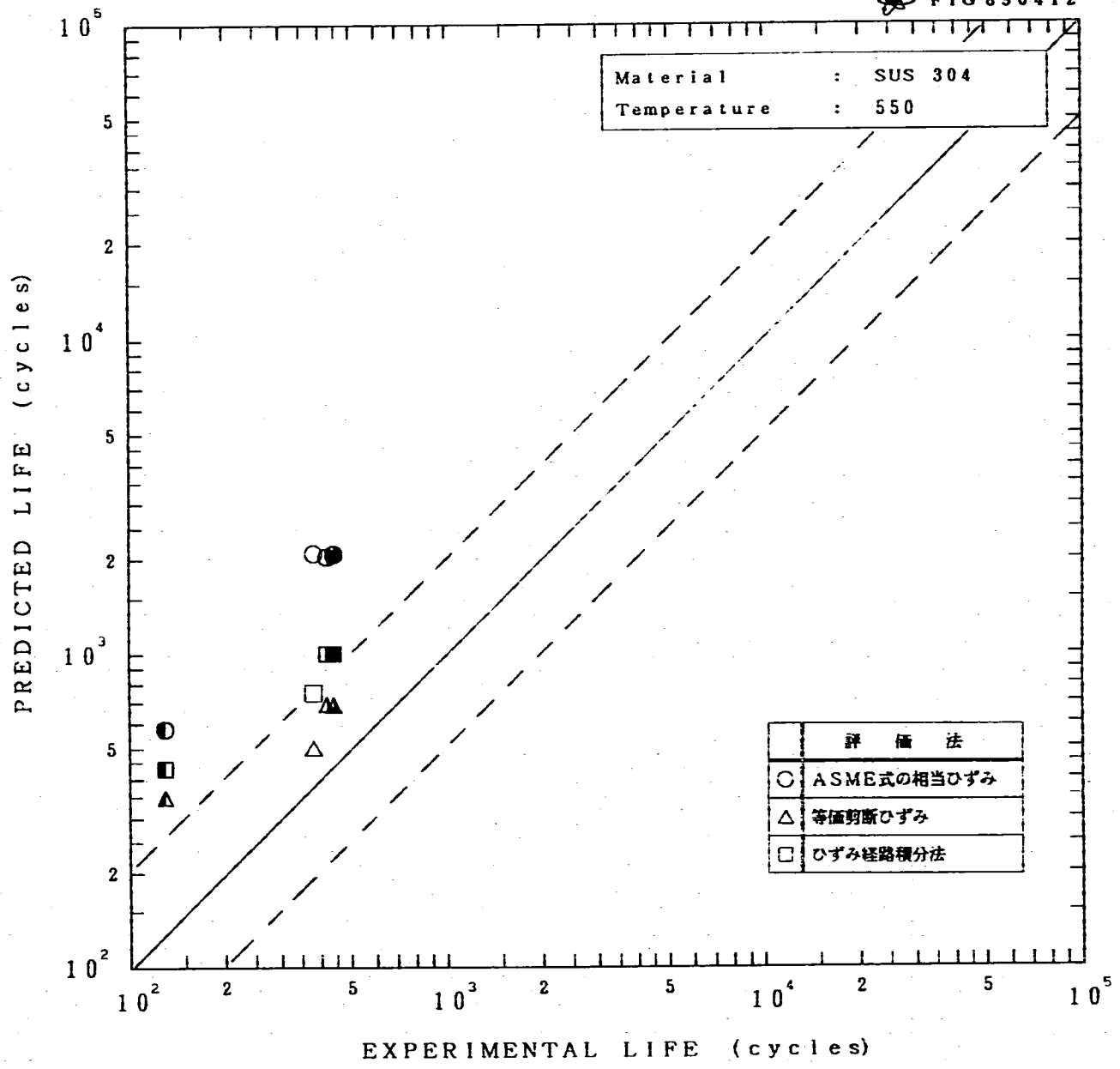


図3.7 ひずみのパラメータによる非比例重畳負荷の寿命評価

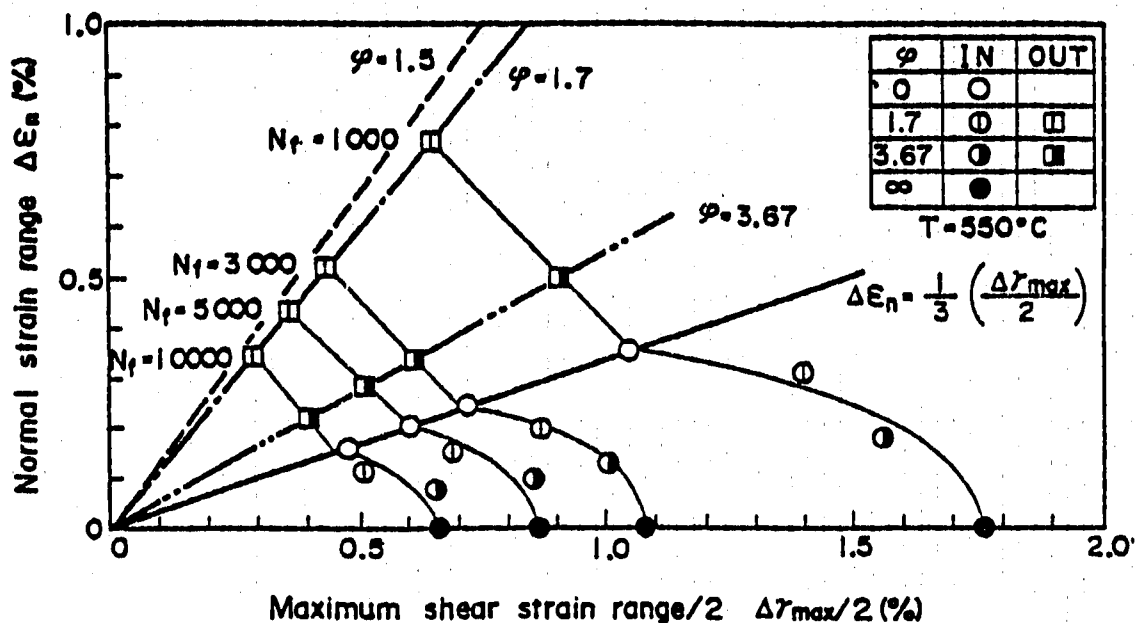


図 3.8 拡張 τ -plane の概念図

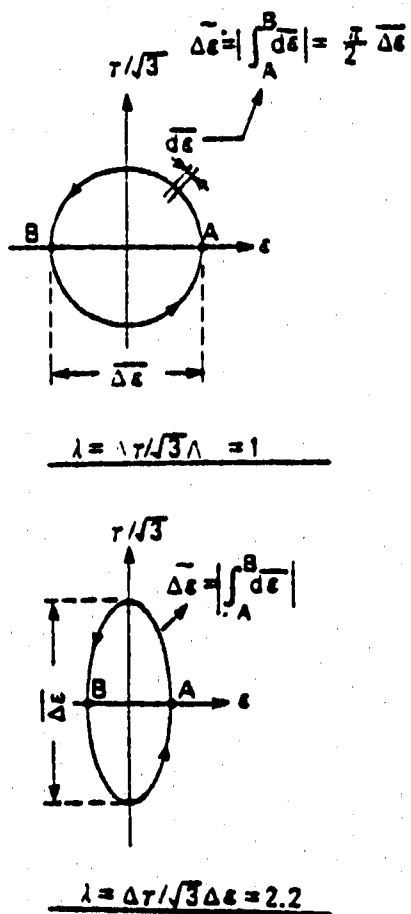


図 3.9 ひずみ経路積分法の概念図

3.2 現状におけるひずみクライテリアの問題点の検討

3.2.1 ASME式の相当ひずみ範囲の問題点

ASME式の相当ひずみ範囲では、非比例負荷の疲労寿命を危険側に評価することは前節で明らかにした通りであるが、ここではこれについて若干の考察を行う。

ASME式の相当ひずみ範囲では、その定義から明らかなように、相当ひずみ範囲は軸ひずみ範囲およびねじりひずみ範囲だけで決定され、各軸におけるピーク間の経路は全く考慮されない。従って、軸およびねじりひずみ範囲が同じであれば比例負荷の場合も非比例負荷の場合も相当ひずみ範囲は同一となる。これに対して実験では非比例負荷は比例負荷に対して寿命が低下している。

この傾向はひずみ経路を考慮することによりかなり改善されることは3.1.3項「Misesの相当ひずみをひずみ経路に沿って積分する方法」で示した通りである。この方法はASME式の相当ひずみ範囲の定義における $\Delta \epsilon_{\alpha}$ 等を $\int \epsilon_{\alpha} d\epsilon_{\alpha}$ 等に変更したものに当たることも述べた。しかし、この方法でも完全とは言えない。著者らはこの原因は、ひずみ経路積分法を用いても、すべての影響因子を考慮しきれないためではないかと考えている。著者らはこの因子は時間ではないかと考えている。

ASME式の相当ひずみ範囲が同一の場合でも負荷ひずみの経路は無限に考えられる。その一例を図3.10に示す。経路A、B、Cは比例負荷、D、E、Fは非比例負荷であり、いずれもASME式相当ひずみ範囲は同一である。経路Dと経路Eについてはひずみ経路積分法による等価ひずみも同一である。この両経路において、軸及びねじりのひずみ成分と時間の関係を同じく図3.10に示す。ひずみの時間履歴に注目すると、経路Dは経路Aと経路Bのひずみが軸とねじりで位相差をもって負荷されたものであることが分かる。これに対し、経路Eの場合は経路A経路Bの両端で保持時間をもつ波形が位相差をもって負荷されたものであり、時間因子に着目した場合には大きな差があることが別る。経路Eの場合は各ひずみ成分が保持時間を含むことから材料の挙動には当然時間依存の効果（単軸でいうひずみ保持効果）が寄与する可能性がある。また、本報で用いた経路Fの正弦波は三角波と保持波の中間の形状をもつと言える。従って、全ての経路による負荷を単純にひずみ範囲だけで寿命が規定される疲労という概念のみで整理することには無理があり、時間因子を考慮する必要があるように思われる。

また、例えば経路Dと経路Eで周期を同一に設定した場合には、ひずみを実際に変化する部分のひずみ速度は経路Eでは経路Dの1.4倍となる。従って、経路Dと経路Eではひずみ速度効果により、材料挙動が異なっている可能性も検討する必要がある。

このように、ASME式の相当ひずみあるいは前項で示したひずみ経路積分法による整理では、保持時間効果、ひずみ速度効果等の時間依存の因子による効果を合理的に評価できないことに注意しなければならない。

3.2.2 応力クライテリアの検討

一般に疲労強度の評価はひずみクライテリアで評価されるが、クリープなど時間依存の効果が顕著となりひずみと応力が一対一対応でなくなる領域の現象の評価には応力クライテリアが用いられる。本報では、試験条件をASME式の相当ひずみ範囲を基準に設定しているため、前項で指摘したように、その結果に時間依存の効果が含まれている可能性がある。この観点から、本項では応力クライテリアによる検討を行ってみた。

まず、ASME式の相当ひずみ・相当応力の関係をプロットしたものを図3.11に示す。ここで相当応力の定義は次の通りである。

$$\Delta \sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ (\Delta \sigma_x - \Delta \sigma_y)^2 + (\Delta \sigma_y - \Delta \sigma_z)^2 + (\Delta \sigma_z - \Delta \sigma_x)^2 + 6 (\Delta \tau_{xy}^2 + \Delta \tau_{yz}^2 + \Delta \tau_{zx}^2) \right\}^{1/2} \quad (1)$$

2軸状態の場合には次のようになる。

$$\Delta \sigma_{eq} = (\Delta \sigma^2 + 3 \Delta \tau^2)^{1/2} \quad (2)$$

図3.11によると、この方式で応力・ひずみ関係は一意的には整理されず、負荷形態によって差異が生じることが分かる。すなわち、同一ひずみ範囲で比較すると、非比例重畳負荷、単軸引張圧縮負荷、比例重畳負荷、ねじり負荷の順に応力が高くなっている。これは、ASME式の相当ひずみ範囲を指定してもこれに対応する応力値は一意的には定まらず、例えば単軸負荷における時間依存の現象であるひずみ速度効果と同様の現象が生じていることを示している。また、応力値の高い順に寿命が短くなっていることが分かる。この事実は、応力パラメータを採用することにより、評価が改善される可能性を示唆するものと考えられる。

図3.12に相当応力により試験結果を整理したものを示す。さらに図3.13～3.16に、
応力により寿命を評価した結果を他の方法により評価した結果と合わせて示す（注1）。
これらの値を表3.4に示す。これによると結果は全体に危険側の評価となるものの、
ひずみクライテリアの場合と異なり、特に非比例負荷を危険側に評価するという傾向
は観察されない。この事実は、応力クライテリアを採用することにより多軸下、特に
非比例負荷において生じている時間依存の効果を反映することができるためではない
かと著者らは考えている。

（注1） 求められた相当応力を高速原型炉高温構造設計指針の材料強度基準で定められ
たSUS304鋼の動的応力ひずみ関係式に代入することにより対応するひずみ範囲に
換算し、これを最適疲労破損式に代入し、疲労寿命の評価を行った。

表 3. 4 ASME 式の相当応力範囲の検討

試験片	ϕ	λ (deg)	ε_{eq} (%/sec)	$\Delta \sigma_{eq}$ (kgf/mm ²)	予測寿命 (cycles)	ひずみ補正率
MBS6B9	0	0	0.1	42.3	17022	0.984
6B7				56.5	1756	1.06
6B8				67.9	586	1.17
6B3	∞		0.1	38.9	42062	0.740
6B4				51.2	3411	0.760
6B6				59.0	1340	0.772
6B1	1.7		0.001	45.9	3470	0.555
6B0			0.1	41.2	22293	0.925
6A6				54.8	2145	0.975
6B5				62.1	983	0.914
6A8			0.001	46.7	3060	0.638
6A9			1.0	50.9	5377	0.810
6C5	1.7	90	0.1 相当	64.5	786	1.53
6C3	2.3			70.2	486	1.93
6C4				72.1	419	2.05
6C8	4.4			71.4	442	1.13

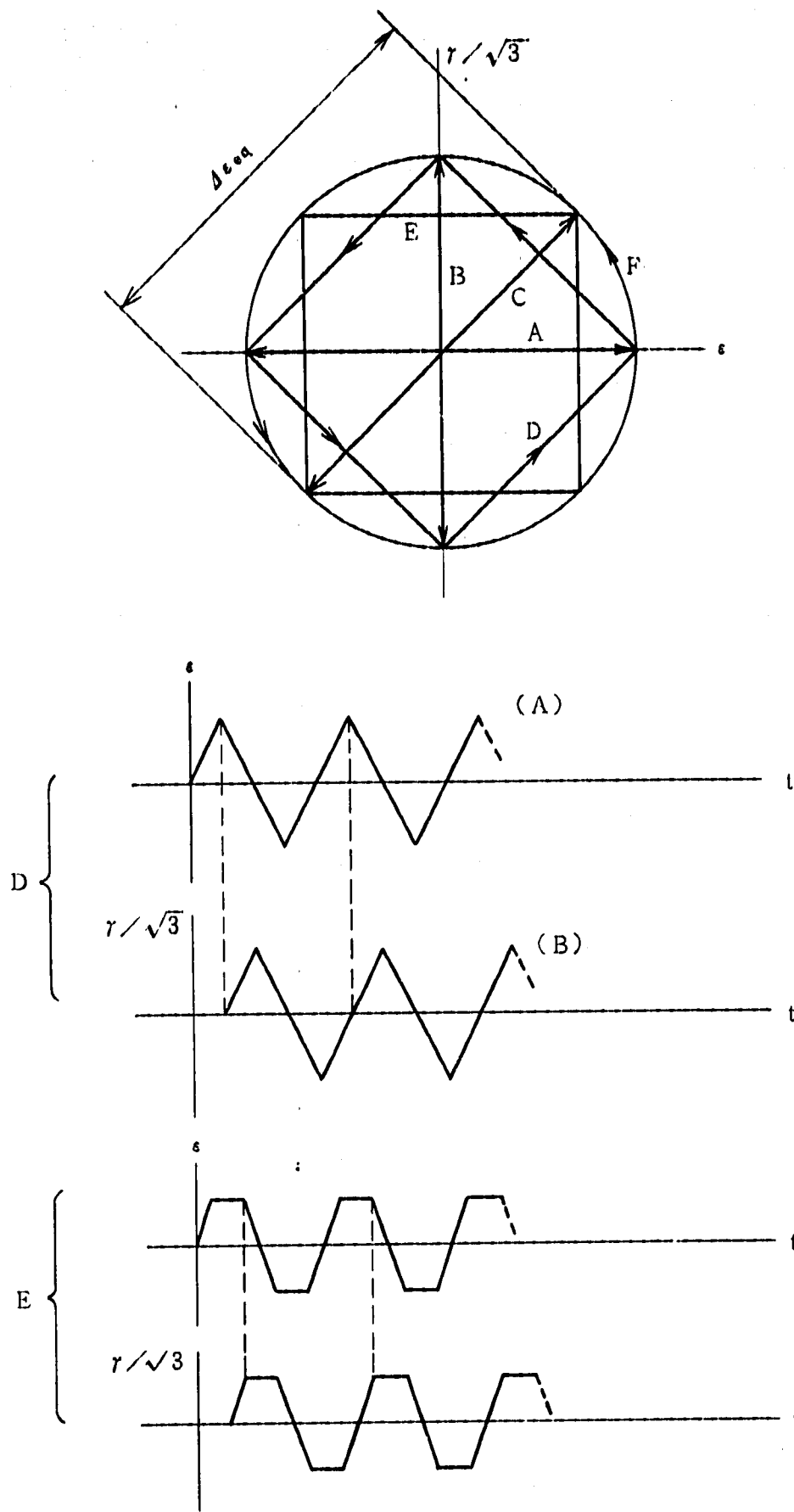


図 3.10 ASME式の相当ひずみ範囲の問題点

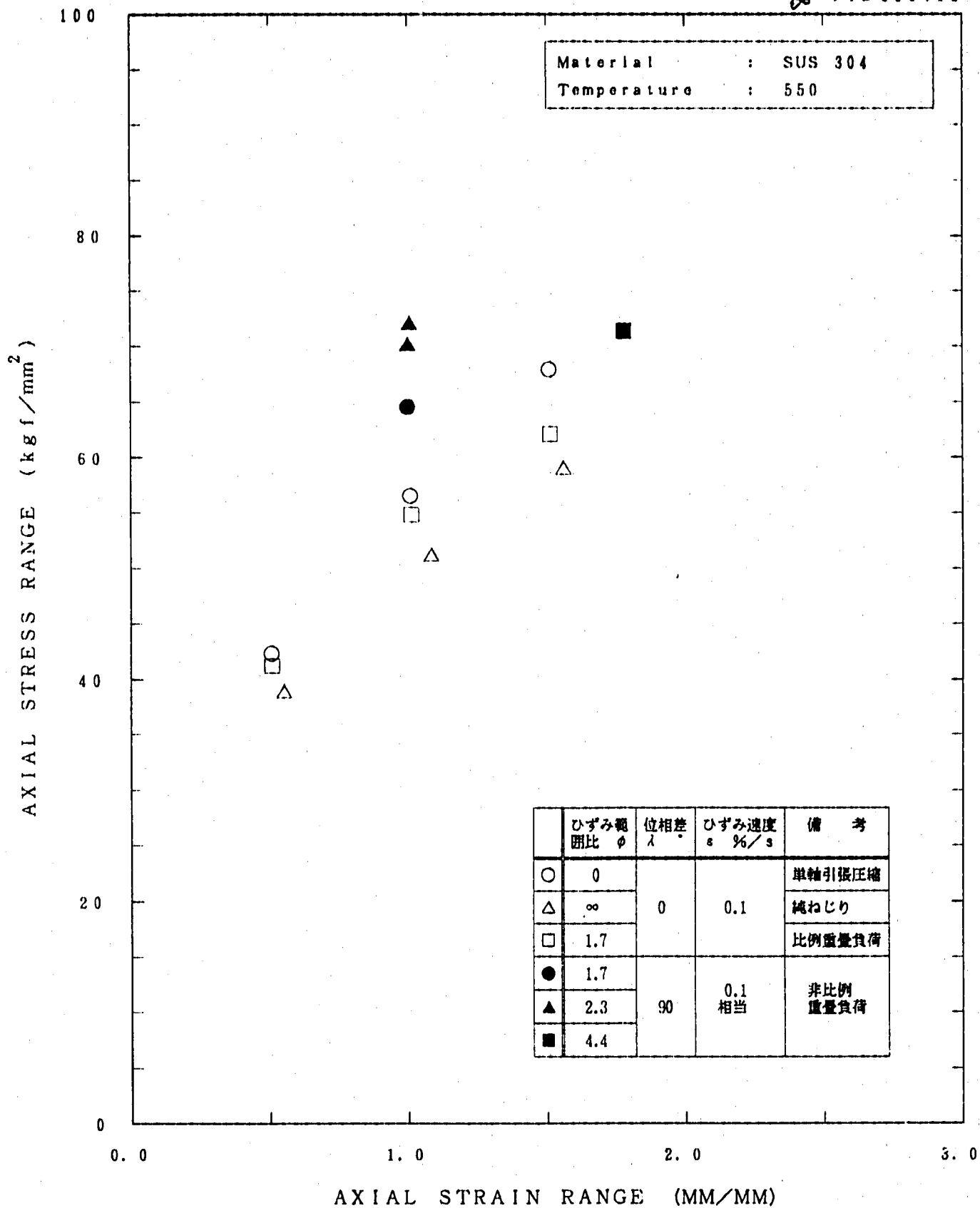


図 3.11 ASME式相当ひずみ・相当応力の関係

PNC.FIG 890310

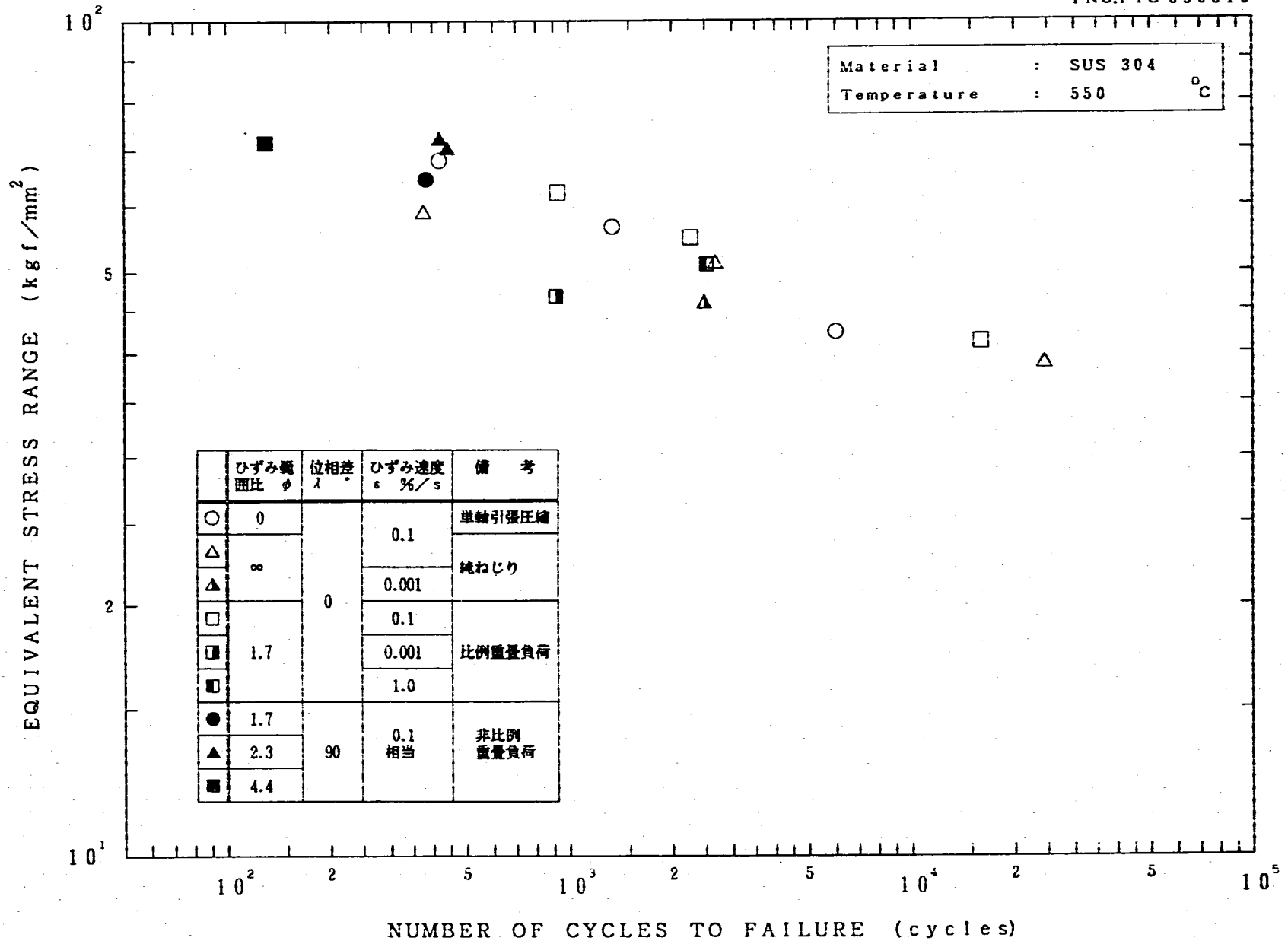


図 3.12 ASMB式相当応力による疲労寿命の整理

FIG 890412

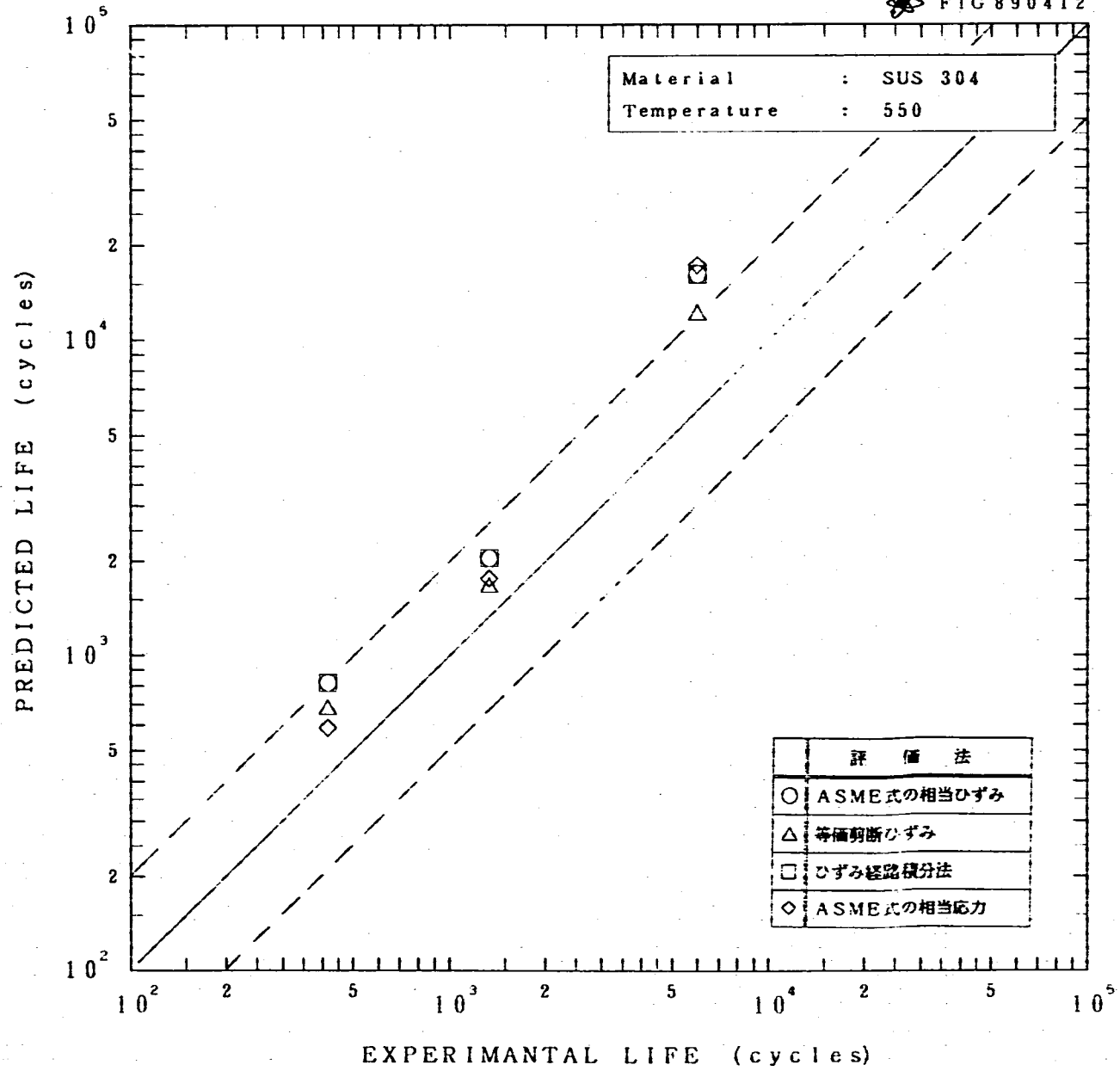


図3.13 ASME式相当応力による軸力負荷の寿命評価

FIG 890412

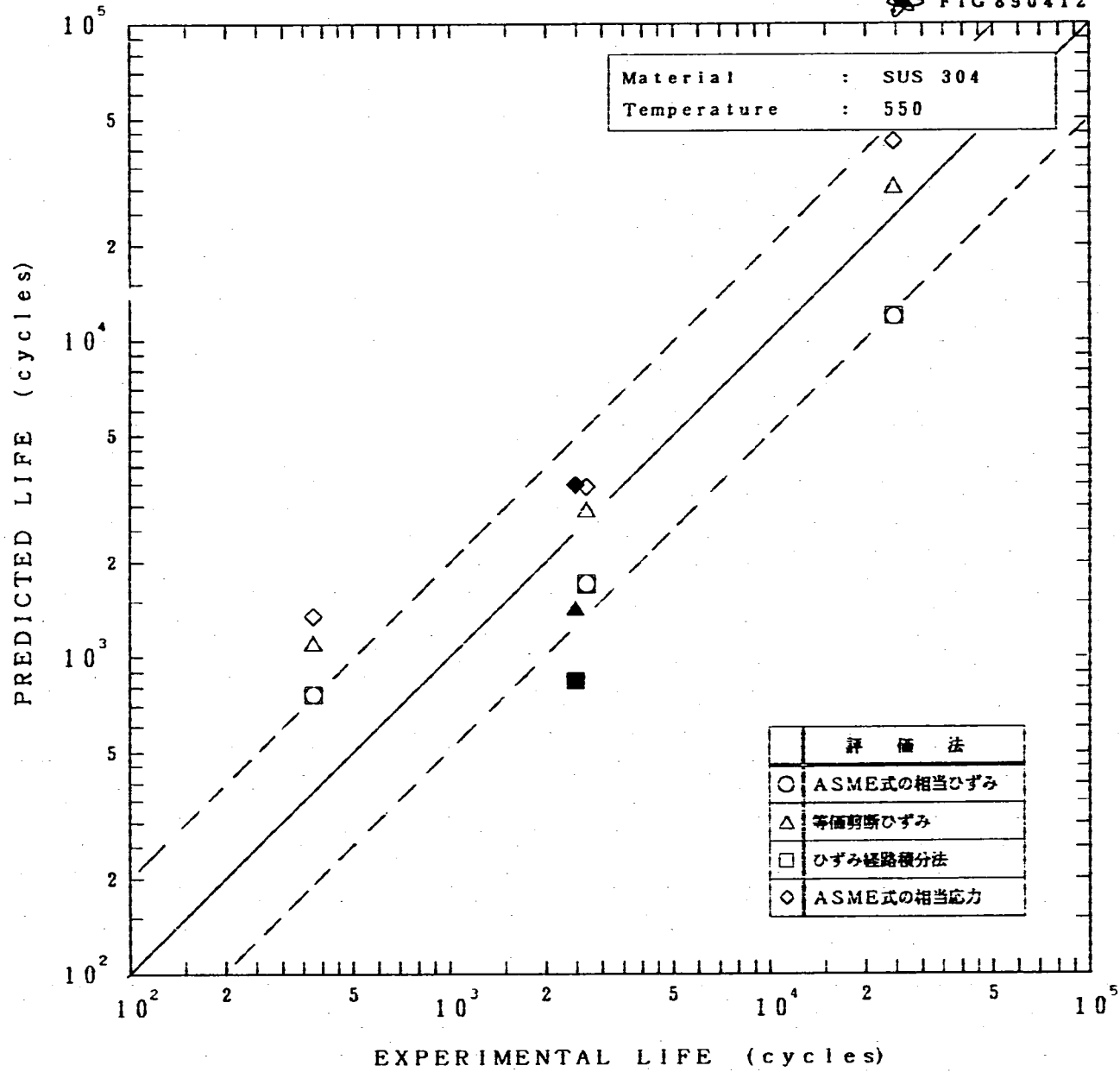


図3.14 ASME式相当応力によるねじり負荷の寿命評価

FIG 890412

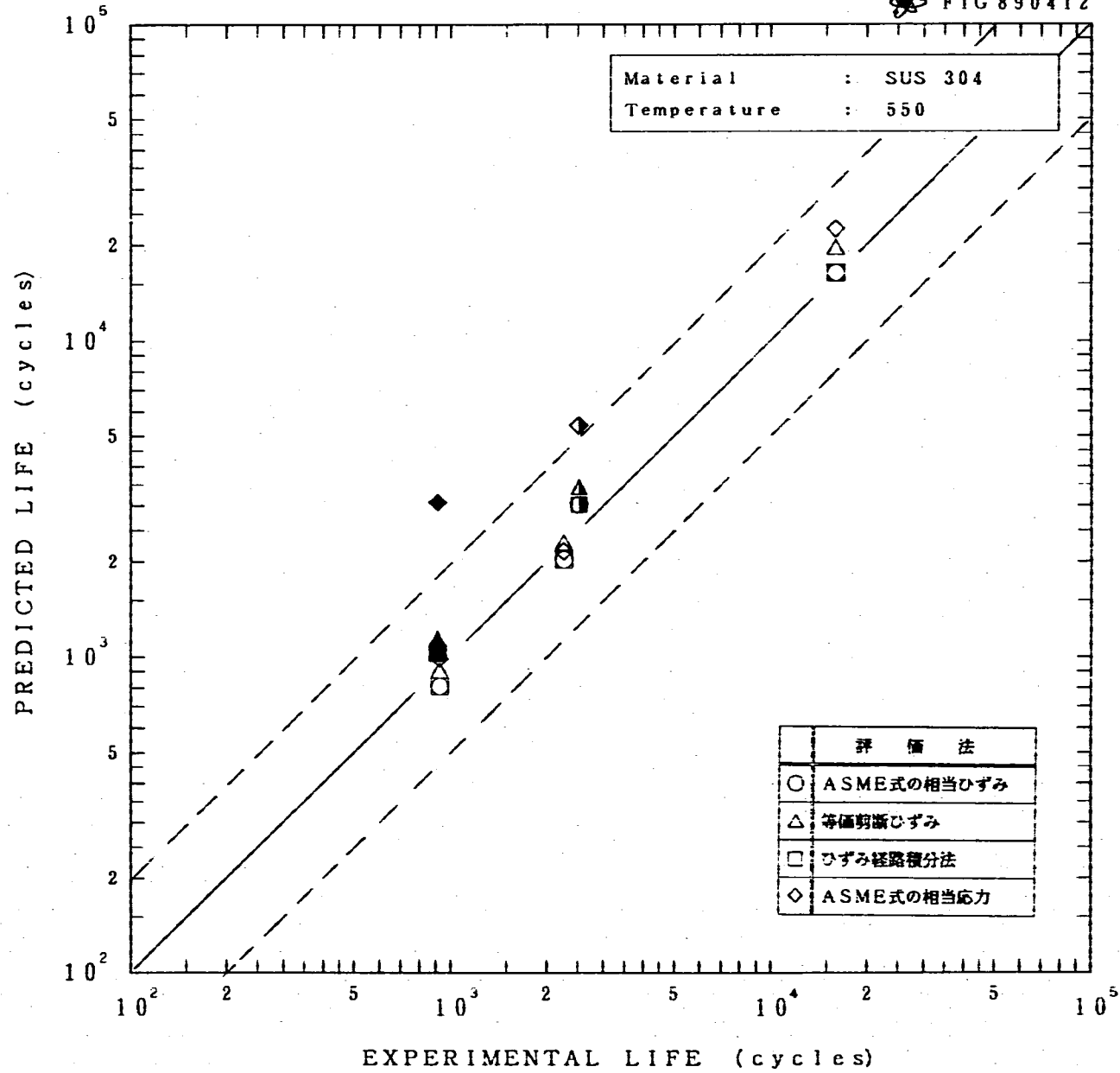


図 3.15 ASME式相当応力による比例重畳負荷の寿命評価

FIG 890412

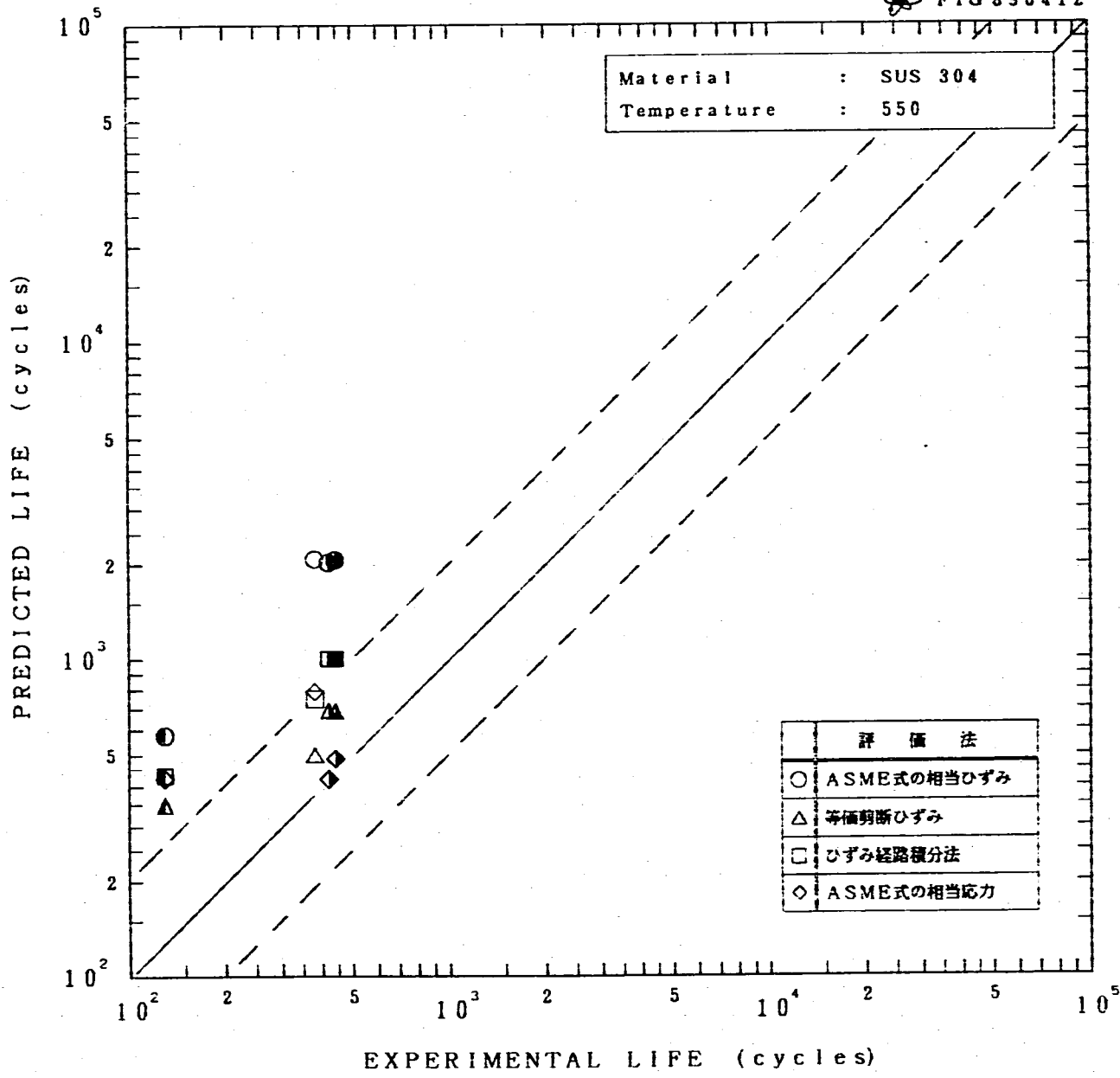


図3.16 ASME式相当応力による非比例重畳負荷の寿命評価

4. まとめ及び今後の検討事項

4.1 まとめ

本報では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行った。この結果、次の結論を得た。

- (1) 非比例負荷下では比例負荷下に比較して $1/2 \sim 1/3$ に疲労寿命が低下する。
- (2) 本試験結果を代表的パラメータであるASME式の相当ひずみ範囲、拡張 Γ -planeによる等価剪断ひずみ範囲、ひずみ経路を考慮したMisesの相当ひずみ範囲により整理比較した結果に基づくと、多軸疲労寿命を記述するパラメータとしてひずみ経路を考慮したMisesの相当ひずみ範囲が有望である。
- (3) 今後、ひずみ経路とひずみ速度が疲労寿命に及ぼす効果を重点的に検討する必要がある。

4.2 今後の検討事項

今後は以下の点に重点をおいて検討を行う予定である。

4.2.1 ひずみ速度効果（周波数効果）の検討

3.2.1項で指摘したように、ASME式の相当ひずみ範囲は言うまでもなく、ひずみ経路積分法においても、ひずみ経路と等価ひずみ範囲の関係は一意ではなく、同一の等価ひずみに対応するひずみ経路の中にも時間依存の効果を含むものと含まないものがある可能性が高い。様々なひずみ波形を検討し、この点を今後定量的に明らかにする予定である。

さらに、本報告でもひずみ速度効果に関する試験（ひずみ速度を一桁ないし二桁変化させた試験）を行ったが、今後このデータを拡充し、ひずみ経路に含まれる時間依存の効果の検討のバックデータとする計画である。

また、ある時点ですべてのひずみを保持するいわゆるクリープ疲労試験を行う。このデータもひずみ速度効果に関する試験と同様、ひずみ経路と時間依存の効果を統一的に扱う方策を策定するためのバックデータとしても役立つであろう。

4.2.2 環境効果の検討

本報告の多軸試験および他の機関等で行われる多軸試験はほとんどが大気中で行われたものであり、その結果は大気による環境効果を受けている可能性が充分にある。非比例負荷の場合に比例負荷に対して寿命が低下する現象にもこの効果が寄与している可能性がある。今後この可能性についても検討を進める予定である。

現在提案されている多軸疲労に対するパラメータとして、3章で検討したものの他に、代表的なものとして大南のモデル(5)があげられる。このモデルは、微小き裂の存在を前提とした破壊力学的なアプローチに基づくものであり、表面き裂の開口変位を考慮する点で環境効果によるき裂の進展の促進をモデル化する可能性がある点で検討の余地があると思われる。このモデルによると、例えばMisesの相当ひずみが同一でも非比例負荷の場合は比例負荷の場合に比べてき裂の開口量が大きくなるのではないかと考えた検討も可能と期待される。

4.2.3 環境効果とひずみ速度効果の相乗作用

単軸疲労において、いわゆるひずみ速度効果の大部分が環境効果に起因していることは一般に認識されている。多軸負荷下ではこれに加えて2項で指摘したような微小き裂の開口量の影響等が加わり、両者が重畳することによりこの効果が単軸負荷と比較してより顕著になる可能性が十分に考えられる。しかしこの点に関する研究例は極めて少なく、1項で指摘したひずみ経路の効果とひずみ速度の効果の分離に加え、これに関しても著者らは今後重点的に研究を行う予定である。

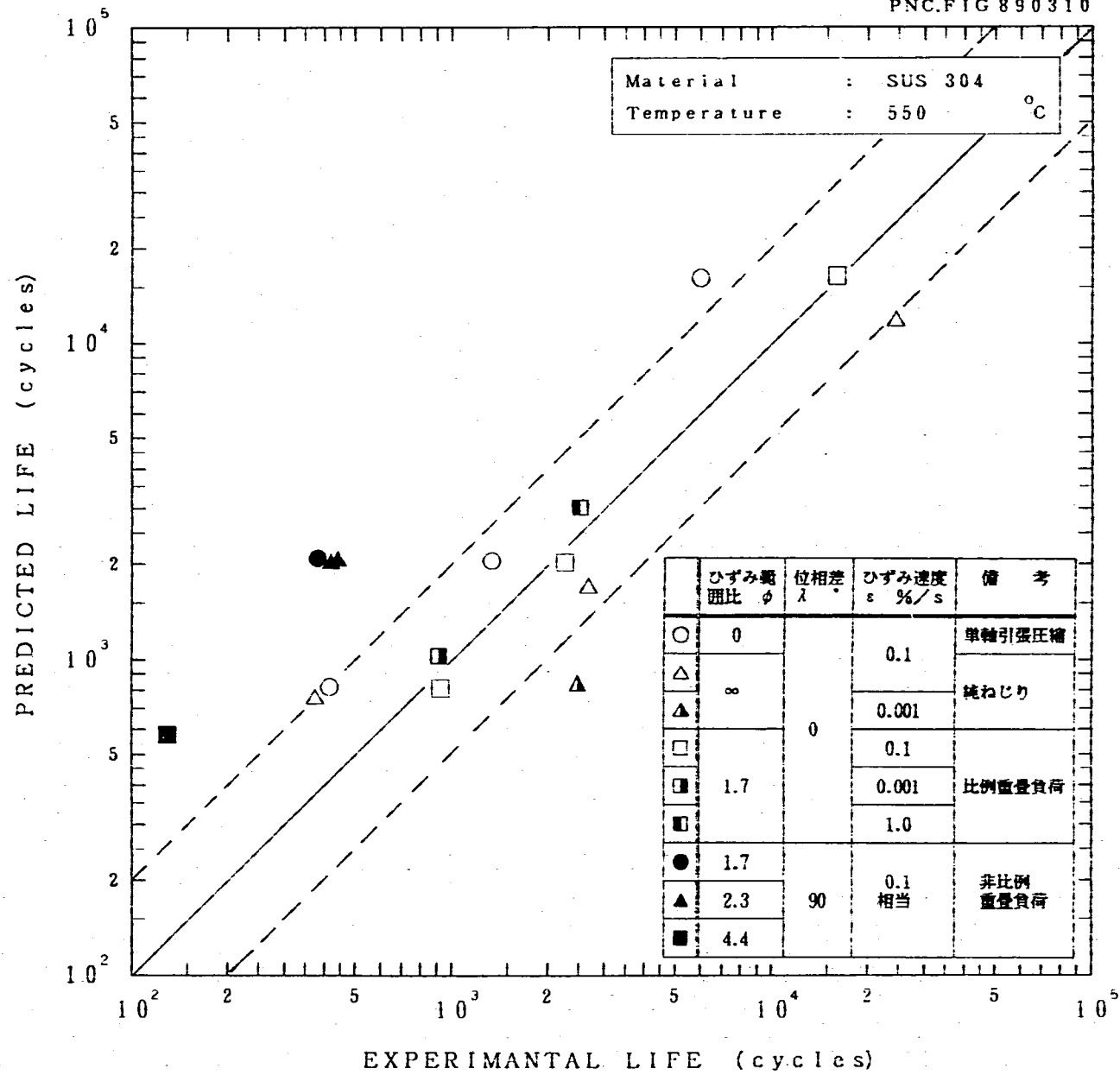
参考文献

- (1) ASME コードケース N-47-21 (邦訳), PNC N 251 83-02, 動力炉・核燃料開発事業団
他, 1984, 117.
- (2) Brown, M. W., Miller, K. J., "A Theory for Fatigue Failure under Multiaxial
Stress-Strain Condition", Proc. Instn. Mech. Engrs., 187, (1973), 745.
- (3) 緒方, 新田, 桑原, "FBR構造材料SUS304鋼の高温多軸疲労強度特性(第3報)",
電力中央研究所報告T86051 (1987)
- (4) Sakon, T., Wada, H. and Asada, Y., "Procedures of Creep-Fatigue Life
Evaluation Applied to Inelastic Design Analysis", Trans. of the 9th Int.
Conf. on SMIRT, Vol. L (Wittmann, ed.), 1987, 267.
- (5) Ohnami, M., Sakane, M. and Hamada, N., Multiaxial Fatigue, ASTM STP 853,
Miller, K. J. and Brown, M. W. Eds, American Society for Testing Materials,
Philadelphia, 1985, 622.

謝 辞

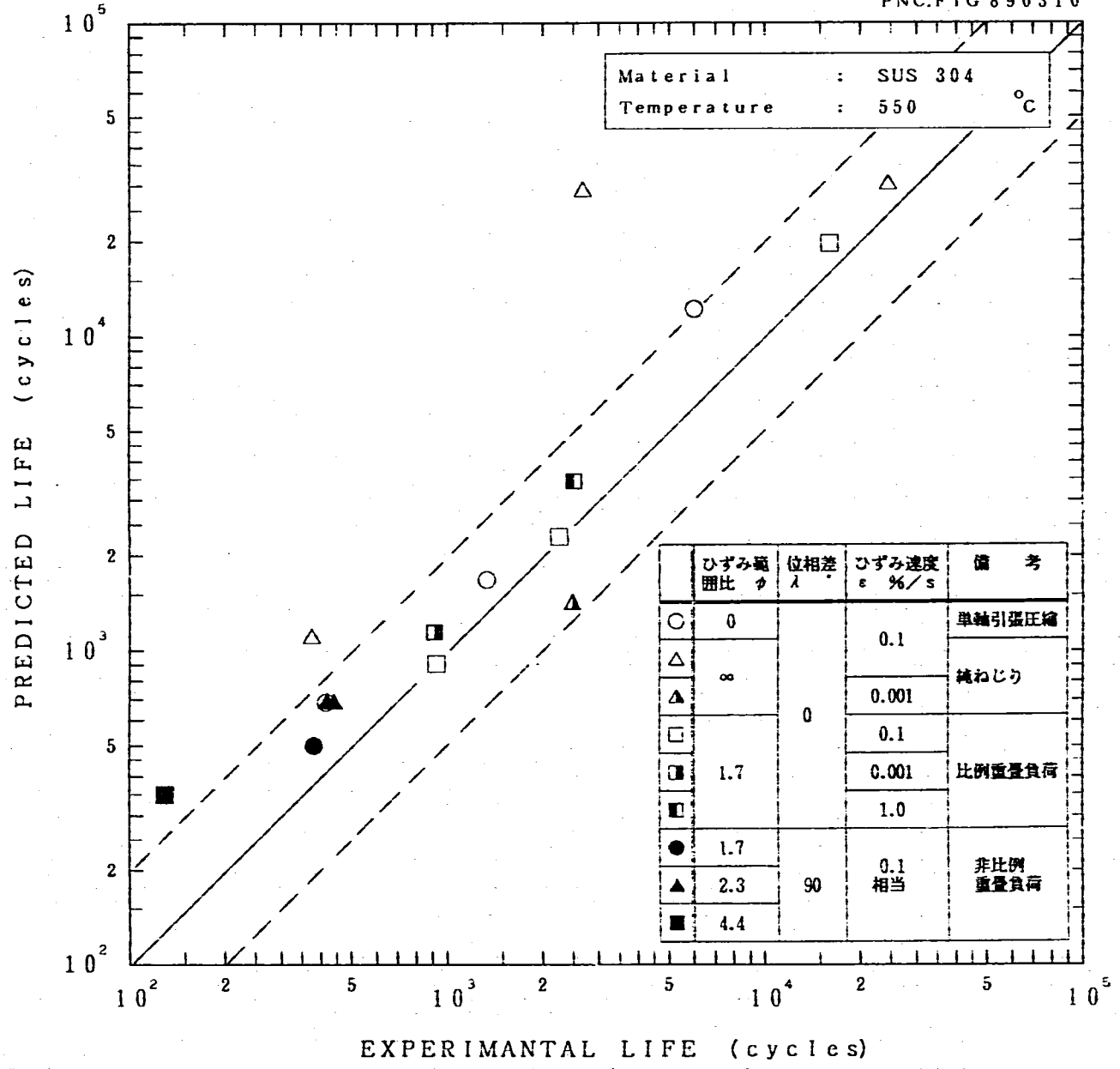
本報告書をまとめるにあたり、永田 敬氏をはじめ構造工学室の方々には大変貴重な助言をいただいた。また、本報告書中のデータは、材料開発室強度試験グループの小峰龍司氏及び常陽産業㈱の川島 成一氏をはじめとする多くの方々の御尽力なくしては得られないものであった。これらの方々に改めて謝意を表す。

付 図

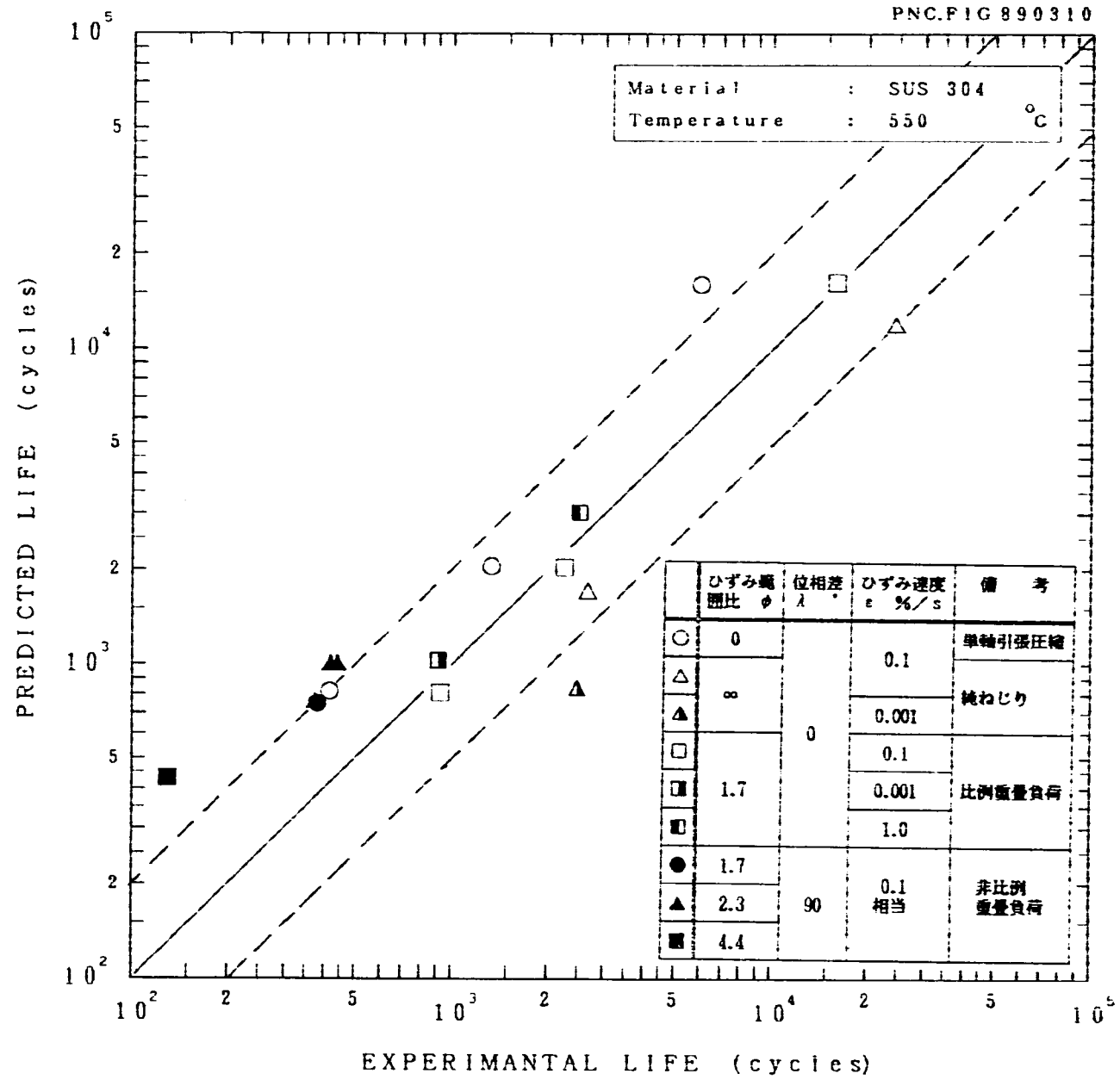


図A.1 ASME式の相当ひずみ範囲による寿命評価

PNC.FIG 890310

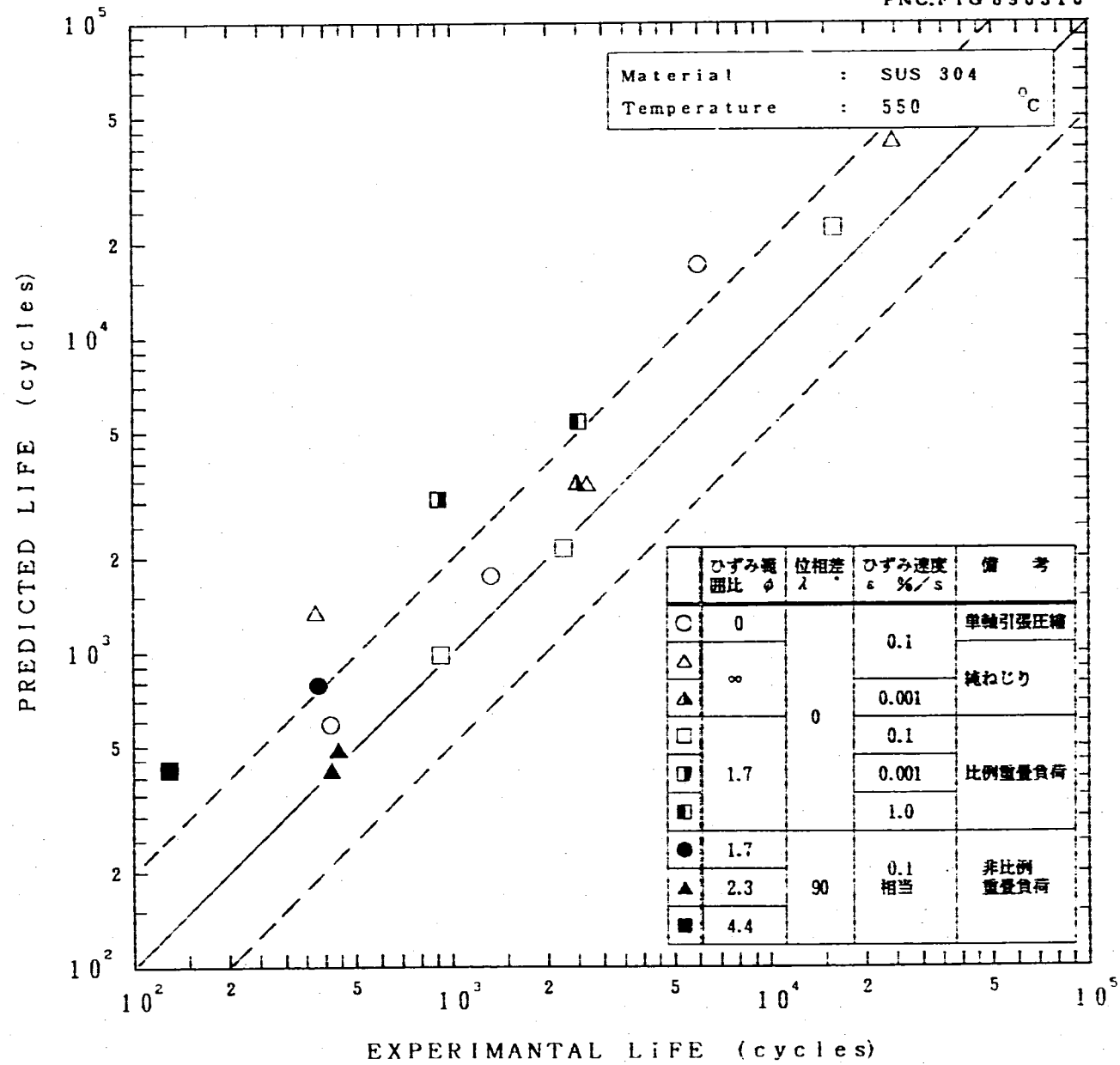


図A.2 等価剪断ひずみ範囲による寿命評価



図A.3 ひずみ経路積分法による寿命評価

PNC.FIG 890310



図A.4 ASME式の相当応力範囲による寿命評価