

非比例多軸低サイクル疲労寿命評価モデル⁺

伊藤 隆基*

A Model for Evaluation of Low Cycle Fatigue Lives Under Nonproportional Straining

by

Takamoto ITOH*

This paper develops a damage model for evaluation of low cycle fatigue lives under complex cyclic multiaxial loadings. The author has proposed the equivalent strain parameter for the life prediction of the nonproportional low cycle fatigue. This strain parameter could evaluate the dependence of fatigue lives on strain history and material, and correlate the fatigue lives within a small scatter band under 15 kinds of proportional and nonproportional strain paths. However, the parameter was applicable to the life prediction under the limited nonproportional strain history, so that some modifications were required. In this study, a simple damage model for the life prediction by combining the equivalent strain parameter with Miner's law in order to apply the life prediction under more complex nonproportional loadings. The applicability of the proposed model was examined for life evaluation of nonproportional low cycle fatigue for different materials; type 304 stainless steels, copper, aluminum alloys, chromium-molybdenum and carbon steels, which were obtained from different research institutes. The model could correlate most of all the fatigue data within a factor of two scatter band and has a possibility to become a good damage model for nonproportional low cycle fatigue.

Key Words: Low cycle fatigue, Life prediction, Multiaxial strain, Nonproportional loading, Additional hardening, Slip system

1 緒言

主応力や主ひずみ軸方向が時間的に変化する、いわゆる非比例多軸低サイクル疲労下にある構造部材の強度設計では、従来 ASME Boiler & Pressure Vessel Code Case N47 中の設計基準¹⁾が使用されてきた。しかし最近の研究成果によるとこの設計基準では必ずしも安全側の設計とはならず、時によっては危険側予測を与えることが指摘されてきた^{2)~8)}。たとえば SUS304 ステンレス鋼の場合、ASME 基準のひずみ範囲が同じ試験でも非比例多軸負荷での低サイクル疲労寿命は比例負荷のそれと比べて最大で約 1/20 に低下することが報告されている³⁾⁴⁾。非比例多軸負荷は通常の機器構造物に頻繁に見られる負荷形態であり、この様な負荷での適切な寿命評価法を確立することは、低サイクル疲労下にある極めて過酷な条件下での材料および構造物の安全保障、高信頼性にとって必要不可欠といえる。著者は先に SUS304 ステンレス鋼および 6061 アルミ合金の 2 種類の薄肉円筒試験片を用いて非比例多軸負荷下での損傷を抽出するために 15 種類のひずみ負荷経路の低サイクル試験を実施し、得られた試験データを基にひずみ基準の非比例多軸低サイクル疲労寿命評価式を提示した⁴⁾⁸⁾。しかし、同評価式は両材料の様々な経路での疲労寿命をある程度うまく推定することができたが、より複雑な負荷経路の寿命

評価に適用するためには、明確なひずみ繰返し数の計数方法や累積損傷の評価方法について検討を加える必要があった。

本稿ではひずみ繰返し数の決定方法および累積損傷評価の新たな手法を提案し、上記の寿命評価式⁴⁾⁸⁾を基に非比例多軸低サイクル疲労寿命評価モデルを提示した。さらに、異なる研究機関で試験された種々の材料の非比例多軸低サイクル疲労寿命評価に対する検証を行い、提示したモデルの有効性について考察した。

2 非比例多軸低サイクル疲労寿命評価式

2・1 非比例多軸におけるひずみの定義

非比例多軸負荷ではひずみ経路が比例負荷のように単純ではないことから、先ず本稿でのひずみおよびひずみ範囲の定義について説明する必要がある。Fig. 1 は、あるひずみ経路を一巡したときの $\varepsilon_1(t)$ と $\xi(t)$ との関係を示した図である。ここで、 $\varepsilon_1(t)$ は時刻 t における主ひずみの大きさの最大値であり、次式で与えられる。

$$\varepsilon_1(t) = \text{Max} \left[\left| \varepsilon_1(t) \right|, \left| \varepsilon_3(t) \right| \right] \quad (1)$$

式中の $\varepsilon_1(t)$ および $\varepsilon_3(t)$ は、それぞれ時刻 t における最大および最小主ひずみである。また $\varepsilon_{\text{Imax}}$ はひずみ経路を

+ 原稿受理 平成 12 年 11 月 9 日 Received Nov. 9, 2000

* 正会員 福井大学工学部機械工学科 〒910-8507 福井市文京, Dept. of Mech. Eng., Fukui Univ., Bunkyo, Fukui, 910-8507

一巡する間での $\varepsilon_I(t)$ の最大値であり、次のように表される。

$$\varepsilon_{I\max} = \text{Max}[\varepsilon_I(t)] \quad (2)$$

一方、 $\xi(t)$ は $\varepsilon_{I\max}$ と $\varepsilon_I(t)$ の主軸方向の角度で、時刻 t における $\varepsilon_I(t)$ の主軸方向の変化角度を表している。すなわち $\xi(t)$ は、非比例多軸負荷によって刻々と変化する主ひずみ軸方向の変化角の大きさを表している。なお $\xi(t)$ の大きさは、試験片上での主軸方向の変化角に対して 2 倍の関係となっている。

また、非比例多軸ひずみ経路での主ひずみ基準の最大ひずみ範囲を次式で定義した。

$$\Delta\varepsilon_I = \text{Max}[\varepsilon_{I\max} - \cos\xi(t) \cdot \varepsilon_I(t)] \quad (3)$$

$\Delta\varepsilon_I$ は Fig. 1 に示すように、 $\varepsilon_{I\max}$ の主軸方向と垂直な面 ($\varepsilon_{I\max}$ -面) に負荷される主ひずみ基準のひずみ範囲の大きさ示している。

2・2 ひずみ基準の寿命評価式

非比例多軸低サイクル疲労寿命は負荷経路および材料に依存するが、それはすべり系間の相互作用との関係で説明されている^{9)~11)}。すなわち、Fig.2 に示すように非比例負荷による主応力や主ひずみ軸方向が時間的に変化することによって活動するすべり系が変化するが、これは異なるすべり系での転位間の相互作用力の増加を誘起し、その結果として応力増加を伴って寿命が低下する^{4),8),10)}。また、すべり系間の相互作用力の増加は材料に依存し、材料の積層欠陥エネルギー (SFE) 値と良い相関があることが報告されている^{9),11)}。たとえばステンレス鋼や純銅のような SFE が小さい材料では Planar すべりによってすべり系間の相互作用力が大きくなり^{9)~11)}、非比例負荷による寿命低下は大きくなる^{4),10),12)}。一方、純アルミやアルミニウム合金のように SFE が大きい材料では、wavy すべり^{9),10)}により比較的容易にすべり方向が変化することから、非比例負荷による応力増加お

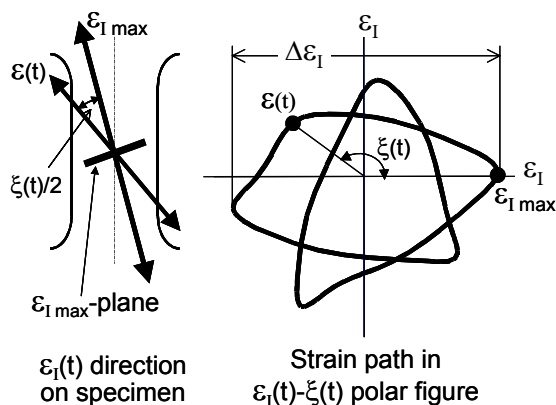


Fig. 1. Schematic graph of $\varepsilon_I(t)$, $\xi(t)$ and $\Delta\varepsilon_I$.

よび寿命低下も小さい^{8),10),12)}。

上述したように非比例多軸低サイクル疲労寿命を評価するには、非比例負荷による寿命低下および応力増加のひずみ経路および材料依存性を適切に評価することが重要であるといえる。ところが、非比例負荷による応力増加を解析で求めるには一般的には容易なことではない^{12)~15)}。したがって非比例多軸低サイクル寿命評価式には、応力を含まないことが望ましいと考えられる。そこで著者が先に提示した寿命評価式はひずみ基準の相当ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{NP}$ であり、次式で与えられる^{4),8)}。

$$\Delta\varepsilon_{NP} = (1 + \alpha \cdot f_{NP}) \Delta\varepsilon_I \quad (4)$$

式中の f_{NP} および α は、それぞれ疲労寿命に及ぼすひずみ経路および材料依存性の強さを表す定数である。 f_{NP} はひずみの主軸方向の変化とその大きさから求められるひずみ経路のみに依存するパラメータで、次式で定義されている。

$$f_{NP} = \frac{\pi/2}{T \cdot \varepsilon_{I\max}} \int_0^T (|\sin(\xi(t))| \cdot \varepsilon_I(t)) dt \quad (5)$$

ここで、 T はひずみ負荷経路を一巡するのに要する時間である。係数 α は、非比例負荷による応力増加^{3),10),11)}を示す材料定数である。

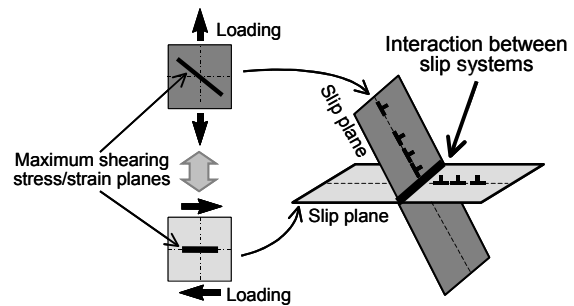


Fig. 2. Interaction between slip systems due to nonproportional straining.

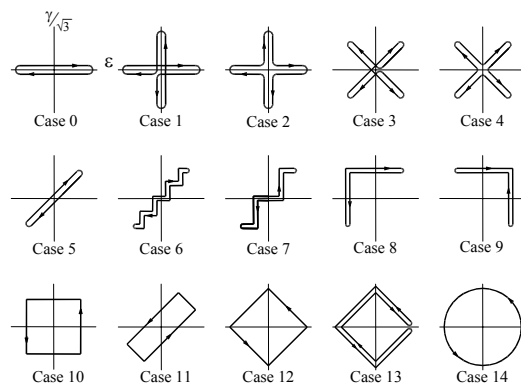


Fig. 3. 15 kinds of strain paths employed in the previous tests^{4),8)}.

式(4)の寿命評価式 $\Delta \varepsilon_{NP}$ は、著者が実施した非比例負荷による応力増加および寿命低下が異なる SUS304 ステンレス鋼 (SUS304) および 6061 アルミ合金 (6061Al) について、Fig.3 に示す 15 種類の比例および非比例多軸ひずみ経路の低サイクル疲労寿命を係数 2 のばらつき範囲内である程度うまく整理することができた^{4),8)}。しかしながら、 $\Delta \varepsilon_{NP}$ は Fig.3 に示すような限定したひずみ経路下での寿命評価には適用できるが、ひずみ経路の折返しなどがもっと複雑な場合の非比例多軸低サイクル疲労寿命をうまく評価できない可能性があった。

非比例多軸試験では主応力・主ひずみ軸方向の変化に応じてひずみ振幅が刻々と変化する。たとえば薄肉円筒試験片を用いた非比例多軸試験では軸ひずみ (ε) やせん断ひずみ (γ) が時間的に変化し、ひずみ波形が一種の周期性のある変動負荷となる。このような変動ひずみ負荷における低サイクル疲労寿命を評価するためには、適切なひずみ繰返し数の計数法および累積損傷の評価法が必要となる。ところが既報の寿命評価法では、ひずみが変動する場合の波形の計数法が不明確のままであった。そこで、次節では非比例多軸ひずみにおける繰返しの計数法を提案し、式(4)の寿命評価式と線形累積損傷則を組み合わせた新たな非比例多軸低サイクル疲労寿命評価モデルを提示する。

3. 非比例多軸低サイクル疲労寿命評価モデル

3・1 ひずみ繰返し数の計数法

Fig.4 は Fig.1 のひずみ経路をそれぞれ I-面および II-面に投影したひずみ波形を示す。各ひずみ波形はそれぞれ試験片材料の $\varepsilon_{I \max}$ -面および同面と 45 度傾いた面に負荷される主ひずみ基準の垂直ひずみである。すなわち非比例多軸ひずみ経路は、I-面および II-面に負荷される周期性のある主ひずみ基準のひずみ繰返しの組合せと捉えることができる。本研究ではひずみ繰返しのカウ

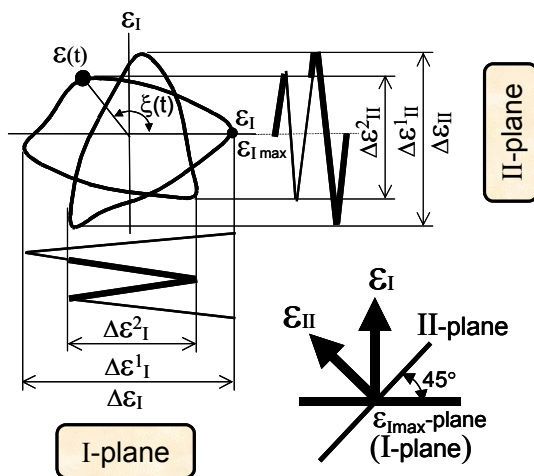


Fig.4. Explanation of cycle counting under nonproportional straining.

ントを、I および II の各方向のひずみ波形に対してレインフロー法の読み取り方法^{16),17)}に準じて行った。それに従うと Fig.4 のひずみ経路を一巡する間での各軸方向のひずみ範囲は、それぞれ $\Delta \varepsilon_I^1$ 、 $\Delta \varepsilon_I^2$ および $\Delta \varepsilon_{II}^1$ 、 $\Delta \varepsilon_{II}^2$ に分解される。

ひずみ繰返し数のカウントの一例として、Fig.3 で示した Case 1、12 および 7 のひずみ経路について Fig.5 で説明する。Case 1 のように円筒試験片に引張・圧縮と繰返しねじりを交互に負荷する十字型のひずみ経路では、主ひずみ軸方向が試験片上で 45 度の角度で入れ替わり変化する。したがって Case 1 の試験では、ひずみ経路の一巡する間に I および II 方向に各 1 サイクルのひずみ波形が交互に負荷される。Case 12 の ε と γ に位相差のある箱

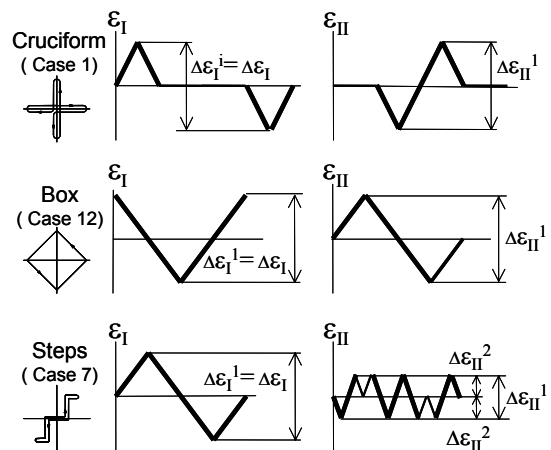


Fig.5. Strain waves and definition of strain ranges for some Cases.

Table I. Cycle counting in each strain paths.

Case number	I-plane		II-plane	
	Strain range $\Delta \varepsilon_I^1 / \Delta \varepsilon_I$	Number of cycles	Strain range $\Delta \varepsilon_{II}^1 / \Delta \varepsilon_I$	Number of cycles
0	1	1	0	0
1	1	1	0.87	1
2	1	1	0.87	1
3	1	1	1	1
	0.1	1	0.1	1
4	1	1	1	1
	0.1	1	0.1	1
5	1	1	1	0
6	1	1	0.18	8
			0.09	2
7	1	1	0.35	3
			0.16	2
8	1	1	0.5	2
9	1	1	0.5	2
10	1	1	1	1
11	1	1	0.64	1
12	1	1	0.87	1
13	1	2	0.87	2
14	1	1	0.87	1

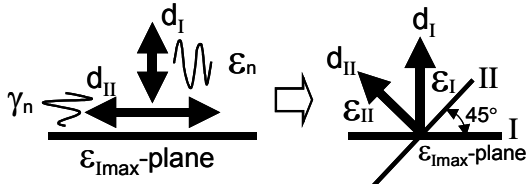


Fig. 6. A general idea of nonproportional LCF damage model.

型のひずみ経路では、I および II 方向のひずみが位相差をもって各 1 サイクル負荷される。Case 7 のような階段状のひずみ経路では、I 方向に 1 サイクルの大きなひずみ波形と II 方向に複数の比較的小さなひずみ波形に分解される。すなわち Case 7 の試験では、I 方向のひずみ範囲 $\Delta \varepsilon^1_I$ が 1 サイクル、II 方向では中ぐらいの大きさのひずみ範囲 $\Delta \varepsilon^1_{II}$ が 3 サイクル、小さなひずみ範囲の $\Delta \varepsilon^2_{II}$ が 2 サイクルのひずみ繰返し数がカウントされる。

Table I には Fig. 3 に示したそれぞれの Case のひずみ経路を一巡する間での分解した各ひずみ範囲の大きさとそのカウント数を示す。なお、表のひずみ範囲の大きさは $\Delta \varepsilon^1_I$ で基準化して表示した。

3・2 寿命評価モデル

これまでに提案されている非比例多軸低サイクル疲労損傷モデルでは、き裂が発生・成長する破壊面 (Critical plane) に負荷されるひずみや応力振幅の大きさから疲労損傷が評価されることが多い^{18),19)}。しかし、非比例多軸下では主軸方向が時間的に変化するためにき裂の発生・成長挙動は複雑でき裂の方向を一意的に決定することは極めて難しい。本稿のモデルでは Fig. 1 および 4 で示した $\varepsilon_{I\max}$ -面 (I-面) が破壊面に対応するものと考えられるが、き裂は $\varepsilon_{I\max}$ -面のみで必ずしも発生・成長するとは限っていない。

$\varepsilon_{I\max}$ -面には Fig. 6 に示すように非比例多軸負荷では垂直ひずみ (ε_n) とせん断ひずみ (γ_n) が任意な波形で負荷されるが、各ひずみ繰返しによってそれぞれ損傷 d_I および d_{II} が累積されると考えられる。本モデルでは主ひずみ基準のひずみから損傷を評価するものとし、損傷が I-面および II-面が受ける主ひずみ変動によって累積すると仮定した。

そこで、本稿で提案するモデルでは線形損傷則を適用して、I および II 方向の損傷 d_I および d_{II} をそれぞれ次式で定義した。

$$d_I = \sum_{i=1}^m \frac{N_I^i}{N_{If}^i}, \quad d_{II} = \sum_{j=1}^n \frac{N_{II}^j}{N_{IIf}^j} \quad (6)$$

ここで、 i および j はそれぞれ I および II 方向の変動ひずみ波形をレインフロー法^{16),17)}に従って分割した各ひずみ範囲の番号であり、 m および n はそれらの総数である。また、 N_I^i および N_{II}^j は分割した i および j 番目のひずみ

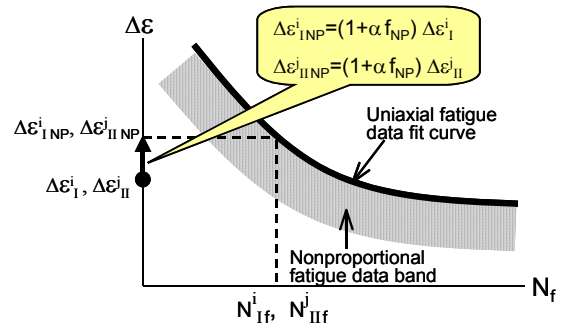


Fig. 7. Schematic showing of nonproportional LCF data and a curve for the basis of data correlation.

範囲のひずみ繰返し数であり、 N_{If}^i および N_{IIf}^j は各ひずみ範囲に対する疲労寿命である。

N_{If}^i および N_{IIf}^j は、Fig. 7 に示すように寿命評価の基準データとなる引張・圧縮試験 (Case 0) のひずみ範囲-疲労寿命 ($\Delta \varepsilon_I - N_f$) 線図を基に、式(4)で定義される相当ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{NP}$ から決定する。すなわち各ひずみ範囲から決定される疲労寿命には、この時点で負荷経路および材料依存性が加味されていることになる。

一方、材料が受ける全損傷量 D は d_I および d_{II} から得られるが、その関係式を物理的に定義することは容易なことではない。すなわち、各疲労損傷 d_I および d_{II} はひずみ経路に依存し両者は必ずしも独立な関係にあるわけではない。しかしながら、全損傷量を求めるためには両者の適切な組合せを提示する必要がある。そこで本稿では、 $d_{II}=0$ となる比例負荷や $d_I=d_{II}$ となる十字型負荷のとき $D=d_I$ となる最も簡単な関数形として、全損傷量 D を次式で定義した。

$$D = \frac{d_I^2 + d_{II}^2}{d_I + d_{II}} \quad (7)$$

Table II には Fig. 3 に示す各ひずみ経路について、疲労寿命 ($D=1$) での I および II 方向の各累積損傷値を示した。

以下では、 D の求め方の例として幾つかの負荷経路について説明する。

(i) 比例負荷の場合

比例負荷のひずみ振幅変動試験では II 方向のひずみ振幅は常に 0 であり、式(5)のひずみ経路の非比例性の強さを示す係数 f_{NP} も 0 となる。すなわち式(7)の全損傷量 D は次式で表され、

$$D = d_I = \sum_{i=1}^m \frac{N_I^i}{N_{If}^i} \quad (8)$$

従来の単軸および多軸比例負荷での累積線形損傷則と一致する。また Fig. 3 の Case 0 の引張・圧縮および Case 5 の引張・圧縮/繰返しねじりの一定ひずみ試験では、全損傷 D は次の単純な式となる。

$$D = d_I = \frac{N_I}{N_{If}} \quad (\text{for Case 0, 5}) \quad (9)$$

(ii) 交差型負荷の場合

Case 1~4 のような交差型のひずみ経路では、交差するそれぞれの方向の損傷で表される。とくに Case 1 および 2 のように $\varepsilon_I(t) - \xi(t)$ 線図上で直交する十字型のひずみ経路では、 d_I および d_{II} は次式で表すことができる。

$$d_I = \frac{N_I^1}{N_{If}^1}, \quad d_{II} = \frac{N_{II}^1}{N_{If}^1} \quad (10)$$

一方 Case 3 および 4 の試験では、 d_I および d_{II} の値は等しいが、交差する両ひずみ経路の交差角度が $\varepsilon_I(t) - \xi(t)$ 線図上では 90 度以外のある角度 (本 Case の場合 81.6 度) を有するために振幅の小さいひずみ範囲が I および II 方向にそれぞれ 1 サイクル負荷される。この場合の I および II 方向の損傷値は次式で表される。

$$d_I = d_{II} = \frac{N_I^1}{N_{If}^1} + \frac{N_{II}^2}{N_{If}^2} = \frac{N_I^1}{N_{If}^1} + \frac{N_{II}^2}{N_{If}^2} \quad (11)$$

ここで、Case 1, 2 および Case 3, 4 の試験ではそれぞれ d_I と d_{II} との関係が、

$$\begin{aligned} d_I &\doteq d_{II}, \quad d_I > d_{II} && \text{for Case 1, 2} \\ d_I &\doteq d_{II}, \quad N_{If}^2 = N_{If}^1 \doteq \infty && \text{for Case 3, 4} \end{aligned} \quad (12)$$

であることを考慮すると、Case 1~4 のような十字型のひずみ経路の試験では、全損傷量 D は次式で近似することができる。

$$D = \frac{N_I^1}{N_{If}^1} = \frac{N_I^1}{N_{If}^1} \quad (\text{for Case 1-4}) \quad (13)$$

(iii) 箱型・円型負荷の場合

Case 10~12 の箱型および Case 14 の円型ひずみ経路のような試験では、 d_I および d_{II} は式(10)で表される。さらに Case 10, 12 および 14 では上式(12)の関係が成り立ち、全損傷量 D は式(13)で与えられる。ただし、箱型や円形負荷では Case 1~4 と比べて f_{NP} 値が 2 倍以上の大きい値となることから、結果的には箱型・円形負荷での材料が受ける損傷は大きくなる。

(iv) 階段型負荷の場合

Case 6~9 のような階段状のひずみ経路は、基本的に

Table II. Value of d_I and d_{II} at fatigue life ($D=1$).

Case	0,5	6,7~9, 11	1,2,12~14	3,4,10
d_I	1	$\cong 1$	$\cong 1$	1
d_{II}	0	$0 \leq d_{II} \leq d_I$	$d_{II} \leq d_I, \cong 1$	1

は I 方向の一つの最大ひずみ範囲と II 方向の複数の小さいひずみ範囲で構成されている。たとえば Fig.5 で示したように、Case 7 では $\Delta \varepsilon_I$ に対応する I 方向の最大振幅のひずみが 1 サイクル、II 方向では中程度および小さな振幅のひずみがそれぞれ 3 および 2 サイクル負荷される試験であり、I および II 方向の損傷は次式で表される。

$$d_I = \frac{N_I^1}{N_{If}^1}, \quad d_{II} = \frac{3N_{II}^1}{N_{If}^1} + \frac{2N_{II}^2}{N_{If}^2} \quad (14)$$

このように、階段状のひずみ経路ではステップ数が増加するにしたがって式(14)の第 2 式の項の数が増えるが、逆に各項の損傷値が小さくなり、結果として d_{II} 値は小さくなる。したがって Case 6 のような小刻みな階段状の試験では d_{II} の値は無視できるほど小さくなり、全損傷は比例負荷の場合の損傷値に近づくことになる。

以上、本モデルによる多軸低サイクル疲労損傷を幾つかのひずみ経路について示した。次節では著者がこれまでに実施した試験結果および他の研究機関で実施された主な試験結果の非比例多軸低サイクル疲労寿命データと式 (7) の全損傷量が $D=1$ となる寿命との比較を行い、本損傷モデルの適用性について検討する。

4. 疲労寿命評価モデルの適用性

非比例多軸低サイクル疲労試験を様々なひずみ経路の下で系統的に実施した研究例は国内外を併せてもその数は少ない。その中でも比較的信頼性のある試験データを基に、非比例多軸寿命予測に対する本モデルの適用性を検証した。寿命評価に採用した試験データは、Table III に示すように各研究機関で実施された各種材料の非比例多軸低サイクル疲労試験結果である。また、各材料の非比例負荷による応力増加量を示す係数 α の値は表に示す通りである。また各試験結果の疲労寿命特性については、Table III に示した各原著で詳しく報告されているので本稿での記述は割愛する。

Fig.8 に本稿で提示したモデルで予測した結果と実験結果の寿命との比較を示す。同図の結果では若干のデータのばらつきは見られるもののほぼ全てのデータが係

Table III. List of materials used in data correlation.

Material	Condition	α	Author	Ref.
SUS 304	R.T.	0.8	Itoh	4
SUS 304	R.T.	0.8	Socie	10
SUS 304	923K	0.4	Hamada	5
OFHC Cu	R.T.	0.5	Socie	10
6061 Al	R.T.	0.4	Itoh	8
1100 Al	R.T.	0.0	Socie	10
42CrMo	R.T.	0.5	Chen	7
S45C	R.T.	0.2	Kim	20

数2のばらつき範囲内で評価されている。したがって本稿で提示した寿命評価法が、非比例多軸負荷における寿命低下割合が異なる各種材料の非比例多軸低サイクル疲労寿命を統一的に評価できるモデルであることが示唆された。しかし本モデルによる寿命評価の適用性の検証は、Fig.3の限られたひずみ経路で実施された試験結果に限定されていた。したがって、多種多様なひずみ経路を有する非比例多軸低サイクル疲労では、より複雑なひずみ経路での寿命評価への有効性も確認する必要があることはいうまでもない。しかし、それにはより複雑なひずみ経路での試験を系統的に行うことが必要であり、実験に相当な時間を必要とすることから次の研究課題とする。

5. 結 言

これまで著者が非比例多軸低サイクル疲労寿命評価式として提案してきた主ひずみ基準のひずみパラメータを基に、より複雑な負荷経路の寿命評価にも適用するための非比例多軸低サイクル疲労寿命評価モデルを提示した。本モデルは、異なる研究機関で実施された種々の金属材料の非比例多軸低サイクル疲労寿命データを比較的良い精度で予測できることが確認できた。すなわち、本寿命評価モデルは、非比例負荷による寿命低下および応力増加が異なる様々な材料の非比例多軸低サイクル疲労寿命を統一的に評価し得る可能性のあるモデルであった。

おわりに、本研究を行うにあたり多大なご助言をいただいた福井大学工学部小幡谷洋一教授に深く感謝します。また、実験結果の解析にあたっては、本学大学院生の宮崎俊樹氏にご協力いただいたことを感謝します。

参 考 文 献

- 1) ASME Biler and Pressure Vessel Code Case N-47 (1978).
- 2) 新田明人, 緒方隆志, 桑原和夫, 材料, **36**, 376 (1987).
- 3) D.F. Socie, ASME JEMT, **109**, 293 (1987).
- 4) T. Itoh, M. Sakane, M. Ohnami and D.F. Socie, ASME JEMT, **117**, 285 (1995).
- 5) N. Hamada and M. Sakane, Proc. of 5th Int. Conf. on Biaxial/ Multiaxial Fatigue and Fracture, **I**, 251 (1997).
- 6) C.H. Wang and M.W. Brown, Fatigue and Fract. Engng. Mater. Struct., **16**, 1285 (1998).
- 7) X. Chen, S. Xu, D. Huang, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., **22**, 679 (1999).

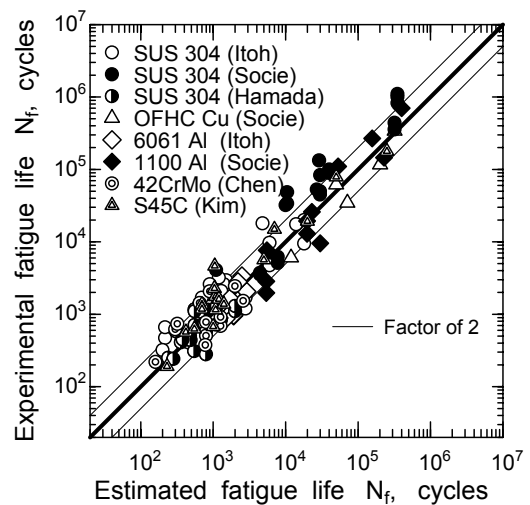


Fig.8. Comparison of low cycle fatigue data between experimental and estimated results.

- 8) T. Itoh, T. Nakata, M. Sakane and M. Ohnami, "Multiaxial Fatigue & Fracture", ESIS-25, 41 (1999).
- 9) 伊藤隆基, 坂根政男, 大南正瑛, 飴山恵, 材料, **41**, 1361 (1992).
- 10) S.H. Doong, D.F. Socie and I.M. Robertson, ASME JEMT, **112**, 456 (1990).
- 11) S. Kida, T. Itoh, M. Sakane, M. Ohnami and D.F. Socie, Fatigue Fract. Engng Mater. Struct., **20**, 1375 (1997).
- 12) S.H. Doong and D.F. Socie, ASME JEMT, **113**, 23 (1991).
- 13) D.L. McDowell, Proc. Int. Conf. on Constitutive Laws for Engng. Mater, 125 (1983).
- 14) E. Krempl and H. Lu, Mechanics and Materials, **2**, 183 (1983).
- 15) A. Benallal and D. Marquis, ASME JEMT, **109**, 326 (1987).
- 16) 砂本大造, 遠藤忠良, 材料, **17**, 128 (1968).
- 17) N.E. Dowling, J. of Materials, **7**, 71 (1972).
- 18) C.H. Wang and M.W. Brown, ASME JEMT, **118**, 367 (1996).
- 19) J.A. Bannantine and D.F. Socie, "Fatigue under Biaxial and Multiaxial Loading", ESIS-10, 35 (1991).
- 20) K.S. Kim and J.C. Park, Int. J. of Fatigue, **21**, 475 (1999).