塑性ひずみに着眼したランダム荷重下での疲労損傷則†

関 裕 之* 飯 田 達 也**

小 田 歩*** 猪 飼 靖****

Evaluation of Fatigue Damage under Random Stress Sequences on the View Point of Plastic Strain

by

Hiroyuki SEKI*, Tatsuya IIDA**, Ayumu ODA***

and Yasusi IKAI****

Fatigue damage evaluation is one of the most important process for the integrity of a machine or a structure. Although many trials have been made for fatigue damage evaluation, few methods can be used to deal with a wide range of stress or strain conditions of fatigue tests. In this study, the fatigue damage evaluation methods were examined with respect to plastic strain ranging from small to large amplitudes of strain repetition for a given stress sequence. Then, a new fatigue damage rule was proposed in terms of strain condition. The new rule showed a good agreement with the theoretical estimations for various experimental conditions.

An interpolation technique was developed to obtain the stress-strain behavior of a sample material for a given stress sequence. This showed a good applicability for the fatigue damage estimation.

Key words : Fatigue, Fatigue life evaluation, Plastic strain, Random stress, Interpolation

1 ま え が き

疲労現象が発見されて以来、疲労に関する研究は現在に至るまで盛んに行われているがこれらの研究の多くは破断繰返し数が 10^4 回以下の低サイクル疲労に関するもの、またはそれ以上の高サイクル疲労に関するものに大別できる。通常、低繰返し数領域では塑性ひずみ制御で、高繰返し数領域では応力制御で疲労試験を行うことから、これらの実験結果を統一的に取扱うのは困難である。しかし、疲労破壊は不可逆塑性ひずみの蓄積によって生じ、それは低サイクルでも高サイクルでも変わらないと考えられることから全寿命域において同じ条件の基に疲労試験を行い、統一的な損傷評価法を求める意義は大きいといえる。

累積損傷則において代表的なものに Manson-Coffin 則¹⁾があり、主として低サイクル領域で疲労損傷評価に用いられている。塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon_p$ には通常塑性ひずみレンジペア $\Delta\epsilon_{rp}$ を用いるがレンジペアが平均塑性ひずみを持つ場合やヒステリシスループが最終的に閉じないためレンジペアを決定できない場合などの取扱いはさまざまな方法が提唱^{1),2)}されておりいまだ確定的ではない。また、Manson-Coffin 則を拡張して変動ひずみ波形に適用した研究結果もあるが条件によって

定数や式の形式をかえている。これらの方法は低サイクル域におけるものであり、それぞれの条件の時のみに適用できるものであって統一的とはいえない。

そこで本研究ではさまざまな種類の疲労試験を塑性ひずみ制御で行って既存の損傷則や新たに提案したものについて吟味を行い、広範囲に適用可能な損傷評価法の発見を目的とした。損傷則の吟味においてはできるだけ実験事実に基づくとし、また条件(低・高サイクル、ひずみ振幅の変動、平均塑性ひずみの変動や有無、ループが閉じるか否か)がどのように組合わさっても、定数や形式を変える必要の無いものを目指した。

実際の機械設計においては通常、応力を設計基準としており応力基準の損傷評価法が必要となっている。そこで本研究では実働荷重下における応力-ひずみ応答を内挿補間法を用いて推定し、この結果を基に変動応力条件下における寿命予測を試みた。

2 供試材料および試験方法

疲労試験には機械構造用炭素鋼 S35C 焼なまし材(850°C, 1 時間加熱後炉冷)を使用した。その化学成分を Table I に示す。また、試験片はひずみの測定方法にあわせて 2 種類用意した。塑性ひずみ幅が 0.2% 以下の疲労試験ではひずみの測定に抵抗線ひず

† 原稿受理 平成 5 年 4 月 20 日 Received Apr. 20, 1993

* 大日本印刷(株) 〒599-02 箕面市新稲, Dainippon Printing Co. Ltd., Niina, Mino, 599-02

** 神戸大学工学部機械工学科 〒657 神戸市灘区六甲台, Dept. of Mech. Eng., Kobe Univ., Nada-ku, Kobe, 657

*** シャープ(株) 〒562 阪南市自然田, Sharp Co. Ltd., Shizenda, Hannan, 562

**** 正 会 員 神戸大学工学部機械工学科 〒657 神戸市灘区六甲台, Dept. of Mech. Eng., Kobe Univ., Nada-ku, Kobe, 657

Table I. Chemical composition of the material S35C.

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.35	0.20	0.79	0.027	0.021	0.02	0.02	0.16

Fig. 1. Configuration of specimen.

みゲージを使用するため試験片中央にゲージを接着するために最小限必要な 20 mm の平行部を設けた。塑性ひずみ幅が 0.2% 以上の疲労試験では座屈を防ぐため Fig. 1 に示す砂時計型とし、どちらも周方向のきずが消えるまでエメリー紙で軸方向に研磨し、試験に供した。

疲労試験に用いた機材は油圧サーボ型引張圧縮疲労試験機（鷺宮製作所，容量 49 kN）とその制御のためのパーソナルコンピュータ（NEC PC9801VX）である。疲労試験における荷重制御はハンドラソフトおよび自作のプログラムによってすべて自動的に行われる。

3 実験結果およびその考察

3.1 両振り一定振幅試験およびその結果

最も単純な条件下で塑性ひずみと疲労損傷の関係を明らかにし、今後の損傷評価の基礎となる損傷則を得るため、高サイクル領域から低サイクル領域まで広範囲に両振り一定塑性ひずみ振幅疲労試験を行い、Manson-Coffin 則の適用を検討した。

Fig. 2 は両振り一定塑性ひずみ振幅疲労試験の結果を $\Delta\epsilon_p-N_f$ 線図に表したもので、四角い点が実験点を示している。破断繰返し数が 10^4 回以下のいわゆる低サイクル領域では他の多くの研究と同様の結果を得た。また、高サイクル領域での実験結果から寿命曲線は右下がりのなだらかなカーブを描いていることがわかる。

3.1.1 損傷則による整理とその吟味 両対数グラフ上では Manson-Coffin 則は直線で示されるためこれらの実験点のすべてを Manson-Coffin 則によ

Fig. 2. $\Delta\epsilon_p-N_f$ diagram of material.

Table II. Damage evaluations according to Eq. (1).

No.	$\Delta\epsilon_p$ (%)	ΣD
4	0.05	0.5
5	0.06	1.21
6	0.08	1.78
7	0.1	1.43
8	0.2	0.85
9	0.3	1.35
10	0.5	0.43
11	1.3	1.08
12	2.2	1.27
13	4.5	0.99

て整理するのは適当でない。そこで、すべての繰返し数領域において式に含まれる定数を変えることなく適用可能な新たな損傷則を作成した。Fig. 1 における未破断の実験点を除く 10 種のデータについて式 (1) で整理した結果を Table II に示す。ほとんどの実験点において破断時の累積損傷値は 1 に近い値が得られ、式 (1) の妥当性を示している。

$$N_f \cdot \exp \{A1 \cdot (\Delta\epsilon_p)^{B1} + C1\} = 1 \quad (1)$$

$$A1 = -5.42, B1 = -0.296, C1 = -1.959$$

3.2 平均塑性ひずみ漸増試験とその結果

引張り塑性ひずみと圧縮塑性ひずみの寿命に及ぼす影響の違いを明らかにするため 1 サイクル中の引張り側塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon_{p+}$ と圧縮側塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon_{p-}$ が異なる、いわゆる平均塑性ひずみ漸増試験を行った。実験条件および破断繰返し数を Table III に示す。平均塑性ひずみ漸増試験における破断繰返し数が全体的にかなり短いことから疲労において平均塑性ひずみの影響が大きいことがわかる。

3.2.1 損傷則の拡張と考察 3 章 1 節で得られた損傷則は両振り（対称波形）におけるものであったので平均塑性ひずみ漸増試験の結果を基に式 (1) を非対称ひずみ波形にも適用できるように以下のように拡張した。ここで $\Delta\epsilon_{pr}$ は $\Delta\epsilon_{p+}$ と $\Delta\epsilon_{p-}$ の重なった部分、い

Table III. Fatigue test results under increasing mean plastic strain conditions and the damage evaluations according to Eq. (2).

No.	$\Delta\epsilon_{p+}$	$\Delta\epsilon_{p-}$	N_f	ΣD
14 J	0.63	0.31	165	2.14
15	3.08	1.54	18	1.11
16	2.66	1.33	19	1.00
17	0.1	0.2	103	2.11
18	0.18	0.72	17	0.90

いわゆる塑性ひずみレンジベアを表している。平均塑性ひずみ漸増試験の結果を式(2)により整理したものをTable IIIに示してある。

$$N_f \cdot \exp |A2 \cdot (\Delta \varepsilon_{pr})^{B2} + C2 \cdot D| = 1 \quad (2)$$

ただし

$$D = \exp |D2 \cdot (R-1)|$$

$$+ \exp |E2 \cdot (R-1)| - 2, R = \left| \frac{\Delta \varepsilon_{p+}}{\Delta \varepsilon_{p-}} \right|$$

$$A2 = -5.42, B2 = -0.296, C2 = 129.79$$

$$D2 = -0.825, E2 = -0.845$$

やや開きがあるものの全体的に見て実験点を良く再現している。式(2)は対称波形($R=1$ のとき)については式(1)に収れんする。式(2)の本質的意味は、任意のひずみ波形を破断まで繰返し負荷した場合において、疲労損傷が負荷ひずみの大きさのみに依存するとの仮定のもとに、その1回当たりの疲労損傷を算出できるところにある。したがって上の仮定に基づく限り任意の大きさのひずみによる損傷評価を式(2)を用いて行うことは妥当であると考えられる。

3.3 塑性ひずみ幅変動試験

両振り一定振幅疲労試験および平均塑性ひずみ漸増試験の結果は式(2)を用いることで良く整理されることがわかった。つぎにこの結果を基に塑性ひずみ幅変動試験を行い、より実働荷重に近い状態での損傷評価を試みた。

3.3.1 塑性ひずみ幅変動試験と結果 塑性ひずみ幅変動試験ではFig.3のように2種類の非対称ひずみ

Fig. 3. Fatigue test method under varying plastic strain range condition.

Table IV. Test conditions under varying plastic strain range fatigue test and the fatigue life (upper: $\Delta \varepsilon_{p+}$, lower: $\Delta \varepsilon_{p-}$).

No.		1	2	3	4	N_f
19	$\Delta \varepsilon_{p+}$	1.75	1.75			626
	$\Delta \varepsilon_{p-}$	0.5	3.0			
20	$\Delta \varepsilon_{p+}$	1.1	1.1			1589
	$\Delta \varepsilon_{p-}$	0.2	2.0			
21	$\Delta \varepsilon_{p+}$	0.4	0.4			3586
	$\Delta \varepsilon_{p-}$	0.3	0.5			
22	$\Delta \varepsilon_{p+}$	1.75	0.5	1.75	3.0	726
	$\Delta \varepsilon_{p-}$	0.5	0.5	3.0	3.0	
23	$\Delta \varepsilon_{p+}$	1.1	0.2	1.1	2.0	1343
	$\Delta \varepsilon_{p-}$	0.2	0.2	2.0	2.0	

Table V. Damage evaluations of fatigue tests under varying plastic strain range conditions according to Eq. (2).

No.	19	20	21	22	23
ΣD	138.6	371.8	1.09	80.9	157.7

み波形を組合わせて負荷する。塑性ひずみ幅変動試験の実験条件および破断繰返し数をTable IVに示す。塑性ひずみ幅変動試験の損傷評価では、Table IVにあるようなさまざまな非対称波形に対応する損傷値を求める必要がある。この問題に対して本研究では2種の評価法について検討を加えた。以下、順を追って述べる。

3.3.2 ひずみ波形の大きさのみを考慮した損傷評価法とその考察 任意の非対称ひずみ波形を負荷した時の損傷はその波形の大きさのみに依存すると仮定した場合、先に述べた式(2)を用いて任意波形に対応する損傷値を算出することができる。そこで式(2)を用いてTable IVに示した非対称波形に対応する損傷値を求め、それらを破断繰返し数まで順次加えていくことでそれぞれの実験条件における破断時の累積損傷値を算出した。

Table Vはこの方法によって求めた累積損傷値を示している。このように1を大きく上回る結果が得られた。したがって式(2)は両振り一定振幅や平均塑性ひずみ漸増試験のようにひずみ波形が変化しない場合にのみ有効であり、変動波形に対して式(2)を用いるのは適当でないことがわかった。累積損傷値が1を上回るという結果について次のような考察を加えた。

第一に、平均塑性ひずみ漸増試験の結果と塑性ひずみ幅変動試験の結果が著しく異なる点に注目すべきであろう。単独で繰返した場合と組合わせた場合の最も大きな相違点は、平均塑性ひずみの変化である。Table IVの波形1や波形2は単独で繰返し負荷するとそれらは平均塑性ひずみ漸増試験になるが両者を組合わせるとヒステリシスループは常に原点付近に存在することになり、平均塑性ひずみは増加しない。このことが損傷値を算出する上で大きな問題であると思われる。つまり材料が引張や圧縮方向へ大きく変形している場合はそうでない場合に較べて同じ波形を負荷したとしても損傷が大きいと考えられる。そのため損傷はひずみ波形の大きさだけでなく平均塑性ひずみにも依存すると仮定し新たな評価法を作成する必要が生じた。評価法の作成に当たって次の点に特に注意した。

- (1) 既存の実験データを説明できること。
- (2) 実験の種類や塑性ひずみ幅によって定数や形式を変える必要がないこと。
- (3) 近年報告されている複雑な疲労挙動をできるだ

け考慮すること。

(3)の複雑な疲労挙動の1つとして破断ひずみの80%程度の予ひずみを与えても疲労寿命は予ひずみのない場合と顕著な差を生じない場合があるという報告が上村らによってなされている⁴⁾。これは疲労損傷はそのすべてが平均塑性ひずみの影響を受けるわけではないことを示していると考えられる。これらの点に注意して新たな損傷評価法を作成した。

3・3・3 平均塑性ひずみを考慮した損傷評価法
前述の3点を考慮しつつ、平均塑性ひずみを考慮した新たな損傷評価法を以下のように定義した。

今回の半サイクルにおいて与えられたひずみによって材料が直前回の半サイクルに受けたひずみ状態を逆行する場合は損傷は小さく、平均塑性ひずみの影響を受けない。しかし、「未経験な状態に移行する場合」は損傷は大きく、また平均塑性ひずみの影響を受ける。

ここで塑性ひずみは各サイクルごとに損傷評価するため各半サイクルに対して番号を付す。

Fig. 4のように*i*番目の塑性ひずみ幅が*i*-1番目の塑性ひずみ幅より小さい場合は、「直前回のひずみ状態に逆行する場合」に対応している。*i*番目の損傷値 ΔD_i は式(1)によって $\Delta \varepsilon_{p,i}$ に対応する値を算出し、これを0.5倍して用いる。0.5倍するのは半サイクル分を評価するためである。

Fig. 5のように*i*番目の塑性ひずみ幅が*i*-1番目の塑性ひずみ幅より大きい場合は、「直前回のひずみ状態に逆行する場合」+「未経験な状態への移行」に対応しており、 ΔD_i は平均塑性ひずみに影響を受ける。損傷値 ΔD_i は前述と同様に式(1)によって $\Delta \varepsilon_{p,i}$ に対応する値を求め

Fig. 4. Retrogression within the strain condition of the half cycle just before.

Fig. 5. Excess retrogression over the strain condition of the half cycle just before.

$$\Delta D_i = (\text{式(1)から求めた損傷値}) \times 0.5$$

$$\times (\text{平均塑性ひずみの影響}) \quad (3)$$

という形で重みを付ける。 $\Delta \varepsilon_{pr,i}$ は「直前回のひずみ状態に逆行する場合」に対応しているから平均塑性ひずみに影響を受けない。このため式(3)における(平均塑性ひずみの影響)は $\Delta \varepsilon_{pm,i}$ (平均塑性ひずみの増加(減少)量)の大きさおよびその位置 x に依存すると考えると、

$$f(x) = A3 \cdot \log(X+1)^{B3} \cdot (\Delta \varepsilon_{pm,i}/33.6) + 1 \quad (4)$$

$$A3=100.05, B3=10.0$$

なる実験式で示される。また、位置 X は応力-ひずみ平面上での $\Delta \varepsilon_{pm,i}$ の中点の座標をとる。

式(4)の右辺第1項前半は平均塑性ひずみの大きさに依存する項であり、平均塑性ひずみが増加するほど、つまり破断ひずみに近づくに従って指数関数的に増大する。第1項後半は*i*番目の半サイクルにおける平均塑性ひずみの増加量を破断ひずみ(33.6%)で規格化したものである。Table VIは以上の手順に従って塑性ひずみ幅変動試験の結果を整理したものであり、このように塑性ひずみ幅変動試験において累積損傷値は1に近い値が得られた。また、整理においては実験の種類や塑性ひずみ幅の大きさにあわせて定数を変える

Table VI. Damage evaluations under varying plastic strain range conditions according to the new damage rule.

No.	19	20	21	22	23
ΣD	0.92	1.26	0.43	1.07	1.12

Fig. 6. Hysteresis loop on fatigue test under programmed plastic strain condition.

必要はなく、当初の目的にも合致する。

3・3・4 プログラム波形疲労試験 ここまでの吟味から本章において提案した損傷評価法がさまざまな条件の疲労試験結果を良く整理でき、しかも損傷式の形式や定数を変える必要がないことが明らかになった。そこでさらに実働荷重に近い複雑なプログラム波形を材料に負荷し、この損傷評価法の実用性を確認する実験を行った。Fig. 6 にそのひずみ波形の大きさを示す。大小 10 種類の非対称波形が $-2.0 \sim +4.0\%$ の広範囲なひずみ領域にわたって分布しており、実働荷重にかなり近い実験条件であるといえる。そこで 3 章 3 節において提案したところの損傷評価法を用いて上の実験結果を整理したところ次の結果を得た。

破断繰返し数 N_f	1268 回
破断時の累積損傷値	1.30

このように複雑な条件においても累積損傷値は 1 に近い良好な結果が得られたことは新損傷評価法の変動ひずみ波形への適用の妥当性を示している。以上の結果から本研究において提案した損傷評価法の有効性が明らかになったと考えている。

3・4 変動応力条件下における疲労損傷評価

疲労損傷が基本的に不可逆塑性ひずみの蓄積によって発生することから前章までの疲労損傷評価はすべて塑性ひずみに基づくものであった。しかし実際の機械構造物において荷重負荷によって生じる塑性ひずみを測定するのは困難である。したがって機械設計においては通常、予想される負荷応力を基準として耐疲労性能を決定せざるを得ないため、応力基準の損傷評価法が必要となる。本研究ではこの問題に対処するため多次元内挿補間プログラムである NAIS-SYSTEM⁵⁾を用いて任意応力下におけるヒステリシスループを推定し、この推定結果と前章で得られた損傷評価法を総合して変動応力条件下における疲労損傷評価を試みた。

3・4・1 NAIS-SYSTEM による内挿曲面の作成 さまざまな応力レベルにおける金属のヒステリシスループを A/D 変換によって有限個の点として採取する。得られた点の座標から $(\sigma, \epsilon, \Delta\sigma, \Delta\epsilon)$ を 1 組とす

るデータ群を 200 組ほど作成した。

つぎに NAIS-SYSTEM を用いてすべてのデータ点を通る 4 次元曲面を作成した。この NAIS-SYSTEM とは n 次元空間からなる関数値の組に対して、 $n+1$ 次元空間でそれらの点を必ず通る限り滑らかな曲面を求める方法である。NAIS-SYSTEM の原理は、多次元の変数 x についてその関数値 $Z(x_i)$ は定常確立過程かつガウス過程であり、 Z_i と他の諸点との共分散関係は各点間の距離のみに依存すると仮定して最適な $Z(x)$ の平均値 μ と分散 ρ を決定し、この μ と ρ によって記述される曲面を解とするものである。したがって NAIS-SYSTEM によって作成した 4 次元曲面に 3 変数 $(\sigma, \epsilon, \Delta\sigma)$ を与えたと残りの目的量 $\Delta\epsilon$ を求めることができる。応力-ひずみヒステリシスループを推定するには

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta\sigma$$

$$\epsilon_i = \epsilon_{i-1} + \Delta\epsilon$$

として応力 σ_i が目標値になるまで帰納的に点を求めていく。その後で $\Delta\sigma$ の符号を反転させて同様の手順を繰り返す。

3・4・2 推定結果と実測値の比較 本手法によって推定した応力-ひずみヒステリシスループと同じ応力条件において実測したループを Fig. 7, Fig. 8 に示す。Fig. 7 と Fig. 8 を比較すると推定結果は実測のループ形状にかなり類似しており本手法の有効性を示している。

3・4・3 変動応力条件下における疲労損傷評価

Fig. 7. Estimated hysteresis loops of the material.

Fig. 8. Experimental hysteresis loops of the material.

Table VII. Stress sequence for fatigue tests under varying stress condition.

No.	σ (MPa)
1	300
2	-300
3	250
4	-200
5	250
6	-250

Fig. 9. Estimated hysteresis loops of the material.

以上の結果から NAIS-SYSTEM を用いたヒステリシスループ推定から良好な結果を得られることが明らかになったので, 実際に多段変動応力を負荷する疲労試験を行い, ヒステリシスループの推定およびこの結果に基づく寿命予測を試みた。試験に用いた6段の応力パターンを Table VII に示す。

Table VII を基に本手法によって推定したヒステリシスループを Fig.9 に示す。推定したヒステリシスループからそれぞれの応力レベルに対応する塑性ひずみ幅を求め, 損傷値を算出し, 寿命予測を試みた。6段を1ブロックとした場合の損傷値の合計 $\sum D = 1.68E-4$ から得られる予測破断繰返し数は17863回であるのに対し実験結果は20460回であるから十分に精度良く推定できたと考えられる。また, 推定したヒステリシスループの正確性をさらに吟味するため Table VII と同様の負荷条件においてヒステリシスループを採取し, そこから求められた塑性ひずみ幅を用いて破

断寿命を予測したところ, 18336回なる値が得られた。したがって推定ループを基に予測した破断寿命と実測ループを基に予測した破断寿命との差は2.7%であり, 寿命予測を行う上で本手法により推定したヒステリシスループは充分実用にあたるといえる。

4 結 論

機械構造用炭素鋼 S35C を用いてさまざまな疲労試験を行い, 条件(低・高サイクル, ひずみ振幅の変動, 平均塑性ひずみの変動や有無, ループが閉じるか否か, 等)がどのように組み合わせられても定数や形式を変える必要のない統一的な損傷評価法の発見を目指した。その結果, 疲労損傷はひずみの大きさとその組み合わせおよび平均塑性ひずみに依存するものとして,

今回の半サイクルにおいて与えられたひずみによって材料が直前回の半サイクルに受けたひずみ状態に逆行する場合は損傷は小さく, 平均塑性ひずみの影響を受けない。しかし, 「未経験な状態に移行する場合」は損傷は大きくまた平均塑性ひずみの影響を受ける。

を提案し実験結果を整理したところ, 多くの実験点において破断時の累積損傷値が1に近い良好な結果が得られた。また, NAIS-SYSTEM を用いて任意応力を負荷した時のヒステリシスループを推定し, 推定ヒステリシスループと塑性ひずみ基準の損傷則を総合して任意応力条件下における損傷評価および寿命予測を試み, 十分な精度で破断寿命を予測できることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 菊川 真, 大路清嗣, 鎌田敬雄, 城野政弘, 日本機械学会誌, **70**, 585, p. 1495 (1967).
- 2) 日本材料学会編, “金属材料疲労設計便覧”, p. 208 (1978).
- 3) 菊川 真, 大路清嗣, 城野政弘, 溝口孝遠, 日本機械学会論文集, **35**, 278, p. 2021 (1969).
- 4) 日本材料学会第21回疲労シンポジウム講演論文集, p. 51 (1992).
- 5) 木村寿己, 猪飼 靖, 神戸大学修士論文 (1992).