新しい高温クリープ疲労損傷則に基づく余寿命評価法と その Mod.9Cr-1Mo 鋼への適用†

時 政 勝 行* 宮 原 光 雄**

The Remaining Life Evaluation Based on a New Creep-Fatigue Damage Rule for Mod.9Cr-1Mo Steel

by

Katsuyuki TOKIMASA* and Mitsuo MIYAHARA**

The idea and procedures are presented for evaluating the remaining life based on a new creep-fatigue damage rule. The proposed method needs only information about crack length at a given number of cycles or crack length change during a given cycles interval and F_{ij} , the ratio of the partitioned inelastic strain range to the total inelastic strain range. It is shown that the material damage and the applied inelastic strain range as well as the remaining life of IJ tested Mod.9Cr-1Mo steel can be evaluated when the difference between the measured crack length and the hypothetical initial crack length or the measured crack length change is greater than $30\mu\text{m}$, and that the respective accuracy in predicting each of the remaining life, the applied inelastic strain range and the material damage is within about factor of 3~4, 2.5~2.8 and 1.5~3.

Key words: Creep-fatigue, Material damage, Small crack, Remaining life evaluation, Mod.9Cr-1Mo steel

1 緒 言

高温クリープ疲労条件下における材料損傷の発達に関しては、一般に、負荷履歴依存性が存在し、その程度は材料によって異なることが知られている。したがって、高温クリープ疲労負荷を受ける機器要素の余寿命評価にあたっては、第一に使用材料の損傷発達の負荷履歴依存性が明確であること、第二に材料損傷値の測定手段が明らかであること、第三に負荷履歴を正確に推定する手法が明確であることが不可欠である。もし使用材料の損傷発達に負荷履歴依存性が無ければ、問題は極めて簡単となり、余寿命評価の問題は材料損傷の測定問題に帰することになる。

実際の設計においては大きな安全余裕度が見込まれ、使用材料の損傷発達の負荷履歴依存性は設計時には無視されている。しかし、余寿命評価に際してはこのような損傷発達の負荷履歴依存性を無視しては行えない。運転条件を余寿命評価前後で変更する場合や損傷計測に必要なデータベースが使用条件とかけ離れた試験条件で求められている場合が実際問題として想定されるからである。

したがって、余寿命評価精度向上のためには、使用材料の損傷発達の負荷履歴依存性を明確にすると同時に、これを考慮できる寿命推定法を研究し使用することが第一に重要で、機器要素の設計段階でこのような寿命推定法を採用し、使用材料の損傷発達の負荷履歴依存性に関して使用前に十分な研究がなされるのが理想である。

筆者らは、ひずみ範囲分割法の有用性に着目して、その改良と実構造物、機器要素の寿命評価への適用を図る一方、余寿命評価への適用を考慮して、上述のような観点からの研究を進め、ひずみ範囲分割法が材料損傷発達の負荷履歴依存性を考慮できるように、ひずみ範囲分割概念に基づく新しいクリープ疲労損傷則を提案した。新損傷則は、負荷履歴依存性を考慮でき、また材料損傷を微小き裂の進展挙動と関連付けて定式化し評価できるのが特徴である。^{1)~3)}

ここでは、この新損傷則を余寿命評価へ適用する具体的な手法を提案するとともに、Mod.9Cr-1Mo 鋼の 600℃ 大気中の PP, PC, CP および CC 試験途中における余寿命評価へ適用した結果を報告する。

2 新しい高温クリープ疲労損傷則の概要

2・1 平滑材におけるき裂の発生進展モデル^{1), 2)}

新しい高温クリープ疲労損傷則の導出に際して、筆者らが構築し設定した平滑材におけるクリープ疲労き裂の発生進展モデルは以下に示すようなものである。

(1) 材料中には $\Delta\epsilon_{ij}$ に対応して材料固有のき裂発生源が存在し、初期き裂として active となるときのそれらの大きさは $2(a_o)_{ij}$ である。すなわち、一般には、 $2(a_o)_{pp}$, $2(a_o)_{pc}$, $2(a_o)_{cp}$, $2(a_o)_{cc}$ の最大 4 つのき裂発生源が存在する。

(2) 材料に繰り返される非弾性変形が 1 種類の $\Delta\epsilon_{ij}$ で構成される場合、 $\Delta\epsilon_{ij}$ がある限界以上大きい場合にはき

† 原稿受理 平成 10 年 4 月 28 日 Received Apr. 28, 1998

* 正 会 員 近畿大学生物理工学部基礎機械工学科 〒 649-6493 和歌山県那賀郡打田町西三谷, Dept. of Mech. Eng., School of Biology-Oriented Science & Tech., Kinki Univ., Uchita-cho, Wakayama, 649-6493

** 正 会 員 住友金属工業株式会社総合技術研究所 〒 660-0891 尼崎市扶桑町, Corporate R & D Lab., Sumitomo Metal Ind. Ltd., Fuso-cho, Amagasaki, 660-0891

裂発生寿命は全寿命 N_{ij} に比べて無視でき、寿命 N_{ij} は初期き裂 $2(a_0)_{ij}$ から $2(a_f)_{ij}$ までのき裂進展寿命に等しい。また、 $2(a_0)_{ij}$ 、 $2(a_f)_{ij}$ は材料固有の値である。

(3) 材料に繰り返される非弾性変形が2種類以上の $\Delta\epsilon_{ij}$ の和で構成される場合、たとえば、

$$\Delta\epsilon_{in} = \Delta\epsilon_{pp} + \Delta\epsilon_{cc} + \Delta\epsilon_{pc} \text{ or } \Delta\epsilon_{cp} \equiv \Sigma\Delta\epsilon_{ij}$$

のとき、 $\Sigma\Delta\epsilon_{ij}$ の影響を受けて active となるき裂発生源 $2(a_0)_{pp+cc+pc \text{ or } cp} \equiv 2(a_0)_{\Sigma ij}$ が存在し、 $2(a_0)_{\Sigma ij} \rightarrow 2(a)_{\Sigma ij} \rightarrow 2(a_c)_{\Sigma ij}$ と進展し破断に至る。き裂先端からのき裂進展量は、各々の $\Delta\epsilon_{ij}$ 成分に対応した進展量の和に等しい。ここで、 $2(a_c)_{\Sigma ij}$ は破断時 (N_f サイクル後) のき裂長さである。また、き裂発生源半長 $(a_0)_{pp+cc+pc \text{ or } cp} \equiv (a_0)_{\Sigma ij}$ は、 $(a_0)_{pp}$ 、 $(a_0)_{pc}$ 、 $(a_0)_{cp}$ 、 $(a_0)_{cc}$ のいずれかに等しい。

(4) 上記 (2)、(3) において、き裂発生源からのき裂は、微小き裂進展領域では、現実には分布き裂の状態になると考えられるが、ここでは仮想的な単一き裂を想定し、この仮想き裂が巨視的き裂進展則に従うものとする。

(5) き裂進展曲線すなわち $a-n$ 関係はひずみ条件によって異なり、ひずみ条件を繰り返し途中で変化した場合、き裂 a は変化後のひずみ条件によって決まるき裂進展曲線に従って進展し、遅延・加速効果は無視できるものとする。

2.2 損傷則

上述のクリープ疲労き裂進展モデルに基づいて、Mod.9Cr-1Mo 鋼に関する3種類の高温クリープ疲労試験（平滑材のIJ試験、IJ波形下のき裂進展試験および平滑材の二段二重変動ひずみ試験）の結果を無理なく説明できる以下のような損傷則を導出した。

(1) $\Delta\epsilon_{pp}$ が単独に繰り返されるPP波形の場合、 $\Delta\epsilon_{pp}$ がある限界値 $(\Delta\epsilon_{pp})_{cr}$ 以上ではき裂発生寿命は全寿命に対して無視できるが、 $\Delta\epsilon_{pp}$ がある限界値 $(\Delta\epsilon_{pp})_{cr}$ 以下になるとき裂発生寿命は無視できなくなり、き裂進展曲線は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} n/N_{pp} &= \alpha + (1-\alpha) \ln(a/a_0)_{pp} / \ln(a_f/a_0)_{pp} \\ \alpha &= C_1 \log \Delta\epsilon_{pp} + C_2 \quad (\Delta\epsilon_{pp} < (\Delta\epsilon_{pp})_{cr} \text{ のとき}) \\ &= 0 \quad (\Delta\epsilon_{pp} \geq (\Delta\epsilon_{pp})_{cr} \text{ のとき}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(C_1, C_2 : 材料定数)

(2) $\Delta\epsilon_{in} \equiv \Delta\epsilon_{pp} + \Delta\epsilon_{cc} + \Delta\epsilon_{pc} \text{ or } \Delta\epsilon_{cp} \equiv \Sigma\Delta\epsilon_{ij}$ が繰り返されるとき、解析を簡略化するため、き裂発生寿命がひずみの大小にかかわらず無視できるとした。 $F_{ij} = \Delta\epsilon_{ij} / \Delta\epsilon_{in}$ として、き裂進展曲線は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} n/N_f & \\ &= \ln(a/a_0)_{\Sigma ij} / \ln(a_c/a_0)_{\Sigma ij} \quad (\Sigma ij = pp + cc + pc \text{ or } cp) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \ln(a_c/a_0)_{\Sigma ij} &= \Sigma \left(B'_{ij} F_{ij}^{1/m_{ij}} \Delta\epsilon_{in}^{1/m_{ij}} \right) \\ &/ \left\{ \Sigma \left[B'_{ij} F_{ij}^{1/m_{ij}} \Delta\epsilon_{in}^{1/m_{ij}} / \ln(a_f/a_0)_{ij} \right] \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

(3) IJ波形下における初期き裂長さ $2(a_0)_{pp+ij}$ は、 $2(a_0)_{pp}$ 、 $2(a_0)_{ij}$ のいずれかに等しく、次式に示すような $\Delta\epsilon_{in}$ 中の $\Delta\epsilon_{pp}$ 成分と $\Delta\epsilon_{ij}$ 成分の大小関係によって決

まる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\epsilon_{ij} &\geq \Delta\epsilon_{pp} \text{ のとき} : 2(a_0)_{pp+ij} = 2(a_0)_{ij} \\ \Delta\epsilon_{ij} &< \Delta\epsilon_{pp} \text{ のとき} : 2(a_0)_{pp+ij} = 2(a_0)_{pp} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

上述の式中で、 m_{ij} 、 B'_{ij} は平滑材の高温クリープ疲労特性および平滑試験片における半円状き裂の進展特性をそれぞれ次式のように表示したときの定数である。

$$\Delta\epsilon_{ij} = A_{ij} N_{ij}^{-m_{ij}} \quad (i, j = p, c) \quad (5)$$

$$(da/dN)_{ij} = B'_{ij} \Delta\epsilon_{ij}^{1/m_{ij}} a \quad (i, j = p, c) \quad (6)$$

2.3 寿命評価式

Table I に、新損傷則に基づいて寿命評価を行う場合に必要材料パラメータを Mod.9Cr-1Mo 鋼の場合について示す。式 (1)～式 (4) および Table I を用いることにより、任意波形下の寿命推定が可能であり、所定き裂長さまでのき裂進展寿命の計算が可能である。²⁾

IJ 波形の場合の寿命 N_f は次式で計算できる。

$$N_f = 1 / \Sigma \left\{ B'_{ij} F_{ij}^{1/m_{ij}} \Delta\epsilon_{in}^{1/m_{ij}} / \ln(a_f/a_0)_{ij} \right\} \quad (7)$$

式 (7) はき裂発生寿命が無視できる場合の寿命評価式であり、PP 波形の場合は、 $\Delta\epsilon_{pp}$ の大きさによってはき裂発生寿命が無視できない ($\alpha \neq 0$) 場合があるので、寿命評価式は次式となる。

$$(1-\alpha)N_{pp} = 1/B'_{pp} \Delta\epsilon_{pp}^{1/m_{pp}} \ln(a_f/a_0)_{pp} \quad (8)$$

3 余寿命評価法

筆者らが本報で提案する余寿命評価法は、対象とする部材に発生した表面の微小き裂長さ $2a$ を測定して行うものであるが、これまでに提案されている同種の手法^{4)~9)} よりもより一般的な取り扱いができるのが特徴である。通常、微小き裂は分布き裂の状態を観察されるが、本提案法では観察される最大き裂あるいは分布き裂の観察より推定されるき裂長さの最大値を $2a$ として用いる。

以下、PP 試験および IJ 試験 (IJ $\neq$ PP) の場合に分けて提案手法を具体的に説明する。

3.1 PP 試験の場合

式 (1) と式 (8) において、試験開始からの繰返し数 n とき裂半長 a が既知であるとする、Table I の材料パラメータも既知であるので、式 (1) と式 (8) は寿命 N_{pp} 、 α および $\Delta\epsilon_{pp}$ に関する3元連立方程式を与える。したがって、この方程式を解くことにより、寿命 N_{pp} 、 α および $\Delta\epsilon_{pp}$ を知ることができ、したがって余寿命 ($N_{pp} - n$) を求めることができる。また、材料損傷値 (n/N_{pp}) は式 (1) に α とき裂半長 a の値を代入して求めることができる。

一方、実際問題として、試験開始からの繰返し数は不明であるがある繰返し期間のき裂長さの変化が明確な場合がある。いま、繰返し数 n_1 におけるき裂長さ $2a_1$ 、繰返し数 $n_2 (= n_1 + \Delta n)$ におけるき裂長さを $2a_2$ とし、 n_1 は不明であるが、 Δn 、 $2a_1$ および $2a_2$ は既知であるとする、式 (1) の最初の式より、

$$\Delta n / N_{pp} = (1-\alpha) \ln(a_2/a_1) / \ln(a_f/a_0)_{pp} \quad (9)$$

が得られ、式 (1) の2番目の式と式 (8) とから、 N_{pp} 、 α および $\Delta\epsilon_{pp}$ が求められる。また、繰返し数 n_1 、 n_2 および

Table I. Summary of material parameters obtained until now which are needed in creep-fatigue life estimation based on the proposed new damage rule.

Material	ij	A_{ij}	$1/m_{ij}$	B'_{ij}	$\ln(a_f/a_o)_{ij}$	$2(a_o)_{ij}$ (mm)	$2(a_f)_{ij}$ (mm)	$(\Delta\epsilon_{pp})_{cr}$	C_1	C_2
Mod.9Cr-1Mo (600°C)	pp	1.24	1.43	3.97	5.40	0.045	10.0	0.0055	-0.922	-2.08
	pc	0.454	1.45	11.6	3.69	0.091	3.64	—	—	—
	cp	2.64	1.08	1.26	3.60	0.091	3.33	—	—	—
	cc	2.84	1.15	1.11	3.69	0.091	3.64	—	—	—

材料損傷値 (n_2/N_{pp}) も式 (1) の最初の式より求めることができる。

このように、負荷ひずみ波形が PP 波形であることがわかっていると、余寿命、材料損傷値、作用ひずみ $\Delta\epsilon_{pp}$ を定量的に求めることができる。しかし、通常の余寿命評価プロセスでは、作用ひずみ波形の種類は明らかでない。したがって、余寿命評価を行う前に非弾性解析を行い、作用ひずみ波形が PP 波形 ($F_{pp} = 1$) であることを確認しておく必要がある。ただし、 $\Delta\epsilon_{pp}$ を解析によって正確に求めておく必要はない。

3・2 IJ 試験の場合

まず、繰返し数 n とき裂長さ $2a$ が既知である場合を考えると、IJ 試験の場合も、PP 試験の場合と同様に、あらかじめひずみ波形の種類すなわち F_{ij} の値が明確であれば、式 (4) より $(a_o)_{\Sigma ij}$ の値も定まるので、式 (2) と式 (7) は寿命 N_f と $\Delta\epsilon_{in}$ に関する二元連立方程式となり、これを解くことにより、余寿命評価ができることになる。厳密には F_{ij} と $\Delta\epsilon_{in}$ は独立な変数ではなく、 $\Delta\epsilon_{in}$ が変化すれば F_{ij} の値も変化し、IJ 試験の場合の F_{ij} と $\Delta\epsilon_{in}$ の関係はひずみ速度条件によっても変化するので上記のように簡単にはならない。しかし、本報では、暫定的な近似法として、 F_{ij} の値が明確であるとして寿命 N_f と $\Delta\epsilon_{in}$ を求めて余寿命を評価する手法を採用した。

つぎに、繰返し数 n_1 におけるき裂長さ $2a_1$ 、繰返し数 $n_2 (= n_1 + \Delta n)$ におけるき裂長さを $2a_2$ とし、 n_1 は不明、 Δn 、 $2a_1$ および $2a_2$ は既知である場合を考えると、式 (2) より、

$$\Delta n/N_f = \ln(a_2/a_1)_{\Sigma ij} / \ln(a_c/a_o)_{\Sigma ij} \quad (10)$$

が得られるので、これと式 (7) を連立させることにより、寿命 N_f したがって余寿命 ($N_f - n$) と $\Delta\epsilon_{in}$ を求めることができ、式 (2) より繰返し数 n_1 、 n_2 および材料損傷値 (n_2/N_f) を求めることができる。

4 IJ 試験中の Mod.9Cr-1Mo 鋼の余寿命評価結果

本報で提案した余寿命評価法の評価精度を検証するために、Fig. 1 から Fig. 5 に示すような Mod.9Cr-1Mo 鋼の IJ 試験途中で実測された表面最大き裂長さデータを用い、実測時点における余寿命を次の 2 つの手法で評価した。

(1) 試験開始からの繰返し数 n とき裂長さ $2a$ が既知であるとして評価する方法 (手法 1)

(2) 繰返し数 n_1 におけるき裂長さ $2a_1$ 、繰返し数 $n_2 (= n_1 + \Delta n)$ におけるき裂長さを $2a_2$ とし、 n_1 は不明、 Δn 、 $2a_1$ および $2a_2$ は既知であるとして、繰返し数 n_2 時

点の余寿命を評価する方法 (手法 2)

手法 2 の場合、 Δn としては Fig. 1 から Fig. 5 の最大表面き裂長さを測定した間隔をとって評価した。

余寿命評価の対象とした IJ 試験データをまとめて Table II に示す。

なお、Fig. 1 から Fig. 5 の最大表面き裂の観察結果か

Fig. 1. The maximum surface crack length $2a$ measured during PP straining test.

Fig. 2. The maximum surface crack length $2a$ measured during PC straining test.

Fig. 3. The maximum surface crack length $2a$ measured during CP straining test.

Fig. 4. The maximum surface crack length $2a$ measured during CC straining test.

Fig. 5. The maximum surface crack length $2a$ measured during PP straining test conducted by IHI researches.⁸⁾

Table II. The IJ test results analyzed by the proposed remaining life procedures.

IJ	$\Delta \varepsilon_t$	$\Delta \varepsilon_{in}$	F_{pp}	F_{ij}	N_t (Cycles)	Remarks
PP	0.010	0.0074	1	0	1512	Ref.(8)
	0.003	0.001	1	0	34775	
PP	0.016	0.0130	1	0	715	
	0.010	0.0070	1	0	1572	
	0.005	0.0026	1	0	6054	
	0.0042	0.0018	1	0	9237	
PC	0.010	0.0077	0.247	0.753	1021	
	0.005	0.0029	0.483	0.517	3308	
	0.004	0.0018	0.667	0.333	7050	
CP	0.010	0.0072	0.375	0.625	637	
	0.005	0.0026	0.577	0.423	5104	
CC	0.010	0.0072	0.375	0.625	1264	
	0.005	0.0027	0.444	0.556	5200	
	0.004	0.0019	0.579	0.421	8860	

ら明らかなように、各試験の初期観察データの中には $(2a_o)_{pp}$ や $(2a_o)_{ij}$ の値より小さい値が測定されている。このような場合には、 $2a = 2(a_o)_{pp}$ あるいは $2a = 2(a_o)_{ij}$ において余寿命評価を行った。手法1を採用した場合は、PP試験以外では、方程式上余寿命評価は不可能となる。また、観察区間 Δn の間にき裂進展が認められないような場合、手法2による余寿命評価は不可能になる。

また、式(4)の適用に際しては、暫定的に次式のように修正して余寿命評価を行った。

$$\left. \begin{aligned} F_{pp} < 0.4 \text{ のとき: } 2(a_o)_{pp+ij} &= 2(a_o)_{ij} \\ F_{pp} \geq 0.4 \text{ のとき: } 2(a_o)_{pp+ij} &= 2(a_o)_{pp} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(11)を適用したケースは、PC試験およびCC試験の $\Delta \varepsilon_t = 0.5\%$ の場合である。

Fig. 6とFig. 7は、筆者らが測定したFig. 1からFig. 4に示したデータをもとに、それぞれ手法1と手法2で評価した余寿命 $N_r (= N_f - n)$ を実験値に対する比をとって示したものである。推定値と実験値との比が10の評価点は、余寿命評価が不可能か、き裂の変化が極めて小さく、実験値の10倍以上の余寿命を予測した点を示す。また、推定値と実験値との比が0.1の評価点は、余寿命を実験値の1/10以下と評価した場合および余寿命なしと評価した場合を示す。なお、各図において、2本の水平な点線が記入されているが、これらはfactor of 2予測精度の上下限を示している。これらの結果から次のことが言える。

(1) PP試験およびCC試験の場合

$\Delta \varepsilon_t = 1.0\%$ の場合、両試験の場合とも、手法によらず良好な結果が得られている。しかし、 $\Delta \varepsilon_t$ が小さい場合は予測精度が悪くなる傾向が見られ、手法2で予測した場合は評価点10のプロット点が多くなっている。

(2) PC試験の場合

手法1で予測した場合には、 $\Delta \varepsilon_t = 1\%$ の寿命初期を除けばかなり良い結果が得られている。手法2による場合も寿命の前半 ($n/N_f < 0.6$) を除けば予測精度は良好である。

(3) CP試験の場合

PP, PC および CC 試験の場合に比べて最も結果は良くないが, $\Delta \varepsilon_t = 1.0\%$ の場合は, 寿命前半では危険側の推定とはなるものの寿命初期を除けば factor of 3 程度の精度内にある。

全体を通じて言えることは, 寿命末期では, 試験の種類, 手法の種類を問わず, 安全側の推定になっている。また, 余寿命無しもしくは余寿命を全寿命の 1/10 以下と判定した時点は, 最も短くて $n/N_f \approx 0.75$ であり, その他は $n/N_f > 0.8$, その大半は $n/N_f = 0.9$ 前後である。

(a) PP test

(b) PC test

(c) CP test

(d) CC test

Fig. 6. The results of the remaining life estimation by the proposed procedure 1.

したがって, 余寿命無しと判定する能力は十分満足すべきものであるといえる。

Fig. 8 は, Fig. 6 の結果を得た時に予測された作用非弾性ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{in}$ の予測精度を示したものである。すなわち, 推定値の実験値に対す比を縦軸にとって n/N_f に対してプロットしたものである。推定値と実験値との比が 2 の点は推定値が実験値の 2 以上となった評価時点を示す。また, その比が 0 の点は余寿命が推定できなかった場合か極めて大きい余寿命を推定した評価時点を示す。図中 2 本の水平な点線が記入されているが, これらは

(a) PP test

(b) PC test

(c) CP test

(d) CC test

Fig. 7. The results of the remaining life estimation by the proposed procedure 2.

factor of 1.5 予測精度の上下限を示している。

Fig.8 の結果より、以下のことが言える。

- (1) PP 試験の場合、 $\Delta \epsilon_t$ の大小によらず予測精度は factor of 1.5 の範囲に収まっている。
- (2) PC 試験の場合、 $\Delta \epsilon_t = 1.0\%$ の場合の寿命前半および $\Delta \epsilon_t = 0.5\%$ の場合の寿命中期で危険側に外れる以外は、予測精度は factor of 1.5 の範囲に収まっている。
- (3) CP 試験の場合、 $\Delta \epsilon_t = 1.0\%$ の場合の寿命中期で予測精度が factor of 1.5 の範囲に収まる程度である。

Fig. 8. The results of estimation of the applied inelastic strain range by the proposed procedure 1.

- (4) CC 試験の場合、 $\Delta \epsilon_t = 0.4\%$ の寿命前半および $\Delta \epsilon_t = 0.5\%$ で危険側に外れる以外は、予測精度は factor of 1.5 の範囲に収まっている。

Fig. 9 は、Fig. 5 に示した他機関で測定された PP 試験中のき裂データに基づいて、手法 1 で予測した場合の余寿命 N_r と作用非弾性ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{in}$ の予測精度を示したものである。余寿命の予測精度は、すべて factor of 2 の範囲に収まっており、作用非弾性ひずみ範囲もすべて factor of 1.5 の範囲に収まっている。(Fig. 9(a) の $n/N_f = 1$ の点は寿命ゼロと見積もった点であり、表記上は factor of 2 の範囲外にある。) しかも、推定値と実験値の比は、余寿命 N_r については作用ひずみ範囲の大小によらず $n/N_f < 0.7$ の範囲で、 $\Delta \epsilon_{in}$ については $\Delta \epsilon_t$ が 1% 以上の場合すべての n/N_f に対して、ほぼ 1 に等しい。すなわち、 $\Delta \epsilon_t$ が 0.5% 以下の場合の $\Delta \epsilon_{in}$ の予測精度を除けば、その他の場合の予測精度はきわめて良好であると言える。

5 考 察

5・1 推定値が実験値に対して大きく外れる原因

Fig. 6 から Fig. 9 において、推定値が実験値に対して大きく外れるケース（推定不能も含む）は次の 3 通りである。すなわち、(1) 手法 1 の寿命初期、(2) 手法 2 による場合、(3) 寿命末期（手法 1 および手法 2 と）である。

手法 1 の寿命初期で大きく外れるのは、PP 試験以外の場合に多く、これは $\alpha = 0$ としているために、寿命初期では $2a$ と $(2a_o)_{ij}$ との差が小さいために生じた結果であり、あるいは $2a$ が $(2a_o)_{ij}$ より小さい場合は $2a = (2a_o)_{ij}$

Fig. 9. The results of the estimation of the remaining life and the applied inelastic strain range by the proposed procedure 1 applied to IHI PP test data.

として評価するとしたために生じた結果である。手法2による場合は、寿命初期、中期、後期を問わず、 $\Delta(2a)$ が極めて小さい場合でも推定計算を実行した結果である。また、寿命末期では、き裂の形状（アスペクト比）が半円形状の仮定を満たさなかったり、分布き裂が合体したりするために、推定値が実験値に対して大きく外れたものと考えられる。

5・2 手法1と手法2の予測精度の比較

そこで、手法1と手法2の2つの余寿命評価手法の予測精度は、上述のような推定値が実験値に対して大きく外れるケースや推定不能のケースを除いて、検討することにした。

Fig. 10, Fig. 11 および Fig. 12 は、 $\Delta(2a)$ が $30\mu\text{m}$ 以下や $(2a - 2a_0)_{ij}$ が $30\mu\text{m}$ 以下の場合を除き、また、寿命末期では、手法1あるいは手法2による推定余寿命が実験余寿命の1/2以下となった評価時点以降および n/N_f

> 0.9の評価時点以降を除いて、余寿命 N_r 、 $\Delta\epsilon_{in}$ および材料損傷値 n/N_f の予測精度を手法1と手法2で比較したものである。図中2本の点線はfactor of 2予測精度の上下限を示している。手法2の方が評価時点の数が手法1よりも少なくなっている。また、全般的に、手法2の方が手法1よりも安全側の予測傾向となっている。余寿命 N_r 、 $\Delta\epsilon_{in}$ 、材料損傷値 n/N_f の推定値は、手法1の場合、それぞれ、実験値の0.5～4倍、0.4～1.6倍、0.33～1.5倍の範囲にあり、手法2の場合、それぞれ、実験値の0.33～4倍、0.5～2.8倍、0.5～1.4倍の範囲にある。手法2の場合、factor of 2の精度範囲から外れるのは、PP試験の2点、CC試験の3点であり、これらの点を除けば、factor of 2の精度範囲以内での推定がなされていると言える。

5・3 予測精度に及ぼす影響因子について

将来、さらに予測精度を向上させるためには次の各項

Fig. 10. Comparison in predicting the remaining life between by the procedure 1 and by the procedure 2.

Fig. 11. Comparison in predicting the applied inelastic strain range between by the procedure 1 and by the procedure 2.

Fig. 12. Comparison in predicting the material damage between by the procedure 1 and by the procedure 2.

に記述するような検討が望まれる。

(1) クリープ疲労損傷則や材料パラメータの再検討、とくに、き裂形状を半円形状と仮定している点、 $(2a_0)_{ij}$ の値の再検討、PP試験以外は $\alpha = 0$ としている点の検討を進め、クリープ疲労損傷則をき裂形状（アスペクト比）が繰返し数とともに変化するような場合にも適用できるように修正する必要がある。

(2) Fig. 1 から Fig. 5 に示した $2a$ の測定値に測定誤差がある可能性があり、深さの測定も含め、さらに精度のよいき裂形状測定法の開発が必要である。

(3) F_{ij} を既知として求める手法が内包する誤差の検討とその改善法の検討が必要である。

Fig. 2, 3 および 4 から明らかなように、PP試験の場合を除いて、 $(2a_0)_{ij}$ より小さな $2a$ が観察されており、とくに、CP試験の場合に小さな $2a$ が観察されていることは、上記各項の検討の必要性を強調するものであろう。 α の値については、316LC 鋼の CP 試験の場合 $\alpha \neq 0$ となる結果が得られており²⁾、式 (2) および式 (10) を α を含む式に修正（一般化）することも検討する必要がある。

6 結 言

筆者らが構築した新しいクリープ疲労損傷則に基づいて余寿命を評価する方法を提案し、Mod.9Cr-1Mo 鋼の PP, PC, CP および CC 試験へ適用した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 提案手法は、表面き裂長さと繰返し数（手法 1）あるいはある繰返し数期間の表面き裂長さの変化を知る（手法 2）ことにより、余寿命、作用ひずみおよび材料損傷値を推定することができ、PP試験の場合はきわめて精度の良い推定が可能である。しかし、PC, CP および CC

試験の場合は factor of 2 予測精度を下回る場合があり、この傾向は CP 試験の場合とひずみが小さい場合に顕著であった。

(2) 測定したき裂長さと筆者らが定義する仮想初期き裂長さとの差あるいはある繰返し数期間のき裂長さ変化が $30\mu\text{m}$ 以下の場合と寿命末期には予測精度が極端に悪くなる。このような場合を除けば、提案法による余寿命、作用非弾性ひずみ範囲および材料損傷値の推定値は、実験値の 0.5 ～ 4 倍、0.4 ～ 1.6 倍、0.33 ～ 1.5 倍（手法 1）、0.33 ～ 4 倍、0.5 ～ 2.8 倍、0.5 ～ 1.4 倍の範囲内であった。

参 考 文 献

- 1) 時政勝行, 宮原光雄, 日本機械学会論文集, A-60, 591 (1994).
- 2) 時政勝行, 宮原光雄, 住友金属, 48, 20 (1996).
- 3) M. Miyahara and K. Tokimasa, MSRI, 3, 49 (1997).
- 4) 桜井茂雄, 宇佐美三郎, 梅沢貞夫, 宮田 寛, 材料, 35, 170 (1986).
- 5) 宇佐美三郎, 福田嘉男, 志田 茂, 材料, 33, 685 (1983).
- 6) 桜井茂雄, 宇佐美三郎, 宮田 寛, 日本機械学会論文集, A-53, 451 (1992).
- 7) 野中 勇, 北川正樹, 日本材料学会第 40 期学術講演会前刷集, p.237 (1991).
- 8) 野中 勇, 鳥畑政二, 木原重光, 馬木秀雄, 日本機械学会第 73 期通常総会講演会講演論文集 (II), 151 (1996) (詳細データは私信).
- 9) 野中 勇, 北川正樹, 馬木秀雄, 材料, 41, 1749 (1992).