A パラメータ法による Cr-Mo-V 鍛鋼の クリープ損傷評価における信頼性確保の検討*

生 野 健^{*1}, 福 島 一 夫^{*2}
隅 田 武 男^{*3}, 吉 川 州 彦^{*4}

Study of the Guarantee of Reliability for Estimating Creep Damage by "A" Parameter Method in Cr-Mo-V Steel Forgings

Takeshi IKUNO, Kazuo FUKUSHIMA,
Takeo SUMIDA and Kunihiro YOSHIKAWA

The "A" parameter method is frequently used to estimate creep damage of Cr-Mo-V steel forged rotors. The creep damage value estimated by this method may vary owing to the variance of data and the different means arising from different etching methods and/or the discrimination of different examiners. In this study, the variances and the means were calculated from numerous "A" parameter data of the same creep-damaged Cr-Mo-V steel forgings. Comparing these data with data from previous studies, the following results were obtained: (a) A method for estimating creep damage value which guaranteed an optional degree of safety was determined. (b) It was suggested that the percolation of grain boundaries played a large part in creep rupture of Cr-Mo-V steel forged rotors.

Key Words: Creep, Life Prediction, Statistical Treatment, Reliability, Cr-Mo-V Steel Forging, "A" Parameter, Percolation

1. 緒 言

結晶粒界に発生するクリープキャビティを観察し、キャビティ発生粒界数の全粒界数に対する比率で損傷度を表す A パラメータ法¹⁾は、蒸気タービンロータ等のクリープ損傷評価に広く用いられている。しかしこの方法は、測定値がキャビティ観察時のエッチング等に敏感で、異なる検査員の間でかなりの個人差が出ることが有るという欠点を持っており、現在、本法の実施方法の標準化²⁾が図られつつある。また、同程度の損傷でも測定箇所によって値がばらつく可能性も考えられ、さらに、材質、成分偏析や応力状態等の微妙な差が測定値にどの程度影響するかについても、十分には明らかとなっていない。そのため、タービンロータ等の重要部位の余寿命評価においては、かなり大きな安全率を用いざるを得ないのが現状である。そこで本研究は、同一のタービンロータ損傷材の A パラメータ値を多数測定することによって、測定箇所による値の差異、ならびに値のばらつきの特性を調査し、それ

に基づいて、必要な信頼性を確保するための合理的な安全率について検討し、合理的な評価法の作成を試みる。

2. A パラメータ値のばらつきの実験的調査

2.1 クリープ損傷材の作成 約14万時間使用して廃却された Cr-Mo-V 鍛鋼の高圧ロータジャーナル部より、クリープ試験片を採取した。その化学成分を表 1 に、ミクロ組織写真を図 1 に示す。また、試験片の形状・寸法を図 2 に示す。ミクロ組織写真からも分かるように、本試料は未使用材と同等と見なせるものである。

これらの試験片を単軸クリープ試験し、その破断材と、破断材の破断時間の 80%、50% 付近の試験時間でそれぞれ中断したものを作成した。試験条件、試験時間の詳細を表 2 に示す。なお、以下、これらの破断・中断材を、それぞれ 100% 損傷材、80% 損傷材、50% 損傷材と呼ぶこととする。

Table 1 Chemical composition of the rotor
used in this study. (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	N
0.30	0.34	0.75	0.010	0.006	1.14	1.24	0.27	0.004

* 原稿受付 1996 年 8 月 2 日。

*¹ 正員、関西電力(株) (〒661 尼崎市若王寺 3-11-20)。

*² 住友金属テクノロジー(株) (〒660 尼崎市扶桑町 1-8)。

*³ 関西電力(株)。

*⁴ 正員、住友金属テクノロジー(株)。

Fig. 1 Microstructures of test material.

Fig. 2 Dimensions of creep test specimen.

Table 2 Creep test conditions.

Specimen No.	Test temp. (K)	Stress (MPa)	Test duration (h)	Nominal damage (%)
1	848	176.5	6866.8	100
2	848	176.5	5377.0	80
3	848	176.5	3288.0	50

2.2 Aパラメータ測定 各試験片の縦断面面部について、外表面から一定距離の、荷重方向に平行な直線を考える。この直線を、以後、参照線 (traverse line) と呼ぶこととする。その参照線と交差する粒界上のキャビティないしは亀裂の有無を観察して、Aパラメータを測定した。参照線の位置は、2つの外表面X、Yから、それぞれ1.0 mmまでは0.2 mmピッチで、1.0 mmから5.0 mmまでは0.5 mmピッチとした。これは、表面付近の応力状態が内部と若干異なることが考えられるので、それによってキャビティ発生状況に差が生ずるか否かを見るためである。研磨は湿式研磨機等で#1200ペーパーまで磨いた後アルミナバフで仕上げ、エッチングはピクリン酸系の腐食液により行った。これをレプリカ膜に転写し、光学顕微鏡にて倍率 500倍で観察し、各参照線ごとのAパラメータ値を求めた。なお、観察位置は、試験片平行部のほぼ中央としたが、100%損傷材については、破断部付近のくびれた部分避け、中央からずらして測定した。

2.3 測定結果 各損傷材のAパラメータ測定値の平均値と標準偏差を、後述する損傷度 ϕ の推定値等とともに表3に示す。また、測定値と参照線の位置との関係を図3に、各損傷材ごとの測定値の分布をヒストグラムにまとめたものを、図4に示す。なお、外表面X、Yから距離 5.0 mmの位置の参照線は、理想的には試験片の中心線に重なるべきものだが、若干の絞りや、測定時の誤差の蓄積によるズレのため、それぞれ

別の粒界群でAパラメータを測定することとなったので、ここでは、独立なデータとして扱った。

Table 3 Results of "A" parameter measurement.

("A" parameter data for each traverse line.)

Specimen No.	1	2	3
Number of traverse line	26	26	26
Average number of observed grain boundaries ; M_{av}	118	170	132
Average value of "A" parameter ; p	0.25	0.14	0.08
Standard deviation of "A" parameter ; σ_A	0.050	0.036	0.029
Standard deviation of $B(n; M_{av}, p)$; σ_B	4.70	4.52	3.12
σ_B / M_{av}	0.040	0.027	0.024
$\sigma_A - \sigma_B / M_{av}$	+0.010	+0.009	+0.005
Life fraction; t/t_r	1.00	0.78	0.48
ϕ calculated by eq. (3)	1.00	0.66	0.49

Fig. 3 Distribution of "A" parameter values.

Fig. 4 Frequency histogram of "A" parameter values.

3. 考 察

3.1 表層部と内部の差について 図3を見ると、試験片の表面付近と中央部とで、Aパラメータ測定値に、差は認められない。表層部と内部の応力状態は、厳密に考えるなら若干の相違が有るはずだが、上記の測定結果によれば、その程度の相違が影響するほどには、キャビティ発生現象は応力に敏感でないと考えられる。

3.2 平均値と分散の損傷度依存性 表3ならびに図4に示した調査結果と、著者らの一部が以前に統計力学的解析によって得た結果³⁾とを考え合わせると、近似的には、下記のように言っても良いと思われる。すなわち、クリープ損傷度が ϕ であるCr-Mo-V鍛鋼材のAパラメータ測定値Aの分布は、二項分布 $B(n; M, p)$ 、ただし

$$A = n/M \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$p = \frac{\phi}{\phi + k} \times \exp\left(-\frac{C}{\phi}\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

n ; 損傷粒界数 M ; 観察粒界数
 $k, C > 0$; 定数

と比較すると、平均値はほぼ等しいが、ばらつき幅が大きく、その差は、損傷度 ϕ の値が大きいくほど大きな傾向にある。

ここに、 ϕ は、通常、クリープ寿命比として定義され、クリープ時間が t である中断材の ϕ は、 t を破断材の破断時間 t_r で割った値 t/t_r であるとされることが多い。しかしながら、クリープ破断時間には、かなりのばらつきが有り、 ϕ を求めるべき中断材の破断時間は、別の試験片で測定された破断時間 t_r とは異なる可能性がある。したがって、 ϕ は、厳密には、 t/t_r に等しくないと考えるべきである。すなわち表3の50%損傷材ならびに80%損傷材の t/t_r の値は、真の ϕ の値とは、若干異なっていることに注意する必要がある。

3.3 k, C の値の推定 k, C の値は、ここで得た試験データと、以前の解析に用いたデータ⁴⁾とを比較検討して、次のように推定することができる。

以前に用いたデータは、4種のロータ材から採取した試験片を、ここでの条件とは若干異なるクリープ条件で試験して破断材ならびに中断材を作成し、ここでのエッチングと同じくピクリン酸系腐食液でエッチングしてAパラメータを測定し、 t/t_r で整理したものである。それらを最尤法で(2)式の形に近似したとき、 k は、ほぼ1.0となり、また100%損傷時点での

p の値は、ここでの100%損傷材のAパラメータ平均値である0.25に、ほぼ等しい値となった。

このことから、これらのロータ材と同等のCr-Mo-V鍛鋼を、ピクリン酸系の腐食液で正しくエッチングして正しく測定する場合には、ほぼ $k=1.0$ で、100%損傷時点でのAパラメータ平均値は、ほぼ0.25となるのであろうと推定される。これらを(2)式に代入して C を求めると、 $C=0.693$ となる。すなわち、この場合に、 p を ϕ で表す式は、下記の(3)式

$$p = \frac{\phi}{\phi + 1} \times \exp\left(-\frac{0.693}{\phi}\right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

になると考えられる。

(3)式は、上記のロータ材測定と、同等のロータ材を同等の検査員が同等の測定法で測定する場合に限って、マスターカーブとして使用できる。

3.4 必要な信頼度を満足する評価法作成の試み

3.4.1 定数 k と C の解釈 以前の解析で(2)式を導き出す過程において、 k は、キャビティの検出されやすさを表すために導入された³⁾。すなわち、 k は、キャビティの検出感度に対応し、 $k=0$ の時、最高感度で、値が大きくなるほど感度が下がる。そうして、その値は、Aパラメータ測定方法、特にエッチング法と、検査員のキャビティ認識の特性に強く依存すると考えられる。一方、 C は、材料定数と考えられ、測定法や検査員に依存しない。したがって、近似的には、Aパラメータ測定値の個人差の原因は k の値が測定法や検査員によって異なるためであるとして、 k の値を調整することにより、(3)式のマスターカーブを修正することが可能である。

このことから、(3)式を求めるのに使ったデータの測定とは異なる検査員が異なる測定法でAパラメータを測定する場合でも、3.2項の記述内容は成立すると仮定の下に、次のように、若干の測定結果で補正することによって、必要な信頼度を満足する評価法とすることができる。

3.4.2 C の値が既知の場合の評価法 測定する実機のロータ材がここで試験・測定したものと同等であることが分かっている場合には、 $C=0.693$ とすることができる。したがって、 ϕ が既知の試験片の測定結果を使って k の値とばらつきを求めることにより、マスターカーブを補正できる。すなわち、 $\phi=1$ である破断材のAパラメータを、実機の測定と同等の検査員が同等の測定法で多数測定し、平均値 $A_{1.0}$ と標準偏差 σ_1 を計算すれば良い。 $\phi=1$ 、 $p=A_{1.0}$ 、ならびに $C=0.693$ を(2)式に代入することにより、 k の値

が次の(4)式の k'

$$k' = (0.5 - A_{1a}) / A_{1a} \quad \dots\dots\dots (4)$$

として求まる。したがって、 $k = k'$ と $C = 0.693$ とを(2)式に代入した下記の(5)式

$$p' = \frac{A_{1a} \times \phi}{0.5 - A_{1a} (1 - \phi)} \times \exp \left(- \frac{0.693}{\phi} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

の p' を平均値とし、標準偏差 σ_1 の正規分布を使った信頼区間の計算により、必要な信頼度を満たす損傷評価値を求めれば良い。3.2項の内容が成立するとの仮定により、同等の測定法であれば破断材の標準偏差 σ_1 が最も大きくなるので、若干安全側の評価ではあるが、少なくとも必要な信頼度を満足する評価値が得られることとなる。

この方法は、測定する実機のロータ材がここでのロータ材と同等でない場合でも、何らかの方法によってCの値が既知であれば、同様に行うことができる。

なお、実機の測定における観察粒界本数Mは、破断材の一つのAパラメータ測定の観察粒界本数 M_1 に等しくするべきである。 $M > M_1$ では、さらに安全側の評価になり、また、もし $M < M_1$ であれば、二項分布 $B(n; M, p)$ の標準偏差が $B(n; M_1, p)$ より大きくなって、必ずしも σ_1 が最大とは言えなくなるので、注意が必要である。

3.4.3 Cの値が不明な場合の評価法 Cの値も不明であれば、前項のようにkの値を求めることはできない。しかし、この場合でも、前項の方法よりさらに一層安全側にはなるが、次のようにして必要な信頼度を満足する評価値を得ることができる。

まず、測定するべき実機のロータ材と同等のCr-Mo-V鍛鋼で作成したクリープ破断材で、前項と同様に、実機の測定と同等の検査員が同等の測定法で多数のデータを測定し、その平均値 A_{1a} と標準偏差 σ_1 を求める。この A_{1a} に対して最も安全側となるkの値は何かというと、図5に示すように、 $k = 0$ である。したがって、(2)式に $\phi = 1.0$ 、 $p = A_{1a}$ 、 $k = 0$ を代入することにより求めた下記の(6)式の C''

$$C'' = \ln(1/A_{1a}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

によって、下記の(7)式の p''

$$p'' = \exp \left\{ - \frac{\ln(1/A_{1a})}{\phi} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

を平均値とし、標準偏差を σ_1 とする正規分布で、必要な信頼度を満たす損傷評価値 ϕ_0 を計算すれば、か

なり安全側の評価とは思われるが、少なくとも必要な信頼度を満足する評価値が得られることとなる。

Fig.5 Variation of the curve of equation (2) with k values.

3.5 試みた評価法の有用性 ここで得た測定結果に対して、3.4.3に記した方法で求めた、99%信頼度を保証する評価損傷度 $\phi_{99\%}$ の曲線、すなわち、下記の(8)式

$$\phi_{99\%} = \frac{\ln(1/A_{1a})}{\ln\{1/(A + 2.33 \times \sigma_1)\}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

で計算された評価曲線を、測定データとともに図6に実線で示す。ただし、50%損傷材、80%損傷材の損傷度 ϕ は、(3)式が正しいものと仮定して、(3)式のpに測定値の平均値を代入して計算し、それぞれ0.49、0.66と推定している。また、破断材の1つのAパラメータ測定の観察粒界本数 M_1 は平均118本で、50%損傷材や80%損傷材の観察粒界本数より、やや少なく、一層、安全側の評価になっている。

図6で、 $\phi_{99\%}$ の評価曲線と測定データを比較すると、損傷度の小さいところでは、やや安全側になり過ぎているようだが、大きな損傷度では、ほぼ適正と思われる。

因みに、図6の破線の曲線は、(3)式を基に、損傷度評価値を二倍した値を100%から減じて余寿命とする、いわゆるfactor of 2の精度の考え方による評価損傷度 ϕ_{12} 、すなわち下記の(9)式

$$A = \frac{\phi_{12}/2}{\phi_{12}/2 + 1} \times \exp \left(- \frac{0.693}{\phi_{12}/2} \right) \quad \dots\dots (9)$$

の曲線を示したものである。また一点鎖線は、以前に(2)式等を導く時に用いたのと同じデータを、損傷力学に基づく考えで解析し、Aと t/t_c の関係の近似式として導出された次の(10)式⁴⁾

$$t/t_r = 1 - (1-A)^{1/0.111} \quad \dots\dots\dots(10)$$

を基とした、同じくfactor of 2 の考え方による評価損傷度 ϕ_{dfr} 、すなわち下記の(11)式

$$\phi_{dfr} = 2 - 2 \times (1-A)^{1/0.111} \quad \dots\dots\dots(11)$$

の曲線である。factor of 2 の考え方は、ばらつきの大きな非破壊検査結果から余寿命を評価するときや材質のばらつきの大きい部材の余寿命評価に良く使われるが、どれだけの信頼度が保証されるのかが不明確であり、また、蒸気タービンロータ材のような比較的ばらつきの少ない部材を同等の検査員が同等の方法で測定したAパラメータ測定値に対しては、図6からも分かるように、損傷度の大きなところで著しく安全側になり過ぎるようである。

これに対して、ここで新たに提唱した評価方式により作成した(8)式の評価曲線では、大きな損傷度のところで合理的な評価を行うことが可能である。したがって、例えば、経年ロータを、定期検査によって安全を確認しながら使用し続ける場合等に、有用であると考えられる。

Fig.6 Comparison of the changes calculated by equations (8), (9), (11) and test results.

3.6 観察粒界本数の影響 Aパラメータ測定時の観察粒界本数Mは、400 本程度とすることが推奨されている²⁾。ここでは、統計的解析を行うために1つの試験片から多くの測定値を得る必要があったことと、実機での測定で400本の粒界観察が困難である場合もあることを勘案して、100～200本程度の粒界数での測定値で議論してきた。しかし、試みに、外表面X、Yからの距離が0.2～4.5 mmの24本の参照線の測定値で、3本ずつを1つにまとめてAパラメータ値を計算し、それらの8個の値の分布を調べてみると、表4に示すように、標準偏差が二項分布B(n; M, p)

に近いものとなる。このことから、次のことが考えられる。すなわち、一般に測定値のばらつきが理論的なB(n; M, p)より大きい原因の1つとして、各微小領域におけるクリープ強度の微妙な差異が考えられるが、それがばらつきに反映するのは観察粒界数が少ない時のみで、観察数が多くなって広い面積での測定になれば、それらの効果が相殺され、消えてしまうことが考えられる。つまり、100～200本程度の観察数では強度の差異の効果が残り、その3倍程度の観察本数なら、十分に平均化されて効果が消えたということなのかも知れない。表4のデータだけでは数が少な過ぎるので断定できないが、もし、もっと多くのデータによって、M≥400を満たす測定値の分布が、二項分布B(n; M, p)で近似できることが確認されるなら、さらに合理的な統計計算による余寿命評価法を作ることにも可能である。

Table 4 "A" parameter data for the sets of three traverse lines.

Specimen No.	1	2	3
Number of data	8	8	8
Average number of observed grain boundaries; M_{av3}	354	510	396
Average value of "A" parameter; p	0.25	0.14	0.08
Standard deviation of "A" parameter; σ_{A3}	0.019	0.015	0.016
Standard deviation of B(n; M_{av3} , p); σ_{B3}	8.15	7.84	5.40
σ_{B3}/M_{av3}	0.023	0.015	0.014
$\sigma_{A3} - \sigma_{B3}/M_{av3}$	-0.004	±0.000	+0.002

3.7 破断条件 3.3項において、ここで試験・測定したデータと以前(2)式等を導くのに用いたデータとから、(3)式を得た。しかし、ここでのデータと以前用いたデータとでは、クリープ試験の応力等が異なるので、もし、その両方に対して(3)式が成り立つのだとすると、一見、奇妙なことになる。すなわち、クリープ破断は、応力等には依存せず、損傷粒界率だけで決まる。より正確に言えば、荷重方向に平行な直線に交わる粒界面のグループにおける損傷粒界率が一定値 $\exp(-0.693/1) = 0.5$ に達した時に、急速に粒界破面が形成されてクリープ破断するということになる。

しかし、次のように考えれば、近似的には、このようなことが実際に起こる可能性もあると思われる。すなわち、損傷粒界のつながりがクリープ破断に本質的な役割を果たす、言い換えれば粒界破面の形成に一種

のパーコレーション現象⁷⁾が関わっていると考えるのである。たとえば、損傷粒界では引き剥がしに対する抵抗は依然大きい粒界すべりに対する抵抗が著しく減じていると仮定するなら、損傷粒界のつながりが小さく、周りを健全な粒界に取り囲まれているうちは健全粒界がすべりを拘束して安定で、多数の損傷粒界がつながって、いわゆるパーコレーション・クラスターとなれば、不安定な粒界すべりを生じて損傷粒界領域が拡大し、急速に粒界破面を形成する、というようなことも考えられないことはない。実際、上記の破断を起こす損傷粒界率の値 0.5 が、2 次元三角格子のサイト過程の臨界浸透確率の値に一致していることは、興味深い。3 次元粒界ファセットを応力軸に垂直な面に投影した 2 次元粒界ファセット面⁶⁾が、図 7 の破線のような蜂の巣状に近似できるなら、それらのつながりは 2 次元三角格子のサイト過程で表せるからである。

この、粒界破面形成は一種のパーコレーション現象であるとする考えは、いまだ十分議論されたものではなく、また、従来の損傷力学におけるクリープ破断の考え方、すなわち、損傷粒界率とは有効断面積の減少を表すものであるとして解析する考え方⁷⁾と著しく異なっているが、一部の材料のクリープ破断に対しては近似的に成り立つ可能性があると思われ、今後、さらに検討すべき課題であるとする。

Fig. 7 Triangular lattice on the honeycomb lattice representing grain boundary facets.

3.8 k 、 C が変数である可能性 これまで、(2) 式の k 、 C は、定数であるとして議論してきた。しかし、厳密に考えるなら、これらが、若干変化することは、十分有り得る。すなわち、加熱時間の違いによる金属組織変化の差により、同等の検査員が同等の方法で測定しても、 k の値が若干変わることは十分考えられ、また、今までのデータだけで C が定数と断言するのも無理があるかも知れない。

もし、 k 、 C が定数でなく、そのことが結果に重大な影響を与える可能性が、例えば 0.1% 有るのであれば、

3.4 項に記した方法で 99.9% の信頼度を満足したつもりでも、実際は、 $(100 - 0.1)\% \times 99.9\%$ 、すなわち、99.8% の信頼度しか保証されないこととなる。

したがって、3.4 項に記した方法も、厳密に考えるなら、完全に信頼度を保証する方法とは言えない。特に重要な部位への適用を図るには、さらに多くのデータと解析が必要と思われる。

4. 結 論

同一のタービンロータ損傷材の A パラメータ値を多数測定することによって、値のばらつきの特性を調査し、下記の結果を得た。

- (1) Cr-Mo-V 鍛鋼の実機ロータの A パラメータ測定値から、検査員の個人差や、ばらつきを補正・考慮して、必要な信頼度を満足する損傷評価値 ϕ を得ることは、可能である。すなわち、実機と同等材のクリープ試験破断材を、実機の測定と同等の検査員が同等の方法で多数測定して得た A パラメータの平均値を A_{1a} 、標準偏差を σ_1 とするとき、真のクリープ寿命比 ϕ に対して次の p 値

$$p = \exp \left\{ - \frac{\ln (1/A_{1a})}{\phi} \right\}$$

を平均値とし、標準偏差を σ_1 とする正規分布の信頼区間によって、必要な信頼度を満たす ϕ を決定すれば良い。

- (2) Cr-Mo-V 鍛鋼のキャビティ型クリープ破断においては、損傷粒界のパーコレーション現象が、本質的な役割を果たしている可能性がある。

参 考 文 献

- (1) Cane, B. J. and Townsend, R. D. : Proc. ASM Material Seminar, Flow and Fracture at Elevated Temperature., (1983), 279.
- (2) 大南, 新谷, 田中, 機講論, No. 930-73, (1993), 476-477.
- (3) 生野, 隅田, 後藤, 角屋, 機論, A-61, (1995), 389-394.
- (4) 角屋, 後藤, 材料, 41-471, (1992), 1736-1741.
- (5) たとえば, 小田垣, パーコレーションの科学, (1993), 1-29, 裳華房.
- (6) 多田, 周, 北村, 大谷, 材料, 44-495, (1995), 84-89.
- (7) Viswanathan, R., Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components., (1989), 85-86. ASM INTERNATIONAL.