腐食疲労の寿命予測†

松 田 昭 三* 岡 崎 章 三* 長 谷 川 潔**
尾 野 英 夫** 仁 瓶 寛 太**

Prediction of Corrosion Fatigue Life

by

Shozo MATSUDA, Shozo OKAZAKI, Kiyoshi HASEGAWA,
Hideo ONO and Kanta NIHEI

(Technical Institute, Kawasaki Heavy Industries Ltd., Akashi)

It can be regarded that the corrosion fatigue life consists of three processes; the growth of corrosion pits, the initiation of fatigue cracks from these pits and the propagation of fatigue cracks. Especially, the fatigue crack propagation life for a member subjected to considerably fast stress repetition, such as a turbine blade, is considered to be extremely short and sometimes neglected compared to other lives. The corrosion fatigue life in such a case may be estimated by predicting the corrosion pit growth behavior and the critical pit depth of fatigue crack initiation with a help of the fracture mechanics technique.

It is made clear in this paper that the life predicted, regarding the corrosion pit as a micro-crack, is in good agreement with the empirical results as well as that predicted by means of the conventional method proposed by the authors.

(Received Feb. 1, 1984)

キー・ワード：腐食疲労，寿命予測，タービン翼，破壊力学

1 緒 言

腐食環境下で使用する機械部品の疲労強度設計では、たとえばタービン翼の場合、耐用年数を約10年と考えると、翼の固有振動数が大きいために繰返し数でいえば $10^{10} \sim 10^{11}$ となり、こうした長寿命域の腐食疲労強度の把握が特に必要である。一方、腐食疲労について長時間試験することが容易でないため、現在これについての資料は非常に少なく、腐食疲労を考えて設計しようとすると、その部材が長時間においてどの程度の強度を有するかを定量的に把握することが難しい。したがって、その部材の許容応力および安全率をどの位にとれば良いかを決定することが現状では非常に困難な場合が多く、精度の良い腐食疲労寿命推定方法の確立が急がれている。

そこで、本報では、タービン翼部材を対象に、長寿命域における腐食疲労強度を、ピットの成長を考えた破壊力学的手法によって推定する方法を試み、実験値と比較することにより、その妥当性を検討した。この方法の基本的考え方は、河合らによってすでに報告さ

れている。しかしながら、河合らが提案した方法は巨視的き裂の $4K_{th}$ を使う推定方法であるので、微小なピットからき裂が発生すると思われる実際の場合と異なると考えられる。そこで、本報では、ピットを微小き裂と考えた破壊力学的手法により、具体的に寿命を推定し実例と照合することにより、その妥当性を確認した。また、短時間寿命の試験結果を用いた従来の筆者らの推定法により得られた結果についてもあわせて比較検討した。

2 長寿命域の腐食疲労強度を破壊力学的手法を用いて推定する方法についての考え方

ここで対象としたタービン翼の耐用年数における応力繰返し数は固有振動数が高いため $10^{10} \sim 10^{11}$ と非常に大きい。このような長期間腐食環境下にさらされた場合、腐食ピットの成長により、疲労き裂の発生する限界応力が低下し、かなり低い応力においても疲労破壊を起すことが予測される。またき裂の進展速度はき裂が進展を開始すれば間もなく $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{mm/cycle}$ 以上となるため、き裂の進展する期間は進展に伴う応力の再分配による応力緩和がなければ、たかだか $10^7 \sim 10^8$ 回程度までと考えられる。このため長寿命域の腐食疲労破壊においては寿命のほとんどがピットの成

† 原稿受理 昭和59年2月1日

* 正 会 員 川崎重工業(株)技術研究所 明石市川崎町

** 川崎重工業(株)技術研究所 明石市川崎町

Fig. 1. Flowchart for prediction of corrosion fatigue S-N diagram.

長に費やされているものと考えられる。

Fig. 1 に腐食ピットの成長を考えた腐食疲労強度推定手順を示す。すなわち、

(1) 大気中における S-N 線図を求める (Fig. 1 (a)).

(2) 腐食環境下におけるピットの成長線図を求める (Fig. 1 (b)). ピットの成長についてはまだ定説はないようであるが、ここでは、ピット深さ d と腐食期間 t の関係は河合らが報告している次式を用いる。

$$d = C_p t^{m_p} \quad (1)$$

ただし、 $m_p = 1/2 \sim 1/3$, C_p : 定数

(3) ピット深さとそのピットを有する部材の疲労限 σ_{ws} の関係を求める (Fig. 1 (c)). いま、ピットをき裂と考え、その応力拡大係数 K と応力 σ およびピット深さ d の間に、

$$K = \sigma \cdot g(d) \quad (2)$$

の関係があると仮定する。その場合、き裂を巨視的き裂と考えると、疲労限 σ_{ws} は

$$\sigma_{ws} = \frac{AK_{th}}{2} \cdot \frac{1}{g(d)} \quad (3)$$

となる。しかしながら、実際には長寿命域で測定されるタービン翼のピット深さは非常に小さいので、ここでは次式で近似する。

$$\sigma_{ws} = \frac{AK_{th}}{2} \cdot \frac{1}{g(d+a_0)} \quad (4)$$

ここで、 AK_{th} はき裂進展下限界値 (応力拡大係数範囲), また a_0 は次式を満足する量である。

$$AK_{th} = 2\sigma_w \cdot g(a_0) \quad (5)$$

ただし、 σ_w は平滑材の大気中の疲労限である。

(4) 式 (1) を (4) に代入することにより腐食時間 t と σ_{ws} の関係が得られる (Fig. 1 (d)). これは言わば時間 t の腐食を受けた腐食材の疲労限と考えられる。

(5) このような腐食材の S-N 線図が、大気中の S-N 線図に平行に低下すると仮定することにより、腐食材の腐食時間 t に対する S-N 線図 (t -S-N 線図) が得られる (Fig. 1 (e)).

(6) ここで腐食疲労強度が同じ大きさのピットを有する腐食材の疲労強度と等価であると仮定すれば、腐食時間 t_i に対する S-N 線図と、 t_i に対する繰返し数 $N_i (=ft_i)$ の交点を結ぶことにより、腐食疲労強度の

Table I. Chemical compositions of materials tested.

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Nb+Ta
12 CrMoWV	0.23	0.35	0.73	0.018	0.003	0.61	12.27	0.82	0.27	—	0.81	—
13 CrMo	0.14	0.29	0.57	0.019	0.003	0.23	12.01	0.23	0.03	0.04	—	—
SUS 630	0.04	0.32	0.42	0.020	0.003	4.56	15.64	—	—	3.48	—	0.23

Table II. Mechanical properties and heat treatment of materials tested.

Material	Yield strength MPa	Tensile strength MPa	Elongation %	Reduction of area %	Heat treatment
12 CrMoWV	731	934	22.8	68.3	1080°C×1.5 hr A.C. 980°C×1.75 hr O.C. 715°C×3.0 hr W.C.
13 CrMo	584	781	26.1	69.8	960°C×0.5 hr O.C. 700°C×1.5 hr A.C.
SUS 630	917	1047	23.3	67.0	1050°C×2 hr W.C. 650°C×5 hr A.C.

Fig. 2. Fatigue test specimen.

Fig. 3. Fatigue crack propagation specimen.

推定 $S-N$ 線図が得られる (Fig. 1 (f)). タービン翼のように繰返し速度の速い腐食疲労強度の推定には全寿命に占めるき裂の進展期間は長寿命域ほど小さいため, この仮定は長寿命域ほど成立しやすいものと考えられる.

3 供試材と実験方法

3.1 供試材および試験片

供試材は 12 CrMoWV 鋼, 13 CrMo 鋼および SUS 630 鋼で, その化学成分を Table I に, また機械的性質および熱処理条件を Table II に示す. 腐食疲労試験片および腐食材の疲労試験片は Fig. 2 に示す切欠き試験片で, 応力集中率 K_t は 1.36 である. また $4K_{th}$ は Fig. 3 に示す面内曲げ試験片を用いて求めた.

3.2 実験方法

3.2.1 腐食疲労試験および腐食材の疲労試験

腐食疲労試験は, Fig. 2 に示す試験片を用いて, 片持式回転曲げ腐食疲労試験機 (繰返し速度 1800 rpm) により, 腐食液を試験部に滴下して実施した. 腐食液は, Cl^- イオンを 10 000 ppm 含んだ水溶液で, Cl^- イオンの調整は蒸留水に NaCl を添加することにより行った (約 1.7% NaCl 水溶液に相当). ここで, 腐食液の温度は滴下部で 50℃ 一定とし, 滴下量は約 3 cc/min とした.

また腐食材の疲労試験については, 実機内に Fig. 2 の試験片を一定期間放置することによって腐食材を作り, 大気中で疲労試験を行った.

3.2.2 疲労き裂進展試験

疲労き裂進展試験は面内曲げで $4K$ 漸減試験により行った. き裂長さの測定は, 大気中と腐食液中のいずれの試験も, レプリカ法とコン

プライアンス法によって行った. なお, 応力拡大係数範囲 $4K$ の算出は次式を用いた.

$$4K = 4\sigma \sqrt{\pi a} \cdot F\left(\frac{a}{W}\right) \quad (6)$$

ただし, 4σ : 曲げ応力範囲

W : 板幅

a : 試験片端部からのき裂長さ

ここで,

$$F(\xi) = \sqrt{\frac{2}{\pi\xi} \cdot \tan \frac{\pi\xi}{2} \cdot \frac{0.923 + 0.199 \left[1 - \sin\left(\frac{\pi\xi}{2}\right) \right]^4}{\cos\left(\frac{\pi\xi}{2}\right)}} \quad (7)$$

ただし, $\xi = \frac{a}{W}$

なお, 腐食液は, 3.2.1 項で示したものと同一の溶液で, 試験部に滴下して試験を実施した. また繰返し速度は 60 cps である.

4 実験結果および腐食疲労強度の推定

4.1 腐食疲労試験結果およびき裂進展試験結果

12 CrMoWV 鋼, 13 CrMo 鋼および SUS 630 鋼の腐食疲労試験結果を, それぞれ Fig. 4, 5, 6 に示す. 各材質とも腐食疲労強度は大気中よりも低く, 10^7 あるいは 10^8 以上でも破断する結果が得られた.

つぎに, 供試材の腐食環境下におけるき裂進展試験結果を Fig. 7, 8, 9 に示す. 応力比 $R=0$ においては, 各材質とも荷重速度が 60 cps では低 $4K$ 領域を除いて大気中と腐食液中で差はみられなかった. $4K_{th}$ については, 12 CrMoWV 鋼および SUS 630 鋼では大気中と腐食液中でほとんど差がみられないが, 13 CrMo 鋼では腐食液中の方が大きくなった. 13 CrMo 鋼の場合, 腐食液中で行った試験片では腐食生成物の付着が激しく, くさび効果により da/dN の遅延現象をひきおこしたのと考えられる. $R=0.5$ の場合は, 腐食環境下において $4K_{th}$ が $R=0$ に比べて下がる傾

Fig. 4. Corrosion fatigue test results and predicted lives for 12 CrMoWV steel.

Fig. 5. Corrosion fatigue test results and predicted lives for 13CrMo steel.

Fig. 6. Corrosion fatigue test results and predicted lives for SUS630 steel.

Fig. 7. da/dN - ΔK diagram for 12CrMoWV steel.

向を示した。3種類の材質に対する腐食条件下での ΔK_{th} を R に対して示したのが Fig. 10 である。一般に大気中では、

$$\Delta K_{th} = (1-R)^n \cdot \Delta K_{th}(R=0) \quad (n: \text{定数}) \quad (8)$$

で表されるが、これを考慮に入れて次の式で近似した。

$$\Delta K_{th} = 6.2 \left(\frac{1-R}{2} \right)^{0.5} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (9)$$

4.2 破壊力学的手法を用いた推定結果

いま腐食ピットが十分小さく、半無限体の表面にある半円形き裂に近似でき、また応力こう配も無視できるものと仮定する。このような仮定のもとでは、式(2)に示す K は

$$K = 2\sigma \sqrt{\frac{d}{\pi}} \quad (10)$$

で近似できる⁹⁾。したがって ΔK は

$$\Delta K = 4\sigma_a \sqrt{\frac{d}{\pi}} \quad (11)$$

ただし、 σ_a : 応力振幅

であり、式(11)と(5)より、 a_0 は次式で得られる。

$$a_0 = \left(\frac{\Delta K_{th}}{4\sigma_w} \right)^2 \pi \quad (12)$$

一方、ピットの成長速度は式(1)から

$$d = C_p N_f^{m_p} \quad (13)$$

ただし、 $C_p = \frac{C_p}{f^{m_p}}$

$N_f = ft$ (f : 繰返し速度)

である。

実際にはピットの成長速度は応力の影響を受け、高応力ほど成長速度は速いものと考えられるが、長寿命側では応力が低くなるため、この影響は小さいと考えて無視した。

したがって腐食材の疲労限は式(4)、(11)および(13)から

$$\begin{aligned} \sigma_{ws} &= \frac{\Delta K_{th}}{4} \sqrt{\frac{\pi}{d+a_0}} \\ &= \frac{\Delta K_{th}}{4} \sqrt{\frac{\pi}{C_p N_f^{m_p} + a_0}} \end{aligned} \quad (14)$$

Fig. 8. da/dN - ΔK diagram for 13CrMo steel.

Fig. 9. da/dN - ΔK diagram for SUS 630 steel. Fig. 10. Relation between ΔK_{th} and stress ratio R .

となる。

ここで、大気中の $S-N$ 線図は

$$\sigma_a = \sigma_w \quad (N_f \geq N_w) \quad (15)$$

$$\sigma_a^\alpha N_f = C \quad (N_f \leq N_w) \quad (16)$$

ただし、

α, C : 定数

で表されるから、腐食材の大気中の疲労強度 σ_{ac} は

$$\sigma_{ac} = \sigma_{ws} = \frac{\Delta K_{th}}{4} \sqrt{\frac{\pi}{C_p N_f^{m_p} + a_0}} \quad (N_f \geq N_w) \quad (17)$$

$$\sigma_{ac} = \left(\frac{N_w \sigma_{ws}^\alpha}{N_f} \right)^{1/\alpha} \quad (N_f \leq N_w) \quad (18)$$

となる。なお、腐食ビットが応力集中あるいは曲げ応力によって応力こう配に対し無視できない程大きくなった場合、式(10)は成立しなくなるが、 σ として表面の公称応力をとれば K_t は過大評価となるため式(17), (18)は安全側の評価を与える。

以下に、タービン翼材の長寿命域の腐食疲労強度の推定を上記の手順で試みた。

まず、各材質について、大気中における切欠き材の疲労限 σ'_w を求め、 K_t の補正を行って a_0 を求めた

Table III. σ_w and a_0 .

Material	Fatigue limit in air		a_0 mm
	Notched specimen σ'_w MPa	Smooth specimen σ_w MPa	
12 CrMoWV	363	494	0.0309
13 CrMo	294	400	0.0472
SUS 630	441	600	0.0210

($\sigma_w = K_t \cdot \sigma'_w$)

(Table III). また m_p は $1/2$ あるいは $1/3$ とし、 C_p は $N_f = 10^7$ における実験結果と推定 $S-N$ 線図が一致するように定めた。 a_0, C_p の値を式(17), (18)に代入して得られる腐食材の疲労強度線図をもとに、腐食疲労の $S-N$ 線図を推定した。その結果、12 CrMoWV 鋼、13 CrMo 鋼 および SUS 630 鋼について、それぞれ Fig. 4, 5, 6 に示す。 $m_p = 1/2 \sim 1/3$ にすれば推定結果と実験結果は比較的良く一致する。

4・3 短時間寿命の試験結果を用いて推定する従来の方法との比較

Fig. 4, 5 および 6 において実線で示した腐食疲労強度線図は従来の方法で推定したものである。すなわち、腐食疲労強度 σ_{ac} は腐食時間 t , 繰返し数 N_f との間には、

$$\sigma_{ac} = \frac{\sigma_a}{1 + B t^p N_f^q} = \frac{\sigma_a}{1 + B N_f^{p+q} t^p} \quad (B, p, q : \text{定数}) \quad (19)$$

なる関係があるものとする、これまでに行った炭素鋼、ステンレス鋼の結果が良く説明できた。ここで実際に寿命を推定するにあたっては、式(19)をもう少し簡単な式とし、次式で表したものをを用いることとする。すなわち、

$$\sigma_{ac} = \frac{\sigma_a}{1 + B' N_f^{m'}} \quad (20)$$

ただし、 $B' = \frac{B}{f^p}$, $m' = p + q$

とする。繰返し数 $N_f = 10^7$ での強度低下率と m' の関係について整理すると Fig. 11¹¹⁾ の結果となる。Fig. 11 において、横軸に大気中の疲労限 σ_w に対する $N_f = 10^7$ での腐食疲労強度 σ_{wc} の比 (σ_{wc}/σ_w) をとり、縦軸に m' をとり直線回帰を行うと、

$$m' = -1.24 \left(\frac{\sigma_{wc}}{\sigma_w} \right) + 1.11 \quad (21)$$

ただし、 $0.2 \leq \frac{\sigma_{wc}}{\sigma_w} \leq 0.8$

と表される。つぎに B' の値は $N_f = 10^7$ で大気中と腐食環境中での疲労強度が明らかとなるので、式(20)より

$$B' = \frac{\frac{\sigma_w}{\sigma_{wc}} - 1}{10^{7m'}} \quad (22)$$

と表される。これら m', B' の値を式(20)に代入すれば

Fig. 11. Relation between m' and σ_{wc}/σ_w .

Fig. 12. Example of pits in corroded SUS 630 steel for 6 months.

腐食疲労強度線図が求められる。

この結果, Fig. 4, 5, 6 に示すように式(20)で推定した $S-N$ 線図と破壊力学手法を用いて推定した $S-N$ 線図が比較的良好に一致することが明らかとなった。

5 長寿命域への腐食疲労強度の推定

5.1 腐食材疲労試験結果についての検討

実機内において 3～12 か月間腐食環境下にさらした試験片について, 大気中で疲労試験を実施した。Table IV に腐食材の疲労限 σ_{ws} , および SEM により実測された腐食ピット深さ d を示す。また Fig. 12 は SUS 630 鋼の 6 か月腐食材のピットの一例である。Table IV 中には

$$\Delta K_{th1} = 4 K_t \sigma_{ws} \sqrt{\frac{d}{\pi}} \quad (23)$$

$$\Delta K_{th2} = 4 K_t \sigma_{ws} \sqrt{\frac{d+a_0}{\pi}} \quad (24)$$

の値を示すが, ΔK_{th1} は $3.3 \sim 6.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ とばら

きが大きいのに対し, ΔK_{th2} は $5.6 \sim 7.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ とばらつきは小さく, またその平均値 $6.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ は式(9)に $R=-1$ を代入して得られる $\Delta K_{th} = 6.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ともほぼ良く一致しており, 式(4)の仮定が妥当であることを示している。

5.2 長寿命域の腐食疲労強度の推定結果

5.1 節で示した実機での腐食材のピットの成長状況から, 長寿命域における腐食疲労強度を推定した。ピットの成長速度は式(13)における m_p を $1/2$ とし, 6 か月腐食材のピット深さから C_p を求めた。ただし, 翼の振動数は 500 Hz とした。Fig. 13, 14 および 15 はこのようにして求めた実機環境中における推定 $S-N$ 線図である。図中には腐食材の疲労限を腐食期間に相当する繰返し数の位置にプロットしている。また腐食材は $K_t=1.36$ の切欠き試験片での実験データであるため応力は K_t 倍してある。Fig. 13, 14, 15 に示すように, 推定寿命と実験データは良く一致しているが, これは Table IV における ΔK_{th2} が仮定した $\Delta K_{th} =$

Fig. 13. Predicted corrosion fatigue life and fatigue limit of corroded specimen (12CrMoWV).

Fig. 14. Predicted corrosion fatigue life and fatigue limit of corroded specimen (13CrMo).

Table IV. Test results of corroded specimens.

Material	Fatigue limit σ_{ws} MPa			Pit depth d μm		ΔK_{th1} $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$		ΔK_{th2} $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	
	Corrosion period							month	
	3	6	12	3	6	3	6	3	6
12CrMoWV	245	196	—	20	80	3.3	5.4	5.6	6.5
13CrMo	196	196	—	55	100	4.5	6.0	6.4	7.5
SUS 630	343	245	196	25	60	5.3	5.8	7.4	6.9

Fig. 15. Predicted corrosion fatigue life and fatigue limit of corroded specimen (SUS 630).

Fig. 16. Predicted corrosion fatigue life and actual data.

6.2 MPa $\sqrt{m}$ に近いことから当然予測される結果である。さらに平均応力による強度の低下は応力比 R が一定の場合は R を用いて、式(9)から $4K_{th}$ を求め、これを式(7)に代入することにより得られる。しかしながら、平均応力が一定のとき、 σ_{ws} が求まって始めて R が求まるため、解が収束するまで繰返し計算を行う必要がある。Fig. 16 は $\sigma_m = 324$ MPa として Fig. 13 を修正した推定線図である。図中の○印は、過去に同程度の平均応力がかかり、比較的高い応力集中をもつ翼根部でき裂が認められたものについて整理したデータである。図にみられるように、予測寿命と実際のデータはほぼ良い対応を示しており、長寿命域の強度を推定する方法として妥当であることを確認した。

6 結 言

腐食疲労の過程を、ピットの成長とき裂の発生およ

びき裂の進展過程から成り立つと考えた場合、本報でとりあげたタービン翼のように繰返し速度の比較的高速の部材のき裂進展寿命は他の寿命に比べて短く無視できるものと考えられる。このような場合の寿命推定はピットの成長挙動、および破壊力学的手法を用いて求めたピットのき裂発生限界深さを推定することにより可能となる。本報では、ピットを微小き裂と考え、き裂限界深さを求めて、長寿命域の腐食疲労強度を推定し、腐食材の試験結果および実例と対応させることにより、その寿命推定法がほぼ妥当であることを明らかにした。

なお、今後の課題として、さらに長寿命域の実験結果を増やすことにより、本推定方法の妥当性について検討していくつもりである。

(昭和59年3月6日 腐食防食部門委員会第119回例会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 例えば、中村 宏, 馬越立郎, 堀川 武, 岡崎章三, 材料, **24**, 9 (1975).
- 2) 河合末男, 笠井憲一, 日本機械学会講演論文集, No. 830-2, 80 (1983).
- 3) 岡崎章三, 中村 宏, 恒成利康, 材料, **28**, 887 (1979).
- 4) M. H. ElHaddad, N. E. Dowling, T. H. Topper and K. N. Smith, Int. J. of Fracture, **16**-1, 15 (1980).
- 5) R. E. Peterson, "Stress Concentration Factors", p. 71 (1973).
- 6) 岡村弘之, "線形破壊力学入門", p. 218 (1976) 培風館.
- 7) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 大西一男, 材料, **17**, 160 (1968).
- 8) 太田昭彦, 佐々木悦男, 小管通雄, 日本機械学会論文集, **43**, 3179 (1977).
- 9) 石田 誠, "き裂の弾性解析と応力拡大係数", p. 214 (1976) 培風館.
- 10) 岡崎章三, 中村 宏, 材料, **24**, 15 (1975).
- 11) 岡崎章三, 長谷川潔, "長寿命域の腐食疲労強度を推定する考え方と若干の実験結果", 日本機械学会 P-SC41 分科会資料 (1982).