腐食疲労強度推定に関する一実験*

中村 宏** 岡崎章三** 高杉俊二***

An Experiment on the Estimation of Corrosion Fatigue Strength

By Hiroshi Nakamura, Shozo Okazaki, Shunji Takasugi

The method of estimation of the corrosion fatigue strength was proposed on the occasion of loading the constant stress, or varying stress.

As a result, the estimated corrosion fatigue strength was considerably corresponded to the experimental results under the experimental conditions within the limit of this paper. Especially, when the constant stress was loaded, it was founded that on the corrosion fatigue test by combination the low carbon steel with the 3% saline solution, in spite of the dimension of the specimen, loading condition, and repeated rate, the estimated corrosion fatigue strength was expressed by

$$\sigma_{ac} = \frac{\sigma_a}{1 + 2.16 \times 10^{-4} \cdot N_f^{0.75} / f^{0.39}}$$

, when σ_a is the fatigue strength in air, f is the repeated rate (cpm).

1. 緒 言

機械部品および構造部材の破壊の大部分は疲労破壊であるが、部材の疲労強度を考慮して設計する場合、その部材がおかれる環境の影響を無視することはできない。

腐食性環境中で同時に繰返し応力を受けるとき疲労強度は著しく低下し、これを腐食疲労と呼んでいるが、腐食疲労強度に影響する因子はいろいろあり、実際の機械部品においては、それぞれの因子が複雑に作用することで疲労破壊を生じる。

腐食疲労に関する研究は古くから行われており、その設計資料としては、最近、機械学会より「金属材料、疲れ強さの設計資料(Ⅲ)環境効果」¹⁾が発刊され、腐食疲労に関するいろいろの実験結果について整理されている。

一方、設計の立場から考えると、これらいろいろの結果をどのように取り入れて部材の寿命を推定し、設計すればよいか大きな問題である。また、実際の機械部品に腐食疲労強度が問題となるのは、部材が非常に長時間、腐食環境下にさらされる場合である。しかしながら、腐食疲労試験を非常に長時間実施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い。そのため、腐食疲労を加味した設計をする場合、使用する部材が長時間腐食環境下にさらされたとき、どの程度の腐食疲労強度を有するかを、定量的には握ることが現状で

は非常に困難である。

そこで筆者らは、実験室で比較的短時間で得られた腐食疲労の実験結果を、どのようにして長寿命域まで拡大して強度を推定すればよいか注目し、いろいろの条件下における腐食疲労強度推定法について、検討した結果を報告する。

2. 腐食疲労強度推定についての基本的な考え方

腐食疲労をうける部材の強度を考える場合、腐食疲労に影響する因子を一つずつ取り出し、それについて系統的に実験をして解決していく方法が最良と考えられるが、とくに、腐食疲労においては時間の因子が非常に大きいために、正攻法でやっていたのでは一生かかっても解決できる問題ではないと考えられる。このため筆者らは、上記で述べた方法も考慮しながら、腐食疲労をうける部材の強度推定について検討した。

まず、その基本的な考え方を図1に示す。ここで、pHは腐食環境、 σ は応力繰返し(疲労)を示す。一般に、実機の部材は図1の最上段に描いたように、腐食環境、および応力ともに変動し、その変動は両者ともランダムであると考えられる。しかるに、実際にはこうした状態のもとでの部材の腐食疲労寿命を推定する必要があるが、現時点では困難である。そこで、これをさらに細かく分解してみると、狭い範囲では腐食環境が変化する(以下、腐食変動と呼ぶ)なかで、応力繰返しの変動(以下、応力変動と呼ぶ)のパターンが①に示すごとく、ゼロクロスして変動する場合、また、広い範囲で考えた場合、応力

* 原稿受付 昭和51年8月2日

昭和51年春季学術講演(昭和51年5月14日)

** 正会員 川崎重工業(株)技術研究所(明石市川崎町1-1)

*** 川崎重工業(株)技術研究所(明石市川崎町1-1)

図1 腐食疲労強度推定に関する実験系統図

変動が②に示すごとく、平均応力の変動する応力変動のパターンとして分解できよう。さらに、①は非常に特殊な例として、③に示すごとく単純な腐食変動の中で応力振幅が、一定の繰返しを受ける場合（以下、一定応力と呼ぶ）、あるいは、④に示すごとく単純な腐食変動のなかで応力が二段多重、あるいは多段多重の規則的な応力変動をうける場合（以下、変動荷重と呼ぶ）とにわけられよう。③のパターンの寿命推定としては、③は空中で一定応力をうける疲労と、腐食環境下で一定応力をうける疲労との交互試験と考えて⑥のように分解し、それぞれのS-N線図から寿命を推定する方法が考えられる。

この場合、一定応力下での腐食疲労(⑩)の長時間のもののS-N線図が必要であるが、そのS-N線図を求める

手段として⑬(腐食材の疲労、あるいは腐食-疲労間欠試験(後述))の方法を用いて推定する(後述)。また、④の単純な腐食変動のなかで応力が変動するような場合も同様に考えて、空中、および腐食環境下のそれぞれ単独の環境下で、変動荷重をうける場合の寿命曲線を用いて寿命を推定する。この場合、腐食環境で変動荷重をうける場合(⑫)の強度は、⑭の方法を用いて推定する方法と、⑨、⑩、⑪を使用して推定する方法が考えられる(後述)。

次に、②のパターンの特殊な例として⑤の場合を考える。すなわち、⑤は単純な腐食環境下で二重重畳波形の応力変動をうける場合で、この寿命推定としては、それぞれの環境下で重畳波形をうける寿命曲線を用いて推定

する(⑧)。さらに、腐食環境下で重畳波形をうける場合の寿命推定としては⑬、あるいは⑭に分解して考える。⑬は最大応力と重畳する二次応力との変動荷重と考える場合²⁾、⑭は最大応力と重畳する応力が変動する場合を示す。⑬はさらに取扱いを簡単にとすると、最大応力、および重畳する応力の繰返し速度を同じと考える(⑰)(後述)。この場合、腐食疲労においては繰返し速度の影響は無視することはできないので、⑬は⑱のように分解して速度効果を取扱う。また、⑭の場合は⑲のように考えて、それぞれの平均応力の単純な変動として取扱う。⑲は⑳のように分解し、㉑のそれぞれの平均応力下での腐食疲労は㉒のように分解して考える。

以上のように考えると、腐食疲労における基本的なパターンが明確になるので、それぞれ単純化された基本的パターンについて十分な基礎実験を行い、分解したパターン相互の関連を確立していくことで、部材の寿命推定をしていくことが、現時点では可能なことではないかと考えている。実際には、この図が示すように単純に分解できるものではないと考えられるが、単純な波形による腐食疲労そのものも解決するために長年月かかるものであるから、まず、この図のように分解して大体の傾向をつかみ、その中で主要な部分の問題を系統的に実験をしていくことが、この問題を解決するための近道になるのではないかと考えている。

本報では、図1の腐食疲労の基本的パターンのうち、腐食環境下で一定応力をうける場合、および二段多重の変動荷重をうける場合の腐食疲労強度推定法についての考え方、および実験結果について示す。

3. 基本的パターンによる腐食疲労強度推定

3.1 一定応力をうける場合の腐食疲労強度推定

腐食環境下における部材の寿命推定をする場合、まず、基本的には腐食環境下で一定応力をうける部材のS-N線図を一般的に求めることであろう(図1の⑩)。しかも、その場合、空中の疲労と異なって腐食疲労においては、明確な疲労限は存在せず、非常に小さい応力でも長時間繰返せば破断に至る可能性があるため、そのS-N線図を非常に長い繰返し数範囲まで定量的に求めることが必要である。これについての一試案を以下に述べる。

図2は空中、および腐食環境下で一定応力をうける場合の、それぞれのS-N線図を模型的に描いたものである。ここで、腐食疲労による強度低下は、腐食と疲労によってできる腐食痕による切欠き効果³⁾ K_c に依存すると仮定する。すなわち、図2において、いま任意の繰返し数 N_f における空中の強度(⑥)を σ_a 、腐食疲労強度(⑦)を σ_{ac} とすると、 K_c は

$$K_c = \frac{(\text{腐食をうけないときの応力 } \sigma_a)}{(\text{腐食をうけたときの応力 } \sigma_{ac})} \quad (1)$$

と定義する。 K_c は腐食時間、応力繰返しの相互作用によ

図2 S-N線図(一定応力)

って変化するとし、一般には次の関係があるものとする。

$$K_c = 1 + B \cdot t_0^{n_1} \cdot N_f^{n_2} \quad (2)$$

ここで、 t_0 は破断までの全腐食時間(sec)、 N_f は破断までの総繰返し数(サイクル)、 B 、 n_1 、 n_2 は使用材料、腐食環境によって決まる定数である。いま、腐食疲労試験における繰返し速度を f (cpm) とすると、 t_0 は

$$t_0 = 60 \cdot N_f / f \quad (3)$$

となる。これを(2)式に代入すると、

$$K_c = 1 + B \cdot (60)^{n_1} \cdot N_f^{(n_1+n_2)} / f^{n_1} \quad (4)$$

ここで、 $B' = B \cdot (60)^{n_1}$ (5)

とすると、(1)、(4)、(5)式より

$$\sigma_a / \sigma_{ac} = 1 + B' \cdot N_f^{(n_1+n_2)} / f^{n_1} \quad (6)$$

と書き直せる。いま空中一定応力のS-N線図を、

$$N_f \leq N_w ; \sigma_a \cdot N_f = C \quad (7)$$

$$N_f \geq N_w ; \sigma_a = \sigma_w \quad (8)$$

とする。ここで、 σ_w は疲労限、 N_w はS-N線図の折れ曲がり開始点の繰返し数である。(7)、(8)式を(6)式に代入すると、

$$N_f \leq N_w ; \sigma_{ac} = \frac{(C/N_f)^{1/\alpha}}{1 + B' \cdot N_f^{(n_1+n_2)} / f^{n_1}} \quad (9)$$

$$N_f \geq N_w ; \sigma_{ac} = \frac{\sigma_w}{1 + B' \cdot N_f^{(n_1+n_2)} / f^{n_1}} \quad (10)$$

となり、これが腐食環境下で一定応力をうける場合の疲労強度線図である。

3.2 変動荷重をうける場合の腐食疲労強度推定

腐食環境下で一定応力をうける場合の腐食疲労強度推定に関する一試案を述べたが、さらに、腐食環境下で変動荷重をうける場合(図1の⑫)は、疲労強度は非常に低下すると考えられる。そこで、腐食環境下で変動荷重をうける場合の強度推定に関する一試案を述べる。

図3は、図中の各条件におけるS-N線図を示す。すなわち、④は空中疲労、⑧は腐食疲労(両者はいずれも一定応力負荷)、⑥は空中で変動荷重、⑩は腐食環境下で変動荷重をうける場合のS-N線図を模型的に描いたもので、一般に図3に示すような結果になったとする。

ここで、変動荷重の結果に対する整理法としては、等価応力 σ_{eq} 、等価繰返し数 N_{eq} による整理法⁴⁾を用いてい

図3 S-N線図(変動荷重)

る. すなわち,

$$\sigma_{eq} = \sqrt[n_f]{\sum \sigma_{ai}^n n_i / \sum n_i} \quad (11)$$

$$N_{eq} = \sum n_i \quad (12)$$

ここで, α は一定応力負荷における S-N 線図の式, $\sigma_a^{\alpha} N_f = C$ の α に相当する. σ_{ai} は, 各段の応力振幅, n_i はそれぞれの応力での繰返し数を表す. また, $\sum n_i$ は破断までの総繰返し数である.

いま, 図中に示すように, 任意の繰返し数 N_f に対する強度が, 各 S-N 線図から σ_a (E), σ_{eq} (F), σ_{ac} (G), σ_{eqc} (H) になったとする. ここで, 空中で変動荷重による疲労強度の低下をあらわすみかけの影響係数を r_v , 腐食疲労による強度低下をあらわすみかけの影響係数を r_{cor} , 腐食環境下で変動荷重をうける場合, 疲労強度の低下をあらわすみかけの影響係数を r_{vcor} とすると, それぞれの係数間に次の関係があるものと仮定する. すなわち,

$$r_{vcor} = r_v \cdot r_{cor} \quad (13)$$

ここで, 図3より

$$r_v = \sigma_a / \sigma_{eq}, \quad r_{cor} = \sigma_a / \sigma_{ac}, \quad r_{vcor} = \sigma_a / \sigma_{eqc} \quad (14)$$

と定義すると, (13) 式は (14) 式を代入して,

$$\sigma_{eqc} = \sigma_{eq} \cdot \sigma_{ac} / \sigma_a \quad (15)$$

が得られる. これを繰返し数 N_f をかえて (15) 式を適用してゆき, 変動荷重下での腐食疲労強度線図を求める.

なお, (13) 式の考え方は, 二重切欠きをもつ試験片の応力集中率を出すときの考え方⁵⁾と, 類似の考え方をとっている.

以下, 筆者らがこれまでに行ってきたいろいろの実験結果を, 上記の考え方に従って整理し検討した結果を述べる.

4. 腐食環境下で一定応力をうける場合の実験結果

4.1 腐食疲労試験結果 図4は, SS41 平滑試験片 (板厚 4mm, 板幅 10mm) の空中, および 3% 食塩水中 (浸漬, 室温) における平面曲げ疲労試験 ($f=1750$ cpm) 結果である. 図中○印が空中, ●印が 3% 食塩水中における実験結果である. 図4の腐食疲労強度に対する S-N 線図は, (2) 式の係数を,

図4 S-N線図(SS41平滑材)

$$B = 4.38 \times 10^{-8}, \quad n_1 = 0.39, \quad n_2 = 0.36 \quad (16)$$

として推定したものである. $f=1750$ であるから (16) 式を (6) 式に代入すると, 腐食疲労強度線図は,

$$\sigma_{ac} = \frac{\sigma_a}{1 + 2.16 \times 10^{-4} N_f^{0.75} / (1750)^{0.39}} \quad (17)$$

と表わされる.

図中, 腐食疲労強度線図のうち, 実線で示されるものは, (17) 式の σ_a に (7) 式で示される空中の S-N 線図の式を, N_f の全範囲について適用した場合に得られる線図である.

すなわち, (9) 式を $N_f \geq N_w$ についても適用した場合で, 空中の S-N 線図を疲労限以下まで直線に延長した線図を基準としている. これに対して図中の一点鎖線で表わされる腐食疲労強度線図は, (17) 式の σ_a に, 空中の S-N 線図として疲労限以上では (7) 式を, 以下では (8) 式を代入して得られる (9), および (10) 式を用いて推定した線図である. この場合, $\sigma_w = 25 \text{ kg/mm}^2$, $N_w = 1.84 \times 10^8$ である. この結果, 得られた実験範囲内では, 実験点は前者の強度線図に近い. しかしながら, $\sigma_a = 4 \text{ kg/mm}^2$ の場合は, 両者の強度線図から推定される寿命よりも長い寿命で破断する結果がえられた.

図5は, S15CK 平滑材の回転曲げ腐食疲労試験における速度効果の影響をみたもので, 腐食液は 3% 食塩水 (浸漬, 30°C 一定) である. 腐食疲労においては, 速度効果の影響は大きく, 図に示すように繰返し数で整理す

図5 S-N線図(S15CK平滑材)

ると、繰返し速度が遅くなるほど、腐食疲労強度の低下は大きい。図5は、繰返し速度を6, 36, 100, 3,600cpmとかえて実験を行ったものである。図中の各繰返し速度に対する腐食疲労強度線図は、図4のときと同様、(17)式の繰返し速度の値を、それぞれの実験速度に置き換えて作成して得られたものである。その結果が、3,600cpmに対しては破線、100cpmに対しては一点鎖線、36cpmに対しては二点鎖線、6cpmに対しては三点鎖線で表わされる線図である。なお、この場合、空中のS-N線図は、疲労限以下まで直線で延長した、いわゆる、修正マイナーのS-N線図を用いた。この結果、得られた実験範囲内では、推定S-N線図と実験点とは、ほぼ、よい一致をみた。6cpm、36cpmでの実験は非常に少ないが、これよりさらに長い繰返し数の実験は、非常に時間がかかるため、推定強度線図の長寿命域での妥当性を今後検討していかなければならない。

こうした問題は、たとえば、船殻部材の腐食疲労による寿命推定をするとき、波浪外力の繰返し速度(8~10cpm)に相当するような、非常に遅い繰返し速度で長時間($N=10^7 \sim 10^8$ 程度)のS-N線図を定量的に求める必要がでてくる。筆者らは、実船の縦強度部材が海水中で積荷、および波浪外力による重畳波形をうける場合を想定して、部材の腐食疲労寿命を検討したが、そのもとになる海水中で波浪外力(繰返し速度10cpm)をうける場合の腐食疲労強度線図を求めたものが、図6である。この線図は、空中のS-N線図を基準とし、(17)式の繰返し速度を10cpmとして求めたものである。寿命計算の

図6 推定腐食疲労強度線図

表1 疲労寿命計算結果

σ_{Bei} (kg/mm ²)	σ_M (kg/mm ²)	n_i	N_{fi}	n_i/N_{fi}
13.4	8.1	9×10^0	3.060×10^5	2.94×10^{-5}
11.5	"	9×10^1	4.516×10^5	1.99×10^{-4}
9.6	"	9×10^2	5.753×10^5	1.56×10^{-3}
7.7	"	9×10^3	9.143×10^5	9.84×10^{-3}
5.8	"	9×10^4	1.524×10^6	5.91×10^{-2}
3.9	"	9×10^5	2.960×10^6	3.04×10^{-1}
2.0	"	9×10^6	7.515×10^6	1.20×10^0
0.09	"	9×10^7	1.798×10^9	5.00×10^{-2}

詳細は文献にゆずるが^{6),7)}、結果は表1に示すものとなった。すなわち、寿命推定には、低応力負荷における長寿命の腐食疲労試験結果が必要であることがわかるが、長時間の試験のためデータはなく、現時点では前述した方法によって強度を推定し、寿命推定せざるをえないと考えている。

図7は、HT50材を用い、平面曲げ試験片の両側にV

図7 S-N線図(HT50切欠き材)

型切欠きをつけた($\alpha_k=3.0$)試験片の結果である。腐食疲労試験における環境は、3%食塩水(浸漬、室温)である。図中の腐食疲労強度線図は、(17)式を用いて推定したものである。なお、もとになる空中のS-N線図は、修正マイナーのS-N線図を用いた。●印が、腐食疲労に対する結果で、破断に対して整理したものである。

この結果、実験点と推定強度線図は、かなりの応力範囲まで両者のよい一致をみた。

4.2 腐食材の疲労強度より腐食疲労強度の推定結果

腐食疲労の長年月にわたる試験は、かなりの試験機台数と人手がかかり、また、実験結果を求めるのに非常に時間がかかる。このため、静腐食させた試験片をあとでくりかえし応力を加えて得られる、いわゆる腐食材の疲労強度と、短期間で得られる腐食疲労強度との相関をみつけ、腐食材の疲労強度から腐食疲労強度を推定できれば、取扱いが簡単である。そこで、腐食材の疲労と腐食疲労を結びつける考え方を図8に示す。同図(a)に示す腐食疲労を(b)のように腐食-疲労の交互試験と考え、さらに、その各々を腐食と疲労にわけて積算すれば、第一近似として腐食疲労は腐食材の疲労に置換されたものとされよう。ここで両者の強度は、3.1で述べた考え方に従って低下するとし、(1)式を両者の共通なパラメータとして扱う。これに対する実験結果を図9に示す。

図9は、S35C切欠き試験片($d=9\phi$, $\rho=10R$, $\alpha=1.12$)の全天候下における腐食材の疲労試験結果と、腐食疲労試験結果である。腐食材は、全天候下で1か月間、3か月間、1年間、および2年間放置したものを室内にて実験して得たものである。図9の各腐食材のS-N線図から、 $N_f=5 \times 10^5, 10^6, 10^7$ における強度を求め、それぞれの強度が腐食時間 t_0 によりどの程度低下するかを

図8 腐食疲労と腐食材料疲労とを結びつける考え方

図9 S-N線図 (S35C 切欠き材)

図10 腐食時間と強度の関係

調べたものが、図10である。図より強度は、各繰返し数とも片対数目盛表示で、ほぼ直線的に低下することが伺えた。図11は、図10から各繰返し数について腐食時間に対する強度の低下を(1)式に基づいて計算し、 $(K_c - 1)$ と t_0 の関係をみたものである。図11から各繰返し数とも、

$$K_c - 1 = A \cdot t_0^{n_1} \quad (18)$$

なる結果がえられ、 $n_1 = 0.09$ となった。次に、繰返し数 N_f と A との関係をみたものが図12で、両者は、

$$A = B \cdot N_f^{n_2} \quad (19)$$

を満足するようである。ここで、 $B = 6.16 \times 10^{-2}$ 、 $n_2 = 0.03$ が得られた。(18)式と(19)式より、

$$K_c = 1 + B \cdot t_0^{n_1} \cdot N_f^{n_2} \quad (20)$$

と(2)式と同様の結果が得られた。(20)式を(4)式に変換し、腐食疲労試験における $f = 3,600$ cpmを用い、さらに腐食材の結果から得られた B 、 n_1 、 n_2 の各係数を用いて推定される腐食疲労強度線図を作成したものが、図9の破線である。これに対して、◆印が全天候下における実験結果を示し、実験点は推定S-N線図に近い結果が得られているものと考えられる。

ここで述べた方法は、学問的には非常に問題で、実際には腐食疲労試験を非常に長時間実施しないと、真の答は出ないことは確かであるが、実際の機械部品の疲労寿命を算出する場合の影響因子として腐食が問題となる場合、腐食による強度低下を大雑ばには握りたいとき、上述の方法をある程度の目安をつける手段として使用すればよいのではないかと考えている。

また、たとえば、実機部材の腐食疲労強度が問題となる場合⁸⁾、そのふん囲気は実験室では再現しにくいものが多いため、実機部材の腐食疲労強度が長年月でどの程度あるものかを、定量的には握ることが非常に困難である。しかしながら、実機部材がおかれる環境に試験片を挿入

し、定期的に取り出して腐食材の疲労試験を行い、それから大体の強度を上記の方法によって推定することが、現時点では可能なことではないかと考えられる。この考え方に従って実験した例をあげる。

図13は、地熱発電用タービン翼材に使用された13% Cr-Mo鋼の地熱蒸気下における腐食疲労、および腐食材の疲労試験結果⁹⁾である。腐食材は、地熱蒸気下で3

か月間、6か月間放置して作成したものである。腐食材の疲労試験結果より、上記で述べた考え方に従って(20)式に相当するものを求めると、

$$K_c = 1 + 4.33 \times 10^{-3} \cdot t_0^{0.11} \cdot N_f^{0.22} \quad (21)$$

図11 (K_c-1) と t_0 の関係

図12 A と N_f の関係

図13 S-N線図(13%Cr-Mo平滑材)

図14 腐食疲労強度の実験結果および計算結果

が得られた。(21)式から腐食疲労強度線図を推定したものが、図14である。図中実線は、地熱蒸気下で得られた腐食疲労強度線図であり、破線が(21)式から推定された強度線図である。実験を行った繰返し数の範囲内($N_f = 10^4 \sim 10^8$)では、実験点と推定式は比較的よい一致をみた。さらに、長い繰返し数の範囲は、実際の実験では長年月かかるため、破線の推定強度線図を用いて実際の翼は設計されたが、このように実機部材の腐食疲労強度をは握するためには、現段階では、こうした方法によって現実の問題解決に対処せざるをえないと考えている。

なお、筆者らはこの考え方に従って、軸流送風機翼材の腐食疲労強度をは握するため、現在、高炉用ブローアの吸込、および吐出側の風管に、翼と同種の材料でつくった平面曲げ試験片を、昭和50年10月27日に取りつけた。機会があるたびに取り出して疲労試験を行い、強度をは握していこうと考えている。

4.3 腐食一疲労間欠疲労試験から腐食疲労強度の推定結果 腐食材の疲労強度は、ある一定期間腐食させたものを後で疲労試験をして得られるものであるから、腐食疲労強度と対応させようとする、4.2の結果から、非常に長時間腐食させた腐食材の試験結果から推定する必要があるものと推察される。図8(c)の場合のように、腐食一疲労の間欠疲労(以下、間欠疲労と呼ぶ)も、広義の腐食材の疲労と考えれば、この場合の方が実際の腐食疲労に近いものと考えられる。間欠疲労と腐食疲労の関係を調べるために、SS41材を用い平面曲げ(1,300 cpm)にて疲労試験を実施した。腐食液は3%食塩水(室温)で、間欠時間は、1時間腐食-1時間疲労、および2時間腐食-2時間疲労の二通りのパターンで実験をし、それぞれのパターンで試験片が破断するまで繰返した。実験結果が図15である。同図は、3%食塩水での腐食疲労の結果と、間欠疲労の結果を示し、後者は破断までの総繰返し数で整理した。腐食疲労の実験結果は●印で、この実験点に対しては、

(17)式の繰返し速度を1,300 cpmとして得られる強度線図(図中の破線)とほぼ一致する。

また、間欠疲労の実験結果を表2に示す。表中 t_0 は、間欠疲労による破断までの全腐食時間(sec)、 N_f は同試験による破断までの総繰返し数である。 $\bar{K}_c$ は、

$$\bar{K}_c = 1 + 4.38 \times 10^{-3} \cdot (\bar{t}_0)^{0.39} \cdot (\bar{N}_f)^{0.36} \quad (22)$$

によって、それぞれの $\bar{t}_0$ 、 $\bar{N}_f$ を代入して得られた値である。また、間欠疲労によって推定される腐食疲労強度 $\bar{\sigma}_{ac}$ は、 $\bar{N}_f$ に相当する空中の疲労強度を $\bar{\sigma}_a$ とした場合、

$$\bar{\sigma}_{ac} = \bar{\sigma}_a / \bar{K}_c \quad (23)$$

として求めたものである。また、腐食疲労強度

図 15 腐食疲労および間欠腐食疲労試験結果

表 2 実験結果

負荷応力 σ_a (kg/mm ²)	t_0 (sec)	N_f (cycles)	K_c	σ_{ac}	σ_{ac}
20	8.28×10^4	1.21×10^6	1.56	17.0	17.5
30	1.44×10^4	1.92×10^5	1.15	27.0	28.0
25	3.96×10^4	6.03×10^5	1.33	21.0	22.0
30	2.16×10^4	1.39×10^5	1.15	28.0	29.5
25	7.20×10^4	5.24×10^5	1.39	20.5	22.5

σ_{ac} は (17) 式より,

$$\sigma_{ac} = \frac{(1.23 \times 10^{20} / \bar{N}_f)^{1/0.99}}{1 + 2.16 \times 10^{-4} \cdot \bar{N}_f^{0.78} / (1300)^{0.39}} \quad (24)$$

として得られる値である。この結果、図 16 に示すように σ_{ac} と σ_{ac} はかなりよい一致を示した。腐食疲労強度は、こうした間欠疲労試験を用いて、 K_c をパラメータとし、ある程度推定できるのではないかと考えている。

なお、腐食環境下で一定応力をうける場合の (2) 式における定数 B , n_1 , n_2 については、筆者らがこれまでにやってきた実験範囲内では、表 3 の結果が得られた。このうち興味あることは、低炭素鋼と 3% 食塩水の組合せでは、負荷方法、回転数、試験片の変化にもかかわらず、

図 16 間欠腐食疲労強度と腐食疲労強度の比較

$B = 4.38 \times 10^{-5}$, $n_1 = 0.39$, $n_2 = 0.36$ でほぼ推定できることであろう。これについては、さらに数多い実験を行って検討していく必要があると思われるが、材料と腐食環境の組合せによって、これらの定数が一義的に求まれば、設計上非常に有利となろう。

5. 腐食環境下で変動荷重をうける場合の実験結果

5.1 二段多重変動荷重疲労試験結果 一定応力負荷による腐食疲労試験結果について述べたが、変動荷重をうける場合の実験結果、および 3.2 の考え方について検討した。

図 17 は、13%Cr-Mo 鋼に対する実験結果で、空中での一定 (○印)、変動荷重 (⊕印) 試験結果、および 3% 食塩水滴下 (室温) の腐食環境下での一定 (●印)、変動荷重試験 (●印) の回転曲げ ($f = 3600$ cpm) による実験結果を示す。なお、変動応力は二段多重試験である。この結果、腐食環境下で変動応力をうける実験結果は、一定応力試験結果の寿命よりもさらに低下することがわかる。なお、変動荷重の整理は空中、腐食環境下で変動荷重をうける場合の疲労強度の推定を、3.1 により考察

表 3 各種腐食疲労実験条件での B , n_1 , n_2 の値

使用材料	試 験 方 法			試験片形状		腐 食 環 境			実 験 定 数		
	負荷方法	負荷荷重	試験速度	寸 法	形 状	ふん囲気	腐食条件	液 温	B	n ₁	n ₂
S 35 C	回 曲	両 振	3600 cpm	d=9φ, ρ=10R	α=1.12	全天候下	屋 外	大気温	6.16×10 ⁻²	0.09	0.03
13%Cr-Mo	回 曲	両 振	2800 cpm	d=6φ	α=1.0	地 熱 蒸 気	ふきつけ	90℃	4.33×10 ⁻³	0.11	0.22
12%Cr-Mo-V									7.80×10 ⁻³	0.12	0.21
3%Cr-Mo									5.77×10 ⁻³	0.12	0.22
3.7%Ni-Cr-Mo									5.28×10 ⁻³	0.14	0.23
Cr-Mo-V									1.05×10 ⁻²	0.14	0.18
SS 41	平 曲	両 振	1750 cpm	t=4, b=10	α=1.0	3% 食塩水	浸 漬 滴 下 浸 漬 浸 漬	室 温 室 温 30℃ 室 温	4.38×10 ⁻⁵	0.39	0.36
S 15 CK	回 曲		3600 cpm	d=9φ	α=1.0						
S 15 CK	回 曲		6~100cpm	d=6φ	α=1.0						
HT 50	平 曲		1750 cpm	t=4, b=10	α=3.0						

した。

まず、(15)式において、任意の繰返し数 N_f における空中の強度 σ_a は、図中の式より、

$$\sigma_a = (7.12 \times 10^{20} / N_f)^{1/8.32} \quad (25)$$

変動荷重による強度は、

$$\sigma_{eq} = (1.25 \times 10^{36} / N_f)^{1/18.9} \quad (26)$$

と表わされる。さらに、一定応力負荷による腐食疲労強度は、 $\sigma_{ac} = 25 \text{ kg/mm}^2$ でみかけの疲労限がみられるが、便宜上もとのS-N線図を直線で延長した線図を用いると、腐食疲労強度は、

$$\sigma_{ac} = (1.38 \times 10^{16} / N_f)^{1/6.69} \quad (27)$$

となる。(25)、(26)、(27)式を(15)式に代入し整理すると、

$$\sigma_{eq}^{4.96} N_f = 3.31 \times 10^{13} \quad (28)$$

が得られ、これが腐食環境下で二段多重変動荷重をうける場合の強度線図となり、図17の一点鎖線で表わされるS-N線図である。得られた実験結果(●印)と推定強度線図は、この実験範囲内では、ほぼよい一致を示していると考えられる。図18は、同材の平面曲げによる実験結果で、上記と同様の考え方で推定した強度線図と実験点(◆印)は、この場合でもほぼよい一致を示した。

図17 S-N線図(回転曲げ)

図18 S-N線図(平面曲げ)

5.2 二重重畳波形下での腐食疲労試験結果

腐食環境下で変動荷重をうける場合の強度推定の考え方を、腐食環境下で二重重畳波形をうける場合の強度推定に拡張して考えた。図19は、SS41材の3%食塩水

中における結果¹⁰⁾である。この場合、二重重畳波形を変動荷重に変換するために、図20の方法を採用した。すなわち、図20(a)に示す二重重畳波形の1サイクルを、同図(b)のように最大応力($\sigma_1 + \sigma_2$)1回と、 σ_2 が $(n-1)$ 回繰返される二段多重変動試験と考え、(11)式、(12)式を用いて整理した結果が、空中の場合が図19の◇印、3%食塩水中の場合が◆印である。ここで、空中での一定応力試験結果、空中での変動荷重試験結果、および3%食塩水中での一定応力試験結果を用い、3.2の(15)式の考え方によって推定した線図が◆に対する一点鎖線のS-N線図である。この結果、この実験範囲内では、推定強度線図と実験点はほぼよい対応を示した。

図19 S-N線図(重畳波疲労)

図20 二重重畳波形の波形の分解

腐食環境下で重畳波形をうける部材の強度推定は、上記で述べたように一種の変動荷重のパターンに置きかえて整理すれば、ある程度推定できる可能性があることが推察された。

このほか、腐食環境も応力も同時に変動するような場合(図1の④)の寿命推定¹¹⁾についても、若干検討しているが、この問題も非常に重要である。

6. 結 論

材料の疲労強度推定法として、とくに腐食疲労に注目し、部材が長時間腐食環境下におかれる場合の疲労強度について、一定応力が繰返される場合、負荷応力が変動する場合の腐食疲労強度を推定する方法を提案し、それぞれの実験結果を述べた。その結果、本報告の実験範囲内の実験条件では、推定強度と実験結果は、かなりよく一致したと考えられる。とくに、低炭素鋼と3%食塩水との組合せによる腐食疲労強度は、

$$\sigma_a/\sigma_{ac} = 1 + B \cdot t_0^{n_1} \cdot N_f^{n_2}$$

において, $B = 4.38 \times 10^{-5}$, $n_1 = 0.39$, $n_2 = 0.36$ の定数を用いれば, かなりの応力範囲まで寿命を推定できる結果がえられた. しかしながら, これらの定数は材料, 腐食環境の組合せによって異なり, また, 本推定式が妥当でない場合も数多くえられるものと考えられるが, 現時点では本推定法を中心に, いろいろの実験を行い, 推定式が適用できる範囲を明確にすると同時に, 今後においては, 本推定法には考慮されていない試験片寸法, 応力負荷方法, 温度, 平均応力等の腐食疲労強度におよぼす重要な因子を組み入れながら, さらに, 発展した腐食疲労強度の推定法を確立していきたいと考えている.

文 献

- 1) 日本機械学会; 「金属材料疲れ強さ設計資料(Ⅲ), 環境効果」, (昭49)
- 2) 堀川, 中村; 関西造船協会誌, No.155, p.151(昭49)
- 3) 遠藤, 宮尾; 機 論, 24-139, p.167(昭33)
- 4) たとえば, 日本機械学会関西支部; 「シンポジウム長寿命疲れ強さ」資料, (昭47)
- 5) 石橋著; 「金属の疲労と破壊の防止」 p.49(昭29)
- 6) 中村, 堀川, 岡崎; 機械の研究, 27-5, p.705(昭50)
- 7) 日本造船研究協会報告書; No.77, p.134(昭50)
- 8) 中村, 馬越, 堀川, 岡崎; 材料, 24-256, p.9(昭50)
- 9) 岡崎, 中村; 材料, 24-256, p.15(昭50)
- 10) 中村, 岡崎, 堀川; 材料, 21-231, p.20(昭47)
- 11) 中村, 岡崎; 日本材料強度学会講演論文集, p.37(昭51)