

技 術 資 料

鋼 の 腐 食 疲 れ

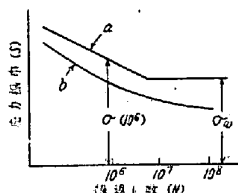
岩 元 兼 敏*

Corrosion Fatigue of Steel.

Kanetoshi Iwamoto

I. 緒 言

金属材料が腐食作用を持つ液体あるいは気体に接触しながら繰返し応力を受けるときには、腐食作用がないときに比べていちじるしく疲れ強さが低くなる。(一般に鋼の空気中での疲れ試験では応力振幅 S と破壊までの繰返し数 N との間には第1図の a 曲線のような $S-N$ 曲線が得られ、ある応力 σ_w 以下では無限の応力繰返しに耐えるといわれており、

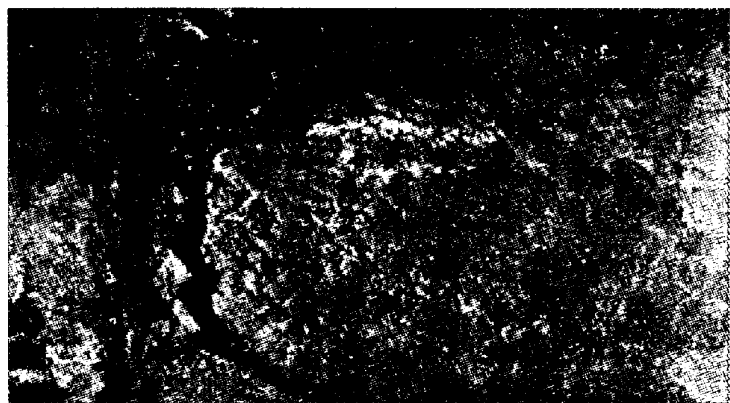


第1図 $S-N$ 線図
曲線は図のように N 軸に平行になる。このとき σ_w を疲れ限度と呼んでいることは周知のとおりである。近時材料に対する要求がきびしくなるにつれて、ある一定時間外力に耐えればよいという考え方で設計される場合が多くなつて来た。このような場合に疲れに対する強さを考えるときにはある繰返し数(たとえば 10^6)に耐える応力の最大値 $\sigma(10^6)$ をとり、このような応力を時間強度と呼んでいる。腐食疲れの場合は図の b 曲線のように水平部分が現われない場合が多いために、疲れ限度というよりむしろ時間強度を考えなければならない。この意味で以下においては疲れ強さという表現を用いることにする。)腐食作用が激しいときには材料全体がだんだん細くなり、その結果当然疲れ強さも低下するが、この場合は腐食疲れというよりはむしろ腐食の問題であつて、ここで対象にしているのは材料の寸法の減少は少ないけれども強さがいちじるしく低下することであつて、これはのちに述べるように腐食作用と繰返し応力との共同作用による局部的腐食によるものである。腐食疲れについてはすでに GOUCH が多数の文献を引用しながらくわしく説明しており¹⁾ 30年近く経過した今日においても大いに参考になる講義であつて、本文においても随所にこれを引用した。

通常の空気中での疲れ試験においても第1表²⁾にみられるように、空気との接触をさけて試験したときの疲れ限度よりもわずかながら疲れ限度が低くなり、空気の腐食作用の影響がみられるがその量はわずかで無視できる程度であるので、以下においては空気中の疲れは応力の繰返しのみによるものとみなし、これと比較しながら腐食疲れを考察することにする。

II. 腐食疲れの実例

第2図³⁾はディーゼル船の推進軸に起つた腐食振り疲れによる破壊の例で軸心と約 45° の傾をなす不定形のきれつが多数発生しているのが見られる。推進軸の材料は引張強さ $42\sim 50 \text{ kg/mm}^2$ の炭素鋼鍛造材(組成の一



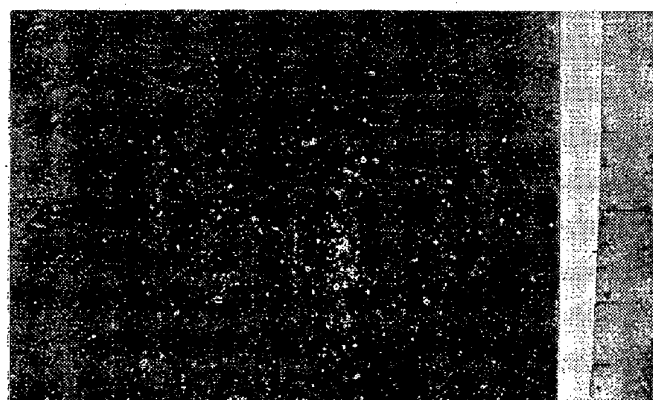
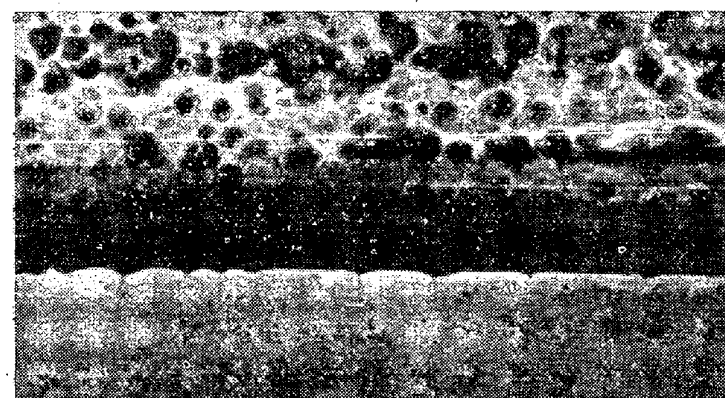
第2図 船の推進軸の腐食疲れ破面

例: $C 0.30, Mn 0.58, Si 0.28, P 0.034, S 0.033$) で空気中の振り疲れ限度は 15 kg/mm^2 程度であるが、第2図の例は 4.5 kg/mm^2 の振り振動応力の下で4800時間の稼働後破壊したと報告されている。第3図⁴⁾は噴霧型の再熱器の管壁に生じた熱腐食疲れによる破損の例で噴霧ノズルの配置が適当でないと水滴が高温の管壁に間歇的に滴り落ちるために、管壁は周期的な加熱作用と

* 金属材料技術研究所

第 1 表

材 料	組 成	引張強さ kg/mm ²	疲 れ 限 度 kg/mm ²					
			回 転 曲 げ		引 張 圧 縮			
			空気中	ラノリン 塗 布	空気中	ラノリン 塗 布	真 空 中 10 ⁻³ mmHg	空気中平均 真空中平均
0.5%C鋼 (冷間引抜)	C 0.48, Si 0.11, Mn 0.64 S 0.032, P 0.034	99.2	38.2 ~40.6	38.2 ~40.9	32.6 ~35.8	33.5 ~35.0	35.0 ~35.8	0.97
15%Cr鋼	C 0.12, Si 0.28, Mn 0.24 S 0.022, P 0.018, Cr 14.75	67.7	39.0	40.6	34.3 ~35.0	34.3 ~35.0	35.0	0.99
18-8不銹鋼	C 0.11, Si 0.28, Mn 0.26 S 0.010, P 0.010, Cr 18.32	104.0	37.4	37.4	38.2 ~40.1	38.2	38.2	1.02
17-1CrNi鋼	C 0.25, Si 0.52, Mn 0.68 S 0.012, P 0.016, Cr 17.10	85.8	51.6	49.3	44.5 ~44.9	44.5 ~45.7	44.5	1.00
0.13%C鋼 (熱間圧延)	C 0.13, S 0.18, Mn 0.70 S 0.042, P 0.046	44.2	—	—	20.5	—	21.6	0.95
Ni Cr 鋼	C 0.36, Si 0.29, Mn 0.50 S 0.020, P 0.023, Cr 0.60	142	—	—	55.9	—	57.5	0.97
	Ni 3.42							

内 面 断面
第 3 図 再熱器管壁の熱腐食疲れ

第 4 図 ピストンロッドの冷却水孔

冷却作用を受けそのために生ずる熱応力の繰返しによる疲れ現象と、水の腐食作用とを同時に受けて破損したものと考えられている。同様な破損は過熱器管、ボイラードラム、エコマイザーなどにも見られる。第4図は内燃機関のピストンロッド(0.36%炭素鋼)の冷却水用の中心孔の部分で、腐食疲れにより円周方向のきれつを

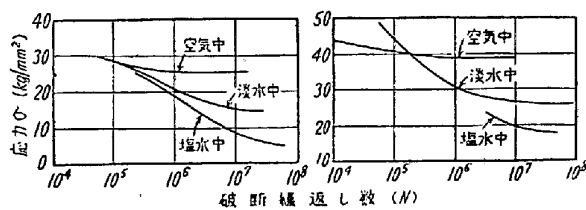
第 2 表

鉄 道	橋りょう、レール(特にトンネル内)、継め板、鉄まくら木、機関車、電車のばね、冷凍車車軸
自 動 車	ステアリングアーム スタブアクスル
船 舶	ワイヤロープ、プロペラ軸 かじ軸
航 空 機	飛行艇、農業散布用飛行機 フライングワイヤ
熱 機 械	ポンプ: 軸、棒(特に油井)、シリンダー ボイラ: 過熱管、ボイラ管、ドラム、蒸気 ため、その他
流体機械	タービン: 円板、羽根、その他
エンジン	ディーゼルその他内燃機関のピストンロッド
化学機械	圧力容器、圧縮機弁およびばね、 硫酸または硫酸アンモニウム用管
農業機械	噴霧器
そ の 他	通信ケーブル用鉛被覆、ケーブルクレーン 炭坑用ワイヤロープ、製紙機械軸、 製鉄用圧延ロール軸

生じている。第2表は岡本・北川による腐食疲れの事故の例であつて、腐食疲れに帰せられる事故が多種多様にわたっていることが知られる。

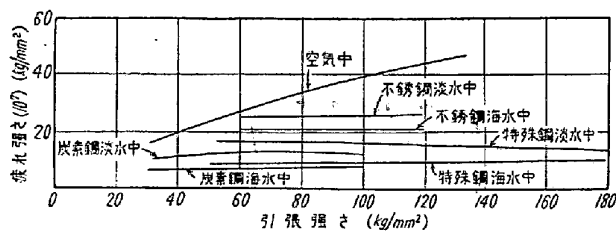
III. 腐食疲れの特徴と腐食疲れ 強さに影響するもの

第5図は空气中、淡水中、塩水(河水)中の S—N



0.16% C 鋼 (C 0.16, Mn 0.45, Si 0.02, Ni 0.03, Cu 0.09) Cr 不銹鋼 (C 0.38, Mn 0.26, Si 0.20, Ni 0.23, Cr 14.50, Cu 0.07)

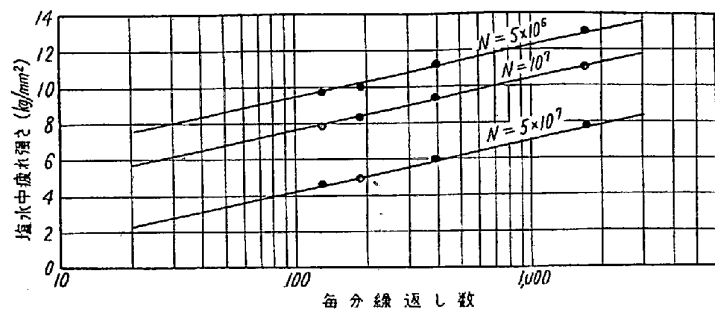
第 5 図 腐食疲れの S-N 線図 (回転曲げ 1450 rpm)



第 6 図 引張強さと疲れ強さ

曲線の一例であるが、鉄鋼材料は空気中では 10^6 付近で水平部分が現われ疲れ限度が認められるのに対し、腐食疲れでは繰返し数 10^8 になつても曲線が水平にならないことが多く、空気中の場合に比べていちじるしく疲れ強さが低くなる。又当然のことであるが腐食液の種類により疲れ強さは異なってくる。第 6 図⁷⁾は鉄鋼の引張強さと腐食疲れ強さ (10^7) との関係を示す線図である。疲れ強さはバラッキが多く図は大体の傾向を示すものであるが、腐食疲れ強さは引張強さに無関係にほぼ一定であつて熱処理によつても高くない。また Cr, Ni らの耐食性を増すもの以外は空気中での強さを増す合金元素の効果も期待し得ない。

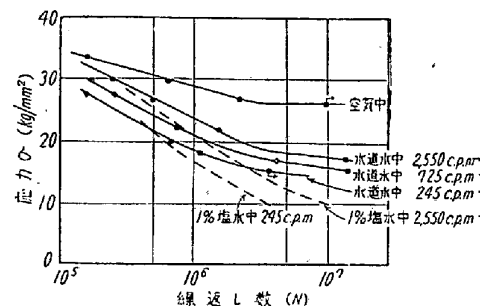
腐食疲れのいちじるしい特徴の一つは応力繰返し速度の影響が大きいことである。空気中においては第 3 表⁸⁾の例のように繰返し速度が大きくなるにつれて少しずつ



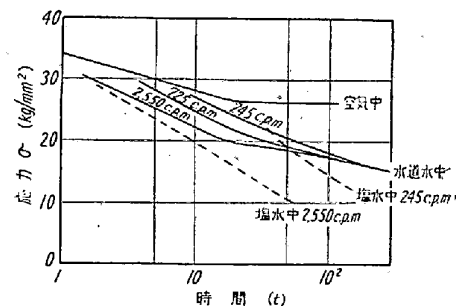
第 7 図 繰返し速度による腐食疲れ強さの変化 (铸铁片持平面曲げ)

疲れ限度が大きくなる傾向があるが、毎分 10,000 回位の速さまでは繰返し速度の影響は小さい。非常に遅い速度および速い速度では幾分低くなるようである。

第 7 図⁹⁾は铸铁の腐食疲れ強さと繰返し速度との関係を (間接的な方法で) 求めた結果を示したもので、疲れ強さと繰返し速度の対数との間に直線関係がみられる。第 8 図¹⁰⁾は炭素鋼の空気中、淡水中、塩



第 8 図 繰返し速度による S-N 曲線の変化 (炭素鋼回転曲げ)



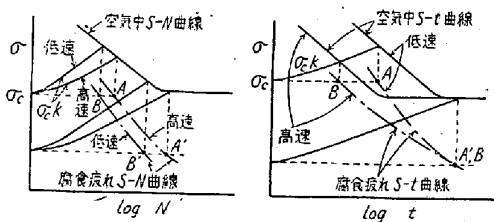
第 9 図 繰返し速度による S-t 曲線の変化

水中、塩

第 3 表

材 料	組 成					熱 処 理	回転曲げ疲れ限度 kg/mm²						
	C	Mn	Si	P	S		80rpm	2000	5000	8000	10000	12000	15000
0.07%C 鋼	0.07	0.30	0.14	0.040	0.040	890°C 焼鈍	<24.5	—	24.7	—	—	24.2	24.5
0.2%C 鋼	0.21	0.58	0.25	0.042	0.030	870°C 焼鈍	<27.6	—	29.0	29.1	—	29.1	29.3
						890°C 水冷600°C 焼戻	<32.0	—	38.0	38.2	—	38.2	38.3
0.4%C 鋼	0.41	0.48	0.32	0.040	0.038	825°C 焼鈍	<27.5	—	28.9	29.4	—	29.4	29.5
						850°C 油冷600°C 焼戻	—	—	32.9	33.4	—	—	—
						850°C 水冷600°C 焼戻	<35.9	—	36.4	36.9	—	37.5	38.5
0.6%C 鋼	0.61	0.61	0.25	0.044	0.026	790°C 焼鈍	<27.0	—	27.0	27.2	—	26.8	25.0
						830°C 水冷600°C 焼戻	<43.0	—	46.0	—	—	—	—
铸 鉄	—	—	—	—	—	—	—	9.7	—	—	10.2	—	10.4

水中のS—N曲線を示したもので、腐食疲れにおいては繰返し速度が小さくなると破壊までの繰返し数が小さくなり、繰返し数をもとにすると繰返し速度が遅いほど時間強度は低くなる。第9図は第8図の結果を横軸に破壊までの時間をとって表わしたもので、(S—t 曲線) 淡水中では応力が高いときは繰返し速度の影響がみられるけれども応力が低くなり破壊までの時間が長くなると、繰返し速度に関係なく一つの曲線にまとまってくる。遠藤は腐食疲れによる強さの低下は腐食のために表面に生じた欠陥の切欠き効果によるものと考え、これを腐食効果 k とよびつぎのようにして腐食疲れ破壊の条件式を導いている。第10図において σ_c なる応力で腐食疲れを



第10図 腐食疲れ破壊の説明図 (遠藤による)

行なうと試験片に作用する応力は時間とともに $\sigma_c k$ の曲線に沿って上昇し空气中の S—N 曲線 (または S—t 曲線) と交わるようになりこの点の繰返し数 N (または時間 t) で破壊すべきであつて、腐食疲れの S—N 曲線 (または S—t 曲線) は図の鎖線 AA' または BB' のようになる。空气中の疲れ試験では繰返し速度の影響を無視できるから σ は繰返し数 N のみの関数と考えてよい。(したがつて S—t 曲線は繰返し速度が低くなれば右へ平行移動する。) 腐食効果 k は腐食液の種類と材料の切欠き感受性によつて変わるが時間 t と繰返し速度 f の関数であると考えられる。以上の考察のもとに腐食疲れによる破壊の条件は

$$\sigma_c k = \sigma \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし k は t , f の関数, σ は N の関数

と書くことができる。 k は実験結果からつぎのように求められる。

$$k = 1 + a \log(b C f t + d) \quad \dots \dots \dots (2)$$

k の値の一例を示すと、

0.44% C 鋼 (C 0.44, Mn 0.08, Si 0.21, P 0.033,

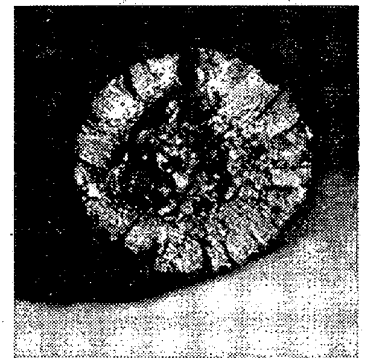
S 0.026) 水道水中: $k = 1 + 0.30 \log(0.60 t + 1)$

同上塩水中: $k = 1 + 2.2 \log(0.0135 \times 1.00052 f \cdot t + 1)$

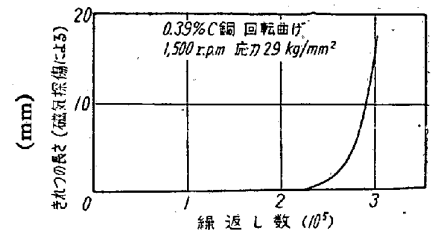
以上が遠藤の研究の要旨であつて、よく実験結果を説明しており (2) 式の常数 a , b の意味が明らかになればさらに応用が広がるものと期待されるが、 k の変化が応力の大きさに関係しないとしていることは疑問であ

つて、筆者の研究では腐食疲れによる被害 (被害の定義はまだ明確なものがなく現在の段階では硬度と同様に測定法を定めてこれから被害の定義をしている状況であるが、材料の疲れに対する性質の劣化を表わすものと考えればよい。遠藤の k も一種の被害を表わしている。) は応力が高いほど早く進行すると考えた方が妥当のようである。いずれにしても (1) 式が示すように腐食疲れでは応力の繰返し数と同時にその間の時間を考慮しなければならない。

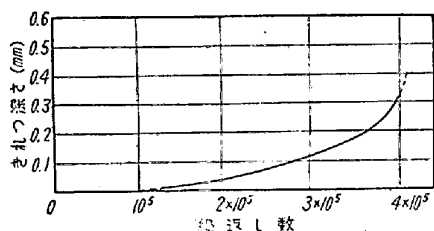
腐食疲れを受けた材料ですぐ目につくことは多数のきれつが発生していることである。空气中の疲れではよく知られているように多くは1個所の断面にきれつが入りまた破面についてみてもきれつの発生点は1個所か2個所で貝殻状の破面になるのが普通である。腐食疲れでは第2図、第3図に見るように多くの断面にきれつが発生し、また破面についても多くの点からきれつが出発するので第11図⁽¹⁾のような放射状の模様が見られる。こ



第11図 腐食疲れ破面 (回転曲げ)



ような破面はたとえば不銹鋼の空气中疲れ試験片にも見られ、必ずしも腐食疲れの特徴ではないがきれつの様子からある程度までは空气中の疲れによる破壊か、腐食疲れによる破壊かを判断することもできる。きれつはその外観だけでなく発生 of 時期でも空气中の場合と趣を異にしている。空气中で第12図 空气中でのきれつの発達は光学顕微鏡で観察し得る大きさのきれつは第12図にみるように寿命 (破断までの繰返し数または時間) の終り近く数%の所で発生しその後急速に発達するが、(電子顕微鏡で観察すれば非常に微細なきれつはかなり早い時期にみられるという。) 腐食疲れでは第13図⁽²⁾のように寿命の比較的初期にきれつが発生する。岡本、北川によれば空气中の疲れでその寿命の73~75%の間に準備されてきたのと同じ効果が、腐食疲れではわずか15~20% (空气中に比べて同じ応力の下では寿命も小さいからこの繰返し数ははるかに小さな値になる。) の間に完了してし



第 13 図 腐食疲れのき裂の発達

まい、それ以後は腐食疲れを腐食のない乾燥疲れにきりかえても以後の寿命に変化はないという。したがって腐食疲れによる寿命の低下を防止する目的で防食などの処置を施す場合、これに対する注意を寿命の 20% 程度に相当する間息り、この間に腐食疲れの状態に入っておればその後たとえ再塗装などの処置を施しても荷重を十分に軽減しないかぎりその効果は期待し得ない。

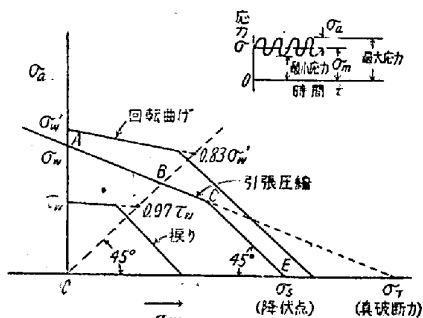
平均応力が零でない場合に平均応力の影響をあらわす

には第 14 図のような耐久限度線図を用いると便利であつて、空気中の場合にはおよそ図のような形になるといわれている。

図において横軸に

は平均応力 σ_m を

とり縦軸には疲れ限度の応力振巾 σ_a をとつてあらわしてある。縦軸上の点 A は両振り疲れ限度を与え、OB 線上の点では繰返し応力の下限が零になるから B 点は片振り疲れ限度の応力振巾をあらわす。(片振りの場合は応力振巾の 2 倍すなわち最大応力を片振り疲れ限度と呼んでいる。) CE 線上では繰返し応力の上限が常に降伏点に等しく、この線上の応力を繰返せば材料は大きな変形をおこすことになり、CE 線は疲れ変形をするかしないかの限界線をあらわしている。腐食疲れの場合平均応力の影響を求めた研究は少なくその結果もまちまちである。



第 14 図 耐久限度線図

第 4 表¹²⁾の引張圧縮の例では耐久限度線図の勾配は腐食疲れの場合の方がゆるやかである。他方遠藤ら¹³⁾は高張力鋼線 (C 0.75, Mn 0.37, Si 0.16, P 0.012, S 0.021) について

1) 線引きしたままのもの

2) 線引き後 250°C 焼なまししたもの

3) 線引き後 630°C 焼なまししたもの

4) おなじく 630°C 焼なまし材をロール加工したもの

の四種類で水道水中の回転曲げ疲れ試験を行なつた。これらはそれぞれ表面に 1) および 2) は引張, 3) は零, 4) は圧縮の残留応力が存在しているが、腐食疲れ強さは 1) 2) 3) 4) の順に高くなつており残留応力を平均応力とみなすと第 15 図の

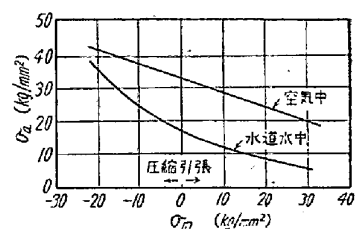
ような線図が得られる。

図にみるように平均応力が引張応力の範囲では腐食下も空気中も傾向においてはおなじであるが、

平均応力が圧縮応力の場合 第 15 図 腐食回転曲げ疲れの耐久限度線図

合は腐食疲れの方が空気中の疲れに比べて平均応力の影響がいちじるしく、圧縮平均応力が大きくなると腐食疲れ強さは空気中の疲れ強さとほとんど等しくなってくる。ここで注意すべきことは腐食下では線引きしたものよりも焼なまししたものの疲れ強さははるかに高いことで、外力の条件しだいでは必ずしも線引材が有利ではない。(引張強さは線引材が焼鈍材よりはるかに高い。) 第 16 図¹⁴⁾は 0.15%C 鋼 (C 0.15, Mn 0.71, Si 0.224, P 0.013, S 0.027) の繰返し振りの場合の一例でこの場合には腐食疲れの方が空気中の疲れに比べて平均応力の影響が大きく現われている。

材料の表面仕上の状態は



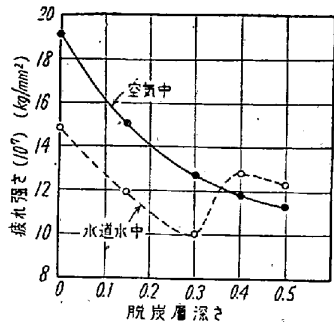
第 16 図 腐食振り疲れの耐久限度線図

第 4 表

繰返し速度 2000c.p.m.

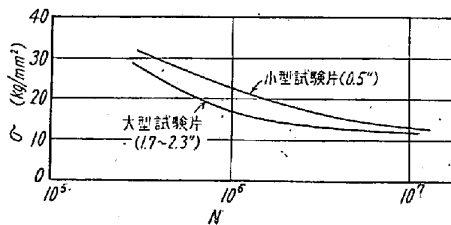
材 料	引張圧縮疲れ強度 ($\sigma_m \pm \sigma_a$)				kg/mm ²			
	空 気 中		塩 水 中		10 ⁷		5×10 ⁷	
0.5%C 鋼冷間引抜	±34.2	28.2±28.2	56.5±21.6	±7.1	7.8±7.8	56.5±5.8	±3.8	4.9±4.9
15%Cr 鋼950°C 焼入	±34.6	27.7±27.7	47.2±19.2	±19.4	20.8±20.8	47.2±11.0	±17.3	19.9±19.9
650°C 焼戻								
18-8不銹鋼冷間引抜	±39.2	29.8±29.8	59.8±20.1	±27.1	23.2±23.2	59.8±11.8	±23.3	21.5±21.5
17-1不銹鋼950°C 焼入	±44.8	38.8±38.8	63 ±24.8	±27.1	25.2±25.2	63 ±15.5	±24.4	22.2±22.2
630°C 焼戻								

空気中の場合に比べてさほど大きな影響はない⁷⁾¹⁵⁾。第17図はS55C材(C 0.61, Mn 0.20, Si 0.25, P 0.04 S 0.026)の表面に脱炭層があるとき脱炭層の深さと疲れ強さとの関係を示したもので、脱炭層の深さが0.4 mm以上になると腐食疲れ強さは空気中の疲れ強さよりも高くなっている。



第17図 脱炭層による疲れ強さの変化

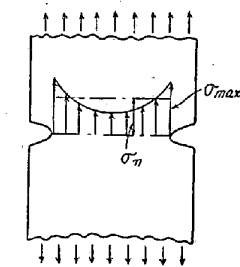
材料の寸法が異なる場合に空気中においては大きな試験片の疲れ限度は小さな試験片の疲れ限度よりも低くなるのが普通である。腐食疲れの場合は第18図¹⁷⁾にみる



第18図 試験片の寸法の影響 (Cr Ni 鋼淡水中片持回転曲げ 250~400 rpm)

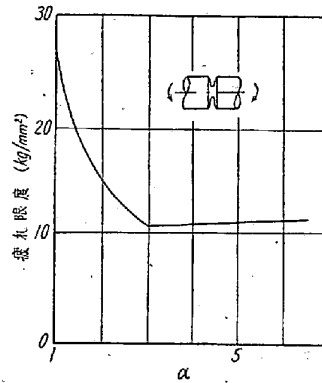
ように0.5吋から2吋の範囲では大きな違いはないようである。ただし試験片の直径または厚さがきわめて小さいときには腐食による断面積の減少が原断面積に対して大きな割合になるために、疲れ強さは当然低くなってくる。

材料に切欠きがある場合には第19図のように応力が集中し切欠底の応力 σ_{max} を最小断面の平均応力 σ_n で除した値 $\alpha = \sigma_{max} / \sigma_n$ は荷重状態と試験片の形状により定まる常数であるので、 α を形状係数と呼んでいることは周知のとおりであつて $\alpha = 1$ は切欠きの無い平滑材をあらわし、 α が大きい



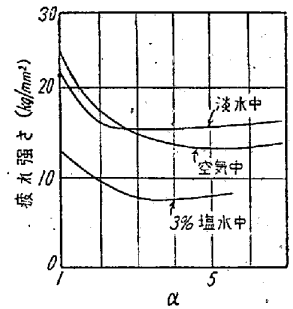
第19図 切欠底の応力集中

ことは切欠きがするどいことをあらわしている。鋼の場合空気中では第20図⁷⁾の例のように α のある値までは疲れ限度はいちじるしく低くなる。腐食疲れにおいては切欠き材の方が平滑材より高くなるという実験結果もあるが¹⁸⁾、一般には切欠き材の疲れ強さが低いようである。しかしながら繰返し数が大きくなると両者の差は目立たなくなってくる。同じ形状係数をもつた切欠き材の空気中の疲れ強さと腐食疲れ強さとは第21図¹⁹⁾のように腐食疲れ強さの方が高くなる場合もある。これからみると腐食により生ずる表面欠陥の形状係数にはある極



第20図

切欠材の疲れ限度 (0.62% C 鋼空気中回転曲げ)



第21図

切欠き材の疲れ強さ (0.44% C 鋼回転曲げ)

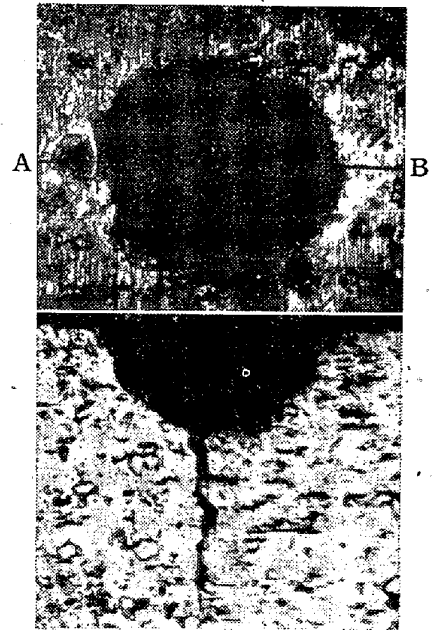
限の値があつて、これ以上には切欠きはするどくならないものようである。

上記のように腐食疲れ強さにはこれに影響するものが多く、これらが複雑に作用し合いわずかな外部条件の違いでも強さが大きく違うことがあるので、実験結果を利用して実際の場合の強さを推測するときには、そのときの外部諸条件に十分の注意が必要である。各種材料の腐食疲れ強さについては石橋教授の著書⁷⁾にくわしい表がのせてあるから参照されたい。

IV. 腐食疲れの機構

腐食疲れを受ける金属材料の表面には多数の腐食疲孔が発生する。この腐食孔は応力の作用を受けない単なる腐食だけの場合にも発生するがこの

ときの腐食孔は第22図のように半球形になるのが普通である。このような腐食孔は腐食液中に空気が含まれているほど発生しやすいことからみると液中の酸素により一種の濃淡電池を形成し電気化学的作用で腐食が進行するものと考えられる。一方金属が腐食液に接触すればその表面に薄い被膜ができるが、一般にこの被



断面A—B

第22図 応力零のときの腐食孔 (中央のきれつばその後空気中で応力を加えて破断したとき生じたもの)



第 23 図 腐食回転曲げの腐食孔

膜は防食の作用をするので多くの場合腐食速度は時間の経過とともにだんだん遅くなってくる。腐食作用に繰返し応力が伴うと第 23 図のように腐食孔は主応力に直角の方向に延びてくることから、腐食孔の拡大には応力の繰返しが大きく影響することは明らかである。繰返し振りの場合に平均応力を応力振巾よりも大きくとつて、二つの主応力の中の 하나가常に圧縮応力になるようにしたときこれに直角な方向にも腐食孔が延びること、および X 状の腐食孔では中心部で剪断応力の方向に腐食孔が延びた部分がありその外方で X 状に拡がっていることなどから、腐食孔の拡大には引張応力のみならず圧縮応力剪断応力のいずれも関係していると考えられるけれども大きく影響するのは引張主応力、もしくは引張主歪¹⁹⁾であろう。この応力または主歪により表面の被膜が破れると金属面がふたたび腐食液に触れて腐食作用を受け腐食孔はさらに発達してゆき、このようにしてできた腐食孔は切欠として作用し応力集中をおこすから腐食作用は益々促進されることになる。

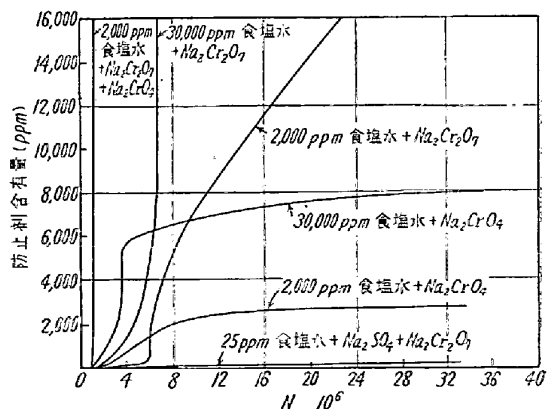
これらの腐食孔が破壊の原因となるきれつと直接関係があるか明かでないが、密接な関係があることは疑ない。実験²⁰⁾によると破壊の原因となるきれつは腐食液中で生じた切り線付近にのみ発生し、腐食液に接する以前に生じた切り線の付近には発生しないという。したがって腐食疲れ破壊は試験片の表面あるいは腐食孔の底部に腐食液に接しながら生じた切り線に沿つてきれつが発生し、これが腐食液の促進作用を受けながら繰返し応力により発達し、最後に隣接するきれつが連絡し遂に材料の破壊にいたるものと考えられる。腐食液の作用が弱い場合はきれつが深くなれば腐食液がきれつの先端まで進入しにくくなるから、腐食疲れの末期はきれつ材として取扱うことができる⁵⁾。腐食作用が強い場合にはきれつの巾も広げられるから、腐食液の作用する時間も長くなり単なるきれつ材としては考えられないであろう。

V. 腐食疲れの防止法

明らかに材料の耐食性が大きいほど腐食疲れ強さは大きいから、事情がゆるせば耐食性の材料を用いるがよい。淡水に対しては不銹鋼を用いればよいが海水などに接する場合には鋼では不十分であつて、非鉄金属を用いるほかはない。熱処理、冷間加工などはそのために表面に引張応力が残留する場合はかえつて有害である。ただし表面をロールしたりして圧縮残留応力が生ずる場合には有利になる。この意味でショットピーニングも有効なことがある。また高周波焼入も有効であるという。窒化などの処理で表面の耐食性を改善することも有効である。

腐食疲れは腐食作用を伴うことが前提であるからなんらかの方法で表面を覆い、腐食液の接触をさまたげると腐食疲れを防止できるはずであつて、塗装、メッキなどの処置を施し表面を被覆すれば初期においてはたしかに有効である²¹⁾。しかしながら試験片にゴム輪を巻き腐食疲れ試験を行なうと疲れ強さがいちじるしく低くなる事実から分るように、腐食作用にむらがあるときわめて有害であるから、塗膜の一部が破れて金属表面が露出すると塗膜のない場合よりかえつて危険であり、またある程度腐食疲れが進んでからは再塗装しても効果はないから、絶えず塗膜の状態に注意を払わなければならない。

機械部分の冷却水またはボイラー給水のように腐食液そのものに多少の性質の変更を許される場合には、溶解酸素を除去する方法を講ずるかまたは適当な化学薬品を混入することにより腐食疲れをふせぐことができる。腐食防止剤としてよく用いられるものにクロム酸ソーダ、重クロム酸ソーダ、乳化油などがあり第 24 図はクロム酸ソーダと重クロム酸ソーダの効果を示す一例である。

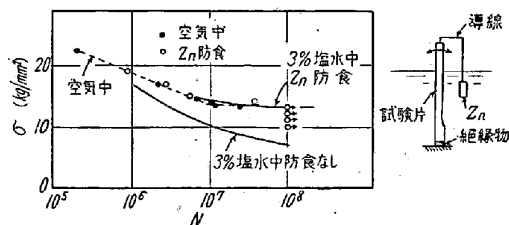


註) 図中 25 ppm 食塩水 + Na₂SO₄ + Na₂Cr₂O₇ は 25 ppm 食塩水 + 25 ppm Na₂SO₄ + Na₂Cr₂O₇ の誤り

第 24 図 腐食防止剤の効果 (0.42% C 鋼回転曲げ 応力 24 kg/mm²)

これで見ると腐食液の種類によつて防止剤の効果もまちまちであるから、条件に応じて適当な防止剤を選ぶことが必要である。

腐食が電気化学的なものである以上は電気防食法がきわめて効果的であることは一般に認められているが、腐食疲れにおいても効果がいちじるしい。第 25 図²³⁾は鑄鉄の例であるが、Zn を陽極として防食したものは空気中の場合とほとんど同じ S-N 線図が得られている。試験片表面も腐食の形跡は全然認められなかつたということである。電気防食法にはこの例のような流電陽極方式と外部電源方式とがありいずれも効果はいちじるしい。陽極用材料としては前者では Zn, Mg, Al など後者では炭素鋼, Si 鑄鉄, 磁性酸化鉄などが一般に用いられる。



第 25 図 Zn 防食の効果 (片持平面曲げ 1800cpm)

VI. 結 語

以上主として水中の腐食疲れについて述べたが、いうまでもなくほかの液体中または気体中の疲れも腐食疲れの対象になるものであるが、水中の場合に比べて現在までの所あまり研究されていない。したがって今後の研究課題として残された問題が多いが、考えられるおもなものをあげると、

a) 腐食液の影響：材料、腐食液の種類、濃度、温度などの組合せにより非常に広範な実験を必要とし、とくに腐食性の強い液体中の実験は試験機を傷める恐れがあり実験が困難であるが、少なくとも酸性液、中性液、塩基性液それぞれについて代表的な液中の疲れがとりあげられて欲しい。

b) 気体中の腐食疲れ：近時耐熱材料の研究が進むにしたがつて高温疲れの問題も取り上げられるようになったが、高温疲れになると空気中のみならず各種雰囲気中の疲れが当然問題になつてくる。筆者は空気中の疲れはこの気体雰囲気中の疲れの特殊な一例に過ぎず、むしろ腐食疲れという広い視野から空気中の疲れを眺めた方が、かえつて疲れ現象の理解を早めるものではないかと

考えている。

c) 材料の組織の影響：化学組成は a) の中に含まれるが、そのほかに粒度、非金属介在物、微量元素の影響などがあげられる。

そのほか運転休止、応力振巾変動など空気中の疲れの研究にとりあげられた問題はそのまま腐食疲れの問題としても解明しなければならないことがらである。

さきにも述べたように腐食疲れの S-N 曲線は繰返数 10^7 でも水平にならないことが多く 10^8 さらには 10^9 までも実験を続けなければならないことがあるかもしれない。この方面に関心をもち長期にわたるたゆまぬ努力を惜しまぬような研究者が現われることを望んでやまない。(昭和 35 年 8 月寄稿)

文 献

- 1) H. J. GOUGH: J. Inst. Metals, 49 (1932), 2, p. 18
- 2) H. J. GOUGH: D. G. SOPWITH: J. Inst. Metals, 49 (1932), 2, p. 93
- 3) S. HARA: Internat. Conf. on Fatigue of (1956) p. 348
- 4) A. H. GOODGER: Internat. Conf. on Fatigue of Metals, (1956) p. 394
- 5) 岡本, 北川: 機械学会誌, 62 (1959), 481, p. 204
- 6) D. J. Mc ADAM: Congress Internat. Lessai Materiaux (1928, Amsterdam) 1, p. 305
- 7) 石橋 正: 金属の疲労と破壊の防止, 養賢堂
- 8) 西原, 村瀬: 機械学会論文集, 17 (1951), 61, p. 107
- 9) 宇野, 山口: 第 9 回材料試験講演会前刷, p. 17
- 10) 遠藤: 機械学会論文集, 24 (1958), 139, p. 167
- 11) 岩元: 機械学会論文集, 23 (1957), 127, p. 238
- 12) GOUGH, SOPWITH: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 135 (1937), p. 293
- 13) 遠藤, 藤井, 大森: 機械学会論文集, 23 (1957), 131, p. 484
- 14) 岩元: 機械学会論文集, 23 (1957), 135, p. 859
- 15) 大内田: 機械学会論文集, 19 (1953), 87, p. 27
- 16) 上田: 材料試験, 9 (1960), 78, p. 200
- 17) Mc ADAM: Proc. of A.S.T.M. 28 (1928), I p. 117
- 18) THUM, H. OCHS: Mitt. Material-Prüf-Anst. Tech. Hoch. Darmstadt, Heft 9 (1937)
- 19) 西原, 遠藤: 材料試験, 4 (1955), 21, p. 154
- 20) GOUGH, SOPWITH: Proc. Roy. Soc. 135 (1932) p. 392
- 21) 河本, 水の上: 材料試験, 3 (1954), 17, p. 427
- 22) 山口, 邑本: 材料試験, 6 (1957), 46, p. 474