

# 鋼材等の腐食疲れ対策について

北 川 英 夫

腐食疲れによる事故は跡を絶たず、その対策は難しいものとされている。しかし、その対策には、筆者によるものも含めて、多くの試みと研究がなされてきたので、その選択と適切な使用が望ましい。その一助にもと、これらの試みや研究を集成整理し、腐食疲れに関する筆者の見解を加味して、その功罪を論じてみる。

## 1. ま え が き

金属材料の腐食疲れ——すなわち腐食性環境下で繰返し荷重を受けると材料の強度が著しく低下する現象——が注目され初めた当初から<sup>1),2)</sup>、この分野での研究者はその多くが腐食疲れ対策に取り組んできた。しかし、現実には、腐食疲れによるらしい、または腐食疲れがかなり重要な一要因であるらしいと判断される事故は現在もなおかなり多い。筆者自身の調査または文献に見られる著名な腐食疲れ事故だけでも第1表のようにきわめて広範囲の機械・構造物にわたっていて、今もなお年数千件を超える事故例や、人命にかかわる事故例も含んでいる。これらの事故の発生に際しては多くの場合、それぞれ各種の対策が講じられたが必ずしも十分とは言えないものが多く、現在でも腐食疲れ防止は難問題の一つである。したがってこれら諸対策の最近までの経験と研究結果を整理して、その功罪を論じ、新しい提案など行なうことはかなり意義のあることであろう。限られた紙数にこれを尽くすことは難しいが、この問題に関する文献・書物で新しいものが見当たらないので、ここではその概要に触れてみたい。ただし、事故のほとんどは第1表に見るように鋼材に関して起こるので、対策も鋼材に関するものが大部分である。また誤用を避けるため、諸実験結果の一括表示はしないが、そのかわり参考文献をかなり多く示しておいた。

## 2. 腐食疲れ対策一般について

一般に材料の疲れ対策は、第1には、与えられた条件下での強度低下を知って、許容応力また安全率を決定する。または安全使用期間を推定することと、第2には、疲れによる強度低下の防止策、すなわち疲れ強さの向上策を施すこととである。腐食疲れ対策も以上に準じて二大別されてよい。

その第1の対策については、従来の腐食疲れ特性についての研究成果のすべてがその解答になる。これにつ

いては、すでに Thum・Ochs<sup>3)</sup>、Gough<sup>4)</sup>、Evans<sup>5)</sup>、Gould<sup>6)</sup>、石橋氏<sup>7)</sup>、川田氏<sup>8)9)</sup>および筆者<sup>10),11),12)</sup>により整理されたものがあるので、ここでは省略する。

特に問題になるのは、鋼材でもその強度が荷重繰返し回数とともに無制限にかつ激しく下がることで、使用期間を制限しないと許容応力をいかに小さく取っても事故を免れない点である。したがって従来、この第1の対策が有効に使用された例はあまり聞かず、腐食疲れ対策と言えは従来はもっぱら次の第2の対策が中心であった。

その第2の対策は通常腐食疲れ防止策または救済策と言われるものであり、ここではこの第2の対策を中心に述べる。

この第2の対策のほとんどは S—N 曲線の位置に関するものであった。しかしながら、直接の腐食疲れ対策だけでも、現実に要求されるのは、腐食疲れによる損傷の検出と判定、腐食疲れ発生の防止と延引、材料の最終的破断の防止と延引、腐食疲れ損傷による誘発事故の防止まで含んでいるから、S—N 曲線の左または下の領域まで考慮しなければならない。その場合は第2の対策に関する従来の研究結果だけでは対処しえないので、腐食疲れ特性一般から腐食疲れ機構にまで触れざるをえない。

## 3. 腐食疲れ対策と腐食疲れ理論

腐食疲れ対策の研究は、多かれ少なかれその研究者の腐食疲れ機構に対する考え方、すなわち腐食疲れ理論を反映している。少し前までは、腐食疲れは、通常の意味での疲れ (fatigue) と通常の意味での腐食 (corrosion) の共同作用による強度低下であるとする考え方が支配的であって、fatigue についての知識と corrosion についての知識の併用でそのまま腐食疲れ現象は説明できる<sup>4)</sup>とされ、corrosion fatigue と命名された<sup>2)</sup>。これを反映してか腐食疲れ対策も、通常の疲れ強さ向上法と通常の防食法のほとんどすべてがそのまま転用され、かつそれ以外の独自の対策は何一つ試みられていないと言っても過言ではない。そしてその努力は、S—N 曲線を右方ま

第1表 腐食疲れ事故例

大 別	小 別	備 考
鉄 道 関 係	鋼 鉄 道 橋	単けた橋アイビーム、トラス橋アイバー、その他（特に臨海地ははなはだしい）
	レール	継目部破端の大部分と横裂の一部（特にトンネル内に多い）
	継目板	継目孔より
	鉄まくら木	孔より（外国の例）
	車輪のバネ	コイルバネ（ねじり腐食疲れ）
	車 軸	特に冷凍車（食塩水腐食による）および炭水車
自動車関係	操だ（舵）関係	ステアリングアーム、スタブ・アクスル等
艦 船 関 係	プロペラ軸	かなり多い（曲げによるものとねじりによるものがある）
	だ（舵）軸	主にねじり
	ワイヤーロープ	特に機雷防ぎょ（禦）索の事故はよく知られている（波による振動のため）
航 空 機 関 係	鋼 線	フライングワイヤー（最近は聞かない）
	脚	農薬散布用飛行機
	そ の 他	最近一般にふん囲気による材料の劣化が問題にされつつある
熱機械および流体 機械関係一般	ボ ン プ	シャフト、ロッド、ボデーその他に起こる。特に石油井戸のロッドに多い。 （岩塩層通過と海底掘さくの場合）
	ボ イ ラー	加熱器、復水器のチューブおよびドラム（酸素の偏在の影響と超低速繰返し応力による。熱効果を伴う）
	タ ー ビ ン	ディスク、ブレイド、付属パイプ（蒸気による。平均応力がかかる）
エンジン関係一般	ディーゼルエンジン	水冷ピストン棒、クランクシャフト（温度サイクルも伴う）
	ガソリンエンジン	同上
	ガスエンジン	同上
荷役運搬機械関係	起 重 機	特に海岸にあるもの。走行用ガーダー、トロリー懸垂部、バケットに著しい。
	ケ ー ブ ル	炭坑用ケーブル、ケーブルカー、リフト。主にワイヤーロープ（外部より損傷が発見しがたいことが多い）
製 鉄 関 係	発生炉ガス用送風機	ピストン棒（冷却水による）
	圧 延 用 ロール	シャフトおよびロール本体（アルミニウム圧延用のものも）
発 電 関 係	水 車	ケーシング（低速サイクルによると思われる。湛水は酸性のものが多い）
	ペンストック	（誘起振動、水でつ、膨張収縮その他による）
農 業 機 械 関 係	噴 霧 器	砲金製圧力容器（低速度の繰返し応力による）
	ま（磨）砕 機	エッジ（繰返し衝撃）
土木機械関係	モーターグレーダー	懸荷用アーム
化学工業関係	パイピング	硫酸用鉛管および硫酸アンモニウム用鋼管（液流または外部より誘起された振動による）
	コンプレッサー	弁およびバネ
	圧 力 容 器	
	ボ ン プ	食塩水用うず（渦）巻ポンプ軸
	かくはん（攪拌）器	アルデヒド用軸
そ の 他	通信用ケーブル	鉛被覆（波による振動のため）
	製 紙 機 械	シャフト（アルカリ溶液によるものが多い）
	送 電 線	問題になったのは Al 合金のもの
	さく 岩 機	

たは上方に移動させることに向けられた。したがって偶然有効な方法を発見し得た時でもその根拠は薄弱であり、有効であると断定された方法でも、“有効である”ことの基準が明らかでないで、それを反論するに足る研究結果をもたない発見できる場合が多い。

腐食疲れ機構についての最近の研究結果<sup>(11), (13), (14), (15), (16)</sup>によれば、き裂の発生応力と発生繰返し数が乾燥時に比して小さく、したがって腐食疲れ特性はき裂の発生・進展に支配され、これに及ぼすふん囲気の影響が重大なものであると考えるべきであろう。この立場から考えると腐食疲れ対策はきわめて具体的になる。すなわち、

- 1) 腐食疲れの監視・判定はき裂の検出・測定・判定であり
- 2) 腐食疲れによる破断の完全な防止は腐食疲れき裂の発生の抑制とき裂の進展の早期停留化であり
- 3) 腐食疲れ破断時期の延引は、腐食疲れき裂発生時期の延引とき裂進展速度の抑制であり
- 4) 腐食疲れの回復は、き裂の除去またはき裂効果の抹殺である。

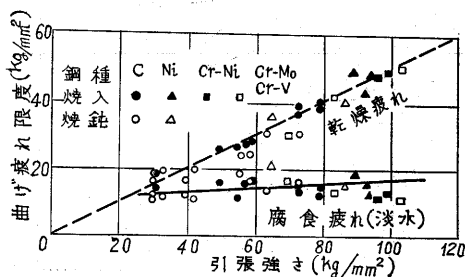
次章 4 以下の各種の腐食疲れ対策についての記述では、一応従来の諸研究を尊重して、疲れ強さ向上法的方法と防食法的方法に分けて述べ、その機構的考察にはこの新しい考え方を適用することにした。

#### 4. 疲れ強さ向上法的方法

従来この種の研究には、特に救済法と明記していないものもあり、またその多くは結果として救済になっていないが、実際にはしばしば誤用されているので、これらを含めることにする。

##### (1) 化学成分と熱処理による材質の改善<sup>(17), (18), (19)</sup>

C, Mn, Si, W, Ni, Cr 等を添加し、これに関連して焼入れ・焼戻し等の熱処理条件を変更することによって、鋼材の疲れ強さの向上をはかることは常識になっている。かかる冶金学的材質改善により静的強さや乾燥疲れ強さが向上しても、腐食疲れ強さの改善は望めず第 1 図の関係が知られている<sup>(18)</sup>。焼入れによりかえって腐食



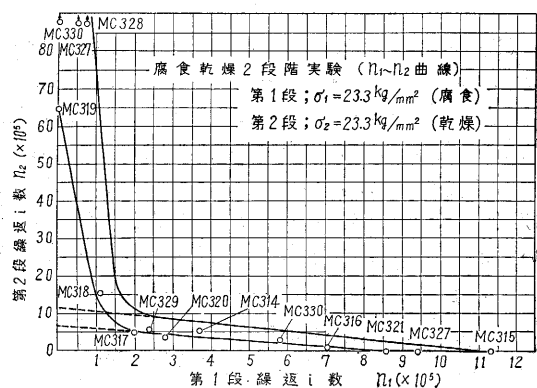
第 1 図 鋼材の静的引張り強さと腐食疲れ強さ (D.J. McAdam)

疲れ強さが下がる例もある。それにもかかわらず、明ら

かに腐食疲れを受けると思われる条件下で高張力鋼を、しかも高抗張力であることを期待して使う場合も多く、それが問題になりかけているのが現状である。

多量の Cr 等の添加によりステンレス鋼とした場合は例外であるが、これは次の 5 章で述べる。

(2) 常温加工と鍛錬 常温での圧延・引抜き等により適当な塑性加工を与えて材料の強さを向上させることもよく知られているが、腐食疲れ S-N 曲線には加工の有無による変化がほとんど現われてこない。第 1 図は (1), (2) を含めて材質と腐食疲れ強さの関係が示されていると考えてよい。以上の結論は、常温加工材についての McAdam<sup>(17)</sup> の、引張り塑性加工材についての Thum と Ochs<sup>(3)</sup> の実験結果や引抜き鋼線についての諸実験結果を総合したものであるが、繰返し荷重による加工硬化が、腐食疲れ特性に影響しないことも確かめられた<sup>(13)</sup>。understressing による影響さえほとんどないらしいことは筆者の同応力 wet-dry 試験結果を示す第 2 図<sup>(20)</sup>からも分かる (特に MC 327, MC 330 に注意)。



第 2 図 同応力 wet-dry 試験結果  
( $\sigma_1 = \sigma_2 = 23.3 \text{ kg/mm}^2$ )

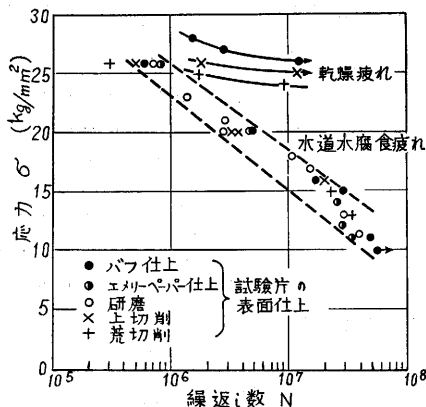
鍛錬は田川氏<sup>(21)</sup>の論文によれば、効果ありとされているが、その実験値の示すところはあまり効果なしと考えるべきものであり、他の材質的改善が無効であることと考え合わせれば当然である。

以上の (1), (2) に述べた諸傾向が厳密に成立するのは、一般に腐食効果の強い場合である。ほぼ中性で、しかも特に塩素イオン等を含んでおらず、液温が高くない場合は、材質改善はやはり腐食疲れ強度に若干の向上をもたらすことが多い。したがって以上の (1), (2) 両節の諸結論は“著しい腐食疲れ”を受ける場合と考えておきたい。

材料の機械的性質のほとんどすべてに影響する冶金学的材質改善が、なぜ腐食疲れ強さにのみ影響しないかについてはまだ明確な解答が与えられていない。McAdam<sup>(18)</sup>は同系統材料間での材質改善が材料の耐食性に

本質的な差をもたらさないことを理由にあげているが、強度と耐食性の両尺度の異質性より考えて、この説明の不十分さは明らかである。腐食疲れ材はき裂材であると考え、き裂材の機械的特性こそが材質改善の影響を受けにくいと考えるのも一つの考え方であり、これを裏づけるかのような実験結果もある。そして、このき裂発生、進展を補助する腐食作用も、同系統材料では材質等によりあまり差がないと考えるべきであろう。ただし、き裂進展速度の遅い腐食条件下で材質の影響が腐食疲れ特性に現われるのは、き裂材の乾燥疲れ切欠き係数が材質の影響を受けない<sup>7)</sup>からであり、き裂進展速度を著しく早める腐食条件下では腐食疲れによる強度低下限界は主としてき裂発生限界応力により支配される。この場合は低応力領域での腐食液のき裂発生効果と進展促進効果が材質の差の影響をあまり受けないと考えるべきである。腐食の弱い場合も長時間の腐食疲れを考える場合はこれと同様であろう。以上を要約すると、結局従来の材質の改善では有力な腐食疲れき裂の発生を阻止できないのである。

(3) 機械加工による表面仕上げ 疲れを考慮する時は、材料表面のミル・スケール、熱処理による黒皮、鋳肌を除去してなるべく平滑な表面に仕上げて強度低下を防ぐのが常識である。仕上げの不良に起因すると思われる事故も少なくない。しかし、腐食疲れ特性は研磨仕上げから、荒引き程度に至るまでほとんど差が認められない。その1例を第3図<sup>9)</sup>に示す。電解研磨はむしろ若干



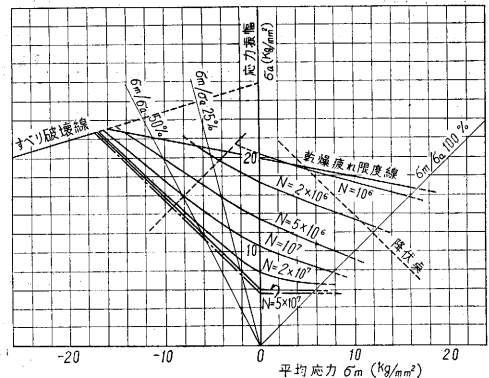
第3図 表面仕上げの差と腐食疲れ強さ  
(A. Thum & H. Ochs)

腐食疲れ強さを下げるといふ結果<sup>9)</sup>もあるが、これは13Cr鋼と水蒸気の組合せ、すなわち弱い腐食条件下での結果であり、強度低下が激しければやはり仕上げの有無は影響を失うであろう。

黒皮等は通常は強度低下の要因であるが、腐食疲れでは、これらが耐食性を示す限りでは、むしろ若干強度向上に役立つようである。しかし、長時間の腐食作用下で

はその効果はほとんど期待できない。

(4) 静的応力の重畳 両振れ繰返し荷重に重畳された静的応力、すなわち平均応力が腐食疲れ特性に与える影響は、第4図<sup>24)</sup>に示すように顕著であり、圧縮平均応

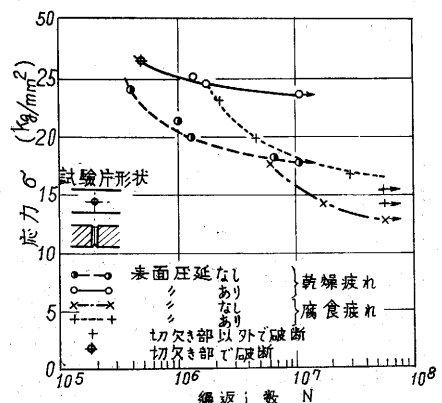


第4図 腐食疲れの時間疲れ強さ線図  
(軟鋼、食塩水、1500 rpm)

力は腐食疲れ強度の向上に役立つ。かかる特性があることはかなり以前より不完全ながら考えられていたため<sup>23), 25), 26)</sup>設計時に考慮した例<sup>3)</sup>もある。たとえば、腐食を受けやすい部材・部品が圧縮荷重を負担するように設計するのであるが、有効に使える場合はかなり制限される。

この圧縮平均応力の効果は腐食疲れき裂の発生の抑制よりも進展の抑制にある<sup>24)</sup>。腐食疲れき裂は材料表面にのみ発生する。したがって、十分な圧縮平均応力を、たとえば残留応力の形で表面に与えれば、き裂の進展を防ぎえて腐食疲れ破断を阻止する、また遅延させることができるはずである。次に述べる(5)、(6)、(7)、(8)の諸方法の効果は主としてこの理由によるものであろう。

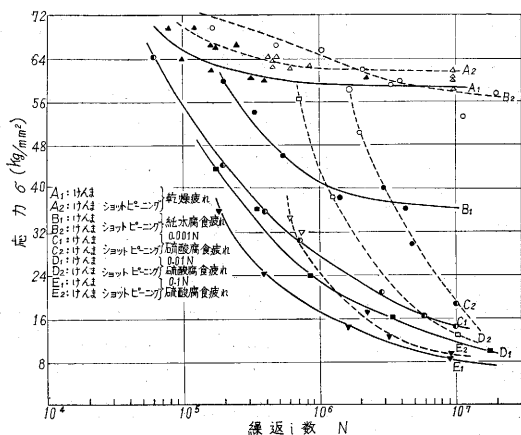
(5) 表面圧延 材料表面の危険部分が、あまり広い場合に、一種のロールでその部分の表面を適当な圧



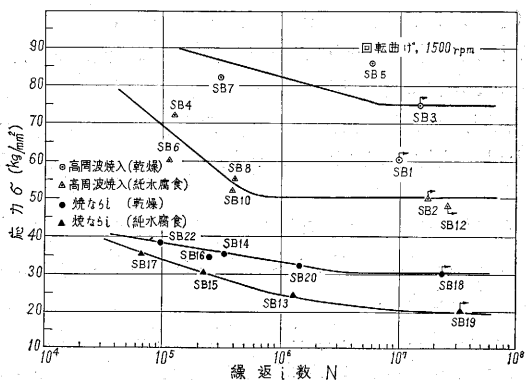
第5図 表面圧延した鋼材の腐食疲れ特性  
(A. Thum & H. Ochs)

力で加圧して表面近くに塑性変形を与えれば、疲れ強さの向上に役立つことはかなり以前から分かっていた。腐食疲れに対しても古くから試みられ<sup>31), 27), 28)</sup>、第5図のように S-N 曲線を右上方に移動させることが知られている。塑性加工による材質変化が無効であることは、(2) の記述より明らかであるから、この効果が表面の圧縮残留応力によるものであることはほぼ間違いない。

(6) ショットピーニング<sup>29), 30), 31)</sup> 乾燥疲れ強さ向上法としてのショットピーニングの効果は、肯定的否定的のいずれとも言えない。表面の残留応力は平均して圧縮が卓越するようであるが、材料表面の粗面化や不均質な塑性加工を伴うためであろう。腐食疲れでは既述のように後の二つの効果は減殺され、圧縮残留応力の効果のみが残るので、腐食作用が弱い場合はき裂の進展を阻止して S-N 曲線を右上方に移動させる効果がある。しかし通常の用法では残留応力の存在する表層はきわめて浅いので、硫酸・食塩水のように強力な腐食条件下ではある時間の後に、すべてその効果を失う。1例を第6図<sup>31)</sup>



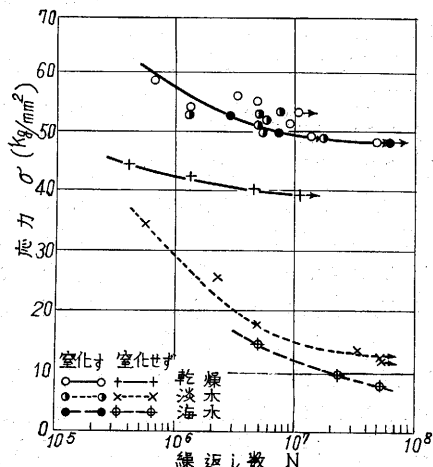
第6図 ショットピーニングした鋼材の腐食疲れ特性 (パネ鋼, 硫酸) (竹内, 本間)



第7図 高周波焼入れした鋼材の腐食疲れ特性 (S45C, 地下水, 回転曲げ)

に示す。

(7) 高周波 (表面) 焼入れ 上述の表面圧延・ショットピーニングの効果は、既述のように S-N 曲線の右上方への移動にあり、少なくとも  $10^7$  回程度まででは無制限降下特性の改善に何ら寄与しない。すなわち延命策である。時間の経過とともに失効する理由は、一つには腐食孔・腐食溝等の浸透により荷重負担有効断面の減少と残留応力の開放を招くことにもあるが、一つにはこれら塑性変形により生じた残留応力が繰返し荷重下で減少するためであろう。もし繰返し荷重下でもなお消滅しないような圧縮残留応力を相当な深さまで与える方法があるならば、長時間腐食疲れき裂の進行を阻止して腐食疲れの防止に役立つであろう。この目的に合致するものとして選ばれたのが高周波焼入れである。ずぶ焼きでもよいが有効な表面焼入れができればなおさらよい。良好に施工できた場合は、第7図<sup>32)</sup>に示すように、疲れ限度らしきものも得られ、しかも約  $50 \text{ kg/mm}^2$  で鋼材の腐食疲れ強さとしては現在までに得られた最高のものに属する。この場合も著しい発錆が応力の方向と直角な線状隆起の集合として現われるからこの種の処理によって耐食性ないしは、き裂発生を抑制する能力が改善されていないことは明らかで、したがってこの場合の腐食疲れ防止作用は圧縮残留応力のき裂進行に対する抑制効果によるものと考えざるを得ない。平均圧縮応力が著しく大となれば、すべり破壊を招き第4図に見られるように時間疲れ強さ線は低下を始めるが、高周波焼入れ材はこれに対する抵抗力も大である。注意すべきことは、高周波焼入れをしても、急熱急冷の効果を十分に利用しないと、従来の電気炉焼入れと同じ結果になり、かえって強度が下がる<sup>32)</sup>。また強腐食・長時間腐食に対しては特別の考慮が必要である。



第8図 窒化した鋼材の腐食疲れ特性 (A. Thum & H. Ochs)

(8) 窒化<sup>3), 21), 33), 34), 35), 36), 37), 38)</sup> 窒化は乾燥疲れ防止はもとより、腐食疲れ防止にも古くから着目された。この効果についての明確な機構の解明は見られないが、既述の高周波焼入れとはほぼ同じであることは明らかで、しかも両者そろって腐食疲れ対策中抜群の成績を示している。その良好な結果は第8図に示すように、高周波焼入れの場合とほとんど同程度の特性を与える。窒化材は通常の意味での耐食性もよいと言われ、耐摩性、疲れ限度、腐食疲れ強さのすべてにすぐれていることになる。しかし、多くの実験結果のなかには、腐食疲れ特有の無制限降下特性の改善に少しも役立っていない結果の方が多く、最適窒化条件がまだ明らかでないこと、施工できる材種に制限のあること、大型部品に適用しにくいこと、施工費の高いこと、加工上の問題等が現状での欠点であり今後の開発・研究の余地が残されている。

(9) その他の方法 窒化・高周波焼入れと同様当初耐摩性向上を目的として使用されたといわれる滲炭も、一般には疲れ強さ向上に役立つ。固体滲炭についてはまだ実験例はないが事故例はある。液体滲炭（青化）についてはただ一つ実験例<sup>39)</sup>があり、S-N曲線を右に移動させる効果があるが、 $2 \times 10^7$ 回以上ではほとんどその効果を失う。

珪素滲透をした材料の腐食疲れ特性は、乾燥疲れのそれとほとんど異なるところがなかった<sup>39)</sup>。しかし珪素滲透材の強度自体がきわめて低く第1図から明らかなように、この場合は初めから腐食疲れそのものが問題とならないのであり、一つの試みというほかはない。

## 5. 防食法的方法

この分類に属する諸方法の優劣の判定は定量的にはもとより、定性的にもかなりの困難がある。温度や供給方法によって腐食液の作用は著しく変わる。材料と液の組合せ数は無限とさえ言える。このように化学的ないし電気化学的諸方法の効果には、関係する諸因子の数が多いのに、たとえば平滑材の乾燥疲れ限度や引張り強さのように公認された統一基準尺度がなく、大多数の論文には比較すべき諸因子の値が記載されていない。したがって従来の研究結果からでは一般的結論が下しにくいのである。筆者としては、かなりの程度の一般性を目標として記述するが、該当しない結果もまた少なからずあろう。

(1) 耐食性金属の使用 ここでは普通鋼以外の材料についてもふれるが、それは機械等において腐食ないし腐食疲れを避けて一部耐食金属で代用する場合も多いので、鋼材を主対象とするこの論文にもこれを含めることにしたのである。

腐食疲れに強い金属材料を探して鋼に代用させるという努力は腐食疲れ研究史の初期より行なわれていたし、今もなお続けられている。各種のステンレス鋼<sup>17), 34), 39), 40), 41)</sup> モネルメタル<sup>18)</sup> その他の Ni 合金<sup>42)</sup>、アルミ青銅その他の銅合金<sup>18), 43), 44)</sup>、チタン<sup>45), 46)</sup>、その他<sup>47)</sup> 耐食性ありと思われる構造用金属材料のほとんどは各種条件下でその耐腐食疲れ性が試験された。これらは予想通りそれぞれある程度の効果があり、中にはまったく腐食疲れを生じないで疲れ限度さえ得られかなりの強度が保証されるかのように考えられたこともあった。しかし多くの実験結果を総合すると、これらの耐食性材料では腐食疲れ現象の発現が相対的に遅いのであって、 $10^7$ 回強度のみを見たのでは結論が下せない。普通の実験速度では、銅合金では $10^7$ 回をはるかに超してから、モネルメタルは $10^8$ 回を超してから急に顕著な強度低下を開始する例がある。また耐食性であるかどうかは相手の腐食条件いかによるので、従来の耐食合金はほぼ中性の腐食液に対するものであるとさえ言える。とにかく純水、酸性液および塩化物溶液のいずれに対しても見るべき腐食疲れを起こさず、しかも必要な強度を有する材料はまだ発見されていないのであって、この意味では、この方法はまだ成功したとは言えない。すなわち、鋼に限らずどの金属材料でもき裂の発生・成長を促進するふん囲気が存在すると言えるだろう。しかし、とにかく純チタンとステンレス鋼は現在かなり有望で、中性液では $10^7$ 回強度で $30 \text{ kg/mm}^2$ 程度が得られているのであるから、ある一定の使用期間後部品交換等のできる箇所には使用できる。いうまでもなく、機械・構造物の多くの部材・部品を上記耐食金属で代用することは不可能であり、かつ耐食材料自体も不完全なので材料表面に防食を施したり ((2)~(4))、外部よりの腐食条件に手を加える ((5)~(7)) 等の措置が当然平行して考えられた。以下にそれを述べる。

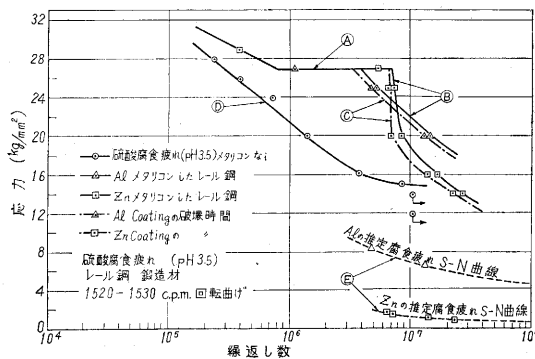
(2) 金属被覆 亜鉛被覆<sup>35), 37), 38), 48), 49), 50), 51), 52), 53)</sup> (電気メッキ、溶融メッキ、溶射、シェラダイジング) カドミウム被覆<sup>35), 38), 51), 52), 54)</sup> (主として電気メッキ)、アルミニウム被覆<sup>51), 52), 53), 55)</sup> (溶射、溶融浸漬)、青銅被覆<sup>56)</sup>、ニッケル被覆<sup>36)</sup>、錫被覆<sup>50)</sup>、クローム被覆<sup>21), 34), 54)</sup> (以上主として電気メッキ) の効果が調べられている。

その狙いは材料表面と液との隔絶であるが、亜鉛被覆の中には当初から後述の cathodic protection を目標としたものもある。

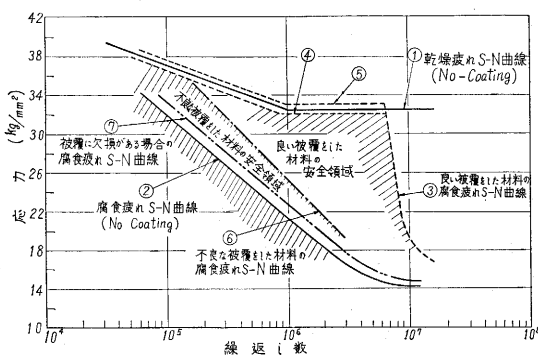
これら金属被覆は施工の出来不出来に差が大きいので、一率に論じられないが、腐食疲れ防止効果は全体としてはきわめて否定的である。クロームメッキ、ニッケルメッキでは特にそうであり、比較的有效な亜鉛被覆で

も施工時の発生水素で下地材が損傷されて強度の低下を見ることが多い。表層の被覆金属が特に腐食疲れに強いこと、材質的に弱くて単なる繰返し荷重によっても破壊されて機能を失う可能性が大きいことを考えれば、これは当然である。

亜鉛等のように電気化学的保護作用が強くて、下地表面が無損傷である時のみかなりよい効果が得られている。その場合の防止機構についての筆者の考え方を小瀬氏<sup>53)</sup>の求めた実験値と筆者の追試の結果を例にとって説明する。下地材はレール鋼、被覆は亜鉛およびアルミニウムのメタリコン（溶射）、pH 3.5~3.6 の硫酸酸性腐



第 9 図 腐食疲れに対する被覆の効果の機構的説明図 A  
(実験値は小瀬氏による)



第 10 図 腐食疲れに対する被覆の効果の機構的説明図 B

食疲れである。

第 9 図の④は下地材の乾燥疲れ破断に基因する、⑤は同じく腐食疲れに基因する被覆材の腐食疲れ S-N 曲線である。第 10 図の①は無被覆材の乾燥疲れ S-N 曲線であるが、④は一般に①と一致せず④または⑤の位置に出現する。これは被覆施工時の下地材表面の粗面化や腐食ぜい化、プラストによる残留応力、被覆による空気遮断等に基因する。したがって被覆材の腐食疲れ時の安全使用領域は④と③または⑤と③で囲まれた領域となる。しかし、JIS 防食ペイント、乾燥不十分な鉛丹や

ポリウレタン、不良なジンクリッチペイント等では③は⑥の位置にくる。④または⑤以下の領域で被覆材が腐食疲れを受けると、被覆がまず腐食疲れや weathering により機能を失い、間もなく下地材の腐食疲れが始まる。被覆が部分的に破壊されても電気化学的に保護されるためこの開始は若干遅れる。被覆に欠損のある場合の S-N 曲線⑦がこのことを示している。⑥の示す繰返し数から⑥の示す繰返し数を引いて得られる③が被覆の失効時期を近似的に示す。この場合の応力は下地材の公称応力で考えているから、被覆のひずみと下地材表面のひずみが同じであるとして

$$\frac{\sigma_c}{E_c} = \varepsilon = \frac{\sigma_b}{E_b}$$

$\sigma$  は応力,  $E$  はヤング率

ただし添字  $b$  は base metal,  $c$  は coating を示す。

$$\therefore \sigma_c = \frac{E_c}{E_b} \sigma_b$$

ここで

$$\frac{E_c}{E_b} = \begin{cases} \frac{1}{3} : \text{Al} \\ \frac{1}{16} : \text{Zn} \end{cases}$$

程度である。

この換算された  $\sigma_c$  による曲線⑥が被覆金属（この場合は Zn, または Al）の腐食疲れ S-N 曲線である。多くの下地材の乾燥疲れ・腐食疲れ両 S-N 曲線は既知であり、⑥は一度求めておけばどの下地材にも原則として共通であるから⑥が求められる。この場合曲線③を決定するのは、メタリコンの場合は、被覆金属の溶失でなく被覆の完全な腐食疲れ破壊であるから、被覆金属の上層にき裂が入ってはく離しても、これを材料表面より離脱しないようにしておくと、下地材表面に密着した被覆下層を電気化学的に保護するので、鋼表面には腐食疲れき裂の発生がまったく見られず、S-N 曲線は大きく右に移動して長時間腐食疲れ破壊が起こらない。

したがって金属被覆施工の要点は

- (1) 被覆金属自体の腐食疲れ特性がよいこと
- (2) 被覆のヤング率が相対的に小さいこと
- (3) 施工時に下地材表面にき裂発生条件を与えないこと

こと

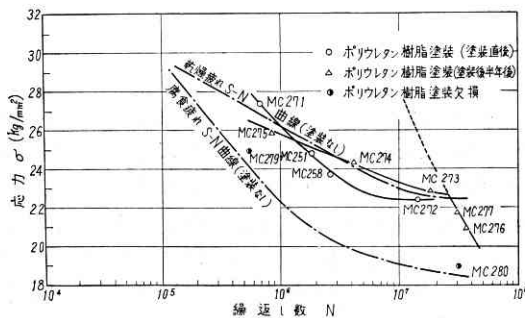
(4) 被覆金属が下地材に対して強い電気化学的保護作用を有する時は、被覆の部分的破壊後もなるべく材料表面より離脱させないこと等である。

(3) 塗装 鉛丹<sup>57), 58)</sup>, 各種人工樹脂塗料<sup>13), 57), 59)</sup>, 60), 防錆塗料<sup>57)</sup>, エナメル<sup>51), 52)</sup>, 亜麻仁油<sup>52)</sup>, その他<sup>18), 38), 61)</sup> についての研究結果がある。その狙いは、金属被覆の場合とまったく同じであるが、ただ塗料の場合は電気化学的保護作用に相当する役割は塗膜中の抑制剤



第11図 腐食疲れ試験片への亜鉛メタリコンの施工

(inhibitor) が果たすのである。上記諸塗装のうち前三者はかなり有効で特に最近の合成樹脂塗料にはポリウレタン樹脂のように、すぐれた特性を示すものがあり、その性能や腐食疲れ救済効果の機構は既述の亜鉛メタリコン等のそれとまったく同じであり、その一例を第12図<sup>13)</sup>に示す。ただし現用の塗装中の inhibitor の作用は亜鉛



第12図 塗装した軟鋼の腐食疲れ特性 (地下水、回転曲げ)

の電気化学的保護作用に劣るようなので、塗膜がたとえば幅 1~2mm 程度でも欠損していると第12図または McMaster<sup>60)</sup>の報告に見られるように、無被覆材と同じ寿命しか保証できない。したがって、機械的に強く、しかも(2)の(1)~(3)に述べた諸特性を持つ塗膜でなければならないという困難が残る。施工対象物の選択も必要である。しかしとにかく、金属被覆も塗装も使用を誤らなければ、多数の繰返しに耐えるので適当な被覆保全と一定期間ごとの再施工が保証されれば腐食疲れき裂の発生を阻止して、安全な腐食疲れ防止効果を果たす。ただし、腐食が強く荷重繰返し速度が遅い場合は単なる化学作用により被覆の効果が失われるので、これについては別途検討が必要である。

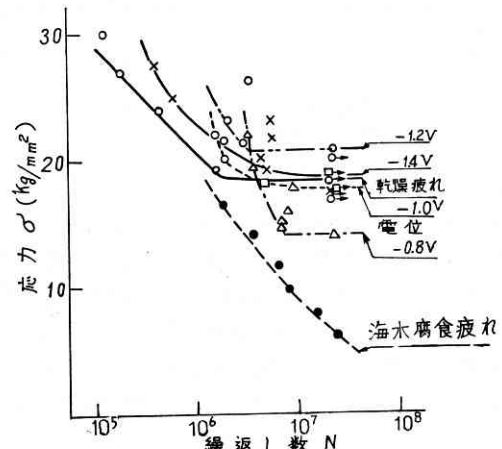
(4) 陽極処理と化成処理 軽合金には陽極処理による保護皮膜の防食法が多く使われ腐食疲れに対する効果についても、かなりの実験結果<sup>18), 51), 62), 63)</sup>がある。陽極処理した材料を熱湯または重クロム酸ソーダ等で処理し

たり、陽極処理後その上にさらに塗装を施すとかかなりの効果が見られることもあるが、S-N曲線の形は本質的には変わらず単なる平行上昇である。鋼材に対する化成処理たとえば、りん酸塩膜については若干の実験結果<sup>31), 37)</sup>もあるがこれの効果はまず期待できない。

#### (5) 腐食液の処理<sup>21), 37), 64), 65), 66), 67), 68), 69), 71), 72), 73), 74)</sup>

以上述べたように金属表面を被覆する方法は有効な場合もかなりあるが、摩擦し合う部分にはまったく使えないし管理・交換のできないところには、一般に不適である。腐食液に鋼材表面が露出せざるをえない場合も多い。その場合の対策の一つがこの腐食液の処理で、広義の抑制剤の添加がそれである。主として純水または塩化物水溶液に対する添加の効果が調べられ、そのうち特に有効であると判断されるのは乳化油、それにつぐものは防錆油、重クロム酸塩、クロム酸塩であり、若干効果ありと思われるのは少量の苛性ソーダ、炭酸ソーダ等である。その効果の程度は一定せず添加量や、材料と腐食液の条件等の組合せにより S-N 曲線の位置は多様であるが、一般に無処理時の腐食疲れ S-N 曲線を右上方に順次移動させる効果であり、被覆材のように、ある時期までき裂の発生をまったく阻止することはできない。現実には機械の冷却水、ボイラー用水のように同じ液を反覆使用する場合に限り適用できる。ある種の機械・器具で生産工程中に腐食と繰返し応力を受け不良品を出す場合があるが、この場合には当然効果がある。

(6) 接触気体の処理 腐食疲れが起こるには腐食液のほかは空気、特に酸素の供給が必要条件であるとされ、水分は触媒的機能を果たすとさえいわれることがある<sup>33), 34), 75), 76), 79), 80)</sup>。したがって、空気を排して不活性ガスで表面を包んだり、液中の溶存酸素を排除し、同時に接触気体の酸素分圧を下げる等のことができれば



第13図 cathodic protection を施した場合の腐食疲れ特性 (軟鋼、海水) (南、高田)



腐食疲れを防げるであろう。塗装やメタリコンの効果中には多分にこの影響が含まれるものと考えてよい。この方法が使用できる場合は局限されるので、現在まではまだ腐食疲れ救済法として採用されたことはなかったが、特殊な場合にはこの原理もいづれ応用されるものと考えられる。き裂の発生・進行に対するふん囲気の影響に関しては次第に知識が開発されているから、この問題は近く改めて論ずる機会もあろう。

(7) **cathodic protection**<sup>51), 57), 72), 78), 79), 81), 82), 83), 84), 85), 86), 87), 88), 89)</sup> 最近特に注目されている有力な方法の一つである。その具体策としては、材料表面に向けて陰極電流を流す、亜鉛塊を腐食液中にけん垂するか、または保護すべき鋼材表面に固着する、亜鉛テープを巻き付ける、ジंकリッチペイントを塗る等である。既述の亜鉛電気メッキや亜鉛メタリコンもこれに含めてよい。この方法が有効に使用できた場合は腐食疲れき裂の発生は見られず、乾燥時より若干高い疲れ限度が得られることもあるが、そのためには、たとえば陰極電流の場合なら第 13 図<sup>87)</sup>に示すように電位、したがって電流密度をある狭い範囲に合わせなければならないので、複雑な表面を持つ実際の機械・構造物では使用上の困難さがある。亜鉛塊等の場合も同じである。使用上の大きな制限は、一般に水に浸った部分にしか使えない。船舶でも常時海水に浸った部分はよいが、載荷によって水中に出入する部分、常時空中にあって海風やしぶきでぬれる部分には有効に使用できない。ジंकリッチペイントなら液中に浸ってなくてもよいことになるが、ペイントの機械的強度が低いので、送電線鉄塔などにはよいが、橋りょうのアイビーム等には使えない。また亜鉛はそれ自身の消耗によって鋼材を保護しているのであるから、適時それを補給できる条件も考えておく必要がある。陰極電流ならその考慮は不要だが、その代わり、電流値を長時間常時一定に維持するというさらにいっそうの困難な問題が生じる。この方法の代表的研究者たる Evans 自身も言う通り、有効な方法ではあるが、どの場合にも使えるとは限らない方法なのである。

(8) **防食法的方法の使用上の問題** 筆者<sup>13), 20)</sup> および, Evans・Simnad<sup>81), 82)</sup> によれば、疲れ試験中腐食作用のみ止めると継続して腐食疲れを与えた時よりも寿命は短くなるかはほぼ相等しい。したがって防食効果の断続または途中よりの開始は、防食を施さなかったよりも一般に有害である。これは、ある応力以下では、腐食疲れによりある程度まで成長したき裂は、腐食作用が除かれると進行速度が早くなるからである。したがって、防食法的方法は、その適用時期、適用後の管理維持、補給または再適用等に十分な注意を払わないと結果として有害

である場合が生じうるであろう。

また材料表面を局部的に覆うと局部電流により腐食疲れ強さの低下が激しい<sup>90)</sup>から、部分的にはく離してしかも抑制剤の効果が失われた塗膜などを材料表面に放置することは百害あって一利なしと言わねばならない。

防食法的方法の効果は主として腐食疲れ特有のき裂発生または成長の促進作用を減殺するにあり、一般に乾燥疲れ特性以上に強度の向上は望めない。一方、4章の疲れ強さ向上法的方法では腐食疲れき裂の発生は阻止しえないし、その進行の抑制も不十分であることが多いが、強度は本質的には向上している。したがって両者の併用はその短所を補い合うであろう。たとえば高周波焼入れ材に亜鉛メタリコンその他の cathodic protection を併用する等である。

## 6. その他の対策

腐食疲れ特有の強度低下ないし寿命低下現象は、き裂の発生時期が早められ、発生応力が低下し、進行速度が高くなることによることが分かってみれば、以上の諸方法のほかには次の対策も考えられてよい。

(1) **腐食疲れの回復** 腐食疲れき裂をある時期に除去して直ちに防食を施せば、寿命と強度は向上するか少なくとも処女材と同じであるから、腐食疲れ材の回復になる。き裂は表面のみにあり時期を選べば、その切除厚さはきわめて少なく済み——たとえば 1/100 mm 以下——切除作業もハンドグラインダー、きさげ、ペーパー等でできる。

(2) **腐食疲れの監視と部品交換** 腐食疲れ損傷はき裂であるから、現在のまたは近い将来の発達した非破壊検査技術と抜取り検査により、その検出と測定は可能であろう<sup>91)</sup>。定期検査によりき裂の進行程度を判定できるならば、部品・部材の安全な交換時期が指定できる。したがって、検査と交換を考慮して設計することが許されるならば、4・5 両章に述べたと別の意味での腐食疲れ対策が成立することになる。腐食疲れき裂の進展法則については別に報告する<sup>14), 92)</sup>。

(3) **古材使用による材料の節減** 繰返し荷重を受けると材料にはき裂の発生が準備される。これを古材と呼ぶことにすれば、腐食疲れ寿命は古材と新材との間で差がない。したがって、いったん腐食疲れを受け始めた材料は指定期間後に廃棄するものとすれば、その箇所に使用する材料は、すでに乾燥疲れ、強度の超過荷重、軽度の腐食疲れを受けた古材の転用でよい。このことは経済性を考慮すれば消極的な意味での腐食疲れ対策と考えるとよいであろう。

## 7. あとがき

以上、き裂を考慮した腐食疲れ機構という新しい立場から、腐食疲れ諸対策を再検討し、同時に従来の諸研究成果を整理して腐食疲れ諸対策の功罪を論じ、若干の新しい提案をも試みた。

この研究に際しては、材料力学・応用化学関係を初めとする本研究所の諸先生、日本国有鉄道、高周波熱錬株式会社、東京メタリコン株式会社、丸山製作所、その他のご援助をいただいた。腐食疲れ事故に関しては貴重な資料を多くの方々からいただいた。ここに合わせて深謝の意を表する次第である。(1962年8月11日受理)

## 文 献

- 1) B. P. Haigh: "Experiments on the Fatigue of Brasses" J. Inst. Met., 18, (1917), 55
- 2) D. J. McAdam, Jr.: "Stress-Strain-Cycle Relationship and Corrosion-Fatigue of Metals" Proc. ASTM, 26, 2 (1926), 224
- 3) A. Thum, H. Ochs: "Korrosion und Dauerfestigkeit" (1937) VDI-Verlag
- 4) H. J. Gough: "Corrosion-Fatigue of Metals" J. Inst. Met., 49, 2, (1932-12), 17
- 5) U. R. Evans: "Metallic Corrosion Passivity and Protection" (1946) Edward Arnold & Co., London
- 6) A. J. Gould: "Corrosion Fatigue" Proc. Intern. Conf. Fat. Met., (1956) IME, 341
- 7) 石橋正: "金属の疲労と破壊の防止" (1954)
- 8) 川田雄一: "疲れ強さを低下する諸因子" 機械学会第58回講習会教材 (1953-10), 112
- 9) 川田雄一: "金属の疲労と設計" (1959), オーム社
- 10) 北川英夫: "疲れにおける表面効果" 機械学会第150回講習会教材 (1961-5), 63
- 11) 北川英夫: "金属材料の腐食疲れ" 第6回金属材料の強度と疲労総合シンポジウム予稿 (1961-4), 55
- 12) 北川英夫: 新しい設計技術講習会, 化学機械装置材料講習会, 疲労と摩耗対策講習会教材 (1959) 日刊工業
- 13) 岡本舜三, 北川英夫: "腐食疲れに関する一考察" 機誌 62, 481, (1959-2), 204
- 14) 北川英夫, 堀内正明, 藤田茂: "鋼材の疲れき裂の挙動に与えるふん囲気の影響" 機械学会, 第40期全国大会前刷, 77, (1962-10), 107
- 15) 遠藤吉郎, 永井欣一, 有崎慶治: "腐食疲れを受けた鋼材のき裂深さと低温ぜい性について" 機論, 27, 179, (1961-7), 1100
- 16) S. Hara, J. Hoshino, J. Arai: "Rotating Bending Fatigue Tests on Large Mild Steel Specimens under Sea Water Corrosion": Proc. 10th. Jap. Nat. Cong. App. Mech. (1961-3), 163
- 17) D. J. McAdam, Jr.: "Corrosion Fatigue of Metals as Affected by Chemical Composition, Heat Treatment and Cold Working" Trans. ASST, 11, 3, (1927-3), 355
- 18) D. J. McAdam, Jr.: "Fatigue and Corrosion-Fatigue of Metals" Congrès International pou L'essai des Matériaux, Amsterdam, Sept., 1927, 1, (1928), 305
- 19) T. J. Dolan: "Simultaneous Effects of Corrosion and Abrupt Changes in Section on the Fatigue Strength of Steel" J. App. Mech., 5, 4, (1938-12), A-141
- 20) H. Kitagawa, M. Sato: "Apparent Brittleness of Steel Produced by Corrosion Fatigue" Proc. 4th. Jap. Cong. Test. Mat., (1961-3), 29
- 21) 田川浅次郎: "熔鋳炉送風機用瓦斯機関ピストン棒材料の腐蝕疲労に関する研究" 鉄と鋼, 23, 11, (1937-11), 1063.
- 22) 石橋正: "鋼材のき裂強さ" 機誌, 60, 465, (1957-10), 1054
- 24) H. Kitagawa, T. Morohashi: "Some Behaviors of Structural Steel Subjected to Corrosion Fatigue (The 4th Report)—Influence of Mean Stress—" Proc. 10th. Jap. Nat. Cong. App. Mech. (1961-3), 155
- 25) G. Seeger: "Wirkung von Druckvorspannungen auf die Dauerfestigkeit Metallischer Werkstoffe" Mitt. Mat. prüf. anst. Tech. Hochs. Stuttgart (1935) VDI-Verlag, Berlin
- 26) G. Seeger: "Dauerfestigkeit unter Druckvorspannung" Z. VDI, 80, 22, (1936-5), 698
- 27) A. Thum, H. Ochs: "Die Bekämpfung der Korrosionermüdung durch Druckvorspannung" Z. VDI, 76, 38, (1932-9), 915
- 28) O. Föppel, O. Behrens, Th. Dusold: "Die Erniedrigung der Schwingungsfestigkeit durch Korrosion und ihre Erhöhung durch Oberflächendrücken" Z. Metallkunde, 25, 11, (1933-11), 279
- 29) A. J. Gould, U. R. Evans: "The Effect of Shot-Peening upon the Corrosion-Fatigue of a High-Carbon Steel" J. Iron Steel Inst., 160, (1948-10), 164
- 30) Y. Minami, K. Inami, N. Okano: "Stress-Corrosion of Mild Steel. 2. The effect of Shotblasting on the Corrosion-fatigue of Mild steel" 造船協論, 102, (1958-2), 267
- 31) 竹内栄, 本間恒夫: "金属の疲労強度に及ぼす Shot-peening の影響 (第4報) 腐蝕疲労に対する効果について" 金属学会誌, 22, 2, (1958-2), 59
- 32) 北川英夫, 中村宏, 高橋秀雄, 堀内正明: "鋼材の腐食疲れの救済に関する研究 (1)—高周波焼入の影響 (第1報)—" 機械学会第38期全国大会前刷, 32, (1960-11), 55
- 33) T. S. Fuller: "Endurance Properties of Steel in Steam" AIMME Tech. Pub., 294, (1930-2), 3
- 34) T. S. Fuller: "Endurance Properties of Some Wellknown Steels in Steam" Trans. ASST, 19, 2, (1931-12), 97
- 35) R. Mailänder: "Über die Dauerfestigkeit von nitrierten Proben" Z. VDI, 77, 10, (1933-3), 271
- 36) N. P. Inglis, G. F. Lake: "Corrosion-Fatigue Tests of Nitrided Steel and Nickel-plated Steel in River Tees Water" Trans. Faraday Soc., 28, (1932), 715
- 37) A. Jünger: "Steigerung der Seewasser-Korrosion-wechselfestigkeit von Stahl" Z. VDI, 81, 33, (1937-8), 974

- 38) T. J. Dolan, H. H. Benninger: "The Effect of Protective Coatings on the Corrosion-Fatigue Strength of Steel" Proc. ASTM, 40, (1940), 658
- 39) H. J. Gough, D. G. Sopwith: "Some Comparative Corrosion-Fatigue Tests Employing Two Types of Stressing Action" J. Iron Steel Inst., 127, 1, (1933), 301
- 40) W. E. Harvey, A. J. Ciastkewicz, F. J. Whitney, Jr.: "Corrosion-Fatigue Study of Welded 18: 8 Stainless Steel" Weld. J., 14, 1, (1935-1), 18
- 41) N. P. Inglis, G. F. Lake: "Corrosion-Fatigue Tests of Mild Steel and Chromium-Nickel Austenitic Steel in River Tees Water" Trans. Faraday Soc., 27, (1931), 803
- 42) D. J. McAdam, Jr.: "Corrosion-Fatigue of Non-Ferrous Metals" Proc. ASTM, 27, 2, (1927-12), 102
- 43) H. J. Gough, D. G. Sopwith: "The Resistance of Some Special Bronzes to Fatigue and Corrosion-Fatigue" J. Inst. Met., 60, 1, (1937), 143
- 44) 竹内勝治: "黄銅の腐蝕疲労に関する研究" 金属学会誌 22, 3, (1958-3), 132
- 45) 竹内勝治: "工業用純チタニウムの耐疲労性に就いて (第1報)" 軽金属, 19, (1956-5), 90
- 46) 竹内勝治: "工業用純チタニウムの耐疲労性について (第2報)" 軽金属, 24, (1957-3), 82
- 47) 中城忠彦, 塩田信雄, 今林守: "耐食軽合金鋳物の腐食について (第2報) 腐食疲労と潰食" 金属学会, 昭和34年春期大会講演概要 (1959-4), 86
- 48) B. P. Haigh: "Chemical Action in Relation to Fatigue in Metals" Trans. Inst. Chem. Eng., 7, (1929), 29
- 49) W. E. Harvey: "Zinc as a Protective Coating Against Corrosion Fatigue of Steel" Metals and Alloys, 1, 10, (1930-4), 458
- 50) J. Krystof: "Über die Haltbarkeit von Zinn-und Zinküberzügen bei Korrosiondauerbeanspruchungen" Metallwirtschaft Wiss. Tech., 14, 16, (1935-4), 305
- 51) I. J. Gerard, H. Sutton: "Corrosion-Fatigue Properties of Duralumin with and without Protective Coatings" J. Inst. Met., 56, 1, (1935), 29
- 52) D. G. Sopwith, H. J. Gough: "The Effect of Protective Coatings on the Corrosion-Fatigue Resistance of Steel" Engg. 143, (1937-5-7), 533
- 53) 小瀬豊: "軌道材料の防食対策 (第7報) レール材の腐食疲労" 鉄研速報, 60-249, (1960-9), 21
- 54) D. J. McAdam, Jr.: "Fatigue and Corrosion Fatigue of Spring Material" Trans. ASME, 51, 1, (1929), 45
- 55) 加藤良雄: "鋼の耐久性に及ぼす高温浸漬法によるアルミニウム被覆の影響" 材試, 10, 91, (1961-4), 304
- 56) J. N. Kenyon: "A Corrosion-Fatigue Test to Determine the Protective Qualities of Metallic Platings" Proc. ASTM, 40, (1940), 705
- 57) 岡本舜三, 北川英夫, 他: "古橋桁耐久強度の基礎的研究報告書" (1958-3), 鉄道技術協会
- 58) R. Kühnel: "Herabsetzung der Schwingungs-festigkeit durch Korrosion" Maschinenbau, 24, (1931), 700
- 59) F. N. Speller, I. B. McCorkle: "Effect of Organic Coatings in Preventing Damage to Metal Subjected to Stress and Corrosion" Oil and Gas J., 32, 11, (1933-8), 73
- 60) R. C. McMaster: "An Investigation of the Possibilities of Organic Coatings for the Prevention of Premature Corrosion-Fatigue Failures in Steel" Proc. ASTM, 48, (1948), 628
- 61) R. S. Jensen: "Fatigue Test of Rail Webs" Bull. Eng. Exp. Sta., Univ. Illinois, 45, 58, (1948-5), 21
- 62) N. P. Inglis, E. C. Larke: "Corrosion-Fatigue Properties of an Aluminium-Magnesium-Silicon Alloy in the Unprotected, Anodized and Painted Conditions" J. Inst. Met., 83, 4, (1954-12), 117
- 63) 五十嵐勇, 深井誠吉: "高力アルミニウム合金の疲強度に及ぶアルマイトの影響に就て" 機論, 6, 22, (1940-2), I-12
- 64) F. N. Speller, I. B. McCorkle, P. F. Mumma: "Influence of Corrosion Accelerators and Inhibitors on Fatigue of Ferrous Metals" Proc. ASTM, 28, 2, (1928-12), 159
- 65) F. N. Speller, I. B. McCorkle, P. F. Mumma: "The Influence of Corrosion Accelerators and Inhibitors on Fatigue of Ferrous Metals" Proc. ASTM, 29, 2, (1929-12), 238
- 66) W. C. Schroeder, E. P. Partridge: "Effect of Solutions on the Endurance of Low-Carbon Steel Under Repeated Torsion at 482°F (250°C)" Trans. ASME, 58, (1936), 223
- 67) A. J. Gould: "The Influence of Solution Concentration on the Severity of Corrosion Fatigue" Engg., 136, (1933-10-27), 453
- 68) H. Buchholtz, K. Krekeler: "Zur Bekämpfung des Korrosionsdauerbruchs" Stahl und Eisen, 53, I-26, (1933), 671
- 69) H. Ochs: "Steigerung der Korrosions-Biege-wechselfestigkeit von Stahl durch Zusätze zur Angreifenden Flüssigkeit" Z. VDI, 79, 11, (1935-3), 358
- 70) W. E. Harvey: "Cadmium Plating vs. Corrosion-Fatigue Pickling vs. Corrosion-fatigue" Metals & Alloys, 3, (1932-3), 69
- 71) A. J. Gould, U. R. Evans: "A Scientific Study of Corrosion-Fatigue. Preliminary Report of Experiments at Cambridge University" Second Report of the Alloy Steel Res. Comm., Iron Steel Inst. Spec. Rep., 24, (1939), 325
- 72) 山口啓一: "鑄鉄の腐食疲れ強度に及ぼす各種防食法の影響" 機械学会長崎臨時大会前刷, 16, (1959-10), 35
- 73) C. G. Fink, W. D. Turner, G. T. Paul: "Zinc Yellow in the Inhibition of Corrosion Fatigue of Steel in Sodium Chloride Solution" Trans. Electrochem. Soc., 83, (1943-4), 377
- 74) P. Ludwik, R. Scheu: "Die Veränderlichkeit der Werkstoffdämpfung" Z. VDI, 76, 28, (1932-7), 683
- 75) H. J. Gough, D. G. Sopwith: "Atmospheric Action as a Factor in Fatigue of Metals" J. Inst. Met., 42,

- 2, (1932), 93
- 76) H. J. Gough, D. G. Sopwith: "Inert Atmospheres as Fatigue Environments" J. Inst. Met., 72, (1946), 415
- 77) 小野鑑正: "鋼の疲労限度に対する油及び水の影響" 機誌, 37, 201, (1934-1), 8
- 78) N. Stuart, U. R. Evans: "The Effect of Zinc on the Corrosion-Fatigue Life of Steel" J. Iron Steel Inst., 147, 1, (1943), 131
- 79) A. U. Huddle, U. R. Evans: "Some Measurements of Corrosion-Fatigue Made with a New Feeding Arrangement" J. Iron Steel Inst., 149, 1, (1944), 109
- 80) A. M. Binnie: "The Influence of Oxygen on Corrosion Fatigue" Aero. Res. Comm. R and M., 1244, (1929-3), 1
- 81) U. R. Evans, M. T. Simnad: "The Mechanism of Corrosion Fatigue of Mild Steel" Proc. Roy. Soc., 188, A1042, (1947-2), 372
- 82) M. T. Simnad, U. R. Evans: "The Mechanism of Corrosion Fatigue of Steel in Acid Solution" J. Iron Steel Inst., 156, 4, (1947-8), 531
- 83) U. R. Evans: "The Electrochemistry of Corrosion Fatigue" The Failure of Metals by Fatigue. (1947), Melbourne University Press, 84
- 84) Y. Minami: "The Effect of Cathodic Protection on the Corrosion-Fatigue of Mild Steel" Proc. 6th. Jap. Nat. Cong. App. Mech., 1956, (1957-3), 69
- 85) Y. Minami, Y. Fukuda: "Stress-Corrosion of Mild Steel, 3, Fatigue Strength of Mild Steel plate after Stress-Corrosion or Cathodic Protection" 横浜国立大学工学部報告, 7, (1958-3)
- 86) Y. Minami H. Takada: "Corrosion-Fatigue of Mild Steel in Sea Water. 1, The Influence of Cathodic Protection on the Corrosion-Fatigue" 造船協論, 103, (1958-7), 165
- 87) Y. Minami, H. Takada: "Fatigue Strength of Mild Steel under Cathodic Protection in Sea Water" Proc. 2nd. Jap. Cong. Test. Mat. (1959), 123
- 88) Y. Minami, H. Takada: "Fatigue Strength of Mild Steel After Cathodic Protection in Sea Water" Proc. 3rd. Jap. Cong. Test. Mat. (1960), 30
- 89) 賀田秀夫, 竹村数男: "軟鋼の腐食疲労に対する防食の効果" 防食技術, 8, 6, (1959-6), 5
- 90) 遠藤吉郎, 宮尾義治: "振り腐食疲労強度に及ぼす切欠および局部腐食の影響" 広島大学工学部研究報告 8, 1, (1959), 15
- 91) 北川英夫: "疲れき裂の研究における二三の問題(その1)-疲れき裂の認知方法とその基準について-" 生産研究, 13, 1, (1961-1), 3
- 92) 北川英夫: "き裂材の立場より見た鋼材の腐食疲れ" 生研報告に発表の予定
- 93) 大内田久: "電解研摩の 13Cr 鋼の疲れ強さに及ぼす影響" 機論, 19, 87, (1953), 27

### 表紙説明

有効にしてかつ実用化の見込みが大きい腐食疲れ防止法にメタリコンと表面圧縮残留応力の付与とがある。表紙の写真は亜鉛メタリコンを施したレール鋼腐食疲れ試験片で、中央の危険部以外はビニールテープで亜鉛の付着を防いでいる。亜鉛層の厚さは0.05~0.20 mm で機械的強度も高い。メタリコンの施工状況は本文中(8ページ)の写真に示す。表紙中央の線図は各指定繰返し数の腐食疲れ強さと、応力振幅  $\sigma_a$ 、平均応力  $\sigma_m$  の関係を示す。 $\sigma_m$  が圧縮になると強度を示す曲線は著しく上昇する。この  $\sigma_m$  を高周波焼入れで与えると、この図から予想される強さが実際に得られる。

## 次号予告 (11月号)

### 研究解説

アスファルトエマルジョンの研究	野崎	弘
土木工学の研究における電子計算機の利用例	伯野	元彦
最近の光電的レンズのピンダン装置	小瀬	輝次
極低圧における水蒸気ガラス表面への吸着	辻	泰
<b>研究速報</b>		
一部分が水に浸る曳航ロープの張力	田宮	真
<b>ニュース</b>		