

1. 参考資料編の取り扱いについて

ストックマネジメントに関する技術は、近年、社会資本の適切な保全管理のために、様々な分野で検討が行われているところであるが、発展途上の段階であり、データの蓄積も十分でないことから、今後の現場での実践とデータの蓄積を踏まえて、更に技術の向上を図っていく必要がある。

本参考資料編は、現時点で収集可能なデータや検討結果をもとに、機能診断調査の解説を業務参考として整理したものであるが、今後、機器・部品の耐用年数や機能診断調査における定性的健全度評価など、今後、客観性の向上を図る上で、機能診断調査や評価の結果、維持管理記録などを継続的に蓄積・分析を行って、定期的な見直しを行う必要がある。

なお、設備の安全性・信頼性を確保する上で、重要な要素には、①技術者倫理、②技術力、③組織体制、④財政力などが考えられるが、今後、財政が逼迫する中、ストックマネジメントを実施するためには、従来の点検以上に高度な技術力（診断技術）が必要となってくる（例えば、桁材など重要部材の変形を例にみた場合でも、局部座屈に繋がるような重大な変形なのか、機能・性能に影響を及ぼさない箇所の変形なのか等）。このため、参考資料編の適用にあたっては、単に書き物に頼るのではなく、現場レベルで、創意工夫をしながら考えて行くことが、今後の技術力向上や技術の継承のためにも必要であり、設備の安全性・信頼性の確保に寄与することになる。なお、健全度評価にあたっては、判定根拠を整理しておくと共に、必要に応じて技術検討委員会等による客観的評価なども踏まえ、整理していくことで機能診断調査実施の効率化や技術の向上に努めていくことが重要である。

2. 設備の劣化の解説

2. 1 劣化要因

劣化要因種別	機械的要因
劣化内容	摩耗

(1) メカニズム

二つの固体が擦りあわされ、表面が擦り減る現象を摩耗という。摩耗の状態には、初期摩耗と定常摩耗がある。この初期摩耗では表面粗さの大きい突起がつぶされたり、摩耗して除去されるとともに表面層の構造が変化してゆく。これをなじみという。新しい摺動面では摩耗量が多く、摺動面でのなじみが終わったあとには摩耗量が少なくなる。この状態を定常摩耗という。

潤滑油が存在しない、乾燥状態にある摺動面での摩耗のメカニズムには凝着摩耗、アブレシブ摩耗、疲れ摩耗の三つがある。そして摺動する二つの表面の材料と硬さ、また、摺動面に加える圧力と速度の条件によって、これらのメカニズムのどれかが主体の摩耗が起こる。通常はこれに潤滑油が加わるので、摩耗の現象はさらに複雑になる。

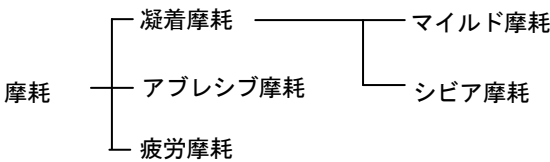


図 2.1.1 摩耗の種類

(2) 具体的な要因

1) 凝着摩耗

凝着摩耗とは、摺動面にある微小な凹凸同士が高い圧力によって結合し、これらが摩擦によって破壊するとき、結合部の周辺が脱落して摩耗粉になることである。

凝着摩耗にはマイルド摩耗とシビア摩耗の二つの状態がある。

摺動面に加える圧力と速度が小さいときには、細かい酸化物の摩耗粉が発生する。また、表面は滑らかで摩擦係数が小さく、摩耗量も少ない。この穏やかな摩耗の状態をマイルド摩耗という。

このときは、周囲の空気の中にある酸素が潤滑材のような働きをして、摺動面を保護している。

摩擦する圧力と速度が大きくなると、酸素の潤滑作用が失われ、温度も上がるので、発生する摩耗粉は金属光沢を持った大粒のものになる。さらに表面は粗く、摩擦係数も摩耗量も大きくなるようになる。この激しい摩耗の状態をシビア摩耗という。

材料の摺動面の組み合わせが同じでも、摺動する圧力と速度の違いで、摩耗の状態は大きく変わるのである。

2) アブレシブ摩耗

アブレシブ摩耗は、摺動面的一方が他方より硬いときに起こる。硬い方の摺動面にある凹凸がヤスリのように、軟らかい方の摺動面を削りとり、その切り屑が表面から脱落して摩耗粉になる。

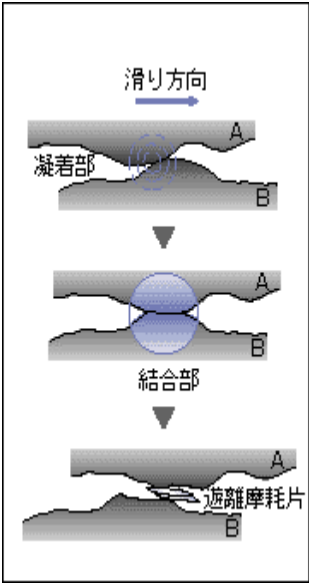


図 2.1.2 凝着説による個体摩耗

る。このときは、軟らかい方の摺動面が摩耗する。

しかし、例外的に硬い方の面が削られる場合もある。砥石や砂のような硬い微粒子が、第三の物質として摺動面の間に侵入した場合、硬い進入粒子が軟らかい方の摺動面に埋め込まれることとなる。それがヤスリのような働きをして、硬い方の表面を削りとして摩耗させる。

3) 疲れ摩耗

疲れ摩耗は、摺動面で材料が疲れ破壊を起こし、表面の一部が脱落して摩耗することである。

表面が応力を受けて弾性変形すると、せん断応力の最大値は表面ではなく、表面より下の内部に発生する。そのため、このせん断応力が最大になる位置の付近に材料の欠陥や不純物があると、そこに応力の集中が起こり、疲れによる亀裂（クラック）が発生する。このクラックが発生すると表面にまで伝わり、表面が魚のうろこのように脱落して摩耗になる。

滑り摩擦でも転がり摩擦でも、摺動が繰り返されると、表面における材料の疲れ破壊によって摩耗が起こる。

（3）事例

頭首工の洪水吐ゲートに設置されたサイドローラが、腐食、軸受不良により回転しないため生じた摩耗の例



図 2.1.3 ゲートのサイドローラ部の摩耗

劣化要因種別	機械的要因
劣化内容	疲労
(1) メカニズム 金属が一回では到底壊れないような小さな負荷でも、繰り返し数万回、数十万回の負荷を受けるとミクロンオーダーのき裂が生じ、最終的には破断してしまう。これを金属疲労という。 構造物・機器の破損の80%以上はこの疲労が原因と言われている。 金属が疲労を起こすのは、金属の持つ根源的な性質による。金属の特徴は加工により様々な形に成形することができることにあり、それは金属が塑性（永久）変形するからである。 金属の塑性変形は格子欠陥（原子配列の乱れ、しわ）、転位の移動によるものであり、転位の移動は絨毯のしわを移動させるのが比較的簡単にできるように、小さな応力のもとでも可能である。この転位の移動、すなわち微視的レベルでの滑りが疲労の原因と言ってよい。したがって塑性変形を示す金属材料では疲労は必ず起こるものである。 (2) 具体的な要因 金属の疲労破壊過程は通常、き裂の発生と進展過程に分けられる。 繰返し応力が作用すると、その表面にせん断応力成分によって結晶の特定の面に沿ってわずかに非可逆的な滑りが集中的に発生する。 形成された滑り帯が応力の繰返しとともに発達し、繰返し負荷の場合には局部的に入り込みや突き出しと呼ばれる微視的凹凸（数十ナノオーダー）ができ、それが成長してついには結晶粒単位のき裂となる。一般の構造用金属材料のき裂生成は、この機構によると言われる。 繰返しすべりによって発生したき裂は、結晶粒界が抵抗となって停留することがあり、これが疲労強度に関係する。応力が高い場合や多数回の繰返しによってき裂は粒界を突破し、内部方向へ材料組織に依存した方向性を示しながら進展するが、徐々に方向を変えて引張り応力に垂直な方向へ安定したき裂進展をするようになる。 金属の疲労破壊は、金属が塑性変形という特徴を持つ限り避けられないものであり、繰返し応力を受けるあらゆる構造物・機器で起こりうる。また、外力によるばかりでなく、温度変化、温度勾配による熱応力の繰返しが疲労の原因となるし、回転機器では共振が思わぬ疲労損傷を招くこともある。大型構造物では、き裂の生成を抑制することが一般的に困難であるので、疲労損傷が予測される場合には、供用中の維持管理が極めて重要になる。したがって、構造・機器の設計、施工、維持管理者すべてが「疲労」の認識を共有することが損傷防止にとって最も重要なことである。	

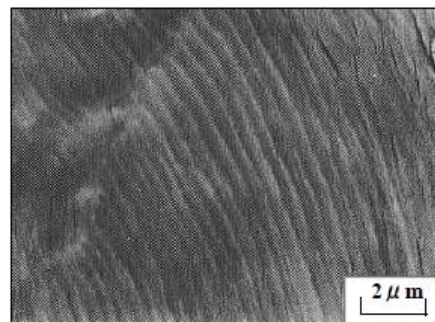


図2.1.4 疲労破壊上に出現する縞状模様
(25% Cr－5% Ni鋼)

劣化要因種別	化学・電氣的要因
劣化内容	水接触による腐食

(1) メカニズム

腐食は鋼材の表面部分で水分の存在により局部電池ができ、鉄がイオンになって溶出し酸化することで酸化鉄つまり錆が生じる現象である。腐食の生じやすい環境としては、一般的に、海岸部では、飛来塩分の影響による鋼材の腐食が他の地域に比べて圧倒的に多く、飛来塩分量を腐食環境の主たる指標として、その防錆対策を施すことが多い。

一方、同一の腐食環境下でも、その構造特性や塗料をはじめとした防錆特性等の差異により腐食速度は異なる。例えば、端部で構造上、滞水が生じやすい箇所などは、腐食の進行が著しい。また、ボルトなどの突出部分は、塗膜の品質が確保しにくいため一般部に比べてさびの発生が早い傾向にある。

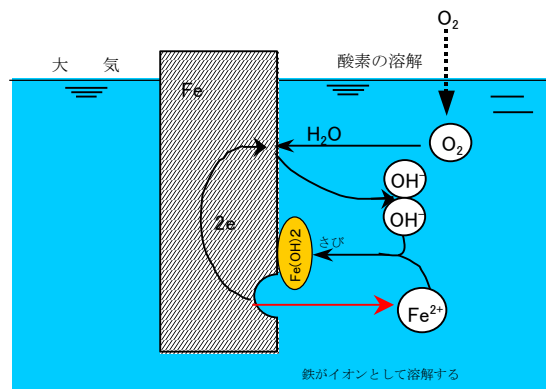


図 2.1.5 腐食のメカニズム

(2) 具体的な要因

鉄の腐食は湿食と乾食に大別されるが、鋼構造物における腐食は、主として湿食であり、また、その湿食は、全面腐食と局部腐食に大別される。全面腐食は、金属表面状態が均一で均質な環境にさらされている場合に生じ、全面が均一に腐食する現象であり、局部腐食は、金属表面の状態の不均一あるいは環境の不均一により腐食が局部に集中して生じる現象である。一般に、アノードとなる腐食部分が固定されるため、腐食速度は全面腐食と比較して著しく大きい。

このため、一般に構造物の性能に腐食が問題となるのは局部腐食である。また、飛来塩分量などの環境条件や、地形条件あるいは、構造物において滞水しやすい部位によって、その進行速度は左右され、除々に進行する破壊現象であるため、早期に発見し適切な補修又は補強を行うことが重要である。腐食は局部的な減肉による断面欠損を生じる損傷であり、検出を行うためには、鋼構造物

の各部材に接近することが必要となる。よって、定期的な点検の他に塗装塗替え時やその他の補強工事の際に設置される作業足場を利用して、詳細点検を実施することも多くみられる。

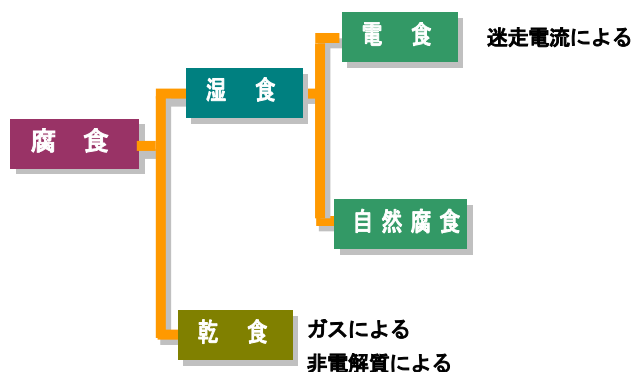


図 2.1.6 鉄の腐食の種類



図 2.1.7 ゲート腐食による板厚測定

(3) 事例

頭首工のゲート各部の腐食状況を下図に示す。

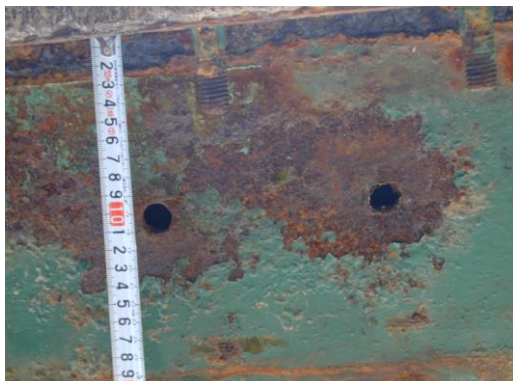


図 2.1.8 ゲート扉体下部の腐食



図 2.1.9 シェルゲート内部の腐食

劣化要因種別	化学・電氣的要因
劣化内容	絶縁低下

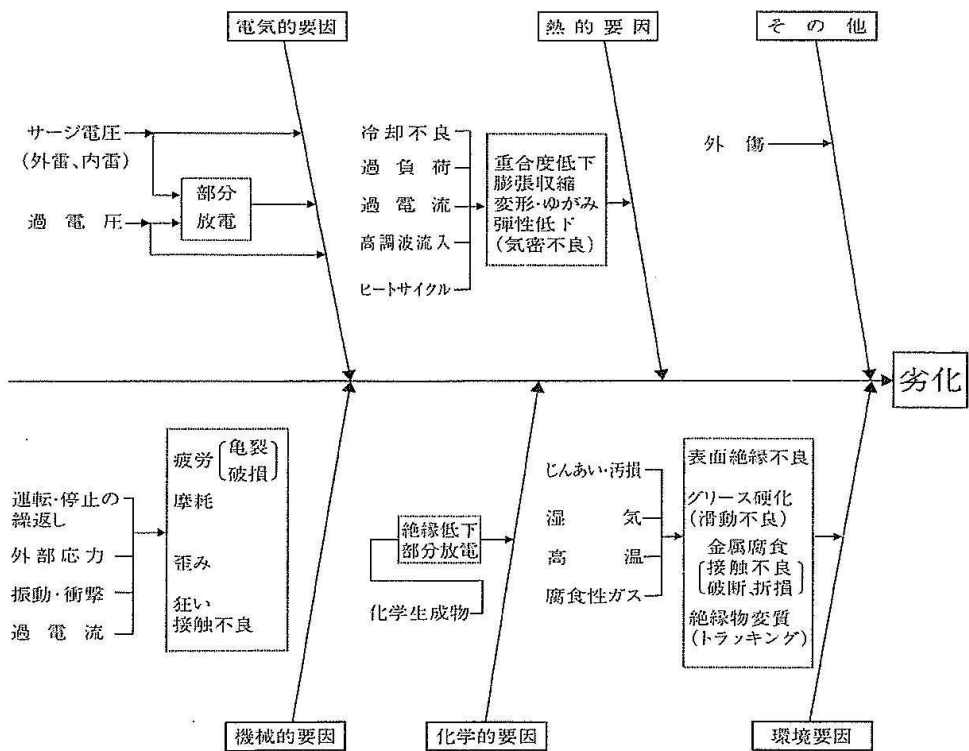
（１）メカニズム

絶縁物が使用中において、吸湿や各種のストレスを経年的に受け絶縁物内部のボイド（空洞）あるいは亀裂の発生などによって、脆弱化し絶縁破壊する現象をいう。

電動機は、固定子コイルの絶縁層内に多数の小さなボイドや局部的に大きなボイドが発生し高電圧を印加するとボイドは部分放電を発生し、導電体となるので絶縁パスは短くなり絶縁破壊電圧が低下する。

（２）具体的な要因

劣化要因が電動機に与える影響の程度は、対象機器によって異なるが一般的には下図のように表される。



（注）1. 各要因が並列的又は直列的に複合進行し、劣化が加速的に進行する場合もある。
 2. 上記のほか、設計、製作、施工及び保守の不良なども劣化を促進させる原因となる。

図 2. 1. 10 電動機の劣化要因

（３）事例

電動機絶縁損耗の例（ボイド放電痕）

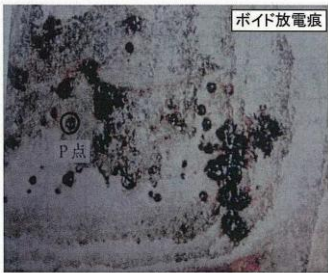


図 2. 1. 11 電動機固定子コイルの絶縁損耗の例

劣化要因種別	化学・電氣的要因
劣化内容	その他の腐食
(1) 異種金属間接触 金属は、強電解質溶液である海水中では、表 2.1.1 のように一定の電位を示す。 電位の異なる金属が電解質溶液中で接触すると、金属間に腐食電位が形成されて卑の金属が酸化され貴な金属は還元される。これを異種金属接触腐食という。例えば、普通鋼材とステンレス鋼材が河川中などで直接接触している場合、又は離れていても電氣的に接続していると、ステンレス鋼材近傍の普通鋼材は通常より著しく腐食する。 溶接部は、局部的に加熱・冷却され金属組織は一般部と異なり卑となるため一般部より腐食しやすい。	
(2) すき間腐食 電解質溶液中において金属表面に供給される溶存酸素量の差（通気差又は酸素濃淡）によって電位差が生じて、酸素の多い部分で還元反応が生じ、酸素の少ない部分で金属は溶け出す。 非常に狭いすき間に電解質溶液が侵入すると、侵入した電解質溶液がほとんど入れ替わらないため、酸素の供給が悪くなり酸素濃淡が生じ、腐食が進行する。 例えば、ボルトで閉じ合わせた面や、フジツボ等の貝類や藻類が金属表面に付着した場合の付着物の下及び金属表面を覆う錆こぶの下などに酸素濃淡が生じてすき間腐食が進行する。	
(3) 孔食 不働態化している金属の電位は貴となっているが、不働態皮膜の一部が何らかの原因で局部的に破られるとその部分の電位は卑となり腐食電池が形成される。このとき、卑な面積が貴な面積より非常に小さいため、腐食は著しく進行する。さらに、金属表面に腐食孔ができると、図 2.1.12 のように孔に侵入した塩化物イオンなどの腐食因子が外に出にくくなるため、腐食は急速に進行する。	
(4) 微生物腐食 自然界に微生物は広く存在しており、河川環境にも様々な微生物が存在している。ステンレス鋼の腐食に関与する代表的な微生物として嫌気性菌の硫酸塩還元菌や好気性菌である鉄酸化細菌がある。これらの微生物は、電位を貴化させステンレス鋼の腐食感受性を高め腐食され易くする。 淡水域において、ステンレス鋼は電位が貴化しても腐食は発生しない。しかし、海水域では塩化物濃度が高いため、ステンレス鋼の不働態皮膜は破壊され腐食が生じる。このとき、微生物の関与があると腐食は急激に進行する。 汽水域では、満潮時など塩化物濃度が高い時期には、ステンレス鋼の不働態皮膜は破壊されるが、干潮時に塩化物がほとんどなくなり淡水となると不働態皮膜は直ちに修復されるため、腐食は進行しない。しかし、干潮時にも塩化物濃度が高いまま長時間維持された場合や、隙間部や溶接部などステンレス鋼の腐食が弱点となりやすい場所に、微生物が大量に繁殖していると腐食は急激に促進されることがある。	

低 ↑ ↓ 高	マグネシウム
	亜鉛
	アルミニウム
	鋳鉄
	炭素鋼
	13%クロムステンレス鋼(活性)
	18-8 ステンレス鋼(活性)
	鉛
	黄銅
	銅
	モネル
	13%クロムステンレス鋼(不働態)
	18-8 ステンレス鋼(不働態)
	チタン

表 2.1.1 海水中における
金属の電位の順



図 2.1.12 孔食の事例

劣化要因種別	環境要因
劣化内容	
(1) 塗膜の劣化 鋼構造物の設置環境は様々であるが、塗膜の劣化原因には次のようなものがある。 1) 塩 分・・・・塩分の影響は、海上、海岸地域などの飛来塩分量の著しい地域や、寒冷地・山間部の凍結防止剤の散布によりその被害は著しく見受けられる。 2) 紫外線・・・・紫外線は海上、海岸地域や山間部、田園部などで多い。塗膜表面を分解し、白亜化と顔料の艶やかさを低下させる。 3) 腐食性ガス・・・・発生する個所は化学工場などに限られる。2) 及び3) が加味されると塗膜は著しく劣化する。 4) 水滴による結露・水滴は塗膜を繰り返し透過し、鋼面にマクロセルを形成し、アノード部に塗膜下錆を発生させる。 5) その他・・・・油煙や砂じんによる汚れ。 塗膜は、長期間供用されている間に水や酸素の他、上記に示す腐食性物質の影響により素地の鋼材の腐食が徐々に進行し、紫外線、熱、硬化、煤塵などによって塗膜表面が風化し、光沢の低下やチョーキング、変退色の進行、汚れの増大などが見られるようになる。 さらに塗膜に割れや剥がれなどの欠陥が生じ、ついには塗膜自体の防食や美観保持機能が失われることになる。 塗替えの基本は、塗膜の機能をいかに合理的かつ効果的に良好な状態に維持するかということである。すなわち、塗膜調査により塗膜の劣化程度を調査し、塗膜の管理水準に基づいて、塗替えの判定を行い、最適の塗替え時期を選定し、塗替え塗装工事を行うことである。	
	
図 2.1.13 塗膜が劣化し剥離した扉体下部	
(2) 合成ゴムの劣化 有機材料である合成ゴムは、高温・高圧の条件下で重合し成形されているため、金属材料に比べて安定性に劣っている。 合成ゴムは環境の影響を受け易く、屋外や水中で使用した場合には、光、熱などの影響によって物理的・化学的作用が生じ、本来の物性を徐々に失ってしまう。 また、成形された合成ゴムに含まれる残留触媒などが引き金となって劣化が生じることもある。 合成ゴムの弱点を知る意味で、劣化の形態を合成ゴム表面からの添加物の析出による劣化と、外的因子作用による劣化に分けて内容を示す。	
	
図 2.1.14 合成ゴムが劣化した事例	
1) 合成ゴム表面からの添加物の析出による劣化 合成ゴムは劣化を防止するため、老化防止剤などを添加し改質が施されている。 しかし、合成ゴムを長期に亘り放置すると、条件によっては表面に細かな粉末が吹き出したりす	

ることがある。表面に析出しているのは、合成ゴムに含まれる滑剤、可塑剤、老化防止剤、加硫促進剤などであり、粉末が析出すると水密ゴムとしての価値が失われるだけでなく、析出している成分によっては触れることにより皮膚障害を生じる場合もある。

2) 外部因子作用による劣化

ゲート設備の水密ゴムに採用されている合成ゴム製品には、使用環境によって外部からの圧力、温度及び光などの様々な要因が作用している。一般的に合成ゴムは、長期に亘って柔軟性などの物性特性を保持するものと思われているが、外的因子が作用することによって合成ゴム分子には何らかの反応が僅かに生じている。具体例としては、空気中の酸素による酸化反応などが挙げられ、輪ゴムを机の上などに放置していると、時間経過とともに弾性は失われ、手にとって引っ張ると塑性破壊のような性状を示すことがあり、常温環境においても僅かながら劣化は絶えず進行していると思って間違いない。

金属材料の劣化の一形態である腐食が、電気化学的作用に説明されるように、合成ゴム製品の劣化も化学反応作用によるものと説明されるが、複数の環境因子がかかわるため、解明は複雑で慎重を要する。