

鋼構造物を長持させる防食塗料



たなか まこと

田中 誠

材料技術研究部(防振材料 研究室長)

はじめに

鋼構造物には、それぞれの使用目的に合わせて適切な性能を持つ材料が使用されています。その中で、長期間使用する設備では、材料の劣化による性能低下が問題となります。使用する材料が金属材料の場合には、材料劣化要因として疲労、摩耗や腐食が問題となります。腐食が問題となる場合には、設備の使用したい期間(期待耐用期間といいます)中に性能低下に至らないよう腐食の防止または抑制を目的に防食対策が施されます。防食対策の中には、耐用期間中に問題となるほどの腐食量に至らない耐食金属(耐候性鋼、ステンレス鋼やアルミニウム合金など)を用いる方法、表面を被覆して腐食抑制する方法、使用環境を制

御(除湿、脱酸素、pH制御など)して腐食を抑制する方法などがあります。表面被覆方法は、用いる材料で金属被覆(めっきや溶射など)、無機材料被覆(モルタルやセラミックなど)、有機材料被覆(塗料や樹脂ライニングなど)に区分されます。ここでは、最も身近な塗料による防食について、橋りょうなど大型鋼構造物を例に説明します。

鋼材の寿命とは

鋼構造物の寿命に影響する鋼材劣化因子には、鋼材の特性に起因する疲労き裂(繰り返しの力を受けて発生した金属の割れ)と腐食による減肉(鋼材の厚みが減ってしまうこと)があげられます。人の病気にあてはめると、疲労き裂は鋼材の“がん”といえます。腐食は“慢性病”のようなものです。“がん”は早期発見と早期治療が大切です。“慢性病”は日ごろからの管理が大切になります。

多くの鋼構造物は、塗装で防食されています。塗装鋼は、塗膜が劣化して鋼材の腐食が開始するころ(鋼材の厚み減少に至る前)の適切な時期に塗り替え塗装することで、永久的に鋼材の減肉を防止できます。図1に示すように、適切な管理を行えば100年以上も現役で活躍できます。

鋼材の腐食と防食原理

裸の鋼を放置しておくと表面に“さび”が発生します。“さび”は、室内より屋外に放置した方が、屋外でも山間より海岸地区の方が多いいことを経験しています。

なぜ“さび”が出るのでしょうか?なぜ放置する環境で“さび”の出方が違うのでしょうか?

鉄の元素記号はFeと書きます。“さび”は化学式で書くと数種の $FeOOH$ (結晶構造の違いで数種あります)や Fe_3O_4 の混合物で構成されています。化学式から“さび”は、鉄が酸素(O)や水(H_2O)と反応してできたものであることが分かります。つまり、放置する環境に酸素と水があると“さび”が発生すること、“さび”の発生量は、酸素や水



1896年製造 関西本線 大河原・笠置間 木津川橋りょう



1904年製造 中央本線 神田・お茶の水間 昌平橋架道橋

図1 現役で活躍する鉄道橋
(土木学会附属土木図書館所蔵)

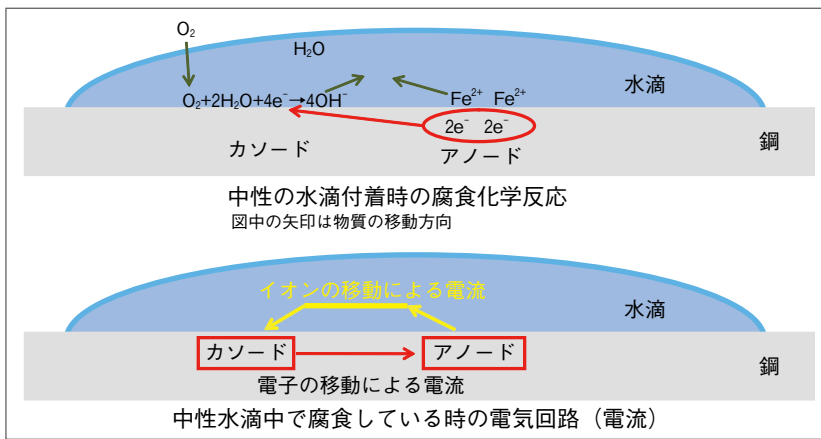


図2 裸の鋼に水滴が付着した時の腐食反応モデル

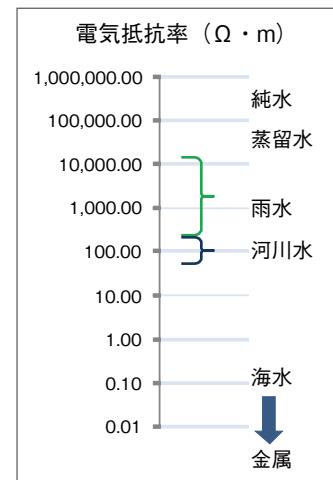


図3 水溶液の電気抵抗率の例

の量が多い環境ほど多いことが推測されます。大気中の酸素量の変化はほとんどありませんので、放置場所での“さび”の量は、水の量に関係すると推定できます。

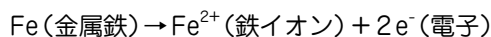
ここまでくれば、お分かりいただけると思いますが、“さび”の発生を抑制する方法の一つとして、鋼表面への酸素や水の接触を防ぐのが有効であるといえます。

それでは、海岸に近い環境と山間部での“さび”発生の違いについて次に説明します。

鋼の大気腐食と環境

図2の上の図は、裸の鋼表面に水が付着した時の様子を示します。鋼表面のちょっとした状態の違い（結晶面の向き、結晶粒界、不純物など）から表面の中に電位の違う個所が生じます。この結果、電流が鋼から水滴に向かって流れる部分（アノードと言います）と、水滴から鋼に向かって電流が流れる部分（カソードと言います）が生じます。この現象は電池（セルという）内の電気化学反応と同じなので、腐食分野ではマイクロセルが形成したと言います。アノードとカソードでは、付着した水滴のpHで異なる化学反応が生じています。

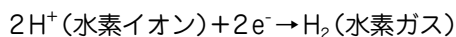
アノード反応：水滴のpHが約10以下



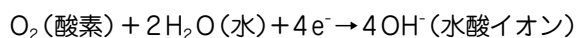
水滴のpHが10以上（アルカリ性）では、表面に不動態皮膜と称する数ナノメートルの非常に薄い保護皮膜が生じて反応がほぼ停止します。

カソード反応：

pHが約4以下での主反応



pHが4以上での主反応



付着する水滴が酸性の場合には、水滴のpHに応じて多量の水素イオンが存在するので、非常に激しく腐食します。一方、水滴が中性の場合には、カソード反応の最大速度は大気から水滴を通じて鋼表面に拡散してくる酸素の量で決

まります。従って、原理的には、腐食速度の最大値は水滴のpHに依存せずほぼ同じ（これを酸素拡散律速と言います）になります。

実際には“海岸近くでは腐食が早く、山間部等では腐食の進行が遅い”と経験されるのはなぜでしょうか？

図3に水溶液の電気抵抗率の例を示します。アノードとカソードを結ぶ電流は、図2の下図に示したように、鋼の中での電子移動と水溶液中でのイオンの移動で維持されます。山間部では、雨水や結露水（蒸留水に近い）といった電気抵抗率の大きい水で濡れます。海岸近くの鋼表面は、海から飛来した海水成分が表面に付着しているため、結露水は高い塩濃度となって海水のような電気抵抗率の小さい水滴になります。従って、アノードとカソードを結ぶ電気回路の水中部の抵抗が著しく違うため、山間部と海岸地区では流れる電流量に大きな差が生じます。化学反応量は電流量と比例関係（ファラデーの法則）にあるので、さびの発生量に大きな違いが生じるのです。海岸地区のような塩濃度の高い（電気抵抗率の低い）中性水で濡れた場合には、限りなく酸素拡散律速での最大速度に近い腐食が進行することになります。

余談ですが、将来にpHが4以下の酸性雨が増えると酸素拡散律速に加えて、水素ガス発生のカソード反応が多くなるため、腐食被害が増えると予想されています。

鋼の防食原理

腐食反応抑制方法としては、アノード反応を抑制する方法、カソード反応を抑制する方法が考えられます。

アノード反応の抑制は、人為的に不動態化するような環境を作ることや鉄より腐食しやすい金属と接触させてアノード反応の場を形成させないことなどで可能です。

人為的に不動態化する方法には、鋼表面をセメントモルタルなどで高アルカリ環境に変える方法、不動態化剤を用いる方法などがあります。高アルカリ環境に変える方法は、

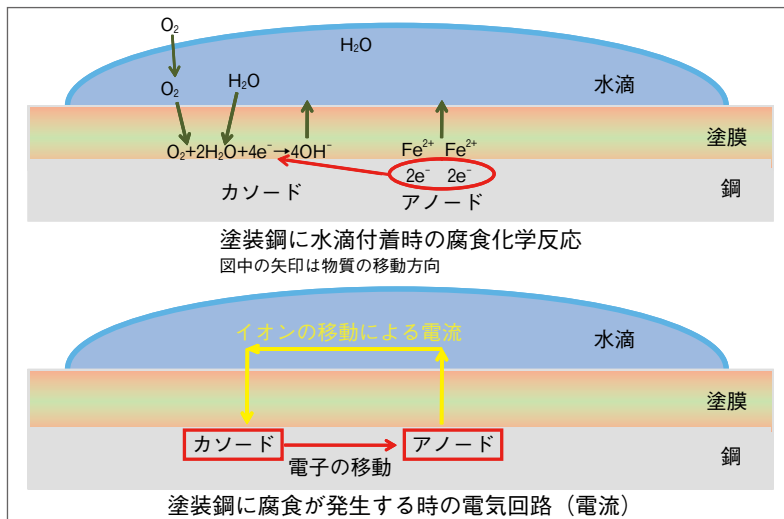


図4 塗装鋼に水滴が付着した時の腐食反応モデル

大気中の二酸化炭素で中性化し効果が無くなること、再補修時に全面除去が必要になることなどから大型鋼構造物の防食方法にはあまり使用されていません。塗装では不動態化剤を添加したさび止め塗料が下塗り塗料として古くから用いられてきました。主なものには、鉛化合物（鉛丹，亜酸化鉛など）、クロム化合物（クロム酸鉛，ジメチルクロム酸鉛など）、シアン化合物（シアナミド鉛），リン酸塩（リン酸亜鉛，リンモリブデン酸亜鉛など）などがあります。最近では環境問題から鉛やクロム化合物を含む不動態化剤は使用困難になってきました。

アノード反応の場を形成させない方法として代表的なものに亜鉛めっき鋼があります。亜鉛は鉄より腐食しやすいため、何らかの原因で鉄素地が露出しても、亜鉛がアノードになり鋼がアノードになるのを防止できます。これを犠牲防食作用と言っています。この原理を用いた塗料にはジメチルクロム酸プライマーやジメチルクロム酸ペイントがあります。ジメチルとは金属亜鉛のことで、塗料中に質量百分率で70%以上含んだものをジメチルクロムと称しています。現在の防食塗装の下塗り塗料として主流になりつつあります。

カソード反応の抑制は酸素の拡散速度を減らすことで、電気化学反応全体の抑制は鋼と水滴で形成される電気回路を高抵抗の回路とすることで達成可能です。塗装鋼での腐食反応を模式的に図4に示します。鋼表面への水や酸素の拡散を抑制することでカソード反応を抑制すると共に、高抵抗の塗膜でイオン移動に伴う腐食電流を大幅に削減することを目的に塗料設計がされています。最近の防食用塗料では電気抵抗が高く、耐薬品性に優れ、水や酸素の透過を抑制できる樹脂としてエポキシ樹脂の使用が主流になっています。塗料の設計では、水や酸素の透過性をさらに抑制するため、無機顔料を質量百分率で30%以上配合したり、

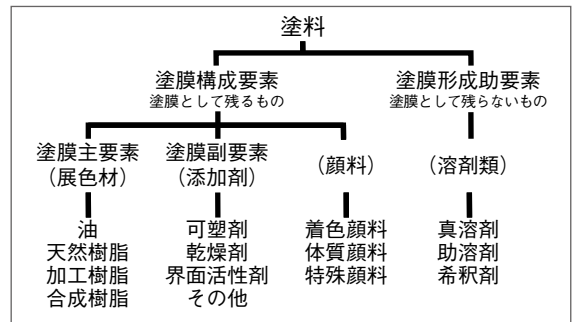


図5 塗料を構成する原料

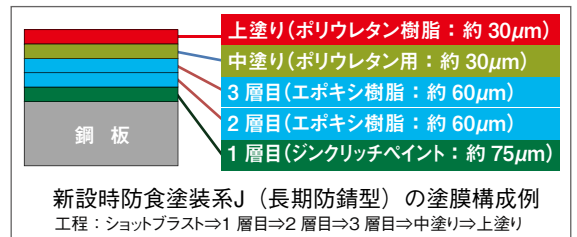


図6 防食塗装系の塗料構成例

微細な欠陥部を自己修復できるように粘性の低い樹脂を配合したりしています。

同原理を用いた塗料以外の防食方法には、貴金属メッキ、セラミック被覆（ホーローともいう）、樹脂ライニングなどがあります。これらは、化学プラントなどの特殊な腐食環境で使用されていますが、陸上大型構造物では施工性、施工コストで劣るためほとんど使用されていません。

防食塗装の基本

鋼構造物の防食塗料には、一般に次の基本機能が求められます。

- ①アノード反応の抑制
- ②カソード反応の抑制：腐食因子の遮断，高抵抗化
- ③防食性能の長期維持：30年以上の性能維持
- ④景観の付与：周辺景観との調和

塗料は、図5に示すような、要求機能を満たすため、樹脂のみならず多くの添加剤などで構成されますが、全ての機能を単一の塗料で発揮することは技術的に困難です。このため、それぞれの機能に優れた塗料を複数組み合わせで用いられます。これを塗装系といいます。防食塗装では、それぞれの機能に優れたものを図6に例示するように4層から6層に塗り重ねて用いられています。

実際の防食塗装では、鋼材の保護が第一の目的で、景観の付与は二の次となっています。このため、使用する塗料やその組み合わせが車両のように美観を優先する塗装とは大きく異なります。図6の例では1層目に犠牲防食作用が期待できるジメチルクロムペイント，上に環境遮断性（水や

酸素の遮断)の高いエポキシ樹脂系塗料を2層重ね、環境遮断性付与に加えて上塗り塗料との付着性確保を目的にしたポリウレタン樹脂塗料用中塗り(エポキシ樹脂系塗料)を塗装し、最後に景観性付与と下層塗膜の紫外線劣化防止などを目的にしたポリウレタン樹脂塗料上塗りを塗り重ねています。塗膜の合計厚みは約250 μ mと薄いのですが、海岸付近の環境でも30年以上の耐久実績がある塗装系です。この塗装系を含めて、様々な塗装状況に適合する塗装系について「鋼構造物塗装設計施工指針」¹⁾(「塗装指針」と略記します)にまとめています。

防食塗装の実際と将来

図6に例として示した防食塗装でも耐久性は30年程度です。鋼構造物が100年以上使用されることを考えると塗膜の更新が必要になります。これを塗替え塗装といいます。図7に塗替え塗装作業の風景を示しました。このように、足場の悪い環境での作業になるので、塗料には先に説明した性能に加えて要求される項目が多くあります。その主なものを次に示します。

- ①機械化が困難な状況、天候急変に対応できること
- ②構造物の検査・補修に支障を与えないこと
- ③周辺環境や作業者の健康に甚大な影響を与えないこと

塗替え塗装では、河川や道路の上など周辺状況によっては頑強な足場(作業用の空間)が作れないため、重量のある機械が持ち込めず、簡易な動力工具や手工具での作業が中心となります。このような状況でも十分な防食性能を発揮できる塗料・塗装方法が必要です。また、屋外での塗装となるため、温湿度の変動が大きく、場合によっては予期せぬ“にわか雨”にも遭遇します。このような気象条件の変動にも対応可能な塗料が望まれます。

先に説明した構造物の“がん”とも言ふべき鋼の疲労き裂発見のため、定期的な検査が行われています。この検査時に発見を遅らせるような塗料、すなわち伸びが大きくき裂が発生しても目視で発見できなくなるような塗料は、どんなに防食性能が高くとも使用することができません。また、き裂が発見された場合の補修・補強に影響するような容易に剥がせない材料も使用困難です。疲労き裂以外にも多くの点検項目がありますので、それらに悪影響となる材料は容易に使用できないことになります。

将来の防食塗装を考えると最後に示した“周辺環境や作業者の健康に甚大な影響を与えないこと”への対応が今後の研究開発の中心になると考えられます。過去の塗装・塗



図7 塗替え塗装作業風景

料の研究は、防食性能の向上と経費節減を主眼に行われてきましたが、ご存知のように、1990年代から地球環境問題をはじめとする材料や作業の環境負荷について大きく注目されるようになりました。今後もこの傾向は強まる一方と予想されます。そこで、2005年の「塗装指針」改訂では、環境負荷低減を前面に出して、塗装系の大幅な見直しと新たな環境負荷低減型塗装系ECOの開発・導入を図りました。「塗装指針」改訂では、RRR平成19年8月号で解説していますが、防食性能を維持しつつ鉛化合物、クロム化合物や発がん性物質を使用した塗料の廃止、その他有害化学物質の大幅削減、大気汚染要因のVOC(揮発性有機化合物)量の大幅削減を実施してきました。

おわりに

鋼構造物を長持ちさせることは、経費節減のみならず地球環境問題、資源枯渇問題からも好ましいことと考えられます。しかし、長持ちさせるための手法が環境負荷や経費を増大させては本も子もありません。そのため、防食塗装においても、的確な防食を行いつつ経費節減や環境負荷低減に寄与する技術について更なる研究・開発が必要であると考えています。このためには、これまでの防食性能を中心とした研究・開発方針を踏襲することも重要ですが、発想の転換も必要でしょう。例えば、防食塗料に設備の異常(疲労き裂など)を早期発見する機能を付与する、構造物の振動抑制機能を付与するなど塗膜の多機能化により維持管理技術全体での経費節減や環境負荷低減を図れる技術開発も視野に入れても良いと考えています。RRR

文 献

- 1) 助鉄道総合技術研究所編集：鋼構造物塗装設計施工指針，(助鉄道総合技術研究所，2005.5)