

## 塗装構造物に生じる塗膜下腐食の要因解明の取組み

## STUDIES ON UNDER-FILM CORROSION MECHANISM OF STEEL STRUCTURE

坂本達朗\*

Tatsuro SAKAMOTO

**ABSTRACT** The local corrosion is one of the factors which have a bad effect on steel structure. Generally, the local corrosion on the painted steel structure tends to be occurred as under-film corrosion. In order to understand the under-film corrosion factor, we investigated the corroded steel structure and conducted an accelerated test.

**KEYWORDS** :鋼構造物, 塗膜, さび, 塩分, 環境

Steel structure, coating, rust, salt, environment

## 1. まえがき

鋼構造物の安全性に影響する要因の一つに、部材の腐食が挙げられる。特に、板厚方向へ進行する腐食形態である局部的な腐食（以下、局部腐食とする）は、部材の有効断面積を減少させることになる。このため、局部腐食の発生要因を特定することや、局部腐食を生じた箇所に対して適切な措置を行なうことは、鋼構造物を維持管理するうえで重要な項目となる。

塗装構造物の場合、塗膜下で生じる腐食（以下、塗膜下腐食とする）は局部腐食となりやすい。しかし塗装鋼材における鋼の腐食メカニズムは複雑であり、塗膜下腐食の発生要因の解明には至っていない。

本稿では、塗膜下腐食の概要を説明するとともに、塗膜下腐食の発生機構を解明するため、既設鋼橋の腐食箇所調査と塗装さび鋼板を試験片とした室内促進劣化試験を実施したので、その概要について紹介する。

## 2. 塗膜下腐食の概要

鋼構造物に適用する塗膜は、性能の異なる塗料を複数回塗り重ねた複合塗膜（以下、塗装系とする）である。塗装系に求められる最も重要な性能は長期間の耐久性である。技術の向上に伴い、近年用いられる塗装系の多くは一般的な腐食性の環境において数十年の耐久性が期待できる。このため、材料性能の観点において塗膜下腐食を懸念する必要はほとんどないと言える。

塗膜下腐食を生じる状況は、大きく2つに分類される。1つ目は、塗膜の施工不良箇所や初期欠陥部等からの腐食である。鋼構造物の塗装は人の手によるものであり、塗装の困難な部材の狭隘部や角部等では所定の膜厚が得られにくい。また、鋼構造物に用いられる塗料は一般に常温乾燥型の溶剤型塗料であり、塗膜形成時にピンホールや泡などの微細な塗膜欠陥が生じることがある。このような塗膜の施工不良箇所や初期欠陥部では、他の部分と比較して塗膜の耐久性が低くなるため、鋼材の腐食因子である水分や酸素が塗膜/鋼材界面に浸入しやすい。その結果、腐食箇所周辺の健全な塗膜下にも腐食が進行し、塗膜下腐食が生じることになる。

---

\* (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

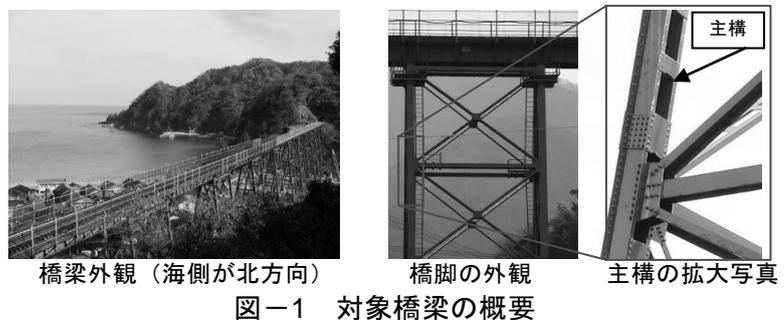
2 つ目は、鋼材の素地状態が良好ではない状態で塗装した場合に生じる腐食である。このような状態で鋼材に塗装すると、塗膜が十分に密着せず水分や酸素が浸入しやすくなるほか、腐食の反応場が広範囲に及ぶなどの理由により、塗膜下で鋼材が腐食しやすくなる。

近年では、後者の塗膜下腐食の方が早期かつ広範囲に生じるため、鋼構造物を維持管理するうえで懸念されることが多い。以下にその理由を述べる。

塗膜の寿命は数十年程度とされるため、鋼構造物を長期間供用する場合には塗替えが行われる。このとき、劣化した塗膜や腐食箇所に対して素地調整が行われるが、複雑な形状の部材では素地調整が困難であり、さびが残置されやすい。多くの塗料はさびに浸透しにくいいため、塗膜／鋼材間に空隙を有する箇所が存在することになり、早期に腐食が進行しやすくなると考えられる。また、腐食性の高い環境では腐食を促進する塩化物イオンがさび中に蓄積されたり、空隙の多い構造である層状のさびが広範囲に形成されやすい傾向にある。こうした理由から、塗膜下腐食が早期かつ広範囲に生じる場合が多い。例えば沿岸部に架設された鋼構造物では、塗替えから数年程度で、再度の塗替えを検討しなければならない程の塗膜下腐食を生じることがある。

### 3. 本稿で紹介する研究事例の概要

前章で述べた維持管理上での塗膜下腐食の重要性に鑑み、本稿ではさびが残置した場合に生じる塗膜下腐食を対象とした。まず、腐食性の高い環境に架設された既設鋼橋に生じる塗膜下腐食の詳細調査を行い、塗膜の耐久性に影響する環境因子を評価した結果について述べる。続いて、実構造物の塗膜下腐食を模擬した塗装さび鋼板を作製し、環境因子と塗膜耐久性の定量的な関係性を評価した結果について述べる。



### 4. 既設鋼橋の腐食箇所調査

#### 4.1 対象鋼橋の概要および調査部位

対象鋼橋は日本海に面する海岸付近で約 100 年程度使用され、2011 年に廃用されたものである。使用当時の対象鋼橋の外観を図-1 に示す。橋脚部は全 11 基から成り、両端以外の橋脚高さは約 40m である。離岸距離は数十 m 程度であり、過去の調査によって飛来塩分の影響を強く受けることが知られている。

調査部位を図-2 に示す。調査部位は離岸距離が最も小さい 3 番目の橋脚の主構部とした。主構部の最終塗替え塗装年は 1997 年であり、その前には 1986 年に塗替えが行われた。このとき用いられた塗替え塗装系は、1986 年では塗装系 G-7 (厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 4 回塗り)、1997 年では塗装系 T-7 (厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 3 回塗り+厚膜型ポリウレタン樹脂塗料) である。なお、当時の記録によると 1986 年の塗替えの際にそれ以前に塗装された旧塗膜を全て除去したとされている。

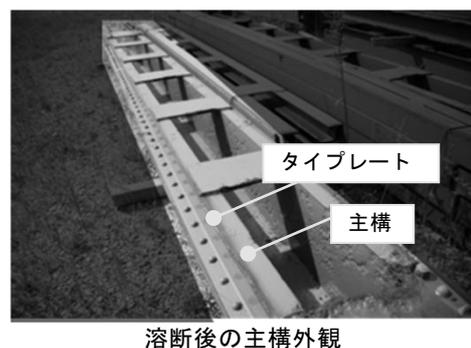
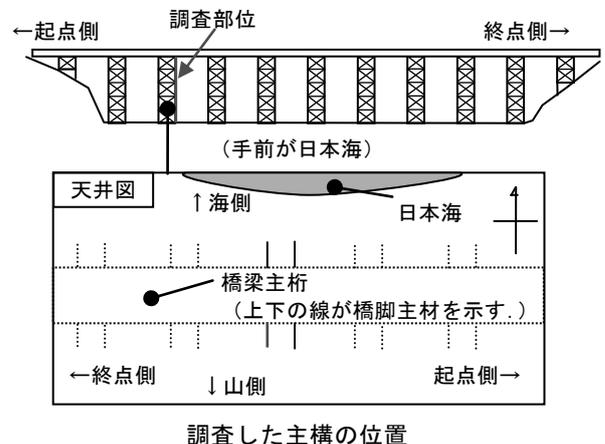


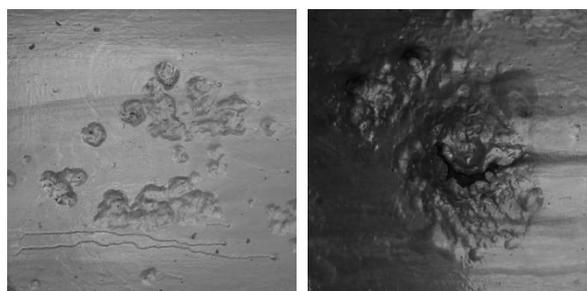
図-2 調査部位概要

## 4.2 調査方法

既設鋼橋の塗膜下腐食箇所の状況を把握するため、塗装履歴調査およびさびの性状分析を行なった。このとき、さび中に含まれる塩分量の測定も行なった。

### 4.2.1 塗膜履歴調査

塗膜履歴調査にはカット式膜厚計を用いた。これは、円錐状に切削した塗膜断面を拡大観察することで塗膜の履歴を推定する方法である。調査箇所は地上から約 1m の箇所とし、過去に一度も腐食していないと想定される平坦部と、腐食により凹凸を生じた部分（以下、変状部とする）の 2 箇所を実施した。このとき、図-3 および表-1 に示すように、腐食状態に応じて変状部を変状箇所①と変状箇所②の 2 種類に大別した。なお、カット式膜厚計では凹部の塗膜を切削できないため、変状箇所①では塗膜履歴のみを割愛した。



a 変状箇所①  
板厚が減少しているが塗膜は健全

b 変状箇所②  
塗膜下からの腐食が認められる

図-3 変状箇所①と変状箇所②の外観

表-1 変状部の分類

呼称	概要
変状箇所① (図-3a)	過去に局部腐食を生じて板厚が部分的に減少しているが、素地調整時にさびがほとんど除かれたため、現在は塗膜ふくれや塗膜われ、さびなどは見られず塗膜下で腐食していないと判断した状態
変状箇所② (図-3b)	塗膜ふくれが生じており塗膜下で腐食進行していると判断した状態、または塗膜われによって明らかに鋼材の腐食が確認された状態

### 4.2.2 さびの性状および含有塩分量の分析

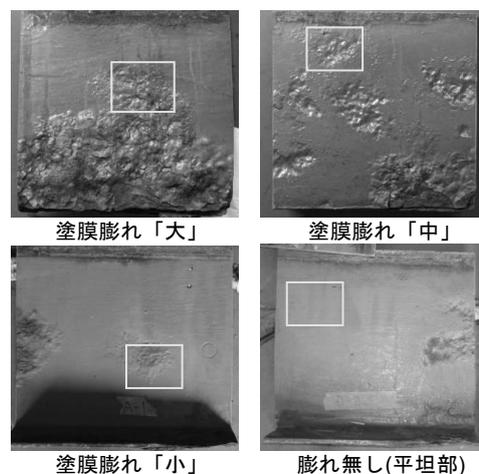
分析箇所は、様々な変状が確認された地上から約 35m の地点とし、平坦部、変状箇所①および変状箇所②からそれぞれの試料を約 15mm×20mm の寸法で切り出した。ただし、変状箇所②では直径数 mm～数十 mm 程度の塗膜膨れが発生していたため、塗膜膨れの大きさを四段階に区分し、それぞれの箇所から試料を 2 つずつ切り出した。選定した塗膜変状箇所の例を図-4 に示す。

断面分析用の試料は、不飽和ポリエステル樹脂に埋込みしたものとし、断面部に対して走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた拡大観察および電子線マイクロアナライザ (EPMA) を用いた元素分析を実施した。さび性状およびさび中の塩分量の分析は、次の手順により実施した。

- 1) 動力工具を用いて測定対象面以外の塗膜を除去した後、カッターナイフ等を用いて測定対象面の塗膜およびさびを採取した。
- 2) 採取したさびの一部を用いて、X 線回折によるさび組成を分析した。
- 3) 採取したさびと、鋼材に固着して残存するさび（固着さびと称する）の残存する試料をそれぞれ純水に約 48 時間投入し、各試料中に含まれる塩化物イオンを抽出した。
- 4) イオンクロマトグラフィーを用いて、各試料に含まれる塩分量を式 (1) から算出した。

$$x = \frac{Y \times 10^{-6} \times L}{A} \quad (1)$$

ここで、 $x$  は試料中の塩分量 (gcl/m<sup>2</sup>)、 $Y$  は測定値 (ppm)、 $L$  は抽出液の質量 (g)、 $A$  はさびを採取した箇所の面積 (m<sup>2</sup>) を示す。



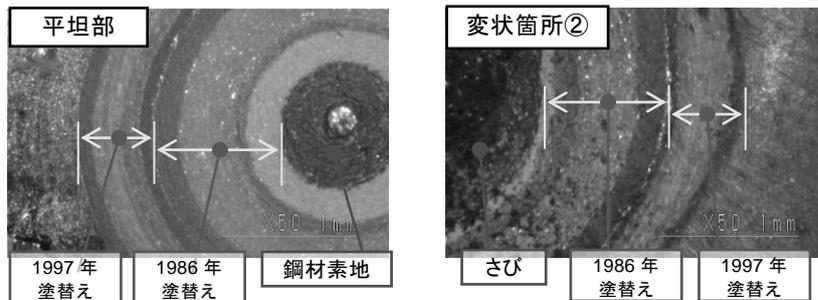
備考：各膨れの評価は黄枠内で実施した。

図-4 選定した塗膜膨れの例

### 4.3 調査結果と考察

#### 4.3.1 塗膜履歴調査

平坦部および変状箇所②で実施した塗膜断面の拡大写真を図-5 に示す。この写真から、双方の調査部位には過去 2 回分の塗替え塗膜（4.2 節で述べたように 1986 年と 1997 年に塗装された塗膜）が残存しており、この塗替え塗膜下で腐食が生じていることがわかった。残存する塗膜は長期耐久性の期待できる塗装系であり、これまで腐食していない箇所から短期間で腐食進行することは考えにくい。したがって、変状箇所②は 1986 年の塗替え時に素地調整した箇所のうち完全にさびを除去できなかった部分と考えられ、1997 年以降（塗装後 11 年～25 年程度）に再腐食したと推定される。



注：塗膜膨れ部は平滑な表面でないため、塗膜断面に歪みが生じた

図-5 平坦部および塗膜膨れ部の塗膜断面写真

#### 4.3.2 さびの性状および含有塩分量の分析

試料の SEM 観察結果の一例を図-6 に示す。選定したすべての箇所において、図-5 と同様に、過去 2 回分の塗替え塗膜が観察された。

図-7 に、試料断面の反射電子像および元素定性分析結果の一例を示す。酸素の分布から、酸化鉄であるさびと鋼材の界面の位置が明瞭となり、いずれの試料においても鋼材-さびの界面に空隙が存在するとともに塩化物イオンが広く存在していることが確認された。また、塗膜膨れ「大」ではさび-塗膜界面にも塩化物イオンの存在していた。さび厚みは、塗膜膨れ「小」では約 0.8mm、塗膜膨れ「中」および「大」では約 2.0mm であり、塗膜膨れが大きい場合にはさび厚みも大きくなる傾向がみられた。

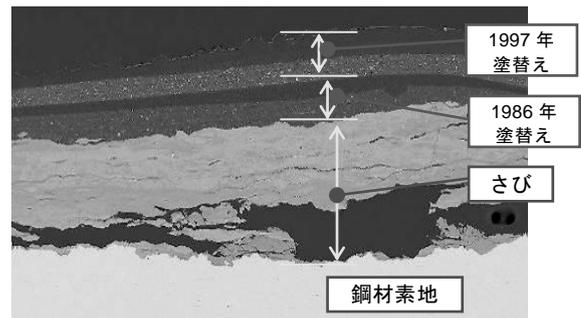
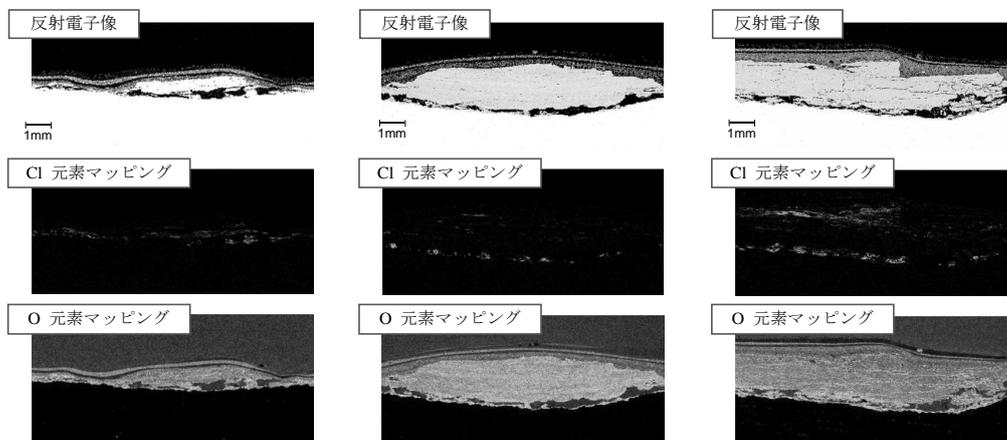


図-6 断面観察用試料の SEM 写真



塗膜膨れ「小」 塗膜膨れ「中」 塗膜膨れ「大」  
マッピング写真における各元素の分布は、赤>橙>黄>緑>青の順に多く分布していることを示す  
図-7 塗膜膨れ程度の異なる試料断面の元素定性分析結果

表-2 に、各試料から採取したさびの X 線回折結果を示す。これより、塗膜膨れの程度に関わらず、さびの組成はマグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )、ゲーサイト ( $\alpha\text{-FeO(OH)}$ ) およびレピドクロサイト ( $\gamma\text{-FeO(OH)}$ ) を主成分としていることが分かった。鋼材を屋外暴露して腐食させた場合、経年によってマグネタイトおよびゲーサイトの増加とレピドクロサイトの減少によるさび性状の変化が起きる<sup>2), 3)</sup>。表-2 の分析結果から、いずれの試料においても、マグネタイト、ゲーサイト、レピドクロサイトの相対強度がほぼ同一であることを考慮すると、いずれの試料においてもほぼ同一の腐食過程を経たと考えられる。

表-3 に、採取したさびおよび固着さびに含まれる塩化物イオン量と、それらを総合した全てのさび中に含まれる塩分量 (塩化ナトリウム換算) の測定結果を示す。さび中の塩化物イオン量は鋼材に近い固着さびの方が多い傾向にあること、塗膜膨れ「大」では採取さびにも多くの塩化物イオンを含むなど、図-7 と類似した傾向にあることが分かった。また、平坦部では塩化物イオンがほとんど存在しない一方で、変状箇所①および変状箇所②のような過去に腐食した箇所では塗膜膨れの有無に係わらずさび中に約  $0.7\text{g/m}^2$  以上の塩分が含まれていることが分かった。また、塗膜膨れの程度が大きくなるに伴ってさび中の塩分量は増加する傾向にあることも確認された。

#### 4.4 まとめ

塗膜下腐食に影響する環境因子の把握を目的とした既設鋼橋の調査を行ない、以下の知見を得た。

- (1) 調査した主構部には過去 2 回分 (1986 年, 1997 年) の塗替え塗膜が残存し、過去に腐食した箇所の一部で塗膜下腐食が生じている。
- (2) 塗膜下腐食が進行した時期は、1986 年の塗装から 11 年~25 年後と推定される。
- (3) さびの性状分析結果から、塗膜下腐食の進行程度はさび中の塩分量と相関する傾向にある。また、さび中の塩分は鋼材/塗膜間に広く分布する。

### 5. 塗装さび鋼板を用いた室内促進試験

前章の調査結果から、塗膜下腐食の進行にはさび中の塩分量が影響している可能性が得られた。そこで、さび中の塩分量と塗膜の耐久性の定量評価を目的とした室内試験を行なうこととした。

#### 5.1 試験方法

##### 5.1.1 さび鋼板の作製

さび鋼板は塩水噴霧により作製した。片面をエポキシ樹脂塗料で塗装したサンドブラスト処理 SS400 冷間圧延鋼板 ( $150 \times 70 \times 3.2\text{mm}$ ) に対して、 $0.01\text{wt}\%$  塩化ナトリウム水溶液を 168 時間もしくは 840 時間噴霧して鋼面を腐食させたものをさび鋼板とした。これらのさび鋼板には、前章で調査した変状箇所②の膨れ「小」もしくは膨れ「中」に含まれる程度のさび中塩分量が含まれる。鋼板の素地調整にはワイヤブラシを用い、緩く付着するさびを入念に除去した。

##### 5.1.2 さび中の塩化物イオンの除去方法

一般に、さび中の塩化物イオンの大部分はさび/鋼素地の界面に濃縮し、純水等への浸漬のみで完全に除去することは困難である。そこで、素地調整後のさび鋼板を  $0.1\text{mol/l}$  の硝酸カリウム ( $\text{KNO}_3$ )

表-2 X 線回折試験結果 (各組成の相対強度)

組成	変状箇所②の塗膜膨れ程度			
	無し	「小」	「中」	「大」
マグネタイト $\text{Fe}_3\text{O}_4$	+++	+++	+++	+++
ゲーサイト $\alpha\text{-FeO(OH)}$	++	++	++	+++
レピドクロサイト $\gamma\text{-FeO(OH)}$	+	+	+	+
ヘマタイト $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	-	-	-	-

備考:表中の記号は存在比の高い順に+++>++>+>- とした。

表-3 イオンクロマトグラフィー測定結果

分析対象	塗膜膨れの程度	塩化物イオン量 ( $\text{gC/m}^2$ )		全さび中の塩分量 ( $\text{g/m}^2$ )
		採取さび中	固着さび中	
平坦部	膨れ無し	-	0.01	0.02
変状箇所①	膨れ無し	0.23	0.17	0.66
変状箇所②	「小」	0.19	0.14	0.54
	「小」	0.20	0.36	0.92
	「中」	0.49	0.36	1.41
	「中」	0.18	0.48	1.10
	「大」	0.75	0.94	2.78
	「大」	1.55	1.08	4.33

水溶液 1000ml に浸漬し、白金電極を正極、さび鋼板を負極として 1.0A の電流を約 60 分印加することで、さび中の塩化物イオンを抽出した。このとき、浸漬液を 5～10 分間隔で約 20ml 採取し、JIS K 0101 に規定される吸光光度法を用いて溶出した塩化物イオン量を測定した。なお、比較対象とするさび中の塩化物イオンを除去しないさび鋼板についても、通電せずに KNO<sub>3</sub> 水溶液に 60 分浸漬した。

### 5.1.3 塗装さび鋼板の作製および室内促進劣化試験

さび中の塩化物イオンを除去した後、2 通りの塗装系を施した。1 つは鉛・クロムフリーさび止めペイントと長油性フタル酸樹脂塗料から成る塗装系（以下、塗装系 B とする）で、もう 1 つは厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料と厚膜型ポリウレタン樹脂塗料から成る塗装系（以下、塗装系 T とする）である。水分や酸素の遮断性の観点から、塗装系 T の方が高い耐久性を有するとされる。各塗装系の概要を表-4 に示す。

表-4 各塗装系の概要

工程	塗装系 B	塗装系 T
第 1 層	鉛・クロムフリーさび止めペイント (35)	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 (60)
第 2 層	鉛・クロムフリーさび止めペイント (35)	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 (60)
第 3 層	長油性フタル酸樹脂塗料中塗 (25)	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 (60)
第 4 層	長油性フタル酸樹脂塗料上塗 (20)	厚膜型ポリウレタン樹脂塗料 (60)

カッコ内の数字は、目標となる膜厚 (μm) を示す。

表-5 鉄道総研式複合サイクル試験条件

工程	試験名	試験時間	次の工程
1	オゾン暴露	12h	2
2	人工海水噴霧	4h	3
3	模擬濃縮雨水噴霧	44h	4
4	乾燥	48h	2

室内促進劣化試験には、複合塗膜の耐久性評価試験方法として用いられる鉄道総研式複合サイクル試験を適用した<sup>4)</sup>。本サイクル試験の試験条件を表-5 に示す。塗膜の耐久性評価は、塗膜表面に観察される塗膜膨れや点さびから塗膜変状面積率を算出して行なった。このとき、塗膜が高い耐久性を有する場合には、塗膜変状が進行しにくく評価に長時間を要する場合がある。そこで、塗膜変状速度に関する理論を適用して、変状程度の予測を試みた。一般に、促進劣化時間と塗膜変状程度との関係は、生物曲線（ロジスティック）に従うとされている<sup>5)</sup>。そこで、11 サイクルまでの試験結果を基にしたロジスティック回帰を行ない、一定の変状面積率に達すると想定されるサイクル数を計算した。ロジスティック関数には、下記の式 (2)～式 (4) を用いた。

$$p(x) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (2)$$

$$z = \alpha + \beta \quad (3)$$

$$\ln(L) = \sum_{j=1}^m [d_j \times \ln(p(x_j)) + (n_j - d_j) \ln(1 - p(x_j))] \quad (4)$$

ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$ は、式 (4) に示す尤度関数 ( $L$ ) を最大にするときの値となる。 $d_j$ は各サイクルの塗膜変状面積率、 $m$  は実施したサイクル回数であり、 $n_j$ については最終的に塗膜全面が変状すると仮定し、いずれも 100%とした。

## 5.2 試験結果と考察

### 5.2.1 さび中の塩化物イオンの除去

通電時間と溶液中の塩化物イオン濃度の関係を図-8 に示す。塩水噴霧条件によって塩化物イオンの溶出傾向は異なるが、両条件とも通電開始から 50 分経過した段階で塩化物イオン濃度は一定値となった。これより、さび中の塩化物イオンがほとんど除去されたと考えられる。通電前後のさび鋼板の外観を図-9 に示す。通電後にはさびが全体的に黒色に変化した。これは、通電にとまらぬ電気化学反応によって含水水酸化鉄が還元され、マグネタイトに変化したためと考えられる。

### 5.2.2 室内促進試験

サイクル数と塗膜変状面積率の関係を図-10 に示す。また、塗膜変状面積率が 10%または 50%に

達するまでに要するサイクル数をロジスティック回帰によって算出した結果を表-6 に示す。これより、塗装系および塩水噴霧条件に関わらず、電気化学的にさび中の塩化物イオンを除去した塗装さび鋼板の方が塗膜変状を生じにくいことが確認された。ロジスティック回帰による 10%または 50%の塗膜変状面積率に達するまでに必要なサイクル数を比較すると、塗装系 B の場合には 1.5~2 倍に増加した。塗装系 T の場合には塩水噴霧条件によって大きく異なり、塩水噴霧 168 時間では約 1.5 倍、塩水噴霧 840 時間の場合には数倍から数十倍に増加した。さび中に塩化物イオン等のイオン性物質が存在する場合、浸透圧の作用によって塗膜内へ水分が浸入しやすくなる。塗装系 T は材料構成や塗膜厚から高い環境遮断性を有するため、さび中の塩化物イオンを除去することによって塗膜内への水分の浸入を大幅に抑制し、その結果、塗装系 B と比較して塗膜変状面積率の増加割合が大きく低減したと考えられる。

### 5.3 まとめ

さび中の塩化物イオン量と塗膜の耐久性の関係の把握を目的として、塩水噴霧によって作製したさび鋼板を対象に、電気化学的手法によってさび中の塩分を除去した後に塗装した場合の塗膜の耐久性評価試験を実施した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 電気化学的手法によって、さび中の塩化物イオンの残存量を制御することができる。
- (2) 電気化学的にさび中の塩分を除去した塗装さび鋼板の方が塗膜変状を生じにくくなる。この傾向は、環境遮断性の高い塗装系において顕著である。

## 6. おわりに

本稿では塗膜下腐食の概要を説明するとともに、さびが残置した場合に生じる塗膜下腐食を対象として、塗膜下腐食の発生機構の解明を目的とした既設鋼橋の腐食箇所調査と塗装さび鋼板を試験片とした室内促進劣化試験の概要について紹介した。各調査、試験結果から、塗膜下腐食の進行程度にはさび中の塩分量が影響し、さび中の塩分量の低下に伴い塗膜の耐久性は向上することが確認された。

本稿で述べた室内促進劣化試験では、塗膜下腐食にともなう塗膜変状面積率はロジスティックに増加することが推定された。この要因の一つに、さびの成長過程における塗膜/鋼材間の密着性の減少が寄与した可能性がある。このため、今後は塗膜下腐食の体積増加率と塗膜耐久性の関係に着目した検討を行なう予定である。

最後に、山陰本線・旧余部橋りょうの主構部を用いた各種調査を実施するにあたり、部材を提供し

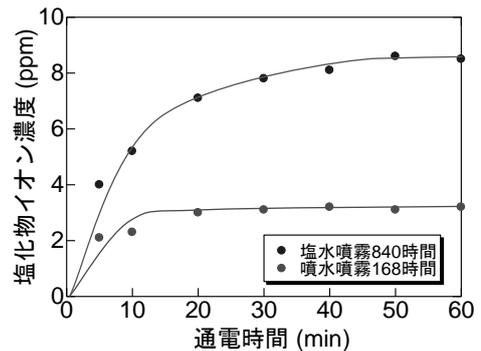


図-8 通电時間に対する溶液中の Cl<sup>-</sup>濃度

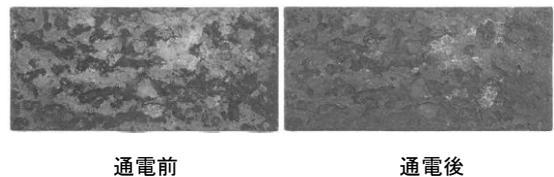


図-9 通电前後のさび鋼板の外観

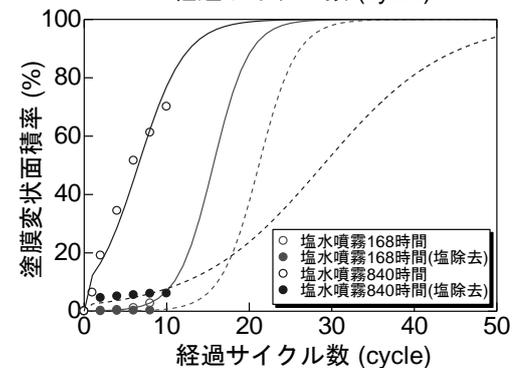
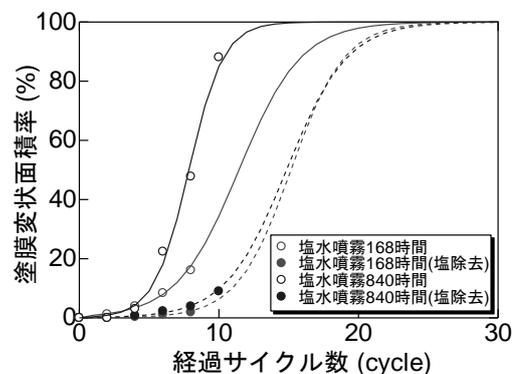


図-10 塗膜変状面積率の推移

表-6 所定の塗膜変状面積率となるサイクル数 (ロジスティック回帰)

塗装系	塩除去の有無	168 時間噴霧		840 時間噴霧	
		10%	50%	10%	50%
B	未除去	6.6	11.4	5.1	7.9
	除去	11	15.2	10.1	14.8
T	未除去	10.9	15.6	0.3	6.6
	除去	16.2	21.2	12.1	28.9

ていただいた西日本旅客鉄道株式会社に厚く御礼を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 田中，江成，坂本：鋼鉄道橋防食塗膜劣化に影響する海塩粒子付着量測定結果，材料と環境討論会講演集，Vol.53，pp.225-228，2006.
- 2) 田中，桐村他：さび面用塗料の耐久性，鉄道総研報告，Vol.5，No.5，pp.11-19，1991.5.
- 3) 三澤：鉄鋼腐食科学の温故知新，材料と環境，Vol.50，pp.538-545，2001.
- 4) (公財)鉄道総合技術研究所：鋼構造物塗装設計施工指針，2013.
- 5) 栗山：防錆塗膜の寿命予測に関する一つの試み，防せい管理，Vol.34，No.5，pp.182-186，1990.5

# 塗装構造物に生じる塗膜下腐食の 要因解明の取組み

(公財)鉄道総合技術研究所 坂本 達朗

2015.8.7 土木学会鋼橋委員会主催 第16回 鋼橋と環境に関するシンポジウム

## 塗膜下腐食とは

- ・塗膜下で板厚方向に進行する腐食形態
- ・面方向に広がる腐食ではないため、局部的に発生
- ・腐食箇所直上の塗膜は概ね健全
- ・腐食性の高い環境において散見

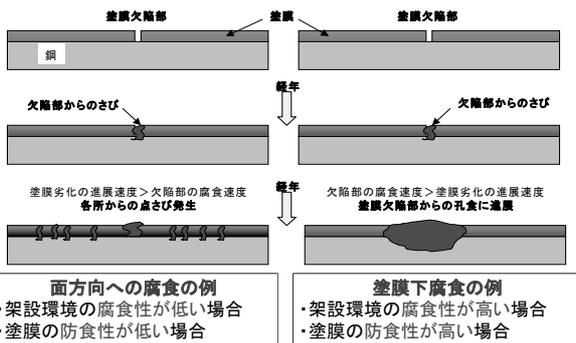


塗膜下腐食の一例

板厚減少にともない、構造物の安全性低下が懸念

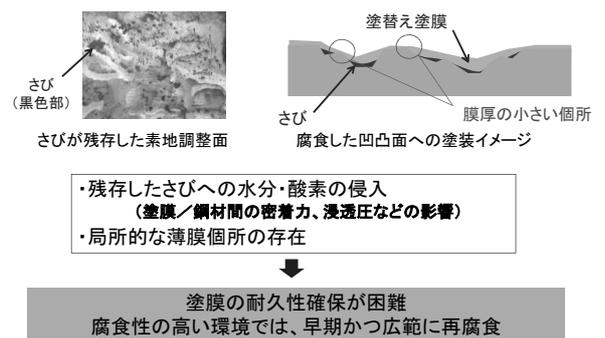
## 塗膜下腐食の発生要因

### ① 塗膜の施工不良箇所や初期欠陥部からの腐食



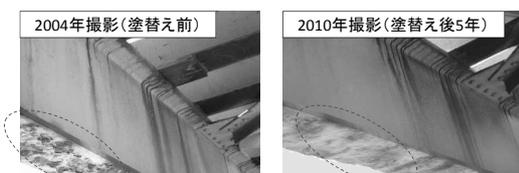
## 塗膜下腐食の発生要因

### ② 塗替え時の素地調整が困難な箇所での再腐食



## 塗膜下腐食で苦慮するケース

塗膜下腐食で苦慮している鋼構造物...再腐食によるケースが多数



過去に腐食した箇所が早期に再腐食した例

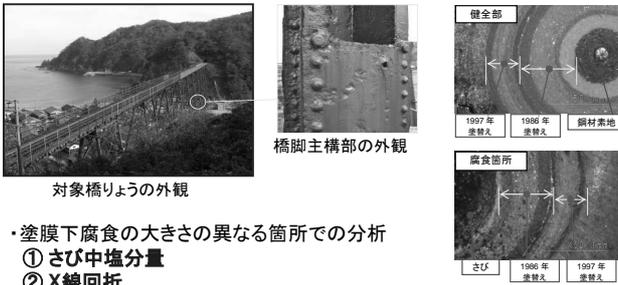
塗膜下腐食の要因解明および適切な対処方法の構築が必要

## 本稿で紹介する研究事例の概要

- ① 既設鋼橋の腐食箇所調査  
腐食性の高い環境の既設鋼橋に生じる塗膜下腐食の詳細調査  
→塗膜の耐久性に影響する環境因子を評価
- ② 塗装さび鋼板を用いた室内促進試験  
実構造物の塗膜下腐食を模擬した塗装さび鋼板を使用  
→環境因子と塗膜耐久性の定量的な関係を評価

## 既設鋼橋の腐食箇所調査 その①

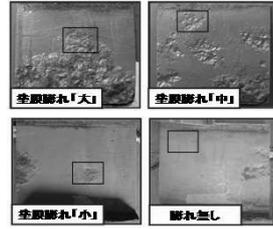
- 著しく腐食した箇所のさびの構成
- 沿岸部に架設された橋梁の橋脚主構部の腐食箇所を分析



- 塗膜下腐食の大きさの異なる箇所での分析
- ① さび中塩分量
- ② X線回折
- ③ EPMA分析

## ① さび中塩分量の測定結果

対象箇所の塗膜膨れの状態



膨れ程度とさび中塩分量の関係

分析対象	塗膜膨れの程度	さび中の塩分量 (g/m <sup>2</sup> )
平坦部位	膨れ無し	0.02
	「小」	0.54
変状箇所	「小」	0.92
	「中」	1.41
	「中」	1.10
	「大」	2.78
	「大」	4.33

さび中の塩分量が塗膜変状程度と相関する傾向

## ② X線回折結果

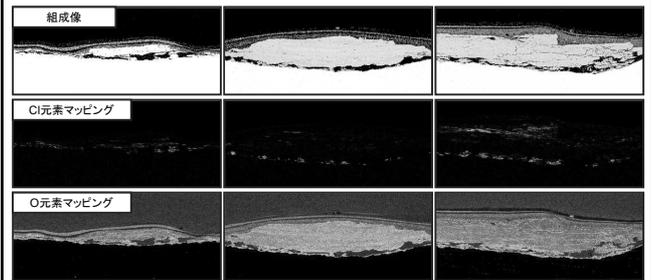
さびのX線回折結果(さび中成分のピーク強度比)

組成	さびの成分	変状程度(膨れの大きさ)					
		大	大	中	中	小	小
マグネタイト Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	塗料の顔料成分	+++	+++	++	+++	+++	+++
ゲーサイト α-FeO(OH)		+++	++	++	++	++	++
レビドクロサイト γ-FeO(OH)		+	+	+	+	-	+
ヘマタイト α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		-	++	++	-	-	-

一般鋼材を屋外で腐食させた場合... ・マグネタイトおよびゲーサイトの増加  
レビドクロサイトの減少

塗膜膨れの程度にかかわらず、さびの組成はほぼ同一  
選定した箇所はほぼ同一の年代で腐食発生

## ③ EPMA分析



塗膜膨れ小 塗膜膨れ中 塗膜膨れ大  
塗膜膨れ程度の異なる試料断面の分析結果 (青→赤になるほど高濃度に存在)

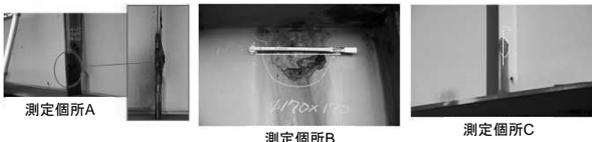
いずれの試料でも、基材さびの界面に塩化物イオンが多く存在

## 既設鋼橋の腐食箇所調査 その②

- さび厚みと板厚減少量の関係
- 沿岸部に架設された橋梁にて、さび厚みと板厚減少量を測定



対象橋りょうの外観



測定箇所A

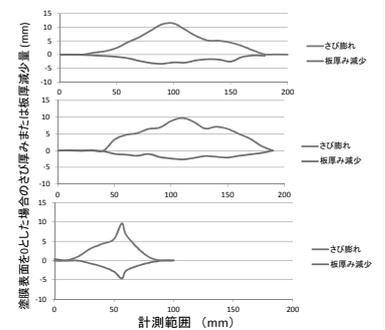
測定箇所B

測定箇所C

測定箇所A  
A(最大さび層厚み) 11.43mm  
B(最大板厚減少量) 3.37mm  
A/B = 3.39

測定箇所B  
A(最大さび層厚み) 9.74mm  
B(最大板厚減少量) 2.60mm  
A/B = 3.74

測定箇所C  
A(最大さび層厚み) 9.65mm  
B(最大板厚減少量) 4.62mm  
A/B = 2.09



板厚が減少している箇所ほどさび厚みが大きくなる傾向  
外観上のさび厚みから鋼材の板厚減少程度を定性的に推測可能

### 塗装さび鋼板を用いた室内促進試験

さびが残った場合の塗膜耐久性に影響する因子...

- ・さび性状(さびの厚み、さび中塩分量など)
- ・塗装系種別など

#### 室内試験による塗膜の耐久性評価

- ① 腐食程度と塗膜耐久性の関係
- ② 素地調整程度と塗膜耐久性の関係
- ③ さび中塩分を除去した場合の塗膜耐久性への影響

### 塗装さび試験片の作製条件

- ・試験鋼板: SS400 (150×70×3.2mm)
- ・腐食条件: 連続塩水噴霧で片面腐食 (NaCl水溶液 0.05wt%)
- ・ケレン条件: a) ワイヤブラシを用いて浮きさび除去  
b) カップワイヤーを用いて大部分のさびを除去  
c) プラストを用いて殆どのさびを除去
- ・塗装条件: はけ塗り (塗装系T-7)



a) ワイヤブラシ処理 b) カップワイヤー処理 c) プラスト処理

### 適用する塗装系

工程	塗装系B (合計115)	塗装系T (合計240)
第1層	鉛・クロムフリーさび止めペイント (35)	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 (60)
第2層	鉛・クロムフリーさび止めペイント (35)	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 (60)
第3層	長油性フタル酸樹脂塗料中塗 カツコ内の数字...目標となる膜厚 (μm)	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 (60)
第4層	長油性フタル酸樹脂塗料上塗 (20)	厚膜型ポリウレタン樹脂塗料 (60)

### 塗装さび試験片の促進劣化条件

- ・鉄道総研式複合サイクル条件

#### 1サイクルの工程

工程	試験名	試験時間	次の工程
1	オゾン暴露	12h	2
2	人工海水噴霧	4h	3
3	模擬濃縮雨水噴霧	4.4h	4
4	乾燥	4.0h	2

工程1: 2時間以内 20分以内 3回繰返し  
工程2: 15分以内  
工程3: 20分以内  
工程4: 20分以内

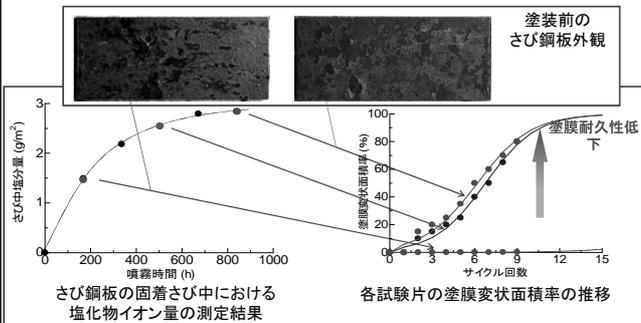


複合サイクル試験機



試験前(0サイクル) 試験後(10サイクル)  
塗膜膨れ(さび膨れ)の面積率により塗膜の耐久性を評価

### ① 腐食程度と塗膜耐久性の関係

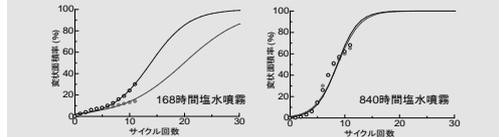


さび中塩分量と塗膜耐久性が相関する傾向 (さび中塩分量以外(さび厚など)の因子も影響)

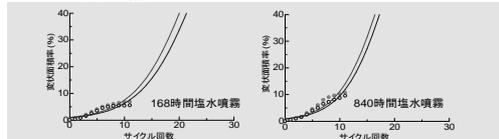
### ② 素地調整程度による塗膜の耐久性の影響程度

(塗装系Bによる評価)

- ・ワイヤブラシ処理の場合

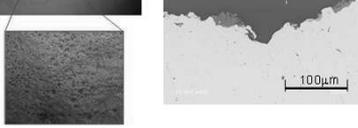


- ・カップワイヤー処理の場合



・プラスト処理の場合...微細な膨れのみ (10サイクル時点で数%以下)

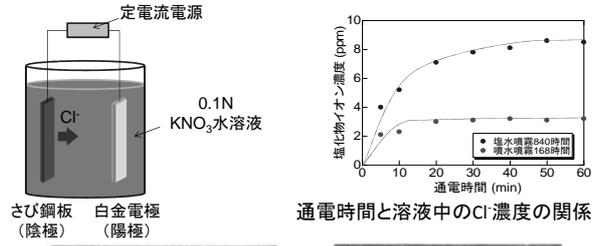
腐食条件 (塩水噴霧時間)	さび中に内在する塩分量		ファイヤブラシ 処理
	プラスト処理(ISO準拠) B Sa2	B Sa3	
168h噴霧	0.6 g/m <sup>2</sup>	0.5 g/m <sup>2</sup>	1.3 g/m <sup>2</sup>
504h噴霧	0.5 g/m <sup>2</sup>	0.5 g/m <sup>2</sup>	2.4 g/m <sup>2</sup>
840h噴霧	0.5 g/m <sup>2</sup>	0.5 g/m <sup>2</sup>	2.8 g/m <sup>2</sup>



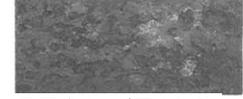
・さび中塩分量以外にさび厚などの因子も塗膜耐久性に影響  
 ・除錆度Sa2程度のプラスト処理でも、鋼素地に塩が残存しても一定の塗膜耐久性を有する

### ③ さび中塩分を除去した場合の塗膜耐久性

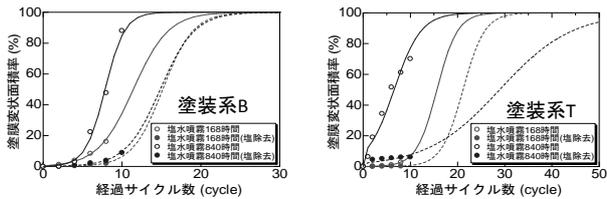
・さび中の塩化物イオンの除去...電気化学的手法により実施



通電前のさび面の外観



通電後のさび面の外観



さび中塩分の除去の有無による塗膜変状面積率の推移

さび中塩分の除去によって塗膜の防食性が向上  
 環境遮断性の高い塗装系を適用するほど、その傾向は顕著

### おわりに

- ・塗膜下腐食の発生 → 板厚減少に伴う構造物の安全性低下が懸念
- ・塗膜下腐食の問題 → 既腐食箇所の再腐食によるケースが多い
- ・塗膜下腐食の腐食状況として以下の項目を確認
  - ① さび中塩分量と塗膜の変状程度 → 相関関係にある
  - ② さび中の塩分 → さび/鋼材界面に濃縮しやすい
  - ③ 腐食箇所の板厚減少量 → さび厚みから推定できる可能性
- ・さびの上に塗装した場合の塗膜耐久性について以下の項目を確認
  - ① プラスト(Sa2程度の除錆度)での素地調整  
→ 鋼素地に塩が残存しても一定の塗膜耐久性を有する
  - ② プラストでの素地調整が困難な箇所  
→ 塩の除去による塗膜の耐久性向上が見込める  
→ その場合には環境遮断性の高い塗装系の適用が望ましい

適切な維持管理方法の構築の観点では、  
 ある程度のさびが残存しても問題ない環境の把握も重要