

# 亜鉛めっき鋼管製電車線路支持物の腐食劣化状態評価

臼木 理倫\*

## Evaluation of Corrosion of Contact Line Supports made of Galvanized Steel Pipe

Tadanori USUKI

Since galvanized steel has good balance among mechanical strength, price and corrosion resistance, it is widely used as contact line supports. When corrosion occurs on the surface of the steel, rust is generated on the surface of the steel. So, it is easy to find steel corrosion and to determine the corrosion degree of the external surface of the galvanized steel. On the other hand, it is difficult to determine the corrosion degree of the internal surface of the galvanized steel pipe because it is difficult to inspect the internal surface of pipe. This paper reports the investigation results of the corrosion degree of the removed galvanized steel pipes in order to establish proper maintenance of contact line supports made of galvanized steel pipe.

キーワード：亜鉛めっき鋼管，電車線路支持物，可動ブラケット，アーチパイプ，腐食

### 1. はじめに

電車線路材料には用途に応じてさまざまな金属材料が用いられ、その腐食は保守上の大きな課題のひとつである。例えば、電車線路を支持するためのビームに使用されている山型鋼は金属表面の腐食状態を目視で確認できるため、検査を行う人の主観に左右されることがあるものの、腐食状態を評価することが可能である。しかし、鋼管柱や可動ブラケットに多く用いられる亜鉛めっき鋼管の内部、土中に埋設された支線ロッドなどの設備は検査自体が難しい、または非常に手間のかかる検査を行う必要がある。そのため、土中に埋設された支線ロッドの腐食劣化診断に関する研究<sup>1)</sup>が行われた事例があるものの、電車線設備の腐食劣化判定は人による主観的な評価が一般的である。

そこで、亜鉛めっき鋼管の腐食部位や腐食形態を明らかにすることにより重点検査箇所の提案、腐食劣化に対する信頼度の高い設備の提案、腐食劣化評価手法の検証に資する基礎データ収集のため、電車線路設備から撤去した亜鉛めっき鋼管の材料分析を行い、劣化状態を評価した結果を報告する。

### 2. 亜鉛めっき鋼の概要

#### 2.1 腐食メカニズム

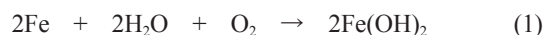
元素自身が化学的に極めて安定した金などを除けば、多くの金属は元々酸化物や硫化物などの鉱物として地球上に存在している。その鉱物を精錬し、さらに合金とす

ることにより、所期の性能を持たせて実用材料としている。精錬された金属は熱力学的にエネルギーの高い不安定な状態にあり、使用環境下の化学反応によりエネルギーの低い化合物や元の鉱物に戻ろうとする性質を持っている。この現象を腐食といい、腐食を大別すると乾食と湿食に分けられる。今回の調査対象である電車線路支持物の亜鉛めっき鋼管は自然環境下で使用されているため、湿食が主である。従って、本稿では湿食のことを腐食と称する。

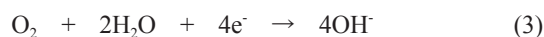
自然環境下で腐食が進行するためには次の2つの条件が必要である。

- ① 金属の表面に液体としての水分があること
- ② 水分中に酸素が溶け込んでいること

電車線路で使用されている亜鉛めっき鋼管は一般構造用炭素鋼鋼管（代表例：STK490，JIS G 3444:2010）または一般構造用圧延鋼材を用いた管に熔融亜鉛めっきが施してあるものが一般的である。鋼の主元素である鉄の腐食反応は式(1)のように表される。



これを電気化学的に示すと、式(2)、(3)のように表される。



鉄の表面で式(2)のようなアノード反応が起こり、Fe原子が水中で2価の陽イオンと電子に電離する。水中では式(3)のようなカソード反応が起こる。つまり、腐食においては酸化と還元が同時に過不足なく起こっている。

\* 電力技術研究部 集電管理研究室

特集：電力技術

前述の2つの条件がそろえば式(2)、(3)で示した通り、Fe原子から出た電子がなかだちとなり腐食が進行する。逆に、電子がなかだちとならなければ腐食が進行しないことになる。電子の移動を妨げるためには、母材表面に不導態の膜を発生させればよく、積極的に膜を発生させるものが鋼材の塗装であり、ステンレス鋼やアルミニウムなどでは、金属表面に生成する酸化皮膜が非常に安定かつ強固なため、結果的に酸化皮膜が不動態皮膜となる。他の方法として、母材表面に犠牲陽極を作ることにより、選択的に犠牲陽極を腐食させて母材の耐食性を高めるものがあり、その代表的な例が溶融亜鉛めっきである。

2.2 めっき層の皮膜組織

溶融亜鉛めっきのめっき層に見られる皮膜組織は4層構造になっており、表面に近い方からη層(亜鉛層)、ζ層、δ<sub>1</sub>層、γ層と呼ぶ<sup>2) 3)</sup>。文献3)によると、腐食が激しい環境下ではη層の消失した残存めっき層は腐食に対して非常に弱いため、η層の有無が溶融亜鉛めっきの耐食性を左右するとされている。各層の特徴を表1に、模式図を図1に示す。

表1 亜鉛めっき皮膜組織各層の特徴

η層	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ちょう密六方晶</li> <li>・ 軟らかく展延性に富み、変形加工を受けても破れない</li> <li>・ 亜鉛めっき浴と同じ組成(亜鉛層)</li> </ul>
ζ層	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 柱状組織</li> <li>・ 比較的脆く、めっき後過酷な加工を受けると、き裂を生じることがある</li> <li>・ 合金中の鉄含有量6%程度</li> </ul>
δ <sub>1</sub> 層	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 緻密な組織を示し、複雑な六方晶形の構造</li> <li>・ 靱性、延性に富む</li> <li>・ 合金中の鉄含有量6~11%</li> </ul>
γ層	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 硬く、割れやすい</li> <li>・ ヒートショックなどで鋼母材が変形するとクラックや剥離を起こしやすい</li> </ul>

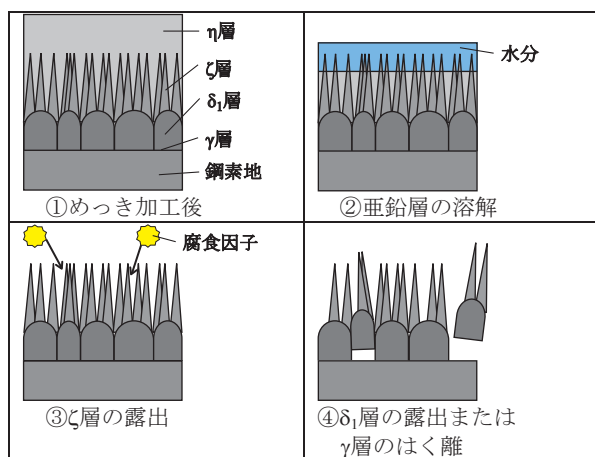


図1 溶融亜鉛めっき腐食の模式図

3. 撤去調査品

今回調査を行ったのは、明かり区間の可動ブラケット主パイプおよびトンネル内のちょう架線支持部材であるアーチパイプである。26箇所の支持点から撤去、調査したパイプの一覧を表2に示す。表中の初期肉厚とは、製造図面上の値である。汚損区分および取替時判定は調査品を提供頂いた鉄道事業者の区分・判定に準拠した。判定にはA~Dの段階があるが、A判定が最も状態が良く、D判定が最も状態が悪いものである。

明かり区間については、方針として地理的条件および経年を網羅するように選定・採取した。しかし、結果的には電化当初からの設備の老朽取替に伴う発生品が多く、経年は40年前後のものが多くなった。一方、海底トンネルからの撤去品は、全ての判定(A~D)を網羅するように採取した。調査品の撤去前の設置状態例を図2に示す。

表2 調査品一覧

初期肉厚 [mm]	めっき	汚損区分	地理的条件	構造物区分	経年	取替時判定
7.1	HDZ55	重塩害	海底	トンネル	不明	B
7.1	HDZ55	重塩害	海底	トンネル	不明	B
7.1	HDZ55	重塩害	海底	トンネル	不明	D
7.1	HDZ55	重塩害	海底	トンネル	不明	D
7.1	HDZ55	重塩害	海底	トンネル	不明	D
7.1	HDZ55	重塩害	海底	トンネル	不明	D
7.1	HDZ55	重塩害	海底	トンネル	不明	C
7.1	HDZ55	重塩害	海底	トンネル	不明	B
7.1	HDZ55	重塩害	海底	トンネル	不明	C
7.1	HDZ55	重塩害	海底	トンネル	不明	C
7.1	HDZ55	重塩害	海底	トンネル	不明	A
3.8	HDZ55	一般	山間部	一般	43年	D
3.8	HDZ55	一般	山間部	一般	39年	D
3.8	HDZ55	塩害	海岸部	一般	39年	D
3.8	HDZ55	塩害	住宅地	一般	39年	D
3.8	HDZ55	塩害	住宅地	一般	39年	D
3.8	HDZ55	一般	山間部	一般	不明	C
3.8	HDZ55	重汚損	海岸部	一般	不明	D
3.8	HDZ55	一般	田園部	一般	37年	C
3.8	HDZ55	一般	田園部	一般	37年	C
3.8	HDZ55	塩害	海岸部	一般	37年	C
3.8	HDZ55	塩害	海岸部	橋梁	37年	D
3.8	HDZ55	塩害	海岸部	橋梁	38年	D
3.8	HDZ55	一般	山間部	一般	37年	D
3.8	HDZ55	塩害	住宅地	橋梁	37年	D
4.0	HDZ55	塩害	住宅地	橋梁	10年	B



(a) 海底、トンネル

(b) 海岸部、橋梁

図2 調査品の設置状態例

## 4. 腐食劣化調査

### 4.1 調査項目と評価基準

調査は外観評価およびパイプ肉厚測定の2項目とした。現地から撤去した1本の可動ブラケット主パイプおよびアーチパイプ1本に対し任意で2～8箇所を選定し調査したため、調査箇所数はパイプ26本に対して全105箇所となった。

文献4)で示されている溶融亜鉛めっきの劣化色見本を表3に示し、それに準じてパイプ表面の劣化度を評価した。製品購入時に見られる金属光沢をした斑模様は認められないものの、全体的にねずみ色、または軽い白さびが認められる状態が劣化度Ⅰ、全体的に著しい白さびが認められる状態が劣化度Ⅱ、褐色のさびが認められる状態が劣化度Ⅲ、赤黒いさびが認められる状態が劣化度Ⅳである。

試料調整としてパイプの横断面を作成、切断面を研磨したのち、光学顕微鏡で切断面の肉厚を測定した。肉厚測定結果を基に、初期肉厚が7.1mmのパイプは0.5mm減肉するごとに、初期肉厚が3.8mmおよび4.0mmのパイプは0.3mm減肉するごとに腐食の程度を軽、中、重、超重腐食と分類し、腐食度を評価した。パイプ肉厚による腐食評価分類を表4に示す。なお、今回はパイプの腐食劣化状態調査が主眼であったため、切断面観察によるめっきの有無および金属組織の調査、材料の機械的強度確認は実施していない。

表3 溶融亜鉛めっきの表面劣化度と腐食状態

劣化度	劣化見本	腐食状態
Ⅰ		η層が残存
Ⅱ		ζ層が部分的に露出
Ⅲ		ζ層が全面的に露出
Ⅳ		δ <sub>1</sub> 層が露出

表4 パイプ肉厚による腐食評価分類

初期肉厚	肉厚 [mm]		腐食判定
	7.1	3.8, 4.0	
実肉厚	6.6～	3.5～	軽腐食
	6.1～6.6	3.2～3.5	中腐食
	5.6～6.1	2.9～3.2	重腐食
	～5.6	～2.9	超重腐食

### 4.2 調査結果

#### 4.2.1 海底、トンネル

パイプ11本、全37箇所の評価結果を図3に示す。表面劣化度評価はⅣが主であるが、肉厚による腐食評価は重腐食までに留まっており、調査範囲において超重腐食は認められなかった。特徴として、中腐食は全部位に認められるものの側面から下部に多い傾向が認められ、重腐食は側面にのみ認められた。重腐食が側面にのみ認められた原因は、次の項目が原因と考えられる。

- ① トンネル壁面からの漏水がパイプに滴下し、線路側へ流れる
- ② 列車通過に伴う水蒸気を多く含んだ列車風がパイプ側面に当たりやすい
- ③ パイプ形状がトンネルの上壁面の形状に沿ったアーチ型のため、付着した水分がパイプ端部へ流れる
- ④ パイプ端部が開放のため、パイプ内外環境の差がない

最も腐食が進んでいるとみられる調査例を図4に示す。外観ではさびによる膨れが認められるものの、横断面では肉厚はほぼ均一で、局所的な減肉は認められなかった。当該鉄道事業者では、重塩害環境であることから短い周期で至近距離検査を行い、予防的に交換を行っているためと考えられる。

同環境で検査を行う場合、パイプにトンネル漏水が滴下している箇所およびパイプ側面を重点的に検査することが効率的と考えられる。

#### 4.2.2 山間部、一般

パイプ4本、全19箇所の評価結果を図5に示す。表面劣化度評価は全てⅣであるものの、肉厚による腐食評価は軽腐食が主で、一部に中腐食が認められたのみであった。これは、海塩粒子や工場等からの腐食因子飛来が少ないためと考えられる。今回の調査範囲においては、外観上赤さびが生じていてもその成長に伴い生じる膨れや剥離が認められなければ、肉厚が大きく減少している可能性は低いと考えられる。

#### 4.2.3 住宅地、一般および橋梁

パイプ4本、全17箇所の評価結果を図6に示す。大多数の表面劣化度評価はⅣであるものの、腐食評価は軽腐食が主で、一部中腐食が認められた。調査品は全て塩害地区からの撤去品であるものの、腐食の程度は前述の山間部と大きくは異なっていなかった。

#### 4.2.4 田園部、一般

パイプ2本、全8箇所の評価結果を図7に示す。どちらも表面劣化度評価はほぼⅣであった。腐食評価は、一方は軽腐食が主、他方は中腐食～重腐食であった。この腐食による減肉はほぼ外側からで、春～夏にかけて周囲の水田から供給された水蒸気と風向に起因すると考えられる。

特集：電力技術

4.2.5 海岸部，一般および橋梁

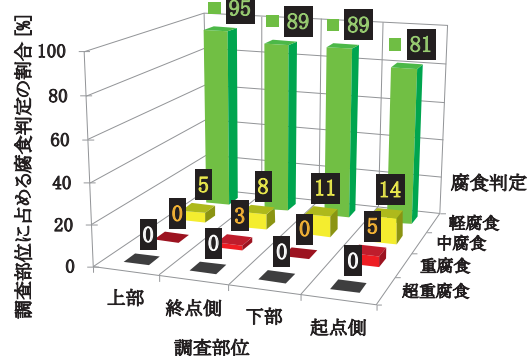
パイプ5本，全24箇所の評価結果を図8に示す。表面劣化度はほぼIVで，腐食評価は軽腐食が約3割，中腐食が5割強であった。他の環境とは異なり，海岸部のみ中腐食の割合が最も多かった。また，超重腐食も海岸部のみであり，海岸は腐食にとって厳しい環境であることが示された。超重腐食は上部に多く認められる特徴がある。調査の一例を図9に示す。パイプ先端側側面にはちょうど架線支持金具取付用の穴が複数あけられており，その部位では上部内側に超重腐食に相当する著しい腐食減肉が認められた（図9（a））。上部内側の腐食減肉の推定メカニズムは次の通りである。

- ① パイプ側面の穴から雨水，酸素，海塩粒子などの腐食因子がパイプ内部に浸入
- ② 上記腐食因子を含んだ水分がパイプ内に滞留
- ③ 水分が蒸発
- ④ 水滴がパイプ上部内側へ付着し，腐食が進行
- ⑤ 水滴が凝集，滴下

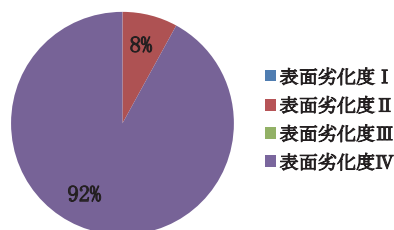
この②から⑤のサイクルを繰り返すことにより，パイプ上部内側の腐食が進行するものと想定される。なお，パイプ下部には水分が滞留するものの，水中の水酸化物イオン濃度が高くなった影響で極端に減肉しなかったものと考えられる。このような腐食減肉の概念図を図10に示す。

一方，同じパイプの中央部は，表面劣化度はパイプ先端と同程度であるにも関わらず，腐食の度合いが異なり，局所的な減肉は認められなかった。これは，パイプ中央部側面に穴がないこと，海塩粒子を含む水が滞留する可能性がほぼなかったことに起因すると考えられる。従って，パイプ内部の腐食を防止するには，腐食因子となる水が流出できる穴をパイプ下部の両端にあけることが望ましい。なお，今回調査した5本のうち2本に上部内側の腐食が認められた。

従って，海岸部に架設されたパイプのうち，パイプ端部に内部から腐食因子が流出できる穴が開いていないものを検査する際には，表面上の腐食劣化度だけでなく，打音検査や工業用内視鏡など，他の方法を併用した検査が望まれる。逆に，水分が流出できる穴が開いているものについては，パイプ内部の腐食の可能性は低く，現状と同じ外観上の検査でよい可能性が高い。しかし，断定のためにはサンプル数を増やして検証することが必要である。



(a) 腐食判定結果



(b) 表面劣化度

図3 海底，トンネルの評価結果

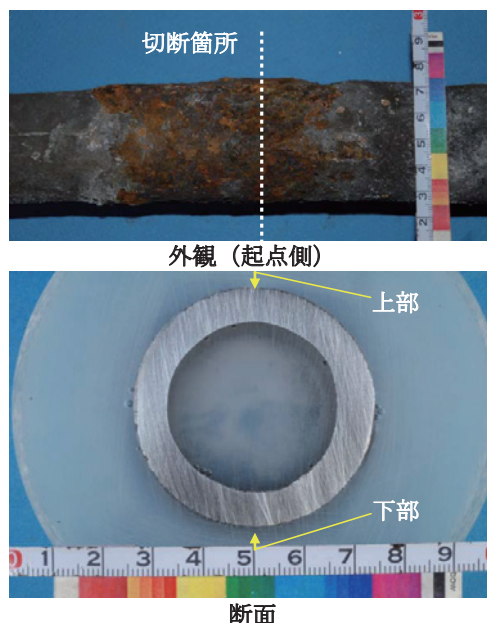
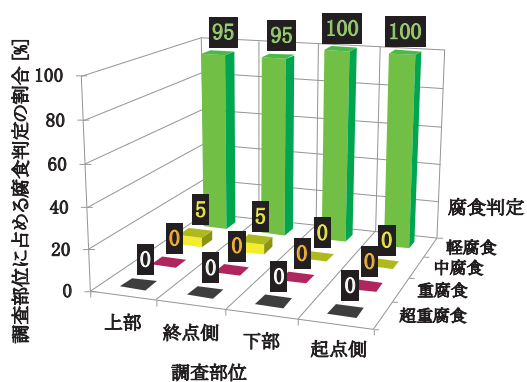
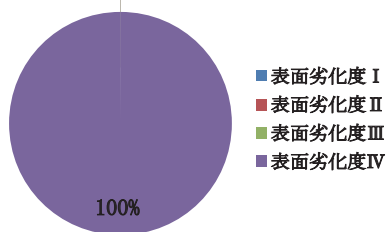


図4 海底，トンネルの調査例

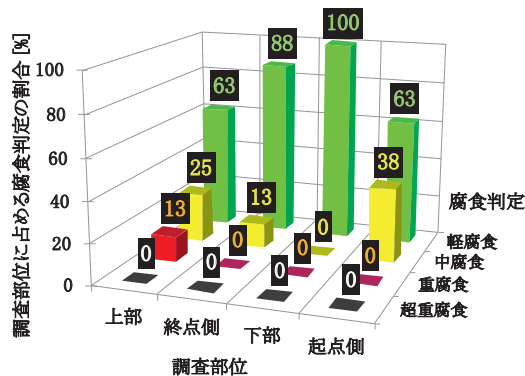


(a) 腐食判定結果

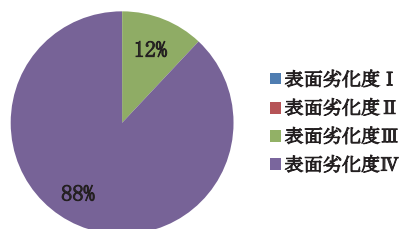


(b) 表面劣化度

図5 山間部の評価結果

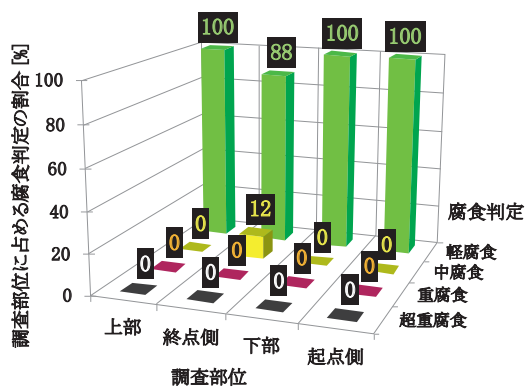


(a) 腐食判定結果

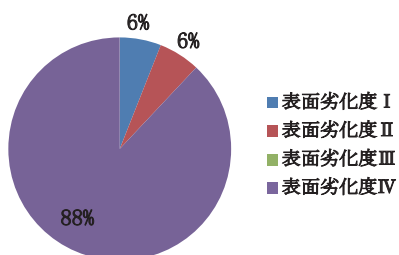


(b) 表面劣化度

図7 田園部の評価結果

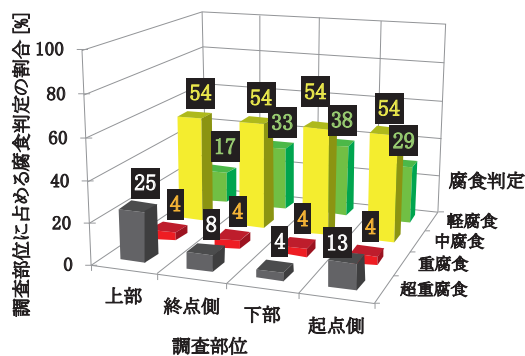


(a) 腐食判定結果

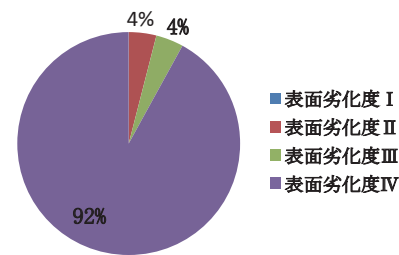


(b) 表面劣化度

図6 住宅地の評価結果



(a) 腐食判定結果



(b) 表面劣化度

図8 海岸部の評価結果

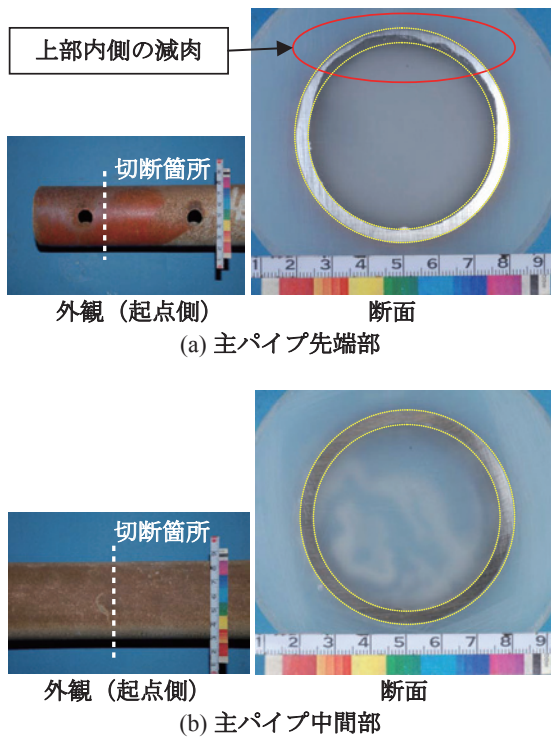


図9 海岸部，一般の調査例

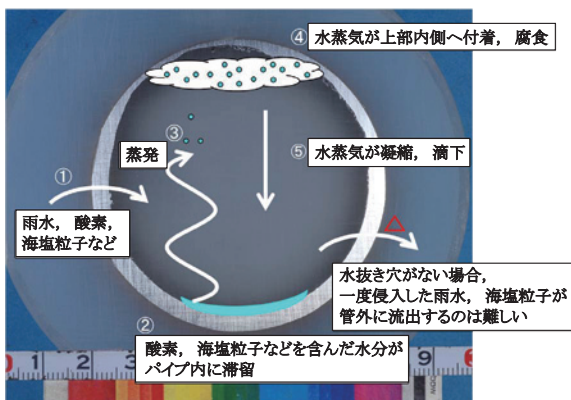


図10 パイプ内側上部腐食の推定メカニズム

#### 4.3 調査のまとめ

今回の調査の範囲では、腐食部位や形態などに一律の傾向を認めることはできなかった。これは、腐食が環境に大きく依存するためと考えられ、経年や地区、重点検査部位の特定など、画一的な管理は難しいことが改めて明らかとなった。

しかし、海岸部からの撤去品にパイプ上部内側が著しく腐食する例があることが明らかとなった。電車線路の保全では、基本的に外観検査が行われているため、今回

の調査結果から、目視できない箇所の状態も考慮する必要があることを示した。従って、海岸部かつ長経年のパイプについては、入念な目視検査を行うとともに、打音検査、工業用内視鏡等の検査装置を併用することが望ましいと考えられる。なお、今回の調査において内側に著しい腐食が認められたのは海岸部の2本のみで、側面穴あり・水抜き穴なしのパイプであった。

パイプ内部の腐食を抑制するために、パイプ両端の下部に水抜き穴を設けることが望ましい。それにより、パイプ内部の腐食の可能性は低くなることから、現状と同じ外観上の検査でよい可能性が高い。しかし、断定のためにはサンプル数を増やして検証することが必要である。

#### 5. おわりに

今回、鉄道営業線から撤去した26支持点の亜鉛めっき鋼管の材料調査を行い、撤去品の腐食判定、表面劣化度を評価した。それにより、亜鉛めっき鋼管の腐食に対する基礎データを収集することができた。一方、重点検査箇所の提案、腐食劣化手法の検証には至らなかった。しかし、撤去品調査からパイプ内部、特に内側上部が腐食する場合があることを明らかにした。

今後は、腐食が進行する環境を定量的に示すべく、鉄道沿線で暴露試験や環境測定を行い、腐食と環境の関係を検討する予定である。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご協力をいただいた九州旅客鉄道株式会社の関係各位に深く感謝し、紙面を借りて御礼申し上げます。

#### 文献

- 1) 菊地，佐藤，大浦，藤井，佐藤，大黒：支線用ロッド腐食劣化診断方法についての研究，平成24年電気学会産業応用部門交通・電気鉄道研究会，TER-12-017，pp.53-56，2012
- 2) 日本溶融亜鉛鍍金協会 <http://www.aen-mekki.or.jp/>  
(参照日：2015年8月12日)
- 3) 一般社団法人電気協同研究会編：電気協同研究 第69巻 第3号，p.103，2013
- 4) 日本電信電話株式会社公社建築局編：溶融亜鉛めっき鉄塔の劣化度写真見本帖 経済的な補修時期の判断，pp.11-12，1987