

# Zn-Al系擬合金溶射管の強腐食環境下における寿命推定

## Life Prediction of Zn-Al Pseudo-Alloy Sprayed DCI Pipe in a Highly Corrosive Soil Environment

堤 親平\* 大津秀樹\* 大内 勲\*\* 近久博司\*\*

Shimpei Tsutsumi Hideki Otsu Isao Ouchi Hiroshi Chikahisa

ダクタイル鉄管の埋設管掘上調査は、経年変化による腐食の進行を調べることにより、寿命予測や更新計画に役立てるための重要な調査である。徳島市は、吉野川の沖積平野に発達した都市であり、特に海水の影響を受けた沿岸部においては、国内でも数少ない強腐食性土壌である。今回、徳島市上下水道局と共同で埋設後 22 年目の調査を実施した。また、近年開発した高耐食仕様である GX 形管仕様と埋設管で用いた Zn-Al 擬合金溶射仕様の腐食促進試験による比較評価を行った。それらの結果より、GX 形管の強腐食性土壌環境における寿命推定を行い、強腐食環境下においても GX 形管では 50 年以上の寿命が期待できることがわかった。

A buried-pipe survey of ductile cast iron pipes is an important survey for predicting the life of then and upgrade plans, by examining the progress of corrosion due to aging. Tokushima City is a municipality which is developed in the alluvial plain of the Yoshino River. Especially in the coastal areas of Tokushima City affected by seawater, the soil is highly corrosive. This highly corrosive soil is one of the few in Japan.

This time, a survey was conducted 22 years after the burial of pipes in collaboration with the Tokushima City Waterworks Bureau.

In addition, the GX-type specification, which is a highly corrosion-resistant specification developed in recent years, and a Zn-Al pseudo alloy spraying specification used for buried pipes were comparatively evaluated with a corrosion acceleration test. From these results, it was found that the life span of the GX-type pipes was predicted to be more than 50 years in a highly corrosive soil environment.

### 1 はじめに

徳島市は、吉野川の沖積平野に発達した都市であり、特に沿岸部においては、ダクタイル鉄管の管体腐食による漏水事故を経験してきた。そこで、徳島市上下水道局では、腐食性土壌地域にはポリエチレンスリーブ工法を採用し、管路全体の防食対策に取り組んできた。また、ポリエチレンスリーブ工法よりも防食性、施工性に優れた外面特殊塗装の検討も進めてきた。ポリエチレンスリーブの外面特殊塗装の検討として、現在 GX 形管で採用している Zn-AlSiMn 擬合金溶射の前身となる Zn-Al 擬合金溶射において、1996 年より、腐食性土壌地域におけるダクタイル鉄管の外面特殊塗装に関する埋設実験を開始した。これまで 3 年目、6 年目、10 年目の調査を行い、その防食効果が持続していることを確認している<sup>1), 2)</sup>。今回、更に 22 年目の調査を行ったため、その結果について報告を行う。

また、高耐食仕様により長寿命化を実現し、近年注目されている GX 形管仕様と埋設管である Zn-Al 擬合金溶射仕様の腐食促進試験による比較評価を行うことにより、GX 形管仕様の徳島市強腐食埋設環境下における寿命推定を行った結果についても併せて報告する。

### 2 各種防食仕様の特徴について

今回、徳島市において、埋設実験を行った Zn-Al 擬合金溶射仕様および腐食促進試験による比較評価を行った GX 形管仕様を表 1 に示す。なお、当社の GX 形管仕様で用いている材料は全て自社開発品である。それぞれの防食仕様の特徴を以下に示す。

表 1 各種防食仕様

	Zn-Al 擬合金溶射 (埋設管) 仕様	GX 形管仕様
プライマー	Zn-Al 擬合金溶射	Zn-AlSiMn 擬合金溶射 (Zn 系合金溶射)
封孔処理	なし	シリカ系封孔処理剤
塗装	合成樹脂塗装	合成樹脂塗装

#### 2.1 Zn-Al 擬合金溶射 (埋設管) 仕様の特徴

一般に Zn 溶射皮膜は、鉄に対して電気化学的に卑であるため、犠牲陽極として働く。一方、Al 溶射皮膜は、表面に緻密な不動態皮膜を形成し、その遮断効果により優れた耐食性を示す。Zn-Al 擬合金溶射は、それぞれの特徴を組合わせたものであり、Zn と Al を併せて使用することで、Zn と Al が層状に分布し、Al の緻密な不動態形成膜によって Zn の溶出を抑制する作用が働き、長

期にわたり耐食性を発揮することを特徴とする。図1にZn-Al 擬合金溶射皮膜の断面図を示す。なお、擬合金溶射とは、図2に示すように、アーク溶射において、線材に2種の材料を用いることにより、各々の材料が混在した溶射皮膜を形成する手法である<sup>1)~3)</sup>。

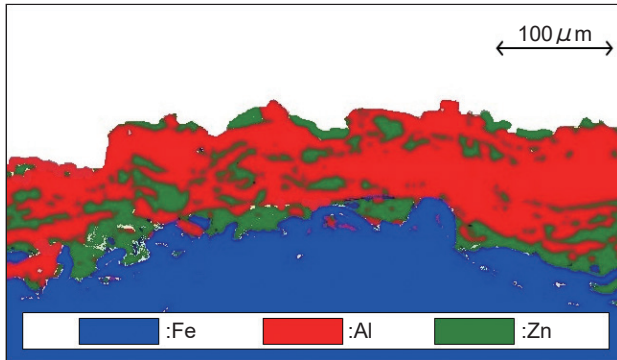


図1 Zn-Al擬合金溶射皮膜断面

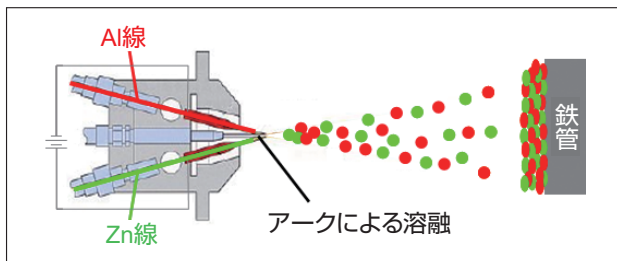


図2 Zn-Al擬合金溶射の概略図

## 2.2 GX 形管仕様の特徴

GX 形管仕様は、前述の Zn-Al 擬合金溶射仕様から大幅に耐食性向上を図った塗装仕様となる。その違いは大きく2つであり、1点目は、従来の Zn-Al 擬合金溶射に Si、Mn を添加することにより、Al の腐食速度の低減や Zn の保護皮膜作用の向上を図り、大幅に耐食性を向上させた溶射材料（プライマー）を使用している点である。2点目は、溶射皮膜の上に封孔処理を施すことにより、更なる溶射皮膜の耐食性向上を図っている点である。なお、GX 形管仕様においても同様に、図2に示す Al 線の代わりに、AlSiMn 線を使用した擬合金溶射である（図3）。GX 形管の溶射施工状況写真を図4に示す。

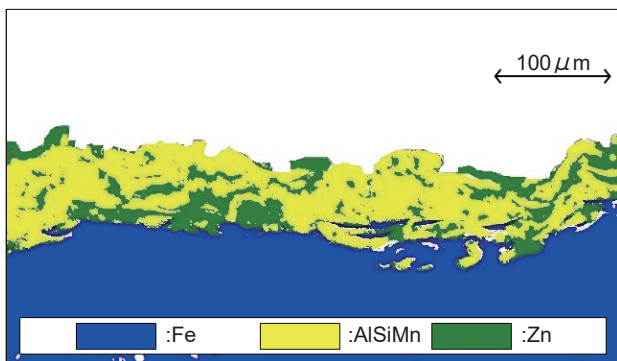


図3 Zn-AlSiMn擬合金溶射皮膜断面（GX形管仕様）

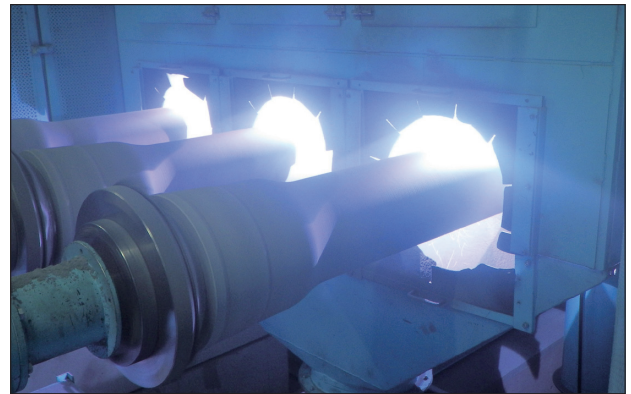


図4 GX形管の溶射施工状況

## 3 埋設管掘上調査について

### 3.1 埋設管掘上調査概要

#### 3.1.1 埋設年数

埋設年月  
1996年11月～1997年2月  
調査年月  
2018年5月～6月（埋設後22年目）

#### 3.1.2 埋設場所

調査は徳島市川内町加賀須野地内の2ヶ所において実施した。埋設場所の北側には今切川が流れており、地下水位の干満差が大きく、常に地下水が流れている非常に厳しい埋設環境である。今回の22年目調査は図5中に示す①、②の2ヶ所にて埋設管掘上調査を実施した。

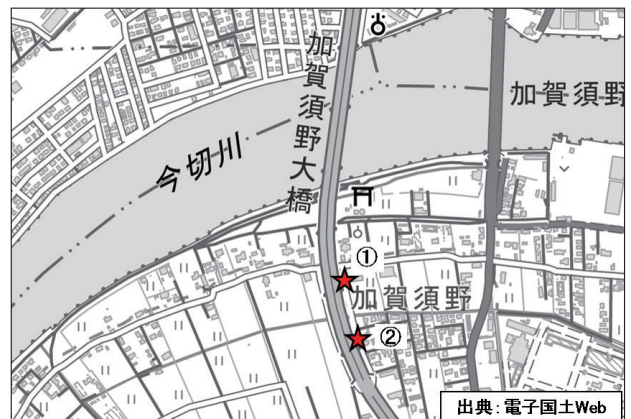


図5 埋設管掘上調査地点

#### 3.1.3 埋設管

埋設管仕様を表2に、接合内容を表3に示す。今回の実験では、接合部のみポリエチレンスリーブを施工している。

表2 ダクタイル鉄管仕様

形式	呼び径	防食仕様		
		内面	外面	
			プライマー	塗装
K 形ダクタイル鉄管	200	エポキシ樹脂粉体塗装	Zn-Al 擬合金溶射 (Al 含有率 27%) 塗布量: 260 g/m <sup>2</sup>	合成樹脂塗装 膜厚: 100 μm

表3 接合内容

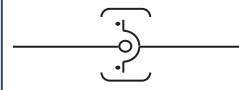
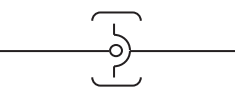
調査箇所	①	②
呼び径	200	200
配管図		
直管	Zn-Al 擬合金溶射 + 合成樹脂塗装 甲切管 L=2,630 mm 乙切管 L=2,450 mm	Zn-Al 擬合金溶射 + 合成樹脂塗装 甲切管 L=2,700 mm 乙切管 L=2,380 mm
押輪	-	エポキシ樹脂 粉体塗装
特殊押輪	合成樹脂塗装	-
ボルト・ナット	SUS304	SUS304

表5 土壌抽出水調査項目

調査項目	調査内容
比抵抗	上水試験方法により電気伝導度を測定して算出 比抵抗 = 1/電気伝導度
pH	JIS Z 8802 (pH 値測定方法) により測定 (ガラス電極式 pH 計法)
硫酸イオン	上水試験方法により測定 (イオンクロマトグラフ法)
塩化物イオン	上水試験方法により測定 (イオンクロマトグラフ法)
過マンガン酸カリウム消費量	上水試験方法により測定 (酸性法)
蒸発残留物	上水試験方法により測定 (蒸発残留物)
酸度測定	上水試験方法により測定 (総酸度)
アルカリ度測定	上水試験方法により測定 (総アルカリ度)

### 3.2 調査内容

#### 3.2.1 土壌調査

##### 1) 土壌調査項目

図5に示す2ヶ所において土壌腐食性評価を実施した。現地にて土壌棒およびオームメータ (交流抵抗計) により比抵抗を測定した後、土壌、湧水を採取し、土壌については、表4に示す項目の調査を実施した。また、土壌抽出水および湧水については表5に示す項目の調査を行った。土壌抽出水は採取した土壌を風乾した後、2.5倍の重量の純水により24時間以上抽出し、その上澄み液を試験水とした。

表4 土壌調査項目

調査項目	調査内容
比抵抗	未処理 試料土をアクリル製土壌箱 (15 × 20 × 30) に固く詰め、交流抵抗計にて測定
	水飽和 試料土に純水を添加して飽和させた状態で未処理と同様に測定
Redox 電位 (酸化還元電位)	Redox 電位計にて測定した値を補正して算出*
強制酸化試験	土壌に30%過酸化水素水を加えて強制的に酸化させ、pH値を測定
含水比	JIS A 1203 (土の含水比試験方法)
硫化物測定	ナトリウムアジドヨウ素溶液を用いて、窒素ガスの発生状況により硫化物を判定
硫黄含有率測定	乾燥した土壌を JIS G 1215 の赤外線吸収法により測定

※算出方法 E Redox=E+247+EpH  
 E Redox : Redox 電位 (mV)  
 E : 電位計メータ直読値 (mV)  
 247 : 水素電極 (標準) 補正値 (mV)  
 EpH : pH 値による補正値 (mV)  
 EpH= (pH 値 -7) × 60

##### 2) 土壌の腐食性評価

上記の土壌分析後、ANSI A21.5-2010 (アメリカ国家規格、以下 ANSI) に示される腐食性評価方法および DVGW GW9-1971 (ドイツガス水道技術者協会規格、以下 DVGW) により、土壌の腐食性評価を実施した。表6に ANSI による評価基準を、表7に DVGW による評価基準を示す。

ANSI では、比抵抗、pH、Redox 電位、水分および硫化物の有無を点数化し、その合計点数が10点以上になれば腐食性土壌と判断され、ポリエチレンスリーブ工法による防食対策を考慮することとされている。

DVGW では、その合計点数を表8に示す腐食性判定基準に基づいて土壌の腐食性を判定する。

表6 ANSI A21.5-2010による土壌の腐食性評価基準

測定項目	測定値	点数	測定項目	測定値	点数
比抵抗 (Ω・cm)	< 1,500	10	Redox 電位 (mV)	> 100	0
	1,500 ~ 1,800	8		50 ~ 100	3.5
	1,800 ~ 2,100	5		0 ~ 50	4
	2,100 ~ 2,500	2		< 0	5
	2,500 ~ 3,000	1	水分 (%)	排水悪い、常に湿潤	2
	> 3,000	0		排水良好 一般に湿っている	1
pH	0 ~ 2	5	硫化物	排水良好 一般に乾燥している	0
	2 ~ 4	3		検出	3.5
	4 ~ 6.5	0	痕跡	2	
	6.5 ~ 7.5	0*	なし	0	
	7.5 ~ 8.5	0			
> 8.5	3				

※ pH が中性域 (6.5 ~ 7.5) で硫化物が存在し、かつ Redox 電位が低い場合 (100 mV 以下) には3点を加算する

表7 DVGW GW9-1971による土壌の腐食性評価基準

測定項目	測定値	点数	測定項目	測定値	点数
土壌の種類	石灰質	2	含水比 (%)	20 % 以下	0
	泥灰状石灰岩	2		20 % 以上	-1
	砂状泥灰土	2	pH	6 以下	-2
	砂	2		6 以上	0
	砂質ローム (ローム含有 75 % 以下)	0	総酸度 (mg/kg)	125 以下	0
	泥灰ローム	0		125 ~ 250	-1
	砂質粘土 (シルト含有 75 % 以下)	0		250 以上	-2
	粘土	-2	Redox 電位 (mV)	400 以上	2
	泥灰粘土	-2		200 ~ 400	0
	腐植土	-2		0 ~ 200	-2
	泥灰	-4		0 以下	-4
	重質ローム	-4	アルカリ度 (mg/kg)	50,000 以上	2
	沼沢地土壌	-4		10,000 ~ 50,000	1
埋設位置での地下水	なし	0	硫化水素および硫化物	10,000 以下	0
	あり	-1		なし	0
	変動有り	-2		微量	-2
土壌の条件 (掘返しの有無)	掘返していない	0	石灰ガラコークスの存在	あり	-4
	掘返した土壌	-2		なし	0
土壌の条件 (構造物周辺との土質差)	構造物周辺と同質	0	塩化物 (mg/kg)	あり	-4
	構造物周辺と異質	-3		100 以下	0
比抵抗 (Ω・cm)	10,000 以上	0	硫酸塩含有量 (mg/kg)	100 以上	-1
	10,000 ~ 5,000	-1		200 以下	0
	5,000 ~ 2,300	-2		200 ~ 500	-1
	2,300 ~ 1,000	-3		500 ~ 1,000	-2
	1,000 以下	-4		1,000 以上	-3

表8 DVGW GW9-1971による土壌腐食性判定基準

点数の合計	土壌の腐食性
0 以上	腐食性なし
-1 ~ -4	やや腐食性あり
-5 ~ -10	腐食性あり
-11 以下	著しく腐食性あり

表10 土壌分析結果

調査箇所	サンプル No.	土の種類	土の色	比抵抗 (Ω・cm)			Redox 電位 (mV)	含水比 (%)	硫化物	pH (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	硫黄含有率 (%)
				現地	未処理	水飽和					
①	1-1	砂混じり粘土	黒色	780	821	778	61	49	検出	5.4	0.350
	1-2	粘土	オリーブ 黒色	1,400	1,250	1,220	63	33	なし	3.9	0.065
	1-3	砂混じりレキ	明黄褐色	3,200	10,500	4,030	418	9	なし	4.6	0.120
	1-4	粘土	オリーブ 黒色	1,300	960	940	98	31	なし	3.3	0.320
②	2-1	粘土	オリーブ 黒色	3,950	2,180	2,050	264	45	検出	3.7	0.210
	2-2	砂混じりレキ	オリーブ 褐色	8,700	3,150	3,060	400	21	なし	5.2	0.024
	2-3	石混じり粘土	オリーブ 黒色	2,700	2,730	2,660	161	22	検出	4.1	0.170
	2-4	砂混じり粘土	オリーブ 黒色	3,000	2,350	2,320	75	42	検出	4.0	0.200

### 3.2.2 管体腐食調査

#### 1) 外観調査

掘上調査管に関して、赤錆、白錆などの外観状況を確認した上でショットブラスト処理により外面塗膜を除去し、腐食の有無を確認した。

#### 2) 溶射皮膜断面観察

走査型電子顕微鏡 (SEM) による溶射皮膜断面観察および電子線マイクロアナライザ (EPMA) による定性分析を行い、溶射皮膜の防食効果の有無を確認した。

#### 3) 老朽度評価

腐食調査で得られた腐食深さのデータをもとに「水道施設更新指針 (日本水道協会)」に示される「鑄鉄管・ダクタイル鉄管の老朽度ランクおよび更新対策」に準じて評価を行った。老朽度ランクおよび更新対策を表9に示す。

表9 老朽度ランクおよび更新対策

老朽度ランク	定義	対策例
I	貫通腐食した状態 (規定管厚 - 管厚許容差)	更新対象
II	腐食が進行し、内外圧に耐えられない状態 (設計安全率 1.0 未満)	更新対象
III	腐食が進行し、内外圧に対する安全率が不足する状態 (設計安全率 1.0 以上、2.0 ~ 2.5 未満)	更新計画の立案など
IV	腐食深さが管の腐食しろ 2.0 mm を超える状態 (設計安全率は 2.0 ~ 2.5 以上)	10 年以内に再診断
V	腐食深さが管の腐食しろ 2.0 mm 以下の状態	20 年以内に再診断

### 3.3 調査結果

#### 3.3.1 土壌調査結果

土壌分析結果を表10に、土壌抽出水 (湧水) 分析結果を表11に示す。また、それらの結果に基づく ANSI および DVGW による腐食性評価結果を表12に示す。腐食性評価の結果、調査箇所①ではレキ以外は、非常に腐食性が強い土壌であった。また、表11中に赤字で示すように湧水の比抵抗も非常に低く、塩化物イオン含有量も多いことから、強腐食環境であるといえる。調査箇所②は、調査箇所①と比較すると腐食性の程度は低い環境であるが、一部で腐食性の強い土壌も見られる腐食性土壌であった。

表11 土壌抽出水（湧水）分析結果

調査箇所	サンプルNo.	比抵抗 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	pH	硫酸 イオン (mg/l)	塩化物 イオン (mg/l)	KMnO4 消費量 (mg/l)	蒸発 残留物 (mg/l)	総酸度 (mg/l)	アルカリ度 (mg/l)
①	1-1	1,110	5.7	260	77	7.6	578	54	1 未満
	1-2	5,100	6.4	10	49	26	202	5	7
	1-3	5,870	7.3	8.8	36	14	148	3	7
	1-4	2,080	6.9	33	100	11	294	3	16
	湧水	151	6.9	210	2,100	21	4,080	11	270
②	2-1	2,430	4.8	150	2.4	4.4	278	8	1 未満
	2-2	29,500	6.9	3.6	2.0	5.7	98	4	7
	2-3	5,340	6.0	71	3.2	2.0	126	4	1 未満
	2-4	3,730	6.4	100	3.0	8.2	192	4	4
	湧水	2,300	7.1	97	18	4.9	292	4	58

表12 土壌の腐食性評価結果

調査箇所	サンプルNo.	土の種類	ANSI A21.5-2010		DVGW GW9-1971	
			点数	腐食性評価	点数	腐食性評価
①	1-1	砂混じり粘土	19.0	腐食性が強い	-22	著しく腐食性あり
	1-2	粘土	15.5	腐食性が強い	-12	著しく腐食性あり
	1-3	砂混じりレキ	2.0	—	-2	やや腐食性あり
	1-4	粘土	15.5	腐食性が強い	-13	著しく腐食性あり
②	2-1	粘土	10.5	腐食性が強い	-16	著しく腐食性あり
	2-2	砂混じりレキ	2.0	—	-5	腐食性あり
	2-3	石混じり粘土	6.5	—	-16	著しく腐食性あり
	2-4	砂混じり粘土	11.0	腐食性が強い	-15	著しく腐食性あり

3.3.2 管体腐食調査結果

1) 外観調査結果

1.1) 調査箇所①

調査箇所①のダクタイル鉄管の外観写真を図6に示す。ショットブラスト後の拡大写真は、図中の赤丸で示した範囲の拡大写真である。外観は、全面に赤錆が発生しており、ショットブラスト後、深さ 0.7 ~ 1.1 mm の腐食が

多数確認され、腐食面積率は 60 ~ 70 % であった。また、最大腐食深さは 3.5 mm と激しい腐食が認められた。

1.2) 調査箇所②

調査箇所②のダクタイル鉄管の外観写真を図7に示す。外観は調査箇所①と比較すると腐食の程度は軽微であり、腐食面積率は 20 % で、最大腐食深さは 1.4 mm であった。

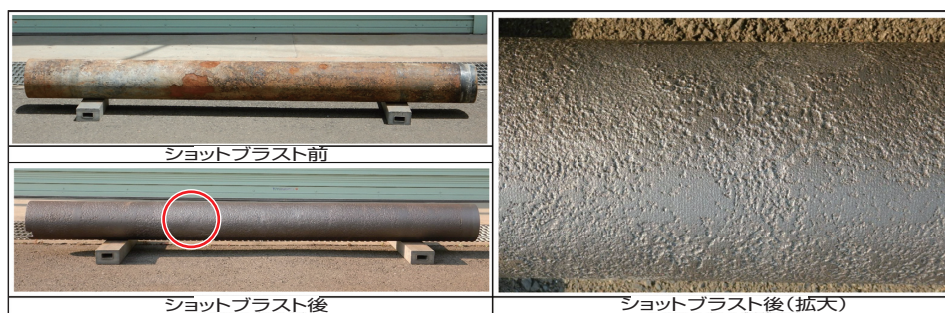


図6 調査箇所①乙切管外観写真

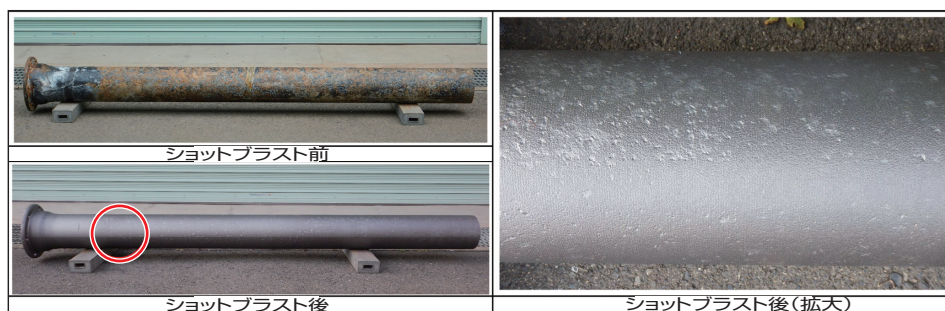


図7 調査箇所②甲切管外観写真

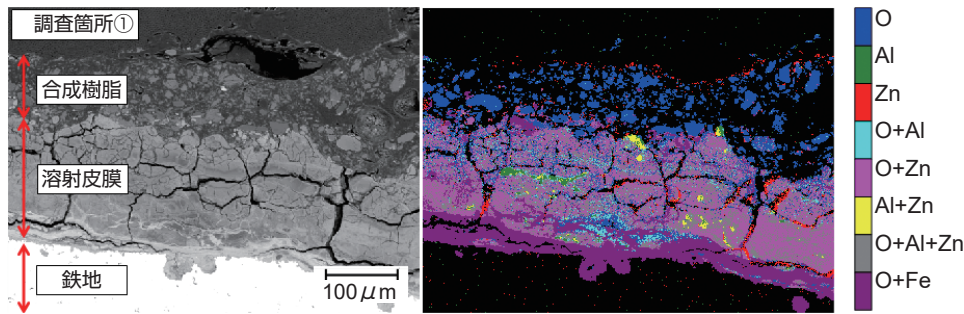


図8 調査箇所①溶射皮膜断面

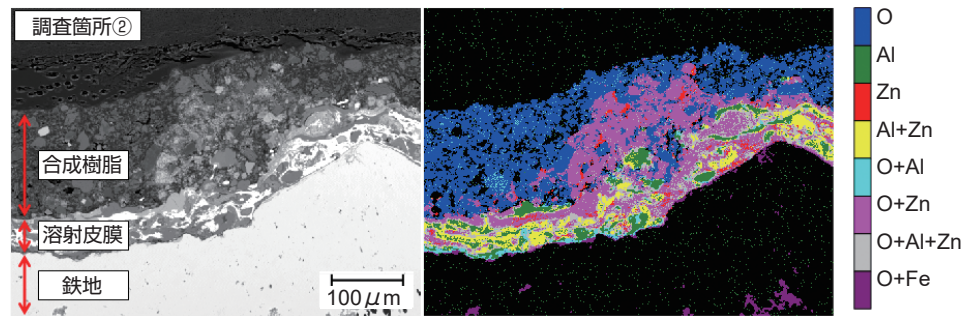


図9 調査箇所②溶射皮膜断面

2) 溶射皮膜断面観察結果

2.1) 調査箇所①

調査箇所①の溶射皮膜断面を図8に示す。Zn-Al 擬合金溶射皮膜のほとんどすべてがZnとAlの酸化物となっており、既にZn-Al 擬合金溶射の防食効果は期待できないと考えられる。

2.2) 調査箇所②

調査箇所②の溶射皮膜断面を図9に示す。Znの酸化物が一部合成樹脂塗膜中に侵入しているが、ZnとAlが層状に分布した溶射皮膜層と合成樹脂塗装の複合膜が連続的に覆っており、防食効果は完全には消失していないと考えられる。

3) 老朽度評価

調査管の最大腐食深さから、現状の老朽度ランクを求めた。徳島市埋設環境下における強度的必要管厚の算出を行った。強度的必要管厚算定式を以下に示す。また、管厚算定式より導き出した許容腐食深さの結果を表13に、許容腐食深さから求めた老朽度ランクに該当する腐食深さを表14に示す。また、表15に今回埋設管掘上調査を実施した調査箇所での老朽度ランクを示す。調査箇所①では、最大腐食深さ3.5 mmであり、老朽度ランクはIV、調査箇所②では、最大腐食深さ1.4 mmであり、老朽度ランクVとなった。

$$t_1 = \frac{Ps+Pd+\sqrt{(Ps+Pd)^2+16.8(Kf \cdot Wf+Kt \cdot Wt)S}}{4S} d \dots (1)$$

$$t_2 = \frac{1.25 Ps+Pd+\sqrt{(1.25 Ps+Pd)^2+8.4(Kf \cdot Wf+Kt \cdot Wt)S}}{4S} d \dots (2)$$

表13 許容腐食深さ

規定管厚 T (mm)	T-管厚許容差 <sup>1)</sup> (mm)	安全率 (1.0)		安全率 (2.0 ~ 2.5)	
		正味管厚 t <sub>1</sub> (mm)	許容腐食深さ <sup>2)</sup> y <sub>1</sub> (mm)	正味管厚 t <sub>2</sub> (mm)	許容腐食深さ <sup>3)</sup> y <sub>2</sub> (mm)
7.5	6.5	0.9	5.6	1.4	5.1

- 1) 管厚許容差は、規格管厚-1.0 mm
- 2) 許容腐食深さ：y<sub>1</sub> = (T-管厚許容差)-t<sub>1</sub>
- 3) 許容腐食深さ：y<sub>2</sub> = (T-管厚許容差)-t<sub>2</sub>

表14 各老朽度ランクに該当する腐食深さ

老朽度ランクに該当する腐食深さ (mm)				
I	II	III	IV	V
y > 6.5	6.5 ≥ y > 5.6	5.6 ≥ y > 5.1	5.1 ≥ y > 2.0	2.0 ≥ y

表15 調査地点における老朽度ランク

調査箇所	最大腐食深さ y (mm)	現状の老朽度ランク	対策例
①	3.5	IV 腐食深さが管の腐食しろ2.0 mmを超える状態	10年以内に再診断
②	1.4	V 腐食深さが管の腐食しろ2.0 mm以下の状態	20年以内に再診断

t<sub>1</sub>：静水圧、水衝撃、土圧および輪荷重に対し安全率：1.0の場合の必要管厚

t<sub>2</sub>：静水圧に対し安全率：2.5、水衝撃、土圧および輪荷重に対し安全率：2.0の場合の必要管厚

d (呼び径)：200 mm、Ps (静水圧)：0.50 MPa、Pd (水衝撃)：0.50 MPa、S (ダクタイル鉄管の引張強さ)：420 N/mm<sup>2</sup>、Kf (埋め戻し土圧の分布条件により決まる係数)：0.132 (管頂)、0.223 (管底)、Kt (路面荷重による土圧の分布条件により決まる係数)：0.076 (管頂)、0.011 (管底)、Wf (埋め戻し土圧)：22.1 kN/m<sup>2</sup>、Wt (路面荷重による土圧)：6.6 kN/m<sup>2</sup>

#### 4 Zn-Al擬合金溶射仕様の強腐食埋設環境下における寿命推定

ここでは、より腐食性の強い環境であった調査箇所①において、寿命推定を行った。徳島市では独自調査として、1993年にZn溶射を施していないダクタイル鉄管の掘上管調査より、埋設年数17年で腐食深さ4.6mmを確認している。ダクタイル鉄管の腐食予測式  $\eta = kt^{0.4}$  ( $\eta$ : 腐食深さ、k: 土壤腐食係数、t: 年数) より、調査箇所①における土壤腐食係数kを導き出すと  $k=1.48$  となる。よって、調査箇所①における腐食予測式は  $\eta = 1.48t^{0.4}$  となる(図10)。なお、土壤腐食係数は数字が大きいくほど腐食性が強く、1.0以上では国内でも数少ない強腐食性土壤に該当し、その割合は山地を除くと国土の5%以下である。前述の腐食予測式から、今回の22年目調査において確認された最大腐食深さ3.5mmに達する期間を算出すると約8年となる。そのため、外面防食の効果があった期間としては22年-8年=14年と考えられる。

また、今回は安全率を考慮し、腐食予測式より、鉄部腐食深さが水道施工更新指針で示される老朽度ランクⅢ(腐食深さ5.1mm)に到達するまでの期間を管体寿命とすると徳島市の設定環境下では22年となる。そのため、外面防食効果が働く期間14年、鉄部腐食深さが老朽度ランクⅢに到達する期間22年を併せた36年が調査箇所①の強腐食性土壤における推定寿命となる。

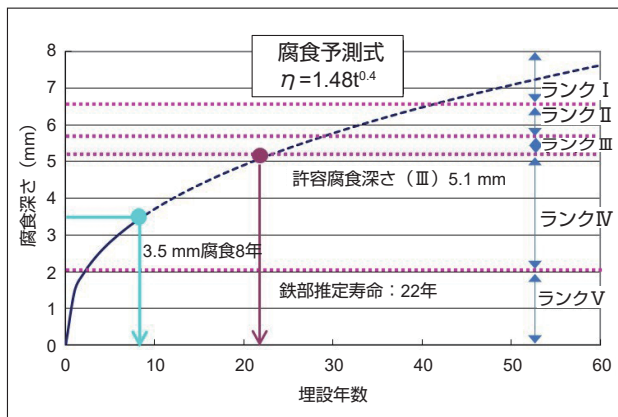


図10 調査箇所①の腐食予測式 (Zn溶射を施していないダクタイル鉄管)

#### 5 GX形管仕様における寿命推定

近年、水道用ダクタイル鉄管は、ライフサイクルコストの低減に対する需要が高まっており、耐震性、耐久性に優れたGX形管が規格化され、広く普及している。GX形ダクタイル鉄管の外面防食にはZn系合金溶射を施しており、高い耐食性が付与されている。ここでは、Zn-Al擬合金溶射仕様の埋設管掘上調査における寿命推定結果および、Zn-Al擬合金溶射仕様とGX形管仕様の腐食促進試験結果より、GX形管仕様の強腐食埋設環境下における寿命推定を試みた。

#### 5.1 腐食促進試験による比較評価

##### 5.1.1 腐食促進試験

ダクタイル鉄管の上に、表1で示す防食仕様を施した試験片を作製し、試験片の中央に、幅0.3mm×長さ50mmの鉄地に達する傷を試験片の対角線に沿ってX字状に付した。この試験片に対し、腐食促進試験として、複合サイクル試験(JWWA G120 附属書F: 耐食亜鉛系塗装の性能)を行い、Zn-Al擬合金溶射仕様とGX形管仕様の耐食性比較評価を実施した。

##### 5.1.2 腐食促進試験結果

###### 1) 電位の推移

腐食促進試験における電位の推移を図11に示す。GX形管仕様は試験期間である120日経過後でも溶射皮膜の犠牲防食作用が働くとされる電位を維持しているのに対し、Zn-Al擬合金溶射仕様においては、59日目を境に電位が貴側へ急激に上昇し始めた。

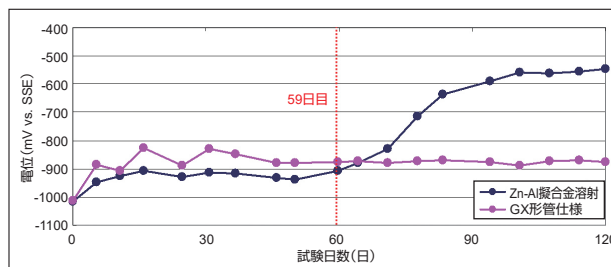


図11 電位の推移

###### 2) 試験片外観

試験片外観確認結果を図12、図13に示す。GX形管仕様においては、試験期間である120日経過後においても試験片から赤錆の発生は見られなかった。一方、Zn-Al擬合金溶射仕様においては、64日目の確認にて図13に赤枠で示す箇所において赤錆の発生が見られ、その後試験日数の経過と共に赤錆発生量は増加していった。図14に図13赤枠部の拡大写真を示す。赤丸で示す箇所において、赤錆が発生していることが確認できる。

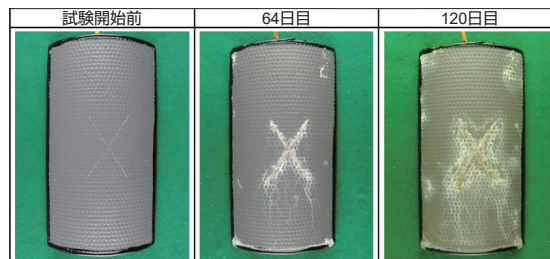


図12 試験片外観写真 (GX形管仕様)

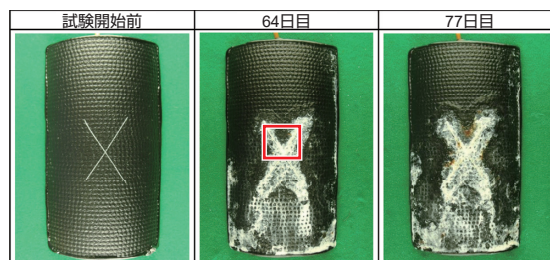


図13 試験片外観写真 (Zn-Al擬合金溶射仕様)



図14 Zn-Al擬合金溶射仕様64日目発錆部

### 5.2 埋設試験と腐食促進試験の関係

腐食促進試験では、Zn-Al 擬合金溶射仕様は 59 日目より電位が貴側へ急激に上昇を開始し、64 日目では試験片から赤錆の発生が見られた。このことから、約 60 日で Zn-Al 擬合金溶射皮膜の犠牲防食作用は失われたものと考えられる。一方、埋設試験においては、徳島市の強腐食埋設環境下 (k 値 =1.48) での 22 年目の埋設管掘上調査より最大腐食深さ 3.5 mm を確認した。外面に防食塗装を施していない場合、k 値 =1.48 の腐食予測式では、腐食深さ 3.5 mm に到達するのは 8 年となるため、Zn-Al 擬合金溶射の犠牲防食作用が働いた期間は 14 年と推定した。それらの結果より、腐食促進試験 60 日が徳島市の強腐食埋設環境 (k 値 =1.48) 14 年に相当するものと考ええる。

### 5.3 GX 形管仕様の強腐食埋設環境下における寿命推定

腐食促進試験と埋設試験の関係より、GX 形管の寿命推定を行った。各種防食仕様における寿命推定結果を表 16 に示す。GX 形管仕様においては、腐食促進試験において 120 日以上の耐食性能が確認されている。そのため、埋設環境下では 28 年以上の耐食性能が期待される。また、安全率を考慮し、腐食予測式  $\eta = 1.48t^{0.4}$  より腐食深さが水道施工更新指針で示される老朽度ランクⅢに到達するまでの期間を管体寿命とすると 22 年となるため、外面防食 28 年以上、管体寿命 22 年を合わせた 50 年以上となる。また、ポリエチレンスリーブを併用することにより更なる延命効果が期待できる。

表 16 各種防食仕様における寿命推定

腐食促進試験性能 (日)	Zn-Al 擬合金溶射 (埋設管) 仕様		腐食促進試験性能 (日)	GX 形管仕様	
	徳島市埋設環境 (強腐食性土壌)	鉄部寿命 (年)		徳島市埋設環境 (強腐食性土壌)	鉄部寿命 (年)
60	外面防食寿命 (年)	22	120 以上	外面防食寿命 (年)	22
	36	50 以上			

## 6 まとめ

GX 形管で採用している Zn-AlSiMn 擬合金溶射の前身である Zn-Al 擬合金溶射仕様における徳島市の強腐食埋設環境下 (k 値 =1.48) での 22 年目の埋設管掘上調査を行った。埋設管掘上調査結果より、安全率を考慮し、老朽度ランクⅢに達する期間を寿命として Zn-Al 擬合金溶射管の寿命推定を行った結果、国内でも数少ない (山地を除く国土の 5 % 以下) 強腐食環境下における寿命は 36 年と推定された。

また、前述の埋設管掘上調査結果および Zn-Al 擬合金溶射仕様と GX 形管仕様の腐食促進試験における比較評価結果より、GX 形管の強腐食埋設環境下における寿命推定を行った。結果、GX 形管仕様においては、国内でも数少ない (山地を除く国土の 5 % 以下) 強腐食環境下においても寿命は 50 年以上と推定された。最後に、本報告が腐食土壌地域におけるダクトイル鉄管布設工事の一助となれば幸いである。

### 参考文献：

- 1) 道浦、喜多川：ダクトイル鑄鉄管外面特殊塗装の耐食性検証、クリモト技報、No.49 (2003)、pp.16-25
- 2) 廣島、道浦、左海、井村：ダクトイル鑄鉄管外面特殊塗装の耐食性検証 (第二報)、クリモト技報、No.58 (2009)、pp.16-25
- 3) 堺、山田、八尾、遠藤、兼子：Zn-AlSi 擬合金溶射管の開発、クリモト技報、No.65 (2016)、pp.2-6

### 執筆者：

堤 親平

2006 年入社

ダクトイル管の生産技術・研究に従事



大津秀樹

1990 年入社

ダクトイル管の研究・開発に従事



大内 勲

徳島市上下水道局



近久博司

徳島市上下水道局

