亜鉛を中心とする各種金属被覆の耐食性

—— 軌道材料の防食法 ——

滝原 幹夫*・内藤 甲子郎*

Corrosion Resistance of Coating Composed of Zinc and Other Metals

——Corrosion Prevention of Track Materials——

Mikio TAKIHARA* and Koshiro NAITO*

Field tests, exposure tests, and laboratory tests of the coating composed of zinc and other metals were carried out for the purpose of preventing corrosion of track materials in tunnels and the following results were obtained.

- 1) Corrosive condition in tunnels under steam traction was in weak acid state, but zinc coating was effective for the prevention of cracks in the areas of rail joints.
- 2) By any procedures of application, the durability of zinc coating was almost proportional to the amount of the coated zinc in the above condition.
- 3) Corrosion resistance of zinc was sensitive to corrosive condition and the durability of zinc coating highly depended upon the types of tunnels or the positions in the tunnel.
- 4) Tests were also carried out on other metallic coatings than zinc, but none of them were more effective than zinc coating.

1. 緒 言

素地よりも電気化学的に卑な電位を示す金属で被覆する防食法は、被覆に多少のキズが入ってもさしつかえないので、機械的に苛酷な条件のもとで使用される鉄鋼製品の防食に適している。この目的に使用される金属の代表的なものは亜鉛であるが、アルミニウム、カドミウムなども用いられており、被覆方法にも溶融メッキ法、電気メッキ法、溶射法（メタリコン）などがある。

この防食法の問題点は、被覆金属自身の耐食性が腐食環境により大きく変化することで、腐食環境によってはこの防食法の適用できない場合もあり、また被覆金属の種類および加工方法の選択が適切でなければ、十分な防食効果はあげられない。腐食環境を知りだけで防食方式を選定できることが望ましいが、これができる範囲は、現在のところきわめて限られており、今後この範囲を拡大していかなければならない。このためには、被覆金属の性質を明らかにするとともに、各種腐食環境における実際の使用成績、および試験片暴露結果を積重ねていく必要がある。

当研究所においては、レール、タイプレートなど、軌道材料の防食対策を樹立する研究の一環として、亜鉛を中

心とした各種金属被覆による軌道材料の防食試験を実施している。軌道材料のおかれている環境は、鉄道特有のものであるが、条件が苛酷で、この種金属の耐食性を知るための加速試験とも見られるので、現在までに明らかにした試験結果を、関連室内実験結果と併せ報告する。

2. 腐食環境と試験方法の概要

軌道材料の腐食による劣化は、主としてズイ道内で起こるので、この環境に対する防食対策樹立を目的に研究を進めた。ズイ道内の腐食環境については、すでに紹介されているので¹⁾ その要点のみを述べる。同じズイ道内でも、蒸気列車運転区間と電気列車運転区間では、腐食環境はおおいに異なる。前者では、パイ煙の滞留のため、レールなどの表面は pH 3~4 の硫酸酸性を呈し、また多湿なため、鉄製品は全面的に腐食するが、特にレール端部に発生するキ裂は、レールの寿命を限定するので、その防止対策樹立が急務であった。後者では、電食の防止がもっとも重要であるが、塩分などにより激しい自然腐食を受ける場所もあるので、この環境においても、金属被覆による防食効果を検討しておく必要があった。

この研究は、なるべく速やかに結論を出す必要があったので、防食加工した実物による現場試験、試験片の現場暴露試験および関連室内実験を平行して進めた。また防食法としても、金属被覆のほか、塗装、樹脂ライニン

* 鉄道技術研究所（東京都国分寺市光町）

The Railway Technical Research Institute

グ、防錆油など防食効果のありそうな方法をすべて採上げ、同時に試験を開始した。そのため現場試験では、種々の防食処理を施こした多数の品物の劣化状態の判定を同時に行なったので、金属被覆にもっとも適

第1図 試験片の形状および寸法
(単位 mm)

する調査方法を採用することはできなかった。

現場試験は、各種防食処理したレールおよびタイプレートを、下記の場所に昭和34年度に敷設し試験を開始した。

蒸気ズイ道；北陸線親不知，子不知，および勝山ズイ道

電気ズイ道；東海道線丹那ズイ道

試験片暴露試験は、各種金属被覆の耐食性を知るための第1回試験を終了し、各ズイ道内の腐食環境調査を主目的とした第2回試験を現在実施中である。試験片の寸法は第1図に示すとおりで、試験片取付け位置は、第1回試験ではズイ道の側壁、第2回試験ではレールの腹部とした。第1回試験の暴露場所は、現場試験を実施した上記子不知および丹那ズイ道とし、現場試験と同時に開始し、第2回試験の暴露場所は全国の主要ズイ道で、試験の開始は昭和38年度である。

室内実験は、問題の多い蒸気ズイ道内の被覆金属の挙動を解明する一助として行なったもので、試験片の寸法は、暴露試験と同一とし、各種金属被覆の硫酸酸性硫酸ソーダ水溶液中の腐食減量および電位の経時変化、ならびに、試験片を上記水溶液の噴霧中においた場合の腐食減量を測定した。

第2図 レール端部

3. 現場試験結果

3-1 レール

蒸気ズイ道の試験結果を第1表に示す。表の得点は、第2図に示すレール端4ヶ所の調査結果を数字で示したものの、すなわち各箇所ごとにつぎの基準で得点を与え、これを各端部ごとに合計したものの防食処理別の平均値である。サビの発生なし；3，サビの発生5%未満；2，サビの発生5%以上50%未満；1，サビの発生50%以上0，したがって満点は12である。レール端部のキ裂の発生は、金属被覆レールには見られなかったが、塗装レールには20%，樹脂ライニングレールには50%，無処理レールには54%見られ、この種金属被覆のキ裂防止効果は顕著であった。

2.5年経過後の防食皮膜の状態は、第1表の得点が示すように、アルミニウムメタリコン皮膜がほとんど完全に劣化したほか、他の金属皮膜も膜厚の厚い熔融亜鉛メッキを除き、かなり劣化が進んでいた。メタリコン施工の上にさらに塗装したものは、メタリコンのみよりも若干成績がよかったが、予期したほどの差は認められなかった。この試験では、防食処理を車輪のあたる踏面を除き全面に施こしたが、パイ煙に直接さらされているレール腹部の防食皮膜の劣化は端部よりも速やかで、熔融亜鉛メッキも2.5年目には完全に劣化していた。レール底部の防食皮膜の劣化は、マクラ木のあたる部分を除き進行が遅く、良好な状態を示す部分が多かった。なお防食処理レールのマクラ木のあたる部分の摩耗量は、無処理

第1表 レール端部調査結果（蒸気ズイ道）

処 理 方 法	膜 厚		レール 端の数	得 点				キ 裂 発生数
	目 標	実 測		0.5年目	1年目	1.5年目	2.5年目	
溶 融 亜 鉛 メ ッ キ	550 g/m ²	100~150 μ	4	12.0	11.3	9.5	9.7	0
亜 鉛 メ タ リ コ ン	100 μ	50~100 μ	6	11.7	11.5	9.7	8.3	0
亜 鉛 メ タ リ コ ン + 塗 装	100 μ	50~100 μ	6	11.0	10.5	7.9	8.4	0
アルミニウムメタリコン	100 μ	50~100 μ	6	9.7	6.8	7.5	2.2	0
アルミニウムメタリコン+塗装	100 μ	50~100 μ	6	10.7	9.2	7.3	6.8	0

注1. メタリコン+塗装の膜厚はメタリコンのみの厚さを示す。

注2. 塗装はエポキシ塗料の2回塗りである。

レールよりも少なく、金属被覆は、この種摩耗を減少する効果を持つようである。

電気ズイ道内においても、蒸気ズイ道におけると同様な試験を実施したが、この場合はレール端部の腐食は少なく、蒸気ズイ道では、キ裂の発生を防止できなかった方法で防食したレールにも、キ裂の発生は見られなか

った。この試験で、直流電化区間ズイ道では、必要なレール底部の電食防止に対する金属被覆の効果は多少認められたが、金属被覆自身には耐電解腐食性がないので、この方法に大きな電食防止効果を期待するのは無理であるう。

3-2 タイプレート

蒸気ズイ道の主な試験結果を第2表に示す。タイプレートは、レールとマクラ木の間に 入れて使用するもので、その形状を第3図に示す。これは防食処理が簡単にできるので、金属被覆の範囲を拡げ、耐摩耗性の強いクロムメッキ、耐硫酸性の強い鉛メッキなどを加えた。表の得点は、タイプレートの表面を4箇所（表をレールのあたる面とその両側の3つに分け、これに裏面を加えた）に分け、各箇所別にレール端部と同じ基準で判定し、その得点を合計したもの処理別の平均値である。したがって、この場合も12点満点である。タイプレートの防食処理被覆の劣化が、レール端部より速やかな理由は、タイプレートの表面が直接外気に暴露しているか、あるいは摩耗を受けるためである。

各処理別の特徴を簡単に述べる。カドミウム電気メッキの劣化の進行が速やかなのは、膜厚が薄いためであり、クロム電気メッキは、皮膜の剥レにより劣化したものが多かった。鉛の厚メッキは、防食得点から見ると成績がもっとも良いが、鉄素地の露出部分は激しい侵食を受けており、この防食方法は、タイプレートに必ずしも適しているとはいえない。溶融亜鉛メッキタイプレート

第3図 タイプレート（C型）

第2表 タイプレートの調査結果（蒸気ズイ道）

処 理 方 法	膜 厚		得 点			
	目 標	実 測	0.5年目	1 年目	1.5年目	2 年目
溶 融 亜 鉛 メ ッ キ	350g/m ²	60～100μ	8.4	4.0	2.8	1.3
亜 鉛 メ タ リ コ ン	100μ	50～100μ	9.6	6.0	2.8	1.7
溶融アルミニウムメッキ	300g/m ²	40～ 80μ	10.0	4.0	3.5	1.9
アルミニウムメタリコン	100μ	50～ 80μ	8.0	4.0	0.0	—
カドミウム電気メッキ	20μ	10～ 20μ	0.0	0.0	—	—
クロム電気メッキ	100μ	50～100μ	6.0	3.7	2.5	1.5
鉛 メ ッ キ	150μ	130～400μ	9.7	7.2	5.3	3.6
鉛、スズ合金メッキ	20μ	10～ 20μ	3.0	1.5	—	—

については、使用による重量減を測定したので、その結果を第3表に示す。試験終了後には、防食皮膜はほぼ完全に劣化していたが、重量減は無処理に比較して大幅に少なく、溶融亜鉛メッキの防食効果の大きいことを示している。

電気ズイ道内のタイプレートの劣化は、レール底部と同様に電食によるものが多く、その程度は被覆金属の種類以外の要因に支配されることが大きいので、その違いによる防食効果の差はあまり認められなかった。しかし、タイプレートは継目板に覆われているレール端部とちがい、列車から落ちる塩分と多湿により、かなりの自然腐食を受ける場合があり、溶融亜鉛メッキで防食したものでも、1～2年で発錆することがあるので、タイプレート付属のバネなどには、この種防食法を適用する必要がある。

4. 暴露試験結果

4-1 第1回試験

試験片の種類と膜厚を第4表に、蒸気区間ズイ道の結果を第4図に、電気ズイ道の結果を第5図に示す。試験片は、各経過月数毎に取出すものをあらかじめ決めておき、これを研究所に持帰り、表面の汚れおよびサビをできるだけ除いた後、目視調査および重量測定を行なった。なお、図の値は試験片3個の平均値である。

この試験結果をみると、蒸気ズイ道と電気ズイ道の差はきわめて大きく、前者では、試験終了時まで防食被覆が完全であったものは、鉛の厚メッキのみであったが、後者では、サビの発生がみられないものが多かった。蒸

第3表 溶融亜鉛メッキタイプレートの重量減

処 理 方 法	試験前の 平均重量	試験後の 平均重量	重量減
溶融亜鉛メッキ	5.11 kg	4.71 kg	0.40 kg
無 処 理	5.09 kg	3.76 kg	1.43 kg

気区間で成績のよかったのは鉛の厚メッキ、亜鉛メタリコン+塗装およびアルミニウムメタリコンで、メタリコンの上に塗装する効果が明らかに表われたこと、およびアルミニウムメタリコンの腐食減量の少ないことが注目された。

4-2 第2回試験

この試験は、各ズイ道内の腐食環境を明らかにするのが主目的なので、金属被覆関係の試験片は、第4表のうち亜鉛メタリコンおよび亜鉛メタリコン+塗装とした。なお、この試験に用いた試験片の亜鉛メタリコン皮膜の厚さは、120~170 μ である。試験は現在実施中であるが、暴露1年目に取出した試験片の調査結果の一部を、第5表に示す。表の目視劣化%は、亜鉛メタリコンでは鉄素地の露出面積を、亜鉛メタリコン+塗装では塗膜のフクレと剥レの面積の合計を示す。1回に取出す試験片の個数は、各箇所ともレールの内軌側

1個、外軌側1個の合計2個で、表の数字はその平均値である。

表から、蒸気長大ズイ道および丹那ズイ道（電気ズイ道）の湿潤区間の腐食量の多いこと、およびズイ道のちがいににより亜鉛メタリコンの腐食減量の差の大きいことが注目される。

5. 室内実験結果

5-1 浸セキ試験

試験片を、1N 硫酸ソーダ溶液に少量の硫酸を加え、弱酸性とした溶液に浸セキした場合の重量減を第6表に、電位の経時変化を第6図に示す。試験片を浸セキしておくと、溶液のpHはしだいに上昇するので、自動的に希硫酸を補給してpHを一定に保った。溶液の温度は25℃とし、ガラス棒でゆっくりとカクハンした。試験片は、暴露試験と同じものを用いたが、亜鉛の性質を明らかにするため、高純度亜鉛(99.99%)およびこれに0.1%のカドミウムを加えたものの2種類を追加した。亜鉛の腐食減量は、pHが低くなる

第4表 試験片の種類と膜厚

記号	処 理 方 法	膜 厚	
		目 標	実 測
Z1	溶 融 亜 鉛 メ ッ キ	400 g/m ²	70 μ
Z2	亜 鉛 メ タ リ コ ン	100 μ	200 μ
Z2P	亜鉛メタリコン + 塗装	100 μ	250 μ
A1	溶融アルミニウムメッキ	300 g/m ²	20 μ
A2	アルミニウムメタリコン	100 μ	500 μ
C	カドミウムメッキ	20 μ	15 μ
CR	クロムメッキ	100 μ	15 μ
L	鉛メッキ	150 μ	250 μ
LS	鉛・スズ合金メッキ	20 μ	25 μ
O	無 処 理	—	—

(注) Z2Pの膜厚はメタリコンのみの厚さである。

第4図 蒸気ズイ道内暴露試験結果(予不知)

第5図 電気ボイ道内暴露試験結果

と急速に増加し、また電位もほぼ各金属特有の電位を示し、だいたい予期どおりの結果が得られた。しかし、アルミニウムメタリコンの電位が、ある時期から急に卑になることが注目された。なお、カドミウムメッキの重量減が少ないのは、膜厚が薄く pH が低い場合には、早期に皮膜が消滅するためである。

5-2 間歇噴霧試験

硫酸酸性 1N 硫酸ソーダ水溶液 (pH 3.0) による間歇噴霧試験を行ない、第7表に示す結果を得た。試験装置は、塩水噴霧試験装置とほぼ同じであるが、噴霧と乾燥を自動的に繰返せるようにしたもので、1日16サイクル (30 min 噴霧, 1 h 乾燥) および48サイクル (10 min 噴霧, 20 min 乾燥) の2方式で試験した。いずれの試験も、温度は $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、試験期間は5日間で、表の値は4個の平均値である。この場合は pH 3.0 の水溶液を用いたにもかかわらず、試験片の種類による重量減の差が少ないこと、および乾湿のサイクルの違いによって差の

あることが注目される。

6. 考 察

電気ボイ道内の自然腐食は、塩分と多湿が主な原因であるゆえ、亜鉛などの金属被覆の効果は明らかで、検討の余地は少ない。これに反し、蒸気ボイ道内はきわめて多湿な弱酸性環境であるゆえ、耐酸性のない亜鉛、アルミニウムなどによる防食効果は疑問であった。しかし本試験で、この防食法は、蒸気ボイ道内のレール端部のキ裂発生防止にきわめて有効であり、またタイプレートの防食法として効果のあることが明らかになった。この理由を、この種防食にもっとも多く用いられ、また代表的な性質を備えている亜鉛を例にあげて考察する。蒸気ボイ道内は、pH 3 程度の硫酸酸性である。そこで、pH 3 の水溶液に浸セキした場合の亜鉛の腐食減量を見ると第6表のとおりで、従来からいわれている²⁾ように鉄よりも大きい。つぎに第4図から、子不知ボイ道内の暴露試験片による亜鉛の腐食減量は 20 mdd 程度で鉄の約半分であり、第7表の間歇噴霧試験結果ともほぼ一致している。し

たがって子不知ボイ道内の亜鉛の腐食は、pH 3 の水溶液中ほど激しくないが、pH 3 の水溶液の噴霧を 5-2 の条件で間歇的に浴びせた状態に似ており、この環境下では、外気に直接暴露した表面の鉄の防食法として亜鉛被覆は適当でない。しかし、レール端部の亜鉛皮膜の劣化は第1表に示すとおりで、暴露試験片あるいは同じレールの直接外気に暴露している部分よりもはるかに少ない。この理由は、レール端部が継目板に覆われているため、腐食性物質の亜鉛被覆にふれる量が少ないためである。またタイプレートの場合も、第3表に示すごとく、亜鉛被覆効果の大きいのは、直接外気にさらされている部分が少ないためと考えられる。以上の結果から、同じボイ道内にあっても、その品物の存在する条件によって亜鉛被覆の腐食量は大きく変わり、室内実験あるいは暴露試験片の成績からは、疑問視された亜鉛被覆の有効なことが明らかになった。

レール端部の防食効果を、防食皮膜の劣化程度のみか

ら判定した場合には、塗装、樹脂ライニングなどにもかなりよい成績を示すものもあったが、キ裂発生防止効果は少なかった。この理由は、塗装などの防食方法によった場合には、ボルト穴周辺の塗膜が剥れ、その部分の鉄が侵食されやすいので、他の部分の皮膜が完全であっても、一番重要なボルト穴付近が腐食疲労を起こし、キ裂が

第6図 電位の経時変化

第5表 各ズイ道内暴露試験結果

(取付け位置：レール腹部，試験期間：1年)

区間線区	ズイ道		Z2		Z2P	
	名称	長さ	目視劣化	腐食減量 (mdd)	目視劣化	
蒸気区間	裏子不知	1503m	70%	41.17	20%	
	縦第2塚山	1115	8	24.75	3	
	貫第7米山	329	4	10.62	1	
	中央冠着	2656	70	24.20	2	
	線鳥居	1673	1	15.64	2	
	中山	316	4	11.42	1	
電氣区間	室礼文華山	2776	3	10.13	4	
	蘭弁辺	1503	1	6.01	5	
	線第2茶志内	382	0	4.51	2	
	ズイ道外	—	0	1.99	1	
電氣区間	中央小仏	2574	0	3.50	1	
	線第1小淵	374	0	0.59	0	
	東海丹那(乾)	7804	4	14.51	3	
	線丹那(湿)	7804	1	3.04	2	
	米神山	260	0	1.21	1	
	ズイ道外	—	0	0.94	1	

(注) mdd は試験片の片面のみ腐食にしたものと計算した。裏面は塗装したが、腐食環境の激しい場所では裏面も多少腐食があり、この場合の値は実際の腐食量より若干大きく出ている。

第6表 浸セキによる重量減

試験片の種類	重量減 (mdd)		
	pH 2.7	pH 3.6	pH 4.9
Z 1	1620※	121	30
Z 2	2660	424	⊕
Z a	1945	144	33
Z b	136	83	30
A 1	73	28	4.5
A 2	238	36	⊕
C	101※	44※	44※
CR	24	9	1.2
L	1.2	36	36
LS	114	77	14
O	137※	161※	37※

(注) ※印は鉄サビの発生を示す。

⊕印は増量を示す。

第7表 間歇噴霧試験の重量減 (単位 mdd)

試験片の種類	48サイクル/day	16サイクル/day
亜鉛メタリコン	28.5	60.9
亜鉛板	30.3	66.8
軟銅板	53.7	64.2

発生するのである。亜鉛の場合には、皮膜が電気化学的な防食効果を持つので、皮膜の一部にキズが入っても、亜鉛が全部消滅してから腐食疲労がはじまるため、亜鉛の存在する期間だけキ裂の発生を遅らせることができる。したがってこの場合には、亜鉛の腐食減量が比較的鉄のそれに接近していても、亜鉛被覆による防食が経済的に成立つのである。

第2回暴露試験結果から、各ズイ道内の腐食環境を検討してみる。蒸気ズイ道における亜鉛の腐食減量は、線区別にはほぼズイ道の長さに比例している。ズイ道が長くなるとパイ煙の滞留時間が長くなるので、腐食が多くなるのは当然であるが、線区が異なると、同じ長さのズイ道内でも腐食減量が違うのは、線路の単位長あたり、列車から出される腐食性物質の量が線区によって異なるためである。

電気区間ズイ道の結果をみると、ズイ道による差がきわめて大きく、また第5表の丹那ズイ道の結果と第4図の結果を比較すると、差がきわめて大きく、電気ズイ道内では、レール腹部と側壁では、腐食環境に非常に大きな差のあることが明らかになった。

亜鉛皮膜の加工方法の相違による耐食性の差は、pH一定の水溶液中に浸セキした場合には、第6表に示すようにかなりの差があるが、ズイ道内暴露試験および実使用試験ではあまり差がなく、その防食期間は亜鉛金属の付着量に比例するようである。これは、英国工業地帯における試験結果⁹⁾でも明らかにされていることで、この種環境では、亜鉛被覆の防食期間を長くするには、亜鉛付着量の多いことが重要である。

亜鉛以外の金属被覆についても一部の試験を行なったので、その結果から、蒸気ズイ道内の軌道材料の防食に使用される可能性を検討する。アルミニウム被覆の皮膜自身の耐食性は、亜鉛よりも多少優れているが、硫酸酸性の環境では、かならずしも鉄素地を電気化学的に防食するとは限らず、加工も亜鉛に比較して多少困難なので、現在のところ、軌道材料の防食方法として亜鉛被覆よりも適しているとはいえない。カドミウム被覆は、この種環境においては、その皮膜の耐食性が亜鉛よりも特に優れているとは考えられず、防食効果を発揮させるには、亜鉛に近い膜厚を必要とするので、その高価な点を考えると、軌道材料の防食に使用される可能性は少ない。

最後に、メタリコンの上に塗装することの効果についてふれる。この効果は、試験片の暴露試験の場合には明瞭に現われたが、実使用試験ではそれほど明らかでなかった。この理由は、実使用では機械的に苛酷な条件で使用されるので、塗膜にキズの入りやすいことも上げられるが、この種の用途に対する塗装方法が確立されていないためとも考えられ、メタリコン上の塗装方法には改良の余地があろう。

7. ま と め

試験結果をまとめると次のとおりである。

1) 弱酸性を呈する蒸気ズイ道においても、レール端部のキ裂発生防止を目的とした場合には、亜鉛被覆の防食効果は顕著である。また亜鉛被覆はタイプレートの防食方法としても有効である。

2) 加工方法の相違による亜鉛被覆の腐食減量の違いは、この種環境においてもあまりなく、亜鉛被覆の寿命は、ほぼ亜鉛の付着量に比例する。

3) 亜鉛被覆の腐食減量に対するズイ道腐食環境の相違の影響はきわめて大きく、同じズイ道内でも場所による差がはなはだしい。したがって、暴露試験結果より実際の腐食量を推定する場合には、この点を十分注意する必要がある。

4) 亜鉛被覆のほか、アルミニウム被覆、カドミウム被覆などの試験も同時に行なったが、防食効果のほか加工の難易、加工経費などを併せ考えると、亜鉛被覆より優れたものはこの試験では見あたらなかった。またメタリコン上に塗装したものの試験を行ない、暴露試験片では、塗装した効果が顕著に現われたが、実使用試験では期待したほどの効果は見られなかった。

報告を終るにあたり御指導、御協力いただいた国鉄本社および現場機関の方々、ならびに当研究所軌道材料防食研究班の方々に深く感謝の意を表する。

(1965.8.17 受理)

文 献

- (1) 小瀬, 露木, 防蝕技術, 10, 49 (1961)
- (2) 日本学術振興会編, 金属防食技術便覧, 98 (日刊工業新聞社, 昭和32年)
- (3) J. C. Hudson, J. F. Stanner, J. Iron & Steel Inst., 176, 381 (1953)