

# 吊橋ケーブル送気乾燥システムの 防食性能に関する研究

北川信<sup>1</sup>・古家和彦<sup>2</sup>・中村俊一<sup>3</sup>・鈴村恵太<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 本州四国連絡橋公団 長大橋技術センター長 (〒651-0088 神戸市中央区小野柄通 4-1-22)

<sup>2</sup>正会員 広島県道路公社 事業部 技術専門監 (〒730-0015 広島市中区橋本町 7-14)

<sup>3</sup>正会員 Ph.D. 東海大学教授 工学部土木工学科 (〒259-1292 平塚市北金目 1117)

<sup>4</sup>正会員 新日本製鐵(株) 相模原技術開発部 マネージャー (〒229-1131 相模原市西橋本 5-9-1)

明石海峡大橋ケーブルの防食方法として、ケーブル内部に乾燥空気を送り込み、内部水を強制的に排除させる送気乾燥システムを世界で初めて適用した。本システムの導入に際し、乾燥空気を送気した小型ケーブル試験体の腐食試験結果を、送気しなかった試験体と比較することにより、送気乾燥システムの防食効果を確認した。さらに、ケーブル試験体から除湿された水分を計測することにより、内部水が除湿されるプロセスを定量的に把握し、除湿メカニズムを明確にした。また、湿度および付着塩分が亜鉛メッキ鋼線の腐食におよぼす影響を室内実験により調査し、送気システムによる亜鉛メッキ鋼線の耐久寿命を推定した。その結果、ケーブル内に相対湿度 60%以内に保てば、きわめて長期の耐久性が得られることを見い出した。

**Key Words:** suspension bridges, cable corrosion, dehumidification by dry air injection, relative humidity

## 1. はじめに

因島大橋および大鳴門橋ケーブルの腐食状況の調査により、ケーブル内部には滞留水が存在し、ケーブル表面に局部的な鉄鏽が発生していることが発見された<sup>1), 2)</sup>。とくに、ケーブル側面部の腐食が大きく、防錆ペーストの劣化も認められた。ケーブルを構成する高張力鋼線には亜鉛メッキを施し、さらにケーブル表面を防食被覆し外界の腐食環境から遮断していたにもかかわらず、建設後 10 年以内の吊橋ケーブルに腐食が発生したことは予想外であった。

筆者らは、ケーブル内の温度湿度測定、ケーブル内環境を想定した腐食シミュレート試験、各種防食仕様を施した模擬ケーブルの暴露試験を実施した。その結果、ケーブル内部の滞留水がケーブル内部全体を高湿度化し、温度変化の大きいケーブル表層部では結露による濡れを生じ亜鉛メッキ鋼線の腐食環境を形成すること、内部に滞留水がある場合にはケーブル外面を十分に防食被覆しても、ケーブル内部に対しては十分な防錆効果を期待できないことを明らかにした<sup>1), 2), 3), 4)</sup>。

ケーブル内部は密封された系に近いため、いったんケーブル内に侵入した水は、自然状態では排水されにくい。そこで、ケーブル内部に乾燥空気を送り込み、内部水を強制的に排出する送気乾燥システムが有効であると考え、明石海峡大橋ケーブルに適用した<sup>1), 2), 5), 6), 7)</sup>。

アンカレイジ内部や鋼製箱桁内を除湿乾燥する事例は国内外に見られるが<sup>8), 9), 10), 11)</sup>、ケーブル内部を除湿する試みは世界的に例がなかった。したがって、ケーブル送気乾燥システムの導入に際し、わずかな隙間しかしないケーブル内部に送気可能であるか、内部の滞留水を除湿可能であるか、送気による防食効果は認められるか、長期にわたりケーブルを確実に防食するには管理送気湿度をどう設定するかなど多くの課題があった。

本研究では、送気乾燥システムの防食性能に関する 3 種類の実験を実施し、これらの課題の解決を図った。第一は、従来仕様の試験体と乾燥空気を送気した試験体の腐食促進試験を実施し、両者の腐食結果を比較することにより送気システムの防食効果を確認する。第二は、注水したケーブル試験体からの

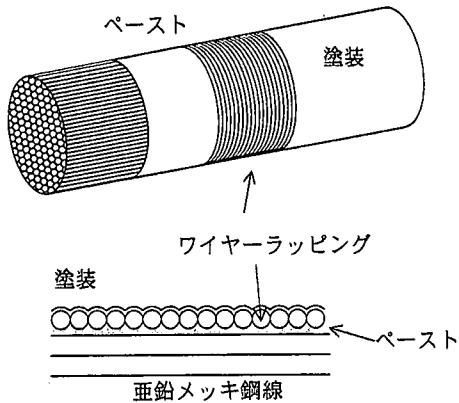


図-1 一般的な吊橋ケーブルの防食構造

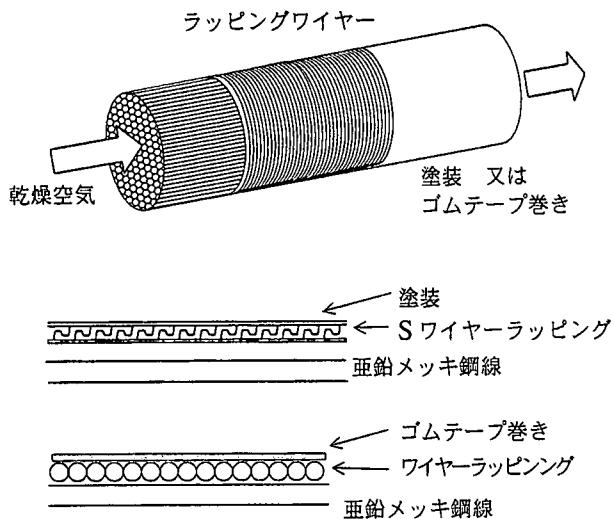


図-2 ケーブル送気乾燥システム

除湿量を計測することにより、内部水を除湿するプロセスを定量的に把握し、除湿メカニズムを明確にする。第三は、相対湿度を変化させた亜鉛メッキ鋼線の腐食促進試験を実施し、腐食速度と相対湿度との関係を把握する。さらに、実橋と促進試験の腐食倍率を求め、送気システムを適用した場合の亜鉛メッキ鋼線の寿命予測を試みる。

## 2. 送気乾燥システム

一般的な吊橋ケーブルの防食構造を図-1に示す<sup>12)</sup>。ケーブルは直径 5mm の高張力鋼線で構成されており、鋼線表面には  $350\text{g}/\text{m}^2$  の亜鉛メッキが施されている。この亜鉛メッキ鋼線を束ねたケーブルの表面

に防錆ペーストを塗布した後、ワイヤーラッピングを行い、次いで防食塗装を行う方法が一般的である。ラッピングワイヤと防食被覆により、ケーブル内部を外界の腐食環境から遮断し、腐食原因となる水や塩分などの浸入を防止するという設計思想である。

しかし、実際にはケーブル内部への水の侵入を完全に防止することは不可能であり、ケーブル施工時の雨水が残留したり、完成後も被覆欠陥部などから雨水が侵入する可能性がある。従来の吊橋では、内部水を自然排出するためにケーブルバンド部に水抜き孔を設けているが、その効果は十分ではなく、因島大橋や大鳴門橋ではケーブル内部に滞留水が確認された。この滞留水はケーブル内を高湿度化とともに、温度変化の大きいケーブル表面では結露を生じさせ、亜鉛メッキ鋼線に対し湿った厳しい腐食環境を形成する。そのため、因島大橋や大鳴門橋では、建設後 10 年未満でケーブル表層に鉄錆の発生が認められた。

このような早期の腐食は、ケーブル内の滞留水が原因であり、ケーブル内部水の対策は防食上きわめて重要な課題であった。内部水による腐食を防止するための手段として、図-2 に示すように、ケーブル内部に乾燥空気を送り、ケーブルを防食する方法が有効であると考えられた。送気によりケーブル内部の水分を排除するとともに、ケーブル内部を低い湿度に保ち、腐食環境から回避させ、ケーブルを確実に防食する原理である。

その際、ケーブル内部を気密化することが重要であり、2種類の方法が実橋で採用されている。第一は、亜鉛メッキ鋼線の上に表面が平坦となる S ワイヤーを巻き付け、その上を塗装する方法であり、来島大橋で用いられた。第二は、亜鉛メッキ鋼線の上に通常の丸ワイヤーを巻き付けた後、ゴムテープを巻き付ける方法であり、明石海峡大橋で用いられた。いずれも、ペーストを塗布していない。これは、別途試験により、送気システムを用いる場合には、ペーストの有無による防食効果には差が無く、しかもペースト無しの方が乾燥空気は流れやすいことが確認されているためである。

## 3. 送気乾燥システムの防食効果に関する実験

注水した小型ケーブル試験体を、湿度変化が繰り返されるケーブル内部を想定した環境に設置し、ケーブル試験体内に送気を行うことにより、送気乾燥システムの防食効果を検討した。

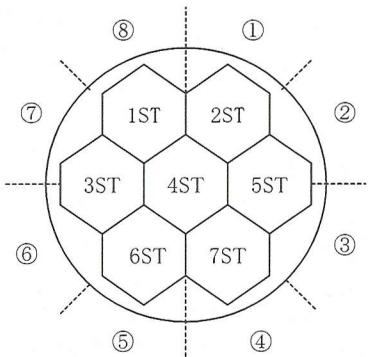


図-3 試験体の断面

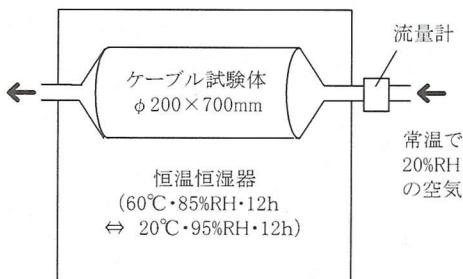


図-4 送気による防食効果の確認試験

### (1) 試験要領

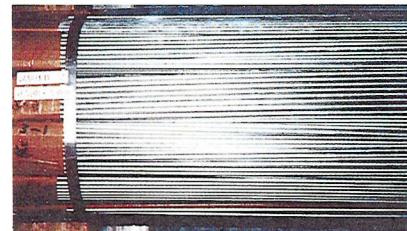
直径5mmの127本の亜鉛メッキ鋼線を束ね1ストランドとし、さらに7ストランドを束ねて直径200mm、長さ700mmの小型ケーブルを製作した(図-3)。この小型ケーブルをワイヤラッピングし、エポキシ樹脂系下塗および中塗、フッ素樹脂系上塗の計 $200\mu\text{m}$ の塗装を施した。ケーブルの端部は、エポキシ樹脂系のバテやコーティング材を用いて完全にシールした。この試験体内に蒸留水250mlを加え、恒温恒湿機内に設置し、乾湿の繰り返しを行った。乾湿繰り返し条件は、60°C・85%RH(相対湿度)を12時間、20°C・95%RHを12時間、散水を1時間の3条件を1サイクルとし3ヶ月間継続した。なお、このサイクルは昼と夜と降雨を想定したものである。

試験体は2体とした。1体は、試験体端部から常温で約20%RHの空気を流量250ml/min、流速15cm/minで送気した(図-4)。他の1体は比較材とし、送気しなかった。3ヶ月後に試験体を解体し、ケーブル内部の水濡れ状況を観察するとともに、ケーブルの腐食状況の評価を行った。

評価方法は表-1に示すように、亜鉛メッキの腐食生成物の発生状況を、日本塗料検査協会塗膜評価基

表-1 ケーブルの腐食状況の評価基準

亜鉛の腐食生成物発生面積率	評点
0.0 %	5
0.0 - 0.1 %	4
0.1 - 1.0 %	3
1.0 - 33.0 %	2
33.0 % -	1



(a) 送気あり



(b) 送気なし

図-5 試験体の腐食外観

準の白化判定基準の5段階に分けて実施した<sup>13)</sup>。

### (2) 試験結果と考察

試験直後の観察により、送気されたケーブル試験体内部は乾燥していたが、送気されなかつたものは水濡れが認められた。図-5にケーブル内の腐食外観を示すが、送気されなかつた試験体はケーブル全面が亜鉛の腐食生成物で覆わっていたが、送気された試験体は試験体の下面にわずかに亜鉛の腐食生成物が認められる程度であった。下面で腐食が認められたのは、注入した水が完全に乾燥するまでにある程度時間を要し、その間に腐食が進行したためと考えられる。

ケーブル表層部に関する腐食状況の評価結果を表-2に、ケーブル内部に関する評価結果を表-3に示した。いずれも、送気した試験体の腐食は送気しなかつた試験体の腐食に比べて非常に小さいことがわかる。以上の結果より、送気システムはケーブルの表面および内部に対し優れた防食効果を示すことが明らかとなった。

表-2 ケーブル表層の腐食状況

	観察位置							
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
送気あり	5	5	3	2	2	4	5	5
送気なし	1	1	1	1	1	1	1	1

表-3 ケーブル内部ストランドの腐食状況

	観察位置						
	1ST	2ST	3ST	4ST	5ST	6ST	7ST
送気あり	5	5	5	5	5	2	2
送気なし	1	1	1	1	1	1	1

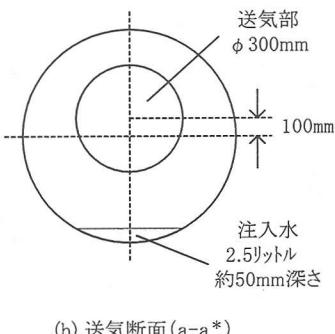
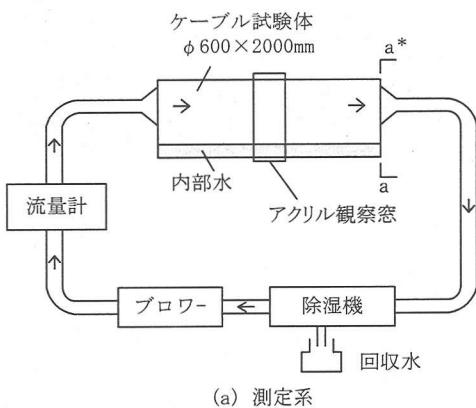
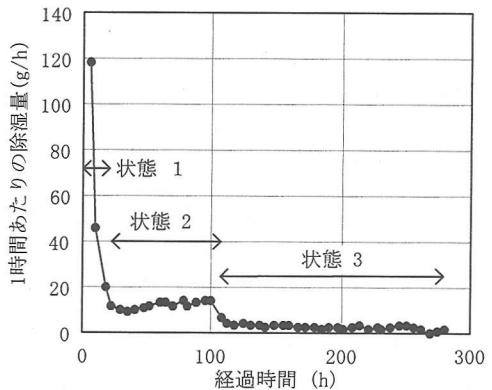


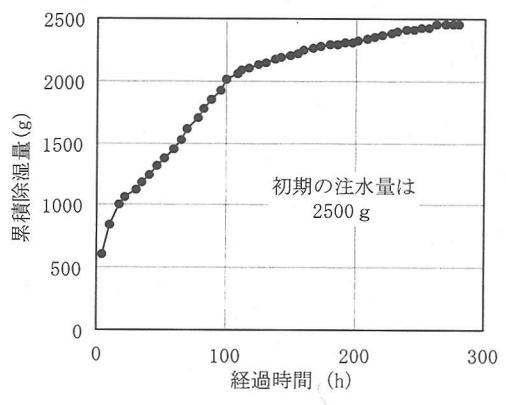
図-6 送気乾燥システムの除湿効果の確認試験

#### 4. 送気乾燥システムの除湿効果に関する実験

ケーブルは多数の亜鉛メッキ鋼線を束ねた複雑な構造であり、内部水の分布状況も明らかでない。このような構造系に乾燥空気を送気した場合、どのように内部水を除湿するのか明確にする必要がある。本章では、送気システムを用いた注水したケーブル試験体からの除湿量を測定することにより、内部水を除湿するプロセスを定量的に把握する。



(a) 単位時間あたりの除湿量



(b) 累積除湿量

#### (1) 試験要領

試験体は、直径 5mm の 11,557 本の亜鉛メッキ鋼線を束ねて直径 600mm、長さ 2m のケーブルとし、さらに外面を気密化のため熱収縮ポリエチレンチューブで被覆した。試験方法を図-6 に示す。ケーブル試験体内に 2.5 リットルの水を注入し、送気システムにより除湿されたケーブル内部水を回収し、除湿量を把握した。実橋においてはケーブル断面の一部分にしか送気されない場合も想定されるため、ケーブル上部の直径 300mm の円形断面から乾燥空気を送気・排気した。乾燥空気の相対湿度は約 30% とし、送気量は  $1\text{m}^3/\text{min}$  とした。また、ケーブル試験体の中央部には、幅 50mm の透明のアクリル観察窓を設け、ケーブル内の乾燥状態を観察した。

#### (2) 除湿挙動

単位時間あたりの除湿量の経時変化を図-7(a)に示すが、除湿量は送気開始時に大きく（状態 1）、

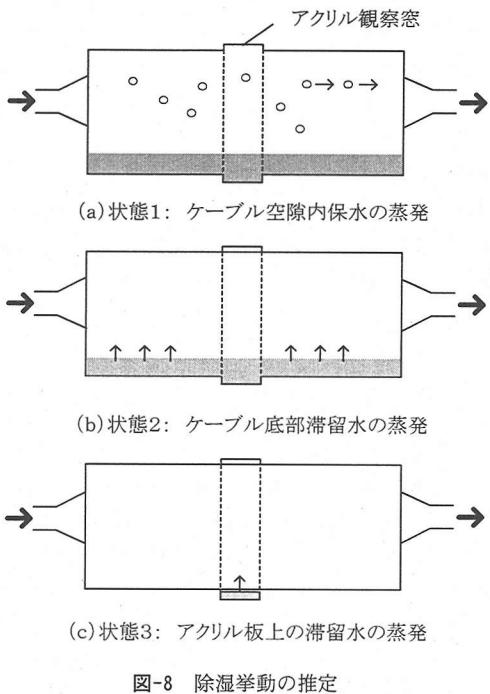


図-8 除湿挙動の推定

その後に定常状態となり（状態2），最後は除湿量が少なくなる（状態3）。状態2から状態3に移行する段階で急激に除湿量が低下したが，このとき滞留水面がケーブル下面から離れたことがアクリル窓から観察された。

累積除湿量を図-7(b)に示すが，ケーブル試験体に注水した2.5リットルの水は約2週間で完全に回収されており，本システムにより内部水の除湿が可能であることが示された。また，図-7(b)には3つの状態に応じた除湿こう配が明確にあらわされている。

状態1～3は，図-8(a)～(c)に示す除湿の形態であると推定される。状態1は，亜鉛メッキ鋼線間に存在した水が蒸発したものであり，乾燥空気と接触する表面積が広いため，除湿速度が大きい。状態2は，ケーブル底部に存在する水が蒸発したものであり，この状態が終了した時点でケーブル内は乾燥したと考えられる。状態3は，滞留水面がケーブル底面から離れているため，アクリル観察窓下の水が蒸発したものと考えられる。蒸発する表面積がアクリル観察窓の幅であり小さいため，蒸発速度は遅い。

### (3)送気流量の影響

送気流量を変化させて同様の実験を実施した。定常状態である状態2における単位時間当たりの除湿

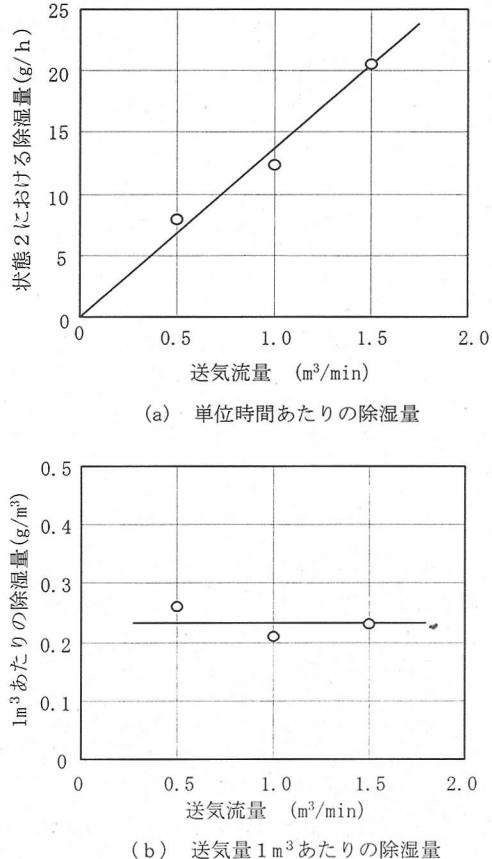


図-9 送気流量と除湿量の関係

量を図-9(a)に示す。これより、送気流量が0.5～1.5 m³/minにおいては、送気流量と除湿量はほぼ線形増加である。すなわち、乾燥空気を多く送るほど、除湿量も増えることになる。

一方、図-9(b)は、送気流量を変化させたときの単位送気量あたりの除湿量を示したが、送気流量に関係なく除湿量はほぼ一定である。ちなみに、0.2 g/m³は20°C時の絶対湿度の約1%に相当する。乾燥空気の相対湿度は約30%と同一であるため、送気流量1m³あたりの水分の蒸発は、送気流量ではなく、ケーブル内を流れる空気の相対湿度に依存すると考えられる。すなわち、乾燥空気がケーブル内を通過するとき、ケーブル内の相対湿度との差に比例して水分を吸収するメカニズムであると推定される。なお、この除湿メカニズムは明石海峡大橋での実測結果により証明しており、別論文にて詳述する予定である。

表-4 亜鉛メッキ鋼線の腐食試験条件

条件	環境	備考
(a)	30% RH	恒温恒湿室
(b)	60% RH	恒温恒湿室
(c)	30%RH-60%RH 交番	恒温恒湿室 1 日交番
(d)	100%RH	注水した容器とともに 密封容器に設置
(e)	湿った ガーゼ巻	水を浸したガーゼで 2 重巻 し、密封容器内に設置
(f)	浸漬	約 1 リットルの溶液に 深さ 10mm で浸漬

表-5 各種腐食試験 1 ヶ月目の外観

条件	NaCl の影響		
	(a)(b)(c)(d) : ワイヤ塩分付着量 0 g/m <sup>2</sup>	(a)(b)(c)(d) : ワイヤ塩分付着量 0.1 g/m <sup>2</sup>	(a)(b)(c)(d) : ワイヤ塩分付着量 10 g/m <sup>2</sup>
(a)			
(b)			
(c)			
(d)			
(e)			
(f)			

## 5. 亜鉛メッキ鋼線の腐食に及ぼす湿度の影響

ケーブル内を常に乾燥した状態に保てば、ケーブルを長期にわたり確実に防食可能である。一般に、鋼や亜鉛が腐食しない臨界相対湿度は 50%～70% であるといわれている<sup>14)</sup>。しかし、実際の吊橋ケーブルの場合は複雑な影響因子が存在する。

汚染の激しい大気中の場合、金属の表面にポーラスで吸水しやすい付着物がある場合、あるいはケーブルのように亜鉛メッキ鋼線間の微小な隙間がある場合は、水分が凝縮しやすく臨界湿度がかなり低下する場合もある。さらに、吊橋は海浜環境に建設されることが多いため、亜鉛メッキ鋼線表面には吸湿性のある塩分がケーブルに付着する可能性もある。

また、金属の大気腐食は臨界湿度を越える時間である「ぬれ時間」が大きな影響をおよぼす。ぬれ時間中は、金属表面の水分が電解質となり腐食が進行するため、ぬれ時間を減少させることが防食上有効である<sup>14)</sup>。

本章では、亜鉛メッキの腐食に及ぼす湿度および付着塩分の影響について、定量的に評価を行い、さらに送気システムを適用した場合の亜鉛メッキ鋼線の寿命予測も試みた。

### (1) 濡度の影響

直径 5mm、長さ 150mm の亜鉛メッキ鋼線を、表-4 に示す 6 種類の環境条件下に設置した。条件(a)は良く乾燥した状態を想定し 30%RH とし、条件(b)は臨界湿度と想定される 60%RH とした。実橋梁での送気システムでは、外気を取り込み、これを除湿して乾燥空気として送っているため、ケーブル内の相対湿度は変動している。条件(c)は、この状態を想定し 30%RH と 60%RH を交番させた。条件(d)は、飽和水蒸気中を想定して、100%RH とした。実橋梁ケーブルでは側面部が最も腐食が激しかった。この部分は常時濡れた状態にあるため、条件(e)では濡れたガーゼを巻き付けて、この状態を再現した。実橋梁ケーブルの下面も腐食が大きく、この部分は常時滯留水に浸っていた。条件(f)はこの状態を再現した。

さらに、塩分の影響を調査するため、条件(a)～(d)においては亜鉛メッキ鋼線への付着塩分量として 0, 0.1, 10 g/m<sup>2</sup> の 3 水準について、条件(e)(f)では水の塩分濃度を 0%, 0.01%, 0.1% の 3 水準について実験した。試験温度は 40°C とし、試験期間は 3 ヶ月とした。なお、温度湿度の調整は恒温恒湿器を用いて行い、温度湿度センサーにより試験中の湿度を随時確認した。試験後に、腐食外観観察および亜鉛メッキの腐食減量を測定した。亜鉛の腐食生成物は 10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> を浸したナイロン製不織布を用いて、過酸洗に注意して除去した。

1 ヶ月目の供試材の腐食外観を表-5 に示した。(a) と(b)では、付着塩分が 0.1 g/m<sup>2</sup> 以下の場合には、腐食が進行していないかった。(c) では 30%RH と 60%RH で湿度を交番させたが、交番による腐食の増大は認められなかった。(d) では、塩分付着が 10g/m<sup>2</sup> と大きい場合に鉄錆の発生を伴う激しい腐食を示し、供試材表面には塩分の吸湿による水滴の付着が認められた。(e) では、付着塩分によらず腐食が大きく、亜鉛の腐食生成物に覆われ鉄錆の発生も認められた。(f) では、付着塩分によらず厚く亜鉛の腐食生成物に覆われたが、鉄錆の発生は認められなかった。

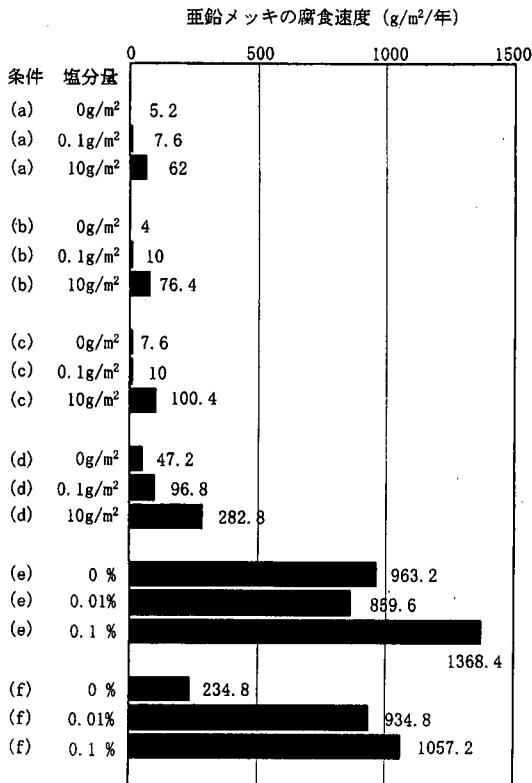


図-10 亜鉛メッキ鋼線の腐食速度

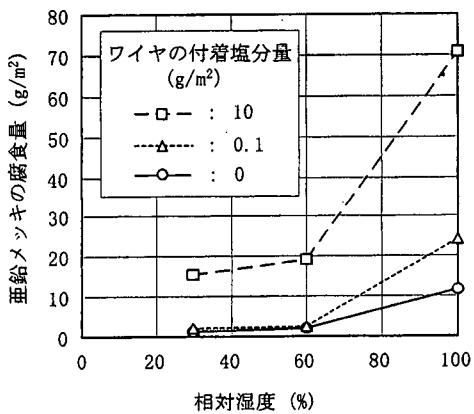


図-11 亜鉛メッキ鋼線の腐食に及ぼす湿度の影響

後述するように、腐食速度は時間とともに減少する場合もあるが、最も厳しい状況を想定し、測定した3ヶ月目の亜鉛メッキの腐食減少量を4倍し、1年あたりの単位面積あたりの腐食速度を計算した(図-10)。なお、これらは試験体2体の測定値の平均である。これより、条件(e)の腐食速度が最も大きく、つぎに条件(f)が大きい。また、条件(d)で付着塩

分量が多い場合もやや大きい。他のケースは、これらに比較して腐食速度は小さい。以上の結果は、前述した腐食外観とも一致している。

条件(e)の濡れたガーゼ巻き試験の場合、すなわち亜鉛メッキ鋼線が濡れた環境に保持されたとき著しい腐食を示した。これは、腐食に必要な水と酸素が十分に供給されたためと考えられる。一方、水に完全に浸漬した条件(f)の場合には、腐食に必要な酸素の供給が少なく、腐食量は湿ったガーゼ巻きに比べ小さかった。湿ったガーゼ巻き試験はケーブル側面部を、浸漬試験はケーブル下面をシミュレーションしているが、実ケーブルにおいても側面部の腐食は下部より大きく、試験結果と実ケーブルの腐食状況は同一である。

図-11は条件(a), (b), (d)における亜鉛メッキ鋼線の腐食速度をまとめたものである。付着塩分量にかかわらず、相対湿度が高いほど腐食速度は大きい。ただし、付着塩分量が0.1g/m<sup>2</sup>以下の試験体では、相対湿度60%以下ではほとんど腐食しなかった。また、付着塩分量が多いほど腐食速度が増大し、とくに付着塩分量が10g/m<sup>2</sup>の場合には腐食は著しく加速された。これらの理由として、条件(a)～(d)の環境下では亜鉛メッキ鋼線に付着した塩分が吸湿し、腐食しやすい環境を形成したためと考えられる。

以上より、送気システムの適用にあたっては、湿度をなるべく低く設定することが好ましいこと、付着塩分量が大きいと低い温度下でも吸湿し腐食が進行しやすいため、塩分はフィルターなどで除去することが必要である。

図-12は条件(b)(c)(e)の腐食量の経時変化を示す。湿った状態が保持されている(e)では腐食量は時間とともに増大したが、(b)(c)のように比較的乾いた状態では腐食量は時間とともに横ばいになる傾向が認められた。これは、生成した亜鉛の腐食生成物が保護層として働き、腐食を抑制したと考えられた<sup>3)</sup>。

## (2) 温度の影響

一般的に、亜鉛メッキ鋼線の腐食速度は温度が高いほど大きくなる。前記の腐食試験は40°Cで実施しているが、実際のケーブル内の温度はこれより低く、腐食促進試験となっていると思われる。本章では、本試験の腐食促進倍率および橋梁建設地点での寒暖の影響を把握するため、種々の温度下において亜鉛メッキ鋼線の腐食実験を実施した。

表-4の条件(e)に示した湿潤ガーゼ巻き腐食試験を、温度0, 10, 20, 40°Cの4水準で行い腐食量を測定した。各温度における腐食減量を図-13(a)に

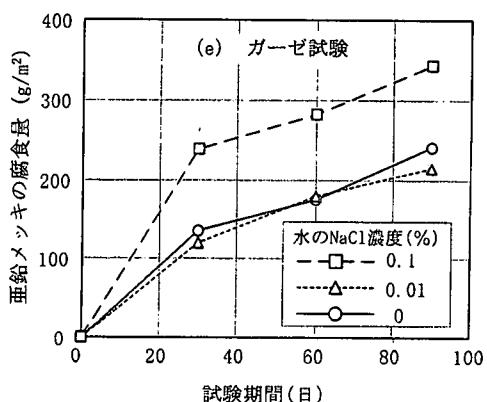
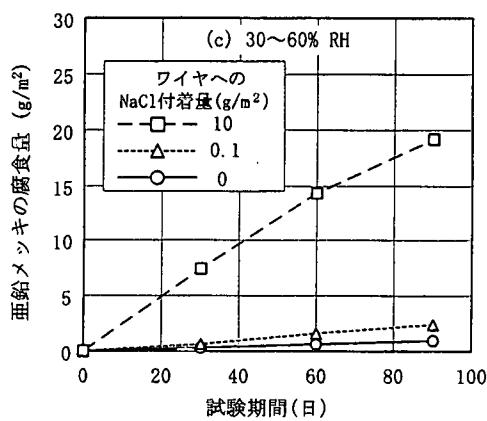
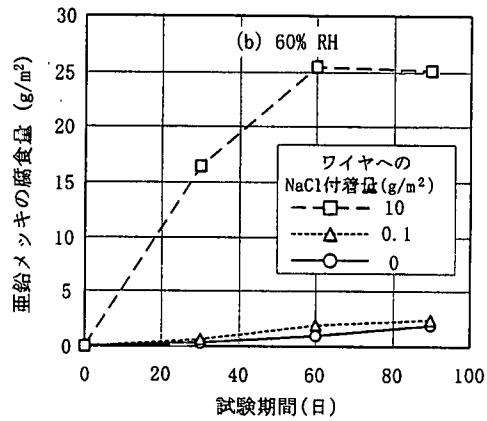
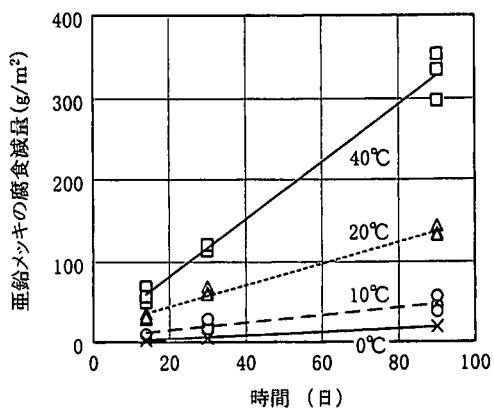


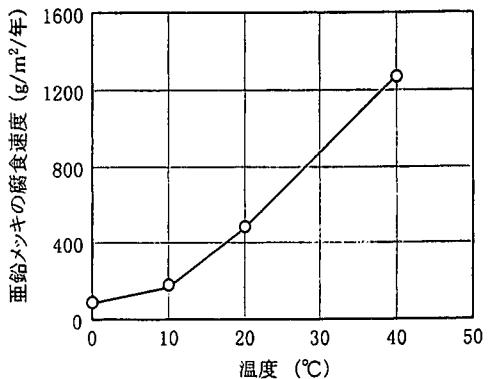
図-12 亜鉛メッキ鋼線の腐食量の経時変化

示すが、腐食減量は時間とともに比例増加し、高温になるほど腐食量が大きい。

この傾きから最小2乗法で計算した腐食速度と温度との関係を図-13(b)に示すが、腐食量は温度とともに指数的に増大する傾向が明確に認められた。たとえば大鳴門橋の場合、ケーブルの平均温度は16°C程度と推定されるが、試験温度40°Cでの腐食速度は実橋ケーブルの4倍程度であることがわかる。また、



(a) 腐食量の経時変化



(b) 温度に対する亜鉛の腐食速度

図-13 亜鉛メッキ鋼線の腐食に及ぼす温度の影響

寒冷地に建設される吊橋ケーブルでは相対的に腐食速度が小さく、熱帯地では大きいと推定される。

### (3) 亜鉛メッキ鋼線の寿命推定

ケーブルの平均温度を16°Cとした場合の各種条件下(ガーゼ巻き、60%RH、100%RH、浸漬)での亜鉛メッキ鋼線の推定寿命を表-6に示す。実橋では乾燥空気を処理する際に、フィルターにより塩分を除去しているため、亜鉛メッキ鋼線の腐食速度は図-10での塩分なしの値を用いた。また、促進試験時の温度は40°Cであり、これを16°Cに換算するために図-13より促進倍率を4とした。

実ケーブルでは、亜鉛メッキ鋼線表面が局所的に腐食する孔食の可能性もあり、かならずしも平均的には腐食しない。また、亜鉛メッキが消費された後も、鋼線の地鉄が完全に消費されるまでにはかなりの余寿命が期待される。また、ケーブルは多数の亜鉛メッキ鋼線で構成されており、かりに少數の亜鉛

表-6 亜鉛メッキ鋼線の腐食寿命の推定

試験項目	試験温度(℃)	亜鉛メッキの腐食速度(g/m <sup>2</sup> /年)	促進倍率	亜鉛350g/m <sup>2</sup> が消費される年数
ガーゼ巻 塩分なし	40	963	4	1.5
60%RH 塩分なし	40	7.6	4	184
100%RH 塩分なし	40	47.2	4	30
浸漬 塩分なし	40	234	4	6.0

メッキ鋼線が破断しても、直ちに落橋には至らず、さらに余裕がある。このように、ケーブルの寿命予測はきわめて複雑であるが、ここでは鋼線に付着させている350 g/m<sup>2</sup>の亜鉛メッキが消費されるまでをケーブルの寿命と定義した。

ガーゼ巻き試験はケーブル側面の腐食を、浸漬試験はケーブル下面をシミュレートしたものであるが、表-6に示すように、それぞれ1.5年および6.0年ですべての亜鉛メッキが消費されることになり、実ケーブルでの調査結果より腐食進行が速い。これは、腐食試験条件が実ケーブルでの腐食環境より厳しかったことによると思われる。また、100%RHでは30年と推定され、このケースも比較的早期に亜鉛メッキが消費される。一方、60%RH保った場合には、亜鉛メッキの腐食速度は小さく、約200年の寿命となる。なお、この寿命年数は促進試験における3ヶ月目の腐食量から推定したが、図-12に示したように、腐食量は時間とともに横ばいになる傾向があるため、さらに長い寿命年数が期待できる。

以上の結果から、送気乾燥システムを用い、ケーブル内の腐食原因となる水分を排除し、ケーブル内の湿度を60%RH以下に保ち、外気を取り込んで乾燥空気を作る際には塩分をフィルターなどで除去すれば、極めて長期のケーブルの防食が可能であると考えられる。

## 6. まとめ

明石海峡大橋のケーブル防食法として、世界で初めてケーブル内に乾燥空気を送り込み、腐食原因となる内部水を強制排水する送気乾燥システムを適用した。本論文では、本システムの防食効果、除湿効果、亜鉛メッキ鋼線の腐食寿命について研究した。得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) ケーブル内に注水した小型ケーブル試験体を温度変化する環境に設置し、その腐食促進試験を実施した。その結果、送気された試験体の腐食量は、送気されなかった試験体に比較してきわめて軽微あることを見い出し、ケーブル送気システムは優れた防食効果を有することを明確にした。
- (2) 模擬ケーブル試験体の送気システムによる除湿試験を実施し、ケーブル内部水の除湿が可能であることを明確にした。また、試験中に除湿された水分量を計測することにより、送気流量と除湿量は比例することを見出した。一方、単位送気流量当たりの水分の蒸発は送気流量に影響されず、ケーブル内相対湿度と送気空気の相対湿度の差に比例した水分が除湿されると考えられる。したがって、相対湿度の低い空気を多く送るほど、除湿効果は高いと言える。
- (3) 種々の環境下における亜鉛メッキ鋼線の腐食促進試験を実施し、相対湿度が高いほど、また付着塩分が多いほど、亜鉛メッキ鋼線の腐食速度は大きいことを見出した。したがって、送気システムの適用にあたっては、ケーブル内相対湿度を低く保ち、かつ塩分付着を防止することが重要であると考えられた。
- (4) さらに、腐食試験結果の実橋ケーブル腐食速度に対する腐食促進倍率の検討も行い、送気システムによりケーブル内の相対湿度を60%以下に保ち、かつ塩分付着を防止すれば、亜鉛メッキ鋼線の耐久寿命はきわめて長期であることを見出した。

吊橋ケーブル送気乾燥システムは、明石海峡大橋に1997年11月に導入された。それ以降、現在に至るまで順調に稼働しており、除湿効果も確認されている。今後は、長期にわたり実橋におけるケーブルの腐食状況をモニタリングし、この革新的な技術を調査し続ける必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 古家和彦：送気乾燥による吊橋ケーブル防食試験、本四技報、Vol. 21, No.84, pp.12-18, 1997.
- 2) 佐伯彰一、河藤千尋：送気による吊橋ケーブルの防食、土木学会誌、vol.83, pp.11-13, 1998.
- 3) 古家和彦、北川信、中村俊一、鈴村恵太、聖生守雄：吊橋ケーブルの腐食機構に関する研究、土木学会論文集、No.637/VI-45, pp.103-114, 1999.
- 4) 古家和彦、北川信、中村俊一、鈴村恵太、聖生守雄：暴露試験による吊橋ケーブル防食法の防食性能評価、土木学会論文集、No.637/VI-45, pp.15-28, 1999.
- 5) 江口立也、鈴村恵太、松岡徹郎、渡辺竹紀：Sワイヤ

- ラッピングによるケーブル防食技術の開発, 新日鉄技報 372, pp.8-14, 1999.
- 6) 下村 稔, 杉山剛史, 花井 拓: 明石海峡大橋のケーブル防食システム, 本四技報, Vol.22, No.86, pp.63-71, 1998
- 7) 平野信一: ケーブル一般部の新防食工法, 橋梁と基礎 No.5, pp.35-36, 1995.
- 8) 奥田基, 山下五月, 伊香賀信文: 北備瀬戸大橋ケーブル送気試験, 本四技報, Vol.21, No.82, pp.14-18, 1997.
- 9) Bloomstine, M.L., Rubin, F. and Veje, F.: Corrosion Protection by Means of Dehumidification, *IABSE Symposium*, pp.373-380, 1999.
- 10) 藤野陽三, 上田雅俊, 延藤 遼: 鋼ボックス内部の腐食環境と防錆について, 構造工学論文集, Vol.36A, pp.1-11, 1990.
- 11) 金子正猪, 溝上義昭, 内藤 真: 乾燥空気による箱桁内防食, 橋梁と基礎, No.5, pp.31-34, 1995.
- 12) Stahl, F.L. and Gagnon, C.P.: *Cable Corrosion*, ASCE Press, 1996.
- 13) 大日本塗料(株): 防食塗料と塗装, 日本塗料新聞社, 1996.
- 14) ユリック, レヴィー: 腐食反応とその制御(第3版), 産業図書, 1994.

(2000. 5. 29 受付)

## A STUDY ON ANTI-CORROSION CAPACITY OF DRY AIR INJECTION SYSTEM OF SUSPENSION BRIDGE CABLES

Makoto KITAGAWA, Kazuhiko FURUYA, Shun-ichi NAKAMURA  
and Keita SUZUMURA

A new anti-corrosion method, removing remaining water inside the cable by injecting and circulating dry air, was introduced to the Akashi Kaikyo Bridge cables for the first time in the world. The superiority of this system was demonstrated by the experiments using cable specimens with and without this system. The dehumidification mechanism of this system was clarified by measuring the volume of dehumidified water from the dry air injected specimen. It was also found from the corrosion tests that corrosion ratio of galvanized wires is accelerated by higher humidity, temperature and volume of attached salt. The service life of galvanized wires is then predicted to be sufficiently long when they are kept under relative humidity under 60% using this dehumidification system.