

## 2. 鋼構造物の耐久性向上に関する取り組みについて

### —金属溶射のこれから—

技術委員会 製作小委員会

前田 博 小川 博基

平野 晃 大庭 哲也

#### 1. はじめに

鋼構造物における維持管理コストを低減することを目的として、種々の防食方法が検討されているが、金属溶射についても有効な手段として注目されている。また、鋼道路橋塗装・防食便覧（平成 17 年 12 月（社）日本道路協会）に代表的な防食技術として示されたことにより、施工事例も増加している。しかしながら、その耐久性と経年変化を調査確認されたデータは少なく、環境別耐久性データの蓄積と維持管理法の確立が重要である。（社）日本橋梁建設協会では、これらを解決するために追跡調査ならびに暴露試験を実施している。

今回の報告は、各種調査（表-1）の概要報告を行うことにする。

#### 2. 秋田県「戸賀4号橋」調査

##### 2.1 調査場所

秋田県の戸賀4号橋は秋田県男鹿半島の先端に位置する（図-1）鋼上路単純トラス橋で、海岸近くの高台に位置しているため、日本海からの飛来塩分が多く、凍結防止剤散布も多い腐食環境の非常に厳しい場所である。

##### 2.2 調査内容

平成 19 年 11 月の試験板設置に合わせ調査を開始している。戸賀4号橋についてはA2橋台側の海側



図-1 戸賀4号橋架設箇所図

下弦材ならびに山側下弦材各1箇所での追跡調査を実施している。戸賀4号橋の金属溶射仕様を表-2に示す。

試験板は金属溶射仕様試験板で4種類、比較試験板で3種類を設置している（表-3）。

表-1 調査実施箇所一覧

| 箇所                               | 内容                  | 環境                            |
|----------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| 秋田県「戸賀4号橋」                       | 実橋追跡調査<br>試験板暴露試験   | 飛来塩分の多く、凍結防止剤散布も多い環境（厳しい環境）   |
| 東名阪自動車道<br>「亀山高架橋・伊勢関IC橋」        | 合成床版追跡調査<br>試験板暴露試験 | 飛来塩分は少ないが、凍結防止剤散布の多い環境（厳しい環境） |
| 沖縄県（独）土木研究所<br>「沖縄建設材料耐久性試験施設場内」 | 試験桁暴露試験<br>試験板暴露試験  | 飛来塩分の多い環境（厳しい環境）              |
| 茨城県「（独）土木研究所場内」                  | 試験板暴露試験             | 飛来塩分の少ない環境（一般環境）              |

表-2 戸賀4号橋溶射仕様

|      |                             |
|------|-----------------------------|
| 素地調整 | ブラスト Sa 2 1/2               |
| 溶射   | 亜鉛・アルミニウム合金溶射<br>+封孔処理・着色仕上 |

表-3 秋田試験板の種別

| 試験片区別          | 種別                       | 封孔処理 |
|----------------|--------------------------|------|
| 溶射試験板          | 亜鉛(85)・アルミニウム(15)合金溶射    | なし   |
|                |                          | あり   |
|                | アルミニウム溶射                 | なし   |
|                |                          | あり   |
|                | アルミニウム(95)・マグネシウム(5)合金溶射 | なし   |
| あり             |                          |      |
| 亜鉛・アルミニウム擬合金溶射 | なし                       |      |
|                | あり                       |      |
| 比較試験板          | 溶融亜鉛めっき HDZ55            | —    |
|                | 溶融合金めっき Zn95・Al5合金       | —    |
|                | C-5系塗装仕様                 | —    |

## 2.3 調査結果

平成22年11月に実施した3年後調査結果について述べることにする。

### 2.3.1 外観調査

実橋については、変状が見受けられない。試験板については、亜鉛・アルミニウム合金溶射(封孔処理なし)および亜鉛・アルミニウム擬合金溶射(封孔処理なし)の試験片で、表面・裏面共に白さびが発生している。また、亜鉛・アルミニウム合金溶射の試験板は、封孔処理の有無に関わらず全体的に色相が黒く変化しているが、亜鉛・アルミニウム擬合金溶射の試験板は、封孔処理なしの場合のみ全体的に色相が黒く変化している。

表-5 試験板膜厚変化量

| 試験板                      | 封孔処理 | 膜厚変化量(μm) |
|--------------------------|------|-----------|
| 亜鉛(85)・アルミニウム(15)合金溶射    | あり   | +13~+21   |
|                          | なし   | +2~+11    |
| アルミニウム溶射                 | あり   | -13~-1    |
|                          | なし   | -11~+1    |
| アルミニウム(95)・マグネシウム(5)合金溶射 | あり   | -6~+8     |
|                          | なし   | -5~+4     |
| 亜鉛・アルミニウム擬合金溶射           | あり   | -7~+8     |
|                          | なし   | -13~+5    |
| 溶融亜鉛めっき HDZ55            | —    | 0~+3      |
| 溶融合金めっき Zn95・Al5合金       | —    | 0~+5      |
| C-5系塗装仕様                 | —    | 0~+3      |

### 2.3.2 膜厚測定

実橋の初期と3年後の膜厚変化量を表-4に示す。膜厚変化の原因は、金属溶射表面の凹凸による測定誤差と考えられる。

表-4 戸賀4号橋膜厚変化量

| 確認箇所  | 膜厚変化量(μm) |
|-------|-----------|
| 海側下弦材 | +10~+22   |
| 山側下弦材 | -2~+26    |

試験板の初期と3年後の膜厚変化量を表-5に示す。膜厚変化の原因は、金属溶射については実橋同様、金属溶射表面の凹凸による測定誤差と考える。

めっきと塗装は膜厚変化が小さいが、表面の凹凸が金属溶射より少ないためと考えられる。

### 2.3.3 付着塩分量測定

実橋の付着塩分量を表-6に示す。垂直面外面の付着塩分量は、その他の部位と比較して少ない傾向にある。外面は降雨により付着塩分が洗い流されるためと考える。垂直面内面および下面の付着塩分量は多い傾向にあるが、垂直面内面および下面は付着塩分が洗い流され難く堆積しているためであると考えられる。この部位については、今後注意深く経過確認を行う予定である。試験板については、付着塩分量が10mg/m<sup>2</sup>以下と少なく、降雨で流されたものと考えられる。

表-6 戸賀4号橋付着塩分量測定結果

| 測定部位      |            | 付着塩分量(mg/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|------------|---------------------------|
| 実橋下弦材(海側) | 上面         | 55.1                      |
|           | 下面         | 365.0                     |
|           | 垂直面(海側) 外面 | 17.8                      |
|           | 垂直面(山側) 内面 | 45.1                      |
| 実橋下弦材(山側) | 上面         | 148.2                     |
|           | 下面         | 1229.0                    |
|           | 垂直面(海側) 内面 | 402.0                     |
|           | 垂直面(山側) 外面 | 24.8                      |

### 3. 東名阪自動車道

#### 「亀山高架橋・伊勢関 IC 橋」調査

##### 3.1 調査場所

亀山高架橋ならびに伊勢関 IC 橋は三重県内の東名阪自動車道にあり、両橋梁の合成床版に金属溶射仕様が採用されている。海岸線からは距離があり飛来塩分は少ないが、凍結防止剤散布の多い腐食環境の厳しい場所である。

試験板は、両橋梁から比較的近い亀山パーキングエリアの管理地域内に設置を行った(図-2)。

##### 3.2 調査内容

亀山高架橋のA2橋台付近で2箇所、伊勢関 IC 橋のA2橋台付近で2箇所について、追跡調査を平成17年11月から実施しており、検査路上から合成床版の下面を調査している。両橋梁における金属溶射仕様を表-7に示す。

表-7 合成床版における金属溶射仕様

| 区分   | 亀山高架橋                  | 伊勢関IC橋                 |
|------|------------------------|------------------------|
| 素地調整 | ブラストSa2 <sup>1/2</sup> | ブラストSa2 <sup>1/2</sup> |
| 溶射   | 亜鉛・アルミニウム擬合金溶射+封孔処理    | 亜鉛・アルミニウム合金溶射+封孔処理     |

表-8 亀山における試験板の種類

| 試験片区別 | 種別                     |
|-------|------------------------|
| 溶射試験板 | 亜鉛・アルミニウム合金溶射+封孔処理     |
|       | 亜鉛・アルミニウム擬合金溶射+封孔処理    |
|       | アルミニウム・マグネシウム合金溶射+封孔処理 |
| 比較試験板 | 溶融亜鉛めっき HDZ55          |
|       | I系塗装仕様                 |
|       | C-2系塗装仕様               |



図-2 亀山高架橋・伊勢関 IC 橋架設箇所図

試験板は金属溶射仕様試験板で3種類、比較試験板で3種類を設置している（表-8）。

### 3.3 調査結果

平成22年10月に実施した5年後調査結果について述べることにする。

#### 3.3.1 外観調査

亀山高架橋（亜鉛・アルミニウム擬合金溶射仕様）は特に変化は見られない。伊勢関IC橋（亜鉛・アルミニウム合金溶射仕様）においては、3年目の調査時よりさらに黒味を帯びた色合いへと変化している。

試験板については亜鉛・アルミニウム合金溶射試験板は、3年目と比べてさらに黒味を帯びた色合いへと変化している。他の溶射仕様試験板には変化は見られない。溶融亜鉛めっきの試験板に関しては、3年目と比べて、白錆の発生が多くなっている。塗装系の試験板は、特に変化は見られないが汚れの付着が目立つようになっている。これは、表層部のチョーキング現象が進行したものと推測される。

#### 3.3.2 膜厚測定

亀山高架橋および伊勢関IC橋とも、調査年度毎に膜厚の変動は見られたが、溶射皮膜の表面凹凸部の影響による測定誤差の範囲であると考えられる数値であった。初期から5年後までの膜厚変化量を表-9に示す。

表-9 合成床版膜厚変化量

| 確認箇所   | 膜厚変化量(μm) |
|--------|-----------|
| 亀山高架橋  | -44~+18   |
| 伊勢関IC橋 | +2~+10    |

試験板における初期膜厚から5年後までの膜厚変化量を表-10に示す。亜鉛金属を含む亜鉛・アルミニウム合金溶射、亜鉛・アルミニウム擬合金溶射および溶融亜鉛めっきの試験板は調査年度毎に膜厚が増加傾向を示している。この膜厚増加は、亜鉛金属の酸化物生成が影響しているものと考えられる。一方、アルミニウム・マグネシウム合金溶射および塗装仕様の試験板に見られる数値の誤差は、測定誤差であると考えられる。

表-10 亀山試験板膜厚変化量

| 確認箇所              | 膜厚変化量(μm) |
|-------------------|-----------|
| 亜鉛・アルミニウム合金溶射仕様   | +10~+22   |
| 亜鉛・アルミニウム擬合金溶射    | +5~+12    |
| アルミニウム・マグネシウム合金溶射 | -1~+15    |
| 溶融亜鉛めっき<br>HDZ55  | +4~+12    |
| I系塗装仕様            | -1~-1     |
| C-2系塗装仕様          | -3~-1     |

#### 3.3.3 付着塩分量測定

亀山高架橋の付着塩分量は、測定時期による数値の大きな変化は見られず測定上の誤差の範囲であると考えられる（表-11）。

一方、伊勢関IC橋においては、3年目・5年目の調査時に、春期（4月～6月測定）の測定結果において秋期（10月）の定期調査時の測定結果より2～4倍以上高い付着塩分量が測定された。特に桁中央側の定点測定部では、春期（4月～6月測定）の測定結果のほうが高い付着塩分量を測定された。両橋梁の測定部は床版裏面で降雨等による洗浄が無い箇所であることから測定時期により付着塩分量に変化が生じる原因は、地理的および構造的な要因により、塩分調査位置において風況特性が異なることによるものと考えられる（表-12）。

試験板の水平面における測定値は、3年目に測定された付着塩分量よりもさらに高い163mg/m<sup>2</sup>が測定された。測定時期による付着塩分量の変化は、冬季に凍結防止材が散布された影響が現れる春期（4月～6月の測定）の測定結果の方が、秋期の定期調査時よりも低い塩分量を示している結果であった。計画当初は逆の現象が現れると予測していた（表-13）。

表-11 亀山高架橋付着塩分量

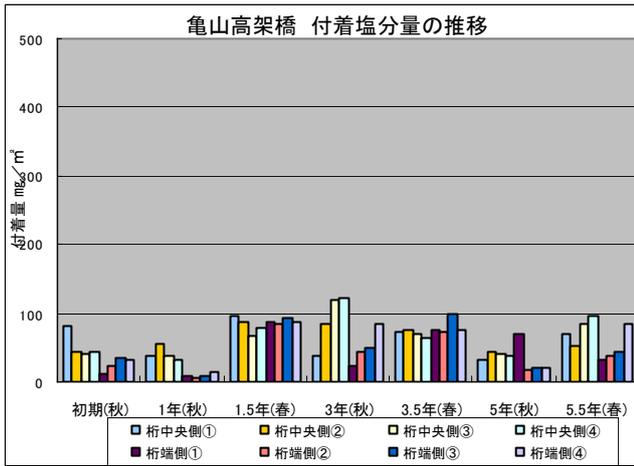


表-12 伊勢関IC橋付着塩分量

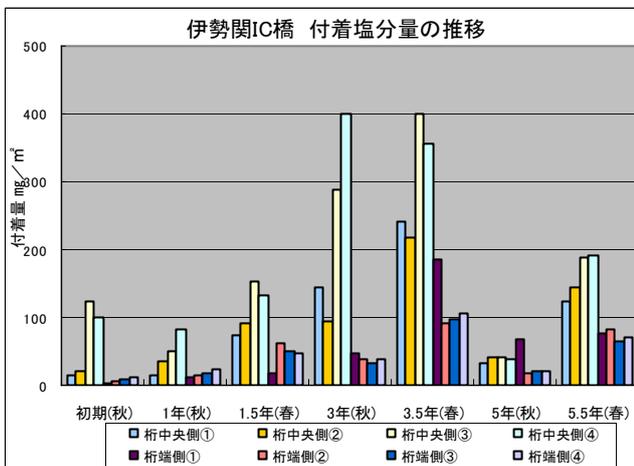
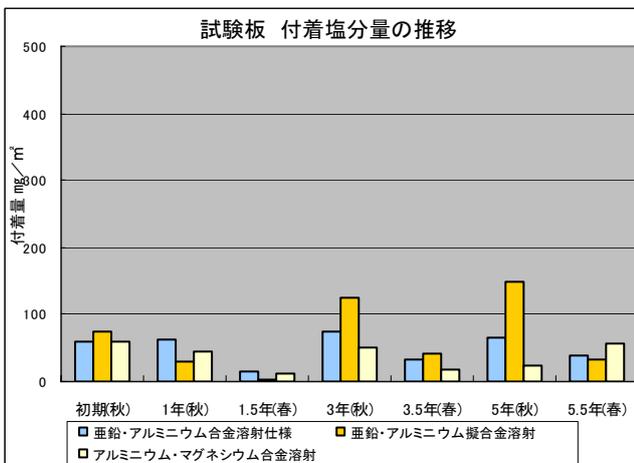


表-13 試験板付着塩分量



4. 沖縄県（独）土木研究所

「沖縄建設材料耐久性試験施設内」調査

4.1 調査場所

(独) 土木研究所の沖縄建設材料耐久性試験施設(沖縄県大宜味村字津波 図-3)は、東シナ海に面し、海岸線に近接しているため、特に冬の季節風の影響を強く受け、状況によっては波飛沫を直接受ける腐食環境の非常に厳しい場所である。

4.2 調査内容

各種金属溶射および塗装との組合せによる長期耐久性を、塗装による重防食仕様と比較して性能を確認することを目的として大型試験桁および試験板を設置し、追跡調査を実施している。

大型試験桁は鋼床版鉄桁構造をした 2,200mm(W) × 1,500mm(H) × 4,000mm(L)、塗装面積が約 60 m<sup>2</sup>の構造物であり、2台を設置した(写真-1)。各試験桁の溶射仕様を表-14、表-15 に示す。

試験板は試験桁と同じ仕様のもを暴露している。

なお、各種溶射の上に塗装を施工している仕様については報告するような差異が発生していないため、金属溶射施工のみの仕様についてのみ報告を行う。



図-3 沖縄建設材料耐久性試験施設

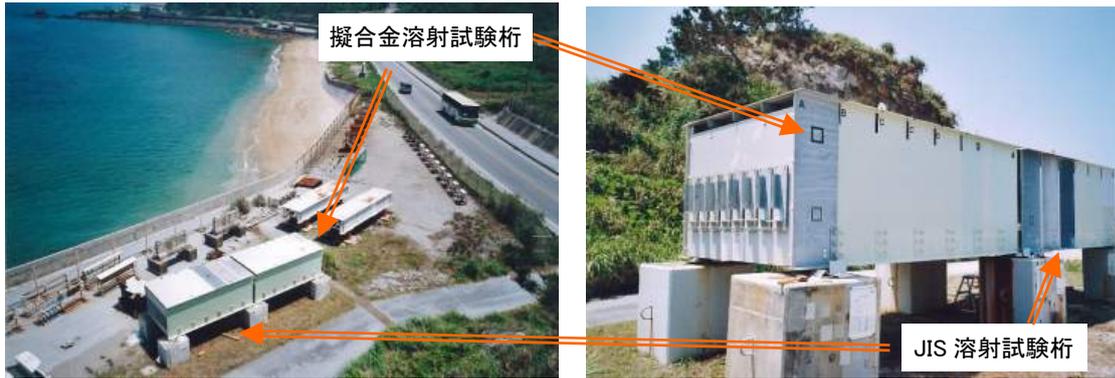


写真-1 大型試験桁

表-14 擬合金溶射試験桁

| 区分   | 区分A          | 区分B                     | 区分C                     | 区分C'                    | 区分D                     |
|------|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 素地調整 | 2種+粗面        | 2種+粗面                   | 1種+粗面                   | ブラストSa2 <sup>1/2</sup>  | ブラストSa2 <sup>1/2</sup>  |
| 溶射   | 亜鉛・アルミニウム擬合金 | 亜鉛・アルミニウム擬合金<br>+ふっ素上塗り | 亜鉛・アルミニウム擬合金<br>+ふっ素上塗り | 亜鉛・アルミニウム擬合金<br>+ふっ素上塗り | 亜鉛・アルミニウム擬合金<br>+ふっ素上塗り |

表-15 JIS 溶射試験桁

| 区分   | 区分H                    | 区分I                    | 区分J                    | 区分K                    | 区分L                    |
|------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 素地調整 | ブラストSa2 <sup>1/2</sup> |
| 溶射   | 亜鉛                     | アルミニウム                 | 亜鉛・アルミニウム合金            | 亜鉛・アルミニウム合金<br>+ふっ素上塗り | 溶射比較用<br>(C-4塗装系)      |

#### 4.3 試験桁についての説明

2台の試験桁は平成3年から塗装系暴露試験において新設仕様ならびに塗替仕様の検討に使用した後、溶射系暴露試験のために転用している。塗替仕様試験桁に擬合金溶射を、新設仕様試験桁にJIS溶射を施工している。擬合金溶射試験桁の孔食部分がJIS溶射試験桁より若干多かったことが確認されている。

#### 4.4 調査結果

平成21年4月に実施した7年目調査結果について述べることにする。

##### 4.4.1 外観調査

###### ①〔仕様A(亜鉛・アルミニウム擬合金)〕(写真-2)

上フランジ下面(外側)に3年目から確認された赤さびの発生部は、7年目には下面の約75%程度にまで進行していた。桁内面の下部に5年目から確認された赤さびの発生箇所は、7年目にはさらに進行して大きくなり、一部はがれが生じていた。本試験桁は、前試験において塗替仕様の検討を行っており、ほぼ全面を意図的に発錆させた経歴がある腐食の著

しい部材であったことから、動力工具処理で除去できなかった孔食中の塩分および桁内部に付着・堆積した塩分の影響により、溶射皮膜の劣化が促進され、さびが進行した可能性が考えられる。

###### ②〔仕様H(亜鉛)〕(写真-3)

上フランジ(外側)は、溶射皮膜の溶出が3年目より起こり7年経過時点でさらに溶出が進行し、部分的に素地露出部で赤さびの発生が確認された。沖縄地区のような厳しい腐食環境では亜鉛溶射の早期劣化は想定されており、この箇所についてはすでに限界に達したと判断し、暴露試験を終了して、劣化した亜鉛溶射皮膜の補修仕様に関する検討を行うべく補修溶射を実施した。

上フランジ(内側)には飛来塩分の付着と、一部腐食生成物の発生はみられるが、素地鋼板の腐食(赤さびの発生)には至っていない。ウェブ面については、内側・外側共に変色傾向(黒灰色)にある。下フランジ(内側)は亜鉛溶射皮膜の腐食生成物である白さびが多く発生している。

③ [仕様I(アルミニウム)] (写真-4)

試験桁外側はどの部位においても白い灰色を呈しており、ほとんど変化が見られない。試験桁内側もほとんど変化していない。

④ [仕様J(亜鉛・アルミニウム合金)] (写真-5)

試験桁外側、内側ともほとんど変化していない。

⑤試験板

亜鉛・アルミニウム擬合金溶射試験板の裏面はカット部より腐食が進行し、全面的に膨れが発生した。この試験板は、大型試験桁と仕様を合わせるため、意図的に発錆させたのち溶射施工を行っている。試験桁同様に動力工具処理で除去できなかった残存塩分により腐食が発生し、付着・堆積した塩分により、

腐食が促進した可能性が考えられる。その他の試験板には大きな変化は見られない。

4. 4. 2 膜厚測定

仕様Aおよび仕様Hの測定位置⑥で膜厚の増加傾向(+100 $\mu$ m~+200 $\mu$ m程度)がみられる。これは付着堆積した塩分により発生した腐食生成物と考えられる。その他の箇所には大きな変化は見受けられない(図-4、図-5)。

試験板については、全面的に膨れの発生した亜鉛・アルミニウム擬合金溶射試験板の裏面で膜厚測定が実施できないが、その他については大きな変化は見受けられない(図-6)。



3年後

5年後

7年後

写真-2 仕様A(擬合金溶射) 部位(上フランジ下面、ウェブ上側)



3年後

5年後

7年後

写真-3 仕様H(亜鉛: JIS 溶射) 部位(上フランジ上面)



3年後

5年後

7年後

写真-4 仕様I(アルミニウム: JIS 溶射) 部位(上フランジ上面)



3年後



5年後



7年後

写真-5 仕様J (亜鉛・アルミニウム合金 : JIS 溶射) 部位 (上フランジ上面)

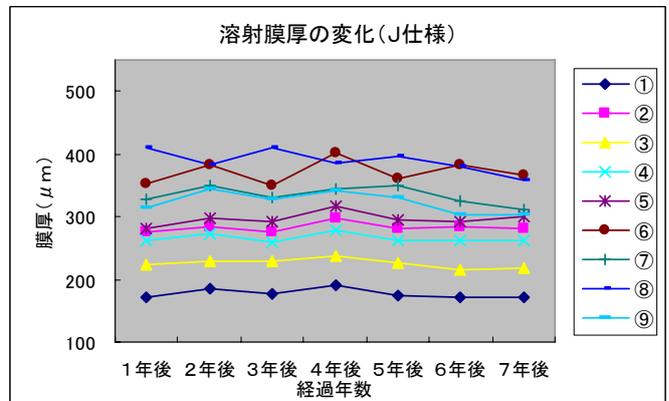
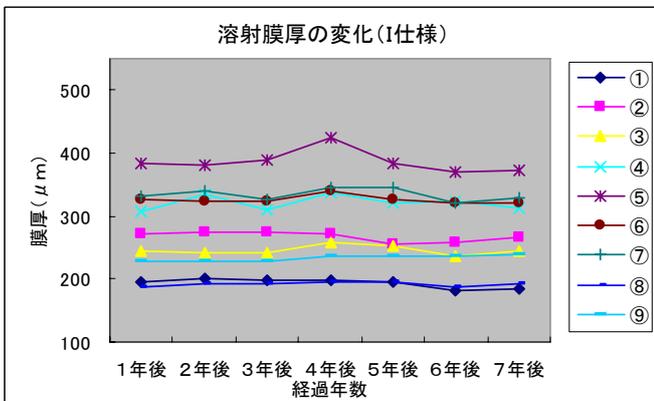
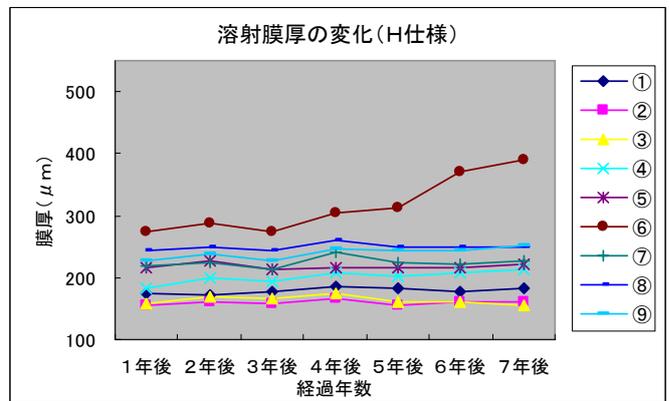
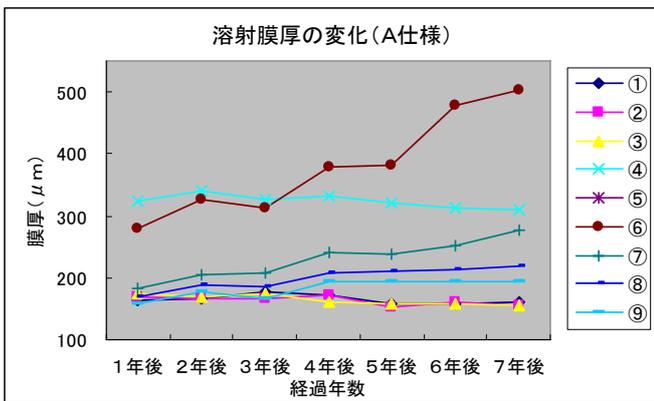


図-4 試験桁溶射膜厚測定結果

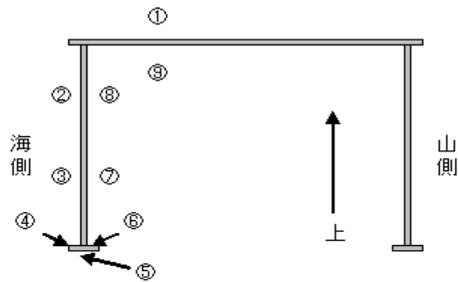


図-5 溶射膜厚測定位置

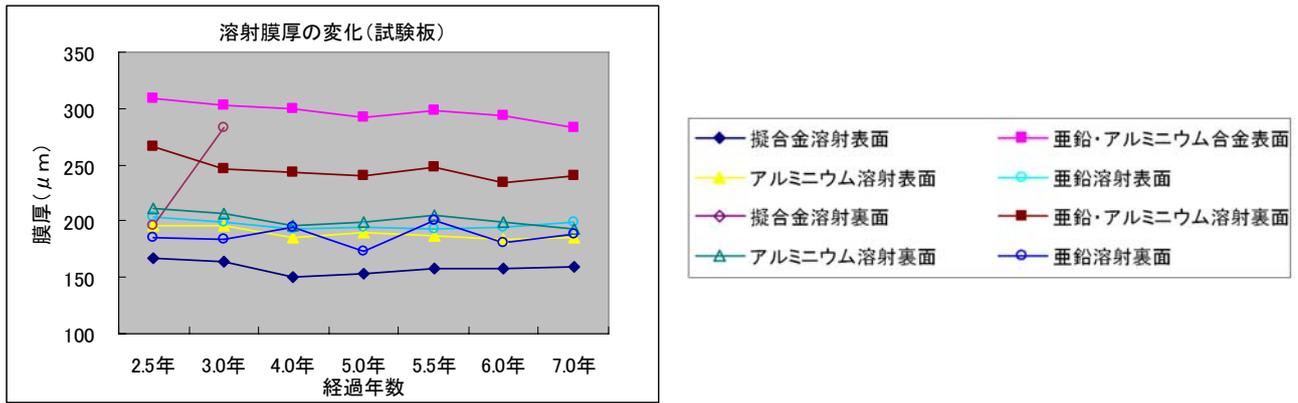


図-6 試験板溶射膜厚測定結果

#### 4. 5 亜鉛溶射部の補修溶射

亜鉛溶射（封孔処理まで）における上フランジ上面において、3年目から溶射皮膜の溶出が顕著となり、5年目、7年目の調査でさびの発生・進行が確認された。これ以上試験を継続する事による腐食部の拡大は、他の仕様の評価の妨げになる恐れがあることから、試験を終了し補修試験を行うこととした。

補修の考え方については、鋼道路橋塗装・防食便覧（第V編）金属溶射編の第6章維持管理に示す金属溶射皮膜の劣化レベルと補修方法(表-V.6.4)に

よる劣化レベルIV(補修範囲:全面)を想定している。補修仕様は、アルミニウム・マグネシウム合金、アルミニウム、亜鉛・アルミニウム合金、亜鉛・アルミニウム擬合金の4種類の溶射金属を用いてそれぞれの封孔処理までと、塗装仕上げによる8種類の仕様とし、補修を実施した(写真-6、図-7、写真-7)。

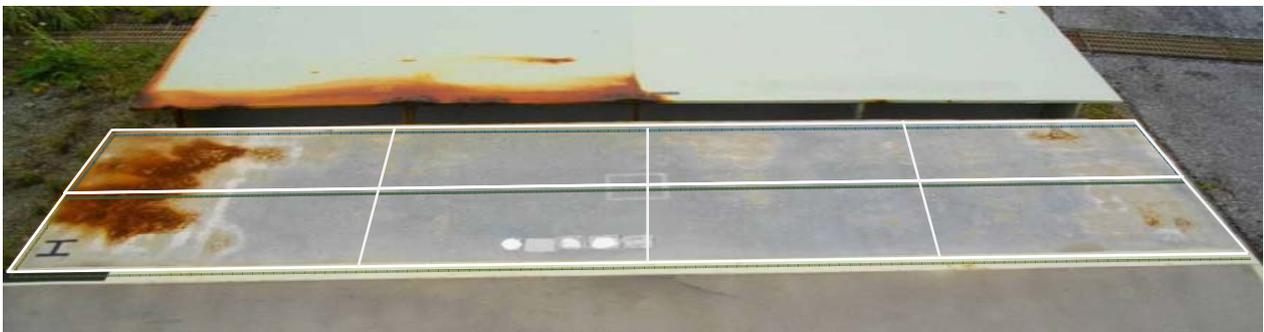
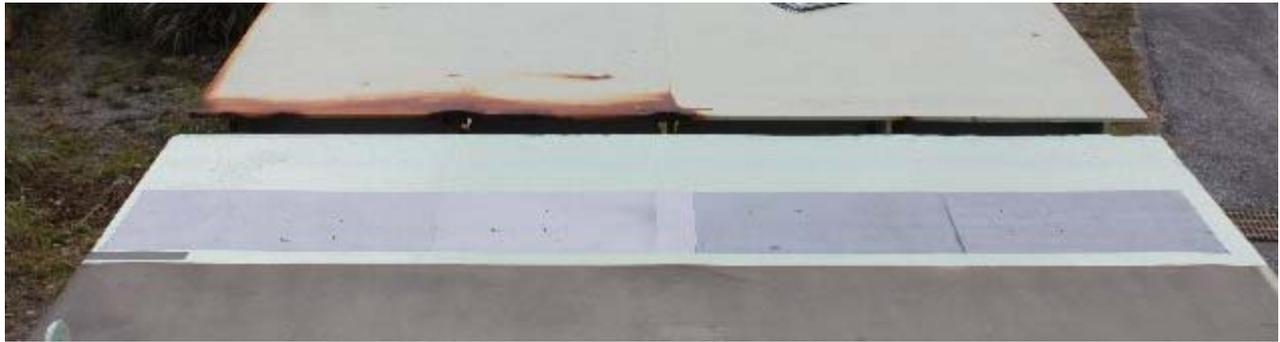


写真-6 補修溶射 補修前

|                         |                |                     |                      |
|-------------------------|----------------|---------------------|----------------------|
| ①' アルミニウム・マグネシウム合金溶射+塗装 | ②' アルミニウム溶射+塗装 | ③' 亜鉛・アルミニウム合金溶射+塗装 | ④' 亜鉛・アルミニウム擬合金溶射+塗装 |
| ①アルミニウム・マグネシウム合金溶射      | ②アルミニウム溶射      | ③亜鉛・アルミニウム合金溶射      | ④亜鉛・アルミニウム擬合金溶射      |

図-7 補修溶射仕様区分図



写真－7 補修溶射 補修後

## 5. 茨城県「(独) 土木研究所場内」調査

### 5. 1 調査場所

茨城県つくば市にある(独)土木研究所は飛来塩分も少なく、凍結防止剤散布もほとんどない一般的な環境である。

### 5. 2 調査内容

沖縄の暴露試験開始に合わせ、比較検討を行うため、試験板を設置した。仕様は沖縄の試験板と同じである。

### 5. 3 調査結果

#### 5. 3. 1 外観調査

試験板の外観については、大きな変化は見られない。

#### 5. 3. 2 膜厚測定

膜厚の大きな変化は見受けられない。

## 6. まとめ

各地での調査結果から、以下の暫定的結論が得られた。

- 1) 沖縄暴露試験より、亜鉛溶射に関しては、腐食環境の厳しい場所で使用する場合、塗装と併用することが望ましい。
- 2) 沖縄暴露試験より、亜鉛・アルミニウム擬合金溶射において、部分的な腐食が確認できる事に関しては、沖縄地区の海浜環境で暴露された鋼材に動力工具処理による素地調整を行ったことから、塩分の除去が不十分であり、残存している塩分の影響が原因であると推定される。塩分環境で劣化した塗装、めっき、金属溶射および耐候性鋼橋を金属溶射(擬合金)で補修を行う

場合は、素地調整後の残留塩分の管理が重要な要素になると考えられる。

現状では、結論を得られるような現象が確認されているのは沖縄の暴露試験だけであるが、今後、各地の調査を継続し、金属溶射+封孔処理と金属溶射+塗装を併用した仕様の調査結果や、一般環境と腐食環境との差異、付着塩分量の耐久性への影響等を含め、金属溶射の環境別耐久性データの蓄積と維持管理方法の確立に繋がるように、調査を継続する予定である。

## 謝 辞

本検討を実施するにあたり、御協力頂きました独立行政法人土木研究所、中日本高速道路株式会社、内閣府沖縄総合事務局北部国道事務所、秋田県、日本溶射工業会、防食溶射協同組合、MS工法協議会の関係各位に謝意を表します。