

# 報告 アルミニウム系流電陽極パネル方式電気防食工法の鉄道橋への適用試験における防食効果と温度変化の影響

布田 仁美\*1・篠田 吉央\*2・大谷 俊介\*3・松田 芳範\*4

**要旨:** コンクリート構造物における電気防食工法は、塩害劣化の補修対策として有効であるといわれており、その電気防食工法のうち、直流電源装置や通電調整などのメンテナンスが軽減できる流電陽極方式が注目されている。また、その効果を定期的かつ継続的に観察することは評価するにあたって重要な項目である。本報は、ある鉄道橋へ適用したアルミニウム系流電陽極パネル方式電気防食工法における防食効果と、季節による温度変化が鉄筋電位に及ぼす影響を調査したので報告する。

**キーワード:** 塩害, 鉄筋腐食, 電気防食, 維持管理

## 1. はじめに

これまでコンクリート構造物は維持管理が不要と言われていたが、コンクリート構造物においても適切な管理が行われないと破壊に至るような損傷を生じる場合がある。劣化損傷事例の中でも塩害はコンクリート内部にある鋼材が腐食し、かぶりコンクリートにひび割れが生じて剥離・剥落といった事象が発生するほか鋼材断面の減少によって構造物の耐力を低下させることがある。特に、日本海沿岸は冬季の厳しい季節風により海からの飛来塩分の影響が大きく、コンクリート中の含有塩分量が増加する傾向にある。そこで、コンクリート中の含有塩分量に関わらず鋼材に対して防食効果が得られる補修対策として電気防食工法が注目されている。この工法のうちでアルミニウム系流電陽極パネル方式（以下アルミパネルとする）がある。

本報はアルミパネルを部分防食として実構造物（鉄道橋）へ適用し、パネルの適正間隔調査、および防食部分と無防食部分の追跡調査を 2010 年 3 月に開始した。追跡調査は、6, 10, 12 月と季節ごとに行った。今後も継続する試験だが、防食効果および季節による温度変化が鉄筋電位に及ぼす影響に関して検討を行った結果を中間発表として報告する。

## 2. 試験工事概要

### 2.1 コンクリート鉄道橋

対象としたコンクリート鉄道橋は、日本海の海沿いに位置する鉄道 RC 橋梁である。日本海沿岸から 20m 程度に位置し、周囲には飛来塩分をさそぎするような建設物はなく、海風が橋桁の下部を吹き抜けるような環境におかれている。対象としたコンクリート鉄道橋の写真を図-1

1, 構造を表-1 に示す。



図-1 調査対象としたコンクリート鉄道橋

表-1 コンクリート鉄道橋の構造諸元

構造型	幅員[m]	桁長 [m]
RC 床版桁	4.80	6.59
RC 床版桁	4.80	6.59

### 2.2 防食範囲

電気防食施工前の事前調査で測定したコンクリート中鋼材の自然電位を ASTM 規準で評価した結果から防食対象範囲を選定した。ASTM 規準を表-2 に、鋼材の自然電位分布を図-2 に示す。この結果より、ASTM 規準において 90%の確率で腐食ありに該当する箇所は、海側で広範囲にわたり確認された。また、コンクリートの塩害によるひび割れや浮きも海側側面部分にのみあった。この結果から、海側半面にアルミパネルを設置する部分防食とした。

\*1 (株)ナカボーテック 事業統括部 RC 推進部 修士 (正会員)

\*2 (株)ナカボーテック 事業統括部 RC 推進部 (正会員)

\*3 (株)ナカボーテック 技術研究所 博士 (工) (正会員)

\*4 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 構造技術センター コンクリート構造グループ (正会員)

表-2 ASTM C 876 判定規準

凡例	規準 [mV vs. CSE]	判定
■	$-200 < E$	90%以上の確率で 腐食なし
■	$-350 < E \leq -200$	不確定
■	$E \leq -350$	90%以上の確率で 腐食あり

### 2.3 防食範囲

アルミパネルを設置した写真を図-3、桁断面図を図-4、配置図を図-5に示す。図-3、5に示したように海側半面を防食部、山側半面を無防食部とした。また、アルミパネルは構造物全体を覆ってしまうため、躯体の観察ができない。そこでアルミパネル間にスリットを設けて躯体を目視できるようにし、スリットを各種異なる間隔に設定して陽極間隔の影響を調査できるようにした。スリット部には鋼材電位の測定点のマーキングを行い、定期点検ごとに同じ位置で測定するものとし、図-2に示したような鋼材電位分布図を作成することにより経時変化を追跡調査した。測定は、電気防食のモニタリングとして一般的に使用される埋設式照合電極 (MnO<sub>2</sub>: 二酸化マンガン) と可搬式照合電極 (SSE: 飽和塩化銀) で行い、オン電位 (Eon)、インスタントオフ電位 (Eio)、



図-3 アルミパネル設置写真

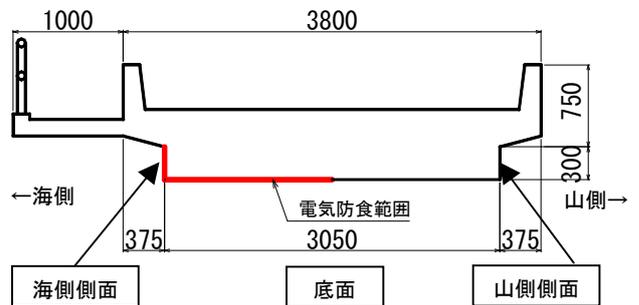


図-4 コンクリート鉄道橋断面図

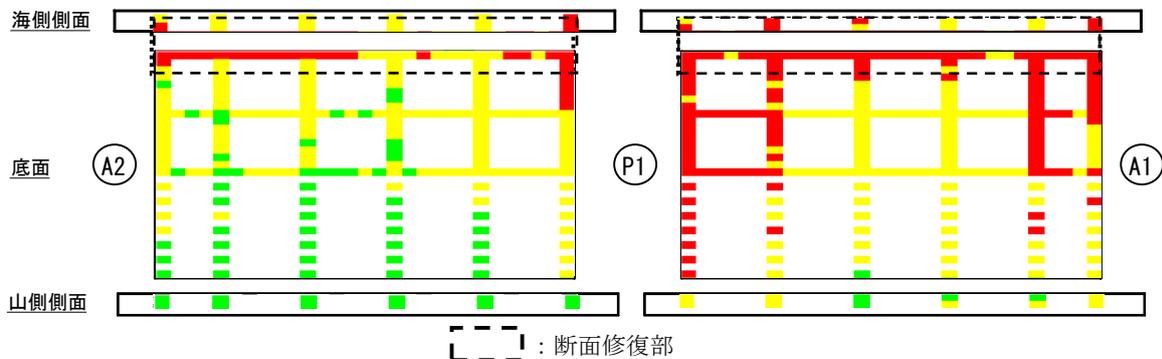
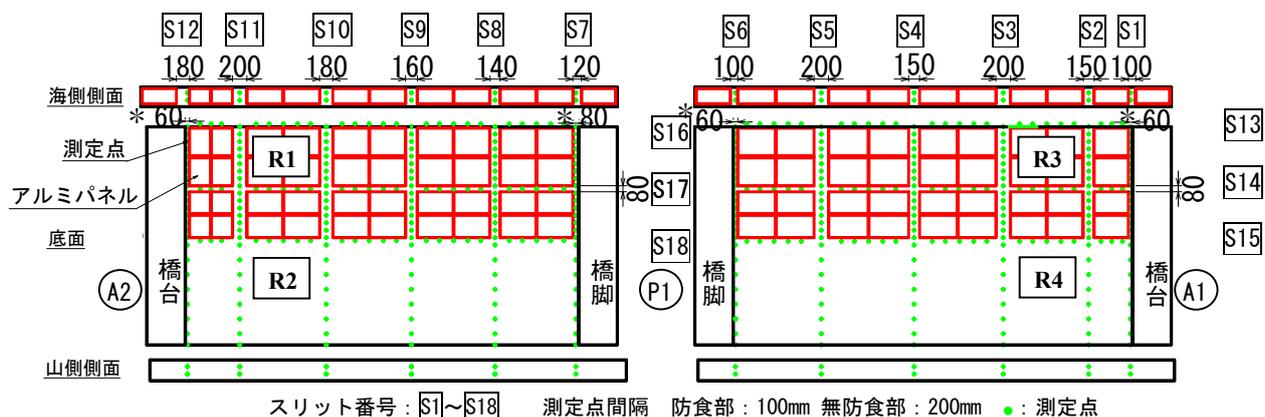


図-2 2009年10月における鋼材自然電位分布 (見上展開図)



スリット番号: S1~S18 測定点間隔 防食部: 100mm 無防食部: 200mm ●: 測定点

図-5 アルミパネル配置図 (見上展開図)

24 時間後のオフ電位 (Eof), 無防食部自然電位 (Ec) の他, 陽極発生電流 (ia) も調査した。埋設式照合電極は各径間につき 2 箇所設置した。A2-P1 は R1 (防食部), R2 (無防食部), P1-A1 は R3 (防食部), R4 (無防食部) とし, 防食部および無防食部双方の追跡調査を行えるようにした。また, 常時データロガーで Eon, Eof, Ec, ia の他温度も計測した。

表-3 埋設照合電極による復極量  $\Delta E$  [mV]

測定箇所		2010 年 測定月			
		3 月	6 月	10 月	12 月
A2-P1	R1	292	249	222	184
P1-A1	R3	238	196	202	184

### 3. 電気防食効果の追跡調査

#### 3.1 埋設照合電極における測定結果

埋設照合電極による防食効果の定期点検結果を表-3 に示す。コンクリート構造物の電気防食は, 復極量 (電位変化量) 100mV 以上<sup>1)</sup>を満足することが防食基準として定められている。復極量 ( $\Delta E$ ) は, 鉄筋オン電位 (Eon) から IR ドロップを補正したインスタントオフ電位 (Eio) と電気防食を一定期間 (約 24 時間) 停止させた後の鉄

筋オフ電位 (Eof) との差であり, 式 (1) で表される。

$$\Delta E = Eof - Eio \quad (1)$$

これらのことから, 本橋梁において適用したアルミペネル方式電気防食工法の電気防食効果は良好と判断できる。なお, R2, R4 については無防食部のため復極量は評価していない。

#### 3.2 鋼材電位における温度変化の影響

スリット部の測定間隔は, 防食部を 100mm 間隔, 無防食部を 200mm 間隔で測定を行った。測定点は図-5 に緑点で示している。電位測定は SSE を用いて Eon, Eio および Eof の測定を行い, 図-2 と同様に電位分布図を作成した。本報では主に Eof について報告する。測定値は温度補正して飽和硫酸銅照合電極 (CSE) に換算した。2010 年 3, 6, 10, 12 月に測定した計 4 回の Eof 分布図を図-6 に示す。分布図は代表例として P1-A1 とし, 色分けは表-2 の ASTM 規準とした。

##### (1) 防食部

3 月は電気防食の竣工直後の Eof で, 6, 10, 12 月と経過するにつれて貴化している。Eof の貴化は, 電気防食の適用により, 鋼材周囲のコンクリート環境が改善されるために起こる現象である。このことは, 2010 年度に本

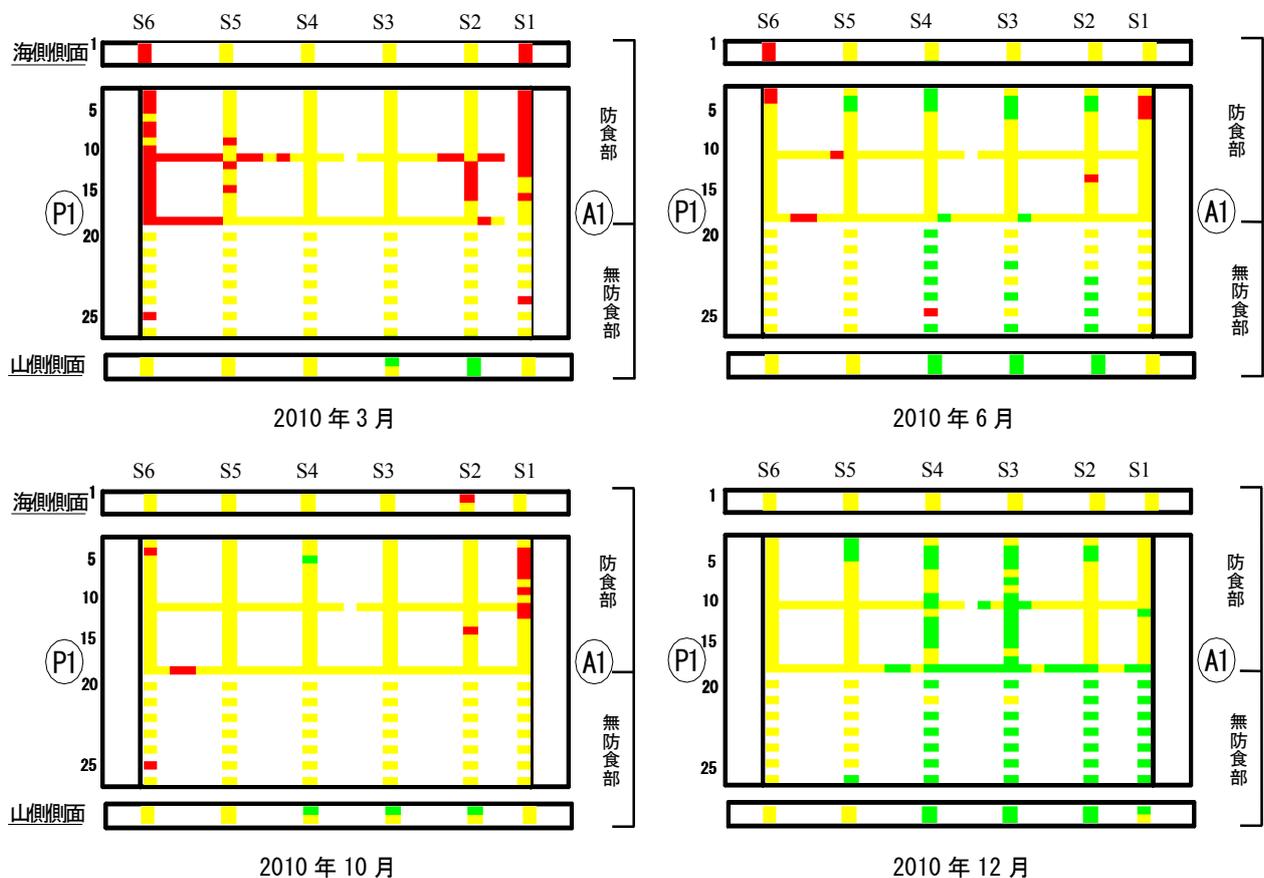


図-6 P1-A1 における Eof の経時変化 (見上展開図)

スリット番号 : S1~S6 横断方向の測定点番号 : 1~28

表-4 無防食部における Eof の電位変化量平均 [mV]

項目	A2-P1	P1-A1	全体平均
①	-1	26	13
②	15	30	22

①: 2009年10月と2010年10月の比較(同じ季節)

②: 2010年6月と2010年12月の比較(夏と冬)

学会で報告した。<sup>2)</sup>

ここでいう環境改善とは、電気防食を適用することにより水酸化物イオン(OH<sup>-</sup>)が生成され、鋼材表面付近がアルカリ性傾向になり、塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)により破壊された不動態皮膜が再度形成されて電位が貴化することである。電位が貴化するということは、鉄筋近傍が環境改善され腐食電位が貴になり、電位を卑化させるための電流量を小さく抑えることにつながり、その結果、陽極の寿命が長くなることが期待できる。

(2) 無防食部

図-6からは無防食部に関してもEcが貴化しているように見える。しかし、流電陽極であるアルミパネルは異種金属による電位差を起電力としている。したがって、起電力はアルミパネルと鋼材の自然電位の差となるため約0.6V程度でしかない。0.6Vの電圧でアルミパネルから約1.5mの山側端部まで防食電流が供給されているとは考えにくい。無防食部のEc貴化は別の要因であると考えられる。そこで図-2と図-6のデータを比較した。すなわち、同じ季節の電位変化と、夏冬の比較である。結果を表-4に示す。

無防食部の自然電位を平均するとその電位変化の平均は表-4に示したとおり、同じ季節の電位変化よりも冬季と夏季の電位変化の方が大きい結果になった。したがって、この自然電位の貴化は主に温度変化による影響と判断できる。供試体において冬季の電位が夏季の電位

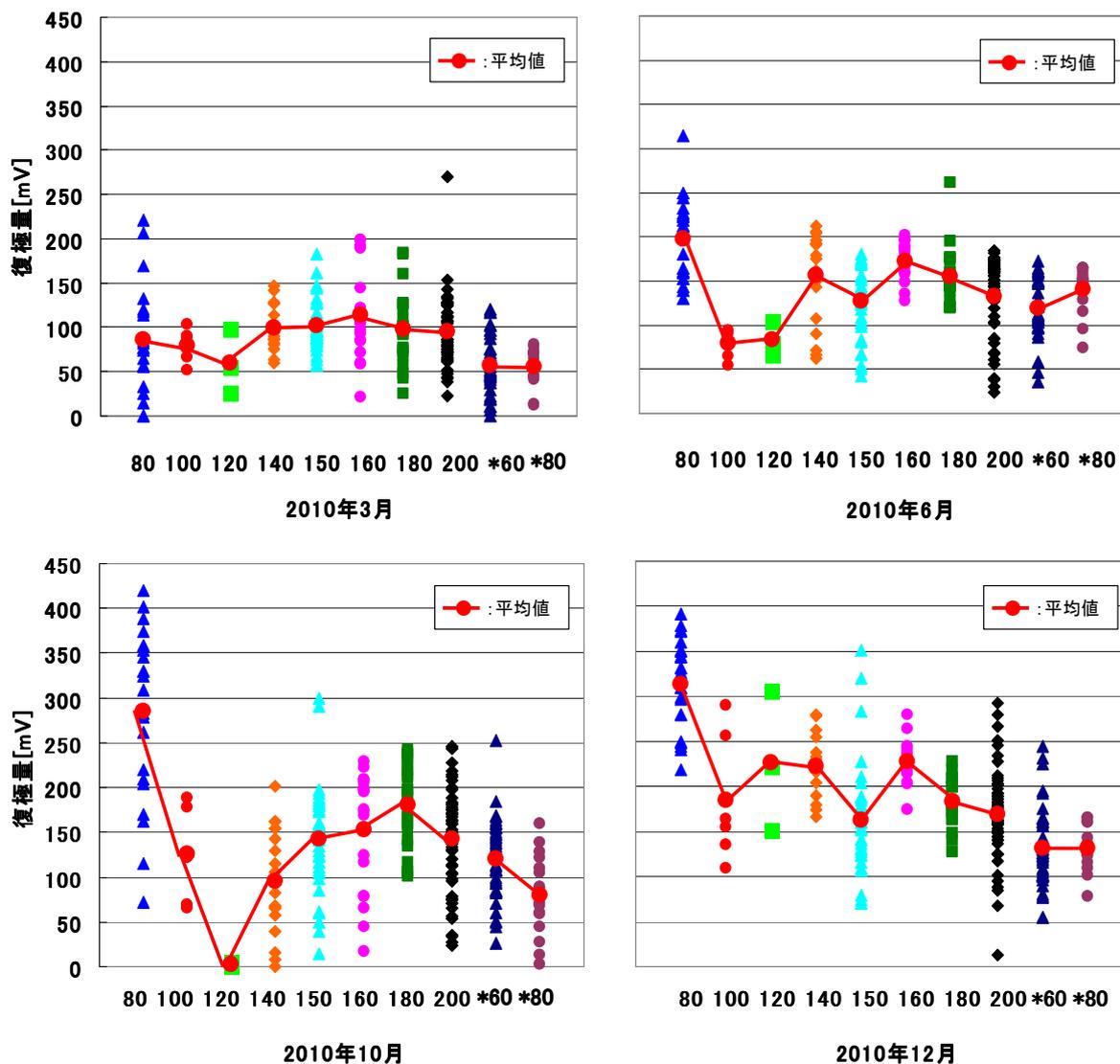


図-7 各陽極間隔における復極量

よりも貴な電位を示すことが報告されている。<sup>3)</sup> 本報告では、実構造物においても同じ現象を確認することができた。

### 3.3 鋼材電位における陽極間隔の影響

本試験ではアルミパネルの間隔を変化させて部分防食を行った。陽極間隔は図-5 に示したとおり、60, 80, 100, 120, 140, 150, 160, 180, 200mm の計9種類である。図-7 に各間隔における復極量を示す。ただし、\*60 および\*80 は図-5 に示した S1, S6, S7, S12 のよう

な構造物の端部を示した。構造物の端部における測定点は、測定点の片側のみ陽極を設置しているため分別した。復極量は、陽極間隔が狭い場合に増加し広い場合は減少すると予想される。当初は、陽極間隔の大小による影響はみられず、復極量も 100mV 前後であった。約 9 ヶ月後の 2010 年 12 月は復極量は大きくなり、陽極間隔が小さいほどその傾向も大きい。復極量が 100mV 未満の箇所もあったが、通電し続けることにより復極量は増加していた。外部電源方式と異なり、通電調整ができない流

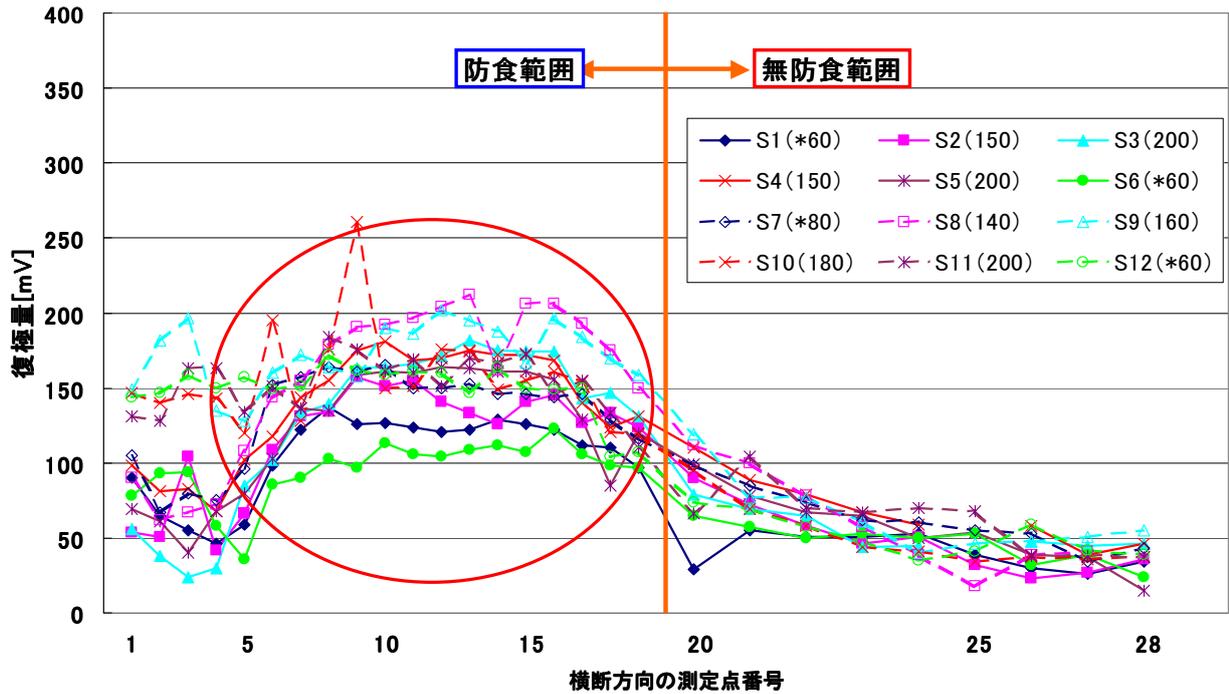


図-8 2010年6月 各陽極間隔における復極量の変化

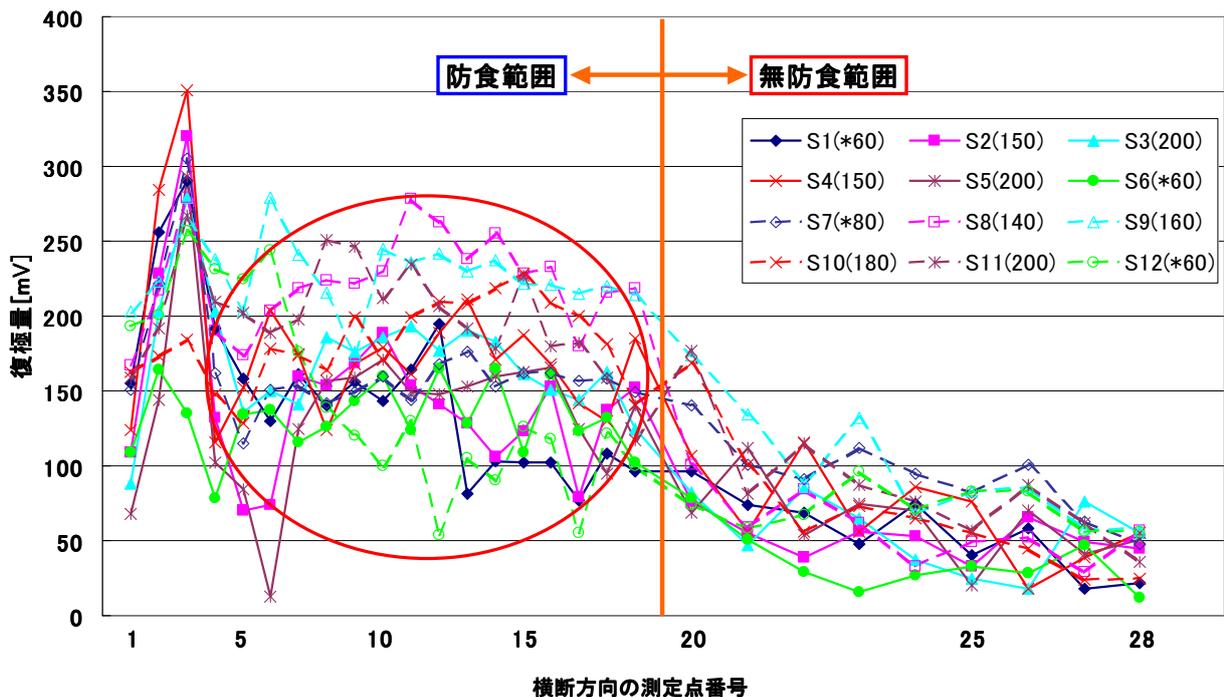


図-9 2010年12月 各陽極間隔における復極量の変化

電陽極方式では復極量が基準値を上回るまで時間がかかる場合がある。ただし、多くが 50mV 以上であることから、防食効果は全くないわけではなくある程度得られていると判断できる。今後、長期的に電気防食を適用することにより、100mV を満足することが期待できる。

次に、同じ陽極間隔の中で防食部から無防食部に至るまでにどのような変化があるかを調べるため、スリット別に同データをプロットしなおすと図-8, 9 のようになった。凡例の横断方向の測定点番号は図-6 に示した。図-8 は 2010 年 6 月の復極量を示している。このグラフの赤線で丸く囲った範囲内を見ると、スリット間隔の影響は少ないように見える。測定点番号 1~5 においては、鋼材の腐食が進行していた箇所だったため、復極量が他に比べて少なかったと推測される。

図-9 は 2010 年 12 月の復極量を示している。このグラフの赤線で丸く囲った範囲内を見ると、構造物の端部にあたる S1, S6 が中間部の S2 等よりも復極量が大きくなるなど、陽極間隔の影響があまり表れていない。桁側面に関しては復極量が非常に大きくなっている箇所が目立つが、桁側面をはじめ全体的に増加していた。冬季の電位が夏季よりも貴傾向を示すことは 3.2 で述べたが、本橋のような実構造物でも電位の季節変動が確認された。季節変動の影響が大きいため、陽極間隔による影響は打ち消されている可能性がある。

#### 4. まとめ

- (1) 本橋において電気防食効果は良好であることが確認された。
- (2) 鋼材電位における温度変化の影響は、一般的に言われているように冬季は夏季よりも電位が貴になる、ということが本橋においても確認された。
- (3) アルミパネルの陽極間隔の影響は、現時点では、初期（夏場）は陽極間隔の影響が出たが、冬場はなくなった。季節変動なのか電気防食の影響なのか判断は困難である。

今後は追跡調査を継続するとともに、電気防食設計および維持管理について本知見を活かせる様な検討をしていきたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 宮川豊章ほか：電気化学的防食工法設計施工指針（案）コンクリートライブラリー107，土木学会，2001
- 2) 布田仁美，篠田吉央，松田芳範：コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.1, pp.1037-1042, 2010
- 3) 独立行政法人土木研究所：コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書，2007