

塩害を受けた鉄筋コンクリート構造物への  
間欠通電方式による電気防食工法の適用に関する研究

三村 典正



## <目次>

第1章 序論.....	1
1.1 本研究の背景.....	1
1.2 電気防食の現状と課題.....	3
1.3 研究の目的.....	4
1.4 本論文の構成.....	4
【参考文献】.....	5
第2章 既往の研究.....	6
2.1 塩害による鋼材腐食.....	6
2.2 鉄筋コンクリート構造物の電気防食.....	8
2.2.1 鉄筋コンクリート構造物の電気防食の原理.....	8
2.2.2 鉄筋コンクリート構造物の電気防食の防食効果判定基準.....	10
2.2.3 鉄筋コンクリート構造物の電気防食工法の種類.....	11
2.2.4 鉄筋コンクリート構造物の電気防食工法の課題.....	12
2.3 鉄筋コンクリート構造物の電気防食時の電流供給方法.....	14
2.3.1 電気防食時の電流供給方式.....	14
2.3.2 外部電源方式の電流制御方式.....	15
2.3.3 電気防食時の電力供給源.....	16
2.3.4 間欠通電による電気防食.....	19
2.4 本研究で検討する課題.....	21
【参考文献】.....	22
第3章 間欠通電方式による電気防食工法の構造物への適用に関する検討.....	26
3.1 間欠通電方式による電気防食時の制御方法の検討.....	26
3.1.1 はじめに.....	26
3.1.2 ソーラーパネルの制御システムの検討.....	26
3.1.3 実験概要.....	30
3.1.4 実験結果.....	32
3.1.5 本節のまとめ.....	43
3.2 室内環境下での間欠通電方式による鋼材腐食抑制効果の検討 (5℃, 20℃, 35℃環境下).....	44
3.2.1 はじめに.....	44
3.2.2 実験方法.....	45
3.2.3 実験結果.....	50
3.2.4 本節のまとめ.....	71
3.3 通電調整時期が防食効果に及ぼす影響に関する検討.....	72
3.3.1 はじめに.....	72
3.3.2 実験概要.....	73
3.3.3 実験結果.....	75

3.3.4	本節のまとめ	86
3.4	電気防食施工箇所への水掛りによる影響に関する検討	88
3.4.1	はじめに	88
3.4.2	実験概要	89
3.4.3	実験結果	90
3.4.4	本節のまとめ	92
3.5	陽極配置が防食効果に与える影響に関するFEM解析による検討	93
3.5.1	はじめに	93
3.5.2	大型供試体と実験概要	93
3.5.3	大型供試体の実験結果	95
3.5.4	大型供試体の数値解析結果	97
3.5.4.1	解析モデル	97
3.5.4.2	境界条件	97
3.5.4.3	数値解析の結果	98
3.5.5	小型供試体の数値解析結果	100
3.5.5.1	解析モデルと境界条件	100
3.5.5.2	解析結果	100
3.5.6	本節のまとめ	101
3.6	本章のまとめ	102
	【参考文献】	107
第4章	間欠通電方式による電気防食を適用した実構造物の鋼材腐食抑制効果	109
4.1	はじめに	109
4.2	試験施工の概要	109
4.2.1	陽極の概要	109
4.2.2	電流供給源の概要	110
4.2.3	施工箇所の概要	110
4.2.4	調査項目	113
4.3	現場調査結果	113
4.3.1	道路橋の施工結果	113
4.3.1.1	常時計測結果	113
4.3.1.2	間欠通電箇所の通電時間	117
4.3.1.3	復極試験結果	119
4.3.1.4	カソード分極試験結果	122
4.3.1.5	道路橋調査結果のまとめ	123
4.3.2	栈橋の施工結果	124
4.3.2.1	常時計測結果	124
4.3.2.2	暴露期間中の通電時間	132
4.3.2.3	復極試験結果	133



4.3.2.4	カソード分極試験結果 .....	136
4.3.2.5	栈橋調査結果のまとめ .....	138
4.4	現場調査結果とFEM解析結果の比較検討 .....	140
4.4.1	現場調査箇所の概要 .....	140
4.4.2	現場調査結果とFEM解析結果の比較 .....	141
4.5	本章のまとめ .....	143
	【参考文献】 .....	145
第5章	結論 .....	146
5.1	本研究で得られた結論 .....	146
5.2	間欠通電方式による電気防食工法の適用に関するシナリオデザイン .....	153
5.2.1	適用範囲 .....	153
5.2.2	適用方法 .....	155
5.2.3	適用後の維持管理 .....	156
5.3	今後の展望 .....	157
	【参考文献】 .....	158



# 第1章 序論

## 1.1 本研究の背景

かつてコンクリート構造物はメンテナンスフリーの半永久的なものと考えられてきた。そのため、現在でも、国土交通省により毎年発表されている道路統計年報における橋梁現況の推移において、鋼橋、鉄筋コンクリート橋、プレストレストコンクリート橋、石橋およびこれらの混合橋に対し、「永久橋」という言葉が使用されている<sup>1)</sup>。一方、資産としての構造物の耐用年数は、内閣府が発行している日本の社会資本2012によると、鉄筋コンクリート構造物は60年、橋梁は鉄筋コンクリート橋の60年と鋼橋の45年を単純平均した52.5年とされている<sup>2)</sup>。ただし、これはあくまでも資産としての耐用年数であり、適切な設計施工で、適時適切な維持管理が実施されているコンクリート構造物は遙かにそれらを超える耐用年数を有しており、現在も多数供用されている。

しかし、近年、1960年以降の高度経済成長期に東京を中心とする日本の大改造時に緊急的に整備された箇所や、海岸部等の立地環境の厳しい場所に建設された構造物では老朽化による変状が顕在化してきている。これらのコンクリート構造物の劣化状況を踏まえ、近年、財務省の示す資産としての構造物の耐用年数：約50年を妥当とする意見もある<sup>3)</sup>。

構造物の耐用年数を50年とした場合、2010年の50年前がちょうど高度経済成長期の1960年に相当する。図1.1に示すように我が国には橋梁(橋長2m以上)を約70万橋保有しており、建設後50年の高齢化を迎える橋梁は2013年時点では約18%であったものが、2023年には約43%、2033年には約67%となり、急激に増加することが見込まれている<sup>4)</sup>。国土交通省の社会資本整備審議会の道路分科会からも、「適切な投資と修繕を行わなければ、近い将来大きな負担が生じる」と2002年から繰り返し警告されてきた。しかし、警告は軽視され、2009年に「コンクリートから人へ」の名のもとに、2010年の公共事業費の予算は2割削減された。

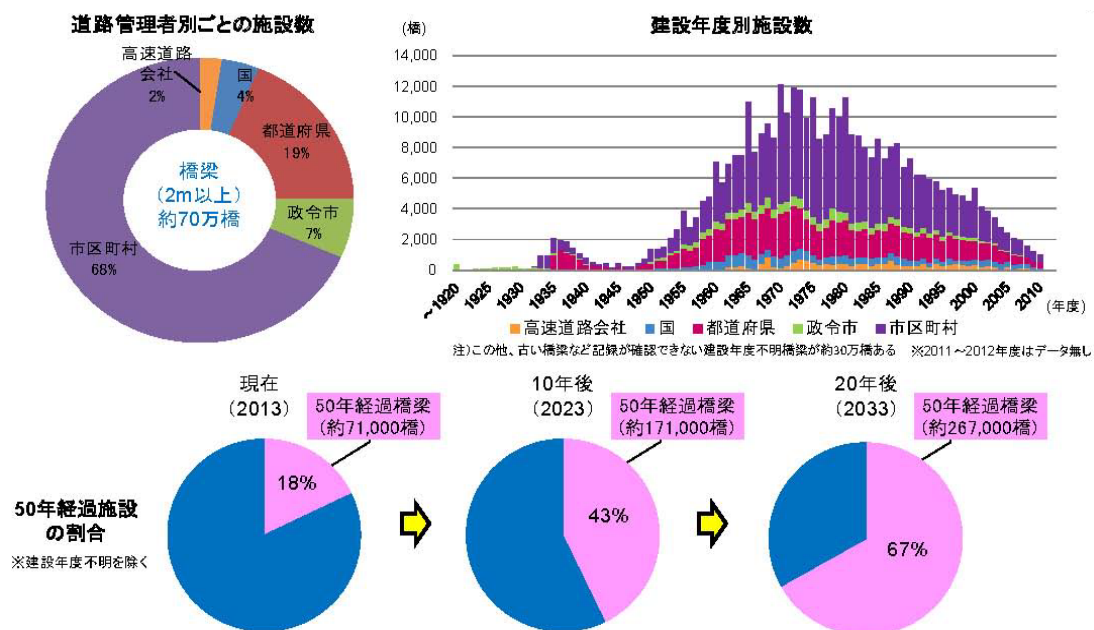


図1.1 橋梁の年度別施設数とその割合（橋長2m以上）<sup>5)</sup>

その後、社会資本のメンテナンスに対する考え方を本格的に見直す最後の警告と言われる「笹子トンネル天井板落下事故」が2012年12月の供用中のトンネルで発生した。

そこで、道路の適切な管理を確実に実施するために、2013年6月に道路法が改正され、予防保全の観点も踏まえて道路を点検することが明確化された。さらに、2013年11月には、産学官一体となり社会資本の安全性・信頼性を確保するためのメンテナンスサイクルを本格的に回すために、「インフラ長寿命化基本計画」<sup>5)</sup>が策定され、2014年4月には国土交通省の社会資本整備審議会の道路分科会から、図1.2に示す内容の「道路の老朽化対策の本格実施に関する提言」<sup>6)</sup>が発表された。

しかし、図1.3の日本の人口構造の変化<sup>7)</sup>および、図1.4の公共事業関係費（一般会計）の推移<sup>8)</sup>に示すように、人口減少・少子高齢化に伴い労働者人口は右肩下がりの状態であり、予算についても2000年頃のピーク時の半分以下である。つまり、今後、老朽化を迎える構造物の量が飛躍的に増加するのに反し、人材や財政は減少するため、人手が掛からない効率的な方法で維持管理していく必要がある。そのような背景の下、インフラは定期的な点検・診断により維持管理され、修繕や更新の時期を適切に判断し、利用者や第三者の安全と安心を確保しながら利用し続けられるようにする必要がある。そのためには、修繕を必要とする構造物への補修対策についても、維持管理が容易かつ確実にその効果を発揮する構造物が求められている。

## 最後の警告－今すぐ本格的なメンテナンスに舵を切れ

### 静かに危機は進行している

高度成長期に一齐に建設された道路ストックが高齢化し、一齐に修繕や作り直しが発生する問題について、平成14年以降、当審議会は「今後適切な投資を行い修繕を行わなければ、近い将来大きな負担が生じる」と繰り返し警告してきた。

しかし、デフレが進行する社会情勢や財政事情を反映して、その後の社会の動きはこの警告に逆行するものとなっている。即ち、平成17年の道路関係四公団民営化に際しては高速道路の管理費が約30%削減され、平成21年の事業仕分けでは直轄国道の維持管理費を10～20%削減することが結論とされた。そして、社会全体がインフラのメンテナンスに関心を示さないうまま、時間が過ぎていった。国民も、管理責任のある地方自治体の長も、まだ橋はずっとこのままであると思っているのだろうか。

この間にも、静かに危機は進行している。道路構造物の老朽化は進行を続け、日本の橋梁の70%を占める市町村が管理する橋梁では、通行止めや車両重量等の通行規制が約2,000箇所に及び、その箇所数はこの5年間で2倍と増加し続けている。地方自治体の技術者の削減とあいまって点検すらままならないところも増えている。

今や、危機のレベルは高進し、危険水域に達している。ある日突然、橋が落ち、犠牲者が発生し、経済社会が大きな打撃を受ける...、そのような事態はいつ起こっても不思議ではないのである。我々は再度、より厳しい言い方で申し上げたい。「今すぐ本格的なメンテナンスに舵を切れなければ、近い将来、橋梁の崩落など人命や社会システムに関わる致命的な事態を招くであろう」と。

### すでに警鐘は鳴らされている

平成24年12月、中央自動車道笹子トンネル上り線で天井板落下事故が発生、9人の尊い命が犠牲となり、長期にわたって通行止めとなった。老朽化時代が本格的に到来したことを告げる出来事である。この事故が発した警鐘に耳を傾けなければならない。また昨今、道路以外の分野において、予算だけでなく、メンテナンスの組織・体制・技術力・企業風土など根源的な部分の変革が求められる事象が出現している。これらのことを明日の自らの地域に起こりうる危機として捉える英知が必要である。

2005年8月、米国ニューオーリンズを巨大ハリケーン「カトリーナ」が襲い、甚大な被害の様子が世界に報道された。実はこの災害は早くから想定されていた。ニューオーリンズの巨大ハリケーンによる危険性は、何年も前から専門家によって政府に警告され、前年にも連邦緊急事態管理庁（FEMA）の災害研究で、その危険性は明確に指摘されていたのである。にもかかわらず投資は実行されず、死者1330人、被災世帯250万という巨大な被害を出している。「来るかもしれないし、すぐには来ないかもしれない」という不確実な状況の中で、現在の資源を将来の安全に投資する決断ができなかったこの例を反面教師としなければならない。

橋やトンネルも「壊れるかもしれないし、すぐには壊れないかもしれない」という感覚があるのではないだろうか。地方公共団体の長や行政も「まさか自分の任期中は...」という感覚はないだろうか。しかし、私たちは東日本大震災で経験したではないか。千年に一度だろうが、可能性のあることは必ず起こること。笹子トンネル事故で、すでに警鐘は鳴らされているのだ。

### 行動を起こす最後の機会は今

道路先進国の米国にはもう一つ学ぶべき教訓がある。1920年代から幹線道路網を整備した米国は、1980年代に入ると各地で橋や道路が壊れ使用不能になる「荒廃するアメリカ」といわれる事態に直面した。インフラ予算を削減し続けた結果である。連邦政府はその後急ピッチで予算を増やし改善に努めている。それらの改善された社会インフラは、その後の米国の発展を支え続けている。

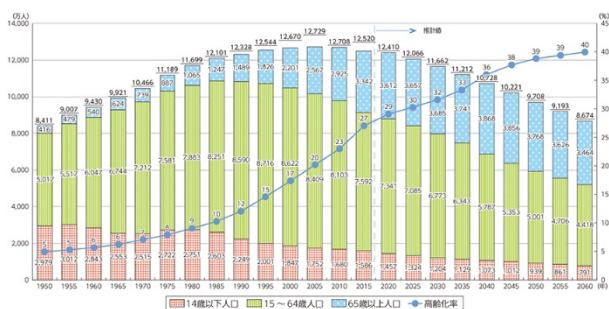
笹子トンネル事故は、今が国土を維持し、国民の生活基盤を守るために行動を起こす最後の機会であると警鐘を鳴らしている。削減が続く予算と技術者の減少が限界点を越えたのちに、一齐に危機が表面化すればもはや対応は不可能となる。日本社会が置かれている状況は、1980年代の米国同様、危機が危険に、危険が崩壊に発展しかねないレベルまで達している。「笹子の警鐘」を確かな教訓とし、「荒廃するニッポン」が始まる前に、一刻も早く本格的なメンテナンス体制を構築しなければならない。

そのために国は、「道路管理者に対して厳しく点検を義務化」し、「産学官の予算・人材・技術のリソースをすべて投入する総力戦の体制を構築」し、「政治、報道機関、世論の理解と支持を得る努力」を実行するよう提言する。

いつの時代も軌道修正は簡単ではない。しかし、科学的知見に基づくこの提言の真意が、この国をリードする政治、マスコミ、経済界に届かず「危機感を共有」できなければ、国民の利益は確実に失われる。その責はすべての関係者が負わなければならない。

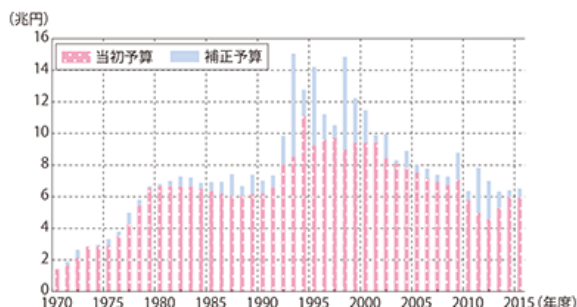
社会資本整備審議会 道路分科会 建議「道路の老朽化対策の本格実施に関する提言」（平成26年4月14日）

図 1.2 道路の老朽化対策の本格実施に関する提言<sup>6)</sup>



2015年までは総務省「国勢調査」、2020年以降は国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口(H24.1月推計)」より。

図 1.3 日本の人口構造の変化



(注) 東日本大震災の復旧・復興にかかる経費は、2012年以降においては東日本大震災特別会計において計上されており、公共事業関係費には含まれていない。  
資料) 財務省「財政統計」より国土交通省作成

図 1.4. 公共事業関係費（一般会計）の推移

## 1.2 電気防食の現状と課題

鉄筋コンクリート構造物の電気防食は、塩化物イオン等の劣化因子の有無にかかわらず鉄筋を腐食から抑制し、構造物の長寿命化対策として非常に有効な手段として注目されている。電気防食では、コンクリート表面側に設置した陽極から電解質であるコンクリートを介して鋼材表面へ防食電流を供給することで、鋼材表面で電気化学反応を行う。そして、腐食電流が発生しないように鉄筋の電位をマイナス方向へ変化させることで電位差を無くし、鉄筋の腐食を抑制する。

防食電流の供給方式には、流電陽極方式と外部電方式がある。流電陽極方式は、電源を使用しないため維持管理が容易である反面、防食電流の調整ができず、陽極が消耗するという課題がある。一方、外部電源方式は鉄筋の腐食状況や環境状況に応じて防食電流の調整が可能であるが、商用電源の確保や落雷・誘導雷への対策等の維持管理が必要である。近年、電力事情や環境対策から再生エネルギーが注目されており、中でも、蓄電池を用いた独立型太陽光発電システムが注目されている。また、将来の電気自動車等の需要から、蓄電池は日々改良・開発が実施されている。しかし、ソーラーパネルと比較すると、現在のところ、蓄電池は低寿命・高コスト・低耐久性であるため、維持管理面に課題がある<sup>9)</sup>。電源供給方式をソーラーパネルのみとすると高寿命・低コスト・高耐久性となり維持管理面が容易となるが、夜間不通電状態の間欠通電方式となり通常の常時通電方式とは異なるため、その防食効果の検討が必要となる。

ところで、コンクリートは比較的抵抗が高く、ひび割れがなければ鉄筋への酸素透過性は気中よりも低く、コンクリート内の鉄筋は一度防食電流を供給し分極すると、復極するまでに時間を要し、その間防食効果を維持すると考えられる。既存の研究においても、塩水半浸漬状態で実施した電気防食によって、鉄筋表面の環境改善が図られ、間欠通電でも中長期的に防食効果が得られたという報告がある<sup>10),11),12)</sup>。

以上より、間欠通電方式による電気防食工法の有効性を確認し、電気防食時の防食電流の供給方式をソーラーパネルのみの間欠通電方式とすることは、高寿命・低コスト・高耐久性となり維持管理面で優れる。よって、実構造物へ間欠通電方式の電気防食工法を適用できた場合、インフラの長寿命化に貢献できる可能性が高い。ただし、鉄筋コンクリート構造物の電気防食では、水溶液等の均一な層でない不均一なコンクリートを介して通電する必要があり、また、コンクリートの電気抵抗は含水率や温度に応じて変化するため、間欠通電方式による電気防食工法を適用するには検討が



必要である。

### 1.3 研究の目的

本研究では、コンクリート構造物の劣化現象である塩害に対し、有効な補修対策である電気防食工法に関し、防食回路の耐久性の向上や維持管理の向上、再生エネルギーの利用などの観点から、防食電流の供給方法に関する検討を行った。防食電流の供給方法にはソーラーパネルを選定し、防食回路の耐久性の向上や維持管理の向上を考慮し、蓄電池を使用しないソーラーパネルのみから防食電流を通电するシステムで検討することとした。ただし、ソーラーパネルのみを電流供給源とした場合、常時通电している通常の電気防食と異なり、夜間は無通电状態となり、日中のみ通电する間欠通电方式となる。そこで、そのような間欠通电方式でも電気防食による鋼材の腐食抑制効果が確実に発揮できるシステムとするための検討を行った。

本研究では、間欠通电方式による電気防食工法の防食効果を確実に発揮できるシステムを見極め、適用条件や適用範囲を把握し、実構造物へ適用するための基準の確立を主な目的とした。

### 1.4 本論文の構成

本論文は、5章から構成される。

●第1章「序論」では、本論文の背景と目的について述べた。

●第2章「既往の研究」では、本論文に関連する研究事例について整理し、本論文で検討する課題と方向性を述べた。

●第3章「間欠通电方式による電気防食の鋼材腐食抑制効果」では、ソーラーパネルのみを電流供給源とする電気防食工法が防食効果を確実に発揮できるシステムとするため、制御システムの構築やシステムの動作状況、防食効果、適用条件、適用範囲などの検討を行った。また、実構造物へシステムを適用するため、陽極の配置方法による防食電流の通电状況と鋼材電位の変化に関し、FEM解析によるシミュレーションによって検討を行った。また、解析値の検証は、実際の試験結果との比較により検討した。

●第4章「間欠通电方式による電気防食を適用した実構造物での鋼材腐食抑制効果」では、塩害環境下の道路橋や飛沫帯の栈橋にて試験施工を行い、第3章で得られた検討結果に関する検証を行った。また、飛沫帯の栈橋では、FEM解析によりシミュレーションした解析値と実施に得られた計測値との比較により、解析値の検証を行った。

●第5章「結論」では、第3章と第4章で得られた検討結果に基づき、実構造物への適用範囲や適用方法の他、適用後の維持管理について提案を行い、本研究のまとめとした。

以上、本論文の構成をフローチャートとして図1.5に示す。

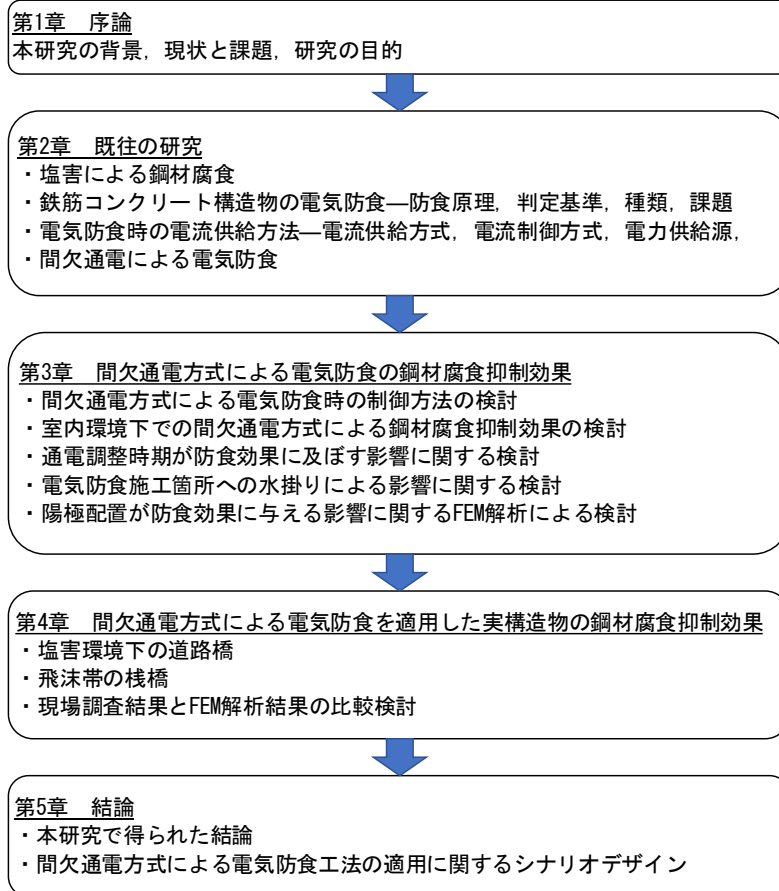


図 1.5 本論文の構成

### 【参考文献】

- 1) 国土交通省：道路統計年報2016 橋梁の現況，表39 橋梁現況の推移
- 2) 内閣府政策統括官(経済社会システム担当)：日本の社会資本2012，pp.115，2012.11
- 3) 藤野陽三：土木構造物の寿命 橋を中心に，日本建築学会 総合論文誌，No.9，pp19-22，2011.1
- 4) 国土交通省：道路構造物の現状(道路)，H25.4道路局集計資料
- 5) インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議：インフラ長寿命化計画，2014. 11
- 6) 社会資本整備審議会 道路分科会：道路の老朽化対策の本格実施に関する提言，2014.4
- 7) 総務省：情報通信白書 人口減少社会の到来，2016
- 8) 国土交通省：国土交通白書 経済動向とインフラ整備，2015
- 9) 経済産業省 蓄電池戦略プロジェクトチーム：蓄電池戦略，2012.7
- 10) 望月紀保：コンクリート中鉄筋のカソード防食について，材料と環境，59，121-128，2010
- 11) G.K.Glass, A.M.Hassanein, N.R.Buenfeld：Cathodic protection afforded by an intermittent current applied to reinforced concrete，Corrosion Science，43，1111-1131，2001
- 12) 大谷俊介，小林浩之，若林徹，望月紀保：鋼材表面の環境改善を考慮した電気防食試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，2012

## 第2章 既往の研究

### 2.1 塩害による鋼材腐食

鉄筋コンクリート中の鋼材は、pH12以上のアルカリ環境下にあるため、鋼材表面には緻密な酸化皮膜である不動態皮膜が形成され、さらに鋼材が酸化し、腐食すること抑制されている<sup>1)~5)</sup>。また、コンクリートの弱点である引張強さを鋼材が補っており、鉄筋コンクリートはお互いの長所を活かした非常に相性の良い複合材料である。しかし、コンクリート自体も骨材、セメント等から構成された複合材料であるため、鉄筋コンクリート構造物の劣化形態は複雑かつ多様である。鉄筋コンクリート構造物の劣化は、一般にコンクリート自身の劣化とコンクリート中の鋼材腐食に分類される<sup>6),7)</sup>。塩害は、コンクリート中の鋼材腐食を引き起こす劣化機構の一つである。鉄筋コンクリート構造物の塩害とは、コンクリート中の塩化物イオンの存在により、鋼材の腐食が進行し、腐食生成物の体積膨張によりコンクリートのひび割れや剥離・剥落、あるいは鋼材に断面減少を生じ、構造物に損傷を与える現象である<sup>8)</sup>。

図2.1に示すように<sup>9)</sup>、コンクリート中に塩化物イオンが浸透あるいは存在すると、塩化物イオンの影響で鋼材表面の不動態皮膜が破壊され、鋼材は腐食し、エネルギー的に安定なさびの状態に移行していく。三澤らがまとめた図2.2の大気腐食さびの生成過程に示すように、自然界では、鉄は酸化鉄として存在し、精錬工場にてエネルギーを与えて強制的に還元して使用しているものが鋼材であり、鋼材の安定な状態とは、自然界に存在する酸化鉄である錆の状態となる<sup>10),11)</sup>。

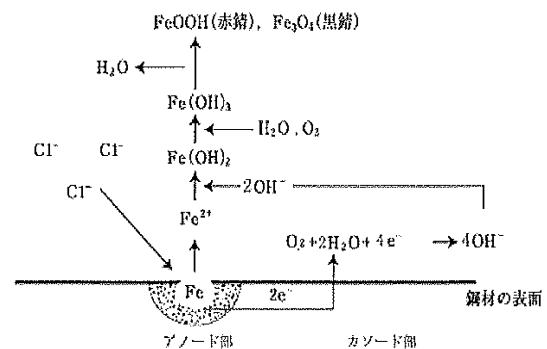


図 2.1 コンクリート中の鋼材腐食

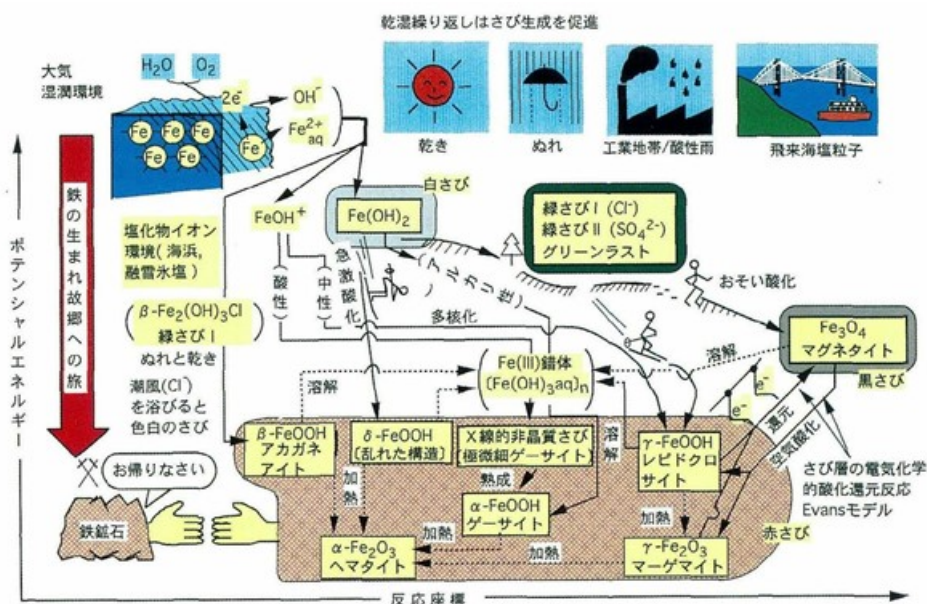
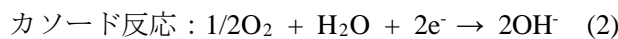
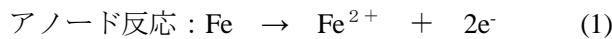


図2.2 大気腐食さび（鉄酸化物）の生成過程系統図（MISAWAダイアグラム）



このように鉄は酸素や水と結びついた様々な酸化鉄の形態を取り、その酸化鉄は図2.2に示すように、それぞれエネルギー状態が異なる。よって、図2.1に示すように塩素イオンで不動態皮膜が破壊されたエネルギーの高い活性態にある鋼材の表面では、一般に、鉄がイオン化するアノード反応（酸化反応）と、健全な鉄の表面では酸素が還元するカソード反応（還元反応）とが、下記の反応式(1)と(2)で進行し、アノード部（相対的マイナスの電位）とカソード部（相対的にプラスの電位）で腐食電池が形成される。

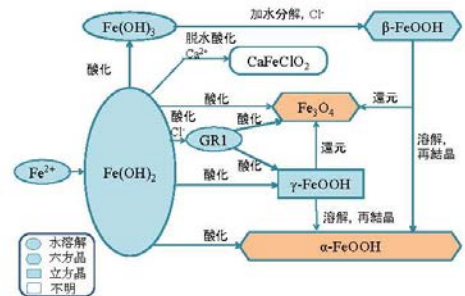


腐食電池が形成され、腐食が進行し、腐食生成物が生成すると、腐食生成物は元の鉄の状態より体積膨張しており、引張強度の小さいコンクリートにひび割れを生じさせる。ひび割れが生じると、水や酸素等の腐食因子が供給され、鋼材の腐食速度がさらに増加し、第三者被害につながるかぶりコンクリートの剥離や剥落を、はく落、あるいは、構造物の耐力の低下を生じさせる。

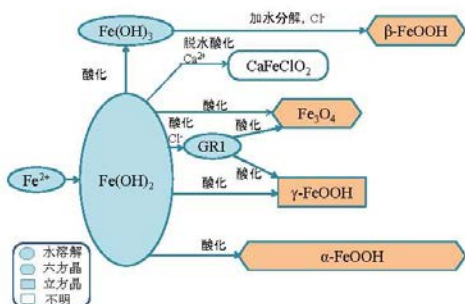
高谷らは<sup>12)</sup>、図2.3に示すように、コンクリート中における腐食生成物のプロセスを解明するとともに、表2.1に示すように各腐食生成物の体積膨張率の推定も行っており、腐食環境や腐食進行過程によって、腐食生成物が異なり、条件によって体積膨張率の大きいCaFeClO<sub>2</sub>が生成する可能性についても示唆している。また、腐食が進行し鋼材表面のpHが中性領域まで低下するとβ-FeOOHやγ-FeOOHが生成し、さらにpHが低下し鋼材表面に酸性環境が生じると、これらは還元されFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>に変化することが示された。つまり、β-FeOOHやγ-FeOOHの生成により、これらは水の存在下で鉄の酸化剤として、鉄の腐食つまり酸化反応をさらに進行させ、つまり、カソード反応を促進されることとなり、自然電位が貴化する可能性が示された。

なお、表2.1に示すようにβ-FeOOHやγ-FeOOHは、α-FeOOHより体積膨張率が大きく、密度が小さいことから、これらの錆層は多孔質でひび割れが多く、環境中の水分を容易に下地鋼にまで浸透することからも、鉄の腐食をさらに進行させる可能性がある<sup>13)</sup>。

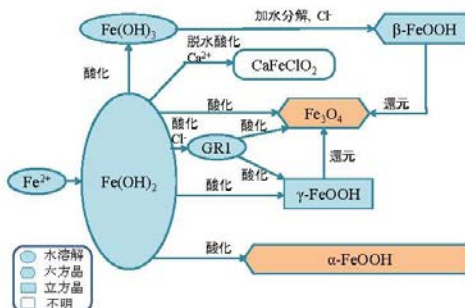
このような塩化物イオンによる不動態皮膜の破壊を



(a) アルカリ環境



(b) 中性環境



(c) 酸性環境

図 2.3 コンクリート中における腐食生成物の生成プロセス

表 2.1 各腐食生成物の体積膨張率

腐食生成物	密度(mg/cm <sup>3</sup> )	体積膨張倍率	
Goethite	α-FeOOH	4.3	2.9
Akaganeite	β-FeOOH	3.6	3.5
Lepidocrocite	γ-FeOOH	4.1	3.1
Magnetite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5.2	2.1
塩化酸化鉄(III)カルシウム	CaFeO <sub>2</sub> Cl	3.4	6.9

引き金とした塩害の補修工法について、現在各種工法が検討されているが、その代表として電気化学的に鋼材の腐食を抑制する電気防食工法がある。

## 2.2 鉄筋コンクリート構造物の電気防食

電気防食は、1824年にイギリスのSir Humphrey Davyが鉄あるいは亜鉛を接触させ銅を保護するために実施した船舶の流電陽極方式が端緒とされ、その後、1910年代に地下構造物に外部電源方式が適用されるなど、海水中や土中の鋼構造物への適用の歴史は古い<sup>14)~17)</sup>。コンクリート構造物への電気防食は土中でのPCパイプラインへの適用が1950年代後半より実施されている。一方、アメリカでは、1960年代中頃より融雪剤による道路橋のRC床版や駐車場建物の劣化が顕在化し、1973年にR.F.Stratfullがカリフォルニア州で本格的な電気防食工を適用された。それ以来、多くの試行錯誤を繰り返しながら、電気防食が鋼材の腐食防止の極めて有効な手段としてとして実施されている。日本では、1955年頃から電気防食が適用され、1981年にコンクリート構造物を対象とした電気防食の研究発表がなされ<sup>18)</sup>、1980年代後半からコンクリート構造物へ適用され始め、試行錯誤と検討の末、現在に至る。

### 2.2.1 鉄筋コンクリート構造物の電気防食の原理

電気防食法には図2.4の腐食域にある鋼材電位をプラス方向へ分極させて不動態域とするアノード防食法とマイナス方向へ分極させて不活性域とするカソード防食法の2種類に大別される。アノード防食法の適用はパルプ工場での炭素鋼製の攪拌槽や貯蔵槽等の適用例があるが所定範囲の電位で制御の必要があり特定の環境下に限られる。鉄筋コンクリートの鋼材腐食に用いられているのはカソード防食法である。カソード防食法を指して電気防食法と呼ぶことが一般的である。

電気防食の基本概念を図2.5および図2.6に示す。ともに鋼材腐食の内部分極曲線の概念図である。なお、図2.6はカソード反応の電流の向きを、アノード反応の逆方向としてあらわしたものである。鉄筋

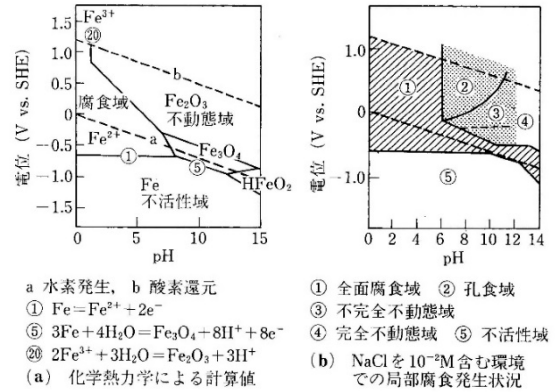


図 2.4 鉄の pH-電位の関係<sup>19)</sup>

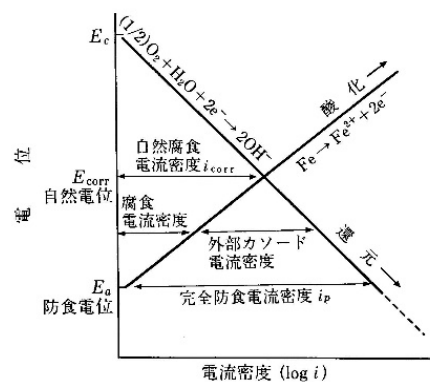


図 2.5 電気防食の概念図<sup>17)</sup>

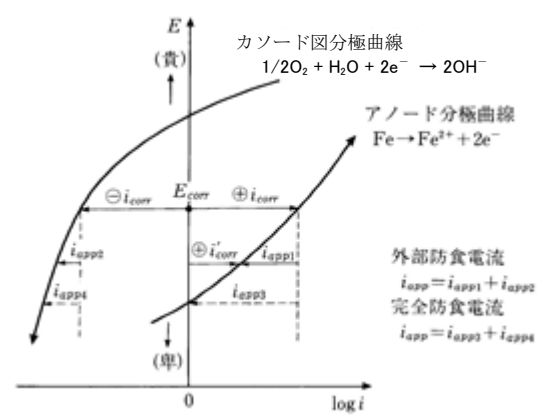


図 2.6 分極曲線と防食電流<sup>14)</sup>

コンクリート中の鋼材表面では、一般に、鉄が酸化してイオン化するアノード反応と水と酸素が反応し酸素が還元するカソード反応が同時に進行している。それらの反応が平衡状態となり、釣り合っている時の電位が図2.5の自然電位 ( $E_{corr}$ ) である。鉄筋コンクリート供試体に陽極からコンクリートを介して鋼材表面へ防食電流を通電する(電気防食を施す)と、鋼材表面での電気化学反応により鋼材表面に電子エネルギーが与えられる。防食電流により与えられた電子エネルギーは鋼材表面の電子エネルギーが低い箇所(鉄筋電位が高い箇所)から高くなっていく。

その結果、鉄筋電位が一様に低下する<sup>20),21)</sup>。防食電位 ( $E_a$ ) までマイナス方向へ下げると、図2.4の不活性域の電位となり、腐食電流密度がゼロとなる完全な防食が達成される。しかし、図2.7に示すように不活性域まで鋼材電位を下げなくても、鋼材電位をマイナスとすることで、鋼材表面の電位差が小さくなるため、腐食電流量が小さくなり、鉄筋の腐食を抑制できる。

図2.8は、鋼材をアノード分極させ、コンクリート中の鋼材の酸化反応と電位の関係を確認した一例である。不動態化している鋼材が浸透してきた塩化物イオンの影響で不動態皮膜が破壊され鋼材腐食が生じることを孔食ととらえ、図2.9に示すように孔食の有無にかかわらず、分極曲線がアノード分極後、一定の孔食停止電位(約-0.55V vs. 飽和Ag/AgCl)に集約することから、この孔食停止電位より鋼材電位をマイナスとすることで孔食は発生せず、孔食の進行も停止できるとしている<sup>22)</sup>。

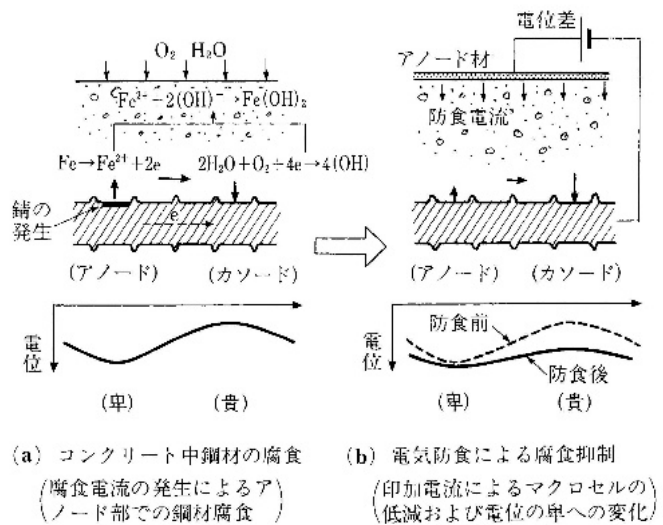


図 2.7 電気防食による腐食の抑制効果

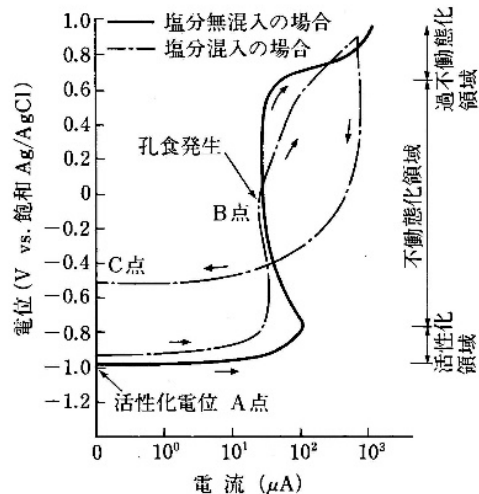


図 2.8 コンクリート中の鋼材のアノード分極曲線

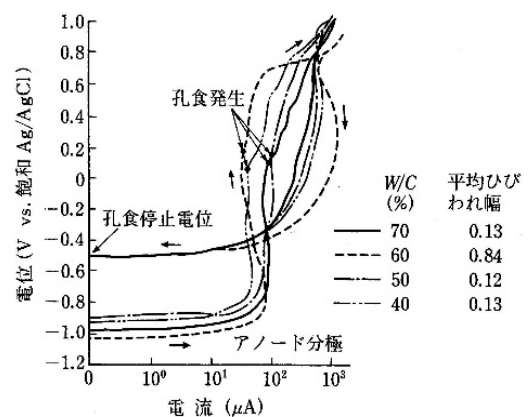


図 2.9 孔食停止電位の検討<sup>22)</sup>

## 2.2.2 鉄筋コンクリート構造物の電気防食の防食効果判定基準

鉄筋コンクリート構造物の電気防食法はカソード防食法であり、鋼材電位をマイナス方向へ変化させることで鋼材の腐食を抑制する。カソード防食が確立されている海水中や土壌中にある鋼構造物では、鋼材電位を不活性域とする防食電位を基準に定められており、通電時の鋼材電位を防食電位よりマイナスとすることで管理されている。しかし、コンクリートや環境等が不均一であるため、コンクリート中の鋼材を、防食電位で管理しようとするとき大きな電流密度が必要となり、陽極システムの耐用年数の減少の他、コンクリート自体への悪影響を及ぼす可能性がある。つまり、コンクリート中の鋼材は、防食電位に環境依存性があるため、絶対値である防食電位で管理することが困難である。そのため、鉄筋コンクリート構造物の防食基準は、防食電流を流す前後の鋼材電位の変化量を基準値に定められている。これによって、環境や通電の継続による鋼材表面あるいは照合電極などの測定方法の違いが、鋼材電位の測定結果に及ぼす影響を考慮する必要がなくなり、一義的に防食基準を設定できる。鋼材電位の変化量の基準値は、国内外を含め100mV以上とする場合が多い。この値の根拠は、コンクリート中の電気防食を最初に採用した米国の基準（NACE : National Association of Corrosion Engineers, RP0290-90の基準）に基づいており、多くの実績により確認されているためである<sup>23),24)</sup>。

具体的には、図2.10に示すように、分極量は防食電流停止直後のインスタンオフ電位と通電前の自然電位との差、復極量は防食電流停止直後のインスタンオフ電位と電流停止24時間後のオフ電位との差が100mV以上ということとなる。

表2.2は、望月が整理した主な団体によって規格化されている基準である<sup>25)</sup>。この表に示されているように、ISOの基準（ISO/DIS12696(EN12696:2000)では、一定の防食電位を基準として併記しているものもある。

防食基準の妥当性について、望月<sup>25)</sup>によると図2.11に示すように腐食している鉄筋のアノード反応に対するターフェル勾配を自然腐食状態におけるそれと同等と考え、60mV/decadeとすると、カソード防食によって100mVマイナスの電位では、腐食速度が約1/50に抑制されていたことを意味する。腐食している鉄筋のアノード反応のターフェル勾配は、通常100mV/decade以下であることから復極量100mV以上は防食率90%以上のカソード防食が施されていたと評価できるとしている。

また、腐食防食協会<sup>26)</sup>やG.K.Glass<sup>27)</sup>は、復極量100mVの意味をButler-Volmerの式<sup>28),29)</sup>と

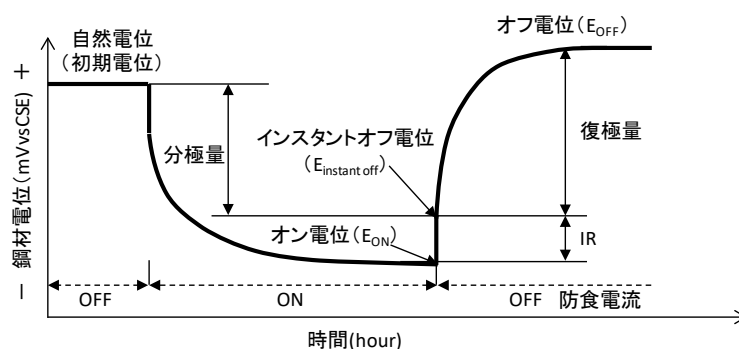


図 2.10 防食中の鋼材電位の変化概念図

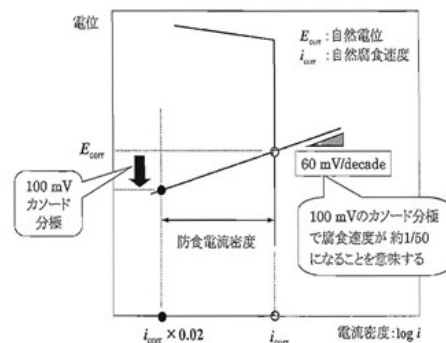


図 2.11 100mV シフト（復極量 100mV）基準の概念

呼ばれる単一電極反応の反応速度を表す基本式を用い、復極量100mV時の腐食速度が極端に小さくなることを速度論により求め、防食基準の妥当性を評価している。

表 2.2 各種団体により規格化されたカソード防食に関する適用基準

制定機関	土木学会	NACE	ISO
規格の名称	電気化学的防食工法 設計施工指針(案)	NACE Standard RP0290-2000	ISO/DIS12696 (EN12696:2000)
制定年度	2001年11月	2000年6月	2005年9月
適用範囲	・コンクリート構造物の塩害・中性化による腐食防止対策 ・干満帯部を含む大気中にあるコンクリート構造物 ・新設構造物の予防保全対策	・大気中に暴露された既設・新設のコンクリート構造物(PC構造物を除く)	・大気中に暴露された既設・新設のコンクリート構造物(PC構造物を含む) ・鉄筋は有機系の被覆材の有無に関係なく適用可能
防食方式	外部電源方式, 流電陽極方式	外部電源方式に限定	外部電源方式, 流電陽極方式
防食基準	・防食電流を流す前の電位に対し, 100mV以上卑方向に電位変化させる ・PC鋼材は下限値電位を-1000mV(CSE)とする	・通電前の電位が最も卑な部分で, 0.1V以上の分極または復極 ・復極後の電位が200mV(CSE)より貴電位の場合, 鉄筋は不動態化しているため0.1V分極(復極)基準は要求されない ・E-logI試験(分極曲線測定)が, 初期防食電流の決定に使われる	・24時間以内の復極量が100mV以上 ・24時間を越える長期間(一般的には7日以上)の復極量が150mV以上 ・720mV*より卑電位 ・普通鉄筋は1100mV*, PC鋼材は900mV*を下限電位とする.

\*) Ag/AgCl/0.5MKCl 基準電位

### 2.2.3 鉄筋コンクリート構造物の電気防食工法の種類

鉄筋コンクリート構造物の電気防食工法の種類を表2.3, 各種電気防食工法の一般的な特長を表2.4に示す<sup>30)</sup>。

電源方式には外部電源方式と流電陽極方式があり, 外部電源方式は商用電源等の電源設備が必要であるが, 環境に応じて防食電流が調整可能である。一方, 流電陽極方式は, 電源設備は不要であり維持管理が容易であるが, 防食電流の調整ができず, 陽極材が消耗する<sup>14),17)</sup>。

陽極材の配置形状には, 面状, 線状, 点状があり, 鋼材表面への防食電流を供給するには, 比較的比抵抗の大きいコンクリートを介す必要があるため, 防食電流の均一性は点状<線状<面状の順となる。ただし, 面状を施工するにはコンクリート表面全体を下地処理する必要がある。一方, 線状や点状であれば, 部分的あるいは局部的な処理のみで施工可能となる。

コンクリートは不均一な材料であり, 比抵抗も大きく, また, 鋼材のかぶりも不均一である。電気防食では, コンクリートを電解質として通電しており, 陽極と鋼材には電気泳動による細孔内に分散していたイオンの偏積が生じ, また, 鋼材周囲には電気浸透による水分が集積する<sup>23)</sup>。これらの作用によって, コンクリート組織そのものへの影響が懸念されるため, 少ない電流量で内部の鋼材を広範囲に均一な防食を行える陽極システムおよび通電システムが最適である。

表 2.3 電気防食工法の種類

電源方式	陽極材の形状	陽極材の設置方法	電気防食方式 <sup>*)</sup>
外部電源	面状陽極	防食対象面全体に面状陽極を設置する.	チタンメッシュ陽極方式
			パネル陽極方式
			導電性塗料方式
			チタン溶射方式
			チタン亜鉛溶射方式
			導電性モルタル方式
	貼付け型シート陽極方式		
	線状陽極	防食対象面に一定間隔で線状陽極を設置する.	チタンリボンメッシュ方式
			チタングリッド方式
TCユニット方式			
貼付け型モール陽極方式			
点状陽極	防食対象面に棒状陽極を点状に挿入し, 設置する.	チタンロッド方式	
流電陽極	面状陽極	防食対象面全体に面状陽極を設置する.	亜鉛シート方式
			亜鉛アルミ擬合金溶射方式
			ALAPANEL方式

\*)国土交通省北陸地方整備局の塩害橋梁維持管理マニュアル(案)を基に一部加筆.

表 2.4 各種電気防食工法(陽極材)の一般的な特長

項目		長所	短所
電源方式	外部電源	電流調整ができる	電源設備が必要
	流電陽極	電源設備が必要ない	電流調整は不可
陽極の材質	チタン系	高寿命	コスト高
	カーボン系	コスト低	短寿命
	亜鉛系(流電陽極)	電源設備が不要	交換が必要
陽極材の形状	面状陽極	電流分布の均一性に優れる	設置全面の下地処理が必要
	線状陽極	部分的な前処理で良い	美観に劣る
	点状陽極	局部的防食	広範囲の防食には不向き

#### 2.2.4 鉄筋コンクリート構造物の電気防食工法の課題

鉄筋コンクリート構造物の電気防食はコンクリート表面あるいは表面近傍に設置した陽極から、電解質であるコンクリートを介して鋼材表面へ通電することにより、鋼材電位をマイナス方向へ変化させ、鋼材表面の電位差を解消することで鋼材腐食を抑制する工法である。

このように、電気防食は鋼材の腐食反応が電気化学的反応であることに着目し、腐食電流が鋼材表面に流れないように、鋼材表面の電位を電気化学的に制御することが必要である。そのためには、防食期間中、対象とする鋼材表面へ必要な電流および電流分布で通電し続けるための防食回路および電源装置等を含めたシステム全体の変化に関する予測が必要である。したがって、①適切な防食



基準の選定による電流量の調整，②陽極システムなど構成材料の耐用年数の予測と選定，③電気防食設備の保守点検と更新などの工法適用後の維持が適切に行わなければならない<sup>23)</sup>。

つまり，防食期間中，鋼材腐食を抑制するためには上記の①～③の課題を解決する必要がある。

近年，電気防食の適用の事例が増加し，施工後の調査報告も頻繁になされ，上記の①～③の課題を含め，種々の課題が指摘されるようになった<sup>24)</sup>。本項では，それらに関する課題と現状を示す。

まず，土木学会のコンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338委員会)委員会報告書に示された電気防食の不具合の内容と原因およびその対策の文献調査結果に加筆したものを表2.5に示す<sup>31)～44)</sup>。

電気防食ではコンクリートを電解質とし，陽極材表面からコンクリートを介して鋼材表面へ通電する。その際，電気泳動により鋼材表面では塩化物イオンが減少，水酸化物イオンが上昇する。一方，陽極材の表面では水酸化物イオンや塩化物イオン等が陽極へ電子が受け渡し，塩素ガスや酸素ガスの発生や酸性化が生じる可能性がある。それらの生成物は通電電流密度と相関があるため，電流密度に偏り等が生じた場合，生成物の生成速度が上昇し，陽極材，陽極被覆材，陽極付着面に不具合を生じることがある。これらの対策は，①想定される防食電流密度に適した陽極システムの選定，②電流が偏らないためのコンクリートの湿潤状態や鋼材量を考慮した回路分け，③陽極材・通電点の配置と配線材の選定を適切に行うことが重要である。

なお，鋼材量や構造物の形状に対する陽極システムや陽極配置に関しては，近年，電気防食工法適用時の電流分布や鋼材電位を数値解析により，予測する手法が用いられている。具体的には，陽極材とコンクリート中の鋼材の分極特性をモデル化し，それを境界条件としてLaplace方程式を数值的に解く手法が一般的に用いられている<sup>45)</sup>。この手法の妥当性は供試体レベルの実験において確認されており，実務においても使用されている<sup>46)～50)</sup>。ただし，非線形である陽極材や鋼材表面の分極曲線を数学モデルに置き換える際，線形近似することがあるが，近似式が不適切であると真の値から，かい離することがあるため，注意が必要である<sup>51)</sup>。また，温度等の環境条件が変化する場合，環境条件に対応した分極曲線を選定する必要もある<sup>48)</sup>。さらに，電気防食では上記に示したように電気泳動により，通電を継続すると鋼材表面の環境改善効果が生じるため，分極特性が変化する<sup>51)52)</sup>。数値解析により電気防食工法の寿命を予測するにはこれらの経時変化についても考慮する必要がある<sup>53)</sup>。

電気防食の期間中，干満帯や飛沫帯，あるいは雨掛かり箇所等では，陽極材の被覆モルタルの防水処理を施していない場合，外部から海水や水が供給される箇所では，電流がその周辺に集中する電流の偏りが生じ，写真2.1のように被覆モルタルが劣化する可能性がある<sup>54)</sup>。また，コンクリート内の鉄筋はコンクリート打設前に結束線で固定されており，陽極設置前に絶縁抵抗を確保するため，陽極設置箇所の結束線はすべて撤去する。しかし，そのような外部から海水や水が供給される箇所では，陽極設置箇所以外についても，対策が講じられていなければ，電流の



写真2.1 陽極材被覆モルタルの劣化事例

偏りの原因となる可能性がある。現在、電気防食時の陽極反応による生成物を考慮しつつ、防水対策としてシラン系表面含浸材を併用する方法<sup>55)</sup>や、防水対策として表面はプラスチック皮膜で陽極を覆いつつ、絶縁性確保のためにイオン導電性粘着材をコンクリートと陽極材の間に配置した電流の偏りを考慮した工法も開発されてきている<sup>56)</sup>。

陽極システムの劣化や損傷を生じる電流の偏りは、電気防食としての目的である鋼材の腐食抑制経も影響を与えることが懸念される。そのため、本検討では、電流の偏りについても、その影響を考慮した実験や実構造物での試験施工を実施し評価した。

表 2.5 電気防食の不具合の内容と原因およびその対策

不具合内容	原因	対策
a)陽極システムの劣化、損傷	・環境や鋼材量の違いで、電流密度に偏りが発生し、部分的に劣化が生じた <sup>31),32),43)</sup> 。	・適切な回路分け、適切な陽極配置
	・電流分布が悪いため、電流密度に偏り部分的に劣化が生じた <sup>33),38),39),40),42)</sup> 。	・想定する電流密度に応じた陽極システムの選定と陽極の配置
	・波浪による物理的損傷した <sup>37)</sup> 。	・環境に応じた適切な陽極システムの選定
	・流電陽極の陽極材の消耗が部分的であったり、消耗率が想定以上であった <sup>31),32)</sup> 。	・陽極システムの改良、設定寿命の適正化
b)防食電流や分極量の不均一性、復極速度の低下	・防食電流や分極量の不均一性 <sup>43)</sup> 。	・事前調査において、含水率、電気抵抗率、鋼材量、鋼材腐食量を適切に評価し、回路設計へ反映させる(特に回路分け)。
	同一回路内の鋼材の分極性状、コンクリート含水率、電気抵抗率、鋼材腐食量、鋼材量の著しい変化	
	・低復極速度 <sup>43), 44)</sup> 。	・可能な限り防水処理をする。
	干満帯に位置する部材や防水処理が適切に実施されていない部材などでは、母材コンクリートの高含水率、低酸素拡散に伴い復極速度が著しく低下する。	・湧水箇所を記録する。
c)照合電極の不良	・電極部の金属表面の被膜生成により、表面状態が変化。	・適切な照合電極の選定。
	・セメントアルカリ水による電解液の劣化。	
	・電解液の漏れ・乾燥。	
	・液絡部構造が悪く、埋め戻しモルタルとの接触不良。	
d)配線配管	・経年劣化 <sup>35)</sup> 。	・損傷を受けにくい配管ルートの設計
	・波浪による物理的損傷(台風など)。	・環境に応じた材料選定
		・取替・補修が容易な方法

\*)コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338委員会)委員会報告書の表に加筆して作成

## 2.3 鉄筋コンクリート構造物の電気防食時の電流供給方法

### 2.3.1 電気防食時の電流供給方式

鉄筋コンクリート構造物の電気防食時、防食電流の供給方式には図2.12に示すように流電陽極方式と外部電源方式がある。

流電陽極方式は鋼材に対しマイナスの電位を示す陽極(亜鉛、アルミニウム等)を用い、コンクリートを介して鋼材と電氣的に接続し、両者の電位差を利用して鋼材に防食電流を供給する方式である。一方、外部電源方式は直流電源装置を用い、プラス側を陽極、マイナス側を鋼材に接続し、直流電源装置を利用して鋼材に防食電流を供給する方式である。

流電陽極方式は陽極の消耗や電流調整できない等の短所があるが、電源設備やランニングコストが不要であり、維持管理が容易である。また、鋼材と陽極材の電位差による微弱な電流しか流せないため適用箇所は限られるが、陽極周囲の充填モルタルの変質の原因となる過剰な電流が流れるこ



とはない<sup>57)</sup>。

一方、外部電源方式は電源設備が必要であるが、陽極材は高耐久性であり、鋼材の腐食環境に応じた電流調整が可能であるため、確実に鋼材の腐食を抑制することが可能である。ただし、電源設備への電流供給を商用電源とすると、毎月の支払い等のランニングコストが発生する他、落雷や誘導雷に対しても維持管理する必要がある。落雷による被害は、主に直撃雷と誘導雷に起因しており、電気機器関連の被害はほとんどが誘導雷による異常電圧や誘導電流が電線やケーブルを伝わって発生したものである<sup>58)</sup>。なお、日本は落雷の発生が多く、多いところでは20km四方で年間2000回以上の落雷があり<sup>59)</sup>。地域別では図2.13に示すように<sup>60)</sup>、日本海側の北陸地方や東北地方で多くなっている。このような落雷が多い箇所に設置するため、外部電源方式の電源装置には落雷対策が施されているが、商用電源とつながっており完全な防御はできておらず、定期的な点検は必須である。ただし、近年は遠隔監視装置が取り付けられており、ランニングコストは加算するが故障を遠隔で監視できるようになっている<sup>61)</sup>。

このように維持管理では流電陽極方式の方が容易であり、防食効果では外部電源方式が確実である。本検討はこれらの課題を解消することも視野に実施した。

### 2.3.2 外部電源方式の電流制御方式

外部電源方式の電源装置から防食回路への電流供給方式には定電流方式と定電圧方式がある。

定電流方式では初期の通電調整時に求めた電流を環境変化に拘らず一定に供給する。そのため、環境変化(温度、水分量、塩化物イオン量、コンクリート抵抗率等)に追従できない場合、電流不足が生じる可能性がある<sup>62)</sup>。また、電気防食の防食効果が発揮され、鋼材表面に水酸化物イオンが増加(再アルカリ化)し、塩化物イオンが鋼材表面から減少すると、必要な電流量が減少し、長期的に鋼材電位が大きくマイナス方向に変化することも考えられる<sup>14)</sup>。

一方、定電圧方式では、概ね鉄筋の腐食程度に応じた電流が供給され、大きい電流が必要な場合、つまり、鋼材の分極抵抗が低い場合、大きな電流が流れる。小さな電流で十分な場合、つまり、鋼材の分極抵抗が大きい場合、小さな電流が流れる傾向にある。しかし、環境変化により必要な防食電流密度が変化した場合、電流不足が生じる可能性がある<sup>62)</sup>。

このように電源装置の電流制御方式により一長一短があり、通電初期には定電流方式とし、コンクリートの湿潤化等により鋼材電位が大きくマイナス方向に変化することが懸念される箇所では定

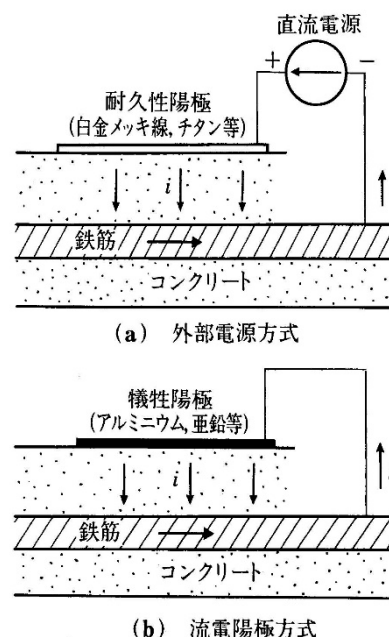


図 2.12 防食電流の供給方式

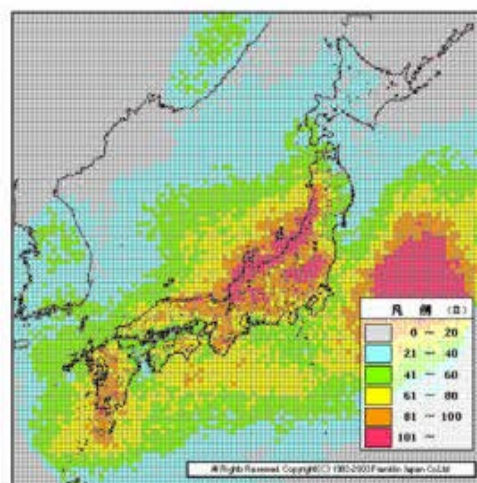


図 2.13 落雷発生日数マップ  
(2000年～2012年の積算値)

電圧とすることも推奨されている<sup>19)</sup>。

ただし、本検討では、写真2.1に示すような電流の偏りによる陽極被覆モルタルの劣化や間欠通電により夜間無通電の緩和時間があることを考慮し、定電流方式を使用することとした。

### 2.3.3 電気防食時の電力供給源

商用電源が使用できない場合や、商用電源より維持管理が容易になる等のメリットがある場合、電気防食時の電力供給源として再生可能エネルギーが使用されている。再生可能エネルギーとは、石油、石炭、天然ガス等の化石燃料から生み出したものではなく、太陽光や風力、地熱等、地球上で自然に起こる現象を利用して繰り返し使えるエネルギーを指す。具体的には、図2.14に示すような太陽光発電、風力発電、バイオマスエネルギー、水力発電、地熱発電、太陽熱利用、潮流発電等がある。これらの再生可能エネルギーは、表2.6に示すように、発電出力が気象条件により変動する変動電源(太陽光発電、風力発電など)と、出力が比較的安定している安定電源(地熱発電、水力発電など)の二つに分類できる。出力安定性では、

前者は既存の火力発電などと同等に扱うことができるが、前者は出力制御できないため、その出力変動を他の電源あるいは蓄電池により吸収する必要がある<sup>63)</sup>。通常、鉄筋コンクリート構造物の電気防食は継続的な通電による鋼材表面での電気化学的作用によって鋼材腐食を抑制している。そのため、安定電源であり、キロワットあたりの発電コストが低い地熱発電や水力発電の方が最適であると考えられる。しかし、これらの地熱発電や水力発電は施設が複雑であり、施設建設にコストが掛り、地域社会の社会施設として、一か所で集中的に発電するためには有効であるが、点在する膨大な数量の鉄筋コンクリート構造物の電気防食のためには不向きである。

後者は既存の火力発電などと同等に扱うことができるが、前者は出力制御できないため、その出力変動を他の電源あるいは蓄電池により吸収する必要がある<sup>63)</sup>。通常、鉄筋コンクリート構造物の電気防食は継続的な通電による鋼材表面での電気化学的作用によって鋼材腐食を抑制している。そのため、安定電源であり、キロワットあたりの発電コストが低い地熱発電や水力発電の方が最適であると考えられる。しかし、これらの地熱発電や水力発電は施設が複雑であり、施設建設にコストが掛り、地域社会の社会施設として、一か所で集中的に発電するためには有効であるが、点在する膨大な数量の鉄筋コンクリート構造物の電気防食のためには不向きである。

太陽熱や海洋エネルギーについても、同様の理由により、不向きであると考えられる。また、風力発電について



図 2.14 さまざまな再生可能エネルギー

表 2.6 再生可能エネルギー電源比較

	太陽光	風力	バイオマス	地熱	水力	
	不安定				安定	
出力特性	※気象により変動	※気象により変動	※安定集積が必要	-	-	-
キロワット時当たりのコスト	33.4-38.3	9.9-17.3	17.4-32.2	9.2-11.6	19.1-22.0	10.6
立地特性	大規模化には大面積の設置場所確保が必要	適地が北海道東北に集中環境影響への配慮が必要	大規模化には広域収集が必要	適地が国立公園内や温泉地に近接するため配慮が必要	水利権の行政手続き有	新規建設可能地は限定的
設備利用率	12% 南向き	20% 設置場所により大きく変動	80% 品質の安定及び安定集積が必要	70%	60%	45%

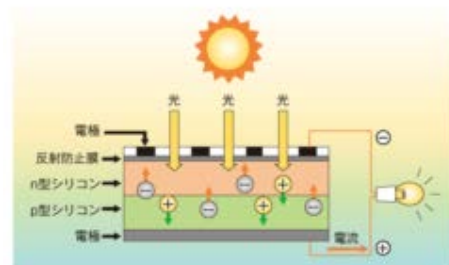


図 2.15 ソーラーパネルの発電原理 (半導体系)

ては、地域性があり、風が常にある地域では有効であると考えるが、各地に点在する構造物に対しては不向きである。よって、本研究では、2011年の東日本大震災後、急速に普及したソーラーパネルを電気防食時の電力供給源として用いることとした。ソーラーパネルは、図2.15に示すように太陽からの光エネルギーを直接、電気に変化する半導体の一種である。半導体にはn型半導体とp型半導体の2種類があり、一般に太陽電池はn型

とp型を積み重ねた構造となっている。このようにn型とp型の接合部を作り、このn型とp型の半導体の界面に光（光子）が当たると、光エネルギーによって、プラスとマイナスを持った粒子（正孔と電子）が発生し、マイナスの電子は伝導電子となりn型半導体の方へ、電子が抜けた箇所はプラスの正孔となり、p型半導体の方へ移動し、内部電位の勾配が発生する。このような仕組みを内部光電効果と呼ぶ。この電子と正孔の移動により発生する起電力を光起電力と呼ぶ。このようにソーラーパネルは光エネルギーを直接利用し、電気を発電している。

なお、太陽のエネルギーは、つまり、日射が得られる場所であれば、ソーラーパネルを設置することで、必ず一定の発電量を得ることが可能である。また、ソーラーパネルの設置量を変えることで、得られる発電量を自在に変化させることができる。なお、図2.16に示すように、2008年のリーマンショック以降、中国や台湾メーカーを中心とした生産設備への大規模な投資やヨーロッパの経済不況によって増加した在庫の影響で、ソーラーパネルの価格が低下しており、コスト的にも低下傾向である。また、図2.17に示すように、ソーラーパネルは、経年変化後の大量廃棄を見据え、国家的なプロジェクトでリサイクル方法も確立されつつある<sup>64)</sup>。

ソーラーパネルを用いて外部電源方式の電気防食を実施する場合、日射のない夜間は無通電となるため、商用電源と同様に夜間も通電するには蓄電設備を用いた独立型太陽光発電システムが必要となる。各種蓄電池のエネルギー密度<sup>65)</sup>を図2.18、各種蓄電池の概要<sup>66)</sup>を表2.7に示す。図に示

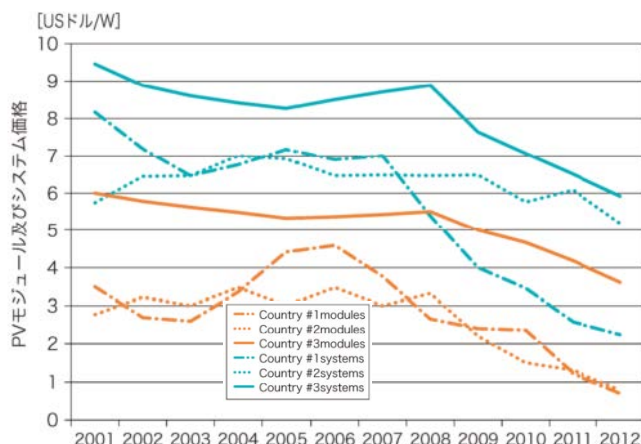


図 2.16 ソーラーパネルおよびソーラーシステムの主要国における市場価格の推移

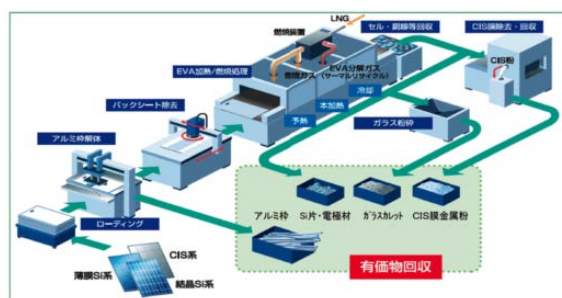


図 2.17 NEDO プロジェクトで開発中のリサイクル貫処理フロー

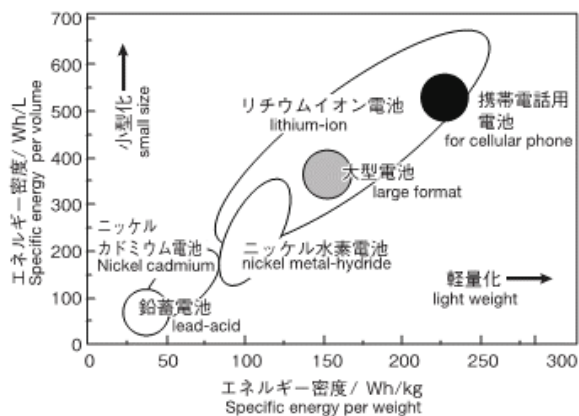


図 2.18 各種蓄電池のエネルギー密度



すように、蓄電池のエネルギー密度は、鉛蓄電池<NiCd電池<NiH電池<リチウムイオン電池となっており、リチウムイオン電池はエネルギー密度が高く軽量で、小型化が可能であるため、小型機器に頻繁に使用されている。ただし、リチウムイオン電池は過充電しないように個々の容量を確認しながら充電する特殊充電器が必要であり、高温で使用すると劣化しやすく、火災等が発生した場合にエネルギー密度が高く、爆発等の危険がある等の欠点がある。また、ニッケル水素電池についても、エネルギー密度が高く、小型化が可能であるが、メモリー効果を考慮した特殊充電器が必要である。さらに、NAS電池についても小型化が可能であるが、作動温度が300℃以上必要で、ナトリウムを使用しており、火災時に水が使用できない等の欠点がある。そのため、鉄筋コンクリート構造物の電気防食について、ソーラーパネルを用いた独立型太陽光発電システムが使用されている事例はあるが、主に鉛蓄電池が用いられている<sup>7)</sup>。

また、蓄電池の寿命について、鉛蓄電池は容量分の電力をすべて使用した後(放電深度100%)、充電すると寿命(サイクル数)が短くなる。これは放電時に硫酸鉛が生成し、硫酸鉛が充電で溶解しにくくなるためである。このような不溶性生成物による充電回数の減少はリチウムイオン電池でも生じる現象である。このような特徴を有する蓄電池は、放電深度を少なくしてすぐに充電した方が、寿命が長くなる。写真2.2は筆者が過去に設計した独立型太陽光発電システムである。本システムは、最大30Wを10年間通電できるように蓄電池の放電深度を考慮し、不照日数3日間で設計した。独立型太陽光発電システムを電気防食の電流供給源とする場合、①蓄電池を充電するためのMPPT充電器(最大電力点追従充電器)、②バッテリーから電源装置へ通電するためのDC/DCコンバーター(直流昇圧器)あるいはDC/ACコンバーター(交流昇圧器)、③通電するための定電流電源装置が必要であり、これらの電力ロスも考慮する必要がある。つまり、耐久性を考慮すると、蓄電池の放電深度を抑えるために蓄電池容量は大きくなり、ソーラーパネルのサイズも充電および各種装置の電力ロスを考慮すると大きくなる。なお、写真2.2のソーラーパネルのサイズは500W(250W×2枚)、蓄電池サイズは400Ah(4800Wh)である。

独立型太陽光発電システムを電気防食の電流供給源に使用した場合、蓄電池の充電を考慮する必

表 2.7 各種蓄電池の概要

電池の種類	鉛	ニッケル水素	リチウムイオン	NAS (ナトリウム塩類)	レドックスフロー	溶融塩
コンパクト化 (エネルギー密度: Wh/kg)	×	△	◎	○	×	◎
コスト(円/kwh)	5万円	10万円	20万円	4万円	評価中	評価中
大容量化	○ ~Mw級	○ ~Mw級	○ 通常1Mw級 まで	◎ Mw級以上	◎ Mw級以上	◎ 評価中
充電状態の正確な計測・監視	△	△	△	△	◎	△
安全性	○	○	△	△	◎	◎
資源	○	△	○	◎	△	◎
運転時における 加温の必要性	なし	なし	なし	有り (≥300℃)	なし	有り (≥50℃)
寿命 (サイクル数)	17年 3,150回	5~7年 2,000回	6~10年 3,500回	15年 4,500回	6~10年 制限無し	◎ 評価中

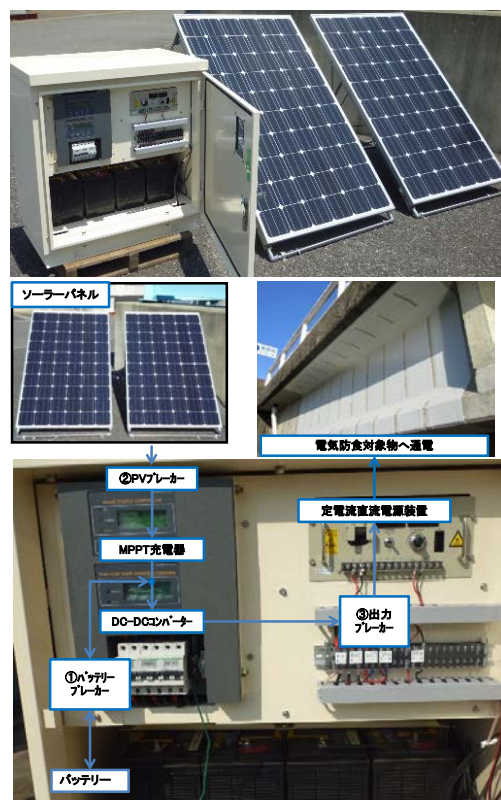


写真 2.2 電気防食用独立型太陽光発電システムの事例

要があり、その結果、電気防食で使用する電力は小さくても、システムとしては大型となり、コスト面で不利となる。そのため、さらに耐久性を向上させるには、大型化かつ高コストとなり、現行の技術では不経済である。また、蓄電池設備は4800Ah（鉛蓄電池：9600Wh、ニッケル水素電池5760Wh、リチウムイオン電池17760Wh）を超えると所轄消防署への届け出が必要となり<sup>68)</sup>、法令で定める定期点検が必要となる<sup>69)</sup>。さらに、リチウムイオン電池の種類によっては電解液の引火点が40°Cとなり、第4類第二石油類に分類され、数量によっては屋外貯蔵所として登録の可能性も発生する<sup>70)</sup>。

そこで、本研究では、以下の理由により、ソーラーパネルのみを電流供給源とする間欠通電方式でも鋼材の腐食を抑制できると考え、**写真2.3**の蓄電池を用いないソーラーパネルと定電流電源装置からなるシステムの鋼材腐食抑制効果について検討した。

- ① 鉄筋コンクリート構造物の鋼材の腐食反応が酸素拡散速度に律速であること。
- ② 継続的な通電により、鋼材表面に環境改善効果（電気泳動による塩化物イオンの減少、通電による水酸化物イオンの増加：再アルカリ化）が生じると腐食電流密度が減少すること。

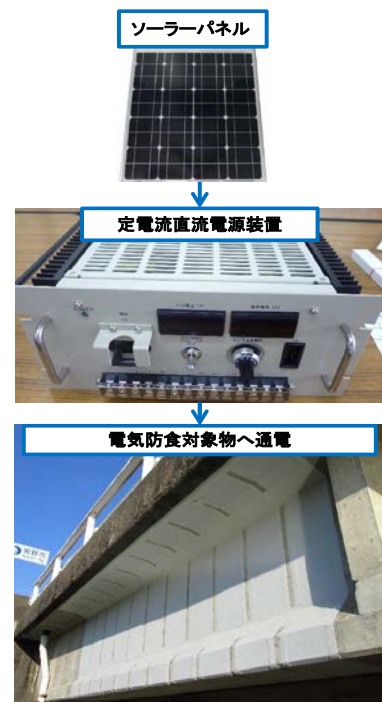


写真 2.3 検討するシステム

### 2.3.4 間欠通電による電気防食

ソーラーパネルのみを電流供給源とする間欠通電方式でも、**図2.4**に示す不活性領域に鋼材電位を保てば、鋼材腐食を抑制することができる<sup>71),72)</sup>。しかし、鉄筋コンクリート構造物の電気防食では、コンクリートの電気抵抗が高いため、大きな電流が必要となるほか、陽極界面で分極抵抗が増加することにより陽極周囲で酸性の生成物が発生し、陽極が消耗する等の耐久性の低下が懸念される。

一方、矢島らは、間欠通電による防食効果を、コンクリート模擬水溶液を用いた間欠通電による実験で評価している<sup>73)</sup>。具体的には、塩化ナトリウム0.23重量%含有(コンクリート中の5kg/m<sup>3</sup>に相当)させた飽和水酸化カルシウム水溶液500mlのコンクリート模擬水溶液を用い、φ13×100mmの丸鋼（試験面積20cm<sup>2</sup>）を浸漬し、対極に白金チタン線を用いて防食電流密度30mA/m<sup>2</sup>とする6時間/日の間欠通電を50日間実施し、常時通電および無防食との比較により防食効果を評価している。その結果、腐食減量が間欠通電および常時通電とも無防食の半分程度となり、外観目視で鋼材表面に腐食生成物が無く、鉄イオンの溶出量は無防食では50mg、間欠通電では4.9mg、常時通電では1～0.2mgとなり、この結果で間欠通電による防食効果を確認している。また、同様の水溶液に吸水性高分子を用いてゲル化させたコンクリート模擬水溶液を用い、シリコンで評価面を75×75mmとしたSS400の鋼板（75×75×2mm）を浸漬し、対極にチタンメッシュ電極を用いて常時通電と間欠通電を連続で行い、その防食効果を評価している。具体的には、防食電流密度30mA/m<sup>2</sup>で7日間の常時通電を実施後、防食電流密度30mA/m<sup>2</sup>で6時間/日の間欠通電を10日間実施したところ、鋼材のオフ電位がプラスに変化したことから、鋼材表面が不動態化し、腐食が抑制されていると推測している。

G.K.Glassらは、塩化物イオン量2%(セメント質量比)を含有する鉄筋コンクリート供試体（φ100×2

50mm) を用い、干満帯を想定した乾湿繰り返し(0.5時間人工海水浸漬+11.5時間空中暴露を1サイクル、湿潤状態時のみ定電流のカソード防食となる間欠通電)を1年間実施し、供試体の表面状況を写真2.4のように示している。また、電流遮断後のオフ電位の推移を図2.19示している<sup>74)</sup>。当初、58mA/m<sup>2</sup>の腐食速度を示していた供試体についても、電流密度6.2mA/m<sup>2</sup>の小さな電流密度でひび割れもなく十分な効果が得られている。また、このような結果が得られた供試体は、図2.19に示すように時間の経過とともに鋼材電位が徐々にプラス方向に変化している。このことから、継続的な通電により鋼材表面のpHが上昇し、かつ、塩化物イオン濃度の減少が生じたため鋼材の再不動態化が誘起されたとしている<sup>25)</sup>。

大谷らは、モルタル中において腐食状態にある鋼材に対して異なる電流密度と間欠通電で防食を行い、鋼材表面の環境改善効果による電気防食の効果を評価している<sup>52)</sup>。具体的には、図2.20の試験概要に示すように、普通ポルトランドセメントを使用し、W/C=50%、S/C=2.5とし、NaClを10kg/m<sup>3</sup>を混入したモルタル供試体を用い、アノード溶解処理で鋼材を腐食させた後、かぶり50mmの20mmを海水に浸漬させた状態で、通常分極量100mVシフトの通電電流密度とそれ以下の2種類の通電電流密度で常時通電、および100mVシフトの通電電流密度で間欠通電の4種類の通電方法で評価している。その結果、いずれの供試体についても、カソード分極挙動の変化は小さいものの、経時変化でアノード分極は増大し、不動態化が促進したとしている。また、これは、鋼材表面のpHの上昇と塩化物イオン量の低下といった鋼材表面の環境改善による効果であると推測している。

筆者を含む二木らは、φ19×300mmの丸鋼を内在した塩化物イオン量6kg/m<sup>3</sup>のコンクリート供試体(24-8-20N, W/C=65%)を用い、図2.21に示す光エネルギーにより自己発電するシート陽極を設置し、6か月間の屋外暴露試験を実施し、常時通電および無防食供試体と

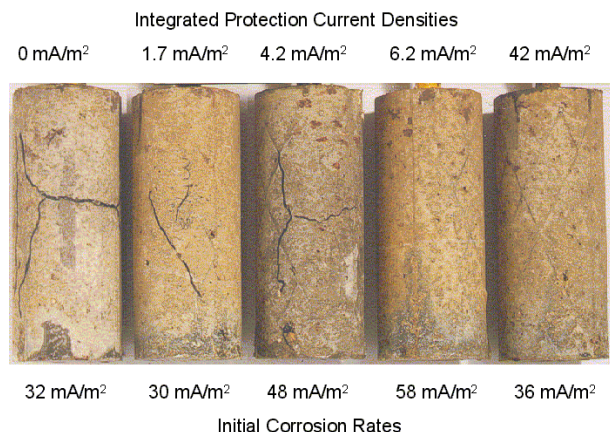


写真 2.4 年間暴露試験後の供試体

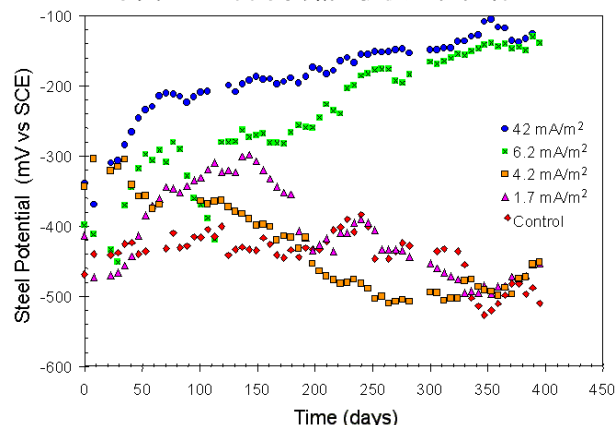
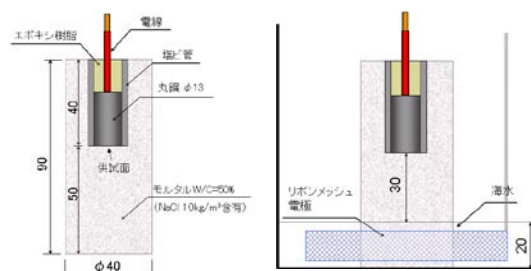


図2.19 電流遮断8時間後のオフ電位の推移



a)モルタル供試体 b)通電方法  
c)通電条件

No.	通電条件	仕様
1	100mV シフト (203 mA/m <sup>2</sup> )	試験初期に 100mV カソード分極する電流密度で定電流通電
2	15 mA/m <sup>2</sup>	15 mA/m <sup>2</sup> で定電流通電
3	60 mA/m <sup>2</sup>	60 mA/m <sup>2</sup> で定電流通電
4	間欠通電 (226 mA/m <sup>2</sup> )	試験初期に 100mV カソード分極する電流密度で 8 時間通電、16 時間停止を繰返す間欠通電

図 2.20 試験概要



の比較により、その防食効果を評価している<sup>75)</sup>。なお、シート陽極の面積は大小2種類、向きは太陽の方向と地面の方向の2種類の計4種類で評価している。光発電のため、夜間は無通電となる間欠通電状態となっている。供試体を解体調査した結果、シート陽極を太陽の方向で設置した供試体の腐食面積率は、いずれも常時通電と同様であり、また、シート陽極を太陽と反対の地面方向で設置した供試体についても、無防食供試体より腐食面積率が小さくなっており、間欠通電であっても防食効果を発揮できる可能性を示唆している。

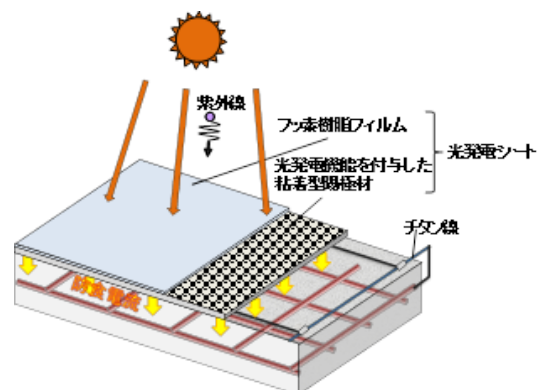


図 2.21 光発電シート陽極

## 2.4 本研究で検討する課題

本章では、塩害による鋼材腐食とその補修対策である鉄筋コンクリート構造物の電気防食工法に関し、防食原理や防食効果の判定基準、種類、課題などについて、既往の研究をレビューした。そして、防食回路の耐久性や維持管理の向上に着目し、電気防食時の電流供給方法に関し、既往の方法や近年の再生エネルギーとその利用方法をレビューし、本研究における課題と方向性を整理した。

本研究では、第3章および第4章にて、以下のように課題を設定し、検討を実施した。

第3章では、電流供給源として再生エネルギーであるソーラーパネルを選定し、ソーラーパネルのみを電流供給源とした場合の防食効果を発揮する電源の制御方法に関する検討を行った。そして、適用環境や条件を判断するため、塩化物イオン量や暴露環境、陽極の種類などを変化させ検討を行った。また、環境温度による鋼材の腐食電流密度の変化に対し、通電調整時の温度を変化させ、屋外暴露試験により検討を行った。さらに、水掛かり部の防食回路への影響やその影響を抑制するための方法を検討したほか、間欠通電方式による電気防食工法に適した防食回路を設計するため、FEM解析によるシミュレーションにより検討を行った。

第4章では、塩害環境下の道路橋や飛沫帯の栈橋にて、第3章で検討した方法を用いた間欠通電方式による電気防食工法を適用し、その適用性の検討を行った。また、飛沫帯の栈橋のデータを用い、FEM解析によるシミュレーションの結果に対する検証を行った。

そして、これらの検討を通じて、塩害劣化による鉄筋コンクリート構造物の補修対策として、維持管理の向上を目的に、ソーラーパネルを用いた間欠通電方式による電気防食工法を適用する場合、その適用範囲や適用方法のほか、適用後の維持管理について、提案を行うことを本研究の目的とする。

## 【参考文献】

- 1) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル(案)，土木研究所資料 第4343号，ISSN 0386-5878，2016.8
- 2) 小林一輔，牛島栄：コンクリート構造物の維持管理，2006.12
- 3) 石田健太，武若耕司，山口明伸，前田聡：鉄筋腐食発生塩化物イオン量の定量評価に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1065-1070，2007
- 4) 小林豊治：コンクリート中の鋼材の腐食機構，コンクリート工学，Vol.19.No.3，pp.25-28
- 5) 丸屋剛，武田均，堀口賢一，小山哲，許鎧麟：コンクリート中の鋼材のマクロセル腐食に関する解析手法の構築，土木学会論文集E,Vol.62 No.4,pp.757-776,2006.11
- 6) 上田隆雄，宮川豊章：コンクリート構造物の劣化と問題点，材料と環境，59,pp.111-116，2010
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修・補強指針(案)・同解説，1997
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書【維持管理編】2013年制定
- 9) 佐々木慎一，田口史雄：電気防食によるコンクリート構造物の補修，北海道開発土木研究所月報，No.609，pp.49-54，2004.2
- 10) 三澤俊平：ふえらむ,6,325，2001
- 11) 三澤俊平：鉄鋼腐食化学の温故知新，材料と環境，50，pp.538-545，2001
- 12) 高谷哲，西澤彩，中村士郎，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中における鉄筋の腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性，土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造),Vol.71，No.3，pp.235-247，2015
- 13) 杉本克久：金属腐食工学，pp.158，2009
- 14) 関博：コンクリート構造物に対する電気化学的応用，コンクリート工学，Vol.36，No.2,1998.2
- 15) 松島巖：錆と防食のはなし 第2版，1993
- 16) 峰松敏和，若杉三紀夫，阿部忠：道路橋RC床版の塩害に着目した電気防食技術の動向，日本大学生産工学部第44回学術講演会講演概要,3-18，pp.437-440，2011.12
- 17) 武若耕司：コンクリート構造物における電気防食法の現状，コンクリート工学，Vol.30，No.8，PP16-27，1992.8
- 18) 本田哲，宮川豊章，岡田清：コンクリート中鋼材に対する電気防食の適用性について，土木学会第36回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.205-206,1981
- 19) コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，pp.256,1994.10
- 20) 阿部正美，福手勤，浜田秀則，三浦幸治：コンクリート中の鉄筋のマクロ腐食と電気防食によるアノード・カソードへ流入する電流および分極量，港湾技術研究所報告，Vol.33，No.2，pp 175-205，1994.6
- 21) 佐藤教男：電極化学(下)，日鉄技術情報センター，pp.59，1994
- 22) 武若耕司，峰松敏和：鉄筋の電気防食に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.2，pp.511-516，1988



- 23) 土木学会：電気化学的防食工法 設計施工指針（案），2001.11
- 24) 土木学会：コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338委員会)委員会報告書
- 25) 望月紀保：コンクリート中鉄筋のカソード防食について，材料と環境,59,pp.121-128, 2010
- 26) 腐食防食協会:金属の腐食・防食Q&A 電気化学入門編，PP.162-163, 2002.12
- 27) G.K.Glass, Corrosion,55 [3] , 286, 1999
- 28) J.A.Butler:Trans.Faraday Soc.,19,729,1923/24
- 29) T.Erdey-Gruz and M.Volmer : Z.physik.Chem., A150, 203, 1930
- 30) 国土交通省北陸地方整備局：塩害橋梁維持管理マニュアル（案），pp.55,2008
- 31) 五寶光基，荒本貴司，朝倉功，野村昌弘：北陸地区における施工後15年を経た各種電気防食工事の評価報告，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.1, pp.1867-1872, 2005
- 32) 野村昌弘，前田好裕，石村勝則，平俊勝：北陸自動車道 大慶寺川橋での電気防食試験の評価，コンクリート工学，Vol.37, No.12, pp.17-21, 1999
- 33) 青山敏幸，関博，阿部正美，井川一弘：10年間電気防食を施したプレテンション方式PC部材の材料および力学的特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.2, pp.541-546, 2005
- 34) 横尾武夫，荒川孝児：国道8号弁天大橋の電気防食工法継続調査，土木学会年次学術講演概要集，Vol.62, pp.813-814, 2007
- 35) 香川浩司，川西正雄，峰松敏和，川俣孝治：電気防食法を適用した新設PC桁の13年後，土木学会学術講演概要集，Vol.60, pp.331-332, 2005
- 36) 篠原貴，泉隆士，大城敦，宇治原崇夫：電気防食施工後15年経過した新数久田橋の調査と補修工事報告，プレストレスとコンクリート技術協会第16回シンポジウム論文集，Vo.16, pp.79-82, 2007
- 37) 吉田隆浩，荒巻智，近藤拓也：施工後約10年を経過した電気防食工法の追跡調査，土木学会年次学術講演概要集，Vol.62, pp.1017-1018, 2007
- 38) 長谷川智，横田国輝，荒木弘祐，荒巻智：複合劣化した鉄道高架橋への電気防食工法の適用性，土木学会年次学術講演概要集，Vol.59, pp.521-522, 2004
- 39) 前田勝幸，尾山寿嗣，荒木弘祐：かぶりコンクリートが高比抵抗を有する場合の電気防食の復極量経時変化，土木学会年次学術講演概要集，Vol.60, pp.333-334, 2005
- 40) 白濱康弘，前田勝幸，大江崇元，荒木弘祐：中性化と内的塩害を受けた鉄筋コンクリート構造物へ適用した電気防食工法の追跡調査，土木学会年次学術講演概要集，Vol.61, pp.541-542, 2006
- 41) 田中一弘，仲谷伸人，篠田吉央，鉄筋コンクリート構造物に適用した亜鉛シート電気防食工法の点検結果，防錆防食技術発表大会講演予稿集，Vol.27, pp.13-16, 2007
- 42) 笠井和弘，名倉政雄，守屋進，山本悟，井川一弘：長期暴露した大型PC供試体の電気防食効果の確認，土木学会第56回年次学術講演会，Vol.56, pp.646-647, 2001
- 43) 関繭果，宇佐美惣，小城守，大島高雄，峰松敏和：電気防食の維持管理における課題抽出を目的とした橋梁調査，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第16巻，2016.10

- 44) 木村哲士, 中野松二, 山路徹, 審良善和, 濱田秀則, 高橋良輔: RC栈橋干満帯部の電気防食における復極挙動に関する検討, 土木学会年次学術講演概要集, Vol.62, pp.1019-1020, 2007
- 45) 増田正孝, 有田誠, LEE EnJu, 花田賢志, 川俣孝治, 皆川浩: コンクリート中の鉄筋に対するカソード電気防食のFEMによる評価, 土木学会論文集, No.791/VI-67, pp.59-67, 2005
- 46) 鹿島篤志, 佐藤唯, 山本誠, 皆川浩, 久田真: FEM解析による電気防食工法の電流と分極量分布の再現性に関する実寸大供試体を用いた検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第12巻, pp.273-280, 2012.10
- 47) 佐藤唯, 鹿島篤志, 皆川浩, 久田真: 電気防食工法における電流分布性状と分極性状の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, 2012
- 48) 佐藤唯, 鹿島篤志, 皆川浩, 久田真: 温度が鉄筋のカソード分極特性に及ぼす影響の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1067-1072, 2010
- 49) 石田邦洋, 青山敏幸, 桐川潔, 関博: 電気防食工法の陽極材配置に関する解析的検証, プレストレストコンクリート技術協会 第19回シンポジウム論文集, pp.515-518, 2010.10
- 50) 菊池順, 青山敏幸, 関博: 塩化物濃度分布のあるコンクリート床版への電気防食の適用性に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.29, No.1, pp.1353-1358, 2007
- 51) 皆川浩, 川俣孝治, 増田正孝: 有限要素法による鉄筋コンクリートの電気防食の電流分布に関する検討, 「コンクリート構造物の長期性能照査支援モデル」に関するシンポジウム, Vol.JCI-C64, pp.351-356, 2004
- 52) 大谷俊介, 小林浩之, 若林徹, 望月紀保: 鋼材表面の環境改善を考慮した電気防食試験, コンクリート工学論文集, Vol.34, No.1, pp.1030-1035, 2012
- 53) 小林浩之, 審良善和, 山路徹, 濱田秀則, 若林徹, 望月紀保: 鉄筋表面の環境改善を考慮したコンクリート中鉄筋のカソード防食設計, 材料と環境, 62, pp.153-160, 2013
- 54) 日経コンストラクション: 特集 老朽橋探偵の「補修」事件簿 File.4 電気防食神話, pp.46-47, 2015.7.13
- 55) 石神暁郎, 堀耕次, 大久保謙治, 竹村浩志: 表面含浸材によるコンクリートの電気抵抗率安定化に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1655-1660, 2011
- 56) 三村典正, 二木有一, 石川康登, 鈴木潤: 貼付け型シート陽極を用いた電気防食工法, 土木学会第67回年次学術講演会, V-076, pp.149-150, 2012.9
- 57) 篠田吉央: 電気防食と被覆防食の現状と将来, 材料と環境, 63, pp.180-186, 2014
- 58) 横山茂: 雷害対策研究の最近の動向, 電気設備学会誌, Vol.28, No.8, pp.5663-5666, 2008
- 59) 横川勲和, 長井浩: GISによる落雷頻度・地形マップと風力発電機の関係, 風力エネルギー利用シンポジウム, Vol.29, pp.243-246, 2007
- 60) 齊藤洋平: 小規模施設の落雷対策について, 国土交通省関東地方整備局,
- 61) 真田修, 池谷公一, 佐藤正明, 石井浩司: 道路橋のPC桁に用いた新しい線状陽極方式電気防食工法の防食効果と維持管理の省力化, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010
- 62) 石川光男, 堺孝司, 大越威, 峰松敏和: コンクリート中鉄筋の電気防食における通電システムに関する研究, コンクリート工学年次論文報告書, Vol.15, No.1, 1993
- 63) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 第1章 再生可能エネルギーの役割,

- 再生可能エネルギー普及拡大にむけて克服すべき課題と処方箋，NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版
- 64) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：第2章 太陽光発電，再生可能エネルギー普及拡大にむけて克服すべき課題と処方箋，NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版
  - 65) 金村聖志：蓄電池技術の今後の展開 リチウムイオン電池から革新電池へ，FBテクニカルニュース，No.70，pp.3-8，2014.11
  - 66) 経済産業省 蓄電池戦略プロジェクトチーム：蓄電池戦略，2012.7
  - 67) 真鍋年次，山本誠，川俣孝治，西井学，阿部敦徳：太陽電池を用いた外部電源方式による電気防食，土木学会大第56回年次学術講演会，V-320，pp.640-641，2001.10
  - 68) 総務省消防庁 蓄電池設備技術基準検討部会：蓄電池設備技術基準検討部会報告書，2016.3
  - 69) 電池工業会：蓄電池設備の定期点検項目及び点検周期に関する指針，SBA G 0605
  - 70) 総務省消防庁 リチウムイオン電池に係る危険物施設の安全対策のあり方に関する検討会：資料1-9 現行の消防法令の基準について，2011.8
  - 71) 酒匂直浩，菅誠：電気防食方法，特開平7-286289，1994.4
  - 72) 近藤規正，山下澄男，木内幸則，角田智巳：太陽電池を利用したタンク底面の電気防食システム，防錆管理，pp.238-242，1994.7
  - 73) 矢島秀治：鉄筋コンクリート構造物の電気防食方法，特開2002-115085，2000.10
  - 74) G.K.Glass, A.M.Hassanein, N.R.Buenfeld：Cathodic protection afforded by an intermittent current applied to reinforced concrete, Corrosion Science, 43, pp.1111-1131, 2001
  - 75) 二木宥一，三村典正，石川康登，鈴木潤：光発電シート陽極による電気防食工法，土木学会第67回年次学術講演会，V-076，2012.9

### 第3章 間欠通電方式による電気防食工法の構造物への適用に関する検討

#### 3.1 間欠通電方式による電気防食時の制御方法の検討

##### 3.1.1 はじめに

コンクリート構造物の電気防食工法は、設置した陽極から電解質であるコンクリートを介して鋼材表面へ防食電流を通電することで、鋼材電位をマイナス方向へ分極し、鋼材の腐食電流を抑制する。その防食電流の供給方法には、商用電源による外部電源方式と犠牲陽極の腐食電流による流電陽極方式がある。両者とも、常に通電していることが基本である。鉄筋コンクリート構造物の電気防食時の防食基準は、鋼材電位の変化量を管理する電位シフト基準となっており、その管理値は分極量100mV以上である<sup>1)</sup>。なお、電位シフト基準の分極量100mV以上とは、通電時の鋼材電位（オン電位：Eon）から、カレントインタラプタ法でIRドロップを除去した真の鋼材電位（インスタントオフ電位：Einstant off）と、防食電流の遮断後24時間経過した復極後の鋼材電位（オフ電位：Eoff）との電位差が100mV以上であることを示している<sup>1)2)</sup>。しかし、電気防食時の電流供給源にソーラーパネルを用いた場合、夜間はソーラーパネルの発電が停止するため、必ず無通電状態の間欠通電となる。前章でも示したように、鉄筋コンクリート構造物の鋼材の腐食速度は、気中の鋼材と異なり酸素の供給速度が遅く、酸素の拡散速度に律速である。そのため、一度分極すると復極に時間を要するため、間欠通電方式でも防食可能な事例が報告されている<sup>3)~5)</sup>。しかし、確実に防食するための制御方法、設計手法、管理方法等は、確立されていない。

そこで、本節では、屋外暴露環境下で、小型供試体を用い、従来の電位シフト基準による制御方法でソーラーパネルを用いた間欠通電による防食を行い、間欠通電時の電位シフト基準による制御方法の有用性を検討した。なお、制御方法の有用性は、無防食供試体や常時通電供試体との防食効果を比較することで評価した。間欠通電方式では夜間無通電状態となるため、常時通電の基準値以上の分極量が必要である可能性がある。そのため、電位シフト量(分極量)は50,100,150,200,300mVの5通りで実施した。

##### 3.1.2 ソーラーパネルの制御システムの検討

###### (1) ソーラーパネルについて

ソーラーパネル<sup>6)7)</sup>は図3.1に示すようなV-I特性を示し、使用できる電流量は、ソーラーパネルのV-I特性から絞り出す電圧に応じて変わる。通常、ソーラーパネルが発電した電力を蓄電池等へ充電し使用する場合、ソーラーパネルのサイズに対する発電量をなるべく効率的に利用するため、電力(=V×I)が最大となる電力点(最大電力点:Pmax, 最大出力動作電圧:Vmax, 最大出力動作電流:Imax)を自動で計測しながら、ソーラーパネルが発電した電力を使用する。つまり、図3.2に示すようなソーラーパネルと蓄電池の間に、パワーコンディショナーと呼ばれている最大電力点追従制御装置(MPPT: Maximum

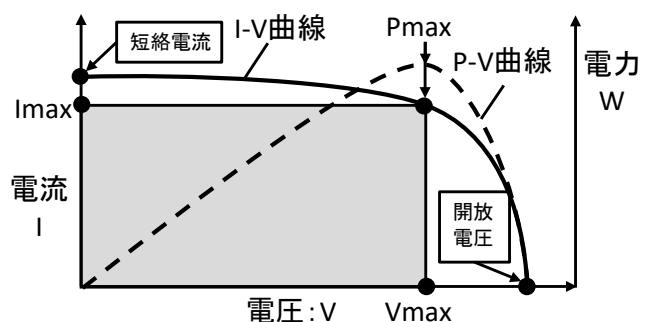
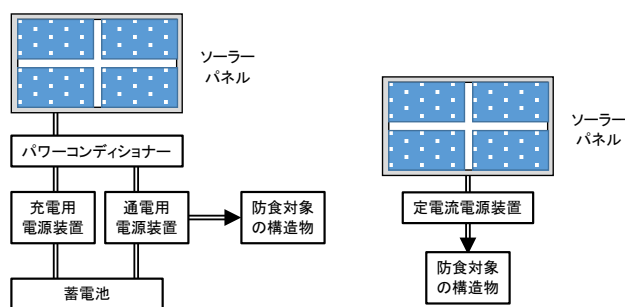


図 3.1 ソーラーパネルの特性概念

Power Point Tracker) を使用する。このようなパワーコンディショナーや蓄電池を使用すると独立型太陽光発電装置となり、設置したソーラーパネルの発電量を最大限利用できるため、防食箇所に必要な電力に対し、効率の良いサイズのソーラーパネルが選択でき、夜間も通電可能となる。しかし、システムが大型化かつ複雑化し、電力ロスその他、システム自体の耐久性やコスト等に課題がある。



独立型太陽光発電システム 間欠通電方式のシステム

図 3.2 ソーラーパネルを用いたシステム

そこで、本検討で用いるシステムは、耐久性とコストに着目し、図 3.2 に示すソーラーパネルと定電流電源装置のみのシンプルな構成とした。ただし、通常の独立型太陽光発電装置のようなソーラーパネルの発電効率を重視した設計とすると、天候ごとに通電量が変化し、蓄電池を使用しない間欠通電では防食効果が安定しないと考えられる。そのため、太陽からのエネルギーの最低時である曇天時や雨天時を基準にソーラーパネルを設計し、なるべく日々通電し、日中も通電時間が長くなるように、システムの構成を検討した。

太陽から地球表面へ降り注ぐエネルギーは図 3.3 に示すように約  $1.0 \text{ kW/m}^2$  とされており<sup>8),9)</sup>、例えば、ソーラーパネルの発電効率が 5% とすると、ソーラーパネルの  $1 \text{ m}^2$  当たりの最大発電量は  $150 \text{ W}$  となる。しかし、ソーラーパネルが最大発電量を発揮できるのは晴天時のみであり、図 3.4 に示すようにソーラーパネルの短絡電流と日射強度は比例関係

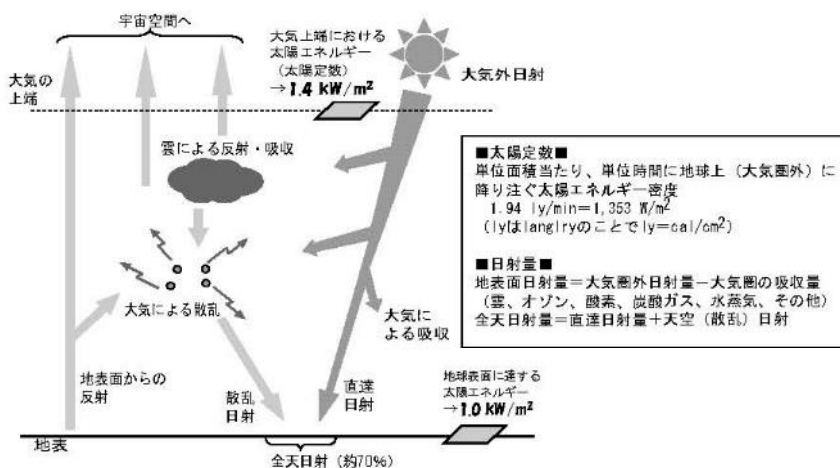


図 3.3 大気に入射した日射の日射収支

のため、曇天時や雨天時の発電量は晴天時の  $1/2 \sim 1/10$  や  $1/20$  となる<sup>6),7)</sup>。逆に、日射強度が最低となる雨天時の発電量を基準にソーラーパネルを設計すると、雨天時も通電可能となる。

一方、外部電源方式の電気防食では、鋼材表面への均一な通電を行うため、構造物の環境を考慮した回路分けが必要である<sup>1)</sup>。その場合、1回路 (電源装置1台) あたりの防食範囲は最大  $500 \text{ m}^2$  程度である。例えば、通電電流密度  $0.01 \text{ A/m}^2$ 、通電回路の電圧  $5 \text{ V}$  とすると、電

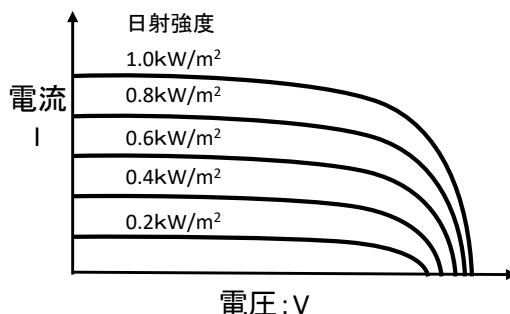


図 3.4 日射強度別の IV 曲線

気防食時の通電に必要な電力は $25\text{W}$  ( $=500\text{m}^2 \times 0.01\text{A/m}^2 \times 5\text{V}$ ) 程度となる。そこで、雨天時を考慮し、10倍サイズのソーラーパネルとしても、ソーラーパネルのサイズは $250\text{W}$ 程度である。

以上より、多少の天候不順があっても毎日通電できるようにソーラーパネルのサイズは、防食回路に必要な電力の10倍を基準に設計することとした。

## (2) 電源装置について

図3.5に示すようにソーラーパネルの発電から使用できる電流量は、ソーラーパネルから絞り出す電圧に応じて変わる。つまり、図3.5に示すように高い電圧で絞り出すと、使用可能な電流は小さくなり、低い電圧で絞り出すと使用可能な電流は大きくなる。また、図3.4に示すように日射強度と短絡電流は比例関係であり、短絡電流は天候に影響するが、短絡電圧は比較的天候の影響が少ない。そこで、日の出や日の入り時あるいは雨天時の日射強度と短絡電流が低い時にも通電できるように低電圧の $5\text{V}$ 程度で起動するよ

うに検討した。なお、 $5\text{V}$ 程度で起動するように設計したのは、遠隔監視等が可能となるマイコンを使用した基板、昇圧回路、LED制御回路等が $3.3\text{V}$ や $5\text{V}$ で起動するものが多いためである。また、実構造物での電気防食時の防食回路自体も $5\text{V}$ 以下が多いためである。

以上より、電源装置は、ソーラーパネルの短絡電圧が $5\text{V}$ 程度となると起動、通電を開始するように設計した。

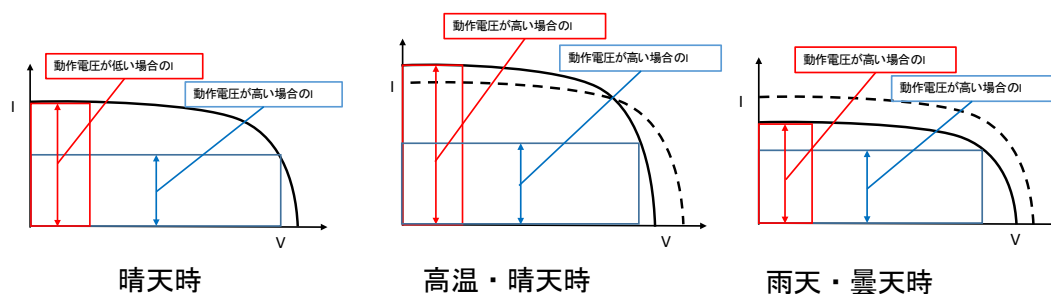


図3.5 ソーラーパネルから使用できる電流量

## (3) 電源の制御方法

ソーラーパネルが発電する電流は電気防食で使用する防食電流と同様の直流であるが、直接、防食回路へ通電すると過電流となる可能性があるため、通電量を制御する電源が必要である。外部電源方式による電気防食時に使用される電源装置には、①定電圧方式と②定電流方式がある。これらを電気防食の電源装置に使用した場合、それぞれ以下のような特徴がある<sup>10)</sup>。

- ① 定電圧方式：鋼材の腐食状況に応じた防食電流が供給され、大きな電流が必要な時には大きな電流が流れ、小さな電流で十分な時には小さな電流が流れる傾向にある。
- ② 定電流方式：初期の通電調整時に求めた防食電流を環境変化にかかわらず一定に供給する。

しかし、①の方式は環境変化（温度、水分量、塩化物イオン量、コンクリート抵抗率等）に追従できない場合、防食電流に過不足が生じ、②の方式は環境変化により必要な防食電流密度が変化した場合には防食電流に過不足が生じる。

その他、近年、過去に施工された電気防食箇所に対する調査で、陽極被覆モルタルの劣化等の課題が報告されており<sup>11)</sup>、使用する電源の制御方法には、その対策も考慮した。例えば、防食回路の一

部のみには海水が掛かる場合、陽極に海水対策が講じられていないと、海水は電気抵抗が低いため、防食回路に短絡が生じ、海水が掛かる場所に防食電流が集中的に流れる可能性がある。防食電流が海水の掛かる場所に集中的に流れた場合、海水の塩化物イオンが陽極表面での電気化学反応により塩素に変化し、その部分の被覆材が酸性化することで陽極材に劣化が発生する可能性がある<sup>12)</sup>。

そのような防食回路に短絡が発生した場合、防食回路は並列回路であるため、定電流電源では、電圧が極端に小さくなり、短絡部には設定値を最大とする電流が集中的に流れる。つまり、電源装置の電圧を確認すると、短絡前と比較し、電圧が極端に小さくなることで、異常を確認できる。また、鋼材電位をモニタリングしているとその部分や他の部分でも極端に鋼材電位が変化するため、異常を確認できる。

一方、定電圧回路でも、短絡部位に電流が集中的に流れるが、定電流回路と異なり、電圧は一定であるため、短絡部には電流が電源の定格まで際限なく流れる。ただし、他の部位の通電量は防食回路が並列回路であるため短絡前と変化がない。電源装置の電流計を確認し、短絡前と比較し、電流が極端に大きくなることで、異常を確認できる。鋼材電位をモニタリングしていると短絡部位では極端に電位が変化することで異常を確認できるが、他の部位でモニタリングしていると、変化がないため、異常を見落とす可能性がある。つまり、このような短絡が発生した場合、定電流回路では設定値以上の電流量は通電しないが、定電圧回路では電源装置の定格まで通電する可能性がある。また、定電流回路では電源装置の表示および鋼材電位のモニタリングにより異常を確認できるが、定電圧回路では電源装置の表示では確認可能であるが、鋼材電位のモニタリングでは異常を見落とす可能性がある。

また、電流が集中的に流れることで防食回路の接続等のわずかに電位差がある箇所での電力消耗による防食回路の切断や物理的な原因により開放状態となった場合、定電流回路では開放された部分以外に電流が割り振られ、他の部分では通電量が多くなるため電圧が上昇する。つまり、電源装置の電圧計を確認し、解放前と比較し、電圧が極端に高くなることで、異常を確認できる。また、短絡時同様に電流量がどの箇所でも変化するため、どの部分で鋼材電位をモニタリングしていても、異常を確認することができる。一方、定電圧回路の場合は、開放が発生しても、防食回路は並列回路であるため、電圧は変化せず、開放が発生した箇所の電流量のみが減少する。電源装置の電流計を確認すると、開放箇所分の電流量が低下するため、注意深く観察していると確認可能である。しかし、定電圧回路では、環境変化や防食効果による通電量低下等で常に通電量に変化しているため、開放箇所分の電流量が低下しても、その変化は確認しづらい。また、開放箇所の鋼材電位は変化するが、他の箇所では電流量に変化がないため、異常を見落とす可能性がある。

つまり、定電圧回路は、短絡や開放を起こさない箇所は電流、電圧ともに変化しない。そのため、これらの箇所でモニタリングをしていた場合、短絡や開放を発見できない。定電流回路は、全ての箇所で電流、電圧が変化するため、どの箇所でモニタリングしても鋼材電位に変化が生じ、短絡、開放を発見しやすい。

よって、電気防食に使用する電源装置の制御方式は、定電流回路の方が定電圧回路より短絡や開放等の異常を発見しやすく、防食回路の変状を起こしにくい回路と考えられる。

以上の結果から、本検討で用いる電源の通電方式には定電流方式とした。

#### (4) 検討時のシステム構成



上記の検討結果から、検討に用いるシステムは図3.6の構成とした。

### 3.1.3 実験概要

#### (1) 供試体の概要

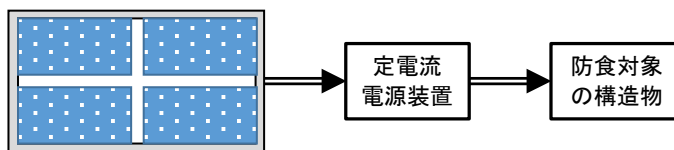
供試体の概略図を図3.7に示す。供試体の寸法は100×150×400mmとし、鋼材には黒皮付き丸鋼（SS400, φ19×320mm）1本を用い、型枠底面よりかぶり30mmの位置に設置した。陽極材はかぶり30mm側に設置し、照合電極には貼付け型の銀塩化銀照合電極を用い、かぶり51mm側の打設面に設置した。なお、供試体には、6kg/m<sup>3</sup>の塩化物イオン量を混入した配合18-8-20N, 水セメント比65%のコンクリートを用いた。供試体の養生は封かん28日間とした。

#### (2) 陽極材の概要

陽極材には、汎用の線状チタンリボンメッシュと貼付け型シート陽極の2種類を選定した。

チタンリボンメッシュの外観を写真3.1に示す。線状のチタンリボンは耐久性に優れたチタンをリボン状に加工し、ルテニウムやパラジウム、イリジウム等のレアメタル貴金属を焼き付けコーティングされた外部電源方式の電気防食の陽極材である。耐食性、長期耐久性に優れたチタンを基材としているため、防食効果を長期に渡り保持できる。また、薄く、軽量、線状であるため、容易に加工が可能である。

貼付け型シート陽極の概略図を図3.8に示す。貼付け型シート陽極は、フィルム状のカーボン陽極材とアクリル樹脂系導電性粘着材により構成された粘着型陽極材とフッ素樹脂フィルムとを工場加工で厚み約1.0mmに積層したシート状の陽極材である。貼付け型シート陽極の設置作業は、下地処理されたコンクリート面に直接貼り付けるだけである。コンクリート面にシートを貼



ソーラーパネル：  
汎用のシリコンソーラーパネル  
最大発電量：防食対象の構造物に必要な電力の10倍  
ダイオード有り：逆電流防止

定電流電源装置  
入力電圧：最低DC5V  
ダイオード有り：逆電流防止

図 3.6 検討時のシステム構成

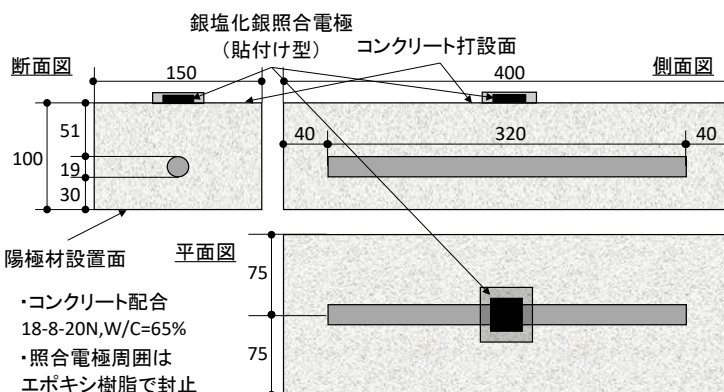


図 3.7 供試体概要図



写真 3.1 チタンリボンメッシュ

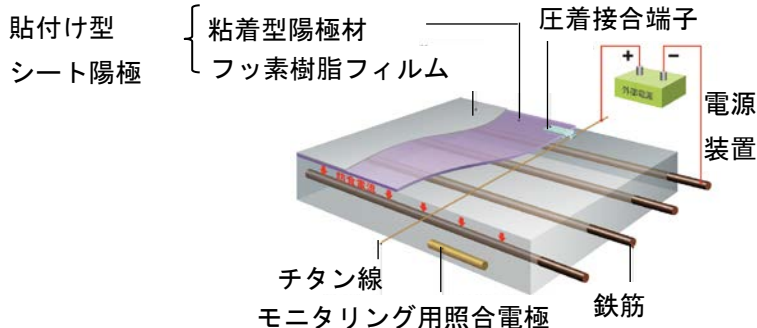


図 3.8 貼付け型シート陽極

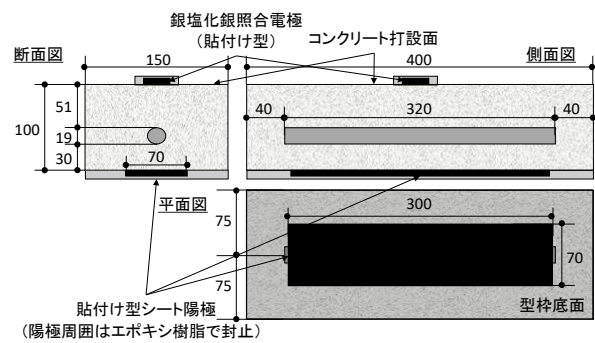


付け、圧着端子を用いて各シート間をチタン線で接続した後、外部電源を用いて電流を流すことで鉄筋の腐食を抑制することができる、なお、シート周囲の封止はエポキシ樹脂を用いる。通電部の陽極材は躯体面と接触しない構造となっており、露出鋼材を撤去せず、有機絶縁材の被覆処理のみで設置可能である。また、通電時の陽極反応による生成物に対して、コンクリート面に露出部を設けるほか、貼付け型シート陽極は表面にガス透過性のフッ素樹脂フィルムを用いている。ただし、シートはコンクリート面に直接貼り付ける必要があり、有機系塗膜等の電気的絶縁材料が施工されている箇所へは、有機系塗膜等の撤去が必要となる。

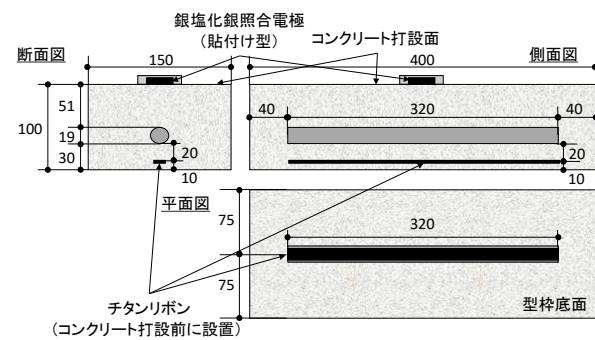
### (3) 試験概要

陽極材には貼付け型シート陽極とチタンリボンメッシュを用い、図3.7の供試体のかぶり30mm側に設置した。貼付け型シート陽極は養生後のコンクリート表面、チタンリボンはコンクリート打設前に横置きで鋼材から20mmの位置に設置した。供試体概要図を図3.9に示す。通常の常時通電方式では分極量100mV以上とする電流量を通電することで防食効果を発揮できる。しかし、間欠通電方式では、夜間は無通電状態となるため、同等以上の電流量が必要となる可能性がある。そこで、分極量の設定値は50,100,150,200,300mVの5通りとし、日中、所定の分極量となる電流量を最大電流量とし、ソーラーパネルを電流供給源とし暴露試験を実施した。供試体の種類一覧を表3.1に示す。供試体への電流は、ソーラーパネルの起電開始から終了までの供給とし、雨天時等で最大電流量まで発電しない場合も同じ状態とした。また、逆電流防止のため、ダイオードを設置した。なお、電気防食では、

継続的に通電することで、鋼材表面の状態が改善され、防食効果としてアノード反応が抑制され、分極に必要な通電量が小さくなる<sup>4)</sup>。そこで、暴露期間中、復極量の増減に合わせ、4～5回通電調整を実施し、設定通りの分極量に調整した。供試体の暴露状況を写真3.2、暴露期間中の通電調整の状況を表3.2に示す。なお、暴露試験は2013



貼付け型シート陽極供試体



チタンリボン陽極供試体

図 3.9 陽極材設置後供試体の概要図

表 3.1 供試体一覧

No.	陽極	通電方式	分極量
1-1			50mV
1-2	貼付け型		100mV
1-3	シート	間欠通電	150mV
1-4	陽極		200mV
1-5	(外付)		300mV
1-6		常時通電	100mV
2-1			50mV
2-2			100mV
2-3	チタン	間欠通電	150mV
2-4	リボン		200mV
2-5	(埋設)		300mV
2-6		常時通電	100mV



写真 3.2 供試体の暴露状況

年11月初旬より茨城県つくば市のショーボンド建設（株）補修工学研究所内のビルの屋上にて実施し、無防食供試体にひび割れが発生した後、暴露331日目に供試体を解体調査した。主たる評価は、外観調査及び鋼材の腐食状況により検討した。鋼材の腐食状況は、JCI-SC1に準拠し腐食面積率および腐食減量を算出して評価した。比較供試体には無防食供試体と常時通電供試体を用いた。

表 3.2 通電電流密度

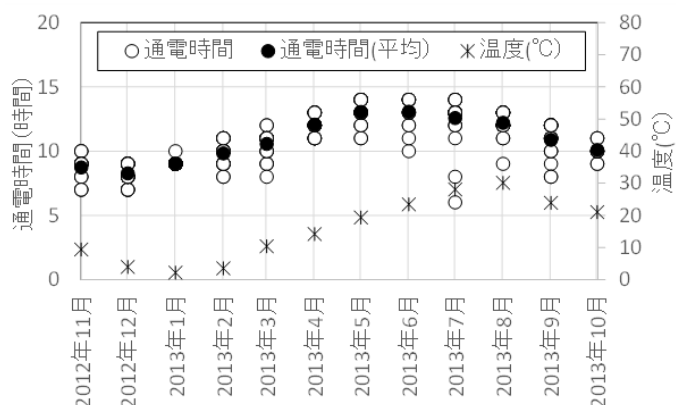
供試体No.	分極量(mV)*)	日中の最大電流密度の設定値(μA)					
		0-29日	29-52日	52-238日	238-247日	247-252日	252-330日
No.1-1	50I	0.84	0.42	0.42	0.63	0.71	0.71
No.1-2	100I	0.52	0.26	0.21	0.52	0.79	0.79
No.1-3	150I	0.52	0.26	0.13	0.52	0.52	0.52
No.1-4	200I	2.83	1.05	0.65	0.65	1.57	1.57
No.1-5	300I	4.71	2.10	1.31	1.68	2.78	2.25
No.1-6	100C	1.78	0.79	0.94	1.00	1.00	1.00
No.2-1	50I	1.05	0.52	0.63	0.68	1.31	1.31
No.2-2	100I	1.57	0.79	0.79	0.63	4.30	4.30
No.2-3	150I	4.19	2.10	2.10	2.20	5.24	5.24
No.2-4	200I	2.10	1.31	0.73	1.31	5.50	5.50
No.2-5	300I	0.79	0.42	0.26	1.83	7.33	7.33
No.2-6	100C	3.14	1.57	1.36	1.89	2.62	2.62

\*)I(Intermittent): 間欠通電方式, C(Continuation): 常時通電方式

### 3.1.4 実験結果

#### (1) 通電状況

暴露試験時の通電状況を図3.10に示す。暴露試験時の通電状況は、図に示すように、一日当たりの通電時間は、雨天時等の悪天候時を含め、6時間では100%、7時間では99.7%、8時間では97.0%、9時間では90.1%となり、最低6時間は毎日通電できており、平均では10.8時間通電できていた。また、通電時間は気温低下時に減少、気温上昇時に増加しており、春秋の4~6月・10~12月時は10.6時間、夏の7~9月時は11.9時間、冬の1~3月時は9.8時間通電できていた。このように腐食速度が増加する気温上昇時に通電時間が長くなり、腐食速度が低下する気温低下時に通電時間が短くなっているのは、気温上下に伴う鋼材腐食速度の増減に対し、効率的な通電が実施できていると考えられる。



年月	平均温度(°C)	月別の1日当たりの通電時間の割合(%)														平均通電時間(h/日)
		1h/日	2h/日	3h/日	4h/日	5h/日	6h/日	7h/日	8h/日	9h/日	10h/日	11h/日	12h/日	13h/日	14h/日	
2012年11月	9.4	100	100	100	100	100	100	100	86	73	14	0	0	0	0	8.7
2012年12月	3.9	100	100	100	100	100	100	100	83	43	0	0	0	0	0	8.3
2013年1月	2.2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	3	0	0	0	0	9.0
2013年2月	3.5	100	100	100	100	100	100	100	100	93	68	0	0	0	0	9.8
2013年3月	10.3	100	100	100	100	100	100	100	100	96	84	68	8	0	0	10.6
2013年4月	14.2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	77	30	0	0	12.1
2013年5月	19.3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	91	77	36	0	13.0
2013年6月	23.4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	91	77	36	0	13.1
2013年7月	28.1	100	100	100	100	100	100	96	96	93	93	93	89	79	18	12.6
2013年8月	30.1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97	97	90	35	0	12.2
2013年9月	23.9	100	100	100	100	100	100	100	100	92	83	71	42	0	0	10.9
2013年10月	21.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	82	27	0	0	0	10.1
暴露中の1日当たりの通電時間の割合(%)		100	100	100	100	100	100	99.7	97.0	90.1	67.0	55.1	42.2	25.1	6.9	10.8

\*)コンクリート表面に設置した熱電対で計測

図 3.10 供試体の通電状況

## (2) 常時計測結果

無防食供試体の鋼材電位の経時変化を図3.11、貼付け型シート陽極を用いた防食供試体の鋼材電位の経時変化を図3.12、チタンリボン陽極を用いた防食供試体の鋼材電位の経時変化を図3.13に示す。各鋼材電位は、暴露期間中1時間ごとにデータロガーで収集し、気象庁から入手したつくば市の降水量、湿度を同じグラフ上に同期させた。便宜上、グラフの起点は、試験日時開始日（2013年11月5日）の翌日午前0時（2013年11月6日）とした。つまり、日数が記載されている箇所が午前0時である。また、気象庁からは日平均の値を入手し、日中の午後0時にその値がくるように鋼材電位の暴露日数に同期させた。なお、200～220日付近において、データが平坦となっている部分は、落雷等によりデータロガーの電源が落ち、データが収集できなかった期間である。ただし、間欠通電による防食供試体への電流供給はソーラーパネルのみで実施しているため、この期間中も、雷等の影響も無く通電状態であった。また、常時通電方式の供試体についても、自動復帰可能な電源を用いており、常時状態を保っていた。

図3.11に示すように、無防食供試体の鋼材電位は、試験開始時より常に降水量と湿度の変化に伴い、上下する傾向を示した。つまり、雨天により降水量が発生し、湿度が上昇すると鋼材電位は低下した。これは、コンクリートが湿潤状態となると、酸素の拡散速度が低下し、カソード反応が抑制されカソード分極抵抗が高くなることで、鋼材電位が低下しているためであると考えられる。その後、鋼材電位が上昇するのは、降雨が停止し、湿度が低下すると、酸素の拡散速度が上昇し、カソード反応が促進されカソード分極抵抗が低くなるためであると考えられる。また、150日前後までの気温20℃以下の状態では、時折大きくマイナス方向へ変化することはあるが、数日でプラス側の方の電位に回復するような傾向を示した。しかし、気温が20℃を超えた150日辺りからマイナス方向へシフトすると、徐々にプラス方向へ変化するのが遅くなる傾向を示した。これは、上記の湿度低下とともにカソード分極抵抗が小さくなり鋼材電位がプラス方向へ変化する際、気温が上昇するとアノード反応も促進されアノード分極抵抗が小さくなっていることを示していると考えられる。後述する外観調査からも121日時点ではひび割れ無しであるが、237日時点でひび割れが発生している。

図3.12、図3.13に示すように、間欠通電しているいずれの供試体についても、鋼材電位は、日中、日の出とともに防食電流が供給され防食方向の電位となるマイナス方向へ変化し、夜間、日の入りとともに防食電流が停止し、復極方向の電位となるプラス方向へ変化した。つまり、間欠通電している供試体の鋼材電位は日々上下に変化しており、マイナス側の電位が日中、プラス側の電位が夜間を示している。

間欠通電している供試体について、陽極材に貼付け型シート陽極を用いた分極量200mVと300mVの防食供試体以外、当初30日付近まで、夜間の復極後の電位は徐々にプラス方向へ推移した。これは、通電により鋼材表面の状態が徐々に改善されることでアノード反応が抑制されアノード分極抵抗が高くなっているためであると考えられる。なお、陽極材に貼付け型シート陽極を用いた分極量200mVと300mVの防食供試体では、当初30日付近まで夜間および日中とも、徐々に低下しているが、これは、カソード反応に必要な酸素が日中の通電時に消費されたことで、カソード反応が抑制されているためであると考えられる。しかし、その後、通電調整を実施すると、いずれの間欠通電方式による防食供試体についても、夜間と日中の電位差は小さくなり、夜間復極後の鋼材電位のプラス方向への変化も小さくなった。特に、チタンリボンを用いた供試体では、図3.13に示すように、200～

240日付近の約30°Cになると夜間と日中の電位差がほぼ無い状態となり、無防食供試体のように降水量の増加、湿度の上昇により、常時通電供試体も含め、鋼材電位が大きく低下した。一方、陽極材に貼付け型シート陽極を用いた供試体についても、図3.12に示すように200~240日付近の約30°Cになると、夜間と日中の電位差が小さくなった。しかし、チタンリボンを用いた供試体と異なり、分極量50mVを除くと、いずれの供試体についても、夜間と日中の電位差が存在している状況であった。

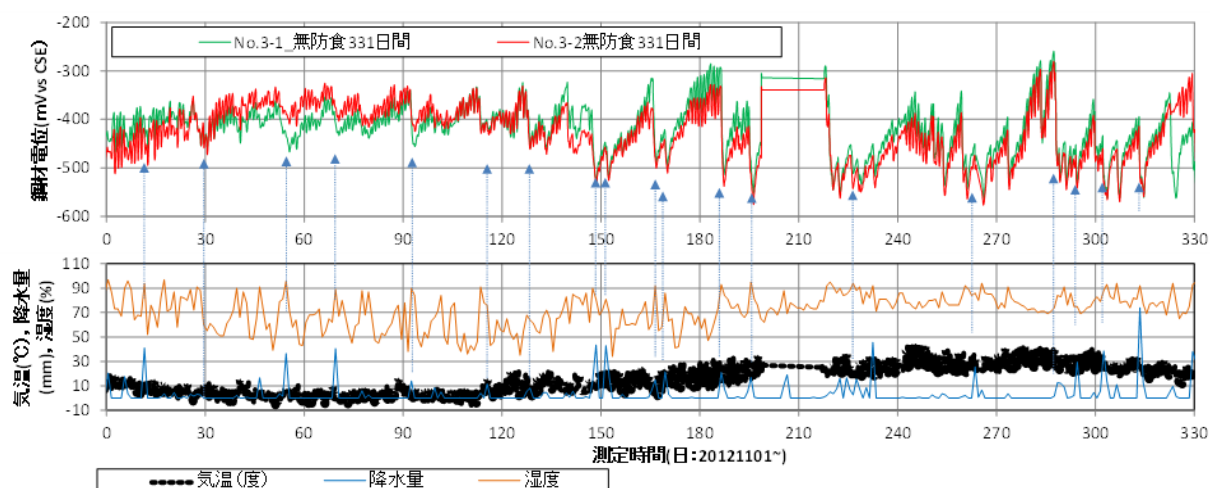


図 3.11 無防食供試体の鋼材電位の経時変化

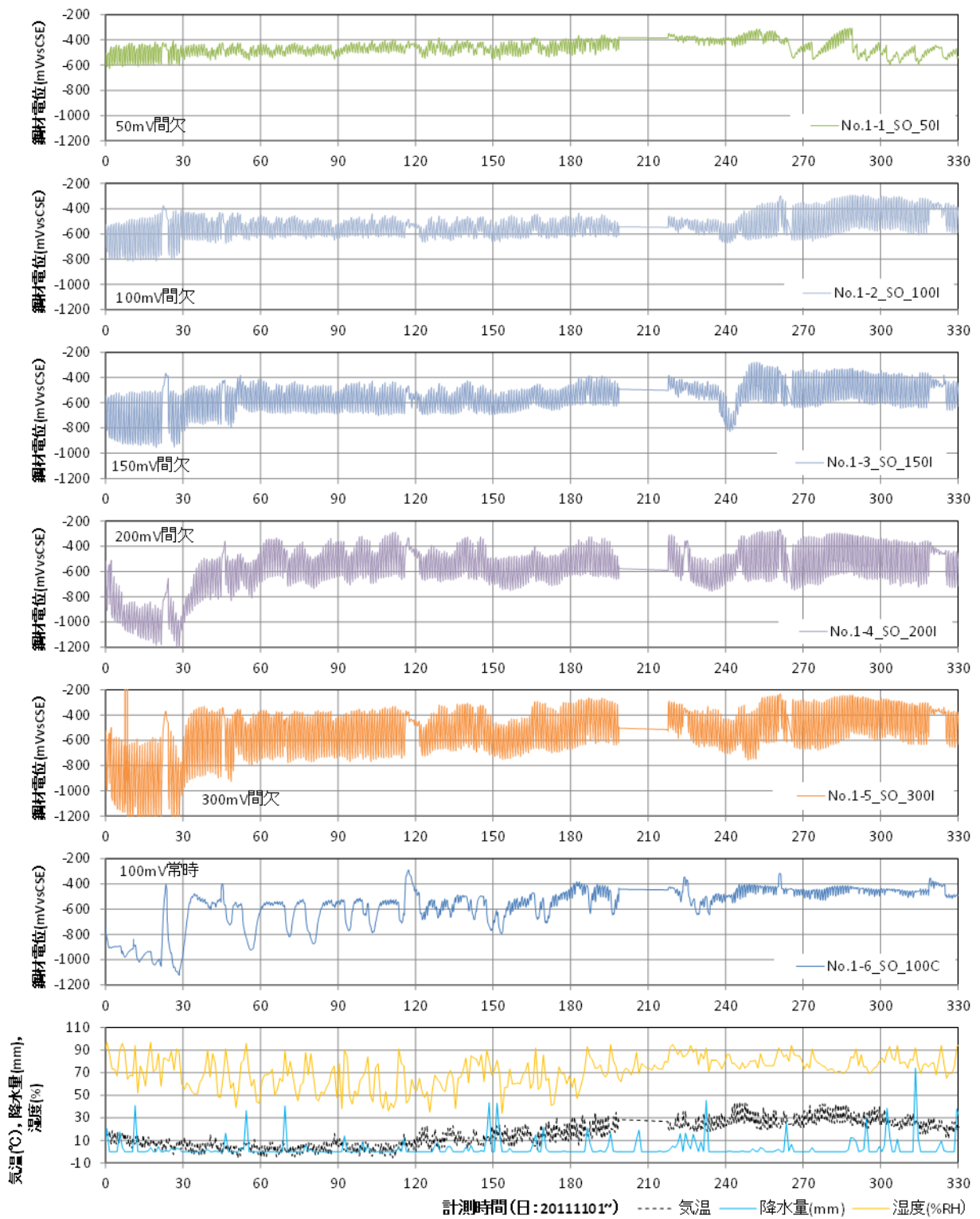


図 3.12 貼付け型シート陽極を用いた防食供試体の鋼材電位の経時変化



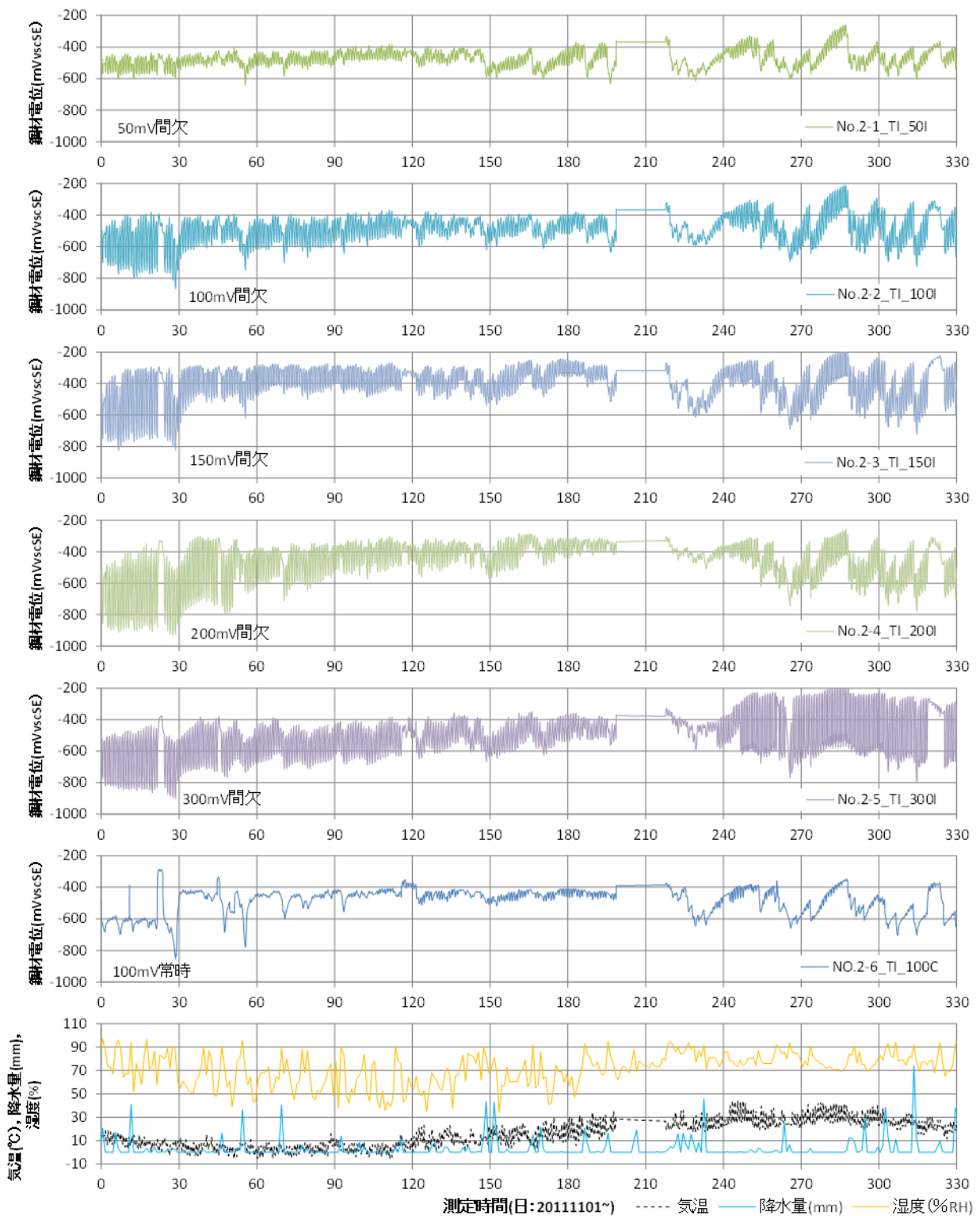


図 3.13 チタンリボンを用いた防食供試体の鋼材電位の経時変化

### (3) 解体前の分極抵抗法による調査結果

暴露期間中、定期的に鋼材の状態を確認するため、腐食診断器（CM-V：四国総合研究所製）を用



い、復極試験後の供試体の分極抵抗を図3.14に示す陽極材設置面の反対側のかぶり51mm側で計測した。供試体は測定前に3時間以上湿潤状態とした。測定時の印加交流電圧は10mVとし、周波数10Hzと20mHzの高低2周波で交流を印加して分極抵抗を求める簡易法にて計測した。分極抵抗より算出した各供試体の腐食電流密度の推移を図3.15に示す。なお、図に示す電流密度の推移には供試体1体あたり3箇所計測し、それらの値の平均値を用いた。

図に示すように、常時通電供試体を含め、供試体の腐食電流密度は0.2~1.0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の値を示し、腐食判定基準では低~高程度の腐食速度を示した。また、防食、無防食の優劣の有無は確認できなかった。後述する解体後の鋼材では明らかに優劣の差があるのに対し、分極抵抗法で測定した結果がこのように防食・無防食で優劣を確認できなかったのは、通電時と異なる復極後の自然電位の状態で計測しているため、①腐食速度の差が小さい状態で計測している、あるいは、②電気防食による鋼材表面の環境改善効果（塩化物イオンの減少、水酸化物イオンの増加によるpH上昇<sup>4)</sup>）によって生じた不動態皮膜 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ <sup>13),14)</sup>が $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 等の3価の酸化鉄になる酸化反応をアノード反応として計測している等の可能性が考えられる。

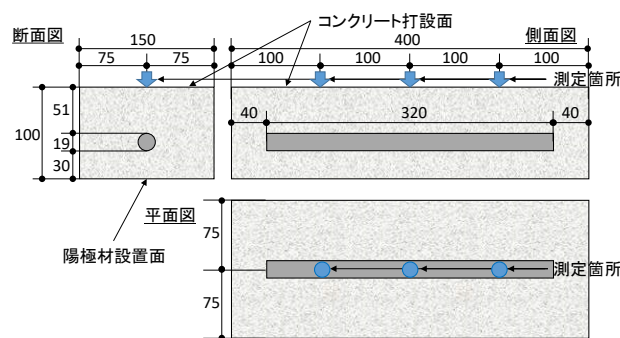
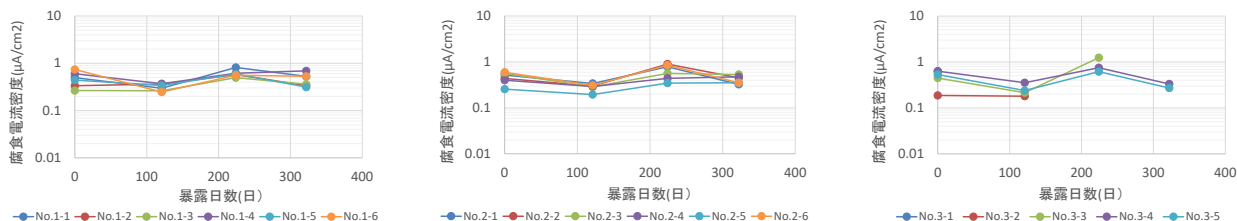


図 3.14 腐食診断器による分極抵抗測定箇所



陽極材：貼付け型シート陽極

陽極材：チタンリボン

無防食供試体

腐食速度判定基準				
腐食電流密度 $I_{corr} (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	0.2未満	0.2以上0.5以下	0.5以上1.0以下	1より大
腐食速度の判定	不動態状態(腐食なし)or 極めて遅い腐食速度	低~中程度の腐食速度	中~高程度の腐食速度	激しい, 高い腐食速度

図 3.15 腐食診断器による分極抵抗測定箇所

#### (4) 解体後の鋼材の調査結果

暴露試験後の供試体の割裂後、供試体から鋼材を採取し、JCI-SC1の「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準拠し、鋼材表面の腐食面積率と腐食減量を算出した。各供試体の解体前のひび割れ発生状況を表3.3、暴露試験後の鋼材の腐食状況について、貼付け型シート陽極を用いた防食供試体の鋼材の腐食状況を表3.4、チタンリボンを用いた防食供試体の鋼材の腐食状況を表3.5、無防食供試体の鋼材の腐食状況を表3.6に示す。

表3.3に示すように、コンクリート表面に発生したひび割れは、無防食供試体では暴露237日目に延長400mmのひび割れが発生し、暴露331日目には900mm以上に進展した。貼付け型シート陽極を用いた防食供試体では、分極量50mVの間欠通電方式のみ、暴露331日時点で405mmのひび割れが発生

したが、その他の防食供試体にはひび割れは一切発生しなかった。

また、貼付け型シート陽極を用いた防食供試体の鋼材の腐食状況に関し、分極量100mV以上の防食供試体は、表3.4に示すように、無防食供試体の養生直後あるいは常時通電で防食した供試体と同等であった。

一方、チタンリボンを用いた防食供試体では、いずれもコンクリート表面に延長300mm以上のひび割れが発生した。また、チタンリボンを用いた防食供試体の鋼材の腐食状況に関し、表3.5に示すように、ひび割れの発生していた防食供試体は、チタンリボンを用いた分極量300mVの防食供試体を除き、腐食面積および腐食減量とも大きな値を示した。つまり、チタンリボンを用いた防食供試体では、分極量300mVの間欠通電供試体のみ無防食供試体の養生直後同等であり、それ以外は常時通電供試体を含め、腐食面積率および腐食減量とも大きな値を示した。

本検討では、貼付け型シート陽極を用いた場合、分極量を100mV以上とすることで、間欠通電方式でも常時通電方式と同等の防食効果が確認できた。しかし、同様の分極量で実施したチタンリボンを用いた供試体では、常時通電方式を含めひび割れや腐食が発生した。これは、①乾燥収縮による影響、②通電調整時期による影響、③陽極の設置位置による影響等が考えられる。

以下にそれぞれの影響に関する詳細を示す。

そこで、これらの原因を検討するため、次節以降、引き続き室内および屋外暴露試験を実施した。

#### ① 乾燥収縮による影響

本試験では、供試体の養生を封かん養生28日間とし、養生直後から通電を開始した。電気防食では、陽極からコンクリートを介して陰極である鋼材へ通電する際、鋼材表面では酸素と水が電子を受け取り酸素が還元し水酸化物イオンが生じる反応が起きている。つまり、鋼材表面では通電とともに水が消費される。よって、コンクリートの水和反応が不完全な状態で通電すると、コンクリートの硬化反応に必要な水分を消費する可能性があり、その影響で供試体にひび割れが発生した可能性がある。

#### ② 通電調整時期の影響

本検討では、鋼材の分極量を設定し、その分極量に見合う電流量を最大電流量として、ソーラーパネルで発電した電力を制御して供試体へ通電した。つまり、ソーラーパネルの発電が十分な場合、定電流制御で通電していることとなる。そこで、本試験では鋼材電位の分極量を制御するため、一定期間ごとに復極試験で分極量を確認し、通電量を上下させた。電気防食では、継続的な通電により鋼材表面に吸着していた塩化物イオンは減少し、酸素の還元反応で水酸化物イオンが生成し、鋼材表面のアルカリ性が上昇する。このように鋼材表面の状態が改善すると不動態皮膜が再生し、鋼材電位はプラス方向へ変化し、定電流では分極量が増加する。つまり、定電流方式での電気防食時、通電を継続し、電気防食の効果が発揮されると、分極量が大きくなる<sup>4)</sup>。本試験では、通電調整時の気温や気候変動を考慮せず、防食効果による分極量の増加時に通電量を小さくした。一方、鋼材の腐食反応は、化学反応であるため、腐食速度は温度に依存する<sup>15)</sup>。つまり、気温を考慮せずに通電調整を実施したため、環境変化で気温が上昇し、腐食速度が増加した際、通電量不足が発生した可能性がある。

#### ③ 陽極材の設置位置による影響

本試験では、陽極材に貼付け型シート陽極とチタンリボンを用い、貼付け型シート陽極は供試体

の外部，チタンリボンは鋼材から 20mm の位置に横向きで設置した．電気防食では，継続的な通電により鋼材表面で塩素イオンは低下，水酸化物イオンは増加する．望月らの報告<sup>2),16),17)</sup>によると，それらの要因は，各電極間の距離，水酸化物イオンの拡散定数，環境抵抗率によって変化することが示されている．具体的には，小さな電流密度で水酸化物イオン生成による pH 上昇を得るには，電極間の距離を大きくし，拡散定数を小さく，環境抵抗率を小さくすることが効果的である．また，小さな電流密度で塩化物イオン量の低下率を上げるには，電極間の距離を大きく，環境抵抗率を大きくする方が効果的である．つまり，鋼材表面の水酸化物イオン量の増加と塩化物イオン量の低減を小さな電流密度で両立するには，陽極材を鋼材からできるだけ離れた位置に設置することが重要となる．よって，陽極材の設置位置が異なると鋼材表面での防食効果が異なり，その影響で異なる試験結果となった可能性がある．また，間欠通電では夜間無通電状態となるため，日中の通電時に陽極材および鋼材表面で生成したイオン等が夜間の無通電時に拡散するため，陽極材の設置位置によって影響が異なる可能性がある．さらに，電気防食では，陽極材からコンクリートを介して鋼材表面へ通電するため，陽極材の設置位置や設置面積によって，鋼材表面への電流分布が異なり，その影響の可能性もある．

表 3.3 各供試体のひび割れ発生状況

No.	1-1	2-1	2-2	2-3
陽極	貼付け型シート陽極	チタンリボン(外付)	チタンリボン(外付)	チタンリボン(外付)
分極量 (mV)*	501	501	1001	1501
ひび割れ延長 (mm)	405	670	660	325
状況				
No.	2-4	2-5	2-6	
陽極	チタンリボン(外付)	チタンリボン(外付)	チタンリボン(外付)	
分極量 (mV)*	2001	3001	100C	
ひび割れ延長 (mm)	550	325	415	
状況				
No.	3-3	3-4	3-5	
陽極	無防食供試体	無防食供試体	無防食供試体	
分極量 (mV)*	暴露237日	暴露331日	暴露331日	
ひび割れ延長 (mm)	400	920	975	
状況				

\* ) I : 間欠通電方式, C : 常時通電方式

表 3.4 貼付け型シート陽極を用いた防食供試体の鋼材の腐食状況

供試体 No.	分極量 (mV) <sup>1)</sup>	ひび割れ(mm)	腐食面積率(%)	腐食減量(g) <sup>2)</sup>	腐食マッピング図 <sup>3)</sup> (腐食箇所: 黒色)	鋼材の腐食状況	
						かぶり30mm側	かぶり50mm側
1-1	50I	405	35.4	7.50			
1-2	100I	—	2.1	3.71			
1-3	150I	—	1.7	3.56			
1-4	200I	—	2.5	4.01			
1-5	300I	—	2.6	3.85			
1-6	100C	—	2.7	4.46			

1): 間欠通電方式, C: 常時通電方式, 2) 黒皮質量含む, 3) 中央部分: かぶり30mm側 →

表 3.5 チタンリボンを用いた防食供試体の鋼材の腐食状況

供試体 No.	分極量 (mV) <sup>1)</sup>	ひび割れ(mm)	腐食面積率(%)	腐食減量(g) <sup>2)</sup>	腐食マッピング図 <sup>3)</sup> (腐食箇所: 黒色)	鋼材の腐食状況	
						かぶり30mm側	かぶり50mm側
2-1	50I	670	33.1	6.94			
2-2	100I	660	30.0	6.55			
2-3	150I	325	23.9	6.12			
2-4	200I	550	24.3	5.46			
2-5	300I	325	5.1	4.62			
2-6	100C	415	21.7	5.87			

1): 間欠通電方式, C: 常時通電方式, 2) 黒皮質量含む, 3) 中央部分: かぶり30mm側 →

表 3.6 無防食供試体の鋼材の腐食状況

供試体 No.	暴露日数	ひび割れ(mm)	腐食面積率(%)	腐食減量(g) <sup>1)</sup>	腐食マッピング図 <sup>2)</sup> (腐食箇所: 黒色)	鋼材の腐食状況	
						かぶり30mm側	かぶり50mm側
3-1	0日	—	15.3	4.16			
3-2	121日	—	6.4	4.08			
3-3	237日	400	21.0	5.46			
3-4	331日	920	45.7	7.03			
3-5		975	52.0	8.09			

1) 黒皮質量含む, 2) 中央部分: かぶり30mm側 →

(5) 解体後のコンクリートの調査結果

1) 中性化深さの測定結果

図3.16に示す位置で暴露試験後の供試体を割裂し、陽極材設置面であるかぶり30mm側の中性化深さを確認した。各供試体の中性化深さ測定結果の一覧を表3.7に示す。なお、割裂後の中性化深さを撮影した写真は図3.16の側面図の位置関係と同様である。中性化深さは陽極材を設置していたかぶり厚30mmの側のコンクリート表面から5点計測した。なお、ひび割れの生じた防食供試体や無防食供試体についても、ひび割れが発生していない断面で計測した。

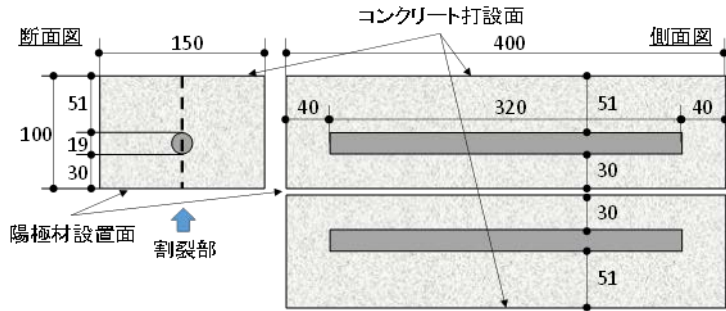


図 3.16 供試体の割裂箇所

表3.7に示すように、331日間暴露した無防食供試体の中性化深さは、6.6～6.9mmであった。貼付け型シート陽極を用いた防食供試体の中性化深さは、無防食供試体と異なり、0.4～1.3mm程度とほとんど中性化していなかった。一方、チタンリボンを用いた防食供試体の中性化深さは、ほぼ無防食供試体と同等の5.2～6.8mmの値を示した。

このように貼付け型シート陽極を用いた防食供試体のみ中性化深さが小さいのは、貼付け型シート陽極は表面をフッ素樹脂フィルムで覆っており、その劣化因子の遮断効果のためである。なお、塩化物イオンを含むコンクリートに電気防食を適用すると塩化物イオンが電気泳動で陽極材付近に移動し、陽極材へ電子を受け渡すと塩素ガスとなり、その塩素ガスが水と反応し、塩化水素及び過塩素酸となる可能性があり、陽極材の周囲でコンクリートが中性化することが想定された<sup>12)</sup>。しかし、今回の暴露試験では、両陽極材とも塩化物イオンの影響と考えられる陽極材周囲の中性化は確認できなかった。

表 3.7 各供試体の中性化深さ測定結果一覧

No.	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
陽極	貼付け型シート陽極	貼付け型シート陽極	貼付け型シート陽極	貼付け型シート陽極	貼付け型シート陽極	貼付け型シート陽極
分極量 (mV)*	501	1001	1501	2001	3001	100C
中性化深さ (mm)	1.2	1.3	1.2	0.4	0.4	0.5
状況						
No.	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6
陽極	チタンリボン(外付)	チタンリボン(外付)	チタンリボン(外付)	チタンリボン(外付)	チタンリボン(外付)	チタンリボン(外付)
分極量 (mV)*	501	1001	1501	2001	3001	100C
中性化深さ (mm)	6.8	6.2	5.2	6.1	5.7	6.4
状況						
No.	3-4	3-5				
陽極	無防食供試体	無防食供試体				
暴露日数	331日後	331日後				
中性化深さ (mm)	6.9	6.6				
状況						

\*1) I: 間欠通電方式, C: 常時通電方式



## 2) 塩化物イオン量の測定結果

暴露試験後の供試体から図3.17に示すようにスライスした供試体を採取し、含まれている塩化物イオン量を定量分析した。特に、かぶり30mm側については、通電による影響を確認するため、厚さ10mmで供試体を採取した。定量分析はJIS A 1154:2012「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し、電位差滴定法により分析した。電位差滴定法による定量分析の結果を図3.18に示す。

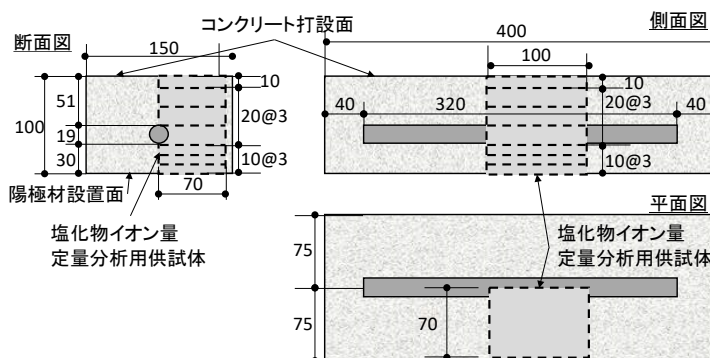


図 3.17 塩分分析用供試体の採取箇所

### ①貼付け型シート陽極を用いた防食供試体

塩化物イオンを含むコンクリートに電気防食工法を適用すると、塩化物イオンは陰イオンであるため、陰極である鋼材表面から陽極材の方へ電気泳動で移動すると考えられ、鋼材表面の塩化物イオン濃度は低下し、陽極材付近の塩化物イオン濃度は上昇することを想定した。しかし、図に示す電位差滴定法による定量分析の結果から、いずれの供試体についても、かぶり30mm側の陽極材設置箇所のコンクリート面で、鋼材からコンクリート表面に近づくに従い、塩化物イオンが減少する傾向を示した。これは、電気防食に伴いかぶり30mm側の塩化物イオンが電気泳動により陽極材の方に移動し、陽極材へ電子を受け渡し塩素ガス等として放出したと考えられる。かぶり51mm側のコンクリートについては、表面側から90-100mm部分の塩化物イオン濃度が内部より減少しているが、これは中性化による塩化物イオンの濃縮化現象の影響と考えられる。

### ②チタンリボンを用いた防食供試体

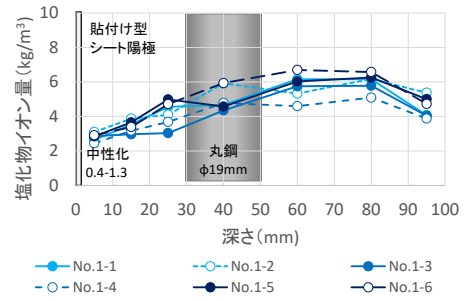
貼付け型シート陽極を外付した防食供試体と同様、いずれの供試体についても、かぶり30mm側の陽極材設置箇所のコンクリート面で、鋼材からコンクリート表面に近づくに従い、塩化物イオンが減少する傾向を示した。また、かぶり51mm側のコンクリートについても、中性化による塩化物イオンの濃縮化現象により、表面側から90-100mm部分の塩化物イオン濃度が内部より減少した。

### ③無防食供試体について

図に示すように、331日間暴露した無防食供試体は、かぶり30mm側及び51mm側のコンクリート面（表面からの距離0-10mm及び90-100mm）の中性化領域では、塩化物イオンが減少しており、中性化部と未中性化部の境界付近の未中性化部の塩化物イオン量が若干高くなっている傾向を示した。これは、元々コンクリート内に一様に存在していた塩化物イオンが、中性化により中性化部分の塩化物イオンが未中性化部の内部へ濃縮したためであると考えられる。

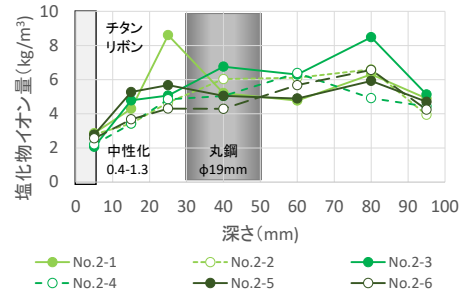


表面からの 深さ(mm)	塩化物イオン量(kg/m <sup>3</sup> )					
	No.1-1 SO_50I	No.1-2 SO_100I	No.1-3 SO_150I	No.1-4 SO_200I	No.1-5 SO_300I	No.1-6 SO_100C
0 - 10	2.63	3.10	2.86	2.44	2.84	2.91
10 - 20	3.54	3.88	2.97	3.17	3.66	3.39
20 - 30	4.56	4.10	3.03	3.68	4.99	4.72
30 - 50	4.66	5.92	4.35	4.78	4.57	5.94
50 - 70	6.16	5.33	5.75	4.60	6.03	6.70
70 - 90	6.16	6.17	5.78	5.09	6.26	6.58
90 - 100	4.07	5.38	4.04	3.88	5.01	4.73



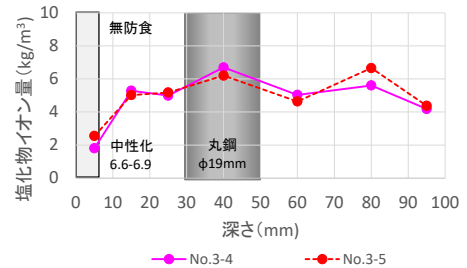
貼付け型シート陽極を用いた防食供試体

表面からの 深さ(mm)	塩化物イオン量(kg/m <sup>3</sup> )					
	No.2-1 TI_50I	No.2-2 TI_100I	No.2-3 TI_150I	No.2-4 TI_200I	No.2-5 TI_300I	No.2-6 TI_100C
0 - 10	2.87	2.79	2.07	2.21	2.78	2.56
10 - 20	4.29	3.43	4.79	3.42	5.27	3.68
20 - 30	8.61	4.65	5.07	4.85	5.68	4.31
30 - 50	5.21	6.03	6.76	5.04	5.05	4.29
50 - 70	4.77	6.11	6.30	6.39	4.89	5.68
70 - 90	6.30	6.60	8.49	4.91	5.93	6.57
90 - 100	4.90	3.94	5.13	4.44	4.70	4.24



チタンリボンを用いた防食供試体

表面からの 深さ(mm)	塩化物イオン量(kg/m <sup>3</sup> )	
	No.3-4 無防食	No.3-5 無防食
0 - 10	1.81	2.55
10 - 20	5.29	5.03
20 - 30	4.99	5.18
30 - 50	6.70	6.21
50 - 70	5.04	4.64
70 - 90	5.61	6.66
90 - 100	4.19	4.38



無防食供試体

図 3.18 塩分分析結果

### 3.1.5 本節のまとめ

本節では、鉄筋コンクリート構造物の電気防食時、ソーラーパネルのみを電流供給源とした場合の電源の制御方法について、屋外暴露試験により検討した。本検討により明らかになったことを以下に示す。

- (1) 貼付け型シート陽極を用いた場合、分極量を100mV以上とすることで、間欠通電方式でも常時通電方式と同等の防食効果が確認できた。しかし、同様の分極量で実施したチタンリボンを用いた供試体では、常時通電方式を含めひび割れや腐食が発生した。このような使用した陽極の違いによる腐食抑制効果の相違は、①乾燥収縮による影響、②通電調整時期による影響、③陽極の設置位置による影響が考えられた。
- (2) システム構成に関し、ソーラーパネルのサイズは防食回路に必要な電力の10倍、電源装置の起動は入力電圧5V程度、防食回路への通電は定電流制御方式とすることで、雨天時の悪天候時を含め最低でも1日6時間通電でき、平均では10.8時間通電できた。
- (3) 通電時間の平均は季節で異なり、春秋の4～6月・10～12月時では10.6時間、夏の7～9月時では1

1.9時間、冬の1～3月時では9.8時間であり、ソーラーパネルを電流供給源とすることで、気温上下に伴う鋼材腐食速度の増減に対し効率的な通電時間が確保できていた。

- (4) 防食供試体の腐食速度を復極試験後に分極抵抗法で評価したが、暴露途中を含め、防食、無防食とも $0.2\sim 1.0\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の同等の腐食電流密度を示し、復極試験後の分極抵抗法による評価では防食効果の優劣を確認できなかった。
- (5) 間欠通電方式による電気防食では、夜間に無通電状態があるため、常時鋼材電位を計測することで、鋼材電位の状況が確認可能であった。
- (6) 中性化深さは使用した陽極によって異なり、シート陽極は $0.4\sim 1.3\text{mm}$ であり、チタンリボンは無防食とほぼ同様の $5.2\sim 6.8\text{mm}$ であった。つまり、中性化深さは使用する陽極によるコンクリート表面の被覆状況で異なっており、通電方式による相違は確認できなかった。
- (7) 塩化物イオン量に関し、通電による電気泳動の影響で陽極設置側のかぶりコンクリート部で減少していたが、通電方式による減少量の相違は確認できなかった。

### 3.2 室内環境下での間欠通電方式による鋼材腐食抑制効果の検討 (5°C, 20°C, 35°C環境下)

#### 3.2.1 はじめに

鉄筋コンクリート構造物の鋼材の腐食反応では、鉄が酸化してイオン化するアノード反応と酸素が水と反応して還元するカソード反応が同時に進行している。それらの反応が平衡状態にある場合、鉄の電位は下記の式①：ネルンストの式で表される<sup>18)</sup>。電極電位 $E$ を表すネルンストの式には温度因子 $T$ が含まれており、温度が変化すると平衡状態が変わり、腐食電流が変化するとともに電位が変化する。つまり、温度は腐食電流が変化する要因の一つである<sup>15),18)</sup>。

また、式②：アレニウスの式でも反応速度定数 $k$ と温度 $T$ の関係が表されており温度変化とともに反応速度が異なる。さらに、コンクリート構造物に含まれる塩化物イオン量についても、塩化物イオンが不動態皮膜に作用し腐食速度に影響を与えるため、塩化物イオン濃度の変化に伴い、腐食速度が変化する<sup>19)</sup>。また、温度変化と塩化物イオン濃度が相互に作用し、腐食速度へ影響すると報告されている<sup>20)</sup>。そこで、間欠通電方式による電気防食時の鋼材腐食抑制効果について、本節では温度や塩化物イオン量による腐食速度への影響を考慮し、室内暴露試験時の室内温度は5°C, 20°C, 35°Cの3条件、供試体の塩化物イオン量は、 $2\cdot 6\cdot 10\text{kg}/\text{m}^3$ の3条件で検討した。

$$\text{ネルンストの式} : E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{\text{Red}}}{a_{\text{Ox}}} \quad \text{①}$$

$E$ : 電極電位,  $E^\circ$ : 標準電極電位,  $R$ : 気体定数,  $T$ : 絶対温度 (K),  $n$ : 移動電子数,  
 $F$ : ファラデー定数,  $a$ : 活量

$$\text{アレニウスの式} : k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{②}$$

$k$ : 反応速度定数,  $A$ : 定数,  $E_a$ : 活性化エネルギー,  $R$ : 気体定数,  $T$ : 絶対温度 (K)

一方、前節では、陽極材に貼付け型シート陽極とチタンリボンの2種類を用い、設置方法を貼付け型シート陽極では供試体の外部、チタンリボンでは横向き状態で鋼材から20mmの位置とした。その供試体を用い、設定した鋼材の分極量で、定電流制御による間欠通電で屋外暴露試験を実施した結果、防食効果の異なる実験結果を得た。電気防食では、継続的な通電により鋼材表面で塩素イオン

は低下，水酸化物イオンは増加する．望月らの報告<sup>2),16),17)</sup>によると，それらの要因は，各電極間の距離，水酸化物イオンの拡散定数，環境抵抗率によって変化することが示されており，鋼材表面の水酸化物イオン量の増加と塩化物イオン量の低減を小さな電流密度で両立するには，陽極材を鋼材からできるだけ離れた位置に設置することが重要とされている．つまり，陽極材の設置位置が異なると鋼材表面での防食効果が異なり，その影響で防食効果が異なる可能性がある．また，電気防食では，陽極材からコンクリートを介して鋼材表面へ通電するため，コンクリートが抵抗体となり陽極材の設置位置や設置面積によって，鋼材表面への電流分布が異なり，その影響で防食効果が異なる可能性がある．

また，電気防食時の防食電流の供給は，通常の常時通電方式の場合，通電前の電位から通電後のインスタントオフ電位の変化量を $-100\text{mV}$ 以上変化させる，あるいは復極量を $100\text{mV}$ 以上確保できる電流量とすることで防食性能を達成できる．しかし，夜間通電しない間欠通電方式では，常時通電と同等の防食効果を発揮するには $-100\text{mV}$ シフト基準以上の電流量を必要とする可能性がある．

以上から，本節では，陽極材として一般的に使用されている線状のチタンリボンメッシュを用い，陽極材をコンクリート供試体の内部に設置した場合と外部に設置した場合の2通りで間欠通電方式による電気防食を実施し，その防食効果への影響を確認した．また，陽極面積および設置位置の影響を確認するため，コンクリート供試体の外部に設置する貼付け型シート陽極も併せて検討した．陽極材設置位置の概念図を図3.19に示す．なお，防食効果を発揮する構造や条件を見極めるため，本検討では，環境条件として試験温度，供試体に用いるコンクリートの塩化物イオン量，各種供試体に通電する防食電流量を変化させて実施した．また，一定条件で評価するため，電流供給源には商用電源，通電時間の制御にはタイマースイッチを用いて防食電流を供給することとした．

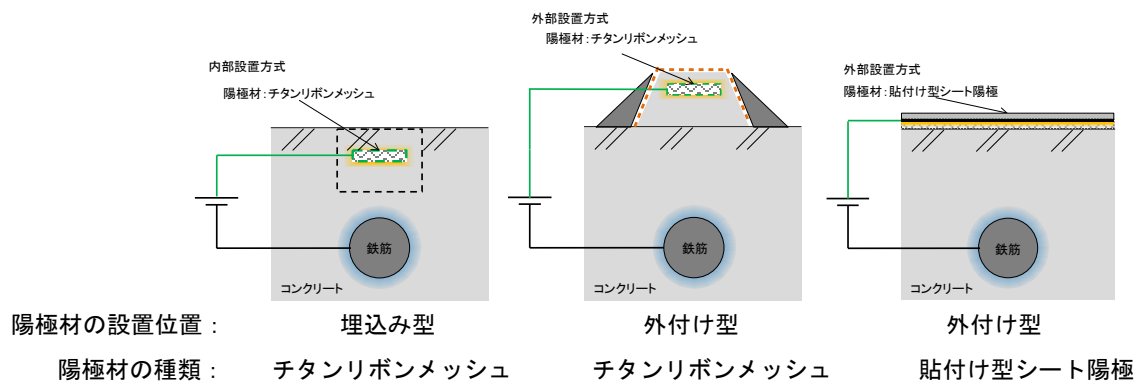


図 3.19 各種陽極材の設置概要図

### 3.2.2 実験方法

#### (1) 供試体の概要

供試体寸法はすべて $100 \times 150 \times 400\text{mm}$ とし，鋼材は黒皮付き丸鋼（SS400， $\phi 19 \times 320\text{mm}$ ）を1本，型枠底面よりかぶり $30\text{mm}$ の位置に設置した．また，陽極材はかぶり $30\text{mm}$ 側に設置し，照合電極はかぶり $51\text{mm}$ 側の打設面の中心付近に貼付け型の銀塩化銀照合電極を設置した．供試体の概略図を図3.20に示す．供試体のコンクリート配合は表3.8に示す18-8-20N，水セメント比 $65\%$ とし，塩化物イオン量は $2.6 \cdot 10\text{kg/m}^3$ の3種類の割合とする塩化ナトリウムを，水に溶解してさせ供試体に混入した．

陽極材には貼付け型シート陽極とチタンリボンを用い、図3.20の供試体のかぶり30mm側に設置した。ただし、チタンリボンは設置位置の影響を確認するため、供試体養生後に横置きで埋込み型と外付け型の2通りの方法で設置した。埋込み型の供試体はコンクリートカッターで作製した溝に、鋼材から10mmの位置にチタンリボン（幅12.7 mm×長さ320mm）を設置し専用モルタルを充填して作製した。外付け型の供試体は鋼材から40mmとなるようにチタンリボン（幅12.7mm×長さ320 mm）を固定したプラスチックモールを供試体外部の中央にエポキシ樹脂で外付した後、専用注入モルタルをモール内に充填して作製した。貼付け型シート陽極を用いた供試体は、通電部が幅70mm×長さ300mmである貼付け型シート陽極をコンクリート表面に貼り付けた後、周りをエポキシ樹脂で封止して作製した。供試体概要図を図3.21に示す。

前節では、供試体の養生は封かん養生28日間とし、屋外暴露試験を実施した結果、無防食供試体の他、常時通電を含めた防食供試体にもひび割れが発生し、乾燥収縮の影響が疑われた。そこで、本節では供試体の養生は、封かん養生28日間+気中養生165日間+各室内環境条件7日間の合計200日間とした。なお、各室内環境条件とは、室内暴露試験時と同じ環境の5°C,20°C,35°Cの3通りである。陽極材の設置や通電や常時計測するための配線作業は気中養生165日間の内、残り30日間で実施した。また、通電回路やデータロガーとの接続、分極抵抗法による腐食電流密度や自然電位の計測、通電調整のための分極試験等は、各室内環境に設置後2日以上経過した段階で実施した。

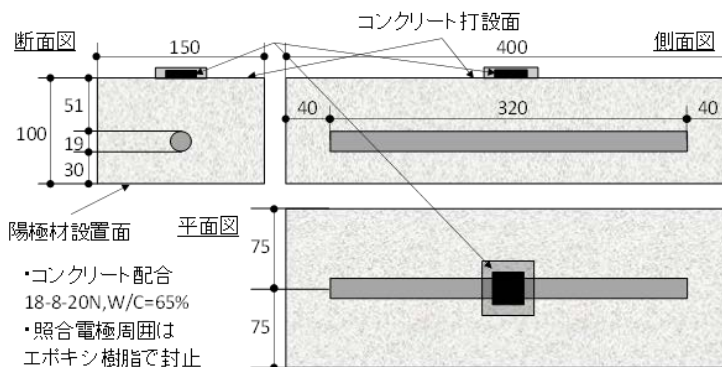


図 3.20 供試体の概要図

表 3.8 コンクリートの配合

・コンクリート配合：18-8-20N(ドライミックス事業共同組合製)

・コンクリート配合表(kg/m<sup>3</sup>)

セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
251	163	906	1041	1.51
水セメント比: 65%		細骨材率: 46.6%		

セメント: 普通ポルトランドセメント, 住友大阪セメント製

細骨材: 砕砂, 栃木県佐野市地内産

粗骨材: 砕石, 栃木県佐野市地内産

混和剤: ヤマソー80P(リグニンスルホン酸塩, セルロースエーテル), 山宗化学製

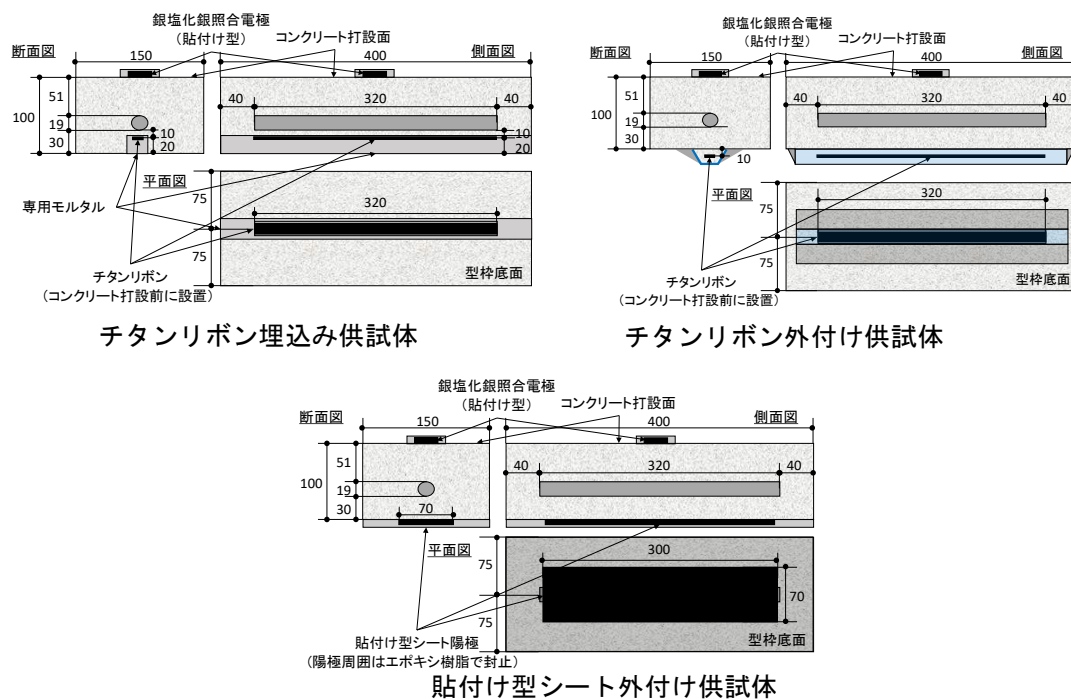


図 3.21 供試体の概要図

## (2) 通電前の鋼材の腐食状況

通電前の鋼材の腐食状況を確認するため、各室内暴露環境下の供試体を予め3時間以上湿潤状態とした後、腐食診断器（四国総合研究所製）を用い分極抵抗法により腐食電流密度を計測した。なお、計測箇所は各供試体のカブリ51mm側の中央付近の1点とした。計測結果を図3.22に示す。また、自然電位についても、計測箇所は各供試体のカブリ51mm側の中央付近1点とし、銅硫酸銅照合電極を用いて計測した。自然電位の計測結果を図3.23に示す。その後、各分極量に相当する通電量を確認するための分極試験を実施した後、鋼材の初期の腐食状態を確認するため、各室内暴露環境下に7日間養生後の供試体を解体調査した。解体した各供試体の鋼材の腐食状況を表3.9に示す。表に示すように、各供試体には腐食が発生しており、塩化物イオン量 $10\text{kg/m}^3$ の $20^\circ\text{C}$ と $35^\circ\text{C}$ の供試体では、他の供試体と比較し、腐食面積率に対する腐食減量が大きくなる局部型の腐食傾向を示した。また、図3.22と図3.23に示すように、ネルンストの式およびアレニウスの式より想定した通り、環境温度が高いほど、腐食電流密度は大きくなり、鋼材電位はマイナスの値を示した。さらに、塩化物イオン量についても、塩化物イオン量が多いほど、腐食電流密度は大きくなり、鋼材電位はマイナスの値を示した。図に示す腐食電流密度の傾向と表に示す腐食の状態が異なるのは、図に示す腐食電流密度が各暴露環境下に設置後2日以上経過した段階での各室内環境下での鋼材の腐食環境を計測しているのに対し、表3.9に示す鋼材の腐食状態は200日間養生中に発生した腐食の蓄積値であるためである。



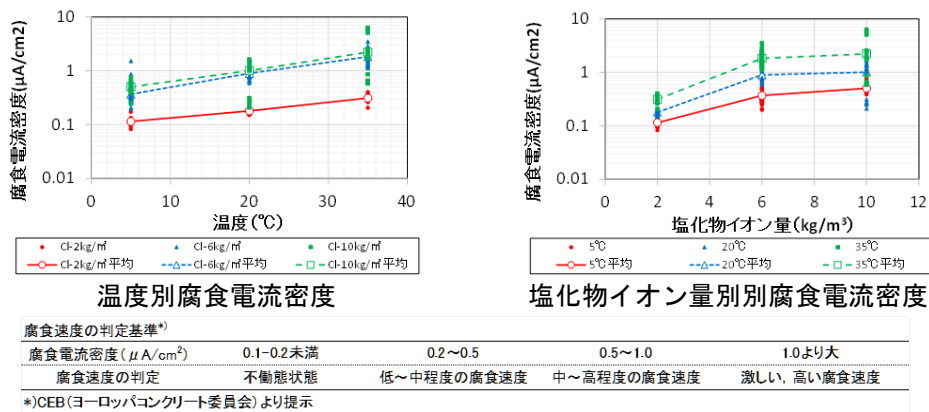


図 3.22 養生直後の鋼材の腐食電流密度

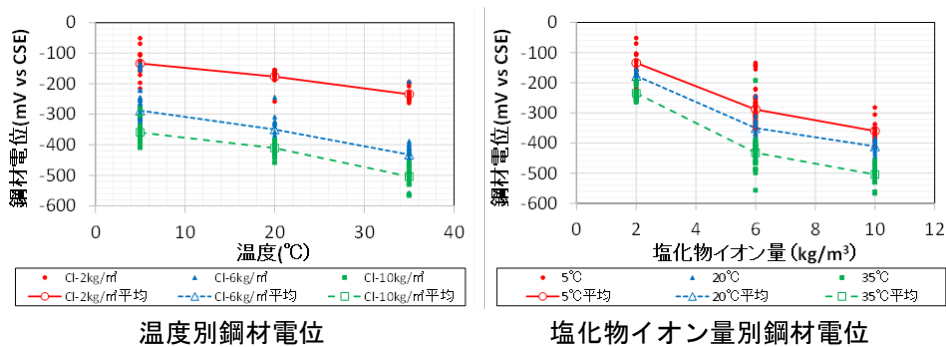


図 3.23 養生直後の鋼材電位

表 3.9 養生直後の鋼材の腐食状況

環境条件	Cl <sup>-</sup> 量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	腐食面積率 (%)	腐食減量 ( $\text{g}$ ) <sup>1)</sup>	腐食マッピング図 <sup>2)</sup> (腐食箇所: 黒色)	鋼材の腐食状況	
					かぶり30mm側	かぶり50mm側
5 $^{\circ}\text{C}$	2	7.1	5.01			
	6	20.2	4.43			
	10	6.2	3.19			
20 $^{\circ}\text{C}$	2	14.2	3.46			
	6	24.2	4.26			
	10	3.6	5.12			
35 $^{\circ}\text{C}$	2	12.2	3.08			
	6	27.1	4.61			
	10	2.9	5.15			

1)黒皮質量含む。2)中央部分: かぶり30mm側 →



**(3) 室内暴露条件**

室内暴露試験時の室内温度は5°C、20°C、35°Cの3条件とし、5°Cおよび20°C環境下では湿度65%RHの一定条件とし、35°C環境では鋼材腐食を促進させるため、湿度調整した乾湿条件とした。ただし、当初の30日間は湿度40%RH、続く140日間は湿度60~90%RHの高湿度状態とした。その後、より厳しい腐食環境とするため、25%RH4時間+60%RH2時間+95%RH4時間+60%RH2時間を1日2サイクルとし120日間、さらに60%RH8時間+95%RH4時間を1日2サイクルで30日間暴露した。

室内暴露試験時の電流供給源には商用電源を用い、所定の分極量となる電流量を定電流電源装置で通電した。分極量の設定値は100,150,200mVの3通り、1日あたりの通電時間は、タイマースイッチを用い5°C65%RH環境下では9時間、20°C65%RH環境下では9時間、35°C乾湿環境下では10時間とした。なお、通電時間は図3.24に示すソーラーパネルを用い試験施工している塩害環境下の2箇所の実構造物（道路橋：北緯33度、栈橋：北緯35度）での通電時間の実績値より設定した。

35°C乾湿環境では合計320日間の暴露試験（通電日数：268日間）を実施し、無防食供試体にひび割れが生じたため、防食供試体を含め全ての供試体の解体調査を行った。また、20°C65%RH環境でも、460日間（通電日数：383日間）の暴露試験で、無防食供試体の一部にひび割れが生じたため、解体調査を行った。なお、5°C65%RH環境では、ひび割れは発生しなかったが、490日間（通電日数：386日間）の暴露試験後、解体調査を行った。無防食供試体のひび割れ発生状況を表3.10に示す。なお、いずれの条件下でも、通電調整は初期のみとし、暴露期間中は通電調整を一切実施しなかった。

評価は、外観調査および鋼材の腐食状況により検討した。鋼材の腐食状況は、JCI-SC1に準拠し腐食面積率および腐食減量を算出して評価した。比較供試体には無防食供試体と分極量100mVの常時通電供試体（塩化物イオン量10kg/m<sup>3</sup>）を用いた。

**・道路橋(2014年4月~2016年11月)**

時期	平均通電時間(h)	平均温度(°C)*	
1~3月	9.9	10.3	
4~6月	11	26.3	
7~9月	11.2	10.2	19.9
10~12月	9.1		16.3
			18.2

\*)現場のコンクリート表面温度

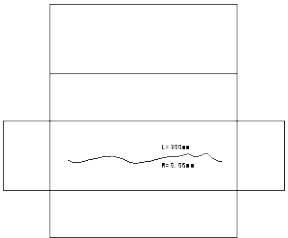
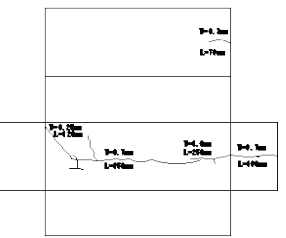
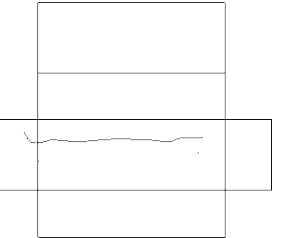
**・栈橋(2015年5月~2016年11月)**

時期	平均通電時間(h)	平均気温(°C)	
1~3月	9.8	10.5	
4~6月	12.1	26.6	
7~9月	13.1	10.9	23.0
10~12月	9.2		15.6
			18.9

\*)現場のコンクリート表面温度

図 3.24 実構造物での通電状況

表 3.10 無防食供試体のひび割れ発生状況

暴露環境	20°C65%RH	35°C乾湿	35°C乾湿
供試体の種類	無 Cl6 無防食供試体	無 Cl6 無防食供試体	無 Cl10 無防食供試体
塩化物イオン量	6kg/m <sup>3</sup>	6kg/m <sup>3</sup>	10kg/m <sup>3</sup>
ひび割れ幅×延長(mm)	0.06 × 300	0.70 × 690	0.08 × 430
状況			

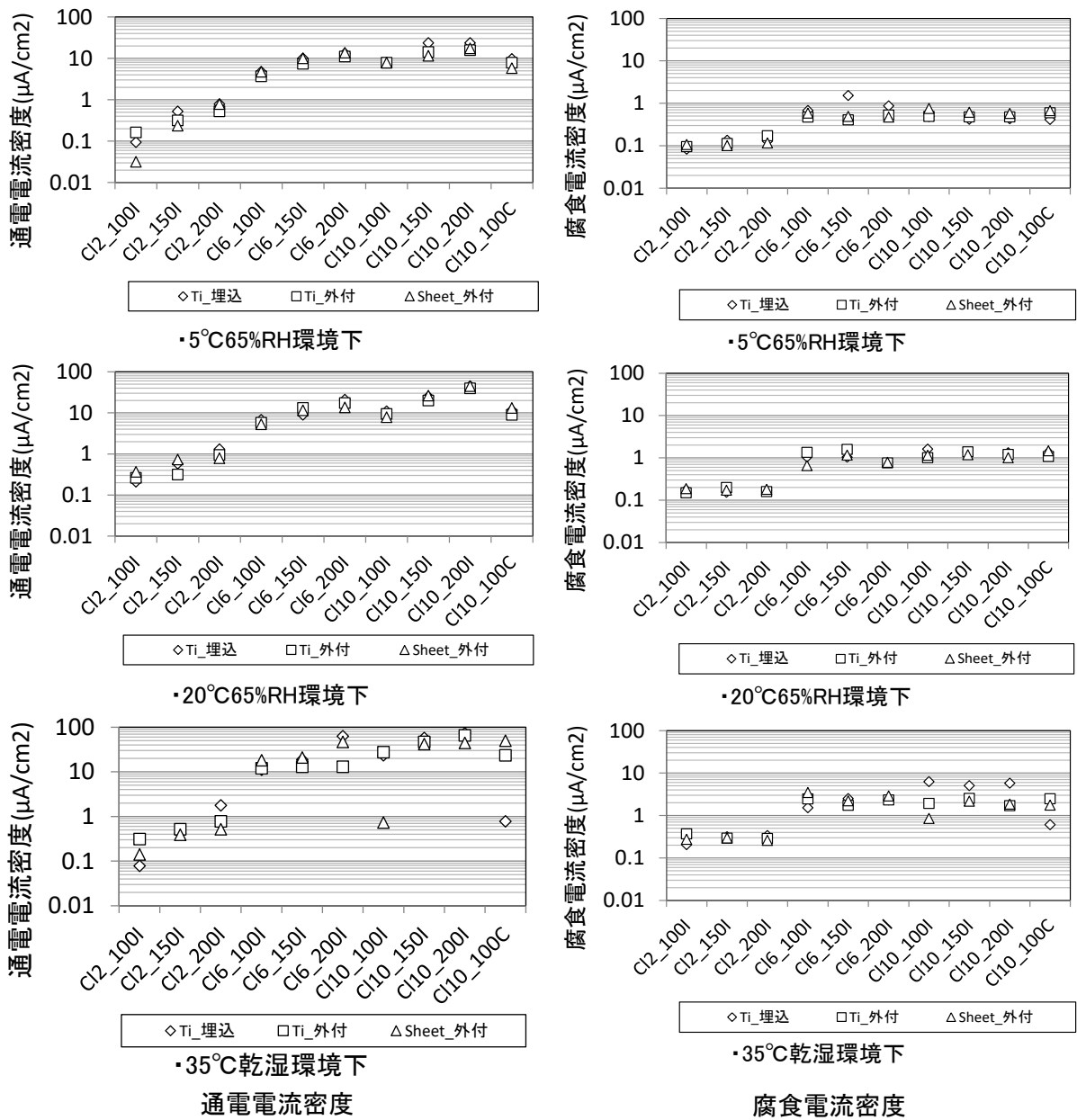
### 3.2.3 実験結果

#### (1) 通電電流量

通電電流量は通電前の各室内暴露環境下で実施した分極試験によって、所定の分極量となる電流量を設定値とした。各室内暴露環境下での供試体への通電電流量と通電前の分極抵抗法により計測した腐食電流密度を図3.25に示す。

図に示すように、陽極の設置位置・面積・種類が異なるが、各分極量に必要な通電電流密度は、各室内暴露環境とも、同様の傾向を示し、塩化物イオン量・分極量・暴露温度の上昇に伴い、通電電流量が多くなる傾向を示した。ただし、35°C環境下の塩化物イオン量10kg/m<sup>3</sup>の2種の供試体では、他の供試体よりも通電電流密度が極端に低くなった。これらの供試体は、腐食電流密度でも極端に小さな値を示しており、供試体の個体差によるものと考えられる。

なお、腐食電流密度が小さく、分極量を100mVとする塩化物イオン量2kg/m<sup>3</sup>や10kg/m<sup>3</sup>の供試体の一部では、通電電流密度より腐食電流密度の方が大きな値を示した。これは、①腐食電流密度計測時はコンクリートを湿潤状態、通電電流密度計測時は乾燥状態で計測しており、計測時の供試体の状態が異なるため、あるいは②腐食電流密度計測箇所と通電電流密度計測箇所が異なるためであると考えられる。特に、腐食電流密度が小さく、分極量の設定に対する通電電流密度が小さな供試体で相違が生じており、電流密度調整時の調整誤差等の発生要因の一つとして、示唆された。



- ・凡例: Ti\_埋込
  - └ 陽極材設置箇所: 埋込, 外付
  - └ 陽極の種類: Ti-チタンリボン, Sheet-貼付け型シート陽極
- ・横軸ラベル: C16\_150I
  - └ 分極量: 100-100mV, 150-150mV, 200-200mV + 通電方式: I-間欠通電, C-常時通電
  - └ 含有塩化物イオン量: C12-2kg/m<sup>3</sup>, C16-6kg/m<sup>3</sup>, 10-10kg/m<sup>3</sup>
- ・通電電流密度: 鋼材表面積あたりの通電量

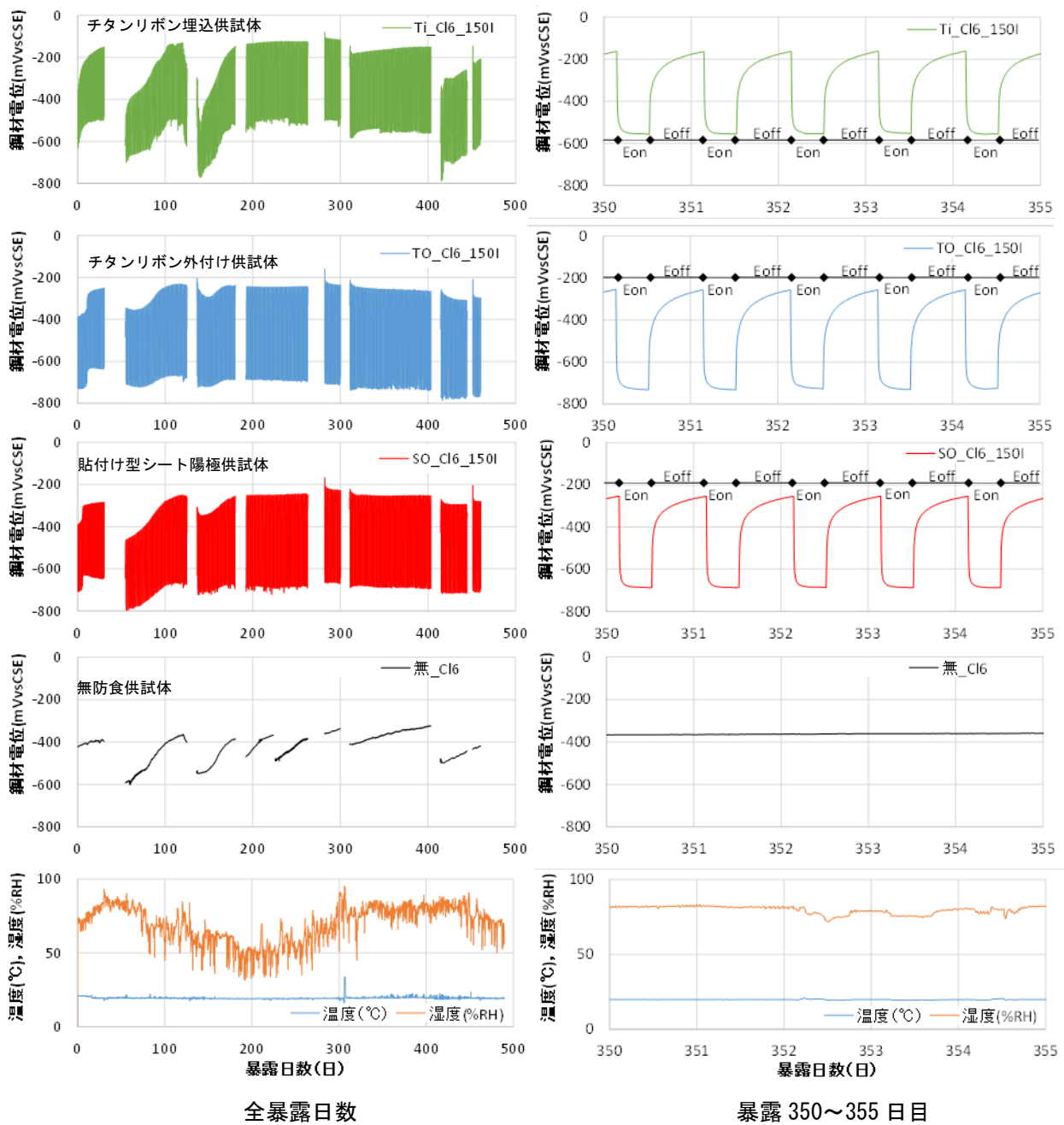
図3.25 通電電流密度と腐食電流密度

## (2) 常時計測結果

各供試体の鋼材電位は、かぶり51mm側に設置した貼付け型の銀塩化銀照合電極で暴露期間中10分ごとにデータロガーで計測した。また、無防食供試体の一部には埋込み型の鉛照合電極を設置し、貼付け型の銀塩化銀照合電極と同時に計測した。計測した鋼材電位は、いずれも銅硫酸銅基準に変換し評価した。鋼材電位の常時計測結果の代表例として、20°C65%RH環境下での分極量150mVの間欠通電方式で防食している供試体の計測結果を無防食供試体の計測結果と併せて図3.26に示す。なお、図に示す無防食供試体の計測結果は埋込み型の鉛照合電極により計測した結果である。各計測結果には、計測時の温湿度も併せて示した。通電時の鋼材電位がオン電位（Eon）であり、無通電時の鋼材電位がオフ電位（Eoff）である。なお、無防食供試体の鋼材電位はオフ電位である。便宜上、グラフの起点は、試験日時開始日の午前0時とした。つまり、日数が記載されている箇所が午前0時である。

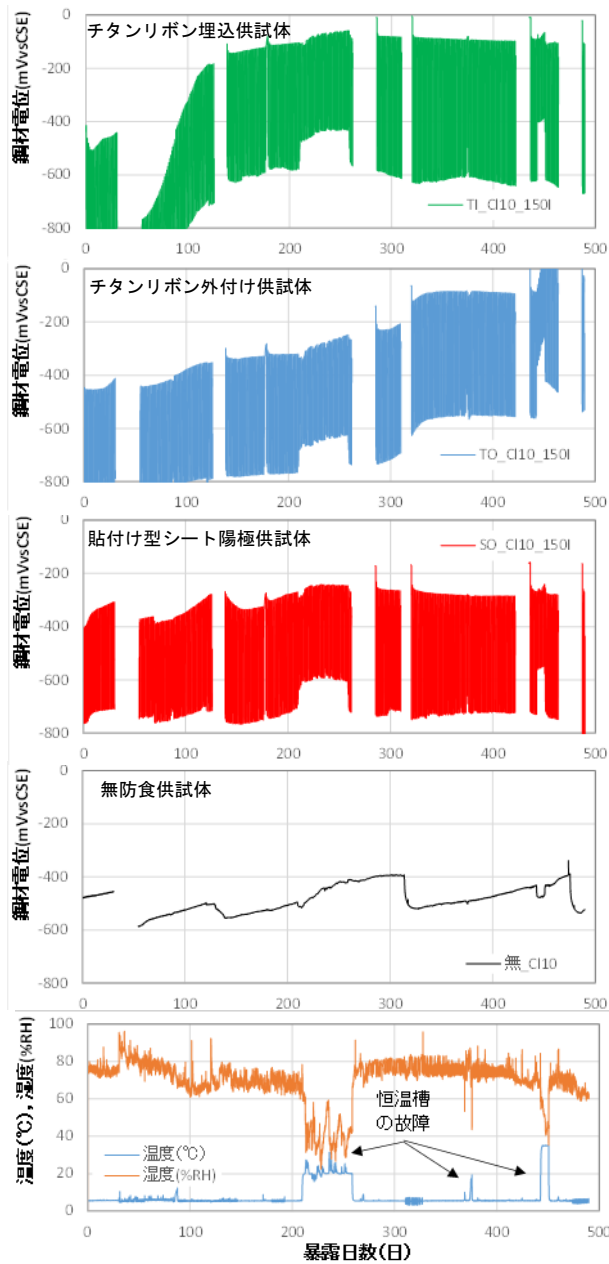
間欠通電方式で防食している供試体の鋼材電位は、いずれも図に示すように、通電状態のオン電位になると急激にマイナス方向へ変化し安定化した後、無通電状態のオフ電位になるとプラス方向へ徐々に変化することを日々繰り返した。つまり、オン電位時のマイナス方向への変化は急激に、オフ電位時のプラス方向への変化は緩やかに推移した。このようにオフ電位時の鋼材電位のプラス方向への変化が緩やかなのは、オフ電位時の鋼材電位のプラス方向への変化は酸素の拡散速度に律速であるためである。通電時のオン電位から無通電時のオフ電位となると、鋼材表面では電気防食により抑制されていたアノード反応が生じ、カソード反応と平衡状態を保ちながら、鋼材電位はプラス方向へ変化する。しかし、通電時のオン電位の鋼材表面では、通電により水と酸素が常に消費され水酸化物イオンが生じる反応が生じており、酸素が不足した状態である。そのため、無通電時のオフ電位となっても、カソード反応に必要な酸素が不足しており、アノード反応とカソード反応の平衡電位である鋼材電位は急激にはプラス側へ変化できず、オフ電位のプラス方向への変化は鋼材表面への酸素の供給速度に依存するためである。

図3.26の鋼材電位の常時計測が途切れている箇所は、通電を停止し、復極試験や分極試験等を実施した箇所である。分極試験では供試体を湿潤状態として計測しており、湿潤状態とすると乾燥状態よりも鋼材表面では酸素濃度が低い状態となる<sup>21)</sup>。そのため、通電停止後の鋼材電位はカソード反応が抑制されたマイナス状態となっており、無防食供試体では、供試体の乾燥に伴いカソード反応に必要な酸素が供給され、徐々にプラス方向へ変化することを繰り返した。間欠通電方式で防食している供試体のオフ電位についても、200日付近までは無防食供試体と同様の傾向を示した。しかし、暴露日数の経過とともに通電再開後のオフ電位はプラスの値となり、経時変化によるオフ電位の変化量も小さくなった。これは図3.27示すように電気防食の効果で鋼材表面の状態が変化し、アノード反応が抑制されているためと考えられる。なお、図3.28に5°C65%RH環境下および35°C乾湿環境下の供試体の鋼材電位の一部を示しているが、20°C65%RH環境下の供試体と同様の傾向を示している。

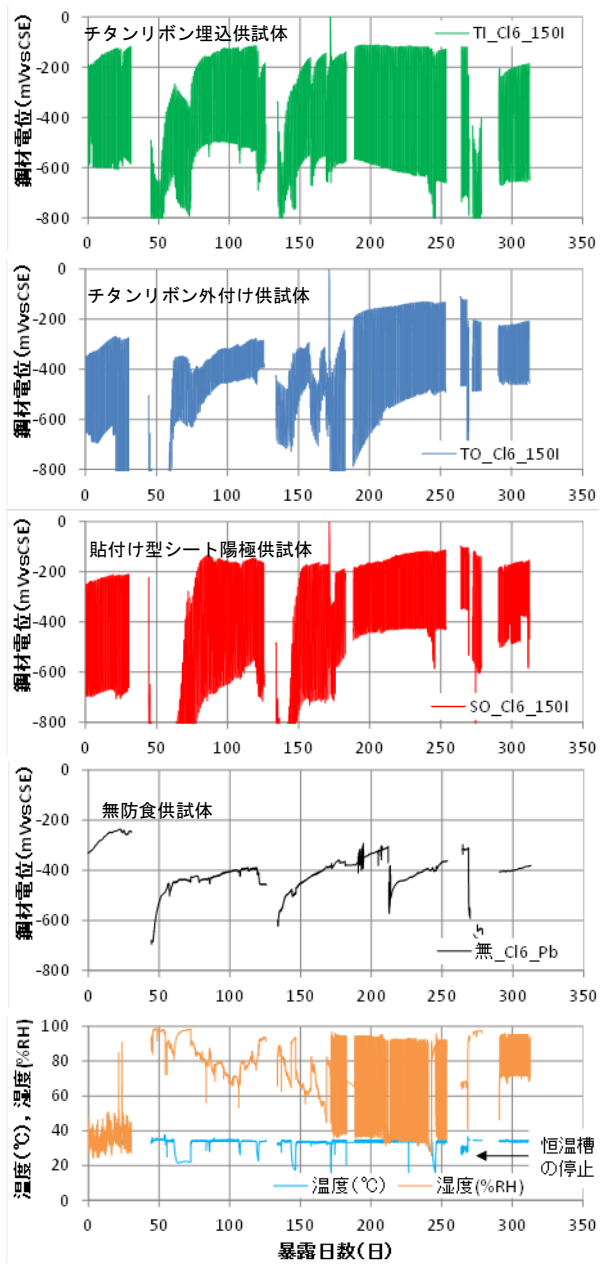


・凡例: Ti\_Cl6\_150I  
 分極量: 150-150mV+ 通電方式: I-間欠通電  
 含有塩化物イオン量: Cl6-6kg/m<sup>3</sup>  
 陽極の種類: Ti-チタンリボン+埋込, TO-チタンリボン+外付, SO-貼付け型シート陽極+外付, 無-無防食供試体

図 3.26 20°C65%RH 環境下での鋼材電位の経時変化



5°C65%RH環境下



35°C乾湿環境下

- ・凡例: TI-Cl6\_150I
  - 分極量: 150-150mV+ 通電方式: I-間欠通電
  - 含有塩化物イオン量: Cl6-6kg/m<sup>3</sup>
  - 陽極の種類: TI-チタンリボン+埋込, TO-チタンリボン+外付, SO-貼付け型シート陽極+外付, 無-無防食供試体

図3.28 5°C65%RH環境下および35°C乾湿環境下での鋼材電位の経時変化



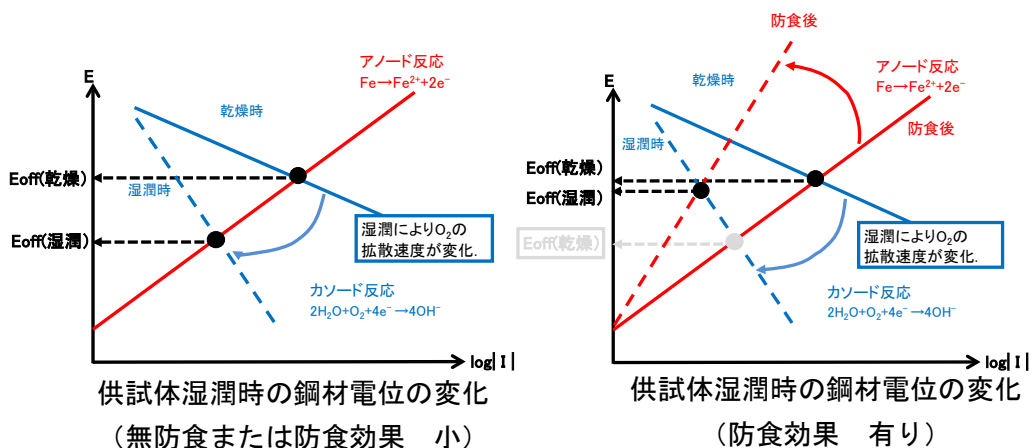


図 3.27 湿潤時と乾燥時の鋼材電位の変化

### (3) 解体前の腐食電流密度計測結果

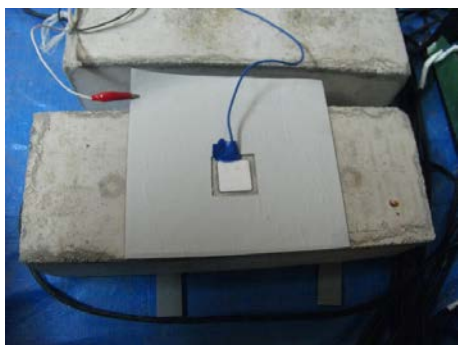
各室内暴露試験後、供試体解体前にカブリ51mm側の中心付近にて分極試験を行い、ターフェル外挿法により腐食電流密度を算出した。分極試験には、Princeton Applied Research社製のポテンシヨ/ガルバノスタット：VersaSTAT 3を用いた。分極試験では、24時間の復極試験後、2日以上経過した段階のオフ電位（E<sub>off</sub>電位）を自然電位とし、掃引速度40mV/minで復極後のオフ電位からカソード分極させ、5分間以上停止させた後、再度オフ電位からアノード分極させ、電流量と電位の変化を計測した。そして、計測した電流量と電位を用い、アノード反応およびカソード反応とも、ターフェル関係の成立と酸素拡散の影響を考慮し、分極量70～200mVの範囲で外挿したターフェル直線の交点から鋼材の腐食電流密度を算出した。なお、IRドロップは分極試験前に交流インピーダンス法で計測し、その試験結果を分極試験結果に反映させた。湿潤状態ではカソード反応が抑制され、腐食電流密度が低く計測される可能性があるため、分極試験は供試体のコンクリート表面が乾燥状態および湿潤状態の2通りで実施した。無防食供試体についても、同様の方法で分極試験を実施した。

乾燥状態での測定時の対極には貼付け型シート陽極を用い、照合電極には貼付け型の銀塩化銀照合電極（30×30mm）を用いた。貼付け型シート陽極は、通電部を150×150mmで切断後、中心部に切欠き部（40×40mm）を設け、シートの切欠き部が供試体のカブリ51mm側の中心となるように供試体に貼付けて設置した。切欠き部には貼付け型の銀塩化銀照合電極を設置した。

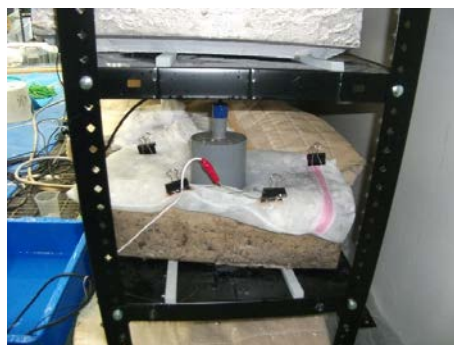
湿潤状態での測定時の対極にはチタンメッシュ（150×400mm）を用い、照合電極には鉛照合電極を用いた。チタンメッシュは、湿潤状態とした脱脂綿で覆い、供試体のカブリ51mm側全体に設置した。その中央には鉛照合電極を設置した、なお、供試体は、分極試験前に養生マット等で2時間以上、湿潤状態とした。供試体の計測状況を写真3.3、算出した各供試体の腐食電流密度を図3.29～図3.31に示す。

図に示すように、無防食供試体も含め、いずれの供試体についても塩化物イオン量が少ない方が腐食電流密度は小さくなる傾向を示したが、前節の分極抵抗法で計測した結果と同様、常時通電方式を含め防食供試体と無防食供試体の優劣の差は確認できなかった。このように優劣の差が確認できなかった原因は、通電時と異なる24時間復極後に2日以上経過した段階で計測しているため、①

腐食速度の差が小さい状態で計測している，あるいは，②電気防食による鋼材表面の環境改善効果（塩化物イオンの減少，水酸化物イオンの増加によるpH上昇<sup>4)</sup>）によって生じた不動態皮膜 $Fe_3O_4$ <sup>13),14)</sup>が $Fe_2O_3$ 等の3価の酸化鉄になる酸化反応をアノード反応として計測している等の可能性が考えられる。

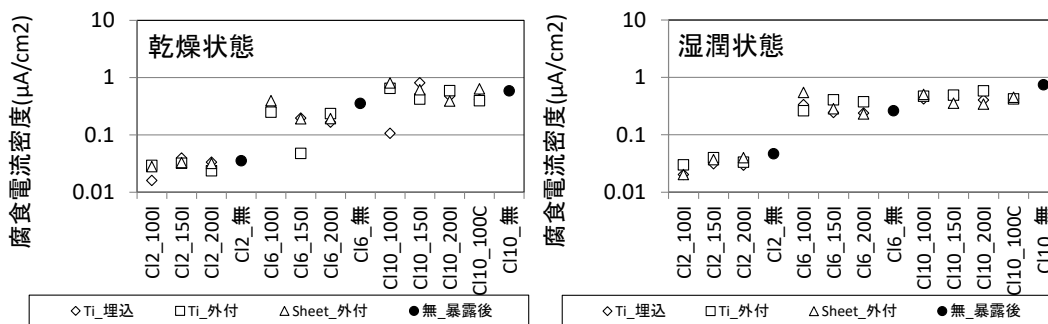


供試体：乾燥状態



供試体：湿潤状態

写真 3.3 腐食速度計測状況



- ・凡例: Ti\_埋込
  - 陽極材設置箇所: 埋込, 外付, または暴露後-無防食供試体の暴露後
  - 陽極の種類: Ti-チタンリボン, Sheet-貼付け型シート陽極, または無-無防食供試体
- ・横軸ラベル: Cl6\_150I
  - 分極量: 100-100mV, 150-150mV, 200-200mV + 通電方式: I-間欠通電, C-常時通電
  - 含有塩化物イオン量: Cl2-2kg/m³, Cl6-6kg/m³, 10-10kg/m³
- ・腐食電流密度: 鋼材表面積あたりの通電量

図 3.29 5°C65%RH 環境下の鋼材の腐食電流密度

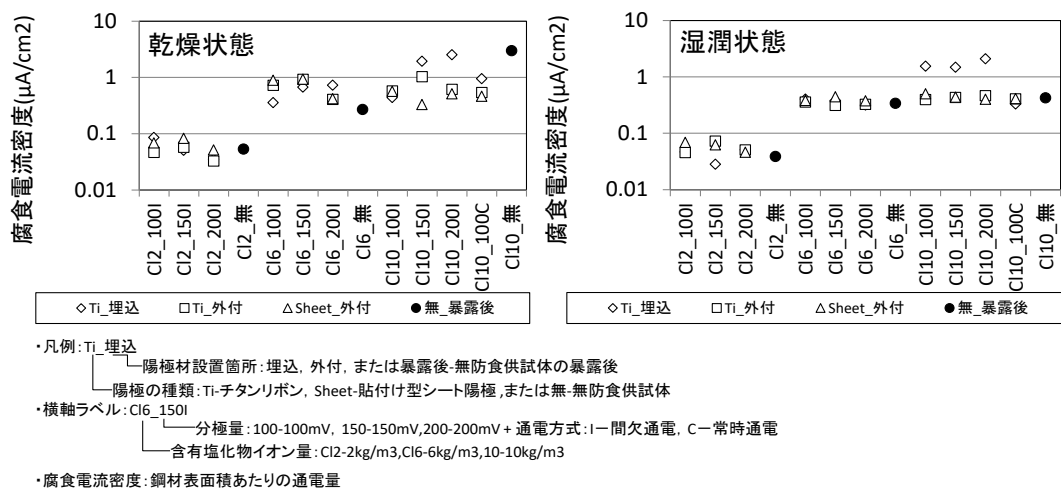


図 3.30 20°C65%RH 環境下の鋼材の腐食電流密度

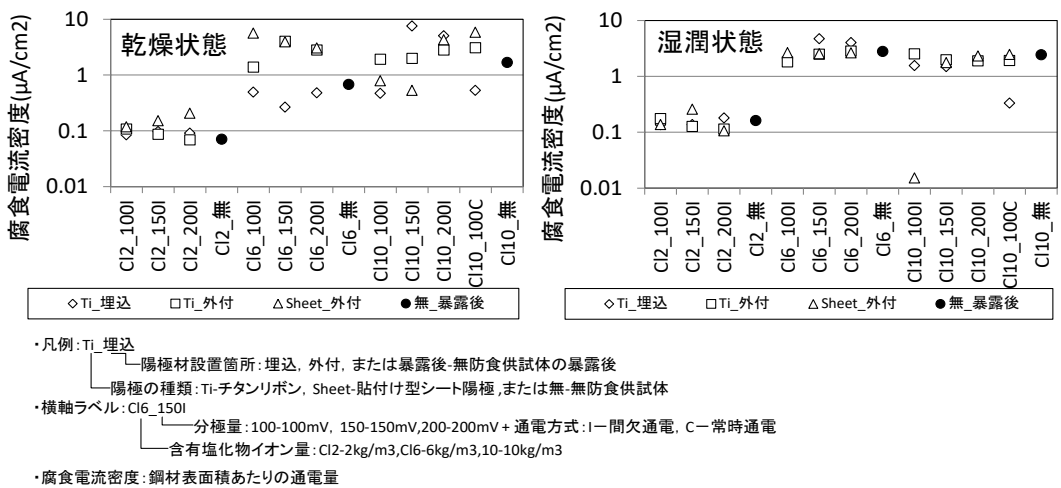


図 3.31 35°C乾湿環境下の鋼材の腐食電流密度

#### (4) 復極試験結果

暴露期間中、カブリ51mm側に設置した貼付け型の銀塩化銀照合電極を用い、定期的に24時間の復極試験を実施した。なお、復極試験の開始は、カレントインタラクタ法によりIRドロップを考慮するため、すべて通電中に実施した。計測した復極量と鋼材の初期電位 (Einitial) に対するオフ電位 (Eoff) の変化量 (Eoff-Einitial) について、経時変化の計測結果の代表例として20°C65%RH環境下の計測結果を図3.32に、各供試体の解体前に実施した復極試験の計測結果を図3.33～図3.35に示す。

図に示すように、経時変化に伴い、ほとんどの供試体の復極量は設定した分極量よりも大きくなる傾向を示した。また、初期電位に対するオフ電位の変化量も、概ね解体前にはプラスとなる傾向を示した。これは、電気防食の効果によりアノード反応が抑制されたため、その結果として鋼材電位がプラスの値を示したと考えられる。しかし、図3.34と図3.35に示すように、20°C65%RHと35°C乾湿環境下の供試体の一部では、間欠通電方式の供試体を含め、オフ電位の変化量がマイナスとな

った。これは電気防食の効果が生じてくると、アノード反応が抑制され分極に必要な電流量が小さくなり、定電流制御では分極量が大きくなる。一方、復極には酸素が必要であり、復極する速度は、酸素の拡散速度に律速である。よって、分極量が大きくなり復極量も大きくなると、復極に必要な酸素も多くなり、その分、復極に要する時間が必要となる。つまり、夜間に無通電状態となる間欠通電方式でも、電気防食の効果が生じてくると、復極に必要な酸素が不足する可能性があることを示している。

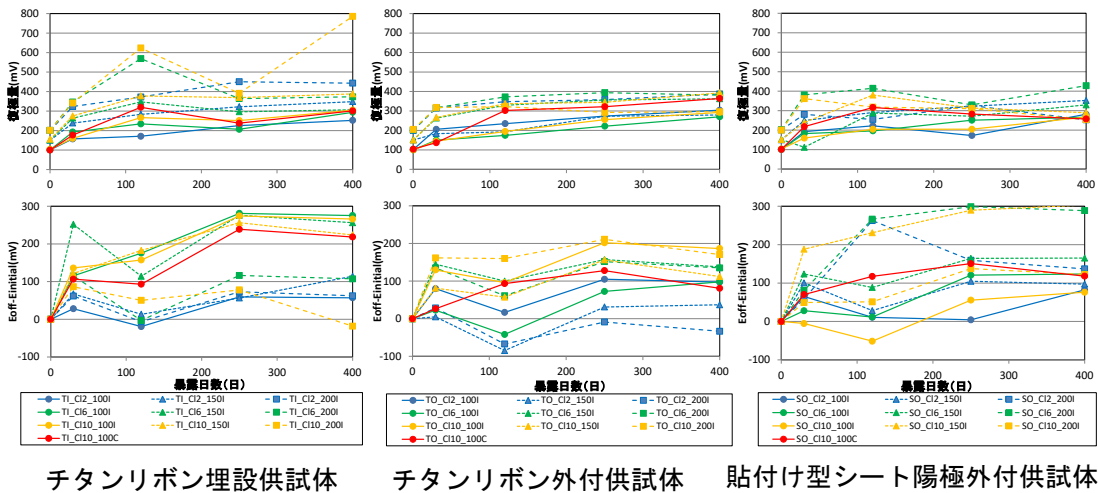
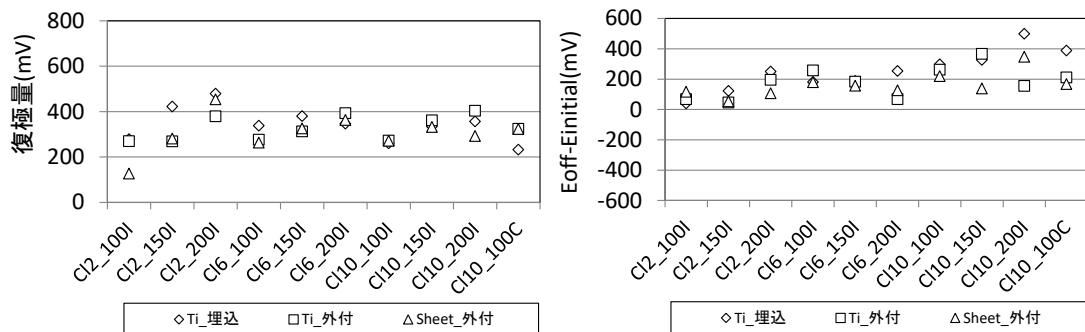


図 3.32 20°C65%RH 乾湿環境下の復極試験結果の推移



・凡例: Ti 埋込  
           └─陽極材設置箇所: 埋込, 外付  
           └─陽極の種類: Ti-チタンリボン, Sheet-貼付け型シート陽極  
 ・横軸ラベル: Cl6\_150I  
           └─分極量: 100-100mV, 150-150mV, 200-200mV + 通電方式: I-間欠通電, C-常時通電  
           └─含有塩化物イオン量: Cl2-2kg/m3, Cl6-6kg/m3, 10-10kg/m3

図 3.33 5°C65%RH 環境下の復極試験結果

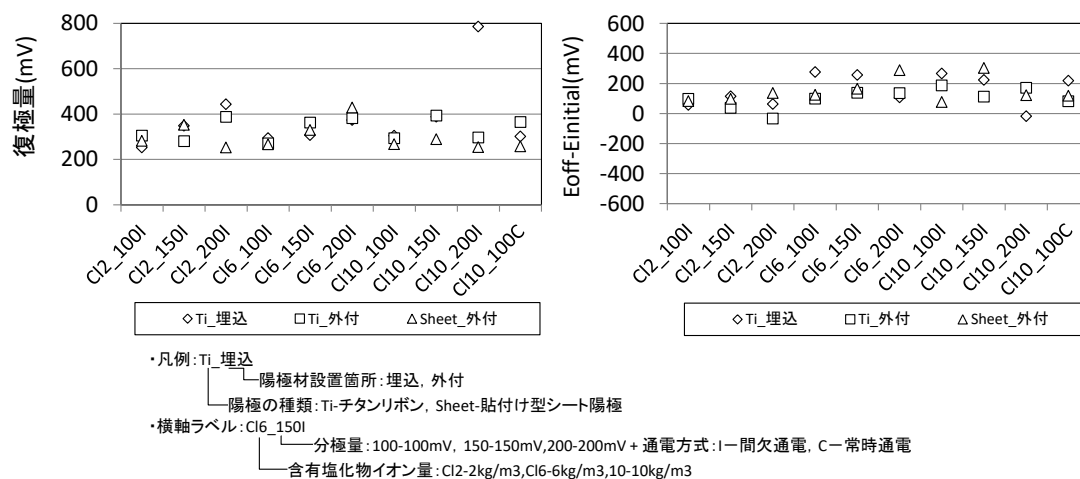


図 3.34 20°C65%RH 環境下の復極試験結果

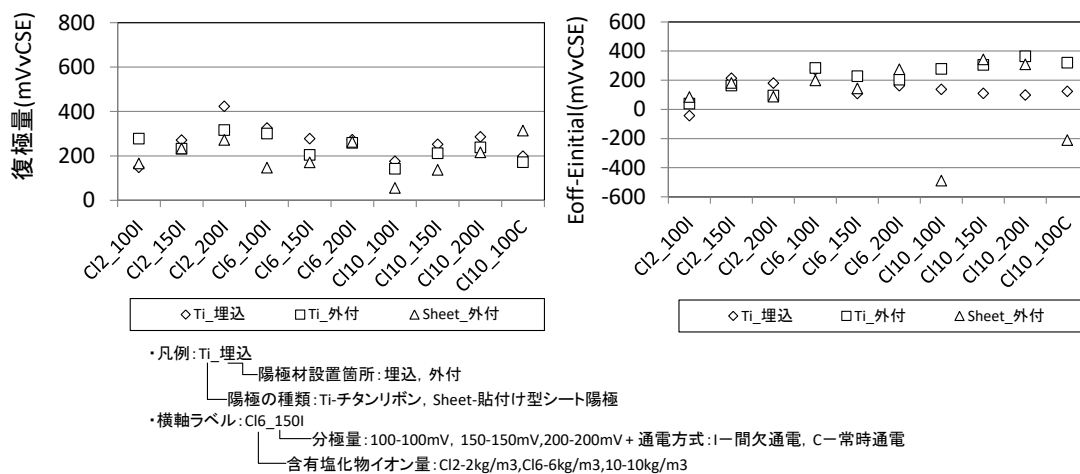


図 3.35 35°C乾湿環境下の復極試験結果

### (5) 解体後の鋼材の腐食状況

解体後の鋼材の腐食面積率および腐食減量の結果を図3.36～図3.38に示す。また、解体後の鋼材の腐食状況に関し、5°C65%RH環境下の供試体は表3.11～表3.14、20°C65%RH環境下の供試体は表3.15～表3.18、35°C乾湿環境下の供試体は表3.19～表3.22に示す。

図3.36～図3.38に示すように、各供試体の防食効果は、主に塩化物イオン量によって分類でき、塩化物イオン量2kg/m<sup>3</sup>の供試体では、いずれの環境下でも、分極量にかかわらず腐食面積率、腐食減量とも同等の値であり、腐食面積に関しては通電前の無防食供試体よりも小さくなる傾向を示した。塩化物イオン量6kg/m<sup>3</sup>の供試体についても、個体差の影響による5°C環境下のチタンリボン埋込み型の分極量200mVの供試体を除くと、腐食面積率はいずれの環境下でも通電前の無防食供試体と同等以下の値を示した。また、腐食減量についても、無防食供試体の暴露前よりは大きい暴露後よりも明らかに小さくなっており、個体差の影響による35°C乾湿環境下の貼付け型シート陽極外付け型の分極量100mVの供試体を除くと、分極量にかかわらず同等の値を示した。

一方、塩化物イオン量10kg/m<sup>3</sup>の供試体では他の塩化物イオン量と異なる腐食の傾向を示した。個体差の影響により無防食供試体の暴露前の腐食面積が小さかったことから、腐食面積率は常時通電



も含め、いずれも無防食供試体の暴露後よりも小さいが、暴露前と比較するとすべて大きい値を示した。また、腐食減量も同様の傾向を示し、35°C乾湿環境下の一部を除き、無防食供試体の暴露後よりも小さいが、暴露前と比較すると大きくなる傾向を示した。さらに、チタンリボンの埋込み型や外付け型の供試体では、5°C環境下も含め、腐食面積率に対し腐食減量が大きくなるものが発生した。特に、35°C乾湿環境下で分極量100mVのチタンリボン埋込み型の供試体では、暴露後の無防食供試体より大きくなるものが発生した。これは、他の供試体よりも、局部型の腐食が大きくなり、腐食減量が大きくなったと考えられる。なお、貼付け型シート陽極を用いた間欠通電方式では、そのような相違は生じていない。さらに、常時通電方式では、いずれの陽極材および設置方式でも、そのような相違は生じていない。よって、塩化物イオン量10kg/m<sup>3</sup>の供試体で腐食面積率と腐食減量の割合で相違が生じた原因は、①通電方式が夜間に無通電状態のある間欠通電方式であったことと、②陽極の種類が線状であったことの2点が考えられる。つまり、鋼材表面での電流分布や電気防食による鋼材表面の改善効果は陽極材の設置位置や面積によって異なるため、夜間に無通電状態となる間欠通電方式ではその影響でこのような局部型の腐食が発生したと考えられる。以上より、塩化物イオン量6kg/m<sup>3</sup>以下であれば、今回使用した陽極材に関しては、分極量100mVとなる電流量を通電することで防食可能であると考えられるが、塩化物イオン量が10kg/m<sup>3</sup>と多くなる場合、夜間に無通電状態となる間欠通電方式で防食するには、鋼材表面での電流分布や改善効果への影響を考慮した陽極の設計が必要であると考えられる。

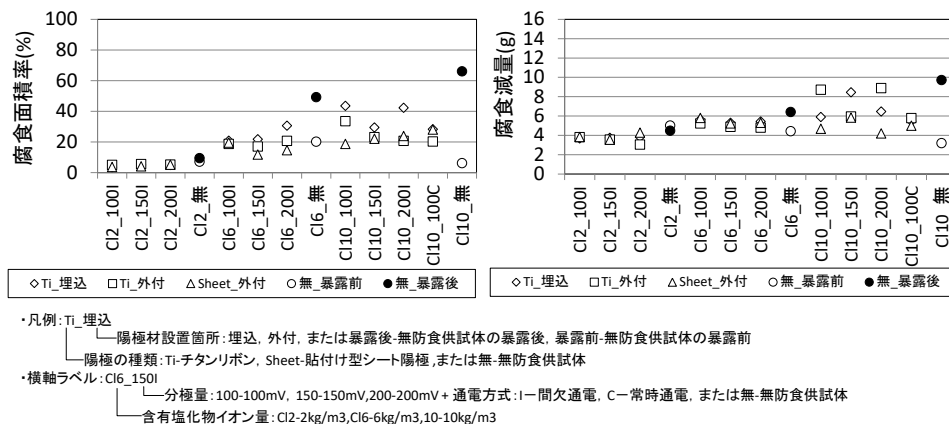


図 3.36 5°C65%RH 環境下の腐食面積率および腐食減量

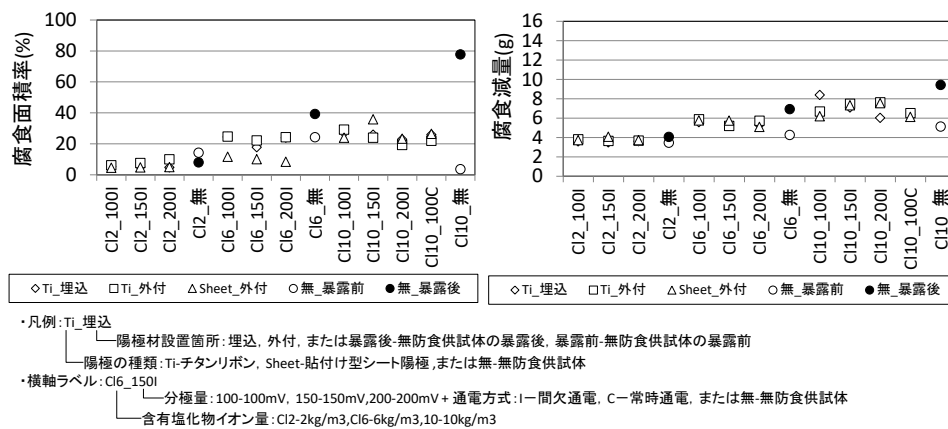
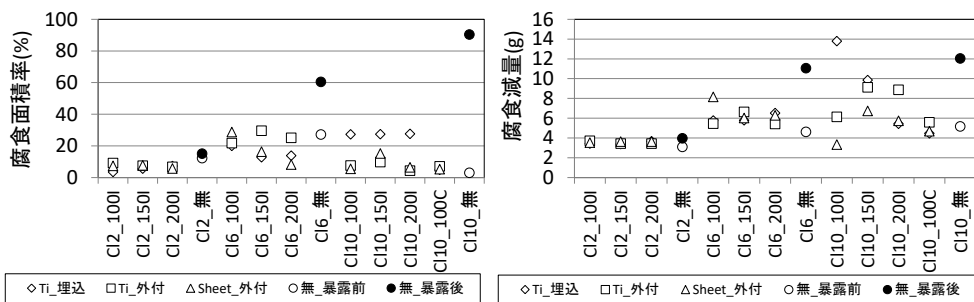


図 3.37 20°C65%RH 環境下の腐食面積率および腐食減量



・凡例: Ti\_埋込  
 陽極材設置箇所: 埋込, 外付, または暴露後-無防食供試体の暴露後, 暴露前-無防食供試体の暴露前  
 陽極の種類: Ti-チタンリボン, Sheet-貼付け型シート陽極, または無-無防食供試体  
 ・横軸ラベル: Cl2\_150I  
 分極量: 100-100mV, 150-150mV, 200-200mV+ 通電方式: I-間欠通電, C-常時通電, または無-無防食供試体  
 含有塩化物イオン量: Cl2-2kg/m<sup>3</sup>, Cl6-6kg/m<sup>3</sup>, 10-10kg/m<sup>3</sup>

図 3.38 35°C乾湿環境下の腐食面積率および腐食減量

表 3.11 5°C65%RH 環境下での無防食供試体の鋼材の腐食状況

	鋼材の腐食状況 (JCI-SCI 準拠) 腐食面積率 (%) <sup>1)</sup> 腐食減量 (%) <sup>2)</sup>	腐食マッピング図 <sup>2)</sup> (腐食箇所: 黒色)	鋼材の腐食状況	
			かぶり30mm側	かぶり50mm側
養生 200日 + 暴露 450日 後	無-Cl2 9.4 4.48			
	無-Cl6 53.9 6.67			
	無-Cl10 66.0 9.71			

1) 黒皮質量含む。2) 中央部分: かぶり30mm側⇒

表 3.12 5°C65%RH 環境下でのチタンリボン埋込み供試体の鋼材腐食状況

	鋼材の腐食状況 (JCI-SCI 準拠) 腐食面積率 (%) <sup>1)</sup> 腐食減量 (%) <sup>2)</sup>	腐食マッピング図 <sup>2)</sup> (腐食箇所: 黒色)	鋼材の腐食状況	
			かぶり30mm側	かぶり50mm側
Ti_Cl2_100I	3.4 3.65			
Ti_Cl2_150I	4.9 3.73			
Ti_Cl2_200I	4.8 3.80			
Ti_Cl6_100I	20.7 5.60			
Ti_Cl6_150I	21.7 5.28			
Ti_Cl6_200I	30.5 5.40			
Ti_Cl10_100I	43.5 5.87			
Ti_Cl10_150I	29.4 8.43			
Ti_Cl10_200I	42.2 6.45			
Ti_Cl10_100C	28.2 5.44			

1) 黒皮質量含む。2) 中央部分: かぶり30mm側⇒

表 3.13 5°C65%RH 環境下でのチタンリボン外付供試体の鋼材腐食状況

	鋼材の腐食状況 (Cl-SO1 濃度) 腐食面積 腐食質量 率(%) (g/㎡)		腐食マッピング図 <sup>2)</sup> (腐食箇所:黒色)	鋼材の腐食状況	
	腐食面積 (%)	腐食質量 (g/㎡)		かぶり30mm側	かぶり50mm側
TO_O2_100i	5.0	3.81			
TO_O2_150i	5.5	3.56			
TO_O2_200i	5.3	3.04			
TO_O6_100i	18.7	5.22			
TO_O6_150i	17.0	4.87			
TO_O6_200i	20.7	4.79			
TO_O10_100	33.5	8.72			
TO_O10_150	23.2	5.95			
TO_O10_200	20.7	8.88			
TO_O10_100	20.3	5.77			

1)黒皮質量含む; 2)中央部分:かぶり30mm側⇒

表 3.14 5°C65%RH 環境下での貼付け型シート陽極外付供試体の鋼材腐食状況

	鋼材の腐食状況 (Cl-SO1 濃度) 腐食面積 腐食質量 率(%) (g/㎡)		腐食マッピング図 <sup>2)</sup> (腐食箇所:黒色)	鋼材の腐食状況	
	腐食面積 (%)	腐食質量 (g/㎡)		かぶり30mm側	かぶり50mm側
SO_O2_100i	3.5	3.8			
SO_O2_150i	3.9	3.53			
SO_O2_200i	5.1	4.26			
SO_O6_100i	19.4	5.78			
SO_O6_150i	11.6	5.21			
SO_O6_200i	14.5	5.27			
SO_O10_100	18.6	4.65			
SO_O10_150	22.0	5.81			
SO_O10_200	23.8	4.17			
SO_O10_100	27.9	4.98			

1)黒皮質量含む; 2)中央部分:かぶり30mm側⇒

表 3.15 20°C65%RH 環境下で無防食供試体の鋼材腐食状況

	鋼材の腐食状況 (Cl-SO1 濃度) 腐食面積 腐食質量 率(%) (g/㎡)		腐食マッピング図 <sup>2)</sup> (腐食箇所:黒色)	鋼材の腐食状況		
	腐食面積 (%)	腐食質量 (g/㎡)		かぶり30mm側	かぶり50mm側	
実生 200日 + 暴露 450日 後	無-O2	7.9	4.05			
	無-O6	48.5	8.14			
	無-O10	77.7	9.42			

1)黒皮質量含む; 2)中央部分:かぶり30mm側⇒

表 3.16 20°C65%RH 環境下でのチタンリボン埋込み供試体の鋼材腐食状況

	鋼材の腐食状況 (JIS-S01準拠) 腐食面積 腐食質量 率(%) (g) <sup>1)</sup>		腐食マッピング図 <sup>2)</sup> (腐食箇所: 黒色)	鋼材の腐食状況	
				かぶり30mm側	かぶり50mm側
TL_O12_100I	5.3	3.57			
TL_O12_150I	5.0	3.47			
TL_O12_200I	4.7	3.59			
TL_O16_100I	24.4	5.55			
TL_O16_150I	17.7	5.27			
TL_O16_200I	23.9	5.27			
TL_O110_100I	27.0	8.38			
TL_O110_150I	25.8	7.08			
TL_O110_200I	22.9	6.00			
TL_O110_100C	25.9	6.36			

1) 黒皮質量含む。 2) 中央部分: かぶり30mm側⇒

表 3.17 20°C65%RH 環境下でのチタンリボン外付供試体の鋼材腐食状況

	鋼材の腐食状況 (JIS-S01準拠) 腐食面積 腐食質量 率(%) (g) <sup>1)</sup>		腐食マッピング図 <sup>2)</sup> (腐食箇所: 黒色)	鋼材の腐食状況	
				かぶり30mm側	かぶり50mm側
TO_O12_100I	6.1	3.8			
TO_O12_150I	7.5	3.64			
TO_O12_200I	9.9	3.68			
TO_O16_100I	24.6	5.87			
TO_O16_150I	22.1	5.19			
TO_O16_200I	24.2	5.73			
TO_O110_100	29.1	6.68			
TO_O110_150	23.9	7.47			
TO_O110_200	19.2	7.62			
TO_O110_100	21.9	6.5			

1) 黒皮質量含む。 2) 中央部分: かぶり30mm側⇒



表 3.18 20°C65%RH 環境下での貼付け型シート陽極外付供試体の鋼材腐食状況

	鋼材の腐食状況 (JCI-S01準拠)		腐食マッピング図 <sup>2)</sup> (腐食箇所:黒色)	鋼材の腐食状況	
	腐食面積 率(%)	腐食重量 率(%)		かぶり30mm側	かぶり50mm側
SO_O12_100I	4.4	3.71			
SO_O12_150I	4.7	4.06			
SO_O12_200I	4.9	3.71			
SO_O16_100I	11.6	5.74			
SO_O16_150I	10.0	5.73			
SO_O16_200I	8.3	5.08			
SO_O110_100	23.9	6.18			
SO_O110_150	35.8	7.31			
SO_O110_200	23.3	7.52			
SO_O110_100	26.4	6.11			

1)黒皮質量含む。2)中央部分:かぶり30mm側⇒

表 3.19 35°C乾湿環境下で無防食供試体の鋼材腐食状況

	鋼材の腐食状況 (JCI-S01準拠)		腐食マッピング図 <sup>2)</sup> (腐食箇所:黒色)	鋼材の腐食状況		
	腐食面積 率(%)	腐食重量 率(%)		かぶり30mm側	かぶり50mm側	
養生 200日 + 暴露 320日 後	無-O12	15.2	4.49			
	無-O16	78.1	17.44			
	無-O110	90.3	12.03			

1)黒皮質量含む。2)中央部分:かぶり30mm側⇒

表 3.20 35°C乾湿環境下でのチタンリボン埋込み供試体の鋼材腐食状況

	鋼材の腐食状況 (JCI-S01準拠)		腐食マッピング図 <sup>2)</sup> (腐食箇所:黒色)	鋼材の腐食状況	
	腐食面積 率(%)	腐食重量 率(%)		かぶり30mm側	かぶり50mm側
TL_O12_100I	3.5	3.42			
TL_O12_150I	5.6	3.38			
TL_O12_200I	7.3	3.65			
TL_O16_100I	19.9	5.76			
TL_O16_150I	12.7	5.78			
TL_O16_200I	13.7	6.51			
TL_O110_100I	27.2	13.79			
TL_O110_150I	27.3	9.85			
TL_O110_200I	27.6	5.43			
TL_O110_100C	4.8	4.46			

1)黒皮質量含む。2)中央部分:かぶり30mm側⇒

表 3.21 35°C乾湿環境下でのチタンリボン外付供試体の鋼材腐食状況

	鋼材の腐食状況 (JCI-SO1準拠) 腐食面積 腐食質量 率(%) (g) <sup>1)</sup>		腐食マッピング図 <sup>2)</sup> (腐食箇所:黒色)	鋼材の腐食状況	
	腐食面積 率(%)	腐食質量 率(g)		かぶり30mm側	かぶり50mm側
TO_O12_100I	6.1	3.8			
TO_O12_150I	7.5	3.64			
TO_O12_200I	9.9	3.68			
TO_O16_100I	24.6	5.97			
TO_O16_150I	22.1	5.19			
TO_O16_200I	24.2	5.73			
TO_O10_100	29.1	6.68			
TO_O10_150	23.9	7.47			
TO_O10_200	19.2	7.62			
TO_O10_100	21.9	6.5			

1)黒皮質量含む、2)中央部分:かぶり30mm側⇒

表 3.22 35°C乾湿環境下での貼付け型シート陽極外付供試体の鋼材腐食状況

	鋼材の腐食状況 (JCI-SO1準拠) 腐食面積 腐食質量 率(%) (g) <sup>1)</sup>		腐食マッピング図 <sup>2)</sup> (腐食箇所:黒色)	鋼材の腐食状況	
	腐食面積 率(%)	腐食質量 率(g)		かぶり30mm側	かぶり50mm側
SO_O12_100I	7.3	3.52			
SO_O12_150I	7.7	3.62			
SO_O12_200I	5.7	3.63			
SO_O16_100I	28.7	8.15			
SO_O16_150I	16.3	6.01			
SO_O16_200I	8.2	6.28			
SO_O10_100	5.5	3.32			
SO_O10_150	15.2	6.72			
SO_O10_200	6.4	5.72			
SO_O10_100	5.3	4.68			

1)黒皮質量含む、2)中央部分:かぶり30mm側⇒

(6) X線回折法による鋼材表面の組成分析結果

防食供試体および無防食供試体の鋼材表面に生成している鉄酸化物の組成をX線回折法で分析した。X線回折用の試料は、写真3.4に示すように、カッターナイフを用い鋼材表面より均等に試料を採取し、直ちにポリエチレン製の試料袋に保管した。なお、試料採取は、腐食面積率の計測後、腐食減量を計測する前に実施した。X線回折装置は、Multi Flex 2kW リガク社製を用いた。分析結果



一覧を表3.23, 代表的な分析結果を図3.39に示す. なお, 分析結果一覧には, 供試体作製前の黒皮の分析結果も併せて示した. 黒皮部分は,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (マグネタイト),  $\text{FeO}$  (ウスタイト),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (ヘマタイト) で構成されており, それらの構成成分のX線回折強度は比較的強く, ノイズが少ない晶質性であった.

常時通電供試体を含め,  $5^\circ\text{C}65\%\text{RH}$ 環境下および $20^\circ\text{C}65\%\text{RH}$ 環境下の防食供試体の鋼材表面は, 少量の $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を含む,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\text{FeO}$ を主成分とした酸化物で構成されていた. なお,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を少量としたのは,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ や $\text{FeO}$ のX線回折強度に対し,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ のピーク箇所のX線回折強度が比較的低かったためである.

また,  $35^\circ\text{C}$ 乾湿環境下で暴露した供試体も同様の傾向であったが, 陽極を外付けした供試体の半数では,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を含まず,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\text{FeO}$ のみの酸化物で構成されていた. 特に, 貼付け型シート陽極を用いた供試体の場合, 10体中8体が $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\text{FeO}$ のみの酸化物で構成されていた. 一般に, 熱間圧延加工された鋼材表面は酸化スケールで形成されており, 地鉄側から $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ の順で層状に形成されており, 表面は $\text{Fe}_2\text{O}_3$ で構成されている<sup>22)</sup>. また, 前述したように, 貼付け型シート陽極で防食した供試体は間欠通電でも,  $35^\circ\text{C}$ 乾湿環境で防食できており, 腐食減量も常時通電と比較して特に大きくなっておらず, 腐食によって $\text{Fe}_2\text{O}_3$ が消失したわけではない. このことから, このようにX線回折法で $\text{Fe}_2\text{O}_3$ が消失していたのは, 電気防食によって,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ が還元され,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ が生成した可能性が考えられる. 奥野らの報告によると<sup>14)</sup>,  $\text{O}_2/\text{OH}^-$ と $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ の系に対する平衡電位を考慮すると, 中性あるいは酸性環境では $\text{Fe}^{2+}$ は $\text{Fe}^{3+}$ へ酸化しやすく, アルカリ環境では $\text{Fe}^{3+}$ は $\text{Fe}^{2+}$ へ還元しやすくなっており, 鉄の不動態皮膜の主成分は酸性環境では $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ であり, アルカリ性環境では $\text{Fe}_3\text{O}_4$ である. このことから, 電気防食による継続的な通電によって, 陰極である鋼材表面で水酸化物イオンが生成しアルカリ環境となり, 鋼材表面で還元反応が生じ, 不動態皮膜となる $\text{Fe}_3\text{O}_4$ が生成したと考えられる. なお, 間欠通電と常時通電とで鋼材表面の生成物に変化は見られなかったが, これは, ともに通電に伴う鋼材表面のアルカリ化によって不動態皮膜が生成し, 安定化しており, 本検討条件の範囲では間欠通電でも常時通電と同様の防食効果を発揮できているため, 鋼材表面の生成物が同様であると考えられる.

一方, 無防食供試体の鋼材表面についても, 供試体作製前の鋼材表面の黒皮と同様,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を含む構成である. 特に,  $5^\circ\text{C}65\%\text{RH}$ 環境下や $20^\circ\text{C}65\%\text{RH}$ 環境下で暴露した塩化物イオン量 $2\text{kg}/\text{m}^3$ の無防食供試体では, 腐食面積率および腐食減量とも小さかったため, ほぼそれらの成分で構成されており, X線回折強度も強く, ノイズも少なく, 晶質性であった. しかし, 腐食面積率が約半分以上の塩化物イオン量 $6\text{kg}/\text{m}^3$ や $10\text{kg}/\text{m}^3$ の無防食供試体では, それらのピーク箇所のX線回折強度は比較的強く, 非晶質であるノイズを多数含んでいた. 特に,  $5^\circ\text{C}65\%\text{RH}$ 環境下の塩化物イオン量 $10\text{kg}/\text{m}^3$ や $35^\circ\text{C}$ 乾湿環境下の無防食供試体では, 非晶質であるノイズが多数含まれるだけでなく,  $\alpha\text{-FeOOH}$ ,  $\beta\text{-FeOOH}$ ,  $\gamma\text{-FeOOH}$ などのオキシ水酸化鉄のピークを含んでいた. なお,  $\beta\text{-FeOOH}$ のピークが含まれていた供試体は,  $35^\circ\text{C}$ 温湿環境下での暴露試験によりひび割れが発生した塩化物イオン $6\text{kg}/\text{m}^3$ の無防食供試体である.



写真 3.4 X線回折用試料採取状況

以上より、無防食供試体の鋼材表面では腐食に伴い酸化鉄が非晶質性となり、さらに腐食が激しくなると、 $\alpha$ -FeOOH、 $\beta$ -FeOOH、 $\gamma$ -FeOOHなどのオキシ水酸化鉄が生じたと考えられる。

表 3.23 鋼材表面の X 線回析結果一覧

供試体の種類	暴露環境		
	5°C65%RH	20°C65%RH	35°C乾湿
TI_C12_100I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TI_C12_150I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TI_C12_200I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TI_C16_100I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TI_C16_150I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TI_C16_200I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
TI_C110_100I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TI_C110_150I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TI_C110_200I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TI_C110_100C	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TO_C12_100I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TO_C12_150I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TO_C12_200I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TO_C16_100I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TO_C16_150I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TO_C16_200I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TO_C110_100I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
TO_C110_150I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
TO_C110_200I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
TO_C110_100C	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
SO_C12_100I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
SO_C12_150I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
SO_C12_200I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
SO_C16_100I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
SO_C16_150I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
SO_C16_200I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
SO_C110_100I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
SO_C110_150I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
SO_C110_200I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
SO_C110_100C	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
無_C12	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\alpha$ -FeOOH, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
無_C16	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\alpha$ -FeOOH, $\beta$ -FeOOH, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
無_C110	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , $\alpha$ -FeOOH, $\gamma$ -FeOOH	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\alpha$ -FeOOH, $\beta$ -FeOOH, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
黒皮		Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	

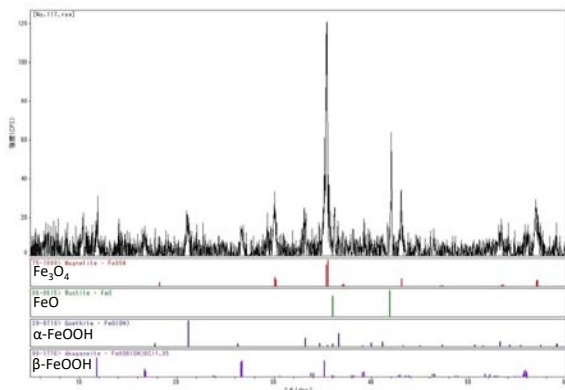
・供試体の種類:

TI\_C16\_150I

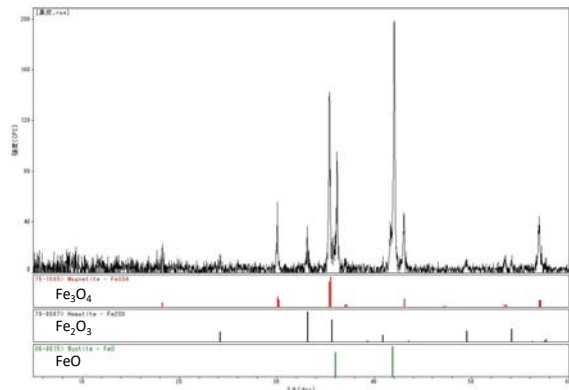
└─分極量: 100-100mV, 150-150mV, 200-200mV + 通電方式: I-間欠通電, C-常時通電, または無-無防食

└─含有塩化物イオン量: C12-2kg/m<sup>3</sup>, C16-6kg/m<sup>3</sup>, 10-10kg/m<sup>3</sup>

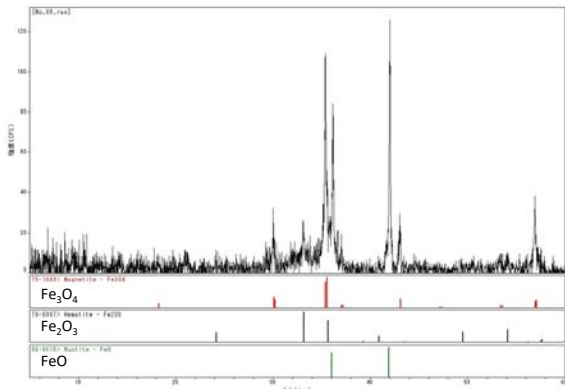
└─陽極の種類 + 設置箇所: TI-チタンリボン+埋設, TO-チタンリボン+外付, SO-貼付け型シート陽極+外付, または無-無防食供試体



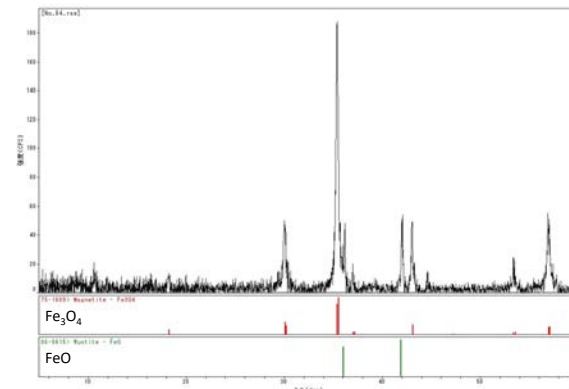
無\_C110



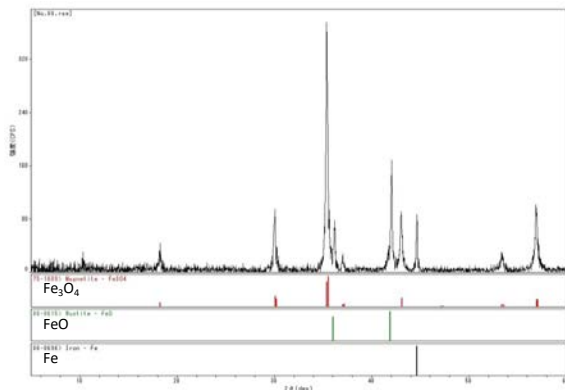
鋼材表面の黒皮



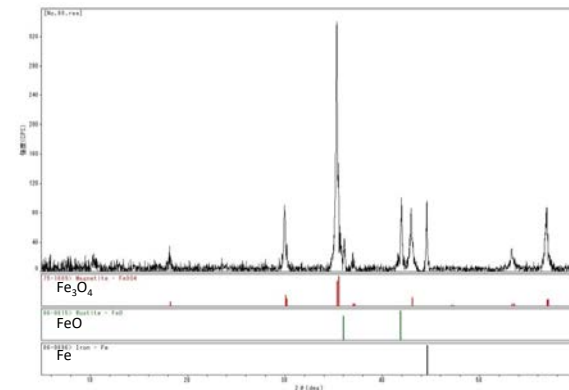
TI\_C110\_150I



TO\_C110\_150I



SO\_C110\_150I



SO\_C110\_100C

・供試体の種類:

TI\_C110\_150I

└──分極量: 150-150mV+ 通電方式: I-間欠通電, C-常時通電

└──含有塩化物イオン量: Cl10-10kg/m<sup>3</sup>

└──陽極の種類+設置箇所: TI-チタンリボン+埋設, TO-チタンリボン+外付, SO-貼付け型シート陽極+外付, または無-無防食供試体

図 3.39 X線回析結果の代表例

## (7) 供試体解体後のコンクリートの調査

### 1) 中性化深さ状況

図3.40に示す位置で暴露試験後の供試体を割裂し、陽極材設置面であるかぶり30mm側の中性化深さを確認した。中性化深さ測定結果を図3.41に示す。中性化深さは陽極材を設置していたかぶり

厚30mmの側のコンクリート表面から5点計測した。ひび割れの発生した無防食供試体についても、かぶり厚30mmの側のコンクリート表面から5点計測することとし、ひび割れ断面は中性化しているため、ひび割れの無い断面で計測した。

図に示すように、無防食供試体の中性化深さが約3~4mmあったのに対し、防食供試体は常時通電による供試体を含めすべて3mm以下であった。特に、貼付け型シート陽極を外付した防食供試体の中性化深さは、1.0mm前後の値でほとんど中性化していなかった。このように貼付け型シート陽極を外付した防食供試体のみ中性化深さが小さいのは、貼付け型シート陽極の表面はフッ素樹脂フィルムで覆っているため、その遮蔽効果により、コンクリート面が露出している他の供試体よりも中性化が生じにくくなったと考えられる。なお、塩化物イオンを含むコンクリートに電気防食工法を適用すると塩化物イオンが電気泳動で陽極材付近に移動し、陽極材へ電子を受け渡すと塩素ガスとなり、その塩素ガスが水と反応して塩化水素及び過塩素酸となることからコンクリートが中性化することが想定された。しかし、今回の暴露試験では、両陽極材とも塩化物イオンの影響と考えられる陽極材付近の中性化は確認できなかった。

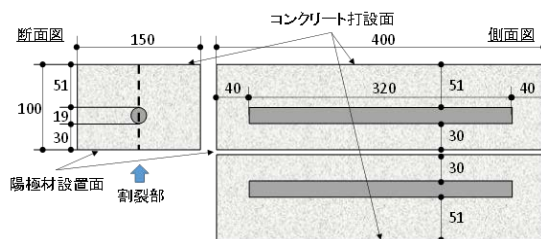


図 3.40 供試体の割裂箇所

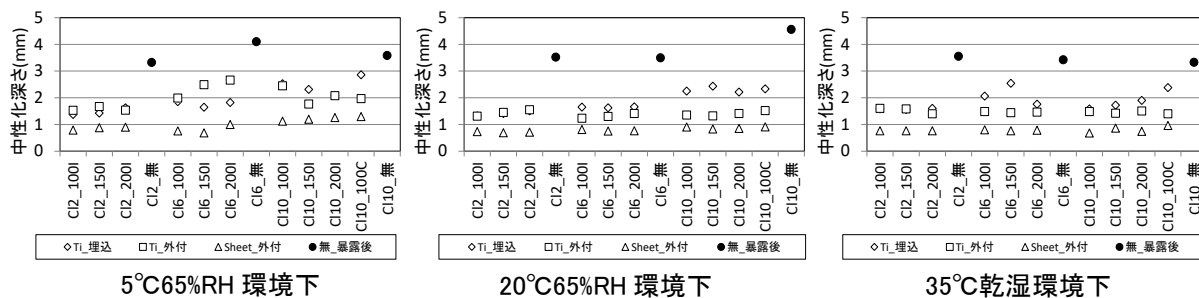


図 3.41 各暴露環境下での中性化深さの状況

## 2) 塩化物イオンの分布状況

3.1節では、電位差滴定により塩化物イオン量を確認したところ、図3.18に示すようにかぶり側の塩化物イオン量が減少しているのを確認した。しかし、塩化物イオンの移動は通電部分に限定され、それ以外の部分は移動していない可能性がある。そこで、陽極側暴露試験後の供試体から図3.42に示すように陽極材設置面より深さ方向にスライスした供試体を採取し、電子線マイクロアナライザ：EPMA(EPMA-1600;島津製作所製)を用いて、塩化物イオンの分布状況を確認した。分析結果の代表例とし、塩化物イオン量 $10\text{kg/m}^3$ を混入し、貼付け型シート陽極を用いて防食した供試体を図3.43に示す。図3.43の各図に示すカラーバーは塩化物イオン量の相対比率を示しており、カラーバーの上部に示す白や赤の箇所は下部に示す青や黒の箇所に比べ、濃度が濃くなっていることを示す。

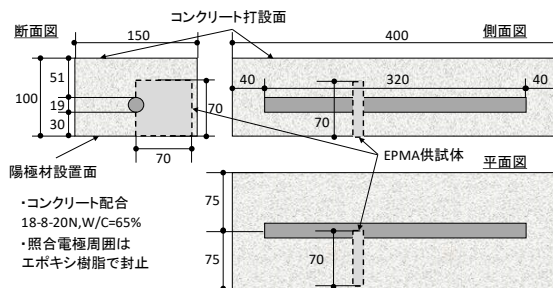
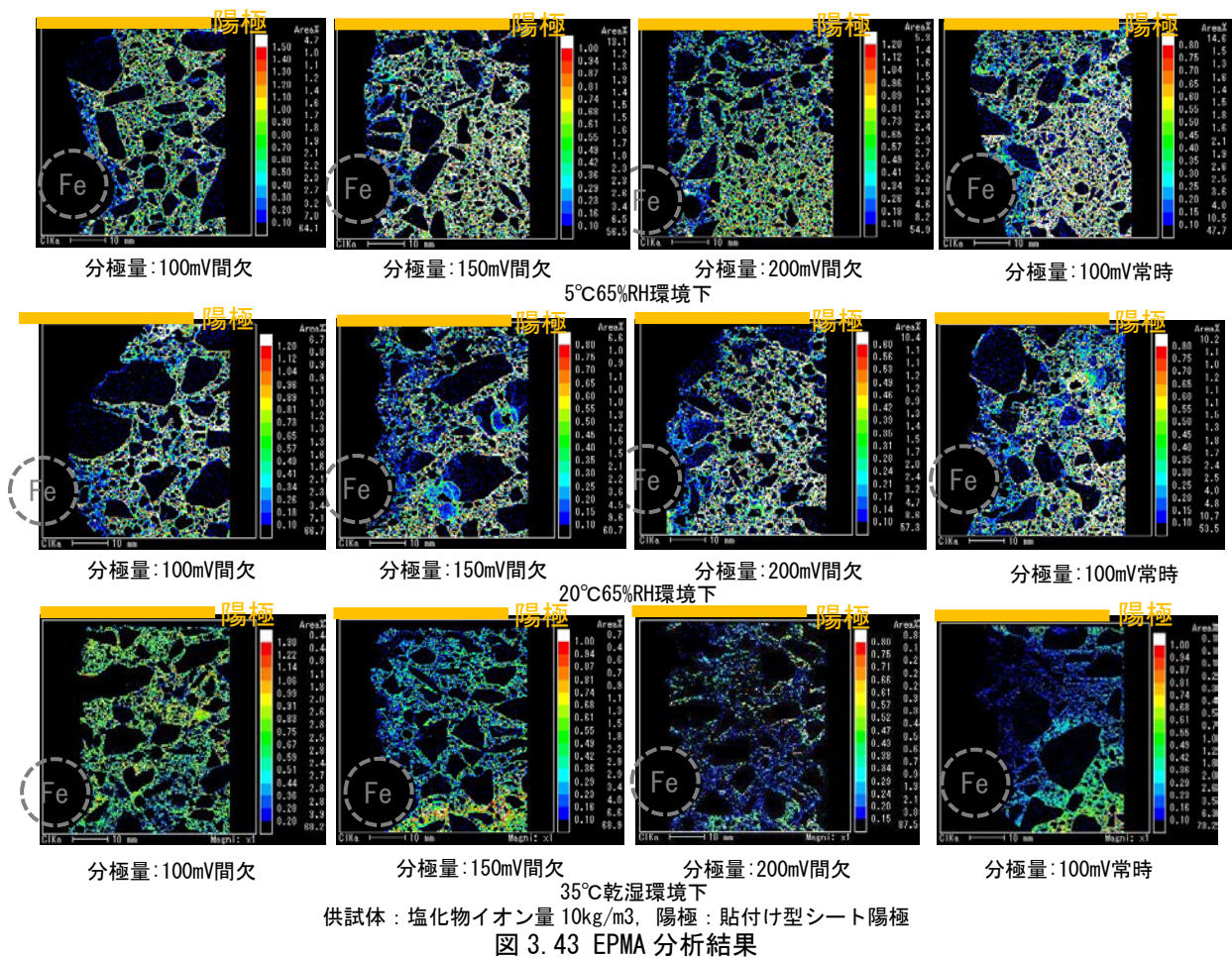


図 3.42 EPMA 分析用供試体の採取箇所

塩化物イオンを含むコンクリートに電気防食を



適用すると、陰イオンである塩化物イオンは電気泳動により陽極側へ移動し、鋼材表面の塩化物イオン量が相対的に低くなると考えられる<sup>12)</sup>。実験結果も、35°C乾湿環境下の分極量100mVによる間欠通電の防食供試体以外、図3.43に示すように、間欠通電および常時通電とも、いずれの環境下でも、想定通りに鋼材表面の塩化物イオン量が低下していた。また、鋼材直上についても塩化物イオン量が低下しており、その低下している範囲は概ね5°C65%RH<20°C65%RH<35°C乾湿の順で大きくなった。ただし、分極量や通電方法の違いによる大小は確認できなかった。各環境下での鋼材-陽極材間の通電はそれぞれ塩化物イオンが減少している箇所を主に通電していたことが推察される。特に、5°Cの低温環境下ではほぼ鋼材直上のみとなっており、気温低下によるコンクリート抵抗上昇の影響によるものと考えられる。また、35°C乾湿環境下では、分極量100mVの間欠通電を除くと、いずれも他の環境下より広範囲に減少していた。これは、温度上昇によるコンクリート抵抗減少の影響と、乾湿繰り返しの湿潤状態を含む環境で暴露試験したため、塩化物イオンとして移動しやすいことも含まれていると考えられる。なお、35°C乾湿環境下の分極量100mVによる間欠通電の防食供試体のみ塩化物イオンの変化が少ないが、これは図3.25に示すように、この供試体のみ、通電量が他の供試体の10%以下と極端に小さくなっていることが原因であると考えられる。



### 3.2.4 本節のまとめ

本節では、ソーラーパネルを電流供給源とする間欠通電方式による電気防食時の基本的な適用環境や条件を確認するため、種々の供試体を用い、温湿度一定環境下での室内暴露試験により検討した。本検討により明らかになったことを以下に示す。

- (1) 200日間（封かん養生28日間＋気中養生165日間＋各室内環境条件7日間）養生後の無防食供試体について、各供試体とも鋼材腐食が発生していた。特に、20°Cと35°Cの塩化物イオン量10kg/m<sup>3</sup>の供試体では、他の供試体と比較し、腐食面積率に対し腐食減量が大きい局部腐食型の傾向を示した。
- (2) 200日間養生後の防食前供試体について、分極抵抗法で計測した鋼材の腐食速度は、ネルンストの式およびアレニウスの式での想定通り、環境温度が高いほど、腐食電流密度は大きくなり、鋼材電位はマイナスの値を示した。また、塩化物イオン量についても、塩化物イオン量が多いほど、腐食電流密度は大きくなり、鋼材電位はマイナスの値を示した。つまり、防食前の無防食供試体に関しては、分極抵抗法による鋼材の腐食速度の測定は、想定通りの結果が得られた。
- (3) 各供試体への通電量に関し、陽極の設置位置・面積・種類が異なるが、各分極量に必要な通電電流密度は、各室内暴露環境とも、同様の傾向および値を示し、塩化物イオン量・分極量・暴露温度の上昇に伴い、通電電流量が多くなる傾向を示した。
- (4) 通電調整によって設定した供試体の通電電流密度は、計測した腐食電流密度よりほぼ大きい値を示した。しかし、一部の供試体では個体差により腐食電流密度の方が大きな値を示した。特に、腐食電流密度が小さく、設定する通電電流密度が小さな供試体で相違が生じた。これは、電流密度調整時の調整誤差等の不具合発生要因としての可能性がある。
- (5) 間欠通電方式で防食している供試体の鋼材電位は、オン電位時のマイナス方向への変化は急激に、オフ電位時のプラス方向への変化は緩やかに推移した。このようにオフ電位時の鋼材電位のプラス方向への変化が緩やかなのは、オフ電位時の鋼材電位のプラス方向への変化が酸素の拡散速度に律速であるためである。
- (6) 間欠通電方式による電気防食では、夜間に無通電状態があるため、鋼材電位を常時計測することで、防食による鋼材電位への影響が確認できた。
- (7) ターフェル外挿法による腐食速度の計測結果に関し、いずれの供試体についても、塩化物イオン量が少ないほど、腐食電流密度が小さくなる傾向を示した。ただし、常時通電供試体を含め、防食および無防食供試体の優劣の差は確認できなかった。このようにターフェル外挿法で優劣の差が確認できなかった原因は、前節の分極抵抗法による計測同様、①復極後の腐食速度の差が小さい状態で計測している、あるいは、②電気防食による鋼材表面の環境改善効果（塩化物イオンの減少、水酸化物イオンの増加によるpH上昇<sup>4)</sup>）によって生じた不動態皮膜Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub><sup>13),14)</sup>がFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等の3価の酸化鉄になる酸化反応をアノード反応として計測している等の可能性が考えられる。
- (8) 供試体のほとんどは、経時変化に伴い、電気防食の効果によりアノード反応が抑制され、復極量が設定した分極量よりも大きくなる傾向を示した。また、初期電位に対するオフ電位の変化量も、概ね解体前にはプラスとなる傾向を示した。しかし、20°C65%RHと35°C乾湿環境下の供試体の一部では、オフ電位の変化量がマイナスとなるものが発生した。つまり、夜間に無通電



状態となる間欠通電方式でも電気防食の効果が生じてくると、復極に必要な酸素が不足する可能性があることがわかった。

- (9) 解体後の鋼材の腐食状況より、間欠通電による防食効果は主に塩化物イオン量に影響されていた。塩化物イオン量 $6\text{kg}/\text{m}^3$ 以下であれば、いずれの陽極についても分極量 $100\text{mV}$ とする電流量を通電することで間欠通電でも防食することが可能であった。しかし、塩化物イオン量が $10\text{kg}/\text{m}^3$ と多くなる場合、面状の貼付け型シート陽極を用いた供試体では間欠通電で防食可能であったが、線状のチタンリボンを用いた供試体では局部腐食が発生した。本結果から、塩化物イオン量が $10\text{kg}/\text{m}^3$ と多くなる場合、間欠通電で電気防食するには鋼材表面での電流分布や改善効果への影響を考慮した陽極の設計が必要であると考えられる。
- (10) X線回折法による解体後の鋼材表面の組成分析より、防食供試体の鋼材表面には $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を少量含むものも存在したが、常時通電、間欠通電とも主成分は $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\text{FeO}$ の酸化物で構成されていた。また、それらの酸化物のX線回折強度は比較的強く、ノイズの少ないX線回折パターンを示したことから、それらの酸化物は晶質性であると考えられる。特に、確実に防食できていた貼付け型シート陽極を用いた供試体では、8割の割合で $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\text{FeO}$ のみの酸化物で構成されていた。これは通電による鋼材表面のアルカリ化で不動態皮膜が生成し、安定化したためと考えられる。つまり、本検討条件の範囲では間欠通電でも常時通電と同様の防食効果を発揮できていたため、鋼材表面の生成物が同様であったと考えられる。
- (11) 無防食供試体の鋼材表面の生成物は、黒皮同様の $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ の構成であった。しかし、腐食面積が50%以上の腐食が激しい供試体では、ピーク箇所のX線回折強度は低く、非晶質であるノイズを多数含んでおり、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\beta\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ などのオキシ水酸化鉄を含んでいた。つまり、無防食供試体の鋼材表面では腐食に伴い酸化鉄が非晶質性となり、さらに腐食が進行すると、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\beta\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ などのオキシ水酸化鉄が生じたと考えられる。
- (12) 無防食供試体の中性化深さは約 $3\sim 4\text{mm}$ であったのに対し、防食供試体は常時通電による供試体を含めすべて $3\text{mm}$ 以下の小さな値を示し、電気防食により中性化深さが増加するような現象は見られなかった。特に、シート陽極を外付けした供試体は、表面をフッ素樹脂フィルムが覆っているため、その遮蔽効果により、 $1.0\text{mm}$ 前後の値でほとんど中性化していなかった。なお、今回の暴露試験では、塩化物イオンの影響と考えられる陽極材付近の中性化はいずれも確認できなかった。
- (13) 常時通電、間欠通電に関わらず、いずれの環境下でも、鋼材表面および鋼材直上の塩化物イオン量が低下していた。その低下している範囲は、概ね $5^\circ\text{C}65\%\text{RH}<20^\circ\text{C}65\%\text{RH}<35^\circ\text{C}$ 乾湿の順で大きくなっており、温度変化によるコンクリート抵抗の変化やコンクリートの湿潤化が塩化物イオンの移動に影響を及ぼしている可能性が考えられた。なお、分極量や通電方法による明確な優劣は、確認できなかった。

### 3.3 通電調整時期が防食効果に及ぼす影響に関する検討

#### 3.3.1 はじめに

常時通電方式の電気防食では、通電前の電位から通電後のインスタントオフ電位の変化量を $100\text{mV}$

V以上マイナス方向へ変化させる、あるいは復極量を100mV以上確保できる電流量を通電することで防食性能を達成できる。一方、間欠通電方式の電気防食で防食する場合についても、前節の5°C～35°Cの一定温度で実施した室内暴露試験の試験結果から、設定温度での通電調整により分極量100mV以上とする電流量を通電することで貼付け型シート陽極を用いた場合塩化物イオン量10kg/m<sup>3</sup>、その他の陽極では6kg/m<sup>3</sup>では、乾湿繰返し等の条件下でも防食できることを確認した。

しかし、3.1節で当初実施した屋外暴露試験では、同様の塩化物イオン量6kg/m<sup>3</sup>で暴露試験を実施したにも関わらず、チタンリボンを埋設した供試体では分極量200mVの間欠通電方式や常時通電方式でも腐食が発生した。この原因の一つとして、気温を考慮せず頻繁に実施した通電調整が考えられる。つまり、気温を考慮せずに通電調整を実施したため、季節変化で気温が上昇し、腐食速度が増加した際、通電量不足が発生し、腐食が生じた可能性がある。前節に示したように、鋼材の腐食反応の反応速度はアレニウスの式に従うことから<sup>23)</sup>、前節の通電前の分極抵抗法による腐食電流密度の計測結果（図3.22）をアレニウスの式に従い絶対温度を用いて整理すると、図3.44のように示される。この図から、塩化物イオン量が異なってもアレニウスの式に従うことがわかる。また、塩化物イオン量6kg/m<sup>3</sup>と10kg/m<sup>3</sup>では、ほぼ同様の傾きであり、温度変化に対する腐食電流密度の変化はあまり変わらない。しかし、塩化物イオン量2kg/m<sup>3</sup>の傾きと比べると、6kg/m<sup>3</sup>や10kg/m<sup>3</sup>の傾きは大きく、2kg/m<sup>3</sup>よりも温度変化に対する腐食電流密度の変化が大きい。つまり塩化物イオン量の多い6kg/m<sup>3</sup>や10kg/m<sup>3</sup>ほど、温度が変化した場合、腐食電流密度が変化しやすいことを示している。以上の結果から、塩化物イオン量が大きく温度変化による腐食電流量の変化が大きい場合、間欠通電方式では夜間に無通電の状態があるため、通電量の調整時期による防食効果への影響が常時通電方式より大きくなることが予想される。そこで、通電調整時期による防食効果への影響を確認するため、低温環境下と20°Cの屋外暴露環境下の2通りで通電調整した供試体を用い、ソーラーパネルによる間欠通電方式で屋外暴露試験により評価した。なお、低温環境下は5°C65%RH環境とし、5°C65%RH環境下で通電調整し、そのまま30日間通電した後、屋外暴露環境下へ移動させ、その防食効果への影響を検討した。なお、ソーラーパネルによる間欠通電時の電源の制御方式は、3.1節で議論した最大電流量制御の定電流制御方式とした。

### 3.3.2 実験概要

#### (1) 供試体および試験方法の概要

供試体は前節と同時に作製し、寸法や養生条件を含め、陽極材や設置位置等すべて同じである。ただし、塩化物イオン量はすべて6kg/m<sup>3</sup>とした。分極量の設定値も前節同様の100mV、150mV、200mVの3通りとし、通電調整は初期のみで、20°Cの屋外暴露環境下と5°C65%RHの室内暴露環境下の2通りで実施した。20°C屋外で通電調整した供試体はそのまま屋外に暴露し、5°C65%RHの室内で通電調整した供試体は5°C65%RH

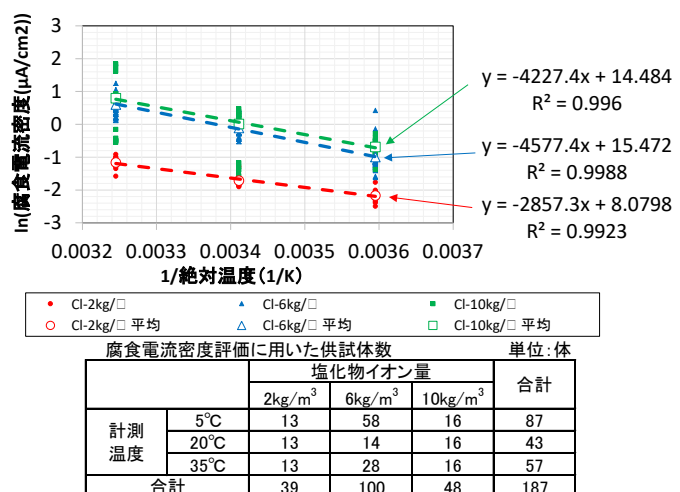


図 3.44 絶対温度と腐食電流密度との関係 (アレニウスプロット)

の室内での30日間の通電および各種計測と通電回路移設に伴う24日間の通電停止後、同じ通電量で屋外暴露した。ただし、20°C屋外で通電調整した供試体も、同期間通電を停止させた。屋外暴露時の間欠通電方式の供試体への電流供給源はソーラーパネルを用い、常時通電方式の供試体へは商用電源を用いた。また、5°C65RH の室内暴露試験時は商用電源とタイマースイッチを用い、1日あたり9時間通電した。なお、ソーラーパネルのサイズは防食回路に必要な電量の10倍以上とし、電源装置は入力電圧が5V程度で起動し、定電流制御方式で防食回路へ通電を開始するシステムとした。

暴露試験はすべて2015年7月中旬より開始し、435日間の暴露試験後、無防食供試体にひび割れが発生したため、解体調査を実施した。5°C室内で通電調整した供試体の屋外暴露は2015年9月初旬である。なお、20°C屋外で通電調整した供試体の通電日数は369日間、5°C室内の供試体は368日間である。無防食供試体のひび割れ発生状況を表3.24に示す。

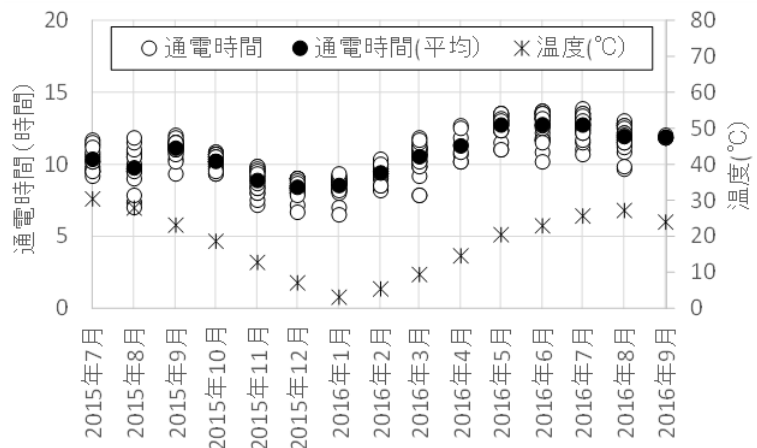
(2) 屋外暴露試験時の通電時間

暴露試験時の通電状況は、図3.45に示すように、一日当たりの通電時間は、雨天時等の悪天候時を含め、6時間では100%，7時間では99.4%，8時間では96.6%となり、最低6時間は毎日通電できており、平均では10.6時間通電していた。また、通電時間は気温低下時に減少、気温上昇時に増加しており、春秋の4～6月・10～12月時は10.7時間、夏の7～9月時は11.3時間、冬の1～3月時は9.5時間通電できていた。このように腐食速度が増加する気温上昇時に通電時間が長くなり、腐食速度が低下する気温低下時に通電時間が短くなって

表 3.24 無防食供試体のひび割れ発生状況

暴露環境	屋外暴露	屋外暴露
供試体の種類	無 Cl6 無防食供試体	無 Cl6 無防食供試体
塩化物イオン量	6kg/m <sup>3</sup>	6kg/m <sup>3</sup>
ひび割れ幅×延長(mm)	0.06 × 120	0.10 × 300

状況



年月	平均温度(°C)	月別の1日当たりの通電時間の割合(%)													平均通電時間(h/日)
		1h/日	2h/日	3h/日	4h/日	5h/日	6h/日	7h/日	8h/日	9h/日	10h/日	11h/日	12h/日	13h/日	
2015/07	30.4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	60	27	0	0	10.3
2015/08	27.9	100	100	100	100	100	100	100	84	84	42	16	0	0	9.8
2015/09	23.1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	95	76	5	0	11.1
2015/10	18.6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	77	0	0	0	10.2
2015/11	12.7	100	100	100	100	100	100	100	90	55	0	0	0	0	8.9
2015/12	7.1	100	100	100	100	100	100	97	90	23	0	0	0	0	8.4
2016/01	3.1	100	100	100	100	100	100	96	93	21	0	0	0	0	8.5
2016/02	5.4	100	100	100	100	100	100	100	100	90	14	0	0	0	9.4
2016/03	9.4	100	100	100	100	100	100	100	94	94	81	39	0	0	10.5
2016/04	14.6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	50	25	0	11.3
2016/05	20.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	88	50	12.7
2016/06	22.9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	93	77	57	12.7
2016/07	25.6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97	87	48	12.7
2016/08	27.2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	92	88	54	4	11.9
2016/09	23.9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	25	0	11.9
暴露中の1日当たりの通電時間の割合(%)		100	100	100	100	100	100	99.4	96.6	81.9	60.6	42.5	25.6	12.9	10.6

図 3.45 暴露試験時の通電状況

いるのは、気温変化に伴う腐食速度の増減に対し、効率的な通電が実施できていると考えられる。

### 3.3.3 実験結果

#### (1) 通電電流量

通電電流量は、20°C屋外暴露環境下と5°C65%RHの室内環境下で通電前に実施した分極試験によって、所定の分極量となる電流量を設定値とした。各暴露環境下での供試体への通電電流量と通電前の分極抵抗法により計測した腐食電流密度を図3.46に示す。図に示すように、概ね腐食電流密度より通電電流密度の方が大きな値を示した。また、通電前に計測した腐食電流密度に関し、20°C屋外の方が5°C室内より大きな値を示したのと同様、分極量に必要な通電電流密度に関しても、20°C屋外の方が5°C室内より大きな値を示した。また、分極量に必要な通電電流密度は、陽極の設置位置・面積・種類によらず、同様の傾向を示し、分極量の増加に伴い、通電電流量も大きくなる傾向を示した。ただし、5°C室内で通電調整したチタンリボンの埋込み型の常時通電供試体では、腐食電流密度より極端に小さな値を示した。これは、①腐食電流密度計測時は計測用の対極を用いコンクリートを湿潤状態として計測するのに対し、通電電流密度計測時は設置した陽極用いて乾燥状態で計測しており、計測時の供試体の状態が異なるため、あるいは②腐食電流密度計測箇所と通電電流密度計測箇所が若干異なるためであると考えられる。特に、5°C室内環境の腐食電流密度が小さく、分極量を100mVとする小さな通電電流密度の供試体で相違が生じており、調整する通電量が小さいことも、電流密度調整時の誤差等の発生要因の一つとして、示唆された。

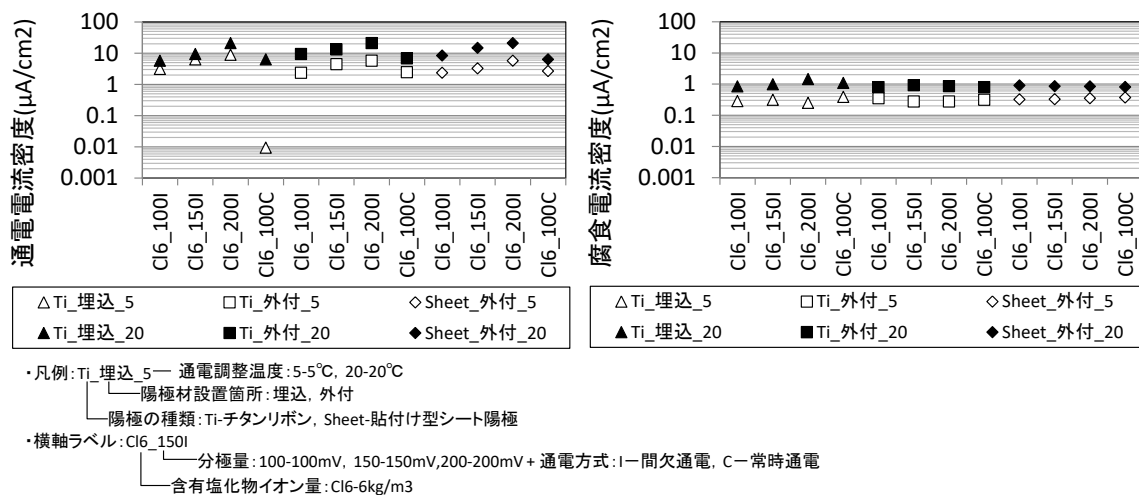


図 3.46 通電電流密度と腐食電流密度

#### (2) 常時計測結果

各供試体の鋼材電位はかぶり51mm側に設置した貼付け型の銀塩化銀照合電極で暴露期間中10分ごとにデータロガーで計測した。また、無防食供試体の一部には埋込み型の鉛照合電極を設置し、貼付け型の銀塩化銀照合電極と同時に計測した。計測した鋼材電位は、いずれも銅硫酸銅基準に変換し評価した。鋼材電位の常時計測結果の代表例として、チタンリボンを埋込んだ防食供試体の鋼材電位の常時計測結果を、無防食供試体の計測結果と併せて図3.47に示す。なお、図に示す無防食

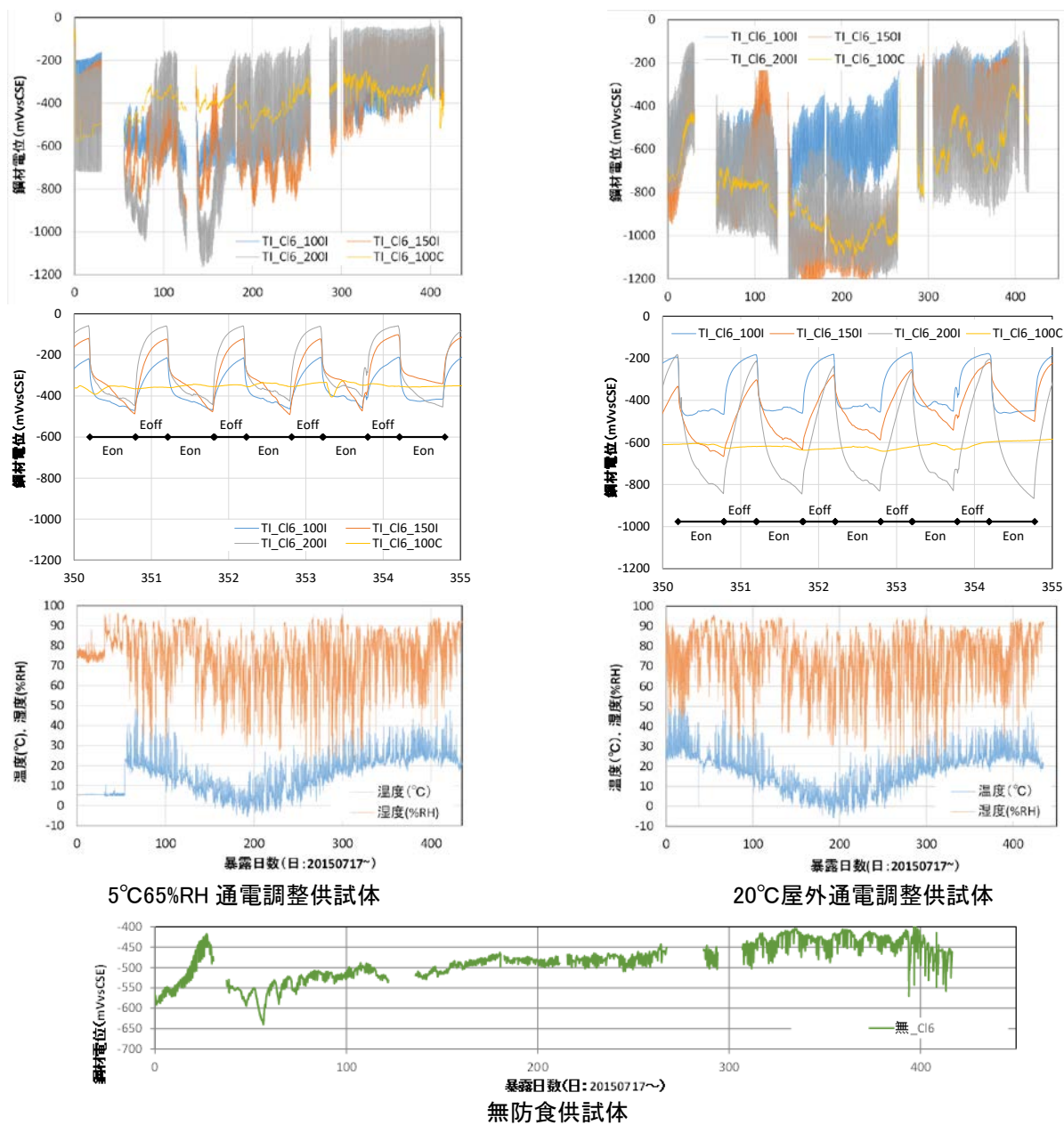
供試体の計測結果は埋込み型の鉛照合電極により計測した結果である。各計測結果には、計測時の温湿度も併せて示した。通電時の鋼材電位がオン電位 (Eon) であり、無通電時の鋼材電位がオフ電位 (Eoff) である。なお、無防食供試体の鋼材電位はオフ電位である。便宜上、グラフの起点は、試験日時開始日の午前0時とした。つまり、日数が記載されている箇所が午前0時である。

間欠通電方式で防食している供試体の鋼材電位は、いずれも図に示すように、通電状態のオン電位になると急激にマイナス方向へ変化し安定化した後、無通電状態のオフ電位となると復極試験時のようにプラス方向へ徐々に変化することを日々繰り返した。つまり、オン電位時のマイナス方向への変化は急激に、オフ電位時のプラス方向への変化は緩やかに推移した。このようにオフ電位時の鋼材電位のプラス方向への変化が緩やかなのは、オフ電位時の鋼材電位のプラス方向への変化が酸素の拡散速度に律速であるためである。通電時のオン電位から無通電時のオフ電位となると、鋼材表面では電気防食により抑制されていたアノード反応が生じ、カソード反応と平衡状態を保ちながら、鋼材電位はプラス方向へ変化する。しかし、通電時のオン電位の鋼材表面では、通電により水と酸素が常に消費され水酸化物イオンが生じる反応が生じており、酸素が不足した状態である。そのため、無通電時のオフ電位となっても、カソード反応に必要な酸素が不足しており、アノード反応とカソード反応の平衡電位である鋼材電位は急激にはプラス側へ変化できず、オフ電位のプラス方向への変化は鋼材表面への酸素の供給速度に依存するためである。図の鋼材電位の常時計測が途切れている箇所は、通電を停止し、復極試験や分極試験等を実施した箇所である。

防食供試体に関し、5°C65%RHの室内環境下で通電調整した供試体も含め、暴露100日から200日の気温の低下に伴い、オン電位およびオフ電位ともマイナス方向へ変化し、分極量が大きくなった。これは、通電継続による鋼材表面の改善効果や気温低下に伴う腐食電流密度の低下によって、分極に必要な電流量の相対的な低下に対し、定電流制御であるために分極量が大きくなったと考えられる。特に、20°C屋外で電流調整した供試体の方が通電量は大きいため、より大きく分極した。

300日以降の気温上昇時、350~355日目の拡大図に示すように、20°C屋外で通電調整した供試体について、オン電位およびオフ電位ともプラスに推移したが、オフ電位の最大値とオン電位の最小値との差は低下しておらず、所定の分極量以上の値を保持していた。一方、5°C65%RHの室内環境下で通電調整した供試体では所定の分極量は保持していたが、オフ電位の最大値とオン電位の最小値との差は徐々に低下する傾向を示した。つまり、5°C65%RHの室内環境下で通電調整した供試体の場合、温度上昇時に防食効果が低下する傾向が示唆された。

このように、間欠通電方式による防食供試体は、無通電時のオフ電位が計測できるため、常時電位を計測するだけで、通電による鋼材電位の変化が確認できる。



・凡例: TI\_C16\_100I (陽極の種類と設置箇所: T-タンホﾞン, S-貼付け型シート陽極+I:埋込み, O:外付け  
塩化物イオン量kg/m<sup>3</sup> 分極量mV+I:間欠通電方式 or C:常時通電方式)

図 3.47 屋外暴露供試体の鋼材電位常時計測結果

### (3) 解体前の腐食電流密度計測結果

各暴露試験後、供試体解体前に供試体のカブリ51mm側の中心付近にて分極試験を行い、ターフェル外挿法により腐食電流密度を算出した。分極試験にはPrinceton Applied Research社製のポテンシヨ/ガルバナスタツト: VersaSTAT 3を用いた。分極試験は24時間の復極試験後、2日以上経過した段階のオフ電位 (Eoff電位) を自然電位とし、掃引速度40mV/minで復極後のオフ電位からカソード分極させ、5分間以上停止後、再度オフ電位からアノード分極させ、電流量と電位の変化を計測した。そして、計測した電流量と電位を用い、アノード反応およびカソード反応とも、ターフェ



ル関係の成立と酸素拡散の影響を考慮し、分極量70~200mVの範囲で外挿したターフェル直線の交点から鋼材の腐食電流密度を算出した。なお、IRドロップは分極試験前に交流インピーダンス法で計測し、その試験結果を分極試験結果に反映させた。湿潤状態ではカソード反応が抑制され、腐食電流密度が低く計測される可能性があるため、分極試験は供試体のコンクリート表面が乾燥状態および湿潤状態の2通りで実施した。無防食供試体についても、同様の方法で分極試験を実施した。

乾燥状態での測定時の対極には貼付け型シート陽極を用い、照合電極には貼付け型の銀塩化銀照合電極(30×30mm)を用いた。貼付け型シート陽極は、通電部を150×150mmで切断後、中心部に切欠き部(40×40mm)を設け、シートの切欠き部が供試体のカブリ51mm側の中心となるように供試体に貼付けて設置した。切欠き部には貼付け型の銀塩化銀照合電極を設置した。

湿潤状態での測定時の対極にはチタンメッシュ(150×400mm)を用い、照合電極には鉛照合電極を用いた。チタンメッシュは、湿潤状態とした脱脂綿で覆い、供試体のカブリ51mm側全体に設置した。その中央には鉛照合電極を設置した、なお、供試体は、分極試験前に養生マット等で2時間以上、湿潤状態とした。算出した各供試体の腐食電流密度を図3.48に示す。

乾燥状態の測定では、図に示すように、20°Cの屋外環境で通電調整した供試体の腐食電流密度は、いずれの供試体についても無防食供試体より小さくなり、また、5°C65%RHの室内環境で通電調整した供試体よりも小さい値を示した。一方、湿潤状態の測定では、逆の傾向を示し、5°C65%RHの室内環境で通電調整した供試体の方が20°Cの屋外環境で通電調整した供試体より腐食電流密度が小さくなる傾向を示した。後述する供試体解体後の腐食面積率および腐食減量では、腐食面積率は5°C65%RHの室内の方が大きく、腐食減量は20°Cの屋外の方が大きくなる傾向を示した。ただし、腐食減量は温度履歴の影響であると考えられるため、乾燥状態での測定の方が鋼材腐食の状態を反映していると考えられる。しかし、5°C65%RHの室内の結果が無防食供試体の結果より劣る結果となっており、解体後の鋼材腐食の状態とは明らかに異なる結果である。つまり、前節と同様、常時通電方式を含め防食供試体と無防食供試体の優劣の差は分極試験によるターフェル外挿法では確認できなかったこととなる。このようにターフェル外挿法で優劣の差が確認できなかった原因は、前節同様、24時間の復極試験後に2日以上経過した段階で計測していることや、照合電極設置箇所の鋼材の腐食状態が鋼材全体の腐食状態を平均化した場合と異なること等が原因であると考えられる。

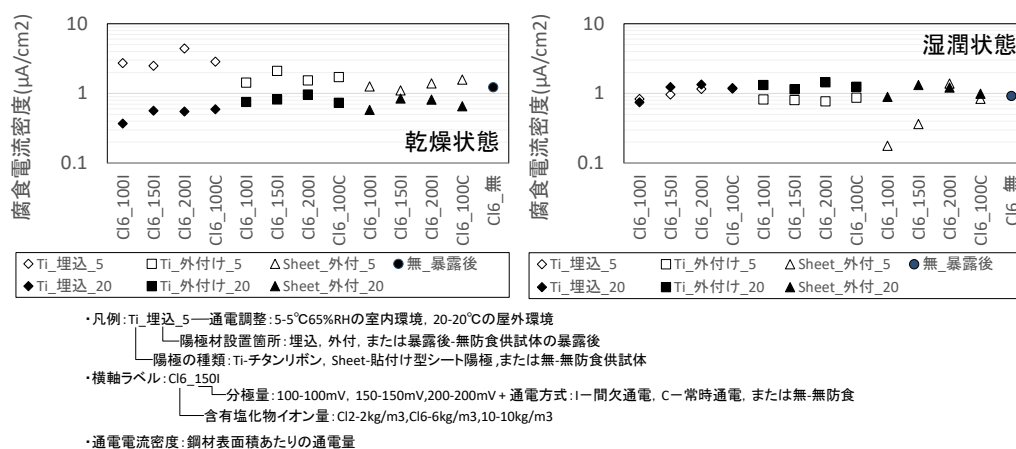


図 3.48 屋外暴露供試体解体前の鋼材の腐食電流密度

#### (4) 復極試験結果

暴露期間中、カブリ51mm側に設置した貼付け型の銀塩化銀照合電極を用い、定期的に24時間の復極試験を実施した。なお、復極試験の開始は、カレントインタラクタ法によりIRドロップを考慮するため、すべて通電中に実施した。計測した復極量と鋼材の初期電位（Einitial）に対するオフ電位（Eoff）の変化量（Eoff-Einitial）について、経時変化の計測結果を図3.49に、供試体解体前に実施した計測結果を図3.50に示す。

図3.49に示すように、20℃屋外で通電調整した供試体の復極量は設定した分極量よりもすべて増加する傾向を示した。また、Eoff-Einitialの値は、暴露30日まではすべてプラスに推移した後、常時通電供試体を含めマイナス値を示すものが多数発生した。つまり、復極量がプラスに推移しつつ、暴露30日でEoff-Einitialの値が全てプラスに推移したのは防食効果が確実に作用し、アノード反応が抑制されていることを示している。その後、Eoff-Einitialの値に関し、マイナスに推移する供試体が発生したのは、分極量が大きくなり酸素の供給速度との関係により24時間で復極できなくなっていることを示していると考えられる。

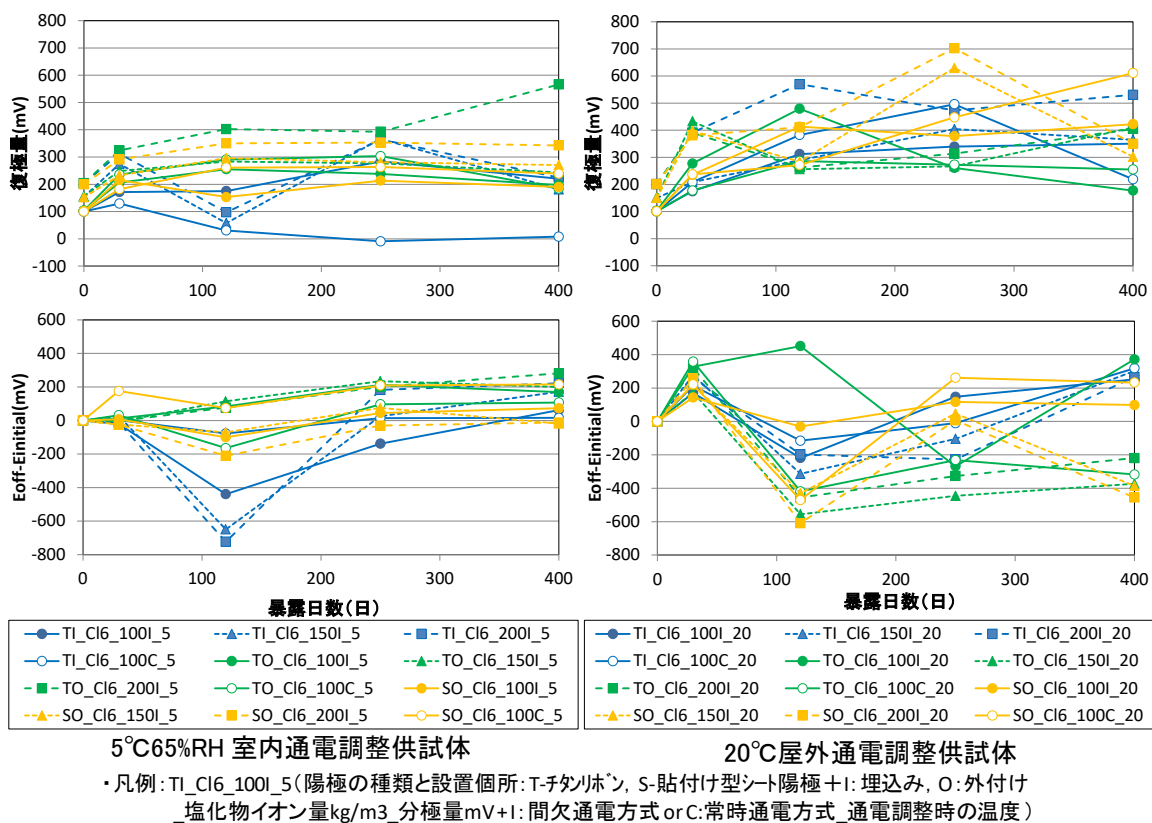


図 3.49 復極量と Eoff-Einitial の経時変化

一方、5℃室内で通電調整した供試体の復極量についても、同様に概ね増加する傾向を示したが、一部の供試体では、120日目の復極試験で復極量が分極量の設定値を下回るものが発生した。ただし、設定値を下回っていても、チタンリボンの埋込み型の間欠通電供試体は、Eoff-Einitialのマイナス値が大きくなっており、分極量自体は大きい酸欠等で復極できていない状態と考えられ、その後の調査でも所定の復極量を満足しており、通電不足等の問題ではないと考えられる。しかし、チタン

リボンの埋込み型の常時通電供試体では、通電調整時の通電量が他の供試体より極端に小さかったこともあり、5°C環境下の30日目までは所定の復極量を満足したが、その後の屋外環境下では復極量が小さくなり、解体前には7.8mVと小さくなった。また、初期電位に対するオフ電位の変化量も16mVと小さくなった。

これらの試験結果から、間欠通電に関わらず、常時通電も含め通電調整時の環境温度が、その後の防食効果に与える影響がある可能性が示唆された。特に、常時通電ではこのような通電量不足が発生しても、常時通電しているため、解体前でも7.8mVの復極量があり、Eoff-Eintialの値も16mVとプラス値を示していたが、間欠通電では夜間無通電となるため、その影響はより大きくなると考えられる。

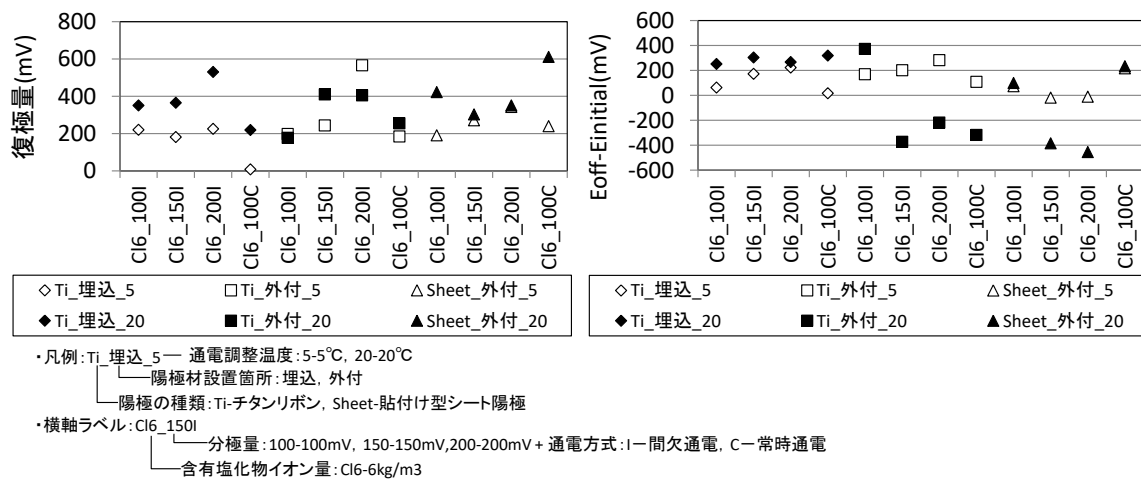


図 3.50 解体前の復極量と Eoff-Eintial

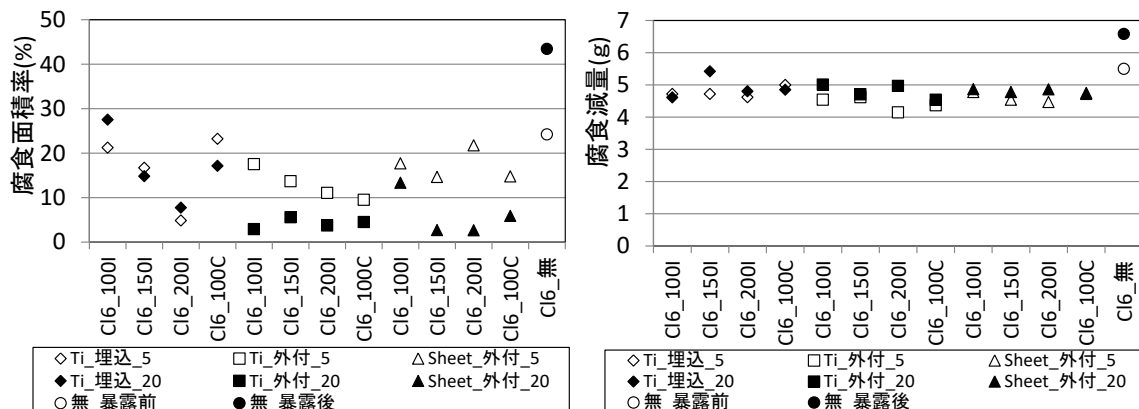
### (5) 供試体解体後の鋼材の腐食状況

解体後の供試体の腐食面積率および腐食減量の結果一覧を図3.51に示す。また、解体後の鋼材の腐食状況を表3.25～表3.27に示す。

図3.51に示すように、腐食面積率は、5°C65%RHの室内環境下で通電調整した供試体の方が20°Cの屋外環境で通電調整した供試体より、大きくなる傾向を示した。これは、温度によって、鋼材の腐食電流密度が変化することが主要因と考えられ、通電調整は温度が高い時期に実施すべきであることを示唆していると考えられる。特に、5°C室内で通電調整したチタンリボンの埋込み型の常時通電供試体では、復極量が7.8mVとなり、初期電位に対するオフ電位の変化量も16mVと小さくなった影響で、他の常時通電供試体より腐食面積率および腐食減量とも大きくなった。これは、供試体の個体差で通電電流密度が他と比べて小さかったことも要因の一つと考えられるが、通電調整時の温度が5°Cであったことも要因の一つとして考えられる。

一方、腐食減量は、5°C65%RHの室内環境で通電調整した供試体の方が小さい傾向を示した。これは、5°C65%RHの室内環境で通電調整した供試体の当初54日間の暴露は5°C環境下であるのに対し、20°Cの屋外環境で通電調整した供試体の暴露は夏季の高温下であり、その温度履歴の差が原因であると考えられる。ただし、いずれの供試体についても、明らかに無防食供試体の暴露後よりも腐食面積率および腐食減量とも小さな値であり、防食効果を確実に発揮していると考えられる。分極量に対する防食効果に関し、チタンリボンを用いた供試体の腐食面積率は分極量の設定値が大きいもの

ほど小さくなっている傾向を示している。しかし、腐食減量ではそのような傾向は見られず、本検討条件では、前章の屋外暴露試験同様、分極量100mV以上の通電電流密度を通電することで、間欠通電でも常時通電同様の防食効果を発揮可能であると考えられる。



- ・凡例: Ti\_埋込\_5 通電調整: 5-5°C65%RHの室内環境, 20-20°Cの屋外環境
  - 陽極材設置箇所: 埋込, 外付, または暴露前-無防食供試体の暴露前, 暴露後-無防食供試体の暴露後
  - 陽極の種類: Ti-チタンリボン, Sheet-貼付け型シート陽極, または無-無防食供試体
- ・横軸ラベル: C16\_150I
  - 分極量: 100-100mV, 150-150mV, 200-200mV + 通電方式: I-間欠通電, C-常時通電, または無-無防食
  - 含有塩化物イオン量: Cl2-2kg/m3, Cl6-6kg/m3, 10-10kg/m3
- ・腐食減量: 黒皮質量含む

図 3.51 腐食面積率と腐食減量

表 3.25 無防食供試体の鋼材腐食状況

	鋼材の腐食状況 (JIS-S10 準拠) 腐食面積 腐食質量 率 (%) (%)	腐食マッピング図 <sup>1)</sup> (腐食箇所: 黒色)	鋼材の腐食状況	
			かぶり30mm側	かぶり50mm側
暴露200日 + 暴露430日 後	無-Cl6 37.0 5.91			
	無-Cl6 49.8 7.25			

1) 黒皮質量含む, 2) 中央部分: かぶり30mm側⇒

表 3.26 5°C環境下で通電調整した防食供試体の鋼材腐食状況

	鋼材の腐食状況 (JCI-SO法適用) 腐食面積 腐食質量 率(%) (g)		腐食マッピング図* (腐食箇所:黒色)	鋼材の腐食状況	
				かぶり30mm側	かぶり50mm側
TL_C16_100I_5	21.2	4.72			
TL_C16_150I_5	16.7	4.72			
TL_C16_200I_5	4.9	4.62			
TL_C16_1000I_5	23.2	5.00			
TO_C16_100I_5	17.5	4.54			
TO_C16_150I_5	13.7	4.62			
TO_C16_200I_5	11.1	4.15			
TO_C16_1000I_5	9.5	4.37			
SO_C16_100I_5	17.7	4.78			
SO_C16_150I_5	14.7	4.54			
SO_C16_200I_5	21.8	4.47			
SO_C16_1000I_5	14.8	4.72			

1)黒皮質量含む 2)中央部分:かぶり30mm側⇒



・凡例: TL\_C16\_100I\_5(陽極の種類と設置箇所: T:チタン/鉛、S:貼付け型シート陽極+I:埋込み、O:外付け  
塩化物イオン量kg/m<sup>3</sup>\_分極量mV+I:間欠通電方式 or C:常時通電方式\_通電調整時の温度)

表 3.27 20°C環境下で通電調整した防食供試体の鋼材腐食状況

	鋼材の腐食状況 (JCI-SO法適用) 腐食面積 腐食質量 率(%) (g)		腐食マッピング図* (腐食箇所:黒色)	鋼材の腐食状況	
				かぶり30mm側	かぶり50mm側
TL_C16_100I_20	27.5	4.61			
TL_C16_150I_20	14.8	5.42			
TL_C16_200I_20	7.7	4.80			
TL_C16_1000I_20	17.1	4.85			
TO_C16_100I_20	2.9	5.01			
TO_C16_150I_20	5.6	4.71			
TO_C16_200I_20	3.8	4.97			
TO_C16_1000I_20	4.5	4.54			
SO_C16_100I_20	13.3	4.87			
SO_C16_150I_20	2.7	4.78			
SO_C16_200I_20	2.7	4.86			
SO_C16_1000I_20	5.9	4.75			

1)黒皮質量含む 2)中央部分:かぶり30mm側⇒



・凡例: TL\_C16\_100I\_5(陽極の種類と設置箇所: T:チタン/鉛、S:貼付け型シート陽極+I:埋込み、O:外付け  
塩化物イオン量kg/m<sup>3</sup>\_分極量mV+I:間欠通電方式 or C:常時通電方式\_通電調整時の温度)

(6) X線回折法による鋼材表面の組成分析結果

防食供試体および無防食供試体の鋼材表面の組成を分析するため、供試体より取り出した鋼材を用い、カッターナイフを用い鋼材表面より均等に試料を採取した。試料採取後、直ちにポリエチレン製の試料袋に試料を採取し、X線回折法で分析した。なお、試料採取は、腐食面積率の計測後、腐食減量を計測する前に実施した。X線回折装置はMulti Flex 2kW リガク社製を用いた。分析結果一覧を表3.28、代表的な分析結果を図3.52に示す。なお、分析結果一覧には、供試体作製前の鋼材表面の黒皮の分析結果も併せて示した。なお、供試体作製前の鋼材表面を構成している黒皮部分は、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (マグネタイト)、FeO (ウスタイト)、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ヘマタイト) で構成されており、それらの構成成分のX線回折強度は比較的強く、ノイズも少なく、晶質性であった。

常時通電供試体を含め、5°C65%RHの室内環境で通電調整した防食供試体の鋼材表面は、少量のFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含む、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>とFeOを主成分とした酸化物で構成されていた。なお、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を少量としたのは、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>やFeOのX線回折強度に対し、そのピーク箇所のX線回折強度は比較的低いためである。一方、20°Cの屋外で通電調整した防食供試体は、チタンリボンの埋込み型の供試体は5°C65%RHの室内環境で通電調整したものと同様であるが、陽極を外付けした供試体は、ほとんどFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含まず、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>とFeOのみの酸化物で構成されていた。これまでの試験結果から、20°Cの屋外で通電調整した供試体の方が、確実に防食できていると考えられる。よって、前節同様、このようにX線回折法でFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が消失していたのは、電気防食によってFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が還元され、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>が生成した可能性が考えられる。

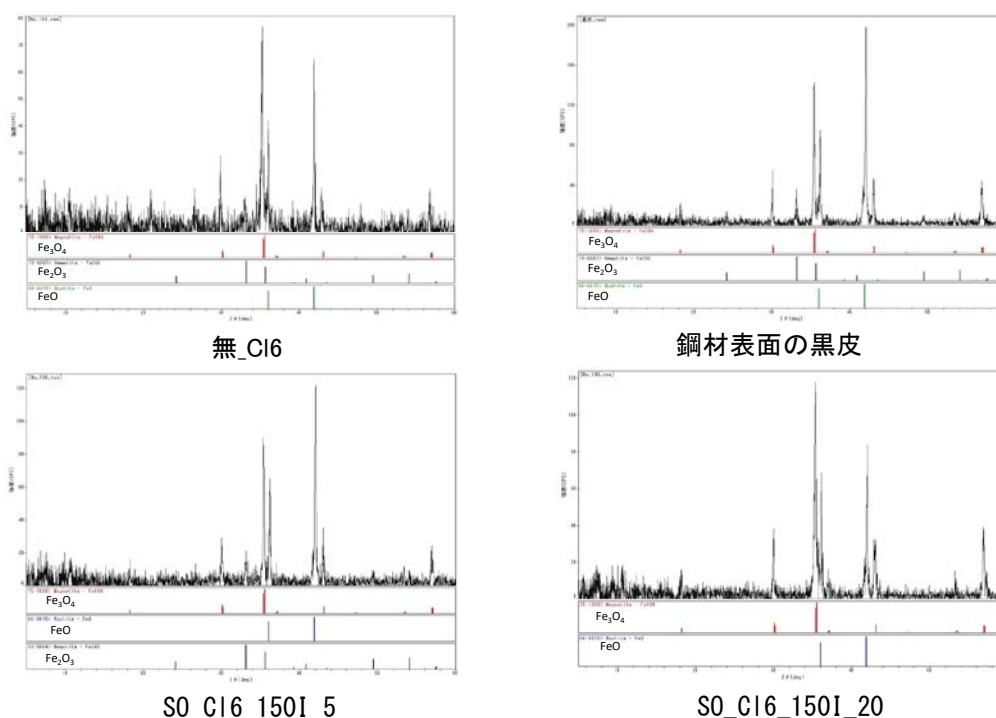
一方、無防食供試体の鋼材表面は、黒皮と同様の成分であるFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、FeO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を少量含む成分により構成されていた。ただし、少量としたのは、他の防食供試体や供試体作製前の黒皮と比較し、それらのピーク箇所のX線回折強度が低く、非晶質であるノイズを多数含んでいたためである。

表 3.28 鋼材表面の X 線回折結果一覧

供試体の種類	通電調整	
	5°C65%RH室内環境	20°C屋外環境
TI_C16_100I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TI_C16_150I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TI_C16_200I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
TI_C16_100C	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
TO_C16_100I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
TO_C16_150I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
TO_C16_200I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
TO_C16_100C	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
SO_C16_100I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)
SO_C16_150I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
SO_C16_200I	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
SO_C16_100C	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO
無_C16	(Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 少量)	
黒皮	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	

・供試体の種類: 分極量: 100-100mV, 150-150mV, 200-200mV + 通電方式: I-間欠通電, TI\_C16\_150I — C-常時通電, または無-無防食  
 含有塩化物イオン量: Cl2-2kg/m<sup>3</sup>, Cl6-6kg/m<sup>3</sup>, 10-10kg/m<sup>3</sup>  
 陽極の種類+設置箇所: TI-チタンリボン+埋設, TO-チタンリボン+外付, SO-貼付け型シート陽極+外付, または無-無防食供試体





・供試体の種類:SO\_C16\_150I\_5 — 通電調整:5-5°C室内, 20-20°C屋外  
 — 分極量:150-150mV+ 通電方式:I-間欠通電  
 — 含有塩化物イオン量:Cl6-6kg/m<sup>3</sup>  
 — 陽極の種類+設置箇所:SO-貼付け型シート陽極+外付,または無-無防食供試体

図 3.52 X線回析結果の代表例

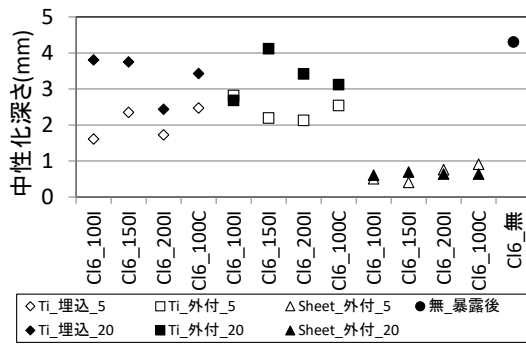
## (7) 供試体解体後のコンクリートの調査

### 1) 中性化深さ状況

暴露試験後の供試体を割裂し、陽極材設置面であるかぶり30mm側の中性化深さを確認した。中性化深さ測定結果を図3.53に示す。中性化深さは陽極材を設置していたかぶり厚30mmの側のコンクリート表面から5点計測した。ひび割れの発生した無防食供試体についても、かぶり厚30mmの側のコンクリート表面から5点計測することとし、ひび割れ断面は中性化しているため、ひび割れの無い断面で計測した。

図に示すように、無防食供試体の中性化深さは4.3mm、チタンリボンを用いた供試体の中性化深さは約2~4mmの値を示したのに対し、貼付け型シート陽極を外付した防食供試体の中性化深さは、1mm未満の値でほとんど中性化していなかった。このように貼付け型シート陽極を外付した防食供試体のみ中性化深さが小さいのは、貼付け型シート陽極の表面はフッ素樹脂フィルムで覆っているため、その遮蔽効果により、コンクリート面が露出している他の供試体よりも中性化が生じにくくなったと考えられる。

なお、塩化物イオンを含むコンクリートに電気防食工法を適用すると塩化物イオンが電気泳動で陽極材付近に移動し、陽極材へ電子を受け渡すと塩素ガスとなり、その塩素ガスが水と反応して塩化水素及び過塩素酸となることからコンクリートが中性化することが想定された<sup>12)</sup>。しかし、今回の暴露試験では、両陽極材とも塩化物イオンの影響と考えられる陽極材付近の中性化は確認できなかった。



・凡例: Ti\_埋込\_5 通電調整: 5-5°C65%RHの室内環境, 20-20°Cの屋外環境  
 陽極材設置箇所: 埋込, 外付, または暴露後-無防食供試体の暴露後  
 陽極の種類: Ti-チタンリボン, Sheet-貼付け型シート陽極, または無-無防食供試体  
 ・横軸ラベル: C16\_150I  
 分極量: 100-100mV, 150-150mV, 200-200mV + 通電方式: I-間欠通電, C-常時通電, または無-無防食  
 含有塩化物イオン量: Cl2-2kg/m<sup>3</sup>, C16-6kg/m<sup>3</sup>, 10-10kg/m<sup>3</sup>

図 3.53 各供試体の中性化深さ測定結果

## 2) 塩化物イオンの分布状況

暴露試験後の供試体から図3.54に示すように陽極材設置面より深さ方向にスライスした供試体を採取し、電子線マイクロアナライザ: EPMA(EPMA-1600;島津製作所製)を用いて、塩化物イオンの分布状況を確認した。分析結果の代表例として、貼付け型シート陽極を用いて防食した供試体の分析結果を図3.55に示す。図3.55の各図に示すカラーバーは塩化物イオン量の相対比率を示しており、カラーバーの上部に示す白や赤の箇所は下部に示す青や黒の箇所に比べ、濃度が濃くなっていることを示す。

塩化物イオンを含むコンクリートに電気防食を適用すると、陰イオンである塩化物イオンは電気泳動により陰極である鋼材表面から陽極側へ移動し、鋼材表面の塩化物イオン量が相対的に低くなると考えられている<sup>12)</sup>。

5°C環境下で通電調整した分極量100mVの間欠通電による防食供試体以外、図に示すように、間欠通電および常時通電とも、いずれの環境下でも、想定通りに鋼材表面の塩化物イオン量が低下していた。また、鋼材直上についても塩化物イオン量が低下しており、その低下している範囲は、5°C環境下より20°C環境下で通電調整した防食供試体の方が大きくなった。これは、図3.46に示すように20°C環境下で通電調整した防食供試体の方が、通電量が大きいためであると考えられる。

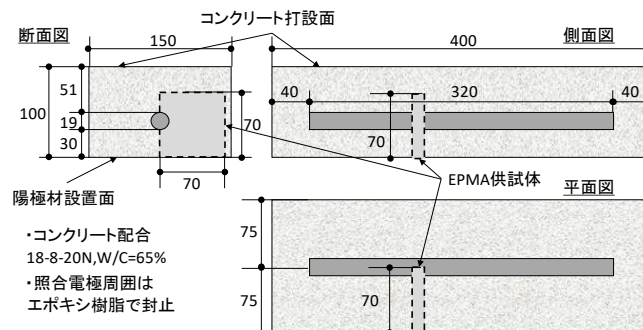


図 3.54 EPMA 分析用供試体の採取箇所

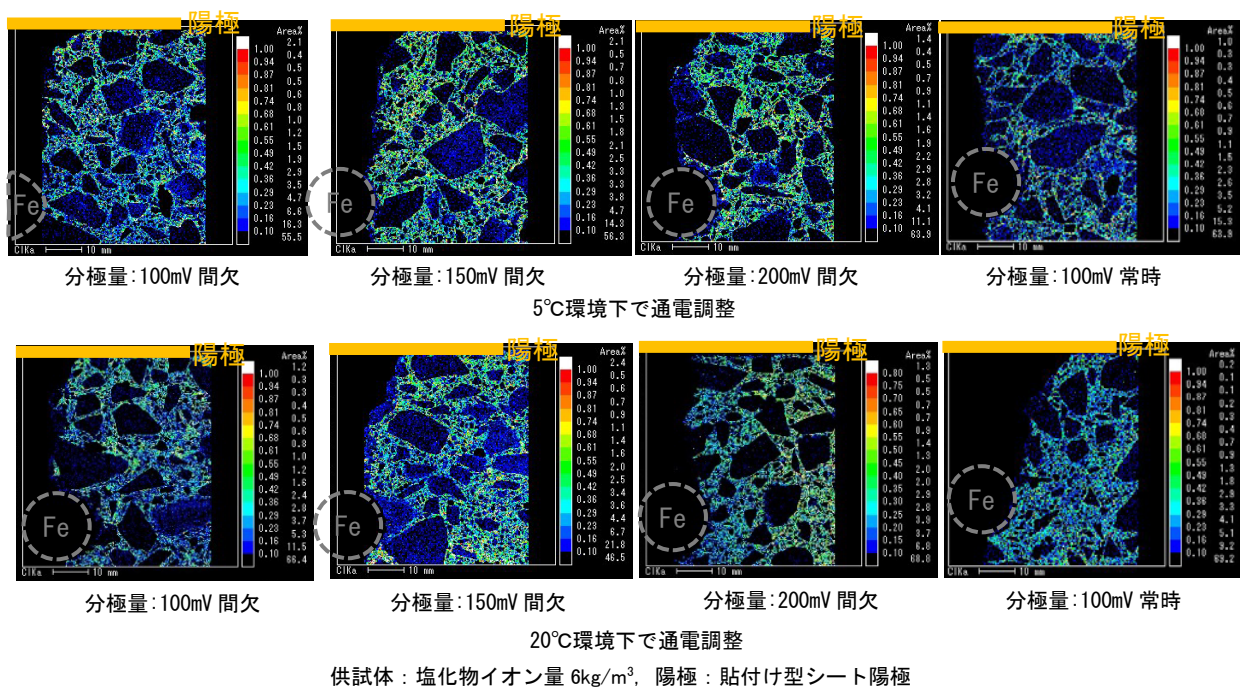


図 3.55 EPMA 分析結果

### 3.3.4 本節のまとめ

本節では、ソーラーパネルを電流供給源とする間欠通電方式による電気防食時、通電調整時の温度が防食効果へ及ぼす影響を屋外暴露試験により検討した。本検討により明らかになったことを以下に示す。

- (1) ソーラーパネルのサイズを防食回路に必要な電力の10倍以上とし、起動電圧を5V程度とする定電流制御方式の電源装置を使用することで、雨天等の悪天候時を含め、1日あたりにより防食回路へ最低6時間通電でき、平均では10.6時間通電できていた。
- (2) ソーラーパネルを電流供給源とすることで、気温上下に伴う鋼材腐食速度の増減に対し、効率的な通電が実施でき、通電時間の平均は、春秋の4～6月・10～12月時では10.7時間、夏の7～9月時では11.3時間、冬の1～3月時では9.5時間であった。
- (3) 腐食電流密度より通電電流密度の方が概ね大きな値を示した。また、通電前に計測した腐食電流密度に関し、20°C屋外の方が5°C室内より大きな値を示したのと同様、分極量に必要な通電電流密度に関しても、20°C屋外の方が5°C室内より大きな値を示した。
- (4) 分極量に必要な通電電流密度は、陽極の設置位置・面積・種類によらず同様の傾向を示し、分極量の増加に伴い、通電電流量も大きくなる傾向を示した。
- (5) 間欠通電方式による防食供試体は、鋼材電位を10分間隔で常時計測するだけで、通電時のオン電位と無通電時のオフ電位が計測でき、通電による鋼材電位の変化が確認できた。
- (6) 間欠通電方式で防食している供試体の鋼材電位に関し、オン電位時のマイナス方向への変化は急激に、オフ電位時のプラス方向への変化は緩やかに推移した。このようにオフ電位時の鋼材電位のプラス方向への変化が緩やかなのは、オフ電位時の鋼材電位のプラス方向への変化が酸素の拡散速度に律速であるためである。

- (7) 定電流制御であるため、通電継続による鋼材表面の改善効果や気温低下に伴う腐食電流密度の低下によって、分極に必要な電流量が相対的に低下すると分極量は大きくなった。
- (8) 気温上昇時、所定の分極量は保持していたが、5°C65%RH環境下で通電調整した供試体に関しては、オフ電位の最大値とオン電位の最小値との差が徐々に低下する傾向を示した。つまり、温度上昇時に防食効果が低下する傾向が示唆された。
- (9) 解体後の腐食面積と腐食減量の結果は明らかに無防食供試体より防食供試体の方が小さいのに対し、前節同様、解体前に計測した腐食電流密度の結果では優劣の差は確認できなかった。このように、腐食電流密度の計測で防食と無防食の優劣の差が確認できなかった原因は、前節同様、24時間の復極試験後に2日以上経過した段階で計測していることや、照合電極設置箇所の鋼材の腐食状態が鋼材全体の腐食状態を平均化した場合と異なること等が原因であると考えられる。
- (10) 20°C屋外で通電調整した供試体および5°C室内で通電調整した供試体とも、通電継続による防食効果により、復極量は設定した分極量よりもすべて増加する傾向を示した。また、 $E_{\text{off}}-E_{\text{initial}}$ の値についても、酸欠等によりマイナスの値を示したものも発生したが、概ねプラス方向へ推移し、防食効果が確実に作用し、アノード反応が抑制されている傾向を示した。
- (11) 5°C室内で通電調整した供試体のうち、通電量が小さい常時通電供試体では、環境温度が高い屋外暴露時に復極量の低下が発生した。このことから、通電調整時の環境温度が、その後の防食効果に与える影響がある可能性が示唆された。
- (12) 腐食面積率は、5°C65%RHの室内環境下で通電調整した供試体の方が20°Cの屋外環境で通電調整した供試体より、大きくなる傾向を示した。これは、温度によって、鋼材の腐食電流密度が変化することが主要因と考えられ、通電調整は温度が高い時期に実施すべきであることを示唆していると考えられる。
- (13) 腐食減量は、腐食面積の結果と異なり、5°C65%RHの室内環境で通電調整した供試体の方が小さい傾向を示した。これは、5°C65%RHの室内環境で通電調整した供試体の当初54日間の暴露は5°C環境下であるのに対し、20°Cの屋外環境で通電調整した供試体の暴露は夏季の高温下であり、その温度履歴の差が原因であると考えられる。
- (14) 防食供試体はいずれも防食効果を確実に発揮し、無防食供試体の暴露後より、腐食面積率および腐食減量とも小さな値を示した。分極量に対する防食効果に関しても、チタンリボンを用いた供試体の腐食面積率は分極量の設定値が大きいものほど小さくなっている傾向を示した。しかし、腐食減量ではそのような傾向は見られなかった。本検討条件では、前章の屋外暴露試験同様、分極量100mV以上の通電電流密度を通電することで、間欠通電でも常時通電同様の防食効果を発揮可能であると考えられる。
- (15) 5°C65%RHの室内環境で通電調整した防食供試体の鋼材表面はいずれも、少量の $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を含む、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\text{FeO}$ を主成分とした酸化物で構成されていた。一方、20°Cの屋外で通電調整した防食供試体では、ほとんど $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を含まず、ほとんどの供試体は $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\text{FeO}$ のみの酸化物で構成されていた。20°Cの屋外で通電調整した防食供試体の方が確実に防食できていると考えられることから、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ が消失していたのは、電気防食によって $\text{Fe}_2\text{O}_3$ が還元され、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ が生成した可能性が考えられる。



- (16) 無防食供試体の鋼材表面は黒皮と同様の成分である $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を少量含むが、ほぼ非晶質な成分で構成されていた。
- (17) 無防食供試体の中性化深さは4.3mm、チタンリボンを用いた防食供試体は約2~4mmであったのに対し、貼付け型シート陽極を外付けした供試体は1mm未満の値であった。貼付け型シート陽極の表面はフッ素樹脂フィルムで覆っているため、その遮蔽効果により、コンクリート面が露出している他の供試体よりも中性化が生じにくくなった。なお、今回の暴露試験では、塩化物イオンの影響と考えられる陽極材付近の中性化はいずれも確認できなかった。
- (18) EPMAによる塩化物イオンの分布状況の分析の結果、間欠通電および常時通電とも、いずれの環境下でも、鋼材表面の塩化物イオン量が低下し、鋼材直上のかぶりコンクリート部の塩化物イオン量についても低下していた。ただし、その低下している範囲は、5℃環境下より20℃環境下で通電調整した防食供試体の方が大きくなった。これは、通電量が20℃環境下で通電調整した防食供試体の方が大きいためであると考えられる。

### 3.4 電気防食施工箇所への水掛りによる影響に関する検討

#### 3.4.1 はじめに

コンクリート構造物の電気防食工法では、鋼材を陰極とし、コンクリート表面に設置した陽極からコンクリートを介して鋼材表面へ通電することで、防食回路を形成でき、鋼材を防食することができる。つまり、コンクリートを介して鋼材表面へ通電しなければ、鋼材を防食することはできない。ところが、コンクリートはイオン伝導体であるため、電気を伝導するイオン種やイオン濃度によって電気伝導率が異なる。そのため、湿潤状態と乾燥状態ではコンクリートの電気伝導率が異なり、電気抵抗が異なる。コンクリートの電気伝導性は、水に浸した場合、含水率が13~15%となり、電気伝導率は $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、電気抵抗は $1 \times 10^3 \sim 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ となる。通常の乾燥状態の場合、含水率は3~5%となり、電気伝導率は $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ より、電気抵抗は $1 \times 10^5 \sim 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ となる。さらに、高温で乾燥させ、含水率を1%以下とした場合、電気伝導率は $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ より電気抵抗は $1 \times 10^8 \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ となる<sup>24)</sup>。



写真 3.5 陽極材の劣化事例

よって、雨掛り箇所や沿岸部等の海水飛沫滞で電気防食工法を適用する場合、そのような水が掛かる箇所（以下、水掛り箇所と称す）では、コンクリートの電気抵抗が低下し、それ以外の箇所と電気抵抗に差が生じる場合がある。同一の防食回路内にそのような箇所が発生すると、水掛り箇所への電流の偏りやコンクリートの湿潤化による鋼材周辺の酸素不足等の現象が発生し、防食性能に影響を及ぼす可能性が考えられる。写真3.5は、埋込み型の陽極設置箇所へ海水が掛り、電流の集中が生じ、海水の塩素イオンが陽極材表面で塩素ガス等となり、陽極を埋め込んでいるモルタルと反応し、モルタルに変色および中性化をもたらした事例である<sup>11)</sup>。このような水掛りによる防食性能への影響は、図に示す陽極の劣化事例のように、常時通電でも課題となっており、間欠通電でも防食回路自体は常時通電と同様であるため、考慮する必要がある。

ところで、鉄筋コンクリート内部への劣化因子（水分、塩分等）の浸透を防止する工法として、表



面含浸材を塗布する工法が知られている。表面含浸材を塗布することでコンクリートの吸水率が低下し、電気抵抗率の安定化が図れると報告されている<sup>25)</sup>。

本検討では、外部電源方式の電気防食工法を施工した箇所の一部に水掛かりが発生した場合の影響を確認するとともに、表面含浸材を塗布することで防食性能に及ぼす水の影響を低減できるかどうかを確認した。なお、陽極材には線状のチタンリボンと貼付け型シート陽極の2種類を選定した。また、表面含浸材にはシラン系表面含浸材とケイ酸塩系表面含浸材の2種類を選定した。検討に用いた表面含浸材の吸水率および吸水抑制率を表3.29に示す。

表3.29 表面含浸材の吸水率

種別	試験方法	吸水率 (%)	吸水抑制率 (%)
無塗布		0.8	—
シラン系	JSCE-K571	0.1	87
ケイ酸塩系		0.3	62

### 3.4.2 実験概要

#### (1) 供試体の概要

供試体寸法は140×100×100mmとし、陽極材の設置面は140×100mmとした。鋼材のかぶり高が、陽極材の設置面より30mmの位置となるように、型枠側面に予め鋼材設置用の穴を作製した後、その穴に丸鋼φ19mm×300mmを設置し、陽極設置面の側面よりモルタルを打設し供試体を作製した。供試体のモルタルの配合比は普通ポルトランドセメント：砂：水＝1：3：0.55とし、塩化物イオンを6kg/m<sup>3</sup>混入した。供試体は、上記配合のモルタルを打設し、20℃封かん状態での7日間養生および20℃65%RH環境下での28日間の気中養生により作製した。作製したモルタル供試体の陽極材設置面をケレン処理した後、陽極を設置した。陽極にはチタンリボンと貼付け型シート陽極を用いた。チタンリボンは、コンクリート表面を幅10mm、深さ20mm溝状にはり取り縦向きに設置し、モルタルを充填し、供試体中に埋め込んだ。貼付け型シート陽極はコンクリート表面に貼付けて設置し、シートの周囲をエポキシ樹脂で封止した。陽極材設置後、陽極材設置面に20℃65%RHの環境で表面含浸材を塗布した。表面含浸材を塗布した後、シラン系はJSCE-K 571に、ケイ酸塩系はJSCE-K 572に従ってそれぞれ28日間養生した。照合電極には貼付け型の銀塩化銀照合電極を使用し、供試体側面に設置した。その後、陽極材設置面以外の5面をエポキシ樹脂で被覆した。なお、表面含浸材の塗布面積は、チタンリボンを用いた供試体の場合140×100mmであり、貼付け型シート陽極供試体の場合、シート部および封止部を除いたシートの両側35×100mmである。各供試体の概要図を図3.56に示す。

#### (2) 試験方法

電気防食工法を施工した箇所の一部に水が掛ることを想定し、3体の供試体を並列に接続した後、定電流制御にて通電し、うち1体だけに散水した。試験概略図を図3.57に示す。鉄筋の露出部分を配線後にエポキシ樹脂で被覆し、通電を開始した。通電量は分極試験を実施し、各供試体の鉄筋の電位がマイナス方向に100mV以上分極するように設定した。24時間通電後、

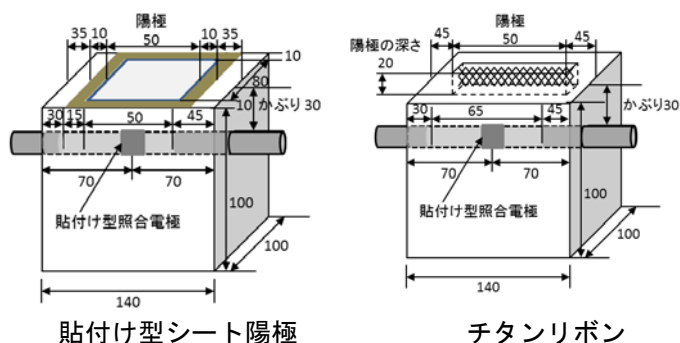


図 3.56 供試体概要図

3体の供試体のうち1体に約200ml/hの流量で水道水を散水した。通電と散水を約2か月間継続した後、各供試体の電流量を計測し、通電を停止した。24時間後に復極量及び鉄筋のオフ電位を計測した。これらの試験結果から、防食性能に及ぼす水の影響(水掛り箇所への電流の偏り、鉄筋周辺の酸素不足)の有無を評価した。供試体の条件一覧を表3.30に示す。なお、3体の供試体のうち、散水する供試体を水掛り箇所、散水しない供試体を通常箇所1、通常箇所2と称す。

表 3.30 供試体の条件一覧

供試体No.	陽極材	表面含浸材
1-1		無塗布
1-2	チタンリボン	シラン系
1-3		ケイ酸塩系
2-1		無塗布
2-2	貼付け型シート陽極	シラン系
2-3	シート陽極	ケイ酸塩系

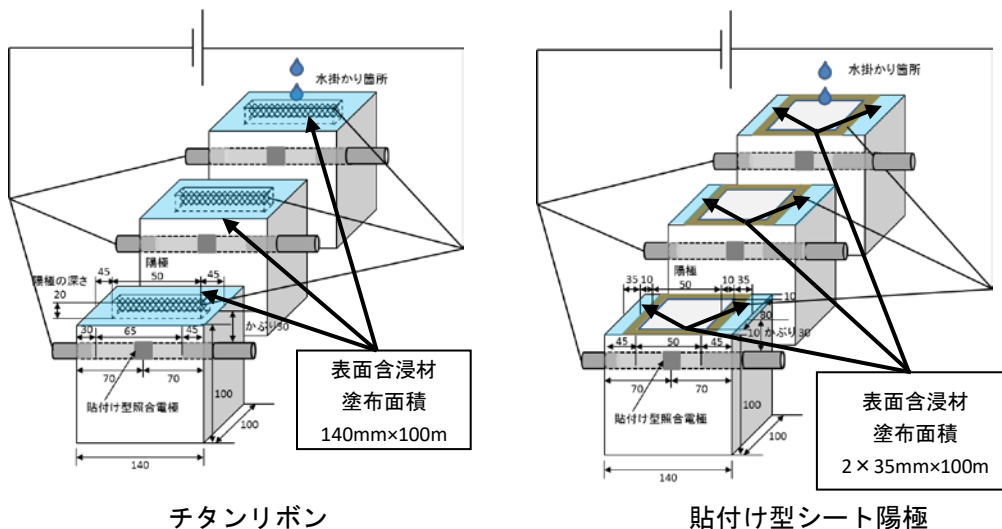


図 3.57 試験概略図

### 3.4.3 実験結果

#### (1) 水掛り箇所への電流の偏り

水掛り箇所への電流の偏りの有無を調査するため、各供試体の散水前後の電流量を測定し比較した。試験結果を図3.58に示す。

表面含浸材無塗布の供試体では、陽極材にチタンリボンを用いた供試体No.1-1、貼付け型シート陽極を用いた供試体No.2-1ともに、水掛り箇所の電流量が増加し、通常箇所の電流量が減少していた。したがって、水の影響による水掛り箇所への電流の偏りが発生したと考えられる。

シラン系表面含浸材を塗布した供試体の場合、陽極材にチタンリボンを用いたNo.1-2は、散水による電流量の変化がほぼ見られなかった。一方、陽極材に貼付け型シート陽極を用いたNo.2-2は水掛り箇所の電流の増加、通常箇所の電流の減少が若干見られた。しかし、無塗布やケイ酸塩系を用いた供試体と比べるとその増加量は少なかった。したがって、シラン系表面含浸材を塗布することで水掛り箇所への電流の偏りを抑制できると考えられる。ケイ酸塩系表面含浸材を塗布した供試体では、陽極材にチタンリボンを用いた供試体No.1-3、貼付け型シート陽極を用いた供試体No.2-3ともに、無塗布と同様に水掛り箇所の電流量が増加し、通常箇所の電流量が減少した。したがって、ケイ酸塩系表面含浸材による水掛り箇所への電流の偏りの抑制効果は確認できなかった。

表面含浸材の種類によって効果に差が生じた原因として、吸水抑制率の差が考えられる。表3.29に示した通り、今回選定した表面含浸材を供試体に塗布した場合、その吸水抑制率はシラン系>ケ

イ酸塩系であり、シラン系表面含浸材を塗布した供試体の方が水の影響を受けにくかったと考えられる。また、シラン系表面含浸材を塗布し

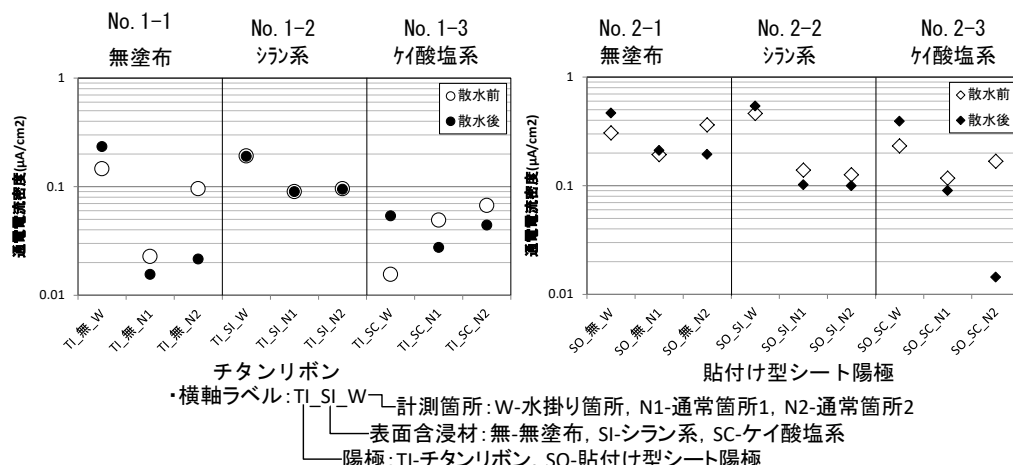


図 3.58 通電電流密度の測定結果

た供試体は、陽極材の種類によって電流の偏りの低減効果に差が見られた。この原因として、表面含浸材の塗布面積の差が考えられる。陽極材にチタンリボン用いた供試体は、陽極材を供試体に埋め込んで設置しているため、陽極材設置面全体に表面含浸材を塗布した。一方、陽極材に貼付け型シート陽極を用いた供試体は、陽極材を供試体表面に貼付けて設置しているため、モルタルにシートやエポキシ樹脂が被覆されていない両端部のみに表面含浸材を塗布した。よって、陽極材に貼付け型シート陽極を用いた供試体は、塗布面積が小さいため、チタンリボンを用いた供試体よりも水の影響を受けた、あるいは、影響の差が評価できなかったためであると考えられる。

## (2) 湿潤化による復極速度への影響

鋼材の復極速度は酸素の拡散速度に依存するため、躯体の湿潤化で鋼材周囲の酸素が不足した場合、復極速度が低下し、

100mV以上の復極が困難である場合があると考えられている<sup>2)</sup>。そこで、各供試体の電位および24時間復極後の復極量を測定した。結果を表 3.31に示す。

いずれの供試体についても、散水後の復極量は100mV以上を確保しており、鋼材周囲の酸素不足は発生しなかった。つまり、本検討における復極試験の結果からは、表面含浸材の有無や種類による復極速度への

表 3.31 復極試験結果

供試体 No.	陽極材	表面含浸材	箇所	散水前 (通電開始時)				散水後			
				鉄筋の電位 (mV vs CSE)			分極量 (mV)	鉄筋の電位 (mV vs CSE)			復極量 (mV)
				E <sub>off</sub>	E <sub>on</sub>	E <sub>instantoff</sub>		E <sub>on</sub>	E <sub>instantoff</sub>	E <sub>off</sub>	
1-1	チタンリボン	無塗布	水掛り箇所	-256.4	-361.0	-357.8	101.4	-477.7	-472.7	-72.7	400.0
			通常箇所1	-319.5	-426.7	-424.9	105.4	-354.3	-352.3	5.0	357.3
			通常箇所2	-238.5	-417.5	-415.5	177.0	-365.1	-363.1	45.5	408.6
		シラン系	水掛り箇所	-286.9	-399.1	-396.0	109.1	-484.1	-481.1	-25.4	455.7
			通常箇所1	-251.6	-445.8	-443.6	192.0	-461.2	-458.2	25.5	483.7
			通常箇所2	-221.9	-424.3	-420.4	198.5	-413.0	-411.0	57.9	468.9
ケイ酸塩系	水掛り箇所	-225.6	-384.0	-381.2	155.6	-612.3	-610.3	-39.4	570.9		
	通常箇所1	-221.1	-424.6	-420.7	199.6	-455.9	-452.9	19.4	472.3		
	通常箇所2	-184.2	-456.3	-453.1	268.9	-439.0	-436.0	37.3	473.3		
2-1	貼付け型シート陽極	無塗布	水掛り箇所	-310.6	-475.5	-470.6	160.0	-494.0	-482.6	-210.8	271.8
			通常箇所1	-315.8	-477.9	-474.9	159.1	-532.3	-526.4	-241.5	284.9
			通常箇所2	読み取り装置不良のためデータ無し							
		シラン系	水掛り箇所	-340.9	-460.6	-456.2	115.3	-543.0	-531.0	-237.7	293.3
			通常箇所1	-306.6	-439.8	-433.3	126.7	-452.9	-447.1	-282.0	165.1
			通常箇所2	-279.8	-424.1	-420.2	140.4	-439.7	-434.5	-257.5	177.0
ケイ酸塩系	水掛り箇所	-303.0	-485.5	-471.8	168.8	-569.3	-560.5	-187.8	372.7		
	通常箇所1	-315.6	-453.5	-449.6	134.0	-480.9	-474.9	-261.0	213.9		
	通常箇所2	-235.0	-431.8	-427.7	192.7	-432.2	-427.2	-234.9	192.3		

優位な差は確認できなかった。ただし、貼付け型シート陽極を用いた供試体の散水後のオン電位はチタンリボンを用いた供試体と同等であるのに対し、復極量は小さく、オフ電位は明らかにチタンリボンを用いた供試体よりマイナスの値であった。このことから、本検討で用いたエポキシ樹脂で周囲を被覆した小型供試体の条件下では、貼付け型シート陽極を用いた供試体の場合、コンクリートの露出面積が小さいため、酸素の供給速度が小さく、完全に復極しておらず、オフ電位がチタンリボンの場合よりマイナスとなったと考えられる。

#### 3.4.4 本節のまとめ

本節では、外部電源方式の電気防食工法を施工した箇所の一部に水が掛ることによる防食性能への影響と、表面含浸材の併用による水掛かりの影響に対する抑制効果を確認するため、各種試験を実施した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 電気防食工法を施工した箇所の一部に水が掛る場合、水掛り箇所に電流の偏りが生じた。これは水の影響によるものと考えられる。
- (2) シラン系表面含浸材を塗布した供試体は水の影響による電流の偏りを軽減できることを確認した。
- (3) ケイ酸塩系表面含浸材による水掛り箇所への電流の偏りの軽減効果は確認できなかった。シラン系表面含浸材と比較してケイ酸塩系表面含浸材の吸水抑制率が低いためであると考えられる。
- (4) シラン系表面含浸材による電流の偏りの軽減効果は、チタンリボンを使用した供試体の方が貼付け型シート陽極を使用した供試体と比較して高かった。これは、表面含浸材の塗布面積の差によるものと考えられる。
- (5) いずれの供試体も散水後の復極量は散水前の分極量よりも大きく、100mV以上を確保していた。よって、本検討では表面含浸材の有無に関わらず鉄筋周辺の酸素不足が発生しなかったため、表面含浸材の塗布による鉄筋周辺の酸素不足低減効果を確認できなかった。

上記に示すように、水掛り箇所では電流の偏りが生じる可能性がある。しかし、そのような影響が生じた場合、シラン系表面含浸材を併用することで電流の偏りを抑制できることがわかった。特に、チタンリボンを躯体表面に埋め込んで使用するようなコンクリートの露出面積が大きい場合、その抑制効果が顕著であった。

よって、間欠通電による防食時においても、水掛り箇所の影響で電流の偏りが生じる可能性がある場合、コンクリートの露出箇所へシラン系表面含浸材を併用することでその影響を低減できる。

### 3.5 陽極配置が防食効果に与える影響に関するFEM解析による検討

#### 3.5.1 はじめに

外部電源方式の電気防食工法では、陽極システムの形状により面状陽極方式、線状陽極方式、点状陽極方式に区分される。面状陽極方式では、他の方式に比べて防食電流を均一に鋼材表面へ分配させることができるメリットがある。そして、防食電流を均一に分配できれば、防食電流の偏りを小さくでき、鋼材の腐食抑制の確実性につながると考えられる。防食電流の鋼材表面への分配特性を向上させるには、陽極材の設置範囲を拡げることや印加電圧を大きくすることが考えられる。しかし、前者を行えば経済性が、後者を行えば通電時の陽極反応による生成物の影響が問題となる可能性がある。また、前述した 35°C 乾湿環境下の暴露試験では、塩化物イオン量 10kg/m<sup>3</sup> を含む供試体において、線状陽極方式のリタンリボンを用いた場合、埋込型および外付型とも、間欠通電と常時通電とで防食効果に差異が発生し、間欠通電では局所的な腐食が生じた。一方、面状陽極方式の貼付け型シート陽極を用いた供試体では、間欠通電でも防食できており、そのような常時通電と異なる結果は見られなかった。このような陽極による防食効果の違いは鋼材表面への防食電流の分配の影響と考えられ、防食電流の分配特性を向上させるために、適切な陽極材の配置方法や間隔に関する検討は重要であると考えられた。

本研究では港湾栈橋の梁を模擬した鉄筋コンクリート梁である大型供試体を用いて検討した。塩化物イオンを予め混入させた大型供試体に対して、貼付け型シート陽極の間隔や配置方法を変化させた場合、各鋼材に流入する電流量と分極量にどのような差異が生じるかを確認した。さらに、得られた実験結果を計算にてシミュレーションできるかを確認した。

従来、シミュレーションの1つである FEM 解析で Laplace 方程式を計算し、流入電流量や分極量を求める手法が報告されている<sup>26)</sup>。FEM 解析では陽極材、鋼材およびコンクリートの幾何学形状をモデル化し、境界条件に陽極材・鋼材の分極特性とコンクリート抵抗率を入力する。本研究では境界条件の算出のために、小型供試体を作製し、陽極材・鋼材の分極特性を求めた。得られた境界条件を用いて FEM 解析を実施し、大型供試体で得られた流入電流量と分極量を再現できるかを確認した。さらに、前述した 35°C 乾湿環境下の暴露試験で、陽極の種類により間欠通電と常時通電とで防食効果に差異が発生した原因についても、FEM 解析で流入電流量の状況を確認することで原因推定を行った。

#### 3.5.2 大型供試体と実験概要

##### (1) 大型供試体の概要

大型供試体 (800×500×1100mm) は港湾栈橋の梁を模擬した鉄筋コンクリート梁である。形状と寸法、測定する鉄筋の番号および鉛照合電極の位置を図 3.59 に示す。コンクリートは表 3.32 に示す配合とし、塩化物イオン量で 10kg/m<sup>3</sup> となるよう練混ぜ水に予め塩化ナトリウムを混入しておき、コンクリートを打設した。鋼材は黒皮が付いた状態のままとし、主鉄筋には異形鉄筋 D29、配力鉄筋には異形鉄筋 D16 を使用した。コンクリートに充填されない鋼材部はエポキシ樹脂にて被覆した。各鋼材への流入電流量を測定するため、それぞれ電氣的導通のないよう配筋し、打設前に導通が

表 3.32 コンクリート配合

W/C (%)	S/a (%)	スランブ (cm)	単位数(kg/m <sup>3</sup> )				
			C	W	S	G	AE減水剤
58.3	45.5	12	286	167	863	1083	2.86

※ 骨材の最大寸法は 20mm



ないことを確認した。コンクリート内部から鋼材電位を測定するために供試体中央部に2か所鉛照合電極を埋設した。鉛照合電極は主鉄筋（主4，7）に沿うように設置した。

本実験では貼付け型シート陽極の配置方法や間隔をいくつか検討するために、下地処理等を行わずコンクリート躯体面に貼付け型シート陽極を貼付けるのみとした。一度設置した貼付け型シート陽極はエポキシ樹脂で封止してないため剥がすことができ、新たに貼付け型シート陽極を設置することが可能である。つまり、本実験では同一の大型供試体に、図3.60に示す配置パターンで貼付け型シート陽極を設置した。貼付け型シート陽極の通電部の幅は300mmである。

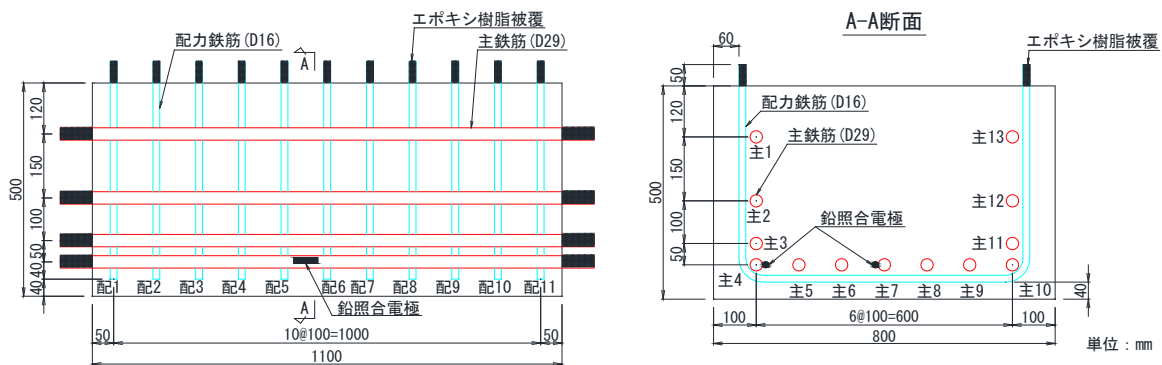


図 3.59 大型供試体

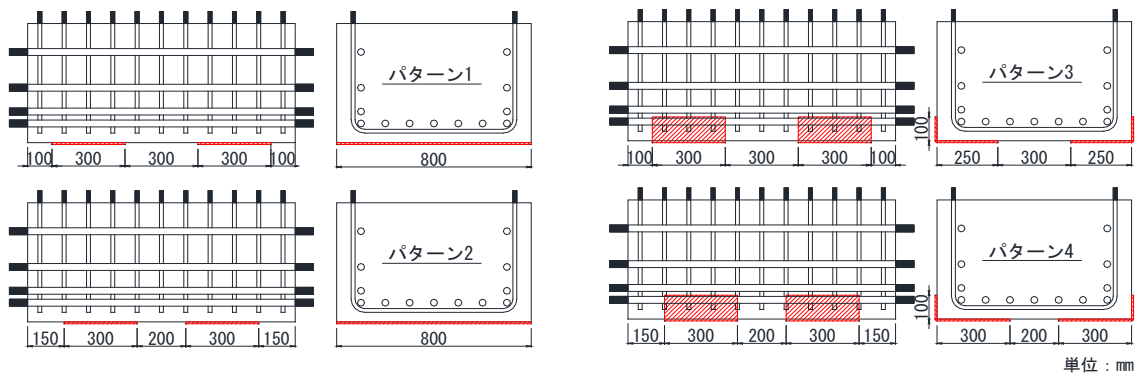


図 3.60 貼付け型シート陽極の配置パターン

## (2) 試験概要

鋼材の自然電位は、供試体面に直接貼付けるのみで測定可能な貼付け型の銀塩化銀照合電極を用い、貼付け型シート陽極の設置前に、鋼材の腐食状況を確認した。

分極試験は貼付け型シート陽極と鋼材間に定電流電源装置（最大電圧：10V）を接続した後に、所定の電流量にて鋼材のオン電位が安定するまで印可し続けた。通電時の鋼材と貼付け型シート陽極のオン電位、通電遮断直後のインスタントオフ電位および通電電圧の測定を行った。通電前のオフ電位から通電遮断直後のインスタントオフ電位を減じて、鋼材・貼付け型シート陽極材の分極量を算出した。2か所埋設した鉛照合電極の分極量がともに100mV以上を達成するまで、電流量を漸増させてその度に測定を実施した。なお、分極試験はコンクリート材齢が2～7か月の間に屋外で実施し、測定後は供試体が雨等で濡れないよう養生した。

各鋼材への流入電流量は鋼材に接合したリード線と定電流電源装置（最大電圧：10V）の間に1Ω

のシャント抵抗を挿入し、電圧計にて測定した。測定した電圧を $1\Omega$ の抵抗で除して電流量を算出した。各鋼材は外部で導通しており、使用したリード線は各リード線の抵抗が同一となるように長さを揃えた。本研究では、各鋼材への流入電流量を鋼材表面積で除した電流密度で評価した。

### 3.5.3 大型供試体の実験結果

通電前に自然電位法にて鋼材の状態を確認した。鋼材の自然電位の測定結果を図 3.61 に示す。測定時のコンクリート材齢は約 2 か月で、測定箇所の電位はすべて $-350\text{mVvsCSE}$  以下となっており、ASTM C 876 の鋼材腐食判定基準では「90%以上の確率で腐食がある」となった。なお、コンクリート材齢約 7 か月後の分極試験時においても、ひび割れ等の変状は一切発生していなかった。

分極試験において、2 か所埋設した鉛照合電極の分極量がともに  $100\text{mV}$  以上を達成した時の流入電流密度にて評価を行った。

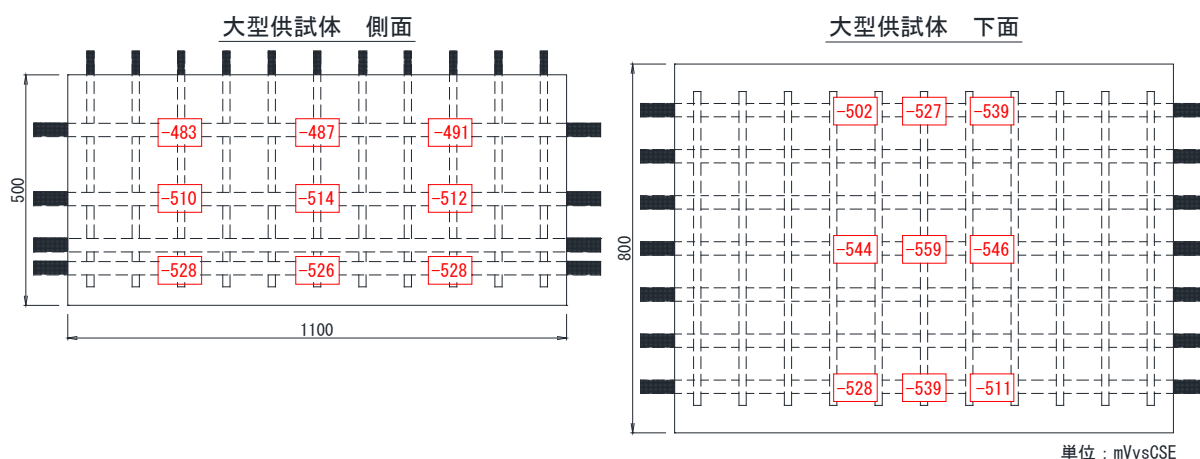


図 3.61 鋼材の自然電位

#### (1) パターン1と2の流入電流分布の比較

貼付け型シート陽極の間隔を変化させた場合（パターン 1 と 2），鋼材へ流入する電流密度分布を図 3.62 に示す。両パターンともに貼付け型シート陽極から離れた位置にある主鉄筋（主 1～3，11～13）や配力鉄筋（配 1，5～7，11）への電流流入量は他の鉄筋に比べて小さいことがわかる。しかし，貼付け型シート陽極から 380mm 離れている主鉄筋（主 1，13）においても約  $0.01\text{A/m}^2$ ，パターン 1 であれば貼付け型シート陽極から 150mm 離れている配力鉄筋（配 6）においても約  $0.02\text{A/m}^2$  の流入電流密度を確保できていた。主鉄筋へ流入した最大流入電流密度を見ると，パターン 1 で約  $0.045\text{A/m}^2$ （主 8），パターン 2 で約  $0.04\text{A/m}^2$ （主 7），配力鉄筋においてはパターン 1 で約  $0.08\text{A/m}^2$ （配 3），パターン 2 で約  $0.09\text{A/m}^2$ （配 8）であった。電流が流入しにくい主鉄筋（主 1，13）・配力鉄筋（配 6）においても，最大流入電流密度の約 25% が流入していた。

大型供試体の下面にある主鉄筋（主 4～10）には両パターンとも均等に電流が流入した。配力鉄筋では貼付け型シート陽極の設置を 300mm（パターン 1）から 200mm（パターン 2）に間隔を狭めると，配力鉄筋の一部（配 8）に局所的に電流量が流入する傾向にあった。

ただし，パターン 2 では 3.5V から 5.2V へ印加電圧を上昇させたところ，図 3.63 のように配力鉄筋の一部（配 8）への局所的な電流の流入は解消された。一般的に，貼付け型シート陽極の設置間隔

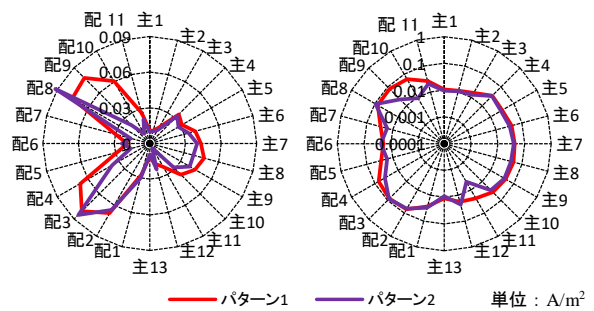
を狭くすると、陽極直下にある鋼材表面に対する陽極面積は増加するため、防食電流の均一性に対し有利である。一方、電気防食では陽極から鋼材表面へ高抵抗であるコンクリートを介して通電する。しかし、今回の供試体では、印加電圧が低く、通電電流量が小さい場合、シート間隔を狭く、鋼材—鋼材表面間の抵抗を小さくしても、局所的な流入電流量が大きくなった。これは同じ供試体および陽極を用いて実験していることから、鋼材の局所的な腐食が原因であると考えられる。つまり、シート間隔を狭く、陽極—鋼材表面間の抵抗を小さくしても、局所的に抵抗の低い箇所（分極抵抗の小さい、腐食が発生している箇所）あると、局所的な流入電流量が大きくなり、電流の偏りが大きくなる場合があることを示している。

#### (2) パターン3と4の流入電流分布の比較

貼付け型シート陽極の配置方法を変化させた場合（パターン3と4）、鋼材への流入する電流密度分布を図3.64に示す。パターン3、4では大型供試体の下面より側面に向けて100mm貼付け型シート陽極を立上げており、上面に近い主鉄筋（主1～3、11～13）にも電流が流入することを期待した。しかし、上面に近い主鉄筋（主1～3、11～13）の他にシート陽極から離れた位置にある主鉄筋（主6～8）や配力鉄筋（配1、配5～7、配11）への電流流入量は他の鉄筋に比べて小さくなった。パターン3では貼付け型シート陽極から離れている主鉄筋（主1、13）、配力鉄筋（配1、11）ともに約0.01A/m<sup>2</sup>が最小流入電流量である。一方、最大流入電流量は主鉄筋（主10）で約0.33A/m<sup>2</sup>、配力鉄筋（配9）で約0.51A/m<sup>2</sup>となり、最小流入電流密度は最大の2～3%程度しかない。

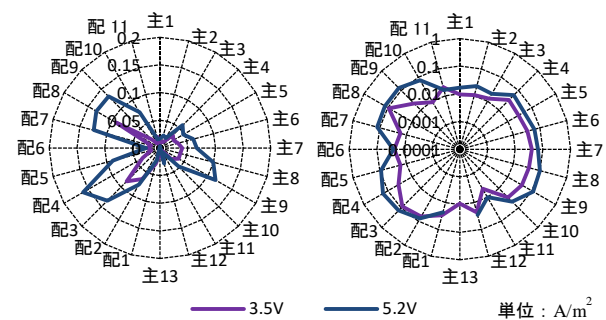
また、パターン4でもその割合は1～7%程度であった。また、電流密度分布を見ると貼付け型シート陽極の配置方法を変化させても、設置間隔が300mm（パターン3）と200mm（パターン4）で鋼材へ流入する電流密度分布に大きな差は生じていない。

パターン3、4ではパターン1、2に比べると流入電流量の偏りが大きくなった。これは貼付け型シート陽極を4分割したために、大型供試体の中央部の主鉄筋と配力鉄筋まで電流が分配されず、電流量に偏りが生じたと考えられる。なお、どのパターンにおいてもシート陽極個々の電流分布に



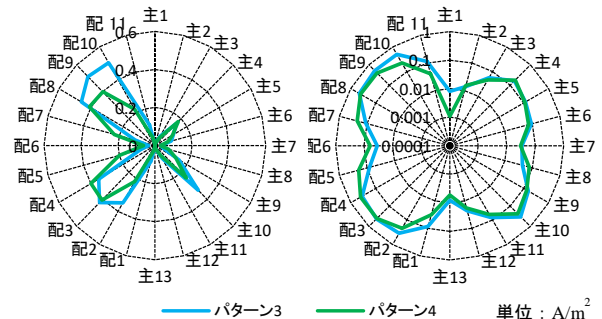
(a) 整数グラフ (b) 対数グラフ

図 3.62 鋼材への流入電流密度  
(パターン1, 2)



(a) 整数グラフ (b) 対数グラフ

図 3.63 印加電圧変更時における鋼材への流入電流密度（パターン2）



(a) 整数グラフ (b) 対数グラフ

図 3.64 鋼材への流入電流密度  
(パターン3, 4)

差はなかった。

### (3) 分極量について

大型供試体に埋設した鉛照合電極を用いて測定した各パターンに分極量と通電時の印加電圧および流入電流量を表 3.33 に示す。パターン 1, 2 では 2 ヲ所の埋設した鉛照合電極とも 100mV 以上分極できた。パターン 3, 4 では 2 ヲ所の埋設した鉛照合電極で 100mV 以上分極させるためには大きな印加電圧と流入電流量を必要とした。これは前述のように電流の偏りが生じているためだと考えられる。パターン 3 では中央の主鉄筋（主 7）を定電流電源装置（最大電圧：10V）の性能内で 100mV 以上分極させることはできず、50mV の段階で終了とした。パターン 3 は主鉄筋（主 7）に埋設された鉛照合電極と貼付け型シート陽極に最も距離があるため、鋼材を分極させることが困難であったと考えられる。その根拠として、パターン 4 ではシート間隔を狭めたために、中央の主鉄筋（主 7）を 100mV 以上分極できた。

パターン 1, 2 の分極量は、ともに同等の値を示しており、流入電流密度分布通りに各主鉄筋（主 4～10）に均一に電流が流入し、分極したと考えられる。一方、パターン 3, 4 ではそれぞれの分極量に差異があり、流入電流量の偏りが生じたことが原因だと考えられる。

表 3.33 分極量とその他の値

パターン	計測日	印加電圧 (V)	流入電流量 (mA)	実験	
				主4 (mV)	主7 (mV)
1	2015/11/17 打設後約2ヵ月	2.55	80.82	151	167
2	2016/1/13 打設後約4ヵ月	3.50	63.80	176	157
3	2016/4/11 打設後約7ヵ月	9.71	350.20	209	50
4	2016/4/21 打設後約7ヵ月	8.44	304.49	269	110

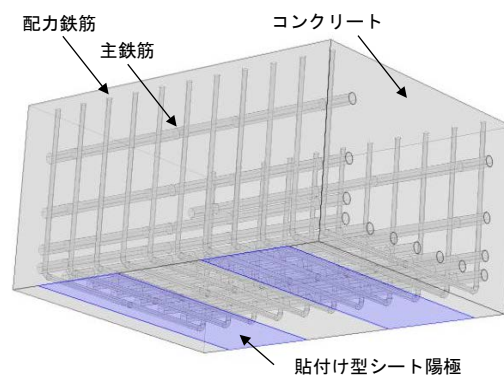


図 3.65 解析モデル

## 3.5.4 大型供試体の数値解析結果

ここでは、大型供試体で得られた鋼材に流入する電流密度分布と埋設した鉛照合電極にて測定した分極量を解析結果と比較した。

### 3.5.4.1 解析モデル

既往の研究<sup>27)</sup>と同様に Laplace 方程式を使用し、汎用有限要素解析ソフトにて電流分布を計算した。図 3.65 のようにコンクリート、鋼材・陽極の幾何学形状をモデル化した。主鉄筋と配力鉄筋の間に導通はなく、両者の間にはコンクリートがモデル化されており、それぞれ独立している。境界条件として鋼材・陽極に分極特性を入力した。なお、主鉄筋と配力鉄筋は同様の境界条件を与えた。コンクリートはソリッド要素、鋼材・貼付け型シート陽極は板要素を用いた。

### 3.5.4.2 境界条件

鋼材・陽極に分極特性は図 3.66 に示す小型供試体を用いて求めた。小型供試体は大型供試体と同一日に打設し、塩化物イオン量も同様とした。小型供試体に貼付け型シート陽極を設置し、鋼材・陽極材の電流流入量は大型供試体と同様に鋼材・陽極材に接合したリード線と定電流電源装置（最大電圧：10V）の間に 1Ω のシャント抵抗を挿入し、電圧計にて測定した。小型供試体の上面中央部に

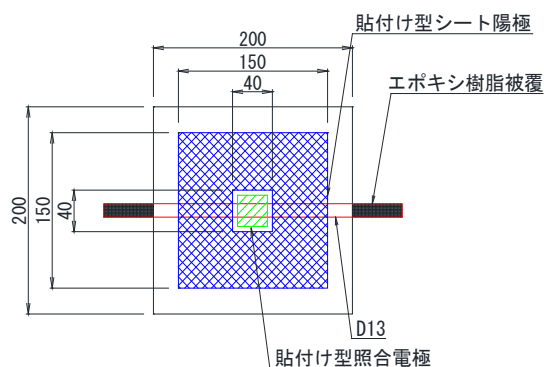


鋼材の分極量を測定するために、貼付け型の銀塩化銀照合電極を設置した。

小型供試体にて分極試験を実施して鋼材と貼付け型シート陽極の分極特性を求めた。鋼材・陽極の分極特性は図 3.67 のように 2 つの対数関数で表現する。分極量が小さい場合 (case1) にはオームの法則が成立し、その後、分極量が大きくなる場合 (case2) にはオームの法則が成立しなくなる。そのため、分極量が小さい場合に対数近似すれば、解析精度が若干低下することになる。しかし、電気防食工法では防食管理基準として分極量 100mV シフトが適用されているため、分極量が小さな場合に解析精度へ与える影響は小さいと思われる。分極特性は 5°C 60%RH, 20°C 60%RH の環境下にてそれぞれ測定した。分極特性の係数一覧を表 3.34 に示す。

大型供試体での分極試験の実施日が異なるため、実施日の気温に応じて分極特性を使い分けた。また、コンクリート抵抗率はコンクリートの乾燥の進行や温度状況によって変化するため 100~300 Ω・m の値を適宜選定し、計算した。

小型供試体 平面図



小型供試体 側面図

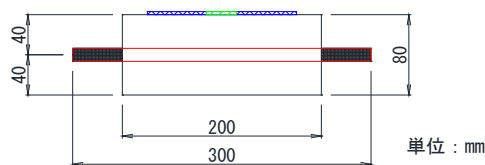


図 3.66 小型供試体

### 3.5.4.3 数値解析の結果

#### (1) 流入電流分布について

図 3.68 に実験と解析の鋼材への流入電流密度を示す。主鉄筋・配力鉄筋ともに流入電流密度分布の形状を表せており、どのパターンにおいても実験値と解析値の整合性が確認できる。また、流入電流密度の値も実験と解析ではほぼ同等とい

表 3.34 分極量と印加電圧

		case1		case2	
		交換電流密度 (A/m <sup>2</sup> )	勾配 (V)	交換電流密度 (A/m <sup>2</sup> )	勾配 (V)
鋼材	5°C	7.59E-04	-0.02	1.48E-02	-0.23
	20°C	9.64E-05	-0.01	2.49E-02	-0.23
貼付け型シート陽極	5°C	1.55E-04	0.03	1.75E-03	0.46
	20°C	2.29E-05	0.01	2.65E-03	0.62

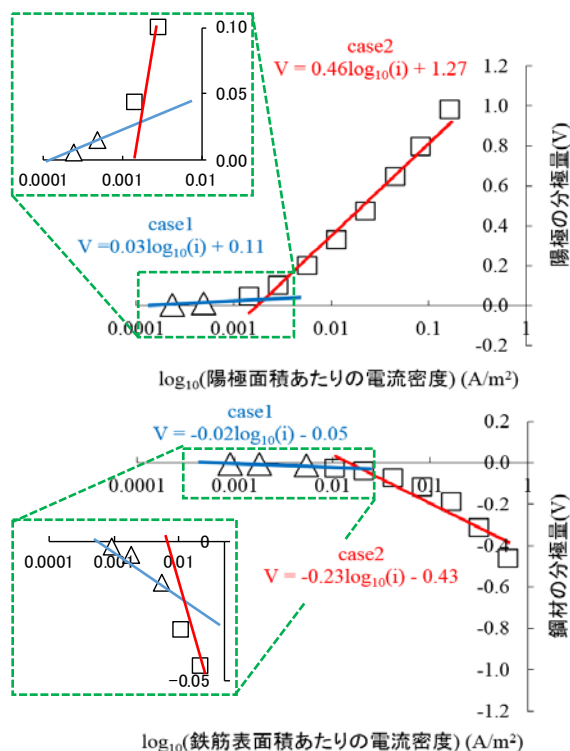


図 3.67 鋼材・陽極の分極特性 (5°C)



える。ただし、貼付け型シート陽極から離れた位置にある主鉄筋（主1～3，11～13）や配力鉄筋（配1，6，11）においては解析値の方が実験値よりも小さくなる傾向にあった。貼付け型シート陽極から大きく離れた鋼材の流入電流密度の推定には課題が残るものの、安全側の評価になっている。

パターン2では配力鉄筋の流入電流密度分布に差異が見られる。解析では、配力鉄筋における電流分布の偏りが実験よりも小さくなっている。ただし、前述のとおり実験にて印加電圧を上げると、配力鉄筋における電流分布の偏りが解消されていることから、実験に起因する要因等(鋼材の部分的な腐食等による鋼材表面の局所的な分極抵抗の変化)によりパターン2では実験と解析に差が生じたと考えられる。

(2)分極量について

表3.35に実験と解析による鋼材の分極量を示す。解析では、パターン3の中央部の主鉄筋（主7）の分極は見られなかった。これは、前述のように貼付け型シート陽極から大きく離れているためだと考えられる。パターン3の主鉄筋（主7）の分極量測定位置はどのパターンよりも貼付け型シート陽極から離れている。

表 3.35 実験と解析による鋼材の分極量

パターン	実験		FEM解析	
	主4 (mV)	主7 (mV)	主4 (mV)	主7 (mV)
1	151	167	114	105
2	176	157	128	108
3	209	50	211	0
4	269	110	292	137

パターン1, 2では実験と同様に、主4と主7で同程度の分極量が解析で得られた。また、パターン3, 4でも実験と同様に、主4と主7で分極量の差が生じており、そのことを解析でも表すことが出来ている。全体的に若干誤差があるものの、実験に近い値を求められている。

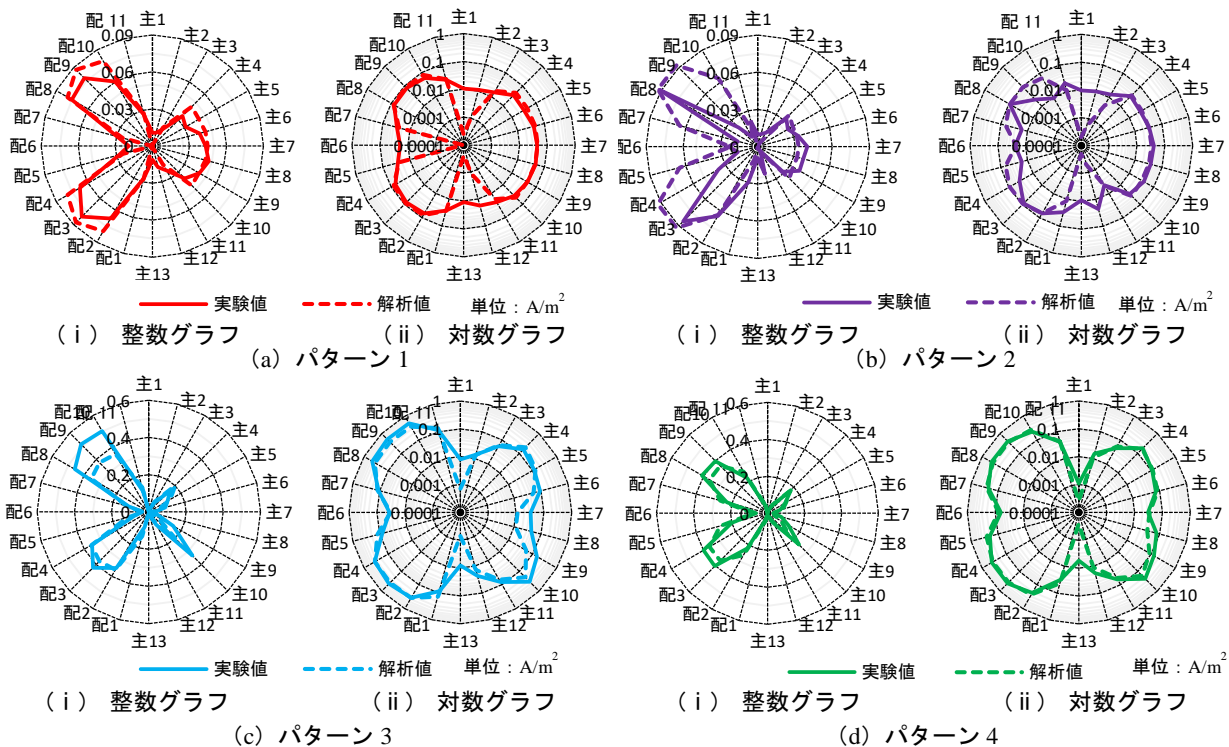


図 3.68 鋼材への流入電流密度（パターン1～4）

### 3.5.5 小型供試体の数値解析結果

ここでは、3章の2節において、35°C乾湿条件下の小型供試体を用いて実施した暴露試験で、陽極の種類により間欠通電と常時通電とで防食効果に差異が発生した理由について、FEM解析で陽極から鋼材表面への防食電流の分布状況を確認することで原因推定を行った。

#### 3.5.5.1 解析モデルと境界条件

既往の研究<sup>27)</sup>と同様に Laplace 方程式を使用し、汎用有限要素解析ソフトにて電流分布を計算した。図 3.69 に示すコンクリート、鋼材・陽極から構成された幾何学形状をモデル化した。初期条件として鋼材と陽極の初期電位、境界条件として印加電圧、材料特性としてコンクリート抵抗率を入力した。鋼材と陽極の初期電位および印加電圧は、実験値を用い、コンクリート抵抗率は既往の文献値<sup>28)</sup>を参考とした。また、コンクリートは板要素を用いた。なお、幾何学形状の違いによる流入電流の分布状況を比較するため、幾何学形状以外、すべて同条件で評価した。解析に用いた境界条件および入力値を表 3.36 に示す。

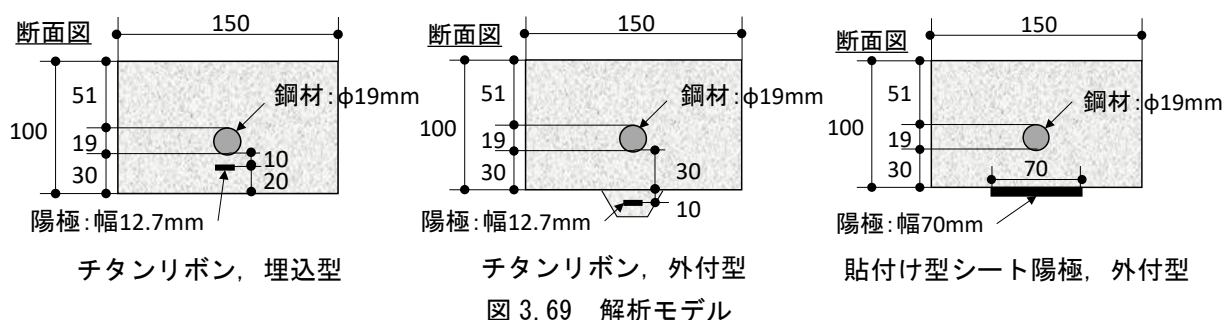


表 3.36 境界条件と入力値

塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	環境温度 (°C)	コンクリート抵抗率 (Ω・m)	初期条件		境界条件
			鋼材電位 (VvsCSE)	陽極電位 (VvsCSE)	印加電圧 (V)
10	35	200	-0.15	0.25	0.5

#### 3.5.5.2 解析結果

図 3.70 に FEM 解析で求めた電流の分布状況を示す。電流の分布状況はカラーコンター図で示した。カラーコンター図の鋼材以外の白色箇所はカラーバーの最大値以上の箇所である。境界条件等を同条件で比較した場合、貼付け型シート陽極は陽極と反対側の鋼材表面にも電流が分布しているのに対し、チタンリボンの場合は埋込型および外付型とも、ほとんど電流が分布しておらず、反対側の鋼材表面へは電流が流入しづらくなっている。また、チタンリボンの埋込型と外付型を比較すると、埋込型では陽極側は最大値を超え、その反対側は最小値に近い値となっており、外付型より埋込型の方が陽極側とその反対側で鋼材表面への電流の流入量に大きな差があると考えられる。

以上の結果から、間欠通電により防食した塩化物イオン量 10kg/m<sup>3</sup>の供試体の内、チタンリボンを用いた供試体で、局所的な腐食が発生したのは鋼材表面の電流の分布状況が主原因であると推測される。特に、チタンリボンの埋込型では陽極側とその反対側で電流の流入量の差が大きく、陽極側

や反対側で電位差が発生している可能性がある。その結果、35℃乾湿環境下で、分極量 100mV の間欠通電で防食したチタンリボン埋込型の供試体の場合、夜間無通電時にその電位差の影響で腐食電流が流れ、局所的に腐食し、腐食減量が無防食より大きくなったと考えられる。

なお、電流密度の相対値は異なるが、図 3.70 に示す 35℃環境下での電流の分布状況は 5℃や 20℃でも同様の傾向を示す。また、チタンリボンを用いた塩化物イオン量 10kg/m<sup>3</sup>の供試体の一部では、5℃環境下でも腐食面積に対する腐食減量が大きくなった。よって、塩化物イオン量が 6kg/m<sup>3</sup>より多い構造物を対象に間欠通電により防食するには、面状陽極方式のような電流の分布状態がより均一となる陽極による設計が必要であると考えられる。

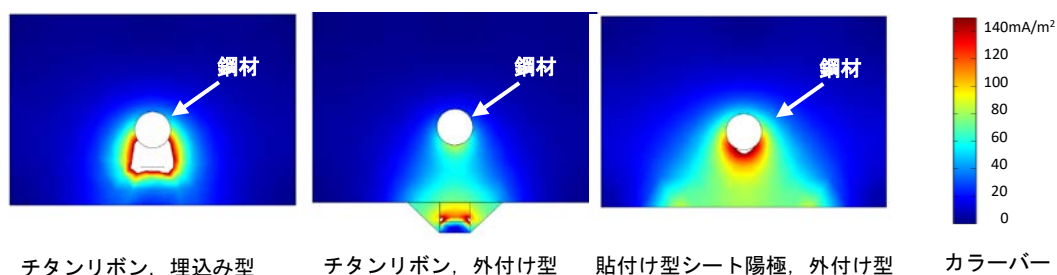


図3.70 防食電流の分布状況

### 3.5.6 本節のまとめ

本節では、貼付け型シート陽極の設置間隔や配置方法を変化させた場合の流入電流量や分極量に対する影響を、塩化物イオン量 10kg/m<sup>3</sup>を含有した鉄筋コンクリート梁である大型供試体を用いた実験と解析により検討した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 適当な間隔・配置方法で貼付け型シート陽極を設置すると、流入電流量の偏りを抑制できる。
- (2) 小型供試体から得た分極特性を入力して FEM 解析したところ、流入電流量と分極量の傾向に関し、実験値を比較的精度良く再現することができる。
- (3) 貼付け型シート陽極の配置方法によっては印加電圧が過大となり、100mV 以上の分極量が確保できなくなる可能性がある。

なお、貼付け型シート陽極の設置間隔を狭くすると、鋼材表面に対する陽極面積は増加するため、防食電流の均一な通電に対し有効であり、解析の結果からもそのような結果を示した。しかし、今回の供試体を用いた通電試験では、印加電圧が低く、通電電流量が小さい場合、シート間隔を狭くすることで陽極と鋼材表面間の抵抗を小さくしても、局所的な電流の流入が発生した。これは、解析によって理想的な陽極の配置としても、供試体特有の局所的な抵抗の低い箇所（分極抵抗の小さい、腐食が発生している箇所）等があると、局所的な流入電流量の偏りが発生する可能性があることを示している。

このような供試体で生じた局所的な流入電流量の偏りは、実構造物でも十分に考えられる。よって、解析による通電を考慮した陽極の配置計画の他、実構造物独自の局所的な流入電流量の偏り等の発生を考慮した設計が必要であると考えられる。

また、第 2 節での室内暴露による検討時、陽極の種類によって間欠通電と常時通電で防食効果に

差異が発生した事象に対し、解析によって鋼材表面への防食電流の分布状況を確認することで、原因の一つとして防食電流の偏りが推定された。つまり、陽極の種類によって、鋼材表面への通電状況が異なり、その通電状況が異なることで、塩化物イオン量が多い場合、間欠通電では夜間に無通電の状態があるために、常時通電と異なる結果となったことが推定された。

このように、実験と解析の結果を検討することにより、より確実な防食効果が発揮できる電気防食とすることができると考える。

### 3.6 本章のまとめ

第1節では、間欠通電方式による電気防食時、ソーラーパネルのみを電流供給源とした場合の電源の制御方法に関し、防食効果を発揮するための防食電流の制御方法について小型供試体を用いた屋外暴露試験により検討した。本検討により明らかになったことを以下に示す。

- (1) 貼付け型シート陽極を用いた場合、分極量を100mV以上とすることで、間欠通電方式でも常時通電方式と同等の防食効果が確認できた。しかし、同様の分極量で実施したチタンリボンを用いた供試体では、常時通電方式を含めひび割れや腐食が発生した。このような使用した陽極の違いによる腐食抑制効果の相違は、試験の概要から①乾燥収縮による影響、②通電調整時期による影響、③陽極の設置位置による影響等が考えられる。
- (2) ソーラーパネルのサイズは防食回路に必要な電力の10倍とし、電源装置は入力電圧が5V程度で起動し、定電流制御方式で防食回路へ通電を開始するシステムとすることで、雨天時の悪天候時を含め、1日あたり最低6時間通電でき、平均では10.8時間通電できていた。
- (3) ソーラーパネルを電流供給源とすることで、気温上下に伴う鋼材腐食速度の増減に対し、効率的な通電が実施でき、通電時間の平均は、春秋の4～6月・10～12月時では10.6時間、夏の7～9月時では11.9時間、冬の1～3月時では9.8時間であった。
- (4) 防食供試体の腐食速度を復極試験後に分極抵抗法で評価したが、暴露途中を含め、防食、無防食とも $0.2\sim 1.0\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の同等の腐食電流密度を示し、防食、無防食の優劣を確認できなかった。
- (5) 間欠通電方式による電気防食では、夜間に無通電状態があるため、常時鋼材電位を計測することで、鋼材電位の状況が確認可能である。
- (6) 中性化深さは使用した陽極によって異なり、シート陽極は0.4～1.3mmであり、チタンリボンは無防食とほぼ同様の5.2～6.8mmであった。つまり、中性化深さはコンクリート表面の被覆状況で異なっており、通電方式による相違は確認できなかった。
- (7) 塩化物イオン量は、通電による電気泳動の影響で陽極設置側のかぶりコンクリート部で減少していた。ただし、通電方式による減少量の相違は確認できなかった。

第2節では、間欠通電での電気防食時の基本的な適用環境や条件を確認するため、陽極材の種類や設置位置、塩化物イオン量、制御方法などを変化させ、小型供試体を用い、温湿度一定環境下での室内暴露試験により検討した。本検討により明らかになったことを以下に示す。

- (1) 200日間（封かん養生28日間＋気中養生165日間＋各室内環境条件7日間）養生後の無防食供試体

について、各供試体とも鋼材の腐食が発生していた。特に、塩化物イオン量 $10\text{kg/m}^3$ の $20^\circ\text{C}$ と $35^\circ\text{C}$ の供試体では、他の供試体と比較し、腐食面積率に対し腐食減量が大きい局部腐食型の傾向を示した。

- (2) 200日間養生後の無防食供試体について、分極抵抗法により計測した鋼材の腐食速度は、ネルンストの式およびアレニウスの式より想定した通り、環境温度が高いほど、腐食電流密度は大きくなり、鋼材電位はマイナスの値を示した。また、塩化物イオン量についても、塩化物イオン量が多いほど、腐食電流密度は大きくなり、鋼材電位はマイナスの値を示した。つまり、防食前の無防食供試体に関しては、分極抵抗法による鋼材の腐食速度の測定は、想定通りの結果が得られた。
- (3) 各供試体への通電量に関し、陽極の設置位置・面積・種類が異なるが、各分極量に必要な通電電流密度は、各室内暴露環境とも、同様の傾向および値を示し、塩化物イオン量・分極量・暴露温度の上昇に伴い、通電電流量が多くなる傾向を示した。
- (4) 通電調整によって設定した供試体の通電電流密度は、計測した腐食電流密度よりほぼ大きい値を示した。しかし、一部の供試体では個体差により腐食電流密度の方が大きな値を示した。特に、腐食電流密度が小さく、設定する通電電流密度が小さな供試体で相違が生じた。これは、電流密度調整時の調整誤差等の不具合発生要因としての可能性がある。
- (5) 間欠通電方式で防食している供試体の鋼材電位は、オン電位時のマイナス方向への変化は急激に、オフ電位時のプラス方向への変化は緩やかに推移した。このようにオフ電位時の鋼材電位のプラス方向への変化が緩やかなのは、オフ電位時の鋼材電位のプラス方向への変化が酸素の拡散速度に律速であるためである。
- (6) 間欠通電方式による電気防食では、夜間に無通電状態があるため、鋼材電位を常時計測することで、防食による鋼材電位への影響が確認できた。
- (7) ターフェル外挿法による腐食速度の計測結果に関し、いずれの供試体についても、塩化物イオン量が少ないほど、腐食電流密度が小さくなる傾向を示した。ただし、常時通電供試体を含め、防食および無防食供試体の優劣の差は確認できなかった。このようにターフェル外挿法で優劣の差が確認できなかった原因は、前節の分極抵抗法による計測同様、①復極後の腐食速度の差が小さい状態で計測している、あるいは、②電気防食による鋼材表面の環境改善効果（塩化物イオンの減少、水酸化物イオンの増加によるpH上昇<sup>4)</sup>）によって生じた不動態皮膜 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ <sup>13),14)</sup>が $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 等の3価の酸化鉄になる酸化反応をアノード反応として計測している等の可能性が考えられる。
- (8) 供試体のほとんどは、経時変化に伴い、電気防食の効果によりアノード反応が抑制され、復極量が設定した分極量よりも大きくなる傾向を示した。また、初期電位に対するオフ電位の変化量も、概ね解体前にはプラスとなる傾向を示した。しかし、 $20^\circ\text{C}65\%\text{RH}$ と $35^\circ\text{C}$ 乾湿環境下の供試体の一部では、オフ電位の変化量がマイナスとなるものが発生した。つまり、夜間に無通電状態となる間欠通電方式でも電気防食の効果が生じてくると、復極に必要な酸素が不足する可能性があることがわかった。
- (9) 解体後の鋼材の腐食状況より、間欠通電による防食効果は主に塩化物イオン量に影響されていた。塩化物イオン量 $6\text{kg/m}^3$ 以下であれば、いずれの陽極についても分極量 $100\text{mV}$ とする電流量



を通电することで間欠通电でも防食することが可能であった。しかし、塩化物イオン量が $10\text{kg}/\text{m}^3$ と多くなる場合、面状の貼付け型シート陽極を用いた供試体では間欠通电で防食可能であったが、線状のチタンリボンを用いた供試体では局部腐食が発生した。本結果から、塩化物イオン量が $10\text{kg}/\text{m}^3$ と多くなる場合、間欠通电で電気防食するには鋼材表面での電流分布や改善効果への影響を考慮した陽極の設計が必要であると考えられる。

- (10) X線回折法による解体後の鋼材表面の組成分析より、防食供試体の鋼材表面には $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を少量含むものも存在したが、常時通电、間欠通电とも主成分は $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\text{FeO}$ の酸化物で構成されていた。また、それらの酸化物のX線回折強度は比較的強く、ノイズの少ないX線回折パターンを示したことから、それらの酸化物は晶質性であると考えられる。特に、確実に防食できていた貼付け型シート陽極を用いた供試体では、8割の割合で $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\text{FeO}$ のみの酸化物で構成されていた。これは通电による鋼材表面のアルカリ化で不動態皮膜が生成し、安定化したためと考えられる。つまり、本検討条件の範囲では間欠通电でも常時通电と同様の防食効果を発揮できていたため、鋼材表面の生成物が同様であったと考えられる。
- (11) 無防食供試体の鋼材表面の生成物は、黒皮同様の $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ の構成であった。しかし、腐食面積が50%以上の腐食が激しい供試体では、ピーク箇所のX線回折強度は低く、非晶質であるノイズを多数含んでおり、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\beta\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ などのオキシ水酸化鉄を含んでいた。つまり、無防食供試体の鋼材表面では腐食に伴い酸化鉄が非晶質性となり、さらに腐食が進行すると、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\beta\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ などのオキシ水酸化鉄が生じたと考えられる。
- (12) 無防食供試体の中性化深さは約 $3\sim 4\text{mm}$ であったのに対し、防食供試体は常時通电による供試体を含めすべて $3\text{mm}$ 以下の小さな値を示し、電気防食により中性化深さが増加するような現象は見られなかった。特に、シート陽極を外付けした供試体は、表面をフッ素樹脂フィルムが覆っているため、その遮蔽効果により、 $1.0\text{mm}$ 前後の値でほとんど中性化していなかった。なお、今回の暴露試験では、塩化物イオンの影響と考えられる陽極材付近の中性化はいずれも確認できなかった。
- (13) 常時通电、間欠通电に関わらず、いずれの環境下でも、鋼材表面および鋼材直上の塩化物イオン量が低下していた。その低下している範囲は、概ね $5^\circ\text{C}65\%\text{RH} < 20^\circ\text{C}65\%\text{RH} < 35^\circ\text{C}$ 乾湿の順で大きくなっており、温度変化によるコンクリート抵抗の変化やコンクリートの湿潤化が塩化物イオンの移動に影響を及ぼしている可能性が考えられた。なお、分極量や通电方法による明確な優劣は、確認できなかった。

鋼材の腐食電流密度は温度変化により異なり、定電流制御での通电調整時、環境温度により防食電流量が異なる可能性があり、通电調整時の環境温度が防食効果に与える影響する可能性がある。そこで、第3節では、環境温度を変化させて通电調整した供試体を用い、間欠通电での電気防食による屋外暴露試験により検討した。本検討により明らかになったことを以下に示す。

- (1) ソーラーパネルのサイズを防食回路に必要な電力の10倍以上とし、起動電圧を $5\text{V}$ 程度とする定電流制御方式の電源装置を使用することで、雨天等の悪天候時を含め、1日あたりにより防食回

- 路へ最低6時間通電でき、平均では10.6時間通電できていた。
- (2) ソーラーパネルを電流供給源とすることで、気温上下に伴う鋼材腐食速度の増減に対し、効率的な通電が実施でき、通電時間の平均は、春秋の4～6月・10～12月時では10.7時間、夏の7～9月時では11.3時間、冬の1～3月時では9.5時間であった。
  - (3) 腐食電流密度より通電電流密度の方が概ね大きな値を示した。また、通電前に計測した腐食電流密度に関し、20℃屋外の方が5℃室内より大きな値を示したのと同様、分極量に必要な通電電流密度に関しても、20℃屋外の方が5℃室内より大きな値を示した。
  - (4) 分極量に必要な通電電流密度は、陽極の設置位置・面積・種類によらず同様の傾向を示し、分極量の増加に伴い、通電電流量も大きくなる傾向を示した。
  - (5) 間欠通電方式による防食供試体は、鋼材電位を10分間隔で常時計測するだけで、通電時のオン電位と無通電時のオフ電位が計測でき、通電による鋼材電位の変化が確認できた。
  - (6) 間欠通電方式で防食している供試体の鋼材電位に関し、オン電位時のマイナス方向への変化は急激に、オフ電位時のプラス方向への変化は緩やかに推移した。このようにオフ電位時の鋼材電位のプラス方向への変化が緩やかなのは、オフ電位時の鋼材電位のプラス方向への変化が酸素の拡散速度に律速であるためである。
  - (7) 定電流制御であるため、通電継続による鋼材表面の改善効果や気温低下に伴う腐食電流密度の低下によって、分極に必要な電流量が相対的に低下すると分極量は大きくなった。
  - (8) 気温上昇時、所定の分極量は保持していたが、5℃65%RH環境下で通電調整した供試体に関しては、オフ電位の最大値とオン電位の最小値との差が徐々に低下する傾向を示した。つまり、温度上昇時に防食効果が低下する傾向が示唆された。
  - (9) 解体後の腐食面積と腐食減量の結果は明らかに無防食供試体より防食供試体の方が小さいのに対し、前節同様、解体前に計測した腐食電流密度の結果では優劣の差は確認できなかった。このように、腐食電流密度の計測で防食と無防食の優劣の差が確認できなかった原因は、前節同様、24時間の復極試験後に2日以上経過した段階で計測していることや、照合電極設置箇所の鋼材の腐食状態が鋼材全体の腐食状態を平均化した場合と異なること等が原因であると考えられる。
  - (10) 20℃屋外で通電調整した供試体および5℃室内で通電調整した供試体とも、通電継続による防食効果により、復極量は設定した分極量よりもすべて増加する傾向を示した。また、E<sub>off</sub>-E<sub>initial</sub>の値についても、酸欠等によりマイナスの値を示したものも発生したが、概ねプラス方向へ推移し、防食効果が確実に作用し、アノード反応が抑制されている傾向を示した。
  - (11) 5℃室内で通電調整した供試体のうち、通電量が小さい常時通電供試体では、環境温度が高い屋外暴露時に復極量の低下が発生した。このことから、通電調整時の環境温度が、その後の防食効果に与える影響がある可能性が示唆された。
  - (12) 腐食面積率は、5℃65%RHの室内環境下で通電調整した供試体の方が20℃の屋外環境で通電調整した供試体より、大きくなる傾向を示した。これは、温度によって、鋼材の腐食電流密度が変化することが主要因と考えられ、通電調整は温度が高い時期に実施すべきであることを示唆していると考えられる。
  - (13) 腐食減量は、腐食面積の結果と異なり、5℃65%RHの室内環境で通電調整した供試体の方が小さ

い傾向を示した。これは、5°C65%RHの室内環境で通電調整した供試体の当初54日間の暴露は5°C環境下であるのに対し、20°Cの屋外環境で通電調整した供試体の暴露は夏季の高温下であり、その温度履歴の差が原因であると考えられる。

- (14) 防食供試体はいずれも防食効果を確実に発揮し、無防食供試体の暴露後より、腐食面積率および腐食減量とも小さな値を示した。分極量に対する防食効果に関しても、チタンリボンを用いた供試体の腐食面積率は分極量の設定値が大きいものほど小さくなっている傾向を示した。しかし、腐食減量ではそのような傾向は見られなかった。本検討条件では、前章の屋外暴露試験同様、分極量100mV以上の通電電流密度を通電することで、間欠通電でも常時通電同様の防食効果を発揮可能であると考えられる。
- (15) 5°C65%RHの室内環境で通電調整した防食供試体の鋼材表面はいずれも、少量の $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を含む、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\text{FeO}$ を主成分とした酸化物で構成されていた。一方、20°Cの屋外で通電調整した防食供試体では、ほとんど $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を含まず、ほとんどの供試体は $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\text{FeO}$ のみの酸化物で構成されていた。20°Cの屋外で通電調整した防食供試体の方が確実に防食できていると考えられることから、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ が消失していたのは、電気防食によって $\text{Fe}_2\text{O}_3$ が還元され、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ が生成した可能性が考えられる。
- (16) 無防食供試体の鋼材表面は黒皮と同様の成分である $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を少量含むが、ほぼ非晶質な成分で構成されていた。
- (17) 無防食供試体の中性化深さは4.3mm、チタンリボンを用いた防食供試体は約2~4mmであったのに対し、貼付け型シート陽極を外付けした供試体は1mm未満の値であった。貼付け型シート陽極の表面はフッ素樹脂フィルムで覆っているため、その遮蔽効果により、コンクリート面が露出している他の供試体よりも中性化が生じにくくなった。なお、今回の暴露試験では、塩化物イオンの影響と考えられる陽極材付近の中性化はいずれも確認できなかった。
- (18) EPMAによる塩化物イオンの分布状況の分析の結果、間欠通電および常時通電とも、いずれの環境下でも、鋼材表面の塩化物イオン量が低下し、鋼材直上のかぶりコンクリート部の塩化物イオン量についても低下していた。ただし、その低下している範囲は、5°C環境下より20°C環境下で通電調整した防食供試体の方が大きくなった。これは、通電量が20°C環境下で通電調整した防食供試体の方が大きいためであると考えられる。

コンクリートの電気抵抗は含水率で異なり、水掛かり箇所や海水の飛沫帯などでは電流の偏りが発生し、防食効果への影響が生じる可能性がある。そこで、第4節では、電気防食の適用箇所に関し、供試体の一部に水掛かり箇所が発生した場合の防食回路の影響と表面含浸材の併用による水掛かり対策の効果について検討した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 電気防食工法を施工した箇所の一部に水が掛る場合、水掛り箇所に電流の偏りが生じた。これは水の影響によるものと考えられる。
- (2) シラン系表面含浸材を塗布した供試体は水の影響による電流の偏りを軽減できることを確認した。
- (3) ケイ酸塩系表面含浸材による水掛り箇所への電流の偏りの軽減効果は確認できなかった。シラ

ン系表面含浸材と比較してケイ酸塩系表面含浸材の吸水抑制率が低いためであると考えられる。

- (4) シラン系表面含浸材による電流の偏りの軽減効果は、チタンリボンを使用した供試体の方が貼付け型シート陽極を使用した供試体と比較して高かった。これは、表面含浸材の塗布面積の差によるものと考えられる。
- (5) いずれの供試体も散水後の復極量は散水前の分極量よりも大きく、100mV以上を確保していた。よって、本検討では表面含浸材の有無に関わらず鉄筋周辺の酸素不足が発生しなかったため、表面含浸材の塗布による鉄筋周辺の酸素不足低減効果を確認できなかった。

電気防食時の陽極に関し、陽極の配置方法によって、防食電流の通電状況が異なり、防食効果へ影響する可能性がある。そのため、第5節では、陽極材と鋼材との分極特性とコンクリート抵抗値を境界条件としたFEM解析によりシミュレーションし、電気防食時の陽極の配置による防食効果への影響を検討した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 適当な間隔・配置方法で貼付け型シート陽極を設置すると、流入電流量の偏りを抑制できる。
- (2) 小型供試体から得た分極特性を入力してFEM解析したところ、流入電流量と分極量の傾向に関し、実験値を比較的精度良く再現することができる。
- (3) 貼付け型シート陽極の配置方法によっては印加電圧が過大となり、100mV以上の分極量が確保できなくなる可能性がある。

#### 【参考文献】

- 1) 土木学会：電気化学的防食工法 設計施工指針（案），2001.11
- 2) 望月紀保：コンクリート中鉄筋のカソード防食について，材料と環境,59,pp.121-128, 2010
- 3) G.K.Glass, A.M.Hassanein, N.R.Buenfeld：Cathodic protection afforded by an intermittent current applied to reinforced concrete, Corrosion Science, 43, pp.1111-1131, 2001
- 4) 大谷俊介, 小林浩之, 若林徹, 望月紀保：鋼材表面の環境改善を考慮した電気防食試験, コンクリート工学論文集, Vol.34, No.1, pp.1030-1035, 2012
- 5) 二木宥一, 三村典正, 石川康登, 鈴木潤：光発電シート陽極による電気防食工法, 土木学会第67回年次学術講演会, V-076, 2012.9
- 6) トランジスタ技術編集部：太陽電池活用の基本と応用, CQ出版社
- 7) 佐藤勝昭：太陽電池の基本, SBクリエイティブ
- 8) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)：ソーラー建築デザインガイド
- 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)：業務用太陽熱利用システムの設計ガイドライン, 2009.12
- 10) 石川光男, 堺孝司, 大越威, 峰松敏和：コンクリート中鉄筋の電気防食における通電システムに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp771-776, 1993
- 11) 日経コンストラクション：特集 老朽橋探偵の「補修」事件簿 File.4 電気防食神話, pp.46-4

- 7, 2015.7.13
- 12) 武若耕司：コンクリート構造物における電気防食法の現状，コンクリート工学，Vol.30，No.8，PP16-27，1992.8
  - 13) 野田哲二，佐藤教男：鉄の表面不働態酸化被膜内のイオン電流，日本金属学会誌，第38巻，pp. 1143-1149，1974
  - 14) 奥野翔矢，本田正和，佐藤眞市，高谷哲：鉄腐食生成物の環境依存性に関する基礎的研究，物理化学的解釈に基づく電気化学的計測手法の体系化に関するシンポジウム，pp.361-366，2015.9
  - 15) 飯島亨，工藤輝大，玉井譲：コンクリート中の鉄筋の腐食速度に及ぼす気温の影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第8巻，2008.10
  - 16) G.K.Glass and J.R.Chadwick,Corrosion Science,36[12]2193,1994
  - 17) G.K.Glass,J.Z.Zhang and R.N.Buenfeld,Corrosion,51[9]721,1995
  - 18) 渡辺正，中林誠一郎：ネルンストの式，電位移動の化学—電気化学入門，pp.60-73,1996
  - 19) 石田健太，武若耕司，山口明伸，前田聡：鉄筋腐食発生限界塩化物イオン量の定量評価に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，2007
  - 20) 網野貴彦，羽瀨貴士，守分敦郎：種々の条件を変化させたコンクリート中の鉄筋の腐食速度及び腐食発生限界塩化物イオン濃度に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，2008
  - 21) 木村哲士，中野松二，山路徹，審良善和，濱田秀則，高橋良輔：RC栈橋干満帯部の電気防食における復極挙動に関する検討，土木学会第62回年次学術講演会，pp.1019-1020，2007.9
  - 22) 多根井寛志，近藤泰光：酸化スケールの相変態挙動とその制御，新日鐵住金技報 第401号，2015，pp.91-95
  - 23) 中村英佑，渡辺博志，小松原健：塩害環境下のコンクリート中鋼材のマクロセル腐食に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1031-1036，2006
  - 24) 朝倉祝治：鉄筋腐食とコンクリート構造物の劣化 講義テキスト，pp. 10，2013.5
  - 25) 石神暁郎，堀耕次，大久保謙治，竹村浩志：表面含浸材によるコンクリートの電気抵抗率の安定化に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1655-1660，2011
  - 26) 皆川浩，増田正孝，川俣孝治：有限要素法による鉄筋コンクリートの電気防食の電流分布に関する検討，「コンクリート構造物の長期性能照査支援モデル」に関するシンポジウム，Vol.JCI-C64，pp.351-356，2004
  - 27) 鹿島篤志，佐藤唯，山本誠，皆川浩，久田真：FEM解析による電気防食工法の電流と分極量分布の再現性に関する実寸大供試体を用いた検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.12，pp.273-280，2012
  - 28) 鈴木僚，西村次男，加藤佳孝，岩波光保：測定環境条件が鉄筋コンクリートの電気化学的測定結果に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.751-756，2007



## 第4章 間欠通電方式による電気防食を適用した実構造物の鋼材腐食抑制効果

### 4.1 はじめに

鉄筋コンクリート構造物を電気防食する場合、防食電流の供給には外部電源方式と犠牲陽極方式があり、ともに常時通電が基本である。電気防食は鋼材を陰極とし、設置した陽極からコンクリートを介して鋼材表面へ通電することで、鋼材表面での電気化学反応によって鋼材電位を分極させ、鋼材の腐食を抜本的に抑制する。常時通電では電気化学反応により、陽極表面では水酸化物イオンや塩素イオン等の陰イオン、陰極の鋼材表面では水や酸素等が常に消費され、拡散等で供給される量と平衡を保っている。しかし、環境変化等の影響で消費が供給を上回った場合、濃度分極等の影響で各電極の分極量が過剰となる場合が発生し、防食回路の耐久性に影響を与える可能性がある。そのため、近年、経済性や耐久性の観点から、電気防食時の通電方法や間欠通電等の研究が行われている<sup>1)4)</sup>。また、外部電源方式では腐食環境に応じて防食電流の調整が可能であるが、商用電源の確保や誘導雷対策等の煩雑な維持管理が必要である。そこで、これらの課題に対し、防食電流の供給をソーラーパネルからの日中だけとし、日中のみの間欠通電でも防食効果が得られると考え、前章において小型供試体を用いた室内や屋外での暴露試験を実施した。その検討結果から、塩化物イオン量 $6\text{kg/m}^3$ 程度までであれば、一般的に使用されている線状のチタンリボンや面状のシート陽極を用い、分極量を $100\text{mV}$ 以上とする電流を通電することで、間欠通電でも通常の常時通電相当の防食効果が得られることを確認した。また、鋼材表面へのより均一な通電が可能となる面状の貼付け型シート陽極を用いれば、塩化物イオン量 $10\text{kg/m}^3$ でも、間欠通電で常時通電相当の防食効果が得られることを確認した。

そこで、塩害環境下の道路橋と飛沫帯の栈橋の2箇所の間欠通電と常時通電の2種類の通電方法で試験施工を行い、その防食効果を比較検討した。また、前章で検証したFEM解析の適用性を確認するため、飛沫帯の栈橋では、現場で得られた実測結果とFEM解析で求めた解析値との整合性を確認した。なお、解析の適用性が確認できれば、陽極材の配置や間隔を含む適切な電気防食回路の設計が可能となる。

### 4.2 試験施工の概要

#### 4.2.1 陽極の概要

検討に用いた陽極は、海水や水掛かり等の影響を考慮し、陽極材の外側をプラスチック皮膜で覆った貼付け型シート陽極と貼付け型モール陽極の2種類を選定した。貼付け型シート陽極の概略図を図4.1、貼付け型モール陽極の概略図を図4.2に示す。ともに躯体面の外側に貼り付けて設置する。なお、通電部の陽極材は躯体面と接触しない構造となっており、露出鋼材を撤去せず、有機絶縁材の被覆処理のみで設置可能である。また、両陽極とも通電時の陽極反応による生成物に対して、コンクリート面の露出部を設けるほか、貼付け型シート陽極は表面にガス透過性のフッ素樹脂フィルムを用い、貼付け型モール陽極はモールに通気孔を設けている。

貼付け型シート陽極は、フィルム状のカーボン陽極材とアクリル樹脂系導電性粘着材で構成された粘着型陽極材とフッ素樹脂フィルムとを工場加工で厚み約 $1.0\text{mm}$ に積層したシート状の陽極である。陽極を躯体面に貼り付け、通電部を処理した後、シートの周囲をエポキシ樹脂で封止して完成である。貼付け型モール陽極は、チタンリボンメッシュ陽極を内部に固定したモールをエポキシ樹

脂で躯体面に貼り付け、モール内にグラウトモルタルを充填して完成である。

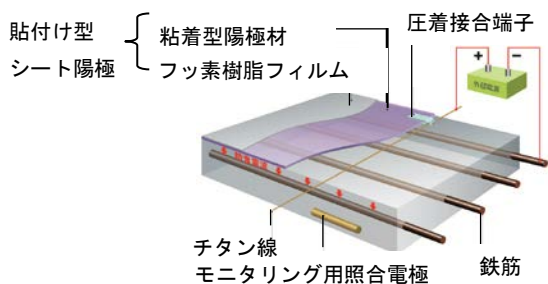


図 4.1 貼付け型シート陽極

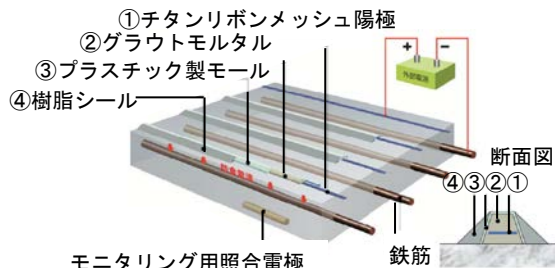


図 4.2 貼付け型モール陽極

#### 4.2.2 電流供給源の概要

常時通電の電流供給は商用電源からとし、間欠通電は汎用の単結晶シリコンセルのソーラーパネルを用いた。ソーラーパネルを用いた間欠通電では前述したように充電設備を使用せず、発電した電力を調整して防食電流として通電した。充電設備を使用していないため、悪天候が継続した場合、ソーラーパネルの発電が停止し、無通電状態が続くと、無防食状態となる。そこで、悪天候を含めた日々の通電を考慮し、ソーラーパネルには最大公称電力が設計時の使用電力の10倍以上を有するものを使用した。なお、道路橋では48W（35x535x666mm）、栈橋では36W（35x412x666mm）のケー・アイ・エス製の単結晶シリコンセルを使用した。

#### 4.2.3 施工箇所の概要

試験施工は海岸線から200mの道路橋と飛沫帯の栈橋の2箇所で実施した。各施工箇所の陽極および通電方式を表4.1、道路橋の施工箇所の概要を図4.3、栈橋の施工箇所の概要を図4.4に示す。通電量の制御は定電流制御方式とし、間欠通電用は最大電流量を制御した。なお、目標とする分極量は、常時通電の場合100mV以上、間欠通電の場合、実構造物であるため安全を考慮し150mV以上とした。

施工箇所の道路橋は、1972年の竣工後40年以上を経過したPCT桁橋である。露出鉄筋やかぶりが15mm程度の薄い箇所では発錆していた。しかし、塩化物イオン量は深さ0-10mmの範囲でも1.16~1.89 kg/m<sup>3</sup>程度であり、鋼材腐食によるひび割れや浮きは発生していなかった。常時通電はG3とG5の2箇所とし、2012年3月から2015年6月までの39ヶ月間通電した。間欠通電はG1とし、2014年4月の通電開始から2016年2月の時点で22ヶ月間経過し、現在も通電中である。いずれの箇所も施工面積は約23 m<sup>2</sup>である。

施工箇所の栈橋は1973年の竣工後、1996年より大規模補修工事で岸壁と平行方向の桁は電気防食、垂直方向の桁は塩害対策の保護塗装が実施された。保護塗装は竣工後23年経過した段階での施工のため、図4.4に示すように表面は中性化し、内部に塩化物イオンを含んでいた。また、施工箇所No.2では鋼材腐食による浮きや塗膜のワレを伴う再劣化が発生していた。施工箇所は岸壁に垂直方向の3箇所の桁とし、保護塗装の撤去後、表4.1に示す貼付け型シート陽極と貼付け型モール陽極の2種類の陽極を設置した。各陽極では躯体面の露出面積が異なり、貼付け型シート陽極では各シート間に幅40mmの隙間、貼付け型モール陽極ではモール間の幅100mm以上の隙間でコンクリート面が露出している。2015年5月より商用電源およびソーラーパネルを用いて通電を開始し、現在も通電中である。施工面積はいずれも9.6m<sup>2</sup>ずつである。図4.5に栈橋での陽極設置概略図を示す。

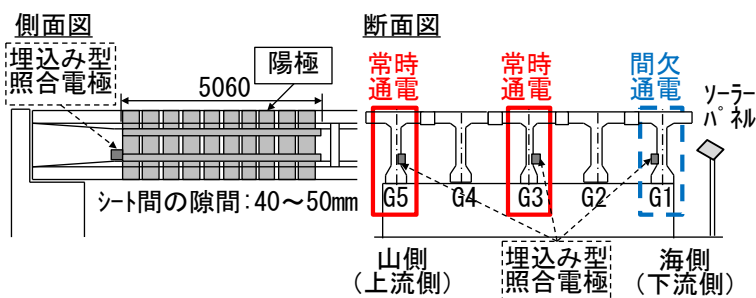
ソーラーパネルの発電時間は天候のほか、日の出から日没までの日中の時間に依存する。施工箇

所の道路橋の緯度は北緯 33 度 50 分，栈橋の緯度は北緯 35 度 35 分である。ソーラーパネルは写真 4.1 に示すように，道路橋では樹木の脇に設置したポール柱の上，栈橋では既設筐体の横に設置した筐体上とし，ともに南向き 30 度で設置した。なお，両設置箇所とも，時折日陰になる箇所である。

表 4.1 各施工箇所の陽極と通電方式

施工箇所	陽極	通電方式	施工面積(m <sup>2</sup> )	通電期間	通電電流密度 <sup>*</sup>
道路橋	G1	貼付け型シート陽極 間欠通電	23.0	2014/04-通電中	1.14mA/m <sup>2</sup> (~101日), 1.72mA/m <sup>2</sup> (101日~)
	G3	貼付け型シート陽極 常時通電	22.6	2012/03-(39ヶ月間)	1.30mA/m <sup>2</sup> (~260日), 1.00mA/m <sup>2</sup> (260日~)
	G5	貼付け型シート陽極 常時通電	22.6	2012/03-(39ヶ月間)	0.70mA/m <sup>2</sup> (~30日), 0.90mA/m <sup>2</sup> (30日~260日), 0.70mA/m <sup>2</sup> (260日~)
栈橋	No.1	貼付け型シート陽極 間欠通電	9.6	2015/05-通電中	3.00mA/m <sup>2</sup>
	No.2	貼付け型モール陽極 常時通電	9.6	2015/05-通電中	3.00mA/m <sup>2</sup> (~288日), 1.35mA/m <sup>2</sup> (288日~)
	No.3	貼付け型シート陽極 常時通電	9.6	2015/05-通電中	3.00mA/m <sup>2</sup> (~288日), 1.35mA/m <sup>2</sup> (288日~)

<sup>\*</sup>)防食対象の躯体表面積あたりの通電電流量



		含有塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )			中性化 深さ (mm)
		深さ (mm)	0-10	10-20	
G1	間欠通電箇所	1.16	0.43	0.29	2.0
G3	常時通電箇所	1.89	0.96	0.31	2.1
G5	常時通電箇所	1.66	0.86	0.45	2.9



G5 : 常時通電



G3 : 常時通電

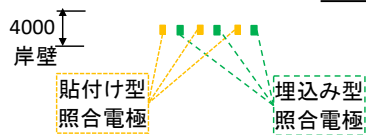
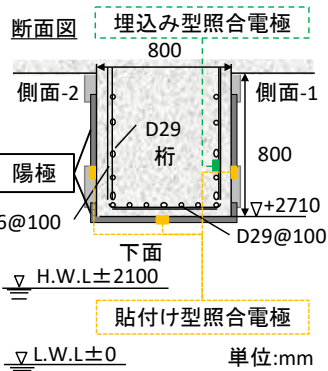


G1 : 間欠通電

図 4.3 道路橋の施工概要

平面図  
海側

施工箇所  
No. 1: 間欠  
No. 2: 常時  
No. 3: 常時



			施工箇所: No.1	施工箇所: No.2	施工箇所: No.3
かぶり (mm)	側面-1	実測値	50	30	75
	下面	図面	40	40	40
	側面-2	推定値*)	69	89	44
中性化深さ (mm)	側面-1	最小値	9.6	10.1	2.0
		最大値	14.3	18.2	4.8
		平均	11.7	14.3	2.9
含有塩化物イオン量 調査箇所: 側面-1					

\*)図面より側面-1と側面-2のかぶり合計119mmから側面-1の実測値を引いた推定値:  
側面-2の推定値=119mm-側面-1の実測値



No. 1 : 貼付け型シート陽極  
間欠通電

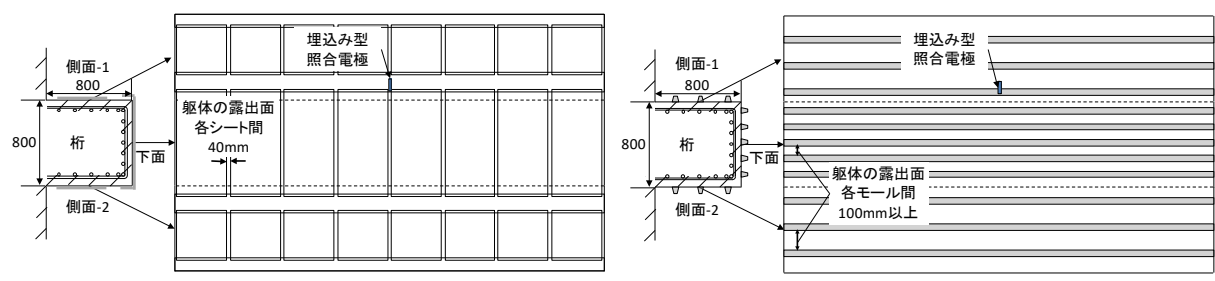


No. 2 : 貼付け型モール陽極  
常時通電



No. 3 : 貼付け型シート陽極  
常時通電

図 4. 4 棧橋の施工概要



施工箇所No.1およびNo.3(陽極材: 貼付け型シート陽極)

施工箇所No.2(陽極材: 貼付け型モール陽極)

図4. 5 棧橋での陽極設置概略図



道路橋



栈橋

写真 4.1 各施工箇所のソーラーパネル設置状況施工状況

#### 4.2.4 調査項目

各施工箇所では、鋼材電位やコンクリート表面温度をデータロガーで10分毎に計測した。電気防食の防食効果は復極試験およびカソード分極試験により評価した。復極試験では、道路橋の場合、埋込み型の鉛照合電極と外付け型の銅硫酸銅照合電極を用い、栈橋の場合、埋込み型の鉛照合電極と外付け型の銀塩化銀照合電極を用いて実施した。カソード分極試験は埋込み型の鉛照合電極を用い、道路橋では間欠通電箇所、栈橋ではいずれの箇所でも定期的な実施した。なお、いずれの計測結果についても、銅硫酸銅照合電極基準に換算し、評価した。間欠通電箇所は夜間に無通電状態となるため、復極試験時の通電停止は昼間に実施した。具体的には、道路橋では、午後に停止し、約18時間後の翌朝にオフ電位を測定した。また、栈橋では、昼に停止し、約23時間後の翌日の昼にオフ電位を計測した。カソード分極試験は復極試験後のオフ電位を自然電位として評価するため、復極試験時の通電停止後、翌日のオフ電位計測後に実施した。

### 4.3 現場調査結果

#### 4.3.1 道路橋の施工結果

##### 4.3.1.1 常時計測結果

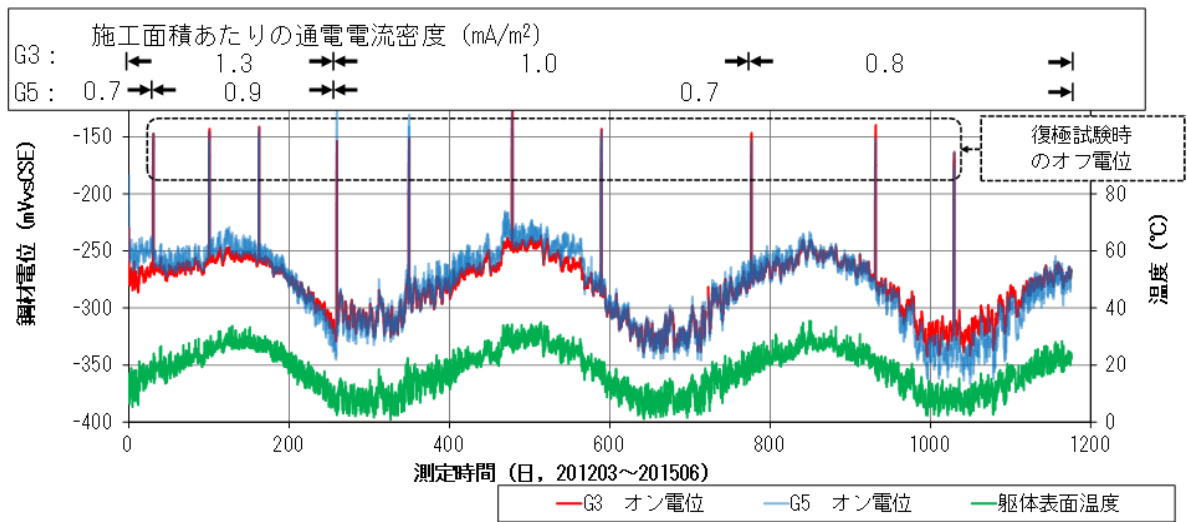
埋込型の鉛照合電極を用い、データロガーで常時計測している鋼材電位と回路電圧の計測結果について、常時通電箇所G3およびG5の計測結果を図4.6、間欠通電箇所G1の計測結果を図4.7に示す。なお、コンクリート表面で計測した温度も併せて示した。便宜上、各計測結果とも、横軸の測定日数は起点を夜中0:00としており、各整数値の箇所が夜中0:00を示す。鋼材電位は回路の開閉装置を切断せず、10分毎に計測しており、常時通電箇所は常にオン電位状態、間欠通電箇所の日中はオン電位、夜間はオフ電位を計測している。そのため、オン電位での計測値にはコンクリート抵抗等のIRドロップの値が含まれている。また、常時通電箇所および間欠通電箇所とも、暴露期間中、鋼材電位が目標値を下回った際、通電調整を実施しており、図中には通電時の通電電流密度を示した。なお、図4.7に示す間欠通電箇所のコンクリート表面温度の変動量が480日付近より増加しているが、これは、日陰でコンクリート表面温度を計測していた熱電対を日向に移設したためである。

間欠通電箇所G1の通電は、ソーラーパネルの発電に依存しており、日の出とともに通電を開始し、日の入りとともに通電を停止する。よって、図4.7の300～305日目の経時変化に示すように、鋼材電位は通電開始とともにマイナス方向に分極し、日の入りの通電停止とともにプラス方向に復極する

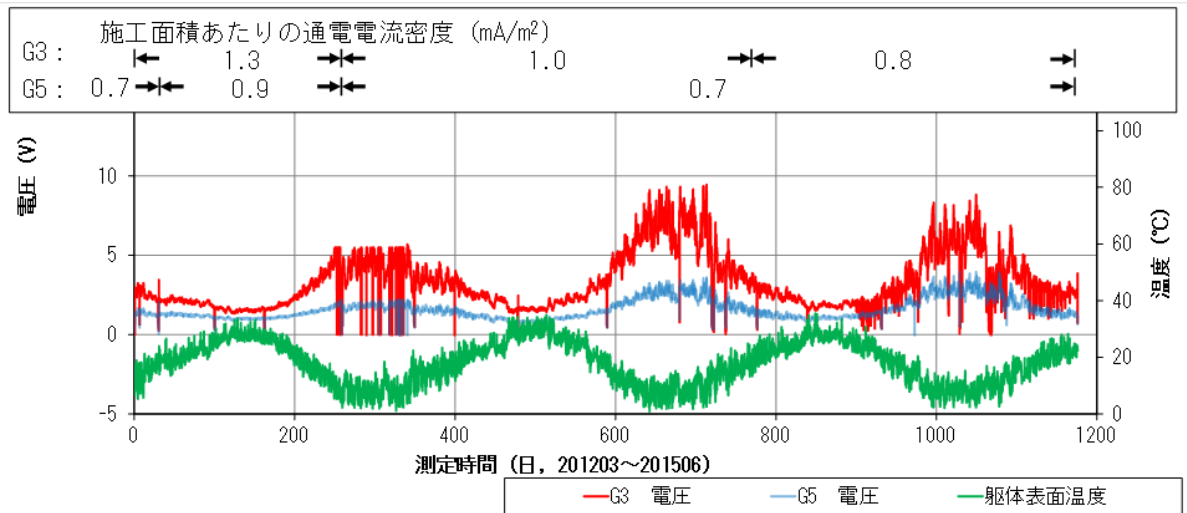


が、鋼材電位は自然電位となる前の復極の途中で日の出とともに分極を開始した。また、間欠通電箇所のおフ電位は通電後100日程度までプラス方向へ推移した後、気温低下時に若干低下したが、初期の鋼材電位に比べ、プラス状態を維持した。これは、電気防食によって、鋼材表面の状態が徐々に変化し、鋼材のアノード分極抵抗が増加することでアノード反応を抑制しているためであると考えられる。また、オフ電位とオン電位の日々の変動量に関し、気温上昇時の100日、500日、850日前後では防食回路の電圧低下に伴い減少、気温低下時の300日および650日前後では防食回路の電圧上昇に伴い増加した。なお、後述する復極試験の結果においても常時通電方式を含め、同様の傾向を示している。本試験施工箇所は直接海水が掛かる飛沫帯ではないため、鋼材電位の変動量が温度によって変化しているのは、鋼材の腐食速度が温度に依存しており、温度上昇とともに鋼材の腐食速度が増加、温度低下とともに鋼材の腐食速度が低下しているためと考えられる。よって、通電量の調整時期は、現場の腐食環境を把握した上で、腐食速度が上昇する時期に実施するのが最適であると考えられる。

図4.6の常時通電箇所の鋼材電位のオン電位は-150mVvsCSE付近の値を示した復極後のオフ電位と比較して、コンクリート表面温度と連動した変化を示した。また、図4.7の間欠通電箇所の日中のオン電位も、同様の変化を示した。各施工箇所の鋼材電位とコンクリート表面温度との関係を図4.8に示す。オン電位にはIRドロップが含まれており、IRドロップは通電量により変化する。そこで、図4.8のように鋼材電位とコンクリート表面温度との関係をプロットするにあたり、通電量ごとに色を変化させた。また、通電量が同じでも、グラフに変化点が生じた場合、その前後で鋼材電位とコンクリート表面温度の対象を変化させた。なお、常時通電箇所のG3とG5は同時刻に計測した鋼材電位とコンクリート表面温度であるが、間欠通電箇所G1は、日中の鋼材電位の最小値をオン電位、夜間の復極量の最大値をオフ電位とし、コンクリート表面温度は24時間の平均値を用いた。図4.8に示すように常時通電箇所G3、G5とも、決定係数 $R^2$ は当初、G3では0.8448、G5では0.5102で低い値であるが、ともに170日以降は非常に相関のある0.9を上回る値を示した。また、間欠通電箇所のG1のオン電位についても、当初0.8532であったが、100日以降は非常に相関のある0.9を上回る値を示した。なお、決定係数が0.9を上回ったのは、常時通電箇所のG3とG5では170日以降、間欠通電箇所のG1では100日以降と大きく異なるが、ともに通電開始後の最初の夏季を過ぎた段階からである。つまり、通電開始後、最初の夏季を経過する段階で、鋼材の分極特性や断面修復材の抵抗によるIRドロップが安定化し、鋼材電位と温度とが相関を示すように変化したと考えられる。なお、復極途中のため温度との相関性は劣ると考えるが、IRドロップを含まない間欠通電箇所のG1のオフ電位についても、100日前後で鋼材電位の温度特性が変化した。オフ電位にはIRドロップが含まれないため、これは、通電開始後の最初の夏季を過ぎた段階の100日前後で鋼材の分極特性が変化したと考えられる。

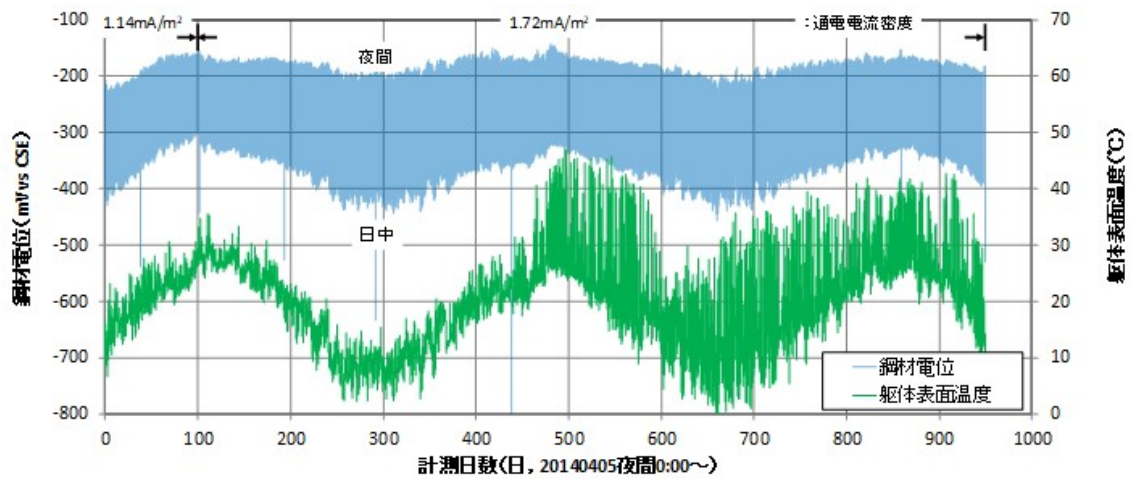


G3 と G5 の鋼材電位 (オン電位)

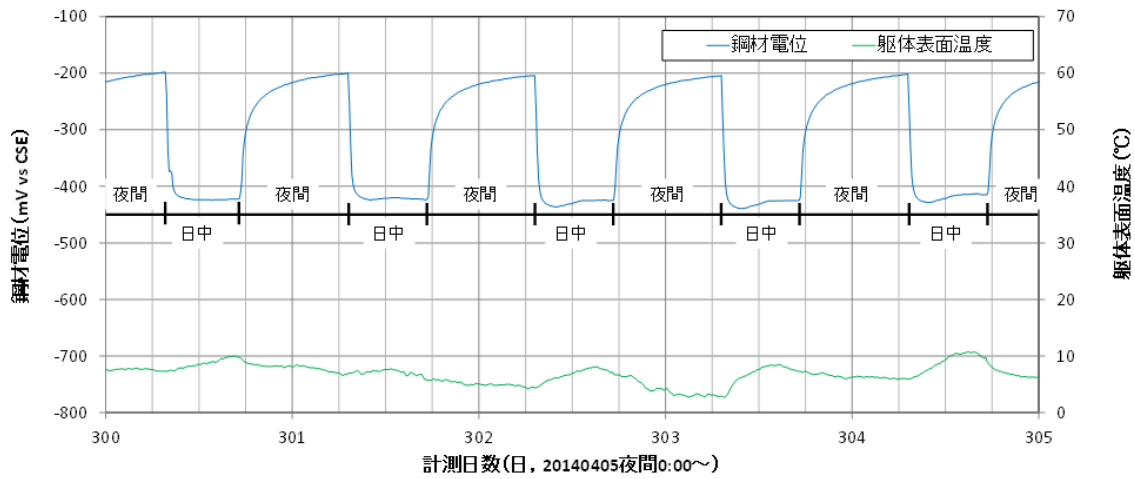


G3 と G5 の回路の電圧

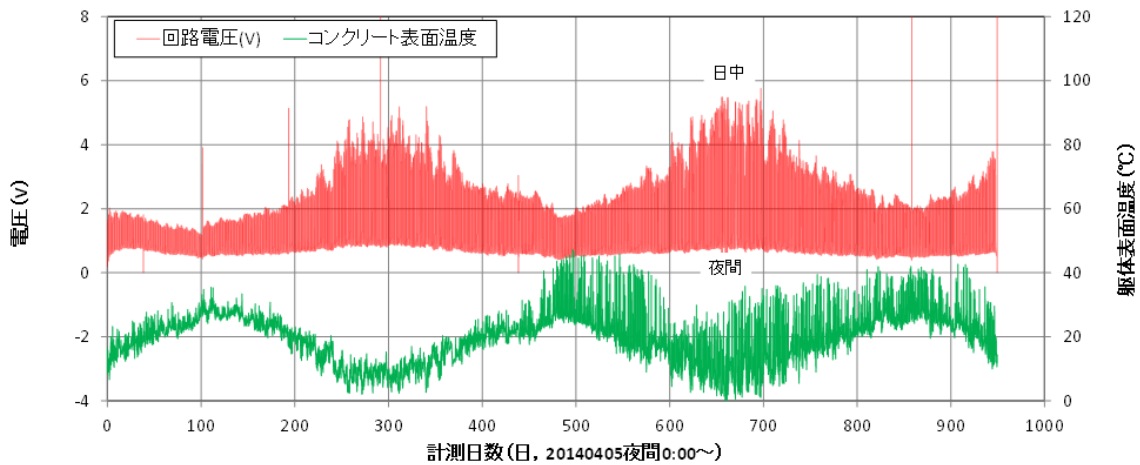
図 4.6 常時通電施工箇所 (G3, G5) の鋼材電位と回路の電圧の経時変化



G1の鋼材電位



G1の鋼材電位 (300~305日目)



G1の回路の電圧

図 4.7 間欠通電施工箇所 (G1) の鋼材電位と回路の電圧の経時変化

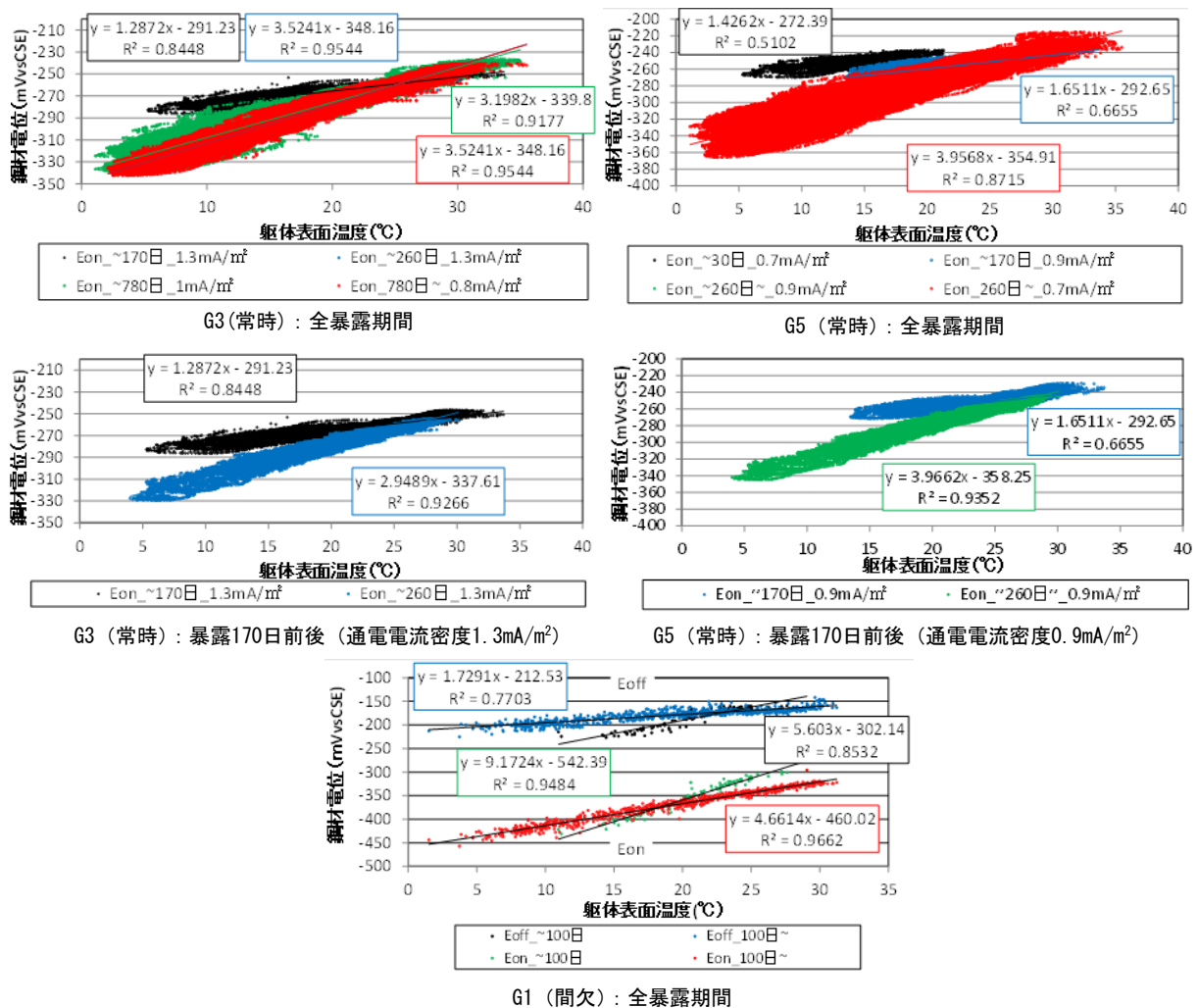


図 4.8 鋼材電位とコンクリート表面温度との相関性

#### 4.3.1.2 間欠通電箇所の通電時間

ソーラーパネルは悪天候時に発電能力が著しく低下するため、悪天候が続くと無防食状態が続き、防食効果に影響する可能性がある。そのため、ソーラーパネルの設計では雨天時の発電能力が晴天時の10%以下に低下することを考慮し、施工箇所に必要な電力の10倍サイズを選定した<sup>5),6)</sup>。

そこで、ソーラーパネルが所定の性能を発揮できているかを確認するため、常時計測した通電量から設定電流量の通電時間を算出し、ソーラーパネルが日々通電できていたかを確認した。また、算出した日々設定電流量の通電時間を月別に整理し、各月の1日あたりの通電時間を1時間毎に区切って日数を積算し、通電状況を確認した。各施工箇所の月別の1日あたりの通電時間の割合を図4.9、表4.2に示す。

表より、通電期間中、道路橋の施工箇所では2014年6月と2016年9月に最低値となる通電時間2.3時間を記録したが、全く通電しない日は発生しなかった。また、平均では10.4時間/日通電しており、90%以上の割合で日中8時間以上通電していた。よって、適切なソーラーパネルを選定することで悪

天候時を含め日々通電可能であると考えられる。さらに、図に示すように、腐食速度が大きくなる気温上昇時に通電時間が長くなり、腐食速度が低下する気温低下時に通電時間が短くなっており、鋼材腐食の温度変化に対応した通電ができていると考える。なお、表4.2の道路橋で2.3hr/日の最低を記録した2014年6月の通電状況を図4.10に示す。図に示すように発電が時折停止し、その影響で通電が停止した。通電停止とともに、IRドロップの影響で陽極電位は大きく低下し、鋼材電位は上昇した。その後、陽極電位は低下、鋼材電位は上昇を続けた。しかし、鋼材電位の上昇は緩やかで、最低を記録した日の夜間でも鋼材電位はカソード分極している上昇状態のまま、カソード反応とアノード反応の平衡状態となる自然電位になる前に日の出の時刻となり、通電開始とともに分極を開始した。つまり、日々の通電による防食効果によって、1日の通電時間が最低を記録した日でも、夜間を含め防食状態を維持していたと考えられる。

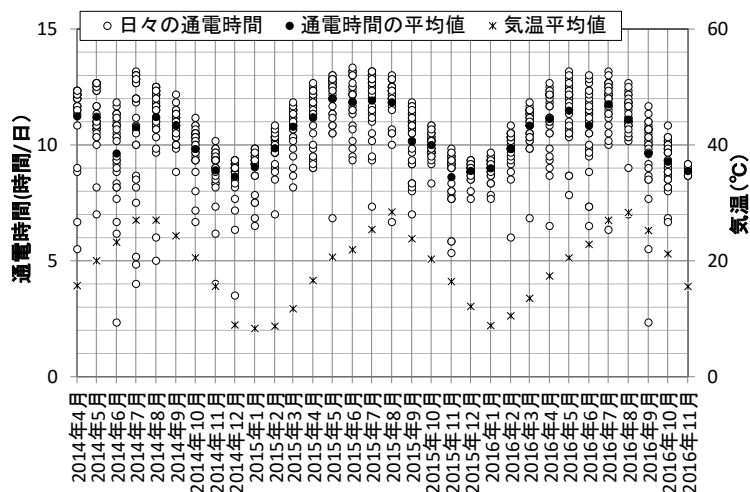


図 4.9 月別の通電時間と平均気温との関係

表 4.2 各月ごとの設定電流量の平均通電時間および通電時間と通電日数の関係

年月	平均気温 (°C)	月別の1日あたりの通電時間の割合(%)												通電時間(h/日)		
		2h/日	3h/日	4h/日	5h/日	6h/日	7h/日	8h/日	9h/日	10h/日	11h/日	12h/日	13h/日	平均	最低	最高
2014年4月	15.7	100	100	100	100	96	92	88	85	81	54	0	11.2	5.5	12.3	
2014年5月	20.0	100	100	100	100	100	100	97	93	93	59	34	0	11.2	7.0	12.7
2014年6月	23.2	100	97	97	97	97	90	87	73	57	27	0	0	9.6	2.3	11.8
2014年7月	27.0	100	100	100	93	90	90	86	76	76	59	52	14	10.8	4.0	13.2
2014年8月	27.0	100	100	100	100	97	94	94	94	87	74	42	0	11.2	5.0	12.5
2014年9月	24.3	100	100	100	100	100	100	100	97	93	47	3	0	10.8	8.8	12.2
2014年10月	20.5	100	100	100	100	100	97	93	86	59	3	0	0	9.8	6.7	11.2
2014年11月	15.6	100	100	100	97	97	93	90	70	3	0	0	0	8.9	4.0	10.2
2014年12月	8.9	100	100	97	97	97	94	87	65	0	0	0	0	8.6	3.5	9.3
2015年1月	8.3	100	100	100	100	100	90	81	74	0	0	0	0	8.9	6.5	9.8
2015年2月	8.7	100	100	100	100	100	100	100	93	61	0	0	0	9.9	7.0	10.8
2015年3月	11.7	100	100	100	100	100	100	97	90	81	52	0	0	10.7	8.2	11.8
2015年4月	16.6	100	100	100	100	100	100	100	100	77	67	33	0	11.1	9.0	12.7
2015年5月	20.6	100	100	100	100	100	97	97	97	84	71	6	6	12.0	6.8	13.0
2015年6月	21.9	100	100	100	100	100	100	100	100	89	79	57	25	11.9	9.3	13.3
2015年7月	25.4	100	100	100	100	100	100	97	97	90	84	65	26	11.9	7.3	13.2
2015年8月	28.4	100	100	100	100	100	97	97	97	84	68	3	3	11.8	6.7	13.0
2015年9月	23.8	100	100	100	100	100	100	96	79	64	39	0	0	10.2	7.0	11.8
2015年10月	20.3	100	100	100	100	100	100	100	97	55	0	0	0	10.0	8.3	10.8
2015年11月	16.4	100	100	100	100	90	90	77	67	0	0	0	0	8.6	5.3	9.8
2015年12月	12.1	100	100	100	100	100	100	97	55	0	0	0	0	8.9	7.7	9.3
2016年1月	8.8	100	100	100	100	100	100	94	68	0	0	0	0	9.0	7.7	9.7
2016年2月	10.5	100	100	100	100	100	96	96	89	52	0	0	0	9.8	6.0	10.8
2016年3月	13.5	100	100	100	100	100	97	97	97	90	58	0	0	10.8	6.8	11.8
2016年4月	17.4	100	100	100	100	100	97	97	93	80	70	40	0	11.1	6.5	12.7
2016年5月	20.5	100	100	100	100	100	100	97	90	90	71	52	6	11.5	7.8	13.2
2016年6月	22.8	100	100	100	100	100	97	90	87	77	67	23	3	10.8	6.5	13.0
2016年7月	27.0	100	100	100	100	100	97	97	97	97	84	61	6	11.8	6.3	13.2
2016年8月	28.3	100	100	100	100	100	100	97	97	97	69	21	0	11.2	7.0	12.7
2016年9月	25.2	100	97	97	97	93	93	90	80	60	10	0	0	9.6	2.3	11.7
2016年10月	21.2	100	100	100	100	100	94	94	68	29	0	0	0	9.3	6.7	10.8
2016年11月	15.6	100	100	100	100	100	100	100	50	0	0	0	0	8.8	8.7	9.2
暴露中の1日あたりの通電時間の割合(%)		100.0	99.8	99.7	99.2	98.3	96.5	93.5	84.2	56.9	37.7	21.6	3.3	10.4	2.3	13.3



### 4.3.1.3 復極試験結果

埋込み型の鉛照合電極を用いた復極試験の結果について、定期的に計測した各計測結果を表4.3、復極量とオフ電位の経時変化を図4.11に示す。また、外付け型の銅硫酸銅照合電極を用いて実施した復極試験に関し、調査箇所を図4.12、常時通電箇所の調査結果を図4.13、間欠通電箇所の調査結果を図4.14に示す。常時通電箇所では、表および図に示すように、G5の1ヶ月目の調査時以外、いずれも100mV以上の復極量を示した。

また、継続的な通電による防食効果で、G3およびG5とも初期の通電量よりも小さな通電量で100mV以上復極した。さらに、図4.13に示す外付け型照合電極による復極試験の結果でも、G5では6ヶ月目までは中央部で100mV以下、端部で30mV程度の復極量の小さな箇所が存在したが、継続的な通電による防食効果で、9ヶ月目以降は復極量が増加、いずれの箇所でも100mV以上の値を示した。間欠通電箇所のG1に関しても、図および表に示すように、3ヶ月目の調査時以外、いずれも分極量の設定値である150mV以上の復極量を示した。また、通電前の鋼材電位と比較し、通電後のオフ電位（E<sub>off</sub>）は1ヶ月目よりプラス方向に変化し、その後の調査でも通電前よりプラスの値を示した。これは、継続的な通電により鋼材表面の環境が改善されたことでアノード反応が抑制され、鋼材電位の変化として防食効果が表れたと考えられる。さらに、図4.14に示すように、外付け型の銅硫酸銅照合電極を用いて計測した結果についても、3ヶ月目までは中央部で150mV以下の復極量の小さな箇所が存在したが、6ヶ月目以降は端部以外150mV以上の値を示した。

なお、オフ電位の経時変化に関し、常時通電の施工箇所 G3 および G5 では、いずれも通電前のオフ電位と比較し、時折マイナスの値を示したが、間欠通電の施工箇所 G1 では常にプラスの値を示した。常時通電では通電中、常に鋼材表面では酸素が消費され、酸素の少ない状態となっている。鋼材の貴化現象である復極には酸素が必要であり、復極速度は酸素の拡散速度に律速である<sup>7,8)</sup>。そのため、常時通電の施工箇所では時折マイナスの値を示したのは、18時間の復極試験では十分な酸素が供給されておらず、完全に復極できていないためであると考えられる。一方、間欠通電の施工箇所では常にプラスの値を示したのは、①間欠通電の施工箇所 G1 の照合電極を埋め込んだ箇所は鋼材表面に若干腐食が発生しており、初期の鋼材電位が-200mVvsCSE と比較的低かったこと、②間欠通電では夜間に無通電状態となるため、鋼材の貴化現象に必要な酸素が常時通電より鋼材表面に供給され、その影響で鋼材電位がプラスに変化した可能性があることの2点の要因が考えられる。

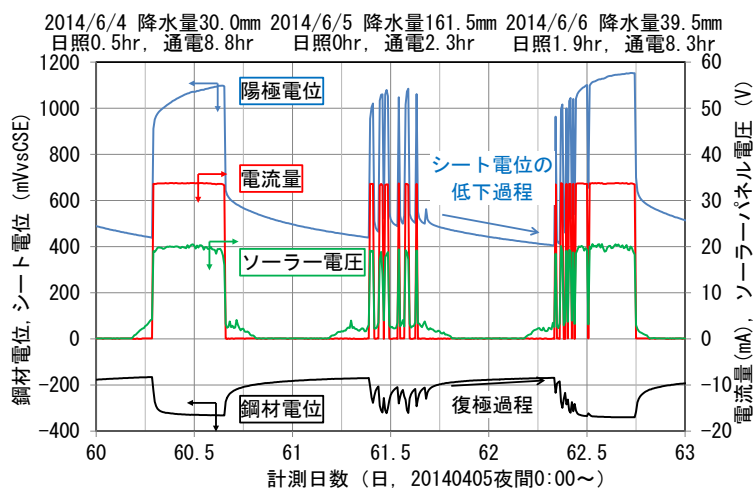


図 4.10 通電時間最低時の通電状況（道路橋）

表 4.3 復極試験の各計測結果

a)常時通電箇所													b)間欠通電箇所								
施工後の調査		G3						G5					施工後の調査		G1						
日目	温度 (°C)	電流 密度 mA/m <sup>2</sup>	Eon	Eio	Eoff	復極量	Eoff-Einitial	電流 密度 mA/m <sup>2</sup>	Eon	Eio	E18h off	復極量	Eoff-Einitial	日目	温度 (°C)	電流 密度 mA/m <sup>2</sup>	Eon	Eio	Eoff	復極量	Eoff-Einitial
			(1)	(2)	(3)	(3)-(2)	(3)-Einitial		(1)	(2)	(3)	(3)-(2)	(3)-Einitial				(1)	(2)	(3)	(3)-(2)	(3)-Einitial
			mV vs CSE						mV vs CSE							mV vs CSE					
			mV						mV							mV					
0	16	0.0	Einitial: -138.0						0.0	Einitial: -121.3					0	15	1.1	Einitial: -189.9			
31	18	1.3	-265.9	-264.7	-147.7	117.0	-9.7	0.7	-252.1	-248.3	-149.4	98.9	-28.1	40	21	1.1	-358.3	-352.1	-187.8	164.3	2.1
91	26	1.3	-268.8	-254.7	-138.3	116.4	-0.3	0.9	-252.4	-247.6	-140.8	106.8	-19.5	102	30	1.1	-288.7	-284.7	-150.1	134.6	39.8
163	28	1.3	-271.5	-257.1	-142.0	115.1	-4.0	0.9	-254.2	-246.4	-142.5	103.9	-21.2	194	20	1.7	-346.2	-338.2	-161.2	177.0	28.7
259	8	1.3	-308.4	-303.3	-136.8	166.5	1.2	0.9	-317.8	-315.6	-97.8	217.8	23.5	292	10	1.7	-400.2	-386.6	-172.2	214.4	17.7
349	12	1.0	-294.5	-291.8	-151.4	140.4	-13.4	0.7	-287.3	-286.3	-131.1	155.2	-9.8	439	22	1.7	-344.6	-336.6	-153.6	183.0	36.3
478	28	1.0	-239.9	-238.3	-127.6	110.7	10.4	0.7	-248.0	-247.7	-144.7	103.0	-23.4	534	23	1.7	-339.4	-334.8	-157.0	177.8	32.9
589	20	1.0	-272.1	-269.4	-129.6	139.8	8.4	0.7	-260.5	-259.9	-129.0	130.9	-7.7	672	14	1.7	-397.9	-382.9	-171.5	211.4	18.4
776	20	0.8	-265.6	-264.0	-136.0	128.0	2.0	0.7	-261.2	-260.8	-140.0	120.8	-18.7	858	34	1.7	-315.3	-307.1	-145.5	161.6	44.4
931	20	0.8	-262.0	-260.0	-128.0	132.0	10.0	0.7	-263.0	-262.0	-135.0	127.0	-13.7	949	20	1.7	-372.7	-359	-157.2	201.8	32.7
1029	11	0.8	-300.0	-297.0	-139.8	157.2	-1.8	0.7	-314.0	-313.0	-125.3	187.7	-4.0								
1176	24	0.8	-257.6	-255.8	-133.3	122.5	4.7	0.7	-261.3	-260.4	-147.8	112.6	-26.5								

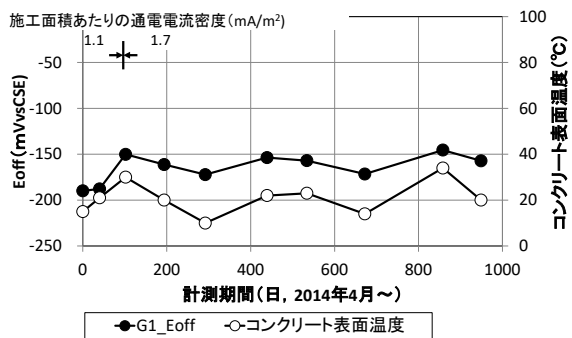
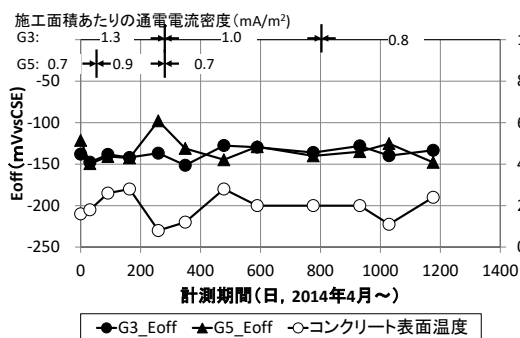
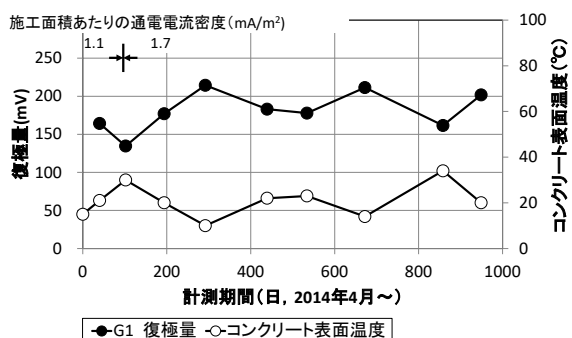
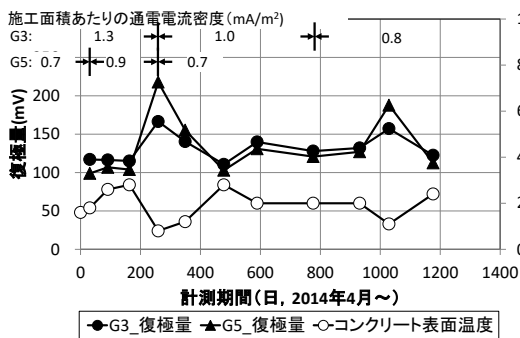


図 4.11 復極試験の経時変化

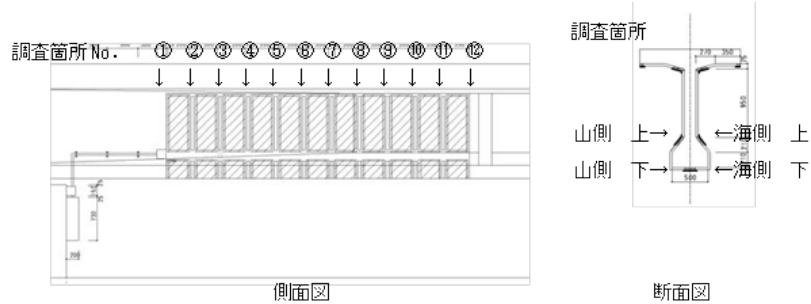
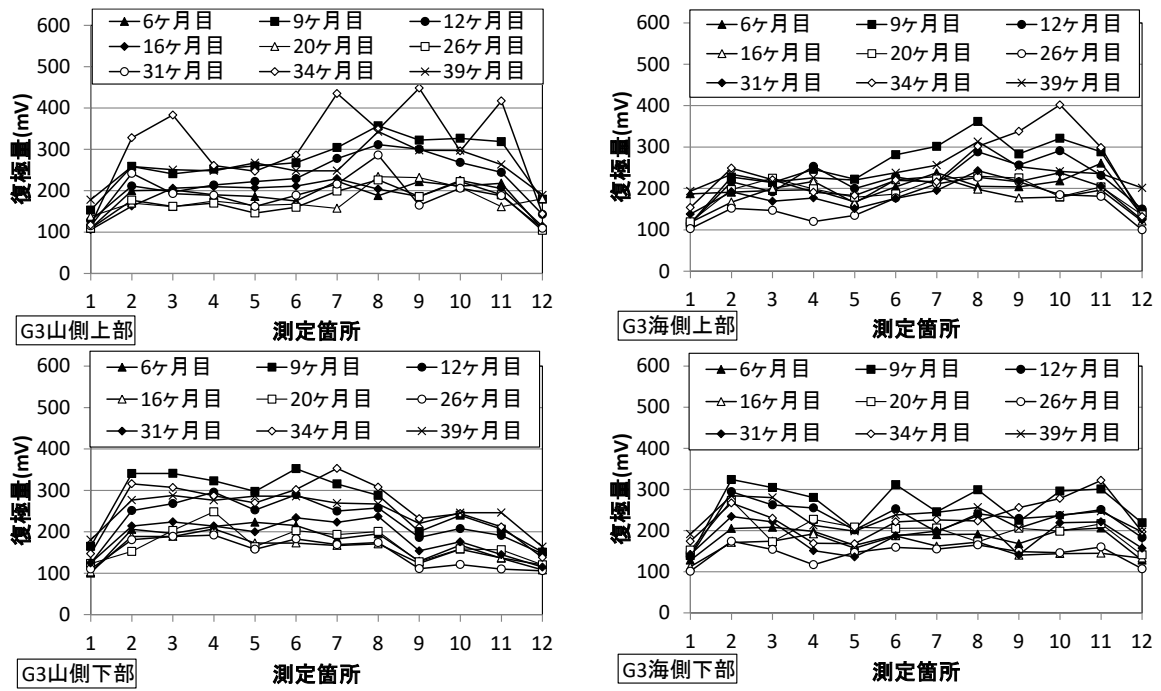
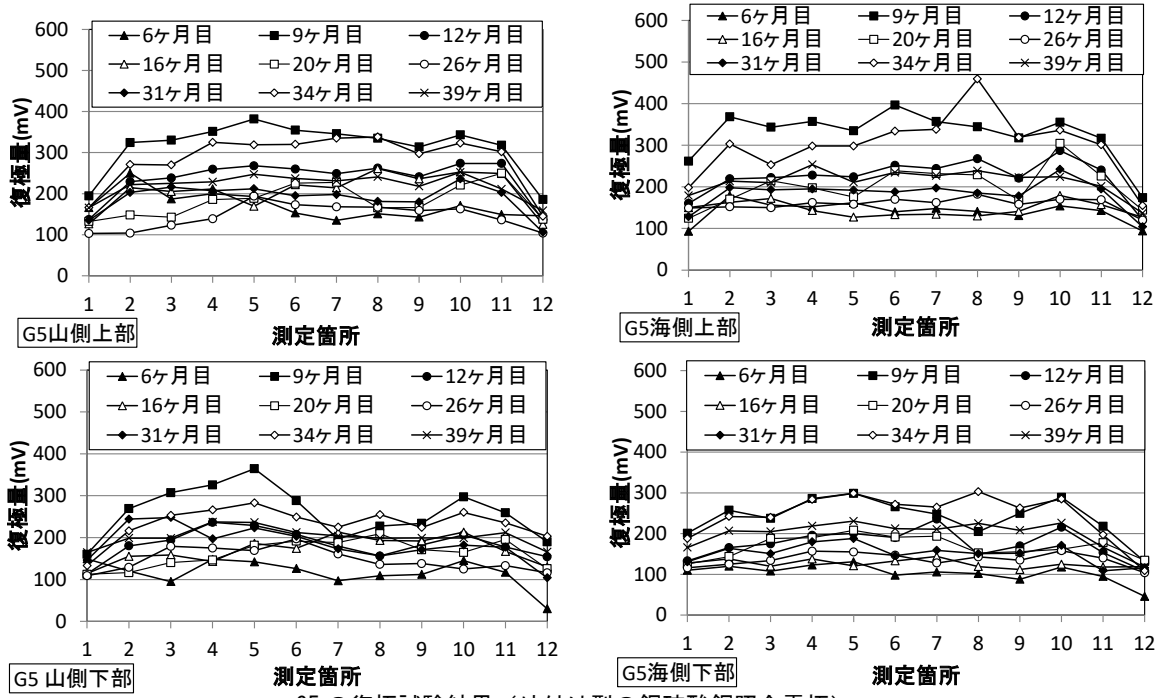


図 4.12 復極試験調査箇所 (外付け型の銅硫酸銅照合電極)

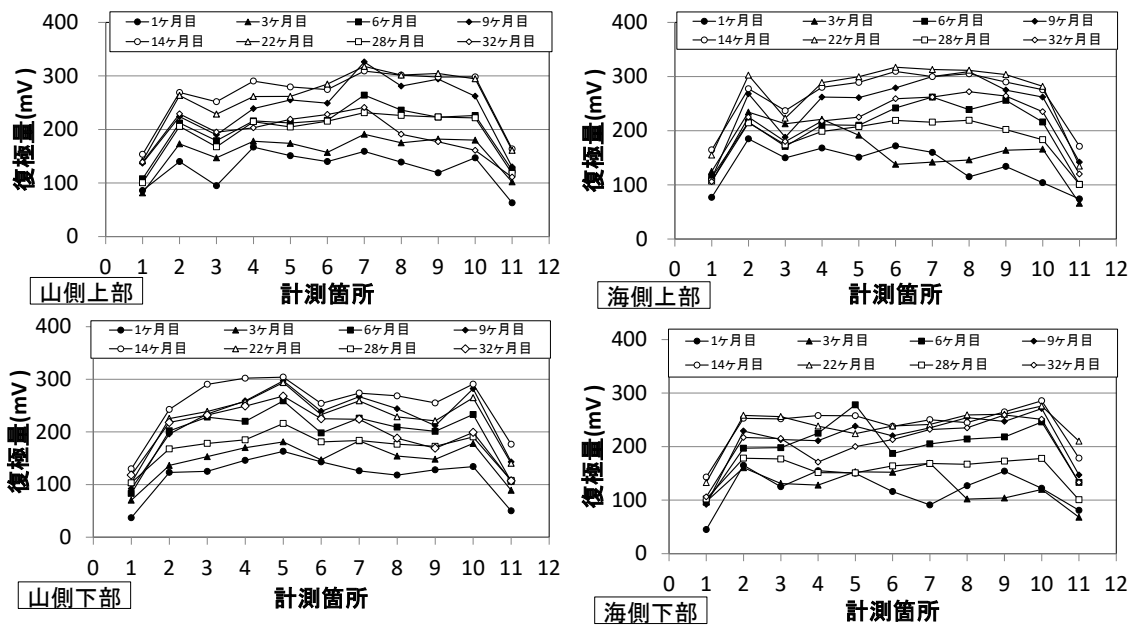


G3の復極試験結果（外付け型の銅硫酸銅照合電極）



G5の復極試験結果（外付け型の銅硫酸銅照合電極）

図 4.13 常時通電箇所の復極試験結果（外付型の銅硫酸銅照合電極）



G1の復極試験結果（外付け型の銅硫酸銅照合電極）

図 4.14 常時通電箇所の復極試験結果（外付型の銅硫酸銅照合電極）

#### 4.3.1.4 カソード分極試験結果

間欠通電の施工箇所G1では防食効果を確認するため、復極試験後のオフ電位を自然電位とし、その自然電位からカソード分極試験を実施した。そして、ターフェル関係の成立と酸素拡散の影響を考慮した分極量70~200mVの範囲で外挿したターフェル直線と自然電位との交点から鋼材の腐食速度を腐食電流密度として算出し、電気防食による防食効果を検討した。なお、カソード分極試験では陽極を対極、鋼材を作用電極とし、ガルバノスタットにて陽極から鋼材へ定電流を印加し、埋込み型の鉛照合電極を用いて鋼材電位を計測した。定電流の印加後、鋼材電位が安定した時点でカレントインタラプタ法によりIRドロップ分を取り除いたインスタントオフ電位（Einstant off電位）を計測した。その作業を数回繰り返すことで、電流密度とインスタントオフ電位をプロットし、カソード分極曲線を作成した。カソード分極試験により作成したカソード分極曲線の試験結果を図4.15、算出した腐食電流密度とターフェル勾配の経時変化を図4.16に示す。なお、道路橋の防食対象のコンクリート表面積は23m<sup>2</sup>であるが、防食電流の影響範囲にある鋼材の表面積は不明である。そのため、腐食電流密度は防食対象の躯体表面積あたりの通電電流量とした。

図4.16に示すように、間欠通電の施工箇所G1の腐食電流密度は、温度の上昇時に若干上昇しているが、通電後も同等の値であり、温度変化によって上下する値を示した。ただし、いずれの計測値についても腐食電流密度は小さく、最大でも0.0468μA/cm<sup>2</sup>であり、対象とする鋼材面積が施工面積の半分であったとしても、0.1μA/cm<sup>2</sup>未満の小さな値である。なお、コンクリート中の鉄筋の腐食速度に関し、CEB（ヨーロッパコンクリート委員会）の分極抵抗法による判定基準（案）<sup>9)</sup>によると、腐食速度0.1μA/cm<sup>2</sup>未満の鋼材は不活性の不動態状態である。また、前節の復極試験時のオフ電位も、すべての箇所でプラス方向に推移していた。よって、通電前の腐食電流密度と比べ、通電後の腐食電流密度は低下していないが、鋼材は防食状態を維持していると考えられる。なお、暴露期間0日の時

点です。すでに腐食電流密度が低いのは、鋼材電位の計測箇所である埋込み型の鉛照合電極の設置箇所が新たに電気防食用モルタルを打設した箇所であり、モルタル打設後7日程度でカソード分極試験を実施したためと考えられる。

一方、図4.16に示すターフェル勾配に関し、カソード分極試験時のターフェル勾配が大きくなった場合、カソード反応の分極抵抗が大きくなっていることを示している<sup>10),11)</sup>。一般にコンクリート内の鋼材のカソード反応は酸素の拡散速度に律速であり、コンクリートが湿潤化した場合、酸素の拡散係数は小さくなる。その結果、電気防食で酸欠状態となり、鋼材電位が卑化した事例が報告されている<sup>12)</sup>。つまり、カソード反応の分極抵抗が増加した場合、コンクリートが湿潤状態となり酸素の拡散係数が小さくなることが考えられる。一方、間欠通電の施工箇所のG1は、雨天時は雨掛かりする箇所であるが、通常は乾燥状態であるため、カソード勾配が徐々に大きくなるような傾向は示さなかった。

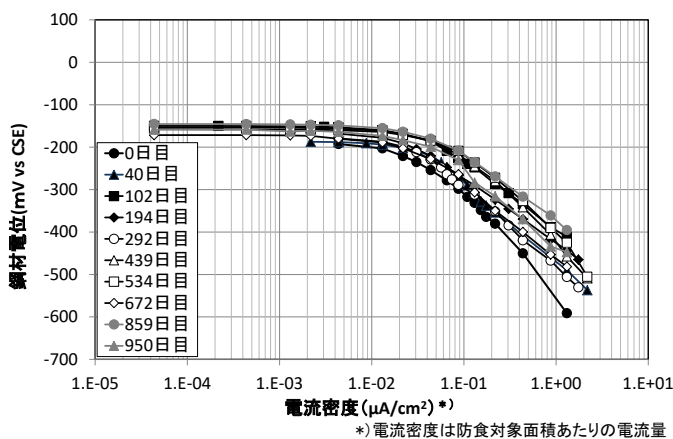


図 4.15 G1 のカソード分極試験の結果

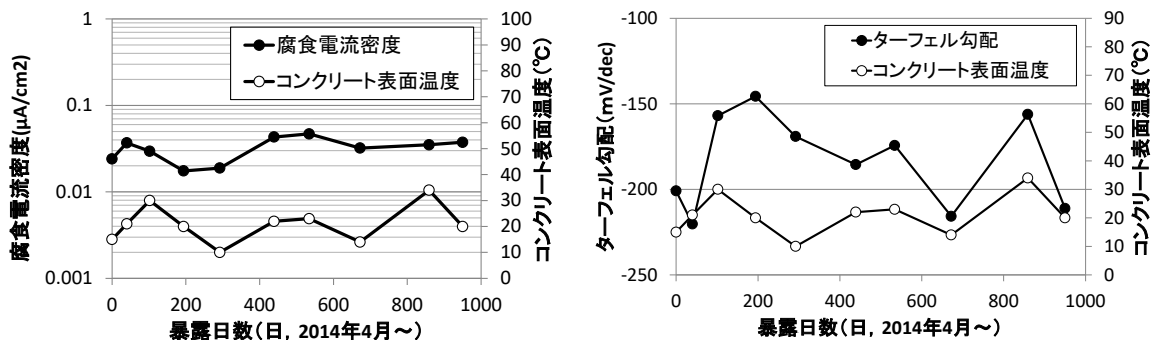


図 4.16 G1 のカソード分極試験の経時変化

#### 4.3.1.5 道路橋調査結果のまとめ

塩害環境下の道路橋の補修対策として、常時通電方式および間欠通電方式による電気防食工法を試験施工で適用した結果、以下のことが分かった。

- (1) データロガーで鋼材電位等を常時計測することで、間欠通電方式の場合、日中はオン電位、夜間はオフ電位の時間変化が追跡でき、電気防食による鋼材への影響を追跡できた。特にオフ電位は、初期の鋼材電位に比べ、プラス状態を維持できていた。これは、電気防食による鋼材表面の環境改善効果によって、鋼材のアノード分極抵抗が増加し、アノード反応を抑制できているためであると考えられる。
- (2) 間欠通電方式の鋼材電位に関し、オフ電位とオン電位の日々の変動量は、気温上昇時に減少、気温低下時に増加した。これは、気温変動による鋼材の腐食速度の影響を示していると考えら



れる。これは常時通電方式の復極試験でも同様の傾向を示しており、通電量の調整時期は、現場の腐食環境を把握した上で、腐食速度が上昇する時期に実施するのが最適であると考えられる。

- (3) 常時通電方式および間欠通電方式とも、オン電位に関し、コンクリート表面温度と相関のある変化を示した。また、いずれの施工箇所でも、最初の夏季を経過した段階より、決定係数 $R^2$ が上昇した。これは、オン電位にはIRドロップが含まれており、最初の夏季を経過する段階で、鋼材の分極特性や断面修復材の抵抗によるIRドロップが安定化し、鋼材電位と温度とが相関を示すように変化したためであると考えられる。
- (4) 間欠通電箇所の通電期間中、最低となる通電時間2.3時間を2日記録したが、通電しない日は発生しなかった。また、平均では10.4時間/日、90%以上の割合で日中8時間以上通電できていた。よって、適切なソーラーパネルを選定することで悪天候時を含め日々通電可能であることを確認した。
- (5) 復極試験時のオフ電位に関し、間欠通電箇所のオフ電位は防食前の初期電位に比べ、常にプラスの値を示した。一方、常時通電箇所では時折、マイナスの値を示した。復極には酸素が必要であり、常時通電箇所の場合、18時間の復極試験では十分な酸素が供給されておらず、完全に復極できていないためであると考えられる。一方、間欠通電の施工箇所では常にプラスの値を示したのは、①間欠通電の施工箇所G1の照合電極を埋め込んだ箇所は鋼材表面に若干腐食が発生しており、初期の鋼材電位が-200mVvsCSEと比較的低かったこと、②間欠通電では夜間に無通電状態となるため、鋼材の貴化現象に必要な酸素が常時通電より鋼材表面に供給され、その影響で鋼材電位がプラスに変化した可能性があることの2点の要因が考えられる。ただし、後述する飛沫帯の栈橋の結果を考慮すると無通電状態となるによる鋼材表面への酸素供給の影響であると考えられる。
- (6) カソード分極試験による間欠通電の施工箇所の腐食電流密度は、温度上昇時に若干上昇しているが、通電後も同等の値であり、温度変化によって上下する値を示した。通電前後での腐食電流密度に関し、極端な低下は見られないが、オフ電位は初期電位よりもプラスの値を示しており、鋼材は防食状態を維持していると考えられる。また、カソード分極曲線の傾きについて、施工箇所は雨掛かりする箇所であるが、湿潤化によるカソード勾配の上昇は見られなかった。

以上の結果から、今回実施した道路橋でのソーラーパネルのみを電流供給源とした間欠通電方式による電気防食では、日々防食電流が通電できており、常時通電方式と同様、防食後のオフ電位はプラスに変化し、鋼材表面の環境改善効果を含む、電気防食の防食効果を発揮していた。

## 4.3.2 栈橋の施工結果

### 4.3.2.1 常時計測結果

各施工個所の鋼材電位や通電量等を、データロガーを用い10分毎に計測した。鋼材電位は埋込み型の鉛照合電極および貼付け型の銀塩化銀照合電極を用い、図4.17に示す位置にて計測した。通電量は陽極の施工面ごと（側面-1，側面-2，下面）の分配量を確認するため、施工面ごとに回路を分離し、各回路に100Ωの抵抗を挿入し、その両端の電圧を計測することにより $V=IR$ により算出した。さらにコンクリートの表面温度および電源装置設置箇所の温度も熱電対を用いて計測した。各デー

タとも横軸の計測日数は通電を開始した2015年4月28日の午前0:00を起点とし、日数の記載箇所が、経過した日数の午前0:00とした。

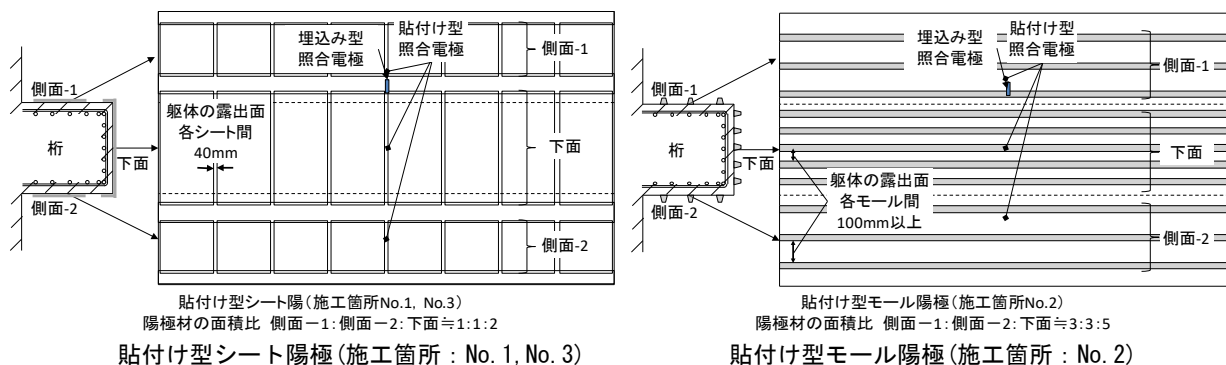


図4.17 調査箇所の概要図

### (1) 施工箇所No.1 (間欠通電, 貼付け型シート陽極)

施工箇所 No.1 の回路の電圧, 電流量, 鋼材電位に関する暴露期間中の経時変化, および 200~205 日のみ拡大した各測定結果を図 4.18 に示す。

#### 1) 電圧の経時変化

図 4.18 に示すように施工箇所 No.1 の出力はソーラーパネルの発電に依存し, 日々, 日の出とともに出力電圧が上昇し, 日の入りとともに出力が低下することを繰り返した。ただし, 逆方向へ電流が流れないようにダイオードを設置しており, 夜間も 1V 前後の電圧が生じている状態であった。日中の防食回路に掛かる電圧は当初 2V 程度で推移した後, 70~130 日目の 2016 年 7~8 月の気温上昇時に若干低下し, それ以降, 気温低下とともに上昇し, 300 日目の 2016 年 2 月には 6V 程度まで上昇した。その後, 気温上昇時に電圧が低下し, 気温低下時に電圧が再度 6V 程度まで上昇した。

気温低下で電圧が上昇している要因は, ①陰極である鋼材電位の低下あるいは鉄筋周囲の分極抵抗の変化, ②コンクリートの抵抗増加, ③陽極材周囲の濃度分極の変化による陽極電位の上昇が考えられる。①の鋼材電位の変化は 0.5V 未満であり, また, 防食効果で鉄筋周囲の抵抗が若干変動している可能性があるが, 数 V の変動を伴う抵抗の上昇が発生しているとは考えづらく, 主要因ではないと考えられる。②のコンクリートの抵抗増加は乾燥等で生じている可能性があるが, コンクリート面の剥き出し面積が大きく, 海水飛沫によるコンクリート抵抗が低下しやすい施工箇所 No.2 の貼付け型モール陽極の方が電圧の上昇が大きく, 剥き出し面積が小さく, 海水飛沫の影響が小さい貼付け型シート陽極の方が電圧上昇は小さいため, 主要因ではないと考えられる。③の陽極材周囲では通電時に酸素の生成反応 (例えば  $4OH \rightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^-$  等の反応) が生じており, 施工箇所 No.1 は間欠通電のため, 通電時は陽極材周囲で酸素の生成と拡散が生じ, 無通電時は酸素の拡散のみが生じていると考えられる。一方, 酸素の拡散係数はアレニウスの式より温度変化に依存しており, 気温が上昇すると大きくなり, 気温が低下すると小さくなる<sup>17)</sup>。よって, 気温上昇時は酸素が拡散しやすく, 気温低下時は酸素が拡散しづらくなる。つまり, 温度変化によって陽極周囲の酸素濃度が異なり, 気温低下時に酸素生成による酸素濃度上昇が拡散を上回ることによって, 濃度分極が高くなり, 気温低下時に電圧が上昇したと考えられる。

なお, 510~520 日目の 2016 年 9 月に回路の電圧が 1 V 以下に低下する異常が発生しているが, 同

期間の通電量や鋼材電位にも異常が発生していた。具体的には、夜間の電圧が 0V となり、0V で無通電のはずが通電し、鋼材電位は変則的にプラスに変化した。同期間は他の電気防食の調査点検が行われており、その影響で他の点検箇所から試験施工箇所へ電流が流入したことが原因であると考えられる。

## 2) 通電量の経時変化

各陽極からの電流量の分配は、経時変化で変動したが、100 日経過した段階で側面-1：側面-2：下面 $\approx$ 1.2:1:1.7、286 日以降は 1:1:1.7 でほぼ一定となり、陽極の面積比の 1:1:2 に近い値を示した。このように下面への電流量が側面の 1.7 倍となっているのは、施工箇所の下面が側面よりカブリが薄く、鋼材量が多いため、防食に必要な電流量が大きくなったためと考えられる。なお、214~220 日や 510 日前後の 10 数日間で発生した不連続は、電圧同様、他の点検箇所の影響と考えられる。

## 3) 鋼材電位の経時変化

200~205日のみを拡大した図に示すように、鋼材電位はいずれの計測箇所においても、日の出の通電開始とともに大きくマイナス方向へ分極し、日中は分極した状態となり、日の入りの通電停止とともに大きく復極した。また、夜間の通電停止後の復極過程では、電位はプラス方向にしか推移しておらず、自然電位に戻る前に、日の出とともにマイナス方向へ分極を開始した。つまり、通電停止後の鋼材電位の変化がプラス方向にしか推移していないのは、自然電位がより貴な値であることを表している。日々の通電停止後、完全に復極しておらず、マイナス方向に分極した状態であり、鋼材の腐食であるアノード反応が抑制された防食状態であることを表していると考えられる。日中と夜間の鋼材電位の差を比較すると、いずれの計測箇所でも分極量の目標値である150mV以上を満足している。また、防食回路の電圧が温度上昇で低下、温度低下で上昇したように、鋼材電位の夜間と昼間との変化量についても、150日目以降の温度低下に伴い変化量が増大し、280日以降の温度上昇に伴い減少した。ただし、温度上昇に伴い変化量は減少したが、夜間のオフ電位は貴化する傾向を示した。つまり、鋼材自体の自然電位は初期に比べ貴化しているが、復極に時間を要するため、温度低下時の日中の変化量が大きいと復極後の値が小さくなり、気温上昇時の変化量が小さいと、夜間に復極するため復極後の値が貴になっていると考えられる。また、温度は酸素の拡散速度に影響するため、復極するための酸素供給速度が温度上昇時の方が大きいこともその一因であると考えられる。なお、鋼材電位に関し、510日以降で貼付け型の銀塩化銀照合電極の損傷と考える異常が発生した。そのため、それ以降は埋込み型照合電極のみで計測した。

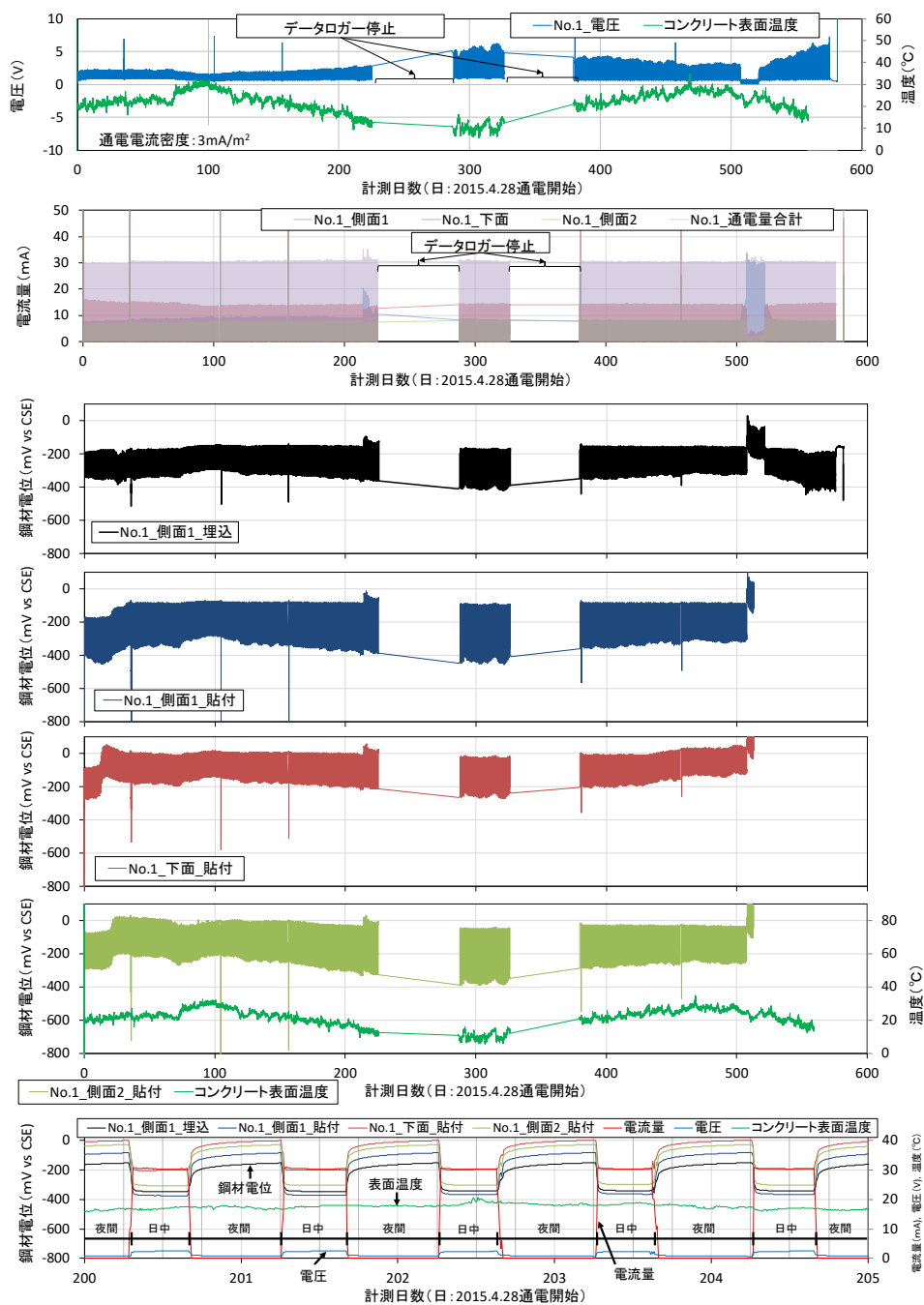


図 4.18 施工箇所 No. 1 の計測結果

(2) 施工箇所No. 2 (常時通電, 貼付け型モール陽極)

施工箇所 No.2 の回路の電圧, 電流量に関する暴露期間中の経時変化の測定結果を図 4.19 に示す。

1) 電圧の経時変化

図4.19に示すように, 回路の電圧は通電開始直後と比較し, 徐々に高くなり, 225日目の2015年12月10日の調査では8V程度, 286日目の2016年2月9日の調査では11V程度にまで上昇した。冬季に電圧

が上昇した要因は、鉄筋周囲の分極抵抗の変化やコンクリートの抵抗増加も考えられるが、施工箇所No.1の電圧の経時変化で記したように陽極材周囲の濃度分極の影響により陽極材電位が上昇したことが主であると考えられる。

ただし、施工箇所No.2の通電電流量は、当初、比較のため、施工箇所No.1の分極量150mV時の電流量（通電電流密度:3mA/m<sup>2</sup>）に設定しており、常時通電で必要な分極量100mV時の電流量よりも過剰な防食電流を通電しており、より顕著に電圧が上昇したと考えられる。そこで、286日目の調査で、施工箇所のNo.2とNo.3は、通電電流密度を3mA/m<sup>2</sup>から1.35mA/m<sup>2</sup>へ変更した。その結果、その後の調査では、286～320日付近の気温低下時でも6V程度、380日以降の気温上昇時は5V以下の値を示すまで電圧が低下した。しかし、520日以降の気温低下時、再度、電圧が10V付近まで上昇した。気温低下による陽極周囲の酸素拡散速度の影響による濃度分極の影響も含まれていると考えられるが、通電電流密度は1.35mA/m<sup>2</sup>に低下させており、上記に示した原因とは、別の要因であると考えられる。後述する電流量の経時変化から、施工箇所No.2ではコンクリートの露出面積が大きいため、経時変化でコンクリートが湿潤化し、施工部位ごとの電流の偏りが発生した。また、520日前後で電流の偏りはほぼ変化していないにもかかわらず、520日以降、鋼材電位は大きく低下した。また、後述するコンクリートの露出面積の小さい施工箇所No.3の電圧は電流密度の調整後、それほど上昇していない。このことから、520日以降の電圧上昇の原因は、気温低下による影響だけでなく、コンクリートの湿潤化により酸素の供給速度が低下したことで、濃度分極による抵抗がより高くなったことが原因と考えられる。

## 2) 通電量の経時変化

図 4.19 に示すように、電源装置の定格内であるが、昼間と夜間で電流量が 2mA 程度変動した。この変動は、用いた定電流電源装置がダイオードの基準電圧で電流量を制御しており、その基準電圧が電源装置の設置箇所の温度変化で若干変動しているためである。ただし、電流量の変動は、電源装置の定格の範囲内（最大出力 1A，電流安定度：最大出力±1%）である。

各陽極からの電流の分配は、当初、側面-1：側面-2：下面≒2.3：1：1.5であったが、286日目(2016年2月9日)の調査では17.6：1：1.4となり、側面-1の電流が大きくなった。電流調整後、380日目(2016年5月12日)の調査では13.5：1：1.1、456日目(2016年7月28日)の調査では12.3：1：1.1となり、若干分配量の差は小さくなったが、以前として側面-1に電流が偏っていた。

側面-1の電流の分配が大きい原因は、①側面-1が写真4.1に示すように鋼材腐食による躯体の浮きや塗膜の割れを伴う再劣化が発生していた箇所であるため、②コンクリートの露出面積が施工箇所No.1やNo.3より大きく、コンクリートの湿潤化による電気抵抗の低下が生じやすいため、③図4.4に示すように側面-1のかぶりは他の施工面より薄い30mmとなっており、長期的に他の部位より電流が流れやすくなっているためと考えられる。ただし、プラスチック皮膜で覆われた陽極を用いており、数時間以内での急激な電圧低下や電流の極端な偏りは生じておらず、陽極の通電に対



写真 4.1 施工前の状況  
(施工箇所 No. 2, 側面-1)



する、波しぶき等の海水による直接的な影響は生じていないと考えられる。これは、海水が陽極の通電に影響した場合、海水の抵抗はコンクリートより低く、電流は陽極から躯体表面の水膜を通じ、直ちに電食のように流れやすい方へ通電し、数時間以内での急激な電圧低下や電流の極端な偏りが発生すると考えられるためである。

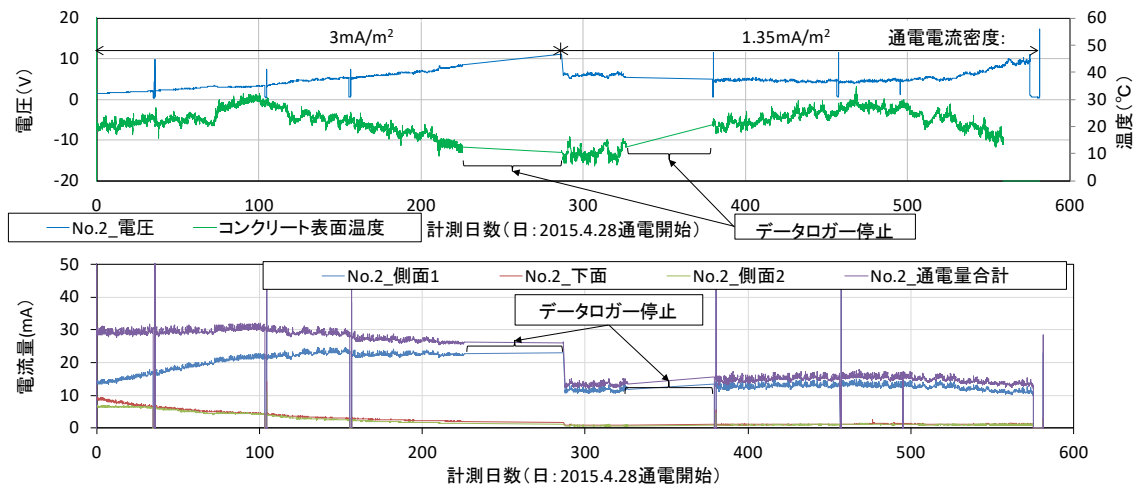


図 4.19 施工箇所 No. 2 の計測結果

### (3) 施工箇所No. 3

施工箇所 No.3 の回路の電圧, 電流量に関する暴露期間中の経時変化の測定結果を図 4. 20 に示す。

#### 1) 電圧の経時変化

図4. 20に示すように回路の電圧は通電開始直後と比較し、徐々に高くなり、225日目の2015年12月10日には11V程度、286日目の2016年2月9日には17V程度にまで上昇した。気温低下時に電圧が上昇した要因は、鋼材周囲の分極抵抗の変化やコンクリートの抵抗増加も考えられるが、前述したように陽極材周囲の変化による濃度分極の影響による陽極材電位の上昇が主であると考えられる。施工箇所No.2では286日目では11V程度に対し、施工箇所No.3の方が17Vと高い値を示したのは、施工箇所No.3の方がコンクリートの露出面積が小さく、酸素の拡散係数が小さいためと考えられる。

ただし、施工箇所No.3の電流量は、比較のため、施工箇所No.1の分極量150mV時の電流量(通電電流密度:3mA/m<sup>2</sup>)に設定したため、常時通電で必要な分極量100mV時の電流量よりも過剰な防食電流が通電しており、より顕著に電圧が上昇したと考えられる。

そこで、286日目の調査で、施工箇所No.2とNo.3は、通電電流密度を3mA/m<sup>2</sup>から1.35mA/m<sup>2</sup>へ変更した。その結果、施工箇所No.3の電圧は、その後の調査で、286～320日付近の気温低下時で9V程度、380日以降は7V以下の値を示すまで、電圧が低下した。

#### 2) 電流量の経時変化

図4. 20に示すように、施工箇所No.2と同様の理由により、電源装置の定格内であるが、昼間と夜間で電流量が2mA程度変動した。

各陽極からの電流量の分配は、当初、側面-1 : 側面-2 : 下側 ≒ 1.1:2:1と側面-2は側面-1の約2倍の値を示したが、100日以降徐々にその差が小さくなり、380日目(2016年5月12日)には1.1:1.6:1、456日目(2016年7月28日)では1.1 : 1.5 : 1となり、分配量の差が小さくなった。一方、図4. 4に示す施工前の

調査から側面-1の配力鉄筋のかぶり厚は75mmと他の施工箇所No.1やNo.2と比較し大きくなっており、反対側の側面-2のかぶり厚が他と比べて若干薄くなっている可能性がある。その結果、当初、側面-2の防食に必要な電流が大きく、電流量の分配割合が大きくなったと考えられる。しかし、100日以降、その差が小さくなっており、電気防食により鋼材周囲の環境や鋼材自体が改善され、その効果が分配割合の差の減少として現れてきた可能性が考えられる。

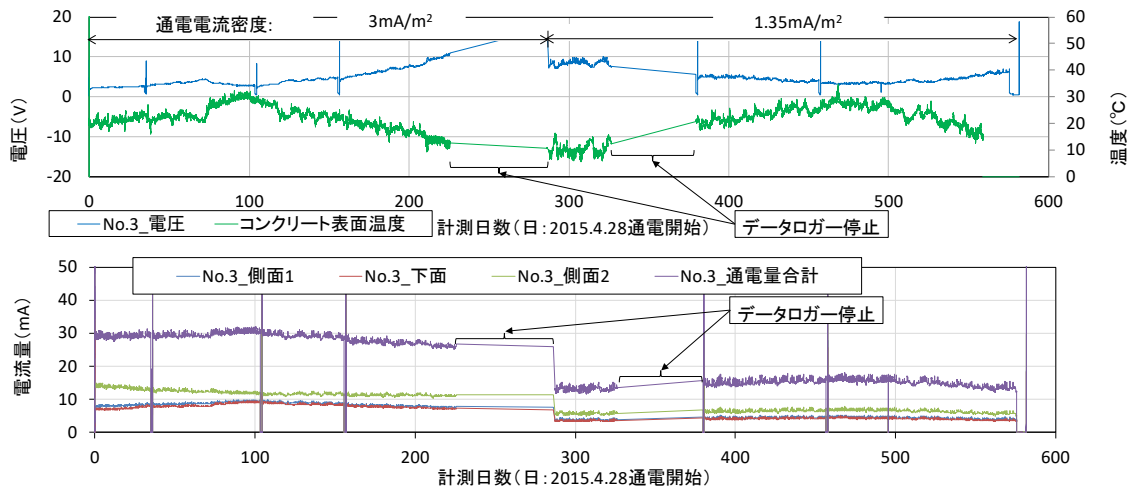


図 4.20 施工箇所 No. 3 の計測結果

#### (4) 鋼材電位とコンクリート表面温度

各施工箇所の側面-1に設置した埋込み型の鉛照合電極で計測した鋼材電位の経時変化に関し、コンクリート表面温度との関係を図4.21に示す。図に示すように、道路橋の常時計測結果同様、いずれの箇所に関しても、鋼材電位のオン電位はコンクリート表面温度と連動した変化を示した。各施工箇所の鋼材電位とコンクリート表面温度との関係と関係を図4.22に示す。オン電位委はIRドロップが含まれており、IRドロップは通電量により変化する。そのため、鋼材電位とコンクリート表面温度との関係をプロットするにあたり、通電量ごとに色を変化させた。また、通電量が同じでも、グラフに変化点が生じた場合、その前後で近位する鋼材電位とコンクリート表面温度の対象を変化させた。なお、常時通電箇所のNo.2とNo.3は同時刻に計測した鋼材電位とコンクリート表面温度であるが、間欠通電箇所No.1は、日中の鋼材電位の最小値をオン電位、夜間の復極量の最大値をオフ電位とし、コンクリート表面温度は24時間の平均値を用いた。図に示すように常時通電の施工箇所No.2では、決定係数 $R^2$ は当初、0.0863と非常に低い値であったが、100日以降は非常に相関のある0.9を上回る値を示した。また、常時通電の施工箇所No.3や間欠通電の施工箇所No.1のオン電位に関しても、100日前後で決定係数 $R^2$ が上昇した。図4.21に示すように暴露100日は、暴露開始後の最初の夏季を過ぎた段階からである。つまり、通電開始後、最初の夏季を経過する段階で、鋼材の分極特性やIRドロップが安定化し、鋼材電位と温度とが相関を示すように変化したと考えられる。特に施工箇所No.2の側面-1は、写真4.1に示した鋼材腐食が発生していた箇所であったため、当初100日までの決定係数 $R^2$ は非常に低い値を示したと考えられる。

なお、復極途中のため温度との相関性は劣ると考えるが、IRドロップを含まない間欠通電箇所のG1のオフ電位についても、100日前後で鋼材電位の温度特性が変化した。オフ電位はIRドロップを含

んでいないため、これは、通電開始後の最初の夏季を過ぎた段階の100日前後で鋼材の分極特性が変化したと考えられる。

これらの電気防食後の鋼材電位とコンクリート表面温度との関係は、道路橋でも同じような傾向を示しており、防食効果の確認手法の一つとしての可能性が考えられる。

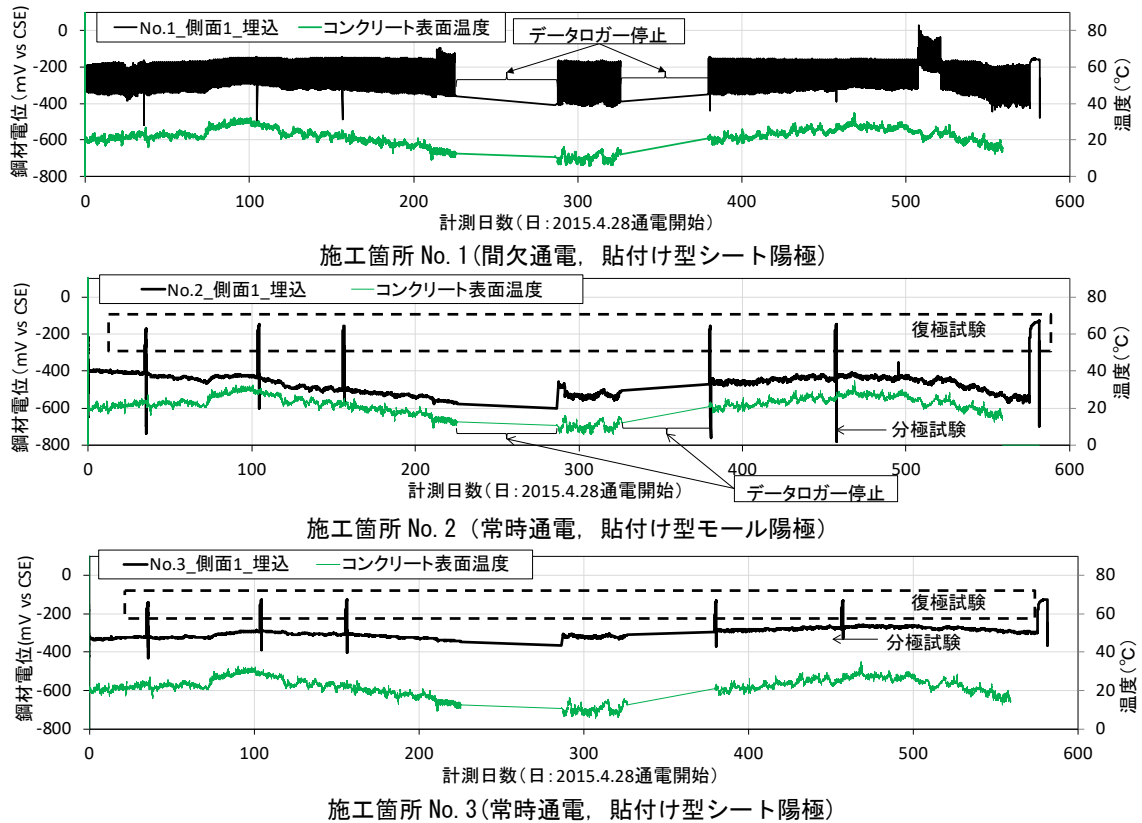


図 4.21 埋込み型照合電極

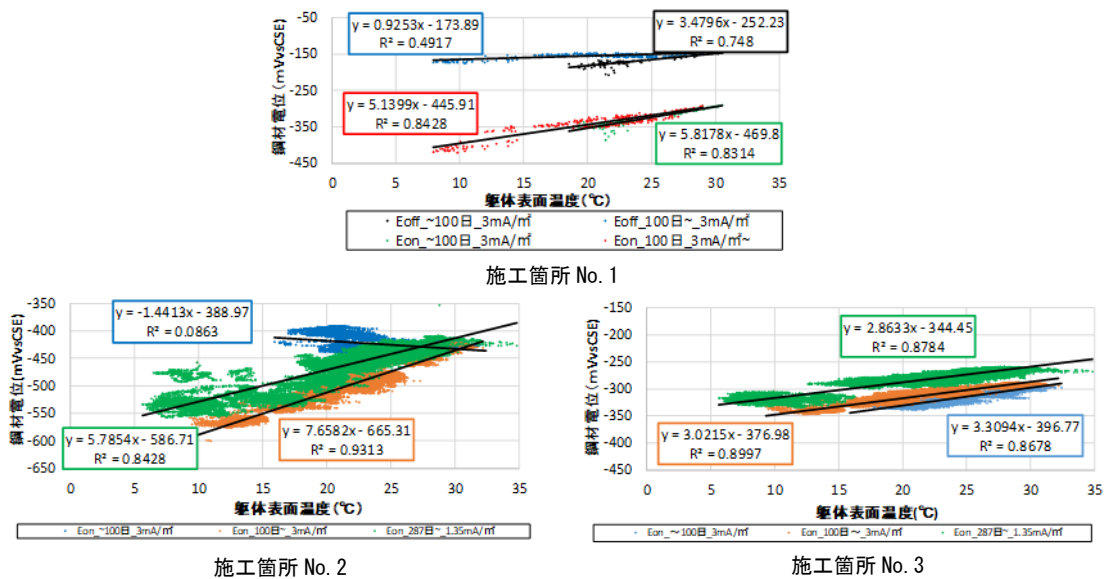


図 4.22 鋼材電位と躯体表面温度

## (5) 常時計測結果に関する考察

### 1) コンクリートの湿潤化について

使用した陽極材はプラスチック皮膜で覆われているため、陽極の通電に対する、波しぶき等の海水の影響による短時間での電圧低下や電流の偏りは発生していない。しかし、施工面ごとの電流量の差を長期的に比較すると、コンクリートの露出面積が小さい施工箇所 No.1 や No.3 では小さくなるのに対し、露出面積の大きい No.2 では大きくなった。また、通電調整で通電電流密度を小さくした常時通電による施工箇所 No.2 と No.3 に関し、コンクリートの露出面積の小さい No.3 は電圧が低下したのに対し、露出面積の大きい No.2 は、気温低下時に再度、通電調性前付近の電圧に上昇した。これは、施工箇所 No.2 では露出面積が大きいいため、コンクリートが湿潤状態となり、酸素の拡散速度が変化し、濃度分極による抵抗が増加しているためであると考えられる。

### 2) 通電方法による回路の電圧への影響

暴露期間を通じ、間欠通電の方が常時通電より回路の電圧が低くなった。これは、①常時通電の方が防食効果の発揮が早く、鋼材表面の状態が改善されたことによる抵抗分極が増加したことによる影響、あるいは、②陽極材表面での陽極反応による生成物の蓄積等で陽極材の濃度分極が増加したことによる影響等が考えられる。後述する施工箇所 No.1 と No.3 の復極試験とカソード分極試験の結果を比較すると防食効果は同等と考えられることから、間欠通電では夜間の不通電時に陽極反応による生成物の蓄積等が解消され、濃度分極による電圧の上昇が抑制されたためと考えられる。ただし、本検討では、当初、各施工箇所の分極量の下限値のみ設定し、比較のため同一の電流を通電した。よって、常時通電では過度な電流を通電しており、その影響でも電圧が高くなったと考えられる。

#### 4.3.2.2 暴露期間中の通電時間

道路橋同様、ソーラーパネルが所定の性能を発揮できているかを確認するため、常時計測した通電量から設定電流量の通電時間を算出し、ソーラーパネルが日々通電できていたかを確認した。施工箇所の月別の通電時間の割合と平均気温の関係を図4.23、暴露期間中の通電時間を表4.3に示す。表に示すように、設定電流量の通電日数は雨天や季節で変動したが、全暴露期間を通じ、日々6時間以上通電できており、全日数の97.3%では8時間以上、89.4%では9時間以上通電できていた。また、平均すると1日あたり11.2時間通電できていた。試験施工箇所の復極試験時の通電停止期間は23時間程度で実施しており、オフ電位は鋼材電位がプラスに推移した状態の自然電位に戻る前の状態で計測している。そこで、575～581日目（2016年11月24日～11月30日）の調査時、自然電位に戻るまでの時間を確認するため、長期間通電を停止させて復極試験を実施した。試験結果を図4.24に示す。図4.24に示すように、通電停止後、約62時

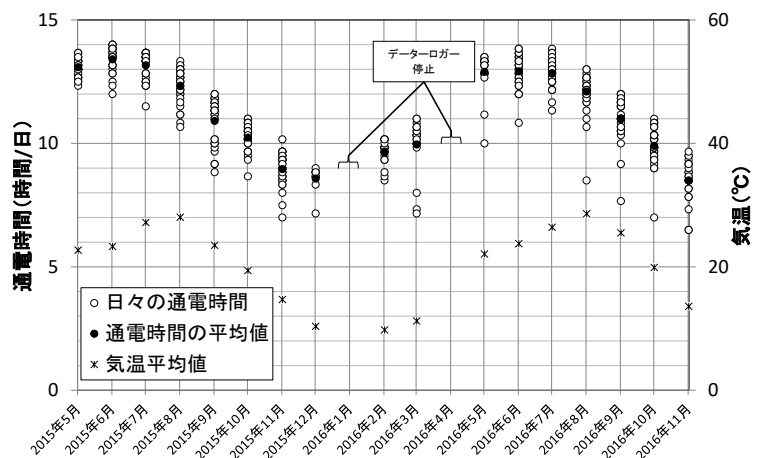


図 4.23 月別の通電時間と平均気温との関係

間経過するまで、鉄筋電位は上昇を続けた。つまり、62時間以内に通電を再開すれば、鋼材電位は自然電位よりも卑の状態であるため、防食状態にあると考えられる。このことから、試験施工箇所では日々通電できており、夜間の通電停止後、24時間以内に必ず通電を再開できているため、常に防食状態を維持していると考えられる。

前節の通電前供試体の分極抵抗法による腐食電流密度の計測結果同様、鋼材腐食は電気化学反応であり、鋼材の腐食速度は温度上昇時に大きくなる傾向にある。つまり、気温の低下した冬季よりも気温の上昇した夏季の方が鋼材の腐食速度が大きくなる傾向にある。図に示すように、ソーラー

パネルによる通電時間は、気温の低下した冬季よりも、気温の上昇した夏季や春秋の方が通電時間が長く、鋼材の腐食速度増加時に通電時間が長い結果となっている。つまり、ソーラーパネルの発電時間は日照時間に依存しており、日本の場合、日照時間は気温が高くなる夏季や春秋の方が冬より長く、ソーラーパネルを電流供給源として用いることは理にかなっていると考えられる。

表 4.3 暴露期間中の通電時間

年月	平均気温 (°C)	月別の1日あたりの通電時間の割合(%)													通電時間(h/日)		
		4h/日	5h/日	6h/日	7h/日	8h/日	9h/日	10h/日	11h/日	12h/日	13h/日	14h/日	平均	最低	最高		
2015/5	22.7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	74	0	13.1	12.3	13.7	
2015/6	23.3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	82	11	13.4	12.0	14.0	
2015/7	27.2	100	100	100	100	100	100	100	100	97	68	0	0	13.2	11.5	13.7	
2015/8	28.0	100	100	100	100	100	100	100	100	93	76	24	0	12.3	10.7	13.3	
2015/9	23.5	100	100	100	100	100	97	83	67	7	0	0	0	10.9	8.8	12.0	
2015/10	19.4	100	100	100	100	100	97	79	7	0	0	0	0	10.2	8.7	11.0	
2015/11	14.7	100	100	100	100	93	57	3	0	0	0	0	0	9.0	7.0	10.2	
2015/12	10.4	100	100	100	100	89	11	0	0	0	0	0	0	8.5	7.2	9.0	
データロガー停止																	
2016/2	9.8	100	100	100	100	100	84	26	0	0	0	0	0	9.6	8.5	10.2	
2016/3	11.2	100	100	100	100	89	84	79	11	0	0	0	0	10.0	7.2	11.0	
データロガー停止																	
2016/5	22.1	100	100	100	100	100	100	100	94	89	67	0	0	12.9	10.0	13.5	
2016/6	23.7	100	100	100	100	100	100	100	97	97	53	0	0	12.9	10.8	13.8	
2016/7	26.7	100	100	100	100	100	100	100	100	93	52	0	0	12.8	11.3	13.8	
2016/8	28.6	100	100	100	100	100	97	97	94	74	6	0	0	12.1	8.5	13.0	
2016/9	25.5	100	100	100	100	97	97	93	67	10	0	0	0	11.0	7.7	12.0	
2016/10	19.9	100	100	100	100	97	97	52	3	0	0	0	0	9.9	7.0	11.0	
2016/11	13.6	100	100	100	91	78	35	0	0	0	0	0	0	8.5	6.5	9.7	
暴露中の1日あたりの通電時間の割合(%)		100.0	100.0	100.0	99.6	97.3	89.4	75.7	59.3	47.0	26.5	0.7		11.2	6.5	14.0	

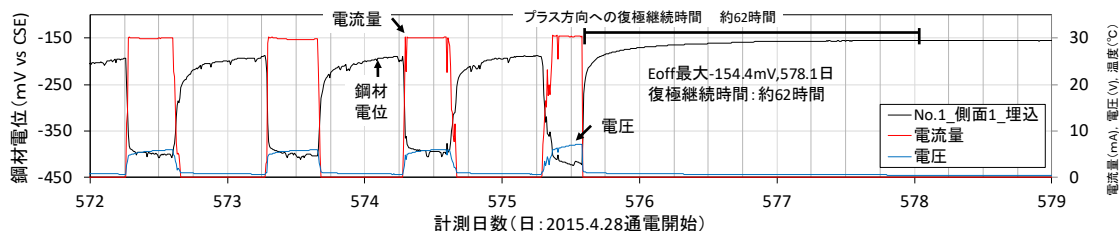


図 4.24 長期間での復極試験

#### 4.3.2.3 復極試験結果

各施工箇所の復極試験の結果を表4.4、復極量とオフ電位の経時変化を図4.25、図4.26、図4.27に示す。復極量はカレントインタラプタ法によりIRドロップ分を取り除いたインスタントオフ電位とオフ電位の差から算出した。復極量の目標は、間欠通電箇所では150mV以上、常時通電箇所は100mV以上である。

##### (1) 施工箇所No.1 (間欠通電, 貼付け型シート陽極)

図4.25に示すように、夏季に実施した103日目の調査では、34日目より復極量が小さくなり、目標とする150mVを下回る箇所が発生した。しかし、155日目以降の調査では、いずれの箇所でも、復極量150mV以上を満足し、1年後の夏季の456日目の調査でも、復極量150mV以上を満足した。

103日目の調査で復極量が低下したのは、通電前の通電調整をコンクリート表面温度が20°C程度の時期に実施し、防食初期の温度が上昇した夏季に調査したため、温度上昇による鋼材腐食速度の増加の影響で復極量が小さくなったと考えられる。鋼材腐食は電気化学反応であり、一般に鋼材の腐



食速度は温度上昇時に大きくなる。よって、分極量を同一とする場合、通電調整時の温度によって、必要な電流量が異なる。一方、電気防食を継続すると、鋼材表面では、①電気泳動による塩化物イオン量の減少、②酸素と水の電気化学反応による水酸化物イオンの増加（pH上昇）等の改善効果が生じる<sup>13)~16)</sup>。しかし、鋼材表面の改善効果が不十分な防食初期に温度が上昇すると、間欠通電では夜間に無通電状態があるため、改善効果の発現が遅く、その影響で復極量が小さくなったと考えられる。事実、間欠通電により防食した施工箇所No.1では、34日目と103日目の復極量を比較すると、いずれの測定箇所でも低下しており、その低下量は30~70mV程度の値を示した。一方、図4.27に示すように同じシート陽極を用いて常時通電で防食した施工箇所No.3でも復極量の低下が発生したが、その低下量は12mV程度と小さな値であった。よって、間欠通電では、常時通電より、温度の上昇時の腐食速度増加の影響を受ける可能性があるため、その影響を考慮した設計が必要である。

ただし、155日目以降の調査では、図4.25に示すようにいずれの箇所でも復極量150mV以上を満足し、通電前と比較した通電後の鋼材電位（E<sub>off-Einitial</sub>）も貴化しており、鋼材自体は電気防食により、腐食となるアノード反応が抑制され、腐食抑制効果が現れてきていると考えられる。

#### (2) 施工箇所No.2（常時通電，貼付け型モール陽極）

図4.26に示すように①側面-1の埋込み型の鉛照合電極と貼付け型の銀塩化銀照合電極で計測している箇所では、いずれの調査段階でも復極量100mV以上を満足した。しかし、下面や側面-2の貼付け型の銀塩化銀照合電極で計測している箇所では、経時的な復極量の低下が見られた。これは図4.19で示したように電流の偏りにより側面-2と下面の通電電流量が減少しているためと考えられる。ただし、図4.26のオフ電位の経時変化に示すように、通電前と比較した通電後の鋼材電位（E<sub>off-Einitial</sub>）は、いずれも貴化しており、電気防食の継続により、鋼材腐食であるアノード電流が抑制され、鋼材電位にも防食効果が表れてきていると考えられる。

なお、図4.26に示すように、286日目に電流量をそれまでの3mA/m<sup>2</sup>から1.35mA/m<sup>2</sup>へ半分以下とした影響で、その後の調査では若干復極量が減少している。しかし、復極後の鋼材電位は貴化しており、電気防食の継続により鋼材周囲の環境および鋼材自体が改善され、防食効果を維持していると考えられる。

#### (3) 施工箇所No.3（常時通電，貼付け型シート陽極）

図4.27に示すように、286日目に電流量を3mA/m<sup>2</sup>から1.35mA/m<sup>2</sup>へ減少した影響で、その後の調査では復極量が減少している。しかし、復極量は、いずれの箇所でも100mV以上を満足し、防食効果を維持していると考えられる。若干、通電前と比較した通電後の鋼材電位（E<sub>off-Einitial</sub>）が卑化した値になっている箇所があるが、これは鋼材の復極に必要な酸素の供給が不足しており、復極試験の23時間程度では復極しきれていないためと考えられる。図4.27に示す復極量と復極後の電位にもその影響が現れており、286日目、379日目、456日目を比較すると、通電電流量の減少の影響で復極量は減少しているが、通電後の鋼材電位はいずれも貴化している。これは、電気防食では通電中、鋼材周囲で酸素の消費反応（例えば $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ 等の反応）が生じており、286日目までの電流量では、103~286日目にかけていずれの箇所でも復極量が増加したが、通電後の鋼材電位は卑化を示す箇所が存在しており、それらの箇所では鋼材周囲の酸素が不足した状態となっていたことを示している。その後、286日目に電流量を小さくしたことで、380日目や456日目では復極量が低下したが、復極後の電位は貴化したと考えられる。

なお、電気防食では一定期間ごとに通電調整が必要であるのは、このように電気防食の継続で、鋼材表面の状態が変化するためである。つまり、鋼材周囲の酸素が不足するような通電量を継続しつづけると、鋼材電位はさらに卑化状態となり、過防食状態となる場合があるためである。

表 4.4 暴露期間中の通電時間

No.1 間欠通電、貼付け型シート陽極

施工後調査			電流密度 mA/m <sup>2</sup>	側面-1.埋込み型鉛照合電極					側面-1.貼付け型銀塩化銀照合電極					下面.埋込み型鉛照合電極					側面-2.貼付け型銀塩化銀照合電極				
ヶ月目	日	温度 (°C)		Eon	Eio	Eoff	復極量	Eoff-Einitial	Eon	Eio	Eoff	復極量	Eoff-Einitial	Eon	Eio	Eoff	復極量	Eoff-Einitial	Eon	Eio	Eoff	復極量	Eoff-Einitial
				①	②	③	③-②	③-Einitial	①	②	③	③-②	③-Einitial	①	②	③	③-②	③-Einitial	①	②	③	③-②	③-Einitial
0	0	20	—	Einitial: -186.8					Einitial: -158.5					Einitial: -64.5					Einitial: -47.5				
1	34	24	3.0	-332.7	-329.8	-156.3	173.5	30.5	-328.2	-303.5	-57.6	245.9	100.9	-159.7	-136.6	32.1	168.7	96.6	-196.2	-160.6	44.9	205.5	92.4
3	103	29	3.0	-287.9	-280.8	-137.4	143.4	49.4	-276.3	-232.7	-55.3	177.4	103.2	-131.8	-99.9	26.7	126.6	91.2	-194.8	-136.2	15.7	151.9	63.2
5	155	22	3.0	-314.7	-305.9	-131.6	174.3	55.2	-324.7	-271.7	-58.0	213.7	100.5	-163.4	-125.7	28.3	154.0	92.8	-240.7	-166.6	19.2	185.8	66.7
10	286	11	3.0	-397.4	-376.3	-140.6	235.7	46.2	-437.1	-353.6	-67.5	286.1	91.0	-256.1	-189.5	5.8	195.3	70.3	-391.7	-258.7	-23.2	235.5	24.3
12	379	21	3.0	-338.0	-322.7	-130.9	191.8	55.9	-349.9	-332.7	-56.6	276.1	101.9	-190.3	-169.8	22.5	192.3	87.0	-279.2	-229.3	1.2	230.5	48.7
15	456	27	3.0	-323.7	-313.0	-142.4	170.6	44.4	-318.1	-273.5	-63.7	209.8	94.8	-140.4	-103.9	47.3	151.2	111.8	-252.9	-180.4	-7.0	173.4	40.5
19	576	20	3.0	-413.3	-393.0	-143.6	249.4	43.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

No.2 常時通電、貼付け型モール陽極

施工後調査			電流密度 mA/m <sup>2</sup>	側面-1.埋込み型鉛照合電極					側面-1.貼付け型銀塩化銀照合電極					下面.埋込み型鉛照合電極					側面-2.貼付け型銀塩化銀照合電極				
ヶ月目	日	温度 (°C)		Eon	Eio	Eoff	復極量	Eoff-Einitial	Eon	Eio	Eoff	復極量	Eoff-Einitial	Eon	Eio	Eoff	復極量	Eoff-Einitial	Eon	Eio	Eoff	復極量	Eoff-Einitial
				①	②	③	③-②	③-Einitial	①	②	③	③-②	③-Einitial	①	②	③	③-②	③-Einitial	①	②	③	③-②	③-Einitial
0	0	20	3	Einitial: -207.9					Einitial: -123.5					Einitial: -159.5					Einitial: -72.5				
1	34	24	3.0	-405.4	-397.9	-174.0	223.9	33.9	-359.5	-328.3	-108.3	220.0	15.2	-330.2	-275.8	-110.4	165.4	49.1	-267.3	-202.3	7.0	209.3	79.5
3	103	29	3.0	-433.6	-389.9	-146.4	243.5	61.5	-276.9	-192.6	4.7	197.3	128.2	-282.6	-197.6	-77.1	120.5	82.4	-149.8	-96.5	23.1	119.6	95.6
5	155	22	3.0	-498.9	-430.9	-149.4	281.5	58.5	-343.1	-225.6	-5.0	220.6	118.5	-236.1	-134.5	-11.2	123.3	148.3	-129.7	-90.3	15.9	106.2	88.4
10	286	11	3.0	-597.9	-484.9	-165.3	319.6	42.6	-470.0	-289.3	-38.7	250.6	84.8	-337.6	-149.7	-19.3	130.4	140.2	-140.3	-107.5	-10.7	96.8	61.8
12	379	21	1.35	-468.9	-452.7	-149.7	303.0	58.2	-290.2	-214.1	-26.1	188.0	97.4	-144.1	-86.7	17.3	104.0	176.8	-100.0	-88.5	-8.0	80.5	64.5
15	456	27	1.35	-449.8	-396.8	-142.5	254.3	65.4	-273.5	-203.5	-22.9	180.6	100.6	-115.6	-60.1	38.9	99.0	198.4	-99.2	-83.0	-8.3	74.7	64.2
19	576	20	1.35	-575.0	-477.0	-120.7	356.3	87.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

No.3 常時通電、貼付け型シート陽極

施工後調査			電流密度 mA/m <sup>2</sup>	側面-1.埋込み型鉛照合電極					側面-1.貼付け型銀塩化銀照合電極					下面.埋込み型鉛照合電極					側面-2.貼付け型銀塩化銀照合電極				
ヶ月目	日	温度 (°C)		Eon	Eio	Eoff	復極量	Eoff-Einitial	Eon	Eio	Eoff	復極量	Eoff-Einitial	Eon	Eio	Eoff	復極量	Eoff-Einitial	Eon	Eio	Eoff	復極量	Eoff-Einitial
				①	②	③	③-②	③-Einitial	①	②	③	③-②	③-Einitial	①	②	③	③-②	③-Einitial	①	②	③	③-②	③-Einitial
0	0	20	3	Einitial: -145.6					Einitial: -33.5					Einitial: -14.5					Einitial: -93.5				
1	34	24	3.0	-314.6	-312.7	-147.3	165.4	-1.7	-409.1	-323.5	-96.8	226.7	-63.3	-104.9	-60.7	76.4	137.1	90.9	-297.4	-278.3	-80.1	198.2	13.4
3	103	29	3.0	-289.5	-286.5	-121.3	165.2	24.3	-342.5	-267.2	-53.2	214.1	-19.7	-139.3	-101.2	46.8	148.0	61.3	-292.2	-253.6	-67.3	186.3	26.2
5	155	22	3.0	-303.7	-300.7	-119.3	181.4	26.3	-404.5	-306.5	-66.8	239.7	-33.3	-226.6	-175.6	-12.3	163.3	2.2	-326.9	-277.3	-70.6	206.7	22.9
10	286	11	3.0	-358.6	-353.8	-138.1	215.7	7.5	-685.4	-399.3	-98.3	301.0	-64.8	-442.5	-283.5	-60.4	223.1	-45.9	-386.4	-319.0	-76.5	242.5	17.0
12	379	21	1.35	-287.8	-286.4	-125.5	160.9	20.1	-376.2	-369.7	-80.3	289.4	-46.8	-243.0	-182.4	-38.6	143.8	-24.1	—	—	—	—	—
15	456	27	1.35	-273.3	-271.5	-125.4	146.1	20.2	-335.1	-266.1	-77.5	188.6	-44.0	-150.9	-106.1	28.8	134.9	43.3	—	—	—	—	—
19	576	20	1.35	-289.0	-287.0	-119.4	171.6	30.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

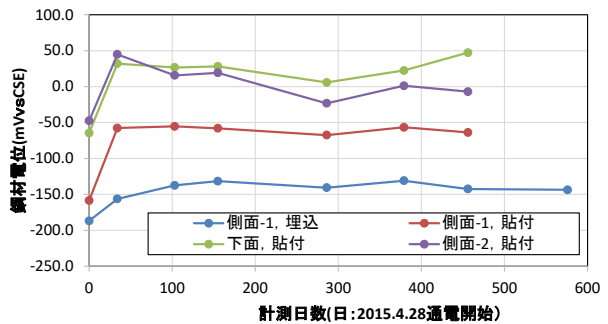
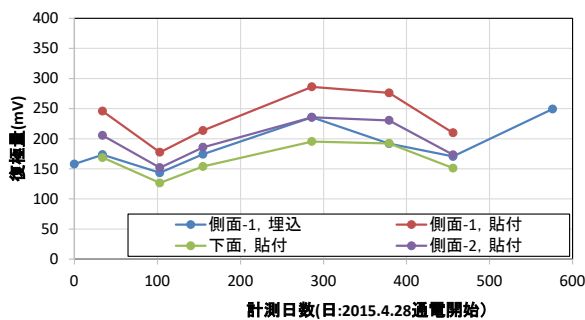


図 4.25 施工箇所 No. 1 の復極量とオフ電位の経時変化  
(通電方法：間欠通電，陽極：貼付け型シート陽極)

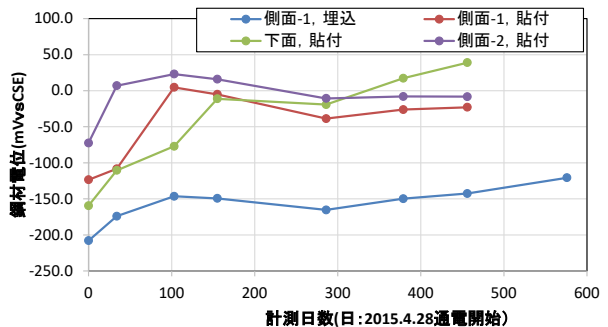
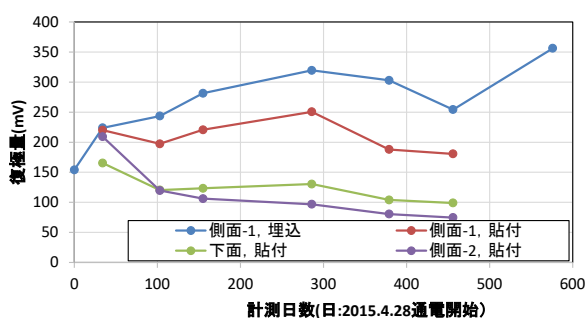


図 4.26 施工箇所 No. 2 の復極量とオフ電位の経時変化  
(通電方法：常時通電，陽極：貼付け型モール陽極)

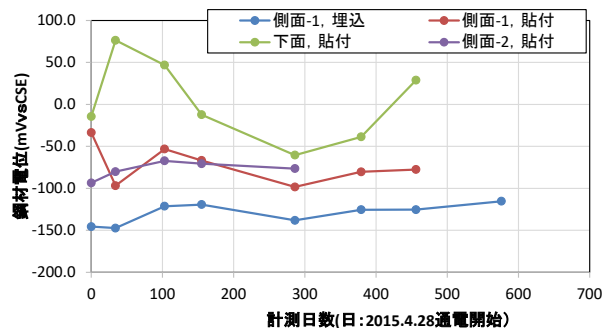
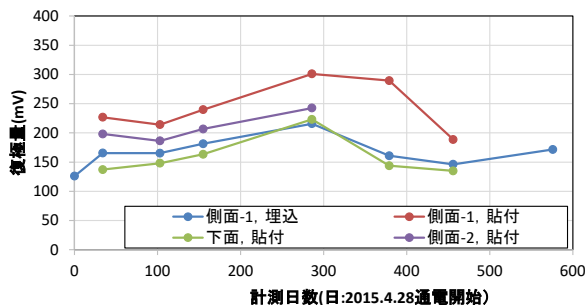


図 4.27 施工箇所 No. 3 の復極量とオフ電位の経時変化  
(通電方法：常時通電，陽極：貼付け型シート陽極)

#### 4.3.2.4 カソード分極試験結果

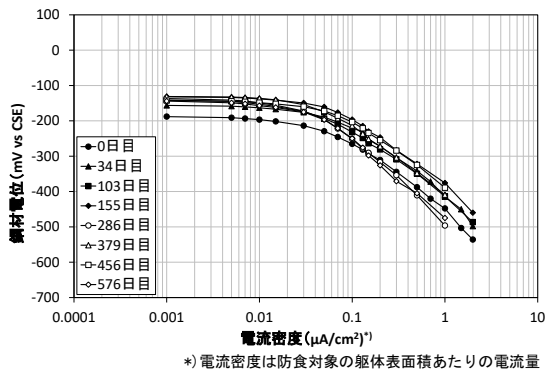
復極試験後のオフ電位を自然電位とし、その自然電位からカソード分極試験を実施した。そして、ターフェル関係の成立と酸素拡散の影響を考慮した分極量70~200mVの範囲で外挿したターフェル直線と自然電位との交点から鋼材の腐食速度を腐食電流密度として算出し、各施工箇所の防食効果を検討した。なお、カソード分極試験では陽極を対極、鋼材を作用電極とし、ガルバナスタットにて陽極から鋼材へ定電流を印加し、埋込み型の鉛照合電極を用いて鋼材電位を計測した。定電流の印加後、鋼材電位が安定した時点でカレントインタラプタ法によりIRドロップ分を取り除いたインスタントオフ電位を計測した。その作業を数回繰り返すことで、電流密度とインスタントオフ電位を

プロットし、カソード分極曲線を作成した。カソード分極試験により作成したカソード分極曲線の試験結果を図4.28、算出した腐食電流密度の経時変化を図4.29、ターフェル勾配の経時変化を図4.30に示す。各図に示す電流密度は、道路橋の計測時同様、防食対象の躯体表面積あたりの通電電流量とした。なお、栈橋の防食対象の鋼材表面積は $10.6\text{m}^2$ であり、コンクリート表面積は $9.6\text{m}^2$ である。

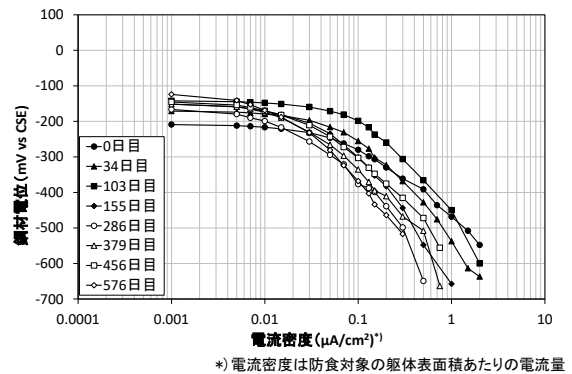
図4.29に示すように栈橋の施工箇所No.2では経時変化に伴い、徐々に腐食電流密度が低下した。しかし、施工箇所No.1とNo.3では、通電後も通電前同等の値であり、温度変化によって上下する値を示した。ただし、いずれの箇所についても腐食電流密度は小さく、鋼材表面積あたりの電流密度に換算しても、明らかに $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 未満の小さな値である。なお、コンクリート中の鉄筋の腐食速度に関し、CEB（ヨーロッパコンクリート委員会）の分極抵抗法による判定基準（案）<sup>9)</sup>によると、腐食速度 $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 未満の鋼材は不活性の不動態状態である。また、前節の図4.25～図4.27に示すように復極試験時のオフ電位も、すべての箇所でプラス方向に推移していた。よって、施工箇所No.2以外、通電前の腐食電流密度と比べ通電後の腐食電流密度が低下していないが、いずれの箇所でも、鋼材は防食状態を維持していると考えられる。

なお、腐食が発生していた施工箇所No.2を含め、いずれの箇所でも、暴露期間0日の時点ですでに腐食電流密度が低いのは、鋼材電位の計測箇所である埋込み型の鉛照合電極の設置箇所が新たに電気防食用モルタルを打設した箇所であり、モルタル打設後7日程度でカソード分極試験を実施したためと考えられる。

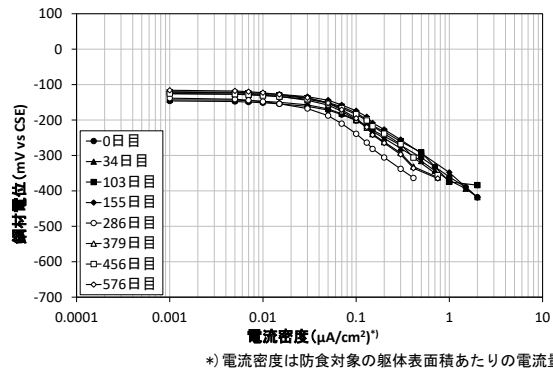
一方、図4.30に示すターフェル勾配に関し、いずれも徐々に勾配が大きくなるマイナス方向への変化を示した。カソード分極試験時のターフェル勾配が大きくなることは、カソード反応の分極抵抗が大きくなっていることを示している。その変化量は、コンクリートの露出面積の小さいNo.1やNo.3より、露出面積の大きいNo.2の方が大きくなる傾向を示した。また、常時通電箇所のNo.2とNo.3では288日目に通電調整を実施し、通電電流密度を $3\text{mA}/\text{m}^2$ から $1.35\text{mA}/\text{m}^2$ としたため、288日以降、No.2とNo.3の腐食電流密度は温度の上昇とともに若干上昇した。しかし、No.2のターフェル勾配は、その後も傾きが大きくなるマイナス方向へと推移した。コンクリート内の鋼材のカソード反応は酸素の拡散速度に律速であり、コンクリートが湿潤化した場合、酸素の拡散係数は小さくなり、電気防食時に酸欠状態となることで鋼材電位が卑化した事例も報告されている<sup>12)</sup>。よって、カソード反応の分極抵抗の増加は、コンクリート露出部からのコンクリートの湿潤化により酸素の拡散係数が小さくなることで生じていると考えられる。なお、コンクリート露出面積はNo.1やNo.3では約6%であるのに対し、No.2は約54%で、半分以上コンクリート面が露出している。つまり、飛沫帯の栈橋では物理的にもNo.2の方が湿潤状態となりやすい。そのため、No.2では前述の電流の偏りも生じていたことから、通電開始後、急激に湿潤化し、34日目よりターフェル勾配が上昇したと推察される。一方、No.1およびNo.3についても、徐々にターフェル勾配が大きくなるマイナス方向へ変化していることから、徐々にコンクリートが湿潤化してきていると考えられる。ただし、アノード反応とカソード反応で構成される腐食電流密度は温度変化の影響も受けるため、No.1やNo.3では湿潤化の影響より、温度変化の影響の方が大きく、その影響で腐食電流密度が上下していると考えられる。一方、No.2では、温度変化の影響よりも、コンクリートの湿潤化によるカソード反応の分極抵抗が増加する影響の方が卓越しており、腐食電流密度が経時変化に伴い低下したと考えられる。



No. 1 間欠通電，貼付け型シート陽極



No. 2 常時通電，貼付け型モール陽極



No. 3 常時通電，貼付け型シート陽極

図 4.28 カソード分極試験結果

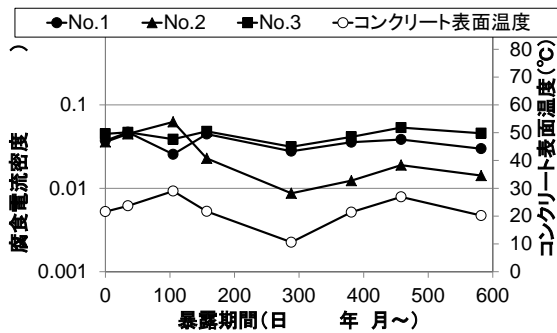


図 4.29 腐食電流密度の経時変化

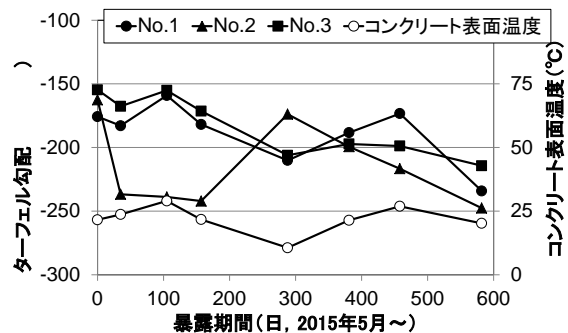


図 4.30 ターフェル勾配の経時変化

#### 4.3.2.5 棧橋調査結果のまとめ

飛沫帯の棧橋の補修対策として、常時通電方式および間欠通電方式による電気防食工法を試験施工で適用した結果、以下のことが分かった。

- (1) データロガーで鋼材電位，電圧，通電電流量，躯体の表面温度等を常時計測することで，飛沫帯の棧橋における電気防食時の躯体の湿潤化が回路の電圧や防食電流の通電状況，鋼材電位に与える影響を確認できた。また，間欠通電方式の場合，日中はオン電位，夜間はオフ電位の時間変

化が追跡でき、電気防食による鋼材への影響を追跡できた。特にオフ電位は、初期の鋼材電位に比べ、プラス状態を維持できていた。これは、電気防食による鋼材表面の環境改善効果によって、鋼材のアノード分極抵抗が増加し、アノード反応を抑制できているためであると考えられる。

- (2) 常時通電および間欠通電とも、定電流制御での通電により、気温上昇時に電圧が低下し、気温低下時に電圧が上昇した。陽極材周囲では通電時に酸素の生成反応（例えば $4\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$ 等の反応）が生じており、通電時は陽極材周囲で酸素の生成と拡散が生じている。酸素の拡散速度は温度変化に依存し、気温上昇で大きくなり、低下で小さくなる。つまり、気温上昇時は酸素が拡散しやすく、気温低下時は酸素が拡散しづらくなる。その結果、温度変化による陽極周囲の酸素濃度は異なり、気温低下時に酸素生成による酸素濃度上昇が拡散を上回ることで、濃度分極が高くなり、気温低下時に電圧が上昇したと考えられる。
- (3) 構造物の腐食環境や腐食状況を同一とし、陽極材に貼付け型シート陽極を用い、同一の通電量で通電方式を常時通電および間欠通電の2方式で通電した場合、低温時の電圧上昇は間欠通電よりも常時通電の方が高い傾向を示した。これは、間欠通電では夜間の不通電時に陽極反応による生成物の蓄積等が解消され、濃度分極による電圧の上昇が抑制されたためであると考えられる。
- (4) 飛沫帯の栈橋での電気防食に対する波しぶき等による防食回路の影響に関し、いずれの箇所でも、数分～数時間の短時間での電圧低下や電流の偏りは生じなかった。よって、プラスチック皮膜で覆われた陽極を用いることで、海水飛沫による陽極への電氣的な影響は抑制可能であると考えられる。
- (5) 飛沫帯の栈橋では、コンクリート表面の露出面積に応じて、波しぶき等によるコンクリートの湿潤化が異なり、その影響を電圧や電流量の変化によって確認できる可能性があることが分かった。施工箇所No.1やNo.3の露出面積率は約6%に対し、施工箇所No.2のそれは約54%である。そのため、施工箇所No.2ではコンクリートが湿潤化しやすく、湿潤化の影響で酸素の拡散速度が小さくなり、濃度分極による分極抵抗が大きくなり、電流調整後も電圧が上昇した。また、電流の偏りも、他と比較し、大きくなった。
- (6) 常時通電方式および間欠通電方式とも、オン電位に関し、コンクリート表面温度と相関のある変化を示した。また、いずれの施工箇所でも、最初の夏季を経過した段階より、決定係数 $R^2$ が上昇した。これは、オン電位にはIRドロップを含んでおり、最初の夏季を経過する段階で、鋼材の分極特性や断面修復材の抵抗によるIRドロップが安定化し、鋼材電位と温度とが相関を示すように変化したためであると考えられる。
- (7) 間欠通電箇所の通電時間に関し、全暴露期間を通じ、日々6時間以上通電できており、全日数の97.3%では8時間以上、89.4%では9時間以上通電できていた。また、平均すると1日あたり11.2時間通電できていた。よって、適切なソーラーパネルを選定することで悪天候時を含め日々通電可能であることを確認した。
- (8) 575日間の暴露試験後、間欠通電箇所での24時間以上の復極試験を実施した結果、通電停止後、約62時間経過するまで、鉄筋電位は上昇を続けた。つまり、62時間以内に通電を再開すれば、鋼材電位は自然電位よりも卑の状態である防食状態にあると考えられる。このことから、試験施



工箇所では日々通電できており、夜間の通電停止後、24時間以内に必ず通電を再開できているため、常に防食状態を維持していると考えられる。

- (9) 貼付け型シート陽極を用いた施工箇所では、通電後103日目を実施した復極試験で、常時通電箇所および間欠通電箇所とも、気温変動により復極量が低下した。その低下量に関し、常時通電箇所では最大12mV程度であったのに対し、間欠通電箇所では最大70mV程度低下した。つまり、間欠通電方式の場合、夜間に無通電状態となるため、常時通電よりも鋼材表面の環境改善効果の発現が遅く、通電初期は、常時通電より温度の上昇時の腐食速度増加の影響を受ける可能性がある。そのため、間欠通電箇所の通電量の設計では、気温変動時の影響を考慮した設計が必要である。
- (10) 貼付け型シート陽極を用いた施工箇所での復極試験後のオフ電位に関し、常時通電箇所と間欠通電箇所と比較すると、間欠通電箇所では初期電位よりもすべてプラスの値であるのに対し、常時通電箇所ではマイナスの値を示す場合が発生した。また、常時通電箇所でもマイナスを示す計測箇所は、復極量が大きい箇所であり、鋼材周囲の酸素が不足した状態となっていることが推察された。このように電気防食では、継続的な通電により、鋼材表面の状態が変化する。そのような鋼材周囲の酸素が不足するような通電量を継続しつづけると、鋼材電位はさらに卑化状態となり、過防食状態となる場合がある。そのため、電気防食では一定期間ごとに通電調整が必要である。特に、常時通電では通電し続けることで、酸素を常に消費しており、間欠通電よりもその傾向を示しやすいと考えられる。
- (11) 復極試験後のカソード分極試験によって、施工箇所No.2では、施工後34日目よりターフェル勾配の傾きが大きくなっており、常時計測によっても経時変化で電圧は上昇し、電流の偏りも大きくなった。また、施工箇所No.1やNo.3のコンクリートの露出面積は約6%であるのに対し、施工箇所No.2の露出面積は約54%である。よって、施工箇所No.2では、施工直後からコンクリートが湿潤化し、酸素の拡散係数が小さくなっていったと考えられる。また、施工箇所No.1やNo.3でも経時変化により徐々にターフェル勾配が大きくなっており、長期的には施工箇所No.1やNo.3でも、徐々にコンクリートが湿潤化してきていると推察される。

以上の結果から、今回実施した飛沫帯の栈橋でのソーラーパネルのみを電流供給源とした間欠通電方式による電気防食では、①日々防食電流が通電でき、鋼材はカソード分極状態であり、②防食後のオフ電位は鋼材表面の環境改善効果によりプラスに変化しており、③カソード分極試験による腐食電流密度の計測結果でも不働状態を維持しており、常時通電方式と同様、電気防食の防食効果を発揮していた。

#### 4.4 現場調査結果とFEM解析結果の比較検討

##### 4.4.1 現場調査箇所の概要

現場施工箇所とFEM解析による解析値との比較検討には、**図4.4**に示す飛沫帯の栈橋において、貼付け型シート陽極を用いた間欠通電方式による電気防食工法を施工した施工箇所No.1の調査結果を用いた。なお、施工は既設塗膜を撤去した躯体面に貼付け型シート陽極を貼付け、陽極材間を電氣的に接続した後、電源へ配線した。**図4.31**に示すとおり、貼付け型シート陽極間は幅40mmの隙間でコ

ンクリート面が露出している。シート幅は460mmで、その内の300mmが粘着型陽極材である。施工面積は約9.6m<sup>2</sup>である。通電はソーラーパネルを用いた間欠通電方式とし、電源装置は最大電流制御方式を使用した。目標とする分極量は150mV以上、通電電流量は28.8mA (0.003A/m<sup>2</sup>)とした。陽極設置後、通電前に自然電位法で自然電位を調査した結果、ASTM C 876の腐食判定基準で「90%以上の確率で腐食が無い」となる電位を示した。

#### 4.4.2 現場調査結果とFEM解析結果の比較

##### (1) 現場調査結果

鋼材電位は埋設した鉛照合電極を用い、図 4.31 に示す位置にて計測した。通電量は陽極の施工面ごと（側面-1，側面-2，下面）の分配量を確認するため、施工面ごとに回路を分離し、各回路に 100Ω の抵抗を挿入し、その両端の電圧により計測した。鋼材の復極量は復極試験にて確認した。コンクリート電気抵抗率は四電極法にて測定し、通電開始前のコンクリート電気抵抗率は 1000~2000Ω・m であった。

FEM 解析による解析値との比較には、通電開始後最初の復極試験時の 34 日目に計測した値を用いた。

復極試験開始前の電圧および陽極材への流入電流量を表 4.5、復極試験結果を表 4.6 に示す。

##### (2) FEM解析結果

###### 1) 解析モデル (FEM解析)

3章の大型供試体での解析時同様、既往の研究<sup>8)</sup>と同様にLaplace方程式を使用し、汎用有限要素解析ソフトにて電流分布を計算した。コンクリート、鋼材と陽極の幾何学形状をモデル化し、境界条件として鋼材と陽極に分極特性を入力した。コンクリートはソリッド要素、鋼材と陽極は板要素を用いた。鋼材である主鉄筋と配力鉄筋の間に導通はなく、両者の間にはコンクリートがモデル化されており、それぞれ独立している。解析モデルは桁の一部を模擬し、桁の長手方向の中央500mmを切断した3次元モデルとした。幾何学形状は図 4.4の施工箇所No.1に示すように両側面のかぶり厚の差異を考慮してモデル化した。解析では主鉄筋と配力鉄筋の両者は導通させていない。図4.32に解析モデルを示す。

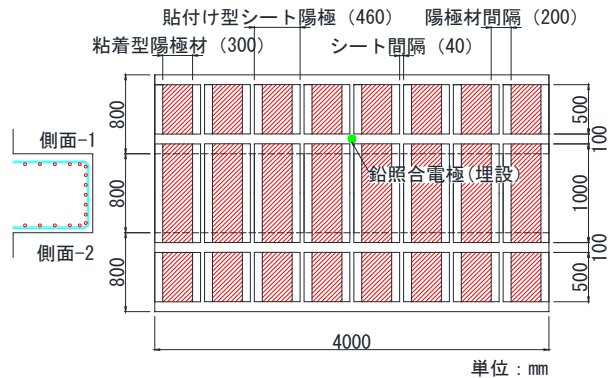


図 4.31 陽極材の割付け図

表 4.5 流入電流量 (試験施工)

寸法	回路	通電	陽極材への流出電流量		
	電圧 (V)	電流量 (mA)	側面-1 (mA)	下面 (mA)	側面-2 (mA)
全体	2.68	28.8	7.95	14.03	6.81
500mmサイズ		3.6	0.99	1.75	0.86

表 4.6 復極試験結果 (試験施工)

通電前		通電34日目			
日時:4/28		日時:6/2-3			
気温:21.6°C		気温:23.7°C			
初期電位	オン電位	インスタントオフ電位	オフ電位	復極量	Eoff-Einstant off
Einitial	Eon	Einstant off	Eoff	(mV)	(mV)
(mVvsCSE)	(mVvsCSE)	(mVvsCSE)	(mVvsCSE)	(mV)	(mV)
-186.8	-322.7	-329.8	-156.8	173	30

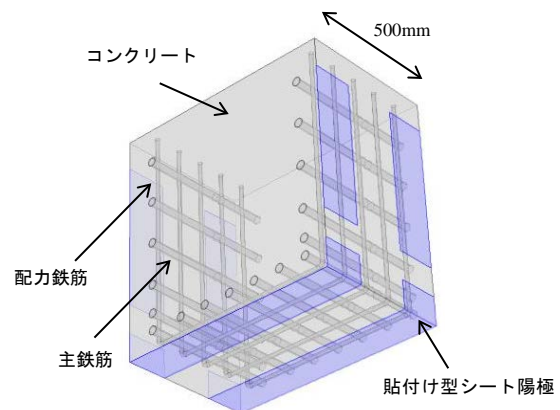


図 4.32 解析モデル

## 2) 境界条件 (FEM解析)

鋼材と陽極の分極特性は3章のFEM解析で使用した図4.33に示す小型供試体を用いて求めた。小型供試体は、測定時の一週間前から所定の環境下で養生し、その上で測定を行った。小型供試体に貼付け型シート陽極を設置し、鋼材と陽極の電流流入量は大型供試体と同様にリード線と定電流電源装置(最大電圧:10V)の間に1Ωのシャント抵抗を挿入し、電圧計にて測定した。小型供試体の上面中央部に鋼材の分極量を測定するために、貼付け型の銀塩化銀照合電極を設置した。

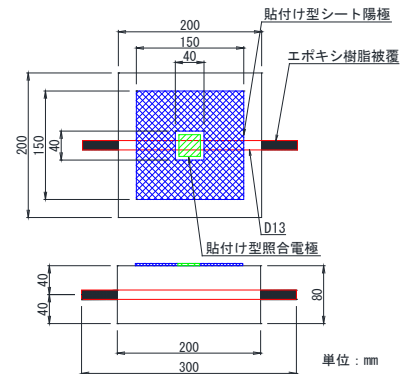


図 4.33 小型供試体

小型供試体にて分極試験を実施して鋼材と貼付け型シート陽極の分極特性を求めた。鋼材と陽極の分極特性は図4.34のように2つの分極曲線で表現した。分極量が小さい場合(case1)と大きい場合(case2)において、それぞれ対数近似し、分極量20~40mVあたりが2つの分極曲線の交点となるようにした。分極特性は5°C60%RH, 20°C60%RHの環境下にて測定した。分極特性の係数一覧を表4.7に示す。

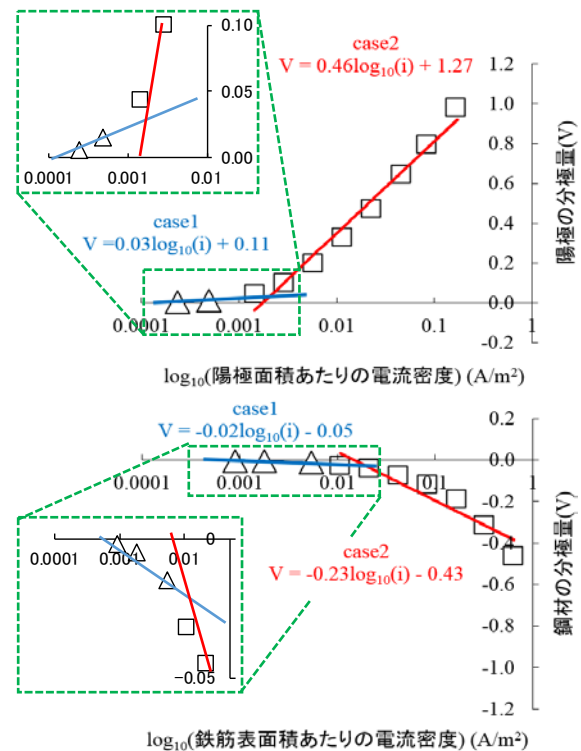


図 4.34 鋼材と貼付け型シート陽極の分極特性

図4.4に示すように施工箇所ではコンクリート表面から配筋鉄筋までの塩化物イオン量は0.5~2.0kg/m³であり、これを参考にして陽極材および鋼材の境界条件を表4.7に示した20°C時の塩化物イオン量0kg/m³と2.5kg/m³の値を使用した。コンクリート電気抵抗率は調査結果を下に1500Ω・mとした。

## 3) FEM解析結果

試験値と解析値の比較を表4.8に示す。解析では復極量と分極量が同値となるよう回路電圧を調整した。解析ケース①(塩化物イオン量0kg/m³)では、解析で想定した鋼材状態は試験施工時のものよりも腐食が進行していないと考えられ、小さな電圧で分極している。一方、解析ケース②(塩化物イオン量2.5kg/m³)では、解析で想定した鋼材状態は試験施工時のものよりも腐食が進行していると考えられ、分極させるのに大きな回路電圧を要している。

表 4.7 分極特性一覧

		case1		case2		
		交換電流密度 (A/m²)	勾配 (V)	交換電流密度 (A/m²)	勾配 (V)	
鋼材	5°C	0kg/m³	1.08E-05	-0.04	4.82E-05	-0.15
		2.5kg/m³	6.30E-05	-0.03	6.43E-05	-0.24
		10kg/m³	7.59E-04	-0.02	1.48E-02	-0.23
	20°C	0kg/m³	1.14E-05	-0.03	7.34E-05	-0.15
		2.5kg/m³	7.94E-06	-0.01	6.19E-04	-0.18
		10kg/m³	9.64E-05	-0.01	2.49E-02	-0.23
貼付け型シート陽極	5°C	0kg/m³	2.17E-05	0.01	3.76E-04	0.12
		2.5kg/m³	2.44E-05	0.01	6.08E-04	0.24
		10kg/m³	1.55E-04	0.03	1.75E-03	0.46
	20°C	0kg/m³	**	**	3.19E-03	0.16
		2.5kg/m³	3.23E-03	0.01	1.47E-03	0.29
		10kg/m³	2.29E-05	0.01	2.65E-03	0.62

\*\*貼付け型シート陽極20°C,0kg/m³,case1では正確な計測ができなかった。

#### 4) 実構造物におけるFEM解析の適用性

解析ケース①・②の結果より、両者の中間にある分極特性を境界条件にできれば、試験値を概ねシミュレーション可能だと考えられる。よって、実構造物においても十分にFEM解析が適用できると思われる。ただし、各鋼材間の鋼材状態の違いに注意が必要である。

設計段階で鋼材近くにおけるコンクリート中の塩化物イオン量を把握できれば、その塩化物イオン量から想定される陽極材と鋼材の分極特性を選定できる。その分極特性を用いてFEM解析できれば、電源装置の仕様や陽極材の配置と間隔などの電気防食回路の設計に役立てられる。

表 4.8 復極試験結果

測定	試験施工	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	回路電圧 (V)	陽極材への流出電流量				復極量 (分極量) (mV)
				全体 (mA)	側面-1 (mA)	下面 (mA)	側面-2 (mA)	
		0.5~2.0	2.68	3.60	0.99	1.75	0.86	173
解析	①	0.0	0.88	3.70	1.00	1.80	0.90	(173)
	②	2.5	3.40	20.30	5.60	10.00	4.70	(173)

#### 4.5 本章のまとめ

塩害環境下の道路橋および飛沫帯の栈橋にて、常時通電方式および間欠通電方式による電気防食工法を適用し、間欠通電方式による電気防食を適用した実構造物での鋼材腐食抑制効果に関し、定期的な調査を実施した結果、以下のことがわかった。

- (1) データロガーで鋼材電位、電圧、通電電流量、躯体の表面温度等を常時計測することで、環境変化による防食回路や防食効果への影響が確認できた。特に、間欠通電方式の場合、日中はオン電位、夜間は無通電状態のオフ電位となり、一定時間ごとに計測することで、防食効果を確実に確認できた。本試験施工箇所でも10分毎にデータロガーで計測した結果、貼付け型シート陽極を用い、分極量150mVとなる通電量を通電することで、間欠通電でも常時通電同様の防食効果が得られることが確認できた。
- (2) データロガーで常時計測することで躯体の湿潤化による防食回路や防食効果への影響が確認できた。具体的には、飛沫帯の栈橋で、コンクリート面の露出面積が異なる陽極を用いたところ、波がかりによる躯体の湿潤化が異なり、電圧や通電面ごとに計測した電流量が経時的に変化した。また、道路橋の雨掛かり箇所においても、コンクリート露出面積の小さい貼付け型シート陽極を用いることで、雨天日等でも電圧や鋼材電位に極端な変化は生じておらず、飛沫帯の栈橋同様、コンクリート露出面積の小さい陽極を用いることで湿潤化による影響が低いことが確認できた。
- (3) 定電流制御での電気防食時、常時通電方式および間欠通電方式とも、データロガーで常時計測した鋼材のオン電位とコンクリートの表面温度は相関関係を示した。栈橋および道路橋とも、最初の夏季を経過する前後で相関状態が変化し、夏季を経過する段階で決定係数R<sup>2</sup>が上昇し、相関関係が上昇した。つまり、最初の夏季を経過する段階で、オン電位の温度特性が変化した。これは、最初の夏季を経過する段階で、鋼材の分極特性や断面修復材の抵抗による温度特性が安定化し、IRドロップを含む鋼材電位と温度とが相関を示すように変化したためであると考えられる。
- (4) 道路橋および飛沫帯の栈橋とも、復極試験時のオフ電位に関し、間欠通電箇所は防食前の初期電位に対し、常にプラスの値を示したが、常時通電箇所では時折、マイナスの値を示した。復極

には酸素が必要であり、常時通電箇所の場合、18～24時間程度の復極試験では十分な酸素が供給されておらず、完全に復極できていないためであると考えられる。一方、間欠通電箇所では常にプラスの値を示したのは、夜間に無通電状態となるため、鋼材の貴化現象に必要な酸素が常時通電より鋼材表面に供給され、その影響で鋼材電位がプラスに変化したと考えられる。

- (5) 試験施工した道路橋および飛沫帯の栈橋では、防食対象の状態や雨天時の日射強度を考慮し、適切なソーラーパネルを選定したため、全暴露期間を通じ、道路橋では最低2.3時間以上・平均10.4時間、栈橋では最低6時間以上・平均11.2時間通電できており、全日数の90%以上で8時間通電できていた。
- (6) 道路橋および飛沫帯の栈橋とも、施工直後の鋼材表面の環境改善効果が発揮できていない時期に気温が上昇すると、常時通電箇所および間欠通電箇所を含め、鋼材の腐食速度増加の影響により復極量が低下した。ただし、間欠通電箇所の復極量の低下は常時通電よりも大きく、道路橋では最大30mV程度、飛沫帯の栈橋では最大70mV程度低下した。つまり、間欠通電方式の場合、夜間に無通電状態となるため、常時通電よりも鋼材表面の環境改善効果の発現が遅く、通電初期は、常時通電より温度の上昇時の腐食速度増加の影響を受ける可能性がある。そのため、間欠通電箇所の通電量の設計では、気温変動時の影響を考慮した設計が必要である。
- (7) 復極試験後のカソード分極試験で定期的に腐食電流密度を算出した結果、道路橋の間欠通電箇所では気温上昇時に若干増加するが長期的にはほとんど変化していなかった。また、飛沫帯の栈橋でも常時通電箇所を含め気温上昇時に若干増加したが、いずれも腐食電流密度は $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 未満であった。よって、復極試験後のカソード分極試験より、鋼材は不活性の不働状態を維持した防食状態にあることが確認できた。また、カソード分極試験時のターフェル勾配に関し、飛沫帯の栈橋では、コンクリートの湿潤化による酸素の拡散速度の影響と考えられる挙動を示した。つまり、コンクリートの露出面積が大きい施工箇所では施工直後から極端に大きな傾きを示し、露出面積が小さい箇所では長期的に大きくなる傾向を示した。また、コンクリートの露出面積の小さい道路橋では、湿潤化の影響より温度変化による影響と考えられる変動を示した。なお、カソード分極試験による腐食電流密度の刑事的な計測結果からも、本施工箇所での間欠通電方式による電気防食は、常時通電方式と同等の防食効果を発揮していると考えられる。
- (8) 飛沫帯の栈橋における電気防食の適用後の電圧や通電量の他、鋼材の分極量等に関し、FEM解析でシミュレーションした結果、概ね現場での計測値を再現できており、実構造物についてもFEM解析が適用できることを確認した。

以上の塩害環境下の道路橋および飛沫帯の栈橋での試験施工の結果、ソーラーパネルのみを電流供給源とした間欠通電方式による電気防食では、①日々防食電流が通電できており、②防食後のオフ電位は鋼材表面の環境改善効果によりプラスに変化し、③カソード分極試験による腐食電流密度の計測結果でも不働状態を維持しており、常時通電方式と同様、電気防食の防食効果を発揮していた。

#### 【参考文献】

- 1) 三村典正, 太田翔, 黒川公人, 河野宏隆: 通電方法が電気防食工法の防食効果に与える影響に関する検討, 日本材料学会アップグレードシンポジウム, Vol.16, No.52, pp.293-298, 2016.10
- 2) 三村典正, 黒川公人, 鹿島篤史, 河野宏隆: 港湾構造物の維持管理の向上に着目した電気防食工法の適用に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1161-1166, 2016
- 3) 大谷俊介, 小林浩之, 若林徹, 望月紀保: 鋼材表面の環境改善を考慮した電気防食試験, コンクリート工学論文集, Vol.34, No.1, pp.1030-1035, 2012
- 4) G.K.Glass, A.M.Hassanein, N.R.Buenfeld: Cathodic protection afforded by an intermittent current applied to reinforced concrete, Corrosion Science, 43, pp.1111-1131, 2001
- 5) トランジスタ技術編集部: 太陽電池活用の基本と応用, CQ出版社
- 6) 佐藤勝昭: 太陽電池の基本, S Bクリエイティブ
- 7) 篠田吉央, 望月紀保, 高久豊広, 小林浩之: 湿潤環境下コンクリート電気防食の防食評価方法に関する検討, コンクリート工学年次論文, Vol.33, No.1, pp.1158-1162, 2011
- 8) 高久豊広, 望月紀保, 仲谷伸人: 電気防食されたコンクリート中鉄筋の自然電位貴化現象に関する検討, 第56回材料と環境討論会講演集, D-206, 2009
- 9) CEB Bulletin No. 243: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures affected by Reinforcement Corrosion, 1998
- 10) 大谷俊介, 小林浩之, 若林徹, 望月紀保: コンクリート中鋼材のカソード分極特性と電気防食に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1063-1068, 2013
- 11) 審良善和, 山路徹, 小林浩之: 電気化学的測定による鉄筋腐食と塩化物イオン濃度の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1133-1138, 2011
- 12) 木村哲士, 中野松二, 山路徹, 審良善和, 濱田秀則, 高橋良輔: RC栈橋干満帯部の電気防食における復極挙動に関する検討, 土木学会第62回年次学術講演会, pp.1019-1020, 2007.9
- 13) 望月紀保: コンクリート中鉄筋のカソード防食について, 材料と環境, 59, pp.121-128, 2010
- 14) G.K.Glass, Corrosion, 55 [3], 286, 1999
- 15) 小林浩之, 審良善和, 山路徹, 濱田秀則, 若林徹, 望月紀保: 鉄筋表面の環境改善を考慮したコンクリート中鉄筋のカソード防食設計, 材料と環境, 62, pp.153-160, 2013
- 16) 大谷俊介, 小林浩之, 若林徹, 望月紀保: 鋼材表面の環境改善を考慮した電気防食試験, コンクリート工学論文集, Vol.34, No.1, pp.1030-1035, 2012
- 17) 松村卓郎, 白井孝治, 三枝利有: コンクリートキャスクの実用化研究—鉄筋コンクリートの塩害評価法の開発, 電力中央研究所報告, N04032, 2005.6
- 18) 皆川浩, 増田正孝, 川俣孝治: 有限要素法による鉄筋コンクリートの電気防食の電流分布に関する検討, 「コンクリート構造物の長期性能照査支援モデル」に関するシンポジウム, Vol. JCI-C64, pp.351-356, 2004



## 第5章 結論

### 5.1 本研究で得られた結論

本研究では、コンクリート構造物の劣化現象である塩害に対し、有効な補修対策である電気防食工法に関し、再生エネルギーの利用と維持管理の向上を目的に、防食電流の供給方法について検討した。防食電流の供給方法にはソーラーパネルを選定し、防食回路の耐久性やコストを考慮し蓄電池を使用せず、日中のみソーラーパネルから通電する間欠通電方式による電気防食工法のシステムで検討することとした。そこで、ソーラーパネルのみを電流供給源とした場合の防食電流の制御方式や防食効果、適用範囲、設計方法などについて検討した。

以下に各章により得られた結論を総括する。

「第1章 序論」では、本研究の背景と目的を示し、各章における検討概要や構成を示した。

「第2章 既往の研究」では、塩害による鋼材腐食とその対策である鉄筋コンクリート構造物の電気防食工法に関し、その防食の原理や防食効果の判定基準、種類、課題などについて、既往の研究をレビューした。また、電気防食時の電流供給方法に関し、既往の方法や近年の再生エネルギーとその利用方法をレビューし、本研究における課題と方向性を整理した。

「第3章 間欠通電方式による電気防食の鋼材腐食抑制効果」の第1節では、まず、間欠通電方式による電気防食時、ソーラーパネルのみを電流供給源とした場合の電源の制御方法に関し、防食効果を発揮するための防食電流の制御方法について小型供試体を用いた屋外暴露試験により検討し、以下の結論を得た。

- (1) 貼付け型シート陽極を用いた場合、分極量を100mV以上とすることで、間欠通電方式でも常時通電方式と同等の防食効果が確認できたが、異なる陽極では常時通電方式を含めひび割れや腐食が発生した。腐食抑制効果の相違は、乾燥収縮や通電調整時期、陽極の設置位置などの影響が考えられた。
- (2) システム構成に関し、ソーラーパネルのサイズは防食回路に必要な電力の10倍、電源装置の起動は入力電圧5V程度、防食回路への通電は定電流制御方式とすることで、雨天時の悪天候時を含め最低でも1日6時間通電でき、平均では10.8時間通電できた。
- (3) 通電時間の平均は季節で異なり、春秋の4～6月・10～12月時では10.6時間、夏の7～9月時では11.9時間、冬の1～3月時では9.8時間であり、ソーラーパネルを電流供給源とすることで、気温上下に伴う鋼材腐食速度の変化に対し効率的な通電時間が確保できていた。
- (4) 防食供試体の腐食速度を復極試験後の分極抵抗法で評価したが、暴露途中を含め、防食、無防食とも $0.2\sim 1.0\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の同等の腐食電流密度を示し、復極試験後の分極抵抗法による評価では防食効果の優劣を確認できなかった。
- (5) 間欠通電方式による電気防食では、夜間に無通電状態があるため、常時鋼材電位を計測することで、鋼材電位の状況が確認可能であった。
- (6) 中性化深さは使用する陽極によるコンクリート表面の被覆状況で異なっており、通電方式によ

る相違は確認できなかった。

- (7) 塩化物イオン量に関し、通電による電気泳動の影響で陽極設置側のかぶりコンクリート部で減少していたが、通電方式による減少量の相違は確認できなかった。

第2節では、間欠通電での電気防食時の適用環境や条件を確認するため、陽極材の種類や設置位置、塩化物イオン量、制御方法などを変化させ、小型供試体を用いた温湿度一定環境下での室内暴露試験により検討し、以下の結論を得た。

- (1) 200日間養生後の防食前供試体の鋼材には腐食が発生しており、20°Cや35°Cの塩化物イオン量10kg/m<sup>3</sup>の供試体では、他の供試体と比較し、腐食面積率に対し腐食減量の大きい局部腐食型の傾向を示した。
- (2) 200日間養生後の防食前供試体について、分極抵抗法で計測した鋼材の腐食速度は、ネルンストの式およびアレニウスの式での想定通り、環境温度が高いほど、腐食電流密度は大きくなり、鋼材電位はマイナスの値を示した。また、塩化物イオン量についても、塩化物イオン量が多いほど、腐食電流密度は大きくなり、鋼材電位はマイナスの値を示した。つまり、防食前供試体に関する分極抵抗法による鋼材の腐食速度の測定は、想定通りの結果が得られた。
- (3) 各供試体への通電量に関し、陽極の設置位置・面積・種類が異なるが、各分極量に必要な通電電流密度は、各室内暴露環境とも、同様の傾向および値を示し、塩化物イオン量・分極量・暴露温度の上昇に伴い、通電電流量が多くなる傾向を示した。
- (4) 通電調整によって設定した供試体の通電電流密度は、腐食電流密度よりほぼ大きい値を示した。しかし、一部の供試体では個体差により腐食電流密度の方が大きな値を示した。特に、腐食電流密度が小さく、設定する通電電流密度が小さな供試体で相違が生じた。これは、電流密度調整時の調整誤差等の不具合発生要因としての可能性がある。
- (5) 間欠通電で電気防食している供試体の鋼材電位の変化は、マイナス方向へのオン電位時の変化は急激に、プラス方向へのオフ電位時の変化は緩やかに推移した。このようにプラス方向へのオフ電位時の鋼材電位の変化が緩やかなのは、プラス方向へのオフ電位時の鋼材電位の変化が酸素の拡散速度に律速であるためである。
- (6) 間欠通電による電気防食では、夜間に無通電状態があるため、鋼材電位を常時計測することで、防食による鋼材電位への影響が確認できた。
- (7) ターフェル外挿法による腐食電流密度の計測結果に関し、いずれの供試体についても、塩化物イオン量が少ないほど、腐食電流密度が小さくなる傾向を示した。ただし、常時通電供試体を含め、防食および無防食供試体の優劣の差は確認できなかった。このようにターフェル外挿法で優劣の差が確認できなかったのは、復極後の腐食速度の差が小さい状態で計測している、あるいは、電気防食による鋼材表面の環境改善効果（塩化物イオンの減少、水酸化物イオンの増加によるpH上昇）によって生じた不動態皮膜Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>がFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等の3価の酸化鉄になる酸化反応をアノード反応として計測しているなどの可能性が考えられる。
- (8) 供試体のほとんどは、経時変化に伴い、電気防食の効果によりアノード反応が抑制され、設定した分極量よりも復極量が大きくなる傾向を示した。また、初期電位に対するオフ電位の変化

量も、概ね解体前にはプラスとなる傾向を示した。しかし、20°C65%RHと35°C乾湿環境下の供試体の一部では、オフ電位の変化量がマイナスとなるものが発生した。つまり、夜間に無通電状態となる間欠通電方式でも電気防食の効果が生じてくると、復極に必要な酸素が不足する可能性があることがわかった。

- (9) 解体後の鋼材の腐食状況より、間欠通電による防食効果は主に塩化物イオン量に影響されていた。塩化物イオン量6kg/m<sup>3</sup>以下であれば、いずれの陽極についても分極量100mVとする電流量を通電することで間欠通電でも防食することが可能であった。しかし、塩化物イオン量が10kg/m<sup>3</sup>と多くなる場合、面状の貼付け型シート陽極を用いた供試体では間欠通電で防食可能であったが、線状のチタンリボンを用いた供試体では局部腐食が発生した。本結果から、塩化物イオン量が10kg/m<sup>3</sup>と多くなる場合、間欠通電で電気防食するには鋼材表面での電流分布や改善効果への影響を考慮した陽極の設計が必要であると考えられる。
- (10) X線回折法による解体後の鋼材表面の組成分析より、防食供試体の鋼材表面にはFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を少量含むものも存在したが、常時通電、間欠通電とも主成分はFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>とFeOの酸化物で構成されていた。また、それらの酸化物のX線回折強度は比較的強く、ノイズの少ないX線回折パターンを示したことから、それらの酸化物は晶質性であると考えられる。特に、確実に防食できていた貼付け型シート陽極を用いた供試体では、8割の割合でFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>とFeOのみの酸化物で構成されていた。これは通電による鋼材表面のアルカリ化で不動態皮膜が生成し、安定化したためと考えられる。つまり、本検討条件の範囲では間欠通電でも常時通電と同様の防食効果を発揮できていたため、鋼材表面の生成物が同様であったと考えられる。
- (11) 無防食供試体の鋼材表面の生成物は、黒皮同様のFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、FeO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の構成であった。しかし、腐食面積が50%以上の腐食が激しい供試体では、ピーク箇所のX線回折強度は低く、非晶質であるノイズを多数含んでおり、α-FeOOH、β-FeOOH、γ-FeOOHなどのオキシ水酸化鉄を含んでいた。つまり、無防食供試体の鋼材表面では腐食に伴い酸化鉄が非晶質性となり、さらに腐食が進行すると、α-FeOOH、β-FeOOH、γ-FeOOHなどのオキシ水酸化鉄が生じたと考えられる。
- (12) 無防食供試体の中性化深さは約3~4mmであったのに対し、防食供試体は常時通電による供試体を含めすべて3mm以下の小さな値を示し、電気防食により中性化深さが増加するような現象は見られなかった。特に、シート陽極を外付けした供試体は、表面をフッ素樹脂フィルムが覆っているため、その遮蔽効果により、1.0mm前後の値でほとんど中性化していなかった。なお、今回の暴露試験では、塩化物イオンの影響と考えられる陽極材付近の中性化はいずれも確認できなかった。
- (13) 常時通電、間欠通電に関わらず、いずれの環境下でも、鋼材表面および鋼材直上の塩化物イオン量が低下していた。その低下している範囲は、概ね5°C65%RH<20°C65%RH<35°C乾湿の順で大きくなっており、温度変化によるコンクリート抵抗の変化やコンクリートの湿潤化が塩化物イオンの移動に影響を及ぼしている可能性が考えられた。なお、分極量や通電方法による明確な優劣は、確認できなかった。

鋼材の腐食電流密度は温度変化により異なり、定電流制御での通電調整時、環境温度により防食

電流量が異なる可能性があり、通電調整時の環境温度が防食効果に与える影響する可能性がある。そこで、第3節では、環境温度を変化させて通電調整した供試体を用い、間欠通電での電気防食による屋外暴露試験により検討し、以下の結論を得た。

- (1) ソーラーパネルのサイズを防食回路に必要な電力の10倍以上とし、起動電圧を5V程度とする定電流制御方式の電源装置を使用することで、雨天等の悪天候時を含め、1日あたりにより防食回路へ最低6時間通電でき、平均では10.6時間通電できていた。
- (2) ソーラーパネルを電流供給源とすることで、気温上下に伴う鋼材腐食速度の増減に対し、効率的な通電が実施でき、通電時間の平均は、春秋の4～6月・10～12月時では10.7時間、夏の7～9月時では11.3時間、冬の1～3月時では9.5時間であった。
- (3) 腐食電流密度より通電電流密度の方が概ね大きな値を示した。また、通電前に計測した腐食電流密度に関し、20℃屋外の方が5℃室内より大きな値を示したのと同様、分極量に必要な通電電流密度に関しても、20℃屋外の方が5℃室内より大きな値を示した。
- (4) 分極量に必要な通電電流密度は、陽極の設置位置・面積・種類によらず同様の傾向を示し、分極量の増加に伴い、通電電流量も大きくなる傾向を示した。
- (5) 間欠通電方式による防食供試体は、鋼材電位を10分間隔で常時計測するだけで、通電時のオン電位と無通電時のオフ電位が計測でき、通電による鋼材電位の経時変化が確認できた。
- (6) 間欠通電方式で防食している供試体の鋼材電位に関し、マイナス方向へのオン電位時の変化は急激に、プラス方向へのオフ電位時の変化は緩やかに推移した。このようにプラス方向へのオフ電位時の鋼材電位の変化が緩やかなのは、プラス方向へのオフ電位時の鋼材電位の変化が酸素の拡散速度に律速であるためである。
- (7) 定電流制御であるため、継続的な通電による鋼材表面の改善効果や気温低下に伴う腐食電流密度の低下により、分極に必要な電流量が相対的に低下すると分極量は大きくなった。
- (8) 気温上昇時、所定の分極量は保持していたが、5℃65%RH環境下で通電調整した供試体に関しては、オフ電位の最大値とオン電位の最小値との差が徐々に低下する傾向を示した。つまり、温度上昇時に防食効果が低下する傾向が示唆された。
- (9) 解体後の腐食面積と腐食減量の結果は明らかに無防食供試体より防食供試体の方が小さいのに対し、解体前に計測した腐食電流密度の結果では優劣の差は確認できなかった。このように、腐食電流密度の計測で防食と無防食の優劣の差が確認できなかった原因は、24時間の復極試験後に2日以上経過した段階で腐食電流密度を計測していることや、照合電極設置箇所の鋼材の腐食状態が鋼材全体の腐食状態を平均化した場合と異なること等が原因であると考えられる。
- (10) 20℃屋外で通電調整した供試体および5℃室内で通電調整した供試体とも、継続的な通電による防食効果により、復極量は設定した分極量よりもすべて増加する傾向を示した。また、初期電位に対する復極後のオフ電位の値についても、酸欠等によりマイナスの値を示したものも発生したが、概ねプラス方向へ推移し、防食効果が確実に作用し、アノード反応が抑制されている傾向を示した。
- (11) 5℃室内で通電調整した供試体のうち、通電量が小さい常時通電供試体では、環境温度が高い屋外暴露時に復極量の低下が発生した。このことから、通電調整時の環境温度が、その後の防

食効果に与える影響がある可能性が示唆された。

- (12) 腐食面積率は、5°C65%RHの室内環境下で通電調整した供試体の方が20°Cの屋外環境で通電調整した供試体より、大きくなる傾向を示した。これは、温度によって、鋼材の腐食電流密度が変化することが主要因と考えられ、通電調整は温度が高い時期に実施すべきであることを示唆していると考えられる。
- (13) 腐食減量は、腐食面積の結果と異なり、5°C65%RHの室内環境で通電調整した供試体の方が小さい傾向を示した。これは、5°C65%RHの室内環境で通電調整した供試体の当初54日間の暴露は5°C環境下であるのに対し、20°Cの屋外環境で通電調整した供試体の暴露は夏季の高温下であり、その温度履歴の差が原因であると考えられる。
- (14) 防食供試体はいずれも防食効果を確実に発揮し、無防食供試体の暴露後より、腐食面積率および腐食減量とも小さな値を示した。分極量に対する防食効果に関しても、チタンリボンを用いた供試体の腐食面積率は分極量の設定値が大きいものほど小さくなっている傾向を示した。しかし、腐食減量ではそのような傾向は見られなかった。本検討条件では、分極量100mV以上の通電電流密度を通電することで、間欠通電でも常時通電同様の防食効果を発揮可能であると考えられる。
- (15) 5°C65%RHの室内環境で通電調整した防食供試体の鋼材表面はいずれも、少量の $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を含む、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\text{FeO}$ を主成分とした酸化物で構成されていた。一方、20°Cの屋外で通電調整した防食供試体では、ほとんど $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を含まず、ほとんどの供試体は $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\text{FeO}$ のみの酸化物で構成されていた。20°Cの屋外で通電調整した防食供試体の方が確実に防食できていると考えられることから、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ が消失していたのは、電気防食によって $\text{Fe}_2\text{O}_3$ が還元され、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ が生成した可能性が考えられる。
- (16) 無防食供試体の鋼材表面は黒皮と同様の成分である $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を少量含むが、ほぼ非晶質な成分で構成されていた。
- (17) 無防食供試体の中性化深さは4.3mm、チタンリボンを用いた防食供試体は約2~4mmであったのに対し、貼付け型シート陽極を外付けした供試体は1mm未満の値であった。貼付け型シート陽極の表面はフッ素樹脂フィルムで覆っているため、その遮蔽効果により、コンクリート面が露出している他の供試体よりも中性化が生じにくくなった。なお、今回の暴露試験では、塩化物イオンの影響と考えられる陽極材付近の中性化はいずれも確認できなかった。
- (18) EPMAによる塩化物イオンの分布状況の分析の結果、間欠通電および常時通電とも、いずれの環境下でも、鋼材表面の塩化物イオン量が低下し、鋼材直上のかぶりコンクリート部の塩化物イオン量についても低下していた。ただし、その低下している範囲は、5°C環境下より20°C環境下で通電調整した防食供試体の方が大きくなった。これは、通電量が20°C環境下で通電調整した防食供試体の方が大きいためであると考えられる。

コンクリートの電気抵抗は含水率で異なり、水掛かり箇所や海水の飛沫帯などでは電流の偏りが発生し、防食効果への影響が生じる可能性がある。そこで、第4節では、電気防食の適用箇所に関し、供試体の一部に水掛かり箇所が発生した場合の防食回路の影響と表面含浸材の併用による水掛かり対策の効果について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 電気防食工法を施工した箇所の一部に水が掛る場合、水の影響により水掛り箇所に電流の偏りが生じた。
- (2) シラン系表面含浸材の併用で水の影響による電流の偏りを軽減できることを確認した。
- (3) ケイ酸塩系表面含浸材による水掛り箇所への電流の偏りの軽減効果は確認できなかった。シラン系表面含浸材と比較してケイ酸塩系表面含浸材の吸水抑制率が低いためであると考えられる。
- (4) シラン系表面含浸材による電流の偏りの軽減効果は、チタンリボンを使用した供試体の方が貼付け型シート陽極を使用した供試体と比較して高かった。これは、表面含浸材の塗布面積の差によるものと考えられる。
- (5) いずれの供試体も散水後の復極量は散水前の分極量よりも大きく、100mV以上を確保していた。よって、本検討では表面含浸材の有無に関わらず鉄筋周辺の酸素不足が発生しなかったため、表面含浸材の塗布による鉄筋周辺の酸素不足低減効果を確認できなかった。

電気防食時の陽極に関し、陽極の配置方法によって、防食電流の通電状況が異なり、防食効果へ影響する可能性がある。そのため、第5節では、陽極材と鋼材との分極特性とコンクリート抵抗値を境界条件としたFEM解析によりシミュレーションし、電気防食時の陽極の配置による防食効果への影響を検討し、以下の結論を得た。

- (1) 適当な間隔・配置方法で貼付け型シート陽極を設置すると、流入電流量の偏りを抑制できる。
- (2) 小型供試体から得た分極特性を入力してFEM解析したところ、流入電流量と分極量の傾向に関し、実験値を比較的精度良く再現することができる。
- (3) 貼付け型シート陽極の配置方法によっては印加電圧が過大となり、100mV以上の分極量が確保できなくなる可能性がある。

「第4章 間欠通電方式による電気防食を適用した実構造物での鋼材腐食抑制効果」では、まず、塩害環境下の道路橋および飛沫帯の栈橋にて、常時通電および間欠通電による電気防食工法を適用し、実構造物での鋼材腐食抑制効果に関し、定期的な調査により検討し、以下の結論を得た。

- (1) データロガーで鋼材電位、電圧、通電電流量、躯体の表面温度等を常時計測することで、環境変化による防食回路や防食効果への影響が確認できた。特に、間欠通電方式の場合、日中はオン電位、夜間は無通電状態のオフ電位となり、一定時間ごとに計測することで、防食効果を確実に確認できた。本試験施工箇所でも10分毎にデータロガーで計測した結果、貼付け型シート陽極を用い、分極量150mVとなる通電量を通電することで、間欠通電でも常時通電同様の防食効果が得られることが確認できた。
- (2) データロガーで常時計測することで躯体の湿潤化による防食回路や防食効果への影響が確認できた。具体的には、飛沫帯の栈橋で、コンクリート面の露出面積が異なる陽極を用いたところ、波がかりによる躯体の湿潤化が異なり、電圧や通電面ごとに計測した電流量が経時的に変化した。また、道路橋の雨掛り箇所においても、コンクリート露出面積の小さい貼付け型シート



陽極を用いることで、雨天日等でも電圧や鋼材電位に極端な変化は生じておらず、飛沫帯の栈橋同様、コンクリート露出面積の小さい陽極を用いることで湿潤化による影響が低いことが確認できた。

- (3) 定電流制御での電気防食時、常時通電方式および間欠通電方式とも、データロガーで常時計測した鋼材のオン電位とコンクリートの表面温度は相関関係を示した。栈橋および道路橋とも、最初の夏季を経過する前後で相関状態が変化し、夏季を経過する段階で決定係数 $R^2$ が上昇し、相関関係が上昇した。つまり、最初の夏季を経過する段階で、オン電位の温度特性が変化した。これは、最初の夏季を経過する段階で、鋼材の分極特性や断面修復材の抵抗による温度特性が安定化し、IRドロップを含む鋼材電位と温度とが相関を示すように変化したためであると考えられる。
- (4) 道路橋および飛沫帯の栈橋とも、復極試験時のオフ電位に関し、間欠通電箇所は防食前の初期電位に対し、常にプラスの値を示したが、常時通電箇所では時折、マイナスの値を示した。復極には酸素が必要であり、常時通電箇所の場合、18～24時間程度の復極試験では十分な酸素が供給されておらず、完全に復極できていないためであると考えられる。一方、間欠通電箇所ですべてプラスの値を示したのは、夜間に無通電状態となるため、鋼材の貴化現象に必要な酸素が常時通電より鋼材表面に供給され、その影響で鋼材電位がプラスに変化したと考えられる。
- (5) 試験施工した道路橋および飛沫帯の栈橋では、防食対象の状態や雨天時の日射強度を考慮し、適切なソーラーパネルを選定したため、全暴露期間を通じ、道路橋では最低2.3時間以上・平均10.4時間、栈橋では最低6時間以上・平均11.2時間通電できており、全日数の90%以上で8時間通電できていた。
- (6) 道路橋および飛沫帯の栈橋とも、施工直後の鋼材表面の環境改善効果が発揮できていない時期に気温が上昇すると、常時通電箇所および間欠通電箇所を含め、鋼材の腐食速度増加の影響により復極量が低下した。ただし、間欠通電箇所の復極量の低下は常時通電よりも大きく、道路橋では最大30mV程度、飛沫帯の栈橋では最大70mV程度低下した。つまり、間欠通電方式の場合、夜間に無通電状態となるため、常時通電よりも鋼材表面の環境改善効果の発現が遅く、通電初期は、常時通電より温度の上昇時の腐食速度増加の影響を受ける可能性がある。そのため、間欠通電箇所の通電量の設計では、気温変動時の影響を考慮した設計が必要である。
- (7) 復極試験後のカソード分極試験で定期的に腐食電流密度を算出した結果、道路橋の間欠通電箇所では、気温上昇時に若干増加するが長期的にはほとんど変化していなかった。また、飛沫帯の栈橋でも、常時通電箇所を含め気温上昇時に若干増加したが、いずれの箇所でも腐食電流密度は $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 未満であった。よって、復極試験後のカソード分極試験より、鋼材は不活性の不働状態を維持した防食状態にあることが確認できた。また、カソード分極試験時のターフェル勾配に関し、飛沫帯の栈橋では、コンクリートの湿潤化による酸素の拡散速度の影響と考えられる挙動を示した。つまり、コンクリートの露出面積が大きい施工箇所では施工直後から極端に大きな傾きを示し、露出面積が小さい箇所では長期的に大きくなる傾向を示した。また、コンクリートの露出面積の小さい道路橋では、湿潤化の影響より温度変化による影響と考えられる変動を示した。なお、カソード分極試験による腐食電流密度の刑事的な計測結果からも、本施工箇所での間欠通電方式による電気防食は、常時通電方式と同等の防食効果を発揮してい

ると考えられる。

次に、飛沫帯の栈橋での貼付け型シート陽極の陽極配置による通電量と分極量への影響に関し、小型供試体で計測した陽極材と鋼材との分極特性とコンクリート抵抗値を境界条件としたFEM解析によりシミュレーションした値と実測値との比較により検討した。その結果、電気防食の適用後の電圧や通電量、鋼材の分極量などに関し、FEM解析でシミュレーションした結果は、概ね現場での計測値を再現できており、実構造物についてもFEM解析が適用できることを確認した。

## 5.2 間欠通電方式による電気防食工法の適用に関するシナリオデザイン

第2章において、電気防食工法の近年の研究をレビューし、電流供給方法が電気防食工法の維持管理の重要な課題として残されていることを確認した。そして、その解決手段の一つとして電流供給源に再生エネルギーであるソーラーパネルを選定し、維持管理の向上を考慮したソーラーパネルのみを用いた日中のみの通電による間欠通電方式の電気防食工法を考案した。そこで、第3章ではソーラーパネルのみを電流供給源とする場合の効率的な電流供給システムの考案と検証の他、間欠通電方式による電気防食工法の適用対象や適用方法、課題などに関し、小型供試体を用いた暴露試験により検討した。また、現場への適用を考慮するためにFEM解析によるシミュレーションによる検討も実施した。さらに第4章では、実際に検討した間欠通電方式による電流供給システムを実構造物に適用し、その防食性能を検証した。これらの検討結果から、塩害劣化による鉄筋コンクリート構造物の電気防食工法に関し、維持管理の向上のため電流供給をソーラーパネルのみとする場合の適用範囲と適用方法の他、適用後の維持管理について、以下に提言する。

### 5.2.1 適用範囲

電気防食工法では、犠牲陽極を電流供給源に用いる場合、防食電流量の調整ができないため、適用の際、対象構造物の腐食状況や環境に応じて検討する必要がある。一方、商用電源を用いた外部電源方式では対象構造物に応じて防食電流の調整が可能であり、ほぼすべての鉄筋コンクリート構造物に適用可能である。ソーラーパネルを電流供給源とする間欠通電方式の電気防食工法は、外部電源方式の陽極部分はそのままに、商用電源となる電流供給部分をソーラーパネルに置き換えるシステムとなるため、適用対象はほぼ外部電源方式と同様となる。土木学会コンクリートライブラリー107「電気化学的防食工法\_設計施工指針(案)」<sup>1)</sup>に基づき作成した間欠通電方式による電気防食工法の適用対象箇所を図5.1に、鉄筋コンクリート構造物の劣化過程(塩害)を図5.2に示す。

ソーラーパネルのみの間欠通電方式による電気防食では夜間に無通電状態となる。そのため、第3章の2節で適用箇所の検討を実施し、塩化物イオン濃度が $10\text{kg/m}^3$ の時、面状の貼付け型シート陽極を用いた供試体では常時通電同等の防食効果を発揮したのに対し、防食線状のチタンリボン陽極を用いた供試体では局所腐食型の腐食が生じ、面状のシート陽極とは異なる試験結果を示した。つまり、塩化物イオン量が多く、腐食速度の激しい構造物では、陽極材の種類や配置に応じて防食電流の均一性が異なり、陽極材の種類によっては局所的な腐食が生じ、常時通電とは異なる試験結果が発生した。この結果から、基本的な適応対象とする構造物の塩化物イオン量は $6\text{kg/m}^3$ までとし、 $6\sim 10\text{kg/m}^3$ では防食電流の均一化への検討が必要とした。陽極の種類や配置による防食電流の均一化への検討では、鋼材と陽極の分極特性を境界条件に用いたFEM解析によるシミュレーションを実施す

ることで確認することが可能である。なお、塩化物イオン量が $10\text{kg}/\text{m}^3$ を上回る場合は

また、湿潤化によるコンクリート抵抗の変化によって、防食電流の不均一は海洋環境の干満帯や海中部でも生じる可能性があり、適用するには検討が必要とした。さらに、図5.2のひび割れが発生している加速期や劣化期にある構造物に関しても、ひび割れ部からの酸素供給や塩化物イオンの浸透により、ひび割れの有無で腐食環境が大きく異なる可能性があるため、適用するには検討が必要とした。

以上の結果を踏まえ、ソーラーパネルを用いた間欠通電方式による電気防食工法の適用に関する確認手順を図5.3のように示した。

その他、水掛かり箇所のような防食電流の不均一が生じやすい箇所については、貼付け型シート陽極のようなコンクリートの露出面積が小さく、面状の陽極を用いれば、第4章で検討したように道路橋の気中部の外桁のような雨掛かり箇所や飛沫帯の栈橋でも防食電流の均一性が確保され、間欠通電方式で電気防食可能であると考えられる。また、線状のチタンリボン陽極を用いた場合においても、第3章の4節で検討したような電気防食の施工後、コンクリートの露出面にシラン系表面含浸材を併用することで、外部からの水の影響を抑制することが可能であると考えられる。

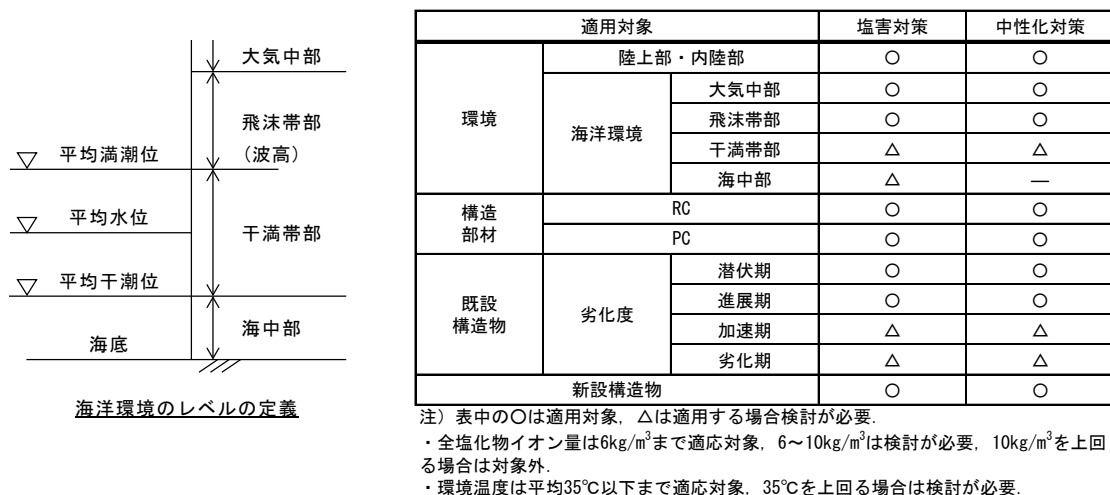


図5.1 間欠通電方式による電気防食工法の適応対象箇所

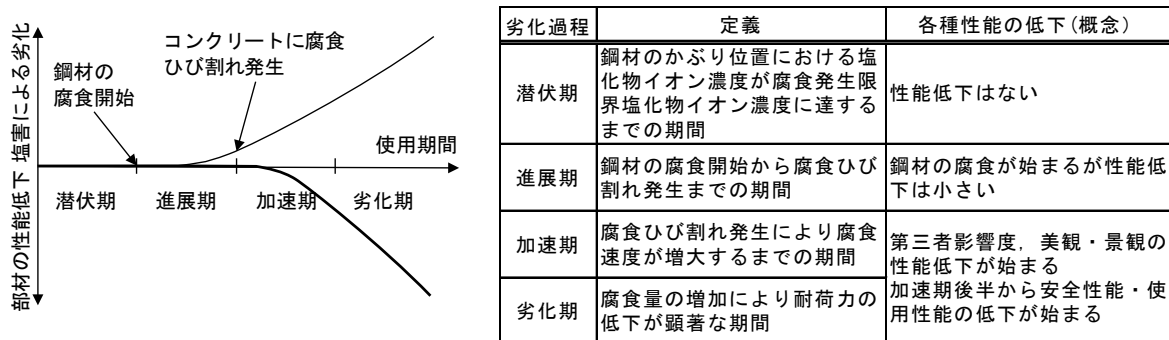


図5.2 鉄筋コンクリート構造物の劣化過程(塩害)

## 5.2.2 適用方法

ソーラーパネルを用いた間欠通電方式による電気防食工法では、外部電源方式による電気防食工法の電流供給部分である商用電源に関し、ソーラーパネルを利用する。そのため、基本的な陽極材の設置や防食回路の設計は、既存の外部電源方式の電気防食工法と同様である。ソーラーパネルを用いた間欠通電方式による電気防食工法の適用にあたり、外部電源方式と異なるのは、①ソーラーパネルの設計の必要性、②ソーラーパネルを効率的に利用する電源装置の必要性、③防食電流の制御方法である。以下にそれらの(1)ソーラーパネルと電源装置

ソーラーパネルの発電量が最大となるのは晴天時のみであり、曇天時や雨天時の発電量は晴天時の1/2～1/10や1/20となる。よって、ソーラーパネルのサイズは雨天時を基準に設計することとした。また、日の出や日の入り時あるいは雨天時等のソーラーパネルが発電した電力がわずかな時でも、防食電流として利用できるように、ソーラーパネルより電力を絞り出す電源装置は低電圧の5V程度で起動することとした。

さらに、電源装置からの防食電流の制御方法は、防食回路の異常が検知しやすく、防食回路の変状が生じにくい定電流制御とした。つまり、ソーラーパネルのサイズは防食回路に必要な電力の10倍以上とし、電源装置の起動電圧は5V程度とし、定電流制御で防食回路へ通電するシステムとした。

その結果、第3章の小型供試体を用いた検討では毎日最低6時間以上、平均では10時間以上通電できており、第4章の実構造物においても毎日最低2.3時間以上、平均では10時間以上、雨天時の悪天候時を含め100%毎日通電できており、日々鋼材を防食状態とすることができていた。

### (2) 防食電流の制御方法

第3章の小型供試体を用いた防食効果の検討では、分極試験で分極量100mV以上とする電流量を設定値として定電流制御方式で通電することで、防食効果を確実に発揮できることを確認した。しかし、電気防食による防食効果が鋼材表面の環境改善効果として発現する前に、気温の上昇等により腐食電流が増加方向へ変化した場合、復極量が低下する場合がある。特に、第4章の道路橋では通電後の温度上昇時に復極量が最大30mV程度、飛沫帯の栈橋では最大70mV程度低下した。

一方、第3章の供試体を用いた検討では、常時通電時のみでなく、日々、無通電状態となり酸素が拡散しやすく酸欠状態となりにくい間欠通電時も、継続的な通電により鋼材表面が改善され、酸素

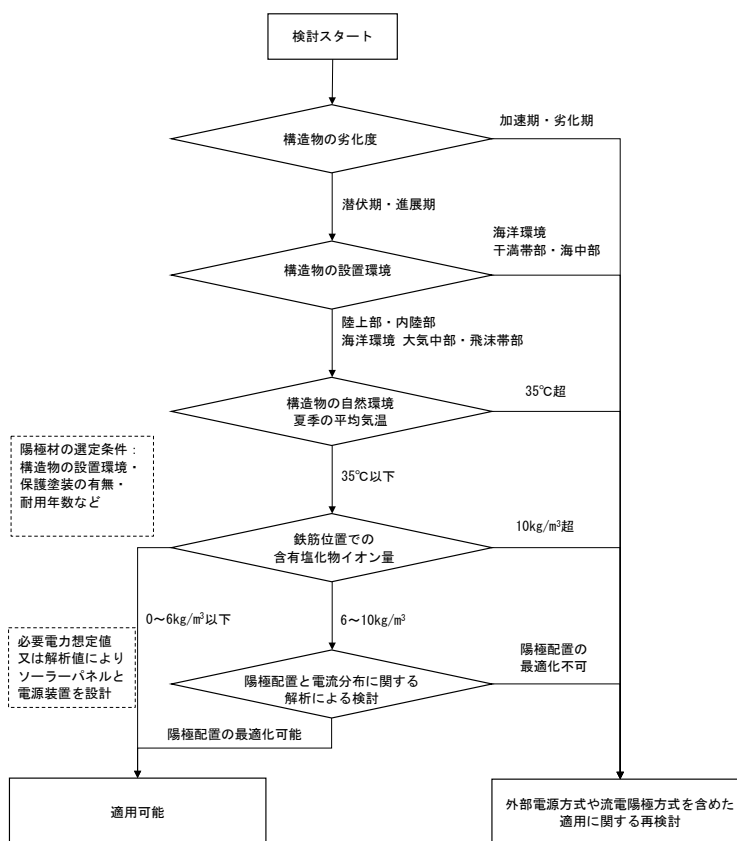


図 5.3 ソーラーパネルを用いた間欠通電方式による電気防食工法の適用性の確認手順

濃度が低下し、回路の電圧が上昇、鋼材電位が卑化することが発生した。鋼材電位が卑化し、回路の電圧が上昇することは、防食回路の耐久性に影響を与える。ただし、第4章の道路橋や飛沫帯の栈橋での実構造物では、分極量150mV以上とする電流量で通電していても、間欠通電方式では酸素濃度の低下による鋼材電位の卑化現象や回路の電圧上昇は発生していない。なお、飛沫帯の栈橋では分極試験によるターフェル直線の経時変化から、躯体は湿潤化していると考えられ、比較として同じ電流量を通電した常時通電方式では1年後の通電調整まで、回路の電圧が上昇し続けた。

これらの結果から、定電流制御により通電する防食電流の設定値は、防食回路の耐久性を確保しつつ、間欠通電方式で確実に防食できる分極量150mV以上とする電流量とした。

### 5.2.3 適用後の維持管理

ソーラーパネルを用いた間欠通電方式の電気防食工法の適用後の維持管理に関し、電流供給方式が異なるのみであり、他の電気防食工法と同様、防食期間を通じ、防食回路が適切に動作し、鉄筋コンクリート構造物内の鋼材の腐食を抑制しているかを確実に管理する必要がある。維持管理の手順は、図5.4に示す土木学会コンクリートライブラリー107「電気化学的防食工法\_設計施工指針(案)」に基づき実施するものとする。点検項目について

も、電源装置、モニタリング回路、陽極システム、配管等の目視点検および稼働状況の確認や計測を実施するものとする。防食効果の評価は他の電気防食同様、基本的には復極試験による復極量で検討する。復極試験の手順は同様であるが、電流供給源としてソーラーパネルのみを用いた間欠通電方式であるため、計測自体はソーラーパネルが発電している日中のみ実施可能である。復極量の評価にはモニタリング用に設置した照合電極で計測した鋼材電位変化量を用い、評価基準値は分極量の設定値である150mV以上を目標とする。また、初期電位に対するオフ電位を考慮することで、鋼材表面の環境改善効果やそれに伴いアノード反応の抑制状況が確認できる。具体的には、電気防食後の鋼材電位が、初期電位に対し、プラス方向へ変化している場合、鋼材表面の環境改善効果により、アノード反応が抑制されていると考えられる。

一般に、復極試験による鋼材電位の計測では高入力抵抗の直流電圧計を用い、モニタリング回路への正確な接続や正確な値の読み取りが必要であり、専門的な技術を要する。一方、ソーラーパネルを用いた間欠通電方式による電気防食工法では、日中はオン電位、夜間はオフ電位となり、データロガーをモニタリング回路へ接続するだけで、複雑な計測回路や専門的な技術を必要とせず評価データを収集することができる。それらの収集したデータの日変化量や経時変化で、復極量や鋼材表面の環境改善効果を確認することができ、腐食抑制効果を評価できる。第4章の実構造物での評価

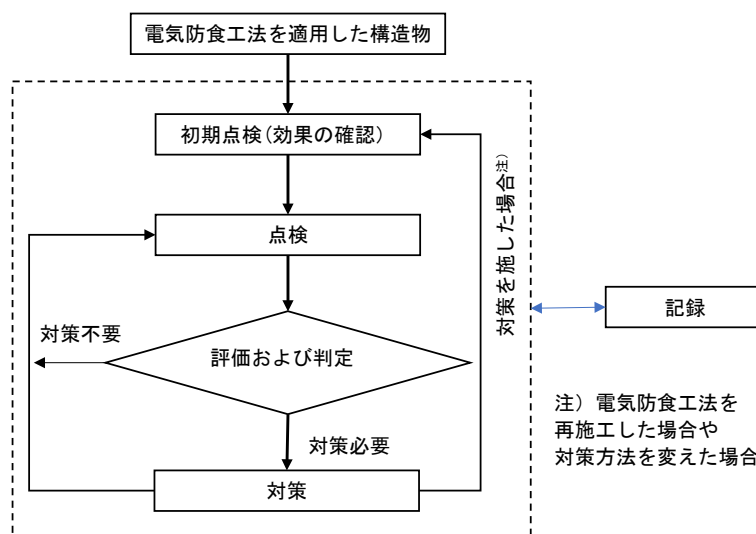


図 5.4 維持管理の手順

では、データロガーを用い10分毎に鋼材電位を常時計測しているだけでオフ電位やオン電位の日変化量や経時変化量を計測でき、コンクリート表面温度を併用で計測することで、電気防食による温度特性の変化を確認することができた。

防食回路の耐久性に関し、配線配管等は紫外線等によるプラスチック材料の劣化や電子部品の耐久性(特にコンデンサー部品の液漏れ)に影響する。防食回路である陽極材の劣化は、通電時の陽極表面での電気化学反応による陽極材の消耗により生じる。そこで、NACE法<sup>2)</sup>やエルガード協会法<sup>3)</sup>では、水溶液中で鋼材表面へ強制的に大きな電流を通電し、通電できた時間から積算電流量(=通電量×通電時間)を算出し、耐用年数を評価している。一方、ソーラーパネルを用いた間欠通電方式による電気防食では、24時間のうち通電しているのは平均で10~11時間程度である。つまり、ソーラーパネルを用いた間欠通電方式による電気防食では、常時通電の半分以下の時間しか通電できておらず、積算電流量で考慮すると耐久性は2倍に向上することとなる。また、常時通電方式では、陽極材表面や鋼材表面で常に電気化学反応が生じており、環境変化等が発生すると、その影響で回路の電圧の上昇や陽極材の被覆モルタルの劣化が発生することがある。一方、間欠通電方式による電気防食では、通電による陽極表面や鋼材表面での電気化学反応時の生成物も半分以下であり、夜間の通電停止時に拡散し、耐久性の確保には有利に作用する。よって、電気防食工法の電流供給源をソーラーパネルのみとすることは、積算通電時間や電気化学反応による生成物の影響が軽減でき、耐久性には有利に作用すると考えられる。

### 5.3 今後の展望

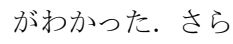
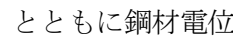
塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物の維持管理を向上することを考慮し、ソーラーパネルを用いた間欠通電方式による電気防食を構造物へ適用することによる展望と課題を以下に示す。

#### ① 適用に関する評価

本研究では塩化物イオン量 $6\text{kg/m}^3$ までは確実に防食効果を発揮できていたが、 $10\text{kg/m}^3$ では陽極材の種類による防食電流の均一性の影響が発生した。そのため、面状陽極である貼付け型シート陽極では $10\text{kg/m}^3$ でも常時通電と同等の防食効果を発揮していたが、 $10\text{kg/m}^3$ 超については

とした。また、海洋環境の干満帯や海中部でも直接海水の影響が発生するため、防食電流の不均一を生じる可能性があり、適用するには再検討が必要であるとした。よって、このような構造物へ適用するには更なる検討が必要であると考えられる。

#### ② 対策後の防食効果の評価

間欠通電方式では、日々、データロガーを接続するだけ、オン電位とオフ電位が自動計測でき、鋼材電位の日々の変化量と経時変化が確認でき、防食効果の評価手法の一つとして確認できることがわかった。さらに、4. 8や4. 22で示したように、実構造物の評価では定電流条件下で温度変化とともに鋼材電位を計測すると、常時通電方式を含めオン電位と温度で相関性のある結果が得られ、防食効果の評価手法の一つとして可能性がある現象を確認できた。これらの鋼材電位と温度との関係から防食効果を検証できれば、データロガーでデータを収集しているだけで、防食効果を評価でき、維持管理が向上すると考えられる。

#### ③ 間欠通電による耐久性向上に対する検討

防食電流の通電を常時通電から間欠通電とすることで、通電時間が半減するだけでなく、陽極表



面での電気化学反応による反応生成物も減少する。その結果、それらの反応生成物の影響は減少し、陽極材の耐久性は向上すると考えられる。しかし、通電を間欠通電とした場合の陽極材の耐久性の向上度合いは、電気回路の故障の原因同様、陽極表面でオン、オフが頻繁に繰り返されるため検討が必要であると考えられる。

#### ④ 配管配線の耐久性向上に対する検討

間欠通電とすることで通電量は減少するため、陽極材の耐久性は向上すると考えられるが、配管や配線の耐久性は紫外線等によるプラスチック材料の劣化(耐候性)や電子部品の耐久性(特にコンデンサー部品の液漏れ)に影響する。素材やシステムその他、設置方法などについて改善を図ることができれば、システムとして耐久性を向上させることができると考えられる。

#### 【参考文献】

- 1) 土木学会：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
- 2) NACE:NACE standard TM0294-94, Item No.21225, March 1994
- 3) 中川将秀, 壹岐直之, 羽瀨貴士, 峰松敏和, 福手勤; 港湾コンクリート構造物を対象とした各種補修工法とLCC試算. 日本コンクリート工学協会「コンクリート構造物のアセットマネジメント」に関するシンポジウム, 2006.12

## 謝 辞

本論文は、勤務先であるショーボンド建設株式会社で取り組んできた研究の成果を基に、平成26年10月から京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻博士後期課程において、取り組んだ研究の成果を取りまとめたものです。

京都大学大学院教授 河野広隆先生には、本研究の遂行にあたり、終始、懇切丁寧なご指導、ご教授を頂きました。先生に御指導頂いたことを今後の人生の糧に活かしていきたいと思いを。ここに心より感謝申し上げますとともに、厚く御礼申し上げます。

京都大学大学院教授 宮川豊章先生には、本研究を実施するにあたり、貴重なご指導、ご教授を賜りました。ここに心より感謝申し上げますとともに、厚く御礼申し上げます。

京都大学大学院教授 杉浦邦征先生には、本研究の遂行にあたり、貴重な御指導、御教授を賜りました。ここに心より感謝申し上げますとともに、厚く御礼申し上げます。

京都大学大学院准教授 服部篤志先生には、本研究の遂行、本論文の取りまとめ、審査を通じて貴重な御指導、御助言を賜りました。ここに心より感謝申し上げますとともに、厚く御礼申し上げます。

京都大学大学院准教授 山本貴士先生には、本研究の遂行、毎月のドクターミーティング、本論文の取りまとめ、審査を通じて貴重な御指導、御助言を賜りました。ここに心より感謝申し上げますとともに、厚く御礼申し上げます。

京都大学大学院助教授 高谷哲先生には、本研究の遂行、毎月のドクターミーティング、本論文の取りまとめに関し、終始貴重な御指導、御助言を頂きました。ここに心より感謝申し上げますとともに、厚く御礼申し上げます。

京都大学大学院助教授 松本理佐先生には研究課程において貴重な御助言を頂きました。ここに心より感謝申し上げますとともに、厚く御礼申し上げます。

京都大学 稲田紀子氏には事務面での懇切丁寧な御支援、御対応頂きました。心より厚く御礼申し上げます。

京都大学 平野裕一氏には本研究の遂行にあたり、終始貴重な御助言を頂きました。心より厚く御礼申し上げます。

博士後期課程への編入学および本研究の機会を与えて頂きましたショーボンド建設株式会社 創業者会長 故上田昭氏、代表取締役会長 藤井宗司氏、代表取締役副会長 石原一裕氏、代表取締役社長 岸本達也氏、専務取締役技術本部長兼補修工学研究所長 岳尾弘洋氏、執行役員技師長 加藤暢彦氏に心より感謝の意を申し上げます。

本研究の遂行にあたり、御理解、御協力を頂いたショーボンド建設株式会社補修工学研究所の職場の方々には深く感謝の意を申し上げます。特に、大久保謙治氏、山崎大輔氏、太田翔氏、二木有一氏、黒川公人氏には、試験施工や供試体の作製、計測などで多大な御協力を頂きました。ここに深く感謝の意を申し上げます。

住友大阪セメント株式会社 鹿島篤志氏には，試験施工や供試体の作製，計測，電気防食の数値解析などで多大な御協力を頂きました．ここに深く感謝の意を申し上げ致します．

藤森工業株式会社 石川康登氏，同社 鈴木潤氏には，博士後期課程への編入学前後を通じ，本研究にご協力頂きました．ここに深く感謝の意を申し上げ致します．

京都大学大学院博士後期課程に同時期に在籍した三井住友建設株式会社 佐々木亘博士，西日本旅客鉄道株式会社 吉田隆浩博士，株式会社国際建設技術研究所 葛目和宏博士，電気化学工業株式会社 宮口克一博士，Artur Sagradyan博士，株式会社IHIインフラ建設 廣井幸夫氏，株式会社IHIインフラ建設 高木祐介氏，日本ピーエス株式会社 天谷公彦氏には毎月のドクターミーティングでの議論を通じ，本研究の遂行にあたり貴重な御教授，御意見を賜りました．心より感謝の意を申し上げ致します．

本研究を遂行するにあたり，皆様方より終始心温まる励ましのお言葉を頂きました．ここに深く，深く，心より感謝の意を申し上げ致します．

最後に，本研究の遂行にあたり，常日頃よりサポート頂いた家族に感謝の意を表し，本論文の謝辞と致します．