

電車線路設備における腐食・塩害環境の定量化に向けた基礎検討

白木 理倫* 柴田 直樹** 平川 慎太郎**
 近藤 優一*** 藺田 洋平*** 白水 義人#

Fundamental Consideration of Corrosion/Salt Damage Environment Quantification in OCL

Tadanori USUKI Naoki SHIBATA Shintaro HIRAKAWA
 Yuichi KONDO Yohei SONODA Yoshito SHIROUZU

There are many researches tackling the extension of the life of OCL material. However, in these researches there are few indicators or ideas quantitatively indicating the corrosive environment. This paper shows various environment data acquired from beside the railway track in a short period (about two weeks) and a medium period (about half a year) aiming at quantification of the environment evaluation. Furthermore, this paper shows the results of the basic study on quantifying the environment evaluation based on the results of a medium period measurement.

キーワード：電車線路設備，腐食，がいし，塩害，環境

1. はじめに

国土交通省への運転事故等の報告・届出を基に、電気鉄道の電力設備に起因する運転事故や輸送障害を分類した報告がある¹⁾。図1に示すように、輸送障害に至る様々な原因の中で、劣化・不良によるものに着目すると、設備別では電車線路が約5割、原因別では腐食が約2割となっている。このことから、統計的にみると電車線路設備の腐食の抑制は鉄道事業者が解決すべき優先度の高い課題のひとつであるといえる。

これまでにも、腐食に起因する設備事故発生リスクの低減やメンテナンスコストの低減を目的として、亜鉛めっき鋼材に対して塗装を施した例²⁾や、従来の材質から耐食性の高い材質に変更した例³⁾など、材料の耐食性向上を目的とした研究開発が多数報告されている。ただし、電車線路設備の一般的な構造材である亜鉛めっき鋼材と比べると耐食性の高い材料は、材料費が高く、イニシャルコストの面から導入する箇所をある程度限定せざるを得ない。しかし、現状では腐食環境を定量的に示す指標や考え方がほとんどないため、各鉄道事業者において電車線路部材の過去の取替周期の実績などを基に、高耐食性部材の導入箇所を決定しているのが実情である。一方で、あるエリアにおける腐食マップの作成⁴⁾や、トロッコ線表面に生成する被膜厚さと接触抵抗の関係の解明

⁵⁾など、腐食量と腐食を引き起こす環境の程度の間関係を定量的に捉える検討も着実に進められている。

そこで、鉄道事業者が鉄道の安定輸送に資する高耐食性部材の導入を検討する際、費用対効果の高い導入範囲を合理的に決定するために、筆者らはいし等の汚損度合いや腐食量などを測定が容易な他の指標から推定する研究を行っており、その検討材料として環境に関するデータの取得を行っている。

本論文では、営業線沿線で取得した環境に関する各種データを示すと共に、短期間測定（概ね2週間）に基づくトンネル内がいしの清掃周期やシリコン塗布範囲の検討に資する環境の程度の検討結果および中期間測定（概ね半年間）による環境の定量化に向けた基礎検討結果を報告する。

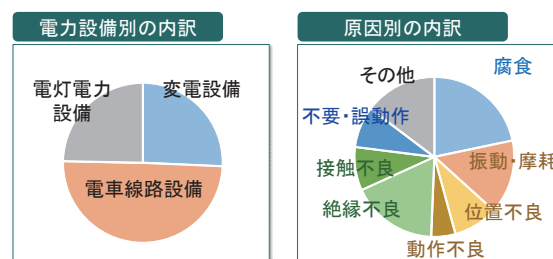


図1 劣化・不良による輸送障害等¹⁾

2. 腐食・塩害環境の評価方法

2.1 測定場所

短期間測定は、海底部を含む新開門トンネルと陸上部にある北九州トンネルの2つの新幹線用複線トンネ

* 電力技術研究部 集電管理研究室

** 電力技術研究部 き電研究室

*** 西日本旅客鉄道株式会社

九州旅客鉄道株式会社

特集：電力技術

で実施した。それぞれのトンネルにおける測定場所と略称を図2に、トンネル坑口から測定点までの距離、測定日数を表1に示す。測定日数が異なるのは、全ての地点で同時に測定を行ったのではなく、測定器の場所を変えながら順次測定したためである。また表中の電荷量、ESDD、NSDDは次節で説明する。中間測定は、表2に示す7か所で行った。測定は現在も継続中である。本稿では半年間の結果を示す。

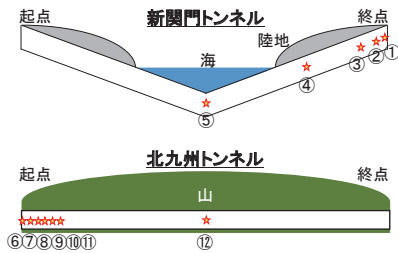


図2 測定場所および略称

表1 測定点詳細位置（短期間測定）

トンネル	略称	坑口からの距離 [m]	測定日数 [日]
新関門	①	162	6
	②	382	11
	③	835	13
	④	7,722	6
	⑤	14,033	12
北九州	⑥	8	17
	⑦	225	14
	⑧	356	13
	⑨	535	12
	⑩	760	9
	⑪	985	電荷量:17 ESDD, NSDD:26
	⑫	5,994	17

表2 暴露試験場所（中間測定）

場所、線区・駅間	略称	環境
鉄道総研勝木塩害実験所（新潟県村上市）	勝木	冬期、波しぶきが飛散
山陽本線 下関～門司間関門トンネル	関門	列車通過に伴い、漏水した海水が飛散
鹿児島本線 スペースワールド～八幡間	八幡	海（湾）から600m程度、波しぶきの飛散なし
筑肥線 大入～福吉間	福吉	海から120m程度（途中松林あり）、波しぶきの飛散なし
日豊本線 市棚～北川間	北川	川から200m程度、波しぶきの飛散なし
日豊本線 都農～川南間	川南	海から100m程度（途中松林あり）、波しぶきの飛散なし
日豊本線 竜ヶ水～鹿児島間	鹿児島	海（湾）から400m程度、波しぶきの飛散なし

2.2 測定項目

2.2.1 腐食量

評価用試験片の材質は、暴露試験時の腐食量評価において一般的に用いられている一般用鋼材 SS400（表面処理なし。以下、鋼板）である。評価指標は質量増加率とした。

2.2.2 等価塩分付着密度

がいの汚損度を示す指標として、等価塩分付着密度（Equivalent Salt Deposit Density, 以下 ESDD）があり、がいの汚損区分と想定塩分付着密度が示されている⁶⁾。

旧国鉄では「電気工作物（電車線路）設計施工標準」で塩害を考慮すべき線区を示しており、JR各社は基本的にそれに則った設備とし、メンテナンスを行っている。一般に、屋外においては、絶縁部にその性能を低下させる導電性物質が付着しても雨洗効果による絶縁性能の自然回復が期待されるため、JR各社においては、がいの汚損に起因する設備事故は屋外ではほとんど発生していない。一方、トンネル内や跨線橋の下などでは雨洗効果が期待できないため、そのような場所においては、絶縁部の定期的な洗浄・清掃や、シリコンコンパウンド塗布によって、絶縁性能の維持・強化に努めているが、各種環境因子の影響により稀に絶縁低下による地絡が発生している。

そこで、短期間測定では支持点の起点/終点側にある地絡導線用懸垂磁器がいに注目し、図3に示すがいの上面と保護面に分けて、また、中間測定では試験用に暴露した懸垂磁器がいをを用い、がいの上面/保護面、海（川）側/山側に分けて、筆洗い法⁷⁾による導電率測定から ESDD を算出した。



(a) 上面 (b) 保護面

図3 磁器がいし

2.2.3 不溶性物質付着密度

不溶性物質付着密度（Non-water-Soluble Deposit Density, 以下 NSDD）とは、単位面積あたりに付着している水に溶解しない物質（金属粉や塵埃など）の量を示すものである。導電率測定後の溶液をろ過して乾燥させ、ろ過前後のろ紙の質量差から NSDD を算出した。

2.2.4 電荷量

自己消耗型腐食センサである大気腐食モニタリングセンサ（Atmospheric Corrosion Monitor Sensor, 以下 ACM センサ）により、センサが暴露さ

れた環境の腐食性を定量的に評価することができる。鉄道事業者においては、ACM センサを用いた検討例は少ないが、他の業界では数多くの検討が行われている^{8) 9)}。今回、このセンサを用い、期間中に発生した電流から、その後の解析により電荷量を算出した。電荷量が多いほど、腐食しやすい環境であることを意味する。センサの構造および外観を図4に示す。センサは下から順に、基板金属（Fe や Zn など、卑な金属。ここでは M と記す）、窒化ホウ素（BN）を添加したエポキシ樹脂製の絶縁層、銀（Ag）が添加された導電性ペーストが積層された3層構造である。ACM センサの表面が乾燥した状態では基板と導電性ペースト間は絶縁されているため化学反応は起こらないが、雨や結露などの電解液によって基板と導電性ペーストを短絡すると、それぞれの金属で次のような化学反応が生じる。



この反応で授受される電子が、ガルバニック電流として基板と導電性ペーストを短絡したリード線に流れ、その電流値をロガーで収録することで定量的に腐食の情報を得る。なお、腐食環境性の傾向は基板の材質に依存しないため、今回の測定では測定期間に応じて基板が鉄の Fe-Ag 対、基板が亜鉛の Zn-Ag 対の2種類のセンサを用いた。

今回、測定器の都合から、短期間測定では支持点の起点側/終点側に、中期間測定では、がいし上面を模擬するために ACM センサの導電性ペーストが上（天）向きになるように、また、保護面を模擬するために導電性ペーストが下（地面）向きになるように取付けた。

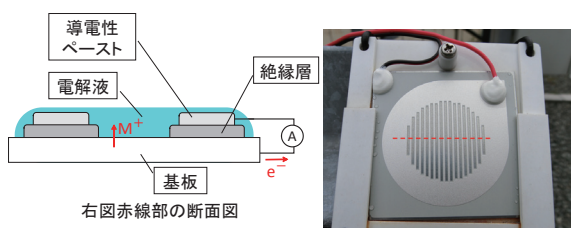


図4 ACM センサの構造および外観

3. 短期間測定の結果評価

表1に示した通り、各測定場所での測定日数が異なること、トンネル内は屋外に比べて降雨など気象の影響を受けにくいと考えられることから、本論文では1日当たりの測定結果を示す。

3.1 新関門トンネル

3.1.1 ESDD

測定結果を図5に示す。起点側/終点側、がいし上面

/保護面を問わず、他の場所に比べて⑤での ESDD が顕著に大きいことが分かる。海底部での測定が1箇所のみのため、⑤における固有の現象か、海底部全般の現象か断定できないが、これは、海底部付近のトンネル壁面からの漏水やトンネル内の上下線間にある排水溝に集まってきた排水（雨水および海水を主とする漏水）が、列車の通過によってトンネル内の上部まで巻き上げられ、がいしに付着することが原因と考えられる。起点側/終点側を問わず、保護面よりも上面の ESDD が高いこと、⑤では直上からの漏水がなかったことから、巻き上げられた漏水は保護面に下から吹き付けられるよりも、空气中に舞い上がったものが上面に自然落下して付着する可能性が高いと考えられる。一般的に磁器がいしは沿面距離の長い保護面で絶縁を維持していることから、がいしの絶縁維持という観点では有利な結果である。

図5の①～③から、坑口から奥に行くにつれ ESDD が減少する傾向が認められる。これは、トンネル外からトンネル内部へ流入する導電性物質が奥に行くにつれ減少することに起因するためと考えられる。所々逆転しているものもあるが、これは測定がいしの取外し作業に起因する測定誤差と考えられる。

3.1.2 NSDD

測定結果を図6に示す。起点側/終点側、がいし上面/保護面を問わず、他の場所に比べて④で多いことが分かる。一方、⑤では海底部付近のトンネル壁面からの漏水や高湿度の影響で、付着した水滴と一緒に不溶性物質が流れ落ちるため④よりも少なくなると考えられる。また、①～③ではトンネルの奥の方が NSDD が減少する傾向にある。これは、トンネル外からトンネル内部へ流入する不溶性物質が奥に行くにつれて減少することに起因するためと考えられる。一部逆転しているものもあるが、これは測定がいしの取外し作業に起因する測定誤差と考えられる。④で多いのは、列車走行やトンネル内の工事に伴って発生した粉塵がトンネル外へ排出しにくく滞留すること、水滴による洗浄効果がないことに起因すると考えられる。

3.1.3 電荷量

測定結果を図7に示す。起点側/終点側、がいし上面/保護面を問わず、他の場所に比べて⑤で顕著に多いことが分かる。これは、測定点付近の壁面からの漏水および排水溝の雨水や海水の影響によるものと考えられる。一方、①～④では有意差は認められなかった。

3.2 北九州トンネル

3.2.1 ESDD

測定結果を図8に示す。場所による ESDD の顕著な差は認められない。また、新関門トンネルの⑤と比べると、ESDD の絶対値が小さいため、北九州トンネルは

特集：電力技術

新関門トンネルより地絡のリスクが低いトンネルと言える。ただし、⑩の値が他と比べて僅かに大きくなっている。これは、支持点直上からの漏水による影響と考えられる(図9)。図8の⑥～⑧においては、概ね坑口からの距離に応じてESDDが減少する傾向にある。

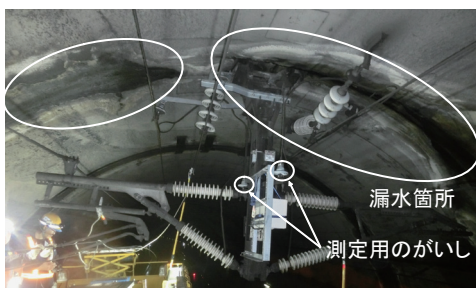


図9 測定点⑩の漏水箇所の様子

3.2.2 NSDD

測定結果を図10に示す。ESDDと同じく、漏水のある⑩の値が大きくなっている。これは湿度の高い環境であるため、がいし磁器部が結露し、粉塵等を吸着するが、滴下には至らないためと考えられる。また、⑩を除くと、坑口からの距離に応じてNSDDが減少する傾向にある。所々値が逆転しているものもあるが、これは測定がいの取外し作業に起因する測定誤差と考えられる。

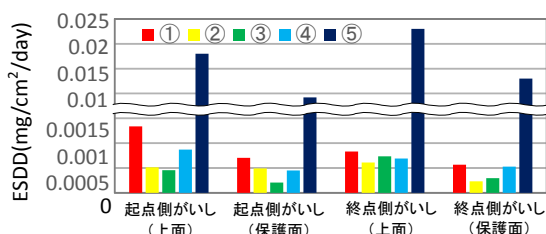


図5 新関門トンネルのESDD測定結果

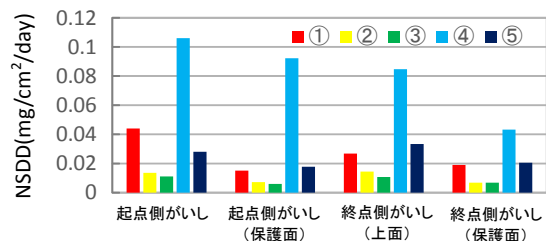


図6 新関門トンネルのNSDD測定結果

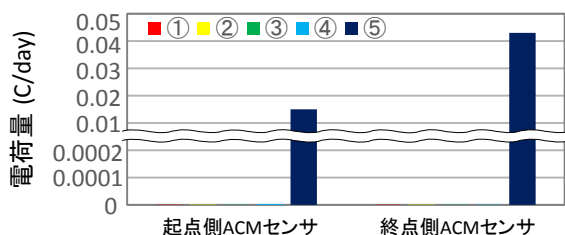


図7 新関門トンネルの電荷量測定結果

3.2.3 電荷量

測定結果を図11に示す。⑩の起点側が顕著に大きく、新関門トンネルの⑤終点側と同程度の値を示した。つまり、漏水がある箇所では腐食が極端に進むことが明らかとなった。

3.3 短期間評価のまとめ

経験的に知られていることではあるが、漏水箇所における絶縁性能の維持・強化の必要性や漏水箇所での腐食が進行することを改めて定量的に示した。また、海底部における測定データが1つであるため断定できないが、海底トンネルであるため腐食が進行しやすいのではなく、水分の存在の有無に大きく依存する可能性を明らかにした。

4. 中期間測定の結果評価

横軸を測定日数、縦軸をそれぞれ質量増加率、ESDD(保護面)、NSDD(保護面)、電荷量(上向き)とした時の結果を図12～15に示す。波しぶきや海水が直接飛散する勝木と関門はばらつきが大きいものの、波しぶきが飛散しない場所(勝木、関門以外)に限ると、測定日数と質量増加率、測定日数とESDD(保護面)にそれぞれ相関を認めることができる。今回は秋から春にかけて

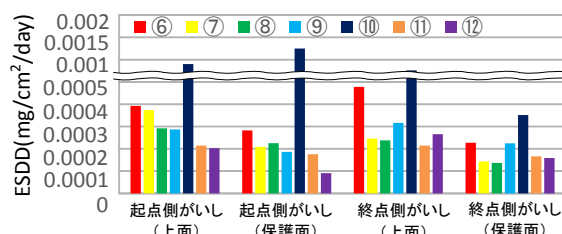


図8 北九州トンネルのESDD測定結果

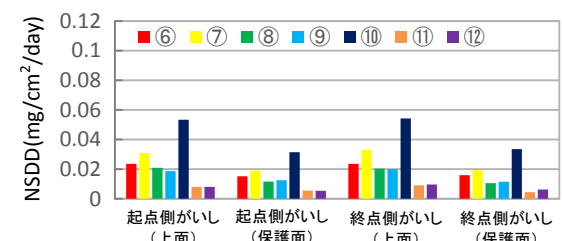


図10 北九州トンネルのNSDD測定結果

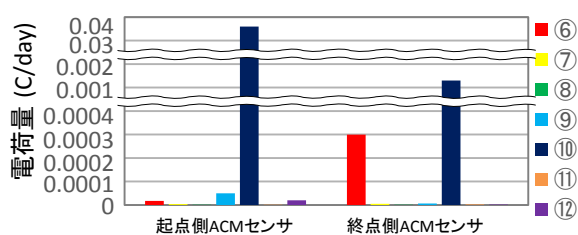


図11 北九州トンネルの電荷量測定結果

の結果であるため、今後 ESDD と時季の関係性、さらに長期間のデータ取得により ESDD を測定するためのがいしの暴露期間の目安を示すなどの検討を進める予定である。

測定日数と NSDD (上面) には高い相関が認められた。これは、導電性物質は水溶性のため雨水の付着により溶解しやすい(雨洗効果の影響を受けやすい)が、不溶性物質は表面に付着して乾燥すると、がいし表面に強固に

付着し、雨洗効果を受けにくいとと考えられる。

また、測定日数と電荷量(上向き)にも正の相関が認められる。ACM センサから得られる電荷量は、センサの原理を鑑みると腐食量と同義と考えられること、電荷量(上向き)と NSDD (上面) に関係性が認められることから、腐食環境の評価に NSDD を加味することを軸とし、環境の定量化に向けた基礎検討を行った。

5. 腐食環境の定量化に向けた基礎検討結果

鋼の質量増加率とがいし ESDD (保護面) の関係を図 16 に示す。波しぶきや海水が直接飛散する勝木と関門を除いた地点においては、鋼の質量増加率と ESDD (保護面) には相関が認められた。また、鋼の質量増加率と NSDD (上面) の関係を図 17 に、鋼の質量増加率と電荷量の関係を図 18 に示す。ESDD (保護面) と同じく、勝木と関門を除くとそれぞれに相関が認められることから、半年間の暴露試験においては腐食量を ESDD (保護面)、NSDD (上面) もしくは電荷量で推定できる可能性を見出した。

この結果を受けて、単位が同じ ESDD と NSDD を合わせたものを新たに汚損密度 (Pollusion Deposit Density, 以下 PDD) と定義し、腐食環境の定量化に向けた基礎検討を行った。ここで、

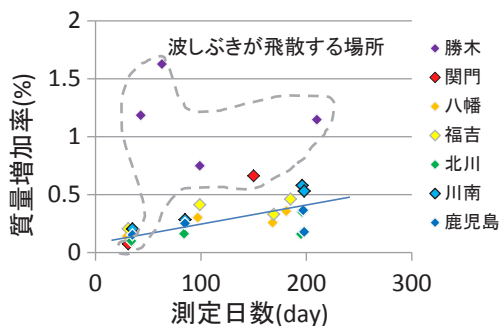


図 12 測定日数と質量増加率の関係

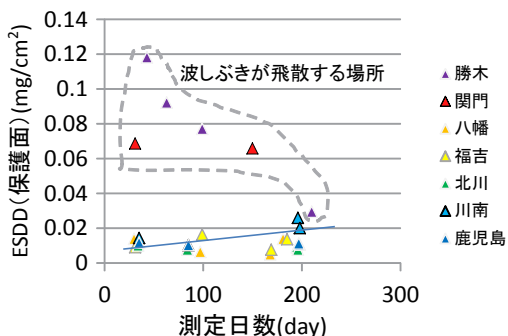


図 13 測定日数と ESDD (保護面) の関係

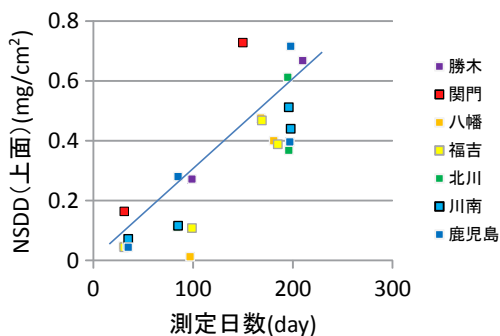


図 14 測定日数と NSDD (上面) の関係

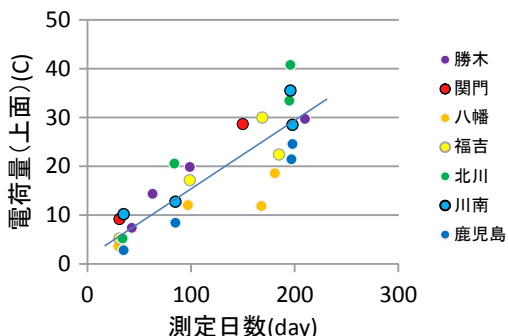


図 15 測定日数と電荷量(上向き)の関係

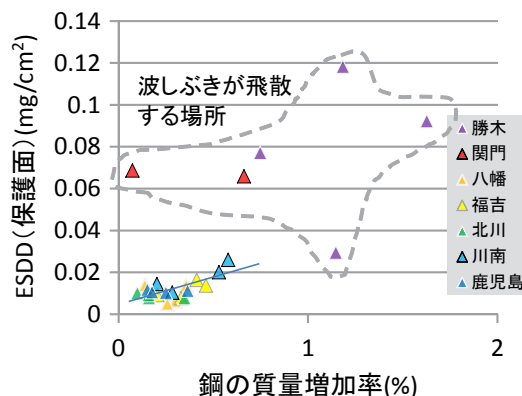


図 16 質量増加率と ESDD (保護面) の関係

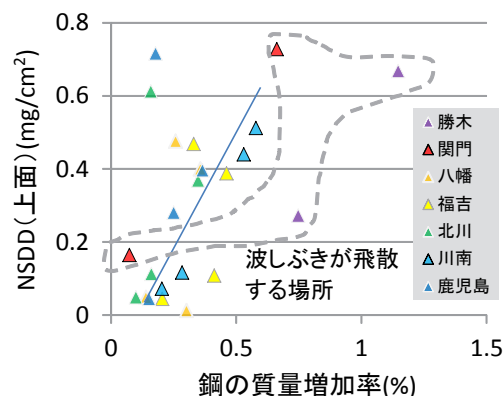


図 17 質量増加率と NSDD (上面) の関係

特集：電力技術

$$[PDD]=a \times [ESDD]+b \times [NSDD] \quad (3)$$

*a,b は係数

とする。式(3)の[ESDD]をESDD(保護面)および[NSDD]をNSDD(上面)とし、図16の勝木・関門を除いた場合の近似曲線の傾き(およそ0.03)および図17の勝木・関門を除いた場合の近似曲線の傾き(およそ0.85)から、傾きの逆比を参考に $a=1$ 、 $b=0.025$ と仮定した場合の鋼の質量増加率とPDDの関係を図19に示す。波しぶきが飛散する勝木・関門を除いた地点に限れば強い相関となる。つまり、腐食環境をPDDという間接的な指標で評価、定量化できる可能性があることを示している。今後は、さらに長期間のデータやデータ数の積み重ねなどにより、今回提案した式(3)の妥当性検証や最適な係数を求めるなど、腐食環境の定量化についてさらに検討を進めていく予定である。

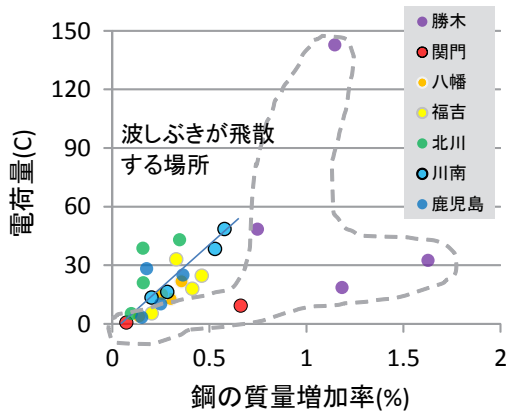


図18 質量増加率と電荷量の関係

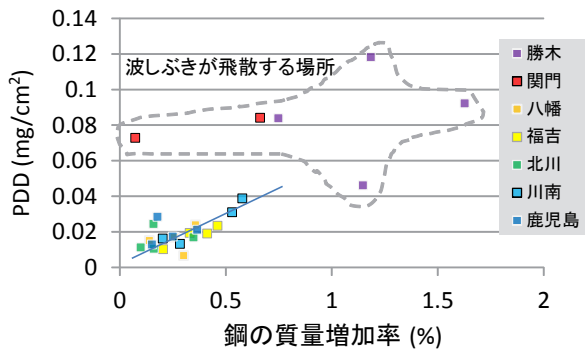


図19 質量増加率とPDDの関係

6. おわりに

本研究では、鉄道事業者に沿線の腐食環境の程度を提案することを目的として腐食・塩害に関するデータを取得し、腐食・塩害環境の定量化に向けた基礎検討を行っ

た。主な成果は以下の通りである。

- (1) 短期間測定結果から、経験的に知られていることではあるが、漏水箇所付近において、絶縁性能の維持・強化の必要性や腐食が進行することを改めて定量的に示した。また、海底部における測定データが1つであるため断定できないが、海底トンネルであるため腐食が進行しやすいのではなく、水分の存在の有無に大きく依存する可能性を明らかにした。
- (2) 中期間測定結果から、波しぶきや海水が直接飛散する勝木・関門を除くと日数とESDD(保護面)の間に相関が認められる。一方、日数とNSDD(上面)および電荷量(上向き)の間には、地点を問わず相関が認められる。
- (3) 中期間測定結果から、鋼の質量増加率と新たに提案する汚損密度に一定の相関があることを示した。これは、腐食環境をPDDという間接的な指標で評価、定量化できる可能性があることを示している。

文献

- 1) 網干光雄：鉄道電力設備のメンテナンスと劣化予測，第29回鉄道総研講演会，2016
- 2) 倉岡拓也，出野市郎：塩害区間用可動ブラケットの開発，JR EAST Technical Review, No.39, pp.31-34, 2012
- 3) 白木理倫，上東直孝，森久史，山下博史，池田賢治：海底トンネルにおけるチタン製電車線路支持物の撤去品調査，平成29年電気学会全国大会，No.5-208, pp.321-322, 2017
- 4) 本田誠彦，新保雅士：東日本エリアにおける亜鉛・鋼の腐食環境調査，第22回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2015)講演論文集，No.1219, 2015
- 5) 白木理倫：暴露したトロリ線の接触抵抗測定，第23回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2016)講演論文集，No.S-8-3-2, pp.639-640, 2016
- 6) 社団法人電気協同研究会：変電設備の耐塩設計，電気協同研究，Vol.35, No.3, pp.77-81, 1979
- 7) 黒川正明，松本隆宇：人工汚損がいの筆洗い抵抗法によるESDD測定精度，電気学会論文誌B, Vol.1.18, No.10, pp.1208-1209, 1998
- 8) 龍岡照久，長田将典：大気環境における鋼構造物の腐食性評価，電気学会誌，Vol.137, No.3, pp.161-165, 2017
- 9) 押川渡，糸村昌祐，篠原正，辻川茂男：雨がかりのない条件下に暴露された炭素鋼の腐食速度とACMセンサ出力の関係，Zairyto-to-Kankyo, Vol.51, No.9, pp.398-403, 2002