

公開データによる気象情報や地形情報を用いた がいし汚損度推定手法

白木 理倫* 柴田 直樹**

Estimating Method of Equivalent Salt Deposit Density on Insulator Surface Using Meteorological and Topographical Information Provided by Public Institutions

Tadanori USUKI Naoki SHIBATA

Traditionally, the design and maintenance of electric power facilities of electric railways in coastal areas have been carried out according to a uniform classification of contamination based on the distance from the coast and other factors. To improve safety of these facilities and save labor in maintenance, it is necessary to subdivide the uniform classification according to actual contaminated situations. Therefore, we develop an estimating method of Equivalent Salt Deposit Density on insulator surface at any point of an outdoor section using published data of meteorology and topography.

キーワード：がいし, 汚損度, 推定手法, 公開データ, 気象, 地形

1. はじめに

電気鉄道の電気絶縁に関する設計や保全是、各鉄道事業者の電気工作物（例えば、電車線路）設計施工標準で定められている塩害対策に則り実施されている。その設計施工標準の元は、1961年9月の第二室戸台風の影響で発生した塩害による大規模な送電事故を契機として、電気事業者を中心として電気設備に対する塩害対策の研究が本格化し、その成果としてまとめられた電気協同研究第20巻1号「配電設備の塩害対策」（1964年）¹⁾である。同報告書には、想定される塩害の発生頻度や塩害を考慮すべき区域などが示されている。電気鉄道の電気工作物設計施工標準や保全マニュアルは旧国鉄時代に作成され、その後の送電事故などを踏まえ多少の変更があるものの、基本的には今日まで大幅な見直しは行われていない。

設計時や保全時に絶縁協調がなされているため、がいし汚損に起因して地絡した送電故障事例は少ない。一方で、実際の汚損が想定以下であれば、過剰な設備や清掃周期となっている可能性がある。そこで、適切な設備への変更や、保全の省力化のためには、実際に即して汚損区分の見直しを検討する必要がある。ただし、その検討のためには、広範囲の設備について高密度かつ高頻度に汚損度を測定し、また数年間にわたるデータの蓄積が必要である。

現在広く用いられているがいしの汚損度を測定する手法として、絶縁部に付着した汚損物（主に海塩粒子）を

ふき取る筆洗い法がある。この方法では、1回のデータ取得にも多くの労力を要するため、汚損区分を見直すのに十分な数のがいしの汚損度のデータを取得するのは困難と考える。また、筆洗い法では測定結果が直前の気象や、測定者の技量に大きく左右されるという課題がある。

そこで、過去に電気事業者の送電線に対して行われた数々の測定やシミュレーションによる知見^{1)~10)}を活用しつつ、電力送電線と比較すると低層にあるため周辺環境の影響をより受けやすい鉄道電力設備のがいし汚損度の経時変化を推定する手法を開発した¹¹⁾¹²⁾。この推定手法では、気象庁から公開されている風速・風向・雨量という気象情報（以下、アメダスデータ）および海岸からの距離などの地形情報を入力データとする。この手法により、明かり区間の任意地点における通常汚損（台風や発達した低気圧通過時などの急速汚損ではない通常時に、がいしを1か月以上暴露した時の汚損）に対するがいし汚損度の経時変化の推定が可能である。入力データの性質上、例えば民間会社の有償の気象データ（アメダスデータとは異なる地点や、より細かいサンプリングデータ）も利用可能であるが、今回の検討では、公開データによる汚損区分見直しの検討が可能な精度を有する推定手法の構築を目指した。なお、本稿では磁器の懸垂がいし絶縁部へ付着する等価塩分付着密度（Equivalent Salt Deposit Density, 以下 ESDD）をがいし汚損度とする。

2. がいし汚損度推定手法

2.1 海塩粒子の輸送および付着モデル

主に、電気学会電気協同研究会で行われた海塩粒子の発生、輸送、脱落といったそれぞれ個別に行われた検討

* 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

や、その他の文献調査から、図1のような海塩粒子の輸送モデルを構築した。海上や沿岸で発生した海塩粒子が風により内陸に運ばれて電気設備に付着し、降雨により洗い流される、というものである。図1の①から⑤に対応する各推定式や係数を式(1)から式(6)に示す。

- ① 海岸付近における単位体積あたりの気中塩分密度 C_0 を算出する¹⁾

$$C_0 = a \cdot W_0^2 \quad (1)$$

C_0 : 海岸付近の気中塩分密度 (mg/cm³)

a : 係数

W_0 : 海拔 10m における海岸付近の風速 (m/s)

- ② 任意高さの風速を求める計算式(2)を用い¹³⁾、アメダスデータの風速 W から海岸付近海拔 10m の風速 W_0 を算出する

$$w = W \times \left(\frac{h}{H} \right)^p \quad (2)$$

w : 現地設備高さにおける風速 (m/s)

W : アメダスデータの風速 (m/s)

h : 風速を求めたい高さ (m)

H : アメダスデータの風速測定点高さ (m)

p : 周辺環境係数 (地上 0.14~0.5)¹³⁾

※大都市部 : 0.5 程度, 一般的な住宅街・森林 : 0.25 程度, 洋上 : 0.14 程度

$$W_0 = W \times \left(\frac{10}{H} \right)^{0.14} \quad (3)$$

- ③ 設備付近の気中塩分密度 C は、離岸距離 l と共に指数関数的に減少する⁴⁾

$$C = C_0 \times l^x \quad (4)$$

C : 離岸距離 l (km) における気中塩分密度 (mg/cm³)

l : 離岸距離 (km)

x : 係数

- ④ ③の気中塩分密度の空気が、風速 w で設備に吹き付けるため、単位時間あたりに設備に付着する塩分付着密度 M は、設備を通過する空気の体積に比例する⁴⁾

$$M = \beta \times C \times w \quad (5)$$

M : 単位時間あたりの塩分付着密度 (mg/cm²)

β : 係数

w : 現地設備高さにおける風速 (m/s)

- ⑤ 降雨 R の場合、雨量に応じて単位時間当たりの塩分付着密度 M' が指数関数的に減少する³⁾

$$M' = M \times (1 - R^y) \quad (6)$$

M' : 降雨による洗浄を受けた単位時間当たりの塩分付着密度 (mg/cm²)

R : 直近 1 時間の雨量 (mm/h)

y : 雨洗係数

2.2 がいしの汚損度推定アルゴリズム

前節で示した通り、個々の式は簡単である。しかし、それらが相互に関連するため、推定値を導出するための計算アルゴリズムは複数考えられる。さらに、各式には未知数の係数が含まれる。このため、これまで取得した

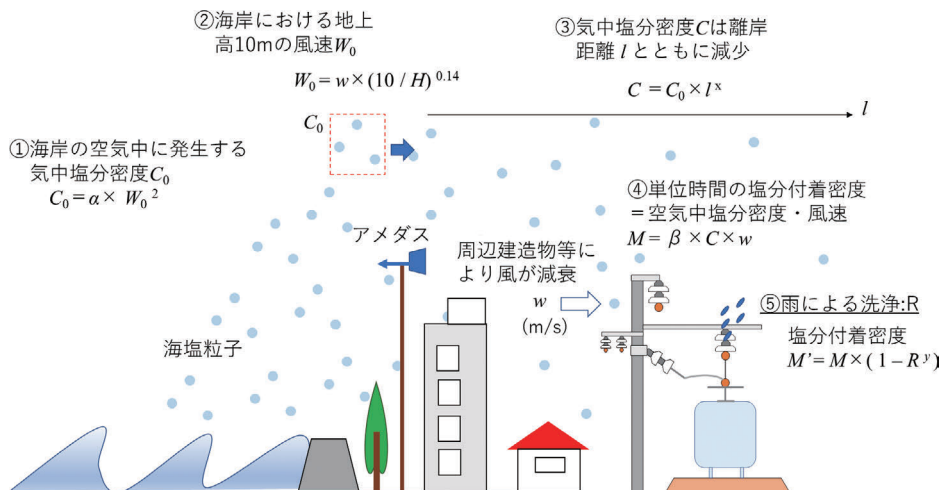


図1 海塩粒子の輸送モデル

がいし汚損度の実測値と、実測時点の気象情報・地形情報と仮の係数を用いて計算した推定値の相関係数が最良になるまで計算を繰り返して計算アルゴリズムと係数を決定した。アルゴリズム決定に用いた実測データの主な諸元を表1に示す。入力データとなる気象情報は、汚損度を推定する地点から最も近い気象庁観測点のデータを気象庁ホームページから、地形情報は国土地理院のホームページから、それぞれ引用した。

図2に、がいし汚損度推定手法の計算アルゴリズムを示す。このアルゴリズムにより、アメダスデータおよび海岸からの距離などの地形情報から、明かり区間の任意地点における過去のある時刻におけるがいし汚損度を推定する。入力する気象情報の風速および風向は、推定したい地点に最も近い気象観測点における直近1時間の平均値、雨量は直近1時間の累積値、地形情報は、推定したい地点における16方位の離岸距離、および周辺環境係数である。

表1 アルゴリズム決定のために使用した実測データの主な諸元

測定場所	国内5箇所
測定期間	2~5年
データ数	およそ120
ESDD最小値（保護面）	0.0022mg/cm ²
ESDD最大値（保護面）	0.2119mg/cm ²

3. がいし汚損度推定精度の検証

3.1 複数の地点におけるがいし汚損度推定精度の検証

広範囲な設備範囲の汚損度を高密度に推定するためには、任意の地点について同一の手法で推定できることを検証する必要がある。そこで、推定対象地点として、表2に示す5つの線区で12箇所の駅構内または駅間を選定し、実設備のがいし汚損度（ESDD）を測定した。ここでは、推定結果に最も大きな影響を与えると考えられるパラメータである離岸距離に関する式や、その式の中の

係数が適切かを検討するため、海沿いから内陸へ向かう線区を中心に場所を選定した。なお、表2の場所は、アルゴリズム決定用データを取得した場所とは異なる。各測定点の明かり区間に設備された懸垂ががいしについて、天空側（上側）の面を上面、地上側（下側）の面を保護面として、筆洗い法でがいし汚損度を測定した（図3）。

図4に測定結果を、表3に文献2に示されている汚損区分とそのESDDを示す。雨洗効果を受けにくい、つまり汚損が蓄積しやすい保護面側の最大値でも、表3の汚損区分に照らすと“中汚損”であった。

図5に、図4で示した現地の実設備におけるがいし

表2 測定場所

会社	線区	一般/塩害区間、ロケーションの特徴	場所
A社	A-1線	・一般区間 ・海沿いから内陸へ向かう線区	A-1-1構内
			A-1-2構内
			A-1-3構内
			A-1-4構内
			A-1-5構内
			A-1-6構内
B社	B-1線	・塩害区間 ・海上橋上	B-1-1~B-1-2間*1
			B-1-1~B-1-2間*2
	B-2線	・一般区間 ・海沿いから内陸へ向かう線区	B-2-1構内
			B-2-2構内
C社	C-1線	・一般区間 ・内陸にある線区	C-1-1~C-1-2間
			C-2線
	C-2線	・塩害区間 ・沿岸にある線区	C-2-1~C-2-2間

※同じ駅間だが、異なる地点。ともに、海上で上空に構造物あり



図3 実設備における筆洗い法によるがいし汚損度測定の様子

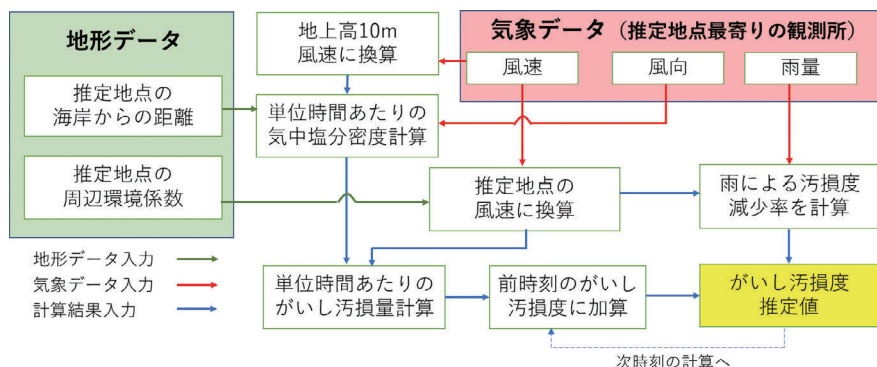


図2 がいし汚損度推定手法の計算アルゴリズム

表3 汚損区分とESDD²⁾

汚損区分	ESDD
一般地区	0.01 mg/cm ² 以下
軽汚損地区	0.01 mg/cm ² 超過 0.03 mg/cm ² 以下
中汚損地区	0.03 mg/cm ² 超過 0.06 mg/cm ² 以下
重汚損地区	0.06 mg/cm ² 超過 0.12 mg/cm ² 以下
超重汚損地区	0.12 mg/cm ² 超過 0.35 mg/cm ² 以下
特殊地区	0.35 mg/cm ² 超過

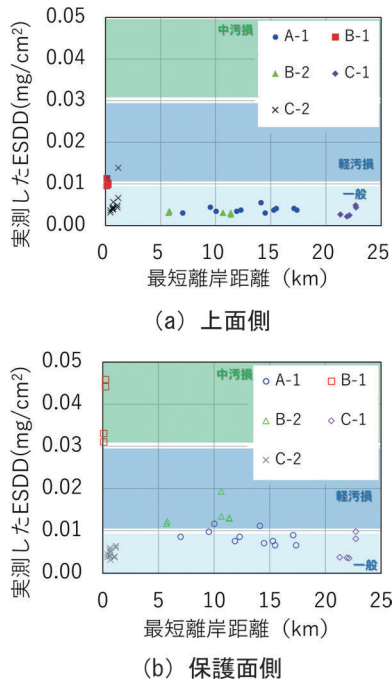


図4 実設備での測定結果

汚損度の実測値と推定値の比較を示す。上面側については、実測値と推定値の決定係数 $R^2=0.62$ 、保護面側については、決定係数 $R^2=0.72$ と高い相関となった。さらに、保護面側については、近似直線の傾きがほぼ1であり、“中汚損”までの汚損度推定については、概ね妥当と考える。

3.2 塩害実験所取得データによるがいし汚損度推定精度の検証

前節において、今回構築した明かり区間（雨洗効果あり）におけるがいし汚損度推定手法は、一定の精度を有することを確認したが、汚損度の高い領域を含めた精度検証ができなかった。そこで、高い汚損度が数多く測定されている鉄道総研勝木塩害実験所（新潟県村上市）に限定して検証をおこなった。文献3に記載のある方法に準じ、複数回がいし汚損度を実測して発生頻度グラフを作成して実測値の近似直線を引き、指定した発生頻度と近似直線が交わった点をがいし汚損度の設計値とする、発生頻度5%汚損度と、推定式から求めた発生頻度5%

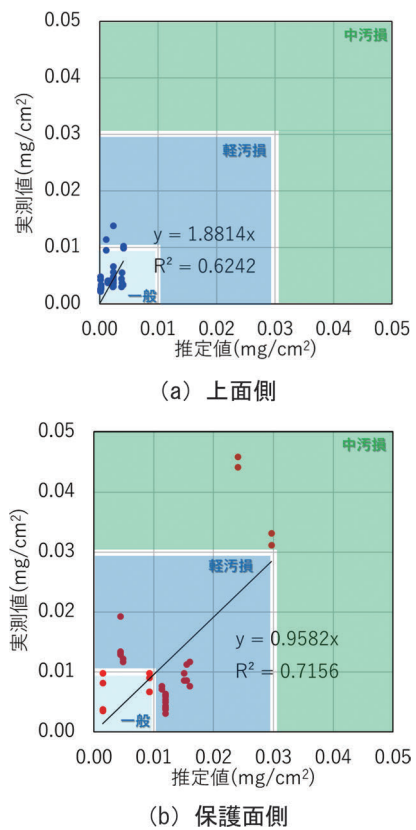


図5 実測値と推定値の比較



図6 塩害実験所と直近の気象庁観測点の位置関係

汚損度の比較を行った。

図6に、勝木塩害実験所と推定に使用した気象庁観測点（鼠ヶ関）の位置関係を示す。どちらも日本海側沿岸にあるが、直線距離で約10km離れている。図7に勝木塩害実験所における2019年のがいし汚損度推定値（保護面側）と実測値を示す。同地点付近では冬に汚損度が高くなることが経験から予想されたが、推定結果も冬に汚損のピークを迎えており、傾向が一致することを確認した。

次に、図7と同様の推定値と実測値について、2018年～2020年の3年間のデータを文献3記載の図と同じように汚損度の発生確率をプロットしたものを図8(a)に示す。検討対象を保護面側としたのは、一般に、磁器がいしは沿面距離の長い保護面側の方に絶縁耐力を期待していることによる。図8(a)から、実測値の近似直線を引き、近似直線の発生頻度5%となる汚損度（同図

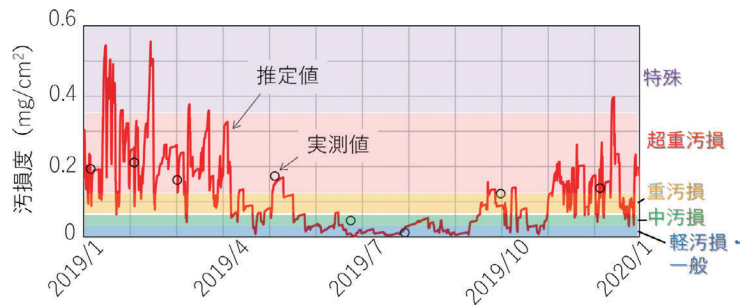


図7 勝木塩害実験所におけるがいし汚損度（保護面側）の実測値および推定値

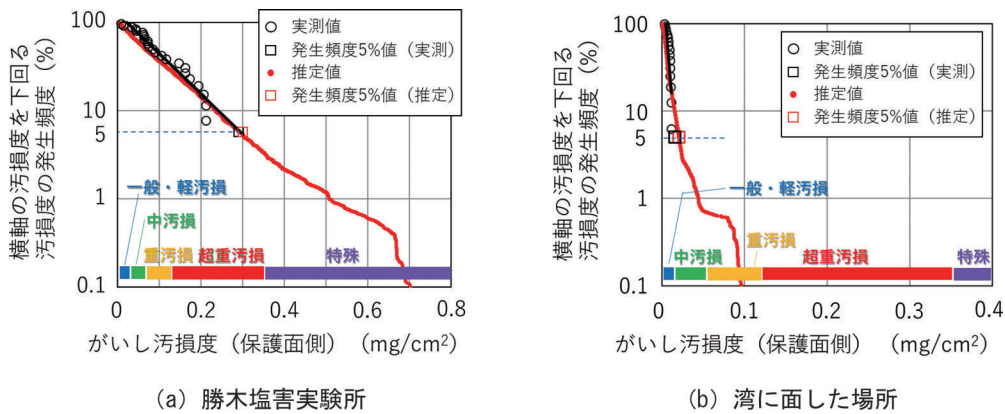


図8 がいし汚損度と発生頻度の関係

中の黒い四角)と、推定値から求めた発生頻度5%の汚損度(同図中の赤い四角)が概ね一致することを確認した。また、別の地点(太平洋側に面する湾岸)において、同じ計算手法を用いて同様の検証を行った。その結果を図8(b)に示す。勝木塩害実験所の結果と同じく、実測値および推定値の発生頻度5%汚損度が概ね一致することを確認した。このことから、本手法は任意区間の汚損度設定に適用できる推定精度を有するものと判断した。

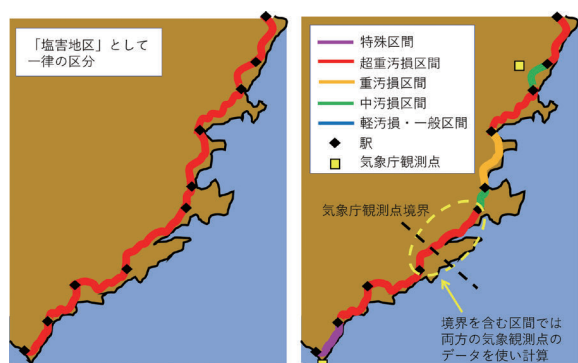
4. がいし汚損度推定手法の活用例

がいし汚損度推定手法の活用により、図8のようながいし汚損度の発生頻度を任意の地点に対して得ることが可能となる。現在は、発生頻度5%の汚損度に耐えられるような絶縁設計となっているが、例えば、発生頻度3%の汚損度を耐汚損設計値とする、つまり耐汚損に対するグレードを上げることで、耐汚損に対しての設備強化となり、汚損による地絡発生リスクを下げる事ができる。逆に、発生頻度7%の汚損度を耐汚損設計値とする、つまり耐汚損に対するグレードを下げることで耐汚損の設備を軽くする、もしくは保全にかかる労力を減らす、といった使い方ができるため、任意の地点で定量的な根拠に基づいた設備設計が可能となる。また、現状では広い範囲で一律の耐絶縁設備となっているが、がいし汚損の実情にあった区分に細分化することができれば、実情

に応じた設備や保全を行うことができ、耐絶縁性能について設備のスリム化や、保全の省力化に資することができる。

汚損区分細分化の例として、基本的には海岸に沿っているものの、所々内陸に入り込んで敷設されている線区をモデル線区として選定し、その線区において計算により汚損区分を細分化したものを図9に示す。これは、各地点における発生頻度5%の汚損度を推定し、推定結果を表2に示す汚損区分に従って分類したものである。汚損度推定は、各駅間で最も離岸距離が近い地点で行った。

図9(a)で示すように、現状では全ての区間で「塩害区間」と設定されているところを、図9(b)で示すように、汚損度の実態に合わせて、汚損のリスクが低い箇所(ここでは中汚損区間と表記)と高い箇所(特殊区間と表記)、というように区分を細分化することができる。これにより、例えば、汚損のリスクが低いところはがいしの清掃周期を延伸する、または耐汚損設備を軽くする(例えば、がいしの個数を減らす)、汚損のリスクが高い箇所は汚損に対して設備を強化する(例えば、現状よりもがいしの個数を増やす)、または、がいし表面に撥水剤を塗布する、といった実情に合った耐汚損設備や保全を行うことが可能となる。なお、図9中の点線で囲んだ場所は、海に近い箇所と少し海から離れた箇所がある。海から最も近い点で推定したため超重汚損という結果となったが、海から少し離れた場所の実態とは一致



(a) 現状 (b) 本手法による推定結果

図9 モデル線区における汚損区分細分化の例

しない可能性がある。今回のケーススタディでは、駅間ごとに汚損区分を求めたためこのような結果となったが、離岸距離は電化柱ごとに異なるため、原理上は電化柱ごとの汚損度推定も可能であり、細分化の範囲は任意に設定可能である。

5. まとめ

アメダスデータ（風向・風速・降雨）の気象情報や国土地理院による離岸距離などの地形情報という公開データを用いて、通常汚損に対する明かり区間の任意地点でのがいしの汚損度を推定する手法を提案した。主な成果は以下の通りである。

- (1) 提案したがいし汚損度推定手法は、任意の地点で推定が可能で、かつ、推定値が実測値と概ね一致することを確認した。
- (2) 実測から求める発生頻度5%の汚損度と、推定値から求める発生頻度5%の汚損度が複数箇所でも概ね一致することから、本手法は任意区間の汚損度設定などに適用できる推定精度を有するものと判断した。
- (3) 本手法を用いることで、現状では線区で一律に「塩害区間」と設定されているところを、汚損度の実態に合わせて、汚損のリスクが相対的に低い箇所と高い箇所に汚損度および区間の区分の細分化が可能となる。これにより、区分に応じたがいしの設備設計や清掃方法を策定することが可能となり、安全性の向上とともに、設備のスリム化や保全管理の省力化を図ることができる。

謝辞

本研究における実設備のがいし汚損度の取得にあたり、西日本旅客鉄道株式会社、四国旅客鉄道株式会社、九州旅客鉄道株式会社のご関係の皆様には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文献

- 1) 電気協同研究会：配電設備の塩害対策，電気協同研究，第20巻，第1号，1964
- 2) 電気協同研究会：変電設備の耐塩設計，電気協同研究，第35巻，第3号，1979
- 3) 電気協同研究会：配電設備の耐塩性向上対策，電気協同研究，第51巻，第3号，1996
- 4) 電気協同研究会：配電機材に対する劣化環境の定量評価，電気協同研究，第69巻，第3号，2013
- 5) 鳥羽良明，田中正昭：塩害に関する基礎的研究（第1報），京都大学防災研究所年報，pp.331-342，1967
- 6) 本間宏也，高橋章：塩雪害の発生条件の解析及び対策評価への取り組み，電力中央研究所 REPORT4，Vol. 1，2011
- 7) 西原崇，杉本聡一郎，清水幹夫，本間宏也，石川智己，屋地康平，松宮央登，大原信，木原直人，麻生照雄，渡邊真人，平口博丸：送電設備の雪害に関する研究2007～2011年度の研究成果，電力中央研究所報告 N19，2013
- 8) 500kV 送電実証試験研究委員会：500kV 送電設備の実証試験研究報告その2 塩害対策，電力中央研究所報告，1972
- 9) 宇多高明，小俣篤，小西正純：海岸からの飛散塩分量の計算モデル，海岸工学論文集，39巻，pp.1051-1055，1992
- 10) 中村文則，下村匠，大原涼平，細山田得三：飛来塩分の予測シミュレーション技術の開発と構造物の長期的な塩害環境作用の評価への適用，土木学会論文誌，2019
- 11) 柴田直樹，白木理倫：気象データを用いて推定した塩分付着密度と実曝露した鋼板腐食減少量に関する検討，第67回材料と環境討論会，B-303，pp.157-160，2020
- 12) 白木理倫，柴田直樹：公的機関による気象情報や地形情報を用いたがいし汚損度推定手法の推定精度検証，2021年電気学会産業応用部門大会，5-47，pp.V-273-V-276，2021
- 13) 理科年表オフィシャルサイト：
https://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/kisyo/kisyo_011.html
(参照日：2021年7月9日)