

架線着霜の発生予測手法



鎌田 慈
Yasushi Kamata
防災技術研究部
気象防災研究室長

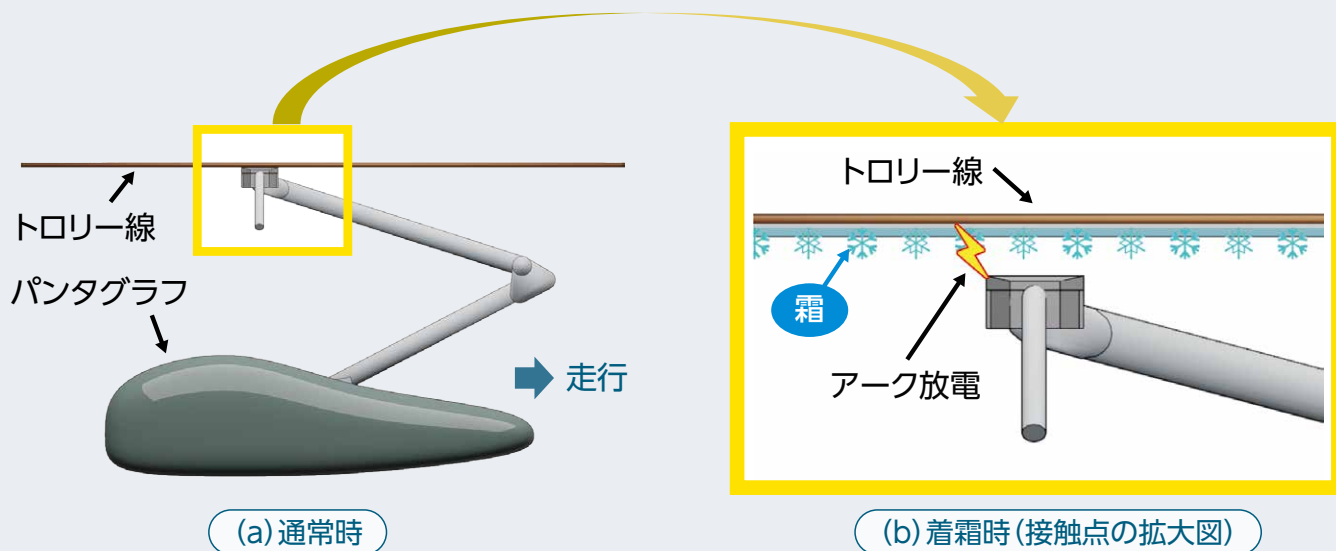
はじめに

電車は線路上にある架線のトロリー線とパンタグラフとが接触することにより、電力が供給されて走行します。冬の寒い晴れた朝には、自動車のボンネットに白い霜がびっしりと付着するように、トロリー線表面に霜が付着(架線着霜)することがあります。架線着霜がある区間を走行すると、トロリー線とパンタグラフが直接接触できなくなる(離線が発生する)ため、アーク放電が発生します(図1)。アーク放電は、大きな熱や光とともに空气中を電流が流れる現象で、パンタグラフに深刻な損傷を与え

たり、トロリー線の溶断を引き起こす場合があります。

そのため、架線着霜が見込まれる日には、霜取り用のパンタグラフを搭載した「霜取り列車」を営業前に運行したり、走行時の電流を制限するために速度を抑制したりするなどの対策が実施されています。これまで、対策実施の判断は気温などの気象情報をもとに経験的に行うことが一般的でしたが、予測精度の点で課題があり、翌朝の着霜発生を高い精度で予測する手法の開発が望まれていました。ここでは、気象庁などが発表する推定箇所近傍の気象データを用いて、

図1 架線着霜により離線が発生する様子



霜の発生メカニズムに基づいて架線着霜の発生を予測する手法とこれをアプリケーション化した「架線着霜発生予測プログラム」について紹介します。

霜の発生メカニズム

架線着霜を正確に予測するためには、霜の発生メカニズムを知る必要があります。ここでは、身近な現象を例に霜が発生するメカニズムについて説明します。

夏にガラスのコップに冷水を注ぐと、コップの表面が露でぬれることを目にしたことがあると思います。これは、コップの表面温度が冷水で冷やされて周辺の気温よりも下がり、空気中の水蒸気がコップ表面に凝結して結露が生じるためです。架線に発生する霜についても、コップ表面に発生する結露と同様のメカニズムで発生すると考えられます。

霜が降りるような冬の晴れた夜間には、強い放射冷却が生じます。この影響でトロリー線の表面温度は気温よりも下がり、空気中の水蒸気がトロリー線表面に凝結して霜が発生することが考えられます(図2)。このように、架線着霜の発生を考える際には、架線近傍の水蒸気に注目する必要があります。

もう少し空気中の水蒸気の性質についてみてみます。一般に、ある温度の単位体積あたりの空気に含まれる水蒸気量(水蒸気濃度)には上限があり、この上限値を飽和水蒸気濃度とよびます。図3に温度と飽和水蒸気濃度との関係を示します。図中の飽和水蒸気濃度曲線は、みなさんが気象情報で耳に

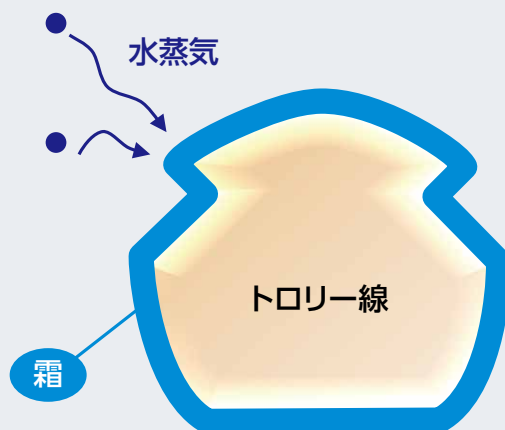
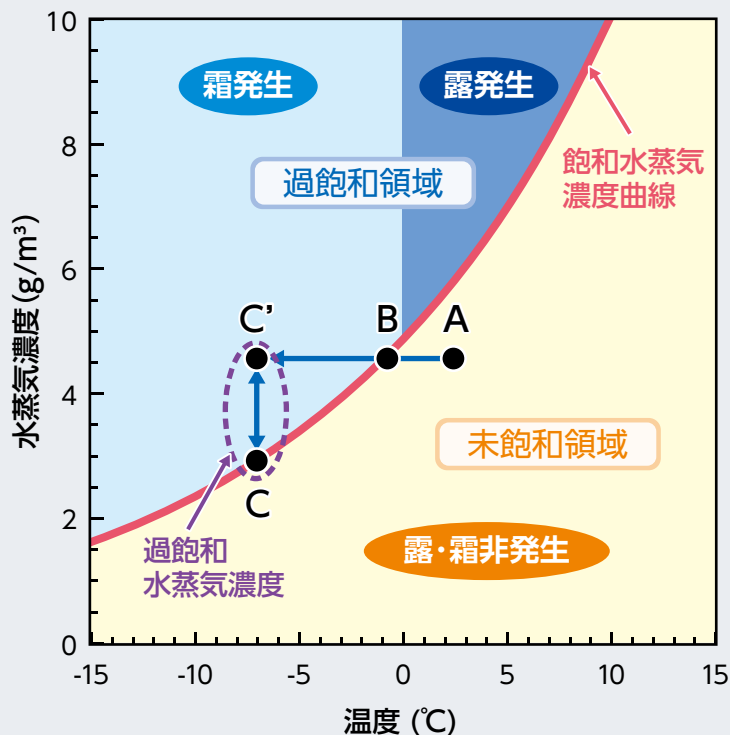


図2 架線着霜の発生模式図

図3 温度と飽和水蒸気濃度との関係



凝結

気体の水蒸気が液体の水になる相変化の呼称です。

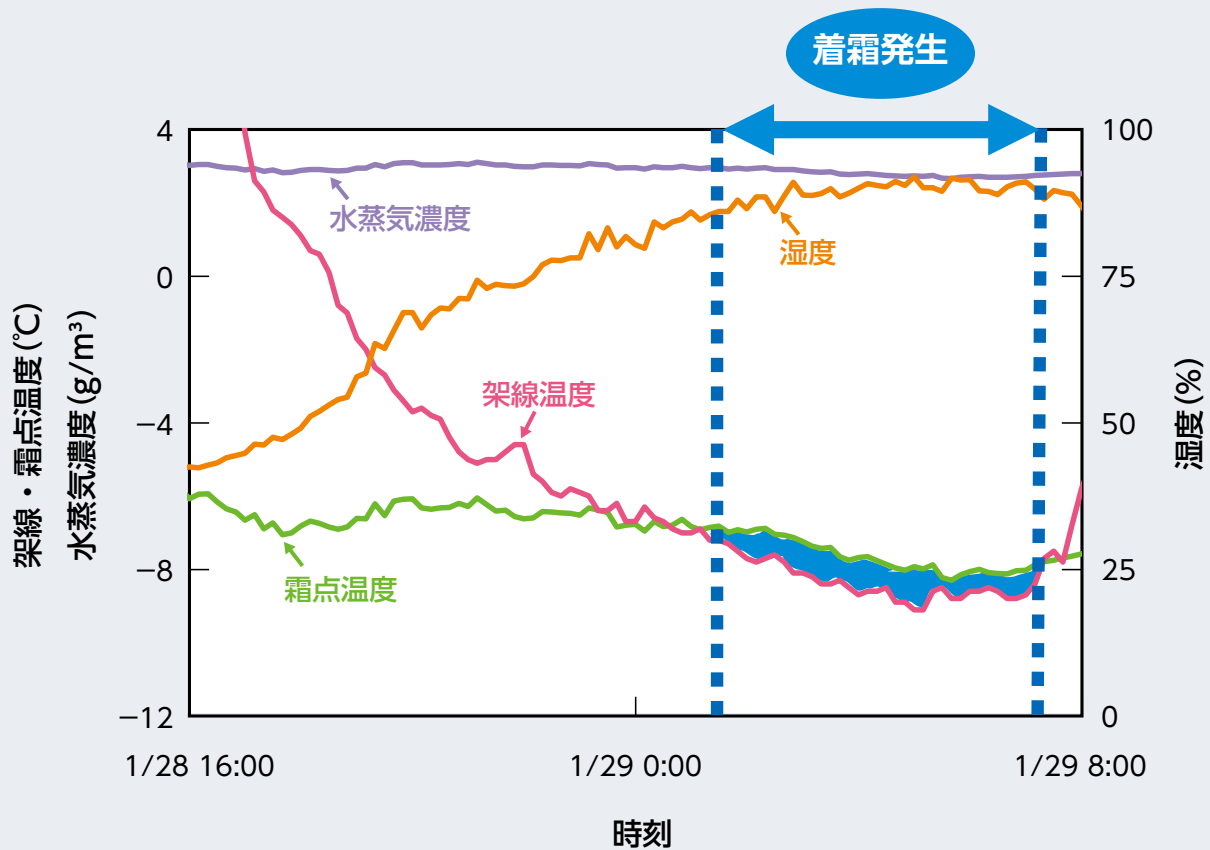


図4 典型的な架線着霜発生日の気象状況の変化

することがある湿度というよび方では、各温度における湿度100%に対応します。例えば、湿度80%とは、空気中の水蒸気濃度がそのときの気温に対する飽和水蒸気濃度の8割となっていることを表します。つまり、ある気温の湿度80%に対応する水蒸気濃度は、ある気温の飽和水蒸気濃度に0.8をかけることで求めることができます。このように観測地点の気温と湿度がわかれば、水蒸気濃度を計算することができます¹⁾。

飽和水蒸気濃度曲線をはさんで、左上は水蒸気濃度が飽和以上（過飽和）となって霜や露が発生する過飽和領域、右下は水蒸気濃度が飽和に達せず（未飽和）霜または露が発生しない未

飽和領域となります。気温と湿度から計算される水蒸気濃度（図中の点A）の気温が低下するとある温度（図中の点B）で飽和に達して霜または露が発生します。この温度のことを0°C以下であれば霜点温度とよび、0°Cよりも高い温度であれば、露点温度とよびます。

架線に霜が発生するのは、放射冷却により気温よりもトロリー線の表面温度は下がって0°C以下になり、かつトロリー線表面付近の水蒸気濃度が過飽和（図中の点C'）となる状態です。この過飽和分の水蒸気（図中の点C'と点Cの差）が凝結することで、霜が発生・成長します。このとき、点Bよりも点C'の温度が低いことからわかるようにトロリー線の表面温度は、霜点温

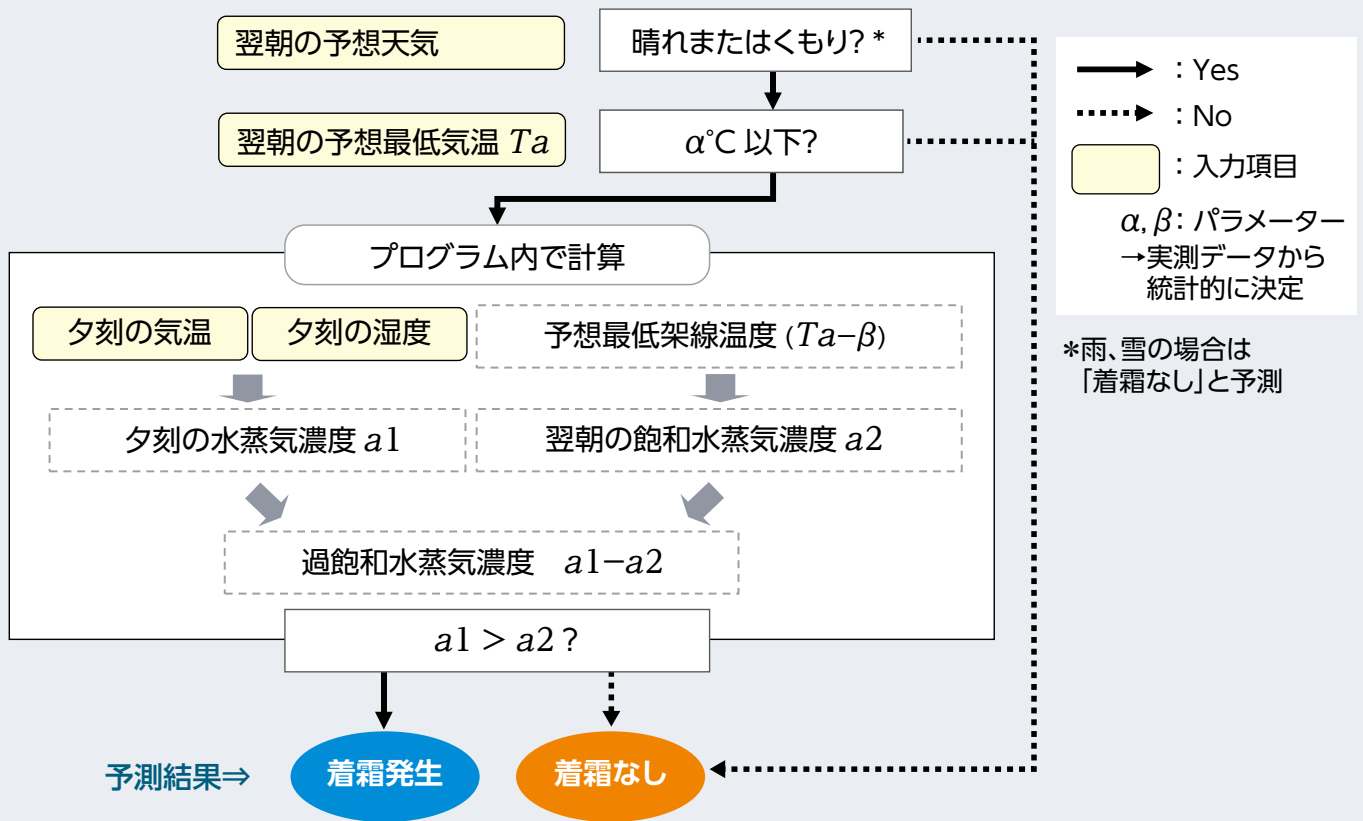


図5 架線着霜の発生予測フロー

度よりも低くなっています。一方で、朝に日射などでトロリー線温度が上昇して霜点温度を超えると、図中右下の未飽和状態となり、付着した霜や露は昇華蒸発して消えてしまいます。

典型的な架線着霜発生日前日の夕方から当日の朝までのトロリー線温度（架線温度）、霜点温度、湿度および空気中の水蒸気濃度の時間変化を図4に示します。空気中の水蒸気濃度は、一晩を通して変化が小さく、このため霜点温度はあまり変化しません。一方で、架線温度は、日没後に放射冷却の強まりとともに低下して霜点温度よりも低くなり、日の出とともに上昇して霜点温度よりも高くなるという変化をします。そして、架線着霜が観察された時間帯（図

中の縦の点線で囲まれた範囲）と、架線温度が霜点温度を下回った時間帯（図中の網かけ部分）が一致していることから、架線着霜についても霜の発生メカニズムに基づいて発生していることが確認できました。

架線着霜の予測方法と 架線着霜発生予測プログラム

霜の発生メカニズムに基づいた架線着霜の発生予測フローを図5に示します。早朝の霜取り列車の運行の要否は、前日の夕方に得られる気象情報から判断する必要があります。このため、予測手法に必要なのは4つの気象情報（夕刻の気温と湿度の観測値、翌朝の予想最低気温と予

①
夕刻(17~18時頃)に入力

- ・気温, 湿度の実測値
- ・翌朝の予想天気
- ・翌朝の予想最低気温

②
翌朝の架線着霜の有無を予測

③
翌朝に着霜発生の有無, 天気, 最低気温を入力
→パラメーターを統計的に決定
→適中率が向上

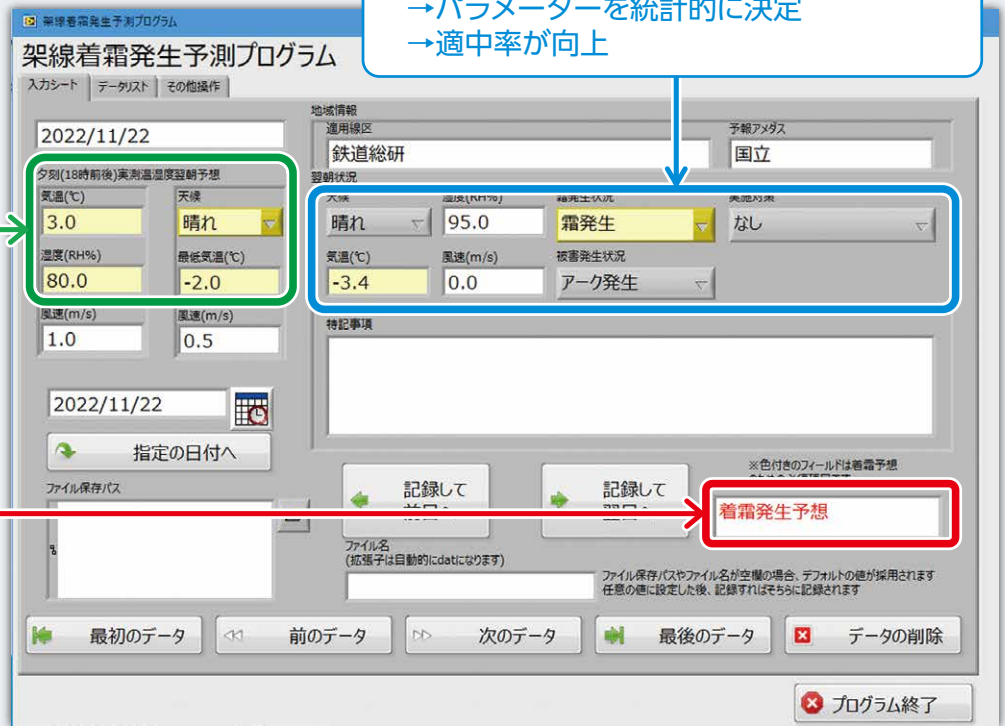


図6 架線着霜発生予測プログラムの画面

報天気)になります。予測の流れとしては、Ⅰ.翌朝の天気は「晴れまたはくもり」か(放射冷却がおこりやすいか?), Ⅱ.予想最低気温は霜が発生しやすい気温以下か, Ⅲ.予想最低架線温度が霜点温度を下回るか, の3つの段階を経て霜の発生を予測します。一般的には, 気象観測点と架線着霜が発生する地点とは異なるため, 架線着霜が発生する気温などの条件は, 気象観測点と霜発生地点では差があります。このような差の影響を少なくするために, 霜が発生しやす

適中率

予測に対して実況が一致した回数の割合です。たとえば, 架線着霜発生と予測した場合に実際に架線着霜が発生すれば適中となります。

い気温 α と予想最低架線温度 β (気温よりも架線温度が何°C下がるか)については, 観測点や地域によって適正な値を決める必要があります。

本予測手法をアプリケーション化し, 汎用PCで使用可能な架線着霜発生予測プログラム(図6)を開発しました。①の緑枠で囲まれた入力欄に4つの気象情報(夕刻の気温と湿度の観測値, 翌朝の予想最低気温と予報天気)を入力すると, ②の赤枠で囲まれた出力欄に架線着霜の発生の有無が表示されます。さらに③の青枠に実際の架線着霜の有無を入力することで, 統計的に最も適中率¹⁾が高くなるように図5の発生予測フローに示したパラメーター α と β を自動的に調整します。

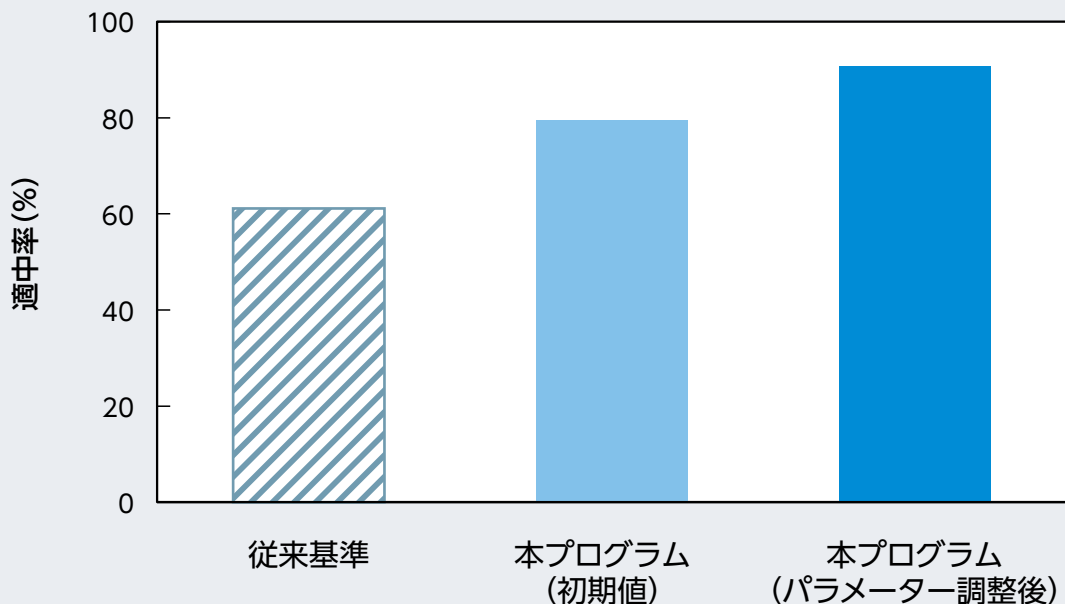


図7 架線着霜発生予測プログラムによる予測の適中率

本予測手法による架線着霜発生の予測精度は、天気予報の適中精度に依存します。そこで、本予測手法自体の精度を調べるために、天気予報が100%適中した場合として、架線着霜発生区間における4か月分の観測データを用いて適中率を計算しました(図7)。その結果、従来の経験的な判断基準での適中率は約60%ですが、本プログラム(初期値 $\alpha: 2^{\circ}\text{C}$, $\beta: 4^{\circ}\text{C}$)を用いると適中率が約80%になること、さらに実際の架線着霜の発生の有無を入力することで、パラメーター調整後の適中率が90%以上となることを確認しています。本プログラムにより、対策実施の判断の合理化が期待できます。

おわりに

霜の発生メカニズムに基づいた架線着霜発生予測手法と架線着霜発生予測プログラムについて紹介しました。紹介した予測手法では、高い適中率で霜の発生・非発生を予測することができます。また、本プログラムは2023年1月より株式会社テスから販売されています。

今後も架線着霜による被害発生を軽減できるように研究開発を進めていきます。RRR

文献

- 1) 近藤純正：地表面に近い大気の科学，東京大学出版会，p3, 2000