

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

気象データから架線着霜の発生を予測する

冬の晴れた朝には、電車の走行に必要な電力を供給するトロリー線に霜（架線着霜）が発生することがあります。このような区間を電車が走行するとアーク放電などが原因の障害がパンタグラフやトロリー線に発生することがあります。霜による障害抑制のためには、架線着霜を除去することが重要となります。そして、架線着霜の除去を効率的に実施するためには、架線着霜の発生を精度よく予測することが重要です。そこで、霜の発生メカニズムに基づいて、気象データから架線着霜を予測する手法を開発したので紹介します。



鎌田 慈
Yasushi Kamata
防災技術研究部
気象防災研究室
主任研究員（上級）
【専門分野】雪氷学、雪害対策



穴戸 真也
Masaya Shishido
防災技術研究部
気象防災研究室
副主任研究員
【専門分野】雪氷学、雪害対策



根津 一嘉
Kazuyoshi Nezu
電力技術研究部
集電管理研究室
室長
【専門分野】集電系の状態監視

はじめに

電車は線路の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することがあります。ここでは、トロリー線表面に霜が付着することを架線着霜とよぶことにします。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ため、アーク放電が発生します。アーク放電は、大きな熱や光とともに空気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。

ここでは、架線着霜による輸送障害の調査結果とその対策を紹介し、効率的な対策を講じる際に必要となる架線着霜の発生予測手法について紹介します。

架線着霜による輸送障害の実態

はじめに、架線着霜による輸送障害に関する調査結果について紹介します。



図1 架線着霜による問題

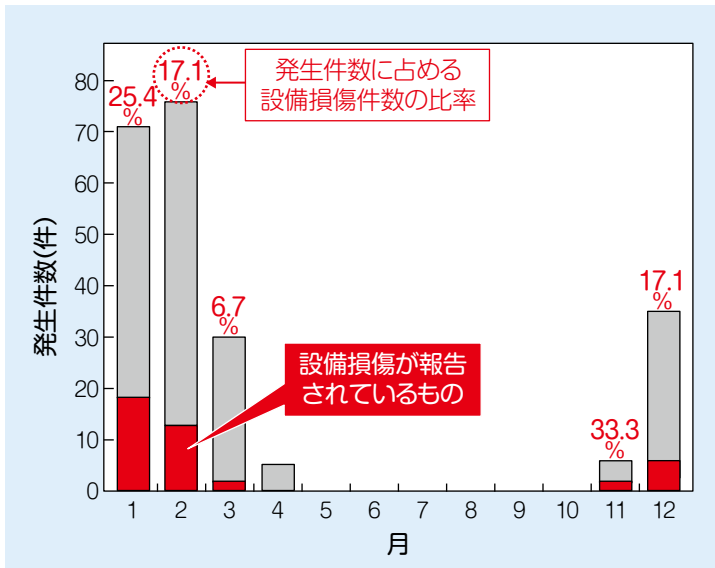


図2 架線着霜が原因と報告されている輸送障害の月別発生件数 (期間：2001年10月～2013年3月)

鉄道事業者は、列車の運休、または旅客列車で30分以上、旅客列車以外で1時間以上の遅延があった場合、国土交通省に輸送障害として報告または届出することが定められています。これらの報告または届出の中で、2001年10月から2013年3月までの間に全国で発生した、架線への「霜」「氷」「凍結」を原因とした輸送障害は223件ありました。なお、「着霜」と「着氷」は生成の過程が異なる別の現象ですが、両者は混同して報告されることが多く、実際の発生頻度は、着霜の方が圧倒的に多いと推測されるため、ここでは両者を区別せずに発生時期や地域を分析しました。

輸送障害の発生時期を図2に示します。棒グラフ中の赤塗り部分は、パンタグラフなどの集電装置、もしくはトロリー線などの電車線設備の損傷が報告されているものです。設備損傷があると、一般には復旧に時間を要する重大な輸送障害となります。このような設備損傷をとまなうものは、冬季前半(11月～1月)に比率が高いことがわかります。

都道府県別の輸送障害の発生件数を図3に示します。架線着霜による輸送

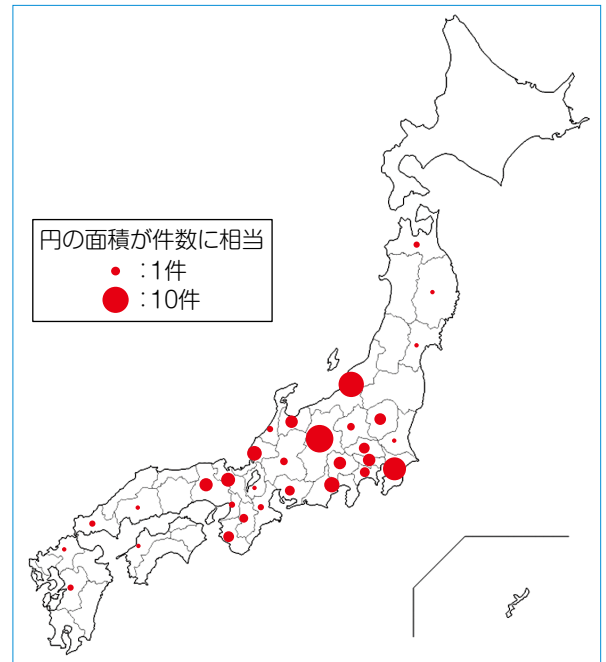


図3 架線着霜が原因と報告されている輸送障害の都道府県別発生件数(期間:2001年10月～2013年3月)

表1 架線着霜に対する対策例

対策	対象	対策	長所	短所
設備面	電車線	凍結防止剤の塗布	設備コストが安い	塗布に手間がかかる 効果が持続的でない
		ヒーター入りトロリー線	着氷霜を確実に除去 現場作業の必要がない	設備コストが高い 特殊なトロリー線が必要
		トロリー線の通電加熱	トロリー線は通常のもの	直ちよう架線のみ適用 通電用設備が必要
運転面	パンタグラフ	アークカットボードの取付	改造が軽微で安価	舟体のみ保護
		寒冷地用すり板の使用	現行設備のまま対応可能	トロリー線摩耗への影響
		押し上力の増加	現行設備のまま対応可能	摩耗量の増大
運転面	運転	ノッチ制限	現行設備のまま対応可能	列車ダイヤに影響
		霜取り列車の運転	現行設備のまま対応可能	運転後に再着霜の可能性 運転コスト大
		霜取りパンタグラフ	運転への影響は少ない	追加パンタグラフが必要

障害の発生件数の多寡は電化されている路線延長や列車本数にもよりますが、とくに多いのは長野、新潟、千葉の各県で、これら3県で全件数の49%を占めます。一方、全国で見ると北から南まで31都府県で発生しており、日本国内どこでも発生する可能性があることがわかります。

架線着霜の対策

架線着霜の代表的な対策を表1に示します。効果が確実なのは、設備面での対策の一つであるトロリー線を加熱する方法ですが、特別な設備が必要で

あるため、コストや保守の点で限定的な導入にとどまっています。一方で、ノッチ制限(☞参照)や霜取り列車(初列車前の臨時回送列車)の運行といった運転面での対策も行われています。とくにノッチ制限は、集電電流

☞ ノッチ制限

ノッチとは、車両の加減速を制御するマスターコントローラーの段数です。力行時(加速時)は、ノッチが大きほどモーターへ電流を多く供給します。ノッチ制限とは、ノッチの上限を通常よりも低い段数にして集電電流を低減することです。

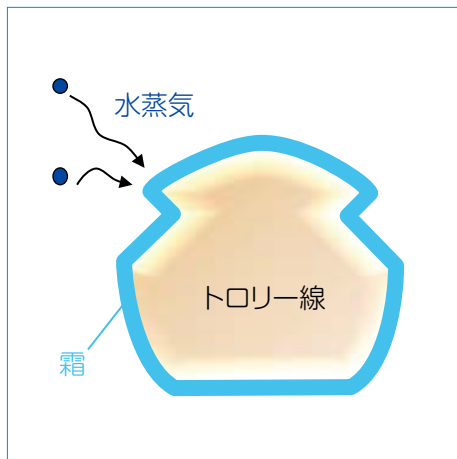


図4 架線着霜の発生模式図

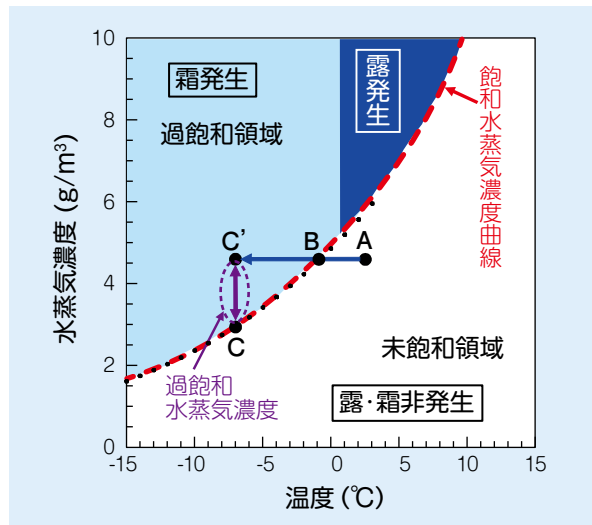


図5 温度と飽和水蒸気濃度との関係

を低減することで、トロリー線着霜にともなうアークのエネルギーが低減するので、被害の軽減に有効ですが、列車の遅延を招くことが問題となります。また、霜取り列車の運行には運転電力や乗務員の手配に労力およびコストがかかります。

このような運転面での対策は、トロリー線着霜発生日の気象条件の記録から経験的に要否を判断することが多いため、架線着霜発生の見逃しや対策の空振りが発生することがあります。そこで、架線着霜発生の有無を適確に予測することは、列車遅延や追加コストを必要最小限に抑えた対策を行ううえで重要となります。

霜の発生メカニズム

架線着霜を適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4)。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5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することがある湿度というよび方では、各温度のときの湿度100%の空気に含まれる水分の量に対応します。たとえば、気象情報の湿度80%とは、その時の気温に対する飽和水蒸気濃度の8割の水蒸気濃度が空気中に含まれ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)の空気の温度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。この時、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。

実際にこのようなメカニズムで霜が発生しているか調べました。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6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がわかります。このことから、霜の発生メカニズムに基づいて架線着霜が発生していることがわかりました。

架線着霜の予測手法

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7に示します。この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報天気）になります。予測の流れとしては、①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？）、②予想最低気温は霜が発生しやすい気温以下か、③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。ここで、霜が発生しやすい気温と予想最低架線温度（気温よりも架線温度が何℃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。

本予測手法による架線着霜発生の予

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。

おわりに

トロリー線に着霜した場合の被害と対策および霜の発生メカニズムに基づいた架線着霜発生予測手法について紹

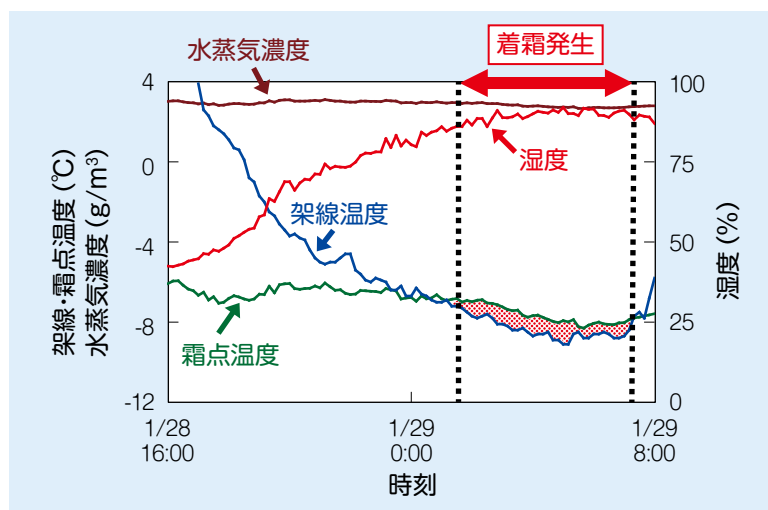


図6 典型的な架線着霜発生時の気象状況の変化例

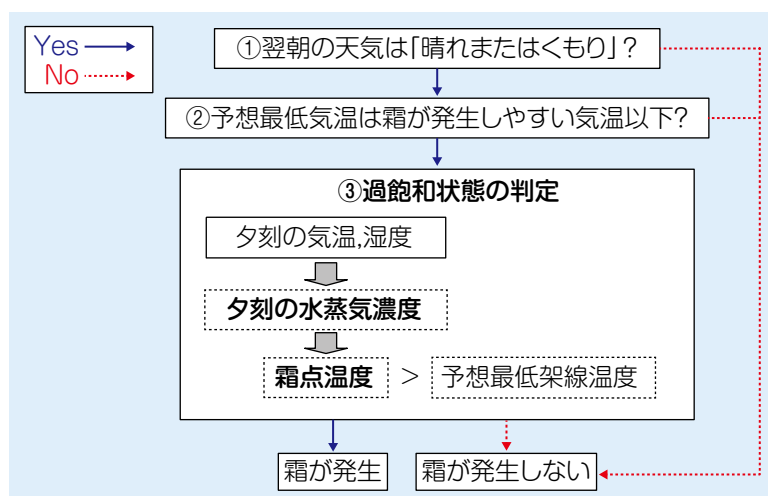


図7 架線着霜予測フロー

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、予測フローの①と②に観測値を用いて適中率(☞参照)を調べました。その結果、架線着霜の発生を90%の適中率で予測できました。また、同じ期間の天気予報の予報値を①と②に用いた場合でも60～70%の適中率で架線着霜の発生を予測できることがわかりました。

介しました。今回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。

一部の事業者には霜取り列車の運行などの対策を判断するために本予測手法を試行していただいています。今後も架線着霜による被害発生危険度を評価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