

架線着霜の発生条件と予測手法の開発

防災技術研究部 気象防災

主任研究員 鎌田 慈

1. はじめに

気温が低く、かつ、湿度が高い冬の晴れた夜間には、電車線（架線）に霜が付着し成長することがある。このような架線着霜が発生した区間を電車が走行すると、パンタグラフと架線との間に介在する霜により離線が発生し、これに伴うアーク放電により、パンタグラフの損傷、架線の溶断等が生じることがある。そのため鉄道会社では架線着霜対策として、霜の付着および成長を抑制する凍結抑止剤の塗布や、架線に付着した霜を除去する『霜取り列車』と呼ばれる臨時列車の早朝運行等が行われている。霜取り列車の運行判断を的確に行うためには、架線着霜の発生予測が重要である。しかし、現状では過去の架線着霜発生日の気温、湿度、風速、天気的气象条件から経験的に霜の発生を予測した上で、運行の判断がなされることが多い。そこで、本研究では、気象観測を行って架線着霜が発生する気象条件を定量的に明らかにし、得られた気象条件と霜の発生メカニズムに基づいて翌朝の架線着霜を予測する手法を検討した。

2. 架線着霜発生時の気象条件

2.1 観測方法

架線着霜の観測場所は、一冬期間に複数回、架線着霜の発生が見込まれること、気象測器等の設備を配置しやすいことを条件として、中央西線中津川駅構内（中津川運輸区、岐阜県中津川市）を選定した。

過去の文献を調査した結果から、観測する気象要素は、気温、湿度、風速・風向、放射収支量、架線温度および降水量とした。このうち、放射収支量は観測地点の天気に関わる観測項目であり、雲量によって値が変化する。特に、霜が発生する

ような冬期の晴れた夜間には放射冷却現象（地表面および地表面付近にある物体が赤外放射により熱を放出して冷却される現象¹⁾）が発生し、放射収支量の値は負になる。

図1に各気象測器の設置状況を示す。観測柱（地上高さ6m）を設置し、強制通風式の温湿度計、風速計、風向計をそれぞれ地上1.5mおよび架線とほぼ同じ高さの地上5.1mに取り付け、長短波放射計は地上5.9mに取り付けた。架線温度は、架台を組み、地上3mの位置に長さ3mの模擬架線（新品架線1本、摩耗架線2本）を設置し、これに测温抵抗体を接着して測定した。

架線着霜の有無は、Webカメラ（10分毎）およびデジタルカメラ（毎正時）により撮影された模擬架線の画像から判断した。観測期間は、2005年11月10日～2006年3月31日および2006年11月1日～2007年2月28日の262日間であり、このうち停電による欠測が13日あった。期間内で

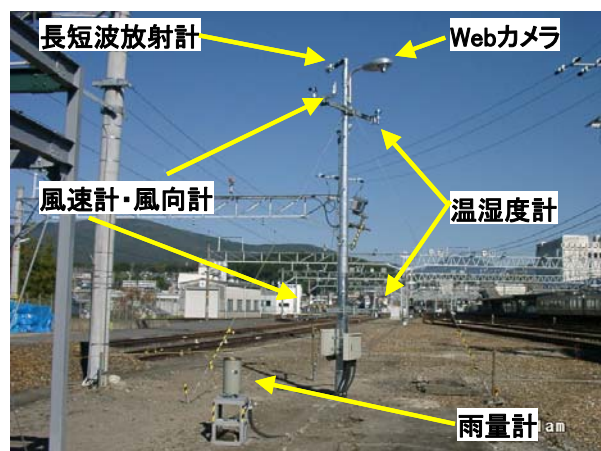


図1 各気象測器の設置状況

霜が発生した総日数は、72日であった。

2.2 観測結果

(1) 架線着霜発生日の特徴

架線着霜発生日の典型的な気象状況の一例として、2006年1月28日16時～29日8時の気温、架線温度、湿度、風速および放射収支量の変化を示す(図2)。着霜が発生した時間帯は、2時から7時までであった(図中の破線で囲まれた時間帯)。28日18時に2.8℃であった気温は時間とともに低下し、29日5時には-6.8℃となり、この間に湿度は49%から92%へ増加した。また、架線温度は気温と同様に低下し、日没後は気温よりも1～3℃低く、29日5時には-9.1℃となった。28日18時から29日8時まで、風速は1m/s以下であった。夜間の天気は晴れであり、日没(17時13分)とともに放射収支量は約-100W/m²以下となり、29日5時まで-100W/m²程度で推移していた。前述のように夜間晴れている場合の放射収支量は負の値となり、放射冷却が起きるために地表面付近の物体の温度は気温よりも低くなる¹⁾。

(2) 着霜発生時の気象条件

観測期間中の着霜発生時の気象条件について調べた結果、気温は0.5℃以下、湿度は80%以上、風速は1m/s以下、放射収支量は-120～-70W/m²、架線温度は0℃以下で、かつ気温より1～3℃低い、という条件が重なる時に架線着霜の発生する可能性が高いことがわかった。

(3) 霜の発生メカニズム

身近な現象として、テーブルの上に冷水を入れたコップを置いたとき、コップ表面には結露が生じる。結露は空気中の水蒸気がコップ表面に凝結したものであることから、この現象には水蒸気の性質が深く関わっている。架線に発生する霜についても、コップ表面の結露と同様のメカニズムで発生すると考えられる。一般に、ある温度の水蒸気濃度(単位体積あたりの空気に含まれる水蒸気量)には上限値があり、これを飽和水蒸気濃度と呼ぶ。また、空気中のある水蒸気濃度が飽和に達する時の温度を露点温度と呼び、特に0℃以下の物体表面に対して飽和に達する時の温度を霜点温度と呼ぶ。つまり、コップ表面の結露は、冷水で冷やされたコップの表面温度が露点温度まで下がることで発生する。架線に発生する霜についても、放射冷却の影響で架線表面温度が霜点温度以下となり、空気中の水蒸気が凝結して霜が発生すると考えられる。このように、架線着霜の発生メカニズムを知る上では、架線近傍の水蒸気濃度に注目する必要がある。

空気の温度(気温)と湿度から空気中の水蒸気濃度を以下の式(1)、(2)を用いて算出することができる¹⁾。

$$e = e_{SAT} \times RH \div 100 \quad (1)$$

$$a = 2.167 \frac{e}{T + 273} \quad (2)$$

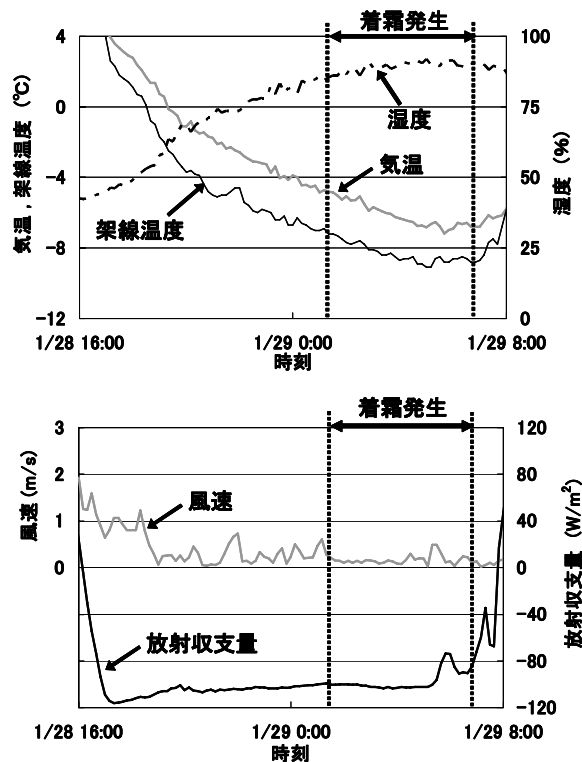


図2 架線着霜発生日の各気象要素の経時変化

ここで、 e (Pa)は温度 T (°C)の時の水蒸気圧、 e_{SAT} (Pa)は温度 T の時の飽和水蒸気圧、 RH (%)は湿度、 a (g/m^3)は水蒸気濃度である。

図3に温度と飽和水蒸気濃度の関係を示す。図中の曲線は飽和水蒸気濃度曲線であり、各温度での湿度100%に対応する。霜または露は水蒸気濃度が飽和に達した時点から発生するため、飽和水蒸気濃度曲線をはさんで、左上が水蒸気濃度が過飽和となって霜または露が発生する領域、右下が水蒸気濃度が未飽和のため霜または露が発生しない領域を示す。ここでは、ある温度で過飽和領域の空気に含まれる水蒸気濃度(図中の点C')と飽和水蒸気濃度(図中の点C)との差を過飽和水蒸気濃度と呼ぶ。この過飽和分の水蒸気が凝結して霜または露が発生・成長し、未飽和状態では霜または露は蒸発するため消失していく。

2006年1月28~29日を例に、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に示す。着霜が観察された時間帯(図中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(図中の斜線部分)が一致していることが分かる。架線温度が霜点温度を下回るといことは、架線表面付近の空気中に飽和水蒸気濃度を超える量の水蒸気が含まれていることを示しており、図3中の霜または露が発生する領域に入っているということである。このような傾向は、他の架線着霜発生日にも共通していた。

さらに、他の霜発生日にも共通して特徴的なのは、気温、湿度の観測値から計算された水蒸気濃度が一晩を通して変化が小さいということであった。

3. 架線着霜発生予測手法の検討

3.1 発生予測手法の原理

本予測手法では、霜発生日の夜間は空気中の水蒸気濃度の時間的変化が少ないという観測結果から、夕方の時点での水蒸気濃度(例えば図3の点A)が翌朝まで変わらないと仮定した。そして、予想される翌朝の架線温度が、飽和水蒸気濃度の点Bを挟んで、点C'のような霜または露が発生する過飽和領域に入るか否かで霜の発生の有無を判断することとした。

3.2 発生予測フロー

本研究では容易に得ることのできる気象情報のみで霜の発生が予測可能な方法について検討した(図5)。架線着霜の発生予測を行う上で必要な気象要素は、夕刻の気温 T_1 (°C)と湿度 RH_1 (%)の実測値、翌朝の予想天気と予想最低気温 T_2 (°C)である。フローの水蒸気濃度は式(1)、(2)から

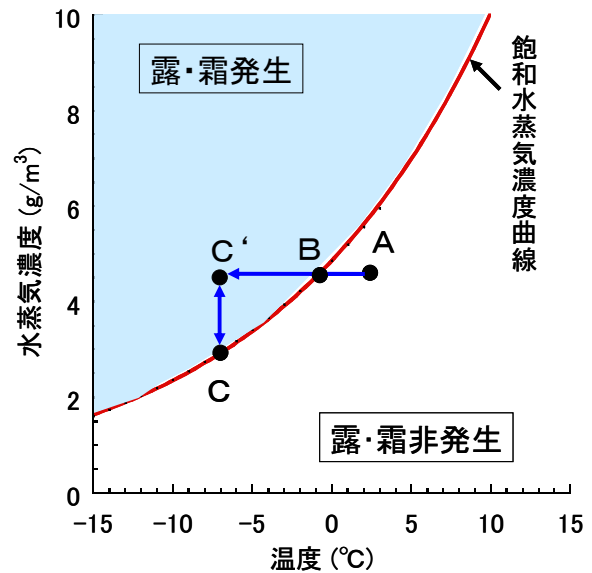


図3 温度と飽和水蒸気濃度の関係

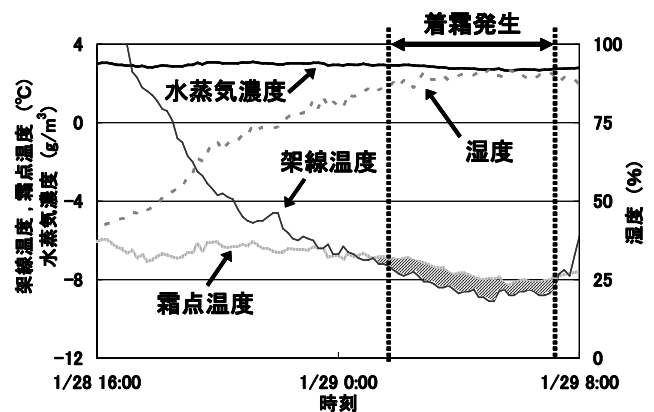


図4 霜点温度と水蒸気濃度の時間変化
(図2に霜点温度と水蒸気濃度の変化を加筆)

求められる。また、観測結果のばらつきの範囲で安全側の条件を取り、架線温度は気温よりも 3°C 低くなるものと仮定した。したがって、フローの温度 (T_2-3) は、予想最低架線温度に相当する。

3.3 予測精度の検証

予測フローにしたがって架線着霜の発生予測を行い、実際の架線着霜の発生と比較して、天気予報の適中率計算と同様の方法²⁾で検証した。

まず、本予測手法自体の精度を調べるために、観測値を用いて、現地の天気予報が100%当たった場合を想定した検証を行った。夕刻の気温 T_1 と湿度 RH_1 は、17:00 の地上 1.5m に設置した

温湿度計の値を用いた。翌朝の天気は放射収支量 $-70\text{W}/\text{m}^2$ 以下であれば「晴れまたはくもり」と判断し、気温 T_2 には観測値を用いて、フロー中の基準を満たす条件が1時間以上継続した場合を霜発生と予測した。検証に用いたデータ数は249である。この結果、適中率は90.8%、見逃し率は0%、空振り率9.2%であった。観測値を使用しても空振りが発生するのは、例えば 0°C 付近で、実際には露が発生していることを、この判定では霜の発生と予測するためである。

次に、観測期間中で気象予報値が得られた85日を対象として、天気予報の精度(適中率)を加味した場合の本予測手法の精度を検証した。気温 T_1 と湿度 RH_1 は、17:00 の地上 1.5m に設置した温湿度計の値を用いた。予想最低気温 T_2 には午前11時30分発表の中津川市ピンポイント天気予報を用いた³⁾。この結果、適中率は70.6%、見逃し率は8.2%、空振り率21.2%であった。このように天気予報の精度(特に、最低気温の予測精度)により、適中率、見逃し率、空振り率が変化する。本予測手法では、実際の気温が予想最低気温よりも低温側に大きくずれると見逃しにつながり、高温側にずれると空振りにつながる。

ここで、本予測手法では霜がわずかでも発生する場合を架線着霜発生としたため、必ずしも障害を引き起こす架線着霜を予測していないことに注意が必要である。

4. まとめ

架線着霜発生時の気象条件を把握するための現地観測を実施し、気温は 0.5°C 以下、湿度は80%以上、風速は $1\text{m}/\text{s}$ 以下、放射収支量は $-120\sim-70\text{W}/\text{m}^2$ 、架線温度は 0°C 以下で、かつ、気温に比べ $1^{\circ}\text{C}\sim3^{\circ}\text{C}$ 低い、という条件が重なった時に、架線着霜が発生する可能性が高いことがわかった。次に、観測結果と霜の発生メカニズムに基づき、夕刻の気温と湿度の実測値、翌朝の予想天気と予想最低気温を用いて、翌日の架線着霜の発生を予測する手法を考案した。この手法による予測精度を検証した結果、架線着霜の発生予測は高い適中率で可能となることが確認された。

参考文献

- 1) 近藤純正：地表面に近い大気の科学、東京大学出版会、2000
- 2) 新田尚：気象予報士のための天気予報用語集、東京堂出版、1998
- 3) <http://weather.yahoo.co.jp/weather/jp/21/5210/21206.html>

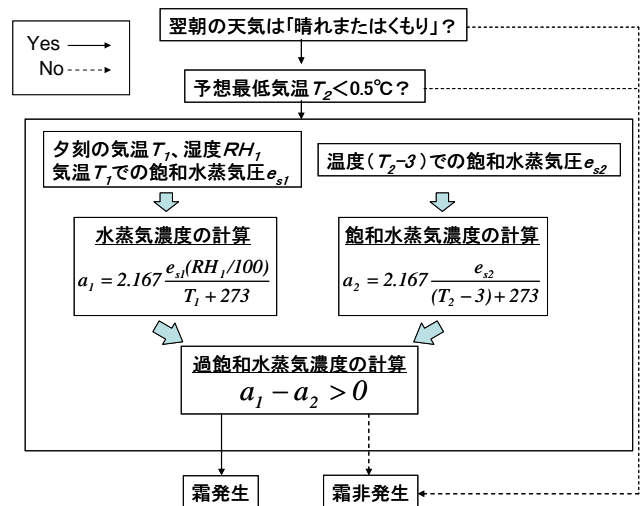


図5 架線着霜発生予測フロー