

架線着霜現象の解明と発生予測手法の検討

鎌田 慈* 宍戸 真也*

遠藤 徹* 飯倉 茂弘*

Resolution of Frost-Phenomena Adherent to the Overhead Lines and
a Study on Prediction Method of Overhead Line Frosting

Yasushi KAMATA Masaya SHISHIDO

Toru ENDO Shigehiro IIKURA

To investigate the overhead line frosting phenomena, we analyzed meteorological elements when overhead line frosting occurred. As a result, it was clarified that probability of the frosting outbreak was high when the following conditions occurred at the same time: air temperature was less than 0.5°C , humidity was more than 80%, wind velocity was less than 1m/s and net radiation was less than $-70\text{W}/\text{m}^2$. Based on these climatic conditions and outbreak mechanism of the frost, we examined a method of predicting an outbreak of overhead line frosting using air temperature and humidity in the evening, and the forecasted weather condition and minimum temperature in the next morning.

キーワード：架線，霜，発生予測，水蒸気濃度，適中率

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がパンタグラフの損傷、架線の溶断等の事故の原因となることがある。こうした事故の低減対策として、霜の付着および成長を抑制するための油などの凍結防止剤の塗布¹⁾、架線に付着した霜を除去するためのトロリ線の加熱²⁾、さらに霜取りカッターや無集電パンタグラフを搭載した『霜取り列車』と呼ばれる臨時列車の早朝運行が行われている^{3, 4)}。これらの対策を効率的に行うためには、架線着霜の発生予測が重要である。現状では、線区毎に架線着霜発生日の気温、湿度、風速、天気的气象条件が記録されており、これらのデータを用いて経験的に霜の発生が予測されることが多い。そこで、本研究では気象観測を行って、架線着霜の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簡便な手法を検討した。

2. 架線着霜現象の解明

2.1 観測場所

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、中央西線塩尻～神領間の中央付近に位置する中津川駅構内（中津川運輸区、岐阜県中津川市）を選定した（図1）。この場所は山間部に位置し、冬期間に放射冷却による気温の低下が起きやすく、また、近くに木曾川の支流である中津川があり、湿度も高くなりやすいため、着霜が生じやすい条件がそろっている。

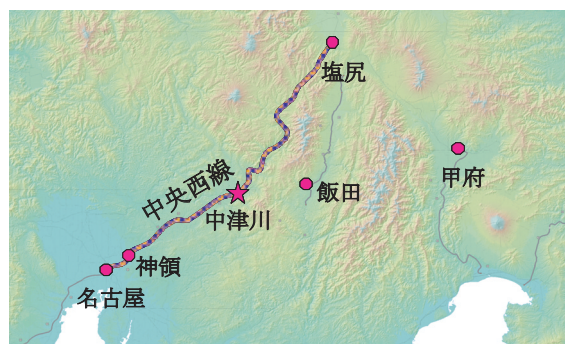


図1 観測場所の位置

* 防災技術研究部（気象防災）

特集：防災技術

2.2 観測方法

過去の文献を調査した結果、霜の発生にかかわる気象要素として、気温、湿度、風速および天気が挙げられている⁵⁾。そこで、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、放射収支量は天気に関わる観測項目であり、上空から地表面へ入る放射量と地表面が放つ放射量の差で計算される。過去の文献による霜害事故発生事例では、晴れた朝に事故が発生することが多いことから、霜の発生には放射冷却が影響することが考えられる⁶⁾。放射冷却とは、冬期の晴れた夜間に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である⁷⁾。このとき、放射収支量は負の値となり、値が小さな程、放射冷却が強いことを示す。

図2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、風向計、風速計をそれぞれ地上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。営業線の架線は常時通電されており、架線温度の測定が困難であることから、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、使用済み架線2本）を設置した（図3）。この使用済み架線に测温抵抗体を接着して架線温度を測定した。

表1に観測要素と使用した気象測器を示す。気温、湿度、風向、放射収支量、架線温度は10分毎の瞬間値を測定し、風速は10分間の平均値を測定した。降水量は10分毎の積算値を測定した。架線着霜の有無は、観測柱に設置した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日間である。

2.3 観測結果

2.3.1 架線着霜発生日の特徴

観測期間中、停電による欠測（13日間）の他は、連続したデータを取得することができた。架線着霜は、全249日間で72日で発生していた。月別の着霜発生頻度は、2005年度、2006年度ともに1月が最も多かった。

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図4に示す。着霜が発生した時間帯は、2時から7時までであった（図中の点線で囲まれた時間帯）。28日17時に4.3℃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45%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

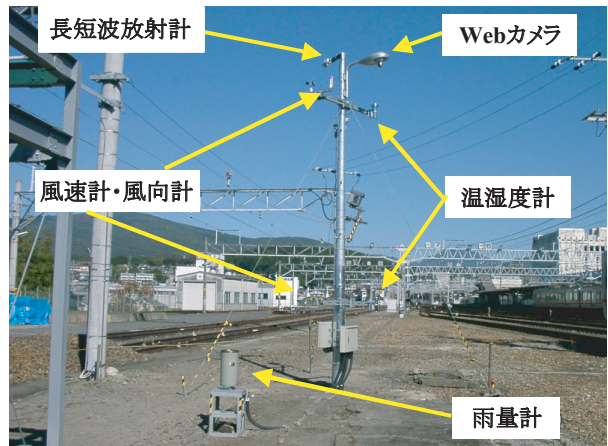


図2 各気象測器の設置状況

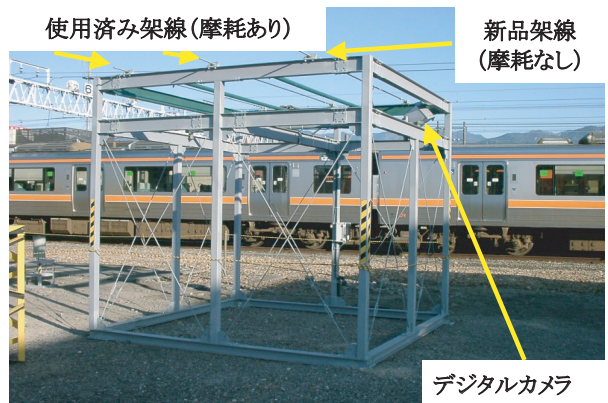


図3 模擬架線の設置状況

表1 観測要素と気象測器

観測要素	測器名	型番	メーカー名
気温・湿度	通風式温湿度計	TR-22A	牧野応用測器研究所
風向	矢羽根型ポテンシヨ風向発信器	VR536	牧野応用測器研究所
風速	3杯式光電風速発信器	AF540	牧野応用測器研究所
放射収支量	長短波放射計	MR-50	英弘精機
降水量	転倒ます型雨量計（ヒータ付）	WB-0011-00-20	横川電子機器株式会社
架線温度	测温抵抗体（直径7mm）	R060-38	チノー
観測サーバー			新潟電気

は晴れであり、日没とともに放射収支量は約-100W/m²以下となり、29日5時まで-120～-100W/m²で推移していた。前述のように夜間晴れている時は放射収支量は負の値を示し、放射冷却が起きるため、地表面付近の物体の温度は気温よりも低くなる⁸⁾。観測期間中の他の着霜発生日についても類似の気象状況を確認した。このことから、①気温が大幅に低下し、②湿度が高く、③風速が小さく、④夜間から早朝にかけて放射冷却が強まり、⑤架線温度が気温より低いという条件が重なった時に架線着霜が生じる可能性が高いことがわかった。

2.3.2 着霜発生時の気象要素

前項では架線着霜の発生する定性的な傾向を明らかにした。そこで、着霜発生時の気温、湿度、風速、放射収支量および架線温度を区別して、定量的な分析を行った。(1) 気温と湿度の関係（図5）：着霜発生時の気温は0.5℃以下であることがわかった。また、着霜発生時の

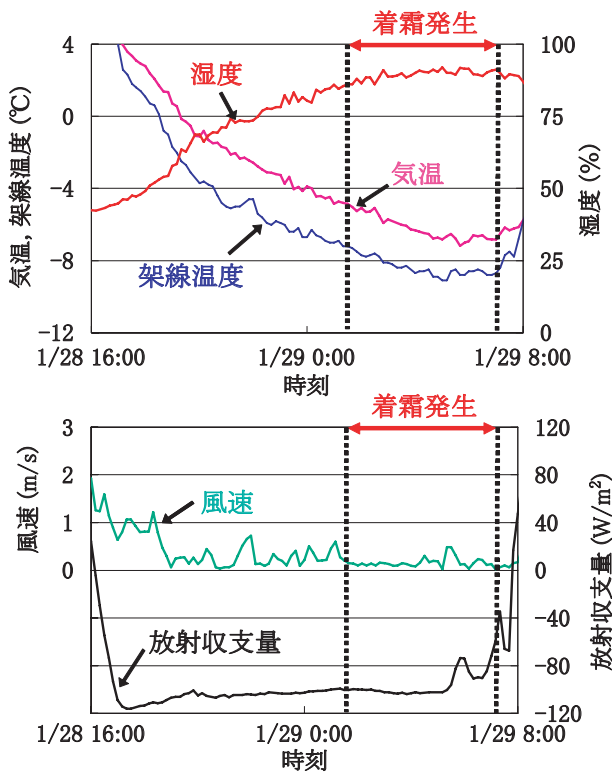


図4 架線着霜発生日の各気象要素の経時変化 (2006年1月28日16:00～2006年1月29日8:00)

湿度は、気温が0℃付近では90%以上であったが、気温が-5℃程度まで低下すると、80%程度でも着霜が発生した。このように、気温が低いほど、着霜が発生する湿度も低くなる傾向にあることがわかった。

- (2) 気温と風速の関係 (図6)：着霜が発生するのは、風速1m/s以下であることがわかった。
- (3) 気温と放射収支量の関係 (図7)：着霜発生時の放射収支量は-70W/m²以下であることがわかった。この放射収支量の値から、着霜発生時の夜間の天気はおおむね晴れであり、顕著な放射冷却現象が起きていることがわかった。
- (4) 気温と架線温度の関係 (図8)：架線着霜が発生する架線温度は0℃以下、かつ、気温よりも約1～3℃低いことがわかった。このような気温と架線温度との差は、風の有無および放射収支量から生じるが、観測された夜間の風速は小さいため、主に放射収支量の影響を受けたと考えられる。

なお、図5～8中に示した点線で囲まれたデータのようならばつきがあるのは、日の出以降に気温、架線温度、放射収支量が上昇し、湿度が低下した時間帯においても夜間に成長した霜が残っており、この場合も着霜ありと判定したためである。

以上の関連分析から、①気温は0.5℃以下、②湿度は80%以上、③風速は1m/s以下、④放射収支量は-70W/m²以下、⑤架線温度は0℃以下で気温より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。

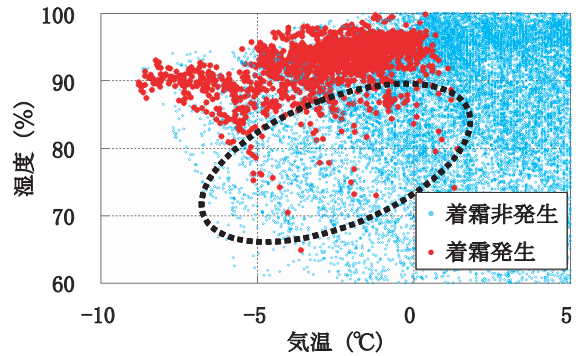


図5 気温と湿度の関係

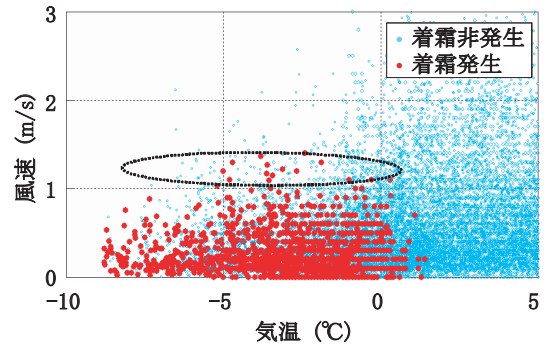


図6 気温と風速の関係

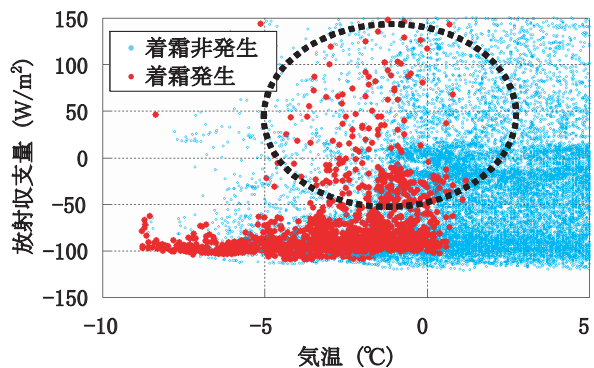


図7 気温と放射収支量の関係

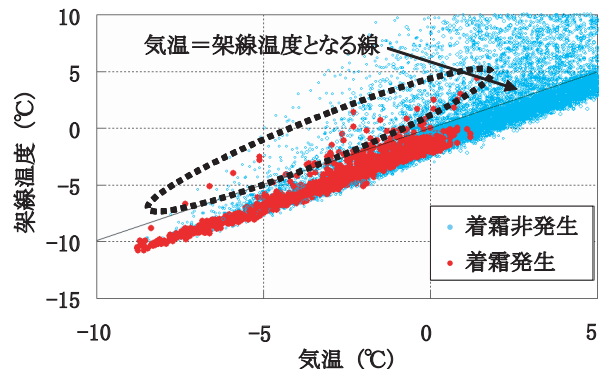


図8 気温と架線温度の関係

特集：防災技術

表2 着霜発生日の気圧配置パターン

気圧配置パターン		着霜発生日	
		事例数	割合
高気圧接近型	西高東低	36	50%
	移動性高気圧	21	29%
高気圧型	帯状高気圧	4	6%
	南高北低	1	1%
	日本海低気圧	5	7%
低気圧接近型	南岸低気圧	4	6%
	二つ玉低気圧	1	1%
	北高	0	0%
その他	梅雨・秋雨前線	0	0%
	台風	0	0%
	その他	0	0%
	総数	72	100%

2.3.3 着霜発生時の気圧配置

架線着霜発生時の天気状態を知るために、観測期間中の午前3時の地上天気図を用いて、着霜発生日の気圧配置を11のパターン⁹⁾に分類した(表2)。着霜発生日の気圧配置は、高気圧接近型(西高東低)または高気圧型(移動性高気圧, 帯状高気圧, 南高北低)であることが多く、これらを合わせると全体の86%を占めた。一般に、高気圧接近型および高気圧型では、中津川は晴れとなることが多い¹⁰⁾。これにより、顕著な放射冷却現象が生じたものと考えられる。

2.3.4 霜の発生メカニズム

ここで、身近な現象を例に霜が発生するメカニズムについて考察する。テーブルの上に冷水を入れたコップを置いたとき、コップの外側には結露が生じる。これは、冷水で冷やされたコップの表面温度が露点温度に達し、空気中の水蒸気がコップ表面に凝結するためである⁸⁾。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。つまり、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、架線近傍の水蒸気に注目する必要がある。

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、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。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⁸⁾。

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

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

ここで、 e (Pa) は温度 T (K) の時の水蒸気圧、 e_{SAT} (Pa) は温度 T (K) の時の飽和水蒸気圧、 RH (%) は湿度、 a (g/m³) は水蒸気濃度である。

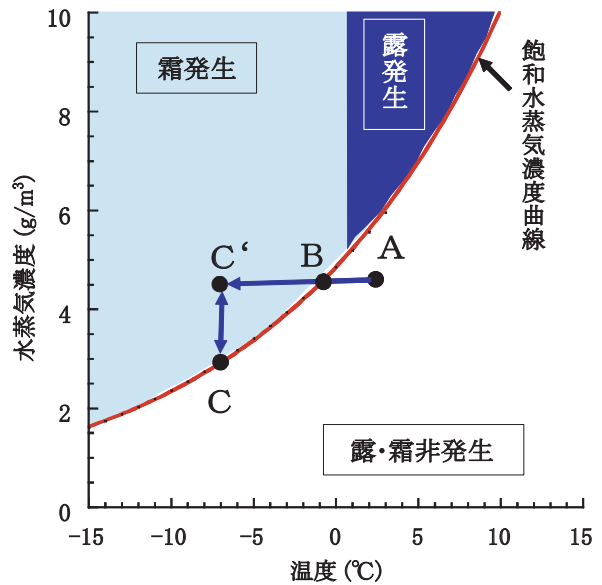


図9 温度と飽和水蒸気濃度の関係

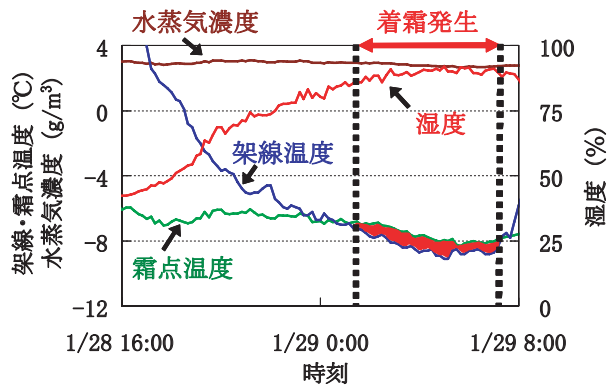


図10 霜点温度と水蒸気濃度の時間変化 (図4に霜点温度および水蒸気濃度の変化を加筆)

図9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・成長する。逆に、未飽和状態では、霜または露の昇華蒸発が起こる。

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10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(図中の赤色部分)が一致していることが分かる。この傾向は、他

の架線着霜発生日にも共通していた。

架線温度が霜点温度を下回るということは、架線表面付近の空气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9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。このことにより、前述した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明らかとなった。

もう一つ、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の変化が一晩を通して小さいということである。

ここで、湿度が100%に達しないにもかかわらず架線着霜が発生しているのは、架線温度と気温との温度差によるものである。仮に、気温と架線温度の差がない場合は、湿度が100%に達しなければ、飽和水蒸気濃度を超えないため、霜または露は発生しない。ちなみに観測期間中に湿度100%に達したのは、降水時のみであった。前述のとおり、架線着霜発生時には主に放射収量に影響を受けて架線温度は気温よりも1~3℃低くなるために、空气中的水蒸気濃度が架線表面温度に対する飽和水蒸気濃度を超え、霜が発生したと考えられる。架線着霜に関するこれまでの研究では測定されておらず、本研究で新たに測定された架線温度と放射収量が、架線着霜の発生に重要な要素であることが分かった。

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

観測結果および霜の発生メカニズムに基づき、過飽和水蒸気濃度に着目した架線着霜発生の予測手法を検討した。本予測手法は、前日の夕方の時点で図9の点Aの水蒸気濃度を持つ湿潤空気が、翌朝の気温および架線温度の低下に伴い、飽和水蒸気濃度の点Bを挟んで、点C'のような過飽和領域に入るか否かで霜の発生を判断する方法である。本予測手法が成り立つのは、霜発生日の夜間は空气中的水蒸気濃度の時間的変化が少ないという傾向があるからである。

3.2 発生予測フロー

過去の研究でも熱収支法による露や霜の凝結量の計算方法が示されているが、これを使用するためには、パラメータとして気温、湿度、空気の密度、風速、物質の表面温度等を与える必要がある。これらのパラメータは、一般の気象情報から得ることが困難なものもあるため、本研究では容易に得ることのできる気象情報で霜の発生が予測可能な方法を考案した(図11)。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 (K) 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 (K) である。フロー中の水蒸気濃度は式(1)、(2)から

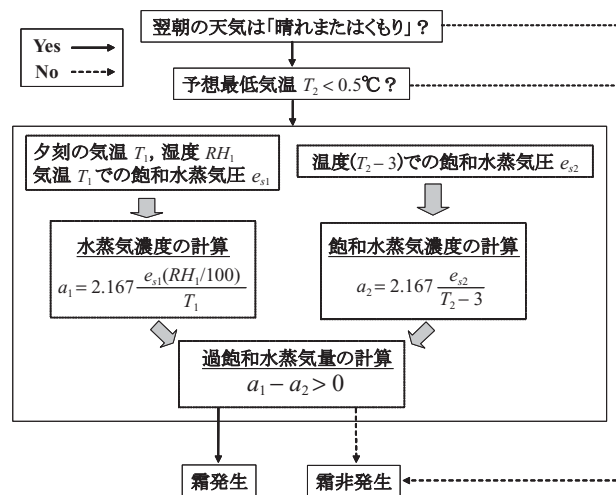


図11 架線着霜発生予測フロー

求められる。また、観測結果から安全側を考慮して、架線温度は気温よりも3℃低くなるものと仮定した。したがって、フロー中の温度 (T_2-3) は、予想最低架線温度に相当する。架線着霜の発生予測に用いた基準は、2.3.2項の結果から以下のとおりとした。

- I. 翌朝の予想天気が晴れまたは曇りであること。
- II. 翌朝の予想最低気温 T_2 が0.5℃以下であること。
- III. 過飽和水蒸気量が正であること。

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、その関係を以下の4つに分類して検証した¹¹⁾。

- A. 予測は「霜発生」、実際には「霜発生」
- B. 予測は「霜非発生」、実際には「霜発生」→見逃し
- C. 予測は「霜発生」、実際には「霜非発生」→空振り
- D. 予測は「霜非発生」、実際には「霜非発生」

上記AとDは予測が適中した場合、BとCは予測が外れた場合であり、それぞれ、見逃し、空振りと呼ばれる。これらの確率(適中率、見逃し率、空振り率)を以下の式を用いて計算した。

$$\text{適中率} = (A + D) / (A + B + C + D) \times 100$$

$$\text{見逃し率} = B / (A + B + C + D) \times 100$$

$$\text{空振り率} = C / (A + B + C + D) \times 100$$

まず、本予測手法の精度を調べるために観測期間249日を対象として、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。予測に使用した気温 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観

特集：防災技術

測値を用いた。翌朝の天気は放射収支量 $-70\text{W}/\text{m}^2$ 以下で判断し、気温 T_2 は観測値を用い、これらの条件が1時間以上継続した場合を霜発生と予測した。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 付近での露の発生についても霜の発生と予測するためである。

次に、観測期間中の一般の気象情報が得られた85日を対象として、天気予報の精度（適中率）を考慮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観測値を用いた。予想最低気温 T_2 には午前11時30分発表のYahoo天気情報の中津川市ピンポイント天気予報を用いた¹²⁾。これは、日本気象協会が作成しているものと同じのものである¹³⁾。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、最低気温の予想精度）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、注意しておかなければならないのは、本予測手法は霜がわずかでも発生した場合を架線着霜発生としたため、必ずしも事故が発生するような架線着霜を予測しているのではないということである。事故発生時の気象条件、霜の付着性状を明らかにした上で、本予測手法を発展させることが今後の課題となる。

4. おわりに

架線着霜発生時の気象条件を把握するために、2005年度および2006年度の冬期間、岐阜県中津川市中津川駅構内において、架線着霜の実態把握のための観測を実施した。この結果、①気温は 0.5°C 以下、②湿度は80%以上、③風速は $1\text{m}/\text{s}$ 以下、④放射収支量は $-70\text{W}/\text{m}^2$ 以下、⑤架線温度は 0°C 以下で、かつ気温に比べ $1^\circ\text{C}\sim 3^\circ\text{C}$ 低い、という気象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を明らかにした。また、着霜発生日の気圧配置をパターン毎に分類した結果、西高東低の冬型の気圧配置から高気圧が接近する場合、あるいは移動性高気圧に覆われた場合に、架線着霜の発生が多いことがわかった。架線着霜の発生時間帯と架線温度が霜点温度を下回る時間帯が一致していることから、架線着霜の発生

メカニズムに架線周囲の過飽和水蒸気濃度が深く関わっていることが明らかとなった。

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、過飽和水蒸気濃度の正負を判定することで、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、精度の高い天気情報（特に、予想最低気温）を使用することで、架線着霜の発生を高い適中率で予測可能なことがわかった。

謝辞

最後に、本研究の実施にあたり貴重なご意見、資料のご提供、現地調査へのご協力を頂いた東海旅客鉄道株式会社車両部車両課、同社中津川運輸区の関係各位に深甚なる謝意を表す次第である。本研究で得られた成果が、効果的な着霜対策を講じる上での一助になることを願ひ結びとする。

文献

- 1) 福井清一: 霜害に対する取り組み, 鉄道電気, Vol.1, pp.26-30, 1992
- 2) 渡辺義孝: 越後線のトロリ線着霜対策, 鉄道と電気技術, Vol.5, No.2, pp.10-12, 1994
- 3) 白石秀男, 林雅晴: トロリ線の着霜氷対策, 鉄道と電気技術, 8, Vol.2, pp.40-44, 1991
- 4) 山口平和: パンタグラフ霜雪害等の現状と対策, 電車, 12, pp.6-10, 1989
- 5) 小林修, 西片秀夫: トロリ線着氷雪の発生状況, 電力と鉄道, 2, pp.10-11, 1985
- 6) 西尾敏, 重盛典明: 我が区に着霜対策の取り組み, 鉄道電気, 12, pp.53-55, 1996
- 7) 白木正規: 百万人の天気教室, 成山堂書店, 2003
- 8) 近藤純正: 地表面に近い大気科学, 東京大学出版会, 2000
- 9) 森田正光: 10年天気図, 小学館, 1996
- 10) 三村珪一: 冬季西高東低気圧配置時の中部地方内陸部の気象の特徴, 天気, 12, pp.3-14, 2000
- 11) 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
- 12) <http://weather.yahoo.co.jp/weather/jp/21/5210/21206.html>
- 13) <http://www.tenki.jp/pyoh/p21206052561.html>