

のである。散水区間は約1～5kmごとに区切られており、それぞれに消雪基地が置かれている。消雪基地では、散水に使用する河川水やトンネル湧水をボイラーで加熱するとともに散水の発停や温度の制御を行っている。散水量は地域や降雪状況の変化によらず一定であり、上越新幹線の場合は $0.042\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ($0.7\text{L}/\text{m}^2/\text{min}$) (一部バラスト軌道区間は $0.072\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$) である。このように、多量の水を必要とすることから、雪を融かした後の水は、線路勾配を利用して、軌道側方の流水路を流れて消雪基地に戻され、再び加熱して用いられる⁷⁾。

2.2 上越新幹線の散水温度の制御

上越新幹線の散水温度は二つの方法で制御されている。その一つは、散水開始直後に、消雪基地ごとに決められた一定の温度で散水を行う初期散水制御であり、散水開始後に流水路を戻ってくる水（返送水）が、一定の量になるまで続けられる。もう一方は、散水基地へ戻ってくる返送水の温度を監視し、この温度が一定の温度に保たれるように散水温度を制御する返送水温度制御であり、初期散水制御後、降雪が止むまで続けられる⁸⁾。

しかし、これらの温度制御方法では、一定温度で撒かれる初期散水制御時に散水温度の過不足が生じる可能性がある。また、数キロメートルの散水区間で撒かれた水が返送水として消雪基地に戻るまでには数十分以上の時間がかかるため、返送水温度による制御では気象状況の変化に即時に対応できない。したがって、温暖・多雪地域と比べて寒冷地では返送水が凍結する危険性が高いなど、八戸・新青森間への適用に際しては課題がある。

3. 東北新幹線八戸・新青森間の気象状況

上越新幹線（上毛高原・新潟間）と東北新幹線（八戸・新青森間）について降雪時の気象条件を比較した。上毛高原・新潟間についてはアメダス湯沢を、また八戸・新青森間については青森地方気象台をそれぞれ選定し、1982～2009年度の12～3月（28冬期）について両観測点における1時間ごとの気温、降雪量（降雪強度）、風速を調べた。なお、これらの観測点では雨雪の判別を行っていないため、気温 2°C 以下のときの降水を降雪として扱った。前述の28冬期の降雪時間（気温 2°C 以下で降水があった時間）は湯沢では14370時間、青森では8389時間であり、青森の降雪時間は湯沢の約6割で

あることがわかった。しかし、降雪時の気温をみると、青森の方が平均で約 1°C 低く、風速については平均で約 3m/s 大きいことがわかった（表1）。

また、八戸・新青森間沿線の5カ所に沿線気象観測点（図1参照）を設けて気温、風向、風速、積雪深を1998～2005年度（8冬期間）観測した結果、降雪時の気温は $-6\sim 1^{\circ}\text{C}$ の範囲で頻度が高く、この温度範囲で全体の約90%を占めることがわかった。また、降雪強度を気温ごとにみると、気温の低下とともに増加し、 $-5\sim -3^{\circ}\text{C}$ の間で最大となることがわかった。一方、降雪時の風速は、観測地点で大きく異なるものの、おおよそ 5m/s 程度まで頻度が高いことが分かった⁴⁾。

アメダス観測値および沿線の気象観測値の分析から、八戸・新青森間の降雪強度は上毛高原・新潟間と同等もしくはそれ以下であるものの、消雪に大きく影響する気温や風速については、より厳しい条件であることがわかった。

4. 寒冷地における散水温度制御方法の検討

4.1 高架橋上の熱収支

散水消雪方式を寒冷地へ適用する場合、散水量の他、降雪状況に応じて遅れなく散水温度を制御することが重要である。このためには、高架橋上のスラブ表面での熱収支をリアルタイムで把握し、完全消雪に必要な散水温度を遅延なく算定する必要がある。

降雪状況下における散水時の高架橋上のスラブ表面における熱収支は式(1)で表される。

$$Q_H + Q_R + Q_C + Q_{AE} = Q_{IS} \quad (1)$$

Q_H ：散水消費熱量 ($\text{kJ}/\text{m}^2/\text{h}$)

(散水水滴の持つ熱量－流水で運び去る熱量)

Q_R ：放射収支量 ($\text{kJ}/\text{m}^2/\text{h}$)

Q_C ：スラブ伝導熱量 ($\text{kJ}/\text{m}^2/\text{h}$)

Q_{AE} ：乱流伝達熱量 ($\text{kJ}/\text{m}^2/\text{h}$)

Q_{IS} ：融雪熱量 ($\text{kJ}/\text{m}^2/\text{h}$)

(降雪の融解熱量＋融雪水の昇温に要する熱量)

ここで、 Q_H 、 Q_R 、 Q_C 、 Q_{AE} は、スラブ表面に供給される方向の熱輸送をプラスにとる（図2）。この場合、 Q_{IS} の符号は融雪が生じる場合にプラスとなる。

これらの熱収支の各構成要素は、以下によって求めることができる。

$$\text{①散水消費熱量} \quad Q_H = L\rho_w C_w (T_L - T_D) \quad (2)$$

L ：散水量 ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$)

ρ_w ：水の密度 (kg/m^3)

C_w ：水の比熱 ($\text{J}/^{\circ}\text{C}/\text{kg}$)

T_L ：散水水滴の着地温度 ($^{\circ}\text{C}$)

表1 気象状況の比較（越後湯沢・青森）

	気温 ($^{\circ}\text{C}$)	降水量 (mm/h)	風速 (m/s)
越後湯沢	-1.2	1.5	1.7
青森	-2.3	1.2	4.5

※28冬期間の平均値の比較。気温については、 2°C 以下の降水時の平均値を示す。

T_D : 返送水温度 (°C)

②放射収支量 Q_R : 高架橋上に設置した放射収支計のデータから直接的に求まる。

③スラブ伝導熱量 Q_C : スラブに埋設した温度計のデータから伝導熱量を求める。

④融雪熱量 $Q_{IS} = (|T_A|C_i + L_i + T_D C_w) \rho_s I_s$ (3)

T_A : 気温 (°C)

C_i : 氷の比熱 (kJ/°C /kg)

L_i : 氷の融解潜熱 (kJ/kg)

ρ_s : 雪の密度 (kg/m³)

I_s : 降雪強度 (m/h)

⑤乱流伝達熱量 $Q_{AE} = Q_{IS} - Q_H - Q_R - Q_C$ (4)

ここで示すように、熱収支の構成要素のうち、 Q_H と Q_{IS} は、散水量 L 、散水水滴の着地温度 T_L 、返送水温度 T_D 、気温 T_A 、雪の密度 ρ_s 、降雪強度 I_s の各値から、また Q_R と Q_C は、放射収支計およびスラブ温度の測定値からそれぞれ求めることができる。よって Q_{AE} は、式 (4) に示すように各要素の差分から求まる。

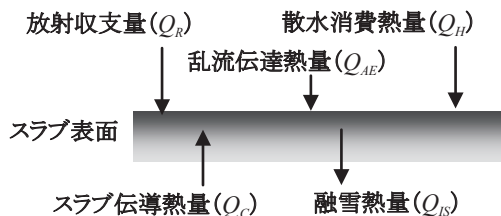


図2 高架橋スラブ表面での熱収支構成要素

4.2 上越新幹線の高架橋上の熱収支

上越新幹線建設時には新潟県の九日町において、上越新幹線に適用する散水消雪方式確立のための試験が実施された。試験では、散水、返送水およびスラブの温度測定や気象観測データから、1時間ごとに前述の①～⑤の熱量を求めている。これらの結果をもとに気温、降雪強度、風速の3つの気象要素から完全消雪に必要な散水温度を推定する式（上越式（式5））が作成された⁹⁾。上越式においては、試験結果をもとに、放射収支量 $Q_R=0$ (kJ/m²/h)とスラブ伝導熱量 $Q_C=-42$ (kJ/m²/h)は、それぞれ定数で与えている。また、顕熱と潜熱の伝達に伴う熱損失である乱流伝達熱量 Q_{AE} は、式 (6) に示すように散水水滴の着地温度 T_L と気温 T_A および熱伝達係数 $f(u)$ （風速 u の関数で示す）とで表し、このうち、 $f(u)$ は、試験結果の解析から式 (7) で与えている。上越式では、散水水滴が飛翔中に失う熱量は乱流伝達熱量 Q_{AE} に含むものとしているため、式 (6) および、式 (2) と式 (5) 中の散水水滴の着地温度 T_L は、散水温度 T_H で与えられている⁹⁾。

上越新幹線建設時には、式 (5)、式 (6) および式 (7) に、上毛高原・新潟間沿線の気象観測値を与え、消雪区間ごとに完全消雪するために必要となる散水温度の出現頻度を求め、それらの値を参考として各消雪基地の設備容量

（ボイラーの能力など）が見積もられた。

$$T_L = \frac{(|T_A|C_i + L_i + T_D C_w) \rho_s I_s + L \rho_w C_w T_D - Q_C - Q_R - Q_{AE}}{L \rho_w C_w} \quad (5)$$

T_L : 散水水滴着地温度(°C), $T_L=T_H$ (上越新幹線の場合)

ρ_s : 雪密度 (80kg/m³) L : 散水強度 (0.042m³/m²/h)

$Q_C=-42$ kJ/m²/h, $Q_R=0$ kJ/m²/h

$$Q_{AE} = f(u)(T_L - T_A) \quad (6)$$

$$f(u) = -21.8\sqrt{u} - 36.5 \quad (7)$$

u : 風速 (m/s)

5. 寒冷地で適用可能な散水温度の算定式の開発

上越新幹線沿線の気象状況と比べて八戸・新青森間は、気温や風速条件が厳しいため、散水時に雪の融け残りや返送水の凍結を防ぐためには、時々刻々と変化する気象状況に応じて散水温度を即時に制御することが望ましい。そこで、高架橋上の熱収支を表す式 (1) から導かれた式 (5)（上越式）において、九日町における散水消雪試験の結果から経験的に与えられている①乱流伝達熱量 Q_{AE} 、②放射収支量 Q_R 、③スラブ伝導熱量 Q_C 、④雪密度 ρ_s 、⑤散水水滴の着地温度 T_L の各要素の与え方を寒冷地に適合するように精査するため、青森市に先行建設された本線高架橋を用いて散水消雪試験を実施した。

5.1 試験設備

寒冷地で適用可能な散水温度の算定式を開発するための試験は、延伸ルート上の船岡高架橋（青森市）で行われた。試験設備は、試験高架橋と河川水の取水器、それを加熱するためのボイラーなどの機械設備および散水の制御装置から構成されている。試験で使用した高架橋は、全長 316m、縦断勾配が 3% の複線高架橋であり、実際に本線として使用されるものである。試験区間のうち 300m が散水区間であり、散水ノズルは複線軌道外側に 6m 間隔で千鳥に配置されている（図3）。また、七戸町のモデル高架橋を用いた散水試験の結果、上越新幹線と同じ散水量 (0.042 m³/m²/h=0.7L/m²/min) を八戸・新青森間に採用した場合、散水温度を著しく高くする必要が示唆された⁵⁾。空気中を飛翔する水滴の失熱は散水温度と気温との差が大きくなるに従い増加するため、本線高架橋の試験では、効率的な散水を行うために散水量を 0.060 m³/m²/h (1.0L/m²/min) に増して実施した。

5.2 試験方法

散水温度の算定式を作成するための試験においては、散水温度を 10～16°C とし、試験ごとに一定とした。試験中は、高架橋上の熱収支を把握するために散水量 L 、散水温度 T_H 、返送水温度 T_D 、放射収支量 Q_R （放射収支計による測定から算出）、スラブ伝導熱量 Q_C （スラブ温

特集：防災技術

度の測定値から算出), 気温 T_A , 降雪強度 I_s , 風速 u を 5 分ごとに自動測定するとともに, 短時間に堆積した雪の密度 ρ_s などを測定した。また, スプリンクラーから射出された水滴の飛翔中の温度低下量を測定した。

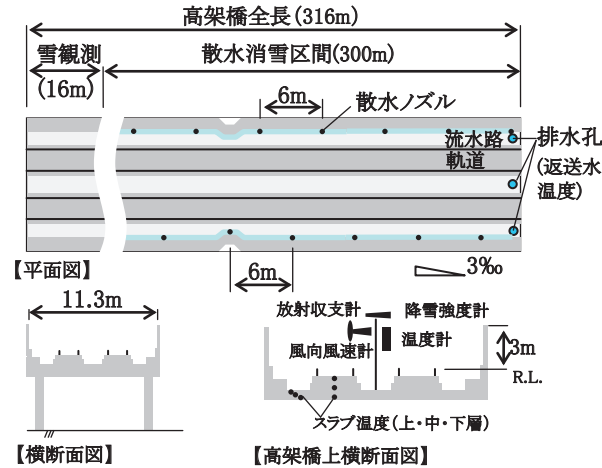


図3 散水消雪試験区間

5.3 試験結果および解析

散水温度の算定式を作成するための試験は, 2 冬期間で合計 34 回実施した。試験時の高架橋上の気象状況, および解析に用いる取得データの一例を図 4 に, このときの試験状況を図 5 に示す。解析では, 5 分間隔で得られた測定値から 1 時間ごとに平均値を算出し, 式 (1) に示す要素ごとに熱量を求めた。算定式を作成するための解析においては, 散水開始後, 散水温度が設定温度に達するまでに十数分要すること, また, 延長 300m の高架橋を返送水が戻るまでに 20 分程度要することから, 散水開始直後の 1 時間のデータは使用しないこととした。

雪密度 ρ_s については, 1 時間程度の短時間で堆積した雪の密度を観測し, 気温との関連分析を行った¹⁰⁾。また, 散水水滴の着地温度 T_L を散水温度 T_H から推定する方法を検討した¹¹⁾。

図 4 に示した試験において 1 時間ごとに求めた熱収支構成要素の各熱量の変化を図 6 に示す。散水消費熱量

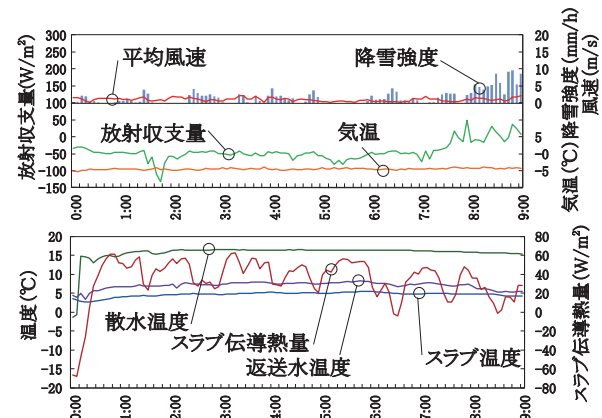


図4 試験時の高架橋上の気象状況および散水温度, 返送水温度, スラブ温度, スラブ伝導熱量の変化

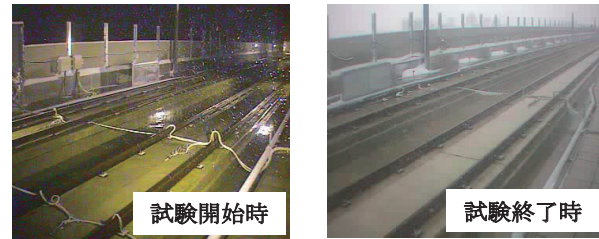


図5 散水試験の状況

Q_H と融雪熱量 Q_{IS} はプラスであるが, 乱流伝達熱量 Q_{AE} , 放射収支量 Q_R , スラブ伝導熱量 Q_C はマイナスであり, 融雪熱量の他に Q_{AE} , Q_R , Q_C は散水によりスラブ表面に与えられた熱を奪う方向の熱輸送であることがわかる。この傾向は, 他のほとんどの試験においても同様であった。散水によりスラブ表面に与えられた熱量のうち融雪以外で消費された熱量 ($Q_H - Q_{IS}$) に占める Q_{AE} , Q_R , Q_C の割合は, それぞれ 78%, 15%, 7% であり, Q_{AE} が散水温度を決める上で最も大きく影響することがわかった。

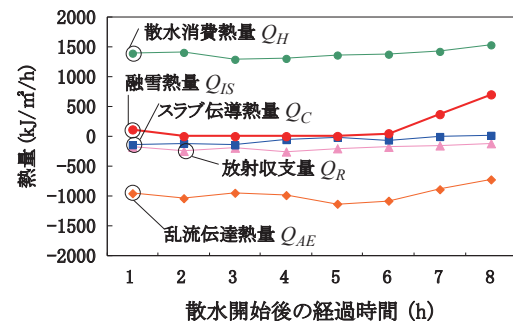


図6 熱収支構成要素の時間変化

各試験で得られた熱収支構成要素の各熱量から乱流伝達熱量, 放射収支量, スラブ伝導熱量に関しては, 以下に示す (1) と (2) によって与えるものとした。また, 雪密度については, 現地観測の結果から (3) によって与え, 散水水滴の飛翔中の温度低下量については, 試験結果および数値計算から (4) によって与えるものとした。

(1) 乱流伝達熱量

熱伝達係数 $f(u) = Q_{AE} / (T_L - T_A)$ とそれに対応する時間帯の平均風速 u との関係を図 7 に示す。データにはばらつきがあるものの, 風速が大きくなるほど $f(u)$ は緩やかに減少する傾向が認められる。回帰分析から $f(u)$ と u の関係を次に示す曲線で表現することができる (式 8)。

$$f(u) = -20.9\sqrt{u} - 59.5 \quad (8)$$

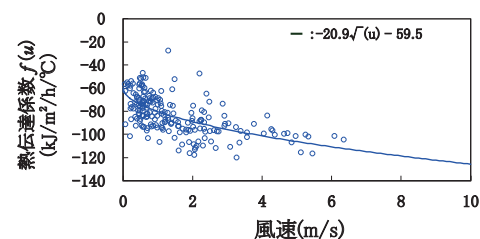
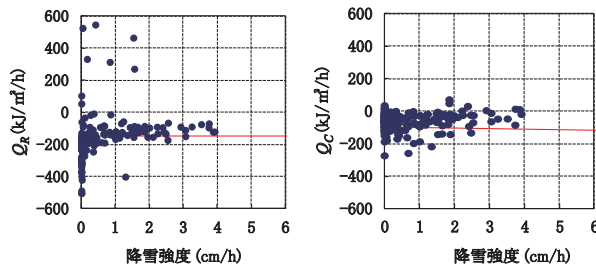


図7 風速と熱伝達係数との関係

(2) 放射収支量およびスラブ伝導熱量

降雪強度と放射収支量 Q_R およびスラブ伝導熱量 Q_C との関係を図8に示す。 Q_R は無降雪時には $-500\text{kJ/m}^2/\text{h}$ 程度まで低下しているが、ある程度以上の降雪強度では、 $-150\text{kJ/m}^2/\text{h}$ が最低である。同様に降雪時の Q_C の最低値としては $-100\text{kJ/m}^2/\text{h}$ を見込んでおけば良いと考えられる。したがって、放射収支量 Q_R 及びスラブ伝導熱量 Q_C については上越式と同様に一定値として与える。

図8 降雪強度と Q_R 、 Q_C との関係

(3) 雪密度

短時間雪密度測定試験のデータを用いて、ここでは雪密度 ρ_s を気温 T_A で表現する (図9, 式(9))¹⁰⁾。

$$\rho_s = 53.6 \exp(0.488T_A) + 37 \quad (9)$$

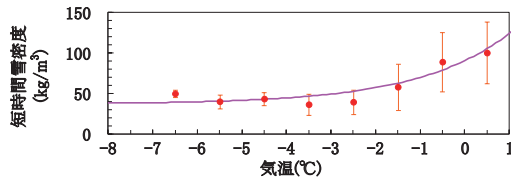
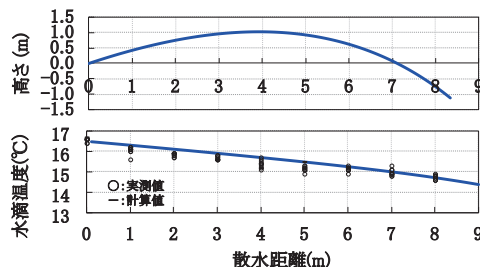


図9 雪密度(乾き密度)と気温との関係

(4) 散水水滴の着地温度

スプリンクラーから射出された水滴の運動方程式および水滴表面の熱収支計算を行い水滴飛翔中の温度降下量を推定し、実測値と比較した (図10)。さらに散水温度低下量 (ΔT) について、散水温度 T_H 、気温 T_A 、風速 u の依存性を調べるために重回帰分析を行った結果、式(10)を得た¹¹⁾。

$$\Delta T = 0.116T_H - 0.045T_A - 0.025u - 0.194 \quad (10)$$

図10 散水水滴の軌跡および温度変化
(実測値と計算値との比較)

5.4 散水温度の算定式

前節の(1)～(4)で示した関係式などを用いて、各熱収

支構成要素を以下の式(11)～式(15)のように整理した。

①散水消費熱量

$$Q_H = L\rho_w C_w (0.884T_H + 0.045T_A + 0.025u + 0.194 - T_D) \quad (11)$$

②放射収支量 $Q_R = -150$ (12)③スラブ伝導熱量 $Q_C = -100$ (13)

④融解熱量

$$Q_{IS} = (|T_A|C_i + L_i + T_D C_w) \times (53.6 \exp(0.488T_A) + 37) I_s \quad (14)$$

⑤乱流伝達熱量

$$Q_{AE} = (-20.9\sqrt{u} - 59.5) \times (0.884T_H + 0.045T_A + 0.025u + 0.194 - T_A) \quad (15)$$

前述の式(1)に式(11)から式(15)を与え、散水温度 T_H について解くことにより、船岡での散水消雪試験の結果が反映された散水温度の算定式(式16)が得られる。

$$T_H = (Q_{IS} - L\rho_w C_w (0.045T_A - T_D + 0.025u + 0.194) + f(u)(0.955T_A - 0.025u - 0.194) - Q_R - Q_C) \times 1/0.884(L\rho_w C_w + f(u)) \quad (16)$$

式(16)を用いて、完全消雪するために必要な散水の温度が気温、風速、降雪強度、散水量によりどのように変化するか調べた (図11)。ここでは返送水温度を 1°C として計算した。

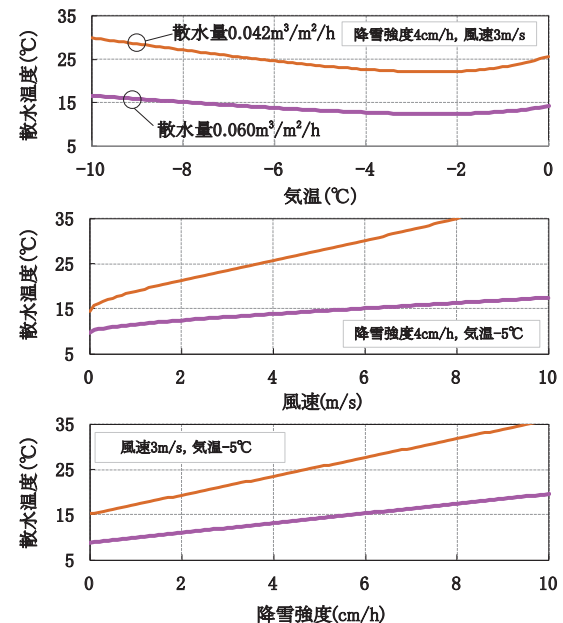


図11 散水温度の制御式を用いた散水温度の計算例

この結果、散水量 $0.060\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ($1.0\text{ L}/\text{m}^2/\text{min}$) のときの散水温度は、ほとんどの気象条件下で 20°C 以下であるのに対して、散水量 $0.042\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ($0.7\text{ L}/\text{m}^2/\text{min}$) のときにはほとんどの気象条件下で散水温度が 20°C 以上となり、場合によっては $30^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ に達する。また、風速及び降雪強度が大きくなると散水温度は単調に高くなる。一方、気温 $-2 \sim -1^\circ\text{C}$ 付近において散水温度は低下から上昇に転じる。この結果は、図9に示した雪密度の

気温依存性が散水温度に反映されて出現したものである。

青森地方気象台で得られた気温、降水量（降雪量）および風速の観測値（28 冬期）を用いて散水温度の出現度数を求めた結果、散水温度が 8 ～ 14℃で全体の 95%が消雪できると推定された。この温度は上越新幹線の通常の散水温度の制御範囲である 8 ～ 12℃¹²⁾ に比べてやや高いものの、制御温度としては実用的な範囲であると考えられる。

6. まとめ

東北新幹線八戸・新青森間の雪処理方式としてスプリンクラー散水消雪方式の適用性を検討するため、低温実験室内での基礎試験をはじめとして、モデル高架橋および青森市内の本線高架橋における散水消雪試験を行った。一連の試験結果の解析から、沿線の気温、降雪強度および風速の実況値から求まる高架橋上の熱収支量に基づく完全消雪に必要な散水温度の算定式を提案した。

この式では、融雪以外の消費熱量の支配的要素である乱流伝達熱量を求める際に用いる熱伝達係数を風速の関数 $f(u)$ として与えた（式(8)）。また、放射収支量およびスラブ伝導熱量については、本線高架橋での試験結果から寒冷地に適した定数として与えた（式(12)、式(13)）。

融雪熱量に影響する雪密度は、短時間に堆積した雪密度と気温との相関分析から気温の関数で与えるものとした（式(9)）。さらに、寒冷地では散水温度と気温との温度差が大きくなることが考えられることから、散水水滴飛翔中の温度低下量を散水温度、気温および風速の関数として与えるものとした（式(10)）。

開発した散水温度の算定式は、沿線の気温、降雪強度および風速の観測値のみから完全消雪に必要な散水温度を導くことができるため、気象状況の変化に応じて遅延無く、有効かつ効率的な散水温度の制御が可能である。

7. おわりに

東北新幹線七戸十和田・新青森間で導入されている散水消雪システムでは、本報告で示した散水温度の制御式を基本として 3 つの方法で制御されている。一つは、初期散水制御であり、消雪基地ごとに定められた設定散水温度で散水を開始し、5 分ごとに算定式による温度と比較して散水温度を変更する方法である。二つ目は、初期散水後の算定式による制御である。ここで、返送水温度が目標とする温度とならない場合には、返送水温度を目標値へ、近づけるために散水温度を昇降させる 3 つ目の制御が行われる。

本報告にかかわる試験は鉄道建設・運輸施設整備支援機構が実施し、解析に関して鉄道総研が委託を受け実施したものである。

謝 辞

本研究の実施にあたり、東北・北陸新幹線雪害対策委員会（委員長：国士舘大学工学部・岡田勝也教授）の委員および幹事からご指導をいただいた。本委員会の関係各位に深甚なる謝意を表するものである。

文 献

- 1) 野口守・小林等・藤井俊茂・河島克久・飯倉茂弘：東北新幹線八戸・新青森間における年最大積雪深の再現期待値からみた雪害対策区間の検討，寒地技術論文・報告集，Vol.25, pp.389-392, 2009
- 2) 村上温・野口達雄（監修）：第 5 編雪害，鉄道土木構造物の維持管理，日本鉄道施設協会，pp.517-551, 1998
- 3) 野口守・小林等・河島克久・飯倉茂弘・藤井俊茂，伊豫部勉・鎌田慈：寒冷地の新幹線におけるスプリンクラー散水消雪方式の適用性に関する基礎的研究，寒地技術論文・報告集，Vol.25, PP.68-72, 2009
- 4) 野口守・小林等・伊豫部勉・河島克久・飯倉茂弘・藤井俊茂：東北新幹線八戸・新青森間における散水消雪に係る気象の解析，寒地技術論文・報告集，Vol.25, pp.383-388, 2009
- 5) 野口守，小林等，飯倉茂弘，河島克久，藤井俊茂，伊豫部勉：モデル高架橋を用いたスプリンクラー散水消雪方式の適用性に関する研究，寒地技術論文・報告集，Vol.25, pp.379-382, 2009
- 6) 野口守，小林等，飯倉茂弘，河島克久，伊豫部勉，藤井俊茂：寒冷地の新幹線における散水消雪方式の適用限界把握，寒地技術論文・報告集，Vol.26, pp.126-129, 2010
- 7) 田仲祥伸：上越新幹線（大宮－新潟間）技術のすべて，鉄道界図書出版株式会社，pp.389-405, 1983
- 8) 竹下茂：上越新幹線の散水消雪設備と今後の課題，鉄道線路，Vol.31, No.8, pp.46-48, 1983
- 9) 後藤巖：鉄道高架橋における消雪時の熱移動の研究，東京大学博士論文，pp.1-172, 1986
- 10) 野口守，小林等，河島克久，飯倉茂弘，伊豫部勉，藤井俊茂：東北新幹線八戸・新青森間における雪害対策の研究（6）降雪直後の雪密度の気温依存性，雪氷研究大会（2010・仙台）講演予稿集，p.174, 2010
- 11) 野口守，小林等，飯倉茂弘，河島克久，伊豫部勉，藤井俊茂：東北新幹線八戸・新青森間における雪害対策の研究（7）散水水滴飛翔中の温度低下量の推定，雪氷研究大会（2011・長岡）講演予稿集，p.257, 2011
- 12) 佐藤雅文：進化を続ける上越新幹線散水消雪設備，サイバネティクス，Vol.11, No.1, pp.33-37, 2006