軌道散水消雪のフィードフォワード制御*

沢 瀬 和 久^{*1}, 佐々木 君 章^{*2}
大 野 伸 一^{*3}, 黒 崎 晏 夫^{*4}

Feed Forward Control in Tepid Water Sprinkler System for Melting Snow on Railway Tracks

Kazuhisa SAWASE, Kimiaki SASAKI, Shinichi OHNO and Yasuo KUROSAKI

The Joetsu Shinkansen Line running through a heavy snowfall district is installed with a snow-melting system whose function is to melt snow deposited on the railway tracks by sprinkling heated water over the total length of the line within the limits of Niigata Prefecture. Because of its long water path, in these systems, delivery and return of the water takes a very long time, resulting in a time lag as the feedback control characteristics. In order to improve this control, a control system using a feed forward algorithm has been developed and a system operation test has been carried out in a field. It is found very promising as a snow-melting system from the viewpoint of energy saving since the control cycle time is cut down by following the changes in weather conditions such as snowfall, atmospheric temperature, and wind velocity.

Key Words: Automatic Control, Computer Control, Fluid Machinery, Energy Saving, Railway

1. 緒 言

本報は、鉄道における軌道上の降積雪を散水によって消雪する場合に、スプリンクラから散水する時の水温の制御について、気象変化に応じて行うフィードフォワード制御を構築することと、そのフィールド試験による特性の検証を述べたものである。

高速鉄道において軌道上の無雪化は不可欠であり、我が国では気象条件(雪質、気温)と経済性の面から散水消雪が広く用いられ、軌道の外から旋回するスプリンクラにより温水を軌道上の降積雪に対し一様な分布で散水し消雪を行っている。

スプリンクラは常時一定量を散水するので降雪量、気温など気象によって変化する消雪負荷の変動に対する制御は、従来までは、消雪を果たした後の返水の温度を目標値と比較し、その高低に対しフィードバック制御により散水温度を定めていた。これは長時間にわたる一定量の降雪に対しては理想的な制御である。

しかし、現実の気象は短時間で変化することが多い。したがって、気象変化に追従し、併せて無駄時間と時定数に依存する制御サイクル時間の短縮を図るためフィードフォワード制御を開発し、さらに制御の信頼性を向上するためフィードバック制御を併用し、合理的な機能を果たす制御システムを構築することができた。

従来、フィードフォワード制御は、外乱の影響を考慮して出力を予測する場合、制御精度を向上する手段として大形電子計算機を必要としたため、電力、化学等の大形プラントに限られる傾向にあった。しかし、昨今におけるマイクロコンピュータの進歩は処理速度と記憶容量が向上し、コンピュータ支援によるモデル化がフィールドにおいて容易にできることとなったため本システムの構築が実現した。

よって、マイクロコンピュータを使用したフィードフォワード制御システムは、比較的低廉なコストで構築できること、またフィールドにおける実用試験から気象に対応して動作し、その結果、省エネルギー効果が顕著であることが確かめられた。

記 号

a : 温度伝導率 $a_a = 1.9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

* 原稿受付 平成2年7月20日。

^{*1} 正員、(財)鉄道総合技術研究所 (〒185 国分寺市光町2-8-38)。

^{*2} (財)鉄道総合技術研究所。

^{*3} 東日本旅客鉄道(株) (〒100 東京都千代田区丸の内1-6-5)。

^{*4} 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

c : 比熱 $\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$
 d : 管径 m
 E : 雪の融解熱量 $=334.9 \text{ kJ/kg}$
 Gr : グラスホフ数
 g : 重力加速度 $=9.81 \text{ m/s}^2$
 h : 熱伝達率 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$
 I_s : 降雪強度 cm/h
 k : 熱伝導率 $k_a=0.241 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$
 L : 無駄時間 min
 l : 管長 m
 Nu : ヌセルト数
 Pr : プラントル数
 Q : 流量 m^3/min
 q : 熱流束 W/m^2
 Re : レイノルズ数
 S : 管表面積 m^2
 T : 温度 $^\circ\text{C}$
 t : 時定数 min
 v : 風速 m/s または流速 m/min
 W : 単位面積当たり散水量 $\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^2$
 X : 計算区間長 m
 Z : 高架幅 m
 β : 線膨張係数 $1/^\circ\text{C}$
 ΔT : 目標温度の増減値 $^\circ\text{C}$
 Δt : 温度差 $^\circ\text{C}$
 ν : 動粘性係数 $\nu_a=0.138\times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
 ρ : 密度 g/cm^3
 τ : 時間 min

添 字

a : 大気
 ae : 対流, 蒸発
 b : フィードバック制御
 d : 送水管
 e : 散水の着地
 f : フィードフォワード制御

h : ヘッド管
 i : 地点
 o : 制御サイクル開始時
 r : 返水, または返水路
 ra : 放射
 s : 雪
 t : 合計
 w : 散水

2. フィードフォワード制御 システムの構築

2.1 従来のフィードバック制御と問題点 上越新幹線の散水消雪の水源はトンネル湧水と河川水である。トンネル湧水はそのものを、河川水は加熱機で温水にした後、軌道消雪に使用する。散水は、降雪強度 0.25 cm/h で 20 分の降雪時間、または 1.0 cm/h で 10 分の条件を超えた時に開始する。この時、初期散水として加熱機は一定時間、最大出力で運転を行い、軌道に対し散水を行う。初期散水時間を経過すると気象変動に伴う消雪負荷の変化を返水温度で捕捉し、これが $1\sim 2^\circ\text{C}$ の範囲を維持するように一定時間間隔のもとでフィードバック制御で散水温度を設定する。散水停止は無降雪 10 分間、返水温度 1°C 以上の条件を超えた時であり、この時に運転を終了する。この系のブロック線図を図 1 に示す。従来のフィードバック制御における問題点は、返水温度に対し一定時間間隔で作動する制御サイクル時間内において気象の変化に起因する外乱の影響が大きいこと、よって、操作量に対する散水温度、返水温度の伝達関数を線形系に近似して扱うことが困難であること、また、消雪基地から先端までの散水地点の距離が長く、散水、返水の無駄時間と時定数は芝野消雪基地におけるフィールド試験結果によると基地近傍において、 $L_w=13 \text{ min}$, $L_r=25 \text{ min}$; $t_w=14 \text{ min}$, $t_r=19 \text{ min}$, と比較的大きいこと、さらに、長距離配管のもとでの一定量散水であるため軌道上の各点における負荷に対し供給熱量を独立に制御することが不可能であること、一方、系の安定性の面から初期散水時間、制御サイクル時間の短縮は限界に達していることなどである。したがって、気象変化に対して追従性を高める合理的な制御の開発が望まれる。

2.2 フィードフォワード制御の機能 従来のフィードバック制御のもとでは外乱による影響が大きく、その主な因子は降雪強度、気温、風速である。したがって、フィードフォワード制御では、この気象因子を系に対する入力として用いて、系の状態を計算し、

図 1 従来のフィードバック制御のブロック線図

操作量, すなわち, 供給熱量を決めることとする。また目標値と系の状態との差を把握しシステムの信頼性の向上を図るため従来のフィードバック制御を併用する。新しく開発したフィードフォワード制御システムのブロック線図を図2に, この場合の軌道散水消雪の機器構成を図3に示す。軌道上の消雪負荷に対する供給熱量は気象と返水温度の因子から散水温度を設定する。従来の制御で採用していた初期散水時間は不要となり, また, 制御サイクル時間は大幅な短縮が図られる。

3. 水系の任意断面における 水温と流量収支

軌道散水消雪の水系は消雪基地と高架上を結び, 送水系と返水系から成り, その水移動モデルを図4に示す。送水系には送水管とこれから分岐するヘッダ管と

図2 フィードフォワード制御システムのブロック線図

図3 フィードフォワード制御軌道散水消雪の機器構成

があり, ヘッダ管には一定間隔でスプリンクラが取付けられ, それぞれ一定量の散水を行う。したがって, それぞれのヘッダ管の流量は等しいが, 送水管の流量は距離に比例して減少する。逆に返水系ではそれぞれのスプリンクラからの散水が返水路に集合するので返水量は先端が最も少なく, 消雪基地に向かって次第に増加する。以下, 各部の水温と流量収支を求める。

3.1 送水管における水温と流量の変化 消雪基地の加熱機から高架上に到る送水管について, 管径一定の場合に管表面を円筒面とみなし, また管内水温の外気への熱損失は送水管がピットに納められているため自然対流であるとする, 次の式で表される⁽¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} Gr &= g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot d_a^3 / \nu_a^2 \\ Pr &= \nu_a / \alpha_a \\ Nu_{a,d} &= 0.53 (Gr \cdot Pr)^{1/4} \\ h_d &= Nu_{a,d} \cdot k_a / d_a \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

したがって, 任意断面*i*地点における管内の水温は, 管中の単位長さ当たり水重量を M_d , 制御サイクル開始時の水温を $T_{d,i-1,0}$ とすると次のとおりとなる。

$$T_{d,i} = T_a + (T_{d,i-1,0} - T_a) \times \exp\{-0.06 h_d \cdot S_{d,i} / (c_w \cdot M_d \cdot X_d)\} \tau_i \dots (2)$$

この場合, 隣接区間における位置と経過時間の関係は次のとおりとなる。

$$l_{d,i} = l_{d,i-1} + X_d \dots \dots \dots (3)$$

$$\tau_i = \tau_{i-1} + (X_d / v_d) \dots \dots \dots (4)$$

$$Q_{d,i} = Q_{d,i-1} \dots \dots \dots (5)$$

しかし, ヘッダ管の分岐する地点では送水管の管径が $d_{d,i-1}$ から $d_{d,i}$ に変化するので次のとおりとなる。

$$Q_{d,i} = Q_{d,i-1} - l_h \cdot W \cdot Z \dots \dots \dots (6)$$

3.2 ヘッダ管における水温と流量の変化 ヘッダ管の管表面を円筒面とみなし, 管内温水の熱損失は

図4 軌道散水消雪における水移動モデル

ヘッダ管が外気にさらされているので強制対流である
とすると、次の式で表される⁽¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} Re_n &= v_a d_h / \nu_a \\ Nu_{h,n} &= 0.378 Re_n^{1/2} + 0.057 Re_n^{2/3} \dots\dots\dots (7) \\ h_h &= Nu_{h,n} \cdot k_a / d_h \end{aligned} \right\}$$

したがって、任意断面の i 地点におけるヘッダ管内の
水温は送水管と同様に、管中の単位長さ当たり水重量
を M_h とすると次のとおりとなる。

$$T_{h,i} = T_a + (T_{h,i-1} - T_a) \times \exp\{-0.06 h_h \cdot S_{h,i} / (c_w \cdot M_h \cdot X_h)\} \tau_i \dots\dots (8)$$

流量収支については、計算対象区間が隣接スプリンクラ
のスタンション間では変化がない。

$$Q_{h,i} = Q_{h,i-1} \dots\dots\dots (9)$$

しかし、計算対象区間がスプリンクラのスタンション
を超える場合はスプリンクラ取付間隔が 6 m である
ので次のとおりとなる。

$$Q_{h,i} = Q_{h,i-1} - 6 \cdot W \cdot Z \dots\dots\dots (10)$$

**3.3 スプリンクラから散水し消雪後の排水温と流量
の変化** スプリンクラからの供給熱量は消雪熱
量、対流・蒸発による熱損失、放射熱量をあわせたもの
であり、次のとおりとなる⁽²⁾。なお、散水は一般に降雪
時に行うので放射熱量を零とした。

$$\left. \begin{aligned} q_t &= q_s + q_{ae} + q_{ra} \\ q_s &= (1/0.36) I_s \cdot \rho_s (E + c_s |T_s|) \\ q_{ae} &= (10.1 + 6.0 v_a^{1/2}) (T_w - T_a) \\ q_{ra} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

したがって、任意断面の i 地点における排水温は次の
とおりとなる。

$$T_e = T_w - 0.00006 q_t / (W \cdot c_w \cdot \rho_w) \dots\dots\dots (12)$$

それぞれのスプリンクラの流量はすべて等しい。

$$Q_{e,i} = Q_{e,i-1} \dots\dots\dots (13)$$

3.4 返水路の水温と流量の変化 返水路の粗度
係数 n 、こう配 g_r 、幅 B_r 、水深 H_r とすると、Gan-
guillet-Kutter の式から Chezy の流速係数 C 、返水
路平均深さ m_r 、流速 v_r が得られる⁽³⁾。

$$\left. \begin{aligned} C &= (23 + 1/n + 0.00155/g_r) \\ &\times \{1 + (23 + 0.00155/g_r) n/m_r^{1/2}\}^{-1} \\ m_r &= (B_r \cdot H_r) / (B_r + 2H_r) \\ v_r &= C(m_r \cdot g_r)^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

したがって、返水路の流れを水塊の移動とみなし、返
水が任意断面 $i-1$ 地点から i 地点まで流れる時間を
 $\Delta\tau$ とすると i 地点における返水路の水温は次のとお
りとなる⁽²⁾。

$$\left. \begin{aligned} T_{r,i} &= \{T_{r,i-1} \cdot B_r \cdot H_r \cdot X_r \\ &+ T_e \cdot Q_e \cdot \Delta\tau - 0.00006 q_t \cdot B_r \cdot X_r \\ &\times \Delta\tau / (c_w \cdot \rho_w)\} / (B_r \cdot H_r \cdot X_r + Q_r \cdot \Delta\tau) \end{aligned} \right\}$$

なお、

$$\left. \begin{aligned} \Delta\tau &= 1/v_r \\ q_t &= q_s + q_{ae} + q_{ra} \\ q_s &= (1/0.36) I_s \cdot \rho_s (E + c_s |T_s|) \\ q_{ae} &= (5.61 + 4.56 v_r) (T_r - T_a) \\ q_{ra} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

流量収支については次のとおりとなる。

$$Q_{r,i} = Q_{r,i-1} + X_r \cdot W \cdot Z \dots\dots\dots (16)$$

3.5 水温、流量の逐次計算 それぞれの任意断
面における水温、流量収支の計算は式(1)から式(16)
までを用いて、計算区間長を $X_d = X_h = X_e = X_r = 1$ m
として、初期条件を前地点に与え、次いで当該地点の
水温、流量を求め、以下、逐次計算を行う。そして返水
路における各地点の返水温度を羅列し、そのなかから
極小値 $T_{r,min}$ を求め、これを操作量の計算に用いる。

3.6 操作量 フィードフォワード制御では、軌
道上のジャム化率 J 、制御増幅率 G_f 、 G_b とし、散水
温度の目標値に対する状態値の温度を次式より求め、
これにより散水温度の増減を行う。

$$\Delta T_f = (E \cdot J - c_w \cdot T_{r,min}) G_f \dots\dots\dots (17)$$

また、フィードバック制御を併用し、消雪基地地点の
返水温度 $T_{r,Base}$ を因子として $T_{r,Base} \geq 2.0$ の時、次の
式により ΔT_b を求め、散水温度の増減を行う。

$$\Delta T_b = \Delta T_f + (2.0 - T_{r,Base}) G_b \dots\dots\dots (18)$$

4. 粗度係数、雪密度、ジャム化率、 制御増幅率の推定

4.1 粗度係数の推定 返水路の水温を式(15)か
ら求める時、粗度係数を把握の上、流速を式(14)から
求める必要がある。図5に水深の計算値と実測値を示
す。これより粗度係数を $n=0.010$ とした時、実測値と
良くあうので、これを式(14)で用いる。

4.2 雪密度の把握 消雪熱量の計算に際し雪密
度を求める必要があるが、降積雪の密度は12月、1

図5 返水路の水深と粗度係数

月、2月、3月により差があり、また気温、風速や雪質によっても異なる。したがって、芝野消雪基地では降水量計と降雪検知器とで計測を行い、その都度、雪密度を求め、式(11)、式(15)における、消雪熱量の計算に用いる。1月に計測した数値例を図6に示す。この場合、 $\rho_s=0.03\sim0.06$ の範囲で運転している。

4.3 水移動モデルの解析とジャム化率、制御増幅率の推定 高架上の散水温度、返水温度について実測値と計算値を図7に示す。いずれもほぼ一致しており、フィードフォワード制御に用いた計算式は十分に使用できる。返水系における返水温度は式(15)から求める。その場合、極小値 $T_{r,\min}$ を示す地点は先端から100 m 付近に存在している。この地点は気象条件により移動し、また消雪基地付近との温度差も寒冷豪雪時の高負荷の時大きくなるので、 $T_{r,\min}$ 地点でのスノージャムの発生がないように制御する必要がある。したがって、試験結果とシミュレーションから式(17)、式(18)において $J=0.01$, $G_f=1.5$, $G_b=0.8$ を決定した。

5. フィールド試験結果および考察

5.1 フィールド試験における降雪気象特性 上越新幹線芝野消雪基地(新潟県見附市)の区間長 2 833

図6 降水量計と降雪検知器とから求めた雪密度の例

図7 高架上の散水温度、返水温度の変化

m, こう配 0.5~3.5% において昭和 63 年, 64 年, 平成元年, 2 年に軌道散水消雪のフィードフォワード制御試験を実施した。平成元年度における降雪強度の分布を図8に、日降雪時間と平均降雪強度との関係を図9に示す。図8から一般に降雪は、小さな降雪強度の繰返しが多く、大きい降雪強度は数少ない寒波襲来の時に限定される。図9から日降雪時間は、平均降雪強度が小さい時短く、逆に平均降雪強度が大きい時は長い。

5.2 フィールド試験による運転特性 新しく開発したフィードフォワード制御と従来のフィードバック制御による場合の運転特性について、負荷としての降雪強度に対する散水温度、返水温度の応答を図10に示す。フィードフォワード制御は、5分ごとの制御サイクルで作動させるので起動直後の散水温度は熱収支の計算からほぼ一定温度で運転しているのに対し、フィードバック制御では軽負荷にもかかわらず散水温度が上昇し、その結果、返水温度も高くなっている。このようにフィードフォワード制御は散水温度が気象変化に対応するので立上りが早く、また負荷が軽くなった時の散水温度の低下も早い。しかし、フィードバック制御では初期散水の開始時は、消雪システムにおける無駄時間と時定数を勘案し、負荷とは無関係に最大

図8 降雪強度の分布

図9 日降雪時間と平均降雪強度との関係

図10 新しく開発したフィードフォワード制御と従来のフィードバック制御の運転特性

出力で50分間の運転を規定しているため、初期散水時間中は必要以上に高温で散水することが多い。

5.3 燃料消費率の比較 従来のフィードバック制御と新しく開発したフィードフォワード制御について燃料消費率と運転時間の関係として、1回の降雪に対する運転時間における比較を図11に示す。フィードバック制御の場合は運転時間が短いと燃料消費率が高くなるのに対しフィードフォワード制御ではほぼ一定で、燃料消費率も低い。これはフィードバック制御では軽負荷時や間欠的な降雪気象の場合は高めの温度を示すためである。このような場合、フィードフォワード制御では起動直後から制御が働いて散水温度を下げるため燃料消費率は低下する。さらに、連続降雪で運転時間が長くなる場合の燃料消費率は、フィードバック制御の場合はフィードフォワード制御の場合に近づくものと考えられる。次に、1日の降雪に対する運転時間についての比較を図12に示す。フィードバック制御は運転時間の長短に対し燃料消費率の変化が $0.035 \sim 0.044 \text{ L/h/m}^2$ と少ない。これに対し、フィードフォワード制御では燃料消費率が運転時間に対応して増減しており、図9の降雪気象特性で示すように日降雪時間が長くなると平均降雪強度も大きくなるので燃料消費率は増加し、運転時間6時間では 0.025 L/h/m^2 を示すがフィードバック制御の 0.043 L/h/m^2 よりかなり低い数値である。この時、約42%の省エネルギーである。

6. 結 論

(1) 軌道散水消雪の省エネルギー化を図るととも

図11 連続降雪に対するフィードバック制御とフィードフォワード制御の燃料消費率と運転時間の関係

図12 日降雪に対するフィードバック制御とフィードフォワード制御の燃料消費率と運転時間の関係

にスノー jams の発生を防止するため降雪強度、気温、風速の気象因子と状態値である返水温度の因子とから散水温度を制御するフィードフォワード制御のシステムを構築した。

(2) フィードフォワード制御システムのアルゴリズムを確立するため軌道散水消雪モデルにおいて各地点の水温と流量収支を導き求め、試験とシミュレーションから計算式の妥当性を確認した。

(3) フィールドにおいてフィードフォワード制御の試験を実施した結果、気象に対する追従性が向上しまた制御サイクル時間の短縮が図られ、高い省エネルギー効果が得られることを確認した。

文 献

- (1) 伝熱工学資料(改訂第3版), (1975), 日本機械学会。
- (2) 上越新幹線工事誌(大宮-新潟間), (1984-3), 日本鉄道建設公団。
- (3) 機械工学便覧 水力学および流体力学(改訂第6版), (1976), 日本機械学会。