熱伝導逆問題を利用した冬季高速道路面温度予測法について

金沢大学工学部　関平和　内山孟　○伊藤太一
中日本高速道路株式会社 金沢支社　西谷直人　中源達雄

1. はじめに

北陸のような豪雪地帯では冬季の路面管理が毎年重要となっている。高速道路などでは降雪、路面の凍結が道路交通の安全を阻害している。その対策として、路面の温度を予測し、凍結する前に凍結防止剤を散布する方法がとられている。これまでは統計的な路面温度の予測を行ってきたが、これでは急激な気象変動に対して適応できず、正確な路面温度の予測をしきれないのが現状である。そこでより正確に予測するための方法が求められてきている。そこで舗装体周囲の熱収支の関係から熱伝導解析解を導き、舗装体内の温度分布式を求め温度予測を行う方法を新しく提示する。具体的には、熱伝導逆問題の手法（解析解から伝熱係数を求める）を用い、外部の様々な条件においても適用できる路面温度の予測プログラムの作成・検討を行った。

2．理論

2－1．解析解の誘導

ここでは解析解を求め、熱伝導逆問題の手法を用い、10分後及び1時間後の路面温度を予測する。

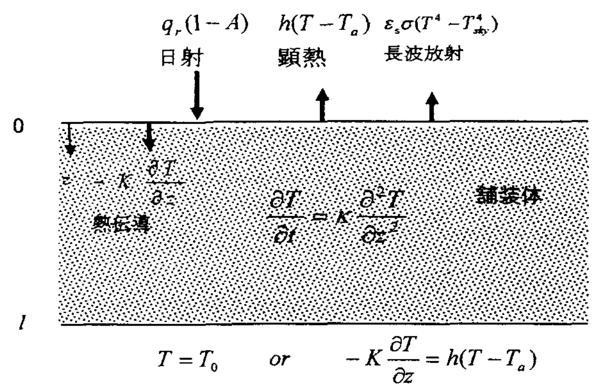
まず、舗装体内の伝熱モデルを図－1に示す。図－1より、舗装体内の熱伝導方程式、境界条件、初期条件は次のように表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

$$z = l; \qquad T = T_0(t)$$

$$t = 0; \qquad T = T_i(z)$$

$$z = 0; \qquad -K\frac{\partial T}{\partial z} = F(t) - U\{T - T_a(t)\}$$



図－1　舗装体内の伝熱モデル

ただし、F(t), Uは $F(t) = q_r(1-A) - \varepsilon_s\sigma(1-f_{pw})T_a^4$ 、$U = h + 4\varepsilon_s\sigma T_a^3$ とする。

z：鉛直方向距離、T：舗装体内温度、T_a：外気温、T_{sky}：天空温度、q_r：日射量（日射熱流束）、A：アルベド（反射係数）、h：顕熱伝達係数、ε_s：土壌表面の放射率、σ：Stefan-Boltzmann 定数、K：舗装体の熱伝導率、κ：舗装体の熱拡散率、T_0：舗装体底面温度、を表す。

この問題の解析解はGreen 関数法により次のように導かれる。

$$T = \sum_{i=1}^{\infty}\frac{2}{(K^2\alpha_i^2+U^2)l+KU}e^{-\kappa\alpha_i^2 t}\{K\alpha_i\cos(\alpha_i z)+U\sin(\alpha_i z)\}\int_0^l T_i(z')\{K\alpha_i\cos(\alpha_i z')+U\sin(\alpha_i z')\}dz'$$

$$+\kappa\frac{U}{K}\sum_{i=1}^{\infty}\frac{2K\alpha_i}{(K^2\alpha_i^2+U^2)l+KU}\{K\alpha_i\cos(\alpha_i z)+U\sin(\alpha_i z)\}\int_0^t\{T_a(\tau)+\frac{F(\tau)}{U}\}e^{-\kappa\alpha_i^2(t-\tau)}d\tau$$

$$-\kappa\sum_{i=1}^{\infty}\frac{2K\alpha_i}{(K^2\alpha_i^2+U^2)l+KU}\{K\alpha_i\cos(\alpha_i z)+U\sin(\alpha_i z)\}\{-K\alpha_i^2\sin(\alpha_i l)+U\alpha_i\cos(\alpha_i l)\}\int_0^t T_0(\tau)e^{-\kappa\alpha_i^2(t-\tau)}d\tau$$

ただし、式中のα_iは次式の正根である。

$$\alpha_i l \cot(\alpha_i l) + (Ul / K) = 0$$

この解析解は式の形が複雑なので、これ以降 f(z, t, U)と略化する。

2－2．解析方法

解析解を用いての路面温度予測は次の手順で行う。

Ⅰ）測定開始時点の舗装体内任意の点（約5点）の温度実測値から多項式近似により初期温度分布を求めておく。

Ⅱ）所定の時間ステップΔｔ経過後の表面下z_mの位置（$z = z_m$）における温度実測値をT_mとする。解析解をf(z, t, U)とするとき、

（１）$T_m = f(z_m, t, U)$を満たすようなUの値を、非線形方程式の解としてパソコンにより算出する。

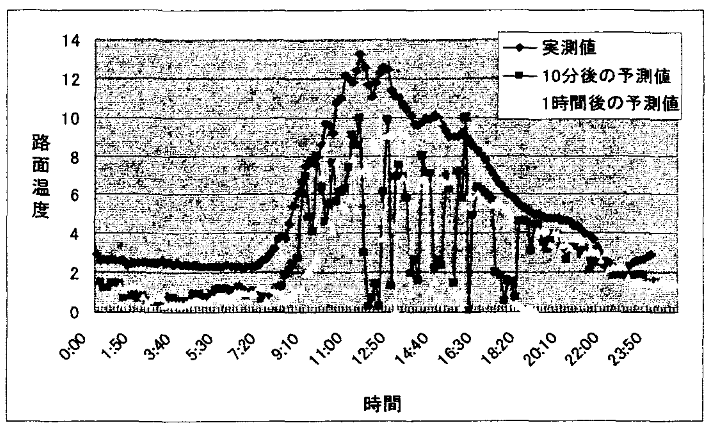
（２）これで確定されたUの値を用いて、解析解により t=Δt における温度分布を計算する。このとき自動的に舗装体表面温度も計算されることになる。

（３）さらに時間ステップをΔtだけ繰り上げて 1)、2)の計算を繰り返す。

この計算により、舗装体内の任意位置（$z = z_m$）での t =Δt における温度実測値T_mからその時点における舗装体表面温度を瞬時に計算することができる。なお、Uがあらかじめ既知であるときは、解析解に外部条件$T_a(t)$, $F(t)$, $T_0(t)$, $T_i(z)$を代入すれば、事前に温度分布を予測できる。

3結果・考察

観測時点から 10 分後と1時間後の温度の予測をした。図－2はその一例である。結果として夜間の予測値は実測値と比較的よく一致したが、日中は予測値が、実測値に比べ低く見積もられる傾向がみられた。原因としては、路面付近のアルベドや気温などの気象値を正確に測定できていないため伝熱係数Uの値の変動が激しくなり、日中の値が的確に求まらなかったこと、プログラム中に気象値を瞬間値としてではなく、1時間ごとの平均値として盛り込んだことなどが考えられる。
この改良策として、プログラム中に、より正確な気象値をいれることや、伝熱係数Uの求め方を見直すことがあげられる。



図－2　10分後と1時間後の予測結果

4．結論

解析解利用による路面温度予測結果は、夜間については比較的予測精度が高いといえるが、日中の予測精度は比較的低かった。予測手法はおおむね妥当であったと考えられるが、より精度を上げるために路面付近の気象条件（日射量、アルベド、気温）を正確に測定することが重要となる。また、逆問題で求めた伝熱係数Uの値の変動が激しいため、日中には有意な値が求まらない場合がみられた。その改良策として、伝熱係数Uについてこれまでは舗装体内の１点のみを活用しUを求めたが、いくつかの測定点においてUを算出しその平均値を適用するのがよいと考えられる。