

# 鋼床版橋路面での蓄熱材封入凍結抑制法の 数値シミュレーションによる効果予測

宮本重信

正会員 福井県雪対策・建設技術研究所 (〒918-8108 福井県福井市春日3丁目303)

熱容量の小さい鋼床版橋の路面は凍結しやすく、しばしば交通事故をもたらしている。2~5℃で凝固・融解する蓄熱材を鋼床版に封入することで、凍結を抑制する工法を福井市内で既に実用化した。その効果を設計時に知ることができれば、他の地域での実用化に有用である。そこで、気象台の日原簿データを読み込み、放射・対流・蒸発・融雪の熱収支計算を行い、蓄熱材なしの鋼床版橋、蓄熱材封入鋼床版橋の路面の温度を逐次求めていく数値シミュレーションを行った。降雪と放射冷却が繰り返された10日間、計算値は実測値と一致した。

**Key Words :** steel deck bridge, numerical simulation, antifreezing, snow-melting, heat storage, phase change material, solar system

## 1. はじめに

熱容量が小さい鋼床版橋は、コンクリート床版橋や地盤部に比べ、写真-1のように、著しく結露凍結する。ドライバーが突然結露凍結に出くわすことによる交通事故が少なくない。

そこで、筆者は、2~5℃で凝固・融解する蓄熱材を鋼管に詰め込み、これを鋼床版上に敷設し、舗装の内に封入することで、凍結直前の熱容量を大きくし、路面の凍結を抑制する工法を開発してきた<sup>1)</sup>。試験を重ね、すでに、九頭竜川に架かる福井市地保の国道の橋梁で実用化し(写真-2)、その結露凍結は地盤部なみに改善された<sup>2)</sup>。

この工法の効果は、鋼床版橋路面の凍結を地盤部なみに改善する程度に限られているが、電気ヒーター方式より建設費が安価で、運転管理が不要で、昼間の太陽熱を蓄え利用するソーラーシステムで環境にやさしい。マスコミに報じられたこともあって、雪国だけでなく、瀬戸内海などの温暖な地域からも問い合わせが寄せられている。

しかし、この工法は、昼間の日射で蓄熱材が液化し潜熱蓄熱されなければ、効果が得られない。その効果は、その地域の気象に大きく依存する。また、鋼床版橋床版下面の構造や床版舗装厚さの違いによっても路面凍結は異なる<sup>3)</sup>。したがって、気象条件が異なり、構造も異なる橋梁への普及には、設計時



写真-1 鋼床版とコンクリート床版の結露凍結の違い

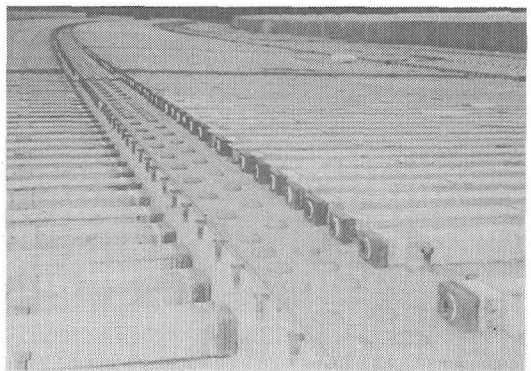


写真-2 蓄熱材を封入した鋼管を敷設した鋼床版橋

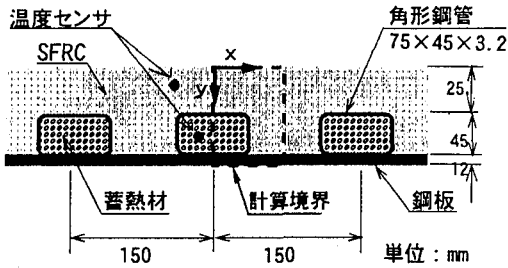


図-1 蓄熱材封入鋼床版の断面と座標系

にその効果を予測できる数値シミュレーションが必要となった。

さらに、この数値シミュレーションができれば、翌朝の融雪剤散布の必要性を、前日の夕方までに予測することができる。なお、現在国内で融雪剤散布などの予測に使われている手法は、いずれも気象予想項目との重回帰に基づくもので、数値シミュレーションによるものは見当たらない。

そこで、気象台のデータを逐次読み込み、熱の流入を計算し舗装・床版の温度を数値計算することにした。本論では、数値シミュレーションのモデル式・仮定・手法などを示し、その計算結果と実測との比較を行う。

## 2. 熱解析のモデル式・仮定・手法

### (1) 気象の取り扱い

本論で対象とする蓄熱材を有する鋼床版橋の構造を図-1に示す。また、熱解析での座標系と計算境界を図-1のようにとると、この舗装・床版・蓄熱材の内部と舗装表面での熱移動について、各々式(1)と式(2)が成り立つ。

なお、蓄熱材を封入しない鋼床版橋では、図-1の蓄熱材鋼管は舗装に置き換えられ、この場合はX方向に温度差は生じないので、1次元の解析となる。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) \quad (1)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial Y} \Big|_{Y=0} = q \quad (2)$$

ここで、 $\rho$ 、 $C$ 、 $k$ 、 $T$ は、それぞれ舗装または床版の密度、熱容量、熱伝導率、温度で、 $\tau$ は時間、 $q$ は舗装への上面からの流入熱量である。

$q$ については、路面に雪があるかどうかで異なるので、積雪の判定をまず行った。

積雪の有無の判定については、降雪量(降雨換算

重量)を融解熱量に置き換えて、その融解熱量を計算時間ステップ毎に積み上げ(式(3))、この熱量 $Q_s^{P+1}$ が舗装と積雪上面からの流入熱量によって0になれば、積雪なしとした。なお、雪は、1時間毎の降雪量(降雨換算重量)が計算の時間ステップの一つおきに均等に降ると仮定した。積雪を取り扱っての熱収支数値シミュレーションは、論理的に圧密沈降、融雪、排水などを取り入れて行くと複雑になり実用的でなくなるので、このように熱量を用いての簡便な方法で試行した。

積雪のない場合は、式(4)<sup>(4),(5)</sup>によって舗装表面に熱が流入する。降雪によって路面に雪が積もる場合は、式(5)によって上空からの熱は直接には積雪に伝わり、路面へは積雪を介して式(6)によって熱が伝わりと仮定した。

雪と舗装表面の間の熱伝達率 $h$ は、無散水融雪実験で得られた熱伝達率<sup>(5)</sup>を用いた。

$$Q_s^{P+1} = S + Q_s^P \quad (3)$$

$$Q_s^{P+1} = 0 \quad : \text{積雪なし時}$$

$$q = G \cdot (1 - \alpha_r) + Nr + Hr + Er - S \quad (4)$$

$$Q_s^{P+1} > 0 \quad : \text{積雪時}$$

$$Q_s^{P+1} = Q_s^{P+1} - \{G \cdot (1 - \alpha_s) + Ns + Hs + Es - q\} \quad (5)$$

$$q = h \cdot (T_{\text{snow}} - T_{y=0}) \quad (6)$$

ここで、 $S$ は降雪による雪の融解熱量、 $Q$ は積雪による雪の融解熱量、 $G$ は日射量、 $\alpha$ はアルベド、 $N$ は長波長の正味放射熱量、 $H$ は顕熱輸送量、 $E$ は蒸発凝結に伴う潜熱輸送量、 $T_{\text{snow}}$ は路面上の積雪温度を示し、添え字の $s$ は積雪との熱移動、 $r$ は積雪なしで路面との熱移動を意味する。ただし、 $q$ は $Q_s^{P+1} < 0$ とならない範囲での値とする。

顕熱 $H$ については、ユルグスの式(7)<sup>(7)</sup>を用いて見積もった。

$$Hr = hj \cdot (T_a - T_{y=0}) \quad (7)$$

$$U \leq 5 \quad hj = 3.95 \cdot U + 5.8$$

$$U > 5 \quad hj = 7.13 \cdot U^{0.78}$$

ここで、 $hj$ は熱伝達率[W/(m<sup>2</sup>K)]、 $T_a$ は気温[K]、 $T_{y=0}$ は舗装表面の温度、 $U$ は平均風速[m/s]である。 $Hs$ では、 $T_{y=0}$ を積雪の表面温度に置き換える。ここでは、積雪表面温度は計算しないので、0°Cとした。

潜熱 $E$ については、結露と蒸発がある。前者については、滑り抵抗が氷膜同様になるほどの結露であっても水量換算厚さで0.01mm<sup>(8)</sup>と小さいことから無視した。降雪後に溶けた融雪水は、ある一定水量までは路面に残り蒸発するが、それを越える融雪水は排水されると仮定した。排水されず蒸発する一定水量を初め任意に仮定し、その仮定水量が蒸発でな

くなるまで、式(8)<sup>9)</sup>による熱量が路面から奪われるとして路面温度を試算した。次に、仮定水量を変えて試算を繰り返し、その計算路面温度が実測路面温度と最も一致する水量を求めた。なお、この逆解析は、降雪の多かった26日についてのみ行い、厚さ0.7mmまでの水が蒸発するという仮定が最も一致した。この値は他の日の降雪後の融雪水についても変わらないものとして用いた。

$$E_r = -0.0086U \cdot (e_l - e_{sur})H_v \quad (8)$$

ここで U は高さ1mでの平均風速[m/s],  $e_l$  は高さ1mでの水蒸気圧[hPa],  $e_{sur}$  舗装表面での水蒸気圧[hPa],  $H_v$  水の蒸発潜熱[J/kg]である。

日射については、アスファルト舗装のアルベドは先の融雪水がある時は0.18, ない時は0.1と推定した<sup>10)</sup>。なお、積雪時の積雪のアルベドは  $Qs^{PI}$  が0に近づくことと舗装のそれに次第に近づくようにした。蓄熱材封入の舗装は、鋼繊維補強コンクリートであることから、そのアルベドは、融雪水がある時は0.25, ない時は0.13とした。

長波長放射は、雲量・雲の種類・水蒸気圧に依存し、幾つかのモデル式がある<sup>11)</sup>。ここでは、OutcaltとSmithの式(9)<sup>12)</sup>を用いた。

$$N_r = \epsilon_r (1 - n^2 \cdot K) [\sigma T_r^4 - \sigma T_\infty^4 \cdot \{1 - 0.26 \cdot \exp(-7.77 \times 10^{-4} \Delta T^2)\}] \quad (9)$$

ここで、 $\epsilon_r$  は路面の放射率、 $\sigma$  はステファンボルツマン定数、 $T_r$  は舗装表面温度[K],  $n$  は雲量、 $K$  は雲の種類による係数、 $T_\infty$  は気温[K],  $\Delta T$  は0°Cからの気温のずれである。 $N_s$  は上記の路面に対する式の中で $\epsilon_r$ ,  $T_r$  を積雪に置き換える。

また、雲の種類による係数は、Sellersのものを用いた<sup>13)</sup>。この式や顕熱移動を積雪面で用いるには、雪の表面温度を変化させて計算しなければならない。しかし、雪層内部を融雪・沈降・車両の踏みつけ攪拌を含めて差分的に取り扱うことは、極めて複雑である。そこで、先に述べたように、雪の融解熱量を積算するだけの簡易な方法を用いた。長波長放射の熱移動では、雪の温度は0°C一定として、放射率を新雪の値より下げた。

床版下面での熱移動に関しては、河川水からの長波長放射  $N_l$  と下面空気からの顕熱熱移動  $H_1$  のみを考え、式(2)の  $q$  を下のように  $q_l$  として求めた。

$$q_l = F_l \cdot N_l + F_l \cdot G \cdot (1 - \alpha_l) \cdot \alpha_{river} + H_1 \quad (10)$$

$$N_l = \epsilon_l \cdot \sigma \cdot (T_{river}^4 - T_{sl}^4) \quad (11)$$

$$H_1 = (Ch + Cv \cdot S_{fin} \cdot \eta_{fin}) \cdot (T_{\infty} - T_{sl})^{1.25} \quad (12)$$

ここで、 $T_{river}$  は床版下の河川水の温度[K],  $T_{sl}$  は床版下表面温度[K],  $T_{\infty}$  は床版下の気温[K],  $\epsilon_l$  は床版下面の放射率[-],  $F_l$  は形態係数[-],  $S_{fin}$  は床

版面積当たりのリブの表面積、 $\eta_{fin}$  はリブを熱フィンとみなすフィン効率[-]<sup>14)</sup>,  $\alpha_{river}$  は床版下の河川水のアルベド[-]である。

主桁で囲まれた床版下での平均風速を当該現場で実測したところ、舗装上面での平均風速  $U$  の1/4と小さく、問題とする放射冷却の深夜から早朝は無風に近いことから自然対流と考えた。床版下は水平であるので、その熱伝達率  $Ch$  は、下向き冷却では  $2.67 [W/(m^2 K^{1.25})]$ , 下向き加熱では  $0.76 [W/(m^2 K^{1.25})]$  と見積もった。鉛直面であるリブ部は、その熱伝達率  $Cv$  を  $1.98 [W/(m^2 K^{1.25})]$  とした<sup>15)</sup>。

形態係数  $F_l$  は、主桁下フランジと隣接する主桁下フランジをつなぐ仮想面に流入した放射は仮想面内側の主桁側面と床版の面積比に応じて放射されるとして、その値を求めた。

以上の計算にデータとして用いる雲量・雲の種類の係数、気温、降雨(降雪)量、日射量の気象条件は、地方気象台の気象日原簿から得ることができ、これを用いた。福井地方気象台での雲量と雲の種類は、21時から翌朝9時まで12時間観測されないことから、この12時間を比例案分するという方法で計算せざるを得ない。

平均風速は、福井地方気象台の値は、地上26.2mの観測値であることから、実測するか、高さと周辺状況を換算して推定しなければならない<sup>16)</sup>。ここでは、実測値を用いた。

床版下面への長波長放射を求めるための河川水温も実測値を用いた。なお、河川水による長波長放射は、後述の計算結果から流入熱量全体の中ではわずかな量であることから、実測せずに適当に推定しても結果にあまり影響を与えないと思われる。

蒸発潜熱に関わる高さ1mでの水蒸気圧は、気象台の観測地と河川上の橋面では異なると考えられるが、蒸発潜熱は後述の計算結果から流入熱量全体の中ではわずかな量で影響が少ないと考え、気象データをそのまま用いた。また、水蒸気圧は長波長放射  $N_r$  にも影響を与えるが、水蒸気圧を用いない唯一の実験式である式(9)を用いることで、水蒸気圧を求めなくて求められるようにした。

なお、実測した橋梁は、福井地方気象台から0.8 kmの距離に位置する。

## (2) 蓄熱材の取り扱い

ここで用いた蓄熱材は、一定範囲の温度幅で凝固・融解する。また、凝固温度は過冷却をも考慮して融解温度より低いと考えた。この凝固・融解の過程を、図-2の蓄熱材の温度-エンタルピーで例を挙げ

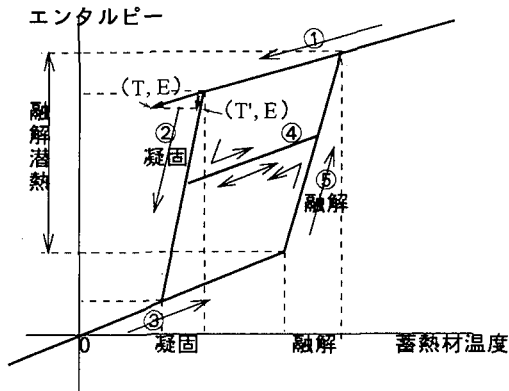


図-2 蓄熱材の温度-エンタルピー

表-1 計算に用いた蓄熱材・舗装などの熱特性

材料名	熱伝導率	熱容量
パラフィン系蓄熱材	0.165 W/mK	融解潜熱 130 kJ/cm <sup>3</sup> 融解: 3.6~4.9 °C 凝固: 3.5~2.0 °C 顕熱 1,741 J/(cm <sup>3</sup> K)
アスファルト	2.44 W/mK	2.05 kJ/(cm <sup>3</sup> K)
SFRC 珪石骨材	3.6 W/mK	2.05 kJ/(cm <sup>3</sup> K)
鋼	53.5 W/mK	3.65 kJ/(cm <sup>3</sup> K)

て次に説明する。

まず、完全液体から温度低下すると、ライン①（勾配：液体の顕熱容量）上で下がり、凝固開始温度以下になるとライン②（勾配：凝固潜熱容量）上で温度が下がる。凝固終了温度以下にまで下がればライン③（勾配：固体の顕熱容量）に移行し急激に温度が下がる。もし、凝固途中から温度が上昇すると、ライン④（勾配：その時点での固液混合比に応じた顕熱容量）上を上るとライン⑤（勾配：融解潜熱容量）に移り、液化する。

凝固時には、過冷却が生じるケースも実測では見られるが、過冷却は、いつも同じようには生じないので、凝固温度を融解温度より下げて、過冷却としては扱わなかった。

上記の式をパソコンで計算するが、蓄熱材のない1次元の熱解析では、陽解法を用いた。蓄熱材封入した鋼床版橋では、薄層で熱伝導の大きい角型鋼管の存在から収束制約が厳しくなり、陽解法ではパソコンでの計算時間が長くなるので、陰解法を用いた。

陰解法での計算では、舗装と床版下面からの熱の流入量は、直前の計算時刻での舗装表面温度から求め、その値は、当該ステップの時間中は変わらないとした。

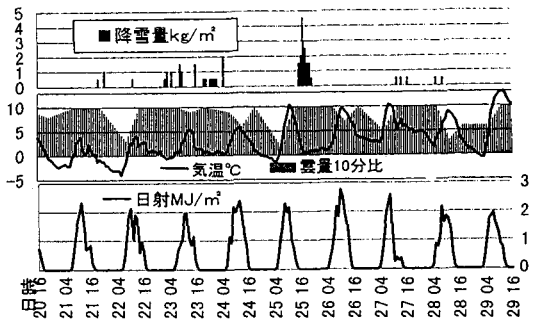


図-3 期間中の気象

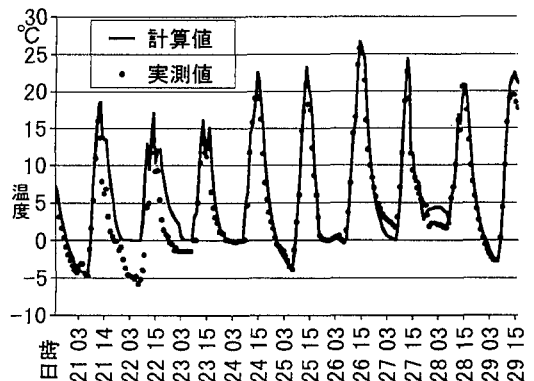


図-4 蓄熱材なし鋼床版舗装表面温度の変化

また、熱容量も、直前の温度で液体、固液共存域、固体の相状態から対応する熱容量を求め、時間経過後の温度を求める。その時間経過後の温度が熱容量の異なる領域に突入した場合には、エンタルピーの変化量を新しい領域の熱容量で除して得られる温度で補正する<sup>17)</sup>。例えば、蓄熱材が図-2のライン①にあった場合、このライン上の温度-エンタルピーで次の時間ステップの温度を計算し、その結果が温度低下で図-2の(T, E)のようにライン上をはみ出した時は、エンタルピーを同じとしたライン②上の(T', E)に修正する。

この方法と熱流束を時間ステップ直前の温度を用いることによって生じる誤差を大きくしないため、陰解法での計算時間ステップは3分とした。

### 3. 計算結果

降雪と結露凍結が繰り返された1996年2月20日16時から10日間について、鋼床版橋（城東橋）を対象に、20日16時の実測舗装温度を初期値として与え



写真-3 2月21日 21時30分



写真-4 2月22日 7時00分

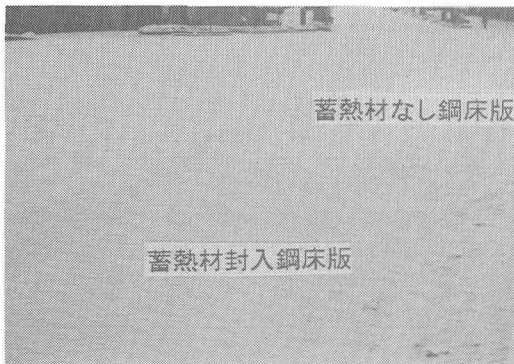


写真-5 2月23日 8時00分

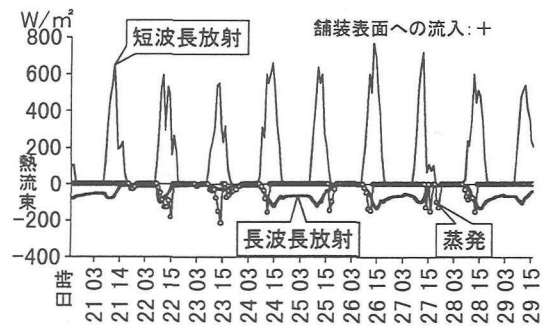


図-5 舗装表面への放射・蒸発の熱流

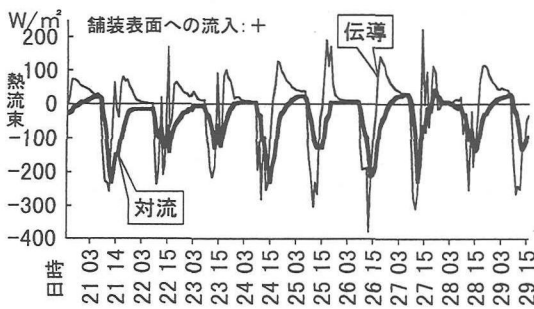


図-6 舗装表面への伝導・対流の熱流

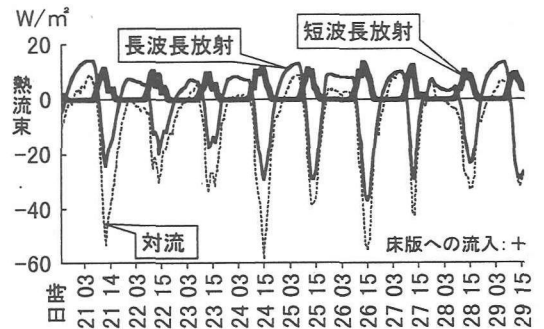


図-7 下面床版への放射・対流の熱流

て数値シミュレーションを行った。なお、この初期値が多少違ってても、熱容量が小さい橋梁では短時間に、その影響はなくなる。

なお、今回の使用した蓄熱材や舗装の熱特性を表-1に示す。

この期間の雲量、降雪量、気温を図-3に示す。

#### (1) 1次元のシミュレーション結果

まず、蓄熱材を封入しない鋼床版橋の舗装表面から10mmの深さの温度（以下表面温度）について、計算値と実測値とを表したのが図-4である。

この図では、放射冷却で結露凍結となった21、25、29日の早朝の舗装表面の最低温度について、計算は実測より最大でも0.2℃高いにすぎなくて、きわめて良く一致している。

雪の降った23日夜～24日朝と25日夜～26日朝では、計算も現地観測も積雪で、路面温度も0℃で実測と計算値は一致した。しかし、同じく降雪のあった21日夜(写真-3)～22日朝(写真-4)と23日朝(写真-5)では、積雪状況は計算と実測とも積雪で一致したが、その最低路面温度は実測値でそれぞれ-5.8℃、-1.5℃に対して計算値は0℃と大きく異なった。これは

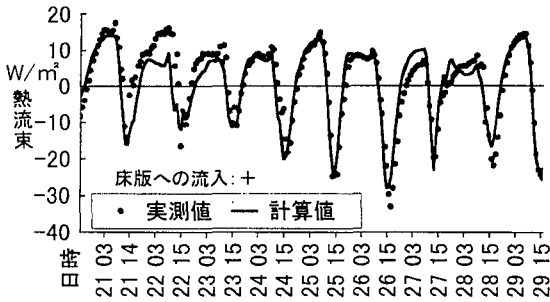


図-8 床版下面での放射熱流の実測値と計算値

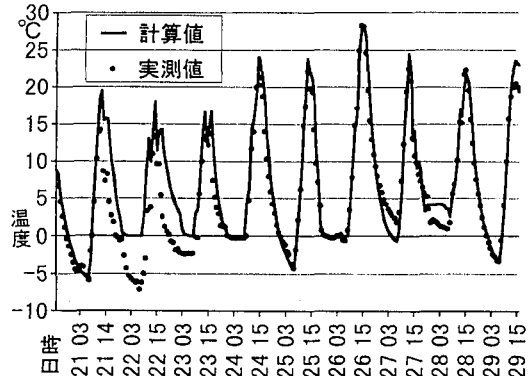


図-9 床版下面断熱鋼床版舗装表面温度の変化

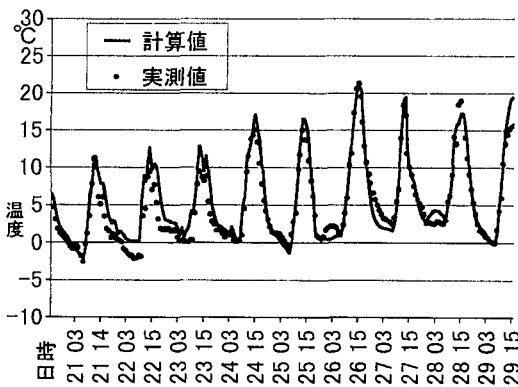


図-10 蓄熱材封入鋼床版橋舗装表面温度の変化

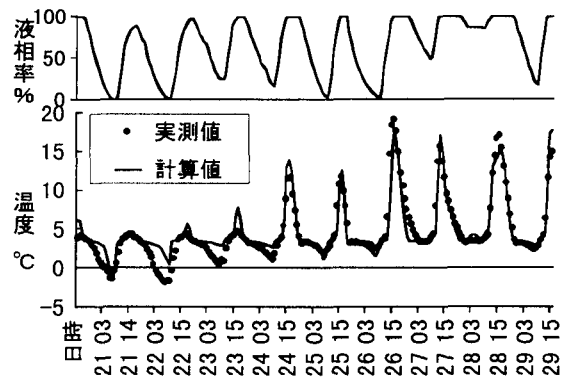


図-11 蓄熱材の温度と液相率の変化

積雪温度を計算せず簡便化し0°Cと仮定していることによって生じる。走行車によって圧雪となる現象の計算への取り込みを含め、今後の課題と思われる。

昼間の最高路面温度については、実測と計算の差は平均で1.6°C、最大で3.1°Cの差で、これもほぼ一致している。

図-5、図-6に、舗装表面に流入する熱流の内訳を示した。路面温度が高い状態で、降雪があると、舗装・床版から舗装表面に伝導として瞬間的に大きな熱流が生じる。ここでは、1時間の平均値を用いているので、極端に大きな値にはなっていないが、値の変動が見られる。

さらに、放射冷却のあった21日、25日、29日の前日夜から朝までは、主に長波長放射によって舗装が冷えているのが分かる。このことは、地盤上でのこれまでの実測調査<sup>18)</sup>とも一致する。

図-7に、床版下面での熱流束の計算結果を示す。放射冷却となった深夜から朝の時間帯では、床版下から対流熱による熱と放射による熱が下から上へと流れ、舗装床版の冷却が抑制されていることも分か

る。このことも、これまでの調査結果<sup>3)</sup>と一致する。なお、この橋は、開断面リブ(厚さ16mm、長さ200mm、設置間隔330mm)であったので、先に述べたようにリブをフィンとして計算した結果、例えば21日の6時では、リブからは3.0W/m<sup>2</sup>、床版底からは5.3W/m<sup>2</sup>の対流となった。開断面リブでは、リブ両側面から空気から熱が流入し、リブの厚さも厚いので、フィン効率は大きく、放射冷却時の凍結と昼間の高温化を抑制している。

床版下面での放射については、短波長と長波長を含む正味の放射熱量を計測できる放射熱流計を設置し実測したので、その実測値と当該計算値とを図-8で比較した。21日夜から翌朝は積雪で、舗装路面の実測温度はマイナス数°Cにまで冷えたが、積雪は0°Cとの仮定から計算路面温度も0°Cと計算され、流入放射熱量の計算値は実測値より小さく算出されている。しかし、その他の時間帯では、計算値と実測値はほぼ一致している。

図-9は、床版下面に断熱材厚さ3cmを吹き付けた鋼床版橋の計算と実測の表面温度を示したものであ

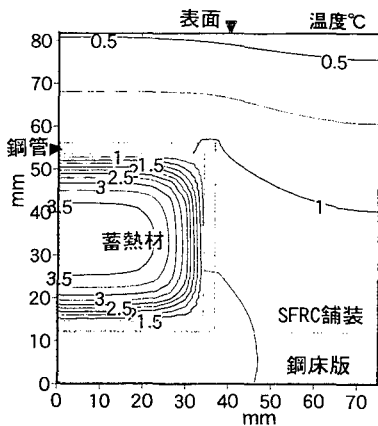


図-12 凝固課程での等温線図

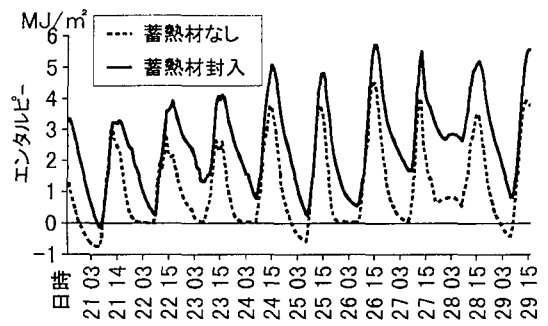


図-14 蓄熱材の有無によるエンタルピーの違い

に蓄熱材封入では積雪にならず、計算も同時刻では無積雪となっている。翌朝は、写真-4のように積雪に至ったが、計算でも積雪となった。23日の朝(写真-5)は、蓄熱材なしでは計算と実測とも積雪であったが、この蓄熱材封入では計算と実測とも積雪なしで一致した。24日の朝は、わずかな積雪があるとの計算結果で、これも現地観測と一致している。

蓄熱材の温度と蓄熱材の液相率(液体となった割合)の変化を図-11に示す。計算温度と実測温度はほぼ一致している。また、蓄熱材は計算された液相率が100%である時は、計算と実測の温度変化が著しく、液相率が100%より下がり0%までには下がっていない時は、表-1の融解・凝固の温度範囲にほぼとどまっている。更に、液相率から、2月下旬の降雪と結露凍結が繰り返す気象条件の下で、相変化が1日サイクルで繰り返され、鋼床版舗装温度の急変を抑制していることが分かる。

参考として図-12に凝固途中における計算によって得られる等温線を示す。この蓄熱材部分は、3.5°Cで固体になり始め、2.0°Cで完全な固体になるとの仮定で計算しており、蓄熱材がその周囲から熱を奪われ完全な固体になり、中心部では固体になった状態であることが分かる。

### (3) 蓄熱材封入の効果

蓄熱材なしの計算値(図-4)と蓄熱材封入の計算値(図-10)を図-13を示した。実測値と計算値の比較では、計算で用いた気象が実際と異なることからの影響が含まれるが、この図での比較では、同じ気象条件での蓄熱材封入工法による効果が得られる。この図によって蓄熱材封入の効果を設計時に知ることができる。なお、このケースでは、放射冷却の21、25、29日の朝の蓄熱材封入の最低舗装表面温度は、蓄熱材なしより2.3~2.4°C高い結果となっている。

さらに、結露は、露点温度以下になって生じることから図-13に、気象台観測での露点温度を示した。

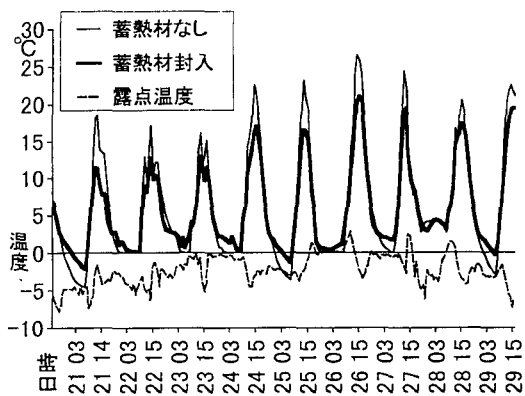


図-13 蓄熱材なしと封入の計算舗装表面温度の変化

る。この計算結果も、放射冷却の21、25、29日朝の最低舗装表面温度は、実測値より0.2°C、-0.2°C、-0.2°C高いだけで実測値とよく一致した。下面断熱によって、放射冷却(昼間高温)時に床版下面からの流入(流出)する熱が遮断され、舗装表面温度が低下(上昇)することを筆者らは実測で明らかにした<sup>2)</sup>が、この当該計算によっても検証することができた。

### (2) 蓄熱材封入(2次元)シミュレーションの結果

次に蓄熱材封入鋼床版橋での計算結果と実測との比較を行う。その舗装表面の計算温度と実測温度を図-10に示す。

放射冷却で結露凍結となった21、25、29日の早朝の舗装表面の最低温度について、計算は実測より0.5°C、-0.8°C、-0.2°C高いが良く一致している。昼間の計算温度も、ほぼ実測値と一致している。

2月21日は夜に雪が降り始めたが、写真-3のよう

河川上の露点温度は、气象台のそれよりやや高いと考えられるので、そのまま評価すると危険であるが、蓄熱材なしでは、結露凍結となるところが、蓄熱材挿入によって、この露点温度より随分高くなることが分かる。

最後に、舗装・床版・蓄熱材の総体のエンタルピーが、蓄熱材なしと蓄熱材封入とで、どの程度異なるかを図-14に示した。この図から、総じて、蓄熱材によってエンタルピーが増えることで効果が得られていること、しかし、21日のように昼間の最大エンタルピーは蓄熱材なしも封入も変わりがないが、蓄熱したものはやや遅れてから熱が放出され、効果につながっているケースがあることが分かった。これは、当該蓄熱材の熱伝導率が小さいことによる。このようなことも含めて効果を考えるには、数値シミュレーションが不可欠と思われる。

#### 4. おわりに

当該数値シミュレーションモデルと气象台の日原簿データを用いれば、放射冷却時については、蓄熱材封入した鋼床版橋を含めて、その舗装温度をかなり精度良く推定できることが分かった。

降雪による路面の積雪についても、その路面温度では一致しないケースがあるが、積雪となるかどうかについては、ほぼ計算と実際は一致した。勿論、今回計算で用いた以上の降雪では、一致するか分からないが、こうしたケースでは、実際の道路は早朝に除雪されるので除雪をプログラムに取り込めばよい。また、消雪装置のある箇所では、消雪をプログラムに取り込めばよい。

以上、放射冷却、降雪を含め、計画される橋梁の設置地域の気象日原簿とその河川水温、風速をデータとして入力すれば、その刻々の路面温度が求められ、蓄熱材の効果が予想できる。

そして、この数値シミュレーションを用いれば、蓄熱材の選定、蓄熱材封入量、設置方法の改良などがその地域の気象条件に応じて可能である。

謝辞：蓄熱材の取り扱いでは、福井大学機械工学科竹内正紀教授、床版下面の放射の取り扱いでは福井高専田中貞行教授、名古屋工業大学堀越哲美教授、プログラムの作成では合資会社共栄コンピューターサイエンスの和田敏洋氏に貴重な助言をいただいた。記して、謝意としたい。最後に、(株)横河ブリッジの故寺田博昌博士には、蓄熱材封入による鋼床版橋凍結抑制技術の開発に関して、多大な助言と協力を

いただいていた。突然の訃報に、心からの哀悼を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 宮本重信, 室田正雄: 鋼床版橋路面の蓄熱材封入による凍結抑制の研究, 土木学会論文集, No. 574/VI-36, pp. 73-83, 1997. 9.
- 2) 宮本重信, 室田正雄: 蓄熱材封入による鋼床版橋路面の凍結抑制-閉断面リブ鋼床版橋での計測, 第13回寒地シンポジウム査読論文, pp. 121-125, 1997. 11.
- 3) 宮本重信, 室田正雄, 杉森正義: 橋梁の下面構造がその路面凍結におよぼす影響, 日本雪工学会誌, Vol. 14, No. 1, pp. 1-8, 1998. 1.
- 4) 中尾正義, 清水増次郎, 高橋修平: 積雪路面交通路における路面凍結に関する研究, 防災科学技術研究所報告第50号, pp. 175-177, 1992. 12.
- 5) 武市靖: 地表面熱収支解析による冬期間の路面温度の推定, 土木学会第46回年次学術講演会, pp. 24-25, 1992. 9.
- 6) 宮本重信: 地下水を利用した節水型融雪システムの開発, 土木学会論文集, No. 492/VI-23, pp. 78, 1994. 6.
- 7) 建築学大系編集委員会: 建築学大系 8 音・光・熱・空気・色, pp. 343, 1959.
- 8) 木曾忠幸, 福原輝幸: 橋梁路面の結露凍結に関する基礎的研究, 土木学会第50回年次学術講演概要集第IV部, pp. 748-749, 1995.
- 9) 小島賢治, 石川信敬, 本山秀明, 山田芳典則: 積雪の蒸発量, 北海道低温科学研究所低温科学物理編, 第44号, pp. 52-60, 1985.
- 10) 中尾正義, 清水増次郎, 高橋修平: 積雪路面交通路における路面凍結に関する研究, 防災科学技術研究所報告, 第50号, pp. 177-178, 1992. 12.
- 11) 竹内清秀, 近藤純正: 大気科学講座 1 地表に近い大気, pp. 86-88, 1981.
- 12) 福田正己, 石崎武志: 平衡地表温度による土壌凍結深推定モデル, 日本雪氷学会誌, 雪氷42巻2号, pp. 70-80, 1980. 6.
- 13) Sellers, W. D. :Physical Climatology , University of Chicago Press, pp. 58, 1965.
- 14) 相原利男: 伝熱工学, 裳華房, pp. 26, 1994.
- 15) 田中俊六, 武田仁, 足立哲夫, 土屋喬雄: 最新建築環境工学, 井上書院, pp. 164, 1989.
- 16) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 丸善(株), pp. 258-268, 1997.
- 17) 大中逸雄: コンピュータ伝熱・凝固解析入門- 製造プロセスへの応用- 丸善, pp. 202, 1985.
- 18) Masujiro Shimizu, Masayoshi Nakawo and Shuhei Takahashi: Measurement of atmospheric radiation for winter road management , International Workshop on Winter road Management, pp. 4-6 , 1993.
- 19) 相原利男: 伝熱工学, 裳華房, pp. 26, 1994.
- 20) 田中俊六, 武田仁, 足立哲夫, 土屋喬雄: 最新建築環境工学, 井上書院, pp. 164, 1989.

(1997. 7. 31. 受付)



PREDICTING EFFECT OF ANTIFREEZING SYSTEM  
WITH PHASE CHANGE MATERIAL ON STEEL DECK BRIDGES  
USING NUMERICAL SIMULATION

Shigenobu MIYAMOTO

The road surfaces on steel deck bridges have more amount of frost and snow cover than any other ones, because the heat capacities of their decks are small. Antifreezing system with phase change material which has the 2~5°C solidifying point was developed and has been into practical use in Fukui city, a snowy and rather mild city. Simulations of the road surface temperatures with and without phase change material are useful for popularizing this system in other regions. Taking into account radiate, sensible, latent and conductive heat fluxes which were estimated using weather data observed the meteorology observatory, we carried out the numerical simulations.

The numerical results for successive 10 days which were frosty and snowy alternately agree with the measured ones.