

# 拡張アメダス気象データと数値シミュレーションを用いた橋面凍結の推定

## Estimating Road Icing on Bridge Using Expanded AmMeDAS Weather Data and Numerical Simulation

宮本重信\*, 奥村 茂\*\*

Shigenobu MIYAMOTO and Shigeru OKUMURA

\*工博 福井県雪対策・建設技術研究所 (〒918-0818 福井市春日3丁目303)

\*\* 福井鐵鋼(株) (〒918-0818 福井市若栄町702 福井県鉄工団地内)

Road icing on bridges depends on the weather on the site and the structural details of the bridge deck, pavement and rib. Steel decks have road icing surfaces more frequently than reinforced concrete decks and steel decks with phase change material which has 3 ~ 5 °C melting point. Previous paper shows the calculated temperatures for successive 10 days that have frost and snow alternately, taking into account radiate, sensible, latent and conductive heat fluxes that were estimated from weather data observed by the Meteorology Observatory agree with the measured ones in Fukui city. In this paper, calculated results for a winter season from Expanded AMeDAS weather data edited by Architectural Institute of Japan were compared with ones from weather data observed by the Meteorology Observatory.

key words: road icing, phase change material, numerical simulation, weather data

### 1. はじめに

写真-1は、早朝結露凍結した際の福井市郊外の鋼床版橋とRC床版橋が連続する路面状況を撮影したものである。RC床版橋には結露が見られないが、鋼床版橋の路面は結露で白くなっている。降雪時にも鋼床版橋は地盤部やRC床版橋へ雪が積もりやすい。これは、鋼床版がRC床版に比べ熱容量が小さいことによる。こうした鋼床版橋の凍結は、本州四国連絡橋などの暖かい地域の橋でも生じ<sup>1)</sup>、国内の広い地域で問題になっている。

筆者らは、約3°C凝固温度の潜熱蓄熱材を封入した鋼管を鋼床版橋上に設置し、その周囲を鋼繊維補強コンクリート舗装とする工法で、鋼床版橋の凍結を地盤部なみに抑制する工法を福井県の2橋梁で実用化している。

さて、この凍結や圧雪は、その立地点の気象と橋の床版、舗装、桁の構造と熱特性に依存する。そこで、熱収支モデルに作成し、気象台の地上観測データから数値シミュレーションを行った。結露凍結と降雪が繰り返した10日間について、鋼床版橋とそれに潜熱蓄熱材を封入した橋の路面温度の実測値はその計算値とよく一致することを前稿<sup>2)</sup>で示した。今回は、路面温度だけでなく、積雪深も計算できるようにモデル式を更新し、それが実測とほぼ一致することを示す。

この数値シミュレーションで使用した日射量、雲の量と種類などを含む地上観測データは気象官署のある67地点に限られている。本年1月、日本建築学会は、全国842地点のデータについて日射量や大気放射量を推定して1981年から1995年までの15年間拡張アメダス気象データCD-ROM化した。これを用いれば、ほぼオンサイトの予測が



写真-1 鋼床版橋とRC床版の結露凍結の違い

できる。ここでは、この方法での予測を従来の地上観測データからの計算値と比較し、その実用性について述べる。

### 2. 熱収支モデル

ここでは、前稿以後計算できるようにした積雪深の扱いと拡張アメダス気象データ利用に伴う長波長放射の扱いを含めて述べる。

2次元の解析において、座標系と計算境界を図-1に示すようにとると、この舗装・床版・潜熱蓄熱材の内部と舗装表面、床版裏面での熱移動について、式(1)、式(2)、(3)が成り立つ。

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

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial Y} \right|_{Y=0 \text{ (舗装表面)}} = q_u \quad (2)$$

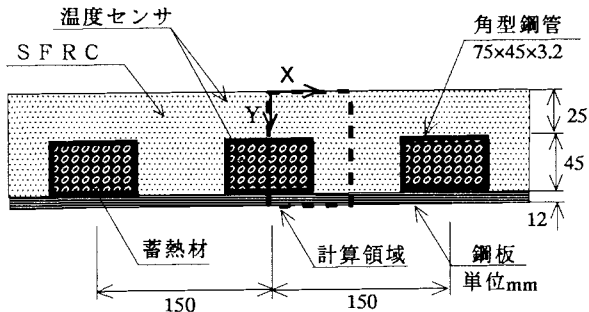


図-1 潜熱蓄熱材封入鋼床版の断面と座標系

$$-k \frac{\partial T}{\partial Y} \Big|_{\text{床版裏面}} = q_1 \quad (3)$$

ここに、 $\rho, C, k, T$  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、 $q_u, q_1$  はそれぞれ舗装表面と床版下面への外からの流入熱量である。

以下では式をパソコン計算を前提に差分的に記す。積雪  $Q_{sw}^{p+1}$  は、降雪量（降雨換算重量）を計算時間ステップ毎に積み上げる（式(4)）。 $\Delta\tau$  は時間間隔。融解熱量に置き換えた  $Q_s^{p+1}$  も計算時間ステップ毎に積み上げる（式(5)）。降雪を含む降水重量  $Sw$  の中で、水の割合  $s(T_{ret})$  はその雨水の水温の関数とされ<sup>9)</sup>、その水温からは湿球温度  $T_{ret}$  に等しいことから、さらに、 $T_{ret}$  は水蒸気圧から推定した<sup>4), 5)</sup>。

降雪後に溶けた融雪水や降雨水は、水分量  $Q_{water}$  として式(6)で積算もしくは蒸発で減じるが、ある一定水量  $Q_{water\ max}$  を越えた分は排水されるとした式(7)。  $Q_{water\ max}$  は勾配1.5%の舗装に水をスプレーで吹き付け、路面から水が流れ出す限度水膜を0.3mmと推定した。なお、J.E.Thornesは0.2mmとしている<sup>9)</sup>。水蒸気の移動は熱移動と相似性を有することで求めた<sup>7)</sup>。

降雪があるか残雪が路面にある（熱量  $Q_s^{p+1}$  が0を越える）場合は、上空からの短波長放射  $G$  は表面で反射（雪面での日射反射率  $\alpha_s$ ）され、その残りのなかで、 $1 - \beta_G$ （積雪中の透過率）が捕捉され、それ以外は路面に達し、路面に反射（路面での日射反射率  $\alpha_r$ ）されない部分が路面に吸収されると仮定した（式(8)）。長波長放射  $N$  と対流  $H$  についても、同様に考えそれぞれ透過率を  $\beta_N, \beta_H$  とした。透過率は積雪中のそれぞれ短波長、長波長放射、対流の消光（減衰）係数を用いて求められる<sup>9)</sup>。蒸発  $E$ 、降雨伝導  $R$  などは、直接路面に伝わらない（式(9)）。積雪から路面への熱流  $M$  は、路面温度が0℃を越える条件では無散水融雪実験で得られた熱コンダクタンス  $h$  で得られ（式(10)）、0℃以下では積雪と舗装表面の境界には熱抵抗がないとした（式(11)）。

積雪は、融雪と降雪で重量が変動する一つの層として扱った。雪は上下縦（ $y$ ）軸方向の熱移動は生じるが、横（ $x$ ）方向は積雪の温度差が小さいので無視した。

計算によって求められた  $Q_s^{p+1}$  が積算された降積雪重量と融解熱量の積より大きい（ $Q_s^{p+1} > Q_{sw}^{p+1} L_s$ ）時は、積

雪温度  $T_{snor}$  が0℃より下がる（式(12)）。逆に  $Q_s^{p+1}$  が積算された降積雪重量と融解熱量の積以下である時は、積雪温度  $T_{snor}$  は0℃となり、積雪重量  $Q_{sw}^{p+1}$  は  $Q_s^{p+1}$  に対応して溶けたものとして減らす（式(13)）。

路面に流入する熱量  $q_u$  は通過車による影響は交通量が少ないことから無視できるとして式(14)によって与えた<sup>9), 10)</sup>。なお降積雪がない条件では、 $\beta_G, \beta_N$  は1で、 $M$  は0となる。

$$Q_{sw}^{p+1} = Q_{sw}^p + s(T_{ret}) Sw \Delta\tau \quad (4)$$

$$Q_s^{p+1} = Q_s^p + s(T_{ret}) Sw L_s \Delta\tau \quad (5)$$

$$Q_{water}^{p+1} = Q_{water}^p + Sw \Delta\tau \quad (6)$$

$$\text{ただし } Q_{water}^{p+1} \leq Q_{water\ max} \quad (7)$$

$Q_s^{p+1} > 0$ （降積雪時）では

$$Q_s^{p+1} = Q_s^{p+1} - \{(1 - \beta_G) G(1 - \alpha_s) + (1 - \beta_N) \cdot Ns + Hs + Es + Rs - M\} \quad (8)$$

$$Hr = Er = Rr = 0 \quad (9)$$

$$T_{y=0} > 0 \text{ では } M = (0 - T_{y=0})h \quad (10)$$

$$T_{y=0} \leq 0 \text{ では } M = (T_{snor} - T_{y=0}) k_s / (2 Q_{sw}^p / \rho_s) \quad (11)$$

$Q_s^{p+1} > Q_{sw}^{p+1} L_s$  では

$$T_{snor} = -(Q_s^{p+1} - Q_{sw}^{p+1} L_s) / (C_s \rho_s) \quad (12)$$

$$Q_s^{p+1} \leq Q_{sw}^{p+1} L_s \text{ では } T_{snor} = 0, Q_{sw}^{p+1} = Q_s^{p+1} / L_s \quad (13)$$

$Q_s^{p+1} = 0$ （無降雪かつ無積雪時）では

$$q_u = \beta_G G(1 - \alpha_r) + \beta_N Nr + Hr + Er + Rr \quad (14)$$

ここに、 $Q_s^{p+1}$  は  $(P+1)$  時刻での積み上げられた積雪必要融解熱量  $Q_{sw}^{p+1}$  は積み上げられた積雪の重量  $Sw$  は降雪を含む降水重量、 $L_s$  は降雪重量当たり必要融解熱量、 $C_s$  は氷の熱容量  $k_s$  は積雪の熱伝導率である。積雪密度は福井の最頻値  $0.1g/cm^3$  を用いた<sup>11)</sup>。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。 $\rho_s$  は路面上の積雪密度を示す。なお、 $T_{snor}$  は積雪の平均温度であるが、雪の断熱性からかなりの寒冷地では上層面と下層面で温度差が生じることを考慮しない当該式はそのまま使えない。

顕熱  $H$  については、ユルゲスの式(15)<sup>12)</sup> を用いて見積もった。

路面水分量  $Q_{water}^{p+1}$  と路面温度からは、結露量と路面すべり摩擦係数の実験式<sup>13)</sup> を用いて路面のすべり摩擦係数を推測することができる。

大気との正味の長波長放射は、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>14)</sup>。ここでは、代表的な一つである山本・Brunt の式(16)を用いた。

$$Nr = \varepsilon_r (1 - n \cdot K) [\sigma T_r^4 - \sigma T_\infty^4 \cdot \{0.51 + 0.066 \cdot e^{1/2}\}] \quad (16)$$

ここに、 $\varepsilon_r$  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]、 $e$  は地表付近の空気の水蒸気圧[hPa]である。 $Ns$  は上記の路面に対する式の中で  $\varepsilon_r, T_r$  を積雪に置き換える。雲の種類による係数は、Sellersのものを用いた<sup>15)</sup>。

雪を除く降水による熱伝導  $R$  は雨水の水温が湿球温度  $T_{wet}$  に等しく<sup>16)</sup>、その水温は路面表面温度もしくは積雪温度にまで至るとした。

床版下面からの流入熱量については、河川水との正味の長波長放射  $N_1$ 、下面空気からの顕熱熱移動  $H_1$ 、床版下の河川(地盤)から日射反射  $G \cdot (1 - \alpha_1) \cdot \alpha_{river}$  を考慮した式(17)で求めた。

$$q_1 = F_1 \cdot N_1 + F_1 \cdot G \cdot (1 - \alpha_1) \cdot \alpha_{river} + H_1 \quad (17)$$

$$N_1 = \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_{river}^4 - T_{s1}^4) \quad (18)$$

$$H_1 = (C_h + C_v \cdot S_{fin} \cdot \eta_{fin}) \cdot (T_{\infty} - T_{s1}) \quad (19)$$

ここに、 $T_{river}$  は床版下の河川水の温度[K]、 $T_{s1}$  は床版下表面温度[K]、 $T_{\infty}$  は床版下の気温[K]、 $\varepsilon_1$  は床版下面の放射率、 $F_1$  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>17)</sup>、 $\alpha_{river}$  は床版下の河川水のアルベドである。 $C_h$ 、 $C_v$  はそれぞれ床版とリブの空気との熱伝達率である。

形態係数  $F_1$  については、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。

主桁で囲まれた床版下とリブが周囲の空気から得る熱量は、現地観測で求めた熱伝達率を用いて計算した。

以上の計算にデータとして用いる雲量、雲の種別の係数、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る。福井地方気象台では、雲量と雲の種別は、21時から翌朝9時まで12時間観測されていないことから、この12時間を比例案分するという方法で計算した。

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>18)</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。

その他の定数や式の詳細については、文献<sup>12)</sup>を参照されたい。

### 3. 実測による数値シミュレーションの検証

計算は、降雪と放射冷却が繰り返された1996年2月20日16時から10日間について行った。図-2に、蓄熱材を封入しない開断面リブ鋼床版(図-1で蓄熱材を除いた断面)の舗装表面温度について、計算値と実測値を示した。

この図では、放射冷却で結露凍結となった21、25、29日の早朝の最低路面温度の計算と実測の差は、0.2℃以内であった。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℃で実測と計算は一致した。21日夜～22日朝と23日朝の降雪では、最低路面温度は計算と実測は異なったが、積雪状況

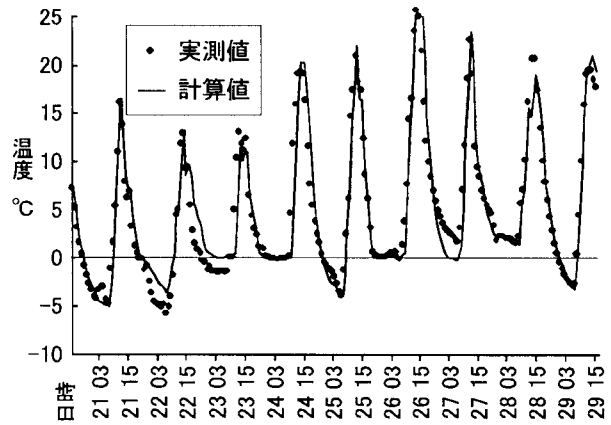


図-2 蓄熱材なし鋼床版橋路面温度の実測値と計算値

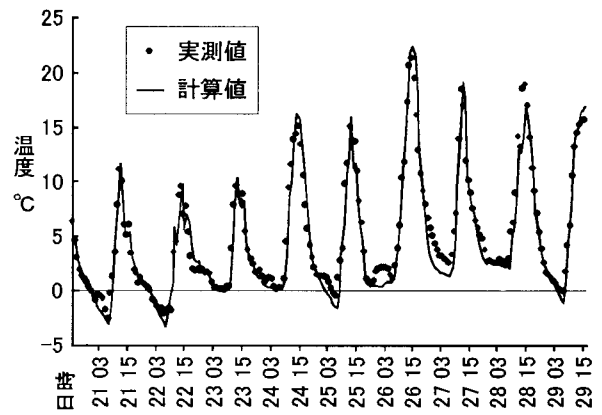


図-3 蓄熱材封入鋼床版橋路面温度の実測値と計算値

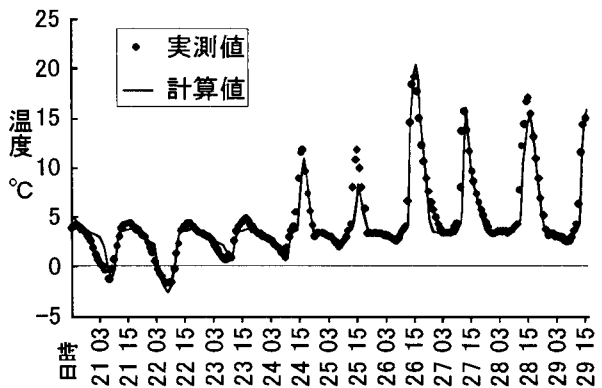


図-4 蓄熱材温度の実測値と計算値

は積雪で一致した。

蓄熱材封入鋼床版(図-1)の舗装表面の計算温度と実測温度を図-3に、その蓄熱材の温度を図-4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、計算と実測は一致している。

2月21日は夜に雪が降り始めたが、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(写真-2)。24日の朝は、わずかな積雪があるとの計算結果で、これも観測と一致している。

図-4から、蓄熱材が相変化を日サイクルで繰り返していること、凝固過程で蓄熱材がほぼ一定温度を保ち、路

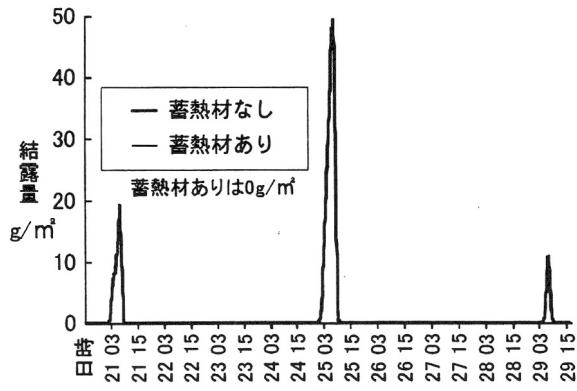


図-5 結露量の計算

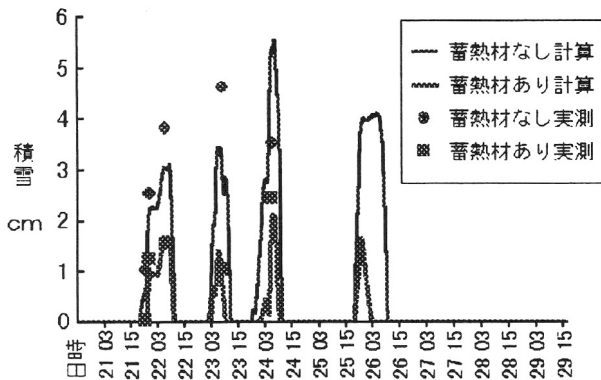


図-6 積雪深の計算値と実測値



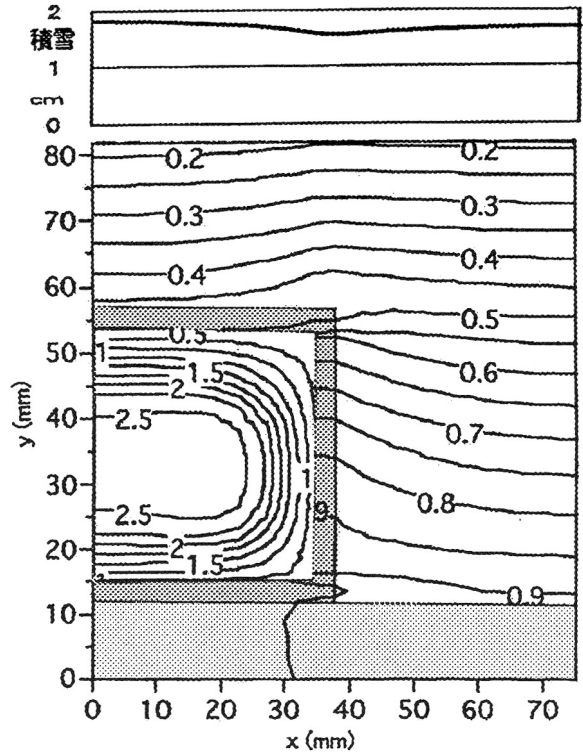
写真-2 2月21日 21時30分の積雪深状況

面の凍結を抑制していることが分かる。

路面上の結露量を図-5に示す。蓄熱材封入で結露が生じなくなることが分かる。なお、実験から結露量が $20\text{g}/\text{m}^2$ 以上になると路面のすべり抵抗は乾燥時の36%程度に低下することが分かっている<sup>19)</sup>。

図-6は、積雪深の実測と計算との比較で、計算値が実測値とほぼ一致すること、蓄熱材の積雪深さ減の効果が計算されることが分かる。

図-7に計算によって得られた蓄熱材が凝固する過程での等温線を示す。蓄熱材は、 $3.5^\circ\text{C}$ で固体になり始め、 $2.0^\circ\text{C}$ で完全な固体になるとして計算したが、蓄熱材は周囲部分から熱が奪われ、その部分が完全な固体になり、



等温線間隔: 鋼管内は $0.25^\circ\text{C}$ 、外は $0.1^\circ\text{C}$

図-7 潜熱蓄熱材、鋼管、舗装の温度場と積雪深

中心部では固体になりかけていることが分かる。パラフィン系蓄熱材は熱伝導率が舗装材や鋼管に比べそれぞれ1桁2桁以上小さいことから、蓄熱材内部の熱伝導は著しく少ない。したがって、蓄熱材内部の熱は舗装上面に近いところから主に奪われるのではなく、側面や底面の鋼板から奪われる。結果として、図-7に示すように、蓄熱材のほぼ中心部が高温部となる等温線となっている。蓄熱材からの熱は鋼管の底と鋼板を経ての熱伝導と鋼管側面からの熱伝導が重なることから、鋼管真上部の積雪より鋼管の角の部分の積雪が少なくなり、鋼管真上が最も積雪が多くなる図-7の積雪図のような現象が生じる。

以上、気象台の気象日原簿データを用いての本数値シミュレーションは、実測と一致することが分かる。

#### 4. 拡張アメダス気象データの利用

拡張アメダス気象データでは、アメダスが雲量を観測していないことから、日別日照率と日平均大気放射量の近藤純正らの相関式を時間別に適用した式(20)により大気放射量 $L_h$ を推定し、降雨時にはこれを補正している<sup>20)</sup>。さらに、日照時間データの得られない夜間については雲量の継続性から日没直前日の出直後を直線補完している。この大気放射量 $L_h$ を用いれば地表面での長波長放射は式(16)に代わる式(21)で得られる。

$$L_h = \sigma T_h^4 \{1 - (1 - L_{hf} / \sigma T_h^4) C_h\} \quad (20)$$

$$L_{hf} = (0.74 + 0.19(0.0315 TD_h - 0.1836) + 0.007(0.0315 TD_h - 0.1836)^2) \sigma T_h^4$$

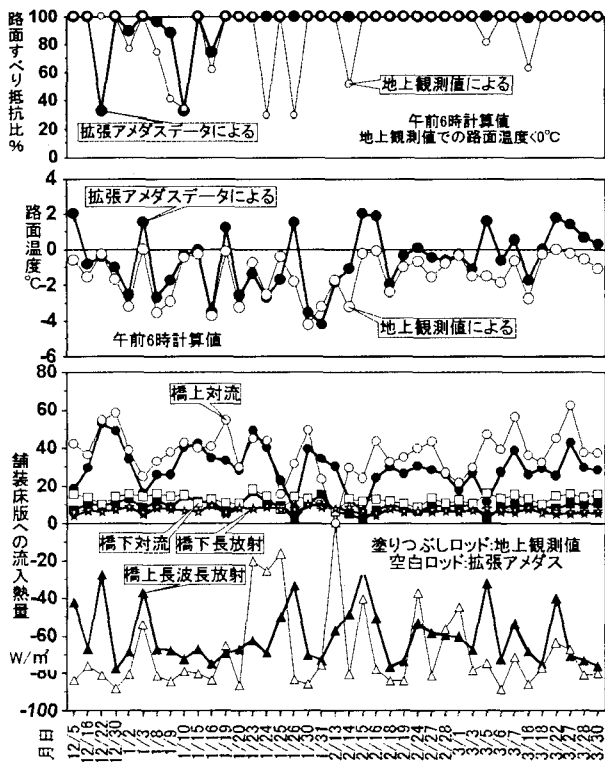


図-8 拡張アメダスデータ利用と地上観測値利用の結果比較

$$x = (0.0315 TD_h - 0.1836)$$

ここに、 $L_h$ は雲の影響を考慮した大気放射量で、 $L_{hf}$ は快晴時の大気放射量、 $C_h$ は雲の影響を表すファクターである。

$$Nr = \epsilon_r (\sigma T_r^4 - L_h) \quad (21)$$

日射量や湿度なども拡張アメダス気象データでは推定されているので、これらはそのまま計算に用いることができる。

この拡張アメダス気象データによる計算が地上観測値による計算とどの程度一致するかを調べた。雲や日射の観測が3時間ごとになされている大阪市を対象に、1993年12月1日から1994年3月31日まで、鋼床版橋Uリブを想定し、その路面表面温度を拡張アメダスと地上観測値で計算した。比較は、凍結の生じやすい午前6時について、地上観測値による計算舗装表面温度が0℃以下となった日時のみを選んで行った。その際の舗装と床版への流入熱量、舗装表面温度を図-8に示した。

拡張アメダス値を用いると地上観測値使用に比べ、路面温度は平均で約0.9℃ほど高くなる結果となった。床版舗装への流入熱量の図から、拡張アメダスデータからの長波長放射の推定は平均で8.5W/m²(拡張アメダスデータ推定長波長放射の14%相当)ほど地上観測値からの推定に比べ少ないことがその原因であることが分かる。なお、橋上の対流は、地上観測値の方が路面温度が低下するためかその流入量が拡張アメダスデータからの推定より大きいことが多く、両者の誤差を小さくするように作用している。拡張アメダスデータからの計算値と地上観測値

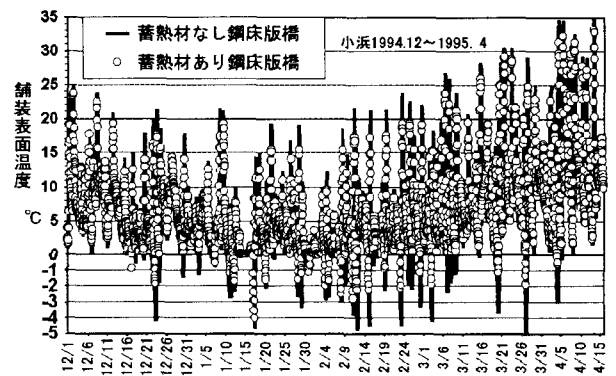


図-9 拡張アメダスデータ利用での鋼床版橋路面温度推定

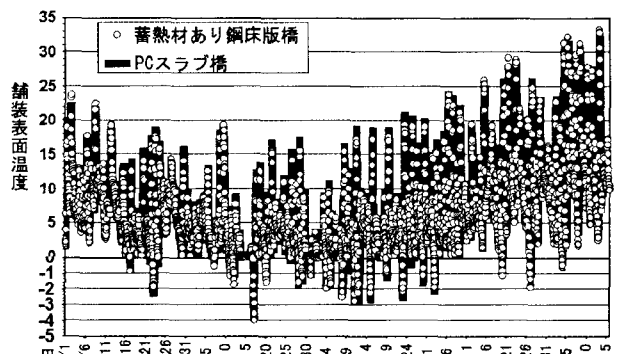


図-10 拡張アメダスデータ利用でのPCスラブ橋路面温度推定

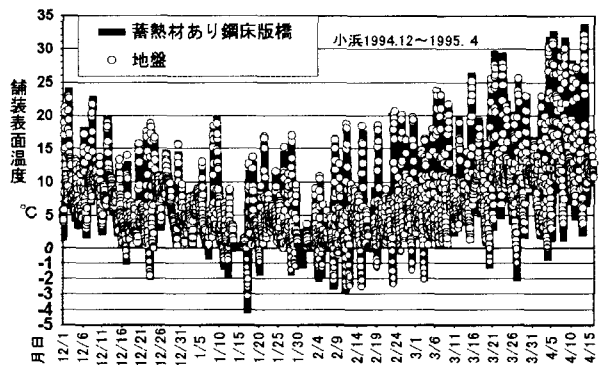


図-11 拡張アメダスデータ利用での地盤部路面温度推定

から計算値のいずれが正確なのかは、大気放射量なり路面実測温度がないことから分からない。広島についても、同じような比較を行ったが、ほぼ同じ結果となった。したがって、現状では拡張アメダスを利用すると1℃ほどは危険側の推測になる可能性のあることを念頭におくなり、14%ほど長波長放射を増やして見積もるなどを要する。

最終的に問題になる結露凍結による路面のすべり抵抗値BPN (British Pendulum Number) の低下について、筆者らは路面の結露量と路面のすべりの関係式を実験で求めている<sup>19)</sup>。結露凍結量は露点(水蒸気圧)と路面温度の差が問題になり、1℃の温度差は大きい。さらに、水蒸気圧データが、地上観測値と拡張アメダスデータでは異なる。そこで、最終的に問題になる路面すべり抵抗比(乾燥時100%)を両方のデータで計算し結果を図-8に示した。期間中の結露による路面すべり抵抗の低下は、地上

観測値では10回となるが、拡張アメダスデータでは6回であった。

以上から、数タイプの橋梁凍結の比較を目的に、その路面温度の相対的な差を見るならば、拡張アメダス値を用いても同じ大気放射量の値を用いるので問題はないと思われる。そこで、福井県高浜町で計画されている橋梁について、拡張アメダスデータを用いて計算を行った。この橋梁部は、JR跨線橋区間が鋼床版橋で、他はPCスラブ橋となっている。そこで、Uリブ鋼床版橋、それにパラフィン系潜熱蓄熱材を封入した鋼床版橋、PCスラブ、地盤部の4種類について、同地点から最も近い小浜観測点のデータを用いて1シーズン計算した。

なお、蓄熱材なし鋼床版橋の路面積雪が午前5時に10cm以上であれば機械除雪で路面上の雪は一旦0cmにするとした。そして、その除雪の有無をデータに保存して、蓄熱材封入やPCスラブの計算の際に、それを読み込んで同じ除雪で一旦積雪が一掃されるという計算を行った。

図-9から蓄熱材によって0℃以下での鋼床版橋の0℃以下の路面温度が最大で3℃上昇することが分かる。その蓄熱材による温度上昇効果が0.5℃と少ない1月17日は、前日昼の路面温度が最高で約1℃ほどと蓄熱材が液化できない条件である。このような日はPCスラブや地盤部でも前日昼に熱を貯めにくい、スラブ橋、地盤部では深部に蓄えた熱があるため、からそれぞれ蓄熱材封入より、3.6℃、0.9℃高くなっている(図-10、図-11)。しかし、このような例は少なく、総じて図-9～図-11から、蓄熱材封入工法によって鋼床版路面はPCスラブや地盤部なみの凍結に抑制されていることが分かる。そのことで時間的・空間的な路面の変化で生じる交通事故は回避されると推測される。

## 5. おわりに

地方気象台の時刻ごとの地上観測値を読み込んだ熱収支に基づく本数値シミュレーションの結果は、鋼床版橋とそれに蓄熱材封入した床版の10日間、その路面温度と積雪深の両方について実測値と一致した。また、路面上の結露凍結量を計算推測できた。

大気放射量などの拡張アメダス気象データを読み込んだ大阪での1シーズンの計算結果は、凍結時で地上観測値に比べ平均約1℃高温になる誤差であった。道路管理上は危険側の予測で結露凍結量や路面のすべり抵抗の推定には難点があるが、かなりの精度であることから、各種の床版橋や地盤部の路面温度の相对比较には使える。

蓄熱材を封入した鋼床版については、移動荷重試験などの研究から今日では薄層合成床版と呼ぶことが適切であるが、本稿では蓄熱材封入鋼床版とした。

本研究の一部は、科学振興事業団の独創的研究成果育成事業でなされた。記して謝辞とする。また事業の共同研究者であった大阪大学松井繁之教授、大阪工業大学堀

川都志雄教授には、励ましと助言をいただいていた。鹿児島大学赤坂裕教授、曾我和弘博士、長岡造形大学二宮秀與助教授には拡張アメダスデータに関して助言を得た。記して謝辞とする。

## 参考文献

- 1) 森谷俊美, 金子正猪: 路面温度予測システム, 本四技報, Vol. 15, No. 57, p. 14-17, 1991
- 2) 宮本重信, 室田正雄: 鋼床版橋の路面凍結と蓄熱材封入による抑制, 第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集pp. 247-252, 1998
- 3) 菅谷博: 寒候期降水中の雨・雪の判別(その3) - 湿球温度による推定, 平成3年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, pp. 41, 1991
- 4) 山崎剛: 厳寒地に適用可能な積雪多層熱収支モデル, 日本雪氷学会誌雪氷第60巻2号, pp. 134, 1998. 3
- 5) 小島賢治: 融雪機構と熱収支, 気象研究ノート第136号融雪・なだれ特集, pp. 12, 1979. 3
- 6) J.E. Thornes: A preliminary performance and benefit analysis of the UK national road ice prediction system, The Meteorological Magazine, vol. 118, No. 140 2, pp. 24-25, 1992
- 7) 渡辺俊行: 住宅の採涼設計, 住宅のパッシブクーリング(浦野良美編著), pp. 87, 1991
- 8) 小島賢治: 融雪機構と熱収支, 気象研究ノート第136号融雪・なだれ特集, pp. 27, 1979. 3
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 山田穰: 日本海沿岸22都市における新積雪密度の度数分布と平均値について, 防災科学技術研究所報告第52号, p. 51~67, 1993年12月
- 12) 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. 6
- 13) 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回年次学術講演会IV部, pp. 748-749, 1995. 9
- 14) 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
- 15) Sellers, W. D.: Physical Climatology, University of Chicago Press, pp. 58, 1965
- 16) 小島賢治: 融雪機構と熱収支, 気象研究ノート第136号融雪・なだれ特集, pp. 12, 1979. 3
- 17) 相原利男: 伝熱工学, 裳華房, pp. 26, 1994
- 18) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 丸善(株), p. 258-268, 1997
- 19) 宮本重信, 室田正雄, 飯塚敏樹: 橋面の路温・結露量・すべり抵抗の数値シミュレーションによる予測, 第16回日本雪工学会大会論文集, 1999
- 20) 赤坂裕, 二宮秀與, 松本真一, 曾我和弘, 永村一雄, 三木信博, 永村悦子, 武政孝治: 拡張アメダス気象データ, 日本建築学会, pp. 313-317, 2000