橋梁道路における霜の発生に及ぼす 橋梁微気象の影響とすべり抵抗

Hoarfrost Phenomenon on Bridge Road Controlled by Micrometeorology over Bridge and Skid Friction Resistance

渡邊 洋^{*1}・木曾 忠幸^{*2}

Hiroshi Watanabe Tadayuki Kiso

福原 輝幸^{*3}

Teruyuki Fukuhara

SYNOPSIS

This paper presents an attempt to evaluate the skid friction resistance associated with an amount of hoarfrost on the bridge road surface. This phenomenon is described by heat and moisture transfer between bridge road and atmosphere, which considered micrometeorological properties. Field surveys and indoor experiments are carried out in order to estimate the beginning time of the hoarfrost and the time variation of the skid friction resistance using a mathematical model developed by authors. The intimate relationship of both the skid friction resistance and the variation of micrometeorology were evaluated by the sensitively numerical computing based on this model.

Keywords : bridge road, hoarfrost, heat and moisture transfer, micrometeorology, skid friction resistance

1. はじめに

近年は平野部における降雪量の減少を背景として、放射冷却現象に起因した路面凍結型の道路雪氷災害が増加傾向にある。それに伴い、冬期道路の維持管理者は、凍結防止剤散布時期の決定や散布量の低減などの困難な課題に直面している。特に、橋梁道路では地盤からの熱供給がないことに加えて、大気気象の局所的な変化に起因した熱・水分輸送現象が生じる¹⁾。例えば、霧が発生した後の結露水の凍結(以下、結露凍結と呼称)、大気中水蒸気の昇華および凝結に伴う霜の発生が挙げられる^{2~6)}。結露凍結路面(路面で氷板や氷膜を形成)および霜路面(白色の結晶が路面に析出)は積雪や降雪に比較して、

夜間では視認性が悪く、大きな交通事故を誘発し易い。また、コンクリート床版橋に比べ、鋼床版橋で発生し易く⁷⁾、早急な対策が望まれる。しかしながら、霜が大気と路面との間の熱・水分輸送に起因して生じるにも関わらず、橋梁道路の局所的な微気象特性を捉えたデータは少ない。このことから、橋梁道路における霜の発生メカニズム、霜付着量の増加に伴って低下する霜路面のすべり抵抗の変化およびその危険性について、依然として不明な点も多く、対策手法の確立をさらに難しくさせている。

本研究では室内実験、実橋梁道路における微気象観測および道路温度計測より霜の発生メカニズムを解明し、それらの成果から独自に霜付着量算定モデ

本研究の一部は、1997年土木学会水理講演会にて発表された。

* 1 工博

* 2 積水プラントシステム株式会社 工修

* 3 福井大学工学部建築建設工学科 工博

[本稿受理: 1999年9月21日, 修正原稿受理: 2000年1月21日, 討論期限: 2001年3月31日]

ルを構築した。また、同モデルを用いた数値解析により、微気象特性の変化が霜路面の危険性に及ぼす影響について検討を行った。

2. 熱エネルギー収支モデルによる橋梁道路の伝熱解析と霜付着量算定モデル

(1) 伝熱解析

橋梁道路内部では以下の熱伝導方程式が成り立つ。

$$(\rho c) \partial T / \partial t = \nabla (\lambda \nabla T) \quad (1)$$

ここに、 (ρc) ：橋梁道路の体積熱容量、 T ：温度、 t ：時間、 λ ：熱伝導率、 ∇ ：微分演算子、である。ここで、アスファルト舗装体部と鋼床版部との間の熱伝導率は、両者を空間的に平均した調和平均熱伝導率を適用する。

なお、本研究における伝熱解析は積分有限差分法により解かれる⁹⁾。

(2) 橋梁道路と大気との間の熱・水分移動

橋梁道路と大気との間の熱エネルギー収支は、図-1に示す概念図で表される。ここで、熱エネルギー収支モデルは均一な厚さの鋼床版上にアスファルト舗装体が存在するような単純化された形状とし、縦桁および横桁による複雑な橋梁下部構造の熱的影響は無視される。よって、同図に従えば橋梁道路上面および下面における境界要素の単位体積当たりの内部熱エネルギーを $U(=(\rho c)T)$ とすると、そのエネルギー収支は次式で与えられる。すなわち、

$$(\partial U / \partial t) dV = (G + R_G - R_F + R_S - R_U + R_R - R_B + L_C - L_E - S) dA \quad (2)$$

ここに、 dV ：微少境界要素の体積、 dA ：鉛直軸に直交する微少境界要素の面積、である。さらに、 G ：橋梁内部の熱伝導エネルギー（式(1)の右辺第1項）、 R_G ：太陽からの短波放射エネルギー、 R_F ：路面におけるその反射成分、 R_S ：天空放射エネルギー、 R_U ：路面放射エネルギー、 R_R ：河川からの橋梁道路下面へ入射する放射エネルギー、 R_B ：橋梁道路下面の放射エネルギー、 L_E ：水蒸気の蒸発に伴うエネルギー、 L_C ：昇華に伴うエネルギー、 S ：空気移動による顕熱、である。

よって、橋梁道路の凍結現象はこれらの熱エネルギー成分の収支により支配される。

(3) 霜の発生条件と昇華フラックス密度

橋梁道路の表面温度 T_{sur} が露点温度以下に冷却される時、橋梁道路表面極近傍に存在する水蒸気は、飽和した後に橋梁道路表面で結露する。ここで T_{sur} が氷点 (0°C と仮定) より低ければ、霜が生じる。また、これまでの著者らの観測では、霜は夜間放射冷却の卓越した無風条件下で生じ、橋梁道路表面近傍の大気においては水蒸気密度境界層の形成（境界層厚さは2~3cm）が確認されている^{4, 6, 9)}。よって、霜の発生を支配する条件式は、式(3)のように定義される。すなわち、

$$\rho_{v(air)} > \rho_{v(sur)} \text{ and } T_{sur} < 0^\circ\text{C} \quad (3)$$

ここに、 $\rho_{v(sur)}$ ： T_{sur} に対する飽和水蒸気密度、 $\rho_{v(air)}$ ：橋梁道路上の境界層上縁における気温 T_{air} および相対湿度 RH_{air} から算出される境界層上縁の

図-1 橋梁道路における熱エネルギー収支の概念図

水蒸気密度¹⁰⁾、である。

また、式(3)を満足する微気象条件下において、単位時間、単位面積当たりに橋梁道路表面へ付着する霜の質量、すなわち昇華フラックス密度 M_c は、以下のようなバルク式¹¹⁾によって算出される。

$$M_c = \alpha_e (\rho_{v(air)} - \rho_{v(sur)}) \quad (4)$$

ここに、 α_e ：昇華バルク係数（昇華時の水蒸気伝達係数）、である。なお、 α_e の適用範囲は霜の発生時、すなわち、無風に近い夜間晴天時であるために、 α_e に及ぼす風速の影響は小さいと考える。

3. 霜付着量室内実験、橋梁道路における微気象観測および橋梁道路温度計測

(1) 霜付着量室内実験の概要

霜付着量室内実験の目的は、飽和状態にある水蒸気が、0℃以下に冷却されたアスファルト舗装体表面に凝結、あるいは昇華する際の霜付着量の算定、昇華バルク係数の決定および霜付着量に対するアスファルト舗装体表面のすべり抵抗値の測定にある。なお、本室内実験の詳細は参考文献4)および9)を参照されたい。

(2) 昇華バルク係数

霜は無風に近い夜間晴天時に発生することが多い。よって、昇華バルク係数 α_e は、大気の実定性的指標となる $(T_{ar} - T_{sur})$ を用いて、室内実験から経験的に次式で与えられる^{4,9)}。すなわち、

$$\alpha_e = 1.1 \times 10^{-3} \exp \{-0.16(T_{ar} - T_{sur})\} \quad (5)$$

これより、 α_e は $(T_{ar} - T_{sur})$ が大きくなる（大気の実定性が増す）につれて減少する。

(3) すべり抵抗

単位面積当りの霜付着量 Q_c とすべり抵抗値 BPN の関係は室内実験より式(6a)および式(6b)で与えられる^{4,9)}。

$$BPN = 97.3 - 1.67 \times 10^4 Q_c + 8.83 \times 10^5 Q_c^2 \quad (6a)$$
$$(Q_c \leq 0.01 \text{ kg/m}^2)$$

$$BPN = 20 \quad (6b)$$
$$(Q_c > 0.01 \text{ kg/m}^2)$$

上式により、霜付着量 Q_c に対する霜路面のすべり

抵抗値 BPN が算出される。ここで、式(6b)の BPN は氷板のすべり抵抗値に相当し、 BPN および BPN から換算されるすべり摩擦係数 μ の変化は、計測時の車両の走行速度および測定対象となる路面の温度に依存する^{12,13)}。よって、本論では式(6a)および式(6b)の適用範囲を、路面温度においては氷点以下の条件を、車両の走行速度においては40km/h程度の条件を、それぞれ適用した。なお、 BPN から μ への換算法については参考文献12)を参照されたい。

4. 微気象観測および橋梁道路温度計測

(1) 橋梁道路における微気象観測および橋梁道路温度計測の方法と観測装置

橋梁道路における微気象観測および温度計測は、放射冷却が卓越する夜間を見計らって、福井市内の河川に架かる鋼床版橋（長さ約140m、幅約13mの片側1車線道路）へ微気象観測機器を運搬し、それらを同橋の中央付近の車道端部に設置して行われた。なお、表-2には観測項目別に測器名、観測位置および製造元の詳細を示す。また、霜路面のすべり抵抗値（すべり抵抗測定器で得られる BPN ）の測定も、これらの観測と並行して行われ、後述の橋梁道路における路面状態の危険性が評価された。さらに、橋梁を構成する材料の熱物性値は表-3に示した通りの手法で計測、もしくは算出した。

(2) 橋梁道路における熱エネルギー収支の特性

これまで筆者らは1993年より毎年数回程度の微気象観測を継続している^{3,4,6,9)}。ここでは、1996年1月13日の観測結果を紹介するが、他の観測においても定性的傾向は酷似する結果を得ている。

図-2に同日午前1時から翌日午前0時に亘る、橋梁道路上1mの気温 T_{ar} (○) および路面下0.01mにおける橋梁道路温度 T_{sur} (□) の経時変化を示す。また、図中には福井地方気象台観測の気温 T_{met} (▲) も併示する。まず、 T_{met} および T_{ar} の経時変化に注目すると、深夜から早朝にかけて T_{met} より T_{ar} の方で温度は低い。一方、昼間は両者の関係は逆転し、 T_{met} より T_{ar} の方で温度が高くなる。

次に、 T_{sur} および T_{ar} の関係に注目すると、夜間

表－２ 観測機器一覧

観測項目	測器名	観測位置	製造元
橋梁道路の温度	T型熱電対	路面下 0.01, 0.03, 0.05, 0.07m	山里産業(株)
橋梁道路上の気温	T型熱電対	路面上 0.005, 0.01, 0.03, 0.05, 0.08m	山里産業(株)
河川水温	T型熱電対	橋梁直下の河川中央部	山里産業(株)
橋梁道路上の相対湿度	温湿度センサー	路面上 0.005, 0.01, 0.03, 0.045m	ヴァイサラ(株)
橋梁道路上の風速	微風速計	路面上 0.05m	カノマックス(株)
天空放射量	赤外放射計	橋梁道路中央付近の車道端部	英弘精機(株)
道路面のすべり抵抗値	すべり抵抗測定器	橋梁道路中央付近の車道端部	(株)マクロス

表－３ 橋梁道路を構成する材料の熱物性値と計測，算出方法

項目	値	単位	計測，算出手法
アスファルト舗装体の熱伝導率	1.4	w/mK	京都電子工業(株)製造の Kemtherm QTM-D3 迅速熱伝導率計により，現場橋梁道路で実測した
アスファルト舗装体の体積熱容量	1909.2	kJ/m³K	使用骨材の類似した実験用試料から室内実験により比熱および比重を計測した
鋼床版の熱伝導率	61.6	w/mK	実橋梁の設計図面より，同等の試料(SS-41)を準備し，上記の熱伝導率計で計測した
鋼床版の体積熱容量	3617.4	kJ/m³K	実橋梁の設計図面より，使用鋼材の炭素含有量(0.218%)を調査し，参考文献(14)より換算した

図－２ 福井地方気象台の気温，橋梁道路上の気温および舗装体表面温度の経時変化

図－３ 橋梁道路表層における熱エネルギー収支成分の経時変化

では T_{sur} が T_{air} に比較して，相対的に低い傾向にある。特に，午前２時以降は T_{sur} と T_{air} はともに氷点下に達し，この状態は午前９時まで継続する。 T_{sur} ， T_{air} および T_{met} における最低温度は，いずれも午前７時頃に観測され， T_{met} で -2.3°C を， T_{air} で -3.4°C を， T_{sur} で -3.6°C を，それぞれ記録した。これより，夜間において橋梁道路上の気温は気象台のそれよりも低く，橋梁道路温度は橋梁道路上の気温よりも低下し易いことが知れる。これは橋梁道路の構造および微気象特性に起因し，橋梁道路における路面

凍結発生頻度の高さとその危険性を示唆するものである。なお，午前１０時以降の橋梁道路温度 T_{sur} は，日射の影響を受けて急激な温度上昇を示し，その程度は T_{air} および T_{met} に比較して大きい。

図－３に微気象観測結果を用いて計算された橋梁道路表層における熱エネルギー収支の経時変化を示す。なお，昇華に伴う潜熱エネルギー L_c は微小な量であり，また水蒸気の蒸発に伴うエネルギー L_E は路面が乾燥状態であったため，ここでは省略される。さらに，図中で正の熱エネルギーフラックスは

橋梁道路上面への熱エネルギー供給（橋梁道路表層の温度上昇に貢献）を、負のそれは熱エネルギー損失（橋梁道路表層の温度低下に貢献）を、それぞれ意味する。まず、純長波放射エネルギー R_{NET} （天空放射エネルギー R_S と路面放射エネルギー R_U との差）および熱伝導エネルギー G の経時変化に注目すると、観測期間中 R_{NET} は常に負の値を、一方、 G は常に正の値を記録し、両者の絶対値は時間の経過とともに緩やかに小さくなる。また、顕熱 S は、観測期間を通じて無視できる程度に小さい。さらに、橋梁道路表層における微少要素の上面を横切

る熱エネルギーフラックス $\partial U / \partial t (dV/dA)$ （同図右軸参照）は、観測期間を通じて常に負であり、時間の経過とともに大きくなる。しかしながら、その絶対値は他の成分に比べて充分小さいことから、静穏な夜間晴天時の橋梁道路における熱的挙動は G および R_{NET} で規定されることが知れる。すなわち、橋梁道路表層における熱エネルギー収支は R_{NET} によるエネルギー損失を補うように G が作用し、 G の大きさおよびその作用時間が霜の発生に大きな影響を及ぼす。

図-4 橋梁道路温度および橋梁道路上における気温の鉛直分布の経時変化

図-5 橋梁道路温度および橋梁道路上における水蒸気密度の鉛直分布の経時変化

(3) 橋梁道路上の気温および水蒸気密度の鉛直分布

図-4に午前1時から午前8時（最低気温の出現より約1時間経過後）に亘る橋梁道路温度および橋梁道路上気温の鉛直分布の経時変化を、それぞれ示す（図中には実線で計算値も併示される）。同図より、午前1時から午前7時において、橋梁道路温度および橋梁道路上の気温は、ともに道路表面に向かうにつれて低下することが判る。また、その温度低下は午前4時以降で明確となる。さらに、 T_{air} （橋梁道路上0.05mの気温）および T_{sur} （路面下0.01mにおける橋梁道路温度）に注目すると、午前2時以降では T_{air} および T_{sur} ともに氷点下に達していることが判る。なお、橋梁道路温度および橋梁道路上気温の鉛直分布は午前9時であっても全域で氷点下にあり、午前10時でようやく気温の分布は正值を記録した。また、計算値と観測値との適合は良好であり、本計算モデルの妥当性が示唆される。

図-5に1月13日における橋梁道路上の水蒸気密度鉛直分布の経時変化を示す。なお、同図には1月13日の観測結果（○）に比較して、鉛直方向の水蒸気密度勾配の変化がより明瞭に観察された1994年12月23日の観測結果（●）も参考のために併示する（12月23日の0.045mおよび1月13日午前1時の ρ_v は欠測）。まず、12月の観測結果（●）に注目すると、午前1時の ρ_v は鉛直方向にほぼ一様に分布する。しかしながら、午前2時以降から ρ_v の鉛直方向の勾配は正となり、この状態は午前8時まで続く。従って、この間では橋梁道路表面上の水蒸気密度の状態は $\rho_{v(air)} > \rho_{v(sur)}$ の関係を満足することが知れる。加えて、ここでは示していないが、実測データでは同日午前2時以降で橋梁道路表面温度 T_{sur} は氷点下にあったことから、式(3)の霜の発生条件が満たされたことになる。

一方、1月13日午前2時の結果（○）において、同図の観測結果のみで明確に霜の発生時刻を判定するのは困難である。しかしながら、午前5時以降では、 $\rho_{v(air)} > \rho_{v(sur)}$ の関係は明瞭であり、加えて、先述の図-4より、橋梁道路表面温度 T_{sur} も氷点下にあることから、霜の発生が知れる。これら両日の霜発生時刻は、筆者らの目視による霜の認知時刻

（12月23日の観測では午前3時頃に、一方、1月13日の観測では午前5時頃）とほぼ一致する。

(4) 橋梁道路上の霜付着量とすべり摩擦係数の評価
微気象観測における霜発生の判定から、その発生時刻および継続時間を概ね判断することができた。次に、伝熱解析モデルおよび室内実験で得た霜付着量算定モデルを実際の橋梁道路に適用し、道路表面のすべり抵抗値を用いて、霜路面の危険性を評価する。ここでは伝熱解析で得た路面温度結果を基に霜発生の判定を行い、すべり摩擦係数 μ を算出する。

図-6に1996年1月13日における先述のBPNから換算されたすべり摩擦係数 μ （実線）の経時変化を示す。また、同日の観測では、すべり抵抗測定器によって実測されたBPNから換算した μ （○）も併示する。ただし、 μ とBPNの関係は、原則的に式(6a)および式(6b)で示したBPNと Q_c の関係を基に算出するが、実測された乾燥路面のBPNは室内実験でのそれと異なるために、実測値（図中午前1時および午前2時の○印）を用いた。よって、午前2時以降においては、実橋梁道路上でも室内実験と同じBPNを示すと仮定する。同図より、 μ の換算値の減少過程に注目すると、午前3時前後に μ の低下が見受けられ、午前5～7時の間で急激に低下する。ここで、一般道路で期待される μ の値（ >0.3 ）¹²⁾に配慮すれば、同日における路面状態の危険性の高さが理解できる。また、 μ の実測値（○）と霜付着量算定モデルによる計算値（実線）を比較

図-6 橋梁道路表面のすべり摩擦係数の経時変化

表－４ 天空放射量 R_s を用いた感度解析実験条件

	条件	R_s の範囲
Obs.	$R_{s(Obs.)}$ (1月13日実測値)	0.257 ～ 0.269 kW/m ²
CASE1a	$R_{s(Obs.)}$ を基に 10% 減少	0.231 ～ 0.242 kW/m ²
CASE2a	$R_{s(Obs.)}$ を基に 5% 減少	0.244 ～ 0.256 kW/m ²
CASE3a	$R_{s(Obs.)}$ を基に 2% 減少	0.252 ～ 0.264 kW/m ²
CASE4a	$R_{s(Obs.)}$ を基に 2% 増加	0.262 ～ 0.274 kW/m ²
CASE5a	$R_{s(Obs.)}$ を基に 5% 増加	0.270 ～ 0.282 kW/m ²

図－７ CASE1a～5a における天空放射量の経時変化

図－８ 天空放射量を用いた感度解析における橋梁道路のすべり摩擦係数の経時変化

すると、霜発生初期から午前5時頃までで、両者の値に僅かながら違いが生じていることが判る。これは、室内実験で使用したアスファルト舗装体に比べ、実際の橋梁道路表面は凹凸が大きく、粗度状態に差異があることに加え、本観測で使用したすべり抵抗測定器における観測精度の限界に起因すると考えられる。特に後者に関して、測定器の設置時に道路の表面状態の完全な保全が困難なこと、霜発生初期におけるすべり抵抗値の僅かな変化を感知し難いことおよび個人観測誤差が挙げられ、今後の研究で検討すべき課題である。しかしながら、 μ の実測値(○)と霜付着量算定モデルによる計算値 μ (実線)において、両者の時間的な減少過程に著しい差が見受けられないことから、本論で示す橋梁道路における霜付着量算定モデルの妥当性が示唆される。

5. 霜路面に及ぼす気象因子の感度解析

ここでは霜付着量算定モデルによる感度解析結果について述べる。先述した橋梁道路の微気象特性から、その気象条件の変化は橋梁道路と大気との間の熱・水分輸送特性に大きな影響を及ぼすと考えられる。よって、ここでは天空放射量および気温の変化が霜の発生、さらには橋梁道路のすべり摩擦係数に及ぼす影響について、先述の1996年1月13日の実測結果および気象データを基に、感度解析より明らかにする。

(1) 夜間の大気放射量の影響

先述の図－3では、夜間の橋梁道路における熱的な挙動に対し、天空放射量が熱エネルギー収支の主要な成分であることを示した。ここでは、さらに天空放射量の変化が霜の発生および道路のすべり摩擦係数に及ぼす影響について述べる。

図－7に1996年1月13日に実測された天空放射量

図-9 霜発生時間の実測値と計算値の比較

$R_{s(Obs.)}$ (●) および感度解析に用いる天空放射量 (CASE1a~5a) の経時変化を、それぞれ示す。ここで、CASE1a~5aにおける解析条件は表-4に示す通りであり、実測された天空放射量 $R_{s(Obs.)}$ のレベル (同日午前1時から午前8時まで $0.257 \sim 0.269 \text{ kW/m}^2$ の範囲にある) を基に、 -10% 、 -5% 、 -2% 、 $+2\%$ および $+5\%$ と変化させたケースを、それぞれ CASE1a~5a とする。また、同表には各ケースにおける R_s の範囲も、それぞれ併示した。さらに、橋梁道路内部温度の初期値および天空放射量以外の気象条件 (気温、相対湿度、風速、短波放射量および河川水温) は、それぞれ15分毎に計測された実測値を使用する。なお、数値計算は1996年1月13日午前1時から開始し、同日午前8時までとする。

図-8にCASE1a~5aにおける橋梁道路のすべり摩擦係数 μ の経時変化を示す。また、同図には実測の BPN から換算された μ (●) も併示される。まず、CASE1a~CASE3aにおける μ の低下開始時刻は、CASE1a (○)、CASE2a (△)、CASE3a (□) の順に、それぞれ午前1時15分、午前1時25分、午前1時50分、となる。また、CASE1a (○) では午前7時頃に、CASE2a (△) では午前8時頃に、 μ は氷板と同程度の値となり、CASE3a (□) においても最終的に氷板の路面状態に近づく。一方、CASE4a (▽) および CASE5a (×) においては、前者で午前2時30分頃に、後者で午前4時20分頃に、それぞれ霜が発生する。両者の午前8時における μ の最小値 μ_{Min} は、前者 (▽) で0.7程度、後者 (×) で0.8程度にある。従って、CASE5aについては霜

図-10 すべり摩擦係数の最小値の実測値と計算値の比較

発生心配はないと思われる。

図-9に長波放射量 R_s の実測値 $R_{s(Obs.)}$ を基準に、 $-10 \sim +10\%$ の範囲で R_s を増減させた時の霜発生時間 t_F を示す。なお、計算された霜発生時間は実測の霜発生時間を基準時間 ($t_F=0$) として表現している。同図より、 R_s が小さくなるとともに霜発生時間 (○) は早くなる。一方、 R_s が大きくなるとともに霜発生時間は遅くなるが、それは $+5\%$ (前述の Case5a) を越えた場合に顕著となる。

図-10に各ケースの午前8時におけるすべり摩擦係数の最小値 μ_{Min} を示す。 R_s と μ_{Min} はS字型の分布を呈し、 μ_{Min} は R_s の増加とともに大きくなる。ここで、前述の図-9において R_s の増加率が $4\% \sim 6\%$ の間で霜発生時間は5時間程度遅延されているが、 μ_{Min} は0.78から0.81の範囲にあり、その変化は小さい。よって、霜発生時間の遅延は必ずしも路面のすべり摩擦係数の増大に結びつくとは限らないことが示唆される。

(2) 夜間気温の影響

ここでは橋梁道路周辺の気温変化が、霜の発生および道路のすべり摩擦係数に及ぼす影響について述べる。

表-5に夜間の気温の影響を調べるために設定した解析条件 (CASE1b~5b) を示す。なお、同表には各ケースにおける T_{air} および RH_{air} の範囲も、それぞれ併示した。ここでは実測された気温 T_{air} を基に、 -2°C 、 -1°C 、 $+1^\circ\text{C}$ および $+2^\circ\text{C}$ と変化させたケースを、それぞれ CASE1b~4b とする (相対湿度 RH_{air} は実測値を適用)。また、同日の福井地方

表－5 気温 T_{air} および相対湿度 RH_{air} を用いた感度解析実験条件

条件		T_{air} および RH_{air} の範囲
Obs.	T_{air} (1月13日実測値)	$-3.4 \sim 0.1^{\circ}\text{C}$
	RH_{air} (1月13日実測値)	95 ～ 100%
CASE1b	T_{air} を基に 2°C 減少	$-5.4 \sim -1.9^{\circ}\text{C}$
	RH_{air} (1月13日実測値)	95 ～ 100%
CASE2b	T_{air} を基に 1°C 減少	$-4.4 \sim -0.9^{\circ}\text{C}$
	RH_{air} (1月13日実測値)	95 ～ 100%
CASE3b	T_{air} を基に 1°C 増加	$-2.4 \sim 1.1^{\circ}\text{C}$
	RH_{air} (1月13日実測値)	95 ～ 100%
CASE4b	T_{air} を基に 2°C 増加	$-1.4 \sim 2.1^{\circ}\text{C}$
	RH_{air} (1月13日実測値)	95 ～ 100%
CASE5b	同日気象台の気温	$-2.4 \sim 0.8^{\circ}\text{C}$
	同日気象台の相対湿度	88 ～ 100%

図－11 CASE1b～5b における気温および相対湿度の経時変化

気象台のデータを CASE5b とする。

図－11に1996年1月13日に橋梁道路上で実測された気温 T_{air} (●) および相対湿度 RH_{air} (▲), 感度解析に用いる気温および相対湿度 (CASE1b～4b), CASE5b に適用する福井地方気象台から得た T_{met} (×) および RH_{met} (+) の経時変化を, それぞれ示す。ここで, 福井地方気象台の気温および相対湿度を適用する意義は, 広範囲に利用される気象台の観測データから算出される橋梁道路のすべり摩擦係数と実橋梁上でのそれとを比較することにより, 本論で主張する橋梁道路の微気象特性が霜の発生に及ぼす影響を把握する点にある。

図－12 気温を用いた感度解析における橋梁道路のすべり摩擦係数の経時変化

感度解析における橋梁道路内部温度の初期値, 気温および相対湿度以外の気象条件 (天空放射量, 風速, 短波放射量および河川水温) は, それぞれ実測値を使用した。なお, 数値計算は先述した天空放射量の感度解析の場合と同様に, 1996年1月13日午前1時を初期時間とし, 同日午前8時までとする。

図－12に CASE1b～5b における橋梁道路のすべり摩擦係数 μ の経時変化を示す。また, 同図には実測の BPN から換算された μ (●) も併示される。まず, 各ケースにおける霜の発生時間は, CASE2b (△) で午前0時45分, CASE1b (○) で午前0時55分, CASE5b (×) で午前3時, CASE3b (□) で

図-13 霜発生時間の実測値と計算値の比較

午前3時25分の順となり、CASE4b (▽) では午前8時までに霜の発生はない。次に、CASE1b (○) および CASE2b (△) における μ の時間的な変化に注目すると、霜の発生から両者の μ は急激に低下し、前者で6時頃、後者で8時頃に、その路面状態は氷板と同程度に至ることが判る。一方、CASE3b (□) で霜は発生するが、 μ の低下は僅かである。最後に、福井地方気象台の気温および相対湿度を用いた CASE5b (×) において、霜の発生時間は実測データから算出した結果に比べ、2時間程度遅く、 μ の時間的な低下も相対的に小さい。また、 μ は午前8時に最低となるが、その値は約0.7程度であり、両者の経時変化には大きな差が生じる。

図-13に実測の T_{air} を基準に、 $-5 \sim +5^{\circ}\text{C}$ の範囲で T_{air} を増減させた時の霜発生時間 t_f を示す。なお、計算された霜発生時間は実測の霜発生時間を基準時間 ($t_f=0$) として表現している。同図より、 T_{air} が大きくなるとともに霜発生時間 (○) は遅くなることが判る。また、実測の T_{air} から 1°C 増加するだけで、霜発生時間には約3時間程度の遅延が生じ、 2°C 増加すると霜の発生はない。一方、 T_{air} が 1°C 減少すると霜の発生は45分程度早期化されるが、 -5°C の計算結果では逆に霜発生時間は遅くなる。これは、この感度計算が T_{air} のみをパラメータとしているために、見かけ上の大気中水蒸気量が減少し、式(3)の条件を満足しないためである。

図-14に各ケースの午前8時におけるすべり摩擦係数の最小値 μ_{Min} を示す。 μ_{Min} の分布型は先述の図-10と同様であり、 T_{air} が大きくなるとともに

図-14 すべり摩擦係数の最小値の実測値と計算値の比較

μ_{Min} も大きくなる。ここで、図-13では T_{air} の低下が必ずしも霜発生の早期化に寄与しないことを示した。しかしながら、いずれのケースにおいても μ_{Min} は T_{air} の低下に伴い、氷板と同程度の状態にまで小さくなることが判る。また、 T_{air} が $+1^{\circ}\text{C}$ の時 μ_{Min} は0.8 (乾燥路面と同等) に、一方 T_{air} が -1°C の時 μ_{Min} は0.2 (氷板と同等) に、それぞれ大きく変化することから、橋梁道路の霜付着量およびすべり摩擦係数は、夜間の橋梁道路周囲の気温変化に対し、非常に敏感に反応することが判る。

6. おわりに

室内実験、実橋梁道路上における微気象観測および橋梁道路の温度計測から、冬期橋梁道路における霜型路面凍結現象の特性を明らかにした。また、霜付着量算定モデルによる数値実験から、実橋梁道路における霜の発生時間やすべり抵抗の経時変化の再現に加え、橋梁微気象特性が霜路面に及ぼす影響を明らかにした。

本研究から、以下の結論を得た。

- 1) 実橋梁道路上において霜が発生する際、路面へ付着する昇華フラックス密度は、橋梁道路上の空気の水蒸気密度と橋梁道路表面での水蒸気密度との差に、昇華バルク係数を乗じた形で表現される。
- 2) 霜の発生時に、橋梁上の水蒸気密度は道路表面で最も小さくなり、路面から離れるにつれて大きくなるような分布を呈する。
- 3) 実橋梁の微気象観測データを室内実験で得られた霜付着量算定モデルに適用し、そこで計算された

路面のすべり摩擦係数の経時変化が、計測結果と概ね一致したことで、本モデルの信頼性を裏付けることができた。

- 4) 霜の発生を精度良く予測するためには、橋梁道路における微気象観測が重要となり、気象台からの広域気象情報では、実路面における霜の発生状況に対して、著しく乖離した予測結果を算出する危険性がある。
- 5) 橋梁道路の熱・水分輸送特性は、その微気象特性に強く依存し、特にそれらの挙動を支配する主因である天空放射量および気温の変化は、霜付着量、霜の発生時間とその継続時間、ひいては路面のすべり摩擦係数に大きな影響を及ぼすことが明確となった。

今後さらに橋梁道路上での微気象観測を続け、データを蓄積し、本霜付着量算定モデルの精度向上に努める予定である。

参考文献

- 1) 洲崎治平・井上要三・仙黒邦行・飯塚敏樹・矢島 篤：橋梁部における路面凍結調査，雪と道路，No.21，pp.60-70，1989.
- 2) Lunardini, Virgil J : Heat Transfer in Cold Climates, Wiley John & Sons Incorporated, 1998.
- 3) 渡邊 洋・福原輝幸：橋梁道路と大気間との間の熱・水分輸送と路面凍結現象，水工学論文集，第39巻，pp.183-188，1995.
- 4) 木曾忠幸・渡邊 洋・福原輝幸：橋梁での微気象が生む橋梁道路と大気との間の熱・水分移動特性と路面結露凍結現象，水工学論文集，第41巻，pp.361-366，1997.
- 5) 宮本重信・室田正雄・杉森正義：橋梁の床版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，No.46，pp.36-42，1998.
- 6) 福原輝幸・渡邊 洋：結露凍結による橋梁道路のすべり抵抗－1997年冬期事例－，第15回日本雪工学会全国大会論文報告集，Vol.15，pp.57-62，1999.
- 7) 渡邊 洋・福原輝幸：サーマルマッピングによる冬期道路の路面温度特性，日本雪工学会誌，Vol.14，No.2，pp.11-18，1998.
- 8) 例えば，斎藤武雄：数値伝熱学，養賢堂，1992.
- 9) 渡邊 洋：道路雪氷災害への地中熱エネルギー利用システムの適用に関する基礎的研究，福井大学博士論文，1999.
- 10) 例えば，日本機械学会編：湿度・水分計測と環境のモニタ，技報堂出版，1992.
- 11) 例えば，竹内清秀・近藤純正：大気科学講座 1 地表に近い大気，東京大学出版会，1981.
- 12) 松野三郎・山下弘美：舗装技術の質疑応答第2巻，建設図書，1974.
- 13) 市原 薫・小野田光之：路面のすべりとその対策，技術書院，1997.
- 14) 日本機械学会編：伝熱工学資料－改訂第4版，日本機械学会，1986.

APPENDIX NOTATION

BPN (－)	: すべり抵抗値
dA (m^2)	: 鉛直軸に直交する微小境界要素の面積
dV (m^3)	: 微小境界要素の体積
z (m)	: 橋梁路面からの高さおよび深さ
G (W/m^2)	: 熱伝導フラックス
H (m)	: 橋梁路面からの高さ
L (W/m^2)	: 潜熱フラックス
L_c (W/m^2)	: 昇華に伴う潜熱フラックス
L_e (W/m^2)	: 蒸発に伴う潜熱フラックス
M_c (kg/m^2s)	: 昇華フラックス密度
Q_c (kg/m^2)	: 単位面積当たりの霜付着量
R_b (W/m^2)	: 橋梁道路下面からの放射エネルギーフラックス
R_f (W/m^2)	: 太陽からの短波放射エネルギーフラックスの反射成分
R_g (W/m^2)	: 太陽からの短波放射エネルギーフラックス
RH (%)	: 相対湿度
RH_{air} (%)	: 橋梁道路上大気の相対湿度

RH_{met} (%)	: 福井地方気象台で観測された相対湿度	T_{met} (°C)	: 福井地方気象台で観測された気温
R_{NET} (W/m ²)	: 純長波放射エネルギーフラックス	U (kJ/m ³)	: 単位体積当たりの橋梁道路内部熱エネルギー
R_{NS} (W/m ²)	: 純短波放射エネルギーフラックス	V (m ³)	: 体積
R_s (W/m ²)	: 天空放射エネルギーフラックス	α_e (m/s)	: 昇華バルク係数
R_U (W/m ²)	: 路面放射エネルギーフラックス	λ (W/mK)	: 熱伝導率
R_R (W/m ²)	: 河川からの放射エネルギーフラックス	μ (—)	: すべり摩擦係数
S (W/m ²)	: 顕熱フラックス	μ_{Min} (—)	: すべり摩擦係数の最小値
t (h)	: 時間	∇ (—)	: 微分演算子
t_F (h)	: 霜発生時間	(ρc) (kJ/m ³ K)	: 単位体積熱容量
T (°C)	: 温度	ρ_v (kg/m ³)	: 水蒸気密度
T_{sur} (°C)	: 橋梁道路の路面温度	$\rho_{v(air)}$ (kg/m ³)	: 橋梁道路上大気の水蒸気密度
T_{air} (°C)	: 橋梁道路上大気の気温	$\rho_{v(sur)}$ (kg/m ³)	: 橋梁道路表面の水蒸気密度