

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

Characteristics of heat and moisture transfer between bridge road and atmosphere
caused by micro meteorology over bridge and dew freezing phenomenon

木曾忠幸 *・渡邊洋 **・福原輝幸 ***

By Tadayuki KISO, Hiroshi WATANABE and Teruyuki FUKUHARA

Characteristics of heat and moisture transfer between bridge road and atmosphere caused by micro meteorology over bridge is explored from not only field surveys at a bridge but also indoor experiments. Indoor experiments give a relation between dew freezing density and friction resistance of an asphalt plate. It is seen from the outdoor surveys at the bridge that the surface temperature of bridge road is apt to fall below zero and to be lower than the atmospheric temperature in the night. The temperature profiles in the pavement of bridge, obtained by the survey, agree with numerical results.

keywords : dew freezing, heat and mass transfer, micro meteorology, friction resistance of road

1. はじめに

南北に細長い我が国は気候の地域性が強く、都市の熱的問題も複雑で多様性に富む。ヒートアイランドのような局所的温熱問題もそのひとつと言えよう。一方、国土面積の約60%を占める積雪寒冷地域では、積雪や道路凍結に代表される冷熱問題も無視できない。特に、橋梁および陸橋道路では地盤からの熱供給が期待できないことに加えて、気象の局所の変化も大きく¹⁾、特有の冷熱問題が生じる。例えば、融雪水による凍結、河川で発生する霧の付着凍結、さらには、渡邊ら²⁾の報告にある大気中の水蒸気の昇華凝結を伴う凍結（以下、結露凍結と呼称）などが挙げられる。この結露凍結は、路面上に積雪や液状水が無いにもかかわらず発生し、その挙動は橋梁道路と大気との間の相変化を伴う熱・水分移動により規定される³⁾。しかしながら、過去の実績²⁾では結露凍結における熱移動のメカニズムは明確にされたが、水分移動のそれは依然として不明な点が多い。

そこで本研究では、結露凍結現象を橋梁道路と大気との間の熱・水分同時移動現象として捉え、その発生メカニズムおよび結露凍結が及ぼす路面への危険性について、室内実験、冬期の橋梁道路における微気象観測および温度計測から検討を行った。

2. 橋梁道路の凍結解析

2.1 橋梁道路と大気との間の熱・水分移動

夜間における橋梁道路と大気との間の熱エネルギー収支は Fig 1 に示す概念図で表される。同図に従えば、橋梁道路上面・下面における境界要素の内部熱エネルギー U の時間的変化率 $\partial U / \partial t$ は、純長波放射エネルギー R （橋梁道路上面では天空放射エネルギー R_s と路面放射エネルギー R_u との和、下面では河川からの放射エネルギー R_r と橋梁道路下面からの放射エネルギー R_b との和）、空気移動による顕熱 S 、水蒸気の相変化に伴う潜熱 L （蒸発に伴うエネルギー L_E と昇華凝結に伴うエネルギー L_c の和）および熱伝導エネルギー C で規定される。すなわち、

$$\partial U / \partial t = C - R - L - S \quad (1)$$

となり、橋梁道路で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。

* 学生員 福井大学大学院工学研究科博士前期課程環境設計工学専攻 (〒910 福井市文京 3-9-1)

** 学生員 福井大学大学院工学研究科博士後期課程システム設計工学専攻 (〒910 福井市文京 3-9-1)

*** 正会員 工博 福井大学教授 工学部環境設計工学科 (〒910 福井市文京 3-9-1)

2.2 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。

(ρc) ∂T/∂t = ∇(λ∇T) (2)

ここに、(ρc)：橋梁道路の体積熱容量、T：温度、λ：熱伝導率、∇：微分演算子、である。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。

2.3 結露凍結の発生条件と結露凍結量

橋梁道路の表面温度 T_{sur} が橋梁道路表面に存在する水蒸気の露点温度以下に冷却されていれば、この水蒸気は飽和した後、橋梁道路表面に結露する。さらに、 T_{sur} が氷点下であれば、ここで結露凍結が発生する。一方、著者らは橋梁道路表面近傍の大気では水蒸気密度境界層が形成されることを観測しており³⁾、この境界層上縁の水蒸気密度を ρ_{vi} とすると、結露凍結の発生を支配する条件式は橋梁道路表面の飽和水蒸気密度 $\rho_{v(sat)}$ および ρ_{vi} を用いて、以下のように定義される。すなわち、

$\rho_{vi} > \rho_{v(sat)}$ かつ $T_{sur} < 0^{\circ}\text{C}$ (3)

また、式 (3) を満足した場合、橋梁道路表面へ付着する水蒸気の結露フラックス密度 M_c は、以下のようなバルク式によって算出される。

$M_c = \alpha_c (\rho_{vi} - \rho_{v(sur)})$ (4)

ここに、 α_c ：結露バルク係数、すなわち結露時の水蒸気伝達係数、 $\rho_{v(sur)}$ ：橋梁道路表面極近傍の水蒸気密度である。なお、結露凍結は無風に近い夜間晴天時に発生するので、 α_c に及ぼす風の影響は小さいと考える。

3. 結露凍結室内実験、橋梁道路における微気象観測および橋梁道路温度計測

3.1 結露凍結室内実験

3.1.1 結露凍結室内実験の目的

結露凍結室内実験の目的は以下の通りである。

- (1) 0℃以下に冷却されたアスファルト舗装体表面に、飽和状態にある水蒸気が付着する際の結露凍結量の算定
- (2) 結露凍結量に対するアスファルト舗装体表面の滑り抵抗値の測定
- (3) 結露バルク係数の決定

3.1.2 結露凍結室内実験の方法および実験装置

実験装置概要を Fig. 2 に示す。恒温室内は氷点下に保たれ、循環風の影響は無いように配慮する。アスファルト舗装体 (100×200×高さ 15mm) への結露を促すために、恒温室内へ加湿器の水蒸気が供給される。上面を除いて断熱された舗装体は 2 種類用意され、一つは結露による重量変化測定に、もう一つは温度変化測定に用いる。舗装体の重量変化は電子天秤 (精度 1/1000g) を用いて計測され、舗装体の結露凍結過程はビデオカメラによって記録される。舗装体表面温度 T_s および舗装体上の気温 T_a は、氷点式基準接点を用いた熱電対 (精度 1/100℃) により 30 秒ごとに計測される。

Table 1 に各実験ケースの初期温度条件を示す。なお、舗装体表面の危険性は滑り抵抗値 (BPN) で評価され、それは実験終了後に滑り抵抗測定器を用いて、各々測定される。

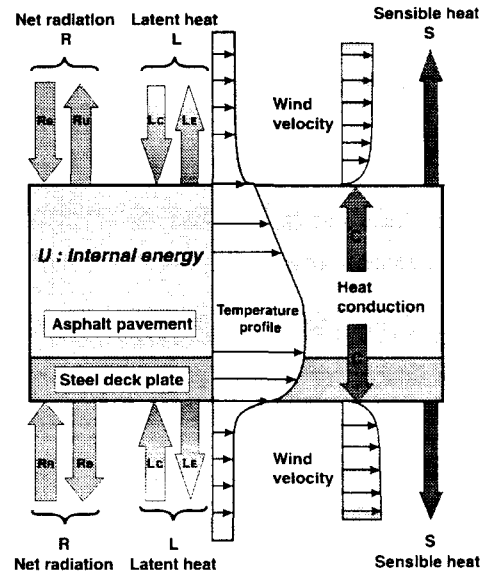


Fig.1 夜間における橋梁道路の熱エネルギー収支の概念図

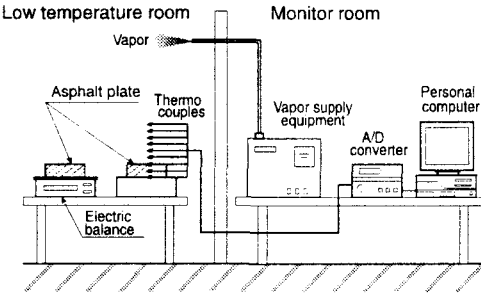


Fig.2 実験装置概要

Table 1 実験条件

CASE	T _a (°C)	T _s (°C)
CASE 1	-3	-1
CASE 2	-6	-3
CASE 3	-6	-1
CASE 4	-9	-3

Table 2 観測機器一覧表

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	湿度センサー	路面上0.005、0.01、0.03、0.05m	ヴァイサラ(株)
橋梁道路上の風速	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)
橋梁道路の滑り抵抗値	滑り抵抗測定器	橋梁道路中央付近の車道端部	(株)マクロス

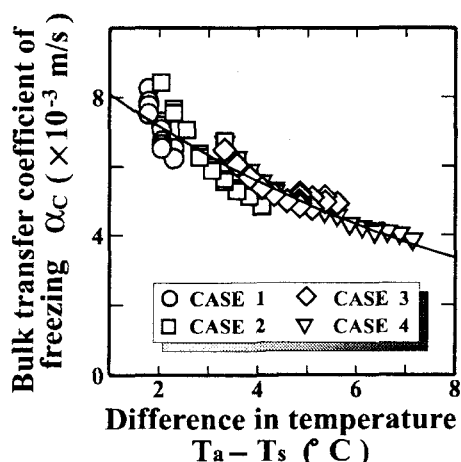


Fig 3 結露バルク係数と温度差の関係

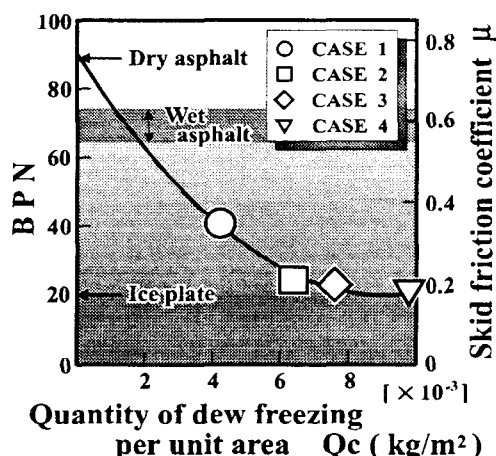


Fig 4 BPN および滑り摩擦係数と凍結量の関係

3. 2 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、福井市内の河川に架かる鋼床版橋(長さ 約 140m、幅 約 13m) 中央付近の車道端部にて行われる。Table 2 には観測項目別に測器名、観測位置および製造元を示す。また、結露凍結時の橋梁道路表面の BPN の測定も、これらの観測と並行して行われる。

4. 橋梁道路の微気象特性と結露凍結現象

4. 1 結露凍結室内実験の結果および考察

結露凍結は無風に近い夜間晴天時に発生することが多く、それには橋梁道路上の大気の安定性が影響すると予想される。そこで、本実験においては大気の安定性を支配する T_a (舗装体上の気温) と T_s (舗装体表面温度) との差 ($T_a - T_s$) と結露バルク係数 α_c の関係を調べる。その結果を Fig 3 に示す。 α_c は T_a と T_s の温度差が大きくなるにつれて減少し、この両者の関係は式 (5) によって与えられる。すなわち、

$$\alpha_c = 0.0092 \exp\{-0.13(T_a - T_s)\} \quad (5)$$

Fig 4 には単位面積当りの結露凍結量 Q_c と滑り抵抗値 BPN の関係を示す。図中には、4 つの実験ケースより得られた Q_c に対する BPN がプロットされる。また、同図にはアスファルト乾燥状態 ($Q_c = 0$) に対する BPN (= 90)、氷板に対する BPN (= 20) およびアスファルト上に水が存在する場合の BPN (= 65 ~ 75) も併示される。同図より、 0.01 kg/m^2 以上の結露凍結量を有するアスファルト表面では、氷板と同程度の滑り抵抗値となることが判る。一方、 $Q_c \leq 0.01 \text{ kg/m}^2$ の範囲では BPN と Q_c の関係は次式により表される。すなわち、

$$\text{BPN} = 90.1 - 1.54 \times 10^4 Q_c + 8.45 \times 10^5 Q_c^2 \quad (6)$$

上式により、結露凍結量 Q_c に対応する結露凍結路面の滑り抵抗値 BPN は算出される。

4. 2 橋梁道路における微気象特性

これまでの微気象観測結果から、本論文では1994年12月23日および1996年1月13日の観測結果を紹介する。Fig. 5は両日の午前1時から翌日の午前0時までに渡る、橋梁道路上1mの気温 T_{atm} (○) 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、12月の観測結果(同図上段)と1月のそれ(下段)を比較すると、時間経過に伴う温度変化の分布形状は互いに類似する。しかしながら、両日の T_{met} および T_{atm} においては、深夜から早朝にかけて T_{met} より T_{atm} 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_{atm} の方で温度が高くなる。次に、両日の T_{sur} および T_{atm} の関係に注目すると、夜間においては T_{sur} の温度が T_{atm} 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_{atm} 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_{atm} および T_{met} における最低温度については、いずれも両日の午前7時頃にそれを記録し、中でも1月の最低温度は、 T_{met} は -2.3°C 、 T_{atm} は -3.1°C 、 T_{sur} は -3.6°C である。これらのことより、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。これは橋梁道路の微気象特性に起因し、橋梁道路の路面凍結の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_{atm} および T_{met} に比較して大きい。

次に、Fig. 6に両日における橋梁道路温度および橋梁道路上の気温の鉛直分布の経時変化を示す(図中には実線および点線で計算値も併示される)。同図より、12月(○) および1月(●)の午前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って温度低下が観られ、午前3時までは両日の温度分布に大きな違いはない。しかしながら、午前4時以降は12月に比べて、1月の方で温度低下は明確となる。さらに、両日の T_{air} (橋梁道路上0.005m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。12月の観測結果では、午前5時以降において T_{air} に比べて T_{sur} の方が相対的に低いが、1月の観測結果では橋梁道路の温度低下は一様に進行しているものの、前述の関係($T_{air} > T_{sur}$)

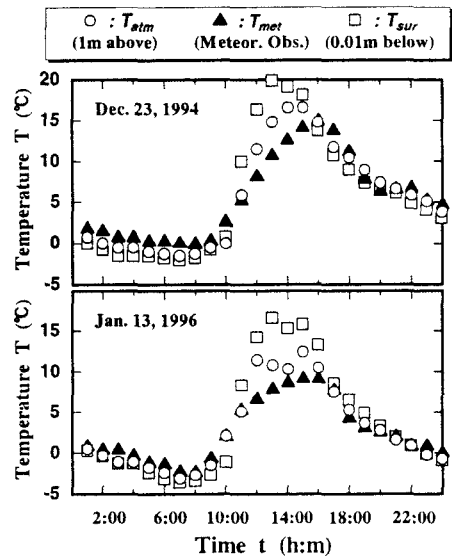


Fig. 5 福井地方気象台の気温、橋梁道路上の気温および舗装体表面温度の経時変化

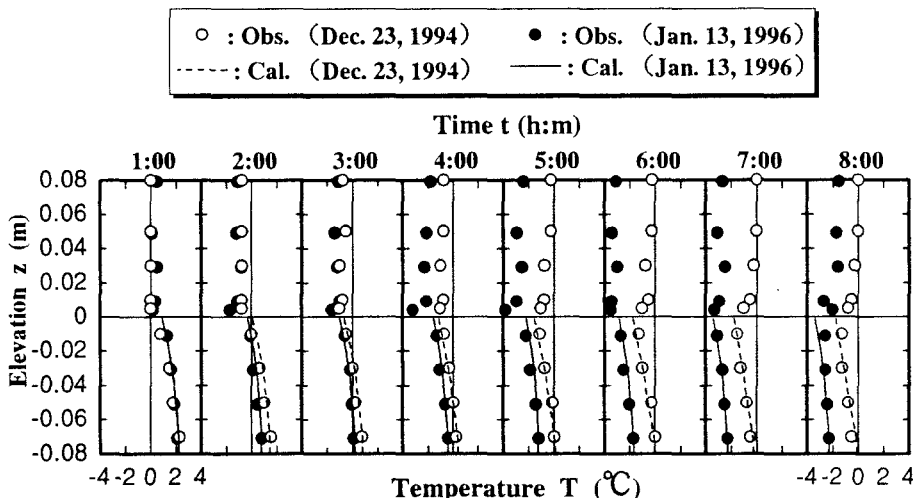


Fig. 6 橋梁道路温度および橋梁道路上の気温の鉛直分布の経時変化

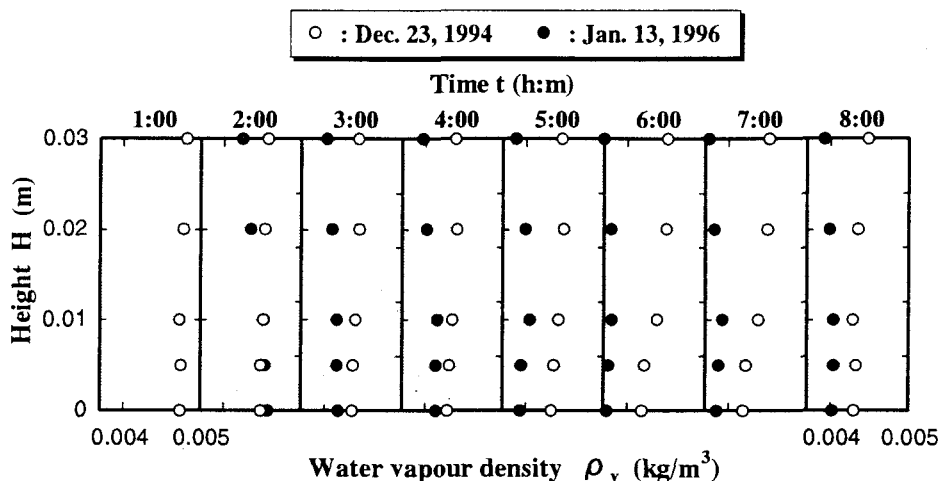


Fig 7 橋梁道路上の水蒸気密度鉛直分布の経時変化

は明瞭に認められない。また、同図から判かるように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。

Fig 7 には、12 月 23 日(○)および 1 月 13 日(●)における橋梁道路上の水蒸気密度 ρ_v の鉛直分布の経時変化を示す(1 月 13 日の午前 1 時の ρ_v は欠落)。なお、結露凍結発生を判定するために必要となる $\rho_{v(sat)}$ (橋梁道路表面の飽和水蒸気密度)は、路面下 0.01m の道路温度から算出される。まず、12 月の観測結果に注目すると、午前 2 時以前は ρ_v は鉛直方向に様に分布する。しかしながら、午前 3 時以降で 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 $\rho_{v(sat)} > \rho_v$ の関係を満足することが判れる。加えて、Fig 6 の結果より、橋梁道路温度は氷点下にあることから、式(3)の結露凍結条件が満たされたことが理解される。一方、同時刻の 1 月 13 日の観測結果においては、 ρ_v の鉛直方向の分布結果から明確に結露凍結発生を判定するのは困難である。しかしながら、午前 5 時から午前 8 時において、 $\rho_{v(sat)} > \rho_v$ の関係は満たされており、橋梁道路温度も氷点下にあることから、結露凍結の発生が判れる。

Fig 8 は、1994 年 12 月 23 日および 1996 年 1 月 13 日の午前 0 時から午前 8 時に渡る微気象観測結果を用いて計算された橋梁道路表層の熱エネルギー収支の経時変化を、両日についてそれぞれ示す。図中、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を、負のそれは熱エネルギー損失をそれぞれ意味する。まず、両日において純長波放射エネルギー R は常に負である。一方、熱伝導エネルギー C は常に正であり、時間の経過とともに緩やかに減少する。顕熱 S は、観測期間を通じて無視できる程度に小さい。また、橋梁道路の内部熱エネルギーの時間的変化率 $\partial U / \partial t$ は両日とも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。両者の値は午前 3 時まで大きな違いは無いが、それ以降は 12 月の $\partial U / \partial t$ が相対的に大きい。これより、Fig 6 で示した 1 月の午前 3 時以降の橋梁道路の著しい温度低下が理解される。また、橋梁道路上面を横切る熱エネルギー成分の絶対値は C および R で大きい。従って、静穏な夜間晴天時の橋梁道路における熱的挙動は C および R によって規定され、 R によるエネルギー損失を補うように C が作用していることが判る。

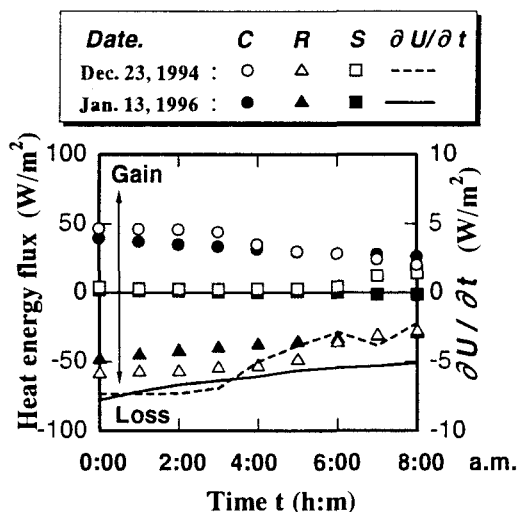


Fig 8 橋梁道路表層の熱エネルギー収支の経時変化

4. 3 橋梁道路上の結露凍結量と滑り摩擦係数の評価

微気象観測における結露凍結の判定から、その発生および継続時間を概ね判断することができた。次に、結露凍結室内実験で得た水蒸気の結露凍結量の算定を橋梁道路表面に適用し、道路表面の滑り摩擦係数を用いて結露凍結路面の危険性を検討する。

Fig 9 に 1994 年 12 月 23 日および 1996 年 1 月 13 日における結露凍結積算量 Q_c の経時変化を、前者は破線、後者は実線でそれぞれ示す。まず、両者の絶対値に注目すると、午前 8 時における結露凍結積算量は前者で約 2.6 倍大きい。しかしながら、時間的な増加率は両者で大きな違いはなく、これは結露凍結の発生時刻およびその継続時間に起因する。次に、両日の Q_c を基に、式 (6) から得られる結露凍結路面における BPN を算出し、滑り摩擦係数の予測を試みる。

Fig 10 には先述の BPN の予測値から換算された滑り摩擦係数 μ を 12 月 23 日 (破線) および 1 月 13 日 (実線) について、それぞれ示す。また、1 月 13 日の観測中では滑り抵抗測定器によって BPN が実測された。同図には、この実測された BPN から換算された μ (○) も併示する。まず、Fig 9 に示した Q_c と Fig 10 における μ (○) に注目すると、 μ は Q_c の増大とともに減少することが知れる。先述の Fig 4 の結果によれば、午前 8 時の橋梁道路が持つ μ は氷板のそれと同程度であることから、路面状態の危険性が理解できる。また、1 月 13 日における μ の実測値 (○) と予測値 (実線) を比較すると、多少の違いは生じる (室内実験の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、粗度状態の差異に起因する) もの、 μ の減少過程は互いに良好に一致する。よって、この結露凍結量の予測手法の妥当性が示唆される。

5. おわりに

本研究から、以下の結論を得た。

- (1) 実橋梁道路上において結露凍結が発生する際、路面へ付着する水蒸気のフラックス密度は、橋梁道路上の空気の水蒸気密度と橋梁道路表面の持つ水蒸気密度との差に、結露バルク係数を乗じた形で表現される。
- (2) 結露凍結が発生する際、橋梁上の水蒸気密度分布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ことが確認された。
- (3) 室内実験で得られた結露凍結モデルを実橋梁の微気象観測データに適用し、予測計算から求められた橋梁道路表面の持つ滑り摩擦係数の経時変化は、計測結果と概ね一致したことで、結露凍結モデルの信頼性を裏付けることができた。
- (4) 結露凍結を精度良く予測するためには、橋梁道路上の微気象観測が重要となる。
今後さらに橋梁道路上での微気象観測を続け、データを蓄積していく予定である。

参考文献

- 1) 山田忠幸・福原輝幸：サーマルマッピングに観られる橋梁路面温度特性、土木学会第 49 回年次学術講演会概要集、IV-325、1994
- 2) 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、1995
- 3) 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 回年次学術講演会概要集、IV-374、1995
- 4) 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

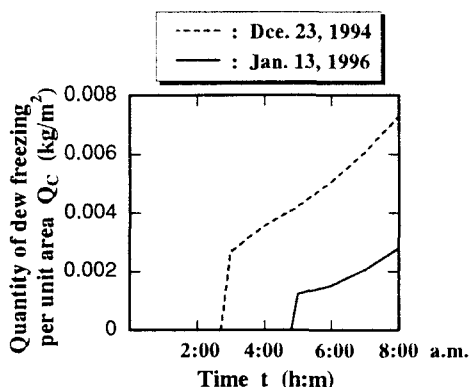


Fig 9 橋梁道路に発生した結露凍結量経時変化

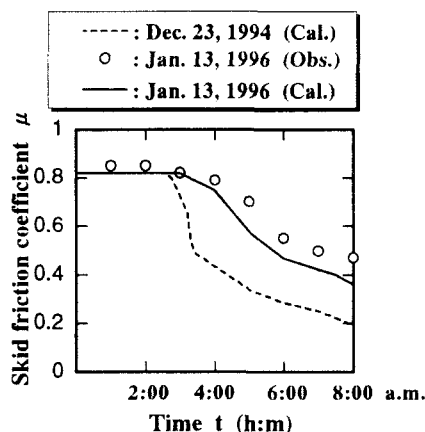


Fig 10 橋梁道路表面が持つ滑り摩擦係数の経時変化の実測値と予測値