

橋梁道路と大気との間の熱・水分輸送と路面凍結現象

Heat and moisture transfer between bridge road surface
and atmosphere and road freezing phenomenon

渡辺洋*・福原輝幸**

By Hiroshi WATANABE and Teruyuki FUKUHARA

The heat and moisture transfer between bridge road surface and atmosphere is explored from indoor experiments and survey on a real bridge road, in order to prevent bridge road freezing. It is observed that the surface temperature of the real bridge road is mainly affected by the sky radiation, the road surface long-wave radiation and the pavement heat conduction, when the wind is weak.

Finally, the reason, why a steel bridge road is apt to freeze compared to a concrete bridge road, is discussed from the time change of the heat energy budget and of the internal energy of the bridge floors.

Keywords : heat and mass transfer, bridge, freezing, micro meteorology

1. はじめに

積雪・寒冷地域における水循環と熱輸送現象の一つに路面凍結がある。路面凍結は一般道路よりも橋梁道路上で、またコンクリート橋よりもスチール橋でその発生頻度が高く、これに起因する交通事故や障害は毎年後を絶たない。通常、一般的な凍結現象は融雪水や雨による液状水凍結を想像しがちであるが、必ずしもこれに限ったものではない。洲崎ら¹⁾、および筆者らの言う路面凍結とは主に大気の水蒸気が乾燥道路表面に付着して生じるような凍結現象であり、冬期の橋梁道路では頻繁に観察することができる。これはまさに橋梁と大気との間の相変化を伴う水分および熱の同時輸送現象である。従って、路面凍結の発生は橋梁と大気との間の水分・熱エネルギー交換により支配されることになる。しかしながら、現在のところ橋梁における気象データは皆無であり、橋梁道路と大気との間の熱・水分輸送の実態が掴めないために、橋梁上の凍結現象には不明な点が多い。

そこで、本研究では橋梁道路と大気との間の熱・水分輸送と凍結現象の関係について、室内実験および実橋梁での観測から検討を行った。

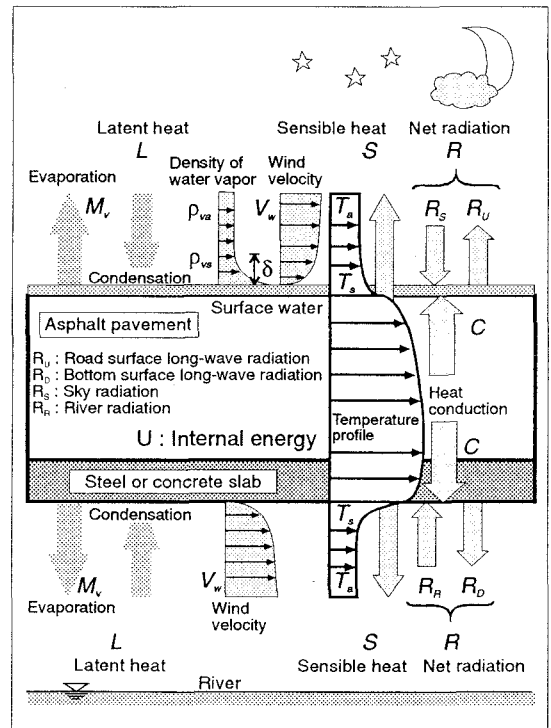


Figure 1 橋梁道路の熱エネルギー収支概念図

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

** 正会員 工博 福井大学助教授 工学部環境設計工学科 (同上)

2. 凍結解析

2.1. 橋床表面と大気との間の熱・水分輸送

橋床（舗装部と床版）表面と大気との間の熱エネルギー収支は Figure 1 に示す概念図で表される。同図に従えば、橋床上・下面における境界要素の内部熱エネルギー U_B の時間的変化率 $\partial U_B/\partial t (= \Delta E)$ は純長波放射エネルギー R （橋床上面では大気放射エネルギー R_S と路面放射エネルギー R_U との和、下面では川からの放射エネルギー R_R と橋床下面からの放射エネルギー R_D との和）、空気移動による顕熱 S 、蒸発による潜熱 L および熱伝導エネルギー C で規定される。すなわち、

$$\partial U_B/\partial t = (C - R - S - L) \tag{1}$$

となり、橋床上面（路面）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。

2.2. 伝熱解析

橋床内部では以下の熱伝導方程式が成り立つ。

$$(\rho c) \partial T/\partial t = \nabla (\lambda \nabla T) \tag{2}$$

ここに、 (ρc) ：橋床の体積熱容量、 T ：温度、 λ ：熱伝導率、 t ：時間、 ∇ ：微分演算子である。なお、本研究における凍結解析は積分有限差分法により解かれる。

2.3. 蒸発量

路面凍結において橋床表面の水分の蒸発に伴う潜熱は無視できない。ここで蒸発フラックス密度 M_v は、以下のバルク式²⁾により導かれる。すなわち、

$$M_v = \alpha_m (\rho_{vs} - \rho_{va}) \tag{3}$$

ここに、 α_m ：蒸発のバルク係数、すなわち水蒸気伝達係数（速度の次元： m/s ）、 ρ_{vs} ：表面水の水蒸気密度、 ρ_{va} ：大気の水蒸気密度である。

水分の蒸発に起因する橋床と大気との間の熱・水分輸送の関係は、式（3）中の α_m が重要なパラメータとなる。 α_m は風速 V_w の関数であり、両者の関係は Figure 2 に示される。 α_m （○）は V_w の増加と共に増し、 α_m と V_w の関係は経験的に

$$\alpha_m = a_1 V_w^{b_1} + c_1 \tag{4}$$

で与えられる。ここに、 $a_1 = 1.15 \times 10^{-2}$ 、 $b_1 = 0.60$ 、 $c_1 = 0.40 \times 10^{-2}$ である。

2.4. 顕熱

橋床上の空気の移動に伴い、橋床の上・下面と大気との間で輸送される熱エネルギー、顕熱 S は次式で与えられる。

$$S = \alpha_h (T_s - T_a) \tag{5}$$

ここに、 α_h ：熱伝達係数、 T_s ：橋床上・下面の温度、 T_a ：大気温度である。熱伝達係数 α_h は風速 V_w と

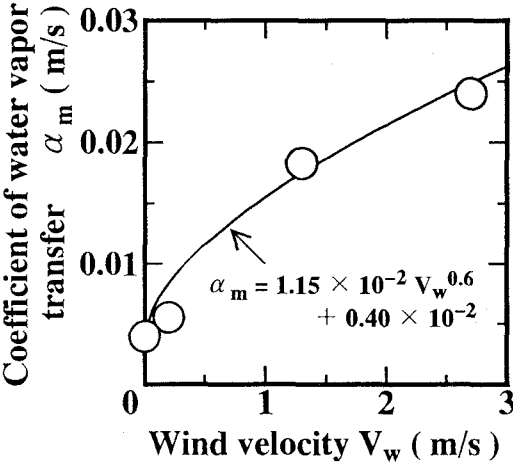


Figure 2 水蒸気伝達係数と風速の関係

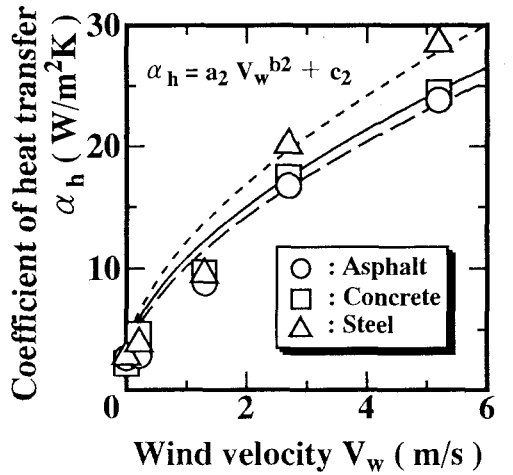


Figure 3 熱伝達係数と風速の関係

Table 1 熱伝達係数に関する係数

Material	a_2	b_2	c_2
Asphalt	9.30	0.60	2.79
Concrete	8.72	0.60	2.33
Steel	8.14	0.60	2.21

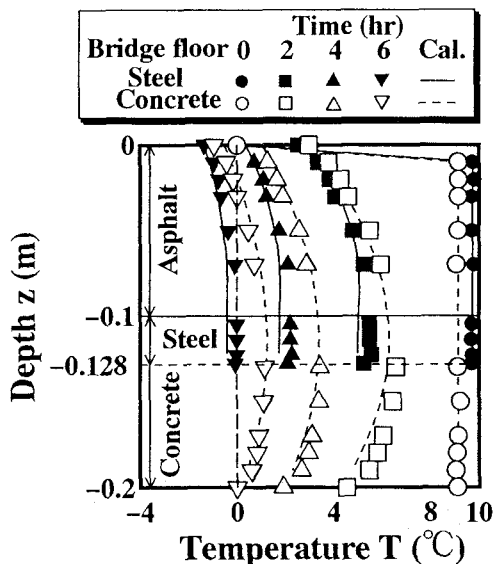


Figure 4 温度分布の経時変化
(風速 0 m/s)

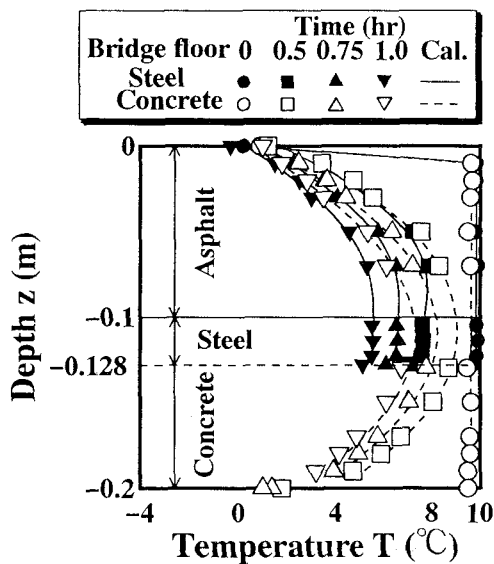


Figure 5 温度分布の経時変化
(風速 2.7 m/s)

共に変化する物理量であり、両者の関係は橋床を構成する要素 (Asphalt (○)、Concrete (□)、Steel (△)) について、それぞれ Figure 3 に示される。同図より、 α_h は V_w の増加と共に式 (6) のように非線形的に増大する。式 (6) 中の係数 a_2 、 b_2 および c_2 の値は Table 1 により与えられる。

$$\alpha_h = a_2 V_w^{b_2} + c_2 \quad (6)$$

式 (1) の熱収支計算では式 (3) ~ 式 (6) の実験式が使用される。

3. 橋床モデルによる伝熱実験

橋床モデルはコンクリート橋床 (0.2 × 0.2 × 高さ 0.2 m) およびスチール橋床 (0.2 × 0.2 × 高さ 0.128 m) の 2 種類である。両橋床とも中央部の表面および内部 (10 ~ 12 ヶ所) に熱電対が埋め込まれ、温度の鉛直分布が計測される。なお、橋床モデルの熱伝達率および体積熱容量は別途測定される。

橋床モデルは初め恒温室内 (室温 10 °C、湿度 50 %) に放置され、内部温度が一樣となった時点で全面を断熱、低温室内 (室温 -5 °C、湿度約 85 %、射出率 0.96) に運び込まれる。そこで上面と下面の断熱材を取り除くと同時に、温度測定を開始する。このとき、舗装部の上面には設定された温度の水が一定量 (水深約 1 mm に相当) だけ散布される。温度はコンピューターによって 30 秒ごとに記録され、散布されたアスファルト表面水 (路面水) の凍結過程はビデオカメラにより可視化される。なお、実験は自然対流および風洞 (幅 0.3 m、高さ 0.8 m、長さ 2.3 m) を利用した強制対流 (橋床表面上の一樣に近い風速が 1.3 m/s、2.7 m/s) について行われる。

4. 実験結果および考察

Figure 4 は自然対流時の橋床内部温度および路面水温度の変化を実験開始、2、4 および 6 時間後の時点で表わしたものである (図中には実線および点線で計算値も示される)。コンクリート橋床ではアスファルト部分およびコンクリート部分とも、上面および下面での温度低下により、時間経過に伴う温度勾配が形成される。この温度分布は両部分の接合部 (橋床中央) 付近で最大値をとるような弓状の分布となる。ただし、温度低下は蒸発潜熱の効果により、上面の方で時間的進行が速い。スチール橋床でも上面での温度低下は下面に比べて速いが、アスファルト部分にのみ明確な温度勾配が現れ、接合部付近で折れ曲がるような温度分布となる。これはスチールの熱拡散率がアスファルトやコンクリートのそれに比べて極めて大きいこと (約 30 ~ 36 倍) に起因する。

Figure 5 は強制対流 (風速 2.7 m/s) 時での温度分布を実験開始、30、45 分および 1 時間後で表わしたものである (図中には実線および点線で計算値も示される)。温度分布の定性的傾向は自然対流時と変わらない。しかし、自然対流時に比べて橋床上面および下面での温度低下が著しく、温度の弓状分

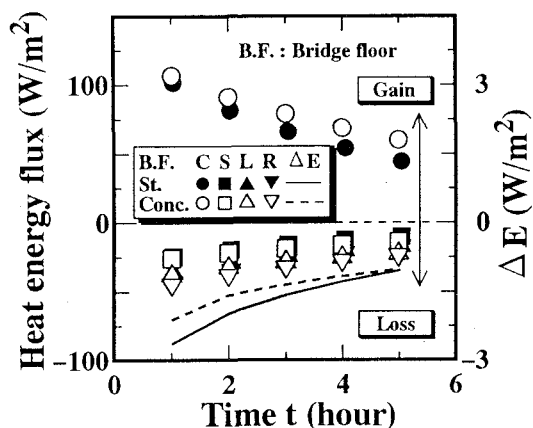


Figure 6 熱エネルギーフラックスの経時変化
(風速 0 m/s)

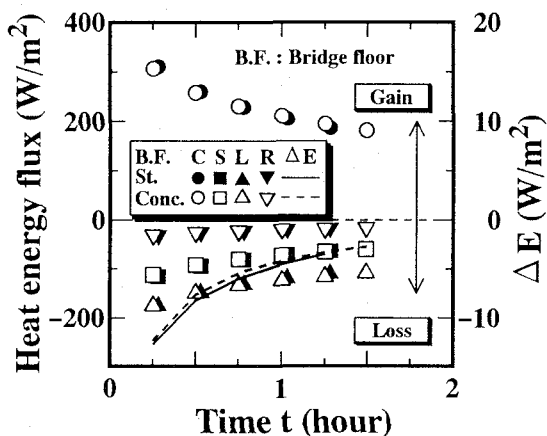


Figure 7 熱エネルギーフラックスの経時変化
(風速 2.7 m/s)

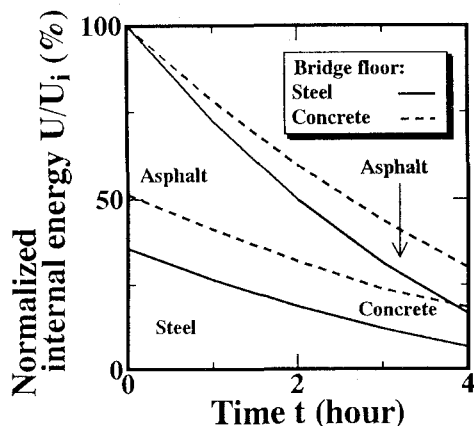


Figure 8 内部熱エネルギーの経時変化
(風速 0 m/s)

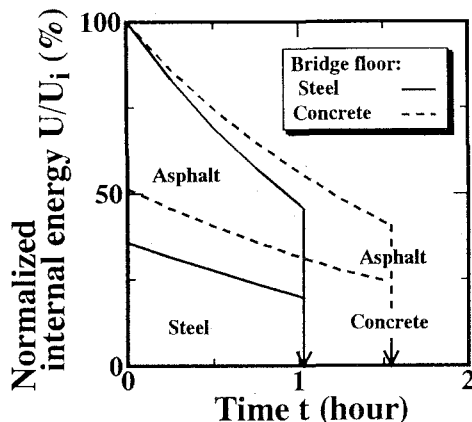


Figure 9 内部熱エネルギーの経時変化
(風速 2.7 m/s)

布や接合部付近での折れ曲がり方が極めて明確になる。路面水温度の低下はコンクリート橋床よりもスチール橋床の方で速い。また、Figure 4 および Figure 5 から判るように計算値と実験値の適合は両橋床ともに良好であり、本研究で使用された熱・水分輸送に関する諸係数の値の妥当性が示唆される。

Figure 6 および Figure 7 は自然対流時および強制対流 (風速 2.7 m/s) 時の橋床上面を横切る熱エネルギー成分の経時変化 (実験開始からおおよそ凍結時点まで) を示したものである。コンクリート橋床およびスチール橋床とも、橋床内部からの熱伝導エネルギー (C) が橋床上面での損失熱エネルギーを補うように供給される。自然対流時において、両橋床とも損失熱エネルギーは純長波放射 (R)、潜熱 (L)、顕熱 (S) の順となる。ただし、強制対流時は潜熱 (L)、顕熱 (S)、純長波放射 (R) の順になる。また、これらの各熱エネルギーを加えた値が橋床上面の内部熱エネルギー U_B の時間的変化率 ΔE (図中、実線および点線で、スケールは右縦軸) となる。両橋床の ΔE の絶対値はコンクリート橋床 (点線) よりもスチール橋床 (実線) で大きく、実験初期では風が吹くことにより著しく増大する。

最後に、橋床内部熱エネルギー U の時間経過に伴う変化を示したものが Figure 8 (自然対流時) および Figure 9 (強制対流時) であり、各時間の内部熱エネルギー U は初期のそれ U_i で無次元化される。コンクリート橋床の初期内部熱エネルギー U_i は、体積の違いもあってスチール橋床の U_i に比べて約 1.4 倍大きい。同図より、内部熱エネルギーの時間的な減少率はスチール橋床の方がコンクリート橋床よりも大きいことが知れる。さらに、この傾向は自然対流時よりも強制対流時でより顕著に現れる。

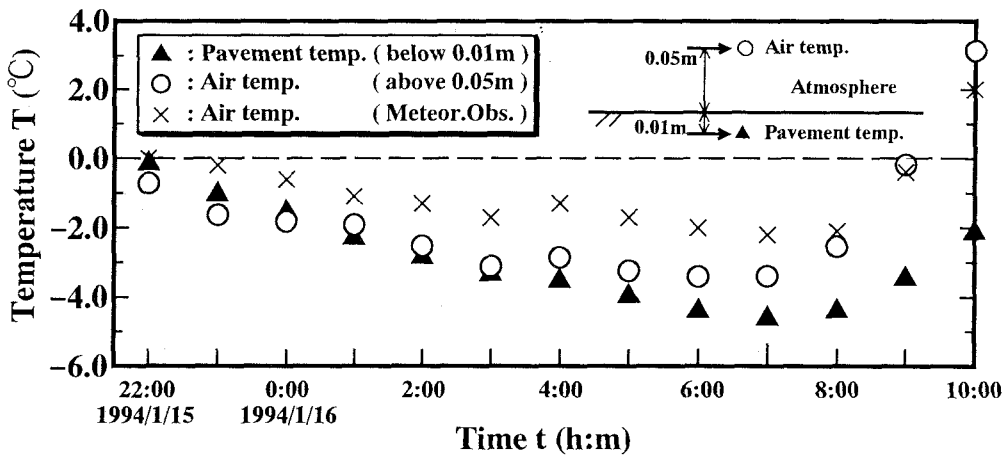


Figure 10 福井気象台の気温、路面上 (0.05 m) の気温および道路内 (0.01 m) 温度の経時変化

5. 実橋梁路面と大気との間の熱エネルギー輸送特性

実橋梁路面と大気との間の熱エネルギーの輸送特性を調査するために、1994年1月11日と1月16日の夜間に渡って野外観測を行った。測定場所は福井市内の河川に架かるスチール橋（長さ約140m、幅約13mの2車線道路）中央付近の車道端部である。測定項目は橋床内部温度（路面下0.01、0.03、0.05、0.07mの深さ）、橋梁上の気温および湿度（路面上0.005、0.01、0.02、0.03、0.05、1.0mの高さ）、河川水温度、長波放射エネルギー、路面温度、風向および風速である。本実験の目的は水蒸気が乾燥道路表面に付着して生じる結露凍結の解明にあり、そのために夜間快晴の日を選んで観測を行った。ここでは紙面の都合上、1月16日の計測データを紹介する。

まず、当夜の福井地方気象台の気温（×）、路面上（0.05m）の気温（○）および路面下（0.01m）の道路内部温度（▲）の経時変化を Figure 10 に示す。橋梁での温度変化に注目すると、測定を始めた1月15日午後9時の時点ですでに気温（○）は氷点下であり、相対的に路温（▲）が気温（○）よりも高い。しかし、1月16日午前1時頃を境に前者と後者の高低関係は逆転し、路温（▲）が気温（○）より低くなる。温度低下はその後も依然として進行し、最低気温は6時30頃に、最低路温は7時頃に観測される。さらに、福井地方気象台の気温（×）と路面上の気温（○）を比較すると、両者における温度経時変化の分布形状は同じであるが、夜間では相対的に約1.0～1.3℃程度低い。この事実は橋梁道路における微気象の特殊性を示唆する。

次に、橋床内部温度および路面上気温の鉛直分布の経時変化を Figure 11 に示す。結果は室内実験により得られたスチール橋床内部温度の鉛直分布と定性的に一致し、橋床内部から表面に向かって温度低下がみられる。また、温度低下は時間の経過と共に舗装部全域に渡って観測される。次に、路面上の気温分布に注目する。路面と大気との直接的な熱交換の範囲（境界層厚さ）は路面上0.02～0.03mである。気温勾配は1月16日午前0時以前は負であり、4時以降は正となる。この時、観測された相対湿度はほぼ100%に近いことから、午前2時頃には大気中の水蒸気密度勾配が負から正に変わる。換言すれば、午前2時以降では水蒸気を路面へ凝結付着させる推進力が生じると共に、結露条件が満たされることとなる。実際に、本観測では結露凍結が午前3時30分頃に確認され、路面状況はスリップしやすい状態となった。

最後に Figure 1 に示した概念図に従って、実橋梁路面での熱エネルギー収支を Figure 12 に紹介する。天空放射量 R_S (×) が路面放射量 R_U (+) の絶対値に比べて小さいために、純長波放射量 R は負である。また、同夜は安定した晴天であったために R_S の時間的変化は小さい。顕熱 S (□) の値そのものは大きくないが、午前2時には負から正になる。熱伝導エネルギー C (○) は常に正の値をとる。一般に放射冷却が強い夜間晴天時では風の影響も少なく、路面の熱エネルギー収支は、 R_S 、 R_U および C で規定されると考えてよい。全熱エネルギー成分を加えた値 ΔE (▲) は常に負の値をとり、式(1)から判るように時間経過に伴う表面近傍の路面温度の低下が理解される。

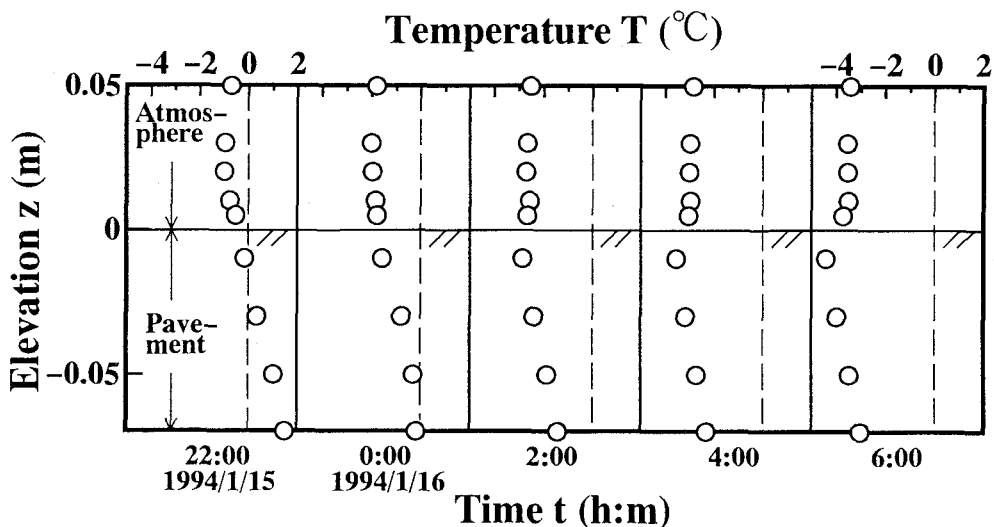


Figure 11 橋床内部温度および路面上気温の鉛直分布の経時変化

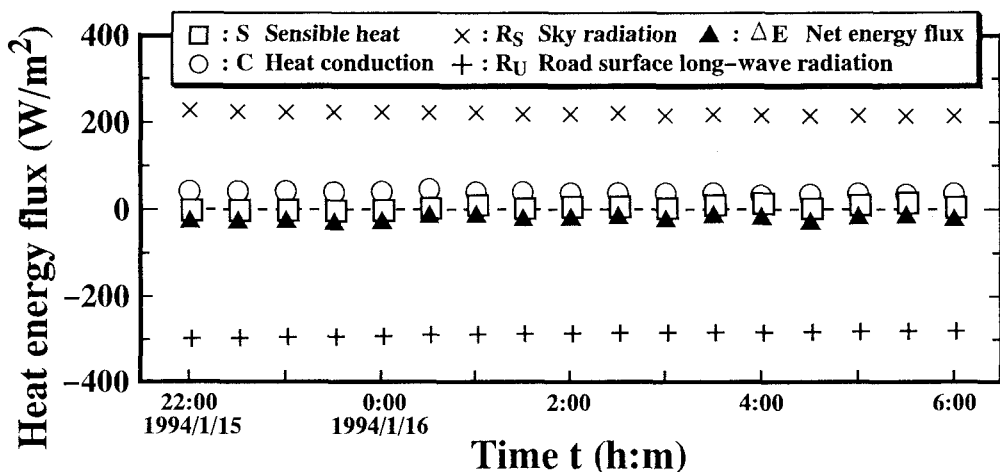


Figure 12 実橋梁路面を横切る熱エネルギーフラックスの経時変化

6. おわりに

室内凍結実験および実橋梁路面での凍結観測を通して、以下のような結論が得られた。

一般にスチール橋床の方がコンクリート橋床に比べて凍結しやすいとされる原因は、前者の持つ内部熱エネルギー U が後者の持つそれに比べて小さく、さらに橋床上面での内部熱エネルギーの時間的損失率 ΔE の絶対値もコンクリート橋床に比べて、スチール橋床の方が大きい点にある。すなわち、スチール橋床はコンクリート橋床に比べて、内部から舗装部上面へ熱エネルギーを長期的に供給する能力が欠如していることを意味する。加えて、静穏な夜間晴天時の橋梁道路の凍結は主に天空放射量 R_S 、路面放射量 R_U および熱伝導エネルギー C で規定されることがわかった。しかし、風が吹くと共に ΔE の絶対値は著しく増大することから、凍結現象における風の影響は必ずしも軽視できないと思われる。今後、さらに橋梁上の気象データの収集に努めたい。

なお、本研究の実施に当たり、(財) 日本積雪連合からは研究費の補助を、(株) 北川ヒューテックおよび(株) TEXL からは供試体の提供を、および(株) 山田技研からは長波放射計の提供を受けた。ここに、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 洲崎治平・井上要三・仙黒邦行・飯塚敏樹・矢島薫：橋梁部における路面凍結調査、雪と道路、No. 21, pp. 60 - 70, 1989.
- 2) 竹内清秀・近藤純正：地表に近い大気、東京大学出版会、1981.