

無散水融雪路面と積雪との間の伝熱特性

福井大学大学院 学生員 小寺健太郎*

福井大学工学部 正会員 福原輝幸*

国土交通省 近畿地方整備局 豊岡工事事務所 非会員 河合源悟**

1. はじめに

兵庫県美方郡村岡町の国道9号線沿いにある道の駅「ハチ北」において、1999年より浅層地中熱を利用した貯水槽集熱システム（RHCS:Reservoir Heat Collection System）による無散水融雪が行われている¹⁾。無散水舗装体中には放熱パイプが埋設されており、その融雪伝熱解析はいくつか提案されている²⁾が、路面からの伝熱と融雪との関係については、あまり議論がなされておらず、不明な点が多い。

そこで、本論文では積雪と舗装表面との伝熱特性について、熱収支法により検討を行った。

2. 熱収支法による融雪路面解析

2001年1月21日～22日にかけて兵庫県村岡町にある道の駅「ハチ北」で融雪実験を行い、路面と雪の熱収支を調べた。実験では「ハチ北」駐車場の無散水舗装上に縦3m、横2m、高さ0.1mの雪を載せてRHCSを連続運転させ、積雪高さ h_s および単位面積当たりの積雪重量 W_s を2時間から6時間毎に求めた。

図-1は、融雪による積雪の変化を示す。雪密度が実験初期から約 0.55 g/cm^3 と大きいのは、実験の都合上突き固めたためである。同図を見ると、 h_s および W_s は、実験初期から時間の経過と共に減少する。これに対して雪密度は、概ね線形的に増加する。

図-2は、融雪時における舗装体温度の鉛直分布である。舗装体温度は上部($z=0 \text{ cm}$)で最も低く、下方に向うにつれて上昇し舗装体底部($z=-30 \text{ cm}$)で最高となる。これより舗装体下部から地盤への熱移動は無く、放熱パイプから舗装体へ向う熱は上方にのみ伝播することが知れる。舗装体温度の鉛直分布は、22日11時を除けば、実験中に亘りほぼ同じである。

温度勾配は、放熱パイプを境に、その上部で大きく下部で小さい。これは、RHCSによる熱エネルギー供給により、放熱パイプ周辺における舗装体温度の低下が抑制されるためと考えられる。

この舗装体温度の鉛直分布を基に、舗装体および舗装体上の積雪の熱エネルギー収支を調べる。

図-3は、その概念図を示したものである。まず舗装体の熱エネルギー収支は次式で表される。

$$(\rho c)_p \frac{\partial T_p}{\partial t} h_p = dU_p = E_{sou} + E_u + E_d \quad (1)$$

ここに、 $(\rho c)_p$:舗装体の体積熱容量($\text{J/m}^3\text{K}$)、 T_p :舗装温度(K)、 h_p :舗装体の厚さ(m)、 dU_p :舗装体内部エネルギーの時間変化率($\text{J/m}^2\text{sec}$)、 E_{sou} :放熱パイプから周囲舗装体への供給エネルギーフラックス(J/m^2)、 E_u :舗装体から雪への供給エネルギーフラックス(W/m^2)、および E_d :舗装体底部を横切る熱エネルギーフラックス(W/m^2)である。 E_{sou} および E_d はそれぞれ次式で表される。

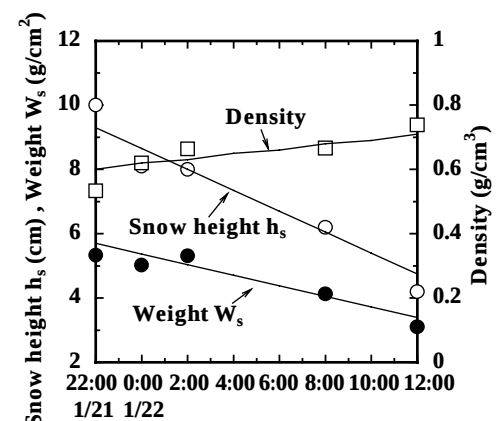


図-1 融雪による積雪の変化

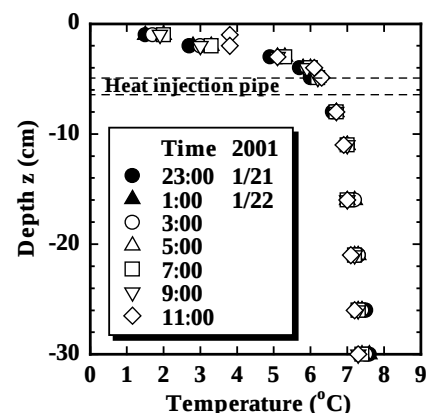


図-2 舗装体温度の鉛直分布

キーワード：浅層地中熱、伝熱特性、RHCS、無散水舗装体、舗装体温度分布

* 〒910-8507 福井県福井市文京3-9-1 TEL: 0776-27-8595 FAX: 0776-27-8746

** 〒668-0025 兵庫県豊岡市幸町10-3 TEL: 0796-22-3126 FAX: 0796-24-5267

$$E_{sou} = (\rho c)_w Q (T_{in} - T_{out}) / A_{pav} \quad (2)$$

$$E_d = -\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial z} \quad \text{for } z = -h_p \quad (3)$$

ここに、 $(\rho c)_w$ ：循環水の熱容量 ($\text{J/m}^3\text{K}$)、 Q ：循環流量 (m^3/h)、 T_{in} ：舗装体流入水温 (K)、 T_{out} ：舗装体流出水温 (K)、 A_{pav} ：融雪舗装体面積 (m^2)、 λ_p ：舗装体の熱伝導率 (W/mK) である。

また、積雪の熱エネルギー収支は、次式で与えられる。

$$E_{melt} = E_s + E_u - E_w - E_l \cong E_s + E_u \quad (4)$$

ここに、 E_{melt} ：融雪エネルギーフラックス (W/m^2)、 E_s ：大気と雪面との間の顕熱 (W/m^2)、 E_w ：融解水の移動による顕熱 (W/m^2)、 E_l ：雪面での相変化に伴う潜熱 (W/m^2) である。ただし、ここでは E_w および E_l は無視される。

E_s はニュートンの冷却則に従って、次式で計算される。

$$E_s = \alpha (T_s - T_a) / A_{pav} \quad (5)$$

ここに、 α ：雪面と大気との間の熱伝達係数³⁾、 T_s ：雪の温度 (K)、 T_a ：気温 (K) である。また、 E_{melt} は式 (6) で近似する。

$$E_{melt} = \Delta h_m \frac{dW_s}{dt} \quad (6)$$

ここで、 Δh_m ：融解熱 (kJ/kg) である。

図-4 は、舗装体の熱エネルギー収支の経時変化である。舗装体にとって、エネルギー利得を正、損失を負とする。放熱パイプからは、常に約 0.16 kW/m^2 の熱エネルギー (E_{sou}) が供給される。舗装体下部地盤から舗装体への熱エネルギー供給はあるものの ($E_d > 0$)、その値は小さい。また、 dU_p の値は小さいことから、式 (1) より E_{sou} 、 E_u とみなすことができる。

図-5 に雪の熱エネルギー収支の経時変化を示す。融雪に寄与する熱エネルギーを正、その逆を負とする。式 (4) と式 (6) から得られる E_{melt} に僅かな差異はあるが、両者はほぼ等しいとみなせられることより、本実験の妥当性が示された。

3. 結論

積雪路面の熱エネルギー収支を計算した結果、放熱パイプから供給される熱エネルギーは、舗装体下部地盤へ放熱されることはなく、全て融雪に消費されることが判った。今後さらに積雪時および放射冷却時における無散水融雪舗装の熱エネルギー収支を調べ、その伝熱解析モデルを構築し、融雪計算を行う。

参考文献

- 1) 福原輝幸・坂本信弘・石野圭史郎：地中熱利用による道の駅「ハチ北」の路面温度制御システム，水工学論文集第44巻，pp.235-240，2000。
- 2) 例えば，日本道路協会制定：「道路防雪便覧」
- 3) 渡辺 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

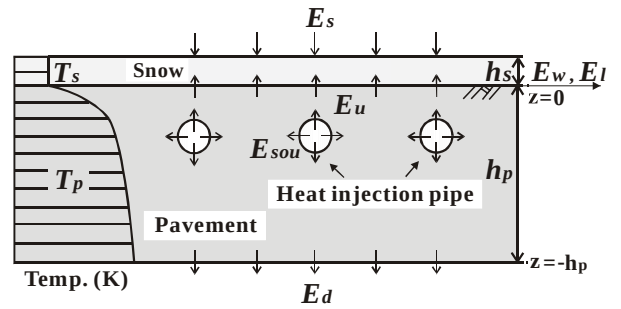


図-3 積雪路面の熱エネルギー収支概念図

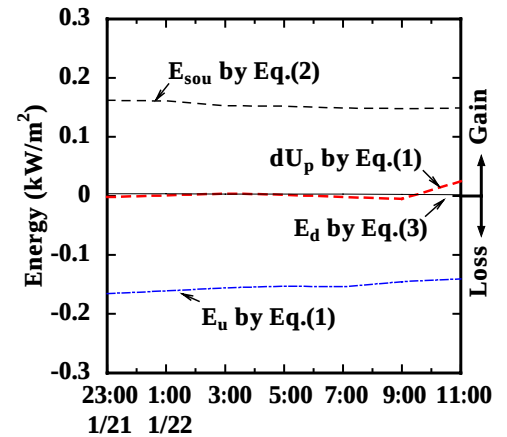


図-4 舗装体の熱エネルギー収支

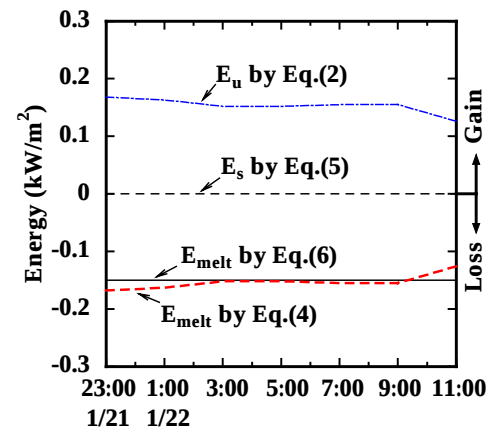


図-5 雪の熱エネルギー収支