

ロードヒーティング表面の熱収支に関する実験と解析

岩本欣也 (北大工学部), 佐山惣吾 (寒地技術研究所)
山口宗宏 (北海道工業技術研究所)

1. 緒言

ロードヒーティング表面の熱収支は、一般地表面の熱収支と異なり、ヒーターからの人為的な加熱が行われる他、表面が舗装面であるためにアルベド (日射反射率) がその色調によって大きく左右される点、水が浸透せずに表面を流れて熱を持ち去る点 (アスファルトの場合) 等が特徴である。また熱収支の評価は、融雪負荷熱量の設計に際して重要であり、従来より式 (1) の所要融雪熱量算定式として用いられてきているが¹⁾、舗装表面のアルベド (日射反射率) の差異による影響までを考慮していない他、各因子間の相互関係についての知見が少なく、簡易で概略的な計算式である。本報は、このようなロードヒーティング表面の熱収支に関して、特に日射の吸収と反射の影響を中心として、温水融雪パネルの放熱量、放射および対流熱伝達、雪の融解熱等、実地の実験結果を踏まえた解析を行うものである²⁾。

$$Q_p = Q_s + Q_m + A_r (Q_s + Q_h) \dots (1) \quad A_r; \text{自由面積率}$$

Q_p ; 所要融雪熱量 Q_s ; 顕熱 Q_m ; 融解熱 Q_r ; 蒸発熱 Q_h ; 対流および放射熱

2. 実験方法

実験に使用した融雪パネルを図1に示した。このパネルを4つの条件のもとで (表1) 4枚直列に設置した。運転期間は1996年2月15日から2月27日までである。実験の測定においては、パネルの中心上60cmの場所に日射計2個を、それぞれ天空と地面に向けて設置し、日射量とパネル表面からの反射量を測定した。日射計の測定波長範囲は0.305~2.80μmであり、これは遠赤外線領域を含まない短波領域である (長波放射量は含まれない)。なお、4枚の融雪パネルは、水道排水熱源 (1次側温度8.1~8.9℃) の圧縮式ヒートポンプから供給される温水 (2次側温度12.8~15.6℃) によって加熱され、各パネルの銅パイプを流れる温水の流量は5ℓ/minであった。

表1 融雪パネルの設置条件

	パネルA	パネルB	パネルC	パネルD
表面色	黒色	灰色	灰色	灰色
パネル下	断熱材無	ウレタン断熱材 20mm	ゴムチップ断熱材 20mm	断熱材無
温度測定点	表面 パイプ温水	表面 パイプ温水 断熱材下	表面 パイプ温水 断熱材下	表面 パイプ温水

注: 表面温度はパイプ間の温度

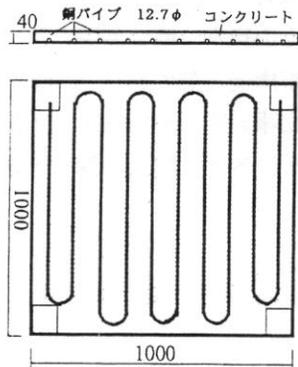


図1 温水式融雪パネルの構造

3. 実験結果

図2に融雪パネルの温水温度変化を示した。また、図3に日射量(反射量)の変化を、図4(a)(灰色表面)および図4(b)(黑色表面)にパネル放熱量と日射吸熱量の変化を示した。図中黑色表面は表1のパネルAに、灰色表面はパネルDに相当する。この期間の日出没時間は2月15日(6:43~17:38)、2月27日(6:31~17:49)であり、日照時間は11時間前後である。図3から1日の日射量と反射量を積算して得られたアルベド(表面反射率)は、黒色で0.05、灰色で0.22であった。また、図4より、昼間は夜間と比べて日射の吸熱量相当分だけパネル放熱量が小さくなる傾向がわかる。

次に実験期間の熱収支のうち、加熱要素のパネル放熱量、日射吸熱量のおよびその合算量の総量について計算した(表2)。日射吸熱量がパネル放熱量の2~3割程度と大きな影響を与えることがわかる。また、黒色表面の方が灰色よりも日射吸熱量比率が大きい反面、加熱合算量としては小さくなる傾向が見られる。

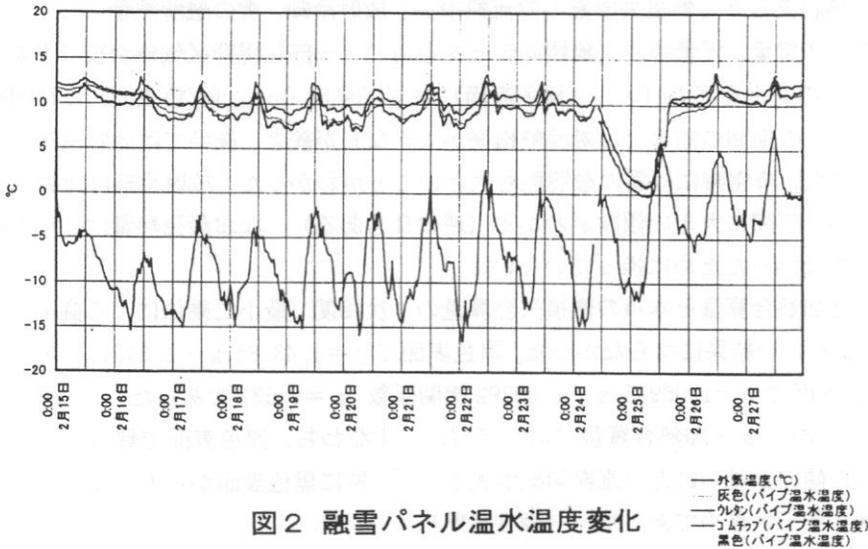


図2 融雪パネル温水温度変化

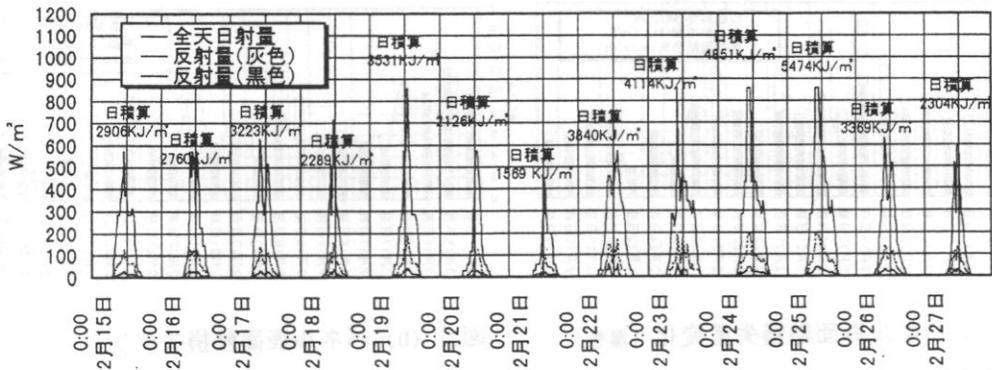


図3 日射量、反射量の変化

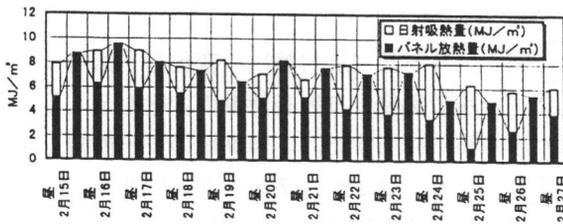


図 4 (a) パネル表面加熱量変化 (黒色)
 昼間夜間に分けた日出没時までの積算量

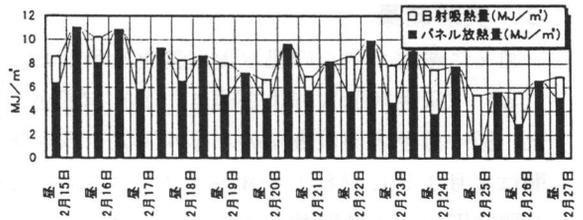


図 4 (b) パネル表面加熱量変化 (灰色)
 昼間夜間に分けた日出没時までの積算量

4. 表面からの熱損失量の計算

実験期間の熱収支のうち熱損失要素の対流熱損失、放射冷却、雪の融解熱量については、外気温度、風速、降雪量、雲量等の気象観測データを用い（一部札幌管区气象台統計を参考）、計算した³⁾。その変化を図5 (a) (黒色表面) および図5 (b) (灰色表面) に期間総量を表3に示した。この期間の前半では対流熱損失が大きな日が続き、後半では放射冷却が大きな日が見れた。また、降雪時には雪の融解熱も大きいことがわかった。放射冷却は比較的小さめの値を示したが、夜間に大きい傾向がわかる（逆の日もある）。なお蒸発熱量は、路面の湿潤状態が把握できなかったために扱っていない。

前項で求めた加熱合算量と本項の熱損失合算量の1次相関（最小二乗法による直線近似）を調べたが、あまりいい結果にならなかった。黒色表面で $y = 1.43586x - 1.34517$ 相関係数 $r = 0.519$ 、灰色表面で $y = 1.06925x - 1.89292$ 相関係数 $r = 0.533$ であった。（ y ；熱損失合算量 (MJ/m^2) x ；加熱合算量 (MJ/m^2)）すなわち、黒色表面で熱損失量が加熱量よりおおきめの傾向が見られた（直線勾配が大きい）。特に黒色表面からの対流熱損失が大きく、放射冷却も若干大きめであった。（表3参照）

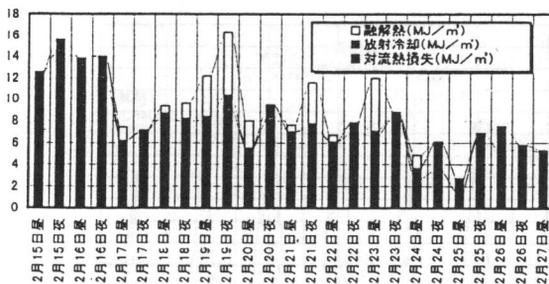


図 5 (a) パネル表面熱損失量変化 (黒色)
 昼間夜間に分けた日出没時までの積算量

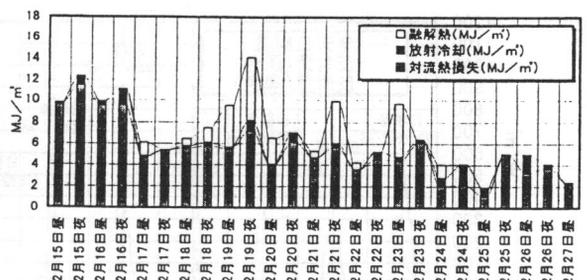


図 5 (b) パネル表面熱損失量変化 (灰色)
 昼間夜間に分けた日出没時までの積算量

表2 加熱合算量と日射吸熱量比率

	黒色表面	灰色表面
期間加熱合算量	183.3MJ/m ²	202.7MJ/m ²
パネル放熱量	143.1MJ/m ²	169.7MJ/m ²
日射吸熱量	40.2MJ/m ²	33.0MJ/m ²
日射吸熱量比率	28.0%	19.5%

表3 各熱損失の期間総量

	黒色表面	灰色表面
期間熱損失合算量	229.6MJ/m ²	173.1MJ/m ²
対流熱損失量	186.5MJ/m ²	133.3MJ/m ²
放射冷却量	16.4MJ/m ²	13.1MJ/m ²
融解熱量	26.7MJ/m ²	26.7MJ/m ²

5. 結論

以上の報告で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 融雪パネル表面では、昼間は夜間と比べて日射吸熱量の相当分だけパネル放熱量が小さくなる傾向がある。
- (2) 日射吸熱量はパネル放熱量の2～3割程度とかなり大きな影響を与え、表面色による違いが無視できないものであると言える。
- (3) 今回のような連続運転の場合、融雪パネル表面からの熱損失として風による対流熱損失が大きく、雪の融解そのものに消費される熱量の5～7倍にもなり、燃費を小さくするために的確な制御が重要であると言える。
- (4) 融雪パネル表面の熱の出入りにおいて、黒色表面のパネルでは熱の出（熱損失）が熱の入り（加熱）より大きい傾向が見られる。特に対流熱損失が大きく、放射冷却も若干大きめとなった。

参考文献

- 1) 空気調和衛生工学便覧 (1987年 第11版) 第6編 空調設備設計
第3章 空調および暖房方式の選択と設計 3.12 融雪方式
- 2) 第12回寒地技術シンポジウム「融雪パネルの温度変化への日射の影響について」 岩本欣也、許才一、山口宗宏、西川泰則、佐山惣吾 (1996)
- 3) 気象研究ノート第136号「融雪機構と熱収支」小島賢治 (1979)