



Title	融雪パネル下の地温変化のシミュレーション
Author(s)	岩本, 欣也; 佐山, 惣吾; 許, オー
Description	第3回衛生工学シンポジウム (平成7年11月9日 (木) -10日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 3 モデリング、情報管理 . 3-1
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 3, 139-144
Issue Date	1995-11-01
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/7898">https://hdl.handle.net/2115/7898</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	3-3-1_p139-144.pdf



3-1

融雪パネル下の地温変化のシミュレーション

○岩本欣也 (株)北海道融雪研究所)  
佐山惣吾 (北海道工業技術研究所)  
許 才一 (北海道大学工学部)

1. はじめに

ロードヒーティングの融雪効率、ロードヒーティング下の路盤構造およびさらにその下の土壌の状況によって大きく影響されると考えられる。その要素としては、①断熱材の有無 ②路盤材料特性(熱伝導率、熱容量) ③路盤下土壌の含水率 等の諸条件による違いが上げられる。断熱材の有無については、地中への放熱を小さくするために北海道では断熱材が有効であるとされている一方、東北以南や北海道の春先等地温がかなり暖かくなる場合は、断熱しない方が地温を利用できるという報告もある。

本報告では、ボックスに充填された土壌の上にコンクリート製の電気融雪パネルを置いたセットを恒温槽の中に設置して、断熱材の有無およびパネル下土壌の含水率を変化させた場合の、各点の温度変化を測定したモデル実験について述べる。また、このモデル実験を定常状態の1次元熱伝導モデルとして、熱流の上下比率や各層の熱伝導率を数値計算し、パネル下の土壌含水率の違いが融雪効率に与える影響について、理論的な解析を行った結果についても報告する。

2. 恒温槽内モデル実験の概要

450×450×300mmのプラスチックボックスに土壌を充填した上に、300×300×50mmのコンクリート製の電気融雪パネル(側面を発泡ポリスチロール20mmで断熱)を置いたセットを用い、それを内寸法500×600×400mmの恒温槽中に設置して通電し、熱特性を測定した。このパネルの中心に電熱線(カーボンタイプ)が100mmピッチで埋め込まれていて、18Wの電力(1㎡あたり200W)で加熱した。恒温槽の空気温度を-10℃、-5℃、-1℃に設定して、パネル各点および土壌中各点の温度を測定し、パネルの表面と下面に熱流板を付けて(300×300×1mm)上下方向の熱流値を測定した。また、以上の実験を、土壌の含水率が飽和の場合と不飽和の場合(35%と25%)についてそれぞれ行った。実験の諸条件を表1に示した。

実験番号	RUN1	RUN2	RUN3
設定空気温度	-1.0℃	-5.0℃	-10.0℃
空気温度	-0.9℃	-3.9℃	-6.9℃
土壌含水率	35%	35%	35%

実験番号	RUN4	RUN5	RUN6
設定空気温度	-1.0℃	-5.0℃	-10.0℃
空気温度	-1.2℃	-5.4℃	-9.8℃
土壌含水率	25%	25%	25%

表1 各実験条件

この実験では、3本の電熱線から定常的に18W(200W/m<sup>2</sup>)の電力が供給された一方、空気温度が一定に保たれるように冷凍機が稼働した。このような外部からの熱の供給および除去によって、恒温層内のセット内の各点の温度は、最初数時間変動してやがて10時間程度たつと定常状態になり変化がほとんどなくなった。温度測定はこの定常状態での温度を対象とした。

### 3. 断熱効果

著者らは前報において、ロードヒーティングの断熱効果について考察を行った<sup>1)2)</sup>。その内容は、北海道のように地温が0℃以下の場合には断熱した方が融雪効率が高く、一方北陸のように地温が0℃かそれより高い地方に於いては断熱の効果が少ないと結論できると考えられた。本報においては、恒温槽内の融雪パネル下の断熱を行わずに実験を行った。次報において著者らは断熱を施した場合について検討する。

### 4. 実験結果

#### 4-1 地中各層の温度分布

定常状態での各点の温度分布を図1(RUN1)および図2(RUN4)に示した。パネル表面よりパネル下面の温度が高く、地中よりも空气中へ多くの熱移動が行われている。また、土壤底面の温度は外気温度がもっとも低いRUN6でも-0.5℃であり、RUN1~RUN6すべてにおいて土壤の凍結は考えなくともよい。

#### 4-2 空気温度と地中温度分布の相関

次に空気温度と地中各層の温度分布との相関を図3に示した。空気温度が高い場合、地中各点の温度も高くなった。一方、図3から含水率が小さくなると(土が乾燥すると)、地中各層の温度が全体として高くなることわかる。また、図4に熱流板の出力電圧値から算出した上下への熱流値を示した。土壤の含水率が大きくなり空気温度が上昇するほど下への熱流が大きいことわかる。

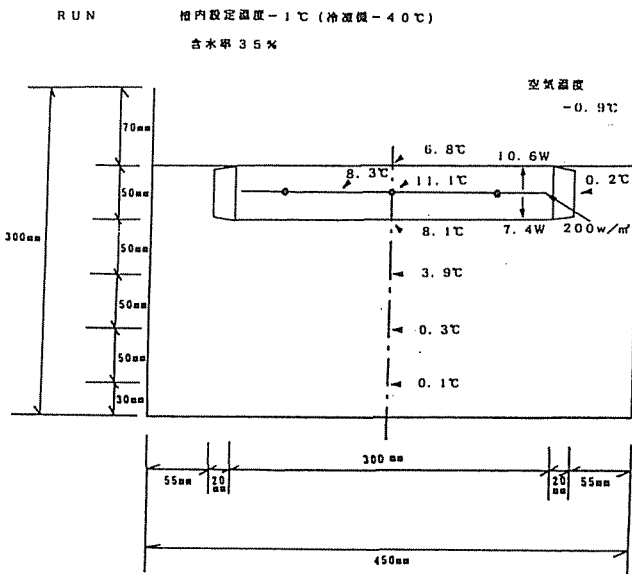


図1 融雪パネル下の温度分布 (RUN1)

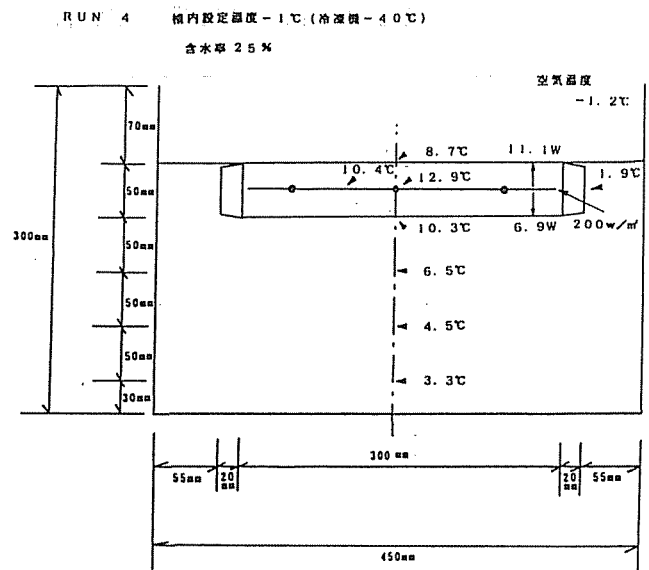


図2 融雪パネル下の温度分布 (RUN4)

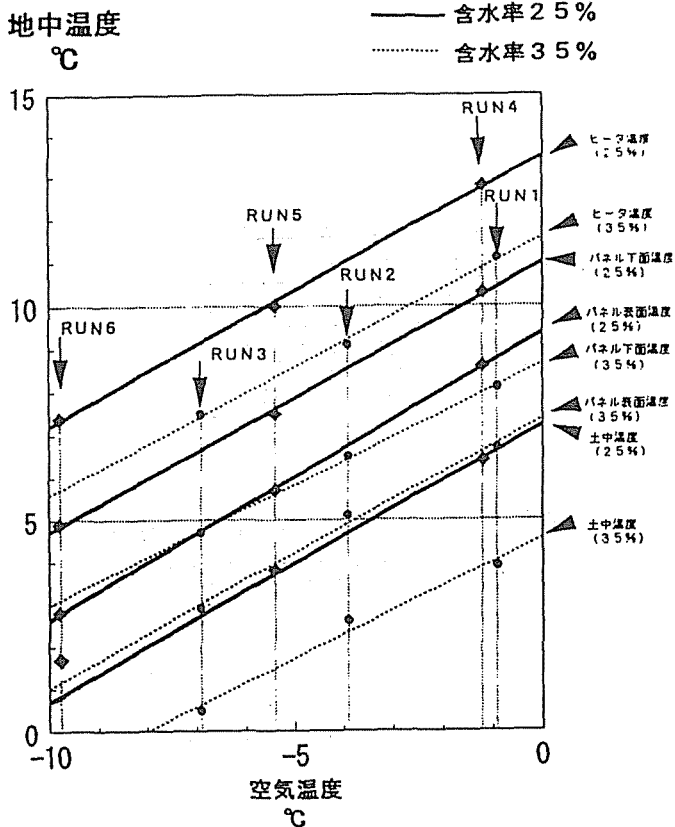


図3 空気温度と地中各層の温度分布

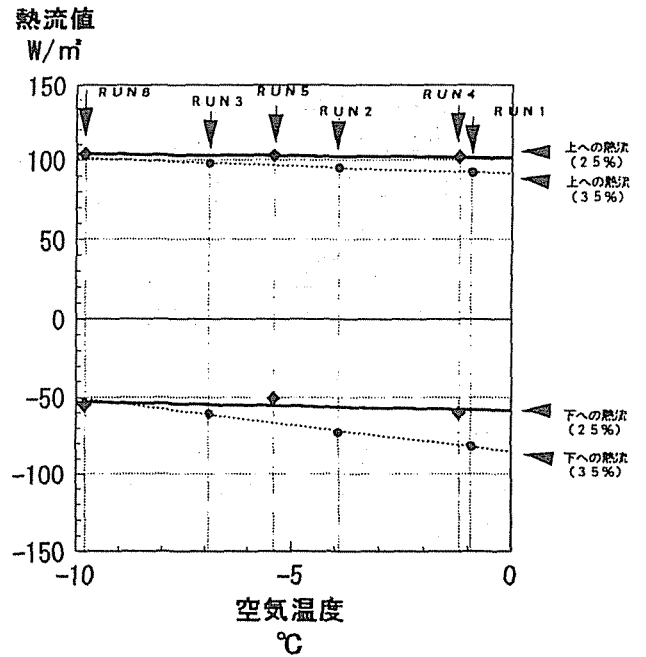
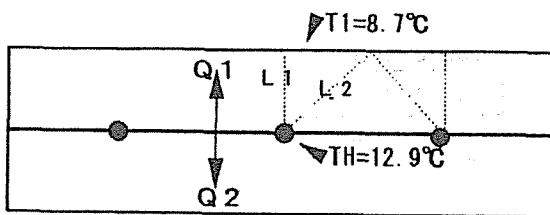


図4 各RUNにおける熱流値

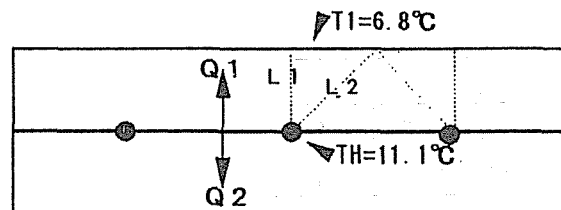
## 5. 考察

### 5-1 上下方向への熱流比

図1 (RUN1) および図2 (RUN4) の数値を用いて、まず上下方向別の熱流量を求めた。モデル実験を1次元の定常熱伝導として考える。



RUN1 (含水率3.5%)



RUN4 (含水率2.5%)

$$Q1 = \alpha (TH - T1) \quad Q2 = \alpha (TH - T2) \quad Q = Q1 + Q2 = 18W$$

$$\alpha = \lambda S / L \quad \lambda: \text{コンクリートの熱伝導率} \quad S: \text{パネル面積 (0.09m}^2\text{)} \quad L = \text{距離}$$

$$TH: \text{ヒータの温度} \quad T1: \text{パネル表面温度} \quad T2: \text{パネル下温度}$$

ここにヒータの埋設深さ(距離)  $L$  については、 $L = (L1 + L2) / 2$  と計算して、ヒータ直上の表面とヒータから最も離れた表面での偏差を平均化する簡易方法が一般に行われている3)。以上の計算を行うと、RUN1のコンクリートの熱伝導率  $\lambda$  は  $1.63W/mK$  となり、 $Q1$ 、 $Q2$  が求まる。他のRUNについても同様に計算して表2の結果が得られる。

実験番号	空気温度	上への熱流	下への熱流
RUN1 (35%)	-0.9℃	Q1=10.6W (58.9%)	Q2=7.4W (41.1%)
RUN2 (35%)	-3.9℃	Q1=10.9W (60.6%)	Q2=7.1W (39.4%)
RUN3 (35%)	-6.9℃	Q1=11.3W (62.8%)	Q2=6.7W (37.2%)
RUN4 (25%)	-1.2℃	Q1=11.1W (61.8%)	Q2=6.9W (38.2%)
RUN5 (25%)	-5.4℃	Q1=11.3W (62.8%)	Q2=6.7W (37.2%)
RUN6 (25%)	-9.8℃	Q1=12.0W (66.7%)	Q2=6.0W (33.3%)

表2 上下方向への熱流値

表2の結果から土壌の含水率が大きくなると、また空気温度が上昇すると下への熱流が相対的に大きくなることからわかる。このことは図4の熱流板によって測定した上下熱流値の特性と一致する。

### 5-2 各層の熱伝導率および熱伝達率

上下への熱流が算出できたので、これが各層に共通であることから、さらに図1 (RUN1) および図2 (RUN4) の結果を用いて (他のRUNについても同様に)、各層の熱伝導率 (式1より) および空気とパネル、空気と土壌 (プラスチックの壁を通して) 間の熱伝達率 (式2より) を計算した。

$$Q1 \text{ (または } Q2) = \Delta T \cdot \lambda \cdot S / l \quad (\text{式1})$$

$$Q1 \text{ (または } Q2) = \Delta T \cdot K \cdot S \quad (\text{式2})$$

K: 熱伝達係数

実験番号	空気温度	熱伝導率		熱伝達率	
		コンクリート	土壌	空気-コンクリート	空気-土壌
RUN1 (35%)	-0.9℃	1.63 W/mK	1.56 W/mK	15.30 W/m <sup>2</sup> K	82.20 W/m <sup>2</sup> K
RUN2 (35%)	-3.9℃	1.70 W/mK	1.79 W/mK	13.46 W/m <sup>2</sup> K	23.20 W/m <sup>2</sup> K
RUN3 (35%)	-6.9℃	1.50 W/mK	2.11 W/mK	12.94 W/m <sup>2</sup> K	11.82 W/m <sup>2</sup> K
RUN4 (25%)	-1.2℃	1.52 W/mK	1.53 W/mK	12.46 W/m <sup>2</sup> K	17.03 W/m <sup>2</sup> K
RUN5 (25%)	-5.4℃	1.68 W/mK	1.60 W/mK	11.21 W/m <sup>2</sup> K	12.62 W/m <sup>2</sup> K
RUN6 (25%)	-9.8℃	1.50 W/mK	1.89 W/mK	11.02 W/m <sup>2</sup> K	7.17 W/m <sup>2</sup> K

表3 各層の熱伝導率および熱伝達率

表3から、コンクリートの熱伝導率は条件が違っていてもほぼ一定であることがわかり、一方土壌の熱伝導率および土壌と空気境界との熱伝達率は、含水率が大きく空気温度が高い方が大きい値となっている。すなわち水分がある方が、土壌での熱移動および空気への放熱を大きくして全体の温度を下げたことがわかる。

### 5-3 土壌の含水率と熱伝導特性

5-1で述べたように土壌の含水率が大きいほど下への熱流が大きくなったが、このことと土壌の熱伝導率の含水率による変化との関係を考察してみた。

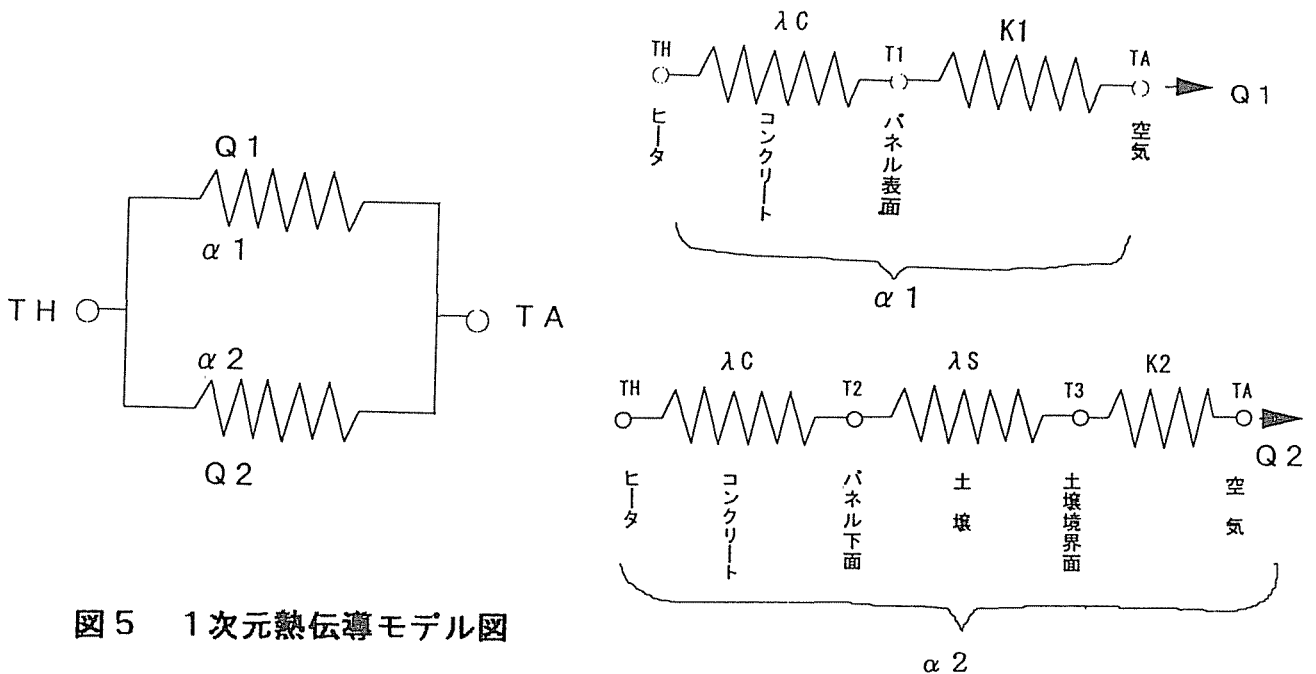


図5 1次元熱伝導モデル図

恒温槽内モデル実験を図5のような1次元の熱抵抗モデルとして考えることにする。ヒータから上下にそれぞれQ1、Q2の並列な熱の流れが存在し、最後は空気中に達して同じ温度となる。並列に分かれた2つの熱抵抗はさらにそれぞれ各層が直列に並んだ熱抵抗となっている。

$$\alpha 1 \cdot LC / S = LC / (LC / \lambda C + 1 / K 1)$$

$$\alpha 2 \cdot (LC + LS) / S = (LC + LS) / (LC / \lambda C + LS / \lambda S + 1 / K 2)$$

LC: コンクリートの厚さの1/2      LS: 土壌層の厚さ  
 $\lambda C$ : コンクリートの熱伝導率       $\lambda S$ : 土壌の熱伝導率  
 K1: 空気-コンクリートの熱伝導率  
 K2: 空気-土壌の熱伝導率

$$Q = Q 1 + Q 2 = \alpha 1 (T H - T A) + \alpha 2 (T H - T A)$$

$$= (\alpha 1 + \alpha 2) (T H - T A) \quad (式 3)$$

ここに $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ は、それぞれ上下方向へのヒータと空気間の総体の熱伝導の係数であり、熱伝導率に断面積を乗じて伝熱距離で除した単位となっている。

式3よりQが一定であるから、 $(\alpha 1 + \alpha 2)$ の値が大きくなれば、 $(T H - T A)$ はそれに反比例して小さくなるはずである。実験結果より、土壌の含水率が大きいと、土壌の熱伝導率 $\lambda S$ は大きくなるから $\alpha 2$ も大きくなる。その場合は相対的にQ2が大きくなり、THとTAの差が小さくなる。すなわち空気温度(TA)は設定値より若干高め値となり、ヒータ温度(TH)は低めとなる。その間にある各層の温度はヒータ温度の低下に連動して低め値となる。以上、①図3において含水率が高い方が設定空気温度に対して高め値をとったこと ②図3において含水率が高い方がヒータ温度が低く、かつ全体に温度が低いこと ③表2において含水率が低い方が下への熱流が相対的に大きくなることを理論的に説明できた。

#### 5-4 2次元定常熱伝導モデル

本報告のモデル実験は、①土壌を入れたボックスの横の壁面から空気中に熱が放散すること ②ヒータは3本の平行線として発熱していることを厳密に評価する必要があり、それには2次元(あるいは3次元)の定常熱伝導モデルが必要となる。著者らは差分法を用いた2次元定常熱伝導のシミュレーションプログラムを作成し、簡単な適用を試みており、詳細については断熱材の効果の解析とあわせて次報で報告する。

## 6. まとめ

以上のまとめとして次のことが言える。

- (1) ロードヒーティングにおいては、土壌の含水率が大きくなると土壌の熱伝導率が大きくなり、下方向への熱流が大きくなる。すなわち土壌の水分が多いことは、融雪には不利な条件となる。
- (2) (1)の結果として、ロードヒーティング下の土壌の水分が多いと、ビータ温度が低下し、ロードヒーティング構造全体の温度を下げる。
- (3) (1)、(2)を考えると下への熱流を遮断する断熱材の存在が有効な対策となる。断熱材があることによって、土壌の水分に関りなく下への熱流を遮断できるからである。
- (4) 土壌から空気への熱伝達についても、土壌の含水率によって影響され、含水率が大きいほど熱伝達係数も大きくなる。
- (5) コンクリートパネル表面から空気への放熱（熱伝達）は、空気温度によって影響され、空気温度が低い程大きな値となる
- (6) (5)と連動して、空気温度が低い程上方向の熱流が下方向の熱流に対して相対的に大きくなる。

### 参考文献

- 1) 佐山、山口、西川、三浦、須藤、酒井 「北海道の雪氷No. 13」(1994)
- 2) 岩本、西川、佐山、山口 「北海道の雪氷No. 14」(1995)
- 3) 建設省土木研究所 土木技術資料(4-11, p24)