

通電発熱塗料を用いた発熱シートの利用

－冬期の階段融雪および材料の保温保管の適用事例－

Heat-generating sheets using electrical heat-generating paint
-Application examples of stairway snow melting and material temperature control storage in winter-

キーワード

通電発熱塗料, 融雪, 発熱シート, 安全対策,
保温保管

前田 幸男*, 伴 享*, 塚本 健二**,
菊田 道宣**, 佐々木 拓***, 内藤 和弘***,
青沼 美鶴****, 武山英治*****

研究概要

これまで、雪や凍結に起因する転倒災害防止対策として、階段部を対象とした発熱シートによる融雪方法を開発してきた。発熱シートは、通電すると発熱する“通電発熱塗料”を用いて製作したシート状のヒーターであり、階段の踏面（ふみづら）裏面に取付けて融雪を図る。

ここでは、2022年冬期の試行結果を踏まえて改良した、屋外の階段融雪の実施例、さらに、同シートを応用し、寒冷地における土木材料の冬期凍結対策を目的とした保温保管の実施例について報告する。

ABSTRACT

In order to prevent falling accidents causing by snow and freezing on the stair tread and floor, we have developed the snow melting method using heat-generating sheets for stair treads. The heat-generating sheet is a sheet-shaped coated by an “electrical heat-generating paint” that generates heat by energization and is applied to the underneath stair treads for melting snow. Here, we report an application of outdoor staircase snow melting that has been improved based on the trial results from winter 2022, and an application of temperature control storage using the same sheet to prevent winter freezing of civil engineering materials in cold regions.

1 はじめに

これまで、電気を通すと発熱する“通電発熱塗料”を用いた薄型の発熱シートを開発し、2022年冬期までに、この発熱シートを仮設足場のステップや屋外の鋼製階段の踏面裏面に貼付けて融雪する転倒防止対策の適用性を確認してきたり⁴⁾。これらの実施例のうち、2022年の宮城県（大崎市）における屋外階段では、踏面周辺部に雪が残り、十分な融雪とはならなかった。これは、過剰加熱防止用リミッター用途のサーモスタット（以下温度スイッチ）の取付け位置が原因と考えられた。発熱シートを被覆する遮水シート内の温度上昇が著しい密閉された位置に温度スイッチを設置したため、これが作動し、断続運転が続いたため、融雪面の温度が十分に上昇しなかったと考えられた。このため、温度スイッチの動作環境を変え、継続運転するように改良を試みた。

また、冬期において凍結により機能低下が懸念されるコンクリートの打継処理剤（凝結遅延剤）の凍結予防対策として、階段融雪に使用する発熱シートを適用し、倉庫内を保温して同材料の保管を行った。

ここでは、鋼製屋外階段の融雪および打継処理剤の保温保管について、2023年冬期、青森県（弘前市）で実施した事例について報告する。

2 発熱シート概要および階段融雪のこれまでの経緯

2.1 発熱シートの概要

通電発熱塗料は、導電体のカーボンナノマテリアルを含む水性樹脂ベースの塗料で、電気を通すと塗装部が発熱し、ヒーターとして機能する塗料である。通常の熱線ヒーターと比べ低電圧で発熱し、温度上昇が早く、加熱が均一となるなどの特徴がある。

一方、塗膜材内での通電が発熱の前提であり、加熱対象面（塗装面）が鉄などの導電性の材質、水が付着している場合には、塗膜面外での通電となり発熱しなくなるため、塗膜面での絶縁が必須となる。

また、均一な発熱のためには均一な塗膜形成が必要となるため、高粘度（粘度30Pa・s程度：マヨネーズくらい）の塗料を薄く均一に塗装する方法が必要となる。

* 技術センター 土木研究部, ** 技術センター 建築研究部, *** 東北支店, ****株式会社メイジ

このように、塗布面の絶縁性確保、均等な塗膜形成などの課題に対して、絶縁、防水、耐熱性を有するポリエチレンテレフタレートシート（以下、PETシート）に、均等な塗布が可能なスクリーン印刷技術を用いて塗布し、これをPETシートにより、パウチ加工あるいは、ラミネート加工を行い製作した。図-1に示す基本構成部に、各用途に応じて保護シート、断熱材を付加し、発熱シートを製作した。

2.2 階段融雪の方法および改良点

2.2.1 2022年宮城県における試行結果の課題

前年の2022年、宮城県大において実施した仮設事務所の屋外鋼製階段での試行では、図-2に示すように、踏面中央部の融雪は認められたが、周囲端部の雪が残る結果となった。この原因として、過剰加熱防止リミッターとして取付けたバイメタル式サーモスタットの設置位置および仕様（設定動作温度が低かった）が原因と考えられた。

図-3に示す階段各所の温度および電力値の変化をみると、電力は、約4分間隔の凹凸の変動のON-OFFが繰り返され、この電力変化に対応して踏面裏面の温度も変動していることがわかる。温度上昇が著しい密閉された遮水シート内部に温度スイッチを配置したため、外部へ熱が伝わる以前に、温度スイッチが動作したため、電源停止を繰り返す断続運転状態となり、融雪面の十分な温度上昇に至らなかったと考えられた。

さらに、踏面裏面の断熱方法や階段構造（蹴込板、手摺横板の有無など）による融雪面外への放熱も一因と考えられた。

2.2.2 2023年青森県での試行における改良点

青森県における試行では、温度スイッチ動作による断続運転の改善および融雪面以外への放熱の低減について改良を行った。

温度スイッチ動作による断続運転の改善については、動作環境を変えるため設置位置を変更した。断続運転の対策としては、動作温度の高い温度スイッチに交換することも考えられたが、材料手配、再配線作業などを考慮し、交換せずに、同じ温度スイッチを使用することとし、温度上昇が著しくなる遮水シート密閉内部の箇所から被覆の外側に移設し、動作頻度の低減を図った（図-4）。

また、融雪面以外への放熱の低減については、対象の階段は蹴込板（階段面の鉛直部材）がある構造であり、風

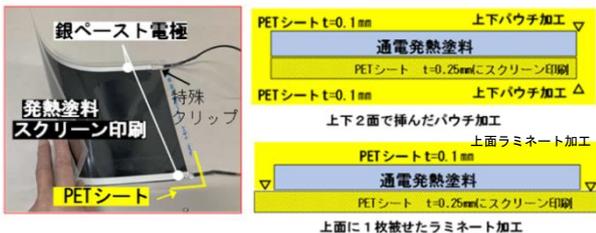


図-1 発熱シート基本構成 (PETシート部)

通しによる放熱の影響も小さく、階段下方の空気の流れを抑制できると考えられた。階段構造・断熱方法の観点から、ヒーター設置範囲の蹴込板背面にスタイロフォームを貼り、さらに、階段下面を側桁に沿って合板 (t=12mm コンパネ) で覆い、階段下方裏側の断熱を図り、融雪面以外への放熱を低減させることとした（図-5）。



図-2 2022年宮城県試行時の融雪状況⁵⁾

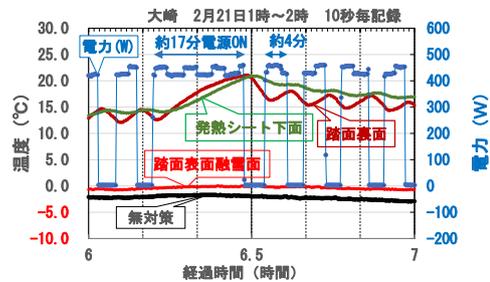


図-3 温度スイッチの動作状況と温度変化

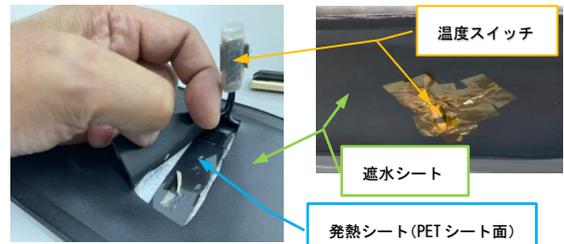


図-4 温度スイッチの遮水シート外への移設



図-5 発熱シート設置状況 (改良点)

階段融雪用の発熱シートは、図-6に示すように、基本構成部(図-1)と保護断熱シートを遮水シートで密閉し、階段面側にマグネットシートを付けたタイプを用いた。接着剤等を使用せず階段裏面に貼り付けることで、資材返納時の着脱・復旧が容易となること、また、設置時の上向き作業の負荷軽減を図った。

3 階段融雪の試行

3.1 融雪シートの設置および計測方法

青森県での試行は、事務所の鋼製屋外階段の全16段のうち、吹込みや靴底に付着した雪の着雪が多くなる下方の6段分に対して発熱シートを設置した(図-7、図-8)。

融雪状況の確認のため、階段各箇所に対し熱電対を設置し、図-8に示す温度計測を行った。使用電力については、発熱シート6枚分の電力(瞬時値)をデータロガーで記録し、また、適宜、サーモカメラ、非接触赤外線温度計による測定も併せて行った。

気温については、気象庁の観測記録を用いた。表-1に示すように、青森県の方が前年試行の宮城県より、気温が低く、降雪が多い気象条件であることがわかる。

3.2 融雪状況および計測結果

融雪状況および発熱シートの動作状況例を図-9に示す。なお、青森県事例の階段構造は、手摺横板有り、蹴込板有りの点が宮城県事例との相違点である。また、図中の気温・積雪量は弘前記録⁵⁾による値で、積雪量は、撮影6時間前との増分を示している。改良前の宮城県の事例(前述図-2)と設置条件の相違点は、使用ヒーター運転条件(踏面寸法、電力密度400W/m²)は同等、階段構造(蹴込板の有無



図-6 マグネットタイプ発熱シート



図-7 対策前の階段状況

手摺横板の有無)と気象条件(降雪量、気温、風向風速に伴う階段部への吹込み量)などが異なる条件となっている。降雪量が多く気温が低い条件下の青森県の事例の方が、融雪範囲が広く良好な状態となったことから、今回の改良の効果が確認された。青森県弘前市における運用は、2023/1/26に運転を開始し、2023/2/15~3/15の期間、温度・電力を測定した。図-10の上図に階段温度・電力を下図に毎時の気温・降雪・積雪記録⁵⁾および日積算電力量を示す。

測定期間の気温-7.3℃~14.6℃、最大降雪8cm、最大積雪120cmに対し、階段温度は、融雪面の裏(4段目踏面裏面:図-8のA-1)が常に高く10.8~59.7℃の範囲となった。

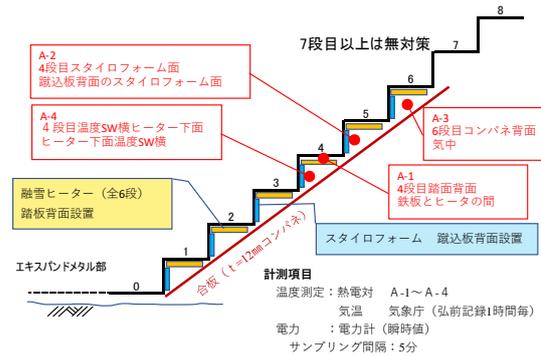


図-8 発熱シート設置および計測位置

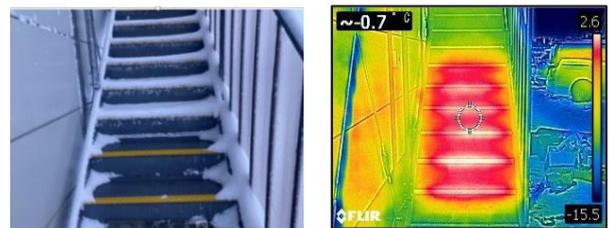
表-1 試行地域の気象記録⁵⁾

要素	観測地点	青森県(弘前)	参考:2022年実施 宮城県(古川)
	降雪時期		11月中旬から4月上旬
降雪の深さ合計		80cm 1月下旬	31cm 1月下旬
最深積雪		78cm 2月中旬	15cm 2月上旬
日最低気温 冬期最低		-5.1℃ 2月上旬	-4.2℃ 1月下旬
平均気温 冬期最低		-1.8℃ 1月下旬	-0.2℃ 1月中~下旬
日最高気温 冬期最低		1.4℃ 1月中旬	3.5℃ 1月中~下旬

観測地点:弘前(北緯40度36.7分、東経140度27.3分) 標高30m
古川(北緯38度35.9分、東経140度54.7分) 標高28m
統計期間:1991~2020年 平年値(旬ごと11月から3月の値)



2023/1/31 7:00 撮影 気温-4.7℃、積雪量 7 cm



2023/2/21 6:48 撮影 気温-3.7℃、積雪量 15 cm

図-9 発熱シートの融雪状況および動作状況例

階段各所の温度は気温とともに変動し、各日の昼前後にピークを示している。上図の電力は、ON-OFF 変動が繰返しみられるが、下図に示す降雪時に対応して、温度スイッチ動作頻度は少なくなり電源 ON 状態となっている。

また、気温が10℃程度と高い場合には、外気温サーモスタットが動作して電源 OFF となるため、ON-OFF 変動頻度が少なくなっている。

下図の日積算の電力量（図中赤ライン）は、気温（図中黒ライン）が高い低く、気温が低く、降雪時には、使用電力量が高くなっていることがわかる。

また、適宜行ったサーモカメラ、赤外線温度計による測定温度は、気温に依らず融雪面となる踏面表面は概ね3℃程度以上となることが確認され、融雪可能と判断された（図-11）。



階段各所温度 (°C)	最大	最小	平均
融雪対策 1~6段	1.6	4.7	3.1
無対策 7~15段	-2.8	-4.0	-3.6
無対策 側桁上方	-4.2	-4.7	-4.4
無対策 反対側階段	-5.1	-5.8	-5.3

図-11 赤外線温度計による測定状況

3.3 青森県弘前市における階段融雪の結果

外気温と踏面裏温度の関係を図-12に示す。同図より、外気温が-7℃～15℃の範囲において、融雪面裏側の温度は、平均25℃程度となっており、改良前の宮城県の結果16℃平均より、8℃程度高い結果となっている。改良効果は、この温度差として発揮され融雪状態が改善されたといえる。

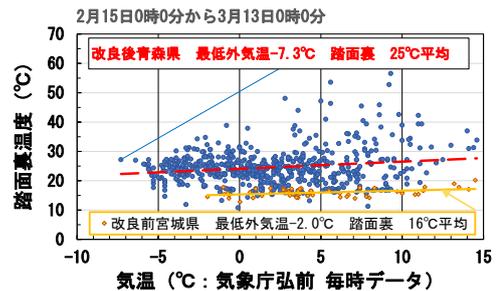


図-12 改良効果確認 外気温と踏面裏温度

3.4 使用電力量について

日平均気温と1日当りの使用電力量の関係を図-13に示す。今回の運用では、外気温6℃で作動するサーモスタットを設置したため、外気温の上昇に伴い電力消費量は低下している。同図の傾きより、気温12℃程度で電力量は0kWh程度になると推定されるが、これは日平均の気温で整理しているためと考えられる。

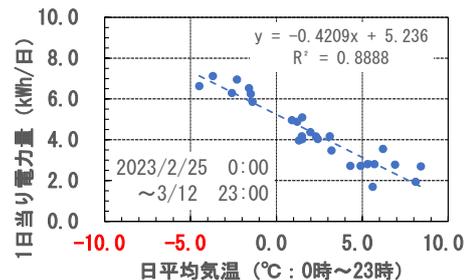


図-13 日平均気温と1日当たり使用電力量

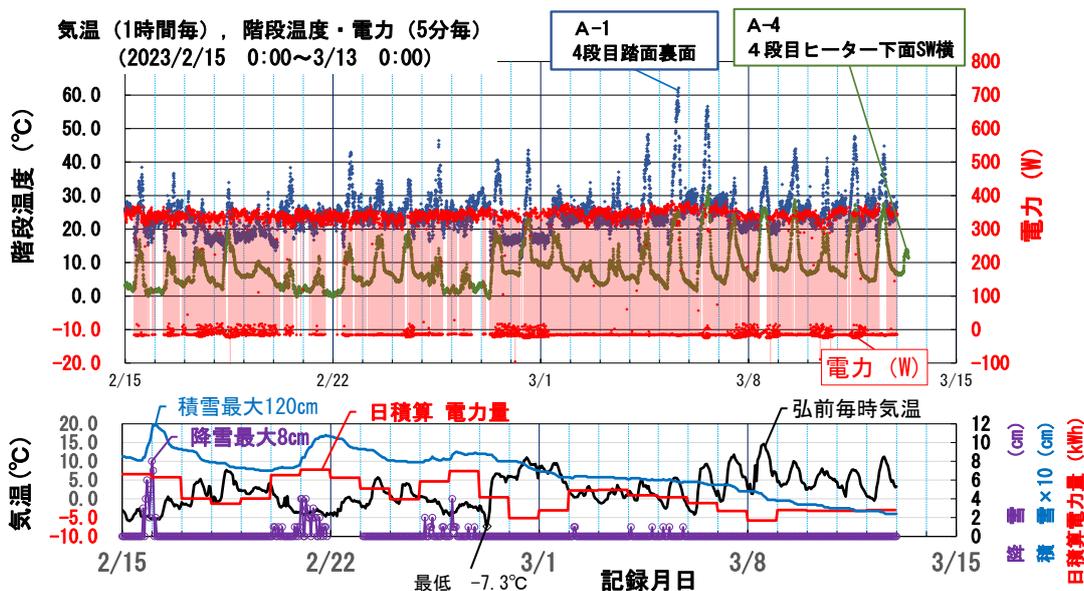


図-10 階段温度、電力、気温、日積算電力量の推移

3.5 階段融雪の今後の展開

弘前の毎時の気象記録を整理すると、図-14に示すように、気温6°C以上の場合、降雪はほぼないことから、今回はサーモスタットの動作温度を6°C程度に設定した。降雪量は、気温の低下とともに増える傾向にあるが、6°C以下の氷点下時でも降雪なしの時間帯も認められる。

今後は、氷点下時の降雪なし状況における、靴底に付着した雪の着氷なども考慮しつつ、降雪センサー併用、リモート運転機能など、気象条件、作業環境に対応した運転制御を検討し、消費電力量の低減を図りたいと考える。

4 寒冷地における保温保管

4.1 保温保管の概要

寒冷地では、材料の凍結による機能低下や着雪・着氷による機械・工具の動作不良やメンテナンス手間の増加などが問題となる。

通電発熱塗料を用いた発熱シートは、薄く、所定面積の均等加熱が可能、火器を使用せず加熱設定が容易で、また、過剰加熱のリスクが低い等の特徴を有することから、前述の階段融雪に用いた発熱シートによる保温保管を行った。

4.2 保管対象・保管条件

保管対象はコンクリートの打継処理剤の凝結遅延剤で、グルコン酸類と水との混合物であるため、-5°C以下となると混合物中の水が凍結し、散布不能、材料分離などの機能低下が懸念された。

使用場所の青森県弘前市の前年冬期の気温は表-2に示すように、日最低気温が-5°C以下を記録した日が31/90日と屋外でのシート養生では、材料の凍結が懸念された。また、屋外では、シート上の除雪、シートの取外し・再セット等の養生が作業手間となるため、簡易倉庫内を発熱シートで加温し、倉庫内を保温して保管することとした。

4.3 環境実験室を用いた発熱量確認試験

現場運用に先立ち、環境試験室を用い低温一定条件下での性能確認試験を行った。発熱シート3種類、環境温度(室温)を-15、-10、-5、0°Cの4ケース、100V印加の

条件で発熱させ、表面温度を測定した(表-3, 図-15)。

図-16に-15°Cの場合の試験結果例を示す。各シートの表面温度(4か所平均)は、T-100, T-200B, T-200の順に高い温度となった。電力密度が等しい場合、ロンマット被覆が無いT-200Bの方の温度上昇が早く、最高温度もやや高い結果となった。これらの結果より、次節4.4倉庫内温度の推定の計算条件の発熱温度 $\Delta\theta$ を設定した。

表-2 実施場所の冬期気象データ⁵⁾

弘前気象記録 (冬期3ヶ月: 2021/12/1~2022/2/28)					
	最低・最小	最高・最大	平均	-5°C以下 日数	0°C以下 日数
日最低気温(°C)	-8.4	3.8	-3.9	31/90日	78/90日
日平均気温(°C)	-6.5	8.0	-0.6	3/90日	59/90日
降雪深さ(cm)	0	27.0		2022/1/5 記録	
最深積雪(cm)	0	112.0		2022/2/23 記録	

表-3 試験条件、発熱シート層別構成

発熱シートの仕様・層別材料	シート種別		
	T-100	T-200	T-200B
設定電力密度 W/m ²	400	440	
層別材料	ロンマット t=2mm	あり	なし
	ラミネート PET t=0.1mm	あり	
	発熱塗料および電極	PETシートに発熱塗料をスクリーン印刷	
	PETシート t=0.25mm	あり	
	ラミネート PET t=0.1mm	あり	
	アルミマット t=4mm	あり	
	遮水シート t=1mm	あり	なし
測定条件	環境温度(室温)	4ケース: -15°C, -10°C, -5°C, 0°C	
	表面温度測定箇所	熱電対 表面4か所	
	印加電圧 V	100V並列	
	電力測定 W	1枚分	2枚分

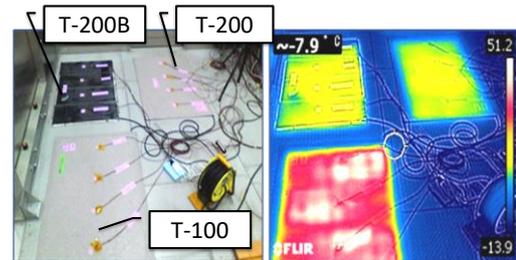


図-15 試験状況

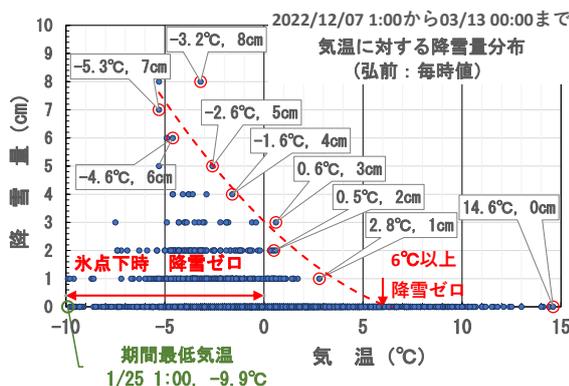


図-14 気温と降雪量の関係(弘前毎時記録)

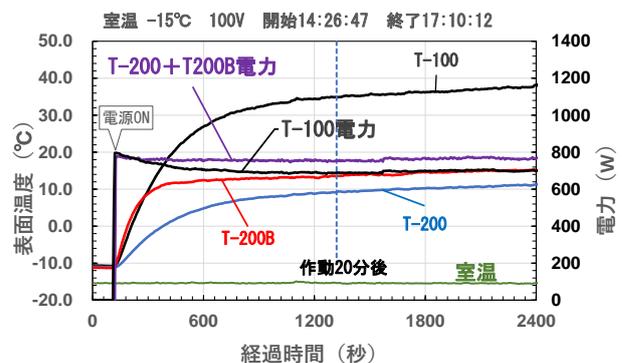


図-16 試験結果例 (-15°Cの場合)

各シートの表面温度は、環境温度が高くなるとともにやや上昇し、10℃～40℃の範囲となった。また、表面温度と環境温度の差分の発熱温度 $\Delta\theta$ は、環境温度に依らず25℃～45℃程度のほぼ一定の値となった（図-17）。

4.4 倉庫内温度の推定

性能確認試験で確認された発熱量を用いて、定常熱収支による室内温度の計算を行い、外気温に対する倉庫内室温を(1)式により推定した。

計算条件の発熱温度は、性能確認試験結果の $\Delta\theta=25\sim 45^\circ\text{C}$ 、外気温 θ_k は、昨年冬期記録の日最低気温の最小値 -8.4°C を参考に、 $-20^\circ\text{C}\sim 20^\circ\text{C}$ の範囲とし、 A_g は発熱シート面積 ($0.8\text{m}\times 1.2\text{m}$) とした。また、倉庫各部位面積 A_k 、熱貫流率 U_k などは、倉庫仕様および部材より推定した。

$$\sum_k A_k U_k (\theta_k - \theta_R) + a_i A_g \{(\theta_R + \Delta\theta) - \theta_R\} = 0$$

$$\therefore \theta_R = \frac{\sum_k A_k U_k \theta_k + a_i A_g \Delta\theta}{\sum_k A_k U_k} \quad (1)$$

- θ_R : 倉庫内温度 [°C]
- A_k : 各部位 k の面積 [m²]
- U_k : " の熱貫流率 [W/m²K]
- θ_k : " に作用する温度(外気温等) [°C]
- a_i : 室内側熱伝達率 [W/m²K]
- A_g : 床面での発熱面積 [m²]
- $\Delta\theta$: 発熱温度(発熱面での室温との温度差) [°C]

発熱温度 $\Delta\theta=25^\circ\text{C}\sim 45^\circ\text{C}$ の場合における、外気温 θ_k に対する倉庫内温度 θ_R の計算結果を図-18に示す。前年冬期の最低気温 -8.4°C 程度が継続する環境においても、シートの発熱温度 $\Delta\theta$ が25℃以上であれば、倉庫内温度は概ね0℃以上となることから、材料の凍結は防止できると推測された。

4.5 保温保管の実施

倉庫内の保温は、2022/12/7より運転を開始し2023/2/17まで、倉庫内の室温(棚上)、内壁面の温度を小型データロガーで測定した(図-19)。また、非接触赤外線温度計、サーモカメラで倉庫内各所の温度を確認した。

倉庫内温度の推移は図-20に示すように、気温変化と対

応し、各日の昼頃にピークを示し、外気温より20℃程度高い値となっている。また、電源停止期間中、夜間の気温低下時の倉庫内温度は気温とほぼ等しくなっている。

測定期間中の各温度を以下に示す。

- 気温：弘前毎時 最低 -9.9°C 最高 12.4°C 平均 -0.8°C
- 倉庫室温(棚上) 最低 4.2°C 最高 33.3°C 平均 18.6°C
- 内壁 最低 2.6°C 最高 31.5°C 平均 13.9°C

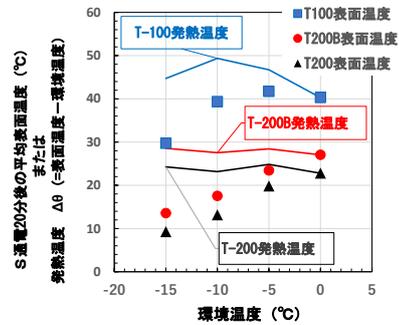


図-17 発熱量確認試験結果

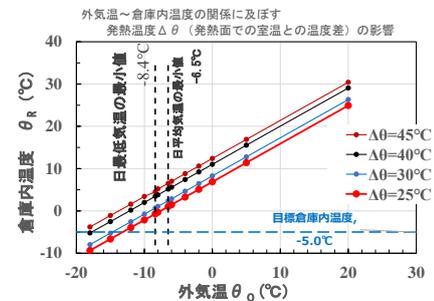


図-18 定常熱収支による倉庫内温度の推定



図-19 保温保管状況

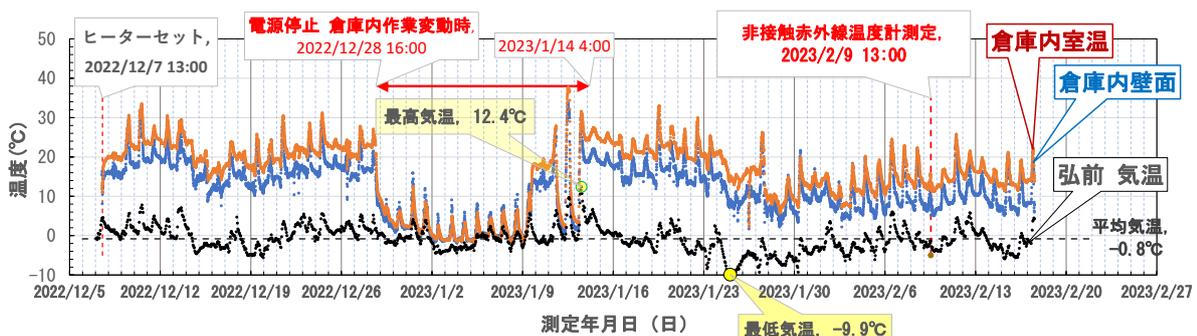


図-20 外気温および倉庫内温度の推移

また、非接触赤外線温度計による倉庫内各所の測定結果例を図-21に示す。外気温-1.3℃、倉庫内14.8℃の状況時、保管材の一斗缶表面は、平均6.5℃となっていたことより、缶内の材料温度は管理目標の-5℃以上と判断された。

外気温と倉庫内室温の関係は、図-22に示すように、倉庫内室温は、概ね外気温より20℃高い値を記録した。同図中には、定常加熱収支の推定結果（前述図-18参照）を示しているが、傾きはほぼ等しいことから、断熱条件とした床面以外の天井、壁面の諸物性の設定は妥当であったと思われる。

4.6 保温保管のまとめ

青森県弘前市において、冬期の低温環境下における材料凍結対策として、小型倉庫内で発熱シートを用いた保温保管を実施した。この結果、以下の有効性が確認された。

(1) 作業の省力化

- ・屋外のシート養生に対し、シート上の除雪やシート取外し、再養生作業が不要となった。
- ・材料が凍結した場合の対応策の加温（暖め）攪拌による機能回復作業の負担・リスクが低減された。
- ・倉庫の空きスペースでの保温有効利用（凍結、着氷、着雪対策が必要な材料・資材・用具の保管）により、

利便性が向上した。

(2) 省スペース化

- ・薄いシート状であるため、設置スペースをとらない。
- ・火器を用いず、所定面積の均等加熱により、熱源近くの過剰加熱リスクが低減できる（図-23）。

(3) 温度設定が容易

- ・加熱出力設定、温度制御が容易であるため、使用環境条件に応じた温度設定が可能となる。
- ・サーモスタット、降雪センサー、IoT スマートスイッチなどを用いた運転制御により、使用電力量の低減、遠隔操作による利便性向上などが可能となる。

5 おわりに

通電発熱塗料を用いた発熱シートにより、冬期の階段融雪および材料の保温保管を青森県弘前市において、実施した。

階段融雪については、前年実施した宮城県における課題であった過剰加熱防止用の温度スイッチの設置箇所を移動し動作環境を改良することで、階段踏面の融雪能力を向上させることができた。

コンクリートの打継処理剤の凍結予防を目的に実施した保温保管については、仮設倉庫内を発熱シートで加温することで、材料の凍結による機能低下を予防することができた。

2023/2/8 13:00		-1.3℃	
室温 倉上気中		14.8℃	
一斗缶表面	上段	7.3℃	平均 6.5℃ 最低 3.1℃ 最高 10.5℃
	上段	6.8℃	
	下段	3.1℃	
	下段 奥	10.5℃	
	下段 手前	4.6℃	
ヒーター	上面各所	37.1℃	平均 32.0℃ 最低 27.2℃ 最高 37.1℃
		28.3℃	
		36.3℃	
		33.7℃	
		27.8℃	
ハウス内面		27.2℃	30.6℃
		壁左	0.8℃
		壁正面	1.8℃
		壁右	0.6℃
		天井	4.2℃



図-21 赤外線温度計測定結果

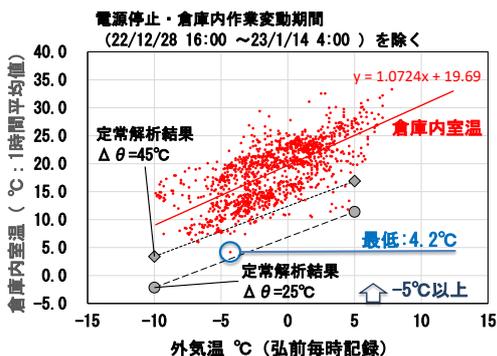


図-22 外気温と倉庫内温度

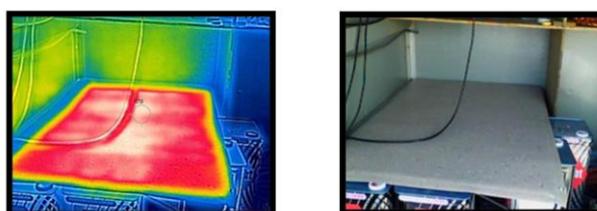


図-23 発熱シートの発熱状況

参考文献

- 1) 前田幸男, 伴享, 浜利男, 小花隆太郎: 通電発熱塗料を用いた発熱シートによる融雪試験-降雪時の運転状況-, 土木学会全国大会第77回年次学術講演会, VI-440, 2022.9.
- 2) 伴享, 前田幸男, 浜利男, 小花隆太郎, 前塚洋介: 通電発熱塗料を用いた発熱シートによる融雪試験-積雪時の運転状況-, 土木学会全国大会第77回年次学術講演会, VI-441, 2022.9.
- 3) 前田幸男, 伴享: 冬期融雪対策への通電発熱塗料を用いたシートヒーターの適用, 令和4年度建設技術報告会 北陸地方建設事業推進協議会, pp.73~76, 2023.1.
- 4) 前田幸男, 伴享, 浜利男, 小花隆太郎, 前塚洋介, 塚田 文哉, 青沼美鶴: 通電発熱塗料を用いた発熱シートによる融雪-冬期現地試験による融雪能力の検討-, 佐藤工業技報, No.47, pp.13~20, 2022.12.
- 5) 気象庁ホームページ: 各種データ・資料, <https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>
- 6) 例えば, 環境工学教科書研究会: 環境工学教科書, pp.54~55, 1996.3.