

快適な雪国生活の実現を目指した融雪システムに関する試験・研究開発

Research and development of snow-melting system for comfortable life in snowy region

赤平 亮

カーボンニュートラルの実現に向けて電化と共に熱の有効活用が挙げられている。未利用熱である排熱の活用は企業単位で既に行われており、今後は地域単位で、すなわち熱の余っている施設から熱を必要としている施設へ熱を供給する「熱融通」という考え方が重要となってくる。また、熱を温度レベルに応じて多段階に利用する場合、環境温度に近い低温の熱の活用もシステム全体の効率向上に大きな役割を果たす。

前者に対しては蓄熱材を活用することにより「場所」と「時間」のズレを解決可能な「熱輸送」と「定置利用」という熱の利用方法を想定し、それぞれの方法におけるエネルギー削減効果を評価可能なソフトウェアを開発した（図 1）。本ソフトウェアは県事業において各種システムを導入した場合の燃料削減費などの算出に活用された。

後者に対しては建物の換気排熱を熱源として活用する屋根融雪という熱の利用方法を想定し、温度の低い熱を活用可能な屋根の構造を有する融雪システムを開発した。屋内及び屋外試験を通じてシステムの改良を行った結果、シーズンを通して雪下ろし作業をしなくて済む程度の放熱量（＝70W/m²）が得られていることを屋外試験により確認した（図 2）。また、考案した構造に関する特許出願を行った。

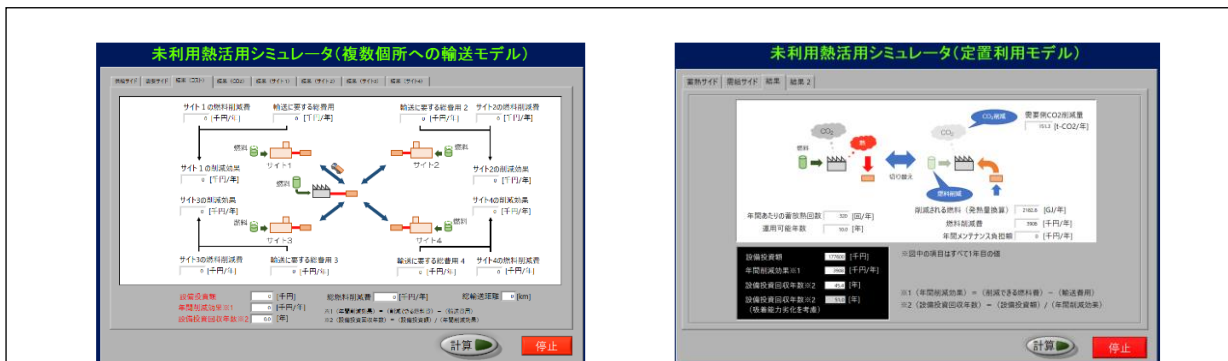


図 1 開発した未利用熱活用シミュレータ

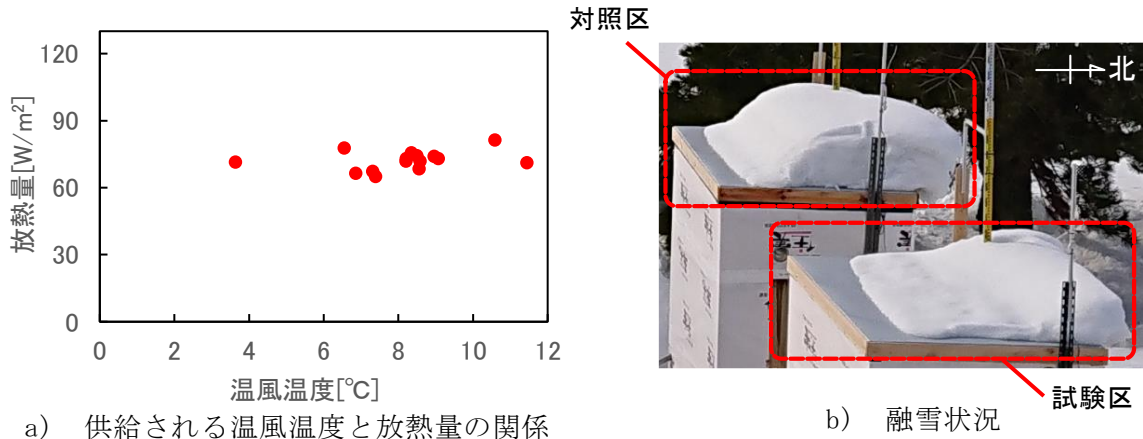


図 2 屋外試験結果と残雪量の違い

1. はじめに

2050年のカーボンニュートラル実現に向けた取組には電化を中心に、アンモニア混焼や水素の活用を据えると共に、熱の有効活用も挙げられている¹⁾。未利用熱である排熱の活用は企業単位で行われてきたが、さらに活用を進めるためには熱融通のような地域単位での活用（＝面的利用）を考えていく必要がある。そこで熱融通の一手法として蓄熱材の利用を想定し、導入した場合の燃料や二酸化炭素排出量の削減効果などにより熱利用の有効性を評価可能なプログラム（＝未利用熱活用シミュレータ）の開発を行った。

熱は環境温度との差が小さくなるほど使いにくくなる。2003年の建築基準法の改正により24時間換気システムの導入が義務付けられたこともあり、換気により常に外気に捨てられている室内の熱（＝換気排熱）も「環境温度との差が小さい」熱源の一つである。しかし、積雪寒冷地である青森県には融雪という熱需要も存在することから、この雪国特有の熱需要を換気排熱で賄うことができれば、熱の多段階利用の最下段に組み込むことで熱利用システム全体の効率向上が見込める。そこでこの換気排熱を熱源として雪を融かすことが可能な融雪システムの開発を行った。

2. 未利用熱活用シミュレータの開発

2. 1 蓄熱システムの概要

熱利用において検討すべき課題として温度・場所・時間という3つのズレがある。つまり、熱が余っている側と必要としている側とで場所や温度帯、時間帯が異なるということである。今回、これらのズレのうち、場所と時間に対して蓄熱材を活用することで対応することを想定した。なお、本報では場所のズレへの対応を中心に報告する。

蓄熱そのものは氷蓄熱のような固相と液相の相変化を利用する潜熱蓄熱や水酸化マグネシウムなどの化学反応を利用する化学蓄熱などが存在するが、今回は産業技術総合研究所（産総研）が開発した「ハスクレイ」への水の吸脱着による発熱・吸熱現象を利用する吸着材蓄熱を蓄熱手段とした。各方式の特徴を表1に示す。

表1 蓄熱方式の比較²⁾

	潜熱蓄熱	化学蓄熱	吸着材蓄熱
蓄熱材 (蓄熱方式)	酢酸ソーダ/エリスリトール (固液相変化)	水酸化マグネシウム等 (化学反応)	ハスクレイ (水吸脱着)
蓄熱密度	265kJ/kg/340kJ/kg	約2,000kJ/kg	約1,000kJ/kg
利用温度	58℃/121℃ 1)空調(暖房)・給湯	200~250℃ 1)空調(暖房)・給湯 2)蒸気	80~120℃ 1)空調(暖房)・給湯 2)空調(外調) 3)除湿
放熱原理 (熱ロス)	凝固 (熱ロスあり)	発熱 (熱ロスなし)	発熱 (熱ロスなし)
国内実績	フィールド実証	なし	なし

吸着材であるハスクレイを利用する方式では、蓄熱時には80~120℃程度の排熱を利用してハスクレイを乾燥させて水分を脱着し、放熱時にはハスクレイに水を吸着させることにより吸着熱を得るシステムである(図1)。潜熱蓄熱では蓄熱材の温度変化が起きないように断熱対策が必要となるが、本方式では蓄熱材の乾燥状態を維持することができれば熱損失も生じず、断熱対策

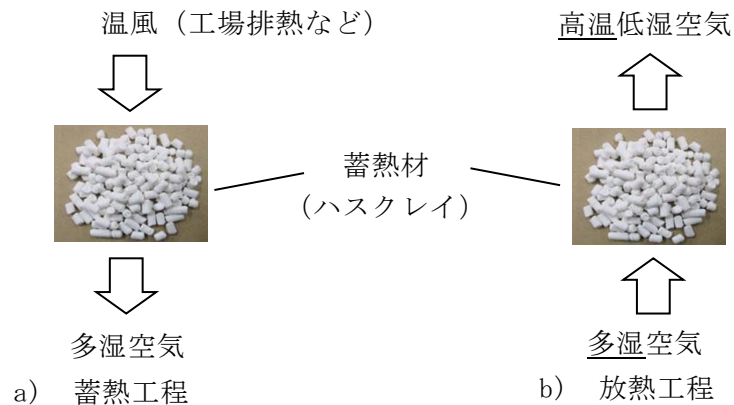


図1 ハスクレイによる蓄熱イメージ³⁾

も必要としない点が特徴の一つとなる。

この特徴を生かして、場所のズレに対しては図2に示すような熱輸送という方式で対応する。すなわち、蓄熱材をコンテナに充填し、熱が余っている工場などでハスクレイを乾燥させた後、熱を必要としている場所までトラックでコンテナを運ぶ。熱を取り出す際にはハスクレイに湿度の高い空気を供給することで空気中の水分が吸着材に取り込まれ、水分子の運動エネルギーが吸着熱として生じることになる。放熱を終えたハスクレイは再びトラックで工場まで運ばれて排熱を利用して乾燥される。

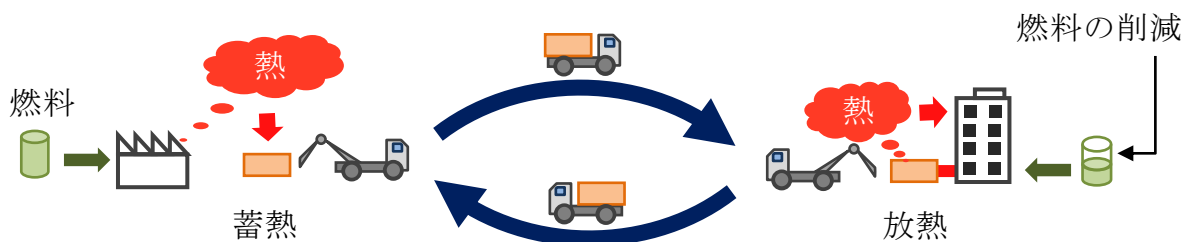


図2 蓄熱材を利用した熱輸送

2. 2 未利用熱活用シミュレータの概要

未利用熱の活用そのものは工場単位では既に行われてきた。今後、さらに未利用熱の活用を進めるためには地域単位での熱エネルギーの効率的な利用が必要不可欠となる。そこで、蓄熱材「ハスクレイ」を活用した未利用熱の熱輸送により需要側ではどれくらいの燃料を削減可能か、そのポテンシャルを評価できるシミュレータを開発することとした。

シミュレータの開発に際し、まずは「熱輸送」による熱利用の有効性を評価する上で多種多様に存在するパラメータ（図3）を整理・確定し、コストや二酸化炭素排出量の数式化を行った。シミュレータそのものはナショナルインスツルメンツ社製のLabVIEWを用いて作成した。実際に作成したシミュレータの結果の出力画面を図4に示す。操作そのものは入力画面にていくつかのパラメータの選択・入力という容易な操作で結果が算出されるようになっている。

また、ハスクレイは水分の吸着・脱着を繰り返し行うことから、将来的には使用に伴う吸脱着量の低下、すなわち蓄熱量の低下が予想されることから、蓄熱材の性能低下について調査を行い、蓄熱能力の低下とそれに伴い発生するメンテナンスに要する費用の影響も評価できるようにした。

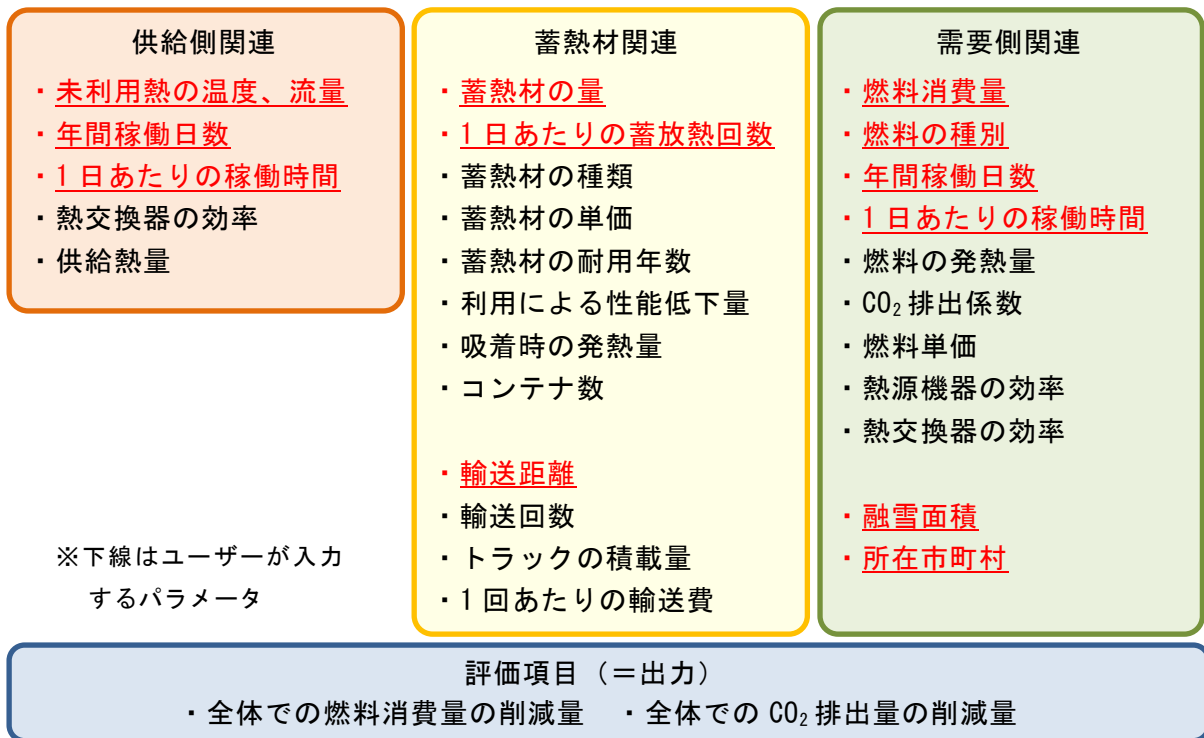


図 3 整理したパラメーター一覧

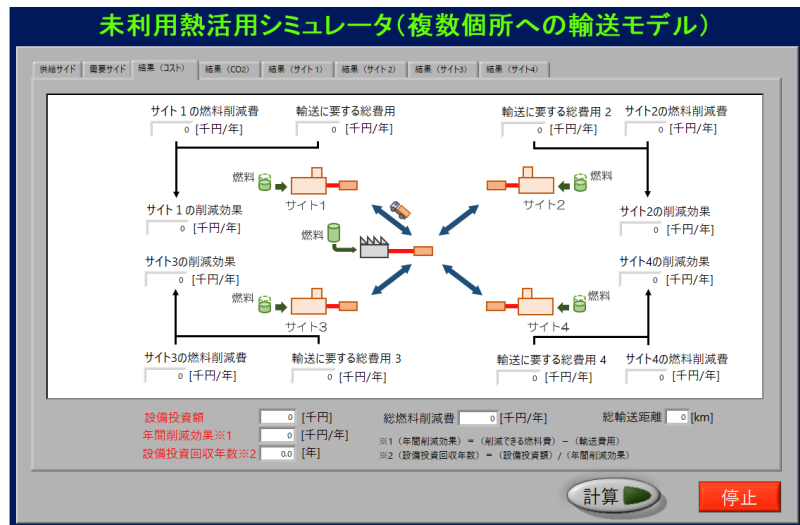


図 4 未利用熱活用シミュレータ（熱輸送モデル）の出力画面

2. 3 試算結果

作成した未利用熱活用シミュレータを用いて県内 6 地域における、実在する施設を対象として未利用熱の活用可能性の評価を行った。本報では例として八戸地域での試算例を示す。対象となった施設は熱を供給する側が鉄鋼業の工場、熱を受け取る側が老健施設であり、この 2 施設間の距離は 1.6km である。供給側では 1 日あたり 141GJ の排熱 (A 重油換算で 3.6kl) が発生している。一方で需要側では給湯用途に 1 日あたり 350l の A 重油 (熱量換算で 13.7GJ) を消費している。そこで、工場の排熱を蓄熱材に蓄熱しトラックで老健施設まで輸送する場合の需

要側での燃料消費量や二酸化炭素排出量の削減量を試算した。基本ケースとして蓄熱材の量を 8t、輸送回数を 1 回とした場合、輸送可能な熱量は 7.2GJ となり、需要側で消費する燃料の 45%程度を賄えることになる。蓄熱材の量を 12t として輸送可能な熱量を増加させた場合は 11GJ の熱量を輸送可能となり、需要側で消費する燃料の 67%程度を賄えることになる。

蓄熱材を輸送するトラックのサイズから蓄熱材の量の上限は 12t となっており、輸送する熱量を増やすためには 1 日あたりの輸送回数を増やす必要がある。しかし、輸送回数を 2 回とすると、輸送される熱量が 22GJ となり、需要側では熱余りの状態となり好ましくない。

そこで、需要側の老健施設に着目すると同じ敷地内に病院と看護学校が存在するため、これら 3 つの施設を熱導管でつなぎ、輸送してきた熱をそれぞれの施設で使える状態になる場合を想定して蓄熱材の量や輸送回数をパラメータとして試算を行ったところ、排熱をさらに有効に活用できることが分かった。

このことからわかるように熱輸送というシステムにおいては、発生している排熱を如何に有効に使い切ることが重要となる。また、設備投資が高額であることから経済性を得るためには規模（＝排熱の量）が大きい方が好ましい。つまり、熱輸送システムを経済的にも成り立たせるためには、供給側にはより多くの排熱が存在し、需要側にはその排熱量を使い切れるだけの施設が多く存在することが条件となる。また、トラックで蓄熱材を輸送する際に排出される二酸化炭素の量が心配されるが、熱輸送により需要側で削減できる二酸化炭素排出量の方が圧倒的に多く、輸送に伴い発生する二酸化炭素量の影響は小さいことも明らかとなった。

3. 融雪システムの開発

3. 1 融雪システムの概要

現在でも融雪システムそのものは各種存在するものの、その多くが電気ヒータやヒートポンプ、灯油ボイラなどの化石燃料を多かれ少なかれ消費する方式である（ただしその分、融雪能力は高い）。一方で、地中熱を地下水で回収し、15℃前後の液体を循環させることにより融雪を行うシステムも存在する⁴⁾が、これらの方式は「除雪作業をしなくても良い」程度の能力の獲得を目指したものがほとんどである。本研究で扱う融雪システムもこの考え方に則り、換気排熱という捨てられている、温度レベルの低い熱を活用することとした。換気排熱そのものは 2003 年度の建築基準法の改正により 24 時間換気システムの導入が義務化されたことにより、改正以降に建てられた家からは 24 時間発生している室温程度の熱源であり、この「温度は低いが常に発生している」熱を活用できる屋根融雪システムの開発に取り組んだ。本融雪システムにおける換気排熱の利用イメージを図 5 に示す。性能の目標値としてシーズンを通して除雪作業を必要としない熱量である 60W/m² 程度の放熱量を獲得することを目指した。この放熱量は青森市において降雪量が 1.2cm/h まで対応可能であることを意味している。

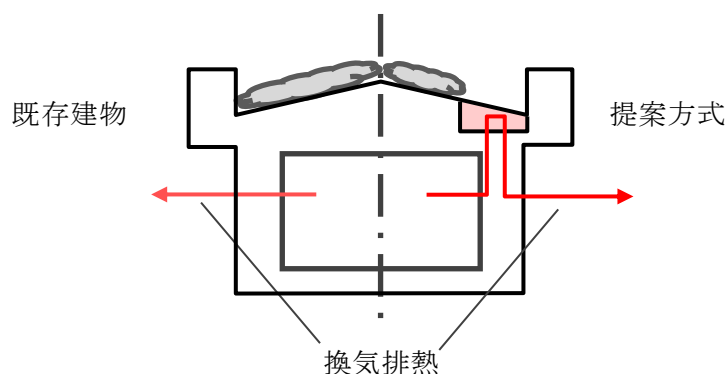


図 5 換気排熱利用イメージ

本システムの概略を図 6 に示す。本システムは屋根面全体ではなく、軒先の一部に放熱部を設け、この裏面にある空間に換気排熱などの低温の熱を供給する方式である。高低差のある滝では水が勢いよく流れるように熱も温度差があれば伝わりやすい。本システムでは低温側が雪や外気になるのに対し、高温側は高く見積もっても室温程度となり、温度差は 20℃前後であることから熱は伝わりにくい。このため、放熱部において屋根裏面から屋根表面に熱が伝わりやすい構造にする必要がある。

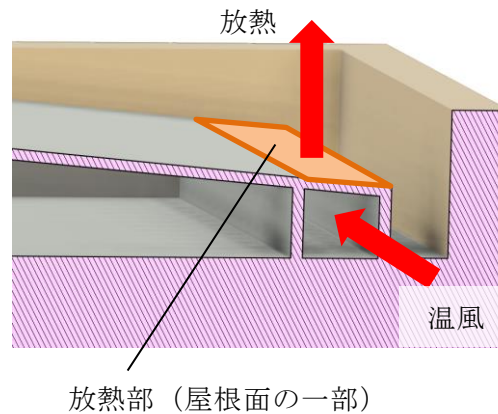


図 6 換気排熱利用屋根融雪システム

そこで既存の屋根の構造について調べたところ、トタン板、防水シート（アスファルトルーフィング）、野地板から構成されていることが分かった。これらの部材について熱の伝わりにくさを表す熱抵抗（＝数値が大きいほど熱を伝えにくい）を算出したところ、表 2 に示すような値となり、木材である野地板が大きな抵抗となっていることが分かった。

表 2 既存屋根の熱抵抗

	熱伝導率 [W/mK]	厚さ [mm]	熱抵抗 [m ² K/W]
トタン板	45	0.5	0.0000111
アスファルトルーフィング	0.11	1	0.0090909
野地板	0.16	10	0.0625000
熱抵抗合計値			0.0716020

表 2 から熱抵抗を改善するためには野地板を除去すればよいことになるが、それでは屋根としての強度を確保できない。つまり、積雪に耐えられるような強度を確保しつつ、熱抵抗を減らせるような構造が必要となる。その方法について検討した結果、側溝の蓋として市販されているグレーチングを用いることとした。これにより屋根裏に供給された換気排熱は屋根裏面の、熱抵抗の小さいアスファルトルーフィングからトタン板に伝わり屋根表面に積もった雪を融かすことが可能となる。

また、放熱面への温風の吹出方法についても試験結果を踏まえて検討した結果、多数の穴が開いた横配管を用いて複数の吹出口から屋根裏面に吹き付ける方法を採用した。放熱部の構造モデルを図 7 に示す。本構造の妥当性を検証するために小型の試験装置を製作し、冷凍室内における屋内試験を行った。その後、屋外に設置された試験棟に本構造を組み込み屋外実証試験を行った。

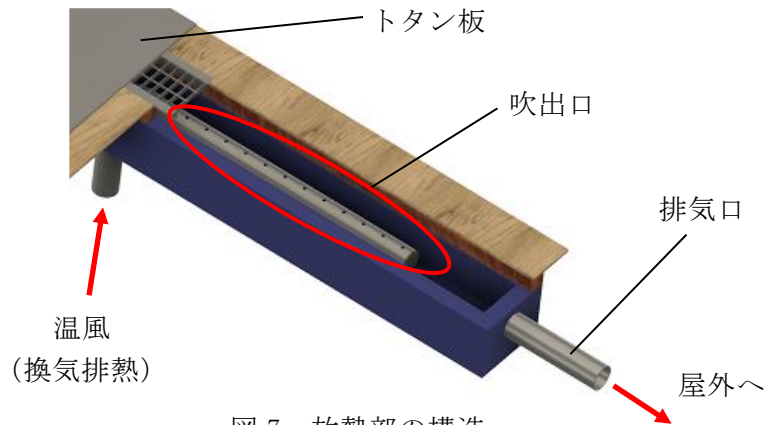


図7 放熱部の構造
(見えやすいように一部をカットしている)

3. 2 屋内試験

屋内試験で用いた試験装置を図8に示す。放熱部のみに特化したものであり、長手方向で1m程度のサイズとなっている。換気排熱の代替熱源として電気ヒータを利用し、発生した熱を送風機で放熱部に送り込む構造となっている。また、屋根面であるトタン板には表面温度を計測する為に200mmピッチでフィルム型の白金測温抵抗体を貼り付けている。

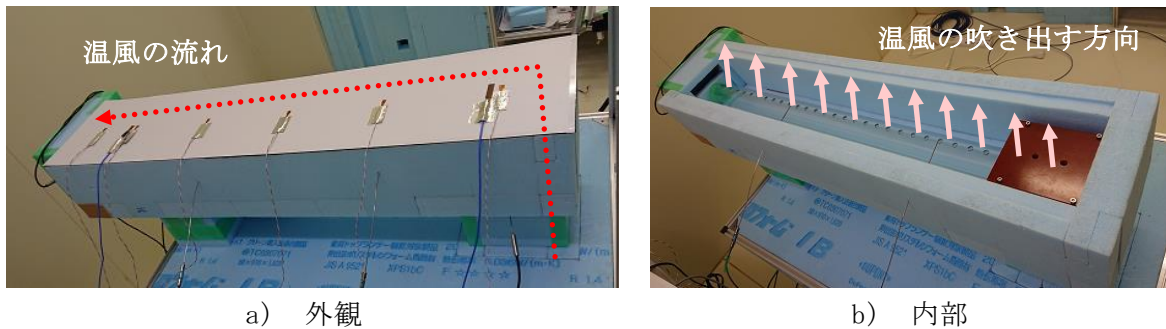


図8 屋内試験装置
(内部写真では吹出口を確認できるようにグレーチングを外してある)

環境温度を0°Cに設定し、温風温度をパラメータとして試験を行った。試験結果の一例を図9に示す。放熱部に流れ込んでくる温風の供給口からの距離と屋根面温度の関係を示したものであり、供給口から800mm離れても屋根面温度の低下は0.3°C程度であることが確認できた。

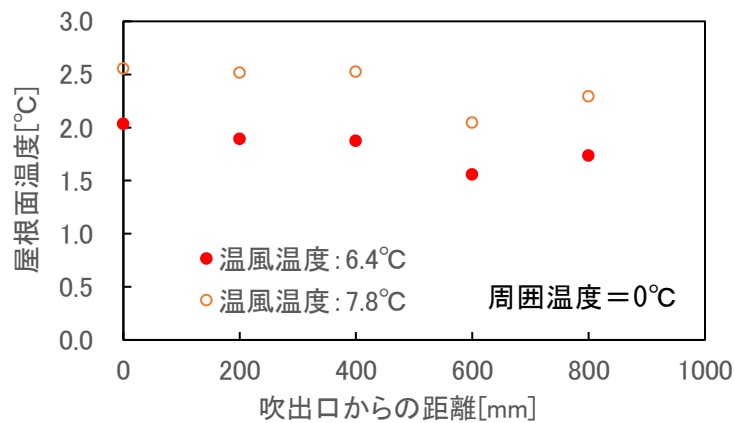


図9 温風供給口からの距離と屋根面温度の関係

また、温風温度をパラメータとした際の放熱量を図 10 に示す。ここで放熱量は放熱部出入口での温度差と風量から算出している。図 10 から目標としている「 $60\text{W}/\text{m}^2$ 」程度の放熱量は温風温度が 6°C 程度あれば得られることが明らかとなった。屋内試験により本構造の有効性を確認できたことから、屋外に設置した試験棟に本構造を組み込み実証試験を行うこととした。

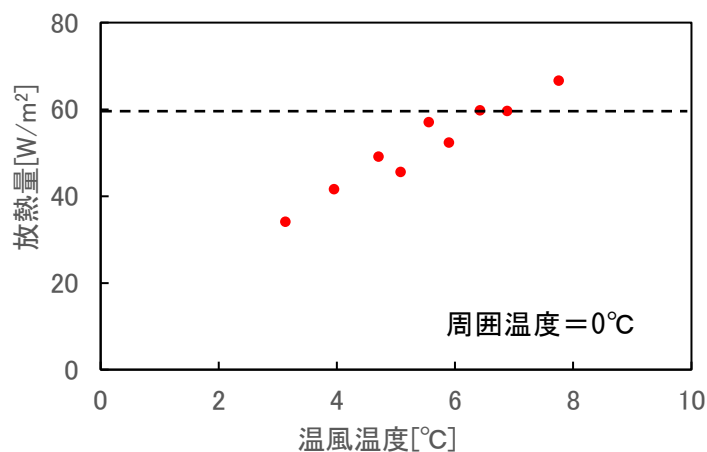


図 10 屋内試験における温風温度と放熱量の関係

3. 3 屋外試験

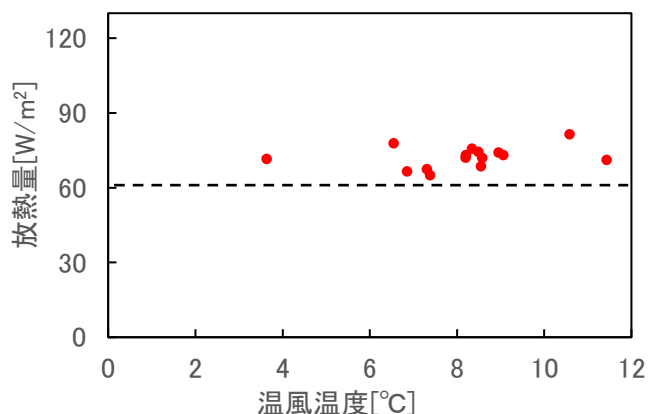
屋外に設置した試験棟を図 11 に示す。融雪システムを組み込んだ試験区と融雪システムなしの対照区の 2 棟からなり、屋内試験装置と同様、換気排熱の代替熱源として電気ヒータを用いている。



図 11 屋外に設置した試験棟

本試験棟を用いて 2022 年 12 月下旬から 2023 年 2 月末にかけて試験を行った。屋内試験と同様、屋根面や温風の温度と共に、外気温や風速、積雪量、屋根上の残雪量なども併せて計測した。また、融雪の状況をネットワークカメラにて撮影し、10 分おきに画像保存も行った。

結果の一例として放熱部に供給される温風温度と放熱部からの放熱量の関係を図 12(a) に示す。放熱量そのものは屋内試験と同様、放熱部前後の温風温度差と風量から算出した計算値であり、目標値を超える $70\text{W}/\text{m}^2$ 前後の放熱量を得られていることが確認できる。また、融雪状況を図 12(b) に示す。放熱部では温風の吹出口が複数設けられていることから、屋根面温度が均一化され、融雪箇所も面状となっていることを確認できた。



(a) 屋外試験における温風温度と放熱量の関係

(b) 融雪状況

図 12 屋外試験結果

屋内試験及び屋外における実証試験の結果、本構造の有効性を確認できたことから、本構造に関して特許出願を行った（特願 2023-049205 「低温熱源を利用可能な融雪構造」）。

4. まとめ

青森県において熱の有効利用を促進するために未利用熱の活用可能性を評価できる未利用熱活用シミュレータの開発を行った。開発したシミュレータは熱利用に関する県重点事業にて実在の施設を対象とした熱利用モデルの評価や、新ビジネス創発事業にて木質バイオマス発電設備の有効性の評価に活用された。今後は熱利用を検討している企業の設備やシステムに応じて未利用熱活用シミュレータの改良などを行いプログラムを配布するなど、企業が行う未利用熱のポテンシャル評価を支援していく予定である。

また、環境温度に近い熱源を活用可能な屋根融雪システムの開発を行った。屋内及び屋外試験を通じてシステムの改良を行った結果、シーズンを通して雪下ろし作業をしなくても済む程度の放熱量が得られていることを屋外実証試験にて確認した。有効性を確認できた放熱部の構造に関して特許出願を行った。今後は成果発表会や企業訪問などで研究内容を紹介し社会実装を目指す予定である。

5. 参考文献

- 1) 第6次エネルギー基本計画、経済産業省資源エネルギー庁、2021
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：成果報告・ダウンロード、2020
<https://www.nedo.go.jp/content/100902072.pdf>
- 3) 高砂熱学工業技術研究所報、No. 31、p. 25-30、高砂熱学工業株式会社、2017
- 4) 例えばエコRシステム、ゼネレールホームサービス株式会社
<http://zeneleale.com/ecor/>