

雪の壁, 天井材としての利用 Utilization of Snow as Wall or Ceiling Element

○正 媚山政良(室工大)

学 佐々木賢知(室工大院)

KOBAYAMA Masayoshi and SASAKI Masanori, Muroran Institute of Technology, Mizumoto Muroran

From a viewpoint of software side, the snow is one of the mysterious materials for almost passengers visiting snowy country from hardly snowfall area. When they encounter with the snow, they may be felt the impulse to touch the snow, to realize coldness and to be charmed by the snow. There are many voices that they would like to have this mysterious experience even during midsummer. In order to respond to those needs, the authors planned to construct a small space enclosed by snow walls, and developed a technique that prevents snowy dissolution under hot condition with the aid of refrigerator. With this technology, a project that makes a small space enclosed with snow walls in midsummer was carried out with the member of the Sapporo Commerce and Industry Meeting in this summer, and we also have been enjoyed.

Key words: mysterious snow, hot midsummer, small space, wall of snow, prevention of snowy dissolution, refrigerator

1. はじめに 環境保全, 省エネルギーの追い風を受け, いわゆる“利雪”が急速に定着しつつある。また, 雪は資源としての新しい一面をも覗かせつつあり, 新しい利雪分野の開拓が推し進められて来ている。雪を77面から見ると, 雪のほとんど降らない地域の人たちにとって, 雪は一つの神秘である。雪国を訪ねる多くの観光客にとって, 雪は“触って冷たさを実感し, その神秘に魅了されたい”ものの一つである。できれば, この体験を真夏にも……との声は多い。雪を用いて小空間を作り, “文化”を行うものとしては, 横手の「かまくら」が有名である。このかまぐらの築造技術とその洗練された形状には完成された感がある。しかし, 残念ながら, このかまぐら, 冬期限定である。夏にかまぐらを作るプロジェクトを札幌商工会のメンバーとこの夏, 実施し, 楽しんだ。このプロジェクトを“雪のピラミッド(雪の金字塔)”と呼んでいる。

2. 構造の概要 真夏, 雪の中に壁と天井が雪で囲われた小空間(展示室)を作る。この小空間の中に, 毎時20名程度の“屋外からの訪問者”をおおよそ10日間受け入れる。炎天下では雪は解ける。雪を壁材, 天井材として強度を保つため冷凍機を用いる。小内部展示空間の温度を+5℃とし, これに面する壁, 天井の雪温を強度を保てる-2℃以下とする。雪で覆った壁, 天井の構造を図1に示す。雪を冷やすため低温の不凍液を流す冷却管を配し, また, 雪を支持するため17kgのブロックを用いる。また, 同時に内部空間の面の上には霜を成長させ, 内部空間を光に映える非日常的なものとする。図1の冷却管より下側には外部からの侵入熱を熱抵抗として軽減させる約30cmの雪(被り雪)と融解熱により軽減させる約10cmの雪(捨て雪)および熱遮蔽材として30cmの断熱材を積む(図9参照)。なお, 冷凍機は研究室所有の7.5kW(蒸発温度-20℃, 凝縮温度40℃, 定格冷凍能力12750kcal/h。77℃/温度-10℃での実能力9000kcal/h(=実測値))を使用する。

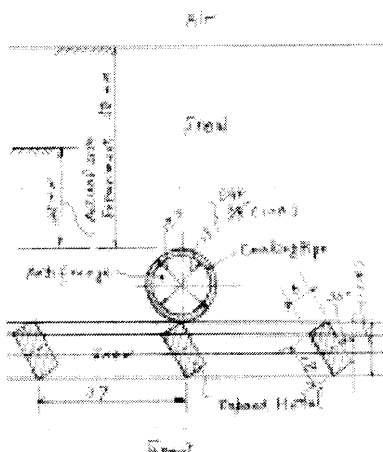


図1
雪で覆った壁, 天井の構造

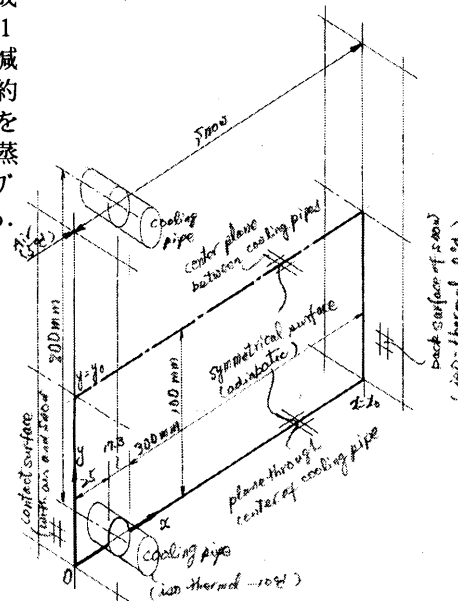


図2 座標系

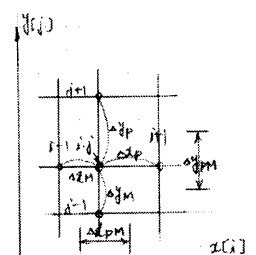


図3 差分格子

3. 熱設計およびシステムの検討 施設の熱設計を行うに際し, ①捨て雪の厚さ, ②被り雪の厚さ, ③内部の壁, 天井表面から冷却管までの距離, ④冷却管のピッチおよび不凍液の温度を決める必要がある。①に関しては, 展示期間を10日とすると100mmと推測される。③は, 内部構造物が壁, 天井を通し透けて見えない厚さを実験により確認し, 25mmとした。

3.1 熱伝導方程式による解析 ②および④に関しては, 次のように定常2次元の熱伝導方程式をシュミットの図式解法を基礎とした差分法により数値解析を行い, その結果を実験と比較し妥当性を確認し, 熱設計の資料とした。なお, 17kgのブロックおよび冷却管の存在を無視し解析を行った。座標系を図2に示す。図2に記入してある寸法は, 最終的に採用した設計値に係わる数量である。

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0 \dots \dots (1)$$

境界条件としては, 状況に応じ等温条件, 断熱条件(対称面および断熱面)を採る。図3に差分格子を示す。この差分格子を用いて式(1)を差分近似すると次式を得る。

$$t_{ij} = [C_1 t_{i+1,j} + C_2 t_{i-1,j} + C_3 t_{i,j+1} + C_4 t_{i,j-1}] / [C_1 + C_2 + C_3 + C_4] \dots \dots (2)$$

ここで, $C_1 = 1 / (\Delta x_P \cdot \Delta x_{PM})$ $C_2 = 1 / (\Delta x_M \cdot \Delta x_{PM})$
 $C_3 = 1 / (\Delta y_P \cdot \Delta y_{PM})$ $C_4 = 1 / (\Delta y_M \cdot \Delta y_{PM})$
 なお, 空気の雪相当厚さ δ [m]は $\delta = \lambda / \alpha$ として求める。

3. 2 解析方法および天井強度の実験による確認

断熱材に囲まれた図4に示す容器に雪を詰め、冷凍機により冷やされた入り口温度 -10.5°C 、出口温度 -10.9°C の不凍液（エチレングリコール 67%、水 33%）を冷却管（SGP 3/8" 10A）を通し流し、雪を凍結させた。流量は 45.1L/h とした。凍結管の下には、雪を支える支持プレート（図1参照）を配してある。また、雪の上の空間の温度を 6.5°C に維持するため、アクリル板上に温度調節器付のヒーターを設置してある。低温庫に保存したざらめ雪を4月下旬に取り出し、うっすらと解けかけた状態で、密度 0.55ton/m^3 となるよう均しながら詰めた。不凍液を流し雪の凍結を開始し、おおよそ3日間ではほぼ定常状態となった。なお、図4の丸文字で示す4ヶ所の温度をT型熱電対により連続し測定した。ほぼ定常となった状態では、2本の凍結管の間部部の雪は約9mm解けており、定常に至るまでに融解一部内部へ浸透・再凍結されていることが分かった。この実験の状態での諸量を解析に取り込んだ温度分布の結果を実験値と比較し図5に示す。同図(a)は雪の熱伝導率を $\lambda=0.55$ [kcal/mh $^{\circ}\text{C}$]とした場合の結果であり、同図(b)は $\lambda=0.90$ とした場合である。底の断熱材に近い部分の温度④は $\lambda=0.55$ の場合に実験値と解析の結果は良く一致しており、空気側②、③では $\lambda=0.90$ とした場合に良い一致が認められた。なお、実験による伝熱量は15.0kcal/hであり、不凍液の温度測定の最小値が 0.1°C であることを勘案すると、雪の熱伝導率を $\lambda=0.90$ [kcal/mh $^{\circ}\text{C}$]とした場合の解析結果12.8kcal/hとほぼ一致している。これらのことから、融解一部内部へ浸透・再凍結を受けるこの系では、雪の中に密度の分布が形成されていることが推測され、これを認めると、本解析手法は現象をかなり良く表すことができるものと考えられる。ちなみに、この熱伝導率から雪の密度を推測すると断熱材に近い部分では 0.60ton/m^3 程度であり、また、空気側では融解・再凍結の影響が大きく表れ 0.75ton/m^3 程度になっていると考えられる。この結果から、安全を見込み、温度分布の熱設計では $\lambda=0.55$ [kcal/mh $^{\circ}\text{C}$]とし、熱負荷の熱設計では $\lambda=0.90$ を採用する。

また、図4の実験装置を上下反転し不凍液を流しながら放置したが、雪は冷却管に支持された支持プレートに十分な力で付着し落下することにはなかった。雪が空気と接する部分の雪温が -2°C 以下（不凍液の温度約 -10°C ）で、雪の厚さが50mm、凍結管のピッチが300mm以下であれば、天井材として利用が可能であることが分かった。なお、準備期間の短いイベントでは、凍結管のピッチを狭くし定常までの時間を短縮する必要がある。

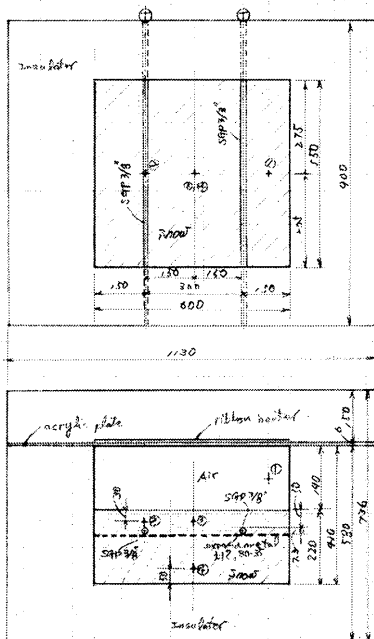


図4 実験装置

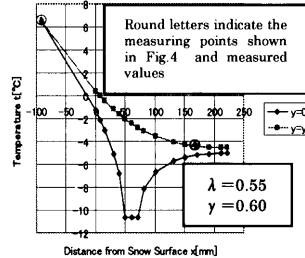


図5 (a) 計算値と実験値の比較

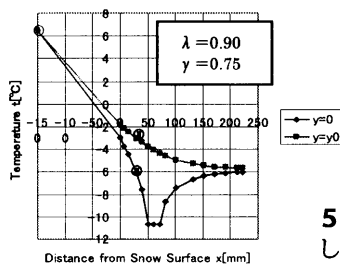


図5 (b)

4. 熱設計 展示室の側壁および天井（図9、面積83.0m²）に雪を貼り付け、これを7.5kWの冷凍機で維持することを考える。なお、調整室（通路、12m²）の冷房も同時に行う。

4. 1 計算結果 内部の壁、天井表面から冷却管までの雪の厚さを25mm、3.2の結果をもとに冷却管のピッチを200mmとする。被り雪の厚さに関しては、これをパラメータとし全熱負荷を計算した結果、30cmとした場合に冷凍機的能力の範囲内に収まることが分かった。また、内部空間の温度を $+5^{\circ}\text{C}$ 、雪表面の熱伝達率を $\alpha=6.0$ [kcal/m²h $^{\circ}\text{C}$]、雪の背面（バーク材側）の温度を氷の融点である 0°C 、冷却（不凍液）管の表面温度を -10°C とした。なお、雪の熱伝導率の値は、3.2において記述の通りである。この時の雪内部の温度を図6に、また、雪の表面温度を図7に示す。雪の表面温度はほぼ -2°C 以下で、天井材としての強度を維持できる範囲である。熱負荷の分布を図8に示す。雪表面から空気への熱流束の平均値は、 $q_{m1}=56.0$ [kcal/m²h]、 0°C の雪から被り雪への熱流束は $q_{mM}=17.8$ である。

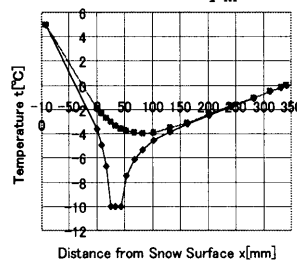


図6 雪内部の温度

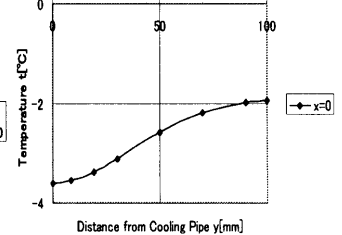


図7 雪の表面温度

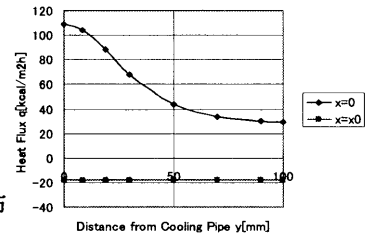


図8 熱負荷の分布

4. 2 熱収支 雪の壁を維持するのに必要な冷熱量は、 $(56.0+17.8)$ [kcal/m²h] \times 83.0 [m²] = 6126 [kcal/h] となり、これを、床からの侵入熱 (365 [kcal/h])、入場者の発熱 (220 [kcal/人 h] \times 20 [人] = 4400 [kcal/h])、換気 (427 [kcal/h])、照明 (372 [kcal/h]) およびポンプの発熱 (645 [kcal/h]) で賄うと、その差は-83 [kcal/h]の僅少となり、室温はほぼ設定した 5°C を保つことができる。また、調整室の熱負荷は、2440 [kcal/h] であり、冷凍機に要求される冷熱出力は、8566 [kcal/h] となり、実冷凍能力 9000 [kcal/h] の範囲内となっている。

4. 3 雪のピラミットの熱的構造 熱的な構造を図9に示す。

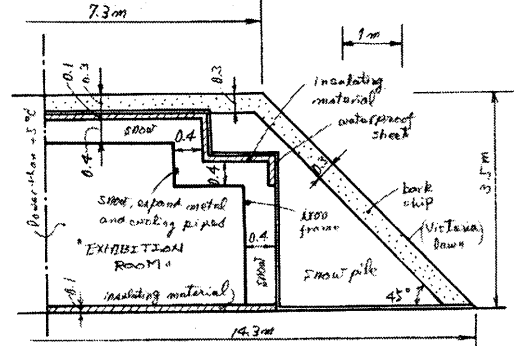


図9 雪のピラミットの熱的構造

5. おわりに 2004年7月8日より10日まで、図9に示した寸法に近い“雪のピラミット”を札幌市大通り公園2丁目において製作し、11日から19日まで一般開放した。おおよそ1万3000人の入場者を集め、好評であり、我々も楽しんだ。