

鉛直孔を有する雪塊と空気との熱交換に関する研究*
(雪塊の初期高さが冷却能力に及ぼす影響)飯嶋和明*¹, 媚山政良*², 王愛栄*²
花岡裕*², 伊藤親臣*³The Study of Heat Exchange between Air and Snow Block
with a Vertical Hole
(The Effect of Initial Height of Snow Block on the Characteristics
of Heat Exchange)Kazuaki IJIMA*⁴, Masayoshi KOBAYAMA, Ai-Rong WANG,
Yutaka HANAOKA and Yoshiomi ITO*⁴Sanki Engineering Co., Ltd., 1742-7 Shimotsuruma Yamato, Kanagawa, 242-0001 Japan

The authors proposed the snow cooling system of direct heat exchange between hot air and snow block with a vertical hole. In this snow cooling system, the characteristics of heat exchange is little affected by the amount of remaining snow, and the outlet air temperature is almost constant, and be enough low to use for the actual air conditioning system. So this system has become to be adopted widely. In this study, the authors investigated the effect of initial snow height on the characteristics of heat exchange by the experiment with models of practical scale. Experimental results showed that heat transfer coefficients on the snow surfaces of top and bottom plane were not affected by initial snow height, but the heat transfer coefficient of snow hole increased with decreasing snow height being affected by the entrance region. It was found that heat transfer coefficient of snow hole approached to a constant value on condition that snow height was over 2 meters. A empirical equation compensated by the initial height of snow block was obtained from the experimental results.

Key Words: Natural Cold Energy, Snow, Air-Conditioning, Direct Heat Exchange, Height of Snow Block, Temperature of Cooled Air, Heat Transfer Coefficient

1. 緒 言

雪塊に鉛直な孔をあけて暖かい空気を流し、雪表面で直接空気を冷却する雪冷房装置は構成機器点数が少なく、安定した冷却能力が得られるなどの利点があることから実用化が進んでいる⁽¹⁾。応用分野としては、一般の居住空間の冷房⁽²⁾から、米や農作物の貯蔵庫⁽³⁾など幅広く、このため、貯雪槽は1 m³以下の小形可搬式ボックスタイプから、米や農作物の貯蔵庫としての1 000 m³を超える大形貯雪槽までさまざまな規模で計画されている。この装置を設計する場合、雪の量は冷却負荷の総量と予想される蓄熱損失との和から計算され、雪にあける孔の数と雪の高さは単位時間あたりの冷却負荷の最大値を満たせるように選定される。雪にあける孔の数の増加や雪の高さの増加は冷却能力を増

加させると考えられるが、現象が複雑なためこれらの冷却能力に及ぼす影響を予測することは必ずしも容易ではない。

したがって、著者らは実規模の装置を用いて実験を行うことによって、冷却能力の基本的な特徴について調べてきた。その結果、この雪冷房装置は冷却能力に及ぼす残雪量の影響が少なく、(1)運転の初期から終了間際まで比較的安定した一定の冷却能力が得られること、(2)空気流量が冷却能力に及ぼす影響を明らかにし、負荷の変動に合わせて貯雪槽に送り込む空気流量を調節することによって必要な冷却能力が得られること、(3)冷却能力のほかに水溶性ガスを吸収除去する空気清浄効果があることなどを明らかにしてきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし、前述のように広範囲な応用分野の拡大に対応するためには、貯雪槽の規模、特に雪の高さが冷却能力に及ぼす影響を明らかにしておく必要がある。このような観点から、本研究では雪塊の初期高さを変えた実験を行うことにより、雪塊の高さが冷却能力に及ぼす影響について検討したので報告する。

* 原稿受付 1999年7月5日。

*¹ 正員, 三機工業(株)技術研究所(☎242-0001 大和市下鶴間1742-7)。*² 正員, 室蘭工業大学工学部(☎050-8585 室蘭市水元町27-1)。*³ 学生員, 室蘭工業大学大学院。

E-mail: kazuaki_ijjima@eng.sanki.co.jp

2. 記号

- A: 雪塊の表面積 m^2
- C_{pa} : 空気の定圧比熱 $J/(kg \cdot K)$
- d: 雪塊の孔の平均直径 m
- H: 雪塊の高さ m
- H_0 : 雪塊の初期の高さ m
- ΔH : 雪塊の高さの変化 m/h
- h: 熱伝達率 $W/(m^2 \cdot K)$
- L: 雪の融解熱 J/kg
- l: 貯雪槽の一辺の長さ m
- Mu_{hol} : 雪塊の孔内の平均ヌッセルト数 $\equiv h \cdot d/\nu$
- Nu_{top} : 雪塊の上面の平均ヌッセルト数 $\equiv h_{top} \cdot l_{top}/\lambda$
- Nu_{bot} : 雪塊の下面の平均ヌッセルト数 $\equiv h_{bot} \cdot l_{bot}/\lambda$
- Q: 熱移動量 W
- Re_{hol} : 雪塊の孔内のレイノルズ数 $\equiv u_{hol} \cdot d/\nu$
- Re_{top} : 雪塊の上面のレイノルズ数 $\equiv u_{top} \cdot l_{top}/\nu$
- Re_{bot} : 雪塊の下面のレイノルズ数 $\equiv u_{bot} \cdot l_{bot}/\nu$
- T: 温度 $^{\circ}C$
- ΔT : 対数平均温度差 $^{\circ}C$ [式(9)]
- t: 実験開始からの経過時間 h
- u_{hol} : 雪塊の孔通過時の空気の平均速度 m/s
- u_{top} : 貯雪槽上部空塔速度 m/s
- u_{bot} : 貯雪槽下部空塔速度 m/s
- V: 空気の流量 m^3/s
- Z: 残雪率(初期容積に対する残雪容積の割合)
- ρ_a : 空気の密度 kg/m^3
- ρ_s : 雪の密度 kg/m^3
- λ : 空気の熱伝導率 $W/(m \cdot K)$
- ν : 空気の動粘性係数 m^2/s

添字

in: 入口

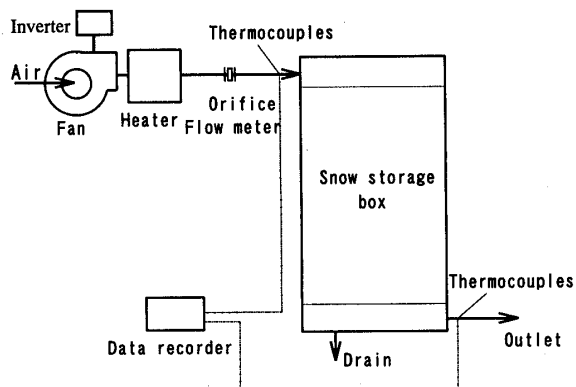


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

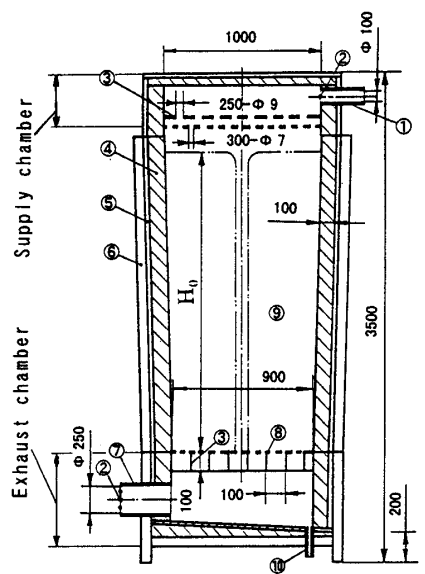
- out: 出口
- bot: 雪塊の下面
- hol: 雪塊の孔面
- top: 雪塊の上面

3. 実験装置および方法

3.1 雪塊の高さ 2 m までの実験

3.1.1 実験装置 実験装置の構成を図1に示す。これは前報⁽⁴⁾で用いた装置と同じである。インバータ付き送風機を用いて空気を設定流量で貯雪槽内に送り込む。流量はオリフィス流量計で測定する。空気の温度はヒータを用いて夏の冷房時を想定して30 $^{\circ}C$ に調整する。また、露点温度0 $^{\circ}C$ 以下の空気を用いることによって湿度の影響のない条件を確保した。空気は貯雪槽の上部から供給し、下部から流出させる。貯雪槽の入口と出口に取付けた温度計により空気の温度を測定し、冷却能力を算出する。空気が冷却されると同時に雪は徐々に融解するが、雪解け水は装置下部に設けたエキスパンドメタルにより雪と分離しドレン管から流出させる。

貯雪槽の断面図を図2に示す。貯雪部は、上部が一辺1000 mm、下部が一辺900 mmの正方形の断面を有し、高さ2000 mmまで雪を詰めることができる。貯雪槽の壁面は厚さ100 mmのポリスチレンフォーム(B類2種)で断熱した。貯雪槽の空気入口は内径



All dimensions are in mm.

- ① Air inlet port
- ② Thermocouples
- ③ Distributing plates
- ④ Thermal insulation material
- ⑤ Plywood
- ⑥ Metal flame
- ⑦ Air outlet port
- ⑧ Expanded metal
- ⑨ Snow
- ⑩ Drain port

Fig.2 Section of snow storage box

100 mm の丸ダクトとし、槽上部には整流板を2枚設けて流速分布を整えている。槽下部にはエキスパンドメタルを設け、空気の流路を確保している。

3.1.2 実験方法 雪の質量を計量した後、貯雪槽に投入し、密度約 500 kg/m^3 を目標とし十分踏み固めて均一になるようにする。雪の初期高さは 0.5 m (平均密度 560 kg/m^3)、 1.0 m (平均密度 580 kg/m^3)、 1.5 m (平均密度 550 kg/m^3) および 2.0 m (平均密度 500 kg/m^3) の四とおりとする。空気を通すための孔は雪の中央に垂直方向にあける。孔の直径は実験開始前で約 50 mm になるように調整する。空気を流量 $0.0255 \text{ m}^3/\text{s}$ 、温度 30°C で流し、貯雪槽の入口と出口の温度を測定することによって冷却能力を調べる。また、定期的に上部を開放し、雪塊の高さと孔の直径を測定する。孔の直径が大きくなりその一部が装置壁面に接するかまたは、雪塊の高さが低くなり、形状の特定が困難となった時点で実験を終了する。

3.2 雪塊の高さ 5 m の実験 雪塊の初期高さが 5 m の場合の実験方法の概略を図3に示す。雪を 5 m 積み上げて山を作り (平均密度 450 kg/m^3)、約 50 mm の空気流通孔をあけ、図2に示した貯雪槽の上部給気部分と下部排気部分とを取付けた。空気は 0°C 以下の外気を、図1に示したファンとヒータと流量計を用いて流量 $0.0255 \text{ m}^3/\text{s}$ 、温度 30°C に設定して供給した。給気部と排気部の熱電対により空気の温度測定を行い、また定期的に上部を解放して雪塊の高さと孔の直径を測定した。孔の直径は上部と下部とで測定し、その平均値を孔の直径とした。なお、倒壊のおそれから雪の高さと孔の直径との比 H/d が 10 程度となるまで実験を続けた。

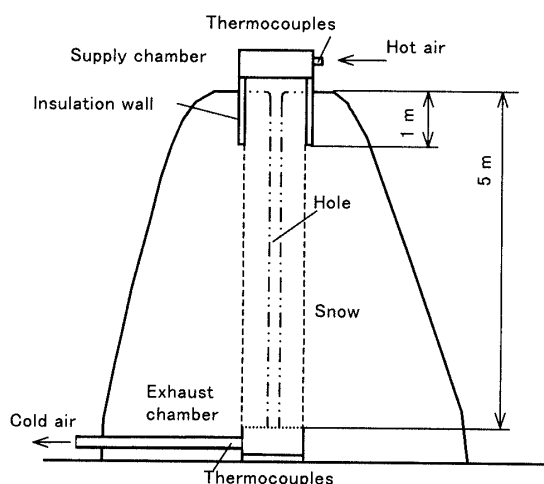


Fig. 3 Outline of experimental method in case of 5 m snow block height

4. 結果および考察

4.1 雪塊の高さと孔の直径 雪塊の高さ H と孔の直径 d の経時変化を図4に示す。高さは時間の経過とともに直線的に減少し、雪の孔の直径は徐々に拡大する。雪塊の初期高さ H_0 が 5 m の場合には孔の直径の拡大が少し遅れ気味である。

4.2 出口温度 貯雪槽出口の空気温度 T_{out} の測定結果を図5に示す。横軸は前報の結果との比較のため残雪率 Z を用いて示した。雪の初期高さ H_0 が 5 m の場合の Z は初期容積を 5 m^3 として算出した。図5より、 H_0 が 0.5 m のように低い場合にも、空気は流入温度 30°C から出口温度約 17°C まで冷却されていて、実用的な範囲にある。 H_0 が高くなるにしたがって T_{out} は低くなり、 H_0 が 5 m の条件では約 7°C まで冷却される。なお、 H_0 が 5 m の場合の残雪率 Z に対する測定範囲は他の H_0 の場合に比べて狭いが、他の H_0 の場合における熱伝達の現象に関する差異は認められず、 Z に対する T_{out} の傾向は同様であると考えられる。したがって、 Z が 0.9 から 0.2 にわたる本実験の

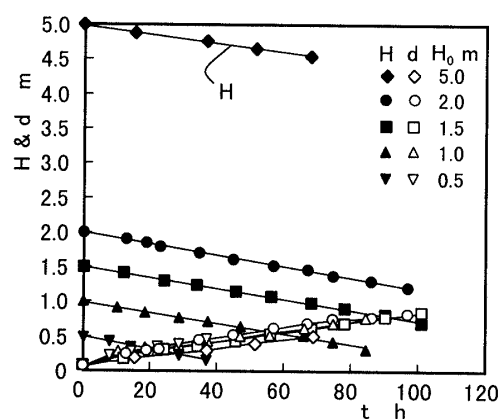


Fig. 4 Trend of Height and diameter of snow hole

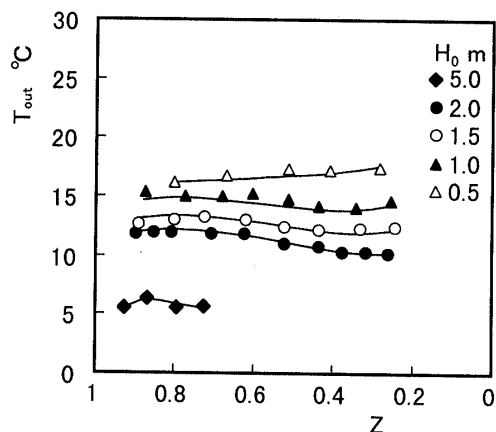


Fig. 5 Outlet air temperature to snow remaining fraction

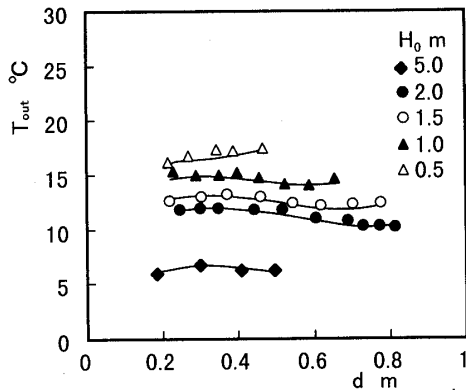


Fig. 6 Relationship between Outlet air temperature and hole diameter

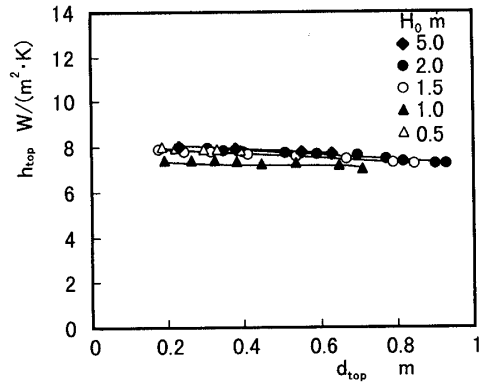


Fig. 8 Heat transfer coefficient on top of snow block

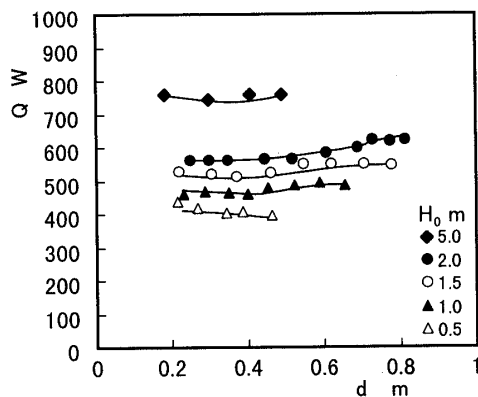


Fig. 7 Effects of hole diameter on heat exchange rate

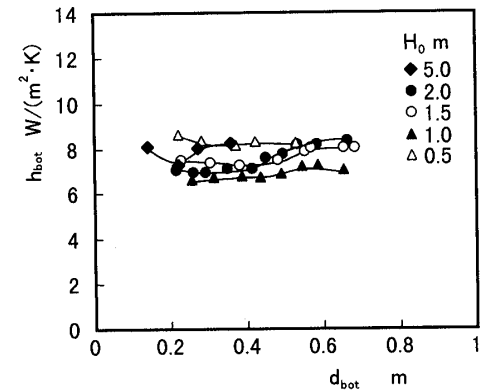


Fig. 9 Heat transfer coefficient on bottom of snow block

範囲では、どの H_0 においても T_{out} は Z に対してそれほど大きく変化しないことがわかる。

本報は雪の初期高さ H_0 の影響を定量することを目的としているため、高さ H と孔の直径 d の関係をおもに検討する。図6は、雪の孔の直径 d と出口温度 T_{out} の関係を示したものである。図6より、出口温度 T_{out} は初期高さ H_0 がいずれの条件においても、孔の直径 d の変化に対してそれほど変化していないことがわかる。初期高さ H_0 が0.5 mの場合を除いて、孔の直径 d が大きくなるのに従い出口温度 T_{out} はいくらか低下する傾向がみられる。これは、直径の拡大とともに雪の表面積が増加するためと考えられる。一方、初期高さ H_0 が0.5 mの場合には、直径が拡大しても高さが同時に減少する影響を受け、結果的に表面積の増加はなく、出口温度は上昇する傾向を有すると考えられる。

4.3 全熱移動量 貯雪槽の入口と出口の空気温度差と空気流量 V とから式(1)を用いて得られる熱移動量 Q を図7に示す。

$$Q = V \cdot \rho_a \cdot c_{pa} (T_{in} - T_{out}) \dots\dots\dots (1)$$

熱移動量 Q は出口空気温度が安定していることか

ら雪の量が増加しても同様に安定している。雪の初期高さ H_0 が0.5 mと低い場合においても約400 Wの冷却能力が得られ、さらに雪の初期高さ H_0 が高くなるにつれて熱移動量は増加し、 H_0 が5 mの場合には約750 Wの冷却能力が得られる。

4.4 上下面の熱伝達率 雪塊の熱伝達面を上下面と孔面とに分けて整理し、雪の孔1本分の熱交換性能を把握する。前報において報告したように、雪の高さの変化 ΔH から式(2)、(4)を用いて上下面の熱伝達率を求めた。ここで雪塊の上下面の表面積は平滑な平面として算出した。図8は、上面の熱伝達率 h_{top} を、横軸に雪の孔の直径 d をとり示したものである。上面の熱伝達率 h_{top} は雪の初期高さ H_0 によらずほぼ等しく、孔の直径 d の拡大による影響は小さい。また図9は下面の熱伝達率 h_{bot} について示したものである。雪の初期高さ H_0 の違いにより多少のばらつきはあるが大きな差異は認められない。これらの結果は、前報に報告した次に示す実験式(6)、(7)より算出した上面の熱伝達率 h_{top} が7.5 W/(m²·K)、下面の熱伝達率 h_{bot} が7.4 W/(m²·K)である事実ともほぼ一致する。以上より、雪塊の上下面の熱伝達に対する雪の初期高さ H_0 の影響は小さいことがわかった。

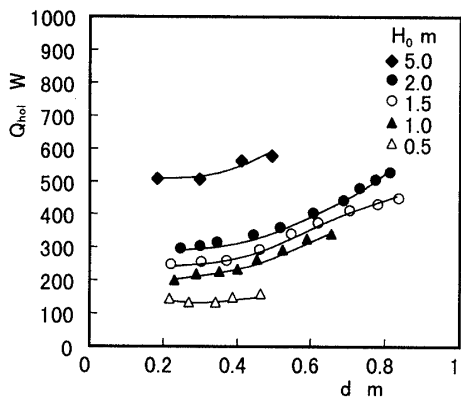


Fig. 10 Heat exchange rate on hole of snow block

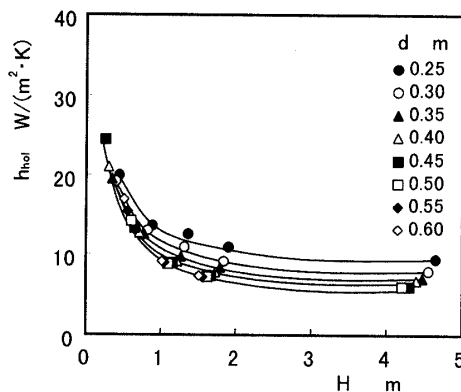


Fig. 12 Heat transfer coefficient on hole of snow block and height

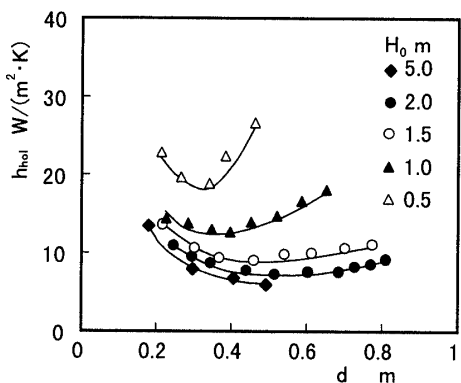


Fig. 11 Heat transfer coefficient on hole of snow block

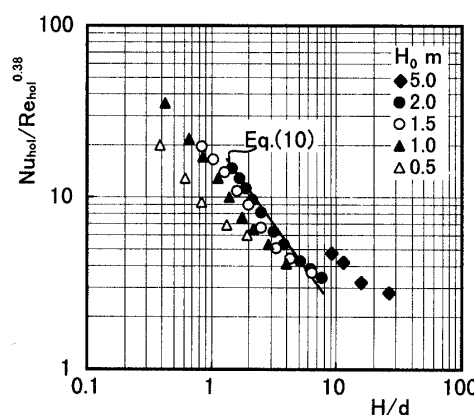


Fig. 13 $Nu/Re^{0.38}$ and H/d on hole of snow block

$$h_{top} = -\Delta H_{top} \cdot \rho_s \cdot L / [(T_{in} + T'_{in})/2] \dots\dots\dots (2)$$

$$T'_{in} = T_{in} + (\Delta H_{top} \cdot \rho_s \cdot L \cdot A_{top}) / (V \cdot \rho_a \cdot c_{pa}) \dots\dots\dots (3)$$

$$h_{bot} = -\Delta H_{bot} \cdot \rho_s \cdot L / [(T_{out} + T'_{out})/2] \dots\dots\dots (4)$$

$$T'_{out} = T_{out} - (\Delta H_{bot} \cdot \rho_s \cdot L \cdot A_{bot}) / (V \cdot \rho_a \cdot c_{pa}) \dots\dots\dots (5)$$

$$Nu_{top} = 47 Re_{top}^{0.25} \dots\dots\dots (6)$$

$$Nu_{bot} = 92 Re_{bot}^{0.14} \dots\dots\dots (7)$$

4.5 孔面の熱移動量 全熱移動量から上下の熱移動量を差引いて孔面の熱移動量 Q_{hol} を算出した結果を図 10 に示す。孔面の熱移動量 Q_{hol} は孔の直径 d が大きくなるのに従って増加する。これは孔の直径の拡大が表面積の増加につながるためである。雪塊に孔をあけ空気を流して直接冷却する本方法においては、孔の拡大に伴う雪塊の上下面の熱移動量の減少を、図 10 に示した孔面の熱移動量の増加が補う結果となり、図 7 に示したように全熱移動量 Q の孔の直径 d 、すなわち残雪率 Z の変化による影響はほとんどない安定した熱交換を実現している。

4.6 孔面の熱伝達率 孔面の熱伝達率 h_{hol} を式 (8) を用いて算出し、それらの結果を図 11 に示す。

$$h_{hol} = Q_{hol} / (A_{hol} \cdot \Delta T) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、

$$\Delta T = (T'_{in} - T'_{out}) / \ln(T'_{in} / T'_{out}) \dots\dots\dots (9)$$

ここに、雪の孔内面の表面積 A_{hol} は孔の平均直径と高さから平滑な円筒として算出したものである。孔面の熱伝達率 h_{hol} は図 7, 8 に示した上下面の熱伝達率に比べて大きな値を示す。雪の初期高さ H_0 が 0.5 m と低い場合には 18 W/(m²·K) 以上の値を示し、 H_0 の増加に従って熱伝達率 h_{hol} は小さくなる。このことは、雪の孔の内部における熱伝達が孔の入口部から速度分布および温度分布が発達する助走区間の影響を受けているためと考えられる。なお、雪の孔の直径 d の拡大に従って熱伝達率が大きくなる傾向を示しているが、これは、実際の雪表面には融解の進行につれて凸凹面が形成され、この影響により表面積が平滑面として算出した場合よりも大きくなるためであると考えられる。

雪塊の高さと熱伝達率の関係を図 12 に示す。図 12 中のプロットは図 11 から雪の孔の直径 d ごとに熱伝達率 h_{hol} を読取って示した。図 12 より、雪の高さ H が低くなるのに従って熱伝達率 h_{hol} は徐々に増加し、 H が 2.0 m 以下の場合にその傾向が顕著となっている。この事実から、孔面の熱伝達率 h_{hol} は孔の直径 d

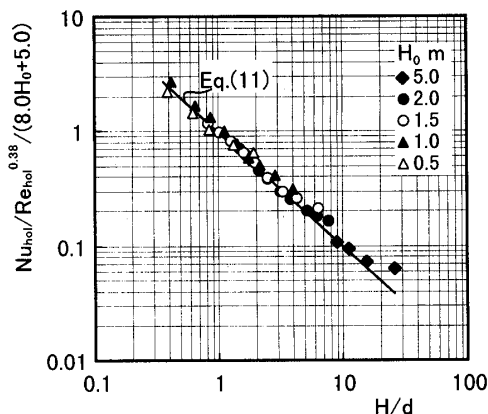


Fig. 14 Effect of H/d included H_0 on heat transfer coefficient

とともに雪塊の高さ H の影響を大きく受けることがわかった。前報では雪の初期高さ H_0 が 2 m の場合について、空気流量の影響を調べ、式(10)に示す実験式を提示した。

$$Nu_{hoi} = 21 Re_{hoi}^{0.38} (H/d)^{-1.0} \dots\dots\dots (10)$$

本報においては式(10)に H_0 の補正を施すのにあたり、本実験結果をもとに、 $Nu_{hoi}/Re_{hoi}^{0.38}$ の値を算出した。その結果を図13に示す。図13中に示す実線は H_0 が 2 m の場合の式(10)による値である。雪の孔の直径で無次元化した雪の高さ H/d が大きくなるのに従って $Nu_{hoi}/Re_{hoi}^{0.38}$ の値は小さくなる。初期高さ H_0 が低くなるのに従って実験式よりも値が小さくなり、逆に H_0 が 5 m と高い場合には $Nu_{hoi}/Re_{hoi}^{0.38}$ の値は大きくなる。このような初期高さの影響を補正するため、図13の縦軸の $Nu_{hoi}/Re_{hoi}^{0.38}$ に $8.0 H_0 + 5.0$ を乗じ補正を施し、式(11)を提示した。その結果を図14に示す。図14より実験データは1本の直線上に集まり実験結果を良好に近似する実験式が得られた。ただし、各初期高さ H_0 において H/d の値が大きい場合には、式(11)による値よりも若干高い値を示す。このことは雪の高さ H の影響よりも孔の直径 d の影響が大きいと考えられる。すなわち、 d が 0.25 m と小さい場合、 Re_{hoi} が 8000 以上と大きく、乱流による熱伝達が支配的になるが、 d の拡大に伴って Re_{hoi} は減

少し、本実験式の適応範囲においては自然対流や遷移流の影響を受けるためと考えられる。しかし、一般に利用される場合にはこの径よりも大きな径で利用されることから、実用上は大きな問題とはならないと思われる。

$$Nu_{hoi} = (8.0 H_0 + 5.0) Re_{hoi}^{0.38} (H/d)^{-1.0} \dots\dots\dots (11)$$

ただし、

$$0.5 \text{ m} \leq H_0 \leq 5.0 \text{ m}, \quad d > 0.25 \text{ m}$$

5. 結 言

雪と空気とを直接熱交換する雪冷房装置について、雪塊の初期高さを変えて冷却能力を実験的に調べた結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 雪塊の初期高さが 0.5 m から 5.0 m の本実験範囲において、雪塊により冷却される空気温度は、雪の量が初期の 2 割程度の減少になるまでほぼ安定し一定である。

(2) 雪塊の初期高さが、雪塊の上面と下面の熱伝達率に及ぼす影響は小さい。

(3) 雪の孔面の熱伝達率は雪塊の高さが低くなるに従って大きくなる。その影響は高さが 2.0 m 以下になると顕著となる。

(4) 雪の孔面の熱伝達率に及ぼす雪塊の初期高さの影響を明らかとし、前報において報告した実験式に対し初期高さ H_0 による補正を加えた実験式(11)を提示した。

最後に、北海道沼田町役場や沼田町農業協同組合の方々および、利雪技術協会の松本尚雄氏には高さ 5 m の雪山を築いて本実験を行うにあたりご協力を賜った。ここに深く謝意を表す次第である。

文 献

- (1) 媚山政良, 空気調和・衛生工学, 72-3 (1998), 63-71.
- (2) 媚山政良・ほか7名, 第12回寒地環境工学合同シンポジウム講論集, (1995), 34-37.
- (3) 媚山政良・ほか5名, 第13回寒地技術シンポジウム講論集, (1997), 64-67.
- (4) 飯嶋和明・ほか4名, 機論, 65-636, B(1999), 2847-2853.
- (5) 飯嶋和明・ほか4名, 機論, 63-614, B(1997), 3390-3395.