

研究ノート

アイスシェル施工時の散水量に関する基礎的検討 —水平面上の(雪+水)→(氷)凍結実験—

粉 川 牧¹⁾

要 旨

散雪散水工法によるアイスシェルの施工において、構造体となる水の質を保ちつつ凍結時間が最短となる散水量を定めることは施工合理性の向上を図る上で重要な検討課題である。この課題を解決する第一歩として、本研究は水平面上における(雪+水)層→(氷)層の凍結現象を定量的に解明することを目的としている。対流、蒸発及び大気放射による冷却熱量を考慮してその熱収支モデルを構築するとともに熱収支式中に現われる熱伝達率を評価するための簡易実験法を提案し、薄型木製シャーレを用いた(雪+水)→(氷)及び(水のみ)→(氷)の凍結実験を実施した。算定された(雪+水)→(氷)の凍結過程における(対流+蒸発)熱伝達率は平均で $8.95 \times 10^{-4} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec}^\circ\text{C})$ と(水のみ)→(氷)のそれを約50%も上回った。この値を用いた水平面上の(雪+水)→(氷)凍結シミュレーション結果は、現行の散水方法に改良の余地があることや施工時間の短縮化が可能であることを示唆した。

キーワード：アイスシェル施工，散雪散水工法，最適散水量，水平面上の凍結実験，熱収支

Key words: ice shell construction, blowing snow and spraying water, optimum amount of spraying water, freezing experiment on horizontal plane, thermal process

1. はじめに

寒さ厳しく雪が多い北海道の内陸部において、氷を材料とする薄肉の曲面板構造、アイスシェルが冬期間限定の簡易構造物として実現されている(Kokawa, 2005)。その建設技法は二重平面膜と網目状カバーロープからなる型枠空気膜に散雪散水するというアイデアに基づくもので(Kokawa, 1985)、施工合理性に優れるのみならずシェルの力学的合理性にも裏付けられ、スパン20~30 m級の巨大アイスドームを正味1週間以内という驚異の短期間で建設施工し、且つ十分な耐久性を有していることが既往の実大フィールド実験(粉川ら, 2002; 粉川, 2002)で確かめられている。このように、北海道のフィールドを舞台として冬の自然環境のなかで、多種多様な実構造物への適用を模索する一方、実大モデルに対する構造工学的実

験が繰り返し行われ、アイスシェル研究は進められて来た。その結果、今日では、アイスシェルは厳寒多雪地域における冬のアクティビティーに対応できる実用的な氷構造物であることが広く認知されつつある。しかし、アイスシェルの研究蓄積は未だ不十分で、健全な氷建築構造物として実現に導くための設計・施工・維持安全管理に関わり、解決すべき工学的諸問題は依然として多く残されているのが現状である。その中の一つに、合理的な施工技術の確立に関わり、散雪散水過程における散水量の決定問題がある。この問題の解決には(雪+水)層→(氷)層の凍結現象における熱収支の解明が欠かせないが、過去に(雪+水)層→(氷)層の凍結問題を扱った研究は筆者の知る限り見当たらない。そこで、この問題の解決に向けた第一歩として、本研究は、水平面上における(雪+水)層→(氷)層凍結現象の解明を図ろうとするもので、本研究ノートでは、熱収支モデルの

1) 北海道東海大学芸術工学部

〒070-8601 旭川市神居町忠和 224

構築と熱収支式の定量的評価を可能にする実験手法の提案, さらに実験結果に検討・考察を加え, アイスシェル施工時の散水量決定に関する基礎的知見を示そうとしている。

2. 現行の散雪散水工法と本研究の検討課題

図 1 に示される様に, アイスシェルの施工において, 構造体である薄肉の水曲面は型枠空気膜曲面上に散雪散水してつくられる。シェルの規模, 気象条件にもよるが, 散雪は 45 分～90 分の間隔をおいて行われ, 一回当たりの散雪に要する時間は 10 分～30 分である。このとき, 撒かれる雪は除雪機で粉碎される一種の焼結雪でその密度は $0.4 \sim 0.5 \text{ g/cm}^3$ 程度と比較的高密度で, さらに一回あたりの散雪厚は 1 cm 以下としている。一方, 水は粒径の大きさを調整できるノズルの先から常時継続してシェル面へ散水される。ここで, (雪+水) としたのは (水のみ) の場合よりも少ない冷却熱量で (氷) になることや雪の吸水・保水性により散水した水が曲面上を下方に流れ落ちるのを極力防ぐためであり, 雪を使用することによって建設可能な外気温の緩和化や凍結時間の短縮化が図れると考えたからである。この方法で氷をつくると, 外気温が -10°C 程度であっても氷厚は 90 分間で約 1 cm 増えることが経験的に分かっている。そして, つくられる氷は密度が $0.83 \sim$

0.88 g/cm^3 程度となり, 純水に比べて材料の短期強度やクリープの性能は劣るものの, 一方で衝撃的荷重や急激な温度変化に対して亀裂は生じにくくその伝播範囲は小さいなど靱性に富む傾向を有している。ここで, 施工上問題となるのは散水量であるが, 外気温に応じてその量を増減するものの, 基本的には散雪層に水が十分に滲みこむように散水する。実際, 散水量はかなり大きめで, 例えばスパン 10 m アイスドームの場合, 外気温にもよるが $14 \sim 40 \text{ (l/min)}$ と大きな幅がある。このように, 散水量は長年の建設経験から得られた知見をもとに大雑把に定められているのが現状である。従って, (雪+水) 層→(氷) 層凍結現象を工学的立場から熱収支問題として捉え, 適切な散水量を定めることは施工合理性の向上を計る上で極めて重要な検討課題と思われる。そこで, アイスシェル施工時における散水量の決定に際し基礎的知見を得るための第一歩として, 本研究では問題を限定して, 水平面上の (雪+水) 層→(氷) 層凍結現象の解明を目的とし, その熱収支モデルを構築するとともに定量的評価を可能にする実験手法を提案する。まず, 凍結現象における冷却熱量を対流熱伝達量, 蒸発熱伝達量, 大気放射熱量の和で与え, この冷却熱量が (雪+水) 層における (水) の部分が (氷) となるときに必要な潜熱量と等しいとする熱収支方程式をたてる。一方で, その潜熱量は木製シャーレを用いた凍結実験により求められ, 実験統計的に熱伝達率が定められることになり, 結局, 水平面上の (雪+水) 層→(氷) 層の凍結問題において, 氷の密度, 散雪の厚さと密度, 建設中の気象条件 (外気温, 風速, 天空の状況) が与えられれば, その凍結時間や散水強度 (単位時間, 単位面積当たりの散水量) の定量的評価が可能となる。

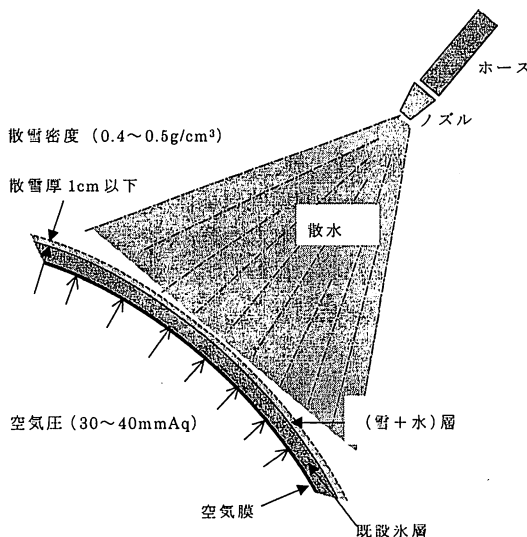


図 1 散雪散水の説明図

3. 熱収支式の構築

3.1 問題の前提

図 1 に示される様に, 既設水層上に密度 ρ_s (g/cm^3), 厚さ 1 cm の雪層があるとする。この状態で水をスプレーすると水は雪層に浸透し (雪+水) 層になる。この際, 型枠曲面の傾斜により, 一般に水はシェルの下方に流れ落ちてゆくため, 現実には, その保水状況に応じて水量を調整しな

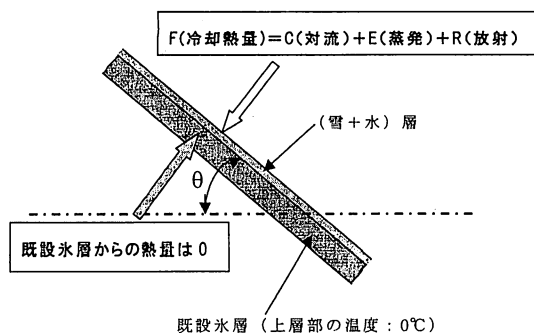


図 2 熱収支問題の一般モデル

ければならない。従って、図 2 に示される様に、傾斜角 θ に応じた散水量が定められねばならないが、これは今後の課題に譲るとして、まずは、本研究では、撒かれた水が全て氷になると考えられる水平面上（傾斜角 θ が 0 度、例えばドーム頂点近傍）における凍結現象を問題とする。そこで、この問題を解明するために、次のような状態を想定する。即ち、一定の水量を加えた直後において、（雪＋水）層の温度は一様に 0°C で且つ雪、水、それぞれの重さ変化はないものとし、さらにその凍結過程において雪に与えられる冷却熱量を 0 と見なす。つまり、（雪＋水）層 $\rightarrow$ （氷）層の凍結現象は、（水） $\rightarrow$ （氷）の凍結現象と単純化して捉えることができると考える。この仮定は、勿論与える水量にもよるが、散水前において、水温は $0^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ 、雪温は -10°C 以下の外気温に近い値であることが経験的に知られており、効率よく散水がなされるとすれば、上記の仮定は首肯できるものと思われる。

今、つくろうとする氷の密度を $\rho_i (\text{g}/\text{cm}^3)$ とすると散雪厚 1 cm に対する散水厚 $h_w (\text{cm})$ は、水から氷への密度変化はあるが、十分な精度の近似で式 (1) で与えられる。

$$h_w = (\rho_i - \rho_s) / 0.917 \quad (1)$$

ここに、純水（空隙率 0）の密度は $0.917 \text{ g}/\text{cm}^3$ としている。従って、検討すべき問題は次のように記述される。

問題：「厚さ $h_w (< 1 \text{ cm})$ 、 0°C の水が氷になるまでの時間、即ち凍結時間 $t_f (\text{sec})$ を求めよ。」

3.2 冷却熱量式

本問題は、対象とする（雪＋水）層が 1 cm 程度ときわめて薄いことから凍結は短時間で終了し、定常熱収支問題として扱う。図 1 において、（雪＋水）層の凍結は一般に内側と外側の両面から進行する。しかし、型枠空気膜の内圧に応じて送風空気の温度が上昇し、その空気温度は外気温より $5^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$ 高くなることから、内側からの熱伝導による冷却熱量は外側から供給される冷却熱量に比べて極めて小さく、以下では無視して考える。従って、単位時間、単位面積当たりの総冷却熱量 $F (\text{cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec}))$ は次のように書ける。

$$F = C + E + R \quad (2)$$

ここに、 C, E, R は夫々、対流熱伝達量、蒸発熱伝達量、夜間・大気放射による冷却熱量である。

まず、対流熱伝達量 $C (\text{cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec}))$ を次式で与える。

$$C = \alpha(T_w - T_a) = -\alpha T_a \quad (3)$$

ここに T_a は外気温 ($^{\circ}\text{C}$)、 T_w は（雪＋水）層の表面温度で 0°C とおく。そして、対流熱伝達率 α は風速 $V (\text{m}/\text{sec})$ の一次式で与える。

$$\alpha = (a + bV) \times 10^{-4} (\text{cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C})) \quad (4)$$

但し、 a, b は実験で定まる定数。

次に、蒸発熱伝達量 $E (\text{cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec}))$ を次式で与える。

$$E = \beta(4.58 - e) \quad (5)$$

ここに、 β は蒸発熱伝達率で、 $\beta = (c + dV) \times 10^{-4} (\text{cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec} \cdot \text{mmHg}))$ とおき、 α と同様、 V の一次式で表されるものとする。 e は大気における蒸気圧 (mmHg) を示す。ここで、 C と E において拡散機構が同じで水面や積雪面でのバルク式が適用されるものと仮定すると（中村・大沼, 1966; Nakawo, 1983; 小島ら, 1985; 近藤, 1998）、以下のプロセスを経て式 (6) が恒等的に成り立つ。

まず、対流熱伝達量 C と蒸発熱伝達量 E のバルク式は下式で与えられる。

$$C = \gamma \rho_a C_p u_a (T_a - T_s), \quad E = \gamma L_e \rho_a u_a (q_a - q_s)$$

ここに、 γ はバルク係数、 ρ_a は空気密度 (Mg/m^3)、 C_p は空気の定圧比熱 ($\text{J}/(\text{g}^\circ\text{C})$)、 u_a は風速 (m/sec)、 T_a は空気温度 ($^\circ\text{C}$)、 T_s は表面温度 ($^\circ\text{C}$)、 L_e は蒸発の潜熱 (J/g)、 q_a は空気の比湿 ($\text{gH}_2\text{O/g}$)、 q_s は表面の比湿 ($\text{gH}_2\text{O/g}$) をそれぞれ表わす。

上式に、 $L_e = 2500$ (J/g) (0°C 水の蒸発の潜熱)、 $C_p = 1.0$ ($\text{J}/(\text{g}^\circ\text{C})$)、 $T_s = 0^\circ\text{C}$ さらに比湿 q ($\text{gH}_2\text{O/g}$) と水蒸気分圧 e (mmHg) の関係式、 $q = 0.818 \times 10^{-3} \times e$ と $e_s = 4.58$ (mmHg) を代入すると、

$$C : E = T_a : 2.05(e_a - 4.58)$$

一方、式(3)、(5)より、

$$C : E = -\alpha T_a : \beta(4.58 - e)$$

結局、

$$\beta = 2.05 \times \alpha \quad (6)$$

加えて、アイスシェル建設場所である北海道内陸部における冬期間の夜間における気象データを参考に、 T_a が $-10^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$ の範囲で湿度を 80% と仮定すると、 e は近似的に次式で与えられる。(近藤, 1998; 二宮, 1998)

$$e = 2.683 + 0.0966 T_a \quad (7)$$

$$\text{結局, } E = \alpha(3.89 - 0.198 T_a) \quad (8)$$

$$\text{同様に, } C + E = \alpha(3.89 - 1.198 T_a) \quad (9)$$

雲のない快晴時の夜間における放射冷却熱量 R_o ($\text{cal}/(\text{cm}^2 \text{sec})$) を次式 (プラント式) で与える。

$$R_o = \delta \sigma \left\{ (T_w + 273.2)^4 - (T_a + 273.2)^4 \right. \\ \left. (p + q\sqrt{e_b}) \right\}$$

ここに、 δ は吸収率 ($=1$)、 σ : ステファン・ボルツマン定数 $= 5.67 \times 10^{-8}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$) $= 1.35 \times 10^{-12}$ ($\text{cal}/(\text{cm}^2 \text{secK}^4)$)、 $p = 0.53$ 、 $q = 0.065$ 、 T_a : 気温 ($^\circ\text{C}$)、 T_w : 表面温度 ($=0^\circ\text{C}$)、 e_b : 水蒸気圧 $= 2.0 \text{ mb}$ (気温 $-10^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$ 、湿度 80% 程度)、 $p + q\sqrt{e_b} = 0.62$ を代入し、 $T_a = -15^\circ\text{C}$ 近傍で、直線近似式をつくると、式(10-a)が得られる。

$$R_o = 10^{-4} \times (29.36 - 0.576 T_a) \quad (10-a)$$

天空に雲がある場合の放射冷却熱量 R ($\text{cal}/(\text{cm}^2 \text{sec})$) は雲量、雲形による低減率 r を導入して、次式で表わす (田中ら, 1994)。

$$R = R_o r \quad (10-b)$$

ここに、 $r = 1 - k$ ($n/10$)、

n : 雲量、快晴の場合 0、全天雲の場合 10 とし、11 段階で表示。

k : 下層雲 0.85、中層雲 0.7、上層雲 0.2

式(2)、(9)、(10-a)、(10-b) より総冷却熱量 F ($\text{cal}/(\text{cm}^2 \text{sec})$) は式(11)となる。

$$F = \{ \alpha_o(3.89 - 1.198 T_a) + (29.36 - 0.576 T_a)r \} \\ \times 10^{-4} \quad (11)$$

但し、 $\alpha = \alpha_o \times 10^{-4}$ 、 $\alpha_o = a + bV$

3.3 凍結時間の算定

厚さ h_w (cm)、 0°C の水が 0°C の氷になるために必要な単位面積当たりの冷却熱量 q_f (cal/cm^2) は、水の潜熱を 80 cal/g 、密度を $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ とし、

$$q_f = 80 h_w \quad (12)$$

従って、凍結時間 t_f (sec) は式(13)となる。

$$t_f = \frac{q_f}{F} = \frac{80 h_w}{F} \quad (13)$$

式(1)、(11)を式(13)に代入して整理すると、

$$t_f = 8.724 \times 10^5 \\ \times \frac{(\rho_i - \rho_s)}{\{ \alpha_o(3.89 - 1.198 T_a) + (29.36 - 0.576 T_a)r \}} \quad (14)$$

式(14)より、密度 ρ_s (g/cm³) の雪を厚さ 1 cm に撒いて散水し、密度 ρ_i (g/cm³) の氷をつくるのに要する時間 t_f (sec) は対流熱伝達率 α_o (風速 V の一次式)、気温 T_a 、天空の状況 r によって求められる。そこで、 α_o もしくは α を次章に示す方法によって実験的に定める。

4. 水平面上の(雪+水)層→(氷)層凍結実験

4.1 実験モデル

曲面の傾斜角度 0 度の場合、即ち、水平面上の場合の対流熱伝達率 α を下記に示す実験によって求めた。まず、図 3 に示す木製シャーレを用意する。このシャーレの中に「2.5 mm 篩」にかけた雪を入れ、擦り切りをする。雪の重量 W_s (g) とシャーレ容積 V_m (cm³) から雪密度 ρ_s (g/cm³) を求めた後、野外に数分間放置する。そして 0℃の水量 W_w (g) をスプレー装置付容器に入れ雪層に様に浸透するように注意深く撒く。その後、シャーレ中央下面に添付した日記記憶型小型温度計 (TR-52 (株)ティアンドデイ製) によってその温度推移を自動的に記録し、温度が急降下し始める時刻を凍結開始時刻とし、凍結時間 t_f (sec) を定めた。尚、シャーレへの散水量 W_w (g) はつくりょうとする氷の密度 ρ_i を設定した場合は、次式で求めることができる。

$$W_w = (\rho_i - \rho_s) \times S_s / 0.917 \quad (15)$$

ここに、 ρ_s : 雪密度、 S_s : シャーレ底面積 (cm²)、さらに、(雪+水)と同じ重さの水量を入れた(水のみ)の場合の凍結実験も行い、両者の比較を試みた。

4.2 対流熱伝達率の算定手順

(雪+水)のうち、水 W_w (g) の凍結に必要な冷却熱量 Q_f (cal) は潜熱を 80 cal/g とし、

$$Q_f = 80 W_w \text{ (cal)}$$

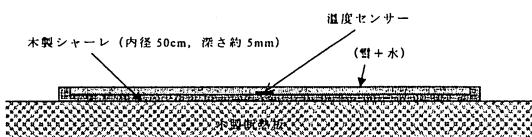


図 3 水平面上 ($\theta=0$ 度) の凍結実験方法

Q_f と、実験場所において計測された平均気温と気象台発表の気象データによる(雲量 n 、雲の種類 k)を式(10)に代入して計算される放射冷却熱量 R (cal/(cm²sec))を用い、次式によって凍結中の蒸発熱伝達と対流熱伝達による冷却熱量 ($Q_E + Q_C$) (cal) を算出する。

$$Q_E + Q_C = Q_f - R \times t_f \times S_s$$

一方、その ($Q_E + Q_C$) は式(9)を用いて、次式でも表される。

$$Q_E + Q_C = (C + E) \times t_f \times S_s = \alpha (3.89 - 1.198 T_a) \times t_f \times S_s$$

ここに S_s はシャーレ底面積で直径 50 cm として 1962.5 cm²とする。従って、対流熱伝達率 α (cal/(cm²sec℃))は、

$$\alpha = (Q_f / (t_f \times S_s) - R) / (3.89 - 1.198 T_a) \quad (16)$$

そして、 $\alpha = (a + bV) \times 10^{-4}$ (cal/(cm²sec℃))より、係数 a 、 b を最小二乗法などにより、実験統計的に決定する。なお、風速 V は実験中の平均風速 (m/sec) を表わすものとし、その計測に熱線式風速計 CLIMOMASTER 6541 (日本カノマックス株式会社)を使用した。

4.3 実験結果

2005 年 3 月 13 日の午前 1 時～午前 4 時、北海道東海大学旭川校舎 1 号館 (RC 造 3 階建) の屋上にて行った実験結果の一例を図 4 に示す。尚、実験を通して、気温 -9℃～-10℃、微風(代表的 10 分間平均風速: 0.18 m/sec (最大風速 0.34 m/sec～最小風速 0.03 m/sec)、気象台発表による実験時の湿度は 84～89%、天空状況は下層雲 ($k=0.85$)、全天雲 ($n=10$) で放射冷却の低減率 $r=0.15$ とした。図 4 は横軸に経過時間 (min)、縦軸に温度 (℃) を示し、空気 (図中○印)、A シャーレ ((雪+水) 図中□印)、B シャーレ ((水のみ) 図中△印) 夫々の温度 T_a 、 T_A 、 T_B を表している。なお、この例では、A シャーレは雪重量 $W_s=390$ g、水重量 $W_w=489$ g、B シャーレは水のみの場合でその重さ W_t は A シャーレの(雪+水)の重

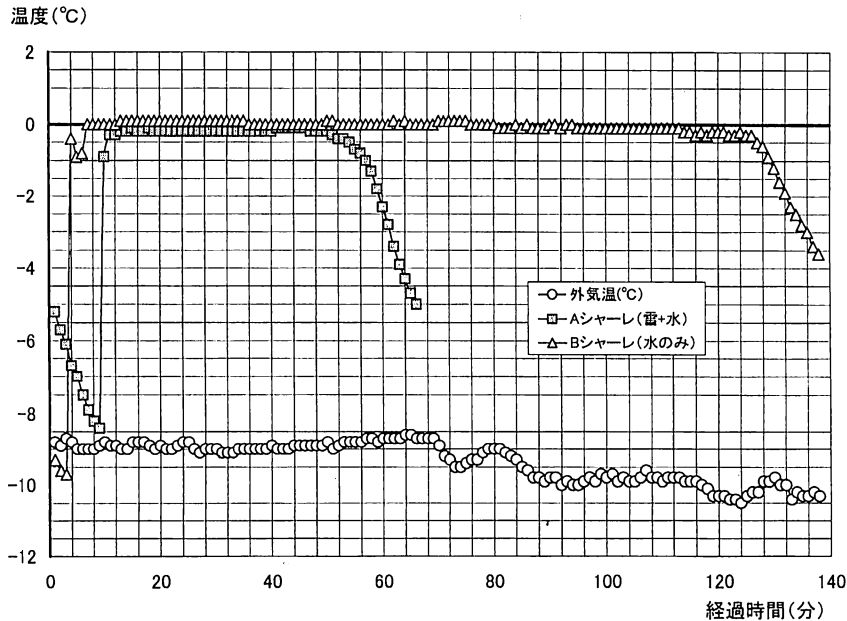


図 4 凍結実験・温度変化 (05/03/13, 1:00-4:00)

さと同じ 879 g としている。A シャーレの温度 T_A は立ち上がりにおいて雪温度を示し、外気温 T_a に達したところで 0°C の水を散水すると、 T_A は急上昇して 0°C になり、以後凍結開始までこの温度状態が続く。46 分後に温度降下の開始が見られた。一方、B シャーレ温度 T_B は 0°C の水を散水後、直ちに 0°C となり、120 分後の温度降下開始までこの温度状態で推移している。ここで両者の単位水量あたりの凍結時間比は $(120/879) / (46/489) = 1.45$ となり、明らかに雪の存在が水部分の凍結を速めていることを示している。このことは、式 (16) によって計算された対流熱伝達率 α が、A シャーレ、B シャーレ、夫々、 $4.59 \times 10^{-4} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C})$ 、 $3.00 \times 10^{-4} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C})$ となり、(雪+水) の場合の方が(水のみ) よりも約 5 割大きくなっていることから窺われる。以上の結果も含めて、当日行われた実験結果一覧を表 1 に示した。さらに表 2 には、3 月 13 日より気温が低い 1 月 22 日に実施した実験の結果一覧を示す。これらの実験で得られた α の値はバラツキが大きく、実験精度の向上とデータの蓄積は今後の課題として残されているが、大局的な傾向を捉えるために α の平均値を求めると、(雪+水) が $5.55 \times 10^{-4} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C})$ 、(水のみ) の場合は

$3.61 \times 10^{-4} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C})$ であった。尚、今回の実験ではいずれも微風であったため、式 (4) において a 、 b の決定は見送ることとした。

4.4 熱伝達率の比較検討

消雪や融雪などの既往実験 (吉田ら, 1950; 小口, 1954; 中村・大沼, 1966; 中村, 1975; Saitoh and Arakawa 1978) で得られた熱伝達率と比較した結果を表 3 に示す。ここで、表中に示す α_i は、 $(C+E) = -\alpha_i T_a$ において算定される蒸発冷却の影響も含んだ (対流+蒸発) 熱伝達率とでもいべきもので、中村・大沼 (1966) の他は全てこの α_i で熱伝達率が評価されている。

$$\alpha_i = \alpha (1.198 - 3.89/T_a) \quad (17)$$

尚、今回の実験結果において、表 1、2 に記載される α_i は式 (9) の右辺と $-\alpha_i T_a$ を等置して導かれる式 (17) によって算定されており、又、表 3 にはこれらの値の平均値が示されている。

表 3 より、今回の実験では風速の影響を定量的に捉えることはできなかったものの、凍結過程における熱伝達率 (α_i あるいは α) の平均値は明らかに消雪や融雪過程における値に比べてかなり大きな値を示している。これは、凍結過程の場合、

表 1 2005 年 3 月 13 日 (0:00-4:00) の実験結果
 平均風速: 0.18 m/s, 湿度: 84~89%, (下層雲, 全天雲): $r=0.15$

シャーレ名(材料)	A(雪+水)	B(氷のみ)	C(雪+水)	E(氷のみ)	F(雪+水)
シャーレ高: $H(\text{mm})$	4.9	5.0	4.6	4.8	5.0
シャーレ容積: $V_m(\text{cm}^3)$	953	1037	895	985	974
雪重量: $W_s(\text{g})$	390		346		272
雪密度: $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	0.41		0.39		0.28
氷密度: $\rho_i(\text{g}/\text{cm}^3)$	0.88		0.88		過飽和*
水重量: $W_w(\text{g})$	489	879	482	851	789
全重量: $W_t(\text{g})$	879	879	828	851	1061
凍結時間: $t_f(\text{分})$	46	120	34	122	62
実験時平均気温: $T_a(^{\circ}\text{C})$	-9.0	-9.2	-9.0	-9.7	-10.0
対流熱伝達率: $\alpha(\times 10^{-4} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C}))$	4.59	3.00	6.23	2.72	5.13
(対流+蒸発)熱伝達率: $\alpha_t(\times 10^{-4} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C}))$	7.49	4.86	10.17	4.35	8.15

* 過飽和: $V_w=(\rho_i-\rho_s)S_z/0.917$ において、 $\rho_i>0.917$ となっている状態を言う。

表 2 2005 年 1 月 22 日 (21:00-24:00) の実験結果
 平均風速: 0.33 m/s, 湿度: 80~84%, (下層雲, 全天雲): $r=0.15$

シャーレ名(材料)	A(雪+水)	B(雪+水)	C(氷のみ)	D(氷のみ)	E(雪+水)	F(雪+水)
$H(\text{mm})$	4.9	5.3	4.6	5.5	4.8	5.0
$V_m(\text{cm}^3)$	953	1037	895	1078	935	974
$W_s(\text{g})$	366	371			306	255
$\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	0.38	0.36			0.33	0.26
$\rho_i(\text{g}/\text{cm}^3)$	0.89	0.91			過飽和*	0.87
$W_w(\text{g})$	527	622	893	992	659	648
$W_t(\text{g})$	893	993	893	992	965	903
$t_f(\text{分})$	30	45	55	90	30	27
$T_a(^{\circ}\text{C})$	-13.3	-14.4	-13.3	-13.6	-13.6	-13.6
$\alpha(\times 10^{-4} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C}))$	5.74	4.18	5.29	3.43	7.12	7.80
$\alpha_t(\times 10^{-4} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C}))$	8.56	6.13	7.88	5.10	10.56	11.58

表 3 熱伝達率 (α, α_t) の比較一覧

実験内容	引用文献	$\alpha(\times 10^{-4} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C}))$	$\alpha_t(\times 10^{-4} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C}))$
道路消雪	(中村秀臣, 1975)		$3.40+0.67V$
	(Saitoh <i>et al.</i> , 1978)		$0.56+0.45V$
融雪	(吉田ら, 1950)		$1.00+3.78V$
	(小口 八郎, 1954)		$1.78+7.22V$
	(中村千里・大沼匡之, 1966)	$1.00+0.40V$	
氷板凍結	(Lozowski <i>et al.</i> , 1991)		4.78
	(水)→(氷) 凍結	3.61	5.83
	(雪+水)→(氷) 凍結	5.55	8.95

大気が凍結面よりも冷たいため対流が生じやすく空気の移動が活発になっていることが第一要因と考えられる。

なお, Lozowski *et al.*, (1991) による低温実験室内における ice plate の凍結実験で得られた表面熱伝達率 (surface heat transfer coefficient) は $4.48 \times 10^{-4} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C})$ で, 今回の (水の

み) 層→(氷) 層の凍結実験における α_t の平均値: $5.83 \times 10^{-4} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C})$ よりも小さい値が示されている。

4.5 水平面上における (雪+水)→(氷) の凍結シミュレーション

今回の実験で得られた (雪+水) における熱伝達率の平均値 ($\alpha=5.55 \times 10^{-4} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C})$) も

しくは $\alpha_i = 8.95 \times 10^{-4} \text{ cal / (cm}^2 \text{ sec}^\circ\text{C)}$ を用いて、外気温が $-10^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$ 、天空が快晴の場合の水平面上における(雪+水)層→(氷)層の凍結問題を定量化する。

式(14)において、 $\alpha_o = 5.55$ と $r = 1$ を代入すると、散雪厚 1 cm に対する凍結時間 t_f (sec) は式(18)で与えられる。

$$t_f = 8.724 \times 10^5 \frac{(\rho_i - \rho_s)}{(50.95 - 7.225 T_a)} \quad (18)$$

式(18)に基づいて、つくろうとする氷の密度 ρ_i を 0.85 g/cm^3 とし、外気温 $T_a = -10^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$ における凍結時間 t_f (min) を散雪密度 ρ_s (g/cm^3) = 0.4, 0.5, 0.6 それぞれに対して算定した結果を図5に示す。式(18)で明らかに凍結時間は $(\rho_i - \rho_s)$ に比例し、同一温度における凍結時間の比率は 9 : 7 : 5 となり、例えば、 $T_a = -15^\circ\text{C}$ において、散雪厚 1 cm に対する凍結時間はそれぞれ 41.1 分、31.9 分、22.8 分となる。これより、散雪密度 ρ_s は凍結時間に大きな影響を与えることが分かる。高密度の雪を如何に簡便につくるかは今後の課題であるが、例えば、気温が高い日中に除雪機で粉碎し、焼結を進行させてその日の夜間に再び除雪機で粉碎する方法は極めて有効な方法の一つと思われる。

次に、基準散水強度 S_v を導入し、現行のドーム建設における散水量を検討する。ここに基準散水

強度 S_v とは散水厚 h_w を凍結時間 t_f で除した値で、撒かれた水が連続的に全て氷になるとしたときの単位時間・単位面積あたりに撒かれるべき水量を意味し、単位を ($\text{g / (sec} \cdot \text{cm}^2)$) で表わすと式(19)で与えられる。

$$S_v = \frac{h_w}{t_f} = \frac{F}{80} = \frac{(50.95 - 7.225 T_a)}{80} \times 10^{-4} \quad (19)$$

式(19)に示されるように、 S_v は ρ_i 、 ρ_s によらず、外気温 T_a (正確には気象条件、式(11)参照)に関係する。 S_v にドームの表面積を乗じた散水量をここでは基準散水量と定義すると、基準散水量はドーム全表面に対して撒かれた水が連続的に全て氷になるとしたときの単位時間あたりに必要な水量を意味する。例えば 10 m ドームの場合、そのドーム表面積はほぼ 100 m^2 であるから、基準散水量は 9.23 (l/min) ($T_a = -10^\circ\text{C}$) $\sim 14.65 \text{ (l/min)}$ ($T_a = -20^\circ\text{C}$) と算定される。しかし、現行のドーム施工において、曲面の傾斜や雪氷表層の状態により保水状況は変化し、撒かれた水の全てが氷になるわけではなく、極めて大まかな表現であるが、その 30% $\sim$ 70% 程度がシェル底部に無駄に流れ落ちているのが実状で、今後において水→氷の凍結過程における歩留り、即ち凍結率 (= 凍結氷重量 / 散水重量) を高める工法が望まれている。ここでは凍結率を 50% と仮定し、上記散水量を夫々2倍

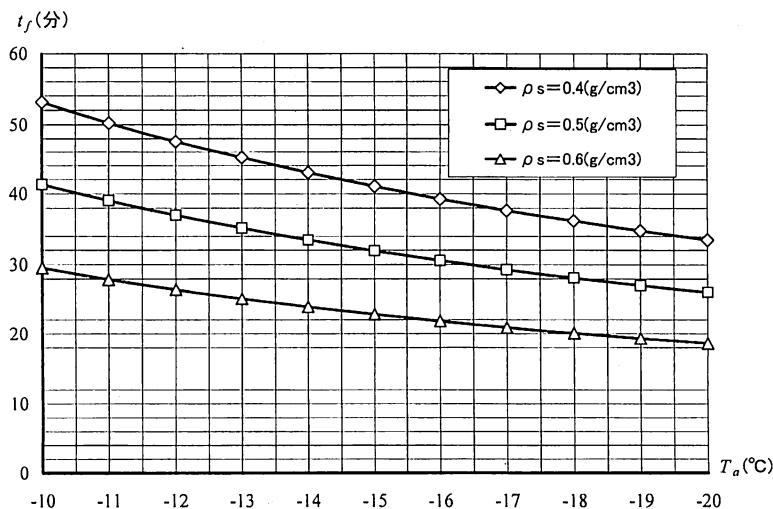


図 5 凍結時間-外気温

すると, 18.46 (l/min) (-10°C) $\sim$ 29.30 (l/min) (-20°C) となる. このとき, 撒かれる水の温度は 3.1 で述べたように $0\sim 5^{\circ}\text{C}$ であることも考慮すると, 凍結時間は水平面上の 41 分 (-10°C) $\sim$ 26 分 (-20°C) よりも延びることが予想されるが, その定量的評価は今のところ明らかではない. 現行の散水量に関して言えば, 10 m ドームの場合, 前節 2.1 で述べたように 14 $\sim$ 40 (l/min) の範囲にあり, 外気温が -20°C としても 40 (l/min) は多過ぎ, 過剰な散水は凍結時間を遅らせる原因の一つと思われる. 曲面上の凍結率評価は, 今後の重要な検討課題であるが, いずれにせよ, 散雪密度や凍結率を高めることによって, 現行の施工時間を大幅に短縮できる可能性を本検討結果は示唆していると思われる.

5. おわりに

散雪散水工法によるアイスシェルの施工において, 構造体となる氷の質を保ちつつ凍結時間が最短となる散水量を定めることは施工合理性の向上を図る上で重要な検討課題である. そこで, その問題解決の糸口を得る第一歩として, 本研究では水平面上の (雪+水) 層 $\rightarrow$ (氷) 層凍結現象の定量的解明を目的としている. まず, 対流, 蒸発及び大気放射による冷却熱量を考慮してその熱収支モデルの構築を図るとともに熱収支式中に現われる熱伝達率を定量的に評価するための簡易実験法を提案し, 撒かれた水が全て氷になると考えられる水平面上に薄型木製シャーレを設置して (雪+水) $\rightarrow$ (氷) 及び (水のみ) $\rightarrow$ (氷) の凍結実験を行い, 熱収支に関する基礎的検討を行った. その結果, (雪+水) $\rightarrow$ (氷) の場合の単位水量当たりの凍結時間は, (水のみ) $\rightarrow$ (氷) のそれよりも短いことが示された. これは, (雪+水) の場合の方が (水のみ) の場合よりも熱伝達率は大きいことを意味しており, その定性的理由として (雪+水) において雪が水の冷却熱源として働いていることや (雪+水) の表面積はその凹凸により (水のみ) の場合よりも大きいことが考えられる. 又, この実験によって得られた熱伝達率は, 道路消雪実験や融雪実験で得られている熱伝達率よりもはるかに大きい値を示した. さらに今回の実験で得られた熱伝達率の平均値 ($\alpha=5.55\times 10^{-4}\text{ cal}/(\text{cm}^2\text{sec}^{\circ}\text{C})$)

もしくは $\alpha_t=8.95\times 10^{-4}\text{ cal}/(\text{cm}^2\text{sec}^{\circ}\text{C})$) を用いて, 外気温が $-10^{\circ}\text{C}\sim -20^{\circ}\text{C}$, 天空の状況が快晴 ($r=1$) における水平面上の (雪+水) 層 $\rightarrow$ (氷) 層凍結問題を定量化し, アイスシェル施工に関連付けて検討を加えたところ, 現行の散水方法に改良の余地があることや施工時間の短縮化が可能であることが示唆された. 本報告で示した水平面上の (雪+水) 層 $\rightarrow$ (氷) 層の凍結実験を外気温と風速をパラメータとして広範に行い, 熱伝達率を統計的に評価することが当面の課題であるが, さらにその次の段階として, 傾斜角の影響を考慮した凍結率について検討を行い, アイスシェル施工の散水問題を解決する基礎的資料の蓄積を計りたく考えている.

謝 辞

融雪の熱収支問題に関わる基礎的知見を賜りました北海道教育大学岩見沢校・油川英明教授と, 本研究ノートをまとめるにあたり, 有益なコメントとご指摘をいただいた査読者に, 深く感謝を申し上げます.

文 献

- 小口八郎, 1954: 融雪に及ぼす気温及び雪面の影響について. 農業物理研究, 3, 33-41.
- 小島賢治・石川信敬・山本秀明・山田芳則, 1985: 積雪の蒸発量. 低温科学, 物理篇, 44, 49-61.
- Kokawa, T., 1985: Experimental studies on ice shell in Asahikawa. Cold Regions Science and Technology, 11, 150-170.
- 粉川 牧・伊藤 修・渡辺 大, 2002: スパン 20 m アイスドームの建設実験とクリープ測定. 雪氷, 64, 59-68.
- 粉川 牧, 2002: スパン 30 m アイスドーム建設の試み. 雪氷, 64, 469-476.
- Kokawa, T., 2005: State of the art developments in ice shell construction. Proceeding of 17th Canadian Hydrotechnical Conference, Edmonton, 973-982.
- 近藤純正 (編), 1998: 水環境の気象学. 朝倉書店, 350 pp.
- Lozowski, E.P., Jones, S.J. and Hill, B., 1991: Laboratory measurements of growth in thin ice and flooded ice. Cold Regions Science and Technology, 20, 25-37.
- 中村秀臣, 1975: 道路の散水消雪. 防災科学技術, No. 53 (雪害防災特集号), 44-45.

- 中村千里・大沼匡之, 1966: 気象環境より見た融雪促進方法の検討. 雪氷, 28, 155-160.
- Nakawo, M., 1983: Criteria for constructing ice platforms in relation to meteorological variables. Cold Regions Science and Technology, 6, 231-240.
- 二宮洸三, 1998: 気象予報の物理学. オーム社, 89-95.
- Saitoh, H and Arakawa, H, 1978: On the technique and the theory of snow melting by sprinkling subterranean water on roadways. Proceedings of the Faculty of Science, Tokai University, Vol. XIV, 67-76.
- 田中俊六・武田 仁・足立哲夫・土屋喬雄, 1994: 最新建築環境工学. 井上書院, 82-84.
- 吉田順五・小島賢治・青木眞一, 1950: 融雪の実験的研究. 低温科学, 3, 101-108.

**Fundamental study on amount of spraying water in ice shell construction
—Experiment on freezing phenomenon of snow+water to ice
on horizontal plane—**

Tsutomu KOKAWA¹⁾

1) School of Design, Hokkaido Tokai University, Kamuicho Chuwa 224, Asahikawa

Abstract: The determination of the optimum amount of water for spraying is an important problem to be solved with regard to the rationality in ice shell construction. For this purpose, in this study, the first step is analyzing the basic subject concerning the freezing phenomenon of the conversion from a snow+water layer to an ice layer on a horizontal plane. A thermal equation is formulated on the basis of the heat losses due to convection, and the evaporation and radiation on the surface. Further, a simple freezing experiment is performed for the quantitative evaluation of this equation. The results reveal that the snow+water layer freezes faster than the water layer, and the average thermal heat transfer coefficient of the snow+water is evaluated as $8.95 \times 10^{-4} (\text{cal}/(\text{cm}^2 \text{sec}^\circ\text{C}))$. The results of this study indicate that the present method of spraying water can be further improved, and thereby reducing the construction period.

(2005年5月8日受付, 2005年7月10日改稿受付, 2005年10月16日再改稿受付, 2005年11月18日受理,
討論期限 2006年7月15日)