

地下水散水による道路融雪実験から 算出した適正散水量

中 村 秀 臣*

国立防災科学技術センター新庄支所

Experimental Study on the Most Reasonable Amount of Ground Water to be Sprinkled for Melting the Freshly Fallen Snow on the Road

By

Hideomi Nakamura

*Shinjo Branch, National Research Center for Disaster Prevention,
No. 1400, Takadan, Toka-machi, Shinjo, Yamagata-ken, 996*

Abstract

Temperatures of the ground water which was sprinkled on the road surface were measured with automatic recorders under various meteorological conditions on an experimental road in order to estimate the most reasonable amount of the ground water for melting the freshly fallen snow.

By the use of empirical relations between the terminal water temperatures of the ground water and the meteorological conditions such as air temperature and wind velocity, the author has improved the coefficients of $f(u)+g(u)$ in Saito's equation as to the sprinkled water temperature and the following equation is obtained:

$$T_{wy} = \left(T_{w_0} - \frac{A}{h+S} \right) \exp \left(-\frac{h+S}{\alpha} y \right) + \frac{A}{h+S} \quad (^\circ\text{C}), \quad (1)$$

where $A = (h + 0.49S)T_a - 80S$, $h = (3.4 + 0.67U) \times 10^{-4}$, T_{wy} the water temperature at a point y cm away from the sprinkling point ($^\circ\text{C}$), T_{w_0} the initial water temperature before sprinkling ($^\circ\text{C}$), U the wind velocity ($\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$), S the snowfall intensity ($\text{mm} \cdot \text{hour}^{-1}$, equivalent water depth per hour) and α the rate of water flow per unit width of the road surface ($\text{cc} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$).

From the definitions of V and α , we can obtain the following relation:

$$V = (\alpha \times 100 \times 60) \div (y + 100), \quad (2)$$

where V is the amount of water volume (cc) sprinkled on the road surface per unit time (min) and per unit area (m^2). Putting the value of y when T_{wy} is equal to zero

* 雪害防災研究室

in equation (1) into equation (2), the final equation which shows the most reasonable amount of water volume for melting the freshly fallen snow is obtained as follows:

$$V_r = 6 \times 10^5 (h+S) \{ \ln (T_w - K) - \ln (-K) \}^{-1} \quad (\text{cc} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}),$$

where $K = \{ (h+0.49S) T_w - 80S \} (h+S)^{-1}$.

1. はじめに

雪国においては、路上積雪が道路交通の大きな障害となっている。このため地下水を道路に散水し、その有する熱エネルギーで降り来る雪を次々に融かしてしまいう工法が考案され実用化されている（大沼，1962；三宅，1963）（写真1）。このような機能および構造を持つ道路は一般には散水消雪道路または単に消雪道路と呼ばれているが、物理的には融雪道路と呼ぶのが正しかろう。

散水融雪道路は、道路の雪対策としては実に有効な施設ではあるが、その建設および運用の際に採用すべき地下水散水量の、気象要素等との関係から定めた基準といったものはあまり見当たらないのが現状である（斎藤，1967）。限りある資源という観点から、地下水問題が議論されている今日、地下水の過剰使用を避けるためにも、適正な散水量で融雪を行なうことが重要である。

そこでこの適正散水量を見積るために、実規模大の野外実験道路において散水融雪実験を実施し、各気象要素等が散水した水の温度に与える影響を調べた。その結果、道路散水融雪を行なう際の適正散水量を定めることができたのでここに報告する。

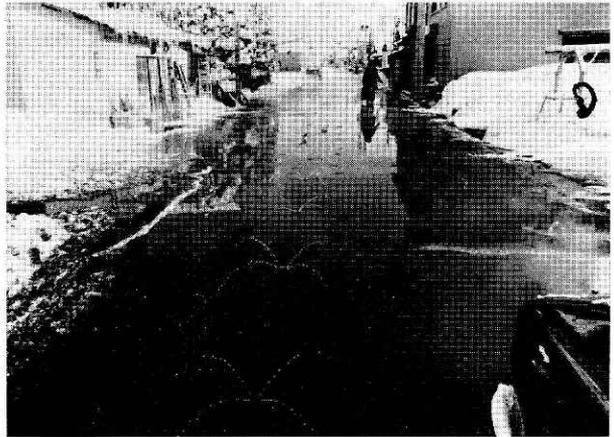


写真1 散水消雪道路

2. 実験施設

1) 実験道路

使用した実験道路は、図1および写真2に示すように、当新庄支所構内にある延長30m、幅員6mのコンクリート舗装道

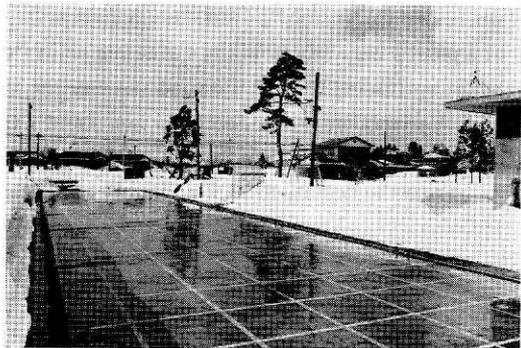


写真2 融雪実験道路

路で、横断方向に1.5%の片勾配を有する。この道路の断面構造は図2に示すとおりで、一般の国道の構造規格に準じたものである。つまり、この道路は延長こそ30mと短い、全幅12mの国道の片側部分を想定した実規模大の実験道路である。

実験に際しては、この道路長を5m毎に仕切り、「区画の長さ」と「区画の幅」がそれぞれ5mおよび6mの6面の区画に分割した（すなわち、面積は5m×6m、ただし、路面の凹凸が激しい所では、これを避けて区画を定めたため、面積は4m×6m）。この時散水した水が隣接する路面に流入するのを避けるために、各区画の境界には高さ数cmの小さな土手を設けた。このように複数の区画に

分割したのは、各区画において異なった散水量で散水することにより、同一気象状況のもとでの散水量と水温変化状況との関係が容易に整理されるという便利さを考えたためである。なお、一つの区画内に落下した雪の融解の程度、すなわち融解面積の形、大きさを知るために、各区画の路面には予め黄色のペンキで、1m間隔の格子を引いておいた。

2) 水源と配管および樋

実験用の水には、構内にある7.5mの浅井戸から汲上げた12°C前後の地下水を使用した。そしてその散水は、図2に示したように、道路と並行して配置した送水本管、およびこれに連なる副管を通して行なった。

副管は直径20mmの硬質塩化ビニール製で、散水のために直径3mmの穴を10cm間隔であけた。散水ノズルの間隔が常用の80cm位に比べて狭いのは、水をなるべく均一に流したいという理由からである。

道路の反対側の側端（以後これを末端と呼ぶ）には、散水量および末端水温測定用の樋を取り付けた。このため流下して来た水は一旦樋に入った後側溝に落ちるようになっている。

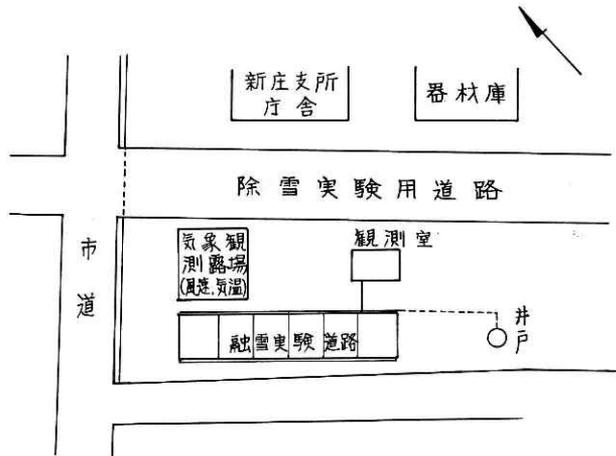


図1 融雪実験道路および構内施設

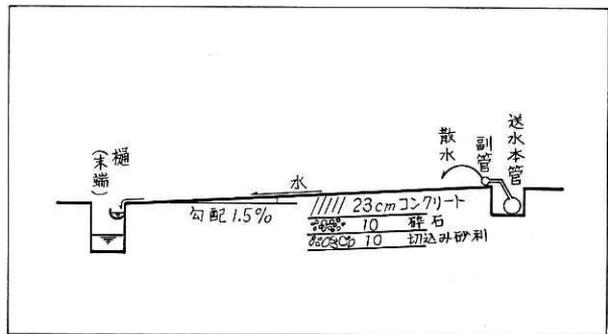


図2 融雪実験道路の断面構造

3. 実験方法

1) 路面に散水した地下水の温度測定

水温は棒状水銀温度計で、あるいは銅-コンスタンタン熱電対、ニッケルクローム-ニッケル熱電対の起電力を自記計に記録させてこれを読み取った。

散水直前の水温(散水温, T_{w_0})は、副管内に水銀温度計を挿入するか、または銅-コンスタンタン熱電対を管内に予め装着して測り、路面を流下した直後の水温(末端水温, $T_{w_{0.0}}$)は樋の落ち口に固定した銅-コンスタンタン熱電対により測定した。

また流下中の水の温度測定は、感部が非常に薄い板状熱電対(商品名サーモカップル・シート) 34個を予め道路表面に貼付けておいて実施した。

2) 散水量の測定

本稿では、1分間に路面 1 m^2 当りに散水した水の、cc で表わした体積を散水量、 V と呼ぶことにする。

散水量は実験当初、樋の落ち口で測定した水量を路面の面積で除して求めていたが、この方法では風が強い時には、風の息に応じて流下水量も一時的に変動するため、長時間の測定を実施せねば十分な精度が得られず、測定回数も多くせねばならないという不便さがあった。そこで、副管に鉛直にガラス製の立ち上り管を取り付け、その水頭測定から散水量を求める方法を採用した。この方法では、予め水頭と散水量との関係を調べておけばよいので、強風の際の散水量の測定および設定にはきわめて有効であった。

3) 気象要素の測定

気温, T_a は銅-コンスタンタン熱電対または白金抵抗体にて、風速, u は熱線式風速計またはエーロベン風速計により、また降雪強度, S (水換算) は転倒ます型雨雪量計を用いてそれぞれ測定した。さらに、相対湿度は毛髪湿度計により、正味放射吸収量については英弘精機株式会社製の示差輻射計を用いて測定し、これらの気象要素はすべて自記計で記録した。

気温および風速の測定は、当初地上 1.5 m で測定した値を使用した。1972年気象観測装置が新たに当支所に導入されたのを機会に、以後この観測装置による測定値を使用することにした。しかし、この気象観測装置では気温を雪面上 1.5 m で、また風速を地上 5.5 m で測定するようになっているため、この測定高の変化による影響が考えられたが、風速については両者で同時測定してみると、周囲建物のせいかわ著しい差は見られなかった。各測定値に特別な補正は行わなかった。気温の測定値については、雪面上での気温の高度分布が雪面温度に左右されると思われるため補正するのはむづかしく、ここではあえて補正は行わなかった。

4) 路面上での雪の融解および積雪状況

路面上での雪の融解、積雪または凍結状況は、適宜スケッチもしくはスチール写真に記録

地下水散水による道路融雪実験から算出した適正散水量—中村

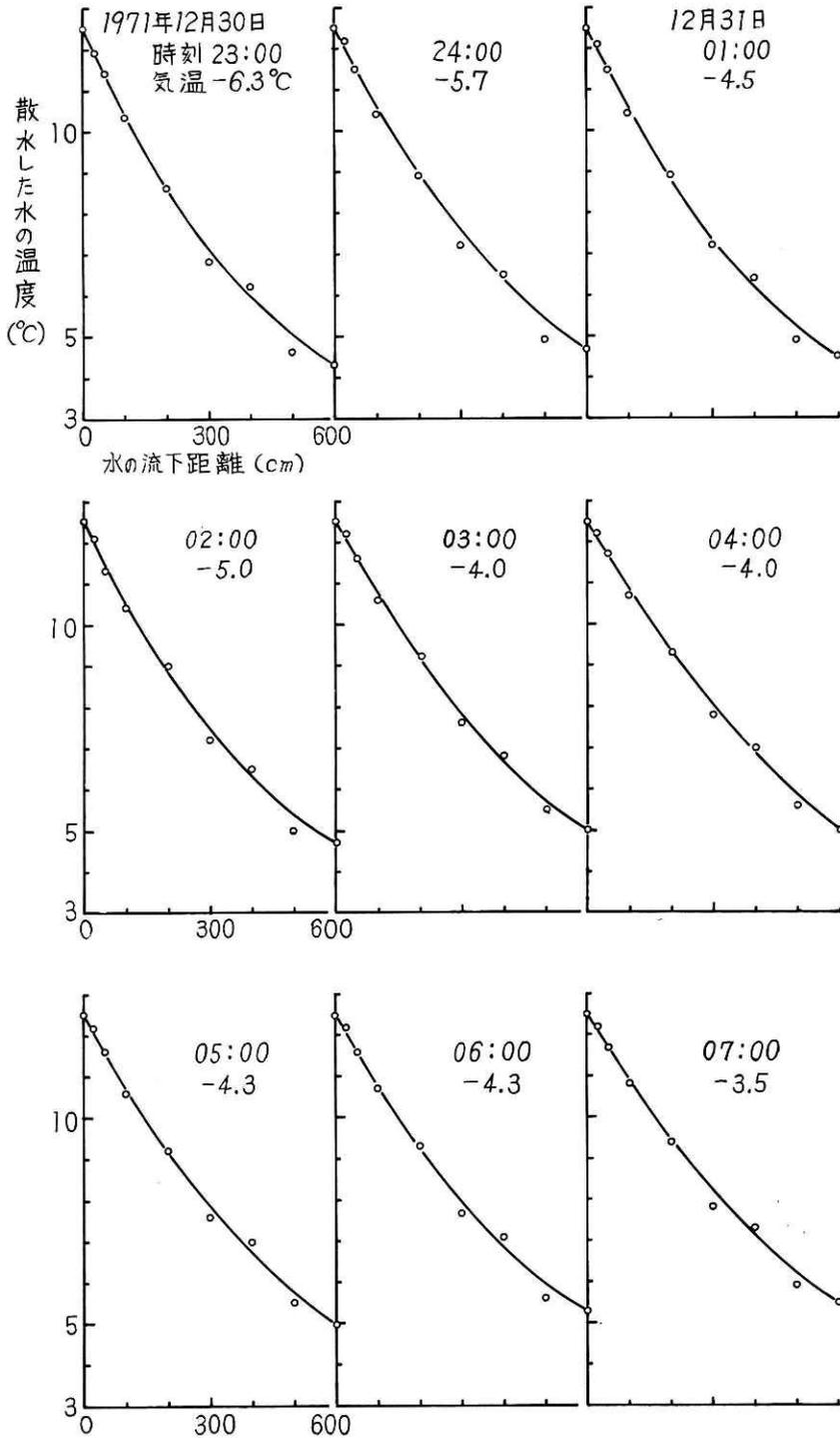


図3 散水した水の温度変化 (1971年12月30日~31日) 散水温 12.5°C, 散水量 280 cc·min⁻¹·m⁻², 風速 0 m·sec⁻¹, 降雪なし

した。

なお、散水は実験期間中（後記する）連続して行なったが、その解析は、水の融雪作用にとって最悪条件下すなわち夜間時（17時～翌7時）を対象として行なった。しかし、風速が変化した直後や、夜間放射冷却の激しい時は例外として除外した。

水温および各気象要素の連続測定値から30分間毎の平均値を求め、これを上記の解析に採用した。

4. 散水実験期間

1970年2月～1977年3月（冬期間）

5. 実験結果およびその解析

1) 散水量および気温と末端水温との関係

路面に散水した地下水の温度変化の測定例

を図3および4に示す。同図によると散水した水の温度は、路面を流下するに従って下に凸のゆるやかな下降曲線を描いており、また気温が下るとそれに応じて水温低下量（散水温－

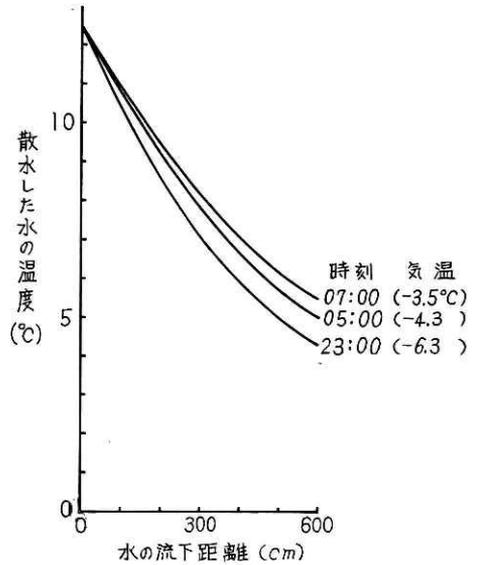


図4 散水した水の温度変化（1971年12月30日～31日）散水温 12.5°C，散水量 280 cc·min⁻¹·m⁻²，風速 0 m·sec⁻¹，降雪なし

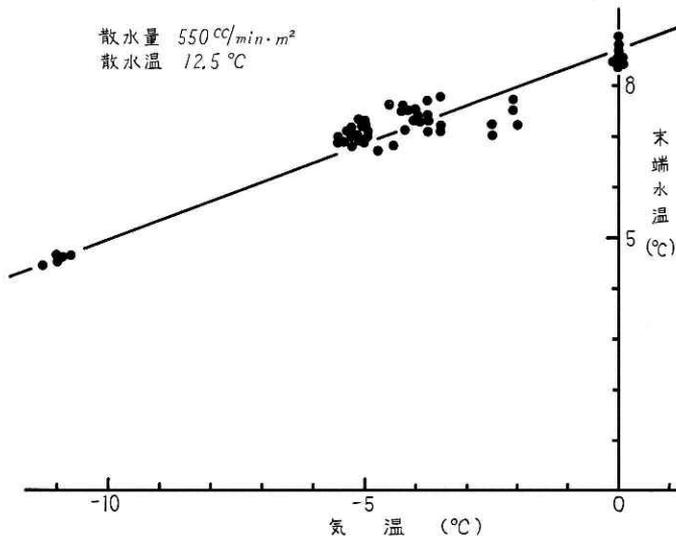


図5 末端水温と気温との関係，散水量 550 cc·min⁻¹·m⁻²，風速 0 m·sec⁻¹，降雪なし（散水温 12.5°C）

地下水散水による道路融雪実験から算出した適正散水量—中村

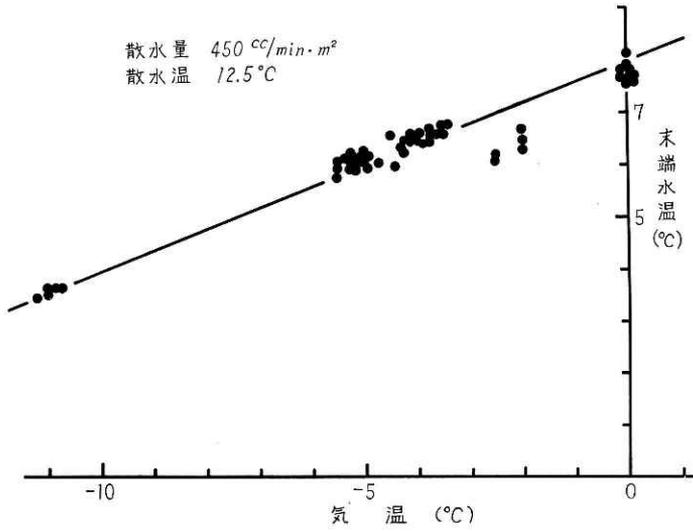


図 6 末端水温と気温との関係, 散水量 $450 \text{ cc} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, 風速 $0 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, 降雪なし (散水温 12.5°C)

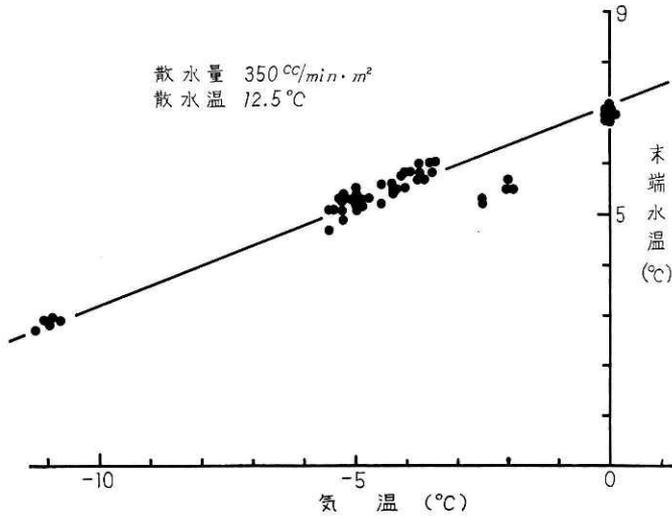


図 7 末端水温と気温との関係, 散水量 $350 \text{ cc} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, 風速 $0 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, 降雪なし (散水温 12.5°C)

末端水温 $= \Delta T = T_{w_s} - T_{w_{\infty}}$ も大きくなっているのがわかる。

次に, 前述した各区画で同時に測定した末端水温とその時の気温との関係を, 図 5, 6 および 7 に示す*. ここでは無降雪時の値, 散水量については特に $550, 450, 350 \text{ cc} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ で, 散水温 12.5°C , 風速 $0 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ の測定値を示した. この三枚の図を比較すると判

* よりくわしい全測定値は, 当センター「防災科学技術研究資料」で刊行の予定である.

るように、散水量が少なくなると、末端水温も低くなり、また気温が下ると末端水温もほぼ直線的に低下する様子がうかがえる（水温低下量は直線的に増加する）。

2) 散水した水の温度変化を表わす式

(1) 斎藤の式

斎藤(1967)は理論的考察から路面に散水した水の、ノズルから y (cm) 離れた地点の水温 T_{wy} (°C) は、一定の外界条件のもとで、一定の散水量で散水し、充分時間が継続したあとでは次の (1), (2) 式で近似できるとしている。

1. 降雪がなく放射の影響の小さい、すなわち厚い雲に被れた夜間には、

$$T_{wy} = (T_{w_0} - T_a) \exp \left\{ -\frac{f(u) + g(u)}{\alpha} y \right\} + T_a \quad (^\circ\text{C}) \quad (1)$$

T_{w_0} : 散水温 (°C), T_a : 気温 (°C), α : 道路の長さ方向の 1 cm 幅上を 1 秒間に流れる流量 ($\text{cc} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$), $f(u) + g(u)$: 顕熱および潜熱輸送に係る係数 ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$), u : 風速 ($\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$) (図 8 参照)

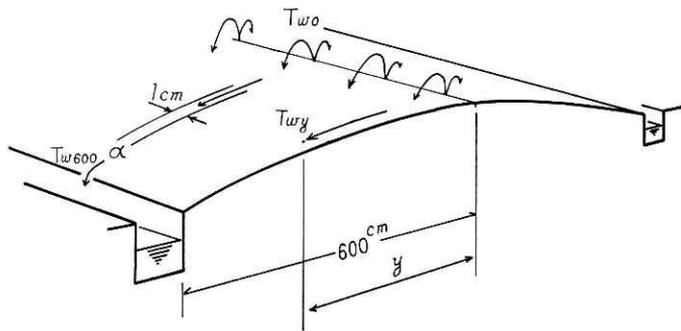


図 8 融雪道路と各記号

2. 降雪の強い夜間には、

$$T_{wy} = \left[T_{w_0} - \frac{\{f(u) + g(u) + 0.49S\}T_a - 80S}{f(u) + g(u) + S} \right] \exp \left\{ -\frac{f(u) + g(u) + S}{\alpha} y \right\} + \frac{\{f(u) + g(u) + 0.49S\}T_a - 80S}{f(u) + g(u) + S} \quad (^\circ\text{C}) \quad (2)$$

S: 水に換算した降雪強度 ($\text{mm} \cdot \text{hour}^{-1}$)

0.49 は氷の比熱 ($\text{cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)

(1), (2) 式中の $f(u) + g(u)$ の項は、水面と大気との間の顕熱輸送および潜熱輸送にそれぞれ係る係数で、斎藤はこの値として $(0.56 + 0.45u) \times 10^{-4}$ という値を採用している。

しかし、この野外実験で求めた末端水温の実測値 (図 5~7 参照) は (1) 式に基づく計算値よりも数 °C 低いので、(1) 式をそのまま実用式として用いると、散水量の見積りが少なくなり、道路の雪は完全には融けず路上に残ることになる。

表 1 末端水温の実測値 (1971年12月28日, 1972年2月3日, 4日)

散水量 $cc \cdot min^{-1} \cdot m^{-2}$		時刻												
		0:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	
1971年12月28日 散水温はいずれも 12.8°C (無降雪)	400	7.7°C	7.6	7.1	7.0	6.3	5.9	5.6	5.5	5.6	5.2	5.1	4.5	4.6
	200	6.2	6.0	5.7	5.5	4.6	4.2	3.9	3.7	3.7	3.1	3.1	2.4	2.5
	450	8.1	8.1	7.8	7.7	6.8	6.5	6.3	6.7	6.3	5.9	5.8	5.3	5.5
	400	7.7	7.5	7.1	7.0	6.0	5.6	5.5	5.4	5.6	5.0	5.0	4.3	4.4
気温 (°C)		1.5	1.4	1.4	1.4	1.6	1.7	1.1	0.7	0.7	0.5	0.5	0.0	-2.0
風速 (m·sec ⁻¹)		2	2	3	4	4	4	4	4	4	3	4	4	5
散水量 $cc \cdot min^{-1} \cdot m^{-2}$		時刻												
		17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00
1972年2月3日 散水温はいずれも 11.5°C (無降雪)	360	3.3°C	3.2	3.5	3.3	3.5	3.3	3.2	3.2	3.7	3.8	4.4	4.5	4.4
	440	4.4	4.4	4.8	4.8	4.9	4.8	4.7	4.8	5.2	5.4	5.8	6.0	5.9
	480	4.2	4.2	4.5	4.5	4.7	4.5	4.4	4.5	5.0	5.2	5.6	5.8	5.7
	気温 (°C)	-1.8	-1.9	-2.0	-2.1	-2.1	-2.3	-2.4	-2.4	-2.3	-2.4	-2.5	-2.4	-2.5
風速 (m·sec ⁻¹)		5	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
散水量 $cc \cdot min^{-1} \cdot m^{-2}$		時刻												
		0:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	
1972年3月4日 散水温はいずれも 11.5°C (無降雪)	360	4.4°C	4.4	4.5	4.7	4.6	4.7	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	4.7	4.4
	440	6.0	6.0	6.1	6.2	6.2	6.3	6.2	6.2	6.3	6.4	6.4	6.1	5.9
	480	5.8	5.7	5.8	5.9	6.0	6.1	6.0	6.0	6.0	6.2	6.2	5.9	5.6
	気温 (°C)	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.4	-2.5	-2.5	-2.5	-2.6	-2.7	-2.6	-2.6	-2.8
風速 (m·sec ⁻¹)		1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0

(2) 改良式

上のような理由から、この式の実用性を高めるために、図5, 6, 7 および表1に示した実測値を用い改良式を求めた。すなわち、上の斎藤の式の(1)式に8冬期間の観測値のうちで無降雪時の実測値の一部を代入し、 $f(u)+g(u)$ の値を逆算した。

その結果、 $f(u)+g(u)$ と風速との関係は図9のようになり、ばらつきは大きい。が $f(u)+g(u)$ と風速との間には次の関係が求められた。

$$f(u)+g(u) = (3.4+0.67u) \times 10^{-4} \quad (\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}) \quad (3)$$

(1) および(2)式の $f(u)+g(u)$ は同じものであるから、(3)式を(1), (2)式に代入すればそれらはそれぞれ次のようになる。

$$T_{wy} = (T_{w_s} - T_a) \exp \left\{ -\frac{(3.4+0.67u) \times 10^{-4}}{\alpha} y \right\} + T_a \quad (\text{C}) \quad (4)$$

$$T_{wy} = \left[T_{w_s} - \frac{\{(3.4+0.67u) \times 10^{-4} + 0.49S\} T_a - 80S}{(3.4+0.67u) \times 10^{-4} + S} \right] \times \exp \left\{ -\frac{(3.4+0.67u) \times 10^{-4} + S}{\alpha} y \right\} + \frac{\{(3.4+0.67u) \times 10^{-4} + 0.49S\} T_a - 80S}{(3.4+0.67u) \times 10^{-4} + S} \quad (\text{C}) \quad (5)$$

ただし、この場合顕熱および潜熱輸送に係る係数が $(3.4+0.67u) \times 10^{-4}$ と表わされるといふことには、特に物理的な意味合いがあるわけではなく、このように書き換えて計算した方が実測値とよく一致するということである。

3) 改良式の検討

(4)式および(5)式の実用性を調べるために、これらの式による計算値と、上記の $f(u)+g(u)$ を求める際に用いなかった実測値との比較を行なった。

(1) 降雪のない時の計算値と実測値との比較

無降雪なので、計算値の正しさについては、末端水温での比較から検討できる。

ほとんど無降雪であった、1976年3月3日から4日の夜間における末端水温についてその実測値および(4)式による計算値を、図10にそれぞれ黒丸および白丸で示す。

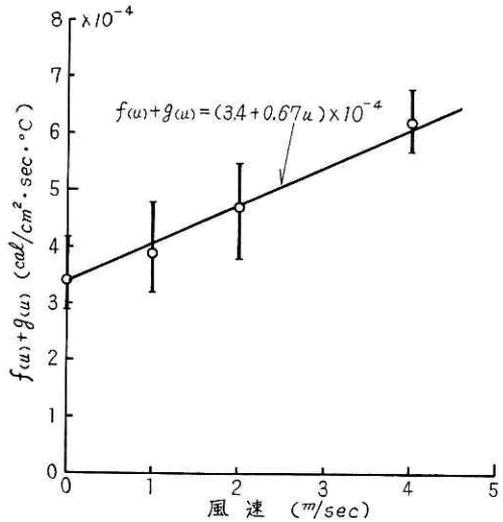


図9 図5~7および表1に示した実測値から求めた風速と $f(u)+g(u)$ との関係

この間の降雪有無の検知は、自記雨雪量計と温度計および目視観測（3月3日18時、3月4日04時）によった。これによると3月4日0時30分頃弱い降雪があったが、それ以外には降雪はなく、かつ、4日5時以降は快晴であった。

図10によると、4日5時以降を除いて計算値と実測値とはほとんどの場合 $\pm 1^\circ\text{C}$ の範囲で一致していることがわかる。ただし、4日2時頃からは全体的に、実測値は計算値より低目に推移しており、この原因としては、湿度が60%位に下がったこと、あるいは $f(u)+g(u)$ の見積りが正確でなかった（風速の効果を低く見積ったかもしれない）ことなどが考えられる。

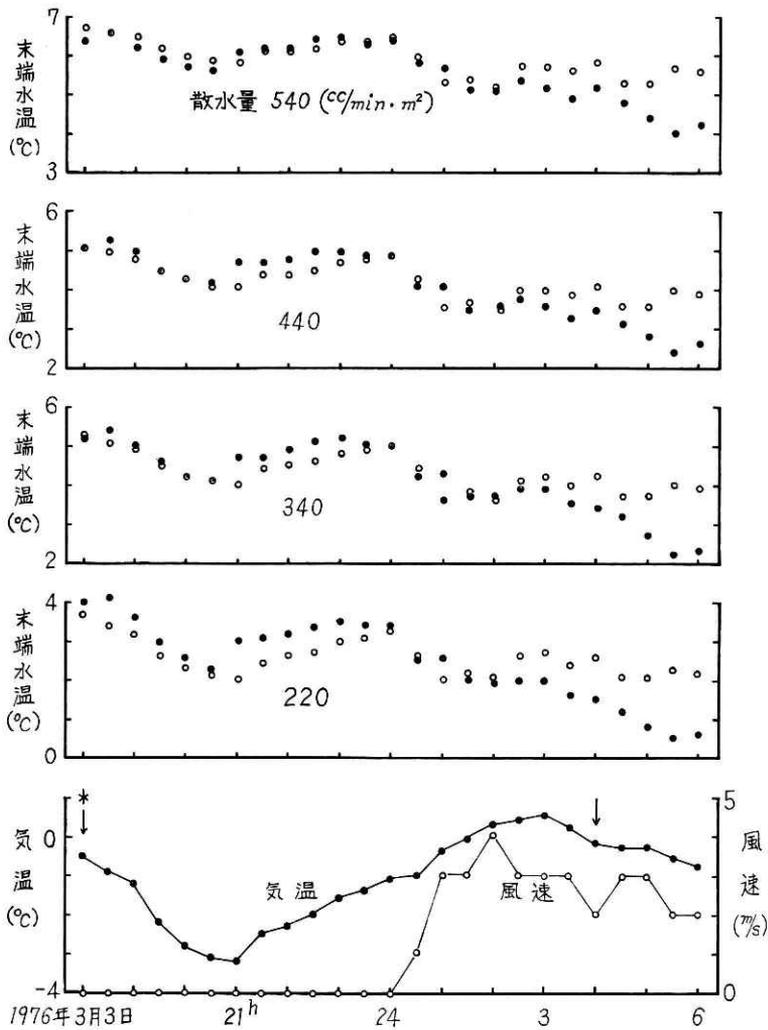


図10 1976年3月3日～4日（無降雪時）の夜間における末端水温の実測値（●）と（4）式による計算値（○）との比較、散水温はいずれも 10.0°C （* 矢印は降雪有無の目視観測）

(2) 降雪がある場合の計算値と実測値との比較

実際、降雪時における散水道路上での融雪状況を観察していると、路上の雪は、たとえ散水量が充分であっても、完全には融けず、かつ不規則な融け方をしている。これは散水の仕方が均等ではなく、かつ、路面の平坦性が悪いためである。この様な時には、末端水温で計算値と実測値との比較はできないから融雪幅、 l_w という概念を導入し、これで両者を比較することにする。

ここでいう融雪幅とは、散水した水が流下するに従い水温が下り、そのため雪が融け切れずに積り始める地点とノズルの間の距離のことである。

今、理想状態を考える。すなわち散水された水は路面上を一様に流下するものとする。このときには、雪は平面的に一様に融け、かつ水の保有する熱エネルギーのうち本来融雪に使われうる量の100%が完全に融雪に利用されるわけだから、融雪幅の末端側の水温(T_w)は 0°C である。また、この 0°C の線は一直線の形をしており融雪幅も一義的に決まる(理想融雪幅と呼ぶ)。

ところが実際には、路面に凹凸があるために水は一様には流れず(水みちを作って選択的に流れる)、このため水は融雪能力を一部残したままで道路の末端部に到達する。それゆえ、この道路末端部で保持している余力ある熱量に相当する分だけ融雪幅は実際には短くなる。これを現実融雪幅と呼ぶことにする。

この現実融雪幅は2つの方法で求められる。すなわち1つは区画内の融雪面積のスケッチ観測から求められ(これを観測融雪幅と呼ぶ)、他方は(5)式中にこの時の観測末端水温を代入して求められる(計算融雪幅と呼ぶ)。

この観測融雪幅と計算融雪幅との比較をすることにより、この(5)式の妥当性が検討できよう。

それで以下に、1973年2月24日から25日にかけての夜間に実施した融雪実験を例にとり、融雪幅について計算値(計算融雪幅)と実測値(観測融雪幅)とを比較検討した結果をのべる。

2月24日22時00分に観測した各区画の路面上の融雪状況を示したのが図11で、図の中で白抜きの部分が積雪範囲を示し、それ以外の部分は融雪されていることを意味している。

これによると、いずれの区画においても末端側で部分的に積雪が見られる。しかし、それにもかかわらず末端水温は 0°C ではなく(図11参照)、正の値を示しており、このことは水と積雪との間で熱交換が充分になされなかったことを意味する。このような場合には、融雪幅としては融雪されている面積をその“区画の長さ”(119頁参照)で除した値、すなわち平均融雪幅 \bar{l}_w が観測融雪幅となる(図12参照)。

一方、図11のように積雪が不規則に分布している場合の計算融雪幅を考える時には、路面上での水温がどのように変化しているか不明なのでここでは次のように仮定する。すなわ

地下水散水による道路融雪実験から算出した適正散水量—中村

1973年2月24日 22時00分

T_{wo} 11.2°C

T_a -5.1°C

U 2 m/sec

S 0.5 mm/hour (20:00~22:00)

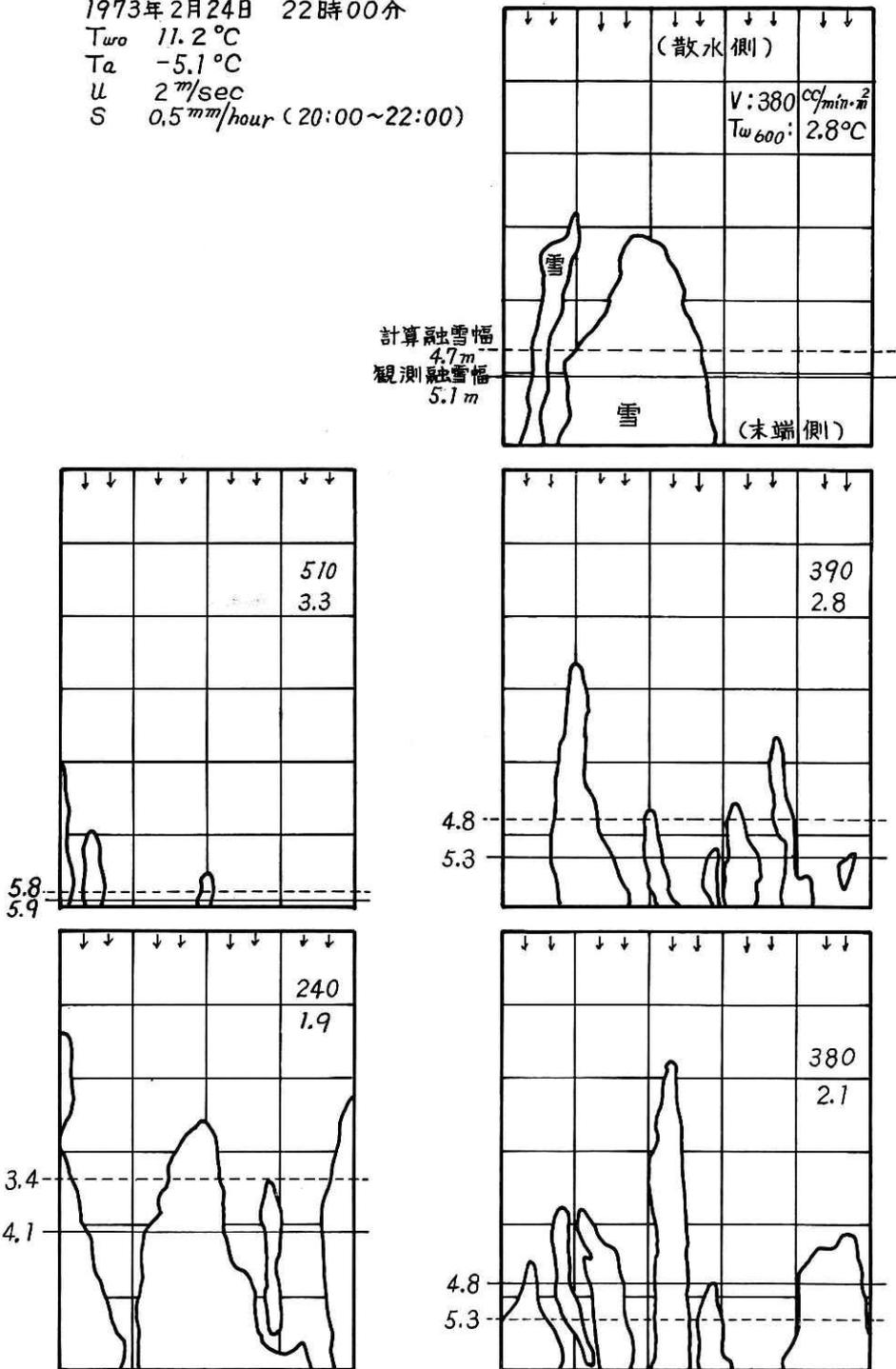


図 11 1973年2月24日23時の各区画での融雪状況および、観測融雪幅（実線）と計算融雪幅（点線）との比較

ちノズルから融雪幅 l_w に等しい距離だけ離れた地点までの間では、水と雪との間の熱交換は理想的に行なわれるが、それより下流では全く行なわれない。いいかえれば、散水した水の温度は、ノズルから l_w 離れた地点までは (5) 式に従って低下し、そこから先はその温度 (プラス) のまま流下するということになる。

このため、図 11 のような場合の融雪幅を計算で求めるには、(5) 式において T_{wy} が末端水温の実測値に等しくなるような地点 y を探し出せばよいことになる。

このようにして計算で求めた融雪幅 (計算融雪幅) を図 11 に破線で示し、同図の融雪部分の面積の実測値から求めた平均融雪幅 (観測融雪幅) の値を実線で示した。

この日行なった 5 回の融雪状況観測から、上の方法で求めた融雪幅の実測値と計算値とを比較したのが図 13 で、これによると最大 1 m の誤差で一致しているのがわかる。相対誤差 ($|$ 実測値 - 計算値 $| \div$ 計算値) は約 17% である。

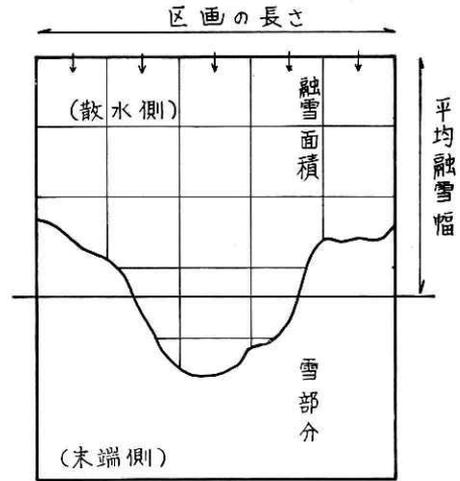


図 12 平均融雪幅 (観測融雪幅) を表わす模式図

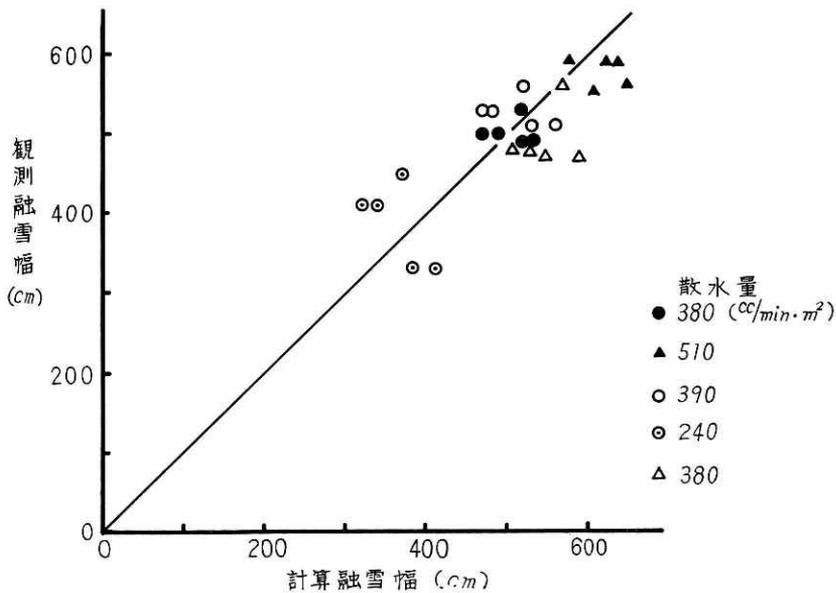


図 13 融雪幅の計算値 (計算融雪幅) と実測値 (観測融雪幅) との比較

地下水散水による道路融雪実験から算出した適正散水量—中村

表 2 気温, 風速および降雪強度と理想融雪幅との関係 (散水温 14°C の時)

散水温 T_w (°C)	気温 T_a (°C)	風速 u (m·sec ⁻¹)	降雪強度 S (mm·hour ⁻¹)	理 想 融 雪 幅					
				$\alpha=0.1$ (cc·sec ⁻¹ ·cm ⁻¹)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
14	-2	0	0.5	370	740	1120	1490	1860	2230
			1.0	270	550	820	1100	1370	1650
			1.5	220	440	660	880	1100	1310
			2.0	180	370	550	730	910	1100
			2.5	160	320	480	630	790	950
			3.0	140	280	420	560	690	830
			3.5	120	250	370	490	620	740
			4.0	110	220	330	450	560	670
	2	0	0.5	300	600	890	1190	1490	1790
			1.0	230	460	690	920	1150	1380
			1.5	190	380	570	760	950	1140
			2.0	160	320	480	650	810	970
			2.5	140	280	430	570	710	850
			3.0	130	250	380	500	630	760
			3.5	110	230	340	450	570	680
			4.0	100	210	310	410	510	620
	5	0	0.5	230	460	690	920	1150	1380
			1.0	190	370	560	750	930	1120
			1.5	160	320	470	630	790	950
			2.0	140	280	410	550	690	830
			2.5	120	250	370	490	620	740
			3.0	110	220	330	440	550	660
			3.5	100	200	300	400	500	600
			4.0	90	180	280	370	460	550
	10	0	0.5	170	330	500	670	840	1000
			1.0	140	290	430	570	710	860
			1.5	120	250	370	500	620	750
			2.0	110	220	330	450	560	670
			2.5	100	200	300	410	510	610
			3.0	90	190	280	370	460	560
			3.5	90	170	260	340	430	510
			4.0	80	160	240	320	400	470
-5	0	0.5	280	570	850	1140	1420	1710	
		1.0	220	450	670	900	1120	1350	
		1.5	190	370	560	740	930	1120	
		2.0	160	320	480	640	800	950	
		2.5	140	280	420	560	700	840	
		3.0	120	250	370	500	620	750	
		3.5	110	220	360	450	560	670	
		4.0	100	200	310	410	510	610	

地下水散水による道路融雪実験から算出した適正散水量—中村

表 2 気温、風速および降雪強度と理想融雪幅との関係（散水温 14°C の時）

散水温 T_w (°C)	気温 T_a (°C)	風速 u (m·sec ⁻¹)	降雪強度 S (mm·hour ⁻¹)	理 想 融 雪 幅					
				$\alpha=0.1$ (cc·sec ⁻¹ ·cm ⁻¹)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
14	-2	0	0.5	370	740	1120	1490	1860	2230
			1.0	270	550	820	1100	1370	1650
			1.5	220	440	660	880	1100	1310
			2.0	180	370	550	730	910	1100
			2.5	160	320	480	630	790	950
			3.0	140	280	420	560	690	830
			3.5	120	250	370	490	620	740
			4.0	110	220	330	450	560	670
		2	0.5	300	600	890	1190	1490	1790
			1.0	230	460	690	920	1150	1380
			1.5	190	380	570	760	950	1140
			2.0	160	320	480	650	810	970
			2.5	140	280	430	570	710	850
			3.0	130	250	380	500	630	760
			3.5	110	230	340	450	570	680
			4.0	100	210	310	410	510	620
		5	0.5	230	460	690	920	1150	1380
			1.0	190	370	560	750	930	1120
			1.5	160	320	470	630	790	950
			2.0	140	280	410	550	690	830
			2.5	120	250	370	490	620	740
			3.0	110	220	330	440	550	660
			3.5	100	200	300	400	500	600
			4.0	90	180	280	370	460	550
		10	0.5	170	330	500	670	840	1000
			1.0	140	290	430	570	710	860
			1.5	120	250	370	500	620	750
			2.0	110	220	330	450	560	670
	2.5		100	200	300	410	510	610	
	3.0		90	190	280	370	460	560	
	3.5		90	170	260	340	430	510	
	4.0		80	160	240	320	400	470	
-5	0	0.5	280	570	850	1140	1420	1710	
		1.0	220	450	670	900	1120	1350	
		1.5	190	370	560	740	930	1120	
		2.0	160	320	480	640	800	950	
		2.5	140	280	420	560	700	840	
		3.0	120	250	370	500	620	750	
		3.5	110	220	360	450	560	670	
		4.0	100	200	310	410	510	610	

表 2 (つづき)

散水温 T_w (°C)	気 温 T_a (°C)	風 速 u (m·sec ⁻¹)	降雪強度 S (mm·hour ⁻¹)	理 想 融 雪 幅					
				$\alpha=0.1$ (cc·sec ⁻¹ ·cm ⁻¹)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
14	-10	5	0.5	120	230	350	460	580	690
			1.0	100	210	310	420	520	620
			1.5	90	190	280	380	470	570
			2.0	90	170	260	350	430	520
			2.5	80	160	240	320	400	490
			3.0	80	150	230	300	380	450
			3.5	70	140	210	280	350	420
			4.0	70	130	200	260	330	400
		10	0.5	80	160	240	320	400	480
			1.0	70	150	220	300	370	450
			1.5	70	140	210	280	350	420
			2.0	70	130	200	260	330	390
			2.5	60	120	190	250	310	370
			3.0	60	120	180	230	290	350
			3.5	60	110	170	220	280	330
			4.0	50	110	160	210	260	320

表 3 気温, 風速および降雪強度と理想融雪幅との関係 (散水温 12°C の時)

散水温 T_w (°C)	気 温 T_a (°C)	風 速 u (m·sec ⁻¹)	降雪強度 S (mm·hour ⁻¹)	理 想 融 雪 幅					
				$\alpha=0.1$ (cc·sec ⁻¹ ·cm ⁻¹)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
12	-2	0	0.5	340	680	1020	1360	1700	2050
			1.0	250	500	750	990	1240	1490
			1.5	200	400	590	790	990	1180
			2.0	160	330	490	650	820	980
			2.5	140	280	420	570	710	850
			3.0	120	250	370	490	620	740
			3.5	110	220	330	440	550	660
			4.0	100	200	300	390	490	590
		2	0.5	270	550	820	1100	1370	1650
			1.0	210	420	630	840	1050	1260
			1.5	170	340	510	690	850	1030
			2.0	150	290	440	580	730	870
			2.5	130	250	380	510	640	760
			3.0	110	230	340	450	560	680
			3.5	100	200	300	400	500	600
			4.0	90	180	270	370	460	550

表 3 (つづき)

散水温 T_w (°C)	気温 T_a (°C)	風速 u (m·sec ⁻¹)	降雪強度 S (mm·hour ⁻¹)	理想融雪幅					
				$\alpha=0.1$ (cc·sec ⁻¹ ·cm ⁻¹)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
12	-2	5	0.5	210	430	640	850	1060	1280
			1.0	170	340	510	680	860	1030
			1.5	140	290	430	580	720	870
			2.0	120	250	370	500	620	750
			2.5	110	220	330	440	560	670
			3.0	100	200	300	400	500	600
			3.5	90	180	270	360	450	540
			4.0	80	160	250	330	410	490
		10	0.5	160	310	470	620	780	930
			1.0	130	260	390	520	660	790
			1.5	110	230	340	460	570	690
			2.0	100	200	300	410	510	610
			2.5	90	180	280	370	460	550
			3.0	80	170	250	340	420	500
	-5	0	0.5	260	520	770	1030	1290	1550
			1.0	200	400	610	810	1010	1210
			1.5	170	330	500	660	830	1000
			2.0	140	280	430	570	710	850
			2.5	120	250	370	500	620	750
			3.0	110	220	330	440	550	660
			3.5	100	200	300	400	490	590
			4.0	90	180	270	360	450	540
		2	0.5	200	400	600	800	1000	1200
			1.0	160	330	490	600	820	1000
			1.5	140	280	420	560	700	840
			2.0	120	240	370	490	610	730
			2.5	110	220	330	440	550	660
			3.0	100	200	290	390	490	590
5	0.5	150	300	450	600	750	900		
	1.0	130	260	390	520	650	780		
	1.5	110	230	340	450	570	680		
	2.0	100	200	300	410	510	610		
	2.5	90	180	280	370	460	550		
	3.0	80	170	250	340	420	500		
	3.5	80	150	230	310	390	460		
	4.0	70	140	210	290	360	430		

表 3 (つづき)

散水温 T_w (°C)	気温 T_a (°C)	風速 u (m·sec ⁻¹)	降雪強度 S (mm·hour ⁻¹)	理想融雪幅							
				$\alpha=0.1$ (cc·sec ⁻¹ ·cm ⁻¹)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6		
12	-5	10	0.5	110	210	320	430	530	640		
			1.0	100	200	290	380	480	570		
			1.5	90	170	260	350	430	520		
			2.0	80	160	240	320	400	470		
			2.5	70	150	220	290	370	440		
			3.0	70	140	200	270	340	410		
			3.5	60	130	190	250	320	380		
			4.0	60	120	180	240	300	360		
	-10	0	0	0.5	190	370	560	740	930	1110	
				1.0	150	310	460	610	770	920	
				1.5	130	260	400	530	660	790	
				2.0	120	230	350	460	580	700	
				2.5	100	210	310	420	520	620	
				3.0	90	190	280	370	470	560	
				3.5	90	170	260	340	430	510	
				4.0	80	160	230	310	390	470	
		2	0	2	0.5	140	280	420	560	700	840
					1.0	120	240	370	490	610	730
					1.5	110	220	320	430	540	650
					2.0	100	190	290	390	480	580
					2.5	90	180	260	350	440	530
					3.0	80	160	240	320	400	480
					3.5	70	150	220	300	370	450
					4.0	70	140	210	280	340	410
		5	0	5	0.5	100	210	310	410	520	620
					1.0	90	190	280	370	470	560
					1.5	80	170	250	340	420	510
					2.0	80	160	230	310	390	470
2.5					70	140	220	290	360	430	
3.0					70	130	200	270	330	400	
3.5					60	120	190	250	310	370	
4.0					60	120	180	230	290	350	
10		0	10	0.5	70	140	220	290	360	430	
				1.0	70	130	200	270	330	400	
				1.5	60	120	190	250	310	370	
				2.0	60	120	180	230	290	350	
	2.5			60	110	170	220	280	330		
	3.0			50	100	160	210	260	310		
	3.5			50	100	150	200	250	300		
	4.0			50	90	140	190	230	280		

表4 気温、風速および降雪強度と理想融雪幅との関係 (散水温 10C° の時)

散水温 T_w (°C)	気温 T_a (°C)	風速 u (m·sec ⁻¹)	降雪強度 S (mm·hour ⁻¹)	理想融雪幅							
				$\alpha=0.1$ (cc·sec ⁻¹ ·cm ⁻¹)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6		
10	-2	0	0.5	310	610	920	1220	1530	1840		
			1.0	220	440	660	880	1100	1320		
			1.5	170	350	520	690	870	1040		
			2.0	140	290	430	570	710	860		
			2.5	120	250	370	490	610	740		
			3.0	110	210	320	430	530	640		
			3.5	90	190	280	380	470	570		
			4.0	80	170	250	340	420	510		
		2	0.5	250	490	740	990	1240	1480		
			1.0	190	370	560	750	940	1120		
			1.5	150	300	460	610	760	910		
			2.0	130	260	380	510	640	770		
			2.5	110	220	330	450	560	670		
			3.0	100	200	290	390	490	590		
			3.5	90	180	260	350	440	530		
			4.0	80	160	240	320	400	470		
		5	0.5	190	390	580	770	960	1160		
			1.0	150	310	460	610	770	920		
			1.5	130	260	380	510	640	770		
			2.0	110	220	330	440	550	660		
			2.5	100	200	290	390	490	590		
			3.0	90	170	260	350	440	520		
			3.5	80	160	240	320	390	470		
			4.0	70	140	220	290	360	430		
		10	0.5	140	280	420	560	710	850		
			1.0	120	240	360	470	590	710		
			1.5	100	210	310	410	510	620		
			2.0	90	180	270	360	450	540		
	2.5		80	160	250	330	410	490			
	3.0		70	150	220	300	370	450			
	3.5		70	140	200	270	340	410			
	4.0		60	130	190	250	310	380			
	-5	0	0.5	230	460	680	910	1140	1170		
			1.0	180	350	530	710	880	1060		
			1.5	150	290	440	580	730	870		
			2.0	120	250	470	490	610	740		
			2.5	110	220	320	430	540	650		
			3.0	100	190	290	380	480	570		
			3.5	90	170	260	340	430	510		
			4.0	80	150	230	310	390	460		
			-5	0	0.5	230	460	680	910	1140	1170
					1.0	180	350	530	710	880	1060
					1.5	150	290	440	580	730	870
					2.0	120	250	470	490	610	740
		2.5			110	220	320	430	540	650	
		3.0			100	190	290	380	480	570	
		3.5			90	170	260	340	430	510	
		4.0			80	150	230	310	390	460	

表 4 (つづき)

散水温 T_{wg} (°C)	気温 T_a (°C)	風速 u (m·sec ⁻¹)	降雪強度 S (mm·hour ⁻¹)	理想融雪幅						
				$\alpha=0.1$ (cc·sec ⁻¹ ·cm ⁻¹)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	
10	-5	2	0.5	180	360	530	710	890	1070	
			1.0	150	290	440	580	730	780	
			1.5	120	250	370	490	610	740	
			2.0	110	210	320	430	530	640	
			2.5	90	190	280	380	470	570	
			3.0	80	170	250	340	420	510	
			3.5	80	150	230	310	380	460	
			4.0	70	140	210	280	350	420	
		5	0.5	130	270	400	540	670	800	
			1.0	110	230	340	460	570	690	
			1.5	100	200	300	400	500	600	
			2.0	90	180	270	360	440	530	
			2.5	80	160	240	320	400	480	
			3.0	70	150	220	290	370	440	
			3.5	70	130	200	270	340	400	
			4.0	60	120	190	250	310	370	
		10	0.5	100	190	290	380	480	570	
			1.0	80	170	250	340	420	510	
			1.5	80	150	230	310	380	460	
			2.0	70	140	210	280	350	420	
			2.5	60	130	190	260	320	390	
			3.0	60	120	180	240	300	360	
			3.5	60	110	170	220	280	330	
			4.0	50	100	160	210	260	310	
		-10	0	0.5	160	320	480	650	810	970
				1.0	130	270	400	540	670	800
				1.5	110	230	340	460	570	670
				2.0	100	200	300	400	500	600
2.5	90			180	270	360	450	540		
3.0	80			160	240	320	400	480		
3.5	70			150	220	290	360	440		
4.0	70			130	200	270	330	400		
2	0.5		120	250	370	490	610	740		
	1.0		110	210	320	430	530	640		
	1.5		90	190	280	370	470	560		
	2.0		80	170	250	330	420	500		
	2.5		80	150	230	300	380	460		
	3.0		70	140	210	280	350	420		
	3.5		60	130	190	260	320	380		
	4.0		60	120	180	240	300	350		

表 4 (つづき)

散水温 T_{w_s} (°C)	気温 T_a (°C)	風速 u (m·sec ⁻¹)	降雪強度 S (mm·hour ⁻¹)	理想融雪幅						
				$\alpha=0.1$ (cc·sec ⁻¹ ·cm ⁻¹)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	
10	-10	5	0.5	90	180	270	360	450	540	
			1.0	80	160	240	330	410	490	
			1.5	70	150	220	290	370	440	
			2.0	70	130	200	270	340	400	
			2.5	60	120	190	250	310	370	
			3.0	60	120	170	230	290	350	
			3.5	50	110	160	220	270	320	
			4.0	50	100	150	200	250	300	
	10		10	0.5	60	130	190	250	320	380
				1.0	60	120	170	230	290	350
				1.5	50	110	160	220	270	330
				2.0	50	100	150	200	250	300
				2.5	50	100	140	190	240	290
				3.0	50	90	140	180	230	270
				3.5	40	90	130	170	210	260
				4.0	40	80	120	160	200	240

表 5 気温、風速および降雪強度と理想融雪幅との関係 (散水温 8°C の時)

散水温 T_{w_s} (°C)	気温 T_a (°C)	風速 u (m·sec ⁻¹)	降雪強度 S (mm·hour ⁻¹)	理想融雪幅						
				$\alpha=0.1$ (cc·sec ⁻¹ ·cm ⁻¹)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	
8	-2	0	0.5	270	530	800	1060	1330	1600	
			1.0	190	380	560	750	940	1130	
			1.5	150	290	440	590	730	880	
			2.0	120	240	360	480	600	720	
			2.5	100	210	310	410	510	620	
			3.0	90	180	270	360	450	530	
			3.5	80	160	240	310	390	470	
			4.0	70	140	210	280	350	420	
	2		2	0.5	220	430	650	870	1080	1300
				1.0	160	320	480	650	810	970
				1.5	130	260	390	520	650	780
				2.0	110	220	320	430	540	650
				2.5	100	190	280	370	470	560
				3.0	80	160	250	330	410	490
				3.5	70	150	220	290	370	440
				4.0	70	130	200	260	330	400

地下水散水による道路融雪実験から算出した適正散水量—中村

表 5 (つづき)

散水温 T_w (°C)	気温 T_a (°C)	風速 u (m·sec ⁻¹)	降雪強度 S (mm·hour ⁻¹)	理想融雪幅					
				$\alpha=0.1$ (cc·sec ⁻¹ ·cm ⁻¹)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
8	-2	5	0.5	170	340	510	680	850	1020
			1.0	130	270	400	530	670	800
			1.5	110	220	330	440	550	660
			2.0	90	190	280	380	470	570
			2.5	80	170	250	330	420	500
			3.0	70	150	220	300	370	440
			3.5	70	130	200	270	330	400
			4.0	60	120	180	240	300	360
		10	0.5	130	250	380	500	630	750
			1.0	100	210	310	420	520	620
			1.5	90	180	270	360	450	530
			2.0	80	160	230	310	390	470
			2.5	70	140	210	280	350	420
			3.0	60	130	190	250	320	380
	-5	0	0.5	190	390	580	780	970	1170
			1.0	150	300	450	600	750	900
			1.5	120	240	370	490	610	730
			2.0	100	200	310	410	510	620
			2.5	90	180	270	360	450	530
			3.0	80	160	240	320	390	470
3.5			70	140	210	280	350	420	
4.0			60	130	190	260	320	380	
2		0.5	150	310	460	610	760	920	
		1.0	120	250	370	490	620	740	
		1.5	100	210	310	420	520	620	
		2.0	90	180	270	360	450	540	
		2.5	80	160	240	320	400	480	
		3.0	70	140	210	280	350	420	
		3.5	60	130	190	260	320	380	
		4.0	60	120	170	230	290	350	
5	0.5	120	230	350	460	580	690		
	1.0	100	200	290	390	490	590		
	1.5	80	170	250	340	420	510		
	2.0	80	150	230	300	380	450		
	2.5	70	140	200	270	340	410		
	3.0	60	120	180	250	310	370		
	3.5	60	110	170	220	280	340		
	4.0	50	100	160	210	260	310		

表 5 (つづき)

散水温 T_w (°C)	気温 T_a (°C)	風速 u (m·sec ⁻¹)	降雪強度 S (mm·hour ⁻¹)	理想融雪幅							
				$\alpha=0.1$ (cc·sec ⁻¹ ·cm ⁻¹)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6		
8	-5	10	0.5	80	160	250	330	410	490		
			1.0	70	150	220	290	360	440		
			1.5	70	130	200	260	330	390		
			2.0	60	120	180	240	300	360		
			2.5	50	110	160	220	270	330		
			3.0	50	100	150	200	250	300		
			3.5	50	90	140	190	230	280		
			4.0	40	90	130	170	220	260		
	-10	0	0	0.5	140	270	410	540	680	810	
				1.0	110	220	340	450	560	670	
				1.5	100	190	290	380	480	570	
				2.0	80	170	250	330	420	500	
				2.5	70	150	220	300	370	440	
				3.0	70	130	200	270	330	400	
				3.5	60	120	180	240	300	360	
				4.0	50	110	160	220	270	330	
		2	0	2	0.5	100	210	310	410	520	620
					1.0	90	180	270	360	450	530
					1.5	80	160	230	310	390	470
					2.0	70	140	210	280	350	420
					2.5	60	130	190	250	320	380
					3.0	60	120	170	230	290	350
					3.5	50	110	160	210	260	320
					4.0	50	100	150	200	240	290
		5	0	5	0.5	80	150	230	310	380	460
					1.0	70	140	200	270	340	410
					1.5	60	120	190	250	310	370
					2.0	60	110	170	230	280	340
					2.5	50	100	160	210	260	310
					3.0	50	100	140	190	240	290
					3.5	40	90	130	180	220	270
					4.0	40	80	130	170	210	250
10		0	10	0.5	50	110	160	210	270	320	
				1.0	50	100	150	200	250	290	
				1.5	50	90	140	180	230	270	
				2.0	40	90	130	170	210	260	
	2.5			40	80	120	160	200	240		
	3.0			40	80	110	150	190	230		
	3.5			40	70	110	140	180	210		
	4.0			30	70	100	130	170	200		

4) 適正散水量

気象状況や散水温に応じた適正な散水量を見積るために、散水した水と雪との間の熱交換が理想的に行なわれる場合について考える。(5)式を書き直すと次式のようになる。

$$y = \alpha(h+S)^{-1}\{\ln(T_{w_s}-K) - \ln(T_{w_y}-K)\} \quad (\text{cm}) \quad (6)$$

$$\text{ただし } h = (3.4 + 0.67u) \times 10^{-4}$$

$$K = (h+S)^{-1}\{(h+0.49S)T_a - 80S\}$$

(6)式において、 $T_{w_y}=0$ になるような y の値を計算すれば、これがこの条件下での理想融雪幅 l_{wr} である。この時、道路の幅（散水が道路中央で行なわれ、道路の両側に均等に散水される時には道路の全幅の半分）が l_{wr} であれば、この道路は完全に融雪されている筈である。

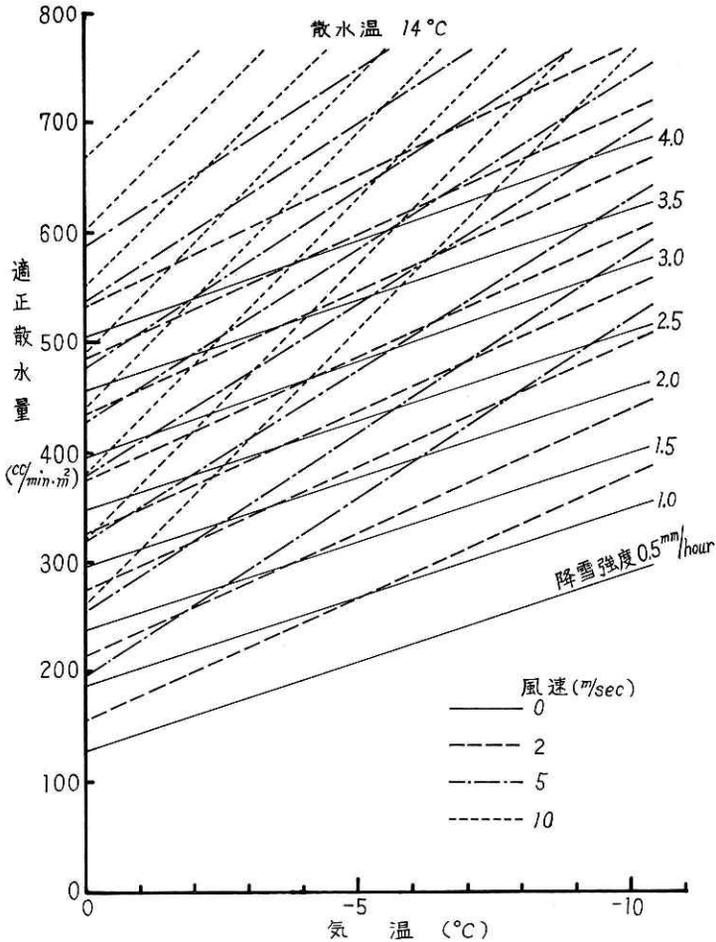


図 14 気温、風速および降雪強度と適正散水量との関係（散水温 14°C の時）。各風速についての直線群は、下から降雪強度が順次 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 mm·hour⁻¹ の場合

もし、この時の α (道路の長さ方向の 1 cm 幅上を 1 秒間に流れる流量) より小さい α で散水すれば、道路上に積雪が残り、逆に大きな α で散水すれば余計に散水を行なっていることになる。それゆえ、この時の α は適正な流量といえる。

この流量の散水量 V への換算は、定義 (120頁参照) および (6) 式から次式により行なう。

$$V_r = (\alpha \times 100 \times 60) \div (y \div 100) \\ = 6 \times 10^3 (h+S) \{ \ln (T_{w_s} - K) - \ln (-K) \}^{-1} \quad (\text{cc} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (7)$$

この V_r がこの条件下での適正散水量である。 V_r は (7) 式からわかるように、散水温および各気象要素のみにより定まり、道路幅員には関係しない。

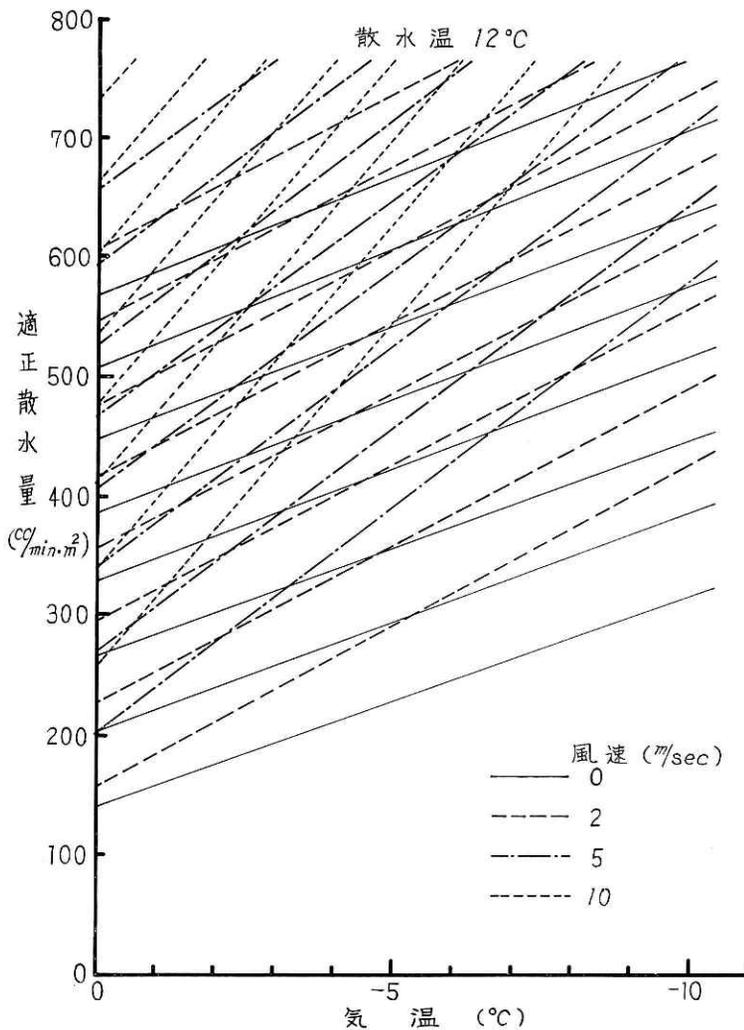


図 15 気温、風速および降雪強度と適正散水量との関係 (散水温 12°C の時). 各風速についての直線群は、下から降雪強度が順次 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 mm·hour⁻¹ の場合

(6) 式を用いて計算した散水温, 気温, 風速および降雪強度と, 理想融雪幅との関係を表 2, 3, 4 および 5 に, また (7) 式を用いて計算した上記の要素と適正散水量との関係を図 14, 15, 16 および 17 に示す.

6. 検 討

(1) $f(u)+g(u)$ の値として $(3.4+0.67u)\times 10^{-4}$ を提案したが, この値を吉田他 (1950) や小口 (1954) が気温融雪実験から求めた結果と比べてみると, 著者が求めた値は, 風速 $0\text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ の時には吉田達の値よりもやや大き目であるものの, 風速が $1\text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ 以上になると

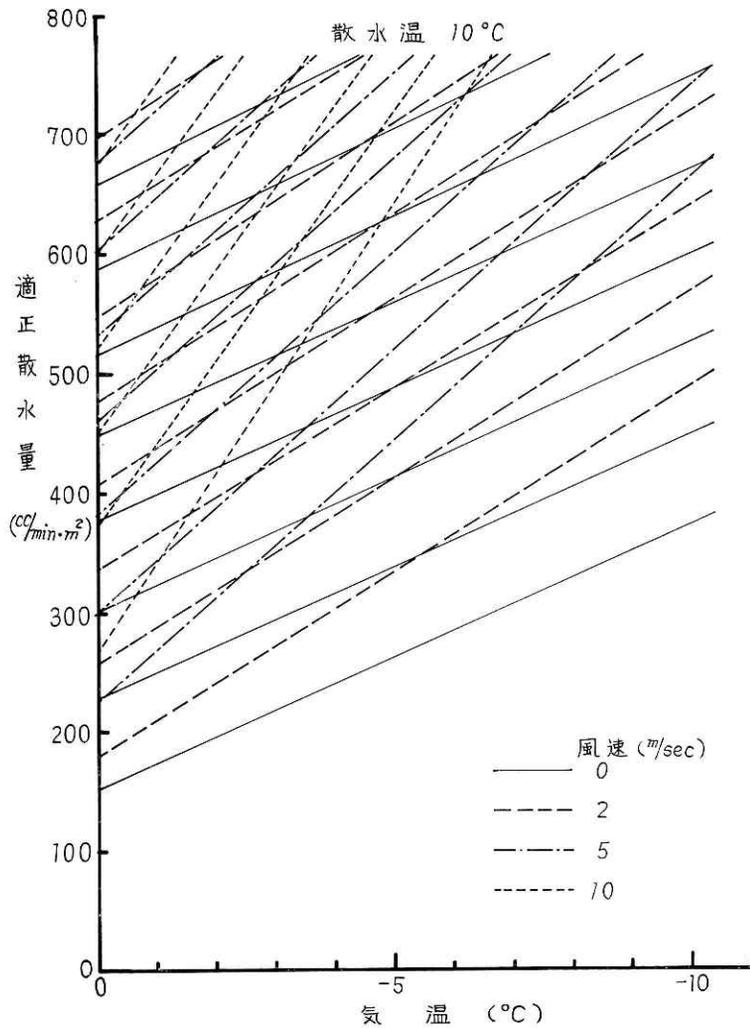


図 16 気温, 風速および降雪強度と適正散水量との関係 (散水温 10°C の時). 各風速についての直線群は, 下から降雪強度が順次 $0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0\text{ mm}\cdot\text{hour}^{-1}$ の場合

逆に小さくなり，風速 $5 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ の時には約 $1/3$ にもなっている．

吉田および小口が求めた式は次のようなものである．

$$f(u)+g(u) = (1.11+3.78u)\times 10^{-4} \quad (\text{吉田}\cdot\text{小島}\cdot\text{青木})$$

$$f(u)+g(u) = (1.78+7.2\sqrt{u})\times 10^{-4} \quad (\text{小口})$$

このような差が生じた原因として，次のことが考えられる．

道路上に水を撒いた場合には，地中からの熱の補給のため，道路の末端部では，地中からの熱の補給のない場合よりも水温低下量は小さくなる．このため， $f(u)+g(u)$ はみかけ上小さく算出される．吉田他や小口の場合には，前者に相当するので，地中（積雪中）との熱交換はなく，このために $f(u)+g(u)$ の値が著者のそれよりも大きくなったのであろう．

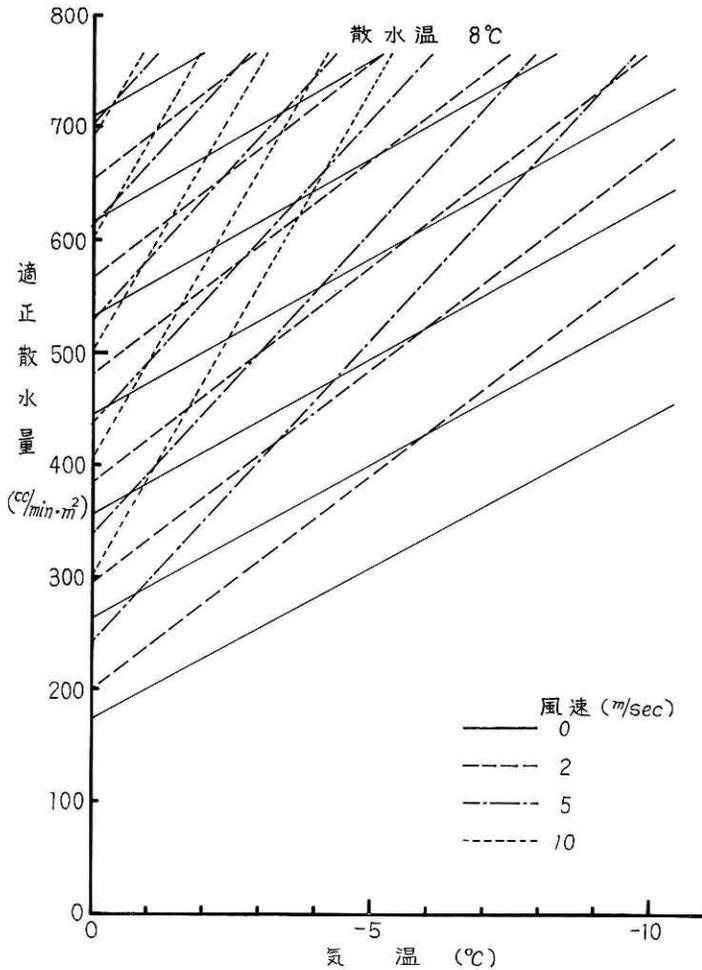


図 17 気温，風速および降雪強度と適正散水量との関係（散水温 8°C の時）．各風速についての直線群は，下から降雪強度が順次 $0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 \text{ mm}\cdot\text{hour}^{-1}$ の場合

(2) $f(u)+g(u)$ の流量 α に対する依存性をみると、無風時では、 $f(u)+g(u)$ は流量に比例したが (中村・坂野, 1973), 風速が強い場合には特にそのような傾向は見られなかったので本稿では流量に無関係として取り扱った。

(3) (4) 式および (5) 式の適用範囲は、気温に関しては、 0°C 以下 -10°C 以上、風速については $5\text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ 以下である。ただし、参考のために表 2, 3, 4, 5 および図 14, 15, 16 および 17 に風速 $10\text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ の場合の計算値を表わした。

(4) 散水による屋根雪消雪実験 (Higashiura, 1977) によると、 12°C の水を毎分 1 m^3 当たり 450 cc の割合で屋根に散水した場合、気温 -5°C 、風速 $3.2\text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ の時には、融雪可能な降雪の強度は $0.4\text{ mm}\cdot\text{hour}^{-1}$ となる。

これを本稿の実験結果と比べてみると、道路融雪の場合、同じ条件のもとでは $1.4\text{ mm}\cdot\text{hour}^{-1}$ の降雪まで融かし得るということになり、これは屋根雪消雪の場合の 3.5 倍である。ところで、この屋根雪消雪実験は低温室内で行なわれた実験であるが、これと並行して行なった屋根雪消雪の野外実験の結果を用いてみると $0.6\text{ mm}\cdot\text{hour}^{-1}$ の降雪まで消雪可能ということになる。

いずれにしても、同じ条件で比較すると、道路に散水した水の方が融雪能力が大きいようである。この原因には、散水面の下方の温度 (道路融雪では地中温度、屋根雪融雪では屋根裏気温) があげられよう。道路融雪の場合、散水を続けている限り、地中は正の温度であろうが、屋根雪融雪の場合、屋根裏気温が負になっていることも予想される。特に -5°C で風速 $3\text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ ともなると、壁面からの熱損失も相当大きく、このため屋根裏も冷えて、屋根に散水した水が屋根面の裏側からも冷やされている可能性がある。融雪可能量に差がみられるのは、このことに起因しているものと思う。

(5) 本実験は車輛通行のない状況下で行なったものであるが、ここで得た結果を実際道路にあてはめる場合には、車の走行による影響、たとえばタイヤによる水や雪の攪拌、走行時に生ずる空気の流れ、タイヤの発熱 (木下・秋田谷・田沼, 1970) などを考慮する必要がある。

現在筆者は、これらの中で車走行が散水融雪に与える最大の効果 (融雪にとってマイナスとなる要因も含めて) は、タイヤによる攪拌作用で水と雪との間の熱交換が効率よく行なわれることであると考えているが、これらの点については今後さらに調査する予定である。

(6) 当新庄市付近では、普通、降雪時の気温は -5°C 以上、降雪強度 (水換算) は $1.5\text{ mm}\cdot\text{hour}^{-1}$ (これは、新雪の密度 $0.07\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ とすると毎時 2 cm の降雪に相当) 以下なので風速 $2\text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ と仮定すると、 12°C の水を散水する時の適正散水量は $430\text{ cc}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ となる。

この値は、この付近の一般消雪道路での散水量とほぼ同じであるが、いま仮に同じ条件下で降雪強度だけが $1.0\text{ mm}\cdot\text{hour}^{-1}$ (これは同じく毎時 1.4 cm の降雪に相当) に変化した

とすれば、この時の適正散水量は $360 \text{ cc} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ となる。

これを上記の場合と比較すると、降雪深の差は毎時わずか 0.6 cm であり、散水量の差でもわずか毎分 1 m^2 当り 70 cc となるが、これを新庄市内の消雪道路全体（延長 20 km ，道路幅員 7 m ）について計算すると一冬期間（90日，連続散水）当り 130 万トンの水量となる。

この 130 万トンの水量は現在（昭和52年度）新庄市で年間使用されている上水道量（ 340 万トン）の約 38% にも相当する水量で、適正な水量で散水融雪すれば莫大な水量の節約となることが定量的にも判明した。

このようなことから、道路散水融雪を行なう際には気象状況によって散水量をきめ細かく調節する必要がある*。

7. むすび

実規模大の野外実験道路を使用して、道路散水融雪実験を行なった結果次のことが判明した。

(1) 散水した水の温度は、路側に向って流下するにつれて指数関数的に低下する。また、無風時には気温に応じて末端水温も直線的に低下する。

(2) 顕熱および潜熱輸送に係る係数 $f(u) + g(u)$ の値は、 $(3.4 + 0.67u) \times 10^{-4}$ とした方が合理的である。

(3) このような改良を加えた(4)式を用いて、降雪のない時の末端水温についての計算値と実測値との比較では、ほとんどの場合 $\pm 1^\circ\text{C}$ の範囲で一致する。

また降雪のある時の融雪幅について、計算値（本文中の(5)式）と実測値との比較をするとそれは $\pm 1 \text{ m}$ の範囲で一致する（相対誤差は 17% ）。

8. おわりに

本研究を行なうにあたり、坂野行雄元新庄支所長ならびに中村勉研究室長、東浦将夫研究員、阿部修技官の多大な御協力を得ました。特に阿部技官には、寒中での散水量の測定など、つらい観測をお願い致しました。ここに記すとともに皆様深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Higashiura, M. (1977): Snow Melting on Roofs by Sprinkling Ground Water, *Report of the National Research Center for Disaster Prevention*, No. 17, 215-225.
- 2) 木下誠一・秋田谷英次・田沼邦雄 (1970): 道路上の雪氷の調査 II, 低温科学, 物理篇, 第28巻, 311-323.
- 3) 三宅恒夫 (1963): 道路除雪としての消雪パイプ, 雪氷, 25巻2号, 21-23.
- 4) 中村秀臣・坂野行雄 (1973): 地下水による道路散水消雪について, 第11回日本道路会議論文集,

* これは上水道料金に換算すると 4600 万円に相当する。

地下水散水による道路融雪実験から算出した適正散水量—中村

623-624.

- 5) 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 卷.
- 6) 大沼匡之 (1962): 散水消雪, 雪氷, 24 卷 6 号, 9-10.
- 7) 齋藤博英 (1967): 地下水を利用する融雪の基礎理論, 雪害実験研究所報告, 1-16.
- 8) 吉田順五・小島賢治・青木真一 (1950): 融雪の実験的研究, 低温科学, 3 輯, 101-108.

(1977年7月22日 原稿受理)