

流雪道路における融雪・流雪の現地試験と解析

吉田昭治* 中島芳文**

Tests of "ryūsetsu dōro" for melting snow and numerical analyses

by

Shōji YOSHIDA and Yoshihumi NAKAJIMA

(Abstract)

The "ryūsetsu dōro" (a road equipped with a snow melting and removing device) with water flow of several centimeters deep was tested for melting snow and removing snow-jam.

The relationship between the water temperature and the distance from the water inlet was determined and the results agreed fairly well with the calculated values.

The critical allowable water discharge for normal walking on the road was proposed.

I ま え が き

一昔前の雪国の冬の道路は雪に埋まったままであった。冬の道を車が走らないことは雪国の人々にとっては常識となっていた。鉄道だけが線路の除雪を行ない汽車を走らせたが、道路は雪で埋めつくされ、そりが唯一の運搬道具であった。豪雪山村地帯は特にこの傾向が強く、いまだにこのような不便な状態を余儀なくされているところが多い。

近年では、ブルドーザ除雪によって基幹道路だけは何とか交通が確保され始めているが、これもまだ住民の要求からみて十分とはいえない。またかりに基幹道路の交通が確保されても、その基幹道路と各部落とを結ぶ連絡道路が確保されない限り、住民の生活環境の改善に役立たず、基幹道路を確保した意味も薄れてくる。積雪期間が半年近くにも及ぶ豪雪地の山村住民にとって連絡道路を含む道路交通網全体の積雪からの解放が切実な要求であり、この問題の解決めきに、その地域の住民の近代的生活は成り立ち得ないといっても過言ではあるまい。

ところで近年、雪国の市街地では積雪パイプで地下水を路面に散水して融雪する方法が威力を発揮して普及してきている。しかし、この方法を山間部の道路に適用するとなるといくつかの問題が残る。この方法によるには、まず水温の高い地下水が豊富に得られなければならない。山間部の急勾配道路では水が均一に流れにくく適用が困難である。維持管理に手間がかかる。そして何よりも、地下水揚水のための諸設備やパイプ埋設などの建設費が膨大なものとなり住民の負担が大きいことがこの方法をとるにあたっての最大の障害となる。

このような事情を反映して現われたのが、流雪道路あるいは流水道路と呼ばれる道路である。この流雪道路は、路面を防水加工し、河川水を道路の動線方向に水深1~3cmの薄層にして流し、降雪を融解しな

* 新潟大学積雪地帯災害研究センター

** 新潟県庁

がら流去し、道路の無雪化を計ろうとするものである。

路面に均一な薄層として河川水を流すために、道路の横断勾配はとらず水平とし、道路側壁を必要とすることが、一般の道路と違うところである。また流水量が大きく、水温が高いほど流水の融雪能力は大きい、冬期の可川水を使用するため水温は限定され、流水量も人の歩行可能な条件から限定される。

このように限定された河川水を利用して流雪道路を設ける場合、流水の冷却条件、融雪・流雪能力によって一区間の制限距離が決まってくるし、これらはまた、その地域の降雪量、気温、風速等の気象条件によって左右されるが、現在まだこれらを考慮に入れた適切な設計基準がないようである。

文献について詳しく調べたわけではないので見落としがあると思われるが、最近では“現地における融雪道路のモデル実験について”（藤沢，1977）があるぐらいのようである。

そこで本研究では、既設の流雪道路において、種々の気象条件によって流水量を変化させた場合、流水がどのように融雪、冷却するかを実測するとともに、理論的解析との比較を試み、さらに流雪道路の設計に必要ないくつかの基礎的事項を明らかにしようとした。

なお、流雪道路の融雪に関する理論式は、“流雪軌道の基礎実験”（中俣，1971）から引用したものである。

謝辞 本論文は、著者の一人、中島の卒業論文（1973）を骨子としている。当時中島は、偶然にも現在の本研究センターの中俣三郎助教授から文献のご教示ならびに種々ご指導を受けた。また著者の一人、吉田は、本研究が現在でもなお実際に役立つことがあれば幸いと見え、同氏より再度上記の文献をおかりして、上記の卒論に若干の考察を加えて体裁を整え、ここに報告することにしたものである。この機会にあらためて同氏に深くお礼申し上げる。また種々ご援助を戴いてきた農学部土地保全学研究室の長崎明教授に感謝申し上げます。

Ⅱ 流雪道路の構造と機能

図-1に示すように、流雪道路の横断面は一般の舗装道路とは異り、横断勾配をとらず横断方向にはレベルとし、道路の両側には数cmのコンクリート製の側壁を設け、路面全体に水深1～5cmで縦断方向に流水できる構造になっている。

流雪道路では、かんがい用水などの河川水を冬期に利用できる利点があるが、地下水と違い水温は低いから大きな融雪効果は期待できない。これは、平面図（図-2）にみるように、フリューム管等で導かれた河川水を取水用横断水路からとり入れ、路面全体に一樣な水深で流水する。流水がある程度の距離を融雪流下し、0℃になると融雪能力がなくなり、雪の混入したスノージャムを生成しつつさらに流下する。この水と雪の混入したスノージャムが沈滞しない範囲の所に排水用横断水路を設け、この水路を通して、スノージャムを道路外の水路、あるいは近接河川等へ導き、流末処理する。この排水用横断水路の下流側に隣接する取水用横断水路から新たに水温の高い河川水を取り入れ、路面に流し、融雪・流雪をくり返す。この流水量は、取水用横断水路に附属する上下開閉ゲートによって調節できるようになっている。

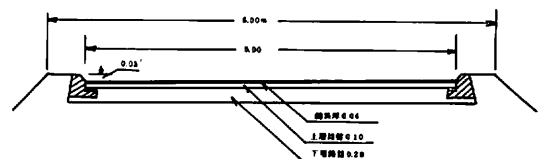


図-1 流雪道路断面図

このような構造をもつ流雪道路は、従来市街地に利用されている消雪パイプ方式のように、路面に温度

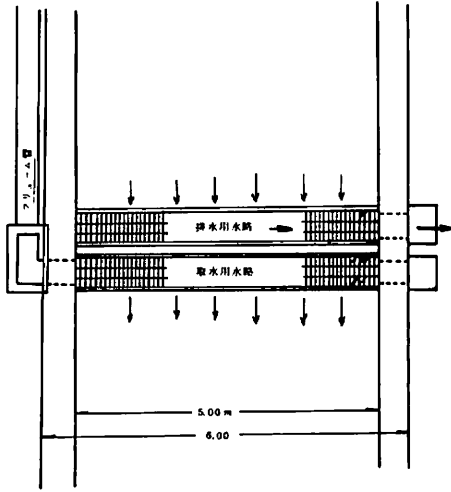


図-2 流雪道路平面図

の高い地下水を散水し、降雪をすべて融雪処理しようとするものではない。流雪道路は、上記の道路とその機能を異にし、先にも述べたように、流水量を大きくして、一区内の後半部分から末端部分にかけて融けない雪、すなわちスノー jams をも流水で押し流す機能をもっている。従って、この流雪道路の採用に当っては、冬期流雪に必要な流水が十分得られること、全区間にわたって必要な道路勾配を確保できることが必要条件となる。

Ⅲ 流水の融雪・冷却の基礎理論式

流水の冷却に関係する理論的な単位水面積当りの失熱量についての詳細は中俣氏の論文(1971)にゆずり、結果のみを記すと、次の4項にまとめられる。

a) 放射による失熱量 (Re)

$$Re = (20 + T_x - 0.7 T_a) \times 10^{-4} \dots\dots\dots(1)$$

b) 対流・蒸発による失熱量 (Qa + Qe)

対流に対して $Q_a = f(u) \cdot (T_x - T_a)$

但し $f(u) = (0.85 + 0.7 u) \times 10^{-4} \dots\dots\dots(2)$

蒸発に対して $Q_e = K_o (T_x - T_a)$

但し $K_o = (0.49 + 0.39 u) \times 10^{-4} \dots\dots\dots(3)$

(2)と(3)をまとめると

$$Q_a + Q_e = (1.34 + 1.09 u) (T_x - T_a) \times 10^{-4} \dots\dots\dots(4)$$

c) 降雪による失熱量 (Qs)

水(雪) Wgr が、-T℃から0℃まで温度上昇後0℃の水となり、更にTx℃まで温度上昇するに必要な熱量として

$$Q_s = (C \cdot T_x + 80 + 0.49 |T_a|) W$$

$$= (T_x + 80 + 0.49 |T_a|) W \dots\dots\dots(5)$$

d) 熱伝導による失熱量 (Qc)

$$Q_c = \frac{T_x - T_E}{\frac{d_c}{\lambda_c} + \frac{d_E}{\lambda_E}} \dots\dots\dots(6)$$

ここに

Tx : 道路α(m)地点の水温(℃)

u : 風速(m/sec)

Ta : 気温(℃)

W : 降雪重量(gr/cm² sec)

TE : 深さdEの地温(℃)

dc : アスファルトの厚さ(cm)

d_E : 地中の深さ (cm)

λ_C : アスファルトの熱伝導率 (cal/cm sec °C)

λ_E : 土の熱伝導率 (cal/cm sec °C)

失熱量の単位はすべて cal/cm² sec とする。

流水の全生熱量は、前記失熱量の和であるから、これを T_x によって変化する項と、他の一定の項とに分けて整理すると次のようになる。

$$Q_t = R_e + Q_a + Q_e + Q_s + Q_c$$

$$= \left[(2.34 + 1.09u) \times 10^{-4} + W + \frac{1}{\frac{d_c}{\lambda_c} + \frac{d_E}{\lambda_E}} \right] T_x$$

$$- \left[\left\{ (2.04 + 1.09u) T_a - 20 \right\} \times 10^{-4} - (80 + 0.49 |T_a|) W + \frac{T_E}{\frac{d_c}{\lambda_c} + \frac{d_E}{\lambda_E}} \right]$$

$$= B T_x - A \dots\dots\dots(7)$$

ここで

$$A = \left\{ (2.04 + 1.09u) T_a - 20 \right\} \times 10^{-4}$$

$$- (80 + 0.49 |T_a|) W + \frac{T_E}{\frac{d_c}{\lambda_c} + \frac{d_E}{\lambda_E}} \text{ (cal/cm}^2 \text{ sec)} \dots\dots\dots(8)$$

$$B = (2.34 + 1.09u) \times 10^{-4} + W + \frac{1}{\frac{d_c}{\lambda_c} + \frac{d_E}{\lambda_E}} \text{ (cal/cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C)} \dots\dots\dots(9)$$

図-3の路面上の流水は、水理学的には定常・不等流であるが、近似的に定常・等流として扱うことにすると、流れ方向の微小区間 δx における流れ方向に直角の単位幅当りの熱流入量と熱流出量の差は、熱的にも定常とすると、

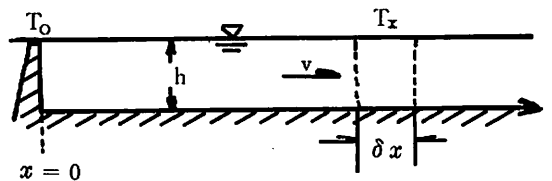


図-3

$$T_x C \rho v h - \left(T_x + \frac{dT_x}{dx} \delta x \right) C \rho v h = - C \rho v h \frac{dT_x}{dx} \delta x$$

この区間 δx の全失熱量は(7)式より

$$Q_t \delta x = (B T_x - A) \delta x$$

ゆえ

$$C \rho v h \frac{dT_x}{dx} = A - B T_x$$

が成り立つ。これを変数分離して積分すると

$$\int_{T_0}^{T_x} \frac{dT_x}{A - B T_x} = \int_0^x \frac{dx}{C \rho v h} \quad \therefore \ln \frac{A - B T_x}{A - B T_0} = - \frac{B x}{C \rho v h}$$

これから

$$T_x = \left(T_0 - \frac{A}{B} \right) \text{Exp} \left(-\frac{Bx}{C\rho v h} \right) + \frac{A}{B} \dots\dots\dots(10)$$

を得る。これは流水温度 T_x と流下距離 x との関係を与える。また、(10)式で、 $T_0 = 0$ となる流下距離、すなわち融雪可能距離 L について

$$L = \frac{2.30 C\rho v h}{B} \log \left(1 - \frac{B}{A} T_0 \right) \dots\dots\dots(11)$$

を得る。但し、ここで

- C : 水の定圧比熱, (1.0 cal / gr °C)
- ρ : 水の密度, (1.0 gr / cm³)
- v : 流速 (cm / sec)
- h : 水深 (cm)
- T_0 : 水源 ($x = 0$) における水温 (°C)
- x : 流水方向の距離 (cm)
- A, B : 全失熱量を求めるに必要な係数 ((8), (9)式を参照)

Ⅳ 現地の流雪道路における試験結果と解析

1972年、津南町土井平地改良区が建設した流雪道路、約600m区間を試験道路とした。この流雪道路は道路縦断勾配0.034区間120m、0.034～0.085区間180m、0.085～0.074区間250mの三区間より成っている。各区間の境界には排水用横断水路及び取水用横断水路がとりつけられている(図-2)。

Ⅳ-1 試験方法

本試験では、この三区間とも流入口から30m間隔に測点を設け、取水用横断水路のゲート開閉により道路の流水量を調節し、流水の水温はサーミスター温度計で測定した。また流水の冷却に影響する気象要素として、気温、風速、降雪重量を測定した。その他、路面から20～30cmの深さの地温を測定し、熱伝導による失熱を推定する手がかりとした。なお地温は、20～30cmから下方はほぼ一定であり、気象条件による変化がほとんど認められなかったため、各試験を通して一定とした。流速はロウを塗った紙片を追跡子として流し、その速度から測定した。流量は道路の縦断方向の平均水深と平均流速の測定値から求めた。

Ⅳ-2 試験結果

いくつかの気象条件のもとで流水量を変えて、流水の水温降下を実測した合計26回の試験結果を表-1に示す。表-1の計算に用いた係数A、Bは、必要な諸量の実測値から、(8)、(9)式によって計算して求めた。また試験毎の失熱量の各項の計算値を表-2に示す。

勾配0.034、延長120m区間の試験道路では、取水用横断水路への流入量が不足し、流量を調節することは困難であった。道路の中央と両端の流れが違うことを考慮して、試験を分けて行った。No.4、18は道路の中央を測定した結果であり、No.14、19、20、21は道路端を測定した結果である。

No.4、18では水温の変動が著しいが、これは路面の中央は、小さい起伏があつて均平でなく、このため各測定点における流水量の違いが大きいためである。これに対し道路端の流れは、ほぼ等流とみなしてよく、水温も流下するほど単調に低下していることが認められる。

勾配0.085、延長240m区間の試験道路では流水量が十分あり、その調節が容易であり、好条件下で

表-1 試験結果

試験番号		1	2	3	4	5	6
実測値	測定時刻	23.21' ~23.51'	23.51' ~0.30'	23.10' ~0.10'	23.10' ~0.10'	0.10' ~1.05'	16.25' ~16.50'
	天気	快晴	晴	雪	雪	雪	曇り
	気温 T_a (°C)	-4.0	-3.8	1.0	0	0	-1.0
	風速 u (m/sec)	0	0	0	0	0	3.6
	降雪量 (cm/h)	0	0	2.0	2.0	2.0	0
	降雪重量 W (g/cm ² sec)	0	0	0.66×10^{-4}	0.66×10^{-4}	0.89×10^{-4}	0
	流量 q (m ³ /min)	0.69	0.30	0.19	0.20	0.19	0.48
	平均水深 h (cm)	0.9	0.5	0.4	0.5	0.4	0.7
	平均流速 v (cm/sec)	128	100	88	65	88	115
	水温 T_b (°C)	3.0	3.0	5.0	4.6	4.0	2.0
測定値	" $T_x=30$	3.0	2.9	4.7	2.0	3.5	1.0
	T_{60}	2.9	2.9	4.0	3.5	3.0	2.0
	T_{90}	2.9	2.8	3.5	2.0	2.6	1.8
	T_{120}	2.5	2.3	3.0		3.0	1.5
	T_{150}	2.1	2.1	3.0		2.0	1.5
	T_{180}	2.0	2.0	2.7		1.5	1.0
	T_{210}	2.0	1.8	2.0		0.5	1.0
	T_{240}	2.0	1.0	2.0		0	1.0
	$T_x = 0$ °C なる x_1 (m)					215	
	スノージャム流送距離 x_2 (m)						
有効距離 ($x_1 + x_2$)							
計算値	$A \times (-10^{-4})$	2416	2375	6708	688	87.2	2196
	$B \times 10^{-4}$	394	394	460	460	4.83	394
	融雪距離 (m)	1,663	711	225	194.5		625
	$T_x=30$ (°C)	2.9	2.8	4.3	3.8	3.1	1.9
	T_{60}	2.8	2.6	3.5	3.1	2.3	1.8
	T_{90}	2.7	2.4	2.8	2.3	1.5	1.7
	T_{120}	2.6	2.2	2.2	1.6	0.7 3.0	1.6
	T_{150}	2.5	2.0	1.5		2.15	1.5
	T_{180}	2.4	1.8	0.9		1.34	1.4
	T_{210}	2.3	1.6			0.56	1.3
T_{240}	2.2	1.4				1.2	

試 験 番 号		7	8	9	10	11	12
実	測 定 時 刻	21.30' ~22.20'	22.30' ~22.48'	16.50' ~17.50'	16.50' ~17.50'	20.45' ~21.14'	22.30' ~23.30'
	天 氣	雪	雪	雪	雪	小 雪	小 雪
	氣 温 T_a (°C)	-1.0	-0.5	0	0	0	0.5
	風 速 u (m/sec)	0	0	0	0	0	0
	降 雪 量 (cm/h)	4.5					
	降 量 W (g/cm ² sec)	1.20×10^{-4}	1.02×10^{-4}	0.36×10^{-4}	0.36×10^{-4}	0.10×10^{-4}	0.05×10^{-4}
	流 量 q (ml/min)	0.48	0.82	0.43 0.60	1.08	0.90	0.15 0.144
	平均水深 h (cm)	0.7	1.0	0.9 0.8	1.2	1.0	0.5 0.3
	平均流速 v (cm/sec)	115	136	80 125	150	150	51 80
	測 水 温 T_o (°C)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.5	3.8
値	" $T_{x=30}$	1.0	1.5	2.0	2.0	2.4	3.5
	T_{60}	0.8	1.1	2.0	1.9	2.4	3.0
	T_{90}	0.2	0.9	1.5	1.6	2.0	3.0
	T_{120}	0	0.5	1.0	1.4	2.0	2.8
	T_{150}	0	0	0.5	1.2	2.0	2.0
	T_{180}	0	0	0	1.0	2.0	1.5
	T_{210}	0	0		1.0	1.9	
	T_{240}	0	0		0.9	2.0	
	$T_x = 0$ °C なる x_1 (m)	95					
	スノーギャム流送距離 x_2 (m)	15					
有効距離 ($x_1 + x_2$)	110						
計	$A \times (-10^{-4})$	114.63	98.87	44.8	44.8	24.0	18.98
	$B \times 10^{-4}$	5.41	4.96	4.3	4.3	4.04	4.0
	融 雪 距 離 (m)	133	259	293	735	1,299	326
	$T_{x=30}$ (°C)	1.6	1.7	1.8	1.9	2.4	3.4
	T_{60}	1.1	1.5	1.6	1.8	2.4	3.0
	T_{90}	0.6	1.3	1.4	1.7	2.3	3.0
	T_{120}	0.2	1.1	1.0	1.6	2.2	2.6
	T_{150}		0.8	0.85	1.5	2.2	2.3
	T_{180}			0.7	1.4	2.1	1.9
	T_{210}				1.3	2.0	
算 値	T_{240}				1.2	2.0	

試 験 番 号		13	14	15	16	17	18
実	測 定 時 刻	23.00' ~23.30'	3.30' ~5.00'	3.30' ~5.00'	3.30' ~5.30'	22.00' ~22.30'	22.30' ~23.00'
	天 氣	小 雪	晴	晴	曇 り	快 晴	快 晴
	気 温 T_a (°C)	0	-2.0	-2.0	-1.0	-4.5	-8.0
	風 速 u (m/sec)	0	0	0	0	0	0
	降雪量 (cm/h)		0	0	0	0	0
	降雪重量 W (g/cm ² sec)	0	0	0	0	0	0
	流 量 q (m ³ /min)	0.36	0.84	0.17	0.53	0.53	
	平均水深 h (cm)	0.6	1.4	0.5 0.4	0.7	0.7	0.8
	平均水速 v (cm/sec)	100	100	56 102	125	125	77
	測 水 温 T_o (°C)	3.5	4.0	4.0	4.0	3.0	3.5
値	" $T_{x=30}$	3.3	3.8	3.6	3.8	3.0	2.8
	T_{60}	3.2	3.8	3.0	3.8	2.8	1.5
	T_{90}	3.0	3.5	3.5	3.6	2.6	1.0
	T_{120}	3.0	3.2	3.0	3.0	2.3	0.8
	T_{150}	2.9		2.0	3.0	2.2	
	T_{180}	2.9		2.0	3.0	2.0	
	T_{210}	2.9			2.6	1.9	
	T_{240}	2.8				1.5	
	$T_x = 0$ °C なる l_1 (m)						
	スノージャム流送距離 l_2 (m)						
有効距離 ($l_1 + l_2$)							
計	$A \times (-10^{-4})$	16.00	20.04	20.04	18.04	25.18	32.32
	$B \times 10^{-4}$	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94
	融 雪 距 離 (m)	946	1,579	410	1,390	1,135	547
	$T_{x=30}$ (°C)	3.4	3.9	3.5	3.9	2.9	3.3
	T_{60}	3.2	3.8	3.1	3.8	2.8	3.1
	T_{90}	3.1	3.7	3.5	3.7	2.6	2.8
	T_{120}	2.9	3.6	3.2	3.6	2.5	2.6
	T_{150}	2.8		2.9	3.4	2.4	
	T_{180}	2.7		2.6	3.3	2.3	
	T_{210}	2.6			3.2	2.2	
T_{240}	2.5				2.0		

試 験 番 号		19	20	21	22	23	24
実	測 定 時 刻	9.00' ~9.30'	13.30' ~13.38'	14.30' ~14.39'	15.00' ~15.10'	9.30' ~9.45'	10.00' ~10.15'
	天 氣	雪	雪	雪	雪	雪	雪
	気 温 T_a (°C)	1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-2.0	-2.0
	風 速 (m/sec)	0	0	0	0	0	0
	降 雪 量 (cm/h)						6
	降雪重量 W (g/cm^2sec)	0.81×10^{-4}	0.37×10^{-4}	0.68×10^{-4}	0.85×10^{-4}	0.786×10^{-4}	1.43×10^{-4}
	流 量 q (m^3/min)	0.59	0.75	0.76	0.28	0.58	0.51
	平均水深 h (cm)	1.1	1.4	1.4	0.5	1.1	0.7
	平均流速 v (cm/sec)	89	89.5	91	94	88	122
	測 水 温 T_o (°C)	4.0	3.5	3.5	3.0	3.0	1.8
値	" $T_{x=30}$	3.8	3.4	3.2	2.5	2.6	1.0
	T_{60}	3.5	3.2	3.0	2.0	2.3	0.3
	T_{90}	3.0	3.0	2.9	1.0	2.0	0
	T_{120}	2.7	2.6	2.7	0.8	1.8	(スノー ジャム)
	T_{150}				0.2		
	T_{180}				0		
	T_{210}						
	T_{240}						
	$T_x = 0^\circ C$ なる x_1 (m)						90
	スノージャム流送距離 x_2 (m)						75
有効距離 ($x_1 + x_2$)						165	
計	$A \times (-10^{-4})$	79.16	47.82	72.77	86.46	83.73	135.9
	$B \times 10^{-4}$	4.75	4.31	4.62	4.79	4.73	5.37
	融 雪 距 離 (m)	444	796	552	151	320	109
	$T_{x=30}$ (°C)	3.7	3.35	3.29	2.37	2.69	1.29
	T_{60}	3.4	3.21	3.08	1.75	2.40	0.79
	T_{90}	3.1	3.07	2.88	1.16	2.11	0.31
	T_{120}	2.8	2.90	2.68	0.58	1.82	-0.17
	T_{150}				0.02		
	T_{180}				-0.53		
	T_{210}						
算 値	T_{240}						

試 験 番 号		25	26
実 測 値	測 定 時 刻	11.00' ~11.15'	15.30' ~15.50'
	天 氣	雪	あられ
	気 温 T_a (°C)	-2.5	-2.0
	風 速 u (m/sec)	0	0
	降 雪 量 (cm/h)	6.6	
	降雪重量 W (g/cm ² sec)	1.89×10^{-4}	0.29×10^{-4}
	流 量 q (ml/min)	0.90	0.60
	平均水深 h (cm)	1.0	0.8
	平均流速 v (cm/sec)	150	125
	水 温 T_0 (°C)	1.5	1.5
	" $T_{x=30}$	1.0	1.2
	T_{60}	1.0	1.0
	T_{90}	0.5	0.7
	T_{120}	0	0.5
T_{150}	0	0.2	
T_{180}		0	
T_{210}			
T_{240}			
$T_x = 0$ °C なる x_1 (m)	115		
スノージャム流送距離 x_2 (m)	120		
有効距離 ($x_1 + x_2$)	235		
計 算 値	$A \times (-10^{-4})$	174.62	43.56
	$B \times 10^{-4}$	5.83	4.23
	融 雪 距 離 (m)	125.5	320
	$T_{x=30}$ (°C)	1.14	1.35
	T_{60}	0.78	1.20
	T_{90}	0.42	1.06
	T_{12}	0.07	0.91
	T_{150}		0.77
	T_{180}		0.62
	T_{210}		
T_{240}			

表-2 失熱量の計算 (単位は $\times 10^{-4}$ cal/cm² sec)

試験番号	1			2			3			4			5		
測点	0m地点	60m	240m	0	180	240	0	60	120	0	60	120	0	150	240
失熱量 Re	25.8	25.7	24.8	25.7	24.7	23.7	24.3	23.3	23.3	24.6	24.0	22.0	24.0	22.0	20.0
Qa+Qe	9.4	9.2	8.0	9.1	8.8	6.4	6.4	4.0	2.7	6.2	5.4	2.7	5.4	2.7	1.3
Qs	0	0	0	0	0	0	56.4	55.8	55.1	55.8	55.4	54.1	74.8	73.0	71.0
Qc	0.8	0.64	-0.8	0.8	-0.8	-2.4	4.0	2.4	0.8	3.4	2.4	-0.8	2.4	-0.8	-4.0

試験番号	6			7			8			9			10		
測点	0	120	240	0	30	120	0	120	240	0	120	180	0	180	
失熱量 Re	22.7	22.0	21.7	22.1	21.1	20.1	22.4	20.9	20.4	22.4	21.0	20.0	22.0	21.0	
Qa+Qe	11.8	9.8	7.9	2.9	1.6	0.3	3.4	1.3	0.7	2.7	1.3	0	2.7	0.13	
Qs	0	0	0	94.4	93.3	92.1	83.9	82.4	81.4	29.5	29.1	28.8	29.5	29.2	
Qc	-0.8	-1.6	-2.4	-0.8	-2.4	-4.0	-0.8	-3.2	-4.0	-0.8	-2.4	-4.0	-0.8	-2.4	

試験番号	11			12			13			14			15		
測点	0	60	210	0	30	120	0	120	240	0	60	120	0	60	180
失熱量 Re	22.5	22.4	21.9	22.5	22.2	21.5	23.5	23.0	22.8	25.4	25.2	24.6	25.4	24.6	23.4
Qa+Qe	3.4	3.2	2.5	4.4	4.0	3.1	4.7	4.0	3.8	8.1	7.8	7.0	8.1	6.7	5.4
Qs	8.3	8.2	8.2	4.2	4.2	4.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Qc	0	-0.16	-0.96	0.48	0.16	0.48	1.6	0.8	0.48	2.4	2.1	1.1	2.4	0.8	-0.8

試験番号	16			17			18			19			20		
測 点	0	120	210	0	180	240	0	60	120	0	60	120	0	60	120
失熱量 Re	24.7	23.7	23.1	26.2	25.5	24.7	29.1	28.4	26.4	23.3	22.8	22.0	25.7	24.2	23.3
Q _a +Q _e	6.7	5.4	4.8	10.0	9.1	8.0	15.4	12.7	11.8	4.0	3.4	2.3	6.03	5.63	4.82
Q _s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68.4	68.0	67.4	31.08	30.97	30.74
Q _c	2.4	-0.32	-0.96	-0.32	-0.8	-1.6	1.6	-1.6	-2.7	2.4	1.6	0.3	1.60	1.12	0.16

試験番号	21			22			23			24			25		
測 点	0	60	120	0	60		0	60	120	0	60	90	0	60	
失熱量 Re	25.7	23.7	23.4	23.7	22.7		24.4	23.7	23.2	23.2	21.7	21.4	23.25	22.75	
Q _a +Q _e	6.03	5.36	4.96	5.36	4.02		6.70	5.76	5.09	5.09	3.08	2.68	5.36	4.69	
Q _s	57.11	56.77	56.57	70.97	70.11		66.01	65.46	65.07	118.38	116.23	115.80	156.35	155.41	
Q _c	1.60	0.80	0.32	0.80	-0.80		0.80	-0.48	-1.12	-1.12	-3.52	-4.00	-1.60	-2.40	

試験番号	26		
測 点	0	60	120
失熱量 Re	22.9	22.4	21.9
Q _a +Q _e	4.69	4.02	3.35
Q _s	23.92	23.77	23.63
Q _c	-1.60	-2.40	-3.20

試験することができた。

降雪重量 W が $1.0 \times 10^{-4} \text{ gr/cm}^2 \text{ sec}$ 以上になると、いずれの試験でもスノージャムを発生した。特にこの中でも、No24, No52の試験は、この地域でも本格的な降雪があった時であり、流水の温度降下が大きく、 0°C に達した後、スノージャムを生成し、これを流送する状態がはっきりと観察された。

実測結果全体をみると、流水の冷却に最も大きな影響を与えるのは降雪量（降雪強度）であり、他の気象条件の影響は、これにくらべて著しく小さい。表-2は各失熱量を試験別にまとめたものであるが、降雪による失熱が $156 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}$ と大きな値を示したのに対し、放射による失熱は、 $20 \sim 29 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}$ 、対流と蒸発によるそれは $1.8 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}$ と各試験による変動が少なく、かつ小さな値を示した。

N-3 理論値と実測値の比較

本試験は2回に分けて行った。一回目は12月末から1月中旬にかけて行ったもので、試験番号で①～⑩である。降雪の無い時の実測値はかなりの精度で計算値と一致した結果を得た。（図-4の②、⑥、⑩、図-7の⑰）

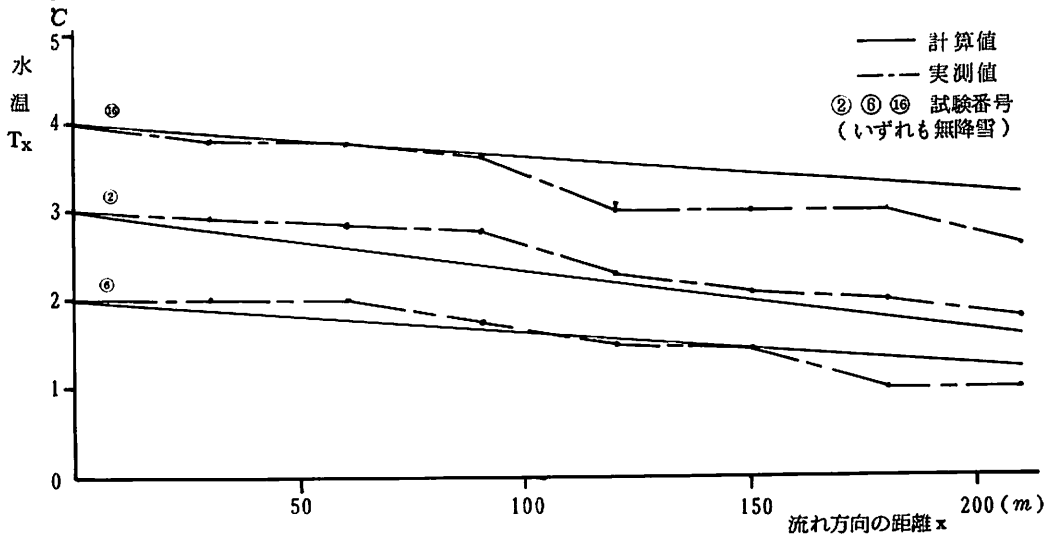


図-4 流水の温度低下(1)

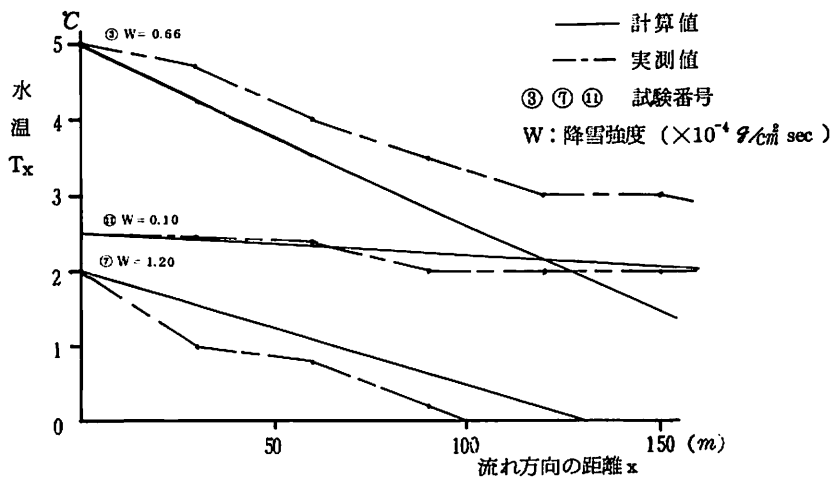


図-5 流水の温度低下(2) (1時間降雪量より W を求めた場合)

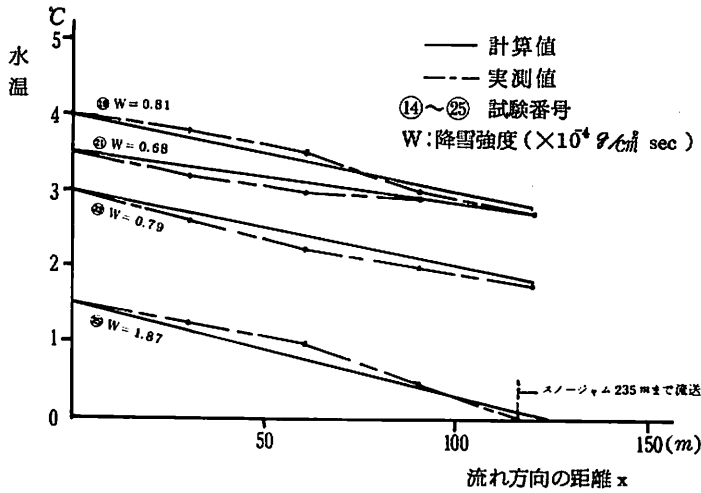


図-6 流水の温度低下(3)

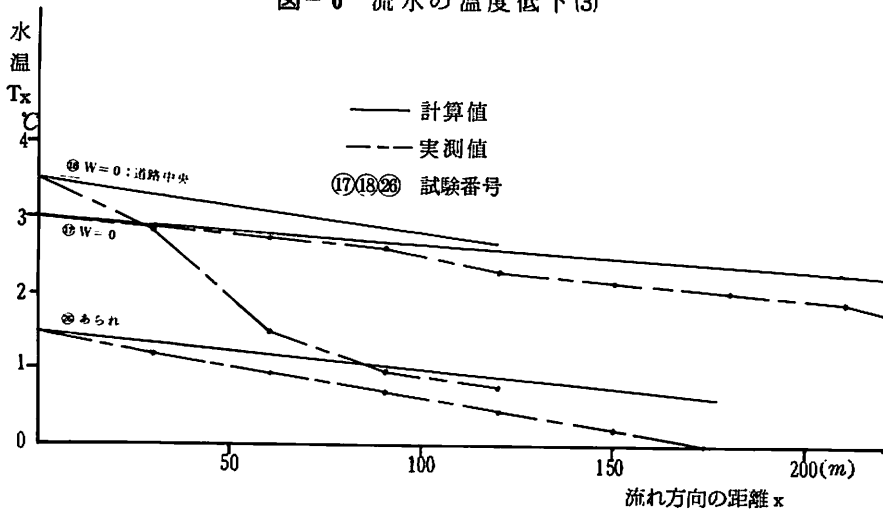


図-7 流水の温度低下(4)

しかし、試験⑪、③、⑦のように、降雪が多くなると計算値と実測値の差が大きくなる傾向があることが認められた(図-5 ⑪、③、⑦参照、降雪重量は、この順に、0.10、0.66、1.20 ($\times 10^{-4}$ gr/cm² sec)である)。

降雪の無い時は比較的良好に一致した値を得ているのに、降雪がある時、一致しなくなるということは、何か試験方法に悪い点があったのではないかと考え、2回目の試験を一月下旬の降雪の最も大きい時期を選び、降雪量の測定に特に注意を払って行った。前回の試験では一時間という長い観測時間をとって一時間当りの降雪量を実測した。しかし一時間の間には降雪状態は変化しその強度は一定ではなく、しかも降雪が流水の冷却に最も大きな影響を与えるということから考えても、一時間降雪量から降雪強度 (gr/cm² sec)を求めたことは適切ではなかったと考えられた。

そこで2回目の試験(⑩~⑳)では、このことを考慮して、10~15分という短時間に迅速に測定したがその結果は、降雪量が0.68~1.89 ($\times 10^{-4}$ gr/cm² sec)という本地域でも最高の降雪状態の時も含めて計算値と実測値はよく一致した(図-6、⑩、⑫、⑬、⑭)。

なお、試験㉑(図-7)は、短時間観測による降雪量をとったにもかかわらず、⑩~⑭と比較すると精

度が劣っている。しかし、この試験は雪があられに変わった時であり、降雪による失熱量の計算式 $Q_s = (T_x + 80 + 0.49 |T_a|) W$ において、降雪(あられ)の温度を気温 T_a と同じとみたところに誤差が生じたものと思われる。

以上、全体として、気象条件、流量などを正確につかむことさえできるならば、実測値は理論による計算値とよく一致するものと認められる。

V 流雪道路の特性と設計に必要な基礎的事項

流雪道路は、路面に水深で1~5 cm程度の水を一様に流して、融雪機能をもたせると同時に、車の運行、人の歩行が可能なものとしなければならない。このことから、流雪道路の設計に当っては、これらの条件を考慮した融雪・流雪可能距離を求め、さらに地形(道路勾配)などの制約条件の下で適切な一区間の設計距離を設定することが必要である。

次に、理論的に明らかにできた流雪道路の若干の特性と関連づけて、これらのことについて考察する。

V-1 流雪道路の融雪距離について

水温が0℃以上である限り雪を融かす能力をもっているわけであるから、流水が T_0 (℃) で流入してきてから0℃に下がるまで流下する距離を流雪道路の融雪可能距離とみなすことができる。これは(1)式で $T_x = 0$ (℃) とおいて得られる(1)式で表わすことができる。

先の実測値との比較から、流水の融雪に伴う水温低下を理論式でほぼとらえられることが分ったから、融雪距離 L についても(1)式で与えられるとみてさしつかえないだろう。

この融雪距離 L は(1)式によって流量 $q = vh$ に比例することが分る。この関係を水源の温度 T_0 をパラメータとして図-8に表わした。この際、(1)式に適用する A 、 B の値は、本試験期間中出现した最悪の気象

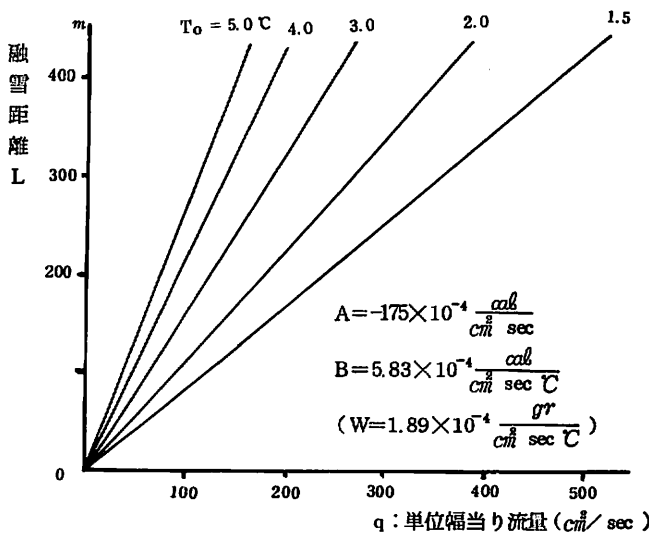


図-8 水源温度 (T_0) による流量と融雪距離

条件(試験②)で得られた値; $A = -175 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}$, $B = 5.83 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}$, $W = 1.89 \times 10^{-4} \text{ gr/cm}^2 \text{ sec}$ をとって計算した。

単位幅当り流量 q ($\frac{\text{cm}^3}{\text{sec}}$) は, 道路勾配 I をパラメータとして水深 h (cm) によって与えられるが, 流速 v (cm/sec) の公式として簡単のためにマンニングの公式

$$v = \frac{1}{n} h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (\text{m/sec}) \quad \dots\dots\dots(12)$$

をとると, $q = v h = \frac{1}{n} h^{\frac{5}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots(13)$

で与えられる。

現地の流雪道路について, (v , h) の実測値から粗度係数 n の値を求めると, 表-3 に示すように, 区間長 120 m, 勾配 0.034 の道路については $n = 0.0099$, 区間長 240 m, 勾配 0.085 の道路については $n = 0.0094$ が得られた。

表-3 流速, 水深の測定とマンニングの粗度係数の算出

$$v = \frac{1}{n} h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (\text{n の値は, } v \text{ (m/sec), } h \text{ (m) にとったときの値})$$

$v(\text{cm/sec})$	$R(\text{cm})$	n
56	0.4	0.0083
62	0.4	0.0065
71	0.6	0.0085
69	0.7	0.0099
66	0.8	0.0112
83	0.9	0.0091
86	1.0	0.0102
89	1.0	0.0096
88	1.1	0.0104
94	1.2	0.0103
95	1.4	0.0113
100	1.5	0.0112
102	1.5	0.0110
107	1.5	0.0105
125	2.0	0.0109
	平均値	0.0099

$I = 0.034$ (区間長 120 m)

$v(\text{cm/sec})$	$R(\text{cm})$	n
88	0.4	0.0083
83	0.6	0.0115
109	0.6	0.0089
130	0.7	0.0082
115	0.7	0.0093
130	0.9	0.0097
136	1.0	0.0099
164	1.0	0.0083
157	1.2	0.0097
164	1.3	0.0098
176	1.5	0.0101
204	1.7	0.0095
	平均値	0.0094

$I = 0.085$ (区間長 250 m)

図-8 (a)式)からは、融雪距離 L は流量 q に比例し、 q は(a)式から $h^{\frac{5}{3}}$ に比例するから、与えられた流雪道路で、水深 h を大きくすれば融雪距離も大きくなることになるが、後述するように、実察に流し得る流雪量は、歩行可能条件から限定されると考えると、融雪距離が、従って道路の一区間の設計長が限定されてくることになる。

V-2 流雪道路の流雪距離について

(a)式から融雪距離が求められるが、流水が 0°C に達してもなおコンベア的に雪を運ぶ働きをするので、更に大きな距離の無雪化を期待できる。このプラスアルファが流雪距離である。

流水は 0°C に達すると降雪の融雪能力を失い、スノージャムを生成しつつ流れ続ける。しかし流下するにしたがいスノージャムの密度が増し、これが流水の運搬能力を超えると、その地点からスノージャムは沈滞し始める。このような状態になると流水は進路を曲げ道路端等を局部的に流れるようになり、スノージャムの上には積雪が始まるようになる。

試験No.24, No.25は本格的な降雪にあったときの観測である。両者を比較すると次の通りである。

試験番号	降雪重量	水深	流速	融雪距離	流雪距離	有効距離
No.24	1.43 gr/cm ² sec	0.7 cm	122 cm/sec	90 m	75 m	165 m
No.25	1.89	1.0 cm	150	115 m	120 m	235 m

No.25の方が降雪重量が大きいにもかかわらず、流量を大きくしてやったため、融雪距離で25 m、流雪距離では45 mも、その差が大きくなっている点が注目される。

流雪距離については、データが少なく理論的検討も不十分なので確固としたことをいえる段階ではないが、No.25の試験はこの地域でも本格的な降雪時のものであり、流雪量も後述の歩行限界以下にあるので、有効距離235 mという値は、流雪道路としての機能を十分もっていることを示すものといえよう。この実測例からみても、流雪距離は、条件によっては融雪距離以上の距離も期待できるので、今後は更にデータをそろえ、流量などとの関係を明らかにする必要がある。

V-3 人の歩行限界について

自動車専用道路ならばともかく、農村連絡道路として住民が頻繁に通学、通勤その他の目的で歩行利用する流雪道路にあっては、流水による融雪・流雪機能だけでなく、人の歩行の限界が重要な問題となる。

既設の流雪道路についてみると、道路いっぱい勢いよく流水され、人の歩行が困難となっている箇所が多い。これほどまでに流水しなければ道路の無雪化を保てないようでは、地形条件を考慮し、経済性に基づいた設計であっても、明らかに片手落ちといわざるを得ない。人が全く支障無しに歩行できる設計はこの道路の機能から考えても無理ではあるが、ある程度の支障はあっても歩ける状態が求められよう。この歩行限界は、子供、大人によっても異なり、個人差も大きく、ある一定の基準を求めることは困難である。

しかし、今回一定の基準を求めることを目的に、一般の大人を対象とし、道路勾配0.034, 0.085の二箇所、流雪量を変化させ、そのつど2~3人に雪国に普通用いるゴム長靴をはいて歩いてもらい、その限界を推定した。流水の水深は大きくても2.0~2.5 cmで、これに対し長靴の深さは20 cm以上であり、歩きにくいという状態は、流水が長靴を伝わって上まであがる、あるいははね上がるという状態であるとした。この状態を水深~流速のグラフ上に△印でプロットしたのが図-9である。×印は歩行困難状態を示す。

さて、この流水が長靴の上まで上がるという状態は、流水の運動エネルギーが位置のエネルギーに変わることによるとすると、流水の運動エネルギーフラックス

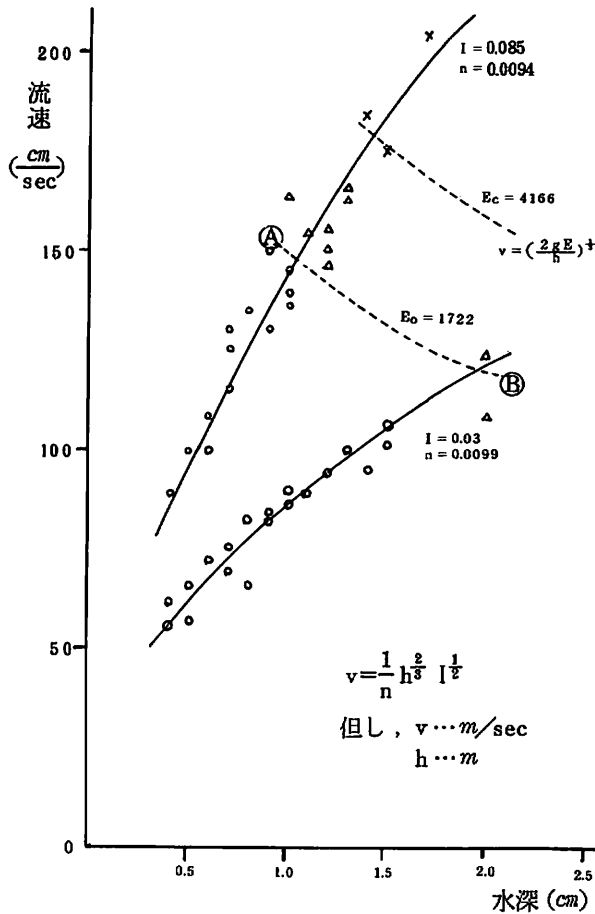


図-9 流速・水深と歩行限界線

$$E = q \times \frac{\tau_w v^2}{2g} = h \frac{\tau_w v^3}{2g} \dots\dots\dots(14)$$

が一定値を越えると歩きにくい状態から、さらには歩行困難状態へと変わると考えた。h ~ v 座標空間では、この歩行限界線は、(14)式から E = const 線で支えられる。すなわち

$$v = \left(\frac{2gE}{\tau_w h} \right)^{\frac{1}{3}} = v \left(\frac{h_0}{h} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots(15)$$

(但し、 h_0 、 v_0 は $E_0 = \frac{h_0 v_0^3}{2g}$ によって E_0 の値を与える一つの基準値)

となり、 $v \propto 1/h^{\frac{1}{3}}$ となる。図-9に示すように、歩きにくさを感じ始める(A)、(B)2つの実測点は、 $E_0 = 1722 \left(\frac{gr \cdot cm}{sec} \right)$ 線で、歩行困難は $E_c = 4166 \left(\frac{gr \cdot cm}{sec} \right)$ 線ではほぼ表わされることが認められた。

なお、歩行限界を与えるエネルギーフラックス E_c がわかると、歩行限界流量 q_c は

$$q_c = v_c h_c = \left(\frac{2gE_c}{\tau_w} \right)^{\frac{1}{3}} h_c^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots(16)$$

で与えられる。

以上から、もう少し実測データを積み重ねれば、流雪道路の歩行限界は、(14)式の運動エネルギーフラックスを指標として与えることが可能であると考えられる。

V-4 流雪道路一区間の制限距離について

流雪道路の流水の機能は、前述の融雪及び流雪機能であり、一区間の制限距離は、融雪距離と流雪距離を加えたものとして算定できる。この際、流水量をどの程度にとるかによってその距離は大きく変わってくる。融雪距離の方は、(4)式によって気象条件を考慮して算定でき、これは流水量に比例して大きくなる(図-8)が、流水量の上限値として前述の歩行限界流水量を用いなければならぬことから、融雪距離は確定してくる。流雪距離については前述したようにさらに今後の研究にまたねばならぬことが多い。

熱的・工学的に流雪道路の一区間の制限距離が確定できたとしても、取水用横断水路の位置設定は、経済性を考慮すると地形条件からも限定されてくる。取水口の水温(T_0)によって融雪距離は大きく変化するわけであるから(図-8参照)、導水路の延長が長くなると、その間で水温が低下するだけ取水口での水温が低くなり、したがって融雪距離も短くなるから、経済的にも二重に不利になる。従って、横断水路の位置は、近接する河川があり、導水路ができるだけ短くてすむ所に設定すべきである。

また、一区間中に急勾配から緩勾配へと勾配が変化するところが融雪距離以上のところにあると、この部分でスノージャムが沈滞しやすくなるから、このような勾配変化はできるだけ避けるべきである。

流雪道路の設計に当たっては、以上のような条件を総合的に検討すべきであるが、現況の実施例ではこのようにことを考慮せず、地形条件に片より過ぎて設計しているところに、種々の問題を生じているようである。

VI そ の 他

VI-1 路面の均平度について

流雪道路では、できるだけ起伏を少なくした方が、融雪上一層効果的であるが、施工上難しく、実際にはかなりの路面の起伏がみられる。取水用横断水路から0.7～0.8 cm及び1.5 cmオーバーフローさせて、路面の水深分布と流速分布を実測してみると、全体的に道路端は水深、流量が大きく、道路中央は小さくなってしまっている。

このような路面の起伏が大きいと、起伏の高い部分への積雪を防ぐために流水量を増やさねばならず不利である。従って、路面仕上げを入念に行うと共に、盛土後の圧縮・圧密沈下などを十分考慮して、できるだけ路面の起伏を小さくすることが施工上肝要である。

VI-2 道路曲線部の設計について

道路曲線部の設計は、普通自動車が遠心力で滑り出し、転倒がない条件から、曲率半径に対応して半径方向に片勾配がつけられる。しかし、流雪道路においてこの条件から片勾配をつけると、大きすぎてカーブの外側に水が流れなくなり、そこに積雪を生じてしまう。そこでカーブの外側も内側も一様に流水できるように、流水に働く遠心力と、重力の路面にそった分力とが釣り合うような片勾配をつける必要がある。近似計算によると、このための片勾配はわずかでよいので、道路の曲率半径に対する自動車の制限速度を普通よりも低くおさえることにして、片勾配は流水の条件からきめてやる方がよいと考えられる。

VI お わ り に

本論では、スノージャムの流送距離の問題については十分な解析、試験ができずに終わったが、実際の流雪道路の設計指針の確立には、今後この点の研究が必要である。

流雪道路の流水の冷却は、降雪量などの気象条件と流水量を正確に把握さえすれば、理論式(4)によって

よく表わすことができることが分った。従って、設計上の融雪距離も、上式から導かれる(4)式によって最悪の条件を基準に算定すれば決定することができる。

流雪道路に要求される特性から、歩行限界条件に対応する限界流量について一つの水理学的基準を与えることができた。これは流雪道路の一区間の設計長の決定に役立つであろう。

以上、本論は、流雪軌道の研究(中俣)で明らかにされた知見を利用して豪雪山村地における住民の積雪による交通障害からの解放を願って流雪道路についてまとめたものであるが、取水横断水路の構造などに工夫を加えればもっと低平な土地においても、この流雪道路の融雪、流雪方法を生かすことができるものと思われる。

参 考 文 献

- 藤沢 和, 他(1977): 現地における融雪道路のモデル実験について, 農業土木学会講演要旨集, 昭52年度, 312~313
中俣三郎(1971): 流雪軌道の基礎実験, 鉄道技術研究所速報, 71-213
中島芳文(1973): 流雪道路に関する基礎的研究, 新潟大学農学部土地保全学研究室卒業論文。