

融雪に関する一実験

森田 勇* 星野英二* 小川芳昭**

1. ま え が き

北海道のように年間の約半分が雪の季節となる積雪地における河川の春の融雪出水量は、3～4月で、年間総流出量の約40%といわれ、最大流量も台風期に匹敵するほどである。したがってその量を推定することは、洪水予報、河道計画、ダム貯水など、雪国での治水、利水上における諸問題を取り扱うにあたり、きわめて重要である。従来より融雪に関する研究は数多くあるが、融雪による河川流出量の推算法は大別して、熱収支に基づく理論的方法と気温日数 (Degree day) による経験的方法

とに分けられる。河川研究室では、昭和36年に融雪機構の実験を行ない、経験方法であるデグリー・アワー法を用いて、融雪量推定の一方法を提案している。本実験では、昭和36年の実験と同様の実験装置をつくり、いろいろの気象と融雪量を測定したが、図-1の例に示されるように、融雪量の時間変化と気温の変化の間に密接な関係があると考えられるので、融雪量推定の Index として気温を採用し、考察をすすめた。その結果融雪量はデグリー・アワーによって推定でき、その時間変化は一定の式で表わしうることを確かめた。

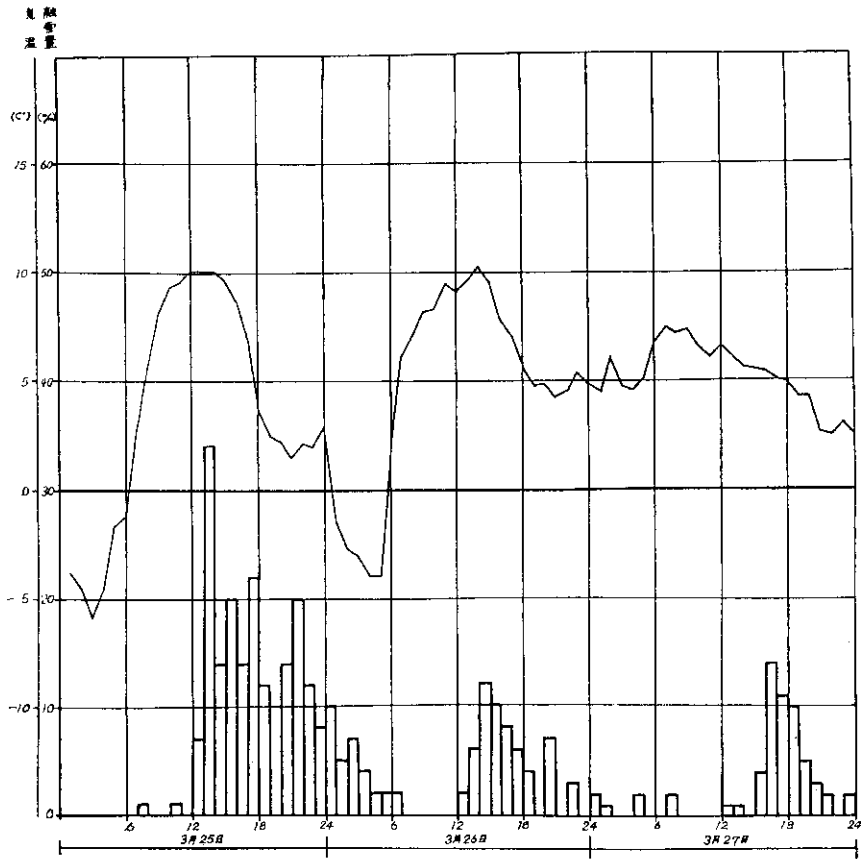


図-1 気温変化と融雪量の一例

2. 実験の目的

デグリー・アワー (以下 $D \cdot H$ と書く) と融雪量 (以下 M と書く) の関係から、平地における融雪末期のデグ

リー・アワーファクター (以下 $D \cdot H f$ と書く) を求め、気温の時間変化または最高、最低を観測することにより M を推定し、さらに時間融雪量 (以下 M_t と書く) を

*河川研究室 **同室長

求める。

3. 実験装置と方法

本実験装置は、土木試験所河川研究室屋外実験場に設けられた。

図-2は、この実験に用いた装置の概略図で、雪受台および観測室の地下部分は、鉄筋コンクリートで製作した。

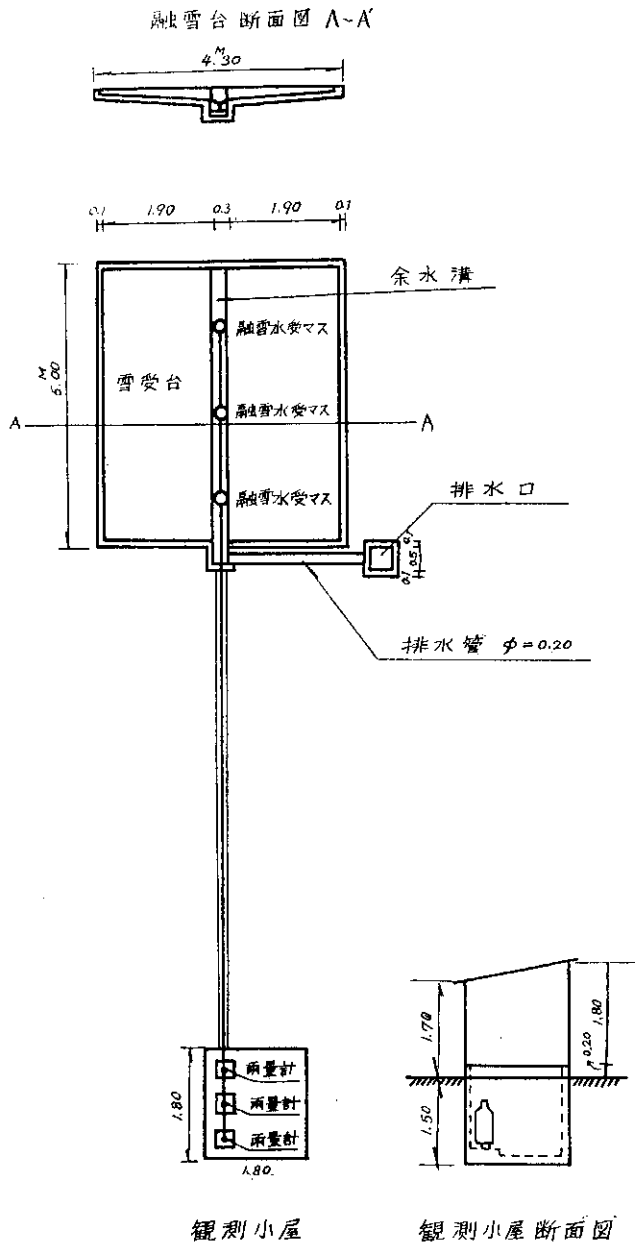


図-2 実験装置の概略図

また、融雪水受マスは、図-3のように径30cmのものを3個製作し、設置した。融雪水受マスのみを設けた場合はマス直上雪柱部の融雪水が早く流出するので、エネルギー勾配を生じ、周囲の融雪水も流入して、単位面積当たりの融雪量は過大な値となる。この欠点を除くため融雪水受マスは面積の大きい雪受台の中に設け、中央部

の均一と思われる部分の融雪水を取水するようにした。

また、余水溝、排水管を設け、余分の融雪水は排水口へ導いた。

融雪水受マス

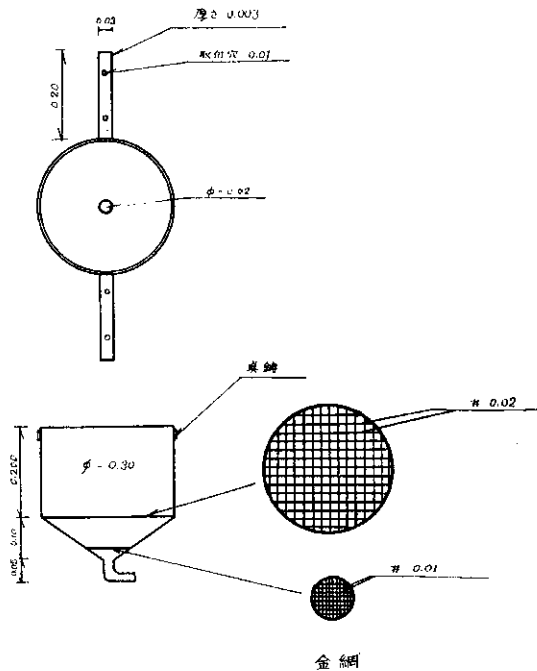


図-3 融雪水受マス

雪受台には平均粒径3.0cmの砂利を約30cm厚に敷き、融雪水が透過しやすいようにした。

実験施設は、設置個所の関係で2月下旬に完成したが積雪量が少なくなっていたので施設付近の雪を粉状にし、人工的に深さ1mの積雪を再現した。したがってこの実験は乱された積雪の融雪実験に相当することになる。

以上のような条件で、3個の融雪水受マスに入ってきた融雪水を径19%の硬質塩化ビニールパイプにより観測小屋へ導き、それぞれの量を3個の長期巻転倒マス型自記雨量計で記録させた。

また気温の観測は地表2mに設けた百葉箱内の週巻自記温度計1台、ルサフオード最高最低寒暖計1組によって行なった。

4. 実験結果

昭和42年における乱された積雪の融雪実験は、融雪期と考えられる3月8日から4月3日までの期間で行なった。その結果は表-1のとおりである。

5. デGREE・アワーと気温の関係

気温が0℃以上になるとただちに融雪が始まるわけではないが、他に適当な方法がないのでここでは、プラス気温はすべて融雪に関係があると考えた。したがってD・Hは0℃以上の気温の時間積分値であって自記温度

表-1 実 験 結 果

No.	日 月	D.H デブリ- アワー (C-hr)	T _{max} 最高 気温 (C)	T _{min} 最低 気温 (C)	T _{mean} 平均 気温 (C)	T _{mean} 前日の最 低を用い た平均気 温	Q ₁ 測定量 (mm)	Q ₂ 測定量 (mm)	Q ₃ 測定量 (mm)	Q _{mean} 平均測 定値 (mm)	R 融氷量 (mm)	M ₁ 融雪量 (mm)	M ₂ 融雪量 (mm)	M ₃ 融雪量 (mm)	M _{mean} 平均 融雪量 (mm)	t ₀₁ t ₀₂ t ₀₃ { 気温の peak 時と 融雪の peak 時との 差 (hr) }	t _{max1} t _{max2} t _{max3} (気温の 0°C 時と 融雪の 始時との 差)	t _{mean} 平 均	L _{mean} 平 均	天 候	MID・H デブリ-ア ワー-ア ワー-ア ワー (mm/C-hr)			
1	3. 8	0-1.5	-7.5	-4.5	-	-	0.33	-	4.00	2.2	0.2	0.33	-	4.00	2.2	3.0	-	4.0	0.5	-	晴	-		
2	9	25.1+4.5	-8.0	-1.8	-	-	2.42	1.87	1.31	1.9	0.2	2.22	1.67	1.11	1.7	0	0.5	0	0	0.5	0.5	雨	0.068	
3	10	24.4+5.0	-6.0	-0.5	-	-	4.44	4.11	1.00	2.9	6.1	4.44	4.11	1.00	2.9	2.0	1.0	1.0	1.3	4.0	5.0	曇後 雪	0.119	
4	11	0-6.0	-12.0	-9.0	-	-	1.78	1.44	0.33	1.2	0	1.78	1.44	0.33	1.2	0	-1.0	-2.0	-	1.5	-	曇後 晴	-	
5	12	0-1.0	-12.7	-6.9	-	-	1.11	0.56	2.45	1.4	0.6	1.11	0.56	2.45	1.4	1.0	5.0	1.0	2.3	-	-	曇後 雪	-	
6	13	16.0+3.0	-3.8	-0.4	-	-	1.89	0.89	4.22	2.3	2.8	1.89	0.89	4.22	2.3	6.0	7.0	4.0	5.7	0	1.0	3.0	0.144	
7	14	0-1.5	-7.6	-4.6	-	-	1.33	-	1.45	1.4	5.6	1.33	-	1.45	1.4	1.0	-	-	1.0	-	-	にわか 雪	-	
8	15	15.6+1.8	-8.9	-3.6	-	-	9.34	1.22	-	5.3	2.0	9.34	1.22	-	5.3	0	3.0	-	3.0	1.5	0.5	1.0 晴後 雪	0.340	
9	16	45.4+5.0	-5.1	-0.1	-	-	8.89	3.78	-	6.3	0.6	8.89	3.78	-	6.3	6.0	9.0	-	7.5	3.5	4.0	3.8 曇後 雪	0.139	
10	17	98.4+9.0	-3.9	+2.6	+	+	16.68	17.66	-	17.2	-	16.68	17.66	-	17.2	1.0	2.0	-	1.5	4.0	5.0	4.5 晴	0.175	
11	18	47.4+5.5	-3.2	+1.2	+	+	14.90	14.00	-	14.5	0	14.90	14.00	-	14.5	0	1.0	-	1.0	4.0	4.0	4.0 曇後 雪	0.306	
12	19	16.4+2.5	-2.5	0	-	-	12.32	12.46	-	12.4	0.5	12.32	12.46	-	12.4	2.0	0	-	2.0	2.5	3.5	3.0 曇後 雪	0.756	
13	20	6.3+1.2	-3.5	-1.2	-	-	1.11	1.56	-	1.3	2.7	1.11	1.56	-	1.3	7.0	7.0	-	7.0	3.0	5.0	4.0 曇後 雪	0.206	
14	21	8.0+2.7	-6.0	-1.7	-	-	1.45	1.33	-	1.4	2.9	1.45	1.33	-	1.4	6.0	6.0	-	6.0	1.5	0	1.5 曇後 雪	0.175	
15	22	13.6+1.1	-7.5	-3.2	-	-	7.91	9.46	-	8.7	7.9	0.01	1.56	-	8.7	1.0	2.0	-	1.5	0.5	1.5	1.0 曇後 雨	0.059	
16	23	34.0+4.4	-1.6	+1.4	-	-	17.33	20.89	-	19.1	17.0	0.33	3.89	-	19.1	1.0	1.0	-	1.0	4.5	3.5	4.0 曇後 雪	0.062	
17	24	16.0+3.0	-3.2	-0.1	+	+	0.56	1.44	-	1.0	3.5	0.56	1.44	-	1.0	6.0	4.0	-	5.0	8.5	6.5	7.5 曇後 雪	0.063	
18	25	100.8+10.5	-5.9	+2.3	+	+	21.00	7.78	7.56	12.1	-	21.00	7.78	7.56	12.1	1.0	1.0	2.0	1.3	5.5	5.5	5.5 曇	0.120	
19	26	116.8+10.2	-4.0	+3.1	+	+	10.08	14.78	17.89	14.3	-	10.08	14.78	17.89	14.3	0	2.0	1.0	1.5	5.5	6.5	6.5 曇	0.122	
20	27	126.8+7.4	+4.2	+5.8	+	+	6.78	13.78	17.00	12.5	18.0	6.78	13.78	17.00	12.5	5.0	5.0	-	3.0	8.0	9.0	7.3 曇後 晴	0.099	
21	28	49.6+3.3	-2.4	+0.5	+	+	25.05	8.88	-	17.0	3.7	25.05	8.88	-	17.0	1.0	0	-	1.0	-	-	曇後 曇	0.343	
22	29	38.2+3.8	-3.9	-0.1	+	+	19.45	7.67	6.00	11.0	0.8	19.45	7.67	6.00	11.0	1.0	1.0	-	1.0	4.0	2.0	0 曇	0.288	
23	30	155.6+11.1	+3.8	+7.5	+	+	8.34	21.22	23.42	17.7	-	8.34	21.22	23.42	17.7	6.0	5.0	4.0	5.0	-	-	快 曇	0.114	
24	31	139.1+7.8	+4.4	+6.1	+	+	28.25	17.38	-	22.8	11.5	26.75	15.88	-	21.3	1.0	3.0	-	2.0	-	-	曇後 曇	0.153	
25	4. 1	95.4+6.1	+2.8	+4.5	+	+	36.70	7.08	-	21.9	10.3	36.40	6.78	-	21.6	2.0	3.0	-	2.5	-	-	曇後 曇	0.226	
26	2	92.0+6.5	+2.3	+4.4	+	+	35.20	18.00	-	26.6	-	35.20	18.00	-	26.6	0	3.0	-	3.0	-	-	曇後 曇	0.289	
27	3	136.0+9.1	+1.7	+5.4	+	+	8.89	29.10	-	19.0	0	8.89	29.10	-	19.0	2.0	0	-	2.0	-	-	高 曇	0.140	
																			約2hr				約4hr	0.196

□は降雨量

グラフからプランメーターで求めた。

6. デグリー・アワーと融雪量

$D \cdot H$ と M の関係は、図-4のように対数紙にプロットしてみると一次式で表わされるとしてよいようである。

すなわち

$$M = 0.196 D \cdot H \text{ (mm)} \dots\dots\dots(1)$$

図中の黒印(9.16, 22, 23, 24日)は、雨あるいは、みぞれのときのもので、概して M は小さい傾向にある。

最も観測されやすい日平均気温(最高と最低の平均値)と融雪量の関係は図-5に示されるとおり相関性は小さいようなので、やはり M は $D \cdot H$ によって求めるのが最良であると考えられる。

7. $D \cdot H$ ファクター ($D \cdot H \cdot f$)

(1)式の定数は $D \cdot H$ ファクター ($D \cdot H \cdot f$) と呼ばれるもので、従来の融雪解析に用いられているデグリー・デファクター ($D \cdot D \cdot f$) に相当する。それゆえ $D \cdot H \cdot f$ は $D \cdot D \cdot f$ と同様に融雪期の月日がたつにしたがって大きな値になる傾向があると予想されたのであるが、実験結果によると、日別の $M/D \cdot H$ すなわち $D \cdot H \cdot f$ は図-6のようになり、3月19日が大きい値を示しているが、他は0~0.4

の中の中にあり、一定値と考えられる。

8. M の時間的变化

図-7は気温の peak と融雪量の peak との時間的ずれを示したもので、積雪深が小になるにつれ小さくなると考えられたが、今回の実験では、はっきりした傾向はつかめず、平均な値として約2時間を得た。また気温が0℃を切る時間と融雪が始まる時間のずれは、図-8のとおりで、平均して約4時間であった。いま融雪の時間的变化が、次式で表わされるとする。

$$M_t = K t e^{-At^n} \dots\dots\dots(2)$$

実験結果から、 $t = 4 \text{ hr}$ で $M_t = M_{max}$ であり、ここでは $\frac{dM_t}{dt} = 0$ 、また $t = 8 \text{ hr}$ で、 $M_t = \frac{1}{2} M_{max}$ となるので、 $t = 16 \text{ hr}$ で $M_t = 0$ になると仮定すると、

$$t = 4 \text{ で } \frac{dM_t}{dt} = 0 \text{ から}$$

$$\frac{dM_t}{dt} = K e^{-At^n} (1 - An t^{n-1}) = 0$$

$$A = \frac{1}{nt^n} = \frac{1}{n4^n} \dots\dots\dots(3)$$

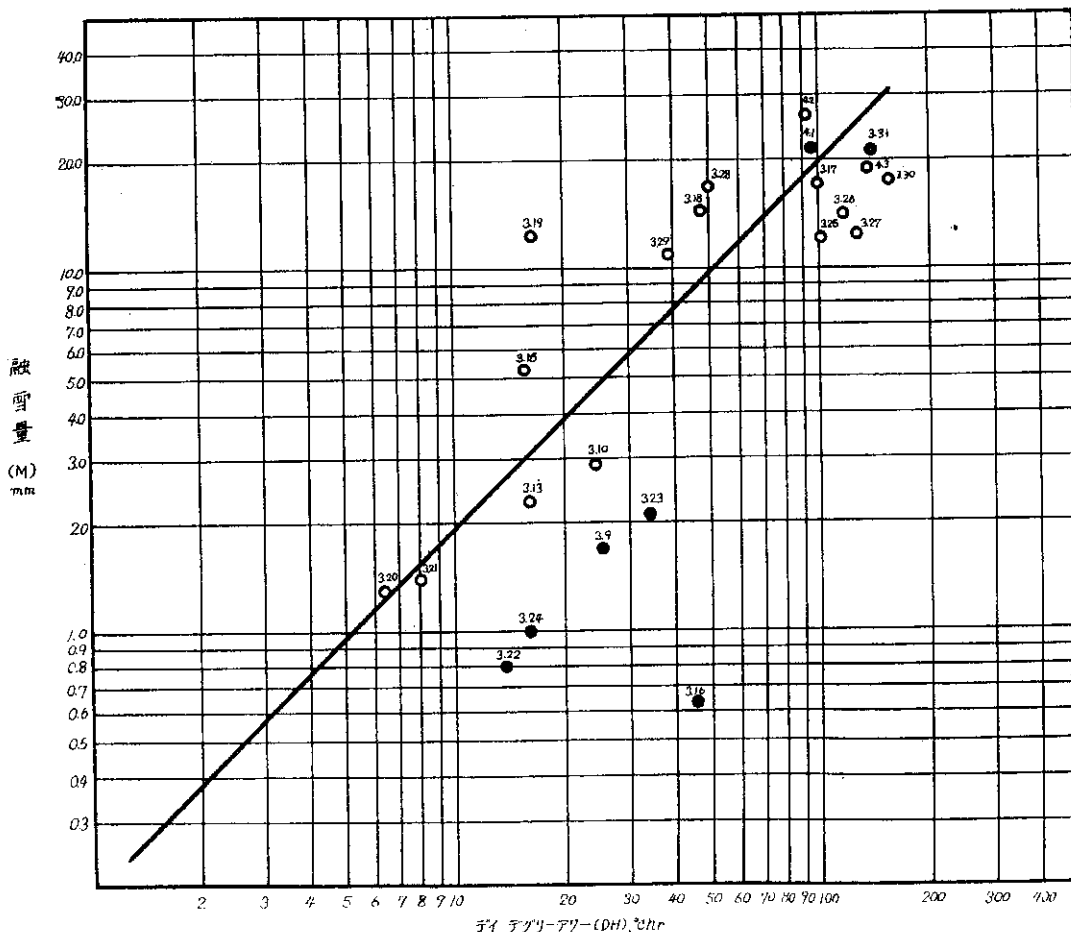


図-4 デグリー・アワーと融雪量

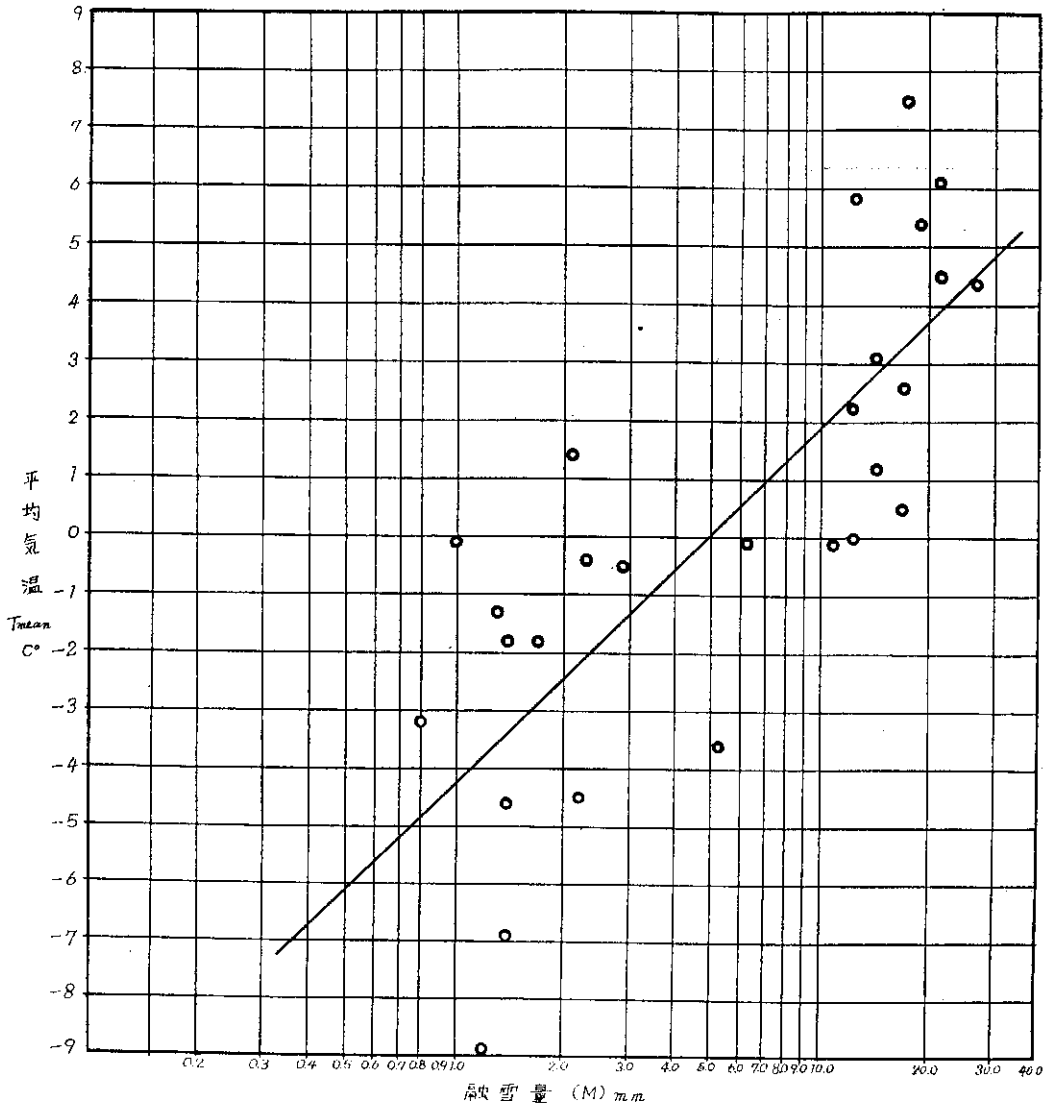


図-5 平均気温と融雪量

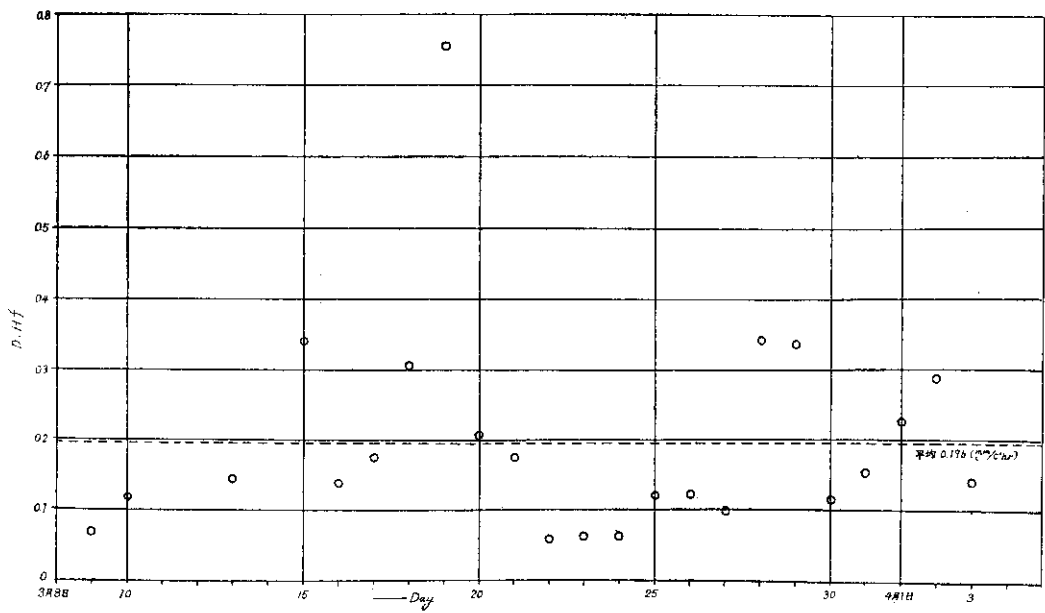


図-6 デグリー・アワーファクターの変化

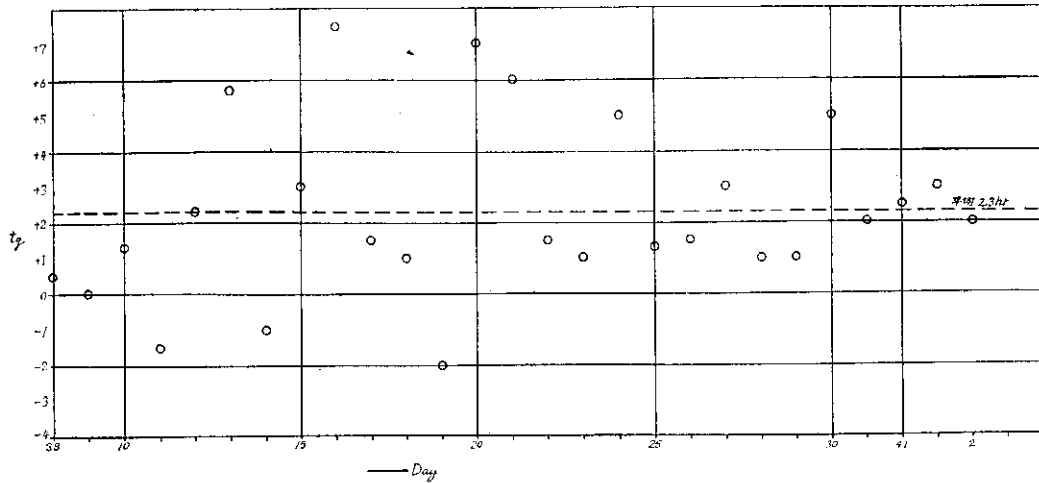


図-7 気温のピークと融雪のピークの時間のずれ

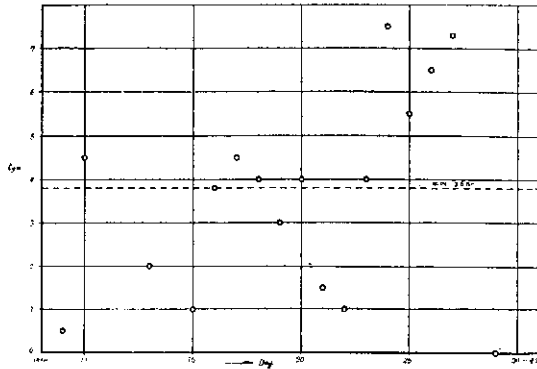


図-8 気温が0°Cを切る時間と融雪の始まりの時間のずれ

$$t=4 \text{で, } M_{max} = K 4e^{-4^2} \dots\dots\dots(4)$$

$$t=8 \text{で, } M_{max} = 2K 8e^{-8^2} \dots\dots\dots(5)$$

(4)と(5)から

$$1 = \frac{4}{16} e^{\frac{1}{n}(2^n - 1)} \dots\dots\dots(6)$$

したがって $\frac{1}{n}(2^n - 1) = 1.39$ となり、この関係から $n \approx 2$

を得る。これを(3)式に入れると、

$$A = \frac{1}{2 \times 4^2} = \frac{1}{32} \approx 0.03 \dots\dots\dots(7)$$

したがって

$$M_t = K t e^{-0.03t^2} \dots\dots\dots(8)$$

となる。

(8)式を $t = 0 \sim 16$ で積分し、 M とすれば

$$M = \int_0^{16} M_t dt = \int_0^{16} K t e^{-0.03t^2} dt \dots\dots\dots(9)$$

$$= K \left[\frac{e^{-0.03t^2}}{(1+1)0.03} - 1 \right] \dots\dots\dots(10)$$

$$= \frac{K}{0.06} \left[e^{-0.03 \times 16^2} - 1 \right] \dots\dots\dots(11)$$

$$= 16.7K \left[e^{-7.68} - 1 \right] \dots\dots\dots(12)$$

となり、(1)式と(12)式から

$$K = \frac{0.196 D \cdot H}{16.7(1 - e^{-7.68})} \dots\dots\dots(13)$$

ここで、 $e^{-7.68} \approx 0$ としてよいから

$$K = 0.0117 D \cdot H \dots\dots\dots(14)$$

ゆえに融雪の時間変化は

$$M_t = 0.0117 D \cdot H t e^{-0.03t^2} \dots\dots\dots(15)$$

としてよいであろう。

この関係をプロットしたのが図-9である。

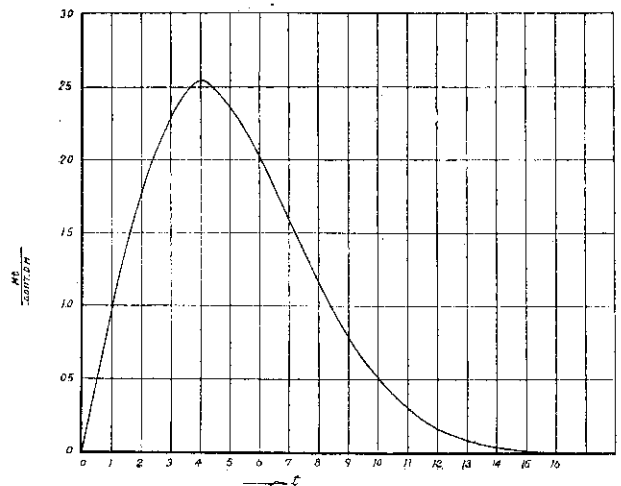


図-9 融雪量の時間的变化

9. む す び

本実験から、次のようなことが明らかにされた。

1. 融雪量はデグリー・アワーの一次の関係で表わしうる。本実験では、 $M = 0.196 D \cdot H$ (mm) であった。
2. 乱された積雪のデグリー・アワーファクターは36

年の自然状態のものよりかなり小さい。この値は、積雪の状態や実験地の地理的条件などで左右されると考えられるので、今後さらに検討しなければならないであろう。

3. 時間融雪量 M_t は

$$M_t = \frac{D \cdot H f}{16.7} \frac{D \cdot H}{t} e^{-0.03t^2}$$

で表わすことができた。

4. 昭和42年度においては、現地（桂沢ダム流域を予定）に試験施設を作り、自記雨量計、自記温度計を設置するほか、地中および雪中の温度勾配と雪表面および、地表面からの熱収支と雪量の変化過程を調べ、本実験施設と並行して、山地を含む一

般流域における融雪機構も追究する。

なお、この実験の遂行に当たり、施設工事、観測を担当した広田郁男技官（現豊平峡ダム建設事務所）・坂口正美君（河川研究室）に謝意を表す。

参 考 文 献

- 土木学会論文集第95号
河川の流出に関する研究……………境 隆雄
桂沢ダム流域の融雪流出について 土木試験所月報165号
土木試験所河川研究室……………村端克己
融雪に関する一実験
第1回北海道開発局技術研究発表会報文集
土木試験所河川研究室……………小川芳昭

* * *