

積雪河川の流出予知の総合研究

北海道開発局 正員 長谷川 茂

まえがき

河川流量の長期予測は、防災計画、利水計画上主要な課題である。従来から、河川流量の予知法に関する研究は多くあるが、長期予測の実用化には多くの問題点がある。本文では、北海道の積雪河川特有の問題である融雪流出について、積雪分布の予知法と一体化された予知法を総合システムとして確立し、併せて、降雨時の表面流出、無降雨時の浸透流出について、年間流量をシミュレートすることを試み実用化するに至った。

河川流域の積雪分布は、地形、風向因子により予測を可能とし、融雪については、Degree hour factorの季節変化があることを明らかにした。降雨による表面流出、浸透水流出は、タンクモデルで模擬し、タンクの物理的構造について提言を試み、年間流況を再現し、地下水位と深い関係があることを報告する。

1. 融雪流出の予知

1.1 積雪分布

融雪流出量の予測を行なう場合には、河川流域内のどの地域にどの程度の積雪量が貯留されているかの積雪量分布の推定をしておくことが重要となる。冬期間は積雪量に関する直接的な情報は、夏期における降雨量の情報に比較して気象条件に制約されて少なくなるので、積雪量調査を実施して補完されているのが実情である。最近では空中写真¹⁾による調査も実施されているが、費用の面で高価である。一方、原田²⁾、丸安等³⁾は、積雪量に関係のある地形因子を取り出して解析している。山口、長谷川⁴⁾が行なった方法は、冬期間における風向と高度、起伏度、傾斜、曲率および地面傾斜の地形因子を $2.0\text{ km} \times 2.0\text{ km}$ にメッシュ分割した格子点と積雪量調査地点および各観測所に求めておき、これと冬期間最大積雪深と見られる時期に積雪量調査を実施した値および同日に各観測所が測定した積雪深の値とを合わせて、多重相関回帰方程式によってメッシュ分割した格子点の積雪量を推定しようとする方法である。積雪深推定の方程式は

$$H_s = A_0 + A_1 X + A_2 Y + A_3 X^2 + A_4 Y^2 + A_5 XY + A_6 P_3 + \dots + A_{17} P_{14} \quad \text{----- (1)}$$

とし、積雪の平均密度の推定方程式は

$$H_p = Q_0 + Q_1 X + Q_2 Y + Q_3 X^2 + Q_4 Y^2 + Q_5 XY + Q_6 P_3 + \dots + Q_{17} P_{14} + Q_{18} H_s \quad \text{---- (2)}$$

とする。また、積雪相当水量 H_w は、 $H_w = H_s \times H_p$ ---- (3) として求める。ここに

H_s : 積雪深 (cm) H_p : 積雪の平均密度 (g/cm^3) X, Y : 地形の位置関係を示す座標値

$A_0, A_1, \dots, A_{17}$, $Q_0, Q_1, \dots, Q_8$: 定数。 また、 $P_3, P_4, \dots, P_{14}$ は地形因子である。

P_3 : 高度 (m) P_4, P_5, P_6 : 起伏度 (半径 2 km 以内、 5 km 以内、 10 km 以内)

P_7, P_8 : 傾斜 (S-N 方向、E-W 方向) P_9, P_{10} : 曲率 (S-N 方向、E-W 方向)

$P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{14}$: 地面傾斜

積雪相当水量はメッシュ格子点で計算されており、流域の総包蔵水量 V は次式で求められる。

$$V = \sum (H_w \cdot Q)_{x,y} = \sum \left\{ (H_s \cdot H_p)_{x,y} + (H_s \cdot H_p)_{x+1,y} + (H_s \cdot H_p)_{x,y+1} + (H_s \cdot H_p)_{x+1,y+1} \right\} Q_{x,y} \quad \text{--- (4)}$$

ここに、 Q : 4 格子点に囲まれた面積、とする。このようにして石狩川上流域と桂沢ダム流域⁵⁾について求めたものが表-1である。また、融雪期の河川流出率については調査率によつて異なり、 $0.6 \sim 0.9$ の範囲にある。

1.2 河川流出量の予測

融雪期の昼夜の温度変動によつて、河川流出量も日サイクルで変動する。これに降雨が伴ったときの融雪洪水

波形はかなり単純化している。融雪洪水量は時間的に変動しているの、モデルを立神単位図法の考えを応用し、気温を融雪因子の代表指標として取扱い、時間単位で予測する方法とした。

基準測水所における河川流量 Q 、基底流量 Q_b 、融雪による流量 Q_s 、降雨による流量 Q_R とすれば

$$Q = Q_b + Q_s + Q_R \text{ ---- (5)}$$

で表わされる。(5)式のうち、 Q_b を除いた直接流出量 Q_s 、 Q_R について立神単位図法を応用する。立神単位図法の仮集中量 $\bar{L}$ を流量の単位 (m^3/s) に換算し、 $\gamma = \frac{1}{dt} (mm/hr)$ とすると

$$\bar{L} = 0.2778 \frac{1}{d'} \cdot \frac{L^{0.2}}{0.7} \frac{dA}{dL} \text{ ---- (6)}$$

となる。ここに d' :定数 L :集中距離 (Km) A :面積 (Km^2)

(6)式を(7)式に書き変える。

$$\bar{L} = 0.2778 \frac{1}{d'} \cdot \frac{L^{0.2}}{0.7} \frac{d}{dL} \left(\frac{L}{L_0} Q_R f \right) \text{ ---- (7)}$$

ここに、 $\bar{L}_0$:融雪時の仮集中量

Q :任意メッシュ内の面積、(Km^2)

R :任意メッシュ内の降水量

l : dL 区間にあるメッシュ内面積の個数

L :基準地実から任意メッシュ内までの距離 (Km)

f :流出係数

また、任意メッシュ内の降水量 R は次式とする。

$$R = R_R + R_S \text{ ---- (8)}$$

$$R_R = \gamma dt' \text{ ---- (9)}$$

$$R_S = \{ T_0 + (H_0 - H_M) \beta \} S_M dt' \quad (0 \leq R_S < H_w + H_w') \text{ ---- (10)}$$

ここに、 R_S :任意メッシュ内の気温による融雪量 (mm/hr)、 R_R :任意メッシュ内の降雨量 (mm/hr) (ただし、任意メッシュ内の温度 T が $T > 0$ の場合は降雨、 $T \leq 0$ の場合は降雪として貯留)

T :基地局の降水強度 ($mm/dt' \cdot hr$) T_0 :基地局の気温 ($^{\circ}C$) β :高度による温度減衰係数、($^{\circ}C/100m$)

H_M :任意メッシュ内の平均標高 (m) H_0 :基地局の標高 (m) S_M :融雪量 (Degree hour factor) (mm/hr)

H_w :降水量があつた場合に $T \leq 0$ のとき任意メッシュ内に貯留される積雪相当水量、 H_w' :積雪相当水量

流出量の計算は、貯留方程式と連続の方程式を用いる。

$$S = K \cdot \bar{L} \text{ ---- (11)}$$

$$dS = (i - \bar{L}) dt \text{ ---- (12)}$$

ここに i :単位流入量、 $\bar{L}$:単位流出量、 K :貯留方程式の比例定数

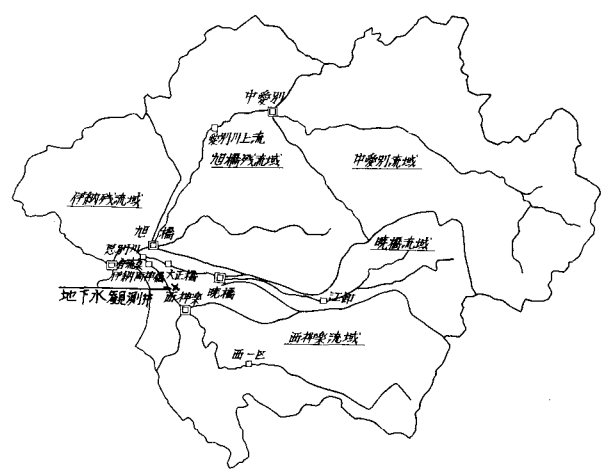


図-1 流域図

表-1 総合貯留高と河川流出率

基準測水所名	流域面積 (Km^2)	積雪量調査 年月日	①	②	③	④
			3月1日から 6月30日まで の水測所の直 接流出量 (mm)	後雪融雪 日の総合貯 留高 (メッシュ 法) (mm)	後雪融雪日 後から6月30 日までの旭川 気象台の総降 水量 (mm)	河川流出率 $\textcircled{4} = \frac{\textcircled{1}}{\textcircled{2} + \textcircled{3}}$
伊 納	3,378.6	S.43.3.21	333	287	171	0.73
		S.44.3.24	341	262	243	0.68
		S.45.3.18	521	505	199	0.74
旭 橋	1,917.2	S.43.3.21	347	260	171	0.81
		S.44.3.24	397	269	243	0.78
		S.45.3.18	499	513	199	0.70
中愛別	1,082.5	S.43.3.21	368	244	171	0.89
		S.44.3.24	312	261	243	0.62
		S.45.3.18	511	569	199	0.67
西神楽	645.0	S.43.3.21	280	287	171	0.61
		S.44.3.24	325	188	243	0.75
		S.45.3.18	651	526	199	0.90
既 橋	298.0	S.43.3.21	256	433	171	0.42
		S.44.3.24	430	267	243	0.84
		S.45.3.18	532	572	199	0.69
桂沢ダム	151.2	S.44.3.6.7	574	707	248	0.60
		S.45.3.10.11	801	790	314	0.73

(注) 桂沢ダムのみ①③は5月31日までの値である。

(12) 式の値に(7)

表-2

計算に使用した係数表(t は時間を表わす3月1日0時 $t=0$)

式の値を代入して dt 時間毎の Q を求め、 dt 時間移動させて合成した流出量が直接流出量(Q_R+Q_S)となる。 Q は、融雪時の基地局温度の変化と高度の温度逓減による融雪量、融雪面積あるいは降水量面積の変化に対応した仮集中量を考えている。(8)式は、流

基準測水所名	計算年	貯留関数の比例定数 K		集中時間 α	流出係数 f		基地局高度 H_0 (m)	温度逓減率 β ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)	基底流量 Q_B (m^3/sec)	積調雪量日	距離 dL (Km)
		融雪 K_1	降雨 K_2		融雪 f_1	降雨 f_2					
曉橋	43	25	20	0.40	0.30	0.48	110	0.6	$0.00102t+5.0$	3月21日	5.0
	44	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	45	25	20	0.40	0.70	0.90	110	0.6	$0.00205t+6.0$	3月18日	5.0
西神楽	43	25	20	0.40	0.60	0.35	110	0.6	$0.00205t+8.0$	3月27日	5.0
	44	25	20	0.40	0.70	0.25	110	0.6	$0.00205t+14.0$	3月24日	5.0
	45	25	20	0.40	0.90	0.90	110	0.6	$0.00171t+9.0$	3月18日	5.0
中愛別	43	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	44	30	25	0.40	0.55	0.70	110	0.6	$0.01195t+15.0$	3月24日	5.0
	45	30	25	0.40	0.80	0.80	110	0.6	$0.01571t+19.0$	3月18日	5.0
旭橋	43	30	25	0.40	0.80	0.55	110	0.6	$0.00342t+20.0$	3月27日	5.0
	44	30	25	0.40	0.70	0.70	110	0.6	$0.00512t+25.0$	3月24日	5.0
	45	30	25	0.40	0.70	0.70	110	0.6	$0.00854t+25.0$	3月18日	5.0
伊納	43	40	35	0.40	0.75	0.83	110	0.6	$0.003070t+46.0$	3月21日	5.0
	44	30	25	0.40	0.67	0.70	110	0.6	$0.01535t+45.0$	3月24日	5.0
	45	30	25	0.40	0.80	0.95	110	0.6	$0.01605t+43.0$	3月18日	5.0
桂沢ダム	44	7	7	0.40	0.95	0.35	190	0.5	$0.00136t+7.0$	3月6日	2.0
	45	7	7	0.40	0.95	0.95	190	0.5	$0.00136t+2.0$	3月10日	2.0

域に降水量があつたときに任意メツシユ内の気温が 0°C 以下の場合には降雪として任意メツシユ内の氷当量に加算され、 0°C 以上の場合は降雨として任意メツシユ内から直接流出する。(10)式は、 0°C 以上のとき融雪が生ずる。また、任意メツシユ内からの融雪量は、 H_u+H_w が0となるまで融雪が継続する。従つて、これ以上は新しく降雨がない限りメツシユ内からの融雪流出は生じないこととなり、いわゆるこれが雪線を表わすことになる。

1.3 計算結果と考察

石狩川上流域と桂沢ダム流域について計算した結果、計算に用いた定数、係数に特徴ある性質をもっていることがわかつた。表-2において K と f の値が水に対して、融雪は K_1 、 f_1 降雨は K_2 、 f_2 を使用することにした。 K については、融雪流出と降雨流出とは異なり、前者は後者に比較して流水の到達時間が遅い。一般に $K_1>K_2$ であり、また、流域面積が小さくなるに従つて K は小さくなる。また、各年によつて大きな変動がなく、流域によつて一定の傾向がある。 f については、表-1の河川流出率と表-2の f を比較すると、ほぼ河川流出率に近似している。従つて、流出率を f として用いてもよいようである。 f_2 は降雨分布によつて異なる。 α は、各流域とも0.4と同一の値を示している。

デクリアワーファクター S_H については、星野⁶⁾が野外実験場での値を、札幌実験場の $0.196(\text{mm}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr})$ 、桂沢ダム $0.118(\text{mm}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr})$ とし、境⁷⁾は、沙流川流域で $0.125(\text{mm}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr})$

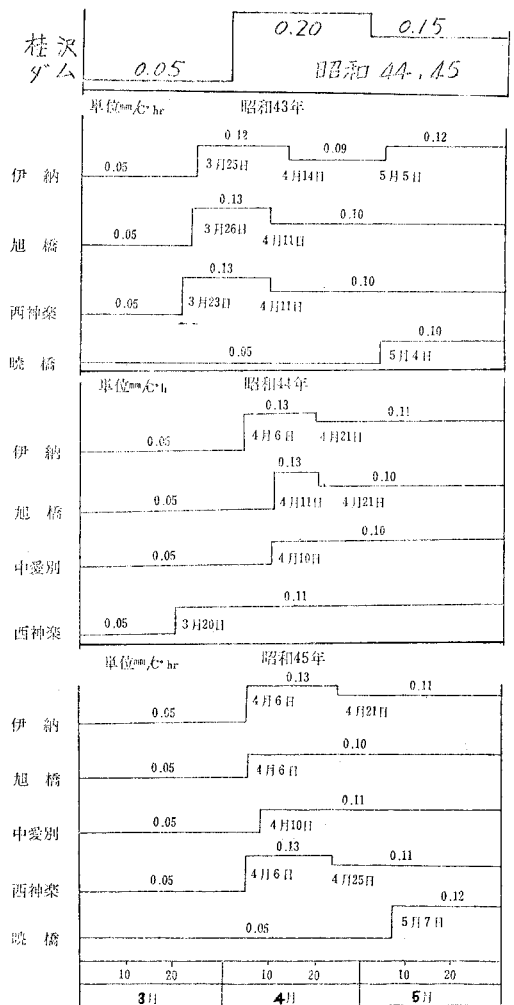


図-2 デグリアワーファクター変化図

としている、現在のところ広い流域での S_M は充分解明されていないが、本文では、図-2に示す値となり時期的にも変化する結果が得られた。図より石狩川上流域では、融雪の最盛期に入る初期では $S_M=0.11\sim0.13$ 程度となり、その後は、 $0.10\sim0.11$ の範囲となっている。桂沢ダム流域では、石狩川上流域に比較して大きな値となっている。この原因として考えられるのはダム貯水池の湖面が冬期間結氷しており、解氷期の湖水の水温が影響しているものと推定される。一般には、融雪が進行するにつれて S_M が大きくなるといわれているが、ここでは、そのような傾向を示さない、これは融雪期において高度が低い所では S_M が大きく、高い所では小さいので、これらが平均化されたものとなっていると思われる。また、石狩川、桂沢ダムとも S_M の時期的変化は同様の傾向を示す。

図-2、表-2の値を用いて計算した結果、伊納測水所について図示したものが図-3であり、時間気温、降雨、融雪初期の積雪量から河川流量を算定することができる。

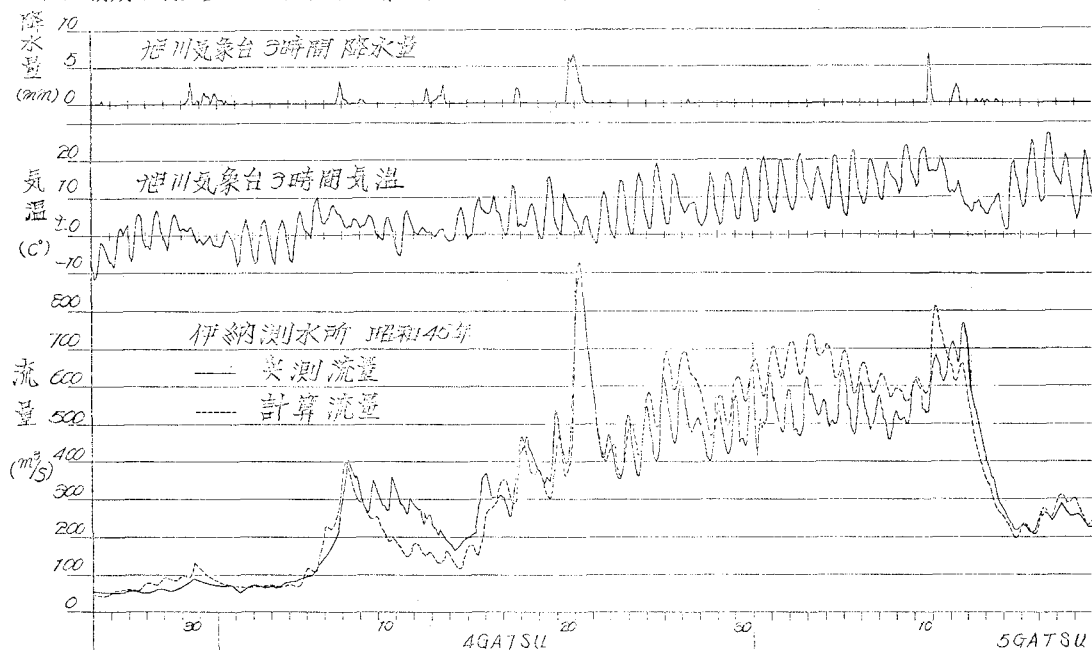


図-3 時刻流量曲線図

2. 日流量

2.1. 流況のタンクモデルによるシミュレーション

河川の水利用は、上流から下流にゆくに従って多量の水が反復利用されている。上流の自然河川の流出と下流の土地開墾された流域の流出とは異なった流出機構を示す。そこで、流域の特性を表現する方法として流域を分割し、分割した流域に流出モデルを考え、流域特性の条件を与えて流出量を合計する方法とした。

長谷川⁹⁾は、流出の基本モデルを図-5に示す直列4段のタンクモデルとし、流出量 Q は、 $Q = Q_0 - Q_s$ --- (13) とした。すなわち、タンクの流出孔から流出した流出量 Q_0 から河川からの取水水量 Q_s （農工上水等）を差引いた値を懸案地奥の Q とする。 Q_s は、地下浸透 Q_R と蒸発散を加えたものであるが、 Q_R を2段目のタンクに還元する流出機構とする、流域がA、B、---と分割した場合の懸案地奥の流量 Q は $Q = (Q_A Q_A + Q_B Q_B + \dots) / (Q_A + Q_B + \dots)$ --- (14) とする。ここに、 $Q_A, Q_B, \dots$ --- (13) 式の Q に流域の添字をつけたもの、 $Q_A, Q_B, \dots$ --- 流域面積

2.2 計算結果と考察

流出の計算は、図-1に示した石狩川上流域で検討した。計算方法は、例えば、旭川基準地奥はあらかじめ単流域の中流別基準地奥で4段タンクの乗数を求めておき、次に、旭川残流域にもつづの4段タンクモデルを

表-3 実測流出量と計算流出量の比較表

3. 地下水を考慮したタンクモデル

下段：流量年別流量別											
調査年月日	特別	普通	西	東	平均	特別	西	東	平均		
昭和	昭和	43.60	12.21	26.05	58.36	102.45	37.87	—	11.60	28.54	98.50
41年7月24日	57.11	—	—	70.60	117.00	37.18	—	9.34	27.53	87.98	
	56.60	27.72	22.18	66.80	178.00	—	—	—	—	—	
	54.75	13.66	33.00	57.97	115.75	50.16	—	18.93	33.30	110.15	
42年7月20日	56.90	—	—	61.22	174.40	39.87	—	19.24	27.53	107.87	
	61.40	8	12.45	65.24	136.16	—	—	—	—	—	
	38.96	3.10	13.29	37.72	61.78	—	5.85	5.48	24.18	—	
42年7月24日	57.71	8.46	26.41	70.60	117.00	—	17.80	9.34	27.53	—	
	43.48	5.04	18.47	46.81	85.93	—	—	—	—	—	
	43.48	3.10	3.06	28.40	55.14	13.97	3.89	3.14	5.19	36.78	
43年7月19日	30.31	4.70	7.58	25.58	54.76	9.56	4.03	4.18	6.93	36.54	
	32.79	9.15	7.44	16.75	62.45	—	—	—	—	—	
	51.37	6.86	8.06	43.15	70.37	23.19	3.47	5.95	10.88	63.98	
43年8月5日	44.51	4.70	14.83	59.12	108.86	24.89	4.60	6.18	17.84	80.78	
	40.53	10.16	17.31	53.43	64.92	—	—	—	—	—	
	21.94	5.97	10.90	35.73	70.00	—	4.42	6.32	13.81	55.86	
44年7月16日	22.77	4.16	6.89	22.28	59.66	—	4.01	6.03	10.30	39.05	
	35.76	9.16	7.14	23.68	60.67	—	—	—	—	—	
	20.55	7.52	11.50	23.30	46.53	14.72	6.12	6.20	9.96	39.46	
45年7月28日	31.49	8.28	9.49	30.23	64.74	19.66	5.04	5.05	9.31	45.16	
	33.28	8.87	8.97	31.92	53.06	—	—	—	—	—	

基準地点名：伊納
 計算年：昭和45年
 実線：実測流出量
 点線：計算流出量

流出量 (m³/s)

10 20 50
 5 2
 1
 0.6

4月 20 5月 20 6月 20 7月 20 8月 20 9月 20 10月 20
 10 20 30 10 20 30 10 20 30 10 20 30 10 20 30 10 20 30 10 20 30 10 20 30 10 20 30

3.1 地下水の物理的構造

図-5に示した直

列4段のタンクの上段に降水量を入れると各段のタンクからの流出量は、時間的な遅れが発生する。ここでは、上段タンクは表流水が、2、3、4段タンクは地下水が流出するタンクと考える。従って、図よりタンク流出孔からの矢印の長さとは、降水量が河川に流出してくる場合の時間の遅れをモデル的に表現した。地下水の変動は、地下水が流出する2、3、4段タンクの貯留高の変化量を有効空疎率で除し、それらの値を合計する方法である。大谷、長谷川¹⁹⁾は次式とした。

$$H_i = H_0 + (T_{2i-1} - T_{2i})/w_2 + (T_{3i-1} - T_{3i})/w_3 + (T_{4i-1} - T_{4i})/w_4 \dots (15)$$

ここに H_i : i 目の地下水位, H_0 : 地下水位の初期値

T2, T3, T4: 2, 3, 4 段タンクの貯留高

$$W_2, W_3, W_4: 2, 3, 4 \text{ 段タンクの有効空隙率}$$

添字 i 、 $i-1$ は i 日および i 日の前日を表わす。

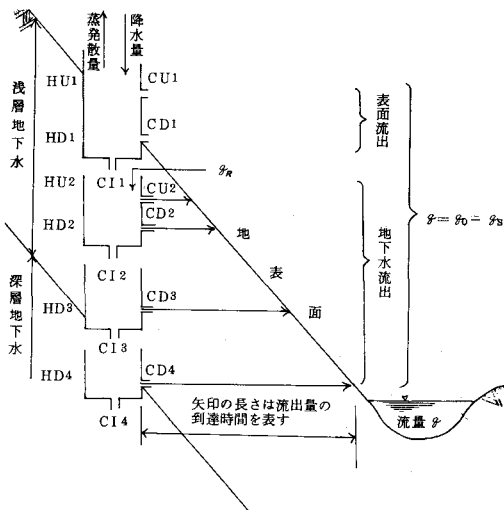


図-5 流出モデル

3.2 計算結果と考察

計算は、河川流量を西神楽測水所、地下水観測所は図-1の美濃川地下水観測所で検討した、タンクの上段に

入力する降水量、蒸発散量あるいは S_R については2.1項で述べたと同様な手法を用いている。(15)式から、

(a) 6月1日から8月31日の期間

$$H_L = H_0 + (T_{2L-1} - T_{2L}) / \mu_2 \quad \mu = 0.12$$

(b) 9月1日から10月31日の期間

$$H_L = H_0 + (T_{2L-1} - T_{2L}) / \mu_2 + (T_{3L-1} - T_{3L}) / \mu_3 \quad \mu_2 = 0.08, \mu_3 = 0.15$$

とした結果が図-6である、一般に μ は0.1~0.15程度といわれているが、繰返し計算結果0.08~0.15となつた。現段階では期間によって μ を変化させなければなら

ない問題があるが、タンクモデルによつて不圧地下水位の予測ができる可能性が得られたことが重要であり、この手法で実測地下水位と検証することによつて表面流出と地下水流出の分離が可能となる、ここで、上段タンクを表面流出、2、3、4段タンクを地下水流出と仮定すれば、それぞれの流出量は年間479^{mm}、972^{mm}で、地下水流出は全流出量の67%を占めることになる。

河川流量を表面、中間、地下水流出に分離するのが一般的であるが、西神楽流域におけるタンクからのピーク時間の遅れは次のとおりであり、4段直列タンクの物理的意味を推定できる。

1段タンク 1日、2段タンク 3日、3段タンク 12日、4段タンク 50日

4. 結 論

北海道河川では、積雪量の把握の観測網が粗であることから、融雪出水の大きさ、または融雪出水期の終期を予測するには大きな差を伴うものと考えられたが、筆者の積雪分布推定、または融雪流出のシステム化によつて、適格な融雪洪水量または融雪終期を予測することができた、この方法によれば、融雪初期に代表地点のスノーサーベウイを実施することによつて、融雪期の流況をあらかじめ予知しうることを示している。

更に、タンクモデルの流出モデルを用いて年間流況をシミュレートし、併せて地下水位を予測できることを示した。河川の長期流量のシミュレートについては、未だ研究成果も少ないようであるが、これらの方法から冬期流量の推定、地下水位と河川流量との関係など多くの問題点の糸口が見つかったことは、今後の流量計画を行なう上で一つの礎石とすることが出来るものと考えられる。

参考文献

- 1). 錦谷清、工藤昇：豊平峡ダム流域における積雪融雪のシステムモデルに関する研究、第29回建設省技術研究会講演要綱、共通課題 昭和50年11月
- 2). 原田健二：水文気象の誌 (VIII) 水温の研究 12 巻第1号 1968年5月
- 3). 丸安隆和、内田正人、田浦秀春：航空写真による融雪並びに流出解析、土木学会論文集 第164号 別刷 1964年4月
- 4). 山口甲、長谷川茂：融雪流出の予知に関する研究、北海道開発局土木試験所報告 第64号 昭和50年1月
- 5). 長谷川茂、小林伸行：柱沢ダム流域の融雪流出の予知、第17回北海道開発局技術研究発表会 昭和49年2月
- 6). 星野英二：融雪流出に関する研究（現地実験による一考察） 第23回建設省技術研究会報告 昭和44年度
- 7). 境 隆雄：河川の融雪流出に関する研究 土木学会論文集、第95号
- 8). 長谷川茂：石狩川上流域の低水流出について 土木学会北海道支部研究発表会論文集 第30号 昭和48年度
- 9). 大谷直郎、長谷川茂：地下水挙動に関する研究（タンクモデルによる方法） 第18回北海道開発局技術研究発表会 昭和50年2月

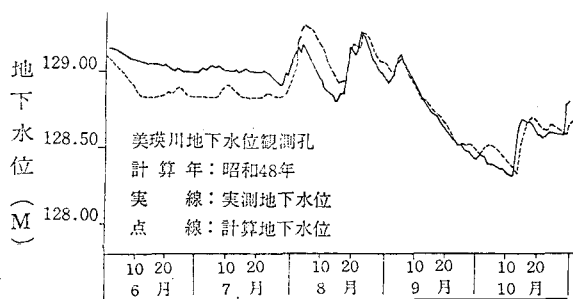


図-6 地下水位変化図