後志利別川流域の DAD 解析

―― 北海道の洪水比流量に関する研究 (I) ――

桜田純司*・秋野隆英**

*北海道大学農学部農業工学科土地改良学教室

**苫小牧工業高等専門学校土木工学科

(昭和54年9月8日受理)

DAD Analysis on the Shiribeshi-Toshibetsu River Basin

Specific Discharge of Flood in Hokkaido (I)

Junji SAKURADA* and Takahide AKINO**

*Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo, Japan

**Department of Civil Engineering, Tomakomai Technical College, Tomakomai, Japan

1. まえがき

近年全国各地で大水害をもたらした集中豪雨の発生は，必ずしも特定流域に限らず気象・地形条件の類似するかなり広範囲の地域のどこかに起きており，その地点に着目すると記録的な豪雨となっている。北海道においても，1974年には低気圧，1975年には低気圧と台風による記録的な豪雨があり，それによる出水で著しい農業災害をひきおこした。

従来ダム・頭首工等の河川工作物の設計には，当該地域の既往最大あるいは確率洪水流量が考慮されて来たが，災害対策の基礎となるべき水文資料の取扱いには，気象・地形条件が類似する広大な地域を包括した地域の既往最大洪水流量の概念の導入が必要である。1977年に改訂された建設省河川砂防技術基準[1]では，ダム設計洪水流量を次の3つのうちいずれか大きい流量をとるよう定めている。

(1) ダム地点において，200年につき1回の割合で発生するものと予想される洪水の流量

(2) ダム地点において発生した最大の洪水の流量

(3) 当該ダムに係る流域と水象または気象が類似する流域のそれぞれにおいて発生した最大の洪水に係る水象または気象の観測の結果に照して，当該ダム地点に発生するおそれがあると認められる洪水の流量

以上はコンクリートダムにおける基準で，フィルダムの設計洪水流量はコンクリートダムの1.2倍の流量とする。

当該ダムの流域と類似する流域の洪水の観測結果に照らして，決定される流量が(3)に相当し，(1)および(2)の流量は当該ダム地点での長時間の観測が必要となるため，簡単には決まらず，したがって一般的には(3)によって流量を決定することになる。しかしわが国では，これまで地域別最大洪水流量に関する研究は少ない。

一方DAD解析は，その必要性が認められながら，あまり進んだ研究がなされていない現状である。たとえば流出解析を行う場合でも，観測点数が少ないことも相まって地点雨量で代用されることが多い。しかし本来は一定の広がりをもつ流域の平均雨量としてどれだけの降雨があったかを定量的に知る必要がある。

北海道は面積に対して降雨資料が少なく，とくに小流域について面積雨量を求めることは著しく困難である。そこで比較的時間雨量の観測が多いと思われる3つの流域を選定し，Fig. 1に示す。

本研究はこれら3流域のDAD特性と流出特性すなわち洪水到達時間の両者について調べ，洪水比流量の形で最大洪水流量を表現するための関数形を決定し，これの定数を流域ごとに推定し，さらに3流域を合成した関数形の総合化を試み，北海道の洪水比流量を推定しようとするものである。

本報では，後志利別川流域におけるDAD解析とそ

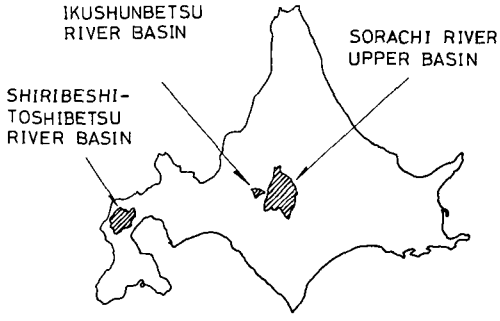

Fig. 1. Location of study basins in Hokkaido.

の手法について検討したものである。

なお，この研究は1977, 1978年度文部省科学研究費(試験研究)「ダム，頭首工の安全設計資料としての洪水比流量に関する研究」(研究代表者角屋睦) の研究成果であり，本研究を行うにあたり直接御指導していただきました京都大学防災研究所教授角屋睦博士および御指導と御助言をいただいた北海道大学農学部教授片岡隆四博士に深く感謝するしだいである。さらに御助言をうけた土地改良学教室助教授梅田安治博士，また計算の手伝いをしていただいた土地改良学教室の皆様方に深く感謝の意を表わすものである。

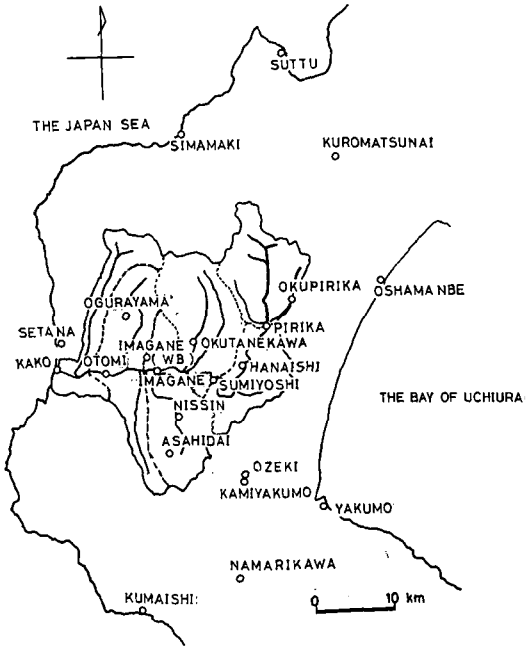

Fig. 2. Shiribeshi-Toshibetsu River basin and stations of rainfall.

2. 流域の概要と降雨資料の選定

この流域は桧山支庁北部に位置し，面積720.4 km² で標高は河口より約1,000 m にいたる範囲にある。降雨については年最大日雨量が生じていると考えられる1963～1976年の14年間について，流域内12地点，流域外10地点の雨量観測地点において得られた時間降雨資料を用いた。流域と雨量観測地点を Fig. 2 に示す。

3. DAD 解析

降雨量 (depth) は流域面積 (area) と降雨継続時間 (duration) に関連したものであり，これらの関係を調べる手続を DAD 解析という。Fletcher はこれら3つの関係を一つの式で表わしているが，内容を吟味すると DD 式は Sherman 式となり，結局 DA 式を決定することが問題となる。したがって DAD 解析は DD 解析と DA 解析とに分けられる。DD 解析とは降雨強度式を決定することであり，わが国でもすぐれた研究があるが，DA 解析は諸外国ではいくつかあるが，わが国ではあまり研究されていない現状である。

3-1 DA 解析

DA 解析とはある流域内の地点最大雨量 P_0 とその地点を含む面積 A 内の流域平均雨量 P との関係をいい，一般に，A の増加につれ P が減少する傾向をもっている。Horton は大雨の雨量分布を調べ，(1) 式で表わした。

$$P/P_0 = \exp(-\alpha A^{\beta}) \qquad (1)$$
$$= 1-\alpha A^{\beta}+\frac{1}{2!}(\alpha A^{\beta})^2-\frac{1}{3!}(\alpha A^{\beta})^3+\cdots$$

一方日本では最近提案された角屋・永井式[2] (I) がある。

$$P/P_0 = (1+\lambda A^{\gamma})^{-1} \qquad (2)$$
$$= 1-\lambda A^{\gamma}+(\lambda A^{\gamma})^2-(\lambda A^{\gamma})^3+\cdots$$

ここでは式の検討の都合上，(1), (2) 式はベキ級数展開式も同時に示した。ここに α, β, λ, γ は定数。これらのベキ級数展開式の第3項以下を無視すると，同じ式形となる。また両式の第2項までのベキ級数展開式と同じ式に Woolhiser-Schwalen 式がある。

$$P/P_0 = 1-\frac{\varepsilon}{P_0}A^{\delta} = 1-\varepsilon_0 A^{\delta} \qquad (3)$$

ここに ε, δ は定数，また $\frac{\varepsilon}{P_0}$ を定数 ε_0 とみなす。その他 DA 式はいくつかあるが，(1) および (2) 式の類似した式であり，この両式間にも密接な共通点があるから，最も代表的な DA 式として，Horton 式をあげてもさ

Table 1. Area rainfall putted in order (Thiessen method)

Duration (hr)	Rank	Area (km²) 0	114.0	206.2	361.4	495.1	615.7	720.4
1	1	53.0	41.4	38.3	33.7	30.8	29.7	27.8
	2	35.4	35.4	27.7	20.0	17.8	16.7	16.3
	3	26.0	22.5	19.8	18.3	17.4	16.6	15.6
	4	25.7	21.2	19.2	17.7	16.5	15.5	14.9
	5	23.5	21.0	19.1	14.7	12.6	11.4	10.8
	6	23.2	20.4	15.7	13.2	12.3	11.2	10.6
	7	18.2	15.6	14.4	11.4	11.1	11.0	10.6
	8	17.0	15.2	12.8	11.4	11.0	10.8	10.0
	9	16.2	13.2	12.2	11.3	10.7	10.3	9.3
	10	13.0	12.1	11.7	11.1	10.5	9.9	9.1
	11	12.5	11.9	11.7	11.0	10.2	9.7	9.1
	12	12.0	10.5	8.8	7.4	6.7	6.2	5.9
	13	10.8	9.4	8.6	7.0	6.6	6.2	5.6
	14	9.5	9.1	7.8	6.9	6.1	5.4	4.7
2	1	70.0	63.0	60.5	53.7	49.8	46.8	44.5
	2	53.9	53.9	39.6	32.5	31.0	29.8	28.9
	3	47.0	40.2	36.0	31.7	28.6	27.4	26.7
	4	37.6	32.0	30.7	29.1	28.2	27.0	25.7
	5	34.5	30.2	25.5	23.4	22.6	22.0	21.3
	6	33.4	30.2	25.3	22.6	22.0	21.6	21.1
	7	33.1	27.1	25.1	21.6	20.9	20.0	18.0
	8	31.5	26.8	23.9	21.2	20.3	19.7	18.0
	9	31.0	26.0	23.3	20.2	19.5	18.6	17.7
	10	28.3	23.8	22.7	20.0	19.3	16.3	15.0
	11	26.5	23.0	20.5	19.5	17.9	15.8	14.4
	12	24.0	20.5	20.4	16.4	17.3	13.5	12.7
	13	18.5	17.2	16.7	14.6	12.2	11.1	10.7
	14	14.5	13.3	12.7	11.9	11.6	10.9	10.1
4	1	95.5	87.7	83.8	79.7	74.9	71.0	68.5
	2	60.0	56.4	55.1	52.4	50.2	47.8	46.1
	3	60.0	53.9	49.0	45.5	44.6	43.5	42.4
	4	59.9	50.2	48.8	45.3	43.2	41.5	40.2
	5	54.0	48.5	47.1	43.0	39.8	38.1	36.8
	6	53.9	48.0	44.5	40.4	38.6	37.2	35.6
	7	53.0	42.7	39.0	36.0	34.9	33.4	31.8
	8	51.1	41.8	37.3	34.1	33.2	32.4	31.8
	9	47.0	40.6	36.4	33.5	31.6	29.6	28.0
	10	44.1	37.4	35.2	32.6	30.8	28.9	26.5
	11	38.0	36.3	31.7	28.6	26.6	24.7	23.2
	12	33.5	33.1	30.0	24.1	23.3	21.8	20.7
	13	32.6	31.3	28.8	23.4	21.1	19.7	18.5
	14	30.6	29.6	26.2	22.2	20.5	18.6	17.1

Duration (hr)	Rank	Area (km²) 0	114.0	206.2	361.4	495.1	615.7	720.4
8	1	128.5	123.9	106.7	97.1	91.4	87.2	83.0
	2	113.5	105.8	102.6	95.8	90.8	86.2	82.3
	3	105.4	92.6	81.4	67.6	62.0	58.4	56.0
	4	92.6	80.7	74.7	67.2	61.4	57.4	54.9
	5	83.2	72.4	67.6	62.5	59.2	57.1	54.7
	6	74.0	69.8	66.1	60.5	58.1	56.4	54.5
	7	71.0	68.1	60.2	57.9	56.9	55.7	54.2
	8	66.6	64.1	60.0	54.0	52.2	48.8	47.7
	9	65.7	62.4	57.2	52.8	49.7	48.5	45.7
	10	65.0	60.2	57.0	52.2	48.5	45.9	44.3
	11	62.1	56.4	52.0	51.3	48.5	45.8	43.9
	12	61.6	52.8	46.2	43.2	41.1	38.5	36.7
	13	53.0	46.1	44.4	37.8	35.6	33.3	30.7
	14	37.0	34.6	32.7	29.6	28.3	26.6	25.3
12	1	162.5	158.8	141.5	127.4	120.4	116.6	114.0
	2	126.3	119.2	107.2	99.7	93.1	88.3	85.0
	3	119.2	108.1	105.3	91.1	84.3	79.6	76.2
	4	115.0	103.6	95.3	84.7	79.2	76.1	73.4
	5	89.6	84.2	73.9	70.3	67.2	64.5	62.2
	6	86.7	82.0	73.3	68.6	65.4	63.4	60.9
	7	83.2	79.6	72.7	67.6	65.3	63.1	60.3
	8	80.2	72.8	67.3	65.7	63.5	61.6	60.3
	9	76.0	70.3	66.6	64.1	60.2	57.8	56.2
	10	74.5	66.8	66.3	61.3	58.8	57.4	55.9
	11	73.6	64.6	61.2	58.9	57.7	56.7	55.4
	12	68.0	63.5	60.9	58.2	56.8	54.8	53.0
	13	67.5	63.2	59.1	57.4	55.3	52.7	50.7
	14	63.0	61.2	52.6	47.1	44.6	42.1	39.1
24	1	203.0	198.8	185.9	172.4	166.1	162.4	159.8
	2	171.4	159.2	143.3	124.0	116.4	111.1	107.5
	3	159.2	145.3	128.8	114.9	109.8	107.0	105.0
	4	137.5	135.5	122.1	113.5	107.0	102.8	98.5
	5	137.4	131.7	112.5	106.3	103.0	99.3	96.5
	6	121.5	113.2	110.6	104.0	97.4	93.9	89.9
	7	120.0	112.5	109.6	101.9	96.7	91.6	88.8
	8	108.5	97.3	93.5	89.9	87.6	85.5	83.3
	9	104.0	90.2	83.4	76.3	73.5	72.5	71.5
	10	98.0	82.0	79.4	75.9	72.1	69.7	66.6
	11	91.2	78.2	76.8	75.6	71.2	67.8	65.5
	12	79.2	78.0	72.7	67.8	64.4	62.1	58.8
	13	74.5	70.3	66.6	61.3	58.8	57.4	55.9
	14	67.5	63.5	61.2	58.9	57.7	56.8	55.4

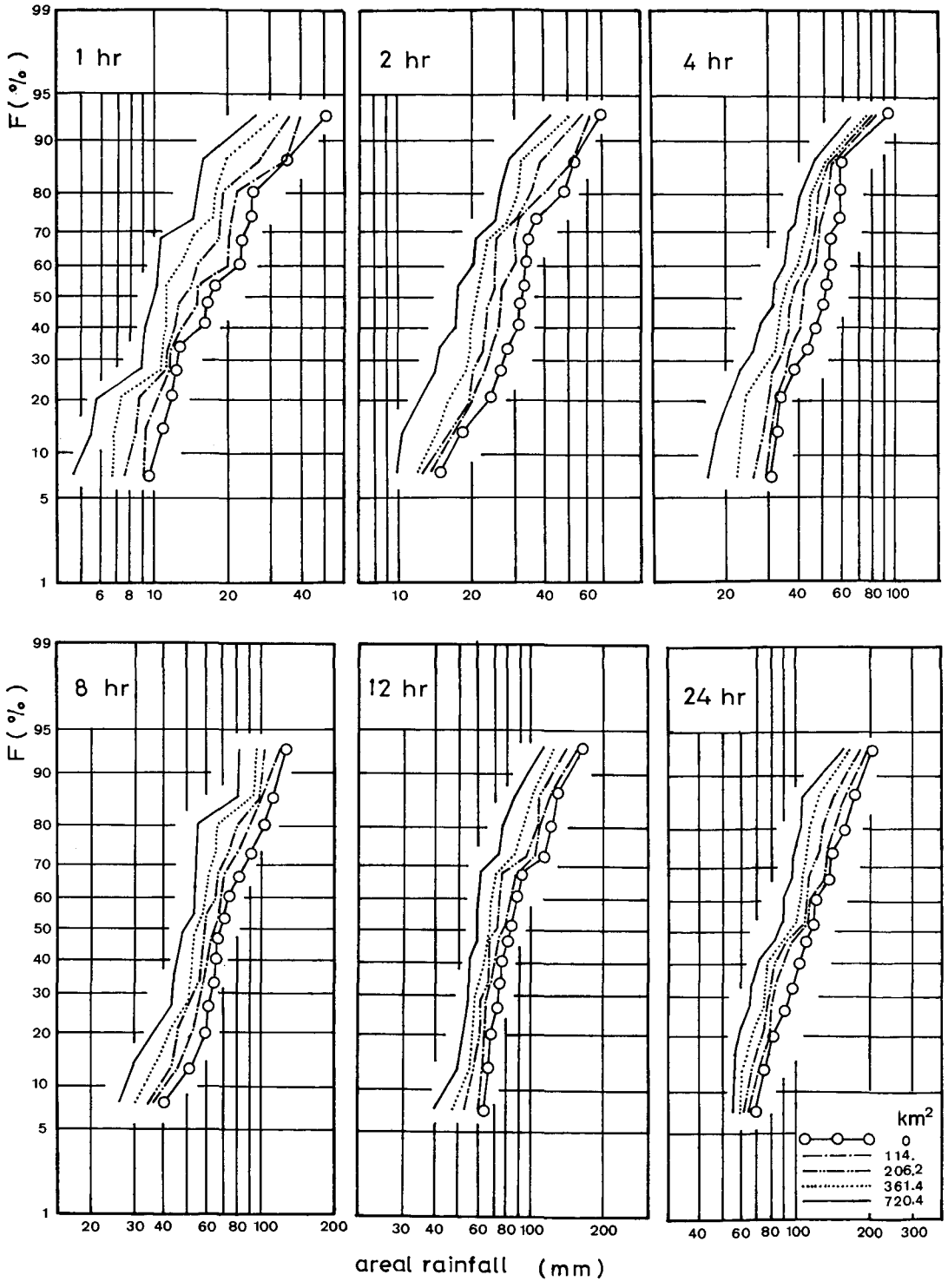

Fig. 3. Areal rainfall on probability paper by Thomas plot.

しつかえない。以上のことから本文では Horton 式を主に検討し，比較する意味で，角屋・永井式および Woolhiser-Schwalen 式についても解析を行った。なお各式の A のところを $(A-A_0)$ に置き換えた式（ここに A_0 は実用上点最大雨量と同じ面積雨量をもつと想定される最小面積）を (4), (5) および (6) 式に示し，これら3つの式についても併せて検討した。

Horton 修正式：

$$P/P_0 = \exp\left\{-\alpha(A-A_0)^{\beta}\right\} \qquad (4)$$

角屋・永井式 (II)：

$$P/P_0 = \left\{1+\lambda(A-A_0)^{\gamma}\right\}^{-1} \qquad (5)$$

Woolhiser-Schwalen 修正式：

$$P/P_0 = 1-\varepsilon_0(A-A_0)^{\delta} \qquad (6)$$

後志利別川流域における DA 解析では，Fig. 2 に示しているように流域を6ブロックに分割し，各年の年最大日雨量資料より一雨ごとに同時性を考慮し，各継続時間 (1, 2, 4, 8, 12 および 24 時間) の最大時間雨量をティーセン法と一部等雨量線法を用いて，ブロックごとの面積雨量を求めた。各ブロックの面積雨量を順次連結しながら流域面積を拡張し，全流域での平均面積雨量を求める方法[3] として，(1) 上流から順にブロックを連結して流域平均雨量を求める「流下方向連結法」，(2) ブロックのつながりを考慮して雨量の大きい順に合成する「隣接連結法」，(3) ブロックのつながりを考えず，平均雨量の大きい順に連結して流域を合成する「大小順連結法」の3つの方法が考えられる。

本研究の最終目的は洪水比流量の推定にあることから，できるだけ大きい降雨について検討する必要があるので，流域の合成方法として (3) の大小順連結法が最良といえるためこの方法で行った。大小順連結法で流域を拡げて行く場合，その雨量は降雨ごとの異なった面積にしか得られず不便である。そこで特定の面積を決め，その面積に対する流域平均雨量を内挿的に求めた。この選定面積を流下方向の流域を加算した 114.0, 206.2, 361.4, 495.1, 615.7 および 720.4 km² に固定した。

3-1-1 ティーセン法による DA 解析

大小順連結法により，継続時間ごとに選定面積に対する流域平均雨量を大きい順に並びかえ Table 1 に示した。またこの表を対数確率紙に描くと Fig. 3 となり，確率分布の傾向は認められるが分布形状はかならずしもきれいではない。DAD 解析の目的が洪水比流量の検討にあるため，選定面積について総降雨量 P の大きい上位降雨の DA 特性が重要である。すなわち選定面積ごとの既往最大または確率雨量となるような P/P_0 を問題にする必要がある。このため継続時間ごとに，第1～3位までの上位降雨の P/P_0 の値と選定面積との関係を Table 2 に示す。第1位の値では一雨の特性が強く現れる可能性もあり，また点のバラツキも考えられるので，ここでは P/P_0 の第1～3位の平均値を用いることとした。またこれらの関係を Fig. 4 に示した。図において降雨継続時間が長くなるにつれ，P/P_0 の値が大きくなることがわかる。しかし他の継続時間に比べ4時間では P/P_0 の値が大きくなっている。理論的には2および8時間の中程に位置すべきはずである。一方 Horton 式により，継続時間ごとの α および β を最小2乗法で求め，これらの

Table 2. Area rainfall (P/P_0 value)—Thiessen method

Duration (hr)	Rank	Area (km²) 114.0	206.2	361.4	495.1	615.7	720.4
1	1	0.781	0.723	0.636	0.581	0.560	0.525
	2	1.000	0.782	0.565	0.503	0.472	0.460
	3	0.865	0.762	0.704	0.669	0.638	0.600
	mean	0.882	0.756	0.635	0.584	0.557	0.528
2	1	0.900	0.864	0.767	0.711	0.669	0.636
	2	1.000	0.735	0.603	0.575	0.553	0.536
	3	0.855	0.766	0.674	0.609	0.583	0.568
	mean	0.918	0.788	0.681	0.632	0.602	0.580
4	1	0.918	0.877	0.835	0.784	0.743	0.717
	2	0.940	0.918	0.873	0.837	0.797	0.768
	5	0.898	0.817	0.758	0.743	0.725	0.707
	mean	0.919	0.871	0.822	0.774	0.755	0.731
8	1	0.964	0.830	0.756	0.711	0.679	0.646
	2	0.932	0.904	0.844	0.800	0.759	0.725
	3	0.879	0.772	0.641	0.588	0.554	0.531
	mean	0.925	0.826	0.747	0.700	0.664	0.636
12	1	0.977	0.871	0.784	0.741	0.718	0.702
	2	0.944	0.849	0.789	0.737	0.699	0.673
	3	0.907	0.883	0.764	0.707	0.668	0.639
	mean	0.940	0.868	0.777	0.728	0.695	0.671
24	1	0.979	0.916	0.849	0.818	0.800	0.787
	2	0.929	0.836	0.723	0.679	0.648	0.627
	3	0.913	0.809	0.722	0.690	0.672	0.660
	mean	0.940	0.854	0.765	0.729	0.707	0.691

曲線も Fig. 4 の実線で示している。これによると選定面積 114.0 km² における P/P_0 の値がどの継続時間についても曲線と大きくはずれていることがわかる。すなわち(1)式では曲線への対応が良好でない。すなわち実用上地点最大雨量と同じ面積雨量が降っていると想定される最小面積をもつと考える方が妥当であり，しかも観測された地点がその流域面積の最大雨量であることがまれで，その地点の近くに最大雨量が生じていると考えられる等を勘案し，試算により A_0 の面積を求めると $A_0 \fallingdotseq 100$ km² となる。A_0 の定数推定例を Fig. 5 に示した。したがって曲線式は (4) 式に $A_0 = 100$ km² を代入し，Fig. 4 に破線で示している。

つぎに角屋・永井式 (I), (II) および Woolhiser-Schwalen 式とその修正式についても Horton の方法と同様にして求めると，Fig. 4 とほぼ同様な曲線となる。

これらの式による値と実測値との誤差 $F(\%)$ を (7) 式により継続時間ごとに求め，評価した。

$$F = \frac{1}{N} \Sigma \left| \frac{P_i' - P_i}{P_i} \right| \times 100 \ (\%) \qquad (7)$$

ここに　P_i: 実測値，P_i': 推定値，N: データ数

Horton 式，Woolhiser-Schwalen 式およびそれらの修正式また角屋・永井式 (I), (II) のそれぞれの係数および誤差を Table 3 に示す。なお (1)～(3) 式は選定面積

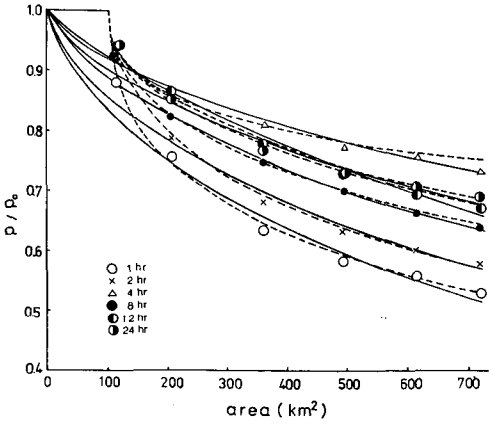

Fig. 4. Relation between area and P/P_0 value by Thiessen method.

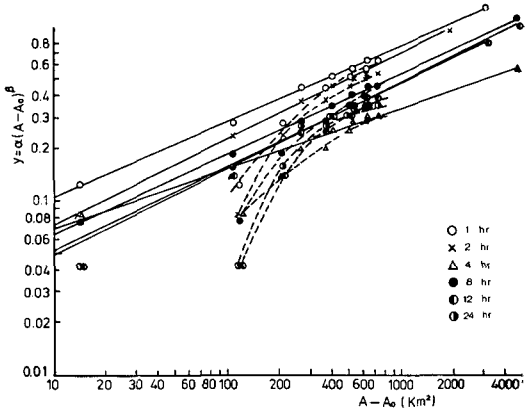

Fig. 5. An example of the estimated constants by revised Horton formula.

Table 3. Coefficients of DA formulas (Thiessen method)

Method	A_0 (km²)	Coefficient	Duration (hr) 1	2	4	8	12	24	Error (%)
Horton method	0	α	0.0091	0.0077	0.0040	0.0051	0.0018	0.0048	1.78
		β	0.653	0.653	0.665	0.683	0.831	0.669	(1.17)
	100	α	0.0392	0.0236	0.0317	0.0227	0.0158	0.0175	
		β	0.435	0.494	0.344	0.462	0.498	0.480	0.89
Kadoya-Nagai method	0	λ	0.0047	0.0042	0.0029	0.0031	0.0011	0.0031	1.62
		γ	0.804	0.791	0.734	0.796	0.936	0.766	(1.05)
	100	λ	0.034	0.020	0.030	0.020	0.014	0.016	
		γ	0.506	0.558	0.375	0.511	0.545	0.524	0.94
Woolhiser-Schwalen method	0	ε_0	0.0158	0.0120	0.0055	0.0077	0.0028	0.0064	2.01
		δ	0.522	0.546	0.594	0.589	0.731	0.597	(1.38)
	100	ε_0	0.044	0.027	0.033	0.025	0.017	0.019	
		δ	0.372	0.436	0.317	0.416	0.457	0.442	1.08

(　) は 114.0 km² の点を除く

114 km² における P/P_0 の値が極端にはずれているため計算から除外して係数を決めた。いまプロットしたすべての点と曲線との誤差は $A_0=100$ km² を考慮した方が小さく，また (1)～(3) 式の場合の選定面積 114 km² の点を除いても (4)～(6) 式の方が誤差は小さくなっている。一方 (1)～(3) 式間における誤差は (2) 式，(1) 式，(3) 式の順に小さく，$A_0=100$ km² では，(4) 式，(5) 式，(6) 式の順に小さくなっている。以上より判断すると $A_0=100$ km² とした (4) 式が誤差 $F=0.89\%$ で最も小さく，これとほぼ近い誤差をもつ (5) 式が適合は良い。しかし $A_0=100$ km² が地点最大雨量と同じ面積雨量をもつ流域と考えるにはあまりにも大きすぎる。もし雨量観測点網が密であると，A_0 をより小さくできるであろう。各 DA 式におけるそれぞれの係数の関係をグラフに描くと Fig. 6 となり相互の係数は一義的に決定されることが分かる。たとえば Horton 式の場合，式形からみて α と β とは互いに補完する関係にある。

次に降雨継続時間により各 DA 式における係数が異なるので，いま継続時間を横軸に各係数を縦軸にとり，Fig. 7～Fig. 9 に示すと Horton 式，角屋・永井式および Woolhiser-Schwalen 式のそれぞれ β, γ および δ は継続時間 t に関係せずほぼ一定の値とみなせるが，α, λ および ε_0 はかなりばらついているが，降雨継続時

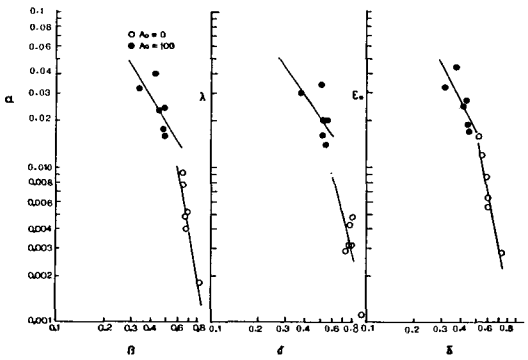

Fig. 6. Each relation of coefficients by DA formulas (Thiessen method).

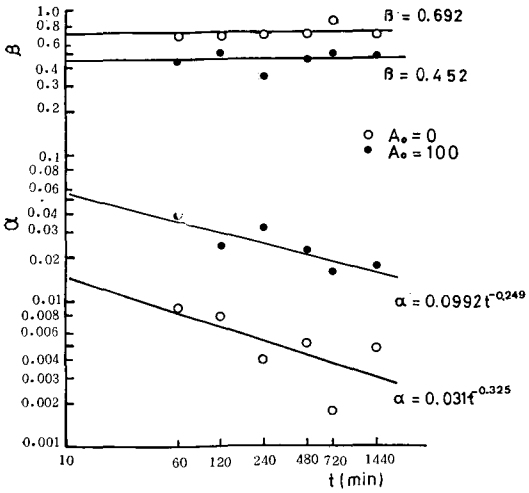

Fig. 7. Relation between duration and coefficients of Horton method (Thiessen method).

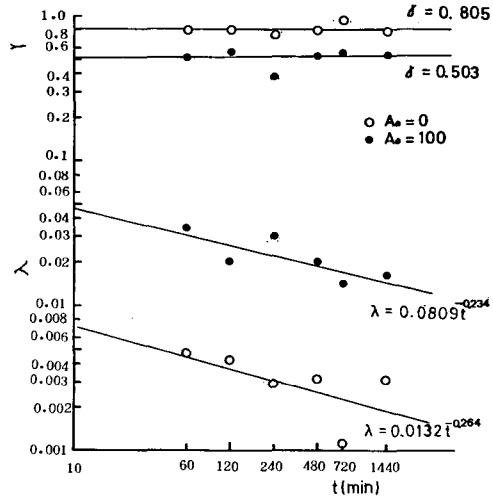

Fig. 8. Relation between duration and coefficients of Kadoya-Nagai method (Thiessen method).

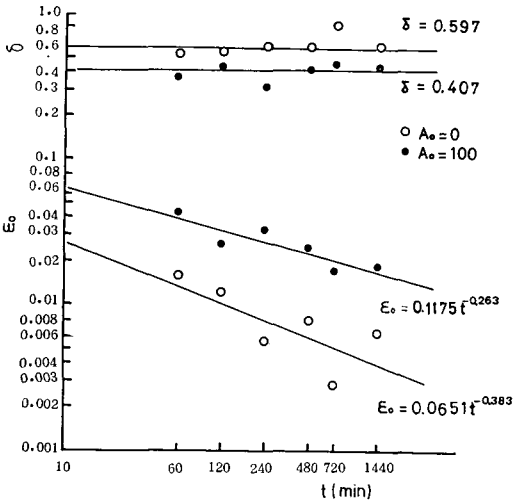

Fig. 9. Relation between duration and coefficients of Woolhiser-Schwalen method (Thiessen method).

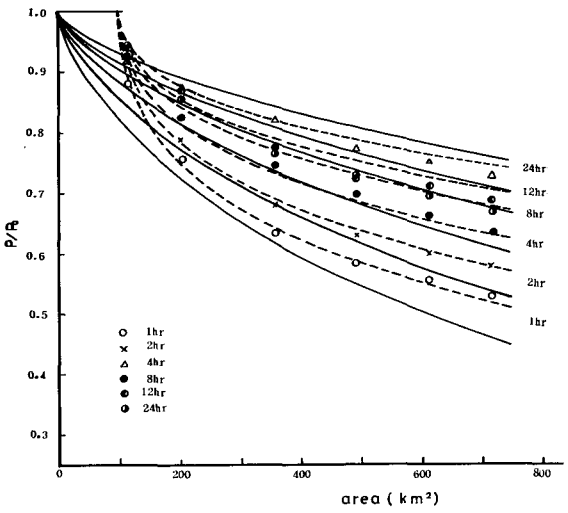

Fig. 10. Relation between area and P/P_0 value by Horton method (Thiessen method).

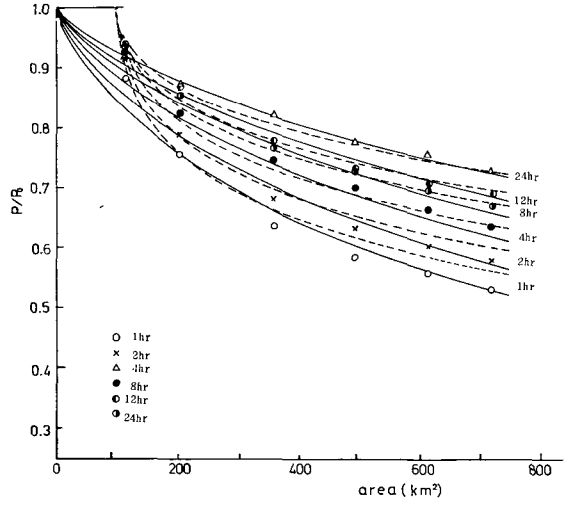

Fig. 11. Relation between area and P/P_0 value by Kadoya-Nagai method (Thiessen method).

間 t の関数となっていると考えられる。そこで β, γ および δ については平均値をとり，α, λ および ε_0 は t の関係式として求め，各図に示した。

つぎに Fig. 7～Fig. 9 で求めた各係数を用いて，(1)～(6) 式の DA 曲線を描くと Fig. 10～Fig. 12 となり，各 DA 式は以下の式となり，誤差 F も併せて示した。

Horton 式

$$P/P_0 = \exp\left\{-0.0310t^{-0.325}A^{0.692}\right\} \qquad (8)$$

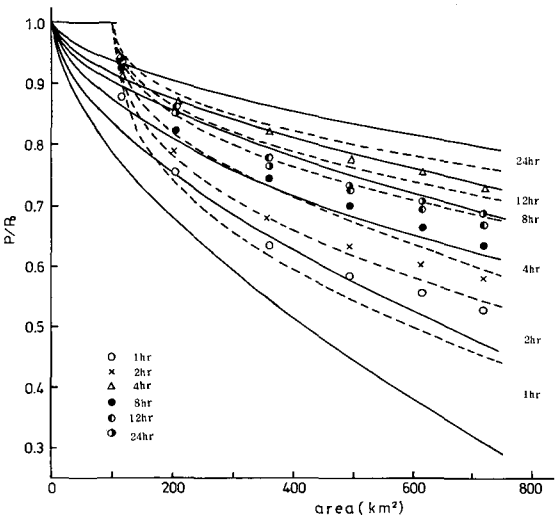

Fig. 12. Relation between area and P/P_0 value by Woolhiser-Schwalen method (Thiessen method).

$F = 6.50\%$, ($F = 6.79\%$ 114.0 km² の値を除いた場合)

角屋・永井式 (I)

$$P/P_0 = \left\{1+0.0132t^{-0.264}A^{0.805}\right\}^{-1} \qquad (9)$$

$F = 4.16\%$, ($F = 4.12\%$ 114 km² の値を除いた場合)

Woolhiser-Schwalen 式

$$P/P_0 = 1-0.0651t^{-0.383}A^{0.597} \qquad (10)$$

$F = 11.24\%$, ($F = 12.44\%$ 114 km² の値を除いた場合)

Horton 修正式

$$P/P_0 = \exp\left\{-0.0992t^{-0.249}(A-A_0)^{0.452}\right\} \qquad (11)$$

$F = 3.98\%$

角屋・永井式 (II)

$$P/P_0 = \left\{1+0.0809t^{-0.234}(A-A_0)^{0.503}\right\}^{-1} \qquad (12)$$

$F = 3.92\%$

Woolhiser-Schwalen 修正式

$$P/P_0 = 1-0.1175t^{-0.263}(A-A_0)^{0.407} \qquad (13)$$

$F = 5.68\%$

各 DA 式の曲線は降雨継続時間の順に並び，またプロットした点と曲線との誤差 F は $A_0=100$ km² の方が小さく，一方 (8)～(10) 式間の誤差についてみると，(9) 式，(8) 式の順に小さく，(10) 式はかなり大きくなっており，

$A_0=100\,\mathrm{km}^2$ では (11) および (12) 式はほぼ同じで小さく $F=4\%$ 未満であるが (13) 式は少し大きくなっている。すなわちティーセン法による DA 式は，$A_0=100\,\mathrm{km}^2$ とした DA 式を用いた方が誤差も小さく，DA 曲線への適合が良い。

さらに Fig. 10～Fig. 12 を比較すると Fig. 11 では各曲線とも実測値の点の間にはさまれ継続時間ごとの P/P_0 の値の曲線の変化幅が小さくなっているのに対し，Fig. 12 では P/P_0 の曲線は継続時間ごとの変化幅が大きくなっており，実測値より相当はなれており，継続時間ごとのバラツキの大きい曲線群である。Fig. 10 ではこれら 2 つの図の中間に位置する曲線群となっている。

3-1-2 等雨量線法による DA 解析

等雨量線法では，14 年間の降雨資料のうちティーセン法による流域平均雨量を参考にして，第 1～3 位までに入ると想定される年を選んで，ティーセン法と同様のブロック分割により，各ブロックの面積雨量を求め，大小順連結法により全体の流域平均雨量を求め，これを Table 4 に示した。さらに継続時間ごとの P/P_0 の値および第 1～3 位の平均値と選定面積との関係を Table 5 に示す。ティーセン法と比較する意味で以下同様に解析を行った。P/P_0 の値と選定面積を (1) 式にあてはめると，Fig. 13 となり (2), (3) 式もほぼ同様な曲線となる。各 DA 式の係数と誤差 F を Table 6 に示す。全般的にティーセン法と比較して面積雨量も小さく，したがって P/P_0 の値も小さくなっている。とくに選定面積 114.0 km^2 における P/P_0 の値が小さいので，(1)～(3) 式の適合性がよい。この原因はティーセン法では面積雨量が雨量観測点の密度に支配されるのに対し，等雨量線法では，

Table 4. Area rainfall putted in order (isohyetal method)

Duration (hr)	Rank	Area (km²) 0	114.0	206.2	361.4	495.1	615.7	720.4
1	1	53.0	30.0	27.6	25.7	24.6	23.7	23.1
	2	35.4	29.1	25.1	21.3	19.1	17.1	16.3
	3	26.0	20.7	19.1	17.6	16.6	15.7	15.7
2	1	70.0	55.5	48.0	43.8	41.3	39.0	37.4
	2	53.9	47.4	43.5	36.9	33.3	32.7	31.8
	3	47.0	39.5	36.8	34.1	31.1	28.1	27.0
4	1	95.5	72.5	71.0	70.2	69.3	65.4	62.1
	2	60.0	53.2	52.6	49.8	48.3	46.4	45.1
	3	60.0	51.5	47.2	43.9	42.2	40.3	38.8
8	1	128.5	122.3	111.2	99.6	95.1	90.5	85.6
	2	113.5	93.3	89.0	86.4	82.4	78.2	75.5
	3	105.4	80.3	73.8	66.1	62.5	59.9	57.6
12	1	162.5	154.3	138.2	129.1	123.6	119.1	116.3
	2	126.3	93.6	90.7	85.9	83.5	79.0	75.7
	3	119.2	80.3	73.8	66.1	62.5	59.9	57.6
24	1	203.0	191.0	181.8	169.9	164.9	162.1	159.4
	2	171.4	144.7	134.8	122.9	117.0	113.9	110.8
	3	159.2	132.8	121.0	110.2	104.3	100.2	96.5

Table 5. Area rainfall (P/P_0 value)—isohyetal method

Duration (hr)	Rank	Area (km²) 114.0	206.2	361.4	495.1	615.7	720.4
1	1	0.566	0.521	0.485	0.464	0.447	0.436
	2	0.822	0.709	0.602	0.540	0.483	0.460
	3	0.796	0.735	0.677	0.638	0.604	0.604
	mean	0.728	0.655	0.588	0.547	0.521	0.500
2	1	0.793	0.686	0.626	0.590	0.557	0.534
	2	0.879	0.807	0.685	0.618	0.607	0.590
	3	0.840	0.783	0.726	0.662	0.598	0.574
	mean	0.837	0.759	0.679	0.623	0.587	0.566
4	1	0.759	0.743	0.735	0.726	0.685	0.650
	2	0.887	0.877	0.830	0.805	0.773	0.752
	3	0.858	0.787	0.732	0.703	0.672	0.647
	mean	0.835	0.802	0.766	0.745	0.710	0.683
8	1	0.952	0.865	0.775	0.740	0.704	0.666
	2	0.822	0.784	0.761	0.726	0.689	0.665
	3	0.762	0.700	0.627	0.593	0.568	0.546
	mean	0.845	0.783	0.721	0.686	0.654	0.626
12	1	0.950	0.850	0.794	0.761	0.733	0.716
	2	0.741	0.718	0.680	0.661	0.625	0.599
	3	0.674	0.619	0.555	0.524	0.503	0.483
	mean	0.788	0.729	0.676	0.649	0.620	0.599
24	1	0.941	0.896	0.837	0.812	0.799	0.785
	2	0.844	0.786	0.717	0.683	0.665	0.646
	3	0.834	0.760	0.692	0.655	0.629	0.606
	mean	0.873	0.814	0.749	0.717	0.698	0.679

Table 6. Coefficients of DA formulas (isohyetal method)

Method	Coefficient	Duration (hr) 1	2	3	4	5	6	Error (%)
Horton method	α	0.0442	0.0092	0.0278	0.0132	0.0356	0.0098	0.70
	β	0.420	0.632	0.389	0.542	0.405	0.565	
Kadoya-Nagai method	λ	0.0307	0.0058	0.0235	0.0096	0.0278	0.0075	0.59
	γ	0.530	0.746	0.443	0.625	0.482	0.636	
Woolhiser-Schwalen method	ε_0	0.0590	0.0137	0.0323	0.0175	0.0438	0.0125	0.93
	δ	0.327	0.531	0.340	0.467	0.337	0.499	

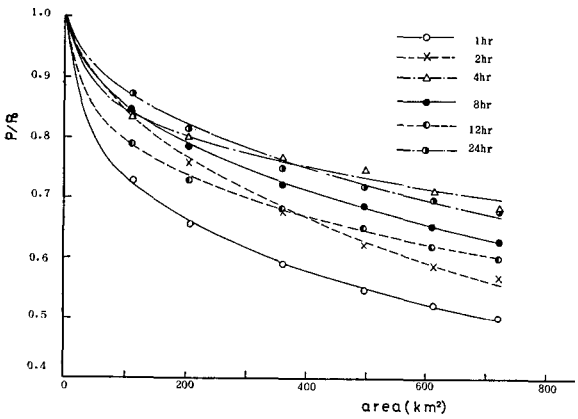

Fig. 13. Relation between area and P/P_0 value by isohyetal method.

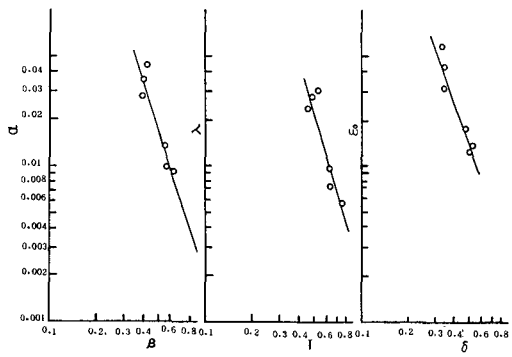

Fig. 14. Each relation of coefficients by DA formulas (isohyetal method).

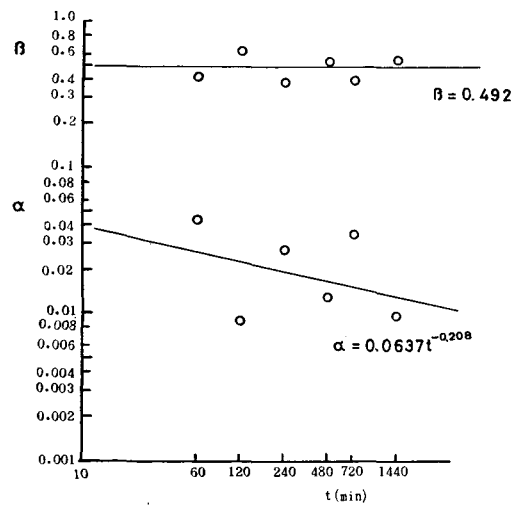

Fig. 15. Relation between duration and coefficients of Horton formula (isohyetal method).

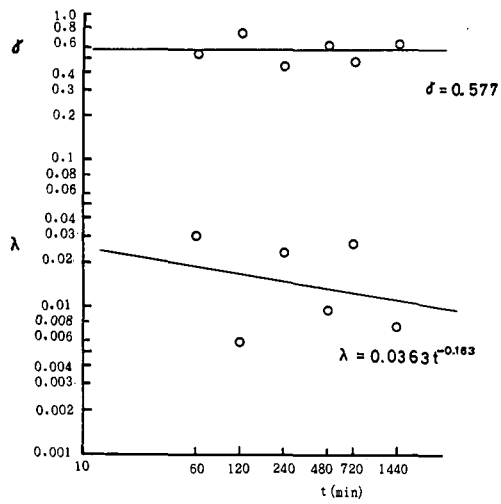

Fig. 16. Relation between duration and coefficients of Kadoya-Nagai formula (isohyetal method).

人為的に面積雨量をコントロールでき，観測点間の連続的な面積雨量を把握できる利点があるためと考えられる。しかし一般的に面積雨量を求める際には膨大な手間がかかる欠点がある。

降雨継続時間 4 hr で P/P_0 の値は，等雨量線法においても大きくなっている。誤差 F は各 DA 式とも 1% 以内で，(2) 式，(1) 式，(3) 式の順に良好である。

またティーセン法と同様に Table 6 において各 DA 式の係数間の関係についてみると Fig. 14 に示すごとく，各係数間の関係がお互いに補完しあっていることがこの場合でも分かる。

つぎに降雨継続時間と各係数との関係を Fig. 15～Fig. 17 に示すが，この場合も β，γ および δ は継続時間に関係せずほぼ一定なので平均値をとり，α，λ および ε_0 は継続時間の関数として各図に示した。一方これらの係数を用いて各 DA 曲線にあてはめたのが Fig. 18～

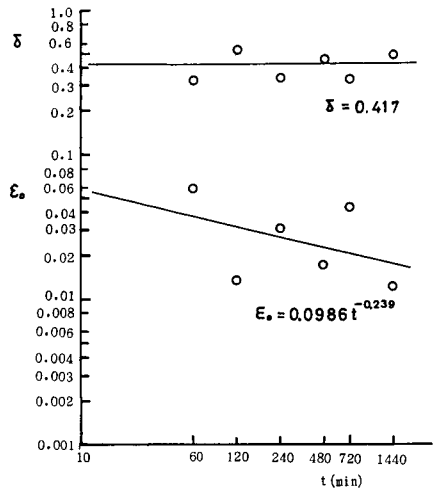

Fig. 17. Relation between duration and coefficients of Woolhiser-Schwalen formula (isohyetal method).

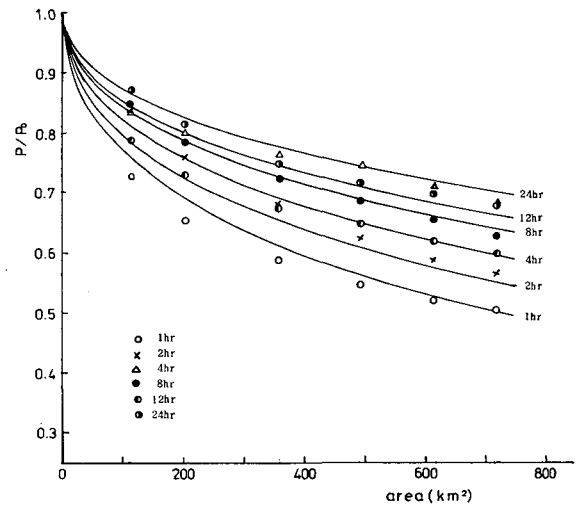

Fig. 18. Relation between area and P/P_0 value by Horton method (isohyetal method).

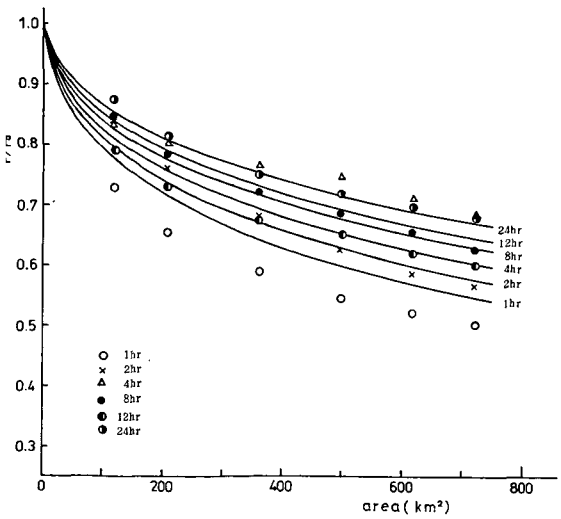

Fig. 19. Relation between area and P/P_0 value by Kadoya-Nagai formula (isohyetal method).

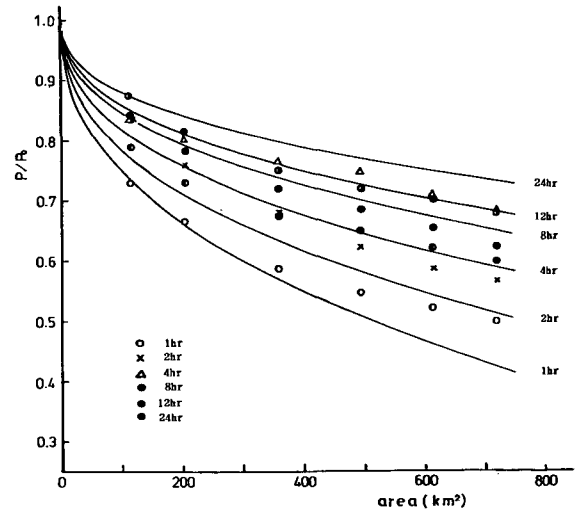

Fig. 20. Relation between area and P/P_0 value by Woolhiser-Schwalen formula (isohyetal method).

Fig. 20 であり，各 DA 式は以下の式となり，誤差 F も併せて示した。

Horton 式

$$P/P_0 = \exp(-0.0637t^{-0.208}A^{0.492}) \quad (14)$$

$$F = 4.85\%$$

角屋・永井式 (I)

$$P/P_0 = (1+0.0363t^{-0.163}A^{0.577})^{-1} \quad (15)$$

$$F = 4.93\%$$

Woolhiser-Schwalen 式

$$P/P_0 = 1-0.0986t^{-0.239}A^{0.417} \quad (16)$$

$$F = 7.20\%$$

誤差 F は(14)式，(15)式はほぼ同じで，$F=5\%$ 未満である。この場合も(16)式は誤差が大きくなっている。

さらに Fig. 18～Fig. 20 を比較すると，ティーセン法の場合と同様な傾向で，各図とも P/P_0 の曲線は継続時間の順に並んでいるが，Fig. 19 では実測値の中央に集まる曲線群となっており，一方 Fig. 20 では実測値よりはなれる曲線群を形成し，Fig. 18 はこれら2つの図の中間に位置する曲線群となっている。このことはティーセン法および等雨量線法ともに各 DA 式の式形からこのような傾向を示すものと推定される。実測値と曲線とのバラツキからみると Horton 式が適合性が良好といえる。

3-2 DD 解析

DD 解析すなわち降雨強度式については，中小河川洪水量の推定，河川の内水排除などの排水，治水計画での降雨特性を知る必要からわが国においても比較的多く研究され，種々の降雨強度式が提案されている。

一連降雨中，任意継続時間 t 内の最大平均降雨強度(一般には単に降雨強度という) I は経験的に (17) 式で示される。

$$I = \frac{a}{t^c+b} \quad (17)$$

ここに　a, b, c:　降雨・流域定数

(16) 式においての特殊解として (18)～(20) 式が得られる。

$c=1$ のとき　Talbot 式:

$$I = a/(t+b) \quad (18)$$

$b=0$ のとき　Sherman 式:

$$I = a/t^c \quad (19)$$

$c=0.5$ のとき　久野式:

$$I = a/(\sqrt{t}+b) \quad (20)$$

(18)式は2時間以下の継続時間の場合で，都市下水道雨水排除計画に用いられ，(19)式は1～2時間以上の継続時間の場合，(20) 式は一般的に，それぞれ適用される。

(17) 式がこれらの式を総括した一般式で，変数2個より定数3個を求めるため簡単には解けないが，これを求める方法として田中・角屋式[4] がある。

この流域では，観測年数が14年間と短いため，各継続時間ごとに観測記録中第1位の値を用いた。

式型は田中・角屋式および Sherman 式について検討し，その結果をそれぞれ(21)式および(22)式となり，両式ともに定数 $c=0.56$ で同じ値となっている。

田中・角屋式

$$I = 504.5/(t^{0.56}-0.379) \quad (21)$$

Sherman 式

$$I = 521.3/t^{0.56} \quad (22)$$

ここに，I: mm/hr，t: min

またこの両式における適合性を誤差 F で評価すると，田中・角屋式 $F=2.5(\%)$，Sherman 式 $F=2.7(\%)$ となり，わずかではあるが田中・角屋式の方が精度は良い。しかし式の簡便さからいえば，Sherman 式で十分であり，この式により降雨強度と継続時間についての関係を Fig. 21 に示す。

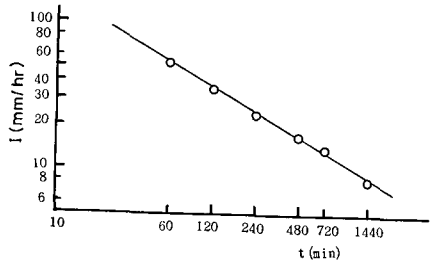

Fig. 21. Maximum rainfall intensity.

4. まとめ

本研究は北海道の洪水比流量に関する研究の一連の研究成果を順次報告するものである。

本報では DAD 特性と洪水到達時間を用いて洪水比流量曲線を推定するための第1段階として，従来わが国であまり研究されていない DAD 解析を後志利別川流域について行ったものである。この結果を要約するとつぎのようである。

1. 流域平均雨量の算定は14年間と短いが，確率紙に描くと確率分布の傾向は認められるが，分布形状はかならずしもきれいではない。

2. DA 解析において，地点雨量と流域平均雨量との

比は指数関数的に減少している。

これを Horton 式, 角屋・永井式, Woolhiser-Schwalen 式およびそれらの修正式にあてはめた結果, ティーセン法では, 各々の修正式を用いた方が誤差 F も小さく, 角屋・永井式 (II) および Horton 修正式が良好である。一方, 等雨量線法では, 地点雨量と同等の面積雨量が発生していると考えられる面積 A_0 を考慮する必要はない。Horton 式, 角屋・永井式 (I) および Woolhiser-Schwalen 式についてその適合性を誤差 F で判断するとティーセン法と同様な傾向を示しているが, Horton 式の方が誤差は小さい。

3. ティーセン法において, $A_0=100\,\mathrm{km}^2$ として地点雨量と同じ面積雨量が生じている面積を用いたが, 実際的に考えるならば大きすぎる。

4. 各 DA 式の係数のうち, α, λ および ε_0 は時間の関数となるが, β, γ および δ はほぼ一定と考えてよい。

5. DD 解析では田中・角屋式が Sherman 式に比べて多少精度が良いが, 式の簡便さからみて Sherman 式で十分使用可能である。

引 用 文 献

1. 建設省： 河川砂防技術基準, 日本河川協会, 1977 年改訂, p. 146–148. 1977.
2. 角屋 睦・永井明博： DA 曲線式の議論, ダム・頭首工の安全設計資料としての洪水比流量に関する研究 (昭和 53 年度科研費), p. 54–56. 1979.
3. 角屋 睦・永井明博： 小畑川・新宮川流域の DAD 解析, ダム・頭首工の安全設計資料としての洪水比流量に関する研究 (昭和 53 年度科研費), p. 57–66. 1979.
4. 田中礼次郎・角屋 睦： 降雨強度式について, 農土講演要旨集, p. 10–11. 1976.

Summary

This paper is the report of a serial reserch on specific discharge of flood in Hokkaido.

In this report, DAD analysis, though not tried very often in Japan, was tried on the Toshibetsu River basin as the first step, in order to estimate the curve of specific discharge of flood by means of DAD characteristics and concentration time of flood. The following is the summary of the research.

1. The calculation period of the average amount of rainfall in the basin is as short as 14 years, but the probability distribution on the probability paper is found, although the figure of distribution is not always clear.

2. By DAD analysis, average areal rainfall in the basin in porportion to point rainfall decreases exponential-functionally.

Applied this to Horton's formula, Kadoya-Nagai's formula, Woolhiser-Schwalen's formula and revised formula of above each, it was found that the error F is smaller by Thiessen's method applied to the revised formulas of above each and better result was found by Kadoya-Nagai's and revised Horton's formula. On the other hand, by isohyetal method, no consideration is needed about the area A_0, in which the areal rainfall equal to point rainfall is possible and Horton's formula, Kadoya-Nagai's formula and Woolhiser-Schwalen's formula are well available. In judging its adaptability by means of error F, similarity to Thiessen's method is seen, although smaller error is shown by Horton's formula.

3. By Thiessen's method, the area in which areal rainfall is counted to be equal to point rainfall is calculated as $A_0=100\,\mathrm{km}^2$, but practically it is thought too wide.

4. Out of coefficients of each DA formula α, λ and ε_0 can be function of time, but β, γ and δ can be considered almost fixed.

5. By DD analysis, Tanaka-Kadoya's formula shows more or less higher accuracy compared with Sherman's formula, though Sherman's formula is well available in view of simplicity.