

北海道における確率降雨分布と地域特性について

北海道開発局 石狩川開発建設部 正員○工 藤 昇

" " 小 松 俊 一

ま え が き

河川の防災事業は、一位的に述べるならば豪雨から人命、財産を守ることにある。これに対処するために、河川技術者は、先ず水文の統計解析を行ない、所定の安全度（一般的には超過確率年を用いる）で、施設計画をたて、事業へ反映する。したがって、河川事業の基礎となるのは、水文、つまり計画降雨の決定にあることが第1条件である。また、都市部における下水道計画、河川堤内地の内水排除計画においても同様である。

一方、降雨資料は、面的にみて密度が粗く、前記計画作業に当り、よく資料がなく困惑する事態に出合ったり、資料があつてもそのしゅう集及び解析に多くの労力を要するなど、宿命的な問題点をもっている。

これまで、降雨強度式については種々提案されており、我が国においても石黒式、物部式、川上式、伊藤式などが提案されているが、いずれも適用範囲に限度があつたり、省力化についてもいまひとつの研究成果が多くの技術者から要求されていた。

ここに、われわれが研究を行なつたのは、北海道における確率雨量強度式を地域的分布に拡大し、空間的な範囲に対しても推定出来る簡易降雨強度式を開発し、本道における河川計画、内水排除計画、下水道計画等に対し精度並びに省力化を提供するものである。

1. 確率降雨強度の計算

北海道における雨量観測所のうち30分、60分、3時間、6時間、12時間、24時間、日雨量の資料が整っている21観測所と、日雨量観測所資料の整っている113観測所においてGumbel法で確率雨量の計算を行なつた。

1)
Gumbel法の基本式は

$$x = x_0 + \frac{1}{a} y \quad (1)$$

であり、極値変量 y は、超過確率年 T から次式で求められる。

$$y = -\ln \{ \ln T - \ln (T-1) \} \quad (2)$$

2. 雨量強度式の関数化

(1)式を(2)式に代入し、書き換えると

$$x = x_0 + \left(\frac{1}{a} \right) \{ -\ln \{ \ln T - \ln (T-1) \} \} \quad (3)$$

となり、(3)式の近似解は

$$T \cong \alpha_0 e^{\beta_0 x} \quad (4)$$

ここに T : 超過確率年, α ; Gumbel 法から求めた確率雨量 (R_T^t)、 t : 雨の継続時間、
 α_0 、 β_0 : 係数

で与えられる。(4)式の適合性は非常によく、その1部を図-1に示すが、相関係数は21観測所において、
各継続時間毎とも $r = 0.999$ 以上を示した。

いま、 $A_0 = -\frac{1}{\beta_0} \ln \alpha_0$ とおくと、(4)式
は、 $\ln(T/\alpha_0) = \beta_0 R_T^t$ から

$$R_T^t = \frac{\ln T}{\beta_0} - \frac{\ln \alpha_0}{\beta_0} = \frac{\ln T}{\beta_0} + A_0 \quad (5)$$

となる。

図-1から判るように(5)式における係数 β_0 、
 A_0 はパラメータ t によって決まることから、
筆者らは次式をあてはめた。

$$t = A_1 e^{B_1 A_0}, \quad t = A_2 \beta_0^{B_2} \quad (6)$$

(6)式は、図-2および図-3に示すように、
全資料とも良い適合性を示した。相関係数
ではどちらも $r = 0.99$ 程度を示した。

なお、(6)式を(5)式に代入すると

$$R_T^t = \frac{\ln T}{(\frac{t}{A_2})^{1/B_2}} + \frac{\ln t - \ln A_1}{B_1} \quad (7)$$

ここに、 t : 雨の継続時間 (hr)

T : 超過確率年 (year)

A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 : 係数

R_T^t : T 確率年、 t 時間の確
率雨量 ($\frac{mm}{t \text{ 時間}} / T \text{ 確率年}$)

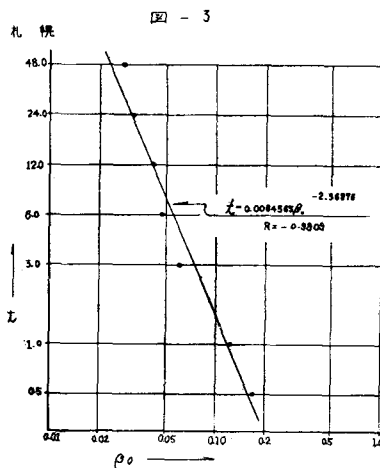
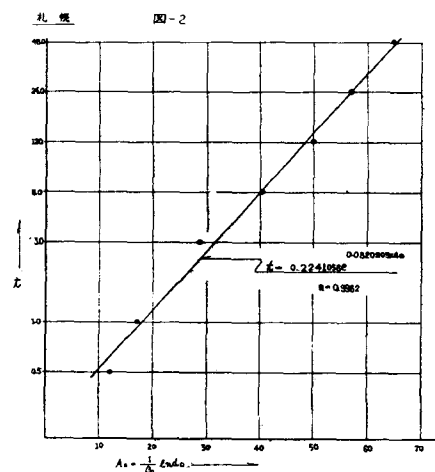
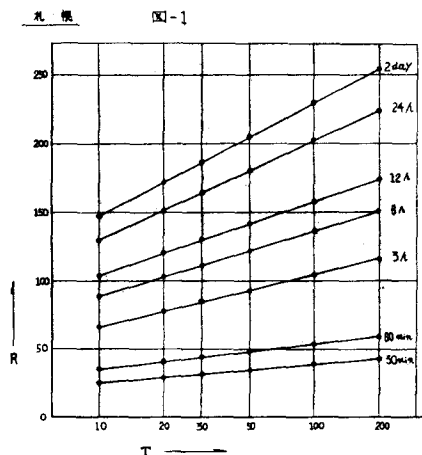
(7)式を得る。

係数 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 は、図-2、3より、
それぞれ最小自乗法で求めることが出来る。

このようにして求めた係数の一部を示した
のが表-1であり、係数間の単相関係数を計
算すると表-2を得た。

表-1 主要都市係数表

都市名	A_1	A_2	B_1	B_2
帯広	0.372146	0.0047901	0.0702251	-2.5568
根室	0.3672178	0.0032886	0.0677553	-2.7731
網走	0.2910445	0.0050642	0.0583175	-2.6479
岩見沢	0.1697266	0.02187	0.0931715	-1.8539
札幌	0.2241058	0.0064365	0.0820205	-2.3698
稚内	0.2081534	0.0035463	0.0860708	-2.5545
室蘭	0.3959556	0.0045837	0.0565605	-2.7992
苫小牧	0.3263736	0.0000022	0.0564454	-4.9961
網走	0.1850973	0.0075037	0.1103209	-2.6417
留萌	0.2592146	0.0033112	0.0811914	-2.6764
旭川	0.2449301	0.0004486	0.0861254	-3.2963
函館	0.2036707	0.0225509	0.0732787	-2.1563
小樽	0.1695239	0.0129055	0.0982929	-2.2775



3. 降雨強度式の地域分布

表-2 係数間単相関マトリックス

	A ₁	log ₁₀ A ₂	B ₁	B ₂
A ₁	1			
log ₁₀ A ₂	0.580	1		
B ₁	-0.8202	-0.4832	1	
B ₂	0.4293	0.9793	-0.5074	1

(7)式の係数は、21観測所において作成したもので、これにより北海道内の空間地域を推定することは困難である。そこで、筆者らは、日雨量観測113ヶ所における降雨強度推定式を求めるため、地形因子(有効なものを選別)と日および2日雨量から求めた因子をそれぞれ表-3の要領で求め、多重相関法でそれぞれの R^2 を推定し、前記同様に(7)式の係数を求めて、134観測所の係数データに基づいて等係数図を描き、10 Kmメッシュで読みとり、雨量強度式の係数一覧表を作成した。²⁾

多重相関回帰式は次式による。

$$R^2 = a_0 + a_1 p_1 + a_2 p_2 + a_3 p_3 + \dots + a_{14} p_{14} \quad (8)$$

ここに R^2 : Tは0, 20, 30, 50, 100, 200年tは30, 60分, 3, 6, 12, 24, 48時間別のそれぞれの確率雨量

$a_0, a_1, \dots, a_{14}$: 回帰係数

$p_1, p_2, \dots, p_{14}$: 因子

(8)式による因子間の単相関係数を求めたのが表-4であり、因子yはT=50年におけるt=3, t=6, t=12時間についてそれぞれの計算例を示したものであるが、いずれの場合においても重相関係数が0.9以上で求まり高い相関性を確認することが出来、確率雨量強度の地域的分布としてかなり有効なものとして評価出来る。また、表-4の回帰係数を示したのが表-5であり、この回帰係数に基づいて、それぞれの継続時間で再現したのが、図-4である。³⁾
 なお、地形因子は、石原の方法、丸安らの方法から引用したものである。

このようにして得た道内134観測所の降雨強度式(7)式の係数分布図を描いたのが図5~8である。

表-3

記号	因子名	定義 (単位)
P ₁	高 度	地点の標高 (m) : h
P ₂	起 伏 度 (2 Km)	地点より2 Km離れた4交点の平均標高 ($\bar{h}$) と 地点標高の差 (m) : $h - \bar{h}$
P ₃	起 伏 度 (4 Km)	地点より4 Km離れた4交点の平均標高 ($\bar{h}$) と $\bar{h}$ の差 : $\bar{h} - \bar{h}$
P ₄	起 伏 度 (8 Km)	同様に8 Km離れた $\bar{h}$ と $\bar{h}$ の差 : $\bar{h} - \bar{h}$
P ₅	起 伏 度 (8 Km)	上記の $\bar{h}$
P ₆	開 放 度	地点を中心とした半径20 Km以内で、地点より200 m以上高い部分をふどり、中心から放射状に開いている部分の角度 (度)
P ₇	係 数 (1) (日)	(4)式の $a_0, \dots$ T超過確率年と日確率雨量
P ₈	係 数 (2) (日)	(4)式の $\beta_0, \dots$ " "
P ₉	係 数 (3) (2日)	(4)式の $a_0, \dots$ " "
P ₁₀	係 数 (4) (2日)	(4)式の $\beta_0, \dots$ " "
P ₁₁	係 数 (5) (日)	(5)式の $A_0, \dots$ 係数(1)と(2)から求める
P ₁₂	係 数 (6) (2日)	(5)式の $A_0, \dots$ 係数(3)と(4)から求める
P ₁₃	確率日雨量	T 確率年日雨量 (mm/day)
P ₁₄	確率2日雨量	T年確率2日雨量 (mm/2 day)
y	確 率 雨 量	超過確率T年と継続時間tの雨量 R^2 (mm/t・hr)

表-4 因子間の単相関マトリックス

因子	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	y
P ₁	1.000														
P ₂	-0.612	1.000													
P ₃	-0.608	0.608	1.000												
P ₄	0.202	-0.090	0.188	1.000											
P ₅	0.878	-0.782	-0.759	-0.144	1.000										
P ₆	-0.572	0.880	0.878	0.889	-0.782	1.000									
P ₇	0.270	-0.008	-0.080	0.180	0.881	-0.415	1.000								
P ₈	-0.117	0.882	0.048	-0.016	-0.219	0.267	-0.688	1.000							
P ₉	0.848	-0.564	-0.157	-0.029	0.440	-0.507	0.919	-0.841	1.000						
P ₁₀	-0.802	0.605	0.847	0.165	-0.440	0.681	-0.894	0.824	-0.870	1.000					
P ₁₁	-0.408	0.471	0.171	-0.128	-0.411	0.497	-0.688	0.848	-0.811	0.248	1.000				
P ₁₂	-0.248	0.428	0.018	-0.092	-0.278	0.417	-0.678	0.892	-0.824	0.987	0.987	1.000			
P ₁₃	-0.074	-0.217	0.100	0.018	0.016	-0.088	0.885	-0.877	0.849	-0.712	0.850	-0.880	1.000		
P ₁₄	0.218	-0.862	-0.172	-0.161	0.880	-0.815	0.628	-0.791	0.785	-0.890	-0.818	-0.826	0.826	1.000	
R ₁ ^{T=50}	-0.618	0.280	0.262	-0.128	-0.852	0.167	0.289	-0.469	0.120	-0.204	0.888	0.248	0.721	0.887	1.000
R ₂ ^{T=50}	-0.698	0.844	0.841	-0.122	-0.460	0.286	-0.294	-0.898	-0.277	0.104	0.576	0.807	0.842	0.840	1.000
R ₃ ^{T=50}	-0.447	0.271	0.291	-0.188	-0.427	0.196	-0.885	-0.186	-0.418	0.288	0.588	0.526	0.110	-0.116	1.000

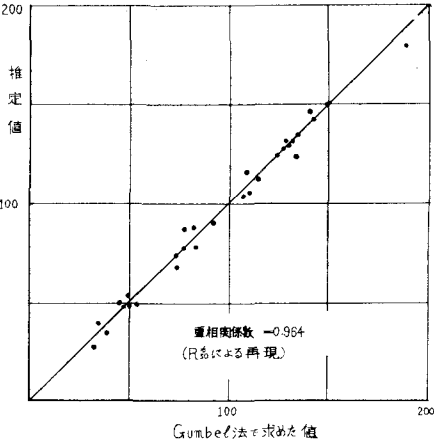


図-4

表-5 回 歸 係 數

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}
$R_{T=12}$	7963	0603	-0468	-0539	-0718	-0568	-0007	-68354	35556	42402	-112367	-452	285	291	-156
$R_{T=6}$	22246	248	-241	-224	-257	-248	-008	-25189	164704	64635	-535644	-219	535	209	-317
$R_{T=50}$	17301	226	-220	-201	-229	-228	-011	-11695	296127	30121	-64911	-226	403	180	-237

圖-5

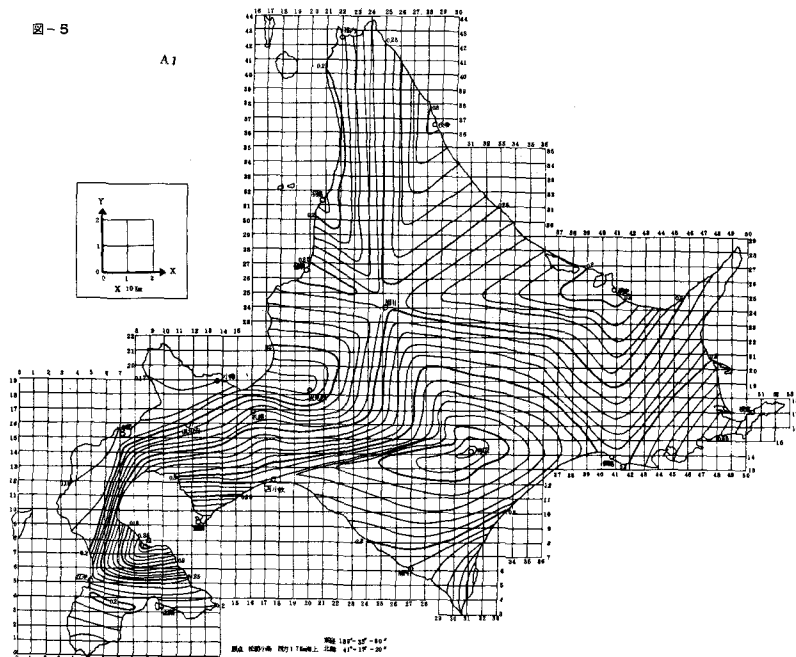


圖-6

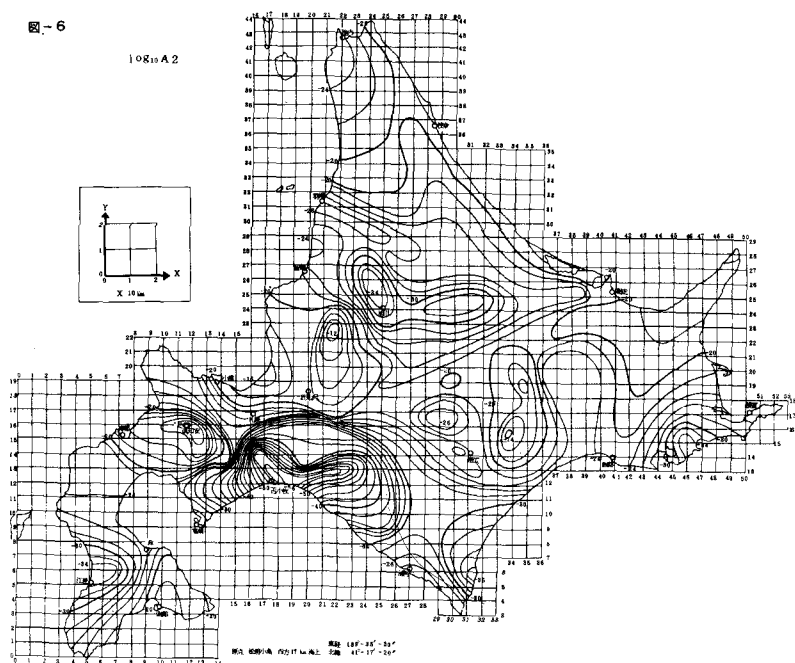


图-7

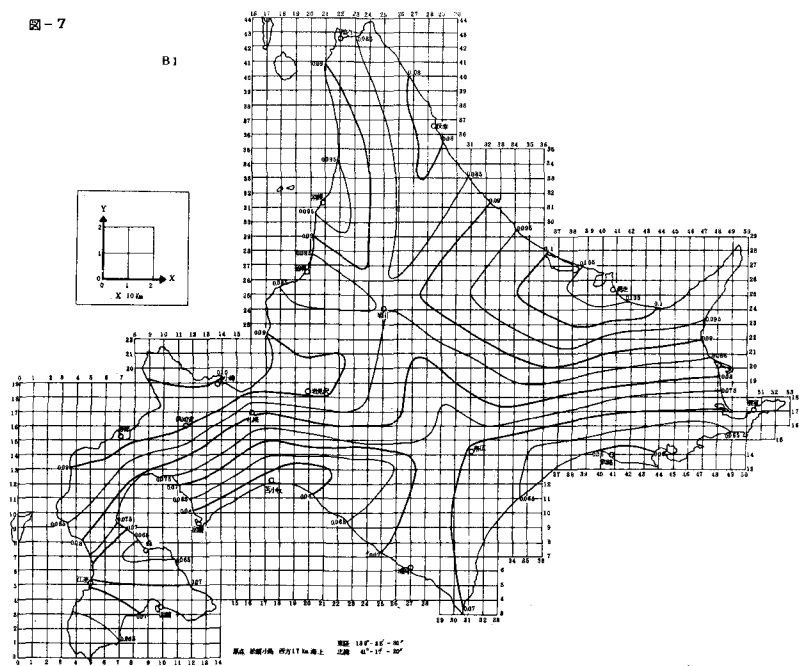
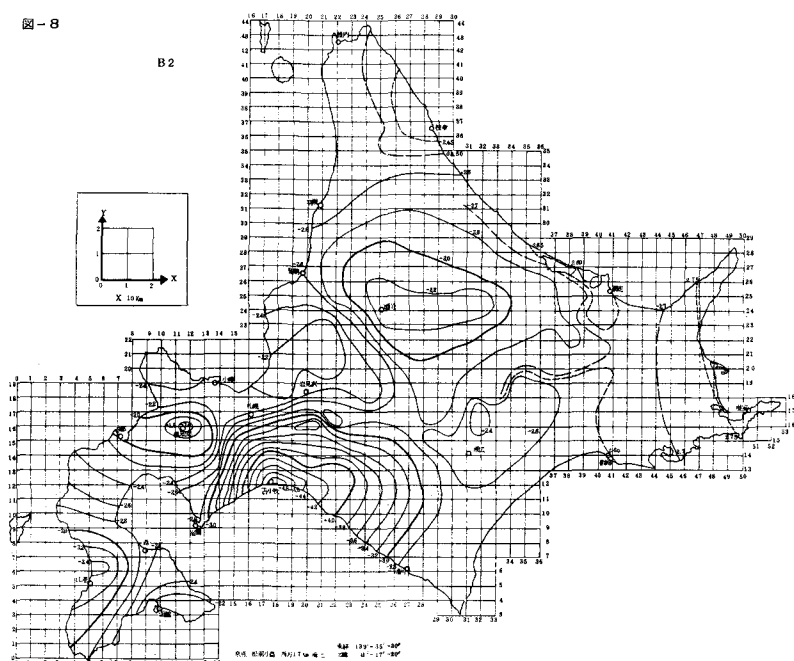


图-8



4. 降雨強度式の検証

21観測所における(7)式は、高い適合性が確認されたが、参考のため他の方法と比較してみる。

これまでの降雨強度式として、米国においてFeir教授は $R_T^1 = C \cdot T^n / (d+t)^m$ 、Linsley教授は $R_T^1 = K \cdot T^{x/t} \cdot t^n$ 式を提唱しているが、図-1における雨量強度曲線が平行線となるので実用上適当でなく、畠氏の研究においても明らかにされている。

我が国では、物部氏、伊藤氏、川上氏、石黒氏らの方法がある。

$$(\text{物部式}) \quad R^t = \frac{R_{24}}{24} \left(\frac{24}{t} \right)^{2/3}$$

$$(\text{伊藤式}) \quad R^t = \frac{R_{24}}{24} \left(\frac{3471}{t^{1.35} + 1502} \right), \quad (t \text{ は分単位})$$

$$(\text{川上式}) \quad R^t = \frac{R_{24}}{24} \left(\frac{30}{t+6} \right)$$

$$(\text{石黒式}) \quad a' = b + 24, \quad b = \frac{\sqrt{24} - \beta_N^t}{\beta_N^t - 1}, \quad \beta_N^t = \frac{I_N^t}{I_N^{24}}, \quad \beta_N = \frac{a'}{\sqrt{t+6}}$$

石黒式については、上式の外に $\beta_N = \frac{a'}{t+b}$ 、 $\beta_N = \frac{a'}{t^n}$ の式があるが、石黒氏の分類によると札幌では(9)式を用いることとなつている。

以上、(9)式の各々と、筆者らの方法を札幌観測所において比較計算したのが表-6である。結果から、物部、川上式は1時間未満の短時間強度に大きな誤差を生じ、伊藤式は3時間以上に大きな誤差を生じ、石黒式は外挿及び内挿部分で誤差が認められ、筆者らの方式は他の方法に比較して平均的に安定した精度を示している。

表-6 比較表 (真値はGumbel法の確率計算値を示す)

T	方 法	30分		60分		3時間		6時間		12時間		24時間		48時間	
		計算値	相対誤差	計算値	相対誤差	計算値	相対誤差	計算値	相対誤差	計算値	相対誤差	計算値	相対誤差	計算値	相対誤差
10	真 値	254	%	354	%	665	%	883	%	1039	%	1294	%	1472	%
	物 部	356	+40.2	449	+26.7	647	-2.7	815	-7.7	1027	-1.2	1294	0	1630	+10.8
	伊 藤	149	-41.2	299	-15.6	894	+34.5								
	川 上	124	-51.0	231	-34.7	539	-18.9	809	-8.4	1078	+3.8	1294	0	1438	-2.3
	石 黒	305	+20.1	354	0	520	-21.8	692	-21.6	941	-9.4	1294	0	1796	+22.0
	筆 者	243	-4.3	376	+6.2	625	-6.0	814	-7.8	1039	0	1312	+1.4	1648	+11.9
50	真 値	347		484		933		1221		1421		1808		2055	
	物 部	497	+43.4	627	+29.5	904	-3.1	1139	-6.7	1435	+1.0	1808	0	2278	+10.8
	伊 藤	209	-39.8	418	-13.7	1250	+33.9								
	川 上	174	-49.9	323	-33.3	753	-19.3	1130	-7.5	1507	+6.0	1808	0	2009	-2.2
	石 黒	407	+17.3	483	-0.2	719	-22.9	963	-21.1	1312	-7.7	1808	0	2513	+22.3
	筆 者	344	-0.9	512	+6.0	840	-9.9	1103	-9.7	1426	+0.6	1830	+1.2	2343	+14.0
100	真 値	387		538		1047		1364		1582		2025		2302	
	物 部	557	+44.0	702	+30.5	1012	-3.3	1276	-6.5	1607	+1.6	2023	0	2551	+10.8
	伊 藤	234	-39.6	468	-13.1	1400	+33.7								
	川 上	195	-49.7	362	-32.3	844	-19.4	1266	-7.2	1687	+6.7	2025	0	2250	-2.3
	石 黒	456	+17.8	541	+0.6	805	-23.2	1078	-21.0	1469	-7.1	2025	0	2814	+22.2
	筆 者	388	+0.3	571	+6.1	933	-10.9	1227	-10.0	1593	+0.7	2053	+1.4	2642	+14.8

あ と が き

筆者らが提案した降雨強度式は、地域的な観点から精度ならびに利用者の省力化について特に考慮をはらったもので、従来から莫大な作業量を伴っていた計画降雨がワンタッチで得られる方法として提案したものであり、河川計画及び内水、下水道計画に対して事業の促進と局地的なエラーを防ぐ意味で広く活用していただければ幸甚である。

参 考 文 献

- (1) たとえば 岩井、石黒 共著 応用水文統計学 森北出版
- (2) 工藤 昇、小松俊一、北海道における計画降雨 石狩川開発建設部 昭和49年3月
- (3) 石原健二 講座 水文気象の話(XIII) 水温の研究第12巻第1号
- (4) 丸安、内田、田浦 航空写真による融雪ならびに流出解析 1964.4 土木学会論文集164号
- (5) 畠 節雄 北海道主要都市における確率雨量強度式について 土木学会研究論文集北海道支部24号