

主として下水道計画上より見たる
長野市の降雨強度に関して

佐々木 八郎^{*}

AN INVESTIGATION OF RAINFALL INTENSITY AT
NAGANO CITY MAINLY FOR THE PURPOSE
OF SEWERAGE DESIGN

Hachiro SASAKI

(Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering)

(Received October 15, 1956)

Synopsis. The author applied the empirical formula proposed by FAIR and SHERMAN to the rainfall records at Nagano City, a representative of mountainous districts in Japan. The calculated values by the formula obtained show a fair accordance with the given data, as is the case in the original computation by them. The present work would therefore suggest to be worthy of notice in sewerage design in this country.

1. ま え が き

本報告は、わが国本州において代表的内陸型気候をもつ長野市について、長野測候所降雨記録(1916~1955)をもとにし、その降雨形に関し、つぎの各項の考察を試みんとしたものである。

(1) 下水道計画上必要な「継続時間の短かき強雨(熱雷性降雨を含めたる)」について“強度-継続時間-頻度 intensity-duration-frequency (I-D-F)”関係をあらわす指数函数形実験式。

(2) 河川工学上にも重要な「継続時間の長き降雨」について、同上。

(3) 上記実験式に含まるる水文学的の3つの係数を、降雨継続日時の長さに関連して変化せしめ、それぞれの適用範囲を制限すること。

いうまでもなく、下水道築造の当初にあたり、排水管渠の大きさを定めるため、雨量を何程に採るべきかは、きわめて重要な基本事項である。

わが国の例に徴すれば、93都市のうち、従来、合理的方法(rational method)による都市おおよそ1/3強であるに対し、経験式による都市はおおよそ2/3弱であり、後者のほとんど大部分は慣行的にBÜRKLİ-ZIEGLER式によっている。経験式は、構成上、

* 信州大学助教授

「降雨継続時間と降雨の強さとの相関」および「主・支両渠の流れの遅滞の相違」についての因子が欠除している。また、外国都市において調査せられた経験式を、気候・地勢を異にする都市にそのまま応用しうことは疑わしいことである。つぎに、合理的方法を用いる場合においては、同一都市にあっても、排水区域の種別に応じて、あるいは主渠・支渠の別に応じて、それぞれ異なる標準雨を採用する必要があるべきであろう。すなわち、上掲 I-D-F 関係を適宜変えて設計を施すことが時によって必要である。

この I-D-F 関係について、有名なドイツの IMHOFF 博士は図表をもって解を示しているのは興味あることであり、他方、わが国においては直線式である TALBOT 型によるものが大部をしめている。

しかして、(1)においていま求めんとする、いわゆる SHERMAN 型と呼ばれる指数函数形については、たとえば近年、C. K. STIDD (1953)の「降雨量の立方根の度数分布の正規性」が唱えられるごとく、疑問がもたれている。しかし、その是・非に関する根本論についてはしばらく措くこととし、わが国の都市において(1)の形で示されたものは稀有に属するゆえ、(1)はその例を示し各位の批判を仰ぐ上からも意義があろうと考える。

なお、(1)の処理の手順は、衛生工学における権威者として著名な FAIR が、同氏の近著 *Water Supply and Waste-Water Disposal*¹⁾中に詳細に掲げた New York 市に対する計算例に準拠したものである。

2. 観測記録

観測資料は、長野測候所（同市城山公園、E 138°12′, N 36°40′, 海拔 419.3m, 創立1889）に保管せられる自記雨量計の記録を見せていただき、Fig. 1 のような自記雨量記録紙より、一降雨を取出し、降雨継続時間 t (min) の 10・20・30・40・50・60・80・100・120・140・160・180 の 12 区分に対して、それぞれ該当する区分における最大降雨量 (mm) をさがしだして測定をなし、これらを R_p ($p=1\cdot2\cdots\cdot 18$) とし、もって降雨強度 i (mm/hr) を算定することとした。ただし、

$$i = 60 (10p)^{-1} R_p \text{ とする。}$$

次に、 t のそれぞれの区分毎について、或る定めめの i もしくは i を超える強雨の回数を集計した。Table 1 はその結果である。

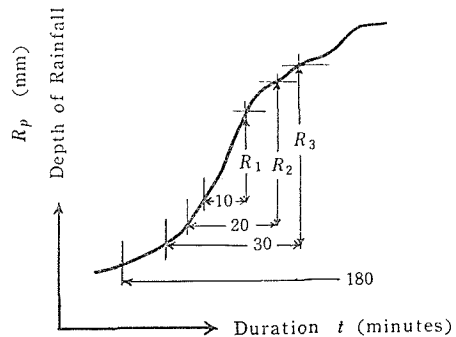


Fig. 1

** 記録の処理方針については、たとえば 2) 3) を参照せられたい。

*** Table 1 を得る過程において、脱落・誤差・過失の類がもしありとすれば、それは観測所側にあるものではなく、全く筆者に帰せらるべきものである。

Table 1 Record of intense rainfalls at Nagano City from 1916 to 1955 (40 yrs).
Number of intense rainfalls of stated intensity i or more.

Duration t (min.)	i (mm/hr)													
	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160
10	1,543	761	301	186	97	65	49	36	32	25	16	9	2	2
20	1,132	477	179	91	45	34	22	17	9	4				
30	833	347	111	52	29	16	11	5	2					
40	624	230	68	34	17	8	3	1						
50	494	171	42	19	7	3	1							
60	405	129	31	12	4	2	1							
80	297	80	16	3	2									
100	228	58	7	2	1									
120	168	34	2	1										
140	120	20	2	1										
160	92	15	1											
180	86	13	1											

ただし、上表は 1916~1955年 (40カ年) に対するもので、降雪を含まない。

3. 頻度について

降雨強度が大なるものほど、その頻度は小さい。簡単には、ある地点の N 年間の記録中の最高強雨は N 年間に 1 回の頻度とし、第 2 位の強雨は N 年間に 2 回、いいかえれば、 $N/2$ 年に 1 回の頻度とする。しかし、次の考え方がより合理的である。すなわち、 N 年間記録中の最高を示すものは $N/(1-1/2) = 2N$ 年に 1 回の頻度を有し、次位のは $N/(2-1/2) = 0.67N$ 年間に 1 回の頻度を有し、一般に、記録中の k 番目のものは $N/(k-1/2)$ 年間に 1 回の頻度を有するとなすものである。これは前者 N/k 法に比すれば、より小さい頻度を与えるものである。 $N/(k-1/2) = I$ は average recurrence interval と呼ばれるものであるが、これは、外挿法を用い、極めて永年月に対する頻度を求める場合に適用される。

Table 2

Duration t (min.)	(a)				(b)			
	Intensity of rainfall, i (mm/hr) For intense rainfalls of stated frequency.				Slope $(-di/dt) = (i_k - i_{k+2}) / (t_{k+2} - t_k)$ (mm/hr/min) For intense rainfalls of stated frequency.			
	1-yr	2-yr	5-yr	10-yr	1-yr	2-yr	5-yr	10-yr
10	67	95	122	130				
20	44	64	81	90	1.65	2.45	2.90	2.90
30	34	46	64	72	0.85	1.30	1.55	1.65
40	27	38	50	57	0.65	0.85	1.25	1.25
50	21	29	39	47	0.45	0.70	0.80	0.85
60	18	24	34	40	0.325	0.50	0.65	0.70
80	14	18	24	29	0.175	0.25	0.375	0.40
100	11	14	19	24	0.125	0.15	0.25	0.275
120	9	12	14	18	0.075	0.10	0.15	0.20
140	8	10	13	16	0.05	0.075	0.05	0.075
160	7	9	12	15	0.025	0.025	0.05	0.05
180	7	9	11	14				

頻度の定義には、幾多の異なる標準が考え得られるのであるが、本報告においては、筆者は次の考え方に従うこととした。すなわち、いま T 年強雨は N 年間に N/T 回起るとするものである。この考え方にもとずき **Table 1** のデータを用い、これに内挿法を施すならば結局 **Table 2(a)** が誘導せられよう。ただし、本例においては、 T に 1, 2, 5 および 10 年の 4 コの return period を採ることとした。

4. 降雨強度-継続時間-頻度 の実験式

本節の関係を表わす実験式に、¹⁾ 筆者は次のごとき指数形を採った。

$$i = C T^m (t + d)^{-n} \quad (1)$$

ここに

i : 強雨の強度 (mm/hr)

t : この強雨の継続時間 (minute)

T : T 年に 1 回起るという意味での頻度

C, d および m, n は係数および指数

いま、上記の諸係数および諸指数を最小自乗法によって求めることとする。

式(1) は 次の直線式に書きかえられる。

$$[\log(-di/dt)] = \log n - (1/n)\log A + (1+1/n)[\log i]. \quad (i)$$

ただし、上式中 $A = CT^m$ とす。

降雨強度順列の時間の間隔を相等しくとるならば i_{k+1} における強度-時間の勾配 $(-di/dt)$ は、ほぼ近似的に

$$(-di/dt) = (i_k - i_{k+2}) / (t_{k+2} - t_k). \quad (ii)$$

ただし $k, k+1, k+2$ は観測値順列を示す。式 (ii) に対する数値を示せば **Table 2 (b)** となる。

いま $x = \log i$, $y = \log(-di/dt)$ として正等方程式を作る。^{**}すなわち

$$\text{I. } n'a + b\Sigma x - \Sigma y = 0 \quad \text{II. } a\Sigma x + b\Sigma x^2 - \Sigma xy = 0$$

ここに $a = (\log n) - (1/n)(\log A)$, $b = (1+1/n)$, $n' = 10$

x, y, x^2 および xy の諸値は次表に示すごとくである。

** 厳格には、指数函数値について正等方程式をとくべきであるが、さほど結果の精密を要せぬ計算であるから便宜上、対数のそれについて解をもとめた。本項について、本教室 谷本勉之助 博士の御助言のあったことを附記する。

	$x = \log i$				$y = \log (-di/dt)$			
	1-yr	2-yr	5-yr	10-yr	1-yr	2-yr	5-yr	10-yr
1.6435	1.8062	1.9085	1.9542	0.2175	0.3892	0.4624	0.4624	
1.5315	1.6628	1.8062	1.8573	-0.0706	0.1139	0.1903	0.2175	
1.4314	1.5798	1.6990	1.7559	-0.1871	-0.0706	0.0969	0.0969	
1.3222	1.4624	1.5911	1.6721	-0.3468	-0.1549	-0.0969	-0.0706	
1.2553	1.3802	1.5315	1.6021	-0.4881	-0.3010	-0.1871	-0.1549	
1.1461	1.2553	1.3802	1.4624	-0.7570	-0.6021	-0.4260	-0.3979	
1.0414	1.1461	1.2788	1.3802	-0.9031	-0.8239	-0.6021	-0.5607	
0.9542	1.0792	1.1461	1.2553	-1.1249	-1.0000	-0.8239	-0.6990	
0.9031	1.0000	1.1139	1.2041	-1.3010	-1.1249	-1.3010	-1.1249	
0.8451	0.9542	1.0792	1.1761	-1.6021	-1.6021	-1.3010	-1.3010	
Sum	12.0738	13.3262	14.5345	15.3197	-6.5632	-5.1764	-3.9884	-3.5322
Mean	1.2074	1.3326	1.4535	1.5320	-0.6563	-0.5176	-0.3988	-0.3532
Antilog(M_x)	16.1	21.5	28.4	34.0	(M_y)0.221	0.304	0.400	0.443

	$x^2 = (\log i)^2$				$xy = (\log i) \times \log (-di/dt)$			
	1-yr	2-yr	5-yr	10-yr	1-yr	2-yr	5-yr	10-yr
2.7011	3.2624	3.6424	3.8189	0.3575	0.7030	0.8825	0.9036	
2.3455	2.7649	3.2624	3.4496	-0.1081	0.1894	0.3437	0.4040	
2.0489	2.4958	2.8866	3.0832	-0.2678	-0.1115	0.1646	0.1701	
1.7482	2.1386	2.5316	2.7959	-0.4585	-0.2265	-0.1542	-0.1181	
1.5758	1.9050	2.3455	2.5667	-0.6127	-0.4154	-0.2865	-0.2482	
1.3135	1.5758	1.9050	2.1386	-0.8676	-0.7558	-0.5880	-0.5819	
1.0845	1.3135	1.6353	1.9050	-0.9405	-0.9443	-0.7700	-0.7739	
0.9105	1.1647	1.3135	1.5758	-1.0734	-1.0792	-0.9443	-0.8775	
0.8156	1.0000	1.2408	1.4499	-1.1749	-1.1249	-1.4492	-1.3545	
0.7142	0.9105	1.1647	1.3832	-1.3539	-1.5287	-1.4040	-1.5301	
Sum	15.2578	18.5312	21.9278	24.1668	-6.4999	-5.2939	-4.2054	-4.0065

よって、4組の正等方程式を解けば次の結果をうる。

$$\begin{aligned} 1\text{-yr} & \quad 0.0563 \quad b = 0.1180 \\ 2\text{-yr} & \quad 0.0580 \quad b = 0.1203 \\ 5\text{-yr} & \quad 0.0552 \quad b = 0.1095 \\ 10\text{-yr} & \quad 0.0455 \quad b = 0.0917 \end{aligned}$$

n は4種の return period に対し同一なるべきものとし、 b の平均値をとれば、 $b = 2.0442$ したがって $n = 0.958$ をうる。すなわち (1) は $i = A / (t + d)^{0.958}$ となる。

次に A と d とを求めんとす。 b なる勾配の直線は $\log(-di/dt)$ と $\log i$ とのそれぞれ幾何平均値たる M_y と M_x との交点を通るべきにより、 $i = 1.0$ における縦軸 $\log(-di/dt)$ の読みを a とすれば

$$b = (\log M_y - a) / (\log M_x - \log 1.0)$$

よって、 a を求めれば

$$\begin{aligned} \text{1-yr} \quad a &= -0.6563 - 2.0442 \times 1.2074 = -3.1245 \\ \text{2-yr} \quad a &= -0.5176 - 2.0442 \times 1.3326 = -3.2417 \\ \text{5-yr} \quad a &= -0.3988 - 2.0442 \times 1.4535 = -3.3700 \\ \text{10-yr} \quad a &= -0.3532 - 2.0442 \times 1.5320 = -3.4849 \end{aligned}$$

次に $a = \log n - (1/n)(\log A)$ とし、 A を求めれば

$$\begin{aligned} \text{1-yr} \quad \log A &= 0.958 \times (-0.0186 + 3.1245) = 2.9755 \quad \therefore A = 945 \\ \text{2-yr} \quad \log A &= \quad \quad \quad (\quad \quad + 3.2417) = 3.0877 \quad \log A = 1,224 \\ \text{5-yr} \quad \log A &= \quad \quad \quad (\quad \quad + 3.3700) = 3.2106 \quad \log A = 1,624 \\ \text{10-yr} \quad \log A &= \quad \quad \quad (\quad \quad + 3.4849) = 3.3207 \quad \log A = 2,093 \end{aligned}$$

これより $A = CT^m$ における C と m の値を、最小自乗法を用いて求む。すなわち

T	$\log T$	A	$\log A$	$(\log T)^2$	$(\log T)(\log A)$	A (Calculated)
1	0.0000	945	2.9755	0.0000	0.0000	950
2	0.3010	1,224	3.0877	0.0906	0.9294	1,200
5	0.6990	1,624	3.2106	0.4886	2.2442	1,650
10	1.0000	2,093	3.3207	1.0000	3.3207	2,080
Sum	2.0000		12.5945	1.5792	6.4943	
Mean	0.5000		3.1486	0.3948	1.6236	

とし、正等方程式をたてて、これを解けば、結局 $m = 0.340$, $C = 950$ (say) をうる。すなわち (1) は $i = 950 T^{0.340} / (t + d)^{0.958}$ となる。

最後に d を定めんに $d + t = (A/i)^{1/n}$ かつ、 t の冪数は 1.0 なるをもって、この直線は $y = (A/i)^{1/n}$ と $x = t$ との、それぞれの平均値たる M_y と M_x との交点を通るべきである。ゆえに

$$\tan \alpha = 1.0 = (M_y - d) / (M_x - 0) \quad \text{すなわち} \quad d = M_y - M_x$$

よって、 i および t の値は観測値より、また、 n および A の値は前記の計算値より、それぞれ採用し $(A/i)^{1/n}$ を計算すれば結局 Table 3 をうる。

すなわち、長野市に対して次式 (2) をうる。

$$\left. \begin{aligned} i &= 950 T^{0.340} (t + 5)^{-0.958} & (2) \\ \text{1-yr} \quad i &= 950 (t + 5)^{-0.958} & (2-1) \\ \text{2-yr} \quad i &= 1200 (t + 5)^{-0.958} & (2-2) \\ \text{3-yr} \quad i &= 1380 (t + 5)^{-0.958} & (2-3) \\ \text{5-yr} \quad i &= 1650 (t + 5)^{-0.958} & (2-5) \\ \text{10-yr} \quad i &= 2080 (t + 5)^{-0.958} & (2-10) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} 20 < t < 180 \\ \text{Nagano City} \\ (H. SASAKI) \end{array}$$

Table 3 Observed and calculated values of rainfall intensity

$x=t$ (min.)	Observed i (mm/hr)	$y=(t+d)$ $= (A/i)^{1/n}$	Calculated i (mm/hr)	Percentage deviation from observed value
10(1-yr)	67	16.0	71	+ 6
10(2-yr)	95	14.2	90	- 5
10(5-yr)	122	15.1	123	+ 1
10(10-yr)	130	18.1	156	+20
20	44	24.8	44	0
20	64	21.4	55	-14
20	81	23.2	75	- 7
20	90	26.6	95	+ 6
30	34	32.4	32	- 6
30	46	30.2	40	-13
30	64	29.6	55	-14
30	72	33.5	69	- 4
40	27	41.2	25	- 7
40	38	36.9	31	-18
40	50	38.4	43	-14
40	57	42.8	54	- 5
50	21	53.6	20	- 5
50	29	48.9	26	-10
50	39	49.7	35	-10
50	47	52.3	45	- 4
60	18	62.9	18	0
60	24	59.6	22	- 8
60	34	57.4	30	-12
60	40	61.9	38	- 5
80	14	81.8	14	0
80	18	80.5	17	- 5
80	24	82.5	23	- 4
80	29	86.6	30	+ 4
100	11	105.2	11	0
100	14	104.6	14	0
100	19	105.3	19	0
100	24	105.5	24	0
120	9	129.8	9	0
120	12	122.9	12	0
120	14	144.9	16	+14
120	18	142.5	20	+11
140	8	146.7	8	0
140	10	148.6	10	0
140	13	156.5	14	+ 8
140	16	161.1	18	+13
160	7	168.7	7	0
160	9	165.9	9	0
160	12	170.1	12	0
160	15	172.4	16	+ 7
180(1-yr)	7	168.7	7	0
180(2-yr)	9	165.9	8	-11
180(5-yr)	11	186.3	11	0
180(10-yr)	14	185.2	14	0
Sum	3,960	4,178.9		Average 5.7%
Mean M_x	=82.5	M_y =87.1		Algebraic average -2.0%

$$d = 87.1 - 82.5 = 4.6 \approx 5 \text{ (use)}$$

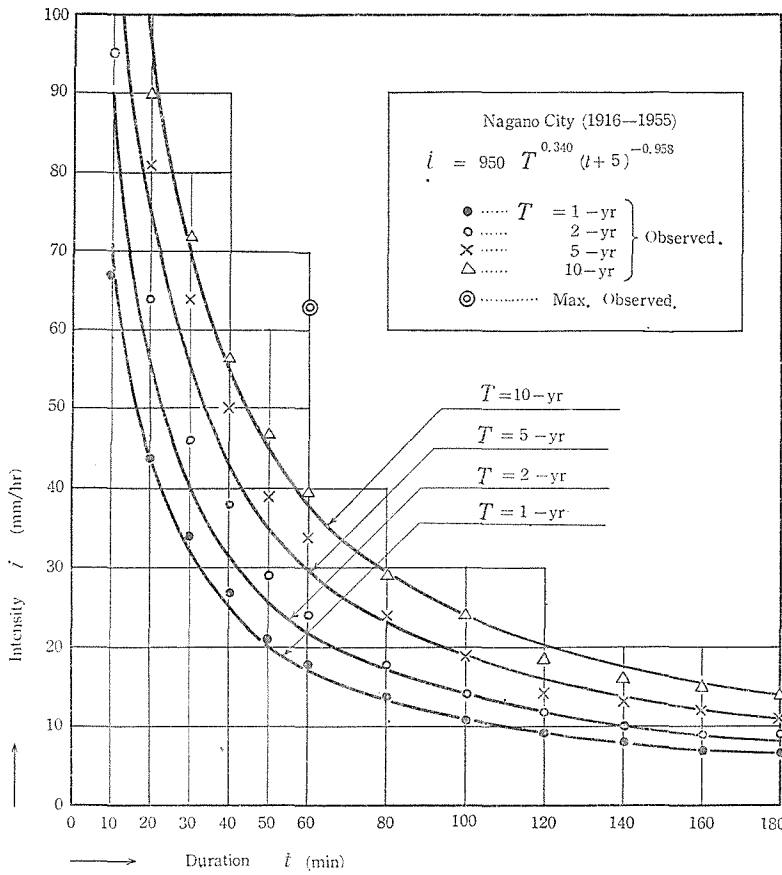


Fig. 2 Intensity-Duration-Frequency (Nagano City)

観測値と式(2)による計算値とは、極めてよく合致し、後者の前者に対する平均偏差は5.7%、代数的平均偏差は-2.0%となる。Fig. 2は、これを図示せるものである。また Fig. 3は、各 return period に対する「降雨量-強度」を示すものである。なお、Fig. 4は、内外数都市において下水道計画上参考にせられるものと併せ掲げたものである。しかして Table 4は、同様の型を探る他の都市と参考までに比較せる例である。

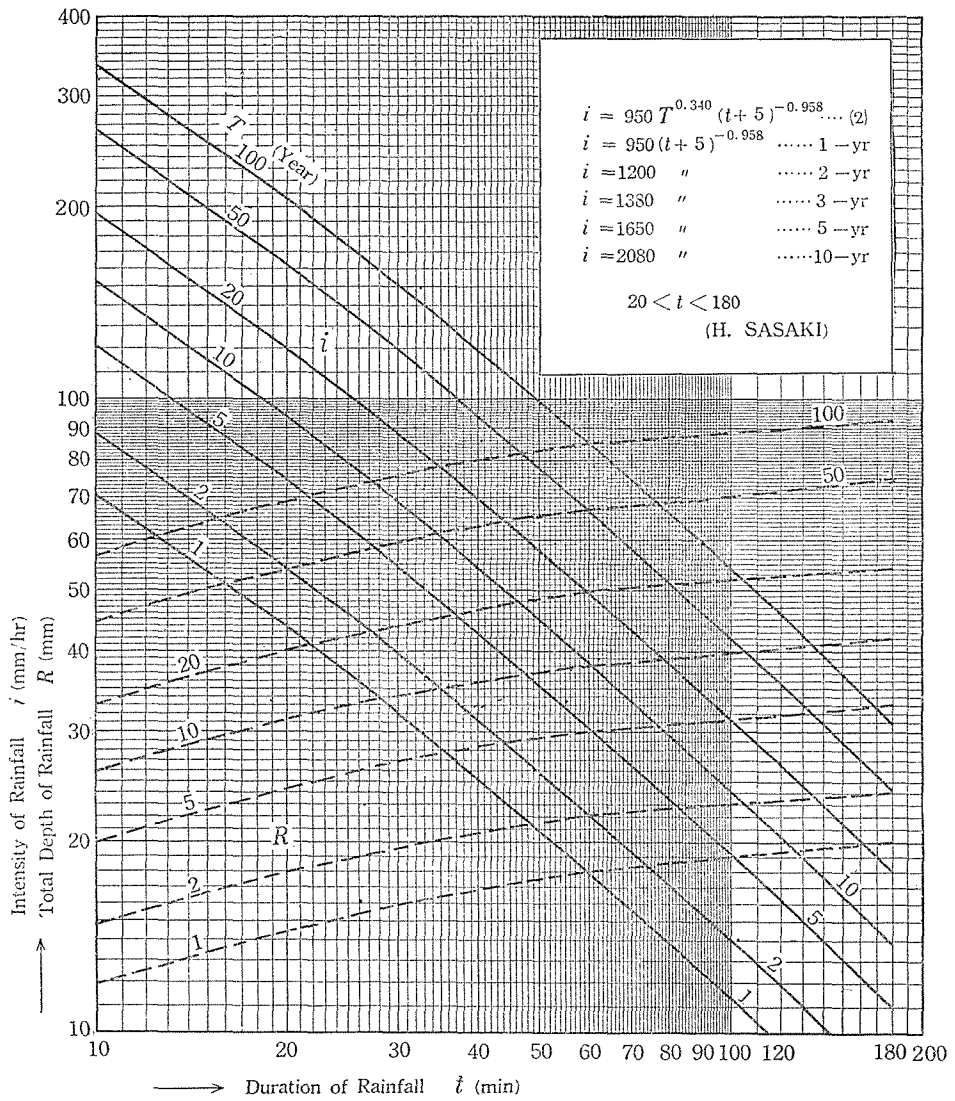


Fig. 3 Intensity-Duration-Frequency (Nagano City 1889-1955)

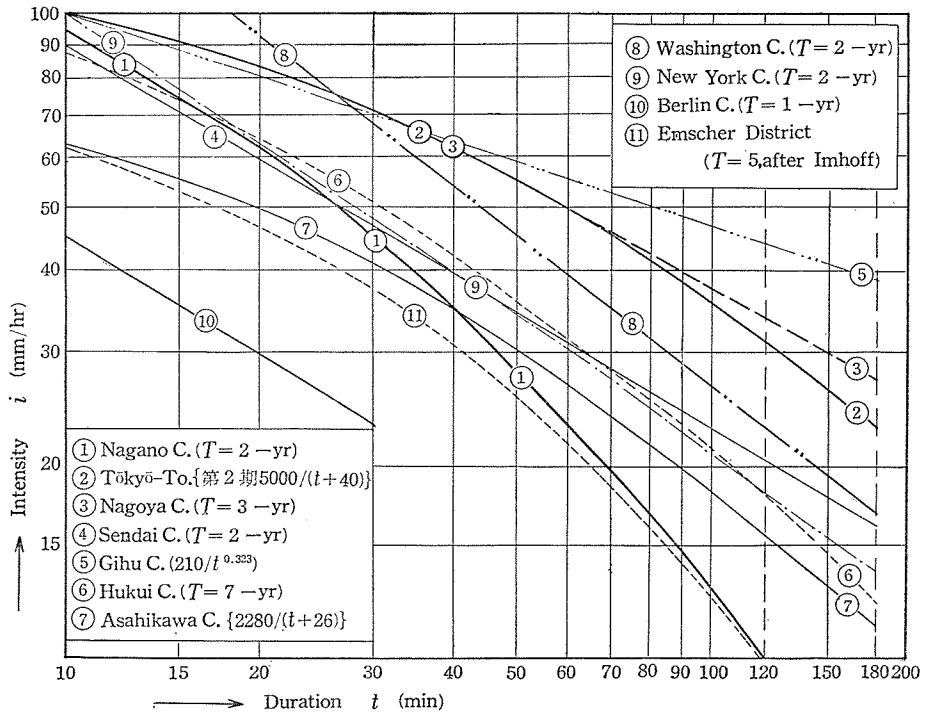


Fig. 4

Table 4 Values of *C*, *m*, *n* and *d*

Cities	<i>C</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>d</i>	Rainfall record	Remarks
Sendai	300*	0.25*	0.6	0	1892-1950	Dr. K. TSURUMI ⁴⁾⁵⁾ $t > 60$
Nagano	950	0.340	0.958	5	1916-1955	H. SASAKI $180 > t > 20$
New York	430	0.372	0.714	1	1869-1913	1) $t > 60$
Washington	840	0.20	0.78	0	1824-1930	"
Baltimore	810	0.20	0.78	0	1821-1920	} M. M. BERNARD ⁶⁾ "
Boston	660	0.23	0.77	0	1821-1920	
"	410	0.27	0.70	7		C. W. SHERMAN ⁶⁾ "
Detroit	955	0.268	0.855	8	M. F. WAGNITZ & L. C. WILCOXEN ⁶⁾	"

* Referring the curve shown by Dr. TSURUMI in 4) and 5), author obtains graphically these values of *C* and *m*.

5. 長野市における降雨の一特色

長野市における年間平均降雨量は、たとえば、名古屋市のそれに比すれば **Table 5**

Table 5 Mean rainfalls (%) (Rika-Nenpyō, 1954)

Cities	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Sum(year)	
													%	mm
Nagano	5.7	<i>5.2</i>	5.6	7.0	7.8	11.0	14.7	9.8	13.1	9.0	5.4	5.7	100	984
Matsumoto	<i>3.4</i>	4.5	6.6	8.0	8.3	12.9	11.9	10.0	14.6	11.0	5.1	3.7	100	1,079
Nagoya	<i>3.1</i>	4.2	6.8	9.3	9.2	13.0	11.0	10.2	14.2	10.2	5.3	3.5	100	1,629
Tōkyō	<i>3.1</i>	4.7	6.9	8.6	9.5	10.6	9.0	9.7	14.9	13.3	6.2	3.5	100	1,565
Sendai	<i>2.9</i>	3.6	5.4	9.3	8.5	10.9	13.3	10.2	14.8	12.0	5.7	3.4	100	1,154
Niigata	10.9	7.2	6.1	6.1	<i>5.6</i>	6.3	9.0	6.6	10.0	9.0	10.8	13.0	100	1,781
Takada	18.2	11.4	6.9	3.9	<i>3.2</i>	3.6	5.8	4.7	7.0	7.5	10.7	17.1	100	3,072

N.B. italic:min. & gothic:max.

によって 984/1629 すなわちその 60% をうる。また $T = 3$ 年における 1-hr の i を比すれば同じく $27/50 = 54\%$ (**Fig. 4** 参照) となる。いわゆる内陸性少雨の地に長野市は属する。しかし、 t の 30分, 20分と短くなるに伴い、比較的強度大なる降雨の現われることは **Table 4** 中 n の大なるによって知り得られよう。いま 60分強雨と他の短時間強雨の強度比をみよう。すなわち **Table 6** のごとくであり、この比の変化は長野市において、かなり激しいものようである。

Table 6 The ratios between 60-min intensity and other short-duration intensities

t (min)	Nagano City by (2)	Tōkyō-To ※	Nagoya City ($T=3$) ³⁾	U.S.A. ($T=2$)*	Kentucky ($T=2$) ³⁾
10	4.1	(2.0)	2.0	3.0	2.9
15	3.1	(1.8)	—	2.3	2.4
30	1.8	(1.4)	1.4	1.5	1.6
60	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
90	0.72	0.77	0.8	0.75	—

* After HERSHFIELD, *United States Weather Bureau Technical Paper*, No. 24, Part 1; refer 7).
 ※ by eq. $i = 5000 / (t + 40)$

Table 7 Record of 1-hr rainfall at Nagano City from 1889 to 1955

Order	i (mm/hr)	Date
1	63.0	1933-8-13
2	55.7	1937-7-28
..... Abbreviated		

長野市 1-hr 強雨の記録は多く真夏に現われており (Table 7 参照), 雷雨によるものが特に n の値に影響が大きいように考察する。^{*}

このようにみれば, 長野市において, 短い継続時間の強度・雨量は, 少雨の地であるほどには, 少く見積ることは出来ないと思考する。

6. C, m および n について

C および m と n とは, 広い意味の水文学的状态によって, 地域的に変化する係数および指数とせられる。たとえば, C と n とは⁶⁾ 海拔の高い処は小となる傾向を BERNARD は地図を示して述べている。北米合衆国北部における例を見るに $t > 60$ 分の場合 n は $0.5 \sim 1$ となっているのが多い。MEYER は, これにほぼ 0.5 をとっている。わが国において, 台風性の豪雨について, 鶴見博士は, 降雨のはじめ ($3 \sim 5$ hr 以内) に n に $0.44 \sim 0.36$ を, それ以降に $0.82 \sim 0.68$ を与えられている。^{4) 5)} 物部博士によれば t の 24hr 以内の場合に対して, n に相当するものに $2/3$ を与えている。⁹⁾ CORN は, 米国における多様の雨を分析せる結果, n に相当すると考えられるものに $0.190 \sim 0.144$ (降雨の初めの方に) および $0.645 \sim 0.520$ (降雨の後期に) をとっている。¹⁰⁾ C. E. GRUNSKY は, t が 20 分よりも短い場合に n に 0.75 を, またそれより長く, かつ, 64 hr 以内のものに対して 0.50 を, 64 hr 以上に 0.67 をとっている。⁶⁾ 松本測候所長 正務氏は, 同市の最大降水量について, n に 30 分以内は 0.33 , 30 分 \sim 4 hr までは 0.94 , また 4 hr から 10 日までは 0.56 をしめされている。¹¹⁾

かくのごとく, n は多く地域的常数として取扱われているようにもみえる。しかし, n はおそらく, 雨の型種 (熱雷, 台風, 低気圧, 前線など) にも関与するもので, これら諸型に見られる継続時間の相違は, n の値に当然反映するものであらうと思う。よって筆者は, 同一地においても n は t によって変化すると考えてみることにし, その形をいま $n = a_1 t^{-b_1}$ (a_1, b_1 は正数) と仮定しよう。すなわち, もし $t = 60$ 分に対し $n = 0.958$ を, また $t = 1,440$ 分に対し $n = 0.60$ を, それぞれとって, 上記仮定を入れるならば Table 12 の n 欄のごとき諸値をうる。

次に, m の値は, 米国北部で $0.1 \sim 0.5$ 平均 0.3 ぐらいとされる。⁷⁾ HERSHFIELD および SAMMONS 両氏によれば, 2-年週期に対する 5, 10, 25, 50 および 100-年の各強度比は, それぞれ $1.36, 1.59, 1.89, 2.11$ および 2.32 となっており, これは $m \approx 0.25$ の場合に相当する。しかし筆者は, 同一地点においても, m の値は, t の長短によって変化すると考えるものである。すなわち, その形を $m = a_2 t^{-b_2}$ (a_2, b_2 は正数) と仮定しよう。しからば長時間降雨については次節のごとくなる。

* HERSHFIELD によれば, 1-hr 記録最大は, ほとんど雷雨であるという。同氏は $T = 2$ 年の 1-hr 降雨強度は, 年間平均降雨量, 年間平均雷雨日数, 年間平均降水日数および平均年間最大日降雨量の 4 コをパラメーターとしてこれを導きうる図表を示している。この方法は米国以外の地におけるデータに対しても平均 20% の誤差で合致するという。7) 参照。

7. 長時間降雨に対する C , m および n

t を長時間にとるときは (1) 式中の d は、これを無視し得よう。ゆえに

$$i = C T^m t^{-n} \quad (1-1a)$$

$$R = (C/60) T^m t^{1-n} \quad (1-2a)$$

あるいは

$$i = C_d T^m t_d^{-n} \quad (1-1b)$$

$$R = 24 C_d T^m t_d^{1-n} \quad (1-2b)$$

ここに

t_d : 降雨継続日数 (日)

R : 総降雨量 (mm)

i, T, t および C については式(1)におけると同じ。

いま、長野市における日雨量 (1889~1955年) の記録中、その最大のものより順次にこれを示せば **Table 8** のようである。これをもとに、式(2)誘導のごとく「日雨量 (R_d) - 頻度」について、適応するこれが実験式を求め表示すれば **Table 9** のごとくなる。

Table 8 Maximum rainfall per day at Nagano City
from 1889 to 1955 (67 yrs)

Order	mm/day	Date	Order	mm/day
1	113.0	1950-8-5	11	79.1
2	108.2	1896-7-21	12	79.1
3	99.5	1910-9-7	13	77.2
4	95.3	1911-8-4	14	75.9
5	92.6	1949-9-23	15	71.0
6	90.5	1911-6-28	16	69.2
7	86.1	1937-7-28	17	69.1
8	86.0	1933-8-14	18	69.0
9	83.1	1945-10-5	19	67.1
10	79.4	1898-6-5	20	66.8
				...Abbreviated...

Table 9 Daily maximum rainfall : R_d

Frequency T (year)	R_d (mm/day)			Deviation of observed from calculated (%)
	Observed	Calculated by	53 $T^{0.20}$	
1	—	53	—	
2	58	61	+5	
3	65	66	+2	
5	75	73	-3	
10	87	84	-3	
20	98	97	-1	
30	105	105	0	
50	112	116	+4	
100	—	133	—	

すなわち $t = 1,440$ 分 (1日) に対して, $24 C_a t d^{1-n} = 53 \text{ mm}$ あるいは $C = 174$ および $m = 0.20$ をうる。

次に, 年総雨量 (1889~1955年) の記録中, その最大のものより順次にこれを示せば, **Table 10** のようである。これをもとにし, 同様にして「年総雨量 (R_y) - 頻度」を求むるときは **Table 11** を得。すなわち $t = 525,600$ 分 (1年) に対して $24 C_a t d^{1-n} = 980 \text{ mm}$ あるいは $C = 3.0$ および $m = 0.07$ をうる。

Table 10 Total depth of rainfall in a year at Nagano City from 1889 to 1955 (67 yrs)

Order	mm/year	Date	Order	mm/year	Date	Order	mm/year	Date
1	1,296.9	1903	11	1,175.2	1921	21	1,070.3	1906
2	1,274.2	1897	12	1,162.4	1919	22	1,068.2	1936
3	1,264.9	1954	13	1,143.4	1951	23	1,067.2	1930
4	1,260.5	1945	14	1,116.0	1938	24	1,059.0	1890
5	1,250.4	1911	15	1,107.6	1905	25	1,057.9	1946
6	1,247.7	1916	16	1,105.5	1892	26	1,052.8	1899
7	1,238.9	1937	17	1,093.1	1909	27	1,047.7	1950
8	1,230.4	1927	18	1,080.5	1955	28	1,047.0	1932
9	1,192.8	1923	19	1,079.3	1917	29	1,041.9	1948
10	1,175.8	1910	20	1,078.6	1896	30	1,019.5	1912
.....Abbreviated.....								

1889~1948.....984mm/year (Average for 60 years)

Table 11 Total depth of rainfall in a year : R_y

Frequency $T(\text{year})$	$R_y(\text{mm/year})$		Deviation (%)
	Observed	Calculated by $980T^{0.07}$	
1	—	980	—
2	990	1,030	+4
3	1,060	1,060	0
5	1,115	1,100	-1
10	1,190	1,150	-3
20	1,240	1,210	-2
30	1,260	1,240	-2
50	1,280	1,290	+1
100	—	1,350	—

いま, 上掲の 0.340, 0.20 および 0.07 なる 3 の m の値をみるに, ほとんど $m = a_2 t^{-b_2}$ の仮定を満足するようにみえる。従って, その他の, たとえば $t_d = 3, 10$ および 20 に対し **Table 12** 中 m 欄に掲ぐるような諸値を定めうる。

次に, C は, t について指数函数的変化をなすものとし, 上掲 3 の C の値よりして同表中にみるごときそれぞれの値をうる。

すなわち, 原式(1)中に適用せらるべき C, m および n の値は, 筆者はこれを変数とし, 前記の仮定が許されるときは, これら諸値は **Table 12** 中に掲ぐるごとき降雨継続時

Table 12 Values of C , n and m for various durations at Nagano City (H. SASAKI)

(A)

Applicable duration t (min)	C	d	n	m	Empirical eq.
20 - 180	950	5	0.958	0.340	(2)
Near to 1,440 (1 day)	174	0	0.60	0.20	(3)
Near to 4,320 (3 days)	80	0	0.50	0.17	(4)
Near to 14,400 (10 days)	38	0	0.43	0.13	(5)
Near to 28,800 (20 days)	21	0	0.38	0.12	(6)
525,600 (1 year)	3.0	0	0.25	0.07	(8)

$$i = CT^m(t+d)^{-n}$$

i : (mm/hr)
 t : (minutes)
 T : (years)

(B)

Near to t_d (day)	C_d	$T = 1$ year		t_d^{1-n}	
		i	R		
1	2.21	2.21	53	1.0	(3)'
3	2.1	1.21	87	1.7	(4)'
10	1.6	0.62	149	3.7	(5)'
20	1.3	0.42	201	6.4	(6)'
30	1.2	0.36	260	8.8	(7)'

$$i = C_d T^m t_d^{-n}$$

$$R = 24 C_d T^m t_d^{1-n}$$

R : Total depth of rainfall (mm)
 t_d : Duration in day

間の長さによって分別せられ得よう。Fig. 5 はその関係を図示せるものである。^{*}本図によれば、継続時間 3-hr ぐらいまでは、熱雷性の強雨の影響が及んでおり、それ以上の長い継続時間では、 i 線の勾配は緩やかで広い地域にわたる安定な降雨をしめすものごとくである。

Table 12 中 (3) より得たる日雨量および (8) より得たる年雨量は、さきに Table 9 および Table 11 に示すごとく観測値とかなりよく合うことは認め得られるが、さらに、別の期間においての適否いかんをみる例とし次表を掲げる。すなわち、Table 13 は、一暦年内の月別最大降雨記録を順に示せるものであるが、これをもとにし「月雨量 (R_m) - 頻度」を求むるときは Table 14 を得。これは、ある月の朔日から末日までの間の降雨量 R_m が「 T 年に1回は何mm」という意味の観測値である。従って、この一暦月中には降水日以外の日も存在しよう。長野市において、平均降水日数は Table 15 のごとくである。一方 Table 13 は、その年の最大降雨月を採ったものであり、従って、これに該当する降水日は、Table 15 の暖候季における日数を上廻り、かつ、30 日を下

* $H_{max} = k_1 D_{max}$, $H_{max} = k_2 C_{max}$

ここに H_{max} : 1 時間雨量の最大

D_{max} : 1 日雨量の最大

C_{max} : 一連の大降雨量 (普通継続日数は 3~4 日ぐらい)

とせる場合、鶴見博士は $k_1 = 0.20 \sim 0.32 \approx 0.28$, $k_2 = 0.16 \sim 0.28 \approx 0.2$ と述べられたが、これを Fig. 5 の R と比較すれば、興味がある。

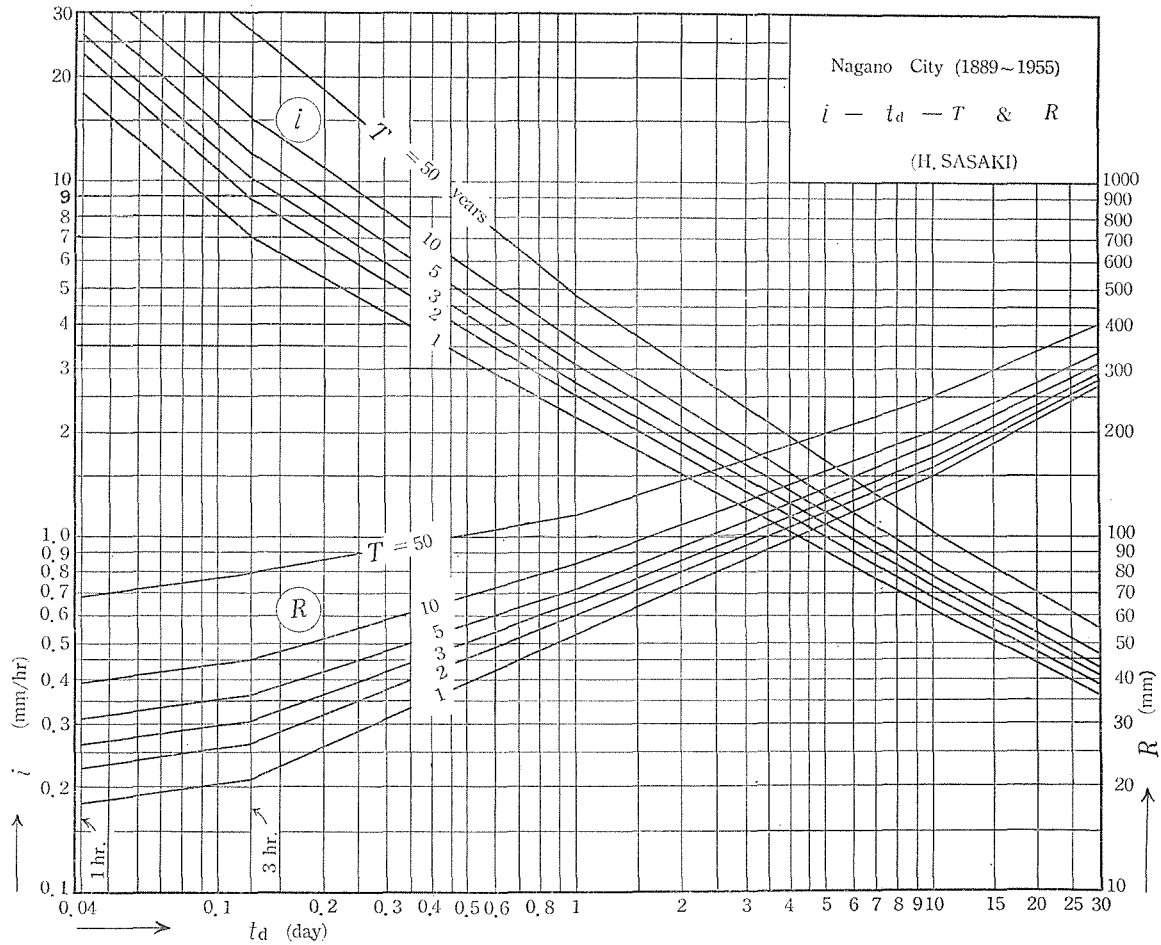


Fig.5 Intensity-Duration-Frequency and Total Depth of Rainfall

Table 13 Record of maximum monthly rainfall at Nagano City from 1889 to 1955 (67 yrs)

Order	mm/month	Date	Order	mm/month	Date
1	324	1897-7	11	259	1905-8
2	316	1945-10	12	254	1895-7
3	296	1937-7	13	248	1911-6
4	293	1917-9	14	232	1906-7
5	279	1896-7	15	228	1938-7
6	277	1952-7	16	227	1919-7
7	273	1916-9	17	225	1910-9
8	271	1903-7	18	222	1912-7
9	269	1930-6	19	217	1927-7
10	267	1929-9	20	216	1891-7
.....Abbreviated.....					

Table 14 Maximum monthly rainfall : R_m

Frequency T (year)	R_m (mm/month)		Deviation (%)
	Observed	Calculated by $R_{20} = 24 \times 1.3 t_d^{1-0.38} T^{0.12}$ ($t_d = 20$ days)	
3	210	228	+9
5	238	242	+2
10	273	264	-3
20	295	287	-3
30	310	301	-3
∞0	320	321	+0.3
100	—	349	—

Table 15 Mean of precipitated days (Nagano City)

Month	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Days	19	17	15	13	12	15	15	13	15	12	12	16

廻る数であろうと推察せられる。この日数をもし20日と想定することが許されるならば、これに該当する式(6)の C_d , m および n を適用し計算すれば、または直接に Fig. 5 より Table 14 中 R_{20} をうる。この場合、同表中左欄の観測値に対する偏差は、右欄に示すごとくになる。

8. む す び

本報告において、第1に、長野市における「降雨強度-継続時間-頻度」の実験式(2)を得た(推計学的取扱については別に稿を改めたい)。これは20分~3時間の短かい継続時間に適用せらるべきものである。長野市は、わが国では少雨の地方である。しかし、1時間未満の強雨の中には、その割合ほどには、軽視し得ざるものがあることを式(2)は示す。同市は、その北部に急傾斜の丘陵を有し、北方市街地の勾配は平均2.5%、その遅滞係数はかなり大きいものであろう。他面、将来の発展を予想せらるる市の東南地帯は、平坦で平時の排水に困惑を感ずるところも含まれる。このような地区において、地

域的に I-D-F 関係を変え、短時間強雨に対し考慮を払うことは下水道計画上とくに必要と思考する。

第2に、降雨継続時間の長い場合に対して考察し、一般に地域的常数とみられる C , m および n は、これを変数としてあつかい、それらの適用範囲を降雨期間の長さによって分別せんと試みた。その結果得られた式(3)以下は、式(2)と対蹠的に、広き流域を覆う安定せる降雨をあつかう河川工学の方でも有用のデータであろうと思考する。なお、式(3)以下の誘導に仮定がおかれ、不備の点も多いことと思われる。たとえば、断続ある降雨期間のあつかい方の一貫性などについて、研究の余地があろう。各位の御叱正を仰げれば幸である。

終りに、資料の閲覧・整理に便宜をお計りいただいた長野測候所に深い謝意を表する。なおまた、資料の整理に多大の努力を払われた本学土木工学科学生 中村長蔵、高木正二の2君に深い謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) FAIR G.M. & J.C. GEYER, *Water Supply and Waste-Water Disposal*, pp. 167-174, (1954), Wiley.
- 2) 山田武治, 下水道の二三の問題について, 水道協会誌, No. 229, (1953).
- 3) 杉戸 潜, “下水道学” 前篇, p. 35, (1953).
- 4) 鶴見一之, 土木学会誌, Vol. 37, No. 6, (1952).
- 5) 鶴見一之, 水道協会誌, No. 215, (1952).
- 6) BERNARD M. M., *Trans. ASCE*, Vol. 96, pp. 592-624, (1932).
- 7) HERSHFELD D. M., L. L. WEISS & W. T. WILSON, Synthesis of rainfall intensity-frequency regimes, *Proc. ASCE*, No. 744, July, (1955).
- 8) SAMMONS W. H., Do., Discuss., *Proc. ASCE*, No. 881, pp. 31-35, (1956).
- 9) 物部長穂, “水理学”, p. 355, (1954).
- 10) CORN, H. M., Rainfall depth-duration relationship, *Proc. ASCE*, Vol. 81, No. 840, Nov. (1955).
- 11) 正務 章・草間宗三, 気象庁研究時報, Vol. 6, No. 12, (1955).