報　文

UDC 627.133.5: 627.11

河川の洪水流量について（続）

正員 工学博士　鶴　見　一　之*

ON THE FLOOD IN THE RIVER (Continued)

(JSCE June 1952)

Dr. Eng., Kazuyuki Tsurumi, C.E. Member

Synopsis In the preceeding paper (Journal of the Japan Soc. of C.E. Vol. 34. No. 3) I proposed a formula on flood discharge of rivers. Now, in this paper I discuss the degree of the proposed formula reliability, by comparing it with many other formulas already published.

緒言　河川の洪水流量については土木学会誌第34巻第3号に掲載し，私案として純降水量を次の式で算出し，これに遅滞による係数と，地表による係数とをかけて実際の洪水流量を求めることを提案した。

$$q_0=\frac{20.6}{t^{0.6}} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$q_a=c_1 \cdot c_2 q_0 \quad \cdots\cdots(2)$$

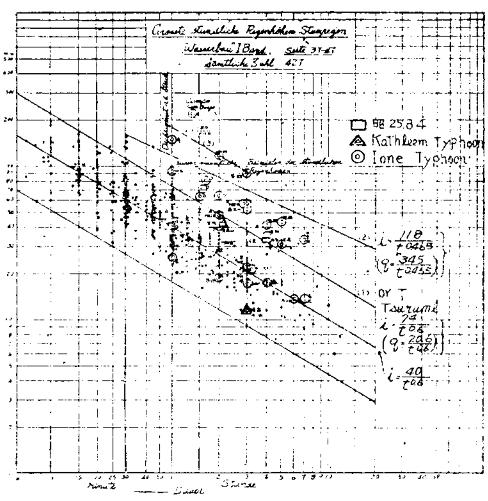
c_1：遅滞係数で，懸案地点の最大洪水流量に関係する流域面積 F_a と全流域面積 F との比，

即ち $c_1=\frac{F_a}{F}$

c_2：地表による流出係数

上式を誘導するまでは既に発表した通りで，今述べるのは本式とかつて発表された諸洪水流量計算方法との関係についてである。

図—1

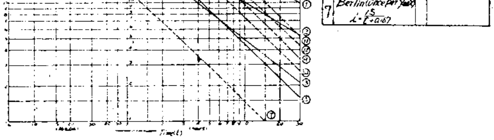


1. 降雨量による流量計算方法

降雨の強度と継続時間との関係を各地で記録したものを図示したのが図—1である。これを見るとKathleen及びIoneは外国の例に比し著しく強いことが明瞭に解る。又Kathleenは頗る広範囲に降つた強雨であるがIoneは範囲が狭小であるのに，強度がKathleenより遥かに強かつた事が知られる。外国の例でも短時間強雨ではIone以上のものが数例あるが，これ等は極めて稀有の例であるか，或いは地方的に多雨，強雨で有名な場所である。

さて(1)式の q_0 について他のものと比較する。各所の降雨例で式に示されたものを図示すると図—2のようになる。式の型は2種あり，1つは $q_0=\frac{a}{t^n}$ 他の1つは $q_0=\frac{\alpha}{t+\beta}$ $(a, \alpha, \beta$: const. t : 分又は時で

図—2

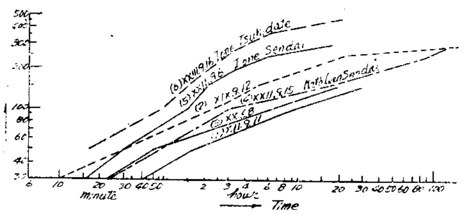


*前仙台工業専門学校校長

降雨継続時間, n：1 より小さい指数で，多くは 0.5～0.6) である。これ等2型の式は図—2 の如く大部分対数紙上では直線又は直線に近い曲線で表わせる。t が小さい時と大きい時は直線からややそれるが中間部分は殆んど直線となり，使用に極めて便利である。

これを詳細に調べると $R=c \cdot t^n$ に於て n は t 時間中一様ではない。例えば Kathleen と Ione 及びこれに次ぐ強雨を仙台で観測したものによると，図—3 のような結果を示している。従つて，$q_0=at^{n-1}$ の型で表わされる。図—3 中の表からも解るように，Ione 台風の雨は異常に大きな強度を有している。

図—3　降水量と時間との関係

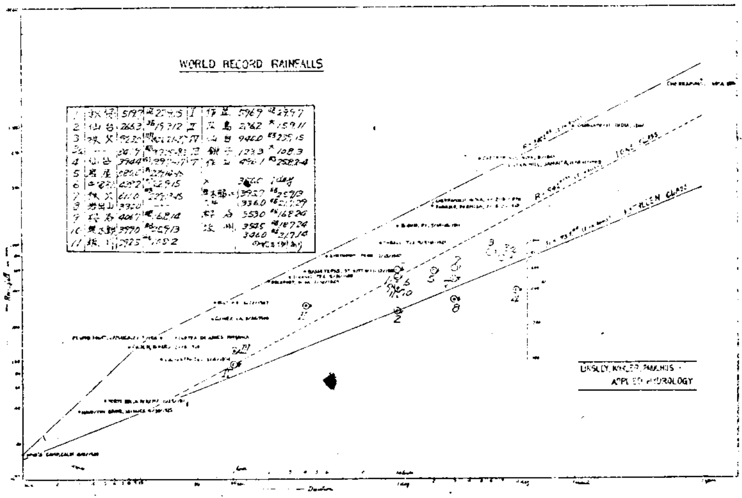


番号	年月日	$R=at^b$ a	b	t		場所	Remarks
1	XII.9.11	[illegible]	0.57	1～4	[illegible]	仙台	
2	XIX.9.12	66.0	0.53	1～6	350	〃	
3	XX.6.8	57.2	0.39	1～9	272	〃	
4	XXII.9.15	54.0	[illegible]	1～4	270	〃	Kathleen
5	XXIII.9.16	94.0	0.57	1～5	556	〃	Ione
6	XXIII.9.16					築館	〃

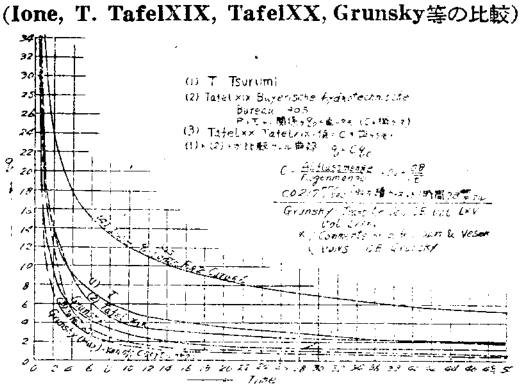
私の式は，前に発表したように Ione 台風を除き今迄記録された主な降雨を上廻る降雨を想定して $R=at^b$ の，$a=74$, $b=0.4$ としたものである。図—1 に於て・点はすべてドイツの例で総観測数 427 である。それらのうち稀に T線の上側に出るのみである。D, F, A はそれぞれドイツ，フランス，アメリカの例で，□, △, ○はすべて我国の例である。今，A, F と宮城県築館町の Ione の例を除けば，$i=\frac{118}{t^{0.465}}$, 従つて $q_0=\frac{34.5}{t^{0.465}}$, の直線を引くと概ねこれより以下になる。更に F と築館を結んだ $i=\frac{180}{t^{0.6}}$, を引くと，これ以上になるのは A の Campo-San-Diego 1 つである。これ等 3 線をそれぞれ (1), (2), (3) とすると，(2), (3) は (1) に比し著しく大きい流量を与える。

米国の新刊書の Linsley, Kohler, Paulhus 3 氏著 Applied Hydrology (1949) に世界の記録的降雨が図—4 に示す如く記されている。同図に我国の記録と 3 本の直線をつけ加えて記載した。我国で多雨且つ強雨の多い徳島県那賀川流域の降雨が番号 9, 10, 11 等で，Vは仙台市を貫流する広瀬川の水源地方作並の記録である。図を見ると，Ione 級以上の降雨は我国では3例に過ぎず，他は殆んど熱帯，亜熱帯地方，即ち，フィリッピンの Baguio, 台湾の奮起湖，米国の Texas 州等の例で，印度でも多雨で有名な Cherrapunji の例が飛び離れて大きい値を示している。標準にとつた降雨が全部流出するとした時の流量は容易に計算出来る。図—4 (a) は先に示した T 線と Handbuch der Ingenieur Wissenschaften III Teil, I Band, に掲載されている曲線と，更に米国の例とを比較したもので，(1) は T 線，(2) は上記の書物にある曲線，(3) は (2) に流出係数をかけたものである。

図—4



図—4 (a)　降雨継続時間と流量
(Ione, T. TafelXIX, TafelXX, Grunsky等の比較)

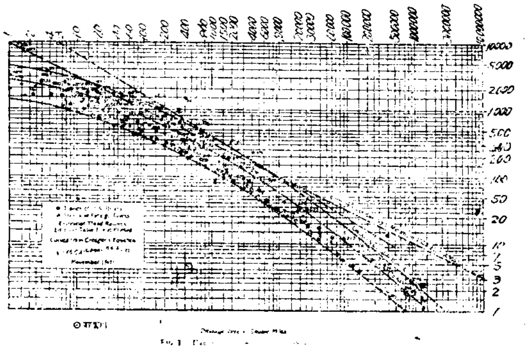


これによると (1) と (2) とは近い値を示すが降雨継続時間 3.5 時間以上になると (1) の値は (2) より遥かに大きい。又 (4) 曲線は図—2 の (6) 線と同じもので，Ione 台風の例である。

2. 流域面積による流量計算方法

米国では洪水流量を流域面積の函数として計算する方法が多く用いられている。図—5 は米国初め諸国の大洪水記録約 1000 を Creager と Jarvis とが図示したものと，Creager 及び Myer の式が記されている。Creager の式が出るまでは米国では Myer の式が一番大きい洪水流量を与える式であつた。又 図—6 は米国東部 Ohio 河流域にある諸河川の実測値を示したものである。

図—5



図—6

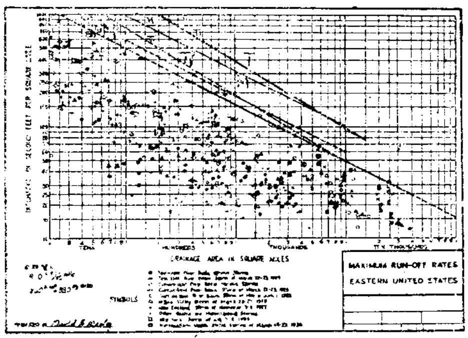


Fig. 4·4 Maximum runoff for Eastern United States (TVA)

日本では最大の河川の流域面積は約 6 200 平方哩の利根川で，その洪水流量は概ね，80 c.f.s./平方哩であろう。而して流出係数は 60% 位であろうから，これが 100% になつた最大流量の点を求めると，$C=100\%$ の Creager と Myer の両線との交点位に当る。Myer 式では F^n の n が 0.5 であるが，今 $n=0.6$ の線を描くと図—5 の T_1 線の如くなる。この T_1 は図—1 及び 2 の①と記したT線と見なすことが出来，Creager 及び Myer 両式より大きい事が解る。図—6 においても，同図の記録は実測であるから比較上 T_1 の値に 50% かけた線を描いても，なお諸点を over している (T_1' 線)。又 M は Myerの $c=100\%$ の線で，M′ は $c=50\%$ の線である。これを見ると米国東部地方では Myer 式で算出される程度の大きい洪水流量がある事が解る。

ここで注意すべきは，前出の T は時間の函数で洪水量を出すものであるから，流域面積を函数とする T_1 に替えるのは無理のように考えるかも知れないが，私と同様な考え方の Victor H. Cochrane の論文が，E.N.R. Nov. 25, 1937, に出ている。即ち

F(流域面積)$=L$(河川延長)$\times B$(平均流域巾)

又 $L=v$(平均流速)$\times t$(時間)

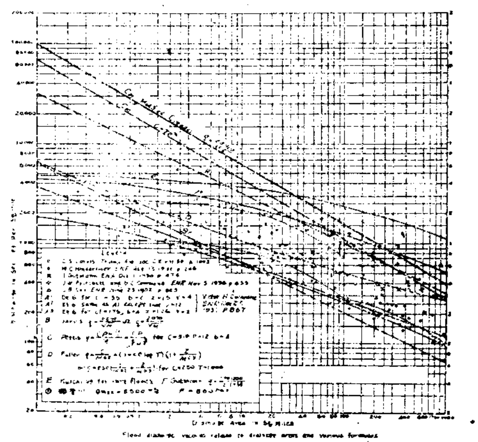
$\therefore\ F=B\cdot v\cdot t$ 故に $B\cdot v=\text{const.}$ とすると

$F=c\cdot t$

故に，F は t に正比例すると考えるのである。

Cochrane は比較的大流量が流出する小流域河川における比流量を前記 E.N.R. で論じ，多くの流量計算公式を図表で比較した。それが図—7 である。同図に併記した c_M 及び c_M' はそれぞれ Modified Creager 式の $c=100\%$ 及び 70% の線である。而して殆んど

図—7



すべての実測値はこれ等の線の下側にあり小流域では $c=100\%$ に近付く。而してこれは最大値と考えてよい。なお注意すべきは E 符号の Kuichling の式である。即ち多くの run off formula が種々の書に掲載されているが，それ等の式は殆んど Kuichling の式より小さい値が出るから，本論で述べた式はこれ等多くの式と比較にならぬ程大きい値を与える。

以上の図表中 Modified Myer とは C.S. Jarvis が北米の 950, 欧亜の 28 河川の記録のすべてがこの式の値より小さいと云う値を与えたのであるが，図—5 ではこれ以上の例を Creager が示しており，彼は 1941 年に Myer 式を over する式を作つた。それが次式である。

$$q=4\ 600A^{(0.894A^{-0.048}-1)}\ \cdots\cdots\cdots(3)\text{「米国単位」}$$

$$q=50\left(\frac{F}{2.6}\right)^{(0.935F^{-0.048}-1)}\ \cdots(4)\text{「メートル単位」}$$

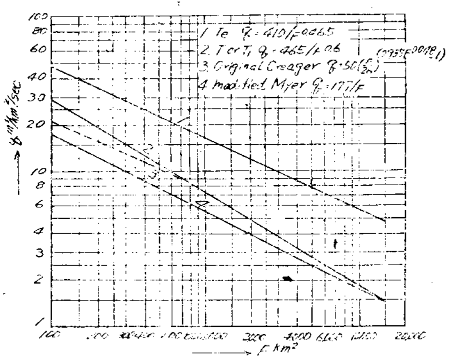
上式は複雑であるから，$F=100\sim16\ 000\ \text{km}^2$ なら大差なく次式が使用出来る。

$q=67F^{(0.935F^{-0.048}-1)}$…………(5)「メートル単位」

又図—5 の Modified Myer 式をメートル単位に換算すると $q=177/F^{0.5}$ を得る。

上式と (5) 式と T_1 線及び図—2 の T_e 線等を一括図示すると，図—8 のようになる。同図を見ると T_e は他の 3 線より遥かに大きい値を示すが，(2)，(3)，(4) はやや接近している。(2) は私の式で，(3)，(4) は米国の式である。

図—8



一般に我国の河川は米国の河川より比流量が大きいから，T_1 線が実用に適すると思う。(1) 式は甚だ大きい比流量を与えるが，我国でも四国地方の数河川ではこれ位の流量の河川もある。従つて地方的事情を斟酌して，T_1 又は T_e を用いるべきである。

従来よく外国人の与えた流量計算式が用いられているが，多くのものは前掲の Kuichling 式に比して小さい流量が出るから我国の河川に用いることは避けたい。

3. 両方式の比較

雨量と時間との関係を基とする方法と，流域面積を基とする方法と何れが実際とよく合うかを比較しよう。これ等の2方法をそれぞれ第1法，第2法と呼ぶ。

第2法は流域面積 F が決まれば比流量が一定してしまい，これに乗ずる流出係数のみで加減するので，計算の根拠がやや薄い。流域が 15 000 km² 以上の大河川ではあてはまるかどうか知れないが，我国の河川では概ねこれ以下であるから応用が困難である。これに対し，第1法は到達時間から計算するから理論的である。即ち到達した流域分だけの水が洪水流量を与える。而して時間は概ね従来の観測から得られ，これを用いれば実際に近い値が求められる。ただ，ここに c_1，c_2 と云う遅滞係数と地表の状態によつて異なる流出係数を根拠なく，漫然と決めぬようにする必要がある。それについて述べよう。

(a) 遅滞係数　この係数の意味は，或る地点で洪水流量を考える時，その地点より上流全流域に降つた雨水が peak としてそこに到達するとは限らず，殊に大流域の河川では全流域のごく一部に降つた雨水が流下して peak の流量を与えるのである。但し，長時日降り続いた場合のみ全流域の雨が peak の流量を与えると考えられる。そこで懸案地点の peak に参加する雨水の流域面積を F_a とすると全流域 F に対する比 c_1 は，$c_1=F_a/F$ となる。

而して F_a は下水道内流量算出に用いる図式法によれば相当確かな値を求める事が出来る。又その点に到達する流域の等時曲線 (time contour) を描けば各時間に対する F_a が求まる。

(b) 流出係数　一般に云われている流出係数は $q_a=cq_0$ として降雨量と実際流量との比 c を指すが，私はこの c は (2) 式の，$c_1\times c_2$ で示されるものとし，その内の c_2 を流出係数と呼びたい。c_2 は地表地下の状態で異なる係数である。これはいわゆる「かん」で決められた値であるが，比較的根拠ある値を出す方法として C.E. Grunsky の式を用いたい。この式の場合にも「かん」を働かせねばならぬ部分もあるが，前者の場合とは程度が違う。即ち式は

$$c_2=\frac{60}{60+ct^{0.5}} \quad \cdots\cdots(7)$$

式中 c は次の値を用う。

地表の性質	c
不滲透性地表	0.10
山　　緑　　地	2
起伏せる原野	3
平坦なる原野	10
砂　　　　地	50

t：分であらわし，最大強雨の始めから，或る河の最大流量になるまでの経過時間。

以上述べた如くT式は相当大きい洪水流量を与えるから，場合によつては少し割引してもよさそうだが，文化の進展と共に土地の開発が進み洪水到達時間が速くなる傾向にあるから将来を考えれば，私の式ぐらいが適当であろう。但し，4～5 時間以下の極めて短時間の非常強雨なら，Ione 級降雨の T_e 線（図—1 (2)，図—2 (6)）で流量を決めればよいと思う。

然し，このような洪水が発生するのは何年に一度か判らぬのに尨大な工費をかけるより，第2級又はそれ以下の降雨量を標準として洪水流量を決めた方が得策の場合が多いのではなかろうか。

4. 強雨の頻度

強雨はそう頻繁に来襲するものではない。故に絶対これ以上は出ぬと云うような大きな値を計画洪水流量として採用する事は実際問題として，経済的にも不得

策である。

従つて，どの程度の降雨が何年に一度の割合で降るかを調べる必要がある。而して洪水流量の決定には強度の大きい比較的短時間の降雨統計が必要である。然るに多くの観測値は「日雨量」で，1時間又はそれ以下の短時間降雨の実態は都市下水道の調査以外には余り知る事が出来ないのは甚だ遺憾である。

宮城県下 33 ケ所の雨量観測所で，18〜40 年間の連続降雨量の主なものを抽出して，それぞれの場所の標準偏差 σ を計算したものがある。それから最大値の確率が計算出来る。それを t とすると

$$t=\frac{x_{\max}-x_m}{\sigma}$$

t 以下又は以上の起り得る確率は誤差の表から求めると，表—1 のようになる。

表—1

t	$t/1.0745$ $=\frac{a}{r}$	$P\%$
0.6745	1.0	50.00
1.0	1.485	68.27
1.5	2.225	86.64
2.0	2.966	95.45
2.5	3.719	98.76
3.0	4.450	99.73
3.5	5.190	99.95

例えば $t=2$，$P=95.45\%$ の如き降雨はどの位かと云うと，仙台では $x_m=167$ mm，$\sigma=61.7$ mm であるから，

$$123.4=x_{\max}-167$$

$$\therefore\ x_{\max}=290.4\ \text{mm}$$

即ち，290.4 mm の降雨は，$100-95.45=4.55\%$ 位の稀な事である。

仙台管区気象台で宮城県下の大雨出現頻度を過去 40 年間の観測結果から次式によつて算出し得ることを示した（表—2 参照）。

表—2

宮城縣全般	$y_A=113\times10095^{-x}$								
台風のみの場合	$y_B=345\times10065^{-x}$								
$x$mm以上の出現回数（宮城縣全般）	$y_C=50\times70.4\times0.6312^{\frac{x}{50}}$								
雨量 mm	y_A			y_C			y_B		
	実測	計算	出現確率	実測	計算	出現確率	実測	計算	出現確率
100	46	47.5	1.05	134	140	2.8	17	18	2.8
150	24	30.8	1.61	88	89	1.8	13	13	3.8
200	20	20.0	2.50	57	56	1.1	9	9.4	5.3
250	14	12.9	3.85	39	35	0.7	8	6.5	7.7
300	12	8.4	5.75	25	22	0.44	7	4.7	10.2
350	3	5.4	9.18	18	14	0.28	3	3.5	14.2
400	5	3.5	14.1	10	8.9	0.18	3	2.6	19.2
450	2	2.3	21.8	5	5.6	0.11	2	1.8	22.8
500	1	1.4	35.0	3	3.5	0.07	0	1.3	38.5
550	1	0.92	52.0	2	2.2	0.04	1	0.9	55.6
600		0.62	82.7	1	1.3	0.03		0.7	71.5
650		0.40	125.0	1	0.85	0.02		0.5	100.0
700		0.26	192.5	1	0.54	0.01		0.4	125.0
750		0.17	294.0	1	0.34	0.007		0.3	167.0
800		0.11	450.0	1	0.21	0.004		0.2	250.0
900				1	0.08	0.002		0.1	500.0
1,000				1	0.03	0.000			
1,150				1	0.008	[illegible]	1		

宮城県全般　　$y_A=1.13\times1.0095^{-x}$

台風のみの場合　　$y_B=34.5\times1.0065^{-x}$

又，x mm 以上の出現回数を y_C とすると

$$y_C=50\times70.4\times0.6312^{\frac{x}{50}}$$

（宮城県全般）

表—2 によると，一連 100 mm の降雨は y_C の式から，出現確率は 2.8 回/年，即ち 1 年に 3 回，又 500 mm 以上のものは，0.07 回/年，即ち 15 年に 1 回であることが判る。

Gauss の正規分布曲線を用いると，確率が 99% 以上にならぬという最大の一連降雨量は仙台では 9 月に，月平均 167 mm であり，又標準偏差 61.7 mm であるから，$167+3\times61.7=352$ mm になる。Kathleen 台風の記録によると，一連 300 mm である。然るに Ione 台風は 481 mm と云う記録的強雨であり，又昭. 25. 8. 4. の「作並」の記録は 506 mm であつた。そこで，過去 50 ケ年の統計から仙台で，一連の降雨量が 100 mm，300 mm，400 mm，以上に達する雨が何回，即ち 0, 1, 2, 3……8, が何年に何回あるか表記すると表—3 の通りである。

表—3

雨量＼回数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	計
≧100mm	5	5	14	11	7	6	1	1	0	50
≧300	29	18	2	1	0					50
≧400	38	11	1	0						50

表—4

確率＼回数	0	1	2	3	4	計
確率	0.7866	0.1888	0.0227	0.0018	0.0001	1.00
期待値	39.3	9.4	1.1	0.09	0.005	49.9
実測値	38.0	11.0	1.0	0	—	50.0

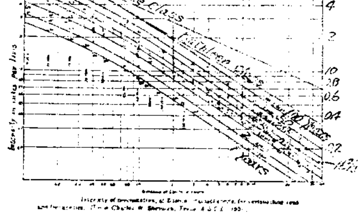
同表によると，仙台で 9 月 1 ケ月間に 100 mm 以上の雨が 7 回降つた事が 50 年間に 1 度あり，又 100 mm 以上の雨が 2 回降つた事が 14 度あつた事が判る。表—3 に基いて 400 mm 以上の大雨が或る 1 年間に起る確率は，$P=\frac{12}{50}=0.24$ であるから，1 年に n 回起る確率及び 50 年間に於ける期待値を計算すると表—4 のようになる。

一般に x_m を統計をとつた期間の平均量とし，これ等の資料から標準偏差 σ を算出すると $x_{\max}$ の期待値は次式で求められる。

$$x_{\max}=x_m+3\sigma$$

これは Charlier が述べた所である。これを超さない確率は 99.85% である。

図—9



又我国と米国の降雨及び洪水流量を頻度の上から比較すると，図—9 のようになる。これは C. W. Sherman が 1931

年に発表したものである。図によれば我国では強雨の頻度が大であることがわかる。

5. 時間雨量と日雨量，又は連続雨量との関係

凡そ洪水は，比較的強い雨が長時間降り続く時と，短時間に強雨が降る時とでは発生の状況が異なるが，前述の如く最大洪水流量に最も関係ある時間雨量，又はそれより短時間の雨量の記録が極めて乏しいので，私は時間雨量と日雨量，又は時間雨量と連続雨量等の関係を極めて単純な考え方であるが，手許にある資料で調べてみた。

Kathleen 台風直後中央気象台から発行された「台風と水害」と云う本から 166 ケ所の記録について，時間雨量の最大を H_{max} とし日雨量の最大を D_{max} として $\dfrac{H_{max}}{D_{max}}$ の比を調べたところ，その値は概ね，0.2～0.33 であり，特に，0.25～0.30 位である。

これは $R=H_{max}t^{0.4}$……式に於て $t=24$hr. とすると $H_{max}=0.28\,D_{max}$ を得る。

故に概ね上記の関係に近くなり，概算ながら D_{max} から H_{max} が求められる。これ等の関係は既掲図—4 からも大略判る。

次に時間雨量と連続雨量との関係は，一連の大降雨（普通，主要継続日数は 3～4 日間位）を C_{max} とすると，前と同様に

$$H_{max}=(0.16\sim0.28)C_{max}\fallingdotseq 0.2C_{max}$$

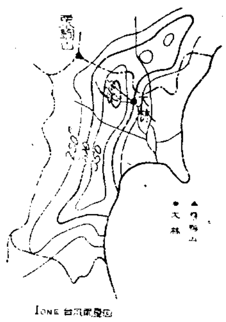
6. 降雨強度と面積との関係

最後に注意すべき事は，強度の大きい降雨面積はそれ程広くないと云うことである。強度は 2～3 流でも面積が大きい雨は広範囲に水害を及ぼすから大河川の場合などには小範囲の大強雨よりかえつて恐ろしい。東北地方全域に対する総降雨量を仙台管区気象台の佐藤義正氏が計算された結果は表—5 の通りである。河川の上流部の如く流域面積が小さく，2～5時間位で洪水が到達する様な処では Ione 台風のような強度の降雨を標準とすべきだが，やや大きい流域からは Kathleen 級の降雨を標準とすべき事が肯れる。今試みに宮城県の迫川流域に於ける Ione 台風の降雨の分布状態を図示すると図—10 のようになる。

表—5

[illegible]		[illegible]
1	[illegible]	[illegible]
2	[illegible]	1,606
3	[illegible]	[illegible]
4	[illegible]	[illegible]
5	[illegible]	[illegible]
10	アイオン台風	865

図—10



図—10 によると Ione 台風では木の葉状の等雨量線図が見られ，強雨部の短軸長は 20 km 位であり，長軸長は 150 km 位となつている。故に最も危険な場合を考えても大岡村字大林で（3 川合流点）一，二，三迫川全流域に最強度の降雨があつたとは到底考えられない。即ち，$c_1=\dfrac{F_a}{F}$ の係数を全流域面積に乗じなくてはならぬことは明らかである。

かつて，ドイツの Oder 河支流の Bober, Queiss 両川に強雨があつた時，その範囲が 50 km² 位に過ぎなかつたことが報じられている。

故に，この点から考えても Kathleen 級よりやや強い雨を想定して作つた私の式で充分であり，むしろ多くの場合には少し多過ぎるとも思われる。但し前にも述べた如く，奥地山間の土堰堤の余水吐計画の如きものに関しては極めて小区域の大降雨を標準とした T_e 式を用いる事を勧める。

（昭.27. 2.2）

新刊紹介

工博　楠　宗道著　**河川工学通論**　理工図書刊

A.5 判 176 頁　定価 **200 円**　昭.27.5.15発行

わが国は年々洪水の為に 2 000 億円内外の損害を蒙つているがその原因は季節的の大雨からである。然しその為に瑞穂の国と云われ昔から農業立国の国柄である。これと並行して現今では工業立国の二本建になつてその動力源は水力にまたねばならない国情だから農工いづれも水源は河川に仰がなければならない。幸いにわが国は年雨量に恵まれているからこれが転禍為福はいやが上にも研究せねばならない。著者は多年河川技術と大学教育とに携わり治水に重大関心をもちその結果が本書となつたのだと思う。而して本書は河川全般に渉つて理論と実地について簡明に述べ且つ巻末に和英対訳の索引を附しているから河川技術家，河川研究家及び大学学生の参考書としたならば得る処大なるものがあるを信じて敢てここに推奨する。

（鈴木雅次）