



Title	豊平川の洪水解析
Author(s)	岸, 力; Kishi, Tsutomu; 中尾, 欣四郎 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 28, 45-77
Issue Date	1962-03-06
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40690
Type	departmental bulletin paper
File Information	28_45-78.pdf



豊平川の洪水解析

岸 力*
中尾欣四郎**

Run-off from Rainfall for the TOYOHIRA River

Tsutomu KISHI
Kinshiro NAKAO

Abstract

Infiltration capacity for the upper basin of the TOYOHIRA River was investigated. Horton's theory of infiltration capacity was found to be applicable for this basin. Initial infiltration capacity f_0 was determined as a function of the initial discharge of the river. Final infiltration capacity f_c and the recession factor k were constant for eight floods investigated. The numerical values of f_c and k were 0.69 mm/hr and 0.13 hr^{-1} , respectively.

Analysis of direct run-off was then carried out. Direct run-off of this basin showed a non-linear character and the unit graph method did not give satisfactory results. A method of calculation based on the characteristic curve was found to be a useful tool to deal with the run-off of non-linear character. In the process of calculation, the authors proposed a simplified method for the estimation of the approximate value of roughness factor for a river basin.

目 次

1. 緒 言	2
2. 流域および出水資料の概要	2
3. 降雨の損失特性	3
4. 直接流出量の単位図法による解析	7
5. 直接流出量の特性曲線法による解析	8
5.1 特性曲線法の概要	8
5.2 豊平川流域の支川配置の特徴と流域の分割	9
5.3 斜面粗度係数 N の算出	10
5.4 直接流出量の計算	12
5.5 計算値と実測値との比較	14
6. 結 論	17

*, ** 北海道大学工学部土木工学科

1. 緒 言

河川の降雨流出の解析においては、直接流出の機構とともに降雨の損失機構の研究が必要であるが、この分野の研究は今の処比較的少なく、直接流出の研究にくらべ立ち遅くれている。しかし北海道の河川においては、降雨特性からみて、降雨損失の研究が特に重要である。

降雨の損失は大部分地中への滲透と考えられるから、損失量には流域の保湿の程度が影響するはずである。筆者らはこの観点から豊平川について降雨の損失機構を考察した。

また直接流出については、単位図法などの線形解析法が広く用いられている。しかし、流域内における局所的な流れは乱流であって、本来非線形の流れである。したがって降雨流出に対する線形解析法の適用には自ら制限があつて、対象とする流域面積が小さければ当然非線形な流れとして扱わなければならない。

本文では豊平川の直接流出が線形流出とはみなし難いものであることを明らかにするとともに、特性曲線法²⁾によれば、大小各種の出水の流出特性を統一的に説明できることを示した。

また流域の支川配置に着目して、流域の代表粗度係数を求める簡易法を考え、計算を著しく短縮することができた。

2. 流域および出水資料の概要

対象とした流域は定山溪市街から約4 km 下流の簾舞(みすまい)発電所取水堰の集水域で、流域面積は460 km²である。流域は源流を無意根岳、空沼岳などの1,000~1,400 m級の山岳地帯に発し、図-1に示すように豊平川本流、薄別川、白井川および小樽内川の4流域に大別される。

出水記録は北海道電力 K.K. が測水した簾舞発電所取水堰の越流量および発電使用水量の和を流量記録として使用した。解析に用いたのは昭和32年から33年までの8個の出水で、概要を表-1に示した。なお流量記録の詳細は附録別表-1に示した。

降雨記録は定山溪市街およびそ

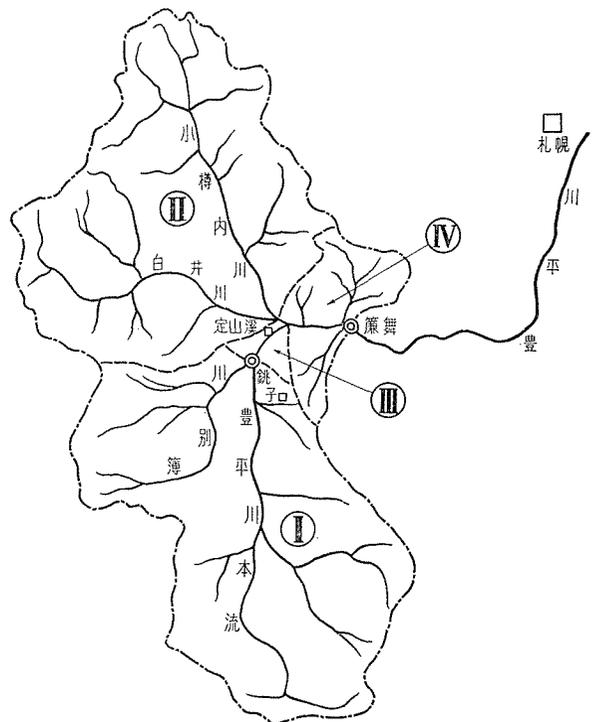


図-1 豊平川(簾舞上流)流域図

表-1 解析に用いた出水記録の概要

洪水番号	年 月 日 (昭和)	総雨量 (mm)	初期損失 (mm)	有効雨量 (mm)	Peak 流量 (m ³ /sec)	
					直接流出	基底流出
1	32. 8. 28~29	74.8	1.6	9.8	120.1	6.7
2	32. 8. 29~30	15.8	0	3.8	79.4	23.4
3	32. 9. 8~ 9	37.7	8.5	2.9	49.5	15.8
4	32. 9. 12~13	45.7	3.0	6.4	68.0	14.9
5	32. 9. 25~26	31.5	3.0	17.2	241.3	23.3
6	33. 7. 23~24	56.6	9.9	5.8	90.4	11.5
7	33. 7. 31~8.1	57.9	8.3	10.7	111.8	13.2
8	33. 10. 1~ 3	52.7	4.9	18.9	248.8	19.1

の上流約2 kmの豊平第一発電所の時間雨量を用い、その詳細を附録別表-2に示した。2箇所の雨量観測所が近接しているので、*Thiessen*法によらず2箇所の雨量の算術平均をもって流域平均時間雨量とした。

3. 降雨の損失特性

雨量の有効雨量と損失雨量への配分は降雨の流出特性を支配する重要な要素であるが、損失雨量の研究はこれまで比較的少なかった。本州の多くの河川では、出水の原因である雨量が大きく総雨量300 mmあるいはそれ以上に達する例が少くない。このような場合には、*Peak*流量の近くでは損失雨量の時間的変化が少なく、しかも総雨量に対する総損失量の比率は相対的に小さくなる。本州河川の水文学的研究が、主として直接流出を対象とし進められてきたのは、また当然であろう。

しかし北海道の河川では事情が異なっている。表-1にもみられる通り、北海道河川の出水では総雨量100 mmあるいはそれ以下のことが大部分で、雨量に対する損失量の割合は必ずしも小さいとは云へないのである。筆者らは、北海道河川の水文学的研究の特質として、損失雨量の研究の重要性を機会ある毎に強調してきた。

損失雨量は直接流出量の定義によって変る。直接流出と基底流出との分離には二、三の方法が用いられているが、本文では表面流出と中間流出との二つを直接流出量と考え、図-2に示したように基底流出量を分離した。a点は流出の始点、b点はaからの水平線とpからの垂線との交点、c点は減

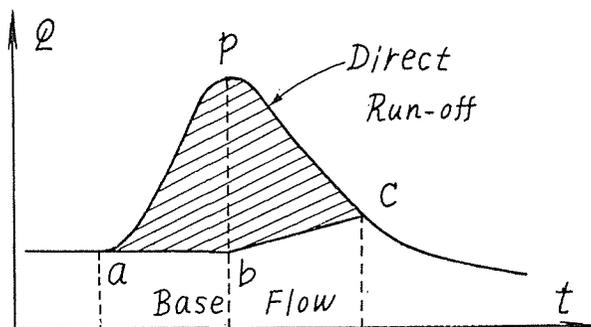


図-2 直接流出量の分離

水部の折曲点である。

豊平川の資料について総雨量（ただし初期損失雨量を除く）と有効雨量との関係をしらべ図-3を得た。

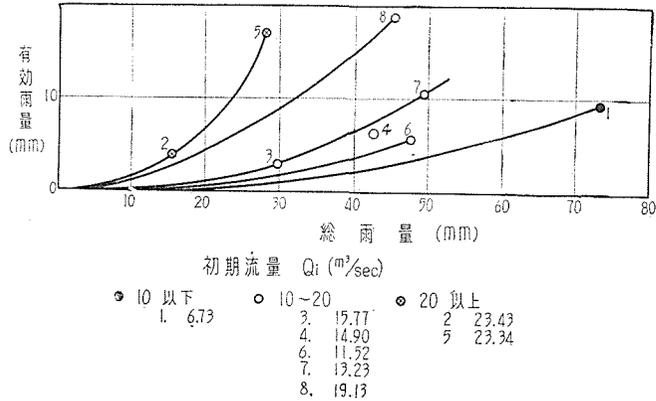


図-3 豊平川における総雨量と有効雨量との関係

図-3によれば、有効雨量が総雨量だけではきまらないことが明らかである。損失雨量のうち蒸発損失は小さく、大部分は地中に滲透する滲透損失と考えられる。滲透損失は流域の保湿の程度によって著しい差を生ずるのであろう。流域の保湿の程度とは、流域内の地下水量の大小であり、それをあらわす Index として無降雨日数を用いた例もある²⁾。

しかし流域内の地下水量はむしろ、流出開始時の河川流量（初期流量）であらわすのが合理的であろう。基底流出の時間変化が指数関数で近似されることは多くの河川で認められる実験的な事実であり、この性質を用いればある時刻に存在する地下水総量はその時刻の流出量に比例することになるからである。図-3では総雨量と有効雨量との関係を初期流量 Q_i をパラメーターとして整理した。図にみられる通り、 Q_i をパラメーターにすれば、総雨量と有効雨量との間には規則性が認められる。

流出率に直して図-3を再整理した結果を図-4に示した。図-4においても図-3の場合と同様に、総雨量と流出率との間には Q_i が関係している。

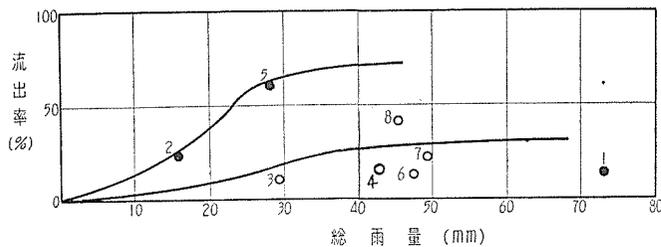


図-4 豊平川における総雨量と流出率との関係

以上の結果から総雨量と有効雨量あるいは流出量との関係が初期流量によって分かれることが明らかになったが、図-3あるいは図-4は実験曲線であって、これらの曲線からより大きな雨量に対する有効雨量あるいは流出率を推定する根拠が乏しい。そこで筆者らは、土壤滲透能の考察から図-3あるいは図-4の結果を説明することを試みた。

Horton³⁾は小試験地の実験から土壤滲透能が(1)式であらわされることを示している。

$$f = f_0 + (f_c - f_0)e^{-kt} \tag{1}$$

ここに

f = 任意時刻の滲透能

f_0 = 初期滲透能

f_c = 最終滲透能

k = 常 数

(1) 式の関係が河川流域全体の滲透についても成り立つものと仮定し f_0 , f_c および k の値をしらべてみる。(1) 式を降雨継続時間 t_u の間で積分すれば

$$F = f_c t_u + [(f_0 - f_c)/k](1 - e^{-kt_u}) \tag{2}$$

ここに F = 総滲透量

t_u = 降雨継続時間

F を各出水の総損失量と考えると、8出水について F と t_u との値をしらべると表-2のようになる。

表-2 豊平川における損失雨量と降雨継続時間との関係

洪水番号	1	2	3	4	5	6	7	8
F (mm)	63.4	12.0	26.3	36.3	11.3	40.9	38.8	28.9
t_u (hr)	9	4	8	26	10	13	13	17

表-2の観測値から f_0 , f_c および k を求めて次の値を得た。

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= 10.7 \text{ mm/hr} \dots Q_i = 7 \text{ m}^3/\text{sec} \\ &= 5.35 \dots = 12 \\ &= 2.14 \dots = 23 \end{aligned} \right\}$$

$$f_c = 0.69 \text{ mm/hr}$$

$$k = 0.13 \text{ hr}^{-1}$$

これらの値を用いた $F \sim t$ 曲線を図-5に記入し、実測値と比較した。

さらに、 f_0 と Q_i との関係をしらべ

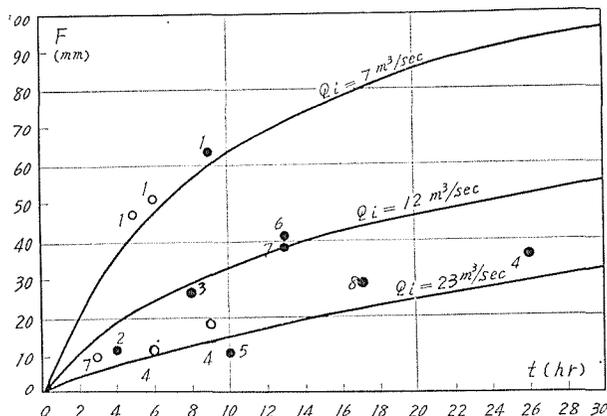


図-5 損失雨量の時間的变化

図-6を得た。図によれば $f_0 \propto Q_i^{-1.27}$ となっており、 f_0 はほぼ初期流量 Q_i に逆比例し、したがって流域の地下水量にも逆比例することになる。

また 図-5 の関係が正しいものとすれば、降雨の途中においても成り立つはずである。洪水 No. 1, 4 および 7 は流出量の極大が二箇所にあられ、これらの例については降雨途中の損失を求めることができる。洪水 No. 7 の直接流出量と時間雨量とを対比して 図-7 に示した。図によれば流出量の極大が 16 時と 24 時の二箇所で見られる。若し 16 時で雨が止んだとすればその流出量は、16 時に Peak 流量 $Q=44.3 \text{ m}^3/\text{sec}$ を示し、以後減水するはずである。16 時以後の降雨は 16 時までの流出に関係しないから 16 時の極大流量

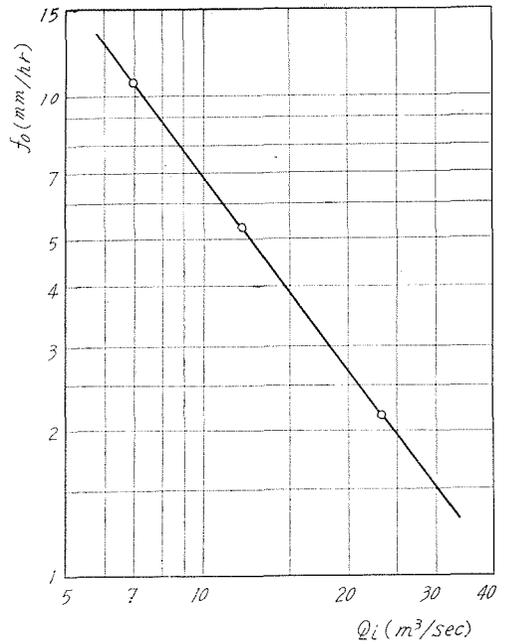


図-6 f_0 と Q_i との関係

は、16 時で降雨が止んだときの Peak 流量に相当するのである。Peak 以後の減水を、この洪水の減水係数 $0.147 (1/\text{hr})$ を用いて近似的に

$$Q = Q_{16} e^{-0.147(t-16)}$$

であらわす。すると 16 時以後の流出総量 R_2 は

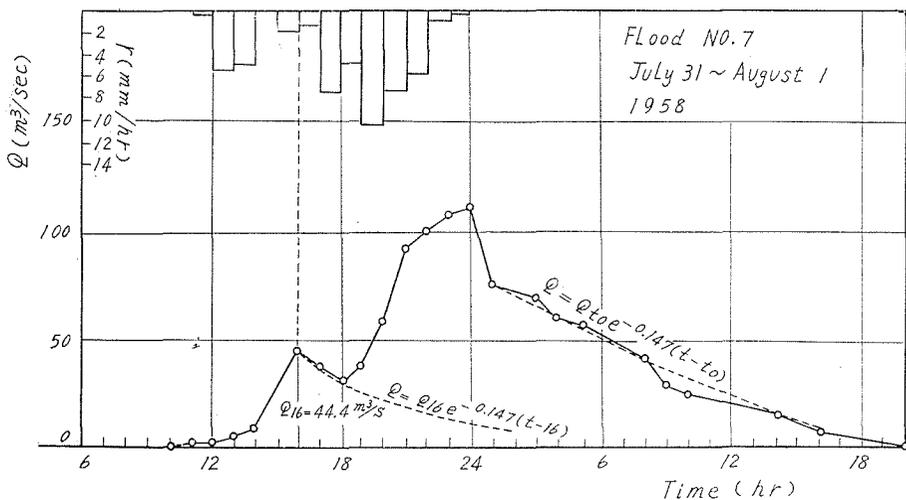


図-7 降雨途中における損失雨量の計算

$$R_2 = \int_{16}^{\infty} Q dt = 1.086 \times 10^6 (\text{m}^3)$$

となり、また 16 時までの流出量 R_1 は 図-7 から求めて

$$R_1 = 0.253 \times 10^6 (\text{m}^3)$$

となる。したがって、16 時までの雨量 11.95 mm による流出高 R_c は $R_c = (R_1 + R_2)/A = 2.91$ mm となり、損失高は

$$F = 9.04 \text{ mm}$$

となる。図-7 の降雨からみてこの損失は 3 時間で生じた損失と考えられる。図-5 において洪水 No. 7 の 0 の点は、このようにして求めたものである。同様にして、洪水 No. 1, 4 について降雨途中で求めた値を 図-5 に 0 で示してある。図-5 によれば、降雨途中の値も、さきに求めた損失量曲線によく適合して居り、損失雨量を (2) 式であらわすという仮定が妥当なものであることがわかる。

本章の解析によって、損失雨量は降雨量によらず、降雨の継続時間によるものであることが明らかになった。これまでは、流出率と雨量との関係を求める試みがしばしば行なわれてきたけれども、この試みは本章の結論にしたがえば、物理的な根拠に乏しい。流出率と雨量との相関図における点の散乱は、流量あるいは雨量観測値の誤差によるものといわれてきたけれども、この点の散乱はむしろ当然であって、観測値の精度が如何に高くても流出量と雨量には完全相関は成り立たない性質のものである。筆者らは、損失雨量を求める方法の合理性を重ねて強調したい。

4. 直接流出量の単位図法による解析

直接流出量の解析には種々の方法が提案されているが、実用上の簡便さから単位図法が最も広く用いられている。単位図法は、単位流出の重ね合せを行ない、流出の線形性を根本仮定としている。しかし流出現象は局所的には非線形の現象であるから、単位図法の適用には自ら制限があろう。特に小流域を対象にする場合は、単位図法が実用上の精度と簡便さを同時に満たし得るかどうか検討の余地がある。この意味で、豊平川の直接流出を先づ単位図法でしらべてみた。

降雨とそれに対する直接流出量とから試算的に 2 時間、1 mm の降雨に対する単位図を各出水毎に求めた。各出水毎の *Peak* 流量および *Peak* の遅れの時間をまとめて表-3 に示した。

表-3 豊平川単位図の特性値

洪水番号	1	2	3	4	5	6	7	8
単位図の <i>Peak</i> 流量 (m ³ /sec)	22	22	21	19	20	19	14	14
<i>Peak</i> の遅れの時間 (hr)	4	2	4	5	2	6	6	4

単位図の概略の形状を表-4に示した。これは8出水の単位図を、*Peak*の時刻を合はせて重ね合はせ、各時刻の縦距の平均値を求めたものである。

表-4 豊平川の平均単位図

時間 (hr)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
単位図の縦距 (m ³ /sec)	6.8	19.4	12.6	8.2	5.7	4.0	3.0	2.1	1.4	0.7	0

表-3によれば、出水毎に*Peak*流量および*Peak*の遅れの時間が異なり、一つの単位図ではすべての出水をあらわし得ないことが明らかである。このような場合でも、若し単位図の*Peak*流量と*Peak*の遅れの時間との間に相関関係が認められるならば、単位図の形状をあらわすパラメーターが1個になり、降雨と単位図のパラメーターを結びつけることも考えられる。しかし豊平川の単位図にはその関係も認められず、単位図法の適用に無理があるものと考えられる。

そこで、つぎに流れを非線形流として取扱う特性曲線法で解析を試みた。

5. 直接流出量の特性曲線法による解析

5.1 特性曲線法の概要

河川における降雨流出をモデル化して、任意の断面形をもつ流路に、横から時間的に変化する流量が流入する流れと考える。流れが等流に近いものとすれば、運動および連続の式はそれぞれ(3)、(4)式で与えられる。

$$A = f(Q) = KQ^p \quad (3)$$

$$\partial A / \partial t + \partial Q / \partial x = q(t) \quad (4)$$

ここに

A = 流路の断面積

Q = 流量

q = 流路単位長さあたりの横からの流入量

また K 、および p は、流れが Manning の平均流速式にしたがうものとすれば

$$K = n / (K_1^{2/3} i^{1/2})$$

$$p = 3 / (3 + 2z)$$

ここに

n = 流路の粗度係数、 i = 流路の勾配

K_1, z は流路の径深 R と断面積 A との関係を示す常数で

$$R = K_1 A^z$$

から定まる値である。例えば広矩形断面の流路では $K_1=(1/B)$, $z=1$ である。

(4) 式の特性格方程式に (3) 式を代入すれば (5), (6) 式の関係が得られる。

$$t = K \cdot x \cdot Q^{p-1} \quad (5-a)$$

$$\text{or } \log t = \log K + \log x + (p-1) \log Q \quad (5-b)$$

$$t = KQ^p/q \quad (6-a)$$

$$\text{or } \log t = \log K - \log q + p \log Q \quad (6-b)$$

横からの流入量 q を求めるには、山腹斜面上の流れを考える。山腹斜面上の流れでは、横からの流入量が有効雨量 r_e 、流路の流量が q であるから、(5), (6) 式において Q を q に q を r_e と置き換えればよい。しかも斜面上で単位幅の流路を考えるから K , p は次の値をもつ。

$$\left. \begin{aligned} K &= (N/\sqrt{I})^p \\ p &= 0.6 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここに

N = 流域斜面の粗度係数

I = 流域斜面の勾配

特性曲線法によって河川の降雨流出を計算するには次の資料が必要である。1) 流域の分割図, 2) 流路の断面, 勾配, 粗度係数, 3) 流域斜面の勾配, 粗度係数。

このうち 1), 2) の項目は、あらかじめ求め得るものである。しかし 3) の流域斜面の粗度係数 N については何等の推定資料も持っていない。 N を決定するには実測流出量曲線に合うように数値計算を繰返さねばならない。実際問題としてこの繰返し計算の手数が極めて煩雑であり、特性曲線法の難点となっている。筆者らは豊平川の支川配置の特徴に着目して、流域斜面の粗度係数 N の近似値を推定する簡易法を考えた。

5.2 豊平川流域の支川配置の特徴と流域の分割

特性曲線法では河川流域をいくつかの等価矩形流域に分割して計算を進めるが、分割数が少ないことが望ましいのはいうまでもない。一方特性曲線法はできるだけ流出の実態を忠実に解析しようとする立場に立つものであるから、実情を無視した簡易計算はその趣旨に反する。

以上二つの点から、流域を主なる支川単位に分割するのが最も簡単な流域分割の限度であろう。

一つの流域内における支川配置には、周知のように樹枝状、扇状などいくつかの型がある。樹枝状の配置では各支川の流出に時差があるが、扇状配置では各支川の流出時差が少ない。2章 図-1 に示した通り、豊平川は簾舞上流で豊平川本流、薄別川、白井川および小樽内川の4川に分かれ、しかも4川が典型的な扇状配置を示している。さらに合流状態で区分すれば、

(豊平川本流+薄別川) と (小樽内川+白井川) は一つの単位と考えることもできる。したがって簾舞上流域をでき得る限り簡単な矩形流域に分割すれば、図-8 のように4 矩形流域になる。それぞれの分割流域は図-1 にもその境界を記入してある。分割流域を等価な矩形流域に換算して諸要素を表-5 に示した。

表-5 等価矩形流域の数値

分割流域	面積 (km ²)	流路長 (km)	斜面流下幅 (km)	勾配
I	216.85	81.5	2.7	0.164
II	204.16	85.8	2.4	0.205
III	5.92	3.5	0.8	0.250
IV	33.04	4.0	4.1	0.200

換算にあたっては、流れを特長づける量は主として斜面流下幅であることに注意し、地図上で溪流についての流域平均幅を細かく求め流域面積を重みとした加重平均で先づ斜面流

下幅を算出した。流路長は区分面積とその斜面流下幅から算出した見掛け上の値である。また分割流域の勾配も、溪流に流入する斜面の勾配を加重平均した値である。

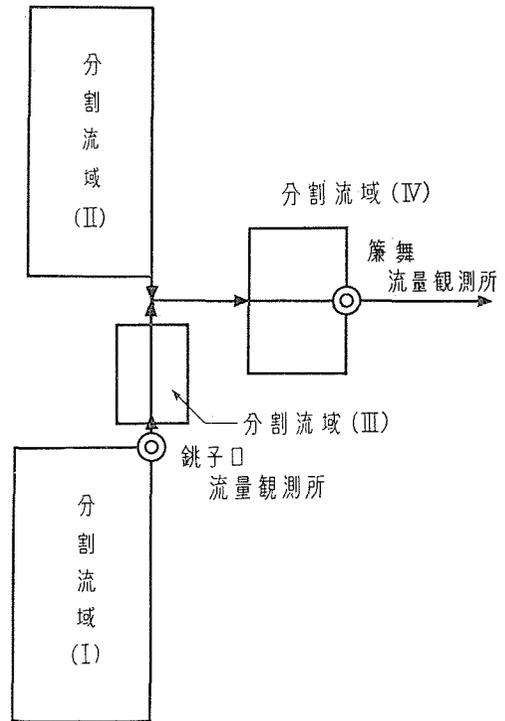


図-8 豊平川流域の分割図

5.3 斜面粗度係数 N の算出

降雨が観測点に到達するまでの流下時間は、一般には山腹斜面の流下時間と河道における流下時間との和である。しかし本例のように河川の上流部で急勾配の小流域を対象とする場合には、山腹斜面における流下時間に比べ、河道に入ってから流下時間ははるかに短いと考えられる。したがって表-5 に示したような、実際の流域と勾配および斜面流下幅が等しい矩形流域を考え、分割流域内における河道流下時間を無視した計算を行なっても結果に大差を生じないであろう。

図-8 および表-5 によれば、豊平川分割流域のうち、流域 (I), (II) の二つが流域の 90% 以上を占めている。また前節で指摘したように両流域を構成する 4 川は殆んど同一地点で合流し、しかも合流点は流量観測点である簾舞にごく近い。したがって、簾舞の流量曲線は (I), (II) 両流域の流出量曲線を、時差を考えずに合成した流量曲線にほぼ合致するはずである。その上表-5 によれば、(I), (II) 両流域は面積、勾配、斜面流下幅ともいずれも類似の値をもっている。したがって第一近似としては、簾舞上流域を一つの矩形流域とみなすことが水理的に可能である。

このように全流域を一括して考えれば、流出の始点から *Peak* 流量までの流出の上昇時間に注目して流域の粗度係数 *N* の近似値を求めることができる。簾舞の流出量曲線を見ると、*Peak* 流量が降雨終了直後に生じている例が多い。任意強度 r_m の降雨が充分長時間継続するときの流出の上昇時間 t_q は (5), (6) 式から $Q=qx$ なる関係が導かれるから

$$t_q = (N/\sqrt{I})^p \cdot B^p \cdot r_m^{(p-1)} \tag{8}$$

ここに

t_q = 流出の上昇時間

B = 斜面流下幅

r_m = 平均雨量強度

表-6 豊平川における斜面粗度係数

洪水番号	上昇時間 t_q (sec)	平均雨量強度 r_m (m/sec)	粗度係数の 第一近似値 N ($m^{-1/3} \cdot sec$)	粗度係数の 最終値 N ($m^{-1/3} \cdot sec$)	<i>Peak</i> 流量 Q_p (m^3/sec)
1	2.88×10^4	0.375×10^{-6}	0.242	0.20	120
2	2.52×10^4	0.319×10^{-6}	0.174	0.15	79
4	5.04×10^4	0.133×10^{-6}	0.309	—	68
5	2.88×10^4	0.608×10^{-6}	0.334	0.30	241
6	4.32×10^4	0.144×10^{-6}	0.252	0.15	90
7	4.68×10^4	0.228×10^{-6}	0.390	0.30	112
8	3.60×10^4	0.506×10^{-6}	0.428	0.30	249

簾舞上流域について設けた前述の仮定が正しければ、豊平川の出水についても (8) 式の関係が成立し、斜面粗度係数 *N* の値が定まるはずである。出水記録から t_q と r_m とを求め表-6 に示した。

表-6 から t_q と r_m との関係をしらべると 図-9 のようになる。図では t_q と r_m との関係は *Peak* 流量によって分かれるようであるから、観測値を *Peak* 流量の大小によって2群に分けてある。しかしいずれの場合でも豊平川の流出については (8) 式の関係が成り立っていると認められる。しかも $t_q \propto r_m^{-0.4}$ となったから $p=0.6$ であり、(7) 式の値と一致している。

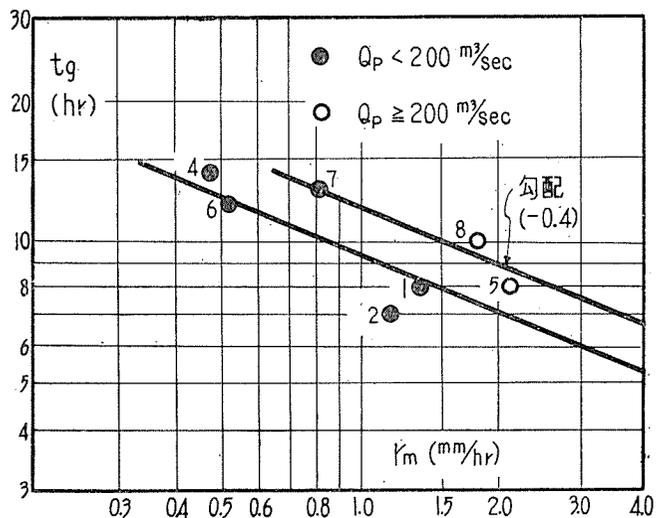


図-9 豊平川における t_q と r_m との関係

表-5 から分割流域 (I), (II) の平均値として $B=2,500$ m, $I=0.185$, $p=0.6$ を用い, (8) 式によって各出水毎の斜面粗度係数 N を求め 表-6 第 3 欄に示した。なお次節に述べる繰返し計算で求めた N の最終値を第 4 欄に示した。第 3 欄の近似値は, 流域を単一の矩形流域で置き換え, しかも流路の流下時間を無視するという極端な近似のもとで算出された値であるが, 第 4 欄の最終値にかなり近い。これは豊平川流域の地形的な特長と降雨流出における流れの特長とが, 水理的な単純化の過程に比較的好く織り込まれた事を示して居ると考えられる。これまで特性曲線法における斜面粗度係数については値を推定する資料がなく, その大きさの程度も不明であった事は前にも述べた。本節の方法によれば, 比較的容易にかなりよい近似値を求めることができる。

5.4 直接流出量の計算

特性曲線法による計算手順を具体例について簡単に述べる。例として洪水 No. 5 で分割流域 III を考える。有効雨量を 図-10 に示した。

流域 III は斜面流下幅 $B=845$ m, 斜面勾配 $I=0.250$ である。前節で求めた斜面粗度係数 N の第一近似値 $N=0.30$ を用いれば (7) 式から

$$K = (N/\sqrt{I})^p = 0.736 (\text{m}^{-1/5} \cdot \text{sec}^{3/5})$$

(5-b), (6-b) 式を斜面の流れについて再記すれば

$$\log t = \log K + \log x + (p-1) \log q \quad (9)$$

$$\log t = \log K - \log ar + p \log q \quad (10)$$

ただし

$$\begin{aligned} a &= \text{雨量 mm/hr を m/sec に換算する係数} \\ &= 0.2778 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

(9) 式は, 距離 x をパラメーターとすれば特性方程式の解である $\log t$ と $\log q$ とが勾配 -0.4 の平行直線群を形成することを示している。同様に (10) 式によれば, 雨量 r をパラメーターとすれば $\log t$ と $\log q$ との関係は勾配 0.6 の平行直線群となる。分割流域 III において, (9), (10) 式を図示すれば 図-11 が得られる。

雨が止んだ後には (4) 式において $q=0$ とすればよいから, 特性方程式は直ちに積分できて

$$t = pKq^{p-1} \cdot x \quad (11)$$

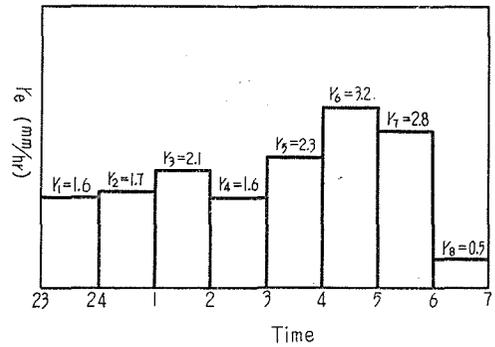


図-10 洪水 No. 5 の有効雨量

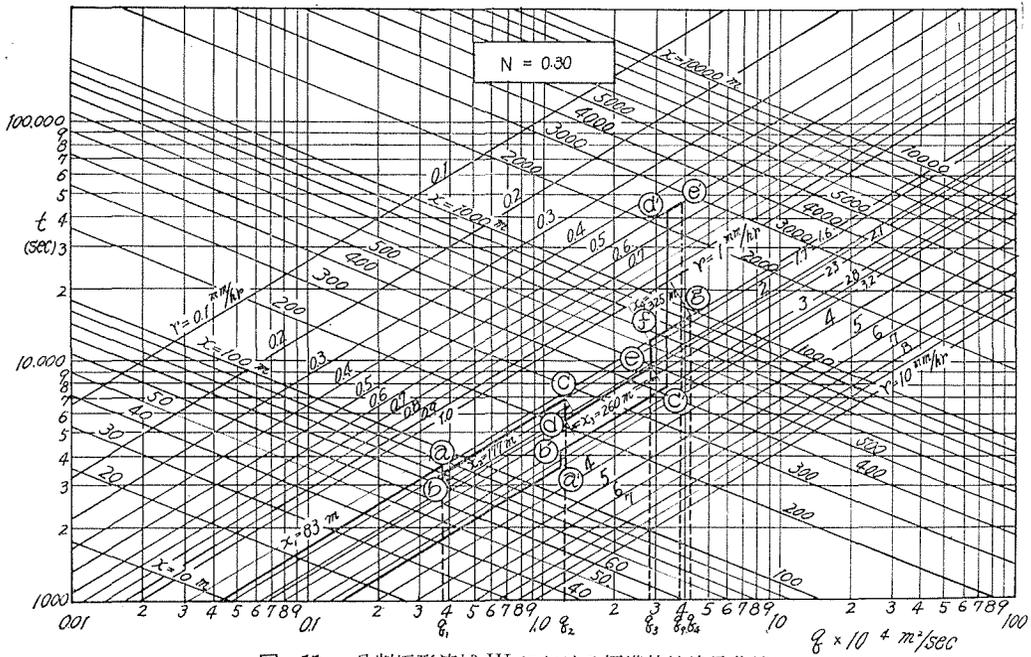


図-11 分割矩形流域 III における標準特性流量曲線

(11) 式において $pK=0.44 (m^{-1/3} \cdot sec^{2/3})$ であるから、 t と x とは q をパラメータとする直線群であり、計算結果を図-12 に示した。

図-10 の有効雨量図によれば、雨は 23 時に始まって $r_1=1.6 \text{ mm/hr}$ で 24 時まで続いている。図-11 で $r=1.6 \text{ mm}$ の線上で $t=3,600 \text{ sec}$ の点 a を求めれば、流下距離 $x=83 \text{ m}$ の地点の流量 $q=0.37 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ が定まる。24 時から雨量が $r_2=1.7 \text{ mm/hr}$ に変わるから、a 点から垂直に $r=1.7 \text{ mm/hr}$ の線上の点 b に移り、この線にそって 3,600 sec 経過した c 点に至る。b 点と c 点との距離は図から $x_2=177 \text{ m}$ となる。また 1 時の流量は上流端から $x_1+x_2=260 \text{ m}$ の地点において $q=1.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ となっている。以下同様に a, b, c, d, e, f および g と計算を続け、g 点に達したときに流下距離は $x_1+x_2+x_3+x_4=83 \text{ m}+177 \text{ m}+260 \text{ m}+325 \text{ m}=845 \text{ m}$ とな

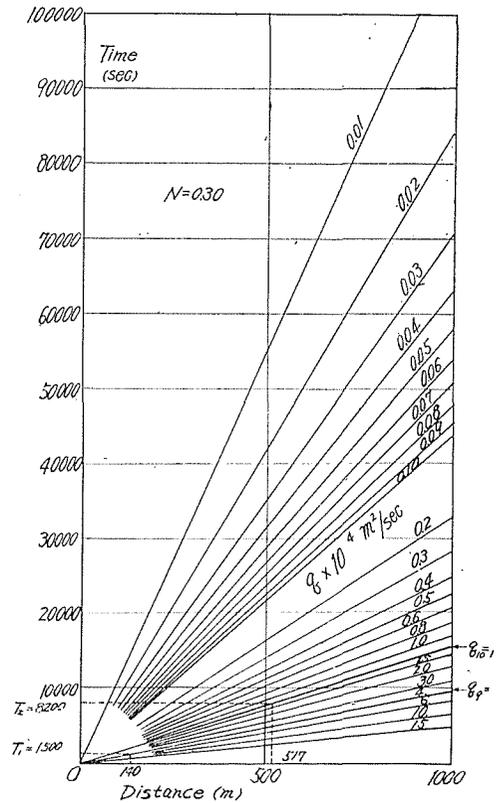


図-12 流域 III における降雨終了後の特性曲線

り斜面流下幅に等しくなる。これまでの経過時間は3時間57分となるから図-10の降雨では2時57分の斜面下流端流量は $q=4.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ となる。以後の時刻における下流端流量を求めるには、24時から $r=1.7 \text{ mm/hr}$ の降雨について同様の計算を繰返せばよい。

流下途中で降雨が止めば、以後の計算は図-12による。例えば図-10で4時に斜面上流端を出た特性曲線では7時の降雨終了時において $x=705 \text{ m}$ 、 $q=3.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ なる値が定まる。斜面下流端までの残りの流下距離は $x'=B-x=140 \text{ m}$ であるから、図-12において $x'=140 \text{ m}$ 、 $q=3.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ から $T=1,500 \text{ sec}$ が得られる。したがって7時25分の下流端流量は $q=3.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ である。

5.5 計算値と実測値との比較

5.3節において、豊平川の流出では河道の流下時間を含くめて流出の遅くれの時間を流域

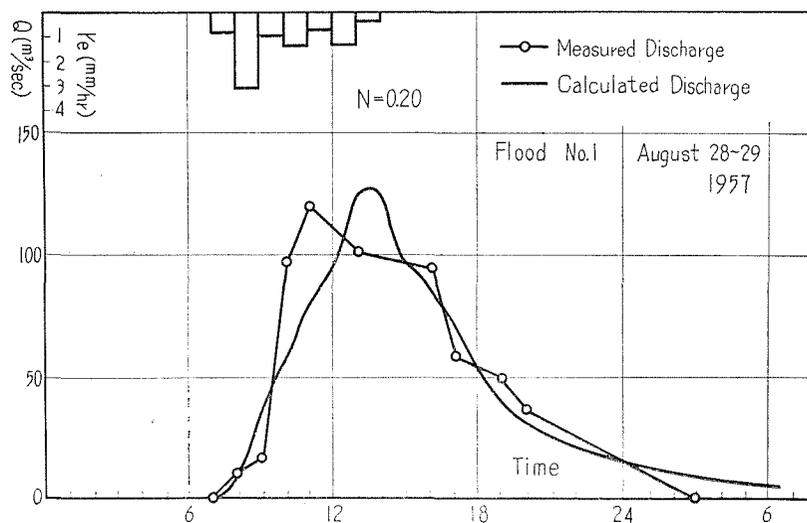


図-13. a

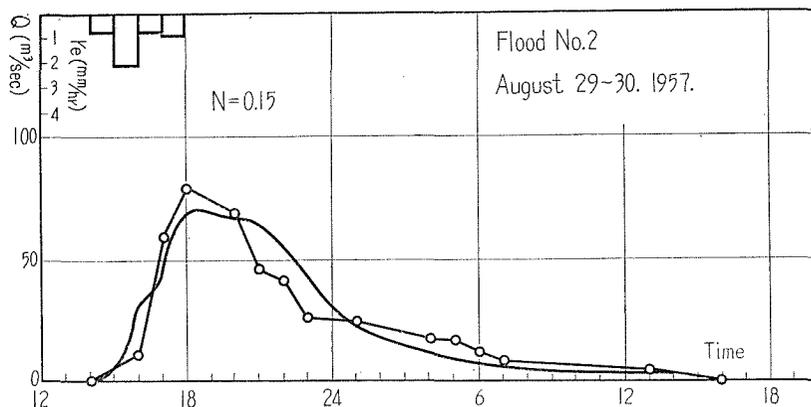


図-13. b

斜面の粗度係数 N であらわす近似法が可能であることを示した。しかも豊平川上流域の支川配置は典型的な扇形であって、各支川が簾舞に集る合流時差は極めて小さいものと考えられる。そこで分割4流域の流出曲線図を時差を考慮せずに合成し簾舞流量の計算値とした。流域斜面の粗度係数 N の値には、さきに求めた第一近似値から始めて数回の補正を加えた。計算に用いた特性流量曲線は附録別図-1 および 2 に収録してある。

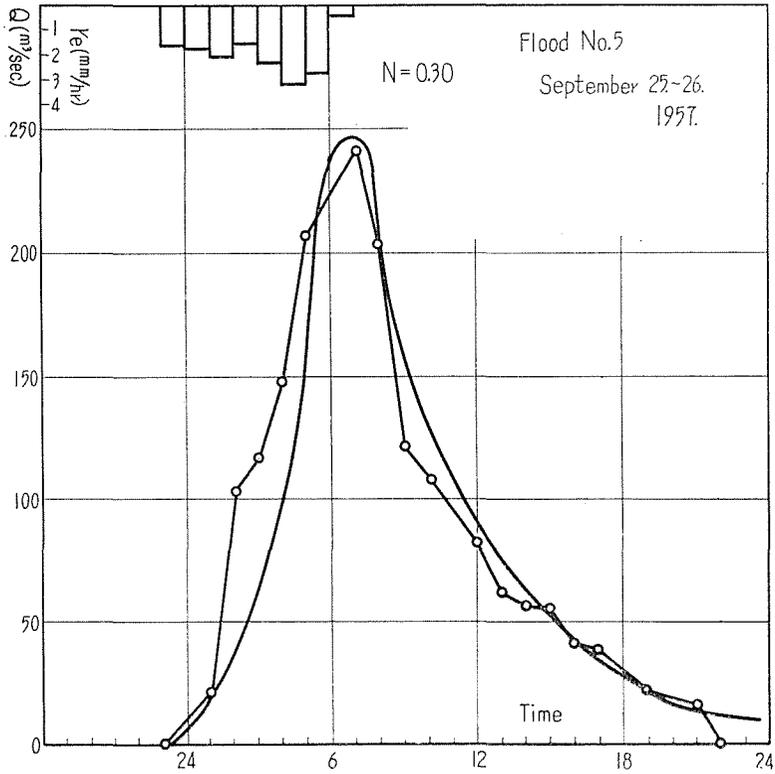


図-13. c

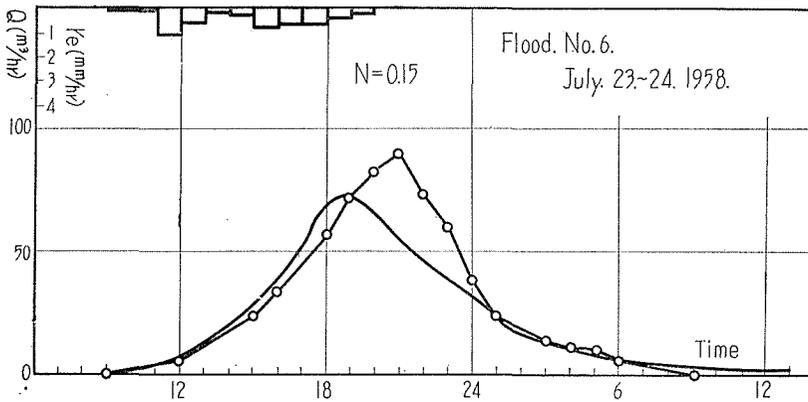


図-13. d

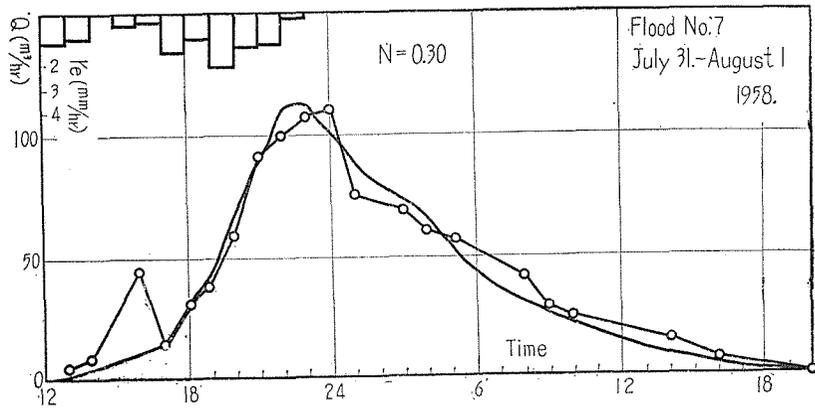


図-13. e

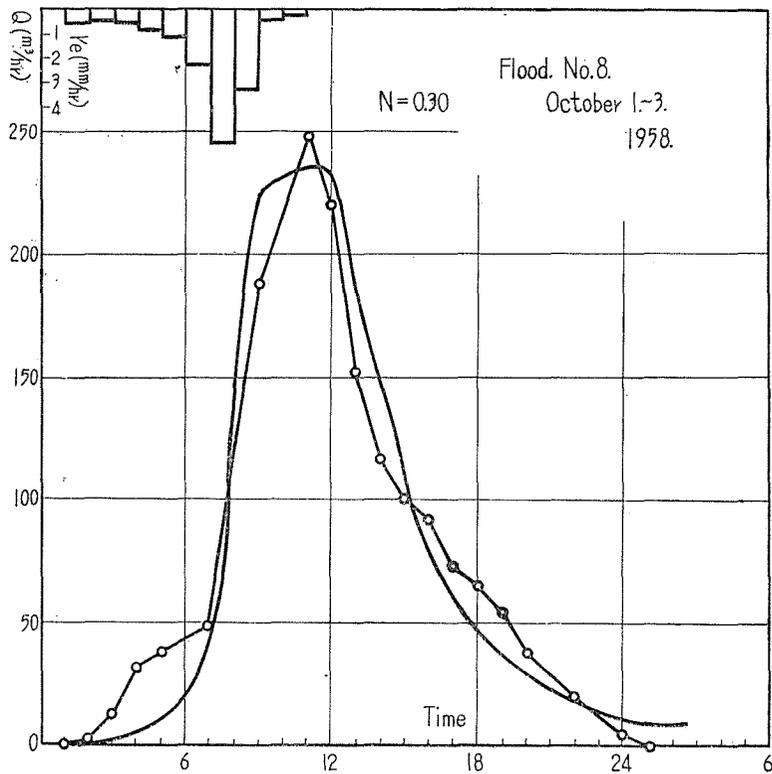


図-13. f

図-13. a~f に流出量の実測値と計算値とを比較して示した。図には計算に用いた粗度係数 N の最終値も記入してある。

図-13 によれば、特性曲線法による計算値は実測値とかなりよく一致している。ただ粗度係数 N の値が全出水を通じて一定にはならず、Peak 流量の大小によって異なる値となった。しかし図-13 あるいは表-6 をみれば、粗度係数 N と Peak 流量 Q_p との間には相関関係が認

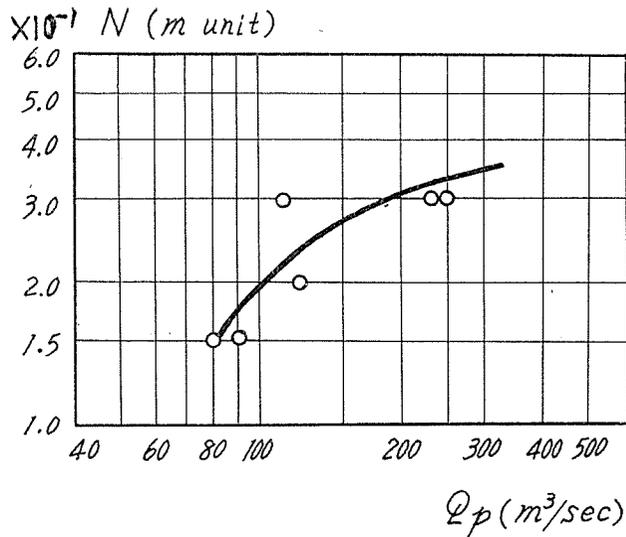


図-14 斜面粗度係数 N と Peak 流量 Q_p との関係

められる。 N と Q_p との関係を 図-14 に示した。

本節に示した通り、豊平川の流出は現象の線形性を仮定する単位図法では説明が困難であるが、特性曲線法によれば任意の降雨に対する流出を統一的に説明することができる。

筆者らは第4章において、豊平川の単位図が出水毎に異なり、しかも単位図相互の間に関連性が見出されないことを述べ表-3を示した。

これに対し特性曲線法によれば、任意の降雨による豊平川の流出を統一的に説明することができた。豊平川篠舞の流域面積は、 460 km^2 であり、本文の結果によれば、数百 km^2 以下の河川では、線形解析法による降雨流出の解析が困難になってくるものと思われる。

6. 結 論

豊平川流域について降雨の損失特性をしらべた。

1) 総雨量と有効雨量の関係あるいは総雨量と流出率の関係は流出の初期流量によって変る。結果を 図-3 および 図-4 に示した。

2) 前項の事実を説明するため、損失雨量の性質をしらべた。損失雨量は Horton 型の時間変化を示すことがわかった。

3) 豊平川流域では最終滲透能 $f_e = 0.69 \text{ mm/hr}$ 、滲透能の減衰係数 $k = 0.13 \text{ hr}^{-1}$ であった。初期滲透能 f_0 は初期流量 Q_e によって変り、両者の関係を 図-6 に示した。有効雨量あるいは流出率が初期流量によって変るのは、初期滲透能が初期流量の関数であるためである。

4) 損失雨量の計算式を検討するため、降雨途中の流出についても計算値と実測値とを比較し、両者がよく一致することを確かめた。

5) 降雨流出における損失雨量は、降雨の地中への滲透と考えて、その機構を説明することができる。出水解析においては、今後有効雨量あるいは流出率を直接考えるよりは、損失雨量を考えるのが合理的であろう。

ついで直接流出の性質をしらべた。

6) 単位図法では出水毎に異なった単位図が得られ、豊平川の流出には線形解析法が適当でないことがわかった。

7) 非線形解析法の一つである特性曲線法で計算し、すべての出水例にかなりよく適合する結果を得た。計算値と実測値とを比較して図-13に示した。

8) 計算にあたっては、流域の支川配置の特長を考慮して斜面の粗度係数を求める近似法を考え計算を著しく短縮することができた。

9) 斜面粗度係数は流出の *Peak* 流量によって変化した。両者の関係を図-14に示した。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一・末石富太郎：土木学会誌，**39**-11，575 (昭29-11).
末石富太郎：土木学会論文集，**29**，74 (昭30-12).
- 2) 石原藤次郎・田中要三・金丸昭治：土木学会誌，**41**-3，102 (昭31-3).
- 3) Wisler, C. O. & Brater, E. F.: Hydrology, 2nd Ed., 116 and 238 (1959), John Wiley & Sons.
- 4) 石原藤次郎・高棹琢馬：土木学会論文集，**60**-別冊 (3-3)，6 (昭34-3).

附 録

別表—1 篠 舞 流 量 (m³/sec)

洪水 番号	No. 1		No. 2			No. 3		No. 4			No. 5			
	昭和32年8月		昭和32年8月			昭和32年9月		昭和32年9月			昭和32年9月			
	28日	29日	30日	8日	9日	12日	13日	14日	25日	26日	27日	28日		
1	6.73	38.39	48.83	15.77	26.49	15.31	50.52	32.57	23.34	45.28	57.39	40.21		
2	7.10	—	—	19.91	—	14.90	50.90	31.82	—	126.18	57.78	39.80		
3	6.73	—	—	19.50	—	15.31	—	—	23.75	139.78	—	—		
4	—	28.87	41.91	23.63	—	—	51.68	—	—	170.33	—	—		
5	—	—	42.28	23.22	—	—	—	—	23.34	229.50	57.37	39.80		
6	7.10	30.03	36.46	23.63	26.08	—	—	32.57	23.75	—	—	—		
7	7.51	29.62	34.04	30.25	23.82	—	47.53	32.98	—	264.64	—	40.21		
8	17.17	27.37	—	—	22.30	—	46.01	—	23.34	228.75	—	—		
9	24.34	27.78	—	43.09	21.89	14.90	—	—	—	150.39	54.89	39.80		
10	104.05	—	—	65.31	—	16.93	44.58	—	—	141.14	55.36	40.21		
11	126.79	—	—	64.90	22.30	—	44.99	—	23.75	130.12	54.89	36.12		
12	122.31	—	—	65.31	21.42	19.91	44.58	32.59	—	119.76	47.17	—		
13	111.01	—	30.94	45.44	21.11	22.89	43.45	30.27	23.34	102.11	—	—		
14	—	23.34	—	39.12	21.42	36.77	43.04	30.68	23.75	100.19	—	35.71		
15	—	23.75	27.78	39.53	20.11	40.88	41.49	28.30	23.34	100.83	—	—		
16	110.50	33.55	27.37	—	20.54	42.42	41.08	28.71	—	89.99	—	—		
17	74.56	82.84	—	35.26	20.11	44.06	40.88	28.30	—	89.58	—	36.12		
18	—	102.84	19.83	—	20.54	46.01	40.47	—	—	84.88	—	35.71		
19	68.40	—	20.24	35.67	—	—	39.85	28.71	23.75	79.25	46.76	36.12		
20	56.62	84.38	—	—	20.11	—	39.44	—	23.34	—	—	—		
21	—	70.13	20.24	—	19.91	58.57	39.85	28.30	—	78.84	—	35.71		
22	—	64.91	19.83	26.08	19.91	65.32	—	28.71	—	66.00	—	—		
23	—	49.20	—	26.49	—	82.93	39.44	28.30	23.75	—	—	—		
24	—	49.61	20.24	—	—	—	39.85	28.71	—	—	—	—		

洪水 番号	No. 6		No. 7		No. 8				
	昭和33年7月		昭和33年		昭和33年10月				
	23日	24日	7月31日	8月1日	1日	2日	3日	4日	5日
1	11.52	39.82	13.23	88.78	22.89	19.13	65.54	41.54	33.61
2	—	—	—	—	—	22.46	—	—	—
3	—	33.16	—	84.32	—	32.20	—	—	—
4	—	31.16	—	76.54	—	50.43	—	—	—
5	—	31.71	—	74.27	19.76	56.17	—	—	—
6	—	28.32	—	72.54	—	60.26	60.38	—	—
7	—	—	—	—	—	66.23	—	—	30.39
8	—	—	—	61.69	—	137.95	—	—	—
9	—	25.83	—	49.56	—	205.45	54.74	—	—
10	13.23	—	—	46.43	—	236.43	—	—	—
11	—	24.04	15.40	—	—	267.89	—	—	—
12	15.40	—	—	42.57	—	239.83	—	—	25.71
13	14.13	22.11	19.13	—	—	176.80	48.94	—	—
14	—	—	22.46	39.43	—	146.30	—	—	—
15	35.00	—	—	36.29	—	133.44	—	—	—
16	44.86	—	57.58	33.07	—	127.85	46.00	—	—
17	—	19.13	48.94	—	19.13	111.97	—	—	—
18	68.44	—	45.94	—	—	108.60	—	—	—
19	82.97	—	51.72	—	—	101.90	—	36.75	—
20	93.98	—	73.42	29.80	—	89.21	—	—	—
21	101.92	—	104.41	25.71	—	—	—	—	—
22	85.68	—	113.59	—	—	—	41.54	33.61	—
23	73.17	—	121.41	—	—	—	—	—	—
24	52.22	—	125.01	—	—	—	—	—	—

別表一2 時間雨量 (mm/hr)

洪水番号 年 月	No. 1			No. 2			No. 3					
	昭和32年8月			昭和32年8月			昭和32年9月					
日 時	定山溪 時間雨量 (mm)	豊平 電所 時間雨量 (mm)	日 時	定山溪 時間雨量 (mm)	豊平 電所 時間雨量 (mm)	日 時	定山溪 時間雨量 (mm)	豊平 電所 時間雨量 (mm)	日 時	定山溪 時間雨量 (mm)	豊平 電所 時間雨量 (mm)	
28. 1	—	—	29. 1	—	↑	7. 1	—	↑	8. 1	4.4	—	
2	—	—	2	—	↑	2	—	↑	2	2.6	—	
3	—	—	3	—	↑	3	—	↑	3	5.4	—	
4	0.6	0.1	4	—	↑	4	—	↑	4	1.0	—	
5	1.0	1.5	5	—	↑	5	—	↑	5	4.4	—	
6	14.0	7.3	6	—	↑	6	—	↑	6	5.5	2.9	
7	17.6	12.1	7	—	↑	7	—	↑	7	6.4	6.4	
8	4.2	11.9	8	—	↑	8	—	↑	8	2.3	5.1	
9	15.5	7.0	9	—	↑	9	—	↑	9	0.4	0.7	
10	4.3	↑	10	—	↑	10	—	↑	10	—	—	
11	6.3	↑	11	—	欠	11	—	欠	11	—	—	
12	3.5	↑	12	—	↑	12	—	↑	12	—	—	
13	6.3	↑	13	—	↑	13	—	↑	13	—	—	
14	1.5	↑	14	—	測	14	—	測	14	—	—	
15	—	↑	15	2.8	↑	15	—	測	15	—	—	
16	—	欠	16	7.0	↑	26	—	↑	16	1.2	0.9	
17	—	測	17	2.8	↑	27	—	↑	17	—	0	
18	—	測	18	3.2	↑	28	—	↑	18	—	—	
19	—	測	19	—	↑	29	—	↑	19	—	—	
20	0.5	測	20	—	↑	20	—	↑	20	—	—	
21	—	測	21	—	↑	21	0.5	↑	21	—	—	
22	0.3	測	22	—	↑	22	0.6	↑	22	—	—	
23	0.5	測	23	—	↑	23	0.9	↑	23	—	—	
24	—	↓	24	—	↓	24	2.1	↓	24	—	—	

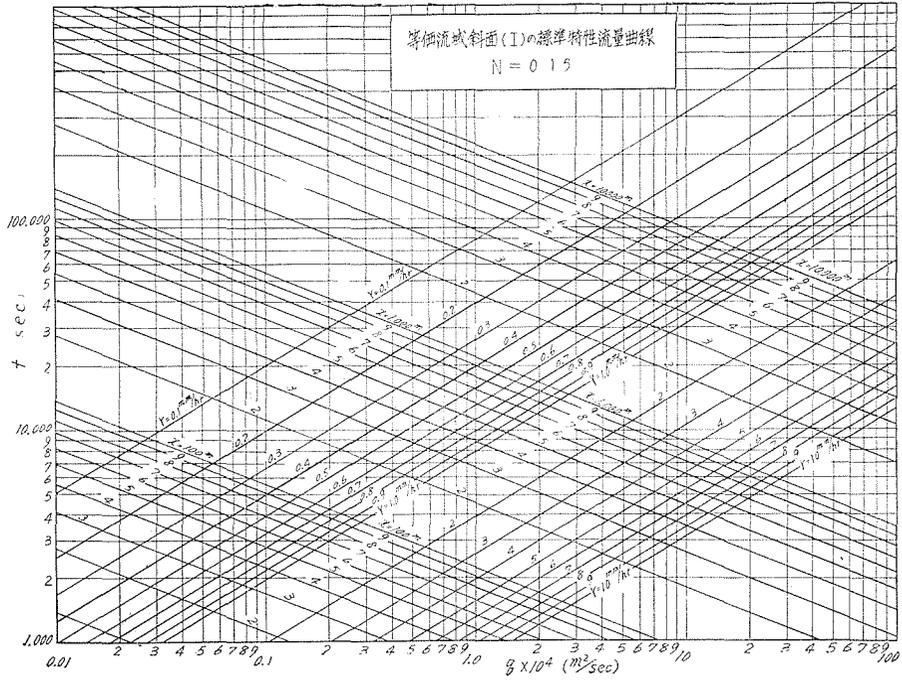
洪水番号 年 月	No. 4					No. 5					
	昭和32年9月					昭和32年9月					
日 時	定山溪 時間雨量 (mm)	豊平 電所 時間雨量 (mm)	日 時	定山溪 時間雨量 (mm)	豊平 電所 時間雨量 (mm)	日 時	定山溪 時間雨量 (mm)	豊平 電所 時間雨量 (mm)	日 時	定山溪 時間雨量 (mm)	豊平 電所 時間雨量 (mm)
12. 1	—	—	13. 1	—	—	25. 1	—	—	26. 1	3.2	2.7
2	—	—	2	—	—	2	—	—	2	3.7	3.8
3	—	—	3	—	—	3	—	—	3	2.3	3.5
4	—	—	4	—	0.3	4	—	—	4	4.3	3.8
5	—	—	5	0.3	—	5	—	—	5	7.5	3.9
6	—	—	6	0.1	0.4	6	—	—	6	2.2	7.9
7	—	—	7	—	—	7	—	—	7	1.0	0.9
8	—	0.4	8	1.0	0.4	8	—	—	8	—	0.6
9	—	5.6	9	0.6	0.9	9	—	—	9	—	0.1
10	1.9	5.3	10	0.4	1.4	10	0.3	0.1	10	—	—
11	3.9	3.8	11	—	0.2	11	3.1	2.6	11	—	—
12	1.6	2.0	12	—	—	12	0.1	0.3	12	—	—
13	1.6	1.4	13	—	—	13	—	—	13	—	—
14	4.0	2.5	14	—	—	14	—	—	14	—	—
15	5.8	5.2	15	—	—	15	—	—	15	—	—
16	4.2	3.3	16	—	—	16	—	—	16	—	—
17	1.4	1.6	17	—	—	17	—	—	17	—	—
18	5.4	6.1	18	—	—	18	—	—	18	—	—
19	4.8	4.2	19	—	—	19	0.1	—	19	—	—
20	3.0	5.2	20	—	—	20	0.3	—	20	—	—
21	0.1	1.1	21	—	—	21	0.2	—	21	—	—
22	—	0.1	22	—	—	22	0.9	0.3	22	—	—
23	—	—	23	—	—	23	2.9	1.3	23	—	—
24	—	—	24	—	—	24	2.7	2.9	24	—	—

別表-2 つづき 時間雨量 (mm/hr)

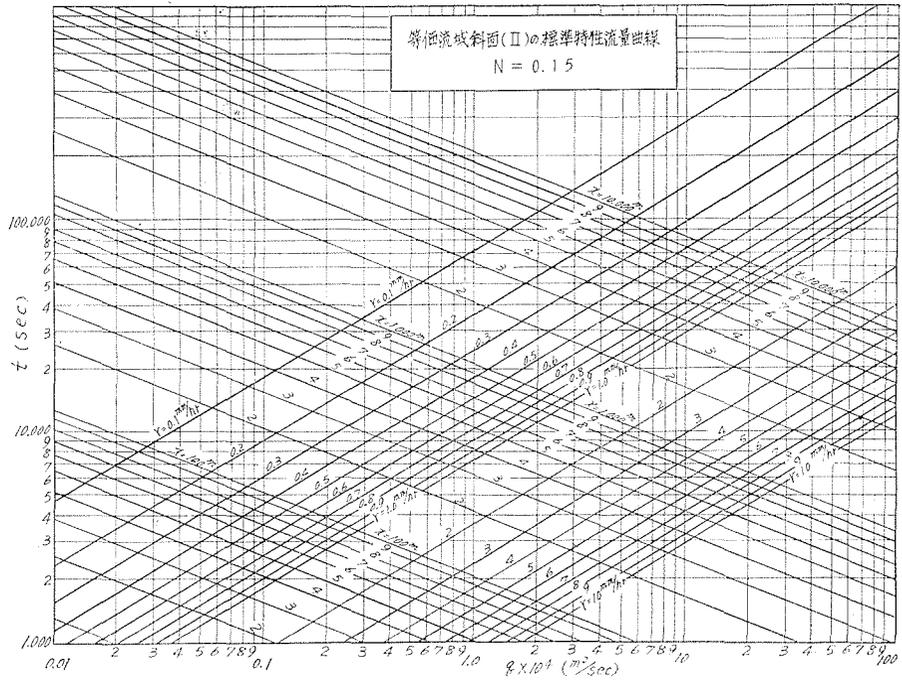
洪水番号 年月	No. 6		No. 7			No. 8					
	昭和33年7月		昭和33年7月			昭和33年10月					
	定山溪 時間雨量 (mm)	豊平 発電所 時間雨量 (mm)	日 時	定山溪 時間雨量 (mm)	豊平 発電所 時間雨量 (mm)	日 時	定山溪 時間雨量 (mm)	豊平 発電所 時間雨量 (mm)	日 時	定山溪 時間雨量 (mm)	豊平 発電所 時間雨量 (mm)
23. 1	—	—	31. 1	—	—	1. 1	—	—	2. 1	1.4	1.2
2	—	—	2	—	—	2	—	—	2	1.0	1.9
3	—	—	3	1.4	—	3	—	—	3	1.7	1.0
4	—	—	4	0.4	0	4	—	—	4	0.9	2.4
5	—	—	5	1.2	0.8	5	—	—	5	2.3	2.4
6	0.4	0.2	6	1.3	5.8	6	—	—	6	2.1	4.3
7	1.8	5.7	7	0.7	0.8	7	—	—	7	4.0	10.3
8	6.2	2.8	8	2.1	0.6	8	—	—	8	9.4	23.1
9	1.9	0.8	9	0.6	0.5	9	—	—	9	19.7	0.7
10	0.6	0.6	10	0.1	0.3	10	—	—	10	1.5	0.8
11	0.4	0.9	11	—	0	11	—	—	11	0.5	0.6
12	7.1	12.4	12	—	0.1	12	—	—	12	0.5	0.4
13	8.8	3.6	13	3.9	7.4	13	—	—	13	—	0
14	2.8	1.4	14	6.1	2.6	14	—	—	14	—	0
15	2.6	3.2	15	—	0	15	—	—	15	—	0.1
16	5.0	9.6	16	2.0	1.8	16	—	—	16	0.5	1.2
17	6.2	6.1	17	1.5	1.5	17	—	—	17	0.9	0.2
18	6.8	6.2	18	7.7	7.7	18	—	—	18	0.5	0.7
19	5.2	2.1	19	5.4	3.9	19	0.4	—	19	—	0
20	0.7	0.6	20	10.0	10.7	20	—	—	20	—	—
21	0.1	—	21	5.5	7.8	21	—	—	21	—	—
22	0.1	0.1	22	7.1	4.5	22	—	—	22	—	—
23	—	—	23	1.1	0.6	23	0.9	—	23	—	—
24	—	—	24	0.2	0.1	24	1.7	4.1	24	—	—

別表-2 つづき 流域平均時間雨量 (mm/hr)

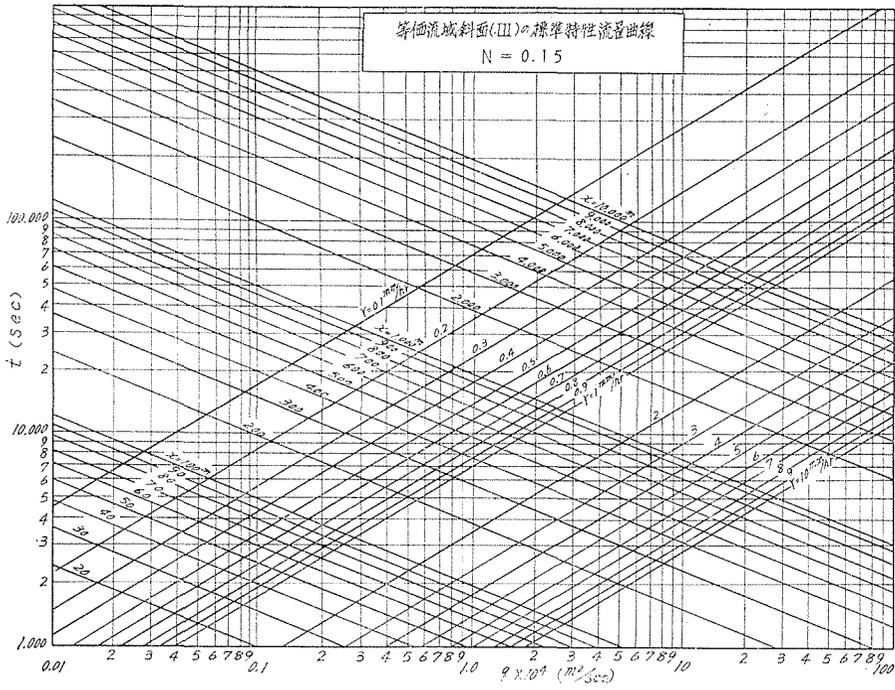
洪水番号 年月日	No. 1	No. 2	No. 3		No. 4		No. 5		No. 6	No. 7	No. 8		
	昭和 32年8月	昭和 32年8月	昭和32年9月		昭和32年9月		昭和32年9月		昭和 33年7月	昭和 33年7月	昭和33年10月		
	時刻	28日	29日	7日	8日	12日	13日	25日	26日	23日	31日	1日	2日
1	—	—	—	4.4	—	—	—	2.95	—	—	—	—	1.30
2	—	—	—	2.6	—	—	—	3.75	—	—	—	—	1.45
3	—	—	—	5.4	—	—	—	2.90	—	0.70	—	—	1.35
4	0.6	—	—	1.0	—	0.15	—	4.05	—	0.20	—	—	1.65
5	1.0	—	—	4.4	—	0.15	—	5.70	—	1.00	—	—	2.35
6	14.0	—	—	5.5	—	0.25	—	5.05	0.30	3.55	—	—	3.20
7	17.6	—	—	6.4	—	—	—	0.95	3.75	0.75	—	—	7.15
8	4.2	—	—	2.3	0.20	0.70	—	0.30	4.50	1.35	—	—	16.25
9	15.5	—	—	0.4	2.80	0.75	—	0.05	1.35	0.55	—	—	10.20
10	4.3	—	—	—	3.60	0.90	0.20	—	0.60	0.20	—	—	1.15
11	6.3	—	—	—	3.85	0.10	2.85	—	0.65	—	—	—	0.55
12	3.5	—	—	—	1.80	—	0.20	—	9.75	0.05	—	—	0.45
13	6.3	—	—	—	1.50	—	—	—	6.20	5.65	—	—	—
14	1.5	—	—	—	3.25	—	—	—	2.10	4.35	—	—	—
15	—	2.8	—	—	5.50	—	—	—	2.90	—	—	—	0.05
16	—	7.0	—	1.2	3.75	—	—	—	7.30	1.90	—	—	0.85
17	—	2.8	—	—	1.50	—	—	—	6.15	1.50	—	—	0.55
18	—	3.2	—	—	5.75	—	—	—	6.50	7.70	—	—	0.60
19	—	—	—	—	4.50	—	0.05	—	3.65	4.65	0.20	—	—
20	0.5	—	—	—	4.10	—	0.15	—	0.65	10.35	—	—	—
21	—	—	0.5	—	0.60	—	0.10	—	0.05	6.65	—	—	—
22	0.3	—	0.6	—	0.05	—	0.60	—	0.10	5.80	—	—	—
23	0.5	—	0.9	—	—	—	2.10	—	—	0.85	0.45	—	—
24	—	—	2.1	—	—	—	2.80	—	—	0.15	2.90	—	—



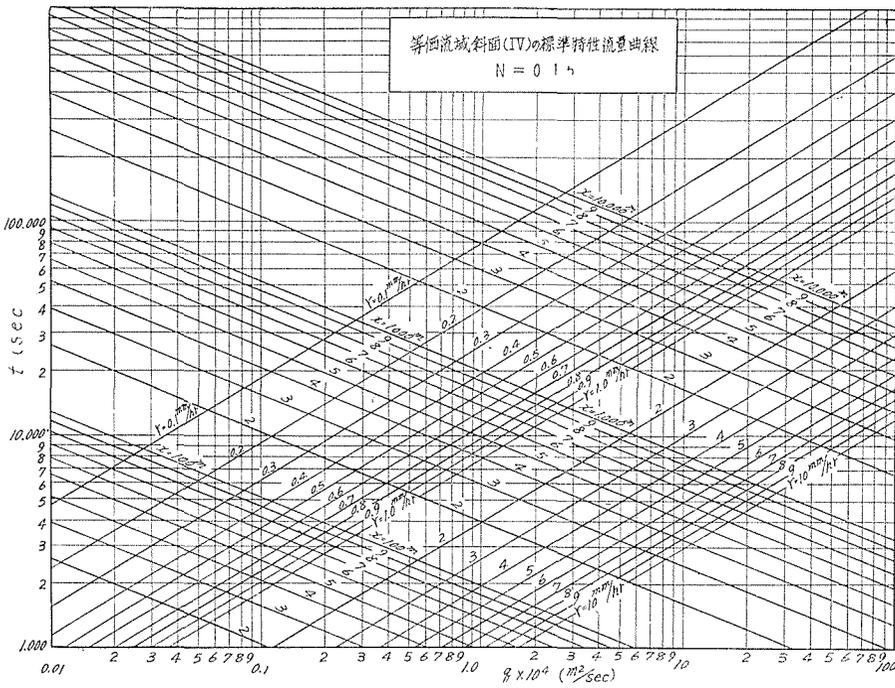
別図—1—(1)



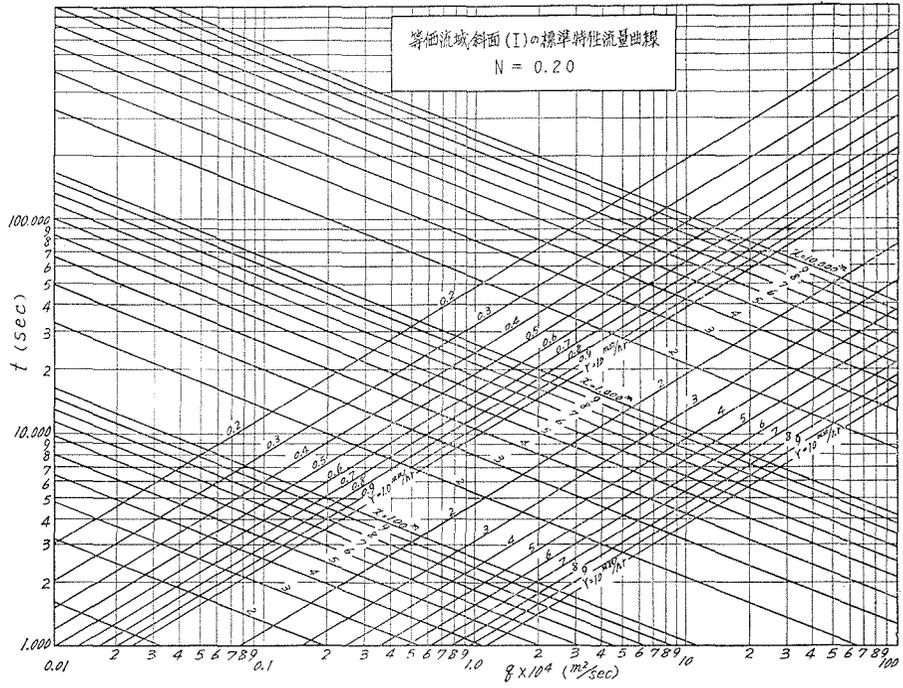
別図—1—(2)



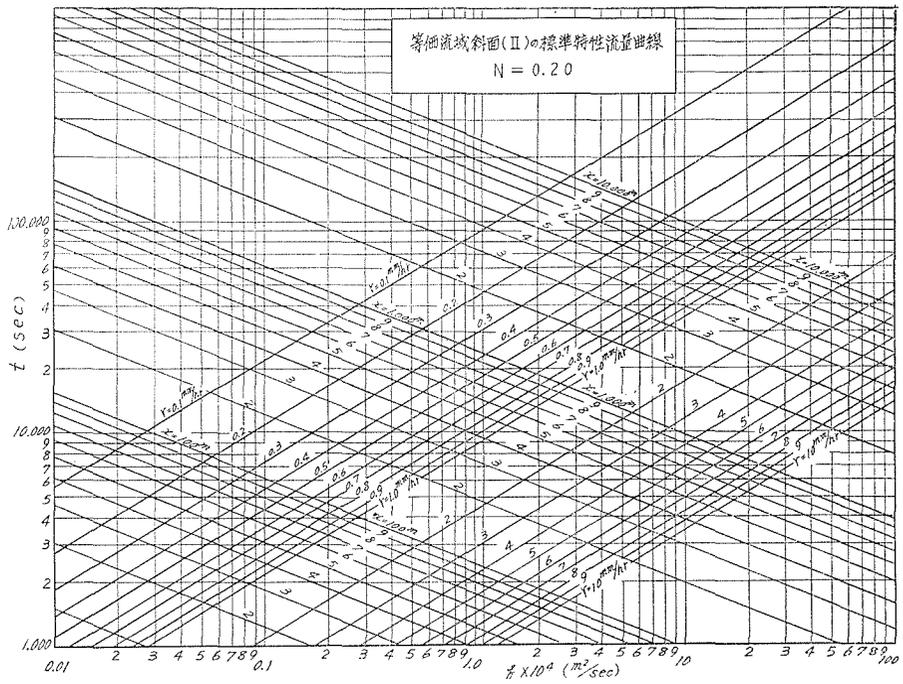
別図—1—(3)



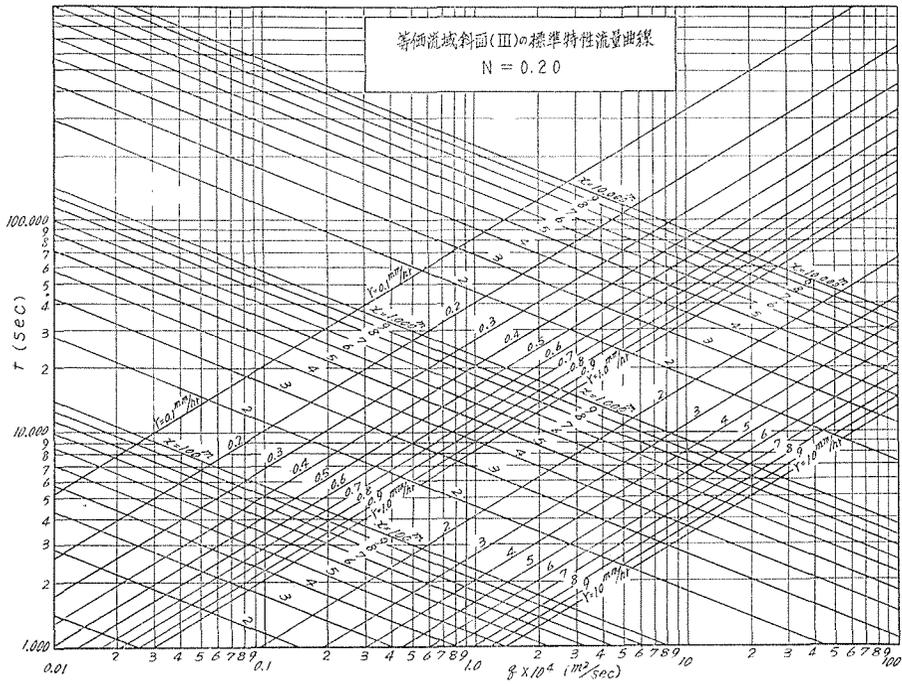
別図—1—(4)



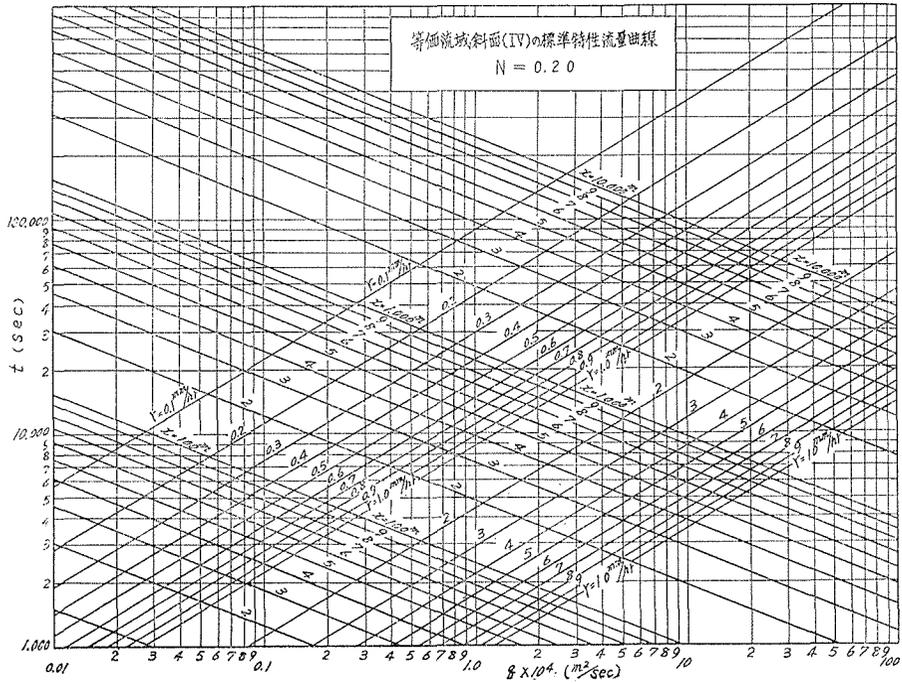
別図-1-(5)



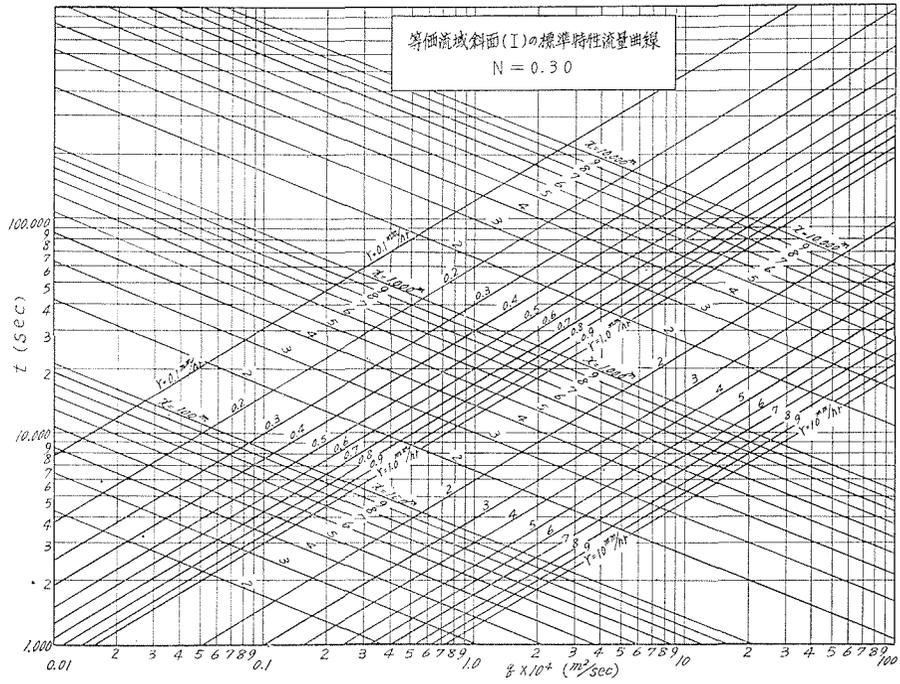
別図-1-(6)



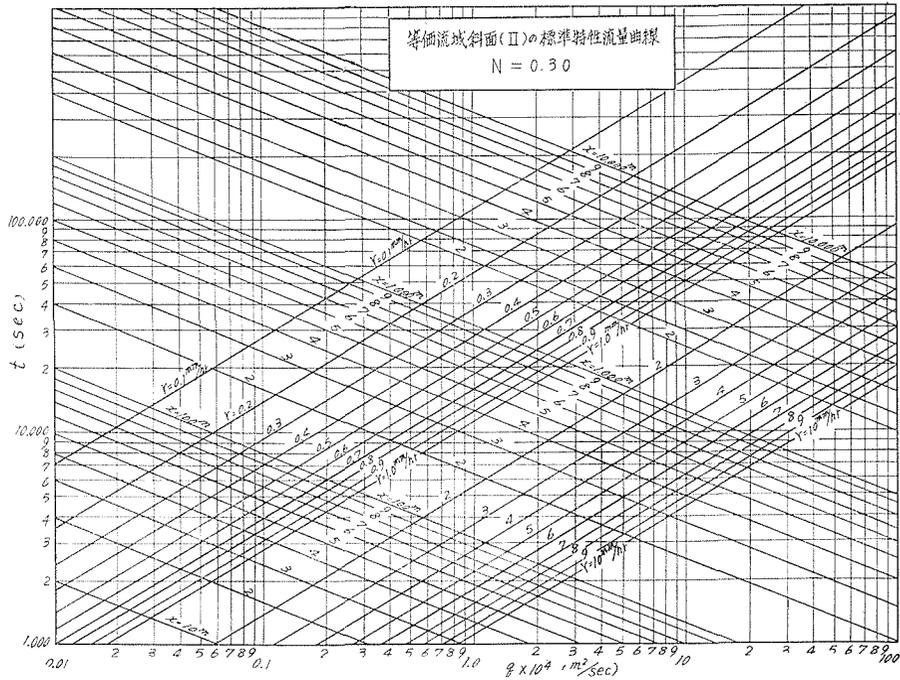
別図-1-(7)



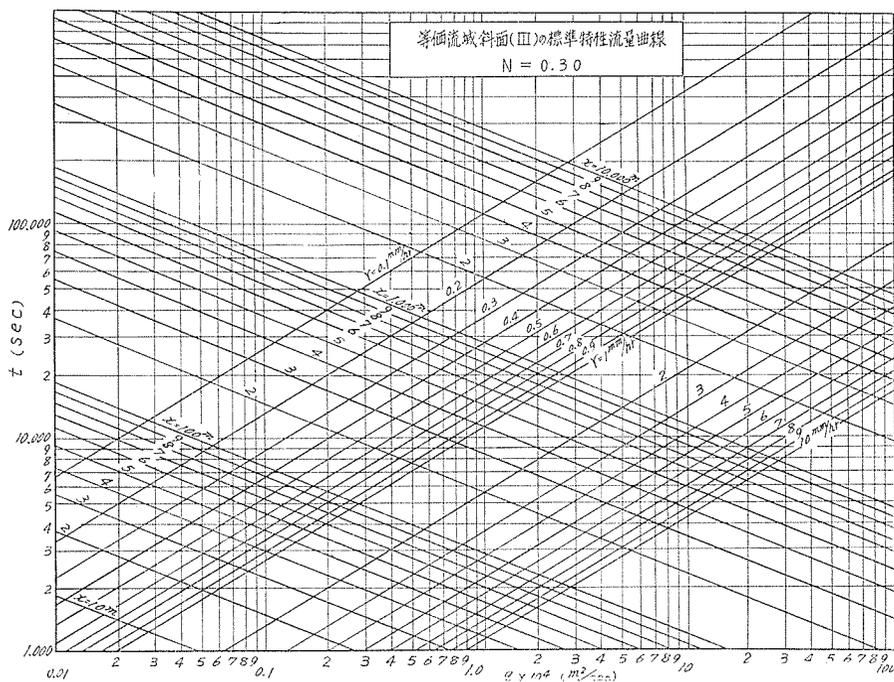
別図-1-(8)



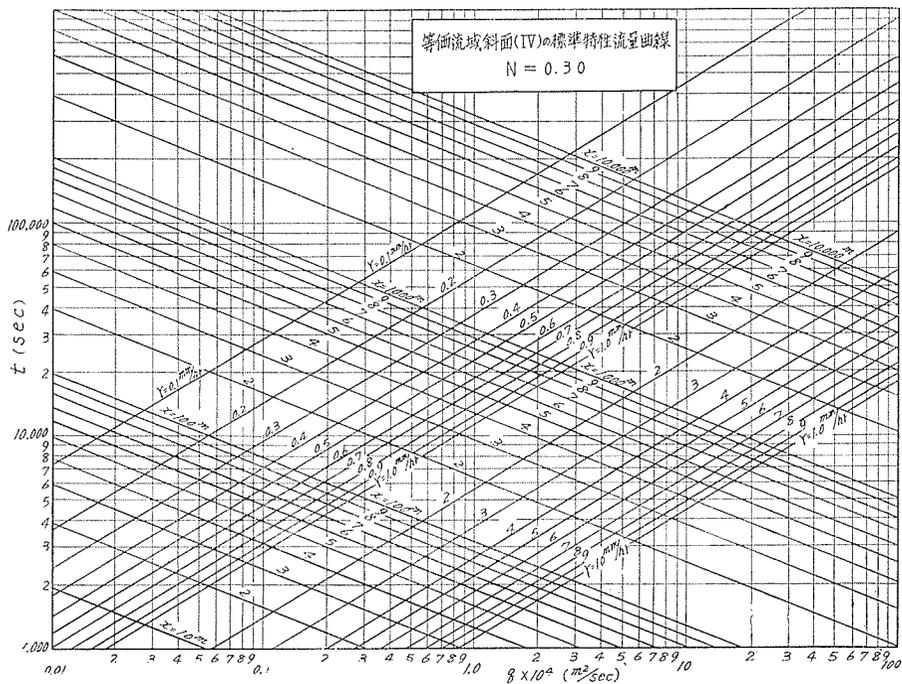
別図—1—(9)



別図—1—(10)

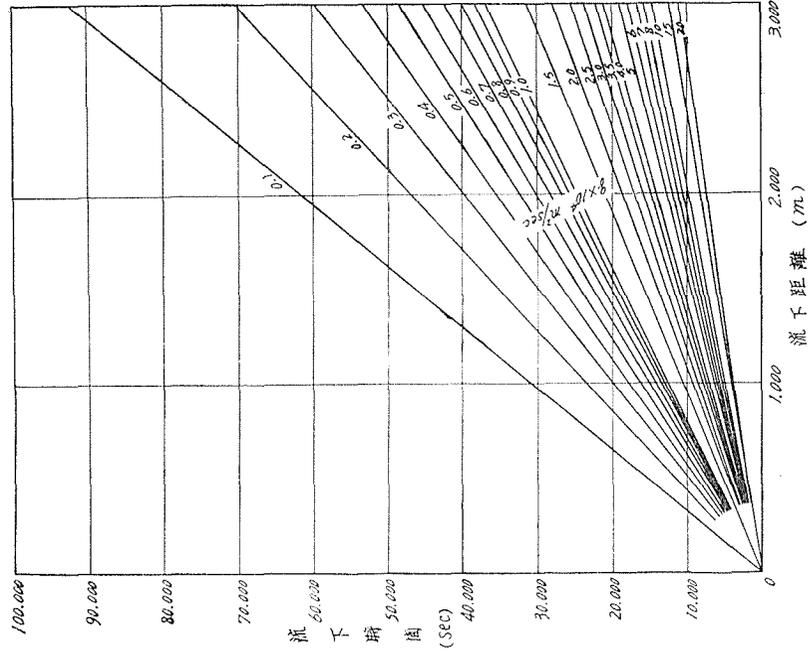


別図-1-(11)



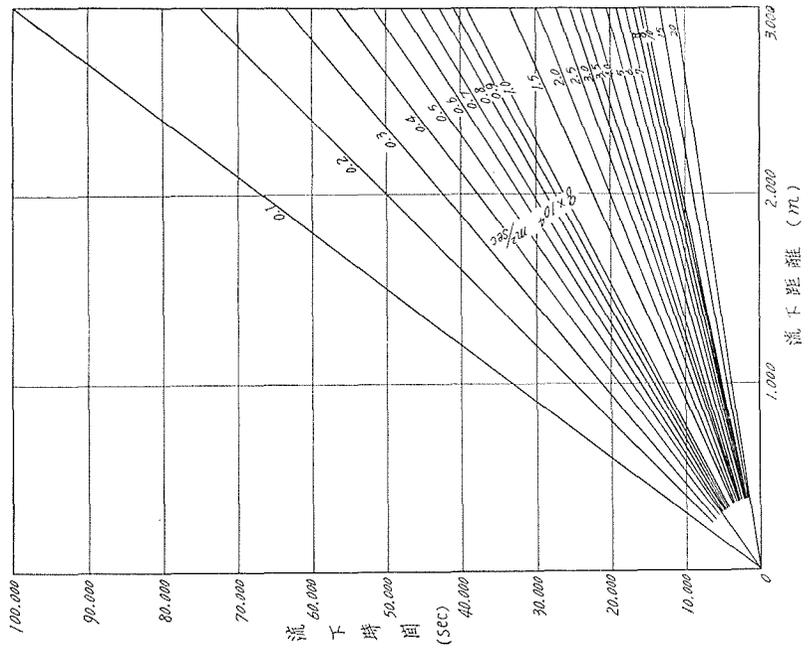
別図-1-(12)

$r=0$ のときの標準特性直線
分界流域 I
 $N=0.15$

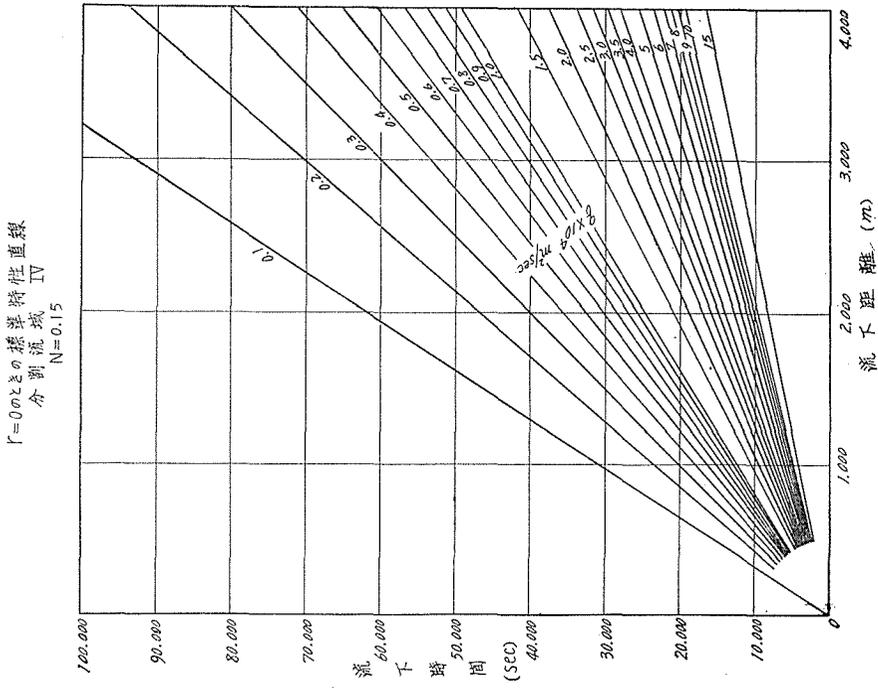


別図-2-(2)

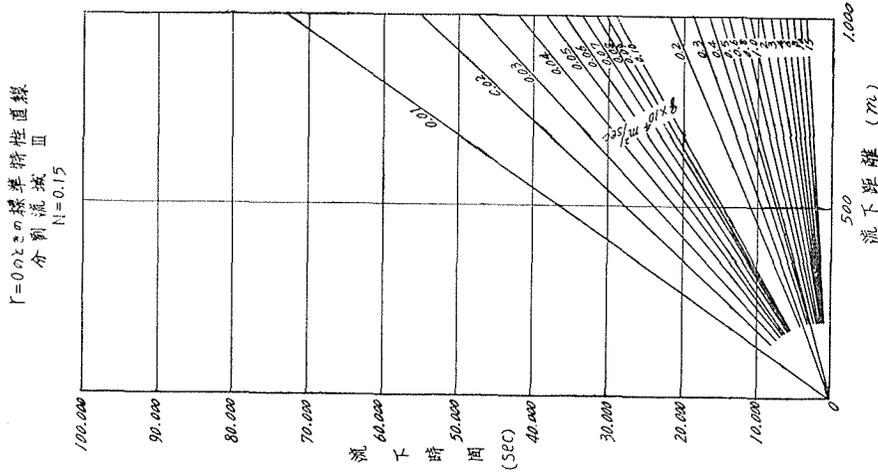
$r=0$ のときの標準特性直線
分界流域 I
 $N=0.15$



別図-2-(1)

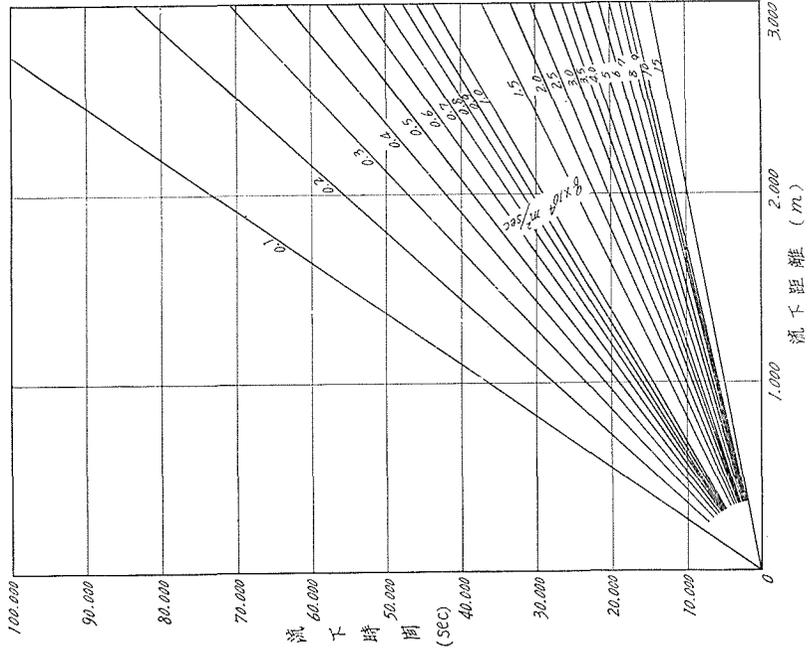


別図-2-(4)



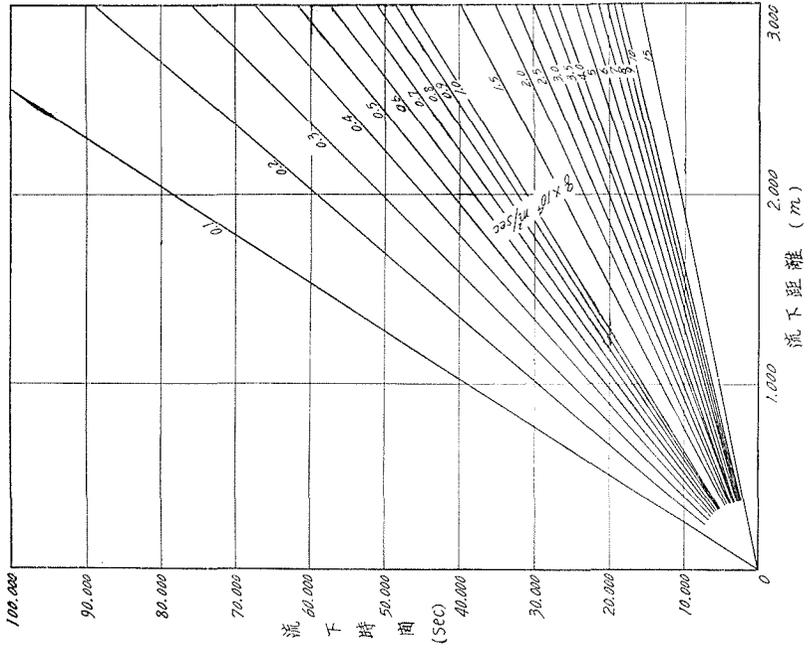
別図-2-(3)

$r=0.0$ の標準特性直線
分界流域 II
 $N=0.20$

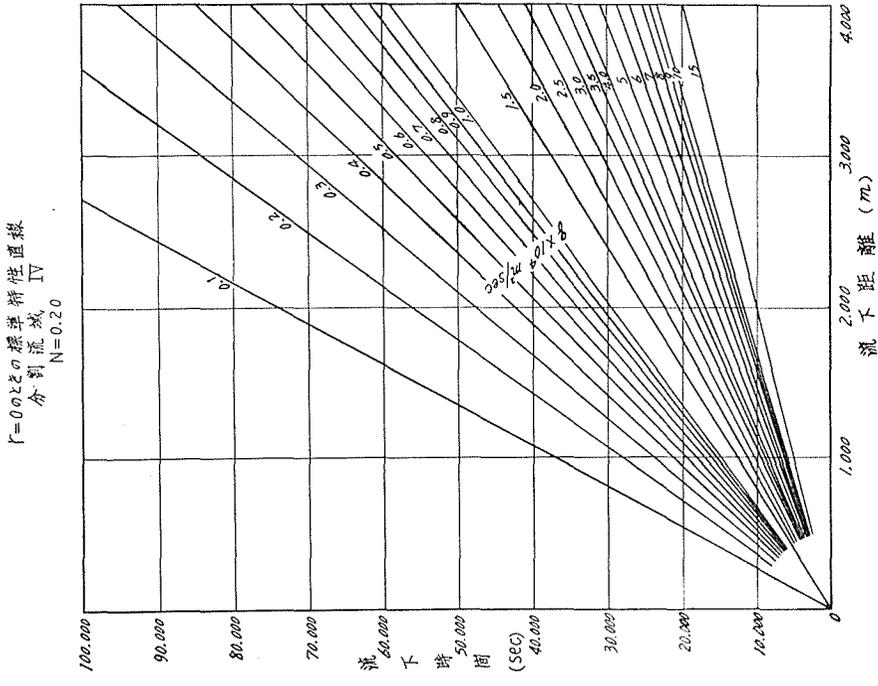


別図-2-(6)

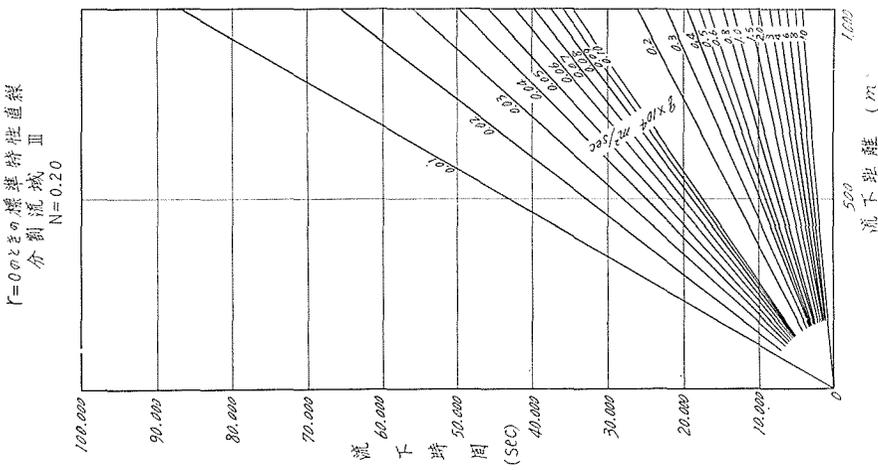
$r=0.0$ の標準特性直線
分界流域 I
 $N=0.20$



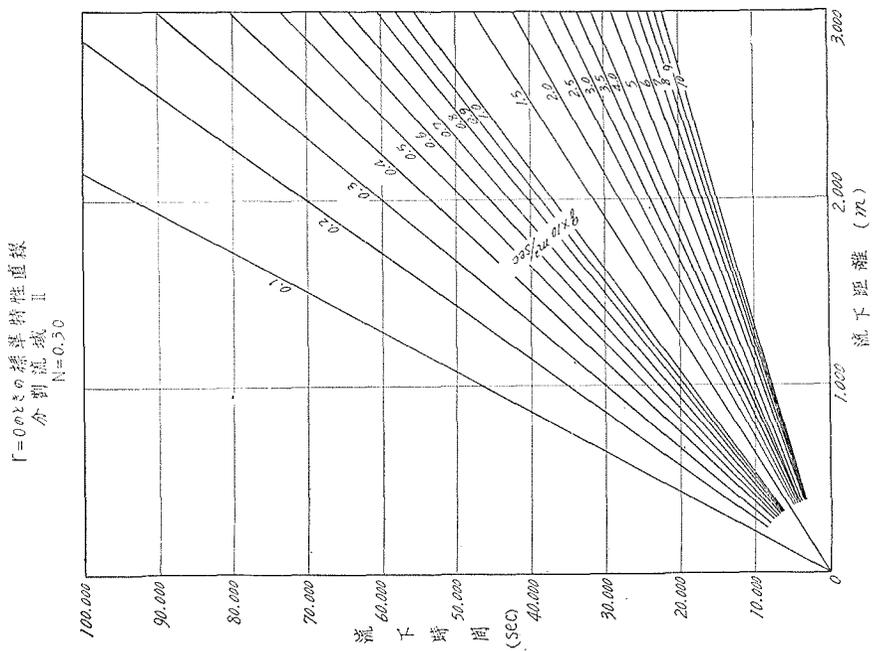
別図-2-(5)



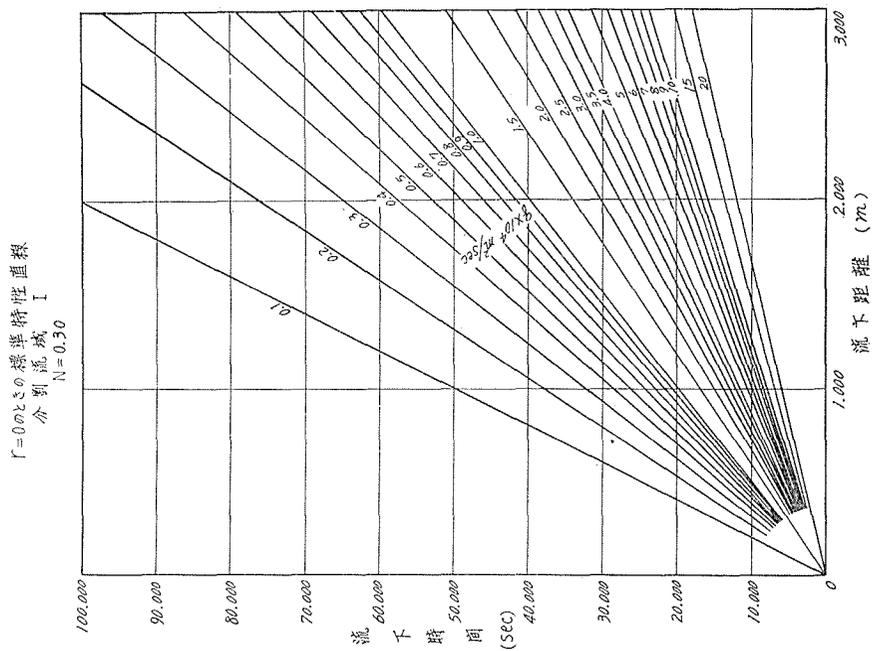
別図-2-(8)



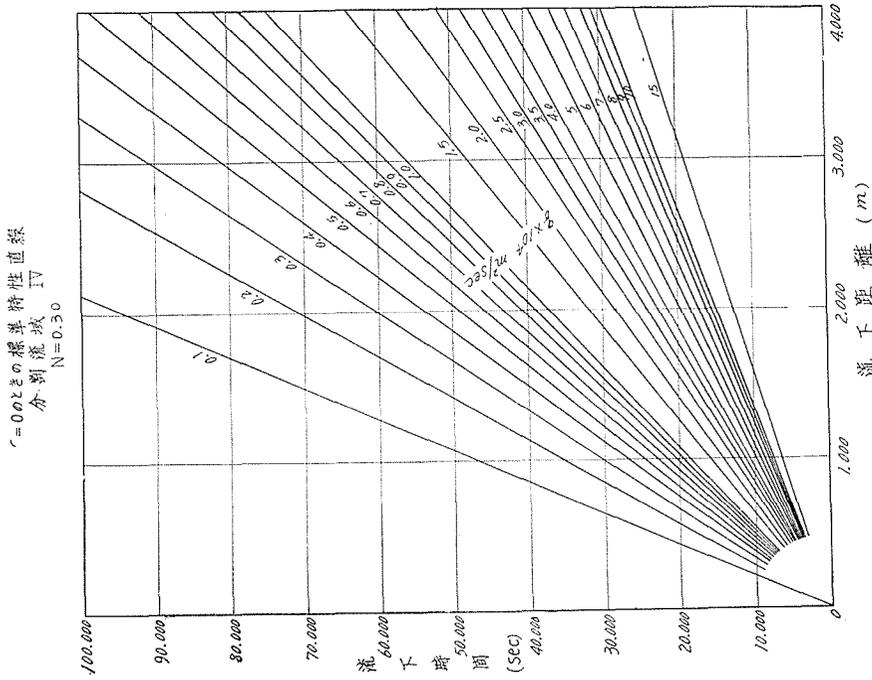
別図-2-(7)



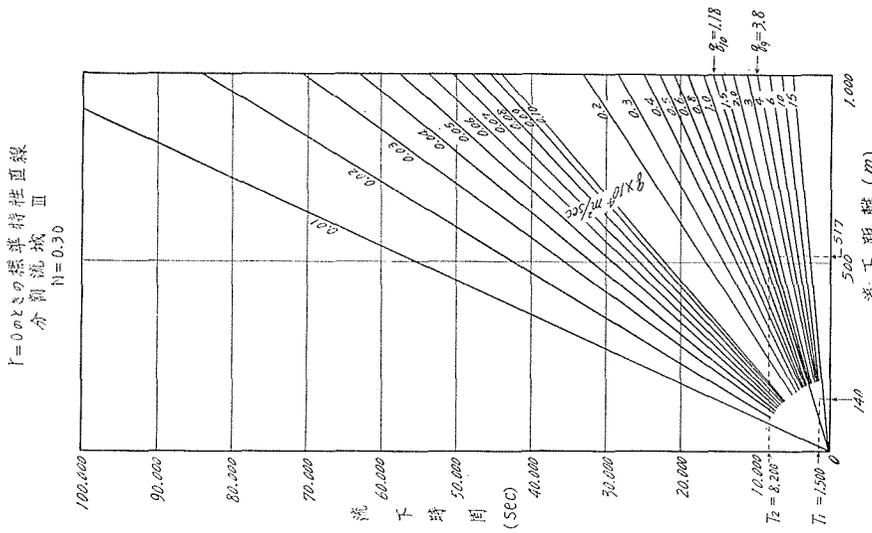
別図—2-(10)



別図—2-(9)



別図-2-(12)



別図-2-(11)