

洪水流の特性について

矢 野 勝 正

ON THE CHARACTERISTICS OF THE FLOOD STREAM

by Dr. Eng. Katsumasa YANO

Synopsis

Theoretical studies on the flood stream movement in a river were already performed by many scientists and engineers. This paper also is a report of a theoretical solution of the flood stream, with some considerations of its characteristics by the numerical calculation. The calculation was made on the flattening of wave form, the velocity of propagation, and the mixing pattern of the flood stream.

1. 諸 言

洪水流の研究は既に多くの河川水理学者及び河川技術者¹⁾によつて理論的にも実験的にも行われている。著者は実際に数値を用いて洪水流の特性を計算して若干の考察を行つてみたので、その結果を発表する。洪水理論に関しては既に本研究所においても、速水教授²⁾によつてその理論が明確に行われ発表されている。

著者の解は別に新しいものではなく、実際に現場の技術者が計算するには、なお複雑な点が多いので、もつと実用的に簡易化する必要があるし、解そのものにも相当の近似化を行つたので今後それらの点は修正を必要とするものであるが、一応河床勾配、初期水深及び抵抗などが洪水の流れにどのように影響するかを明らかにすることができた。

2. 基礎方程式とその解

洪水流の運動方程式及び連続方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{u^2}{C^2 H} + g \left(i - \frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + H \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

(2.1) 式の加速度項を近似的に省略して

$$u = C \sqrt{H \left(i - \frac{\partial H}{\partial x} \right)} \quad (2.3)$$

これを(2.2)式に入れると

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{3}{2} u \cdot \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{C^2 H^2}{2u} \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \quad (2.4)$$

流速を Froude 数 F_r で表わして、

$$u = \sqrt{gH} \cdot F_r \quad (2.5)$$

かつ F_r を河川の小距離及び短時間では一定とみなすと

$$k_1 = \frac{3}{2} \sqrt{g} F_r, \quad k_2 = \frac{C^2}{2 \sqrt{g} F_r} \quad (2.6)$$

と記号して、(2.4) 式をかきかえると

$$\frac{\partial H}{\partial t} + k_1 H^{1/2} \cdot \frac{\partial H}{\partial x} = k_2 H^{3/2} \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

この方程式を

$$|H(x, t)|_{t=0} = H_0' \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

$$|H(x, t)|_{x=0} = H_0' + \frac{1}{2} H_m \pm \varphi(t) = H_0 \pm \varphi(t) \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\left| \frac{\partial H(x, t)}{\partial x} \right|_{x=\infty} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

の条件で解けばよい。

ここに H_0' は洪水発生以前の定常等流水深, H_m は $x=0$ の原点における最大水深である。

(2.7) 式を解くために

$$H(x, t) = H_0 + h(x, t) \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

と置き換えて, かつ

$$H^{1/2} \doteq H_0^{1/2} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{h}{H_0} \right), \quad H^{3/2} \doteq H_0^{3/2} \left(1 + \frac{3}{2} \frac{h}{H_0} \right) \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

の近似化を行うと, (2.7) 式は

$$\frac{\partial h}{\partial t} + k_1 H_0^{1/2} \left(1 + \frac{h}{2H_0} \right) \frac{\partial h}{\partial x} = k_2 H_0^{3/2} \left(1 + \frac{3}{2} \frac{h}{H_0} \right) \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

となる。いま

$$h(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A^n \cdot h_n(x, t) \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

と仮定して (2.13) 式に代入し, A^n の同一べき数の項を0とおく。

いま,

$$\mu_1 = k_1 H_0^{1/2}, \quad \mu_2 = k_2 H_0^{3/2} \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

とおくと, 第一近似解を与える方程式は

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \mu_1 \frac{\partial h_1}{\partial x} = \mu_2 \frac{\partial^2 h_1}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

で, 次の初期及び境界条件で解く。

$$|h_1|_{t=0} = H_0' - H_0 \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

$$|h_1|_{x=0} = \pm \varphi(t) \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

$$\left| \frac{\partial h_1}{\partial x} \right|_{x=\infty} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

第2近似解は

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + \mu_1 \frac{\partial h_2}{\partial x} = \mu_2 \frac{\partial^2 h_2}{\partial x^2} + P_2(x, t) \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

ただし,

$$P_2(x, t) = \mu_2 \frac{3h_1}{2H_0} \cdot \frac{\partial^2 h_1}{\partial x^2} - \mu_1 \frac{h_1}{2H_0} \cdot \frac{\partial h_1}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

を, 次の条件で解けばよい。

$$|h_2|_{t=0} = 0, \quad |h_2|_{x=0} = 0, \quad \left| \frac{\partial h_2}{\partial x} \right|_{x=\infty} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

(2.16) 式は拡散型の微分方程式だから, その解は

$$h_1(x, t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x}{2\sqrt{\mu_2 t}} \exp \left\{ -\left(\alpha - \frac{\mu_1 x}{4\mu_2 t} \right)^2 \right\} \left\{ H_0 - H_0' \pm \varphi \left(t - \frac{x^2}{4\mu_2 \alpha^2} \right) \right\} dx - H_0 + H_0' \quad \dots\dots (2.23)$$

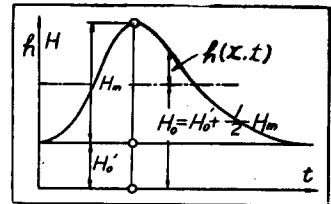


Fig. 1 Flood curve at $x=0$ point

従つて、第一近似解のみをとると (2.11) 式によつて、

$$H(x, t) = H_0' + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{x}{2\sqrt{\mu_2 t}}}^{\infty} \frac{x}{2\sqrt{\mu_2 t}} \exp \left\{ - \left(\alpha - \frac{\mu_1 x}{4\mu_2 \alpha} \right)^2 \right\} \left\{ \frac{H_m}{2} \pm \varphi \left(t - \frac{x^2}{4\mu_2 \alpha^2} \right) \right\} d\alpha \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

として与えられる。

3. 数値計算の方法

$\varphi(t)$ は原点 $x=0$ における、Fig. 2 の EF-軸を座標とする洪水時間に対する水位変動を表示する既知関数であるが、更に、AC-軸を座標とする関数に換えると、

$$\varphi_0(t) = \frac{H_m}{2} \pm \varphi(t) \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

従つて、(2.24) 式は

$$\begin{aligned} H^*(x, t) &= H(x, t) - H_0' \\ &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{x}{2\sqrt{\mu_2 t}}}^{\infty} \frac{x}{2\sqrt{\mu_2 t}} \exp \left\{ - \left(\alpha - \frac{\mu_1 x}{4\mu_2 \alpha} \right)^2 \right\} \varphi_0 \left(t - \frac{x^2}{4\mu_2 \alpha^2} \right) d\alpha \quad \dots\dots\dots (3.2) \end{aligned}$$

Duhamel の原理を用いて $\varphi_0=1$ の時の解を求めると

$$\begin{aligned} H'''(x, t) &= \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{\mu_2 t}}} \exp \left\{ - \left(\alpha - \frac{\mu_1 x}{4\mu_2 \alpha} \right)^2 \right\} d\alpha \right] \\ &\quad - \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{\mu_2 (t-Dt)}}} \exp \left\{ - \left(\alpha - \frac{\mu_1 x}{4\mu_2 \alpha} \right)^2 \right\} d\alpha \right] \quad \dots\dots\dots (3.3) \end{aligned}$$

この式は $0 < t < Dt$ の区間における $\varphi_0=1$ の解で、いわゆる単位図を示すものであるから、この H''' の単位図に φ_n をかけて $(n-1)Dt$ だけずらして加算していけば、数値計算ができるわけである。(3.3) 式を Gauss の誤差関数にかきかえると、Gauss の表を用いて計算が容易になるから、以下 (3.3) 式を变形してみる。

先づ、

$$\eta = \alpha - \frac{\mu_1 x}{4\mu_2 \alpha} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

とおくと、

$$\alpha = \frac{1}{2} \left\{ \eta \pm \sqrt{\eta^2 + \frac{\mu_1}{\mu_2} x} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{\mu_2 t}}} \exp \left\{ - \left(\alpha - \frac{\mu_1 x}{4\mu_2 \alpha} \right)^2 \right\} d\alpha = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{x-\mu_1 t}{2\sqrt{\mu_2 t}}} \frac{1}{2} \left\{ 1 \pm \frac{\eta}{\sqrt{\eta^2 + \frac{\mu_1}{\mu_2} x}} \right\} e^{-\eta^2} \cdot d\eta \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{x-\mu_1 t}{2\sqrt{\mu_2 t}}} e^{-\eta^2} \cdot d\eta \pm \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{x-\mu_1 t}{2\sqrt{\mu_2 t}}} \frac{\eta \cdot e^{-\eta^2}}{\sqrt{\eta^2 + \frac{\mu_1}{\mu_2} x}} \cdot d\eta \quad \dots\dots\dots (3.6) \end{aligned}$$

(3.6) 式の土のいずれをとるかを検討すると+を採ることがわかる。そこで (3.6) 式の第2項の積分を I' とかいて、更に

$$\zeta = \sqrt{\eta^2 + \frac{\mu_1}{\mu_2} x} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

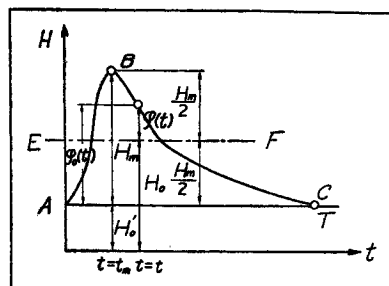


Fig. 2 Relation between $\varphi(t)$ and $\varphi_0(t)$

とかくと,

$$I' = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{x-\mu_1 t}{2\sqrt{\mu_2 t}}} \frac{\eta \cdot e^{-\eta^2}}{\sqrt{\eta^2 + \frac{\mu_1}{\mu_2} x}} \cdot d\eta = e^{\frac{\mu_1}{\mu_2} x} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\infty}^{\frac{x+\mu_1 t}{2\sqrt{\mu_2 t}}} e^{-\zeta^2} \cdot d\zeta \quad \dots\dots\dots(3.8)$$

そこで便宜上,

$$X = \frac{\mu_1}{\mu_2} x, \quad X' = \frac{\mu_1 t + x}{2\sqrt{\mu_2 t}}, \quad X'' = \frac{\mu_1 t - x}{2\sqrt{\mu_2 t}} \quad \dots\dots\dots(3.9)$$

と記号すると, 結局積分 I は

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{-X''} e^{-\zeta^2} \cdot d\zeta + \frac{e^X}{\sqrt{\pi}} \int_{\infty}^{X'} e^{-\zeta^2} d\zeta \\ &= \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{X''} e^{-\zeta^2} \cdot d\zeta \right\} - e^X \cdot \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{X'} e^{-\zeta^2} d\zeta \right\} \quad \dots\dots\dots(3.10) \end{aligned}$$

万能数値表³⁾には $Y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^X e^{-\frac{x^2}{2}} dx$ の数表が製作されているから $\zeta = \frac{x}{\sqrt{2}}$ とおくと,

$$Y'' = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{X''} e^{-\zeta^2} d\zeta = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\sqrt{2} X''} e^{-\frac{x^2}{2}} \cdot dx \quad \dots\dots\dots(3.11)$$

$$Y' = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\sqrt{2} X'} e^{-\frac{x^2}{2}} \cdot dx \quad \dots\dots\dots(3.12)$$

一般に $\sqrt{2} \cdot X'$ の値は大きい。 $\sqrt{2} \cdot X'$ が4以上になると $Y' = 0.49999$ となつて $\frac{1}{2}$ に近づくので (3.10) 式の第2項は第1項に比べて省略してよい。

従つて実用上には (3.10) 式は

$$I = \frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{X''} e^{-\zeta^2} d\zeta = \frac{1}{2} - Y'' \quad \dots\dots\dots(3.13)$$

として取り扱つてよい。そこで $\varphi_0 = 1$ に対する単位図は

$$H' = 1 - I' = \frac{1}{2} + Y_1'' = \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{X_1''} e^{-\zeta^2} \cdot d\zeta \quad \dots\dots\dots(3.14)$$

$t = \Delta t$ の単位図は

$$H'' = 1 - I'' = \frac{1}{2} + Y_2'' = \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{X_2''} e^{-\zeta^2} \cdot d\zeta \quad \dots\dots\dots(3.15)$$

ただし,

$$X_1'' = \frac{\mu_1 t - x}{2\sqrt{\mu_2 t}}, \quad X_2'' = \frac{\mu_2(t - \Delta t) - x}{2\sqrt{\mu_2(t - \Delta t)}} \quad \dots\dots\dots(3.16)$$

従つて, $0 < t < \Delta t$ 間の単位図は

$$H''' = H' - H'' \quad \dots\dots\dots(3.17)$$

として計算することができる。

以上の方法で数値計算を行つてみる。いま仮りに次の値をもつ場合を考える。

$$\text{初期水深} \quad H_0' = 0.5 \text{ m} \quad \text{河床勾配} \quad i_0 = \frac{1}{2500}$$

$$\text{Chezy の定数} \quad C = 40 \quad \text{最大水深} \quad H_m = 5.0 \text{ m}$$

の場合の計算を試みてみよう。

必要な係数として

$$H_0 = H_0' + \frac{1}{2} H_m = 0.5 + \frac{1}{2} \times 5.0 = 3.0$$

$$F_r = \frac{C\sqrt{i_0}}{\sqrt{g}} = \frac{40 \times \sqrt{1/2500}}{\sqrt{9.8}} = 0.256$$

Table. 1 Calculation sheet of $1/\sqrt{2\mu_2 t}$

$t(\text{hr})$	$t(\text{sec})$	$\mu_1 t$	$\sqrt{t}$	$\frac{1}{\sqrt{2\mu_2 t}}$
1	0.36×10^4	0.750×10^4	0.600×10^2	1.636×10^{-4}
2	0.72	1.499	0.849	1.156
3	1.08	2.249	1.039	0.945
4	1.44	2.998	1.200	0.817
5	1.80	3.748	1.342	0.731
6	2.16	4.497	1.470	0.667
7	2.52	5.247	1.587	0.618
8	2.88	5.996	1.700	0.577
9	3.24	6.746	1.800	0.544
10	3.60	7.495	1.900	0.516
11	3.96	8.245	1.990	0.492
12	4.32	8.994	2.078	0.472
13	4.68	9.744	2.163	0.454
14	5.04	10.433	2.244	0.437
15	5.40	11.243	2.324	0.421
16	5.76	11.992	2.400	0.409
17	6.12	12.742	2.474	0.396
18	6.48	13.491	2.546	0.385
19	6.84	14.241	2.615	0.375
20	7.20	14.990	2.613	0.365

Table. 2 Calculation sheet of unit-graph at $x=5.0$ km point

$t(\text{hr})$	$\mu_1 t - x$	$\sqrt{2 \cdot x''}$	Y''	H'	H''	H'''
1	0.250×10^4	0.409	0.1587	0.6587	—	0.6587
2	0.999	1.155	0.3759	0.8759	—	0.8759
3	1.749	1.653	0.4508	0.9508	0.6587	0.2921
4	2.498	2.041	0.4793	0.9793	0.8759	0.1034
5	3.248	2.374	0.4911	0.9911	0.9508	0.0403
6	3.997	2.666	0.4962	0.9962	0.9793	0.0169
7	4.747	2.934	0.4983	0.9983	0.9911	0.0072
8	5.496	3.171	0.4992	0.9992	0.9962	0.0030
9	6.246	3.398	0.4997	0.9997	0.9983	0.0014
10	6.995	3.609	0.4998	0.9998	0.9992	0.0006
11	7.745	3.811	0.4999	0.9999	0.9997	0.0002
12	8.494	4.009	0.4999	0.9999	0.9998	0.0001
13	9.244	4.188	0.4999	0.9999	0.9999	0
14	9.993	4.367	0.4999	0.9999	0.9999	0
15	10.743	4.523	0.4999	0.9999	0.9999	0

$$k_1 = \frac{3}{2} \sqrt{g} \cdot F_r = \frac{3}{2} \times \sqrt{9.8} \times 0.256 = 1.202$$

$$k_2 = \frac{C^2}{2\sqrt{g} \cdot F_r} = \frac{1.6 \times 10^3}{2 \times \sqrt{9.8} \times 0.256} = 1.0 \times 10^3$$

$$\mu_1 = k_1 H_0^{1/2} = 1.202 \times 3^{1/2} = 2.082$$

$$\mu_2 = k_2 H_0^{3/2} = 1.0 \times 10^3 \times 3^{3/2} = 5.196 \times 10^3$$

$X'' = \frac{\mu_1 t - x}{\sqrt{2\mu_2 t}}$ の表を $x=5.0, 20.0, 40.0, 70.0, 100.0 \text{ km}$ として, t の色々の値に対して作製して, Gauss の誤差関数表⁴⁾を用いて, Y'' を定める。次に H' と H'' を (3.14), (3.15) 式から計算し, その差を求めると, H''' なる単位図を求めることができる。

Table 1, Table 2 はこれらの計算過程を示す。

Fig. 4 は河床勾配 i_0 の種々な値に対して $x=0$ 点の与えられた洪水曲線がどのように影響を受けるかを図化したものである。

いま $x=0$ の原点の洪水曲線を Fig. 3 に示すように, 三角形形の直線変化をする場合について, 以上の単位図を用いて計算したものが Table. 3 である。

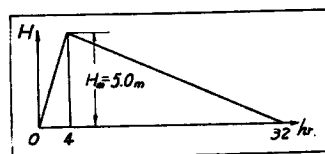


Fig. 3 Flood-curve at $x=0$ point

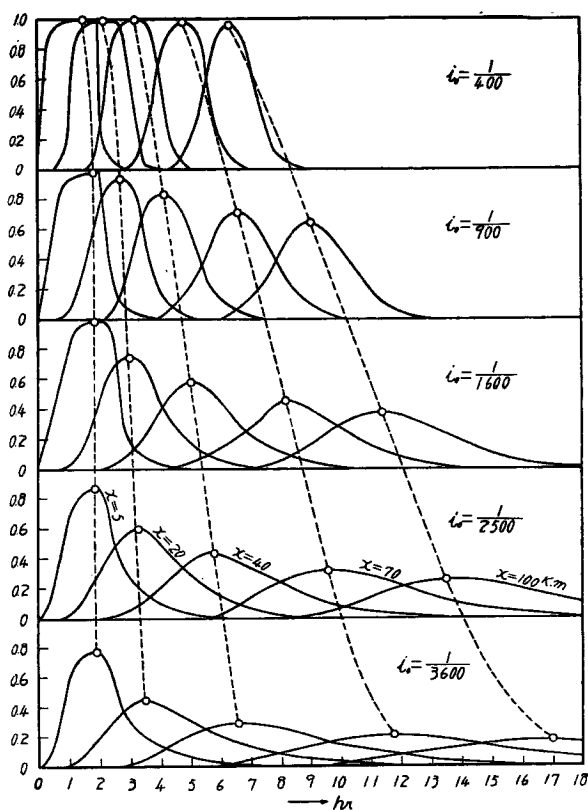


Fig. 4 Flattening pattern of flood curve, effected by river bed slope

Table. 3 Calculation sheet of flood curve at $x=5.0$ km point

$t(\text{hr})$	Unit graph	2.500	5.000	4.641	4.284	3.927	3.570	3.213	2.856	2.500	2.142	1.785	1.428	1.071	0.714	0.357	Total
2	0.8759	2.190															2.190
4	0.1034	0.259	4.380														4.639
6	0.0169	0.042	0.517	4.065													4.623
8	0.0030	0.008	0.085	0.480	3.752												4.255
10	0.0006	0.002	0.015	0.078	0.443	3.440											3.966
12	0.0001	0	0.003	0.014	0.072	0.406	3.127										3.622
14	0		0.001	0.003	0.013	0.066	0.369	2.814									3.266
16			0	0	0.003	0.012	0.060	0.332	2.502								2.909
18					0	0.002	0.011	0.054	0.255	2.189							2.551
20						0	0.002	0.010	0.048	0.258	1.876						2.194
22							0	0.002	0.009	0.042	0.221	1.563					1.837
24								0	0.002	0.007	0.036	0.185	1.251				1.481
26									0	0.001	0.006	0.030	0.148	0.938			1.123
28										0	0.001	0.005	0.024	0.111	0.625		0.766
30											0	0.001	0.004	0.018	0.074	0.313	0.410
32												0	0.001	0.003	0.012	0.037	0.053
34													0	0.001	0.002	0.006	0.009
36														0	0	0.001	0.001
38															0		0
40																0	0

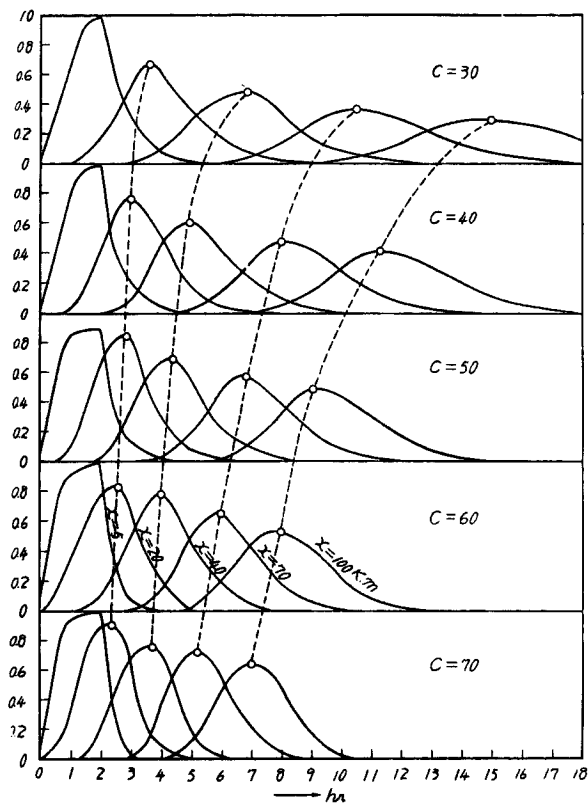


Fig. 5 Flattening Pattern of flood curve, effected by resistance coefficient

4. 洪水流の2, 3の特性

4-1. 洪水の水位時間曲線の変形

洪水が下流に移動するにつれて偏平化することは既に知られていることであるが、この計算によつて初期水深 H_0' 、抵抗係数 C 及び河床勾配 i_0 によつて影響される様相を明らかにすることができた。

すなわち i_0 を $1/400$ から $1/3600$ までの5種類に分けて $H_0'=0.5$ m, $C=40$ の場合の単位図を計算したものが、Fig. 4 である。

この図からわかるように、 i_0 が緩い程、偏平化がはなはだしく、例えば $1/400$ の河床勾配では原点から 100.0 km の地点でもほとんど影響が起つていないけれども $1/3600$ 程度の緩流河川の場合には原点の最大水深を1として0.2まで低減することがわかる。

次に $H_0'=0.5$ m, $i_0=1/1600$ として、 C を $30\sim70$ の間に5種類に分けて、洪水の変形を計算して図化したものが Fig. 5 である。 C が大きくなる程、変形はしにくくなるが、洪水の伝播速度は非常に速くなっている。原点で1の洪水ピークが $C=30$ では $x=100.0$ km 地点で0.3に低減しているが、 $C=70$ では0.64位の低減であることがわかる。

Fig. 6 は初期水深 H_0' が変形に及ぼす影響をしらべたものである。

計算は $i_0=1/1600$, $C=40$ として、 H_0' を $0.10\sim3.0$ m までの5種類について行つたものである。初期

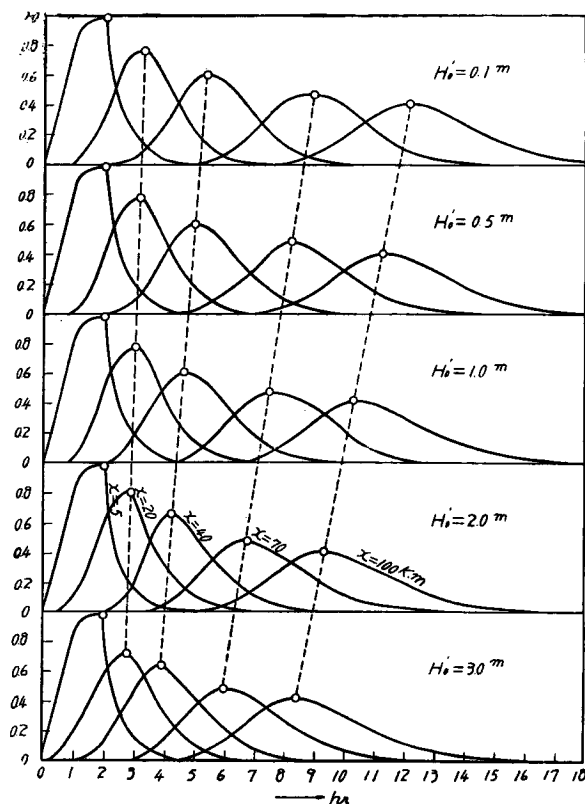


Fig. 6 Flattening Pattern of flood curve, effected by initial water depth

水深の影響は減衰にはほとんど表われてないが、洪水伝播速度は初期水深が大きい程速いことがわかる。このことは大洪水のおこる前に降雨が続いて、河川に相当の増水がおこっているような場合には、すなわち初期水深が大きくなっているから、このような場合には洪水の伝播は相当速くなることを意味している。また洪水調節池などで前期放流をしてダムから下流の河川水位がある程度増水していると、ピークの時大きな放流をすると、先の洪水と後の洪水が重なってくることをも意味しているので、洪水時の堰堤操作には余程注意をしなければならないことになるわけである。

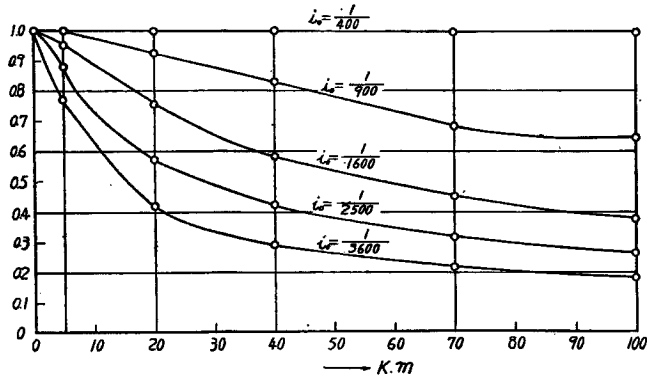


Fig. 7 Damping-curve effected by river bed slope

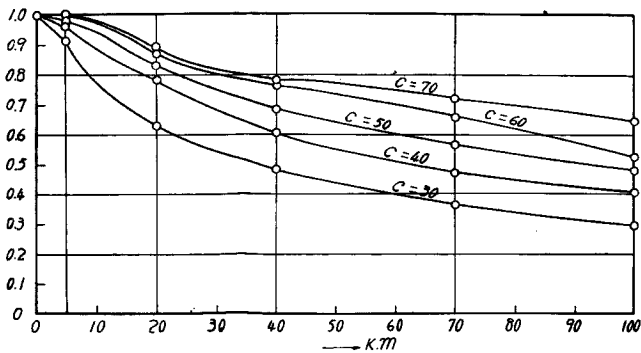


Fig. 8 Damping-curve effected by resistance coefficient

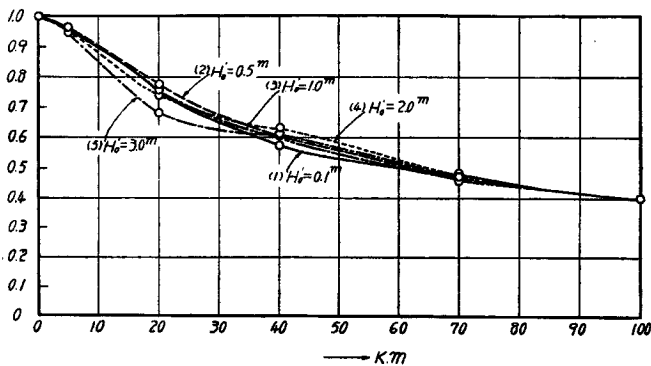


Fig. 9 Damping-curve effected by initial water depth

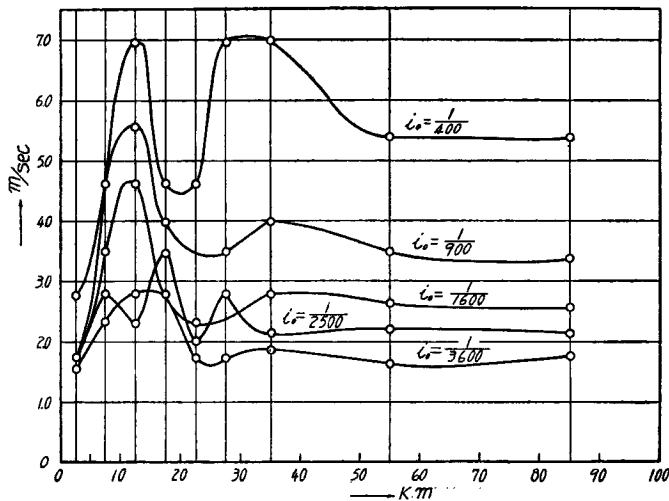


Fig. 10 $\frac{m}{sec}$ Propagation velocity of flood peak, effected by river bed slope

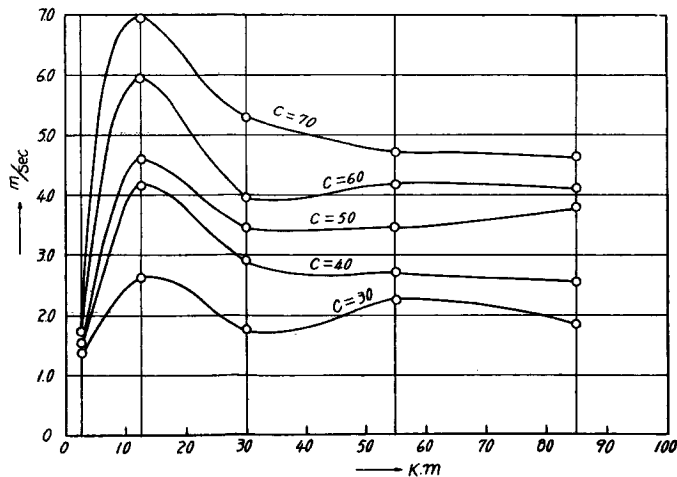


Fig. 11 Propagation velocity of flood peak, effected by resistance coefficient

以上の i_0 , C , H_0' 等の変形に対する影響を、横軸に x (距離) をとつてプロットしたものが Fig. 7, 8, 9 であつて減衰には i_0 と C は相当影響するが H_0' の影響はほとんどないことがわかる。

以上の計算は当初 Froude 数を短い区間に限つて一定と仮定したから、正確には河川の長さ方向に短区間に区切つて、その区間毎に計算すべきものである。

4-2. 洪水の伝播速度

洪水ピークが下流に伝播していく状況を以上の変形図から計算して、プロットしたものが Fig. 10, 11, 12 である。Fig. 10 は河床勾配の影響を示す図で、急流河川の伝播速度が緩流河川のそれより速いことは当然であるが、原点からある距離 (この場合 70.0 km 程度) までの区間に伝播速度に振動型の変動が表われていることは、今のところ説明ができない。

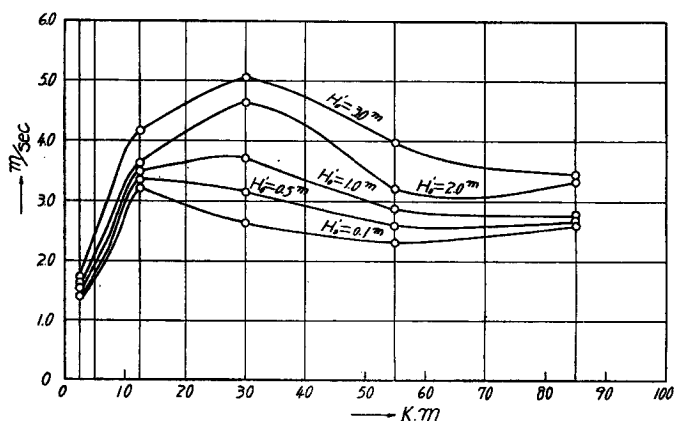


Fig. 12 Propagation velocity of flood peak, effected by initial water depth

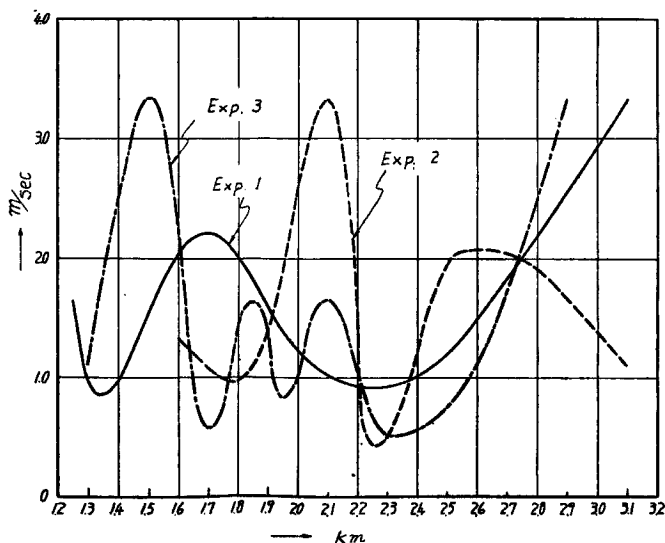


Fig. 13 Propagation velocity of Shintakase-river, measured by Dr. Yoneda

Fig. 11 は C の影響を表わすもので、粗度係数の小さい滑らかな河川の伝播が速いことも当然予想されるところであるが、この場合も伝播速度が大きくなったり小さくなったりしている。

Fig. 12 は H_0 の影響を示す。洪水の伝播速度が距離的に変動する状態は、かつて米田博士⁵⁾が、淀川支流新高瀬川の人工洪水実験を行った実測値について同じ方法で、伝播速度をプロットしてみると Fig. 13 のようになった。この点の検討は今後十分行う必要がある。

4-3. 2つのピークの混合

降雨が短時間に連続して発生したり、支流の洪水が本川の洪水と重なったりした場合には、後の洪水が先の洪水に追いつくことは初期水深の洪水伝播速度に及ばず影響からわかるが、結局2つの洪水波形は重なり合つて、Fig. 14 に示すような混合作用を行うことが計算によつて明らかにすることができる。Fig. 15 は

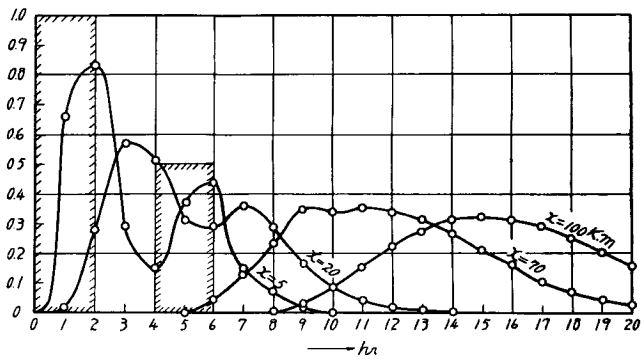


Fig. 14 Mixing-mode of double peak flood wave

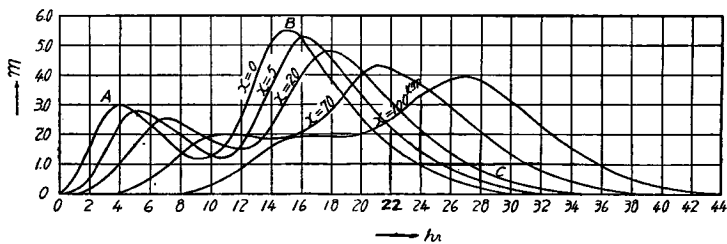


Fig. 15 Mixing-mode of double peak flood, originally OABC-hydrograph

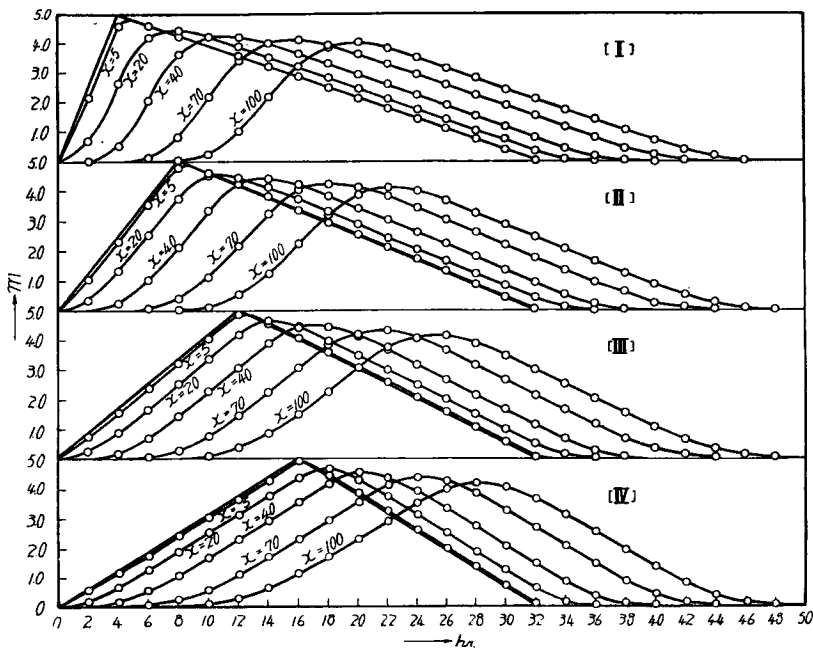


Fig. 16 Effect of original flood curve on flattening

原点で ABC という2つのピークをもつ洪水波形が変遷して次第に混合し、ついには1つのピークをもつ洪水曲線になる様相を計算してプロットしたものである。

4-4. 原点の洪水曲線形状の影響

原点の洪水曲線の形状によつて、その変形がどのように、ことなるものであるかを計算したものが Fig. 16 である、すなわち洪水の継続時間を32時間として、そのピークが $t=0$ から 4, 8, 12, 16 時間に起る I~IV の4種類について、洪水の水位時間曲線を計算したものである。これによると減衰の様子はほとんど変化はないが、ピークの到達時間はI型より、次第にIV型に変わつて、早くなつていく。これを比較しやすくプロットしてみると Fig. 17 のようになる。

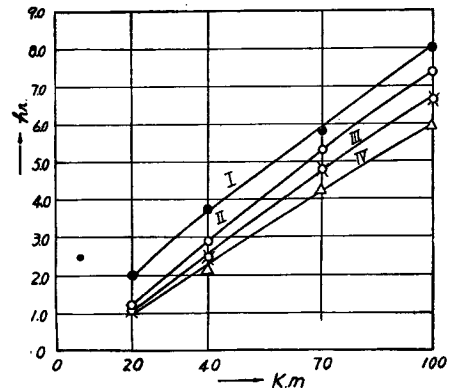


Fig. 17 Arrival time of peak of flood, effected by original flood-curve

5. 結 語

以上のように、一応洪水流の若干の特性を検討してみたが、基礎方程式の誘導及び解にあたつて、かなりの近似化を行つている。すなわち、

1. 加速度項を省略した。
2. Froude 数を一定とした。
3. $H_0 \ll h$ として近似計算をした。
4. (3.10) 式の第2項を省略した。

等であつて、これらの仮定省略についてはなお検討を要すべき点もあるし、加うるにこの計算では第一近似解のみを取り扱つている点などをも考えると、きわめて概略の近似値たるにすぎない。しかし、大体の傾向として次のような洪水特性が結論される。

1. 河床勾配 i_0 が緩い程、洪水の偏平化が著しくおこる。すなわち、急流河川より緩流河川の方が減衰する率が高い。
2. 河川の粗度係数が小さい程、変形は小さい。しかし伝播は速くなる。
3. 初期水深は減衰にはほとんど影響しないが、洪水の伝播速度を速かにする。
4. 伝播速度が距離的に変動する現象がみられる。
5. 洪水の2つのピークが混合していく様相が理論的に解明される。
6. 原点の洪水の形はピークの減衰には影響をほとんど及ぼさないが、到達時間にはある程度影響を及ぼす。

最後に洪水についてのこれからの研究上の考え方にふれておきたい。以上のような解析では洪水の全貌はよくその実態を把むことはできない。洪水現象は複雑な河道を移動する千変万化の運動であることを思えば、単なる数式だけではなかなか解明できない。今後の洪水研究の問題点とその考え方を挙げて、その解明に努力したいと考えている。

1. 洪水は土と水と木の混合流である。

洪水は単なる豪雨に因る河水の移動のみではない。わが国の最近の洪水では特に土砂、石礫の混合流と、おびただしい流木が洪水にはつきものになつていく。

2. 河床変動と洪水

洪水時の河床変動は今日明らかになつていない一つの課題である。従来の洪水理論はすべて固定床理論であるが、実際には利根川や富士川の実測によると、洪水時に河床が 2~4 m も移動しているといわれてい

る⁶⁾。従つて移動床としての洪水理論を検討しなければその実態を把握することは困難である。

3. 洪水実態の計測技術

洪水の研究は先にも記したように、河通が複雑多岐にわたる関係上理論的解析のみによつては究明できない。従つて洪水の実態が完全に実測されねばならない。しかし今日洪水時の実測は僅かに水位変動のみが測定できるだけで、流速、洗掘、流心、流砂などの実測はほとんどできない。水位変動すらもくわしくいうと微細な乱流水面の変動や、洪水の増減水期による横断方向の水位変化などの実態もつかめていない状態であつて、これらの計測機、計測方法などの研究が必要である。

4. 洪水の破壊力

洪水のもつ破壊力というものは今日明らかでない。堤防護岸水制床止などの河川構造物が破壊されるのは、結局は洪水のもつ破壊力に耐えられなくなつた現象であるから、洪水の破壊力そのものを究明することが緊要である。

5. 洪水現象の本質

洪水が流動か、波動かの議論は既に久しいが、未だ十分には解明されていない。また流水の本質として最大流量法則とか最小抵抗法則とかの傾向をもつものとして、流れの本質が議論されつつあるが、洪水を生物と考へて洪水はどのような性格をもつて流れようとしているかを明らかにしないと、これを統禦する河川構造物の計画によりどころがないわけである。河川の蛇行性の問題、河床の安定勾配の問題などの解明にはこの点に問題点があるように思われる。

6. その他

洪水の研究として洪水の分合流、貯水池内の洪水の運動、段波と感潮河川の洪水流など多くの問題点が残されている。

参 考 文 献

- 1) 矢野勝正：洪水特論，昭和33年，pp. 85～87.
- 2) 速水頌一郎：洪水流の理論について，水工学最近の進歩（土木学会，昭和28.3），pp. 25～48.
- 3) 弥永昌吉，矢野健太郎共訳：万能数値表，昭和27年，p. 300
- 4) 3)に掲載，p. 300
- 5) 米田正文：洪水特性論，昭. 28，pp. 13～15.
- 6) 安芸皎一：河相論，昭. 19，p. 54.