

技術・事例報告

計画高水シミュレーションシステムの研究開発（経過） ーハツ場ダム計画地域を対象にしてー

青山 貞一*, 鷹取 敦**

Research and development of design flood simulation model
ーCase study for the Yamba Dam project regionー

Teiichi AOYAMA, Atsushi TAKATORI

Abstract : The simulation model for the design flood of Tone-river applied to plan the Yamba Dam project is so simple that it is not necessarily reliable for heavy rain it can happen only once in a hundred or three hundreds years, because the model doesn't include topographical information. Therefore we have started developing a new model which reflects fine topographical information. This report explain the background of this research and the progress of the development.

キーワード：基本高水、計画高水、シミュレーション、ダム、ハツ場、

Key Words : Design flood, Simulation, Dam, Yamba

1. 研究開発の背景

1.1 洪水対策と基本高水について

治水が目的に含まれるダム等の設置の妥当性を技術的に検討する方法として、基本高水（きほんこうすい、きほんたかみず）のピーク流量を推定する方法がある。「基本高水」とはダム等の洪水量を調整する施設が河川に存在しない時に河川に流出する水の量（流量）を意味する。これに対しダム等の設置により水量を調整した後の流量を「計画高水水量」、その際の水位を「計画高水水位」という（図1-1）。河川法施行令2）第十条の二（河川整備基本方針に定める事項）には表1-1のように定められている。

水量または水位を縦軸に時間を横軸に取ったグラフをハイドログラフと呼ぶ。河川の流域に豪雨があった場合、雨水が河川に流れ込み、水位・水量が時間につれて上昇する。ハイドログラフはこの時の河川の特定地点における水位・水量の上昇の様子を表現する。

水位・水量が最も大きくなった水位・水量を「ピ

ーク水位」、「ピーク水量」と呼び、流量が河川の断面面積が許容できる量を超え、水位が堤防を超えた時、河川から水があふれ、洪水が発生することになる。

したがって洪水について検討する時、水量および河川の断面面積（河川の断面形状：堤防の高さおよび河川の幅）の関係が重要な要素となる。これらの要素を考慮すると、洪水を防ぐ方法には、以下の方法等があることが分かる。

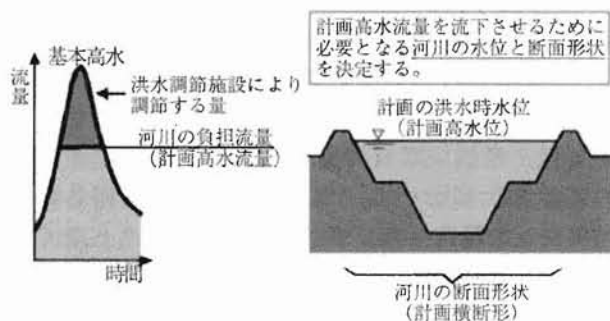


図1-1 基本高水・計画高水水位¹⁾

* 東京都市大学大学院環境情報学研究科

** (株) 環境総合研究所

表 1-1 河川法施行令第十条の二

第十条の二 河川整備基本方針には、次に掲げる事項を定めなければならない。	
一	当該水系に係る河川の総合的な保全と利用に関する基本方針
二	河川の整備の基本となるべき事項
イ	基本高水（洪水防御に関する計画の基本となる洪水をいう。）並びにその河道及び洪水調節ダムへの配分に関する事項
ロ	主要な地点における計画高水流量に関する事項
ハ	主要な地点における計画高水位及び計画横断面に係る川幅に関する事項
ニ	主要な地点における流水の正常な機能を維持するため必要な流量に関する事項

(1) ピーク水位・水量の抑制（流域）
河川に流れ込む水量の抑制（流域の森林整備等により土地の保水量の維持・向上）

(2) ピーク水位・水量の抑制（河川）
河川に流れ込んだ水量の制御（ダム・遊水池・放水路等）

(3) 河川の断面面積を大きくする
河川の幅を広げる、河川改修する、堤防を高くする

(1) に示した「森林整備等」については、例えば「第二次世界大戦がなかったら、カスリーン台風の災害も起こらなかった。戦中の食糧難を解消のため赤城山麓の開墾、エネルギー源のための木材の供出などで乱伐され、森林は消えていった。そこへ大雨を降らせたカスリーン台風の来襲。保水力を失った山はその水を一気に川に流すしかなかった。」(上毛新聞、1999 年 9 月 15 日)³⁾ とあるように、森林による土地の保水力が失われることによって、河川に流れ込む水量が増し、結果として洪水を引き起こすことを意味する。

なお、前記記事中の「カスリーン台風」は本稿で対象とする八ッ場ダムの現地広報センターである「やんば館」においてその被害が強調されている。ちなみに、八ッ場ダムとカスリーン台風の関係については、衆議院議員の質問主意書⁴⁾ に対する内閣の答弁書⁵⁾ において、カスリーン台風と同じ降雨パターンの場合、八ッ場ダムが存在してもしなくてもピーク流量は変わらない、つまり八ッ場ダムではカスリーン台風と同様の降雨による水害は防げないことが既に明らかにされている。

1.2 基本高水の予測方法

基本高水の予測は、一般には図 1-2 に示す手順で

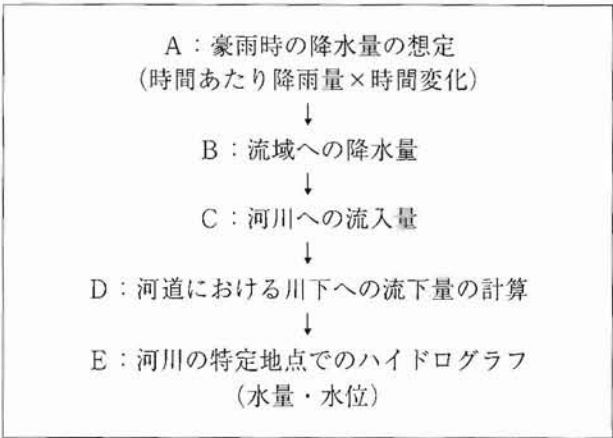


図 1-2 基本高水の計画手順

行うことが出来る。

A はどのような量の降雨が、どの場所に、どのような時間変化で生ずるかについての想定を意味する。例えば過去の実際に水害を起こしたカスリーン台風のような降雨パターンを想定することも可能であるが、一般的には過去数十年間の降水実績を統計処理し、降水量の発生確率を把握する。図 1-3 に利根川水系についての例を示す。確率 1/10 の確率雨量が 193 mm、確率 1/300 の確率雨量が 336 mm 等と示されていることが分かる。継続時間は 3 日間とされている。これを複数の地点について計算する。

次にどの程度の確率の雨量について検討するかを定める。利根川水系河川整備基本方針⁶⁾ では、以

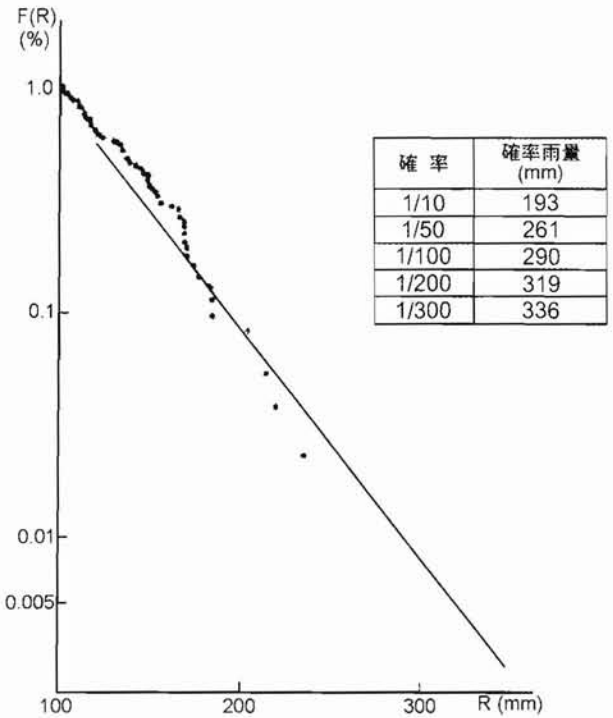


図 1-3 八斗島基準地点における雨量確立図⁶⁾

下のように利根川本川については300年に1度、支川については200年に1度の確率としている。

①計画規模の設定

利根川は流域面積16,840 km²、幹川流路延長322 kmの我が国最大級の河川であり、首都圏を氾濫区域にかかえること等を総合的に勘案し、計画規模として、利根川本川については1/200確率流量と観測史上最大流量のいずれか大きい値を採用とし、支川については原則として1/100確率流量と観測史上最大流量のいずれか大きい値を採用とした。⁶⁾

確率が低い雨量を想定するほど、雨量は大きくなるため、ダムで対処する場合には、必要とされるダムの規模は大きくなる。

図1-2のBからEについて、利根川水系河川整備基本方針⁶⁾では「降雨をハイドログラフに変換するための流出計算モデル（貯留関数法、平地流域では流出関数法）を作成し、流域の過去の主要洪水における降雨分布特性により、モデルの定数（K, P）を同定した」とある。

貯留関数法の基礎式を式（1-1）に示す。貯留関数法とは、簡単に言えば過去の降雨量 r [mm/hr] と流量 Q [m³/s] が式（1-1）において整合するよう定数を求める方法であり入口と出口の辻褄を合わせる簡易な方法と言える。図1-4に示すように、流域を1つのタンクとして表現したものである。

$$s = KQ^p$$

$$\frac{ds}{dt} = r - Q$$

Q : 流量 (m³/s), r : 降雨 (mm/hr)
 t : 時間, S : 貯留量 (m³/s)
 K, p : モデル定数 式 (1-1)

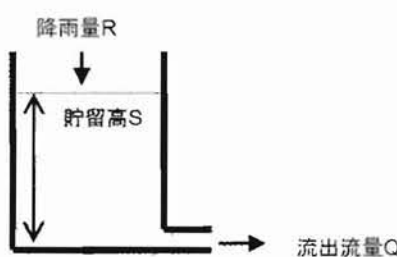


図1-4 貯留関数法の考え方

貯留関数法について、利根川水系河川整備基本方針⁶⁾では、図1-5に示すように過去のデータをよく再現した結果が示されている。

流出関数法はさらに簡易な式であるが、実測値を表現するための簡易な式の定数を求めるという点で

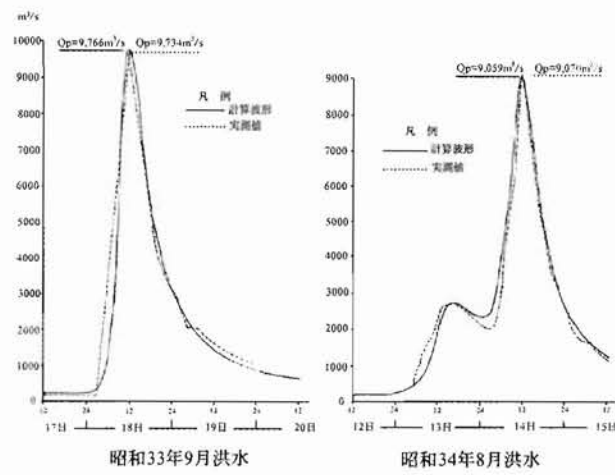


図1-5 八斗島地点における貯留関数法による再現結果⁶⁾

は貯留関数法と同様の考え方である。いずれも、図1-2のBからEに示した水の流れの過程は全く考慮しない。

貯留関数法等は、過去のデータについて辻褄が合うよう定数を決めているため、過去のデータについては再現性が確保できる。

しかしながら、本来予測の対象としたい事象は100年に1回、もしくは300年に1回しか発生しない台風等の豪雨であり、実測データが存在しないことから、過去のデータから求めた定数が当てはまるかどうか検証されていない。

流域への降雨が河川における流量に至る過程をなんらかの形で計算していれば、100年に1回、300年に1回の事象の検証は出来ないまでもそれなりに根拠のある数値となりうるであろうが、貯留関数法はこの過程を大幅に捨象している。流出関数法は物理現象を表現しようとした式ですらない。

2. 研究開発の目的

以上の課題を踏まえ、本報告では、図1-2のB～Eの過程を、地形等の条件を踏まえて計算するモデルの研究開発について経過報告する。

本モデルは、集水域に1時間単位で降る雨をもとに山岳地帯等の3次元デジタルデータ（国土地理院・数値地図50 mメッシュ（標高）⁷⁾等の3次元標高データを用いてメッシュ単位で与え、集水域における水の流れ、河川に流れる水の量等を計算し、最終的に中流地点の河川における基本高水を求めることを目的とする。

3. モデルの構成

3.1 流域モデルと河道モデル

一般に流域への降水より河川の任意の地点におけ

る水量・水位を求める、すなわち基本高水の推計を行うときは、流域における降雨が河川に流入するまでの過程を「流域モデル」によって行い、河川に流入後、河道を流下する過程を予測する「河道モデル」によって行う（図 3-1）。河道モデルによって任意の地点における水量・水位の時間変化が求められるので、これよりハイドログラフを作成することができる。

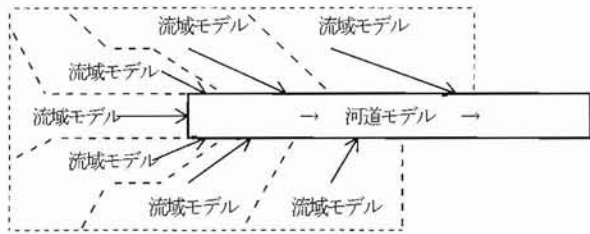


図 3-1 流域モデルと河道モデル

3.2 流出モデル（流出計算法）の分類

図 3-2 に流出モデル（流出計算法）の分類を示す。流域モデルの計算等に使われている流出モデルのうち、地形を考慮する本モデルで利用できる可能性があるのは、時間と空間の双方を考慮して計算するモデル、すなわち図 3-2 の「分布定数モデル」に示されているモデルである。

なお、利根川水系河川整備基本方針⁶⁾で用いられている貯留関数法は図 3-2 では「集中定数モデル」に分類されており、空間を考慮しないモデルであることが分かる。



図 3-2 流出モデル（流出計算法）の分類⁸⁾

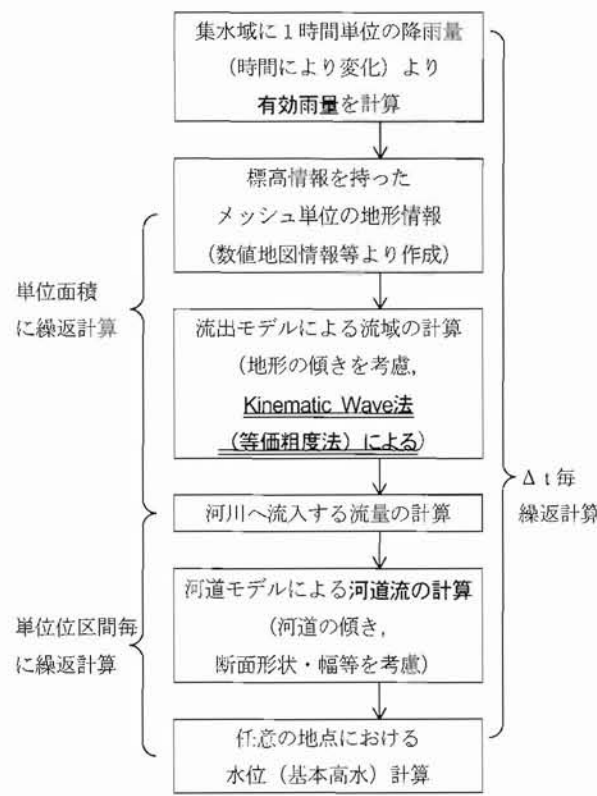


図 3-3 基本処理流れ図

3.3 基本的な考え方

図 3-3 に本検討における処理の基本的な流れを示す。図に示すように流域の計算において Kinematic Wave 法を用いることとした。

4. 流出モデル

4.1 Kinematic Wave 法（等価粗度法）

ここでは、Kinematic Wave 法（等価粗度法）⁹⁾について示す。このモデルは、図 4-1 のような仮定の斜面と河道をモデル化し、流域における流出現象を解析する。

図 4-1 において、単位幅の斜面流を考え単位当たり流量を q とする。ここで、マニングの式（式（4-1））

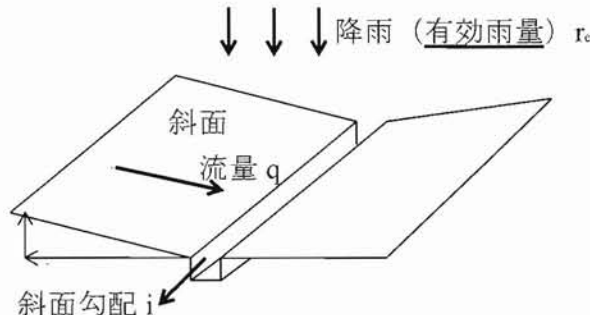


図 4-1 Kinematic Wave 法の考え方（1）

を用いて q を表すと式 (4-3) となる。

マニング則: $q = \alpha^m$ 式 (4-2)

但し, $\alpha = I^{1/2}/N$, $m = 1/p$, $p = 3/5$, q : 流量 [m^3/s], I : 斜面勾配, N : 等価粗度 [$m^{1/3} \cdot s$]

$q = 1/N \times A \times h^{2/3} \times I^{1/2}$ 式 (4-3)

但し, w : 単位幅 [m], A 断面面積 [m^2], 流下水深 h [m] ($A = h \times w$)

$$h = k \times \left[\frac{q}{w} \right]^{\frac{1}{p}}$$
 式 (4-4)

但し, $k = (N/I^{1/2})^{3/5}$

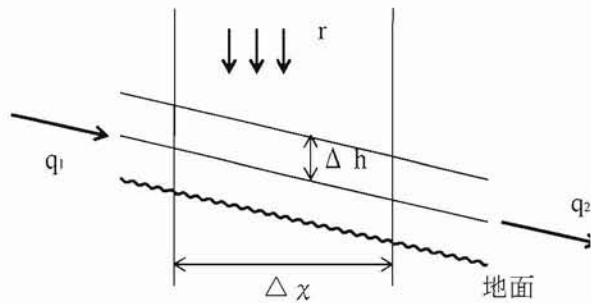


図 4-2 Kinematic Wave 法の考え方 (2)

次に「 $\Delta x \times w$ (単位幅) = Δa 」というブロックにおいて、時間的に Δt 時間での水収支を考える。 Δt 時間内で Δh だけ水位が上昇したと仮定する。 Δt 時間内で降雨として供給される水量 (有効降雨量) r [m/s] は次式で表される。

$r \times \Delta a \times \Delta t$ 式 (4-5)

さらに、上流から入ってくる流量は $q_1 \times \Delta t$ 、下流へ出ていく流量 $q_2 \times \Delta t$ 。以上をもとに、「 Δa 」ブロックでの連続式を立てると以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} r \times \Delta a \times \Delta t \\ = \Delta h \times \Delta a + (q_2 - q_1) \times \Delta t \end{aligned}$$
 式 (4-6)

この式の両辺を $\Delta a \times \Delta t$ で割ると、最終的に以下の微分方程式が得られる。

$$r = \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial a}$$
 式 (4-7)

以上より、斜面流は式 (4-7) および式 (4-4) すなわち下式を連立して解くことができる。

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial a} \\ h &= k \times \left[\frac{q}{w} \right]^{\frac{1}{p}} \end{aligned} \right\}$$
 式 (4-8)

但し, $p = 3/5$, $k = (N/I^{1/2})^{3/5}$, N : 等価粗度 [$m^{1/3} \cdot s$]

式 (4-8) の 1 つ目の式は降雨による水位の上昇、水位の時間変化、流入量・流出量の差との関係を表した式である。2 つ目の式は水位と流出量との関係を表した式である。

なお、等価粗度 N の参考として、河川砂防技術基準 (案)¹⁰⁾ より表 4-1 を示す。

以上、Kinematic Wave 法を、本検討で用いるために任意の面積の流域単位を対象として計算できるように、単位幅を w [m] として示した。

表 4-1 等価粗度²⁾

流域の状態	等価粗度 N ($m^{1/3} \cdot s$)
階段状に宅地造成を行った丘陵地帯	0.05
流域の一部 (15%) に宅地造成が行われた丘陵地帯	0.1~0.2
階段状田畑主体流域	0.2~0.4
上流山地、中下流に市街地を含む階段	
状田畑主体流域	0.3~0.5
林相のかなりよい山地流域	0.4~0.8
上流丘陵地 50%、中流市街地 20%、下流低平水田 30%の流域	0.6~1.1
排水改良の行われていない水田地帯	1~3

4.2 2次元の単調な勾配でない地形における斜面部分の計算

1次元の斜面における Kinematic Wave 法を2次元の計算への拡張を試みた (図 4-4)。1次元の場合、以下の計算を繰り返す行うことによって解を求めることが出来る。ただし、 $x-1$ は x より1つ上流の地点、 $x=0$ は最上流の地点である。

$$\begin{aligned} h_{i+1,x} &= h_{i,x} + r_{i,x} \Delta t - \frac{(q_{i,x} - q_{i,x-1}) \Delta t}{dA} \\ q_{i+1,x} &= w \times \left[\frac{h_{i+1,x}}{k} \right]^{\frac{1}{p}} \end{aligned}$$
 式 (4-9)

但し、初期条件として $h_{0,x} = 0$, $q_{0,x} = 0$, 境界条件として $h_{i,0} = 0$, $q_{i,0} = 0$, $r_{i,0} = 0$ 。

2次元でかつ地形の起伏が一樣でない場合には、流出量 $q_{i,x}$ および流入量 $q_{i,x-1}$ はいずれもそれぞれ 0 項から 4 項、合計で最大でも 4 項存在しうる。

すなわち $(x+1, y)$, $(x-1, y)$, $(x, y+1)$, $(x, y-1)$ のうち、 x より下流にある地点については流出量 $q_{i,x}$ を、上流にある地点については流入量 $-q_{i,x-1}$ を計算する必要がある。



図 4-3 2次元における計算のイメージ (1)

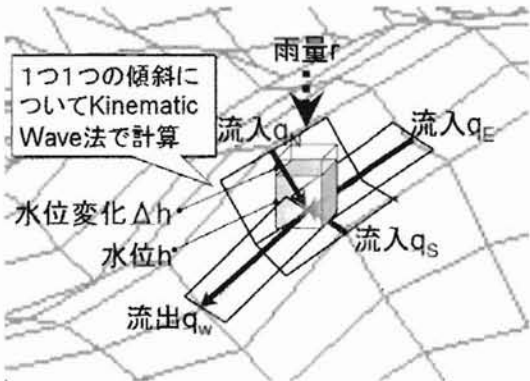


図 4-4 2次元における計算のイメージ (2)

$$h_{t+1,x,y} = h_{t,x,y} + r_{t,x,y} \Delta t - \frac{(q_{for(x+1,y),t,x,y} + q_{for(x-1,y),t,x,y} + q_{for(x,y+1),t,x,y} + q_{for(x,y-1),t,x,y})}{dA} \Delta t + \frac{(q_{t,x+1,y} + q_{t,x-1,y} + q_{t,x,y+1} + q_{t,x,y-1})}{dA} \Delta t$$
$$q_{t+1,x,y} = w \times \left[\frac{h_{t+1,x,y}}{k} \right]^{\frac{1}{p}} \tag{式 (4-10)}$$

但し $q_{for(i,j)}$ は (i,j) 座標への流出量を意味し、 (i,j) の標高 $GL_{i,j}$ + 水位 $h_{t,i,j}$ が (x,y) の標高 $GL_{x,y}$ + 水位 $h_{t,x,y}$ より低い場合のみ考慮する。 $q_{i,j}$ は i,j 座標からの流入量を意味し、 (i,j) の標高 $GL_{i,j}$ + 水位 $h_{t,i,j}$ が (x,y) の標高 $GL_{x,y}$ + 水位 $h_{t,x,y}$ より高い場合のみ考慮する。

5. 河道モデル

5.1 Kinematic Wave 法

本報告では、河道モデルについても Kinematic Wave 法を採用した。河道計算に用いる式を以下に示す¹¹⁾。2つ目の式はマンニングの平均流速の公式である。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$
$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \tag{式 (5-1)}$$

但し、 A : 通水面積 [m^2]、 Q : 流量（流出の方が大きい時に正） [m^3/s]、 q : 流域からの流量 [m^3/s]、 V : 流速 [m/s]、 n : 粗度係数、 I : 勾配、 R : 径深 [m]= A （通水面積）/ P （潤辺長）

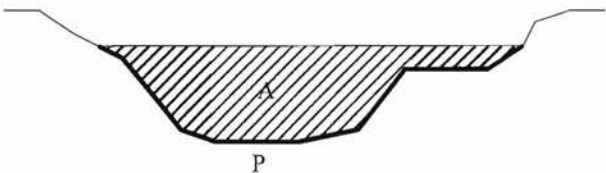


図 5-1 通水断面積 A と潤辺長 P（太線）

河道における粗度係数 n については、表 5-1 を一例として示す。

表 5-1 マニングの粗度係数（出典の表より暗渠を除いたもの）¹¹⁾¹²⁾

水路の形式	材料および潤辺の性質	n の範囲	n の標準値
ライニングした水路	鋼，塗装なし，平滑	0.011～0.014	0.012
	モルタル	0.011～0.015	0.013
	木，かんな仕上げ	0.012～0.018	0.015
	コンクリート，コテ仕上げ	0.011～0.015	0.015
	コンクリート，底面砂利	0.015～0.020	0.017
	石積み，モルタル目地	0.017～0.030	0.025
	空石積み	0.023～0.035	0.032
ライニングなし水路	アスファルト，平滑	0.013	0.013
	土，直線，等断面水路	0.016～0.025	0.022
	土，直線水路，雑草あり	0.022～0.033	0.027
	砂利，直線水路	0.022～0.030	0.025
自然水路	岩盤直線水路	0.025～0.040	0.035
	整正断面水路	0.025～0.033	0.030
	非常に不整正な断面，雑草，立木多し	0.075～0.150	0.100

6. 試みの計算

上記の方法により、実際の地形データ等を当てはめて試みの計算を行った。

6.1 対象範囲

ここでは事例対象として八ッ場ダム計画地域の流域を対象とした。具体的には、北緯 36 度 22 分 8.97 秒～36 度 38 分 3.06 秒，東経 138 度 23 分 0.4 秒～

138 度 46 分 9.27 秒の東西 34.5 km, 南北 29.5 km の範囲とした (図 6-1)。



図 6-1 対象範囲 ¹⁴⁾

標高は国土地理院の「数値地図 50 m メッシュ」⁷⁾を用いた。このデータは、緯度、経度を等分に分割することによって、おおむね 50 m の格子状の標高を数値データとして示したものである。このデータとスプライン補間法を用いて 100 m 格子上の標高データを作成した (図 6-4)。

6.2 河道横断面形状

河道の横断面図については、図 6-2、図 6-3 に示したもの ¹⁵⁾ があるが、吾妻川については一地点しか形状が示されていない。

6.3 計算経過例

図 6-5 に計算中の画面表示例を示す。この表示例

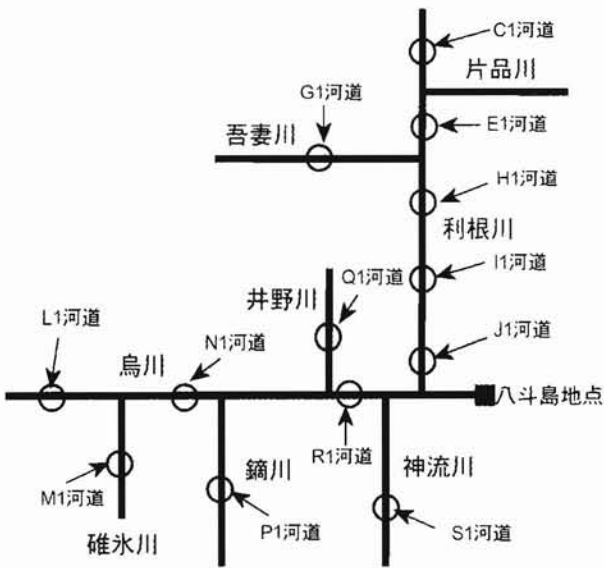
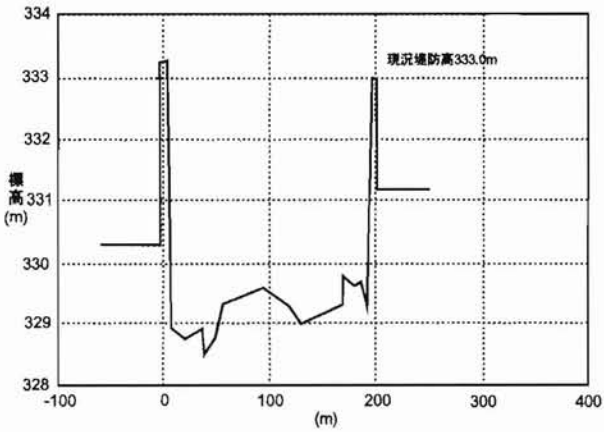


図 6-2 吾妻川横断面図位置模式図 ¹⁵⁾



G1河道 横断面図

図 6-3 吾妻川横断面図 ¹⁵⁾



図 6-4 100 m メッシュ地形データ (高さ方向を 2 倍強調)

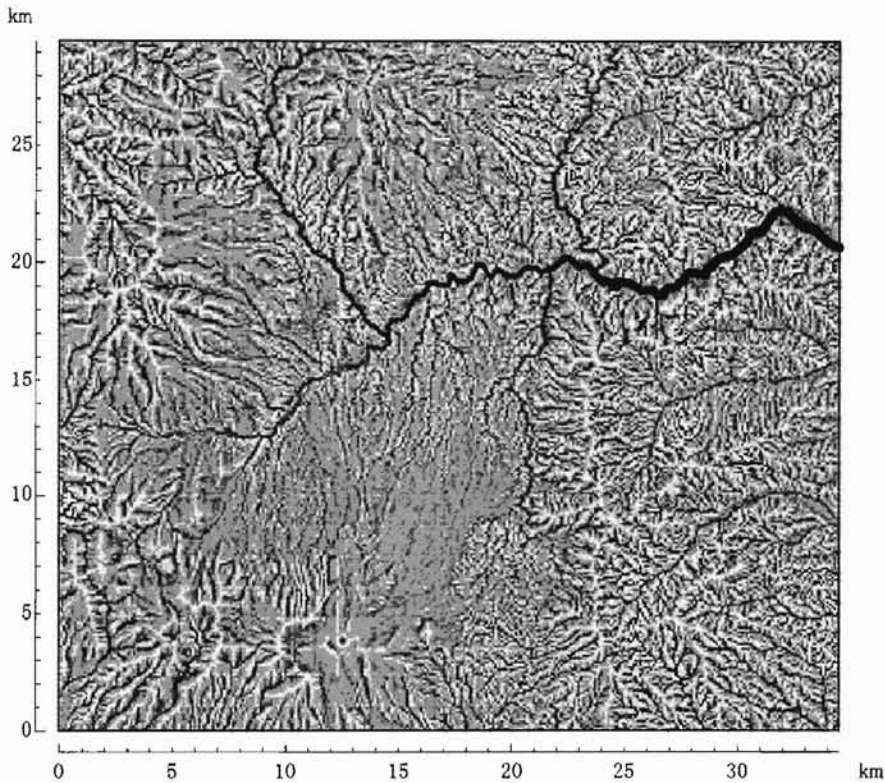


図 6-5 計算経過画面表示例

注 1) 太線で示された部分が吾妻川およびその支川の流量

注 2) 河川以外での色の濃い部分は流域で水位が高いところ、色が薄いところは水位が低いところ

では、吾妻川および主要な支川を河道モデルの計算経過として表示している。粗度係数等は現段階ではデータを得ていないため、ここでは仮に一律として設定している。

7. 今後の課題

本モデルについては、開発途上にある。今後、検討すべき要素として以下の項目がある。

- (1) 有効雨量の考慮
- (2) 飽和雨量の考慮
- (3) 流域内における粗度係数、流出係数などの範囲別の設定
- (4) 河道断面形状の設定
- (5) 実際の降雨量を当てはめた現況再現計算

参考・引用文献

- 1) 犀川水系河川整備検討委員会、犀川水系河川整備方針に関する Q&A, 2003 年 12 月 9 日
- 2) 河川法施行令（昭和四十年二月十一日政令第十四号、最終改正：平成一七年六月一日政令第一九五号）
- 3) 上毛新聞、コラム『戦争がなかったら』、1999 年 9 月 15 日
- 4) 衆議院議員石関貴史、ハッ場ダム問題に関する

質問主意書（質問第四三二号）、2000 年 5 月 27 日提出

- 5) 内閣総理大臣福田康夫、ハッ場ダム問題に関する質問に対する答弁書（内閣衆質一六九第四三二号）、2000 年 6 月 6 日
- 6) 国土交通省、利根川水系河川整備基本方針基本高水等に関する資料、p.9, p.10, p.12
- 7) 国土地理院、数値地図 50 m メッシュ（標高）
- 8) 第 16 回武庫川流域委員会 資料 2-1 流出モデル（流出計算法）の比較、資料 2-2 各流出計算について
- 9) 「第 8 回紀の川流域委員会」資料-1 スライド集・紀の川河川整備計画について（目標流量の検討）洪水流出計算について（Kinematic Wave 法）
- 10) 河川砂防技術基準（案）
- 11) 土木学会、水理公式集〔平成 11 年度版〕
- 12) Chow, V.T : Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill/吉川：水理額、技報堂
- 13) 建設省、二訂建設省河川砂防技術基準（案）調査編
- 14) ゼンリン、ゼンリン電子地図帳 Zi9
- 15) 関東地方整備局、ハッ場ダム住民訴訟調査囑託への関東地方整備局の回答資料・利根川八斗島上流部の河道条件・別紙 1