

参考資料

流出解析システム（Ver2.3）の 解析手法について

3 April 2001

目 次

1. 解析手法.....	1
1.1 流域の流出計算	1
1.2 河道の流出計算	2
1.3 ダムモデル	3
1.4 分流モデル	3
1.5 樋門・ポンプモデル（内水地モデル）	4
1.5.1 放流特性	4
1.5.2 樋門・ポンプの制御	5
1.6 流域平均雨量算定	6
1.7 有効降雨	6
2. パラメータの設定.....	7
2.1 流域の定数設定（一価非線形貯留関数）	7
2.2 流域の定数設定（二価非線形貯留関数法）	8
2.3 河道の定数設定（貯留関数法）	9
2.4 河道の定数設定（不定流計算）	9
2.5 ダムに係わるデータ・定数	10
2.6 分流モデルに係わるデータ・定数	10
2.7 樋門・ポンプに係わるデータ・定数	11
3. 誤差計算.....	11
4. 流出計算モデルの最大値について	12

1. 解析手法

1.1 流域の流出計算

流域の流出解析には、木村の提案した貯留関数法と、後一つは星モデルと言われる二価非線形貯留関数法の2種類の貯留関数法を採用した。

木村の貯留関数法は、現在多くの流域で採用されている表面流出モデル類似の一価非線形貯留関数法であり、貯留量～流量曲線の二価性を定性的に表現したモデルである。特徴としては、貯留量と流出量の関係式に遅れ時間の概念を導入して貯留量～流量曲線の二価性を表現しておりパラメータが少なく比較的計算が容易である反面、パラメータの物理的異義を定量的に評価することが困難であることが挙げられる。

二価非線形貯留関数法は、主に北海道の流域で用いられている解析法である。この方式の特徴は、一定勾配斜面上の流出現象の準物理モデルである等価粗度法（Kinematic Wave 法）¹からパラメータの相互関係を考慮して構築した方式であり、貯留量～流量曲線の二価性を貯留量と流出量の関係式（運動式）に用いている。これにより水理学的パラメータの設定が可能である。

● 一価非線形貯留関数法

項目	内 容	備 考
基本方程式	$s = kq^p$ $\frac{\partial s}{\partial t} = r_{ave} - q(t + T_L)$	k, p : 貯留関数の定数 T_L : 遅れ(hour) r_{ave} : 流域平均雨量(mm/h) q : 流出高(mm/h) s : 貯留高(mm/h)

● 二価非線形貯留関数法

項目	内 容	備 考
基本方程式	$\frac{\partial s}{\partial t} = r_e - q$ $s = k_1 q^{p1} + k_2 \frac{d}{dt} (q^{p2})$	ここで s : 貯留高(mm) q : 流出高(mm/h) r_e : 有効雨量(mm/h) $r_e = f \cdot r_{ave}$ t : 時間(hr) k_1, k_2, p_1, p_2 : モデル定数

¹ Kinematic wave 法 基礎方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (0 \leq x \leq L), \quad q = \alpha \cdot h^m, \quad s = \int_0^L h(x, t) dx, \quad h(x, 0) = 0, \quad h(0, t) = 0$$

t : 時間、 x : 斜面上流端からの距離、 h : 水深、 q : 単位幅流量、 r : 有効雨量

L : 斜面長、 α, m : 斜面流域定数、 s : 斜面単位幅貯留量

1.2 河道の流出計算

河道の流出解析には貯留関数法、遅れ時間法、不定流計算法を備えており、貯留関数法の基本的な考え方は前記の木村の貯留関数法と同様である。

河道の流出計算に不定流計算を備える必要性は、通常の流出計算では河道の貯留効果にのみ注目しているのに対し、河道の運動量を反映できることや流出計算では扱いにくい河道合流部での逆流現象および越流を反映できることにある。

貯留関数法では、利根川支川の小貝川逆流現象に代表されるような逆流による水位上昇のための越流減少を反映することは困難であるが、不定流計算では、分合流点における各河川が相互に影響し合う状況を、運動方程式と連続式を連立させて計算するので反映が可能となる。一方、計算上大きな違いがあるので合流点付近の不定流と貯留関数結果の比較には注意が必要である。

● 一価非線形貯留関数法、遅れ時間法

項目	内 容	備 考
基本方程式	$S = KQ^P - T_L Q$ $\frac{\partial S}{\partial t} = Q_{in} - Q (t + T_{Lz})$	K, P : 貯留関数の定数 T_L, T_{Lz} : 河道の遅れ(hour) Q_{in} : 流入流量(m^3/s) Q : 流出流量(m^3/s) S : 見かけの貯留量(m^3)
解析法	ニュートン法	

● 不定流計算

項目	内 容	備 考
基本方程式式	運動方程式 : $\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Qq}{A^2} - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{ Q Q}{k^2} = 0$ ただし、 A : 河積(m^2) Q : 流量(m^3/sec) H : 水位(m) h : 水深(m) D : 川幅(m) I : 河床勾配、 g : 重力加速度($9.8m/sec^2$) q : 横流入(m^3/sec) k^2 : $k^2 = A^2 R^{4/3} / n^2$ $[R$: 径深、 n : 粗度係数]	分合流モデルについては、合流について 1~4 合流、分流については 1、2 分流の河道に対応している。
	連続式 : $D \frac{dH}{dt} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \tilde{q} = 0$ ただし、 \tilde{q} : 横流入流量(m^3/s)	
解析法	四点陰形式差分法	

1.3 ダムモデル

ダム計算の流出計算には、以下に示すように 7 通りの手法を備える。それぞれの手法は以下のとおりである。

ダムモデル種類	取扱い方法	備 考
1. 考慮しない	流入流量=放流量の計算	基本高水等に使用される。
2. 放流量インプット形式	放流量をファイルから入力。	2 水系の接続計算等に対応
3. 自然調節方式(H-V,H-Q 形式)	H-V と H-Q テーブルにより放流量を計算。	放流特性テーブル(H-Q)を作成
4. 自然調節方式(H-V,オリフィス型)	H-V とオリフィス流による放流計算。 (越流 オリフィス流 管路流の順)	最大 5 オリフィス
5. 一定率調節方式	洪水調節開始流量からビーグ流量まで一定率。ビーグ流量以降一定量放流。	一山洪水に対応
6. 一定量調節方式	洪水波形に係らず、一定量の放流計算。	
7. 一定率・一定量調節方式	洪水調節開始流量からビーグ流量まで一定率。ビーグ流量以降一定量放流。	複数山洪水に対応

1.4 分流モデル

分流の制御は、定率分流、定量分流、自然分流の大きく 3 種類の分流に分け、閾値を分流制御の変化点として複合的な分流制御を実現している。不定流計算による分流は、自然分流のみとした。

分流制御タイプ		制御方法
貯留閾数系	自然分流	<ul style="list-style-type: none">流量閾値(m^3/s)-下限値 $Q <$ 上限値の設定 分流率を自動設定 (流量配分率を Manning 式より逐次配分率を設定する方法)
	定率分流	<ul style="list-style-type: none">流量閾値(m^3/s)-下限値 $Q <$ 上限値の設定 分流率 の設定
	定量分流	<ul style="list-style-type: none">流量閾値(m^3/s)-下限値 $Q <$ 上限値の設定分流流量の設定 (定量分流計算前に、自然分流または定率分流を計算し閾値判定を行う。)
不定流計算系	自然分流	<ul style="list-style-type: none">不定流計算により分流計算 (1、2 分流のみ)

1.5 樋門・ポンプモデル(内水地モデル)

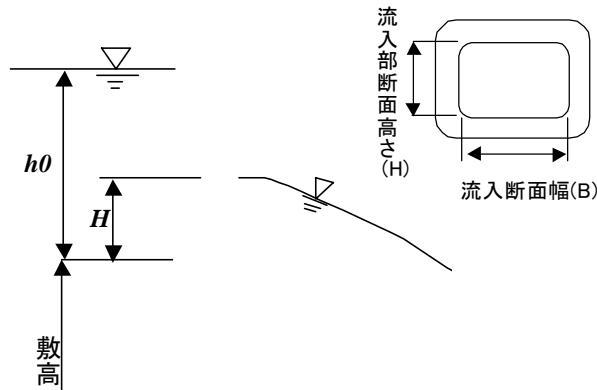
1.5.1 放流特性

内水地からの流出は、樋門とポンプを想定してモデルを構築した。

樋門・ポンプからの流出計算は次式によった。

■ 樋門について

放 流 特 性		
領域	流れ の 種 類	越 流
	計 算 式	$Q = C \cdot B \cdot h0^{3/2}$
	適 用 范 囲 既 定 値	$H \times 0.0 < h0 < H \times 1.3$
領域	流れ の 種 類	オリフィス流
	計 算 式	$Q = C \cdot B \cdot \{h0^{3/2} - (h0 - H)^{3/2}\}$
	適 用 范 围 既 定 値	$H \times 1.3 < h0 < H \times 4.0$
領域	流れ の 種 類	管 路 流
	計 算 式	$Q = C \cdot B \cdot H \cdot \sqrt{h0 - H/2}$
	適 用 范 围 既 定 値	$H \times 4.0 < h0$
ここに、		
C : 流量係数		
B : 流入部断面幅(m)		
H : 流入部断面高(m)		
$h0$: 流入部敷高を基準とする水深(m)		



■ ポンプについて

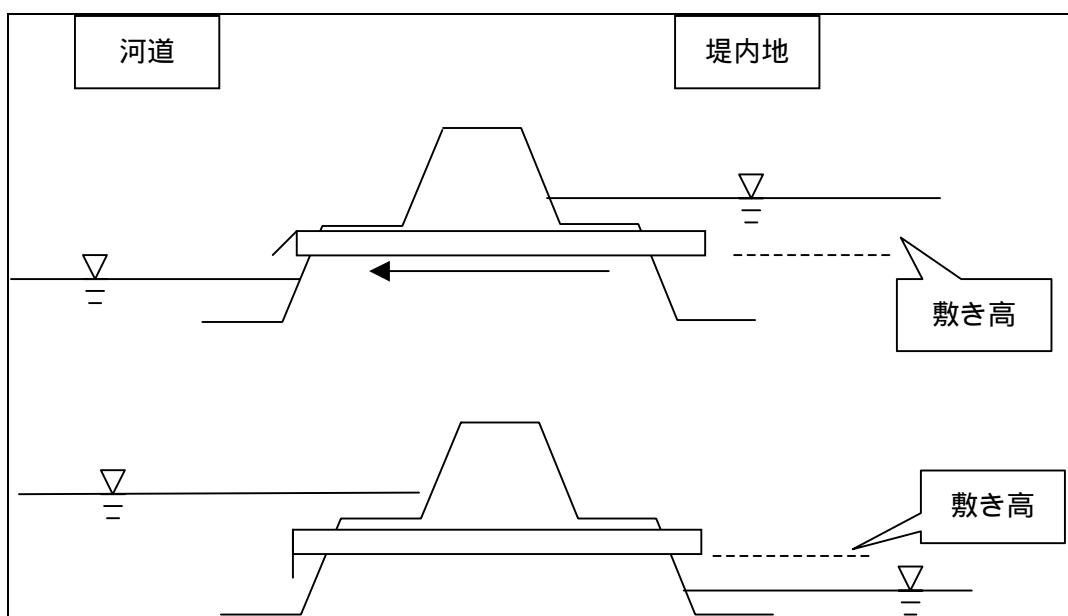
与えられたポンプ容量を放流する。

1.5.2 橋門・ポンプの制御

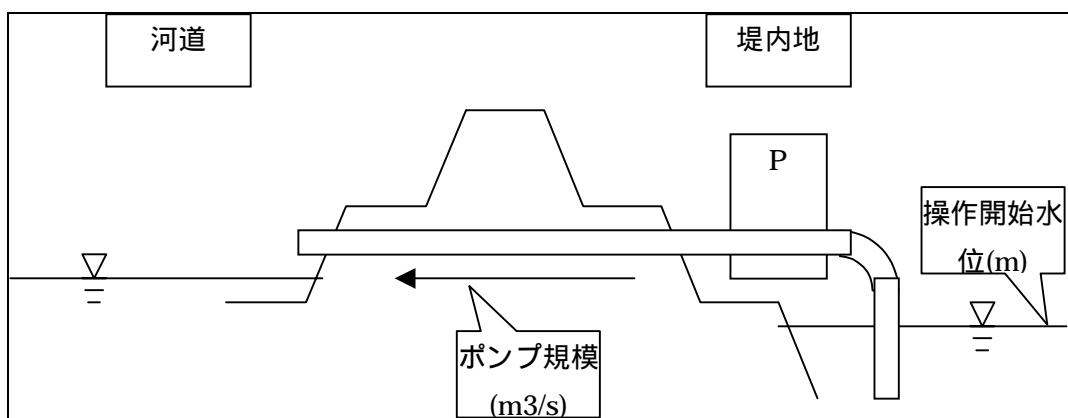
内水地モデルでの橋門・ポンプの制御は、内水地の水位と河道の水位を比較することにより行うが、河道水位の算出方法により、貯留関数領域における制御と不定流計算領域における制御の二種類の制御に分かれる。

貯留関数領域における制御では、橋門・ポンプ下流の河道に H-Q 式を適用し、河道の水位を求め、不定流計算領域における制御では、橋門・ポンプが接続する断面の不定流計算水位を用いて制御を行う。

橋門・ポンプの制御概念図を次図に示した。



橋門制御概念図



ポンプ制御概念図

1.6 流域平均雨量算定

降雨データ処理では、流域平均降雨量を算出するため、ティーセン法を備える。
ティーセン法は以下のとおりである。

$$r = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + \dots + r_N$$

r : 流域平均雨量

r_i : ティーセン係数 $r_i = a_i / A$

a_i : 各雨量観測点とこれらを結ぶ直線の垂直2等分線によって観測所の回りに作られた多角形の面積

A : 流域の面積

r_i : 各観測点の降雨量

1.7 有効降雨

有効降雨モデルは、一価非線形貯留関数法には $f1-Rsa$ 法を用い、二価非線形貯留関数法は流出率 f を乗じて求める方法を採用している。

それぞれ、方式の詳細は以下のとおりである。

● 一価非線形貯留関数法

項目	内 容	備 考
計算式	$Q = \frac{1}{3.6} \cdot f_1 \cdot A \cdot q_l + \frac{1}{3.6} \cdot (f_{sa} - f_1) \cdot A_{nv} \cdot q_{sal} + Q_b$ <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> 流出域 浸透域 </div> <p> Q : 流域からの流出流量(m^3 / s) f_1 : 1次流出率 f_{sa} : 飽和流出率(通常, $f_{sa} = 1.0$) q_l : 全降雨による流出高(mm / h) q_{sal} : 飽和点以降の降雨による流出高(mm / h) A : 流域面積(km^2) A_{nv} : 有効面積(通常, 有効面積 = 流域面積)(km^2) (浸透域の補正面積) Q_b : 基底流量(m^3 / s) </p>	

● 二価非線形貯留関数法

項目	内 容	備 考
計算式	$Q = \frac{1}{3.6} \cdot f \cdot A \cdot q + Q_b$ <p> Q : 流域からの流出流量(m^3 / s) f : 流出率 A : 流域面積(km^2) Q_b : 基底流量(m^3 / s) </p>	

2. パラメータの設定

2.1 流域の定数設定(一価非線形貯留関数)

流域の流出解析に一価非線形貯留関数法を用いた場合のデータ・定数は下表のとおりである。

● 取扱いデータ

取扱いデータ・定数	内 容
1次流出率(fI)、 飽和流出率(fsa)、 飽和雨量(Rsa)	$fI-Rsa$ モデルに係わる係数
モデル定数(k, p)	流出量・貯留量定義モデルのモデル定数
遅れ時間(T_L)	モデル定数
基底流量(Qb)	基底流出成分

● データ・定数の設定方法

データ・定数	設定方法
有効降雨に係わる データ・定数	既往の値を入力 $s-q$ 関係式と累加曲線による方法の組み合わせ ($k-p-Tl-fI-fsa-Rsa$ の自動設定)
1次流出率(fI) 飽和流出率(fsa) 飽和雨量(Rsa)	既往の値を設定 経験式による設定 (利根川経験式) $K = 118.845 \cdot (I^{-1})^{0.3}, p = 0.175 \cdot I^{-0.235}$ $I: \text{流域の平均勾配}$
k, p : モデル定数	等価粗度による設定 $K = 7.35(n \cdot L / \sqrt{I})^{0.6}, p = 0.6$ $L: \text{流路延長(km)}, I: \text{流域の平均勾配}$ $n: \text{等価粗度}(m^{-1/3} / s)$ $n \text{ については、次表の等価粗度係数を参照}$
T_L : 遅滞時間(h)	リザーブ法 $K = 43.4 \cdot C \cdot I^{-1/3} \cdot L^{1/3}, p = 1/3$ $L: \text{流路延長(km)}, I: \text{流域の平均勾配}$ $C: \text{流域粗度(自然流域} C = 0.12, \text{都市流域} C = 0.012)$ 経験式による設定 (利根川経験式) $T_L = 0.0506L - 0.31 \quad L: \text{流路延長(km)}$

データ・定数	設定方法
	既往の値を入力
	全国山地河川資料による提案式 $T_L = \begin{cases} 0.047L - 0.56 & (L > 11.9km) \\ 0.0 & (L \leq 11.9km) \end{cases}$ L : 流路延長(km)
基底流量(Q_b)	水平分離法

等価粗度係数(n)

土地利用形態	標準値	土地利用形態	標準値
水面	0.0	市街化程度	1°
水田	2.0	2°	区画割道路整備ができる相当緑地が残る。配水路整備済
山林	0.7	3°	道路舗装がかなり進む。下水路不整備。
丘陵・放牧地・公園・ゴルフ場・畠地	0.3	4°	舗装されるべき面積の50%以上が整備され、下水路整備もほぼ十分。
市街地	0.03		舗装されるべき面積の舗装、下水路整備完了。

2.2 流域の定数設定(二価非線形貯留関数法)

流域の流出解析に2価非線形貯留関数法を用いた場合のデータ・定数は下表のとおりである。

● 取扱いデータ・定数

取扱いデータ・定数	内 容
流出率(f)	流出率、有効雨量変換値
モデル定数(k_1, k_2, p_1, p_2)	2価非線形モデルのモデル定数
基底流量(Q_b)	基底流出成分

● データ・定数の設定方法

データ・定数	設定方法
流出率(f)	既往の値を入力 $f = qct / rt = \text{総直接流出高} / \text{総雨量}$
基底流量(Q_b)	水平分離
k_1, k_2, p_1, p_2 : モデル定数	等価粗度による設定 $k_1 = 2.823 \cdot (n \cdot / \sqrt{I})^{0.6} \cdot A^{0.24}$ $k_2 = 0.2835 \cdot k_1^2 \cdot (\bar{r}_e)^{-0.2648}$ $p_1 = 0.6$ $p_2 = 0.4648$ I : 流域の平均勾配 n : 等価粗度($m^{-1/3} / s$) \bar{r}_e : 平均有効雨量強度(mm / h)
	成分回帰分析による k_1, k_2 の最適化(自動設定)

2.3 河道の定数設定(貯留関数法)

河道の流出解析に係わるデータ・定数は下表のとおりである。

● 取扱いデータ

取扱いデータ・定数	内 容
モデル定数(K, p)	1価非線形流出量・貯留量定義モデルのモデル定数
遅れ時間(T_L)	1価非線形モデルのモデル定数

● データの設定方法

データ・定数	設定方法
k, p : モデル定数	既往の値を入力する方法
	河道断面を用いた等流・不等流計算により $S \sim Q$ 関係を求める方法
T_L : 遅滞時間(h)	既往の値を入力する方法
	計算式による設定 $T_L = 7.36 \cdot 10^{-4} \cdot L / \sqrt{I}$ L : 流路延長(km)、 I : 河床勾配

2.4 河道の定数設定(不定流計算)

河道の不定流計算に係わるデータ・定数は下表のとおりである。

ここで扱う不定流は、流出解析の性格から、精度の高い計算は必ずしも要求されないことから、単断面モデルを用いる。従って、データの取扱いも比較的簡易である。

● 取扱いデータ

取扱いデータ・定数	内 容
河道の横断座標データ	x,y 横断座標データ
区間距離	
粗度係数	必ずしも横断座標に対応した粗度係数は必要ではない。 一断面一つの合成粗度でもかまわない。
下流端境界条件の設定	水位境界条件、自由流出条件(自由端)
河川接続情報	
流出結果出力地点設定	
タイムステップ	

● データの設定方法

データ・定数	設定方法
河道の横断座標データ	河道計画シミュレータの断面データを用いる。
区間距離	河道計画シミュレータの断面データを用いる。

データ・定数	設定方法
河道の横断座標データ	河道計画シミュレータの断面データを用いる。
粗度係数	河道計画シミュレータの断面データを用いる。(プロダクム内部で合成粗度を計算)
下流端境界条件の設定	インターフェイスにより、水位境界条件、自由流出条件(自由端)を設定
河川接続情報	インターフェイスにより設定
流出結果出力地点設定	インターフェイスにより設定
タイムステップ	インターフェイスにより設定により任意に設定

2.5 ダムに係わるデータ・定数

それぞれのダムに必要なパラメータおよびデータの一覧を次表に示した。

ダム種類	流量調節開始流量 (m ³ /s)	放流率	最大放流量 (m ³ /s)	データ数	ダム制限容量(m ³)	備考
考慮せず (ダムをシンボルとして考慮するが計算はしない)						
放流量インプット形式						別途データを入力。データの頭だけそろえる。
自然調節方式 (H-V,H-Q)						別途 H-V,H-Q 等のデータを設定
自然調節方式 (H-V、オフィス)						別途 H-V、オフィス諸元のデータを設定
一定率調節方式						一山制御
一定量調節方式						
一定率・一定量調節方式						

2.6 分流モデルに係わるデータ・定数

不定流計算にかかるデータ・定数の設定は前記の不定流河道の設定に順ずる。貯留関数の分流にかかるデータ・定数の設定は以下のとおりである。

分流制御タイプ	内 容
自然分流	流量閾値(m ³ /s)の設定 河道計画シミュレータ形式の断面データを3断面設定
定率分流	流量閾値(m ³ /s)の設定、分流率の設定
定量分流	流量閾値(m ³ /s)の設定、分流流量の設定

2.7 橋門・ポンプに係わるデータ・定数

橋門・ポンプに係わるデータ・定数は次に示すとおりである。

種類	内容
内水地諸元	内水地の H - V 特性。 放流先の H - Q 特性または H - Q 式の設定。(貯留関数のときには、河道水位の計算方法として、H - Q テーブルまたは H - Q 式を採用している)
橋門諸元	流量係数、流入部断面幅 (m)、流入部断面高 (m)、流入部敷高を基準とする水深 (m)
ポンプ諸元	ポンプ作動開始水位、ポンプ容量。

3. 誤差計算

実績流量と計算流量の誤差を算出するにあたり、本システムでは、3種類の方法で算出することが可能である。

「河川砂防技術基準(案)」によれば、客観的な判断基準の一つとして誤差の平方和を最小にする方式が提案されているが、これは時々刻々の誤差をピーグ流量で除しているので基準値(0.03)よりも小さく算出される傾向にあり、ここでは、波形全体の流量誤差、ボリューム誤差、ピーグ流量誤差を評価することとした。

それぞれの算出方法は以下のとおりである。

種類	内容	備考
流出波形誤差 (Ew)	$Ew = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Qo(i) - Qc(i)}{Qo(i)} \right)^2$ $n: \bar{\tau}^* - \tau$ 数 $Qo(i)$: 実績流量(m^3/s) $Qc(i)$: 計算流量(m^3/s)	実績ピーグ流量の 1/1, 1/3, 1/5 で評 価可能
流出ボリューム誤差 (Ev)	$Ev = \frac{\sum_{i=1}^n Qo(i) - \sum_{i=1}^n Qc(i)}{\sum_{i=1}^n Qo(i)}$ $n: \bar{\tau}^* - \tau$ 数 $Qo(i)$: 実績流量(m^3/s) $Qc(i)$: 計算流量(m^3/s)	実績ピーグ流量の 1/1, 1/3, 1/5 で評 価可能
ピーグ誤差 (Ep)	$Ep = \frac{Qop - Qcp}{Qop}$ Qop : 実績ピーグ流量(m^3/s) Qcp : 計算ピーグ流量(m^3/s)	実績ピーグ流量の 1/1, 1/3, 1/5 で評 価可能

4. 流出計算モデルの最大値について

本システムの計算モデルで取扱える計算ステップ数、アイテム等の最大値は以下のとおりである。

項目	許容値	備考
計算ステップ数	最大 10000	計算ステップが 1 時間 /ステップ [°] の場合、トータル 10000 時間分の計算が可能。
雨量、流量を入力する地点数	最大 200	
流域アイテム数	最大 200	1 アイテムにつき 入力地点 1、出力地点 1
河道アイテム数	最大 200	1 アイテムにつき 入力地点 1、出力地点 1
合流地点アイテム数	最大 200	1 アイテムにつき 入力地点 2、出力地点 1
ダムアイテム関連	ダムアイテム数	最大 50
	ダムの H - V テーブルの最大値	最大 100/アイテム
	オリフィス数	最大 5/アイテム
樋門・ポンプアイテム関連	内水地数	最大 50
	H - V テーブルの最大値 H - Q テーブルの最大値	最大 100/アイテム
	内水地に含まれる樋門・ポンプの数	最大 20/アイテム
分流地点アイテム関連	分流数	最大 100
	分流遷移数	最大 10/アイテム
計算対象となる入出力地点数(雨量地点含む)	最大 500	上記のアイテム入出力 点数が 500 を超えない ように流出モデルを作成します。