

分布型流出モデルによる洪水到達時間の調査

水気象研究室 中川雅宏

指導教員 陸 旻皎

1. 研究背景

小流域における河川計画は、基本高水ピーク流量 Q_p (数十年に1度の洪水による流量) を基に立案されている。合理式では、基本高水ピーク流量を以下の式で求めることができる(eq.1.1)

$$Q_p = \frac{1}{3.6} K \cdot Re \cdot A \quad (\text{eq. 1.1}) \quad \left[\begin{array}{l} Q_p : \text{ピーク流量}[\text{m}^3/\text{s}], K : \text{流出率}, A : \text{流域面積}[\text{km}^2] \\ Re : \text{降雨継続時間}(T_C)\text{内の平均降雨強度}[\text{mm}/\text{hr}] \end{array} \right]$$

降雨継続時間 t_r 内の平均降雨強度 Re の計算例の一例として、eq.1.2 のフェア式がある。

$$Re = \frac{bT_s^m}{(t_r + a)^n} \quad (\text{eq. 1.2}) \quad \left[\begin{array}{l} T_s : \text{再現期間}[\text{year}], t_r : \text{降雨継続時間}[\text{hr}] \\ b, m, a, n : \text{アメダス観測地点ごとに既に最適化されたパラメータ} \end{array} \right]$$

再現期間 T_s は、基本的に河川ごとに定められた治水安全度によって決まる。また、降雨継続時間 t_r は洪水到達時間 T_C を基に決定する必要があるとされている¹⁾。既往の洪水到達時間の算定式には角屋・福島の式(eq.1.3)^{2) 3)} や土研式(eq.1.4, eq.1.5)³⁾ があるが、既往の算定式には流域特性を間接的に表現したパラメータ定数を含んでいるものが多く、選択するパラメータによって洪水到達時間が大きく変化する。

角屋・福島の式

$$T_C[\text{hr}] = CA^{0.22} Re^{0.35} \quad (\text{eq. 1.3}) \quad \left[\begin{array}{l} C : \text{流域特性を表す係数(丘陵山林地流域 : 290,} \\ \text{放牧地・ゴルフ場 : 190 ~ 210, 粗造成宅地 : 90~120, 市街地地域 : 60-90)} \end{array} \right]$$

土研式

$$\begin{array}{l} \text{自然流域} \cdots T_C = 1.67 \times 10^{-3} (L_{\max} / \sqrt{S_{L_{\max}}})^{0.7} \quad (\text{eq. 1.3}) \\ \text{都市流域} \cdots T_C = 2.40 \times 10^{-4} (L_{\max} / \sqrt{S_{L_{\max}}})^{0.7} \quad (\text{eq. 1.4}) \end{array} \quad \left[\begin{array}{l} L_{\max} : \text{流域最遠点から流域出口までの流路長}[\text{m}] \\ S_{L_{\max}} : \text{流域最遠点から流域出口までの勾配} \end{array} \right]$$

2. 目的

分布型流出モデルを用い、流域面積、流路の長さ、流路勾配、流域形状のような流域地理特性、また降雨特性により洪水到達時間 T_C がどのように変化するか調査する。またその結果を踏まえ、それらの指標を式中に直接的に取り入れ、単一のパラメータ定数をもつ洪水到達時間の算定式の導出を行う。また導出した算定式(確定式)による計算結果と既往の洪水到達時間の算定式(選択するパラメータによる計算結果の変動範囲)とを比較し、確定式の妥当性の評価を行う。

3. 洪水到達時間(T_C)の定義

流域全体に対して一様な降雨強度の降雨を与え続けたとき、流域最遠点からの流出が流域出口に到達して以降、流量の増加が頭打ちになる。そのときの流量の95%に達する値を洪水到達時間とし、 T_C として定義する。

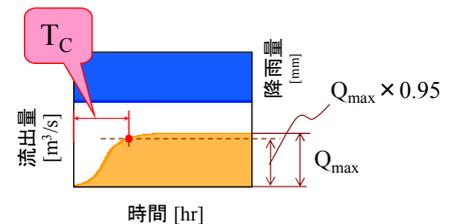


Fig.3.1 洪水到達時間(T_C)の概念

4. 検討対象流域

数値流域モデルには、魚野川上流六日町地点流域(流域面積 362.33km^2)のモデルデータを用いた。また六日町地点流域の中から更に 10km^2 程度の流域(A流域)を8つ、 30km^2 程度の流域(B流域)を3つ、 80km^2 程度の流域(C流域)を2つ、 201.35km^2 の流域(D流域)を1つ、 362.33km^2 の流域(O流域)を1つ選定し、流域地理特性の違いによる洪水到達時間の違いを調査した。選定した検討対象流域の形状と、河道網分布を以下 Fig.4.1 に示す。

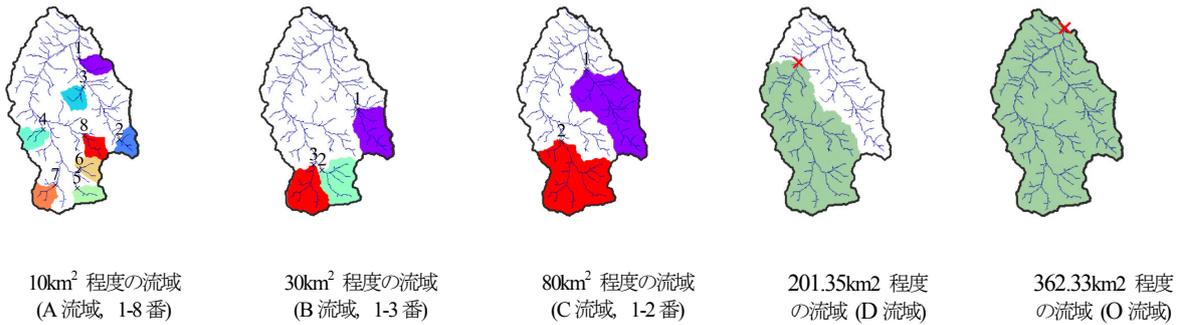


Fig. 4.1 検討対象流域の形状と河道網分布(図中の河道は集水面積1km²以上のメッシュ)

5. 新たな流域の作成

実流域をモデル化した流域モデルだけでは、検討できる流域特性のパターンに限りがある。本検討では、実流域の数値モデルから選定した検討対象流域について、Fig.5.1のように(i)流域面積を変化させずに標高をX倍に変化させる(つまり勾配を変化させる) (ii)勾配を変化させずに流域面積をX倍、流路長はX^{0.5}倍に変化させるよう流域を数値的に拡大・縮小し、地理特性の異なる新たなモデル流域を作成した。

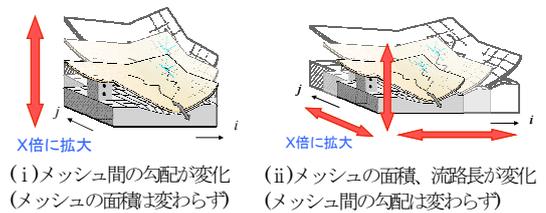


Fig. 5.1 流域の拡大・縮小の概念図

6. 分布型流出モデル

以下に、検討に用いた分布型流出モデルシステムの概要を示す。分布型流出モデルは、1989年陸らにより開発されたものである⁴⁾⁵⁾。今回のモデル計算条件は、土壌は十分に湿った状態を想定し、降雨が即座に河道に流れ込むものとした。また、単一の洪水イベントのため、蒸発散量は無視した。

モデルでは、土壌からの流出成分は一度メッシュ中心に集められ、最急勾配方向のメッシュの中心まで、河道を通して伝播する。河道の合流による流量の増加はメッシュ中心でのみ起きるため、メッシュ間の流路での流量は一定である。またメッシュ間の流路では、流路勾配、粗度係数、河幅も一定である。流路の洪水伝播速度はeq.6.1で表される。

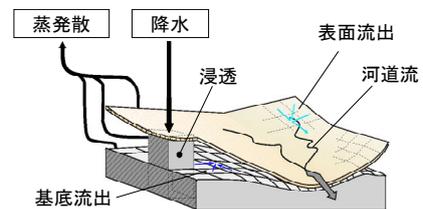


Fig.6.1 分布型流出モデルシステムの概略図(陸ら,1991)

$$c = \frac{5}{3} \cdot \frac{S_i^{0.3} Q_i^{0.4}}{n_i^{0.6} B_i^{0.4}} \text{ [m/s]} \quad \left(\begin{array}{l} S_i: \text{メッシュ間の流路勾配}, Q_i: \text{流量 [m}^3/\text{s]} \\ B_i: \text{河幅 [m]}, n_i: \text{マンニング係数 [m}^{-1/3}\text{s]} \end{array} \right)$$

7. 検討に用いる指標

本検討では、流域中の流路長・流路勾配・降雨量・流域形状の指標について、洪水到達時間T_Cとの関係性を調査した。検討に使用した地理指標とその計算例は以下の通り。

- 座標ijから流域出口までの流出経路の長さ：流路長L_{ij,o}
(例) 右図より L_{24,o}=L₂₄+L₃₄+L₄₄+L₅₄
- 流域最遠点からの流路長：最遠点流路長L_{max} [m]
- 座標ijから流域出口までの平均的な勾配(流路勾配)：流路勾配S_{ij,o}
(例) 右図より S_{12,o}=(S₁₂L₁₂+S₂₂L₂₂+S₃₂L₃₂+S₄₂L₄₂+S₅₂L₅₂)/L_{ij,o}

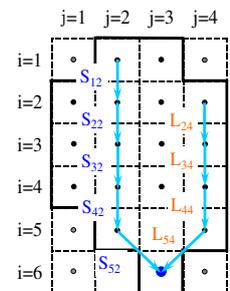


Fig.7.1 流域グリッドと地理指標

(勾配は、メッシュ間の流路の長さをメッシュ間の標高差で除したもの)

- Fig.7.1 より、流域内のメッシュが N 個あったとき、 $k=1, \dots, N-1$ (流域出口を除く座標 (i,j) の組)の流路勾配 S_{k_0} の平均値：流域平均流路勾配 S_{ave}
- 流域最遠点からの流路勾配：最遠点流路勾配 S_{Lmax}
- 1sec あたりの流域全体の降雨量：流域単位時間降雨量 $R_v[m^3/s] = 1/3.6 \cdot Re[mm/h] \cdot A[km^2]$
ここで Re は降雨強度、 A は流域面積である。

8. 算定式の導出

分布型流出モデルにおける洪水の伝播は、メッシュ中心を通る流路においては流路勾配、粗度係数、河幅、流量を一定とし、eq. 6.1 の洪水伝播速度の式を用いて計算している。ただし流域全体では地点ごとに流路勾配、粗度係数、河幅が変化し、流量においては同じ地点でもその時系列や降雨の状況、河道網による洪水の集中過程などにより変化する。本節では、洪水伝播速度の式を単一の流路から流域全体の河道網へ拡大して適用し、理論的に導出した算定式を導出する。

単一の流路における、KinematicWave 法による洪水伝播速度の式(eq.6.1)を河道網全体に対して適用する。このとき、メッシュ間をつなぐ流路において、流路の長さ、また洪水伝播速度は異なる。ここでは、流路長の代表変数を L 、洪水伝播速度の代表変数を c 、洪水の伝播時間を T 、河道網配置などのその他の流域の状態を間接的に表す係数を M とおくと、次のようになる

$$L = M(cT) \quad (\text{eq. 8.1})$$

洪水伝播速度の代表変数 c に eq.6.1 を代入し、時間 T について整理すると

$$T = M \cdot L \left(S^{-0.3} Q^{-0.4} n^{0.6} B^{0.4} \right) \quad (\text{eq. 8.2})$$

このとき、 S は流域の流路勾配を代表する変数、 Q は流域の流量を代表する値、 n は流域における粗度係数を代表する変数、 B は流域の河幅を代表する変数である。粗度係数 n と河幅 B の影響を係数 M で代表させ、流量 Q を 1sec あたりの流域への降雨量 $R_v[m^3/s]$ で代表させる。更に T を洪水到達時間 T_C とおくと

$$T_C = M \left(L S^{-0.3} R_v^{-0.4} \right) \quad (\text{eq. 8.3})$$

eq. 8.3 より、KinematicWave 法による洪水伝播速度の式から、流路長、流路勾配、降雨量を考慮した洪水到達時間の算定式の導出を行うことができた。

流域形状の違いが洪水伝播速度に与える影響を考慮する。流域の形状を Fig.8.1 のように仮定する。このとき斜面の幅は $A/2L$ と表すことができる。 L は幹川の流路の長さ、 A は流域面積である。斜面の幅が長いほど、洪水が短時間で幹川に集められ、洪水伝播速度が速くなると考えられる。斜面の幅を考慮し、流路長 L を $L + A(2L)^{-1}$ で代表させると次のようになる

$$T_C = M \left\{ \left(L + A(2L)^{-1} \right) S^{-0.3} R_v^{-0.4} \right\} \quad (\text{eq. 8.4})$$

eq. 8.4 より、流路長、流路勾配、降雨量に加えて、流域形状の違いによる洪水の集中過程を考慮した洪水到達時間の算定式の導出を行うことができた。

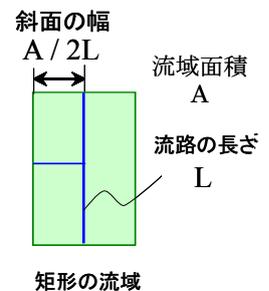


Fig.8.1:流域形状の模式図

9. 検討結果および考察

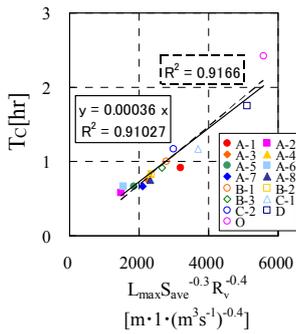


Fig.9.1 検討対象流域（引き伸ばしなし）における $L_{\max}S_{\text{ave}}^{-0.3}R_v^{-0.4}$ と T_c の相関(降雨強度:15mm/hr)。点線は切片を定めずに最小二乗近似したときの回帰直線、実線は切片を 0 に定めて最小二乗近似したときの回帰直線。

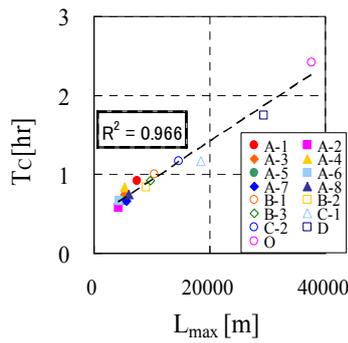


Fig.9.2 検討対象流域（引き伸ばしなし）における L_{\max} と T_c の相関(降雨強度:15mm/hr)。点線は切片を定めずに最小二乗近似したときの回帰直線。

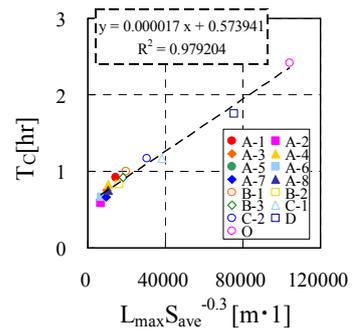


Fig.9.3 検討対象流域（引き伸ばしなし）における $L_{\max}S_{\text{ave}}^{-0.3}$ と T_c の相関(降雨強度:15mm/hr)。点線は切片を定めずに最小二乗近似したときの回帰直線。

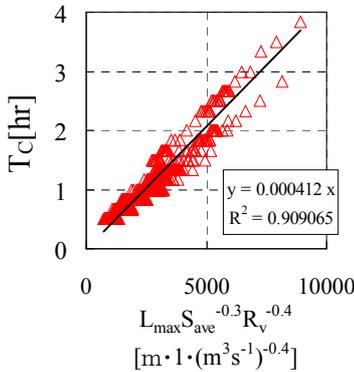


Fig.9.4 検討対象流域(引き伸ばしあり：標高を 0.2-1.8 倍・0.1 間隔、流域面積を 0.2-1.8 倍・0.1 間隔)における $L_{\max}S_{\text{ave}}^{-0.3}R_v^{-0.4}$ と洪水到達時間 T_c との相関(降雨強度:15mm/hr、60mm/hr)。

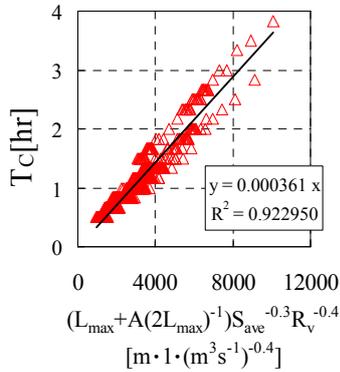


Fig.9.5 検討対象流域(引き伸ばしあり：標高を 0.2-1.8 倍・0.1 間隔、流域面積を 0.2-1.8 倍・0.1 間隔)における $(L_{\max}+A(2L_{\max})^{-1})S_{\text{ave}}^{-0.3}R_v^{-0.4}$ と洪水到達時間 T_c との相関(降雨強度:15mm/hr、60mm/hr)。

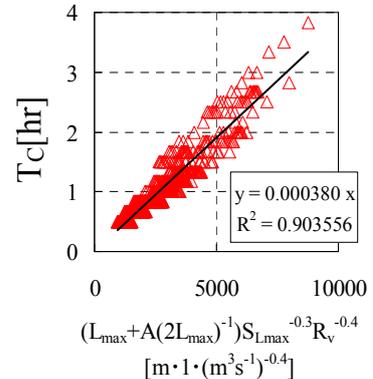


Fig.9.6 検討対象流域(引き伸ばしあり：標高を 0.2-1.8 倍・0.1 間隔、流域面積を 0.2-1.8 倍・0.1 間隔)における $(L_{\max}+A(2L_{\max})^{-1})S_{L_{\max}}^{-0.3}R_v^{-0.4}$ と洪水到達時間 T_c との相関(降雨強度:15mm/hr、60mm/hr)。

Fig.9.1 は、魚野川上流六日町地点の数値モデル流域から選定した流域である、10km²程度の流域(A 流域)が 8 流域、30km²程度の流域(B 流域)が 3 流域、80km²程度の流域(C 流域)が 2 流域、201.35km²の流域(D 流域)、362.33km²の流域(O 流域)のそれぞれの流域について流出解析より求めた洪水到達時間 T_c を Y 軸に、eq. 8.3 の算定式の括弧内の指標の組に $L=L_{\max}$ 、 $S=S_{\text{ave}}$ を当てはめたもの $(L_{\max}S_{\text{ave}}^{-0.3}R_v^{-0.4})$ を X 軸にとり、それらの相関関係を示した図である。図中の実線は切片を 0 に定めてプロットに対して最小二乗近似したときの回帰直線である。この図より、算定式の指標の組 $L_{\max}S_{\text{ave}}^{-0.3}R_v^{-0.4}$ と洪水到達時間 T_c は、切片を 0 に定めずに最小二乗法で求めた決定係数 $R^2=0.91$ と良好な相関があることが分かる。

Fig.9.2 は Fig.9.1 と同様の条件で求めた洪水到達時間 T_c を Y 軸に、X 軸に L_{\max} をとったときの、 L_{\max} と T_c の相関を示した。Fig.9.3 は Fig.9.1 と同様の条件で X 軸に $L_{\max}S_{\text{ave}}^{-0.3}$ をとったときの $L_{\max}S_{\text{ave}}^{-0.3}$ と T_c の相関関係を示した図である。Fig.9.1 と Fig.9.2 のどちらの場合も切片を定めずに求めた最小二乗法の回帰直線の相関係数は高いが、

直線の切片は大きく原点をずれている。 L_{max} が 0 のときに洪水到達時間 T_c が 0 を上回るとは考えられず、現実的ではない。対して X 軸に $L_{max}S_{ave}^{-0.3}R_v^{-0.4}$ をとったときは 最もよく洪水到達時間 T_c の変化を表現しているといえる。

洪水到達時間をよく説明する算定式、また算定式の流域特性を間接的に表現するパラメータ M の設定を適切に行うため、より多くの地理特性パターンを考慮する必要がある。Fig.9.4 は検討対象流域を、六日町地点の流域モデルから選定した流域を基に 5 節で示した流域の引き伸ばしを行い、元の流域から地理特性を変化させた流域を作成した。なお、引き伸ばしを行った拡大倍率 X は、どちらの引き伸ばし方法でも 0.2 から 1.8 まで、0.1 間隔である。図は、作成した全ての流域に降雨強度 15mm/hr、60mm/hr の 2 パターンの降雨を与えて流出解析を行い、求めた洪水到達時間 T_c を Y 軸に、流域形状を考慮していない算定式(eq. 8.3)の指標の組に $L=L_{max}$ 、 $S=S_{ave}$ を当てはめたもの ($L_{max}S_{ave}^{-0.3}R_v^{-0.4}$) を X 軸にとり、それらの相関関係を示している。このときの決定係数は 0.91 となった。図において、プロットが回帰直線から離れているケースがあるが、流域出口付近で河道が大きく二股に分かれている流域は回帰直線による T_c の推定値が拡大倍率によらず過小評価になることが多い(例えば O 流域)。これは流域の違いによる河道網分布の違いが洪水伝播速度に影響しているためだと考えられる。

Fig.9.5 は Fig.9.4 と同様の条件で求めた洪水到達時間 T_c を Y 軸に、流域形状を考慮した算定式(eq. 8.4)の指標の組に $L=L_{max}$ 、 $S=S_{ave}$ を当てはめたもの $\{(L_{max}+A(2L_{max})^{-1})S_{ave}^{-0.3}R_v^{-0.4}\}$ を X 軸に取りそれぞれの相関を示した図である。Fig.9.5 は決定係数 0.93 と、流域形状(支川の長さ)を考慮していない Fig.9.4 に比べて相関が高くなった。Fig.9.6 は Fig.9.4 と同様の条件で求めた洪水到達時間 T_c を Y 軸に、流域形状を考慮した算定式(eq. 8.4)の指標の組に $L=L_{max}$ 、 $S=S_{Lmax}$ を当てはめたもの $\{(L_{max}+A(2L_{max})^{-1})S_{Lmax}^{-0.3}R_v^{-0.4}\}$ を X 軸に取りそれぞれの相関を示した図である。流域形状を考慮し、eq. 8.4 の指標の組に $S=S_{Lmax}$ とした Fig.9.6 では決定係数が 0.90 となり、 $S=S_{ave}$ としたときの決定係数よりも 0.03 小さくなった。しかし、 S_{ave} を求めるためには煩雑な手順が必要となるため、簡便な式である合理式の降雨継続時間内の降雨強度を求めるための洪水到達時間の算定式に S_{ave} を用いるのはあまり妥当ではない。よって本検討では、eq. 8.4 の算定式に $L=L_{max}$ 、 $S=S_{Lmax}$ を当てはめ、Fig.9.6 の最小二乗直線の傾きからパラメータ $M=3.8 \times 10^4$ を当てはめた、以下の式を採用する。

$$T_c = 3.8 \times 10^4 \{L_{max} + A(2L_{max})^{-1}S_{Lmax}^{-0.3}R_v^{-0.4}\}, R^2 = 0.904 \quad (\text{eq. 8.5})$$

L_{max} : 最遠点からの流路長[m] S_{Lmax} : 最遠点からの流路勾配、 R_v : 1 秒あたりの流域全体への降雨量[m³/s]

採用した式(確定式)の妥当性を評価するため、Fig.9.7 に実流域の数値モデルから選定した A,B,C,D,O 流域に対し、確定式により求めた洪水到達時間 T_c 、角屋式より求めた洪水到達時間 T_c のパラメータによる変動範囲、土研式より求めた土地利用の違いによる洪水到達時間 T_c の変動範囲を示す。確定式による T_c の計算結果は、角屋式の定数 C を変動させたときの変動範囲、また土研式により求めた洪水到達時間 T_c の変動範囲の中に収まった。よって、確定式により求められる洪水到達時間 T_c の結果が、実流域での適用の実績のある既往の算定式と比較しても妥当な値であると分かった。しかし、今後確定式を実際に使用していくためには、更に多くの検証が必要である。具体的には、河道網のパターンなどが異なる他のモデル流域においても、確定式により求めた T_c が角屋式や土研式のパラメータの変動範囲内に収まるかどうか、また実流域で観測された洪水到達時間 T_c と確定式により求められた T_c が良い適合性を示すか、検討を行っていく必要がある。

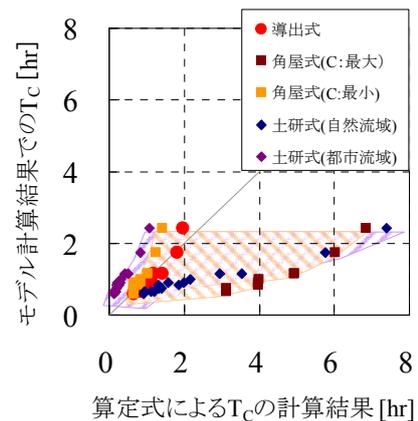


Fig.9.7 導出した算定式による洪水到達時間 T_c の計算結果と、既往の算定式によるパラメータによる最遠流路の長さ c の変動範囲の比較。対象流域は引き伸ばしなしの全ての検討対象流域、降雨強度は

10. まとめ

検討結果より、以下のことが分かった。

- モデルにおけるメッシュ間の横流入のない流路の伝播に使われる、KinematicWave 法を元にした洪水伝播速度の式から、洪水到達時間の算定式 $T_C = M(LS^{-0.3}R_v^{-0.4})$ を導くことができた。
- 導いた算定式に流域形状の指標を加え、算定式 $T_C = M\{(L + A(2L)^{-1})S^{-0.3}R_v^{-0.4}\}$ を導出することができた。またその式に $L=L_{\max}$ 、 $S=S_{L_{\max}}$ を当てはめた式 $T_C = M\{(L_{\max} + A(2L_{\max})^{-1})S_{L_{\max}}^{-0.3}R_v^{-0.4}\}$ を当てはめ、実流域モデルを引き伸ばした流域について求めた洪水到達時間 T_C との相関関係を確認したところ。決定係数 $R^2=0.92$ と、良好な相関を得ることができた。本検討では、この算定式を採用する事とした。最小二乗法によって求めた回帰直線の傾き 3.8×10^4 を算定式に当てはめ、最終的に導いた算定式は以下の通り。

$$T_C = 3.8 \times 10^4 \{(L_{\max} + A(2L_{\max})^{-1})S_{ave}^{-0.3}R_v^{-0.4}\}$$

- 最終的に導出した算定式(確定式)の妥当性を評価するため、確定式による洪水到達時間の計算結果と、既往の洪水到達時間の算定式の計算結果とを比較した。その結果、確定式により求めた洪水到達時間が、既往の算定式の当てはめるパラメータの違いによる計算結果の変動範囲内に収まっている事が確認できた。このことより、算定式の妥当性が確認できた。
- 今後、この確定式に求められる洪水到達時間と実流域で観測された洪水到達時間を比較し、確定式の実流域での信頼性を確認していく必要がある。

参考文献

- 1) 日本河川協会編：国土交通省河川砂防基準 同解説・計画編，山海堂，2005
- 2) 角屋睦，福島晟：中小河川の洪水到達時間，京都大学 防災研究所年報，第 19 号 B-2，pp.1-10，1976.
- 3) 土木学会水理委員会：水理公式集，土木学会，1985
- 4) 陸旻皎：分布型水文情報に対応する流出モデルの開発，長岡技術科学大学博士論文，1991
- 5) 陸旻皎、小池俊雄、早川典生：分布型水文情報に対応する流出モデルの開発、土木学会論文集 第 411 号 135-142p、1989