

遺伝的アルゴリズムを用いた 都市中小河川の水位予測

PREDICTION OF WATER LEVEL IN SMALL URBAN RIVERS USING GENETIC ALGORITHM APPROACH

高崎 忠勝¹・土屋 十圀²・増田 信也³

¹正会員 東京都土木技術研究所 技術部 (〒136-0075 東京都江東区新砂一丁目 9-15)

²正会員 工博 前橋工科大学教授 工学部建設工学科 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1)

³東京都土木技術研究所 技術部 (〒136-0075 東京都江東区新砂一丁目 9-15)

River water level of prediction Real-time plays a very important part due to making early warning about a flooding that should be decrease a flooding disaster in small river basins within the Tokyo metropolis. It is a subject that security of urban river is to estimate an early warning about the flooding on real time, that because of a run-off phenomenon is a very short time in urban river basin.

River water level is predicted due to forecast a rainfall by using distributed rainfall-runoff model by inputting. The parameter recently could get from the data of 5 floods, an error less than 0.3m on water level is reproduced to accurate rainfall using by Genetic Algorithms, that have the ability to be excellent in untying an optimization problem are used to decide parameters of the model.

Key Words : urban basin, genetic algorithm, distributed rainfall-runoff model

1. はじめに

東京都内の中小河川流域は資産の集中に加えて地下空間の高度利用が行われており、浸水時の被害は大きなものと予想されている。早期の水防活動や避難活動を期待できる洪水予報は浸水被害の低減に有用であり、平成 13 年の水防法改正により都道府県が管理する河川においても洪水予報河川の指定が可能となった。都市中小河川の洪水流出現象については、和泉ら¹⁾は下水道整備率と不浸透域面積率を用いて都市化と洪水流出の関係について表している。谷岡ら²⁾は小流域分割をおこなう洪水流出解析モデルを用いて都市中小河川の流出現象を良好に再現している。しかし、洪水流出解析に際しては、下水道整備状況や土地利用状況等の流域情報が必要であり多くの河川を管理する都道府県にとって開発等に伴う流域状況変化を把握し続けることは困難である。

本報は水位予測の継続実施に向けて、人工知能の一種である遺伝的アルゴリズムを使用することで、流域流出

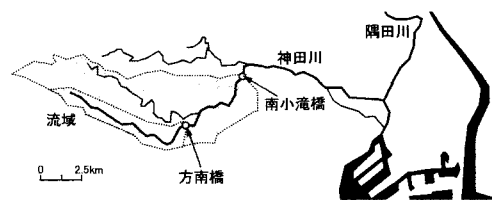


図-1 対象河川

特性変化の自動更新を可能とする、より簡便な水位予測手法を提案するものである。本手法による予測計算結果を示すとともに降水量予測精度が水位予測精度に及ぼす影響について流出特性と降雨特性をもとに考察した。

2. 流出計算

(1) 対象河川の概況

水位予測の対象としたのは、図-1 に示した神田川の 2 地点である。神田川流域は都市化が進行し下水道整備率 100%であることから、流出特性は下水道の影響を大き

く受けたものとなっている。¹⁾

水位予測地点は、神田川上流域に位置し 10.2km² の流域面積を有する方南橋、妙正寺川合流地点の上流に位置し 47.7km² の流域面積を有する南小滝橋の 2 地点である。

(2) 流出モデル

都市中小河川流域においてみられる狭い範囲の降雨と洪水流出の線形的な関係²⁾を考慮し、以下の分布型流出モデルを用いた。

流域が m 個からなる地表面で構成されるとき、面積 ΔA を有する地表面 i において時刻 t に降水量 $Ri(t)$ を生じた時、地表面 i が有する到達時間 Ti 経過後の時刻 $t + Ti$ に、水量 $Ri(t) \cdot \Delta A$ が流域最下流地点に到達する。

時刻 t における流域最下流地点の洪水流出量 $Q(t)$ は地表面 i に時刻 $t - Ti$ に生じた降水量 $Ri(t - Ti)$ を流域面積で積分したものとなり、式(1)で示される。

$$Q(t) = \sum_{i=1}^m Ri(t - Ti) \cdot \Delta A \quad (1)$$

$Q(t)$: 時刻 t における流域最下流地点の洪水流出量

m : 流域を構成する地表面数

$Ri(t)$: 流域を構成する i 番目の地表面における時刻 t の降水量

Ti : 流域を構成する i 番目の地表面に降った雨が流域最下流地点に到達するのに要する時間 (到達時間)

ΔA : 流域を構成する地表面が有する面積

時刻 t における洪水流出量 $q(t)$ は、河川水位 $H(t)$ に対する河川流量から基底流量 $qo(t)$ を引いたものであり式(2)で示される。

$$q(t) = a \cdot (H(t) - b)^2 - qo(t) \quad (2)$$

$q(t)$: 時刻 t における水位観測地点の洪水流出量

$qo(t)$: 時刻 t における基底流量

$H(t)$: 時刻 t における水位観測地点の水位

a, b : 水位流量曲線の係数

計算においてはメッシュ n 個からなる流域を構成しメッシュ i における時刻 t の降水量 $Ri(t)$ とメッシュ毎に到達時間 Ti と到達時間 Ti を代表する比率である到達時間係数 Ki を用いた式(3)により、流域の地表面 m 個からなる到達時間 Tk の組み合わせを近似した。

$$Q(t) = \sum_{i=1}^n Ki \cdot Ri(t - Ti) \cdot Ai \quad (3)$$

$Q(t)$: 時刻 t における流域最下流地点の洪水流出量

n : 流域を構成するメッシュ数

$Ri(t)$: 流域を構成する i 番目のメッシュにおける時刻 t の降水量

Ti : 流域を構成する i 番目のメッシュに降った雨が流域最下流地点に到達するのに要する時間 (到達時間)

Ki : 到達時間 Ti が代表する比率 (到達時間係数)

Ai : 流域を構成するメッシュが有する面積

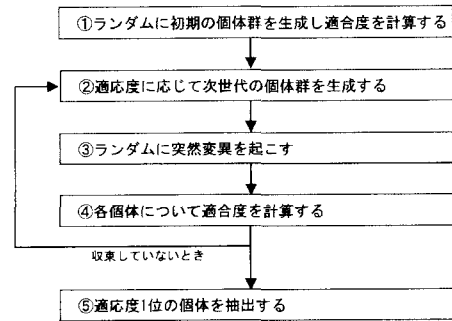


図-2 GAの流れ

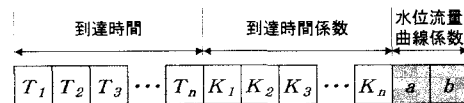


図-3 個体の遺伝子構造

降水量から計算した洪水流出量 $Q(t)$ と水位から計算した洪水流出量 $q(t)$ を等しいとした時、時刻 t における水位 $h(t)$ は式(4)で求められる。

$$h(t) = \sqrt{\frac{Q(t) + qo(t)}{a}} + b \quad (4)$$

$h(t)$: 時刻 t における水位観測地点の計算水位

$Q(t)$: 時刻 t における計算洪水流出量

$qo(t)$: 時刻 t における基底流量

a, b : 水位流量曲線の係数

(3) 遺伝的アルゴリズムによる流出特性解析

遺伝的アルゴリズム (以下GA) は、生物進化をモデル化したものである。自然界における生物進化は、ある世代を形成する個体の集合から環境への適応度が高い個体が高い確率で選択され、交叉や突然変異によって次の世代の個体群が形成されていくが、GAは個別の解をあらゆる遺伝子を有した個体の集合体を遺伝的に変化させることによって、より適した解を求めていく手法であり最適化問題の解を短時間で求める特徴^{3), 4)}を有する。

洪水流出期間の各時刻において降水量から計算した洪水流出量と水位から計算した洪水流出量が等しくなる時のパラメータ値の組み合わせをGAにより求める。求めるパラメータ値は、到達時間 Ti 、到達時間係数 Ki 、水位流量曲線係数 a 、 b であり、流域を n 個のメッシュで構成する時、パラメータ数は $2 \times n + 2$ 個となる。

図-2 にGAによる流出特性パラメータ値の決定作業の流れを示した。初期個体群として図-3 の遺伝子情報を持つ個体を乱数により 100 個生成させた。

プログラムにおいて、到達時間遺伝子 Ti は 0~144 の整数型変数、到達時間係数遺伝子 Ki は 0~1 の浮動小数点型変数、水位流量曲線係数 a は 0~10 の浮動小数点型変数、水位流量曲線係数 b は -2~2 の浮動小数点

型変数として処理した。

個体の適応度は、式(5)～(7)と図-4 に示したように各個体の遺伝子が有するパラメータによる計算水位と観測水位の差をもとに評価した。

$$f_g = \sum_{t=t_1}^{t_2} k_1 \cdot k_2 \cdot (H(t) - h(t))^2 \quad (5)$$

$$k_1 = \frac{H(t) - H_{min}}{H_{max} - H_{min}} + 1 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} k_2 &= 1 \quad (H(t) < h(t) \text{ のとき}) \\ k_2 &= 2 \quad (H(t) > h(t) \text{ のとき}) \end{aligned} \quad (7)$$

- f_g : 個体 g の適応度
- $H(t)$: 時刻 t における水位観測地点の水位
- $h(t)$: 時刻 t における水位観測地点の計算水位
- t_1 : 洪水流出開始時刻
- t_2 : 洪水流出終了時刻
- H_{max} : 洪水流出期間中の観測最高水位
- H_{min} : 洪水流出期間中の観測最低水位

係数 k_1 は高水位の再現精度向上を目的としており、係数 k_2 は流域平均降水量を入力した計算水位が場所毎に異なる降水量を入力した計算水位より低く計算される傾向がみられたことから、降雨予測時の空間解像度の低下に対応する目的で導入した。

個体数は世代交代による変化はないものとし、図-5 に示したように、次世代 p 位の個体を遺伝子毎に評価 1 ～ p 位の個体から選択・交叉することで生成した。交叉はパラメータとパラメータの切れ目で起こしており、交叉によって遺伝子が有するパラメータの値は変化しない。

局所解への収束防止と、収束を早くおこなう目的で突然変異率は個体の評価順位によって変化させた。突然変異率の初期値は 0.01～1% であるが収束が進行しないときには突然変異率を最大で 0.5～50% まで変化させ、収束がみられたときには突然変異率を初期値に戻した。また、100 世代毎に評価 1 位個体のみを対象に到達時間遺伝子を 1、他の遺伝子については約 10% の範囲で遺伝子情報を変化させた。

(4) 流出モデルの再現精度

表-1 に示した平成 11 年～14 年に神田川流域に浸水被害を及ぼした 10 洪水^{5),6),7)}により検証計算 1～3 をおこない、モデルの適用性を検証した。検証計算は検証洪水前の 5 洪水を用いた流出特性解析によりパラメータ値を求め、得られたパラメータ値に検証洪水時の観測降水量を用いて水位変化を計算した。検証洪水は洪水 6、洪水 8、洪水 10 の 3 洪水とした。

流出特性解析及び水位計算は空間単位を 500m メッシュ、時間単位を 10 分とした。10 分間降水量の空間分布は、地上雨量計による観測値をもとにメッシュ毎に距離の 2 乗の反比例で重み付けによる補間計算をおこなった。

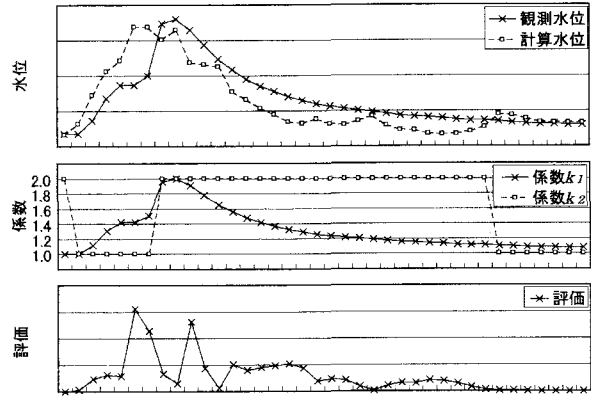


図-4 個体の評価

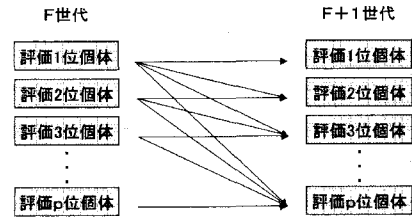


図-5 選択・交叉

表-1 検証計算で用いた洪水

洪水	年	月	日	検証計算 1	検証計算 2	検証計算 3
洪水 1	1999	7	21	流出特性解析 (パラメータ算 定)	流出特性解析 (パラメータ算 定)	流出特性解析 (パラメータ算 定)
洪水 2	1999	8	13			
洪水 3	1999	8	24			
洪水 4	1999	10	27	水位予測計算	水位予測計算	水位予測計算
洪水 5	2000	7	4			
洪水 6	2000	8	5			
洪水 7	2000	8	7	水位予測計算	水位予測計算	水位予測計算
洪水 8	2001	7	18			
洪水 9	2001	7	25			
洪水 10	2002	8	2			

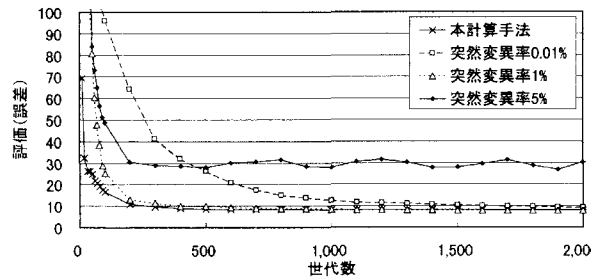


図-6 GAの収束状況(南小滝橋・検証計算3)

流域を構成するメッシュ数は方南橋 39、南小滝橋 195 であり、求めるパラメータ数は方南橋 80、南小滝橋 392 である。

OS : WindowsXP、CPU : Celeron1GHz、メモリー : 256MB の環境下で検証計算 3 の流出特性解析に要した時間は、方南橋が 1000 世代あたり 19 分、南小滝橋が 1000 世代あたり 83 分であった。

図-6 に南小滝橋における検証計算 3 の流出特性解析時の GA 収束状況を 2000 世代まで示した。突然変異率が収束解に及ぼす影響を把握するため、本計算手法の他

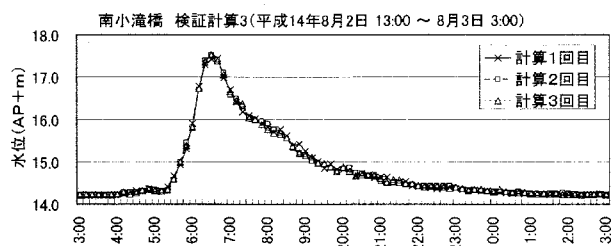


図-7 検証計算3 (南小滝橋)

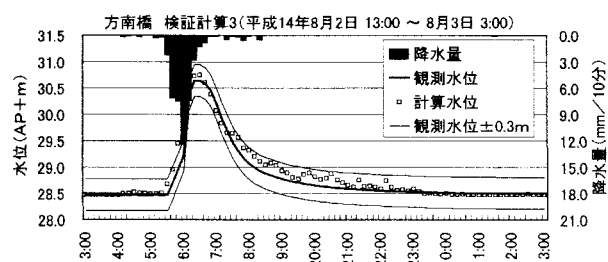
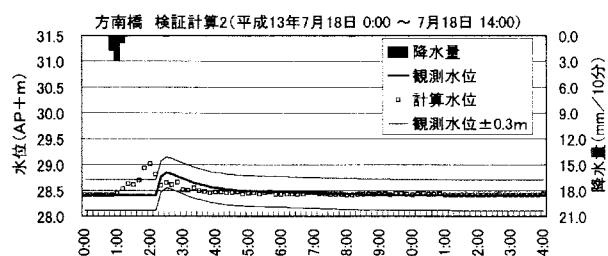
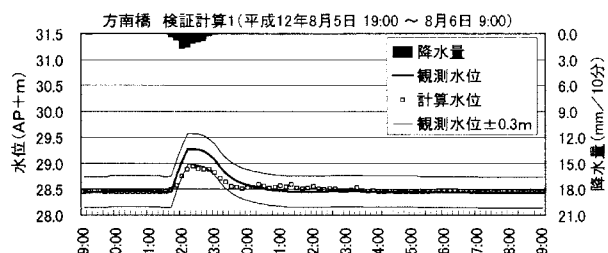


図-8 検証計算結果 (方南橋)

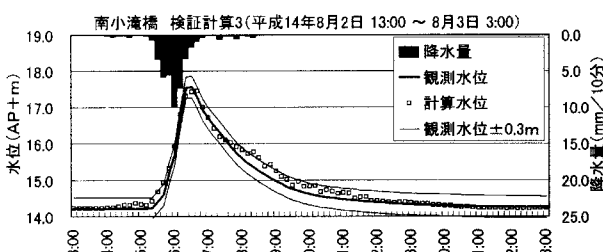
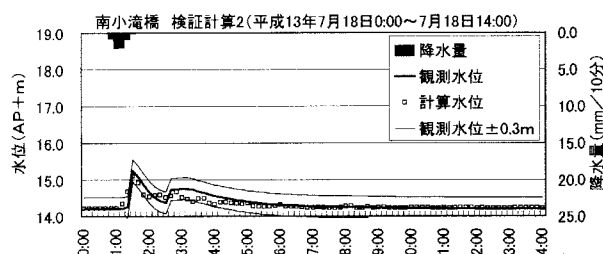
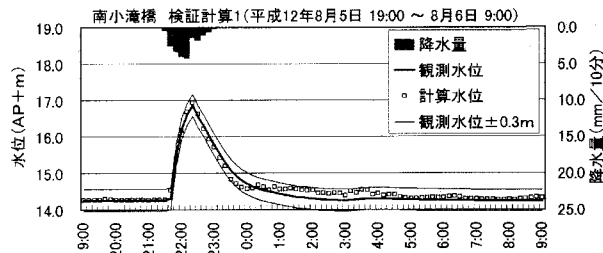


図-9 検証計算結果 (南小滝橋)

洪水A			
洪水B			
洪水C	流出特性解析 (パラメータ算定)	流出特性解析 (パラメータ算定)	流出特性解析 (パラメータ算定)
洪水D			
洪水E			
洪水F	水位予測計算	水位予測計算	水位予測計算
洪水G			
洪水H			
洪水I			

図-10 流出特性の自動更新

に突然変異率 0.01%、1%、5%のケースを計算し、収束状況を比較した。突然変異率 0.01%は収束の進行が遅く 2000 世代の近似解精度は本計算手法と突然変異率 1%より低い。突然変異率 1%は 1200 世代以降の近似解精度が他のケースより高い。突然変異率 5%は 500 世代で収束がとまり近似解精度が他のケースより低い。個体の評価順位によって突然変異率を変化させる本計算手法は初期の収束が速く進行し、近似解精度は 1200 世代までは他のケースより高く、2000 世代において突然変異率 1%よりわずかに低い。この収束特性は、短時間で近似解が得られるとともに時間をかけることで精度の向上を図れる点で、流出特性解析にとって好ましい特性である。突然変異率の設定が収束速度と近似解精度に大きな影響を及ぼすことを確認した。

収束状況と計算時間から 1000 世代までの計算が実用的であると判断し、本報による水位計算は全て 1000 世代時のパラメータ値を用いた。

図-7に南小滝橋の検証計算3について、3回の計算をおこなった結果を示した。3回の計算結果に大きな差がみられなかったことから、初期個体群の違いが近似解精度に及ぼす影響は小さいことを確認した。

図-8に方南橋における検証計算結果、図-9に南小滝橋における検証計算結果を示した。方南橋では観測水位 A.P. +30.0m以上のとき、同時刻の観測水位と計算水位の差は、平均 0.01m、標準偏差 0.09mであった。また、観測水位と計算水位のピーク水位の差は検証計算 1~3の順に 0.33m、-0.17m、-0.11mであった。南小滝橋では観測水位 A.P. +16.0m以上のとき、同時刻の観測水位と計算水位の差は、平均 0.02m、標準偏差 0.11mであった。また、観測水位と計算水位のピーク水位の差は検証計算 1~3の順に-0.07m、0.15m、0.13mであった。流出モデルの水位再現精度は水位上昇が大きくなると向上し、洪水流出による水位上昇が 1.5m以上の水位を 30cm以下の誤差で再現した。流域面積約 10km²の方南橋

と流域面積約 50km²の南小滝橋の 2 地点における洪水時水位を再現できたことから、洪水流出を下水道に支配される流域においては、本流出モデルが適用できると判断される。

図-10 に示したように、流出モデルのパラメータ値を固定せず、予測計算直前の洪水データを用いた流出特性解析により、パラメータ値は流出特性変化に応じて自動的に更新される。⁸⁾パラメータ値を求める流出特性解析には数十分間を要するが洪水前に計算することが可能であり、水位計算は降水量入力後、瞬時に終了する。

3. 平成 16 年洪水の水位予測

気象庁では気象レーダーで観測した雨の分布とアメダス観測値をもとに 1～6 時間先まで 1 時間間隔の降水量予想分布図を 30 分毎に発表している。降水量予想分布図は 5km×5km の空間解像度を有する。

気象庁がホームページで公表している降水量予想分布図と地上雨量計による観測データを用いて 3 時間先までの予測降水量データを作成し、検証計算で求めたパラメータ値による水位計算をおこなった。0～30 分後の降水量は計算時の観測降水量、30～90 分後の降水量は 1 時間後予想分布図、90～150 分後の降水量は 2 時間後予想分布図、150～180 分後の降水量は 3 時間後予想分布図によるものとした。

(1) 平成 16 年台風 2 号時の水位予測

平成 16 年台風 2 号時に 1m 以上の水位上昇を確認した南小滝橋を対象に予測降水量を用いた水位予測計算をおこなった。

水位予測計算は 3 時間先までの水位を対象とし、水位上昇直前から 1 時間毎に計算をおこなった。計算結果を図-11 に示した。増水直前時点から洪水終了時点まで 1 m 以下の誤差で、3 時間先までの水位を計算した。

(2) 平成 16 年 9 月 4 日集中豪雨時の水位予測

平成 16 年 9 月 4 日集中豪雨時に 1m 以上の水位上昇を確認した南小滝橋を対象に予測降水量を用いた水位予測計算をおこなった。

降雨開始直前から 30 分毎に計算をおこなった結果を図-12 に示した。強降雨の発生を 30 分前でも予測することができず、予測水位が観測水位に近づくのは強降雨観測後となっている。水位上昇直前から水位上昇時 10 分毎に計算した結果を図-13 に示す。最大水位は 19 時 3 分に A.P. +16.97m を観測している。最大水位を 1m 以下の誤差で計算できたのは最大水位発生約 40 分前の 18 時 20 分時点の計算である。また、最大水位発生時刻の水位を 1m 以下の誤差で計算できたのは、18 時 30 分時点の計算であり最大水位発生の約 30 分前であった。

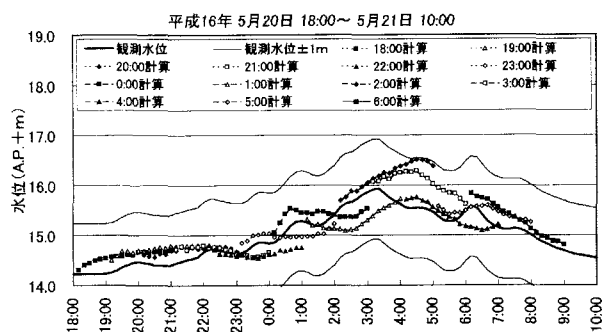


図-11 南小滝橋予測水位（平成 16 年台風 2 号）

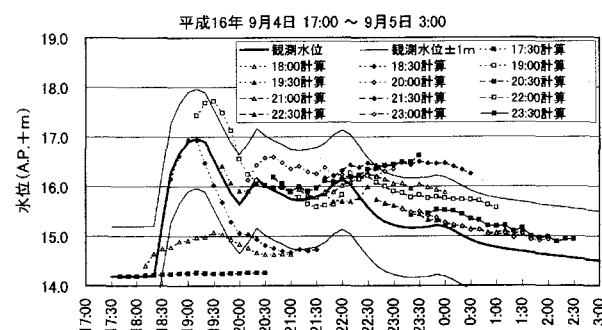


図-12 南小滝橋予測水位 1（平成 16 年 9 月 4 日集中豪雨）

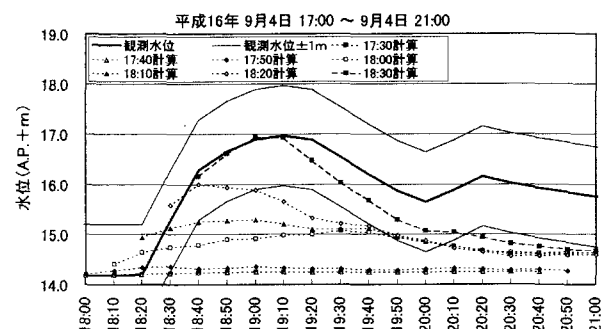


図-13 南小滝橋予測水位 2（平成 16 年 9 月 4 日集中豪雨）

(3) 流出量と予測降水量

水位予測計算精度における予測降水量について流域の流出特性から考察する。

式(8)(9)により示される到達率は、降った雨が流域下流地点に到達する地表面積に対する設定時間内の到達時間を有する地表面積の割合を表す。

$$K(T) = \frac{\sum_{i=1}^n K_i'(T)}{\sum_{i=1}^n K_i} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} K_i'(T) &= K_i \quad (T_i \leq T \text{ のとき}) \\ K_i'(T) &= 0 \quad (T_i > T \text{ のとき}) \end{aligned} \quad (9)$$

$K(T)$: 到達時間 T における到達率

T : 到達時間

T_i : 流域を構成する i 番目のメッシュに降った雨が流域最下流地点に到達するのに要する時間 (到達時間)

K_i : 到達時間 T_i が代表する比率 (到達時間係数)

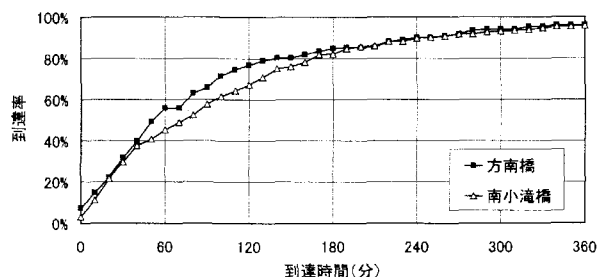


図-14 到達時間と到達率の関係

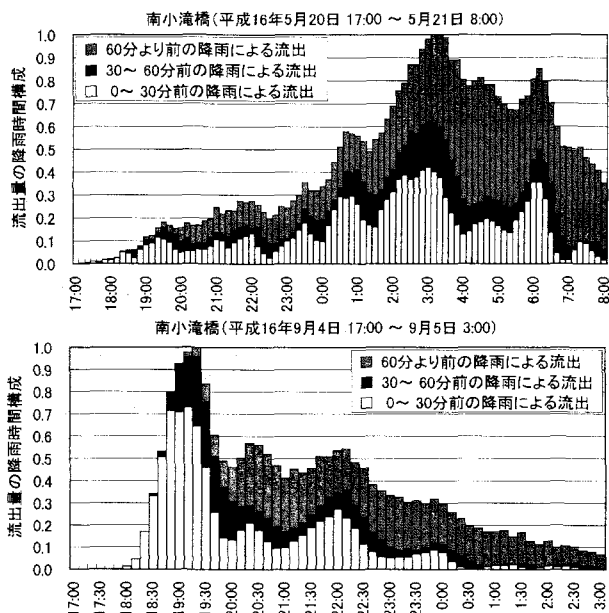


図-15 流出量における降雨時間構成

図-14 に検証計算 3 による到達時間と到達率の関係を示す。到達時間 180 分における到達率 82%は、降った雨が流域下流地点に到達する地表面積の 82%が 180 分以内の到達時間を有していることを示す。流域降水量の降雨強度が時間変化しない場合、南小滝橋の洪水流出量は、到達時間と到達率の関係から 60 分以内の降雨による流出が 45%、60 分から 120 分前の降雨による流出が 22%、120 分から 180 分前の降雨による流出が 15%、180 分より前の降雨による流出が 18%となる。

検証計算で求めたパラメータ値と観測降水量から計算した流出量の降雨時間構成を図-15 に示した。構成比は各洪水における最大流出量を 1 としている。台風 2 号、9 月 4 日集中豪雨ともに、最大流量付近の流出量に占める短時間降雨の割合が大きくなっている。台風 2 号では流出量に占める 60 分以内降雨の割合は最大 62%であり、9 月 4 日集中豪雨では 60 分以内降雨の割合は最大 95%、30 分以内降雨の割合は最大 73%であった。

台風時においては降雨の時空間分布の変化が小さく、洪水流出量は到達時間と到達率の関係に支配される。集中豪雨においては降雨の時空間分布の変化が大きく、洪水流出量は強雨をもたらす 30 分程度の降水量に支配さ

れる。以上のことから集中豪雨時の水位予測精度を向上させるためには 30 分程度の降水量を正確に予測する必要がある。

5. まとめ

都市中小河川である神田川をモデルケースとして、分布型流出モデルによる流出特性の解析と気象庁による降水量予想分布図を用いた水位予測計算によって得られた結果は以下のとおりである。

時間分解能 10 分間、空間分解能 500mメッシュの流出特性解析によって求められたパラメータ値は、観測降水量の入力により洪水時水位を 30cm 以下の誤差で計算できた。

気象庁による降水量予想分布図を降水量予測に用いた水位予測計算では、平成 16 年台風 2 号時の水位変化を 3 時間先の水位まで 100cm 以下の誤差で計算した。また、平成 16 年 9 月 4 日集中豪雨時の最大水位発生時の水位を最大水位発生の 30 分前に 100cm 以下の誤差で計算した。平成 16 年 9 月 4 日集中豪雨時の南小滝橋における最大流量の約 7 割は 30 分以内の降雨の流出によるものであった。このことから、集中豪雨時の水位予測精度は 30 分程度の降水量の予測精度に支配される。

継続的に観測している降水量と水位のデータを用いて GAによって分布型流出モデルのパラメータを最適化する本手法は、流出特性変化を自動的に更新できること、計算に特別な知識を要しないこと、実用的な計算時間で洪水時水位を再現できることから、水位予測における実用性という点で優れた手法であると考えている。

参考文献

- 1) 和泉清, 吉川秀夫: 下水道整備が洪水流出現象に及ぼす影響, 土木学会論文集 No. 399/II-10, 113-120, 1988.
- 2) 谷岡康, 福岡捷二, 谷口将俊, 小山幸也: 都市中小河川の洪水流出特性, 土木学会論文集 No. 586/II-42, 1-12, 1998.
- 3) 佐藤眞木彦, 松本俊二, 寺本陽彦, 安達統衛: Genetic Algorithms による航空乗務ペアリング, 人工知能学会論文誌, 16 卷 3 号 C, 324-332, 2001.
- 4) 藤野和徳: 遺伝的アルゴリズムによるごみ収集輸送計画, 土木学会論文集, No. 558/II-38, 139-146, 1997.
- 5) 東京都建設局河川部: 平成 11・12 年における水害記録, 2002.
- 6) 東京都建設局河川部: 平成 13 年における水害記録, 2003.
- 7) 東京都建設局河川部: 平成 14 年における水害記録, 2004.
- 8) 阿部清明, 菊池英明, 古川浩平, 塩月善晴: ニューラルネットワークによる流出解析手法 (日流量) に関する研究, 土木学会論文集, No. 656/II-52, 1-13, 2000.

(2004.9.30 受付)