

# 下水道による水輸送過程を考慮した WEPモデルの都市流域への適用

## APPLICATION OF WEPMODEL TO URBAN RIVER BASIN CONSIDERING SEWAGE SYSTEM PROCESS

宮本守<sup>1</sup>・木内豪<sup>2</sup>

Mamoru MIYAMOTO and Tsuyoshi KINOCHI

<sup>1</sup>正会員 工修 福島大学 共生システム理工学類 JST/CREST (〒960-1296 福島市金谷川1番地)

<sup>2</sup>正会員 工博 福島大学 共生システム理工学類 (〒960-1296 福島市金谷川1番地)

The hydrological circulation process is changing due to urbanization. The clarification of runoff characteristics in urban river basin is vital to the sound development of city. In this paper, WEP model was upgraded to simulate the sewage system process. This model treats sewage system process as the overland flow. It is main feature of this model. Next, this model was applied to Kanda River basin. The inflow to sewage-treatment plant and stream flow was calculated. The result of the simulation was examined by observed value. In the result, it was found that the technique of this model is available.

**Key Words :** WEP model, sewage system, drainage line, stream flow, runoff process, urban basin

### 1. はじめに

河川流域の都市化に伴い、流域における水循環過程は大きく変化している。特に東京のような大都市を流れる河川流域では、地表面の改変により流出現象は短時間化し流出量は増加している。高崎<sup>1)</sup>は都市中小河川上流域の浸水被害軽減には流域面積スケールに応じた計画雨量の設定が必要だと述べている。谷岡<sup>2)</sup>は都市中小河川の降雨・流出特性の実態から治水計画の問題点を明らかにし、今後の課題を明確にしている。下水道整備をはじめとする人工系の水輸送過程は水循環に対して量的にも質的にも大きな影響を及ぼしている。檜物<sup>3)</sup>は下水道管路への雨水浸入水の実態と対策を示している。このような都市流域が持つ水循環特性の把握や将来予測は都市型水害の被害軽減及び防止に加え、都市の健全な発展のために不可欠である。そこで著者らは、都市において人為的な要素を含み複雑化した人工系の水輸送過程をできるだけ簡略化した形で且つ高精度で再現し、将来予測を可能とするモデルの構築を試みた。

本研究では、複雑な土地利用形態を有する都市河川流域の水・熱循環系を対象として賈<sup>4,5)</sup>によって開発さ

れた分布型水・熱循環モデルであるWEPモデルに、下水道システムによる雨水と汚水の流れの追跡モデルを新たに組み込んだ。本モデルの特徴は、下水道管路網の流れを管路流として直接解くのではなく、下水道処理区内のDEMにより作成した落水線網を用いて表面流のように取り扱う点である。この手法により計算された下水処理場への流入量及び河川流量を実測値と比較検証することで、人工系の水輸送過程を数値モデルで表現するために必要な要素を明らかにした。

### 2. WEPモデルの概要

WEP(Water and Energy transfer Process)モデルは賈らによって開発された水・熱輸送統合解析モデルである。流域を水平方向に単位メッシュサイズに分割し、鉛直方向には表層土壌と地下水帯水層に分割して解析する分布型物理モデルである。WEPモデルが対象としている水・熱輸送過程を図-1に示す。図-1に示した輸送過程は1つのメッシュ内で考慮されている。また、WEPモデルの構造に関しては、本論文では水循環に関する基本的な内容を述べる。

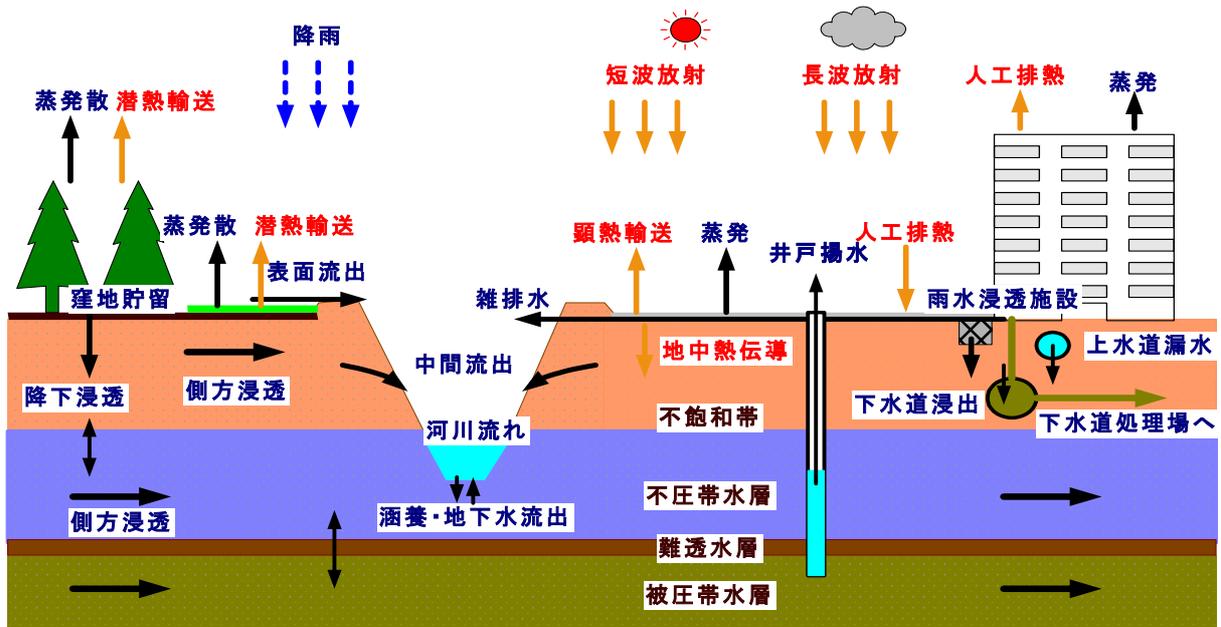


図-1 WEPモデルの鉛直構造

### (1) 蒸発散

メッシュ内の蒸発散は、植生キャノピーの濡れた葉面（降雨遮断）、水域、土壌、都市地表面、都市キャノピー等からの蒸発及び植生キャノピーの乾いた葉面からの蒸散からなる。蒸発は、Penman法で計算され、蒸散はPenman-Monteith法で計算された。メッシュ平均の蒸発散は土地利用ごとに算出される蒸発散にその面積占有率を乗じることによって算出した。

### (2) 浸透

土壌の浸透能力は土壌の透水性、水分量、吸引圧に左右される。降雨強度が土壌の飽和透水係数より大きい場合には多層土壌の浸透に適用できるGreen-Ampモデルを適用した。その他の場合には不飽和層を3層に分けてDarcy則と連続式を用いて浸透の計算を行った。

### (3) 地下水流れと地下水流出

飽和地下水流れは不圧、被圧地下水に分け、準一様流の仮定を用いて定式化した。被圧帯水層は流域の地質条件に応じて多層に分けた。各帯水層においては、上方からの涵養量、下方への浸透量、井戸の揚水量の影響を考慮した。また、河川の存在するメッシュにおける不圧帯水層の流れの解析では、河川と地下水との間の水分移動である地下水流出（RG）を考慮した。被圧帯水層が2層の場合には、基礎方程式は次のように表される。

不圧帯水層

$$C_u \frac{\partial h_u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [k(h_u - z_u) \frac{\partial h_u}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [k(h_u - z_u) \frac{\partial h_u}{\partial y}] \quad (1)$$

$$+ (Q_3 + WUL - RG - E - Per - GWP)$$

被圧帯水層 1

$$C_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_1 D_1 \frac{\partial h_1}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_1 D_1 \frac{\partial h_1}{\partial y}) + (Per - RG_1 - Per_1 - GWP_1) \quad (2)$$

被圧帯水層 2

$$C_2 \frac{\partial h_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_2 D_2 \frac{\partial h_2}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_2 D_2 \frac{\partial h_2}{\partial y}) + (Per_1 - Per_2 - GWP_2) \quad (3)$$

ここに、 $h$ ：地下水位（不圧帯水層）あるいは水頭（被圧帯水層）、 $C$ ：貯留係数（不圧帯水層の場合は不飽和層の土壌水分量に左右される）、 $k$ ：透水係数、 $z$ ：帯水層底部の標高、 $D$ ：帯水層の厚さ、 $Q_3$ ：不飽和透水層からの涵養、 $WUL$ ：上水道漏水、 $RG$ ：地下水流出、 $E$ ：蒸発散、 $Per$ ：下部帯水層への涵養、 $GWP$ ：地下水揚水である。なお、下付き添字  $u$ , 1, 2 はそれぞれ不圧帯水層、被圧第1帯水層、被圧第2帯水層を示している。

### (4) 表面流及び河道内の流れ

表面流及び河道内の流れは、Manningの平均流速式を用いたkinematic wave式により追跡計算した。

$$\text{連続式} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (4)$$

$$\text{運動量方程式} \quad Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S_0^{1/2} \quad (5)$$

ここに、 $A$ ：断面積(m<sup>2</sup>)、 $Q$ ：流量(m<sup>3</sup>/s)、 $q_L$ ：単位長さ当りの横流入量(m<sup>2</sup>/s)、 $n$ ：Manningの粗度係数、 $R$ ：径深(m)、 $S_0$ ：河床勾配である。



図-2 対象流域と落水処理区

### 3. 対象流域

本研究では東京を流れる神田川を対象とした。対象流域は神田川と日本橋川との分流地点より上流域の76.1km<sup>2</sup>とした。対象流域と下水道の落水処理区、河川流量比較地点、雨量観測所地点を図-2に示す。対象流域内には神田川、善福寺川、妙正寺川、江古田川の4河川が流れている。河川流量比較地点では東京都の水位観測所データとHQ式を用いて算出した値を実測流量とした。入力データである降雨量はティーセン分割した際に計算領域内に面積を持つ東京都雨量観測所のうち欠測が多い地点を除いた33観測所の雨量データを用いた。

対象流域は落水処理区、新河岸処理区、三河島処理区、芝浦処理区に分割される。このうち神田川に放流している処理場は落水のみであり、他の処理場では新河岸川及び隅田川、海域に放流している。したがって、これらの処理区の汚水は本解析の対象流域外へと流れることになる。なお、対象流域内には落水と中野の2つの下水処理場があるが、処理区としてはまとめて落水処理区としているため本解析では落水処理区のみを考慮した。

### 4. 下水道による水輸送過程の導入

本研究では下水道システムによる雨水と汚水の水輸送過程の追跡計算モデルを新たにWEPモデルに導入した。本モデルでは、雨水が下水管に流入するまでの過程と下水道システム内の水の流れの両方を下水道処理区内のDEMにより作成した落水線網を用いて表面流として追跡計算を行った。つまり、下水道内の水の流れを管路流として直接解くのではなく、地表面流と同じように落水線により計算した。落水処理区におけるDEMにより作成した落水線網と下水道管路幹線を図-3に示す。濃紺で示した線は累積メッシュ数100以上であり、水色で示した線は累積メッシュ数20から100までの範囲である。落水線網と下水道幹線は近い経路であることがわかる。



図-3 落水処理区における落水線網と下水道幹線

#### (1) 汚水量の算出

生活排水量は1人当りの1日の水使用量を原単位として各メッシュの人口データに乘じ、さらにWEPモデルの日変動パターンを与えて算出した。原単位は2004年

の晴天時における下水処理場の日流入量の平均値を処理区内人口で割ることにより算出した。2004年の落水処理区の前単位は0.419(m<sup>3</sup>/日/人)であった。

#### (2) 雨水の取り扱い

東京都区部における現行の下水道システムでは、降雨時に下水処理場の高級処理能力の3倍の流量を超える水量は、直接河川へと放流される。放流のための雨水吐口は神田川に156箇所、神田川分水路に2箇所、善福寺川に69箇所、妙正寺川に74箇所設置されており、各々の閾値により河川へ放流されている。

本モデルでは、雨水吐口メッシュにおける放流の有無

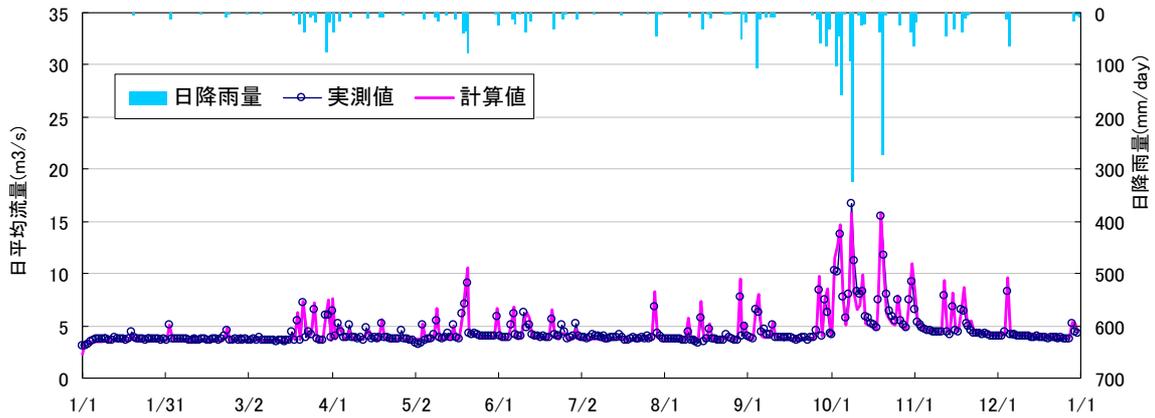


図-4 落合処理場への流入量の実測値と計算値の比較（日平均値）

は次式から得られる基準流量 $I$ により判断した。

$$I = \frac{3V}{a_s} \cdot a \quad (6)$$

ここに、 $I$ ：基準流量( $m^3/s$ )、 $V$ ：下水処理場の高級処理能力( $m^3/s$ )、 $a_s$ ：下水処理場における落水線の累積メッシュ数、 $a$ ：累積メッシュ数である。各雨水吐口メッシュにおいて表面流量が $I$ を超えた場合、 $I$ を上回る量だけ河川へ放流した。今回の計算では落合処理場の高級処理能力が $450,000m^3/日$ 、累積メッシュ数が $4224$ であったため次式により基準流量を決定した。

$$I = 0.001233a \quad (7)$$

雨水吐口の設定は、河道と重なっている地表面メッシュで $I$ が $0.1m^3/s$ 以上となるメッシュとした。その結果、雨水吐口は $37$ メッシュとなった。

また、雨水吐口は落合処理区以外の新河岸処理区などにも存在し、対象流域へ放流するため、雨水吐口メッシュは対象流域全体で考慮した。

## 5. 計算緒元

本解析では2004年1月1日から12月31日までの1年間を対象期間とした。メッシュサイズは $100m$ とし、東西方向に $226$ 、南北方向に $91$ の $20566$ メッシュを計算領域とした。降雨データは前述した通り $33$ 地点の東京都雨量観測データを用いた。気温、風速、日照時間はアメダスデータを与え、相対湿度は東京都環境局が管理する大気汚染常時監視測定局の観測データを与えた。

また神田川と妙正寺川の上流端では地下水をポンプにより揚水し流してため、神田川上流端に揚水量 $4100m^3/日$ 、妙正寺川上流端に $210m^3/日$ を与えた。善福寺川の上流端においても玉川上水からの水が流入しているため、 $900m^3/日$ を上流端流量として与えた。

マンシングの粗度係数は表面流として扱った下水道輸送過程では $0.015$ とし、河川では $0.02$ とした。計算間隔は $10$ 分とした。

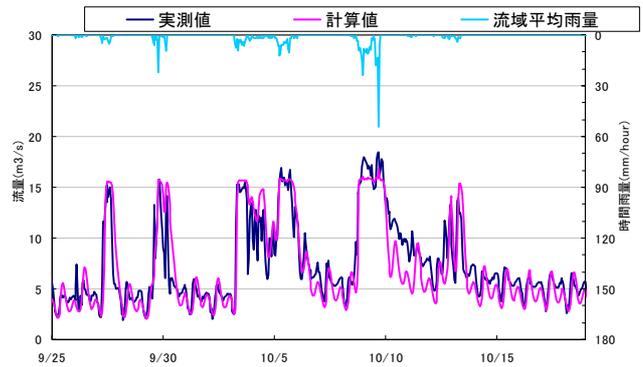


図-5 落合処理場への流入量の実測値と計算値

## 6. モデルの検証と考察

### (1) 下水処理場の流入量の再現性

落合処理場への流入量の日平均値の実測値と計算値の比較を図-4に示す。晴天時の計算結果は実測値とほぼ一致していることがわかる。雨天時の計算結果は実測値よりやや大きな値となっている。この原因としては、下水道システム内の雨水貯留浸透施設の影響が考えられる。しかしながら、計算結果全体としては、日平均値であれば本手法により高い精度で下水流入量を再現可能であることが確認できた。図-5は1時間間隔の落合処理場流入量の時系列である。計算結果は汚水の日変動パターンを再現することができている。降雨時のピーク流量は下水処理場の処理能力により制限された人為的な値であるため、よく一致した結果になった。ただし、降雨終了時の逓減部は実測値を捉えていない。これは地下水の影響や下水道システムに流入する浸出水の影響が考えられる。

### (2) 河川流量の再現性

2004年は10月9日(台風22号)と10月20日(台風23号)に

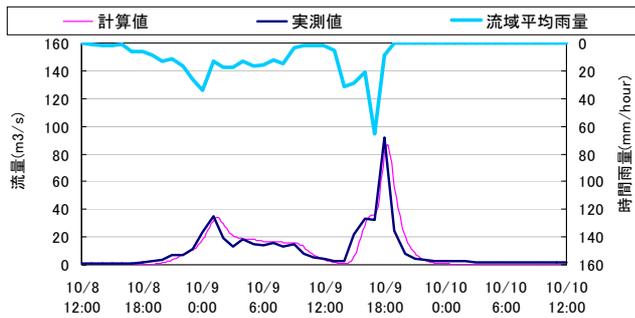


図-6 和泉における出水時の河川流量の実測値と計算値の比較

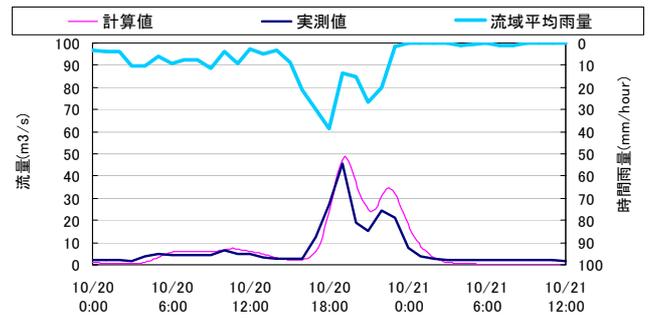


図-7 朝日橋における出水時の河川流量の実測値と計算値の比較

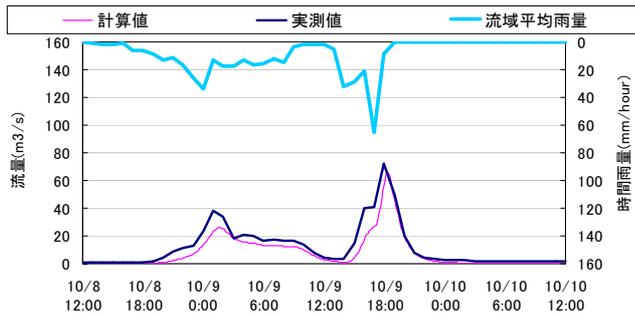
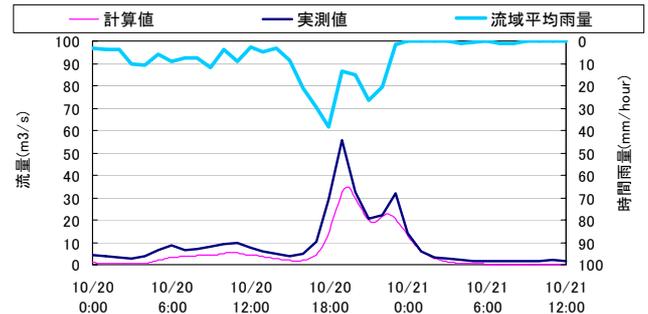


図-8 千歳橋における出水時の河川流量の実測値と計算値の比較



大きな出水が発生した。対象流域平均の総降雨量は10月9日降雨が418mm、10月20日降雨は315mmであった。この2つの降雨イベント時の和泉、朝日橋、千歳橋における河川流量の実測値と計算値の比較を図-6、図-7、図-8に示す。神田川本川である和泉ではピーク値は精度よく再現することができている。またハイドログラフの形状も概ね再現できている。一方、善福寺川の朝日橋では計算値は実測値より流量を少なく算出しておりピーク値を再現できていない。妙正寺川の千歳橋では和泉と同様にピーク値は精度よく再現できていると言える。しかしながら、3地点に共通してハイドログラフの立ち上がりと逓減部は実測値より遅れて反応している。この要因として、解析降雨が時間雨量であり、神田川流域のような降雨に敏感に反応する都市流域ではさらに細かい間隔で解析する必要がある。さらに、実際には河川周辺で降った雨は下水管を経由せず直接河川へと流入するため、直接河川へ流入する雨水も考慮していかなければ

ならない。

この2回の出水時に環七地下調節池は稼働しており雨水を流入している。本モデルではまだ環七地下調節池の効果は組み込んでいないため、環七地下調節池より下流である寿橋ではこの2つのイベントの再現性は評価が困難である。したがって寿橋では9月4日と9月29日の中規模の出水でモデルの再現性を検証した。図-9は寿橋における9月4日と9月29日降雨イベント時の河川流量の実測値と計算値の比較である。寿橋では特にハイドログラフの立ち上がり部分で遅れが目立つ。降雨イベントが異なるが、寿橋では前述の3地点よりも下流に位置しているため時間のずれが大きくなっている可能性がある。

以上より、本モデルは地下水の影響や下水道システムにおける浸出水の影響、雨水吐口数の設定や雨水貯留施設の導入といった今後の課題はあるものの、都市流域における下水道水輸送過程を落水線によりモデル化し、下水道流入量と河川流量を概ね再現可能であることがわ

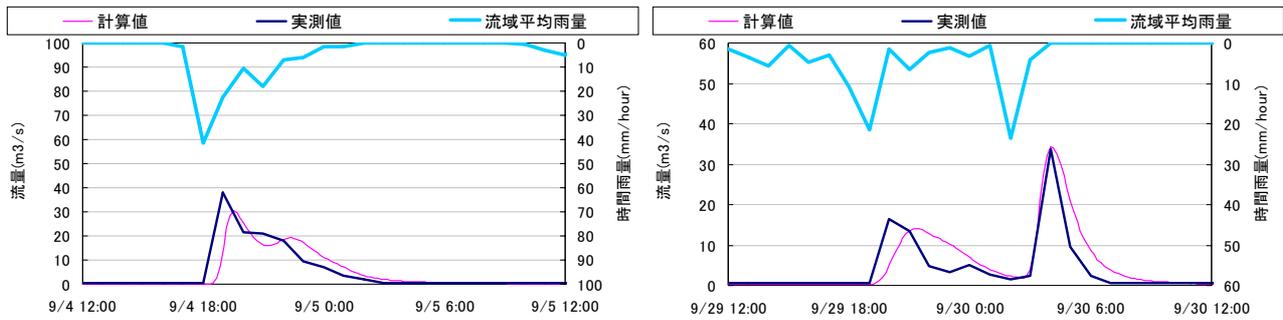


図-9 寿橋における出水時の河川流量の実測値と計算値の比較

かった。

## 7. まとめ

本研究では水・熱輸送統合モデルであるWEPモデルに下水道システムによる水輸送過程を新たに導入した。下水道システムにおける流れを落水線網により表面流として追跡計算するモデルを神田川流域に適用し得られた知見を以下に示す。

- 1) 晴天時の下水処理場の流入量は日変動を捉え、精度よく再現することができた。
- 2) 雨天時の下水処理場への流入量は日平均流量では概ね再現できていたが、時間データではピーク及び逡減部で再現できていない部分あることから、雨水貯留浸透施設や地下水及び浸出水の影響を明らかにする必要がある。
- 3) 和泉及び千歳橋における河川流量はピークを精度良く再現することができていたが、河川流量の計算結果は全体的に降雨に対する応答が遅く計算されていた。したがって、解析降雨の時間間隔や河川周辺の雨水の取り扱いを今後検討していく必要がある。

**謝辞：**本研究に用いた雨量データ及びHQ式は東京都土木技術研究所技術部河川環境グループに提供していただきました。ここに記して謝意を表します。さらに本研究

は科学技術振興機構・戦略的基礎研究推進事業（CREST）「都市生態圏－大気圏－水圏における水・エネルギー交換過程の解明」（代表：神田学東京工業大学助教授）の成果の一部です。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 高崎忠勝, 土屋十囀: 都市中小河川における集中豪雨時の洪水流出特性, 水工学論文集, 第50巻, pp343-348, 2006.
- 2) 谷岡康, 福岡捷二: 都市中小河川・下水道の連携した治水計画—台地部既成市街地を対象として—, 土木学会論文集, No. 733/II-63, pp. 21-35, 2003.
- 3) 檜物良一, 森一夫, 豊田忠宏, 井上弥九郎: 分流式下水道汚水管への雨水流入, 土木技術資料, 43-7, pp. 46-51, 2001.
- 4) Yangwen Jia, Guangheng Ni, Junichi Yoshitani, Yoshihisa Kawahara and Tsuyoshi Kinouchi: Coupling Simulation of Water and Energy Budgets and Analysis of Urban Development Impact, Journal of Hydrologic Engineering, 2002.
- 5) 末次忠司, 河原能久, 賈仰文, 倪广恒: 都市河川流域における水・熱循環の統合モデルの開発, 土木研究所資料第3713号, 2000.

(2006. 9. 30受付)