

流域スケールの水循環・熱輸送モデリング と都市河川流域への適用

HYDROLOGIC CYCLE AND HEAT TRANSPORT MODELING AND ITS APPLICATION TO AN URBANIZED WATERSHED

木内 豪¹・賈 仰文²

Tsuyoshi KINOCHI and Yangwen JIA

¹正会員 博(工) 福島大学共生システム理工学類環境システムマネジメント専攻
(〒960-1296 福島県福島市金谷川1番地)

²非会員 工学博士 中国水利水電科学研究院水資源研究所(〒100044 中国・北京 車公庄西路20号)

A physically distributed hydrological model (WEP model) was coupled with a newly developed physically distributed model of heat transport in river water to simulate watershed scale hydrological and heat transport processes and resulting effects on stream environment. The model is characterized by the capability of simulating runoff from a highly urbanized watershed with a dual drainage system of river channels and a sewer network, which enables appropriate prediction of inflows to wastewater treatment plants and river floods. Also, this model is designed to investigate factors affecting spatial and temporal variations of stream temperature by incorporating anthropogenic heat impacts and urban canopy processes. Applying the model to the Kanda River Watershed, stream flow and temperature as well as inflows to a WWTP are well simulated. The anthropogenic heat impact on stream temperature was also simulated.

Key Words : *Urban watershed, Hydrological model, Heat transport, Stream temperature*

1. はじめに

河川は大都市に残された貴重な自然空間である。そこでは、水が流れることによって景観保全、生物生息域の確保、微気象の緩和といった機能が働いている。したがって、水量の確保とともに、水温が適正なレベルに保たれていることが重要である。一方、都市活動に伴い大量に消費される水は熱が付加されて最終的に公共用水域へと流出するが、下水道が整備された都市ではこの排水・排熱が処理場を経由して河川・湖沼・沿岸海域へと放流され、水圏に影響を及ぼしていると考えられる。都市の人口増大や生活様式の変化によって、処理場からの排水量とともに排水温度も大きく変化し¹⁾、このことが主たる理由となって東京都区部を流れる荒川、新河岸川では明らかな水温上昇が生じ、過去20年で最大4℃以上に達することがデータ解析により明らかとなっている²⁾。本研究では、都市流域から沿岸海域に至る水循環・熱輸送を物理モデルにより再現して都市河川の水温形成やその変動要因、流出特性などを探っていくことを目的として、流域スケールの水循環・熱輸送に関するモデリングと実流域への適用・検証を行った結果について報告する。

2. 水循環・熱輸送のモデリング

(1) モデリングの概要

合流式下水道が整備された都市河川流域では、晴天時、建物からの排水が処理場に集約され河川等に放流される。一方、雨天時には下水道に入った雨水は汚水と混じりながら、ある一定量までは処理場へと運ばれるが、処理場の受け入れ限度を越える豪雨時、雨水は下水道の所々に設けられた吐口から河川に直接流出する。また、都市河川は河岸・河床がコンクリート等で覆われる場合が多く、河川と地下水との相互作用が少ない反面、下水道には処理量のおよそ2割を占める地下水が浸出している³⁾。都市河川流域の水・熱輸送現象を忠実に再現するためにはこのような人工的排水システム及びそれと河川・地下水との関連を考慮した水循環モデルが必要となる。そこで、本研究では都市河川流域での解析事例を有するWEPモデル^{4) 5) 6)}に改良を加えて、下水道と河川という二重の水循環系構造 (Dual system) を表現できるようにした。また、水環境の重要な指標である河川水温を定量化するため、河川の流れを中心とした水の循環に伴う熱輸送現象をモ

デリングし、WEPモデルに組み込んだ。

(2) Dual Systemの水循環系モデリング

下水道の整備された流域では、流出に寄与する雨水（屋根面・路面等の不透水面に降った雨のうち、初期損失・凹地貯留を除く分及び浸透面の超過飽和した分）は、排水溝、取り付け管、下水管路という経路をたどって流下する。ここでは、管路流れを直接解くのではなく、下水道網内の流れは表面流として近似的に表現する手法⁷⁾を踏襲した。WEPモデルでは土地利用に応じた等価粗度を求めてKinematic Wave法による表面流追跡をするが、下水道整備域では雨水が即座に排除されるため、等価粗度設定においてこの点を考慮する。

雨天時には、下水道吐口から河川に越流水（CSO）が流入する。どのくらいの越流量となるかは吐口の構造と管路内の水位によって決まるが、ここでは、越流量 Q_{of}^j を次式により求めた。

$$Q_{of}^j = Q_{in}^j - Q_{lm}^j, \quad Q_{lm}^j = V_{lm} CA_j / CA \quad (1)$$

ここに、 Q_{in}^j ：吐口 j の存在する解析メッシュへの流入量、 Q_{lm}^j ：吐口 j において越流せずに下水道システムが受け入れ可能な流量、 V_{lm} ：下水処理場の受け入れ可能量（簡易処理量を含む）、 CA ：下水道処理区の総面積、 CA_j ：吐口 j における集水面積である。受け入れ可能量は $V_{lm} = \beta V$ とおいた。ここで、 V は処理場の処理能力、 β は定数である。通常、汚水処理能力の3倍までは下水道で受け入れできるように設計されていることから $\beta=3$ となるが、実際には異なることもあるため、処理場への流入量の解析結果を元にキャリブレーションにより求める。

晴天時には、建物からの汚水のみについて、Kinematic Wave法により追跡計算を行い、処理場への流入量が計算される。雨天時、晴天時ともに、流下過程においては地下水や不飽和帯の土壌水が下水管路に流入してくる（この流入水は不明水と呼ばれる）ことから、WEPモデルにおいて、土壌水は不飽和帯の透水係数に比例して、また、地下水は地下水位に応じた量が管路に流出するとしてモデル化した。

(3) 熱輸送のモデリング

熱輸送の基礎方程式には自由断面を持つ河道に対する熱バランスの式(2)を用いた。

$$\frac{\partial(AT)}{A\partial t} + \frac{\partial(QT)}{A\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (AD \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{W_h}{\rho_w c_{pw} V} + \frac{J_h}{\rho_w c_{pw} H} + \frac{J_s}{\rho_w c_{pw} H} \quad (2)$$

ここで、 T ：水温、 A ：横断面積、 Q ：流量、 D ：分散係数、 W_h ：熱の流入（表面流出、中間流出、地下水、下水処理水及び越流水に伴う）、 J_h ：水と大気の熱交換、 J_s ：水と河床の熱交換、 V ：河川の水体体積、 H ：水深、

ρ_w ：水の密度、 c_{pw} ：水の比熱、 x ：流下方向座標、 t ：時間である。熱の流入 W_h はポイントソース（下水処理水）の量 Q_{ps} と温度 T_{ps} 及びノンポイントソース（表面流出、中間流出、地下水流出）の量 Q_{nps} と温度 T_{nps} により式(3)で与える。

$$W_h = \rho_w c_{pw} (\sum Q_{ps} T_{ps} + \sum Q_{nps} T_{nps}) \quad (3)$$

中間流出と地下水流出の水温は地温に等しいと仮定する。深さ z における地温 $T(z)$ は次式により求めた。

$$T(z) = A_0 + \sum_{n=1}^6 A_n \exp(-z\sqrt{n\omega/2a}) \sin(n\omega t - z\sqrt{n\omega/2a} + \varepsilon_n) \quad (4)$$

$$T(0) = a_0 + \sum_{n=1}^6 [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (5)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (6)$$

ここで、 $\sin(\varepsilon_n) = a_n/A_n$ 、 $A_0 = a_0$ 、 $\omega = 2\pi/\tau$ 、 τ ：周期、 a ：温度拡散係数、 a_n 、 b_n ：フーリエ係数である。表面流出水の水温は気温に等しいと近似した。下水放流水温は文献1)により求めることができるが、本論文では処理場における実測の放流水温を用いた。

水と大気の熱交換 J_h は次式で表される。

$$J_h = RN - J_c - J_e = I_s^* + J_s^* - J_c - J_e \quad (7)$$

ここで、 RN ：水面の正味放射量、 J_c ：顕熱輸送量、 J_e ：潜熱輸送量、 I_s^* ：水面の正味短波放射量、 J_s^* ：水面の正味長波放射量である。水面における放射収支には太陽高度、河道断面形状、周囲樹木や建物など様々な条件が複雑に関係することから、ここでは河道断面形状と周囲樹木に起因する大気からの放射量減衰を考慮する。なお、周囲建物の状況によってはその影響も考慮する必要があると考えられるが、現段階では考慮していない。

水面と護岸（片側）が受け取る正味短波放射量 I_s^* 、 I_w^* 及び正味長波放射量 J_s^* 、 J_w^* は次式で与える。

$$I_s^* = S_{DIR}(w-L)(1-\alpha_s)/w + S_{DIF}\psi_s(1-\alpha_s) + S_{DIR}L\alpha_w(1-\psi_s)(1-\alpha_s)/(2h) + S_{DIF}\psi_w(1-\psi_s)\alpha_w(1-\alpha_s) \quad (8)$$

$$I_w^* = S_{DIR}L(1-\alpha_w)/(2h) + S_{DIF}\psi_w(1-\alpha_w) + S_{DIR}(w-L)\psi_w\alpha_s(1-\alpha_w)/w + S_{DIF}\psi_w(1-\alpha_w) + S_{DIR}L(1-2\psi_w)\alpha_w(1-\alpha_w)/(2h) + S_{DIF}\psi_w(1-2\psi_w)\alpha_w(1-\alpha_w) \quad (9)$$

$$J_s^* = \psi_s\varepsilon_s L\downarrow + (1-\psi_s)\varepsilon_s\varepsilon_w\sigma T_w^4 - \varepsilon_s\sigma T_s^4 \quad (10)$$

$$J_w^* = \psi_w\varepsilon_w L\downarrow + \psi_w\varepsilon_w\varepsilon_s\sigma T_s^4 + (1-2\psi_w)\varepsilon_w^2\sigma T_w^4 - \varepsilon_w\sigma T_w^4 \quad (11)$$

ここで、 S_{DIR} 、 S_{DIF} ：キャノピー上端における直達日射量と散乱日射量、 $L\downarrow$ ：下向き長波放射量、 ψ_s ：水面の天

空率、 ψ_w ：護岸の天空率、 T_w ：河道壁面温度、 h ：キャノピー高さ（河道深さ）、 w ：キャノピー幅（河道幅）、 L ：河道底面上の影の長さ、 ε_s 、 ε_w ：水面と壁面の放射率、 α_s 、 α_w ：水面と壁面のアルベド、 σ ：ステファンボルツマン定数である。

水面の天空率 ψ_s と護岸の天空率 ψ_w は文献8)に基づき次式により与えた。

$$\psi_s = \left[(h/w)^2 + 1 \right]^{1/2} - h/w \quad (12)$$

$$\psi_w = \frac{1}{2} \{ h/w + 1 - [(h/w)^2 + 1]^{1/2} \} / (h/w) \quad (13)$$

影の長さは次式により表される⁹⁾。

$$L = \begin{cases} h \tan \theta_s \sin \theta_n & (L < w) \\ w & (L \geq w) \end{cases} \quad (14)$$

ここで、 θ_s ：太陽天頂角、 θ_n ：太陽方位角と河川流路の方位角の差である。

河岸の樹木や上部構造物によっても日射が遮蔽されることから、日射遮蔽の影響を次式によりモデル化した。

$$S_{DIR} = f_s SDIR \quad (15), \quad S_{DIF} = f_s SDIF \quad (16)$$

$$f_s = 1 - \lambda I_{veg} f_{LAI} \quad (17)$$

$$f_{LAI} = (LAI - L_{min}) / (L_{max} - L_{min}) \quad (18)$$

f_s ：河岸樹木による日射遮蔽の影響を表す係数、 $SDIR$ 、 $SDIF$ ：キャノピー上空での直達日射量と散乱日射量、 I_{veg} ：河岸樹木の状態（0：樹木なし、1：片岸のみ、2：両岸樹木あり）、 LAI ：河岸樹木の葉面積指数、 L_{max} 、 L_{min} は LAI の年間の最大値と最小値を意味する。 λ は定数で、キャリブレーションに基づき与える。

顕熱輸送量は文献10)に基づき次式により与えた。

$$J_c = c_1 f(u) (T - T_a) \quad (19)$$

ここで、 $c_1 = 0.47$ 、 $f(u) = 19 + 0.95u^2$ 、 T_a ：気温、 u ：風速である。また、式(7)の正味放射量算出に必要な入力放射成分と潜熱輸送量はWEPモデルに用いられている計算手法を用いる。

水と河床の熱交換量 J_s は次式で表す。

$$J_s = \rho_s c_{ps} \frac{2\alpha_s}{H_{sed}} (T_{sed} - T) \quad (20)$$

$$\frac{dT_{sed}}{dt} = k_h (T - T_{sed}) \quad (21)$$

$$k_h = 2\alpha_s / H_{sed}^2 \quad (22)$$

ここで、 T_{sed} ：河床温度、 H_{sed} ：河床厚さ、 ρ_s ：河床の密度、 c_{ps} ：河床の比熱、 α_s ：河床の熱拡散係数である。

護岸の表面温度 T_w も河床温度の算定と同様

の手法により算定する。ここで、 H_g ：護岸厚さ、 T_g ：護岸内部の温度、 ρ_g ：護岸の密度、 c_{pg} ：護岸の比熱、 α_g ：護岸の熱拡散係数である。

$$J_w^* + I_w^* = H + G \quad (23), \quad \frac{dT_g}{dt} = k_{hg} (T_w - T_g) \quad (24)$$

$$H = c_1 f(u) (T_w - T_a) \quad (25), \quad G = \rho_g c_{pg} \frac{2\alpha_g}{H_g} (T_g - T_w) \quad (26)$$

$$k_{hg} = 2\alpha_g / H_g^2 \quad (27)$$

式(2)は文献10)を参考に式(28)のとおり差分化し、陰形式によりGaussian法で解いた。ここで、 i ：流下方向の格子点、 Δx ：格子点間隔を意味する。

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} T_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} T_i + \frac{D'_{i-1}}{V_i} (T_{i-1} - T_i) + \frac{D'_i}{V_i} (T_{i+1} - T_i) \quad (28)$$

$$- \frac{1}{A_i} \frac{dA_i}{dt} T_i + \frac{W_{h,i}}{\rho_w c_{pw} V_i} + \frac{J_{h,i}}{\rho_w c_{pw} H_i} + \frac{J_{s,i}}{\rho_w c_{pw} H_i}$$

$$D'_i = D_i \cdot A_i / (\Delta x_i + \Delta x_{i+1}) / 2 \quad (29)$$

3. 対象流域

水循環と熱輸送の解析対象流域は東京都区部に位置する神田川流域（図-1）とした。妙正寺川、江古田川、善福寺川、神田川が開水路として流れ（一部区間に暗渠部分あり）、桃園川は全区間で暗渠化されて神田川に合流する。本流域は全域で合流式下水道が整備されており、落合処理区、新河岸処理区、芝浦処理区、三河島処理区、小台処理区及び多摩地域の下水道に含まれる。神田川には落合処理場及び中野処理場より処理水が放流されてい

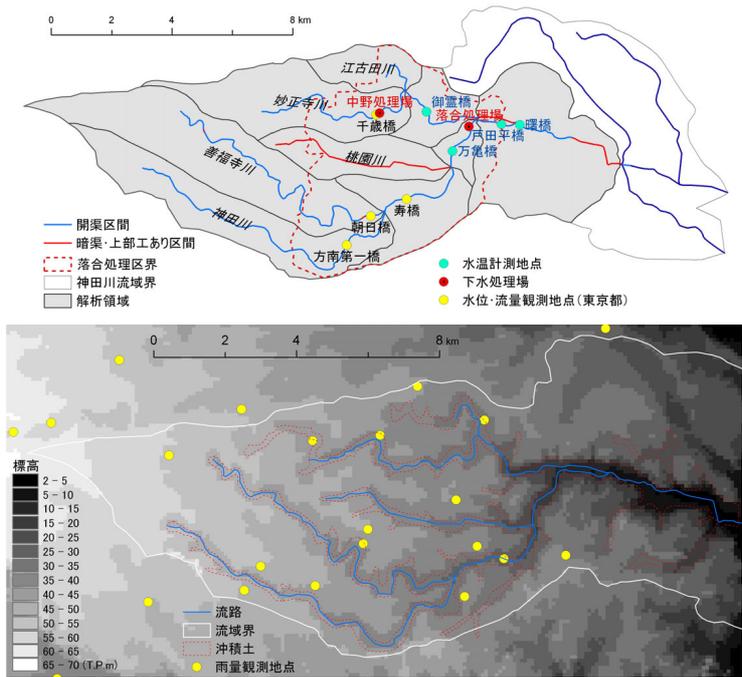


図-1 神田川流域の概要

る。また、強雨時には下水道から河川への吐き口より越流水が流出する。都市化に伴って浸透域が減少したために晴天時の自然流量に乏しいことから、源流部では水源池（妙正寺池、善福寺池、井の頭池）に地下水を揚水するとともに、多摩地区の下水処理水を玉川上水、千川上水経由で導水している¹⁾。

4. 解析条件及び解析結果

(1) 入力データとパラメータ

モデル駆動には流域状況や気象条件等、様々なデータが必要となる。今回作成した入力データのうち、主なものを表-1に示す。空間情報はGIS上で整理し、平面直交座標系上でメッシュデータ化した。

表-1 主な入力データ

データ項目	データソース
流域界・支流流域界(PG)	国土数値情報
標高(RA)	数値地図50mメッシュ標高
土地利用(RA)	細密数値情報
表層土壌(PG)	表層地質図より作成
河川流路(PL)	数値地図25000より作成
河川諸元	東京都データ
河岸植生・上部構造物(PL)	衛星写真より目視判読後に作成
下水道処理区界(PG)	東京都下水道局資料より作成
人口(PG)	平成12年国勢調査町丁字等別集計結果(統計GIS)
気温・日照時間・風速(P, 3点)	AMeDAS
雨量(P, 34点), 相対湿度(1点)	東京都データ

P : Point, RA : Raster, PG : Polygon, PL : Polylineで整理

表-2 土地利用分類ごとの再分類パラメータ

細密数値情報分類	WEPの土地利用分類						
	水域	浸透域中の各分類の割合				不浸透域の占める割合	
		水田	高い植生域	低い植生域	裸地		建物域の割合
山林	0	0	0.8	0.2	0	0.27	0
水田	0	1	0	0	0	0	0
畑など	0	0	0.2	0.8	0	0.21	0
造成中地	0	0	0.2	0.3	0.5	0.23	0
空地	0	0	0.2	0.3	0.5	0.27	0
工業	0	0	0.2	0.3	0.5	0.75	0.36
一般低層	0	0	0.2	0.3	0.5	0.75	0.36
密集低層	0	0	0.2	0.3	0.5	0.79	0.36
中高層	0	0	0.2	0.3	0.5	0.74	0.36
商業	0	0	0.2	0.3	0.5	0.80	0.36
道路	0	0	0	1	0	0.86	0
公園・緑地	0	0	0.3	0.5	0.2	0.16	0.36
公益施設	0	0	0.2	0.3	0.5	0.45	0.36
河川・湖沼	1	0	0	0	0	0.14	0

土地利用別の不浸透面積の割合及び浸透域における地被種別(背の高い植生、低い植生、裸地)の割合は表-2に示す値を用いた⁵⁾。また、熱収支解析に関わる各種パ

ラメータは文献10)及び12)に基づき、表-3のように設定した。

表-3 熱収支の計算パラメータ

項目	河床	護岸
厚さH(m)	0.1	0.3
密度 ρ (g/cm ³)	2.2	2.4
比熱 c_p (cal/g/K)	0.21	0.21
熱拡散係数 α (cm ² /s)	0.008	0.02
アルベド	0.08 (水面)	0.3
射出率	0.95 (水面)	0.90

表層土壌は河川沿いの沖積土とそれ以外の関東ロームに分類し、表層地質図から作成したGIS Polygonからメッシュデータ化した。それぞれの透水係数や不飽和特性は文献5)6)の値を与えた。下水道流下過程を模擬した表面流追跡の等価粗度及び河川の粗度係数にはそれぞれ一律0.01, 0.015を用いた。河道の方角角はGISソフトの機能を用いて算出した。河岸の植生・上部構造物情報もGIS Polyline上で各河道区間の属性情報として割り当てた。越流水量算定に用いる式(1)の β は5とした。

(2) 解析条件

2005年の1年間分の解析を行った。時間ステップは表面流と河道流れ及びそれに伴う熱輸送について10分、それ以外を1時間とした。空間的には100m四方の正方格子によって対象範囲を9062メッシュに分割した。河川の差分間隔 Δx は390~450mとした(河道区間により異なる)。各河川上流境界条件として一定流量を与えた。上流端では地下水が揚水されていることから、この水温は地中温度に等しいとした。同様に、河床から河川に流出する基底流の水温も地中温度と同じとした。

(3) 実測結果との比較

1) 河川流量

解析期間中の実測流量のある寿橋と千歳橋において、実測値と計算値の比較を行った(表-4)。また、東京都が過去に実施した流量観測のデータを用いて朝日橋、方南第一橋の水位流量曲線を算定して年間ハイドログラフを求め、計算結果と比較した。なお、千歳橋においては信頼できる水位流量曲線が得られなかったため年間流量比較は行わなかった。

表-4 河川流量の比較(低水流量)

	期間	実測値	計算値
寿橋	2005/1/20-21	0.52 m ³ /s	0.55 m ³ /s
千歳橋	2005/1/18-19	0.07 m ³ /s	0.10 m ³ /s

神田川の多くの区間では河床もコンクリートにより覆われているため、河川と地下水との水の交換は少ない。よって表-4の両地点とも流量は非常に少ないが、実測値

と計算値に大きな違いはない。また、図示はしないが、朝日橋、方南第一橋の低水流量もほぼ良好に再現されていた。

規模の大きかった4つの降雨イベントに対する方南第一橋と朝日橋の高水流量を図-2に示す。イベントによって計算値の適合性が異なるが、朝日橋では比較的良好な計算精度となっている。面積の小さい高度に都市化された流域は降雨への反応が極めて早いことから、今回のような時間雨量を用いた解析では再現性に限界があるものと考えられることから、10分雨量などを用いた検討が課題である。9/4のイベントは台風14号に伴う集中豪雨に起因するもので神田川流域にも大きな浸水被害をもたらした。当該2地点の上流でも河川沿いに広く浸水が生じていたことから、このイベントにおける実測と計算の違いは、モデルで浸水現象を再現できないことの影響が大きいと考えられる。

図-2のイベントに対応する下水処理場（落合処理場）への流入量の計算値と実績値を図-3に示す。いずれの場合も流入のピークや時間変動が計算により良好に再現されている。合流式下水道における雨天時越流水が公共用水域の水質汚濁の一因になっていることから、このようなモデルは流域での汚濁負荷削減が水域に及ぼす効果を精度よく推定することにも活用できると考えられる。なお、流入量が少なくなる無降雨時において流入量の実測と計算で違いが見られることから、平常時の下水管への不明水流入のモデリングについて改良の余地があると考えられる。

2) 河川水温

水温実測地点における計算結果と実測値との比較事例を図-4に示す。御霊橋地点については年間を通じて計算値と実測値が比較的近い値であったが、万亀橋については秋から冬にかけて計算値の日変動が大きめの傾向が見られた。曙橋地点の計測データは11月下旬からしか存在していないため年間を通じた比較はできていないが、他の地点に比べて大きく異なる変動パターンを示すことがわかる。曙橋については落合・中野の両処理場からの下水処理水放流がある場合と無い場合の計算結果を示しており、処理水放流が無い場合の結果が最大で約12℃下回っていることから、処理場放流水の影響が極めて大きいことがわかる。なお、曙橋の実測データで時々、水温が急激に降下することが確認できるが、計算においてもこの現象が再現されていることから、処理場からの放流量増減の影響が現れていると考えることができる。

都市河川の自然流量は少なく、水深が浅いことも相まって、河川水温には下水処理水や日射・気温、河床伝導熱、河川の幾何形状に依存した放射、街路樹等

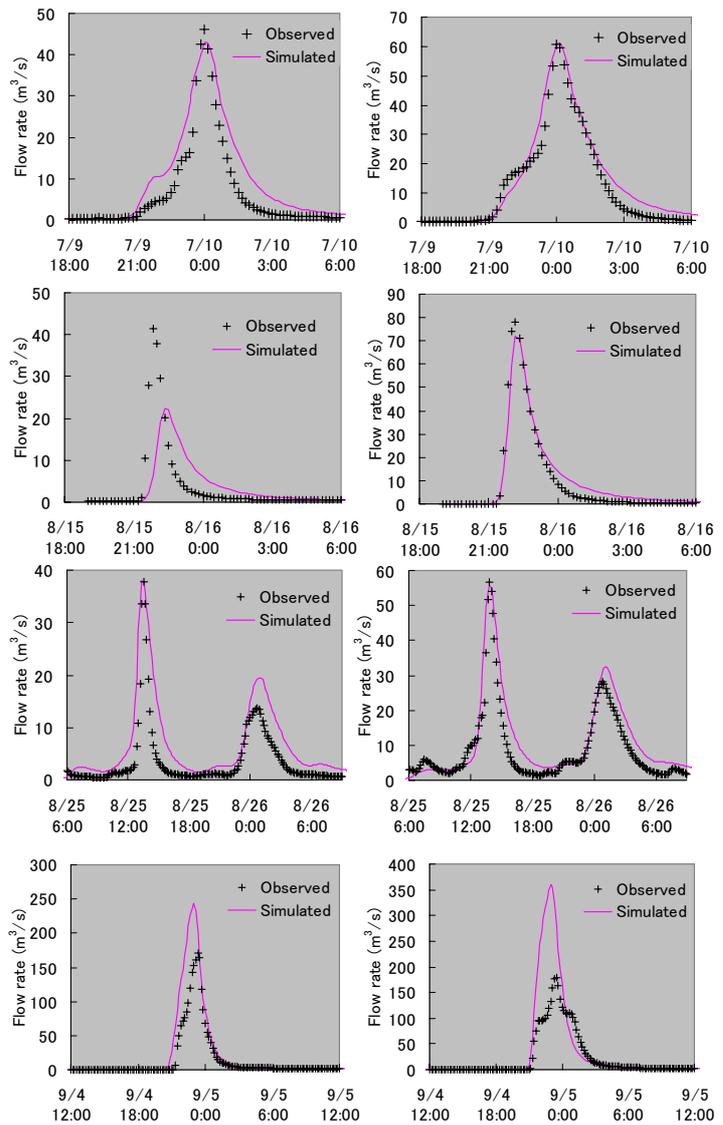


図-2 河川流量の比較 (左：方南第一橋、右：朝日橋)

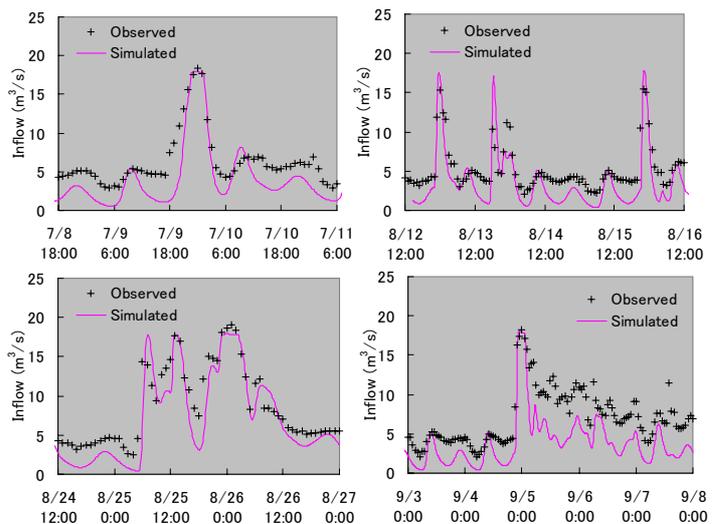


図-3 下水処理場への流入量の比較

による日射の遮蔽も関与していることがモデル計算により確認された。どの要因がより効いているのかについて

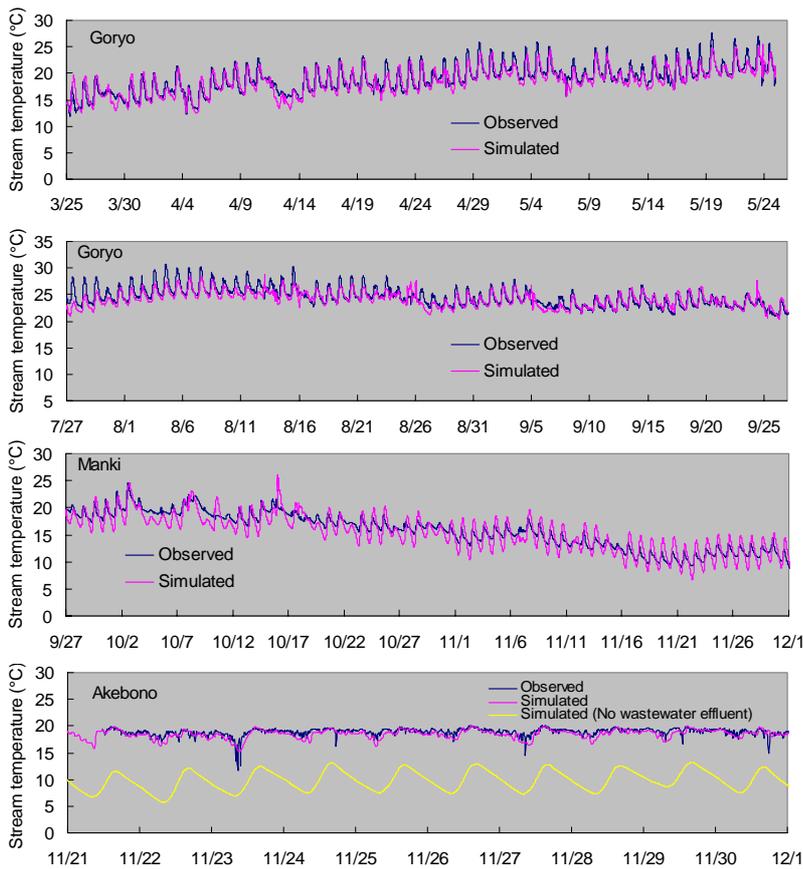


図-4 河川水温の比較

の詳細な検討結果については別途報告したい。

5. 結論

本論文においては、分布物理型水循環モデル (WEP) に熱輸送モデルを組み込むことによって流域スケールの水循環・エネルギー輸送のモデルを構築し、東京都区部内を流れる神田川流域に適用した。本モデルでは、高度に都市化され下水道が整備された河川流域の降雨流出現象を二重の排水系としてモデル化するとともに、河川水温モデルでは下水処理水、日射等の気象条件、河床伝導熱、河川の幾何形状に依存した放射、街路樹等による日射の遮蔽、地下水温・地温影響を考慮した。

対象流域の都市基盤・経済活動等 (地形、地質、土地利用人口、下水道、河川) に関する情報を入力として、流域の水循環・熱輸送過程をシミュレートし、神田川流域の低水・高水流量が再現できたとともに、河川水温や処理場への流入水量などの流域水・熱循環系を良好に再現できることが示された。神田川の河川水温は、冬期には処理場からの放流水などの人工系水循環の影響を強く受けていることを示した。

謝辞: 雨量・河川水位データ等は東京都より提供を受けた。また、下水処理場放流水温、水量データは東工大神

田研究室において取得したデータを用いた。本研究の実施にあたっては科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業 (代表: 東工大・神田学) の支援を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Kinouchi, T.: Impact of long-term water and energy consumption in Tokyo on wastewater effluent: implication for thermal degradation of urban streams, *Hydrological Processes*, Vol.21, 1207 - 1216, 2007.
- 2) Kinouchi, T., H. Yagi, and M. Miyamoto : Increase in stream temperature related to anthropogenic heat input from urban wastewater, *Journal of Hydrology*, Vol.335, 78-88, 2007.
- 3) 中山有, 神田学, 木内豪: 下水処理場での水温観測に基づく都市下水道の水・熱輸送に関する研究, *水文・水資源学会誌*, Vol.20, No.1, 25-33, 2007.1
- 4) Jia, Y., G. Ni, Y. Kawahara, T. Suetsugi, Development of WEP model and its application to an urban watershed, *Hydrological Processes*, Vol.15, No.11, 2175-2194, 2001.
- 5) Jia, Y., G. Ni, J. Yoshitani, Y. Kawahara, and T. Kinouchi: Coupling simulation of water and energy budgets and analysis of urban development impact, *Jour. of Hydrologic Eng.*, ASCE, Vol.7, No.4, 302-311, 2002.
- 6) Jia, Y., T. Kinouchi and J. Yoshitani: Distributed hydrologic modeling in a partially urbanized agricultural watershed using water and energy transfer process model. *Jour. of Hydrologic Eng.*, ASCE, Vol. 10. No. 4, 253-263, 2005.
- 7) 宮本守, 木内豪: 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, *土木学会水工学論文集*, Vol.51, 1141-1146, 2007.2
- 8) Masson V., A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models, *Boundary-Layer Meteorology*, 94 (3), 357-397, 2000.
- 9) Kusaka H., H. Kondo, Y. Kikegawa, F. Kimura, A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models: Comparison With Multi-Layer And Slab Models, *Boundary-Layer Meteorology*, 101 (3), 329-358, 2001.
- 10) Chapra, S.C., Pelletier, G.J. and Tao, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.04: Documentation and Users Manual, Civil and Env. Eng. Dept., Tufts University, Medford, MA., 2006.
- 11) 東京都: 神田川再生構想検討会報告, 2004.
- 12) Oke, T., *Boundary Layer Climates* 2nd edition, Routledge, New York. 1987.

(2007. 9. 30受付)