

賀茂川水系の汚濁負荷流出過程の解析

城戸由能・鳥井宏之*・中北英一

* 京都大学大学院工学研究科

要 旨

下水道整備により特定汚染源 (Point Source) である生活排水・工場排水の浄化処理が進み、河川水系に放流される汚濁負荷は減少しているが、不浸透化が進んだ都市域では非特定汚染源 (Non-point source) から雨天時に流出する汚濁負荷と合流式下水道越流負荷が相対的に増加している。本研究では鴨川水系の下水道排水区域を対象として、雨天時に河川に流入する雨水量および汚濁負荷量を算定した結果、全流出量は比較的良好に再現されたが、最大流出量生起時刻は観測時刻より早く計算されたことについて考察を行った。また表流水と地下水間の水・物質移動の収支が算定評価できるモデルを用いて合流式下水道越流水が及ぼす河川水質への影響および河川水質と河床との相互関係を考慮した晴天時・雨天時を連続させた水質解析の準備を行った。今後このモデルの再現性を観測に基づいて評価した上で、盆地水系全体の水・物質流動およびその収支の解析を進める。

キーワード: 合流式下水道越流水 鴨川水系 水質解析

1. 研究背景と目的

1.1 研究の背景

将来的な水資源および水環境の保全と利活用のためには、河川流域における水・物質循環を水系一環としてとらえ、その経年的な変化や将来予測をおこなうことが重要である。そのためには表流水・地下水・地中水を含めた総合的な水量・水質の観測および水・物質循環の解明、将来予測が可能なモデルの開発が必要であり、このモデルを用いることによって地球規模の気候変動に伴う降水量の変動が地域水系の水量・水質に与える影響を予測することが可能となる。

一方、近年の下水道の整備により生活排水や工業排水の浄化処理が進み、河川水系に放流される汚濁負荷は減少しているが、不浸透化が進んだ都市域では、雨天時の直接流出量が増大し、これに伴う汚濁物質の流出量が増加している。その負荷源は、大気からの降下物や自動車のタイヤ片など様々な汚濁物質が地表面や屋根面などに堆積したものであり、これらの汚濁物質によって河川水質改善の鈍化がみられるようになっている。これまで行われてきた汚濁

物質の削減対策は、家庭や工場、畜舎等の発生源が特定しやすい汚染源からの汚濁物質(特定汚染源負荷: Point Source)が主な対象であり、多くの河川で晴天時に流入する汚濁物質は削減されてきた。しかし、屋根面や地表面等の面的に分布して発生源が特定しにくい汚濁物質(非特定汚染源負荷: Non-point Source)については根本的な対策がとられてこなかった。近年、河川や湖沼の水質悪化の原因として非特定汚濁物質の影響が大きくなってきている(Kido, et al., 2006)。京都市では、昭和 38 年度より水質汚濁の状況を把握するために、毎月 1 回公共用水域の水質を測定している。このデータによると 1980 年代なかばまでは下水道の整備等が進むにつれて晴天時の水質は改善されていることが示されている。しかし、測定は晴天時に行われるため、雨天時や降雨直後の水質についてはほとんど観測が行われておらず、雨天時に都市域から流出した雨水が河川水質へ与える影響は明らかになっていない状況である。

現在の京都市内の上水道や工業用水等は琵琶湖疏水や桂川水系に依存しているが、一部地下水利用も拡大している可能性が否定できない。災害時緊急用水源としての自地域内の地下水・湧水等からの供給

可能水の量的・質的把握は十分ではなく、緊急用水源としての河川・地下水といった地域水源の利用可能性を十分評価することはできていない状況である。

1.2 研究の目的

以上の背景に基づき、本研究では人間活動を支える持続可能な水利用、都市および地域環境を保全するための環境用水、生態系を維持するための水量・水質の管理のための地域内水文循環と物質循環を観測調査に基づき定量的に捉え、様々な要因の影響評価が可能となるモデル構築を主目的とする。

まず、京都市内都市域の下水道の排水区毎の集水面積・管路長・管径などの管網情報と土地利用や地形情報を収集整理した上で、過去の雨天時観測データや公共機関から提供されている水位等の情報を用いて、降雨時の雨水と汚濁物質の流出量算定するモデルを作成する。次に雨天時の増水期に流速に従って河床の堆積物が巻き上げられ河川水に取り込まれる機構と降雨終了後の流量減速期および晴天時に汚濁物質が河床に堆積する機構を解明することを目指して、河道流の追跡に Dynamic Wave Model を適用したモデルを作成し、晴天時から雨天時にかけて連続した河川の流量・流速を算定し、河川水と地下水の間の水・物質収支を評価する。

1.3 本稿の構成

本稿の構成は以下の通りである。

2 章では本研究の対象とする流域の概要および研究方法について説明する。

3 章では本研究で用いた雨水流出と汚濁負荷流出の解析モデルについてそれぞれ説明する。

4 章ではそれら解析モデルを用いて解析を行うことで得られた結果について述べる。

5 章では本研究で得られた結果を考察し、今後の課題について言及する。

2. 対象流域の概要

2.1 研究対象とする流域の概要

(1) 京都盆地と鴨川

京都盆地は東西約 10km、南北約 20km で周囲を山に囲まれている。京都盆地には東部に鴨川、西部に桂川が流れている。この 2 つの河川は京都市の南端(京都市伏見区)で合流しさらに大阪府との府境に位置するいわゆる三川合流部で宇治川・木津川と合流し、淀川となって大阪湾に注いでいる。

本研究では鴨川・桂川等の自然河川および東山を貫通する琵琶湖疏水などの人工的導水システム等や地下水といった複雑な水循環メカニズムをもつ京都

盆地における水・物質循環を念頭において、鴨川を主たる対象とした降雨・汚濁負荷流出解析を行う。

鴨川は上流で賀茂川と高野川が合流して名前を鴨川に変える。本研究で対象とするのは賀茂川の高橋、高野川の高野橋を上流端として、二河川合流後の深草付近を下流端とする区間である。対象区間を Fig.1 に示す。

(2) 鴨川流域の概要

鴨川および上流の賀茂川の全長は約 23 km で全流域は約 156km²である。賀茂川流域では高橋以南は下水道排水区域になっており、高橋から下流の御薮橋付近の範囲では分流式下水道が整備されているが、御薮橋以南では合流式下水道が整備されている。一方高野川は鴨川に合流するまでの高野川の全長は約 20 km、流域面積は 65 km²である。高野川流域では、高野橋以北は分流式下水道整備地域、高野橋以南は合流式下水道整備地域である。

2.2 合流式下水道と分流式下水道の特徴

合流式下水道は雨水と汚水を 1 条の管渠でまとめて集水・処理する方法で、京都市などの古くから下水道が整備されている国内の大都市に多く見られる。その長所としては、1 条の管渠の建設で済むため建設費が安く、ガス管・水道管・電話ケーブルなど他の地下埋設物との競合が少なく施工が容易であること、管径が大きく埋設深が小さいため点検清掃等の

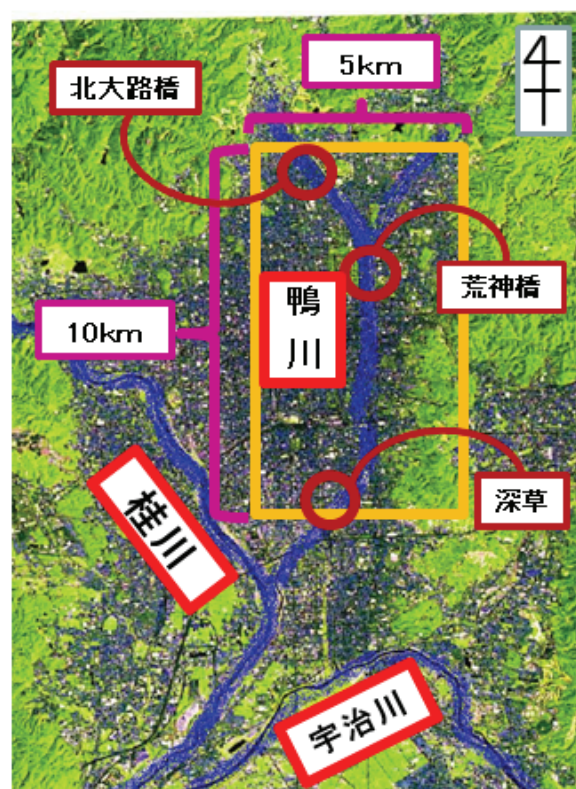


Fig.1 Map of study area

維持管理が容易であることなどが挙げられる。短所としては、計画希釈倍率(遮集率)を越えるような雨水流出が生じた場合、汚水と管内にたまった堆積物が未処理のまま雨水吐室から直接水域に放流され、水質汚濁の原因となっていることが挙げられる。

分流式下水道は雨水と汚水を別の管渠で排除する方法で、水質汚濁防止の観点から 1970 年以降に新規に計画策定あるいは計画見直しが行なわれる地域で基本的に分流式が採用されている。その長所として、汚水は全て処理場で処理されるため水域への流出がないこと、既存水路が多く地形的に雨水の自然排水が容易な地域では污水管だけの敷設で済み建設費がやすくなること、汚水のみを対象とするので下水処理施設の容量が小さくてすむことなどが挙げられる。短所としては汚水と雨水の 2 条の管渠を敷設する場合には建設費が高く施工も困難であることが挙げられる。それに加えて、近年では特に、ファーストフラッシュと呼ばれる降雨初期の高濃度の汚濁物質が未処理のまま水域へ放流されることが大きな問題となっている。

2.3 本研究で使用するデータ

(1) 下水道のデータ

京都市内全域の下水道整備区域の下水管渠網データおよび排水区の排水面積、汚水量、雨水吐きの遮集量等のデータは京都市上下水道局より提供を受けた(京都市, 2003)。また、賀茂川右岸堀川 7 号幹線については深尾(深尾, 2005)が整理したものを利用した。

(2) 鴨川の河川データ

鴨川の河川データは京都府土木事務所から提供された鴨川縦断面図及び鴨川横断面図を用いた(京都府, 2001)。鴨川縦断面図に記載されている河川勾配とその勾配が変化する地点の断面形状を鴨川横断面図から読み取り、鴨川の水路幅を決定した。鴨川縦断面図および鴨川横断面図は桂川合流地点から高野川の御蔭橋までのデータである。高野川合流点以北の賀茂川のデータ含まれていない。そこで川久保らによって行われた測量データ(城戸他, 2003)をもとにした。

(3) 雨量データ・水位データ

2004 年 11 月 11 日の降雨量及び賀茂川の水位・水質観測データについては過去の観測値を用いている(Kido et al., 2006)。2002 年 10 月 1 日から 10 月 15 日の降雨量及び河川水位データは京都府京都土木事務所の雨量観測記録および水位観測記録(京都府, 2002)から抽出整理した。

3. 流出解析モデル

3.1 雨水流出解析モデル

(1) Kinematic Wave Model の基礎式

Kinematic runoff model を用いるために、流域をブロック分割し、各ブロックを長方形斜面と河道からなるものとして流域のモデル化を行う。

モデル化された長方形斜面の雨水流には式(3.1)の Manning 式を適用する。なお斜面勾配および粗度係数は斜面上でそれぞれ一様とみなす。

$$v = \frac{1}{N} I^{\frac{1}{2}} R^{\frac{2}{3}}. \quad (3.1)$$

ここに、 v は流速、 N は等価粗度、 I は斜面勾配、 R は径深である。薄層流を仮定すると、 $R \doteq h$ (h : 斜面上の水深) と近似できる。単位幅あたりの流量は式(3.1)を用いると、

$$q = \frac{1}{N} I^{\frac{1}{2}} h^{\frac{5}{3}}, \quad (3.2)$$

となる。これを水深 h について解くと

$$h = \left[\frac{N}{I^{\frac{1}{2}}} \right]^p q^p = K q^p, \quad (3.3)$$

となる。ここに $p=0.6$ 、 $K = \left[\frac{N}{I^{\frac{1}{2}}} \right]^p$ である。また連

続式は

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r, \quad (3.4)$$

と表される。ここに、 r は有効降雨強度、 x は距離、 t は時間である。

河道流に対しても斜面の場合と同様に Manning 則を適用して、

$$v = \frac{1}{n} I^{\frac{1}{2}} R^{\frac{2}{3}}, \quad (3.5)$$

と表される。ここに、 n は粗度係数である。径深 R については

$$R = k_1 A^z, \quad (3.6)$$

と近似できる。ここに、 A は流積、 $k_1 \cdot z$ は河川横断面より決まる定数である。河道の流量 Q は式(3.5)と式(3.6)より以下のように表される。

$$Q = vA = \frac{1}{n} I^{\frac{1}{2}} \left(k_1 A^z \right)^{\frac{2}{3}} A, \quad ,$$

$$= A^{\frac{3+2z}{3}} \frac{1}{n} k_1^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

式(3.7)を A について解くと、

$$A = \left[\frac{n}{k_1^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{3}{3+2z}} Q^{\frac{3}{3+2z}} = K Q^p, \quad (3.8)$$

となる。ここに、 $p = \frac{3}{3+2z}$, $K = \left[\frac{n}{k_1^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}} \right]^p$ で

ある。また河道における連続式は、

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3.9)$$

で表される。計算では、斜面流については式(3.3), (3.4), 河道流については式(3.8), (3.9)について特性曲線法を用いて解く。

(2) Dynamic Wave Model の基礎式

1 次元開水路流れにおける連続式および運動方程式を広幅長方形断面水路について近似すると、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial vq}{\partial x} + gh \frac{\partial h}{\partial x} - ghI + \frac{gN^2 q^2}{h^{7/3}} = 0 \quad (3.11)$$

の2式になる。ここに、 h は水深、 t は時間、 q は単位幅流量、 x は流下方向座標、 v は流速、 g は重力加速度、 I は水路勾配、 N は等価粗度である。この2式を連立させて解くのが Dynamic Wave Model である。横流入量に関しては空間差分メッシュの境界に瞬時混合を仮定して一括して加える。

式(3.10)を離散化する。左辺第1項は前進差分、第2項は下流側の影響も反映されるように中心差分として、

$$\frac{h_i^{j+1} - h_i^j}{\Delta t} + F_{qi}^j = 0 \quad (3.12)$$

ここに、

$$F_{qi}^j \equiv \frac{\partial q}{\partial x} \Big|_i^j = \frac{q_{i+1}^j - q_{i-1}^j}{2\Delta x} \quad (3.13)$$

である。これらの式より水深に関しては、

$$h_i^{j+1} = h_i^j - F_{qi}^j \Delta t \quad (3.14)$$

で計算することができる。

次に式(3.11)を離散化する。左辺第1項の時間微分は前進差分、第2項の移流項は1次上流差分、第3項の圧力項は下流の影響が伝わるように中心差分として、

$$\frac{q_i^{j+1} - q_i^j}{\Delta t} + F_{vi}^j - F_{pi}^j + F_{fi}^j q_i^{j+1} = 0 \quad (3.15)$$

ここに、

$$F_{vi}^j \equiv \frac{\partial vq}{\partial x} \Big|_i^j = \frac{v_{i-1}^j q_{i-1}^j - v_i^j q_i^j}{\Delta x} \quad (3.16)$$

$$F_{pi}^j \equiv gh \left(i_0 - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \Big|_i^j = gh_i^j \left(i_0 - \frac{h_{i+1}^j - h_{i-1}^j}{2\Delta x} \right) \quad (3.17)$$

$$F_{fi}^j \equiv \frac{gn^2 q}{h^{7/3}} \Big|_i^j = \frac{gn^2 q_i^j}{h_i^{7/3}} \quad (3.18)$$

である。

3.2 汚濁物質流出解析モデル

(1) 懸濁態汚濁物質流出解析モデル

斜面からの懸濁態汚濁物質の流出を表現するモデルとして SWMM (Storm Water Management Model) のサブモデルの1つである表面流出負荷量モデルを応用した。表面流出負荷量モデルの基礎式は式(3.19)で表される。

$$\begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= -K_1 P_1, \\ \frac{dP_2}{dt} &= -K_2 P_2. \end{aligned} \quad (3.19)$$

ここで、 P_1 は屋根面汚濁物質初期堆積量、 P_2 は道路面汚濁物質初期堆積量、 K_1 、 K_2 は比例定数である。この式は、ある時間での堆積量の変化が同時刻の現存堆積量に比例する事を意味している。式(3.19)を差分化すると、

$$\begin{aligned} P_1(t + \Delta t) &= P_1(t) \exp(-K_1 \Delta t), \\ P_2(t + \Delta t) &= P_2(t) \exp(-K_2 \Delta t), \end{aligned} \quad (3.20)$$

となる。ここで、比例定数 K_1 が物質を流送する雨水流の流速に比例すると考えられるので、屋根面の汚濁物質流出速度 $M_1(t)$ は、

$$M_1(t) = \frac{P_1(t) - P_1(t + \Delta t)}{\Delta t}$$

$$= P_1(t) \frac{1 - \exp(-K_1' u_1 \Delta t)}{\Delta t}, \quad (3.21)$$

と表される。ここで、 K_1' は比例定数、 u_1 は屋根面の流速である。

道路面については、表面に多少のこぼれがあるためその隙間に雨水が貯留され、降雨強度が小さいときには汚濁物質の流出がないと考えられる。そこで、限界掃流量の概念を導入し、ある一定の降雨強度に達すると汚濁物質が流出し始めると考えた。道路面の汚濁物質流出速度 $M_2(t)$ は、

$$M_2(t) = \frac{P_2(t) - P_2(t + \Delta t)}{\Delta t} \\ = P_2(t) \frac{1 - \exp(-K_2'(u_2 - u_c)\Delta t)}{\Delta t}, \quad (u_2 > u_c) \quad (3.22)$$

と表される。ここで、 K_2' は比例定数、 u_2 は道路面の流速、 u_c は限界掃流量時の道路面の流速である。

斜面から流出した汚濁物質と排水路内で巻き上げられた汚濁物質が、雨水流出に伴って排水路内を流れる過程には、式(3.23)で表される Euler の移流方程式を用いる。

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial P}{\partial x} = M_1(t) + M_2(t) + M_3(t). \quad (3.23)$$

ここに、 $\bar{U}$ は断面平均流速である。これは、排水路内での汚濁物質の伝播が、排水路内流速による移流成分と、斜面からの汚濁物質の流出速度および排水路内での巻き上げ速度によって決まることを表している。

(2) 溶存態汚濁物質流出解析モデル

河川流域における溶存態汚濁物質の流出量を算定するために、式(3.24)に示す LQ モデルが広く用いられている。

$$L = KQ^n. \quad (3.24)$$

ここで、 L は汚濁物質流出量、 Q は流量、 K, n は係数である。しかし、LQ モデルは流量のみに依存するので、降雨初期における高濃度の汚濁物質流出や流量低減時の低濃度の汚濁物質流出を表すことができない。そこで、排水区内の堆積量に依存すると考えられる溶存態汚濁物質については、式(3.25)に示す LSQ モデルを用いた。

$$L = KS^m Q^n. \quad (3.25)$$

ここで、 S は汚濁物質堆積量、 m は係数である。観測値を用いて重回帰分析を行うことにより、3 つのパラメータを決定する。

(3) 河道流下過程での河川水質モデル

本研究では、河道流下過程の河川水質を再現するために一次元の移流分散モデルを基本とする。移流分散モデルの基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (3.26)$$

ここで、 c は河川水中の着目物質の濃度、 U は河川水流速、 D は分散係数であり、河川流速に河川水深を乗じることで求めた。

式(3.26)を断面積分すると、河川の断面平均濃度を求めるための式(3.27)が得られる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (3.27)$$

ここに、 C は断面平均濃度、 Q は流量、 A は流積である。

河川において移流・分散以外の濃度変化をもたらす要素である生成・消滅項として巻き上げ項、分解項、沈降項を考慮した。水質解析における巻き上げ現象とは、河床表層の土壌が水中に巻き上げられたり河床上を移動したりする過程で、土壌表面に吸着していた汚濁物質や土壌層内の間隙水中の汚濁物質が河川に供給される現象のことを指す。そのため巻き上げ項は河川底泥の濃度と河川水の流速に比例すると考えた。

分解項は、河川水中の有機物質が微生物によって分解される現象を表現する項であり、窒素に関しては有機態から無機態への分解、微生物等による無機態窒素の同化、脱窒等を表している。沈降項は、河川水中の有機物質の河床への沈殿・堆積・吸着を表現する項である。分解項については河川水中の物質濃度に比例すると考え、沈降項については沈殿槽モデルを元に式を決定した。

さらに集水域からの横流入水を考慮に入れると、

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(A \bullet D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + k_1 u_x C_B + k_2 C + \frac{k_3 C}{u_x h} + \frac{Q_s}{Q} (C_s - C) \quad (3.28)$$

と表される。ここで、 u_x は断面平均流速、 h は水深、 k_1, k_2, k_3 は比例定数、 C_B は河床底質濃度、 C_s は横流入水中における着目物質の濃度、 Q_s は横流入水流量で

ある。式(5.3)の離散化には、分散項には中央差分を、移流項には1次精度の上流差分を用いる。

既往研究(城戸他, 2004)では、式(3.28)の C_B は外部条件として一定で与えており、無限に供給され则认为していた。しかし、近年の汚濁負荷流出解析では、下水道管路はもとより、河床に堆積している汚濁物質が晴天時・雨天時を通して河川水質に影響を及ぼすことが注目されており、その堆積-流出過程を含むモデル解析がとりくまれつつある。今回の解析では、河床中の物質についても河川との物質移動の収支に基づき、それぞれの河道区間の河床にひとつのボックスモデルを連結させた。モデル概念図をFig.2に示す。これまでの河床土壌観測(城戸他, 2004, 城戸他, 2007)において最大深さ80cmにおける底質および間隙水水質の分析を行っており、河床ボックス厚を1mと設定した。河床間隙水中の水質モデルを以下の式で表す。

$$\frac{\partial C_B}{\partial t} + u_B \frac{\partial C_B}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(A \cdot D_B \frac{\partial C_B}{\partial x} \right) - k_1 u_x C_B + \frac{k_3 C}{u_x h} - k_4 C_B \quad (3.29)$$

ここで、 C_B : 対象物質の地中水中物質濃度、 u_B : 地中水流下方向流速、 A_B : 河川底質ボックス断面積、 D_B : 地中水中分散係数、 k_4 : 土壌吸着定数である。

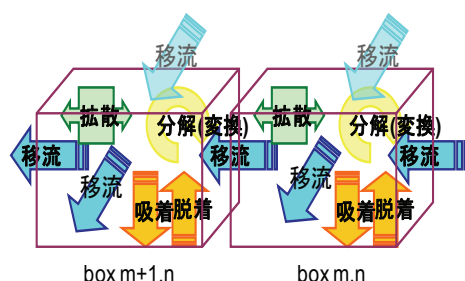


Fig. 2 Concept of interaction between river flow and river bed flow with one box model

土壌吸着とは、間隙水と土壌粒子間でおきる物理・化学的な吸着現象であり、詳細なモデルでは間隙水中物質濃度と土壌粒子結合物質濃度との平衡関係で表現される。本研究では平衡状態が瞬時に起きると仮定して、その濃度変化は間隙水中物質濃度に比例するものと考えた。

厳密な水・物質挙動を考えると河床ボックスは河川と地下水との水・物質移動の中間媒体であり、将来的には地下水流動水質モデルとの統合モデルに発展させる予定である。今回の解析では、間隙水の流動解析をおこなっていないので移流項をゼロと仮定し、河道区間ごとに独立した河床ボックスがあるも

のとしている。

3.3 既往研究との関係

賀茂川流域については著者らによって都市域での雨天時における汚濁物質の流出解析が行われている(Kido, et al., 2006)。この研究では、賀茂川流域を対象として晴天時の河川と都市域から河川への流出水の水質調査、雨天時の河川と都市域からの流出水の流量・水質の観測調査、降雨後の連続した河川水質調査を行った。その結果をもとに都市域における汚濁物質の発生源として屋根面・道路面・下水管内・家庭排水を考え、それぞれの発生源からの汚濁物質流出速度の違いを考慮したモデルを用いて、懸濁態・溶解態汚濁物質の流出解析を行い、合流式、分流式下水道区域での汚濁物質流出量の違いを再現した。

本研究では既往研究をもとに解析範囲の拡大を図り、より広い範囲で雨天時に合流式下水管から越流によって河川に流入する汚濁物質量を算定し、合流式下水管の越流が河川の水質に及ぼす影響をより再現できるモデルとなっている。

具体的には、既往研究では1箇所の雨水吐口での汚濁物質の挙動を解析していたが、本研究では解析範囲における鴨川に流入する複数箇所の雨水吐口からの汚濁物質量を算定することによって、合流式下水道越流水が及ぼす河川水質への影響を評価する。

3.4 対象流域のモデル化

(1) 対象流域の概要

賀茂川の高橋以南は下水道排水区域であり、御園橋以北は分流式下水道、以南は合流式下水道が整備されている。高野川の高野橋以北は分流式下水道、以南は合流式下水道が整備されている。

(2) 支流域分割

流出解析にKinematic Wave Modelを用いるためには、流域をブロック分割し、支流域ごとにモデル定数を求める必要がある。本研究では流出解析の対象区域のほぼ全域が都市域の下水道排水区域であるので、下水道網に沿って支流域を分割した。

(3) 基底流量の設定

直接流出にKinematic Wave Modelを適用するため、観測データのハイドログラフから基底流を分離する必要がある。合流式下水道区域では、汚水が基底流となっている。実際には汚水の量は時間によって異なり、朝夕の調理時に増大する傾向を示すが、その変動は処理区域の土地利用形態や生活形態によって異なるため、対象流域内での時間ごとの汚水量を把握することは難しい。そこで、汚水量の時間変化を考えず、平均汚水量を与えた場合と時間最大汚水量を与えた場合とに分けて考えた。

(4) モデル定数の決定

斜面面積は、各支流の左・右岸の面積と河道長を測定し、面積を河道長で除すことで求めた。

河道形状に関わる係数 $k_{1,z}$ は、下水排水路図に描かれた管路ごとの管径に基づき、式(3.6)に水深ごとの流積と径深を代入し、回帰分析を行って求めた。河道の粗度係数については管径によって素材が異なると考えて 0.01~0.015 の間で最も再現性が高くなるように調節した。

3.5 モデルの検証

(1) 斜面流出モデルの検証

斜面流出の追跡に用いた Kinematic Wave Model の検証は合流式下水道幹線管渠である、堀川 7 号幹線の集水域に降った雨水の流出再現によって行う。この堀川 7 号幹線については、2004 年 11 月 11 日の降雨事例について深尾らによって流量観測及び流量再現計算が行われている。この観測結果及び再現計算結果と本モデルによる解析結果を比較することで本モデルの斜面流出部分について検証した。

(2) 河道も含めたモデル全体の検証

本モデルでは河道については Dynamic Wave Model を適用するため本モデルの河道流量の再現性の検証も行った。

雨量データおよび鴨川の水位データが入手可能な 2002 年の降雨事例のうち適度な降雨量があり、単独の降雨イベントとして分離しやすいように先行無降雨期間が十分にとれている 2002 年 10 月 1 日の降雨事例の河川流量を再現することで本モデルの河道流量の再現性を検証した。

4. 流出解析

4.1 合流式下水道区域での再現計算

(1) 堀川 7 号幹線の再現計算概要

堀川 7 号幹線は賀茂川の右岸を通っている合流式下水管の幹線である。この幹線の北側を通っている堀川 7 号幹線枝線には 2 箇所の雨水吐室があり、遮集能力を超えると若狭川に放流される。堀川 7 号幹線は堀川 1 号幹線へと合流し、さらに堀川 1 号幹線は分水-1 で堀川北幹線に分水される。分水-1 については、低流量時は全て京都市南部に位置する鳥羽処理場へと送られ、遮集能力を超えると雨水吐室 TS.3 に達し、遮集能力を越えた雨水と汚水が吐口から賀茂川に放流されている。堀川 7 号幹線の集水区の図を Fig.3 に示す。

今回は再現計算が行われた 2004 年 11 月 11 日の降雨事例について先行研究⁽¹⁾で行われた支流域分割の支流域を統合して新たな支流域として流出解析を行っ

た。先行研究では各下水道の集水区について詳細に支流域分割を行っており、総計 262 個の支流域に分割している。本研究では解析範囲を拡大するため支流域の統合を行い、統合した排水区の面積の大きさが極端に異ならないように留意した上で、まず集水区を 10 個の支流域に分割した。新しい支流域では統合した支流域の左斜面面積および右斜面面積それぞれ足し合わせて新たな左斜面面積及び右斜面面積とした。河道長は統合前の支流域のうち最長経路となるものを選んで新しい河道長とした。勾配についても最長経路をたどって再計算をして決定した。粗度係数については基準値を 0.013 とし計算結果の再現性を確認しながら数値を変化させて計算した。河道定数は統合前の最大管径のときの係数を使用した。

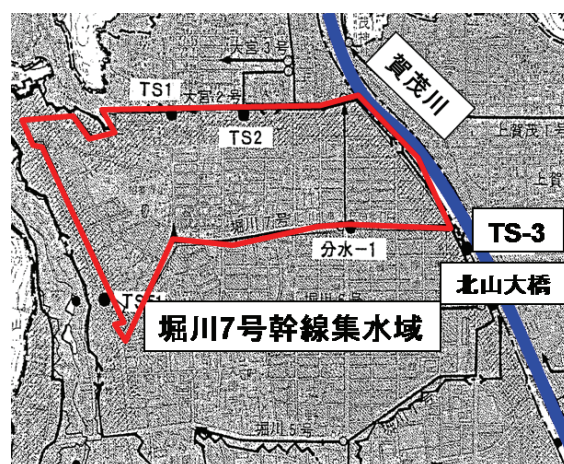


Fig. 3 Map of sewage district of Horikawa sewer No.7

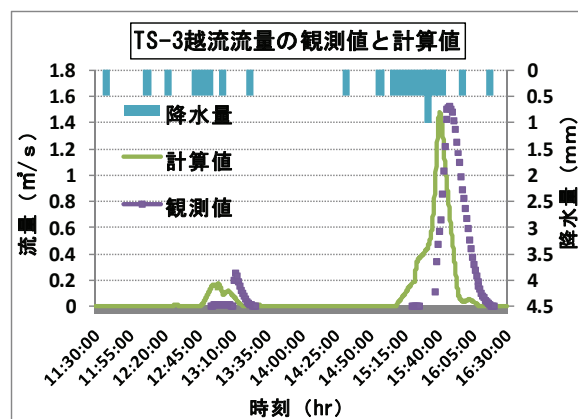


Fig. 4 Hydrograph of TS-3 overflow

(2) 堀川 7 号幹線の再現計算結果

上記の条件のもと斜面流出の再現計算を行った。粗度係数を 0.015 にした時に再現性が最も高くなった。計算で得られたハイドログラフを Fig.4 に示す。これにより支流域統合を行った結果、流出時間が実際よりも小さくなるのが分かる。一方で流出ピーク時の流量は再現されている。これらの結果より、

支流域を統合する(集中化)する場合には、統合前の斜面や管路の勾配や粗度係数について、単純に積算するのではなく、係数を掛けるなどの調整を行う必要があることがわかった。

(3) 支流域統合の影響評価

(2)で述べたように支流域を統合すると流出ピーク時間にずれが生じることが確認された。そこで支流域の統合の度合いによって発生する流出時間のずれについて検証する。

概要で述べたように先行研究では堀川 7 号幹線の集水域は 262 個の支流域に分割されていた。それを本研究では 10 個の支流域に統合したが、ここでは支流域の統合を段階的に行い、統合による影響評価を行う。そこで、まず中間段階として流域を 37 個の支流域に分割した場合の流出計算を行った。計算条件は(1)と同様である。

雨水吐口 TS-3 での越流流量計算結果と観測流量との比較および支流域の分割数 10 個と 37 個と 262 個のときの計算結果の比較のグラフを Fig.5 に示す。以上の 3 つの段階的な統合を比較した結果、262 個から 37 個への支流域統合においてピーク流量およびピーク時間ともにほぼずれが生じていないことが確認された。一方で 37 個から 10 個への支流域統合においては、ピーク時間のずれが生じている。このことから下水管の接続形態の似ている支流域を統合しても流出特性の変化に及ぼす影響はわずかであると考えられる。

(4) 鴨川左岸の合流式下水道網の再現計算

鴨川左岸の合流式下水道網について 2002 年 10 月 1 日の降雨事例について再現計算を行った。支流域分割は京都市上下水道局提供の下水道排水区情報より各排水区を 1 つの支流域として整理した上で合流などのない統合可能な排水区は統合した。鴨川左岸では総計 44 個の支流域に分割した。

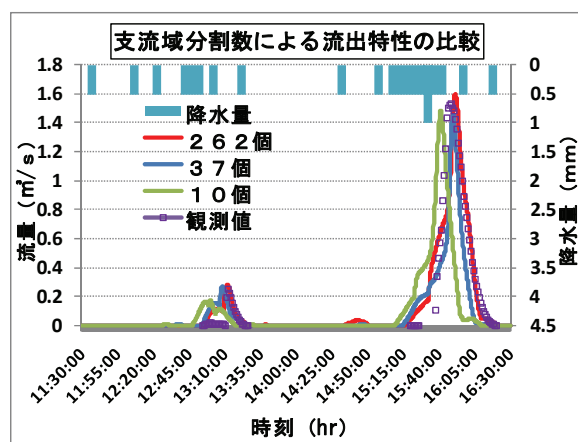


Fig. 5 Hydrograph of the various numbers of sub basin under three calculation conditions.

計算結果については特に越流流量の大きかった雨水吐口 TS-40 のハイドログラフを Fig.6 に示す。計算の結果、この降雨では 12 カ所の雨水吐口で越流が発生するという結果になった。

(5) 鴨川（賀茂川）右岸の合流式下水道網の再現計算

鴨川右岸の合流式下水道のうち、鴨川に流入する雨水吐口に接続する下水道網について再現計算を行った。右岸についても 2002 年 10 月 1 日の降雨を対象にした。右岸側では雨水吐口の遮集能力が明確でない箇所が存在したため今回の計算のため設定した遮集管渠の最大流下流量を遮集能力として計算した。支流域分割については、9 個の支流域に分けた。

計算の結果、賀茂川右岸の雨水吐きからは越流が発生しなかった。これは、雨水吐きの遮集能力を上記のような設定で与えたため、現実の値よりも過剰に評価されているためと考えられる。

4.2 鴨川の流量再現計算

(1) 流量計算の解析範囲

鴨川の流量再現計算は荒神橋を上端とし、深草地点を下端とする約 6.5 km を解析範囲とする。この解析範囲は Fig.1 に示している。水位観測値は上端の荒神橋水位観測所のデータと、下端の深草水位観測所の 2002 年 9 月 30 日から 10 月 2 日にかけての水位データを使用する。

(2) 横流入量について

鴨川への横流入量は鴨川左岸及び右岸の下水道流出モデルを使用して、2002 年 10 月 1 日の降雨事例について計算した流量を横流入量として与えた。横流入は、河道の格子上端に流入させ、当該格子の上流端で流量および水深を再計算しその値をもとに、下流側の流量・水位を順次計算する方法で行った。

(3) 解析計算結果と考察

荒神橋の水位データから河道幅を基準として上流端流量を求め、それを境界条件として Dynamic Wave

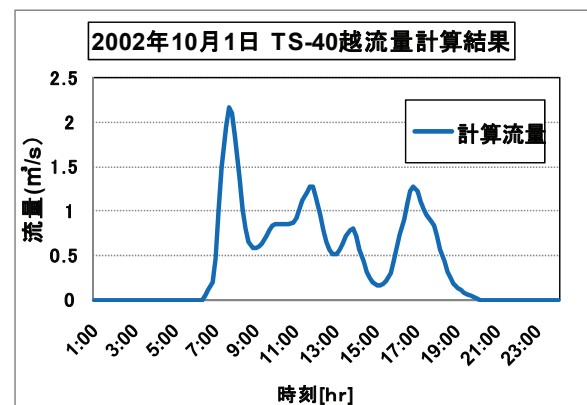


Fig. 6 Discharge hydrograph of TS-40 overflow

Model で解析を行った。水位の比較は深草水位観測所での水位の観測値と解析値で行った。水位及び流量の比較結果を Fig.7 に示す

この結果で示されるように計算値は観測値と比べて水位、流量ともに変動が過小になっている。本研究では、対象降雨の強度はそれほど大きなものではなく、洪水流の評価を目的とした解析と比較して、低流量時の流量の再現性を評価することとなる。このため、計算された流量ピークが小さくならざるを得なかった。より大規模な降雨事例を用いて、総合的にモデルの評価をすべきであるとともに、低流量時については流速観測を実施して、流速を評価することも検討すべきである。

(4) 鴨川流量連続解析の結果と考察

本研究では雨天時に流入した汚濁負荷が降雨終了後の流量低下時に河床に堆積していくメカニズムをモデルによって再現することを目的にしている。そのためには河川の流量を単一の降雨イベントのみを解析するのではなく、複数の降雨イベントを連続して解析する必要がある。そこで鴨川について連続する降雨事象を対象とした解析を行った。対象期間は

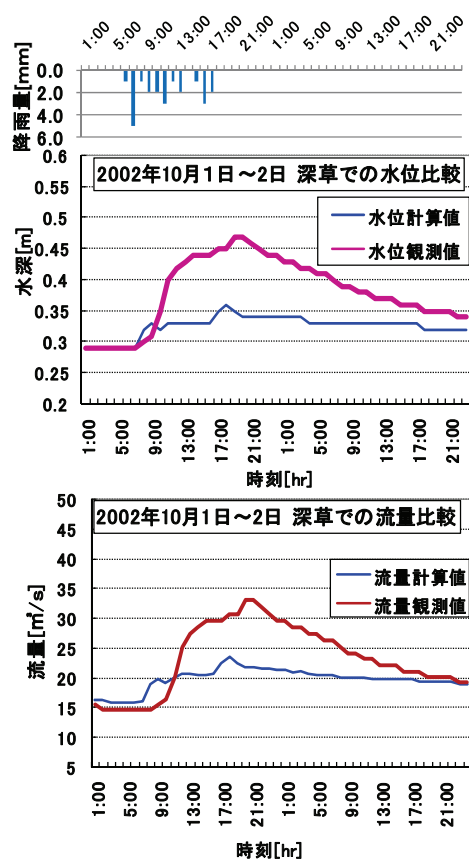


Fig. 6 Observation and calculation of water level and water quantities at observation point Fukakusa.

2002 年 10 月 1 日から 10 月 15 日の 15 日間である。

この期間には降雨イベントが主に 2 回ある。10 月 1 日と 6 日から 7 日にかけての 2 回にわたって総雨量 10 ミリ以上の降雨が観測されている⁽⁴⁾。

これらのデータをもとに、対象期間において荒神橋の水位観測データを上流端境界条件として解析を行った。計算流量と観測流量の比較および計算水位と観測水位の比較結果を Fig.8 に示す。

この比較結果で示されるように水位、流量ともに増加時のピーク量が観測値と比較して計算値は過小になっているが、増減の位相は比較的によく再現されている。今後は横流入量の再現性の評価と河道流との組み込み方などを改良しピーク時の水位および流量の再現性の向上を図る必要がある。

4.3 河川水と河床間隙水の水質解析の考察

河川水中の移流分散モデルに河床の間隙水の水質モデルを結合し、河川水から河床への汚濁物質の沈降及び河床からの巻き上げによって河川水と河床間隙水の水質がどのように変化するかを解析した。対象区間は北山から北大路と短い区間での解析をまず行った。その解析範囲を Fig.9 に、解析結果を Fig.10 に示す。その結果無降雨時には河床への沈降で河床間隙水の懸濁態窒素濃度が上昇していき、降雨流出

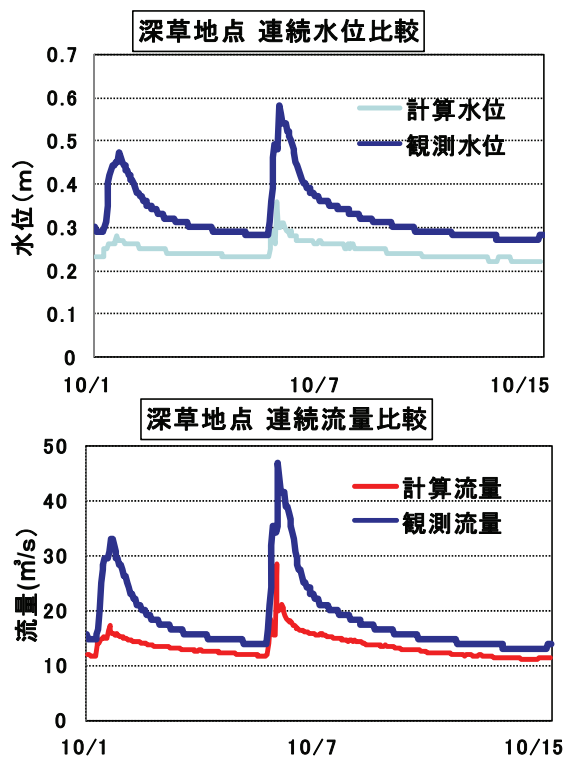


Fig. 7 Observation and calculation of water level and water quantities at observation point Fukakusa during 15 days

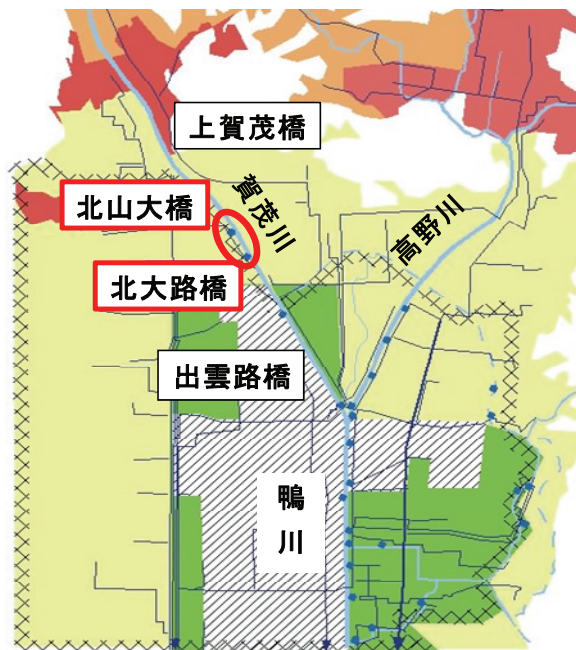


Fig. 8 Map of water quality research area

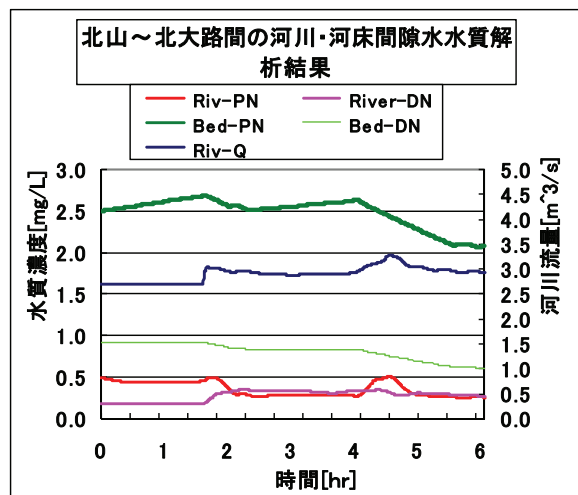


Fig. 9 Calculated nitrogen concentration of river water and river bed porous water

が始まると巻き上げによる河川水への物質移動が増加して河川水の濃度は上昇するとともに河床間隙水の濃度は減少していく。降雨流出量が低下するにつれて、河川水の濃度が低下し河床間隙水の濃度の低下は小さくなっていき、ほぼ一定の値に近づいた。降雨流出終了後の無降雨期間には上述の通り河床への沈降が卓越する。この計算結果から、河川水と河床間隙水との沈降と巻き上げによる物質の移動が再現できており、長期間の汚濁物質の流出解析を行う準備ができた。

5. 結論および今後の課題

5.1 結論

(1) 本研究のまとめ

本研究で行ってきたことをまとめる。

- ① 既往研究の支流域を統合しての再計算
- ② 鴨川左岸地域の下水道網のモデル化と流出計算
- ③ 鴨川右岸地域の下水道網のモデル化と流出計算
- ④ 賀茂大橋以南の鴨川の河道流について Dynamic Wave Model の適用
- ⑤ 賀茂川の河川水の移流分散モデルと、河床間隙水との汚濁物質の入出力を考慮した水質モデルを結合し河川水と河床との沈降、巻き上げによる物質の移動を再現した。

(2) 結果と考察

本研究で行った各事項について、結果の整理及び考察を行う。

まず、排水区を統合したモデル排水区による再現において、ピーク流量の再現は統合前と比べて再現性が高かったが、ピーク流量発生時間に関しては、観測値と比較して早めに算定された。これは、支流域を統合したことにより、斜面勾配が平均化され、管路の流下最長距離に基づいているとはいえ流下距離が短く評価されている可能性が考えられる。支流域を統合する場合には、勾配や粗度係数などに補正を施す必要があると考えられる。

鴨川右岸と左岸の下水道網に関しては、本研究において新たに作成したものである。既往研究と異なり、鴨川流域広域に下水管からの越流が及ぼす河川水質への影響および河床への沈降と河床からの巻き上げにより、雨天時と晴天時を連続させた河川水質の算定を行うとともに、河床への堆積と河川水への巻き上げによる汚濁物質の収支を評価することが可能となった。

5.2 今後の課題

本研究では対象とする鴨川の流域について降雨時の雨水の流出状況を、解析モデルを用いて流出解析を行った。Kinematic Wave Model を用いて斜面および下水道管路網の雨水流出の追跡を行い、河川河道の流下に対しては Dynamic Wave Model を適用した。

河道に対して Dynamic Wave Model を適用した目的は2つある。ひとつは本モデルを晴天時にも適用することである。いまひとつは、下水道の満管状態や合流地点に排水機場が存在するような河川に対して本モデルで表現することである。いずれの目的にも共通しているのが下流側の状況が上流に及ぼす影響を考慮する必要があることである。Kinematic Wave Model では下流の状態を上流に反映させることができないため、上記の目的でモデルを使用するためには河道流については Dynamic Wave Model を用いる必要がある。本研究では、河川の河道にのみ Dynamic

Wave Model を適用したが、今後は下水道の幹線管渠にも適用して、より再現性を高めることが課題である。

また本研究では河川水と河床間隙水の水質モデルを賀茂川の北山・北大路間という短い距離で行っているが、この範囲を広げていくことも課題である。そのためには河川の流量、流速、水深を精度よく再現できるように河川の流量モデルを改善していく必要がある。具体的には現在のモデルでは横流入の影響を反映しきれていない面がある点を改善する必要がある。

参考文献

- 土木学会(2001): 水理公式集例題プログラム集[平成13年度版].
- 深尾大介(2005): 都市域における非特定源からの雨天時汚濁物質流出解析, 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻修士論文
- 城戸由能・井口貴正・深尾大介(2004): 河床底泥が河川水質に及ぼす影響, 京都大学防災研究所年報, 第47号B, pp.809-818.
- 城戸由能・川久保愛太・井口貴正・田中幸夫・中北英一(2007): 鴨川における河川水と地下水間の水・物質循環の解明, 京都大学防災研究所年報, 第50号B, CD-ROM, pp.579-594.
- 國松孝男・村岡浩爾(1987): 河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版.
- 京都府土木事務所(2001): 鴨川河川計画断面図・縦断面図・平面図.
- 京都府土木事務所(2002): 雨量観測記録(2002/04/01~2003/01/28)
- 京都府土木事務所(2002): 水位観測記録(2002/04/01~2003/01/28)
- 京都市下水道局(2003): 京都市公共下水道区域図(汚水), 平成15年度版, 2003.
- Kido, Y. Fukao, D. and Nakakita, E.(2006): Pollutant Runoff Impacts on a Urban River Environment through the Combined and Separate Sewerage System, Proc. of the 6th Japan-Taiwan Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation, pp.Session B-7-1 ~ Session B-7-11.

Pollutant Runoff Analysis in Kamo River Basin

Yoshinobu KIDO, Hiroyuki TORII* and Eiichi NAKAKITA

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Recently, construction of sewerage system has reduced pollutant load flowing into urban rivers and river water quality has been gradually improved. But combined sewerage system having inadequate drainage capacity for designed rainfall intensity is bringing very often overflow including much pollution. On the other hand, the increasing of impermeable urban surface and urban activities have caused another pollutant runoff during rainfall events which so-called diffuse pollution mainly derived from sedimentation on the urban surface and the drainage channel. It becomes the principal pollutant source in urban river water. The pollutant settled on the river bed is considered to become additional factor for river water quality analysis during dry-weather condition. In this study, the water quality mechanism was analyzed including the inter-transportation between river water and river bed. It could estimate the potential of river bed sedimentation as the pollutant source in river basin.

Keywords: combined sewerage system, Kamo river basin, water quality analysis