

西羽東師川流域の水文・環境観測と水・汚濁負荷流出解析 —非特定汚染源からの汚濁負荷流出構造の解明—

城戸由能

要 旨

近年、都市部での局地的集中豪雨による内水浸水等の被害が顕在化しており、本研究で対象とする西羽東師川流域でも治水対策の一貫として大型地下トンネル貯留施設が建設中である。一方、流域内の市街化が進みさまざまな負荷源から流出する汚濁物質により河川水質は汚染されているが、非特定負荷源からの汚濁負荷に関する実態調査が皆無であり、削減対策の検討のための基礎的情報が不足している。そこで、本研究では雨水流出・汚濁負荷流出の実態調査とその流出解析およびモデル化を行った。その結果、対象流域内の雨水流出および汚濁負荷流出機構の特性を明らかにするとともに、今後の調査の要点、負荷削減策についての検討を行った。

キーワード: 西羽東師川流域, 大型貯留施設, 雨水・汚濁負荷流出解析, 非点源汚濁負荷

1. はじめに

近年、都市化や地球規模気候変動の影響を受け、世界各地で異常降雨が発生し、甚大な水害を引き起こしている。特に国内では、都市部での局地的集中豪雨による内水浸水が多発し、地下街の浸水被害も顕在化し、それらの対策が急務となっている。そのため、流域全体での流出抑制対策を含めた総合的な雨水対策（総合治水対策）が昭和55年の事務次官通達「総合治水対策の推進について」に基づいて、17河川を対象に実施され、その後、平成16年には「特定都市河川浸水被害対策法」が成立し、より多くの河川流域を対象とした総合的な雨水対策が進められようとしている。本研究が対象とする西羽東師川流域は、流域貯留浸透事業実施河川として総合治水対策のプログラム評価の中で取り上げられ（国土交通省、2004）、地下トンネル貯留施設による浸水防止事業が進行中である。また、西羽東師川流域でも浸水実績図および浸水予想図を含む洪水ハザードマップが作成され、地域住民への情報提供および防災意識の啓蒙活動の一環として公開されている。

一方、都市河川の水質改善は1990年代以降鈍化しており、水洗化等による生活環境の保全はもとより、低水時の水量・水質の保全および生態系の再生・維持が都市再生の目標に掲げられている。西羽東師川流域は桂川を原水とする農業用水路や流域内中小河

川が合流し、最終的に淀樋爪町にて桂川に合流する。流域内は市街化が進み、人為的な負荷源（特定負荷源）とともに都市地表面等の非特定負荷源から流出する汚濁物質により河川水質の汚染レベルが高い。今後、下水道整備が進むことで特定負荷源からの汚濁負荷の削減は期待できるが、非特定負荷源からの汚濁負荷についてはその発生・流出・流下機構に関する実態調査も皆無であり、今後の削減対策の検討のための基礎的情報が不足している。

本研究の最終的な目標は、治水対策と汚濁負荷削減を両立させた雨水制御計画を立案し、現在建設中の地下トンネル貯留施設を両目的で利用可能な制御戦略を提案することにある。本論文では、そのための基礎となる雨水流出・汚濁負荷流出の実態調査と、それに基づく雨水および汚濁負荷の流出機構の解明とモデル化を目的とする。

2. 西羽東師川流域の現状と課題

西羽東師川流域は桂川右岸に位置し、流域には西暦784年桓武天皇が造営した長岡京があり、歴史的に重要な地域であるが、古くから小畑川・小泉川・桂川の大氾濫が起き、多大な被害を受けてきた地域である。Table 1に示すように、近年も浸水被害が多く発生しており、早急な治水対策が必要な地域である。

2.1 西羽東師川流域における治水全体計画

京都市の「安らぎ 華やぎ 京都21推進プラン」(京都市, 2002)の年次計画書によると, 河川・下水道等の連携による総合的な治水対策の推進の一環として, 西羽東師川や有栖川流域において, 河川・下水道の連携による河川改修, および雨水幹線・ポンプ場・雨水貯留池の整備など総合的な治水対策の推進が挙げられている。また, 向日市のマスタープランでは, 「治水対策の推進」として「京都府桂川流域下水道雨水事業と本市公共下水道雨水事業による雨水幹線及び貯留施設の整備を促進するとともに, 小規模河川の改修や浚渫などによる治水対策」を進めるとともに, 「西羽東師川改修計画の早期実現と淀川や桂川の河床引き下げなどを関係機関に要請し, 抜本的な浸水対策」を図り, さらに「開発行為等による雨水流出量の増加対策として, 事業主に雨水流出抑制施設の設置を指導」することが示されている。

2.2 計画の概要

向日市の公共下水道による雨水整備は, 平成6年度に事業着手し, 平成8年度に策定した「向日市下水道雨水排水基本計画」に基づいて実施されている。本計画では, 目標年次を平成22年度とし, 寺戸川流域や石田川流域など市内を8つの雨水排水区に分割し, 排水区面積約767haについて雨水幹線や貯留施設を整備することになっている。特に, 寺戸川排水区においては, 平成9年から供用を始めた向日市の寺戸川1号幹線, および平成13年から暫定供用を開始した京都府「いろは呑龍トンネル」(以下呑龍トンネルと略す)が流出抑制の役割を果たし, 両者の貯留能力は約6万 m^3 に及ぶ。一方, 石田川排水区では, 平成11年度から約1.1万 m^3 を貯留する石田川1号幹線の建設が開始され, その末端には京都府桂川流域下水道の乙訓ポンプ場 (Table 2) の建設が進んでおり, 西羽東師川本川への放流が始まろうとしている。このように, 京都府流域下水道雨水事業と連携して向日市の下水道雨水排水対策が計画的に進められている。

京都府は, 京都市・向日市・長岡京市にまたがる1.84haの区域の雨水排水・浸水対策を進めるために, 増水河川からの溢水を取り込み貯留するための地下貯留施設(呑龍トンネル)の計画を推進している。呑龍トンネルは延長約8.8km, 容量約15万 m^3 の大規模な施設である。この呑龍トンネルのうち, 北西端部の北幹線1号幹線(935m, 内径8.5m)については, 2001年6月1日から暫定供用が開始され, 約5万 m^3 の雨水が貯留可能となっている。当初計画では, 一端貯留された雨水は河川水位が低下後, 徐々にポンプ施設で西羽東師川に排除することになっていたが, 貯留雨水の一部を降雨中に桂川右岸流域下水道・洛西

Table 1 Flood disaster in Katsura River basin

年月日	時間最大雨量[mm]	総雨量[mm]	浸水戸数
1990/9/13	70.5	349.5	約810戸
1991/7/15	37.0	109.0	約570戸
1993/7/5	29.5	165.0	約400戸
1997/8/5	48.5	103.5	約20戸
1998/8/27	55.5	61.5	約30戸
1999/6/27	67.5	125.0	約480戸
1999/6/29	37.5	177.0	約440戸

Table 2 Outline of Otokuni pumping station

ポンプ場名称	乙訓ポンプ場	
所在地	向日市	
吐水量	0.8 m^3/s	
	計画概要	事業実績
排水面積	1,838ha	216ha
対策量	約24万 m^3	約5万 m^3
幹線管渠	約9.2km	約0.9km
関係市	京都市, 向日市, 長岡京市	

Table 3 Outline of Nishihaddukashi basinwide flood prevention plan

	暫定計画10年確率		H15年度末整備	
	[m^3/s]	貯留分[m^3]	[m^3/s]	貯留分[m^3]
総量	151	327,000	129	241,604
河道対策		0		0
河道改修	100		100	
羽東師貯留管※	9	0	0	0
流域				
下水道対策	35	272,000	20	155,794
●洛西1-1幹線		78,000		78,000
●呑龍		154,196		53,000
●西部開発		24,794		24,794
●その他6カ所		15,010		0
流域対策	7	55,000	6	47,010
○その他6カ所		49,170		45,670
○学校公園貯留		5,830		1,340
計画外	0		3	38,800
西羽東師排水機場	60		60	

※羽東師貯留管は現計画では放水のみで貯留機能は無い。

浄化センターのポンプ場から桂川本川へ直接放流することが検討されている。これにより, 連続する大規模降雨にも対応して, 流域内排水路の雨水排除能力を越えた雨水をトンネル貯留施設に取り込みことができることとともに, 10年確率降雨に対する計画容量を約5万 m^3 縮減できる。西羽東師川流域における総合治水対策の概要をTable.3に示す。

2.3 治水計画の課題

現時点の雨水排除計画では, 呑龍トンネル, 洛西1-1幹線, 久世ポンプ場, 乙訓ポンプ場, 西羽東師川, 羽東師ポンプ場, 羽東師貯留管および関連市の雨水貯留管といった多様な対策施設が計画された能力を同時連携的に発揮することで, 10年確率の治水安全度を保つものである。しかし, 各施設の運営管理は各施設事業者が個別に管理することになっており, 緊急時には各施設管理者が近隣影響地域の被災軽減を図るため, 施設の最大能力を使ってそれぞれ独立に運転される可能性がある。加えて, 現在完

成している施設は計画能力の一定割合しか発揮できない状況が続く、その割合も施設によってばらつきがある。また、近年の都市型水害の被害補償の際に明らかなように、治水対策施設は、そのほとんどが人工・公物となることから、一旦浸水被害が生じれば管理瑕疵を問われる。さらに、西羽東師川流域を自然河川として管理した場合、合流点付近の桂川本川の流下能力から制約を受け、西羽東師川から桂川への許容放流量(60m³/s)が流域の治水安全度を規定してしまう。

2.4 治水計画の課題に対する対応案

上述のように西羽東師川流域の10年確率の治水安全度を確保するためには、様々な対応策を検討する必要がある。まず、西羽東師川流域に完成している各施設等を統合的に管理することにより、各施設の流出抑制効果を最大限に発揮させる運転管理・施設制御方法の検討を行うべきである。そのためには、河川と下水道が一体となった流出解析モデルを構築し、これを活用して、各種運転管理の方策をシミュレーションにより検証することが重要である。さらに、近年問題となっているノンポイント汚染源からの雨天時流出汚濁物質についても、流出解析モデルを活用して、面源負荷流出量の把握と公共用水域における水質挙動を明らかにするとともに、貯留・浸透施設の活用による負荷削減効果の評価を行う必要がある。そのための必要な調査項目としては、①地形調査、②降雨調査、③流量、流況調査、④水質調査、⑤浸水被災履歴調査、などが挙げられる。

3. 既存調査資料の収集・整理

3.1 水文・気象関連データ

対象流域内でこれまでに行われてきた水文・気象関連の観測データについて調査・整理を行った。

水位観測点については、桂川からの分水点にあたる一ノ井堰から松尾付近までの一ノ井用水路(東・西)の区間に水位計はなく、桂川からの導水量が把握できない。松尾以南の洛西幹線(西・中央)、寺戸川、久世ポンプ場までの都市下水路については、各所に水位計が設置されている。しかし、久世ポンプ場から西羽東師川排水機場までの西羽東師川については水位計が少なく、この区間に新たな水位観測点を設ける必要がある。特に、石田川幹線が合流する地点には乙訓ポンプ場が建設中であり、ポンプ場の供用開始に向けて、放流先河川および流入する石田川の水量を把握しておく必要が高い。また、寺戸川の支流や和井川、ふりこんで川などの枝川および小規模な農業用水路については、常時観測を行うの

ではなく、本川への流入量を把握することを目的とした晴天時および雨天時に短期間集中的な観測を実施することで、水系全体の水収支を把握することが必要となる。特に、雨天時の小流域からの流出は、灌漑・非灌漑期といった農業利用状況や地形条件・土地利用等により大きく異なる可能性があるため、観測対象地点を精査して、効率的な観測を行うようにする。

雨量観測点については、流域の全体規模に対し十分な数の雨量計が設置されているといえるので、新たな観測地点を設ける必要性は低い。ただし、降雨分布を把握するために対象流域外部である桂川左岸流域などの観測点のデータも収集して、流域全体をカバーする領域での降雨空間分布および時系列変動について解析を行うことも検討する。

3.2 流出解析等に関する既存研究資料

対象流域でこれまで行われてきた、水文観測や流域内水路等の詳細な調査、および治水計画を目的とした流出・氾濫解析等を含む研究資料を収集した。資料の中には、対象流域の特徴のひとつである、農業用水路と河川河道網の関係を対象流域の北部流域について詳細に調査し、とりまとめたものがある(京都市、2003)。流域全体の流出機構を解明する上でこの資料は非常に重要であり、西羽東師川流域全体について同様の調査を実施することが必要となる。桂川右岸流域下水道排水区内で降雨量18地点、水位4地点のデータをまとめた資料では日雨量・日平均水位をまとめた月報が主であり、10分間雨量・水位をまとめた日報データが少ない。向日市の下水道雨水排水区基本計画に関わる報告書(向日市、2003)では排水施設等の配置図等の基本図面および流量計算等の基礎データが詳細に得られる。

近年の下水道排水区を対象とした流出解析業務では、MOUSE、XP-SWMM等の市販の流出解析ソフトウェアパッケージを利用することが多く、その基本は住戸区画単位で、Kinematic Wave Modelを元にした表面流出解析および管路・水路の水理解析を実施し、マンホール等からの溢水による浸水深・浸水エリアの評価を実施している。対象流域の特性を鑑みれば、農業用水路と雨水排水路の地上排水路網の平面的な位置関係、さらに地下埋設管への取込みなど、立体的な位置関係を表現することが流出計算上必要となる。また、溢水雨水の地表流動つまり氾濫解析を厳密に行わなければ、全般としては低平地であっても微少な地形変動による凹凸によって一部の地区が湛水することは過去の浸水被害からみても明らかであり、氾濫解析についてはモデル化をする上で考慮すべきことが多い。

4. 現地調査

2005～2007年度の期間に複数回の現地踏査を行い、河川網・水路網の状況、流況および水質状況等についての把握を行った。特に、①流出経路および湛水危険度の高い地点の確認、②農業用水路の現状水量把握、③水位計設置地点の確認、④晴天時・雨天時の本川への横流入水路の確認等を行った。

4.1 水文・水質観測地点と観測・分析方法

本研究で実施した水文・水質観測の主要な地点とその写真をFig.1に示す。以下に観測地点と内容についてまとめる。

(1) 自記水位計による連続観測

既設の流域内水文観測地点の配置を検討し、久世ポンプ場より下流部での水位観測が不十分であることが判明したため、本研究では新たに4カ所に自記水位計を設置した。設置地点は、①石田川右岸（乙訓ポンプ場側）、②三反田橋下流右岸、③長権堂橋下流右岸、④古川綴橋上流右岸、である。計測時間間隔は5分とし、データの回収を1～2週間間隔で行った。

(2) 自動水質計による連続観測

水質観測では、イオンセンサー等を装備した自動記録式の自動水質計（堀場製作所社製：W23-XD）を流域内4地点に設置し現地連続観測を行った。設置地点は、①嵐山水0075号（一ノ井西水路・嵐山地点）、②寺戸川左岸（久世ポンプ場上流）、③石田川下流右岸（乙訓ポンプ場近傍）、④古川綴橋上流右岸、である。測定項目は、以下の項目である。1)pH(-)、2)COND(S/m)、3)TURB(mg/L)、4)DO(mg/L)、5)Temp(°C)、6)SAL(%）、7)TDS(g/L)、8)σt(σt)、9)ORP(mV)、10)Cl(mg/L)、11)NO3(mg/L)、12)Ca(mg/L)。計測時間間隔は10分～15分とし、降雨時には随時1～5分間隔に設定変更した。水質計内のロガーに記録されたデータを1～2週間間隔で回収した。

(3) 流況および採水観測

自記水位計および自動水質計のデータ回収と同時に、各地点の流速および水深の現地計測と採水を行った。また、晴天時・雨天時の集中観測では、流速・水深計測とともに自動採水器（ISCO社製：6710オートサンプラー）および手採水による採水を行った。得られた採水試料について実験室内で分析機器を用いた水質分析を行った。

(4) 水質分析方法

採水試料を実験室に持ち帰り、分析機器を用いた水質分析を行った。採水試料は、まずガラス繊維ろ紙(GA-100；保有粒子径1μm)を用いてろ過し、ろ過前後のろ紙の乾燥重量の差から浮遊粒子状物質質量(SS)を計測した。使用した分析機器は全有機態炭素測定器（島津製作所社製：TOC-V/CNS）およびイオンアナライザー（島津製作所社製：PIA-1000）である。分析項目は有機物・富栄養化物質、溶存態の陽イオン類・陰イオン類の16項目である。

1)TOC(全有機態炭素, Total Organic Carbon), 2)T-N(全窒素, Total Nitrogen), 3)SS(浮遊粒子状物質, Suspended Solid), 【溶存陽イオン類】4)Li, 5)Na, 6)NH₄, 7)K, 8)Mg, 9)Ca, 【溶存陰イオン類】10)H₂PO₄, 11)F, 12)Cl, 13)NO₂, 14)Br, 15)NO₃, 16)SO₄。

このうち、1)、2)の項目についてはろ過後試料と原水についてそれぞれ機器分析を行い、4)以降の項目についてはろ過後試料のみを分析した。1)、2)の二項目についてはろ過後試料の分析結果から溶存態物質質量、原水試料の分析結果から総量を求め、両者の差から懸濁態物質質量を算定した。また、各採水地点で複数採水した場合は混合または個別分析後の測定値の平均を用いた。

4.2 観測結果

(1) 晴天時観測

晴天時縦断観測は、水系の上流から下流までの複数地点について同日に採水を行ったものである。晴天時観測集計結果をTable 4に示す。

TOC・T-Nについては自然河川に比べて濃度が高く、都市域の人為的な汚染源からの汚濁負荷の供給が影響を及ぼしている。SSについては比較的lowく、自然河川と比べても特に高いとはいえない。ただし、本川下流部の三反田橋から古川綴橋地点ではSSも高い濃度で観測されており、晴天時の流量が小さく河床堆積物からの巻上げによる供給は考えにくいので、晴天時にも不特定な供給源が流域内に存在することが考えられる。実際、晴天時調査時に河道沿いの施設からの排水が直接放流されるのを目視確認しており、一部の排水については採水して水質分析を行った。枝川である石田川や五間堀川・七間堀川の水質は西羽束師川本川に比べて極めて悪く、特に下流の五間堀川・七間堀川については晴天時の流速は極端に低く、多くの汚濁物質が滞留しており、水質悪化の要因となっている。このように河道中に滞留している河川水および河床堆積物の多くは、雨天時の増水期に一気に流出するので、雨天時負荷の発生源のひとつとなる。

本川に複数流入する水路や排水口からの流出水を採水・分析した結果、寺戸川・久世、三反田橋、古川綴橋地点の横流水は流入先河川水質に比べて極端に高濃度の物質が多く検出された。特に古川綴橋地点の横流水はあきらかに家庭からの洗濯排水と考えられ、流入時間と水量は限定されているが、炭素・

窒素・塩素イオン・Naイオン等が極端に高い。下水道の整備状況および接続状況を確認する必要があるが、同様の負荷源が流域内に多く残存する可能性がある。また、五間堀川は西羽東師川本川から分岐した水が流域内農耕地に網目状に分配され、その一部は随所で本川に戻ってくる。流域境界として図示さ

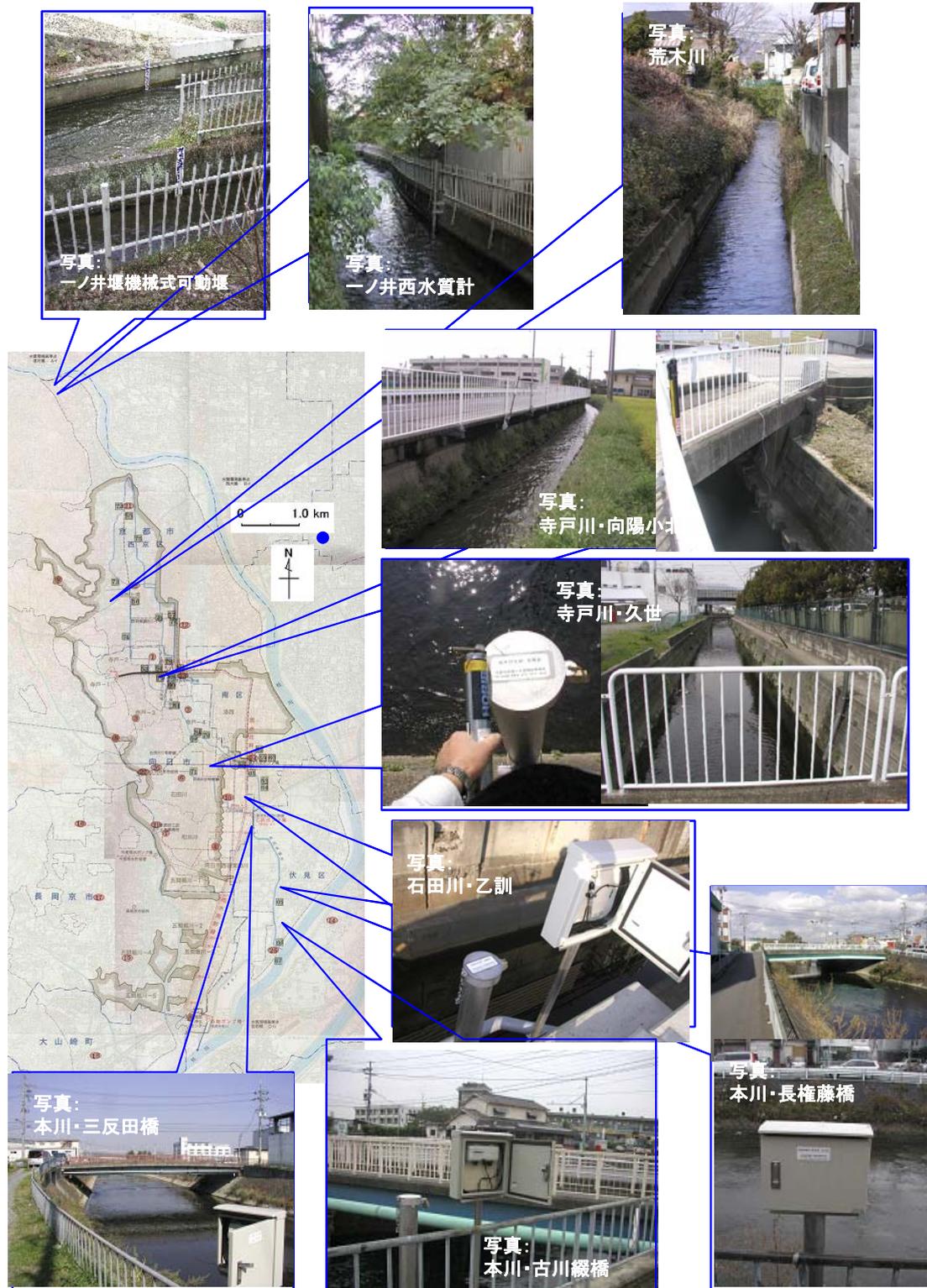


Fig.1 Map of study area and photo of observation stations

れた集水域以外にも西羽束師川に集まる水の経路を詳細に調べることが、水量解析および水質解析を進める上で重要となる。この点は、後述のモデル解析にも大きく影響を及ぼす。

古川綴橋でのNaイオンを除いて、都市河川で典型的な時間周期を特に示す地点および水質項目は見られないが、有機態炭素および窒素についてははなだらかな時間変動が見られる。SSについては特定の時間帯に極端に高くなる傾向があり、特に寺戸川・久世地点で顕著であった。有機態炭素・窒素・SS・溶存陽イオン類については、一ノ井西水路に比べ、下流

川の水質悪化が顕著であり、特に寺戸川・久世地点で高濃度に検出された。溶存陰イオン類濃度については、上流～下流まで大きな差異は見られなかった。

(2) 雨天時観測

雨天時観測を過去3年間に計8回行い、機器の故障等によって回収データが不十分なものを除くと、5回の有効な観測データが得られた。今回の解析では、2006/5/17 および2006/9/6に実施した雨天時観測の結果についてまとめる。採水地点数はそれぞれ4地点、当日の総降雨量は、20.5mm（京都観測所）、17.0mm

Table 4 Average of water quality during dry weather condition in 2006

河川・水路名	地点名	水質項目	TOC	POC	DOC	T-N	P-N	D-N	SS
			[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]
		data数	15	15	15	15	15	15	15
		平均	4.0574	2.4883	1.5690	3.3903	0.3039	3.0987	8.9593
		偏差	3.4663	2.9927	0.9450	7.0488	0.2448	7.0633	12.5154
		最大	13.3453	11.8578	4.5070	28.6379	1.1225	28.4180	52.8000
		最小	0.9312	0.2228	0.7084	0.9014	0.0980	0.8034	2.7875
一ノ井西水路	嵐山	河川水	2.6744	1.7296	0.9448	1.1803	0.2354	0.9449	4.8467
一ノ井東水路	嵐山・第一橋	河川水	4.2011	3.2270	0.9742	1.2787	0.2892	0.9894	6.7391
寺戸川	向陽小北	河川水	3.9318	2.0839	1.8479	1.4916	0.3425	1.1492	8.0999
		横流入	2.2166	1.4526	0.7640	1.2600	0.3421	0.9179	5.9422
	久世P場上流	河川水	0.9312	0.2228	0.7084	1.0161	0.1187	0.8975	4.3900
		横流入	2.9568	1.4235	1.5333	1.3964	0.2782	1.1182	9.4286
	乙訓	河川水	2.4022	0.8038	1.5984	1.4997	0.1720	1.3277	3.0203
		横流入	13.3453	11.8578	1.4876	2.0784	1.1225	0.9558	52.8000
工場排水		2.2308	0.6286	1.6022	0.9014	0.0980	0.8034	3.2000	
西羽束師川	三反田橋	河川水	2.5610	1.2926	1.2684	1.2325	0.2477	0.9848	5.1037
		横流入	2.6113	1.0047	1.6066	1.3789	0.1355	1.2469	2.7875
	長権堂橋	河川水	1.4479	0.5883	0.8596	1.2292	0.1510	1.0782	3.9396
		横流入	5.0922	2.5368	2.5540	4.8795	0.3439	4.5356	14.8000
	古川綴橋	河川水	3.3557	2.0776	1.2781	1.3936	0.2809	1.1127	4.3580
		横流入	10.9022	6.3953	4.5070	28.6379	0.4006	28.4180	4.9333

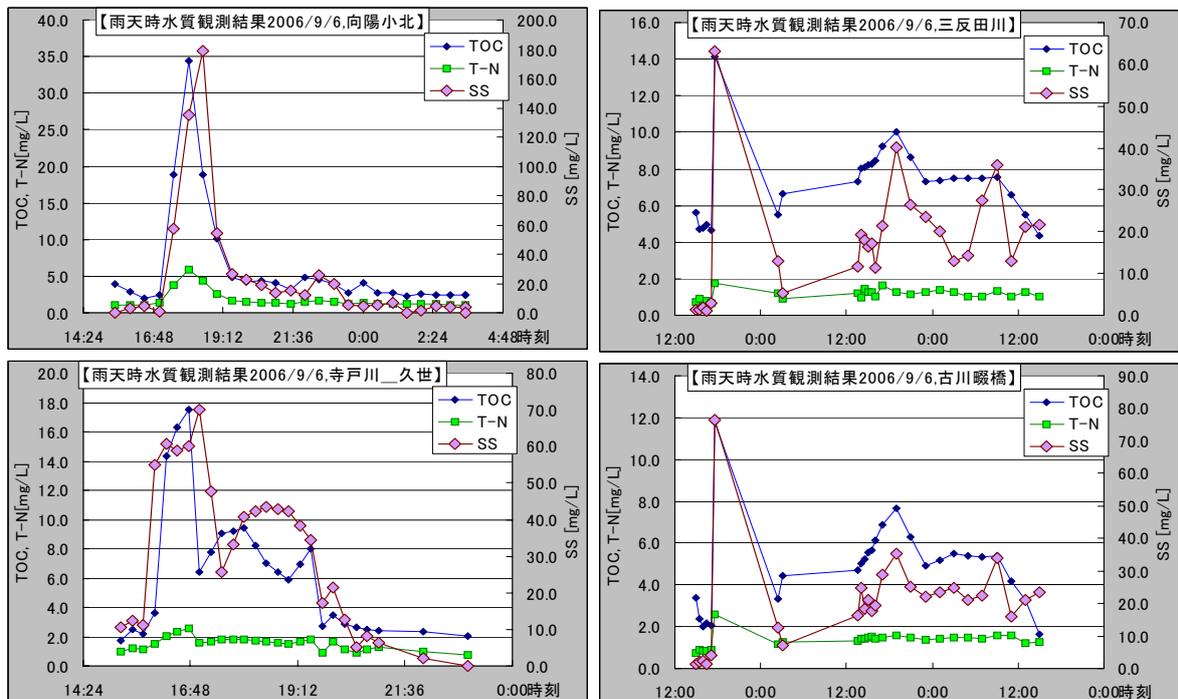


Fig.2 Observed water quality during wet-weather condition in 2006

(長岡京観測所)であった2006/09/06の観測結果をFig.2に示す。

晴天時水質と比較すると、寺戸川中流部の向陽小北地点では有機態炭素はピーク時には10倍、窒素は20倍を越え、SSを含めて降雨初期に高濃度の流出が観測される。この傾向は、西羽東師川本川でも観測されたが、2日間にわたって観測を行った三反田橋および古川堰橋では、9/6当日の降雨による負荷流出と2日目以降に流域から集まってきた汚濁物質の濃度も高い。降雨終了後も有機態炭素は晴天時の2倍程度、総窒素はやや高めであるが、SSはほぼ晴天時水質濃度と同様になっている。

陽イオン・陰イオン類については、寺戸川向陽小北地点では、流量増加期に濃度が低下する負荷量一定のものが多く見られ、降雨終了後は速やかに晴天時レベルの濃度に戻った。しかし、硝酸態窒素のみはファーストフラッシュと共に濃度が増加した。

特に、雨天時の懸濁態成分が高く、都市地表面等に堆積した粒子状物質が、降雨初期に大量に流出する様子ことが農業用水を多く集める寺戸川でも観測された。また、寺戸川・向陽小北地点から久世ポンプ場での水質挙動は2005年までの観測と異なり、向陽小北から久世地点までの区間に何らかの負荷源が考えられる。寺戸川には洛西幹線農業用水路から農地に排水された用水が戻る地点が多く、また国道171号線沿いの違い地部からの横流入口も多い。さらに、下流の西羽東師川本川でも多くの農業用水路が接続しており、農地のみならず市街地の雨水も集水している可能性が高い。

(3) 自動水質計による連続観測

自動水質計による測定のためには、センサー表面

の汚染除去と内部液交換および標準濃度に調整された校正液による校正を行う必要がある。より正確な測定値を得るためには高頻度で校正を行う必要があり、イオン測定に関しては1日1回、その他の測定に関しては1週間に1回程度の校正が推奨されている。現地での昼夜間連続観測のためには、効率的なセンサーのメンテナンス作業が必要である。昨年度からの経験にもとづき、現地でのメンテナンス作業を2週間に1回程度実施するのにあわせて、晴天時縦断観測の一部としての採水・分析作業も行った。さらに、2ヶ月に1回程度の頻度で自動水質計そのものを交換し、実験室内でより精密なメンテナンス作業を実施した。このようなメンテナンス方法における測定精度については別途解析・評価を行う必要がある。

自動水質計による観測データの集計結果をTable 5に示す。計測時間間隔については、基本的に多雨期には10分、秋雨期以降は15分とし、雨天時観測時には降雨時の詳細な水質変動を計測するために一時的に5分程度の間隔で測定を行った。

水質センサーの計測値は、室内分析機器による測定結果とは測定方法が異なるので、その利用については、JIS等で規格化されている分析方法による測定結果と比較する必要がある。また、自動水質計に搭載されている水質センサーには、センサーを河川水中に長時間設置することによる様々な要因で測定値に特有の変動が見られる。その変動については統計的な処理により変動成分を分離・補正して、真の測定値に変換する必要がある(福田, 2006)。今後、収集データに基づいて季節変動を含めたさまざまな変動要因を同定してモデル式を作成して検証を行う予定である。

Table 5 Statistical value of automatically detected water quality

		pH	COND	TURB	DO	Temp	DEP	SAL	TDS	σ_t	ORP	Cl	NO3	Ca
		[-]	[S/m]	[NTU]	[mg/L]	[°C]	[m]	[‰]	[g/L]	[σ_t]	[mV]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]
一ノ井西水路	総数	30.726	30.726	30.726	30.726	30.726	30.726	30.726	30.726	30.726	30.726	30.726	30.726	30.726
嵐山	平均	7.303	0.010	244.46	0.489	13.900	0.876	0.001	0.066	0.000	433.9	7.332	3.410	7.997
2006/4/1	偏差	0.196	0.001	65.80	0.153	0.383	0.083	0.001	0.006	0.000	17.8	0.597	0.730	3.354
~	最大	8.240	0.024	999.00	10.764	26.869	1.500	0.010	0.156	0.000	657.0	28.000	27.221	66.000
2007/3/31	最小	5.000	0.000	0.00	0.000	7.560	-0.252	0.000	0.000	0.000	167.0	0.000	0.000	0.000
寺戸川	総数	30.696	32.651	32.651	32.651	32.651	32.651	32.651	32.651	32.651	32.651	32.651	32.651	32.651
久世P場上流	平均	7.231	0.013	248.38	0.600	19.390	0.933	0.004	0.083	0.000	407.3	14.139	3.812	12.541
2006/4/1	偏差	0.123	0.004	45.57	0.251	0.321	0.017	0.002	0.025	0.001	6.9	2.099	1.073	2.734
~	最大	10.000	0.418	999.00	10.145	30.660	1.805	0.210	2.655	0.100	602.5	56.829	27.557	59.200
2007/3/31	最小	5.000	0.000	0.00	0.000	6.340	0.000	0.000	0.000	0.000	83.0	0.000	0.000	0.000
石田川	総数	45.540	45.540	45.540	45.540	45.540	45.540	45.540	45.540	45.540	45.540	45.540	45.540	45.540
乙訓	平均	6.746	0.017	156.09	0.592	17.491	5.782	0.009	0.111	0.000	433.1	15.480	3.186	13.818
2006/4/1	偏差	0.152	0.002	73.98	0.463	0.196	0.052	0.001	0.012	0.000	20.4	0.908	0.835	2.577
~	最大	10.000	0.154	999.00	10.764	32.348	7.108	0.070	0.984	0.000	681.1	43.005	22.680	65.834
2007/3/31	最小	5.000	0.000	0.00	0.000	5.604	0.200	0.000	0.000	0.000	129.0	0.442	0.000	0.000
西羽東師川	総数	35.408	35.408	35.408	35.408	35.408	35.408	35.408	35.408	35.408	35.408	35.408	35.408	35.396
古川堰橋	平均	6.255	0.015	120.06	0.203	17.515	1.103	0.007	0.099	0.000	404.6	17.373	4.225	16.687
2006/4/1	偏差	0.148	0.001	62.97	0.311	0.598	0.021	0.001	0.003	0.000	71.2	6.324	0.871	3.399
~	最大	10.000	0.128	999.00	7.759	28.984	2.403	0.200	0.820	0.000	576.0	108.400	24.079	73.650
2007/3/31	最小	5.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.300	0.000	0.018	0.000	-422.3	0.000	0.000	0.000

5. 観測データにもとづくモデル解析

5.1 雨水および汚濁負荷流出モデルの構成

本論文では、一ノ井および洛西農業用水路、寺戸川・千代原川および西羽東師川枝川などの中小河川水網に対して、表面流出解析に広く利用されているKinematic waveモデルを適用し、久世以下の西羽東師川本川の河川流動解析には河口部での排水機操作も考慮してDynamic waveモデルを用い、モデルパラメータを調整して流域全体の降雨流出構造の特性把握を試みた。

汚濁物質の流出・輸送モデルはさまざまなタイプのものが提案されているが、雨天時を考慮すると流出雨水の挙動と先行晴天期間中に都市域の屋根面・地表面等に堆積する汚濁負荷量に着目する必要がある(城戸ら, 2006)。前者については、Kinematic waveモデルの斜面流出速度に基づいて堆積負荷量が流出する物理的挙動を表現したモデルを用いる。また、河道流下過程においては、移流・分散を基本として一次元の水質モデルを用いるが、河床堆積物の寄与が重要となる。これは、降雨初期には流量増加に伴いファーストフラッシュの汚濁源となる一方で、降雨終了後の流量通減期には水中の懸濁物質や自然的凝集機構にともない、河川から河床への汚濁物質の移動(沈降および吸着現象)が見られる。これらの堆積負荷はヘドロ化するなどして晴天時の河川水質にも影響をおよぼす。特に、低平地市街部の中小河川ではこの傾向が強く現れ、流域全体の物質収支を評価する上で、流域-河川-河床を接続した解析wetが必要となる(Kido, Y. et al., 2006)。

5.2 雨水流出モデル

雨水流出解析では、流域斜面からの雨水流出についてKinematic waveモデルを用い、差分法を用いた雨水流の追跡プログラムを作成し、対象流域に適用した。河道流については、西羽東師川本川に対してDynamic Wave法による流動解析を行い、一ノ井水路・洛西水路・寺戸川等においては斜面流と一括してKinematic Wave法による雨水流出解析を行った。

(1) 流域分割とモデルパラメータ

1/2,500地形図および1/40,000流域下水道一般図をもとに流域分割を行い、地形条件、水路・管路接続、および地被条件を読みとった。土地利用については地形図および国土地理院の細密数値情報を合わせて用いた。水路および河道の断面形状、勾配等は、現地測量、過去の調査資料および西羽東師川計画図(縦断面図, 平面図)等を元にして算定し、不明なものについては近隣の水路網の情報から推定した。

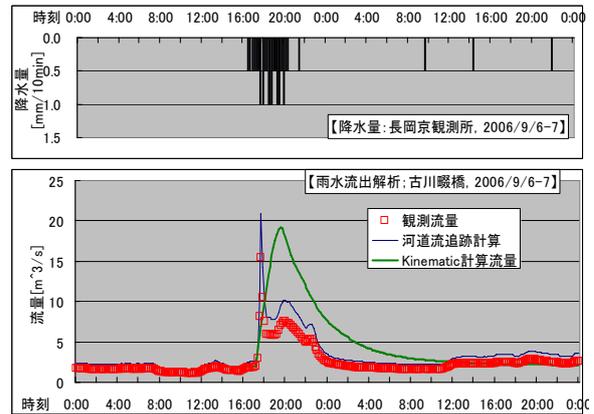


Fig.3 Simulation of stormwater runoff and river water flow during wet-weather condition

(2) 対象流域における雨天時流動特性の解析

解析結果の評価対象地点は寺戸川中流の向陽小学校北、久世ポンプ場上流、および西羽東師川本川の古川堰橋である。対象降雨イベントは2006年9月6日である。解析結果の一例をFig.3に示す。

降雨が短期集中型であり、大きな時間変動が少ないためKinematic wave法による流出解析では、比較的降雨に対応した雨水流出が再現されている。河道流動解析では、久世から上流端の久世地点での流量波形が古川堰地点と類似しており、西羽東師川本川河道形状が比較的単純で、複断面に改修されている区間も短いこととあいまって上流の入力流量波形が下流側にほぼ保存した形で伝播している。

Kinematic Waveモデルを用いた流出解析では、モデル流域の条件も単純化しており、下流部の土地利用条件もほとんど農地(水田)と市街地部で形成され、降雨に対応した流出ピークの時間遅れなどが生じにくい構造になっている。さらに、土地利用や斜面形状・勾配等の地形条件がことなる最上流部からの雨水流出が下流部に伝播するまでに平滑化され、急激な流量の増減を再現できていない。古川堰橋および久世地点での観測流量波形は、降雨の形状とはやや異なり二段のピークが見られるが、これは流域の地被および地形等流出に関わる諸条件が複雑に絡み合った結果と解釈できる。特に、久世地点より上流部の下水道排水区と農業用水路との水分関係や用水路樋門の作動条件等単純化しにくい構造が卓越しているのが、当流域の大きな特徴であり、それらを組み込むためには、下水道分野で用いられている分布型流出モデルに対応した時間・空間密度での解析が必要となる。今回は第一段階の雨水流出モデルを用いた一降雨イベントの解析にとどまったが、基礎となる流出機構についてはモデル化できており、課題も明確である。

5.3 汚濁負荷流出解析

(1) 流送能力型汚濁負荷流出モデル

国内河川の水質解析や流出負荷量予測に広く適用されているモデルとしてLQモデルがある。これは負荷量 L を流量 Q の累乗関数で表現するものであり、流量および対象汚濁負荷の水質濃度の観測データに基づいて統計的手法でモデルパラメータを決定する手法である（國松，1989）。

$$L(t) = k_1 \cdot Q(t)^{n_1} \quad (1)$$

ここで、ここで、 L ：汚濁負荷量(g/s)、 Q ：河川流量(m^3/s)、 k_1 、 n_1 ：定数、 t ：時間である。このモデルを用いた解析事例では多くの場合観測データが晴天時に限られており、そこで決定されたパラメータを用いて年間負荷量推定を行うと、雨天時の流量増に関してモデルの適用限界を超えて外挿を行うこととなる。また、雨天時観測データに基づいてパラメータ同定を行ったとしても、観測事象の流量範囲を超える事象に適用することは避けるべきである。特に都市域では流量増加期と逓減期における同じ流量値に対する流出負荷量の差異が発生するファーストフラッシュ現象を十分考慮すべきであるが、このモデル式ではこの再現することは不可能である。また、流量に伴いかならず負荷量も流出するという前提に基づいており、汚濁負荷源が無限供給型となるため長期間の負荷量推定では過大評価となりやすい。

LQモデルの欠点を補うために堆積負荷量の概念を導入したのがLSQモデルである。これは流域内の発生源から流出可能な負荷量を堆積負荷量として設定するものであり、負荷流出量を堆積負荷量と流量の指数関数で表現するものである。

$$L(t) = k_2 \cdot S(t)^{m_2} \cdot Q(t)^{n_2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial S(t)}{\partial t} = S(0) - \int_0^t L(\tau) d\tau \quad (3)$$

ここで、 L ：汚濁負荷量(g/s)、 Q ：河川流量(m^3/s)、 S ：堆積負荷量(g)、 k_2 、 m_2 、 n_2 ：定数、 t ：時間である。このモデルでは、直接観測できるのは流量と汚濁物質濃度、両者の積で求められる汚濁負荷量であり、時々刻々の堆積負荷量を観測することは不可能である。そこで、雨天時観測データ全体から総流出負荷量をまず算定し、これを降雨前の初期堆積負荷量 $S(0)$ として与え、連続式（式(3)）を用いて時々刻々の堆

積負荷量を算定し、重回帰分析によってパラメータを推定するのが一般的な方法である。このモデルにおいても基本的には観測事象を超える流量範囲での適用はLQモデルと同様に限界がある。このモデルの特徴は堆積負荷量の導入により、特に都市域で発生するファーストフラッシュ現象、つまり流量増加期に高い負荷流出量が発生し、流量逓減期には流出負荷量が低いという特徴を再現することが可能である。また、流出期間中に堆積負荷量は減少していくので、長時間降雨の場合には堆積負荷量がゼロとなり負荷流出量もゼロとなり、汚濁負荷源が有限供給型で表現される。ただし、観測データに基づいて初期堆積負荷量を設定するため、他の降雨事象に対して適用する場合の初期堆積負荷量設定の妥当な方法が課題となる。

(2) 表面負荷量流出モデル

SWMM (Storm Water Management Model)は下水道排水区全体を対象とした雨水・汚濁負荷流出を再現する統合的モデルであり、1970年代に米国環境保護局(US-EPA)によって開発され（US-EPA, 1998）、随時改良が加えられ、現在ではパソコン用の統合パッケージ(XP-SWMM)として販売されている。本研究では、SWMMのひとつのモジュールである表面流出負荷量モデル(surface pollutant runoff model)を利用する。このモデルは地表面堆積負荷の物理的な流出現象に基づいて、米国水資源局・陸軍工兵隊が共同で開発したモデル(STORM: Storage, Treatment, Overflow and Runoff Model)を基礎としている。

$$\frac{dS}{dt} = -k_3 \cdot S(t) \quad (4)$$

$$S(t + \Delta t) = S(t) \cdot \exp(-k_3 \cdot \Delta t) \quad (5)$$

$$L(t) = \frac{\{S(t) - S(t + \Delta t)\}}{\Delta t} \\ = S(t) \cdot \frac{\{1 - \exp(-k_4 \cdot u(t) \cdot \Delta t)\}}{\Delta t} \quad (6)$$

ここで、 S ：堆積負荷量(g)、 L ：汚濁負荷量(g/s)、 $u(t)$ ：雨水流出速度(m/s)、 k_3 、 k_4 ：定数、 t ：時間である。式(4)は堆積負荷量の時間変動が当該時点における存在量に比例し、かつ汚濁負荷量については雨水流出速度の影響を考慮したモデル化がなされており、屋根面・道路面から水路底・河床における堆積負荷量を発生源とする非点源負荷が降雨流出に伴い流出す

る過程を表している。上述のSTORMでは雨水流出速度の代わりに降雨強度を用いており、屋根面堆積負荷量の流出現象の物理的な意味を表現している。一方SWMMでは地表面雨水流出速度および下水道管渠・排水路等での流出についてはManning則に基づいた雨水流出モデルと連結しており、本研究でも前節の雨水流出解析による雨水流出速度を用いることができる。このモデルにおいても上述のLSQモデルと同様に初期堆積負荷量 $S(0)$ の決定方法が課題となる。

(3)堆積負荷量算定モデル

US-EPAが実施した土地利用別の地表面堆積負荷量調査に基づいて、先行晴天日数を説明変数とする飽和型の負荷堆積モデルが提案されている（建設省土木研究所，1975）。このモデルでは先行晴天日数の増加に伴い地表面堆積負荷量は単調増加するが、風等による移動を考慮して一定量以上の堆積が起こらないという仮定に基づいている。指数関数型の堆積負荷量モデルを以下に示す。

$$Su(t_d) = Hu_0 \cdot \{1 - \exp(-k_s \cdot t_d)\} \quad (7)$$

ここで、 Su :堆積負荷量(g/ha)、 Hu_0 :初期堆積負荷量(g/ha)、 k_s :定数、 t_d :先行晴天期間(日または時間)である。しかし、地表面の堆積負荷量は現実にモデル式が示す飽和型の堆積が起こるとは限らない。そこで、屋根面や道路表面の堆積負荷量の多くは大気降下物である点に着目し、降下物を測定した調査事例が国内でもいくつか見られる。ただし、その多くは酸性雨調査を目的とした湿式降下物観測であり、晴天時の降下物の調査事例は決して多くない。

流域地表面や屋根面等に堆積する汚濁負荷にはさまざまな起源のものがある。特に、都市域では大気汚染物質の他にも路面舗装材等の剥離物などが挙げられ、発生起源や堆積場のみならず、その発生サイクル期間も多様なものが集合している。今後、京都都市域における地表面堆積負荷量の調査結果（城戸ら，2006）をもとに非特定負荷源となる堆積負荷量モデルを組み込む予定である。

5.4 対象流域における雨天時汚濁負荷流出特性の解析と削減策の検討

(1) 流出モデルによる算定結果

今回の汚濁負荷流出解析にはSWMMの表面負荷流出モデルを用いた。表面流速は5.2(2)Kinematic Wave Modelで得られた表面流出速度を用いている。初期堆積負荷量 $S(0)$ については、観測総流出負荷量を

与えている。中流部の向陽小北と下流部の古川堰のシミュレーション結果の一部をFig.4に示す。雨天時はDOCやD-Nといった溶存態の再現性はあまりよくないが、構成比の高い懸濁態（POC，P-N）の再現性が高く、総量（TOC，T-N）についても再現性が高い。降雨終了後晴天が継続する期間についても同様のシミュレーションを行ったが、雨天時とは逆に懸濁態の再現性が低く、構成比が高い溶存態の再現性が高いという結果を得られた。また、この降雨イベントにおける観測地点の流下負荷量を推定した結果、西羽束師川下流部の三反田～古川堰地点での流下負荷量が特に大きく、この間の流入負荷量の影響とともに降雨後の流量逡減期に緩勾配下流部河床への沈降負荷量の影響が大きいことが予測された。

(2)非特定負荷源の影響評価

これまでの晴天時および雨天時観測における採水分析結果をもとに、常時観測を行っている自動水質計測項目を用いて連続的な晴雨天時の水質予測を行い、観測地点における長期間の流下負荷量を推定した。

採水分析で得られた主要水質項目であるTOC・POC・DOC、T-N・P-N・D-N、SSの7項目の水質濃度を被説明変数として、採水時刻における自動水質計測濃度を説明変数とした重回帰分析をおこない、主要水質項目の濃度を推定する重回帰モデルを作成した。地点毎に晴雨天別にデータを整理したが、解析に十分なデータ数が無い場合は、晴雨天時のデータを一括して分析した水質予測モデルを作成した。自動水質計測値のうち塩分濃度、海水比重は淡水河川では意味がないので除外し、水位との相関も著しく低いので除外した。また内部相関の高かった項目については代表性を考慮してひとつの項目に絞り込んでいる。最終的に、自動水質計測値のうちの9項目 [pH, TURB(mg/L), DO(mg/L), Temp(°C), TDS(g/L), ORP(mV), Cl(mg/L), NO3(mg/L), Ca(mg/L)] を説明変数の候補とし、 t 値>2.0を基準とする変数増減法を用いて有意性の高い重回帰モデルを作成した。2006/9/6の重回帰式による推定結果の再現性をFig.5に示す。図に示したTOC・T-N・SSおよび懸濁態物質については、全般的に重相関係数およびF値・P値の統計量、有意水準は全てのモデルで高く、十分説明力があると評価できる。懸濁態物質（POC，P-N，SS）については、比較的多くの説明変数が採用され説明力の高いモデルとなっているが、溶存性物質（DOC，D-N）については説明力のある変数は少なく、説明力も相対的に低い。また、雨天時と晴天時では選択される説明変数および偏回帰係数の値は大きく異なるので、できる限り晴雨天時別のモデルを

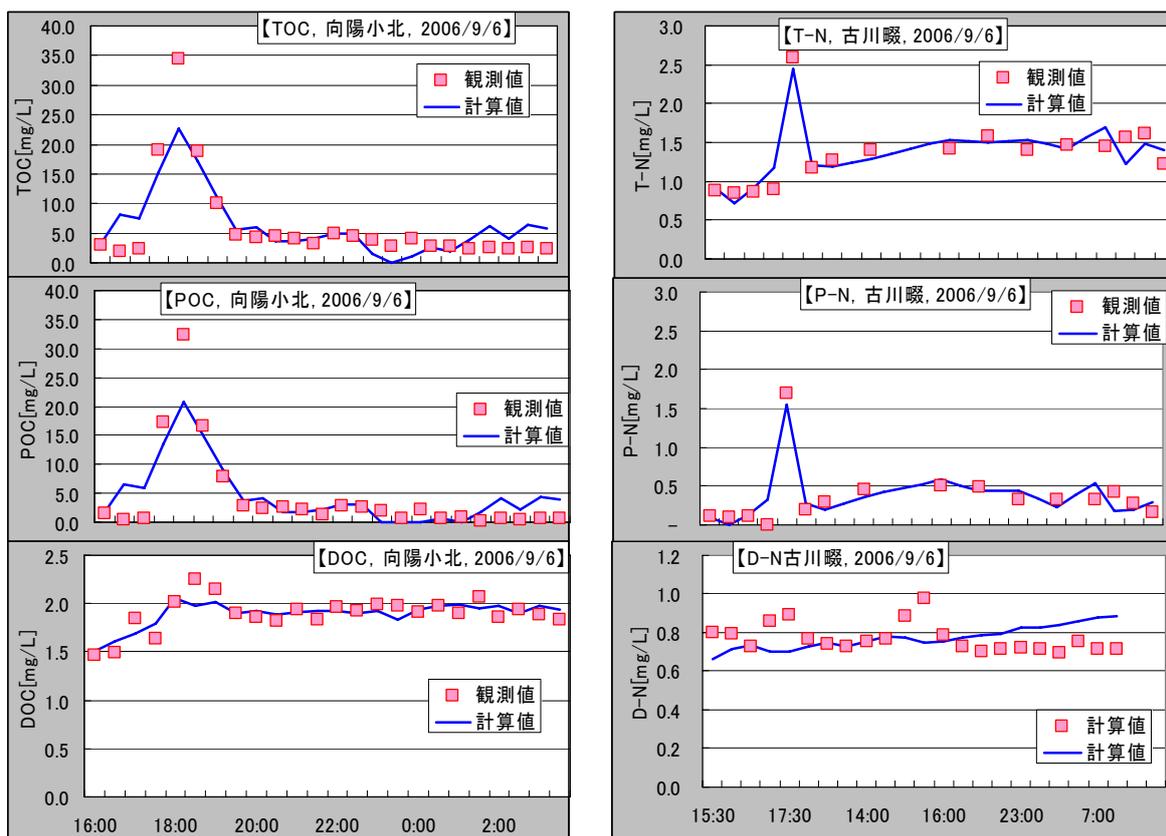


Fig.4 Simulation of pollutant runoff during wet-weather condition

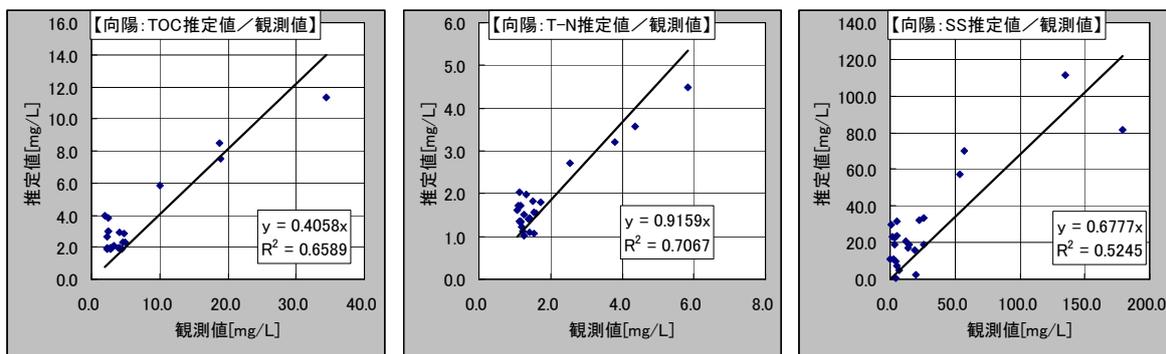


Fig.5 Verification of multi-variable model for water quality

使い分けることとした。ただし、以降の解析ではデータ数が少ない地点については共通の重回帰モデルを使わざるを得なかった。

本年度の雨天時観測のうち比較的良好なデータが入手できた2006/9/6～9/7、および重回帰分析の対象データ期間内で、寺戸川・久世地点の水位データの提供を受けた2006/5/11、の両期間において、自動水質計計測値を入力変数とする重回帰モデルを用いて推定した主要水質項目 [TOC・POC・DOC, T-N・P-N・D-N, SS] の水質濃度と同期間の水位計データおよびこれまでの流況観測から得られた水位－流量曲線により推定した河川流量に基づいて、各観測地点の流下負荷量（フラックス）時系列を算定した。各地

点の流下負荷量をFig.6に、当該地点までの累積集水面積で除した面積原単位をTable 6に示す。

日雨量30mmであった5/11と日雨量15.5mmであった9/6の両者を比較すると、久世地点では流出雨水量は2.9倍であり、降雨損失を考慮すれば雨量と比例するが、流出負荷量については、TOCにおいて約6倍、T-Nで5.2倍、SSでは14.3倍に達する。古川堰においてはTOC・SSにおいて同様であるが、T-Nについては3.7倍にとどまり、雨水流出量は1.4倍となる。古川堰は西羽東師川本川の最下流端付近であり、河道勾配および集水域の流域勾配もゆるく、当日の取水状況は明らかではないが五間堀川・七間堀川等の農業用水路も接続されており、流量自身は相対的に小さ

Table 6 Unit load of pollutants estimated by multi-variable model

			雨量	流量	TOC	POC	DOC	T-N	P-N	D-N	SS
			[mm]	[m3/day]	流下負荷量[ton/日]						
2006/5/11	寺戸川	向陽小北			※水質観測無し						
		久世	30.0	2.84E+05	2.567	2.413	0.154	0.442	0.144	0.298	15.810
	石田川	乙訓	34.0	4.99E+04	0.735	0.486	0.249	0.191	0.039	0.152	0.599
		本川	30.0	1.40E+05	※水質観測無し						
2006/9/6 ~9/7	寺戸川	向陽小北	17.0	6.75E+04	0.269	0.217	0.052	0.070	0.036	0.033	1.208
		久世	17.0	9.78E+04	0.426	0.356	0.070	0.085	0.035	0.050	1.105
	石田川	乙訓	17.0	6.73E+04	1.070	1.005	0.065	0.086	0.043	0.043	0.166
		本川	17.0	3.63E+05	0.347	0.189	0.158	0.175	0.080	0.095	0.819
2006/9/8 ~9/9	寺戸川	向陽小北	0.0	8.92E+04	0.196	0.101	0.095	0.074	0.014	0.060	0.728
		久世	0.0	1.23E+05	0.192	0.118	0.074	0.101	0.053	0.048	0.644
	石田川	乙訓	0.0	2.97E+04	0.404	0.349	0.055	0.063	0.050	0.013	0.096
		本川	0.0	1.96E+05	0.314	0.175	0.139	0.090	0.041	0.049	0.587
					集水面積原単位[kg/km2/日]						
2006/5/11	寺戸川	向陽小北			※水質観測無し						
		久世	30.0	2.84E+05	187.06	175.82	11.23	32.19	10.49	21.70	1,152.19
	石田川	乙訓	34.0	4.99E+04	283.91	187.57	96.34	73.92	15.06	58.86	231.22
		本川	30.0	1.40E+05	※水質観測無し						
2006/9/6 ~9/7	寺戸川	向陽小北	17.0	6.75E+04	52.96	42.70	10.26	13.69	7.13	6.56	237.55
		久世	17.0	9.78E+04	62.08	51.84	10.23	12.32	5.10	7.22	161.01
	石田川	乙訓	17.0	6.73E+04	826.90	776.80	50.10	66.09	32.90	33.19	128.19
		本川	17.0	3.63E+05	35.72	19.42	16.30	17.96	8.20	9.76	84.25
2006/9/8 ~9/9	寺戸川	向陽小北	0.0	8.92E+04	38.57	19.92	18.65	14.56	2.82	11.74	143.26
		久世	0.0	1.23E+05	28.04	17.18	10.86	14.70	7.65	7.05	93.84
	石田川	乙訓	0.0	2.97E+04	311.98	269.51	42.47	49.04	38.85	10.19	74.51
		本川	0.0	1.96E+05	32.32	17.98	14.34	9.29	4.24	5.05	60.44
					48.40	34.13	14.27	10.88	4.03	6.85	176.58

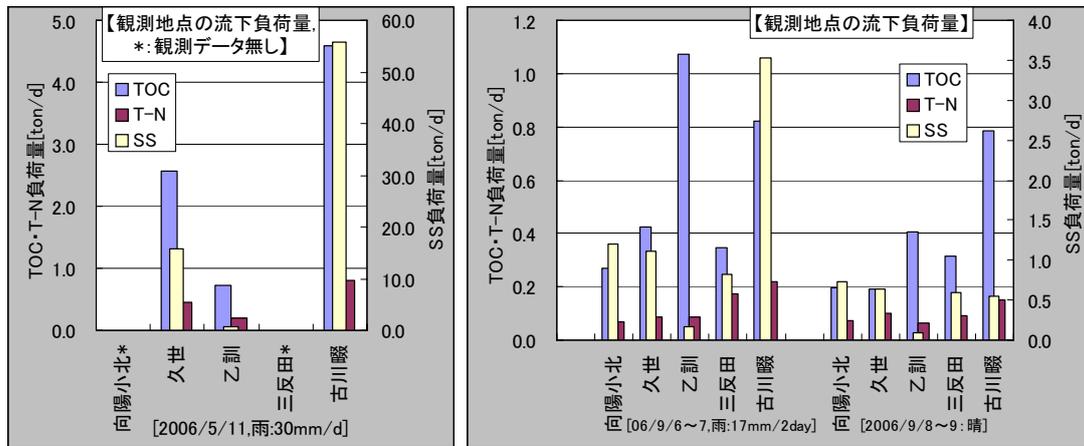


Fig.6 Runoff pollutants load estimated by multi-variable model

くなっている。これは先行晴天日数および雨水および汚濁負荷の流出特性によるものである。また、9/6の解析結果から流下方向で必ずしも一様に流下負荷量が大きくなるわけではなく、寺戸川・久世地点および西羽東師川本川三反田地点から古川驛にかけての流下負荷量が大きくなる。そのひとつの原因としては各観測地点間の流入負荷量が挙げられる。特に、9/6の降雨時およびその後の晴天期間において、乙訓（石田川）地点の流下負荷量はTOC・T-N・SSの全てで高く、西羽東師川本川の大きな負荷源となっている。このことは他の降雨事象でも見られており、

数年間にわたる年間負荷量を解析することで、より明解になるはずである。

古川驛地点の流量に比べて流下負荷量が高く、水質濃度が相当高くなっている。しかし、本川三反田地点から古川驛地点までの集水域面積は極端に小さい。流下特性をより明確にするため、累加集水面積により流下負荷量を除した流下負荷量原単位を流下負荷量とあわせてFig.7に示す。この図から、9/6-7の雨天時および9/8-9の降雨後の晴天期間の両期間において、向陽小北～三反田までの区間に比べて古川驛での流下負荷量およびその原単位は集水面積の増加

Table 7 Comparison between river water quality and lateral inflow water quality

				TOC[TC-IC]				陽イオン類					
				TOC[T]	POC[T]	DOC[T]	SS[Ga100]	Li	Na	NH4	K	Mg	Ca
				[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]
一ノ井水路	嵐山	河川水	雨天時平均	3.6235	2.9367	0.6885	5.0122	0.0000	31.2400	0.0000	3.3992	5.4808	38.7007
		晴天時平均											
		横流入水	晴天時平均	2.1423	1.5165	0.6258	3.8667	0.0000	96.0894	0.0000	9.4884	10.6315	106.0520
寺戸川	向陽	河川水	雨天時平均	4.5877	3.4553	1.1324	23.292	0.0000	31.4472	0.3657	3.4281	5.0565	56.4876
		晴天時平均	3.8110	1.9706	1.8404	10.073	0.0000	37.9743	0.0000	5.0323	6.0428	59.4792	
		横流入水	晴天時平均	2.1088	1.2902	0.8186	5.400	0.0000	41.0175	0.0000	4.1451	6.2086	58.3010
	久世	河川水	雨天時平均	4.9144	4.0598	0.8546	31.6556	0.0000	33.5035	0.0000	3.5228	5.1817	56.8889
		晴天時平均	2.4832	1.7498	0.7334	55.5500	0.0000	7.8156	0.0000	1.7028	3.1748	13.3297	
			横流入水	晴天時平均	36.3158	7.0489	31.9140	4.8000	0.0000	151.6775	0.0000	28.2587	15.9619
石田川	乙訓	河川水	雨天時平均	5.8717	4.8988	0.9729	2.7636	0.0000	93.3876	0.0000	7.3885	8.1484	68.9980
		晴天時平均											
		横流入水	晴天時平均	7.7880	6.2432	1.5449	28.0000	0.0000	52.0707	0.0000	5.4234	6.5771	62.5762
本川	三反田	河川水	雨天時平均	2.3522	1.9044	0.4478	16.3040	0.0000	47.5049	0.0000	4.5960	6.2982	72.8006
		晴天時平均	8.2096	5.5368	2.6728	6.8000	0.0000	82.1243	0.0000	6.9966	8.9586	79.6346	
		横流入水	晴天時平均	2.6113	1.0047	1.6066	4.2400	0.0000	76.8751	0.0000	10.5578	13.5585	121.0469
	古川	河川水	雨天時平均	3.8794	2.9940	0.8854	28.0600	0.0000	25.4285	0.0000	3.5178	5.3748	37.0620
		晴天時平均	4.2290	2.7824	1.4466	4.5116	0.0000	42.5841	0.0000	4.2739	5.9765	45.0395	
			横流入水	晴天時平均	10.3748	6.0569	4.3179	2.2000	0.0000	1,390.5982	69.3772	306.2339	9.1456

				T-N				陰イオン類					
				T-N	P-N	D-N	H2PO4	F	Cl	NO2	Br	NO3	SO4
				[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]
一ノ井水路	嵐山	河川水	雨天時平均	0.9502	0.0915	0.8587	1.2687	0.7415	6.4489	0.0173	0.0000	0.6322	3.0688
		晴天時平均											
		横流入水	晴天時平均	0.9017	0.0603	0.8414	0.2687	2.6124	8.9039	0.0000	0.0000	0.6285	5.2048
寺戸川	向陽	河川水	雨天時平均	1.7212	0.4607	1.2605	1.3713	0.6594	7.5752	0.0011	0.0000	0.9819	3.2842
		晴天時平均	1.4469	0.3301	1.1168	1.3642	0.3607	1.1511	0.0421	0.0000	0.7114	3.4118	
		横流入水	晴天時平均	1.2541	0.3528	0.9012	1.0039	0.0000	0.0000	0.0000	0.7265	3.5795	
	久世	河川水	雨天時平均	1.6421	0.3998	1.2423	1.6775	1.3521	8.5075	0.0008	0.0000	0.9267	3.5489
		晴天時平均	1.2967	0.5070	0.7897	1.1158	0.3926	9.5383	0.0196	0.0000	0.5067	3.2315	
			横流入水	晴天時平均	10.8936	7.0813	3.8122	1.9180	0.0000	23.0436	0.0000	0.0000	11.2155
石田川	乙訓	河川水	雨天時平均	2.2060	0.9787	1.2273	1.2385	0.7784	5.5517	0.0199	0.0000	0.8619	3.7543
		晴天時平均											
		横流入水	晴天時平均	1.4899	0.6102	0.8796	1.7571	0.0000	0.0000	0.0197	0.0000	0.3735	3.9308
本川	三反田	河川水	雨天時平均	2.0235	0.2088	1.8148	1.6380	0.0000	11.6313	0.0147	0.0000	1.3969	7.5598
		晴天時平均	1.3937	0.2655	1.1282	2.2794	1.0838	3.7566	0.0000	0.0000	0.6207	4.7390	
		横流入水	晴天時平均	1.5542	0.2262	1.3280	0.8835	0.0000	4.2894	0.0108	0.0000	1.1670	14.1498
	古川	河川水	雨天時平均	1.6797	0.3016	1.3781	1.6396	0.2596	8.6659	0.0177	0.0000	0.9585	4.5499
		晴天時平均	1.0787	0.1977	0.8810	1.9177	0.0040	8.8020	0.0186	0.0100	0.5751	6.0906	
			横流入水	晴天時平均	53.1166	2.1317	50.9850	0.5709	0.0000	61.9566	26.7291	0.0520	110.4277

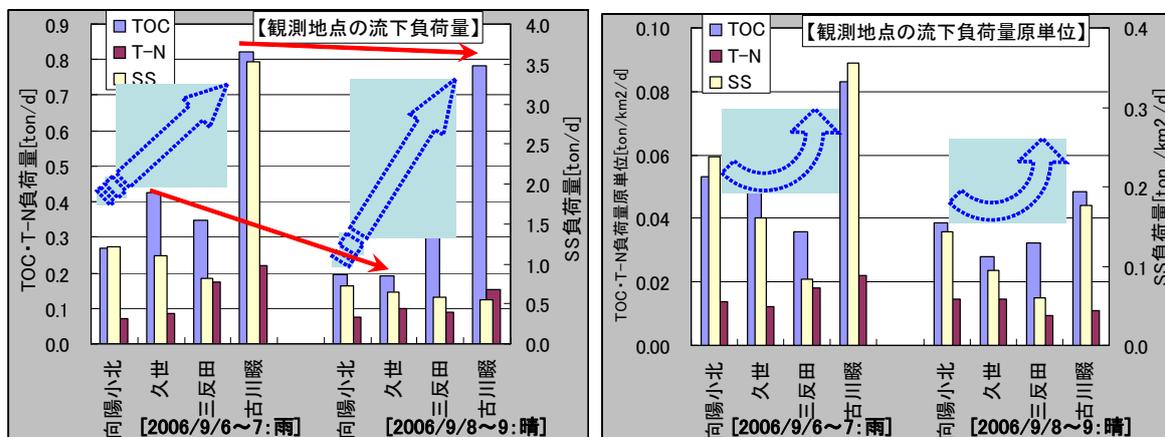


Fig.7 Runoff pollutants load and unit load during flowing down

に対し大きく増加している。三反田地点から古川堰地点間での横流入負荷量については踏査により数地点で確認されており、家庭排水起源のものと農業用水路を通した流入水となる。後者については濃度レベルで河川本川水質と極端に高いわけではないが、前者の家庭雑排水の水質濃度は極端に高い (Table 7)。ただし、この流入地点ひとつに限ると水量的に小さく、時間間欠的に流入しており、河川水質への影響が極端に大きいとは考えにくい。ただし、同様の横

流入水が河道区間全域で定量的に把握できていないので、水質影響のひとつの要因として今後の調査対象として重要視すべきである。

前述の通り、古川堰地点は西羽束師川本川の最下流端付近にあたり雨天時においても流速が小さくなっている。晴天時には七間堀川への導水のため古川堰地点直上の可動堰が立ち上げられており、下流部の流速はますます低くならざるを得ない。このため、降雨後の6/8-9では三反田地点よりも古川堰地点の流

量は小さくなっている。降雨終了後の流量逋減期に下流側の流速が低くなると、流下汚濁負荷のうち特に懸濁態成分は沈降しやすく、河床に堆積する。この堆積汚濁負荷がその後の晴天期間の水質形成に大きな影響を及ぼすことは、京都市内の別河川水系での調査研究でも明らかとなっている(城戸ら, 2004)。さらに、大雨時には桂川への放流規制、小雨時には可動堰による水深調整が行われることを考えあわせると、西羽東師川本川の雨天時流下負荷量がフラッシュ効果として河床堆積物を巻上げ桂川に全量放流されるとは考えにくい。全体的に一ノ井農業用水路から洛西農業用水路幹線、寺戸川を經由して西羽東師川に到達した汚濁負荷は古川堰付近の河道に滞留しやすい構造となっており、下流部の水質汚濁の大きな要因となっている。

(3)非特定負荷源の対策案

水質改善のための対策を以下にまとめる。

流域全体の汚濁負荷流下構造から、寺戸川・久世ポンプ場付近より上流部では、農業用地からの負荷が主たる負荷源と考えられるので、農業用水の水量管理と施肥等の管理が対策として重要となる。観測・踏査の結果、下流側では本来下水道で排除すべき雑排水の一部が直接河川放流されている場合が見られるので、まずは下水道未接続改善が必要となる。次に、面源負荷対策としては下流部での横流入水路からの晴天時・雨天時を通した流入負荷の定量的把握から優先順位を明らかにして、下水道への未接続改善、流入口での小型貯留施設による負荷削減、呑龍貯留管や既存ポンプ施設を利用した積極的な負荷流入防止と最終処理場への輸送・処理などを講じることが挙げられる。特に、これまでの解析の結果、石田川の雨天時流出負荷量は大きく、この流域における下水道整備状況を鑑みた上で生活排水の混入防止を進めた上で、道路排水・屋根面排水をオンサイトで貯留・浸透させるなどの対策が必要となる。特に、久世ポンプ場付近から下流では、主要幹線道路および鉄道網からの排水経路については、一部現地敷地内散水がされているが、残りの多くは都市雨水排水路や農業用水路に流入することが確認されており、高濃度の流出雨水が流入している可能性が高い。全ての流入点を明確にすることは不可能ではあるが、確認地点での観測・分析により河川水質への影響度を評価することで、全域での対策に結びつける方向で検討すべきである。

最後に、西羽東師川本川下流部では流速が特に遅く、流下汚濁負荷が河床に堆積しやすい構造になっており、その堆積汚濁負荷が降雨後の河川水質に影響をおよぼす影響を考慮すれば、できるだけ降雨時

のフラッシュ効果を確保するために可動堰操作や末端排水機場操作を検討して桂川への放流量を増加させることも、西羽東師川本川下流部の水質改善には役立つ。ただし、桂川ー淀川を經由して大阪湾への流入負荷となることを考えると、西羽東師川水系内部での負荷削減対策が重要である。流域内のポイント負荷対策、ノンポイント負荷対策および河道内での対策として河床堆積物の積極的な除去、河道断面形状の改善による流速確保なども含めて総合的な対策を講ずる必要がある。

6. 結論

本研究の成果を以下にまとめる。

- 1)雨水流出解析：河川集水区と下水道集水区が図面に示されるほど明確に分かれておらず、多くの農業用水路に横流入の形で側溝および暗渠が接続しているため、細かい流下過程の再現には多大な時間を要する。今回の解析では、集水域を小流域分割してKinematic Runoffモデルにより西羽東師本川へ到達する雨水流出を再現し、本川における河道流下をDynamic Waveモデルで再現したが、観測値と比較してほぼ満足できる結果が得られた。
- 2)汚濁負荷流出解析：雨天時は溶存態の再現性が低い、構成比の高い懸濁態の再現性が高い。晴天時については懸濁態の再現性は低い、構成比が高い溶存態の再現性が高く、総量としての再現性は十分であると評価できる。
- 3)観測地点流下負荷量：推定の結果、西羽東師川下流部の三反田～古川堰地点での流下負荷量が大きく、この間の流入負荷量の影響とともに降雨後の流量逋減期に緩勾配下流部河床への沈降負荷量の影響が大きいことが予測された。
- 4)水質改善対策：水質改善対策としてまず実施すべきなのは、横流入水路からの晴天時・雨天時を通した流入負荷の定量的把握から優先順位を明らかにして、下水道への未接続改善、流入口での小型貯留施設による負荷削減、呑流貯留管や既存ポンプ施設を利用した積極的な負荷流入防止と最終処理場への返送処理などを講じることである。さらに、西羽東師川本川下流部での流速低下期の汚濁負荷沈降量と、降雨後の河川水質への影響度を評価した上で、降雨時のフラッシュ効果を確保するための可動堰操作や末端排水機場操作の検討、河道堆積物の積極的な除去、河道断面形状の改善による流速確保などの物理的対策を施すことも重要となる。ただし、時空間的な降雨分布と流域性状の空間分布および集水路網・河川網の特性を考慮して、より複雑な雨水流出解析を実施するためには、河川および農業用水路と下水

道網を合わせた集水区域構成と詳細な水路網の接続関係を明確にするための詳細な現地調査を行わなければならない。

謝 辞

本研究は平成16～18年度に行われた京都府受託研究業務「西羽束師川流出実態調査」の一貫として行われたことを記して謝意を表します。

参考文献

城戸・井口・深尾(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，No.47B，pp.809-818。
城戸・齋藤・中北(2006)：都市域の大気汚染由来汚濁物質の堆積と流出，京都大学防災研究所年報，No.49B，pp.543-550。
城戸・川久保・井口・田中・中北(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，No.50(CD-ROM)，pp.579-594。
京都市(2002)：安らぎ華やぎ京都21推進プラン，<http://www.city.kyoto.jp/sogo/seisaku/promop/index.html>，(2008/2/25参照)。
京都市(2003)：農業用水路及び河川の水位調査結果について，京都市下水道局・計画課資料。

京都府：いろは呑龍トンネル，<http://220.110.14.220/donryu/index.asp>，(2008/2/25参照)。
國松孝男・村岡浩爾(1989)：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版。
建設省土木研究所(1975)：都市域からの雨天時汚濁流出調査報告書，土木研究所資料第1019号。
国土交通省(2004)：流域と一体となった総合治水対策に関するプログラム評価・評価書。<http://www.pref.kyoto.jp/gesuido/page7.html>，(2008/2/25参照)。
国土交通省淀川河川事務所：安全に暮らす，<http://www.yodogawa.kkr.mlit.go.jp/safe/inundation/index.html>，(2008/2/25参照)。
福田・城戸・中北(2006)：自動水質計観測データを用いた河川環境の評価，土木学会関西支部年次学術講演集，II-24(CD-ROM)。
堀場製作所：マルチ水質モニタリングシステム，<http://www.jp.horiba.com/products/water/>，(2008/2/25参照)。
向日市(2003)：浸水安全度向上に関する調査及び流出解析モデル構築業務報告書。
KIDO, Y., et al (2006): Pollutant Runoff Impacts on Urban River Environment through the Combined and Separate Sewerage System, Proc. of the 6th Japan-Taiwan Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation, Session B-7-1～Session B-7-11.

Hydrological Observation and Runoff Analysis in Nishihadukashi River Basin - Evaluation of Pollutant Runoff Mechanisms from Non-point Source -

Yoshinobu KIDO

Synopsis

In this study, availability analysis is focused to use the flood control system for pollutant reduction derived from non-point sources. Big tunnel stormwater storage system named "Donryu" is under construction in Nishihadukashi river basin for flood prevention. This paper shows that basic investigations of stormwater and pollutant runoff in this basin continuously carried out from 2004 to clarify the runoff characteristics and effectiveness of pollutant reduction measures. Water level and water quality are automatically monitored by electric sensors. Continuous stormwater samplings were carried out in several rainfall events. Stormwater and pollutant runoff analysis by numerical models had good performance to simulate observed data. Some water quality characteristics are defined by the observation and simulation. Finally, pollutant reduction measures in near future are discussed.

Keywords: Nishihadukashi River basin, stormwater storage facility for flood control, stormwater and pollutant runoff analysis, non-point source pollution