

## 河床底泥が河川水質に及ぼす影響 - 賀茂川における河川水質と河床底質の観測 -

城戸由能・井口貴正\*・深尾大介\*\*

\* 京都大学工学部地球工学科

\*\* 京都大学大学院工学研究科

### 要 旨

本研究では、賀茂川における公共用水域水質観測結果と独自の河川水質と河床底質の観測調査に基づき、河床底泥からの巻き上げ現象による河川水質に及ぼす影響について検討した。その結果、観測日までの先行晴天日数が短く、前降雨の雨量が大きいほど水質濃度が高くなる傾向がみられ、雨天時の汚濁負荷流出がその後の河川水質に影響を与えている可能性を確認した。また、河床土壌溶液の分析の結果、TOCについては表層から深さ方向に濃度が減少し、T-Nについては深さ方向の明確な濃度変化は見られなかった。河床底泥が河川水質に及ぼす影響を定量的に明らかにするために観測を継続するとともに、晴天時から雨天時に連続した観測を実施し、汚濁物質の挙動と収支を解明する予定である。

キーワード：河川水質，河床底質，雨天時汚濁負荷流出，巻き上げ

### 1. はじめに

これまで、河川に流入する汚濁負荷は主に発生源が特定しやすい点源(Point source)から発生したものを対象とし、河川水質モデルでは横流入負荷として表現されてきた。この点源負荷が下水道整備等の対策によって削減されることで河川水質が改善されるといった結果を示してきた。しかし、現実の都市河川の水質改善は予測されたほど進んでいない。この理由の一つとして、流域地表面等に晴天時に堆積した様々な汚濁物質（非点源負荷：Non Point source）が雨天時に処理されることなく流出することが挙げられる。これらの非点源負荷は降雨開始後の比較的早い時間帯に流出しやすく、流量遞減よりも早く流出汚濁物質量が遞減する傾向がみられる。このため、降雨初期に河川等の入水域への水質影響が大きいと考えられてきた。しかし、河川流水中の汚濁物質の挙動を考えた場合、基本的な移流・分散に加え、上述の横流入とともに分解・沈降といった生成消滅に関わる現象を考慮する必要がある（Fig.1）。特に、

懸濁態物質の沈降や河床材からの溶出や巻き上げといった回帰現象については、これまで低水時の安定した流況条件のもとで河床面を境界条件と考え、河床内部の物質移動を系外のものとして、一定速度の沈降・溶出・巻き上げの現象として表現されてきた。また、増水時の流砂現象の解析については多くの実験・研究事例があるが、増水時の汚濁物質の巻き上げと沈降に関する研究はほとんどない。さらに、河床底泥中の汚濁物質の存在量や挙動に関しては未解明な部分が多い。本研究では、河川水と河床中の汚濁物質移動に着目し、京都市内を貫流する賀茂川において河川水質と河床底質に関する現地観測調査を実施し、河川水質と河床底質の状況を明らかにするとともに、河川水質に対する河床底質の影響について検討した。

### 2. 流域の概要

京都市を南北に流れる鴨川は上流部の賀茂川を含めると流下距離は約23 kmで流域面積は約156 km<sup>2</sup>

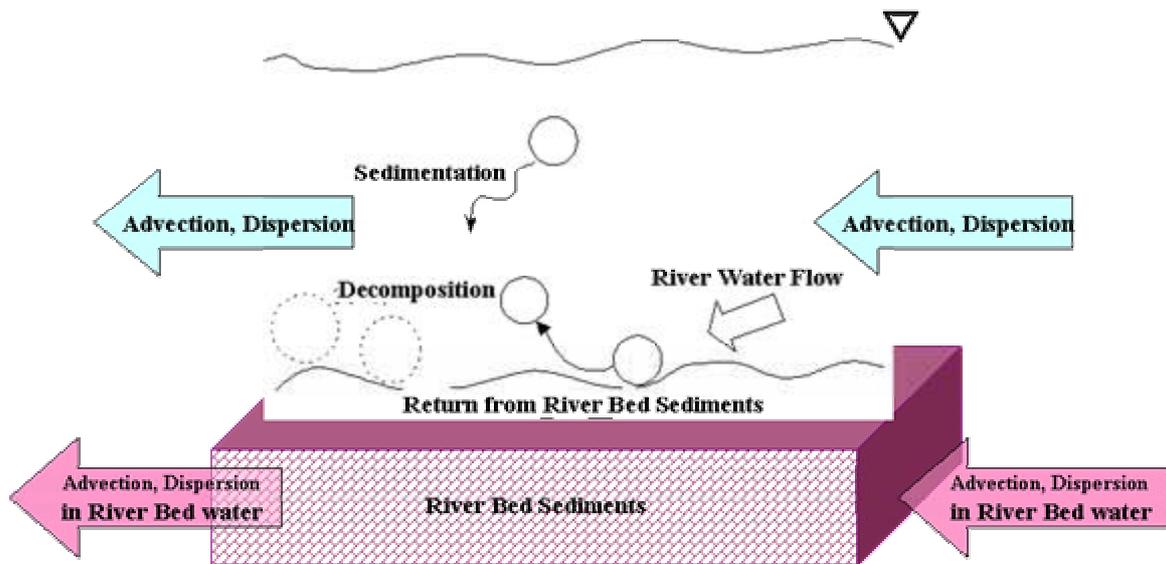


Fig.1 Concept of material flow between river water and river bed sediments

である。上流部の大半は山地となっており，市街地は下流の平野部に集中し，荒神橋上流の鴨川流域において市街地の占める割合は平成15年時点で15.3%となっている。本研究では，自然流域から都市部を流下する過程で様々な汚濁物質による水質変化が予想される区間として，鴨川の上流部である賀茂川の高橋から出町橋を主な解析対象とした。

高橋から下流約1kmまでは市街地は少ないが，それより下流の地域は市街化が進み，下水道が整備されており，人為的な影響は少ないと予想された。しかし，現地調査の結果，高橋から出町橋までの区間で10を超える流入排水路が確認された。この地域には基本的には分流式下水道が整備されているので，これらの排水路は雨水排水であると考えられるが，いくつかの排水路からは晴天時においても河川への流入がみられた。これは，流域内に下水道への未接続家屋等があるか，雨水排水路に家庭排水等が混入しているためであると考えられる。このため，晴天時に排水路からの流入水についても採水を行った。

一方，この区間の河道勾配は比較的緩やかで，降雨による土砂の流出と堆積が繰り返されて落差工の前後に砂州が発達している。これらの砂州や河床からは増水時に流砂とともに汚濁物質が流出し，流量低減期には汚濁物質が堆積し，晴天時に徐々に河川水に供給されていることが予想される。近年，生態系保全を目的としてこれらの砂州を保全する方向で河川管理が進められており，以前のように低水敷をブルドーザーで整地するような工事は行われず，年一回の雑草の刈り取りのみが行われている。このような管理が進められることで河川の生態系保全のた

めに重要な，瀬・淵といった河道形態が保全され，多様な生物の生息場が形成されつつある。しかし，低水敷の一部には死水域が存在し，雨天時に河川に流入した汚濁物質や晴天時に排水路から供給される汚濁物質が滞留して河床の一部にヘドロ状の堆積物が存在している。また，砂州上の草木は増水時に流速を緩和して汚濁物質の沈降を促していると考えられる。このように，河床と砂州は河川内の汚濁物質の挙動に大きな役割を果たしていると考えられる。

### 3. 公共水域の水質観測データの解析

鴨川においては，京都府および京都市による水質観測が毎月1回を原則として主に晴天時に行われている。観測地点によって観測項目や頻度は異なるが，流量等の一般項目をはじめ，水質に関するものとして生活環境項目，健康項目，トリハロメタン生成能，要監視項目，特殊項目，その他項目が測定されている。Fig.2に京都府による水質観測地点を示す。京都府がまとめた公共水域の水質測定データ(1970年～2001年)のうち，有機汚濁物質の指標であるCODと栄養塩類の指標である全リン(T-P)，全窒素(T-N)についてデータ解析を行った。主な対象地点は，高橋・北大路橋・出町橋の3地点である。

#### 3.1 賀茂川の経年的水質変化

出町橋・北大路橋・高橋における1970年から現在までのCODおよびT-Nの経年的水質変化をFig.3に示す。CODに関しては，高橋の水質濃度は0.5～1.8mg/Lの範囲で推移しており，経年的に大きな変化は見ら

れない。北大路橋では0.5～4.4mg/Lの範囲の値が観測され、最近10年間では4.0mg/Lをこえることはなかった。出町橋では1970年代に7.0mg/Lを超えるほど汚染の進んだ状況が観測されているが、最近10年間では0.8～3.4mg/Lの範囲で推移している。北大路橋と出町橋については1985年くらいまで濃度が低下し続け、その後現在に至るまでほぼ横ばいとなっている。

全リンについては、CODと同様に、出町橋と北大路橋では1985年ごろまでは観測濃度が低下し、その後横ばい状態が続いている。最近10年間では北大路橋では観測がなされておらず、出町橋では0.021～0.076mg/Lの範囲で推移している。高橋については1977年に1回だけ高い値があるが、これを除くと全期間を通して0.01～0.059mg/Lの範囲で推移している。

全窒素については、3地点とも全期間を通して若干の濃度低下傾向がみられるが、明確に水質が改善しているとは言えない。高橋では0.15～1.00mg/L、北大路橋では0.35～3.10mg/L、出町橋では0.24～1.50mg/Lの範囲で推移している。

出町橋の最近10年間の平均値はCOD:1.72mg/L、全リン:0.04mg/L、全窒素:0.66mg/Lであり、高橋の最近10年間の平均値はCOD:0.73mg/L、全リン:0.03mg/L、全窒素:0.39mg/Lである。琵琶湖のH13年度における平均水質値と比較すると、出町橋はCODについては

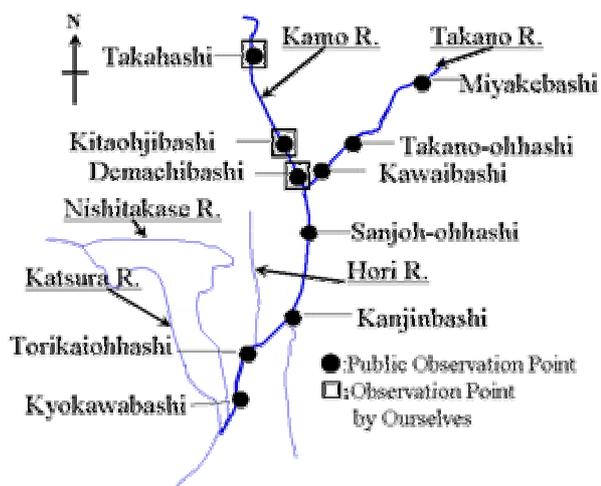


Fig.2 Public observation point of Kamo River

Table 1 Concentration of Lake Biwa

|            | COD | T-N  | T-P   |
|------------|-----|------|-------|
| South Lake | 3.2 | 0.32 | 0.019 |
| North Lake | 2.7 | 0.27 | 0.009 |

Average Concentration in 2001, Unit:mg/L

琵琶湖南湖のH13年度の平均水質と比べて水質状況は良好であるが、全リンと全窒素については南湖のH13年度の平均水質を上回っている。

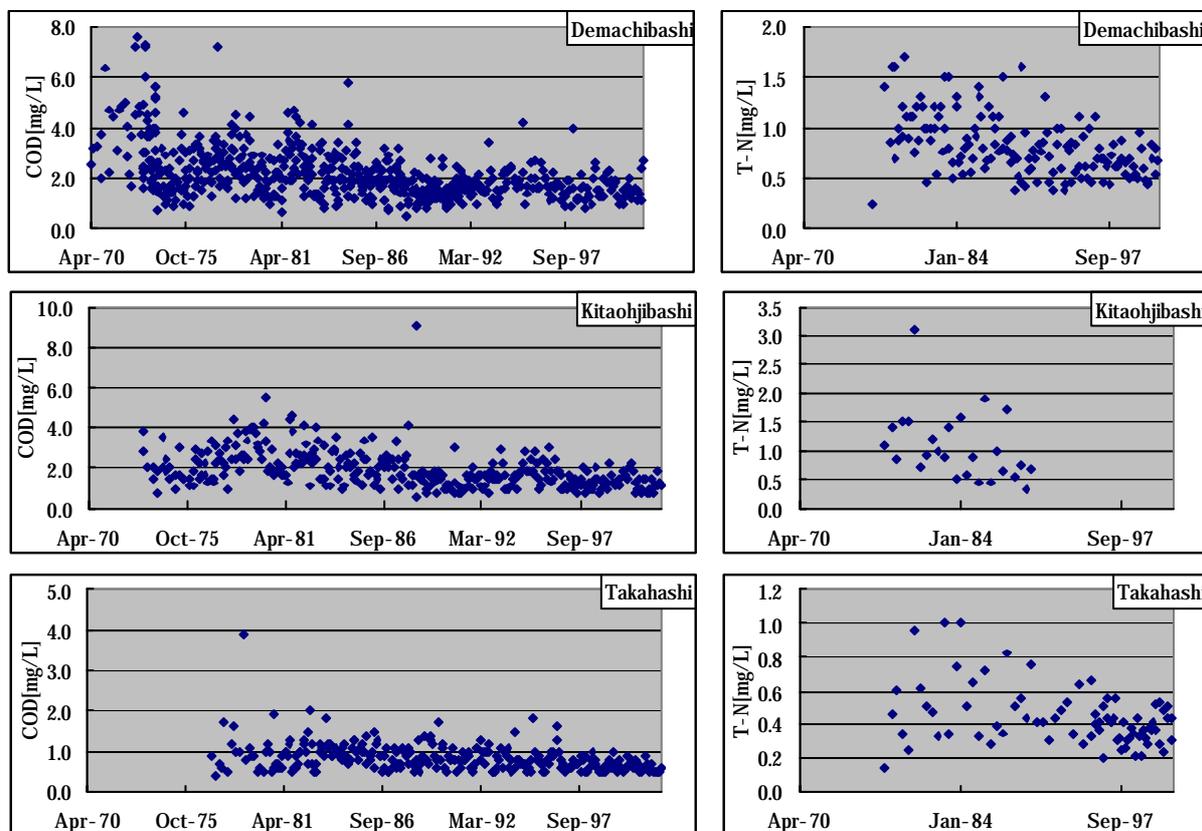


Fig.3 Observed COD and T-N of Demachibashi, Kitaohjibashi and Takahashi between 1970 and 2001

高橋はCODについては琵琶湖北湖のH13年度の平均水質よりも水質状況は良好であるが、全リンと全窒素については北湖のH13年度の平均水質を上回り、南湖の値に近い状況である。

### 3.2 賀茂川の季節的水質変化

CODについては、高橋では夏季が最も高く、北大路橋と出町橋では冬季が他季と比べて若干濃度が高めになっている。全リンについては、高橋・北大路橋・出町橋では夏季・冬季の平均値がほぼ同じ値となっているが、3地点ともに夏季の最大-最小の変動幅が大きくなっている。全窒素については、高橋では夏季・冬季の平均値に差は見られないが、北大路橋と出町橋では冬季の平均値の方が夏季より高くなっている。一般に、湖沼では、夏季に水中に浮遊する藻類増殖などの影響でCODや全リン・全窒素の濃度が高くなる傾向が見られる。賀茂川では浮遊性の藻類よりも河床等に付着している藻類等の生物活動が夏季に活発になり、水中の汚濁物質を摂取して河床上で増殖するために水質濃度が低くなっていると考えられる。ただし、増殖した付着生物等は増水期に剥離して、懸濁態汚濁物質として河川水中に供給されるので、採水した晴天時以外の水質を含めると、必ずしも夏季に濃度が低くなるとはいえない。

### 3.2 賀茂川における汚濁負荷源

1985年までのCODと全リンの濃度については、上流部がほぼ自然地で占められている高橋ではあまり変化が見られず、市街化流域を通過した後の北大路橋・出町橋においては経年的に濃度が低下した。この理由としては、下水道の整備区域の拡大による汚濁負荷の削減効果が挙げられ、この区間の発生源としては人為的なものが多かったと推定される。しかし、それ以降については自然由来の汚濁物質の占める割合が相対的に高くなっている。一方、全窒素に関しては下水道網が普及したにも関わらず目立った濃度の低下は見られなかった。窒素については下水道による処理効率も低く、加えて人為的な発生源以外にも山地を含む自然土壌に含まれるものや、肥料として農地に散布されるものなど様々な発生源が考えられ、これらが賀茂川高橋～出町橋までの区間を流下する汚濁物質の主要な発生源であると考えられる。

また、水質値と先行晴天日数や前降雨降水量との関係を見ると、先行晴天日数が短く、前降雨の雨量が大きいほど水質濃度[mg/L]や負荷量[g/s]が大きくなる傾向がみられた (Fig.4)。雨天時に流出した汚濁物質が降雨期間中はもちろん、その後の晴天時の

河川水質にも影響を及ぼしていることが考えられる。さらに、冬季における対象河川区間(出町橋～高橋)を含む鴨川全区間での水質観測結果をまとめると、北大路橋付近と鳥羽大橋付近での水質変化が大きい (Fig.5)。鳥羽大橋付近は合流式下水道整備区域のため越流負荷の影響が考えられるが、北大路橋付近は分流式下水道整備区域であり、河川水質濃度上昇の原因は河床底泥からの供給が主要な要因と考えられる。

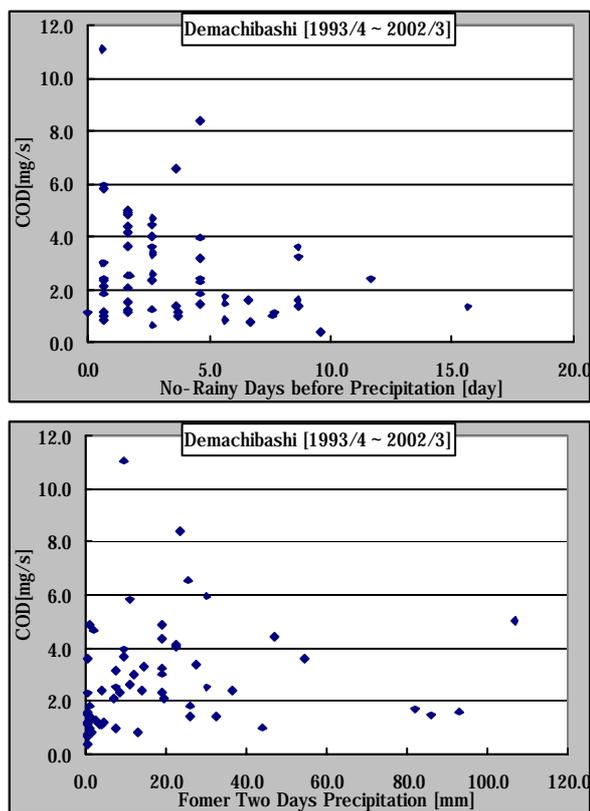


Fig.4 Relation between water quality and no rainy days & former precipitation at Demachibashi

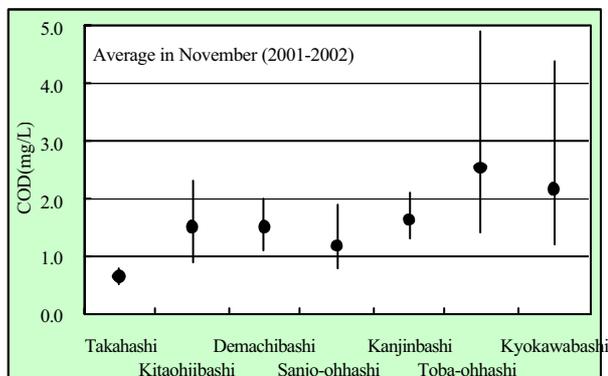


Fig.5 Average, maximum and minimum data observed by public sector of the Kamo River from Takahashi to Kyokawabashi

#### 4. 賀茂川における河川水および土壌の観測と分析

##### 4.1 観測の概要

2003年8月から2004年1月に計6回の水質および河床底泥の採取と分析を行った。縦断観測では主対象区域（高橋～出町橋）の上・下流部を含めて計23地点で採水あるいは採泥を行っている。河川水については、観測地点とした橋などからバケツ等で流水中央部の河川水を採取した。河床底泥については、砂州の水際部で河川水面にできるだけ近い場所を選定し、採土杖およびスコップ等を用いて、表層、表層から深さ30cm、表層から深さ50cmの土壌をそれぞれ採取した。さら

土壤溶液として、中州の水際部に塩ビパイプを埋め込み低水時の河川水位から10cm, 30cm, 50cmの3段階の深さ地点から土壤溶液を手動ポンプでゆっくり引き抜いたものを試水とした（Photo 1, Fig.6）。横流入水については、手採水を行い試料とした。さらに、2003年12月と2004年1月には、賀茂川の高橋～出町橋区間にかかる計11箇所の橋梁（出町橋, 出雲路橋, 北大路橋, 北山橋, 上賀茂橋, 御園橋, 西賀茂橋, 賀茂川通学橋, 志久路橋, 庄田橋, 高橋）付近で河川水の採取を実施し、横流入水については排水路からの流入がみとめられた計7地点で流入水の採取と流量の測定を行った。さらに、採水地点付近の砂州で土壤試料を採取した。

2003年11月6日～15日の期間に高橋・北大路橋・出町橋の3地点で降雨直後の河川水を手採水と自動採水器を併用して連続的に採取した。なお、手採水は基本的に12時間間隔、自動採水は3時間間隔で行った。さらに、同じ期間に出町橋では6日、12日、13日、15日、北大路橋では6日と15日、高橋では15日のみ土壌の採取も行った。

##### 4.2 分析方法

水質分析項目は、TOC(Total Organic Carbon:全有機態炭素)、T-N(Total Nitrogen:全窒素)と溶存態イオンである。TOCは有機物を構成する炭素元素量であり、POC(Particle Organic Carbon:懸濁態有機態炭素)とDOC(Dissolved Organic Carbon:溶存態有機態炭素)の合計で表され、一般的な有機汚濁物質の指標として



Photo 1 Sampling of river bed inner water

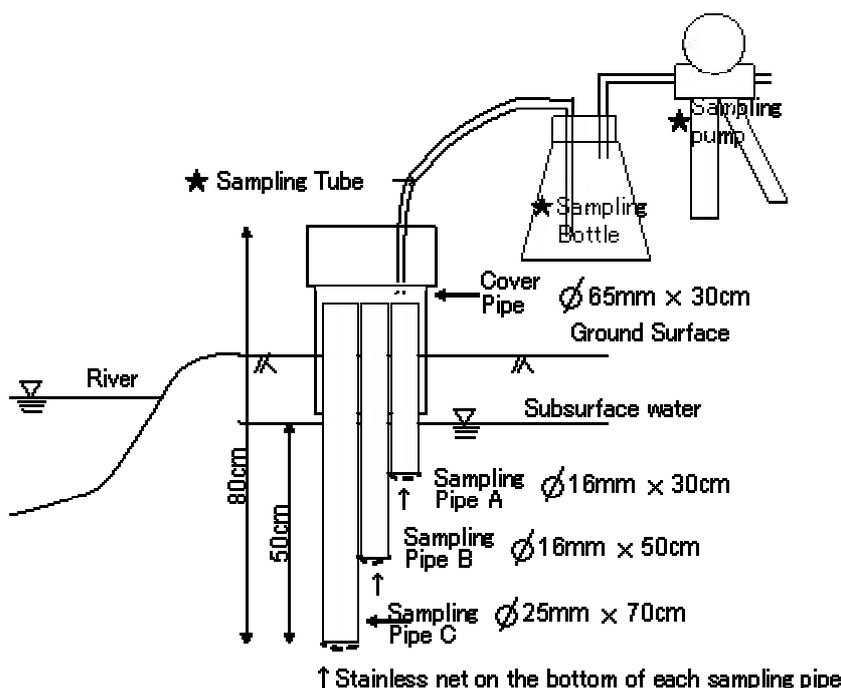


Fig.6 Sketch of sampling device of river bed water

微量有害化学物質など特定の汚濁物質との相関性を検討することができる。T-Nは、窒素ガス以外の水中に存在する窒素化合物の総量であり、P-N(Particle Nitrogen:懸濁態窒素)とDIN(Dissolved Inorganic Nitrogen:溶存態無機体窒素)の合計で表され、富栄養化の原因物質である。溶存態イオンはアニオン・カチオン併せて12種類のイオンが分析可能であるが、本研究では河川水中に比較的多く存在し、保存性物質であるNaおよびCaに着目した。

河川水については、採水試料500mLのうち250mLをガラス繊維ろ紙GA-100(保留粒子径1μm相当)を用いてろ過した試水と原水を、懸濁態対応の全有機態炭素計(島津製作所製: TOC-V/CSN [T-Nユニット付き])を用いてTOCおよびT-Nを測定し、溶存態と総量を求め、原水とろ過後試水の測定値との差を懸濁態の値とした。また溶存イオンについてはイオンアナ



(中)・147.2 mg/L(南),50cm層で109.5 mg/L(中)と深さ方向に高くなっている。11/15の最後の採水時では河川水中TOC濃度10.5mg/Lに対し、土壌溶液のTOC濃度は表層で19.8 mg/L(中)・18.6 mg/L(南),30cm層で17.9 mg/L(中)・35.7 mg/L(南),50cm層で25.7 mg/L(中)・18.8 mg/L(南)と深さ方向に高くなる傾向は11/6時点と同じだが、土壌溶液濃度は全体的に低くなっており、深さ方向のさも小さくなっている。なお、上記の土壌溶液濃度は出町橋付近の砂州の中央部および南部(下流側)に設置した採取装置を示し、図の凡例と対応している。以上の結果から11/11降雨流出中に河床底泥から河川水への汚濁物質が巻き上げ等により移動したか、あるいはより深層の土壌へ移動し、低濃度の河川水が河床土壌の表層から浸入した可能性が高い。

さらに、2003年12月および2004年1月に、出町橋～高橋区間の計11地点で縦断観測を行った。両者を比較すると、1月の河川水は12月のデータと比べて、全項目にわたって濃度が低くなっている。1月は前日に降雨があったが、前日と前々日の降雨量は計6.5mm、最大降雨強度も1.5mm/hrと小規模な降雨であった。また、それ以前は1ヶ月以上にわたって5mm以上の降雨の無い日が続いていた。これに対して12月観測の先行晴天日数は6日と長い、前降雨では1日の総降雨量が18mm、最大降雨強度は3.5mm/hrであった。以上のことから、1月の観測時には前日の降雨流出後に流量が逡減して沈殿により河川水中の物質濃度が下がるとともに、降雨量が小さく流量増加による底泥からの汚濁物質の巻き上げが少なかったことが1月の河川底質の濃度に影響を及ぼしたと考えられる。

#### 4.5 河川水質に及ぼす横流入水と河床底泥の影響

2003年12月と2004年1月に、高橋～出町橋区間において河川水・土壌底質および流入水に関する詳細な縦断観測を実施した。2003年12月の結果をFig.9に示す。河床底泥に関する底質濃度は土壌抽出水の分析から求めたものであり、単位が異なるので、河川水濃度との直接比較はできない。両時期の観測結果とともに、北大路橋付近から下流で濃度上昇を示し、土壌底質濃度・横流入水濃度も他地

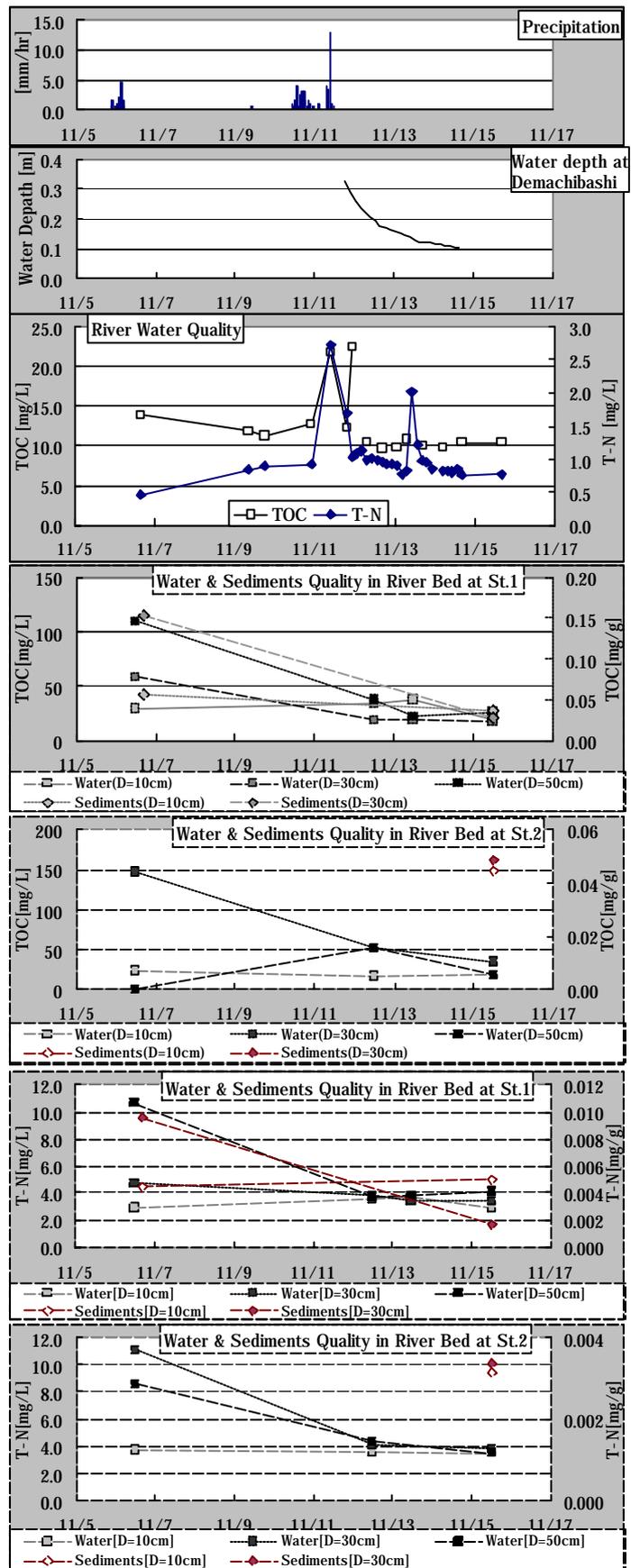


Fig.8 Observation data of water quality and riverbed sediments in Nov. 2003

点より高かった。また1月の観測では中流部の御園橋付近でも河川水濃度は高くなり、この時は横流入水濃度が高く、底質濃度は他地点と同等であった。このように、河川水質の変化は横流入水と河床底泥の両方の影響を受けていると考えられる。

また、12月と1月の河床底泥のTOCおよびT-N濃度を比べると河川水と逆に1月が12月を上回る傾向が見られた。これは、12月の採取日までの無降雨期間が長く、流量が遞減したために底泥にたまった物質があまり押し流されること無くその場に留まり、河床底泥の濃度が上昇したためであると考えられる。

横流入水中のイオン濃度については、12月のNa, Ca, K, Clが高濃度で流入している。この影響で河川水中のNa, K, Clが下流部、特に北山橋から出町橋の区間での濃度上昇が顕著であったと考えられる。NaとClは人為汚染あるいは畜産汚染の指標と考えられているが、対象流域に大規模な畜産業は立地していないので、主に人為汚染の影響であると考えられる。河床底泥中のイオン濃度については、Clは両月ともに下流方向に向かって底質濃度が上昇している。Na, Ca, Kについては1月には下流部で底質濃度が高い地点が見られるが、必ずしも河川水質の変化と対応してはいない。河床底泥中の物質濃度については観測数も少なく、この観測結果のみで河川水質への影響を評価することは難しい。

#### 4.6 河床土壌溶液濃度の特徴

今回観測を行った土壌溶液の分析結果をFig.10に示す。TOCについては、全体的に表層から深さ方向に濃度が増加する傾向がみられる。特に懸濁態の割合が高く、河川水から沈降してきた懸濁態物質が貯留されている可能性がある。また、T-Nについては、表層から深さ方向への濃度の減少傾向はTOCほど明確ではなく、懸濁態の割合も採取日により大きく変化した。降雨流出に伴う河川流量変化によって巻き上げ等で河床から河川水に供給される可能性がある。底質濃度については水抽出法のみで分析をしており、全体的に溶存態の割合が高い。

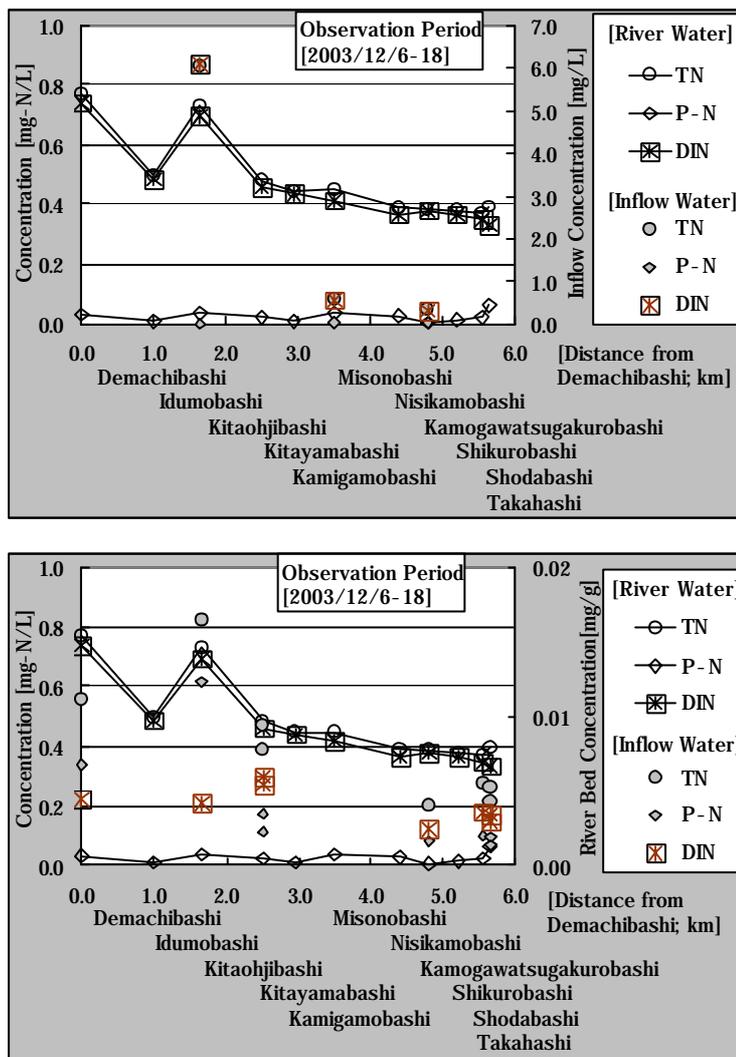


Fig.9 Observation data of water quality, inflow water and river bed sediments from Takahashi and Demachibashi

#### 5. まとめ

本研究では、まず公共用水域の観測データに基づいて賀茂川の河川水質の経年変化についてまとめた。CODおよび全リンに関しては1985年ごろまでは濃度が低下し、その後は現在にいたるまで横ばいの状態となっていた。季節別に見るとCODの夏季濃度が冬季よりも高く、全リンに関しては、季節による差異はあまり見られなかった。全窒素に関しては全期間、全季節を通して目立った変化は見られず、冬季の濃度が夏季よりも高い傾向が見られた。CODと全リン濃度の低下している時期は下水道の整備区域の拡大している時期と一致しており、これらの物質に関しては人為的な影響が大きいと考えられる。下水道整備によっても水質濃度が目立った変化の見られなかった全窒素や水質変化が見られない1985年以降のCODと全リンについては、

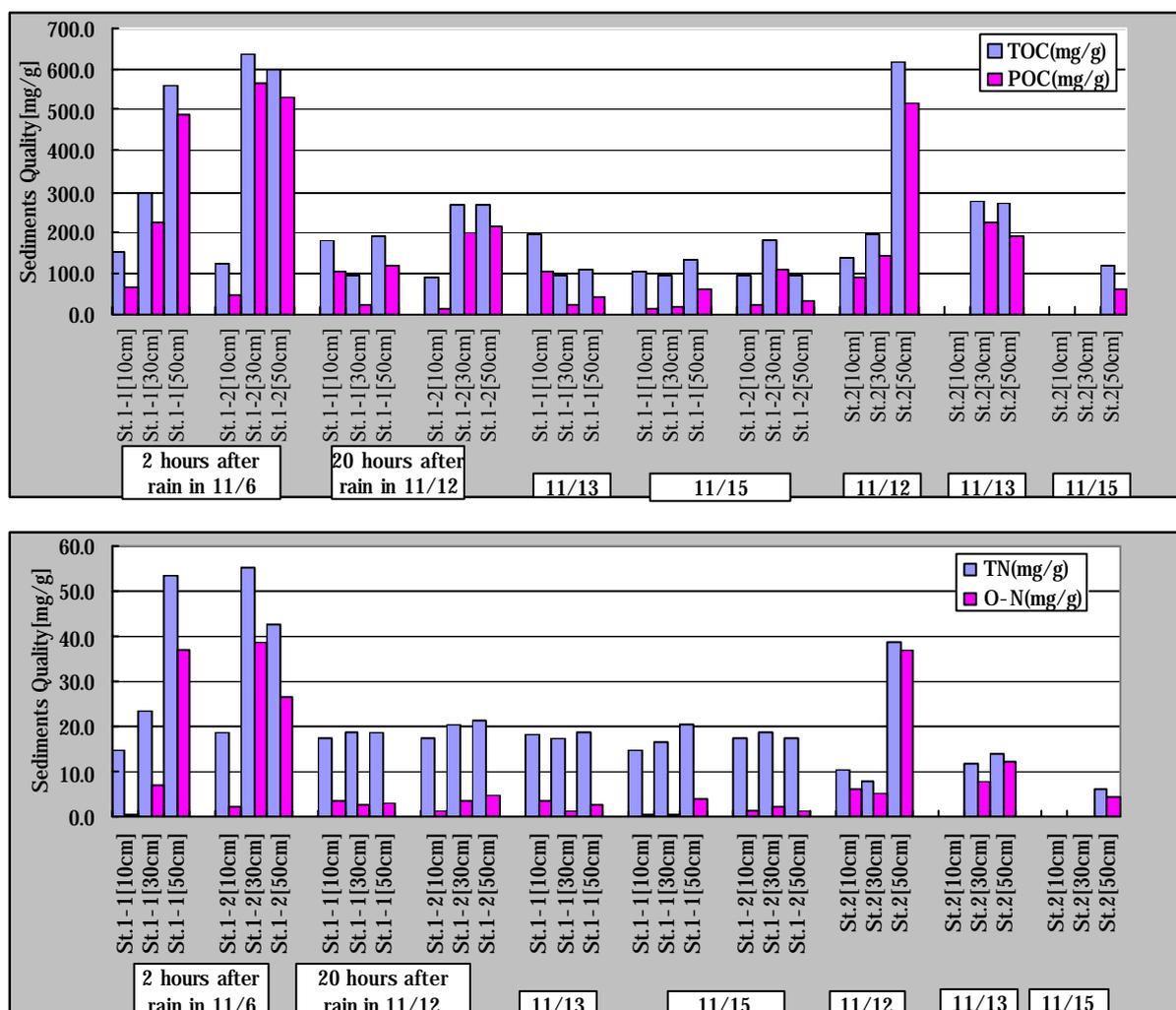


Fig.10 TOC and T-N concentration of sediments in river bed on Kitaohji and Demachibashi

人為的な発生源以外の山地を含む自然土壌に含まれるものや肥料として農地に散布されるものなど様々な発生源からの汚濁物質が多く含まれていると考えられる。

本年度実施した河川水と河床底泥に関する観測結果から、先行晴天日数により、晴天時の河川水質に大きな違いが見られ、河床底泥の底質濃度との関係から、雨天時の流出汚濁物質が河床に沈降・堆積し、降雨終了後に河川水中に汚濁物質が供給されている可能性が明らかとなった。また、河床底泥から河川水への汚濁物質の供給は無限に続くことはなく、晴天時の河川水質はいったん上昇した後低減していくことが予測された。

今回の河床底質濃度の分析は水抽出法のみで行っており、より強く土壌粒子に吸着している汚濁物質の定量は行っていない。今後、降雨流出時の河川水観測と降雨前後での河床土壌中の汚濁物質について、さらに観測データを積み上げるとともに酸抽出法や固体分析法を用いて土壌内の汚濁物質の分析を行い、

より定量的な影響予測を行うことで、河川水質の汚濁機構を明確にし、河川水 - 河床底泥間の物質移動について解明し、最終的には地下水を含めた汚濁物質の挙動を明らかにし、京都盆地における水・物質循環過程の解明と、持続可能な水資源利用へと結びつけていく予定である。

#### 謝 辞

本研究の実施にあたり、現地調査に協力いただいた京都府京都土木事務所河川管理課の方々には謝意を表します。

#### 参考文献

京都府環境整備課(1971～2001):公共用水域及び地下水の水質測定結果(昭和45年版～平成13年版),京都府

**Water Quality Interaction between River Water and River Bed  
- Observation of Water Quality and River Bed Sediments in Kamo River Basin -**

Yoshinobu KIDO, Takamasa IGUCHI and Daisuke FUKAO

\* Undergraduate School of Global Engineering, Kyoto University

\*\* Graduate School of Engineering, Kyoto University

**Synopsis**

The objective of this study is identification of water quality mechanism affected by inflow pollutants, return pollutant from river bed sediments and pollutants runoff during rainfall events. In this study, water quality data records of the Kamo River observed by public sectors and ourselves were analyzed. As a result, pollutant concentration of river water became higher as the no rain days were lower and former precipitation was smaller. From results of analysis of river bed, TOC concentration was decreased along river bed depth and TN concentration had little variation.

**Keywords:** river water quality, pollutant runoff in wet-weather condition, tractional pollutant load from river bed sediments