水源貯水池における分画フェンスが 河川流入水の流動に及ぼす影響

INFLUENCE OF THE VERTICAL FENCE ON THE MOVEMENT OF A DENSITY CURRENT IN A WATER SUPPLY RESERVOIR

新山雅紀¹・甲賀大祐²・横山勝英³・小泉明⁴・山崎公子⁵・増子敦⁶・小林康浩⁷・峯岸宣遠⁸
Masaki NIIYAMA, Daisuke KOUGA, Katsuhide YOKOYAMA, Akira KOIZUMI,
Kimiko YAMAZAKI, Atsushi MASUKO, Yasuhiro KOBAYASHI and Nobutou MINEGISHI

「正会員 修(工) 首都大学東京大学院 都市基盤環境工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1) ²学生会員 首都大学東京大学院 都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1) ³正会員 博(工) 首都大学東京准教授 都市基盤環境コース (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1) ⁴フェロー会員 工博 首都大学東京教授 都市基盤環境コース (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1) ⁵正会員 博(工) 首都大学東京助教 都市基盤環境コース (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1) ⁶非会員 東京都水道局 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1)

7非会員 修 (理) 東京都水道局 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1) 8正会員 いであ株式会社 国土環境研究所 (〒224-0025 神奈川県横浜市都筑区早淵2-2-2)

The current, temperature and turbidity were observed in Ogouchi reservoir, in order to investigate the influence of a vertical fence on a river inflow. Around the vertical fence, the constant current of 100 mm/s was observed at a depth of 10 m. And the temperature profile was changed in the upstream region, because of the mixing of water mass by the vertical fence. It is suggested that this constant current is the river inflow, and it is easy to be led to the middle layer by the change of the temperature in a reservoir.

The turbidity water at a depth of 5 m was stagnating in the upstream region of the vertical fence for the period of a flood. The cumulative suspended sediment load was calculated using the turbidity and the current profile at the river and the reservoir. The cumulative suspended sediment load at the reservoir had decreased by 60 percent compared with the river. It is thought that this decrease is an effect of the vertical fence.

Key Words: water supply reservior, river inflow, current, vertical fence, turibidity water

1. はじめに

一般にダム貯水池では、洪水時に流入する濁水が貯水池に滞留することで放流水の濁水長期化現象が発生し、栄養塩が蓄積することで富栄養化が進みアオコなどが発生する。これらの水質問題に対して、ダム貯水池では曝気循環施設、選択取水施設、分画フェンスなどの水質保全施設が設置されるようになっている。

特に,近年は選択取水施設や分画フェンスにより流動を制御し,河川から流入する濁質や栄養塩を速やかに放流する水質保全対策が実施され始めている.そのため貯

水池の流入濁質や河川水の挙動を適確に把握し、水質保 全施設の効果を明確にすることが求められている.

濁水浸入流については、国内外において室内実験や現地観測による研究が進められ、潜入密度流や濁水挙動に関する理論的な解析や実貯水池での検証が行われている。例えば、Herbert らいによる潜り込み水深の算定式の研究や福岡ら2の成層貯水池に潜入する濁水挙動に関する実験、坊野ら3の出水時の濁水観測などが実施されている。また、数値モデルによる予測の研究が進み、Cesareらかは3次元モデルを用いて貯水池の濁水挙動を再現し、貯水池管理に有用なツールを開発している。

水質保全施設の研究としては、曝気循環施設の影響や効果に関して研究され、大規模貯水池に先進的に導入された釜房ダム5)をはじめ、施設効果について数多くの知見が得られている.

分画フェンスは、貯水池流入部に設置され、湖心部表層へのアオコの拡散防止や栄養塩及び懸濁物質を多く含む流入河川水を深層へ誘導する機能が期待されており、維持管理が容易で建設費用が安価であるため導入事例が増えている.しかし、気象条件や成層状態により複雑な現象が発生する実貯水池において、施設の機能や効果は十分に明らかにされていない.

佐々木らⁿによる濁水長期化及びアオコ対策に効果を発揮する洪水規模や流入河川水温条件の研究, 秋山ら⁸⁾による水槽実験での潜入密度流へのフェンス効果の研究が実施されているものの, 現地での検証事例は非常に少なく, さらに分画フェンスが普段の流入河川水の水理的な挙動におよぼす影響を調査研究した事例はほとんど見あたらないのが現状である.

そこで本研究では、分画フェンスによる前述の機能や効果を明らかにすることを目的として、分画フェンスの上下流部で流速及び水温、濁度の観測を行い分画フェンスが河川水の流動や濁質挙動に及ぼす影響を検討した.

2. 観測概要

(1) 対象貯水池

研究対象池は、東京都奥多摩町に位置する小河内ダム 貯水池である。図-1 に貯水池概要を示す。流域面積 262.9km²,総貯水容量1億9千万m³のわが国最大級の水道 専用貯水池である。その平均滞留日数は240日(年平均回 転率1.5)°であり典型的な成層型貯水池である。水温成層 期には第二取水施設から常時表層取水を実施している。

流入する主要河川は、丹波川 (127.3km²)、後山川 (30.9km²)、小菅川 (42.3km²)、峰谷川 (15.5km²) であり流域 面積の約75%を占めている。この主要河川流域には集落 があり、貯水池への栄養塩の供給源となっている。

東京都水道局は、流動制御によるアオコ発生抑制対策として、貯水池上流部に分画フェンスを設置し2004年から本格的に運用し始めた. ダム貯水池の横断方向に水深2m及び10mまでカーテンを吊り下げ、施設上流部で発生したアオコの拡散を防止するとともに、洪水時に流入する濁質や栄養塩を含む河川水を中層に誘導することが期待されている.

(2) 観測方法

図-2に観測方法を示す.集水面積の約60%を占める丹波川筋(後山川を含む)を対象として、分画フェンス周辺の流動及び水温、濁度を観測した.

流速,水温及び濁度の空間分布を把握するためにSt.1~St.8で短期観測した.このうちSt.6とSt.7では時間変化

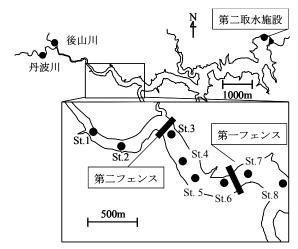


図-1 対象貯水池

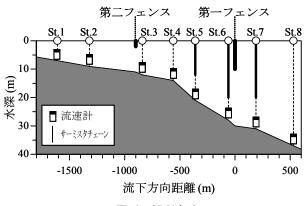


図-2 観測方法

を把握するために流速の長期連続観測を実施した. 流速計 (RDI製WH-ADCP1200kHz, 600kHz) を底層上向きに設置して,短期観測では1地点15分間以上停泊し流速データを取得,長期連続観測では10分間隔で流速を連続計測した. 層厚は0.5mである. また,多項目水質計 (JFEアレック社製クロロテック AAQ1183) を用いて水温,濁度の鉛直分布を計測した. 短期観測は2008年6月4日,7月15日,7月29日,8月12日に実施し,連続観測の期間は2009年7月~8月である.

水温, 濁度を St.5, St.6, St.7 で長期連続観測した. クロロフィル濁度計 (JFEアレック社製COMPACT-CLW) を水深 0m, 2m, 5m, 10m に, 小型水温計 (Onset 製 Tidbit) を水面から水深 20m まで 1m 毎にロープに取り付け, それぞれ 10 分間隔で連続計測した.

さらに、流入河川(丹波川、後山川)で水温及び濁度をクロロフィル濁度計を用いて10分間隔で計測した。河川流量は、東京都水道局のデータを使用した。濁度と水温については2008年6月から8月の期間で観測した。

3. 分画フェンス周辺での河川水の挙動

(1) 降雨量及び河川状況

図-3 に降雨量,河川水温及び流量の時系列変化を示す.降雨量は小河内ダム流域平均雨量,河川流量は後山

川を含む丹波川筋の流量,河川水温は丹波川と後山川の流量比による合成値を用いた.

丹波川筋の流量は平常時で約5m%である。観測期間内には、日雨量50mm程度の降雨によってピーク流量が約20m%の中規模出水が4回発生していた。河川水温は2Cから3Cで日変動しながら上昇している。6月初旬に12C程度であり、気温の上昇とともに7月後半に18C程度まで上昇している。

図-4にSt.6(分画フェンス上流側)及びSt.7(下流側)の 水温変化図を示す.水面から水深20mまで1m毎に観測し た水温データを用いて等水温線図を作成した.

St.6 (上流側)では、6月以降に気温上昇とともに水温成層が強化され、水深2m付近に一次躍層、水深12m付近に二次躍層が発達した水温分布となっている。7月には表層水温が25℃を超え、河川水温よりも高くなっている。また、St.7 (下流側)では、気温上昇とともに水温成層が形成されるが、一次躍層の位置は水深5m付近に形成されており、水深12m付近には二次躍層は見られない。このことから分画フェンスの上流側と下流側では水温分布特性が異なることがわかる。

(2) 河川水の浸入状況

図-5に6月4日と7月29日におけるSt.1(流入部)の 流速及び水温鉛直分布,河川水温を示す.なお,下流へ 向かう流速をプラスとした.

6月4日の観測結果をみると、水深2m付近に水温躍層が形成され表層は約16℃の一定水温層となっている。水温躍層下は水深とともに水温が低下する連続成層となるが水深4m以深では水温11℃と一定値を示している。

水深3mから5mにかけて130mm/sの流速ピークがある. 水深5mより下層の流速は計測されていないが、幅をもった下流へ向かう流れが発生している. 濁度は約30ppmと高く,6月3日に発生した洪水の影響だと考えられる.

次に、7月29日の観測結果をみると、6月と比較して表層水温が10°C上昇している。底層付近には100mm/sの流速ピークがあり2m程度の幅をもった下流へ向かう流れが発生していることがわかる。

この流れの層は、観測時間の河川水温と同水温帯であることから貯水池に潜入した河川水の流れだと考えられる。ただし、水深3mに濁度のピークがあることから、河川水温の変動により中層へも河川水が浸入していると推測される。なお、表層に上流向きの流れが発生している。この流れについては(4)節で考察する。

(3) 分画フェンス周辺での河川水挙動

図-6 に $St.1 \sim St.8$ の短期観測結果から鉛直流速分布及 び等水温線図を示す。6月4日の鉛直流速分布をみると、 $St.2 \sim St.4$ では底層に 100mm/s 程度の流速ピークがあり、 $St.5 \sim St.8$ では水深 12m 付近に連続して流速ピークが存在している様子がわかる。(2) 節で述べたように St.1 に

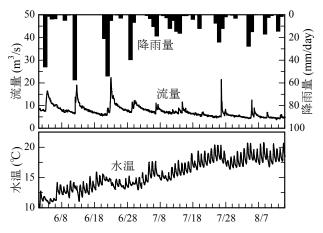


図-3 気象及び河川水状況

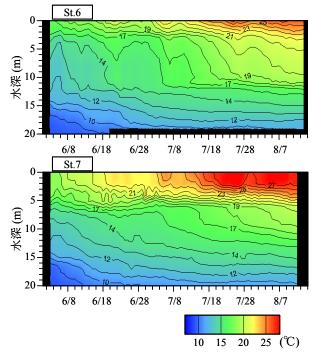


図-4 貯水池の水温変化

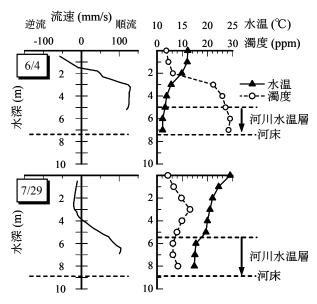


図-5 流速及び水温鉛直分布 (St. 1)

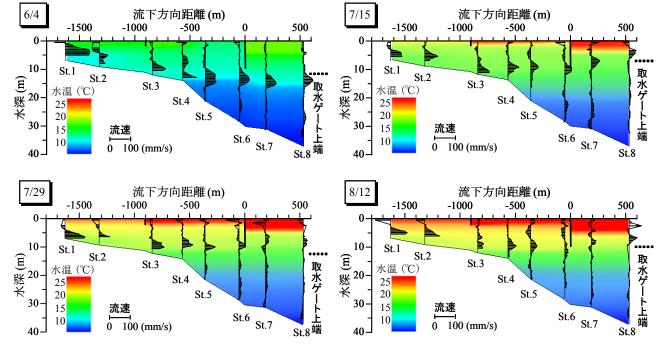


図-6 分画フェンス周辺の河川水の挙動

おける流れが浸入した河川水であると考えられるため、この流れは貯水池内を河川水が連続して流下する状態を示している.

従って、河川水はSt.4 付近までは下層密度流として下流に向かって流れ、St.5 付近で底層から剥離し水深12m付近の同水温帯に貫入して中層密度流となり流下していると考えられる. なお、6 月は河川水温が低いため、下流側においてもフェンス下端(水深10m)より下層を河川水が流れていることがわかった.

次に、7月 15 日の観測結果をみると、河川水が底層を 100mm/s 程度で流れ、St.4 付近で剥離し中層密度流として 連続的に下流に向かって流れている. しかし、6 月と比較して、 $St.4 \sim St.6$ では流動層が水深 10m 付近に上昇し、St.7 と St.8 では水深 5m 付近まで上昇していた.

これは、河川水温が上昇したことに加えて、分画フェンス上下流で水温分布が異なることが要因であると考えられる. すなわち、河川水温と同水温の層が、分画フェンス上流側では水深10m付近に、下流では5m付近に存在しているため、流動層が上昇したと考えられる. この水温分布の違いは、特に水面から10mまでの範囲で顕著であることから、分画フェンスの影響だと推測される.

7月29日及び8月12日の観測結果をみると、分画フェンス上流側の流れの一部が分画フェンスに衝突している様子がわかる。その結果、分画フェンス下流側では、6月のような100mm/sを超える比較的強い河川水の流動層は消滅し20mm/s程度の小さい流れになっている。

(4) 分画フェンスが流動と水温分布に及ぼす影響 図-7にSt.6(分画フェンス上流側)の7月15日10時, 20時の流速鉛直分布,St.6とSt.7の水温鉛直分布を示す.

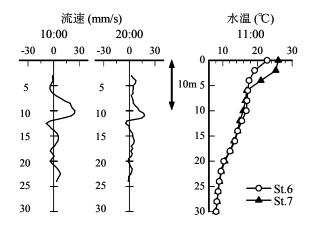
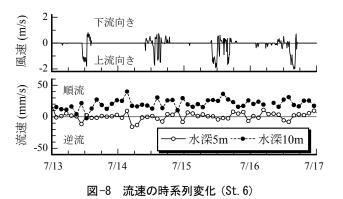


図-7 流速 (St. 6) 及び水温鉛直分布 (St. 6, St. 7)



また、図-8 に水深5mと10mの流速・風速時系列を示す. 流速は、表層から水深6mまでは非常に小さい.また、水深10m付近には30mm/s程度の下流へ向かう流れが発生していることがわかる.流速時系列をみると、水深5mでは、流向が上下流に変動しており往復流が発生している

が、水深10mでは定常的に下流へ向かう流れが発生していることがわかった.

この水深5 mの往復流は、風速変動との関連は小さく、水深10 mの流速の変動に伴い逆流が発生する傾向があるため、水深10 mの流れの一部がフェンスに衝突することで発生した反転流だと考えられる.

水温鉛直分布をみると、St.7 (下流側) では連続成層が 形成されている一方で、St.6 (上流側) では水深3mから 水深11m付近まで一定水温となっており、かつ、表面から5m付近までの水温がSt.7 に比べて低い.

すなわち、St.6 (上流側)では、水深5m付近の往復流や水深10m付近の河川水の流れの一部がフェンスに衝突することで、水塊の鉛直混合を促進し連続成層が破壊されて水温一定層を形成すると推測される。そのため、St.6 (上流側)では、水面から水深5m付近までの水温が低く、水深5mから水深10mまでの範囲で高くなっていると考えられる。

4. 分画フェンスが濁水挙動に及ぼす影響

(1) 河川流入水の到達時間

図-9 に河川の洪水発生状況及び貯水池内の濁度時系列を示す。6月23日午前0時にピーク流量が22.0m%であったが,濁度も概ね同時刻にピークに達していた。 $St.5 \sim 7$ にかけて濁度のピーク時間を追うと,丹波川地点から約8時間後にSt.5の水深10mに到達しており,その2時間後にSt.6~,さらに1時間後にSt.7に到達していた。

この濁水の区間平均流速はそれぞれ 110mm/s, 70mm/s, 50mm/s になり、図-6に示した密度流の流速と同程度であり、平常時の流れとほぼ同じであった。

図-10 に出水のピークから 25 時間後の St.6 と St.7 の水温及び濁度鉛直分布を示す.濁度が最も高い水深 10m の水温は,流入水の到達時間を考慮した河川水温と比較すると概ね等しい.従って,この濁質を含む流れは水深 10m付近を流れる河川水だと考えられる.

(2) 濁水の流動特性

図-9のSt.5 とSt.6の水深5mの濁度変化をみると、分画フェンスに近いSt.6 が先に上昇していることがわかる.これは流れの一部が分画フェンスに衝突し鉛直循環流が発生することで、濁水が湧昇したためだと考えられる.

また、水深5mの濁度は、St.6では上昇した後一時低下したり、St.5では遅れて上昇している。これは、分画フェンスの影響で上流側では鉛直循環流や往復流が発生しているために、複雑な濁水挙動を示したと考えられる。

図-10のSt.6 (上流側) とSt.7 (下流側) の水深5mの濁度を比較すると、それぞれ13.0ppm、4.5ppmであった。St.7 では水深5mの濁度上昇は小さく、分画フェンスにより遮られ上流からの流出が抑制されたことを示している。

St.6では時間が経つと水深10mの濁度は低下するが、水

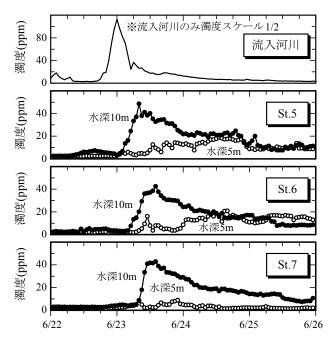


図-9 河川及び貯水池内濁度の時系列変化

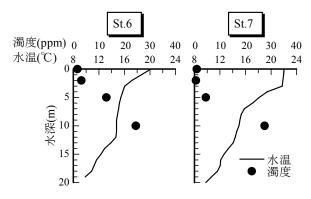


図-10 水温及び濁度鉛直分布 (St. 6, St. 7)

深5mの濁度は安定しており、濁水が滞留し濁質の一部が 分画フェンス上流側に貯留されていると考えられる.

(3) 分画フェンス上流側における濁質捕捉量

分画フェンスの濁質滞留効果を確認するために、丹波川及びSt.6, St.7 における濁度時系列データから6月23日の中規模洪水時の濁質通過量について次式を用いて算出を試みた.

$$Q_s = Q \cdot \frac{SS}{1000} \cdot T \tag{1}$$

ここで、 Q_s : 濁質通過量(kg)、Q: 流量 (m^3/s) 、SS: 浮遊粒子量(mg/L)、T: 時間(S)である. なお、対象期間は、丹波川で増水してからSt.7 で濁度が十分に低下するまでの6月 22 日 0 時から6 月 29 日 0 時までとした.

貯水池内 (St.6, St.7) の濁度鉛直分布については、水深 0m, 2m, 5m, 10mで連続計測した濁度データから直線補間し各水深の濁度を推定した (図-11). 濁度から SS への変換には、既往研究10における丹波川の濁度と SS 量に

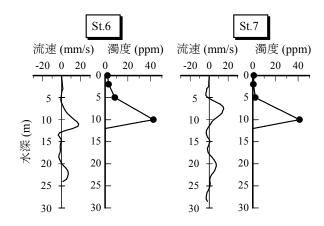


図-11 濁質通過量算出に使用した流速及び濁度分布

関する相関式を用い,各地点の濁度に適用した.丹波川 の流入量は東京都水道局の流量データを用いた.

貯水池の流速分布 (St.6, St.7) は、前述のように平常時と同程度の流れだと推測されることから、洪水直後の7月4日及び5日の流速連続観測データを用いて平均鉛直流速分布形を作成した (図-11). この平均鉛直流速分布と測量断面積を用いて各水深の流量を推定し、流量の連続性を保つため河川総流入量に合わせて、貯水池内の流速分布を一日ごとに補正し時系列データ化した. 洪水時の6月23日の補正係数はSt.6で1.1, St.7で1.2であり、それ以外の日は概ね0.6~0.8の範囲であった.

試算の結果,対象期間内に丹波川筋から流入した濁質量は約145,000kgであり, St.6での通過量は66,600kg, St.7での通過量は63,700kgとなった.流入した濁質の56%が分画フェンス上流側に捕捉されたことを示している.

ただし、濁水の流入過程における粒度分布の変化を考慮すると、捕捉率は変化する可能性が高い.本検討では河川の濁度・SS 相関式を貯水池にも適用しているが、横山いは河川濁水よりも貯水池濁水の方が粒径が細かくなり、そのために濁度計の出力値が同じであっても貯水池濁水の方が SS 濃度が低下することを示している.仮に七ヶ宿貯水池での濁度・SS 相関関係いにより対象洪水のSS 濃度を再計算すると、分画フェンス上流域での濁質補足率は83%となった.また、手賀沼と流入河川で作成された式12)を用いると濁質捕捉率は82%となった.したがって、濁質粒子の分級が濁度応答に及ぼす影響を考慮すれば、実際には6割以上の濁質が捕捉されていると推測される.

5. おわりに

小河内貯水池を対象として流速,水温及び濁度の観測を行い,分画フェンスが河川水の流動や濁質挙動に及ぼす影響を検討した.

貯水池内において約100mm/s の流れが連続的に発生しており、貯水池に流入した河川水の流れであることを示

した. また、分画フェンスによる流れの影響や水温分布の変化メカニズムを示し、それが河川水の挙動に影響を及ぼすことを指摘した. さらに、中規模洪水時の濁質挙動を調査することで、分画フェンス上流側で濁水が滞留していること、流入濁質量の56%が捕捉されている可能性があることを示した.

今後,分画フェンスによる流動や水質への影響を定量 的に明らかにするために,シミュレーションモデルを構 築しそのメカニズムを検証する予定である.

謝辞:本研究では、東京都水道局水質センター「小河内貯水池水質調査委託」の観測データを活用させてい頂いた。また、東京都水道局浄水課、小河内貯水池管理事務所、首都大学東京都市基盤環境コース水工学研究室の学生には、現地観測やデータ提供に協力して頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1)B.Hebbert, J.Patterson, I.Loh and J.Imberger: Collie river underflow into the Wellington reservoir, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.105, HY.5, pp.533-545, 1979.
- 2)福岡捷二,福嶋祐介,村田和夫,荒井健:成層化した二次元 貯水池に流入する密度流の実験的研究,土木学会論文報告 集,293号,pp.65-77,1980.
- 3) 坊野聡子,清水康行,斉藤大作,吉田義一,黒木幹男:出水 時のダム貯水池における濁質観測,水工学論文集,第42巻, pp.715-720,1998.
- 4)G.De Cesare, A.Schleiss and F.Hermann: Impact of turbidity currents on reservoir sedimentationz, J. of Hydraulic Engineering, Vol. 127, pp.6-16, 2001.
- 5)天野邦彦, 丹羽薫, 三浦進: 貯水池における曝気循環の影響 に関する現地観測,水工学論文集,第35巻,pp. 211-216,1991.
- 6)深谷壽久, 岡本幸久, 城敬治, 竹尾敬三: 矢作ダム浮沈式濁 水対策フェンスの操作方法と構造, ダム工学, Vol.17, pp.54-64, 2007.
- 7)佐々木稔,盛谷明弘:貯水池水質対策としての流動制御フェンスの効果の検討,ダム水源地環境技術研究所所報,pp.10-15,2006.
- 8)秋山壽一郎,重枝未玲,安藤祐馬,小野修平,小川真由子: フェンスによる貯水池潜入密度流の流動制御,水工学論文 集,第50巻,pp.1285-1290,2006.
- 9)環境省中央環境審議会:第7回水環境部会資料,2003.
- 10) 菊池彩子,山崎公子,小泉明,横山勝英,斎藤滋,小林康浩:小河内貯水池流入河川における濁質と栄養塩類の関連分析,第60回全国水道研究発表会講演集,pp.94-95,2009.
- 11)横山勝英: 濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察, 土木学会論文集, No.698/ II -58, pp.93-98, 2002.
- 12)山崎祐介, 二瓶康雄, 大関雅丈, 今野篤, 西村司: 都市河 川河口域における土砂・栄養塩・有機物輸送特性に関する現 地観測, 水工学論文集, 第48巻, pp.1489-1494, 2004.

(2009.9.30受付)