

浅い貯水池における夏季の河川水流入時の 流動と水質への影響に関する研究

AN ANALYSIS OF HYDRODYNAMICS OF RIVER INFLOW AND ITS EFFECT ON WATER QUALITY DURING SUMMER IN A SHALLOW RESERVOIR

天野 邦彦¹・鈴木 宏幸²・李 建華³
Kunihiko AMANO, Hiroyuki SUZUKI, and Jianhua LI

¹正会員 工博 (独) 土木研究所 河川生態チーム 上席研究員 (〒305-8516 つくば市南原1-6)

²正会員 国土技術政策総合研究所 河川環境研究室 研究官 (〒305-0804 つくば市旭一番地)

³理博 (独) 土木研究所 水質チーム 専門研究員 (現 中国環境科学研究院都市水環境研究所)

The concentration of nutrients such as phosphorus and nitrogen increases in July to August in Watarase reservoir. This increase is caused by the release of nutrients from bottom sediments. Physical disturbance on bottom sediments is seemed to have significant role in the nutrient release. Physical disturbance on bottom sediments is mainly driven by wind waves in shallow lakes and reservoirs. Since such events occur intermittently, it is necessary to monitor continuously to detect the events. We have conducted several monitoring including current, temperature profiles, meteorology and water quality measurement in Watarase reservoir to detect the record of physical disturbances on bottom sediments and its driving force. Due to its shallowness, the reservoir is warmed to the bottom sediments in summer. The temperature of surface layer of bottom sediments exceeded 30 °C. Density current penetrated to the bottom layer during river inflow in summer since the temperature of river water is cooler than that of reservoir water. Monitored records showed that this density current seems to have great disturbance on bottom sediments. Cooler and denser river inflow to such shallow reservoir should be paid more attention in analysis of material flow between water column and bottom sediments. Based on field survey and numerical simulation results, we discussed such event and its effect on water quality of a shallow reservoir.

Key Words : *bottom sediments, shallow reservoir, density current, and eutrophication*

1. はじめに

利根川水系渡良瀬貯水池は、7月1日から9月30日までの間、洪水調節のための夏期制限水位である3mに水深が維持される様に管理されている多目的貯水池である。本貯水池においては、周辺河川との水の交換が人為的な水門操作により行われている。7月1日から水位を夏期制限水位に維持するために、例年6月中旬以降、常時満水位から水位を低下させる。7月1日から9月30日までは、利根川に補給が必要になった場合（渇水時）には貯水池水を放流するほか、出水時には渡良瀬川より取水し、洪水調節を行うことになっている。このような必要性が無い場合は、河川との水の交換は基本的に生じない。このためにこの間の水質変化は、貯水池水柱で生じる水質変化と、水柱と底泥間での物質移動に主に規定されることになる¹⁾。

既往調査より、7月から8月中旬にかけては、底泥からリンおよび窒素の水柱への回帰が認められており、夏期制限水位時の3mという低水深時の底泥への物理的攪乱が回帰を促進していると推測されている¹⁾。

底泥への物理的攪乱の主要因として考えられる風波による底泥の巻き上げについて検討した結果、特に北東風が吹いた場合に、底泥の巻き上げが生じやすいことが明らかになっている²⁾。夏期制限水位時にはこの北東風が吹きやすい環境にあり、底泥への攪乱が間欠的に生じていることが考えられる。

底泥に攪乱が生じたことを知るには、現場に濁度計を設置して連続観測を行う方法がある。底泥への物理的攪乱については、発生する時期を予め知ることができないことから、これを調査するためには、自動測定機器による連続調査が必要になる。

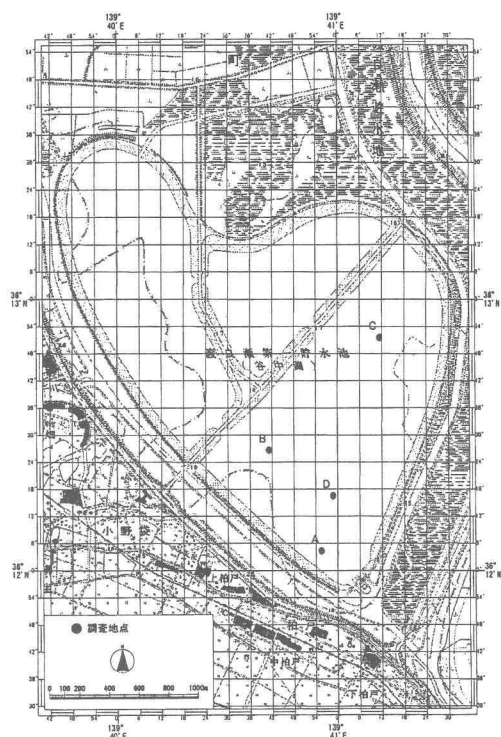
今回の研究では、濁度計による測定に加えて、貯水池の水温分布、水質変動、および流動観測と同時に底

泥への物理的攪乱の程度を調査するために、新たに底泥中の温度変化を鉛直的に測定する装置を開発し、底泥の鉛直方向の温度変化を連続的に観測して、貯水池環境と底泥への物理的攪乱の程度について、現地調査を行った。その結果、風波に加えて、低温河川水流入時に底泥への大きな攪乱が生じていることが示された。

2. 研究方法

渡良瀬貯水池に設置した4箇所の調査地点（図—1中のA～D地点）において電磁流速計による流動の連続観測を行い、貯水池内の流れを調査すると共に、図—1中のD地点において水質連続観測を行った。また、D地点では、底泥温鉛直分布測定装置（図—2）を設置し底泥の温度変化を連続的に測定した。渡良瀬貯水池は浅い貯水池で、水門付近に他より約1m深くなった部分（A地点付近）が存在するが、ほぼ全域にわたり平面的で水深変化は少ない。

さらに測定結果について評価するために、3次元流動モデルを適用して、観測期間に生じた貯水池内の流動現象について再現計算を行った。



図—1 渡良瀬貯水池平面図及び調査地点

(1) 現地調査の概要

a) 電磁流向流速計による流動観測

平成13年5月31日から8月2日にかけて渡良瀬貯水池において電磁流向流速計（ACM-8M, アレック電子社製）を7台、超音波流向流速計（AICM-2, 鶴見精機社性）を1台設置し流動観測を行った。

設置場所は、図—1に示されたA～D地点であり、そ

れぞれ表層計測用に水面から50cm水深地点と、底層計測用に貯水池底から50cm上の地点に1台ずつ設置した。超音波流向流速計はB地点の表層に設置し、その他の地点には電磁流向流速計を設置した。表層計測用の計器はブイに垂下することで水位変動に追従するようにした。計測は10分間隔で行い、1秒間隔で60回スキャンして平均値を記録した。

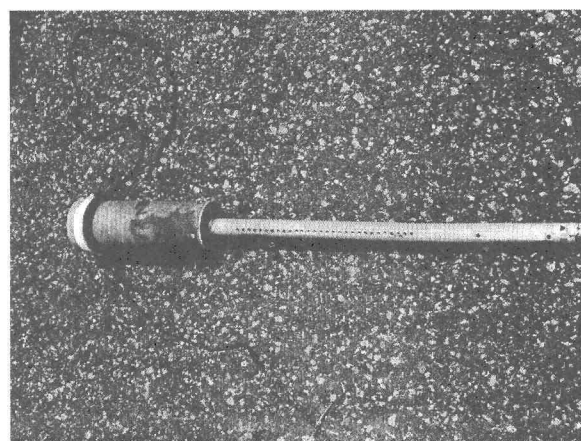
b) 水質変化連続調査

流動観測の期間中、小型メモリー水温計（MDS-T, アレック電子社製）を係留したサーミスタチェーンを設置し、50cm毎の鉛直水温分布を10分間の測定間隔で計測し、貯水池水温の鉛直構造の変化について観測を行った。

図—1中のD地点においては、電磁流向流速計と同様の方法で係留した多項目水質計（YSI-6000, YSI社製）を表層と底層に1台ずつ設置して、水温、電気伝導度（EC）、溶存酸素（DO）、水素イオン濃度（pH）、濁度の5項目について10分間隔で計測を行った。

c) 底泥温鉛直分布変化連続観測

底泥温の鉛直分布を連続的に測定する装置を新たに開発し（三洋測器社製）、図—1中のD地点において、この泥温鉛直分布測定装置を底泥中に挿入して底泥温の鉛直分布変化を連続的に測定した。装置は小型のサーミスタを埋め込んだプラスチック製の棒とメモリを内蔵したシリンダから構成されている。棒の部分を底泥中に押し込み、設置することで底泥内の鉛直方向の温度変化を10～30分間隔で連続的に測定した。小型サーミスタは、プラスチック棒上に1cm間隔に29個並んでおり、さらに2個が10cmずつ離れて並んでおり、全部で約50cm深さまでの底泥温分布が測定できる。図—2に本装置の写真を示す。



図—2 底泥温鉛直分布測定装置の写真

d) 水質鉛直構造観測

流動観測期間中、6月30日までは毎日、以降は3～4日ごとに、D地点において表層（水深0.5m）、中層（1/2水深）、底層（貯水池底上0.5m）、及び貯水池最深部の底層（A地点底上0.5m）の4地点においてバンドーン採水器を用いて採水を行い、分析に供した。

サンプルについては、全窒素(T-N)、硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)、全リン(T-P)、リン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)について分析を行った。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ についてはオートアナライザー(AACS-II, BRAN + LUEBBE社製)を用いて分析を行った。T-N、T-Pについては、5月30日から6月30日のサンプルに関しては、ペルオキシ2硫酸カリウム分解法で前処理し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ としてオートアナライザー(前出)で分析を行い、分解試薬の添加量について補正して測定値とした。また、7月1日以降のサンプルについては、全窒素・全リン専用オートアナライザー(T-N, T-P Auto Analyzer, BRAN+LUEBBE社製)を用いて分析を行った。

また、同時に鉛直方向の水温、濁度、溶存酸素(DO)、pH、電気伝導度(EC)について多項目水質計(Datasonde4, Hydrolab社製)を用いてほぼ50cm毎に計測した。

e) 流入水質観測

流入水質については、利根川上流工事事務所により流入地点で河川水流入(取水)時に毎日行われた流入水質調査結果(水温、COD、SS、T-N、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、T-P、 $\text{PO}_4\text{-P}$)を入手して、解析に使用した。

(2) 流動解析計算

調査期間中の水質変化の再現計算を数値シミュレーションモデルを用いて行った。使用したシミュレーションモデルは3次元の流れモデル²⁾である。平成13年4月17日を初期値として流れの無い状態で計算を開始して(コールドスタート)、平成13年7月31日まで計算を行った。計算入力条件として必要な気象条件については、風向・風速は30分毎に貯水池に設置されたブイ上で計測されている測定値を用い、気温、湿度、日射量については1時間毎に貯水池に隣接した管理所における観測値を用い、雲量に関しては、高崎気象観測所で観測されたアメダスデータを用いた。流入水量と放流量については、管理所で記録されたデータを使用した。

3. 研究結果

(1) 現地調査結果

調査開始から6月11日までは貯水池と河川との間での水の交換はなかった。6月11日以降は、6月29日まで約 $10(\text{m}^3/\text{s})$ で放流が行われ、水深は3mにまで低下した。その後も数度の放流が行われ、7月17日には水深が2mにまで低下した。7月18日から20日までには約 $20(\text{m}^3/\text{s})$ で取水があり、その後は取水、放流が繰り返された(図-3)。

a) 電磁流向流速計による流動観測

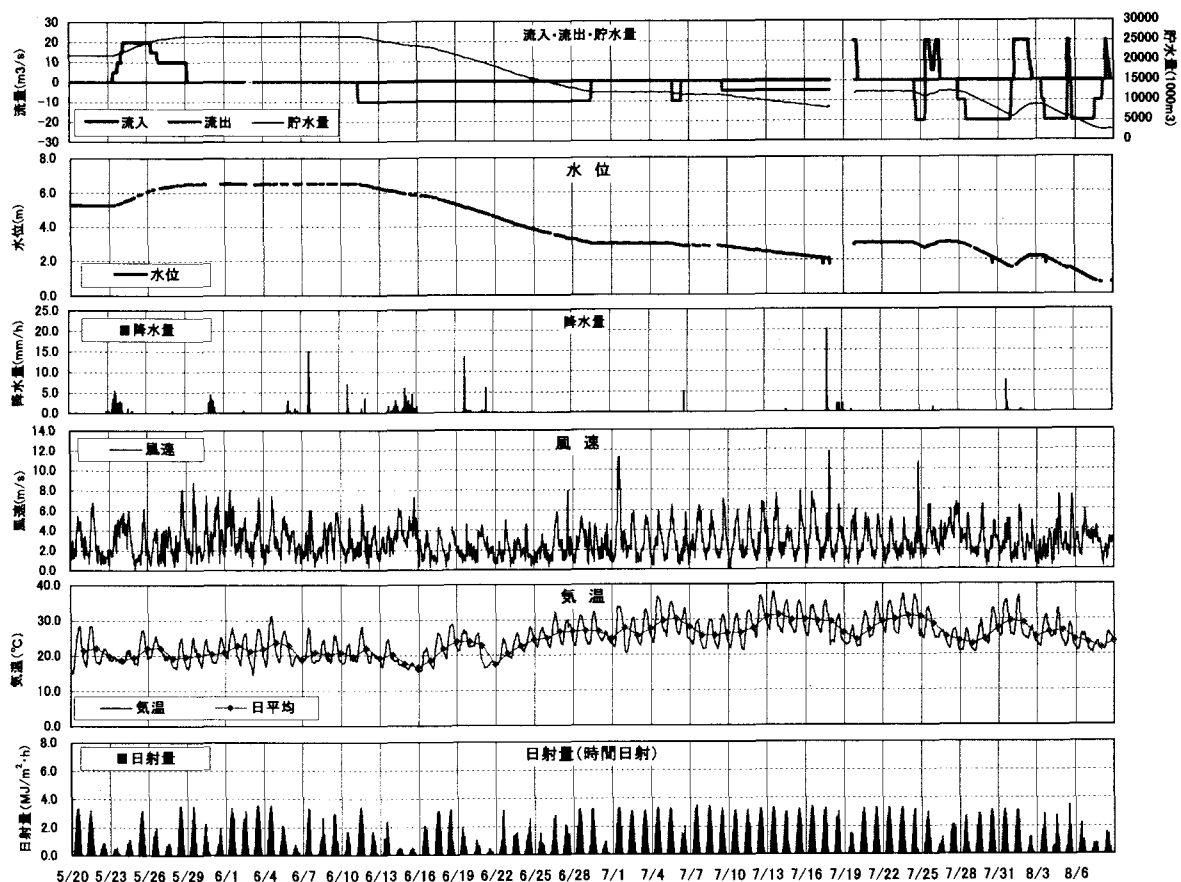
底泥に対する物理的攪乱について確認するために、河川水流入時及び前後期間の調査4地点における底層での流速変化を図-4に示す。底層での流速はあまり大きくなく、4地点とも流速の絶対値の平均は2~2.5cm/s程度であった。水深が深いA地点では、特に流速が低めであった。際だった特徴として挙げられるものは、水門に近いA及びD地点では、7月18日から7月20日の間に非常に大きな流速値を示していたことである。この期間中、河川からの取水($20\text{m}^3/\text{s}$)があったために、このときの流入河川水によって生じた流れが観測されたものと考えられる。

後述するが、この際の流入河川水温は貯水池水より低かったために流入河川水は貯水池底層に密度流を形成して流れ込んだと考えられ、記録に現れた大きな流速は、この密度流を捉えたものと考えられる。

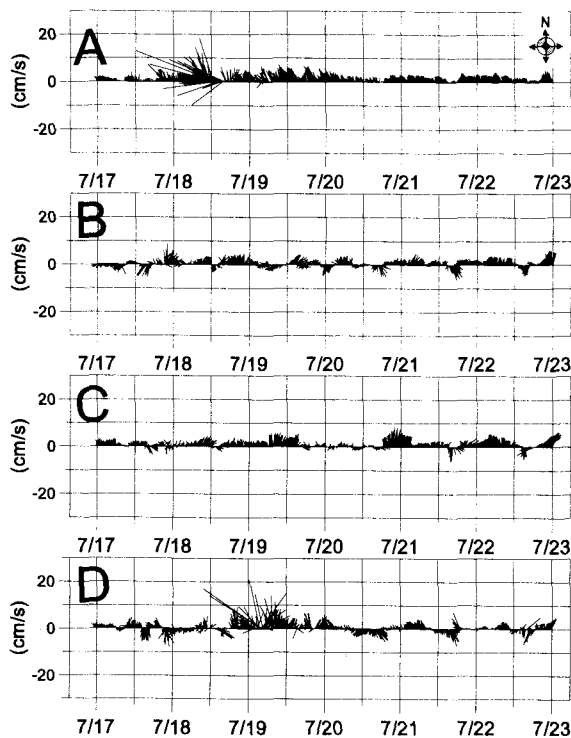
b) 水質変化連続調査

貯水池水温の鉛直構造については、日射量が多く、強風が吹かない日には、日中表層水温が上昇し、底層水温との間に水温差ができる日成層が形成される³⁾。

これに対して、6月14日から15日や、7月17日から19日の様に、降雨があった日には、風を伴うことも多く、表層水温が低下して水柱の鉛直混合が進行する(図-3、5)。これらの期間における水温変化を見ると、表層水温は6月13日の15時には 24°C だったものが、降雨のために表層水温は日中も上昇しなかったため、約 2°C 連続的に低下して、6月16日の早朝には 21.9°C にまで低下している。底層水温は6月13日には 22.8°C に達していたが、6月16日の早朝までには表層水温と等しくなった。これらの水温変化から、風雨により貯水池が表面から冷却されて水柱全体の水温が低下したことが分かる。また、7月17日から7月19日にかけて、洪水調節のために河川から貯水池への河川水流入があった。この際に測定された流入河川水温は 26.3°C から 28°C であった。貯水池水温は、7月17日の河川水流入前は底層でも 32°C 近くと高く、このため流入した河川水は、貯水池底層に貫入したと考えられる。7月19日早朝には底層水温は 27.2°C にまで低下しており、底層水温は約 5°C の低下を示している。この期間中も、気温は低下しているが、底層に冷水が貫入しているため、特に底層水温低下が激しかった。この様に水表面が冷却されたり、貯水池水温に比べて低温の河川水流入があった場合には、水の密度不安定が起こり、底泥への物理的攪乱が増大することが予想される。低温の河川水流入があった期間中の水質連続測定結果を図-5に示す。D地点で測定された結果には、7月18日の午後から流入河川水が到達したことを示す水温や電気伝導度の低下が捉えられている。さらに7月19日には底層濁度の急上昇が示されている。本期間中の流入河川水の溶存酸素の測定は行われていないが、過去のデータから類推してほぼ飽和濃度に近かったと考え



図—3 貯水池水文及び気象観測結果



図—4 河川水流入時前後の調査4地点における底層での流速変化(縦軸が流速ベクトルのスケールを、上向きが矢が北向きの流れを表している。)

られる。しかし、流入河川水による水質変化が捕捉された7月18日の午後からは底層の溶存酸素濃度は2(mg/l)と本貯水池の制限水位時の値としては極めて低い値を示

す結果となった(連続観測による底層での7月1日から7月16日までの溶存酸素濃度は、平均、最大、最小値がそれぞれ7.38, 11.73, 4.46(mg/l)であった。)

c) 底泥温鉛直分布変化連続観測

底泥温の鉛直分布変化測定結果を図—6に示す。図の見方については、以下の通りである。表層に近いほど温度は高く、最も温度が高いものは、貯水池水と底泥との境界付近に位置するサーミスタの測定結果で、温度が低くなる方向に1cmピッチで配置した24個のサーミスタ各々の測定結果が示されている(5cm毎に線を太くして描画)。さらに下側の少し温度が離れた2個は10cmピッチに配置したものの測定結果であり、深さ約35cmと45cmの位置での温度変化を表している。底泥温は貯水池底層水温変化に追随して変化している。また、底泥深さが深いほど、変化が緩やかであることと変化の位相に時間遅れが生じていることが分かる。

貯水池水温分布から水柱の鉛直混合が進んでいたことが示された6月14日から15日や、7月17日から19日については、前者では6月13日には1cm深さ地点では22.5°Cであった泥温は6月16日には21.8°Cにまで約1°C低下している。直近の最高泥温で21.8°C以上の泥温を示していたのは、深さ10cm付近で浅まであったため、この期間中、風雨時の貯水池水の冷却に伴って底泥も深さ10cm程度まで急激に冷却されたことが分かる。後者の期間においては、底泥の冷却がさらに急激であった。

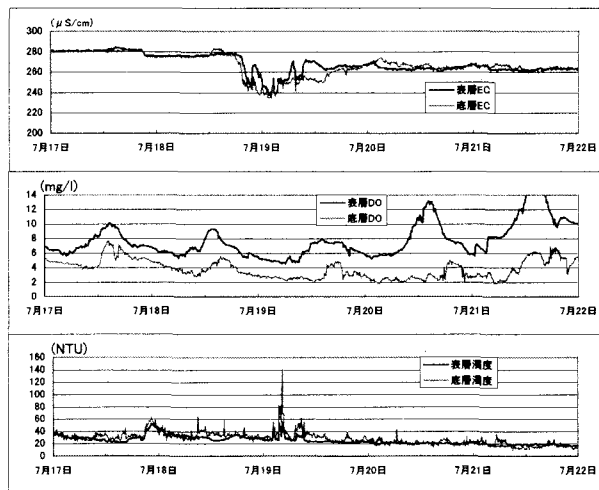
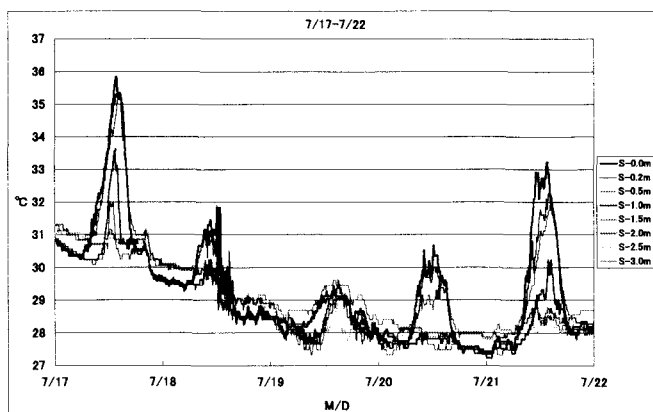


図-5 河川水流入時前後のD地点における水質変化

7月17日から19日にかけての急激な底層水温の低下に伴い、底泥表層温度も29.6℃から26.9℃と3℃程度の低下を示している。直近の最高泥温と比較して、深さ15cm付近までの泥温が急激に低下してほぼ一様の泥温となった。

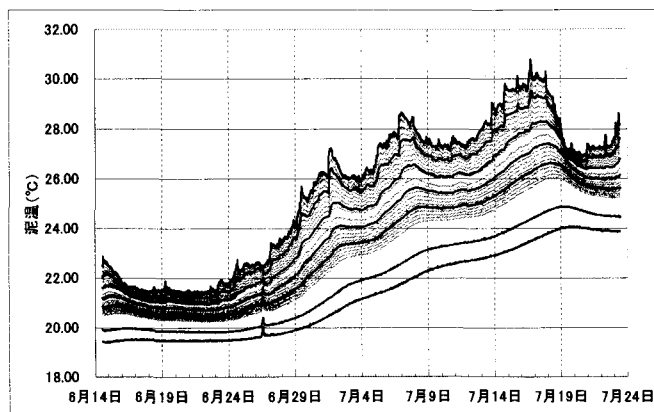


図-6 底泥温鉛直分布変化図

d) 水質鉛直構造観測

6月初旬には、植物プランクトンが動物プランクトンに捕食された結果と考えられる $PO_4\text{-P}$ や $NH_4\text{-N}$ 等の無機態栄養塩類濃度上昇が見られた³⁾。この期間を除いて大幅なこれら無機態栄養塩類濃度上昇が7月17日から19日の冷水流入時に見られる。7月17日から19日にかけての冷水流入時の栄養塩類の鉛直方向分布($PO_4\text{-P}$ 及び $NH_4\text{-N}$)に着目すると、7月16日に測定した際には鉛直方向の濃度差は見られなかったものが、7月19日には中層と底層では表層と比べて明らかに高い濃度を示している(図-7)。流入している河川水質を見ると、 $PO_4\text{-P}$ が0.07~0.12(mg/l)及び $NH_4\text{-N}$ については、7月19日午前10時20分に測定された一回のみの測定結果しかないが、0.11(mg/l)であった。上述のように流入河川水温は貯水池水温に比べて低いことから、底層に貫入して元から存在した貯水池水を上に押し上げる形で流入したと考えられる。このため、中層と底層での $PO_4\text{-P}$ 及び $NH_4\text{-N}$ 濃度が上昇していることは当然の結果と考えられるが、 $NH_4\text{-N}$ については、貯水池中層及び底層での濃度が流入水質を上回るほど上昇している点が特色である(図-7)。流入河川の $NH_4\text{-N}$ は、夏季には低い値をとることが、過去の調査からも示されている(平成10年、11年6、7月に行われた流入河川水質調査結果からも、 $NH_4\text{-N}$ 濃度は最大値で0.12、平均値は0.07(mg/l)となっており、無機態窒素はほとんどが硝酸態窒素で占められている。)。このため、貯水池中層、底層における $NH_4\text{-N}$ 濃度の上昇は、流入水質濃度以上であったと考えられる。

N)に着目すると、7月16日に測定した際には鉛直方向の濃度差は見られなかったものが、7月19日には中層と底層では表層と比べて明らかに高い濃度を示している(図-7)。流入している河川水質を見ると、 $PO_4\text{-P}$ が0.07~0.12(mg/l)及び $NH_4\text{-N}$ については、7月19日午前10時20分に測定された一回のみの測定結果しかないが、0.11(mg/l)であった。上述のように流入河川水温は貯水池水温に比べて低いことから、底層に貫入して元から存在した貯水池水を上に押し上げる形で流入したと考えられる。このため、中層と底層での $PO_4\text{-P}$ 及び $NH_4\text{-N}$ 濃度が上昇していることは当然の結果と考えられるが、 $NH_4\text{-N}$ については、貯水池中層及び底層での濃度が流入水質を上回るほど上昇している点が特色である(図-7)。流入河川の $NH_4\text{-N}$ は、夏季には低い値をとることが、過去の調査からも示されている(平成10年、11年6、7月に行われた流入河川水質調査結果からも、 $NH_4\text{-N}$ 濃度は最大値で0.12、平均値は0.07(mg/l)となっており、無機態窒素はほとんどが硝酸態窒素で占められている。)。このため、貯水池中層、底層における $NH_4\text{-N}$ 濃度の上昇は、流入水質濃度以上であったと考えられる。

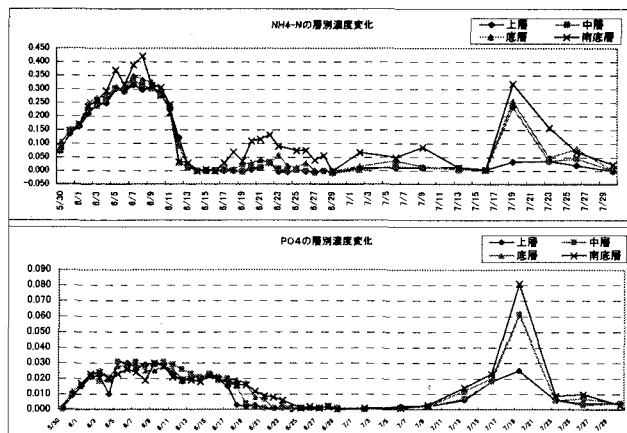


図-7 層別の栄養塩濃度変化

(2) 流動解析計算結果

種々の観測結果から、底泥への物理的攪乱が大きくなっていると推測される冷水温の河川水流入時の流動解析結果を図-8に示す。通常あまり流動が生じていない底層においても河川水流入時には、河川水流入により生じた密度流の様子が再現されている。ただし、解析結果から得られた流速値は、実測で得られた最大値に比べて低めの値であった。

実測で得られた最大値は、継続時間が短いことや、流向が一定でないことから、流入した河川水により生じた密度流が不安定な流れを形成しているために起こったと考えられる。計算結果は、むしろ全体的に平滑化された流れを表しているために、このような差が出たものと考えられる。後述の様に、この底層密度流は底泥への物理的な攪乱を引き起こしていると考えられるが、このような強い変動を持った流れであることも物理的攪乱の要因になっていると考えられる。

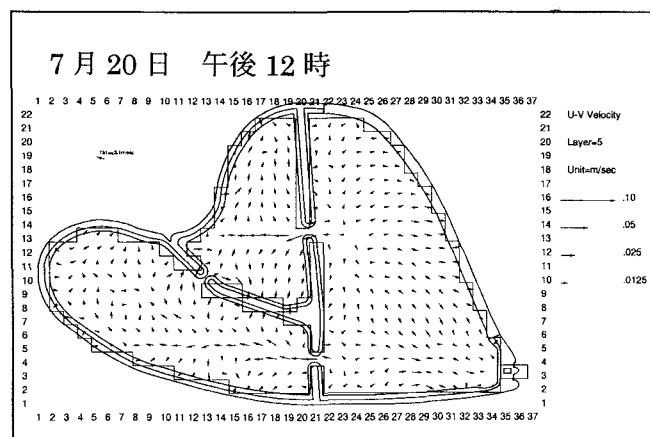
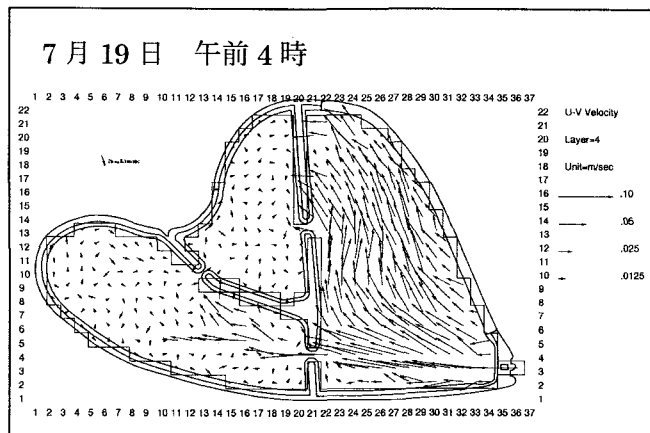


図-8 河川水流入時（上）と流入が終わった時点（下）での底層流動解析結果

4. 考察とまとめ

浅い湖沼や貯水池においては、一般的に底泥への物理的攪乱を増大する要因としては吹送流などに起因する底層での流れに伴うせん断力よりも風波によるものの方が大きいことが知られており、底泥巻き上げも風波により生起するものが主と考えられる⁴⁾。しかし、今回の観測に見られたように水温が極めて上昇している夏季の渡良瀬貯水池の様な場所では、比較的水温の低い河川水流入があった場合に密度不安定に伴う底泥の物理的攪乱が起り得、底泥からの栄養塩回帰にも影響を与えるほどになりうるということがデータから読みとることが出来る。図-5の水質連続観測を見ると、D地点において河川水流入時の7月19日の午前0時から4時頃には、底層濁度が140NTUまで急激に上昇した後に低下すると共に電気伝導度の値が急激に変動している。これは、底層の密度流が貯水池水と激しく混合すると共に底泥を巻き上げていたことを示唆している。図-4のD地点での流動観測からも同時刻に激しく流向を変化させながら大きな流速を持つ流れが生じている。この期間には、底泥の温度も表層か

ら急激に低下しており、底泥への物理的攪乱が大きかったことを示している。7月19日の午前11時頃の採水からは、底層から中層にかけて、流入水質よりも高濃度のアンモニア態窒素が検出されており、これも底泥の巻き上げによって底泥から回帰が起こったことで濃度が高くなっていたと考えられる^{5), 6)}。

この河川水流入は、栄養塩類が枯渇気味であった貯水池に河川水が含む栄養塩類を供給すると共に、底泥に含まれていた栄養塩類をも水柱に回帰させた可能性があり、貯水池水質に対して大きなインパクトを持つものであった。実際、この流入の後には植物プランクトンの急速な増殖が見られている。この河川流入は、貯水池水容量を1/3程度増加させるものであったために、大きな影響を及ぼしたと考えられるが、浅い貯水池や湖沼においては、流量と貯水池容量との比率にもよるが、底層への河川水流入が底泥に与える影響についても検討していく必要があると考えられる。

流動計算は、実測値に見られたような急激な変動は再現できなかった。今後は、底層密度流による底泥への物理的攪乱について、詳細なモデルを作成し、このような現象を適切に捉えていく必要がある。

謝辞：データ収集については、国土交通省関東地方整備局利根川上流工事事務所利水調査課（当時）の皆様、また、現地観測に際しては、同渡良瀬貯水池出張所の皆様にご協力いただきました。記して感謝します。

参考文献

- 1) 天野邦彦, 李建華, 鈴木宏幸, 安田佳哉: 渡良瀬貯水池における水質変化に関する考察 ―底泥と水柱間での物質収支特性―, 国土技術政策総合研究所資料, No.12, 2001.
- 2) 天野邦彦, 安田佳哉, 鈴木宏幸: 浅い貯水池における表層底泥の巻き上げによる水質変化のモデリング, 水工学論文集, 第46巻, pp.1085-1090, 2002.
- 3) 天野邦彦, 李建華, 鈴木宏幸, 野本岳志: 渡良瀬貯水池における初夏の栄養塩回帰についての現地観測と解析, 水工学論文集, 第47巻, pp.1249-1254, 2003.
- 4) 梅田信, 長峯知徳, 長広遙, 石川忠晴, 宇田高明: 霞ヶ浦湖心部における底泥の巻き上げ過程に関する研究, 水工学論文集, 第47巻, pp.1171-1176, 2001.
- 5) 天野邦彦, 李建華, 鈴木宏幸, 安田佳哉: 浅い貯水池における冷水流入および貯水池冷却時の底泥と水柱間の相互関係, 環境工学研究論文集, 第40巻, pp.551-558, 2003.
- 6) Li, J., K. Amano, Y. Yasuda, The effects of sediment resuspension on phosphate release from sediment into the water column, (in M. Munawar Ed.) Sediment Quality Assessment and Management: Insight and Progress, pp. 337-351, 2003.

(2003. 9. 30受付)