

長良川河口堰下流域の流動特性と DO 変動に関する研究

武田 誠*・松尾直規**・酒井孝典***・吉戸嘉浩****

1. はじめに

長良川河口堰の建設に伴い堰上下流域ともに水質問題が懸念されており、近年では特に堰下流域の DO の低下や底泥のヘドロ化などが問題視されている。このような河口堰下流域の水質問題は長良川に限ったことではなく、多くの堰下流域で見られる現象であり、重要な問題である。長良川・揖斐川においては、河口堰建設に伴う経緯から、水質監視を目的として国土交通省・水資源開発公団により水質監視装置が設置され、毎時の観測が行われている。また、その結果は長良川河口堰モニタリング資料としてまとめられている。本研究では、水質変動に大きな影響を与える流動特性を ADCP 観測により得られた観測結果から考察し、モニタリング資料を用いて河口堰下流域の DO 変動を検討した。さらに、流動特性と DO 変動を再現するための数値解析を実施し、観測結果との比較から、現象機構の考察を行った。

2. 現地観測

著者らは、図-1 に示す揖斐川河口-1.0 km から河口堰付近+5.0 km までを対象に流れと水質の現地観測を行っている(松尾ら, 2000)。ここでは、河口堰下流域における流動特性の支配因子を考察し、その特徴をまとめる。流れの観測には ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers, RD Instruments 社)を用い、図-1 に示す-1.0 km から+5.0 km までの揖斐川・長良川の流心における縦断面と+3.0 km, +3.8 km, +5.0 km における横断面を測定した。ADCP は船側部に固定し、時速 4 ノットで走行して計測した。また、クロロテック ACL 1183-PDK (アレック電子株式会社)を用いて、図-1の-1.0 km, +1.0 km, +3.0 km, +3.8 km, +5.0 km の流心で 0.1 m 毎の塩分と水温の測定を行い、それらから状態方程式を用いて密度場を求めた。

横断観測により、揖斐川と長良川の合流点より上流では、両河川でそれぞれ異なる流動特性を示すことが分か

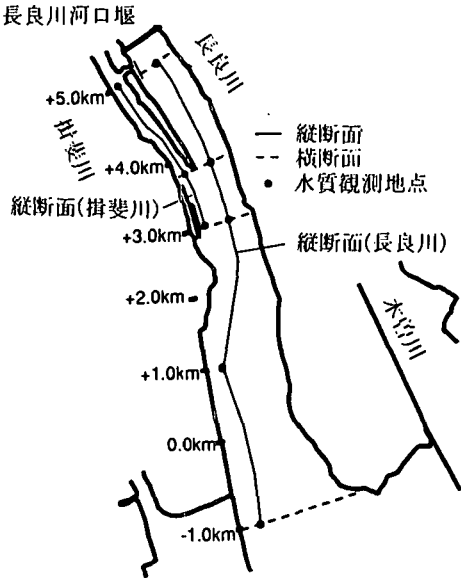


図-1 観測位置

り、大潮時における上げ潮の場合、河口堰の影響を受けて合流点から長良川河口堰に至る水域では流れが停滞し、逆に揖斐川で強い流れが発生することや、河口堰直下の揖斐川と長良川の背割堤開口部で強い流れが生じており、その流れは上げ潮の場合揖斐川へ向かい、下げ潮の場合長良川へ向かっていることが観測されたが、ここでは、縦断的な流れの特徴に着目して考察していく。

これまで行われた観測は計 13 回であり、一日にほぼ 2 回の縦断観測が行えるため、整備されている流速の縦断分布のデータは 26 存在する。これら観測結果と、大潮、小潮といった潮の状況、水温、河川流量の図と比較して、流動特性およびその支配因子について検討した。紙面の都合上比較図を記載していないが、平常時の流れは、水温や河川流量に若干差がある場合でも、大潮や小潮といった潮の状況に支配される傾向があり、その潮位変動に応じた流れになることが認められた。

大潮および小潮の観測結果の一例を図-2 に示し、以下に流動特性を簡単にまとめる。

大潮の上げ潮の場合、全体的に遡上する流れとなつて

* 正 会 員 工 博 中部大学講師 工学部土木工学科
** フェロー 工 博 中部大学教授 工学部土木工学科
*** 正 会 員 工 修 見取コンサルタント
**** 奥村組土木興業

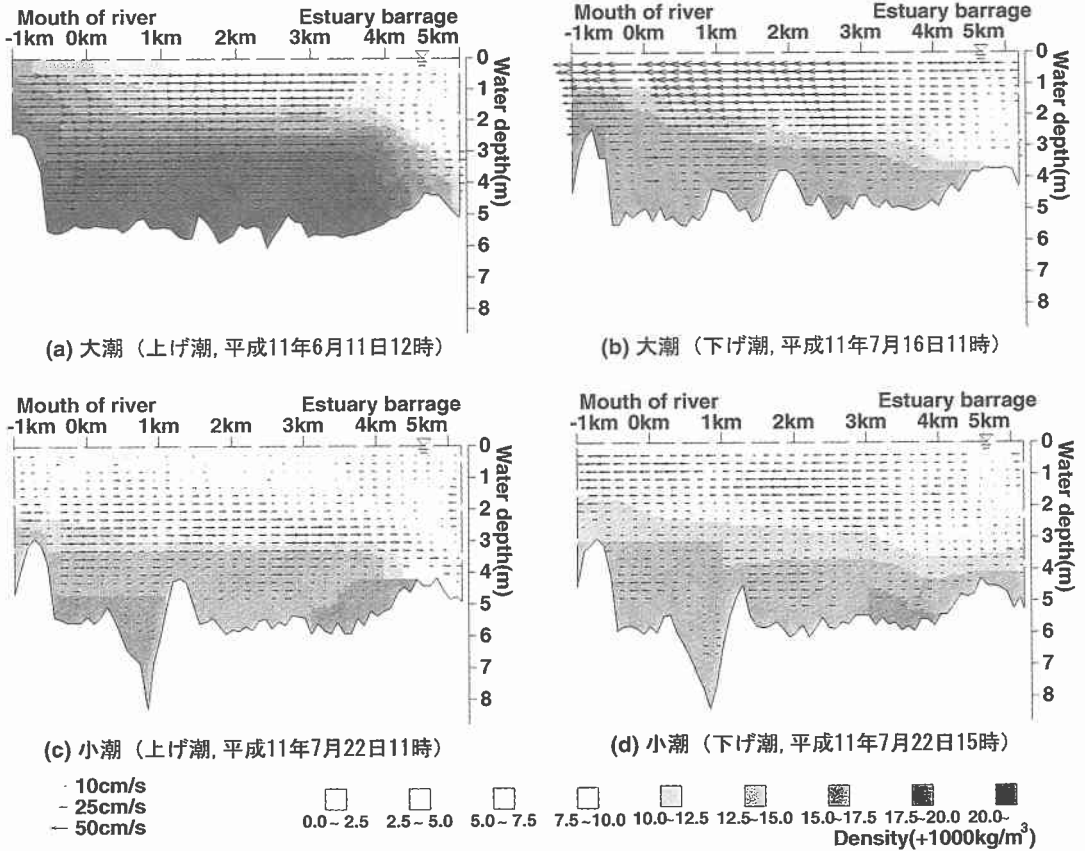


図-2 流速と密度の縦断分布

おり、底層の流れは比較的強く表層と底層の流速はあまり変わりはない。堰付近では流れが弱くなっているが、密度差の影響を受けて潜り込み、堰に衝突して表層では反転する鉛直循環流が形成されている。大潮の下げ潮の場合、全体的に流下方向の流れとなっており、堰付近とくぼみ部では密度差の影響を受けて遡上する流れが形成されている。さらに、大潮の場合、表層と底層の密度差があまりみられないことが分かる。

小潮の上げ潮の場合、潜り込みが生じているが、その水は最深部までは進行せず、中間層に流入しているのが分かる。これは、河口から流入する海水の密度は河口の土砂堆積（マウンド）上流の底層に存在する海水の密度よりも軽いため、同程度の層に流入したものと考えられる。さらに、遡上水は堰に衝突し、上昇して表層を流下する大規模な二層流を形成していることが分かる。小潮の下げ潮の場合、全体的に流下方向の流れとなっているが、底層では遡上する流れとなっていた。これは、小潮時には水位差と比べ相対的に密度差の影響が強まり、河口マウンド上流に潜入した高濃度の底層水の遡上が生じたものと考えられる。小潮の場合、河口のマウンドの影

響もあって表層と底層で密度差が大きくなるが、下げ潮の場合、前述した流動構造に加え、表層の海水が淡水と入れ替わるため、さらに密度差が増して強い密度成層が発達するものと考えられる。

このように、平常時の流れは大潮小潮といった潮の状況から概ね流動構造が把握できることが確認された。

3. DO変動に関する検討

DO低下現象および回復現象について、平成8年から平成11年の長良川河口堰モニタリング資料におけるイーナちゃん（河口から+3.0 km）の底層のDO、塩分濃度、表層の塩分濃度と堰管理所で観測されている長良川の河川流量と堰下流水位を用いて検討した。

3.1 DOの低下現象に関する検討

図-3は平成11年5月10日～5月25日と平成11年7月23日～8月7日のDOと水位、河川流量、塩分濃度の時間変化である。本図から洪水が生じた後にDOの低下が見られ、小潮の場合にはDOの低下が早く生じているのに対し、大潮の場合にはDOがゆっくりと低下している。洪水時には底層に存在していた高濃度の塩水が海

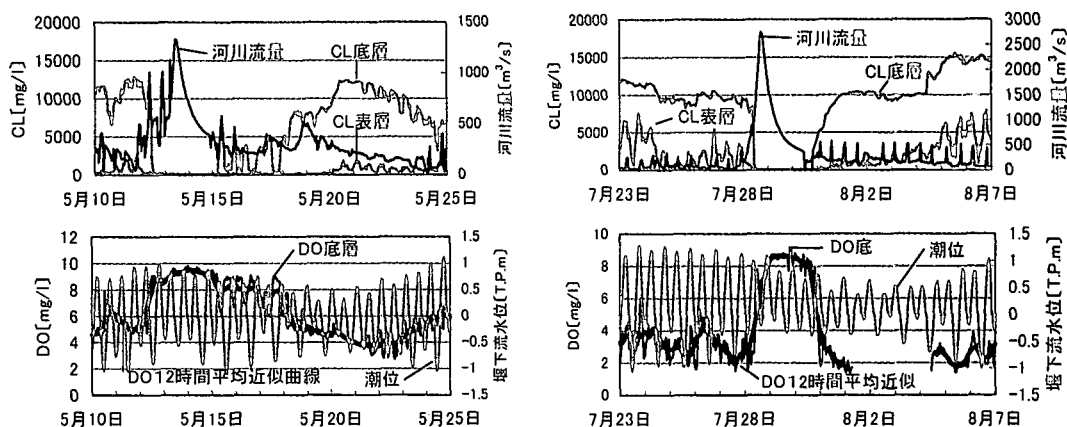


図-3 出水後の DO 低下現象

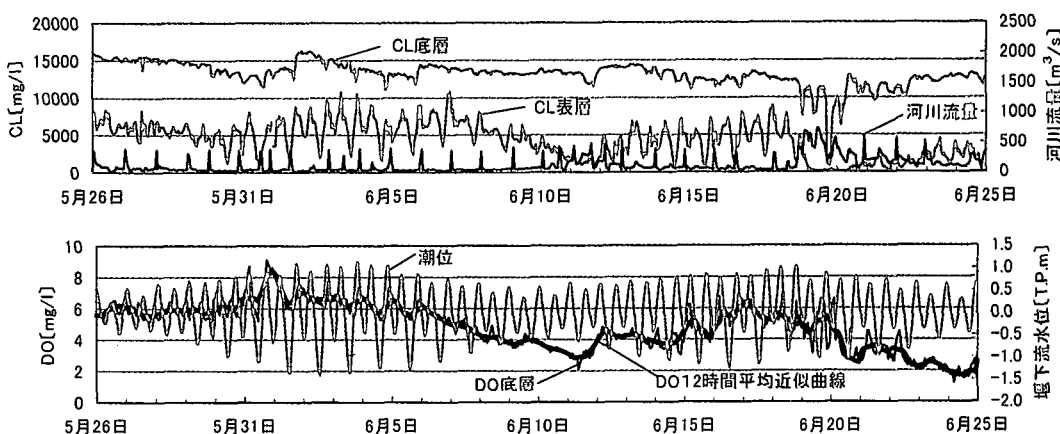


図-4 密度成層発達に伴う DO 低下現象

側へ押し出されるが、河口にはマウンドが存在するためそこで残存する。また、河口付近の海水の塩分濃度は洪水時の大量の淡水流入により低下し、その傾向は特に表層水において顕著である。このような状況下において河川流量が小さくなれば、密度差の効果が相対的に大きくなり底層に残存した高濃度の塩水と鉛直方向に塩分濃度分布を有する海からの塩水が遡上し、結果として底層と表層とで強い密度成層が形成され、水の鉛直混合が抑制される。このため、底層では表層からの酸素供給が断たれるとともに、底泥による酸素消費がすすみ、DO の低下が生じる。ここで、大潮時には底層でも流れが比較的大きく、ある程度の鉛直混合が生じるのに対し、小潮時には底層で大きな流れが生じないため鉛直混合はきわめて小さくなる。この流れの違いが図-4 の潮の状況による DO 低下現象の違いに現れたものと考えられる。

つぎに、図-4 の平成 11 年 5 月 26 日から 6 月 25 日の DO 低下現象について考察する。このとき、底層水の塩分濃度は河川流量が小さいため特に小潮時において高い値

を示し、時間の経過と共に、表層と底層の塩分濃度の差が大きくなり、図-4 の場合と同様に鉛直混合が抑制され DO の低下が生じている。すなわち、長良川河口堰下流域で生じる DO の大きな低下の要因は、洪水後に成層が強まることと洪水に関係なく小潮時において塩分成層が発達することの二つがある。

3.2 DO の回復現象に関する検討

図-5 に平成 10 年 9 月 24 日から 10 月 24 日の DO と水位、河川流量、塩分濃度の時間変化を示す。この図から低下した DO は、大潮に伴う塩水交換と小規模出水による攪乱の相乗作用で増加し、その増加傾向は約 12 時間スケールの潮汐変動と大潮小潮などの約 15 日スケールの水位変動の影響を受けながらゆっくりと回復しており、DO の低下が比較的早く進むことは対照的に、DO の回復には時間を要することが分かる。

4. 堰下流域を対象とした数値解析

堰下流域の流動特性と DO の変動特性を検証し、その

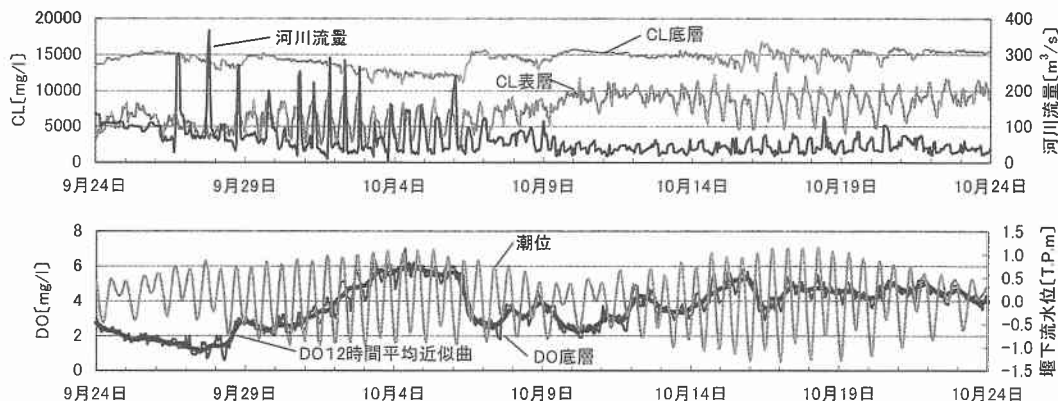


図-5 DOの回復現象

現象機構を考察するために数値解析を行った。用いた支配方程式は連続式、静水圧近似を施した運動量方程式、塩分の収支式、底泥による酸素消費を考慮したDOの収支式、状態方程式である。これらの式を平面多層モデルに展開し解析を行った。

対象領域は河口堰により水面が分離しているため、河口堰上流域と下流域で水位を別個に取り扱い、堰操作がオーバーフローの場合には越流公式を用いてその流量を求め、その流量を下流側表層の計算格子に与えた。また、堰操作がアンダーフローの場合には運動量方程式をそのまま解いている。さらに、特に河口付近では潮位変動に伴い干潟が生じるため、水位により解くべき計算格子を変化させ、表層層厚の最小値が基準層厚の1.6倍以上の場合は層数一つ増やし、基準層厚の0.4倍以下の場合は層数一つ減らしている。層が増える場合、前の表層の物理量を新しい表層と一つ下の層に分配しているが、干潟などのように水位が上昇し新たに計算領域に含まれる格子では、その格子の下に水が存在しないため物理量の設定ができない。そこで、新たな計算格子に対して、面が接する計算格子の物理量を新たな計算格子に受け渡した。

4.1 流動特性の検証

流れの定性的な再現とその特徴の検討さらにモデルの妥当性をみるために、大潮・小潮時の流れと塩分分布を解析した。計算領域を図-6に示す。境界条件として、大潮の場合振幅1.0 m、小潮の場合0.4 mの12時間周期の潮位変動を与え、塩分濃度は鉛直方向一様に20 pptとし、長良川上流部は河川流量80 m³/sを与え、塩分は0 pptとした。初期の塩分には20 pptを与えている。河口堰の堰操作はオーバーフローとしその天端高はT.P.+1.2 mとした。また、揖斐川上流部の正確な条件設定は困難であるが、ここではつぎのように与えた。まず、水位、流速の勾配をゼロとし、計算される流量が過大にならな

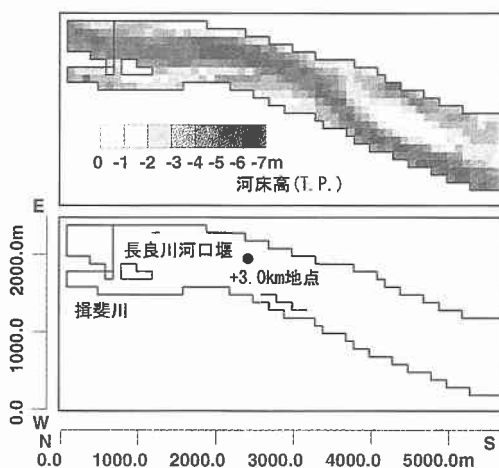


図-6 計算領域

いように修正を加えた。さらに、塩分については河口堰建設以前の1994年5月1日から5月12日までのイーナちゃんにおける低下する期間の塩分値を用い、その低下の割合が時間にのみ依存すると仮定して減衰係数を求め、計算内で揖斐川境界面の流れが流下する場合にその塩分低減係数を考慮した塩分値を流入させた。

計算開始から3日後の小潮における上げ潮時の流れの鉛直分布を図-7に示す。小潮の場合、遡上する強い流れが中間層へ入り込んでおり、観測結果における流動特性と一致している。また、大潮の場合、流れの鉛直分布は一樣となっており、堰近傍では停滞していたが、観測値にみられた堰近傍での潜り込みはみられなかった。これらの結果から、巨視的には数値解析において前述した河口堰下流域の平常時における流動特性がほぼ検証できたといえる。

4.2 洪水後のDOの変化

図-3に示した平成11年5月13日8時から5月20

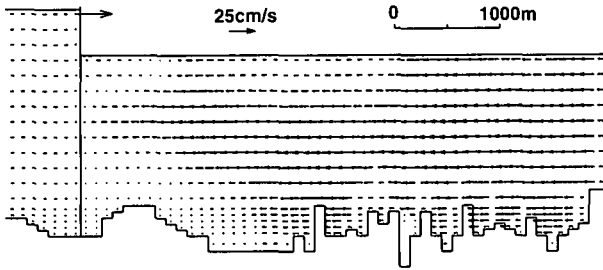


図-7 流速計算値の縦断分布 (小潮, 上げ潮)

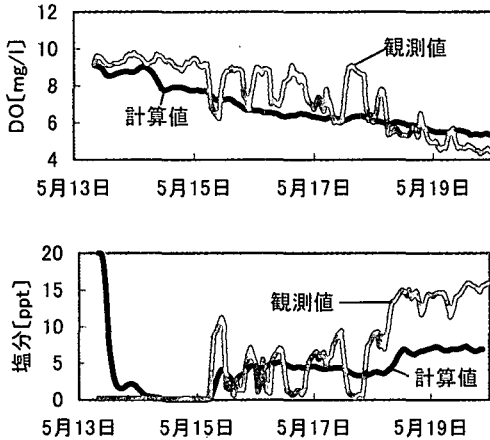


図-8 洪水後の DO と塩分の再現結果

日 0 時までを対象に、洪水後の DO の変動について検討した。河口部に潮位変動と水質自動監視装置ジョークン (河口から -1.0 km) の塩分、DO 値を与え、長良川上流端には長良川の河川流量とイセくん (河口から +6.4 km) における DO 値と塩分 0 ppt を与えた。初期塩分は 20 ppt としている。また、揖斐川上流端には、イーナちゃんの DO 値を与え、運動量、塩分に関する境界条件は前述のとおりである。なお、DO の底泥における消費量は $1.0 \text{ g/m}^2/\text{day}$ としている。

図-8 に河口から +3.0 km 地点の底層の DO と塩分の計算値と観測値を示す。本図から、計算結果は観測値

と同様に DO 濃度が低下しており、その値もほぼ一致していることが分かる。しかし、観測値にみられる潮位変動に伴う周期的な DO 変動が計算値には見られない。これは、塩分においても同様な結果であり、塩分の巨視的な変化は表現されているが、周期的な潮汐変動に伴う現象が表現されていない。この原因として、境界条件の設定や取り扱ったスケールが実際の現象を表現できなかったことなどが考えられる。

5. おわりに

本研究で得られた知見をまとめると以下のようである。

流動特性を検討した結果、河口堰下流域における流れと密度分布に関しては潮位変動が支配的であり、大潮や小潮といった潮の状況によって流れも異なることが再確認された。

DO の低下現象は、通常時の小潮の場合に密度成層が発達して生じるものと、洪水後に急激に生じるものがあった。特に、洪水後に小潮となる場合には急に DO が低下することが認められた。一方、DO が回復する時間スケールは、DO が低下する場合よりも大きく、潮の干満や大潮小潮といった影響を受けながら比較的ゆっくりと進んでいくことが分かった。

数値解析により、定性的な堰下流域の流動特性を検証しモデルの妥当性を示した。また、洪水後の DO 低下現象を対象に解析を行い、潮汐変動に伴う微視的な変動は十分に表現されなかったものの、巨視的な変動傾向として洪水後に塩分による成層化が発達し停滞する底層内での酸素消費によって DO 低下が進むことを示した。

参考文献

- 建設省中部地方建設局・水資源開発公団中部支社 (1996~2000): 平成 7 年度~平成 11 年度 長良川河口堰モニタリング年報。
- 松尾直規・武田 誠・加藤幹人 (2000): 長良川河口堰下流域の流動特性, 水工学論文集, 第 44 巻, pp. 1029-1034。