

# 長良川河口堰下流域の流動特性

## FLOW CHARACTERISTICS IN DOWNSTREAM AREA OF THE NAGARA RIVER ESTUARY BARRAGE

松尾直規<sup>1</sup>・武田 誠<sup>2</sup>・加藤幹人<sup>3</sup>

Naoki MATSUO, Makoto TAKEDA, and Mikihiro KATO

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 中部大学教授 工学部土木工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

<sup>2</sup>正会員 工博 中部大学講師 工学部土木工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

<sup>3</sup>学生員 中部大学大学院 工学研究科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

In this study, the flow characteristics in downstream area of the Nagara river estuary barrage are estimated by means of observed data obtained from ADCP(Acoustic Doppler Current Profilers) and observation plane for water quality. The investigation results are summarized as follows. The flow in downstream area of the Nagara river estuary barrage in inflow of the tide is affected by the situation of density in mouth of river. In the case of existence of low density water in mouth of river, the flow becomes two layer flow because of existence of high density water in bottom. In the case of existence of high density water in mouth of river, the flow get into deep area of river. In the case of the ebb tide, down stream flow pass upon high density water. In the spring tide, inflow of the tide pass to the Ibi river because the water level in the area from the Nagara river barrage to joint point with the Ibi river more rapid increase than the Ibi river.

**Key Words :** Tidal flow, Estuary barrage, Density flow, Observed data analysis

### 1. はじめに

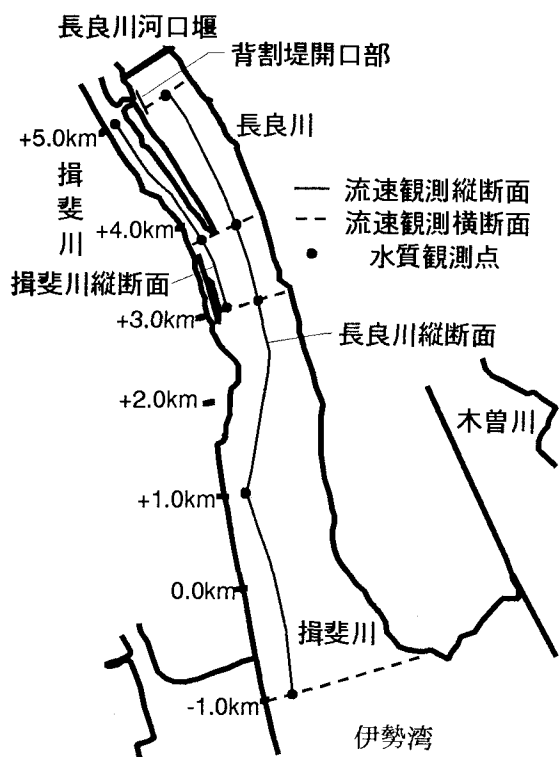
長良川河口堰が地域社会や自然環境に与える影響を明らかにし、堰の適切な運用を図ることは重要な課題である。現在、建設省・水資源開発公団により水質自動監視装置(シラベル)が設置されて水質悪化の傾向がみられた場合の詳細調査などさまざまな調査が行われており、より良い堰運用のための資料として用いられている。また、これまで堰上流域では、フラッシュ操作時の流動構造や夏季における植物プランクトンの増殖およびDOの低下現象などいくつかの調査研究事例があり<sup>1)、2)</sup>、現象の把握や解明が進められている。しかし、堰下流域におけるそれらの研究例は比較的少なく、低酸素水塊の発生や底泥の状況変化など堰運用後の流動特性とそれに関連する水質現象の解明に多くの関心が寄せられている。

本研究は、堰下流域における流れと水質の観測を行い、得られた水理・水質現象の結果から河口堰の長良川河口域に与える影響を明らかにすることを目的としている。本報は、その第一段階として、現地観測から得られた長良川河口堰下流域の流れの実態と特徴について考察する。

### 2. 観測方法

揖斐川河口-1.0kmから河口堰付近+5.0kmまでを対象に流れと水質の現地観測を行った。流れの観測にはADCP (Acoustic Doppler Current Profilers, RD Instruments社)を用い、図-1に示すように、主に、-1.0kmから+0.5kmまでの揖斐川・長良川の流心における縦断面と+3.0km、+3.8km、+5.0km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、水質の観測にはクロロテックACL1183-PDK(アレック電子株式会社、測定項目:クロロフィルa、水温、塩分、DO、Ph、濁度、深度)を用い、図-1中の-1.0km、+1.0km、+3.0km、+3.8km、+5.0kmの流心で0.1m毎の測定を行った。なお、+3.0kmと+3.8kmでは揖斐川でも計測を行っている。ただし、以下の検討では、堰下流域の流動構造とその特徴の把握を主眼におき、水温、塩分、深度のデータのみを用いている。密度は計測された塩分と水温から状態方程式(knudsenの式)を用いて算出した。

ここで観測の場所と時間を表-1、表-2に、観測時の風速、潮位および観測日とその2日前からの堰流出流量を図-2に示す。なお、紙面の都合上、表-1および表-2には本報で使用したデータのみを表



図—1 観測位置

表-1 流速観測

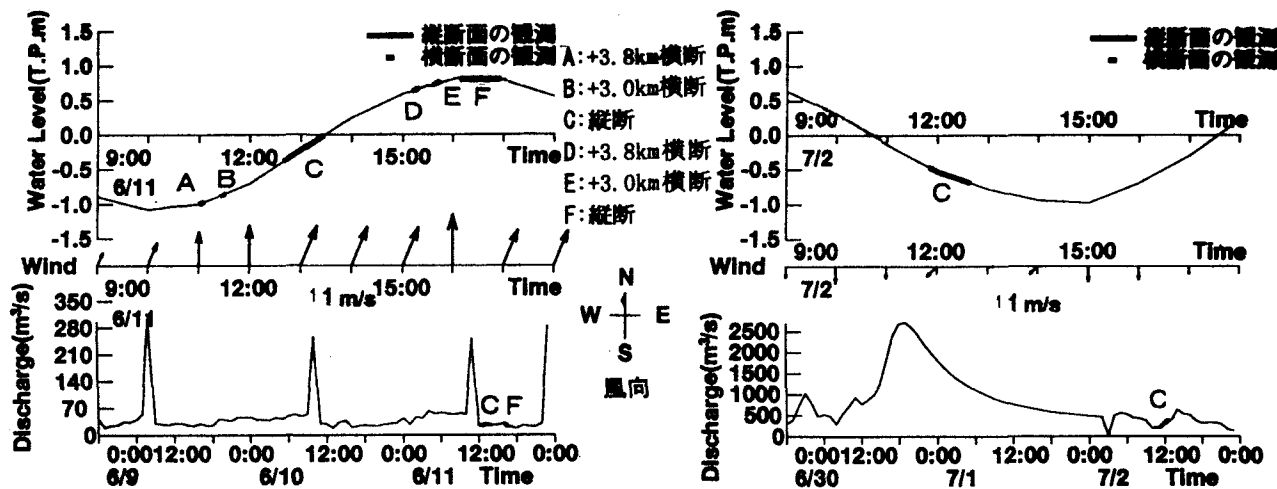
| データ番号  | 場所(km)   | 開始時間  | 終了時間  |    |
|--------|----------|-------|-------|----|
| V0611A | 3.8      | 11:00 | 11:06 | 横断 |
| V0611B | 3.0      | 11:25 | 11:31 | 横断 |
| V0611C | -1.0~5.0 | 12:40 | 13:27 | 縦断 |
| V0611D | 3.8      | 14:40 | 14:46 | 横断 |
| V0611E | 3.0      | 15:05 | 15:12 | 横断 |
| V0611F | -1.0~5.0 | 16:07 | 16:57 | 縦断 |
| V0702A | -1.0~5.0 | 11:50 | 12:39 | 縦断 |
| V0716A | 3.8      | 10:09 | 10:16 | 横断 |
| V0716B | 3.0      | 10:36 | 10:42 | 横断 |
| V0716C | -1.0~5.0 | 11:08 | 12:07 | 縦断 |
| V0716D | 3.8      | 13:47 | 13:53 | 横断 |
| V0716E | 3.0      | 14:06 | 14:13 | 横断 |
| V0716F | -1.0~0.0 | 14:40 | 15:35 | 縦断 |
| V0722A | 3.8      | 10:16 | 10:22 | 横断 |
| V0722B | 3.0      | 10:40 | 10:45 | 横断 |
| V0722C | -1.0~0.0 | 11:14 | 12:10 | 縦断 |
| V0722D | 3.8      | 14:10 | 14:17 | 横断 |
| V0722E | 3.0      | 14:39 | 14:46 | 横断 |
| V0722F | -1.0~0.0 | 15:14 | 16:04 | 縦断 |

(データ番号の数値は観測の月日を表す)

表-2 水質観測

| データ番号  | 場所(km) | 開始時間  | データ番号  | 場所(km) | 開始時間  | データ番号  | 場所(km) | 開始時間  | データ番号  | 場所(km) | 開始時間  |
|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
| Q0611a | 5.0    | 10:35 | Q0702a | 5.0    | 9:52  | Q0716a | 5.0    | 9:58  | Q0722a | 5.0    | 10:10 |
| Q0611b | 3.8    | 11:15 | Q0702b | 3.8    | 10:15 | Q0716b | 3.8    | 10:26 | Q0722b | 3.8    | 10:33 |
| Q0611c | 3.0    | 11:40 | Q0702c | 3.0    | 10:41 | Q0716c | 3.0    | 10:50 | Q0722c | 3.0    | 10:54 |
| Q0611d | 1.0    | 11:55 | Q0702d | 1.0    | 10:50 | Q0716d | 1.0    | 11:00 | Q0722d | 1.0    | 11:03 |
| Q0611e | -1.0   | 12:15 | Q0702e | -1.0   | 11:15 | Q0716e | -1.0   | 11:06 | Q0722e | -1.0   | 11:11 |
| Q0611f | 5.0    | 14:26 | Q0702f | -0.5   | 11:32 | Q0716f | 5.0    | 13:26 | Q0722f | 5.0    | 14:04 |
| Q0611g | 3.8    | 14:55 | Q0702g | -0.7   | 11:45 | Q0716g | 3.8    | 14:00 | Q0722g | 3.8    | 14:30 |
| Q0611h | 3.0    | 15:15 |        |        |       | Q0716h | 3.0    | 14:20 | Q0722h | 3.0    | 14:54 |
| Q0611i | 1.0    | 15:17 |        |        |       | Q0716i | 1.0    | 14:30 | Q0722i | 1.0    | 15:01 |
| Q0611j | -1.0   | 16:02 |        |        |       | Q0716j | -1.0   | 14:36 | Q0722j | -1.0   | 15:10 |

(データ番号の数値は観測の月日を表す)



(図中のアルファベットは表-1のデータ番号のアルファベットと対応している。)

図—2(a) 6月11日と7月2日の水位、風速、流出流量

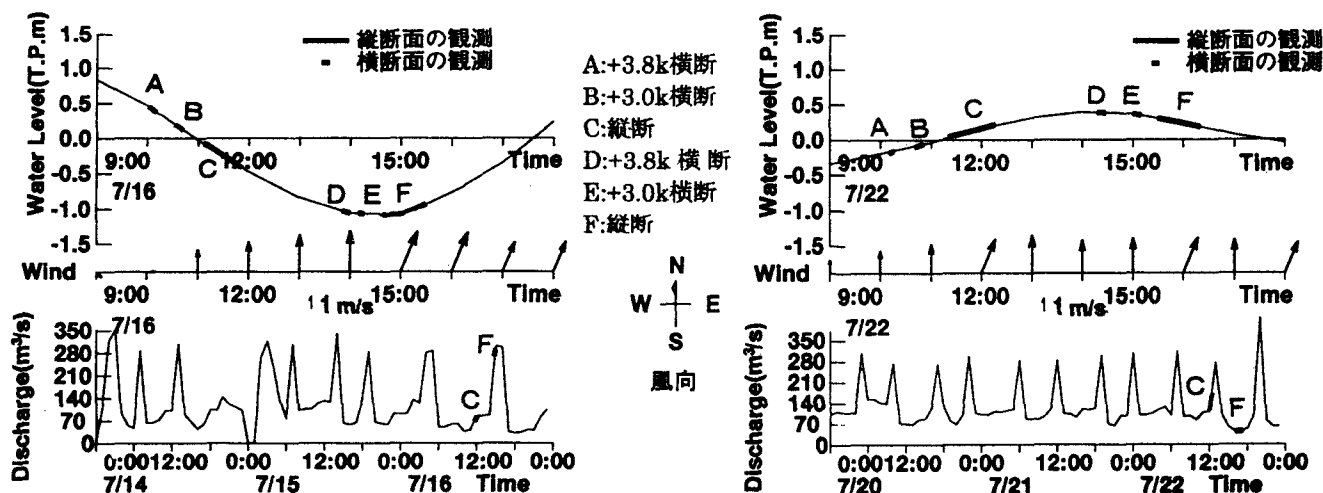


図-2(b) 7月16日と7月22日の水位、風速、流出流量

示している。

図-2から、6月11日は、大潮ではないが潮位差は比較的大きく、観測期間は主に上げ潮時に相当することが分かる。また、南（海）から4.0m/s程度の風が吹いており、流入流量は50m³/s程度である。

7月2日は大潮であり、観測期間は下げ潮時に相当する。また、風速は北からの微風である。さらに、流量図から洪水後で300m³/s程度の流量であった。

7月16日は6月11日と同程度の潮差を示し、観測期間は下げ潮時に相当する。また、午後は南からの風が6.0m/s程度となり流量は80m³/s程度である。

7月22日は小潮時であり、観測期間は上げ潮の終わりから下げ潮時始めまでを含んでいる。また、南からの5m/s程度の風が吹いており、流量は90m³/s程度である。なお、7月2日を除く流量図にみられる変動は堰のフラッシュ操作によるものである。

### 3. 平常時における流下方向の流れの特徴

図-3に縦断観測で得られた流速と密度分布をあわせて表示する。図-3(a)は6月11日の上げ潮の場合であり、河口部で1015.0kg/m³以上の密度の海水が進入している。この場合、-1.0kmから+3.5kmまでは水面下4mまで遡上する強い流れが見られる。しかし、+1.0kmから+4.0kmまでの底層と、3.5kmから+5.0kmの水面下3.0mまでの領域で停滞する流れが存在する。+1.0kmから+4.0kmまでの底層では、遡上水よりも重い海水が存在するため、遡上水はその上を通過し、底層部では流れが生じなかったことが考えられる。また、3.5kmから+5.0kmの流れの停滞は、堰の存在と堰からの流出流量の影響を受けて流れがせき止められた結果であり、後述するように、+3.5kmの揖斐川と長良川との合流地点から、遡上した水が長良川へ入り込まず揖斐川を遡上するためと考えられる。なお、3.5kmから+5.0kmの底層における流れは密度差に起因する流れであろう。

図-3(b)は6月11日の満潮から下げ潮へ移行している場合であり、河口では図-3(a)よりも濃い塩分

濃度の海水の存在が見られる。図-3(b)は満潮から下げ潮に移行する時の状況であるため、全体的に見れば大きな流れは生じていない。しかし、+3.5kmから+5.0kmまでの底層で海水の進入による遡上する流れが認められる。一方、表層においては+3.5km付近まで流下する流れが認められるが、その流れは+3.5km付近で遡上する流れと衝突しており、図-3(a)とほぼ同様の流れの状況を示している。なお、図-3(a)と比べると、図-3(b)では海水の進入が進み、特に堰近傍の底層に高濃度の塩水が進入している様子が分かる。

図-3(c)は7月16日の下げ潮の場合であり、前述の6月11日より薄い塩分濃度の海水が存在する。図-2をみると、7月16日は6月11日と同程度の潮位変化であるのに対し、塩分の状況にこのような差が生じたのは、6月30日の洪水の影響であろう。このとき、流下する水は密度分布に対応した成層流の状態で見られていることが分かる。ただし、-0.5kmから+1.0kmの窪み部ではあまり流動がみられず、流下する水塊は窪み部の上を通過している。また、+3.5kmから+5.0kmの底層でも流れは停滞しているが、これはこの領域では密度差に起因する力と水位差に起因するそれとが、つり合った状態にあるためと考えられる。

図-3(d)は7月16日の干潮から上げ潮へ移行する場合である。この場合、+3.5kmより下流ではほぼ二層流の状態であり、密度分布には-1.0kmから-0.5kmにあるマウンドの影響が現れていると考えられる。また、+3.5kmから+5.0kmの表層では遡上する流れが見られる。これは揖斐川と長良川の合流による影響と考えられこの点については後に詳述する。なお、図-3(c)と比べて密度場にかなりの相違がみられ、下げ潮に伴い表層の塩水が流下したことが分かる。

図-3(e)は小潮の上げ潮の場合であり、図-3(a)と比べて河口部の密度が低い状況にある。この場合、海水は底層へ楔状に遡上していることが分かる。一方、表層は海側へ流下する流れとなっており、遡上水が堰で反転する二層流状態の大規模な循環が生じている。

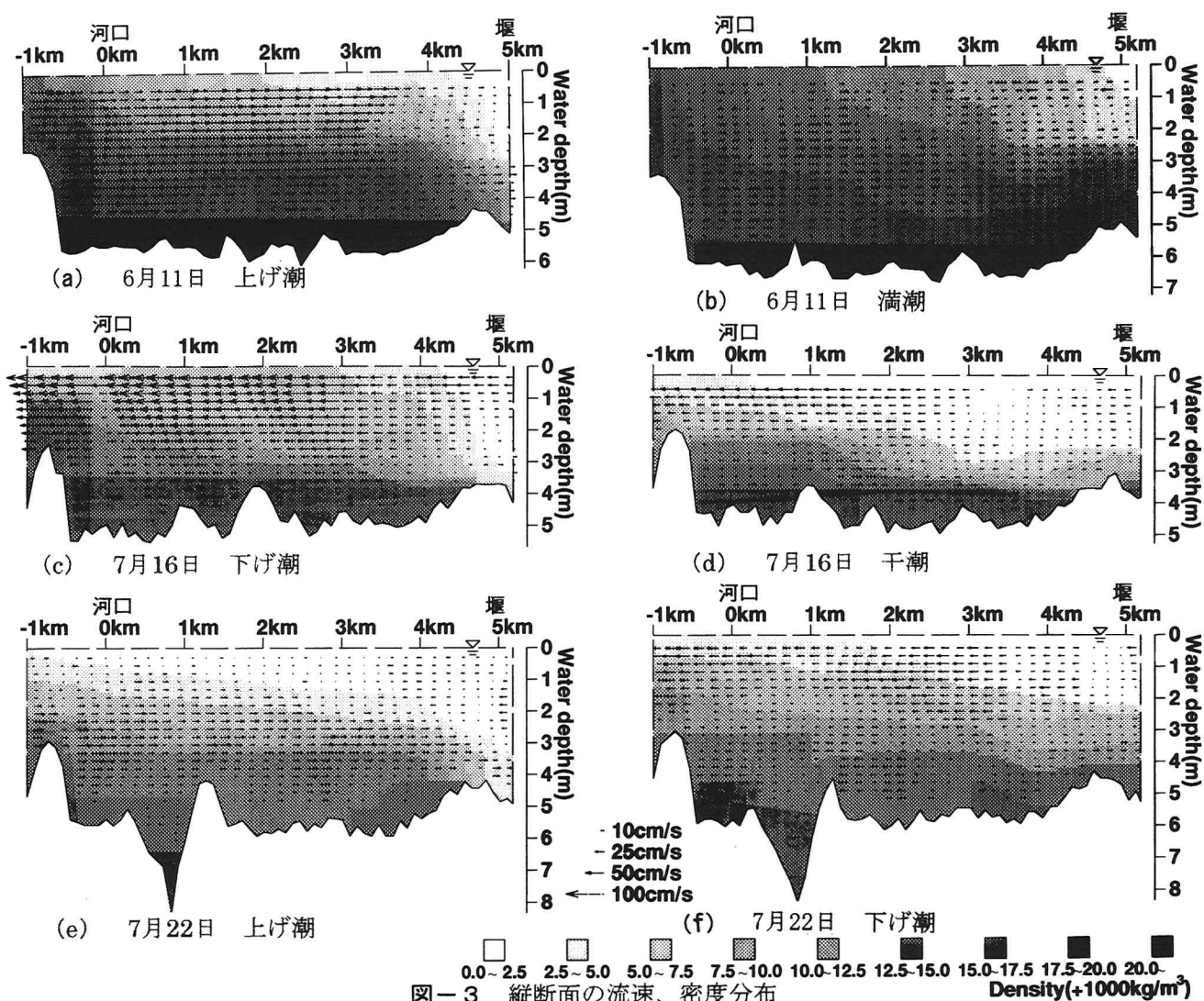


図-3 縦断面の流速、密度分布

図-3(f)は7月22日の満潮から下げ潮に移行する場合である。これも、図-3(b)と比べて河口部の密度が低い状況にある。海側へ流下する水は図-3

(c)の場合と定性的にはほぼ同様にして、重い海水が存在する底層の上を流下しているのが分かる。なお、+3.0kmから+5.0kmの底層では密度差の影響を受けて遡上する流れが見られる。

これらの検討から、平常時における長良川河口堰下流域の流れの縦断特性をまとめると次のようである。大潮（強混合）の場合、表層においても遡上する流れが強く、塩分濃度の濃い海水が進入する。底層に河口よりも重い海水が存在する場合、遡上する海水はその上を通る。しかし、揖斐川合流部である+3.5kmより上流では、堰の影響を受けて流れは停滞する傾向がある。この時、遡上した流れは揖斐川の方へ進む。

小潮（緩混合、もしくは弱混合）の場合、上げ潮時の遡上水は楔状に同密度層に潜入し、徐々に底を這うような流れとなる。

また、表層では堰で反転して流下する流れとなり二層流状態の大規模な循環流が形成される。また、下げ潮時も流下する流れは成層状態で進行し、底層

に重い密度の水塊がある場合、その上を通過する。底層の水塊は河口の堆積土砂（マウンド）の影響により海域へ出ることなく取り残されるため、干潮時を過ぎると水平方向に生じる密度差の影響を受け遡上する流れとなる。この時、下げ潮により表層水は海へと流下し河川水と置き換わるため、表層と底層との密度差が大きくなり、二層流が形成される。

#### 4. 揖斐川と長良川の関係

3章で述べた流動特性に関与する揖斐川と長良川の関係について詳細に検討する。図-4に+3.0kmと+3.8kmの横断面のベクトル図を示す。なお、図中で上向きの矢印は遡上する流れを、下向きのそれは流下する流れを示している。図-4(a)は6月11日の上潮の場合である。本図から+3.8km断面では揖斐川と長良川の流況が異なることが分かり、長良川は停滞しているにもかかわらず、揖斐川ではかなり強い流れが生じている。また、+3.0km断面では揖斐川と長良川とでほぼ同様の傾向を示しているが、+3.8km同様に長良川よりも揖斐川の流速が強く、長良川では底層で停滞していることが分かる。

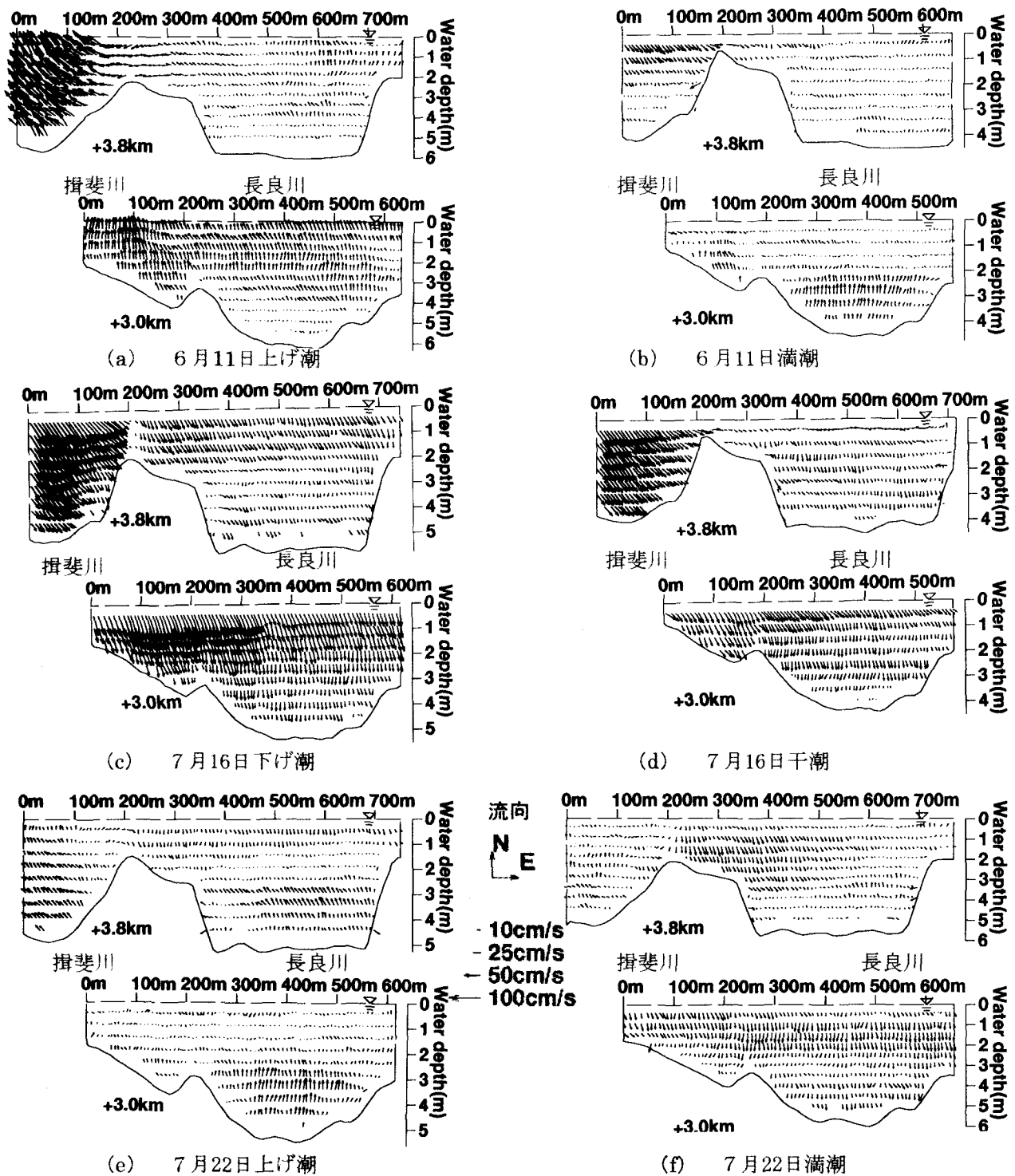


図-4 横断面の流速分布

また、表層では揖斐川方向に流れが向いており、遡上している流れが揖斐川へ流れていることが分かる。

図-4 (b)は6月11日の満潮から下げ潮へ移行している場合である。+3.8km断面では、揖斐川は流下する流れを示しているのに対し、長良川では表層と底層で遡上する流れ、中間層で流下する流れと複雑な流況を示している。また、+3.0km断面では揖斐川・長良川ともに低層で遡上する流れがみられる。また、長良川の中間層で揖斐川へ向かう流れが見られる。

図-4 (c)は7月16日の下げ潮の場合である。+3.8km断面では、揖斐川は鉛直方向に流向の違いがみられないのに対し、長良川では、ほぼ水面下2m付近で流向が西向きとなり、流速値も変化している。また、+3.0km断面では流速の横断方向の変化はあまり見られず、揖斐川と長良川で同様の流れを示していることが分かる。

図-4 (d)は7月16日の干潮から上げ潮へ移行する場合である。+3.8km断面では、揖斐川と長良川で流

況の違いが見られる。揖斐川では鉛直方向に一樣な流れが生じているのに対し、長良川では、表層は揖斐川からの流れにより東向きに、低層および底層は南向きに流れが生じている。この表層における揖斐川からの流れが、前章の同じ観測時に述べた合流部から+5.0kmの間で下げ潮時に表層で遡上する流れに転じたものと考えられる。

図-4(e)は7月22日(小潮)の上げ潮の場合である。+3.8km断面では、揖斐川は表層・底層ともに遡上する流れを示しているのに対し、長良川では完全な二層流の形態を示し、表層は流下する流れ、底層は遡上する流れとなっている。また、+3.0kmでも同様のことが言えるが、+3.8kmと比べて長良川の底層にある遡上する流れが強くなっている。

図-4(f)は7月22日の満潮から下げ潮に移行する場合である。+3.8km断面では、長良川と揖斐川とで異なる流れとなっている。また、横断方向に一樣な流れとなっておらず、流れの三次元性が窺える。しかし、+3.0km断面では水面下1.0mから3.0mとそれ以外の差が明瞭に見られ、横断方向の変化は少ない。

以上の観測結果より、長良川と揖斐川の関係はつぎのようにまとまるであろう。まず、上げ潮時では、長良川河口堰の影響により堰から長良川と揖斐川との合流部までの水位上昇が揖斐川よりも早く生ずるため、遡上水は合流部から相対的に水位の低い、揖斐川へと遡上していくと考えられる。このことは、堰近傍での揖斐川と長良川との背割堤開口部での観測により、揖斐川へ向かう強い流れが認められたことから裏付けられる。また、下げ潮時では、揖斐川および長良川ともに流下するが、長良川では河口堰の存在により堰上流からの水量が下げ潮時に流下する流量とは関係なく定められるため、合流部より上流の水位が揖斐川よりも速く低下すると考えられる。これについても、堰近傍の開口部で下げ潮時に揖斐川から長良川へ向かう強い流れを観測しており、以下の推論を示唆している。7月16日の下げ潮時には揖斐川からの合流水の影響で+3.5km付近の合流部で水位が高くなり、長良川河口堰の方向へ遡上する流れが生じたものと推論される。

## 5. 洪水後における堰下流域の流れ

洪水後の河口堰下流域の流れの様子について考察する。図-5は7月2日における縦断面の流速分布である。6月30日に2000m<sup>3</sup>/sを越す出水があり、河口堰下流域ではほぼ淡水化していた。このような場合は、図-6に示すような鉛直方向に一樣な流れとなる。しかし、-1.0kmから1.0kmでは流れの停滞した領域が存在した。この窪み部における塩分と水温の分布を図-6に示す。図-6から窪み部では高濃度の塩分をもつ海水が停滞していることが分かり、図-5に見られる流れの停滞の要因となっている。

6月30日の出水は大規模なものであった。しかし、河口に存在するマウンドにより海水が抜けきれず停

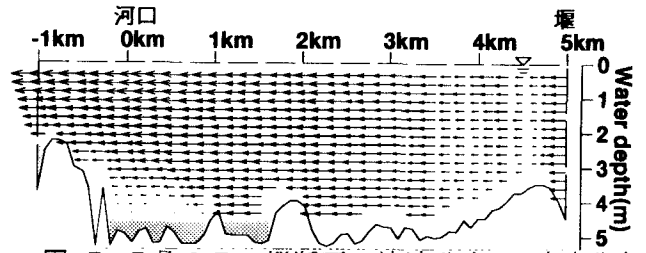


図-5 7月2日の縦断面の流速分布、密度分布  
(トーンは図-3を参照)

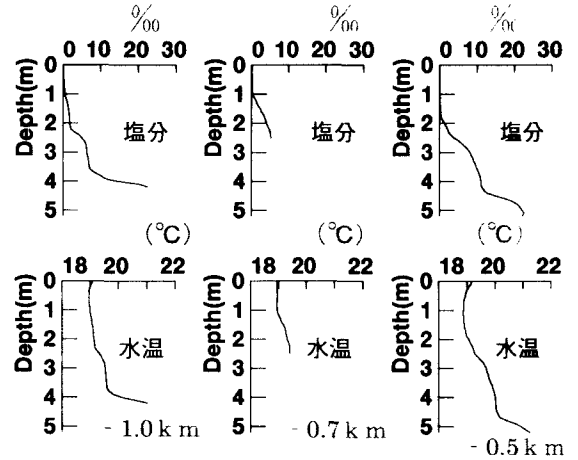


図-6 塩分と水温の観測結果

滞してしまった。このような状況では、高塩分の重い水塊が遡上しない限りは水の交換が行われず、D0消費の進行による低酸素水塊の発生が懸念される。

## 6. おわりに

本研究では、ADCPおよび水質観測装置を用いた長良川河口堰下流域の現地観測結果から、下流域の流動特性、特に密度との関係や、揖斐川と長良川との合流の影響などについて検討した。得られた結果は、観測時における長良川特有の条件下でのものであるが、河口の密度場と流れとの関係、河口のマウンドおよび窪み部の影響、堰の存在による遡上区間(空間)の短縮に伴う現象と堰直下での合流の影響など、類似の条件を有する河口域の流れの特性を知る上で有用な知見もいくつか得られた。今後はこれらについて数値シミュレーションを含めより詳細な検討を実施するとともに、水質(D0とクロロフィルa)と流れとの関係を明らかにするつもりである。

本研究は、建設省中部地方建設局木曽川下流工事事務所の絶大なる協力を得て実施しており、また、中部大学ハイテクリサーチセンター、河川整備基金、文部省科学研究費(基盤研究(c)(2))の補助を受けたものであることを付記する。

### 参考文献

- 1) 建設省中部地方建設局、水資源公団中部支社:平成11年度 長良川河口堰モニタリング年報、第1巻。
- 2) 松尾直規、武田誠、吉田吉治:長良川河口堰上下流域の水質特性、総合工学 第11巻 139頁 - 146頁 1999年。  
(1999.9.30受付)