

# 長良川河口堰が堰下流域の流動と塩水侵入に及ぼした影響に関する研究

鯉 渕 幸 生\*・有 田 正 光\*\*

長良川河口堰運用が堰下流域に及ぼした影響については、従来長良川についてのみ取り扱われた事例が多く、下流域を共有する揖斐川との関係にはほとんど注目されてこなかった。本研究では堰運用が塩水侵入や流動に及ぼした影響を長期モニタリング結果から検討し、堰下流域の潮汐流の弱化、滞留域形成、高塩分化の進行など堰運用の影響の空間分布特性を明らかにした。さらに ADCP を用いた現地観測により、堰運用がもたらした水環境変化を縦断面内の流動や塩分などの水環境諸量変化の観点から明らかにし、揖斐川と長良川の水交換メカニズムもあわせて解明した。両河川間の水交換は大きく、長良川の塩水侵入や成層化の抑制などに大きな影響を与えている可能性が指摘された。

## 1. はじめに

長良川河口堰は長良川の治水対策、塩水遡上の防止、中部圏の水資源確保などを目的として河口から上流 5.4 km に、感潮域を横断して建設された(図-1)。長良川は下流域では揖斐川と背割堤で分流され、堰建設地点の下流 1.4 km で揖斐川と合流した後、河口部の 4 km にわたって揖斐川と河道を共有し伊勢湾に至る。

長良川河口堰の建設にあたっては、水環境変化をモニタリングするための委員会が設置され、堰運用以前の 1994 年から本格運用の 1995 年 7 月以降現在まで、水質や流動、生態系など多岐にわたる項目が定期的に観測されている。これにより、長良川上流の生態系が劇的に変化したことや、堰下流域の下層において貧酸素水塊が頻繁に形成されるようになったことなどが明らかになった(武田ら 2001)。しかしこれら研究の多くは長良川に限定されたものであり、特に揖斐川と長良川の河川水交換が下流域の水質に及ぼす影響についてはほとんど研究例が

なく不明点が多い。ところで堰直下には通称「舟通し」と呼ばれる背割り堤の開口部(幅 30 m, 長さ 50 m 程度)があり、舟通しが魚類の産卵や幼稚魚育成の場になっていることや、鮎等の有用魚種がそれに隣接する河口堰の魚道を好んで利用することが報告されており(住谷ら, 2002), 同部が下流域の水環境に重要な役割を果たしていると考えられる。

そこで本研究では堰建設が堰下流域の水環境に及ぼした影響や揖斐川と長良川の水交換の実態を把握するために、モニタリング委員会の観測データを長期にわたり分析すると共に、ADCP を用いた流動と水質の集中観測を行った。

## 2. 河口堰運用が長良川および揖斐川の流動に与えた影響

河口堰運用が堰下流域の流動に与えた影響を明らかにするために、モニタリング資料の中で長良川については河口から上流に 1.6 km, 2.4 km, 4.0 km(背割堤下流端は 3.8 km)の 3 地点、揖斐川・木曽川については河口から 6.0 km 地点の流速測定結果を検討した。なお、長良川の観測は横断方向に、右岸より、中央、左岸よりの 3 箇所、また、深さ方向にも上層(2 割水深)および下層(8 割水深)の 2 カ所で行われている。以下の議論では、流速の上流向きを負とし、下流向きを正とする。

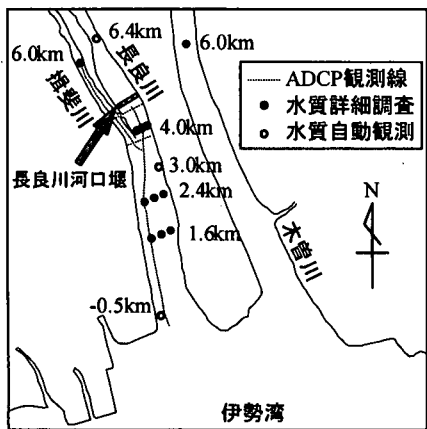


図-1 現地観測地点

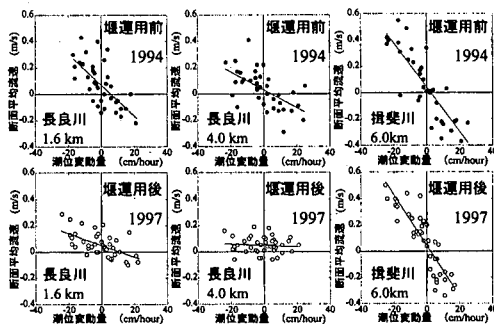


図-2 断面平均流速と単位時間潮位変動量

\* 正会員 博(工) 東京大学講師 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

\*\* 正会員 工 博 東京電機大学教授 理工学研究所建設環境工学科

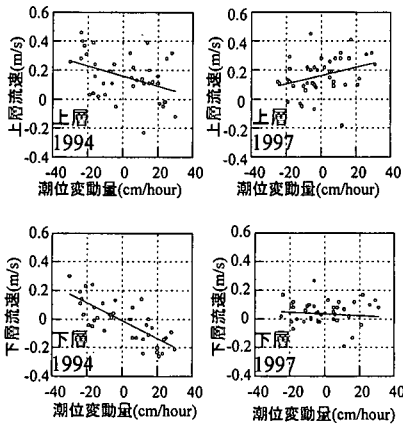


図-3 4.0 km 地点右岸における断面平均流速と単位時間潮位変動量との関係

図-2 は、長良川の 1.6 km、4.0 km 地点と揖斐川 6 km 地点の河川中央における上層と下層の平均流速と時間当りの潮位変動量 (cm/hour) の関係を堰運用前後で比較したものである。ここで、潮位変動量が正の場合は上げ潮時、負の場合は下げ潮時を表している。堰運用以前の 1994 年には、全地点で潮位変動量と流速に強い負の相関が認められ、下げ潮時には下流方向の、上げ潮時には上流方向の強い潮汐流が発生し、堰運用前の長良川下流域では河川の自流速に比較して潮汐流が卓越していたことが分かる。

一方、河口堰運用後の 1997 年には、河口近傍の 1.6 km 地点においても堰運用による著しい潮汐流の弱화가認められる。特に堰に近い 4.0 km 地点では潮汐流はほとんど消失し、河川自流量 (堰からの越流水流量) を反映した下流方向の微小な流速のみになっている。この様に河口堰運用によって堰下流の流れは著しく弱化した。一方、揖斐川 6 km 地点における断面平均流速は堰運用前後でほとんど変化しておらず、同地点における潮汐流に対して堰運用の影響はほとんど認められない。

図-3 は、図-2 において潮汐流の弱화가著しかった 4.0 km 地点右岸 (揖斐川よりの地点) における潮位変動量と上下層流速の関係を示している。堰運用前 (1994 年) の流動は上下層ともに潮汐流の影響が強く出ていた。堰運用後に潮汐流が弱化しているが、特に下層では、潮汐によらず流れがほぼ静止し、堰下流域が滞留域と化した事が分かる。一方、上層では上げ潮時に下流向きの流れが強くなっており、堰建設により揖斐川へ回り込む流れが生じたと考えられる。このような流れの変化は 4 km 地点の右岸上層のみで認められた。

### 3. 河口堰運用が堰下流域の塩水侵入に与えた影響

#### (1) 連続モニタリングによる塩分の時間変動

図-4 は堰運用によって著しい潮汐流の弱화가観測された 3 km 地点 (図-1 参照) における、堰運用前後の上下層塩分と潮位の時系列である。堰運用前では潮汐によく対応した塩分変化をしており、上下層の塩分差が小さく密度成層の安定度は弱いことが分かる。一方、堰運用後は下層塩分が大幅に上昇するとともに、潮時に対応した変動が小さくなったこと、上層の塩分が全体として低下したことが分かる。

#### (2) 木曾三川の塩分比較

河口堰運用が下流域の塩分に及ぼした影響を、河口堰運用の影響が及んでいないと考えられる木曾川 (図-1) の上流 6 km 地点の塩分と、河口堰近傍の長良川 4 km の河川中央地点および揖斐川 6 km 地点の、上下層の塩分の相関から検討した。図-5 は干潮時の塩分の相関を示している。揖斐川 6 km 地点では、流動のみならず (図-2)、塩分に関しても堰運用の影響はほとんど無視しう

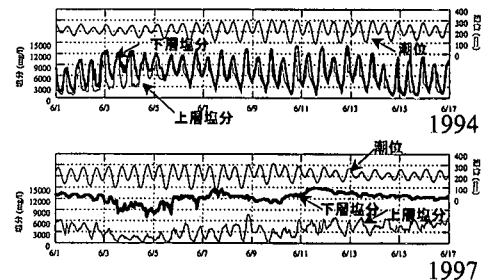


図-4 堰運用前後の長良川 3 km 地点における塩分と潮位の時系列

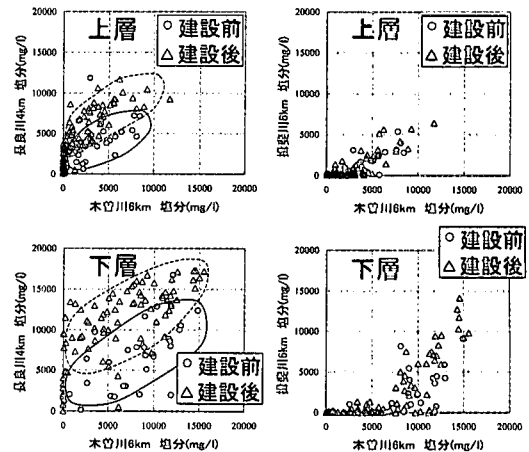


図-5 堰運用前後における木曾三川の塩分濃度

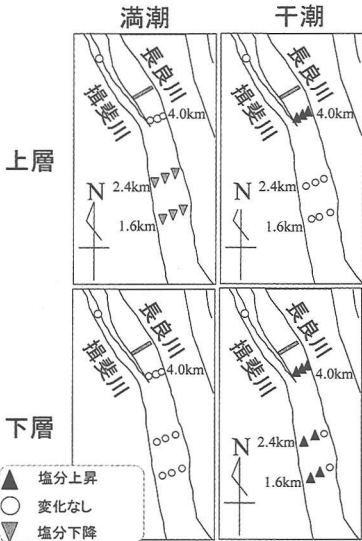


図-6 満潮・干潮における堰運用後の塩分の封鎖変動

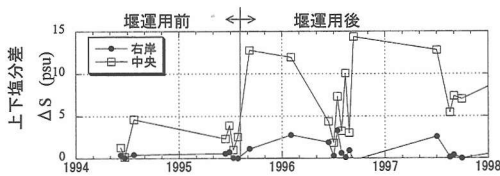


図-7 上下塩分差の時系列 (長良川 4 km 地点)

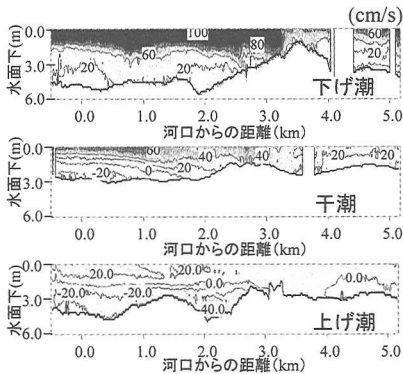


図-8 長良川における流速の縦断分布

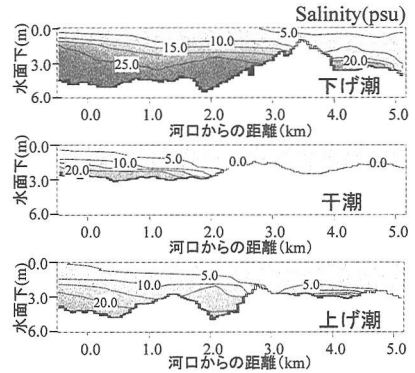


図-9 長良川における塩分の縦断分布

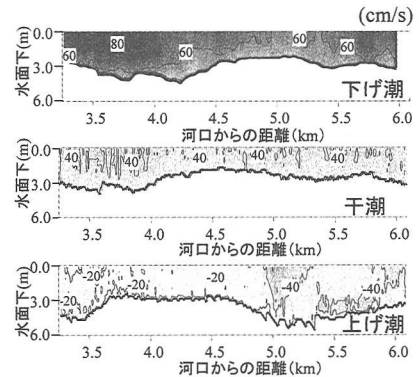


図-10 揖斐川における流速の縦断分布

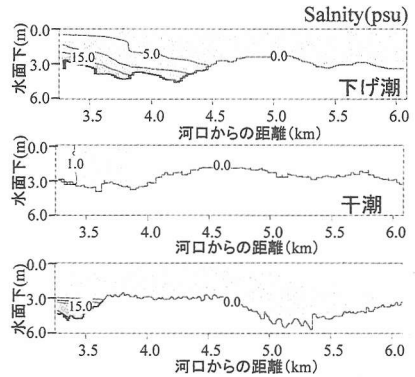


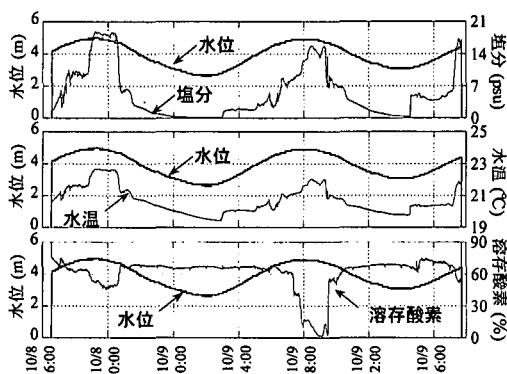
図-11 揖斐川における塩分の縦断分布

ることが分かる。また長良川 4 km 地点の上層塩分は、堰運用によってある程度の上昇が認められるものの全体的にその程度は小さい。一方、下層の塩分は低塩分域が大幅に上昇しており、図-4 に示した堰運用後の 4 km 地点の下層塩分上昇が河川間の比較からも明らかになった。

### (3) 河口堰下流域の空間的な塩分変動

河口堰運用による塩分の空間変動を、潮位と塩分の相関から検討した結果を図-6 に示す。満潮時の上層では

4.0 km 地点を除いて塩分が低下したが、下層では全域で変化していない。これによって、堰近傍を除いて満潮時の堰下流の全域で密度成層が強くなったことが分かる。また、干潮時も全体として堰下流域の密度成層が強くなったことが分かる。図-7 は上下層の塩分差  $\Delta S$  の時系列を示している。同図より堰運用前の干潮時の  $\Delta S$  は小さく、強混合状態となっていたが、堰運用後には  $\Delta S$  が急激に大きくなり成層化が進行したことが認められる。



図一12 舟通しにおける塩分(上段)・水温(中段)・溶存酸素(下段)

ここで注目すべきことは、揖斐川よりの右岸において、堰建設による $\Delta S$ の変化がほとんど見られない点であり、揖斐川とを結ぶ舟通しを通じての河川水交換が堰直下の塩分に重要な役割を果たしている可能性を示唆するものである。

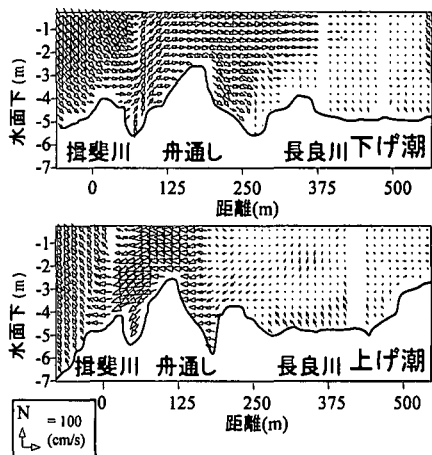
#### 4. ADCP による流動の集中観測

揖斐川と長良川の河川水交換の実態および流動や水質の時空間変動をより詳細に検討するため、日潮不等の小さい2002年10月9日の6:00~17:00にADCPを用いた集中観測を実施した。観測断面として、図一1に示す揖斐川・長良川の2つの観測線を設定し、これらの測線上を2隻の観測船を往復させて観測を行った。流動観測にはWorkhorse ADCP, 1200 kHz, ZedHed (RD Instruments)を用いた。鉛直方向の流速測定解像度は0.01 mである。これを船側部に固定し、時速4~8ノットで航行しながら流動の測定を行った。また、流動観測と同時にクロロテック ACL 208-PDK (アレック電子)を用いた水質分布測定を行い、水温、塩分、溶存酸素(DO)、クロロフィル $a$ 、濁度の空間分布を観測した。

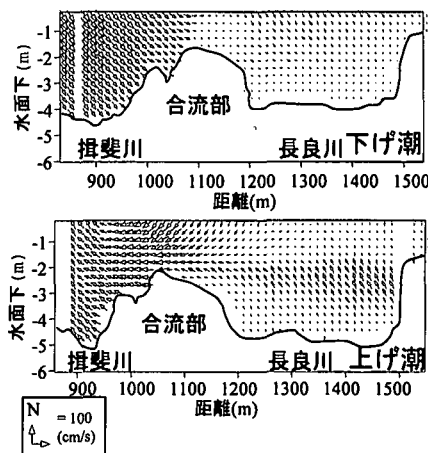
##### (1) 流動および塩分の空間分布

長良川における流速の断面分布の一例を図一8に示す。満潮時・干潮時ともに、下層で上流向き(北向き)の、上層で下流向き(南向き)の流れとなるなど上層と下層とで流向が逆向きになっていた。下げ潮時には、上層から下層までの全層において下流向きの流れとなっており、揖斐川・長良川の下流1 km付近の上層では、下流向きに100 cm/s以上の強い流れが観測されるなど上層流速が下層流速に比べ著しく大きくなっている。上げ潮になると、上層で下流向きの、下層で上流向きの流れが強くなるなど長良川の流動は上層と下層とでは大きく異なることが明らかになった。

同様に、長良川における塩分の断面分布を図一9に示



図一13 舟通しにおける上げ潮時(上段)と下げ潮時(下段)



図一14 揖斐川・長良川合流部における上げ潮時(上段)と下げ潮時(下段)の流速横断分布

す。満潮時には、下層の広い範囲に高塩分水が広がり、これが潮汐とともに移動する様子が観察できる。また、上層には潮時によらず淡水が見られ、上下の塩分勾配が大きいことが分かる。これらは堰建設によって堰下流が成層化するとともに伊勢湾からの塩水侵入の影響が強くなった結果である。一方、河口から3.0 km地点より上流における揖斐川の流動の縦断分布を図一10に示す。揖斐川の流動は長良川と比較して鉛直方向の一様性が強いことが分かる。これは、揖斐川の流量が長良川より大きいこと、河口堰が運用された長良川に比較して潮汐流の効果が強いので上下層の混合が大きく塩水侵入長が短くなること、3 km付近の河床が高くこの地点より上流では塩水侵入が抑止されることなどが原因と考えられる。同様の傾向は図一11の塩分分布からも確認でき、揖斐川の塩水侵入は長良川と比べて弱いことが分かる。

以上のように、一潮汐間にわたり流動と塩分の時空間

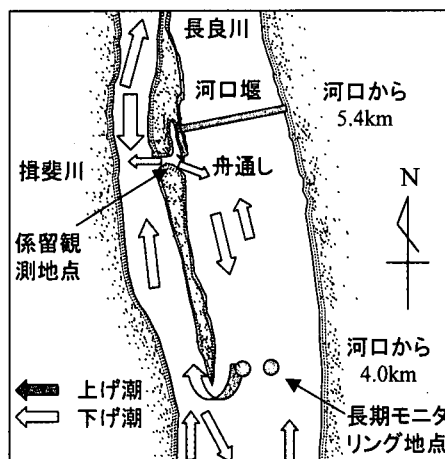


図-15 流動の模式図

変動を観測した結果、長良川における潮汐流の弱化が原因で下層には伊勢湾から侵入した高塩分水塊が希釈されずに侵入する様になるとともに、上層では下流向きの流れが卓越しやすくなった。一方、掛斐川では長良川と比較して鉛直方向の一様性が強いことが分かった。

## (2) 流動および塩分の空間分布

図-12 は舟通しの中央で定点観測した潮位と塩分（上段）・水温（中段）・DO（下段）の時系列を示している。同図より上潮に転じた直後において塩分と水温が急激に上昇し、同時に DO が急激に低下していることが分かる。また、下げ潮時には塩分と水温が急激に低下するとともに DO が急激に回復している。これは舟通しを含む両河川の流動の縦断面分布（図-13）より分かるように、下げ潮時には掛斐川から長良川へ、上げ潮時には反転して長良川から掛斐川へ比較的早い流速（1 m/s 程度）で流れることが原因である。同様に合流部（背割堤直下流）における流動の空間分布を図-14 に示す。合流部の表層においては、上げ潮時に長良川から掛斐川へ流れ込む下流方向の流動が生じており、長期モニタリング結果とも一致した結果となった。

観測結果を基に舟通しを含む平面的な河川水の交換を模式的に示したのが図-15 である。同図に示すように上げ潮時には、干潮域の短い長良川の水位が掛斐川より先行して上昇するために、舟通しを通して長良川より掛斐川に向かって流れる。また同時に背割堤下流端付近では長良川から掛斐川へ回り込む流れを生ずる。一方、干潮時には逆に掛斐川より長良川に向かって流れるようになる。ところで、舟通しの河床は掛斐川、長良川より高い為、上げ潮の開始時には長良川下層に伊勢湾より侵入した高塩分水塊は舟通しより掛斐川には侵入せず、主として長良川上層水が掛斐川に流れる。その後、さらに上げ潮が強くなると舟通しの河床の高い部分を長良川下層

の高塩分水塊が乗り越えて掛斐川に向かって流れるようになる。このとき、定点観測点において図-12 に示すような、水温と塩分の上昇および DO の低下が観測される。一方、下げ潮時には塩分と水温が低く、DO の大きな掛斐川の河川水が長良川に流入するようになり、水温と塩分の低下および DO の上昇がもたらされる。このように、舟通しでの潮時に応じた水交換は、掛斐川と長良川の主に上層水の間で行われる。

ところで、今回の実測例では長良川流量（堰越流量）が  $146 \text{ m}^3/\text{s}$  と報告されているのに対して、舟通し部の最大流量の概略値は  $135 \text{ m}^3/\text{s}$  程度にまで達していた。この様に、舟通しの流量は長良川流量に比較してかなり大きなものであり、舟通しを通した河川水の交換が長良川の塩水侵入や水環境諸量に大きな影響を与えていると考えられる。例えば、舟通しがなかったと仮定すれば長良川の塩水侵入は現在よりも強くなると考えられる。また、4 km 地点における堰運用後の右岸側の  $\Delta S$  が、河川中央に比較して小さいのは（図-7）、舟通しを通しての河川水の流入と流出が、堰下流の右岸側に強い混合を誘起している事が原因となっている可能性がある。

## 5. ま と め

長良川河口堰の建設が堰下流の塩水侵入に及ぼした影響をモニタリング委員会による調査データの分析と現地観測により検討した結果、堰下流域の潮汐流の弱化、滞留域の形成、高塩分化の進行、密度成層の強化などが進行し、伊勢湾の影響を強く受けるようになった。また、ADCP を用いた現地観測により、掛斐川と長良川における流動や塩分などの水環境諸量の特性を明らかにするとともに、掛斐川と長良川における水交換のメカニズムも併せて解明した。今後このような流動の変化が、水生生物に及ぼした影響等についても検討を行う必要がある。

**謝辞**：本研究は日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究 A-1（課題番号：13305035，研究代表者：玉井信行教授）の補助を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表します。

## 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（1997）：長良川河口堰モニタリング年報，平成8年度。
- 住谷昌宏・長瀬 修・木下正樹（2002）：長良川河口堰におえる魚道と魚類の遡上・降下調査について，応用生態工学，pp. 23-40。
- 武田 誠・松尾直規・酒井孝典・吉戸嘉浩（2001）：長良川河口堰下流域の流動特性と DO 変動に関する研究，海岸工学論文集，第48巻，pp. 426-430。
- 藤野智亮・中村由行（2001）：長良川河口堰下流部における貧酸素水塊の形成に関する解析，水工学論文集，第5巻，第3号，pp. 50-57。