

長良川河口堰が塩水侵入に及ぼした影響

THE EFFECTS OF NAGARA ESTUARY BARRAGE ON THE SALINITY INTRUSION

橋本 彰博¹・有田 正光²・南澤 公太郎³

Akihiro HASHIMOTO, Masamitsu ARITA and Kotaro MINAMISAWA

¹ 正会員 博士(工) 東京電機大学 助手 理工学部建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

² 正会員 工博 東京電機大学 教授 理工学部建設環境工学科 (同上)

³ 学生会員 東京電機大学大学院 理工学研究科建設環境工学専攻 (同上)

This paper was carried out to make clear the characteristics of salinity intrusion in the absence of the barrage in Nagara estuary and to discuss the change of the mixing type due to the barrage using the parameter of tidal prism P_t . As a result, the following findings were obtained;

- 1) The mixing type changed by the seasonal variation of the river discharge.
- 2) Before construction of the estuary barrage, the mixing type varied from the partially mixed type to the well mixed type in summer and from the stratified type to the partially mixed type in winter.
- 3) The mixing type changed to the stratified type after construction of the estuary barrage.

Key Words : *salinity intrusion, seasonal change, transition of estuarine systems, tidal prism*

1. はじめに

長良川河口堰は洪水対策・水資源対策等を目的として1988年に着工し1995年7月より本格運用が開始されている。この河口堰の運用開始以降、底層の貧酸素水塊の長期発生や藻類の異常発生等、水質の変化が報告されている¹⁾。そのため、今日までに河口堰の上・下流域を対象に水質や生態系の変化についての研究が数多くなされているが^{2,3)}、これらの現象と河口堰建設との因果関係については今なお不明な点が多く、長良川河口堰が流域の生態系や水環境に及ぼした影響を明らかにすることには強い関心が寄せられている。

河口域の水質には、海水と河川淡水の密度差により生じる塩淡水成層の程度が大きく関係していることから、長良川における水質の変化を考察する上で堰運用前後における塩水遡上形態の変化を明らかにすることは重要と考えられる。このような視点に基づき、中村ら⁴⁾は混合形態の変化という物理的特性から底層のDO変動を考察しているが、混合形態の分類に関しては十分な検討がなされているとはいえない。一方、長良川河口域の塩水遡上を対象とした研究は須賀⁵⁾によって詳細になされているが、使用された観測データは1970年代のものであるため、その

知見が現在の長良川にそのまま適用できるかどうかは不明である。最近、武田ら⁶⁾が現地観測を実施しているが、河口堰運用後の流動を対象としており、堰運用前の塩水遡上特性に関して現在使用し得る知見は須賀⁵⁾によるもののみであるのが実情である。

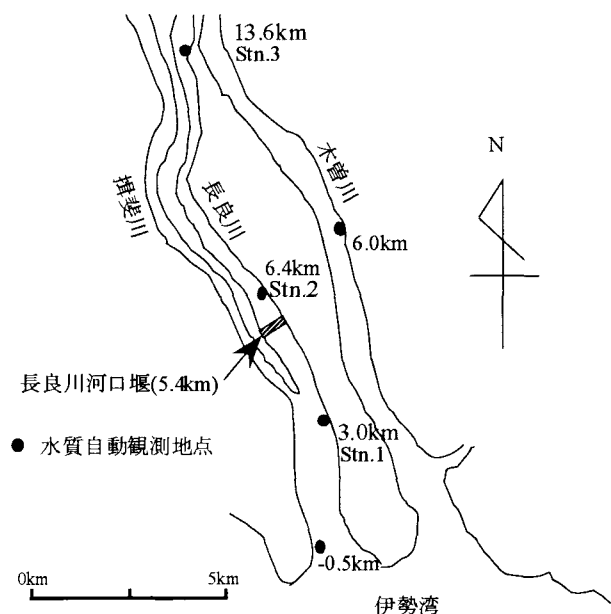


図-1 長良川河口域流域図

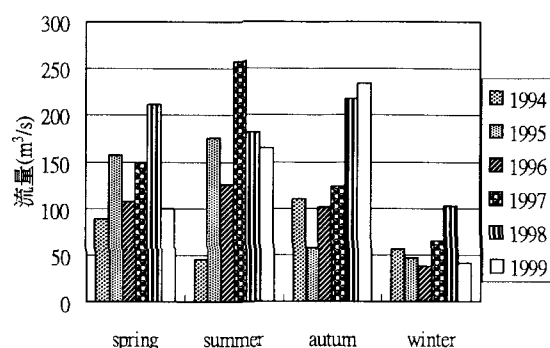


図-2 河川流量（墨俣）の季節変化

そこで本研究では、自動観測装置により得られた現地データを整理することにより、まず河口堰運用前の長良川河口域の塩水遡上特性を明らかにすることを試みた。次に、堰運用前後のタイダルブリズムの変化に着目し、河口堰の運用が塩水遡上特性および混合形態に与えた影響について検討した。

2. 使用した現地データの概要

長良川では河口堰の運用に伴う堰上流域・下流域の水質変化を確認することを目的としてモニタリング委員会が設置され、水質の自動監視装置（シラベール）による24時間連続測定が1994年5月より実施されている。水質自動監視装置は長良川河口堰下流域に1箇所、堰上流域に4箇所、流入域に1箇所の計6箇所に設置されており（図-1）、特にStn.1（河口より3.0km上流地点）、Stn.2（河口より6.4km上流地点）、Stn.3（河口より13.6km上流地点）では表層（2割水深）、下層（8割水深）および底層（河床+50cm）において水温、塩化物イオン、溶存酸素、クロロフィルa、pH、濁度等、様々な項目の自動観測が毎正時行われている（以降モニタリングデータと称する）。本研究では、特に塩水の侵入域に設置されているStn.1、Stn.2、Stn.3において得られたデータを使用して、長良川河口域における塩水遡上の長時間スケールの変動を調べた。解析にあたっては、河川流量は河口より上流39.0km地点の墨俣において観測されたデータを、河口の水位として伊勢湾の潮位データをそれぞれ用いた。ところで、河口堰の完工からゲートを全門閉鎖しての本格運用までの期間においては堰の動作を調べるためにゲートを不規則に開閉する試験運用が実施されているため、以下の考察ではこの試験運用期間中のデータを検討対象から除外した。

3. 河口堰運用前の塩水侵入特性

(1) 塩素イオン濃度の季節変動特性

長良川河口域では河川流量の多い夏季に伊勢湾の塩分が低下して上下層が混合しやすくなる等、河川流量

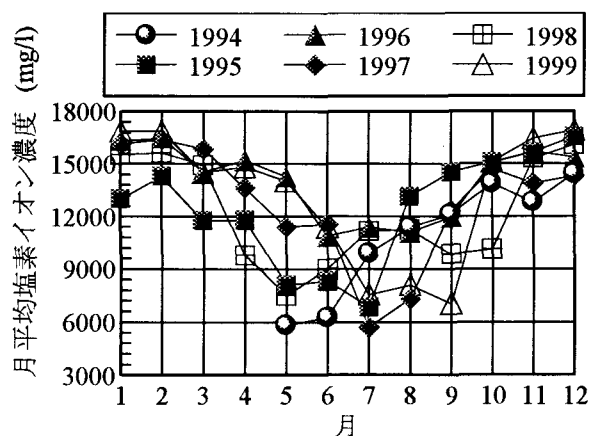


図-3 底層塩素イオン濃度の年変動

の季節変動が塩水の遡上形態に強く影響していることが須賀⁹⁾によって指摘されている。そこで、はじめにモニタリングが開始された1994年7月から1999年12月までのデータから長良川河口域における塩素イオン濃度と河川流量の季節変化について検討した。墨俣における河川流量の各季節の平均流量を算出し年毎にまとめた結果を図-2に、Stn.1における底層の月平均塩素イオン濃度の年変動を図-3に示す。年毎に多少の差はあるものの、底層塩素イオン濃度は河川流量が大きい春季（3、4、5月）から夏季（6、7、8月）にかけて減少し、その後流量が小さくなる冬季（12、1、2月）に増加する傾向が見て取れ、須賀の指摘を示唆する結果が得られた。ここで、1994年の夏季は河川流量が極めて少ないにも拘わらず、他の年と同様に塩素イオン濃度が低下している。これは春季に例年並の河川水が流入したことに加えて（図-2）、夏季の気温の上昇に伴って水温成層が形成されたことにより伊勢湾において強い密度成層が発達したためと考えられる。この点については、伊勢湾奥部において夏季には成層が強く、冬季には鉛直方向に一様化して湾外の比較的高濃度の塩水が湾奥部にまで達することが杉山らの観測⁷⁾により明らかとなっている。

以上の考察から、長良川河口部の塩素イオン濃度は季節毎に大きく異なることが確認された。河川上流へ遡上する塩水の程度や混合形態は、河川流量、潮汐に加えて河口の密度差の影響も受けるため、上記の結果を踏まえると、長良川では夏季と冬季では塩水の遡上形態が異なることが推測された。そこで次節以降では、夏季と冬季とに分けて考察を行った。

(2) 塩素イオン濃度の時間変動特性

次に、夏季、および冬季における塩素イオン濃度の時間変動特性を調べた。ここでは、長良川河口域の塩水侵入特性を検討するため、河口堰運用前の1994年5月～1995年6月までに測定されたデータのうち、可動堰の試験運用が行われていない期間のデータを使用した。

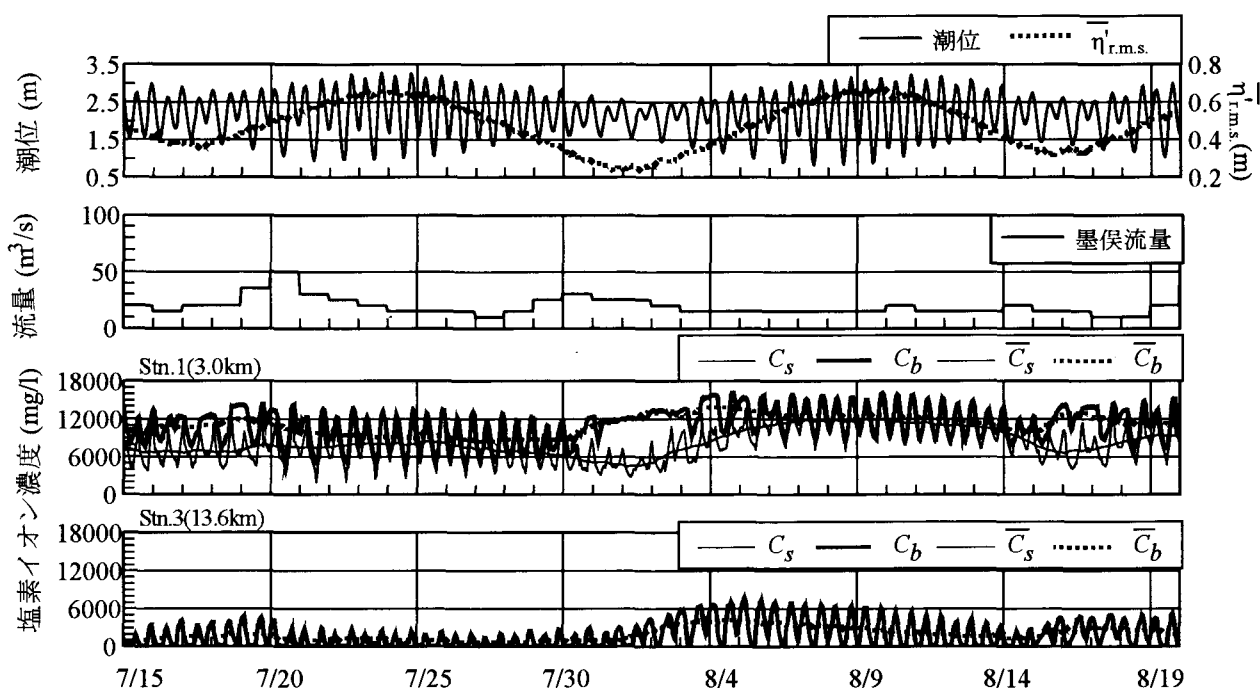


図-4 夏季における潮位，河川流量，塩素イオン濃度（上：Stn.1，下：Stn.3）の経時変化

夏季の観測結果の一例として1994年7月15日から8月20日にかけて毎正時に得られた伊勢湾潮位，墨俣の河川流量，Stn1（3.0km上流地点）およびStn3（13.6km上流地点）の表層，底層塩素イオン濃度の経時変化を示す（図-4）。この年は記録的な渇水で7，8月は大規模な出水がほとんどなく，流量は50m³/sを下回る期間が継続していた。ここで，河口堰運用前の7～8月は同年のみデータが存在することを付記する。まず大潮時を見ると，潮汐による鉛直混合が強いため表層と底層の塩素イオン濃度の差はほとんど無く，潮汐とともに増減を繰り返している。一方，小潮付近では潮汐による混合は弱くなり鉛直方向に濃度差が生じている。これにより塩水の侵入力が増すため塩水が大潮時よりも上流側に遡上し，満潮時には13.6km上流地点のStn.3において比較的大きな濃度が観測されている。次に冬季の観測結果（1995年1月）を見ると（図-5），大潮付近の塩素イオン濃度は，夏季同様，表層・底層共に潮汐変動に伴って増減しているが，河口の塩素イオン濃度が増加したことにより鉛直混合が夏季ほど強くなり，平均的に見ると鉛直方向に濃度差が生じている。一方，小潮付近になると塩素イオン濃度は鉛直方向にほとんど混合することなく13.6km上流地点のStn.3にまで海水と同程度の塩素イオン濃度を持つ塩水が遡上している。

以上の結果をより定量的に考察するために，潮位の変動量 η' のrmsを求め，その25時間移動平均値 $\overline{\eta'_{rms}}$ が最大となる時を大潮時の代表値，最小となる時を小潮時の代表値とし，Stn.1における表層および底層の塩素イオン濃度の25時間移動平均値を $\overline{C_s}$ ， $\overline{C_b}$ として， $\overline{\eta'_{rms}}$ と $\Delta\overline{C}$ （ $=\overline{C_b}-\overline{C_s}$ ）の関係を調べた（図-6）。その結果，夏季と冬季でははっきりとプロットが別れ，大潮時，小潮時いずれの

場合についても，同程度の潮位変動であるのにも拘わらず冬季の方が夏季よりも $\Delta\overline{C}$ が大きいことが分かった。

（3）夏季と冬季の塩水遡上形態について

本節では冬季と夏季における塩水遡上形態について考察する。まず，小潮付近でStn.3の C_b が最大となる日の C_b の流下方向分布を夏季（1994年8月19日），冬季（1995年1月12日）併せて図-7に示す。夏季では伊勢湾において形成される密度成層の影響を受けて，上流に行くのに伴って C_b は単調に減少し，水平方向に濃度分布が生じている。これに対し，冬季では伊勢湾の塩分が鉛直方向に一樣な分布となるため，同程度の潮汐であっても夏季ほど鉛直混合されず，高濃度の塩水が河口より13.6km上流地点のStn.3にまで遡上している。この結果と前節の結果を考え合わせると，夏季の小潮時には弱に近い緩混合型の塩水侵入，冬季の小潮時には弱混合型の塩水侵入になっていたと考えられる。一方，大潮時については，夏季よりも冬季の方が河口付近の塩淡水成層が強いこと，および国土交通省により実施された塩水遡上調査の結果⁹⁾から判断すると，夏季には緩混合に近い強混合型，冬季には緩混合型の塩水侵入になっていたと推測できる。

次に須賀⁹⁾が提案した指標（表層と底層の塩分濃度比 C_b/C_s が0.1以下の場合弱混合，0.1～0.5の時緩混合，0.5以上で強混合）を用いて混合形態を定量的に分類することを試みた。しかし，Stn.1（3.0km上流地点）および侵入塩水のほぼ中間に位置するStn.2（6.4km上流地点）の C_b/C_s を求めたところ，両地点とも弱混合型と判断される冬季の小潮時においても C_b/C_s が0.5以上の値となるケースが見られた。これは，須賀が提案した指標の C_b が水面近傍での

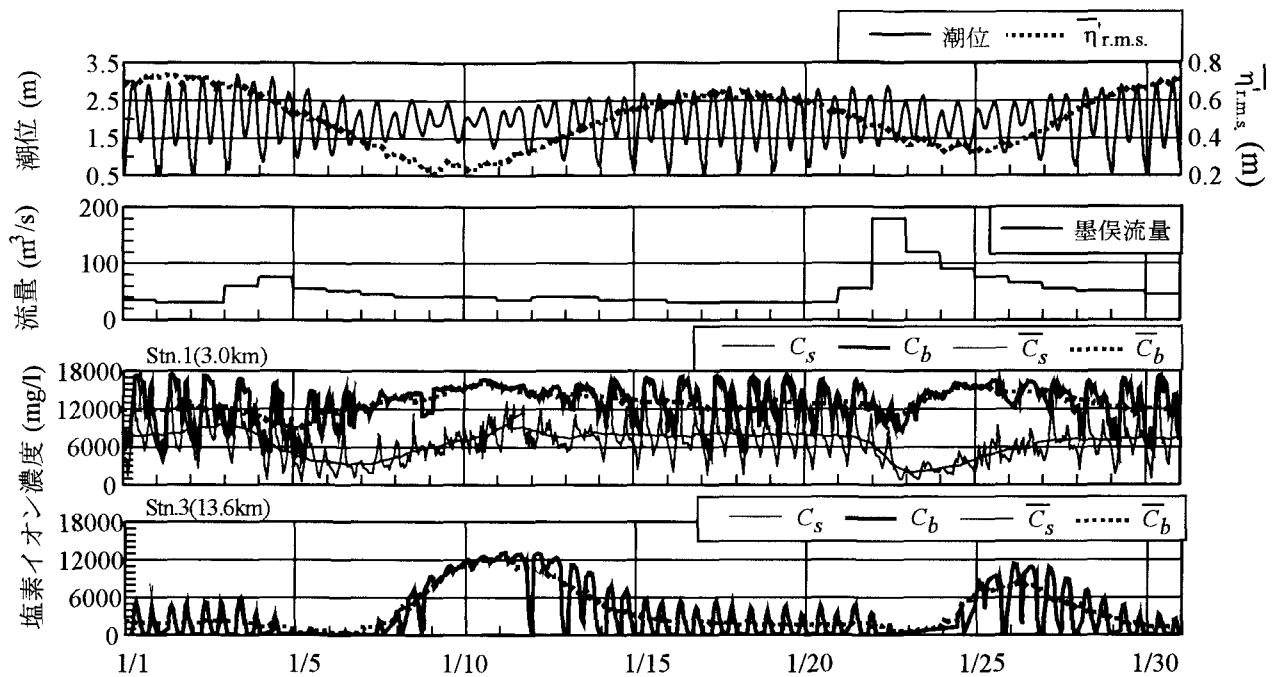


図-5 冬季における潮位，河川流量，塩素イオン濃度（上：Stn.1，下：Stn.3）の経時変化

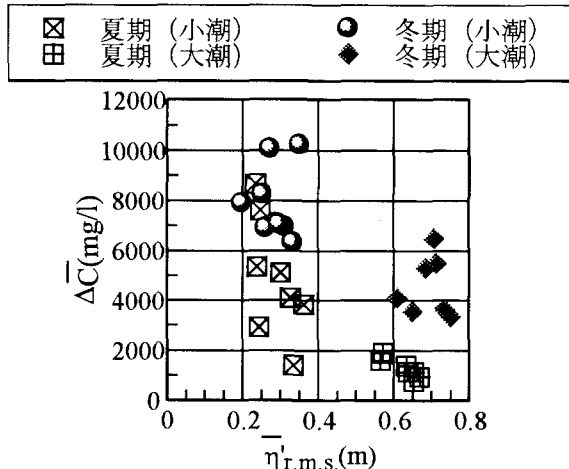


図-6 $\bar{\eta}_{r.m.s.}$ と $\Delta\bar{C}$ の関係

値であるのに対して自動観測装置では表層の値が2割水深での値と比較的深い地点でのものであるためと考えられる。従って，モニタリングデータを用いた場合， C_s/C_b の値では混合形態を分類することが出来ないケースがあることが判明した。ところで，弱混合型の塩水侵入の場合，侵入塩水の先端部においても C_b は海水と同程度の濃度を有している。そこで混合形態を分類する新たなパラメータとして，Stn.3 (13.6km 上流地点) と Stn.2 における C_b の差を Stn.2 の C_b で除した値 $R_{\Delta} = (C_{b,Stn.2} - C_{b,Stn.3}) / C_{b,Stn.2}$ と Stn.2 の C_s/C_b を掛け合わせた値 D_c を提案する。この時， D_c が0に近づくほど弱混合を，1.0に近づくほど強混合を表すことになる。また，出水があった場合には Stn.3 は塩水の先端付近であるため R_{Δ} は1.0に近づき，混合形態は Stn.2 の C_s/C_b によって決まる。特に数値的根拠はないものの，須賀の指標も物理的意味を持つものではないことから，ここではその指標を準用した上で， $D_c < 0.1$ で弱混合， $0.5 < D_c$ で強混

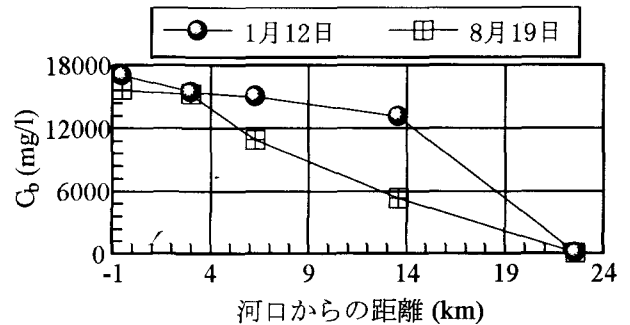


図-7 C_b の流下方向分布

合と定義して再び混合形態を分類してみた。その結果，冬季の小潮時は弱混合，大潮時は緩混合型に，夏季の小潮時は弱に近い緩混合，大潮時は緩に近い強混合型に分類された。この結果は上述の考察と一致しており，モニタリングデータを用いる場合には， D_c を用いることで混合形態を分類することが可能であることが示された。

4. 河口堰の運用が塩水侵入に及ぼした影響

(1) 河口堰運用前後の塩素イオン濃度の比較

本章では河口堰の建設が塩水遡上に及ぼした影響を調べた。堰運用後の観測結果の一例として河川流量が $50\text{m}^3/\text{s}$ で比較的安定している1997年1月（冬季）の伊勢湾潮位，墨俣における河川流量，Stn.1 (3.0km 地点) における表層および底層の塩素イオン濃度の経時変化を図-8に示す。堰運用前（図-5）と比較すると，底層の塩素イオン濃度の変動はほとんど見られず，潮汐変動に関係なくほぼ一定の値をとっていることが分かる。一方，表層濃度は大潮付近では潮汐に伴って変動しているものの，小潮に近づくとも濃度が上昇するとともに変動が小さくな

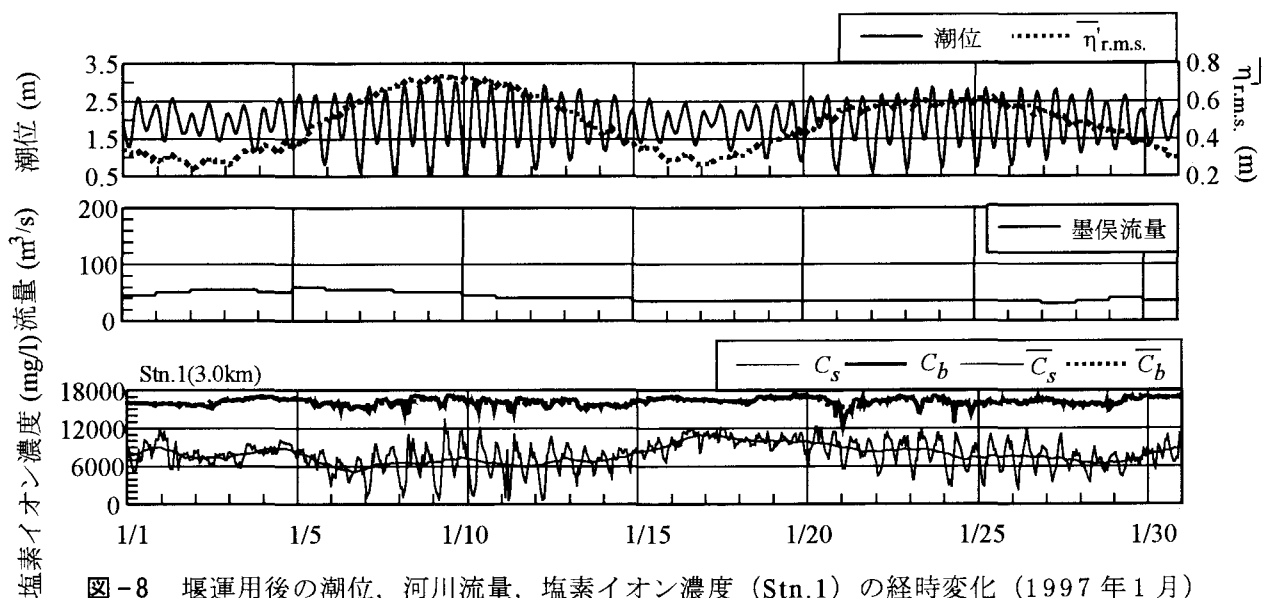


図-8 堰運用後の潮位，河川流量，塩素イオン濃度（Stn.1）の経時変化（1997年1月）

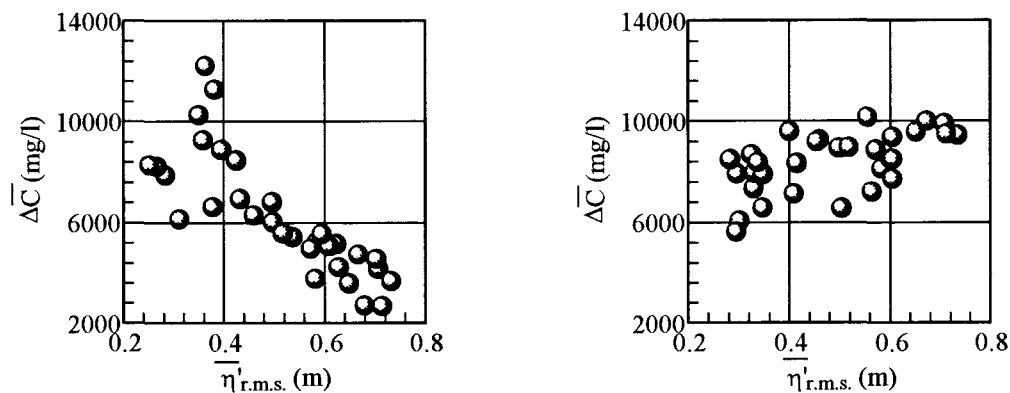


図-9 $\eta'_{r.m.s.}$ と $\Delta\bar{C}$ の関係（左：堰運用前，右：堰運用後）

ている。また、大潮時において塩素イオン濃度が最大となる時でさえ上下層の濃度差は比較的大きく、堰運用前と比較すると月齢を通して上下層の濃度差が大きくなっている。そこで、堰の運用が河口部の成層状態に及ぼした影響をより定量的に検討するために、堰運用前後における $\eta'_{r.m.s.}$ と $\Delta\bar{C}$ の関係を比較した（図-9）。この結果を見ると、堰運用前は強い負の相関があるのに対して堰運用後では弱い正の相関になっており、「河川流量を固定した場合、潮差が小さいほど塩淡成層は強くなる」という一般的な知見とは相反する結果が得られた。この点を説明する為に、2002年11月の大潮時に行われた多点移動観測の結果を図-10に示す⁹⁾。比較的潮差の大きい大潮時においても明瞭な塩淡境界面が存在しており、潮汐と共に塩水が入退している様子が確認できる。この結果から判断すると、上記の正の相関は小潮時の方が鉛直混合が強いことを意味するのではなく、堰の運用により潮汐の往復流による上下層の混合が抑制された結果、小潮時には密度界面が上層の測定水深よりも上に位置するようになり、表層において高い濃度が観測されたためと考えられる。従って、小潮時には大潮時よりも更に強い塩淡成層が形成されていることが推測される。更に夏季において

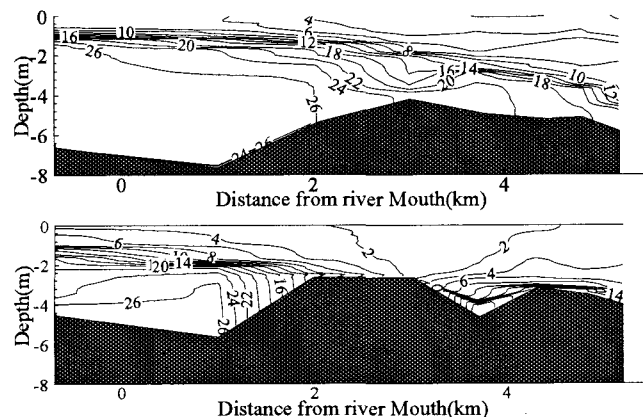


図-10 塩分濃度の流下方向分布（2002年11月20日 上：満潮時，下：干潮時，図中の数値はPSUを示す）

も同様の結果が得られていることから、長良川河口域では河口堰の運用によって塩淡成層が強くなったことが示唆される。

（2）堰運用による混合形態の変化

前節の結果から、長良川では河口堰の運用によって塩淡成層が強くなったことが示唆されたが、このことから塩水の遡上形態そのものが変化していると推測される。

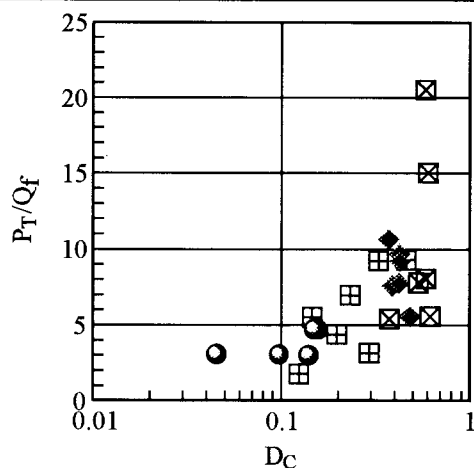


図-11 D_c と P_t / Q_f の関係

そこで次に堰運用後の塩水遡上形態について検討した。既述のように、長良川では河口堰の運用によって $Stn.1$ における C_s の値が必ずしも表層の濃度を意味するとは言えないため、モニタリングデータより算出した C_s/C_b の値から混合形態を議論することには困難を伴う。ところで、長良川河口域の塩淡成層の変化は河口堰の運用によって感潮域が減少したことが主因であると考えられる。そこでここではタイダルプリズム P_t と墨俣における一日の総流量（堰運用後は堰流量） Q_f の比 P_t/Q_f によって河口堰運用前後の混合形態の変化を検討した。なお、長良川は揖斐川に合流する形で河口域が形成されているため、揖斐川と長良川の感潮域を合わせて P_t を定義した。ここで P_t は揖斐川の地形データが不足していたため、航空写真から求めた水面面積に1日の平均潮差を掛け合わせることで算出した。また、塩水侵入の程度は河川流量の変動に影響を受けるため、履歴の影響を考慮して代表日の直前3日間平均流量を採用した。

まず、河口堰運用前のデータを用いて P_t/Q_f と混合形態の関係を調べた。 D_c と P_t/Q_f の関係を図-11に示す。この結果から、両者の間には相関関係が認められ、おおよそ $P_t/Q_f < 40$ で弱混合、 $40 < P_t/Q_f < 100$ で緩混合、 $100 < P_t/Q_f$ で強混合と分類できることが分かった。そこで、河口堰運用後における大潮時及び小潮時の P_t/Q_f の値を求めた（表-1）。先ほどの分類に当てはめてみると、小潮は夏季、冬季ともに弱混合型に分類され、夏季の大潮においても弱混合に近い緩混合に分類されることが分かる。 P_t の減少は潮汐流速の減少を意味することから、長良川河口域では堰運用により感潮域が減少した結果、潮汐による混合効果が減少し、塩水の遡上形態が弱混合型に変化したと考えられる。

表-1 堰運用後の P_t / Q_f の値

	P_t/Q_f			
	夏季		冬季	
	大潮	小潮	大潮	小潮
最大	5.32	1.63	5.05	1.73
最小	0.94	0.12	1.58	0.38
平均	2.07	0.81	3.03	1.1

5. 結論

本研究では、河口堰運用前における長良川河口域の塩水遡上特性を調べた。さらに、堰運用が塩水侵入に及ぼした影響について検討した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) 長良川河口部の塩素イオン濃度は季節毎に大きく異なることが確認された。
- 2) モニタリングデータを用いる場合には、指標 D_c を用いることで混合形態を分類することが可能であることが示された。この指標を用いると、長良川河口域の塩水侵入は冬季の小潮時は弱混合型、大潮時は緩混合型に、夏季の小潮時は弱に近い緩混合型、大潮時は緩に近い強混合型に分類出来ることが分かった。
- 3) 長良川河口域では河口堰が運用されたことによって、塩淡成層が強くなったことが示唆された。
- 4) 長良川河口域では堰運用により感潮域が減少した結果潮汐の混合効果が減少し、塩水の遡上形態が弱混合型に変化したと考えられる。

参考文献

- 1) 西条八束・奥田節夫：河川感潮域，名古屋大学出版，1996。
- 2) 村上哲生・服部典子・藤森俊雄・西条八束：夏期の長良川河口堰下流部の貧酸素水塊の発達と解消，応用生態工学，Vol. 4，pp73-80，2001。
- 3) 武田誠・松尾直規：統計学的手法を用いた長良川河口堰モニタリング資料の解析，環境工学研究論文集，第37巻，pp369-378，2000。
- 4) 中村由行・栗木秀治・藤野智亮：河口域における溶存酸素濃度の動態，港湾航空技術研究所報告，第41巻第3号，pp19-48，2002。
- 5) 須賀堯三：感潮河川における塩水くさびの水理に関する基礎的研究，土木研究所資料，1537号，1979。
- 6) 松尾直規・武田誠・加藤幹人：長良川河口堰下流域の流動特性，水工学論文集，第44巻，pp1029-1034，2000。
- 7) 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・水島雅文：伊勢湾北部海域の密度成層と残差流，海岸工学論文集，第41巻，pp291-295，1994。
- 8) 建設省中部地方建設局：長良川河口堰調査報告書，1995。
- 9) 鯉淵幸生・有田正光：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現地観測，海岸工学論文集，第50巻，pp1021-1025，2003。

(2003. 9. 30 受付)