

長良川河口域の塩水侵入と水質変動の特性

THE CHARACTERISTICS OF SALINE INTRUSION AND WATER QUALITY ON NAGARA RIVER ESTUARY

有田正光¹・橋本彰博²

Masamitsu ARITA and Akihiro HASHIMOTO

¹正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設環境工学科(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂)

²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大字石坂)

The strong stratification on the downstream region after the Nagara river mouth Barrage construction has been reported. The purpose of this paper is to extract the features of saline intrusion and analyze the flow mechanism of this stratification triggered by the Nagara Barrage using monitoring data. Several special features of salinity intrusion were reported and revealed salinity intrusion was effected not only the reduction of tidal prism by barrage construction but also topographical and hydraulic features of Nagara river estuary. This paper also treated the relationship between DO concentration and saline intrusion and revealed strong correlation.

Key words: Nagara river, salinity intrusion, DO concentration, mixing type, tidal estuary

1. はじめに

長良川では河口堰の運用開始に伴って水質や流動の変化^{1), 2)}や、堰下流域が著しく成層化^{3), 4)}したことが報告されている。また、著者等⁵⁾は河口域の環境変化の考察には河口堰運用が塩水侵入に及ぼした影響を評価することが重要であるとの認識から、長良川のみならず一般河川において使用可能な混合形態分類法を提案し、その基礎的概念の妥当性を長良川のモニタリングデータを使用して検証している。しかし、塩水侵入と混合形態は対象とする河川に特有な地形的・水理的条件の影響を強く受け、提案した基礎的概念に不一致の諸現象が混在していることも併せて指摘している。

以上の点を踏まえて本研究では長良川に特有な塩水侵入の挙動を明らかにすることを目的とする。このために、まず、河口域の地形的・水理学的特性について論ずる。次に、長良川におけるモニタリングデータ⁶⁾を使用して堰運用前後の長良川特有の塩水侵入の挙動とメカニズムについて検討する。さらに、塩水侵入および混合形態と DO 濃度の関連についても調べ、河口堰運用が水質変動に及ぼした効果を考察する。

2. 河口域の特性と混合形態分類の概念

(1) 長良川河口域の特性とモニタリングデータ

長良川は下流域で河川流量が 1/2 程度の揖斐川と合流し、伊勢湾に至る一級河川である。河口堰は長良川の河口から 5.4km 地点に建設され、1995 年 7 月から運用開始されている。図-1 に示すように河口堰下流の 4.0km 地点までは背割堤で長良川と揖斐川は分流されているが、堰直下流の背割堤部には「船通し」と呼ばれる水路があり、同水路を通して長良川と揖斐川の河川水交換が行われる。後述するように、この背割堤による分流と船通し部の河川水交換が堰運用後の長良川の塩水侵入と水質変化に大きな役割を演じている。また、河口が水質の悪化している伊勢湾に接していることも同河口域の水質を特徴づける重要な要因となっている。

この長良川では期間を限定した水理・水質諸量の集中観測とともに自動観測装置による水質の 1 時間毎の 24 時間連続測定が堰建設前の 1994 年 5 月より 5 年間に渡って実施されている(モニタリングデータ⁶⁾と称する)。この自動観測装置の設置位置は下流より -0.5km, 3.0km, 6.4km, 13.6km, 22.6km, 28.4km, 31.2km の 7 カ所であり、堰運用

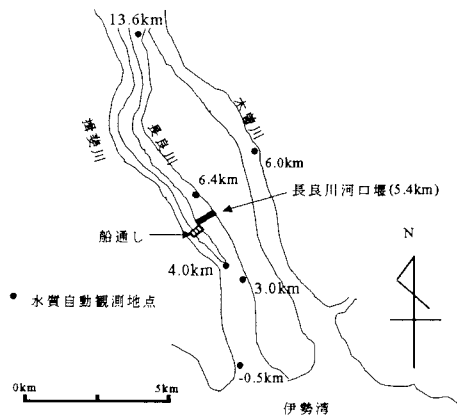


図-1 長良川流域図

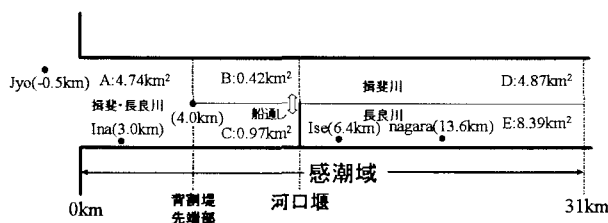


図-2 各部の感潮面積

後は-0.5km, 3.0km の観測地点のみが堰下流に位置する(図-1参照)。

(2) 長良川河口域の潮汐効果と基礎的流動

本報では潮汐効果の評価のために、タイダルプリズム $P_t (= \Delta \eta A)$ ($\Delta \eta$ は潮位変動量, A は感潮面積) を使用する。ここに, P_t と A は任意の地点で定義され, A は任意の地点より上流の感潮面積である。また, 河川感潮域内の水位は一定であると仮定して $\Delta \eta$ には伊勢湾の水位を準用する。

河口域の環境評価のためには潮汐流の規模と流況を知ることが重要である。後述のように長良川河口域では堰運用後に背割堤と船通しの存在により複雑な潮汐流が発生するので, 河口域の潮汐効果の評価のためには感潮域を特性により分割してそれぞれの面積を精度良く求めることが重要である。ここでは長良・揖斐川の河川感潮域を文献調査により河口から 31km までと設定し, 図-2 のように領域分割したうえでそれぞれの感潮面積を航空写真から算出した。その結果, 同図に示すように, 領域 A (揖斐・長良川合流領域) : 4.74km², 領域 B (揖斐川の河口堰地点から背割堤下流端までの領域) : 0.42km², 領域 C (長良川の河口堰地点から背割堤下流端までの領域) : 0.97km², 領域 D (揖斐川の河口堰地点から感潮域上流端までの領域) : 4.87km², 領域 E (長良川の河口堰地点から感潮域上流端までの領域) : 8.39km², を得ている。

この様にして得られた感潮面積より, 河口堰運用前後の-0.5km 地点の感潮面積 A を比較すると堰

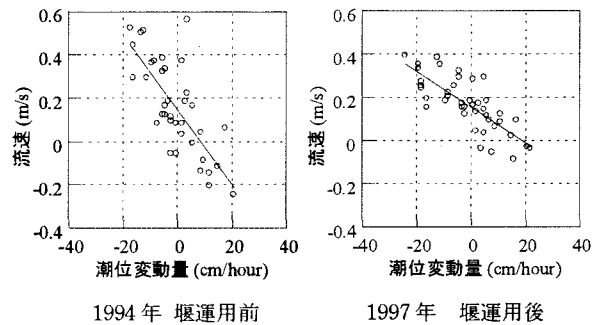


図-3 堰運用前後の平均流速と潮位変動量(1.6km)

運用前は $A=19.39\text{km}^2$ (領域 $A+B+C+D+E$) であるのに対して堰運用後は 11km^2 (領域 $A+B+C+D$) となり半減している。つまり, 堰運用によって下流端における潮汐効果は半減したが, これによって河口域の水質は大きく変化すると予測できる。なお, 堰運用後の感潮面積に領域 C を加算しているのは船通しによる揖斐川と長良川の河川水交換を考慮しているためである。

この潮汐効果の半減を示す具体的な観測事例を図-3 に示す。同図は集中観測期間に実施された 1.6km 地点の, 堰運用前と運用後の河川断面内の平均流速 (河川自流速+潮汐流速, 流速は下流向きを正) と潮位変動量 (1 時間当たりの潮位の変化量:cm) の関係を示している。同図でデータを近似する実線と潮位変動量=0cm/hour との交点の流速は概略河川自流速成分を示し, その値よりのずれは潮汐流成分を示している。同図に示すように河川自流速は河口堰運用前後でほぼ同一の値を示しているのに対して, 潮汐流成分は堰運用による感潮面積の半減に対応して, 半減している。これは感潮面積で潮汐効果进行评估することの妥当性を示している。

ところで, 著者等の堰運用後の現地観測³⁾ によれば, ①堰下流の船通し (幅 45m 程度, 水深 3m 程度) を通した潮汐効果による揖斐川と長良川の河川水交換量は大きい, 同水路の断面積は小さいために, その下流で計算される感潮面積に対応する潮汐流量に比較して小さな流量しか流れない, ②表層水が船通しを通して上潮時には長良川から揖斐川へ, 下潮時には逆に流れる, ③船通しの水路の河床高は両河川の河床より高いので, 潮汐流による河川水交換は表層水のみで行われる, ④背割堤下流では上下層ともに, 上潮時には長良川側から揖斐川方向へ, 下潮時には逆の河川横断方向の流動が生じている, 等が判明している。この様に堰運用後の河口部には特有で複雑な流れが発生している。このことが, 塩水侵入と水質に大きな影響を与えていると考えられ, 第 3 章において考察する。

(3) 混合形態分類指標

本報では上下層混合を上層塩分濃度（2 割水深） C_s と下層塩分濃度（河床より 50cm） C_b の観測値の 25 時間移動平均値： $\overline{C_s}$ 、 $\overline{C_b}$ より $\beta = \overline{C_s}/\overline{C_b}$ を計算し、 β が大きいほど強混合と判定する。また、混合形態に関わるパラメータとして次式の α と F_{ds} を導入する。

$$\alpha = P_r / Q_f T \quad , \quad F_{ds} = (Q_f / A_c) / (g_s' H_s)^{1/2} \quad (1)$$

ここに、 Q_f は河川自流量、 $Q_f T$ は上潮時期における総河川水量、 F_{ds} は河口の層平均密度フルード数、 H_s は河口部の河川横断面内の平均水深、 g_s' は河口部の下層水密度で無次元化された上層水の欠損密度、 A_c は河川の流水断面積、である。

著者らは、 α が大きいほど潮汐効果が強くなり強混合化、 F_{ds} が大きいほど塩水侵入力が弱体化して弱混合化するという基礎的特性を明らかにしている。この基礎的特性および β による混合形態分類法等については文献[5]を参照されたい。なお、次章では長良川河口域に特有な塩水侵入現象、および塩水侵入と DO 濃度の関係について検討する。

3. 長良川河口域の塩水侵入特性と DO 濃度

(1) 河口堰運用前の塩水侵入の挙動

本節では堰運用前の事例を図-4に示す。同図より、出水による α の急減とともに F_{ds} が急増(Q_f の増加による)して成層化 (β の減少)することや、上流域の P_r の減少による成層化など、 α 、 F_{ds} と β の関係はその基礎的特性に合致していることが分かる。

ここで、 F_{ds} が大きくなると弱混合化するメカニズムについて考察する。 F_{ds} が小さく塩水侵入が大きい場合、河口付近が強混合でも上流では弱混合化しているのは一般に観察される現象である (P_r が上流ほど小さいので)。この状態から F_{ds} が増加すると流量増加による潮汐効果の減少を伴いながら塩水侵入長が減少するが、このとき河川内では F_{ds} が小さい場合の弱混合化した先端部分のみが観察される。これが F_{ds} が大きくなると弱混合化がもたらされるメカニズムであると考えられる。

なお、図-4以外の多くの時系列データの分析より、一般的に堰運用前の塩水侵入の混合形態は基礎的特性で概略説明できることが判明したので、ここではよりミクロな塩水侵入の挙動について論ずる。

図-4より出水とほぼ同時に $\overline{C_b}$ 、 $\overline{C_s}$ は低下すること、および両者の位相差は小さいことが分かる。これは出水時には塩水侵入先端部の後退と塩水層厚の減少が上下流の全域でほぼ同時に生ずることを意味している。一方、減水時には塩分濃度の上昇が減水に遅れて生じ、特に $\overline{C_b}$ の値の上昇は上流ほど遅れ、

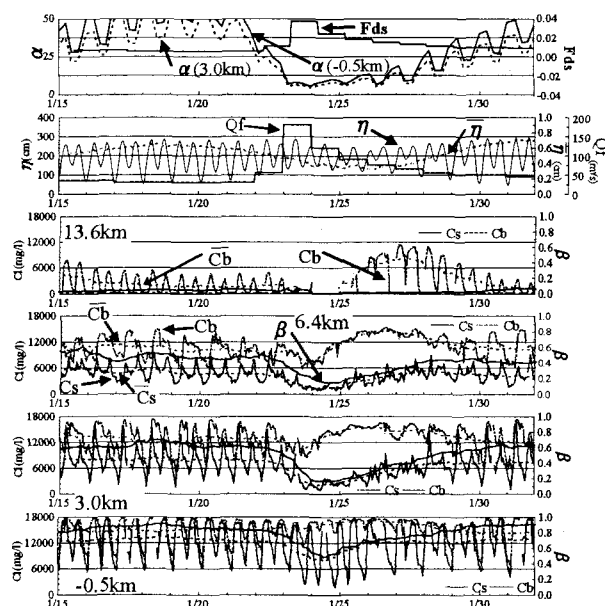


図-4 1995 年 1/18 ～ 1/31 の時系列（堰運用前）

減水時の最大塩分濃度の出現は 13.6km で河口付近に比較して 2 ～ 3 日程度の遅れとなっている。これは、塩水遡上は先端部に形成される密度カレントの遡上の結果としてもたらされるが、上流の塩水侵入先端部の塩水層厚は薄くなり、その遡上速度が遅くなるのが原因であろう。また、減水時の $\overline{C_s}$ の値の上昇は $\overline{C_b}$ の値の上昇に遅れて生じている。これは、塩水の遡上の結果として下層塩水が上層に混入して強混合化することを意味していると考えられる。

(2) 各種混合形態の塩分濃度の動的挙動

図-4に示すように減水時の $\overline{C_b}$ の時系列は最大値を持って上に凸の挙動を示す。これは減水による再強混合化によるものであると考えられる。このように混合形態の変化は塩分濃度に大きな影響を及ぼす。ここでは、各種混合形態の動的挙動についての理解を深めることを目的として、堰運用前の河川流量がほぼ一定で小さく ($Q_f \sim 20 \text{ m}^3/\text{s}$)、潮位変動量 $\Delta \eta$ の変化 (α の変化) による混合形態の変化が大きい時系列の事例を取り上げ考察する。

図-5は 1994 年 7/31 ～ 8/31 の 3km 地点の潮位 η と C_s 、 C_b の相関を示し、上から弱混合、緩混合、強混合の事例となっている。同図より、 $\Delta \eta$ が大きいほど強混合化すること、上潮時には塩分濃度が上昇するとともに強混合化すること、下潮時には塩分濃度が低下するとともに弱混合化することが分かる。また、干潮時に最も弱混合化して上下層塩分濃度は最小値を、満潮時に最も強混合化して上下層塩分濃度は最大値を示すことが分かる。

一方、上下層塩分濃度差は潮時によらず弱混合では大きく、緩混合ではほぼ一定、強混合化すると小

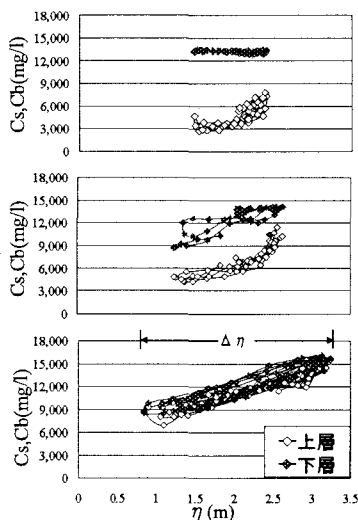


図-5 潮位と上下層塩分濃度の関係

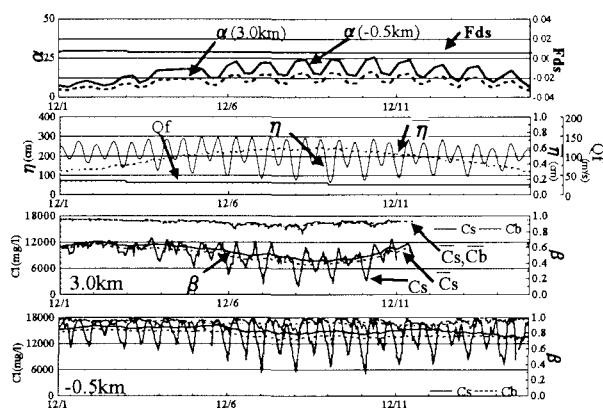


図-6 1995年12/1～12/13の時系列（堰運用後）

さくることが分かる。また、下層塩分の平均濃度は強混合化に伴って小さくなり、上層の平均濃度は大きくなることから分かる。これは、強混合化によって上下層の混合が促進されるためであると考えられる。つまり、図-4のように減水時の $\overline{Cb}$ の時系列が上に凸の挙動を示す最大の原因は混合形態が変化するためであると考えられる（さらに強混合化によって塩水侵入長そのものが短くなることも原因となる）。なお、図-5より満潮時と干潮時の塩分濃度差は強混合化するほど大きくなることから分かる。これは強混合時には、海域の高塩分濃度水塊が上潮時に河道内の上流まで侵入するためである。

(3) 堰運用後の特異な塩水侵入の挙動

一般には河口堰運用の混合形態に及ぼす影響を知るには堰運用前後の感潮面積の変化を考慮すればよい⁵⁾。しかし、堰運用後の長良川河口域の塩水侵入は第2章に示すような地形的特徴によって特有の挙動を示す事例がしばしば観察されるようになっている。本節ではその事例と原因について考察する。

図-6は堰運用後の河川流量が小さくほぼ一定 (Q_f

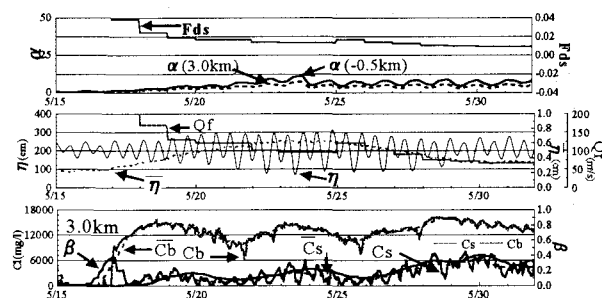


図-7 堰運用後の長周期の塩分濃度変動の事例

～30m³/s)の時系列を示している。同図より-0.5kmに比較して3km地点では、感潮面積に大差がないにもかかわらず著しい成層化が観測されている。これは、2-2節に述べたように地形的条件により船通し部を通した潮汐流による河川水交換は表層水のみで行われ、かつ、水路断面が小さいので通過する潮汐流量が制限されることに起因していると考ええる。このとき、領域Cは著しく弱混合化（成層化）する。この結果、同領域の直下流の左岸に位置する3km地点の観測地点では強い弱混合化が観測されることになると思われる（図-1参照、-0.5kmの観測点は右岸側であることに注意）。

なお、3kmの時系列で小潮から大潮へ遷移する ($\Delta\eta$ の増加→ α の増加)にもかかわらず $\overline{Cb}$ の値がほぼ一定値を示しているのはこの領域Cの弱混合化の影響である。一方、 $\overline{Cs}$ の値は小潮から大潮への遷移に伴って減少するとともに β の値も減少し、弱混合化していることが分かる。これは α の増大は β の増加をもたらすとの基礎的知見とは異なる結果であり、堰運用後の長良川河口域に特有な現象である。この原因は $\Delta\eta$ の増加によって揖斐川との船通しを通した表層水の交換量が増加するとき、領域Cの表層水が希釈されるためであろう。

以上のように堰運用後の河口域は領域Cと船通しの存在によって同河口域に特有な成層化現象が生ずるようになったことが明らかになった。

(4) 堰運用後の大規模出水時に観測される塩分濃度の長周期振動現象

図-7は堰運用後の大規模出水時にしばしば観察される上下層塩分濃度の長周期の振動現象の事例を示している（1997年5/16～5/31）。同事例では $\overline{Cb}$ 、 $\overline{Cs}$ の値が3～5日程度の周期で振動しながら減衰していることが分かる。これは塩水が侵入と後退を繰り返していることを意味しているが、周期の長さから潮汐が原因でないことは明らかである。

本報ではこの長周期の塩分濃度の振動現象は伊勢湾に発生する内部セイシュが原因であると考えられる。つまり、洪水時に密度噴流として海域に河川水が流

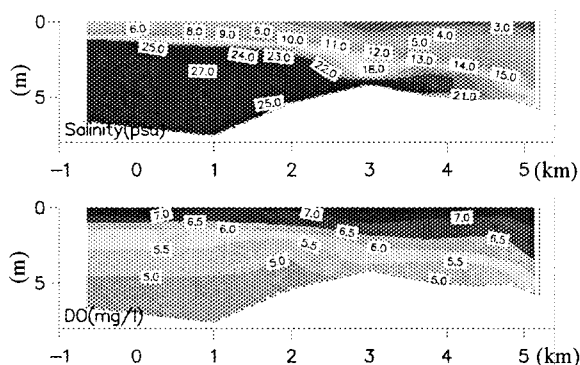


図-8 塩分と DO 濃度分布

(2002年10月9日, 満潮時, 7:00~8:30, 堰越流量: 146m³/s)

出する時に河口付近の海水が排除され密度界面は大きく低下する。この低下した密度界面が洪水の減水期に元の位置に復元しようとする時に内部セイシュが生ずる。要するにこの内部セイシュによって湾奥の密度界面が高くなるときに海水の河川内への遡上が、湾奥の密度界面が低下するときに塩水の河川内での後退が生ずると考える。

ここで内部セイシュの概略の周期を求める。伊勢湾を開放端で湾幅一定と仮定して湾長 $a = 70\text{km}$, また、表層から密度界面の位置までの水深 $h = 7\text{m}$ (文献[8]を参照) とおく。さらに、海水と表層水の無次元密度差 $\Delta \rho / \rho_b$ についてはモニタリングデータを使用して各年の河口域の月別平均値を求めた結果より、5月の平均的値として $\Delta \rho / \rho_b = 0.015$ を採用する。結局、 $m=1$ とした内部セイシュの周期 T_s の理論値は次式で与えられる。

$$T_s = 4 a / C = 4a / (gh)^{1/2} = 4 \times 70,000 / (0.015 \times 9.8 \times 7)^{1/2} = 276,026 \text{ sec} = 3.19 \text{ day} \quad (2)$$

この計算結果は観測値の3~5日程度と概略一致していることから図-7に示される長周期の塩分濃度変動は内部セイシュに基づくと推察するのは妥当であると考えられる。ただし、理論計算では現実と異なる密度が急変する密度界面を仮定していることや、湾の形状が矩形でないなどの理論上の仮定との不一致があることは注意すべきである。

ところで、中村・藤野⁸⁾は洪水によって河川内の塩水が排除された後の、減水時の DO 濃度の低下、つまり貧酸素化を報告している。彼らはこの原因は洪水時に河川内から排除された塩水が減水期に貧酸素化が進行した伊勢湾から再度侵入するためであると考えている。彼らの研究との相違点は、本報でさらに考察を進めた結果、洪水によって内部セイシュが駆動され、長周期の塩分濃度変動がもたらされと考えている点にある。なお、この内部セイシュは堰運用前も洪水時に発生していたと考えられるが、

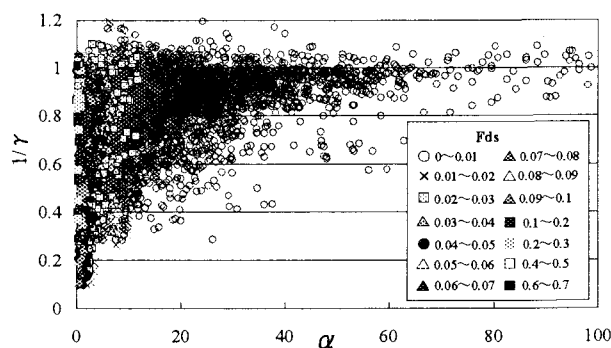


図-9 $\alpha - 1/\gamma$ の関係 (堰運用前後, 3km 地点)

堰運用後は河口域の著しい成層化により顕在化し、しばしば観察されるようになったものと考えられる。

(5) 堰運用が下流域の DO 濃度に与えた影響

中村等⁸⁾、武田等⁹⁾、¹⁰⁾は堰運用が DO 濃度与えた影響について検討しているが残された課題は多いと考えられる。ここではモニタリングデータと著者等の観測結果を使用して考察する。

河口堰運用の結果、伊勢湾の海水が希釈されることなく遡上するようになったが、これを裏付けるために著者らの堰運用後の満潮時における縦断面内の塩分濃度と DO 濃度の観測事例⁷⁾を図-8に示す。同図のように、最も強混合化が進行する満潮時 (図-5参照) においても塩水侵入は典型的な塩水楔の形状となっている。これは堰下流域の弱混合化と、高濃度の伊勢湾海水の堰下流域への侵入を意味している。一方、同時時間帯に観測された DO 濃度分布は塩分濃度と極めて類似な形状を示している。これは堰運用後は塩水侵入と DO 濃度には強い関連があること、つまり、DO 濃度も伊勢湾の水質の影響を強く受けるようになったことを意味している。

中村・藤野⁸⁾は堰運用後の堰下流の DO 濃度と塩水侵入との強い関連を指摘するとともに、塩水侵入の混合形態と関連づけて論じている。ここではこの点をより定量的に検証するために塩水の混合形態分類のための指標 β に類似な $1/\gamma = \overline{DO_b} / \overline{DO_s}$ を導入する。ここに、 $\overline{DO_b}$ と $\overline{DO_s}$ はそれぞれ下層 (河床より 50cm) と上層 (2 割水深) の DO 濃度の 25 時間移動平均値である。なお、 $1/\gamma$ の値が小さいことは下層の貧酸素化を意味している。

図-9は-0.5km 地点の堰運用前後の全期間の $\alpha - 1/\gamma$ 図を示す。同図はモニタリングの時系列データを 8 時間毎に読みとり、 $1/\gamma$ の値を α および Fds の値の 1 日遅れとしてプロットしたものである。同図より、 α が大きくなると $1/\gamma$ の下限値が大きくなる、任意の α に対して $1/\gamma$ の値は塩水侵入限界を示す下限値を持つことなど塩水侵入の混合形態分類

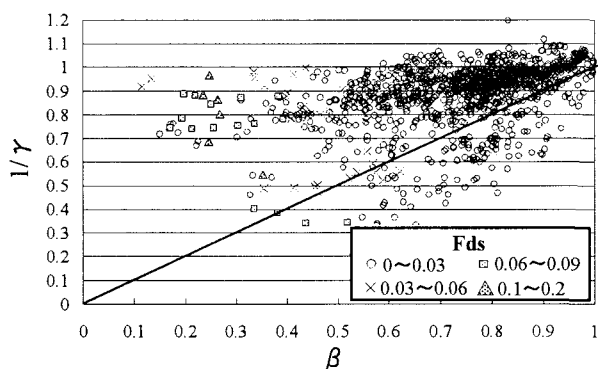


図-10 $\beta - 1/\gamma$ の関係, 堰運用前, 3km 地点
(図の表中のインデックスは Fds)

に使用する $\alpha - \beta$ 図⁵⁾に類似な特徴を持っていることが分かる。つまり、同図からも塩水侵入の混合形態と DO 濃度は強い関係を持つことが分かる。

ここでは両者の関係をより直接的に把握するために堰運用前の β と $1/\gamma$ の相関を図-10に示す。同図に示すように両者には正の相関があり、全体として β の大きい強混合時には $1/\gamma$ が大きく（下層の DO 濃度が大きい）。 β の小さい弱混合時には $1/\gamma$ が小さい（下層が貧酸素化しやすい）傾向があることが分かる。また、強混合ほど両者には強い関係が認められる。これは、強混合では上層河川水と下層塩水の混合が大きいので伊勢湾の水質の影響は緩和されるためである。一方、弱混合の領域ではデータのばらつきが大きい（紙面の都合で割愛するが堰運用後については著しい弱混合化によってさらに大きなデータのばらつきが生じている）。これは弱混合では伊勢湾の貧酸素化が進行した水質の影響を受けることの他に、成層化して下層水が滞留しやすくなった結果、栄養塩濃度・クロロフィル濃度・日射・風・水温などの複雑な要因の影響を受けるようになったことが原因であると考えられる。例えば、武田等¹⁰⁾は堰運用後の堰上流の淡水域の栄養塩濃度や発生する浮遊藻類の増殖と貧酸素水塊との関連に着目しており、残された検討課題は多い。

ところで、図-9で Fds の違いに対する傾向が不明瞭であるが、これは図-10に示すように α と $1/\gamma$ には一定の関連が認められるもののばらつきも大きいこと（堰運用後はさらにばらつきが大きい、それらのすべてのデータが含まれている）、さらには本報で提案した塩水侵入の混合形態分類における基礎的特性に合致せず特異な挙動を示すケースも含めてすべてのデータをプロットしたことに原因があると考えられる。ここでは、同図はデータ全体の挙動を明らかにすることを第一の目的として作図したものであることを付記しておきたい。

4. まとめ

一般に塩水侵入の混合形態は α が大きくなるほど、Fds が小さくなるほど、強混合化して β が大きくなるという基礎的特性を持っている。しかし、現実には対象とする河川の水利的・地形的条件の影響も強く受け、河川ごとに異なる塩水侵入特性を併せ持っている。本研究では長良川の、特に堰運用後にみられる特有の塩水侵入現象の抽出とその物理的メカニズムについて考察したものである。考察の結果、堰運用後の同河口域に特有の塩水侵入特性には背割堤と船通しの存在の役割が大きく寄与していることを明らかにし、また、その事例のいくつかを示した。さらに、塩水侵入と DO 濃度の関連についても検討し、両者の強い関連を明らかにしたが、弱混合下では栄養塩濃度やクロロフィル濃度などの複雑な要因の影響をも受けることを示した。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 橋本彰博・有田正光・南澤公太郎：長良川河口堰が塩水侵入に及ぼした影響，水工学論文集，第 48 巻，pp.1201-1206，2004。
- 5) 有田正光・橋本彰博・南澤公太郎：感潮域の塩水侵入の混合形態分類に関する研究，水工学論文集，第 49 巻，pp.1-6，投稿中，2005。
- 6) 建設省中部地方建設局：長良川河口堰調査報告書，1995。
- 7) 有田正光・鯉淵幸生：長良川河口堰が堰下流の塩水侵入に与えた影響，文部省科研費最終報告書，研究代表者：玉井信行 13305035，pp.17-40，2003。
- 8) 中村由行・藤野智亮：長良川河口堰下流域の溶存酸素濃度の動態，応用生態工学，5 巻 1 号，pp.73-84，2002。
- 9) 武田誠・松尾直規・酒井孝典・吉戸嘉浩：長良川河口堰下流の流動特性と DO 変動に関する研究，海岸工学論文集，第 48 巻，pp.426-430，2001。
- 10) 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，pp.369-378，2000。

(2004.9.30 受付)