感潮域の塩水侵入の混合形態分類に関する研究

THE CLASSIFICATION ON THE MIXING TYPES OF SALINITY INTRUSION IN THE TIDAL ESTUARY

有田正光¹・橋本彰博²・南澤公太郎³

Masamitsu ARITA, Akihiro HASHIMOTO and Kotaro MINAMISAWA

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 工博 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)

³ 学生会員 東京電機大学大学院理工学研究科(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂)

In this paper, study on a new concept concerning on the classification of the local mixing types of the salinity intrusion in the tidal estuary was conducted using monitoring data of the Nagara river estuary. Flow diagram on the mixing types (highly stratified type, partially mixed type, well mixed type) was proposed using newly introduced non-dimensional flow parameters which estimate the strength of tidal effects and buoyant force. Comparison between proposed concept of flow diagram on the mixing type and field data was conducted and it presents good agreements. Proposed flow diagram and flow parameters are useful not only for the classification of local mixing but also to understand the physical characteristics in the tidal estuary.

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

1. はじめに

長良川は下流域で揖斐川と合流して伊勢湾に流れ込む一級河川である。長良川では河口堰が洪水対策・水資源対策等を目的として 1988 年に着工され、1995 年 3 月に完工、試験運用を経て 1995 年 7 月より本格運用が開始されている。河口堰の運用後に堰下流域の底層の貧酸素水塊の長期発生や藻類の異常増殖等の水質変化が報告されるようになってきている¹⁾。この水質変化の原因は河口堰建設によって堰周辺の流れや環境諸量が大きく変化したことにあると考えられている^{2),3)}。この中で堰建設が塩水侵入に及ぼした影響とそれによる水質諸量の変化が特に重要であるとの認識から、著者らは既に堰建設が堰下流の塩水侵入の著しい成層化をもたらしたことなどを報告している^{4),5)}。しかし、堰建設が塩水侵入に及ぼした効果を詳細に論ずる為には、諸条件に応じて出現する混合形態の予測が重要であるが、この点についての既往の研究は不十分なものであるといわざるを得ない。このことを念頭に置いて、本研究では長良川におけるモニタリングデータの分析により、長良川のみならず他の河川でも使用しうる感潮河川の塩水侵入の混合形態分類の為のパラメータの導入と、それを使用した分類法の問題を提案することを目的

とする。

2. 長良川の観測データおよび提案する 局所的混合形態分類の概念とパラメータ

長良川では河口堰の運用に伴う水質変化を調べることを目的としてモニタリング委員会が設置され、自動監視装置による各種水質項目の 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⁶⁾。自動監視装置の設置位置は下流よりジョー(揖斐・長良川-0.5km),イーナ(揖斐・長良川 3.0km),イセ(長良川 6.4km),ナガラ(長良川 13.6km),トカイ(長良川 22.6km),ナンノー(長良川 28.4km),ヤープ(長良川 31.2km)である。なお、河口堰の設置位置は河口より 5.4km 地点であり、堰運用後はジョー(-0.5km),イーナ(3.0km)の 2 地点は堰下流域となる。本研究ではこのモニタリングデータについて考察するが、河口堰完工から本格運用までの試験運用期間は不規則な堰からの放流が実施されている為に考察の対象から除外することとした。

ところで、一般には河口部から上流に遡上する塩水侵入の混合形態は、河川縦断面内の塩水侵入の全体像に対して、弱混合型・緩混合型・強混合型、に分類される(以下では、これを「全域的混合形態分

類」と称する)。しかしながら、現地観測では全域としての塩水侵入が塩水楔(混合形態は弱混合)と見なせる場合でも、河口付近では強混合であり、上流に向かって弱混合化していることはよく観察される。これは上流ほど下記に述べるタイダルプリズムが減少するためである。以下ではこのような任意の地点の上下層の混合形態分類を「局所的混合形態分類」と称する。本報では局所的混合形態を知ることが環境評価の上でしばしば重要であること、また、全域的混合形態は局所的混合形態の集合と位置づけられることから局所的混合形態分類について考察を進めることとする。

(1) 過去に提案された混合形態分類指標と

本報で提案する混合形態分類指標

全域的混合形態分類については須賀の研究⁷⁾や Simmons の研究⁸⁾が挙げられ、局所的混合形態分類の指標については Fischer⁹⁾によるものが挙げられるがいずれも古い研究であり、最近の特筆すべき研究例はないと考えられる。また、これらの既往の研究は現地データによる検証や汎用性に問題があるとともに、その物理的メカニズムを表現する為には混合形態分類のために導入されたパラメータが不足していると考えられる。そこで、本研究では局所的混合形態分類のための新たな指標を提案した上で、それを使用した混合形態分類法について考察する。

(a) 導入するパラメータ

局所的混合形態分類の為には、①河川流によって供給される浮力と潮汐流による混合促進力の比、②塩水の海域から河川内への侵入力(侵入度合)の2つを考慮して以下のパラメータを導入する。

$$\alpha = P_T / Q_{FT} \quad , \quad F_d \quad (1)$$

ここに、 Q_{FT} は1潮汐間の上潮時：T(干潮時～満潮時)の間に海に流出する総河川水量、 P_T は同時に海から河川に流入する総海水量(タイダルプリズム)、 F_d は潮汐による変動の経時平均的な層平均密度フルード数である。以下に α と F_d の算定法と物理的意味についてより具体的に述べる。

(b) パラメータ $\alpha = P_T / Q_{FT}$ の算定法と物理的意味

導入したパラメータ $\alpha = P_T / Q_{FT}$ において P_T は潮汐による水深の変化が河川感潮域で一定と仮定して次式で定義される。

$$P_T = \Delta \eta A \quad (2)$$

ここに、 $\Delta \eta$ は上潮時(干潮時～満潮時)の潮位変動量(以下では潮汐振幅と称する)であり、本報では名古屋港の潮位データを準用して定める。 A は任意の地点の上流の、長良川と揖斐川を合計した感潮域面積であり既存の報告を参照して河口から31km

表-1 各自動観測地点上流の感潮面積: A

	堰建設前	堰建設後
Jyo(-0.5km)	19.4km ²	11.0km ²
Ina(3.0km)	15.5km ²	7.11km ²
Ise(6.4km)	7.85km ²	
Nagara(13.6km)	4.96km ²	

までを感潮域と仮定してその面積を航空写真から読みとり定めた。表-1は各自動観測地点における感潮面積を示す。同表に示すように上流ほど干潮面積が小さくなること、堰建設前に比較して堰建設後は干潮面積が著しく小さくなっていることが特徴である。また、堰建設後の6.4kmと13.6kmのデータが欠落しているのは同地点が堰上流に位置する為である。

一方、 Q_{FT} は潮汐による変動分を除いた河川自流量を Q_f として次式で定義される。

$$Q_{FT} = T Q_f \quad (3)$$

ここに、 T は上潮時の平均的時間をとって $T=6$ 時間とし、 Q_f については、堰運用前は墨俣地点(河口から長良川上流39km地点)の、堰運用後は堰地点の流量(堰流出流量)を使用する。

従って、 P_T は潮汐流流速 u_t の、 Q_{FT} は河川流速 u_f の大きさを表す為の指標となる。よって、 α のオーダー O は、次式で与えられ、 α が大きいほど潮汐流の効果が強くなることを意味している。

$$\alpha = P_T / Q_{FT} \sim O(u_t / u_f) \quad (4)$$

(c) F_d の算定法と物理的意味

任意の地点の層平均密度フルード数 F_{dl} は次式で定義される。

$$F_{dl} = (Q / A_c) / (g'H)^{1/2} = \{(Q_f + Q_t) / A_c\} / (g'H)^{1/2} \sim (u_f + u_t) / (g'H)^{1/2} \quad (5)$$

ここに、 Q は河川流量で $Q_f + Q_t$ 、 Q_t は潮汐流量(潮汐によって駆動される流量で下流向きを+とする)、 u_f は河川自流速、 u_t は潮汐流流速、 H は河川横断面内の平均水深、 $g' = (\Delta \rho / \rho_b) g$ 、 $\Delta \rho = \rho_b - \rho_f$ 、 ρ_f は河川水の密度、 ρ_b は底層の密度、 A_c は河川の流水断面積、である。

ところで、 F_{dl} の潮汐の効果を除いた経時平均的な値を F_d とすると、塩水楔先端で定義される F_d の値 F_{do} は河川密度フルード数と称され、その値が小さいほど、河川流に対する相対的な塩水侵入力が増加して塩水侵入長が長くなることが知られている¹⁰⁾。ここでは観測事例のほとんどない一般的な河川においても使用しやすいように、塩水侵入力を表すパラメータは F_d の海域における値として定義した次式の F_{ds} の値を使用する。

$$Fds = (Qf/Ac) / (g_s Hs)^{1/2} \quad (6)$$

ここに、添字 s は河口端での値であることを示し、本報ではジョー(-0.5km)での値を採用する。また、 g_s' の計算における ρ_b はモニタリングデータの河床より 50cm 高い地点の密度を、 ρ_f は十分上流で海域の塩分の影響を受けていないと考えられるトーカイ(長良川 22.6km)での密度を採用する。なお、密度は観測により得られている塩分濃度と水温からクヌーセンの式より計算して求めた。ここで、 Fds は河川全体の塩水侵入力の代表量として導入されたものであり、局所的な $\Delta \rho$ で定義されたものでないことに留意されたい。

(2) 混合形態分類の概念と模式図

(a) 局所的混合形態分類指標と定義

以下では上下層混合を、上層塩分濃度(2割水深) C_s と下層塩分濃度(底層:河床より 50cm) C_b の時系列データより 25 時間移動平均値 $\overline{C_s}$, $\overline{C_b}$ を求め、 $\beta = \overline{C_s} / \overline{C_b}$ を計算して論ずる。なお、本報では C_s , C_b と β の時系列を参照しながら局所的混合形態を新たに以下のように定義した。

弱混合: $0 \leq \beta < 0.3$: 時系列データの上下層塩分濃度が完全に分離されて、上層塩分濃度の最大値が下層塩分濃度の最小値を上回らないケース。

緩混合: $0.3 \leq \beta < 0.7$: 弱混合と以下の強混合の中間的な挙動を示す。つまり、下層は弱い潮汐変動には追従できないが、上層は潮汐に対応した変動を示す。また、上層塩分濃度の最大値が下層塩分濃度の最小値を上回る時系列を示すケース。

強混合: $0.7 \leq \beta \leq 1.0$: 潮汐と上下層の塩分濃度の変動が強い相関を持ち、上潮で上下層塩分濃度上昇、下潮で上下層塩分濃度の低下というように潮汐の変動と一致する塩分濃度変動が観察され、また、上下層の塩分濃度の差は小さいケース。

(b) 局所的混合形態分類の概念図

以上に導入した α および Fds と β の関係の概念図を図-1に示す。同図のように α が大きくなるとともに潮汐流効果が強くなり、上下層混合が促進されて β が大きくなると考える。上下層混合の原因としては、その他にも河床の凹凸による乱れの発生、上潮時の塩水侵入先端部の密度カレントに伴う乱れの発生、などのさまざまな原因が考えられる。なお、その詳細のメカニズムについての議論は紙面の都合で割愛する。

一方、 Fds の値が大きくなると塩水の侵入力が弱くなり、塩水侵入長が短くなるので任意の観測点における塩水層厚は薄くなる。その結果、上下層混合が弱体化し β の値は小さくなると考えられる。この事を表すために図-1で、 $Fds \rightarrow$ 大、 $\beta \rightarrow$ 小となるよう

図-1 α , Fds と β の関係の概略図

に描いている。

要するに α が大きくなるほど強混合化し、 Fds が大きくなるほど弱混合化すると考える。以下では図-2の理解を深めるための補足的な説明と関連するメカニズムの要点を箇条書きにして示す。

①概念図は潮時平均的挙動を示しているが、潮汐による経時変化を受ける場合についても同図を準用して考察できる。例えば $\alpha = \alpha_1 = \text{const.}$, $Fds = k_2$ (b 点) の場合、 Fds は上潮時に最小値: a 点を、下潮時に最大値: c 点をとる。つまり、b 点で与える混合状態を平均的混合状態として、上潮時に強混合化、下潮時により弱混合化するという現地でよく観察される現象を概念図を使用して説明できる。

②図-1中の曲線: $0 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C$ は塩水侵入限界を表す曲線である(β の下限値)。河口で描かれる概念図の場合には同曲線は $Fds=1$ となる条件を示し、それより下にはデータは存在しない。なお、同曲線は河口上流では考察する地点への塩水侵入限界を表す Fds の値を採り、 $Fds < 1$ となる。

③ $\alpha = \alpha_1 = \text{const.}$, $Fds = k_2$ (b 点) の状態から、河川流量: Qf のみが 2 倍に増加すると $\alpha = \alpha_1/2$, $Fds = 2k_2$ (d 点) に遷移する。また、 Fds の潮汐による変動幅(a 点 - c 点)は小さくなる(a' 点 - c' 点)。要するに、 Qf の増加によって弱混合化するとともに混合形態の経時変化は小さくなる。一方、再び流量が元に戻るときには d 点から b 点に強混合化を伴いながら遷移することになる。

④概念図で α が大きくなると β の下限値も大きくなり、弱混合化しないように描いているのは、 α が大きい場合には下潮時でも強混合の状態が維持されることを念頭に置いたものである。

3. 観測結果と混合形態分類の概念図の比較

本章では図-1に示す概念図の定性的妥当性をモニタリングデータを用いて検証する。

(1) 時系列データの分析と考察

(a) 出水と成層化

図-2は河口堰運用前の 1994 年 5 月の 3km 地点の

図-2 1994年5月の時系列(3km, α は0.5km, 堰運用前)

図-3 α と β の関係(1994年5月, 3km, 堰運用前)

α , F_{ds} , Q_f , η (潮位), $\bar{\eta}$ (η の25時間移動平均値), β および塩分濃度の時系列を示している。同時系列は Q_f がほぼ一定の期間と大きく変化する期間を同時に含み、概念図の検討に適切である。

また、図-3は図-2の時系列より β , α , F_{ds} の値を8時間毎に読みとり、 β の値を α および F_{ds} の値の1日遅れとしてプロットしたものである。これは図-2より分かるように β の値の変化は α および F_{ds} の値の変化に概略1日遅れることを考慮したためである。以下に図-2, 図-3から得られる知見を箇条書きにして示す。

①概念図に示すように出水時の Q_f の増加によって F_{ds} の増加と α の減少、その結果としての弱混合化 (β の減少) がもたらされている。この傾向は、当然ながら出水規模が大きいほど強くなる。ただし、図-3において F_{ds} が大きいケースは α が小さいので F_{ds} の効果が分かりづらいが、同一河川のデータで議論しているための限界であると考えられる。よって、 F_{ds} の効果についてはより直接的に図-2, 図-5 (後述) の時系列を参照されたい。

②既述のように出水後、約1日遅れで β の急激な減少が観察されるが、これは長良川の同地点に特有なものであることに留意する必要がある。

③図-3より F_{ds} が大きいほど、 α が小さいほど β が小さくなるという概念図に示した傾向が裏付けられている。ただし、 F_{ds} が0.01～0.02では概念図の特徴と一致しない。このような現象のメカニズムには様々な要因が考えられるが、一部の要因につい

図-4 1994年8月の時系列(堰運用前)

図-5 1998年2月の時系列(堰運用後)

ては後述する。

(b) 潮汐による局所的混合形態の変化

図-4は河口堰運用前の1994年8月の時系列を示している。同図で8/1～8/18の安定期においては河川流量が $Q_f \sim 20 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度と極めて小さく、 α の値と変動幅が大きくなるので、潮汐効果が混合形態に与える影響を検討するのに適切な事例である。なお、 α については0.5kmの他に3kmにおける値を、混合諸量については3kmの他に0.5km, 6.4km, 13.6kmの時系列を併せて示している。

図-4より α の値の時系列は、上流ほど P_t の値が小さいために、3kmより0.5kmの方が全体として小さい値を示し、また、より弱混合化していることが分かる。同様により上流ほど弱混合化が著しいことが分かる。

一方、3kmの時系列に顕著なように、小潮期間には弱混合、大潮期間には強混合と、潮汐による α の値の変動によって混合形態が大きく変化している。また、この混合形態の変化は図-2の流量安定期 ($Q_f \sim 50 \text{ m}^3/\text{s}$) と比較しても大きいことが明らかである。

図-6 堰運用前の α と β の関係
(1994年5月～1995年6月, -0.5km地点)

図-7 堰運用後の α と β の関係
(1995年7月～1999年12月, -0.5km地点)

図-8 α と β の関係
(1994年5月～1999年12月, -0.5km地点)

この知見は概念図の妥当性を裏付けている。

(c) 堰運用前後の比較

図-5は堰運用後の1998年2月の時系列を示す。同図の2/1～2/13と図-2の5/1～5/12(堰運用前)はともに $Q_f \sim 50 \text{ m}^3/\text{s}$ であり(両図で F_{ds} の値はほぼ同一), 堰運用が混合形態に与えた影響を直接評価できる。両図の比較より堰運用による P_t の減少の結果, 堰運用後の α の値とその変動幅の減少がもたらされ, 著しい成層化が進行したことが分かる。

(2) β と α の関係の整理と概念図との比較

前節では河口堰運用前後の水理・混合諸量の時系列の事例および図-3に α と β の関係の一事例を示し,

提案した局所的混合形態分類の概念の基本的な妥当性を示した。ここではモニタリングデータ全体を対象にして提案する概念の妥当性を検討する。

図-6は堰運用前の-0.5km地点の1994年5月～1995年6月の全データの α と β の関係を纏めてプロットしたものである。全体として β は α に伴って増加すること, 任意の α に対して β は塩水侵入限界を表す下限値を持つこと, などの概念図と一致する特徴が認められる。なお, -0.5km地点以外の上流の任意の地点でも類似の作図が可能である。ここでは, 紙面の都合で, 上流ほど成層化が進行して(P_t の減少), α に対する β の値とその下限値(図-1で曲線: $0 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C$ の位置の低下)が小さくなる, 対象地点の水理的・地形的条件の影響を強く受けることを指摘するに留める。

一方, 図-7は堰運用後の-0.5km地点の1995年7月～1999年12月の全データの α と β の関係を纏めてプロットしたものである。同図は図-6と類似の特徴を持っているものの, データが全体として図の左下にプロットされているが, これは堰運用が河口域の成層化をもたらしたことを意味している。また, 図-6に比較して F_{ds} の取る範囲が大きいの堰運用後のデータ数が運用前より多く, 水理量の変化が大きいためである。

図-8は-0.5km地点の堰運用前後の全データの α と β の関係を纏めてプロットしたものである(図-6, 図-7を重ね合わせたもの)。同図に示すように堰運用の前後のデータが違和感なく同一図上にプロットされている。この事は導入した無次元パラメータを使用すれば, 季節や堰運用の有無に関係なく現象が説明できることを示している。

ところで, 図-6～図-8では F_{ds} の β に与える影響が不明瞭であるが, 先ず, これらの図はデータ全体の特徴を把握するために基礎的特性と一致しないケースや長良川に特有な現象を示す場合を含めて全てのデータをプロットしている点を指摘したい。また, 出水は α の減少と F_{ds} の増加をもたらすが, その規模や持続時間は塩水侵入に異なる非定常プロセスをもたらすと考えられるものの, 概念図には十分考慮されていない。これらが異なる時系列データを重ね合わせた図-6～図-8において F_{ds} の効果をわかりにくくしている原因であると考え。さらに, その他の原因の抽出(4章に一部の原因について考察した)と分析は残された問題である。

要するに, 図-1は図-2, 図-5および割愛した多くの時系列データから描いた, F_{ds}, α を一定と仮定した場合の定性的な概念図である。従って, 定量的な分類図の作成は残された課題となるが, 広範囲で時間的に持続した $F_{ds}, \alpha \sim$ 一定の条件でのデータを得ることは実河川では極めて困難であると考え。

4. 提案する局所混合形態分類法に付加的に考察すべき項目

図-3の $Fds=0.01 \sim 0.02$ の α と β の相関より分かるように、導入した概念に付加的に考察すべき諸項目が存在することは明らかである。本章では、その一事例として潮汐による非定常性の効果が塩水侵入に及ぼす効果について簡単に考察する。

導入された局所的混合形態分類の概念では、潮汐の効果 $\Delta \eta$ (潮汐振幅) は潮汐による非定常効果を表すパラメータとして α の中に、塩水侵入力は Fds の値で別々に考慮されている。しかしながら現実には Fds の他に潮汐の持つ非定常性が塩水侵入力に及ぼす効果も無視できない。

ここで、定常(潮汐がない)で $Fds =$ 一定の塩水侵入の場合の塩水侵入長を L と仮定する。この状態から潮汐によって塩水侵入が非定常運動する場合について考える。潮汐による非定常運動を伴う場合の塩水侵入長は上潮時に大きくなり、下潮時に小さくなるが、その潮時平均値 L_m は、潮汐の変化に塩水侵入の先端部の進行と後退が遅れて生ずる為に定常の塩水楔長より短くなる。このように、 Fds のみならず潮汐による非定常性の強さも補助的に塩水侵入長を定める指標となる。

また、潮汐による非定常性が強くなると ($\Delta \eta$ が大きくなると)、下流側では強混合化がもたらされるものの上流側では塩水侵入長の減少に伴う下層塩水層厚の減少に伴って弱混合化がもたれやすくなる。それに加え、塩水遡上の先端部に形成される密度カレントの成長に伴う乱れが強くなり、下流側の強混合化が促進されることが考えられる。

以上に本報で導入した混合形態分類の概念に付加的に考慮すべき項目の事例として潮汐の非定常性を取り上げた。この他に検討されるべき要素としては、長良川に特有な場合を含めて、①大規模出水時の伊勢湾海水との干渉、②揖斐川と長良川合流部の両河川の干渉、③河口堰下流の背割堤の船通し部を通した両河川水の交換⁴⁾、④塩水侵入長が長い場合の潮汐に対する応答特性とそれが上下層混合に及ぼす効果、などが挙げられる。

5. まとめ

本研究では塩水侵入を伴う河川感潮域の局所的混合形態分類のための新たなパラメータを導入するとともに、それを使用した混合形態の分類法を提案した。また、その概略の妥当性を長良川のモニタリングデータによって検証した。

ところで、図-8に長良川河口地点での混合形態分

類図を示した。一般には河川によらず河口条件として河口では上層密度フルード数がほぼ1の値をとると考えられている。従って、同図は他河川の河口部のデータとも比較検討が可能であると考ええる。一方、上流側の任意の地点において描かれる $\alpha - \beta$ 図には斜面勾配が塩水侵入長やタイダルプリズムに与える影響や河床の凹凸による上下層混合などの各河川に特有の条件が反映されるので、作成された図は対象とした河川の当該地点のみに適用されるべきものであることに注意を要する。

なお、局所的混合形態分類と全域的混合形態分類との関連、混合形態の時間変化(本研究では潮時平均的な混合形態を論じるために β には25時間移動平均値を使用している)、流況・気象・地形的変化などが混合形態に与える影響、さらには、本文中に示した潮汐の非定常性の影響等の基礎的概念を逸脱する項目の抽出と分析は残された課題である。

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) 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。
- 4) 鯉渕幸生・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。
- 5) 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。
- 6) 建設省中部地方建設局：長良川河口堰調査報告書，1995。
- 7) 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。
- 8) Simmons H.D.: Field experience in estuaries, *Estuary and Coastline Hydrodynamics*, A.T. Ippen, ed., McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N.Y., 1966。
- 9) Fisher, H.B.: Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries, *Jour. Fluid Mech.*, vol.53, pp.671-687, 1972。
- 10) Arita, M. and Jirka G.H.: Two-layer model of saline wedge, I and II, *Jour. of Hydr. Engrg.*, Proc. of ASCE, Vol. 113, No.10, pp.1229-1263, 1987。

(2004. 9. 30 受付)