

河口における密度流的水理条件に関する考察

李 文 沃*

1. ま え が き

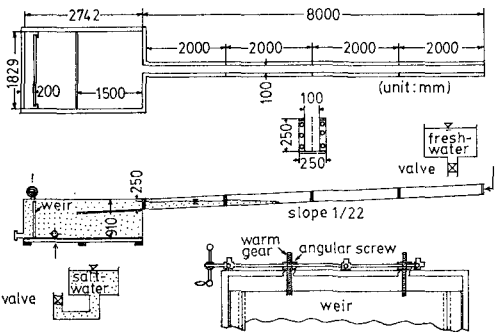
幾何学的に河幅が急拡大する河口部は塩水くさびや河口流出などの解析を行うにあたり、境界条件を与える位置となる。それゆえ、河口部での密度流的水理条件を明確にすることは工学的に非常に意義のあることと考えられる。本研究は河口での密度流的水理条件を明らかにすることを目的とし、定常塩水くさびの存在する流れ場における河口付近の水理現象に関する実験を行い、流れ方向の界面形状の変化と混合現象に起因する躍層厚の発達についての考察を行ったものである。また、これと関連した河口水位の変化についても若干の検討を加える。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概要を図一に示す。河川部は 1/22.5 の勾配を持つ長さ 800 cm、高さ 25 cm、幅 10 cm のアクリル製の矩形断面開水路で、海域部は長さ 274 cm、幅 183 cm、高さ 91 cm の鋼鉄製の水槽を用いている。水槽には河口での水深急増により局所流効果为了避免のために河口より沖側 150 cm までは開水路部と同じ勾配で底板を設けた。

塩水くさびは水槽内に一定濃度の塩水を満たした後淡水を水路の上流端より流して生じさせ、塩水深の低下を抑制するために水槽の下流端の底部より塩水の補給を行った。塩水くさびが定常に達したことを確認してから塩分濃度および流速の測定を開始した。塩分濃度は導電率計で測定し、出力電圧はパソコンに入力してAD変換を行った。流速の測定は河道内では可視化手法によって、海域ではプロベラ流速計を用いて行った。可視化のトレーサーとしては蛍光染料を混入したキシレンとクロロベンゼンの混合溶液を注射器により注入することで油滴を作り、暗室中上方からスリット照射して上・下層での粒子の軌跡を撮影した。その軌跡を画像解析して流速を求めた。一方、界面はメチレンブルー溶液またはウラン溶液により可視化して観察した。

表一に実験条件を示す。



図一 実験装置の概要

表一 実験条件

Run	淡水流量 Q_1 (cm^3/sec)	相 対 密度差 δ	河 口 全水深 h_{00} (cm)	河口上 層水深 h_{10} (cm)	上層 Reynolds 数 Re_1	河口での密 度 Froude 数 F_{d10}
1	208	0.0201	20.0	3.1	1483	0.888
2	255	0.0079	20.0	5.0	1821	0.818
3	360	0.0083	20.3	6.0	2791	0.788
4	390	0.0175	20.1	5.0	2791	0.844
5	527	0.0180	20.1	6.5	3761	0.767
6	527	0.0277	20.1	5.3	3761	0.823
7	527	0.0181	17.5	5.8	3761	0.909
8	527	0.0277	17.6	5.2	3761	0.866
9	700	0.0148	20.2	6.9	4991	0.923
10	700	0.0281	20.2	6.1	4991	0.884
11	700	0.0183	17.6	6.9	4991	0.910
12	700	0.0278	17.6	5.9	4991	0.934
23	870	0.0178	20.3	8.1	6213	0.903
14	870	0.0278	20.2	6.6	6213	0.983
15	870	0.0180	17.6	7.5	6213	1.008
16	870	0.0276	17.7	6.8	6213	0.942
17	1007	0.0179	20.3	8.2	7191	1.024
18	1007	0.0278	20.3	7.2	7191	0.998
19	1007	0.0179	17.7	8.1	7191	1.043
20	1007	0.0277	17.7	7.2	7191	1.001
21	1212	0.0179	20.4	9.3	8657	1.029
22	1212	0.0277	20.4	8.2	8657	0.991
23	1212	0.0181	17.8	9.0	8657	1.066
24	1212	0.0278	17.8	8.0	8657	1.026

* 正会員 工博 大韓民国麗水水産大学助教授 海洋土木工学科

3. 結果とその考察

(1) 鉛直方向の密度分布と界面形状の変化

二成層流における鉛直方向の密度分布形についてはしばしば Holmboe モデルが用いられている。このモデルと実験値とを比較したのが図-2 である。同図中の実線が Holmboe モデルであり、次式で与えられる。なお、縦軸の原点は、密度 ρ が上・下層の密度 ρ_1, ρ_2 の相乗平均値となる水深を取っている。

$$\rho = \bar{\rho} \exp\{-\alpha \tanh(z/\delta)\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\bar{\rho}$ は上・下層の密度の相乗平均値 ($=\sqrt{\rho_1\rho_2}$)、 α は上・下層間の密度差を表す無次元パラメーター、 δ は特性躍層厚さである。同図で見られるように、河道内・海域ともに本実験結果は Holmboe モデルを十分満足しており、Dermisiss ら (1985) による定常塩水くさびでの実験結果とも良好に一致する。そこで、本研究においては $\rho = \bar{\rho}$ となる水深を界面、 δ を躍層厚と定義する。

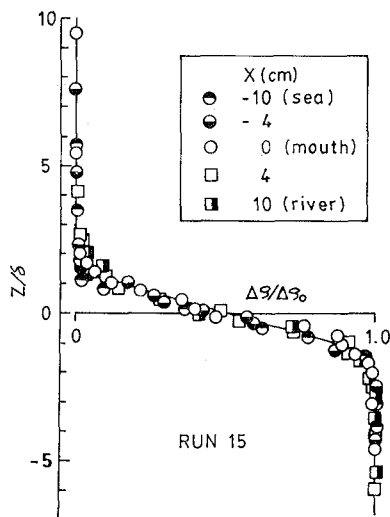


図-2 鉛直方向の密度分布

図-3 は流れの中心軸上で測定した界面形状の変化を示す。図(a)は河口での上層密度 Froude 数 F_{d10} が $F_{d10} \approx 0.85$ の場合を、図(b)は $F_{d10} \geq 0.82$ の場合を表す。ここで縦軸、横軸はそれぞれ河口での上層水深が無次元化したものである。同図より、界面形状の全体的な傾向は、 $x/h_{10}=2$ 付近から変化し始め、河口を少し出た位置で界面勾配は最大となることが分る。これは河口での水路幅の急拡大の影響が水路内にまで及んでいるためと考えられる。また F_{d10} が異なる図(b)を注目すれば、密度 Froude 数が大きくなるにつれ、界面勾配が急になってゆく傾向にあることが分る。この傾向は定性的には福岡ら (1982) による実験結果と一致する。それゆえ、河口付近での界面形状は密度 Froude 数によって決定されると

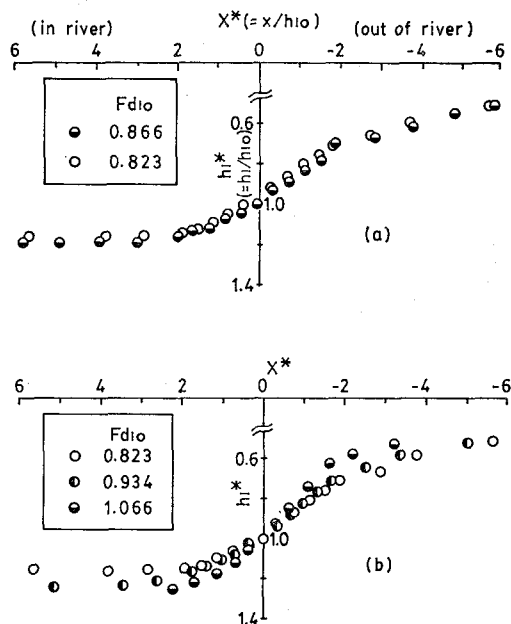


図-3 河口付近での無次元界面形状

いえよう。

連行を無視したときの界面形状は一般に次式に示す定常漸変一次元二層流の基礎式で記述される。

$$\frac{dh_1}{dx} = \frac{1}{\varepsilon(1-F_{d1}^2)} \{-i_{f1} + i_{f2}\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

上式によれば、 $F_{d1} \geq 1$ の場合、河口付近では界面勾配が無限大になるか、もしくは実現象とは逆の傾向となり、式(2)では図-3 の界面形状がうまく説明できない。したがって、界面形状を記述するためには界面付近での界面の曲がりやを考慮した急変流解析を行う必要がある。以下にその理論の概要について述べる。

二成層流における上・下層の流れがポテンシャル流であると仮定すると、上・下層についてそれぞれのベルヌーイの式が成立する。つまり、

上層において

$$\rho_1/2(\phi_{1x}^2 + \phi_{1y}^2) + \rho_1 g y + P_1 = \rho_1 R_1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

下層において

$$\rho_2/2(\phi_{2x}^2 + \phi_{2y}^2) + \rho_2 g y + P_2 = \rho_2 R_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 R_1, R_2 は上・下層における単位幅当りのエネルギーであり、 g は重力加速度である。添字 x, y は x および y に関する微分を示す。また ϕ は流れ関数、 ρ は密度、 P は圧力、添字 1, 2 は上層・下層を示す。

界面は一つの流線であるので、界面に沿って式 (3) および式 (4) が成立し、また界面においては $P_1 = P_2$ という条件から界面高さ $y = \eta$ とすると次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \rho_1 R_1 - \rho_2 R_2 = & \rho_1/2(\phi_{1x}^2 + \phi_{1y}^2) - \rho_2/2(\phi_{2x}^2 + \phi_{2y}^2) \\ & + (\rho_1 - \rho_2) g \eta \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

今、下層での流速を無視すると、界面高さ η は次式で表わされる。

$$\eta = 1 / \{ (\rho_2 - \rho_1) g \} \{ \rho_1 / 2 (\phi_{1x}^2 + \phi_{1y}^2) - \rho_1 R_1 + \rho_2 R_2 \} \quad \dots\dots\dots (6)$$

また河口から十分離れた上流側において静水圧近似が成立する水深の界面におけるベルヌイ式は次式のようになる。

$$\rho_1 R_1 = \rho_1 / 2 (q_1 / h_{1f})^2 + \rho_1 g h_{1f} + \rho_1 g \eta_f \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\rho_2 R_2 = \rho_2 g h_{2f} + \rho_2 g \eta_f \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 q は単位幅当りの流量、 h は水深、添字 f は静水圧近似が成立する水深での値を示す。

以上より、界面での流速が分れば、式(6)~(8)を用いて界面高さが求められる。しかし、界面での流速分布は界面形状が分らなければ求めることができない。そこで、実験により得られた界面形状のもとにリラクゼーション法を用いて流れ関数を求め、次に同式による界面形状を求めることにした。

図-4 はその解析結果と実験値との比較を行ったものである。同図より、漸変一次元解析では界面勾配が小さくほぼ水平であったのに対し、急変流解析では実験で得られた河口付近の界面形状の変化が良好に再現されていることが認められる。

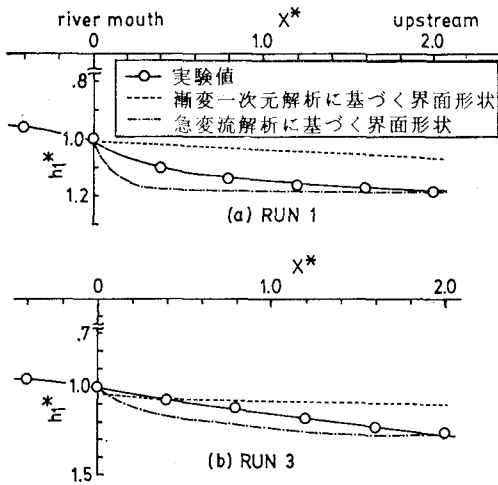


図-4 河口部での界面形状の実験値と計算結果との比較

(2) 躍層厚さ

鉛直方向の密度分布を Holmboe モデルに近似した場合に定義される躍層の特性的厚さ(または界面層の厚さ) δ の流下方向の変化を図-5 に示す。縦軸は躍層厚さを各測点における淡水深により、また横軸は流下方向の距離を河口での淡水深によりそれぞれ無次元化している。同図によると、躍層厚は河道内においてはほぼ一定値を取っているが、河口付近から徐々に増加し始め、河道外に出ると、躍層厚は急に大きくなる。また淡水流量が多

いほど河口を出てからの界面形状の変化率は大きいことが認められる。

これは河口より沖側へ向かって淡水深は減少するが、流速は逆に増加するため上層の密度 Froude 数が大きくなり、つまり連行量が増加する。その結果、躍層厚が流下に伴って増大するものと推察される。

一方、図-6 は本実験で得られた層平均 Richardson 数 R_i に伴う躍層厚さの変化を示す。縦軸は各測点における淡水深で無次元化されている。なお図中の黒塗り記号は河道外での値、白抜き記号は河道内での値をそれぞれ表す。同図より、躍層厚さは R_i に弱い依存性を有することが分る。同結果は次式の回帰曲線によって与えられる。

$$\delta / h_1 = 0.058 + 0.0485 R_i^{-1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

本実験の R_i 数は 0.4~1.15 という狭い範囲であるために、 R_i が大きくなるにつれて躍層厚が一定値に漸近するような傾向は見られなかった。また R_i 数の 1.0 の付近において躍層厚は上層水深の約 1 割程度の値を取っている。これは Crapper ら (1974) が示した $\delta / h_1 = 0.23 \sim 0.24$ よりかなり小さい。この違いは躍層厚さや R_i の定義そのものに起因していると考えられる。

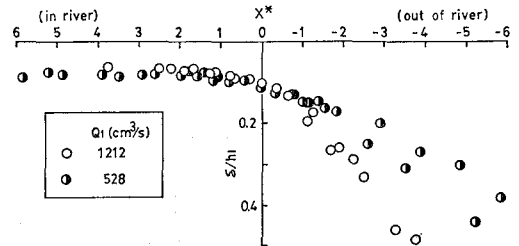


図-5 無次元躍層厚の流下方向の変化

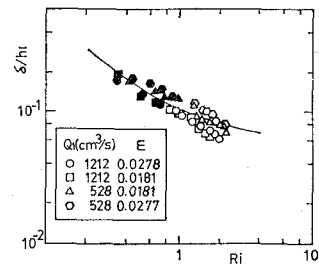


図-6 R_i に伴う無次元躍層厚の変化

(3) 河口での上層水深と水理量との関係

須賀(1979)は連行を考慮したときの河口での水理条件を、Stommel ら(1953)と同様の仮定の下で $F_{d10}^2 + F_{d20}^2 = 1$ と導いた。ここで、 F_{d10} 、 F_{d20} はそれぞれ河口での上層および下層での密度 Froude 数を表わす。しかしながら、現地観測や室内実験の結果から、これらの条件が

必ずしも成立しないことが見い出されており、河口での水理条件に関して見直す必要に迫られている。

図-7(a), (b) は河口での密度 Froude 数 F_{d1} または $F_{d1}^2 + F_{d2}^2$ と下層水深 h_{10} との関係を示す。ここに、縦軸は河口での全水深 h_{00} で無次元化したものである。同図より、本実験においても河口では F_{d10} および $F_{d10}^2 + F_{d20}^2$ が必ずしも 1 とは限らず、 h_{10} 、即ち、河口での淡水深によって変化することが分る。

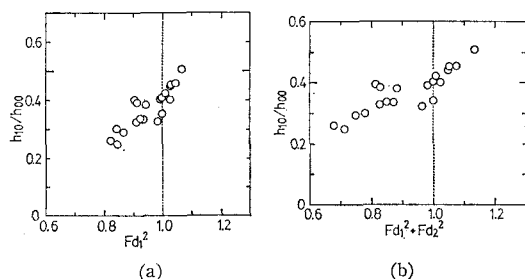


図-7 河口での上層水深と密度 Froude 数との関係

以上のような結果を理論的に検討するために福岡ら⁽¹⁹⁸²⁾と同様に任意点での圧力 P が静水圧とそれからの差圧 P' との和で表わされると考え、次式を得る。なお座標系は流れ方向を x 軸、鉛直上方を z 軸で表した。

$$\left. \begin{aligned} \text{上層;} P(x, z) &= \rho_1 g(s - z) + P'(x, z) \\ \text{下層;} P(x, z) &= \rho_1 g h_1 + \rho_2 g(i - z) + P'(x, z) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 s, i はそれぞれ水表面、界面位置を表わす。

二層間の連行が無視できると仮定すると、界面勾配を表わす基礎式は次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{dh_1}{dx} &= \frac{1}{1 - F_{d1}^2 \left(1 + \frac{P'_i}{\rho_2 u_1^2} \right)} \left\{ \frac{1}{\varepsilon g \rho_2} \left(1 + \frac{P'_i}{\rho_1 g h_1} \right) \frac{\partial P'_i}{\partial x} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\varepsilon g \rho_1 h_1} \frac{\partial}{\partial x} \int_i^s P' dz - \frac{f_i}{2 \varepsilon g h_1} u_1^2 \right. \\ &\quad \left. - \left(1 + \frac{P'_i}{\rho_1 g h_1} \right) \frac{f_i (1 - \varepsilon)}{2 \varepsilon g h_2} u_1^2 \right\} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

この式を Stommel らと同様に河口で分母=0 が成り立つと仮定すると河口での上層密度 Froude 数は次式で表わされる。

$$F_{d10} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{P'_i}{\rho_2 u_1^2}}} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 P'_i はリラクゼーション法を用いて求め、この時の $P'_i / \rho_2 u_1^2$ は 10^{-2} のオーダーとなり、 F_{d10} は 0.9 ~ 0.99 の範囲となる。これより、界面の曲りによる影響を考慮しても河口での水理条件はほとんど変わらないことが分る。

実際の河口部は上層を流れる河川水と下層から侵入し

てくる海水とが相互に影響を与えている水域であって、上層の流れは乱流、下層の流れは層流状態と考える。したがって、上層においては重力効果が粘性より卓越し、下層においては逆に重力より粘性効果が卓越していると推察される。それゆえ、河口での水理条件を従来どおりの上層密度 Froude 数のみで表現するのに代わって、上層・下層での流れの特性を考えたそれぞれの水理量で表現した方がより妥当であると思われる。そこで、上層においては F_{d1} を、下層においては R_{e2} を代表量として導入し、従来からの界面抵抗係数のパラメータである岩崎数 $\phi (= R_{e1} F_{d1}^2)$ と類似した水理量 $\phi' (= R_{e2} F_{d1}^2)$ を河口での水理条件を表わす一つのパラメータとして定義する。

図-8 に ϕ' と h_{10}/h_{00} との関係を示す。同図より ϕ' が増加すると、淡水深も増加する傾向にある。例えば、流量増加のように淡水側が塩水側より慣性力が相対的に大きくなる場合には淡水深が大きく ϕ' が小さくなる。また塩水の及ぼす粘性抵抗および淡水自身の浮力効果が卓越して来ると、淡水深が小さくなることを示しており、河口での水理条件が上・下層の連成作用により決定されることを意味している。しかしながら、定量的な把握を行うには測定資料が少なく、今後さらに研究を要する。

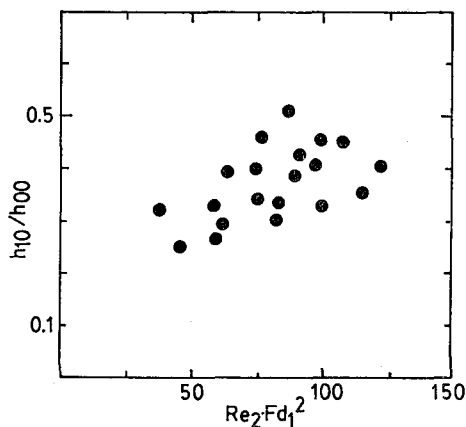


図-8 $R_{e2} F_{d1}^2$ と h_{10}/h_{00} との関係

(4) 河口水位に関する考察

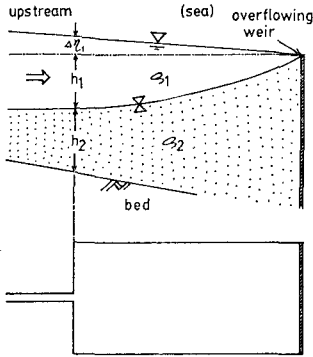
河口での水位は実際の河道計画を立てる場合においても不等流計算の原点となるため非常に重要な問題であるが、これに関連する知見は極めて少ないのが現状である。ここでは淡水流量の増減に伴う河口位置での水位の応答について取り扱うものとする。図-9 に河口流出に関する概念図を示す。

まず、淡水流量が変化してもその流動に関しては全く変化しない場合を想定する。即ち、密度の ρ_2 の流体の上にそれより軽い密度 ρ_1 の流体が浮いている状態を考

えてこのときの河口の下流端に対する水位上昇量 $\Delta\eta_1$ は近似的に次式となる。

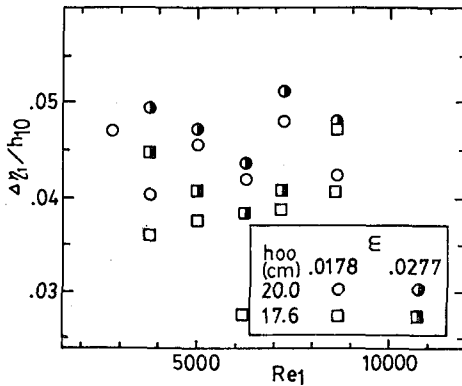
$$\left. \begin{aligned} \rho_1 g (h_1 + \Delta\eta_1) &= \rho_2 g h_1 \\ \text{ゆえに} \quad \Delta\eta_1 &= (\rho_2 - \rho_1) h_1 / \rho_1 \approx \varepsilon h_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

よって、 $\Delta\eta_1$ を河口での上層水深 h_1 で無次元化したパラメータは相対密度差 ε にはほぼ等しいことになる。



図—9 河口流出概念図

図—10 は $\Delta\eta_1/h_{10}$ と Re_1 との関係を示す。 ε が大きい場合に $\Delta\eta_1/h_{10}$ も大きくなるという傾向は見られるものの、 $\Delta\eta_1/h_{10}$ はすべての ε 値を上回っている。これは流出流の流動も全く考慮していないことに起因しているものと思われる。



図—10 Re_1 と $\Delta\eta_1/h_{10}$ との関係

4. 結 論

定常塩水くさびの存在する場合の河口での水理条件を支配するパラメータを実験的に検討し、次のような結果が得られた。

(1) 河口付近での界面勾配は、上層の密度 Froude 数が大きいほど急になり、河口を少し出た位置で最大となる。

(2) 躍層厚は層平均 Richardson 数の関数である。また躍層厚の流れ方向の変化率は淡水流量が多いほど大きい。

(3) 河口での密度 Froude 数は必ず 1 とは限らず、上層水深によって変化する。

(4) 河口の水位上昇量は相対密度差に比例するような傾向にある。

謝辞： 本研究は 1989 年度大韓民国文教部基礎科学育成研究費のご支援の下で行われたものである。本論文の作成にあたり、大阪大学工学部土木工学科室田 明教授、中辻啓二助教授に多大な御助言を頂き、また同大学水工研究室の中村浩一氏（現日本道路公団）、田中敬之氏（現和歌山県）には水理実験やデータの処理に御協力を頂いた。ここに記して、深く感謝したい。

参 考 文 献

- 須賀竜三 (1979)： 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，土研報告，1357 号，255 p.
- 玉井信行 (1980)： 密度流の水理，技報堂出版，pp. 127～149.
- 土木学会編 (1985)： 水理公式集，pp. 57～62.
- 福岡捷二・福嶋祐介・守屋祥一・新庄高久 (1982)： 密度流の流動機構と塩水くさびの河口条件，土木学会論文集，327 号，pp. 61～71.
- 室田 明 (1986)： 河川工学，技報堂出版，pp. 157～164.
- Crapper, P. E. and P. F. Linden (1974)： The structure of turbulent density interfaces, J. Fluid Mech., Vol. 65, pp. 45～63.
- Dermisiss, V. and E. Partheniades (1985)： Dominant shear stresses in arrested saline wedges, J. Waterway, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 111, No. 4, pp. 733～752.
- Stommel, H. and H. G. Farmer (1952)： Abrupt change in width in two layer open channel flow, J. Marine Res., Vol. 11, No. 2, pp. 205～214.