

感潮河口流の密度構造

吉田 静男*・藤井 浩之**

1. 序 文

野外におけるほとんどの河口二層流は、何某かの潮汐の影響を受け、周期的にその流れの状態や成層構造を変えてゆく。もちろん、潮差が十分に小さければ、流れの状態は定常に近く、従来からある、定常流における、塩水楔の形状を表現する式や、河口流出後の流況に関する研究の結果が、すべて、適用可能となり、したがって、成層密度構造も明らかとなる。しかし、潮差が著しく大きい場合には、混合も伴うようになり事柄が非常に複雑になる。本論文は、こうした、両極の状態をも含めた、感潮河口二層流の密度構造の変化を支配する要因をさぐり、その構造を表現する適切なパラメーターの導出を試みたものである。

2. 従来の結果における問題点の検討

河床が平滑で混合が無視できる場合の密度構造は、界面の形状のみ分かれば知ることができるが、この点に関しては柏村・吉田による多くの研究（たとえば、第13～20, 23, 24回海講講演集及び論文集）があり、実験および、野外観測を通じて、かなり詳細な知識が得られている。ただ、彼らの研究においては、河口における流速を河口条件として知られる $F_{i0}=1$ (F_{i0} : 河口における内部フルード数) から得て考察が進められており、現実に忠実でない部分があった。吉田・柏村¹⁾は、特に、微少流量の実験において、上述の手法に問題の生ずることを指摘し、実際の流速値を用いて、それまでの河口流出流況のパラメーターを再検討した。同様の修正は、従来、やはり河口条件を利用してまとめた混合が無視できる場合の非定常河口流出流況の支配パラメーター λ_0 ^{2), 3), 4)} に対しても施されるべきである。そこで、まずこの修正を行っておこう。

流況を支配するパラメーターとしては、河口での定常流下の淡水流速（断面平均値） U_{10} と、潮汐による変動流速振幅 u_{10} で構成される次の量

$$\lambda_0 = u_{10}/U_{10} \quad \cdots \cdots (1)$$

が適当と思われる。 λ_0 の意味するところは、 u_{10} が大きくなるにつれて、 U_{10} に与える影響も大きくなり、 $\lambda_0 > 1$ では淡水の流れが逆流に至ることを暗示しており、その値は、流況にも逐一对応している。ここでは U_{10} を河口条件から求めず、実測値を使用することになる。しかし、 u_{10} については、理論結果と実測値の一致度が良いので、以下の理論結果から求める。

$$u_{10} = Kg\eta_{10}/C_s \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 C_s , g , η_{10} はそれぞれ表面波速、重力加速度、潮汐振幅である。また、 K は進行波性の水路に対しては1とおけるが、定常波性のそれに対しては

$$K = |\tan kl| = 2\pi l/TC_s \quad \cdots \cdots (3)$$

(l : 水路全長, T : 周期) とする必要がある。なお、 U_{10} については、 $F_{i0}=1$ とは限らないという事実に基づき、これに実測値を使用するなら

$$U_{10} = \frac{Q}{b_0 h_{10}} = \left(\frac{\varepsilon g Q}{b_0} F_{i0}^2 \right)^{1/3} \quad \cdots \cdots (4)$$

から得ることもできる。ここに、 b_0 , h_{10} , Q は、それぞれ、河道の幅（一定）、河口での淡水厚さ、流量であり、 $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$, ρ_1 , ρ_2 は上、下層の密度である。かくして(1)～(4)式から最終的に

$$\lambda_0 = K \frac{g\eta_{10}}{C_s} \left(\frac{b_0}{\varepsilon g Q F_{i0}^2} \right)^{1/3} \quad \cdots \cdots (5)$$

と求まる。この λ_0 を用いて、従来の淡・塩二層流の河口流出流況⁵⁾を整理し直し、さらに、新たに得た野外の結果（石狩川、天塩川）をも付加すると、図—1に示す分類が可能である。図中 $\theta_0 = (\varepsilon g \nu)^{1/3}/U_{10}$ はクーリガン数である。この結果のうち、実験により得た分を、さらに詳細に表現すると、以下のごとくである（以下の表現は、混合が無視できれば、野外の結果にも適用できる）。

$\lambda_0 < 0.3$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{全潮時にわたって順流で、流況の変化は、ほぼ、無視できる。} \end{array} \right.$

$0.3 < \lambda_0 < 1$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{全潮時にわたり順流であるが、}\lambda_0\text{の増大につれて、一朝時にわたる流況の変化が著しくなる。} \end{array} \right.$

$\lambda_0 = 0$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{全潮時にわたり順流であるが、流況の変化が著しく、上流向きの変動流速が最大となる漲潮最盛時刻に淡水流れが} \end{array} \right.$

* 正会員 工博 北海道大学講師 工学部工業力学第2講座

** 学生員 北海道大学大学院工学部衛生工学科修士課程

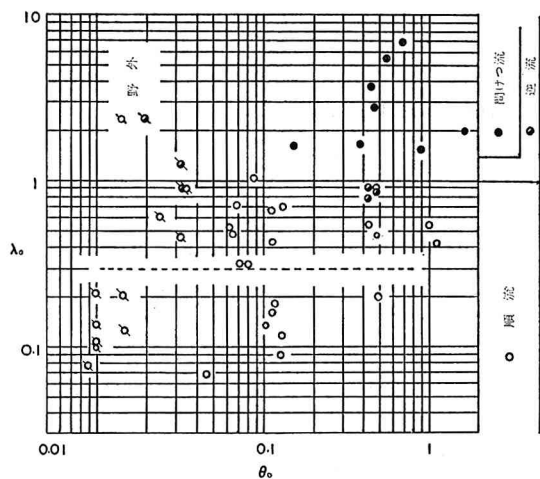


図-1

停止する。

- $1.0 < \lambda_0 < 1.4$
 $\left\{ \begin{array}{l} \lambda_0 \text{ の増大につれて、逆流の見られる時} \\ \text{間が長くなる。} \end{array} \right.$
- $\lambda_0 > 1.4$
 $\left\{ \begin{array}{l} \text{河口では、上流向きの変動流速が最大} \\ \text{値を示す頃に下層塩水が表面に露出す} \\ \text{る。この領域は、} \lambda_0 \text{ の増大につれて拡} \\ \text{大し、露出時間も長くなる。淡水の流} \\ \text{出は落潮期のみとなりその流出形式は} \\ \text{間けつのである。} \end{array} \right.$

上述の修正を施した従来の研究を総合すれば、河床に粗度要素のない場合の河口二層流の密度構造と潮汐の関係がほぼ明らかになる。ただ、未だに野外の河口で見出される潮汐周期の内部波の発生機構が明らかでないために、この効果を含めた高精度の密度構造の予測はできないことを指摘しておかなねばならない。

3. 感潮河口二層流の混合機構

潮差が大きければ、二層の混合が促進されるのが当然のことのように思われがちである。しかし、なぜそうなるのかという問には、未だ十分な答が用意できているわけではない。ただ、界面近傍のせん断流不安定によるか (internal mixing), または、河床上に発達する乱流に基づくか (external mixing) のいずれかであろうという予測は立つ。吉田⁶⁾によれば、河床の粗度要素から生ずるスパイラル渦が界面を破壊することが明らかになっており、前者がいわゆる強混合形式をもたらしほどの界面破壊の原因となることはないようである。実際に、無限小振幅波の成長率を計算してみても (直線化された密度および流速分布を有する4層モデルを適用した), 非粘性的には成長し得るが、粘性等の減衰効果を考慮すると、界面波の不安定による成長は望めないことが分る。この原因は、いかに潮差だけが大きくなろうとも変動流速

の振幅が大きくなるだけで二層間の相対速度があまり大きくなり得ないことにある。同様のことは沖合の二層の混合についてもいえる。ただ、沖合では水深が大きくなっているため、海底の粗度要素の影響が無く、専ら、河道で発生した粗度要素による渦が沖合の一時加速の界面を破壊することになる (写真-1 (1)). もちろん、こうした場面は、落潮時のみ観測され、漲潮時にはその渦の影響もなく、界面は著しく安定化する (写真-1 (2)).

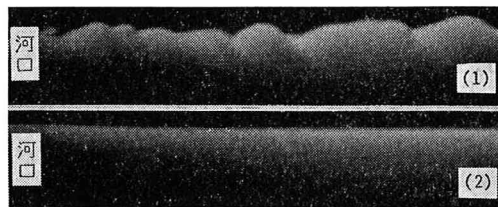


写真-1

4. 河床粗度要素後流境界に発生する渦の発生条件

潮汐による河口二層流の混合状態を表現し得るパラメーターを導出する場合、すべての要因について、実験を積み重ねることが必要である。しかし、この方法は、問題にかかわる要素があまりにも多すぎ、効率のよい実験が望まれる。そのためには、混合機構を十分に明らかにしておかねばならない。こうした観点から、本節では、スパイラル渦の発生条件や、その渦と界面破壊の関係も詳細に調べておく。

断面が 0.6 cm × 0.6 cm の単一の角柱を河床において、流れに沿う、その近傍での流速分布を LDV で測定すると、図-2 の結果を得る。なお、全水深は 4.0 cm

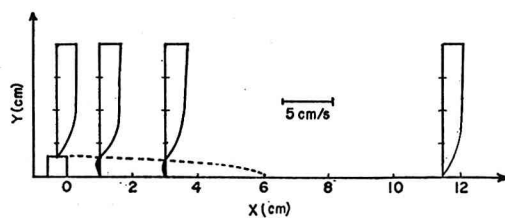


図-2

で水道水のみを定常的に流した場合の結果であり、流量は、スパイラル渦が発生し始める臨界状態になるように調節されている。スパイラル渦は粗度要素後方約 2.0 cm で発生しその波長は約 3.0 cm であった。速度分布から、渦発生点での諸量を推定し、Tatumi and Gotoh の定義に従ってレイノルズ数 R と波数 k_* を求めると図-3 に示す結果を得る。図中○印がその結果で、他の印は潮汐を与えた場合の渦発生時の結果 (臨界状態とは

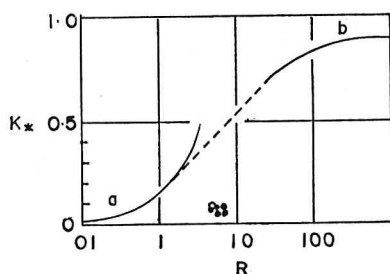


図-3

限らない), そして, a , b は, それぞれ Tatumi and Gotoh⁷⁾ と Lessen⁸⁾ が導いた中立曲線である. なお, $R=0.310\sqrt{xU_0/\nu}$, $L=R\nu/U_0$, $k_*=2\pi L/l_w$, l_w : 波長, L : R の代表長さ, U_0 : 自由境界層を境とする上下層の相対速度の半分値, x : 粗度要素端からの距離である. 図-3 は, 潮汐のように, 波長の長い非定常流の場合には, 定常流のもとで得られる結果と, ほぼ, 一致することを示している. そこで, この事実を利用し, 粗度を変えた場合の渦発生条件を, 定常流のもとで求め, 非定常流時のそれとしよう. 粗度要素間隔を 10 cm, 5 cm, 粗度高さを 1.2 cm, 1.8 cm と変えてみた場合, いずれの場合にも, 渦発生のレイノルズ数は 4.5~5.7 とあまり変化せず, k_* も 0.07~0.10 のせまい範囲内におさまる. このことは, 不安定波の発生因が自由境界層の不安定によるものであることを裏づけているとともに, 上述の粗度の状態下では, その境界層が渦発生に十分なだけ成長できることを示している. これに対し, 粗度要素間隔を 2.5 cm にせばめると, 粗度要素と渦発生点の間に次の要素がくることになり, 境界層の不安定は, さらに, 大きな R に対してしか生じ得なくなる. 渦発生が自由境界層の成長に関係するということは, 粗度間隔のみならず高さにも関係するという事を暗示しているが, これは事実であって, その効果は, 渦の直径が粗度高さの 2 倍程度にしかならないという結果になって現われる.

以上の結果をふまえて, 次節では, 潮汐によって界面が破壊する条件を調べてみる.

5. 粗度要素間隔と混合型式

$\epsilon=0.003$, $Q=10$ cc/s, $\eta_{10}=1.0$ cm とし, 水平におかれた水路部の全水深が 4 cm という条件下で, 粗度間隔と混合の関係を調べてみると, 写真-2 (1)~(6) に示される定性的な結果を得る. いずれの写真も漲潮最盛時の場面を示しており, 粗度要素は 0.6 cm×0.6 cm の断面と, 写真に記入された S で示される高さを有している. また, 観測は河口上流約 1 m の地点で行われている. (1) は先に述べたスパイラル渦, (2) は単一要素の場合で, その後流域に界面破壊が生じた場合である. しかし, さらに遠い後流域ではこの破壊もおさまり, 明確

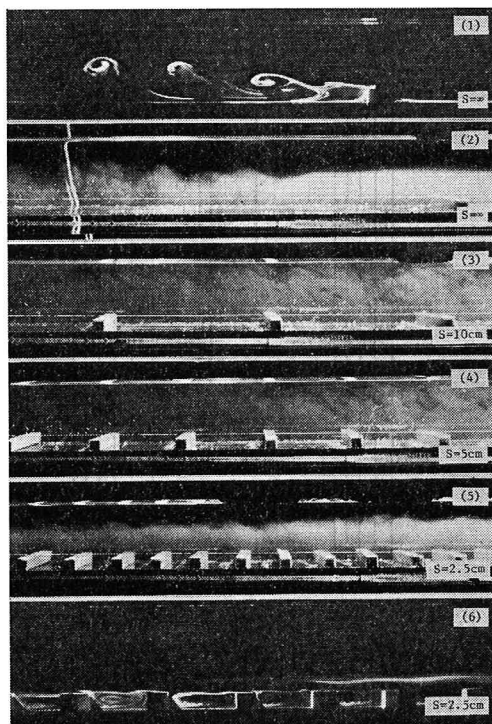
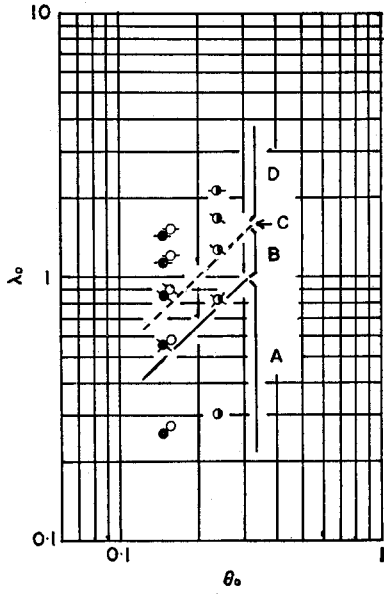


写真-2

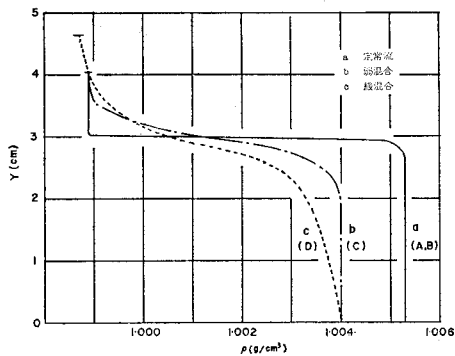
な二層が形成されている. これに対し (3) では一見して強い混合型式になっていることがわかる. この状態は (4) においても見られ, 混合のためには, ある程度粗度間隔をせまくする必要のあることが分かる. しかし, さらに (5) のごとくせまくすると, もはやスパイラル渦が発達せず, 界面もきわめて安定化する. この場合には, 同じ粗度間隔における要素間の流れを可視化した (6) から分かるように要素間のサーキュレーションが, むしろ, 粗度の平滑化に役立っている. ところで, 最も混合の著しい (3) の場合の S/H (H : 粗度高さ) は 16.7 である. この値は, いわゆる相当粗度⁹⁾ が最大値を示す角柱の S/H の値にきわめて近く, 上述の物理的な内容が, 後者の結果と密接に関係していることが分かる. 以上の定性的な結果は, 先に検討した粗度とスパイラル渦の発生状況とほぼ符合している.

6. λ_0 , θ_0 による混合型式の分類

次に, λ_0 と θ_0 を様々に変え, 混合形状がどのように分類されるか見てみる. 実験は, 粗度要素断面 0.6 cm×0.6 cm, 間隔 $S=10$ cm, 水路全長 $l=536$ cm, 全水深 4 cm, $\epsilon=0.0057$ 及び 0.0064, $\eta_{10}=0.5$ cm の条件下で行い, θ については, 流量 Q を 15.0 cc/s, 21.0 cc/s, 27.0 cc/s と変化させることによってその値を変える. 観測の結果は 図-4 に示されている. なお, 分類は漲潮最盛時の観測と, 実際の密度分布の測定を通じて行



図—4



図—5

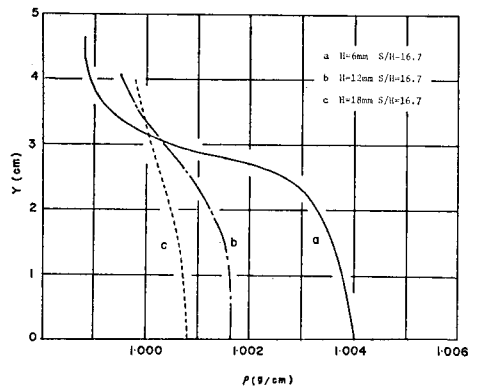
った。それぞれの混合形式に対応する概略の鉛直方向密度構造は図—5に示されている。分類の都合上、直線的な界面を A, lee wave の生じている界面を B, 微弱的な界面破壊を C, 界面破壊がやや進んだ状態を D, 強混合型式を E とする。

ところで、上述の粗度条件下では、河床から速い下層の流速が、ほぼ 2.0 cm/s 以上になると粗度要素後流の自由境界層が不安定となり、スパイラル渦の発生することが分かっている。この臨界条件を図—4に記入すると、同図の破線で示される。この傾向は、 $\lambda_0 \theta_0^{-1} = \text{const.}$ で表現できるが、これは、塩水楔が河道に存在する限り、渦の発生条件が U_{10} にほとんど影響されないということから必然的に出てくる結果である (λ_0, θ_0 の分母がともに U_{10} であることを知れば理解されよう)。混合型式の境界線も同様の傾向が見出され、しかも、スパイラルの発生条件と混合の開始条件が一致するという事実は、やはり、界面破壊がスパイラル渦に基づき生ずるものであることを示している。

ここで、図—5の結果を解釈する上で言及すべき問題をいくつか述べておく。第一点は、図—4, 5が漲潮最盛時に観測されたもので、落潮期には、すべての混合型式が安定化するということである。もう一点は、図—4, 5には強混合型式が見あたらないことである。これは、渦が、粗度高さの2倍程度の直径(振幅)にしか成長できないことと関係しており、強混合型式の確立のためには、装置の限界をこす、さらに強い潮汐を与える必要のあることを示している(あるいは、本質的に強混合型式にはならないのかもしれない)。いま一つ言及すべき点は、水路が有限の長さであることと関係がある。すなわち、変動流速振幅は、上流端に近いほど小さくなり、スパイラル渦のサーキュレーションも、やはり、上流端に近いほど弱まる点である(これについては後にデーターを示す)。この事実のために、河口付近では強い混合が生じて、上流域では、粗度要素間に流入した塩水が、ほとんど混合せずに、いつまでも残留することになる。

7. 粗度要素高さと混合型式

次に、 S/H は 16.7 に保って、 H を変え、スパイラル渦の直径を変化させた場合の混合型式を観察してみよう。図—6には H を 0.6 cm, 1.2 cm, 1.8 cm とした



図—6

場合の鉛直密度分布が示されている。このうち $H=0.6$ cm については、図—4, 5の最も混合の進んだ密度構造に相当している。他の例は、これと同じ潮差を与えた場合のもので、 H が大なるほど混合が進み、特に $H=1.8$ cm においては、いわゆる強混合型式が確立していることが分かる。以上のことから、強混合型式の確立のためには、適当な粗度間隔の他、 H が、満潮時の全水深の約半分程度になる必要があるといえる。

8. 流心に沿った漲潮最盛時の密度分布

$H=1.2$ cm, $S=20$ cm, $\epsilon=0.0064$, $Q=15$ cc/s, $\eta_{10}=0.5$ cm の条件下で、河口沖合 16 cm, 河口上流 10 cm,

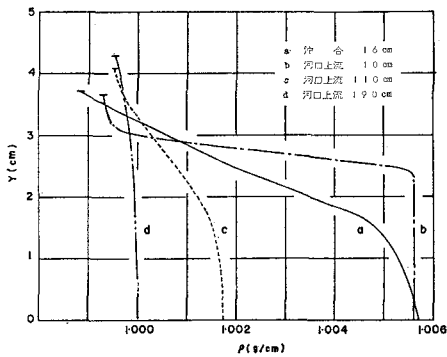


図-7

110 cm, 190 cm における鉛直方向の密度分布を測定すると、図-7の結果を得る、なお、漲潮時、混合しつつ侵入してくる塩水塊の head は河口上流約 200 cm に達するものの、それ以上侵入しないうちに落潮期をむかえる。したがって、強いサーキュレーションのスパイラル渦を生じない 200 cm 以上上流域では粗度要素間に、濃度の高い塩水が残留することになる。一方、河口沖合 16 cm での結果をみてみると、界面近傍の混合が目につくが、これは落潮時に河道で作られた、十分混合した水塊

が漸変密度層を形成するためであり、河口上流 10 cm で、むしろ漸変部分が無くなっている理由は、流出塩水塊が漲潮時に河道に戻ることができず、かわりに、周辺の混合していない一様密度の塩水が侵入するためである。

参考文献

- 1) 吉田・柏村：河口二層流の流れ構造の解析，第 25 回海講論文集，pp. 460～464，1978.
- 2) 柏村・吉田：潮汐による河口の flow pattern の変化，第 19 回海講論文集，pp. 103～106，1972.
- 3) 吉田：潮汐に対する河口二層流の応答，北大工学部研究報告，Vol. 85，pp. 101～114，1977.
- 4) Yoshida, S. and M. Kashiwamura: Tidal response of the two-layer flow at a river mouth, Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., Vol. 4, pp. 3189～3207, 1976.
- 5) 前出 2), 3), 4).
- 6) 吉田：密度界面における波動の発生と破壊条件，第 23 回水講論文集，pp. 363～368，1972.
- 7) Tatum, T. and K. Gotoh: The stability of free boundary layers between two-uniform stream, J. Fluid Mech., Vol. 7, pp. 433～441, 1960.
- 8) Lessen, M.: On stability of free laminar boundary layer between parallel streams, NACA, Rep. 979, 1950.
- 9) 足立昭平：人工粗度の実験的研究，土木学会論文集，104号，1964.