

河口流出流に関する実測に基づく考察

須賀 堯 三*・高 橋 晃**

1. はじめに

河川水が河口より海上へ流出する現象を取扱う。現象としては温度排水の拡散問題などと同様であり、数多くの研究が行われている。しかし、河川海域における密度流としての実測は、石狩川河口などのわずかな例が報告されているに過ぎない。ここでは、準定常状態の現象に限定し、最上川河口における3回の実測と利根川河口における出水時の航測結果に基づき、密度効果を主眼として二・三の考察を行う。

このような問題は実際面においても、河口部の埋没で法線決定上の一つの条件となり得るし、港湾内排出河川（河口前面における防波堤建設計画などを含む）の問題、河川からの流出土砂の沈積の問題、船舶の航行、波浪の河道内への侵入、魚類の生態、あるいは遊泳などの種々の問題との関連が考えられる。また、河道内への海水遡上現象の河口における境界条件を考察するうえに何んらかの示唆を与えるものと期待される。

2. 実測方法とその条件

潮位変動量の小さい日本海側河川では、多くの場合に弱混合流の状態であり、河口付近において内部フルード数 F_1 はほぼ1となる。潮位変動量の大きい太平洋側河川や湾内排出河川では非定常流的な性格が強まり、河水と海水との混合も促進され、かつ河口における内部フルード数も大きく変動するが、出水時には河口部を流下直後に内部フルード数がほぼ1となり、かつ定常効果が卓越するとみてよいであろう。そこで、ここでは定常状態と考えられ、かつ河口付近において内部フルード数が1となる場合をとりあげることとし、平常時の例として最上川における実測資料、および出水時の例として利根川の航測資料に基づいて考察をすることとする。

最上川河口においては、表-1 に示す3ケースについて、水面下 15 cm 層の流線、および縦断的に数断面において流速分布と塩素イオン濃度の測定を行った。表層流線は 50×10 cm のブリキ板を2枚十字に連結し、これをゴムマリで浮かせたものを流下させて2台のトランシ

表-1 実測資料諸元

河川名	実測日	流量 (m ³ /s)	潮位 T.P.m	備 考
最上川	S.49.7.17	490+京田川?	0.48	流量減水時 (7 日前にピーク 1800 m ³ /s)
"	S.50.8.27	61+京田川19	0.45	流量減水時 (3 日前にピーク 244 m ³ /s), 波高 $H_{max}=15$ cm, $H_{1/3}=10$ cm
"	S.51.8.26	250+京田川28	0.50	流量減水時 (9 日前にピーク 1700 m ³ /s), 波高 $H_{max}=60$ cm, $H_{1/3}=37$ cm
利根川	S.47.9.18	4 100	-0.04	18 日 9 時撮影, はほぼピーク時 (布川において 17 日 23 時にピーク)

ットにより流下位置と経過時間とを追跡することにより調査したものである。なお、S.49.7.18 に水深方向の流線変化を 0.5 m ないし 1 m 間隔で 7 m の水深まで調査した結果では、上層における鉛直線上の流線にはほとんど大差なく有意の相異を認めることが困難であった。任意点の鉛直線上の流速分布および濃度分布はプロベラ式微流速計またはブライス型流速計および電導計（一部採水試験）により、急変部で 25 cm 間隔、緩変部で 0.5 m 間隔に測定した。

利根川河口における航空 写真-1 は昭和 47 年 9 月の台風 20 号による出水時のほぼピーク時付近に撮影され、

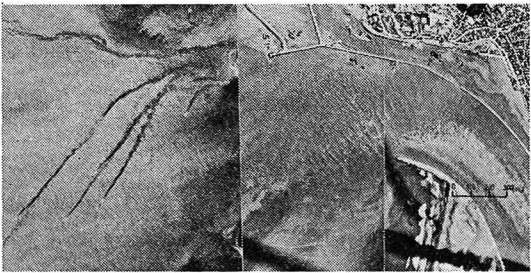


写真-1 利根川出水時航測写真 (Sep. 1972)

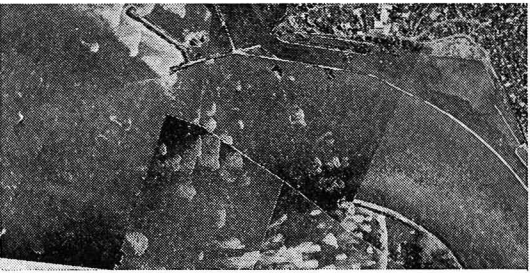


写真-2 利根川出水時航測写真 (Sep. 1971)

* 正会員 建設省土木研究所 河川研究室長
** 正会員 建設省土木研究所 鹿島試験所

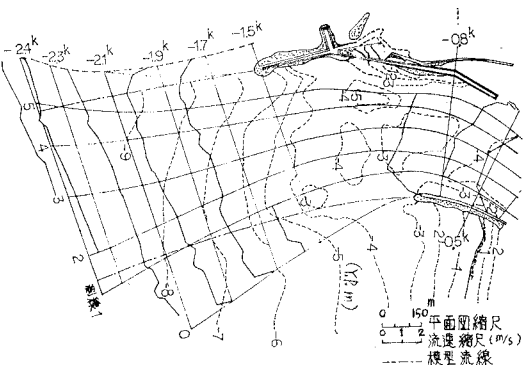
表面流速分布の図化が行われた¹⁾。撮影時の河口流量は、二次元実験により得られた平均流速と表面流速との比が0.9であるとの結果から、ほぼ $4100 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度であると推定された²⁾。利根川河口付近では河道が左に大きくわん曲しているので流速分布は様でなく、二次流も顕著である。わん曲部のらせん流による Boil が写真上鮮明である。河口流量が $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 余りの状態時に撮影された昭和46年9月の航空写真—2の上においても、同様ならせん流に基づく Boil がみられるが、この位置は流量の大きい昭和47年の場合の方がやや下流に位置している。河口からの流出流はこのようならせん流の影響を受けており、直線状に流出する場合と多少異なるものと思われるが、図—1にみられるように表面流速の横断分布は -1.7 km あたりではかなり一様になっている。右岸の防波堤先端からは intermittent vortex の発生がみられ、左岸導流堤下流の浅瀬あたりより流れは急に拡がっている。 $-1.8 \sim -2.0 \text{ km}$ あたりには色調の急変部が

みられ、それより下流では表層が薄くなり、河川水の濁りがほぼ一様に下流一帯に拡がっている。そのあたりでは小型船舶の航行あとが黒く鮮明に撮されているが、これは空気のあわと思われる。このあたりでは上層水深は 6 m ほどあると考えられるので海水ではないであろう。 $-1 \sim -1.5 \text{ km}$ 付近は波浪状況が複雑で、表面流速分布の読みとりが不可能であった。なお、利根川河口ではこのとき、濃度分布や鉛直方向の流速分布の測定は行われていない。

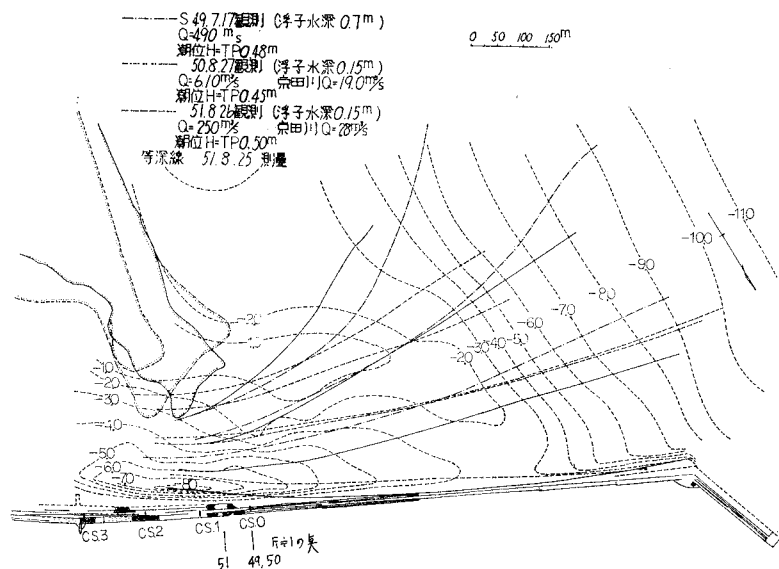
実測資料には、以上のように河道の平面形状、河口砂州、河床横断形状、および導流堤等構造物の影響のほか海底形状と波浪の変形、風、沿岸流や、潮流などによっても多少左右される面もある。しかし、内部ジャンプ後の二層流については、かなり一般的な取扱も可能であると思われる。

3. 内部ジャンプ発生位置

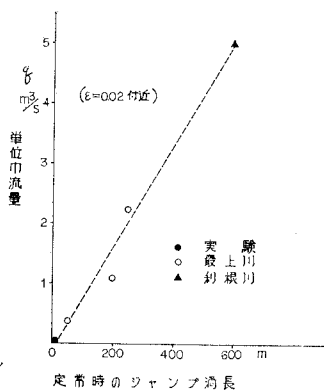
定常状態では安定条件として、河口付近において内部ジャンプが発生し、内部フルード数がほぼ1となる。この位置は流路幅が急拡しうること、および水深がある程度大きいことが条件で、河口を少し出た場所となるが、流量、河口砂州および河川流の蛇行などの影響を受ける。最上川の場合には、縦断的な流速および濃度分布の実測の結果、図—2に示す位置において $F_1 \approx 1$ となっていることが推定された。ジャンプ渦の長さは、流速、濃度分布、あるいは流線の急拡等から判断して図—3の程度である。河口砂州の位置および形状は大きく変動するが、最狭部断面からの距離は流量の増大とともに大きくなっている。図—4に最上川の場合の $F_1 \approx 1$ となる点の横断形状、および基準流路幅 B_0 を示す。



図—1 表面流線と表面流速分布 (利根川 Sep. 1972)



図—2 表層流線 (最上川河口)



図—3 ジャンプ渦の長さ

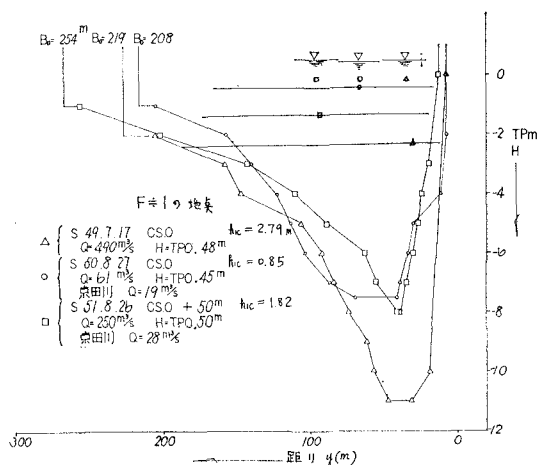


図-4 ジャンプ開始点の横断面図 (最上川)

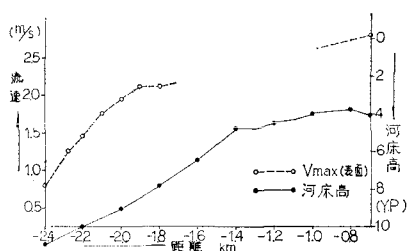


図-5 表面流速最大値の縦断変化 (利根川 1972)

利根川の場合には、水深、表面流速分布、写真上の表面波および色調の変化から判断する。図-5 に表面流速の最大値の縦断変化を示す。流れはわん曲の影響により、-0.5 km 付近からもぐり始め、-1~-1.5 km あたりで湧出していると思われる。湧出部の水面は通常の波とは考えにくい複雑な乱れを示しているが、-1.5 km 付近ではらせん流の影響で右岸から左岸方向へむかう斜めの線がみられる。このような湧出による水面の乱れと斜めの線は昭和 46 年の航空写真においては規模が小さくなり -1.1 km 付近と少し上流の位置に発生していることがわかる。内部ジャンプの発生地点では流速の一次加速現象があり、ジャンプ渦の領域では表面流速の減少がみられる。図-5 によれば -1.8 km あたりより急減している。写真-1 によると、色調の急変部が -1.7~-1.8 km にわたり斜めに現われている。ジャンプ渦による影響範囲は相当に大きく 0.6 km 程度はあると思われる。いっぽう、図-1 の流れの中央部の測線 3~4 間を縦断的に切りとり、二次元流と考えると縮尺 1/20 の密度流の模型実験を行った結果を図-6 に示す²⁾。ただし、-2.1 km で内部フルード数 $F_1=1$ の条件を与えている。計算と実験の対応性はよい。ジャンプ位置を上流へ移した場合の実験は行っていないが、航空写真および表

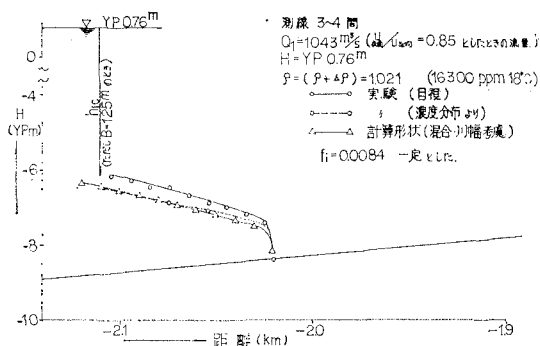


図-6 塩水くさびの実験値と計算値 (利根川の模型実験)

面流速分布等から判断して、利根川の 47 年出水では -1.7 km あたりで $F_1=1$ になっていると考えてよさそうである。これより上流の可能性は水深が不足するので、あり得ないと思われる。

4. 流れの拡がり幅

河川から海上へ拡がる流れは密度効果が大きい。図-1 の密度効果を見逃した模型実験は水平縮尺 1/100 (歪度 5) の場合のものであるが、海上の流路幅は狭い。また、航測結果と比較すると左岸導流堤先端付近では水面勾配の大きいことに原因する流速の増大のほか、密度効果に基づく一時加速現象も理解される。

ここでは、以上の実測値に基づき $F_1=1$ となる点を基準として海域における河川水流の拡がり幅について考察する。拡がりの境界の定義は明確ではないが、基準線における両端からの流線とする。しかし、最上川の例では任意の二点の流線によってもほぼ同様の整理ができることが判明している。図-7 は石狩川と同様な方法でまとめたものである。この場合には係数の関数形が依然未解決である。図-8 は基準点の上層水深 $h_{10}(=h_{10})$ と幅 b_0 の幾何平均で無次元表示したものである。これによれば、MIT³⁾および林・有田⁴⁾の理論曲線とは異なるが、岸・板倉⁵⁾の実測値とはほぼ一致し、aspect ratio h_{10}/b_0 の影響があまり顕著でないことがわかる。最上川および利根川の場合には、片側に長い導流堤状構造物があり、また波や沿岸流などの影響も含まれているものであるが、これらの要因により大きく支配されているとは考えにくく、実験値と非常によく一致したという事実は重視してもよいように思われる。また、内部ジャンプはスケールの大きい現象であり、わん曲流や河口付近の横断形の影響をかなり超越するので、基準点を $F_1=1$ の断面とすることは適当であろう。なお、導流堤先端より沖側の拡がりや浅瀬における碎波の影響については別途の考慮が望まれる。なお、図-8 でジャンプ渦領域と思われる

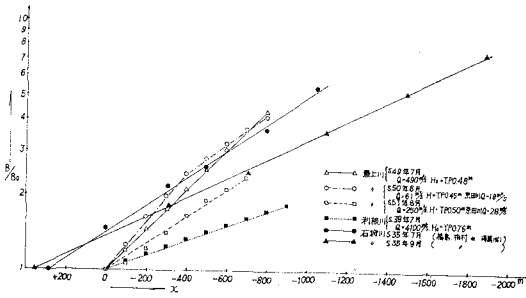


図-7 河口流出流の流線の拡がり幅

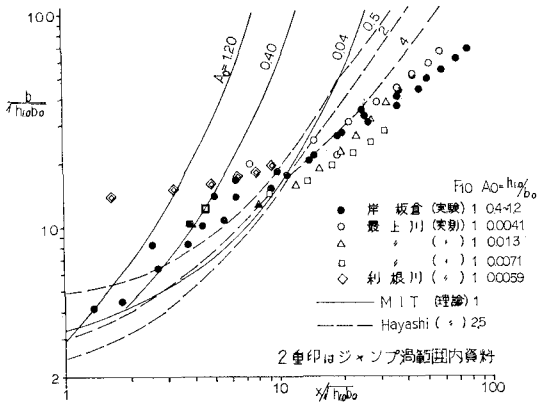


図-8 河口流出流の流線の拡がり幅

区間を除くと、ほぼ直線的になっており、岸・板倉の実験値とは一層同様の傾向となる。

5. 諸水理量の縦横断分布

河口流出流は、河口砂州や海底形状および波浪などに関係があり、それぞれの現象にタイムスケールの相異があつて履歴効果も存在する。最上川の場合には図-2から判るように左岸側に砂州より張り出す浅瀬があつて、これが約500mほど伸延している。S. 50年の場合は左岸側一帯が浅くなつてゐた。この浅瀬の特に浅い部分では砕波現象もみられ、波による混合が促進される。横断

面内の流速と濃度分布の測定例を図-9に示すが、右岸側と左岸側との間で多少の相異点が見い出せる。すなわち、右岸側では予想される流速と濃度の分布形が観測され、上下層間の流量の収支および上層濃度の増量が試算によるとほぼ計算どおりとなっている。これに対し、浅瀬より左岸側では表面流速は横断的にほぼ一様とみなし得るが、下層の逆流流速が観測されていないこと、および塩素イオン濃度が大きい。これに伴い、内部境界面位置も左岸側において多少上昇きである。このように、流れのある部分に浅瀬があり、そこで砕波するような場合には現象は必ずしも単純ではない。しかし、図-9は河口にかなり近い場合であるが、1km程度の遠方においても、表層における流速の横断分布はほぼ一様であるといふことができる資料が得られているので、海底形状が一樣で砕波等の影響が少ない場合には、平均的にみて河口流出流を一次元流と考えることも不可能ではないであらう。

二次元二層流の計算も可能であるが、今回は一次元二層流モデルの適用性について検討を行つてみた。定常流の場合には、内部抵抗係数 $f_i = 0.35(R_e \cdot F_1^2)^{-0.5}$ 、連行係数 $E = v_m / u_1 = 2 \times 10^{-3} F_1^3$ として、下層流速を無視できるとき、

$$\frac{dh_1}{dx} = \frac{F_1^2}{1-F_1^2} \left[-\frac{f_i}{2} \left(1 + \frac{h_1}{h_2} \right) + \frac{h_1}{B_1} \frac{dB}{dx} + 2 \times 10^{-3} F_1^3 \left(\frac{h_1 B_2}{F_1^2 A_1} - \frac{B_2}{B_1} \right) \right] \dots \dots (1)$$

により計算する。図-10は計算結果について実測値と比較したものである。ただし、連行現象のある下層流路幅 B_2 を $1/4 B_1$ とした場合のものである。このときには、内部フルード数 F_1 がやや大きく算出される他はほぼ実測値との適合度がよいとみなしうる。この場合、流路幅の拡がりには実測値を、また計算の出発位置を内部ジャンプ渦の終了位置とし、この点の水理量はジャンプ開始点より $F_1 = 1$ で不変として求めている。 E の式が正しいとすれば、出発点の F_1 を小さくしても $B_1 = B_2$ とすると、連行量が大きくなり過ぎて実測の流量の増分とは合わない。左岸側での連行現象もあるが、図-9のよ

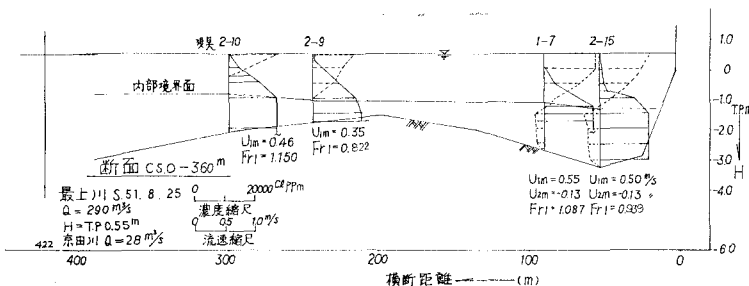
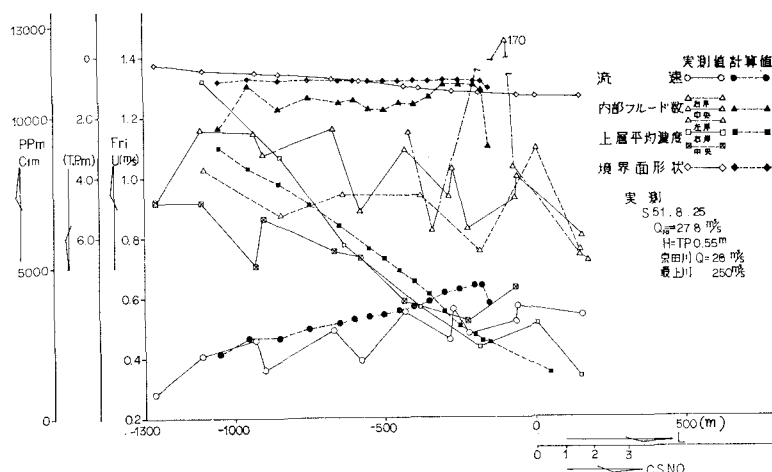


図-9 流速と濃度分布の横断変化(最上川 -360m地点)



図—10 水理量の縦断変化 (計算値と実測値の比較)

うに左岸側での連行現象が明瞭でないので、 $B_2=B_1/4$ としたが、 $B_2=B_1/3$ でも適合度はわるくない。計算によると、図—10 に示す水理量のほか、上層流量の縦断変化についてもほぼ実測値を説明しうることが明らかにされた。上層水深や上層流速の縦断変化は沖合でかなり一定値に近づくが、計算によっても同様の傾向がみられる。単純な海床形状の場合には、このような一次元解析によってさらによい結果が得られるものと期待される。

6. 結 論

最上川および利根川河口海域における準定常状態の実測値に基づき、海上における河川水の拡がり幅について考察した結果、図—8 に示す如く内部フルード数が 1 となる地点の幾何平均により整理され、岸・板倉の実験値とほぼ一致し、Aspect ratio には関係のないことが判明した。上層水深、流速および濃度分布の横断分布を調べた結果、単純な場合には一次元流としての取り扱いが可能であることが推定され、一次元二層流モデルによるシ

ミュレーションの適用性が示唆された。なお、十分沖までの実測は困難であったので不十分さは否めない。不定流効果が卓越する場合は今回検討の範囲外である。

参 考 文 献

- 1) 利根川下流工事事務所：河口に関する研究，建設省技術研究会（河川部門指定課題），1973。
- 2) 須賀堯三・高橋 晃：航空写真による河口流出機構の考察，土木学会第29回年次講演会Ⅱ部，pp. 433～434，1974。
- 3) Stolzenbach, K.D. & D.R.F. Harleman: An analytical and experimental investigation of surface discharges of heated water, M. I. T. Ralph M. Parsons, Lab. Rep. No. 156, Sep. 1972。
- 4) 林 泰造・有田正光：海面上に放出された温排水の拡がりについての数値解—第2報，第19回水理講演会，pp. 173～182，1975。
- 5) 岸 力・板倉忠興：河口における河水の拡がり，土木学会第30回年次講演会Ⅱ部，pp. 463～465，1975。