

河川水の海上への拡がりに関する実験的研究

早川典生*・福嶋祐介**・岩本逸郎***

1. ま え が き

河川水の海上への拡がりとは、密度の軽い河川水が広い海上に拡がる複雑な現象であり、その性状は柏村^{1),2)}、須賀³⁾等の研究を通して明らかにされている。中でも柏村は、実験的研究から、河川水の海上への拡がりとは、淡水流量が少なく、密度差の大きい時に見られるポテンシャル流的なA型から、その逆の場合の噴流的であるE型までに分類できることを示した。このうち、河川水の拡がり特有の型の流れに関しては、Takano⁴⁾が粘性効果が卓越するとして密度差を無視した解を得ている。福岡、福嶋⁵⁾はこれに対して、粘性効果と浮力効果を考慮して Hele-Shaw 流れと類似の解析を行った。

河川水の拡がりがかく噴流的であれば、温排水に関する近年の成果が適用できるはずである。しかしながら、河川水の場合は温排水の場合に比べて、運動量が小さく浮力が大きいせいか、その拡散幅は指数関数的に増大すると報じられている⁶⁾。表層密度流の問題において、拡散幅の変化は解明されていない問題であるが、指数関数の拡散則も経験的なものである。

本報ではこれらの点に注目して、河川水を模型化した実験水槽を用いて実験を行った。また従来この種の研究では、実際の沿岸水域に必ず存在する沿岸流のある場合について取扱われた例はほとんどない。そこで本研究は特にこの点に関して実験観察を行った。

2. 実 験

実験装置は、図-1に示すように沿岸流を模型化した流れを発生させることのできる、縦6m、横6m、深さ1.02mのコンクリート製海部水槽と、これに流入河川水を注入する、勾配1/80、幅20cm、高さ30cm、長さ10mの水路よりなる。河川水と海水の密度差は温度差により相似させた。海部水槽の河口部側には、30°の勾配で砂利を敷いて自然海岸を相似させた。沿岸流は可変速モーターにより循環流を発生させ、水槽内ではヘッダ

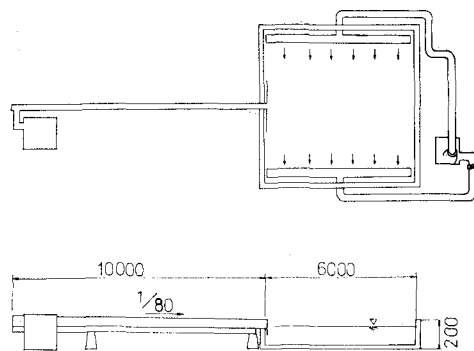


図-1 実験装置 (単位 mm)

ー管を通して一様流を起させた。表層水は水槽の三方に設置された越流トレンチから一様に流出させた。海部水槽には淡水を満たし、河川水を相似させるために温水を使用した。

測定は塩水を流入させてから、水路河口での水面直下の水温が、ほぼ一定になるまで4~6分間放置したのち測定を開始し、できるだけ短時間に測定を終了させた。測定項目は、熱電対による表面温度分布、浮子撮影による表面流速分布、染料水による流線観測、河川部における水面および内部境界面形状の測定を行った。実験条件は河川水流量、河川水(温水)温度、河口水深(海部水槽水深)、沿岸流流速を変えて、沿岸流の無い場合11ケース、沿岸流のある場合25ケースを行った。実験条件を表-1に示す。表より河川部レイノルズ数 10^3 は程度、河口クーリガン数は河口での内部フルード数を1とすると、0.1~0.3の範囲にあり、どちらかと言えば噴流的性格の強い流れであった。

3. 実験結果

図-2(a)に沿岸流がない場合の、図-2(b)に沿岸流のある場合の表面温度の分布を示す。両図共に沖合で温度のやや高い領域があり、河口密度流特有の加速領域に相当するものと思われる。図-3(a)、(b)はおのおの、沿岸流がある場合とない場合の、浮標撮影により求めた速度ベクトルの分布図を示す。図-3(a)では、河口より沖合に、加速された領域が見られる。図-3(b)は、

* 正会員 Ph.D. 長岡技術科学大学教授 工学部建設系

** 正会員 工 博 長岡技術科学大学助教授 工学部建設系

*** 正会員 工 修 水資源開発公団

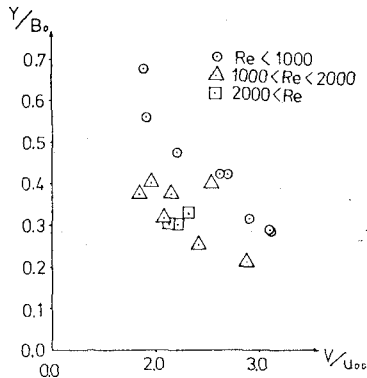


図-5 河川水流の曲げ率 (Y は河口中央から、法線方向にフロントまでの距離)

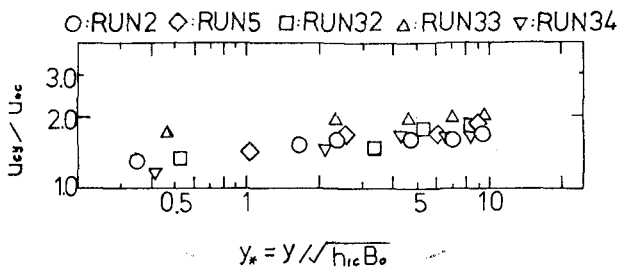


図-6 中心線流速

図-6 は沿岸流のない実験ケースについて、中心線表面流速を読みとり、無次元化した流下距離についてプロットしたものである。図は本実験の範囲がコア領域から連行領域にいく分かった程度であることを示している。

4. 河川水拡散の数値計算

本実験の範囲では、表面密度噴流に近い条件の流れである。従って研究の進んでいる塩排水の噴流解析を応用できるものと思われる。温排水の噴流解析とは、流速および密度に相似分布を仮定し、基礎方程式を流軸直角断面内に積分して解析するもので、「積分法」と呼ばれることもある。本研究では、沿岸流のある場合の実用手法として開発された Stefan-Vaidjaraman⁶⁾、Stolzenbach-Harleman⁷⁾ の手法をとり入れた方法で解析してみた。しかしながらこれらの温排水用の解析を本実験に適用してみると、河川水の拡がり幅が実験値に比べて小さい値が得られた。元来、この拡がり幅は表面密度流の解析の中で、未解決の課題である。そこでここでは、実験的に得られた拡がり幅則を用いて噴流解析を行い、解析が全体として妥当なものかどうか検証してみることにした。

座標系は図-7に示す通りであり、沿岸流流速 V の水域に、幅 $2b_0$ の水路から水深 a_0 、流量 Q で温水が排出されたものとする。温水は噴流型の流速分布、密度

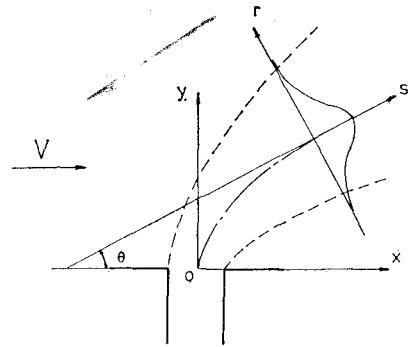


図-7 噴流解析の座標系

分布をなして拡がり、その中心軸に沿った距離を s 、中心軸に直角に測った距離を r とする。ここでは流軸方向流速 u 、周囲水よりの上昇温度 ΔT に次の分布を仮定する。

$$\left. \begin{aligned} u &= V \cos \theta + u_0(s) e^{r^2/2b^2} e^{-z^2/2a^2} \\ \Delta T &= \Delta T_0(s) e^{-r^2/2a^2} e^{-z^2/2b^2} \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

ここで、 u_0 、 ΔT_0 は中心軸上の超過流速、上昇水温であり、 z は鉛直上向きの距離、 a 、 b はのおの、噴流の鉛直方向および横方向の拡がり幅であり、 λ はプラントル数に關係する量で一般に 1.15 である。

噴流外縁における境界条件は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} w &= w_0 e^{-r^2/2b^2} - V \cos \theta \frac{d(ma)}{ds}, \quad z = -ma \\ v &= \pm v_0 e^{-z^2/2a^2} + V \cos \theta \frac{d(nb)}{ds}, \quad r = \pm nb \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ここで w 、 v はのおの z 、 r 方向流速、 w_0 、 v_0 は各方向の連行流速、 m 、 n は外縁を定義する値でここでは 3 とする。 w_0 、 v_0 は密度差のない噴流の拡がり率 γ を用いて次式のように仮定する。

$$v_0 = -\frac{In\gamma}{2n} u_0, \quad w_0 = \frac{Im\gamma}{2m} u_0 \exp\left(\frac{-5}{Fr^2}\right) \dots (4)$$

ここで $Fr = u_0/(\Delta\rho_0 g m a / \rho_0)^{1/2}$ 、ただし添字 c は中心軸における値を表わし、 $In = (\sqrt{\pi}/2) \operatorname{erf}(m/\sqrt{2})$ である。

(2)~(4) の仮定の下に s 、 r 方向の基礎方程式(省略)、を $z = -ma$ から 0 まで、 $r = 0$ から nb まで積分すると次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ}{ds} &= q_0 = \frac{1}{2} I m^2 \gamma (a + b \exp(-5/Fr^2)) u_0 \\ \frac{dM}{ds} &= q_0 V \cos \theta - \lambda^3 g I n / \lambda E m / \lambda \frac{d}{ds} (a^2 b \Delta\rho_0) \\ \frac{d\theta}{ds} &= -\frac{1}{M} q_0 V \sin \theta \\ \frac{dH}{ds} &= -K \Delta T_0 \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

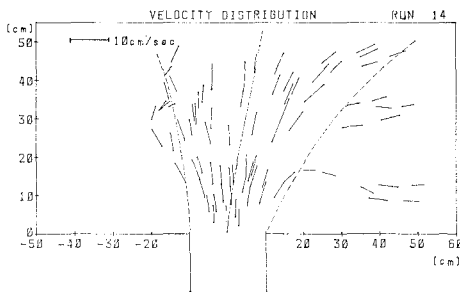
ここで,

$$\begin{aligned} Q &= ab(u_0 I_m I_n + mnV \cos \theta), \\ M &= ab(u_0^2 J_m J_n + 2V \cos \theta \cdot u_0 I_m I_n + mnV^2 \cos \theta), \\ H &= \lambda^2 ab \Delta T_0 (I_m \sqrt{1+\lambda^2/\lambda} I_n \sqrt{1+\lambda^2/\lambda} u_0 (1+\lambda^2) \\ &\quad + I_m/\lambda I_n/\lambda \cos \theta), \\ J_m &= (\sqrt{\pi}/2) \operatorname{erf}(m), \\ E_{m/\lambda} &= \int_{-m/\lambda}^0 \int_{m/\lambda}^y e^{-x^2/2} dx dy. \end{aligned}$$

式 (5) において未知数は Q, M, θ, H および b とみなすことができる. もう一つの方程式については Stefan-Vaidjaraman は db/ds を仮定し, Stolzenbach-Harleman は v の分布を仮定した. 本研究では式 (1) を一般化して次式のようにおく.

$$\frac{db}{ds} = \alpha \frac{b}{B_0} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式 (5), (6) は Q, M, θ, H, b に関する連立 1 階微分方程式であると思えず簡単に解くことができる⁹⁾. ただし, 初期コア領域は文献 8) にあるように与えた.



図—8 速度ベクトルの実験値と噴流解析の比較例
(一点鎖線, 破線: 中心軸, 拡散幅の計算例)

図—8 は計算結果の中心軸と拡がり幅を実験結果と比較したものである. 図は比較的沿岸流流速の小さい場合 ($V/u_0=1.88$) であるので, 良い一致を見ており, 本解析が全体として有効であることを示している. 本解析は元来, 中心軸の曲がりの小さい時に適用するものであり, 沿岸流との間に前述したようなフロントが発生した場合には適用しない. このような場合にはフロント周辺の流れの解析が必要である.

5. 結 論

温水を使用して噴流水に近い河川水の拡がりに相当する実験的研究を行い, 次のような結果を得た.

(1) 表面流速分布は河口からやや沖合で加速される現象が見られ, この傾向は沿岸流の有無に拘らず共通していた.

(2) 河川水の拡がり幅は, 指数関数的に拡がり, そのべき関数を $\alpha x/B_0$ と表せば, α はレイノルズ数とともに増加する傾向を示し, その平均値は 1.4 であった.

(3) 沿岸流が大きくなると, 河川水は非対称的になり, 沿岸流水と河川水との間には, 流速ベクトルが収束し, 水の交換が抑止されるフロントの発生が見られる.

(4) 沿岸流のある流れにおいて, 河川水中心軸の曲りは, 河口流速で無次元された沿岸流速とともに増大するが, レイノルズ数にも依存し, レイノルズ数の小さい程曲りにくい傾向にあった.

(5) 沿岸流の小さい場合の河川水の拡がりは, 表面密度噴流の解析に, 指数関数型の拡散幅の拡がり則を加えて解析できる.

参 考 文 献

- 1) 柏村正和: 河川水の海上への拡がり, 水工学シリーズ 75-B-7, 土木学会水理委員会, 1975.
- 2) Kashiwamura, M. and Yoshida, S.: Flow pattern at a river mouth, IAHR, Novosibirsk, Symp., 1972.
- 3) 須賀勉三・高橋 晃: 河口流出に関する実測に基づく考察, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 539~543, 1977.
- 4) Takano, K.: On the velocity distributions off the mouth of a river, Jour. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 10, No. 2, 1954.
- 5) 福岡捷二・福岡祐介・守屋祥一・新庄高久: 河口密度流の流動機構と塩水くさびの河口条件, 土木学会論文報告集, No. 327, pp. 123~133, 1982.
- 6) Stefan, H. and Vaidjaraman, P.: Jet type model for the three-dimensional thermal plume in a cross current and under wind, Water Res. Research, Vol. 8, No. 4, p. 998, 1972.
- 7) Stolzenbach, K. H. and Harleman, D. R. F.: An analytical and experimental investigation of surface discharges of heated water, EPR Rept. DJU 02171, U.S.A., 1971.
- 8) 早川典生: 温排水拡がりの近接領域における簡易解法, 土木学会第 32 回年次学術講演会講演概要集, II-138, 1977.