

沿岸域における河川流出水の拡がりの解析（その2）

井上 和也・古崎 裕三・豊田 政史

FLOW BEHAVIORS OF RIVER EFFLUX IN ESTUARY (PART 2)

By Kazuya INOUE, Yuzo FURUSAKI, Masashi TOYOTA

Synopsis

The aim of this study is to estimate the characteristics of river efflux in estuary by means of 3 dimensional numerical analysis. The flow behavior of river efflux in estuary is governed by river efflux momentum and buoyancy force due to density difference between fresh and salt waters. In a model estuary, the results show the plume and turbulent jets characteristics of river efflux in estuary. On the characteristics of flow behavior, the increase of river discharge has similar effect with the decrease of density difference, in which the flow behavior resembles turbulent jets. On the contrary, the decrease of discharge or the increase of density difference cause the flow similar to a plume. The similarity in the flow pattern is also discussed.

1. はじめに

前報¹⁾においては、沿岸域における河口から流出する河川水の流れの水理学的特性を明らかにすることを目指して数値解析を行った。本研究はこれに引き続くもので、前報と同様のモデル沿岸域を対象領域として、河川流出水の流動形態とそれを特徴づける要因をさらに明らかにするため、流量および密度差を変化させた9種類の計算条件のもとに検討を行った。

2. 計算条件の設定

河川からの流出水の挙動を決定づける要因として、河川からの運動量束と河川水の浮力束とを考える。また、それらを表す水理量として、河川からの流量 Q および河川水と海水の密度差 $\Delta\rho_0$ を考える。これより、Table 1 に示すように、 Q および $\Delta\rho_0$ を変化させた9 case の計算条件を設定した。すなわち、Run 1 ～Run 6 では流量のみを、Run 7 ～Run 9 では密度差のみをそれぞれ変化させている。ただし、密度差を変化させた場合は、河川水の密度は $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$ と一定にして、海水の密度 ρ_0 を変化させている。なお、表中 h_0 は河口（河道の下流端の沿海域に接する地点を河口と

Table 1. Condition for numerical experiments

	Q (m^3/s)	$\Delta\rho_0$ (kg/m^3)	h_0 (m)	M (N)	N (N/s)	Fr_t
Run 1	500	22.0	5.83	1.48×10^6	1.08×10^5	0.077
Run 2	1000	22.0	5.84	5.96×10^6	2.16×10^5	0.154
Run 3	2000	22.0	5.86	2.39×10^7	4.31×10^5	0.307
Run 4	4000	22.0	5.87	9.60×10^7	8.62×10^5	0.612
Run 5	7000	22.0	5.88	2.94×10^8	1.51×10^6	1.069
Run 6	10000	22.0	5.87	6.00×10^8	2.16×10^6	1.529
Run 7	4000	5.0	5.82	9.36×10^7	1.96×10^5	1.290
Run 8	4000	10.0	5.84	9.44×10^7	3.92×10^5	0.919
Run 9	4000	15.0	5.86	9.51×10^7	5.88×10^5	0.753

呼び、 x 座標の原点とする)での水深、 $M=\rho_0 Q u_0$:運動量束(u_0 は河口の断面平均流速)、 $N=\Delta\rho_0 g Q$:浮力束、 $\Delta\rho_0=\rho_0-\rho_f$ 、 $Fr_1=u_0/\sqrt{\varepsilon g h_0}$:内部フルード数($\varepsilon=\Delta\rho_0/\rho_0$)である。なお、水平面内の渦動粘性係数は $30\text{ m}^2/\text{s}$ 、渦拡散係数 $3.0 \times 10^{-1}\text{ m}^2/\text{s}$ 、中立状態での鉛直方向の渦動粘性係数および渦拡散係数は $3.0 \times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$ で、どのケースについても同一としている。

3. 計算結果および考察

本解析においては、河川の流量の変化および密度の変化に応じたそれぞれの流況特性を考察し、ついでこれらの解析から得られた結果に基づき河口域における流況特性を一般的に検討し、最後に流速分布の相似性について言及することとする。

3.1 河川流量を変化させた場合

(1) 平面的な流動形態

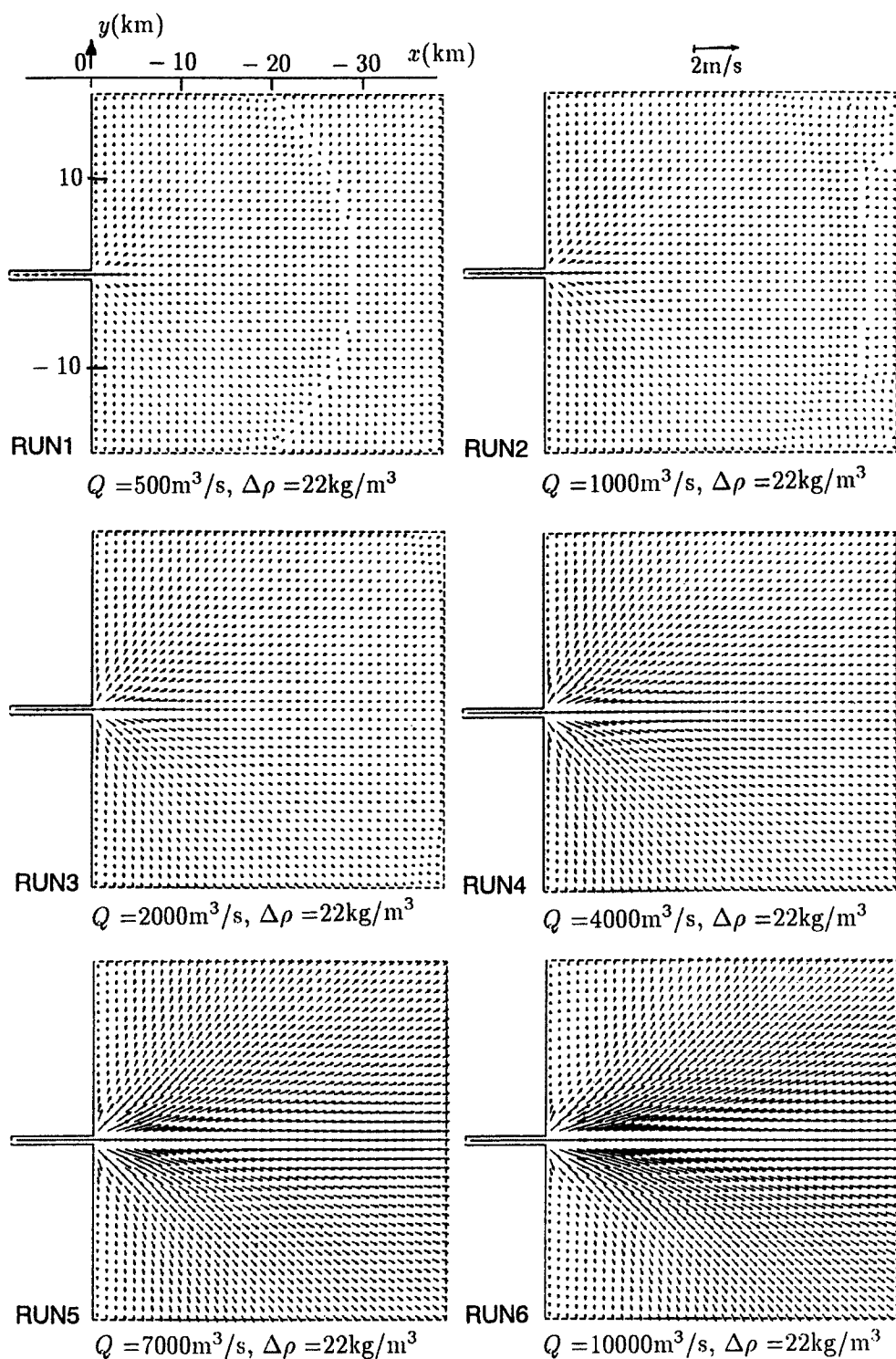
河川流出流は、流量が大きくなるにしたがって、流出形態はブルーム型から噴流型へと遷移することはよく知られている²⁾。ここでは、この点に着目して密度差を一定に保ち河川の流量を変化させた Run 1 ~ Run 6 についての結果をみる。

Fig. 1 は Run 1 ~ Run 6 の表層における流速分布 (a)、トレーサー濃度分布 (b) である。Fig. 1 (a) をみると、河川流量が大きくなるほど全体的な流速は当然大きくなっているが、沿岸線 (y 軸) 沿いの流速は、流量の小さい Run 4 の方が、流量の大きい Run 5 や Run 6 よりわずかながら大きくなっている。また、Fig. 1 (b) をみると、流量が小さいときは河川水は河口を中心に同心円状に拡がっているのに対し、河川流量が大きくなるに従い河川水の拡がる範囲は大きくなるとともに、 y 方向より x 方向への拡がりが増加した形状となっていることがわかる。

Fig. 2 は、初期の静止水面を基準にした水位 ζ の中心軸 ($y=0$) 上の分布である。流量が大きいほど、より高い水位上昇が生じているが、河口近傍 ($x=0$ の近傍) に限れば Run 6 より流量の小さい Run 5 の方が高い水位上昇を示している。また、水位の逓減は、河口からの流出直後で大きく、沖ではしだいに小さくなっている。Fig. 3 は中心軸上の水面こう配を示したもので、Run 1 ~ Run 3 と Run 4 ~ Run 6 とでは異なる傾向がみられる。すなわち、Run 1 ~ Run 3 では流量が大きくなるに従い水面こう配が大きくなっているのに対し、Run 4 ~ Run 6 では河口から $x=-2.5\text{ km}$ まで (河口近傍) は流量が大きいほど逆に水面こう配が小さくなっている。ここでの解析で考えた流量の範囲 ($500 \sim 10000\text{ m}^3/\text{s}$) の中間の流量で、河口近傍での水面こう配は最大になるといえる。

次に、Run 1, Run 4, Run 6 について y 方向 (横断方向) の水面形を示したのが Fig. 4 (a), (b) である。ただし、Fig. 4 (a) は $x=-1.5\text{ km}$ 、Fig. 4 (b) は $x=-10\text{ km}$ 地点の図である。Fig. 4 (a) において Run 1 と Run 4 を比較すると、流量の大きい Run 4 の方が全体的に水位が高くなっているのに対し、Run 4 と Run 6 を比較すると中心軸付近 ($y<1.5\text{ km}$) を除いて、流量の小さい Run 4 の方が水位が高く、 y 方向への拡がりが増加していることが分かる。また、Fig. 4 (b) においても同様の傾向がみられるが、河口から離れるに従い初期運動量 (x 方向の慣性力) の影響が小さくなるため、Run 1 と Run 4 では中心軸付近での局所的な水位上昇はほとんどなく、 y 方向の水面形はほぼ水平になっている。Run 6 では $y=2 \sim 10\text{ km}$ 付近では Fig. 4 (a) と比べて水位が高くなっており、この場合にも y 方向への拡がりをみせはじめていることがわかる。

Fig. 5 は、 y 方向の流速の拡がりを示す指標である、表層の x 方向流速 u が中心軸上の x 方向流速 u_m の $1/2$ になるまでの距離 (半値半幅) b の流下に伴う変化³⁾を示したものである。この図より、流量が大きくなるほど b は小さくなっており、河川流出流の拡がる角度が小さくなることを示している。この傾向は



(a) velocity

Fig. 1. Plane distribution in surface layer

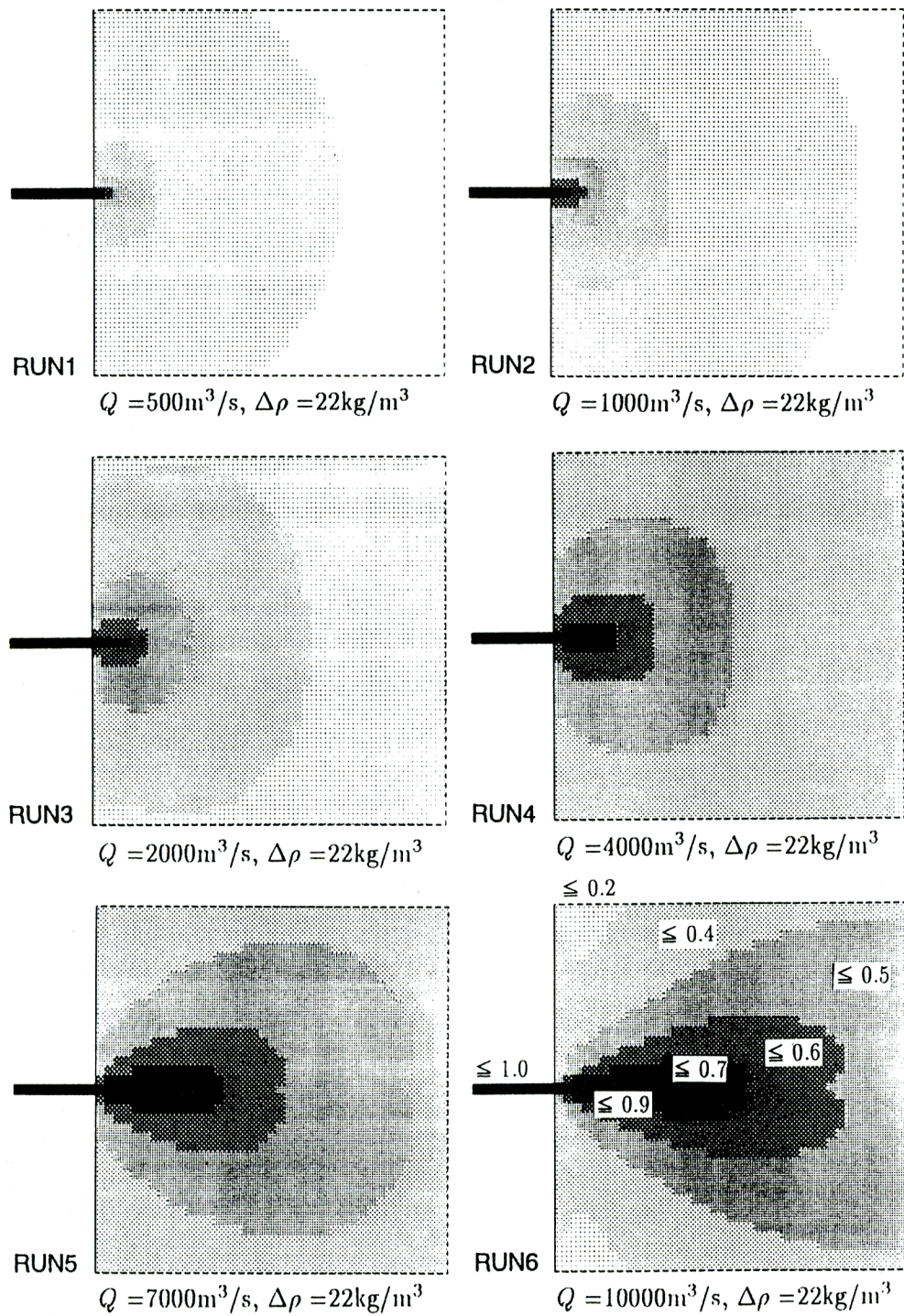


Fig. 1 (b). concentration of tracer

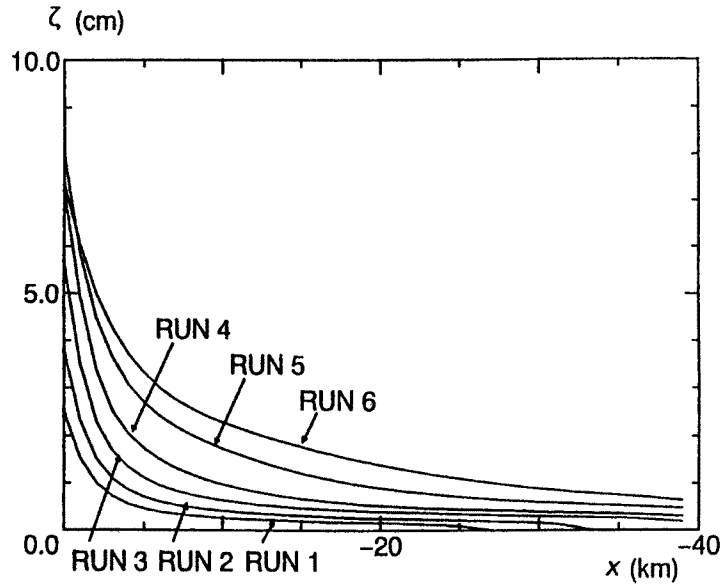


Fig. 2. Longitudinal water surface profile

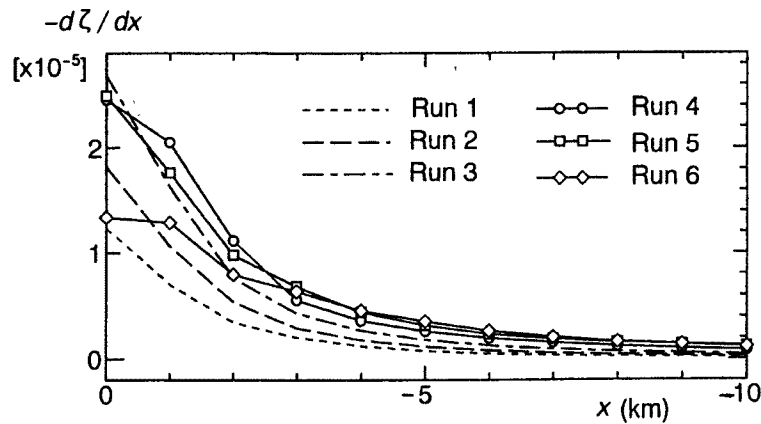


Fig. 3. Longitudinal gradient of water surface

Fig. 1 (b) でもみられたとおりである。しかし、Run 1～Run 3 では b はほとんど同じであり、水面こう配の縦断的变化も同じ傾向を示していることをあわせると、Run 1～Run 3 では拡がり方の空間スケールはほぼ同一と考えられる。

以上の検討結果より、河口近傍の水平面内の流動構造を考えてみよう。はじめに述べたように、本研究で対象とする流れでは、流動形態は河川上流からの運動量と河口における浮力とによって決定されと考えられる。運動量が比較的小さい場合は、河口近傍で受ける浮力によりその水位は上昇し、これは x 方向にも y 方向にも水面こう配を生じさせ、その結果放射状の流況が現れる。このような流動形態では、流量が大きくなるにしたがい流速も増加するが、流況そのものは相似性を保持する。一方、流入運動量がさらに大きくなった場合、浮力の影響は相対的に低下する。これは、相対的に一樣流体の流れに近づくことと同等とみなされ、後述の Fig. 6 に示されるような水深の大きい箇所の逆流は現れにくくなると考えられる。それは、流下方向の流速をもつ層の厚さの増大を意味し、水面こう配は減少し、運動量に支配される

噴流状の流況を呈することになる。以上のことから、河川流出水の表層流の特徴は以下のようにとまとめられる。

1. 河川流量が小さい場合は、河口において働く浮力による影響が流入運動量による影響より大きいために、顕著な方向性をもたないブルーム状の流れになり、流量の変化に対して流動形状にはほとんど変化のみられない相似的な挙動を示す。
2. 河川流量が大きいほど、流入運動量が支配的となるため、流れの直進性が増し、噴流状の特性が強くなる。
3. 沿岸線沿い (y 軸沿い) の河川流出水の拡がり、ブルーム状の流れと噴流状の流れとの中間の流動形態のときに最も大きくなる。

(2) 継断的な流動形態

中心軸に沿った鉛直面内の流速分布を Fig. 6 に示す。流量が大きくなるに従い、河川水とみなされる層内の流速値が大きくなっているのに対して、底層部で見られる逆流には顕著な変化はみられない。また、河口近傍に限れば、Run 1 ~ Run 3 では逆流が生じているのに対し、Run 4 ~ Run 6 では逆流はみられず、この場合には河口近傍で鉛直循環流が発生していないといえる。

しかし、沖を含めて水深方向の流速分布をみると、流向が逆転する連続的な面が明瞭にみられる。この面と河川水の影響範囲との相関をみるために h_{95} (密度 ρ が $\rho_f + 0.95\Delta\rho_0$ となる水深) および h_s (x 方向の流速が順流から逆流になる水深、せん断深さとよぶことにする) を定義し、その縦断変化を示したのが Fig. 7 (a) および (b) である。河口近傍では h_{95} と h_s はほぼ一致しているが、沖へ流下するに従い h_{95} は減少の傾向を示すのに対し、 h_s は増加の傾向を示している。このことから、水表面からせん断深さまでの層 (上層とよぶことにする) は、河口の近傍ではほとんど河川水によって形成されているのに対し、沖では河川水だけでなく河川水により連行された海水によっても形成されていることがわかる。また、その連行されている海水の層 (上層内の海水層) は、河川水が浮上しているにもかかわらず増大することも知られる。さらに、図より h_{95} は Run 1 ~ Run 3 で、全体的に上に凸であるのに対し、Run 4 ~ Run 6 では下に凸の部分が存在し、波状的な変化を示している。こ

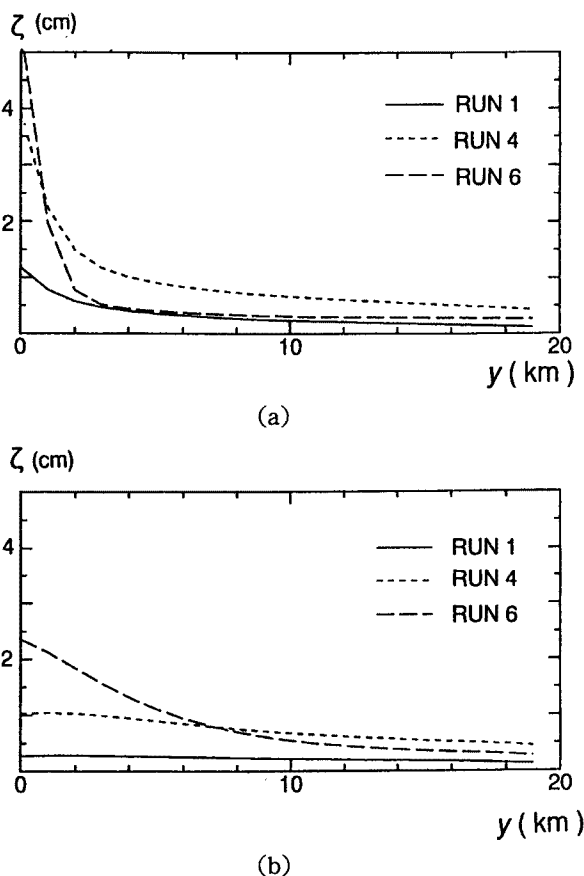


Fig. 4. Transverse water surface profile
(a) $x = -1.5$ km (b) $x = -10$ km

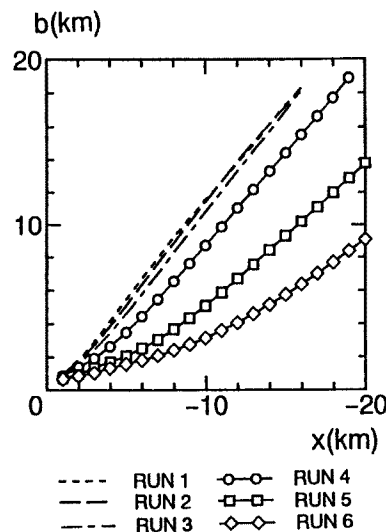


Fig. 5. Half the width at half depth in velocity profile

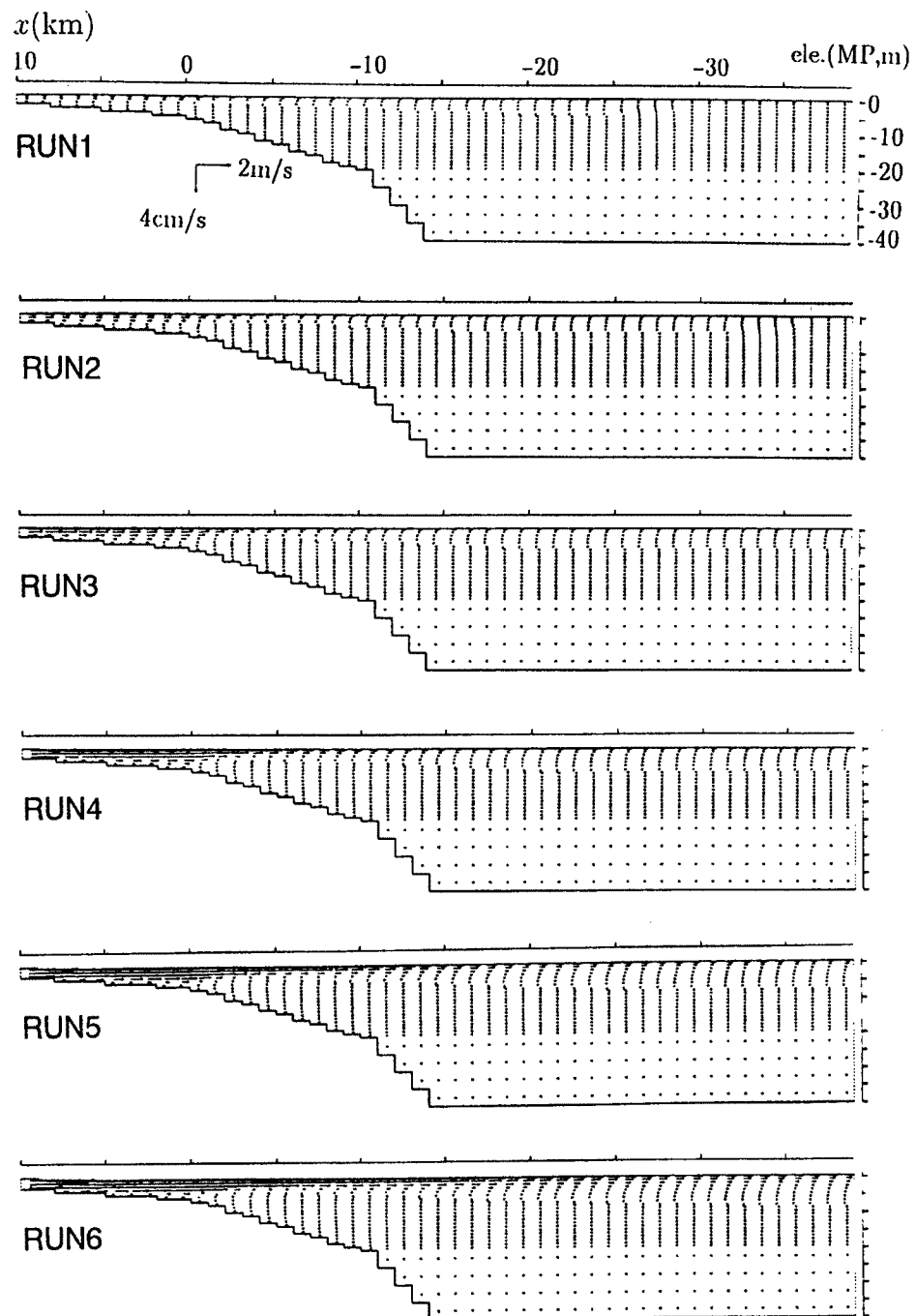


Fig. 6. Velocity distribution in vertical plane along central axis

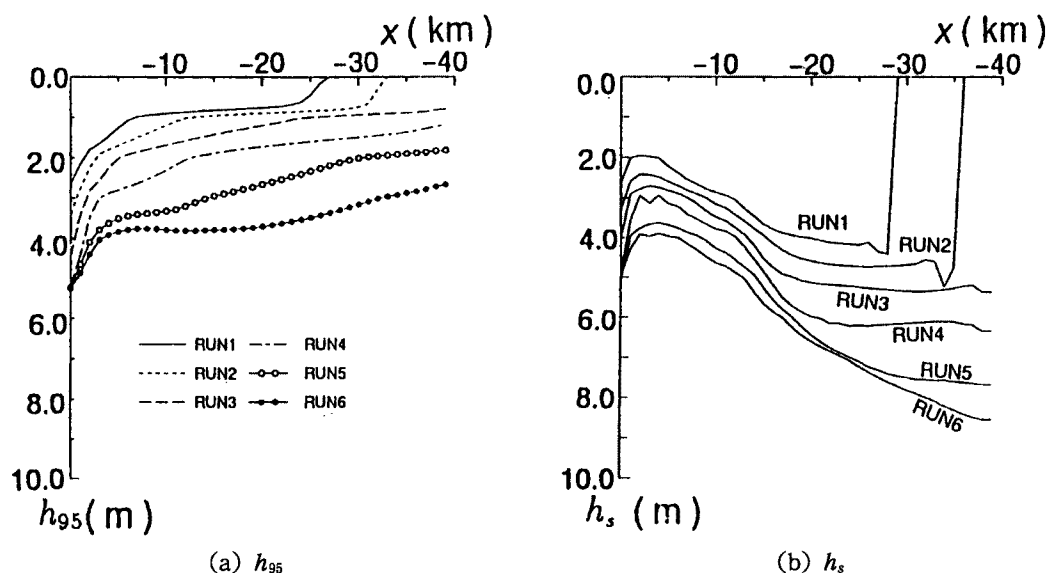


Fig. 7. Longitudinal distribution of characteristic depths

れは次のように解釈できる。まず、河口では浮力を受けるとともに、河道内で y 方向に拘束されていた流れが解放されるため、いずれのケースでも河川水の層厚が減少する。一方、沖では Run 1～Run 3 は初期運動量が小さく、浮力の効果が卓越するため、 h_{95} はさらに一段と早く減少し、その形状は上に凸を示すのに対し、Run 4～Run 6 は卓越する運動量のため海水層への侵入が続き、 h_{95} は部分的に下に凸の形状も示すと考えられる。これらのことより、Run 4～Run 6 で示された h_{95} の下に凸を示す形状は噴流特有の現象と考えられる。この特徴は、中辻ら⁴⁾の指摘している加速領域の出現が内部モードにおいて関連していることを予想させるので、より詳しい検討が必要である。

3.2 密度差を変化させた場合

Run 7～Run 9 では河川流量を一定 ($4000 \text{ m}^3/\text{s}$) とし、密度差 $\Delta\rho_0$ を変化させた。以下では、河川流量が同一である Run 4 と併せて考察する。

Fig. 8 は、Run 7 および Run 8 の表層における流速分布、トレーサー濃度分布である (Run 4 については Fig 1 (b) を参照)。 $\Delta\rho_0$ が小さいほど流速はわずかながら小さくなるがみられる。このため、計算領域内に貯留されている河川水の量は $\Delta\rho_0$ が小さいほど大きく、この違いが Fig. 8 のトレーサーの分布に現れている。また、沿岸線沿いの流速についても、 $\Delta\rho_0$ が小さいほど小さくなっている。これは、 $\Delta\rho_0$ が小さいときには、浮力の効果よりも初期運動量の影響が流動に対して支配的なためであろう。つまり、流量が同じであっても密度差が小さいときには、噴流状の流れの特性が相対的に強く現れると考えられ、それはトレーサー分布図で確認できる。また、このことは、図示はしていないが、半値半幅の流下に伴う発達からも裏づけられる。

Fig. 9 は中心軸上の ζ の分布である。 $\Delta\rho_0$ が大きいほど水位は高くなっており、その差は、河口付近で最も大きくなっている。これは $\Delta\rho_0$ が大きいほど浮力の影響が大きくなるために、河川水が浮上し、水位が上昇するためと考えられる。

h_{95} および h_s の縦断変化をみた Fig. 10 より、 $\Delta\rho_0$ が小さいほど h_{95} および h_s は大きくなっている。これは、 $\Delta\rho_0$ が小さいほど混合が起こりやすいことに起因していよう。また、 h_{95} の縦断変化には、部分的に下に凸の形状が現れており、前述のように噴流としての性質がみられる。

以上の結果より密度差が流動形態に及ぼす影響をまとめる。前に述べたとおり、密度差が小さければ、一様流体の流れに近くなり、噴流状の流況が現れる。一方、密度差が大きいとき、逆流域が相対的に大き

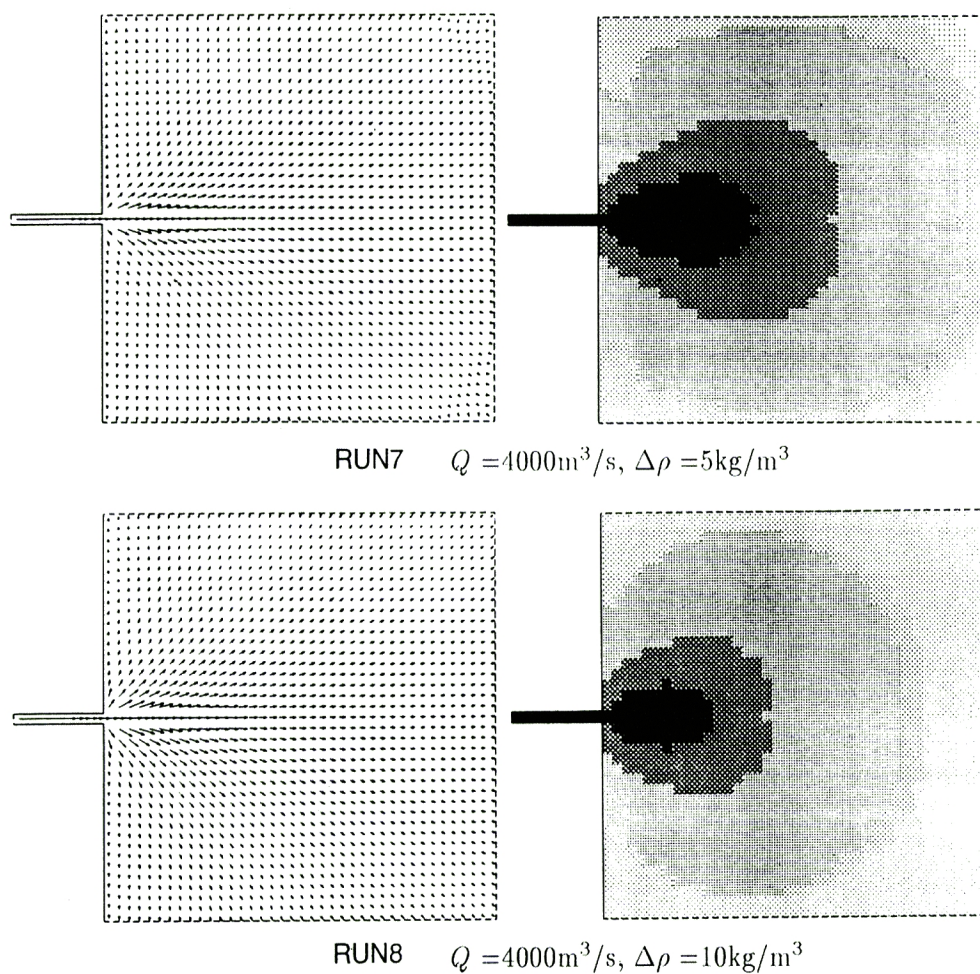


Fig. 8. Plane distribution in surface layer

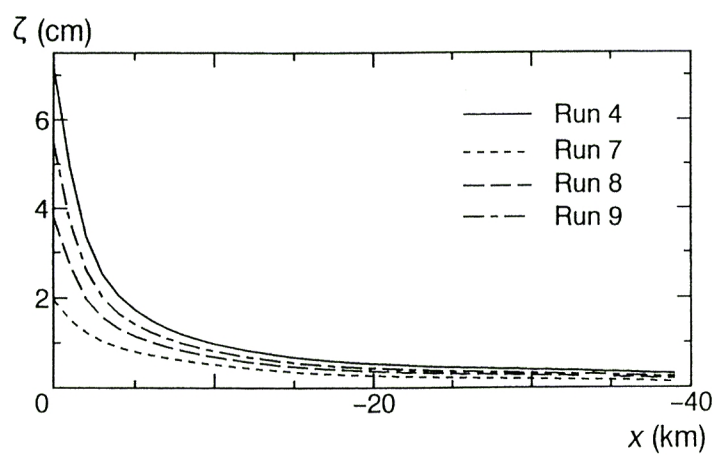


Fig. 9. Longitudinal water surface profile

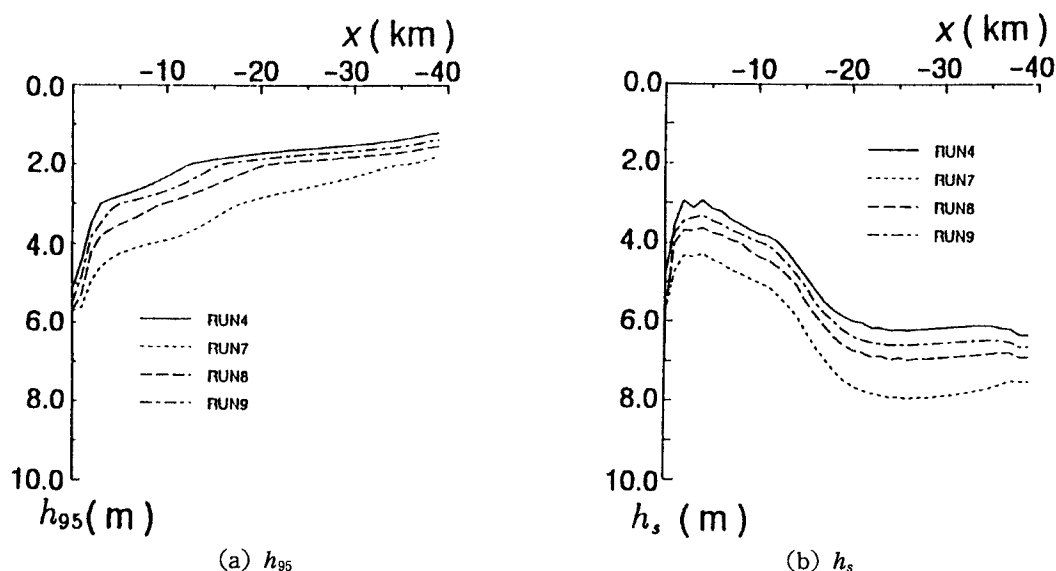


Fig. 10. Longitudinal distribution of characteristic depths

くなり、このことは河口近傍の水位上昇をもたらし、流れは河口から放射状に広がる様相を呈し、ブルーム状の流況が現れる。

3.3 流速分布の相似性

流れの噴流としての特性をみるため、表層における x 方向の流速を、中心軸上の値 (u_m) で正規化して示したのが Fig. 11 である。ここに、 b は半値半幅である。図中には、一様流体の2次元噴流に関する

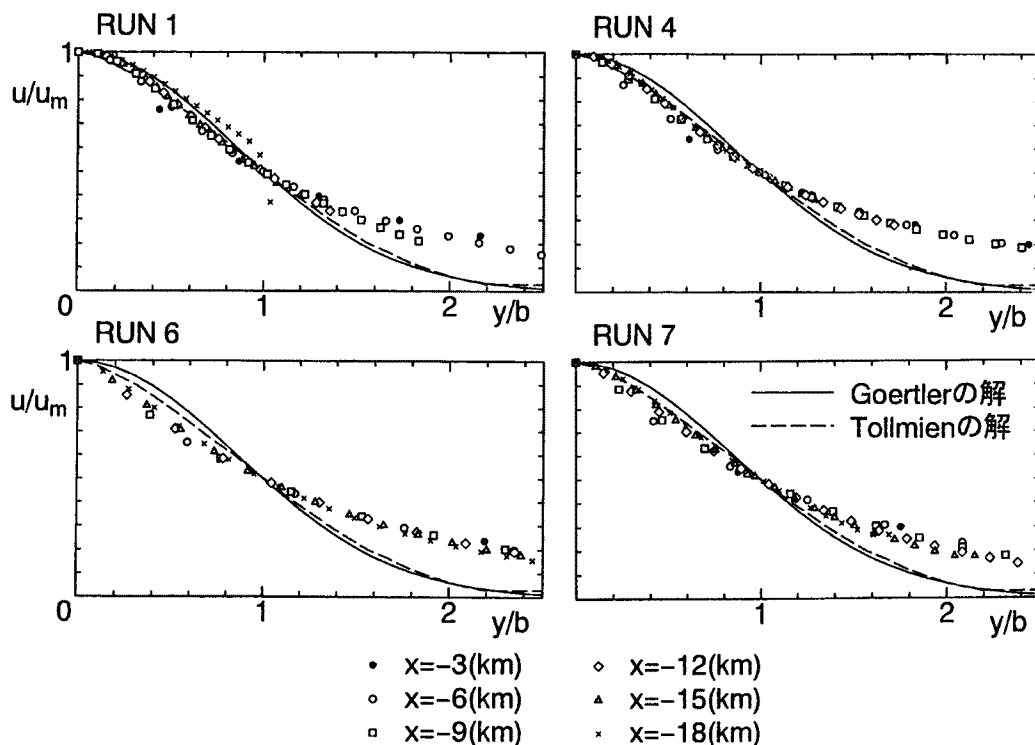


Fig. 11. Similarity of velocity distribution

Goertler および Tollmien の理論解³⁾を示している。注目されるのは、 $y/b \approx 1$ 以下では、理論解にほぼ一致した流速分布がみられるのに対し、 $y/b \approx 1$ 以上ではいずれのケースでも、流速は理論解より大きく、しかも y/b が十分大きければ $u/u_m \approx 0.2$ 程度の一定値に収束していることである。

ここでの数値実験の条件、すなわち、密度一様でない3次元的な流れで、しかも渦動粘性係数や渦拡散係数が一定というもとでの解析においても、噴流理論と同様な流れ方向の相似性が現れ、それが流量や密度差によってほとんど変化しない（Fig. 11 で計算ケースごとの差がほとんどみられない）ことは、興味深い結果といえよう。また、 y/b が大きいとき、 u/u_m が有限値に近づいていることに関しては、計算における境界条件の取り扱いの影響が現れている可能性があるため、より詳しい検討が必要である。

4. お わ り に

本研究は沿岸域における河川流出流の水理学的特性を明らかにすることを目的としている。本報では流量および密度差を変化させることにより生じる流れの構造を数値実験により検討したものである。その結果、河川流量が大きい、あるいは密度差が小さいときには噴流状になり、逆に流量が小さい、あるいは密度差が大きいときにはブルーム状になることが確認できた。また、密度が一様でない流れにおいても相似的な流速分布が現れることが知られた。

本研究においては、ブルーム状の流況と噴流状の流況の構造に関して、定性的な検討を加えたが、それらの区分の判定法や、さらにつねに問題となる渦動粘性係数や渦拡散係数の評価法など、まだまだ検討すべき課題が多い。今後は、より多くの条件のもとでの解析をすすめるとともに、実際の河口部で生じている現象に注目して、河口から流出する河川水の挙動に関して一般的な考察をすすめたい。

最後に、計算・作図にご援助いただいた大学院学生奥寺健彦氏に感謝を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 井上和也・坂口拓史・古寄裕三：沿岸域における河川流出流の拡がりについて、京都大学防災研究所年報，第37号B-2，1994，pp.489-499
- 2) 柏村正和・吉田静男：河口を出る淡水の流れ，第13回海岸工学講演会論文集，1966，pp.268-271.
- 3) N.Rajaratnam, 野村安正訳：噴流 TURBULENT JETS, 1976.
- 4) 中辻啓二・許 再寧・室田 明：河川ブルームの拡がり特性とその物理機構，土木学会論文集，No.434, II-16, 1991. pp.67-76