

河口流出流の拡がり機構—現地調査—

室田 明*・中辻啓二**・柴垣雄一***

1. 緒 言

表層放流密度流の一つである河口流出流は、発電施設からの温排水の放流にみられる表層密度噴流と、流体力学的に同一の範疇に属する現象である。しかしながら、河口流出流は、一般に (i) 規模が大きいこと、(ii) 自然の生み出した特有の河口地形を形成しており、河口での形状比が大きいこと、(iii) 流量変化が大きく、それにともない流出形態が種々変化すること、等の特徴を有しており、温排水とはかなり異なった流況を呈する。

河口流出流の挙動には運動量流束や浮力効果に加えて、波浪・潮流等の海象条件、河口地形や人工海洋構造物等の各種環境要因が複雑に干渉し合うこともあって、その拡がり範囲を推定することはなかなか難しい。水理学的に未解決な問題を数多く残しているのが実情である。たとえば、水理学的な意味の河口位置をどのように設定するかでさえ定かでなく、実験的な研究成果や理論解析だけでは現象を説明しきれない。

そこで、本研究では明石川河口で実施した延べ 15 回の現地調査結果に基づき、河口流出流の拡がり機構について考察する。また、積分モデルによる数値解析を行ない、河口流出流の拡がり範囲を推定することにより、実測結果の考察を補完する。

2. 明石川河口と現地調査の概要

(1) 明石川の概要

明石川は流域面積 126.7km²、流路延長 26.0km のほぼ楕円形の流域形状であり、明石海峡の西部、播磨灘の北岸に流出している二級河川である。1972 年 5 月から約 6 年間の洪水時を除く流量観測（月 1 回）によれば、最大流量は約 6m³/s であり、75% 低水流量は 0.3m³/s と非常に小さい。河口から上流約 2.5km の地点に立地している新設下水処理場が全面操業した場合、明石川に直接放流される処理水は約 1.45m³/s となる。つまり、既往の流量頻度曲線で 20% 弱の発生確率の流量が常時、

連続的に明石川を流下することになり、河口域の淡水化あるいは海苔を主体とした沿岸域漁業環境への新たな影響の生じることも考えられる。本研究はこの環境影響調査を直接の契機として実施された。

河口付近の海域では周期的に西流と東流とが入れ替わる潮流変動を示しているが、恒流は明石川を挟んで複雑な流況を呈している。明石川前面の恒流は西向きに 30～40 cm/s である。

明石川河口および東播磨海岸の底質の移動とそれに伴う地形変化は非常に複雑であり¹⁾、河口閉塞を起し易い波動流型の河口である。両岸から三角状の砂洲が常時発達しており、その砂洲端はきわめて崩れ易く、波浪変化に追従して変形することが観測された。実際、今回の観測期間においても、一洪水あるいは冬季波浪により短期間のうちに地形が変化することを確認した。したがって、河口地形の把握が河川水の拡がりを議論する場合に重要となる。また、河口付近の海底地形は、図-1 に示すように、明石川河口より西方では 10m 以浅の平坦であるが、河川軸上の沖合 600m で勾配 1/3～1/5 の著しい海崖となって水深が落ちこんでいる。沖合海域は明石海峡潮流の主流域をなしていることから、この海崖部分で湧昇流が発達する可能性もあり、河川濁水は海崖に沿って顕著な潮目を形成している。

(2) 現地観測の概要

現地調査は、1981 年 6 月から 1983 年 7 月の期間で流域での平均降水量が 30 mm/day 以上となる降水を対象

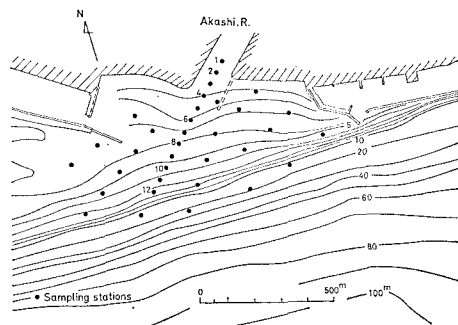


図-1 明石川河口域の海底地形と観測点

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 大阪大学講師 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 (株)関西電力 建設部

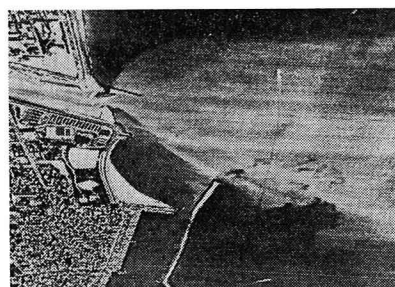
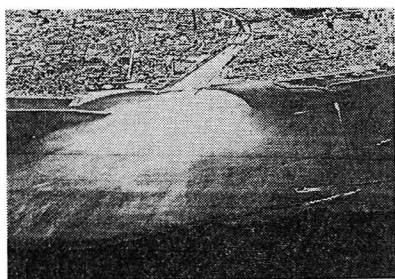
に実施した。海洋観測 8 回、航空写真観測 7 回の延べ 15 回である。そのうち、両観測の対比可能な観測が 4 回ある。また、河口域の流れは西流 5 回、東流 2 回、転流時 4 回であり、本研究では転流時の静穏な海域での河口流出を考察対象とする。

海洋観測では、河口から放射状に配置した 35 の観測点（図—1 参照）の鉛直方向 4 水深で塩分濃度と水温をサリノメーター（EIL 社製 MC-5）で測定するとともに、塩分濃度検定のための採水も行なった。また、同時に漂流桿を投入して、水表面下 50 cm における流速と流跡を測定する流況調査も行なった。航空写真観測では、流域の地質からみて土砂による濁水の流出が顕著であることから、ヘリコプターを飛ばして河口流出流の濁りを撮影するとともに、濁水の拡散域を図化した。任意時刻の当該海域の潮流の概況は既知であるから、河川水の動向のおおよそを知ることができる。また、観測時には河口より上流 120 m の地点で、CM-2 流速計により約 2.5 m 間隔に 6～8 点で流速の断面分布を測り、30 分毎の河川流量を算出した。

3. 現地観測結果

（1）河川水の拡がり状況

写真—1 は 1983 年 6 月 21 日の転流時に撮影されたものであり、河川流量は現地調査で最大の $29.1 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。潮位が低いために、河川水は左右両側から伸びている砂洲の中央を流れ落ちるように流出しており、河口付近で極端に拡がっている様子がわかる。もっとも、河川水中の濁りは海水中で凝集されるために、濁りの拡が



写真—1 明石川出水時の航空写真（1983 年 6 月 21 日）

りと淡水影響範囲との間には多少の相違を含むが、おおよその拡がり範囲はわかる。河口から放射状に流出した河川濁水はその東端で弱い西向きの潮流の影響を受けて潮目を形成しており、またその南端は 10 m 等水深線上で明瞭な潮目を描いている。後者は明石海峡主流に原因する湧昇流による濁水の収斂を表わしており、この海域における固定的な南限であると推定することができる。写真に見られる漁船の航跡から判断して、濁水域の層厚は 0.5 m 内外であろう。

7 回の航空写真観測から河川水の拡がり状況は定性的に以下のように把握できる。潮流の卓越した海域で河川流量の比較的小さい場合には、河口流出流はいずれも流軸を強く曲げられて沿岸沿いに拡がっており、海象条件が拡がりを規定する基本的な要因となっている。また、塩水くさびの河道内への侵入が確認できるような流量の小さい場合には、河川水の拡がりは水表面の極く薄い層に限られ、しかもその範囲は河口付近に局在化するようである。また、波高 1 m 程度の風浪下においても、河川水の層厚は 1～1.5 m 程度にとどまっており、異質水塊間の不連続性の強さと界面の重力安定性を示している。

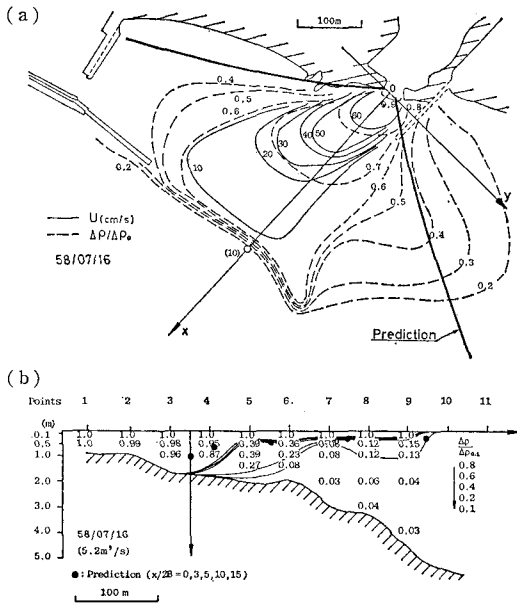
（2）静穏海域における実測結果

潮流の影響の少ない転流時に実施された観測は 4 ケースある。その観測諸元を表—1 に示す。また、図—2～4 は流量の異なる場合の実測結果を示す。各図の上図 (a) の実線と破線はそれぞれ漂流桿による流況調査結果に基づいて描かれた水表面下 0.5 m 層における等流速線と、塩分濃度分布より求めた 0.1 m 層の等希釈率線 $4\rho_{0.1}/4\rho_0$ を示す。また、下図 (b) は河川軸における密度差 $\Delta\rho$ の鉛直方向分布をその断面の $4\rho_{0.1}$ で無次元化して示す。

図—2 は初期密度フルード数 $F_{d0} (=Q_0/\sqrt{\varepsilon_0 g B_0 H_0^3})$ 、ここに、淡塩水間の相対密度差 $\varepsilon_0=0.025$ である。）の推定値が約 1.0 の河口流出流の拡がりを示す。実測を行なった時間帯は弱い東流時（約 0.2 m/s）であり、南東の風が 4～5 m/s で吹いており現場での波高は 0.2 m 程度であった。この影響を受けて河口より 300 m 地点（すなわち防波堤の延長線と河川軸との交点）以南では河川水は拡散され、ほとんど消失している。河口に投入された漂流桿は河川水によって約 50 cm/s で流され、100 m ほど流れると約 15 cm/s の流速でやや西よりに向きを変える。その後、300 m 地点を越えると、沖合の潮流にの

表—1 観測データ

Case	実施日	流量 (m^3/s)	$2B_0$ (m)	H_0 (m)	F_{d0}
1	82/11/06	0.9	100	—	—
2	83/07/16	5.2	18	0.8	1.0
3	83/04/20	15.0	20	0.8	2.1
4	83/06/21	29.1	20	0.7	4.1

図-2 実測結果 (Case 2, $Q_0=5.2 \text{ m}^3/\text{s}$)

って東に向かって流れる。

図-2 (b) をみれば、河口から 120 m の範囲で弱い塩水くさびと混入型の鉛直循環の兆候が認められ、河川水は塩水を徐々に自身の中にとり込みながら流下する。それを過ぎると河川水は急激にその層厚を減じ海面上を四方に拡がってゆく。それは水表面下の極く薄い層に限られている。また、その水平方向の拡がりには図-2 (a) に示されるように河口からの距離とともに指数関数的に増大する。周囲海水の混入が少ないために、流下方向の希釈率の逓減は非常に小さい。河川水が潮流と出会う 300 m 地点以南では、河川水は渦動拡散により完全に混合・希釈されている。

図-3, 4 は転流時の実測例であり、流量は両者ともに明石川の平水時流量と比較して非常に多い。図-3 は F_{a0} の推定値が約 2.1 の河口流出である。この流れでも、図-2 と同様に、浮力による成層効果が河口より直ちに働き、鉛直下方への拡がりが抑制されるとともに、河川水は水平方向に急激に拡げられている。しかしながら、その程度は図-2 と比較して少し小さい。また、周囲海水を連行する噴流型の挙動が河口付近で観測され、河口を離れた領域では河口流出水と海水との間に比較的に明瞭な成層界面が水平に形成されている。

図-4 は F_{a0} の推定値が約 4.1 の例である。実測時の平均流量は $29.1 \text{ m}^3/\text{s}$ と最も大きく、図-2, 3 と比較して運動量流束の勝った流れである。流出直後の河川水は噴流型の挙動を呈して周囲海水を大量に連行しながら鉛直下方へも拡がる。また、運動量は保存され、等流速線の拡がりは比較的小さい。流下するにつれて成層化が

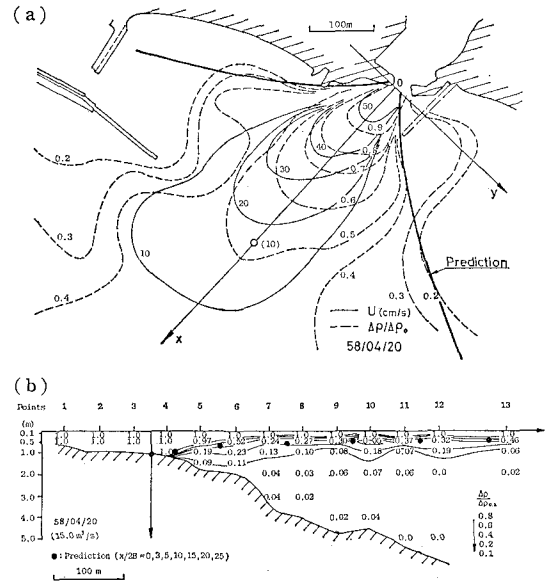
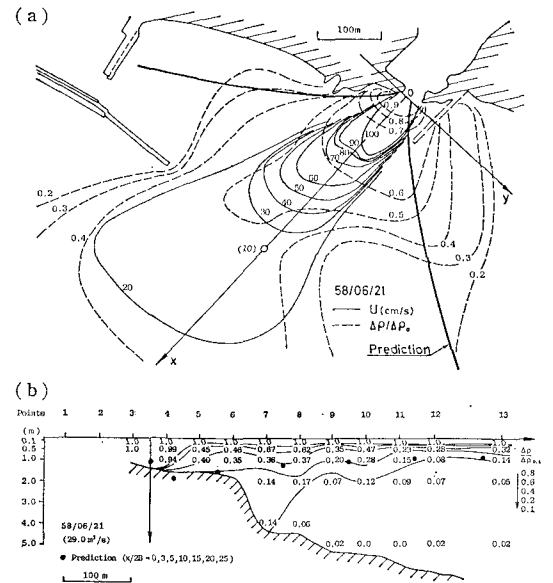
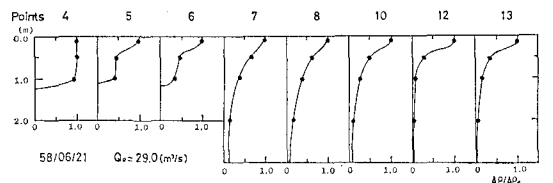
図-3 実測結果 (Case 3, $Q_0=15.0 \text{ m}^3/\text{s}$)図-4 実測結果 (Case 4, $Q_0=29.1 \text{ m}^3/\text{s}$)

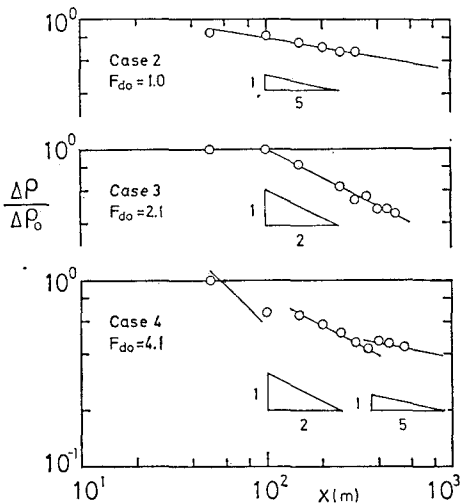
図-5 密度差の鉛直方向分布 (Case 4)

次第に進み、層厚が減少してゆく傾向にある。図-5 はこのときの密度差 $\Delta\rho/\Delta\rho_0$ の鉛直方向分布を示したものであり、流下にともない噴流型のガウス分布形から成層

流型の矩形へと移り変わる様子がよくわかる。また、**図—4 (b)** および **図—5** を詳細にみれば、測点 7 (河口から 170 m) の密度差の鉛直方向分布が 0.5 m 層で脹らんでいるのがわかる。希釈率 $\Delta\rho_{0.1}/\Delta\rho_0$ の実測値も測点 6 (120 m) で 0.28、測点 7 で 0.38 と流下方向に増加している。これには水深が測点 6 で 2 m から 4.4 m へと急増大していることが関係しており、噴流型の河口流出水は海底地形の影響を直接的に受けることを示している。

図—4 (a) の等希釈率線の平面分布は等流速線のそれと比較して河口付近から著しく拡がっており、**図—3 (a)** の傾向とは少し異なっている。これは前述した噴流型挙動に加えて、**写真—1** で述べたように河川水は河口で流れ落ちるように射流状態で流出しており、その結果、局所的な混合が生じたことに原因している。このことは河口から 300 m の流下位置になると、等流速線と等希釈率線とがほぼ合致することからも予測できる。

つぎに、河川軸上の水表面下 0.1 m 層での密度差 $\Delta\rho/\Delta\rho_0$ の通減特性を調べたのが **図—6** である。Case 2, 3, 4 はそれぞれ **図—2, 3, 4** に対応している。Case 2 では密度差の通減率は $-1/5$ 乗則に従っている。このときの河川水は薄い層で海面上を拡がっており、周囲海水の連行はほとんどないものと推察される。Case 3 では流出後直ちに平面噴流の $-1/2$ 乗則に従って通減する。Case 4 の流出直後の噴流型挙動を呈する範囲では三次元均質噴流の -1 乗則に近いが、成層化するに伴い平面噴流の $-1/2$ 乗則に移行し、さらに流下すると Case 2 でみられた $-1/5$ 乗則へと移り変わっている。流出形態と通減特性とが密接に関連しており興味深い。また、 $-1/5$ 乗則の通減率は今までに指摘されたことのない特性であるが、現時点では物理的に説明し難い。



図—6 密度差の流下方向通減特性

4. 河川水拡散の数値解析

(1) 数値解析の概要

数値解析は質量、浮力および運動量の流下方向保存則に基づいた積分モデルを展開して行なった。(詳細は文献 2) 参照。) このとき、流速および密度差の分布形は矩形を仮定している。その主な理由は、河口流出流では形状比が非常に大きいことに加えて、強い浮力効果のために分布形が矩形に近いという実測結果による。また、密度差に起因して生じる圧力勾配は水面上昇量を考慮した形で静的に評価している。以上のようにして、つぎの積分方程式系が誘導される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dx}(UBH) &= (E_b H + E_v B) U \\ \frac{d}{dx}(\Delta\rho \cdot g \cdot UBH) &= 0 \\ \frac{d}{dx}(2 \cdot U^2 BH) &= -\frac{d}{dx}\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_a} g BH^2\right) \end{aligned} \right\} \cdots (1)$$

ここに、 U 、 $\Delta\rho$ は流下方向平均流速と平均密度差、 H 、 B は河口流出流の水深と半幅、 E_b 、 E_v は横方向ならびに鉛直方向の連行係数、 ρ_a は周囲海水の密度を表わす。

式 (1) を項別積分することにより、 U 、 $\Delta\rho$ 、 H に関する連立一階常微分方程式を得る。

また、モデルの展開に際しては、浮力効果を (i) 鉛直方向連行係数の低減と (ii) 横方向拡がり率の増大の二面から導入した。(i) の効果については鉛直方向連行係数 E_v を断面平均密度フルード数 F_d の関数として表現する Koh³⁾ の実験式を採用した。(ii) の効果は、横方向拡がり率 dB/dx が均質噴流のせん断乱れによる拡がり率 $(dB/dx)_{nb}$ と浮力のみによる拡がり率 $(dB/dx)_b$ の和であると考え、次式で与えられる。

$$\frac{dB}{dx} = \left(\frac{dB}{dx}\right)_{nb} + \left(\frac{dB}{dx}\right)_b \cdots \cdots (2)$$

上式中の第二項は水表面上を拡がる密度流塊の拡がり速度で近似できることが実験的に確認されている⁴⁾ ことから、Prych⁵⁾ の提案式 (3) を採用した。

$$\left(\frac{dB}{dx}\right)_b = \frac{1}{\sqrt{F_d^2 - 1}} \cdots \cdots (3)$$

以上が基礎方程式であり、数値的に簡単に解ける。なお、初期コア領域は解析では考慮しなかった。

(2) 数値解析結果

形状比 $2B_0/H_0 = 20$ で初期密度フルード数 F_{d0} を 1.2 ~ 5.0 の範囲で変化させたときの、河口流出流の水利諸量の流下方向変化を **図—7** に示す。明石川の河口地形は砂洲の盛衰とともに変化するので、河口での水利諸量を正確に求めることは難しい。そこで、河口幅 $2B_0$ および水深 H_0 を航空写真や実測結果より推定し、 F_{d0} を求めれば、表—1 のような推定値を得る。したがって、**図—**

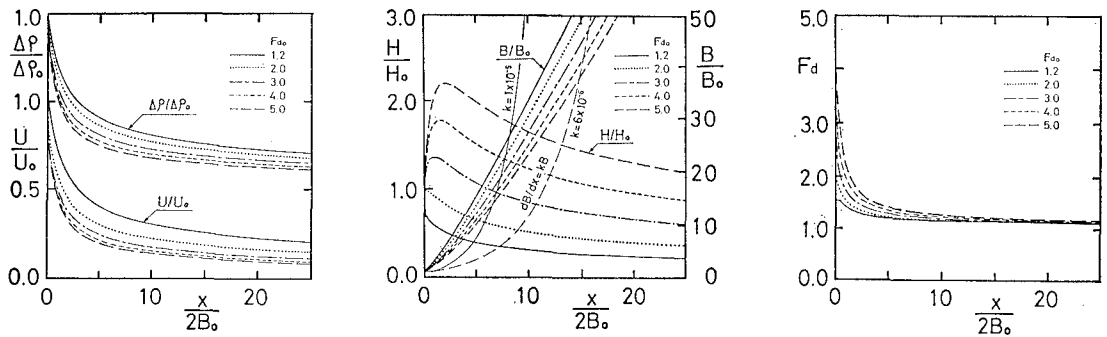


図-7 数値解析結果

2~4 中の防波堤延長線上の測点 (10) は 図-7 の横軸上の $x/2B_0=15\sim17$ に対応する。

流速 U と密度差 $\Delta\rho$ の低減は河口域近傍から始まっており、 F_{a0} の大きいほどその低減率は大きい。また、 U/U_0 の低減率は $\Delta\rho/\Delta\rho_0$ のそれと比較して若干大き目である。数値解析結果では U および $\Delta\rho$ はともに $x/2B_0=20$ で初期値の 10% 程度に減少している。これは 図-2~4 (a) の $\Delta\rho/\Delta\rho_0$ の実測結果と比較して極端に小さいが、実測値が水面下 0.1m の値を示しているのに対して、解析値は断面平均値を示していることに原因している。密度フルード数 F_a は U と $\Delta\rho$ の値の低減ともなっており、 $x/2B_0>15$ で 1.0 に漸近する傾向にある。

拡散幅 B および層厚 H の解析結果は 図-2~4 の実測結果にも太い実線 (図-(a)) と黒塗丸印 (図-(b)) で表示している。同図ならびに B と H の流下方向変化から推察すると、 F_{a0} の小さいほど、浮力効果が有効に働いて、横方向への拡がりが増大するとともに、層厚は減少する傾向にある。

一般に、拡散幅は流下距離の増加とともに指数関数的に増大することが知られている⁹⁾。この傾向は 図-2, 3 の解析解と実測値との比較においても明瞭に現われており、 $dB/dx=kB$ で表現するならば、図-7 の B/B_0 の変化に示したように k の値は $10^{-6}\sim6\times10^{-6}\text{ cm}^{-1}$ となる。この値は石狩川等での実測結果とよく一致している。図-4 の $F_{a0}=4.1$ の場合には解析解と実測値は一致しているとは言い難いが、3. (2) で述べたように、Case 4 は噴流型挙動を呈しているものと予想されており、相似関数表示を矩形としたことの誤差が現われていると考えられる。

これに対して、層厚の変化は $F_{a0}<2.0$ では流下とともに一様に低減するのに対して、 $F_{a0}>3.0$ では河口付

近で一旦増大してから一様に低減する傾向を示す。前論文²⁾の形状比と密度フルード数との関係図から推論すれば、形状比 $2B_0/H_0=20$ に対して $F_{a0}\approx 2.0$ が流動 I ($dH/dx>0$, $dU/dx<0$) と流動 II ($dH/dx<0$, $dU/dx<0$) の臨界値である。したがって、 $F_{a0}>2.0$ では噴流型挙動を、また $F_{a0}<2.0$ では塩水くさび型挙動を呈するものと推量できる。この解析結果は 図-2~4 (b) の実測された成層界面位置を非常に良好に説明する。

5. 結 語

明石川河口で実施した現地調査に基づき河口流出の拡がりの実態を明らかにするとともに、積分モデルによる数値解析を併用してその物理機構について考察した。

最後に、実測に際しては神戸市下水道局、並びに吉沢博主幹に多大の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 建設省近畿地建姫路工事事務所：東播海岸海底地形変遷調査報告書，1980。
- 2) Murota, A., K. Nakatsuji and Y. Shibagaki: Near field behaviors of three-dimensional buoyant surface discharges, J. Hydrosience and Hydr. Eng., Vol. 2, No. 2, 1984 (to be submitted).
- 3) Koh, R. C. Y.: Two-dimensional surface warm jet, Proc. ASCE, Vol. 97, HY6, pp. 819~836, 1971.
- 4) Murota, A., K. Muraoka and K. Nakatsuji: Initial entrainment and lateral spread of three-dimensional buoyant surface jet, J. Hydrosience and Hydr. Eng., Vol. 1, No. 2, pp. 33~51, 1983.
- 5) Prych, E.: An analysis of a jet into a turbulent fluid, Water Research, Vol. 7, pp. 647~657, 1973.
- 6) 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。