

密度成層をとり入れた大阪湾恒流の水理模型実験

石川 雅紀* ・ 熊谷 幹郎**・ 西村 肇***
藤原 建紀****・ 早川 典生*****

1. ま え が き

水理模型実験に、密度成層をとり入れた研究はあまり多くない。既往の研究は、一次元流路に近い estuary における塩水楔の研究^{1),2),3)}、温泉水の拡散の研究⁴⁾が多く、大阪湾のような、潮汐残差流である水平環流の有る所で、河川からの淡水流入による密度流が、恒流、物質の分散にどのように、影響を及ぼすか、について研究した例はまだ見あたらない。熊谷ら⁵⁾は、過去 50 年間の観測値を流量保存、鉛直 3 層は分ける、という条件で整理し恒流を推定した。この図には、地形性の潮汐残差流である時計回りの大環流の他に、夏季表層で湾奥部神戸沖に時計回りの小環流が示されている。また、大環流表層水は神戸沖で中層に沈み、岸和田沖で表層に浮きあがると推定している。熊谷らは、この原因として淀川からの淡水流入による密度流が重要ではないか、と推論している。大西⁶⁾は、2 層位モデルによる数値実験によって、恒流に浮力が影響を及ぼし、湾奥部における浮力については淡水流入ではないか、としている。この数値実験は上層 10 m としているため、湾奥部で密度流が、過少評価になっている可能性がある。

著者らは密度成層に着目し、水理模型に密度成層をとり入れる事により大阪湾において淡水流入が、潮汐残差流にどのような影響を及ぼすかの実験を行った。大型水理模型に海水を入れるのは、付着藻類、プランクトンの発生のため困難である。本実験では河川水の密度を小さくする事により、密度成層を実現させた。アルコール溶液と温水の使用を検討した。両者を比較すると、温水の場合、温度差約 50°C、アルコール溶液の場合、約 16% が、必要となる。表面冷却による鉛直混合の効果、熱損失、エタノール蒸発損失の比較を行い、河川水としてエタノール溶液を用いた。

この報告は、河川水に密度差が有る場合と、無い場合について恒流流速分布、染料の拡がりを比較、検討した

ものである。

2. 実験方法

実験は 1978 年 7 月 17 日、20 日にそれぞれ河川水に密度差が有る場合、無い場合の 2 case 行った。

(1) 水理模型と境界条件

水理模型は、瀬戸内海大型水理模型（中国工業技術試験所）を用いた。縮率は水平 2 000、鉛直 160 である。

潮汐の境界条件としては、関門海峡、豊後水道、紀伊水道で、大潮 (M2+S2) の振幅を連続して与えた。この模型は、この条件下で潮汐については振幅、位相とも原型を良く再現しており、差は ±10% 程度である⁷⁾。

河川としては淀川が淡水流量の主要部を占めるので、淀川のみを考慮した、流量として、夏季 (6, 7, 8 月) の過去 6 年 (1972~1977) 間の平均値 $318 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ より $80 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1}$ とした。淀川流量は、流量年表により枚方における流量をもって淀川流量とした。

密度差は内部フルード数 ($U/\sqrt{\Delta\rho/\rho \cdot gh}$) を等しくするように決めた。この模型の場合、フルード数 ($U/\sqrt{\rho gh}$) が等しくなるように設計されているので、 $\Delta\rho/\rho$ を原型と等しくすればよい、17% エタノール溶液を用い実測密度 0.9702 とした。

(2) 測 定

流速測定はフロートの写真撮影によった。フロートはポリビン内ブタ (直径約 8 cm) を用い、表層用、中層用の 2 種、約 100 個ずつ使った。中層フロートは約 5 mm の発泡スチロールを浮きとして用い、内ブタを 6 m 相当水深に錘りをつけ垂下した。河川水の拡散は染料 (ローダミン B) を入れ写真撮影を行った。染料濃度は河川水に密度差が有る場合 8.42 ppm、密度差が無い場合 29.4 ppm とした。写真撮影はモータードライブ付 35 mm カメラを 6 台使い、大阪湾、友ヶ島水道、明石海峡をカバーした。撮影は、流速測定は 1 周期 24 回とし、拡散撮影は干潮、満潮に撮影した。明石西流開始を時間原点にとり、50 周期の 1 周期フロート移動図を作成した。エタノールの蒸発損失の推定のため、染料とエタノールの定量を行った。染料は分光光度計、エタノールは TOC メーター (Beckman Model 915) によった。採水は実験

* 工修 東京大学大学院博士課程 化学工学科
** 正会員 工博 東京大学助手 化学工学科
*** 正会員 工博 東京大学教授 化学工学科
**** 正会員 工修 中国工業技術試験所 内海水理研究室
***** 正会員 Ph.D 中国工業技術試験所 内海水理研究室長

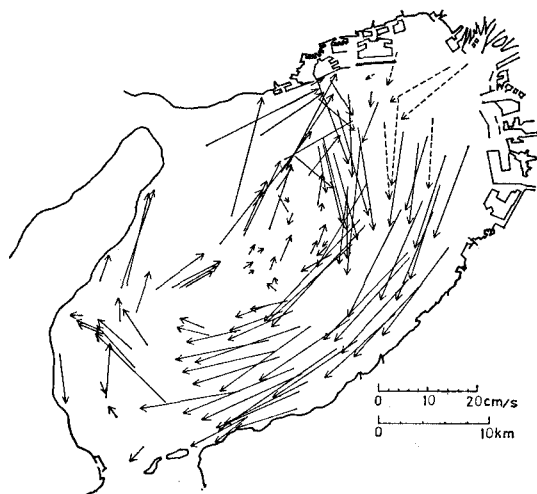
終了直前に沿岸より、主に 0~10 cm の水深より 8 点、河川水タンクより 1 点、計 9 点行った。

3. 結果と考察

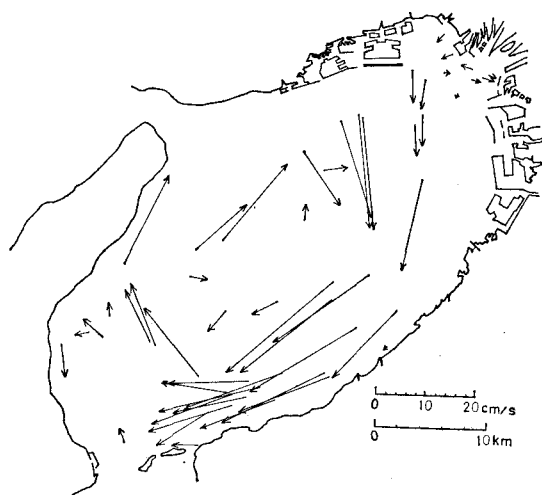
(1) 恒 流

図—1, 2, 3 に河川水流入後 50 周期での 1 周期フロート移動量を示す。この図を比較すると、密度成層が恒流に大きな影響を及ぼしている事がわかる。

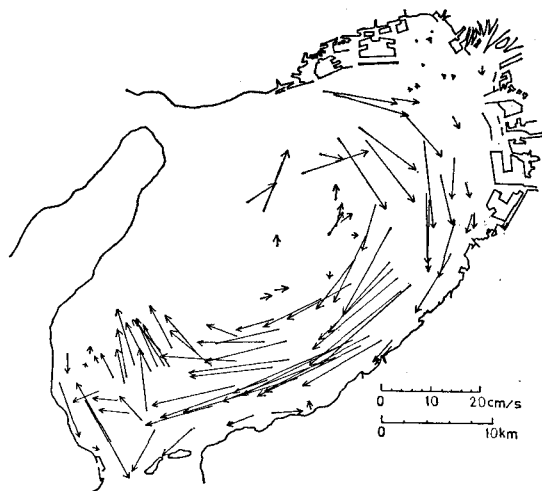
図—1 を見ると、河川水に密度差が有る場合、表層では湾奥部河口周辺より湾中心へ向かう流れの有る事がわかる。この流れは、神戸沖で東北へ向かう環流とぶつかり、急激に方向を南に変え泉南沖へ流れている。また、環流はこの流れのためポートアイランド沖より東へ流れる事ができず、同様にポートアイランド沖より泉南沖へ



図—1 河川水に密度差が有る場合の表層恒流



図—2 河川水に密度差が有る場合の中層恒流



図—3 河川水に密度差が無い場合の表層恒流

南下している。目視観察によれば、この南下流の東側境界に染料のフロントが観察され、フロントはこのフロントにそって動いているように見えた。

図—2 を見ると、河川水に密度差が有る場合、中層では表層と流れが異なる事がわかる。湾奥部河口周辺で流速の小さい複雑な流れが有る。また、六甲アイランド東隅より南下する流れが有るが、その流速は表層の南下流より小さく鉛直 shear の有る事がわかる。

図—3 を見ると河川水に密度差が無い場合、環流が発達し、湾奥部は停滞している事がわかる。また中層の流れは表層の流れと有意の差が無かった。原形の恒流と比較すると、泉南沖の代表的な値として模型 $20 \sim 30 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (原型流速換算)、原型 $10 \sim 30 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ であって、模型の恒流は少し大きいようである。なぜ大きいかは現在明らかではないが、このように潮汐残差流が強い場合にも、淡水流入による密度流の影響が顕著に現われた事は淡水流入による密度流の重要性を示唆しており興味深い。

熊谷らの恒流図に示されている神戸沖時計回り小環流は、水理模型実験では現われなかった。これは、模型がコリオリ力に関して相似でないためと考えられる。現在、著者らは数値実験を行い、この水理模型実験の結果を再現し、次のステップとしてコリオリ力を考慮し、原型の流れを再現する試みを行っている。途中結果によれば、コリオリ力を入れると河川水は河口付近で右旋するようである。

(2) 染料の拡がり

図—4, 5 に染料パッチの拡がるパターンを示す。図—4 を見ると、河川水に密度差が無い場合、河川水は明瞭な境界をもつ細い帯となって湾東岸を南下し、友ヶ島に至って海峡部の強い混合を受け淡路東岸を北上し、明石

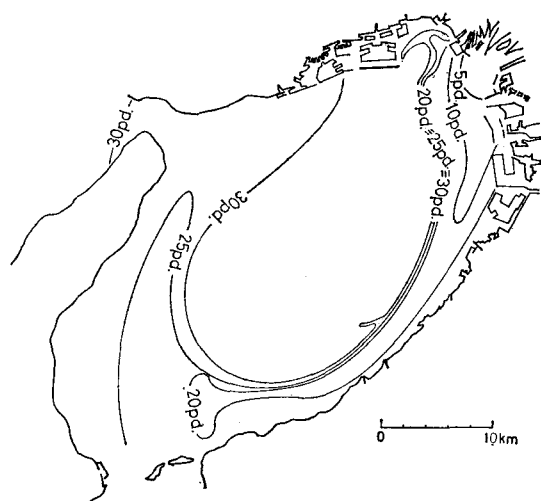


図-4 河川水に密度差が無い場合の染料の拡がり

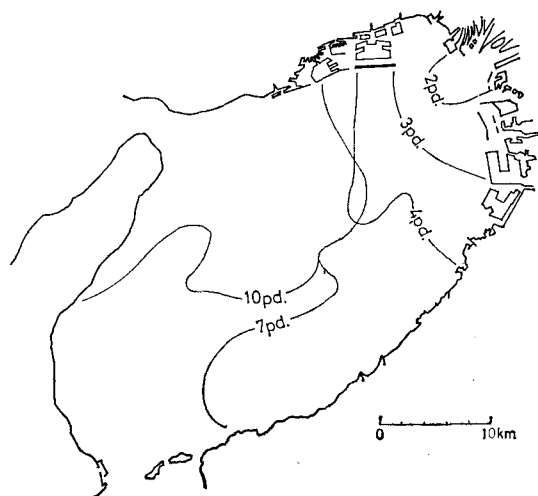


図-5 河川水に密度差が有る場合の染料の拡がり

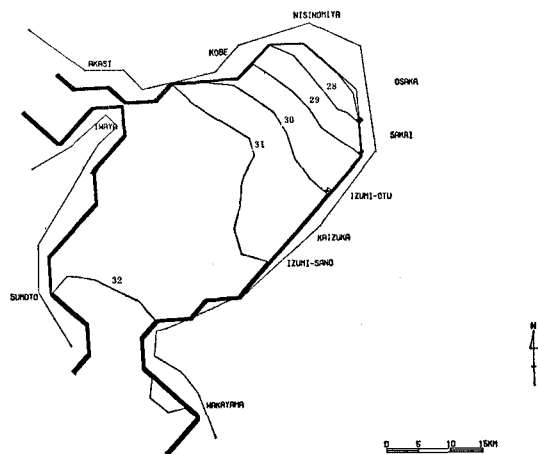


図-6 大阪湾夏季表層平均塩分分布

海峡に至る。この間、湾中央部には染料は拡がらず、明石海峡で混合された後、明石海峡から染料が湾中央部、神戸沖へ環流にのって拡がる。図-5を見ると、河川水に密度差が有る場合、六甲アイランドに到達するまではおおむね同心円状に拡がり、その後は湾東岸泉南沖を南下し友ヶ島水道をへて明石海峡に至る。

図-6に、城らによる観測結果⁹⁾より作成した、夏季表層における平均塩分分布を示す。図-4, 5, 6を比較すると、河川水に密度差が有る場合は染料の拡がりのパターンが原型の塩分分布と極めて良く対応している事がわかる。一方、河川水に密度差が無い場合はあまり対応していない。特に、湾東岸を南下する染料が細い帯状になり、かつ沿岸ぞいに南下して湾中央部へ拡がらない点、神戸沖へ向かっての河川水の張り出しが、無い点に問題がある。河川水に密度差が有る場合の分布は、河川水が自ら拡がろうとするポテンシャルを持っている事により容易に理解できるが、これが現場の塩分分布と対応が良いのは、現場の塩分分布に密度流の効果が大きく影響している事を示唆している。

実験期間中、継続して、河口を中心に半径 50 cm 程度の所に染料の色が薄く見える幅 10 cm 程度のバンドが存在した。このバンドは表面張力の違いによるものと思われる。このバンドでは、河川水の厚みが薄くなり、速度が大きく混合を伴っているように見えた。

(3) エタノールの蒸発損失

9 点の試水につき、ローダミン、エタノールを定量しローダミンが、保存すると仮定して、エタノールの蒸発損失を計算した。結果は表-1に示す。

表-1 エタノールの蒸発損失

場 所	水 深 (cm)	損失率 (%)
淀 川	0	10
淀 川 河 口	0	8
西 宮 沖	4	8
六甲アイランド沖	9.5	8
ポートアイランド沖	9	13
垂 水 沖	10	11
淡路島北東岸沖	0	16
〃	2	11
平 均 値		10.6

平均 10% 程度の損失があった。この損失は、河口からの距離が遠くなるにつれやや増加する傾向があり、エタノールの蒸発によるものと思われるが、あまり明確な分布はない。この程度であれば、定量的にはやや問題があるが、流速、染料の拡がりの定性的なパターンには影響は少ないであろう。

4. 結論と今後の問題点

- ① 河川水に密度差が無い場合、染料の拡がりが現場の塩分分布と対応していないが、密度差を与えると

現場の塩分分布と良い対応を得る事ができた。

- ② 河川水に密度差がある場合と無い場合の、恒流のパターンを比較すると、顕著な違いがあった。
- ③ 模型の恒流と現場の恒流のちがいがコリオリ力で説明できるかどうかは、今後の研究課題である。
- ④ 模型と現場での鉛直混合の違いは、重要であるから、今後の実験研究課題である。

参 考 文 献

- 1) Simmon, H. B.: Use of models in resolving tidal problems, J. Hydraulics Div., Proc. ASCE, Vol. 95, HY 1, January, pp. 125~146, 1969.
- 2) O'Connell, R. L. and C. M. Walter: Hydraulic model test of estuarine waste dispersion, J. Sanitary Eng. Div., Proc. ASCE, Vol. 89, SA 1, January, pp. 51~65, 1963.
- 3) Bailey, T. E., McCullough, C. A. and C. G. Gunnerson: Mixing and dispersion studies in San Francisco Bay, J. Sanitary Eng. Div., Proc. ASCE, Vol. 92, SA 5, October, pp. 23~45, 1966.
- 4) 樋口明生・杉本隆成: 潮流による拡散の水理模型実験について (II), 京都大学防災研年報第 11 号 B, pp. 447~461, 1968.
- 5) 熊谷幹郎・西村 肇: 大阪湾貧酸素水塊のシミュレーション, 海洋科学, Vol. 108, pp. 791~795.
- 6) 大西行雄: 大阪湾の恒流に関する数値実験, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 514~518, 1979.
- 7) 藤原建紀・早川典生: 明石海峡における流跡の報告書, 財団法人中国工業技術協会, 1977.
- 8) 城 久・西田明義・安部恒元・矢持 進・辻野耕実: 大阪府水産試験場事業報告, 大阪府水産試験場, 昭和 47 年度~昭和 52 年度.