

リモートセンシングによる河口拡散の実測 Study of Estuary Diffusion through Remote Sensing

東京理科大学 土木工学科 ○ 大 西 外 明
リモートセンシング技術センター 田 中 総 太 郎
富 山 県 大 西 信 久
東京理科大学 土木工学科 西 村 司

はじめに

海域における河川水の拡散現象の検討にさいては、解析的手法、数値シミュレーション、水理模型実験、現地調査等が有効な手段として用いられてきている。河川水の拡散現象は、対象とする河川および海域によって甚しく多様であるために、上記の諸手段のうちでも現地調査が最も重要視されなくてはならない。しかしながら検討対象となる河口部海域は広範囲であるうえに、海域の状態は短時間内に変動するため、地表あるいは海面からの観測により現象を正確に把握することは不可能に近い。このような場合に対する同時性の高い観測を可能とする方法としてリモートセンシングの応用が有効と考えられる。リモートセンシングは、海面を漂う海水や汚染油膜、水面温度分布、沿岸域における濁水域の探査等には有用な手段であることが既に知られており、近年、内外において数多くの観測例が報告されている。しかし、この手法を水理学の分野に本格的に導入するためには、画像が我々に提供する多様の情報を水理学的知見に照らして処理するシステムが確立されなくてはならない。以上の見地から著者らは富山湾内に流入する諸河川の湾内における拡散現象についてリモートセンシング手法を用いて検討を加えているが、本報告では小矢部川・庄川について現在まで得られた知見につき報告する。

1. 現地調査

1977年6月4日、図-1に示す6コースを選び、富山湾海岸沿いの陸地および海域を高度4,000mから観測した。観測時の天候は無風快晴であり、海面は静穏であった。機上にはM²Sスキャナー、ハッセルブラッドカメラおよびカラービデオカメラを搭載して、観測対象区域の同時撮影を行った。

M²Sスキャナーは視野角110°であり、海上4,000mから約11.4km巾の撮影が可能である。ここでは飛行高度の1.5倍の幅のデータだけが有効であると考え、コース間隔を6kmにとり実施したものである。M²Sスキャナーは0.3μより13μまでの電磁波を合計11個のバンドに分けて記録するようになっている。この情報を解析し、海面の温度、海水の透明度あるいは塩分濃度等を測定することを目標にした。

航空機による観測と併行して、図-2に示す海上の各点で、表面水温、SS、塩素イオン濃度および水の濁度の測定を行なった。観測当日の庄川

図-1

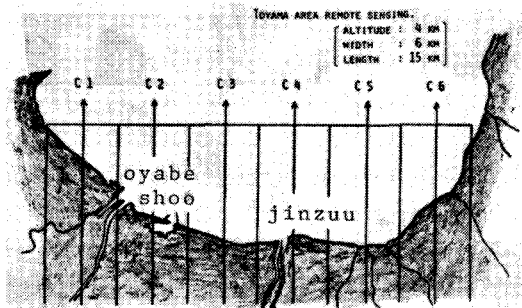
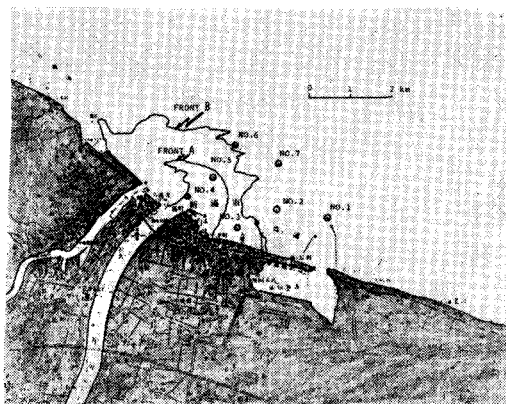


図-2



および小矢部川の河口部流量については、建設省富山工事事務所による観測結果を用いることにした。

なお、本撮影に使用したマルチスペクトルスキャナーは、従来、発電所からの温排水や河川水の拡散調査に利用されてきた熱領域だけを対象とする単バンドのサーマルスキャナーに比べて、紫外線領域から遠赤外線領域に至る電磁波を11バンドに分割してカバーするものであり、解析対象の適用範囲が極めて広いことが特徴である。

2. 河口部の赤外カラー映像および熱映像

撮影されたデータを一通り調べたところ、水理学的に最も興味深い現象を呈しているが、小矢部川と庄川の温度パターンであった。下の写真1,2は、両河川の河口に対象をあて、現地観測データを参考にしながらリモートセンシングデータの解析を行なったものである。そのさいに使用したデータはC-2コースのものであり、午後1時06分より1時09分の間に撮影された。赤外カラー映像（写真-1）は、9チャンネル、5チャンネル、および3チャンネルをそれぞれ赤、緑、青に対応させて表示したものである。また熱映像（写真-2）は、海上における現地観測データがあるので、温度パターン、特にフロントが最も明瞭に表示できるようなオフセットとゲイン（この場合、オフセット4、ゲイン8）を設定して、写真に示すようなカラーズライス映像を出したのである。

写真-1

写真-2



表-1. 海上測定結果

3. 観測結果

空中観測と併行して、図-2に示す各点で行った海上測定により得られた、海水の表面温度および水質に関する調査結果は表1のとおりである。図-2には、熱映像写真にみられる表面水温の不連続線（フロント）の位置も併記してある。フロントは、小矢部川からの流出水と海水との間と、小矢部川と庄川との間の二ヶ所で観測された。なお、観測点No.6は観測当日に発生していた赤潮水域の沿岸寄りの縁に位置しており、他の

資料番号	1	2	3	庄川河口	5	熱洲	7	8	9	神通川河口
塩素イオン(ppm) (規格 25.1)	5700	3100	4500	2200	6500	10,000	4800	5400	5900	160
水温(℃)	17.0	16.8	16.7	14.0	15.0	22.5	18.9	19.0	19.3	15.8
SS(ppm) (規格 10(2))	8	9	11	12	6	1700	10	12	9	5
濁度(度) JISK 101 規格 8.2	7	7	9	11	5	950	6	12	8	4
塩分濃度 (ppm)	10,300	5580	8100	3960	11,700	18,000	8640	9720	10,600	288

*塩分量(%)の概算値から、S₁...1.80655cedに基づいて換算したもの

[UNESCO (1966) : Second Report of the Joint panel on Oceanographic Tables and standards.
Unesco technical papers in marine science]

観測点に比べて水温は異常に高く、また透明度も低い。

河川水の、海域における拡散状態は、河川水と海水との密度分布、海面の静穏度、河川流量および河口部流速により大きく支配されるが、観測当日の庄川・小矢部川の河口部流量はつぎのとおりである。

庄 川	47.1	m^3/sec
大門観測所	10.8	m^3/sec
和田川	36.3	m^3/sec
小矢部川	41.6	m^3/sec
長江観測所	33.5	m^3/sec
租父川	5.0	m^3/sec
住吉	3.1	m^3/sec

上の流量を用い、また伏木港入口巾を180m平均水深を10mとして、小矢部川河口の流積を1800 m^2 と見積ると、小矢部川河口部での平均流出（放出速度）は約0.023 m/sec となる。

また庄川の河口部に関しては、表-2のような観測結果が得られている。いま、庄川河口部の流積を1519 m^2 とすると、河口部平均流出は0.03 m/sec となる。

表-2 庄川河口部横断面の特性

観測年月日	水面巾 (m)	流 積 (m^2)	平均河床高 (m)	最低河床高 (m)
S47・10	428.90	1511.80	-0.87	-3.22
S48・11	431	1493	-0.81	-3.22
S49・	429	1511	-0.96	-3.00
平 均	430	1519	-0.88	-3.18

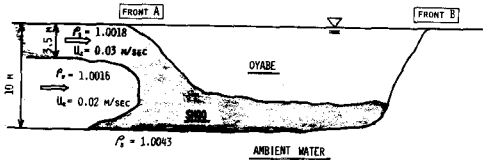
4. 現地調査結果に対する考察

表-3 水の密度の比較

	水温℃	塩素量 ppm	水の密度 g/cm^3
庄 川 河 口 部	14	2200	1.0018
小矢部川河口部	17	2000	1.0016
沖 合 部	19	4800	1.0048

図-3

1) 庄川および小矢部川からの流出水の拡散
一般に沿岸部海水の塩分濃度は18,000～20,000ppm程度以上であることを考えると、調査時における富山湾沿岸の海水濃度は低いものといえよう。それでも、図-2、写真2に示すように、庄川・小矢部川からの流出水と湾内海水との間に明瞭なフロントが観測された。小矢部川河口部の水温は、庄川河口部の測点No.4での水温実測値14℃と写真-2の色調を基に、約17℃と推算できる。また、同じく小矢部川河口部の塩素量を2000ppmと見積って、小矢部川河口部、庄川河口部（測点No.4）および沖合部（No.7）における海水との間で、水の密度を比較すると、表-3のようになる。すなわち、水の密度は小矢部川、庄川、沖合部の順に大きくなっている。



したがって小矢部川の流出は、湾内を表層流となって拡がり、湾内海水を加入しながら希釈されてフロント B を形成し、さらにその外側では、渦動拡散作用を通して海水中に消散していく。

一方、庄川からの流出水は、小矢部川流出水よりも密度が大きいため、いわゆる Negative buoyant jet として低下し、小矢部川流出水と湾内海水との間の内部境界面に達したのちは、5 節での実験結果に示すように、境界面に沿って流れ、次第に海水中に消散していく。すなわち、庄川からの流れの中心軸沿いに断面をとると、この水域では海底が沖合に向って急勾配で低下していることを考慮すると、模式的に図-3 に示すような三層密度流が形成されているものと考えられる。

図-4 のように密度 ρ_1 の水を密度 ρ_2 の水域に放流する場合、内部フルード数を次式で定義すると、

$$Fr = \frac{u_0}{\sqrt{g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} h_0}} \tag{1}$$

$Fr < 1$ の時、二層流間の内部境界面は安定に保たれることが広く知られている。
いま、庄川／小矢部川、小矢部川／海域、庄川／海域のそれぞれについて、 Fr の値を計算すると、表-4 のように $Fr \ll 1$ となっており、内部境界面の安定度は高いものと判断される。

さて、河川水の汚濁が海域の環境におよぼす影響を評価する場合等において、河川水の拡散範囲を適切に予知することが重要なことは言うまでもない。富山湾に流入する諸河川のそれぞれの拡散範囲あるいは影響範囲の評価にさいしては、従来から用いられてきているような水面における拡散面積だけに注目するのではなく、密度流的見地からの検討を、図-5⁽¹⁾ に例示したような湾内の流動特性を考慮にいれたいうえて評価することが重要である。

小矢部川の流出水のように表層流となって拡散している場合の水面での拡散範囲については新田が⁽²⁾ 永年にわたり現地調査した結果、河口より流出した河川水が 6 0 ～ 1 0 0 倍に希釈されたところにシャープなフロントが存在するとして、その内側の水域の面積 $A \text{ (m}^2\text{)}$ は、

$$\log A = 1.2261 \times \log Q + 0.0855 \tag{2}$$

但し $Q = \text{河川流量 (m}^3\text{/day)}$

の関係があると報告している。この式に小矢部川流量 $Q = 4 \text{ } 1.6 \text{ m}^3\text{/sec} (= 3.6 \times 10^5 \text{ m}^3\text{/day})$ を代入すると $A = 5.46 \times 10^6 \text{ m}^2$ をうる。この拡散水域が河口を中心に半円形をなすものとする、その半径は約 2 Km となり、図-2 にしめすようにフロント B の位置とほぼ一致する。また、現地調査当日、湾内には前記の

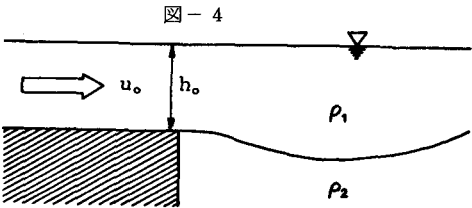
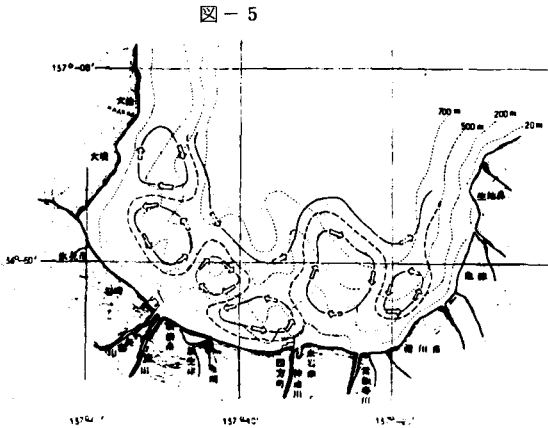


表-4 各水域の間の内部フルード数

	庄川／小矢部	小矢部／海域	庄川／海域
$u_0 \text{ (m/s)}$	0.0 3 1	0.0 2 3	0.0 3 1
$\rho_1 \text{ (g/cm}^3\text{)}$	1.0 0 1 8	1.0 0 1 6	1.0 0 1 8
$\rho_2 \text{ (g/cm}^3\text{)}$	1.0 0 1 6	1.0 0 4 8	1.0 0 4 8
$h_0 \text{ (m)}$	3.5 3	10.0	3.5 3
Fr	0.3 7 3	0.0 0 4	0.0 9 6



様に、測点No. 6より沖合部には赤潮が発生していたが、同湾内の赤潮発生域は流入河川の拡散域と一致して分布する傾向にあることから、フロントBを小矢部川の拡散範囲の境界と判断することが妥当と考えられる。

次に庄川についてであるが、フロントBの内部に流出する庄川の流量は、同水系ダム群の操作状態により、日時ごとに著しく変動するが、その流量がある程度以上の大きになると、フロントBの分布に無視しえないほどの変化をきたすものと考えられる。庄川の流出条件がフロントBに及ぼす影響の評価は今後の課題である。

2) 庄川河口東部水域の水質に及ぶ小矢部川の影響

庄川河口の東側の新湊海岸は、富山湾西部のうちでも特に侵食性の激しい海岸として知られている。同海岸東側に富山新港が建設され、その周辺が工業化されるに伴い、この沿岸水域の水質劣化についての懸念がもたれているが、今回の現地調査では写真-2、図-2にみられるように、富山新港側からの影響は明確には認められてはいるが、むしろ西側からの小矢部川の流出水に覆われている。小矢部川沿いには大規模な工業地帯が発達し都市化も進んでいることから、小矢部川の下流部水温は庄川のそれを上まわる頻度が多く、写真-2の拡散パターンの発生率は高いものと推測される。庄川河口より東方に展開する新湊海岸水域内の諸現象については、従来、主として庄川により支配されるものとの印象をもたれていたが、上記のように、小矢部川からうける影響は決して無視しえないものである。

5. Negative buoyant jet の水理実験

熱赤外線によるリモートセンシングは広範囲の水面現象の観測に優れた方法ではあるが、庄川からの流出水が形成する Negative buoyant jet のような水面下での現象には不適である。そこで、庄川、小矢部川、湾内海水との間に存在すると考えられる図-4の様な Negative buoyant jet の挙動をみるために、簡単な室内模型実験を行った。

実験は東京理科大学土木工学科水理実験室内の図-6に示す密度流実験装置を用いて行なった。長さ6m、巾0.3mの水路内に、図-7のように密度 $\rho_1 = 1.0559$ の塩水と密度 $\rho_2 = 1.009$ の淡水との二層をつくり、水面に平行においた $\phi = 1.43\text{cm}$ の円管から密度 $\rho_3 = 1.008$ の塩水を表-5の条件で放流した。表中でQ：流量、u：放出速度、

$$Fr = u \sqrt{\frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_1} g d} \quad \text{である。}$$

表-5 円型放水管よりの放流条件

	Qcm/sec	Ucm/sec	Fr
Case-1	12.0	7.27	3.56
Case-2	31.5	19.1	9.50
Case-3	31.0	22.4	11.0

図-6

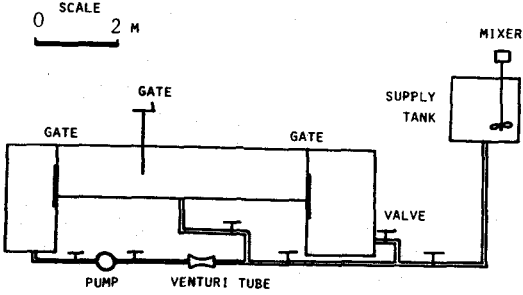
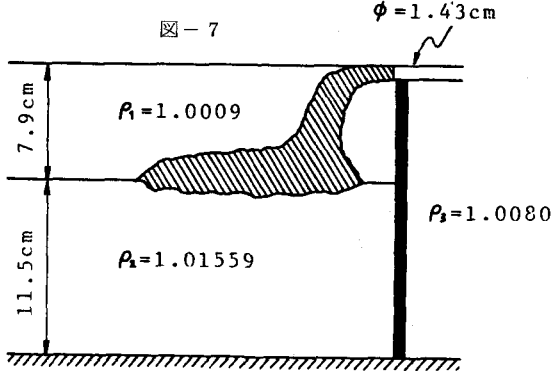


図-7



Case-1、Case-2 の密度分布は図-7のとおりであるが、Case 3 では内部境界面をはさんで中間層が存在する状態で行なった。写真-3はそれぞれの条件下でのNegative buoyant jet の状態の例であるが、図-8は時間と共に Negative buoyant jet が変化していく状態をしめす。この図にみられるように、水面から放流された噴流は、内部境界面に達したのちは時間と共に境界面沿いに水平に移動していくが、水面から境界面までの間の噴流形状は以後は定常状態に達して変化しない。

小矢部川の拡散領域内に放出された庄川からの流出水も同様の状態で小矢部川／湾内海水間の内部境界面沿いに伝播していくものと考えられる。

なお、Negative buoyant jet の内部境界面沿いの伝播速度を図-8の結果から求めると、Case 1 で 0.89cm/s 、Case 2 が 1.07cm/s 、Case 3 が 1.05cm/s となっている。

おわりに

以上、庄川・小矢部川河口部で得られたリモートセンシングデータを用いて、水温をパラメータとした解析結果についてのべた。パラメータの採り方としては、水温のほか濁度を用いることも現在検討中であるが、それについては別の機会に報告する。最後に、本研究の機会をつくっていただいた東京理科大学教授丸安隆和博士に深甚の謝意を表したい。また、現地調査に際しては、北陸電力土木部小野朝男氏、橋場弘氏、三菱商事二宮泰氏、パシフィック航業㈱加藤洋一氏の助力をいただいたことを特記し謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 港湾審議会第57回計画部会資料：伏木富山港湾計画資料-改訂-1973年8月。
- 2) 新田忠雄；“海洋域における工場排水の希釈と拡散について”、用水と排水（1963）。
- 3) 村上彰男；赤潮と富栄養化（公害対策技術同友会発行 P56、（1976）。）

写真-3

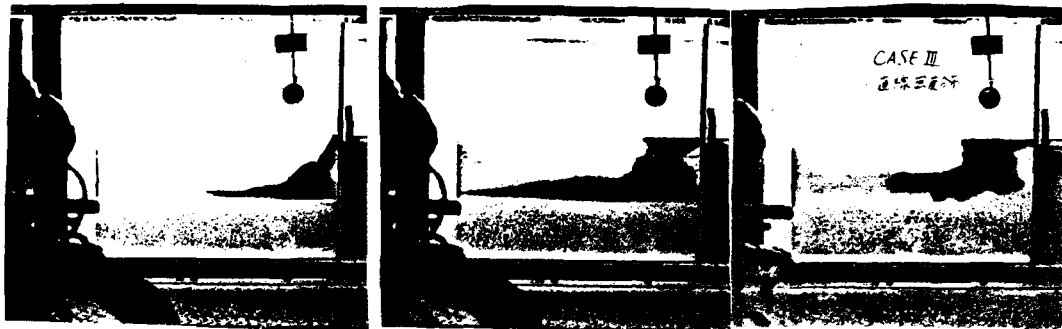


図-8 Jetの前進（4-sec毎に記録）

