

天塩川河口二層流の水理特性

西田修三*・吉田静男**

1. 緒 言

弱混合河口密度流における界面抵抗係数や連行係数に関しては、実河川から室内実験までの広範囲な規模にわたって調査・研究がなされ、定常二層流については、実用上、有効と考えられる経験式がいくつか提案されてきた^{1)~3)}。しかしながら、河口二層流の乱れや非定常性に関する調査・研究は少なく、データの蓄積が望まれている。そこで、潮汐に起因した河口二層流の非定常現象に主眼をおき、昭和58年の調査⁴⁾に引き続き、北海道天塩川河口部において野外調査を行った。ここでは、流況・塩分等の観測データを基に、潮汐に対する河口二層流の応答特性、及び、界面抵抗係数と連行係数の算定に与える潮汐の影響等に関して得られた知見について報告する。さらに、実河川の流れの実態をより明らかにするために、本調査では、2方向電磁流速計と新たに開発したフィールド用 LDA を用いた乱流計測も行った。その結果についても、併せて報告する。

2. 調査内容

天塩川(図-1)は、日本海側に河口を有し、北海道では石狩川に次ぐ流路長をもつ一級河川である。河口より上流 7 km までは水深 4~5 m、河幅 200~300 m のほ

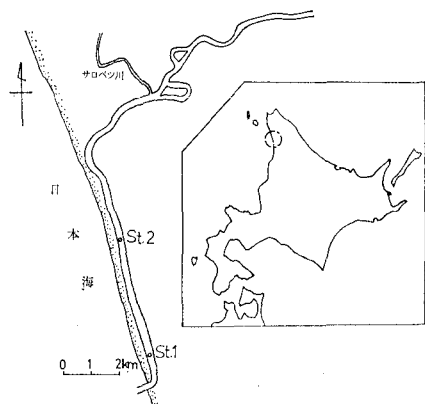


図-1 天塩川河口部

ぼ一様な直線流路となっており、密度構造は密度の急変する内部境界面を有する典型的な弱混合形式を呈している。

調査は、昭和60年8月5日~9日、北海道天塩町において行われた。その主たる調査項目は、以下のとおりである。

- 1) 船を使用した塩水くさびの形状及び流況・塩分の移動観測(河口より天塩川上流 20 km 及びサロベツ川分岐より上流 7 km まで)。使用機器: 超音波測深機, CM-II 型流速計, 電気伝導度計, その他。
- 2) 流況・塩分・水位の2定点における昼夜観測(8月6日 16:00~7日 17:00, St. 1: 河口より上流 1.5 km, St. 2: 河口より上流 5.5 km)。使用機器: リシャル式水位計, 内部界面追尾計, CM-II 型流速計, 電気伝導度計, 塩分計, その他。
- 3) St. 1 における LDA 及び2方向電磁流速計を用いた河川乱流計測。

調査項目 2) の下流側定点 St. 1 は流心より右岸寄りに舳(幅 6 m, 全長 19 m)をアンカーで固定し、観測ステーションとした。さらに、LDA 等を用いた精密な流速測定のために、舳より流心側約 2 m の地点に観測塔⁴⁾を設置し、波による動揺を除去し、データの収集を行った。また、上流側では橋(河口橋)を利用し、橋上より各測定を行った。

3. 調査結果

昼夜観測中、7日 7:00 と 15:00 の2度、St. 2 において流量観測を行い、それぞれ $49 \text{ m}^3/\text{s}$ 及び $110 \text{ m}^3/\text{s}$ の結果が得られ、本調査時の平均流量は約 $64 \text{ m}^3/\text{s}$ と計算された。

(1) 表面及び界面変動

図-2 は、4 km 離れた2定点 St. 1 と St. 2 における表面及び界面の 25 時間変化を示したものである。表面変動の振幅は2定点ともに 10 cm 程度であり、ほとんど減衰はみられず、また、位相もほぼ同位相で顕著な時間遅れは認められない。これに対し、界面変動はその振幅が 60 cm 以上に達し、水面変動に比べ極めて大きく、また、位相に関しても2定点で約3時間の遅れ

* 正会員 工博 八戸工業大学講師 工学部土木工学科

** 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部数物系共通講座

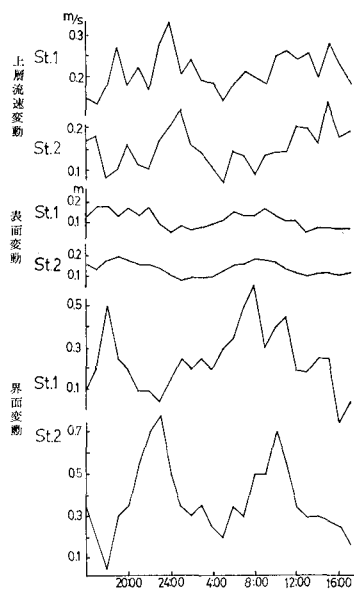


図-2 上層流速・表面位・界面位の時間変化

(相互相関より算出)を示している。ちなみに、二層流の界面波速式より2定点間の伝播時間を計算したところ、約2.7時間となり、実測との良い一致がみられた。従来の研究^{4),5)}によって、潮差が小さい時には、潮汐は内部波モードで上流に伝播し、潮差が著しくなると、満潮、干潮時を除けば表面波と同位相で伝播するという結果が得られているが、本調査結果もその傾向を支持するものとなっている。

また、St. 1においてはあまり顕著ではないが、St. 2を見る限り、淡水内平均流速は、水位変動よりはむしろ界面変動と相関が良く、界面変動に対し約3時間、周期にして約 $\pi/2$ の遅れを示しており、流速変動には界面変動が大きな役割を果していることがわかる。

(2) 密度及び流速の鉛直分布

St. 2 において1周期にわたり観測された流速分布と密度分布の変化のようすを描いたのが図-3である。予想どおり、界面低下時には塩水の逆流層が消失し、全層が流下しており、逆に、上昇時には塩水層内において逆流が卓越している。また、密度分布に関しては特徴的な変化はみられないが、界面位の最高時に混合層が厚く、最低時には薄くなり、再二層化が進む傾向にあるように見うけられる。以前の天塩川の観測結果⁶⁾と比べ、混合層が厚くなっているが、これは上流3ヶ所(河口より7 km, 13 km, 15 km)において行われていた浚渫工事の影響と考えられる。

(3) 界面抵抗係数及び連行係数

図-4 は、界面抵抗係数の時間変化を示したものである。前述のように2定点間の界面変動に位相差が存在するために、界面勾配より算出される f_i の値は一昼夜に

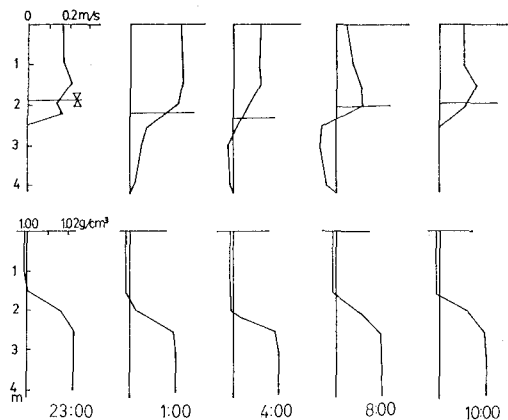


図-3 St. 2 における流速・密度の鉛直分布

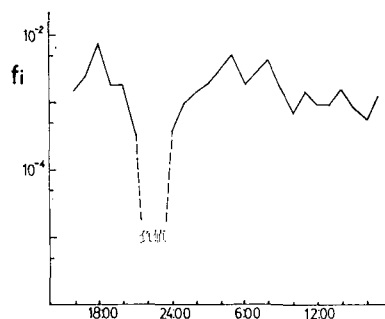


図-4 界面抵抗係数の時間変化

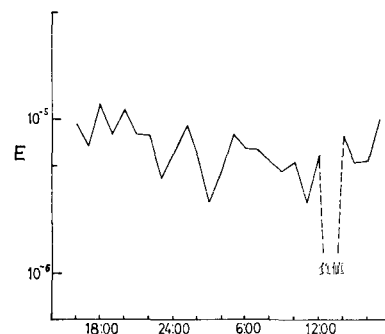


図-5 連行係数の時間変化

わたり大きく変動し、時には負値をえ示すこともある。また、次式により求めた連行係数も同様に潮汐の影響を受け、図-5 に示すように一昼夜にわたり大きく変動している。

$$f_i = \frac{2}{F_d^2(1+h_1/h_2)} \left\{ -(1-F_d^2) \frac{\Delta h_1}{\Delta x} + F_d^2 \frac{h_1}{B} \frac{\Delta B}{\Delta x} \right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

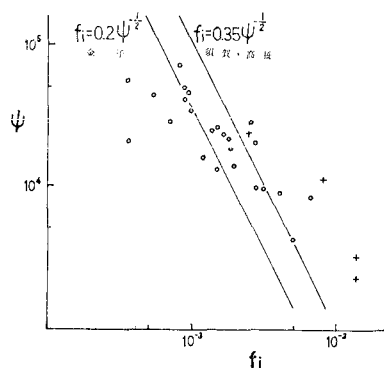
$$E = \frac{h_1}{\rho_2 - \rho_1} \frac{\Delta \rho_1}{\Delta x} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $F_d (=u_1/\sqrt{\varepsilon g h_1})$ は密度フルード数、 B は河幅、 x は下流向きにとった距離座標、 h, ρ は層厚、密度であり、添字 1, 2 はそれぞれ上層、下層の量を表わ

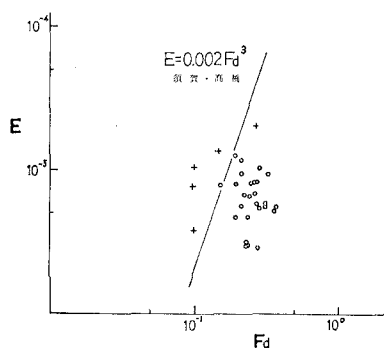
す。連行係数の算定に重要な上層密度として、密度がほぼ一定値を示す表層部の密度を採用した。界面を通して下層または上層より連行された流体塊により、界面付近には混合層が形成され、その密度分布が連行量の算定に重要な意味をもつことになる。しかしながら、実際の測定に際しては、連行量が少ないうえに、界面波の存在により、正確な密度分布を求めることは極めて困難である。そこで本解析では、便宜上、上述のように表層部の密度の変化より連行係数を算出することにした。

図—4, 5 より、界面抵抗係数及び連行係数の決定は、今のところ少なくとも1周期以上のデータを基に行う必要があることがわかる。図—6, 7 には、従来のデータ整理の方法に従い、 $f_i-\psi$, $E-Fa$ の関係を示した。図には、上記の昼夜観測の結果 ○ と船を用いた移動観測の結果 + も併せてプロットした。また、参考までに、金子¹⁾及び須賀・高橋²⁾によって提案されている関係式も示した。近年、界面抵抗係数 f_i と岩崎数 $\psi (=u_i^2/egv)$ の関係が注目され、多くの実験や野外観測が行われてきたが、野外観測データの散乱の最大の要因は潮汐による非定常性にあることがうかがえる。ちなみに、昼夜観測データより得られた25時間平均の ψ と f_i 、及び Fa と E の関係は、

$$\psi = 2.32 \times 10^4 \quad f_i = 1.39 \times 10^{-3}$$



図—6 岩崎数と界面抵抗係数の関係



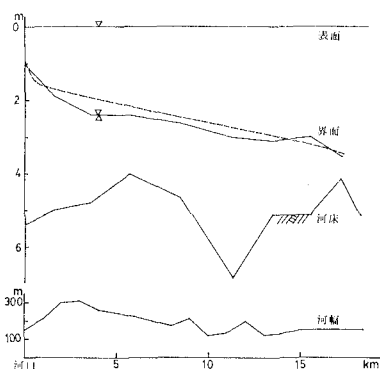
図—7 連行係数と密度フルード数の関係

$$Fa = 0.262 \quad E = 6.57 \times 10^{-6}$$

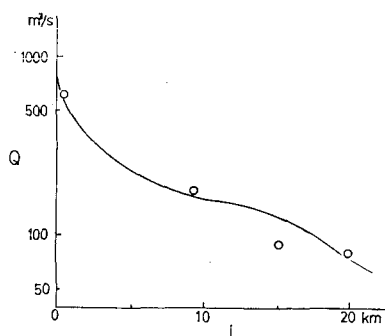
であった。連行係数の値が小さめに表われているのは、St. 2 の上流 1.5 km で行なわれていた浚渫工事の影響で上層密度が上昇したためとも考えられるが、憶測の域を出ない。今後、さらに実河川のデータを収集し、より合理的な界面抵抗係数及び連行係数の決定方法を見出す必要があると考える。

(4) 塩水くさび形状

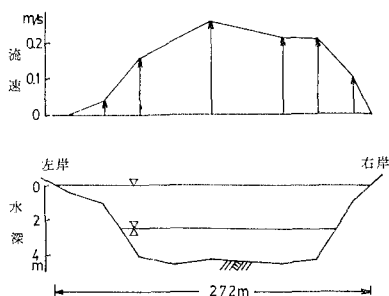
図—8 は、移動観測によって得られた塩水くさび形状である。(1)式を基に、準定常準一次元解析により得られたくさび形状も併せて描いてある。流量 $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$ 、界面抵抗係数 f_i としては須賀等の $f_i=0.35\psi^{0.5}$ を採用し計算を行った。さらに、流量を変えて同様の計算を行



図—8 塩水くさび形状 (— 実測, --- 計算)



図—9 流量と塩水くさび長の関係 (○ 実測値)



図—10 横断面流速分布と断面形状 (St. 2, 7日 15:00)

い、流量 Q とくさび長 L の関係を求めたのが、図-9である。図には、従来の数度にわたる天塩川調査データもプロットした。くさび形状、くさび長ともに、若干の違いはあるが、実用上は予測が可能であることがわかる。

本報では、流心において得られた水理データを基に、諸量の算出・評価を行なったが、例えば、流速に関しても図-10に示すように横断方向にその値は分布しており、今後、このような点を考慮した準一次元解析を進めていく必要があると考える。

(5) 流速・流向変動

LDA プローブを観測塔に支持し、波の影響を除去して測定された上層流速のデータと、そのパワースペクトルを図-11に示す(LDA システム及び詳細な流速データについては吉田・八木⁷⁾を参照)。表層部では、表面波による流速変動が 0.27 Hz 付近にスペクトルピークとなって現われている。水深が増すにつれ、低周波数側 0.15 Hz 付近に界面波によると思われるスペクトルピークが出現し、界面(水深 2.2 m)近くでは、その周波数帯が支配的となっていることがわかる。水深 1.9 m の流速データとスペクトルに見られる約 1.4 Hz の変動は、検討の結果、プローブ支持棒より生じたはく離渦によるものであり、河川が本来有する乱れではないことが明らかとなった。

2 定点における流況、塩分の昼夜観測とほぼ同時に、St. 1 において 2 方向電磁流速計を用いた下層内流速・流向の自動観測を行なった。センサー部が河床より上方

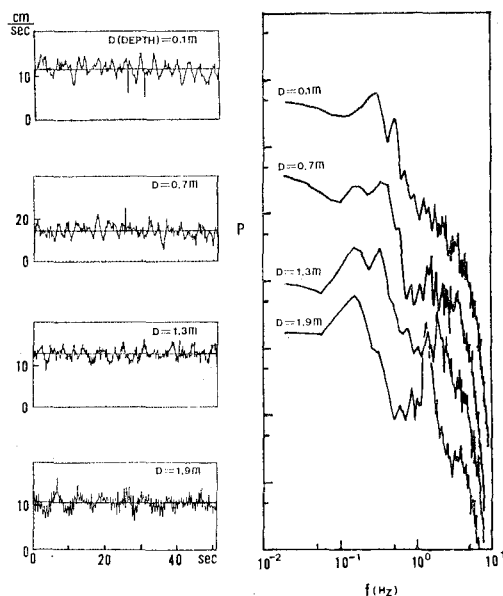


図-11 上層流速の変動とそのパワースペクトル

1 m の塩水中に位置するように流速計を観測塔横の河床に設置し、サンプリング間隔 0.5 秒で水平 2 方向流速を 25 時間連続測定し、一昼夜にわたる下層流速・流向の変化を調べた。図-12 は、得られた流速・流向データのうち、8 月 6 日 14:30 から 4 時間毎に、初めの 10 分間の流速・流向データを抜粋したものである。グラフ中の No. は、測定開始後 20 分毎に付けられた番号である。周期 3 ~ 4 秒程度の短周期の流速変動の他に、流速

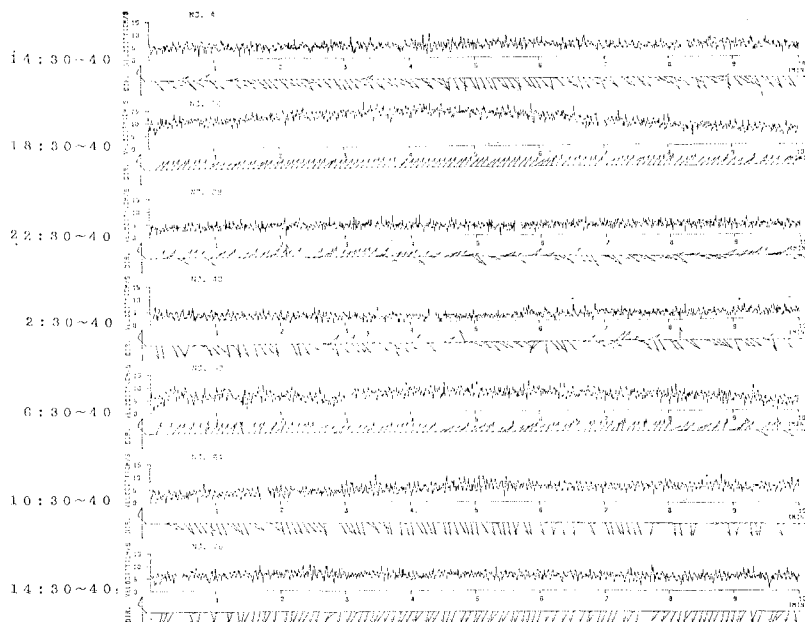


図-12 下層流速・流向の変動(河床より上方 1 m)

が 5 cm/s から 15 cm/s まで変化する周期 16 分程度の長周期の変動が見られる (No. 16). 以前の調査においても 20 分程度の長周期の変動が観測されており, 今回観測された結果とともに, 実河川における大規模な界面変動の存在を示唆するものとして興味深い. ちなみに, 長さスケールでは, 100 m 程度つまり河幅のオーダーの変動と考えられる. また, 図-12 の流向に着目すれば, 1 分程度の周期でゆっくりと流向がゆらいていることも読み取れる (No. 16, No. 52). そして, 5 cm/s 以下の低流速時には流向が大きく変化し, かなり複雑な流れ場となっている.

図-13 は, 電磁流速計のデータを基に, 一昼夜にわたる下層の流向・流速の変化を調べた結果である. 図中, 流向の欠落箇所は, ゆらぎのため流向の決定ができなかったところである. 概ね, 潮汐に合わせて周期的に順流・逆流を繰り返しているのがわかる. また, 流速は時には 15 cm/s 近くまで上がり大きな値を示し, 下層流速を無視し得ないことを示している. 底面付近の流れの実体の把握は, 底面摩擦力の評価や河床粗度の存在に伴う乱れの発生, さらに, 界面破壊の問題と関連し, 極めて重要であると考ええる.

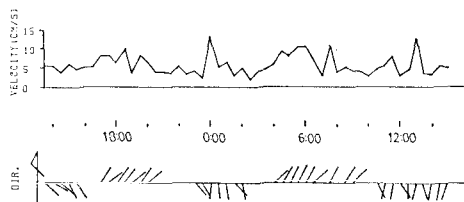


図-13 下層流速・流向の時間変化

4. 結 言

本報において, 潮差 10 cm 程度の小さな潮汐も, 弱混合河川では大きな界面変動を誘起し, 流速構造や, くさび長の算定に必要な界面抵抗係数等に大きな影響を及ぼすことを示した. また, 連行係数については前述のようにその算定方法に問題が残されている. 今後, さらに, データの蓄積を行い, 実河川の f_i や E の合理的かつ普遍的な算定方法の確立が望まれるところである.

本調査を遂行するにあたり, 天塩町, 日本気象協会北海道本部, 並びに, 日本データサービス(株)の多大な御援助を賜った. また, 八戸工業大学土木工学科四年(当時)中村成樹君, 三浦宏貴君はじめ研究室の学生諸君の助力も得た. ここに, あわせて深甚な感謝の意を表する次第である.

参 考 文 献

- 1) 金子安雄: 2層流境界面抵抗係数の一例, 第13回海岸工学講演集, pp. 263~267, 1966.
- 2) 須賀堯三・高橋 晃: 感潮河川の水利 II 内部抵抗係数と連行係数の実用式, 土木研究所報告, 第160号-2, pp. 37~66, 1983.
- 3) 玉井信行: 密度流の水利, 260 p., 技報堂出版, 1980.
- 4) 吉田静男・谷藤康造: 天塩川河口二層流と潮汐, 第28回水利講演会論文集, pp. 51~57, 1984.
- 5) Yoshida, S. and M. Kashiwamura: Tidal response of two-layer flow at a river mouth, Proc. 15th Coast. Eng. Conf., Vol. 4, pp. 3189~3207, 1976.
- 6) 吉田静男他: 弱混合河口二層流の特性, 第26回水利講演会論文集, pp. 507~512, 1982.
- 7) 吉田静男・八木史郎: 河川乱流計測用 LDA の開発, 第30回水利講演会論文集, pp. 541~546, 1986.