

河川の密度流と乱流

Density Current and Turbulence in Estuary

西田 修三

Shuzo NISHIDA

1. はじめに

日本近海の海水塩分濃度は約34～35‰、密度は純水に比して約2.5‰大きいに過ぎない。しかし、この僅かな密度差によって、外海水が河道を遡上し、また、河川水が海水面を広がるなど、特異な密度流現象を招いている。このような河口部の水理学的特性に関しては、環境問題や利水の面から数多くの調査研究がなされており、その力学的構造がある程度明らかにされるとともに、有用な実用式も幾つか提案されるに至っている。しかし、河口部感潮域では、潮汐や波浪、風や気圧変動など種々の外的因子が複雑に作用し、流動・拡散現象の詳細は未だ明らかにされていない。利水の面から、最も重要と考えられる農工業用水の塩害に関しても、精度の高い予測は難しく、現在でも度々被害が報告されている。また、浮遊砂泥の凝集沈澱や滞留海水による水質汚濁、さらには、魚介類の生息変化など、化学的、生物学的にも多くの問題を抱えている。

ここでは、河川感潮域に見られる密度流現象について、現地観測により得られた知見を基に、その流れと密度構造について述べるとともに、塩分拡散に重要な役割を果たす乱流特性についても言及する。

2. 混合形態による分類

河口密度流は、通常図-1に示す3つの密度構造に大別される。弱混合型は、河川水と海水が明瞭な2層を形成し、海水がくさび状に河道内に進入するもので、その形状から塩水くさびと呼ばれている。強混合型は、強い混合作用により密度が水深方向に一様化され縦断方向にのみ変化するものである。また、緩混合型は、その中間的な密度構造を有するものである。

須賀¹⁾は国内の90の一級河川について、感潮区間長と大潮時の潮位変動量をパラメタに混合形態を分類し、図-2に示す結果を得ている。そして、約20%が弱混合型、約70%が緩混合型に属し、強混合型は10%以下であったとしている。

この混合形態の相違は、主として潮位差の違いにより生じるものであるが、河床粗度や河床高などの地形

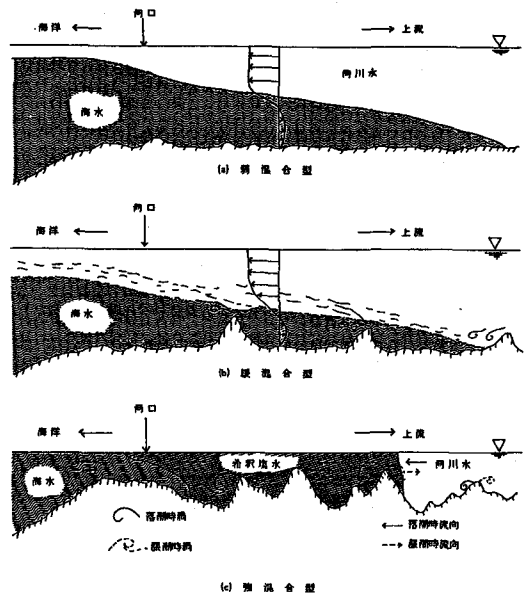


図-1 混合形態の分類

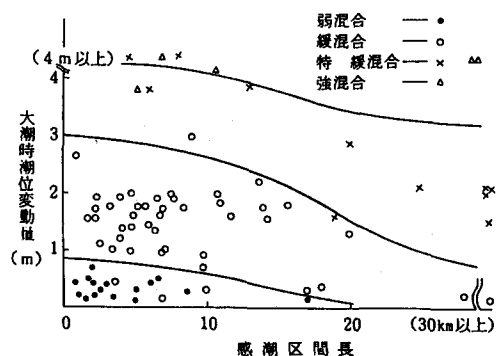


図-2 全国河川資料による混合形態の区分¹⁾

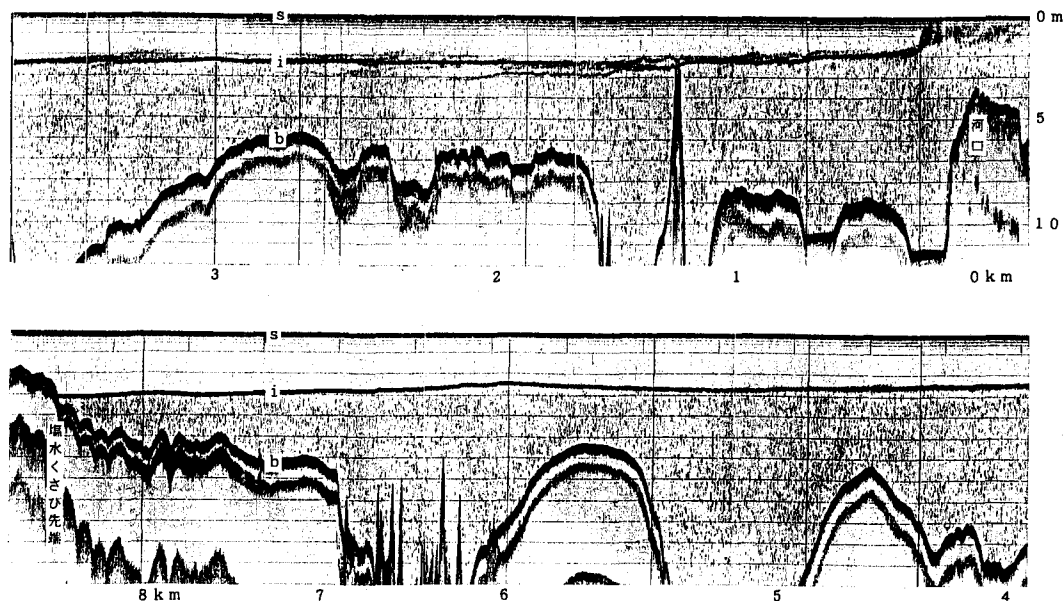


写真-1 石狩川の塩水遡上状況

的要素も大きく作用している。また、それぞれの河川がこの3つの混合形態に必ずしも明瞭に分類されとは限らず、河川によっては潮位変動に応じ時間的に異なった形態を示したり、また、地形の影響で空間的にも異なった混合形態を呈することも多い。

2-1 弱混合河川

比較的潮位差の小さい日本海側に河口を有する河川において見られる。北海道の石狩川や天塩川がその典型で、20km以上にも及ぶ塩水くさびの進入が観測されている。写真-1は河口から上流9kmまでの塩水進入状況を超音波測深機により観測・記録した結果である。sは水表面、iは密度境界面、bは河床を示している。河口より徐々に下層（塩水層）厚を減じ、上流8.5kmまできわめて明瞭な淡塩水2成層を形成していることがわかる。

このくさび形状は、定常で各層内一様密度を有し、かつ、下層が静止しているとの条件下では、以下に示す簡単な一次元の方程式で記述される²⁾。

$$\frac{dh_1}{dx} = \frac{Fd^2}{(1-Fd^2)} \left\{ \frac{fi}{2} \left(1 + \frac{h_1}{h_2} \right) + \frac{h_1}{B} \frac{dB}{dx} \right\}$$

ここに、xは河口より上流向きに取った距離座標、Bは河幅、 h_1 、 h_2 は上下層厚、Fdは上層流速 U_1 、相対密度差 ϵ を用いて $Fd = U_1 / \sqrt{\epsilon g h_1}$ で表される密度フルード数であり、fiは平均的な界面抵抗係数を表している。

界面抵抗は、せん断粘性、界面波、混合、乱流の影響を受け、局所的に異なった値を示し、理論的実験的

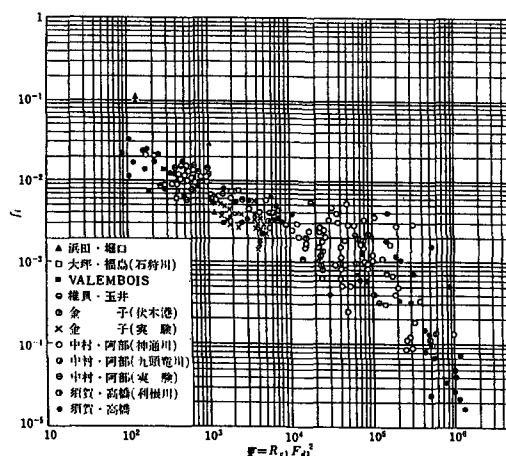


図-3 界面抵抗係数と岩崎数の関係³⁾

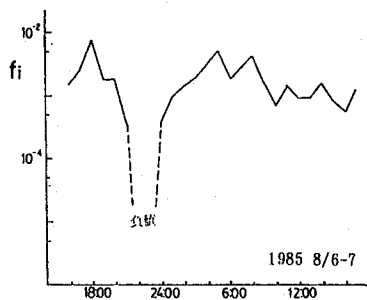


図-4 界面抵抗係数の経時変化

にその評価式は示されているものの、特に実河川において正確に見積ることはきわめて困難である。2地点において観測された水理データを基に、上式より界面抵抗係数を逆算し、岩崎数 $\psi = ReFd^2$ を用いて整理したのが、図-3である³⁾。データは散乱しているものの、ほぼ

$$fi = C\psi^{-n} \quad (C=0.2\sim0.35, n=-0.5)$$

の関係にあることがわかる。散乱の主たる原因は後述の潮汐による非定常性にある。図-4は、天塩川で実測された界面抵抗係数の経時変化である⁴⁾。このように潮汐の影響で時々刻々変化し、時には発生した界面波により境界面が逆勾配となり負値さへ示すこともある。その他、地形や境界面付近の密度構造によっても界面抵抗係数に差異が生じることになる。しかし、実用上は上式によって、平均的なくさび形状を予測することが可能である。計算は、理論的に示され、かつ、実測においてもほぼ確認されている $Fd=1$ を河口条件とし、対象河川の水深と河幅、さらに河川流量を与え、簡単な数値積分を行えばよい。一例として、石狩川において異なる流量時に観測されたくさび形状と、 $C=0.25$ として計算された結果を図-5に示す⁵⁾。その一致度は良好であり、実用に供し得ることがわかる。

さらに、潮汐に起因した非定常な塩水くさびの運動の解析¹⁾や、境界面での連行を考慮した解析⁶⁾もなされ、予測精度の向上が図られている。

2-2 緩混合河川

日本の河川はそのほとんどがこの緩混合型に含まれる。密度構造が縦断方向と水深方向に変化するために、前述の弱混合や後述の強混合の場合のような一次元の簡単な支配方程式で記述することはできず、連行・拡散を考慮した二次元の解析が必要となる。ただし、比較的密度の漸変層厚が薄い場合は、河川水と海水の中

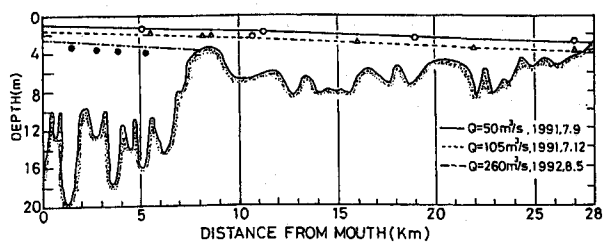


図-5 塩水くさび形状 (点: 実測, 線: 計算)

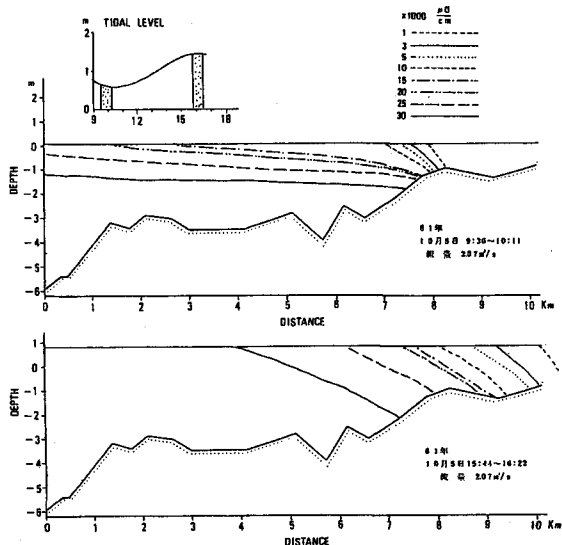


図-6 電導度の縦断構造

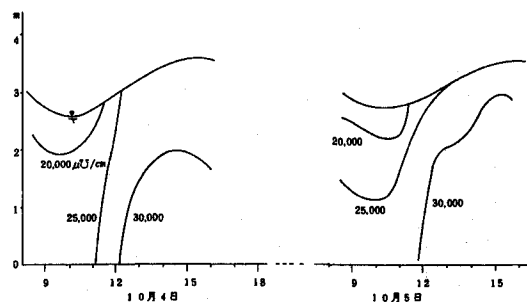


図-7 等密度面の経時変化

間密度を仮想境界面とみなし、近似的に弱混合型の方程式により、その形状を求めることも可能である。この緩混合河川の解析を最も困難にしているのは、潮汐による非定常性が密度構造に顕著に現れ、時間空間的に大きく変化することにある。その一例として、釧路川で干潮時と満潮時に観測された密度（電気伝導度）の縦断構造を図-6に示す。等密度線の勾配が時間空間的に大きく変化していることがわかる。また、図-7は河口より約2 km地点で観測された等密度面の経時変化である。底層の高濃度水塊が水表面に露出し、流れの間欠化が生じている。この現象は、釧路川に限った特異な現象ではなく、他の緩混合河川においても、また、室内実験によっても観測されており、緩混合河川の密度構造を決定する重要な役割を果たすとともに、その解析を困難なものにしている。この上層水の間欠化は、潮汐による水面変動と内部等密度面の変動（内部波）の振幅と位相差に基づくものと考えられるが、十分な解析はなされていない。

2-3 強混合河川

この混合形式を有する河川はきわめて少なく、潮位差の大きい西日本の河川でしばしば観測されている。図-8は有明海に注ぐ六角川で観測された塩分とSSの縦断構造である⁷⁾。密度構造が、水深方向にほぼ一様で流下方向にのみ変化している様子がよくわかる。このような場合には、以下の一次元分散方程式でほぼその構造を記述することができる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

ここに、C、Uは塩分濃度、流速を示し、Dは分散係数である。この分散係数は、流速分布形状に大きく依存し時間空間的に分布し、その平均の取り方によって値はかなり変化する。その評価に関してはFischerらの研究⁸⁾をはじめ多くの提案がなされている⁹⁾。また、一潮汐にわたり平均化して左辺第1項を消去した方程式も用いられるが、その場合は上述のように分散係数は当然ながら異なった値を示すことになる。

3. 河口部の非定常性

河口部では主として潮汐の作用により、流れ場、密度場が決定され、各種の混合形態が現れる。以下、河川感潮域の非定常性について少し詳細に述べることにする。

河川感潮域では、潮汐により1日または半日周期の流動周期が現れる。図-9は天塩川河口より上流5 km

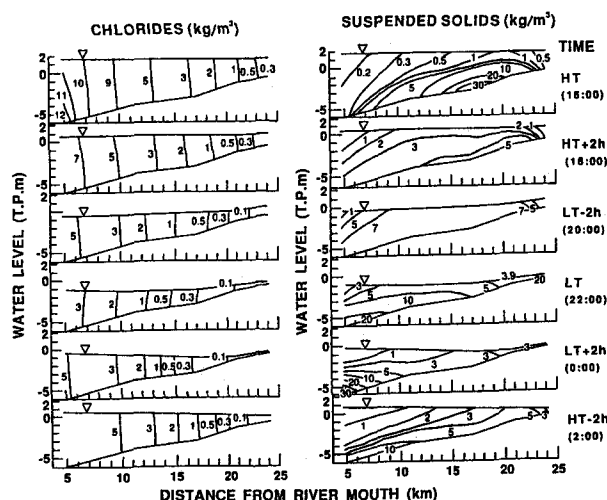


図-8 塩分、SSの縦断構造と経時変化⁷⁾

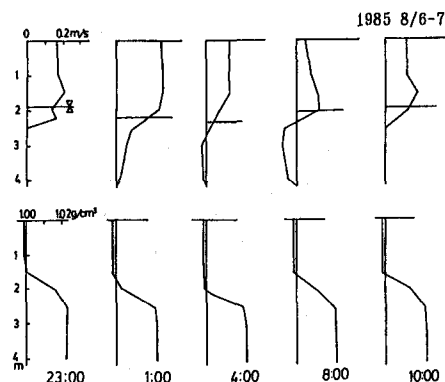


図-9 流速、密度の鉛直分布の一潮汐変化

地点で観測された一潮汐にわたる流速、密度の鉛直分布の変化を示している⁴⁾。概ね上げ潮時には下層部で逆流となるとともに上層流速が低下し、下げ潮時には下層流速は順流に転じ上層流速の増加が見られ、室内実験と同様の傾向を示していることがわかる。しかし、詳細に観測してみると、非定常性がかなり強く、図-10に示すように各水理量は時々刻々大きく変動している¹⁰⁾。また、図-11はレーザー流速計を水深方向に定速度で繰り返し降下させて計測した主流成分の鉛直分布である。一回のトラバースに要した時間は約2分である。約10分の間にもその分布形状は大きく変化し、特に密度境界面(水深1.5~2.0m)付近では速度勾配の著しい変化が認められる。これは、潮汐による長周期の変動に加え、入射波浪や反射波、さらには水面振動などの短周期の変動が存在することに起因している。図-12は天塩川においてサンプリング間隔1分で計測された水位の経時変化である¹¹⁾。下図は時間軸を5倍に引き延ばし、その1部を描いたものである。潮位差は約20cmと小さいが周期が数分から1時間にわたる全振幅5cm程度の水位変動が存在していることがわかる。FFT法を用いたスペクトル解析の結果(図-13)にも、3分、10分、2

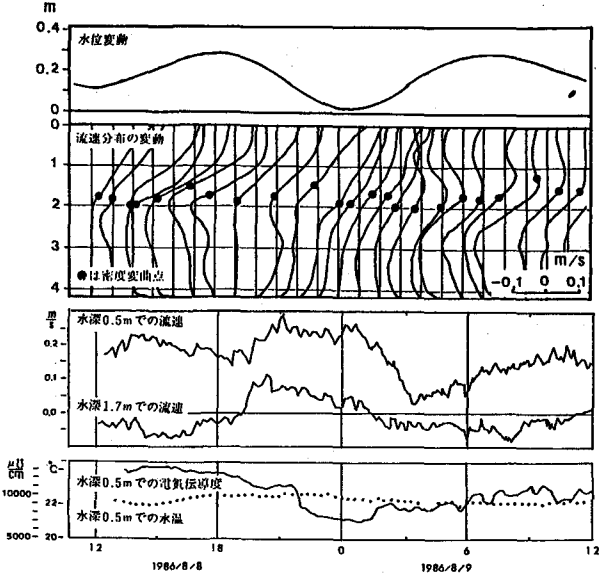


図-10 水理量の経時変化

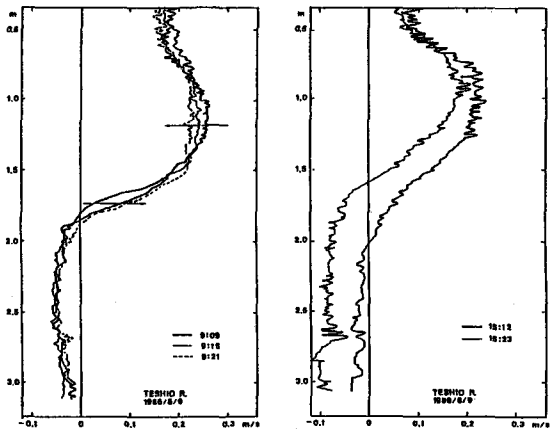


図-11 短時間の流速分布変動

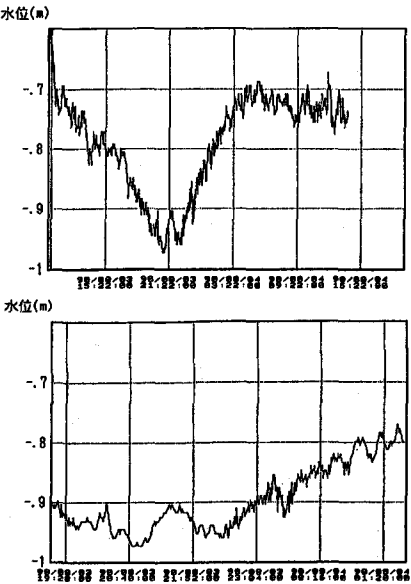


図-12 水位の経時変化

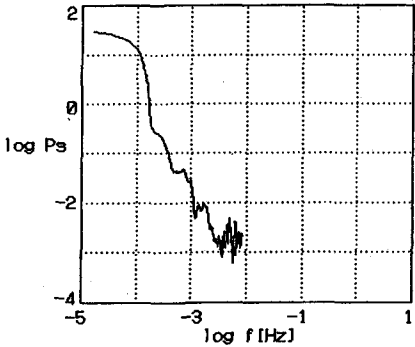


図-13 水位変動のパワースペクトル

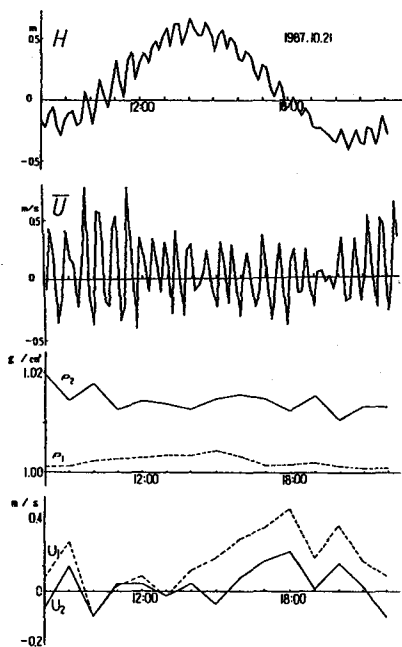


図-14 水理量の経時変化

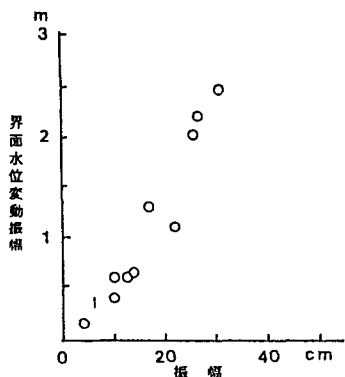


図-15 水位変動振幅と界面変動振幅

図-10の●が誘発されており、その影響の大きさがうかがえる。

川西ら¹⁴⁾は、大潮時に潮位差が4 mにも達する広島湾の太田川放水路において、流況、水質の連続観測を実施している。その結果を図-16に示す。流速(上流向きを正)は潮汐に対し $\pi/2$ の位相差をもち、その相関は良好であり放水路内の流動は潮汐流が支配的となっていることがわかる。また、密度は時間的に大きく変動するものの、水深 z 方向にほぼ一様化されており、強混合に近い密度構造を有していることがわかる。彼らのより詳細な検討によれば、流速の鉛直分布は密度勾配のために、上げ潮時と下げ潮時とはかなり異なり、下げ潮時には上げ潮時に比べ、上層の流速が大きく下層流速が小さい直線的な分布を示す。また、塩分濃度の経時変化は潮汐のような正弦的ではなく、干潮の前後で大きく変化し、満潮付近ではほぼ一定の濃度を示すとともに、上げ潮の塩分濃度増加時には鉛直方向の濃度差はほとんどみられないという結果が得られている。

このように、河口部の流況・水質は潮汐をはじめ多くの要因により、強い非定常性を有しており、その調

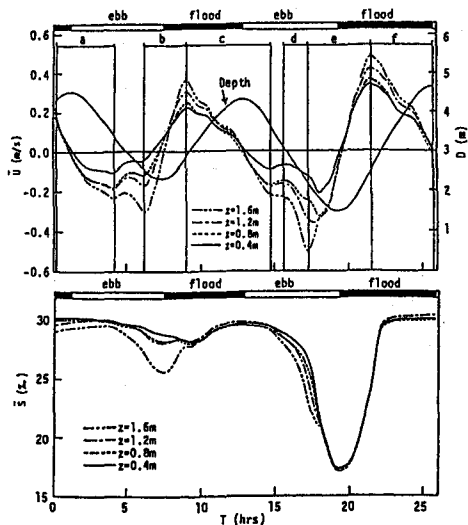


図-16 水理量の経時変化¹⁴⁾

0分の卓越した水位変動が現れている。流速の変動には、水位の時間微分が関わっていることを考えれば、この短周期変動が流れ場に大きな影響を及ぼしていることがうかがえる。

図-14は八戸市を流れる緩混合河川である新井田川の河口より上流2 kmにおいて観測された結果である¹²⁾。この河川は河口部に旧河道を利用した港湾を抱えており、その静振によると考えられる約30分周期の水位変動が生じ、図に示されるように、潮汐による非定常性を凌ぎ、流向さえも短周期で反転する強い非定常性を示している。

このような、短周期の水位変動に加え、密度成層効果により内部境界面も長短周期で大きく変動し流れ場の非定常性の大きな要因ともなっている。図-15は天塩川において過去に観測された表面水位の変動振幅と内部境界面の変動振幅の関係を示したものである¹³⁾。水位変化に対し約5倍、つまり20 cmの潮位変動により1 mにおよぶ境界面変動(例えば、

査方法とデータ解析には格段の配慮が必要である。また、塩水の進入長よりも感潮域は長く、例えば塩水くさび形状の予測のために必要となる河川供給流量の観測等に関しては注意を要する。通常利用されるような水位－流量曲線の適用は感潮域では難しく、上流の非感潮域において観測を実施するか、または、経時観測データを基に実流量を予測・算定する必要がでてくる。

4. 乱流計測

計測技術の進歩と計測機器の開発により、室内水理実験の精度は飛躍的に向上し、乱流現象の詳細が明らかにされてきた。しかし、実河川の水利計測は、その現象の複雑さと野外計測の悪条件が相まって、長足の進歩は見られていない。野外観測において乱流計測が試みられるようになったのは、ごく最近のことである。均質流体の開水路流れに関して、瀬津ら¹⁵⁾は実験水路よりもレイノルズ数が1オーダー大きい琵琶湖疎水と愛知用水において電磁流速計を用いた乱流計測を実施しており、2次流を含む三次元乱流構造の普遍性を見いだしたとしている。しかし、密度成層場が存在し非定常性が卓越する河口部感潮域においては、現象はさらに複雑であり、室内実験結果の実河川への適用性について検証・確認するには至っていない。

川西ら¹⁴⁾は前述の太田川感潮部の現地観測において電磁流速計を用いた非定常乱流計測を実施し、図－17に示すレイノルズ応力と塩分濃度フラックスの経時変化を得ている。さらに、詳細なデータ解析により、底層部以外ではレイノルズ応力は流れの加速期より減速期の方が2倍程度大きいが、河床近くではその差はほとんどない、下げ潮時には安定成層が強くなり鉛直方向の乱れは小規模なもののみとなり平均流から供給される乱れエネルギーの大部分は小規模乱流に輸送され、運動量と塩分濃度の鉛直輸送の大半は小規模乱流によって行われている、等の結果が得られている。

筆者らは、野外計測用の2次元LDVシステムを開発し、河口密度流の乱流計測を実施している。図－18は天塩川の河口より約5 km地点で計測された平均流速、塩分濃度、乱れ強度（主流および鉛直方向）の鉛直分布を描いたものである¹¹⁾。流れ場は前述のように非定常性を有しているため、平均流速の与え方が乱流量の算定に大きな影響を及ぼす。そこで、平均流速として、単純時間平均値（実線）と数値ローパスフィルターを用いた移動平均値（破線）の2種類を採用し、乱流量の算定を行っている。乱れ強度は、表面波の影響で表層においてきわめて大きな値をもち、水深の増加とともに急激に減少し、

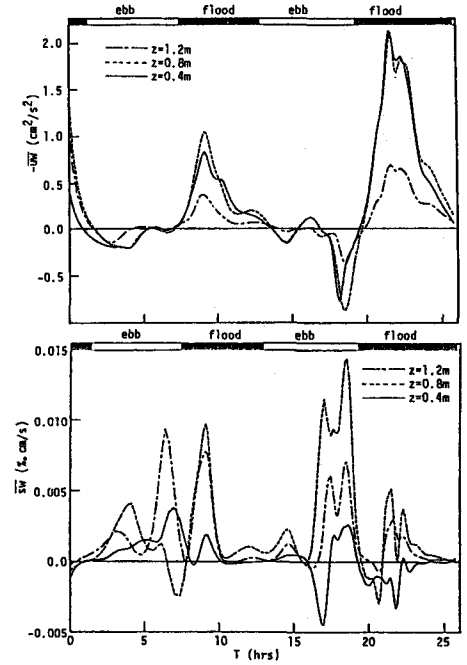


図-17 レイノルズ応力と塩分濃度フラックスの経時変化¹⁴⁾

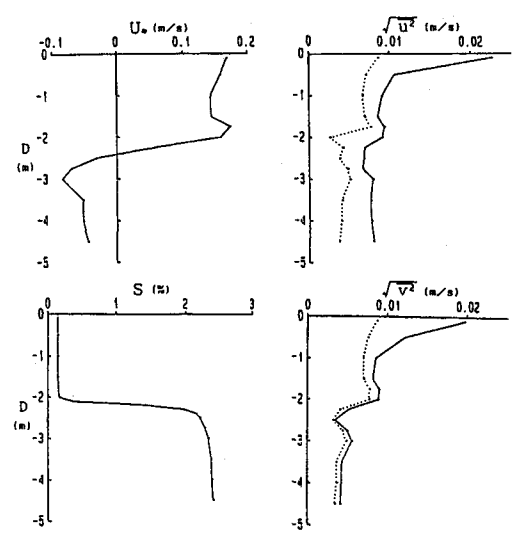


図-18 平均流速、塩分濃度、乱れ強度の鉛直分布

下層内においては若干の減少傾向は見られるものの、ほぼ一定の値を示していることがわかる。単純時間平均と移動平均の2つの結果を比較してみると、表層部でフィルター処理による急激な乱流量の低下がみられ、表面波や風に起因した乱れが表層部の流速変動を誘起していることがわかる。また、乱れ強度分布はともに密度境界面付近とその上下で僅かに極大、極小値を有しており、その分布形状はきわめて良い相似性を示している。図-19は、この計測で得られたUとVの乱れ強度の関係をプロットしたものである。乱れ強度が大きい場合にはかなりのデータのばらつきが見られるが、0.02 m/s 程度まではほぼ線形の関係にあることがわかる。

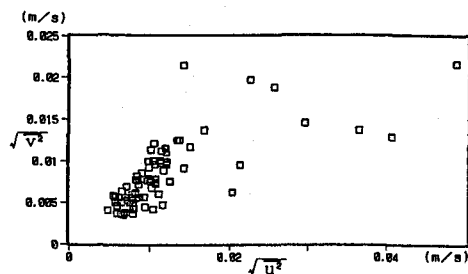


図-19 主流および鉛直方向の乱れ強度の相関

以上、実河川における乱流計測の実例を示したが、現地観測においては室内実験ではみられない種々の問題が生じる。流れの非定常性や個性性による現象の再現性や普遍性の問題はもとより、乱流解析に応え得るための高精度の流速、密度データの採取においても多くの問題を抱えている。室内実験においては問題とならないセンサーの取り付けも実河川では大きな問題となる。橋を利用でき、また、河床までの距離が短い場合にはセンサーを支持フレームに取り付け欄干に固定すれば計測は可能であるが、河床までの距離がかなりある場合には、ガイドロープを使用して計測するなどの工夫が必要となる。しかし、この場合にはロープの振動がセンサーに伝わり、流速値に振動成分が混入する可能性があり、新たに振動計をセットして振動成分の計測も同時に必要となる。さらに、観測地点に橋などの足場がない場合にはその測定はさらに困難となる。船を利用した観測ではその動揺により乱流量の計測は難しく、筆者らはパイプ製の観測塔を河床に設置し動揺を除去した計測を実施している。

また、多種の測定器を用いた同時計測を行う場合、例えば密度フラックス算定のための流速と塩分の同時計測の場合などは、各センサーの周波数応答特性の差異や相互干渉も問題となる。当然ながら乱流解析結果は最も応答特性の低い計器に依存し、高周波数域の乱流解析には全ての測定器の応答特性を所望の周波数以上に向上させる必要がある。また、相互干渉に関しては、入力信号のアイソレーション化によって防ぐことができるが、特に、電極を使用したセンサー、例えば電磁流速計や電導度計を用いる場合には、そのセンサー配置関係も干渉に影響を与えるので、現場における確認が必要である。

実河川の乱流計測は、緒についたばかりであり、計測例もきわめて少ない。今後、さらに操作性が良く高精度の計測器の開発と現地計測に適した簡便な計測方法の確立が望まれる。

5. 連行現象

弱混合型の密度成層場のように物理量が不連続に変化する場の混合現象は、物理量が境界面を通して輸送される速度（連行速度 We ）を用いると解析が比較的容易となる。そして、代表流速 U を用いて無次元化した $E = We/U$ を連行係数と呼び、種々の密度成層場において、リチャードソン数 $Ri = \varepsilon gh/U^2$ による連行係数の評価式が提案されてきている¹⁶⁾。従来の研究によれば、塩分成層場においては、

$$E = CRi^{-3/2}$$

の関係にあることが確認されている。ここに、 C はそれぞれの流れ場において決定される係数であり、塩水くさびに関する須賀の研究¹¹⁾では、 U として上下層の流速差、 h として上層厚を採用し、 $C = 2 \times 10^{-3}$ と得られている。

連行現象は、流れの乱流構造と関係しており、連行係数の評価式の差異は乱流構造の違いによっている。二層流における下層水の上層への連行は、主として境界面のせん断により発生した乱れによって生じており、

上下層の速度差を用いた巨視的リチャードソン数によって評価・予測が可能と考えられている。しかし、実河川においては風や表面波等により生じた乱れが境界面を刺激し、連行を促進する。石狩川下流部に位置する北生振地区の水田の塩害に対して実施された北大農学部の実験結果にも、塩分拡散における風の影響が顕著に現れている（図-20¹⁷⁾）。図-21は、同じく石狩川下流域の2地点（St.2：河口より7.5 km、St.3：13.5 km）で観測された表層塩分濃度と風速風向の経時変化を示したものである⁵⁾。2地点の塩分時系列を見ると、流下にとまなう下層水の連行により上層塩分濃度は上昇しているものの、2地点の塩分波形の相関はきわめてよく、約5時間の位相差を有していることがわかる。また、風速変動の高周波成分を $2 \times 10^{-5} \text{ Hz}$ のローパスフィルターで除去した波形と塩分波形の相関もきわめて良く、St.2においてはその位相差が約12時間と得られた。図-22は、流量、風速が長時間にわたり変化が少ない場合の表層塩分濃度の縦断観測結果を示したものである。図中、Cは上下層の塩分濃度比、Xは塩分上昇が開始する地点から下流向きに取った距離をくさび先端水深で無次元化した量である。両者は線形の関係にあり、その比例係数は上述の連行係数にほぼ相当する。この場合、連行係数は風速と流量（または塩水くさび長）の関数として得られ、実用上、任意地点の表層塩分濃度の予測が可能となる。

風による密度境界面の連行現象に関しては、多くの実験的研究がなされており、発生した乱流の特性速度を用いたリチャードソン数による連行係数の評価がなされ、前述の関係と同様にべき乗則の関係が得られている¹⁶⁾。しかし、実河川においては、せん断流や、風による吹送流や風成波の発生に起因した乱れの生成のほか、水位の揺らぎ、界面波の存在など種々の要素が複合的に連行現象に関係しており、実験結果を評価・

確認するに十分な現地観測データは未だ得られていないのが現状である。

6. おわりに

以上、河道部の密度流現象について概説したが、河川水の外海への流出・拡散現象も環境水理学の面から興味のある問題である。ここでは、紙面の都合により文献¹⁸⁾を示すにとどめる。

河口密度流の現象はかなり複雑であり、また、現地観測におけるデータの収集と有用性は自然条件や計測精度に大きく依存し、実験データとの比較・検討が可能なデータが得られない場

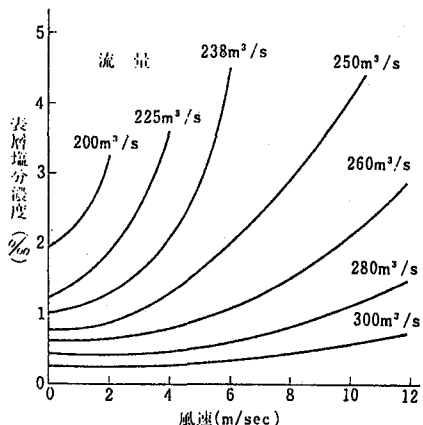


図-20 表層塩分濃度と風速、流量の関係¹⁷⁾

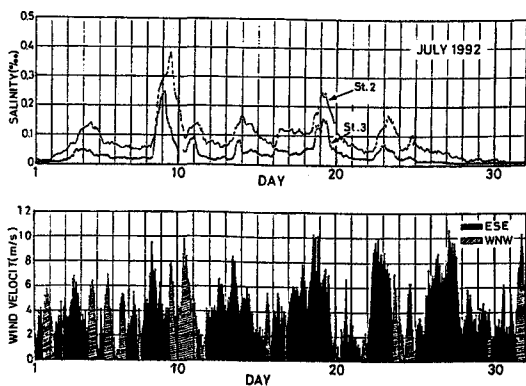


図-21 表層塩分濃度、風速風向の経時変化

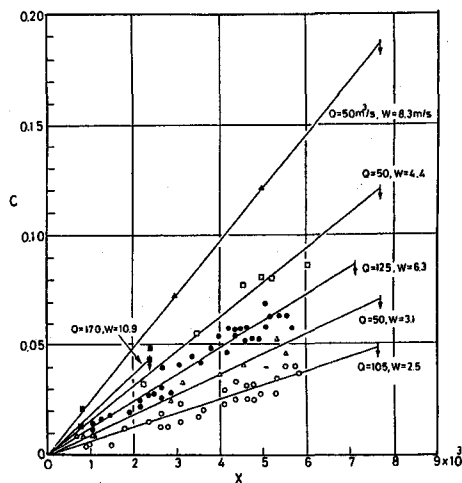


図-22 表層塩分濃度の縦断変化

合も多い。しかし、現地観測からは密度流現象の本質を示唆する重要な知見も数多く得られており、着実に研究は進展している。また、最近では計算機的能力向上と計算手法の開発により、河口密度流の分野においても数値シミュレーションが行われるようになってきた¹⁹⁾。今後さらに、室内実験と現地観測、そして数値解析が有機的に結合された研究がなされ、密度流現象の解明と予測がより一層進展することが期待されている。

参 考 文 献

- 1) 須賀堯三：感潮河川の塩水くさびの水理，建設省土木研究所報告，第160号，1983.
- 2) 水理公式集，土木学会編，1981.
- 3) 水理委員会密度流研究小委員会：成層密度流の界面現象(1)，土木学会論文報告集，第242号，1975.
- 4) 西田修三・吉田静男：天塩川河口二層流の水理特性，第33回海岸工学講演会論文集，1986.
- 5) 吉田静男 他：河口二層流の表層塩分に与える風の効果，水工学論文集，第37巻，1993.
- 6) 玉井信行・菅和利：密度，運動量の分散を考慮した塩水くさびの解析法について，第26回水理講演会論文集，1982.
- 7) 二渡 了 他：強混合河川六角川感潮部における懸濁物質濃度の変動特性，土木学会論文集，第452号，1992.
- 8) Fischer, H.B., et al.: Mixing in inland and coastal waters, Academic Press, 1979.
- 9) 玉井信行：密度流の水理，技術堂出版，1980.
- 10) 吉田静男・西田修三：天塩川河口密度流における鉛直流速分布，第31回水理講演会論文集，1987.
- 11) 西田修三 他：天塩川河口二層流の乱流計測，水工学論文集，第35巻，1991.
- 12) 西田修三・日山良裕：小流量都市河川の流況・水質特性，第33回水理講演会論文集，1989.
- 13) 吉田静男：河口密度流とその解析方法，土木学会水理委員会水工学シリーズ，88-B-2，1988.
- 14) 川西 登・余越正一郎：太田川感潮部の非定常乱流，土木学会論文集，第405号，1989.
- 15) 棚津家久 他：河川乱流の野外計測と2次流に関する研究，土木学会論文集，第467号，1993.
- 16) 玉井信行：密度流現象における連行概念の統一化とその応用，文部省科学研究成果報告書，1986.
- 17) 柏村正和：河川下流部における塩水の影響，水利科学，No.74，1970.
- 18) 水理委員会河口部の水理現象小委員会：河口部の水理現象と関連する諸問題，土木学会論文集，第363号，1985.
- 19) 中辻啓二 他：河口周辺部における河川流出の流動構造，土木学会論文集，第461号，1993.