

II-37 石狩川河口二層流における連行係数について

北海道大学工学部	正員	大谷 守正
北海道大学工学部	正員	吉田 静男
八戸工業大学	正員	西田 修三
北海道大学大学院		中道 陽文

1. はじめに

著者らは石狩川河口における二層流に関しておよそ30年間にわたり調査・研究を継続してきた。1991年以降は特に下層塩水の上層淡水層への巻き上げによる拡散、混合現象の解明に力点を移し多くの知見を得ることが出来た。得られた観測結果の幾つかはすでに報告済みであるが、観測を通して二層境界面から淡水層への塩分の連行に関与する幾つかの要因の影響について論じ、また実河川における連行現象には風、気圧変動、河川流量の増減、潮位変動等さまざまな要因の組み合わせがみられることも報告した。

さらに連行現象に及ぼす要因としては風による影響が最大であることを確かめて風と流量と表層塩分との関係式を導いた<sup>1), 2), 3)</sup>。

本論文は二層流の連行現象に関して1993年の観測結果を整理したものと1994年における観測結果の一部に解析と考察を加えたものである。塩淡二層界面における連行現象は二層場に生ずる特有な流れと界面における乱れおよび組織渦ではあるが、それを発生させる最大の要因が風であるとして連行係数を風速の関数として求め、またその値は場所によりことなることを見いだした。さらに連行係数を求めるにあたり異なる流量による淡水層の厚みの変化に応じた連行係数の値の変化をも検討し、加えて無風状態における連行係数を推定したものである。

2. 観測方法

図1に示すように観測地点をSt. 1からSt. 13まで本流河川水中あるいは川岸に定めた。基本的には文献<sup>3)</sup>と同様であるが、さらに観測体制を強化した。

野外観測にあたっては著者らのひとりが開発した簡易観測塔に改良を加えこれを河川的主流の二層境界面が明瞭に識別できる所を選び設置した。この簡易観測塔は従前の船上からの観測に比べ多くの

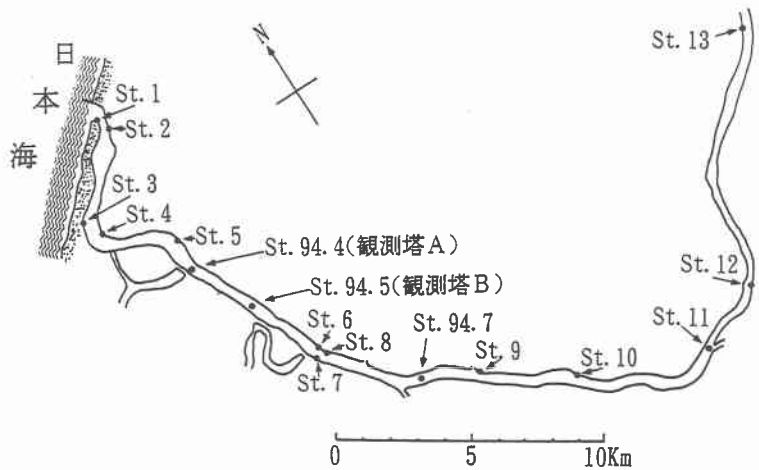


図-1 石狩川下流域河道地形と観測地点

The Entrainment Coefficient on Salt Diffusion in Highly Stratified Flows at the Ishikari River Mouth by Morimasa OHTANI, Shizuo YOSHIDA, Shuzo NISHIDA and Yhobun NAKAMICHI

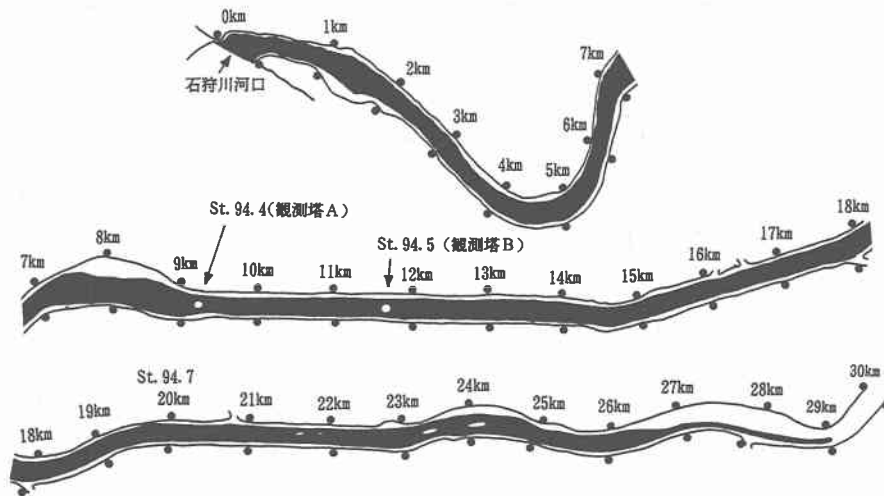


図-2 河口からの距離と塩水楔の侵入状況

利点がある。即ち従前の船上からの観測では船の揺れや振動が測器に影響を与えることと昼夜に互る観測には不向きであったが、この簡易観測塔を設置することで、測器に与える揺れを最小限に押さえることが出来たことと夜間に及ぶ観測作業の能率を上げることが出来た。なお、簡易観測塔は短期間における観測には十分に実用になることが実証された。

塩水の淡水層への連行現象の解明に最もよく使われる方法は、伝導度計による特定の淡水層の伝導度の変動の正確な測定であろう。またこのような変動を誘因する風速変動、河川水位変動、潮位変動、流速変動、河川水面の波高の測定も必要であるから観測にあたっては最も注意を注いだ点である。これに加え、二層境界面の位置の変化や河床地形の把握、河川水の水温の鉛直分布の観測も欠かせないことである。

主な観測地点では次のような観測を行った。括弧内は河口からの距離である。St. 1(0km)基点、St. 2(1km)水位、伝導度、St. 3(4.2km)水位、界面位置、伝導度、St. 5(8.2km)気象、St. 6(14.6km)伝導度、St. 7(14.9km)水位、伝導度、St. 8(15km)界面位置、St. 10(26.6km)水位、界面位置、St. 12(35.4km)水位、St. 13(44.5km)水位、St. 94.4(9.3km)観測塔(A)、伝導度、流速、水温、風向、風速、波高、St. 94.5(11.7km)観測塔(B)伝導度、風速、風向、界面位置、流速等である。

### 3. 観測結果

多くの観測結果からその一例を示すことにする。図2は1994年8月7日における超音波による塩水楔の観測記録から塩水楔の河道内における侵入状況を図化したものである。この観測結果は石狩川における超音波による観測史上最長の塩水楔を記録したもので河口より楔先端まで約29kmに及んでいる。しかし約26kmから先は右岸の水深が浅くなり楔は左岸側の比較的深い部分に沿って侵入しており、従って二層境界面の面積は極端に小さくなっていることが図からも分かる。なおこの楔先端部分は潮位変動の影響を受けてその位置を若干変える。

図3は潮位、河川水位、界面位置の観測例の一部で1993年8月19日から27日までの小樽港潮位と石狩川水位(St. 3)を上段に、二層境界面変位(St. 3)を下段に示している。石狩川水位と小樽港潮位との関係は位相、振幅とも殆ど変わらない。しかし二層境界面の変動は潮位変動の影響を大きく受けていて、その最大振幅は小樽港における潮差の約7倍にも達している。この界面における変動は河口二層流の淡水層の厚みを変化さ

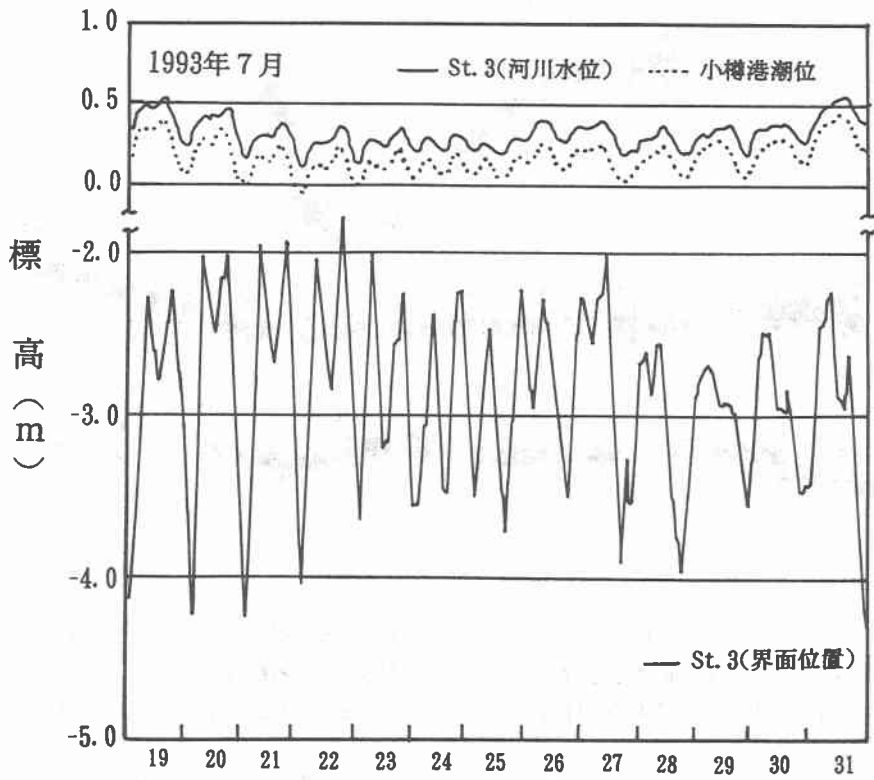


図-3 河川水位、小樽港潮位、界面位置の時系列

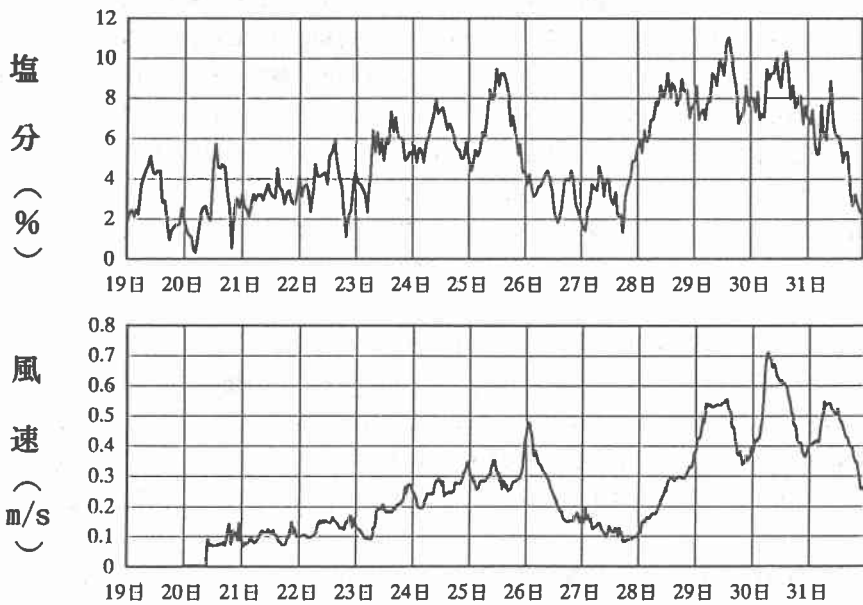


図-4 St. 3における風速、塩分の時系列

せることになる。

図4は同観測期間における風速と塩分の変動の観測結果を示すグラフである。風速はSt. 5, 塩分はSt. 3で測定したものである。この結果から石狩川河口部での風系は気圧傾度が比較的弱い場合には日中は陸から海へ向かって風が吹き、夜間はその逆になる傾向が強いので、風向は通常夜間の短時間を除き南東から南南東の風が卓越している。即ち河道と平行して河水の流下方向に向かって吹いているのが特徴的である。

図5(A)はSt. 3における塩分と平均風速との関係を示すもので1993年7月23日から8月31日までの観測記録から得たものである。塩分の値は水面下90cmに設置した伝導度を用いて測定したものである。また平均風速の取り方は塩分のピークが風のピークより遅れることに留意して、塩分が観測された時刻より表層水が楔先端から観測地点まで流下するのに要する時間遡って風速の平均をとっている。この場合は27時間である。なお平均的な淡水層の厚みは3.1 m、流量は142m<sup>3</sup>/sである。

図5(B), (C)の縦軸の塩分は観測地点間のその区間での塩分の増分を目盛っている。これを用いたのは河道及び河床形状の局所的な差異が連行係数に影響を及ぼすために平滑化を行ったものであり、その区間の区間平均値と考えられる。加えて平滑化を行わない場合との比較を容易にした。

図5(B)は(A)と同期間におけるもので塩分はSt. 94.5観測塔(B)(11.7km)とSt. 94.7(20.0km)の区間での塩分の増分を用いている。この区間の距離は8.3kmである。また平均風速の取り方と流量は同じものである。(C)は1994年の観測において観測記録の中から比較的整理し易い部分、7月26日から8月12日まで選んで塩分と平均風速の関係を得たものである。塩分はSt. 2(1km)とSt. 94.7(20km)間の区間で距離は19kmあり、その区間の塩分の増分を用いている。平均風速は23時間、流量は118m<sup>3</sup>/sであった。

塩分と平均風速との関係は何れも良い相関を示しており、風速が増すに従って指数関数的に増加していることが分かる。

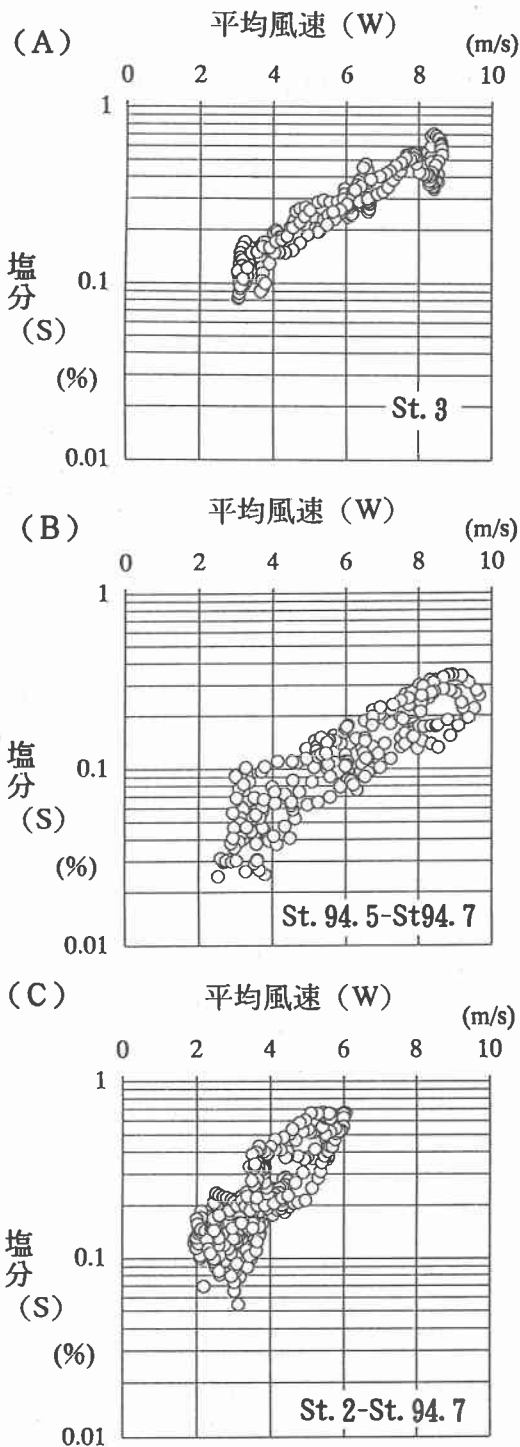


図-5 平均風速と塩分との関係

#### 4. 考 察

前報<sup>3)</sup>において石狩川下流域での表層塩分に与える風の効果を検討し、実用上の観点と研究結果から連行係数に関係する基本式として(1)-(2)式を導いた

$$\frac{C_1}{C_2} = K \frac{x}{H} \quad (1)$$

$$K = \frac{Hv}{h_1 u_1} \quad (2)$$

ここに $C_1$ は上層塩素量、 $C_2$ は下層塩素量、 $K$ は連行係数、 $x$ は河口からの距離、 $H$ は塩水楔先端での水深、 $v$ は下層から上層へ連行される塩水の速度、 $h_1$ は上層の厚さ、 $u_1$ は上層の平均流速である。

ここで、改めて連行係数を $E = v/u_1$ として書き変えると

$$E = \frac{h_1}{C_2 x} \cdot C_1 \quad (3)$$

となる。(1),(2)式に平均風速と表層塩素量及び諸量を実測より求めた値を代入することにより(3)式から連行係数を算出できる。実際の計算では塩素量を塩分に換算している。

次に1993年及び1994年に行った表層塩分と風速の観測結果から図5及び他の観測結果を含めて回帰式を求めて連行係数を算出した。それを一覧表にすると次のようになる。

観測年	観測地点	流量(m/s)	流速(m/s)	淡水層の厚さ(m)	連行係数(E)	RUN. No
1993	St. 3	142	0.229	3.1	$2.22e^{0.281W} \times 10^{-6}$	E 1
1993	St. 3-St. 10(区間平均)	142	0.229	3.1	$2.06e^{0.283W} \times 10^{-6}$	E 2
1993	St. 7-St. 10(区間平均)	142	0.229	3.1	$2.48e^{0.287W} \times 10^{-6}$	E 3
1994	St. 3	118	0.226	2.6	$1.91e^{0.405W} \times 10^{-6}$	E 4
1994	St. 2-St. 94.7(区間平均)	118	0.226	2.6	$1.88e^{0.425W} \times 10^{-6}$	E 5
1994	St. 2-St. 94.6(区間平均)	118	0.226	2.6	$2.11e^{0.391W} \times 10^{-6}$	E 6

表中の条件の基での計算結果から石狩川下流域での連行係数Eは

$$E = \alpha e^{\beta W} \times 10^{-6} \quad \text{とすれば } \alpha \text{ 及び } \beta \text{ の値の範囲は、} 1.88 \leq \alpha \leq 2.48, \quad 0.281 \leq \beta \leq 0.425$$

の結果を得る。ただし計算に用いた風速(W)は $2\text{m/s} \leq W \leq 10\text{m/s}$ の範囲である。これをグラフにあらわすと図6のようになる。

須賀・高橋<sup>4)</sup>らは実験水路を用いて淡水流下にとまなう二層境界面から上層淡水中への塩水の混入速度を求め内部フルード数による整理を行い内部フルード数と連行係数Eとの関係を他の研究者の資料を整理してともに示したのが図7である。この図の中に筆者らの現地観測から得られた無風状態における推定連行係数を黒三角印で図中に示してある。図中連行係数Eが $5 \times 10^{-5} \sim 10^{-3}$ の内部フルード数の大きい範囲にプロットされたデータは塩水楔の実験より求めたものであり、筆者らの現地観測から求めた連行係数とは大きく異なっている。

## 5. 結 論

石狩川河口二層流場において風速変動に伴う淡水層中の塩分変動の現地観測を行い、塩分と風速との関係より淡水層中の塩分を風速の関数として回帰式を求め連行係数を算定した。得られた主な結果は次の通りである。

(1) 代表流速に平均流速を用い、淡水層厚も平均淡水層厚を用いると、連行係数Eは次のような結果を得ることができた。

$E = \alpha e^{\beta W} \times 10^{-6}$  とすれば  $\alpha$  及び  $\beta$  の値の範囲は

$$1.88 \leq \alpha \leq 2.48$$

$$0.281 \leq \beta \leq 0.425$$

ただし、風速は

$$2\text{m/s} \leq W \leq 10\text{m/s}$$

の範囲とする。また無風状態では

$$1.88 \times 10^{-6} \leq E \leq 2.48 \times 10^{-6}$$

の結果となる。

(2) 流量が減少し、淡水層の厚みが薄くなれば風速に対する連行係数の傾きが大きくなり風の効果が強く効いてくる。

(3) 連行係数は河道の特性により観測地点により異なり、また観測地点間の距離による区間平均の取り方によっても異なってくる。

(4) 無風状態での連行係数は須賀、高橋らの研究と比較するならば、回帰式より推定すると連行係数は従来のデータのミニマムに相当している。

### 参考文献

- 1) 吉田 静男・八木 史郎：弱混合河口二層流における塩分拡散に及ぼす風の影響について、土木学会北海道支部、論文報告集、平成3年度、pp347-352.
- 2) 吉田静男・大谷 守正・田城 徹雄・西田 修三・八木 史郎：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、pp299-304、1993.
- 3) 大谷 守正・吉田 静男・西田 修三：弱混合河川下流域における表層塩分濃度の決定要因、土木学会北海道支部、論文報告集、平成5年度、pp584-589.
- 4) 須賀 亮三・高橋 晃：塩込二層流の連行係数、第31回年次学術講演会講演集、II、pp383-384、1976.

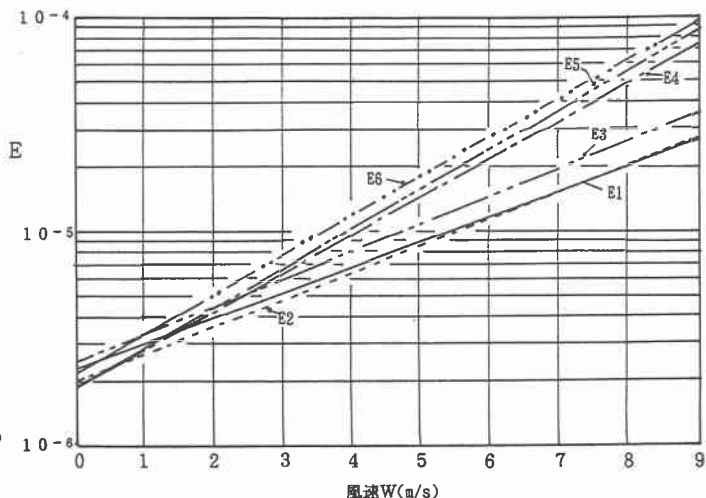


図-6 連行係数と風速との関係

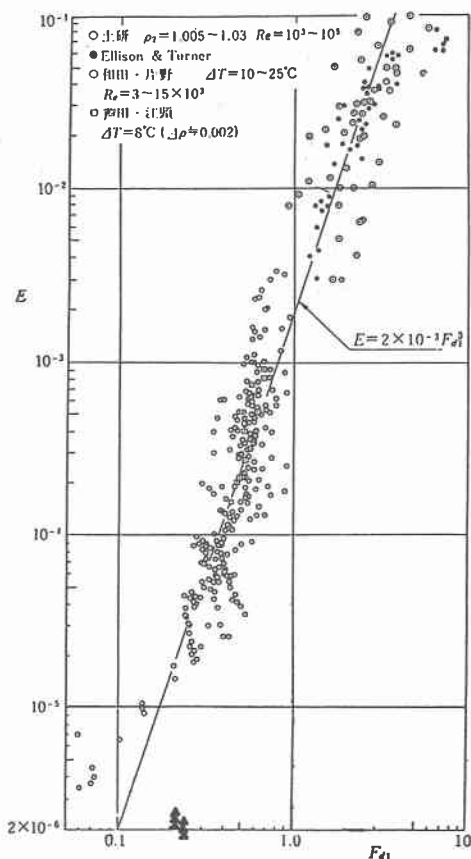


図-7 連行係数と内部フルード数との関係