

河口二層流の表層塩分に与える風の効果

The Effect of Wind on Salt Diffusion in a
Stratified Flow at a River Mouth

吉田 静男*・大谷 守正*・田城 徹雄*

西田 修三**・八木 史郎***

By Shizuo YOSHIDA Morimasa OHTANI Yoshio TASHIRO
Shuzo NISHIDA and Shirou YAGI

The effect of the wind speed on salt diffusion was studied by observations of the longitudinal distribution of Cl concentration in the surface layer of the Ishikari River, which shows highly stratified flow. The measurements were carried out during the dry season. Also, the time series of Cl concentration in the surface layer of two points in the river course are compared with each other and with the time series of wind speed at the points. This comparison appears to enable the prediction of surface salinity distribution.

Keywords: stratified flow, salt wedge, salinity diffusion

1. 序 文

河口二層流の研究は過去半世紀にわたり著しく進展した。しかし、密度界面を通じた塩分の拡散に関する力学的機構をはじめ、未解決の問題も少なくない。たとえば、風による塩分拡散効果についても研究例が少なく¹⁾、比較的調査の進んだ河川であっても、各地点における表層塩分を予測することは困難である。本論文においては、今後、様々な利水が考え得る河口部河川水中の塩分予測においてきわめて重要となる風の効果について現地観測の結果をもとに考察する。

2. 観測方法

観測は1991年7、8月と1992年7、8月に図-1に示す石狩川下流域において実施した。塩水楔全体の形

-
- * 正会員 工博 北海道大学工学部 数物系共通講座
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)
- ** 正会員 工博 八戸工業大学 土木工学科
(〒031 青森県八戸市大字妙字大開88-1)
- *** 正会員 日本気象協会 北海道本部
(〒064 札幌市中央区北4条西23丁目260)

状は超音波測深機を用いて観測した。又、2ヶ月間にわたる塩分、風向、風速については、ほぼ直線をなす河道の最下流部に近いSt.2において、電気伝導度計、気象観測用風向・風速計、及びリシャル水位計を用いて測定した。1991年の伝導度の記録は水深 0m、0.5m、1.0m、1.5mで、又、1992年の同記録はSt.2とSt.3の表層において約2ヶ月にわたり同時採取された。一方、横断測深と横断方向5地点の水温と伝導度の測定は図-1のL₁~L₄₂の測線において実施した。又、その他、バックグランドデータとしての流量の観測もSt.1,3,4,5の橋を利用して実施した。

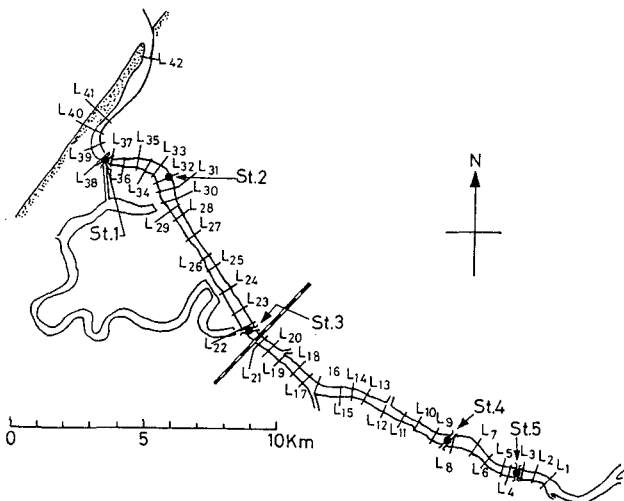


図-1 石狩川下流域地形図

3. 観測結果及び考察

(1) 塩水楔の形状

1991年の7月上旬と中旬の塩水楔は、河川流量が非常に少ないために図-2に示すように最長で約28.5kmに及ぶ長さであった。一方、1992年には降雨の機会が多く、7月を除いては、楔全長が8kmを越す例が少なかった。図-2は代表的な観測例で、実線、破線、一点鎖線は各対応データに対する計算結果で界面抵抗係数が次式を満足するものと仮定して得たものである。

$$f_i = 0.25 \Psi^{-0.5} \quad (1)$$

ここに Ψ は岩崎数²⁾であり、従来の石狩川においては(1)式がほぼ成立していた。計算結果は時間平均の形状を与えるため、現実の観測結果とは若干の相違が見られるが、その予測精度は実用上十分といえる。

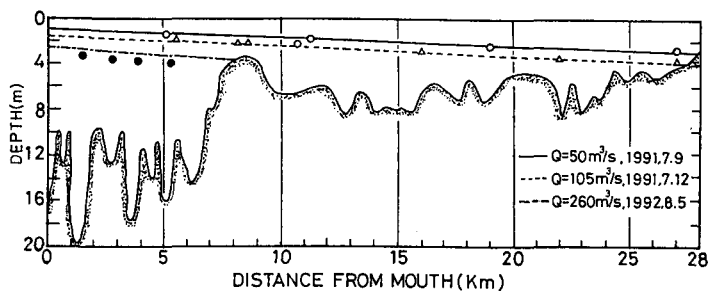


図-2 石狩川における塩水楔の形状

(2) 表層塩分の時系列

図-3は渇水期のSt.2とSt.3における表層塩分と風速の時系列を並列させたものである。全体として、2地点における塩分の時系列は3時間程度の位相差はあるものの良く似ている。しかし、詳細に見ると、塩分上昇開始時刻は同時に見える部分もあり単純な位相関係には無い。いずれにせよ河川のいたるところで同時の時系列とはならず、上流で見出される塩分時系列が、あまり形をかえずに下流に伝播するといえる。

図-4はSt.2における水位及び塩分と風向、風速の時系列を並列させたものである。同図からは、図-3同様、風向はちがっても、いつも河道に沿う風が吹きつけるという特徴の他、潮汐の影響が無視できること及び風と塩分のよい相関が見出せる。しかし、位相差はかなりあって、約12時間程度である。図-3

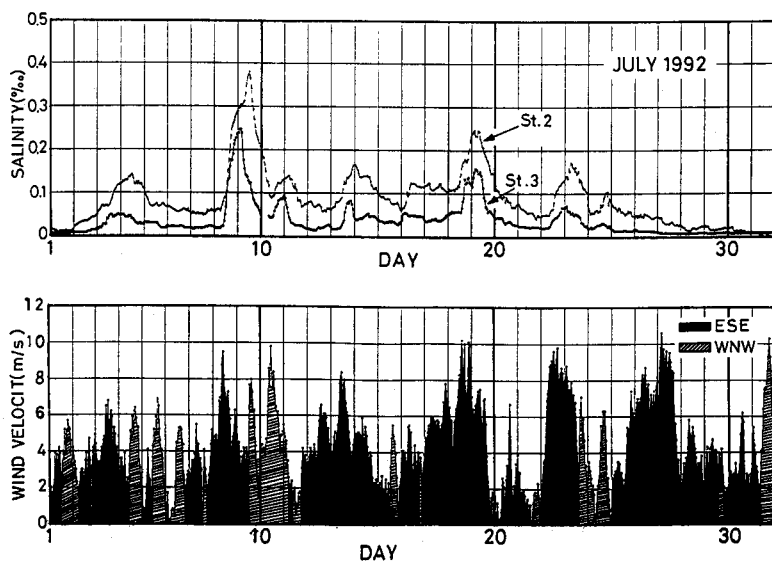


図-3 St. 2及びSt. 3における表層塩分、風向・風速の時系列

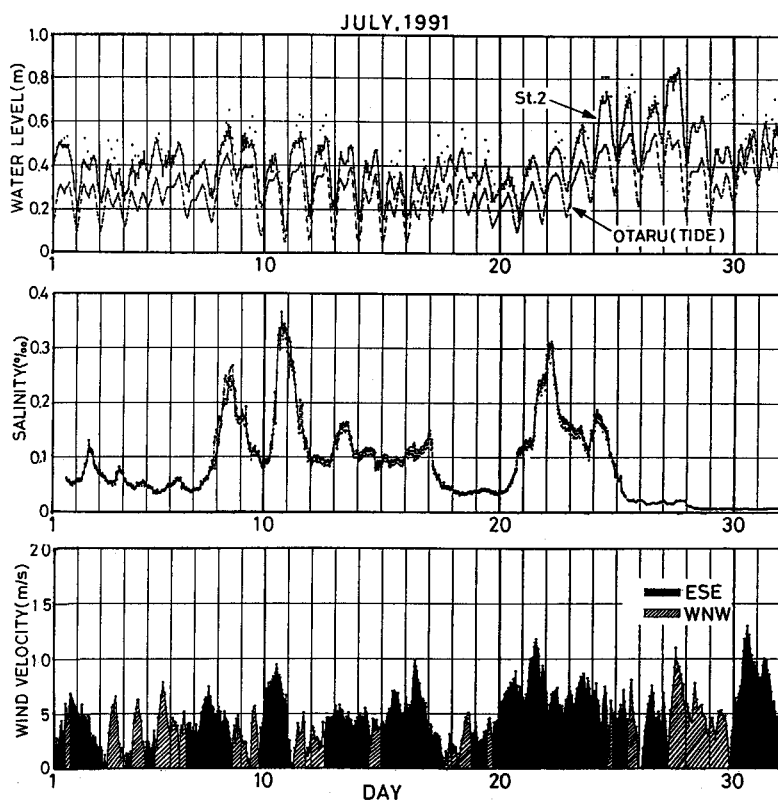


図-4 St. 2における水位、塩分及び風向・風速

の結果と合わせ考えると、上記の位相差は塩水楔の先端に近づく程小さくなることが容易に予想できる。

以上のことから、ある地点の濁水期の表層塩分は風速に強く依存すること、及び、河川水が塩水楔先端から下流に流れる間に、刻々変動する風速に応じた塩分を取り込むため、ある地点で観測される塩分値は測定時の風速に依存しないかのように、たとえば、風速が急に0になったとしても、異常に高い値を示し得る等の知見を得る。

(3) 表層塩分の縦断方向分布

河口二層流の界面から上層に連行される塩分量、及び、その分布は界面近傍の流れの不安定に基づく界面変形、すなわち淡塩水の接触面積の増大と上層内乱れ構造に依存する。上記流れの不安定は潮汐、河川流量、河道地形³⁾、風等による局所的、間欠的なhigh shearの生成に起因するもので、それらが重畳するときは解析がきわめて困難になる。ここでは、石狩川の潮汐が非常に小さいことと、地形による界面破壊領域が限られていることに注目し、流量変化の少ない期間帯を選ぶことにより風のみによる塩分拡散効果を検討する。

今、河道の幅が塩水楔全長にわたって著しく変化する部分がないとすれば、その上層の密度について、およそ、次式が成立する⁴⁾

$$\frac{d\rho_1}{dx} = \frac{v}{h_1 u_1} (\rho_2 - \rho_1) \quad (2)$$

ここに h_1 は上層の厚さ、 u_1 は上層の平均流速、 v は下層から上層へ連行される塩水の速度、 x は塩水楔先端から河口に向かってとった座標、 ρ_1 、 ρ_2 はそれぞれ上層、下層の平均密度である。通常石狩川では $d\rho_2/dx=0$ とおけるので(2) はさらに次式で与えられる

$$\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 - \rho_{10}} = \frac{C_2 - C_1}{C_2 - C_{10}} = \exp \left[- \int_{x_0}^x \frac{v}{h_1 u_1} dx \right] = \exp \left[- \int_{x_0}^x \frac{Hv}{h_1 u_1} d \left(\frac{x}{H} \right) \right] \quad (3)$$

ここに ρ_{10} は $x = x_0$ における上層平均密度で塩水楔からの塩分混入が開始する前の河川水の密度に等しく C_1 、 C_2 、 C_{10} はそれぞれ、上層、下層における平均塩素量及び $x = x_0$ における上層平均の塩素量(%)、 H は塩水楔先端での水深である。

図-5は表層塩素量の縦断方向分布である。測定時の河川流量は125m³/s、風速は6.3m/s、塩水楔全長は25kmであった。図中の C'_* は $(C_2 - C_1)/(C_2 - C_{10})$ に等しい。同図から今回の観測における C'_* はきわめて1に近く、しかも塩水楔先端からやや下流から河口にかけて指数関数的に減少することが分かる。すなわち、(3)が適用できる特性を有している。ここで、表層塩分は塩水楔先端から増大し始めないことに注目し、実際に塩分上昇が開始する地点から河口に向かって取った距離 x_s の無次元化量 $x_{*s} = x_s/H$ と C'_* との関係の求めると次式を得る。

$$C'_* = \exp(-K x_{*s}) = 1 - K x_{*s} \quad (4)$$

観測によれば x_0 を塩水楔先端にとると C_{10} は0とおけるので(4)はさらに次のように変形できる。

$$C_1/C_2 = C_* = K x_{*s} \quad (5)$$

図-6は観測結果から長時間にわたり風速の変化が少ない例を選び C_* と x_{*s} との関係の求めたものである。なお、 $C_2 = 17.5\%$ とした。図-7は各河川流量 (Q m³/s) における K と風速 (W m/s) の関係である。

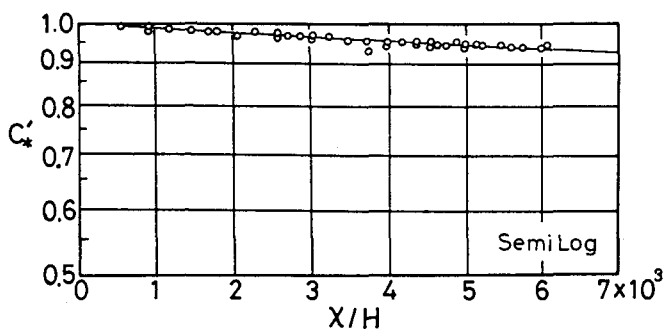


図-5 表層塩素量の縦断方向分布 ($H=3.5\text{m}$)

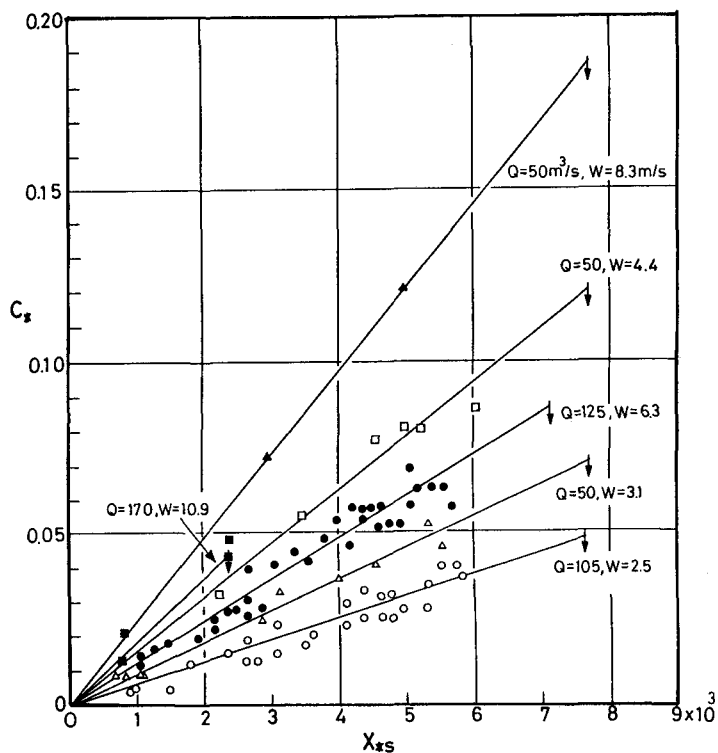


図-6 表層塩素量の縦断分布 (記号↓は河口の位置を示す)

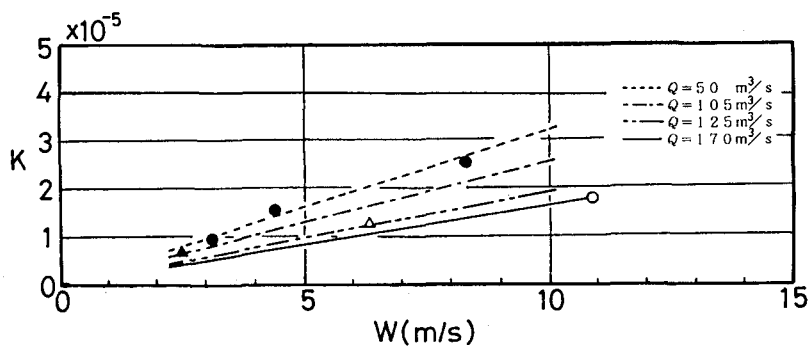


図-7 K 及び風速の関係

h_1/H は河口のごく近くを除き1に近いので K は通常定義される連行係数にほぼ一致する。図-7から K と Q と W の関係を求めると次式を得る。

$$K = (3.8 - 0.013Q)W \times 10^{-6} \quad (6)$$

ただし、適用範囲は $2.5\text{m/s} \leq W \leq 10.9\text{m/s}$, $50\text{m}^3/\text{s} \leq Q \leq 170\text{m}^3/\text{s}$ である。 W については観測前の12時間の平均値を採用した。この12時間という値は図-4で見出された位相差であるが、より理にかなった W の決定法は今後の課題である。ところで12時間にわたって無風という例はまず考えられないので $W=0$ における K の値は見出し難いが、今後、データを積み重ねることにより $W=0$ における K の値が外挿できるようになるであろう。なお、 $Q=125\text{m}^3/\text{s}$, $W=6.3\text{m/s}$ における密度フルード数は0.19であり、これに対する K は 1.4×10^{-5} であってちょうど須賀⁵⁾による経験式から予測される平均値になっている。 K に与える風と流量の影響は(6)が示すように著しいものがあり、その点を考慮に入れずに実測される K は相当に散乱するものと思われる。

4. 結 論

石狩川下流域での表層塩分に与える風の効果を現地観測を通して検討し以下の諸点を明らかにすることができた。

- (1) 石狩川において渇水時 $f_i = 0.25W^{-0.5}$ が成立することが確認された。
- (2) 長時間にわたり風速変動が著しくなければ以下のことがいえる
 - I) 表層塩分の縦断分布は塩水楔先端付近からの距離にほぼ比例して増大する。
 - II) 上流地点での表層塩分時系列はあまり形をかえず下流に伝播する。その伝播速度は塩水楔全長が28.5kmのとき約0.55m/sである。
 - III) 任意の地点の表層塩分は式(5)及び(6)で予測できる。
 - IV) 連行係数は式(6)で与えられ、風速及び流量の変化によって著しく変化する。

本研究は文部省科学研究費、一般研究(B)(N0.04452231)の補助金を受けて遂行された。ここに記して感謝する。

文 献

- 1) 福島 久雄・柏村 正和：石狩川流量と北生振地区表層塩分との関係について、北海道開発局特定地域総合調査資料、1967。
- 2) 谷 一郎編：流体力学の進歩乱流、丸善、1980。
- 3) 吉田 静男：河口密度流に及ぼす地形の影響、第30回海岸工学論文集、pp.585-589, 1983。
- 4) K.Otubo and H.Fukushima: Density current in river mouth with small tidal range, Proc.8th Cong. IAHR, Vol.4c, pp.1-25, 1959。
- 5) 須賀 堯三・高橋 晃：淡塩二層流の連行係数、第31回年講講演集、pp.383-387, 1976。