

II-66

弱混合河川下流域における表層塩分濃度の決定要因

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

1. はじめに

弱混合型塩水楔が存在し、明瞭な二層境界面を有する水域における流体中にある擾乱が作用した場合の成層の拡散機構や混合過程に関する研究は室内実験や野外観測で古くから行われ、理論的にも実験的にも明らかにされつつある。しかし実河川における拡散現象に関しては、各種の因子が複雑な相互関係を有するため未だ十分な解明はされていない。特に下層塩水の上層淡水層への巻き上げによる拡散現象を解明することは農業用水や工業用水を確保する観点から環境問題として検討する上で非常に重要である。

従来、二層密度界面で拡散に寄与する要因として、(1) 潮位変動による影響、(2) 低気圧の通過による影響、(3) 干天による河川流量の減少による影響、(4) 河面上に作用する風の影響等に大別される。これ等の要因は単独に或いは重畳して表層淡水層に影響を与えると考えられてきた¹⁾。

著者等は最近3年間にわたる野外観測の結果、他の要因に比べて風の吹送が二層境界面に波及し表層混合層を形成する決定的な要因であること確かめた。本文では、これらの観測結果を記すと共に風の強さと表層塩分の関係について考察する。

2. 観測方法

観測は1991年、1992年及び1993年の7-8月に図-1に示す石狩川下流域において実施した。塩水楔の形状及び河床地形の構造は超音波測深機を用いて測定した。又各年の2ヶ月間にわたる塩分、風速、風向についてはほぼ直線をなす河道の最下流部に近いSt.6において、電気伝導度、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1992年及び1993年の同記録は St.6 とSt.8の表層において約2ヶ月にわたり同時採取された。また横断測深と横断方向の水温と伝導度の測定は図-1各測地点において実施した。又、気圧はSt.6地点において測定した。その他、バックグラウンドデータとしての流量の観測も St.4、6、8 の橋を利用して実施した。

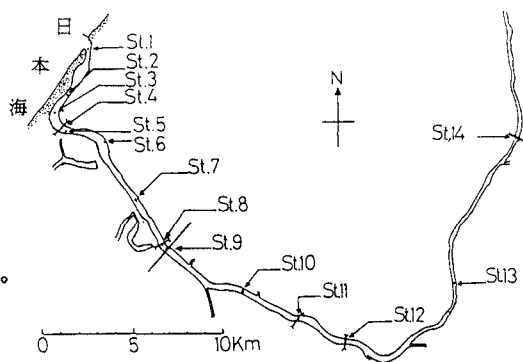


図-1 石狩川下流域地形図

3. 観測結果の解析及び考察

(1) 塩水楔の形状

観測期間中の塩水楔の形状は超音波測深器を用いることによって塩水楔と河水との境界面の状況や塩水楔の消長に伴う境界面の状況の変化等が観測できる。河川流量の増減に伴う塩水楔の長さは観測の結果、最長

で約28.5kmに及び、又、降雨が伴えば楔全長が8km 以下に後退する。さらに流量が増大しておよそ500m³/sを越えると塩水楔は河口外に追い出される。

塩水楔の形状は岩崎数 $f_i = 0.25 Q^{-0.5}$ が石狩川でほぼ成立することから数値計算からも求めることができる。計算結果と現実の観測結果とはすでに報告²⁾してあり、その予測精度は実用上十分である。

(2) 塩分拡散に及ぼす要因

河口域における塩水層の淡水層への拡散現象を支配する要因の一つとして潮位変動が上げられている。そこで観測結果からどの程度影響を与えるのか検討する。

図-2の上段は小樽港の潮位とSt.6での水位とを対比させた図である。小樽港での潮位の変化とSt.6での水位の変化はほとんど位相差もなく一回潮もしくは二回潮の周期的な変化と良く対応していることを見ることができる。なおこの周期的な変化に対応する二層境界面の変動は潮差が高々30cm程度と見積もっても内部境界面では格段に大きく7倍に達することもあるが、観測結果を見るかぎり図-2の中段に示すように塩素量時系列には潮位による影響は見いだすことができず無視できる程度である。

次に要因の一つに上げられている河川流量の減少が塩分拡散に与える影響を見ることにする。干天が長期に続く例ではないが、過去の観測例⁽²⁾の結果をも参考にすれば、例えば河口より5km地点における表層塩分量を流量の増減による変化でみるならば、夏季渇水期で塩水楔は極めて安定の状態であり、流量 $Q=180\text{m}^3/\text{s}$ に対して表層塩分量は0.1%、又、流量が増大し、流量 $Q=270\text{m}^3/\text{s}$ で塩水楔が後退したときの表層塩素量は0.03%、さらに流量が増大したとき、流量 $Q=300\text{m}^3/\text{s}$ に対する表層塩素量は0.05%であった。

河水のバックグランドは0.01%程度であるから確かに流量の減少に伴う表層塩分の増加を考える必要があるが、後ほど述べる風の影響に比べれば非常に小さい。

最近の観測例から見るならば、図-3は1992年7月の渇水期、いわゆる河川流量が減少した時のSt.6と8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。2地点の塩分の時系列は3時間程度の位相差があるが良く似ている。上流で見いだされる塩分時系列が、あまり形を変えず下流に伝播する様子が見える。この観測期間は渇水期と言えども若干の流量の変化を伴うから風が微風の場合に注目し、表層塩分を比較するといずれも0.1%以下の塩素量であり流量の増減に伴う表層塩分の変化は風による影響に比べて小さく、むしろこの月の上旬から中旬の半ばまで風速の増加と表層塩分の増加が比較的良い対応がついている。なお、図中の下旬半ばからの強風の期間がありながら表層塩分が減少している理由は天候の悪化に伴い降雨による流量の増大で塩水楔が後退したことによるものである。

又、低気圧の通過が影響を及ぼすと考えられてきた。この点について観測結果の中から気圧の大きな変動部分を取り出して検討する。図-4の下段の気圧の大きな変化は1993年7月29日の夜半より台風6号の影響によるものである。気圧は1016hpaより低下し31日の午後には1000hpa近くまで下がった。これは台風6号が30日9時には日本海を北東に進んで来たためのものである。台風は31日の9時には低気圧に変わり津軽海峡を通り東に進路を変えたがオホーツク高気圧との張り出しの影響を受けて若干停滞した後やがてカムチャッカ方向へ抜けた。

この間の表層伝導度の変化を見るならば気圧が最低となった31日の15時近くは強風を伴うものの伝導度の値は29日の低気圧の接近前の伝導度の値と同程度である。31日の午後から気圧は徐々に上昇し始めた降雨による増水と低気圧による水位の上昇は続くが低気圧の通過に伴う表層塩分の増大は伝導度の観測結果からは顕著な変化を見ることができない。なおこの低気圧に伴う水位及び二層境界面の上昇は10数cmと推算されるが、これらの変動に対する明確な表層塩素量の変化も現れてはいない。

最後に風による塩分拡散に与える影響について考察する。図-1のみならず1992年及び1993年に実施された観測結果、図-2及び図-4を見るかぎり風速と表層塩分の相関は明白である。しかし、両者の位相差はかなりあって、St.6において約12時間程度である。ただこの位相差は塩水楔の先端に行くほど短縮している。

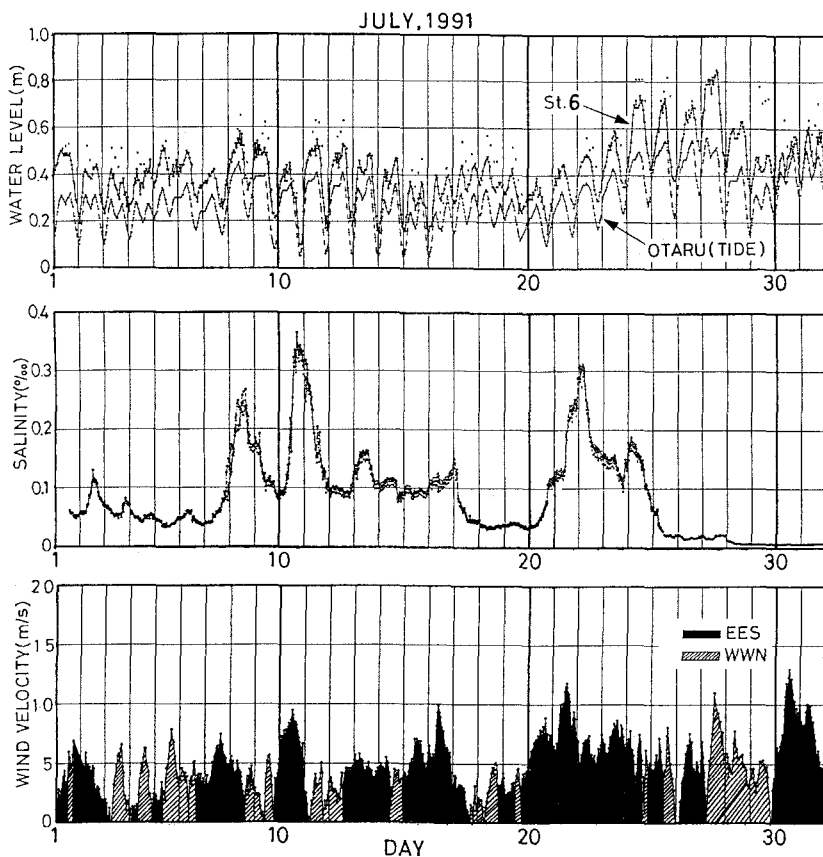


図-2 St. 6に於ける水位、塩分及び風向・風速の時系列

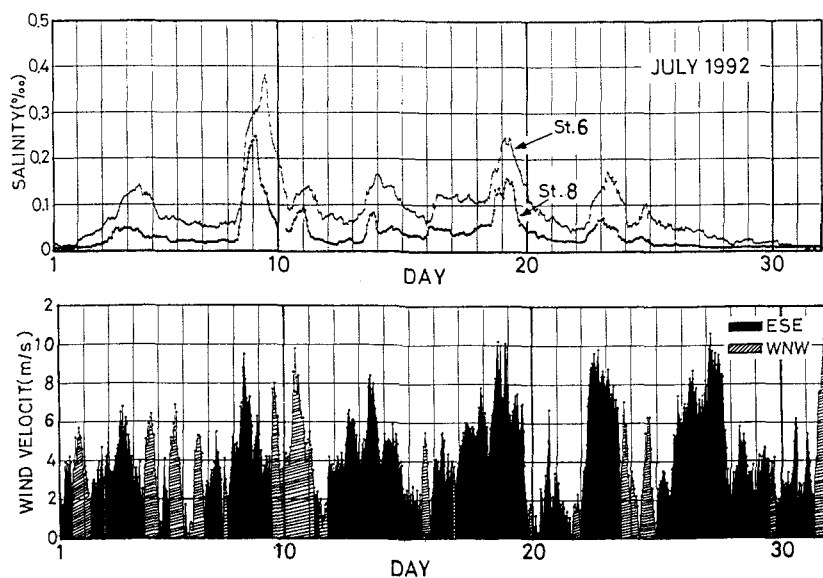


図-3 St. 6及びSt. 8に於ける表層塩分、風向・風速の時系列

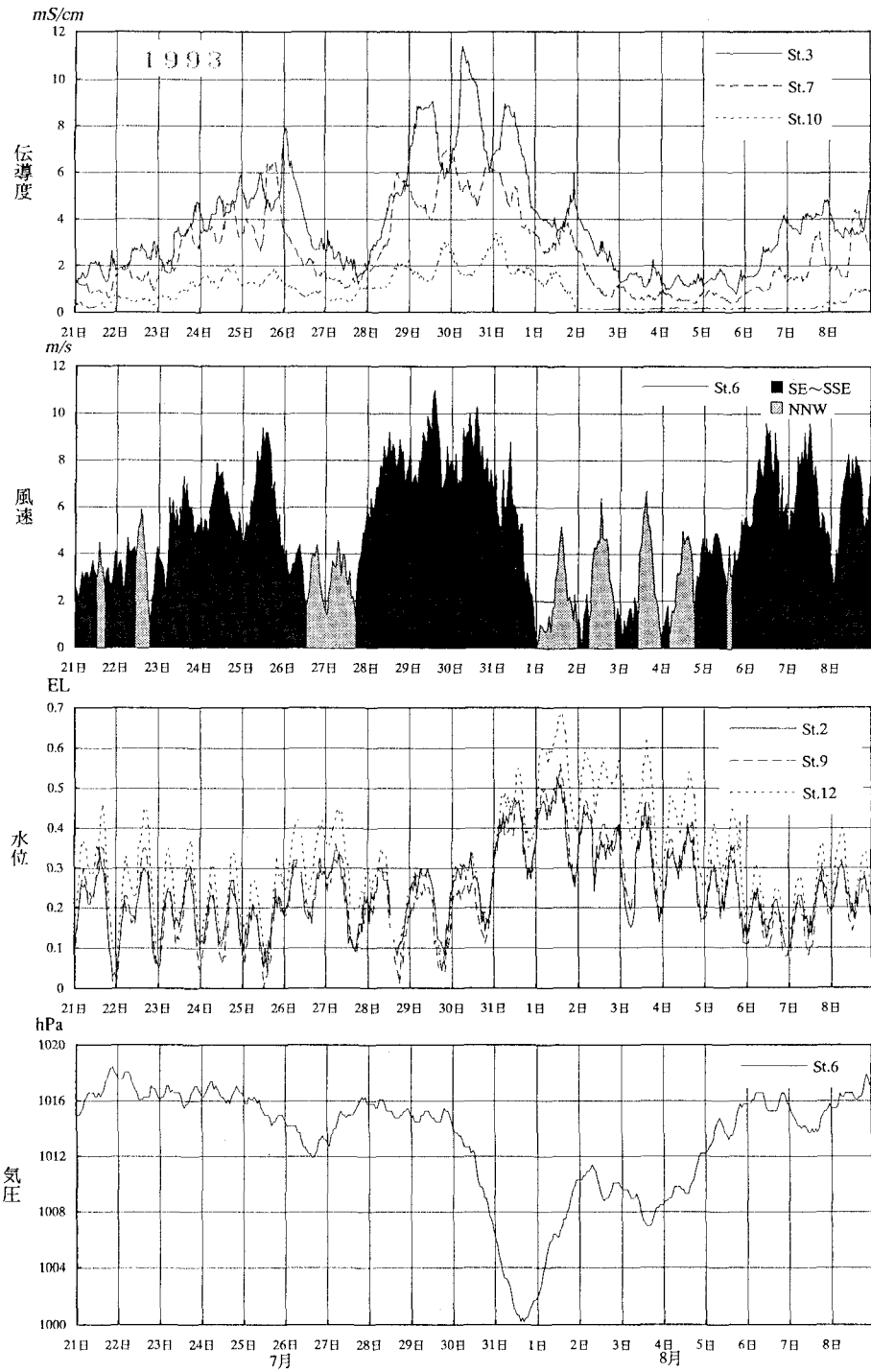


図-4 伝導度、風速・風向、水位、気圧の時系列

図-4の上段は表層の伝導度、二段目は風速である。図から7月の月末から8月の初旬の降雨を伴う低気圧の通過による影響を除けば風速と表層伝導度は非常に良い相関が得られることが分かる。

4. 風と表層塩分との関係

いま、石狩川においては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。

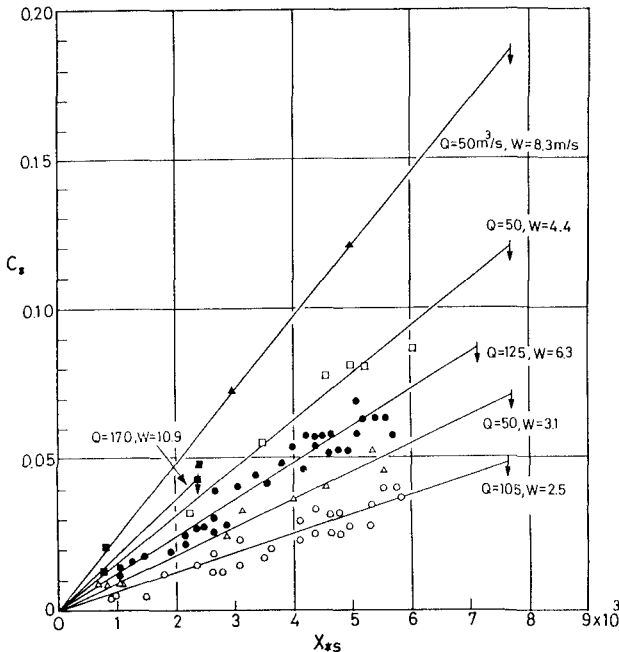
今、河道の幅が塩水楔全長にわたって著しく変化する部分がないとすれば、上層の密度に於いておよそ次式が成立する⁴⁾。

$$\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 - \rho_{10}} = \frac{C_2 - C_1}{C_2 - C_{10}} = \exp \left(- \int_{x_0}^x \frac{v}{h_1 u_1} dx \right) = \exp \left[- \int_{x_0}^x \frac{Hv}{h_1 u_1} d \left(\frac{x}{H} \right) \right] \quad (1)$$

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、 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密度に等しい。 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。 C'_* を $(C_2 - C_1)/(C_2 - C_{10})$ に等しいとすると観測結果から C'_* はきわめて1に近く、塩水楔先端から河口に向けて指数関数的に減少することから(1)式が適用できる。

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'_* との関係を求めると次式を得る。

$$C'_* = \exp(-K x_{s*}) = 1 - K x_{s*} \quad (2)$$



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(2)式はさらに次のように変形できる。

$$C_1/C_2 = C_* = K x_{s*} \quad (3)$$

図-5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*} との関係を求めたものである。なお、 $C_2 = 17.5\%$ とした。

図-5 表層塩素量の縦断分布 (記号↓は河口の位置を示す)

図-6 は各河川流量 ($Q \text{ m}^3/\text{s}$) における K と風速 ($W \text{ m/s}$) の関係である。

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-6 から K と Q と W の関係を求めると次式を得る。

$$K = (3.8 - 0.013Q)W \times 10^{-6} \quad (4)$$

ただし、適用範囲は $2.5 \text{ m/s} \leq W \leq 10.9 \text{ m/s}$, $50 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 170 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、 W については観測前の12時間の平均値を用いた。(4) は K に与える風と流量の影響は著しいことを示しており、この点を考慮に入れずに実測される連行係数は相当に散乱するものと思われる。なお無風の時は Q 大なるほど K が大きくなることは自明である。これに対し風速が 2 m/s を越すと Q 小なるほど K が大となっている。この事実は極めて重要なことである。

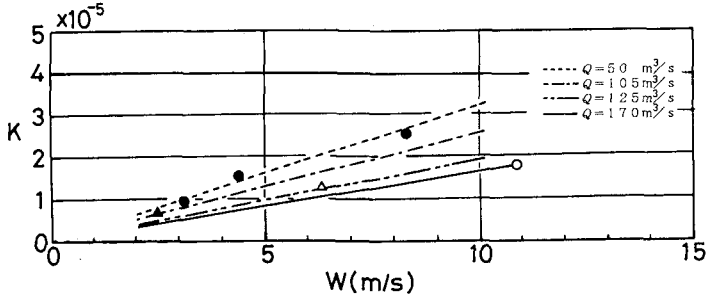


図-6 K 及び風速との関係

4. 結 論

石狩川下流域での表層塩分に与える要因について現地観測を通して検討し以下の諸点を明らかにした。

- (1) 従来表層に塩分が拡散される要因として河川流量の減少、低気圧の影響、潮位変動による影響、風による影響が重畳して塩水層の淡水層への拡散現象を支配していると考えられてきたが、最近3ヶ年の現地観測の結果主要な要因は風外力によるものであることが明らかになった。
- (2) 風と表層塩分との関係は式(3)と(4)で予測できる。
- (3) $2.5 \text{ m/s} \leq W \leq 10.9 \text{ m/s}$ の範囲内では連行係数 K は河川流量の増加とともに減少する。
- (4) 連行係数は式(4)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)(No.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) 堂腰 純・池田 実・前田 隆：石狩川下流地帯の塩害調査、昭和32年かんがい排水障害調査、北海道、1958。
- 2) 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。
- 3) 福島 久雄・八鍬 功・高橋 将・大谷 守正：河口における塩水と淡水の混合、第15回海岸工学講演回講演集、pp185-190, 1968。
- 4) 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, 1938。