

II-8

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

北海道大学工学部 正員 吉田 静男
日本気象協会北海道本部 正員 八木 史郎

1. 序 文

国内における河口二層流の研究が福島¹⁾により開始されて以来50年を経過した。この半世紀間に河口密度成層流をテーマとして発表された研究報告、論文等は膨大であり、今日常識化した河口流の知識も非常に多くなってきている。しかし、未解決の問題も決して少なくない。1例を挙げれば、特定の比較的調査の進んだ河口の流れであっても、各地点における表層塩分を予測することが出来ない。今後、ますます様々な利水に応じて行く必要があると思われるが、そのためにも表層塩分の予測は重要と考える。

河口部の塩分拡散は、最終的には分子拡散によって達成されるが、現実の塩分分布の相異は海水と河川水の接触面積の差異と乱れ分布の差異によって生じる。このうち、接触面積の増加は界面波の発達によりもたらされるが、その界面波の発達は、界面近傍の剪断流不安定に基づいている。塩水くさびと河川の接触部には上記の界面波による接触面積の増加と分子拡散によって中間的な密度のうすい層が形成されるが、この層を形成する流体は乱れによって表層へと輸送される。従って、塩分の鉛直分布は乱れの構造と塩水くさびの上を流れる河川の平均流速構造によって決定づけられる。さて、上記の剪断流不安定を生む要因はきわめて多い。たとえば、主たる要因だけでも潮汐、河川流量、風、河道地形等がある。この要因の中で、比較的解析の進んでいるのが、流量と塩水くさびの形状の関係である。しかしながら、他の要因が重畳すると、塩分拡散予測の精度は極端に悪くなる。その原因は、各要因と塩分拡散の定量的な関連がほとんど解明されていないことによる。

以上の観点から、本研究においては、上記諸要因のうち、研究の進展していない風要因の塩分拡散に及ぼす影響について、最近実施した野外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月に石狩川下流域において筆者らにより実施された。本研究において本質的に重要な塩水楔の形状と河床地形の構造は超音波測深機を用いて測定した。また、長期間にわたる塩分の時系列については、ほぼ直線をなす河道の最下流部に近い(河口上流8km)地点において、4ヶ所の水深(0m、0.5m、1.0m、1.5m、河床水深は1.5m)に固定した伝導度センサーを用いて測定した。一方、バックグラウンドデータとしての流量、水位、風向、風速、塩分の鉛直分布等は通常の計測器を用いて採取した。

観測河道の平面形状は、図-1に示すとおりである。上記塩分の連続観測地点は、St. 2である。L₁～L_{4,2}は横断の測深を行った測線で、各測線の5地点で鉛直方向の塩分や水温の測定が実施された。

3. 観測結果の解析及び考察

(1) 塩水くさびの侵入状況

流量の少ない7月上中旬の塩水くさびの形状は、図-2に示すとおりである。同図には、石狩川における過去のデータもプロットしており、各線は界面抵抗係数 f_i が次式を満足するものと仮定して得た塩水楔の計算結果である。

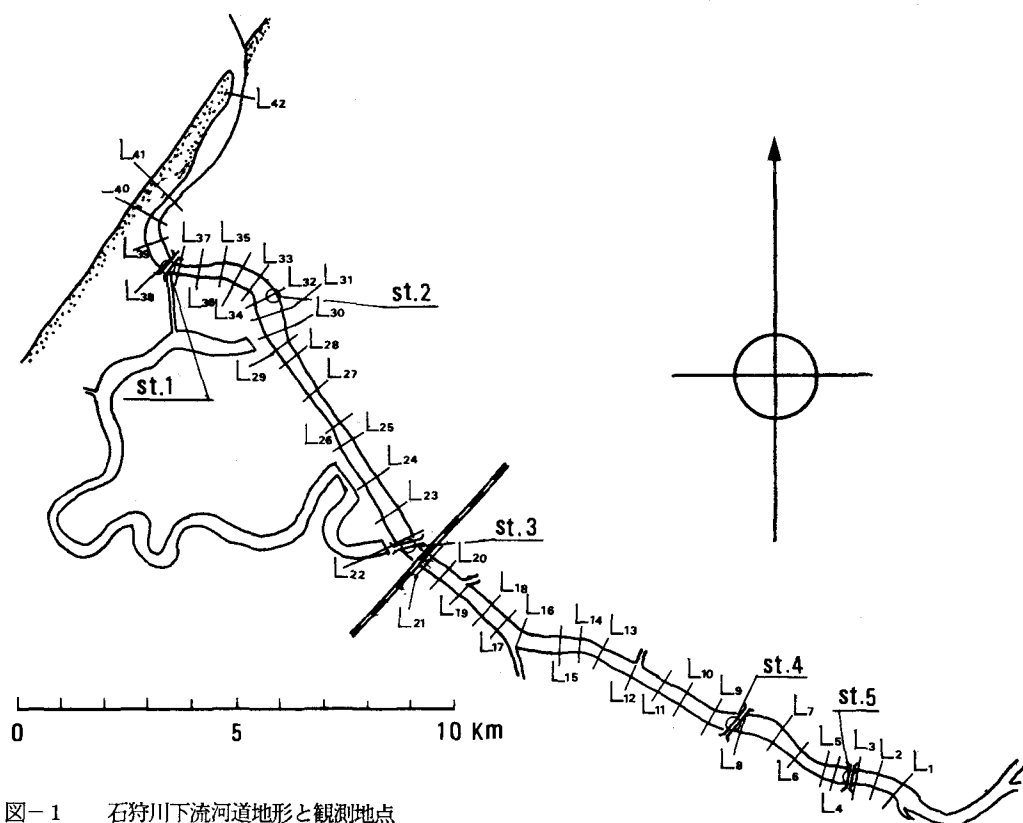


図-1 石狩川下流河道地形と観測地点

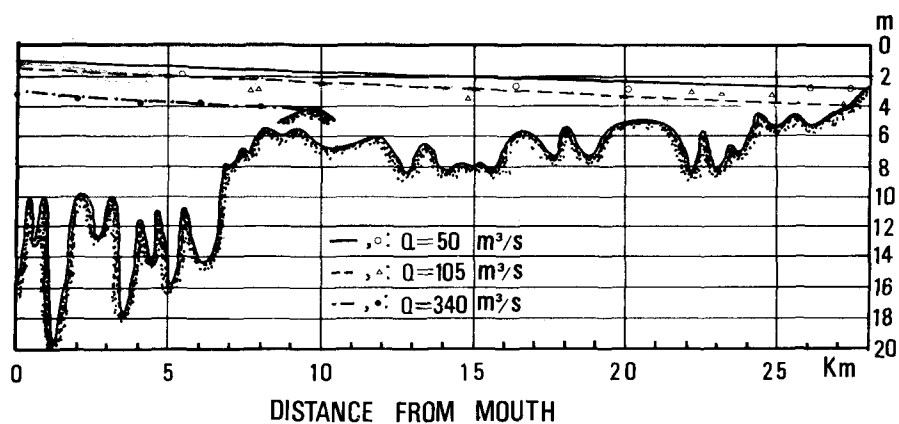


図-2 塩水くさびの形状

図中 Q は河川流量、白ぬきマークは今回の観測データ、黒ぬりマークは過去のデータを示し、各種の線は計算結果を示す。

$$f_1 = 0.25 \phi^{-0.5} \dots\dots\dots (1)$$

ここに ϕ は岩崎数²⁾で、従来石狩川においては(1)式が成立していた。計算結果は時間平均の形状を示すから現実の観測結果と若干の相異が見出せるが、その差異は大きくない。従って、石狩川における塩水の現在の侵入状況は、過去の侵入状況と同様であるといえる。

図-3は観測時の各水深に対応する河床の幅を示す。観測期間中比較的塩水侵入の著しかった7月9日に注目すると、塩水くさびと河川水の接触面の水深が $T_1 \sim T_{4.1}$ の間では、2.5~2.8mであったから、その接触面の横断方向の幅には極端な狭さく部が無かったと推定される。かくして、河川水中の塩分は、下流に向かうに従って漸増する幅を有する淡塩境界面から輸送されていたと判断することができる。なお、河道の一部に島状の浅い領域があり、それに基づく塩分の拡散は、その下流の局所領域において促進されることが、超音波測深機によってとらえ得るが、全体の塩分分布に与える影響は小さいとみてその定量的な評価は行わない。

(2) 表層塩分の縦断方向分布と風速の関係

図-4は福島³⁾の方法に従って片対数紙にプロットした表層塩素量の一例である。河口に向かって変化率が徐々に減少する傾向は天塩川の例⁴⁾によく似ている。従来の石狩川での観測結果を調べると塩水くさびの全長が10km以下の例がほとんどで、図-4に見られる曲線傾向より、むしろ片対数紙上で直線に近くなっている。この結果から福島³⁾は表層塩分の縦断方向分布が指数関数となることを主張した。しかし、その物理的根拠は自明ではない。たとえば、下層塩分はいたる所で一様であることと、鉛直方向の乱れ構造の一様性の仮定が可能であれば河川水中に輸送される塩分量は流下距離に比例すると思われる。実際に図-4を方眼紙上にプロットし直すと図-5に示すとおり、確かに直線的に変化することが分かる。塩分の拡散機構については、もう少し時間をかけて検討するとして、ここではとりあえず、方眼紙上にデータをプロットして考察を進める。

図-6は各風速ごとにプロットした表層塩素量であり、図-7は風速と塩素量増加勾配 α の関係である。なお、風速は時間変化するのでその評価方法は議論の分かれるところであるが、とりあえず塩分観測終了時から12時間前までの平均値とした。12時間さかのぼった理由は、St.2での表層塩分の上昇ピークを示す時刻と風速がピークを示す時刻の時間差が、およそ12時間程度であることによっている。しかし、今後、より理にかなった風速の評価方法を見出す必要がある。上述のように風速の評価にあいまいさを残しているものの、図-7からは風速 W (12時間の平均値m/s)、河川流量(m^3/s)及び α の関係を得ることができる。

$$\alpha = (1.67 - 0.0056Q) W \times 10^{-5} \dots\dots\dots (2)$$

なお、現時点では α を W のより高次の式を関係づけ得る段階には無い。(2)を使用すると、任意の地点での表層塩素量を予測できる次式を得る。

$$S_s = \alpha \ell \text{ (‰)} \dots\dots\dots (3)$$

ここに ℓ は α が一定値をとりはじめる地点から下流にとった距離(m)である。 α が一定値をとりはじめる位置は淡水厚さ、風速、風向に依存することは予想できるが、一般性のある関係は見出されていない。ただ今回の観測によれば(勿論石狩川に限定されるが)塩水くさび全長が27kmに対しおよそ次の関係が見出された。

$$\ell_0 = -703W + 5800 \dots\dots\dots (4)$$

ここに ℓ_0 は塩水くさび先端から α が一定値をとりはじめる位置までの距離である。

(3) 表層塩分の時系列

前節においてはバックグラウンドの条件が、準定常状態にあることを前提に議論した。従って、(2)

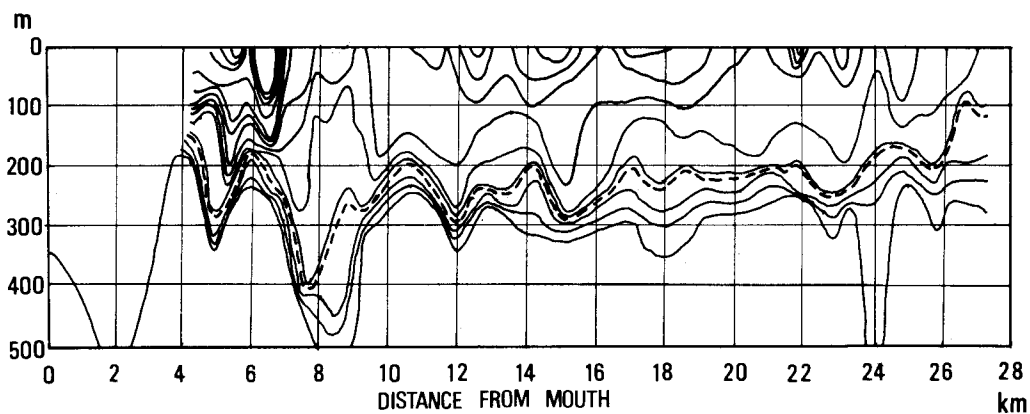


図-3 河道の横断線上での各水深に対応する河床幅
(破線は淡水・塩境界の幅)

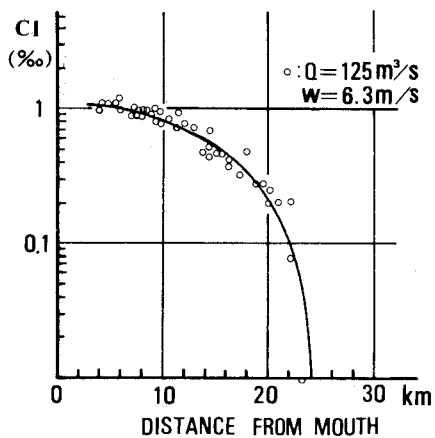


図-4 表層塩分の縦断方向分布

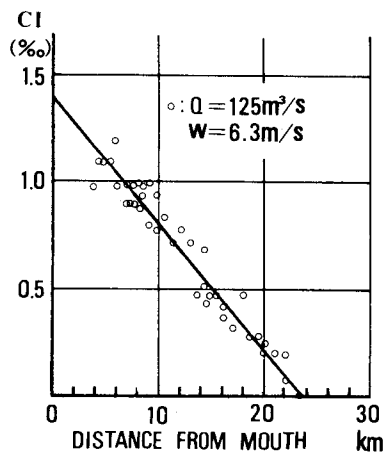


図-5 表層塩分の縦断方向分布

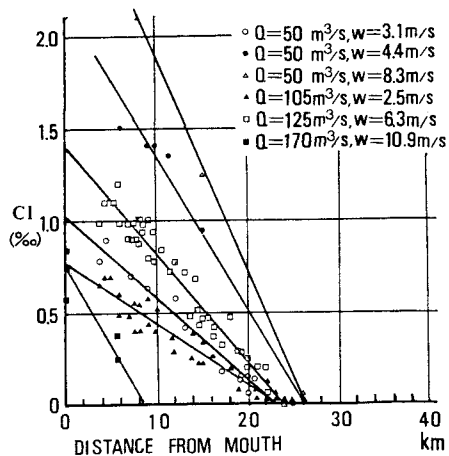


図-6 表層塩分の縦断方向分布と風速の関係

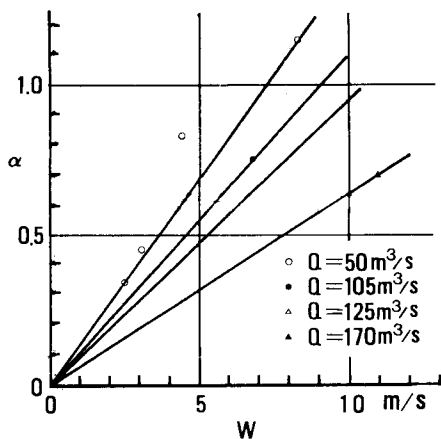


図-7 同一流量に対する α と風速の関係

～(4)式の適用は、風の吹きはじめには成立しない。本節では、本来非定常である風とSt.1における鉛直方向3点における塩分値(%)の時系列について解析する。図-8には7月に観測された表層塩分、風速及び風向が示されている。風速の図で黒ぬりの部分は主として風向がESE～SEのものであり、他はWNW～NWのものである。なお8月のデータについては、紙面の都合で省略した。風向図が示すとおり石狩川河流域での7月には、風向がほぼESEとWNWに2分できる。この風向は、図-1から分かるとおり、ほぼ河道に沿っており、強風時には著しい表面波が観測される原因となる。塩分の時系列と風速の時系列を比較すると、両者間の相関が非常によいことが分かる。ただ、20日頃から河川流量が増加しており、29日以降は河川水自体のバックグラウンドの値が観測されている。両者のピーク値同士を対応させるとその時間差は非常にバラつくが、風の吹きはじめと塩分増加開始の時刻を比べると、後者は前者より10～12時間程度遅れる。この遅れ時間は、上層水塊が平均流速で塩水くさび先端から観測点まで移動するのに要する時間に近い。また、半日を下回る風速の変化には塩分の変化がほとんど応答を示さない。従って、短時間にわたって吹くWNWの風に基づく塩分拡散の程度は、ESEの風の場合に比べて著しく小さくなっている。

河口の塩分拡散に与える風の効果に関する最初の研究は堂腰ら⁸⁾らにより実施された。その報告によれば風速6 m/s以上になると急に表層塩分が増大すること、および、表面塩分濃度のピークが風速最大の時刻より11～13時間遅れること、その遅れは河川流量が少なくなるほど小さくなる傾向にあること等が明らかになっている。今回の筆者らの観測結果からも、ほぼ同様の傾向が確認された。一方、同問題の定量的な考察は、前述のように福島ら⁹⁾によって実施されたが、本研究はそれをさらに進展させた内容になっている。すなわち、縦断方向の塩分増加勾配 α を流量と風速の関数として表わし、各地点での表層塩分の推定式を得ている。しかし、この関係式は定常とみなせる流量と、長時間にわたり一定とみなせる風速にさらされた時のいわば定常的なバックグラウンドにおいて適用できるもので、風の吹きはじめ等の過度、あるいは非定常性の著しい現象に対してはより緻密な観測を必要とする。さらに、本研究においては、 α とWの直線的な関係を得る根拠として乱れ構造の一様性を仮定したが、その立証には乱流計測が必要である。いずれの点についても今後の課題としたい。

4. 結 論

石狩川下流域での観測を通し、塩分拡散に及ぼす影響について考察した。その結果以下の諸点を明らかにすることができた。

- (1) 7月の低水期にあっても、 $f_t = 0.25 \phi^{-0.8}$ という従来の時間平均の界面抵抗係数に関する経験式の適用が可能である。
- (2) 表層塩分の縦断方向の分布は(3)式で与えられる。この結果は乱流による単位界面積あたりの上層への下層海水の輸送量が流下方向に一様であることを示している。
- (3) 石狩川下流域での風向はほとんどESEとWNWに2分されESEの風の割合が大きい。風速は様々な周期で変化するが、それに伴ない各点での表層塩分も良い相関をもって変動する。ただ風速変動に比べ表層塩分の変動が10～12時間程度遅れる。また、半日を下まわる周期の風速変動が塩分拡散に及ぼす影響は小さい。

文 献

- 1) 福島 久雄：石狩川河口の観測 日本海洋学会誌 第1巻 第1号 1949
- 2) 吉田 静男：河口密度流に及ぼす地形の影響 第30回海岸工学講演会論文集 1983
- 3) 福島 久雄・八畹 功・高橋 将・大谷 守正：河口における塩水と淡水の混合
第15回海岸工学講演会講演集 1968
- 4) 八畹 功・高橋 将・大谷 守正：天塩川河口における塩水侵入 第21回海岸工学講演会論集 1974

5) 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

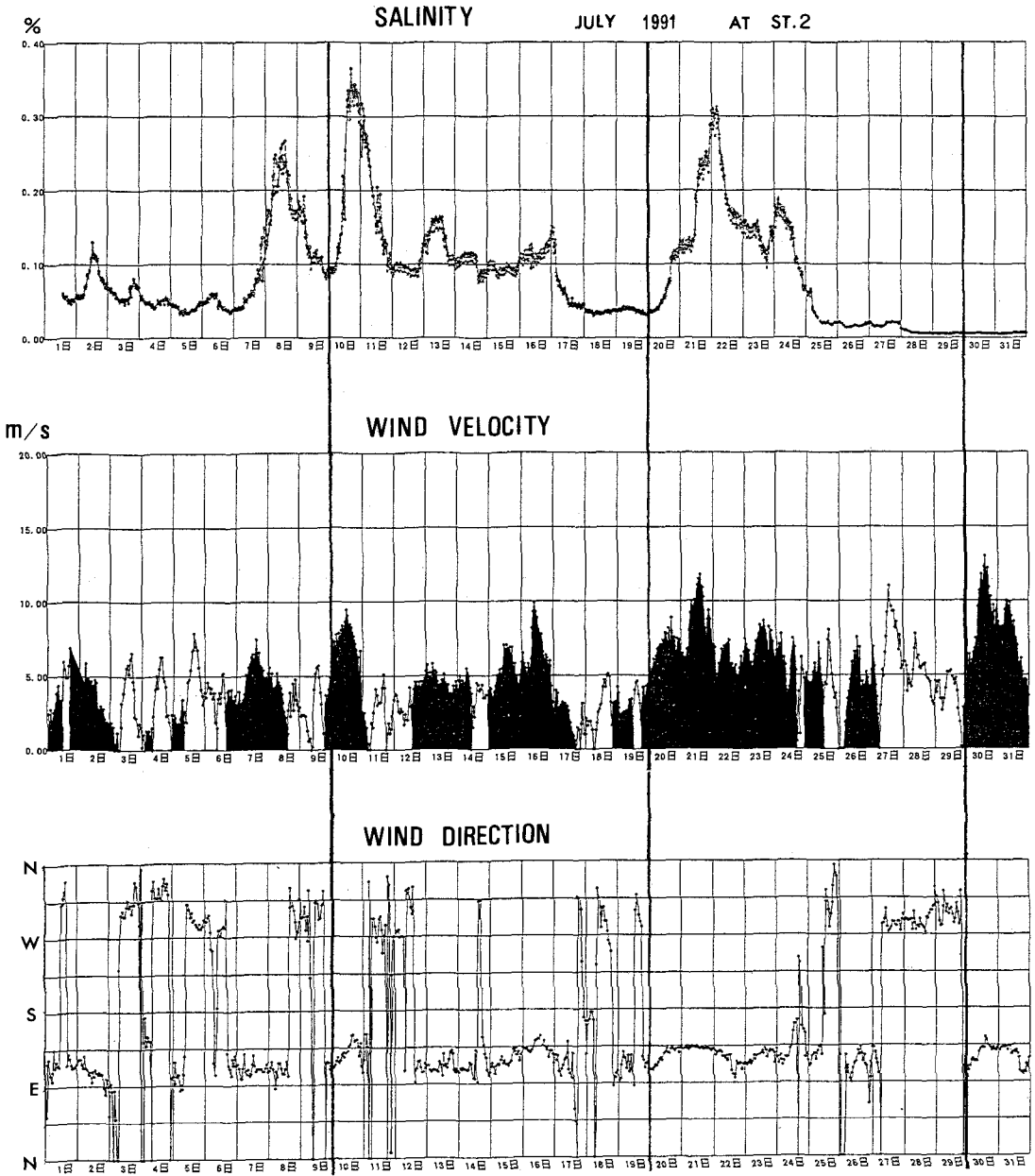


図-8 St. 2 における塩分濃度、風速及び風向