

II-51

石狩川下流域の表層塩分の予測

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

石狩川下流域における河川水の利用に際しては塩害による被害を防止・軽減する上で、淡水層中の塩分量を実時間で予測する意義は大きい。即ち淡水層中に異常な塩分濃度の増大が想定される場合に樋門操作に入る時刻等の推定をいかに早く的確に予測するかが重要である。そのためには、数時間先の表層塩分濃度の予測が必要となり、気象情報、海象情報を加味した予測となる。

密度成層化した石狩川下流域の水表面に風の応力が作用すると、密度成層度・吹送時間などに応じて様相を異にする鉛直混合・拡散現象が発生する。さらにこれらの現象には気圧変動、河川流量の増減、潮位変動等さまざまな要因が加わる。しかし、下層塩水層から上層淡水層への塩分の連行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観測結果から確かめて風と流量と表層塩分との関係式を既に導いて報告をした<sup>1), 2), 3)</sup>。また連行現象は塩淡水層界面の複雑な乱れや渦の様相により左右されるが、それを発生させる最大の要因が風であることも確かめて連行係数を風速の関数として求めて報告した<sup>4)</sup>。

本論文では石狩川下流域における二層流の界面現象に関して観測を開始した1993年以降の観測結果をまとめ整理したものと得られた知見から表層塩分の予測を行い淡水層中の塩分量の推定を試みて実測値と比較したものである。

2. 観測の基本方針

二層流の界面現象を解明するには多くの観測データの集積を必要とする。それらの中から実際に解明に寄与するものを取捨選択しなければならない。

淡水層中の塩分濃度は気象及び海象の変化に対応するから気象データや海象データを得ることを基本とする。

これらは風速・風向、降雨量、気温・湿度、潮位、波高、加えて河

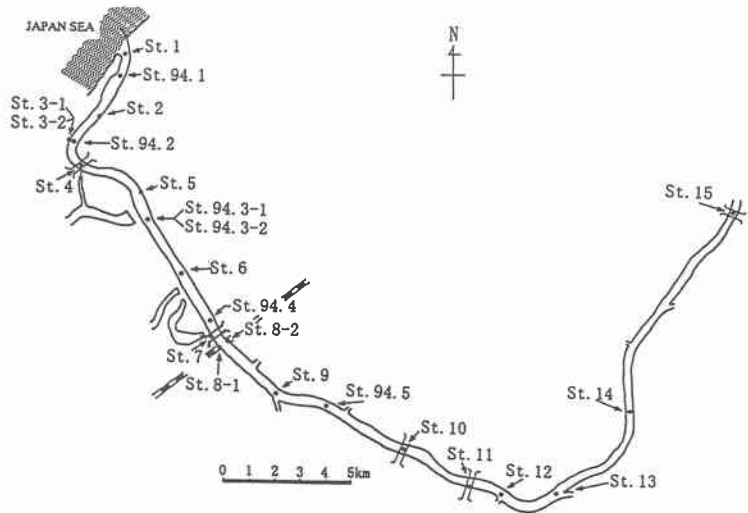


図-1 石狩川下流域地形図及び観測地点

Prediction of Salt Diffusion in the Highly Stratified Flow at the Ishikari River mouth  
by Morimasa OHTANI, Shizuo YOSHIDA, Shuzo NISHIDA and Yhobun NAKAMICHI

川流量、河川水中の横断方向、縦断方向の塩分鉛直分布及び流速分布、塩水楔の長さや形状、淡塩二層境界面での塩水層から淡水層への塩水の拡散状況、塩水及び淡水層の厚さの時間変化等を詳細に知る必要がある。これらの観測方法や観測内容について既に報告済みであるので、その詳細については省略するが、1993年以来観測を継続してきた結果、観測地点を増やし、観測体制を強化する一方、必要最小限に観測地点を整理して現在までに考えられる最適な観測点を整理統合した。これらを示したのが図1である。観測点は河口から上流 44.6km地点まで及び観測点数は15点に及ぶ。なお観測点の河口からの距離と観測点での観測内容を表1に示す。

### 3. 観測結果

#### 3.1 塩水楔

表層塩分の増減は河口より侵入してきた塩水楔の存在のあり方により異なる。従って塩水楔の挙動や二層間の境界に生じる複雑な現象を正しく知ることが必要である。超音波を用いることにより河口より塩水楔先端までの河道内の淡水層と塩水層を明瞭に区別することが出来るとともに二層境界面からの塩水の拡散状況を可視化することが出来る。

図2はその観測例である。二層境界面の様子は河床の地形や河道の湾曲、河川流量の違いにより様々な様相を示す。また計算により石狩川で成立する岩崎数  $f_i = 0.25\Psi^{-0.5}$  を用いるならば時間平均の塩水楔の形状を求めることが出来る。図3は観測値と計算結果を比較したものである。図中の縦の黒棒は界面の振幅を示す。この振幅は図3に見られるように河口から遠くなるほど小さく指数関数的に減少する。

表-1 観測値点名、観測項目及び観測期間

St. (地名名、St.1からの距離km)	観測項目	観測期間
St.1 (河口、0)	ソナーによる界面不安定の観測	8月23日
St.94.1 (地名なし河道中央、1.0)	水温伝導度の自記記録-1	6月30日～8月23日
St.2 (河口岸水位観測所、2.9)	表面水位	全期間
St.94.2 (分駐所河道中央、4.2)	水温伝導度の自記記録-2	6月30日～8月23日
St.3-1 (分駐所岸、4.2)	界面水位 (ソナー式)	冬季を除く全期間
St.3-2 (分駐所、4.2)	表面水位	全期間
St.4 (河口橋、5.4)	今回観測なし	-
St.5 (生振揚水所、8.2)	気象データ	全期間
St.94.3-1 (地名なし河道中央、9.3)	観測塔からの観測	8月1日～8月8日
St.94.3-2 (地名なし河道中央、9.3)	水温伝導度の自記記録-3	6月30日～8月23日
St.6 (実地位排水機場河道中央、11.7)	観測塔からの観測	8月1日～8月8日
St.94.4 (地名なし、14)	水温伝導度の自記記録-4	6月30日～8月23日
St.7 (札幌大橋左岸、14.6)	今回観測なし	-
St.8-1 (鉄橋左岸、15.0)	表面水位	全期間
St.8-2 (鉄橋右岸、15.0)	界面水位 (ステップ式)	冬季を除く全期間
St.9 (豊平川合流点、17.9)	今回観測なし	-
St.94.5 (角山第一補門河道中央、20.0)	水温伝導度の自記記録-5	6月30日～8月23日
St.10 (新石狩大橋、23.4)	今回観測なし	-
St.11 (石狩大橋左岸、26.6)	表面水位、海面水位 (ステップ式)	全期間、冬季を除く全期間
St.12 (千歳川合流点、27.9)	今回観測なし	-
St.13 (夕張川合流点、30.7)	今回観測なし	-
St.14 (お茶の水排水機場、35.4)	今回観測なし	-
St.15 (岩見沢大橋、44.6)	表面水位	全期間

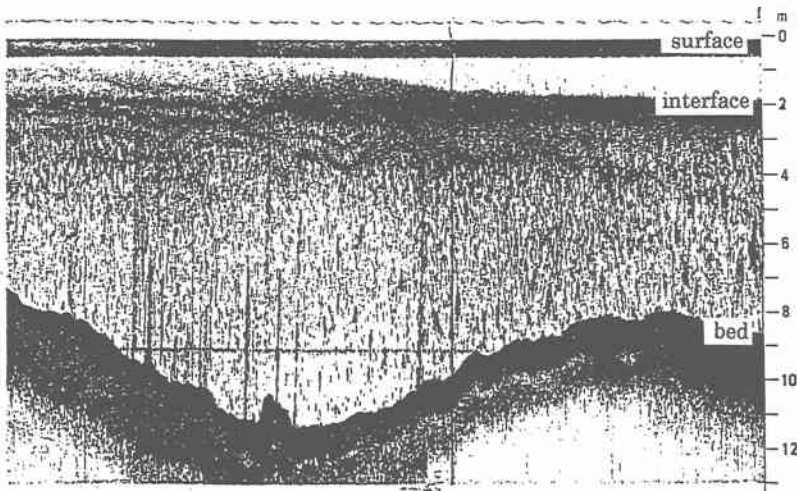


図-2 超音波による塩水楔の観測例

### 3.2 気圧変動に伴う海水面、河川水位

#### 及び境界面の変動

気圧の変化と共に天気や風が変化することは日常的に経験するところであるが、気圧の変動に伴う海水面の変動も知られている。石狩川河口付近では10hpの気圧が高くなれば14cmの海水面の低下が見られる。気圧変動に伴う海水面、河川水位、潮位、境界面の変動を観測すると気圧

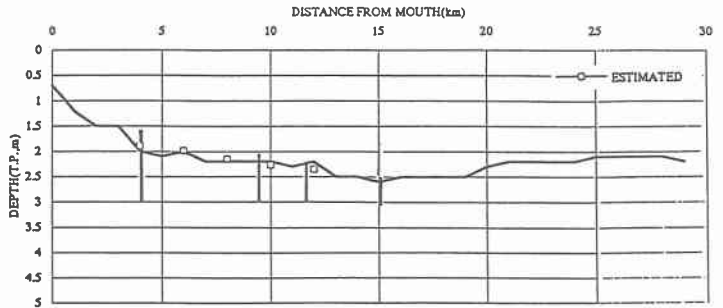


図-3 観測値と数値計算による塩水楔形状

の変化と海水面の変化は良く対応する。また河川水位の変化にも対応するが、低気圧が接近した場合には降雨が伴うことが多いので上流部では注意を要する。また境界面の変動は気圧の変動を無視できないが、より顕著に潮位の変動に対応していることが分かっている。観測例を図4に示す。

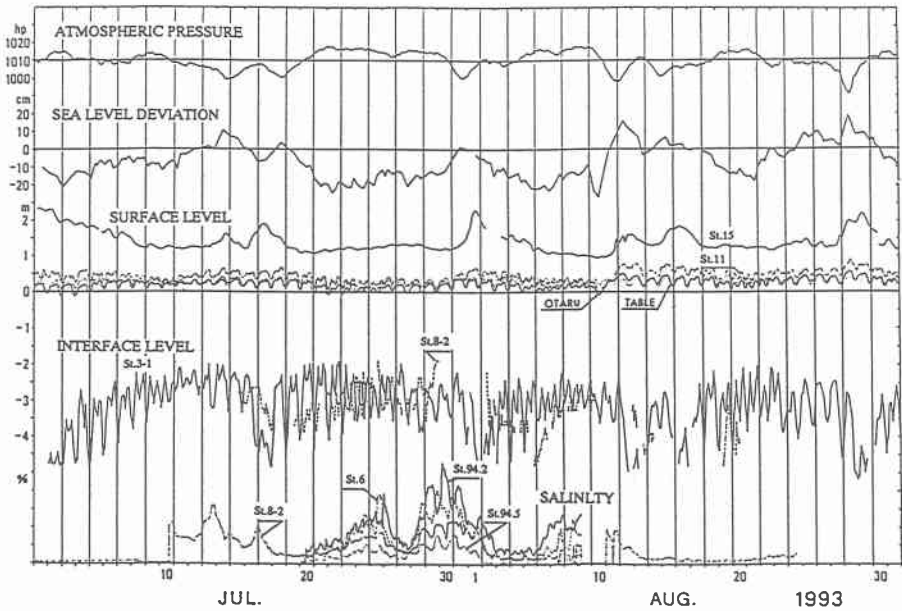


図-4 気圧、海水面、河川水位、二層境界面、塩分の観測値

### 3.3 成層構造と安定性

図5-1(上段)に示すように河口近くの密度構造は不連続に近い。そこでG.A.Lawrence<sup>5)</sup>の非対称流れ(図5-1下段)の安定性理論を適用し、非対称性流れのダイヤグラムを使用して不安定波の波数を求めてさらに波長を求めると4.7mとなり、現地観測で得られた界面波波長5mに近い。このような波動は超音波により観測可能であった。このことより河道内にも安定性理論を適用し流れの不安定が生じるかどうか検討した。河道内での密度構造(図5-2上段)の実測値をTaylor-Goldsteinの第二のケース<sup>6)</sup>(図5-2下段)で近似し、リチャードソン数2.30を得た。その結果この値は安定領域内<sup>6)</sup>にあり、流れ場は安定であって流れの不安定性が河道内の特殊な部分を除き塩分拡散の要因には成り得ないことが分かった。

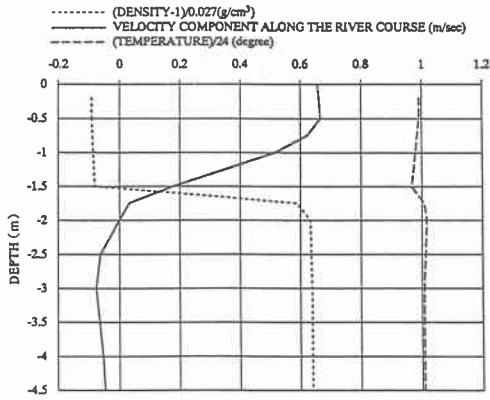


図5-1 河口近傍の密度構造と模式図

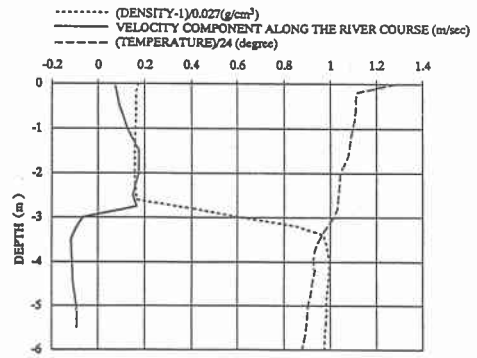


図5-2 河道内の密度構造と模式図

### 3.4 乱れ強度と風速依存性

図6. 7はレーザードップラー流速計を用いて風速の違いによる河川流速の乱れ強度の水平成分及び鉛直成分を示したものである。曲線は各水深毎に得られた多数の風速と乱れ強度の関係を回帰曲線として求めて、その回帰式より風速と乱れ強度との関係を求めたものである。

図が示すように乱れ強度の鉛直成分は水平成分に比べその値は小さいが、いずれも水表面近くでは大きく、水深2m以下でも風の影響を見ることが出来る。このことから乱れ強度は風速に依存し水深が深くなるほど徐々に減衰してゆくことがわかる。

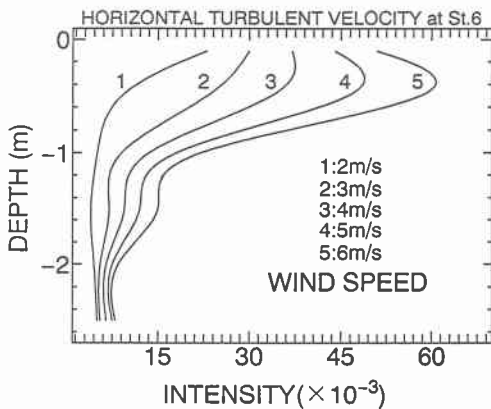


図-6 流速の水平成分の乱れ強度

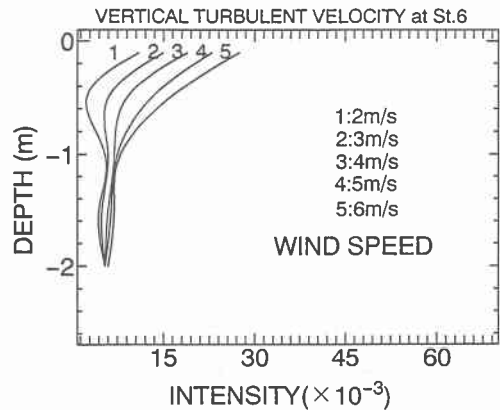


図-7 流速の鉛直成分の乱れ強度

#### 4. 表層塩分の予測

表層塩分の増減については塩水楔が潮汐の効果や河川流量の変化を受けて非定常運動をする場合を含めて二層境界面に生ずる混合・拡散や乱れの発達・消滅過程の微細構造について現在も研究を継続中であるが、現時点での観測結果から得られた知見を基に塩分の予測を行う。

上層の淡水層は楔先端より下流に流れて行く過程で下層の塩水層から塩分を取り込み次第に塩分値を上昇させていく。一般的には、河道をN個に分割するとN地点での塩分量は区間1からN-1区間までの塩分取り込み量の総和が加わることになる。長い河道上での風速は各区間内で異なった値を取るのが普通であるが、ここでは代表風速値として風速観測地点での風速を到達時間で除した時間平均の風速値を用いることにする。

いま河道上の予測地点での表層塩分量を $S_x$ とすると次式で与えられる<sup>3)・4)</sup>

$$S_x = \frac{E}{h} S_2 x \quad (1)$$

ここに  $S_x$  : 予測地点での表層塩分量、E : 連行係数、h : 淡水層の厚さ、x : 楔先端から予測地点までの距離、 $S_2$  は塩水層の塩分

また連行係数Eは次式により与えられる<sup>4)</sup>。

$$E = 2.24 e^{0.281w} \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$E = 1.92 e^{0.405w} \times 10^{-6} \quad (3)$$

W : 風速(m/s)

連行係数は風速の関数として求めたものであるが、流量、淡水層の厚みにより異なった値をとる。

予測するにあたっては、リアルタイムの予測であれば、水位-流量曲線等から流量を求めて流量と塩水楔の長さの関係を図8-1から求めて予測点での塩水楔の長さ(塩水楔先端から予測地点までの距離 x)を求める。次に同様にして流量から図8-2より淡水層の厚み(h)を求める。さらに連行係数は淡水層の厚みが2.5m前後であれば式(2)を用い、3m前後であれば式(3)を用いる。

代表風速値を求めるための塩水楔の先端から予測点までの河川水の到達時間は渇水期であれば平均的な流速は22cm/sec程度であるのでこの値を使用する事にする。

即ち、塩分の変化と風速との間には遅れが生じるから現時点での予測を行うためには過去の風速値を用いることになる。また塩水層の塩分 $S_2$ は一定として3.16%とする。

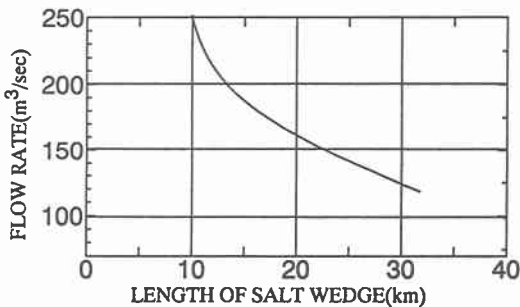


図8-1 流量と塩水楔の長さとの関係

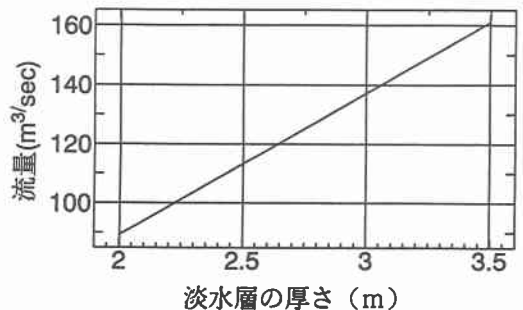


図8-2 流量と淡水層の厚さとの関係

## 5. 予測結果

図9は塩水楔先端から4.2km 地点と11.7km 地点及び20.0km 地点での1993年7月21日から7月31日までの塩分実測値と予測値を比較したものである。流量は142m<sup>3</sup>/s、平均流速は22.9cm/s、淡水層の厚みは3.1mの値を用いた。また連行係数として式(2)を用いている。3地点での予測結果を見ると楔先端からの距離が長く成る程風速の変動が平均化されるため滑らかな曲線を描くことから、実測値の急激な変動に対しては予測値の間にずれが生じる傾向が見られた。

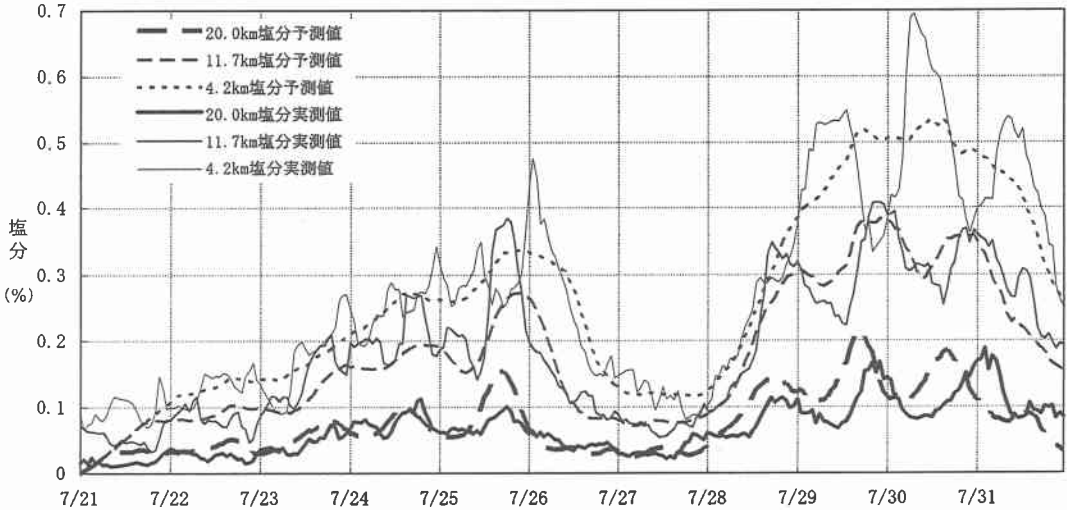


図9 塩分の観測値と予測値の比較

## 6. 結論

本モデルでの表層塩分値の予測は現地観測に基づいて風が淡塩境界面に及ぼす効果が他の要因よりも大きいことから導かれたものである。本計算モデルは定量的には妥当な近似を与えると言えるが、さまざまな条件のもとでの観測例が少なく適用範囲が狭い。今後多くの観測例について計算を行い、計算結果と実測値の比較から予測精度をいっそう高めて汎用性を持ったものに改良を進めていくつもりである。

## 謝辞

本研究は文部省科学研究費補助金・一般研究(B) 課題番号No. 04452231(1992-1955)の補助を受けて遂行された。記して謝意を表したい。

## 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。  
土木学会、水工学文集、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) 大谷 守正・吉田 静男・西田 修三・中道 陽文：石狩川河口二層流における連行係数について。  
土木学会北海道支部、論文報告集、平成6年度、pp152-157.
- 5) G.A.Lawrence, et al: The Stability of a Sherd Density Interface. Phys. Fluids, pp2360-2370, 1991.
- 6) 谷 一郎編：流体力学の進歩 乱流、丸善株式会社 1979.