

現地調査による二成層流れ場における構造物近傍の塩分拡散

In si-tu observation of salt diffusion caused by obstacles in two stratified flows

北海道大学大学院工学研究科	○学生員	兵藤 誠 (Makoto Hyodo)
北海道大学大学院工学研究科	学生員	植田知行 (Tomoyuki Ueda)
苫小牧工業高等専門学校	正員	中野 渉 (Wataru Nakano)
北海道大学大学院工学研究科	フェロー	佐伯 浩 (Hiroshi Saeki)

1. 背景

近年、石狩川において舟運が本格的に検討されている。しかし、石狩川舟運の実現には解決しなければならない多くの技術的課題がある。渇水期の石狩川河口には塩水楔が遡上する。その距離は河口から 20 数キロに及ぶこともある。また、河口では農業用水の取水、漁業を営んでおり、船舶の航行による塩分の混合がそれらに及ぼす影響を評価する必要がある。

2. 研究の目的

石狩川における塩水楔に伴う研究は過去に多くなされているが、物体後流、構造物による二層流体の挙動等の研究はあまり多くなされていないと思われる。我々は、二層流体中における船舶の通過に伴う塩分拡散現象²⁾について、また構造物による拡散現象³⁾については橋脚模型を構造物として両者とも室内実験を行っている。

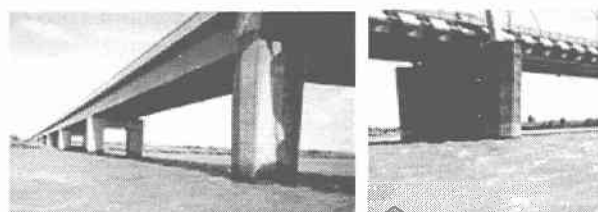
我々の研究の最終的な目的は、既設の橋脚等の構造物による塩分拡散と船舶通過に伴う塩分拡散を比較検討し、舟運による環境への評価を行うことである。その一つの段階として、本研究の目的は橋脚による二層流体の塩分拡散を調べるために現地調査を実施すること、また室内模型実験の妥当性を評価することであり、その成果をここに報告する。

3. 調査の概要・方法

石狩川河口の橋脚による二層流体の塩分拡散を調べるために、2001年8月8日、2001年10月25日の二度、石狩川河口から約5.5キロにある石狩河口橋の橋脚において現地調査を行った。橋梁は石狩河口橋より上流側の河口から約15キロ地点にある札幌大橋、石狩川鉄道橋などがあるが、風が強い日が多いこと、塩水楔がその地点まで遡上していないことがあること等、調査が困難であるため確実に調査を実施することのできる石狩河口橋の橋脚において調査を実施した。

計測項目、計測方法を以下に説明する。比較的小さい船の上に計測器を積み、そこから計測した。計測項目は橋脚近傍の塩分濃度、流速、水温、DO、濁度等である。塩分濃度、水温、DO、濁度の計測はアレック電子のクロロテックを用い、各地点の鉛直方向の分布を計測した。流速は、小型電磁流速計を用い同様に計測した。本論においては主に塩分濃度、流速について検討する。

計測に用いた橋脚は、写真-1に示すように石狩河口橋における左岸側の橋脚を対象とし、その形状は角柱を組み合わせた形状になっている。



右岸側

左岸側

計測を行った橋脚

写真-1 下流から見た石狩河口橋

計測地点は、図-1のようなメッシュを区切り、川幅方向を y 軸、流下方向を x 軸にとり、橋脚の下流側中央に原点をとった。そこから流下方向に向かう距離を $x(m)$ 、川幅方向を $y(m)$ とし、左岸方向を正、右岸方向を負にとった。それぞれの地点への移動は船と橋梁上のハンドレールをロープで結び、河川の流れ方向にロープを伸ばしながら移動し、船のスクリュプロペラによる塩分拡散を防ぐためにこのように移動を行った。しかし、これでは正確な計測地点を定めることができないので、GPSを用いて調整をした。二度にわたる調査の計測地点もそれぞれ図-1に示してある。10月25日は天候が後半に悪化し調査続行が困難になったため、計測地点が8月8日に比べ若干少なくなっている。

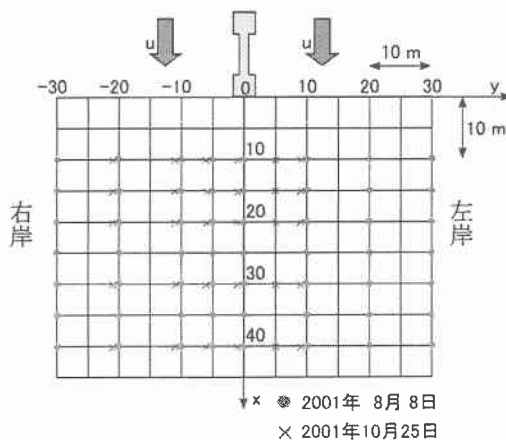


図-1 計測地点

図-2 は計測した二回それぞれの水位変化のグラフである。どちらの調査においても水位変化が 20(cm)以下の非常に小さい時間帯に行った。10 月 25 日の 12 時位から水位が上昇し始めているがこの時点で調査を続けることが困難になり中止した。

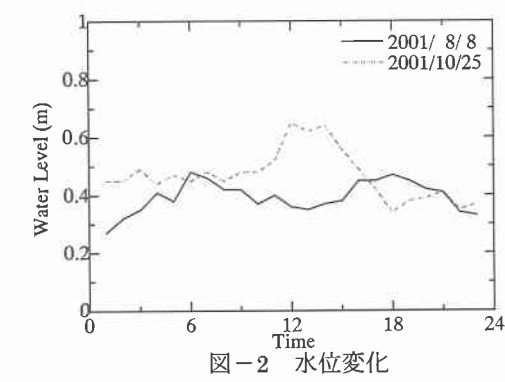


図-2 水位変化

図-3、図-4 は計測した 8 月 8 日、10 月 25 日のそれぞれの河床形状を示している。ここに、座標を水平方向は橋脚の径 $d=3.5(\text{m})$ で除し、それぞれ x/d , y/d と無次元化を行った。以下、同様の座標を用いる。等水深線の単位は(m)である。8 月 8 日の時点での河床形状は、 $y/d=3$ のところで二ヶ所水深が浅くなっており、他の地点はなだらかな形状になっている。10 月 25 日においても 8 月 8 日と比較して $y/d=3$ の下流側における浅い地点の水深が深くなり若干変化しているが、その他はほぼ同様の形

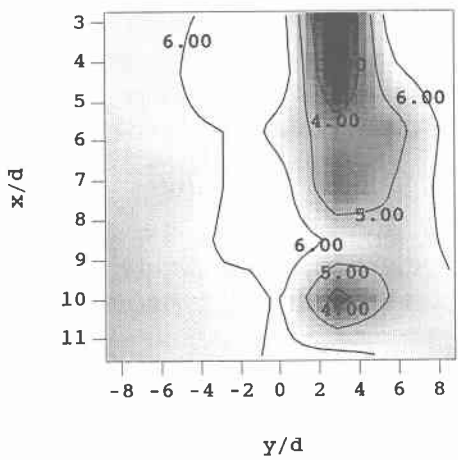


図-3 8 月 8 日における等水深分布

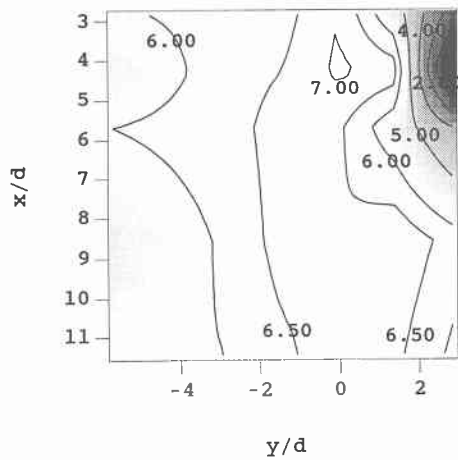


図-4 10 月 25 日における等水深分布

状をしていた。
二回の調査における、諸量を表-1 に示す。

表-1

	$u_1(\text{m/sec})$	F	Re
8 月 8 日	0.57	0.49	23×10^5
10 月 25 日	0.31	0.29	11×10^5

$$F = u_1 / \sqrt{\varepsilon g h_1}, \quad Re = u_1 h_1 / \nu, \quad \varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$$

ここに、 u_1 は上層平均流速、 F は密度フルード数、 Re は上層水深に対するレイノルズ数、 h_1 は上層水深、 ρ_1 、 ρ_2 はそれぞれ上層密度、下層密度である。どちらの場合も、 $F < 1$ の安定した成層を形成する条件であるが、8 月 8 日の方が上層流速が倍程度大きく、 F 、 Re も同様に大きい値をとった。

4. 調査の結果と考察

4. 1. 塩分濃度分布

上記の条件のもとで調査を行った結果を以下に説明する。

はじめに、河川の水平断面における塩分濃度分布図を示す。各地点における塩分濃度 $c(\%)$ は、海水濃度 $c_0(\%)$ で除した c/c_0 としている。また、若干の水位変化、内部波、水面波、河床の凹凸による影響のために、塩分濃度の鉛直分布の形状はよく表れているが、密度界面位置が一定にならないため単純にある水深における水平濃度分布図を示しても河床、界面位置の影響が大きく現象をとらえることが困難であった。そこで、次のような定義をした。界面位置は $0.9c_0$ の値をとる水深、中間層厚さ a (m) を $0.1c_0$ から $0.9c_0$ の値を示す水深方向の距離とした。各地点における中間層厚 a の平均値が約 0.6(m) でありこれより上を上層とする。

図-5 は先ほど定義した上層において、各地点の上層濃度を平均した 8 月 8 日の水平濃度分布図である。上層全体から見ると、 $c/c_0 > 0.1$ を拡散の範囲として考察すれば、 $y/d=7$ 程度の幅で $x/d=6$ 程度下流方向の範囲において塩分の巻き上がりが生じていることがわかる。右岸側に塩分濃度が大きく表れているが、計測した範囲外に水深の小さい所があるのかもしれないが、原因がわからず今後検討する必要がある。巻き上がりの生じている範囲を越えると、徐々に濃度が下がっているが、これは河川流による移流と粘性の効果によるものであると考えられる。

次に界面位置から 1(m)上層における水平濃度分布を図-6 に示す。これは、界面近傍の塩分濃度分布になるが、 $y/d=0$ の両側に二ヶ所濃度の大きくなっている地点が確認できる。これは橋脚の側壁から剥離して生じる鉛直に軸をもつ渦による影響であると考えられる。右岸側では左岸側に比べ上流側にその濃度分布が見られるが、この地点の水深は 3(m)程度であり、ほぼ界面水位に等しくその影響により拡散しているものと思われる。つまり、河床と剥離渦の両方の影響を受け、右岸側よりも濃度の

値が大きくなっていると考えられる。このような分布の形状は室内模型実験において行ったものと良く似たものであった。拡散の幅は $y/d=20$ と上層濃度の平均量より大きくなっており、このことから界面付近では、広い範囲で塩分拡散が生じるが水面付近まで及ぶ影響はあまりないと思われる。

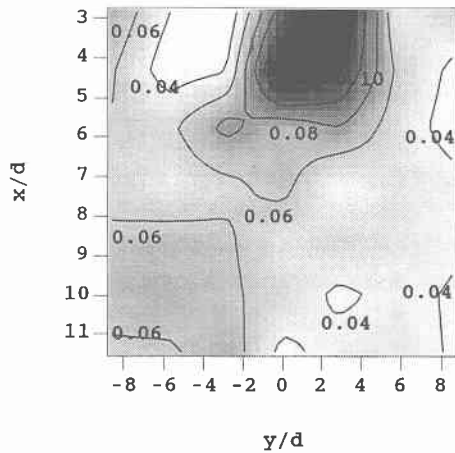


図-5 8月8日における上層濃度の等濃度分布

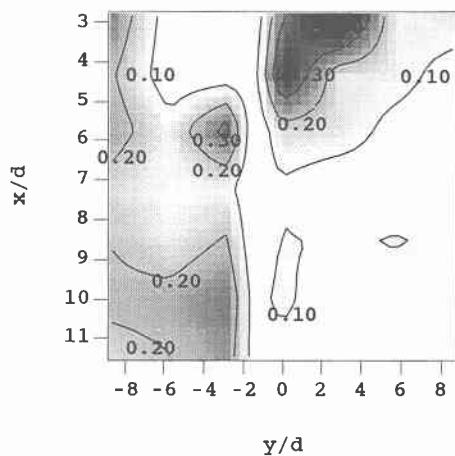


図-6 8月8日における界面より1(m)上方の等濃度分布

次は10月25日において、同様に各地点の上層濃度を平均した水平濃度分布を図-7に示す。上層流速が小さく密度フルード数も小さいため濃度分布に大きな変化は見られないが、 $y/d=0$ の両側に濃度が大きくなっており下流方向かつ川幅方向に広がっている様子がわかる。 $y/d=3$, $x/d=4$ 付近で濃度が下がっているがこの地点は欠損データである。

図-8は、10月25日における界面位置から1(m)上層における水平濃度分布である。この分布の形状は、濃度の値は上層の平均濃度の分布と比較すると若干小さくなっているが、分布の形状は非常に良く似ている。8月8日の調査と比較しても塩分拡散はあまり生じていない。

4. 2. 上層濃度の推測

過去に石狩川における表層塩分濃度の予測について吉田らが研究を行っているが⁴⁾、今回は簡単に中間層の厚さ a (m)と上層の平均濃度の関係を調べた。図-9は、中

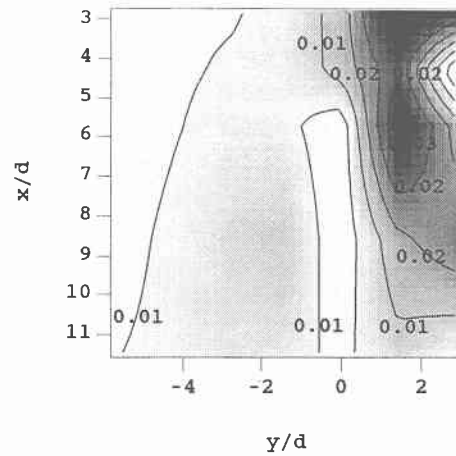


図-7 10月25日における上層濃度の等濃度分布

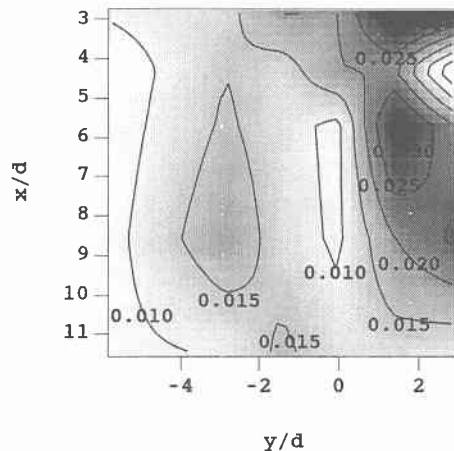


図-8 10月25日における界面より1(m)上方の等濃度分布

間層厚さを a/h_0 、上層平均濃度を $\bar{c}/c_0$ としてプロットしたものである。

この図からある範囲をもって直線的に増加するものと考えられる。 $a/h_0=0.2$ で直線から大きく外れているデータがあるが、これは水深の小さい所で成層状態を保つことのできていないデータによる値である。厳密に濃度を予測することはできないが、およその上層濃度の推定ができると思われる。

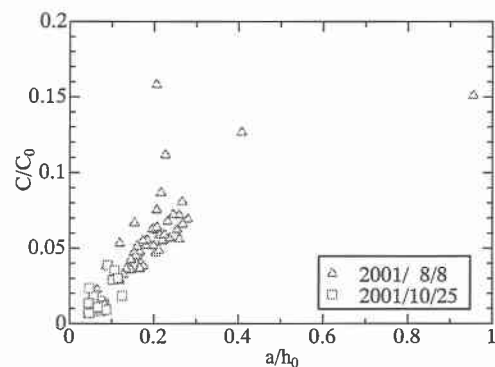


図-9 中間層の厚さと上層塩分濃度の関係

4. 3. 塩分拡散量計算

実際に、どの程度海水が上層に拡散しているのか調べ

た。拡散量は、上層における塩分濃度と流速の鉛直分布から、一横断面において単位秒あたりに輸送される塩分量をグラム数で表した。拡散量の求め方を以下に記す。

ある鉛直分布において $(h_1, h_2, \dots, h_k, \dots, h_n)$,
 $(c_1, c_2, \dots, c_k, \dots, c_n)$, $(u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u_n)$ を図-10
 のようにおく。ある一点の単位幅単位秒あたりの塩分量
 $W(gf)$ は、

$$W = \frac{Vc}{1000 - c}$$

ここに、 V 、 c はそれぞれ、

$$V = \frac{1}{2}(h_k - h_{k+1})(u_k + u_{k+1}) , \quad c = \frac{1}{2}(c_k + c_{k+1})$$

である。上層は界面付近の中間層の影響を受けないように $z=0.6(m)$ より上方において計算した。また、塩淡水の混合は、橋脚によるものだけではなく、河川流による塩淡水の剪断力による混合も考慮する必要があるため、橋脚の影響のない地点においても計算した。

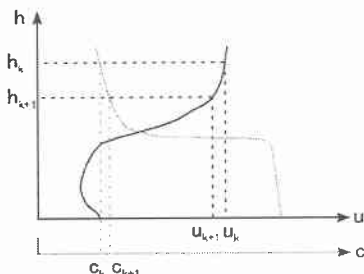


図-10 塩分拡散量の計算方法

はじめに、橋脚の影響がないと考えられる地点においていくつか計測したデータから、それぞれの時間帯における単位幅あたりの上層への拡散量を用いて、 $Re \cdot F^2$ を横軸としてプロットしたものが、図-11である。

また、縮尺が水路幅を除いて約 20 分の 1 である実験水路を用いて行った実験から、現地スケールに換算して行った結果も同図に載せてある。この図は、両辺を対数で表示してあるが、指数関数的に増加している傾向があることが分かった。室内実験におけるレイノルズ数は 10 の 4 乗のオーダーであり比較的大きい値を取っているが、現地に比較すると小さいために全く同じ条件で室内実験を行うことは困難である。しかし、傾向は非常に良く似たものであると考えられる。

次に、 $x=10m$ の横断面から上層への塩分拡散量を求め、河川流の剪断による拡散の影響を減じた結果を図-12

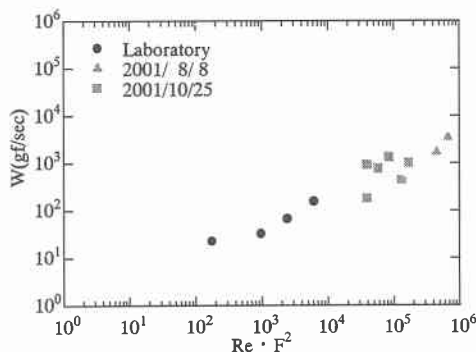


図-11 上下層の剪断による単位幅(m)あたりの拡散量

に示す。この図においても、別に行った室内実験から現地スケールに換算した塩分拡散量を載せた。室内実験において計算を行った断面は、縮尺では等しい地点のものである。この図からも比較的直線的な増加傾向を表した。しかし、8月8日において若干小さくなった理由として考えられることは、天候により計測することができなかった $y=20(m)$ の縦断面を計算していないので、橋脚による塩分拡散の幅が足りなかったために小さい値をとったのではないと思われる。

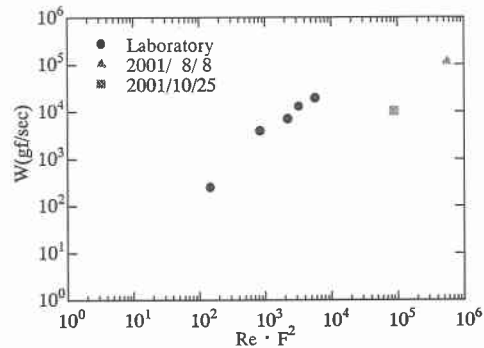


図-12 橋脚による塩分拡散量

5. 結論

今回の調査における結論は、以下の通りである。

- ・橋脚による塩分拡散現象は、橋脚中央から下流側において左岸、右岸側の2ヶ所において大きく巻き上がる地点が認められ、室内で行った模型実験と良く似た結果になった。
- ・上層の流速の違いにより、塩分が巻き上がる幅、塩分拡散量が非常に大きく異なった。
- ・河床の凸部と橋脚による後流が衝突する場合の様に、河床の形状による影響も塩分拡散に大きく影響した。
- ・二成層場における中間層の厚さと上層塩分量は、ある範囲をもって直線的に増加する。
- ・河川流による塩分拡散、橋脚の後流による塩分拡散の両者においても、模型実験において計算した拡散量と比較すると $Re \cdot F^2$ に対して、指数関数的に増加する傾向があることが分かった。
- ・室内における模型実験の妥当性が確認できた。

参考文献

- 1) 吉田静雄、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集、第55号(B)Ⅱ-8、pp. 347-352、1991。
- 2) 中野 渉、兵藤 誠、佐伯 浩：物体後流による二層流体の成層破壊、土木学会海岸工学論文集、第47、pp. 401-405、2000。
- 3) 中野 渉、兵藤 誠、植田知行、佐伯 浩：二成層流れ場における構造物による塩分拡散、海洋開発論文集、VOL.17、pp. 99-104、2001。
- 4) 1)に同じ
- 5) 玉井信行：密度流の水理、土木学会編、pp. 130-137、1979。