

直立構造物による塩分拡散に関する実験的研究

Experimental study on salt diffusion caused by vertical structure

北海道大学大学院工学研究科	○学生員	植田知行 (Tomoyuki Ueda)
北海道大学大学院工学研究科	学生員	兵藤 誠 (Makoto Hyodo)
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. まえがき

舟運はわが国で過去に活用されていた例はあるが、その活用は消極的なものであった。しかし、近年の社会情勢の変化に伴い、物流手段としての舟運の活用が期待されている。

北海道の石狩川では、近年本格的な舟運の活用が検討されている。この石狩川舟運が実現すれば、物流手段の中心がトラック輸送から舟運に転換され、物流コストの削減、環境負荷の軽減、エネルギー消費の抑制、交通渋滞の緩和などが可能となる。

舟運のルートとしては、図-1に示すような石狩湾新港から放水路、茨戸川を經由し石狩川本流を往来するルートが考えられている。このルートにおいて、外海を通る必要がないため、稼働率を高くすることが可能となる。またクリアランスについても、日本の他の河川と比較して、橋脚等のクリアランスも十分にある。以上のことからみても、舟運実現への可能性は高いものと考えられる。

しかし、舟運実現にあたって、季節的な水位の変動、積荷の問題、冬期の河川結氷、農業・漁業への影響などの様々な技術的課題¹⁾を克服しなければならない。

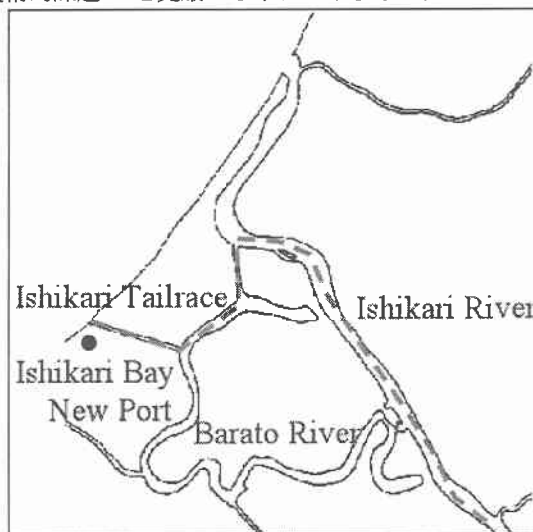


図-1 石狩川舟運のルート

前述した課題の一つに農業・漁業への影響を挙げたが、渇水期においては河口から上流約20数kmにわたり塩水楔が形成されており、船舶航行による塩分拡散が農業・漁業に与える影響を評価する必要がある。また、河口付近

には橋脚などの構造物があり、その後流による塩分拡散も考慮する必要がある。

そこで本研究では、船舶航行による塩分拡散^{2) 3)}と橋脚後流による塩分拡散を比較・検討することを最終的な目的とし、その段階の一つとして実河川の橋脚による塩分拡散現象を調べるため、石狩河口橋橋脚をモデルとした模型実験を試みた。

2. 実験方法

実験装置は図-2に示すように全長800cm、幅60cm、高さ60cmのアクリル水路を用い上層に淡水を、下層に塩水の2層を形成し、水中ポンプで上層に約5分間流速を与え、構造物後流による塩分拡散現象について調べた。塩水の濃度は海水とほぼ等しい3%程度とした。縮尺は水路幅を除き、現地スケールの20分の1とした。塩水層は $z=20\text{cm}$ （以下cmを省略）に設定しており、水中ポンプでの水流入時に起こる塩淡水の混合防止及び、流下中の界面低下防止のため、水路の上流端から200cmまでの範囲に、塩水層の上端にPlateを取り付けている。また、整流装置を水路上流側に設置し、水流を安定させた。構造物として、図-3(a)に示すような形状の石狩河口橋の橋脚模型を水路上流端から370cmの位置、つまり $x=0, y=0$ の位置に設置した。ここで、座標を図に示すような橋脚模型下流側の中心を o とし、 (x, y, z) としている。また、塩分濃度変動を調べるため5本の塩分濃度センサーを用いた。5本の塩分濃度センサーは図-3(b)に示すように

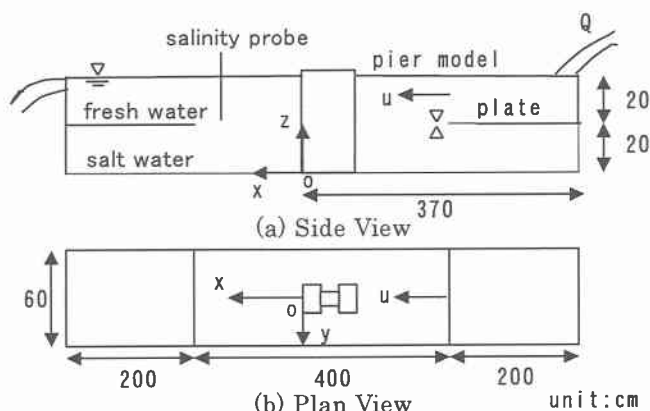


図-2 実験装置

それぞれ 10 cm 間隔で①Probe1 (y=-20)、②Probe2 (y=-10)、③Probe3 (y=0)、④Probe4 (y=10)、⑤Probe5 (y=20) と水路幅方向一直線に固定し、鉛直方向 (z 方向)、流下方向 (x 方向) と移動させて測定できるようにしている。

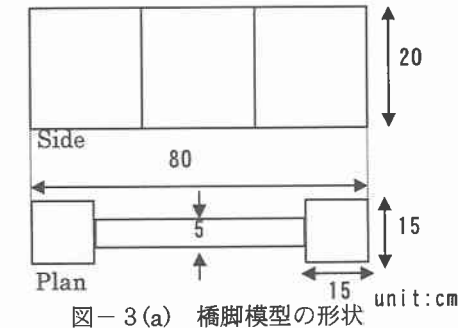


図-3(a) 橋脚模型の形状

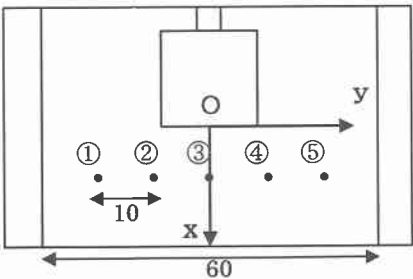


図-3(b) 塩分濃度センサーの配置

3. 実験条件

実験は淡水層の流速によるレイノルズ数の変化による依存性について調べた。表-1に示すように Case-1 から Case-5 のケースでレイノルズ数を変化させた。表における内部フルード数 F、レイノルズ数 Re はそれぞれ以下の式で表わされる。

$$\begin{aligned} Re &= u d / \nu \\ F &= u / (\varepsilon g h_1)^{1/2} \\ \varepsilon &= (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1 \end{aligned}$$

ここで、u は淡水層の平均流速、d は橋脚模型の径、 ν は淡水層の動粘性係数、g は重力加速度、 h_1 は静止時の淡水層の水深、 ρ_1 、 ρ_2 は淡水層、塩水層の密度である。

	Re	F	u(cm/sec)
Case-1	5000	0.21	3.51
Case-2	9000	0.37	6.27
Case-3	12000	0.51	8.66
Case-4	14000	0.58	9.86
Case-5	17000	0.69	11.9

表-1 実験条件

4. 実験結果

4-1 塩分濃度変動特性

(1) 鉛直方向 (z 方向) の塩分濃度変動特性
 模型の下流側に 5 本の塩分濃度センサーを設置し、各ケースにおける流下中の模型後流による塩分拡散を調べた。塩分濃度センサーを流下方向 x=50 の位置 (橋脚模型後方 50cm) に固定し、z=10 の位置から水面まで 1 cm ごとの z 方向の塩分濃度を測定した。流下前の初期塩分濃度分

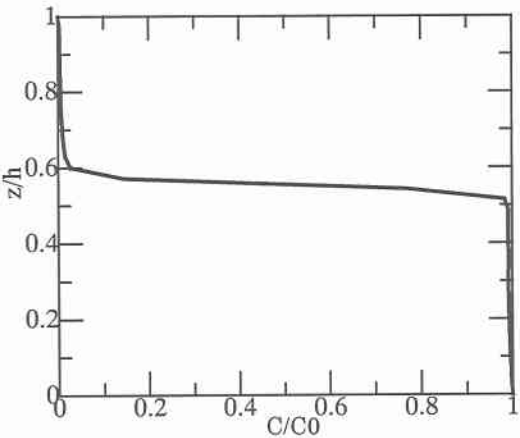
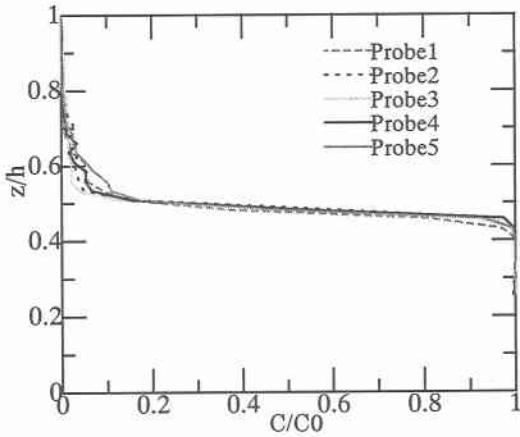
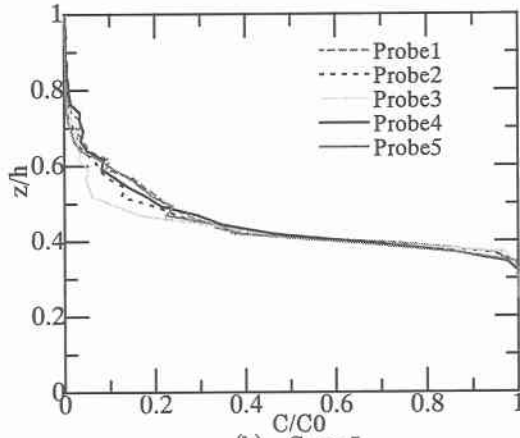


図-4 初期濃度分布



(a) Case-2



(b) Case-5

図-5 z 方向の塩分濃度分布

布を図-4に示す。このグラフは縦軸に測定水深 z を水深 (静止時水深 35cm、流下時 40cm 前後) で除した無次元量 z/h、横軸に測定で得られた塩分濃度 C を塩水の濃度 C₀ で除した無次元量 C/C₀ を用いて表している。初期濃度分布はどのケースにおいても界面付近で不連続となり、明確な 2 層形成が示されている。

図-5(a)は Re=9000、F=0.37 の条件下である Case-2 のグラフで、分布形状にほとんど変化はなく、あまり上層に塩分が拡散していないことがわかる。一方、(b)は Re=17000、F=0.69 の高レイノルズ数条件下である Case5 のグラフで、分布形状が大幅に変化しており、z/h=0.4 付近で上層へ塩分が巻き上がっているのがわかる。また、そ

の鉛直方向の拡散範囲としては、 z/h 値が 0.3~0.4 であり、これは界面から約 12cm~15cm 上方まで塩分が巻き上がっていることを示している。これより、レイノルズ数が高まるにつれ、上層への塩分拡散が激しくなっていくのがわかった。

(2) 流下方向 (x 方向) の塩分濃度変動特性

次に、塩分濃度センサーを鉛直方向 $z=25$ (界面より 5cm 上方) の位置に固定し、橋脚模型下流側 5cm から 50cm までの x 方向の塩分濃度を測定した (Case-5 の条件下)。その結果を図-6 に示す。縦軸は C/C_0 で、横軸は流下方向 x に対する橋脚模型の径 d の比である無次元量 x/d で表してある。

どのセンサーにおいても一旦塩分濃度が上昇し、模型から離れるに従い徐々に濃度が低下している。これは、橋脚模型により巻き上がった塩分が下流側へと拡散しながら移流していることを示している。また下流側に進むに従い、塩分が下方に沈降しているように見えるが、濃度の低下は塩分の沈降ではなく塩分が淡水と混ざり合うことによる濃度の低下によるものである。更に、詳しくこの現象を考察するため、図-7 にこのデータを用いて橋脚後方範囲の C/C_0 値を値別に色分けして表した。色が濃い部分ほど C/C_0 が高くなっており (つまり塩分濃度が高い)、薄いほど低くなっている。図には C/C_0 値の等高線がひかれている。 $x/d=0$ は橋脚模型下端の位置であり、 $y/d=0$ は橋脚の水路幅方向の中心位置である。 $y/d=0$ では $x/d=0.5$ 付近で C/C_0 値は上昇し、それより後方では極端に下がっている。一方、 $x/d=1.0$ より後方では $|y/d|$ が大きくなるほど C/C_0 値は上昇している。これは、橋脚模型背後では模型を巻き込むような流れが生じており、その流れにより巻き上がった塩分が一旦上流側に移動し、そして水路幅方向に拡散しながら移流していることを表している。そのため、図-6 の Probe3 では他のセンサーより橋脚に近い位置で値が上昇し、それ以後は値が小さくなっている。

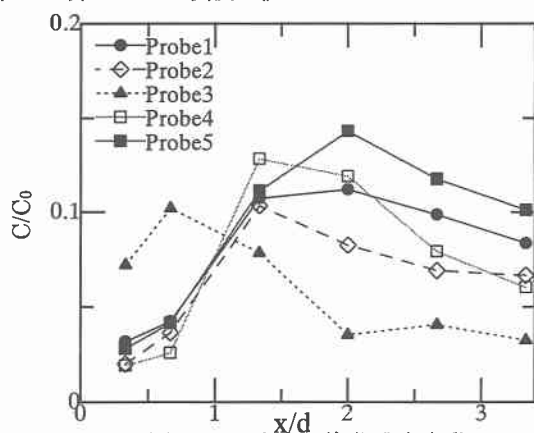


図-6 x 方向の塩分濃度変動

(3) 塩分濃度の時系列変動

図-8 は塩分濃度センサーを流下方向 $x=50$ 、鉛直方向 $z=25$ の位置 (模型後方 50cm、界面上方 5cm) に固定し測定した、塩分濃度変動の時系列データ (100 秒から 200 秒) を示したものである。

Case-2 では C/C_0 値が 0~0.02 の間で推移しているが、塩水層では $C/C_0=1$ であることを考えるとほとんど塩分

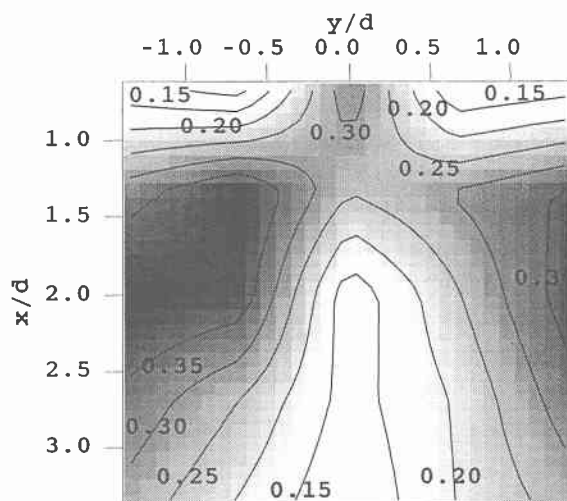


図-7 $z=25$ における模型後方の C/C_0 分布

拡散が生じていないことがわかる。Case-1 も同様の傾向を示しており、(1) で述べたようにレイノルズ数の低い条件下では塩淡水の混合はあまり起こっていないことがわかる。

Case-4 では Case-2, Case-3 と比べ、大きな塩分濃度の変動がみられる。Probe1, 2, 4, 5 ではほぼ一定の周期で変動が生じているが、Probe3 ではわずかな変動がみられるものの、ほぼ一定の値を保っており、他のセンサーと比較しても低い値で濃度が推移している。これは、図-6 に示し

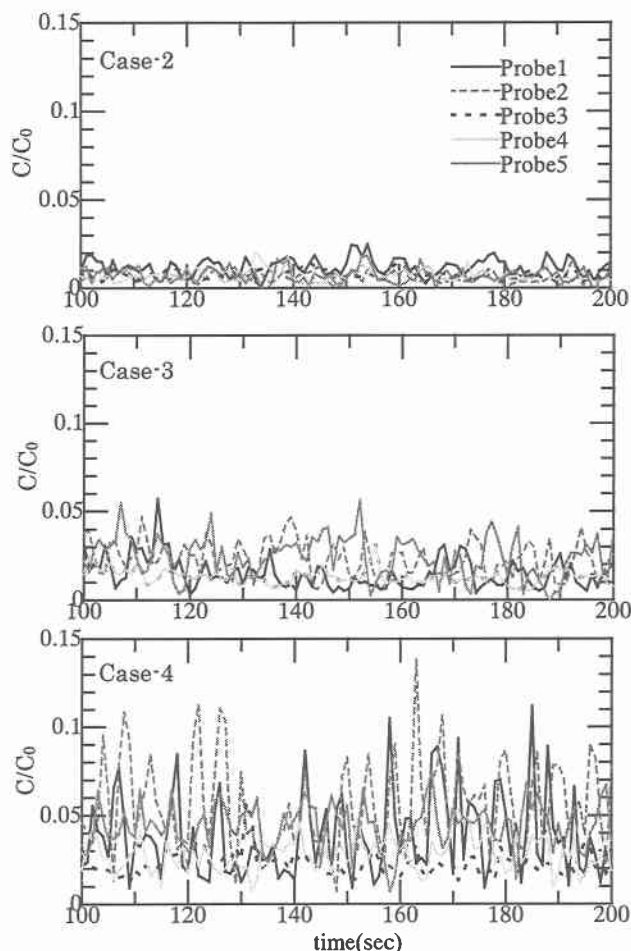


図-8 塩分濃度変動の時系列データ

である橋脚模型後方での塩分拡散現象に起因する結果となった。

4-2 塩分拡散量

前述の塩分濃度変動特性により、橋脚模型後流の鉛直方向、流下方向、時間変化における塩分拡散現象を定性的に把握することができた。そこで、実際にどの程度の塩分が上層に拡散しているのかを調べるために、塩分拡散量のおよその定量化を測った。

定量化の範囲として、鉛直方向は4-1(1)の濃度分布より、界面の2cm上方から10cmの範囲とし(界面付近では約2cmの混合層が形成されており、その影響を除くため)、水路幅方向は水路の幅60cmとした。橋脚模型から50cm下流側の横断面の濃度平均を計測し、上層流速を平均流速 u として塩分拡散量を求めた。橋脚模型を設置しない場合においても、わずかではあるが塩分拡散が生じているので比較のためその拡散量も求めた。また、構造物の形状による塩分拡散量を比較するため、径10.5cmの円柱模型を水路に設置し、橋脚模型と同条件で塩分拡散量を求めた。橋脚、円柱模型のケースによる Re 、 F の値を表-3に示す。また、図-9には橋脚模型、円柱模型、模型なしの場合の塩分拡散量をグラフ化して表している。縦軸は単位秒当たりの塩分拡散量 W で、横軸はレイノルズ数と内部フルード数のパラーター $Re \cdot F^2$ (このパラーターは2層流体の界面抵抗係数を算出する際⁴⁾に使用される)を用いている。また、塩分拡散量と $Re \cdot F^2$ との関係を調べるため、両辺対数の形式となっている。

塩分拡散量であるが、まず、構造物により塩分が拡散しているということが、両模型と模型無しの場合を比べると明確わかる。どちらの模型においてもレイノルズ数が低いCase-1、Case-2ではほとんど拡散は起こっておらず、Case-4、Case-5とレイノルズ数が高まるにつれ拡散量も増加傾向にある。また、グラフにプロットした値をみると、両模型ともに値が直線的に推移しており、このことから、構造物により巻き上げられた塩分拡散量はレイノルズ数、内部フルード数との間に指数関数的な関係があるということがいえる。

両模型の拡散量の推移をみると、明らかに橋脚模型のほうが増加傾向にある。これは、模型の形状が影響していると考えられる。それぞれの径が異なるので正確な比較はできないが、一般的に、円柱よりも角柱のほうがその背後では流れは剥離しやすくなっており、さらに本実験の橋脚模型では角柱が2つ連なった形状をしているため、拡散量が多くなっていると考えられる。

本実験での橋脚模型による塩分拡散量と実河川における橋脚による塩分拡散量を比較することは、模型実験とし

	橋脚模型		円柱模型	
	Re	F	Re	F
Case-1	5000	0.21	2000	0.13
Case-2	9000	0.37	7000	0.39
Case-3	12000	0.51	9000	0.5
Case-4	14000	0.58	11000	0.57
Case-5	17000	0.69	13000	0.69

表-3 実験条件ごとの両模型の Re 値と F 値

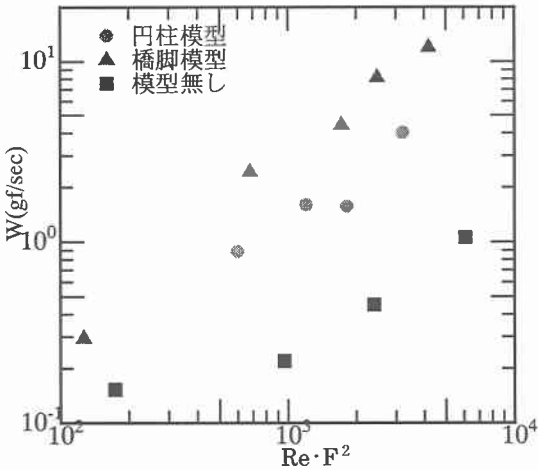


図-9 塩分拡散量と Re 、 F の関係

ての現地への対応がいかなるものか把握することができ、今後船舶の航行による塩分拡散量を調べるうえで重要な役割を果たすものと考えられる。

5. おわりに

本研究の結論は以下に示す通りである。

- (1) 模型後流による塩分拡散現象は、レイノルズ数条件に依存している。レイノルズ数が高まるにつれ上層への塩分の巻き上げが激しくなり、その拡散量も増大する。
- (2) 橋脚模型背後の塩分拡散の状況は、水路幅方向の橋脚模型真中後方では拡散はあまり生じておらず、一定濃度を保っている。また、巻き上がった塩分は水路幅方向に広がり拡散しながら移流している。本実験では水路幅が限られたものであるため、実際はさらに塩分拡散の範囲が広がっている可能性がある。
- (3) 構造物による塩分拡散量とレイノルズ数、内部フルード数とのあいだには指数関数的な関係がある。
- (4) 構造物の形状により塩分拡散量が異なることがわかった。特に角柱形状では円柱形状のものより拡散量が多くなる。このことから、より流線型に近い形状のものほど塩分拡散は少なくなるといえる。
- (5) 本実験結果と現地での観測結果を比較することは、模型実験としての現地への対応を把握することができ、今後船舶航行による塩分拡散を調べるうえで重要な役割を果たすものであると考えられる。

参考文献

1) 兵藤 誠, 中野 渉, 古屋温美, 佐伯 浩: 寒冷地舟運の技術的課題, 寒地技術シンポジウム講演論文集, vol116, pp. 525-530, 2000.
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巻, pp. 401-405, 2000
3) 中野 渉, 兵藤 誠, 佐伯 浩: 移動物体による二層流体の界面破壊, 土木学会北海道支部論文報告集, 第56号(B), pp. 70-75, 2000.
4) 金子安雄: 2層流境界面抵抗係数の一例, 第13回海岸工学講演会講演集, pp. 263-267, 1966.