

石狩川感潮域における物体後流による塩分拡散

SALT DIFFUSION CAUSED BY THE WAKE OF THE BLUFF BODY IN A TIDAL AREA OF ISHIKARI RIVER

兵藤 誠¹・植田知行²・中野 渉³・佐伯 浩⁴

Makoto HYODO, Tomoyuki UEDA, Wataru NAKANO and Hiroshi SAEKI

¹正会員 工修 (株)日本建設コンサルタント (〒105-0004 東京都港区新橋6丁目7-19新御成門ビル)

²学生会員 工修 北海道大学大学院 工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 苫小牧工業高等専門学校 (〒059-1275 北海道苫小牧市錦岡443番地)

⁴フェロー 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

Ways to establish a system of river transportation on Ishikari River are currently being investigated, but there are still many unresolved technical problems. One problem is that a salt wedge extends about 20 km upstream from the mouth of the river in the dry season. The diffusion of salt caused by the passage of a freight boat may have adverse effects on the fishing industry. Moreover, structures such as a bridge pier are in a mouth of the river, and it is necessary to also take into consideration the diffusion of the saltwater by the wake of the bridge pier.

This study aims to compare and analyze diffusion of the saltwater induced by both structures and the passage of a freight boat. As a first step, the salt diffusion of two stratified flows induced by structures and the fracture mechanism of two stratified flows will be clarified.

Key Words : Ishikari river, river transportation, stratified flows, salt diffusion

1. 研究目的

近年の社会情勢の変化に伴い、石狩川では舟運の活用が本格的に検討されている。しかし、実現するには解決しなければならない多くの技術的課題がある。その一つに、渇水期には河川流速が非常に小さいため塩水楔が遡上し河口二層流を形成することである。船舶の通過に伴う成層破壊による塩分拡散¹⁾が、環境に及ぼす影響を評価する必要がある。また、石狩川河口には橋脚等の河川構造物があり、これらの構造物の後流による塩分拡散も生じてと考えられる。船舶の通過に伴う塩分拡散について評価を行う場合に、橋脚等の構造物による塩分拡散を比較対照とすると非常に分かりやすいと思われる。

本研究の目的は、比較の対照となる構造物の後流による塩分拡散を調べることであり、そのために行った現地調査の結果と水理模型実験での結果について報告する。また、水理模型実験の相似性についても検討を行った。

2. 水理模型実験(縮尺1/20)による検証

(1) 実験方法

実験は図-1に示すようなアクリル水路を用い、上

層に淡水、下層に塩水の二層を形成し、上層側に5分間水中ポンプで流速を与えた。座標 (x, y, z) を図のようにとることにする。また構造物に径が11.5cmのCylinder Modelと径が15cmの石狩河口橋の橋脚をモデルにしたものと2種類用いた。橋脚模型を設置した位置は、水路の右端から370cm、水路幅の中央位置に設置した。縮尺は水路幅を除いて現地スケールの約20分の1である。塩水層の塩分濃度は、海水とほぼ等しい約3%である。

また、塩分濃度変動特性を調べるために、5本の塩分濃度センサー (Salinity probes) を用いた。

(2) 実験条件

実験は上層平均流速の変化に伴う密度フルード数、レイノルズ数に対する依存性を調べた。実験条件を表-1に示す。表における密度フルード数とレイノルズ

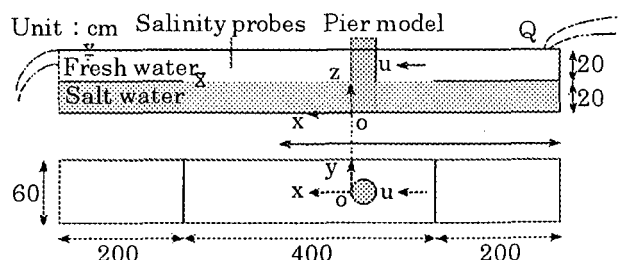


図-1 実験装置

ズ数はそれぞれ、

$$F_d = \frac{u_1}{\sqrt{\varepsilon g h_1}}, \quad \varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \quad (1)$$

$$Re = \frac{u_1 d}{\nu} \quad (2)$$

とした。ここで、 u_1 は淡水層の平均流速、 g は重力加速度、 h_1 は流下時の淡水層水深、 ρ_1 と ρ_2 はそれぞれ淡水層の密度と塩水層の密度である。 d は円柱模型の径、 ν は淡水層の動粘性係数である。また、表においてNo pierというのは橋脚模型を設置せず上下層の剪断のみによる塩分拡散を調べるために、実験を行った。それぞれ5つの条件で実験を行っているが、3つのPier typeに応じて各5つの上層平均流速はそれぞれほぼ等しくなっており流れ場が等しいという条件で実験を行った。

表-1 実験条件

Pier type	Cylinder, 石狩河口橋, No Pier
F_d	0.157, 0.271, 0.366, 0.411, 0.487
d (cm)	11.5 (Cylinder), 15.0 (石狩河口橋)

(3) 実験結果と考察

a) 塩分拡散現象の把握

はじめに、二層流体中における構造物近傍の乱れ構造については、可視化実験により過去に報告を行った²⁾。それらの現象を模式的に表したものを図-2に示し簡単に説明する。はじめに、橋脚模型上流側でDown Flowが生じる。次に、橋脚模型の両側面が発生する渦径の小さいHorseshoe Vortexが密度界面を不安定化させ、これらと橋脚模型から剥離する渦径の大きいWake Vorticesの影響により塩分拡散が生じていると考えられる。石狩河口橋Modelの場合、Wake Vorticesが前方、後方の2ヶ所から生じるために、Cylinder Modelの場合と比較して塩分拡散の規模が大きくなると考えられる。

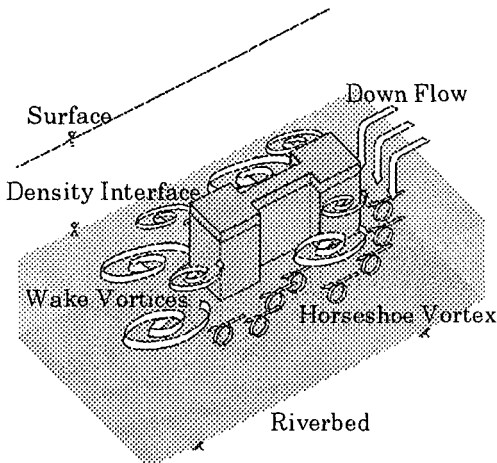


図-2 石狩河口橋モデルにおける構造物周りの流れの概略図

b) 塩分濃度の分布

塩分濃度センサーを用いて計測を行った水平断面(xy-section)の濃度分布をについて報告する。塩

分濃度の計測方法については、ある一点における局所的な平均濃度 \bar{c} を求めるのに次式を用いた。

$$\bar{c} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N c(t_n) \quad (3)$$

この式(3)は任意の固定点において一定のタイムステップで計測を行った濃度の平均量を表している。また、この局所的な平均濃度から変動の大きさ c' を

$$c' = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (c(t_n) - \bar{c})^2} \quad (4)$$

とした。このようにして計測を行った結果について石狩河口橋 Model における一例 (Case-i0, $F_d=0.487$) を図-3, 図-4に示す。これは、塩分濃度センサーを $z=25\text{cm}$, $y=-20, -10, 0, 10, 20\text{cm}$ と固定し、 $x=5, 10, 20, 30, 40, 50\text{cm}$ と移動して各1分間計測した時系列データから計算を行った結果である。図における座標は、橋脚位置の座標を原点として、流下方向に x 軸、水路幅方向に y 軸をとり、それぞれ橋脚の径 d で割った値である。また等濃度線は平均塩分濃度、変動の大きさを塩水の濃度で無次元化した値を用いた。

局所的な平均濃度分布(図-3)では、橋脚模型の近傍の塩分濃度が上昇しているが、これは渦径の小さいHorseshoe Vortexが密度界面を不安定化させこの地点の流れが停滞しているために生じていると考えられる。また、流れ方向に対して対称に下流水路幅方向へ向かって塩分濃度が上昇していることが確認される。これは、Wake Vorticesによって塩分が巻き上げられていると考えられる。変動の大きさの分布

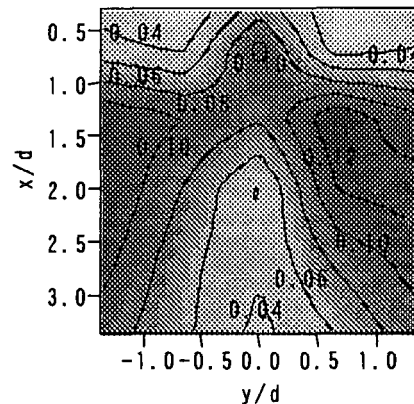


図-3 平均濃度の分布図(石狩河口橋モデル, $F_d=0.487$)

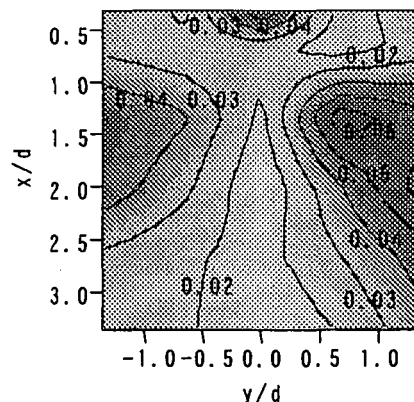


図-4 濃度変動の大きさの分布図(石狩河口橋モデル $F_d=0.487$)

(図-4)においても、塩分濃度分布で濃度上昇のある地点に対応して乱れ強さも大きいことがわかる。

c) 塩分拡散量の計算

上記のものと同様の方法によって計測を行った横断面の塩分濃度分布から塩分拡散量を調べた。拡散量は、上層における塩分濃度と上層平均流速から、一横断面 ($x/d = 3.33$) 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。 $\partial C/\partial t$ として計算を行った。ある鉛直分布において鉛直座標 (cm) を ($z_1, z_2, \dots, z_k, \dots, z_n$)、塩分濃度 (%) を ($c_1, c_2, \dots, c_k, \dots, c_n$)、上層流速を u_i (cm/sec) おく。上層は界面付近の中間層の影響を受けないように $z = 2$ cm より上方において計算した。これは後に説明する現地調査における計算条件と合わせるためにこのように設定した。ある一点の単位幅 (cm) 単位秒 (sec) あたりの塩分量 W_i (gf) は、

$$W_i = \frac{\rho_i V_i c_i}{100 - c_i} \quad (5)$$

ここに V_i 、 c_i はそれぞれ、

$$V_i = \frac{1}{2}(h_k - h_{k+1}) \cdot u_i \quad (6)$$

$$c_i = \frac{1}{2}(C_k + C_{k+1}) \quad (7)$$

である。これで、ある一点における単位幅単位秒あたりの塩分拡散量を求めることができる。さらに、これらを上層の鉛直方向に積分して計算断面の幅 B (水路幅) を考慮すると、横断面における単位秒あたりの塩分拡散量 W_f は、

$$W_f = \sum W_i B_i \quad (8)$$

となる。

このように、計算し求めた拡散量について説明する。二層流の問題において、下層の物質が上層に巻き上がる場合には、連行という概念が用いられる。これは、密度フルード数による関数で表すことができる。そこで、求めた塩分拡散量と F_d の関係を調べた。図-5は、Cylinder Modelと石狩河口橋Modelについて橋脚模型を設置しない場合の塩分拡散量と比較したものである。 F_d が大きくなるにつれて、Cylinder Model、石狩河口橋Modelの両者とも橋脚模型を設置しない場合と比較すると、塩分拡散量の違いが顕著になることがわかる。

Cylinder Modelと石狩河口橋Modelで形状による塩分拡散量を比較する場合、若干径が異なるために

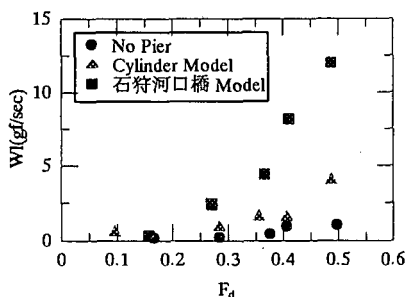


図-5 F_d による塩分拡散量の変化

単純に F_d で比較すると構造物の渦の大きさに対する考慮がなされていないことになる。そこで、二層流体の内部波の抵抗に関する問題を扱う場合に、 $Re \cdot F_d^2$ の項が用いられるのでこの値による検証も合わせて行った。上下層の剪断による塩分拡散の影響を減じて構造物単体での塩分拡散量を、 $Re \cdot F_d^2$ を横軸にしてプロットしたものが図-6である。この図から、構造物の形状によって塩分拡散量が大きく異なることがよくわかる結果となった。

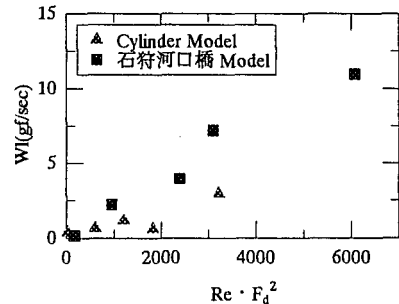


図-6 構造物の形状による塩分拡散量の変化

3. 石狩河口橋現地調査

構造物の後流による二層流れ場における塩分拡散について縮尺20分の1の水理模型実験による評価を行うことができた。そこで、実規模における同様の現象が実際にどのようなものであるか把握するために現地調査を行った。本節の目的は、構造物の後流による塩分拡散を調べることであり、そのために行った現地調査の結果を報告する。合わせて水理模型実験の妥当性についても検討する。

(1) 調査の概要と方法

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2度、石狩川河口から約5.5km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15km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、橋脚近傍の塩分濃度、流速等の鉛直分布を計測した。また、橋脚等の構造物の影響を受けない地点においても計測し、構造物があることによる塩分拡散現象と比較を行った。

計測地点は、図-7のようなメッシュを切り、各グリッドにおいてそれぞれ鉛直分布を計測している。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を行った。これは、調査船のスクリュープオペラによる塩分拡散を防ぐためにこのように行った。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。計測に用いた橋脚は、石狩河口橋における最も水深の大きい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。二度にわたる調査の計測地点もそれぞれ図-7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。

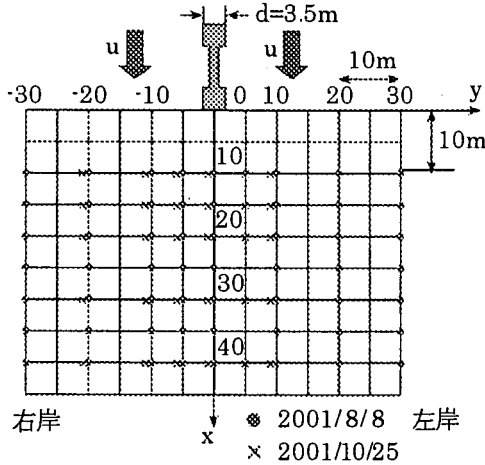


図-7 現地調査における調査地点

図-8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。

二回の調査における水理条件を表-2に示す。8月8日の方が上層流速が倍程度大きく、 F_d 、 Re も同様に大きい値をとった。

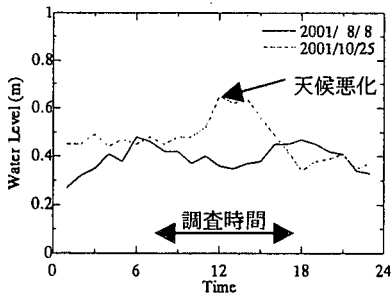


図-8 調査日における水位変化

表-2 調査日における水理条件

	u_1 (m/sec)	F_d	Re
8月8日	0.57	0.49	23×10^5
10月25日	0.31	0.29	11×10^5

(2) 調査の結果と考察

a) 等水深分布と密度界面分布

計測した8月8日の等水深分布を図-9、界面位置の分布を図-10に示す。ここに、座標を水平方向は橋脚の径 $d=3.5$ (m) で除し、 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2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日と比較すると若干変化しているが、ほぼ同様の形状であった。また、界面位置は塩水濃度の0.9倍の位置として定め、水面からの距離を分布に表している。界面位置の分布を各等水深分布と比較すると河床の凸部に対応して界面位置も比較的同様の変化している。

b) 時間的、空間的影響の補正

上記のことからも、空間的には河床の影響により密度界面位置が変化することがわかっており界面位置によって大きく濃度分布が異なってしまう。また、内部波による密度界面の振幅、潮汐による水位変動が密度界面位置を変化させるというように、時間的にも常に密度界面位置は変動してしまう。これでは、橋脚による塩分拡散現象を把握することが困難である。そこで、これらの空間的、時間的変化の影響を除去するために行った補正方法について以下に説明する。

界面位置を塩分濃度が $0.9C_0$ の値をとる水深に設定する。ここに、 C_0 は海水濃度である。また、不連続な成層状態であっても上下層に流速差が存在し、界面位置が明瞭にあらわれる訳ではなく、その領域は中間層とよばれる。中間層を $0.1C_0$ から $0.9C_0$ の間と定義する。また、上層を界面位置 $0.9C_0$ より $0.6m$ 上方の位置から水面までとする。 $0.6m$ というのは、各グリッドにおける中間層の厚さを平均した場

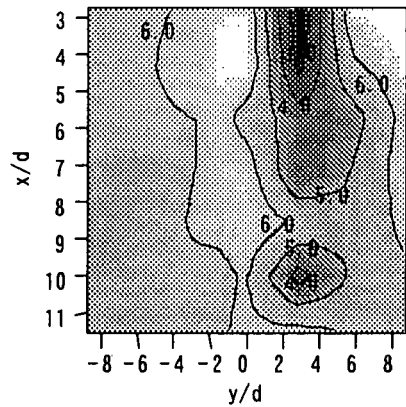


図-9 8月8日における等水深分布

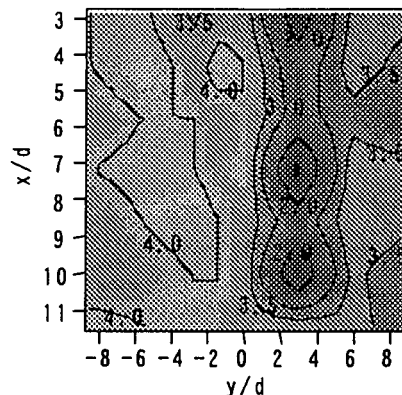


図-10 8月8日における密度界面位置の分布

合、この程度の値となったのでそのように設定した。以下、これらの定義を用いて現象を説明することにする。

c) 塩分濃度分布

はじめに、界面位置を0mとして1m上方における水平濃度分布図を2001年8月8日は図-11、10月25日は図-12に示す。等濃度線は、 C/C_0 である。

8月8日の界面から1m上方における図では、 $y/d=0$ の流れ方向に対して両側に2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(Wake Vortices)による影響であると考えられる。左岸側では右岸側に比べ上流側にその濃度分布が推移しているが、この地点の水深は3m程度であり、ほぼ界面水位に等しくその影響によるものであると思われる。つまり、河床の凸部とWake Vortices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。

10月25日の界面位置より1m上方の塩分濃度分布から、8月8日と比較すると、拡散分布の形状は比較的よく似ている。しかし、濃度の値が小さく、塩分の巻き上がる範囲も小さくなっていることがわかる。これは、 Re が小さく橋脚から生じるWake Vorticesの渦径が小さくなったために、このように濃度や拡散範囲に差が生じたと考えられる。

8月8日、10月25日のこれらの濃度分布形状は、縮尺20分の1で行った水理模型実験によって得られた現象と比較的似たものであった。

次に、先ほど定義した上層(0.9 C_0 より0.6m上方の位置から水面まで)において、各グリッドの上層濃度を平均した塩分濃度の分布について説明する。

8月8日の上層を平均した水平濃度分布図を、図-13に示す。 $x/d=4$ 、 $y/d=0$ 付近で塩分濃度が上昇し、川幅方向、移流方向に向かって徐々に濃度が小さくなっている。これは、巻き上がった塩分が移流拡散と浮力効果によって減衰しているものと考えられる。

10月25日では、濃度の値が小さく詳細はわからなかったが、塩分が上層までほとんど巻き上がっていないということがわかった。

d) 中間層厚と上層塩分量の関係

石狩川の成層状態は河川流速にもよるが、比較的明瞭な二層を形成している。しかし、構造物等の影響により塩分拡散が生じると、上下層の間に中間層が形成される。塩分濃度の鉛直分布の形状を水理模型実験の結果と比較するため、簡単に中間層の厚さ a と上層の平均濃度の関係を調べた。

図-14は、中間層厚さを a/h_0 、上層平均濃度を C/C_0 としてプロットしたものである。 h_0 は各グリッドにおける水深、 C は各グリッドにおける上層濃度の平均量である。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。水理模型実験による結果も同図に載せてあるが、よい一致をしていると思われ、水理模型実験の妥当性を確認することができる。

e) 塩分拡散量

現地において、実際にどの程度の塩分が構造物により拡散しているか調べた。計算方法は流速に現地計測した流速分布を用いる点以外には、水理模型実験で計算した方法と同様であり、計算断面も縮尺

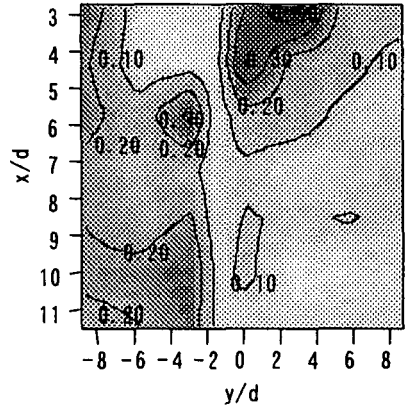


図-11 界面位置より1m上方における塩分濃度分布(2001/8/8)

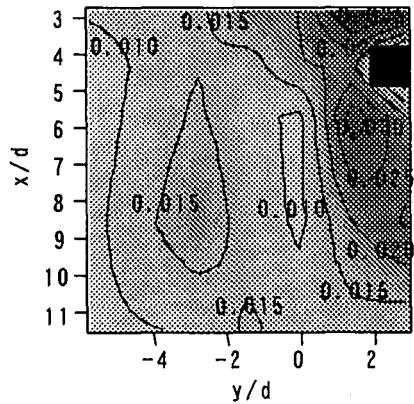


図-12 界面位置より1m上方における塩分濃度分布(2001/10/25)

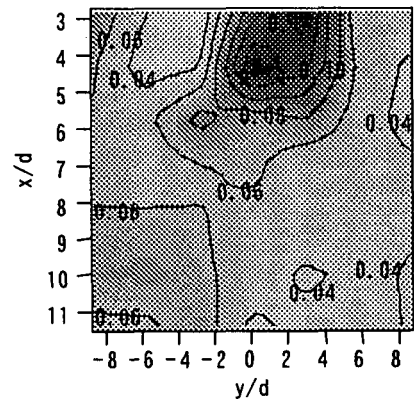


図-13 上層濃度を平均した塩分濃度分布(2001/8/8)

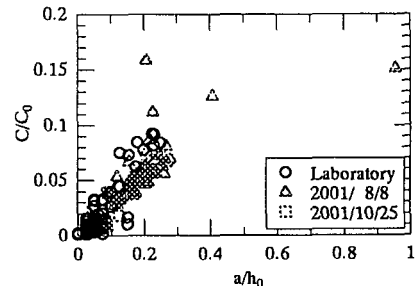


図-14 中間層厚と上層平均濃度の関係

を合わせると等しい断面である。

河川流の剪断によって生じる塩分拡散量は、構造物の近傍でその影響がないと考えられる地点において断続的に計測されたものから計算を行った。図-15は河川流による剪断の影響を除去し、橋脚のみによる塩分拡散量をプロットしたものである。水理模型実験による結果も現地スケールに換算したのもプロットした。現地調査、水理模型実験の結果がよい一致を示すことがわかり、縮尺20分の1における室内実験の妥当性を証明することができる。

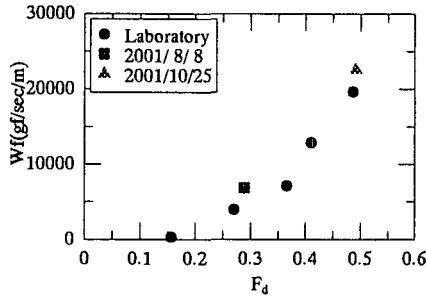


図-15 塩分拡散量(現地調査と水理模型実験の比較)

f) 移流拡散

現地調査によって上層平均濃度の分布が得られたので、その塩分が河川流速によってどの程度移流拡散していくのかを調べた。x方向にのみ一定な流れUがあり、拡散係数は一定であるとすると、二次元の拡散方程式は、

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_1 \frac{\partial C}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (9)$$

である。瞬間点源関数を用いて、(x, y) = (0, 0)においてQだけの物質を瞬間的に放出したとすれば、式(18)の解は次のように与えられる。

$$C(x, y, t) = \frac{Q}{4\pi t (K_x K_y)^{1/2}} \exp \left[-\frac{(x - u_1 t)^2}{4K_x t} - \frac{y^2}{4K_y t} \right] \quad (10)$$

これは、瞬間的に点源から放出された濃度であるが、問題としているのは構造物から連続的に塩分が放出される場合であり、次に上記のtを放出の瞬間t'からの経過時間(t - t')に変え、放出量Qを瞬間の値qdt'、左辺のCをdCとして、t' = -∞からt' = tまで積分すると、

$$C(x, y) = \frac{q}{4\pi K (x^2 + y^2)^{1/2}} \exp \left[-\frac{u_1}{2K} \{(x^2 + y^2)^{1/2} - x\} \right] \quad (11)$$

となる。ここに $K = K_x = K_y$ は拡散係数、qは単位時間あたりの放出量である。式(11)は現地調査によって調べた値に等しい。今、8月8日の調査で考えることにする。得られた上層平均濃度分布から、x軸方向に塩分量が減衰していく様子がわかるのでy=0のx軸で計算して求めるとq=0.09となる。また、y=0の軸ではExponentialの値が1となり簡単な式で表せるので、各計測地点からそれぞれ拡散係数を求めた値を平均すると、 $K = 0.0047 \text{ (m}^2/\text{sec)}$ なる。移流拡散による塩分濃度の分布図を図-16に示す。等濃度線は、 c/c_0 であるので、一旦巻き上がった塩

分が1.5km程度流下するとほとんど水質には影響がないと考えられる。2001年8月8日における水理条件では、塩水楔の長さは河口から約8kmであり、これは塩水楔が遡上するには比較的流量の大きな条件である。それにもかかわらず、計算では川幅方向に塩分は広がっていないことがわかる。船舶においても巻き上がる塩分量は構造物の場合よりも増加すると考えられるが、移流拡散と浮力効果によって、濃度分布の形状は似たものになると思われる。

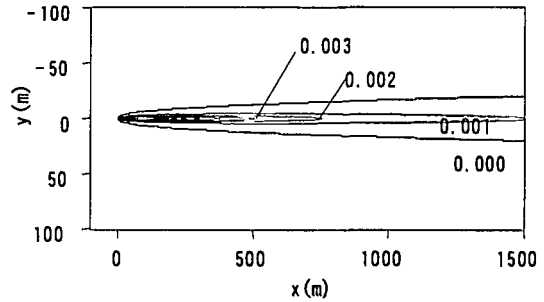


図-16 巻き上がった塩分の移流拡散(2001/8/8)

4. 結論

本論における結論は以下の通りである。

- ・水理模型実験から得られた二成層流体の橋脚模型の後流による塩分拡散現象は、橋脚模型の両側面で発生する渦径の小さいHorseshoe Vortexと橋脚模型から剥離する渦径の大きいWake Vorticesの影響により塩分拡散が生じていることがわかった。
- ・水理模型実験において、構造物の形状により塩分拡散量も異なる結果となった。
- ・現地調査における橋脚による塩分拡散現象も水理模型実験の結果と良く似たものであった。
- ・橋脚下流部の河床の凸部と橋脚による後流が衝突する場合、河床形状による影響が生じた。
- ・2回の現地調査において、上層流速の違いにより橋脚による塩分拡散が生じる範囲、拡散量に大きな違いが生じた。
- ・二成層流れ場における中間層厚と上層塩分量の関係も、水理模型実験による結果と比較的一致した。
- ・現地調査における塩分拡散量を、 F_d において水理模型実験を現地スケールに換算した場合の拡散量と比較すると、よい一致を示すことが明らかになった。
- ・以上のことから構造物による二成層流体の塩分拡散問題は、縮尺20分の1程度までは密度フルード数で示されることが明らかになった。

参考文献

- 1) 中野 渉, 兵藤 誠, 佐伯 浩: 物体後流による二成層流体の成層破壊, 土木学会海岸工学論文集, 第47巻, pp. 401-405, 2000.
- 2) 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.