

二成層流れ場における構造物による塩分拡散

SALT DIFFUSION CAUSED BY OBSTACLES IN TWO STRATIFIED FLOWS

中野 渉¹・兵藤 誠²・植田知行²・佐伯 浩³

Wataru NAKANO, Makoto HYODO, Tomoyuki UEDA and Hiroshi SAEKI

¹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)

²学生会員 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フェロー 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)

River transportation on Ishikari river has been proposed. But there are many technical problems to establish a system of river transportation such as seasonal fluctuation in water level, maintenance of a channel, bank erosion, accumulation of sand, effect on the fishing industry, problem of freezing, problems concerning loading, unloading and mooring facilities and so on. In this study the authors clarified salt diffusion caused by obstacles in two stratified flows.

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

1. 研究の目的

舟運はわが国でも過去に活用された例はあるが、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る。北海道の石狩川では、近年本格的な舟運が検討されている。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である。

図-1 に示すような、石狩湾新港から放水路、茨戸川を經由して石狩川本流を往來するルートが検討されている。この石狩湾新港と石狩川本流を結ぶルートにおいては、外海を航行する必要がなく、稼働率を高くすることが可能である。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梁のクリアランスが十分にある。以上のことからみても、舟運実現の可能性は大きいと思われる。

しかし、石狩川舟運を実現するには多くの技術的問題がある。いくつか例を挙げると航走波による河岸侵食、河川の合流地点における土砂堆積による航路維持、漁業や農業への影響、非常に大きな水位変化による荷役施設の問題、寒冷期における河川の結氷対策などの問題があり¹⁾、これらの技術的問題を解決しなければならない。

前述した技術的問題の一つに漁業、農業への影響を挙げたが、渇水期には石狩川河口から上流 20 数 km に及ぶ塩水楔が形成されており、河口周辺では

漁業、農業用水の取水が行われているため、船舶の航行による塩分拡散が環境に与える影響を評価する必要がある。しかし、河口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。

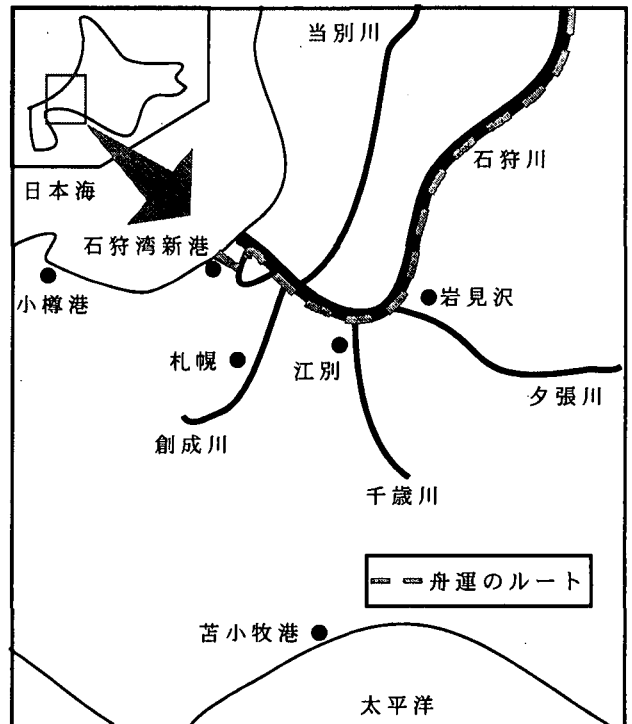


図-1 舟運のルート

表-1 実験条件

	R	F	u(cm/sec)
Case1	4000	0.23	3.9
Case2	9400	0.53	9.0
Case3	14000	0.79	13.5

本研究では、構造物と船舶航行による上層への塩分拡散²⁾³⁾を比較、検討することを最終的な目的とし、その第一段階として構造物による二層流体の塩分拡散、破壊機構を明らかにした。

2. 実験方法

実験は図-2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2層を形成し、上層側に5分間水中ポンプで流速を与えた。実験装置の淡水層の全長は800cm、淡水層の水深は約20cm程度にし、その両端から200cmの地点から深さ20cmの段差を設け、塩水層の全長を400cmとした。水路幅は60cm、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10.5cmの円柱形状の橋脚模型を、x=450cm, y=0cmの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とした。塩水層の濃度は、海水とほぼ等しい約3%である。

橋脚模型の後流による、密度界面の現象を可視化するために塩水層に蛍光性を有するウラニンを混入し、シート光で水平断面(xy断面)は界面位置を、縦断面(xz断面)は水路幅中央を照射し、デジタルビデオカメラで撮影した。また、塩分濃度変動特性を調べるために、4本の塩分濃度センサーを用いた。

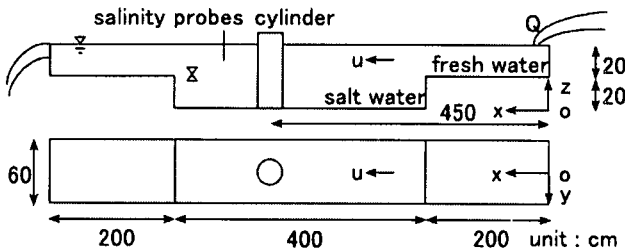


図-2 実験装置

3. 実験条件

実験は淡水層流速の変化に伴うレイノルズ数に対する依存性を調べた。表-1に示すようにCase1からCase3の条件でレイノルズ数を変化させた。表におけるレイノルズ数と内部フルード数はそれぞれ

$$Re = ud / \nu \quad (1)$$

$$F = u / \left\{ \epsilon gh_1 h_2 / (h_1 + h_2) \right\}^{1/2} \quad (2)$$

$$\epsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1 \quad (3)$$

とした。ここで、 u は淡水層の平均流速、 d は円柱模型の径、 ν は淡水層の動粘性係数、 ρ_1 と ρ_2 はそれぞれ淡水層の密度と塩水層の密度、 g は重力加速度、 h_1 と h_2 はそれぞれ静止時の淡水層水深と塩水層水深である。

4. 実験結果

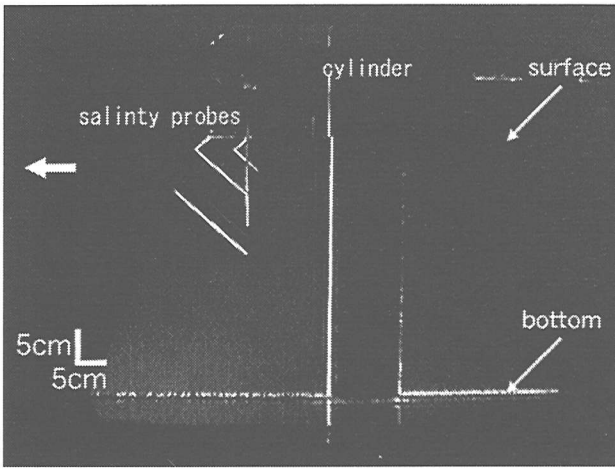
(1) 画像による解析

Case1からCase3における橋脚模型前後の縦断面、水平断面の画像をそれぞれ図-3、図-4に示す。

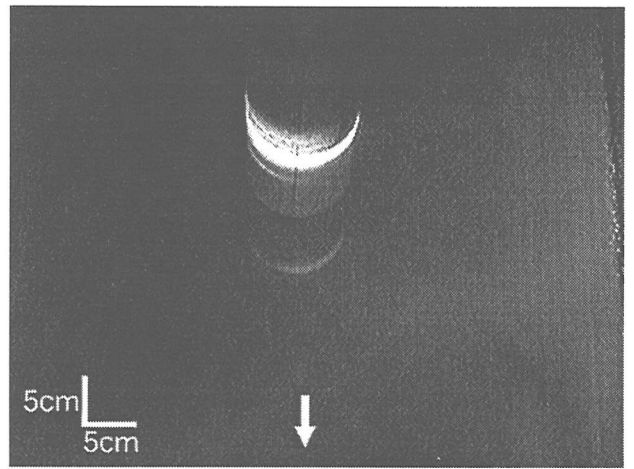
Case1はR=4000の低レイノルズ数の条件である。図-3(a)では淡水層に流速を与えてもほとんど乱れが生じていないことが分かる。橋脚模型の下流側から約5cm後方に、わずかに界面の隆起が見られる程度である。図-4(a)は水平断面の画像であるが、物体後流による水平渦は見られない。界面の隆起がほとんどないため画像にもそれが表れている。

Case2はR=9400の条件である。図-3(b)では橋脚模型の上流側直前で局所的な界面の低下が見られ、そこで反時計回りの渦を発生している。また、下流側では界面の隆起と不安定状態が生じている。図-4(b)では、橋脚模型両側壁から流下方向の斜め後方に向かってV字型に暗くなっている領域が確認できる。これは、橋脚模型側壁から発生する水平方向のせん断渦の影響と思われるが、その規模は小さい。Case2の図-3(b), 4(b)から橋脚模型の後流による塩分拡散現象は以下のように考えられる。橋脚模型の上流側直前で発生する縦方向反時計回りの渦群が剥離し、流れによって下流側の界面に衝突して界面不安定を形成し、橋脚模型の側壁から生じる水平方向の剥離した水平方向の渦と衝突することによって複雑な拡散現象を生じているのである。この現象は一般河川で見られる橋脚による局所的な河床の洗掘に似ている⁴⁾。石狩川河口で塩水楔の遡上する領域では、塩水領域の流速が非常に小さいため、密度界面がちょうど一般河川の河床と類似した状況になっていると考えられる。

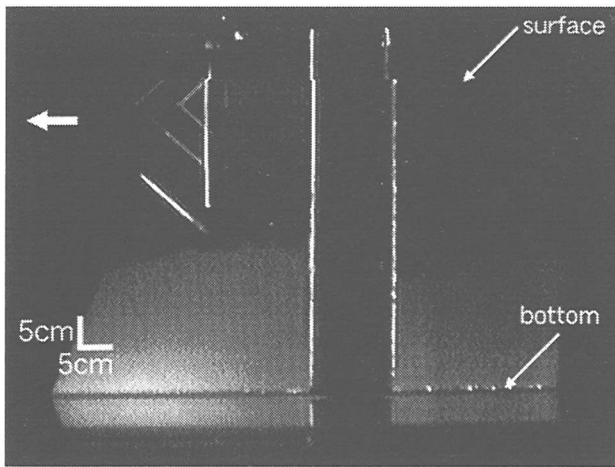
Case3はR=14000の高レイノルズ数の条件である。図-3(c)では橋脚模型の上流側で静止していた状態より10cm程度の非常に大きな界面の低下が起こり、その下流側で大規模な塩分拡散が生じているのが分かる。下流側ではCase1, Case2とは大きく異なり、界面形状がはっきりとは分からなくなっており、塩分濃度センサーの画像の曇りからも上層に塩水が混合していると考えられる。図-4(c)では径が10cm程度の水平方向の渦が見られ、剥離した下流側の渦の中央に暗いスポットが2つ生じている。また、橋脚模型の左側壁は水平渦が剥離する直前の画像である。これらの渦は高レイノルズ数の条件のため、カルマン渦列のように周期的に発生はしないが、比較的大きな水平渦として生じている。



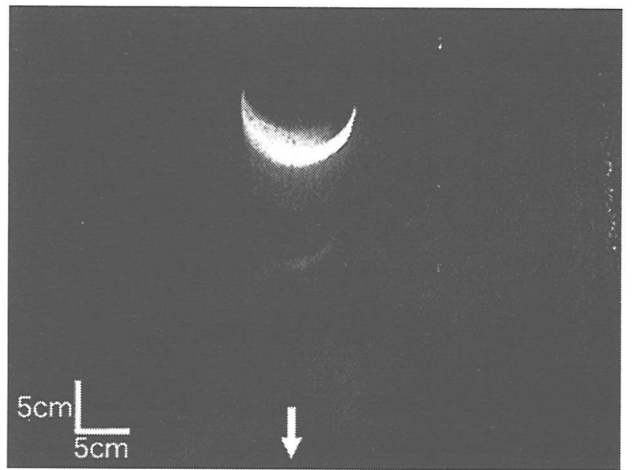
(a) Case1



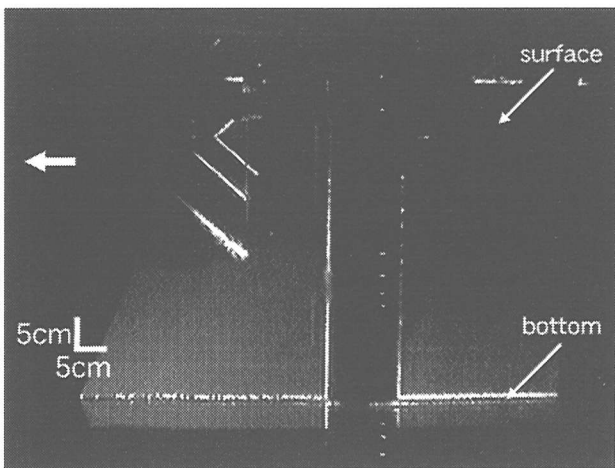
(a) Case1



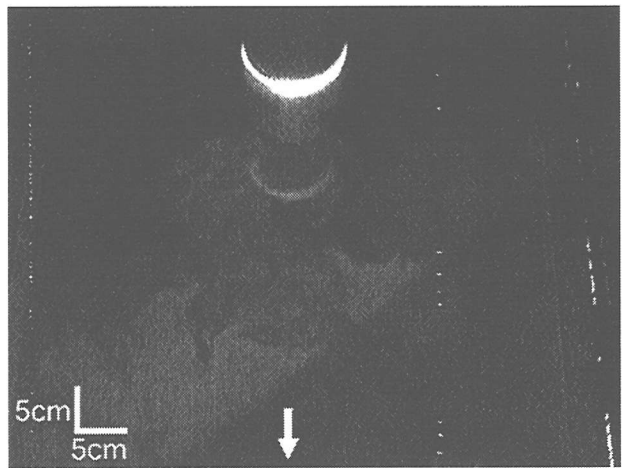
(b) Case2



(b) Case2



(c) Case3



(c) Case3

図-3 縦断面画像

図-4 水平断面画像

(2) 塩分濃度変動特性

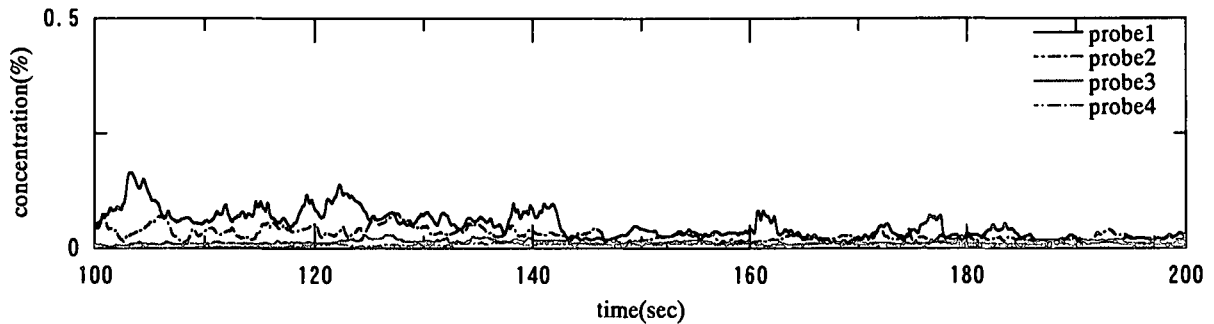
橋脚模型の下流側に設置した4本の塩分濃度センサーにより、各地点での上層における塩分濃度変動特性について調べた。図-5は橋脚模型の座標を $x=450\text{cm}$, $y=0\text{cm}$ とし (以下 cm は省略する), 界面は $z=20$, 塩分濃度センサー (salinity probes) を, probe1 ($x=470, y=0, z=22$), probe2 ($x=470, y=0, z=25$), probe3 ($x=470, y=0, z=30$), probe4 ($x=470, y=0, z=35$) と橋脚模型の後方20cmの地点で z を変化させて設置したときのCase1からCase3における時系列データである。時間軸は流速を与えた300秒間のうち100秒から200秒のデータを図に載せたものである。Case1についてはCase2, Case3と比較して濃度変動が非常に小さいため縦軸のスケールが異なっている。

Case1における塩分濃度変動は図-5(a)であるが, probe2からprobe4の濃度変動はほとんどなく, また

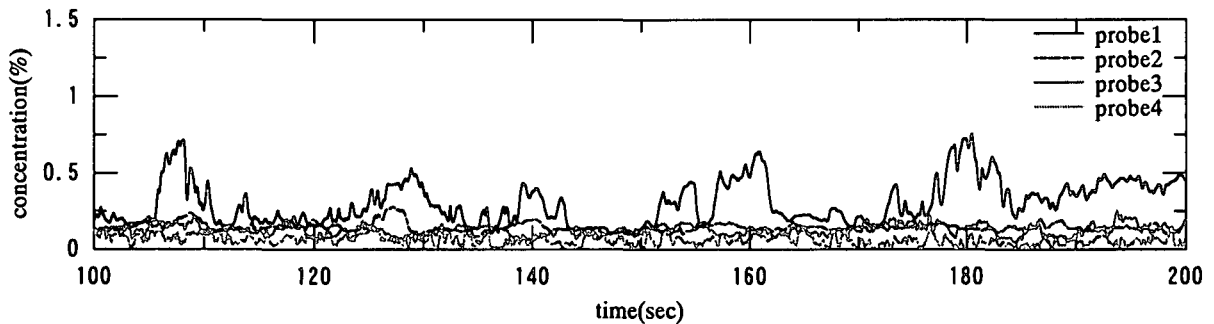
静止時の塩水層の濃度が約3%であることから, 塩淡水の混合はあまり生じていないことがわかる。probe1については, 他のセンサーと比較すると多少の変動は見られるが, 規模は小さい。

Case2における塩分濃度変動は図-5(b)である。probe1では, 比較的大きな変動に乱れ成分が含まれているのがわかる。この比較的大きな変動は, 100秒間に6つほど非周期的に現れている。これは, 図-4(b)で見られた水平断面画像における, 橋脚模型の側壁から生じるせん断渦の影響であると思われる。また微少な乱れ成分は, 図-3(b)で見られた縦方向の渦群の剥離によって生じていると考えられる。probe2からprobe4では, probe1による濃度変動の影響があまり見られないことから, 界面付近で巻き上がった塩分が上層にそれほど拡散していないことがわかる。

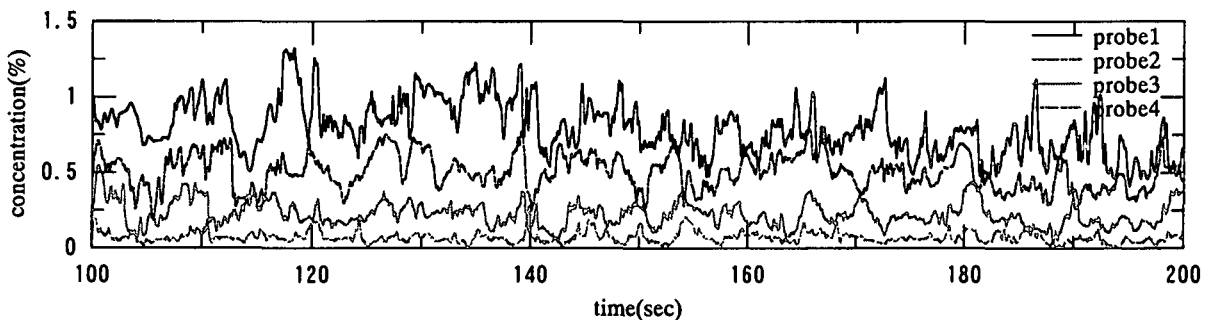
図-5(c)に示したCase3では, 大きな濃度変動が見



(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3

図-5 z方向に対する塩分濃度変動特性

られる。probe1, probe2を比較すると、比較的波形が似ていて界面付近だけでなく上層に塩水が巻き上がっていることがわかる。probe3ではCase2のそれと比べて濃度が約1.5倍高くなっているが、probe4でCase2とCase3を比較すると、濃度変動にそれほど差異が見られないことから、水面付近では塩分拡散による影響が小さいことがわかる。

次に、図-6は塩分濃度センサーの位置をprobe1 ($x=470, y=0, z=25$), probe2 ($x=490, y=0, z=25$), probe3 ($x=510, y=0, z=25$)と y, z を固定し x を変化させた場合における塩分濃度変動の時系列を表している。

probe1とprobe2を比較すると、塩分濃度センサーの値の差はあまり見られないが、完全ではないがprobe2のほうが位相をずらして変動していると思われる。probe3は濃度変動が小さくなり値も小さくなっている。これらのことから、橋脚模型によって巻き上げられた塩水は上層流速にのって移流し、徐々に拡散していることがわかる。

(3) 塩分拡散量

前述した画像や塩分濃度変動特性から、橋脚模型の後流による塩分拡散を定性的に捉えることができた。そこで、実際にどの程度上層に塩分拡散が生じているか調べるため、塩分拡散量のおおよその定量化を測った。

定量化は橋脚模型から20cm下流側の一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少量であるが塩分拡散が生じているため、その拡散量も考慮した。また、水路幅方向に対する塩分拡散量は、塩分濃度センサーの位置を変えて同条件で行ったデータを用いた。塩分拡散量を調べるには、1回の実験において橋脚模型背後の断面の濃度分布を計測すべきであるが、本研究における実験装置では、時間の経過に伴い界面位置が徐々に低下してしまい、定常な時間がとれないため同条件という仮定で塩分拡散量を推定した。

Case3における $z=25$ での濃度分布を図-7に示す。横軸は水路幅方向の座標 y を水路幅 B で割った無次元量 y/B とし、縦軸は測定した塩分濃度 C を静止時の塩水層の濃度 C_0 で割った C_0/C とした。図から $|y/B|$ の増

加に伴い塩分濃度が減衰していることがわかる。同様に、一横断面の濃度分布からCase1からCase3における塩分拡散量を求めた。こうして求めた塩分拡散量を表-2に示す。

表における Wl, Wf はそれぞれ本実験の橋脚模型による単位時間あたりの拡散量、現地スケールに換算した単位時間あたりの拡散量を表している。このように、Case1ではほとんど塩分拡散が生じておらず、レイノルズ数が高くなるにつれて拡散量が増加していることがわかる。Case3における上層への塩分拡散量は現地スケールに換算して4.6kgf/secと小さいと思われるが、毎秒この程度の巻き上げが日々連続的に起こっていること考えると、1時間あたり16.7tonf/hourの拡散が1本の橋脚によって生じていることになる。石狩川河口には札幌大橋、石狩河口橋など多くの橋梁があり、それぞれの橋脚においてこの程度の塩分拡散が生じていれば、1日に数回と想定される船舶の航行による塩分の巻き上げと比較する価値は十分にあると思われる。

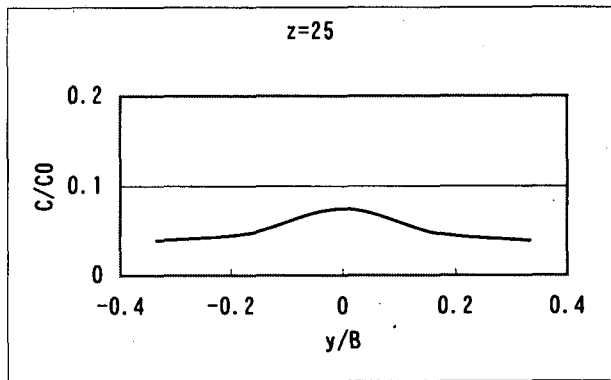


図-7 水路幅方向に対する塩分濃度の減衰

表-2 上層への塩分拡散量

	Re	F	Wl (gf/sec)	Wf (gf/sec)
Case1	4000	0.23	0.11	54
Case2	9400	0.53	4.65	1790
Case3	14000	0.79	12.05	4640

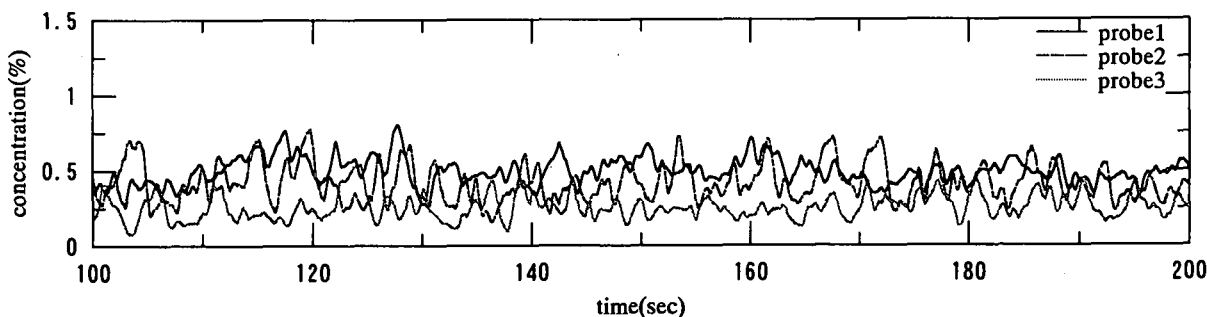


図-6 y方向に対する塩分濃度変動特性

4. おわりに

本研究における結論は以下の通りである。

二成層流体の橋脚模型の後流による塩分拡散現象は、物体の上流側直前に下向きの流れが生じ、そこで縦方向の反時計回りの小さな渦群が発生し、剥離して下流側の界面を隆起させ不安定な状態になる。また、物体の側面から水平方向の渦が剥離して隆起した不安定状態の界面と衝突して成層破壊を生じている。

成層破壊現象は、一般河川の橋脚による局所的な河床の洗掘に似た現象である。これは石狩川河口で塩水楔の遡上する領域では、塩水領域の流速が非常に小さいため、密度界面がちょうど一般河川の河床と類似した状況になっているためと考えられる。

上層への塩分拡散量は、レイノルズ数により大きく左右する。R=4000と小さい条件では、縦渦や水平渦は確認されず、拡散量もほぼ0に近い。それに対してR=14000になると密度界面は安定を保てず、規模の大きい縦渦と、水平渦の剥離との衝突により大きな成層破壊を生じている。

石狩川河口には多くの橋梁があり、それぞれの橋脚で連続的に塩分拡散が起こっていることを考慮す

ると、1日数回と想定される船舶の航行による塩分拡散量と比較する価値は十分にあると考えられる。両者の塩分拡散量の比較方法については現在検討中である。

本実験におけるレイノルズ数の条件は、比較的高いものであるが、現地におけるレイノルズ数と比較すると非常に小さいため、実河川での現象と異なる可能性がある。したがって実際の石狩川河口の橋脚による塩分拡散量の現地調査が必要である。

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, vol16, 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) Bruce W. Melville, Stephen E. Coleman: *Bridge Scour*, Water Resources Publications, LLC, pp.187-242, 1971.