

II-14

移動物体による二層流体の界面破壊

苫小牧工業高等専門学校 正 員 中野 渉
 北海道大学工学部 ○学生員 兵藤 誠
 北海道大学大学院 正 員 佐伯 浩

1 はじめに

物体周りの密度成層流れの問題は、例えば気象学の分野では山岳等の地形上を流れる気流の問題に関わって研究され[1]、河口密度流においても地形によると考えられる内部波の造波に関する観測例がある[2]。一方、河口密度流や安定成層が形成されたダム等の水域水面を船舶等が航行する場合、それに伴う成層の変動や乱流混合は水域の水質保全の観点からも研究の必要がある。

石狩川の下流域には河口部から塩水楔が進入し、渇水期には全長 20 km に及ぶ河口二層流を形成している。また、茨戸湖は石狩川本流と運河で連結されており、渇水期に本流から流入した塩水が二層系を形成することがある。近年、石狩川に隣接する工場地帯への新しい物流手段として、海域から茨戸湖と石狩川を経由するルートでの台船等による舟運が検討されており、それに伴う塩分拡散や底質の巻上げを評価することが必要となっている。

そこで、本研究では、実験水槽に形成された塩水・淡水からなる二層流体の表面を船型の模型物体を曳航し、主に可視化手法を用いて界面変形・界面破壊とそれに伴う塩分拡散現象について解析した。

2 実験方法

実験装置を図1に示す。水槽は透明アクリル製で全長 7.8m で、左端側の 2 m のところに高さ 5 cm の仕切りを設け、塩水層を 5.8m の区間に形成している。現地の 1/100 程度のスケールを想定し、全ての実験において淡水層と塩水層の厚さはそれぞれ約 3 cm, 4 cm である。塩水層は 0.5% 程度の濃度に設定した。模型船は透明アクリル製で、下底の長さ 27cm, 上底の長さ 47cm, 高さ 5cm の前後対称な台形の縦断面形状を持ち、幅は 10.6cm で矩形の横断面形状を持つ。これは舟運への利用が想定される台船の 1/100 程度であ

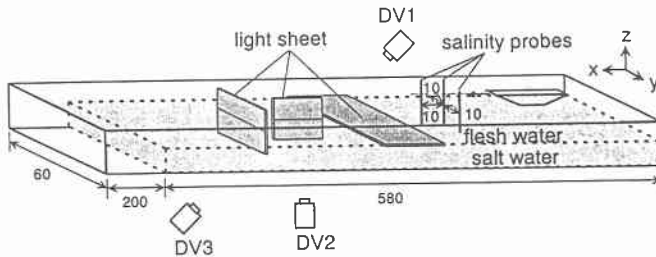


図1 実験装置

Breaking of the Density Interface in Two-layer Fluids by a Moving Obstacle
 by Wataru NAKANO, Makoto HYODO and Hiroshi SAEKI

る。石狩川の渇水期の淡水流速は 0.1~0.2 m/s 程度と、航行が予想される船の最大速力 7 m/s に比べて十分小さいので、本研究では静止した二層系に船模型を自走台車で曳航して実験を行った。

界面現象の可視化のため、塩水層には蛍光性を有するウラニンを混入しておき、シート光で x y 平面（界面位置）、x z 平面（水路幅中央位置）、y z 平面を照射する。その映像を 3 台のデジタルビデオカメラで同時撮影することで各断面における界面現象を記録した。また、流速場の測定のため、直径 0.1mm 程度の球状ポリマー粒子を観測部の淡水、塩水に注入した。界面変動と淡水層への塩分拡散の時系列を得るために、水路幅中央から幅方向に 10cm、水路右端から 2m、水深 2cm の位置に塩分濃度センサーを設置し、このセンサーから x 方向と y 方向にそれぞれ 10cm の間隔で塩分センサーを設置して変動の伝播特性を調べた。

3 界面形状と破壊形態

流れ場を支配する無次元量は以下になる。

$$R = \frac{Ud}{\nu}, \quad F = \frac{U}{\sqrt{\varepsilon g \frac{d_1 d_2}{D}}}, \quad H = \frac{d}{d_1}, \quad r = \frac{d_1}{D}, \quad W = \frac{b}{B} \quad (1)$$

ここで、Rはレイノルズ数、Fは内部フルード数であり、Hは喫水、rは淡水層厚さ、Wは船幅をそれぞれ無次元化した量である。右辺の諸量は、dは船の喫水、Uは船の推進速度、 ν は動粘性係数、D、 d_1 、 d_2 はそれぞれ静止時の全水深、上層水深、下層水深、gは重力加速度、bは船幅、Bは水路幅、 ε は二層の密度差を上層密度で割ったものである。本実験では、 $r=0.428$ 、 $W=0.176$ であり一定である。

図2~図3に、喫水水深を 2cm、塩水層の塩分濃度を約 0.5%に設定し、流速を変えて行った 3通りの実験（以下、Case-1, 2, 3）の撮影画像を示す。図2は上方から撮影した界面付近の水平断面画像、図3は側面から撮影した水路幅中央付近の縦断面画像である。条件は以下の通りである。

Case-1:	U= 1.9 cm/s,	F= 0.77,	H= 0.76,	R= 404
Case-2:	U= 8.2 cm/s,	F= 2.8,	H= 0.76,	R= 1716
Case-3:	U= 32.1 cm/s,	F= 11.1,	H= 0.73,	R= 6715

Case-1は内部フルード数が $F=0.77$ と亜臨界である。図2(a-上, 中)では船尾及び船の長さのほぼ中央付近から波長約 13cm の内部 Kelvin 波の縦波が生じている。(a-下)では側壁からの反射波が重疊している。図3(a)によれば、船首付近では界面が低下し、船首屈曲部直下の淡水層厚さは 2cm 程度であるが、船尾屈曲部では 0.7cm 程度である。船尾後方には波高 3cm 程度の内部 Kelvin 波の断面形状が見られる。また、流れ場全体は層流的である。Case-2は $F=2.8$ での結果であり、超臨界である。図2(b-上)では側壁に沿った剥離剪断層の渦列が船体の後半部分では塩水を周期的に巻上げているが、拡散への寄与は小さい。一方、船底後部の屈曲部から 10cm ほどの区間で界面が隆起し、船尾後方には特徴的な暗いスポットが見られる。これは、船尾から剥離した淡水層内の渦が、隆起した界面に衝突したためと思われる（この渦の鉛直断面の構造は図3(b-下)の画像に捉えられている）。図2(b-中)では船尾から 12cm ほどの位置にそのスポットが取り残されている。このスポットは周期約 3s、間隔約 15cm で周期的に発生している。界面隆起部分の幅は船尾から 30cm 程後方で一度狭くなり、その直後に界面はスポット領域を中心に不安定化し急速に水路幅方向に広がる乱れとなっている。乱れの高波数成分はその後減衰し、図2(b-下)に見られるように、ほぼ軸対称な双子の水平渦構造が次々に作られ、中間密度の塩水からなる密度流として広がりながら船の進行方向にゆっくり進んでいく。乱れによる水平方向の密度の不均一はこの密度流によって徐々に均一化されていくが、その速度はきわめて遅い。また、波長約 15cm の開き角の小さい内部 Kelvin 波が共存している。

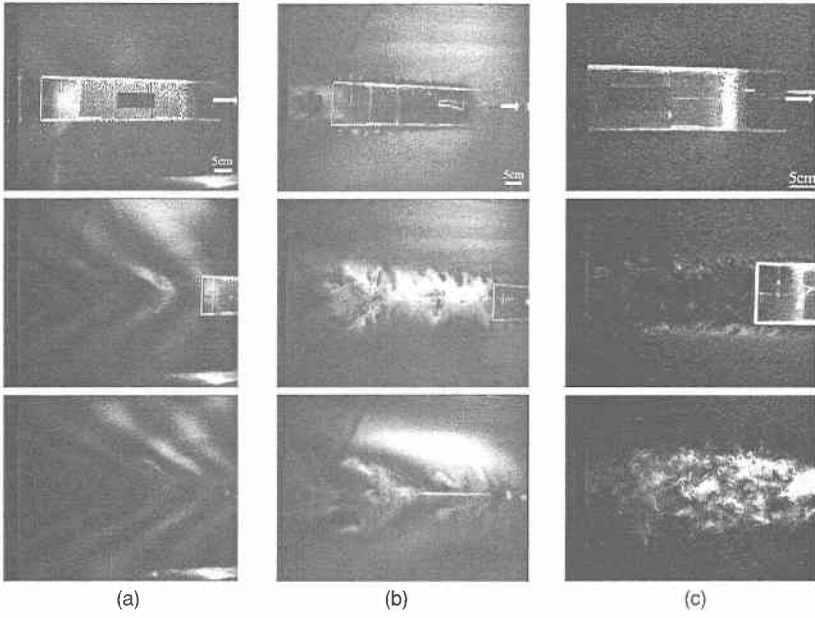


図2 水平断面画像 (a) Case-1 上から $t=0, 19.3, 24.2$ s,
 (b) Case-2 上から $t=0, 5.4, 12.6$ s, (c) Case-3 上から $t=0, 1.2, 2.8$ s

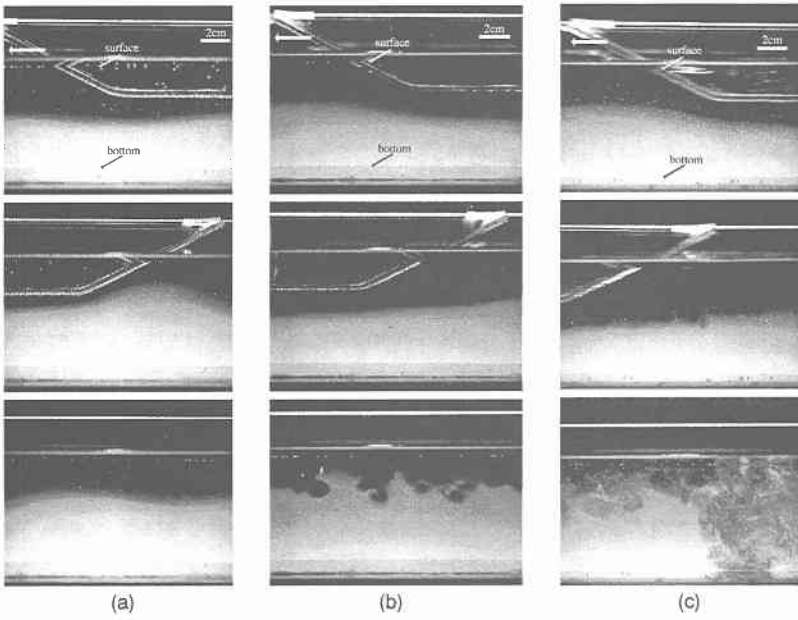


図3 縦断面画像 (a) Case-1 上から $t=0, 15, 25$ s,
 (b) Case-2 上から $t=0, 3.7, 6.9$ s, (c) Case-3 上から $t=0, 1.0, 3.1$ s

Case-3 は、 $F=11.1$ であるが、これは現実の舟運で想定される内部フルード数に匹敵する。図 2 (c-中) では船側からの剥離渦が見られる。また、船の後方 30 cm ほどの区間が周囲より暗くなっており、船底直下を含めると縦断方向に 80 cm 程度の界面凹部が存在することを示している。この凹部は終端で幅が狭くなり、図 2 (c-下) に示される様に、界面の隆起に伴って混合が行われる。この乱れのうち高波数成分はやはり急速に減衰し、低波数の水平渦成分が最後に残される。図 3 (c-下) に示されるように、このケースでは、全水深に及ぶ乱れのために、上層内に連行された塩水は一旦水面にまで達するが、そのまま淡水層に均一に拡散するわけではない。界面破壊が生ずるのは船幅の 2 倍程度の領域に限られているため、その外側にはほとんど混合されていない淡水の領域が広がっている。そのため、一旦表面に達した混合塩水は水路幅方向に厚さを減じながら密度流として広がり、最終的には淡水層の 1/3 程度の厚さを持った中間密度層を形成する。

図 3 (c-下) に見られる界面破壊時の流れ場を調べるため、図 3 (c-下) 直前のビデオ画像の 3 フレーム (1/30 s 間隔) にわたって流体中に混入した粒子を追跡して作成したベクトル分布図が図 4 である。これを見ると上層は、水路幅中央付近で船隻航速度 32 cm/s の半分程度の流速を持ち、流速が小さな下層との間に shear が存在する。また、全水深に及ぶ乱れが鉛直下向きの流速を持って画面右手から進入し、大規模な破壊を生

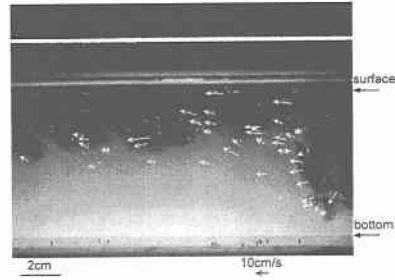


図 4 界面破壊時の流速ベクトル (Case-3)

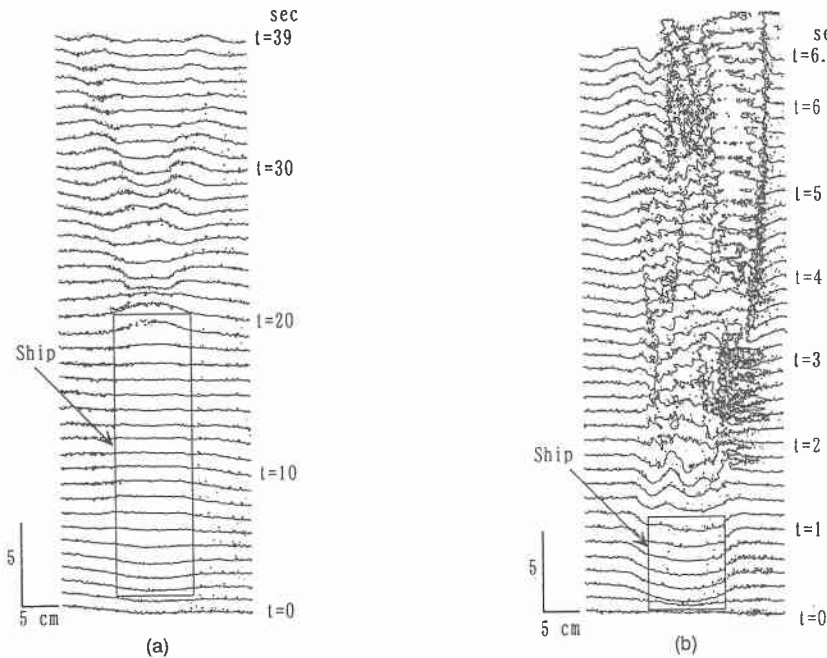


図 5 界面変動の時間発展 (a) Case-1 (b) Case-3

左下に水平・鉛直方向のスケールを示す。参考のため、船の位置を時間尺度に換算して表示している。

じている。

図5(a),(b)は、それぞれCase-1,Case-3の実験においてDV3によって撮影された横断面の画像から画像処理によって界面形状を抽出し、それを一定の時間ステップで40フレーム分を並べたものである。ある瞬間の平面画像ではないが、界面形状の細部構造を調べるために利用することができる。なお、撮影は斜め前方から撮影した画像を用いているため、左端では右端に比べて7%ほど縮小されている。図5(a)では、船体直下の界面形状、船尾直後の界面隆起、そしてその後方に次々に発生する縦波が識別できる。一方、図5(b)では、船後方の界面の凹部とその急激な隆起、左右非対称な界面破壊の進行が見られる。特に注目すべきは、 $t=1.3$ s以降の界面の凹部内に二山ほどの小さな変動があり、その発達の直後に界面破壊が生じている事である。この前駆的な変動は内部 Kelvin 波の縦波とよく似た波動に見える。このような変動は $t=6.5$ s までの界面にも見られるが、このような縦方向の構造の不安定化と船体からの剥離渦が船体周りの界面破壊において重要なメカニズムであるように思われる。

4 塩分濃度変動の特性

上層の濃度変動の特性を調べるため、水路幅中央から10cm、界面上方に1cmの位置に設置した塩分濃度センサーで記録された変動が図6である。(a)では、船の通過に伴う界面低下が塩分の低下として現れている。その後、長周期の変動に重なって周期9.8sほどの波形を先頭に内部 Kelvin 波による変動が8波ほど認められる。(b)では船通過直後の変動ピークが周期100s程度の変動に重なっている。水路幅方向に広がる界面破壊が生じているため、周期約8sの濃度変動が $T=300$ s あたりまで観測されている。(c)では周期約12sの大きな変動が $T=80$ s まで徐々に減少した後、倍程度の周期の変動が卓越してくる。船の後流乱流の高周波成分は粘性減衰とポテンシャルエネルギーへのエネルギー輸送により急速に減衰されるため、濃度変動にもその影響が現れていると思われる。

これらの信号のうち、第一波から約100秒間の濃度変動データを用いて算出したスペクトルを図7に示

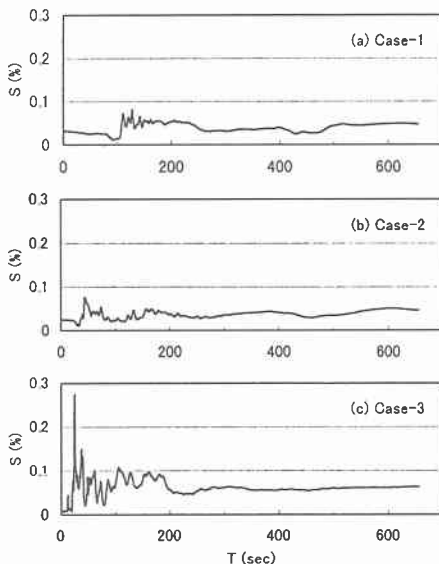


図6 塩分濃度変動の時系列
(a) Case-1 (b) Case-2 (c) Case-3

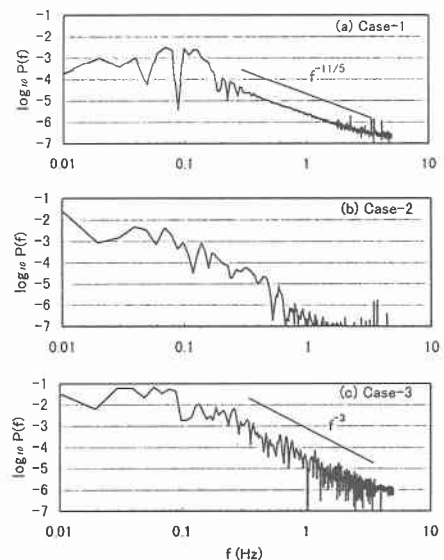


図7 塩分濃度のスペクトル密度
(a) Case-1 (b) Case-2 (c) Case-3

す。各スペクトルのうち 0.15 Hz 以下の低周波領域には、上に記した卓越波の周波数に対応するピークが認められる。(a)と(c)を比較すると、(b)のピークは 0.058 Hz を中心とした低周波側にシフトしている。また、特徴的なことは、0.3 Hz 以上の高い周波数領域のスペクトルが、(a)ではほぼ $f^{-11/5}$ に比例するスペクトル形であるのに対し、(c)では f^{-3} と高周波成分の減衰が大きいことである。これは非混合型と混合型の内部波動の違いとして解釈できる[3]。

船の曳航前に測定した塩分濃度の鉛直分布と曳航後 30 分以上経過して濃度変動がほぼ安定化した時点での分布から上層塩分（水深 0.5~2.0cm で積算）の増加量を計算すると、Case-1 では 1.4 倍、Case-2 では 1.6 倍であったが、Case-3 では 5.4 倍とかなり増加する。渦水期の石狩川での舟運では、船の最大速度において $F=12$, $H=0.67$ 程度であり、実河川の Reynolds 数がかなり高い事も考慮すると、Case-3 のような激しい界面破壊とそれに伴う上層へのかなりの量の塩分拡散が生ずる可能性がある。また、速度がかなり小さい場合でも振幅の大きな内部 Kelvin 波が造波されるので、河川流や地形等の影響でそれが碎波して、船の航跡とはかなり離れた場所に局所的な塩分拡散が生ずる可能性がある。

5 結論

二層流体の表面を曳航される船模型に伴う界面変動と界面破壊機構について、可視化実験を中心とした実験を行った結果、次のような事が明らかになった。

- ・ $F < 1$ で流れ場は層流的であるが、振幅の大きな内部 Kelvin 波が観測される。
- ・ $F > 1$ で $F \approx 1$ の場合、船体後流から周期的に放出される渦群による界面破壊と内部 Kelvin 波が共存する。
- ・ $F \gg 1$ の場合、船体後流乱流による大規模な界面破壊が生ずる。また、内部 Kelvin 波は観測されないが、船体後流の界面凹部に内部 Kelvin 波とよく似た、縦方向に長い界面変形が認められ、界面破壊の前駆現象と考えられる。
- ・ 濃度変動の特性も F によって異なり、そのスペクトルの高周波数領域は、 $F < 1$ で非混合型、 $F \gg 1$ で混合型内部波のスペクトルの特徴に一致する。
- ・ 渦水期の石狩川における舟運の条件では、激しい界面破壊が生ずる可能性がある。

柏村等[4]は、河口二層流における河川水の流出が遷音速流の力学と相似であり、内部フルード数 F がマッハ数 M と同じ役割をすることを発見した。河口流出に対して本研究の対象は物体後流であるが、層流型から乱流型への流れ場のパターンには柏村等[5]の実験結果と類似性があり、そのような視点からの解析も今後重要になると思われる。

参考文献

- [1] P. Baines : *Topographic Effects in Stratified Flows*, Cambridge Univ. Press, 1995.
- [2] W. Nakano and I. Yakuwa. : *Interfacial Gravity Waves in a Salt Wedge Estuary*, Coastal Engineering in Japan, vol.27, 1984.
- [3] 岩崎・安部: 塩淡水二層流における乱れ拡散に関する研究(1), 第17回海岸工学講演会論文集, pp343-347, 1970.
- [4] 柏村・梶井: 河口の内部フルード数の持つ意味とその分布, 第26回海岸工学講演会論文集, pp563-566, 1979.
- [5] 柏村・吉田: 河口密度流の解析, 第14回海岸工学講演会論文集, pp222-225, 1967.