

物体後流による二層流体の成層破壊

中 野 渉*・兵 藤 誠**・佐 伯 浩***

1. はじめに

成層流体が静止物体の周りに形成する後流,あるいは逆に,静止した成層流体内を移動する物体が作る後流の問題は流体力学的にも興味ある対象であり,前者については主に気象学の問題に関連して研究されてきた(Baines, 1995). また石狩川においても出水時に河床地形の影響で造波されたと考えられる大振幅内部波の観測例が Nakano ら (1984) によって報告されている. 一方,後者に関して,安定成層が形成された河口密度流や貯水池の水面を船舶等が航行する場合,船の推進に影響を与える死水現象の発生他,に,非定常かつ局所的ではあるが成層破壊に伴う水質変動の発生が懸念される.

近年,石狩川では 500~1000 トン級の台船,バージなどによる本格的な舟運の可能性が検討されている. この計画では,船舶は河口から上流二十数 km に及ぶ塩水楔の遡上領域を航行することになるが,河口周辺では栽培漁業や農業用取水が行われているため,船による塩水の巻上げなど水質への影響を評価することが必要となっている. そこで本研究では,水表面を移動する船体が二層流体に形成する後流について水理実験を行ない,3 次元物体の後流による成層破壊機構を明らかにすることを目的とする.

2. 理論背景

2 次元地形を越える成層流れについては, Long (1954), Miles (1968) をはじめとする多くの研究が行われ,内部跳水や lee wave の特性が理論,実験の両面から明らかになっている.

一方,3 次元問題に関して, Lee ら (1990) は 3 次元物体周りの均一流体の表面波が fKP 方程式で記述でき,波紋および造波抵抗のいずれも 2 次元物体の場合と異なることを指摘した. また Hanazaki (1994) は 3 次元地形周りの成層流れについて,弱非線形理論に基づく fKP 方程式及び fEKP 方程式の解が Navier-Stokes 方程式の数

値解と定性的には合うという結果を得ている. X 方向の流れが造波する内部波について, n 次モードの振幅 $A(X, Y, T)$ に関する fEKP 方程式は,

$$-\frac{1}{C_n}(A_T + a_0 A_X) + a_1 A A_X + \varepsilon a_2 A^2 A_X \\ + a_3 A_{XXX} + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^X A_{YY} dX + G_X = 0 \dots\dots\dots (1)$$

であり,3 次の非線形項と外力項 G_X がなければ 2 次元自由波に対する通常の KP 方程式である. 外力項 $G(X, Y, T)$ は G_X の形で寄与していることから,3 次元流れの場合でも一様流方向の地形勾配が造波の強制力となる.

成層流体中を移動する 3 次元物体の後流に関する実験は Ma ら (1993) などがあるが,主として内部波動の造波に注目した研究であり,これまで 3 次元物体後流による成層破壊に着目した実験的研究や理論的研究は多くないように思われる. 界面の破壊機構として, (a) 物体と界面の接触, (b) 船体近傍の剪断流不安定, (c) 内部波動の非線形成長に伴う砕波, (d) 後流乱流の界面への衝突などが考えられる. 以下ではこれらの可能性について検討する.

3. 実験方法

実験装置を図-1 に示す. 水槽は透明アクリル製 (780×60×25 cm) で,高さ 5 cm の仕切りによって左側 200 cm の区間に淡水層 (水道水) からなる減速域を設け,塩水層 (食塩水) はその右側の長さ 580 cm の区間に形成している. 船も透明アクリル製で,形状は台船や砕水船をモデル化したものであり,長さが上部 47 cm,底部 27 cm,高さが 5 cm の前後対称な台形の形状を持ち,幅は 10.6 cm である. 水槽と船は水路幅を除いて現地スケールの 1/100 程度である. 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 と 4 cm,中間密度層厚さは 1 cm 程度である. 光屈折による界面付近の画像歪みを抑えるため,塩水層は 0.5%程度と比較的低い濃度に設定した.

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ンを混入しておき,シート光で xy -平面 (界面上

* 正会員 苫小牧高専助教授 一般教科
** 学生会員 北海道大学大学院 工学研究科環境資源工学専攻
*** フェロー 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科環境資源工学専攻

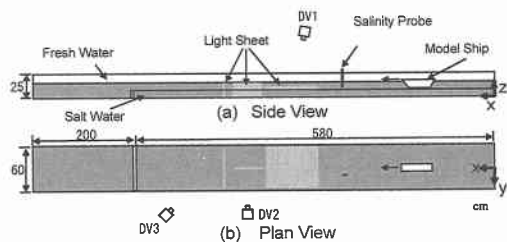


図-1 実験装置

部), yz -平面 (水路幅中央位置), yz -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、微小ポリマー粒子を観測部に注入している。また、界面の1 cm 上である $x=200$ cm, $y=10$ cm, $z=5$ cm の位置に塩分濃度センサーを設置し、界面変動と淡水層への塩分拡散の時系列を得た。

なお、石狩川の渇水期の淡水流速は $0.1 \sim 0.2$ m/s 程度であり、実船の想定平均速度 2.5 m/s に比べて十分小さいので、本研究では静止した二層流体系に船模型を自走台車で牽引して実験を行ったが、河川流による移流拡散の影響については別途考察を加える。また、実船ではスクリューの影響は無視できないと思われるが、第一段階として本研究では船体単独の効果について調べた。

4. 実験結果および解析

対象とする流れ場を支配する parameter は、無次元喫水 $H=d/d_1$, 内部フルード数 $F=U/(\varepsilon g d_1 d_2/d)^{1/2}$, 喫水ベースのレイノルズ数 $Re=Ud/\nu$ 及び相似比 $r=d_1/(d_1+d_2)$ と $W=b/B$ である (d は船の喫水, U は推進速度, ν は上層水の動粘性係数, d_1, d_2 はそれぞれ静止時の上層水深, 下層水深, g は重力加速度, b は船幅, B は水路幅, ε は上下層の密度差の上層密度に対する比)。なお, 全実験において $r=0.43$, $W=0.18$ である。

ここでは, F, H, Re の条件を変えて行なった5通りの実験について説明する。実験条件は表-1に示す通りで, Case-1 から Case-3 までは内部フルード数 F に対する依存性, Case-4 と Case-5 は無次元喫水 H に対する依存性を調べる実験である。

4.1 推進速度の効果

写真-1, 2 に, Case-1~3 の撮影画像を示す。写真-1 は DV1 で撮影した界面付近の水平断面画像, 写真-2 は DV2 で撮影した水路幅中央付近の縦断面画像である。

Case-1 は $F=0.67$ であり subcritical の条件である。写真-1(a) では船尾付近から波長約 13 cm の内部波列 (3次元 lee wave) が生じて, 後方では水路側壁からの反射波が重畳している。写真-2(a) の縦断面画像はその断面形状であるが, 成層破壊は認められず流れ場全体はポ

表-1 実験条件

	U (cm/s)	d (cm)	H	F	Re
Case-1	1.9	2.0	0.76	0.76	4.04×10^4
Case-2	8.2	2.0	0.76	2.8	1.72×10^5
Case-3	32.1	2.0	0.73	11.1	6.72×10^5
Case-4	32.9	1.0	0.33	11.3	3.26×10^5
Case-5	32.8	3.0	1.00	11.5	9.74×10^5

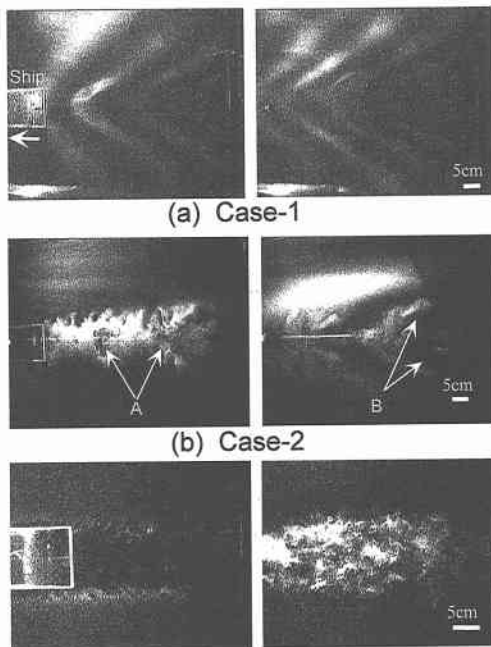


写真-1 水平断面画像

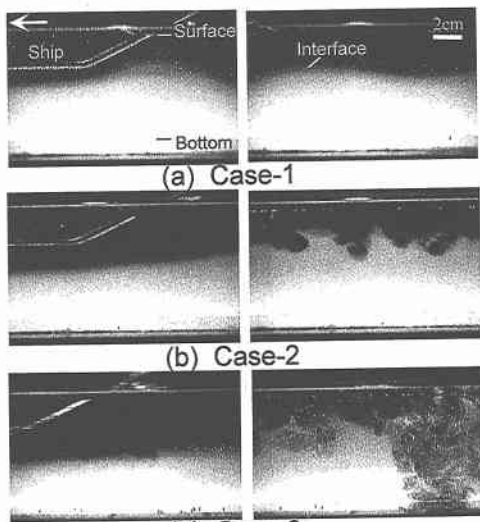


写真-2 縦断面画像

テンシカル流的である。

Case-2 は $F=2.8$ という supercritical の条件である。写真-1(b) では船尾付近からで界面が隆起し、いわゆる V-wake を形成している。この V-wake の側部は船の両舷から放出された剝離渦によって輪郭が侵食されている。また船底からほぼ周期的に放出される渦群による衝突痕 (A) が V-wake 上部に間隔約 15 cm で並んでいる (この渦群の鉛直断面は写真-2(b) の画像に捉えられている)。V-wake の後方にはほぼ軸対称な双子の水平渦構造 (B) が形成され、混合水塊は密度流として水路幅方向にゆっくり広がっていく。乱れによって生じた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る。また、写真-1(b) と写真-2(b) において船体近傍に注目すると、剪断不安定は両舷に沿った渦列を生じて後方で破壊に間接的に寄与しているが、船体近傍に大規模な成層破壊を直接生ずるものではないことがわかる。

Case-3 は、 $F=11.1$ であり、これは実船の限界速力に相当する条件である。写真-1(c) では船底直下を含めると縦断方向に 80 cm 程度のフラットな界面凹部が存在し、それに続いて V-wake が形成されているが、激しい混合が生じているためその形状ははっきりしない。また写真-2(c) に見られるように、全水深に及ぶ混合を伴うが、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、十分時間が経過した時点では淡水層の 1/3 程度の厚さを持った中間密度層を形成した。

さて、Miloh ら (1993) は Green 関数を用いた線形理論に基づいて二層流体の 3 次元界面波を計算し、瘦せた物体周りの波紋の理論的予測を得ている。本実験での subcritical 条件での波紋を表す写真-1(a), supercritical 条件での結果である写真-1(b) は、それぞれ彼らの Fig. 2 及び Fig. 3 と定性的に一致しているように思われる。また、写真-2(c) については内部フルード数が彼らの Fig. 4 の条件に近い。実験では船尾後方に長い凹部が観測されたが、彼らの計算結果では顕著ではない。これは船型あるいは非線形効果の影響とも考えられる。

図-2(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並べた界面形状の時間発展である。ある瞬間の水平断面画像と同一視はできないが、界面が多価関数的に変形してもそれをある程度表現できる利点があり、水平断面画像で識別できない界面形状の細部構造を調べることができる。なお、斜め前方から撮影した画像を用いているため、スパン方向のスケールは鉛直方向の約 1/2 になっており、左側は右側に比べて 7% ほど縮小されて

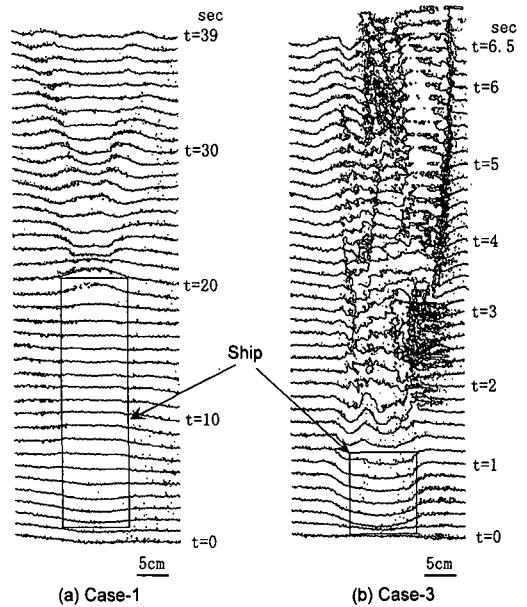


図-2 横断界面形状の時間発展

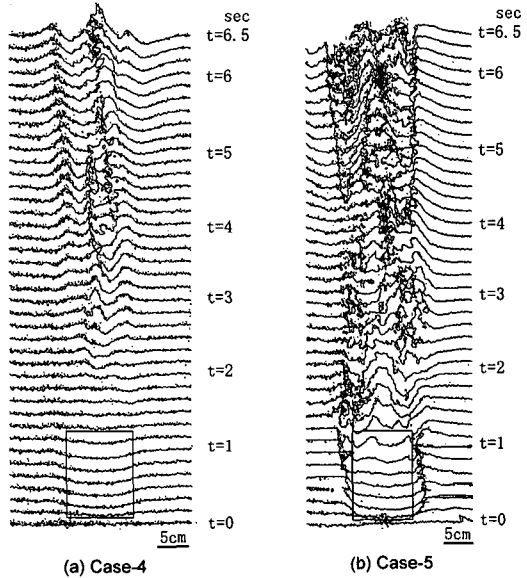


図-3 横断界面形状の時間発展

いる。図-2(a) では、船体直下の界面凹部の形状や船尾直後の 3 次元 lee wave の波紋が認められる。図-2(b) によると、船後方で後流幅が一度狭まり、そこを頂点として V-wake が形成されている。V-wake の内側には縦方向に峰を持つ隆起が認められ、その峰において左右非対称な成層破壊が進行している。

4.2 喫水の効果

次に、喫水の影響を調べたものが図-3 である。いずれ

も Case-3 とほぼ同じ $F=11$ 程度の条件下であるが、Case-4 では $H=0.33$ であり、Case-5 では $H=1.00$ である。Case-4 では喫水が浅く、船体直下の界面の窪み及び界面変形の振幅ともに小さいため、推進速度は大きくても成層破壊は顕著ではない。一方、Case-5 においては船体後方の V-wake の中心軸付近が隆起して、そこを中心に破壊が生じていることが分かる。ところで、この条件では静止時においては船底が界面に接するが、推進時には船体直下の界面が大きく窪んで淡水が船体を包むように流れる。そのため、船体が界面に接触してそれを直接破壊するという事は生じない。喫水が上層水深を越える $H>1$ の場合でも、 H/F があまり大きい値をとらなければこの状況は変わらないものと考えられる。

4.3 後流の乱れ構造

ここで、成層破壊に対する上層内の後流乱流の影響について検討する。2 次元河床粗度を有する二層剪断流の潮汐応答について、粗度から発生するスパイラル渦が剪断不安定よりも支配的な混合機構であることが吉田ら (1980) により報告されている。そこで船尾付近の後流構造を調べるため、流れ場をコンデンスミルク法で可視化し、船体とともに移動するビデオカメラで撮影した画像が写真-3 である (作業流体は水道水による均一流体、水深 7 cm, 喫水 2 cm, 推進速度は 6.8 cm/s, 画像は明暗を反転処理した)。これを見ると、流れ場は back-step 流れを上下入れ替えたものと類似の構造になっている。船底に沿った流れは後部で剝離し、淀み域にはスパン方向に軸を持つ渦 (A) と側面から剝離する傾斜した軸を持つ渦 (B) が形成される。流れは (C) のあたりで再付着するが、淀み域に生成された渦は後流乱流 (D) を形成して斜め右下向きに放出されることがわかる。この結果と前述の実験結果を併せて考えると、本実験において船体後方に観測された激しい成層破壊は、上層内に生じた渦や乱流が、V-wake の形で隆起した界面に衝突することで発生したものと考えられる。

表面航走波と界面航走波に類似点は多いが、自由表面 (気液界面) が船体によって直接破壊されるのに対して、二層界面は上層内の乱れによって間接的に破壊される点が両者において本質的に異なる点である。

4.4 上層塩分濃度変動特性

上層内に設置したセンサーで測定された Case-1 ~ Case-3 での塩分濃度変動が図-4 である。Case-1 では長周期の変動に重なって周期 9.8 s ほどの濃度変動波形が認められる。Case-3 では周期約 12 s の大きな変動が徐々に減少した後、倍程度の周期の変動が卓越してくる。これは後流乱流に含まれる高周波成分のエネルギーが粘性減衰と密度効果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ためと考えられる。

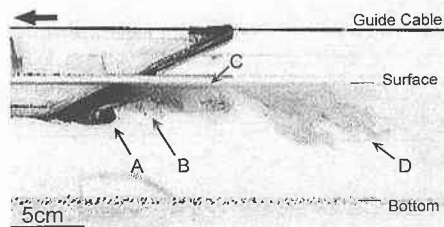


写真-3 後流の乱れ構造

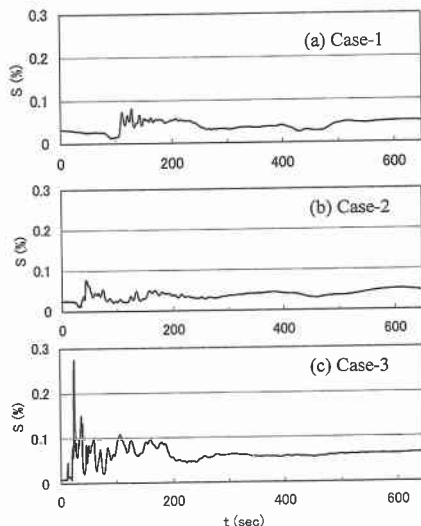


図-4 上層塩分濃度変動

5. 河川流による塩分の移流拡散

前述の通り、実験では巻上げられた塩分が密度流的に広がり中間密度層を形成することが観測された。しかし実河川においては、河川剪断流による乱流拡散・分散のため、成層破壊後の塩分の挙動は本実験の結果と異なる可能性がある。そこで、成層破壊後における上層内の塩分拡散を考察する。なおここでは、拡散効果に対して密度流効果や成層破壊領域外での塩水の連行を無視する。河川上層の鉛直平均流速を定数 U_{riv} とし、その方向を x 方向とする。静止座標系に対して船が一定速度 (U , V) で進行する場合、成層破壊領域も船と共に移動すると考えられ、速度 (U , V) で移動する source 項 $q(x-Ut, y-Vt)$ を持つ水平 2 次元移流拡散方程式は次式となる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_{riv} \frac{\partial c}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + q(x-Ut, y-Vt) \quad \cdots \cdots (2)$$

これに適当な変数変換を行えば、次式となる。

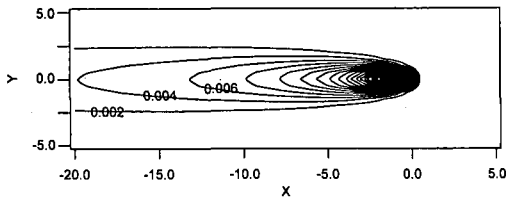


図-5 点源からの移流拡散

$$\left(\frac{\partial}{\partial \tau} - \Delta\right)c = Q(\xi - u\tau, \eta - v\tau) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\tau = t/T_0$ 、 $\xi = (x - U_{riv}t)/(K_x T_0)^{1/2}$ 、 $\eta = y/(K_y T_0)^{1/2}$ 、 $u = (U - U_{riv})/(K_x/T_0)^{1/2}$ 、 $v = V/(K_y/T_0)^{1/2}$ 、 $Q = T_0 q$ であり、 T_0 は時間尺度、 Δ は ξ と η による 2 次元ラプラシアンである。自由空間 Green 関数を用いて、特に x 方向に進行する点源 $Q(\xi - u\tau, \eta - v\tau) = \delta(\xi - u\tau)\delta(\eta)$ に対する解を求めた。 $u=10$ の場合について、無限に時間が経過した後の定常解が図-5 である。このように、船に対する相対速度が大きい場合は、幅が狭く流下方向に伸びた拡散域が形成される。

渇水期における石狩川の上層平均流速が 0.2 m/s 程度、縦分散係数 K_x が 1 m²/s 程度、横分散係数 K_y が 0.1 m²/s 程度とすれば、川幅中央で巻上げられた塩分が約 100 m 離れた川岸の農業取水口に到達するまでには 40 km ほどの流下距離が必要であり、仮に約 20 km の長さの塩水楔先端付近で巻上げられた塩分であっても川岸に到達する前に河口から排出される計算になるが、実河川では河道形状等の二次的な条件が拡散に複雑な影響を与えるであろう。また、 $F < 1$ の場合に造波される 3 次元 lee wave は川幅方向に波峰が広がっているの、これが川岸付近で碎波すれば局所的な混合を生ずる可能性がある。

6. おわりに

本研究の結論は以下の通りである。

- (1) 物体後流による二層流体の成層破壊を支配する

主な無次元量は F 、 H 、 Re であり、 $F < 1$ の場合、成層破壊は認められないが船体後方に 3 次元 lee wave が生ずる。一方 $F > 1$ の場合、船体後方には界面隆起を伴う V-wake が形成され、船尾から剝離した渦群や乱流がそれに衝突することで激しい成層破壊が生ずる。

- (2) 無次元喫水 H が大きいと成層破壊は顕著になるが、 H/F があまり大きくなければ船体は直接界面を破壊せず、これは船体による自由表面の破壊機構と本質的に異なる。

- (3) 成層破壊で巻き上げられた塩分は、実験室においては密度流効果によって中間密度層を形成するが、実河川では密度流効果に加えて上層流による移流拡散の影響を受けるため、船に対する相対流速に応じた拡散域を形成すると考えられる。

参 考 文 献

- 吉田静男・藤井浩之 (1980): 感潮河口流の密度構造, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 419-423.
- Baines, P. G. (1995): Topographic Effects in Stratified Flows, Cambridge Univ. Press, 482 p.
- Hanazaki, H. (1994): On the three-dimensional internal waves excited by topography in the flow of a stratified fluid, J. Fluid Mech., Vol. 263, pp. 293-318.
- Lee, S. J. and R. H. J. Grimshaw (1990): Upstream-advancing waves generated by three-dimensional moving disturbances, Phys. of Fluids, A2(2), pp. 194-201.
- Long, R. R. (1954): Some aspects of the flow of stratified fluids II. Experiments with a two-fluid system, Tellus, Vol. 6(2), pp. 97-115.
- Ma, H. and M. P. Tulin (1993): Experimental study of ship internal waves — The supersonic case, J. Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 115, pp. 16-22.
- Miles, J. W. (1968): Lee waves in a stratified flow. Part 2. Semi-circular obstacle, J. Fluid Mech., Vol. 33, part 4, pp. 803-814.
- Miloh, T., M. P. Tulin and G. Zilman (1993): Dead-water effects of ship moving in stratified seas, J. Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 115, pp. 105-110.
- Nakano, W. and I. Yakuwa (1984): Interfacial gravity waves in a salt wedge estuary, Coastal Engineering in Japan, Vol. 27, pp. 21-31.