

II-313 成層流中の円柱周辺に生じる密度界面の挙動特性

東北工業大学 正員○相原 昭洋
東北工業大学 正員 阿部 至雄

1. はじめに

成層密度流中に設置した円柱周辺の密度界面上には馬蹄型渦が発生し、それが密度界面を破壊して密度混合を引き起こしたり、さらには、界面波を誘起させている¹⁾。本研究では、密度界面の破壊機構を定性的に把握するために、密度界面破壊の主因となる馬蹄型渦に着目した可視化実験を実施し、その渦の構造と役割について考察した。なお、点計測に基づく流速、濃度及び界面の変動数特性についても考察を行った。

2. 実験条件および実験方法

実験には長さ10m、幅0.4m、高さ0.3mの水路を用い、水路中央部に直径 $D=5.0\text{cm}$ の円柱を設置し、密度差 $\Delta\rho=0.02\text{gr/cm}^3$ 、上層水深10cm、下層水深10.5cmとし、上層流動、下層静止の実験を行った。表-1に実験条件を示した。流れの可視化は、円柱前面よりウレシ水溶液を投入し、水面付近、上層水深の中間、密度界面上、密度界面下の横断面、及び、円柱中心を通る縦断面について、各々、水路側方及び水路上方からリット光を照射して実施し、流況を35ミリカメラ、VTRに収録した。なお、界面波は内部波高計で捕捉し、流速の測定にはサマ式微流速計を用い、濃度検出には導伝率計を使用した。

3. 実験結果および考察

(1) 馬蹄型渦とその役割

写真-1に密度界面上の流況を示した。写真中に示した遷移域、渦列域は水面付近のカマ渦に対する領域区分である²⁾。写真より、馬蹄型渦が Ω 型に閉じる馬蹄型渦終端部で、上層のカマ渦と界面上の馬蹄型渦との相互作用によって誘起される上昇流の発生が観察される。この上昇流はカマ渦が遷移域に存在する間は、弱い上昇流として現れる。しかし、カマ渦が遷移域より放出されるとき、馬蹄型渦終端部の脚が互いに接触する際に生じる流れとカマ渦自体の自己誘導とによって強い上昇流となる。この様に、馬蹄型渦終端部では周期的に上昇流の強さが変動するため、圧力に変動が生じ界面波が励起される。密度界面下1cmでは写真-2に示す様に、馬蹄型渦終端部はほぼ定常的に閉じた形状になるが、この部分からも上昇する流れが観察される。この上昇流によって下層の比較的濃度の高い塩水が界面上へ輸送されている。また、馬蹄型渦内には、終端部付近から円柱方向に向かう流れが生じている様子が分かる。

写真-3に、円柱の中心線上に沿って円柱後流の縦断面を可視化して示した。円柱背後の遷移

表-1 実験条件 (U: 上層, 下層の相対速度差)

CASE	流 量 cm^3/sec	内部フルード 数 F_{ri}	ケリガン 数 Θ	レイノルズ 数 $Re=UD/\nu$
1	392	0.069	0.771	456
2	607	0.107	0.500	698
3	824	0.145	0.365	978
4	988	0.174	0.308	1133
5	1170	0.207	0.259	1351

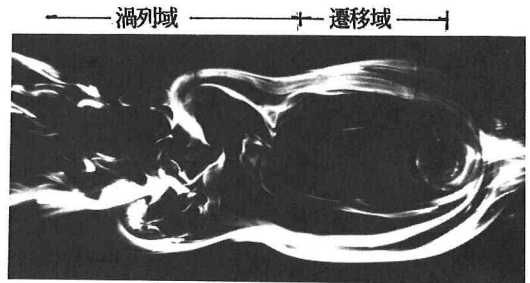


写真-1 密度界面上の流況 (CASE-5 $Y/h_1=0$)

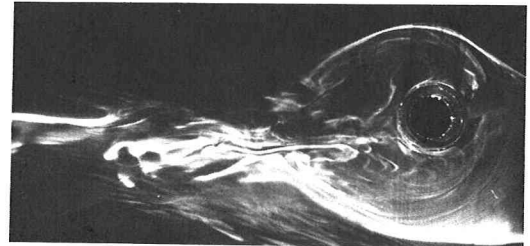


写真-2 密度界面下の流況 (CASE-5 $Y/h_1=-0.1$)

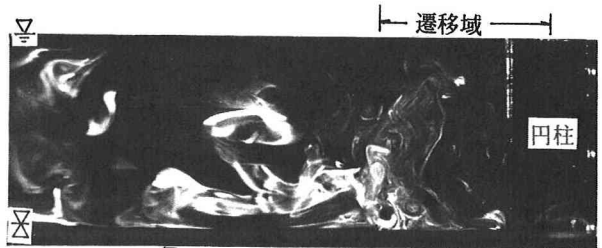


写真-3 円柱背後の流況 (CASE-5)

域に相当する領域で、カマツ渦により界面の塩水が巻き上げられ、密度混合が生じている様子が見られる。また、馬蹄型渦の終端部付近では、上昇流による下層塩水の浮上や界面波の発生が観察された。界面上に発生する馬蹄型渦、カマツ渦及び上昇流は互いに影響し合っているが、円柱周辺の界面破壊は主に馬蹄型渦によってなされる。破壊された塩水は馬蹄型渦内に取り込まれ、その一部は上昇流によって水面付近まで輸送され拡散希釈する。また、円柱背後の遷移域内の密度混合は、カマツ渦によって促進されている。

次に、図-1に馬蹄型渦の形状を示した。図より、円柱前面では、馬蹄型渦の高さ H 、馬蹄型渦の発生点までの距離 Lx_1 は共に Re 数に無関係で、ほぼ一定の値 $H/D=0.3$ 、 $Lx_1/D=1.1$ である事が分かる。また、円柱背後の馬蹄型渦の形状 Lx 、 Lw は Re 数が増加すると大きくなる傾向を示すが、平均的には、 $Lx/D \approx 3 \sim 4$ 、 $Lw/D \approx 3$ である。なお、馬蹄型の渦の高さは界面上+1.5cm程度であった。

(2) 流速、濃度および界面の変動特性

馬蹄型渦終端部 ($X/h_1=1.5$) での流速変動スペクトル Su と濃度変動

スペクトル $S\rho$ の一例を図-2に示した。図より、水面付近 ($Y/h_1=0.95$) での卓越周波数 0.12Hzはカマツ渦の発生周波数に相当するものであり、上層水深の中間付近 ($Y/h_1=0.45$) での0.25Hzは上昇流によるものである。上層流れの流速変動場は、カマツ渦、上昇流によって支配されている事が分かる。これらの流速変動場の特性は、界面近傍 ($Y/h_1=0.1$ 、 $Y/h_1=-0.04$) でも認められ上述の周波数帯でスペクトルエネルギーの励起が見られる。また、流速変動 ($Y/h_1=-0.04$) と同時計測された濃度変動スペクトルには、上昇流に参与する卓越周波数0.25Hzのスペクトルピークが存在し、さらに、図-3に示した濃度変動スペクトルと流速変動スペクトルの相関 $C(f)$ は、0.1Hz~0.16Hzと0.25Hz~0.3Hz付近で高く、流速と濃度との相関が高い事が知れる。図-4は界面変動のスペクトルの一例である。界面波は、馬蹄型渦の終端部 ($X/h_1=1.5$) 付近で発生するが、それが下流 ($X/h_1=+5.0$) に伝播する間にスペクトルエネルギーは10~1程度減衰している。なお、0.18~0.28Hzの周波数帯で-5乗則に従うエネルギー減衰が見受けられる。また、その卓越周波数は流程 $X/h_1=+1.5$ 、 $+5.0$ で共に0.18Hzであり、流速変動や濃度変動の卓越周波数の中間に存在する。

4. あとがき

成層密度場に置かれた円柱周辺の可視化と計測を実施した。密度界面近傍では、カマツ渦と密度界面に発生する馬蹄型渦が共存し複雑な流況を呈するが、

密度界面の破壊は馬蹄型渦によってなされ、密度混合はカマツ渦により促進される。また、上昇流は密度混合と界面波の発生に深く関与している事が分かった。最後に、本研究を遂行するにあたり、当時本学学生であった、今野正太郎君、佐々木一真君、小林茂則君の協力を得た、ここに記し謝意を表します。

《参考文献》 1) 相原,阿部:成層密度場に置かれた円柱周辺の可視化とその考察,東北支部,平成元年度。

2) 流れの可視化学会編:新版 流れの可視化ハンドブック,朝倉書店

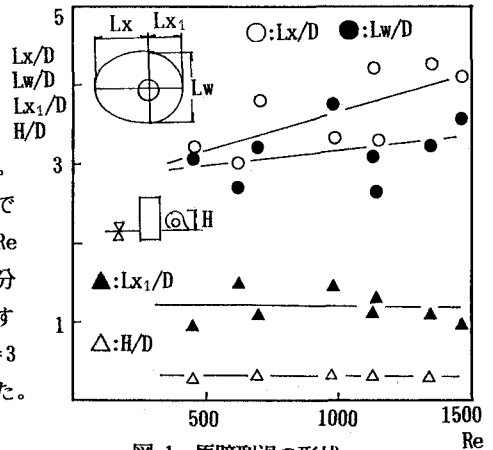


図-1 馬蹄型渦の形状

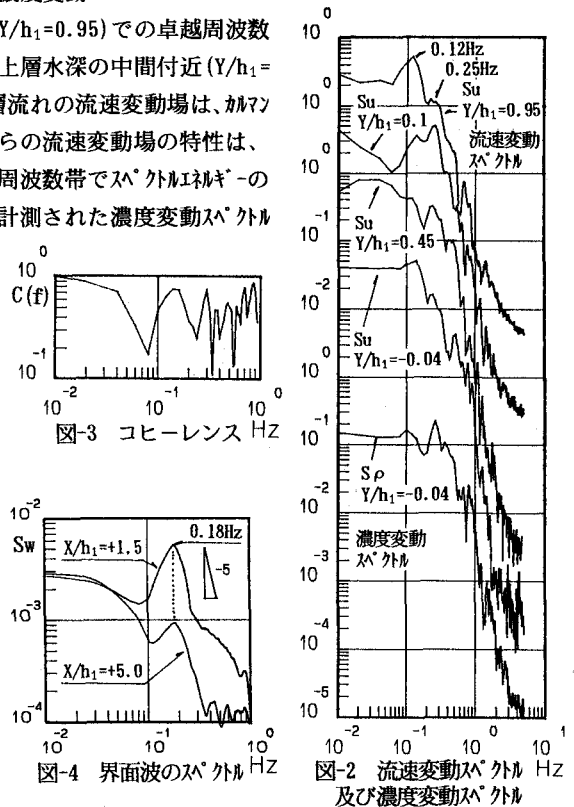


図-2 流速変動スペクトル Hz 及び濃度変動スペクトル

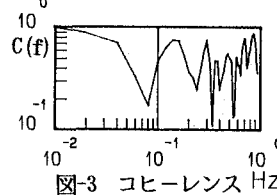


図-3 コヒーレンス Hz

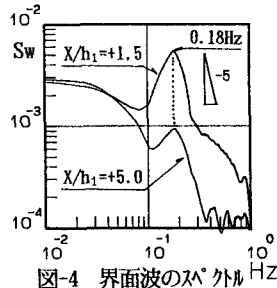


図-4 界面波のスペクトル Hz