3 非定常交換流の界面現象

北大工大学院 米光 昇[○]
北大工 吉田 静男
豊田自動車(株) 安井 孝成

Interfacial Phenomena in an Unsteady Exchange Flow

Noboru YONEMITSU*, Shizuo YOSHIDA*, Takanari YASUI**

Using a flow visualization technique and LDV method, interfacial phenomena of the exchange flow in a rectangular tube tilting from the horizontal have been investigated. Thorpe's spiral vortices were observed for the two layer flow having comparatively large density difference. However, to occur in a steady exchange flow was hard to observe. Through the viscous linear stability theory, it was clarified that the reason why the latter waves had never been observed was based on their extremely small growth rates.

1. 序文

重い流体の上に軽い流体が流れる時、その境界面には様々が原因により複雑な波動が発生する。その安定性の研究は古くから数多く行なわれてきた。その実験的研究の中でも傾斜管を用いた非定常 exchange flow の実験はよく知られている。この実験は、可混合液として淡水と塩水、非混合液として淡水とパラフィンを用いて行なわれており、その成層流界面には多くの場合、規則正しい集中渦列が見出された。Thorpe¹⁾はその原因を Kelvin-Helmholtz 不安定に求めたが、理論解析の結果は、非粘性ながら実験を支持した。しかし、近年定常二層流においては、密度界面直上、直下にも集中渦の発生することが明らかにされている。その渦発生時の界面の変形(波動)と流れの様子は Fig.1 に示した様なものとなり、ている。なお図中の SVA, SVB, SVC は以下の吉田ら²⁾の分類に従っている。

Fig.1 Three typical vortices in a shear flow.

- SVA ; Spiral Vortex above interface (界面より上に生ずるスパイラル渦)
SVB ; Spiral Vortex beneath interface (界面より下に生ずるスパイラル渦)
SVC ; Spiral Vortex the center of which coincides with interface (界面に中心を持つスパイラル渦)

* Faculty of engineering, Hokkaido University, North 13 West 8, Kitaku 060 Japan

** Toyota Motor Corporation

Thorpeの見出した渦はこれらの種のうちSVCに相当するものと見られるが、SVA, SVBの発生については一切触れていない。本研究では非定常exchange flowにおける上記の種の渦の発生機構、発生条件を調べる事を目的としている。この目的のため、まず可視化法及びLEDVを用いて瞬間速度プロファイルの時間変化を追跡し、これを粘性を考慮した線形安定性理論³⁾にあてはめてSVA, SVBの発生の可能性を検討する。

2. 実験装置及び方法

2-1. 実験水路

実験水路はFig. 2(a)に示す様に全長200cm、流路幅5cm、水渠10cmのアクリル製閉水路で、鋼材で作られており図中の軸を中心として自由に傾ける事ができようになっている。

Fig. 2 Schematic drawing of test channel and accessories.

本実験では二層流を形成するのに、淡水と相対密度 $\Delta\rho = 1.0027, 1.033, 1.110, 1.135$ の4種類の塩水を使用し、また実験の際の傾角は、試行実験を行なった結果 5° に統一した。二層を成層させるに際して、密度の選択層厚をできる限り小さくし明瞭な界面を得る為、Fig. 2(b)の様に、まず水路を垂直に立てておき淡水5Lを注入した後、細いチューブ管を使って塩水を静かに入れ成層させる。その後徐々に水路を水平にもどすと、非常に密度選択層厚をうすくする事ができる。

2-2. アルミ粉トレーサ法による流速分布の測定

塩水・淡水中にアルミ粉を混合する事により、瞬間速度プロファイルを求めた。カメラ及び光源の水路に対する位置関係はFig. 4に示す通りである。なお図中、光源を2つ用いているのは光量不足を補うためである。カメラにはモータードライブが装置されており0.8sec/12のスピードでワインドアップされる。シャッタースピード及び絞りは $1/4 \text{ sec. F-2}$ で

Fig. 3 Visualization of exchange flow using tracer method.

あり。フィルムはASA 400 を8倍増感して使用している。

2-3. 色素法(ウラニン)を用いた界面法の観測

ウラニンは水に溶けると黄緑色の蛍光を発する染料である。本実験では下層塩水中にウラニンをあらかじめ混入しておき、水路上方よりストロボスコープで照明する事により界面形状の記録を行なった。照明を水路上方より行なうのは界面を強調する為であり、更にウラニンは短い波長の光に対して強く蛍光を発するのでストロボスコープにはブルーのフィルターが付けてある。なおストロボスコープの発光間隔は4~8 Hz で実験を行なった。

2-4. LDV(デュアルビーム法)による最大流速の測定

アルミ粉トレーサー法による流速

測定では、瞬間的な速度プロファイルを得ることが出来るが、測定の時間間隔はシャッタースピードとモータードライブのタイミングで決定され、離散的にしかな求める事ができない。そこで加速状況をより詳しく知るためにレーザー流速計を用いた。その光学系はFig. 4(a)に示した通りであり、これにより得られた信号はFig. 4(b)の様な処理系を通った後に、記録紙に記録される。なお流速値の測定は淡水層の中心でかつ水路の中央部となる様にセッティングされている。また塩水と淡水の屈折率が異なるために、集中荷が発生し混合が起こると光軸がずれて、測定値は正しい値を示さない。

(a) LDV (Dual Beam System)

(b)

Fig. 4 LDV (Dual beam method) system.

3. 実験結果及び考察

3-1. 実験結果

アルミ粉トレーサー法により得られた写真がFig. 5に示されている。これらの写真から速度プロファイルを計算したものがFig. 6である。これを見ると、加速開始直後から加速の最終段階までシア層の厚さはほとんど変化しないことがわかる。換言すればある時刻での最大流速値が得られると、速度プロファイルの形状を予想することが可能であるということである。Fig. 7にはLDVを用いて計測した淡水層の最大流速の時間変化が示されている。ここで注意すべき点は、時間が経過するにつれて速度が増加し、それがある時点で突然に急激に減少しているが、これは塩水と淡水の混合によるデータの欠如であって、実際の速度が0に近付いたわけではないという事である。

Fig.5 Flow pattern using a tracer method.
w:wall of channel ,b:bed

Fig.7 Acceleration of maximum velocity
in an upper flow.

Fig.6 Time evolution of velocity profile.

Fig.8 はストロボスコープにより記録した界面形状の時間変化の様子である。これを見ると $\Delta P = 1.0027$ では SVC の発生は見られず写真の両端付近にボアが観察される。しかし中央部は加速しない、そこは何ら界面が形成しない。 $\Delta P = 1.033$ の場合には中央部での上下層加速が行われ、界面に SVC の発生を見る事ができるが、やはり SVA, SVB に付随する特有の界面変形は見られなかった。更に $\Delta P = 1.110, 1.135$ についても SVC の発生はあるが同様に SVA, SVB は発生しない。 $\Delta P = 1.033$ の場合に発生した SVC について振幅の変化をプロットしたものが Fig.9 である。ここで横軸には時間、縦軸には振幅の対数を取っているのがグラフの傾きが成長率

Fig.8 Time evolution of SVC.

を表わしており、その値は $\alpha_{ci} \approx 1.1$ である。

3-2. 考察

Fig.6, 7 から速度プロファイルの時間変化が求まるが、これらについて粘性を考慮した線形安定性理論を用いて安定性を吟味したものが Fig.1 に示されている。これは SVA の成長率の時間変化であり、その値は最大値で $\alpha_{ci} \approx 0.07$ という値を持つが、実験で得られた

Fig.9 The growth of SVC.

Fig.10 C_i of SVA.

SVC の成長率 $\alpha C_i \approx 1.1$ と比べると当然ながら非常に小さい。具体的に SVC の成長率について理論的考察を行な, ているが Fig. 9 と Fig. 10 も比較する事により以下の様な事が理解される。

領域(I)では, 流し場は少なくとも SVA 及び SVB については発生条件を満たしておらず, SVC についても同様と思われる, 界面変形は何ら起こらない。

領域(II)では, 流し場は SVA 及び SVB の発生条件を満たすこと 証明できるが, その成長率はこの時点ではきわめて小さく, 写真で確認できる様な界面変形は生じない。

領域(III)では, もちろん SVA, SVB の発生条件が満足される。しかし現実には SVC が急激に成長する。このときの SVC の成長率は SVA, SVB のそれと比べ非常に大きく, もとも SVA, SVB が存在したとしても観測されないものと思われる。これが非定常 exchange flow では, SVC しか観測されない理由と思われる。

領域(IV)では, 混合が生じ発達した乱流状態となっている。

4. 結論

非定常交換流では, ΔP を小さくするとバブが発生するのみで水路中央部が加速されず不安定波の発生が認められない。 ΔP を次第に大きくしてゆくやがて SVC が発生するが, その際 SVA, SVB は観測されない。その理由は SVC の成長率が SVA, SVB のそれと比べ非常に大きい為である。

なお本研究は一部, 科学研究費総合 A (代表者: 東京大学玉井 信行教授) の補助を受けて行なわれたものであることを記し, ここに感謝の意を表する。

< 写真撮影の条件 >

Fig. 5 (a) $\Delta P = 1.033$, $1/4$ sec F-2, ASA400, 8倍増感
(b) $\Delta P = 1.033$, $1/4$ sec F-2, ASA400, 8倍増感

Fig. 8 (a) $\Delta P = 1.033$, 流し切り 8Hz, F-2, ASA400, 8倍増感
(b) $\Delta P = 1.0027$, 流し切り 4Hz, F-2, ASA400, 8倍増感

< 参考文献 >

- 1) S. A. Thorpe: A method of producing a shear flow in a stratified fluid, J. Fluid Mech. (1968), vol 32, part 4, pp. 693-704 他 6 編
- 2) 吉田 静男・西田 修三・田城 徹雄: 定常二層流の三次元混合過程, 第 28 回海岸工学講演会論文集 (1981), pp. 525-529
- 3) 西田 修三・吉田 静男: 二層流の安定性解析, 第 29 回海岸工学講演会論文集 (1982), pp. 550-554