

(Ⅱ - 3) 密度界面における密度フラックスの直接測定について

芝浦工業大学 正員 菅 和利
学員 須賀龍太郎
学員 ○北岸 睦
近藤伸好
東京大学 正員 玉井信行

1. はじめに

密度の異なる2種類の流体が共存して流動する密度流においては、密度の不均質が存在することによる独特な現象が生ずる。密度界面における混合現象は、その現象を生じさせる原因によって性質が異なり、風などの力学的擾乱による乱れや、界面での速度差によるせん断力の作用、熱的擾乱が界面へ作用する場合などがある。

このような密度界面での混合現象の内、塩水くさび界面のようにせん断不安定に起因する場合を考え、密度界面に発達する渦層の変形とそれに伴う界面不安定に着目し、上層、下層の相互連行による密度フラックスについて、密度流発生装置を用いて実験を行い検討した。

2. 実験装置及び実験方法

実験では図-1に示すような半径0.5mの半円部分と1.5mの直線部分からなる楕円形のアクリル製の回転水槽を用いた。せん断流の起動は、この水槽の直線部分の片方に底面と水面にそれぞれベルトコンベアを設置し、粗度を付けたベルトを回転させて上下層の流れを生じさせた。測定は反対側の直線部分で行った。回転水槽においては二次流の問題も指摘されていることから、この問題を排除するために曲線部分に鉛直スリットを、測定部分の両端には、格子スリットと金網を設置することにより直線部分での一様なせん断流をつくった。さらに、起動力部分の影響を除去するため、ベルトコンベアの部分を二重底にし、さらに水平のスリットを設置して底面、水面のベルト相互の影響を除去した。実験では相対速度を得るために上下層の流向が逆向きの場合を中心に実施し、密度変動の測定には0.1mmの電極で手製した幅3mmの楕型超小型伝導度プローブを用いた。

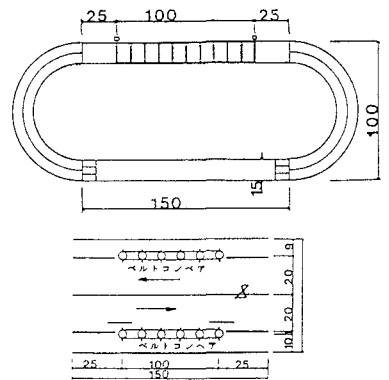


図-1 実験水槽

密度変動を連続的に測定するために密度プローブを5mm間隔で界面をはさんで6個設置し、密度界面の位置に合わせて移動させた。密度界面からのそれぞれの位置での密度フラックスを測定するために二成分ホットフィルムプローブと密度センサーを近接して設置し、これを鉛直方向に移動させて測定を行った。

3. 界面現象と界面の不安定性

上層と下層が逆方向に流動している密度界面での現象を、アルミ粉末を用いて可視化した。両層の流速差が小さくせん断力の小さい間は、界面は安定しており構造的な内部波は見られないが、速度差が大きくなると界面の渦層が構造的に揺らぎ始める。しかし、この段階においても砕波を伴う渦の運動はみられない。さらに流速差が大きくなると渦層の変形に伴う不安定が進行し、渦層内での渦度の集中が生じ、この渦がbellowに発達する。写真-1は渦度の集中の様子を示したものであり、白く光っている部分がこれに相当している。この渦度の集中にともなう渦層の変形は重力不安定を引き起こし、上下層の流質をこの渦の中に取り込み、やがて分離してこの渦の一部分が上下層に取り込まれる。この様子を示したのが写真-2である。また、渦度の集中に伴って渦層の部分的な波形勾配が急になり、このクレスト部分が上下層の乱れによって剥ぎとられ、それぞれの連行層に連行された。このように上下層がともに流動する場合には相互に連行が生じる。

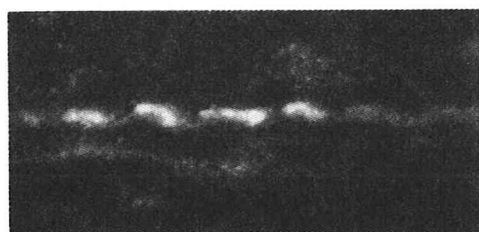


写真-1 渦度の集中

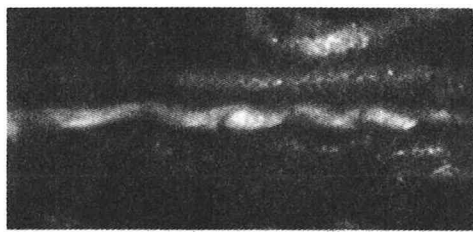
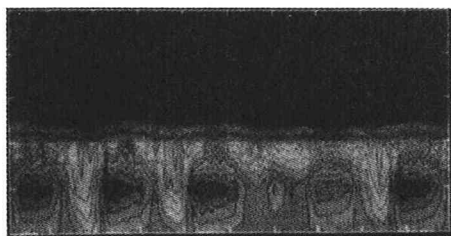


写真-2 渦層の変形

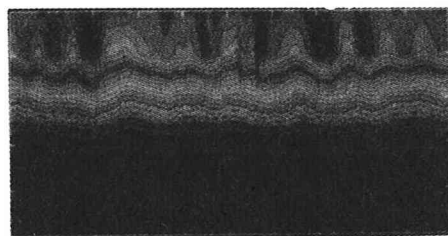
4. 密度変動

界面を挟んで設置した6個の密度プローブの各位置での時系列データを並べて等高線の形に描いたのが画像-1, 2である。この画像の縦軸はプローブの位置を示し、横軸は時間の経過を示しており、ここでは10秒間隔で描いた。これはある固定点に着目し、ここを通過する現象を密度変動を介して観察していることに相当する。画像-1は界面より下に着目して等密度線を描いたものである。中央で带状に振動して見えるのが界面で、この下に渦巻状に見えるのが下層より取り込まれた密度の高い部分であり、また、この高密度の流塊を取り囲むように白く垂れているのが中間層の部分である。画像-2は画像-1の上層に注目してコンタを描いたものであるが、上に突出して見えるのは高密度の部分を表し、中間層の一部が上層に輸送されていることを示している。しかし、中間層を飛び越えての大規模な輸送は観測されず、上層、下層は中間層を媒介にして相互に連行が生じていることが確かめられた。この中間層への連行に渦層の渦度の変形が主要な役割を果たしている。

密度フラックスの測定結果を象限別に整理したのが図-2である。横軸はその場所での平均密度からの偏差を表し、縦軸は鉛直速度成分を表している。第一象限は密度の大きな流質が上方に輸送されることを示し、第三象限は密度の小さな流質が下方に輸送されることをそれぞれ示している。図-2は界面近くの密度フラックスを示した図であるが、微少な密度の振動がみられ、その一部である密度の小さい流質が下方に輸送されているのがわかる。同様な図を界面からの距離を変化させて描くと、流質の輸送の様子がよく理解できる。このように中間層を媒介として上方、下方への流質の輸送が共に存在しており、この総和として連行量を評価する概念の妥当性を示している。



画像-1 下層での密度変動の等高線



画像-2 上層での密度変動の等高線

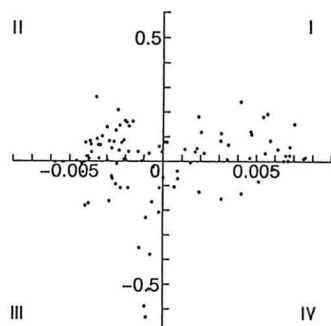


図-2 相互輸送される密度フラックス

5. 考 察

せん断流に起因する密度界面での混合現象を密度変動を通して実験的に検討した結果、つぎのことが考えられる。

- (1) 可視化やコンタ画像により、界面の変形、不安定現象への移行が見ることができる。
- (2) 界面においては中間層を媒介とした混合が支配的で、渦層の不安定が主要な役割を果たしている。
- (3) 界面での密度フラックスを測定した結果、上方、下方への輸送が相互に生じていることがわかる。しかし、中間層を越えた組織的な混合は見られなかった。