# 密度界面における相互連行現象の直接測定について

Direct measurments of the mutual-entrainment velocity at a density interface

菅　和利*・玉井　信行**・須賀龍太郎***

by Kazutoshi Kan , Nobuyuki Tamai and Ryutaro Suka

Through exeriments for horizontally homogeneous shearing flow, characteristics of mutual entrainments are observed. The velocity fluctuations near the density interface became relatively large. This shows the mutual entrainment toward the upper- and the lower layer- directions were caused simultaneously near the interface by shear instability.
With visualization technique it is observed that the mutual interactions between the vortex shear layer and the gravity wave play a dominant role on the interfacial mixing.
The characteristics of mutual entrainment are also analyzed considering the interraction between the dynamical property of vertex shear layer and graviry wave.
Keywords: density interface, mutual entrainment , shear flow

## １．はじめに

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を異にしている。水面に作用する風による乱れの発生は，貯水池などでの躍層の挙動に支配的な作用をし，塩水くさびの密度界面では，塩水と淡水の流れによるせん断力の界面への作用が混合の支配的な力である。また熱的外乱が界面へ作用する場合には，熱成層界面へのサーマルの作用が支配的となる。このような界面での混合をモデル化し，実験的に検討する場合には，実際現象を支配する乱れの発生が反映された装置であるべきである。せん断不安定に起因する塩水くさび面のような場合には，せん断流が再現できる装置での測定が適しており，上層，下層密度流発生装置が用いられてきた。しかし，従来の測定では連行層側の測定が主で，被連行層側での測定がほとんどなされていない。

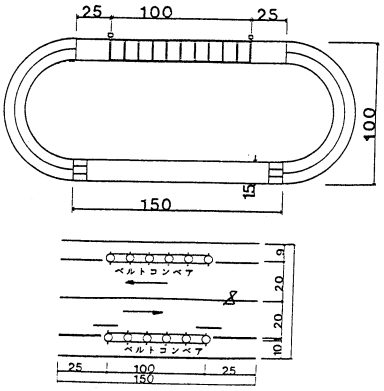
塩水遡上では，上下層の流向・流速の組み合わせが変化し，界面での混合は複雑であり，上層，下層への相互の連行を考えた測定が必要である。内部波の砕波，せん断層の不安定による混合では，混合は上層，下層の両層に向かって連行が生じると考えられる。この現象ををを明らかにするためには，界面を挟んだ上下層での測定が必要である。水路終端の影響がなく，水平方向に一様な現象の再現できる回転水槽が測定の便利さ，測定精度の向上のために適しているが，二次流の問題も指摘されている。二次流の発生は，内岸側での

*　正会員　芝浦工業大学助教授　工学部土木工学科　（〒108　東京都港区芝浦 3-9-14）
**　正会員　東京大学教授　工学部土木工学科　（〒113　東京都文京区本郷7-3-1）
***　学会員　芝浦工業大学大学院　建設工学専攻

乱れ強さを抑制すると共に，連行により形成された中間密度層を内岸側に押しやり，連行可能な面積の減少をきたすことが指摘されている。この二次流の影響を抑制するように工夫した回転水槽を作成し，せん断流下での連行現象を直接測定し，相互連行の特性を明らかにした。上・下層の流向・流速の組み合わせを変化させて，界面を挟んだ流体の輸送を直接測定し，可視化した界面現象と結び付けて考察することにより，起動力を考慮した現象を物理的に無理なく説明できるよう，相互連行の概念の妥当性を検討した。

## 2．実験装置及び方法

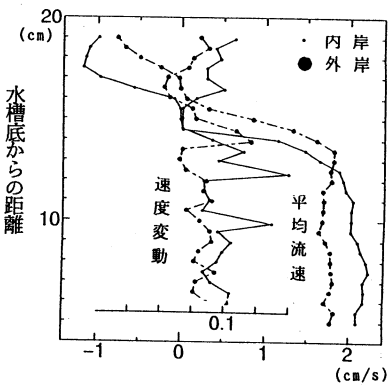
実験では図－1に示すような半径1.5mの半円部分と，1.5mの直線部分からなる楕円形のアクリル製の回転水槽を用いた。せん断流の起動は，この水槽の直線部分の片方に底面と水面にそれぞれベルトコンベヤーを設置し，粗度を付したベルトを回転させて上下層の流れを生じさせた。測定は反対側の直線部分で行った。測定部分には一様なせん断流が得られ，障害物が無いために水面から底面まで精度の良い測定が可能である。二次流の影響を排除するために，曲線部分に鉛直スリットを，また直線部分との接続部分には格子と金網を設置して，直線部分での一様なせん断流を作った。また起動力部分の影響を排除するために，底部のベルトコンベヤーの部分は二重底とし，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。



図－1　実験水槽

図－2は測定部分での流速と変動速度のRMSの鉛直分布を示したものである。内岸側で多少乱れが小さくなるがほぼ一様なせん断流が得られたと思われる。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，水平，鉛直の流速成分の測定には2成分の熱線流速計を用い，密度変動の測定には0.1mmの電極で手製した幅3mmの楔型超小型伝導度プローブを用いた。

密度変動を連続的に測定するために密度ﾌﾟﾛｰﾌﾞを5mm間隔で界面を挟んで6個設置し，密度界面の位置の変化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ﾌﾟﾛｰﾌﾞ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。



図－2　平均流速と速度変動の分布

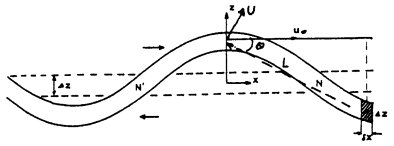
## 3．界面現象と界面の不安定性

アルミ粉末を用いた可視化により，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把握した。界面での安定性については多くの研究がなされているが，不安定の後の現象までも含めての研究は多くない。不安定な波数領域の決定は可能であるが，界面混合を支配する砕波に至るかどうかについては議論できない。ここではScorerの提案した渦層のモデルを用いて検討を行った。

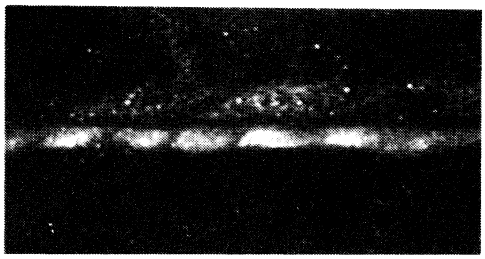
両層を逆方向に流動させ流速差が小さくせん断力の小さい間は，界面は安定で構造的な内部波は見られないが，流速差が大きくなると界面の渦層が構造的にゆらぎ始める。しかし，この段階においても砕波を伴う渦運動はみられない。さらに流速差が大きくなると渦層の変形に伴う不安定が進行し，渦層内での渦度の集中が生じ，この渦がbillowに発達する。写真－1は渦度の集中の様子を示したものであり，白く光っている

部分がこれに相当している。この渦度の集中に伴う渦層の変形は重力不安定を引き起こし，上下層の流体をこの渦魂の中に取り込み，やがて分離してこの渦魂の一部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取られ，それぞれの連行層に連行された。

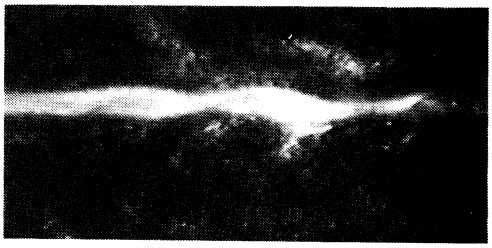
このように上下層が共に流動する場合には相互に連行が生じる。界面位置の時間変化はこの相互の連行の総和として決定される。この渦層内の渦度の集中と，それに伴う相互の連行はScorerの取扱いによって以下のように考える。




図－３　渦層の振動



写真－１　界面の可視化（渦度の集中）



写真－２　界面の可視化（渦層の変形）

流速差によって生じた渦層が図-３のように重力波$\xi = A \cos kx$で振動をする。この振動によって，渦度も波に沿って分布し，渦層内に新しい流れが生じる。クレストからｘだけ離れた地点の$\delta x \delta z$の部分の渦層内の循環$\eta \delta x \delta z$によって，クレストに生じる速度$u_o$は次のように考えられる。クレストとこの循環との距離をLとし，この線分Lに対して垂直な速度をｕとすると，循環の保存則より

$$u\,2\pi L = \eta \delta x \delta z \qquad (1)$$

となる。水平との角度を$\theta$とすると，水平成分は$u'_o = u \sin\theta$で，変位が小さい場合には$L = x$，$\sin\theta = A(1 - \cos kx)/x$と書けるので，クレストでの水平方向の速度$u'_o$は

$$u'_o = \frac{\eta \delta x \delta z \; A(1 - \cos kx)}{2\pi x \qquad x} \qquad (2)$$

で与えられる。新しい渦度の分布によるこの影響を$-\infty$から$+\infty$まで積分すれば，クレストでの新しい流速が得られる。

$$u_o = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\eta \delta x \delta z \; A(1 - \cos kx)}{2\pi x \qquad x} \, dx = \frac{1}{2} \eta A k \delta z \qquad (3)$$

となる。この流速が水平方向に$u_o \cos kx$で変化するとすると，この速度によって渦度も輸送され，渦度は図－３のノードＮに集中し，この増加の割合は$-\eta \delta z \, du/dx$である。さらに，渦層の変形によって受ける重力の作用による新しい渦度の発生は$\beta g \delta z \, d\xi/dx$であり，これは渦層の変形を抑制する方向に作用する。この作用と渦度の集中の作用との和が$\sin kx$の正のところで正だと渦度は図-３のＮの地点に集中し，N'では減少して，図-５に示す様に不安定となる。したがって不安定の条件は以下のように求められる。

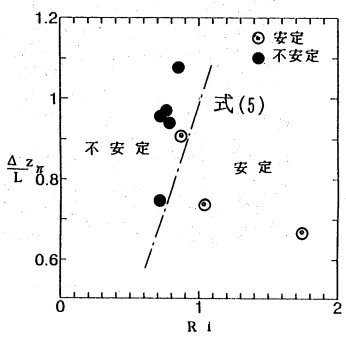
$$k > k_c = 2g\beta/\eta^2 \delta z \qquad (4)$$

ここに，$\beta$，$\eta$は$\triangle U=\eta\delta z$　，　$\triangle\rho=\beta\rho\delta z$　と定義される。
Richardson 数を$Ri=g\beta/\eta^2$と定義すると，不安定となる渦層の厚さ$\delta z$と波長Lとの比（波形勾配に近い）$\delta z/L$とRichardson 数との関係は次式で与えられる。

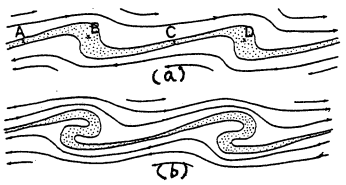
$$\pi\delta z/L > Ri \qquad (5)$$

可視化で得られた結果を図示したのが，図-4である。図中●印は写真－1の様な渦度の集中とその分離が生じている場合，◎印は波長が大きく安定な場合である。今回の実験では$Ri=0.75$の付近を境として，安定，不安定が分かれており，式(5)はほぼ領域を区分していると思われる。

渦層の変形による渦度の図-5（a）のB，Dの部分への集中は図－5（b）の様な重力的に不安定を作り，混合が生じる。このように渦層の不安定性の増大から，砕波へと至る過程をこのようにモデル化すると，混合は上下層の方向に相互に生じていると考えることができる。それぞれの層への混合を混合速度で表したのが相互連行速度である。図-6は下層の速度が相対的に大きな場合の，混合の進行に伴うバイサラ振動数の変化を示したものである。図中・印は上層との境界（Ⅰの界面）での密度勾配を，●印は下層との境界（Ⅱの界面）での密度勾配を，■印は渦層の平均の密度勾配を使用して計算を行ったものである。縦軸が振動数N，横軸は時間の経過を表している。界面Ⅰ，Ⅱでの変化は，この境界での混合に伴う密度分布の変化を示しており，混合がこの両境界において生じていることを示している。さらに，渦層でのバイサラ振動数の減少は，この層内での混合を示しており，渦層を媒介として上下方向の混合が生じていることを示唆している。




図－4渦層の安定性

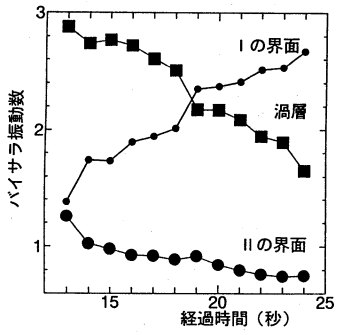



図－5　渦層の変形

## 4．流速変動

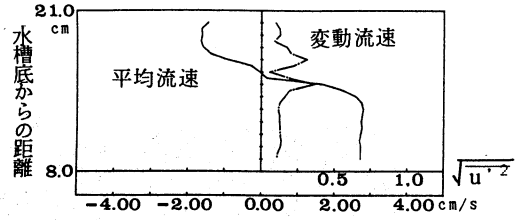
両層が流動している場合のせん断不安定によって生じる現象に，相互連行の概念を導入するが，界面の様子を流速変動の統計量から確かめた。図-7は平均流速，変動速度のＲＭＳを示したものであるが，界面を挟んで変動速度の強い部分が現れている。図-8は鉛直速度成分のＲＭＳを示したものであり，図-9はレイノルズ応力の分布を示したものである。レイノルズ応力のピークの出現する位置と変動速度のピークの出現する位置が一致しており，せん断力の強い部分の存在を示している。これらの位置では，せん断応力による不安定性が強くなっていることが予測される。

図-１０は界面より5mm下方の地点の速度変動スペクトルを示したものである。安定度の相対的に高い場合の図-１０(a)では0.2～0.4の低周波域のピークが卓越しており，これは図-6の中間層のバイサラ振動数にほぼ相当している重力波と考えられる。図-１０(b)は(a)の場合に較べて相対的に界面が不安定な場合である。

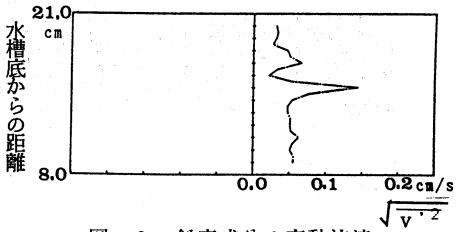



図－6　バイサラ振動数

渦度の集中に伴う不安定性の増加により，0.8～1.0Hzの振動数域に強いピークが現れており，これはbillowタイプの振動に相当している。

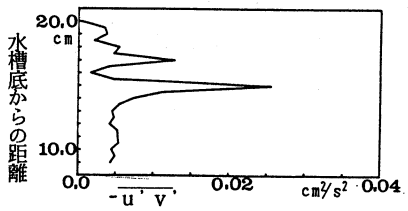



図－７　主流方向流速成分と変動速度




図－８　鉛直成分の変動流速

このように安定度の相対的に高い場合には重力波が卓越しており，安定度が低く渦層の変形が不安定になると少し高周波側のbillowの波数が卓越してくる。しかし，これら両者は共存しており，さらに混合が激しくなるとbillowは小さく砕かれて，より高周波成分の砕波波数が出現する。



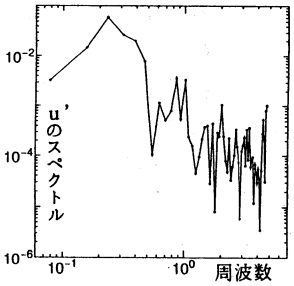

図－９　レイノルズ応力の分布

## ５．密度変動と密度ﾌﾗｯｸｽ

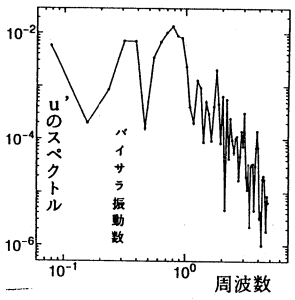
混合を密度変化の視点から測定するために，界面を挟んで5mm間隔で密度ﾌﾟﾛｰﾌﾞを設置し，時系列を測定した。界面での密度変動のスペクトルを示したのが図-１１で図-１０と同様にbillowの周波数にピークを有している。また砕波による混合の為に1～2Hzの成分を有する変動が見られる。

界面を挟んで設置した６個の密度ﾌﾟﾛｰﾌﾞ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いる。ある固定点に着目し，ここを通過する現象を密度を変動を介して観察していることに相当している。

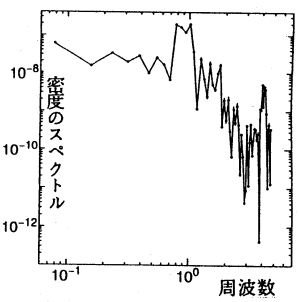
画像－１は界面より下に着目して等密度線を描いたものであり，帯状に振動して見えるのが界面で，この下に渦巻状に見えるのが周囲よりも密度の高い部分である。この高密度の流魂を取り囲む様に垂れているのが密度の低い部分である。相互連行によって中間層あるいは上層の流体が下層に運ばれている様子が理解される。画像－２は画像－１の上層に注目してコンタを描いたものであるが，上に延びた部分は高密度の部分を表し，中間層あるいは下層の高密度が上方に輸送されていることを示している。しかし，中間層を飛び越えての大規模な輸送は観測されず，下層，上層は中間層を媒介にして相互に連行が生じていることが確かめられた。この中間層への連行に渦層の渦度の変形が主要な役割を果たしている。




図－10(a)速度変動スペクトル

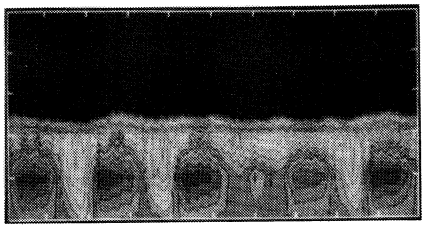



図－10(B) 速度変動スペクトル



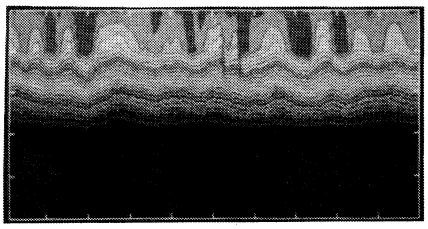

図－11 密度変動スペクトル

密度ﾌﾗｯｸｽの測定結果を象限別に整理したのが図－１２である。横軸はその場所での平均密度からの偏差を表し，縦軸は上向き下向きの鉛直速度成分を表している。第一象限は密度の大きな流体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体が下方に輸送されることを示している。



時間経過（秒）

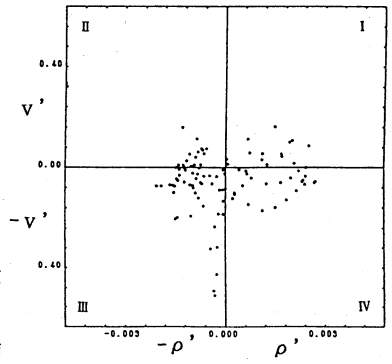
画像　1　下層での密度変動の等高線



経過時間

画像　2　上層での密度変動の等高線

図－１２は界面近くでの密度ﾌﾗｯｸｽを示した図であるが，同様な図を界面からの距離を変化させて描くと，流体の輸送の様子がよく理解される。このように中間層を媒介として上方，下方への流体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相互連行の概念の妥当性を示している。




図－１２　相互に輸送される密度ﾌｯﾗｸｽ

## ６．結論

せん断流のもとでの界面現象と，相互の連行の様子を把握するために循環水槽を用いた実験を行い，流体の輸送の様子を実験的に検討し，以下の結論が得られた。

1)循環水槽の曲率部分に鉛直なスリットを設置することにより，循環水槽の欠点であった二次流の影響を除去する事ができ，楕円水槽の直線部分にほぼ一様なせん断流を作ることができた。

2)渦層の変形に伴う渦度の集中を考えることによって，界面の変形，不安定現象への移行を説明することができる。可視化によって得られたbillowタイプの界面波の安定性はこの取扱いでの結果に一致していた。

3)界面には重力波とそれより周波数の僅かに大きいbillowが出現し，この両者は長時間にわたって存在し，界面での混合に支配的であった。

4)界面での密度ﾌﾗｯｸｽを測定し，上方，下方への輸送が相互に生じていることを確かめた。このことは2)の結論からも分かる。しかし，中間層を越えた組織的な混合は観察されなかった。

5)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ことを示した。

謝辞　実験，資料整理では芝浦工業大学４年生の北岸，近藤君には多大の協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

1)D.R.Scranton and W.R.Lindberg:Phys.Fluids, 26(5),pp.1198-1205,1983

2)西田修三・吉田静男：土木学会水理講演会論文集，第27回，pp.549-553,1983

3)吉田静男：土木学会論文報告集，第273号，1978

4)R.S. Scorer:Environmental Aerodynamics,Ellis Horwood Limited, Chap.6,1978

5)菅　和利・玉井信行：土木学会水理講演会論文集，第27回，pp.543-548,1983