

接近流中に侵入する二次元定常密度流の流動形態

東京電機大学大学院 町田大蔵

東京電機大学理工学部 有田正光 中井正則

1. はじめに

密度の異なる流体が接近流(対向流)中に侵入するとき、侵入流体の先端部の流動形態は密度楔、あるいは、密度カレントのいずれかになる。この問題について、少数の理論的、実験的研究がなされ、密度流先端部の流動形態が接近流速分布に依存することが報告されている¹⁾⁻²⁾。具体的に言えば、密度流侵入部の接近流の運動量が一樣流速分布の場合に比べて欠損している場合には密度楔となり、過剰な場合には密度カレントとなる(図-1参照、表現の簡潔化のために、先の条件を以下では単に「接近流速(分布)が欠損している(あるいは過剰である)」と表現する)。

しかしながら、著者らの最近の実験において、「密度流侵入部の接近流速が過剰であっても密度楔が出現しうる」という上記の知見を否定する結果が得られた。本研究では原点に立ち戻り、接近流(対向流)中に侵入する二次元定常密度流の流動形態の出現条件と流動メカニズムについて実験的に考察した。

2. 実験

実験は実験Ⅰ、Ⅱに大きく分かれる。実験Ⅰでは、長さ6.7m×幅5cm×高さ35cmの二次元風洞水路を用いた。同水路の上流側より流速5~8cm/s程度の接近流(対向流：水道水)を発生させた。また、水路下流側の表層に設置された放出口より温水を上流に向けて放出し、表層侵入型密度流を作り出した。送風機は水路両端の上部に取り付け可能であり、これによって表層付近の接近流速分布が制御される。一方、実験Ⅱでは長さ2m×幅5cm×高さ19cmの二次元水路を用い、水槽上部に設置したベルトコンベアを回転させることにより接近流速分布を制御した。なお、接近流の発生方法、温水の放出方法は実験Ⅰとほぼ同様である。

実験は定常状態(密度流先端部が移動しない状態)で実施し、そのときの温水密度流の流動状況を可視化するとともに、密度流の侵入長、厚さなどを測定した。

3. 実験結果と考察

以下では、著者らの既往の実験結果(ベルトコンベアを使用した実験)²⁾を実験Ⅲとして引用し、実験Ⅰ~Ⅲの結果を総合的に比較・考察する。なお、実験Ⅰのケースに限り、それぞれのケースを送風条件によってTypeA(風向：下流→上流)、TypeB(無風)、TypeC(風向：上流→下流)の3タイプに分類した(表層付近の接近流速はTypeA：欠損、TypeB：やや欠損、TypeC：過剰である)。

図-2は接近流の(表層における)無次元速度勾配 α ²⁾に対して流動形態を分類したもの(実験Ⅰ、Ⅲ)である。なお、 α は $\alpha > 0$ が表層付近の接近流速が欠損していることを、 $\alpha < 0$ が過剰であることを示し、縦軸の L/Ha は密度流の無次元侵入長(L ：侵入長、 Ha ：全水深)を表している。同図より、実験Ⅲの結果は $\alpha > 0$ で密度楔、 $\alpha < 0$ で密度カレントになり、密度流先端部の流動形態は接近流速分布によって決定されているといえる。ところが、実験Ⅰの結果では α の正負にかかわらず、すべてのケースが密度楔であり、流動形態は α の正負に依存しない。つまり、同図は1.で述べた既往の研究結果¹⁾⁻²⁾を否定している。

図-3に L/Ha と $1/Fo^2$ の関係(実験Ⅰ~Ⅲ)を示す(同図中には、密度楔と密度カレントの両方が混在している)。ここに、 Fo は $Fo = Ua / (g' Ha)^{1/2}$ で定義される密度フルード数であり、 Ua は接近流の断面平均流速、 $g' = (\Delta \rho / \rho_a)g$ 、 $\Delta \rho = \rho_a - \rho_o$ 、 ρ_o 、 ρ_a はそれぞれ放出温水と周囲水の密度、 g は重力加速度である。また、図中の記号A、B、CはそれぞれTypeA、B、C(実験Ⅰ)を表している。同図のように、実験Ⅲの(ほぼすべての)ケース(点線で囲まれた領域：領域a)における L/Ha は実験Ⅰ、Ⅱのケース(陰影を付けた領域：領域b、ただし、実験Ⅲのケースも一部含まれている)のそれより大幅に小さく、しかも、 Fo に依存しない。これは、領域a、bのケース群の間には流動メカニズムに何らかの本質的な違いが存在することを意味している。実際に、

key words : Density wedge, Density current, Approach velocity profile, Intrusion length

〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂 TEL 0492-96-2911 Fax 0492-96-6501

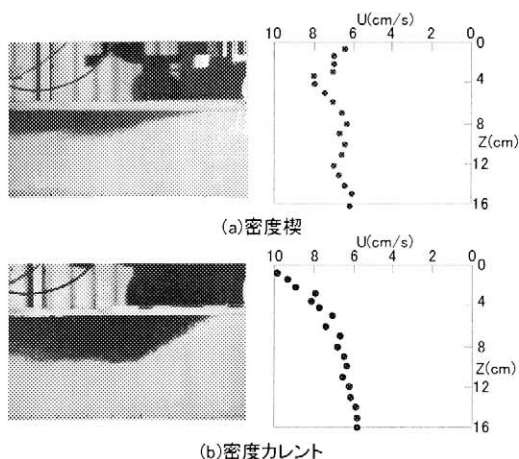


図-1 密度楔と密度カレント

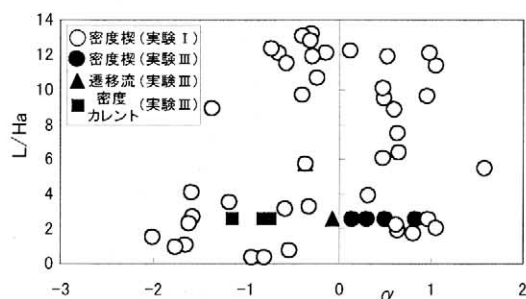


図-2 α と流動形態の関係(実験 I, III)

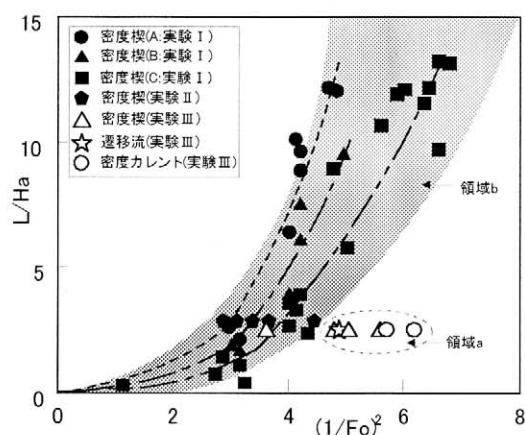


図-3 L/Ha と Fo の関係(実験 I ~ III)

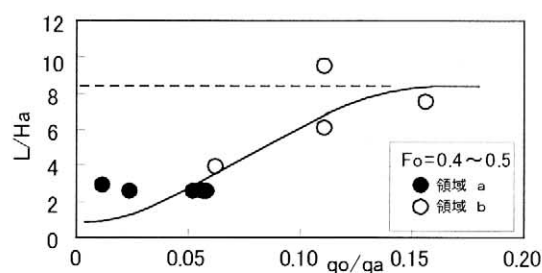


図-4 L/Ha と qo/qa の関係(領域a, b)

領域a, bのケースを図-2で確認すると、領域aのケース(実験III)は流動形態が α の正負によって区分されているのに対し、領域bのケース(実験I)は流動形態が α の正負にかかわらず密度楔となっている。

図-4に領域a, bの密度フルード数 Fo がほぼ等しいケース($Fo=0.4\sim0.5$)を選び、 L/Ha と無次元放出温水流量 qo/qa (qo : 放出温水流量, qa : 接近流の流量)との関係を示す(ただし、領域aのケース(実験III)がすべて無風状態に対するものであるため、領域bの実験IのケースはTypeBに限定している)。同図より、 qo/qa の増大に伴って L/Ha が大きくなり、 $qo/qa \geq 0.10$ では $L/Ha=8\sim9$ 程度の一定値に漸近することがわかる。ここで重要なことは、 L/Ha が領域aのケースでは小さく、領域bのケースでは最大値(L/Ha) m に達することである。

図-2~4の結果より、領域a, bのケースの流動メカニズムの違いについて考える。領域a(qo/qa が小、かつ、 $L/Ha < (L/Ha)m$)では前述のように、 α の正負によって流動形態が密度楔と密度カレントに分かれている(図-2参照)。これらの流動形態は密度流の先端部に対するものであり、侵入長 L/Ha が小さいために先端部付近の局所的な力のバランスによって決まっている。密度楔は、接近流速分布が(密度流の侵入部分で)欠損しているため、接近流が密度流先端部に与える力は小さく、密度流の侵入力と密度境界面(先端部付近)に作用する界面せん断力とが釣り合う結果として出現する。また、密度カレントは、接近流速分布が過剰なため、接近流の持つ大きな慣性力が密度流先端部に形状抵抗として作用し、これと密度流の侵入力とが釣り合う結果として出現する。

一方、領域bでは qo/qa が大きく、 L/Ha が Fo によって決まる最大値(L/Ha) m に達しているため、密度境界面に作用する総界面せん断力が大きな値となる。このような場合には、密度流の侵入力がこの総界面せん断力と釣り合う以外に、定常状態(密度流先端部が移動しない状態)を保つことが出来なくなり、その結果、流動形態は必然的に密度楔となる。これが、領域bのケースにおいて、「接近流速分布にかかわらず、流動形態が密度楔となる(図-2で $\alpha < 0$ の領域に密度楔が出現する)」理由と考えられる。なお、この場合には、流動形態は先端部のみでなく、密度流全体が密度楔となっている。

参考文献

- 1) G.H. Jirka and M. Arita: J. Fluid Mech., Vol.177, pp.187-206, 1987.
- 2) 有田正光・中井正則: 応用力学論文集(土木学会), Vol.1, pp665~pp672, 1998.