230 二重拡散型密度界面を突き抜ける対流パターン

NKK 高雄 信吾 ○, 園田 克樹

Convection patterns across a Double-Diffusive Interface due to a uniform lateral heat flux.

Shingo TAKAO* and Katsuki SONODA*

When a stratified fluid with a sharp double-diffusive interface is heated laterally, intrusive convection starts to form from the diffusive interface along the heated wall. This paper describes experimental investigation of the particular convection patterns by flow visualization. Two types of unique convection patterns were observed: one is streaklike convection pattern and the other is a wave convection pattern. Studies of the pictures indicated that intrusive convection fluid are supplied from some fixed burst points naturally formed at the diffusive interface along the heated wall.

1. はじめに

塩水等を用いて密度成層を容器内に形成し、下層の温度を上層より高くすると、密度界面は二重拡散型界面を形成する^{(1), (2)}。この二重拡散型界面における混合現象の研究がソーラポンドやLNGタンクにおける密度成層の混合現象などを解明するために進められている。著者らは、このような密度成層を側壁から一様加熱すると、加熱壁に沿って界面を突き抜ける対流が発生し、筋状あるいは波状パターンの対流が現れることを見いだした。これまでに、熱レベ数 $Ra [= g\beta_T \Delta T L^3 / (\nu D_T)]$ と濃度レベ数 $Ra_s [= g\beta_s \Delta S L^3 / (\nu D_s)]$ / レイズ数 $Le [= D_T / D_s]$ が突き抜け発生の因子となり、また、波状対流パターンの場合について突き抜けによる移動流量が Ra_s / Le をパラメータとして表せることを明らかにした^{(3), (4)}。ここで、 ν : 動粘性係数、 g : 重力の加速度、 β_s, β_T : 温度および濃度による体膨張係数、 $\Delta S, \Delta T$: 上下の濃度差および温度差、 D_s : 溶質拡散係数、 D_T : 温度拡散係数、 $L: [\nu D_T / \{g\beta_T (q/k)\}]^{1/4}$ で定義される代表長さ、 q : 側壁から流体への熱流束、 k : 熱伝導率である。

本研究では、突き抜け対流パターンおよび構造を可視化により定性的に検討し、対流パターンの遷移状況および下層流体が界面を突き抜ける様子を明らかにした。

2. 実験装置と実験方法

実験装置の概略を図1に示す。容器の内寸法は160mm x 130mm x 550mm、側壁の加熱面は白く塗装された厚さ2mmの銅板に0.1mmのテフロンをコーティングしたものである。銅板の外側に面状ヒータ(160x500mm)、さらに厚さ25mmの断熱材を張り付けている。

実験方法は次のとおりである。

* NKK Engineering Research Center, 1-1, Minamiwatarida-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki 210 Japan

二層形成：容器に水を36cm注入後、0.20 wt%の塩水を容器の底から注入して下層(14cm)を形成する。なお、注入する流体の初期温度は10℃以下とした。

加熱方法：二層形成後、ヒータに通電加熱する。ここでは、様々な対流パターンを観察するために、加熱方法として次のAとBの二ケースを設定した。

Case A 熱流束を0.04 [W/cm²]に設

定後、15分毎に0.10[W/cm²]増加させる。 Fig.1 Schematic diagram of test apparatus.

Case B 熱流束 q を一定に保持する。

可視化：下層に注入する塩水をあらかじめメチレンブルーで着色し、界面を突き抜ける流体を可視化する。加熱壁面の正面から突き抜け対流を撮影する。なお、温度計測用の熱電対を加熱面から約6 cm離し、画面に入らないよう容器内の端に設置した。

3. 実験結果と考察

Case Aの対流パターンの変化を図3-①～⑤に示す。なお、図中の+記号の間隔は1 cmであり、図中の黒い部分が着色された下層流体である。各図の説明を以下に述べる。

図3-①：加熱壁に沿ってわずかに界面が盛り上がったところにほぼ一定間隔で界面が破れたような箇所(バースト部)が生成する。筋状対流は、このバースト部の先端から下層の流体が連続して上昇することにより形成されている。このバースト部は定位置を保っている。図3-②：バースト部の界面の盛り上がり(凸部)が大きくなると共に、その先端から生じていた筋状対流が次第に短くなり、一時的に見えなくなる。図3-③：凸部がさらに大きくなり、その中に太い筋状対流が間欠的に現れる。それら筋状対流は左右に振れるようにして重なり、一部が分離して上昇する。図3-④：凸部の中の太い筋状対流が早い周期で現れるようになるとともに大きく振れ、左右の凸部と重なり、一部が離れて波状対流を形成する。図3-⑤：一定間隔で太い筋状対流が連続して現れるようになり、界面から離れたところで波状対流が形成される。

このように、階段状に熱流束を増加すると、上層の加熱面に形成される対流パターンは筋状から波状に遷移するが、途中で一時的に筋状の対流が消える。また、波状の対流パターンは太い筋状対流を伴っている。

CaseBの場合、設定熱流束の大きさにより、遷移パターンが異なる。熱流束が0.10[W/cm²]の場合、図3のような筋状パターンが現れ、70分の実験時間内では安定して継続した。熱流束を二倍の0.20[W/cm²]にすると、短時間で太い筋状の対流が現れ、対流のパターンは図4-①～③に示すように遷移する。各図の説明は次のとおりである。

図4-①、②：凸部が大きくなるとともに、筋状の対流が左右に移動して重なる。このとき短い波が形成されて筋状の対流に乗って上昇する。そして、再び分離後、移動して元の

位置に戻る．図4-③：界面から太い筋状の対流が定位置から連続して生成し，波状の対流パターンが形成されている．

このCase Bでは熱流束が一定で，上層加熱面の対流が定常的で安定しているために筋状対流はCase Aと比べて安定していると考えられる．筋状の対流は遷移途中で消えることなく波状パターンへ遷移する．また，この場合の波状パターンにおいても界面に一定間隔で生成するバースト部から下層流体が上昇し，太い筋状対流が形成されている．

熱流束をさらに二倍の $0.40[\text{W}/\text{cm}^2]$ にすると単純な筋状パターンは現れず，変化パターンが変わる．図4-④～⑥に変化する様子を示す．各図の説明は次のとおりである．

図4-④：側壁に沿って界面が大きく盛り上がる．図4-⑤：波状の対流パターンが連続して現れる．図4-⑥：一定間隔で界面にバースト部が現れ，そこから下層流体が供給されて太い筋状対流が形成される．さらに，波状パターンが上部で形成されている．

このように初期に単純な筋状パターンが形成されない場合においても，太い筋状対流を伴った波状パターンが形成されている．

① $t=29[\text{min.}]$, $Ra_s/Le=11.7$

② $t=33[\text{min.}]$, $Ra_s/Le=7.2$

③ $t=35[\text{min.}]$, $Ra_s/Le=6.9$

④ $t=40[\text{min.}]$, $Ra_s/Le=6.6$

⑤ $t=50[\text{min.}]$, $Ra_s/Le=4.6$

$t=58[\text{min.}]$, $Ra_s/Le=11.2$

Fig.2 Transition of intrusive convection pattern across the diffusive interface. ①～⑤, Case A.

Fig.3 Streaklike convection pattern:Case B, $q=0.10[\text{W}/\text{cm}^2]$.

① $t=27[\text{min.}]$, $Ras/Le=5.5$

② $t=31[\text{min.}]$, $Ras/Le=5.4$

③ $t=45[\text{min.}]$, $Ras/Le=5.1$

④ $t=1[\text{min.}]$

⑤ $t=6[\text{min.}]$, $Ras/Le=3.9$

⑥ $t=14[\text{min.}]$, $Ras/Le=3.5$

Fig.4 Transition of intrusive convection pattern across the diffusive interface.

①～③, Case B, $q=0.20[\text{W}/\text{cm}^2]$; ④～⑥, Case B, $q=0.40[\text{W}/\text{cm}^2]$.

4. おわりに

二重拡散型界面を形成する密度界面を側壁から一様加熱した場合を可視化することにより、加熱壁に沿って界面から突き抜ける対流パターンが筋状から波状の対流パターンへ遷移する状況が定性的に明らかになった。また、側壁に沿って一定間隔で界面に生成するバースト部から下層流体が上昇する(突き抜ける)ことによって筋状および波状のいずれのパターンも形成されていることが分かった。

参考文献

- (1)Turner, J.S., Int. J. Heat and Mass Transf., 8(1965), 759.
- (2)Takao, S., Narusawa, U., Int. J. Heat and Mass Transf., 23(1980), 1293.
- (3)高雄, 機講論, No. 95-1, III(1995.3), 69-70.
- (4)高雄, 第32回日本伝熱シンポジウム(1995.5), C314.