姫野修廣

目的別テーマ：高品位生産システムの確立

１５年度研究テーマ

15-6-18：多成分材料溶融時に形成される密度成層内での熱技術に関する研究

ABSTRACT

An experimental study is performed on free convection heat transfer in a stably stratified fluid between coaxial cylinders. The stratified layer is formed using a sucrose aqueous solution, and is heated from the outer cylinder at constant heat flux and cooled from the inner cylinder at constant temperature. The experimental results shows that the heat transfer in a stratified fluid is quite different from that in a non-stratified fluid. The effects of the stratification appears conspicuously in the lower part of the fluid: the formation of small cellular convection layers leads to marked deterioration of the local heat transfer coefficient in the lower part, whereas the local heat transfer coefficient increases in the downward for a non-stratified fluid. When the convection layers in the lower part grow thick and contact with the cooling surface of the inner cylinder, the local heat transfer coefficient rapidly increases and approaches that of non-stratified fluid. Mean heat transfer coefficient is governed by such characteristics of the heat transfer in the lower part.

研究目的

繊維材料をはじめ新素材の開発において多成分材料の製造プロセスが重要となるが、一般に多成分系の相変化では、各成分の融点が異なるために凝固の際に必ず偏析を伴い固相内に非一様な濃度分布が生じる。その結果融解時には、各成分の密度差のために液相内に上方ほど密度が小さい密度成層が形成され、単成分の場合とは全く異なった対流現象となる。すなわち通常の自然対流熱伝達とは全く異なるために、高品位な材料製造に重要な影響を及ぼす。そこで本研究では、こうした多成分材料溶融時に形成される密度成層内の熱伝達を解明して伝熱制御を行えるようにすることを目的に、密度成層内の伝熱現象に関して実験的及び理論的に系統的研究を行う。

一年間の研究内容と成果

本年度は、密度成層内の伝熱現象に関する系統的研究の一環として、二重円管内において，外管加熱・内管冷却した場合について実験的研究を行い，その基礎的特性を明らかにした。

長さ 100mm、内径 70mm のアクリル管の中に外径 30mm の銅管を同軸に設置し、前・後面を観測窓用のアクリル板で囲った二重円管容器内にサッカロース水溶液による密度成層を形成して実験を行った。アクリル管内面にはステンレス膜を貼り付け、これに一定電流を流して熱流束一定で加熱した。一方銅管は、PID 制御した冷却水を流して壁温一定で冷却した。実験に当たっては、冷却面温度を溶液初期温度と等しく設定し、実験パラメータとして (1) 初期密度勾配（上下の初期密度差$\Delta\rho_0$が、178、88.9、44.4 kg/m^3）、(2) 加熱熱流束 q（2.0、1.0、0.5 kW/m^2）をとって実験を行った。

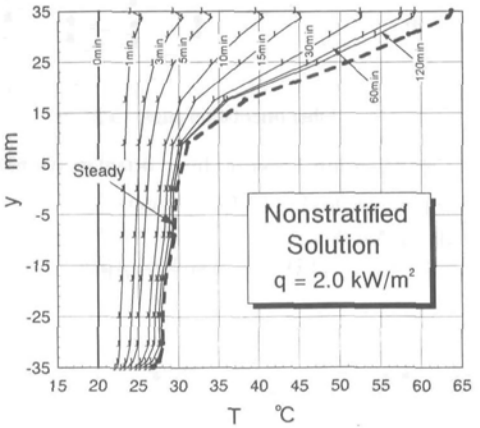


Fig.1 Time-wise variation of the temperature profiles at the heating surface for a non-stratified fluid at q = 2.0 kW/m^2.

最初に密度成層の影響を明らかにするために、密度成層が存在しない一様密度場の実験を行った。Fig.1 は、物性値の影響を排除するため、密度成層実験での平均濃度と等しい溶液を用い、加熱熱流束が 2.0 kW/m^2 の時の一様密度場に対して測定した加熱面温度の高さ方向分布の時間変化である。加熱面に沿って上向きに境界層が発達するため上方ほど温度が高く、時間とともに定常状態の温度分布に滑らかに漸近していく様子がわかる。特に外管加熱の場合

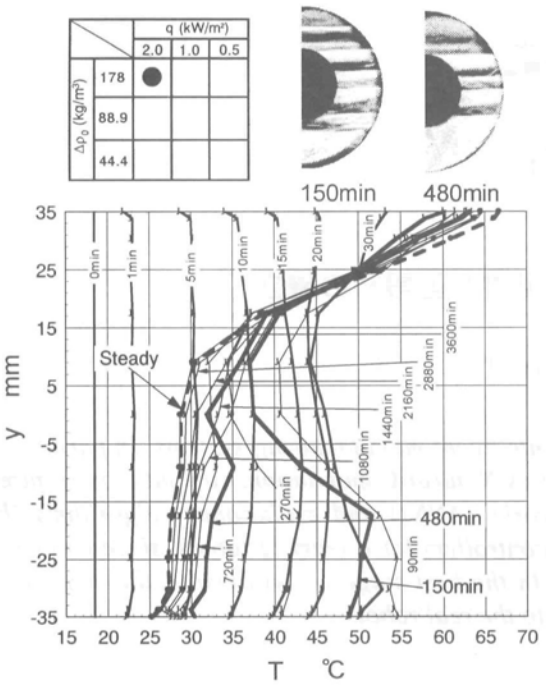


Fig.2 Time-wise variation of the temperature profiles at the heating surface for q = 2.0 kW/m^2 and $\Delta\rho_0$ = 178 kg/m^3.

には、上部では加熱面が上、冷却面が下に位置するため、密度的に極めて安定で対流が生じにくい。そのため上部では熱伝達率が低くなり加熱面温度は急激に上昇している。

一方 Fig.2 は同じ熱流束条件で$\Delta\rho_0$ = 178 kg/m^3 の場合の密度成層場での実験結果である。

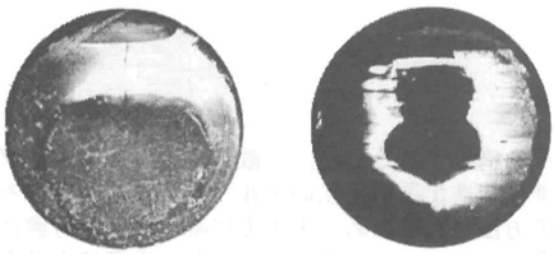
Fig.1 と Fig.2 を比較すると、Fig.2 の密度成層場の場合には、Fig.1 とは異なり加熱開始直後 20 分ぐらいまでは高さ方向にほぼ一様に温度が上昇し、中央部より下では定常の温度分布を超えて上昇する。これは密度成層場での伝熱の大きな特徴で、密度成層が存在するために、全域にわたって対流が生じにくく、非定常熱伝導効果により温度がほぼ一様に上昇する。しかしその後上部と下部では引き続き温度が上昇するのに対し、中央部では温度が低下し定常状態の温度分布に近づいていく。また下部でも加熱開始後 90 分をピークに温度は低下し始め、150 分後ぐらいから急激に低下して定常状態の温度分布に近づいていく。こうした現象もまた密度成層場での伝熱の大きな特徴で、多数に分離した水平対流層の形成と密接な関係がある。

密度成層場で自然対流が生じる場合には対流層が多数に細かく分離するが、二重円管の場合、中央部では両側に冷却面と加熱面が位置するため最も対流が生じやすい。それに対し上部では上述のように加熱面と冷却面の上下関係のために対流がほとんど生じない。また下部では、加熱面が冷却面より下に位置するため本来対流が最も生じやすいはずであるが、対流層が細かく分離する結果、下部の対流層には両側に加熱面しかなく、冷却面が存在しない。そのため上部に隣接する対流層を介して伝熱が行われることになり、中央部に比べて対流が弱く熱伝達率は低い。しかし下部全体で一つの大きな対流層を形成し冷却面に接するようになると、本来の伝熱面配置の関係から対流は促進され熱伝達率は急激に上昇する。Fig.2 のシャドウグラフに見られるように、加熱開始後 150 分では最下部の対流層はまだ冷却面に接していないが、480 分には層界面が消失して冷却面に接する大きな対流層に成長している。150 分から 480 分に至る下部での温度の急激な低下はこうした対流層の挙動に起因している。同じ二重円管の場合でも内管加熱の場合と異なり、外管加熱の場合には、こうした下部での伝熱現象に大きな特徴がある。

このように外管加熱による二重円管内密度成層中での自然対流熱伝達では、特に下部の対流層の形成と伝熱に大きな特徴がある。また平均熱伝達率は密度成層が存在しない場合に比べて最初低下し、その後、層の消失とともに一様密度場の値に漸近するが、それに至るまでの時間も下部での対流層の挙動に大きく支配され、熱流束と初期密度勾配をパラメータにしたその他の実験結果から、それらの定量的特性を明らかにした。

展望

Fig.3 は、円管カプセル内で相変化物質（PCM）を融解させたときの様子を写真観察したもので、左が単成分、右が 2 成分物質の場合である。研究目的でも述べたが、一般に多成分系の相変化では、凝固の際に偏析が生じる結果、融解時には液相内に密度成層が形成され、対流層が細かく分離するために局所熱伝達率は全く異なったものとなる。その結果 Fig.3 のように、融解面形状の大きな違いとなって現れる。本年度の研究によって、こうした密度成層内の自然対流が、密度成層が存在しない場合とは基本的に全く異なることを詳細かつ定量的に明らかにした。特に円管内の熱伝達を中心とした研究は従来全くなされておらず、本研究によって、その熱伝達の本質的特性が明らかとなったことから、今後この分野の大きな道筋が開けたと考えられる。今後さらに内管径の影響など、より詳細にこうした現象を明らかにし、伝熱制御など密度成層内の熱技術に大きく貢献したいと考えている。



Pure p-$C_6H_4Cl_2$ Binary mixture (30% p-$C_6H_4Br_2$ and 70% p-$C_6H_4Cl_2$)

Fig.3 Melting process of PCM in a cylindrical capsule