402 中心から冷却される回転二重円筒容器内の非定常流れと温度場の可視化

Visualization of Flow Pattern and Thermal Field in Rotating Drum with Inner Surface Cooling

○学 久保山 道信 (武蔵工大 (院))

正 富士原 民雄 (武蔵工大)

正 大上 浩 (武蔵工大)

Michinobu KUBOYAMA, Musashi Institute of Technology, 1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya - ku, Tokyo

Tamio FUJIWARA, Musashi Institute of Technology

Hiroshi OHUE, Musashi Institute of Technology

Key Words: Flow Visualization, Flow Pattern, Thermal Field, Rotating Drum, Inner Surface Cooling

1. 緒言

静止している液体の一部を加熱あるいは冷却するとその場所から流れが生じ、対流や熱移動等の物理現象を起こす。一方流動している液体の場合、その流れは非定常流れとなる。特に流動初期での流れの様子は複雑であり変化が大きいので、理論的に解析することは非常に困難である。

本研究では円筒容器内の流体を研究対象として、水平同軸二重円筒容器を回転させ、中心部の内筒から急速に一定温度で冷却することにより生じる非定常流れについて流動の様子や熱移動の変化などを明らかにすることを目的とし、トレーサー法によるフローパターンの可視化実験、及び流体の温度分布を求めるために感温液晶を用いた温度場の可視化実験の二通りの実験を行った。これらの結果から、一定温度で冷却を行ったときの円筒容器内の回転による流動作用を考察した。

なお、本実験で用いた流体はグリセリン水溶液である。

2. 実験装置

実験装置の概要を図1に示す。円筒容器はプーリ、Vベルト、無断変速機を解してモータにより駆動される。円筒容器内の冷却は冷却水を内筒に流すことにより行う。円筒容器の寸法は外筒内径 310mm、内筒外径 80mm、幅 81mm である。また、容器の代表寸法 H を容器内体積と濡れ面積の比とした。内筒の材質は熱伝導率が良いアルミニウムを用い、外筒及び側板は可視化を考慮しアクリルを用いた。

実験開始前冷却水はバイパスを通過させる。従って内筒内の冷却水、及び実験流体は初期温度 (20℃) に保たれている。冷却水は冷却タンク内で冷却され、冷却剤として氷を用いた。図2に切り替え弁を操作した後の内筒内冷却水温度を示す。冷却水温度は急速に低下し、実験開始 20s 後に 5℃、180s 後に 0.5℃となり、実験開始後氷の量が十分であるため、実験を行っている 1200s 間冷却水は 0.5℃付近を保つことができる。

Fig.1 Schema of experimental apparatus

Fig.2 Time history of chill water for inner surface cooling

3. 実験方法

本実験では、実験流体で満たされた円筒容器を回転させると同時に円筒容器内筒から冷却する。

トレーサー法による流れの可視化実験では、流体中に比重 1.02、平均粒径 150 μm のナイロン粒子を混入し幅 3mm のレーザーライトシートで円筒容器の撮影断面に影を作らないように上下左右の二方向から照射して流動の様子を可視化した。感温液晶を用いた温度場の可視化実験では、流体中に比重 1.02、平均粒径 15 μm 、温度範囲が約 17~20℃のマイクロカプセル化された感温液晶を容積比で 0.01% の分量で混入し、シート状の白色光をトレーサー法同様に、二方向から円筒容器に照射して温度場の様子を可視化した。

可視化断面は図3に示すように、円筒厚み幅方向において 1/2 の位置である。

円筒容器の回転と容器内流体の流動、及び温度分布の関係を調べるために回転周期を 2.1rad/s~0.057rad/s の間で 8 条件の回転周期を決めて実験を行った。

Fig.3 Illuminated plane for visualization photography

4. 実験結果及び考察

図4, 図5及び図6に実験流体がグリセリン40vol%及びグリセリン70vol%(以後, 40%, 70%と呼ぶ)の場合, 感温液晶による回転円筒容器内の温度場の可視化(a)と, トレーサー法により流れを可視化したフローパターンのスケッチ(b)を示す。(a)では点の密度が高くなるにつれて, 流体の温度が低いことを示す。

4.1 温度場とフローパターンの特徴

図4に示される40%2.1rad/sでの(a)を見ると, 内筒から発生した低温流体は放射状に広がっているが, 外筒までは至らず, ある半径位置から回転方向へと広がっている。このときの(b)は回転の影響を強く受け, 剛体回転している。

図5に示される40%0.11rad/sでの(a)を見ると, 内筒下部から発生した低温流体は, 真下に下降して温度成層を形成している。(b)を見ると, 下降した低温流体は外筒壁面で左右に分かれている。図中, 右方向への流れは壁面に沿って内筒右部まで流された後, 内筒中央部に移動しながら下降している。また, 図中, 左方向への流れは回転方向と逆向きである。

図4と図5を比較すると, 回転速度が速い図4では, 低温流体が温度成層を形成することなく放射状に広がっている。

図6に示される70%0.11rad/sでの(a)を見ると, 図中, 内筒右下部より発生した低温流体は回転方向に流され低温流体が容器片側に滞留している。このときの(b)を見ると, 図中, 円筒右部では外筒内壁に沿った回転方向の流れが円筒容器右上部から下降し, 回転方向と逆向きの流れとなっている。このため低温流体は円筒左部には到達せずに片側に滞留する。また, 内筒付近では回転方向と逆向きの流れが見られる。

図5と図6を比較すると, 共に低温流体が滞留しているが, グリセリン濃度の高い図6の方は回転方向の流れにより斜めの低温流体の滞留が形成されている。(b)を見ると, 図5に観察できた内筒からの下降流は図6には見られない。これは内筒からの下降流の流速が遅いため, 回転方向に流されることによる違いである。

4.2 無次元数による整理

4.1では回転周期の違いや, 実験溶液の濃度の違いにより, 容器内に発生する流れと温度場は異なったパターンが確認できた。このような温度場の違いは, 大きく分けて3つのパターンに分類することができ, パターンを分ける要因として, 容器寸法, 回転速度, 実験流体が挙げられる。円筒容器内の温度場を無次元数で整理した結果の一例を図7に示す。ここでプラントル数 Pr を

$$Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda}$$

(λ : 熱伝導率, C_p : 比熱, μ : 粘性係数)

また, テーラー数 Ta を

$$Ta = \frac{\omega \delta L}{\nu}$$

(ω : 角速度, δ : 内筒と外筒との間隙(=(外径-内径)/2),

ν : 動粘性係数, L : 代表寸法)

と定義する。図7はプラントル数とテーラー数で整理したものである。

図7中の記号■は上部に示した分類図の低温流体が滞留するパターン, ▲は中心から攪拌されるパターン, ●は同心円状に留まるパターンと分類することができた。

5. 結言

使用流体の濃度や回転速度により流れが変化し, そのパターンを大きく3つに分類できた。

可視化結果を無次元数に整理することで, 円筒容器寸法, 使用流体の種類, 回転速度により容器内の温度分布を推測することができる。

Fig.4 40Vol% glycerin, 2.1rad/s, at 600s

Fig.5 40Vol% glycerin, 0.11rad/s, at 600s

Fig.6 70Vol% glycerin, 0.11rad/s, at 600s

Fig.7 $Ta-Pr$