

鉛直閉ループの対流の可視化

福岡大学理学部 乙部直人 (Otobe, Naohito)

概要

鉛直に設置した閉じたループ状の水槽の上半分を冷却し、下半分を加熱することで対流を生じさせる。この実験は、自由度を減らした対流の実験を意図しているが、いろいろな流れ場が出現し、どのような流れ場が生ずるかについてまだ整理されていない。

また、精密な温度設定のために装置を金属で作ることも多く、流れ場について測定した例はさほどあるわけではない。数点で測定した温度のデータから平均流の状態を推測することも多い。そこで、装置全体を透明な素材で作成し、対流の流れ場、および温度場を可視化して流れを直接観測した。その結果、報告されている流れすべてがみられたわけではなく、特にカオス的な反転は生じなかったが、主流が周期的に反転する現象が生じた。主流が振動しながら周期的に反転する現象は見つかっているようではあるが、三角関数的に反転する現象は見つかっていなかった。

その反転の様子を詳しく見てみると、主流が確かに存在することや反転する場合には、乱流的な領域が形成されているらしいことなどが確認された。また、乱流的な領域は浮力や重力を受けて不安定な領域にとどまっているなど、不思議な現象も確認されたので写真を中心にご紹介したい。

1. はじめに

この実験は、ロレンツのカオスを再現する実験として行われることがあるが、今回はベナール対流の自由度を減らした実験としてスタートした。つまり、1次元のベナール対流の実験を行おうとした。ところが、いわゆるベナール対流では自由度は3あるものの、時間変化は見られないが、この実験においては、自由度はほぼ1として良い実験に思われたのに、ベナール対流とは異なり時間変化する流れ場が得られた。

その流れ場は、管の円周方向に平均した流れについてのみ分類すると

- a) 流れが生じない場合。
 1. 流れが全く生じない場合
 2. 管全域にわたる流れがなく平均すると流れがない場合
- b) 一方向に平均流が生じ、その流れが時間変化しない場合。

- c) 平均流が生じ時間経過とともにその流速が早くなったり遅くなったりする。
- d) 平均流が、反転する。
 1. 反転が周期的
 2. 反転がカオス的

などが、報告されている。c)とd)-1が組み合わさって起こる例も報告されており、流れの時間変化パターンは多岐にわたっている。我々の実験では、a), b), d)だけが見つかった。が、どの報告においても、流れ場の反転に対して経験的な法則であれ、見いだせたとはいえない。1次元モデルやいくつかの理論的な研究もあり、ある程度は現象に対する力学的な示唆を与えてはいるが、実験結果をうまく説明するとは言い難い。そもそも、再現性はあるが、水槽全体を作り直ただけで、全く反転が生じなくなるなどの報告もある。

さらに、水槽には熱伝導度の高い金属素材が使われることが多く、水槽内部の流速場は直接観測されておらず、温度の境界付近に2本の温度計を挿し、それで得られた温度の時間変化のみから平均流を議論することも多い。そこで、今回は、反転の条件を探るために、まず現象を観測し、どのような流れが生じているのかを詳細に見ることが出来る装置を作成し、実験を行った。

2. 装置

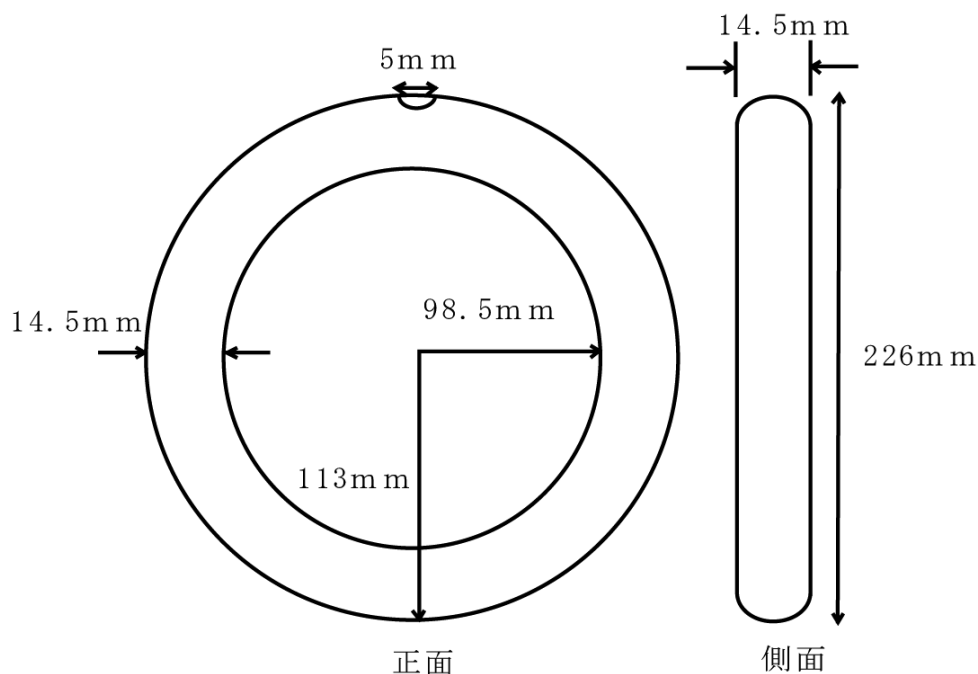


図 1: 対流層の寸法図。寸法は外形。ガラスの厚みは 1mm

対流を起こす水槽はトーラスと呼ばれる、断面が円になるループ状の水路を持つ水槽である。簡単に言うとドーナツの様な形状をしている。今回の報告では使用していないが、断面が正方形になる細いバームクーヘンの様な形状をした水槽での実験も行っている。そのような水槽はアニュラスと呼ばれる。

図1のような水槽を厚さ1mmの薄いパイレックスで作製した。パイレックスガラスは、普通のソーダガラスに比べて2,3倍程度熱伝導率に優れている。この水槽に水グリセリン水溶液を封入して上下の半分ずつを違う温度に保った水槽の中に設置して温度差を与える。上下の恒温槽は薄いアクリルで仕切られており階段状に近いプロファイルで温度差が与えられている。恒温槽の温度は0.1K単位で変更可能で、1Kおきに実験を行ったが、一部の実験についてはより細かい温度差を設定した。また、水槽の内部には温度に応じて光の屈折率を変化させる感温液晶を分散させてあり、水槽へ当てる光の方向と観測する角度を固定することで、温度を知ることが出来る。また、感温液晶は、非常に小さいカプセルなので一つ一つを追うことは困難であるが、集団としてであれば流れのトレーサーとして利用することも可能である。

3. 結果

3.1. レーリー数と動粘性係数に対する対流パターンの依存性

温度差を1.0~10.0Kの間で1Kずつ変化させて実験を行ったその結果、水槽内の流れのパターンが3種類確認された。また、すべてのケースで1.0Kの温度差でも対流運動は確認された。3種類のうち1つめは、温度差が小さい場合で温度境界付近で背の低い対流が生ずるのみで、対流槽全体にわたる主流は生じなかった場合。2つめは、温度差が十分に大きい場合で、対流槽全域にわたり主流が生じている場合。最後に、主流が生じており、その主流が周期的に反転を起こす場合である。

それぞれの流れパターンがどのようなときに生ずるのかを調べるために対流槽の直径を長さのパラメータとして使用したレーリー数を利用することにする。

レーリー数 Ra は

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T d^3}{\kappa\nu}$$

g : 重力加速度 (cm/s^2)

ΔT : 上半部と下半部の温度差 (K)

β : 体膨張係数 ($1/\text{K}$)

d : 管の直径 (cm)

κ : 熱拡散係数 (cm^2/s)

ν : 動粘性係数 (cm^2/s)

と定義する。

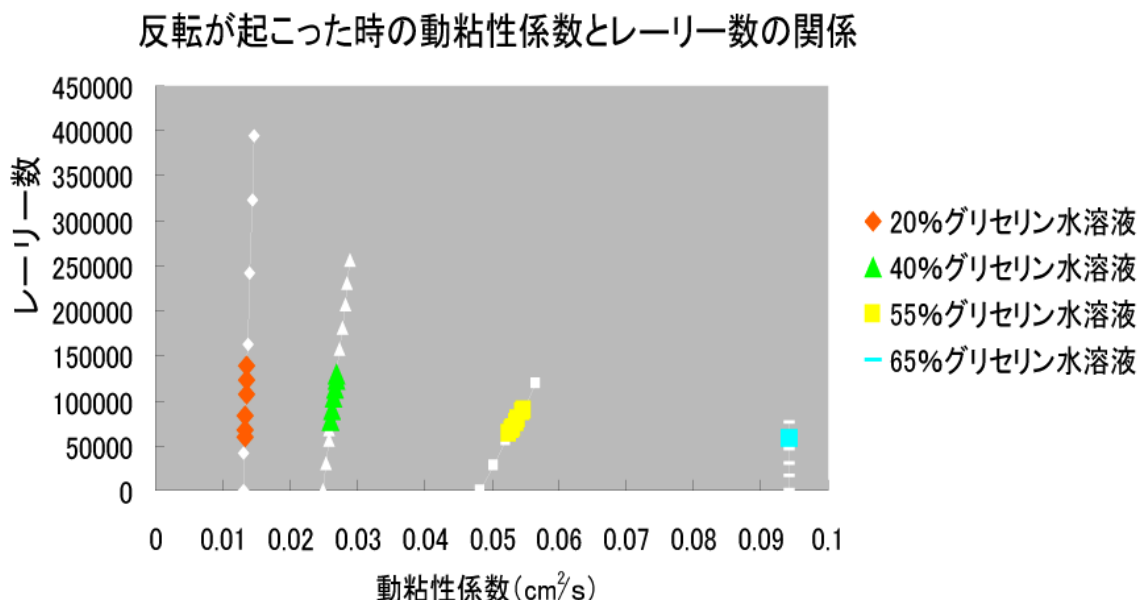


図 2:一番下の白いのは境界付近での背の低い対流のケース、色つきは主流が反転するケース、一番上の白は主流のみで反転しないケース。

これを利用して、今回行った4種類の流体について結果をまとめると上のグラフのようになる。反転が生ずる場合も主流が存在するので、主流が存在するか境界付近の背の低い対流だけが存在するかで2つの領域に分けた場合の、境界のレーリー数はほぼ一定の値をとって、その値は 5×10^4 程度である。主流の反転が、見られる場合と見られない場合の境界は、明らかに動粘性係数に依存している。動粘性係数が増加するにつれて反転が生ずるレーリー数の範囲は狭くなっている。反転自体の周期は、ほぼ粘性のみに依存しており2から7分で粘性が高いほど長くなる傾向にある。

3.2. 典型的な反転のパターン

主流が存在しても反転を起こす場合と起こさない場合が存在する。ムービーを撮影しその流速について注目したところ、反転を起こす場合と起こさない場合では、流速場に違いが見られた。反転を起こさない場合の流速場は、全領域同じ向きに流れており、その流れは層流的である。ポアズイユ流的に中心に最も速い流速が見られ放物線的な速度プロファイルを持っている様には見えないが、乱流的な領域が存在しているようにも見えない。流れ場はおおむね、内側の壁あたりが最速になっており、そこから外側に向かうに伴って一様に減少しているように見える。

このような流れ場が出来てしまうと、それ以降はその流速場が維持されるのみで時間変化しない。

一方、反転を起こす場合の流速場は、時間変化しているのです、反転の振幅がちょうど符号を変えるあたりのスナップショットで見ることにする。このケースは、65%グリセリン水溶液に6.8Kの温度差を与えた場合である。このとき暖められた流体塊が、上昇してきてループの頂点を超える。そのときに、ループの頂点の付近には、冷やされた重い流体塊があるが、ループの頂点を暖かい流体塊が超えるときにはその冷たく重い流体塊の下へ潜り込むような流れに乗っている。その結果、ループの頂点を少し過ぎたあたりでは、温度のプロファイルは明らかに不安定な上の方が冷たくなっている。

反転は、数度で終了することもあるし、時には2時間以上も続くことがあるが多くは突然終了し、反転を起こさなくなってしまう。そのようなときには、頂点を超える時に冷たく重い流体塊をそのまま押し出すように流れていきループに沿って一様な流れ場が形成される。こうなった後は、もはや反転は観測されない。

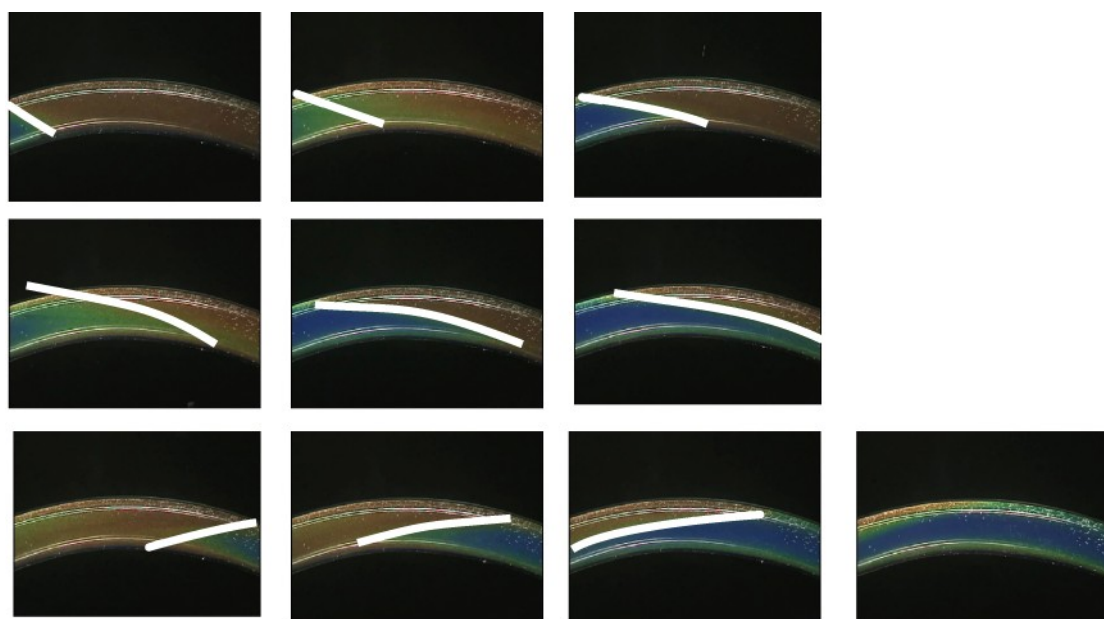


図 3: 左側の9枚は連続写真。左上から右に行って一段下がる様に見ていく。右下の1枚は、反転が起こらない場合。赤系が冷たく、青系が暖かい領域である。白黒印刷時にもわかるように境界に白い線を引いた。

図3は、反転が起こったときの連続写真が左の9枚であるが、そのうち上の6枚で半周期、下の3枚で残りの半周期になっている。時間の間隔は均一ではなく、それぞれの周期の最後の一枚の状態がしばらく続く。この左右の切り替わりは反転の周期に比べればかなり短い時間で起こる。この写真では温度の情報しか見えないが、流れの向きの反転中は温度のコンターの移動速度と流速は、ほぼ同じようになっているように見える。つまり最初の半周期で言えば、左側から暖かい流体が上がってきて、頂上を越えるときに下に入り込みながら右下の方へ流れていく結果、右

上の領域に冷たい流体が取り残される。そのとき、青い流体のエリアは、水槽の下半分では色を変えてはいるものの、流線をたどると一周つながっており、冷たい流体の下に潜っているところは流速が速くなっている。そして、おおむね層流的に流れているように見える。しかし、赤い領域は帽子のように青い領域の上にあるので流線はその領域内で閉じていなければならない。その結果帽子領域を大きくみた場合は1つの渦になっているようであり、内部の領域は乱流的であるようにも見える。

右下の一枚は、もはや反転が起きないとき。この場合は帽子のように乗った領域は観測されず、全域層流的になっている。

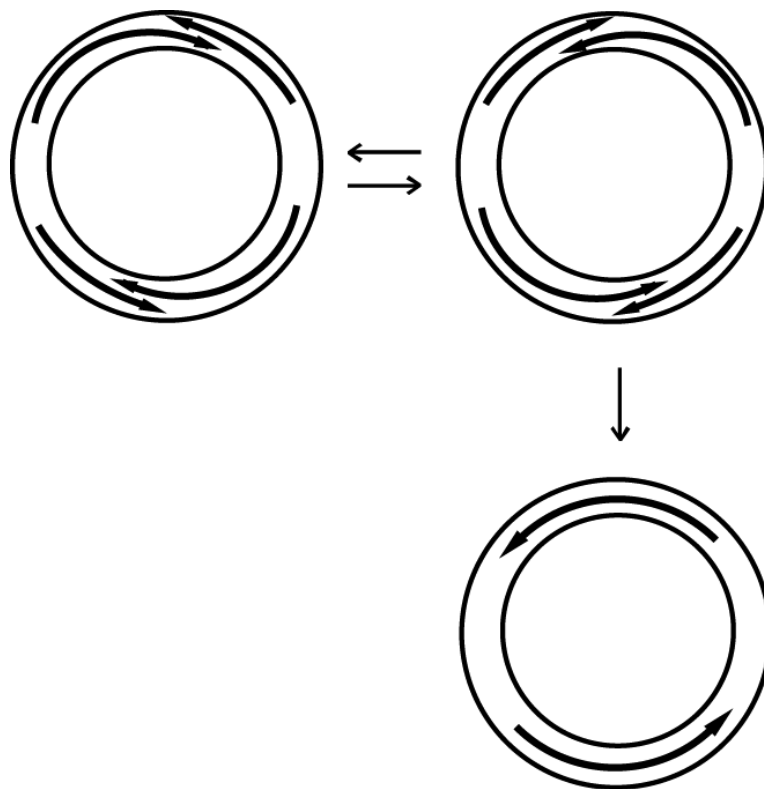


図 4: 流れの模式図。

4. まとめ

確かに主流は存在して、反転することが確認された。時間的に変化しない流速場であっても、単純な予想とは異なる流速プロファイルを持っており、1次元的な流速場とみなして簡単なモデルで考察して良いかに疑問を生じた。まして反転する場合については、流速場の全体像が不思議なパターンになっているように思われる。そのため、まず、全体的な速度プロファイルを少なくとも2次元的に把握することが望まれる。