

円筒容器内で回転する水に生じる諸現象とその理解のための力学

伊賀 啓太¹, 横田 祥², 渡邊 俊一¹, 池田 剛志³, 新野 宏¹, 三澤 信彦¹

[1] 東大大気海洋研, [2] 気象研, [3] 特許庁

1. はじめに

大気や海洋では、外的な環境が軸対称であっても非軸対称な流れが生じたり、流れが時間的に変動して、異なる状態の間を遷移する現象が観測される。このような非軸対称な現象は、水を入れた円筒容器の底で円盤を回転させる簡単な実験でも実現される(図1)。

これまでこの実験で見られるさまざまな非軸対称流の現象を報告してきた(2010 春 D403, 2011 春 D202, 2012 春 C101)おり、その結果は Iga et al. (2014 FDR) としてまとめている。

また、このような現象が起こるしくみを調べるのに必要となる基本場としての軸対称流を解析的に求める試みも報告してきた(2012 秋 D301, 2013 秋 D106)。

この発表では、まず、実験で生じる多様な現象について得られた結果の概要のまとめと、軸対称流の理論的解析によってどこまで記述されているのかを述べ、多様な現象のしくみの解明への展望についても触れる。

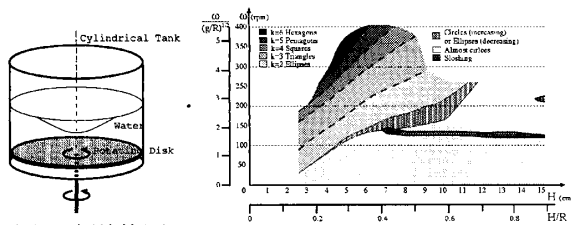


図1: 実験装置

図2: 実験結果 (Iga et al. 2014)

2. 実験設定

半径 168mm の円筒容器に水を入れて、底にある半径 150mm の円盤を回転させる(図1)。初期の水深 H と円盤の回転数 ω のパラメータの組合せに対して、どのような流れが生じるかを調べる。

3. 実験結果

H - ω に対して、さまざまな流れが観察された(図2)。

・ほとんど軸対称な流れ

比較的回転数が小さい時には水は軸対称に流れ、中心付近の水面が下がる。回転数を上げると、中心付近の水面は底につき、円盤が空気に露出した部分ができる。

・多角形の渦

回転数をさらに上げると、渦の形が多角形になる。軸対称な円形から楕円形に遷移し、さらに、三角形・四角形・五角形・六角形と、波数がしだいに大きくなる。

・多角形の渦の間の遷移

隣接する多角形の渦の間どうしの遷移では明確な履歴現象は見られなかった。しかし、軸対称な渦と楕円渦の間の遷移では、回転数を上げていく時には軸対称状態を保っているのに、一旦楕円渦ができると、下げていく時には同じ回転数でも楕円渦になる回転数範囲が存在し、明確な履歴現象が見られた。

・揺動現象

比較的回転数が小さい時に、静かなほぼ軸対称な流れの状態と、大きな振幅の水面の振動が側壁に沿って伝わる状態とが数十秒の周期で繰り返す揺動現象が見られた。この現象は、狭い幅の回転数範囲でのみ観察され、その回転数の H への依存性は小さかった。

4. 軸対称流の理論的解析

このような現象を理解するのに必要な軸対称流を解析的に求めた(図3)。いくつかの境界層領域がある。

・内部領域

流れが z 方向に一樣になる。この領域はさらに内側の剛体回転領域と外側の角運動量一樣領域に分けられる。

・底面境界層

底面付近には、厚さ $E^{1/2}$ 程度の境界層ができる。移流項が無視できず、そのホドグラフも螺旋を描かないなどの相違はあるが、エクマン境界層と似た性質を持つ。

・内部領域の接続層

両内部領域を接続する $E^{1/4}$ の厚さの境界層ができる。スチュワートソンの $E^{1/4}$ 層と同様の構造を持つ。

・側壁境界層

側壁付近には、鉛直移流と水平粘性がつりあう厚さ $E^{1/2}$ 程度の境界層ができる。底面境界層を出た水は底からこの側壁境界層に入り、水面付近まで上昇する。その後、厚さ $E^{1/2}$ の境界層を経て内部領域へと進入する。

5. 軸対称流の水面の変形

このようにして求めた軸対称流は、水面の変形を伴うが、回転数によって、「中心も水の層で覆われる」「中心に底面が空気に露出した領域ができる」「水のある領域が全て角運動量一樣な領域になる」という3つのレジームがある。そのパラメータ境界を理論的に求めたところ、実験で得られた結果をよく説明する(図4)。

6. 非軸対称現象のしくみ

多角形渦は内側の地形性ロスビー波またはエッジ波と外部の流れとの相互作用による不安定、揺動現象は地形性ロスビー波と外壁に沿った重力波の共鳴による不安定、履歴現象は不安定と、擾乱による角運動量輸送が、説明するしくみの候補として考えられる。

7. 大気力学・地球流体力学との関わり

このような複雑な現象を理解には境界層理論(エクマン境界層・スチュワートソン層)、テラー-プラウドマンの定理、地形性ロスビー波、ケルビン波、中立波の共鳴による不安定、波の運動量輸送、臨界層不安定など広い範囲に渡る基礎的な大気・地球流体力学の知識を総合する必要がある。

8. まとめ

単純な装置による流体の実験であるが、起こる現象自体が興味深いものであるだけでなく、しくみを説明するのに、大気・地球流体力学の幅広い分野に関わる必要があり、教育的な教材としても用いることができる。

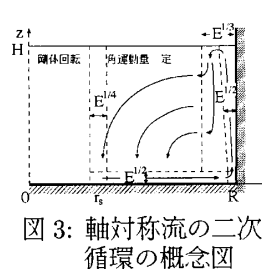


図3: 軸対称流の二次循環の概念図

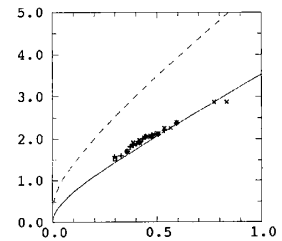


図4: 理論によるレジームの境界と実験結果