

回転同軸円筒内の高レイノルズ数流れの数値的研究

橋本 有莉 (指導教員: 河村 哲也)

1. はじめに

日々の天気の変化は私たちの生活に密接に関わりあっており、これらの天気を変化させている温帯低気圧や移動性高気圧の発生は偏西風帯と呼ばれる中緯度帯の対流圏上部にある強い西風の吹く帯状の領域と深く結びついている。偏西風帯は Fig.1 のように東西に数千 km の波長を持って南北に大きく蛇行していることが知られており、このような構造を持つ偏西風帯の波動を気象学では傾圧不安定波とよんでいる。この傾圧不安定波が南北に大きく蛇行する現象は中緯度地方の天気に支配的な影響を及ぼす為、極めて重要な現象であり、本研究ではこの傾圧不安定波の蛇行についての諸性質を数値的に解析する。モデルとして、傾圧不安定波の室内実験である二重円筒容器(annulus)を使ったアニュラスの実験(Fig.2)を参考にする。

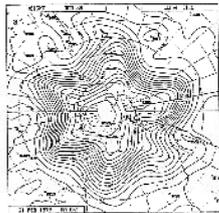


Fig.1 南半球高層天気図^[3] (300hpa 面の等圧面高度)

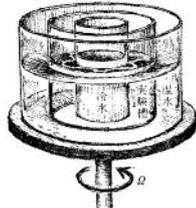
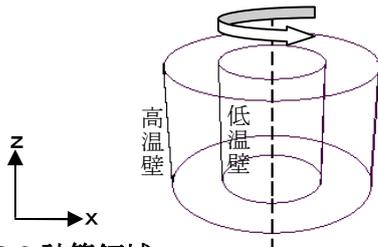


Fig.2 アニュラスの実験^[3] (アニュラス型容器と回転台)

2. モデル化

2.1 問題のモデル化

本研究では、回転同軸円筒モデルを考える。このモデルは、直径の異なる2つの円筒を一定の角速度で同軸に回転させるものである。内側の側壁を低温部とし、外側の側壁を高温部とする。つまり、内側の壁は高緯度、外側の壁は低緯度、内壁と外壁に囲まれた部分は大気と見立てられる。

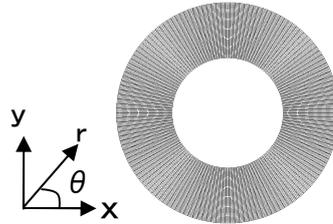


2.2 計算領域

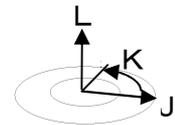
外円筒の直径、内円筒の直径、高さの比を 2:1:2.5 とした。

2.3 格子生成

円柱座標系を用い、格子間隔は等間隔とした。



計算結果 4.1~4.3 において 3 次元での格子数は半径方向(J)、周方向(K)、高さ方向(L)に 150×50×50 とした。



3. 計算方法

3.1 支配方程式

本研究では、流体は非圧縮性であると仮定し、連続の式(1)、非圧縮性 Navier-stokes 方程式(2)、エネルギー方程式(3)を利用する。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} \mathbf{T} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) T = \frac{1}{\text{RePr}} \nabla^2 T \quad (3)$$

ただし、 \mathbf{v} は速度ベクトル、 t は時間、 p は圧力、 T は温度、 Re はレイノルズ数(但し、外円筒半径と外円筒の周方向速度を基準とする)、 Gr はグラスホフ数、 Pr はプラントル数である。これらの方程式を非圧縮性流れの標準的な解法である MAC 法を用いて解いた。圧力のポアソン方程式は SOR 法を用いて解いた。

3.2 初期条件

速度の初期条件は外円筒表面、内円筒表面ともに周方向のみに次式で与えた。

$$v_r = \cos \theta$$

$$v_\theta = -\sin \theta$$

温度の初期条件はすべて 0 とする。

3.3 境界条件

円筒上面および底面はフリースリップ条件とする。周方向については周期境界条件を課す。温度については内円筒表面を 0、外円筒表面を 1 とした。

4. 計算結果

式(2)の Gr/Re^2 を 0.01 と固定して、レイノルズ数(Re)の値を変化させたところ、大きく分けて以下の3つの流れのパターンの結果を得た。

4.1 定常軸対称流

Re が小さい場合、軸対称な流れがみられた。Fig.3、Fig.4 はそれぞれ $Re=300$ での水平断面、鉛直断面での速度ベクトルである。Fig.4 をみると、流体は外壁に沿って暖められ上昇し上層で中心に向かい、内壁に沿って冷やされ下降し下層で外壁に向かっており、これは低緯度で卓越するハドレー循環に似た流れができていていると考えられる。

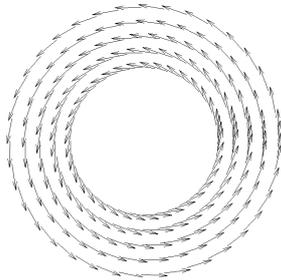


Fig.3
L=25 での速度ベクトル

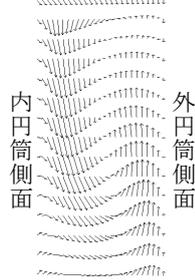


Fig.4
J=1 での速度ベクトル

4.2 定常波動

Re がある値を超えると円周運動が崩れ波うちはじめた。本研究では波数 2~4 の定常波動を確認したが、ここでは $Re=340$ 、波数 4 の結果を示す。Fig.5 および Fig.6 から、波が定常的な波形を形成していることがわかる。これは成熟期の傾圧不安定波に相当する。Fig.7 から鉛直断面内には上昇・下降流があることが分かるが、Fig.4 と比べて流れに大きな変化はみられなかった。



Fig.5 I=25 での粒子軌跡

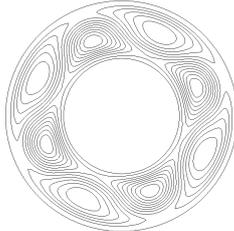


Fig.6 L=25 での Vr 等値線
(中心方向速度成分 Vr)

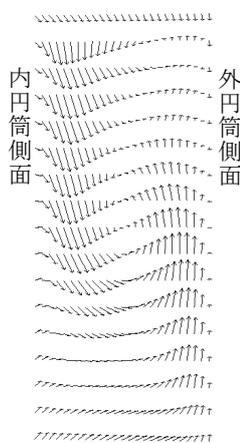


Fig.7
J=1 での速度ベクトル

4.3 不規則波動

さらに Re を大きくしていくと、波数が増え、ゆらぎのパターンも不規則になった。Fig.10 から、Fig.4、Fig.7 に比べ内円筒側に向かう流れが強まり、下降流の勾配も急になっていることがわかる。

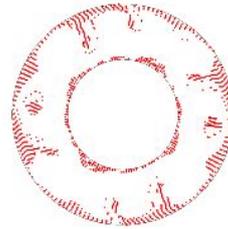


Fig.8 L=25 での粒子軌跡



Fig.9 L=25 での Vr 等値線
(中心方向速度成分 Vr)

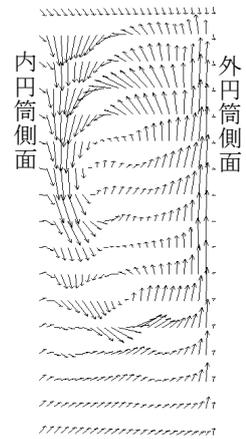


Fig.10 J=1 での
瞬間速度ベクトル

4.4 温度傾向

内外壁間の温度差を順に変化させて定常軸対称流の平衡状態の崩れる Re を調べたところ、温度差が大きくなるにつれて Re の臨界値は減少していく傾向がみられた。

5. まとめと今後の課題

本研究では回転同軸円筒内における3つの流れのパターンをみる事ができた。4.2 および 4.3 の計算結果に見られた波動は実際の中緯度の上層大気(偏西風帯)の流れのパターンに対応していると考えられる。今後は計算結果 4.4 のような定量的な解析を進めていくとともに、波動の成因も調べていきたい。

6. 謝辞

本研究を進めるにあたりお世話になりました、河村哲也先生、研究室の先輩方、友人に深く感謝いたします。

7. 参考文献

- [1]河村哲也、渡辺好夫、高橋聡志、岡野覚：『流体解析Ⅱ』朝倉書店 1997 ISBN4-254-11403-6 C3341
- [2]小倉義光：『一般気象学【第2版】』東京大学出版会 1984 ISBN4-13-062706-6 C3044
- [3]朝倉正、関口理朗、新田尚：『新版気象ハンドブック』朝倉書店 1995 ISBN4-254-16111-5 C3044