

温帯低気圧と熱帯低気圧の簡易モデルによる数値シミュレーション

樋野真弓 (指導教員：河村哲也)

1 はじめに

日々の天気の変化をもたらす大気の流れは、流体力学と熱力学の法則に基づいて数値計算されている。気象シミュレーションの意義は物理法則に立脚して現象を理解できることにあり、社会に役立つ基盤的情報が得られる。しかし数値予報の高精度化にはスーパーコンピュータを駆使する必要がある、モデルも複雑化の一途を辿っている。そこで、本研究では気象現象の重要部分を抜き出し、できるだけ簡単なモデルによって数値シミュレーションを行うことを目的とする。簡易モデルを組み立て、温帯低気圧や熱帯低気圧の発生および移動過程をどの程度再現できるかに注目する。

温帯低気圧は偏西風がきっかけとなり発生する。偏西風は赤道付近の暖気と北極付近の寒気の温度差により勢いを増し、南北に波打つように進む。気圧の谷が近づくと地上から近いところで反時計回りの空気が流れが発生する。この流れの東側では暖気が北へと移動して温暖前線をつくり、西側の寒気は南へと回り込んで寒冷前線が生まれる。さらに気圧の谷が接近すると反時計回りの空気の流れも強くなって、ついに温帯低気圧が発生する。本研究では暖気と寒気をコリオリ力に見立てた力によって釣り合わせることで、不安定な前線面を作り出す。これを温帯低気圧の簡易モデルとみなし、数値シミュレーションにより検証する。

熱帯低気圧は、海水温度が高い (26~27°C) 熱帯地域で発生する。この暖かい海域に大気が接すると、気温が上昇し海面から多量の水蒸気が補給される。そうして大気の状態は次第に不安定になる。低緯度に熱帯収束帯があることにより、下層の不安定な空気は収束し、渦を巻きながら強い上昇流を生じる。そして上昇した水蒸気は凝結し雲をつくる。その際に多量の熱を放出し、周囲の空気をあたため、上昇気流は更に強まる。これが繰り返され渦は発達し、熱帯低気圧になる。本研究では周囲より気温の高い熱源を与え、それを熱帯低気圧の簡易モデルとみなし、進路経路に注目する。

2 コリオリ力

実際の偏西風の様子に近づけるため高度が増すほど速度が大きくなるよう設定する。速度が大きいほどコリオリ力が強くなる。よって、コリオリ力の影響により暖気と寒気の移動はなくなり、つりあった状態になり、初期の状態を保とうとする。ただし、このつりあいは不安定である。

3 簡易モデル

本研究では南北方向に暖気と寒気を、鉛直面を境界として接して置き、暖気は緯度の低い赤道付近で暖められた空気、寒気は緯度の高い北極付近で冷やされた空気とみなした。この状態で暖気は上へ、寒気は下へと移動しようとする。しかし、実際の地球上では自転の影響により大気に対してみかけの力(コリオリ力)が働き、この移動を打ち消そうとする。(図1)

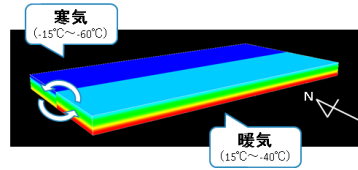


図1：モデル化

標準的な大気を考えると、断熱減率は1km上昇する毎に6.5°Cとなっている。そのため、暖気と寒気それぞれに気温減率を考慮しつつも簡略化した気温を初期条件とした。

熱帯低気圧のシミュレーションでは、赤道より少し北側で貿易風を吹かすとともに、上空に熱源をおいた。これを熱帯低気圧とみなし、その熱源の動きを追跡した。

4 基礎方程式

大気の流れは、圧力をかけても縮まない非圧縮性の流れとみなすことができるため、連続の方程式(1)、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式(2)、温度の移流拡散方程式(エネルギー方程式)(3)を使用する。

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

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \Delta \mathbf{v} + \mathbf{f} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) T = K \Delta T + Q \quad (3)$$

\mathbf{v} : 速度ベクトル p : 圧力 t : 時間 ρ : 密度
 $\mathbf{f} = (2v \Omega \sin\phi, -2u \Omega \sin\phi, -g)$: 外力項
 ϕ : 緯度 g : 重力加速度
 u : x 方向速度 v : y 方向速度
 T : 温度 K : 熱拡散係数 Q : 熱源項

本研究ではこれらの方程式をフラクショナルステップ法を用いて数値的に解いた。方程式(2)の非線形項の差分近似については、3次精度上流差分を用いた。時間微分には前進差分、その他には中心差分を用いた。

5 格子形成

x,y,z 方向におよそ(15000km, 7500km, 15km)のモデル領域を160×80×20の直交等間隔格子に分割した。前線面の時間変化を長く見られるように、東西方向を長くとった。上空15kmに対し、水平スケール1000km程度で起こる現象なので、実際の大気に近づけ非常に薄い領域で計算を行った。なお鉛直方向の変化を見やすくするため、z軸方向は50倍に拡大して表示している。(図2)

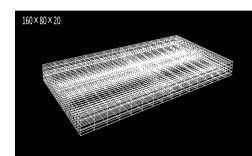


図2：計算格子

6 計算結果

6.1 温帯低気圧

まず、地面付近の温度のシェーディングを示す。レイノルズ数 3000 から 150000 を比較して計算を行った。

(i) レイノルズ数の比較 ($g=3.0, \Omega=2.0, 40000STEP$)

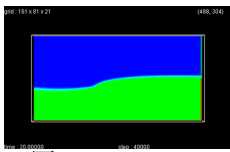


図 3 : Re=3000

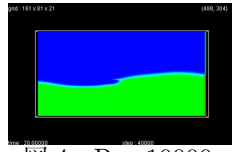


図 4 : Re=10000

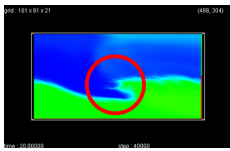


図 5 : Re=100000

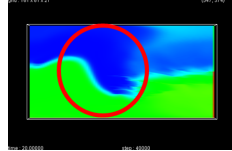
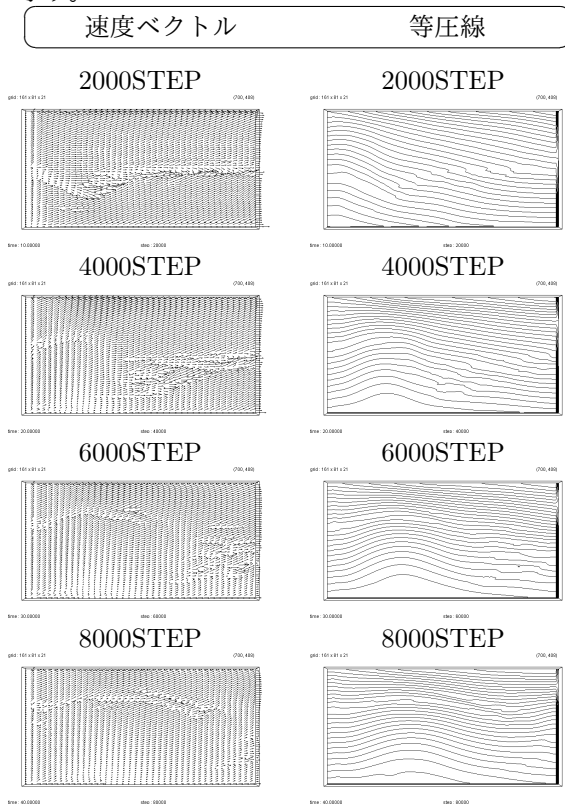


図 6 : Re=150000

低レイノルズ数では波打ちが弱く、レイノルズ数が高くなるにつれて蛇行の程度が強くなった。これは寒気は南へ、暖気は北へ流れ込む温帯低気圧の発生構造の一つを表す。

(ii) 偏西風波動 ($g=3.0, \Omega=2.0, Re=150000$)

次に、地面付近の速度ベクトルと等圧線を時間を追って示す。



偏西風にあたる波動が大きく波打っている様子が見て取れる。

(iii) 浮力の比較

浮力 0.1 から 3.0 で温度のシェーディングを比較して計算を行った。浮力の比較では細かい波打ちが見られ、浮力が大きくなると寒気が渦を巻きそうな形状で南へ侵入した。

(iv) コリオリ力の比較

コリオリ力 0.1 から 5.0 で温度のシェーディングを比較して計算を行った。寒気が渦を巻くように南へ侵入する上に、コリオリ力が大きくなるにつれて暖気の北側への侵入の程度が大きくなった。

6.2 熱帯低気圧

熱源の大きさは水平方向 2×4 格子、高さ方向 10 格子に設定した。現象を起こりやすくするため、温度の初期条件は鉛直境界面の一部を sin カーブで描き、揺らぎを持たせた。(図 7) 速度の初期条件は cos カーブを用い、正の値の西風は偏西風に、負の値の東風は貿易風に見たてた。(図 8)

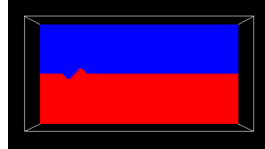


図 7 : 温度の初期条件

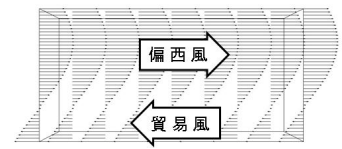


図 8 : 速度の初期条件

(i) 台風の進路経路 ($\Delta T = 5$)

台風(熱源)は周囲との温度差 5°C に設定した。北半球アジアでの台風の動きのシミュレーションを行った。(図 9)

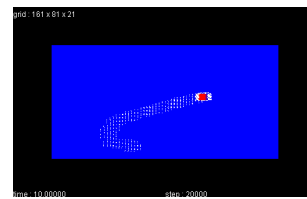


図 9 : 熱源の軌跡

最初、貿易風が吹く領域内では熱源は西に流れつつも弧を描きながら北上する。偏西風が吹く領域内に到着すると今度は北東方向に流れる軌跡を描き、速度は加速した。

7 まとめと今後の課題

本研究で用いた簡単なモデルにより、前線や低気圧と思われる波動を再現することができた。コリオリ力や浮力が低気圧の発達に関与することを確認、レイノルズ数の比較により波動に大きな影響を及ぼすことがわかった。また、実際に日本周辺で発生する熱帯低気圧の進路経路を再現した。今後は季節風が吹く場合などの条件を設定し、更に現実に近いシミュレーションを行いたい。また気象モデルとの比較をして、簡略性を保ったままモデルの改良をしたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご尽力くださいました指導教員の河村哲也先生をはじめ諸先生、本研究室の諸先輩・友人・後輩に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 安田史: "気温減率を考慮した温帯低気圧の簡易モデル", お茶の水女子大学修士論文, 2008
- [2] 小倉義光: "一般気象学", 東京大学出版会, 1984