

温帯低気圧の発達過程のシミュレーション

中島 由貴 (指導教員: 河村 哲也)

1 はじめに

台風や大雨は電車の遅延、飛行機の欠航等様々な場面で生活に影響を及ぼす。2015年9月には台風が温帯低気圧に変わった後も関東地方北部を中心に豪雨となり、堤防の決壊等大きな被害を及ぼした。日本における天気の変化の大きな原因は温帯地域に発生する温帯低気圧にある。温帯低気圧は偏西風の蛇行がきっかけとなり発生する。発達初期段階では偏西風による気圧の谷と気圧の尾根が見受けられ、赤道付近の暖気と北極付近の寒気の温度差により偏西風は勢いを増し、絶えず南北に波打つように進む。そして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の流れが生じる。この流れの東側では暖気が北へと移動して温暖前線を作り、西側の寒気は南へと回り込んで寒冷前線が生じる。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り、温帯低気圧が発生する。本研究では初期条件として不安定な前線面を与え、その後の温帯低気圧の発生過程を数値シミュレーションにより検証する。

2 格子

本研究では実際の現象に近づくため、3次元で計算を行い、 x 方向を東西方向、 y 方向を南北方向、 z 方向を高度とした。 x, y, z 方向におよそ960km, 480km, 15kmの領域を $80 \times 40 \times 80$ の直交等間隔格子に分割した。東西方向を広くとることで前線面の時間変化を観察できるようにし、対流圏の空気の流れは鉛直方向の変化の結果が重要であると考え、 z 方向の間隔を細かく設定した。

3 計算方法

基礎方程式は、対象とする風の流れが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)、エネルギー方程式(3)の3式を使用する。これらの方程式の数値解法はフラクショナルステップ法を用い、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式(2)の非線形項の差分近似は3次精度上流差分、時間微分には前進差分、その他は中心差分を用いた。

$$\nabla \cdot v = 0 \quad \dots (1)$$

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

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

v : 速度ベクトル p : 圧力
 μ : 粘性率 ρ : 密度 t : 時間
 $f = (2v\Omega \sin\phi, -2u\Omega \sin\phi, -g)$: 外力
 Ω : 自転速度 ϕ : 緯度
 g : 重力加速度 K : 温度の拡散係数
 u : x 方向速度 v : y 方向速度 w : z 方向速度

4 モデル

本研究のモデルは、図1のように南北方向(y 軸)に暖気と寒気を配置した。暖気は低緯度の赤道付近で温められた空気、寒気は高緯度の北極付近で冷やされた空気とみなした。また実際の大気の温度は高度(z 軸)が増すに連れて低くなっていくため、それを考慮した初期条件を与えた。図1では z 軸の表示を10倍に拡大している。

気温の初期設定

暖気: $15^\circ\text{C} \sim -25^\circ\text{C}$

寒気: $5^\circ\text{C} \sim -35^\circ\text{C}$

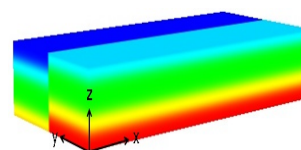


図1: モデル

このまま時間が経過すると暖気は上へ、寒気は下へと移動しようとするが、実際の地球上では自転の影響により大気に対して見かけの力コリオリ力が働く。

5 コリオリ力

本研究のモデルにおいても実際の偏西風の様子に一致するよう西を風上とし、高度が増すほど速度を大きくした。速度とコリオリ力は比例するので、高度が増すほどコリオリ力も大きくなる。また南北方向には緯度が $30 \sim 60$ 度の範囲を設定し、緯度が高くなるほどコリオリ力を正弦関数的に大きくした。このためコリオリ力の影響により暖気と寒気が釣り合った状態になり、初期の状態を保とうとするが、この釣り合いは不安定である。

6 検証

以下の3種類の条件の下で検証を行い、温帯低気圧の発達過程を比較した。計算に使用したパラメータは次の通りである。

$Re = 100000$
 $\Omega = 0.8$
浮力に関する量 = 0.9

- 条件なし
- 大陸配置

図2のように大陸を配置し検証を行った。実際の状況に近づくため、大陸と海洋の温度差を考慮した状況を作り出し比較する。

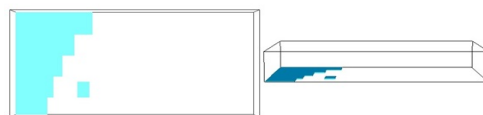


図2: 左側の図: 上空から見た大陸の様子
右側の図: 横から見た大陸の様子

- シベリア気団配置

大陸を配置したモデルにさらに冬を想定し、放射冷却によりシベリア地方で発生する寒冷な気団をモデルの左上に設定し検証を行った。

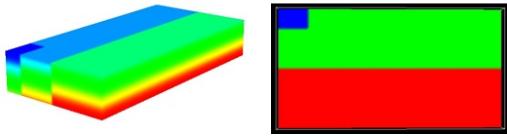


図 3: 左側の図: 横から見た温度表示
右側の図: 上空から見た温度表示

6.1 計算結果 (条件なし)

図 4~7 は上空から地表面付近の圧力を見た表示である。

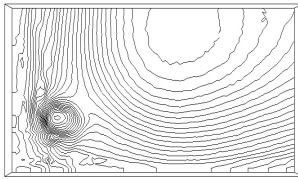


図 4: STEP 19750

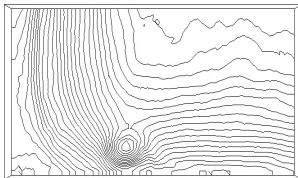


図 5: STEP 26800

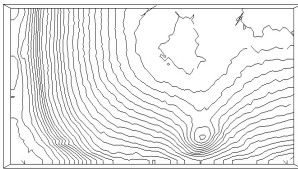


図 6: STEP 31550

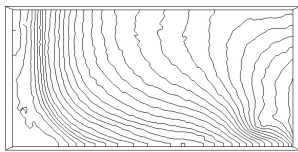


図 7: STEP 35050

図 4~7 より温帯低気圧が発生した後、西から東へ動く様子が見られ、東に進むほど徐々に温帯低気圧の勢力が弱くなり、最終的に温帯低気圧は消滅した。温帯低気圧が発生・発達し、消滅するまでの過程をシミュレーションできたと考えられる。

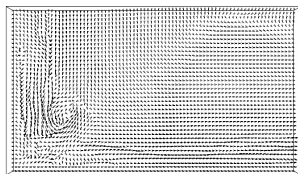


図 8: STEP19750 のベクトル表示

またベクトル表示 (図 8) からベクトルの矢印方向に渦を巻いている様子が見受けられ、温帯低気圧の発生を確認することができた。

6.2 計算結果 (大陸配置)

(1) 温度 (大陸 > 海洋) (2) 温度 (大陸 < 海洋)

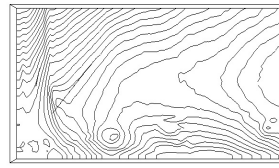


図 9: STEP 26700

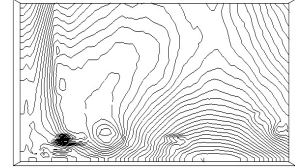


図 10: STEP 26150

6.3 計算結果 (シベリア気団配置)

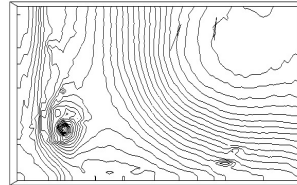


図 11: STEP 35800

6.4 考察

図 4 と図 9,10 を比較すると大陸があることにより、温帯低気圧が発生する速度が遅く、圧力差も小さいことがわかった。海洋より大陸の方が温度の高い夏のような状況 (図 9) では、最も圧力差の小さい温帯低気圧が発生し、STEP 数からも発生速度が遅いことがわかった。また気団により温帯低気圧の発生速度は遅くなるが (図 7 と図 11)、シベリア気団により強い北風が流れ込んだこと、モデル内の温度差が大きくなった影響により、同じ温度条件の大陸のみの場合より圧力差の大きい温帯低気圧が発生したと考えられる (図 10 と図 11)。

7 まとめ

本研究のモデルを用いて、温帯低気圧の発生・発達・消滅の過程をシミュレーションすることができた。今回のモデルでは大陸を配置することで温帯低気圧の発達速度に変化があり、大陸が存在しない場合が最も温帯低気圧の発生速度が速く、消滅するまでの経過時間も一番長いことがわかった。またシベリア気団がない場合よりある場合の方が圧力差の大きい温帯低気圧が発生することもわかり、大気条件によっても発生速度に違いが生じることが判明した。

今後はさらに実際の気象条件に近づけ、日本列島付近の海流や地形等も考慮した現実と類似した状況のモデルを作成し検証を行っていきたい。

参考文献

- [1] 河村哲也, "流れのシミュレーションの基礎!", 山海堂, 2002.
- [2] 小倉義光, "一般気象学", 東京大学出版会, 1984.
- [3] 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.