

雲の発生を伴う温帯低気圧の簡易シミュレーションモデル

A simple simulation model of an extratropical cyclone with generation of cloud

お茶の水女子大学人間文化研究科 安田史 (Fumi Yasuda)

関口裕子 (Yuko Sekiguchi)

河村哲也 (Tetuya Kawamura)

Graduate School of Humanities and Sciences Ochanomizu University

1. はじめに

気象分野は大規模数値シミュレーションが最も活躍している分野の1つであり、典型例として数値予報がある。数値予報の高精度化には初期データの収集も重要であるが、気象に関わる多様な要因をいかに正しくモデル化するかという点も大きな意味をもつ。したがって、モデル化は複雑化の一途をたどり、また数値計算にはスーパーコンピュータを駆使する必要がある。一方、気象現象の本質を物理的に理解するためには、枝葉末節を捨てて重要部分を抜き出す必要がある。本研究はこの点に着目して、できるだけ簡単なモデルによって温帯低気圧の発生・発達過程がどの程度再現できるかを調べることを目的としている。温帯低気圧は温帯地域に発生する低気圧でエネルギー源は南北間の温度差にある。そして温帯低気圧の発生、発達、衰弱を通じて南北間の熱輸送が行われる。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かい空気と北極付近の冷たい空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の流れが生まれる。この流れの東側では暖かい空気が北へと移動して温暖前線をつくり、西側の冷たい空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し、温帯低気圧の簡易モデルとみなす。長波長の波動がおきることとそのときの雲の状態を数値シミュレーションにより検証する。

2. 簡易モデル

2.1. モデル化

本研究で用いる簡易モデルの領域は、 x 方向を東西方向、 y 方向を南北方向、 z 方向を高度とし、主に対流圏で起きる現象に注目するため高度よりも東西南北の領域を広くとる。(Fig.1)

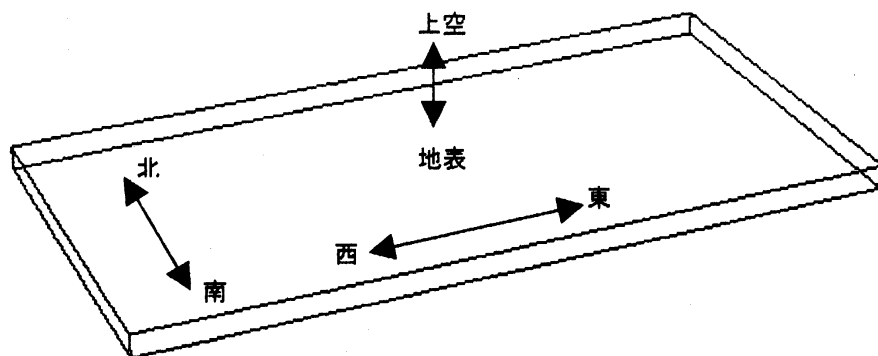


Fig.1:モデル化

また、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。(Fig.2)

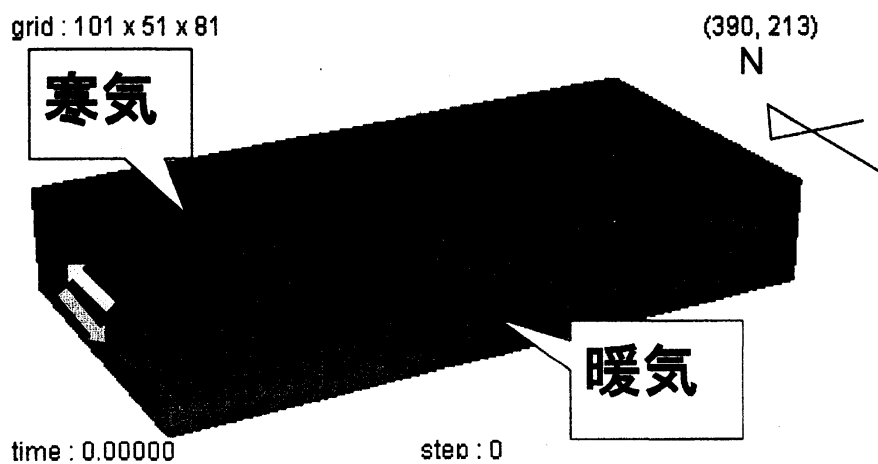


Fig.2:簡易モデル

2.2. コリオリ力

Fig.2 に示した大気の状態で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。一方、実際の地球上では自転の影響により、地面に固定した座標系では、大気に対してみかけの力（コリオリ力）が働く。そこで、実際の偏西風の様子に一致するように高度が増すほど風速が大きくなるよう設定する。風速が大きいほどコリオリ力が強くなるため、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、このつりあいは温度差が大きくなると不安定になる。

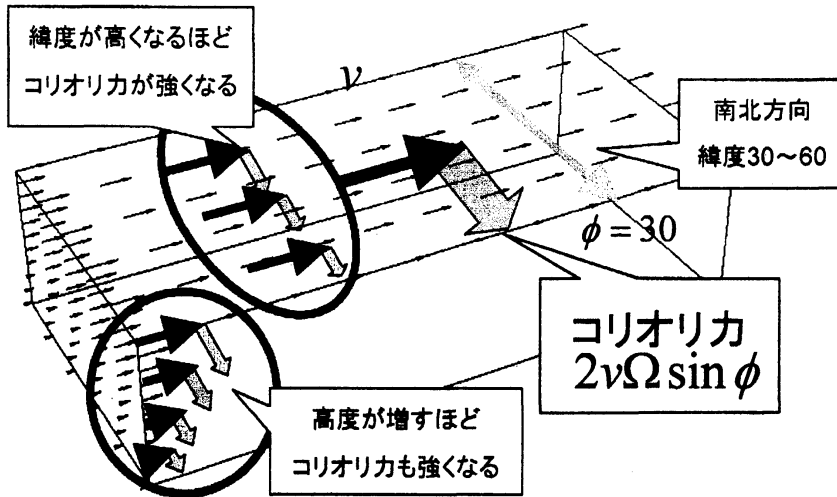


Fig.3:コリオリ力

2.3. 簡易モデル-雲の定義と出力

雲は、大気の水蒸気が下がり、水蒸気が凝結したものである。本研究では大気中に無数にある水蒸気を、温度を持った有限個の粒子と考え、その動きを追跡する。粒子の位置は

$$r^{t+1} = r^t + v^t \cdot \Delta t$$

で求まる。ここで粒子の速度は次式を用いて周りの 8 つの格子点から補間するものとする。

$$v' = \frac{\frac{u_1}{r_1} + \frac{u_2}{r_2} + \frac{u_3}{r_3} + \frac{u_4}{r_4} + \frac{u_5}{r_5} + \frac{u_6}{r_6} + \frac{u_7}{r_7} + \frac{u_8}{r_8}}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} + \frac{1}{r_5} + \frac{1}{r_6} + \frac{1}{r_7} + \frac{1}{r_8}}$$

本研究では、各粒子が存在する位置における温度が、設定した温度を下回った時点で雲と判定する。また、降雨による水分量の減少はないと仮定しているため、温度が設定温度を超えともう一度水蒸気に戻るものとする。なお、雲の発生に伴う流れの影響は考慮していない。

以上の方法では、各粒子ごとに速度・位置の計算をしているため、その数が計算時間に及ぼす影響は大きい。そこで少ない粒子によって計算を実現するため、各格子点において粒子の密集度を表す量を以下のように定義して、これを雲として出力することにした。

$$Cld(j,k,l) = \sum_{i=1}^{imax} (\exp(-r_i^2) + (\kappa z))$$

ここで、 r_i は i 番目の粒子と格子点 (j,k,l) との距離とする。このように定義する

ことにより、有限個の粒子の隙間をうめることができ、さらに一箇所に複数の粒子が集まったときの様子を、より正確に表現できると考えられる。

また、初期の粒子は東西方向に 20、南北方向に 8、高度方向に 4 個等間隔に配置をした。東西の周期条件にあわせて粒子は循環しているものと考えた。

3. 計算条件

3.1. 基礎方程式

大気中の流れは低速で温度変化も大きくないため、非圧縮性の流れとみなすことができ、ブジネスク近似が適用できる。したがって、連続の方程式 (1) と非圧縮性ナビエ・ストークス方程式 (2) およびエネルギー方程式 (3) の 3 式を支配方程式とする。

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

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

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

$\mathbf{v}$: 速度ベクトル p : 圧力 μ : 粘性率 ρ : 密度

$\mathbf{f} = (2v\Omega \sin \phi, -2u\Omega \sin \phi, -g)$: 外力 (コリオリ力と重力) 項

Ω : 自転速度 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 : 熱拡散率 Q : 潜熱による発熱 t : 無次元時間

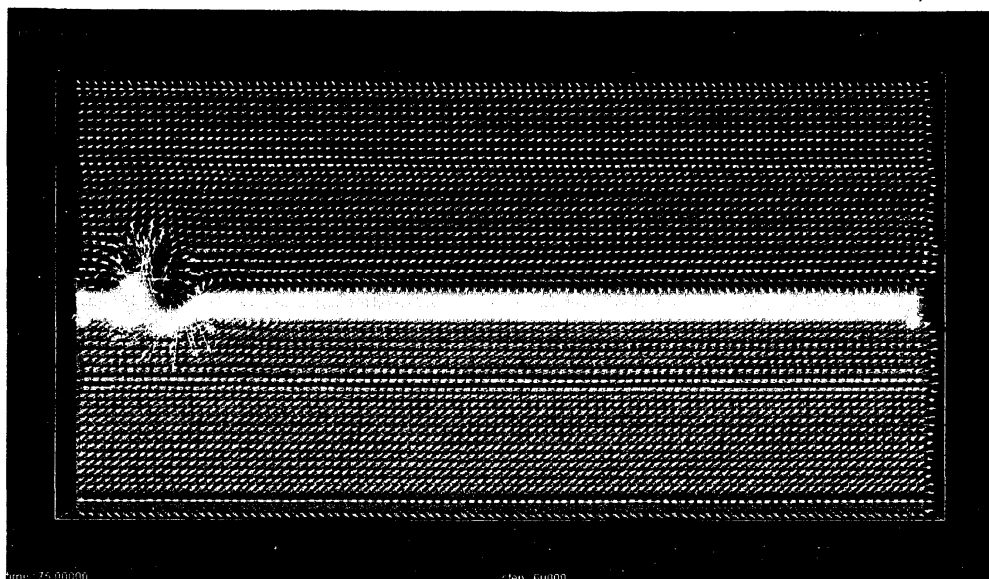
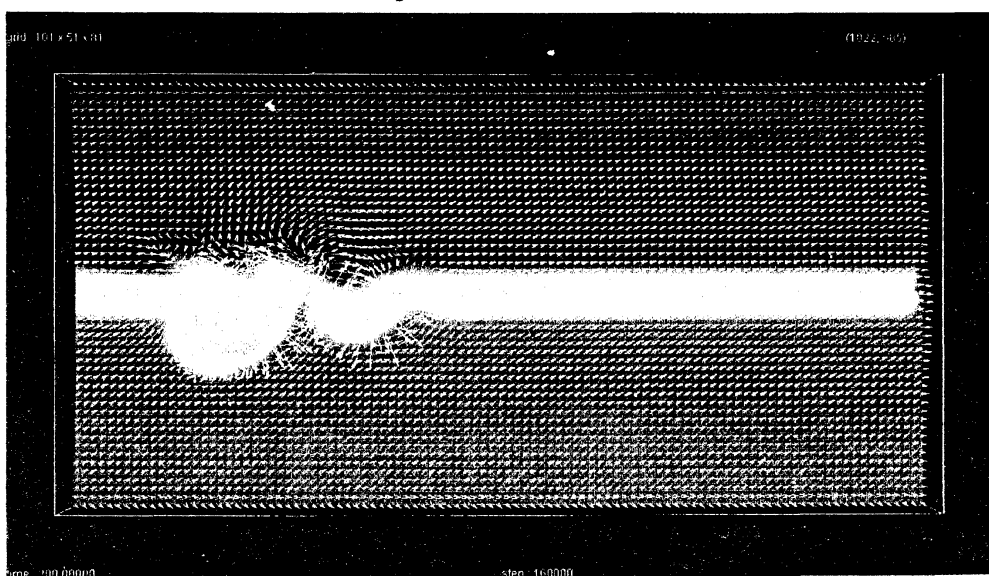
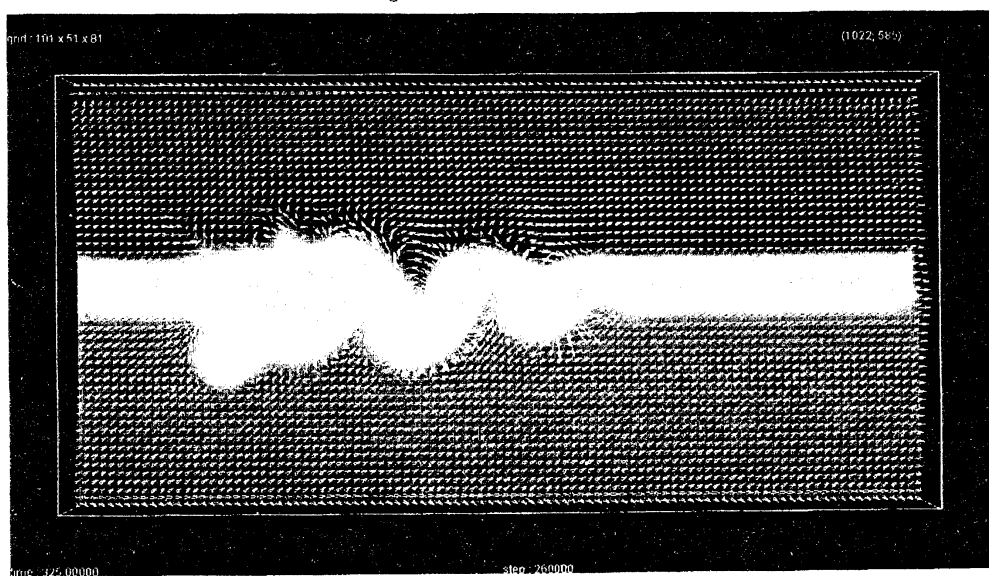
本研究ではこれらの方程式の数値解法としてフラクショナルステップ法を採用した。方程式 (2) の非線形項の差分近似については、3 次精度上流差分を用いた。時間微分には前進差分、その他には中心差分を用いた。

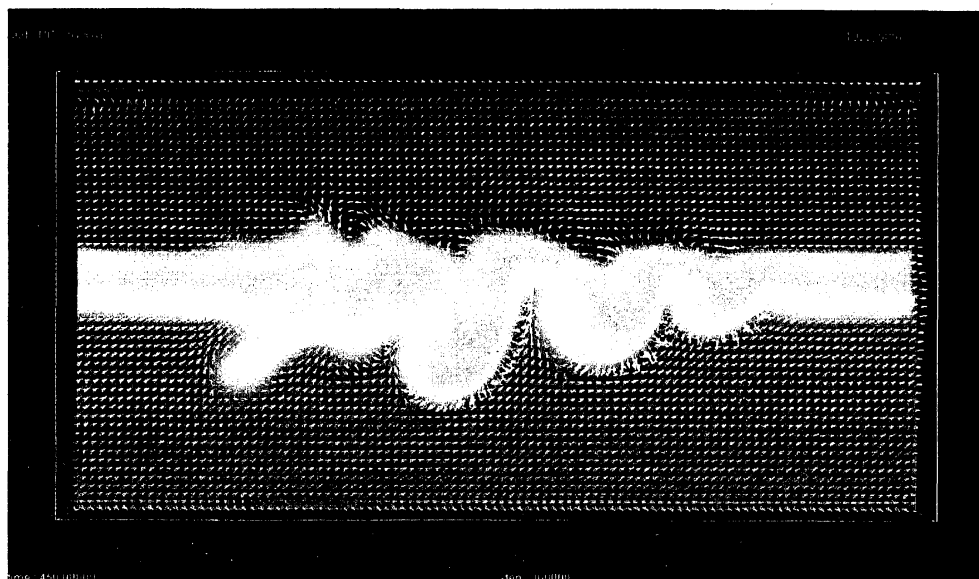
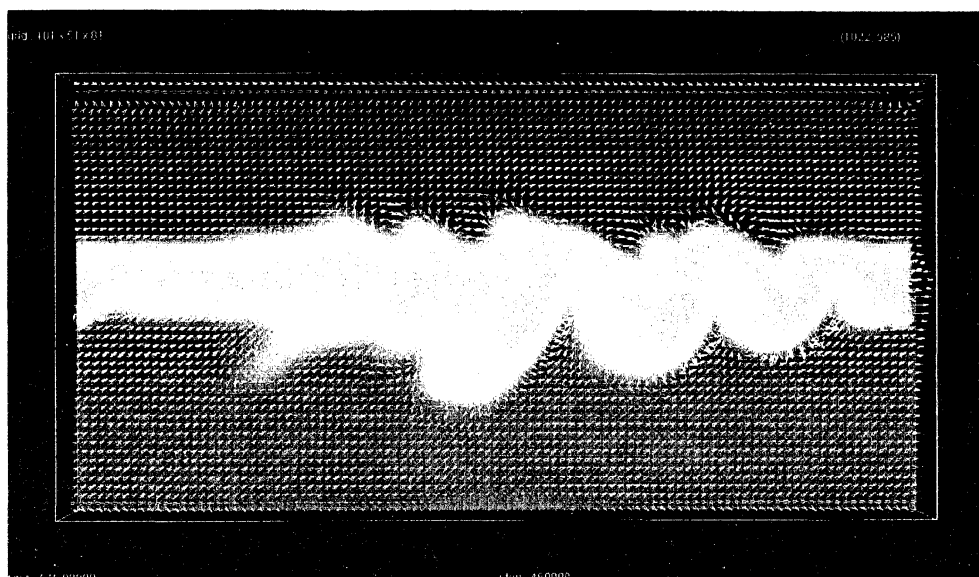
3.2. 格子生成

格子は、直交等間隔格子とする。ただし、対流圏の空気の流れには鉛直方向の変化が重要であると考え、z 方向の間隔は x、y 方向の約 25 分の 1 と細かくした。計算に使用した格子数は x、y、z 方向に $100 \times 50 \times 80$ である。

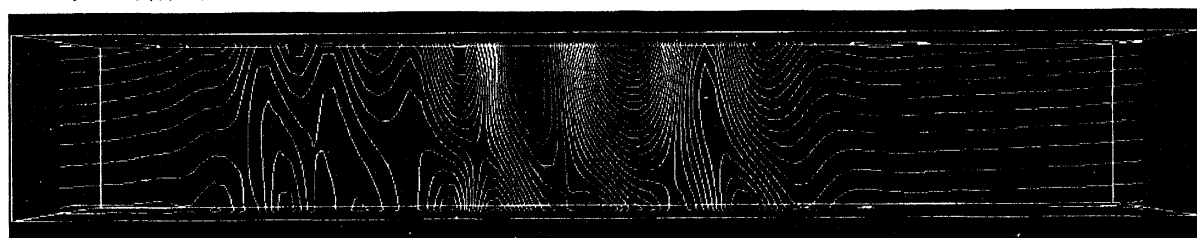
4. 計算結果

まず、Fig.4～Fig.8 に地表面付近の速度ベクトルと温度の図を時間を追って示す。

Fig.4:地表面付近の風速と温度($t=75$)Fig.5:地表面付近の風速と温度($t=200$)Fig.6:地表面付近の風速と温度($t=325$)

Fig.7:地表面付近の風速と温度($t=450$)Fig.8:地表面付近の風速と温度($t=575$)

偏西風波動にあたる波が大きく波打っている様子が見て取れる。Fig.9 に y 方向から見た鉛直面内の等圧線を示す。

Fig.9:前線付近の鉛直面内での等圧線($t=337.5$)

図では気圧の尾根と気圧の谷を見ることができ、発達しつつある偏西風波動の東西鉛直断面内の構造と一致する。

Fig.10～Fig.14 は地表面付近の等圧線を時間で示した図である。

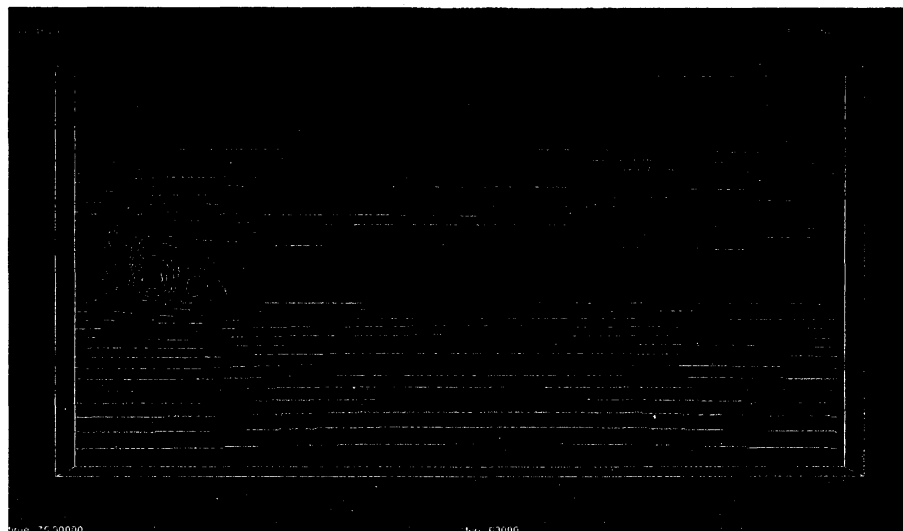


Fig.10:地表面付近での等圧線($t=75$)

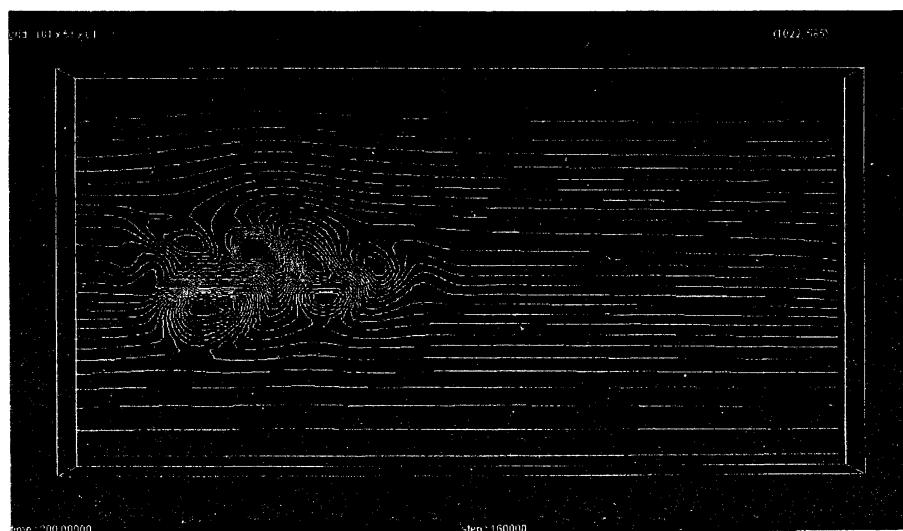


Fig.11:地表面付近での等圧線($t=200$)

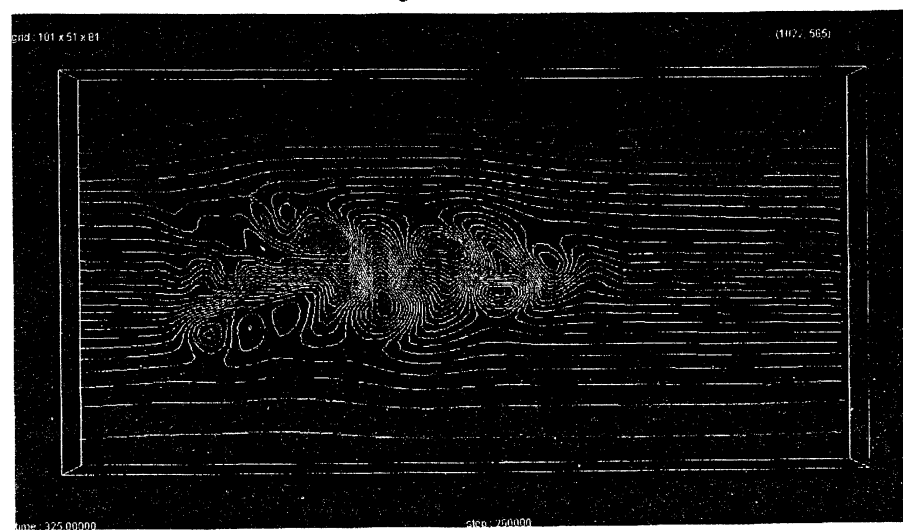


Fig.12:地表面付近での等圧線($t=325$)



Fig.13:地表面付近での等圧線($t=450$)

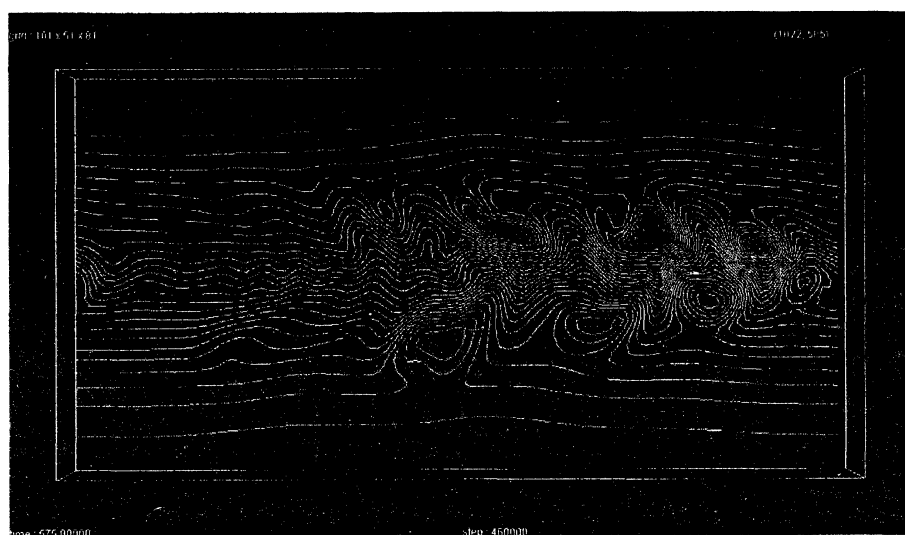


Fig.14:地表面付近での等圧線($t=575$)

温帯低気圧や移動性高気圧と思われる波動が西から東へ動く様子がみられる。さらに、Fig.15 は地表面付近の等圧線と風速の拡大図である。

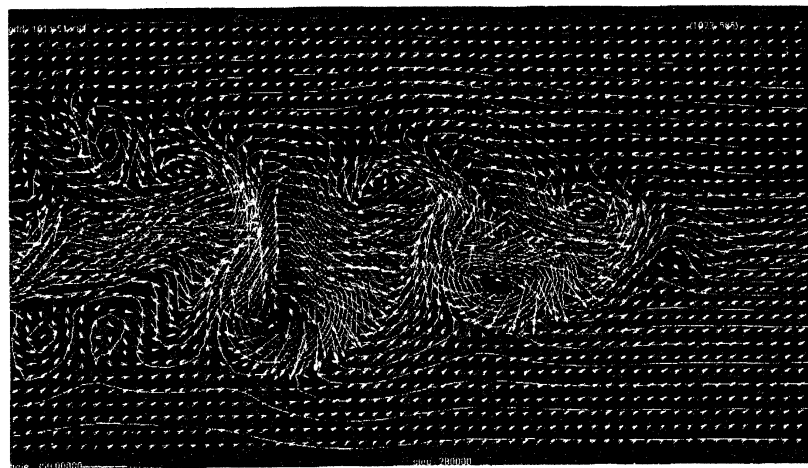


Fig.15:地表面付近での等圧線と風速($t=350$)

温帯低気圧に風が吹き込み、移動性高気圧からは風が吹き出している様子がわかる。

また、上空と地上それぞれの等圧線を、温帯低気圧が発達中と最盛期で比べてみる。Fig.16 のように温帯低気圧の中心を結んだ気圧の谷の軸が、発達中よりも最盛期のほうが起き上がっているのが見られる。

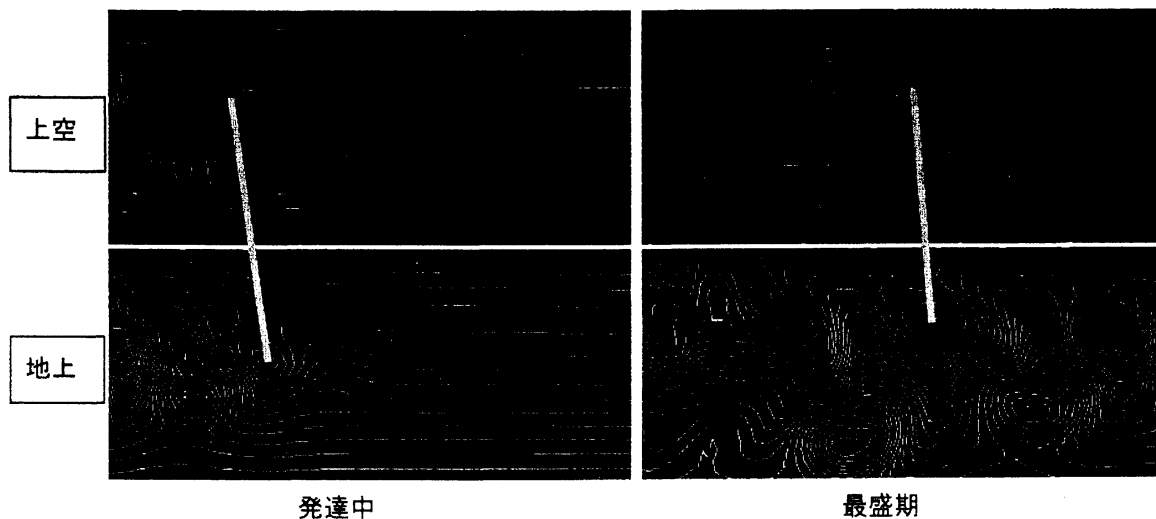


Fig.16:温帯低気圧発達中と最盛期におけるの地表面付近と上空での等圧線

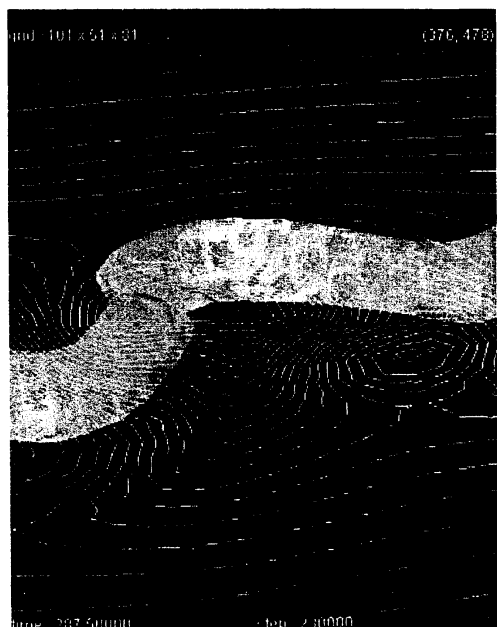


Fig.17:南西上空から見た等圧線（地表面付近）と温度境界面の立体構造

Fig.17 は、南西上空から見た地表面付近での等圧線と暖気と寒気の温度境界面の立体構造を表している。気象学の教科書にも載っている温帯低気圧の立体構造と非常に良く似た構造になっていることがわかる。

Fig.18～Fig.20 は z 方向高度の高いところから地表面に向かって見たときの雲と等圧線を表示させたものである。

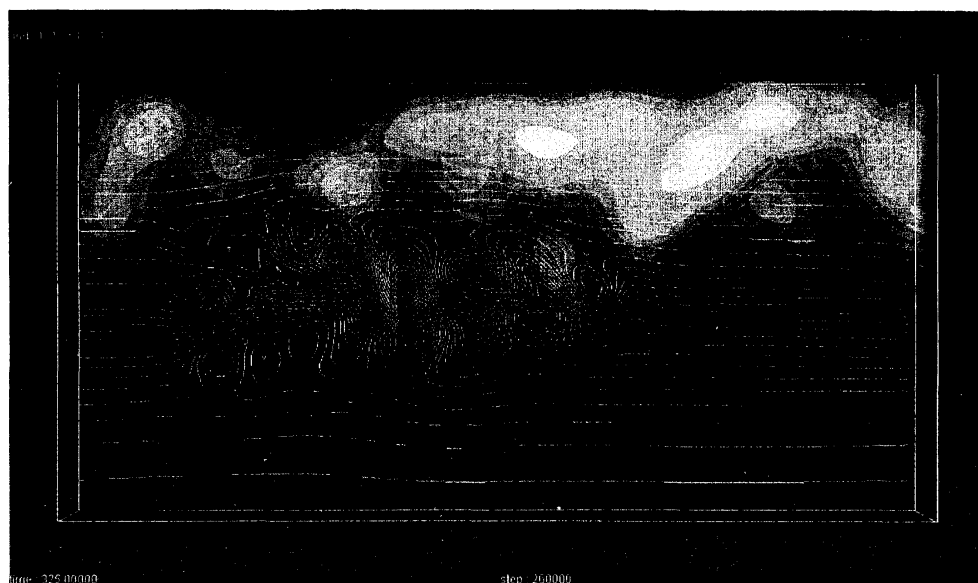


Fig.18:水平面内での雲と地表面付近の等圧線(t=325)

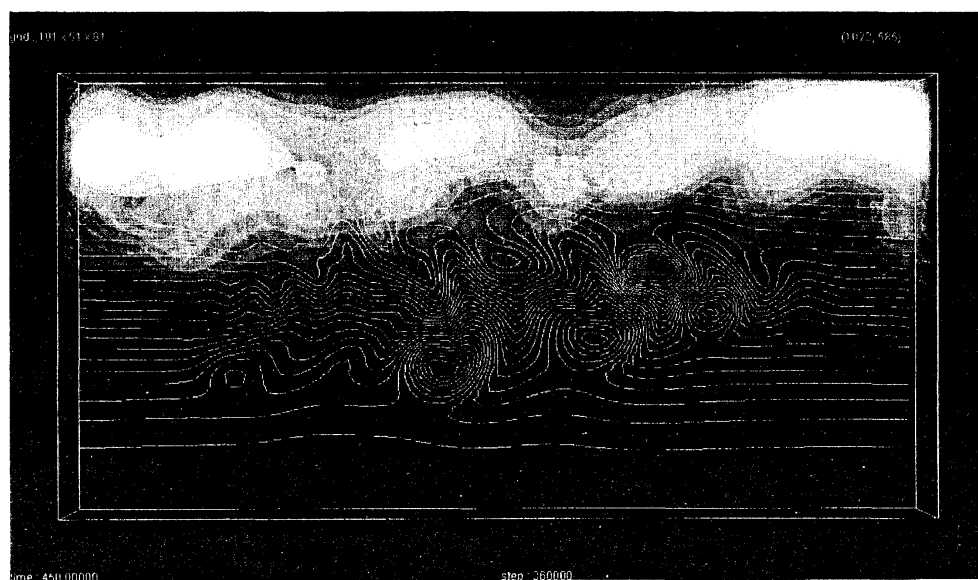


Fig.19:水平面内での雲と地表面付近の等圧線(t=450)

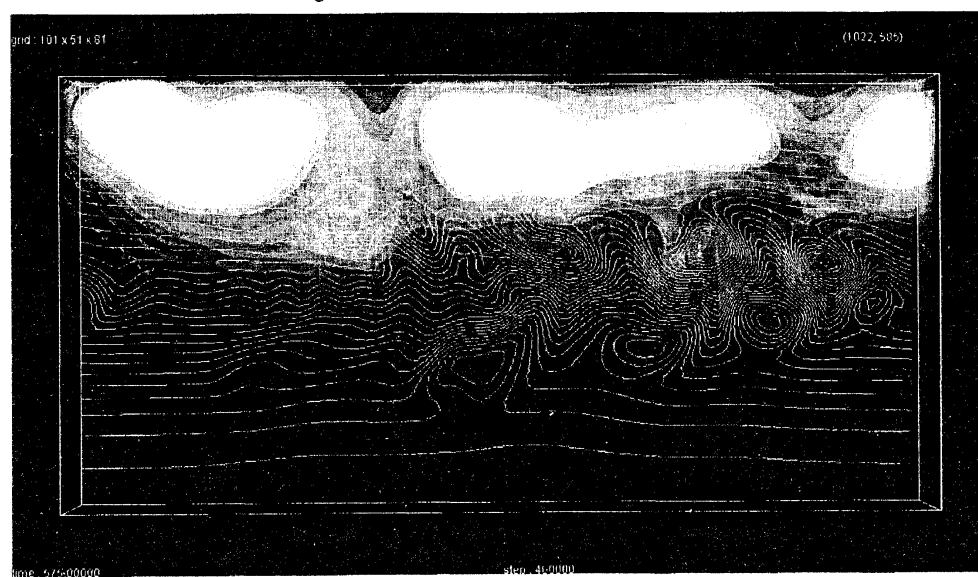


Fig.20:水平面内での雲と地表面付近の等圧線(t=575)

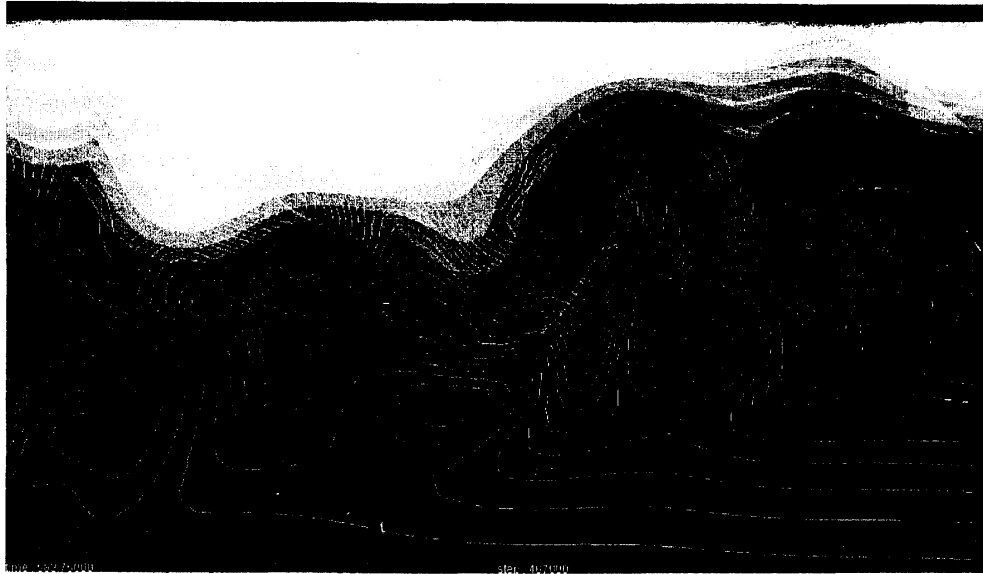


Fig.21:水平面内での雲と地表面付近の等圧線(t=583.75)

Fig.21 は水平面内での雲と地表面付近の等圧線を拡大したものであるが、温帯低気圧と思われる波動の左側に常に厚い雲があることが見て取れる。温帯低気圧の左側に寒冷前線、右側に温暖前線ができるはずなので、寒冷前線にある厚い雲つまり積乱雲が再現できていると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究で用いた簡易モデルによって、東西方向に気圧の尾根と気圧の谷および温帯低気圧、移動性高気圧と思われる波動が生じ、その発生や発達過程と雲の状態をシミュレーションすることができた。前線帯上に低気圧が発生するときに上昇気流と北からの風が吹き、渦が発生する様子が見られた。現在分かっている温帯低気圧の発生メカニズムにほぼ則している結果になった。

今後の課題として計算領域などを実際の大気条件により近づけること、雲の表示は単純な温度によるものであったが、鉛直方向の動きに応じて露点を考慮した雲の表示にすること、雲の発生による流れの影響を顕著にすること、温度の初期値の設定において気温減率を考慮することなどがあげられる。気象モデル(非常に複雑なモデル)との様々な比較をして、簡略性を保ったまま本研究のモデルの信頼性をより高めるためのモデルの改良をしたい。

参考文献

- [1] 土屋なお子：“安定成層中の山越え気流による雲の発生”，お茶の水女子大学卒業論文,2005
- [2] 岸保勘三郎・田中正之・時岡達志：“大気の大循環”，東京大学出版会,1982
- [3] 小倉義光：“一般気象学”，東京大学出版会,1984