

冬における台風発生の数値シミュレーション

九大院 理学府 池田 泰論 (IKEDA Tairon)
伊藤 久徳 (ITOH Hisanori)

概要

下層の低気圧性渦度や高海面温度など、台風の発生に好都合な条件はいくつか知られているが、そのような条件下でどのように台風が発生するのか、その詳細な過程はまだよくわかっていない。その点で、台風の発生過程をシミュレートし、解析することは、発生過程の研究にとって重要である。そこでこの研究では、MM5を用いて発生を再現し易いと思われる冬の台風にしほり、T9626, T0023, T0125のシミュレートを行った。また、台風形成の過程をPVの視点から調べ、ウォームコアの形成についても熱力学の式から定量解析を行った。

熱帯低気圧が観測される二日も前からシミュレーションを開始したにも関わらず、どれも比較的現実的な台風をシミュレートできた。3例に共通して、初期には下層で低気圧性渦が、上層には大規模な高気圧性の渦が存在していた。やがて下層の渦においてシアラインが形成され、多くの積雲が発達し、その非断熱加熱によってPVが生成された。生成されたPVは渦中心へ移流されていき、合併を繰り返しながら強化し、台風となった。シミュレーションで見られたシアラインはQuikSCAT海上風やTBBでも確認できた。これはシミュレーションと同様のことが現実大気でも起こっていることを示唆している。

ウォームコアは台風強度の達成と同時期に形成され、その形成には雲の凝結による非断熱加熱が効いていた。

1 はじめに

台風は北太平洋西部とその沿岸域に存在する最大風速が17.2m/sに達する熱帯低気圧とされている。Gray(1968)により、台風発生に関して好都合ないくつかの条件が明らかとなった、それは高海水温(26.5°C以上)、下層の総観規模低気圧性渦、弱い鉛直シア(Bracken and Bosart 2000によると5~10m/s程度)、赤道から3~5°以上離れていることなどである。また、対流圏上層トラフ(Bosart and Bartlo 1991; Briegel and Frack 1997)や対流圏下層のwind surge(Briegel and Frank 1997)などが重要であるという報告もある。

上記のように、台風発生に関する気候学的要因は広く一般的に知られているが、このような条件下で具体的にどのようなステップを踏んで台風が発生するのか、その詳細はわかっていない。そこで、この研究では数値モデルを用いて実際の台風を再現し、そのデータを用いて台風の発生過程を調べることを目的としている。

本研究でターゲットとして選んだのは冬の台風であるT9626, T0023, T0125である。夏の場合、全体として熱的に台風発生に好ましい環境であるため、至るところで台風が発生する可能性があるが、逆に冬の場合は、熱的には好ましくない環境であるため、大規模な力学場に即した現実的な台風が再現できると考えたため冬の台風に絞っている。

2 使用したモデルとデータ

使用したモデルは5th-Generation Pennsylvania State university/National Center For Atmospheric Research Mesoscale Model version3.4 (MM5)である。これは非静力学の領域モデルで、Asselin タイムフィルターをかけたリープフロッグ法で積分する。今回は三重ネストで計算しており、ドメイン1~3はそれぞれ、格子間隔81km, 27km, 9km、格子数80×90, 130×160, 199×199(T0125のみ229×199)、積雲スキームKuo, Kain-Fritsch, Kain-Fritschでexplicit降水スキームは全てsimple ice、境界層スキームも全てMRFスキームである。また上部境界は放射境界条件であり、鉛直層数は地上から50hPaまで23層とってある。

本研究で使用したデータは、モデルの初期値・境界値としてNCEP/NCARの再解析データとReynolds Sea Surface Temperature データ、モデルと観測との比較用として、気象庁ベストトラックデータ、QuikSCAT 海上風データ、GMS-5 TBB データである。

3 結果

Fig.1 は T0125, T0106 における観測とシミュレーションのストームトラックの比較である。どちらも熱帯低気圧が観測される二日前を初期値として、同様の設定でシミュレートしたのだが、夏の台風である T0106 に比べ、冬の台風 T0125 の方がずっと現実的に再現できていることがわかる。以下では T0125 の事例についてその発生過程を追うことにする。

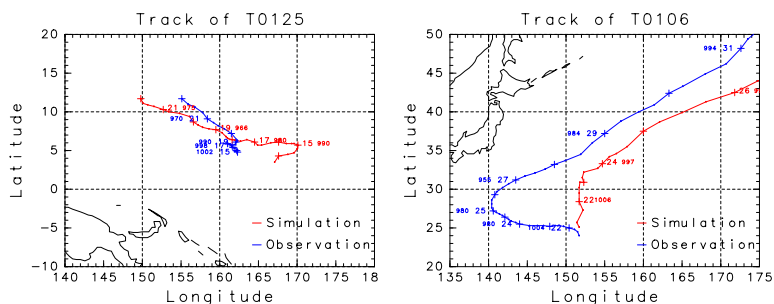


Fig. 1: T0125(左) と T0106(右) における観測とシミュレーションのトラック比較。

3.1 初期発達

Fig.2 には初期と 24h における下層と上層の渦度、そして鉛直シアが描かれている。Fig.2 上段を見ると、初期には、下層に 1000km を超える総観規模の低気圧性の渦があり、上層には高気圧性の渦が下層渦の北側に存在していることがわかる。また下層渦中心付近では鉛直シアは 5~10m/s の範囲である。下段を見ると、24h には下層渦が強まり、初期に見られた上層の高気圧性渦は見えなくなり、代わりに下層渦と対応した場所で発散が起こっている。また、鉛直シアについては 5~10m/s 程度を維持している。

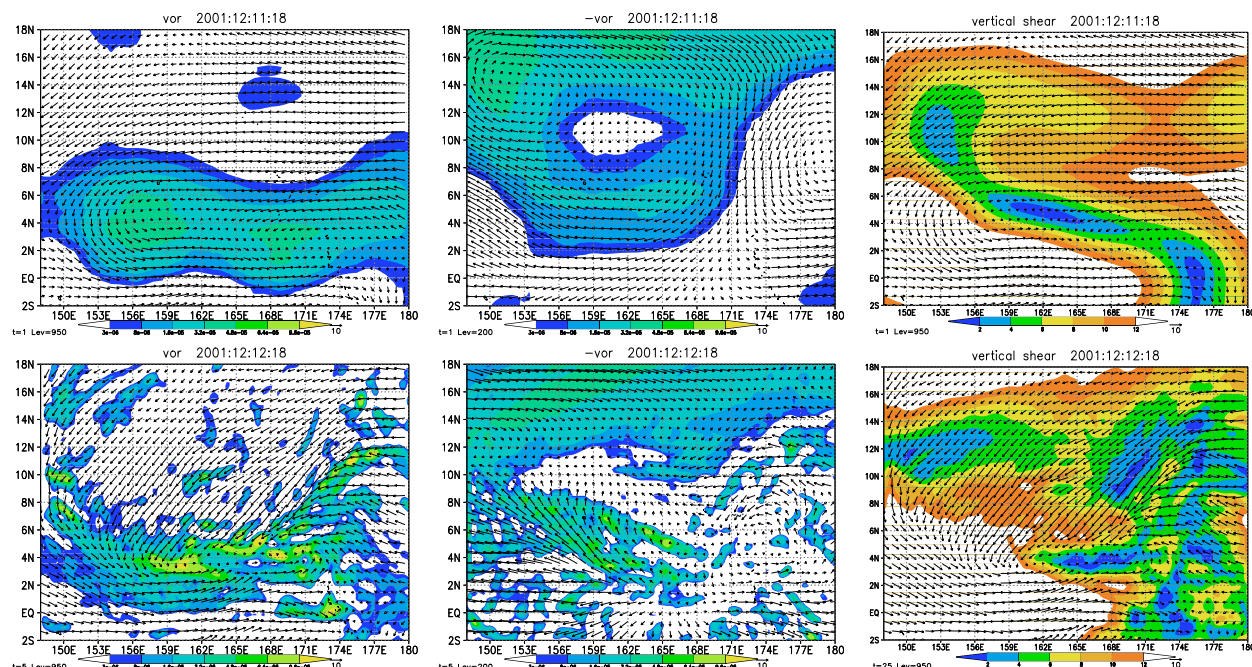


Fig. 2: 左列は 950hPa の渦度 (s^{-1}) と風, 中列は 200hPa の渦度 ($\times 1 s^{-1}$) と風, 右列は 200hPa-850hPa 鉛直シア (m/s) と 850hPa の風である。上段はシミュレーションの初期場、下段は積分開始から 24h 後である。

3.2 シアーラインの形成

前節で見られた初期下層渦は次第に強まり、渦の南西部にシアーラインを形成する。Fig.3を見ると、24hでは渦南西部にはわずかな収束と0.5PVU程度のPVしか見られないが、48hには明瞭な収束線ができていて、それに沿う形で大きなシアーのラインが見えている。また、このシアーラインに沿ってPV列ができていることもわかる。このPV列については4.2節で考察する。

3.3 PVの移流・融合

Fig.4には48~54h, 64~70hの700hPaにおけるPVと風が示してある。PVは等温位面上の保存料であるので、本来等温位面上の分布を示すべきであるが、熱帯域では等温位面と等圧面はほぼ平行であるため、等圧面上の図で代用した。Fig.4を見ると、上段ではシアーライン上に並んだPVが風に流されて渦の中心へと移流されている様子がわかる。また下段ではPV極大が低気圧性の回転をしながら合併し、より大きな極大を作っていることがわかる。

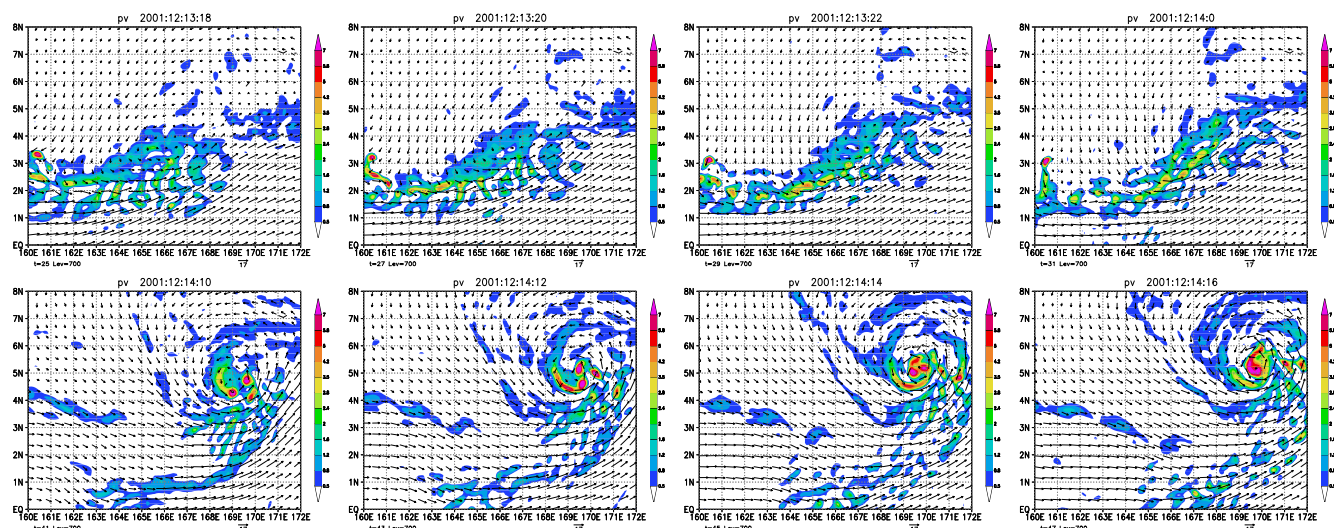


Fig. 4: 48~54h(上段), 64~70h(下段)における700hPaのPVと風。

3.4 台風強度の達成

本研究では、台風を「990hPaにおいて風速15m/s以上の領域が渦を半周以上取り囲み、かつ、最大風速が17m/sを超えている渦」と定義した。Fig.5に示しているように、65hで初めてこの条件を満たしており、この時間が台風強度の達成時間である。また、この時間帯はFig.4でPVの合併が進行している時間でもあり、風速の強化はそれと対応している。

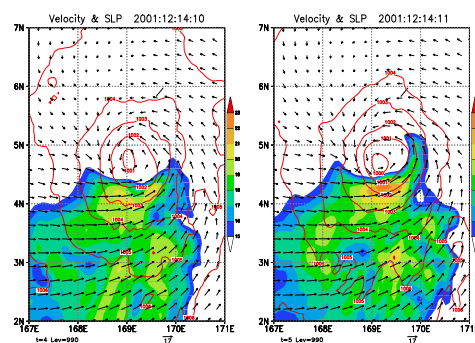


Fig. 5: 64(左),65h(右)における990hPaの風速(カラー,m/s)とSLP(コンター,間隔:1hPa)

3.5 ウォームコアの達成

熱帯低気圧中心付近の下層では、普通、コールドコアとなっている。しかし、台風の形成期にはそれがウォームコアへ変わると言われている (Yanai 1961)。そこで、この研究でもウォームコアへの変化が再現できているかどうかを調べた。ここで、850hPa において、渦の中心の温位偏差が周囲 100km と比較して 1.5K 以上高くなったとき、ウォームコアの形成と定義している。Fig.6 には 61 ~ 66h における 850hPa の温位偏差を示している。最初は渦中心はコールドであるが、だんだん温度が上がり、66h (Fig.6 右下) でウォームコアとなった。その後もウォームコアはどんどん成長していった (not shown)。このように、シミュレーションにおいてウォームコア形成も再現できていた。

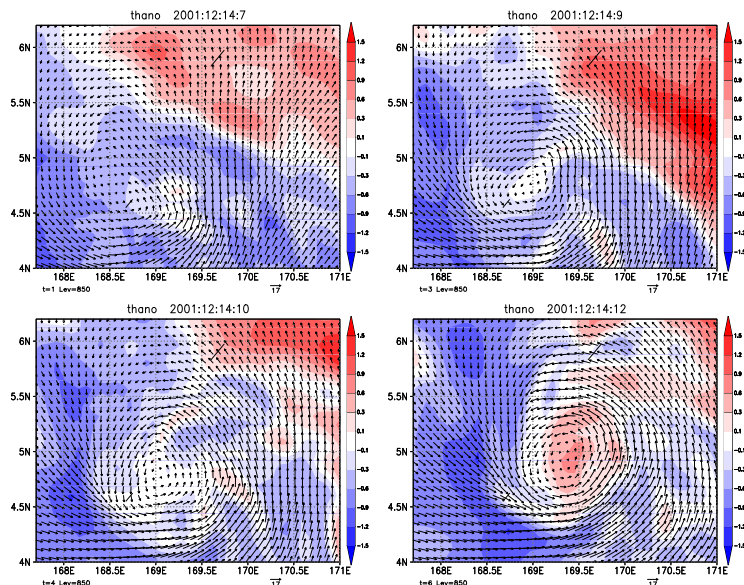


Fig. 6: 61 ~ 66h における 850hPa の温位偏差 (K) と風ベクトル。

4 発生過程におけるいくつかの問題

3 節では T0125 における台風の発生過程を追った。ここまでで、いくつかの疑問がある。それは、1) 初期渦の南西部に見られたシアーラインはどのようにして作られたのか、2) なぜシアーライン上に PV が並んでいたのか、3) ウォームコアの形成要因は何かということである。以下ではこのことについて考察する。

4.1 シアーラインの形成について

Fig.7 には 9, 25h における 850hPa の収束、温位偏差、全雲水量、そして、850, 900, 950hPa の 3 層平均相対湿度が描かれている。初め、特に収束はなく、それほど目立った雲もないが、初期渦南部の低温領域付近でやや高湿度となっている。時間が経つと、初期渦南西部の温度が下がり、それに従って高湿度となり、積雲群が発達している。この積雲群により、収束が強まって前線のようなものを作り、さらに積雲が発達するという正のフィードバックが生まれ、シアーラインが発達したものと考えられる。

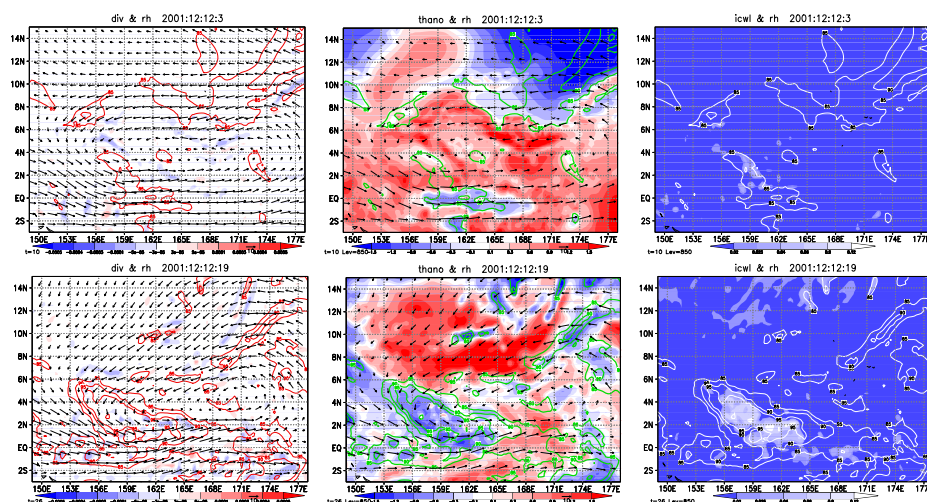


Fig. 7: 左列、中列、右列のカラーはそれぞれ、850hPa 発散、温位偏差、全雲水量 (cm)。コンターは全て 850, 900, 950hPa の 3 層平均の相対湿度であり、間隔は 5%、85%以上のみを描いている。上段は 9h、下段は 25h である。

4.2 シアーライン上に並ぶPVについて

断熱の場合、PVは等温位面上で保存し、式(1)の P で表される。 ζ は相対渦度、 f はコリオリパラメータ、 g は重力加速度、 θ は温位、 p は圧力である。式(2)の σ は静的安定度パラメータである。また、PVのラグランジュ変化は、式(3)で与えられる。ここで、 k は鉛直方向の単位ベクトル、 F_r は摩擦、 V は水平風ベクトルである。式(3)の右辺第1項は非断熱加熱によるPVの生成を表す。具体的には、非断熱加熱率の鉛直差(上-下)が正であれば、PVが生成される。また、第2項は摩擦による効果だが、境界層の上では摩擦の効果は小さいので、以下では考えないことにする。

シアーライン上に並んだPVは、シアーライン上の積雲群による非断熱加熱によって非断熱加熱率の鉛直差がもたらされ、生成されたものと考えられるが、それを式(3)から定量的に計算した。その結果、非断熱加熱による生成とPVの分布はよく一致しており、ライン上に並んだPVは非断熱加熱によって作られたものであることを定量的に確かめることができた(Fig.8)。

また、シアーラインはTBBやQuikSCAT海上風などの観測データにも見られる(Fig.9)。このことは、シミュレーションと同様のことが現実大気においても起こっていることを示唆している。

$$P = (\zeta + f) \left(-g \frac{\partial \theta}{\partial p} \right) \quad (1)$$

$$\sigma = -\frac{1}{g} \frac{\partial p}{\partial \theta} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{DP}{Dt} &= \frac{\partial P}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla_{\theta} p \\ &= \frac{p}{\sigma} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sigma \dot{\theta}) + \sigma^{-1} \mathbf{k} \cdot \nabla_{\theta} \times \left(\mathbf{F}_r - \dot{\theta} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

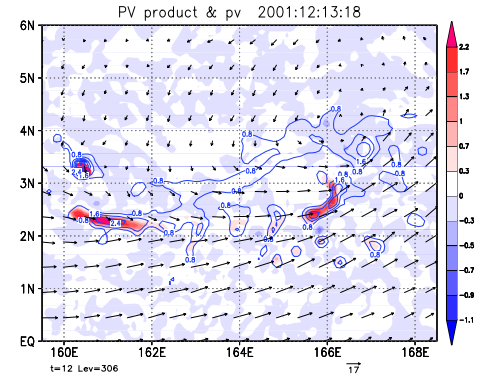


Fig. 8: 48h, 306K面(約830hPa)での非断熱加熱によるPV生成(カラー, PVU/hour)とPV(コンター)

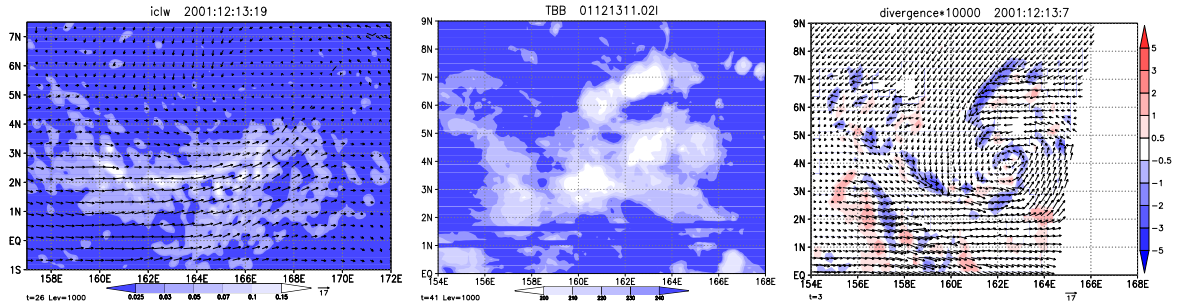


Fig. 9: 左、中、右はそれぞれモデルの全雲水量 (cm) と 1000hPa の風、TBB(K)、QuikSCAT 海上風とその発散 ($1 \times 10^4 \text{1/s}$) である。

4.3 ウォームコアの形成要因

ウォームコアが形成される6時間程前から、850hPaにおいて渦の中心部付近の温度変化はほぼ定常的に正となっていた(not shown)。そのため、渦中心部で温度が上がり、ウォームコアとなった。そこで、その温度変化を主に雲の凝結による非断熱加熱と、主に下降流による断熱加熱に分けてどちらが大きく寄与しているのかを調べた。その結果、渦中心付近では非断熱加熱の効果が大きく効いて昇温していることがわかった(Fig.10)。また、図には示していないが、台風が強くなり眼が形成される頃には、中心付近で非断熱加熱はほぼなくなり、代

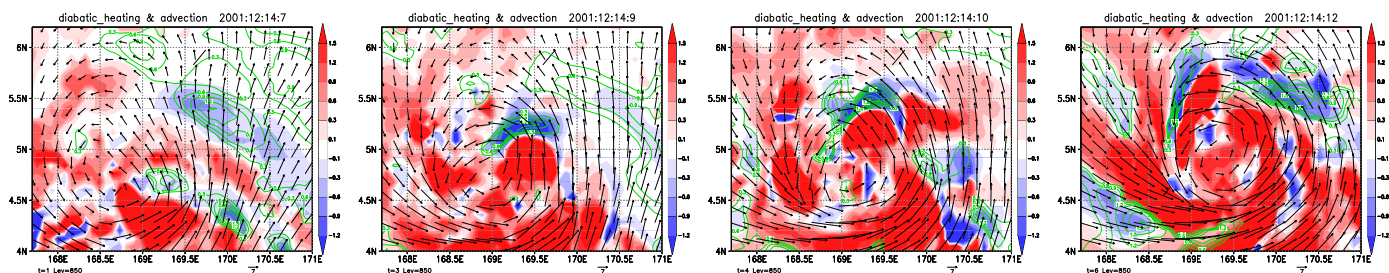


Fig. 10: 61 ~ 66h における 850hPa 温度の非断熱加熱による変化 (カラー, K/hour) と断熱加熱による変化 (コンター, 0.3K/hour)

わりに下降流に起因する断熱加熱が大きくなっていた。つまりウォームコア形成には非断熱加熱が、成熟してからの維持には断熱加熱が効いていた。

5 T0125 と T9626, T0023 の比較

T0125 と T9626, T0023 の発生過程には多くの類似点があり、初期に存在した下層の低気圧性渦、下層渦北側の上層高気圧性渦を始め、シアーラインが形成されること、シアーラインで生成された PV が渦中心へ移流しながら合併することなどが共通していた。また、Fig.11,12 を見ると、位置、形に多少違いが見られるものの、T9626, T0023 のケースでも観測によりシアーラインのようなものが捉えられていることがわかる。

また、T9626 のウォームコアは渦中心付近の非断熱加熱により形成されており、T0125 と同様であった。しかし、T0023 のケースでは、渦中心から大きく外れたところにウォーム部が形成され、それが中心へ移流してウォームコアとなるという他の二事例とは異なったものとなっていた (Fig.13)。そのウォーム部自体の形成には非断熱加熱・断熱加熱の両方が寄与していた。また、眼の形成後、断熱加熱が効くようになるのは3例とも共通であった。

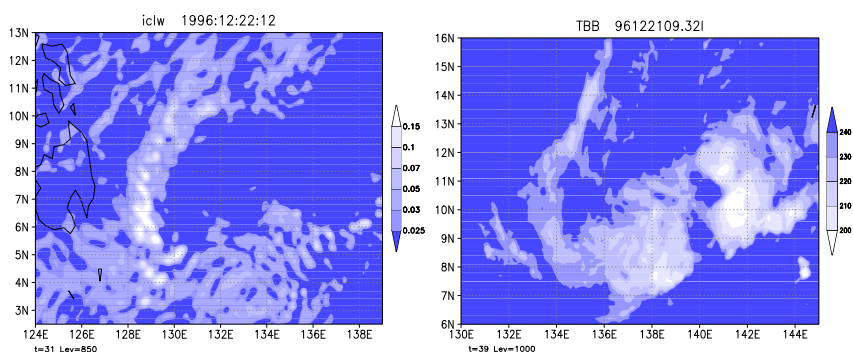


Fig. 11: T9626 における全雲水量 (cm, 左) と TBB(K, 右)。

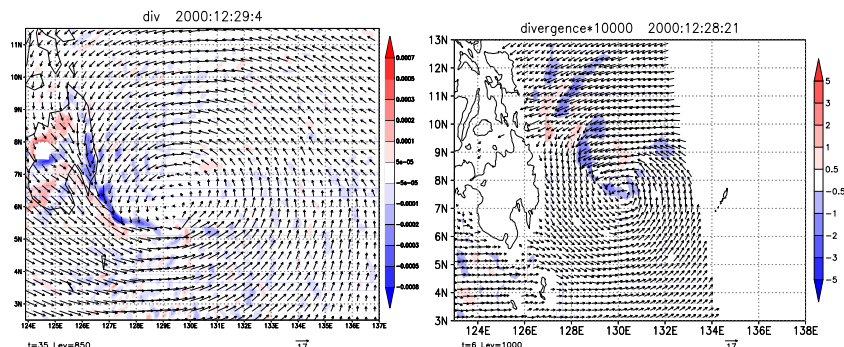


Fig. 12: T0023 における 850hPa 発散 (左) と QuikSCAT 海上風とその発散 ($1 \times 10^4 \text{1/s}$)

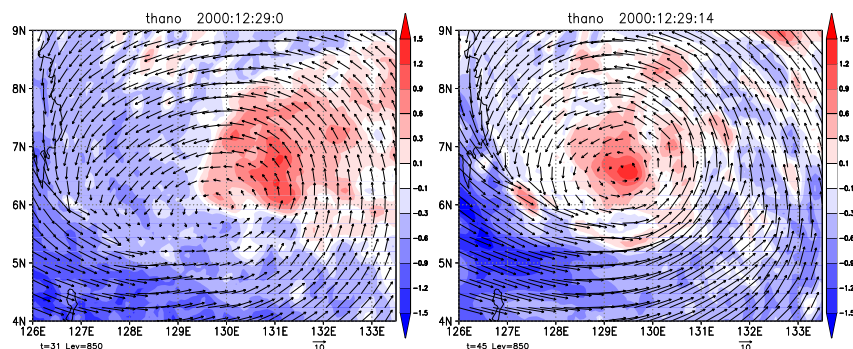


Fig. 13: T0023 における 850hPa の温位偏差。ウォームコア形成前 (左) とウォームコア形成時 (右)。

6 まとめ

本研究ではMM5を用いて台風を再現し、そのデータから台風の詳細な発生過程を調査した。大規模な力学的環境場が台風発生に適していると考えられる冬の台風 (T9626, T0023, T0125) を選ぶことで、比較的現実的な台風を再現することができた。調査の結果、共通の台風の発生過程は次のようであった。

1. 初期の下層に総観規模の低気圧性渦度が存在している。
2. 下層において初期渦の南西部が高湿度となる。
3. 高湿度の領域で雲が立ち、やがて前線のようなものを作る。
4. 前線に沿ってシアーラインが形成され、それに沿った収束線ができる。
5. シアーライン上で積乱雲が発達し、その凝結熱によって非断熱的にPVが生成される。
6. シアーライン上で生成されたPVは中心へと移流されていき、合併を繰り返しながら台風へと発達していく。

全ての事例において、シアーラインに沿って並んだPVは、ライン上の積雲群の非断熱加熱により生成されたものであることを定量的に確かめることができた。また、GMS-5のTBBやQuikSCAT海上風データからシミュレーションと同様のシアーラインを見出すことができた。これにより、現実大気でも同様の発生過程を経ている可能性が示唆された。

ウォームコアの形成はT9626, T0125は非断熱加熱によって成されており、T0023についてはウォーム部の移流によって成されていた。

また、今後の課題としては、どんなときにシアーラインができて、どんな時にできないのか、そしてシアーラインができない場合でも初期渦は発達するのか、ということを感じ度実験などを行って調べる必要があると思われる。

謝辞

京都大学防災研究所の石川助教授、奥雄一郎さんにはTBBデータをいただき、さらにデータについて色々と教えていただきました。深く感謝を申し上げます。

参考文献

- Bosart, L. F., and J. A. Bartlo, 1991: Tropical storm formation in a baroclinic environment. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1979–2013.
- Bracken, W. E., and L. F. Bosart, 2000: The role of synoptic-scale flow during tropical cyclogenesis over the North Atlantic Ocean. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 353–376.
- Briegel, L. M., and W. M. Frank, 1997: Large-scale influences on tropical cyclogenesis in the western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 1397–1413.
- Yanai, M., 1961: A detailed analysis of typhoon formation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **39**, 187–214.