

[共同研究成果]

台風に伴うスパイラルレイnbndの数值実験

沢田雅洋・岩崎俊樹
東北大学大学院理学研究科

台風に伴うレイnbndの形成・維持過程について調べるため、理想化した環境場において雲を解像した数值実験を行った。使用した数值モデルは気象庁・気象研究所で共同開発されたJMA-NHMで、詳細な雲微物理過程が含まれている。数值実験の結果、台風の特徴的な構造である台風の眼や壁雲、レイnbndが再現された。レイnbndの形成過程を詳しく見ると、まず積雲は雨水の蒸発によって、下層に冷氣プールを形成する。その冷氣プールがレイnbndの形成・維持に重要な役割を果たしていることがわかった。

1. はじめに

台風は日本に大きな災害をもたらす大気現象の1つである。その台風の特徴として、しばしばスパイラル上の降水帯(レイnbnd)を伴っている。レイnbndは豪雨、水害などをもたらすだけでなく、竜巻の形成のきっかけとなることもあり得る

(McCaul 1991; Spratt et al. 1997)。2006年の台風13号に伴った、延岡での竜巻は記憶に新しい。

レイnbndの構造や振る舞いについて、古くはレーダーによる観測的な研究がある(Senn and Hiser 1959; Tatehira 1961, 1962)。Senn and Hiserはレイnbndの雲パターンが対数らせんで近似できることを見出し、Tatehiraはレイnbndを構成する一つ一つの積雲は半径方向にはあまり動かないが、レイnbnd全体では外側に伝播していくように見えることを示した。しかし、この伝播メカニズムについては明らかにされなかった。レイnbndは停滞する(殆ど動かない)バンドと移動するバンドに分類されている(Willoghby et al 1984; Shimazu 1997)。停滞するレイnbndは台風自身の移動とその周辺の循環場との相互作用で形成され、移動性のレイnbndは内部重力波に関係していると指摘されたが(Willoghby et al 1984)、必ずしも内部重力波に見られる空間構造が観測されているわけではない(Shimazu 1997)。

レイnbndの形成・伝播メカニズムの理論的、数値的な研究は多くあるが、1例として、冷氣プールの伝播(Yamasaki 1983)を挙げる。彼は2次元軸対称モデルを用いて、レイnbndは冷氣プールと台風中心へ向かう吹き込みが収束するところで形成・維持することを示した。しかし、2次元軸対称モデルではレイnbndの3次元的な構造を捉えることは出来ないため、その詳細な形成過程や構造は分からない。Yamasaki (2001)では3次元モデルを用いてレイnbndを再現するものの、5kmの水平格子を用いているため、レイnbndを構成している積雲(水平スケールは数km~10km程度)を捉えるには不十分である。航空機を用いた台風周辺場の雲の観測によると、1つの積雲(対流)に伴う上昇流のコアサイズは直径4km以下のものが90%以上であったと報告されている(Eastin et al. 2005)。

台風及びそのレイnbndを形成する個々の積雲対流は水平スケールが10km程度であるため、雲を直接表現するには数kmの水平格子が必要である。しかし、数

km の水平格子で、台風の循環場（水平スケール 1000km 程度）をすべて覆うのは、計算機資源の制約からほとんど行われていなかった。近年は計算機の発達に伴い大規模な数値実験が可能となり、水平スケールのオーダーが 2 桁以上も異なる現象を同時に扱うことが現実的になりつつある。

そこで本研究の目的は、雲を直接表現できる水平格子 2km を用いて台風の循環場を全て覆って、台風のレインバンドの形成・維持・伝播メカニズムを明らかにすることである。

2. 使用した数値モデルの概要、及び実験設定

ここで用いた数値モデルは気象庁・気象研究所で共同開発されたもので、現業の局地予報モデルとして使用されている。基礎方程式系には完全圧縮形の運動・熱力学方程式を使用している。雲を表現するため、水蒸気その他、5 つの水物質（雲水、雨水、雲氷、雪、あられ）を扱っている [Saito et al., 2006]。モデルは差分法を用いており、移流スキームは水平に 4 次精度のフラックス型、鉛直に 2 次精度中央差分に加え、波数分散性に伴う偽の極値の出現を抑えるためフラックス補正を併用している。

雲微物理過程では混合比（空気 1kg 中の水物質量）と数密度（ 1m^3 中の水物質の粒子数）を予報する 2moment のバルク法を用いる。素過程は凝結、拡散成長、融解、降水、凍結、氷晶核生成など 32 種類の素過程を含む。

レインバンドの形成・維持過程を再現し、そのメカニズムに注目したいので、なるべく単純な条件で数値実験を行う。そこで初期条件として、気温、相対湿度の鉛直プロファイルは計算領域に水平一様に与える。これらの鉛直プロファイルはヨーロッパ中期気象予報センターによる再解析データから、東経 120-160 度、北緯 0-25 度の領域平均した値を使用した。計算領域下層は 303K で水平一様な海面水温とし、時間変化しない。コリオリ力は北緯 15 度の値で一定とし、台風の中心位置は基本的に移動しないようにする。台風の種となる渦擾乱は以下の式で与えた [Sawada and Iwasaki 2007]。

$$v = 2\hat{v} / (1 + (r/\hat{r})^3) \quad (1)$$

ここで、 \hat{v} は 20m/s、 \hat{r} は 120km とした。計算領域は水平 2000km × 2000km で水平格子は 2km とした。鉛直層は 36 層で最下層 40m 格子を用いて、上層ほど幅が広がり、上端は約 24km である。総格子数は $1001 \times 1001 \times 36 = 36072036$ 点となり、使用したメモリ量は 54GB ほどであった。このような大規模な計算を行うには、スーパーコンピュータの使用が不可欠である。SX-9 (NEC 製) は最大 1TB まで使用できるので、この実験が可能となった。時間積分間隔は 12s で、全ステップ数は 36000 ステップとし、120 時間の積分を行う。

3. 数値モデルの高速化

始めに数値モデルのパフォーマンスを調べるため、少ない時間ステップ数で計算を行ったところ、標準の出力より表 1 のような結果が得られた。モデルコードのベクトル化率は約 98.5% で、基本的には sx-9 のようなベクトル計算機上で十分に高速化さ

れていると考えられる。しかし、バンクコンフリクトが計算時間 (User Time) の 1 割を超えており、改善の余地があると考えられる。そこで、最も負荷の大きかったプロセス (subroutine) を探すため、簡易性能解析機能 (-ftrace) を使用した。その結果、最も計算時間を要したプロセスがバンクコンフリクトによるロスが大きいことが分かった。そこで、そのモデルコード (サブルーチン) がコンパイル時に最適化されるようモデルコードを書き直した。その結果を表 1 の右列に合わせて示す。修正したコードでは、バンクコンフリクトの時間が 3 分の 1 ほどになっており、全体として約 2 割の計算時間を短縮できた。

表 1 数値モデルの実行速度。

	オリジナルコード	修正したコード
Real Time (sec)	642.742522	524.843340
User Time (sec)	2337.203664	1758.417273
Sys Time (sec)	68.866429	73.901861
Bank (sec)	291.070170	95.555678

4. 実験結果

初期に与えた軸対称な渦は時間と共に発達し、台風の眼やレイnbndといった台風の典型的な構造を形成する。図 1 に台風の中心気圧と最大接線風速の時系列を示す。中心気圧を見ると、T=30h 付近から気圧が下がり始め、T=36-72h で急激に気圧が深まり、最低気圧は約 925hPa に達する。最大接線風速を見ると、初期渦は初めの約 3 時間は弱まるが、その後少しずつ強まり、T=12-30h で約 25m/s の接線風速を維持する。その後、気圧変化と同様に風速は急激に強まり、最大接線風速は 95m/s ほどに達する。

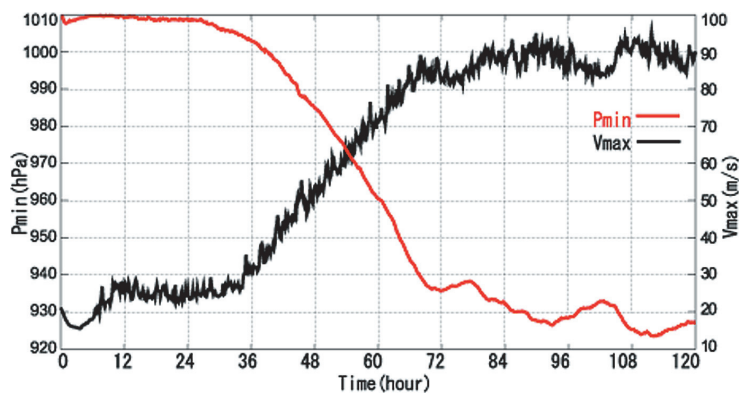


図 1 台風の中心気圧 (赤線：左軸，単位 hPa) と最大接線風速 (黒線：右軸，単位 m/s) の時系列。横軸は積分時間 (単位：時間) を表す。

次にレイnbndの水平構造を見るため、図 2 に台風周辺の降水分布の時間変化を示す。見ての通り、台風の眼やそれを取り囲む壁雲、スパイラル上の降水帯 (レイン

バンド) が再現されているのが分かる。台風の眼のサイズ (台風中心から降水のピークの距離) は約 10km であった。周囲に見られるレインバンドのサイズは様々で、幅は 10-60km、(バンドに沿った) 長さは 50-300km であった。レインバンドの持続時間は 4-8 時間であった。個々の積雲は約 1 時間で形成、発達、衰退するので、レインバンドを構成する積雲群は時間の経過と共に入れ替わっている。レインバンドの移動方向を見ると、接線方向には台風の循環に流されて反時計回りに回転しているが、半径方向には外側に移動していくように見える。また、ここでの数値実験では移動性のレインバンドのみ形成され、停滞するレインバンドは見られない。本実験の台風は動かないので、停滞性のレインバンドは形成されないと考えられる。

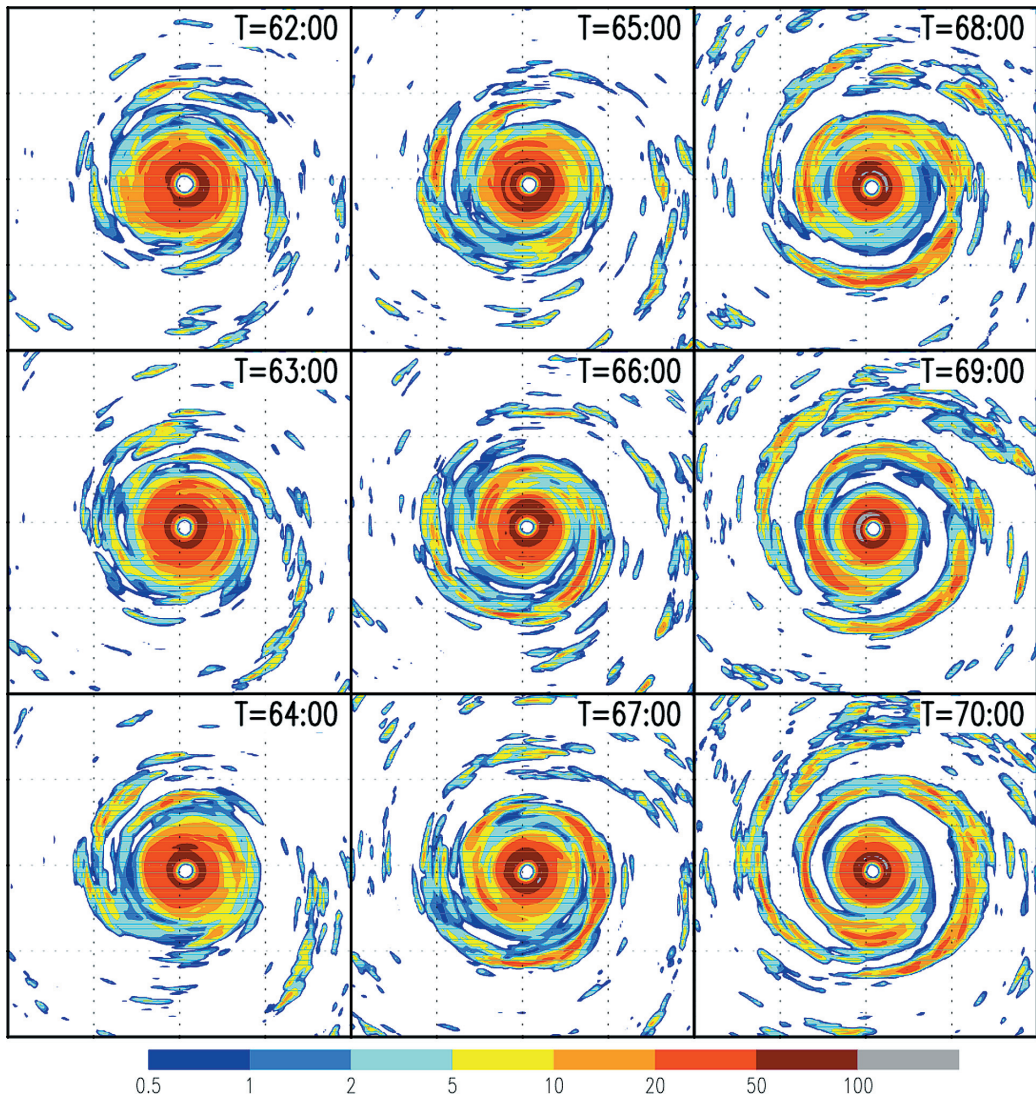


図 2 積分時間 T=62-70h の降水量の水平分布を、1 時間おきに示す。単位は mm/h。台風を中心として 400km×400km の領域を示す。

これらの移動性のレイnbndはどのようにして形成するのか調べるため、過去の研究で指摘された冷氣プールの分布との関連を図3に示す。図3は高度10mで領域平均した気温からの気温偏差を表し、青色で示された領域が冷たい空気（冷氣プール）の位置を表す。図3を見ると、冷氣プールはレイnbndの位置とほぼ対応していることが分かる。これは雨水が蒸発して空気を冷やすことで、その下層に冷氣プールを形成するためである。レイnbndの移動に伴い、冷氣プールも移動しているように見える。

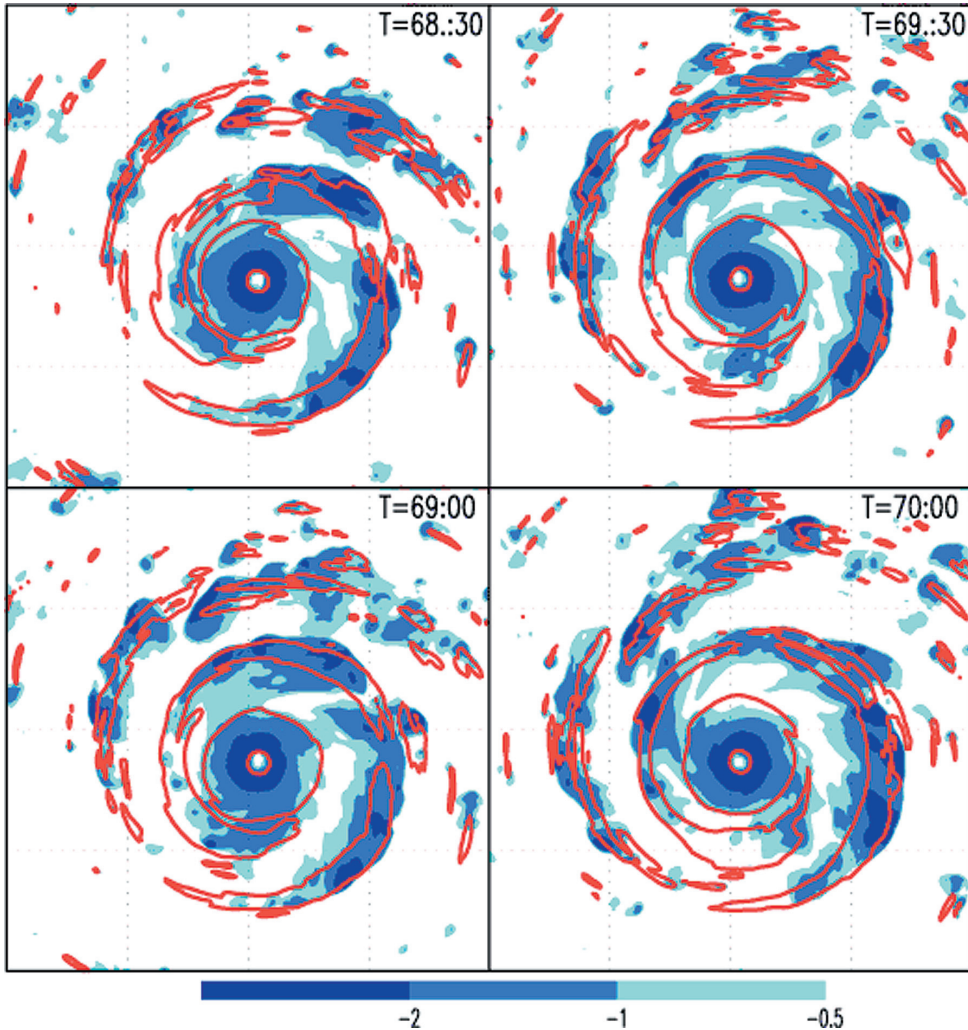


図3 高度10mでの気温偏差（領域平均値からの差）の水平分布（カラー）と5mm/hを超える降水量（赤の等値線）を示す。図は30分間隔。

次に、冷氣プールに沿ってレイnbndが形成・維持されるメカニズムについて詳しく調べるため、下層の風の間と収束場（図4左）、レイnbndの鉛直断面図（図4右）を示す。冷氣プール内の風の間を見ると発散場になっており、台風中心から外側

に向かって吹き出している風が見られる。この冷氣プールの吹き出しと台風の外側から吹き込む湿潤な空気がぶつかり、冷氣プールの前面に沿って収束線が形成される。外側から吹き込んだ湿潤な空気は収束線で持ち上げられることでレインバンドの雲が形成・維持される。鉛直断面を見ると、冷氣プールの前面で持ち上げられた湿潤な空気によって雲水が生成され、凝結熱による上昇流が見られる。それが内側に傾いている様子が見られる。冷氣プール後方の上空で発達した積雲から雨水が供給される。この雨水が蒸発し、下層の冷氣プールを維持している。このように内側から冷氣が供給され続けるため、冷氣プールは外側に移動し、それに伴ってレインバンドも外側に伝播するように見える。

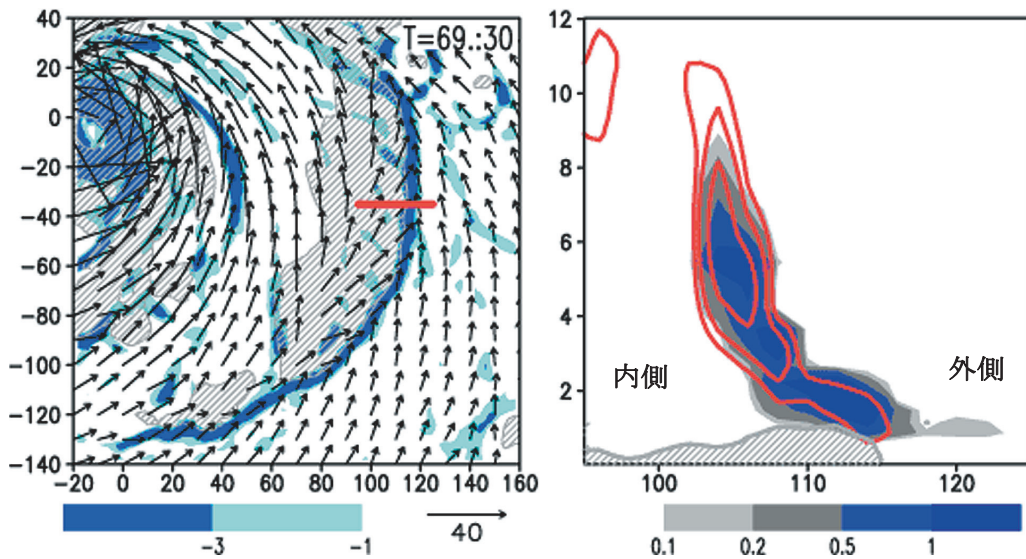


図4 左図は $T=69.5h$ での収束場の水平分布 (カラー) と冷氣プール ($-1.0K$ の気温偏差: ハッチの領域)、高度 $10m$ での水平風速のベクトルを示す。 $180km$ 四方の領域を描画している。右図は左図の赤線の鉛直断面である。カラーは雲水量 (kg/kg)、等値線 (赤線) は上昇流 ($2, 4, 8m/s$)、ハッチは冷氣プールを示す。水平 $30km$ 、鉛直に $12km$ の領域を描画している。

5. まとめ

雲を解像した台風の数値実験を行うことで、レインバンドの形成・維持過程を再現し、そのメカニズムを調べた。数値実験は台風全域に対して、雲を直接表現できる水平格子で覆っており、積雲が組織化している過程 (個々の積雲が台風やレインバンドなどの構造を形成していく過程) を適切に扱うことが出来る。その結果より、積雲は雨水の蒸発冷却によって空気を冷やし、下層に冷氣プールを作る。その冷氣プールと、台風の外側から吹き込む風が下層で収束場を形成し、新たな雲を形成する。これらの積雲群が冷氣プールの外側に沿って形成されるので、スパイラル上のレインバンドが形成される。また、冷氣プールは外側に広がるため、その移動に合わせてレインバン

ドも外側に移動していくように見える。

本数値実験は理想化した環境場として、環境場の風を与えていない。そのため停滞性のレインバンドは形成されない。現実的な環境場の実験を行うことで、停滞性のレインバンドについても形成過程を明らかにしていきたい。また、これらのレインバンドは台風の強度や大きさにどのような影響を持つかについても調べたい。

これらの数値実験を行う上で、数値モデルの高速化も重要な課題の1つとなる。今後も効率的な数値モデルの開発に貢献していきたい。

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターとの共同研究「気候モデルの高速化に関する研究」として行われました。数値モデルの高速化において、同センターの大泉健治氏に大いに相談させて頂きました。この場を借りて感謝致します。

参考文献

- [1] McCaul, E.W. J., Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1954–1978, 1991
- [2] Spratt, S. M., D. W. Sharp, P. Welsh, A. Sandrik, F. Alsheimer, and C. Paxton, A WSR-88D assessment of tropical cyclone outer rainband tornadoes. *Wea. Forecasting*, **12**, 479–501, 1997
- [3] Senn, H. V. and H. W. Hiser, On the origin of hurricane spiral rain bands. *J. Meteor.*, **16**, 419–426, 1959
- [4] Tatehira, R., Radar and meso-scale analysis of rainband in typhoon – case study of Typhoon Helen (No. 5821)–. *Kenkyu Jiho*, **13**, 264–279, 1961
- [5] — Radar and meso-scale analysis of rainband in Typhoon Georgia in 1959 – comparison with the case of Typhoon Helen in 1958. *Kenkyu Jiho*, **14**, 621–630, 1962
- [6] Willoughby, H. E., F. D. Marks, Jr., and R. J. Feinberg, Stationary and Moving Convective Bands in Hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 3189–3211, 1984
- [7] Shimazu, Y., Wide slow-moving rainbands and narrow fast-moving rainbands observed in Typhoon 8913. *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 67–80, 1997
- [8] Yamasaki, M., A further study of the tropical cyclone without parameterizing the effects of cumulus convection. *Pap. Meteor. Geophys.*, **34**, 221–260, 1983
- [9] — A tropical cyclone model resolving mesoscale organized convection with prognostic treatment of subgrid-scale cloud water. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 637–655, 2001
- [10] Eastin, M. D., W. M. Gray, and P. G. Black, Buoyancy of convective vertical motions in the inner core of intense hurricanes. Part I: General statistics. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 188–208, 2005
- [11] Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, T. Muroi, C. and Kato, H. Eito, and Y. Yamazaki, The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266–1298, 2006
- [12] Sawada, M and T. Iwasaki, Impact of ice phase processes on tropical cyclone development, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **85**, 479–494, 2007