

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 16 日現在

機関番号：11301  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2010～2011  
 課題番号：22740308  
 研究課題名（和文）熱帯低気圧の発生・急発達における対流活動の役割に関する観測的・数値的研究  
 研究課題名（英文）Observational and numerical study on roles of convective activity in tropical cyclone formation and rapid intensification  
 研究代表者  
 沢田 雅洋（SAWADA MASAHIRO）  
 東北大学・大学院理学研究科・助教  
 研究者番号：90466524

研究成果の概要（和文）：再解析データから熱帯低気圧の急発達時の特徴について調べ、急発達前には下層に強い低気圧性循環場が見いだされた。数値モデルを用いて熱帯低気圧に伴う周期的に変動する対流活動を再現し、それはレインバンドの形成・伝搬によるものであることが明らかになった。これに伴い、熱帯低気圧の強度や2次循環も変動した。水平解像度に関する感度実験から、高解像度化が急発達過程を再現するのに重要であることを示唆した。

研究成果の概要（英文）：It is found strong low-level cyclonic circulation is formed before rapid intensification of tropical cyclone from reanalysis data. Through numerical simulations on periodic variation of tropical cyclone precipitation, we clarify the periodic behavior is caused by rainband formation and propagation, which leads to the intensity and secondary circulation variation. It is indicated higher resolution simulation is key factor for reproducing rapid intensification.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：気象、台風

## 1. 研究開始当初の背景

近年、気候変動に伴い熱帯低気圧（以下、台風）が強くなる傾向や、強い台風の数の増加が指摘され、台風の数や強度の気候学的な変動に世界的な注目が集まっている。しかし、台風の発生・急発達過程に好ましい環境場や、それに対する対流活動の役割（雲の集団効果）

は十分に理解されていない。台風の発生・急発達を理解するため、環境場と対流活動の相互作用（対流の組織化）を理解することが求められている。このためには、（1）長期再解析による台風の急発達時の環境場の特徴、（2）雲解像モデルによる台風の発生・急発達時の対流活動と環境場の相互作用に関する

研究を進めることが不可欠である。

## 2. 研究の目的

(1) 再解析データから台風の発生・急発達時の環境場の特徴を抽出する。

(2) 最先端の雲解像モデルを用いて台風に伴う対流活動の特性を調べ、発生・急発達に対する役割を調べる。

(3) 台風の急発達に対する数値モデルの水平解像度や物理過程依存性を明らかにし、急発達に重要となるプロセスを理解する。

## 3. 研究の方法

(1) 再解析データによる台風の発生・急発達時の環境場の長期解析

再解析データ、海面水温データ、衛星から推定された降水量データ、ベストトラックデータの整備をする。ベストトラックデータから24時間以上持続した事例について、台風の発生、急発達した時刻を定義する。その前後の環境場の特徴を切り出すため、再解析データ(JRA-25, ERA-interim)から5つの大気場の変数(温位、相対湿度、ジオポテンシャル高度、東西風、南北風)、Reynolds SSTデータから海面温度の、合わせて6つの基本場を、台風の中心から経度、緯度方向に±30、±20度の範囲を切り出し、コンポジット解析を行う。また、切り出した領域に対して主成分解析を行い、特徴的な構造が見いだせるか検討する。

(2) 台風に伴う対流活動の振舞と強度変化に関する数値実験

水平解像度3kmで非静力学モデル(JMA-NHM)を用いて、理想化した環境場での台風の数値実験を行う。簡単化のため、水平一様な温位や湿度プロファイル、海面水温を用いて、軸対称な初期渦を与え、放射過程の日変化は含めない。再現された台風状況下の対流活動の変動、その要因を調べる。また、冷氣プールが対流活動の振る舞いに影響すると考えられるので、顕熱フラックスを増減した感度実験を行い、対流活動がどう応答するのかを調べる(図1)。顕熱フラックスを増加すると、以下の2つの応答が考えられる。1つは、下層温位が増加し、大気が不安定化し、対流が起こりやすくなる熱力学的な効果と、もう1つは温位の増加によって冷氣プールが弱体化することで対流が不活発化するという力学的な効果で、対流活動の組織化に対してお互いに打ち消しあう働きとなる。どちらが卓越するかを調べることで、力学的な役割と熱力学的な役割のどちらが対流活動に効くのかを明らかにする。さらに、台風周辺の環境場の影響も調べるため、放射過程の日変化を考慮した感度実験を行う。計算開始時刻の影響を避けるため、計算開始時刻を変えた実験を

変更して実験を行い、結果の妥当性を確認する。

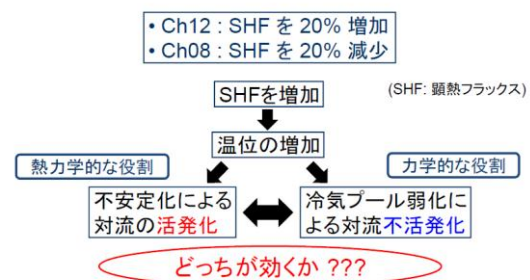


図1: 顕熱フラックス(SHF)に関する感度実験の概要。

(3) 急発達した台風事例に関する数値実験  
急発達に重要となる要因を探るため、水平解像度、モデル上端の高さ、乱流スキーム、雲物理スキームの感度実験を行う。対象とする事例は2010年台風13号で、50hPa/日の気圧低下が見られた事例を典型例として選んだ。再現実験の大気場にはJRA25/JCDAS(1.25度格子)、海面水温にはNOAAのOISST(0.25度格子)を用いてダウンスケールし、120時間積分する。水平解像度は8, 6, 4, 2, 1kmで比較する。乱流スキームはDeardorffとMYNNスキームを比較する。雲物理スキームの一部である蒸発冷却の有無による強度変化を比較する。

## 4. 研究成果

(1) 台風の発達・急発達に好ましい環境場を調べるため、2つの再解析データ(JRA25/JCDASとERA-interim)をそれぞれ33年分(1979-2011年)と23年分(1989-2011年)と海面水温データを29年分(1982-2011年)を整備した。また、台風の発達・急発達に重要となる対流活動との関係も調べるため、衛星による2つの降水データ(TRMMとGSMaP)をそれぞれ13年分(1998-2010年)と4年分(2003-2006年)を整備した。台風の発生時と急発達時、における台風周辺の環境場(下層の循環場、鉛直シア、海面水温や安定度など)を切り出し、それらを重ね合わせることで特徴を抽出した。ベストトラックデータから得られた平均的な気圧変化率は-20.6hPa/日、その標準偏差は13.2hPa/日であった。そこで、本研究では急発達事例を33.8hPa/日の気圧低下が見られたものと定義した。この場合、急発達した事例は107個で、全体の18%程度であった。図2は850hPa面での東西風の急発達事例と全事例のコンポジットしたものである。これらを比べると、偏東風の中にモンスーン西風が入り込んでいるような構造は急発達事例と全事例のコンポジットではほぼ相似な空間構造となる。そこでこの2つの差分を比べると、大規模なスケールで東風成分が

卓越し、中心付近で強い渦を持つ。また、台風周辺場の特徴と急発達の関係異なる観点から調べるため、主成分解析を行った(図3)。寄与率はそれぞれ0.167, 0.153とほぼ同等であった。第3主成分は0.105であった。第1主成分は水平シアを強めるような構造を持ち、シアラインに沿って順圧不安定が卓越し、台風の発達に好ましい場となると期待された。そこで、主成分解析で得られた各事例のスコアと気圧低下率の相関を計算すると、 $-0.037$ と明瞭な関係は見られなかった。第2主成分は西風成分が卓越する。同様に相関を調べると、 $0.222$ で弱い正の相関(東風が卓越すると、気圧低下率が大きい)がみられた。この構造を見ると、大規模場の特徴は図2の急発達事例と全事例の差と似ており、東風の卓越が急発達に関係している可能性がある。この他、南北風、鉛直シア、中層の湿度、層厚などの主成分を取り出し、それぞれについて相関係数を計算したが、 $0.2$ を超えるものは無かった。

ここで行った主成分解析は台風周辺での特徴的な構造を抽出しただけなので、適切な事例の抽出が必要と考える。例えば、本解析では温低下した事例や陸域に近い事例が含まれているので、これらを除くなどの工夫をすべきである。また、特異値分解解析を気圧低下率と台風周辺場に適用することで、より直接的に強度変化と環境場の関係を得ることができると考えられ、今後の課題である。

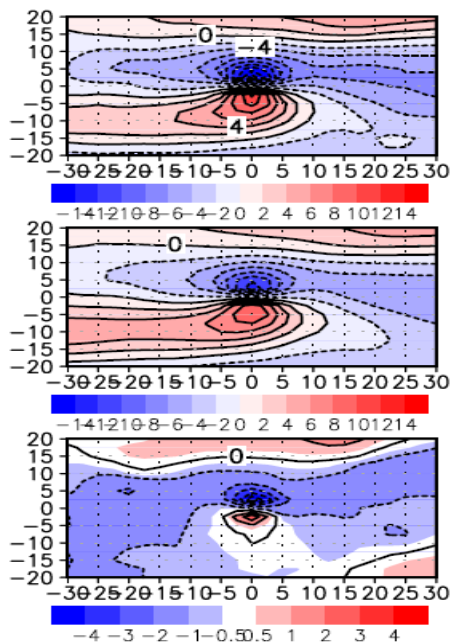


図2: 上から急発達した台風、全事例の東西風をそれぞれコンポジットした図。下図は急発達事例と全事例の差を示す。正の値が西風。コンターは標準偏差で、コンター間隔は $0.5\text{m/s}$ 。

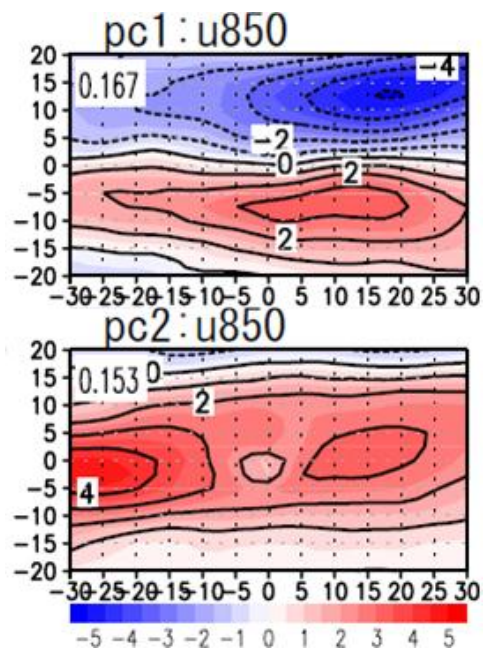


図3: 台風周辺の東西風の主成分解析の結果。左から第1、第2主成分。左上の数字は各主成分の分散の割合を示す。

(2) 台風に伴う周期的な降水活動の形成メカニズムとそれに伴う強度変化の関係について、理想化した環境場で数値モデルを用いて調べた。周期的な降水活動は、台風周辺場の個々の対流が周期的に活発になるというのではなく、組織化した構造(レインバンド)が周期的に中心から外側に向かって伝搬することで起こっていることが明らかになった(図4)。軸平均した降水量の時間半径図を見ると、強い降水域(レインバンド)が半径 $30\text{km}$ 付近から外側に $2\text{-}3\text{m/s}$ の速度で移動する様子が見られる。温位偏差を見ると、降水のピークの約1時間前に正の温位偏差となり、降水のピーク時は負の温位偏差が見られた。これは雨水の蒸発冷却により形成された冷氣プールで、対流の組織化には、冷氣プールが本質的な役割を果たす。冷氣プールはその前面で台風の下層吹き込みを持ち上げ対流セルを形成・維持し、個々の対流セルをスパイラル状に形作る働きをする。レインバンドは台風が発達している時期にしばしば形成・伝搬した。

台風状況下の冷氣プールの周期的な形成・伝搬する理由を確かめるため、放射過程や顕熱フラックスに対する感度実験を行った。顕熱フラックスの増加は冷氣プールを弱め、対流活動が維持されず、レインバンドの伝搬距離が短くなるが示された。逆に、顕熱フラックスを減少させると、冷氣プールが維持され、対流活動が維持されることで、レインバンドの伝搬距離が伸びることが示された。つまり、顕熱フラックスの増加(減少)による下層大気不安定化(安定化)は対流

の活発化（不活発化）を促すかもしれないが、それよりも冷気プールによる力学的な持ち上げ効果の強弱が卓越することが分かった。ただし、これは鉛直方向のカップリングの強さにも依存すると考えられ、境界層スキーム（混合長）にも依存する可能性がある。

短波放射による日変化する加熱を含まない場合、対流活動の周期は約 21 時間であった。日変化する短波加熱を含めると、対流活動の周期は約 24 時間になった。短波加熱は台風周辺の大気安定度などの環境場に日変化をもたらし、対流活発の変動に影響する。対流活動に応じて、冷気プールの広がり始めるタイミングが準日周期にシフトしたと考えられた。残っている課題の1つは、短波加熱を含まない場合はなぜ 21 時間周期でレインバンドが広がるのか、ということだが、境界層のリカバリーの速さ（台風の強度にも依存）、環境場の安定度、レインバンドの伝搬速度が影響すると考えられる。

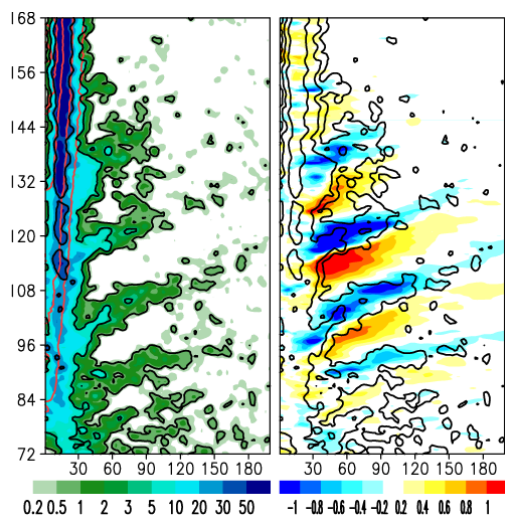


図 4: 降水量と温位偏差の時間半径図。それぞれ軸平均した値。温位偏差は±12 時間の移動平均からの偏差。

この周期的な対流活動によって、台風の強度（中心気圧や最大風速）だけではなく、2 次循環も周期的な変動をしていることが分かった。放射過程を含めて、計算開始時刻を変えた 4 つの感度実験を行い、その降水量の時間変化を調べた（図 5）。積分開始から 60 時間後にはどの実験でも降水量の極大値・極小値がほぼ同じ現地時刻（0-6 時・15-21 時）に再現される。ピーク時では、レインバンドは中心から 100km 以上外側まで広がり、壁雲付近では対流活動が強まり始める。中心気圧変動の時系列から、顕著な気圧低下は 9-15 時に現れる。この時間帯ではレインバンドが壁雲から外側へ広がり始めるタイミングで、放出された潜熱加熱が温暖核の急速な発達

に寄与していることを示唆する。レインバンドで形成された潜熱加熱で駆動される 2 次循環構造を調べるため、軸平均した質量流線関数を診断する（図 6）。レインバンドの移動に伴って、質量流線関数の正（負）偏差が外側に伝搬していく様子が見られた。正偏差は対流活動が活発な領域にあたり、強い加熱により 2 次循環が駆動されていることが分かる。夜間から朝方にかけては外側で、日中は壁雲付近で 2 次循環が強く、特に日中ではそれに伴い角運動量が中心に向かって輸送され、接線風の強化が見られる。これは気圧低下の変動（図 5 上）と整合的である。

現在のところ、数値モデルを用いて対流活動の周期的な変動が台風の強度や構造に影響することを明瞭に示した研究事例はほぼ皆無である。これは現業ではまだ多くの改善の余地を残す強度や構造の台風予報において、精密な強度や強風サイズを予測するうえで重要な知見を与えると期待できる。

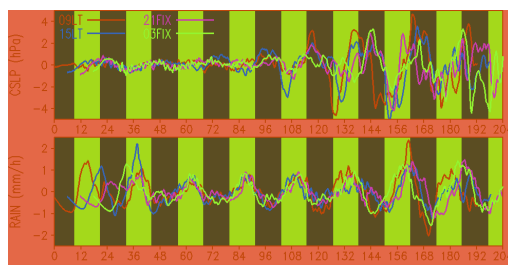


図 5: 中心気圧と領域平均した降水量の時間変化。それぞれの±12 時間の移動平均からの偏差。各線は初期時刻の異なる実験結果を表わす。横軸は 09LT を初期値とした実験を基準にした予報時間。

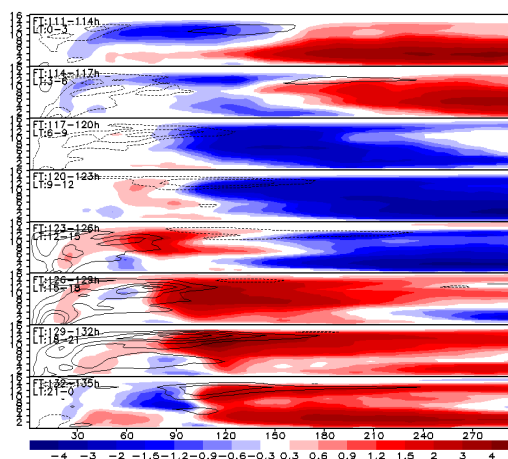


図 6: 再現された台風の 2 次循環の周期的な変動の様子。色は質量流線関数の±12 時間の移動平均からの偏差。等値線は接線風速の±12 時間の移動平均からの偏差。縦軸が高度、横軸は台風中心からの距離。

(3) 台風に関する力学的なダウンスケールを行うためのシステムの構築し、顕著な急発達事例の詳細な解析を行った。各解像度で再現された台風の最大発達率を図1に示す。図7からDeardorffを用いた実験 (Deardorff) を見ると、2kmと1km格子実験では50hPa/日以上 の気圧低下を再現し、ベストトラック値に近い。6kmと4km格子実験では約30hPa/日で、2km と1km格子実験とは発達率が小さい。一方、MYNN-3を用いた実験 (MYNN-3) を見ると、Deardorffに比べて発達率が小さいことが分かる。Deardorffは境界層での鉛直混合が弱く、運動量の海面での摩擦消散が小さい (運動量の 下向き輸送が小さい) ことなどが、急発達 に関係していることが示唆された。雨水の蒸 発冷却を除く実験では、水平解像度8kmから 2kmまでどの解像度においても蒸発冷却を含 む実験に比べて台風は急発達した。蒸発冷却 を含まない場合は、下層の相当温位が高くなり、壁雲での強い対流を形成・維持できるためであり、雲物理過程の最適化が重要である ことが示唆された。さらに、計算領域上端の 高さに対する影響を調べたところ、上端高さ が低い場合 (約20km) は、高い場合 (約28km) に比べて発達率が小さくなり、到達最大強度 も弱くなった。これは台風の温暖核や上層で の吹き出しが、スポンジ層によって発達を阻 害されたのが原因と考えられる。

再現された鉛直構造の違いを調べるため、 軸平均した接線風速と温位偏差 (温暖核) の 高度-半径断面図を示す (図 8)。まず、 Deardorff では、2km と 1km 格子実験では最大接線風速半径 (RMW) が 4km 格子実験より 小さく、壁雲がより収縮し (台風の眼が小さ くなった)、顕著な温暖核が発達した。MYNN-3 では、Deardorff に比べて、RMW 内で半径方 向に勾配の緩い構造となり、温暖核の発達も 遅かった。一次循環の鉛直方向の広がり (10m/s の等値線) を見ると、MYNN-3は約18km まで達し、2km ほど Deardorff より高い。 MYNN-3 の温位偏差には、高度約 14km にピークを持つ温暖核の上層に、正の温位偏差が見られ、過去の観測研究から示された鉛直構造 とは整合的ではない。鉛直方向に広がった一 次循環は、上層での大きな鉛直混合に起因す る。MYNN-3 では、高度 8-16km で乱流エネ ルギーが Deardorff の 10 倍以上も大きく、運 動量の鉛直輸送が過剰であったと考えられ る。このように、境界層スキームの違いは台 風の境界層の構造だけではなく、上層の構造 にも大きく影響し、発達にも影響する可能性 がある。どちらの構造が現実を表わしている のかは、ドロップゾンデや衛星などの観測デ ータによる検証が必要である。

これらの結果について国際学会での発表や、 台風による災害が多発するフィリピンにおけ る台風の強度予測について情報を得るため、

台風の強度予測に関する研究会を開催し、ダ ウンスケーリングによる台風強度予測の有効 性について意見交換した。

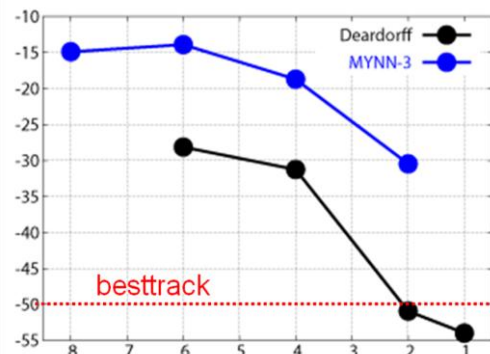


図 7: 各解像度における最大気圧低下値。縦 軸は気圧低下値 (hPa)、横軸は水平解像度。 黒線は Deardorff を用いた実験、青線は MYNN-3 を用いた実験。赤点線はベストトラ ック値。

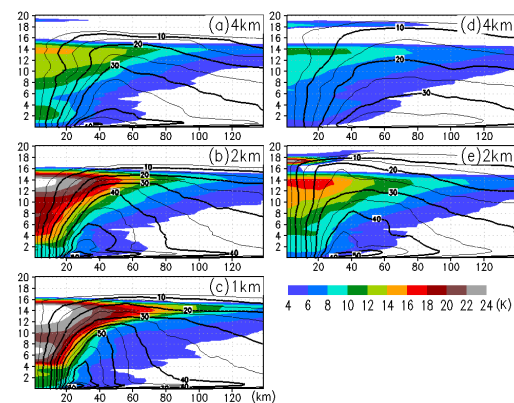


図 8: 各解像度における 72 時間予報での接線 風速と温位偏差の高度-半径断面図。等値線 は軸平均した接線風速 (5m/s 間隔)、色は初 期値からの温位偏差。左図は Deardorff、右 図は MYNN-3 による実験結果。縦軸は鉛直、 横軸は台風中心からの距離。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に は下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

Masahiro Sawada, Toshiki. Iwasaki, et al (9 名、1 番目), Transient Downslope Winds under the Influence of Stationary Lee Waves from the Zao Mountain Range. J. Meteorol. Soc. Japan, 90, 79-100, 2012, 査 読あり。

[学会発表] (計 11 件)

1. Masahiro Sawada, T. Iwasaki, Diurnal variation of precipitation associated with tropical cyclone and its

structure change, IUGG-2011,  
Australia, 2 July 2011

2. Masahiro Sawada, T. Iwasaki, Impacts of evaporative cooling on tropical cyclone rainband, 29th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, U.S., 12 May 2010.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

沢田 雅洋 (SAWADA MASAHIRO)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：90466524

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：