

# 台風の最大強度に対する内部コアの非軸対称成分の寄与

\*辻野 智紀・坪木 和久 (名古屋大学 地球水循環研究センター)

## 1 研究目的

熱帯海洋上で発生する台風は、発達過程においてその渦の中心に対して軸対称な構造をとり、成熟期ではほぼ軸対称な渦と考えることができる。このことから、成熟期における台風の最大強度に関する数値的研究の多くは、台風を軸対称な2次元の渦であると仮定して行われている(例えば、Bryan and Rotunno (2009) (以下 BR09))。しかし、多くの観測や3次元モデルによるシミュレーションから、台風の発達に伴い、非軸対称な成分が存在することが示されている。これらは、軸対称を仮定したモデルでは表現することができない。実際、Yang et al. (2007) は、2次元軸対称モデルと3次元モデルを用いた数値実験を行い、3次元モデルでは、非軸対称成分によって台風の強度が弱くなるという結果を得ている。

そこで、本研究では3次元の非静力学モデルを用いて、成熟期の最大強度が異なる台風の非軸対称成分が最大強度に与える寄与を調べた。ここで、台風の強度は水平風速で評価し、以下、台風の最大強度とは水平風速の最大値を表す。BR09は軸対称モデルでシミュレートした理想的な台風の最大強度が海面交換係数の比、 $C_E/C_D$  に依存することを示した( $C_E$  は熱交換係数、 $C_D$  は運動量交換係数)。そこで、 $C_E/C_D$  に対する台風の最大強度依存性を3次元モデルで検証する。次に、その結果得られた最大強度の異なる台風の非軸対称成分が最大強度に対して与える影響を角運動量、エネルギー収支解析から定量的に見積もることで、台風の最大強度に対する非軸対称成分の寄与を考察する。

## 2 数値モデル・実験条件・解析手法

本研究では、名古屋大学地球水循環研究センターで開発された非静力学雲解像モデル(CReSS; Cloud Resolving Storm Simulator)を用いた。モデルの基本設定は以下のとおりである。水平解像度は4km、計算領域は2000km × 2000km、鉛直は40層のストレッチングで最下層は50mとした。コリオリパラメータは領域にわたり一定で、緯度15°での値を用いた。初期に配置した渦はSawada and Iwasaki(2010)を参考に、軸対称な低気圧性の渦を計算領域中心に配置した:

$$V(r, z) = \frac{z_0 - z}{z_0} \frac{40 \times (r/r_0)}{1 + (r/r_0)^3}, \quad (z \leq 10\text{km}).$$

( $r, z$  は円筒座標系で表した動径方向と鉛直方向の座標であり、 $r$  は渦の中心を原点、 $V$  は円筒座標系でみた接線方向の風速である。) また、 $r_0 = 120$  km、 $z_0 = 10$  km である。温度、湿度場はJAMSTECの観測船「みらい」(MR10-03航海)で得られたラジオゾンデ観測データを水平方向一様に与えた。海面水温は30°Cで水平一様に与え、水温の時間発展はしない。側面境界条件はopen boundary、鉛直境界条件は固定境界でスポンジ層を上層17km以上に設定した。雲物理過程は水相過程を考慮し、乱流過程は1.5次の乱流運動エネルギーによるパラメタリゼーションを用いた。

海面フラックスはバルク法で評価し、 $C_E, C_D$  はKondo (1975)で計算した値をコントロールランの設定とした。感度実験ではこれらの係数について、コントロールランで用いる値から増加(×1.5)させた計算と減少(×0.5)させた計算を表1の組み合わせで行い、台風の最大強度の依存性を調べた。

次に、非軸対称成分の影響を解析するために、Wang

(2002a,b)における解析手法を用いて、角運動量収支解析を行った。具体的には以下の式である。

$$\frac{\partial r\bar{v}}{\partial t} = \underbrace{-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \bar{u}\bar{v}) - \frac{1}{\rho_0(z)} \frac{\partial}{\partial z} (r \rho_0(z) \bar{v}\bar{w}) - fr\bar{u}}_{FLXM} - \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \bar{u}'\bar{v}') - \frac{1}{\rho_0(z)} \frac{\partial}{\partial z} (r \rho_0(z) \bar{v}'\bar{w}') + r\overline{\text{Turb.}}}_{FLXE}. \quad (1)$$

ここで、 $r, z, t$  はそれぞれ台風の中心からの距離、地表面からの高度、時間を表し、 $u, v, w$  は台風を中心とした円筒座標系における動径方向、接線方向、鉛直上向き速度である。また、 $\rho_0(z)$  は基本場の密度である。従属変数を $\phi$ としたとき、 $\bar{\phi}$  は接線方向の平均値、 $\phi'$  は平均値からの変動を表し、それぞれ軸対称成分と非軸対称成分に対応する。右辺最終項は乱流による角運動量の時間変化である。また、上式のFLXMが軸対称成分による角運動量の加減速、FLXEが非軸対称成分による角運動量の加減速を表す。

実験名	CTL	D0.5	E1.5	D1.5	E1.5D1.5	E1.5D0.5
$C_E$	×1.0	×1.0	×1.5	×1.0	×1.5	×1.5
$C_D$	×1.0	×0.5	×1.0	×1.5	×1.5	×0.5

表1 各実験設定。

## 3 実験結果・考察

図1に、各実験に対する最大風速の時間変化を示す。この結果から、理想化した台風の最大強度は $C_E/C_D$ の比とともに大きくなる傾向にあることがわかる。ただし、D0.5とE1.5D0.5の最大強度については、運動量交換係数の値が小さいため、下層での摩擦収束によるインフローが弱く、海面からの水蒸気の壁雲域への供給が少なく、準定常状態にまだに到達していない。次に、図2, 3はそれぞれE1.5の成熟期における接線平均風成分(軸対称成分)による台風の角運動量の時間変化((1)式FLXM)と、接線平均風からの変動成分(非軸対称成分)による台風の角運動量の時間変化((1)式FLXE)の分布を表す。図2からは、壁雲域(≈40kmの中層および最下層)において角運動量の時間変化が正となっており、軸対称成分は台風の最大強度に位置する壁雲域での平均風を加速するように寄与していることがわかる。これは、壁雲域の下層では、摩擦収束によるインフローが角運動量を壁雲の外側から輸送し、中層ではインフローが輸送してきた角運動量を活発な上昇流が下層から中層まで輸送しているからであると考えられる。一方、図3より、壁雲域で非軸対称成分による角運動量の時間変化が負になっている。このことから、非軸対称成分は台風の最大強度に位置する壁雲域での平均風を減速するように作用していることがわかる。

これらの結果から、非軸対称成分が台風の強度に寄与していることがわかる。このような非軸対称成分による角運動量を輸送するキャリアとしては、渦口スビー波が考えられる。

図4 E1.5の成熟期の壁雲域(半径≈40km)における高度約2500mでの鉛直速度の接線平均からのずれを時系列で

表現したものである。ずれ成分は波数 2-3 の波動で台風の回転軸を中心として時計まわりに伝播している。また、この波が台風のまわりを 1 周するのに要する時間 (ここではこれを波の周期とする) はおよそ 2 時間程度であることもわかる。これらの特徴は, Montgomery and Kallenbach (1997) で示されている渦ロスビー波の特徴と類似しているため, Wang (2002a,b) で述べられているような渦ロスビー波による台風の強度の変化が起きている可能性が考えられる。

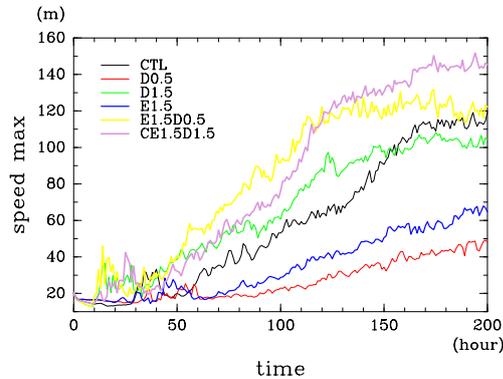


図 1 各実験での最大風速.

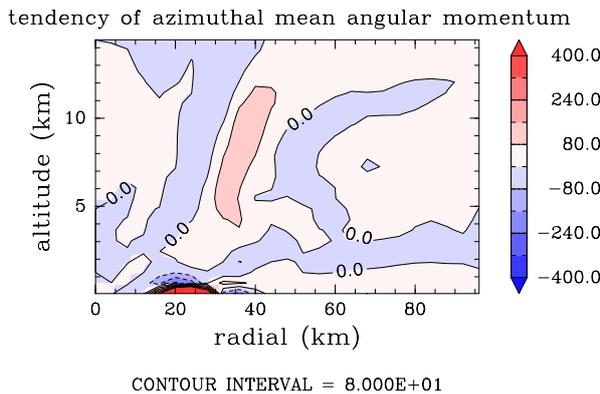


図 2 E1.5 の成熟期において, 軸対称成分 (FLXM) による台風の角運動量の時間変化 (平均風の加減速) の動径 鉛直分布.(単位は  $10 \times \text{m}^2/\text{s}^2$ .)

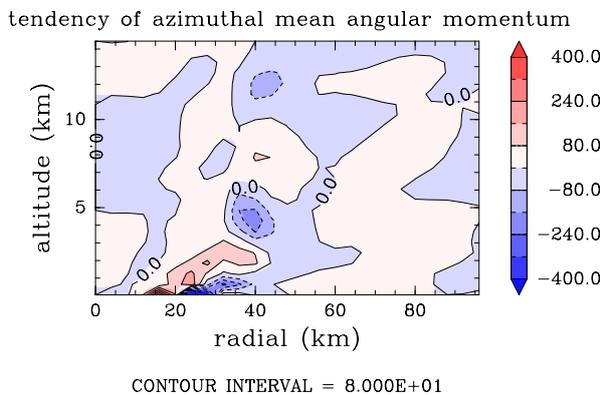


図 3 図 2 と同じ時刻での非軸対称成分 (FLXE) による台風の角運動量の時間変化の動径 鉛直分布.(単位は  $\text{m}^2/\text{s}^2$  で, 時刻は図 2 と同じ.)

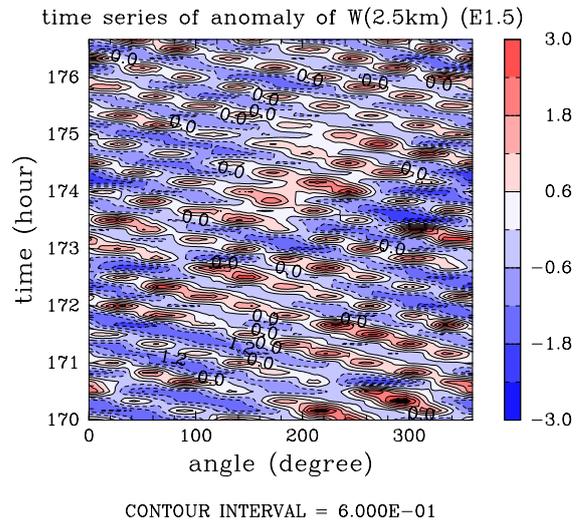


図 4 E1.5 の成熟期において, 最大風速半径 (40km 付近), 高度 2500 m 付近における鉛直速度の接線平均からの変動成分の時系列図 (単位は  $\text{m}/\text{s}$ ). 角度は台風の中心の東向きを  $0^\circ$  とし, 反時計回りにとるものとする.

## 4 まとめ

3 次元数値モデルを用いてシミュレートされた理想化した台風は最大強度が海面交換係数の比に依存することが示された。

角運動量収支解析を行い, 軸対称成分は台風の最大強度に位置する壁雲域において, 平均風を強める働きをしているのに対し, 非軸対称成分は壁雲域において平均風を弱めるように作用していることを示した。この平均風を弱める非軸対称成分として渦ロスビー波の伝播が発生した可能性が示された。発表では各実験ごとの解析結果と, エネルギー収支解析の結果についても示し, 非軸対称成分による最大強度への寄与について考察する。

## 参考文献

- Bryan, H. G., and R. Rotunno, 2009 : The maximum intensity of tropical cyclones in axisymmetric numerical model simulations. *Mon.Wea.Rev.*, **137**, 1770-1789.
- Montgomery, T. M., and R. J. Kallenbach, 1997 : A theory for vortex Rossby-waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes. *Q.J.R.Meteorol.Soc.*, **123**, 435-465.
- Sawada, M., and T. Iwasaki, 2010 : Impact of evaporation from raindrops on tropical cyclones. Part I: Evolution and axisymmetric structure. *J.Atmos.Sci.*, **67**, 71-83.
- Wang, Y., 2002a : Vortex Rossby waves in a numerically simulated tropical cyclone. Part I: Overall structure, potential vorticity, and kinetic energy budgets. *J.Atmos.Sci.*, **59**, 1213-1238.
- Wang, Y., 2002b : Vortex Rossby waves in a numerically simulated tropical cyclone. Part II: The role in tropical cyclone structure and intensity changes. *J.Atmos.Sci.*, **59**, 1239-1262.
- Yang, B., Y. Wang, and B. Wang, 2007 : The effect of internally generated inner-core asymmetries on tropical cyclone potential intensity. *J.Atmos.Sci.*, **64**, 1165-1188.