

# 全球非静力学モデルによって計算された熱帯低気圧の傾度風平衡度合

\*宮本 佳明<sup>1</sup>, 佐藤 正樹<sup>2,3</sup>, 富田 浩文<sup>1,3</sup>, 大内 和良<sup>3</sup>, 山田 洋平<sup>3</sup>, 小玉 知央<sup>3</sup>, Jim Kinter<sup>4</sup>

1:理化学研究所, 2:東京大学, 3:海洋研究開発機構, 4:COLA

## 1. 研究背景・目的

観測的研究・次元解析から、熱帯低気圧 (TC: Tropical Cyclone) は、軸対称平均を施すと第一次近似的に傾度風平衡を満たすことが分かっている (e.g., Willoughby 1990; Ogura 1964)。また、再解析データや全球モデル結果を用いた解析などで良く利用されるMPI (Maximum Potential Intensity) など、TC理論のほとんどは、傾度風平衡を基本的な仮定として取り扱っている (e.g., Eliassen 1951; Emanuel 1986)。しかし近年、数値モデル内で再現されるTCがMPIを超えるという指摘 (Persing and Montgomery 2003) から、超傾度風 (傾度風よりも速い接線風) を加味する必要があると言われている (Smith et al. 2008; Bryan and Rotunno 2009)。しかしこの仮説は軸対称モデルを用いた理想実験結果によって検証された程度である。

一方で、Smith et al. (2009)は二種類のTC渦のspinupメカニズムを提唱した。一つ目は、従来より考えられてきた、自由大気最下層の内向き流によって渦が強化するもの (Mech I)、二つ目は、境界層内上層で角運動量の内向き移流が海面摩擦の影響よりも大きいときに渦が強化するもの (Mech II) である。しかし、どちらが支配的なのか、何が違いを決めているのかは明らかになっていない。本研究では以下のような仮説を立て、両spinupメカニズムと傾度風平衡度合が密接に関係していると考えます。

以上の点を踏まえて本研究では、TC強度の変化機構を理解する上で非常に重要であると考えられる傾度風平衡度合を、高解像度の全球非静力学モデル実験で再現された多数のTCに注目して解析を行う。特に、傾度風平衡度合と様々なTC強度に関する物理変数の関係を調べると共に、以下の仮説を検証することを目的とする。

## 2. 仮説

Mech I・Mech IIを分ける要素として、傾度風平衡からの偏差が考えられる。最大接線風速半径 (RMW: Radius of Maximum tangential Wind) 付近 (コア域) 下層で傾度風よりも速い (遅い) 接線風速で移動する流体粒子は、二次循環に沿って摩擦の弱い自由大気中に出ると、境界層内では高度方向への変化が小さい気圧傾度力に対して、遠心力が大きく (小さく) なり外側 (内側) に移動し始める。コア域自由大気中の動径流が外向きだと、外側からの大きな角運動量を輸送できないため渦はspinupできない。つまりMech Iが働くためには、コア域境界層内で接線風速が傾度風よりも遅くなっていなければならない、と考えられる。しかし、仮にコア域で超傾度風化 (i.e., 自由大気中で外向き流が存在) していても、TCはMech IIによってspinupで

きる。つまり、コア域での傾度風度合によってMech IとMech IIが分けられると考えられる。

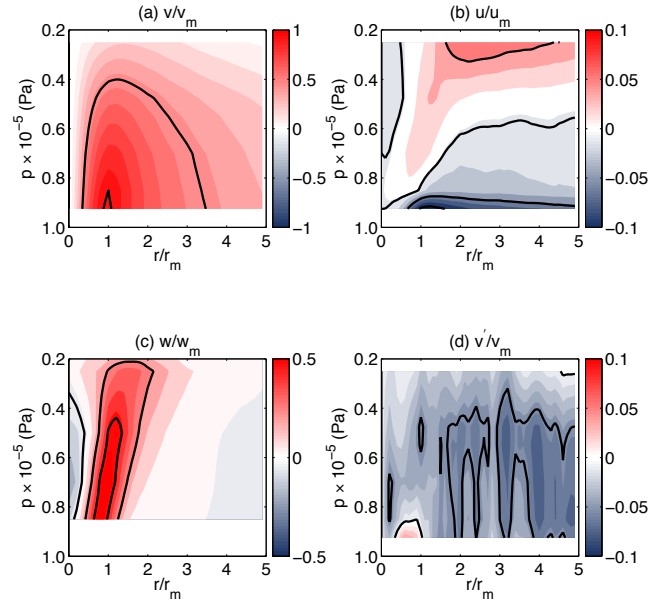


Fig.1. Athena実験中の2004・2005・2006・2007年6月から8月の間に抽出された全TCの準定常状態におけるコンポジット図。(a)接線風速、(b)動径風速、(c)鉛直風速、(d)傾度風平衡度合。接線風速・動径風速・傾度風平衡度合は最大接線風速  $v_m$ 、鉛直風速は最大鉛直風速  $w_m$ により無次元化した値であり、半径も最大接線風速  $r_m$ で無次元化している。

## 3. 実験設定・TCの抽出方法

本研究ではNICAM (Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model, Sato et al. 2008) を用いたAthenaラン (Dirmeyer et al. 2011) の結果を解析した。水平解像度7 km、鉛直方向に下層程細かい40層の場を用意し、2001年から2009年までの2003年を除く8年間、北半球の夏季に相当する5月22日から9月1日まで、時間積分を行った。ここで、積雲パラメタリゼーションは用いておらず、放射 (Sekiguchi and Nakajima 2008)・乱流 (Nakanishi and Niino 2004; Noda et al. 2010) の各過程に加えて、海面水温はslab layerモデルによる冷却効果を解き6時間ごとに解析値に近づけるようにした。データは3時間ごとに保存している。

格子点周囲350 km平均からの海面気圧偏差が-3hPaよりも小さいのをpreTC格子点として抽出し、各点から3度以内の最小値をpreTCとして抽出する。さらに3時間後に2度以内に存在している時同じpreTCとして認識する。時間方向に追跡して最大接線風速が10 m s<sup>-1</sup>を超えたときにTCと定義し、同様にこれらの条件

を満たさなくなったとき消滅したと判断する。

#### 4. 結果

2004年～2007年の6月～8月の期間で抽出された全てのTC (104ケース) が、準定常状態 (前後6時間での強度変化率が $5 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-2}$ より小さい) にあるときの各変数をコンポジットした半径-鉛直断面図を示す。ただし、半径方向はRMWにより無次元化し、各変数の値は最大値で無次元化している。接線風速・動径風速・鉛直風速は定性的に成熟期のTCの構造を良く表している。動径・鉛直風速から二次循環が確認でき、接線風速も自由大気最下層付近に極値があり、上方・外側に向かって減衰している。さらに傾度風平衡度合の断面図を見ると、RMW付近、特に内側で超傾度風化していることが分かる。

次に全TCの傾度風平衡度合と最大接線風速・最小海面気圧・RMW・海面水温の関係を示す。ここで各点は一つのTCの平均値であり、最小自乗法により求めた直線も示す。図から、傾度風平衡度合が小さいほど、傾向は弱いながらTCが強くなっていることが分かる。一方で、最大風速半径が大きく、海面水温が低い時に、傾度風平衡度合が大きい。この結果は、TC強度との関係と整合的であり、簡単な考察の結果 (略) で解釈できる。

さらに傾度風平行度合と背景風の鉛直差・軸対称度 (Miyamoto and Takemi 2011, in revision) ・RMW、850 hPaにおける動径風速・最大接線風速とMPIの差との関係を示す。図から、傾度風平衡度合が大きい時ほど、背景風の鉛直差・軸対称度が大きい。また、超傾度風化する程RMW、850 hPaにおける動径風速が増加しており、この点は先の仮説における仮定と整合的な結果である。さらに、超傾度風化する程MPIよりもTC強度が大きくなる傾向となり、この結果はSmith et al. (2008) ・Bryan and Rotunno (2009)の提案を裏付けるものである。

さらなる物理的解釈、及び、詳細な解析結果は発表時に示す。

#### 参考文献

- Bryan, G. H., and R. Rotunno, (2009) *J. Atmos. Sci.*, 66, 3042--3060.
- Dirmeyer, P.A., B.A. Cash, J. L. Kinter III, T. Jung, L. Marx, M. Satoh, C. Stan, H. Tomita, P. Towers, N. Wedi, D. Achuthavarier, J. M. Adams, E. L. Altshuler, B. Huang, E. K. Jin and J. Manganello (2011) *Clim. Dyn.* DOI10.1007/s00382-011-1127-9.
- Eliassen, A., (1951) *Astrophys. Norv.*, 5, 19-60.
- Emanuel, K. A., (1986) *J. Atmos. Sci.*, 43, 585-604.
- Nakanishi, M., and H. Niino (2004) *Boundary-Layer Meteor.*, 112, 1-31.
- Noda, A. T., K. Oouchi, M. Satoh, H. Tomita, S. Iga, and Y. Tsushima (2010) *Atmos. Res.*, 96, 208-217.
- Ogura, Y., (1964) *J. Atmos. Sci.* 21, 610-621.
- Persing, J. and M. T. Montgomery (2003) *J. Atmos. Sci.*, 60, 2349-2371.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno and S. Iga (2008) *J. Comp. Physics*, 227, 3486-3514.
- Sekiguchi M. and T. Nakajima (2008) *Quant. Spectrosc. Radiat.*

Transfer. 109, 2779-2793,  
doi:10.1016/j.jqsrt.2008.07.013.

Smith, R. K., M. T. Montgomery, and S. Vogl (2008) *Quart. J. Royal. Meteor.*, 134, 551-561.

Willoughby, H. E., (1990) *J. Atmos. Sci.*, 47, 242-263.

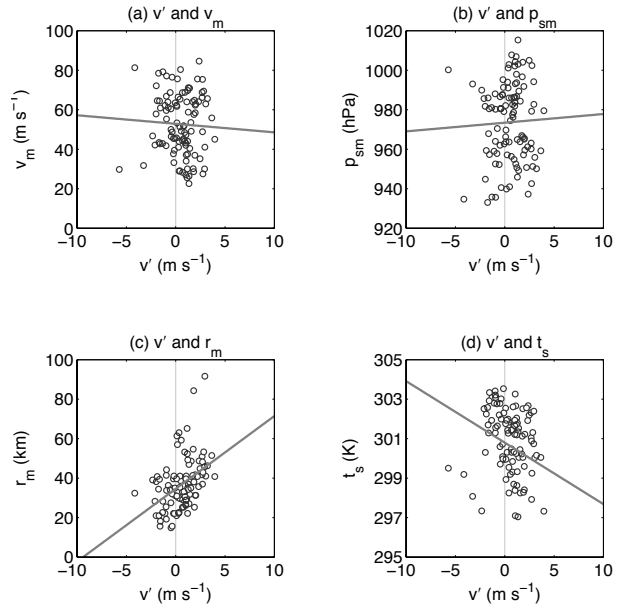


Fig.2. 抽出された各TCの傾度風度合 ( $v' = v - v_g$ , 横軸) とTC強度に関係する各物理変数: (a)最大水平風速  $v_m$ , (b)海面中心気圧  $p_{sm}$ , (c)最大接線風速半径  $r_m$ , (d)海面水温  $t_s$  の関係図。各点は、一つのTCの準定常状態における平均値である。図中の灰色実線は最小自乗法により求めた直線である。

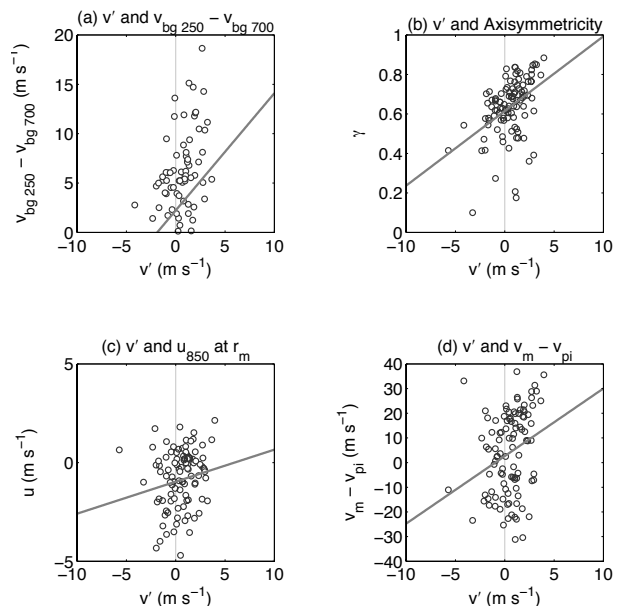


Fig.3. Fig. 2と同じ。ただし (a) 700 hPa・250 hPaにおける背景風  $v_{bg}$  の差、(b) 軸対称度  $\gamma$ 、(c) RMW・850 hPaにおける動径風速、(d) MPI  $v_{pi}$  からの  $v_m$  の偏差。