

理想化した熱帯低気圧に伴う長寿命多重壁雲の維持メカニズム

Maintenance Mechanism of Long-Lived Concentric Eyewall Associated with an Idealized Tropical Cyclone

○辻野 智紀, 名古屋大学宇宙地球環境研究所, 名古屋市千種区不老町名古屋大学研究所共同館 634,
E-mail: satoki@gfd-dennou.org

坪木 和久, 名古屋大学宇宙地球環境研究所, 名古屋市千種区不老町名古屋大学研究所共同館 631,
E-mail: tsuboki@nagoya-u.jp

Concentric eyewalls (CEs) associated with tropical cyclones (TCs) expand the area of severe wind (i.e., TC's size). Long-lived CEs maintain the large size of TCs, and the intensity of TCs associated with the long-lived CEs is stronger than that in the short-lived CEs according to previous studies. Thus, it is important for more accurate prediction of TC intensity to understand the maintenance mechanism of the long-lived CEs. To clarify the maintenance mechanism for the long-lived CEs associated with an idealized tropical cyclone, a numerical experiment is performed using a three-dimensional at a high resolution non-hydrostatic model with full-physics over the long period of 90 days. In this study, long-lived CEs associated with an idealized TC is successfully represented. The outer eyewall has the differences of weak updraft with outward tilting structure, in contrast to the structure of the outer eyewall with the eyewall replacement cycle (ERC) which corresponds to the short-lived CEs. The kinetic energy (KE) budget is employed to diagnose the contraction of the outer eyewall. In the long-lived CE case, negative contribution to KE tendency due to radial pressure gradient force above the planetary boundary layer (PBL) in the outer eyewall prevents the outer eyewall from contracting. The negative KE tendency inside of the outer eyewall due to the negative work is mainly produced by the outflow above the PBL in the inner eyewall. The outflow is caused by the super-gradient wind above the PBL in the inner eyewall. Super-gradient wind in the case of the long-lived CE is much stronger than that in the ERC case. Thus, it suggests that the strong super-gradient wind in the inner eyewall is an essential factor for the maintenance mechanism of the long-lived CE.

の軸対称運動エネルギー (\bar{K}) 収支解析を行う。 \bar{K} の収支式は

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial t} = \text{ADVKB} + \text{PTCB} + \text{BUOYB} + \text{other}, \quad (1)$$

$$\text{ADVKB} = - \left[\bar{u} \frac{\partial \bar{K}}{\partial r} + \bar{w} \frac{\partial \bar{K}}{\partial z} \right],$$

$$\text{PTCB} = - \frac{1}{\rho_0} \left[\bar{u} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \bar{w} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \right],$$

$$\text{BUOYB} = \bar{w} \bar{B}.$$

ここで, ADVKB, PTCB, BUOYB はそれぞれ軸対称風に伴う \bar{K} の移流, 圧力傾度力による仕事, ポテンシャルエネルギーから運動エネルギーへの変換を表す。 \bar{u} , \bar{w} , \bar{B} , \bar{p} はそれぞれ動径風, 鉛直風, 浮力, 非静力学圧力を表す。 また, "other" には非軸対称成分から軸対称成分への変換と摩擦による仕事が含まれている。 各変数における上線は台風中心について接線平均した (軸対称成分の) 物理量であることを示す。

1. はじめに

強い熱帯低気圧 (以下, 台風) に伴う多重壁雲は台風の強風半径を広げる。 また, 多重壁雲が置き換わりを起こすと, 1 日以内で台風の強度に顕著な変化がもたらされる。 このため台風の強度予報の観点から置き換わりについての研究は多く行われている⁽¹⁾。 一方, 北西太平洋域における多重壁雲を伴う台風のうちその構造が長期間維持 (置き換わりを起こさない; 長寿命多重壁雲) される台風では置き換わりを起こす台風と比べて, 台風強度が強い傾向にあることが統計解析⁽²⁾ から示され, 長寿命多重壁雲の維持メカニズムを解明することが必要であることが指摘されている⁽²⁾。

そこで, 本研究では非静力学大気モデルを用いて, 理想的な条件下で弱い台風渦から数値実験を行い, 長寿命多重壁雲のシミュレーションを試みる。 さらに, その結果を用いて, 長寿命多重壁雲の維持メカニズムを明らかにする。

2. 実験設定・解析手法

理想化台風渦に伴う多重壁雲のシミュレーション研究はいくつか存在するが, 長寿命多重壁雲を再現した研究はこれまでにない。 そこで, 本研究では理想化台風渦による 90 日に渡る長時間数値積分を行う。 これは, 文献⁽³⁾ などの報告に基づき, 積分期間内に現れる複数の多重壁雲のうちいくつかは長寿命多重壁雲の特徴を有するかもしれないという考えによる。 本研究では, 名古屋大学において開発されている 3 次元非静力学雲解像モデル CReSS⁽⁴⁾ を用いる。 モデル設定および理想化実験のための設定は表 1 にまとめている。

次に, 長寿命多重壁雲の維持メカニズムを調べるため, 台風渦

3. 結果

3.1 多重壁雲の構造

図 1 は高度 5 km における接線平均鉛直流の動径一時間断面図である。 90 日に渡る積分において, 13 例の多重壁雲形成 (Secondary Eyewall Formation; SEF) イベントが確認された。 各多重壁雲の形成が認められた時刻を基準 ($T_{\text{SEF}} = 0$) にした時間軸を定義する (図 1)。 ここで, $T_{\text{SEF}} = 0$ は高度 5 km においてリング状の上昇流が 6 時間以上維持したとき, リングが現れた最初の時刻として定義した。 このうち, SEF1, SEF2, SEF4 で顕著な置き換わりイベントが発生した。 一方, SEF5 以降の 9 例はいずれも 24 時間以上に渡り多重壁雲が維持し続けた (長寿命多重壁雲)。

Table. 1 Configurations in the CReSS model.

Physical processes	
turbulence	1.5-order closure with turbulent kinetic energy (TKE) prediction ⁽⁵⁾
cloud	Explicit bulk cold rain scheme (two-moment) ^(6, 7, 8, 9)
radiation	The Rapid Radiative Transfer Model (RRTM-G) ^(10, 11) (long-wave radiation processes)
surface	Aerodynamic bulk formulation ⁽¹²⁾
Experimental design	
domain size	2000 km × 2000 km × 23 km
horizontal resolution	2 km × 2 km
vertical resolution	500 m (average; stretching grid), 200 m (the lowest grid interval)
SST	26.5 °C (constant)
Initial vortex	A weak tropical cyclone with hydrostatic and gradient wind balance ⁽¹³⁾ , the maximum wind of 12 m s ⁻¹
Initial thermodynamic field	A tropical sounding data ⁽¹⁴⁾ adjusted to the thermal wind balance
Integration time	90 days
Coriolis parameter	Constant at 15 °N

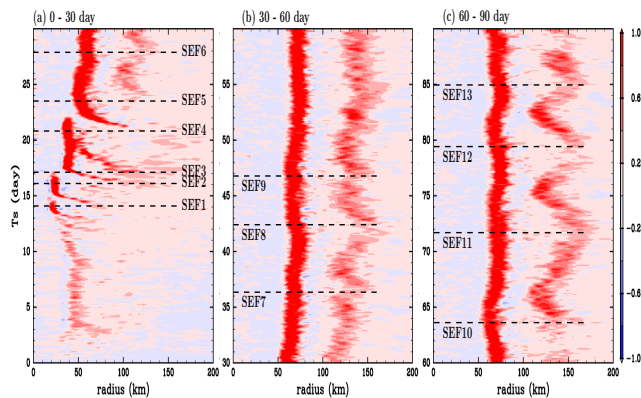


Fig. 1 Radius-time cross section of azimuthally averaged vertical velocity at 5 km in height. Dashed lines denote the times at $T_{\text{SEF}} = 0$ hour.

図2はSEF2イベントにおける多重壁雲に伴う軸対称な流れの動径-高度分布と鉛直流の水平分布の時間変化を示している。 $T_{\text{SEF}} = 0$ hourにおいて半径20 km付近には顕著なリング状の上昇流域が存在しており、半径100 km付近にもリング状の上昇流域が形成されている(図2a)。半径20, 100 kmでの上昇流域はそれぞれ内側壁雲、外側壁雲に相当する。このうち、内側壁雲は既に対流圏の全層を貫く背の高い循環となっているが、外側壁雲はまだ顕著な軸対称構造は見られない(図2b)。しかし、 $T_{\text{SEF}} = 12$ hourでは外側壁雲のリングが明瞭となり(図2c)、内側壁雲と同程度の高さまで循環が到達している(図2d)。さらに、外側壁雲の半径が50 km付近にまで収縮していることが

わかる。さらに、 $T_{\text{SEF}} = 22$ hourでは、内側壁雲が完全に消失してしまい、外側壁雲の上昇流域のみが顕著に見られている(図2e,f)。このような挙動は先行研究⁽¹⁾の結果と整合的である。つまり、SEF2イベントに伴う多重壁雲は置き換わりタイプに分類される⁽²⁾。

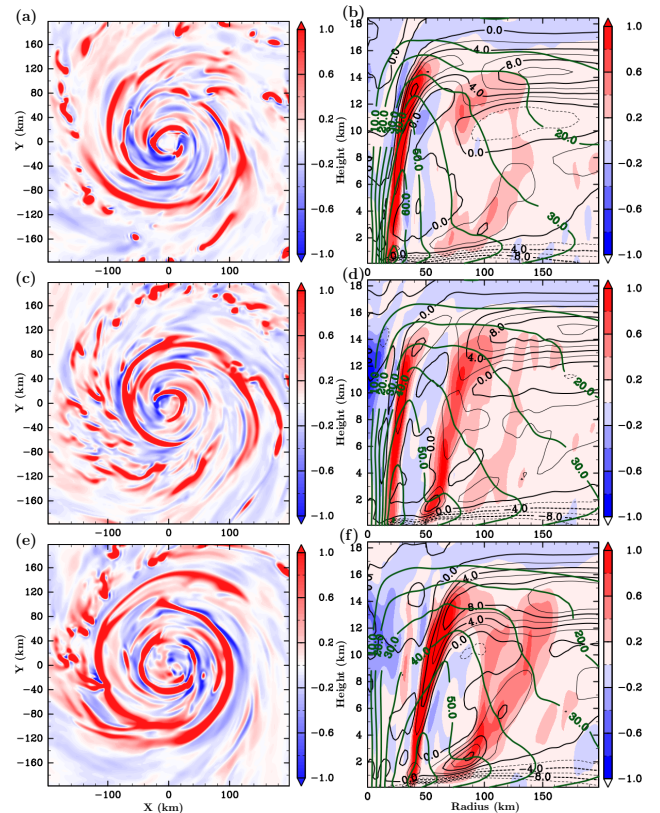


Fig. 2 Time variation of dynamical fields associated with the eyewall replacement cycle (ERC) after "SEF2". Left panels show horizontal distribution of vertical velocity (m s^{-1}) at the height of 5 km. Right panels show radius-height cross section of vertical (color shade), radial (black contour; 2 m s^{-1} interval) and tangential (green contour; 10 m s^{-1} interval) velocities. (a) and (b), (c) and (d), and (e) and (f) are the snapshot at $T_{\text{SEF}} = 0, 12$ and 22 hour, respectively.

一方、図3はSEF10イベントにおける多重壁雲に伴う軸対称な流れの動径-高度分布と鉛直流の水平分布の時間変化を示している。 $T_{\text{SEF}} = 0$ hourにおいて半径50 km付近には顕著なリング状の上昇流域が存在しており、半径120 km付近にもリング状の上昇流域が形成されている(図3a,b)。この2つの上昇流域は48時間以上に渡って維持し続けており、内側壁雲の消失は発生しなかった(図3c,d,e,f)。それだけでなく、外側壁雲の収縮も顕著には見られず、先行研究⁽¹⁾における多重壁雲の時間変化とは明らかに異なっている。多重壁雲が24時間以上維持していたため、SEF10における多重壁雲は長寿命型に分類される⁽²⁾。内側壁雲の長時間維持については、先行研究⁽¹⁾で指摘されている、外側壁雲の境界層における内向きの水蒸気供給の遮断が充分でなかったことが考えられる。これは高度1 km以下の境界層における内向き流れの動径分布から明らかである。SEF2(置き換わり型)の場合は外側壁雲形成後12時間で速やかに外側壁雲の内側境界層で内向きの流れが顕著に減少している(図2d)。しかし、SEF10(長寿命多重壁雲)の場合は、外側壁雲形成後24時

間経過しても、外側壁雲の内側境界層において内向き流れの減少は見られない (図 3d)。これはまさに、外側壁雲の境界層における内向きの水蒸気供給遮断が SEF10 では不十分であったことを示している。各壁雲の上昇流の強さを比較すると、SEF2 では $T_{\text{SEF}} = 12$ hour において内側壁雲と外側壁雲の上昇流は同程度である (図 2d) のに対し、SEF10 では $T_{\text{SEF}} = 24$ hour において内側壁雲の上昇流が外側壁雲より強い状態を維持している (図 3d)。また、外側壁雲の傾きを比較すると、SEF2 では内側壁雲と同程度の傾きである (図 2d) のに対し、SEF10 では外側壁雲の方がより外側に傾いている (図 3d)。SEF10 における外側壁雲のこの特徴的な構造は外側壁雲における上昇流に伴う非断熱加熱量を弱くすることで、外側壁雲の発達を抑えるように作用する⁽¹⁵⁾。

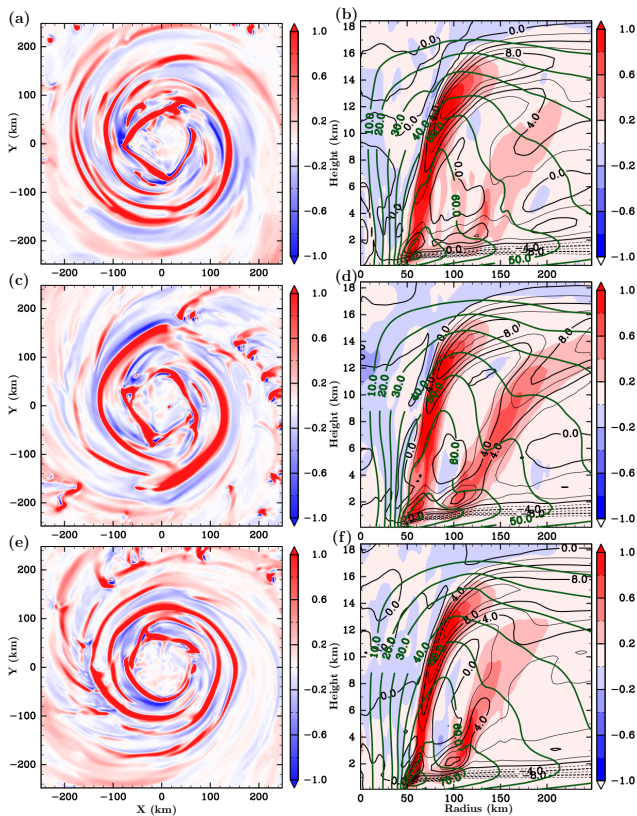


Fig. 3 As in Fig.2, except for the "SEF10". (a) and (b), (c) and (d), and (e) and (f) are the snapshot at $T_{\text{SEF}} = 0, 24$ and 48 hour, respectively.

3.2 運動エネルギー収支解析

この構造がどのようにして維持し続けていたのかを調べるために、運動エネルギー収支 (1) を求める。図 4 は (1) 式をもとに、SEF10 における運動エネルギーの時間変化に寄与する主要項の動径-高度分布を示したものである。外側壁雲は BUOYB および ADVKB によって運動エネルギーの供給が行われている (図 4a,c) が、 $\partial \bar{K} / \partial t$ は外側壁雲の内側で負となっており (図 4d)、外側壁雲の内側への収縮を妨げる傾向になっている。この運動エネルギーの時間変化への負の寄与は主に PTCB によってなされており (図 4b)、本実験の置き換わりタイプでは見られない特徴であった (図略)。PTCB に伴うこの負の寄与は主に内側壁雲の境界層より上における外向きの流れによってなされていた (図 5)。この内側壁雲における境界層直上の外向きの流れは動径方向の運動方程式を考察することで形成要因を明らかにできる。TC の境界層内では内向きの圧力傾度力と低気圧性循

環による外向きのコリオリ力、遠心力が支配的である。これに加えて低気圧性循環を減速する地表面摩擦も作用しているため、大気のパーセルに作用する動径方向の合力は内向きとなる。しかし、内側壁雲の内側で境界層内の水平収束に伴い、大気パーセルが境界層から自由大気に入ると、海面との摩擦がなくなるため、パーセルは外向きに力を受けて加速される。これによって形成される流れが図 5 で見られる高度 2 km 程度の外向き流れである。したがって、このような状況において内側壁雲の境界層直上では、内向きの圧力傾度力に対して外向きのコリオリ力と遠心力が大きくなる。これは傾度風バランスよりも強い低気圧性循環が形成されることを要求している。図 5 では確かに内側壁雲の境界層直上において 10 m s^{-1} 程度の超傾度風状態が $T_{\text{SEF}} = 0$ hour から 48 hour 以上維持し続けていることがわかる。すなわち、外側壁雲の内側における運動エネルギーの時間変化への負の寄与は内側壁雲の超傾度風状態によってなされていることになる。この結果から、長寿命多重壁雲が実現するためには、内側壁雲の超傾度風状態の維持が必要な要因となる。

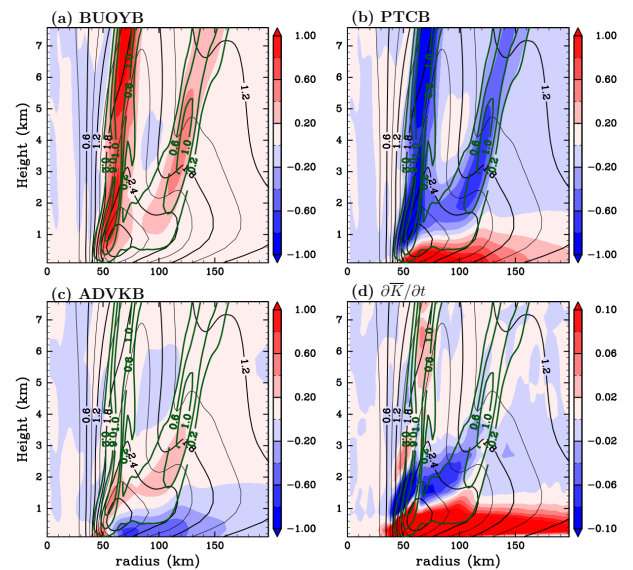


Fig. 4 Radius-height cross section of the leading contributions to contraction of the outer eyewall after the SEF10 in the energy budget analysis. Color shadings denote the contributions of (a) BUOYB, (b) PTCB and (c) ADVKB to the kinetic energy budget and (d) total kinetic energy budget ($\text{m}^2 \text{s}^{-3}$). Black and green contours denote \bar{K} ($\times 10^3 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$) and axisymmetric vertical wind (m s^{-1}). These distributions are averaged over $T_{\text{SEF}} = 12$ to 18 hours.

3.3 超傾度風状態

実際に、90 日のシミュレーションにおいて現れた各 SEF イベントについて $T_{\text{SEF}} = 0$ を基準に内側壁雲における超傾度風の大きさと境界層直上の外向き流れの大きさを 24 時間に渡って調べると、長寿命多重壁雲に伴う内側壁雲では置き換わりタイプの多重壁雲に伴う内側壁雲より超傾度風および外向き流れが明らかに大きいという特徴を示した (図 6)。この事実は長寿命多重壁雲の維持メカニズムに内側壁雲での低気圧性循環が超傾度風状態であることが本質的であることを示唆している。加えて、SEF4 事例では $T_{\text{SEF}} = 0$ hour では長寿命多重壁雲と同程度の超傾度風状態であったが、時間とともに減少し始め、 $T_{\text{SEF}} = 20$ hour あたりでは置き換わりタイプと同程度の超傾度風速になっていた (図 6 黒破線)。このときの外側壁雲の収縮速度は他の置

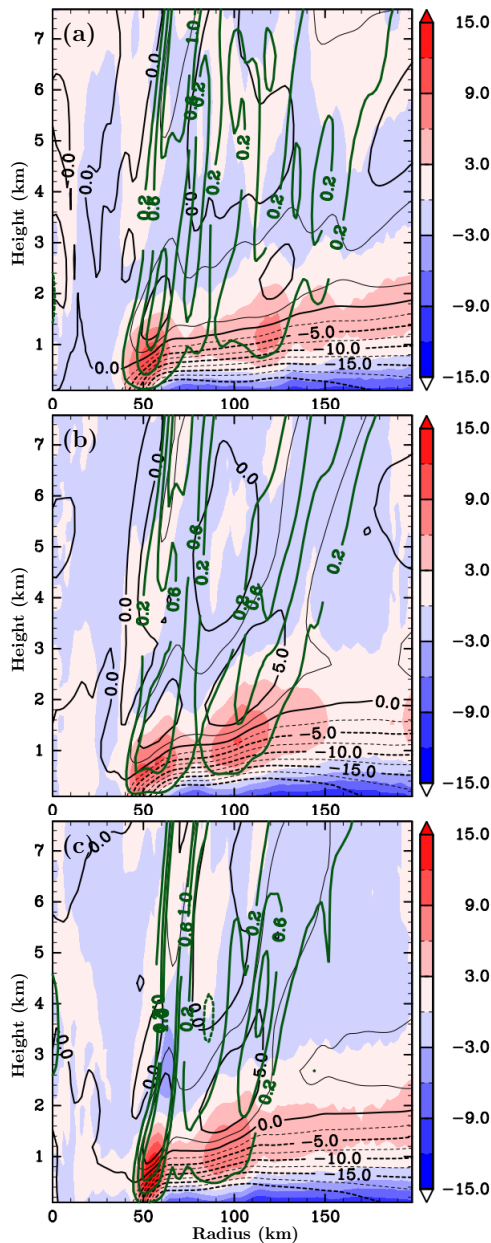


Fig. 5 Radius-height cross sections of a gradient wind associated with the CEM after "SEF10". Green and black contours denote the distributions of azimuthally averaged-vertical and radial winds (m s^{-1}), respectively. A gradient wind is denoted by color. Red and blue colors correspond to "super-" and "sub-" gradient winds, respectively. (a), (b) and (c) are identical to the snapshots at $T_{\text{SEF}} = 0, 24$ and 48 hour, respectively.

き換わりタイプにおける外側壁雲の収縮速度に比べて明らかに遅かった(図略)。これは、 $T_{\text{SEF}} = 0$ hour からしばらくは内側壁雲における大きな超傾度風によって外側壁雲の収縮が抑えられていたが、SEF から後半に外側壁雲における十分な内向き水蒸気の遮断が起きたため、内側壁雲の循環が急速に減衰したことが要因であると考えられる。この事実からも、内側壁雲における超傾度風状態が外側壁雲の維持に本質的であることが示される。

4. 考察

北西太平洋における衛星データに基づく台風の解析⁽²⁾から、多重壁雲構造を伴う台風のうち、置き換わりを経験するものは約53%、長時間維持するものは約23%と長寿命多重壁雲は置き換わりタイプに比べて発生頻度は少ない。しかし、SEF後の強度を比較すると、長寿命多重壁雲の方が置き換わりタイプより強い強度を有していることが明らかとなっている⁽²⁾。これは、本研究における長寿命多重壁雲の維持メカニズムと整合的な結果である。また、本シミュレーションにおける長寿命多重壁雲は短時間での強度変化もあまり見られなかった。壁雲における超傾度風状態は成熟したTCに見られる特徴である⁽³⁾ため、長寿命多重壁雲は発達期というより成熟期に多く見られると考えられる。したがって、本研究における理想化実験でシミュレーションされた長寿命多重壁雲とその維持メカニズムも現実に見られるメカニズムと考えられる。しかし、これに関しては長寿命多重壁雲を伴うTCの実シミュレーションによって確認されなければならない。また、本研究によって提案されるメカニズムは全ての長寿命多重壁雲に適用できるわけではない。例えば、衛星データによる事例解析⁽¹⁶⁾では、発達期の台風においても長寿命多重壁雲が見られることが示されている。このような場合は、内側壁雲における超傾度風速はそれほど大きくないと考えられるため、他の要因によって維持されていると考えられる。

5. まとめ

3次元非静力学モデルを用いた理想化TC渦の長時間数値積分によって、筆者が知る限り世界で初めて長寿命多重壁雲をシミュレーションすることに成功した。モデル内で再現された長寿命多重壁雲は置き換わりを起こす多重壁雲と比較して、外側壁雲における上昇流が弱く、内側壁雲に比べてより外側に傾いた構造をしていた。このため、先行研究で示唆されている置き換わりに伴う外側壁雲の境界層における内向きの水蒸気供給遮断が十分に起こらず、内側壁雲が維持続けた。また、運動エネルギー収支解析の結果から、外側壁雲のもつ大きな運動エネルギーを減少させる効果が働いていた。この効果は外側壁雲の内向き収縮を抑制し、長時間同じ位置に維持続ける働きをした。外側壁雲の内側における運動エネルギーの時間変化に対する負の寄与は主に、圧力傾度力によってなされる仕事が原因であった。この仕事は内側壁雲の境界層直上における外向きの強い流れによってなされており、その流れは内側壁雲での超傾度風状態の維持が原因であった。本研究から、長寿命多重壁雲は内側壁雲の力学によって支配されていることが示唆された。壁雲における超傾度風状態は成熟したTCのもつ特徴である。したがって、本研究で提案されるメカニズムは、先行研究で示唆される長寿命多重壁雲が置き換わりを起こす多重壁雲に比べて強度が強いという観測結果と整合的であると考えられる。

謝辞

CReSSモデルへの放射伝達コードの導入に関して、吉岡真由美氏(名古屋大学 宇宙地球環境研究所)、長谷川晃一氏(中電CTI)にご協力頂きました。本研究の計算結果は理化学研究所のスーパーコンピューター「京」を利用して得られました(課題番号: hp120282)。ここに感謝します。

参考文献

- (1) Zhou, X. and B. Wang, "Mechanism of concentric eyewall replacement cycles and associated intensity change", *J. Atmos. Sci.*, 68 (2011), pp. 972-988.

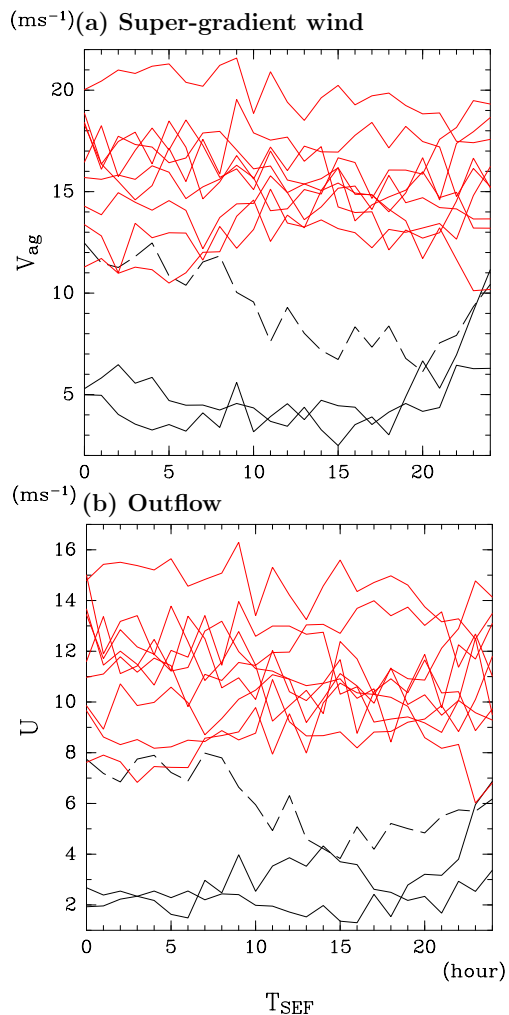


Fig. 6 Time series of the maximums of the super-gradient wind (a) and radial wind (b) in the inner eyewall among all SEF events except for the SEF3. Black-solid lines correspond to the SEF1 and SEF2. Black-dashed line corresponds to the SEF4. Red-solid lines correspond to the SEF5 to SEF13.

- (2) Yang, Y.-T., H.-C. Kuo, E. A. Hendricks and M. S. Peng, "Structural and intensity changes of concentric eyewall typhoons in the western North Pacific basin", *Mon. Wea. Rev.*, 141 (2013), pp. 2632-2648.
- (3) Hakim, G. J., "The mean state of axisymmetric hurricanes in statistical equilibrium", *J. Atmos. Sci.*, 68 (2011), pp. 1364-1376.
- (4) Tsuboki, K. and A. Sakakibara, "Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator", *High Performance Computing*, (2002), pp. 243-259.
- (5) Deardorff, J. W., "Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model", *Boundary-Layer Meteorology*, 18 (1980), pp. 495-527.
- (6) Lin, Y.-L., R. D. Farley and H. D. Orville, "Bulk parameterization of the snow field in a cloud model", *J. Climate Appl. Meteor.*, 22 (1983), pp. 1065-1092.
- (7) Murakami, M., "Numerical modeling of dynamical and microphysical evolution of an isolated convective cloud - The 19 July 1981 CCOPE cloud", *J. Meteor. Soc. Japan*, 68 (1990), pp. 107-128.
- (8) Ikawa, M. and K. Saito, Description of a nonhydrostatic model developed at the forecast research department of the MRI, MRI Tech. Rep., 28 (1991). pp. 1-238.
- (9) Murakami, M., T. L. Clark and W. D. Hall, "Numerical simulations of convective snow clouds over the Sea of Japan: Two-dimensional simulations of mixed layer development and convective snow cloud formation", *J. Meteor. Soc. Japan*, 72 (1994), pp. 43-62.
- (10) Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono and S. A. Clough, "Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave", *J. Geophys. Res.*, 102 (1997), pp. 16663-16682.
- (11) Iacono, M. J., J. S. Delamere, E. J. Mlawer and S. A. Clough, "Evaluation of upper tropospheric water vapor in the NCAR Community Climate Model (CCM3) using modeled and observed HIRS radiances", *J. Geophys. Res.*, 108 (2003), pp. ACL1-1-ACL-1-19.
- (12) Kondo, J., "Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions", *Boundary-Layer Meteorology*, 9 (1975), pp. 91-112.
- (13) Terwey, W. D. and M. T. Montgomery, "Secondary eyewall formation in two idealized, full-physics modeled hurricanes", *J. Geophys. Res.*, 113 (2008), pp. D12112.
- (14) Jordan, C. L., "Mean soundings for the west Indies area", *J. Meteor.*, 15 (1958), pp. 91-97.
- (15) Shapiro, L. J. and H. E. Willoughby, "The response of balanced hurricanes to local sources of heat and momentum", *J. Atmos. Sci.*, 39 (1982), pp. 378-394.
- (16) Yang, Y.-T., H.-C. Kuo, E. A. Hendricks and M. S. Peng, "Long-lived concentric eyewalls in typhoon Soulik (2013)", *Mon. Wea. Rev.*, 142 (2014), pp. 3365-3371.