

数値シミュレーションによって再現された 2013 年スーパー台風 Haiyan における渦位の混合と急発達*

辻野 智紀^{1†}・郭 鴻基^{1‡}

日本語要約

本研究では水平解像度 2 km の雲解像数値モデルシミュレーションを用いて、2013 年のスーパー台風 Haiyan における急発達開始時の中心付近の力学過程を研究する。数値シミュレーションにおける台風中心付近の渦位場は、急発達の開始期間に対流圏の中層および下層で、壁雲に沿って楕円型あるいは多角形のリング構造を再現した。この渦位リングは、対流圏中下層における非軸対称な流れ場に伴う混合によって、中心付近に渦位をかき集めるよう時間変化した。渦位の中心への集中とそれに伴う質量の再配置は、静力学関係を通して台風中心付近の境界層での気圧を低下させ、急発達につながりうる。

シミュレーションでの急発達開始時における渦位の混合の定量的な重要性は、シミュレーションデータを用いた渦位の収支解析から示された。ここでいう渦位の混合過程は、壁雲での凝結加熱によって生成される渦位が、台風中心に向かって非軸対称な流れによって輸送される過程である。この過程は渦位の水平分布をみると、壁雲に沿った多角形の渦位リングがフィラメント状に排出されているように見える。部分渦位逆変換手法 (Piecewise PV inversion; PPVI) を用いると、渦位の混合による台風中心気圧の低下量が、収支解析で得られた混合過程による渦位の変化量から定量的に見積もられる。また渦位の混合に伴う気圧低下 (質量の再配置) は、台風中心での暖気核の形成に対応する。渦位混合に伴う暖気核形成過程は、オメガ方程式診断と温位の収支解析によって定量評価される。

PPVI によって、急発達開始付近での台風中心気圧低下の約 50 % は、渦位の混合によって占められていることがわかった。オメガ方程式と温位収支解析の結果は、PPVI から診断された気圧低下に対応して、台風中心付近で混合に伴う断熱昇温を示した。中心気圧低下は、台風中心の境界層での動径方向の圧力傾度を増加させ、軸対称な境界層インフローを強化する。境界層インフローの強化は、台風の最大風速半径の収縮と、最大風速半径の内側で軸対称な壁雲対流による渦位のタワーを強化する。

台風急発達期間の後半では、暖気核は軸対称な壁雲上昇流の補償下降流に伴う断熱昇温によって強化された。この結果は以下の力学的変化が非線形的に連動することで、台風の急発達を引き起こすことを示唆する：

1. 自由大気におけるポテンシャル渦度の混合に伴う質量の再配置、
2. 静力学関係を通じた境界層の気圧低下、
3. 軸対称な境界層インフローの強化、
4. 軸対称な対流性渦位タワーの形成、
5. 軸対称なインフローに伴う角運動量の輸送による接線風の強化。

重要な点は、自由大気における渦位の混合過程が質量の再配置を通して境界層の力学に影響を与えていることである。この過程は調節過程の一つであるため、ロスビー深度が深いほど自由大気での混合が境界層に大きく影響を与える。このことは、台風渦がある程度の強度を持たないと、渦位混合が発生しても急発達は開始しないことを示唆している。なぜなら、ロスビー深度は慣性安定度が大きいほど深くなるからである。

*原文タイトル : Potential vorticity mixing and rapid intensification in the numerically simulated Supertyphoon Haiyan (2013) (doi:10.1175/JAS-D-19-0219.1)

¹国立台湾大学 大気科学研究科

[†]日本語要約責任 (satoki_at_gfd-dennou.org)

[‡]責任著者 (kuo_at_as.ntu.edu.tw)

数値シミュレーションによって再現された 2013 年スーパー台風 Haiyan における渦位の混合と急発達

一般向け解説（日本語）

1. はじめに

熱帯低気圧（以下「台風」と表記）は熱帯海域上で発生発達し、成熟すると中心に眼と呼ばれる雲のない領域と、その周辺に壁雲と呼ばれるリング状の積乱雲群を伴うほぼ円形（軸対称構造）となる。台風最大の風速は壁雲直下の地表付近に位置し、そこでは降水も最も激しくなる。対して眼の中は上空ほど周辺より気温が高く（暖気核）、大気が安定しているため背の高い雲は発生しにくい。熱帯海洋上での台風の発達過程は、観測機器の少なさから未解明の点が多い。特に 24 時間で最大風速が 20 m s^{-1} 以上強化する急発達過程は、正確な台風強度の数値予報における問題点となっている。典型的な台風の発生初期は、まだ眼をもたず壁雲も円形な構造ではない（非軸対称構造）。急発達時の力学過程の完全な理解には、この非軸対称な構造から成熟期の円形構造を短時間でどのように獲得するかを調べる必要がある。

軸対称化に関して提案されているメカニズムは多くあるが、本研究では渦位^(用語 1)の混合によるメカニズムに焦点を当てる。台風の急発達前に、非軸対称な壁雲積乱雲群に伴う強い上昇流と雲内での水蒸気の凝結加熱が、高度 10 km 程度より下の対流圏中下層において正の渦位を生成する。積乱雲スケールの正渦位は自身のもつ回転の流れに流されて互いに集まり（渦位の混合により増加し）ながら、その水平スケールを大きくする傾向がある。渦位の水平スケールの増大はすなわち、低気圧回転の渦が積乱雲から台風スケールに増大することを意味する。さらに台風スケールに増大した低気圧回転の渦は傾度風バランス^(用語 2)を通して気圧の低下を伴う。この正渦位の集中した領域が眼となり、気圧の低下した眼を中心に、地表面付近で軸対称な（円形の）内向きの空気の吸い込みが増加する。内向きの吸い込みは軸対称な上昇流とそれに伴う壁雲の形成と関係し、急発達となる。

先行研究では上記のメカニズムを調べるため、壁雲での正渦位を人工的に配置した台風の数値実験を行っている。一方で壁雲での凝結加熱や上昇流による渦位生成の効果を考慮していなかった。本研究では実際に急発達が観測された台風に対して、人工的な正渦位を配置せず、積乱雲での凝結加熱や上昇流を考慮した数値実験を行い、渦位混合による急発達の寄与を定量的に調べる。本研究では、2013 年に北西太平洋で急発達し、非常に強い勢力でフィリピンに上陸した台風 Haiyan を対象とした。この台風はフィリピンで甚大な高潮被害を引き起こした。

2. 研究手法

本研究では先行して行われた Haiyan の数値シミュレーションの結果を用いる。このシミュレーションは台風周辺の大気の運動、気圧、気温、水蒸気量、降水物質の質量の時空間変化を計算しており、現実と類似の急発達を再現した。シミュレーションにおける急発達開始時の渦位混合とそれに伴う眼の形成を定量化するために、部分渦位逆変換とオメガ方程式診断と呼ばれる手法を用いる。

部分渦位逆変換は、与えられた渦位の変化がどの程度の気圧変化に対応するかを定量的に見積もる手法である。ここで与える渦位の変化量は、シミュレーションデータの渦位収支解析から見積もられる、渦位の混合による渦位の変化量とする。オメガ方程式診断は、与えられた渦位に対応する 3 次元気流場を定量的に見積もる手法である。急発達開始時での、渦位混合に伴う眼における暖気核の形成は、オメガ方程式診断で得られた 3 次元気流場による温位^(用語 3)収支解析が行われる。

3. 研究結果・研究成果

シミュレーションされた台風 Haiyan は 2013 年 11 月 7 日 0000 UTC あたりで急発達を開始した。急発達開始に伴って中心気圧の顕著な低下が開始した (図 1b)。気圧低下に対応して、台風中心の高度 8 km 以下の暖気が地表面に拡張しながら昇温を開始している (図 1a)。7 日 1200 UTC 以降になると、気圧はさらに急速に低下し、11 km 高度より上にもう一つの暖気核が形成、8 km 以下の暖気核も急速に昇温している。

11 月 7 日 0000 UTC 付近では、台風中心周辺の壁雲に伴う凝結加熱はまだ非軸対称であり、積乱雲スケールの正渦位が壁雲に沿って分布している (図 2a)。この正渦位は時間が経過するとともに水平スケールを大きくしながら互いに集まり、壁雲から台風中心に向かって移動していることがわかる (図 2b-d)。この期間での渦位収支解析から、高度 8 km 以下の渦位変化は以下の特徴をもつことがわかる。1. 半径 30-40 km に位置する壁雲では、水蒸気の凝結加熱による正渦位の生成が活発であり、壁雲に沿って正渦位の極大が形成している (図 3a)。2. 凝結加熱による正渦位の生成位置で渦位混合による正渦位の減少が見られ、そのすぐ内側から台風中心まで渦位混合による正渦位の増加が見られる (図 3b)。2 の効果が渦位混合による台風中心での渦位の集中と水平スケールの増大を表す。この結果は壁雲の凝結加熱によって生成された正渦位が、渦位混合によって次々と台風中心に輸送されていることを示している。

この渦位混合による台風中心での渦位増加に対応して、台風中心付近の気圧低下量が部分渦位逆変換によって示された (図 4b)。その気圧低下は台風中心の地表面付近で最も顕著であり、実際のシミュレーションによる気圧低下量の約半分がこの渦位混合に伴う気圧低下であることが示された (図 4a)。オメガ方程式診断から見積もられた、3 次元気流による温位収支解析は、高度 10 km 以下の半径 20 km 以内で渦位混合に伴う温位の増加 (暖気核の昇温) を示した (図 4c)。

地表付近の台風中心への軸対称な (円形の) 吸い込みの強さは、11 月 7 日 0000 UTC の急発達開始周辺で増加し始め、気圧低下が顕著になった 1200 UTC 付近から急速に増加している (図 5a)。実際、壁雲上昇流の水平分布の時間変化をみると、急発達開始周辺ではまだ壁雲は明瞭な円形ではなく、非軸対称な構造を持っていた (図 5b, c)。しかし 1200 UTC 以降は壁雲上昇流の形が円形 (軸対称構造) に近づいていることがわかる (図 5d, e)。数値シミュレーションされた Haiyan の急発達開始における渦位混合の役割は、図 6 のようにまとめられる。

4. 今後の展望

本研究の結果は、先行研究で提案されたように、台風急発達時における渦位混合が、非軸対称から軸対称構造を獲得する主要な過程であることを定量的に示すものである。先行研究の数値実験では考慮されなかった、壁雲での凝結加熱を組み込んだ実事例での急発達シミュレーションにより、渦位混合に伴う中心気圧の低下と、それによる軸対称な地表面での吸い込みの増加が、急発達後半での軸対称な構造の下でのより急速な発達と連動していることを新たに示した。今後は、衛星などの観測データをもとに、このメカニズムの検証を行う予定である。

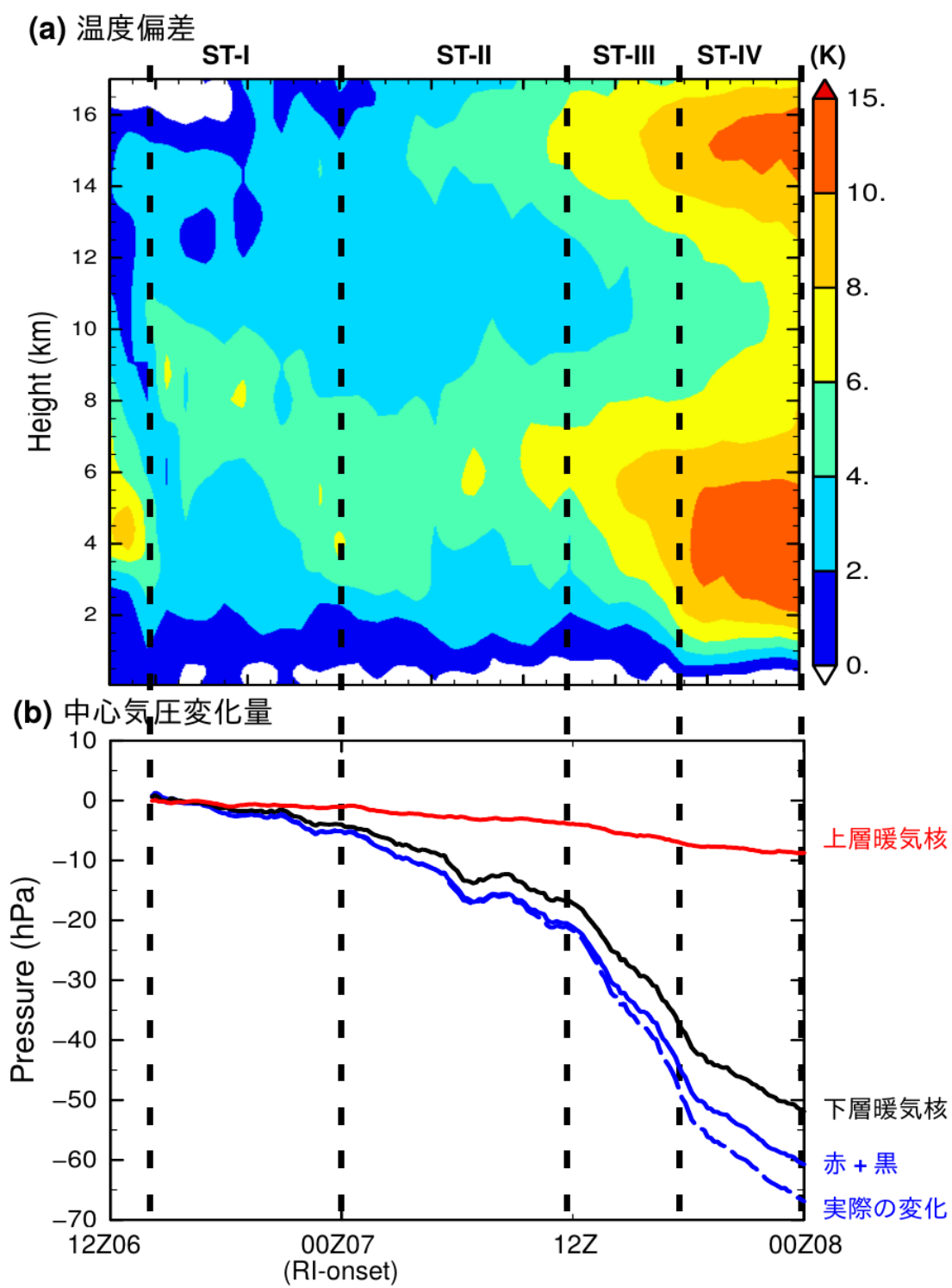


図 1: 数値シミュレーションにおける台風 Haiyan の (a) 中心の温度偏差 (K) と (b) 上層暖気 (赤) および下層暖気 (黒) による中心気圧低下の時間変化. 温度偏差は台風中心から距離 400 km での接線平均温度からの偏差.

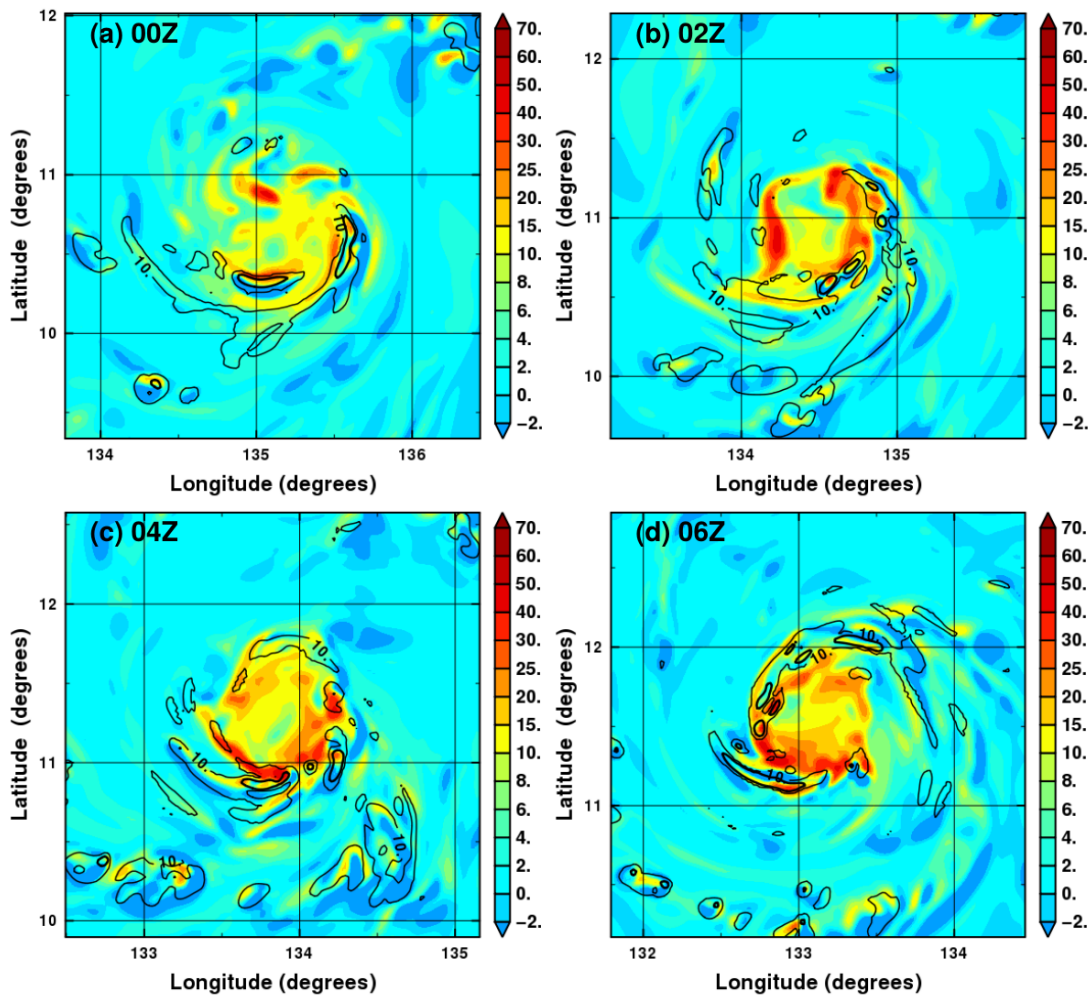


図 2: 急発達開始付近 (2013 年 11 月 7 日 0000 UTC から 0600 UTC) における高度約 6 km での渦位 (カラー; PVU) と水蒸気の凝結加熱量 (等値線; 10 K h^{-1} と 100 K h^{-1}).

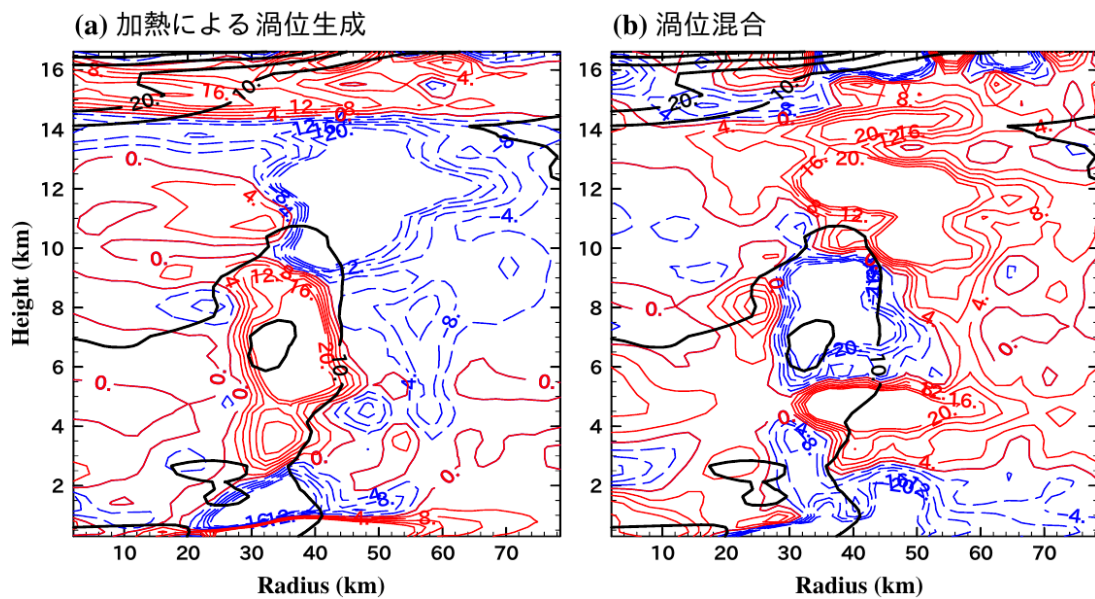


図 3: 急発達開始付近 (2013 年 11 月 7 日 0000 UTC から 0600 UTC) における渦位収支解析から得られた (a) 加熱による渦位生成の寄与と (b) 渦位混合の寄与. 赤線が渦位の増加, 青線が渦位の減少を表す ($\text{PVU} / 6\text{h}$). 黒線は期間平均での軸対称渦位 (PVU).

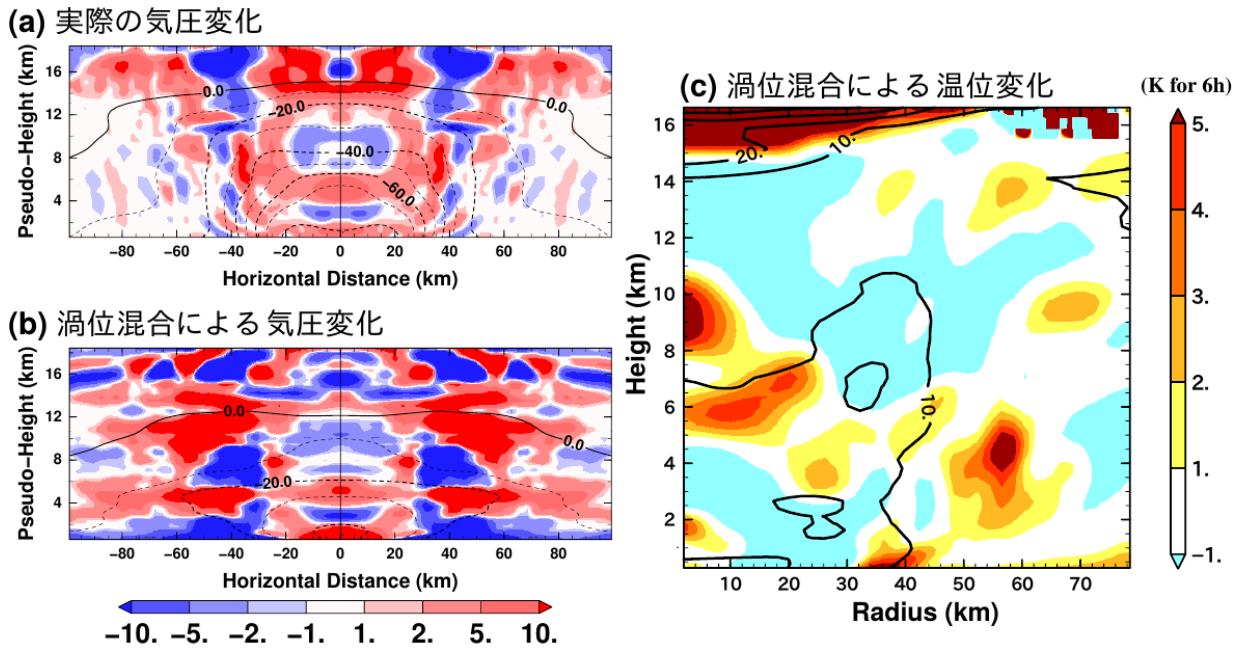


図 4: 急発達開始付近 (2013 年 11 月 7 日 0000 UTC から 0600 UTC) における (a) 実際の気圧変化 (等値線; $\times 0.1$ hPa) と (b) 渦位混合による気圧変化, (c) 渦位混合による温位変化 (カラー; K / 6 h). (a), (b) でのカラーは実際の渦位変化と渦位混合による変化 (PVU / 6 h), (c) での等値線は図 3 の黒等値線と同じ.

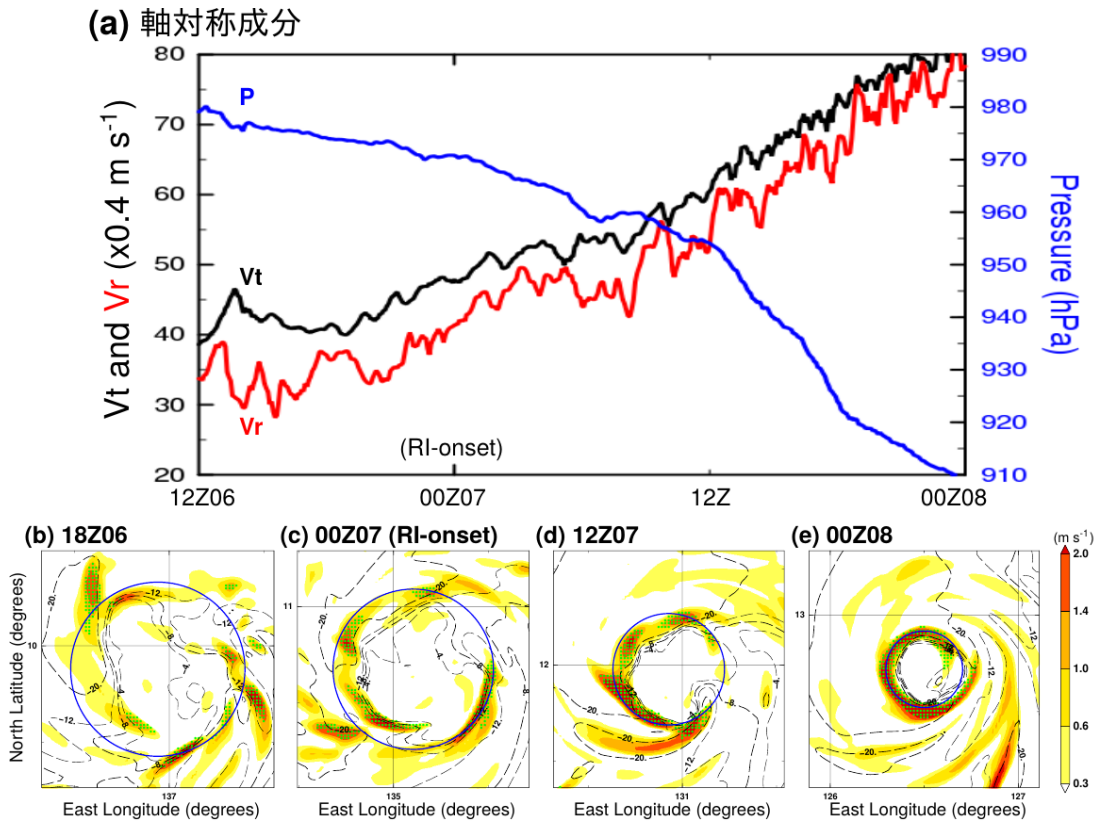


図 5: シミュレーションされた Haiyan における (a) 軸対称な最大接線風 (黒; m s^{-1}), 地表面付近の最大吹込み風 (赤; $\times 0.4 \text{ m s}^{-1}$) と中心気圧 (青; hPa) の時間変化. 下段は (a) 2013 年 11 月 6 日 1800 UTC, (b) 7 日 0000 UTC, (c) 7 日 1200 UTC, (d) 8 日 0000 UTC での高度 1 km の上昇流 (カラー; m s^{-1}), 地表付近での台風の移動方向に相対的な吹込み風 (等値線; m s^{-1}). 下段図の青円は高度 1 km での最大風速半径, 緑の点は特に上昇流の強い場所.

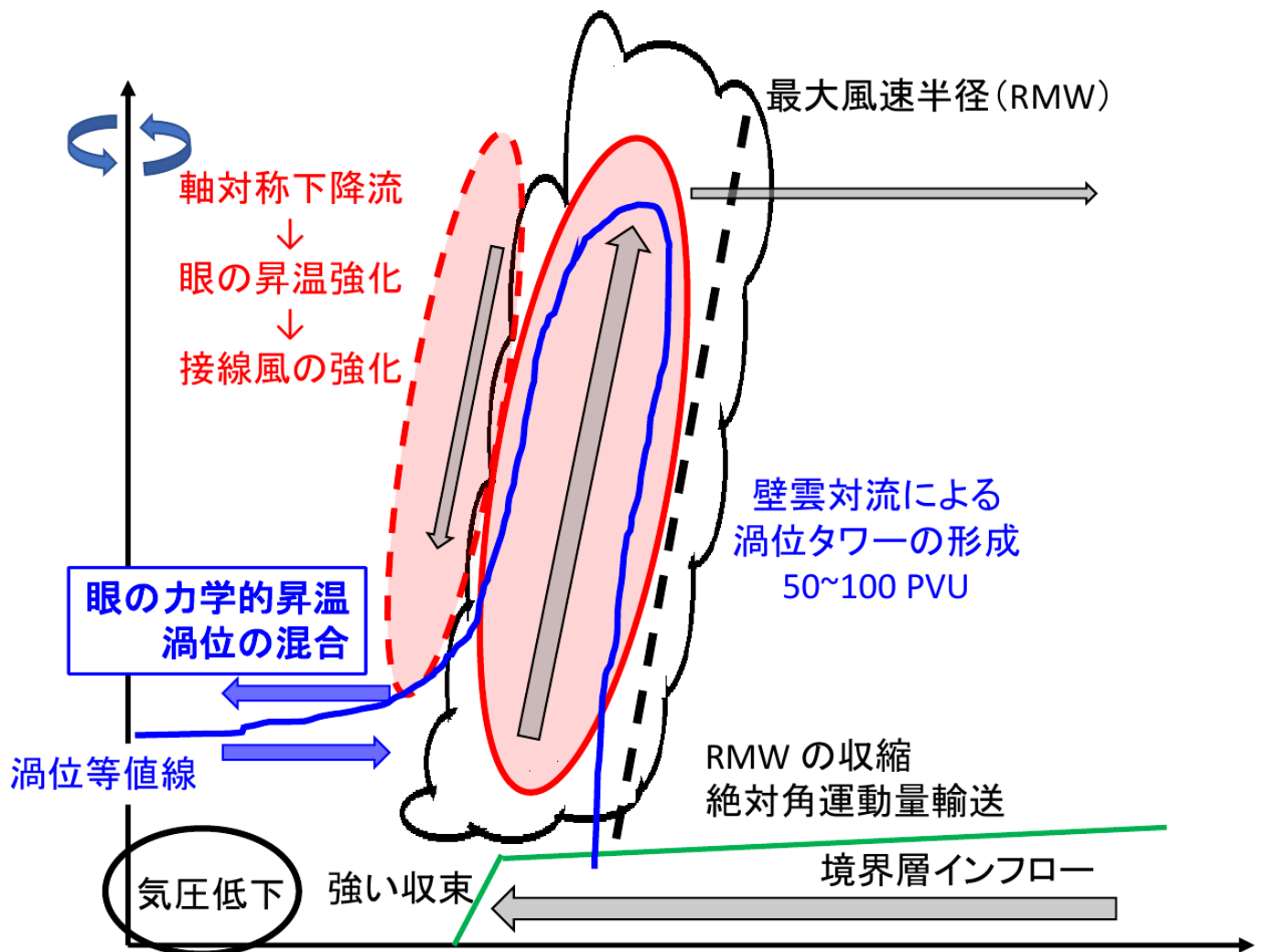


図 6: 数値シミュレーションから示された, 台風 Haiyan の急発達開始時における, 非軸対称な渦位混合から軸対称な構造の獲得を説明する概念図. 渦位収支解析から壁雲での非軸対称な水蒸気凝結加熱に伴う正渦位の生成が存在する. 積乱雲スケールの正渦位が自身に伴う流れ場によって中心付近に集中, 水平スケールを増加させる (渦位の混合). この中心への渦位集中に伴って対流圏中下層での昇温と眼の暖気核が形成 (眼の力学的昇温). 暖気核の形成は地表付近の台風中心気圧の低下を伴う. 中心での気圧低下は軸対称な内向きの気圧傾度力を強化する. 地表付近での内向きの力が強化することで, 壁雲につながる地表付近での内向きの吸い込み風 (インフロー) が強化される. 急発達開始付近では, この非軸対称な渦位混合から軸対称な流れを強化する過程が活発に発生する. 急発達後半になると, 強化された軸対称な壁雲上昇流の一部が眼の中に入り, 断熱圧縮昇温を引き起こす. この強い昇温が暖気核を急速に強化し, 急発達開始時よりはるかに急速な中心気圧の低下を引き起こす. 急発達後半の軸対称構造の獲得は, 急発達前半での対流圏中下層における非軸対称な渦位混合が, 地表付近の力学過程に影響を与えることに伴うことが示唆された.

用語解説

用語 1: 渦位とは、風の局所的な回転の強さに比例し、回転軸の層の厚さに反比例する物理量である。単位は PVU (Potential Vorticity Unit; $10^{-6} \text{ K m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$)。この物理量は渦に外的要因が加わらない限り、変化しない物理量である。例えば、竜巻のような鉛直方向に回転軸をもつ渦を考える。大気の質量を維持するようにこの渦の水平スケールが縮まったとすると、渦自身は鉛直方向に伸び (大気層が厚くなる)、回転速度が速くなる。これはスケートの選手が腕を横に広げてゆっくり回転し始めた後、腕を縮めると選手の回転速度が速くなるのと同じ原理である。回転の強さ (渦度) のみを用いて考えると、この鉛直渦は水平スケールが縮まるとともに回転が強くなる。しかし、渦位という物理量で考えると、回転が強くなるとともに回転軸方向に層が伸びている (厚くなっている) ため、渦位で見ると一定に維持されている。この性質から、渦位は外的要因を受けにくい渦を追跡するトレーサーとして用いられるとともに、渦位変化する渦における外的要因の種類を考察するのにも用いられる。渦位は渦位同士の合体や分裂、水蒸気の凝結などの加熱冷却 (大気層の変化)、摩擦 (回転の変化) によって変化する。

用語 2: 傾度風バランスとは、台風を中心付近で成り立つ力のバランス状態である。これは低気圧回転の流れにかかる台風の外へ向かうコリオリ力 (地球の自転による見かけの力) と、同じく台風自身の回転によって外向きにかかる遠心力、そして台風の内側へ向かう気圧傾度力 (台風中心の気圧が外より低いことによる吸い込みの力) の間で力が釣り合った状態である。もし低気圧回転の流れが強くなると、外向きのコリオリ力と遠心力が増加し、それとバランスするために内向きの圧力傾度力が強くなる。内向きの圧力傾度力の増加はすなわち、台風中心気圧の低下を意味する。

用語 3: 温位とは、断熱変化する空気塊が基準気圧 (一般的には 1000 hPa) でもつ温度である。空気塊が断熱膨張あるいは断熱収縮すると、その空気塊自身の温度は変化する。しかし温位は断熱変化の間で一定となる。空気塊が断熱変化したか非断熱加熱 (例えば水蒸気の凝結による加熱) で変化したかを知る指標となる。静力学関係式と組み合わせると、温位の変化は温度の変化と近似されるので、温位の時間変化 (加熱されたか冷却されたか) はそのまま気圧の時間変化 (低くなったか高くなったか) を表すことになる。

論文情報

雑誌名 : Journal of the Atmospheric Sciences, (2020)

論文タイトル : Potential vorticity mixing and rapid intensification in the numerically simulated Supertyphoon Haiyan (2013)

著者名 : 辻野 智紀¹, 郭 鴻基¹

所属 : 1. 国立台湾大学 大気科学研究科

DOI : 10.1175/JAS-D-19-0219.1

公表 : 2020 年 06 月

責任著者 : 郭 鴻基 (kuo_at_as.ntu.edu.tw)

日本語解説 : 辻野 智紀 (satoki_at_gfd-dennou.org)