

2018 年台風 Trami の壁雲交換における中心付近の風速分布: 気象衛星ひまわり 8 号に基づく定量解析*

辻野 智紀^{1†}・堀之内 武²・塚田 大河²・郭 鴻基³・山田 広幸⁴・坪木 和久⁵

日本語要約

強い熱帯低気圧はしばしば、中心の眼を囲むリング状の積乱雲群（壁雲）を同心円状に複数有することがあり、多重壁雲と呼ばれる。眼を囲む壁雲を内側壁雲と呼び、内側壁雲より後に、より外側に形成される壁雲を外側壁雲と呼ぶ。多重壁雲が形成すると、内側壁雲は時間とともに衰退し、壁雲直下に見られる接線風の極大や降水も衰退する（壁雲交換）。壁雲交換に要する期間は 1 日から 2 日と熱帯低気圧の一生から比較すると短期間である。この短い時間スケールで台風の渦分布や最大風速、台風の大きさ、降水分布が急激に変化するため、台風の強度予報精度に大きく影響を与える。特に、熱帯低気圧の壁雲交換における内側壁雲の消失過程は力学的に未解明のままである。これは壁雲交換が主に海洋上で発生し、気象衛星以外の観測機器が乏しく、台風中心付近の詳細な風分布の情報が得られないためである。太平洋上を高頻度で観測するひまわり 8 号は主に雲の水平分布とその時間変化を観測しているが、その観測から台風の風速分布を客観的・定量的に推定することはなされていない。

本研究では 2020 年に新しく開発された、ひまわりの雲画像から台風の風速分布を定量的に推定する手法を用いて、台風の壁雲交換に伴う内側壁雲消失時の風速分布とその時間変化を詳細に調査する。さらにその調査結果と台風の風速変化理論を組み合わせて、内側壁雲消失時の風速変化の力学過程を議論する。本研究で対象とした台風は 2018 年に北西太平洋上で発生・発達し、日本に上陸した台風 Trami である。この台風は生涯最大勢力期間中に、明瞭な多重壁雲構造を有し、壁雲交換に伴う内側壁雲の崩壊を経験した。

多重壁雲形成後から内側壁雲崩壊までの、台風中心付近の風速分布を先述のひまわり 8 号画像（時間間隔 2.5 分、水平解像度 2 km）から推定した。内側壁雲活発期では壁雲の内縁に位置する半径 30 km で 50 m s^{-1} の接線風を推定した。一方、内側壁雲衰退期における同じ半径での推定接線風は 20 m s^{-1} まで減少していることを明らかにした。推定された接線風から渦の強さを見積もると、壁雲の内縁周辺の渦の強さは 6 時間から 12 時間程度で半減していたのに対し、台風中心付近の渦の強さは 36 時間から 48 時間程度で半減することが示された。

渦の強さの時間変化を記述する方程式を用いて、観測結果の値を検証すると、

- 渦が急速に減少する内側壁雲周辺は主に、外側壁雲との間で発生する順圧不安定に伴った、渦・運動量の輸送による減速
- 渦が緩やかに減少する中心付近は主に、地表面摩擦による減速

であることが明らかとなった。本研究は衛星画像から台風中心付近の風速を定量的に推定し、その結果から内側壁雲消失時の力学過程を明らかにした最初の研究である。

*原文タイトル: Inner-core wind field in a concentric eyewall replacement of Typhoon Trami (2018): A quantitative analysis based on the Himawari-8 satellite (doi:10.1029/2020JD034434)

¹北海道大学 地球環境科学研究院

[†]責任著者 (satoki_at_gfd-dennou.org)

²北海道大学 大学院環境科学研究院

³国立台湾大学 大気科学研究科

⁴琉球大学 理学部

⁵名古屋大学 宇宙地球環境研究所

2018 年台風 Trami の壁雲交換における中心付近の風速分布: 気象衛星ひまわり 8 号に基づく定量解析

一般向け解説 (日本語)

1. はじめに

(台風を含めた) 発達した熱帯低気圧は中心に雲のない「眼」をもち、眼の周囲を「壁雲」と呼ばれる発達した積乱雲群がリング状に取り囲んでいる。壁雲周辺では発達した積乱雲に伴う強い降水があり、台風の最大風速はこの壁雲付近の高度約 1 km 付近に位置する。発達した熱帯低気圧はしばしば壁雲を同心円状に複数有することがあり、多重壁雲と呼ばれる (図 1c)。一般的な多重壁雲構造は眼を取り囲むオリジナルの壁雲 (内側壁雲あるいは第一壁雲) より外側の半径に新しい壁雲 (外側壁雲あるいは第二壁雲) が形成することで完成する。

多重壁雲が形成すると、熱帯低気圧における強風半径および降水域が広がる。多重壁雲は形成後、内側壁雲が衰退し、外側壁雲が収縮しながら強化するという壁雲交換を経験する (図 1c-1d)。この際に、熱帯低気圧の最大風速、最大風速半径、台風の大きさ、降水分布などが急激に変化し、台風の強度・大きさの予報精度に大きな影響を与える。

壁雲交換は主に海洋上で発生し、気象衛星以外の観測機器が乏しい。そのため、台風中心付近の詳細な風分布の情報が得られず、壁雲交換における内側壁雲の消失過程は力学的に未解明のままである。太平洋上を高頻度で観測するひまわり 8 号は主に雲の水平分布とその時間変化を観測しているが、その観測から台風の風速分布を客観的・定量的に推定することはなされていない。このような現状で、気象衛星ひまわり 8 号観測画像から台風中心付近の接線風を客観的かつ定量的に推定する手法が 2020 年に開発された。

本研究では、この手法を壁雲交換を経験した台風に適用し、壁雲交換時における内側壁雲の風速変化を調査する。さらに風速変化の調査結果と理論式を組み合わせることで、内側壁雲の衰退に伴う風速の減少のメカニズムを議論する。対象とする台風は 2018 年に北西太平洋上で発生・発達し、日本に上陸した台風 Trami である。この台風は 9 月 25 日に生涯最大勢力となり、その後緩やかに勢力を弱めた (図 1a, 1b)。多重壁雲構造は生涯最大勢力時に観測され (図 1c)、約 2 日かけて内側壁雲が衰退した (図 1d)。

2. 研究手法

本研究では、静止気象衛星ひまわり 8 号による台風機動観測モードで撮影された画像を用いて、台風中心付近の接線風 (台風に伴う北半球では反時計回りの風) の定量的な推定を行う。台風機動観測モードは、水平分解能 2 km、時間間隔 2.5 分で台風中心を撮影領域の中央に、矩形領域約 1000 km 四方をカバーする。ひまわり 8 号は可視・赤外の異なった 16 波長域で観測を行っているが、本研究では波長 10.4 μm (赤外バンド (用語 1)) の画像を利用する。

台風中心付近の接線風推定法 (文献 1) は以下と図 2 にまとめられる。

1. 2.5 分毎にひまわりの観測画像から台風中心を決定する。
2. ある時刻から 1 時間分先までの連続的な画像 (計 25 枚) をもとに (図 2a)、台風中心から 2 km ごとの間隔で、各半径における円周上の輝度温度 (用語 2) を時間方向に連続的に並べる (図 2b)。
3. 1 つの半径で得られた円周上 (図 2b の横軸) の輝度温度の時間変化 (図 2b の縦軸方向) が、その半径で円周方向に移動する雲の移動速度を表している (図 2b 赤線)。雲は周辺の風によって流されるので、雲の移動速度がその半径での円周方向の気流 (接線風) の速度に近い値をもつと考えられる。

4. 実際は同じ半径でも、一つ一つの雲が移動する速度は異なる。よって、本研究では各半径での雲の平均的な移動速度を、その半径での接線風と定義する。移動速度の平均値は、時空間フーリエ解析^(用語 3)と呼ばれる手法で定量的に求められる。

ステップ 2 から 4 を 30 分ごとに実施し、2018 年 9 月 25 日 00 時 UTC (世界標準時; 日本時間 09 時) から 27 日 06 時 UTC までの約 2 日間に渡って解析を行った。

ちょうど解析期間中に、日本の研究機関による台風観測用航空機が、中心付近で観測機器を投下し、接線風の直接観測を行っていた。そこで、ひまわり画像から得られた接線風が、ひまわりとは独立に直接観測された接線風とどの程度一致するのかも確認した。

3. 研究結果・研究成果

ひまわり衛星画像から推定された Trami の接線風は、内側壁雲が活発であった 25 日前半において、半径 30 km の位置に 50 m s^{-1} を越える値をもった (図 3a)。同じく、25 日前半で接線風から計算された渦度 (台風の回転の強さ、接線風の強さと関係する) は半径 30 km 以内でほぼ同じ値をもっていた (図 3b)。ここで、半径 30 km は内側壁雲の内縁に位置しており、最大風速となる壁雲内の高度 1 km 付近での風速分布は求められていないことに注意する。壁雲では活発な積乱雲が対流圏界面 (高度 15-17 km) 付近まで発達する。このため高度 1 km での雲の動きは、ひまわりから観測することが難しい。

9 月 26 日以降は内側壁雲の衰退に伴い、活発な積乱雲も抑制され、内側壁雲内の接線風も推定できるようになっている (図 3a)。25 日前半とは異なり、26 日以降では半径 30 km での接線風は 20 m s^{-1} 以下にまで減少した。接線風の減少に対応して、渦度も 25 日前半から大きく減少した (図 3b)。

同じ期間で実施された台風航空機観測による接線風と、本研究でひまわりから得た接線風を比較した (図 4)。比較は内側壁雲が活発であった 25 日前半と、内側壁雲が衰退した 26 日の両日で行われた。いずれの時刻でも、ひまわりから得られた接線風は、航空機で直接観測した接線風と 5 m s^{-1} 以内でよく一致していた (図 4c, 4f)。

本研究で得られた、台風 Trami の接線風・渦度変化を、渦度変化の理論式:

$$[\text{渦度の時間変化}] = [\text{地上摩擦}] + [\text{上昇流・下降流による輸送}] + [\text{小スケール渦による輸送}]$$

にあてはめ、どの効果が渦度の時間変化に影響したかを調べた。航空機観測の結果から、[上昇流・下降流による輸送] はほぼ影響しないことが示唆された。一方、[地上摩擦] と [小スケール渦による輸送] は Trami の渦度減少に大きく影響することがわかった。[小スケール渦による輸送] とは、水平 10-20 km 程度の大きさの渦によって、内側壁雲の渦度が外側に輸送される効果のことである。より詳細な調査のため、図 3b の横軸を実際の半径 (幾何半径) ではなく、接線風の大きさの重みをつけた半径 (ポテンシャル半径) に変換する (図 5)。図 5 から、ポテンシャル半径 80 - 130 km (幾何半径 10 - 30 km, 眼の外縁と内側壁雲半径) では 25 日後半に渦度が急速に減少している。一方、ポテンシャル半径 80 km より内側 (幾何半径 10 km, 眼の内部) では減少率が遅く、これは [地上摩擦] による減少率の理論値とほぼ一致した。対して、眼の外側と内側壁雲の半径での急速な渦度の減少は地上摩擦では説明できない。よって、上の理論式に基づくと、内側壁雲半径での渦度・接線風の急速な減少は [小スケール渦による輸送] によって主に引き起こされていることが示唆される。

4. 今後の展望

本研究の結果は、台風の壁雲交換過程における内側壁雲の衰退が、小スケールの渦による渦度輸送によって引き起こされることを観測と理論式から示唆したものであり、輸送過程を直接観測したわけではない。今後は、衛星、気象レーダによるドップラー風速観測も用いて、この輸送過程の検証を行う予定である。

衛星搭載マイクロ波画像

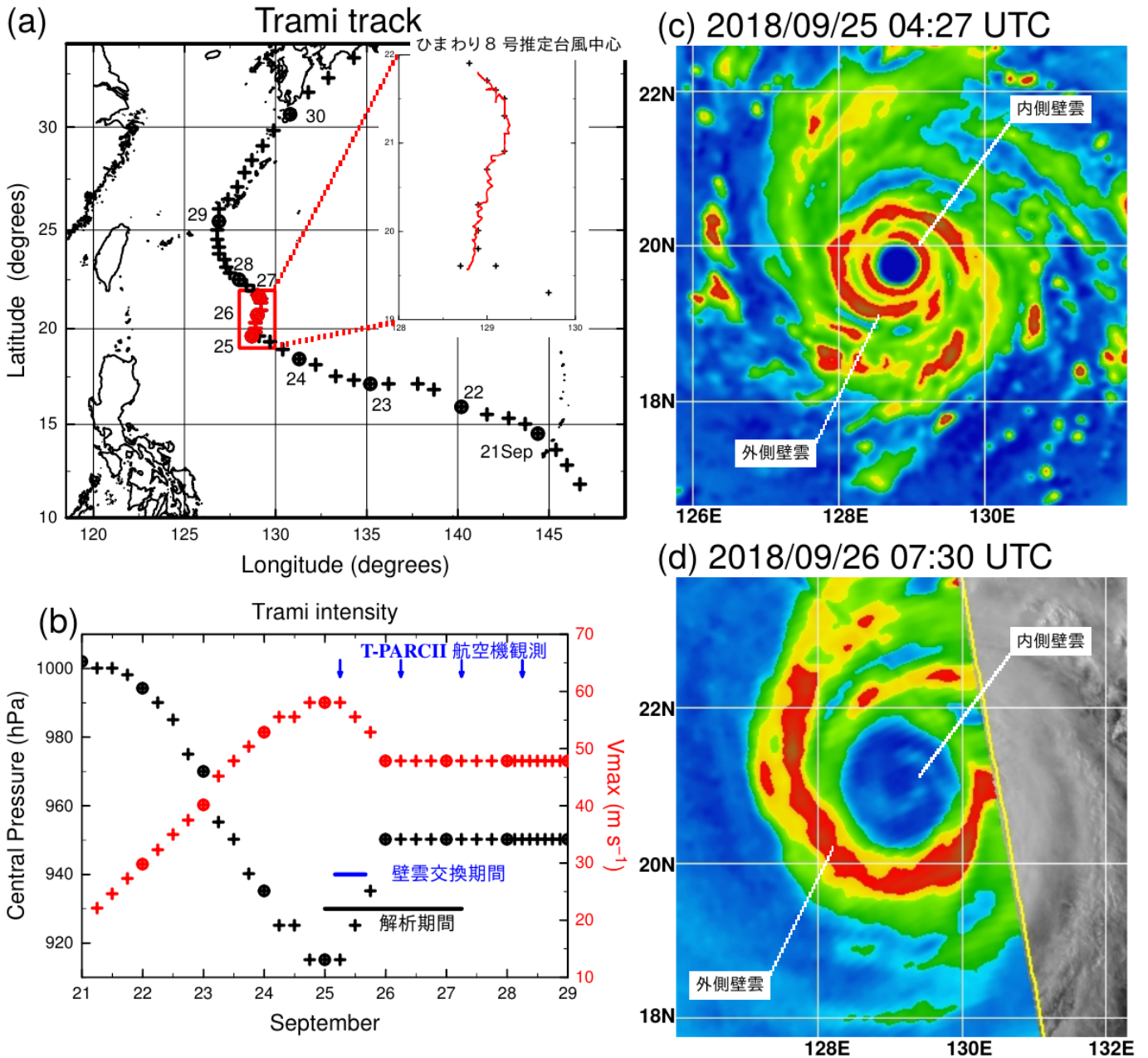


図 1: 台風 Trami の (a) 経路 (黒十字), (b) 中心気圧 (黒十字, 左軸: hPa) と最大風速 (赤十字, 右軸 $m s^{-1}$) の時間変化, (c)-(d) 衛星搭載マイクロ波輝度温度 (赤色ほど発達した雲, 青色ほど薄い雲あるいは晴天域). 台風中心は雲が少なく晴天が広がる. その外側をリング状に囲む発達した積乱雲群が壁雲である. Trami の事例ではリング状の積乱雲群が同心円状に 2 重になっており, これが多重壁雲構造である. 眼を囲む内側の壁雲は時間とともに衰退し, 外側壁雲が発達し始める (壁雲交換).

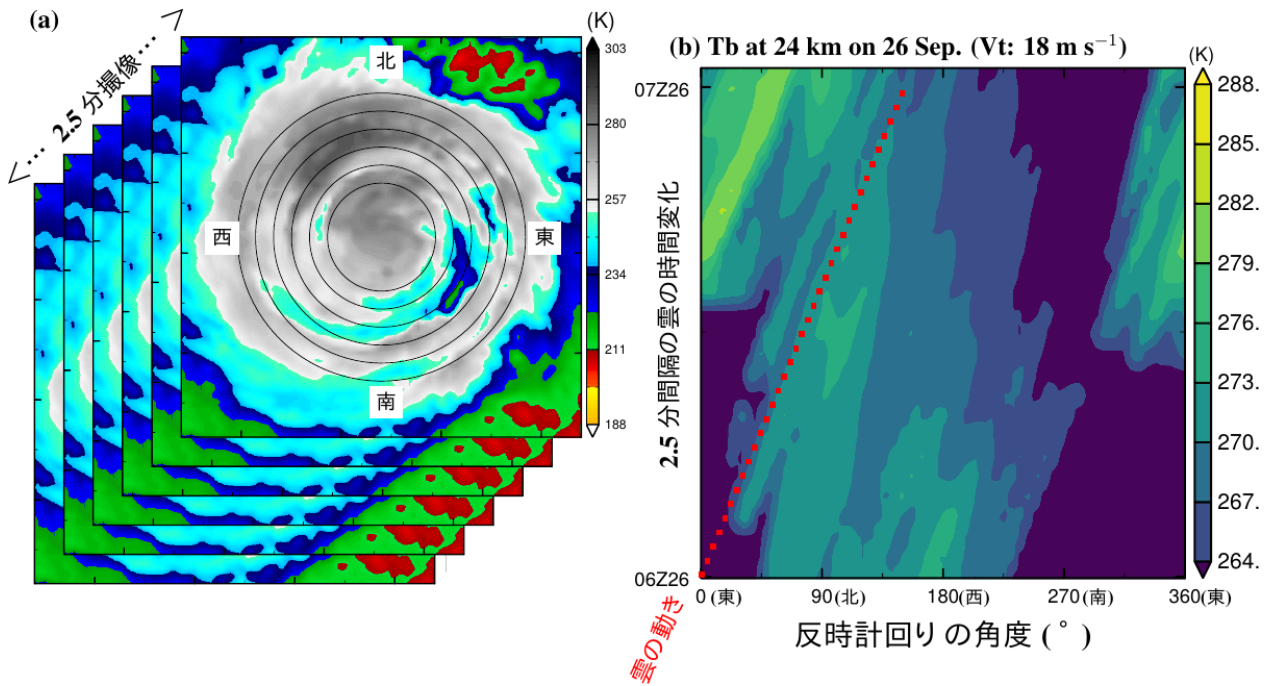


図 2: 本研究で用いられた接線風 (反時計回りの風速) 推定の概念図. 図 (a) のカラーは赤外線帯の輝度温度 (雲の上端温度に対応) であり, 背の低い雲あるいは海面は白から黒で, 非常に背の高い雲は黄色, 赤色などの色付きで表示される. 風速の推定方法は以下のとおりである. (1) ひまわりで観測された輝度温度を, 台風中心から半径方向に 2 km ごとに反時計回り一周分ずつ切り取る. (2) 図 (a) のようにひまわり画像は 2.5 分間隔で撮影されているので, 2.5 分ずつ同じように各半径で切り取る. (3) 同じ半径で切り取られた輝度温度データを時間方向に並べると図 (b) のようになる. これは同じ半径で反時計回りに回転する雲の位置の時間変化を表した図になる. (4) 赤線のように雲の動きを追跡することで, 台風の反時計回り風速によって流される雲の移動速度が得られる. 図の横軸が反時計回りの雲の移動距離, 縦軸が雲の移動時間なので, 赤線の傾きがその雲の移動速度になる.

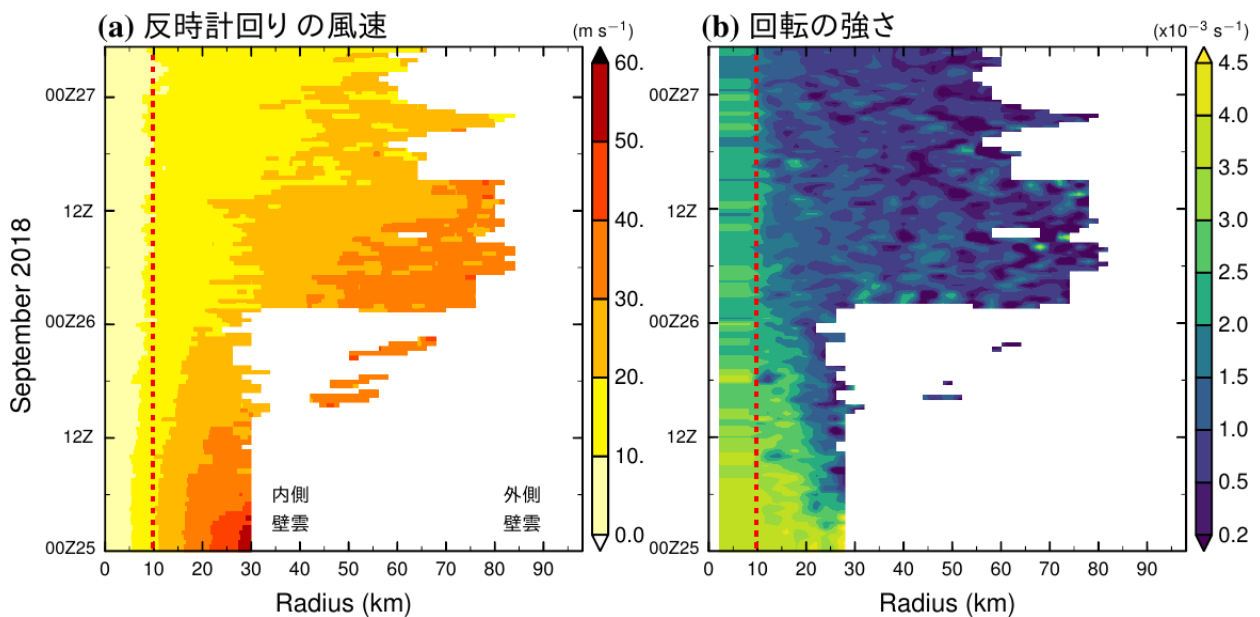


図 3: 壁雲交換期間 (2018/09/25-27) において, ひまわりから推定された (a) 接線風 (m s^{-1}) と (b) 接線風から計算された渦度 (回転の強さ, s^{-1}) の距離・時間断面図である. 空白は上層雲に覆われ, 地上付近の風速推定ができなかった半径を表す.

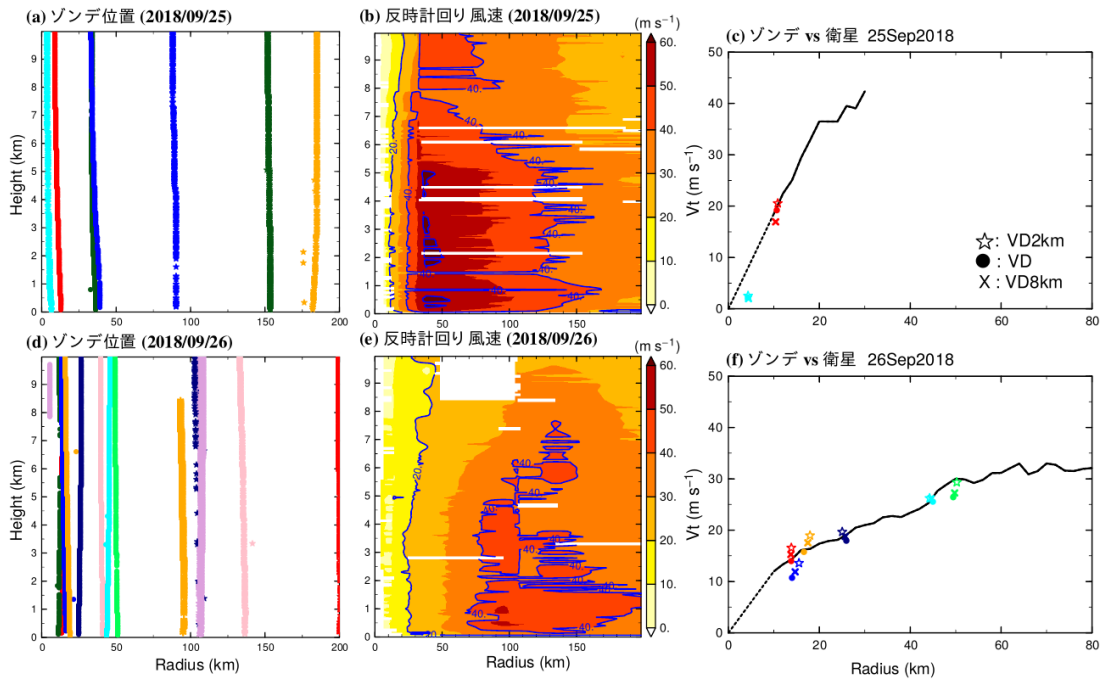


図 4: Trami の壁雲交換時における (左) 航空機投下ゾンデの軌跡, (中) 投下ゾンデで観測された反時計回り風速の距離・高度分布, (右) ひまわりから推定された反時計回り風速 (黒線) と投下ゾンデで観測された反時計回り風速 (カラー点) の距離分布. 右のカラー点は左の投下ゾンデの色と対応する. 上段は内側壁雲活発期の 2018/09/25 06 UTC, 下段は内側壁雲衰退期の 2018/09/26 06 UTC での観測結果を示す.

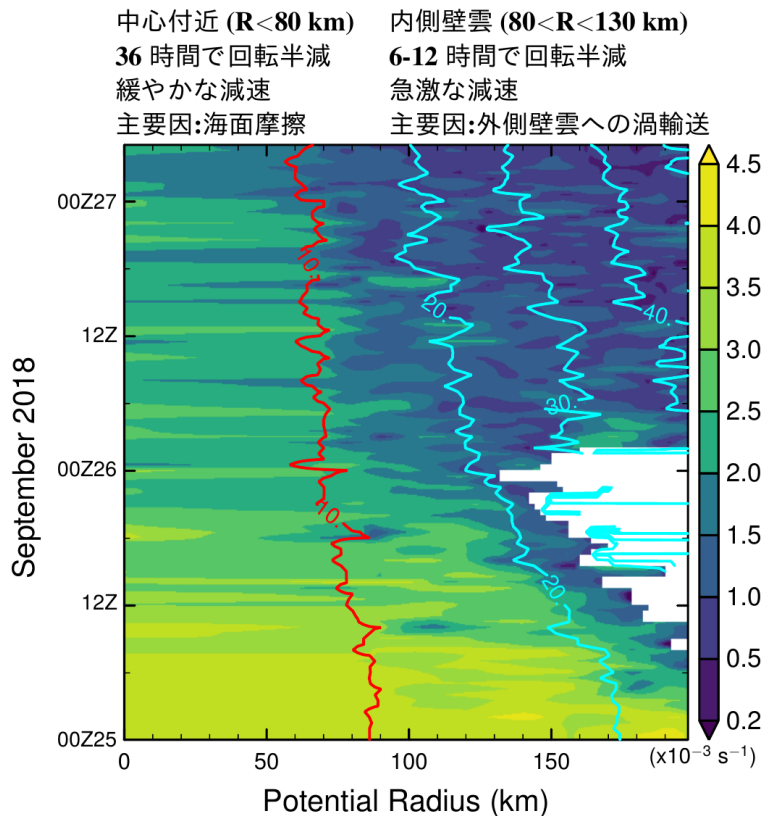


図 5: 横軸ポテンシャル半径 (R) 座標で図 3b を描画した図. 赤線と水色線は実際の台風中心からの距離 (赤: 10 km, 水色: 20, 30, 40, 50 km) を示す. $R < 80$ km が実際の台風中心からの距離 10 km に対応する.

用語解説

用語 1: 赤外バンドは地球から射出される赤外線を観測している。雲がある場合は、雲の上端高度から射出される赤外線が観測される。可視光より波長が長く、日射の影響が小さいため、24 時間台風中心付近の雲の動きを観測することができる。

用語 2: 輝度温度とは、ある強さの電磁波を射出する黒体 (全ての波長の電磁波を完全に吸収し、射出できる理想的な物体) がもつ温度。黒体から射出される、ある波長の電磁波の強さは黒体の温度で完全に決まる。衛星は地球からの特定の波長をもつ電磁波の強さを観測している。よって、物体が黒体であると仮定することで、観測された電磁波の強さから、その電磁波を射出した物体の温度 (輝度温度) を推定できる。例えば、雲が黒体であるとし、雲から射出された赤外線の波長の電磁波を衛星が観測したとする。その電磁波の強さから理論式を用いることで、雲の頂上での温度が推定できる。地球の対流圏は温度が高度とほぼ対応するので、衛星観測で得られた輝度温度 (電磁波の強さ) が、その雲の頂上の温度、雲の高さを示すことになる。図 2b で輝度温度の時間変化が雲の動きを表す理由はこれによる。雲の移動は、雲の高さ (輝度温度) が時間とともに円周上で変化することで可視化されている。

用語 3: 時空間フーリエ解析とは、時空間上で得られた任意のデータを、三角関数で表現される波の重ね合わせとして分離する解析手法である。時空間上で変化するデータは様々な周期、波長をもつ成分で構成されており、時空間フーリエ解析はそれを別々の周期、波長に分離することができる。本研究では、雲の移動速度を求める際に利用される。ある半径での雲の移動速度は一定ではなく様々な値をもつ。時空間フーリエ解析によって、そのデータを共通の周期、波長ごとに分離する。この解析では、もとのデータに含まれる各周期、波長の成分の大きさが定量的に得られる。成分の大きさが大きい周期、波長のみを取り出し、その成分における雲の移動速度を計算する。これが、各半径における平均的な雲の移動速度として推定される。

文献 1: Tsukada and Horinouchi (2020), <https://doi.org/10.1029/2020GL087637>

論文情報

雑誌名： Journal of Geophysical Research: Atmosphere

論文タイトル： Inner-core wind field in a concentric eyewall replacement of Typhoon Trami (2018): A quantitative analysis based on the Himawari-8 satellite

著者名： 辻野 智紀¹, 堀之内 武^{1,2}, 塚田 大河², 郭 鴻基³, 山田 広幸⁴, 坪木 和久⁵

所属： 1. 北海道大学 地球環境科学研究所, 2. 北海道大学 大学院環境科学研究所,
3. 国立台湾大学 大気科学研究科, 4. 琉球大学 理学部, 5. 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

DOI： 10.1029/2020JD034434

公表： 2021 年 03 月

責任著者・日本語解説： 辻野 智紀 (satoki_at_gfd-dennou.org)