

航空機観測で捉えられた2017年台風第21号の  
暖気核構造の維持に関わる熱力学的特徴

Thermodynamic Characteristics Related to the Maintenance of the Warm Core Structure of  
Typhoon Lan (2017) Observed through Upper-Tropospheric Aircraft Reconnaissance

山田 広幸<sup>\*1</sup>, 伊藤 耕介<sup>\*1</sup>, 坪木 和久<sup>\*2</sup>, 篠田 太郎<sup>\*2</sup>, 大東 忠保<sup>\*3</sup>,  
中澤 哲夫<sup>\*4</sup>, 山口 宗彦<sup>\*4</sup>, 長浜 則夫<sup>\*5</sup>, 清水 健作<sup>\*5</sup>

Hiroyuki YAMADA, Kosuke ITO, Kazuhisa TSUBOKI, Taro SHINODA, Tadayasu OHIGASHI,  
Munehiko YAMAGUCHI, Tetsuo NAKAZAWA, Norio NAGAHAMA, and Kensaku SHIMIZU

Upper-tropospheric aircraft reconnaissance was carried out for Typhoon Lan (2017) using a civil jet with a newly developed dropsonde system. This paper describes the warm-core structure in the eye during the mature stage of this typhoon and the thermodynamic characteristics associated with the maintenance of the warm core. Dropsondes, released from the upper troposphere, captured a double warm-core structure with a higher perturbation temperature in the middle (3~4 km) and upper troposphere (> 12 km). The two warm cores showed a difference in equivalent potential temperature ( $\theta_e$ ) of more than 10 K, suggesting different air origins. Saturation-point analysis suggests that the air observed in the upper warm core was entrained from the eyewall. The eyewall updraft in the left-of-shear semicircle had a two-layer structure with a higher  $\theta_e$  and lower absolute angular momentum on the inner side of the updraft core. Analyses of the saturation point and parcel method suggest that the warmer air with a  $\theta_e$  exceeding 370 K on the inner side of the updrafts originated from the eye boundary layer and was eventually transported into the upper warm core. These results led us to hypothesize that the vertical transport of high- $\theta_e$  air from the eye boundary layer contributed to the continuous eye warming in the upper troposphere against the negative effect of strengthening environmental wind shear on storm intensity.

1. はじめに

2017年台風第21号(Lan)に対する上部対流圏の航空機観測を、ドロップゾンデシステムを備えた民間ジェット機を用いて、10月21~22日の2日間に行った(Yamada et al. 2021a)。これは、日本の研究グループがドロップゾンデを用いて非常に強い台風の目と壁雲をドロップゾンデにより観測した初めての事例である。観測を行った2日間において、環境場の鉛直シア(850-200hPa、半径

200-600km)は  $5 \text{ m s}^{-1}$  から  $13 \text{ m s}^{-1}$  に強まったが、中心気圧は 926~929hPa の範囲にあり、非常に強い勢力を維持した。我々は、この台風の目の中に3回(21日に2回、翌日に1回)進入することに成功した(図1)。この2日間に、ドロップゾンデを目の中に合計7つ、壁雲に合計4つ投下した(図2は21日の投下軌跡)。目の中心付近に投下したドロップゾンデにより、この期間に対流圏中層(3-4km)と上層(12km以上)に温位偏差の極大をも

\*1 琉球大学理学部 yamada@sci.u-ryukyu.ac.jp

Faculty of Science, University of the Ryukyus

\*2 名古屋大学宇宙地球環境研究所

Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

\*3 防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

\*4 気象庁気象研究所

Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

\*5 明星電気株式会社

Meisei Electric Co. Ltd.

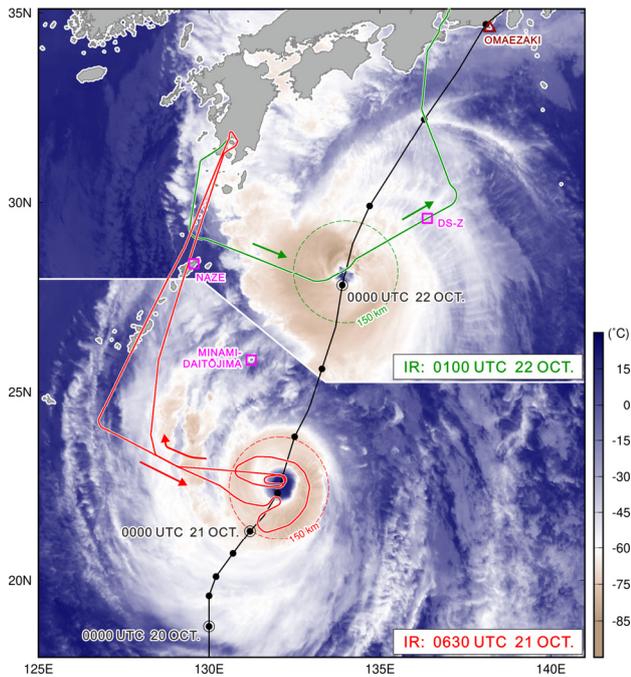


図 1：航空機観測を実施した 10 月 21 日と 22 日における、ひまわり 8 号赤外面像と航空経路。

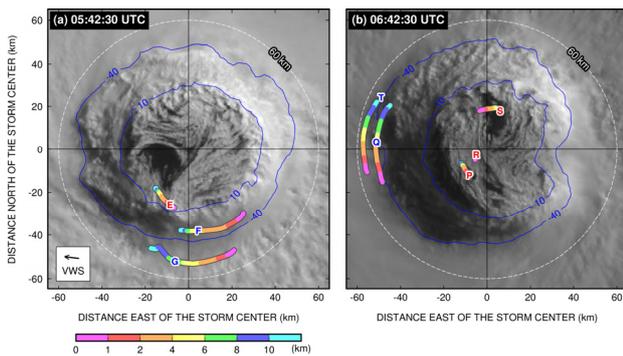


図 2：ひまわり 8 号可視画像と、目と壁雲に投下したドロップゾンデの降下軌跡。左は 10 月 21 日 0542UTC、右は同日 0642UTC。

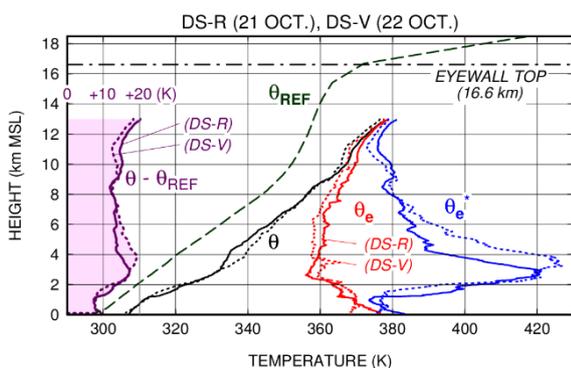


図 3：目の中心付近に投下されたドロップゾンデにより得られた、温位偏差( $\theta - \theta_{REF}$ , 紫線)、温位( $\theta$ , 黒線)、相当温位( $\theta_e$ , 赤線)、飽和相当温位( $\theta_e^*$ , 青線)のプロファイル。実線は 10 月 21 日、点線は翌日の観測値。破線は環境場の温位( $\theta_{REF}$ )。

つ二重暖気核構造が 2 日間にわたり維持されたことがわかった (図 3, 紫線)。本論文では、この暖気核の維持に関わる熱力学的過程について、ドロップゾンデ観測データを用いた飽和点解析と、パーセル法に基づく解析の結果を述べる。

## 2. 解析手法

本研究で使用したドロップゾンデは、明星電気により新たに開発された iMDS-17 型で、気温、気圧、相対湿度、風向、風速を 1 秒間隔で取得した。このドロップゾンデデータには、航空機から射出した直後から約 1 分間に高温バイアスがあることが、試験飛行の段階で確認されたので、本研究ではそのバイアス補正を行ったデータを使用した。補正方法は Yamada et al. (2021a) の Appendix I に記した。この補正を行ったドロップゾンデデータは、J-STAGE Data より公開されている (Yamada et al. 2021b)。

飽和点解析は、目の中における沈降の高度差(断熱昇温の度合い)を定量的に調べ、目の中の空気塊の起源を判定する(成層圏からか対流圏からかの疑問に答える)ために用いた。この手法は Betts (1982)により提唱されたもので、Willoughby (1998)が台風の目の中の昇温を調べるために使用した。飽和点解析とは、目の中を断熱的に下降(昇温)する空気塊が、降下を開始する時点で飽和していると仮定し、その開始高度( $Z_{SAT}$ )を探索する方法である。これは、大気成層の安定度を調べるパーセル法の持ち上げ凝結高度(LCL)を判定するのと同じ方法で得ることができる。すなわち、ある高度( $Z$ )で観測された気温と露点温度を用いて、混合比を保ちながら乾燥断熱減率に従って気温を低下させ、飽和に達する高度を飽和点( $Z_{SAT}$ )とみなす。断熱過程であれば、これより上空から降下することはないので、目の中の空気の起源が成層圏にあるのか、そうでないのかを判定するのに使うことができる。図 4 に飽和点解析の結果の一例を示す。このプロファイルは 10 月 21 日に目の中で取得したものである。740 hPa より上空の未飽和層の各観測点において、赤い丸で示す飽和点は 1~1.5km 上空に存在した。この飽和点解析は、断熱的な変化を仮定しているため、放射冷却などの非断熱的な変化や、乱流混合の効果を考慮していない点に注意が必要である。

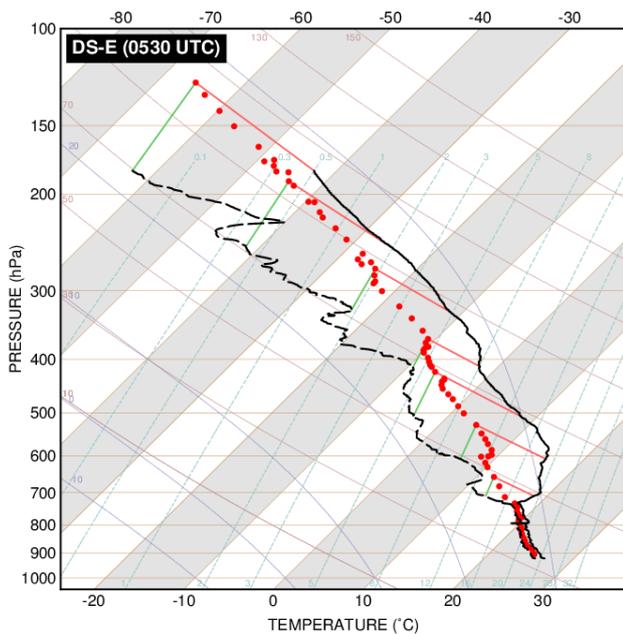


図 4：目の中に投下されたドロップゾンデにより得られた Skew-T log-P 熱力学図。実線は気温、破線は露点温度を表す。赤い点は、未飽和の高度で計算した飽和点の気圧高度を表す。

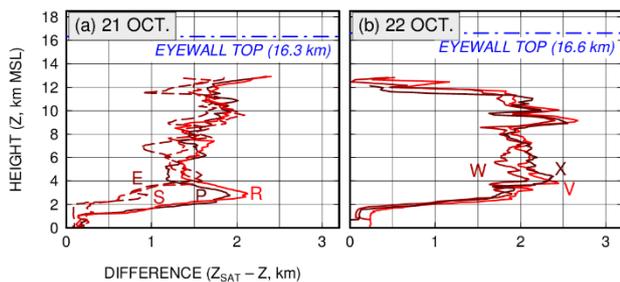


図 5：飽和点解析により得られた、飽和点高度と観測点高度の差 ( $Z_{SAT} - Z$ ) のプロファイル。目の中に投下された7つのドロップゾンデ観測データを使用した。左は10月21日、右はその翌日。

### 3. 結果

目の中で投下された7つのドロップゾンデを用いた飽和点解析の結果を図5に示す。この図では観測点の高度( $Z$ )と飽和点高度( $Z_{SAT}$ )の差をプロットしている。例えば高度13 kmにおける高度差が2 kmであれば、飽和点は高度15 kmにあることを意味する。10月21日において、飽和点との高度差は1.5~2 kmの範囲にあるので、観測されたすべての高度で飽和点は15 km以下に存在することがわかる。翌日も飽和点との高度差は最大で2.5 kmであり、特に12 kmより上ではほぼ0 mであった。このことは、目の中で観測された13 km以下の空気は、高度15 km以下の対流圏に起源をもつことを示唆する。ひまわり8号の雲頂高度デー

タによると、壁雲の雲頂高度は16.3~16.6 kmであった(図3)。したがって、目の中の空気の起源は壁雲からの流入にあると考えられる。ただしこの解析では乱流混合を考慮していないので、成層圏からの乾燥空気が、壁雲からの湿潤空気と混合することを否定するものではない。しかし、混合を考慮する場合でも、壁雲からの湿潤空気の流入は不可欠である。特に、10月22日の場合は飽和点との高度差がほぼ0 mなので、壁雲からの飽和した空気が直接流入していたと考えられる。図3によると、高度12 km以上の上部暖気核では相当温位が非常に高く、最大で380 Kに達した。また、これとほぼ同じ値は、目の中の境界層に表れている。一方、壁雲内のドロップゾンデでは、境界層の相当温位は365 K以下であった(図省略)。このことから、壁雲から上部暖気核に流入する空気の起源は目の境界層にあると考えられる。

上部暖気核の空気の起源を調べるため、ドロップゾンデを用いてパーセル法の解析を実施した。使用するのは、図2aに示すE, F, Gの3つである。これらは台風を中心より南側で取得された。この時点で鉛直シアベクトルは西の方向を向いていたので、シアベクトルの左側(対流が活発になる半円側)に対応する。図6に各ドロップゾンデの skew-T log-P 熱力学図を示す。通常、パーセル法の解析では、真上に持ち上げた空気塊の温度を用いて成層の安定性を判定する。しかし、ここでは目の中の空気塊が水平移動してから壁雲内を斜め上方に上昇することを仮定する。目の中の境界層の空気塊の温度プロファイルを紫の線で全てのパネルに示す。目の境界層はほぼ飽和していたので、空気塊は常に湿潤断熱的に上昇すると仮定す

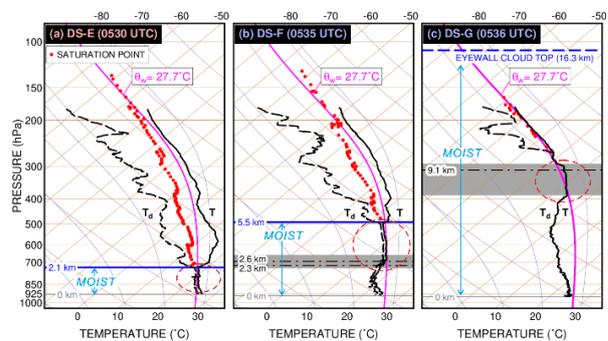


図 6：10月21日における、(a)目と(b,c)壁雲における skew T-log P 熱力学図。赤点は未飽和層で計算した飽和点高度 ( $Z_{SAT}$ )。紫の実線は1000hPaにおける湿球温位 27.7°Cに対応する湿潤断熱線を表し、陰影は  $3 \text{ m s}^{-1}$  以上の上昇流域を表す。

る。この線は湿球温位  $27.7^{\circ}\text{C}$  の湿潤断熱線に対応する。壁雲のプロファイルにおいて、観測された気温がこの湿潤断熱線の温度と同じなら、目の中から流入し上昇する空気塊であると判別することができる。図 6b のプロファイルにおいて、壁雲は高度  $5.5\text{ km}$  以下に存在し、 $2.6\sim 5.5\text{ km}$  の範囲で気温と湿潤断熱線がほぼ同じ値を示す。ドロップゾンデから推定した  $3\text{ m/s}$  以上の上昇流（陰影）は、 $2.3\sim 2.6\text{ km}$  の高度に存在しているため、強い上昇流を伴っていることがわかる。この上昇流域では温度が高度とともに上昇するのが特徴である。このことは、上昇流が2層の構造を持っており、壁雲への流入経路が異なることを示唆する。図 6c でも  $3\text{ m s}^{-1}$  以上の上昇流域で気温と湿潤断熱線がほぼ同じ値を示す。このことから、目の境界層の空気塊は壁雲の内側の縁の近くを上昇していることがわかる。目の境界層から壁雲を経由し上部暖気核に至る空気塊の経路の模式図を図 7 に示す。下部暖気核の空気は目の中の境界層と相当温位が  $10\text{ K}$  以上異なり、性質が異なっていたので、異なる経路の流入（または滞留）によって維持されている可能性があるが、その経路は本観測のドロップゾンデでは特定できなかった。

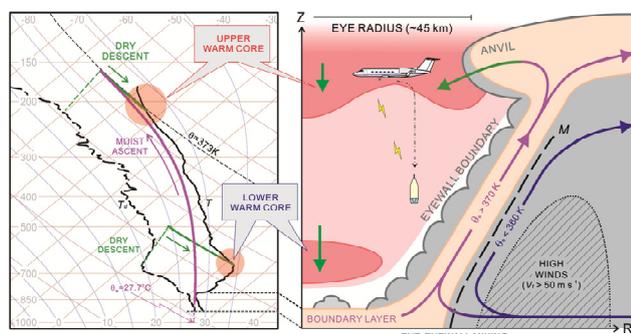


図 7: 目の境界層から壁雲を通り上部暖気核に流入する空気塊の熱力学的な経路（左）と、距離-高度断面内での経路（右）の模式図。紫の線が湿潤断熱的な移動を、緑の線が乾燥断熱的な経路を示す。

#### 4. まとめと考察

航空機観測で捉えられた 2017 年台風第 21 号の二重暖気核構造について、その維持に関わる熱力学的特徴をドロップゾンデ観測データを用いて調べた。飽和点解析により、上部暖気核の空気は壁雲から流入していることがわかった。パーセル法の解析より、この空気は目の境界層を起源として、壁雲の内側の縁を経由して上部暖気核に至ると考

えられた。このような流れは、同じ台風の数値シミュレーション結果を用いた流跡線解析でも存在が確認された (Tsujino et al. 2021)。本研究の結果はこの流れの存在を観測により支持する。

目の中の飽和した境界層の相当温位は、海面からの顕熱・潜熱フラックスの結果として決まるはずなので、境界層の相当温位が上部暖気核の温度偏差と、台風の強さを間接的に表している可能性がある。この点は今後、事例を積み重ねることにより明らかにする必要がある。

#### 謝 辞

台風内の飛行において、飛行経路の策定・修正に柔軟に対応していただいたダイヤモンド・エア・サービスの関係者に感謝します。本研究は科研費補助金(16H06311, 16H04053, JP19K03973)の助成を受けました。雲頂高度データは気象コンソーシアムのサーバーから取得しました。

#### 参 考 文 献

- Betts, A. K., 1982: Saturation point analysis of moist convective overturning. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 1484–1505.
- Tsujino, S., K. Tsuboki, H. Yamada, T. Ohigashi, K. Ito, and N. Nagahama, 2021: Intensification and maintenance of a double warm core structure in Typhoon Lan (2017) simulated by a cloud-resolving model. *J. Atmos. Sci.*, **78**, 595–617.
- Willoughby, H. E., 1998: Tropical cyclone eye thermodynamics. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 3053–3067.
- Yamada, H., K. Ito, K. Tsuboki, T. Shinoda, T. Ohigashi, M. Yamaguchi, T. Nakazawa, N. Nagahama, and K. Shimizu, 2021a: The double warm-core structure of Typhoon Lan (2017) as observed through the first Japanese eyewall-penetrating aircraft reconnaissance. *J. Meteor. Soc. Japan.* **99**, 1297–1327. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-063>
- Yamada, H., and Co-Authors, 2021b: Dropsonde data for "The double warm-core structure of Typhoon Lan (2017) as observed through the first Japanese eyewall-penetrating aircraft reconnaissance". Meteorological Society of Japan. Dataset. <https://doi.org/10.34474/data.jmsj.16759906.v3>