

### 3. 航空機観測の熱帯低気圧予測へのインパクト

山口 宗彦\*

#### 1. はじめに

シンポジウムでは、熱帯低気圧を対象とする航空機観測の現状をレビューし、その意義や効果を「熱帯低気圧の解析」、「熱帯低気圧の予測」、「メカニズムの解明」、「気候の監視」という観点で整理し、関連する最近の研究を紹介した。

#### 2. 熱帯低気圧航空機観測の現状

今日現業的に熱帯低気圧を対象とする航空機観測を行っているのは、米国のハリケーンハンターと台湾のDOTSTAR (Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance near the TAIwan Region, Wu *et al.* 2005) である (Aberson *et al.* 2010)。

米国では、北大西洋域、北東・中部太平洋域の熱帯低気圧を対象として米空軍、及び米国海洋大気庁 (NOAA) の航空機観測部隊が航空機観測を行っており、ハリケーンハンターと呼ばれている。米空軍は、現業のハリケーン解析・予報を改善することを目的として、米国ハリケーンセンターの要請に応じて航空機観測を行う。使用する航空機は主に WJ-C130 と呼ばれるプロペラ機で、熱帯低気圧の中心に突入して観測を行う「貫通飛行」を行う。NOAA による観測は主に研究目的で、研究の観点から必要があると判断された場合に観測を行う。使用する航空機は P3 と呼ばれる高機能の観測測器を搭載した航空機や、G-IV と呼ばれる高高度を飛行できる航空機である。

台湾では、国立台湾大学と台湾中央気象局が主体となって台湾に影響のありそうな台風を対象として航空機観測を行っており、DOTSTAR と呼ばれている。

ASTRA SPX と呼ばれる航空機を使用し、台風の上空からドロップゾンデを投下する。2012年に DOT-STAR は10周年を迎えた。DOTSATR の始まった2003年から2012年までに、49個の台風に対して全64回の観測が行われ、全部で1051個のドロップゾンデが投下された。

#### 3. 航空機観測の役割

##### 3.1 熱帯低気圧の解析

気象庁では、24時間365日台風の活動を監視しており、北西太平洋域の台風に対してその位置や強度、大きさなどを決定している。これを台風の解析と呼ぶ。解析作業においては、当然台風やその周辺で得られる観測データを用いることになるが、台風の中心気圧や最大風速、強風・暴風半径などを「断定」できるような観測データが存在することは稀である。そこで、ドボラック法 (Dvorak 1975, 1984) と呼ばれる、「ひまわり」などの静止気象衛星の衛星画像に基づいてそれらを「推定」する手法が用いられている。ドボラック法は気象庁だけでなく、熱帯低気圧の解析を行っている世界の各気象局で採用されている標準的な熱帯低気圧解析手法である。

ドボラック法では、衛星画像の解析から決定される CI 数 (0~8 まで、0.5 刻みの値をとる) と中心気圧 (および最大風速) との対応表があらかじめ用意されており、CI 数を決めることによって中心気圧を推定する。木場ほか (1990) は、1981~1986年の航空機観測による台風の中心気圧の直接観測とドボラック法の CI 数との対応関係を調査した。その結果、CI 数は台風の中心気圧を推定する良い指標である一方、誤差幅も大きいことが示された。

Landsea and Franklin (2013) は、衛星観測だけを用いて解析した場合と、衛星観測に加えて航空機観

\* 気象庁気象研究所。

myamagu@mri-jma.go.jp

© 2018 日本気象学会

測を利用した場合とで、解析の不確実性がどの程度減少するかを定量的に評価した。たとえば、中心気圧の推定では航空機観測を用いることで不確実性は半減した。また、米国ハリケーンセンターの Franklin 氏は、衛星データだけの場合25%の割合で中心気圧の解析誤差が10 hPa 以上となるが、航空機観測を用いると2%となることを示した。

このように、熱帯低気圧の航空機観測は台風の解析精度を格段に向上させることが出来る。また、解析結果は数値予報の入力値にも使用されているため、解析精度の向上は予報精度の向上にも貢献することが期待できる。

### 3.2 熱帯低気圧の予報

航空機観測を数値予報モデルの初期値に反映させることにより予報精度、特に進路予報の精度が改善するという研究は1980年代頃から行われている。たとえば、Aberson (2010) や Chou *et al.* (2011) は、熱帯低気圧周辺域で航空機から投下されたドロップゾンデによる観測データを同化することにより、熱帯低気圧を移動させる指向流の表現が改善し、進路予報の誤差が平均10~20%減少することを示した。近年では、航空機搭載のドップラーレーダによるドップラー風速などの熱帯低気圧中心付近の観測データを用いて強度予報の改善を目指した研究が盛んである (e.g., Aberson *et al.* 2015)。Zhang and Weng (2015) は、熱帯低気圧の中心付近のドップラー風速を同化することにより、強度予報が米国ハリケーンセンターの予報に比べて予報時間2~4日で25~28%改善することを示した。また、観測データを同化するための高度なデータ同化システムと、熱帯低気圧の中心付近の力学を表現することの出来る最先端の予測モデルを用いることが重要であると述べている。

2005~2014年に、世界気象機関 (WMO) 世界天気研究計画 (WWRP) のプロジェクト「観測システム研究・予測可能性実験 (THORPEX ; The Observing-system Research and Predictability EXperiment)」が実施された。THORPEX では、予報精度向上に効果の高い観測領域を割り出し、その領域で集中的に観測を行い、その新たに得られた観測データに基づく初期値から数値予報を行う最適観測法の有効性が検証された。Yamaguchi *et al.* (2009) は、特異ベクトル法による感度解析手法と DOTSTAR の観測データを用いて、2004年の台風第4号を対象として最適観測法の有効性を示した。2008年には、気象研究所

が中心となって THORPEX 太平洋アジア地域実験 (T-PARC ; THORPEX-Pacific Asian Regional Campaign) と呼ばれる台風を対象とした航空機観測が行われた (Nakazawa *et al.* 2010)。T-PARC で得られたドロップゾンデの台風進路予報へのインパクトを調査した研究では、予報誤差を減少させるという結果が得られたものの、その程度は数値予報システムによって大きく異なることが分かった (Weissmann *et al.* 2011)。Majumdar (2016) は、最適観測法に関してレビューを行い、追加の観測データは予報精度を改善するが、改善の程度は中緯度帯よりも熱帯域の方が大きく、また熱帯低気圧の進路予報には大きなインパクトがあると述べている。

### 3.3 メカニズムの解明

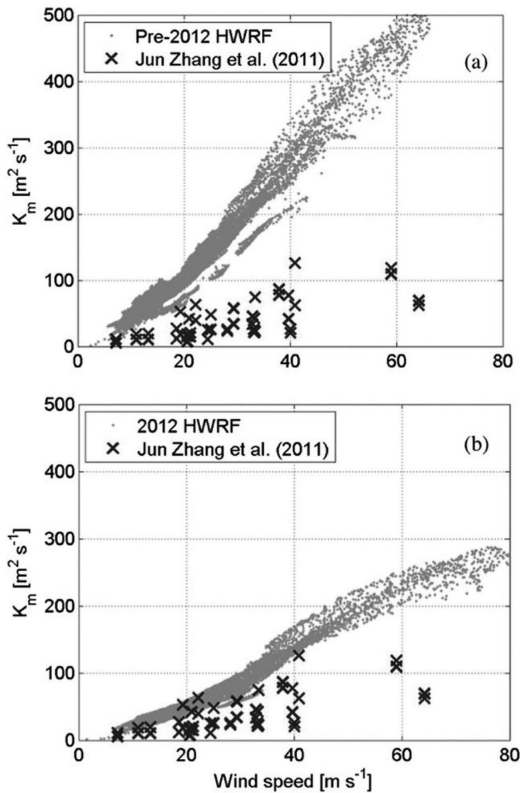
米国ハリケーンセンターは、熱帯低気圧の最大風速 (1分平均値) が24時間で30ノット (1ノット=0.51 m s<sup>-1</sup>) 以上上昇することを急発達 (Rapid Intensification) と定義している。熱帯低気圧の進路予測の精度は年々改善傾向にある一方、強度予測の精度には明瞭な改善傾向は見られない (e.g., Rappaport *et al.* 2009 ; Ito 2016)。特に急発達の予測は難しく、気象庁だけでなく全世界の熱帯低気圧コミュニティの課題である。台風の強度をより正確に予測するためには、大気海洋相互作用、境界層過程、雲物理過程などの理解を深めていくことが重要であると考えられているが、数値予測モデルを用いたモデル研究だけでは限界があり、予測結果を観測データと比較して予測モデルの改良を図り、また観測データから明らかとなる新たなメカニズムを予測モデルに反映させるなど、モデル研究と観測研究を融合させることが重要である。

現在米国では、NOAA が中心となって、HFIP (Hurricane Forecast Improvement Project) と呼ばれる熱帯低気圧予測改善プロジェクトを実施している (Gall *et al.* 2013)。現業機関、研究機関、大学等が連携して予測精度の向上、特に強度予測の精度改善に取り組んでおり、近年のハリケーン領域モデル (HWRF ; Hurricane Weather Research and Forecasting) の改善はこのプロジェクトの成果の1つである。たとえば Zhang *et al.* (2015) は、航空機観測のデータを用いて HWRF の物理過程の1つである境界層過程を改善した。HWRF で採用されていた鉛直拡散係数を航空機観測値に基づき小さくし、結果として HWRF で再現される境界層のインフローと熱帯低気圧の大きさが改善し、現実的な境界層の厚さの表現

につながった (第1図)。

Rogers *et al.* (2013) は, NOAA P-3に搭載されているドップラーレーダの観測データを用い, 急発達する熱帯低気圧と定常状態にある熱帯低気圧の中心部の構造を比較し, 前(後)者の場合 convective burst と呼ばれる局所的な強い対流が最大風速半径よりも内(外)側で起りやすい傾向があることを示した。また最近の研究では, 熱帯低気圧の強化には強い対流の動径方向の分布に加え, 接線方向の被覆率の大きさの重要性も示している (Rogers *et al.* 2016)。

米国では様々な研究プロジェクトが立ち上がり継続的に研究観測を行っている。大気と海洋の間の運動量, 及びエンタルピーの交換割合を理解するための



©American Meteorological Society

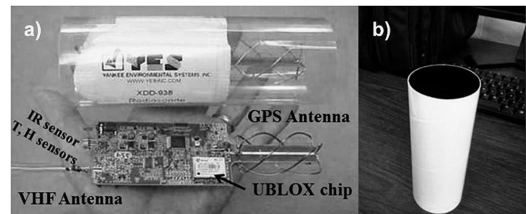
第1図 高度500mにおけるHWRP(灰色点)と観測(×印)の鉛直拡散係数の比較。(a)は2012年以前のHWRP,(b)は航空機観測の結果に基づいてHWRPの境界層過程を改良した後のHWRPによる検証結果。Zhang *et al.* (2015)より。

CBLAST (Black *et al.* 2007), 熱帯低気圧の通過に伴う海水温の低下とその後の回復メカニズムを明らかにするためのITOP (D'Asaro *et al.* 2014), 熱帯低気圧上層の発散風と強度変化の関係を明らかにするためのTCI ([https://www.eol.ucar.edu/field\\_projects/tci](https://www.eol.ucar.edu/field_projects/tci) 2018.8.31閲覧), 高高度滞空型無人航空機であるGlobal Hawkなど新しいプラットフォームによる熱帯低気圧観測の可能性を調査するためのHS3 (Braun *et al.* 2016)などである。TCI, HS3は, XDD (expendable digital dropsonde) (第2図)と呼ばれる次世代の小型ドロップゾンデが使用され, 熱帯低気圧の中心付近に大量に投下されたXDDの観測データを活かした研究が進められている。たとえば, XDDにより対流圏中下層の暖気核, 対流圏中層の接線風速の極大域の存在が明らかとなり, そのメカニズム解明に向けた研究や, XDDを同化した際の強度予測に対するインパクト実験が行われている。このように, モデル研究と観測研究の両輪で熱帯低気圧に関する多様な課題に取り組んでいる。

### 3.4 気候の監視

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が取りまとめる報告書では, 地球温暖化により地球全体で発生する熱帯低気圧の数は減少する一方, 強い熱帯低気圧の数は増えるという予測研究の結果が報告されている。気候変動にともない熱帯低気圧の数や強度がどのように変化するのか(変化したのか), より正確に監視するためには直接観測が可能な航空機観測を定期的に行い, 高精度の解析結果を蓄積することが重要である。

近年特に注目を浴びているのは, 北西太平洋域において, 使用するベストトラックデータにより強い台風の数の変化傾向が異なるという研究である (e.g., Song *et al.* 2010; Schreck *et al.* 2014; Mei and Xie



©American Meteorological Society

第2図 XDDのイメージ。(a)は内部の詳細,(b)は外観。Black *et al.* (2017)より。

2016). 北西太平洋域において、気象庁が解析したベストトラックデータでは強い台風(カテゴリー4, 5相当)の数に増加傾向は見られないが、米軍合同台風警報センター(JTWC: Joint Typhoon Warning Center)が解析したベストトラックデータでは増加傾向が見られる。

台風強度の解析には、気象庁、JTWCともにドボラック法を基本としているが、CI数から中心気圧、最大風速に変換するための対応表が異なる(木場ほか1990)。特に強い台風ほどその差は大きい。Nakazawa and Hoshino (2009)は、気象庁とJTWCのドボラック法で中心気圧に変換される前のCI数を1987~2006年の期間で比較した。その結果、1992~1997年と2002~2005年にJTWCの方が気象庁よりもCI数を大きめに解析する傾向があることを示した。また、Kossin *et al.* (2007)は過去の台風の強度を統一的手法で再解析した。その結果、1990年代のJTWCの解析は、再解析結果よりも強い傾向があることが分かり、この期間JTWCは台風を強めに解析していた可能性があることを示した。

北西太平洋域は、年間の熱帯低気圧の発生数が最も多い海域で、地球全体で発生する熱帯低気圧のおよそ30%がこの領域で発生する。地球温暖化にともない、地球全体で強い熱帯低気圧が増えているかどうかを正確に評価するためには、この北西太平洋域の動向をきちんと把握することが非常に重要である。

#### 4. おわりに

航空機観測により熱帯低気圧の解析精度、予報精度、特に進路の予測精度が向上することは先行研究から明らかである。また、強度の予測精度を向上させるためには、モデル研究だけでは限界があり、航空機観測データを蓄積して予測システムを検証し、さらに改良することが重要である。気候監視という観点からは、地球温暖化に伴って強い熱帯低気圧の数が今後変化するかをより確からしい観測データで評価し、次世代にその記録を残していくことが極めて重要である。熱帯低気圧の発生数が最も多い北西太平洋域において、台風直接観測の空白期間を出来るだけ早急に埋めることが熱帯低気圧コミュニティ全体の課題であると考えられる。

#### 参考文献

- Aberson, S. D., 2010: 10 Years of hurricane synoptic surveillance (1997-2006). *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1536-1549.
- Aberson, S. D. *et al.*, 2010: Aircraft observations of tropical cyclones. *Global Perspectives on Tropical Cyclones* (Chan, J. C. L. and J. D. Kepert, ed.), World Scientific, 227-240.
- Aberson, S. D. *et al.*, 2015: Assimilation of high-resolution tropical cyclone observations with an ensemble Kalman filter using HEDAS: Evaluation of 2008-11 HWRf Forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 511-523.
- Black, P. G. *et al.*, 2007: Air-sea exchange in hurricanes: Synthesis of observations from the coupled boundary layer air-sea transfer experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **88**, 357-374.
- Black, P. *et al.*, 2017: High Definition Sounding System (HDSS) for atmospheric profiling. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **34**, 777-796.
- Braun, S. A., P. A. Newman and G. M. Heymsfield, 2016: NASA's Hurricane and Severe Storm Sentinel (HS3) investigation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97**, 2085-2102.
- Chou, K.-H. *et al.*, 2011: The impact of dropwindsonde observations on typhoon track forecasts in DOT-STAR and T-PARC. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 1728-1743.
- D'Asaro, E. A. *et al.*, 2014: Impact of typhoons on the ocean in the Pacific. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 1405-1418.
- Dvorak, V. F., 1975: Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery. *Mon. Wea. Rev.*, **103**, 420-430.
- Dvorak, V. F., 1984: Tropical cyclone intensity analysis using satellite data. NOAA Tech. Report NESDIS 11, 47pp.
- Gall, R. *et al.*, 2013: The hurricane forecast improvement project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 329-343.
- Ito, K., 2016: Errors in tropical cyclone intensity forecast by RSMC Tokyo and statistical correction using environmental parameters. *SOLA*, **12**, 247-252.
- 木場博之, 萩原武士, 小佐野慎悟, 明石秀平, 1990: 台風のCI数と中心気圧および最大風速の関係。気象庁研究時報, **42**, 59-67.
- Kossin, J. P., K. R. Knapp, D. J. Vimont, R. J. Murnane and B. A. Harpar, 2007: A globally consistent reanalysis of hurricane variability and trends. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04815, doi:10.1029/2006GL028836.
- Landsea, C. W. and J. L. Franklin, 2013: Atlantic hurricane database uncertainty and presentation of a new

- database format. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3576–3592.
- Majumdar, S. J., 2016: A review of targeted observations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97**, 2287–2303.
- Mei, W. and S.-P. Xie, 2016: Intensification of land-falling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/NNGEO2792.
- Nakazawa, T. and S. Hoshino, 2009: Intercomparison of Dvorak parameters in the tropical cyclone datasets over the western North Pacific. *SOLA*, **5**, 33–36.
- Nakazawa, T. *et al.*, 2010: THORPEX-Pacific Asian Regional Campaign (T-PARC). RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review, (12), 1–4.
- Rappaport, E. N. *et al.*, 2009: Advances and challenges at the National Hurricane Center. *Wea. Forecasting*, **24**, 395–419.
- Rogers, R., P. Reasor and S. Lorsolo, 2013: Airborne Doppler observations of the inner-core structural differences between intensifying and steady-state tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 2970–2991.
- Rogers, R. F. *et al.*, 2016: Observations of the structure and evolution of Hurricane Edouard (2014) during intensity change. Part II: Kinematic structure and the distribution of deep convection. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3355–3376.
- Schreck III, C. J., K. R. Knapp and J. P. Kossin, 2014 : The impact of best track discrepancies on global tropical cyclone climatologies using IBTrACS. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 3881–3899.
- Song, J.-J., Y. Wang and L. Wu, 2010: Trend discrepancies among three best track data sets of western North Pacific tropical cyclones. *J. Geophys. Res.*, **115**, D12128, doi:10.1029/2009JD013058.
- Weissmann, M. *et al.*, 2011: The influence of assimilating dropsonde data on typhoon track and midlatitude forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 908–920.
- Wu, C.-C. *et al.*, 2005: Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region (DOTSTAR): An overview. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **86**, 787–790.
- Yamaguchi, M., T. Iriguchi, T. Nakazawa and C.-C. Wu, 2009: An observing system experiment for Typhoon Conson (2004) using a singular vector method and DOTSTAR data. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2801–2816.
- Zhang, F. and Y. Weng, 2015: Predicting hurricane intensity and associated hazards: A five-year real-time forecast experiment with assimilation of airborne Doppler radar observations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **96**, 25–33.
- Zhang, J. A., D. S. Nolan, R. F. Rogers and V. Tallapragada, 2015: Evaluating the impact of improvements in the boundary layer parameterization on hurricane intensity and structure forecasts in HWRF. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 3136–3155.
-