

2. 熱帯域における台風の観測とシミュレーション

～雲と降水をどこまで再現できれば満足か?～

山田 広幸*

1. はじめに

台風やハリケーンを含む熱帯低気圧（以下、台風と呼ぶ）は、上陸時に強風、洪水、土砂災害、高潮などの自然災害をもたらす。このため、台風の進路と強度の予測は、気象予報の中でも重要な位置を占めている。近年では、将来の気候変化に伴い、台風の発生数や強度がどう変化するかという点についても注目が集まっている。1988年に気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が設立されると、最新の気候モデルを用いた気候変化予測が行われるとともに、台風の個数や強度が将来的に増加するのか、それとも減少するのかという点について、活発な議論が行われている。

一方、現業の台風予報や、気候変化予測の研究に広く用いられる全球静力学モデルは、水平分解能が20 km まで高解像になった現在においても、台風の強度を正確に予報する能力を依然として持ちあわせていないという問題が指摘されている（齊藤ほか 2013）。その解決策の一つとして、より高解像度で積雲スケールの過程を的確に表現できる、非静力学モデルを用いた台風の研究が近年精力的に行われている。しかし、高解像度の非静力学モデルといえども、水平分解能は数百 m 以上であり、個々の積雲に伴う鉛直循環や降水過程、境界層の乱流渦などを正確に表現するまでの能力は持ち合わせておらず、パラメタリゼーションに依存せざるを得ないのが現状である。つまり、雲や降水過程などの小規模な現象をどこまで再現できれば、台風のシミュレーションとして十分なのか? という問題は、モデルが高解像度化しても常につきまわっている。

る。

本講演では数値モデルを用いた台風シミュレーションの今日的な課題について整理し、解決に向けた研究の方向性について述べる。なお、台風の研究は数値モデルの高解像化とともに急速に進みつつあるため、この講演では近年の研究を全て網羅するわけではないことを、最初にご承知頂きたい。より詳しい情報は、日本気象学会より2013年に刊行された気象研究ノート「台風研究の最前線（上／下刊）」に記述されているので、興味のある方はそちらを参考にして頂きたい（本講演もこの書籍から多くの情報を得ている）。

2. 台風予報の現状

現在、気象庁では台風の進路と強度（中心気圧と最大風速）の予報を行っている。進路予報については過去数十年で精度が着実に改善し、2009年からは予報期間が72時間から120時間に延長された。この精度向上には、台風の進路を基本的に支配する周囲の流れ（指向流）の再現性が、衛星観測データなどの同化により向上したことと関係しているといわれる（山口 2013）。しかし、2005年以降は進路予報の誤差が目立った減少がみられていない。Yamaguchi *et al.* (2012) によると、3日予報で1000 km 程度の予報誤差が生じる「大はずし」の事例が依然として存在しており、それが予報精度の向上を阻んでいるといわれる。

強度の予報についてはまだ多くの課題が残っている（齊藤ほか 2013）。2007年に気象庁の全球予報モデル（GSM）の水平分解能が60 km から20 km に向上し、それに伴って強度予報の誤差が大きく減少したが、それでも1日予報による誤差が20 hPa を超えており、絶対的な精度は十分とは言えない。また、初期時刻の段階で予報誤差が大きいという課題が残っており、モ

* 琉球大学理学部／海洋研究開発機構。

yamada@sci.u-ryukyuu.ac.jp

© 2015 日本気象学会

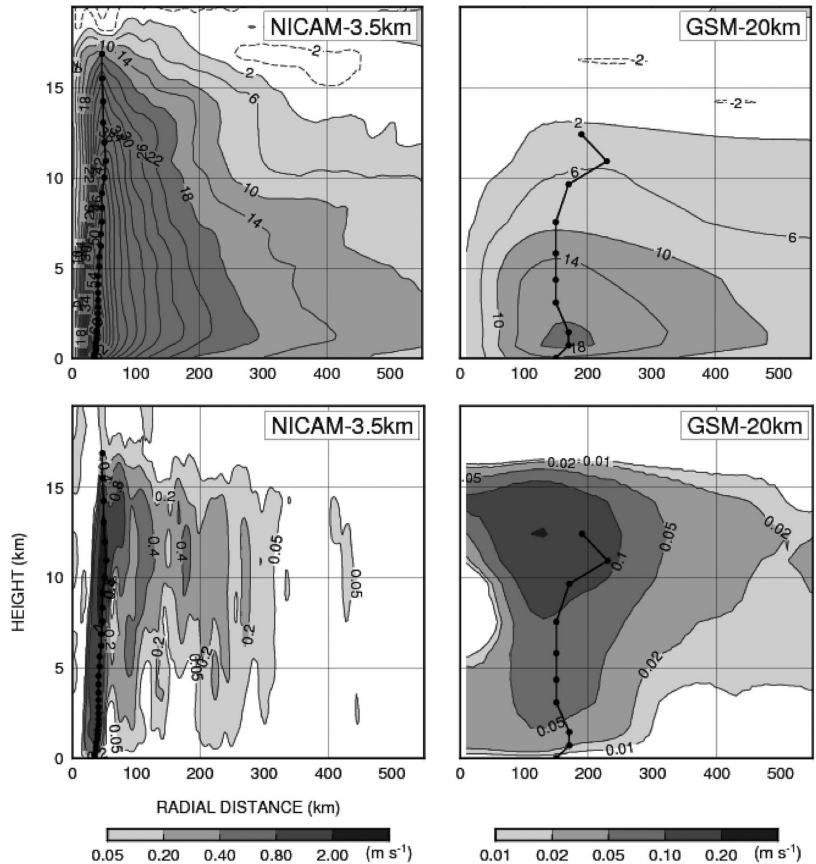
デルの解像度だけでなく初期値や物理過程にも問題があると考えられる。なお、ここでは気象庁の予報について述べているが、米国台風センター (NHC) やヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) をはじめとする外国の気象機関においても台風予報について共通した問題が存在する。

3. 台風の強度に対する積雲加熱の役割

では、気象庁の水平分解能20 kmの全球モデルでは台風の構造がどのくらい表されているのだろうか？一例として、2008年の台風第6号 (Fengshen) について、その構造を見てみたい。この事例については、全球非静力学モデル NICAM を用いて、水平分解能3.5 kmの超高解像度で再現実験が行われている (那須野ほか 2011)。これを気象庁 GSM の予報結果と比較した。第1図は2つのモデルで表現された台風の接線風速(上)と鉛直流(下)を、台風中心からの距離と高度の分布で表したものである。各高度において接線風が最大になる半径 (radius of maximum tangential wind, RMW) を黒丸と実線で示している。一見してわかるのが、RMWが両モデルで大きく異なることである。NICAMでは約40 kmの半径にあるのに対し、気象庁 GSMでは約150 kmとなっている。また、最大風速の値にも大きな違いが見られる。壁雲における上昇流の強さはNICAMのほうが1桁大きく、上昇流域の水平規模も両モデルで大きく異なる。発達期の台風についてはRMWがおおむね数百km以内になるので (坪木・伊藤 2013)、NICAMでは観測に近いものが再現され、GSMでは眼がかなり大き

な台風になっていることがわかる。これはあくまで一事例の結果であるが、静力学モデルで表現される台風の構造が、現実よりもかなり緩やかであることがわかる。

このような台風構造の違いが、最大風速にどう関係するのだろうか？定常的な台風では、方位角方向に平均した距離-高度の2次元断面において、傾度風平衡と静力学平衡が成り立っている。接線風速の増加や減少、すなわち平衡状態の崩壊は、方位角方向の渦輸送や非断熱加熱、そして摩擦という強制力によって引き起こされる。この崩壊強制と距離-高度断面内の循環の強さとの関係を数値的に表したのが Sawyer-Eliassen の方程式である (筆保・宮本 2013)。この方程式は30年以上前の理論研究によって確立したもの



第1図 2008年台風第6号 (Fengshen) について、(左)NICAM-3.5 kmと(右)気象庁全球モデル (GSM-20 km) で再現された構造。上は軸対称平均の接線風分布 (-2 ms^{-1} から 4 ms^{-1} 間隔)で、下が軸対称平均した鉛直流 (等値線間隔は凡例に表示) を表す。黒丸は、各高度における最大接線風半径 (RMW) を表す。時刻は6月20日00UTCで、NICAMは計算開始120時間後、GSMは計算開始24時間後を表す。

であるが、水平分解能が2.5 km の非静力学モデルで再現された台風においても成り立っていることが Fudeyasu and Wang (2011) により報告されている。台風の発達については、強制項の中でも非断熱加熱の役割が重要である (Nolan *et al.* 2007)。上昇流の強さは基本的には非断熱加熱の強さと関係しているのので、モデルで台風の強度を的確に再現するには、壁雲の位置や上昇流の強さを的確に再現することが必要となる。前述した水平分解能20 km の GSM で再現される緩やかな台風構造では、台風の発達を予測するのは難しいと考えられ、台風強度の予測精度の向上にはモデルの高解像度化が必要だと考えられる。

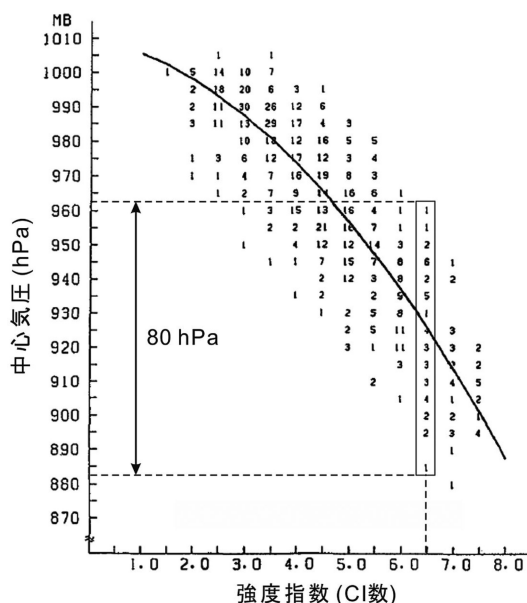
4. 台風観測の現状と問題点

全球モデルの水平分解能が過去数十年で数百 km から20 km まで向上したことで、コンピューターの技術開発が進みつつある現状を考慮すると、水平分解能が数 km の全球モデルが近い将来には現業予報に利用される可能性がある。また、台風の特化するのであれば、領域モデルを利用すれば雲解像での予測が現時点でも可能だと考えられる。しかし、モデルの性能が向上しても、初期値や境界値の精度が向上しなければ予報精度の向上は見込めない。つまり、高解像度のモデルに見合う観測データの取得とその同化技術の確立も必要となってくる。具体的には、台風の中心近く、特に最大接線風が現れる壁雲周辺のデータが必要になる。太平洋上の台風については、衛星マイクロ波サウンドによる気温の鉛直プロファイルや、可視・赤外画像を用いた大気追跡風がモデルに同化されている (山口 2013)。しかし壁雲周辺の運動学的・熱力学的データは、米軍による航空機観測が終了した1987年以降、短期間の特別観測を除けば取得されていない。台湾では DOTSTAR プロジェクトにおいて航空機観測が行われているが (Wu *et al.* 2007)、これは台風の周囲における環境場の観測を目的としており、台風の中心を貫通する観測は行われていない。台風の周縁部における航空機観測は、主に進路予報の精度向上を目的としたものである。

台風の強度については、その推定手法にも課題がある。気象庁では台風の位置と強度の推定を、静止衛星の赤外画像を用いて雲の形状から推定するドボラック (Dvorak) 法により行っている。この手法は熟練した技術を要し、主観的判断を完全には排除できないことや、推定誤差が大きいという問題がある。第2図は、

西太平洋の台風に対し静止気象衛星の観測と、米軍による航空機観測が同時に行われていた1981-1986年の台風50個について、衛星画像から求めた強度指数と、観測によって得た中心気圧の関係を表したものである。この図に示された回帰曲線は、強度指数を中心気圧に変換する際に利用されている (木場ほか 1990)。ここで強度 (CI 数=6.5) に着目すると、実測された中心気圧の誤差幅は80 hPa にもなり、不確実性の大きさがわかる。このような誤差は、台風が急に発達・衰退する際に大きくなるといわれている。衛星を用いた強度推定は気象庁のほか米軍 (JTWC) においても Dvorak 法により行われているが、航空機観測の終了した1987年以降、両機関の推定値に食い違いがあることが指摘されている (Nakazawa and Hoshino 2009)。

台風の位置と強度の推定値は、気候モデルの検証材料として利用されているほか、予報モデルの初期場に台風の渦を擬似的に表現するボーガス手法の根拠にもなっており、より精度の高い推定手法の開発が必要だと考えられる。大西洋のハリケーンに対しては、Dvorak 法を自動化して客観性をもたせることや、衛星マイクロ波画像を併用するなどの改善方法が模索されている (Velden *et al.* 2006)。このような研究が可

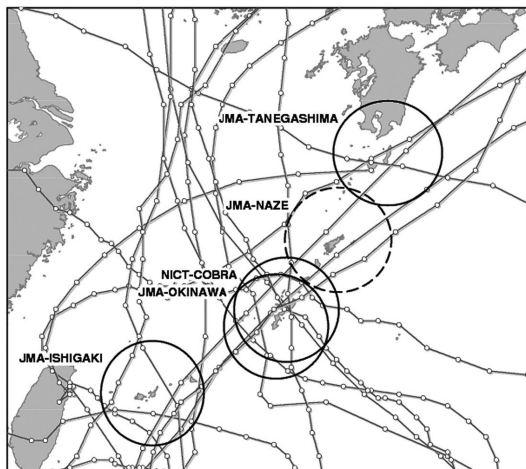


第2図 衛星画像から推定した強度指数 (CI 数) と航空機観測による中心気圧の散布図。木場ほか (1990) の図2a を改変した。

能なのは、大西洋では実測としての航空機ドロップゾンデ観測データがあり、検証が可能だからである。しかしながら航空機による中心気圧の観測データが無い西太平洋においては、新たな手法の開発やその検証を行いたくても出来ない状況にある。

5. ドップラーレーダーを用いた台風強度の推定

台風の強度を推定する方法としては、他にドップラーレーダーの動径風速を用いた手法 (Bell and Lee 2012) がある。この方法では接線風をレーダーで観測できるため、強度とその時間変化が Dvorak 法より精度良く推定できる可能性がある。また、接線風の距離方向の変化が推定できるため、傾度風平衡を仮定すると中心気圧の推定も可能である。観測範囲が海岸から約150 km 以内に限られるという欠点があるが、西太平洋においては台風の襲来を受ける日本、台湾、フィリピンの各地域でドップラーレーダーの設置数が増加している。特に、日本の南西諸島においては高い山が少なく、地形の影響をあまり受けていない台風の強度を推定することが可能である。第3図は気象庁のレーダーがドップラー化された後に観測域を通過した台風の経路を示しており、既に15事例以上の蓄積がある。沖縄には気象庁レーダーの他に情報通信研究機構の偏波ドップラーレーダー (COBRA) があり、佐藤ほか



第3図 南西諸島で運用されているドップラーレーダー (実線の円、円内が探知範囲) と、気象庁のドップラー化が始まった2008年以降に探知範囲を通過した15個の台風の経路。破線で示した名瀬レーダーは2013年3月にドップラー化された。

(2005) は動径風速を使って沖縄を通過した台風0418号 (Songda) の強度推定を行っている。彼らはレーダーから推定した接線風が、地上観測の気圧データから推定した傾度風と大きさがほぼ一致していることを報告している。

6. 台風観測の将来像

レーダーを用いた台風強度の推定手法が確立されれば、沖縄への最接近の半日程度前から強度予報の精度を向上させることができると期待され、データ同化により予報モデルにおける台風の再現性の向上に貢献できると考えられる。また、衛星を用いた推定手法の検証材料にも利用できると期待される。しかしながら、南西諸島から離れた南の熱帯海上でのデータ空白については、やはり航空機を利用した観測が必要だと考えられる。米国では、これまでの WC-130や WP-3C といった有人飛行機の他に、無人飛行機 Global Hawk を用いた台風の観測を大西洋で始めている (<http://www.nasa.gov/HS3/>)。無人飛行機は人が乗らないぶん機体を軽くできるため、30時間近くの飛行が可能である。また、台風の中を貫通させず、台風を上空から観測する“overstorm flight”も可能である。これであれば、台風の中で乱気流や着水により墜落するリスクが少ないと考えられる。また、個人的に聞き得た話では、航空機に搭載可能なフェーズドアレイレーダーの開発も計画されている。前述したドップラーレーダーによる強度推定手法を用いれば、将来的には台風に貫通しない安全な航空機観測によって、強度推定が行えるようになる可能性がある。航空機の運用や航空機搭載レーダーの技術開発にかかる費用については課題が残るが、台風の強度予測の精度向上を目指すためには、モデルの高解像度化とあわせて議論されるべき事項だと考えられる。

7. まとめ

台風の予報については、現在用いられている静力学モデルには特に解像度の点で問題が残っており、計算機の性能がさらに向上する近い将来には、現実に近い台風構造を再現できる非静力学モデルが広く利用されるようになると予想される。しかしそれでも初期値の作成やデータ同化に用いられる観測データの取得に多くの課題があり、強度の推定については不確実性の大きい Dvorak 法に依存しなければならないという問題が残っている。南西諸島で運用中のドップラーレー

ダーを利用することは、強度推定の改善に役立つと期待されるが、それと同時に台風がその一生の大半を過ごす海洋上でのデータ取得をどうするかという課題について、ドップラーレーダーを搭載した航空機の利用を含めた検討が必要だと考えられる。

謝 辞

地球シミュレーターを用いたNICAMによる台風Fengshenの再現実験は、海洋研究開発機構の那須野智江博士とその研究グループの方々を実施して頂きました。また、台風予報の技術資料の収集には、気象研究所の北島尚子博士に協力して頂きました。この場を借りてお礼申し上げます。

略語一覧

ECMWF: European Centre for Medium-range Weather Forecasts
 GSM: Global Spectral Model
 IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
 JTWC: Joint Typhoon Warning Center
 NHC: National Hurricane Center
 NICAM: Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model

参 考 文 献

- Bell, M. M. and W.-C. Lee, 2012: Objective tropical cyclone center tracking using single-Doppler radar. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**, 878-896.
- 筆保弘徳, 宮本佳明, 2013: 発達過程と成熟期. 気象研究ノート, (226), 65-91.
- Fudeyasu, H. and Y. Wang, 2011: Balanced contribution to the intensification of a tropical cyclone simulated in TCM4: Outer-core spinup process. *J. Atmos. Sci.*, **68**, 430-449.
- 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.
- Nakazawa, T. and S. Hoshino, 2009: Intercomparison of Dvorak parameters in the tropical cyclone datasets over the western North Pacific. *SOLA*, **5**, 33-36.
- 那須野智江, 山田広幸, 柳瀬 亘, 野田 暁, 山田洋平, 小玉知央, 谷口 博, 伊賀晋一, 大内和良, 富田浩文, 佐藤正樹, 2011: 全球非静力学モデルを用いた台風0806号 (Fengshen) 再現実験 (第3報). 日本気象学会2011年度春季大会講演予稿集, C308.
- Nolan, D. S., Y. Moon and D. P. Stern, 2007: Tropical cyclone intensification from asymmetric convection: Energetics and efficiency. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 3377-3405.
- 斉藤和雄, 川畑拓矢, 国井 勝, 2013: 台風の強度予報と再予報実験. 気象研究ノート, (227), 37-70.
- 佐藤晋介, 長濱紘子, 花土 弘, 中川勝広, 高橋暢宏, 井口俊夫, 2005: 沖縄偏波降雨レーダー (COBRA) で観測された台風0418号の風速場の特徴. 日本気象学会2005年度春季大会講演予稿集, A460.
- 坪木和久, 伊藤耕介, 2013: メソ構造. 気象研究ノート, (226), 93-126.
- Velden, C. *et al.*, 2006: The Dvorak tropical cyclone intensity estimation technique: A satellite-based method that has endured for over 30 years. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **87**, 1195-1210.
- Wu, C.-C., K.-H. Chou, P.-H. Lin, S. D. Aberson, M. S. Peng and T. Nakazawa, 2007: The impact of dropwindsonde data on typhoon track forecasts in DOT-STAR. *Wea. Forecasting*, **22**, 1157-1176.
- 山口宗彦, 2013: 台風の進路予報. 気象研究ノート, (227), 15-35.
- Yamaguchi, M., T. Nakazawa and K. Aonashi, 2012: Tropical cyclone track forecasts using JMA model with ECMWF and JMA initial conditions. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L09801, doi:10.1029/2012GL051473.