

今後の台風予測研究に関する展望

佐藤 正樹^{*1}・佐藤 芳昭^{*2}・八代 尚^{*3}・伊藤 耕介^{*4}
 筆保 弘徳^{*5}・三好 建正^{*6}・川畑 拓矢^{*7}・坪木 和久^{*8}
 堀之内 武^{*9}・岡本 幸三^{*10}・山口 宗彦^{*11}・中野 満寿男^{*12}
 和田 章義^{*13}・金田 幸恵^{*14}・辻野 智紀^{*15}

1. はじめに

近年, 2018年台風第21号, 2019年台風第15号(令和元年房総半島台風), 第19号(令和元年東日本台風)等, 台風による激甚災害が頻発しており, 日本を襲来する台風活動の活発化や東日本に接近する台風数の増加が指摘されている(Kubota *et al.* 2020; Yamaguchi and Maeda 2020). 今後, 地球温暖化の進行に伴って, 勢力の強い台風がより頻発化することが指摘されている(Tsuboki *et al.* 2015; Yoshida *et al.* 2017; Knutson *et al.* 2020; Seneviratne *et al.* 2021). 台風に対する地球温暖化の影響は2030年頃にはより顕在化し, その傾向は2050年頃にはより顕著になると予想されてい

る(Hoegh-Guldberg *et al.* 2018). 今後予想される台風の激甚化とそれによる被害を軽減するためにも, よりいっそうの台風の予測精度の向上が求められている. 気象庁では「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」^[註1]を2020年に策定し, 台風防災に関し「台風の3日先の進路予測誤差を現在の1日先の誤差(約100km)程度にまで改善する」ことを目標として掲げている. この計画には2030年までの進展すべき数値予報技術開発の目標が定められているが, その先の開発計画は示されていない. 地球温暖化が進行する今後10~30年先までの台風予測研究を展望し, 台風予測精度向上を実現する上で必要な台風研究を遂行していくことが求められている.

将来の台風予測向上に貢献すべく, 2020年より共有化されたスーパーコンピュータ「富岳」を利用した「富岳」成果創出加速プログラム「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」(2020~2022年度)が実施されている^[註2]. また, 科学技術振興機構(JST)ムーンショット型研究開発事業「新たな目標検討のためのビジョン策定(ミレニア・プログラム)」において, 将来の台風予測に係るムーンショット目標候補が採択され, 実現したい2050年の社会像とそれに向けた目標達成に至るシナリオなど調査研究が進められた^[註3].

台風予測向上の課題に取り組む上で, 大学・研究機関と行政現業機関である気象庁との連携が求められており, 気象学会における定期的な大会, 非静力学数値モデル研究連絡会や台風研究連絡会等における研究会等で研究上の情報交換が行われている. これに加えて台風に関しては, 気象庁と大学・研究機関の専門家が

*1 (連絡責任著者) Masaki SATOH, 東京大学大気海洋研究所.

柏市柏の葉5-1-5.

satoh@aori.u-tokyo.ac.jp

*2 Yoshiaki SATO, 気象庁.

*3 Hisashi YASHIRO, 国立環境研究所.

*4 Kosuke ITO, 琉球大学.

*5 Hironori FUDEYASU, 横浜国立大学.

*6 Takemasa MIYOSHI, 理化学研究所.

*7 Takuya KAWABATA, 気象研究所.

*8 Kazuhisa TSUBOKI, 名古屋大学.

*9 Takeshi HORINOUCHE, 北海道大学.

*10 Kozo OKAMOTO, 気象研究所.

*11 Munehiko YAMAGUCHI, 気象研究所.

*12 Masuo NAKANO, 海洋研究開発機構.

*13 Akiyoshi WADA, 気象研究所.

*14 Sachie KANADA, 名古屋大学.

*15 Satoki TSUJINO, 北海道大学.

© 2022 日本気象学会

「台風診断ミーティング」や「台風事例検討会」等の会合において定期的に情報交換を行っている。気象庁では2017年より「数値予報モデル開発懇談会」を定期的に開催し、気象庁と大学・研究機関相互の研究開発課題の創出に資する検討を進めている^[註4]。

このような状況のもと、2021年4月15日に「今後の台風予測研究に関する研究会」をオンラインで開催した^[註5]。本研究会では、2050年頃までの台風予測研究に関する現状の知見を整理し、15名の発表者からそれぞれの知見に基づき、技術的・科学的進展についての展望が示された。本報告では、本研究会における報告およびその後のオンラインでの議論をもとに、今後30年程度先までの台風の数値予測の向上のための課題と予想される進展についての展望をまとめる。

2. 台風予測の精度向上のために必要な進展の概要

2050年に向けて台風予測の精度向上を進展させるためには、様々な領域で科学的、技術的進展が必要とされる。台風の科学的理解、観測的実態の把握、数値モデルでの再現性に関して、まだこれら多くの点で不十分さがあり、それらが現状の台風に関する予測精度の向上の阻害要因となっている。大きくまとめると、特に以下の項目での進展が必要である。

- ・台風のさらなる科学的理解の進展
- ・より稠密・高頻度な観測の実現
- ・台風を現実的に表現することができる、より高精度な数値モデルの開発
- ・観測と数値モデルを最適に組み合わせるデータ同化手法の開発
- ・より高性能なスーパーコンピュータの発展

1987年8月の米軍による航空機観測が終了した後現在まで、観測データの入手が困難な海上における台風の中心気圧や最大風速は間接的な方法で推定されるに留まっている。正確な真値が得られていないことから、より稠密・高頻度な直接的・間接的観測手法により、台風をとりまく環境場や内部構造をより正確に観測・監視する必要がある。こうしたデータを活用する高度なデータ同化により、数値モデルによる予測のための精緻な初期場として利用される。また観測データは数値シミュレーション結果の妥当性の評価のためにも利用される。

数値モデルにおける台風予測は初期値の精度に強く依存することから、非線形性の強い状況下で複雑なリモートセンシングデータを活用する高度なデータ同化

手法を用いて、高精度な状態推定を行う必要がある。また数値モデルにより台風をより現実的に再現するためには、数値モデルの高解像度化や物理過程の改良・高度化が必要である。台風が現実的に再現可能な高精度化した数値モデルとデータ同化を、より高性能なスーパーコンピュータ上で駆動することによって、台風の進路・強度等の予測改善が期待される。これらの数値モデル予測は、初期場のわずかなずれに対する依存性・カオス性や観測の不確実性があるため、データ同化によって推定する初期誤差を適切に反映したアンサンブル予測による確率的な予測情報に発展させる必要がある。こうした予測技術の発展を台風予測精度向上に結びつける上で、台風の物理的理解、たとえば台風と環境場との相互作用に関する科学的理解や台風の内部構造の変化メカニズム、台風発生メカニズムやそれに関連したスケール間相互作用についての理解の深化等の進展が必要である。

2050年に向けてどの程度の台風予測精度向上が要求されるか、共通的な認識はまだ得られていない。ここに示す進展すべき課題は、定量的な目標を達成するためのものではなく、持続的な改善を得るために必要とされるものと理解されるべきである。またそれぞれの課題における進展目標には個別の不確実な要因があるため、2050年までの進展が保証されるものではない。

3. 現状の取り組み：2030年代まで

2050年頃までの台風予測の進展を俯瞰するために、まず現状において取り上げられ、取り組みが進められている2030年代までの課題を述べる。計算性能の観点からスーパーコンピュータの今後の進展・発展を踏まえることで、将来の台風予測の進展を展望することがある程度可能となる。気象庁ではこれまで、概ね6年毎に25倍程度の計算性能をもつスーパーコンピュータに更新されてきた。このことから2030年頃に気象庁に設置されるスーパーコンピュータは現在から2世代先のものになると想定される。2030年時点では、台風予報などにおいて数日前からの見通しの予測を可能とし、現在の1日先と同程度の進路予測誤差で3日先の予測を実現することを目標としている^[註1]。

世界最高性能を誇るスーパーコンピュータ「富岳」級のスーパーコンピュータが現業で利用可能になるのは、2030年までには難しく、その先の2030年代中頃以降と予想される。2020-2022年度に実施中の「富岳」における研究プロジェクト^[註2]では、高解像度・大アン

サンプルの数値予測により台風予測精度向上を目指す試みがなされている。このプロジェクトでは日本域1 km以下のメッシュ、全球10km程度以下のメッシュのメンバー数1000程度の大アンサンプルを使ったデータ同化による予測実験を実施し、台風の進路・強度に関して、確率情報を付加した高精度予測の実現を目標としている。2030年代中頃以降には、このような解像度・アンサンプル数に準じた予測計算および確率情報を付加した高精度予測の現業化が実現している可能性がある。

観測に関して、現状では海洋上の台風の観測データは不十分であり、人工衛星データに頼らざるを得ない。台風の中心付近の圧力や風などの真値は実際には知り得ず、人工衛星データを用いた経験的な手法（ドボラック法）で推定するのみである。台風の予測精度を向上するためには、真値をより正確に観測する必要がある。そのためには航空機による直接観測が要請される。しかしながら北西太平洋では、台風の強度に関する現業的な航空機観測は行われていない。近年、名古屋大学等の主導により、台風の眼やそれを取り囲む壁雲内の航空機観測が実施され、その有効性が示されている（Ito *et al.* 2018；Yamada *et al.* 2021）。また、台湾等の東アジア諸国をはじめとする各国の研究者と連携しつつ、引き続き台風の航空機観測が計画されている。

地上リモートセンシング観測に関して、日本域に展開されている気象レーダーは二重偏波気象レーダーへと更新されつつあり、また研究用フェーズドアレイ気象レーダーによる豪雨・突風研究が実施されている。2030年代においては日本に接近する台風の稠密な観測の実現に向けて、フェーズドアレイ気象レーダー・二重偏波気象レーダー等による最先端地上リモートセンシング観測データを用いた研究がより増えることとなるであろう。

現在、台風の人工衛星観測による監視のため、静止気象衛星ひまわりの他、低軌道衛星（全球降水計画GPMによる降水量、GCOM-W/GCOM-C衛星による雲降水分布）など観測衛星による包括的な観測が利用されている。また台風の強度情報に直結する海上風の把握には、高風速で飽和しない合成開口レーダー（SAR）による偏波観測が有用である。2030年代までに予定されている地球観測衛星^[注6]、特にEarthCARE衛星（2023年度に打ち上げ予定）、ALOS-4衛星（同2022年度）、GOSAT-GW衛星搭載マイクロ波放射計

AMSR3（同2023年度）、AOS衛星群（もしくはACCP衛星群；いずれも仮称、同2030年頃）等は、台風を構成する雲降水過程や大気海洋相互作用の検証・改良に貢献すると予想される。現在実用化されている人工衛星の寿命はせいぜい5-10年程度であるため、将来にわたって継続的な人工衛星観測を立案・実現していく必要がある。欧米中においては、マイクロ波や赤外のサウンダ、マイクロ波散乱計といった、台風観測にとっても重要な先進的観測技術の開発・導入を行いつつ、現在の現業的な気象衛星観測を維持・強化する計画である。例えば欧州では、MetOp-SGやMTGと呼ばれる次世代の極軌道衛星や静止衛星シリーズにおいて、精度や波長数、解像度など観測機能を大幅に強化する。米国では、2030年代初頭から2050年代中頃まで運用する次期静止気象衛星GeoXOについて現在検討しており、赤外サウンダや夜間可視観測を追加することなどを目指している。日本においては、2028年頃の打ち上げを目標にひまわり9号後継機の静止気象衛星について検討が進められており、着実な実現が要請される。次期静止気象衛星では、国際的に要請される新規センサー（赤外サウンダや雷検出装置等）の整備も進める必要がある。加えて、マイクロ波放射計やレーダーによる観測を行う低軌道衛星の後継機についても検討を進める必要がある。

また、精緻なモデルや高度な観測に加え、これらを最適に組み合わせるデータ同化手法が必要となる。これまで実用化されているデータ同化手法は、ガウス分布の誤差を仮定し、また観測誤差には相関がないことを仮定することが多い。台風で重要な降水過程は非線形性が強くガウス分布の仮定が成り立たなくなるほか、密なりリモートセンシングデータには観測誤差に空間相関があるため、これらを考慮した新たなデータ同化手法の検討が必要である。このように非ガウス分布、観測誤差相関を考慮すると、計算量が大幅に増加するため、高性能スーパーコンピュータの活用が必須となる。次節であげる台風の客観解析とシームレス予報を実現するための基礎研究も求められる。

4. 2050年頃を目標とした台風予測の精度向上のための課題

現状の科学的・技術的な取り組み、および今後の科学技術上の進展を踏まえ、2050年頃を目標とした台風予測の精度向上のための課題を項目ごとに展望する。

4.1 スーパーコンピュータ

台風の予測の中核となる高精度な数値シミュレーションによる予測の実現のためには、高性能なスーパーコンピュータが着実に進展している必要がある。逆にいえば、今後のスーパーコンピュータの性能の進展により、2050年頃に可能な数値シミュレーションのスペックが予想される。従来からの延長で考えた場合、2030年代中頃から2050年までの15年の間に、現業システムは2、3世代更新し、最大 $25 \times 25 \times 25 = 15625$ 倍程度の計算性能の向上を見込むことができる。ただし、スーパーコンピュータの今後の発展については以下の懸念がある。

スーパーコンピュータの今後の発展に関して、今後は従来からの外挿での技術の進展は難しくなることが予想される。計算機コミュニティでは「富岳」の次期を見据えたスーパーコンピュータの検討が進められているが、従来の汎用CPUのみを用いたシステムの性能向上には限界が指摘されている。このため、計算資源の向上が従来の延長通りに進展しない可能性に留意して、今後の展望を考える必要がある。また、メモリ性能や電力等の制約要因等から、新時代のコンピュータが従来と異なる方向性で進化する可能性もあり、このような状況に適合して性能が出せるよう、数値モデルの方も変革が迫られる。画像処理装置 (GPU) 等の多様なアーキテクチャに対応できるように、数値モデルのプログラムをドメイン特化言語 (Domain-Specific Language, DSL) で構築し直す等の開発も必要である。計算性能に加えて入出力性能の性能強化が必要であり、莫大な計算出力を格納可能なストレージの拡張を念頭に置く必要がある。

さらに、量子コンピュータやニューロモーフィックコンピュータのような、これまでとはコンセプトの大きく異なるコンピュータを数値シミュレーションの精度向上に活用する道についても、検討を進めることが期待される。これらのコンピュータを用いて数値シミュレーションの全体を実行するためには、数値モデルの設計思想を大幅に変える必要があり、開発は大変困難なものになると予想される。しかし、数値シミュレーションの一部を大幅に加速する可能性があり、機械学習技術とも組み合わせた継続的な利用検討を行うべきであると考えられる。欧州中期予報センター (ECMWF) では2030年までの戦略目標に量子コンピューティング技術等の活用を掲げており、2020年には Atos 社と共同で人工知能 (AI)・量子コンピューティングに関する

研究拠点を設立している。

このように、用いるコンピュータが複雑化していく中で、モデル開発のためにより計算科学的な素養を有する研究者を育成する必要がある。また、もともと情報科学に関する専門性をもった人材を気象学以外の分野から引き入れ、協働していく努力も必要である。

4.2 科学的理解の進展

台風の科学的理解については現在でも課題であり、特に2030年代前後で線引きがなされるものではないが、今後の計算資源の向上・期待される観測の充実によって進展が促進される可能性がある。

台風の進路、強度変化の予測向上には、それらの力学的な機構の解明が必要不可欠である。気象学における力学機構の解明には、現象の稠密な観測、数値モデルによるシミュレーション、そして地球流体力学に基づく理論、これらが強力なツールとして役割を果たしてきた。しかし、強度変化と密接に関係する台風の壁雲の形成、急発達 (rapid intensification)、多重壁雲、壁雲交替 (eyewall replacement) 等は現象の時間スケールが1日以内、空間スケールが100km以下である。後述するようにこれらの現象を捉えるためには現在よりはるかに高頻度、高解像度な観測、シミュレーションが必要となる。さらにこれらの現象の発生機構は台風周辺的环境場 (大きな時空間スケールの過程) と個々の積乱雲 (小さな時空間スケールの過程) が互いに非線形的に相互作用するため、従来の線形論的な枠組みでは完全な理解が困難である。急発達や眼壁の形成に関しては、台風の循環中心周辺で不規則に発生する対流バースト (対流圏界面まで到達する持続的な上昇流) が重要と考えられているが、その発生場所や発生条件の特定にはまだ至っていない。この課題を克服するには、対流の駆動源となる海面水温 (海洋表層水温も含む) や地表から高度1 km 程度までの境界層内の気流、水蒸気、温度の高密度な直接観測が必要となる。また、リング状の積乱雲群である壁雲を同心円状に複数有する多重壁雲構造は、外側壁雲の形成に対する統一的な機構がまだ解明されておらず、内側壁雲の消失 (壁雲交替) に至る機構も複数のシナリオが提案されている状況である。これらの課題を克服するには、台風中心から外側の強風半径までをカバーする高密度な3次元気流場、温度場、水蒸気場の観測が必要となる。次項で詳述するように、これらの高密度な観測データと各現象の力学機構の知見は、将来の台風強度に対する数値モデルの改良に大きく貢献することが

期待される。

すでに存在している台風についての予測だけではなく、今後発生するであろう台風についての予測を可能とする研究開発も必要である。このことにより数日を超えるリードタイムでの防災情報に資するだけでなく、台風季節予報の実現や気候変動・変化に伴う台風活動の変化予測の高精度化にもつながる。そのためには台風発生についての科学的理解のさらなる深化が必要である。台風の発生には、偏東風波動やいわゆるTD型擾乱といった何らかの前駆擾乱が寄与していることは間違いがないが、すべての前駆擾乱が台風へと発達できるわけではない。そのため、前駆擾乱が台風へ発達するにはどのような要因が決定的に働いたのかを理解することが求められる。特に発生前にしばしば観測される対流バーストや対流活動の結果生じるコールドプールの役割、中層渦の役割の理解が求められる。新しい観測技術や高度なデータ同化、機械学習などといった解析手法の活用はこれらの理解を助け得るだろう。加えて、台風の発生頻度は様々な時間スケール(数週間程度の季節内や年々)で変動するが、それは平均場の変動によって起こされているのか、前駆擾乱の活動度の変動によって起こされているのか、もしくは前駆擾乱の台風への発達割合の変動によって起こされているのかは理解されているとは言い難い。前駆擾乱の発生やその台風への発達をうながす環境場形成には、ENSO(エルニーニョ・南方振動)や季節内変動といった熱帯域の大気海洋大規模変動だけでなく、成層圏突然昇温や亜熱帯ジェットでのロスビー波の碎波といった、中高緯度の大規模変動の影響が指摘されている。これらの大規模変動はそれぞれ独立ではないため問題が複雑ではあるが、大規模スケールから、前駆擾乱、個々の対流スケールまでを解像できる高解像度全球モデルを用いた大規模アンサンブル気候実験が実現すれば、この問題解決へのブレークスルーとなり、台風季節予報や地球温暖化による台風活動の変化の理解へとつながりうる。

4.3 数値モデルの開発

台風の強度予測には、台風の中心付近の雲、すなわち眼壁の数値的再現性が必須であり、現状ではまだまだ不十分である。特に強度変化に影響する急発達、眼壁の生成、多重眼壁、眼壁交替の予測のためには、積乱雲が陽に解像可能な水平メッシュ(km程度以下)の数値モデルが必要とされている。モデルの高解像度化に伴い、力学的な数値スキームの精緻化、雲微物理や

乱流、放射等の物理過程の精緻化が必要である。さらに、従来のkm程度の解像度による気象モデルでは、レイノルズ平均によって扱われる乱流が、より高解像なモデルではその一部が直接解像されるようになってきている(Large Eddy Simulation, LES; Ito *et al.* 2017)。また台風は、対流の駆動源となる海面水温を大きく変動させるだけでなく、海面形状の変化や波しぶきの発生などによって、台風特有の大気海洋相互作用の物理プロセスがはたらくため、これらの理解を進展させるとともに、大気・海洋・波浪などを結合したモデルの高度化等が求められる。2050年では現在よりもはるかに高解像化された数値モデルを用いて、高精度な台風強度予測が実施されていることが期待される。この実現には、従来の気象モデルにおける力学、物理スキームの改良、LESのような新しい枠組みの導入、そして大気と海洋・陸面等の相互作用(結合モデル)の検討と改善が必要である。

実際のモデル改良では、数値モデリング技術や知見の集積、現状の科学的課題を正確に理解する必要がある。さらに、数値モデルの結果を、実際の観測データによって検証し、その相違を改善するための科学的な検討が必要になる。台風の強度変化の予測向上のためには、台風の内部構造の力学の理解の進展が必要であり、台風の進路の予測向上のためには、台風と環境場の相互作用の理解の進展、環境場自体の変化の精度向上が必要である。

上記の研究は個々の台風を対象とした領域スケールのシミュレーションであれば、現状の計算資源で研究が可能である。高解像度の数値シミュレーションと包括的な観測データの利用による研究を促進する必要がある。一方、台風の進路予報については大規模場との相互作用が重要であり、全球モデルの利用を念頭に置く必要があるが、環境場との相互作用などに伴う台風中心付近の対流活動の偏りも進路に一定の影響を及ぼすため、高解像度化や物理過程の精緻化も重要である。

台風の数日先の予測はいまだに不確実性が大きく、特に強度変化の予測に関して、数値モデル予測の精度向上にはまだまだ課題がある。台風中心付近の眼壁やアウトレーンバンドはkmスケールのメソ対流によって構成される一方で、太平洋高気圧や中緯度トラフ等の大規模場によって台風の進路が規定される。高精度な予測のためには、台風の内部構造から大規模循環のスケールまでを表現可能な高解像度の広域～全球数値モデルが必要であり、不確実性を含めての予測情

報のためには多数のアンサンブル実験が必要である。データ同化においても、対流スケールから大規模スケールのマルチスケールの誤差構造を考慮するには、多数のアンサンブルが必要となる。これらの目標の達成のため、数値モデルの性能として「1 km メッシュの全球の1000アンサンブル」を設定する。解像度・アンサンブル数は、今後の研究の進展によって具体的に定まるので、ここでは目安として仮の値として設定する。スーパーコンピュータの今後の進展については、前項で述べたように懸念があるが、ここでは最大の向上が見込まれる場合を想定したい。水平解像度が10倍になると、必要な計算資源は1000倍であるとされる。2030年代中頃に水平解像度10km、100アンサンブル数を実現されているとすると、順調に計算資源の向上が進むのであれば、2050年頃に「1 km メッシュの全球の1000アンサンブル」は現実的な目標として設定可能である。週スケールを超える予測には少なくとも大気と海洋とを結合した全球モデルが必要となってくる。北西太平洋域は、ENSO や季節内変動に伴い、モンスーントラフが変動し台風活動に影響しているとされる。また、亜熱帯ジェットの蛇行によっても台風活動が影響されている。このように数多くの大気海洋システムの内部変動の影響を受けるため、季節スケールの台風予測スキルは北東太平洋などと比べて低いとされている。それにもかかわらず、Takaya *et al.* (2021) は、50メンバー程度のアンサンブル予測により、1年先までの台風活動に影響するアジアモンスーンの予測に成功しており、モデルの高解像度化や大アンサンブルによって、台風活動の予測も可能となることが期待される。2050年頃には大気は1 km、海洋は渦解像度できる0.1度で100メンバーの季節スケールのアンサンブル予測が可能となっている可能性がある。雲解像スケールでの大気海洋結合シミュレーションは、現時点では、下層雲が少なく、全球の放射収支が合わないなどの課題がある。

上記の数日～週～季節スケールの台風予測のための1 km メッシュ程度以下で実行可能な全球非静力学モデルの開発を進めていく必要がある。実際、現在進行中の「富岳」を利用した研究プロジェクト^{[注2] [注7]}等でモデルの精緻化・高度化に向けた開発が精力的に行われている。世界気候研究計画が推進している灯台活動 (Light House Activity ; 2019-2028年)^[注8] の一つ “Digital Earths” によっても、高解像度全球モデル開発研究推進の後押しとなっている。

4.4 観測

予測の向上には、近年質・量ともに発展が著しい衛星データを活用することが必要である。台風の人工衛星観測による監視のため、静止気象衛星ひまわり等の多くの観測衛星による包括的な観測が利用されており、今後も継続的に人工衛星観測を継続する必要がある。特に、台風の現業的な監視には、静止気象衛星ひまわりが重要な役割を果たしており、将来も安定的に観測を継続する必要がある。また、台風の静止気象衛星による常時監視のためには、国際的な静止気象衛星観測網の構築・維持が必要である。その上で、科学的理解の進展や社会的要請、モデルやデータ同化技術の高度化を踏まえながら、解像度・頻度・精度の高度化や観測波長や測器の多様化を進める必要がある。

ひまわりに加え、台風の定常的・詳細な観測のため、低軌道衛星や小型衛星による観測網の維持や高度化も必要である。特に風、水蒸気、気温、雲降水の鉛直分布情報や海上風情報を得るため、アクティブあるいはパッシブセンサを用いた観測体制について国際連携を進めながら構築する必要がある。例えば高風速の海上風速を観測することが可能な SAR 搭載衛星の増加やリトリーバル法の向上が求められる。また台風環境場の鉛直構造を把握するため、大気上層の水平風の鉛直プロファイルを観測できるドップラー風ライダーやサウンダによる高頻度観測が有用である。これらは晴天域や雲頂付近でしか観測できないため、ドップラーレーダー等による雲降水域での水平風・鉛直風の衛星観測も望まれる。これらの衛星観測は2030年代までに部分的には実現されるが、複数衛星を用いて十分な観測頻度と観測領域を担保し継続的に観測する体制の構築が重要となる。

衛星によるリモートセンシングの確立、向上には、現場観測による校正と検証が欠かせない。海上で発達する台風の観測には航空機観測が必要である。しかし、現状では、北西太平洋域では現業機関による台風の航空機観測は実現されておらず、将来の現業的な実施計画も存在しないため、今後も大学・研究機関が連携して研究的に航空機観測を進める必要がある。日本に接近する台風全てについて航空機観測をするのであれば、毎年4億円程度の経費が必要と見積もられ、このような経費の獲得・負担が大きな課題である。また、台風の航空機による観測は観測者にかかる負担が大きいため、無人航空機・無人観測船による新しい観測手法の検討を進める必要がある。2050年に向けて、前半

では大学・研究機関の連携により台風の航空機による研究的なアプローチでより継続的な観測を実現する必要がある。後半、さらに将来に向けては、無人航空機・無人観測船による観測手法の研究を進め、台風中心の現業的な観測の実現に向けて検討を進める必要がある。

日本に接近する台風の稠密な観測のため、高解像度高頻度のレーダー網による地上リモートセンシング観測、特にフェーズドアレイ気象レーダー・二重偏波気象レーダーの全国の稠密な展開および現業的利用が期待される。台風の現状監視のためには日本域周辺だけでなく、今まで観測が手薄であった日本南方の小笠原等の離島での観測等、観測網の拡大も視野に入ってくる事が望まれる。これら地上リモートセンシング観測データは、台風の内部構造の詳細監視のために直接利用される他、数値モデルの雲降水過程の検証・改良およびデータ同化による台風内部構造の客観解析のために必要不可欠である。台風に伴う暴風、豪雨の高精度な面的分布は防災・減災に資するだけでなく、社会における様々な産業への利用に貢献することが期待される。

観測データは、データ同化を通じた数値予測精度向上以外にも、台風予測精度向上に直接的・間接的に利用する枠組みがある。その例としては、台風強度解析、台風中心位置解析、各種ガイダンスなどが挙げられる。これらの枠組みについても、既存のアルゴリズムの改善や機械学習の活用などで、新時代の観測データの価値を最大限に引き出すように様々なシステムを設計することが望まれる。

4.5 客観解析

上述したように、現状では海洋上の台風の観測データは不十分であり、台風の予測精度を向上するためには、真値をより正確に観測する必要がある。台風の強度推定は現在ドボラック法を中心に行われているが、誤差が大きいことが知られている。そのため、予報結果の検証にも支障がある。ドボラック法を各種のデータで経験的に補正するという現在のベストトラックデータ作成法は客観性も乏しい。この問題を解決するには、質・量ともに発展が著しい衛星データを活用して、データ同化によって強度、構造を推定するように転換することが必要であろう。ただし、データの継続性、気候モニタリングの観点から、ドボラック解析の実施を継続すべきである。

台風の強度・構造を客観解析によって把握できれ

ば、予報の初期値としてシームレスに利用可能となる。客観解析により、多様な台風の構造を反映できるので、予報の改善も期待できる。そもそも、客観解析による予報サイクルは、現代の数値天気予報の根幹である。その中で残る最後の未対応領域が、台風の強度・構造推定と台風予報の初期化である。台風の内部構造を再現するためには、高解像度かつ高頻度（数100m、5分程度）での時空間分布をより正確に把握する必要がある。人工衛星観測、航空機観測、船舶観測、地上観測を統合的に利用する必要がある。台風の客観解析の実現には、克服すべき課題が多い。既存のベストトラックを真値とみなすことができないので、航空機の直接観測による検証が欠かせない。つまり、ドボラック法が確立される過程で行われたような研究を、データ同化について繰り返す必要がある。これは大きな課題であり、多くの研究者と現業機関の協力が必要である。

数値モデルにおいては、雲・降水過程の表現の不確定性が大きい。様々な観測、特にリモートセンシングデータを制約条件として利用することで、台風の雲物理構造を検証・改善・精緻化する必要がある。台風の客観解析を実現するために必要な、モデルバイアス低減のためのパラメータ調整は、モデルの向上にも役立つであろう。

データ同化手法の更なる向上も必要である。特に台風を構成する雲や降水に関するデータ同化は、非線形性に起因する非ガウス分布の誤差や、モデル変数と複雑な関係を持つ観測量、また密なりリモートセンシングデータの観測誤差の空間相関などが重要となり、これらに対応した新たなデータ同化手法が必要となる。また、効果的な確率予報のためのアンサンブル予報には、データ同化によって初期誤差を適切にサンプルした初期アンサンブルを与える必要がある。台風を構成する個々の対流や雲システムから、台風の進路を左右する指向流まで、マルチスケールで最適なデータ同化手法が必要である。

客観解析技術の改善は、数値予測精度の向上だけでなく、長期再解析データの品質向上にも貢献することが考えられる。長期再解析を高解像度データ同化システムで実施することにより、台風の構造や強度の長期変化傾向を確認でき、高解像度大気海洋結合データ同化システムを用いることで、台風と、大気と海洋の双方の密接な関係についてもより正確に把握することができる。これにより地球温暖化が台風活動に与える影

響等、台風の気候学的な特性を正確に定量化でき、理解がより深まることが期待される。

4.6 防災

これまで述べてきた台風予測の高精度化は、人々の生命・財産に対する被害軽減に貢献することが目的であることを忘れてはならない。気象現象を予測するだけにとどまらず、被害軽減を予測の目的とする考え方をインパクトベース予報と呼び、世界気象機関ではこれを推進し (World Meteorological Organization 2015)、気象庁でも“危険度分布” (太田・牧原 2019) として洪水、浸水、土砂災害に対するリスク情報を提供している。インパクトベース予報の実現には、気象現象と災害被害との間に河川や山・崖、ダム、自治体、住民など様々なプロセスがあることを理解する必要がある。“危険度”ではこのようなプロセスをある程度は陽に、一部は陰に考慮している。具体的には、降水短時間予報に対して水文モデルを結合し、これらの災害をリアルタイムで予測計算している。さらに計算結果に基づくリスクの基準については、過去の災害履歴をもとに自治体と協議を行って毎年、更新される。前者の水文モデルによって物理的な災害発生プロセスが考慮され、後者の基準値更新によりハード・ソフト面での防災対策の進展が反映されている。将来的に望まれる impact-based forecast システムとは、水文・土木学の知見を取り込んだ気象災害を直接予測していくシステムであり、さらに心理学、社会科学、自治体等との協同による効果的な減災を実現するシステムである。特に後者について陽に (動的に) 考慮するシステムは開発・利用が緒についたところであり、発展が望まれる。今後、ハード的な防災対策は増々難しくなると考えられるので、我々気象学者が関連する学術分野やステークホルダーと協力してソフト的に防災技術を進展させていく必要がある。

5. 横浜国立大学台風科学技術研究センターについて

今後の台風予測研究の議論と並行し、今後の台風予測研究の重要性を鑑み、横浜国立大学先端科学高等研究院に「台風科学技術研究センター」が2021年10月に設立された^[註9]。本センターでは、台風の科学研究・応用研究を推進するため台風研究者を全国から招聘し、オールジャパンの研究体制を組む予定である。特に、これまでムーンショット型研究開発事業ミレニア・プログラムにおける筆保弘徳チームリーダー課

題^[註3]のもとで検討が進められてきた研究を引き継ぐ形で、台風観測研究、台風予測研究、台風応用研究 (台風による発電開発等)、社会実装課題検討を推進することとなっている。また、将来の台風の制御技術の検討についても本センターにおいて進める予定である。

6. まとめ

本稿では、2050年までを展望し、台風予測研究の課題・今後予想される研究の展望をまとめた。今後の地球温暖化の進行とともに激甚化が予想される台風の襲来に備えて、多くの研究課題が列挙された。限られた人材、研究資源、資金を有効に利用すべく、大学・研究機関・現業機関が連携し、研究課題を共有することで、予測精度向上の取り組みを進める必要がある。横浜国立大学に新設された台風科学技術研究センターは、このような取り組みを推進するためのプラットフォームとなり得る。台風被害軽減のためには高精度な予測の向上に加えて、防災的な観点からの対策・避難等社会的取り組みも並行して進める必要がある。また、研究や防災に関わる次世代の人材の育成が急務である。

防災という観点からは気象学によるデータ同化・シミュレーション技術の進展だけでは不十分であり、水災害を扱う水文学との連携、さらに予測情報を減災行動に結びつける社会科学・心理学との連携が必要である。

台風予測研究の推進のためオールジャパンで研究を推進する連携を進め、諸課題を克服する必要がある。

略語一覧

ALOS-4: Advanced Land Observing Satellite-4 陸域観測技術衛星 4

AMSR3: Advanced Microwave Scanning Radiometer 3 高性能マイクロ波放射計 3

AOS: Atmosphere Observing System 大気観測システム

ACCP: Aerosol and Cloud, Convection and Precipitation エアロゾル・雲・対流・降水観測システム

AI: Artificial Intelligence 人工知能

CPU: central processing unit 中央処理装置

DSL: Domain-Specific Language ドメイン特化言語

EarthCARE: Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer 雲エアロゾル放射ミッション

ECMWF: the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 欧州中期予報センター

ENSO: El Niño-Southern Oscillation エルニーニョー南

方振動

GeoXO: Geostationary Extended Observations (米国の)
次期静止気象衛星

GCOM-W: Global Change Observation Mission-Water
水循環変動観測衛星

GCOM-C: Global Change Observation Mission-Climate
気候変動観測衛星

GOSAT-GW: Global Observing Satellite for Greenhouse
gases and Water cycle 温室効果ガス・水循環観測技術
衛星

GPU: Graphics Processing Unit 画像処理装置

GPM: Global Precipitation Measurement 全球降水観測

JST: The Japan Science and Technology Agency 国立
研究開発法人 科学技術振興機構

LES: Large Eddy Simulation ラージエディシミュレ
ーション

MetOp-SG: Meteorological Operational-Second Genera
tion (欧州の) 第2世代現業気象衛星

MTG: Meteosat Third Generation (欧州の) 第3世代(静
止) 気象衛星

TD: tropical depression 熱帯低気圧性

SAR: synthetic aperture radar 合成開口レーダ

後 注

[注1] 気象庁「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/tecdev/nwp_strategic_plan_towards_2030.html (2021.12.25閲覧)

台風防災についての記述:「台風の接近に伴う大雨などの予測精度を向上し、伊勢湾台風やカスリーン台風に匹敵する台風などがもたらす災害に対して、広域避難に関する数日前からの防災行動を確実に実行することを可能にする。短期的には、顕著な災害の発生する可能性がある場合に、流域雨量や高潮に関する詳細な予測情報を新たに作成する。また長期的には、台風の3日先の進路予測誤差を現在の1日先の誤差(約100km)程度にまで改善する。また、梅雨前線の停滞などに伴う3日先までの雨量予測精度を大幅に改善することを目指す。」

[注2] 2020年度「富岳」成果創出加速プログラム「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」(佐藤正樹課題責任者) 成果発表会の資料が一部公開されている。

<https://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/fugaku/> (2021.12.25閲覧)

[注3] 科学技術振興機構(JST)ムーンショット型研究開発事業では「新たな目標検討のためのビジョン策定(ミレニア・プログラム)」として、「2050年までに、台風の「脅威」を「恵み」に変換し資源活用することで安心かつ安定した持続可能な社会を実現」(筆保弘徳チームリーダー)、「2050年までに、気象を制御し、豪雨や台風など

の気象災害の恐怖から解放された社会を実現」(三好建正チームリーダー)の課題が採択された。

<https://www.jst.go.jp/moonshot/program/millennia/index.html> (2021.12.25閲覧)

両課題提案を基に、総合科学技術・イノベーション会議において、新たなムーンショット目標8として「2050年までに、激甚化しつつある台風や豪雨を制御し極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会を実現」が決定した(2021年9月28日)。

<https://www8.cao.go.jp/cstp/siryu/haihui057/haihu057.html> (2021.12.25閲覧)

[注4] 気象庁数値予報モデル開発懇談会。以下サイトから、過去の議事資料が入手できる。

https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/suuchi_model_kondankai/suuchi_model_kondankai.html (2021.12.25閲覧)

[注5] 「今後の台風予測研究に関する研究会」概要

開催日時:2021年4月15日(木)13:00-17:00オンライン開催

趣旨・目標:2050年までの台風予測研究の展望について議論する。2030年までの現業センターでの台風予測計画、「富岳」成果創出加速プログラム」課題における取り組みを踏まえ、2050年までの台風予測の展望を議論する。台風予測向上のための基礎研究・基礎研究の網羅的な議論、必要な観測についての展望、富岳・ポスト富岳を踏まえた必要な計算資源についての見通し等の多角的な観点から、2050年頃における台風予測のあるべき姿を議論する。

発表:

佐藤正樹(東京大学):はじめに「富岳」成果創出加速プログラム課題での狙い

佐藤芳昭(気象庁):2030年までの台風予測関連の数値予報技術開発重点計画

八代 尚(国立環境研究所):気象シミュレーションモデル開発と計算機に関する近年の動向

伊藤耕介(琉球大学):台風予報のボトルネック

筆保弘徳(横浜国立大学):タイフーンショット計画〜2050年までに台風の「脅威」を「恵み」に!〜

三好建正(理化学研究所):台風のためのデータ同化研究と制御可能性への展望

川畑拓矢(気象研究所):2050年における台風防災に向けて坪木和久(名古屋大学):台風の人工制御に向けた検討:航空機観測

堀之内 武(北海道大学):台風の強度・構造推定の将来について

岡本幸三(気象研究所)[嶋田宇大代理発表]:衛星観測を用いた台風予測研究

山口宗彦(気象研究所):台風インパクトベース予報に向けて

中野満寿男 (海洋研究開発機構): 台風季節予測実現に向けて あるいは「あなたの季節予報」実現に向けて
和田章義 (気象研究所): 2050年までの台風予測研究の展望 大気海洋相互作用

金田幸恵 (名古屋大学): 大気海洋相互作用と台風予測研究
辻野智紀 (北海道大学): 台風内部コア力学—多重壁雲に関する課題—

[注 6] 2030年代に運用されている米国や欧州の静止気象衛星や、欧州の現業的な低軌道気象衛星の計画について以下に記載されている。

<https://www.nesdis.noaa.gov/next-generation-satellites/geostationary-extended-observations-geo-x> (2021.12.25閲覧)

<https://www.eumetsat.int/our-satellites/meteosat-series?sjid=future> (2021.12.25閲覧)

<https://www.eumetsat.int/our-satellites/metop-series?sjid=future> (2021.12.25閲覧)

[注 7] 科学研究費学術変革領域研究 (B) 「DNA 気候学への挑戦」

<https://dna-climate.org/> (2021.12.25閲覧)

[注 8] 世界気候研究計画 灯台活動

<https://www.wcrp-climate.org/lha-overview> (2021.12.25閲覧)

[注 9] 横浜国立大学台風科学技術研究センター

<https://trc.ynu.ac.jp/> (2021.12.25閲覧)

参 考 文 献

- Hoegh-Guldberg, *et al.*, 2018: Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty (V. Masson-Delmotte, *et al.* eds.), in press.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Chapter3_Low_Res.pdf (2022.5.2閲覧)
- Ito, J., T. Oizumi and H. Niino, 2017: Near-surface coherent structures explored by large eddy simulation of entire tropical cyclones. *Sci. Rep.* **7**, 3798, doi:10.1038/s41598-017-03848-w.
- Ito, K., H. Yamada, M. Yamaguchi, T. Nakazawa, N. Nagahama, K. Shimizu, T. Ohigashi, T. Shinoda and K. Tsuboki, 2018: Analysis and forecast using dropsonde data from the inner-core region of tropical cyclone Lan (2017) obtained during the first aircraft missions of T-PARCII. *SOLA*, **14**, 105-110, doi:10.2151/sola.2018-018.
- Knutson, T., *et al.*, 2020: Tropical cyclones and climate change assessment Part II: Projected response to anthropogenic warming. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **101**, E303-E322, doi:10.1175/BAMS-D-18-0194.1.
- Kubota, H., *et al.*, 2021: Tropical cyclones over the western north Pacific since the mid-nineteenth century. *Clim. Change*, **164**, 29, doi:10.1007/s10584-021-02984-7.
- 太田琢磨, 牧原康隆, 2019: 浸水害及び洪水害の軽減に向けた技術開発と危険度分布情報の社会への提供. *天気*, **66**, 3-22.
- Seneviratne, S. I., *et al.*, 2021: Weather and climate extreme events in a changing climate. IPCC AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis (V. Masson-Delmotte, *et al.* eds.).
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (2022.5.2閲覧)
- Takaya, Y., Y. Kosaka, M. Watanabe and S. Maeda, 2021: Skilful predictions of the Asian summer monsoon one year ahead. *Nature Commun.*, **12**, 2094, doi:10.1038/s41467-021-22299-6.
- Tsuboki, K., M. K. Yoshioka, T. Shinoda, M. Kato, S. Kanada and A. Kitoh, 2015: Future increase of super-typhoon intensity associated with climate change. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 646-652, doi:10.1002/2014GL061793.
- World Meteorological Organization, 2015: WMO Guidelines on Multi-hazard Impact-based Forecast and Warning Services.
https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=17257#.YVOoYJrP0tE (2022.5.2閲覧)
- Yamada, H., K. Ito, K. Tsuboki, T. Shinoda, T. Ohigashi, M. Yamaguchi, T. Nakazawa, N. Nagahama and K. Shimizu, 2021: The double warm-core structure of Typhoon Lan (2017) as observed through the first Japanese eyewall-penetrating aircraft reconnaissance. *J. Meteor. Soc. Japan*, **99**, doi:10.2151/jmsj.2021-063.
- Yamaguchi, M. and S. Maeda, 2020: Increase in the number of tropical cyclones approaching Tokyo since 1980. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **98**, 775-786, doi:10.2151/jmsj.2020-039.
- Yoshida, K., M. Sugi, R. Mizuta, H. Murakami and M. Ishii, 2017: Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large-ensemble simulations. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 9910-9917, doi:10.1002/2017GL075058.