

第51回メソ気象研究会, 台風研究連絡会,  
第6回観測システム・予測可能性研究連絡会,  
第12回気象庁数値モデル研究会の報告

コンビーナー: 加藤輝之\*1・伊藤耕介\*2・本田有機\*3

### 1. はじめに

国土交通省の交通政策審議会気象分科会において、「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方～災害が激甚化する国土、変革する社会において国民とともに前進する気象業務～」が2018年8月に提言としてとりまとめられた。その中で、根幹である観測・予測技術の更なる高度化・精度向上（技術開発）が重点的に取り組むべき分野とされ、「半日前からの早め早めの防災対応等に直結する予測精度の向上」及び「数日前からの大規模災害に備えた広域避難に資する台風・集中豪雨などの予測精度向上」が具体的な目標として取り上げられた。その精度向上に必須である線状降水帯及び台風の予報精度向上に向けて取り組むべき課題を明確にし、研究機関との連携等による数値予報技術向上を推進する取り組みが求められている。

このような趣旨のもと、気象学会の研究連絡会であるメソ気象研究会、台風研究連絡会及び観測システム・予測可能性研究連絡会と、気象庁数値モデル研究会との共催で「線状降水帯・台風予報の精度向上に向けて取り組むべき課題」をテーマとして取り上げることにした。研究会は2019年度春季大会前日の2019年5月14日（火）に気象庁講堂で開催され、200名を超える多くの方々に参加して頂いた。

### 2. 線状降水帯と集中豪雨について

加藤輝之（気象大学校）

毎年、日本各地で集中豪雨が発生し、その降水域を見ると、線状になっているものが多い。この線状に見える降水域が線状降水帯である。気象庁用語集では、集中豪雨は「同じような場所で数時間にわたり強く降り、100mmから数百mmの雨量をもたらす雨」、線状降水帯は「次々と発生する発達した雨雲（積乱雲）が列をなした、組織化した積乱雲群によって、数時間にわたってほぼ同じ場所を通過または停滞することで作り出される、線状にのびる長さ50～300km程度、幅20～50km程度の強い降水をともなう雨域」と記載されているが、ともに厳密に量的な定義はなされていない。これは集中豪雨やそれを引き起こす線状降水帯が災害に直結し、その災害に至るまでの降水量や雨域に地域差等があるからである。

集中豪雨を例えば24時間降水量（年平均降水量の12%以上）および3時間降水量（130mm以上）で定義し、台風事例を除くと、その約3分の2が線状降水帯事例であり、九州や梅雨期ではほとんどが当てはまることが統計的に調べられている（津口・加藤2014）。また線状降水帯の走向の主方向は地域によって異なり、地形による影響が大きいことが示唆されている。線状降水帯の形成過程は局地前線に暖湿流が流入することで、個々の積乱雲（降水セル）が同時期に発生する破線型か、降水セルからみて環境の風の上流方向に新しいセルが次々と出現し、それが成長するとともに移動して線状になるバックビルディング型のほぼどちらかである。バックビルディング型の線状降水帯には、積乱雲をベースとして、積乱雲が積乱雲群（マルチセル）を形成し、積乱雲群が線状降水帯を形

\*1 (連絡責任者) Teruyuki KATO, 気象大学校.  
teruyuki\_kato@met.kishou.go.jp.

\*2 Kousuke ITO, 琉球大学.

\*3 Yuki HONDA, 気象庁数値予報課.

© 2019 日本気象学会

成するという階層構造がよくみられる。

2014年8月広島での大雨のように、水平分解能2 km以下の数値予報モデルでは線状降水帯が予測できる事例もあるが、その事例でも初期値時刻依存性が大きく、このことは今後の数値予報モデルの改善に加えて、正確な初期値の作成が必要であることを示唆している。その一方、線状降水帯が発生しやすい大気状態の諸条件は統計的に調べられており、それらを用いた診断的予測手法(第1表)が2016年から気象庁の予報現業で活用されている(加藤 2015, 2016)。諸条件として、①下層水蒸気流入量FLWVが多いこと、②積乱雲が発生しやすい条件となるLFCまで持ち上げる距離dLFCが小さいこと、③積乱雲の発達を抑制しないためにも大気中層が湿っていること、④積乱雲の組織化に必要な鉛直シアが大きいことを想定し、過去の線状降水帯による大雨事例からそれらの閾値を設定した。また⑤総観場の上昇流域であることを条件に加え、⑥700~850hPaに暖気流入に伴う対流抑制が生じる事例を除去するために平衡高度ELに閾値を設けた。①と②、⑥は大雨時での積乱雲発生に適した500m高度(Kato 2018)で判断し、④には暖気移流場で上空に向かって時計回りに風向が変わることで、積乱雲の進行方向右側から水蒸気が継続的に供給されることも表現できるSREHを採用した。

線状降水帯発生6条件について、2009~2017年暖候期(4月~11月)を対象とし、気象庁メソ解析を用いた統計検証(廣川ほか 2018)によると、高率(特に九州周辺)で線状降水帯を的中させていた一方、空振り率が高かった。このことは、線状降水帯の診断的予測にはさらなる条件(下層相当温位の値や下層収束など)が必要であることを示している。

### 3. 第2期SIP課題「国家レジリエンスの強化」 にむけた線状降水帯に関する包括的観測実験および予測手法開発プロジェクトの紹介

清水慎吾(防災科学技術研究所)

本研究は内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)課題「国家レジリエンスの強化(防災・減災)」の中の1つの研究テーマである、線状降水帯の観測・予測システムの高度化を目指すものである。線状降水帯は数時間程度と短寿命でありながらも記録的な大雨をもたらすため、線状降水帯に伴う甚大な水害からの避難が難しいという問題がある。従って、線状降水帯の早期発生の予測精度向上と正しい現況把握

は避難行動等の対応において喫緊の課題となっている。

本研究は大きく4つの研究課題に分けることができる。(1)線状降水帯の半日程度前の早期発生予測情報(線状降水帯インデックス)の高度化と利活用検討、(2)予測精度向上の鍵となる水蒸気マルチセンシング観測技術の開発、(3)線状降水帯毎の雨量の現況把握と数時間先までの発達予測技術の開発、(4)地域毎の雨量と災害を結びつけるデータベース構築によるリアルタイム被害推定の技術開発をそれぞれ実施し、一体型システムに組み上げることで、水害発生予測時刻に応じた避難指示タイミングの最適化と、リアルタイム被害規模推定に基づく自治体の意思決定支援を可能とする技術開発を行う(第1図)。

線状降水帯の予測精度を向上させるために、最新の水蒸気観測測器を線状降水帯が多発する九州地方に今年度から整備し、データ同化をリアルタイムで実施する。第1図に示すように、洋上の水蒸気観測を可能とする航空機観測(名大)、地表付近の水蒸気の水平分布を観測できる地上デジタル放送波観測(NICT)、水蒸気の鉛直積算量を長時間分解能で取得できるマイクロ波放射計観測(NIED)、さらに水蒸気の高度分布を長時間分解能で取得できる水蒸気ライダー観測(福岡大)を行う。最終的には、それぞれの観測精度と運用コストを調査し、社会実装可能なものを絞り込む。

警報や注意報の対象範囲は線状降水帯のスケールに比べると広いことがある。効率的な避難のために、実際の避難指示に対して意味のある地域区分毎に予測雨量と同時に判断基準も提供する。この判断基準をリアルタイムで提供する「線状降水帯データベース」をNIEDが構築する。具体的には「予測雨量が数十年に一度の大雨に相当しているか」、「そのような雨量が起こった場合に深刻な災害が過去に一度でも発生したかどうか」等の「雨量の稀さ」や「推定される被害規

第1表 線状降水帯発生6条件

①水蒸気供給	FLWV (500m 高度) > 150g m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
②対流発生	dLFC (500m 高度) < 1000m
③中層の湿度	湿度 (500hPa&700hPa) > 60%
④鉛直シア	SREH > 100m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
⑤上昇流域	鉛直流 (700hPa, 400km 四方平均) > 0m s <sup>-1</sup>
⑥対流発達	EL (500m 高度) > 3000m

模」に関する情報を提供する。これらの情報を一元的に地図上に統合させ、自治体に情報提供を行う社会実験を2019年から4年間実施する。自治体のニーズを踏まえつつ、現在自治体で運用されている避難勧告・避難指示の発表までのタイムラインに、新しい情報をどのように加えていけばよいかを自治体と関係省庁と連携しながら検討を進め、新しい線状降水帯対策の在り方を提案することを最終的な目標としている。

#### 4. 線状降水帯予測における数値予報の課題

氏家将志 (気象庁数値予報課)

本講演では、線状降水帯の予測における数値予報の課題や今後の開発の方向性について、気象庁の領域モデル (メソモデル, 局地モデル) の例を中心に紹介した。

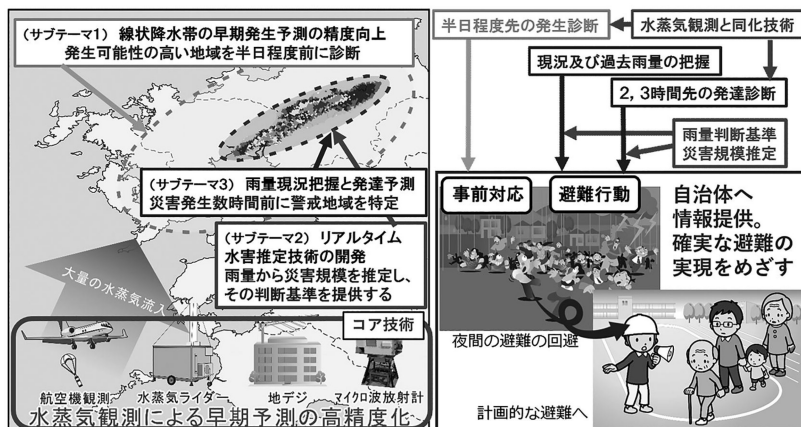
気象庁の「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」で示された4つの重点目標のひとつである「豪雨防災」では、明るいうちからの避難を可能にするための線状降水帯等集中豪雨の予測精度向上が必要であるとし、開発の方向性として、局地モデルの高解像度化、局地アンサンブルの開発、観測データ利活用の高度化、データ同化手法の高度化などが示された。

気象庁は、防災情報作成を支援するため、水平解像度5kmのメソモデル (MSM), 2kmの局地モデル

(LFM) を運用している。また、MSMの予測の不確実性を捉えるためのメソアンサンブル予報システム (MEPS) の運用を2019年6月に開始した。MSM, LFMの予測精度は年々着実に向上しているが、線状降水帯のスケール (メソβスケール) はこれらのモデルが陽に表現することができる最小の現象に近く、その予測は難しい。線状降水帯の予測には、環境場や対流の表現、初期値の把握、位置や持続の不確実性等、多くの要素が関わっており、それぞれについて多くの課題がある。

線状降水帯に関わる対流の表現について、MSM, LFMそれぞれに課題がある。MSMでは対流セルの風下への移動に伴う線状の降水の表現が困難である。また、LFMでは線状の降水がある程度表現されるものの、その発生位置の絞り込みや持続の予測が難しいという課題がある。これら対流の表現はモデルの解像度に加え、対流パラメタリゼーションの扱いにも大きく影響される。対流の表現の向上のためには、高解像度化に加え、対流パラメタリゼーションと力学過程の役割分担の考え直しが必要であり、海外ではそのような研究開発 (Kuehl *et al.* 2007; Malardel and Bechtold 2019など) が始まっている。線状降水帯をもたらす環境場については、下層水蒸気の流入や風の鉛直シア等、多くの先行研究 (瀬古 2010; Unuma and

2018	2019	2020	2021	2022
自治体選定・ニーズ調査	自治体社会実験・精度検証			早期発生予測
ライダー作成着手	首都圏観測開始	九州観測開始		水蒸気観測
表示システム開発	首都圏予測開始	九州予測開始	現況把握・発達予測	
DBプロトタイプ開発	災害データ整備	災害情報提供開始		災害規模推定



第1図 第2期SIP課題での本研究の概要とスケジュール

Takemi 2016など)でその特徴が示されている。環境場の予測精度向上には、モデルの持つ系統誤差の問題を解決しなければならない。MSMの予測には、下層の水蒸気や循環場に系統誤差があり、これらの誤差の縮小には物理過程の総合的な改良が必要である。また、モデルの系統誤差減少はデータ同化手法の高度化や観測データ利用拡充の観点でも重要である。線状降水帯の位置や持続の不確実性を表現するアンサンブル摂動のあり方については、未解明の部分が多く、今後知見の蓄積が必要である。

線状降水帯等の集中豪雨を対象とした高解像度モデルにおける対流の扱いの問題やアンサンブル摂動のあり方等、先進的な研究開発が必要な分野について、関係機関と協力して開発を推進していきたい。

### 5. 台風進路予測に残された課題

榎本 剛 (京都大学防災研究所)

近年気象庁の台風進路予報誤差は着実に小さくなっており、1日予報で100kmを切る水準にあるが、2030年に3日予報の予報誤差をこの水準にすることは容易ではない。

誤差の大きな事例(大外し事例)が時々存在するため、誤差の平均値は中央値より大きくなっている(Yamaguchi *et al.* 2017)。つまり、大外し事例を少なくできれば、誤差の平均値を小さくすることが可能である。予測可能性が低く高精度のモデル・解析値をもってしても、予測が困難な事例も中には存在するが、他のセンターの誤差は小さい事例もあり、改善の余地は皆無とは言えない。

台風を最も単純化すれば、中心付近に渦度が一様に存在するランキン渦と見なすことができる。ランキン渦の渦度は一定値と0との境目が不連続である。高々100km以下の不連続を伴う渦をシミュレートするためには、高解像度が必要であるのはもちろんであるが、単調性を維持し、偽の混合を生じないような高精度の数値スキームを用いるべきである。

予報誤差の要因となる初期値とモデルとの切り分けを行うには、複数の初期値とモデルを用い、相互交換する「たすき掛け」実験が有効である。Yamaguchi *et al.* (2012)では気象庁のモデルに欧州中期予報センター(ECMWF)の初期値を与える実験を行なっている。2009年台風第20号(Lupit)については、気象庁初期値をECMWF初期値に交換することにより転向が再現された。宮地(2014)は米国環境予測セン

ター(NCEP)のモデルを用いてLupitが初期値依存性が高い事例であったことを確認している。Yamaguchi *et al.* (2012)で初期値依存性が小さいとされた同年台風第17号(Parma)に対しては、NCEPのモデルを用いることで気象庁初期値でも3日予報の誤差が大幅に減少したが、ECMWFやNCEPの初期値を用いたときよりも誤差が大きかったため、モデルにも初期値にも依存する事例であったと結論づけることができた。

2013年台風第3号(Yagi)に対しては、上述の現業モデルに加えて、モデルとしてAFESやNICAM、解析値としてALERA2を用いた実験を行なった(榎本ほか2017)。この事例では、進路は初期値に依存し、強度はモデルにも依存していることが分かった。初期値依存かモデル依存かは事例により異なるが、解析値は観測とモデルを用いて作成されることから、観測の充実、同化アルゴリズムとモデルの改善が重要である。この事例に対して現業の解像度のECMWFのモデルで実験を行なったが、大気単体では現業の予想進路とは一致しなかった。しかし、現業に用いられている波浪結合を有効にすると現業の予想進路にはほぼ一致した。台風の発生発達における海洋の役割の重要性を考えれば、気象庁でも波浪モデルや海洋モデルとの結合を検討する段階にあると考える。

台風の非対称構造や境界層、メソスケール構造については、力及ばず言及できなかったが、台風に対する理解の進展は進路、強度、発生予報の改善につながるものと信じている。予報精度改善のため、気象庁・気象研と協力しながら、研究を進めていきたい。

### 6. 台風強度予報の改善に向けて取り組むべき研究課題

嶋田宇大 (気象研究所)

台風の強度予報は、2000年以降でみると、数年前までは気象庁及びJTWCともに1~3日先予報の誤差に明瞭な減少傾向が見られなかった(Yamaguchi *et al.* 2018; Langlade 2018)。一方ここ数年は両機関とも2、3日先予報の誤差が減少傾向にある。これは強度予報向けの資料が充実したためと考えられる。しかし1日先予報は改善しておらず、大きな課題である。

強度予測の手法は数値予報モデルと統計モデルの二つに分類される。数値予報モデルによる予測には、熱帯低気圧に特化した、水平解像度数km以下の領域モデルが用いられる。米国が運用するHWRFの予測結

果は、リアルタイムで公開され (HWRF 2019), 予測精度が最も高い水準にあるため (Cangialosi 2018), 世界の現業機関で広く利用されている (Langlade 2018)。また、数値予報モデルの限界を補強した手法である、重線形回帰やロジスティック回帰等の統計モデルも現業機関で使用されている (Sampson and Knaff 2014)。中でも SHIPS と呼ばれる重線形回帰モデルは、全球数値予報モデルで予測する台風環境場の情報を用いて強度を予測する手法で (嶋田・大和田 2019), 精度の良さと予測の安定性 (異なる初期値の数値予報を利用しても SHIPS の予測値が大きく変わらない), 解釈の容易さから、気象庁の強度予報の基礎資料として利用されている (別所 2018)。

最新の知見を利用した SHIPS の改善も行われてきた。一つは台風内部構造に関する説明変数を SHIPS に追加する改良で (Shimada *et al.* 2018), もう一つは発達・定常・衰弱に対応した 3 つの重線形回帰式とランダムフォレストを用いた手法の開発である (嶋田 2018)。その結果、改良版の SHIPS は HWRF に匹敵する予測精度を達成できた。

一方、現状の強度予報は急発達予測が不得手である。気象庁の発表予報でも HWRF でも急発達事例の予測誤差が非常に大きい (第 2 図)。この問題は国際会合の場でも研究者が取り組むべき課題として勧告が出されている (IWTC 2018)。では急発達予測は可能なのか。嶋田 (2019) は急発達事例のクラスター解析を行い、急発達環境場の条件が複数通りに分類されることを示した。このような特徴を適切に捉えた予測モ

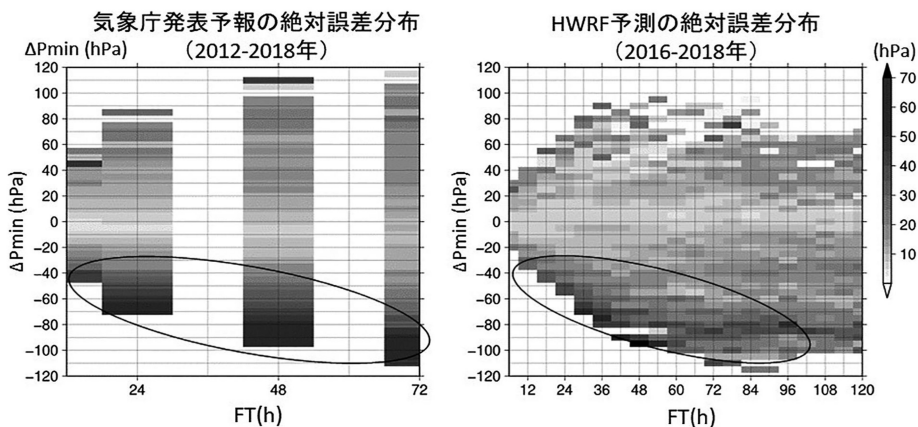
デルを構築できれば急発達予測が改善可能ではないかと考える。

強度予報の改善には強度推定の改善も必須である。強度推定誤差とその後の予測誤差の相関係数は 1 日先予報で約 0.4 もある。これは強度推定の精度が向上すれば 1 日先予報の精度も改善できることを示唆する。強度推定の改善策として二つ提案したい。一つはドボラック法において雲パターンに基づく強度と実際の推定値に 12 時間のラグを衰弱期に設けるルールの再考である。T-PARCI の航空機観測 (Ito *et al.* 2018; 坪木ほか 2019) とドボラック推定を比較した結果、鉛直シアによる上層暖気核の衰弱を考慮したラグのルールに修正すべきであることが示唆された。もう一つは台風に特化した雲追跡風を開発し、より物理的な雲追跡風に基づく強度推定法を確立する方策である (塚田・堀之内 2019)。

将来的には強度予報は暴風の面的分布予報へと発展させる必要がある。暴風災害の軽減と社会インフラの最適な管理に暴風の面的予報は不可欠と考える。さらに長期的には、強度推定 (強度解析) と強度予測を物理に基づく一つのシステムで行う「台風解析予報サイクル」を実現したい。より正確な台風の実況把握と、急発達予測等において大外ししない台風予報が目指す方向であると考ええる。

## 7. 台風進路予報における数値予報の課題

米原 仁 (気象庁数値予報課)  
本発表では、台風進路予報における数値予報の課題



第 2 図 予測時間 (x 軸) と実際の強度変化量 (予測初期時刻から各予測時間までの中心気圧変化量, y 軸) に対する絶対誤差分布。(a) 気象庁の発表予報。(b) HWRF。誤差は気象庁ベストトラックに基づく。丸で囲んだ領域が急発達事例を示す。

について, 気象庁の全球モデルを中心に近年の状況及び今後の開発の方向性と課題を報告した。

気象庁は, 交通政策審議会気象分科会の提言(2018年8月)を受け, 開発戦略として「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画(以下, 重点計画)」を策定した。重点計画では, 台風予測の目標達成に向けて, 全球モデル(GSM)とメソモデル(MSM)の役割分担を明確化して開発を進める方針が示された。具体的には, GSMで3日先の台風進路予測の精度を大幅に向上させ, それを境界値とするMSMを用いて台風の構造(地上気圧, 雨, 風)を精緻に表現させることである。

台風は, 大気と陸面, 波浪, 海洋など多くの系とそれらの相互作用を含み, また力学と熱力学, 放射, 相転移など様々な物理が関連する総合的な現象であり, 進路予測の性能には予報モデルとデータ同化システムの総合力が問われる。進路予測の精度改善には, 指向流の精度を地道に改善するとともに, 台風構造の予測精度にも分解能の限界を見極めつつ取り組む必要がある。近年, GSMについては, 鉛直層数を増強するなどの仕様向上や, 力学過程及び物理過程の改良, ひまわり8号観測データの利用開始, 台風ボーガスの改良等を行い, 台風進路予測の精度を改善してきた。他方, 海外数値予報センターでも数値予報システムの改良を進めており, 国際的な競争は激しい。気象庁が実施している進路誤差の国際比較では, GSMは世界トップクラスの精度を維持しているものの, 最近はトップにはやや水をあけられており, 特に転向後の進行速度の過少傾向が課題になっている。

気象庁では, 引き続きGSMの開発を精力的に進めており, 雲・降水域を含む衛星観測マイクロ波輝度温度データの同化及びアウトルーブの導入や, 4次元変分法で使用する背景誤差にアンサンブルカルマンフィルタからの情報も用いるハイブリッド同化の導入, モデルの高解像度化や物理過程の改良を行う計画である。これら気象庁の開発において, 研究コミュニティにおける先進的な研究は大変参考になっている。

今後, 台風進路予測を更に改善していくためには, 予報モデルの各過程の高度化や高解像度化に加え, 評価・検証手法, 観測データ利用, 台風のデータ同化, アンサンブル予測, 大気・波浪・海洋間の相互作用などにわたって存在する多くの課題に取り組んでいく必要がある。その中でも特に, 積雲対流をはじめ, 大気のパラメタリゼーション改良がKey Issuesであり,

現業運用可能な格子間隔で高い予測精度を実現するための研究開発が必須である。これら多くの先進的な課題に取り組み, 台風進路の予測精度を大幅に改善していくためには, 関係各所との連携を一層強化しつつ数値予報に関する研究と開発を進めていくことが不可欠であると考えている。防災・減災に更に資する予測情報の作成に向けて, 皆様のご協力をお願いしたい。

## 8. 総合討論

総合討論では, 気象庁と研究コミュニティとの連携について主に以下のような意見交換が行われた。

- 1～2 km 水平分解能の数値予報モデルでの対流パラメタリゼーションの必要性について議論し, 研究開発を連携して進めるべき。
- 研究コミュニティでの気象庁のデータ同化システムの利用については両者が一体となり連携して進めた方が良い。
- 気象庁が数値予報で利用している観測データについては, 部外への提供が出来ないデータを除外する作業に時間がかかるため, 研究コミュニティには1か月くらい遅れて提供されている。
- 研究コミュニティへ提供されているGSMを低解像度で利用したいという要望に対して, GSMはどのような解像度でも動作するが, 初期値等の解像度変換などが必要である。なお, 力学過程単体の実験は, 気象庁で利用している観測データがなくても実施できるようになっているとの説明がなされた。
- 気象庁から既に数多くのデータが提供されており, 大学での学生の研究で利用されているが, 修士課程の学生の場合, 就職してしまうと学会発表や論文投稿をせずに終わってしまうこともあり, 研究コミュニティとして, そのような埋もれてしまう研究成果を積極的に気象庁へ還元していく必要がある。

この他, GSMの積雲スキームに荒川-スーパーボトムスキームを使い続けるのかという質問があり, 気象庁側は, 積雲スキームを丸ごと別のスキームに取り換える予定はなく, アンサンブル型の積雲スキームを維持すると回答した。

SIP関連の取組を進めるにあたり, 予算確保のためにはニーズ把握が不可欠であり, 「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」で2030年の目標やそれに向けたロードマップの具体的な設定に対して防災科研の清水氏より謝意が示された。それを受け気象庁の小泉耕参事官から, 今後に向けては随時進捗に応じて見直

していく必要はあり, おそらく5年程度を目途に振り返り, ニーズも含め研究コミュニティに還元していきたいという意向が示された。

最後に気象庁の室井ちあし数値予報課長から, 今はソースコードのバージョン管理や開発管理をきちんと行う体制など, 研究コミュニティと連携ができる環境が少しずつ整ってきているので, ぜひ協力を前向きに検討していただき, 気象庁側からもできる協力は最大限行うつもりであるという発言があり, 討論が締めくくられた。

## 謝 辞

今回の研究会を開催するに当たって, 会場の準備・運営をしていただいた気象庁企画課・数値予報課ならびに気象学会員の有志のみなさまに感謝します。

## 略語一覧

AFES : Atmospheric General Circulation Model for Earth Simulator 地球シミュレータ用大気大循環モデル  
 ALERA2 : AFES-LETKF 実験的アンサンブル大気再解析  
 ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 欧州中期予報センター  
 EL : Equivalent Level 平衡高度  
 FLWV : FLux amount of Water Vapor 水蒸気フラックス量  
 GSM : Global Spectrum Model 気象庁全球モデル  
 LETKF : Local Ensemble Transform Kalman Filter 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ  
 HWRF : Hurricane Weather Research and Forecasting  
 IWTC : International Workshop on Tropical Cyclones  
 JTWC : Joint Typhoon Warning Center  
 LFC : Level of Free Convection 自由対流高度  
 MSM : MesoScale Model 気象庁メソモデル  
 NCEP : National Centers for Environmental Prediction 米国国立環境予測センター  
 NICAM : Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model 非静力学正20面体格子大気モデル  
 NICT : National Institute of Information and Communications Technology 情報通信研究機構  
 NIED : National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience 防災科学技術研究所  
 SHIPS : Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme  
 SREH : Storm Relative Environmental Helicity ストームに相対的なヘリシティ

T-PARCII : Tropical cyclones-Pacific Asian Research Campaign for Improvement of Intensity estimations/forecasts

## 参 考 文 献

- 別所康太郎, 2018: 台風強度予報ガイダンスの開発. 平成29年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 43-55.
- Cangialosi, J. P., 2018: 2017 hurricane season. National Hurricane Center Forecast Verification Report. [https://www.nhc.noaa.gov/verification/pdfs/Verification\\_2017.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/verification/pdfs/Verification_2017.pdf) (2019.7.8閲覧)
- 榎本 剛, 吉田 聡, 山崎 哲, 中野満寿男, 山根省三, 山口宗彦, 松枝未遠, 2017: 大気大循環モデルを用いた2013年台風第3号 Yagi の進路予報実験. 京都大学防災研究所年報, 60B, 466-469.
- 廣川康隆, 加藤輝之, 津口裕茂, 清野直子, 2018: 線状降水帯発生条件の有効性についての客観的検証. 日本気象学会2018年度秋季大会講演予稿集, A358.
- HWRF, 2019: HWRF Forecast Guidance for Current Active Storms. [https://www.emc.ncep.noaa.gov/gc\\_wmb/vxt/HWRF/](https://www.emc.ncep.noaa.gov/gc_wmb/vxt/HWRF/) (2019.7.8閲覧)
- 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.
- IWTC, 2018: IWTC-9 recommendations. Ninth Int. Workshop on Tropical Cyclones, Hawaii, United States, WMO. <http://www.typhooncommittee.org/51st/docs/item%2014/14.1%20Coordination%20with%20WMO.pdf> (2019.7.8閲覧)
- 加藤輝之, 2015: 線状降水帯発生要因としての鉛直シアと上空の湿度について. 平成26年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 114-132.
- 加藤輝之, 2016: メソ気象の理解から大雨の予測について～線状降水帯発生条件の再考察～. 平成27年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 42-60.
- Kato, T., 2018: Representative height of the low-level water vapor field for examining the initiation of moist convection leading to heavy rainfall in East Asia. J. Meteor. Soc. Japan, 96, 69-83.
- Kuell, V., A. Gassmann and A. Bott, 2007: Towards a new hybrid cumulus parametrization scheme for use in non-hydrostatic weather prediction models. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 133, 479-490.
- Langlade, S., 2018: Intensity change: Operational perspectives. Ninth Int. Workshop on Tropical Cyclones, Hawaii, United States, WMO. <https://www.wmo.int/>

- pages/prog/arep/wrrp/tmr/documents/IWTC-9\_Subtopic\_3-3.pdf (2019.7.8閲覧)
- Malardel, S. and P. Bechtold, 2019: The coupling of deep convection with the resolved flow via the divergence of mass flux in the IFS. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, doi:10.1002/qj.3528.
- 宮地哲朗, 2014: 全球数値予報モデルを用いた台風進路予測誤差についての研究. 平成25年度修士論文, 京都大学理学研究科, 66pp.
- Sampson, C. R. and J. A. Knaff, 2014: Advances in intensity guidance. Eighth Int. Workshop on Tropical Cyclones, Jeju, South Korea, WMO. [https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wrrp/new/documents/Topic2.7\\_AdvancesinIntensityGuidance.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wrrp/new/documents/Topic2.7_AdvancesinIntensityGuidance.pdf) (2019.7.8閲覧)
- 瀬古 弘, 2010: 中緯度のメソ $\beta$ スケール線状降水系の形態と維持機構に関する研究. *気象庁研究時報*, **62**, 1-74.
- 嶋田宇大, 2018: 複数のSHIPSモデルとランダムフォレストを用いた台風強度予測. 日本気象学会2018年度秋季大会講演予稿集, D361.
- 嶋田宇大, 2019: 台風急発達環境条件と多様性. 日本気象学会2019年度春季大会講演予稿集, B462.
- 嶋田宇大, 大和田浩美, 2019: SHIPS. *気象研究所技術報告*, **82**, 4-19.
- Shimada, U., H. Owada, M. Yamaguchi, T. Iriguchi, M. Sawada, K. Aonashi, M. DeMaria and K. D. Musgrave, 2018: Further improvements to the Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme using tropical cyclone rainfall and structural features. *Wea. Forecasting*, **33**, 1587-1603.
- 坪木和久ほか, 2019: 台風の眼の貫通飛行による中心気圧のドロップゾンド観測. 日本気象学会2019年度春季大会講演予稿集, B451.
- 津口裕茂, 加藤輝之, 2014: 集中豪雨事例の客観的な抽出とその特性・特徴に関する統計解析, *天気*, **61**, 455-469.
- 塚田大河, 堀之内 武, 2019: ひまわり8号を用いた台風内部コア領域の風速推定. 日本気象学会2019年度春季大会講演予稿集, C156.
- Unuma, T. and T. Takemi, 2016: Characteristics and environmental conditions of quasi-stationary convective clusters during the warm season in Japan. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142**, 1232-1249.
- 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**, doi: 10.1029/2012GL051473.
- Yamaguchi, M., J. Ishida, H. Sato and M. Nakagawa, 2017: WGNE intercomparison of tropical cyclone forecasts by operational NWP models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 2337-2349.
- Yamaguchi, M., H. Owada, U. Shimada, M. Sawada, T. Iriguchi, K. D. Musgrave and M. DeMaria, 2018: Tropical cyclone intensity prediction in the western North Pacific basin using SHIPS and JMA/GSM. *SOLA*, **14**, 138-143.