

気象災害委員会・第53回メソ気象研究会合同研究会—甚大な災害を もらした2019年台風第15号と第19号の実態に迫る—の報告

コンビナー：宮本佳明*1・柳瀬 亘*2・加藤輝之*3・益子 涉*4

1. はじめに

2019年9月9日に千葉市付近に上陸した台風第15号は、ベストトラックデータとして上陸時の台風の強さの記録が始まった1991年以降において最も強い勢力で関東に上陸した台風となり、関東地方を中心に多くの地点で観測史上1位の最大風速・最大瞬間風速を記録した。これにより、房総半島を中心に7万戸以上の住家被害や大規模停電が発生した。また、台風第19号は10月12日に大型で強い勢力で伊豆半島に上陸し、静岡県や新潟県、関東甲信地方、東北地方を中心に広い範囲で記録的な大雨となり、総雨量は神奈川県箱根町で1000mmに達した。この東日本の広範囲における記録的な大雨により、河川の氾濫が相次いだほか、土砂災害や浸水害が発生し、死者・行方不明者は90名を超えた。

気象庁は、顕著な災害をもたらしたこれらの台風について、後世に経験や教訓を伝承することなどを目的に、台風第15号については「令和元年房総半島台風」、台風第19号については「令和元年東日本台風」と名称を定めた。

今回は、メソ気象研究会と気象災害委員会の合同研究会として、台風第15号に伴う暴風と台風第19号に伴う大雨を取り上げ、台風自体の構造、暴風や大雨の発生要因、洪水予測について最新の知見を講演していただくことにした。なお、本研究会は2020年5月23日に開催を予定していたが、コロナウイルス感染拡大に伴い延期していたもので、2021年度春季大会前日の2021年5月17日(月)にオンラインで開催され、220名以上

の方々に参加していただいた。

2. 台風第15号の発生・発達環境場について

筆保弘徳(横浜国立大学)

気象庁が台風第15号発生と発表したのは9月5日15時(JST)であり、千葉県に上陸する8日21時までのリードタイムはわずか3日間である。台風発生前の熱帯低気圧を検出・判定するEDA(土屋ほか2000)によると、台風第15号はEDA024として、8月29日12時に日付変更線より東の北東太平洋上で初めて検出されている。つまり、EDA開始から台風発生となる6日間の発生期間中で、これは過去の統計研究(Fudeyasu *et al.* 2020)からみても異常に長い。そこで本発表では、台風第15号の発生期の環境場について、台風発生環境場を診断するTGS(Yoshida and Ishikawa 2013)と、TIFS(Yamaguchi *et al.* 2018; 嶋田・大和田 2019)を用いて、台風発生期に注目した。

気象庁版TGSであるJMA-TGSによると、EDA検出時の場所と1-3日前の環境場では、Ritchie and Holland(1999)の統計結果から得られた北西太平洋の5パターンの環境場のなかでも、偏東風波動に伴う擾乱(EWタイプ)だったことが示された。また、環境場の空間的な広がり調べるために、Yoshida and Fudeyasu(2020)が開発した全てのグリットに対して台風が発生したと仮定して解析をするGrid-TGS手法を用いた。その結果、台風第15号の発生をもたらすEWタイプのスコアが高い領域は8月25日の160°Wまでさかのぼることができて、時間とともに西進していることが分かった。

また、TIFSの6時間予報による強度予報の説明変数ごとの結果を調べると、発生期全体で海洋貯熱量の効果は大きいですが、他の寄与によりその発達が抑えられていることが分かった。発生期後半になり、鉛直シア

*1 Yoshiaki MIYAMOTO, 慶応義塾大学.

*2 Wataru YANASE, 気象研究所.

*3 Teruyuki KATO, 気象研究所.

*4 Wataru MASHIKO, 気象研究所.

© 2021 日本気象学会

に関する説明変数が発達に大きく寄与しており、台風発生のトリガーとなっていた。この鉛直シアの変化は、発生期から発生していた上空の寒冷渦の衰弱と関係していた。

このように、発生期の事例ごとの理解や Grid-TGS による北東太平洋までのモニタリングは、リードタイムが延びることにもつながるために、防災上でも重要となる。

3. 台風第15号の強度・構造変化について

宮本佳明（慶應義塾大学）

台風第15号は、統計開始後最も強い強度で関東に上陸し、房総半島を中心に主に強風による被害をもたらした。台風第15号の上陸時の強度はその生涯において最大の値であった。一般的に台風は中緯度に差し掛かると、海面水温が下がったり、鉛直シアが大きくなったりして、回転軸対称的な構造が崩れ、強度も弱くなることが多い。そこで本研究は、台風第15号が中緯度まで強い強度を保てた要因を探ることを目的とする。

気象庁非静力学モデルを用いて数値シミュレーションを行った。ここで、水平格子間隔は1 km、台風の風による海面表層のかき混ぜに基づく海面水温の冷却効果は含めていない。その結果、上陸までの経路・強度、及び、雲の構造は、観測結果と比較しても近いものが計算された。台風の強度に影響を与える環境場のパラメータを調べたところ、沿岸域まで海面水温が高く、中緯度にしては鉛直シア（対流圏の上層と下層の風速差）が小さいことが分かった。さらに、計算された台風の構造も明瞭な目があり、それを取り囲む目の壁雲が存在していた。

つまり台風第15号は、台風が発達しやすい環境場が存在していたため、強い強度まで到達したと考えられる。また、中緯度ながら熱帯の台風のような構造を持っていたことが示唆される。さらに、台風第15号の経路付近の可能到達強度（Maximum Potential Intensity：MPI）を計算すると、上陸前の強度は、数時間の間MPIを超えるsuperintensity状態になっていたことが示唆された。これは、回転風速が傾度風平衡を満たす値よりも速くなっていた際に生じるもので、今回は構造が熱帯の発達した台風のようであったためと考えられる。

今後海面水温が高く鉛直シアがそれほど大きくない環境場が整った場合、台風第15号のような強度で日本に接近・上陸する台風が生じる可能性が十分にあると考

えられる。

4. 台風第15号に伴う暴風・突風の特徴

益子 渉（気象研究所）

房総半島を中心に記録的な暴風と突風性の強風をもたらした台風第15号は、関東上陸時でも収縮した眼や眼の壁雲を伴って軸対称に近い構造をもち、発達した成熟期の構造を有していた。統計的に調べたところ、このような構造を有して東京湾付近を通過する台風は稀で、2001年台風第15号以来であったことが分かった。次に、千葉や木更津で観測された7～10分周期で変動する顕著な突風性の強風について解析した。羽田空港のドップラーレーダーによる速度場から、境界層内において水平スケールが数 km のストリーク構造が明瞭に確認された。気象庁非静力学モデルを用いて気象庁メソ客観解析値を初期値・境界値にした水平解像度250mの数値シミュレーションを行ったところ、台風を中心気圧はベストトラックより約10hPa高かったものの、観測と同じように境界層内のストリーク構造が再現された。そのストリーク構造を解析すると、ロール状構造を有しており、地上付近では下降流域で風速が増大していることが分かった。擾乱場の運動エネルギーの生成項を見ると、動径風の鉛直シアによる項が大きくなっていった。その他、シミュレーション結果を用いて台風に伴う期間内最大風速・風向を求めたところ、木更津付近から千葉にかけて、谷筋に沿う形で南東風系に伴って最大風速が再現されていた。これらのことから、千葉や木更津で観測された顕著に大きな最大瞬間風速は、台風が発達した成熟期の構造に伴うものだけではなく、下層のストリーク構造や地形の影響も受けていたと考えられる。

5. 台風第19号による豪雨発生環境条件：湿度条件の重要性

竹見哲也（京都大学）

台風第19号に伴う豪雨は、近年の最悪規模の水災害を生じさせた平成30年7月豪雨と比べると、降雨の継続時間は短かったものの、時間雨量の強度はかなり強く、結果として東日本の各地で数100mmから1000mm程度の大雨となった。このような大雨が発生したメカニズムを理解するため、まず環境条件の特徴を明らかにすることを目的として研究を進めた。気象場の解析には、MSM解析値を用い、Unuma and Takemi (2016)の研究に基づき、環境条件の指標について調べ

た。さらに、Bryan and Fritsch (2000) が提唱した第6の安定性(湿潤絶対不安定)を示す大気層である MAUL について解析した。

対流圏の気温減率は湿潤断熱減率に近い数値であり、その点では不安定度は高くない。例えば、CAPE で言えば特別大きな数値ではなかった。しかし、対流圏の下層から中上層に至る深い層において、相対湿度がほぼ100%という極めて湿度の高い状況が形成されていた。この高湿度の状態は、台風と北側に位置した前線帯との間で形成され、豪雨が発生する前の時間から持続していた。極めて高い湿度の状況であったことから、可降水量は70mmを大きく超えていた。

気温減率が湿潤断熱減率であって、相対湿度が100%の状況は、湿潤絶対不安定であることから、MAULの発生状況について調べた。その結果、台風中心に対して東から北の象限に MAUL が対流圏中下層に広く分布しており、MAUL の下端高度も2 km 以下の高度に下がっている場所も多く見られた。このような MAUL が、台風中心の周辺部に持続し、台風の北上に伴い東日本に移動し続けていたことが分かった。

MAUL の下端高度が2 km 以下であった一方、丹沢・関東・越後などの山地の標高は1.5~2.5km 程度である。したがって、地形強制により MAUL は容易に持ち上げられ、不安定が直ちに発現することになると考えられる。この MAUL が形成・維持され、台風第19号から東日本に押し寄せたため、大雨に繋がったと考えられる。このように、MAUL が、関東山地など地形影響によって強制的に上昇し、絶対不安定性が解消され、結果として対流活動が強化され、大雨となったと考えられる (Takemi and Unuma 2020)。

6. Xバンド偏波レーダを用いた台風第19号に伴う大雨の解析

三隅良平 (防災科学技術研究所)

Takemi and Unuma (2020) によると、台風第19号の北東象限には湿潤絶対不安定層 (MAUL) が広がっていたという。このように MAUL が卓越する環境下では、どのような降水システムが発達するのであろうか？ この問いに答えるため、神奈川県海老名市に設置された X バンド偏波レーダによる5分間隔の RHI (Range Height Indicator) スキャンデータと、地上に設置された光学式ディストロメータによる観測データを用いて、台風第19号の降水過程を解析した。観測された降水システムを、雨滴粒径分布の特性と融解層の

シグナルである偏波間相関係数 (ρ_{HV}) の最小値の存在に基づいて、以下の3つのタイプに分類した；融解層を伴う対流降雨 (タイプ SF), 融解層のない対流降雨 (タイプ C), 融解層を伴う層状降雨 (タイプ S)。これらのうち、強い降水は主としてタイプ SF によってもたらされていた。偏波レーダで観測された各種パラメータの鉛直プロファイルから、タイプ SF の特徴は以下のようにまとめられた；上空に明瞭な融解層をもつとともに、0°C高度より下層では雨滴の体積中央直径と雨水量が急激に増加する。また下層には浅い対流を示唆するセル状エコーが存在する。これらの特徴と、大気下層の MAUL の存在を考え合わせると、タイプ SF では層状性降水と浅い対流との間に Seeder-Feeder 機構が働いていたと解釈できる。通常、Seeder-Feeder 機構は山地で起こるが、本事例では下層の MAUL の存在によって平地でも浅い対流が発達し、山地で降るような激しい雨が平地でも降ることにより、広範囲の大雨につながったと考えられる。

7. 台風第19号による大雨の降水強化メカニズムの数値シミュレーション

荒木健太郎 (気象研究所)

台風第19号による東日本を中心とした大雨について、水平解像度2 km の気象庁非静力学モデルによる数値実験で台風と大雨を再現し、大雨における降水強化メカニズムを調査した。

台風による大雨時の降水強化メカニズムとしては、地形の影響によって形成された下層雲に対する Seeder-Feeder メカニズムが重要であることは非常に多くの先行研究で指摘されている。本研究では地形による降水強化の影響を定量的に把握するため、実地形の標準実験のほかに本州の標高を0 mとした感度実験も行った。

その結果、いずれの実験でも台風経路の西~北側にあたる東日本で大雨が再現され、これは台風中心付近から北側にのびた前線と対応していた。また、標準実験では大雨域のうち特に山岳域で降水が強まっており、標準実験における降水量の60~80%が地形の影響によるものだった地域もあった。両実験の雨の生成項の収支解析の結果、標準実験における山岳の大雨域では先行研究と同様な Seeder-Feeder メカニズムによる降水強化(雲水の捕捉による雨の生成)が確認されたが、地形を編集した実験の大雨域でも前線上で形成された下層の水雲に対する Seeder-Feeder メカニズ

ムを通して降水の強化が起こっていた。

本研究より、台風第19号に伴う大雨では、これまで台風による大雨で指摘されていた山岳域での Seeder-Feeder メカニズムだけでなく、台風の温帯低気圧化に伴う過程で形成された前線における Seeder-Feeder メカニズムも重要であることがわかった。台風の構造変化と降水への影響について、事例解析を蓄積して実態解明をする必要がある。

8. 台風第19号の非対称な降水分布：中緯度プロセスの影響

柳瀬 亘 (気象研究所)

2019年10月12日に上陸して東日本に甚大な被害をもたらした台風第19号は、その北半分に大雨を集中させていた。この特徴は台風が日本の南海上に北進していた11日頃から既に衛星観測で確認でき、13日12時には台風は日本の東海上で温帯低気圧となった。一般に台風の温帯低気圧化は数時間～数十時間かけて非対称化が進行するため (Evans and Hart 2003)、台風第19号の非対称な降水分布にも関係したと考えられる。本研究ではこの非対称化のメカニズムを理解するため、水平格子間隔 2 km で走らせた気象庁非静力学モデルの出力を解析した。

非対称化の後期 (12日頃) には降水は台風の北東側に集中しており、そこでは明瞭な温暖前線が形成していた (荒木氏の発表, Iizuka *et al.* (2021) も参照)。先行研究でも温帯低気圧化では温暖前線が寒冷前線よりも先に強化することが指摘されており、台風第19号のように降水分布が災害につながる事例では特に重要な性質である。理論的には、低気圧性の渦の北側に南北温度勾配が存在すれば、前線は渦の北東側 (北西側) で強化 (衰弱) することが前線形成関数の変形項から理解できる。

一方で、非対称化の前期 (11日頃) には降水は台風の北～北西側に集中しており、前線形成の寄与は不明瞭であった。後方流跡線や発散風の解析では、台風の北側で上昇しながら北に向かう斜めの対流が顕著であった。この場所では、台風に伴う下層の東風と、北側のジェット気流に伴う上層の西風により、強い西風鉛直シアの場となっていた。絶対角運動量および渦位の解析により、鉛直シアが強い場所では湿潤的な対称安定度が減少しており、斜めの対流を強化しやすい場であったことが示された。

本研究では、先行研究で指摘された温暖前線の強化

が、台風第19号でも重要であることを確認できた。さらに、温帯低気圧化のステージにより湿潤対称安定性も寄与することが新たに示された。温帯低気圧化に伴う降水分布を正確に把握する上で、複数の非対称化プロセスを体系的に理解することが今後の研究で重要である。

9. リアルタイム陸面・河川モニタリングシステムを用いた洪水予測

日比野研志 (東京大学)

この発表では東大生産技術研究所と JAXA が共同で開発している Today's Earth (https://www.eorc.jaxa.jp/water/index_j.html, 2021.7.29閲覧) の紹介を行い、実際にこのシステムが台風第19号をどのように再現し、災害対策に役立ちうるかを議論した。他の研究者の発表は台風第19号の強化メカニズムなど理学的な観点からであったが、この発表は応用研究の紹介であり、web で公開している実際のリアルタイム予測情報を見てもらいながら、メディアでこのシステムがどのように取り上げられたかなどを話した。Today's Earth は陸面モデル MATSIRO (Takata *et al.* 2003) と河川モデル CaMa-Flood (Yamazaki *et al.* 2011) をベースに様々な気象外力データを利用することで、陸面の水文状態を再現する。全球スケールから日本域といった領域スケールまで統一したモデルを使うことを特徴とし、またインタラクティブな web サイトで研究者以外のステークホルダーにも有益な情報を提供することを目指している。

台風第19号に関して言えば、MSM-GPV の精度が良かったため、千曲川の氾濫の前からその危険性を検出することができるなど、非常に良い性能を示せていた。ただ、再起確率期間を基準とした警報では空振り率もまだ高いなど、今後も改善の余地があると考えている。質疑では気象庁の流域雨量指数など他の類似した洪水予測システムとの違いが議論された。陸域水文過程を全球から領域までシームレスに再現できるという Today's Earth の強みを今後も活かしていきたい。

報告者は台風第19号の温暖化予測研究を別プロジェクトで関わっており、他の発表者の報告を聞くことで理学的な側面からの理解も深めることができ、非常に有意義な研究会であった。

10. 総合討論

今回は、発表中に使われた用語に関して、zoom 会

議システムのチャット機能も使って議論が行われた。

台風第19号に伴った MAUL の存在が指摘されると、MAUL に関する議論が活発に行われた。例えば、MAUL は対流などの鉛直運動の結果なのではないか、台風に相対的にどの位置で MAUL が観測されやすいのか、温度減率で定義するのであれば、大規模上昇や強制上昇によって生じた層状性の雲域も MAUL になってしまうのではないかと、MAUL の鍵となる湿潤な層の形成要因は、などの質問が上がった。発表者からは、今回の事例の MAUL の成因についてはまだ分かっておらず今後の課題であるとの回答があり、また、元々 MAUL は、孤立対流ではなく組織化した対流を対象にしていたことなどの補足情報も提供された。

もう一つ議論が上がったのが、台風第19号に伴う降水で、その存在が指摘された Seeder-Feeder メカニズムである。これは、より上層にある雲からの降水粒子が、下層の雲の雲粒を捕捉し、降水を活発化させる効果であり、この点から降水粒子を Seeder、雲粒を Feeder と呼ぶ。今回は観測（三隅）・シミュレーション（荒木）両方でこの効果が報告された。下層の雲が対流雲であることから、雨滴が雨滴を捕捉していたと考えられ、これも Seeder-Feeder メカニズムと考えるのか、という質問などがあがった。

台風第15号・第19号ともに強い強度で関東に上陸し、東日本を中心に甚大な被害を生じたこともあり、参加者の人数からも注目度が高いことが示唆された。今回の発表では、観測データの解析から、モデルを用いたシミュレーションの結果を解析するものまで、様々な研究が報告された。特に今回は、台風第15号の発生・発達要因、突風の要因、台風第19号の豪雨の要因・河川氾濫の監視などに焦点が充てられたが、これらは他の台風事例にも適用できる知見であり、研究面においても今回の両台風の経験を糧に将来の減災に資することができれば幸甚である。

略語一覧

CAPE : Convective Available Potential Energy 対流有効位置エネルギー
 MAUL : Moist Absolutely Unstable Layer 湿潤絶対不安定層
 MSM : MesoScale Model 気象庁メソモデル
 EDA : Early Dvorak Analysis 早期ドボラック解析
 TGS : Typhoon Genesis Scores 台風発生環境場診断手法
 TIFS : Typhoon Intensity Forecast scheme based on SHIPS 気象庁強度予報ガイダンス

参考文献

- Bryan, G. H. and J. M. Fritsch, 2000: Moist absolute instability: The sixth static stability state. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 1207-1230.
- Evans, J. L. and R. E. Hart, 2003: Objective indicators of the life cycle evolution of extratropical transition for Atlantic tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 909-925.
- Fudeyasu, H., R. Yoshida, M. Yamaguchi, H. Eito, C. Muroi, S. Nishimura, K. Bessho, Y. Oikawa and N. Koide, 2020: Development conditions for tropical storms over the western North Pacific stratified by large-scale flow patterns. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 61-72.
- Iizuka, S., R. Kawamura, H. Nakamura and T. Miyama, 2021: Influence of warm SST in the Oyashio region on rainfall distribution of Typhoon Hagibis (2019). *SOLA*, **17A**, 21-28.
- Ritchie, E. A. and G. J. Holland, 1999: Large-scale patterns associated with tropical cyclogenesis in the western Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2027-2043.
- 嶋田宇大, 大和田浩美, 2019: SHIPS. 気象研究所技術報告, (82), 4-19.
- Takata, K., S. Emori and T. Watanabe, 2003: Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Glob. Planet. Change*, **38**, 209-222.
- Takemi, T. and T. Unuma, 2020: Environmental factors for the development of heavy rainfall in the eastern part of Japan during Typhoon Hagibis (2019). *SOLA*, **16**, 30-36.
- 土屋昭夫, 三河哲也, 菊池明弘, 2000: 台風へと発達する雲システムの早期判別法について. 気象衛星センター技術報告, (38), 13-19.
- 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., H. Owada, U. Shimada, M. Sawada, T. Iri-guchi, 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.
- Yamazaki, D., S. Kanae, H. Kim and T. Oki, 2011: A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model. *Water Resour. Res.*, **47**.
- Yoshida, R. and H. Fudeyasu, 2020: How significant are low-level flow patterns in tropical cyclone genesis over the western North Pacific? *Mon. Wea. Rev.*, **148**, 559-576.
- Yoshida, R. and H. Ishikawa, 2013: Environmental factors

666 気象災害委員会・第53回メソ気象研究会合同研究会—甚大な災害をもたらした2019年台風第15号と第19号の実態に迫る—の報告

contributing to tropical cyclone genesis over the western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 451-467.
