

台風・竜巻から身を守る

— 相次いだ台風被害から何を学ぶか —

防衛大学校地球海洋学科教授 小林 文明

平成30年には台風21号が関西に上陸し、令和元年には台風15号が首都圏を襲い、これまでに経験したことのない甚大な被害に見舞われた。台風21号は、戦後近代的な大都市となった大阪が経験する初めての“非常に強い”台風であった。また、「令和元年台風19号」の接近時には千葉県市原市で竜巻が発生した。これらの台風でいったい何が起こったのかを振り返り、強風災害からどのように身を守ればよいかを考える。

1. 平成30年台風21号(Jebi)

「平成30年台風21号(T1821、アジア名チュービー)」は、8月28日南鳥島近海で発生し31日9時には915hPaに達し、“猛烈な(最大風速54m/s以上)”勢力に発達した。9月4日12時に徳島県南部に上陸した後、紀伊水道をぬけて4日14時には神戸市に再上陸した(図-1)。台風21号に伴い四国、近畿から北海道に至る広範囲で強風が観測され、各地で住宅の屋根や工所用足場の倒壊などの被害が発生した。特に、近畿圏では、関空島(大阪府泉南郡)で58.1m/s、和歌山(和歌山市)で57.4m/s、室戸岬(高知県室戸市)で55.3m/sを記録するなど、

これまでの最大瞬間風速を更新するような強風が観測された。さらに、大阪湾では高潮による被害も顕著であった。台風21号による人的被害は、死者が1府4県で14人、負傷者は900人を超えた。住宅被害は、全壊26棟、半壊189棟、一部破損50,082棟(内大阪府が42,735棟)となっており(内閣府、2018年10月2日現在)、激甚災害に指定された。

台風が“非常に強い(最大風速44m/s以上54m/s未満)”勢力のまま上陸したのは、1993年の台風13号(Yancy、中心気圧930hPaで九州薩摩半島に上陸)以来25年ぶりであった。非常に強い台風が大阪など大都市を襲ったのは稀であり、最大瞬間風速が50m/sを超える強風に大都市が曝されたのも初めての経験といえる。その結果、数10台の車の横転、1,000本を超える電柱の倒壊、40,000棟を超える住宅被害など、我々のこれまでの経験と想像を絶する被害件数を目の当たりにした。マンションなど頑丈な建物に居ても、飛散物による死亡事例が報告されるなど、あるレベルの風速を超えると、絶対安全な場所はないことを再認識した(写真-1)。

台風21号に伴い突風が相対的にどこで発生したかを調べたのが図-2である。ここでいう突風とは、気象台で観測された最大瞬間風速30m/s以上の風速値、地上被害の中で顕著なもの(F(フジタ)スケールでF1(33~49m/s)以上に相当する被害)、竜巻あるいは竜巻的な渦を指す。この図から突風は、半径150km以内の台風進行方向右側(東側)、つまり危険半円にほとんどが分布していたことがわかる。台風21号の移動速度は上陸前後に急速に増し、台風の進行方向右側では台風の回転速度と移動速度が加算された結果と考えられる。

突風発生と上空の積乱雲との関係は、レーダエコー(反射強度)情報を用いて、降雨強度48mm/h以上の強エコー(発達した積乱雲下)、12~48mm/hの中程度の強度エコー(積乱雲)、12mm/h未満の弱エコー(積乱雲あるいは層状性雲)に分けて調べた。降雨強度48mm/h以上の強エコー下で発生した突風は、台風の中心付近(台風の壁雲)で発生しており、積乱雲からの下降気流(ダウンドラフト、ダウンバースト)の影響を受けている可能性が高い。なお、今回抽出した突風事例はすべてエコー下で発生しており、

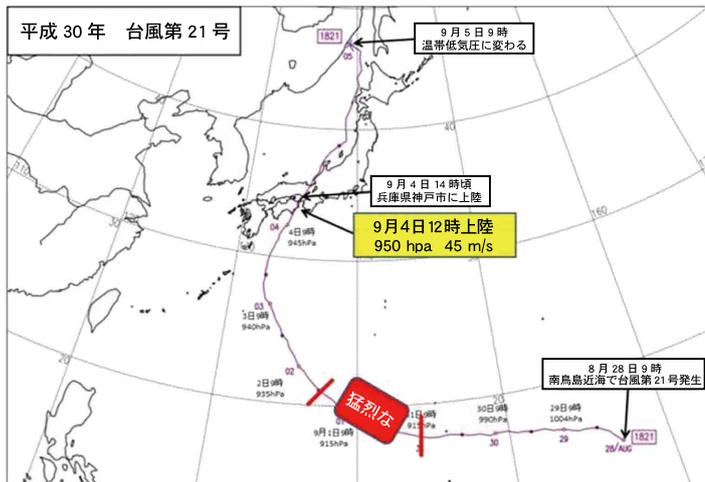


図-1 平成30年台風21号の経路(気象庁に加筆)



写真: 小林文明撮影

写真-1 台風21号による大阪市内の被害

ノーエコー領域で発生した事例はゼロであった。

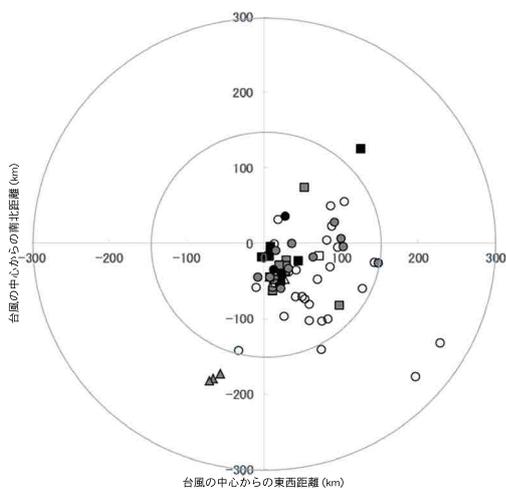
2. 令和元年台風15号 (Faxai)

「令和元年台風15号 (T1915、アジア名ファクサイ)」は、2019年9月8日21時頃神津島付近で再発達し、955hPaの“非常に強い”勢力のまま9日3時頃三浦半島を通過し、960hPaで千葉市に上陸した。台風が非常に強い勢力のまま関東に接近したのは珍しく、関西を襲った台風21号 (T1821) に次いで、今度は首都圏が強風に曝された。関東近海で再発達したことから、東京島嶼部から関

東南部で特に暴風による被害が発生した。神津島村で58.1m/s、千葉市中央区で57.5m/sを記録するなど、これまでの最大瞬間風速を更新するような強風が観測された。台風15号に伴う住宅被害は、全壊219棟、半壊2,126棟、一部破損39,828棟となっており (消防庁、2019年10月10日現在)、全壊と半壊数はT1821の数を一桁上回る結果となった。また、住家だけでなく、特に房総半島では送配電設備、農業施設、樹木等が広域で甚大な被害に見舞われた (写真-2)。停電の長期化、鉄道の計画運休再開が月曜日の朝と重なり混乱を極めたことなど

社会的にも大きな影響が生じた。

図-3は、台風21号 (図-2) 同様に突風の空間分布を、台風進行方向に相対的な位置で表したものである。図中赤丸は上空に強エコー (48mm/h以上) が存在していた箇所である (黄色丸は中程度のエコー、白丸は弱エコーを示す)。この図から、台風15号に伴う突風は半径50km以内に集中し、すべての方向にまんべんなく分布していたことがわかる。一般に、台風に伴う強風、突風は、図-2で示されたように、台風の東側 (危険半円) で比較的広範囲 (半径100km以上) に分布すると考えられるが、本事例では一般的な傾向とは大きく異なる結果となった。これは、台風がコンパクトで、暴風域の最大半径が約110kmと狭かった



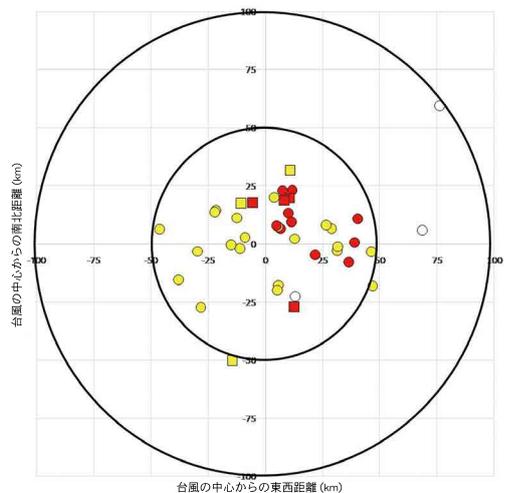
○：最大瞬間風速30m/s以上の地点、□：顕著な地上被害、△：竜巻および渦。上空のエコー強度 (黒塗り：降雨強度48mm/h以上の強エコー、グレー：12～48mm/hの中程度のエコー、白抜き：12mm/h未満の弱エコー) を絶対方位で示してある。

図-2 平成30年台風21号に伴う突風の発生場所



写真：小林文明撮影

写真-2 台風15号による房総半島における被害



○：最大瞬間風速30m/s以上の地点、□：顕著な地上被害と上空のエコー強度 (赤色：降雨強度48mm/h以上の強エコー、黄色：12～48mm/hの中程度のエコー、白抜き：12mm/h未満の弱エコー) を台風の進行方向に相対的な位置で示してある。

図-3 令和元年台風15号に伴う突風の発生場所

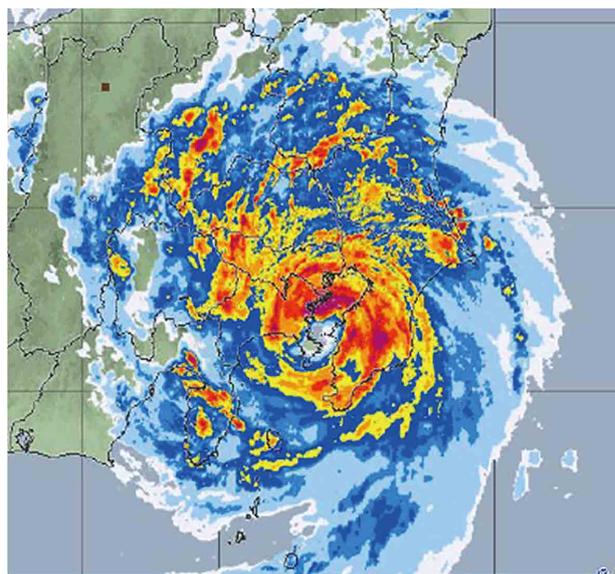


図-4 2019年9月9日4時のレーダエコー (気象庁)



写真：小林文明撮影

写真－3 市原市内における住宅被害

点、台風の渦構造を維持したまま上陸した点が強く寄与していたと考えられる(図-4)。上空のエコー強度との関係を見ると、台風が進行する東側(危険半円)で強エコー(台風循環内の発達した積乱雲)に伴う突風が集中していた。これは、台風中心の右側でレインバンド(台風の中心に向かって伸びる積乱雲の列をレインバンドとよぶ)が発達したことに対応している。

この二つの台風は、いずれも最大瞬間風速が60m/s近い強風を有していた。60m/sは、ちょうど耐風設計の基準風速であり、実大スケールで検証する結果となった。今回の被害の多くは、構造物自体の耐力というより、①老朽化(経年変化)と②飛散物がキーワードとして挙げられた。

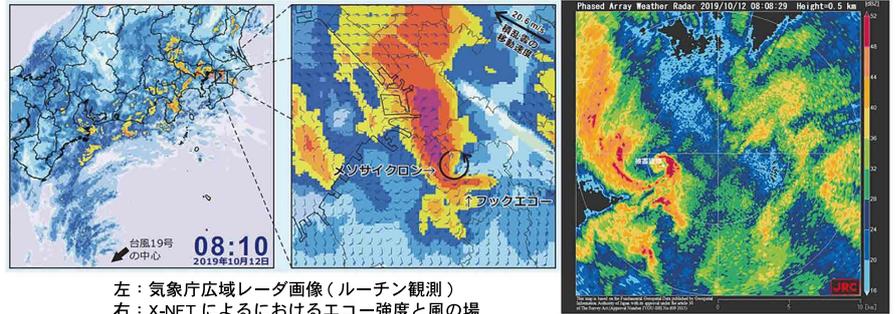
3. 令和元年台風19号(Hagibis)に伴って市原市で発生した竜巻

「令和元年台風19号(T1919、アジア名ハジビス)」は、発生直後に“急速強化”し大型で猛烈な勢力に発達した後、2019年10月12日19時前に強い勢力で伊豆半島に上陸し、関東地方を通過した。東日本では台風の上陸する前から、台風北側の雨雲により地形性降雨が強化された結果、総降水量は東日本を中心に17地点で500ミリを超えるなど、記録的な大雨となった。

台風19号が上陸した半日前の12日8時すぎに、千葉県市原市内で竜巻が発生した。戸建て住宅の倒壊や変形(写真

高感度・高分解能レーダによる竜巻観測

フェーズドアレイレーダにより、メソサイクロン(1km)、竜巻渦(100m)まで検出可能
“これまで見えなかったものが見える!”



左：気象庁広域レーダ画像(ルーチン観測)
右：X-NETによるエコー強度と風の場
(防災科学技術研究所)

フェーズドアレイレーダで観測された竜巻渦(JRC)

図-5 市原竜巻の親雲レーダエコー(左：気象庁レーダ画像、中：X-NETによる観測結果、右：フェーズドアレイ気象レーダによる観測)

ー3)、車両、配電柱、樹木、ネットフェンス等に竜巻特有の被害がみられ、運転中の方が1名亡くなった。気象庁の発表では、最大風速は55m/sと推定され、日本版改良フジタスケール(Japan Enhanced Fujita scale)でJEF2(53~66m/s)と認定された。

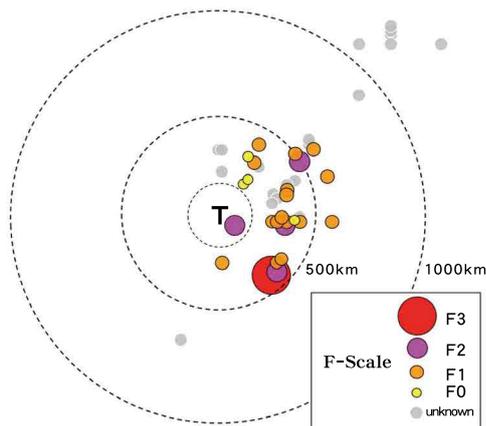
竜巻が発生した時、台風19号は日本の南海上に位置し、市原市から約500km離れていた。竜巻は、台風の北東象限に存在したアウターレインバンド(南東から北西に走向を持つ)内の積乱雲に伴い発生した。竜巻発生時のレーダエコーを見ると、竜巻を引き起こした積乱雲(親雲)であるエコーの南端部では、明瞭なフックエコー(hook echo)が観測され、ドップラー速度場では直径約3kmのメソサイクロン(mesocyclone)が解析された(図-5)。フェーズドアレイ気象レーダの観測では、メソサイクロンの中に直径500mの親渦(misocyclone)、さらには竜巻渦(直径200m)まで検出することに成功した。親雲のエコー頂高度は高度10km以下であり、アメリカ中西部で観測されるスーパーセルと比べて背の低い積乱雲であり、台風に伴う積乱雲(熱帯起源の水雲)に伴う特徴的な構造を有していた。

4. 台風に伴う竜巻

台風、ハリケーン、サイクロンに伴い、その内部や周辺でしばしば竜巻の発生が確認されている。大きな渦(台風)の中に小さな渦(竜巻)が存在するというのは分かりにくいかも知れないが、少なく

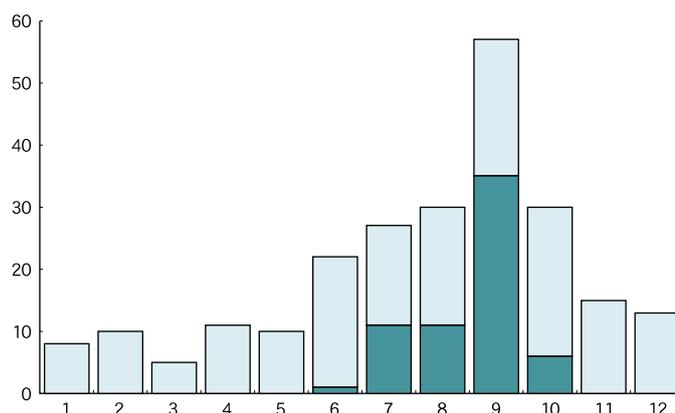
ともわが国では、台風に伴う竜巻は竜巻全体の4分の1を占め、温帯低気圧に次いで2番目に多く、実態としては結構起こりやすい現象といえる。これまでの研究から、台風に伴う竜巻は、台風の進行方向右側でかつ、台風の中心から比較的離れた場所で発生しやすい。台風に対して相対位置で表すと、台風の東側に集中しており、台風の中心から半径100kmから600kmくらい離れた場所で、レインバンドに伴い発生している(図-6)。台風の中心から1000km以上離れて発生した事例もあるように、決して発生場所が決まっているわけではない。台風の中心付近、“台風の眼”の周囲に形成される壁雲で竜巻がどの程度発生するかは、未だよくわかっていない。

2006年9月17日、台風13号が長崎県に上陸する4時間前の14時すぎに宮崎県延岡市でF2の竜巻が発生した。竜巻渦は、上陸後延岡市内を約7kmにわたり走り、死者3名、負傷者140名以上、市内の住宅被害の他、JR日豊本線で特急列車が脱線するなど甚大な被害が生じた。この延岡竜巻に前後して、10個近い竜巻あるいは竜巻と推定される突風災害が、最も早い時刻で当日11時に熊本県で発生し、20時30分の高知県まで約半日にわたり発生した。これは、台風が九州西方を北東に進みながら、レインバンド内でスーパーセルが次々と形成された結果と考えられている。つまり、竜巻を生みやすい台風では、竜巻のアウターブレイク(大発生)の可能性があり、レインバンドが進入する地域では、竜巻が発生しや



発生した竜巻の台風中心 (T) からの相対的な位置で示している。

図一六 台風に伴う竜巻のFスケール別の発生場所



図一七 人的被害が生じた竜巻の月別頻度 (濃い色は台風による竜巻)

すい状況が続くことになる。延岡市では、2019年にも台風17号に伴って竜巻(JEF2)が発生し、その被害域は2006年のそれとほぼ同じルートを辿った。

台風に伴う竜巻は、台風からはるか離れた場所、台風の暴風域に入る半日前や1日前に、まだ晴れ間が見える時に発生するため、人的な被害が拡大しやすい。延岡竜巻でも、まだ風もそれほど強くなく、晴れ間が見えている午後、台風に向けて片付けや買い物をしようとしていた時に竜巻が市街地を襲った。人的被害の生じた竜巻の中で、台風に伴う竜巻は全体の半数以上に当たり、9月に突出している(図-7)。台風に伴う竜巻で人的被害が多い理由は、次の4点に要約される。

- ① F2クラスなど比較的強い竜巻が多い。
- ② 一度に多くの竜巻が発生する。
- ③ 台風の中心付近や暴風域から離れたレインバンドで生じる。
- ④ そのため晴れ間が見え台風に伴って買い物や家の補強中に不意を突かれる。

5. 新しい観測手法

大気の観測では、いかに観測データの分解能を向上させるかが課題といえる。ここでは、リモートセンサーである気象レーダと地上稠密気象観測の最先端を紹介する。フェーズドアレイ気象レーダは、多数の素子で構成されたアンテナを有し、同時に電波を射出することで、これまでパラボラアンテナを機械的に回転させ、天空全体を観測するのに5分から10分

かかっていたものが、秒単位での観測が可能となる。このため、竜巻や局地的な豪雨など短時間の激しい大気現象の観測に特に有効である。既に日本でも気象用フェーズドアレイレーダが開発され、実用化されている。100本以上のスロットアンテナから異なった仰角で同時に電波を発射しながら、この平板アンテナを機械的に回転させることで3次元データが得られる。半径60kmレンジ内のデータは30秒で1回転、半径15kmであれば10秒に1回転させればよいので、従来のパラボラ型レーダに比べて観測時間は10分の1から30分の1に短縮される。距離分解能は約100mと、従来型のレーダとほぼ同様の距離分解能が確保されている。千葉市内に設置されたXバンドフェーズドアレイ気象レーダで、台風15号通過時の観測に成功している。図-8は、台風が三浦半島に接近した9月9日1時30分に、フェーズドアレイ気象レーダで観測されたデータをもとに3次元表示された台風15号のレインバンドのエコー構造である。上陸時の台風15号は、同心円状の渦構造がはっきりしていたが(図-4)、エコー分布の詳細構造は、相対的に背の高いエコー(エコー頂高度6~7km)がインナーコア部分に存在し、個々の積乱雲構造が解像されていることがわかる。またその外側では、背の低いエコーが陸上で面状に広く分布していた。

アメダス(AMeDAS)は日本全国を約20km間隔でカバーする地上気象観測網であり、これだけの高密度観測は世界でも例をみない。しかしながら、アメダスを

もってしても積乱雲や竜巻を観測することは困難である。このような状況のもと、簡易気象センサーを1km間隔で設置するという、“1kmメッシュの高密度地上観測”が試みられている。関東地方を中心に設置してある地上稠密気象観測ネットワーク(POTEKA)は、現在約300カ所の観測点で構成されており、数km間隔における空間分解能の観測を可能にしている。気象観測の中で、気圧は地形や構造物の影響をほとんど受けず、観測地点の標高による更正(海面更正気圧)のみを行えばよい。図-9は、台風上陸時の気圧分布を示しており、台風の中心付近からアウトレーンバンドに至る領域で密な観測が行われたことがわかる。東京湾に沿った各観測地点では、台風中心の通過時に960hPa台が記録されたが、近傍の地点あるいは台風中心から同距離の地点でも気圧値が1~2hPa程度異なっていた。これは、台風内に存在する、メソ~マイクロスケールの大気擾乱の存在を示唆している。台風15号のPOTEKAによる最小気圧値は、東京都利島で9月8日23時9分に観測された956.4hPaであった。また、千葉市に上陸した時点での気圧は、9月9日4時33分に千葉市内で962.5hPaが観測され、気象庁による発表(上陸時960hPa)と整合的であった。

このような革新的な観測技術の向上により、「竜巻を捉える」、「雲を掴む」、「風を観る」という“夢物語”が現実のものとなりつつある。極端気象から命を守るという観点から、その費用対効果が論じられるべきである。

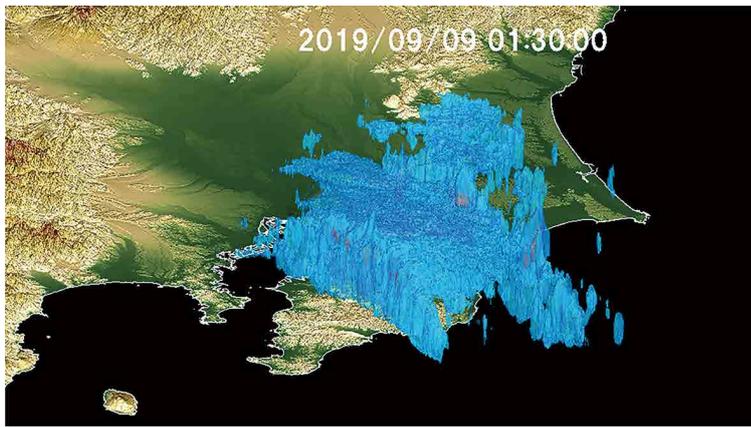


図-8 フェーズドアレイ気象レーダで観測されたデータをもとに3次元表示された台風15号のレインバンドエコー（2019年9月9日1時30分）

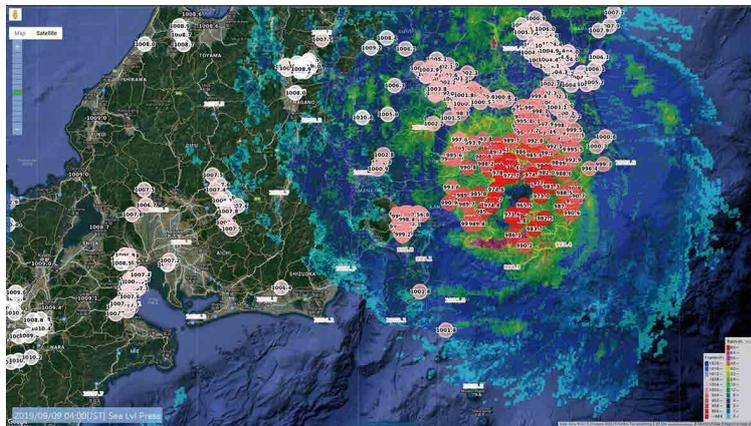


図-9 気象庁レーダエコーとPOTEKAで観測された気圧（図中円内）

6. 相次いだ台風被害と過去の台風

2019年は、台風15号の後、台風19号による広域豪雨、台風21号に伴う千葉県内から東北にかけての集中豪雨など、台風に伴う甚大な災害が相次いだ。これらの台風は特別なもので、風水害被害も全く経験のないものだったのであろうか。台風が10個上陸した2004年を思い出して頂きたい。台風22号（T0422、Marion）はT1915と同様のスケールをもちコンパクトな台風による強風災害が顕著であった。T0422は急速に衰弱しながらも伊豆半島に上陸して被害をもたらしたのに対して、台風15号（T1915）は勢力を維持したまま東京湾を北上して上陸した点が異なっていた。続く2004年の台風23号（T0423、Tokage）は日本列島の広域に大雨をもたらしており、2004年と2019年は2つの類似した台風が激甚災害をもたらした点で同様のパターンであった。ちなみに、T0423時の日本全

体で積算した総雨量は観測史上第1位の記録であり、T1919はそれに次ぐ第2位の記録となった。このように、過去の台風被害から学ぶ点は多い。

7. 竜巻にも台風にも「絶対安全」はない！

竜巻渦の直径は数10m～数100mと、大気現象としてはマイクロなスケールであるが、その風速は100m/sを超えることもあり、自然界で最も大きな風速を生み出すマシンといえる。最強クラスの竜巻では、例えば、空から馬や車が降ってくるなど“ミステリー”が起こり、頑丈な建物でもなすすべがない。つまり、最強クラスの竜巻には、地上で「絶対安全」な場所はない。竜巻の怖さは、単に強い風速で構造物が破壊されるだけでなく、破壊された物が飛散物として渦を巻き、次の家屋を破壊していくという破壊の連鎖が続く点にあり、重さが何kgもある木片やトタンなどが、家の壁を突き破る凶器となるケースも多い。そのため竜巻に

よる飛散物は“ミサイル”とよばれている。

今回の台風被害から、風速があるレベル（50m/s）を超えると、人口密集地で何が起こるのかを学んだ。個々の被害は、風工学的には予想されたものではあったが、都市のいたる場所で同時多発的に被害が発生することで、結果的に都市機能がマヒしてしまった。都市には足場や看板など仮設構造物が想像以上に多く存在している。破壊の連鎖を防ぐためには、飛散物を出さないことが重要となる。つまり、私たちは飛散物によって被害者になるだけでなく、飛散物を出す加害者にもなり得るということを再認識すべきである。台風15号で鉄道や道路の再開を阻んだのが、仮設構造物の倒壊、飛散、樹木被害、送配電施設の被害であった。

台風の通過時には一旦都市機能を止め、通過後すぐにスイッチをオンにすれば都市機能が再開できるのが理想であろう。個々人も、台風や発達した低気圧の接近時に、例えばベランダのスリッパを室内に入れるというような普段からの強風災害に対する意識、心がけが防災に対しては重要になる。

台風に伴う突風と一口にいても、台風本体の風、積乱雲に伴う風、地形による増幅効果、都市の構造による増減などさまざまな風が含まれる。例えば、夏の暑さを解消するために都市計画で作った“風の道”を台風の強風が吹き抜けて被害が増大した事例もみられた。大都市における“風速60m/sの世界”を考える時期に来ている。

【参考文献】

- 1) 小林文明ほか、2019：台風1821号（JEBI）がもたらした広域強風災害について、日本風工学会誌、44、44-53
- 2) 小林文明ほか、2020：台風1915号（FAXAI）がもたらした強風災害について、日本風工学会誌、45、30-39
- 3) 小林文明ほか、2019：台風21号に伴う突風と落雷の空間分布、「平成30年台風21号による強風・高潮災害の総合研究」、平成30年度科学研究費・特別促進費研究成果報告書、1-37-42
- 4) 小林文明、2014：竜巻 メカニズム・被害・身の守り方（成山堂）、151pp
- 5) 小林文明、NHKそなえる防災HP「落雷・突風」