

## □大雨・突風等をもたらす激しい気象現象と観測

高知大学 理工学部門 教授 佐々浩司

## 1. はじめに

我が国の気象予報に関する技術は、気象衛星、レーダーネットワーク、ウィンドプロファイラなどの観測システムや、数値予報モデルの運用も含めて世界のトップクラスにあるにも関わらず、顕著な大雨や突風は毎年のように発生し、被害を防ぐことはできていない。これを単純に気候変動のせいにして、温暖化を食い止めると気象災害が減ると考える人もいるかも知れないが、これは大きな間違いである。確かに温暖化は積乱雲の源となる水蒸気をより多く大気中に含む環境を助長はするものの、気象災害をもたらす顕著な気象現象は温暖化以前から存在しているものであり、温暖化を解消したところで無くなるものではない。気象災害への備えと温暖化対策とは切り離して考えるべきである。ここでは気象災害をもたらす顕著な雨と突風現象に焦点をあて、これらの現象についてわかっていることと、未解明なことと、それを解決するための挑戦について紹介するとともに、気象防災に有用な現状で得られる情報の活用法について述べたい。

## 2. 大雨をもたらす降水システム

時間雨量が30mm/hを超えるような強雨をもたらす降水システムとしては、(1) 孤立積乱雲、(2) マルチセル、(3) 線状降水帯、(4) スコールライン、

(5) 台風のレインバンド、(6) 地形性降水などが挙げられる。

(1) **孤立積乱雲**：周囲の環境風が弱い場合に生じる、水平規模が最大で10km程度の対流雲で熱雷とも呼ばれる。通常の寿命は発生から消滅まで1時間程度であり、強雨は20～30分程度しか持続しないが、局所的な強雨が時として都市部などで災害をもたらす。一般にはゲリラ豪雨と呼ばれる。周囲の環境風が強まり、上空と地上との風速差（以後、鉛直シアと呼ぶ）が大きくなると、孤立積乱雲の中に強い回転上昇流であるメソサイクロンが発生し、スーパーセルになる。通常の孤立積乱雲は自身を成長させるための上昇流と降水に伴う下降流が打ち消し合うことによって最終的に消滅するが、スーパーセルの場合は上昇流域であるメソサイクロンと降水域が水平方向に分かれて存在し上空と下層の気流循環が持続するため、長時間持続することができる。発達したスーパーセルの場合、強雨だけでなく、大粒の雹をもたらすこともある。

(2) **マルチセル**：積乱雲が広範囲に発達しやすい環境にあると、複数の積乱雲が発生し、強雨をもたらす。個々の寿命はやはり1時間程度であるが、降水に伴って積乱雲の下層に生じた冷気プールから冷気外出流が発生し、これが別の積乱雲からの冷気外出流と衝突することによって、新たな積乱雲発生のかきかけとなる気流収束が起こり、次々と積乱雲が発生・消滅を繰り返す

ため、広範囲に長時間大雨をもたらすことになる。他のシステムとして分類している(3)～(5)も広い意味ではマルチセルに属するが、特別に組織化することからここでは区別して扱う。

- (3) **線状降水帯**：鉛直シアアが強い環境では、積乱雲が発生すると風下に流されるが、上流側の大気下層に新たな積乱雲発生之源となる気流収束があると、そこで次々と積乱雲が発生し、風下に流される状況が持続する。個々の積乱雲の寿命が1時間程度であっても、次々と到来する新たな積乱雲により、結果として同じ場所に強雨が長時間持続することになる。図1に示す線状降水帯は複数のレーダーを用いてデュアルドップラー解析をした事例で、反射強度の大きい部分が線状降水帯を構成する積乱雲群に相当する。線状降水帯の開始点に近い南西端では気流が収束している様子が見られる。豪雨災害は線状降水帯の発生によるものが多い。
- (4) **スコールライン**：ある時刻のレーダー画像で見ると線状降水帯と同様に積乱雲が線状に組織化されているが、移動方向が大きく異なり、降水システムの走向とは大きな角度を持った方向

に早く移動するものである。停滞することはあまりないため、強雨は短時間しか持続しないが、時としてガストフロントなどの突風を伴う場合がある。

- (5) **台風のレインバンド**：台風の旋回気流に伴って組織化される積乱雲で構成された螺旋状の雨雲の列であり、強い風と強雨をもたらす。台風目のまわりにある目の壁雲は最も強い強風と強雨をもたらすが、台風の一番外側にあるアウターレインバンドも強雨と共に時として竜巻のような突風をもたらすことがあり、注意が必要である。台風の移動速度が遅い場合は、同じ場所にレインバンドが停滞するため、豪雨災害を引き起こす。
- (6) **地形性降水**：台風環境下で太平洋上の湿潤な暖気が流入し、山地斜面を滑翔する状況では、地形上昇により積乱雲が発達し、大雨をもたらす。特に強い風が流入し続ける場合は積乱雲の源となる水蒸気が大量に供給し続けられるため、長時間にわたって同じ場所で強雨が持続する。図2にレーダーで見た一例を示す。なお、海上に見られる螺旋状の降水水域が先述のレインバン

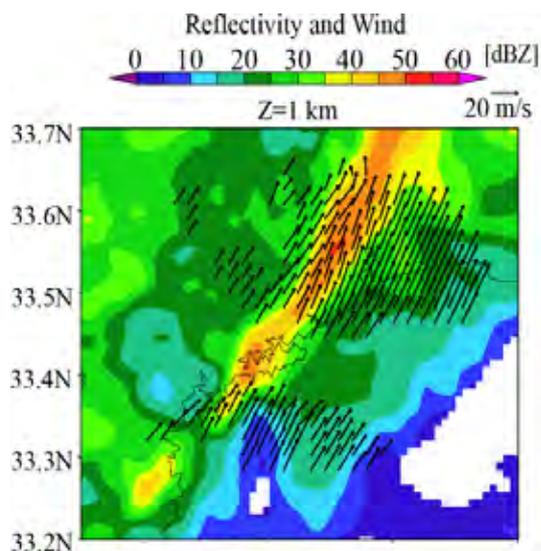


図1 高知県の南西海岸線沿いに形成された線状降水帯の高度1kmにおけるデュアルドップラー解析結果。ベクトルは風向きを示し、シェードは反射強度を示す。

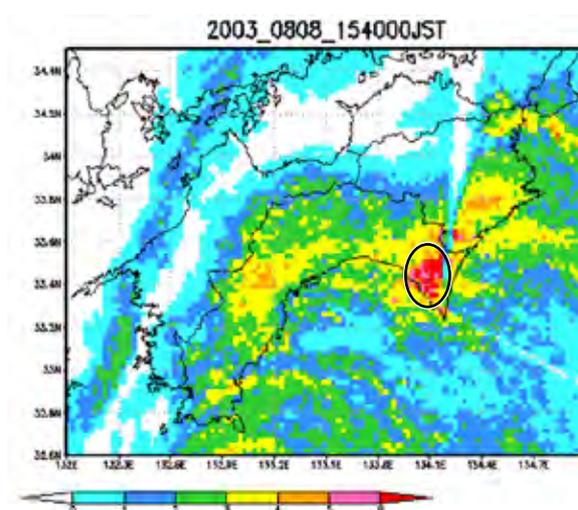


図2 レーダー降雨強度で見た台風に伴う地形性降水の例。図では四国の南に台風の中心があり、四国東部に台風による南西風が湿潤な空気を運び続けるため、図中に楕円で示す室戸岬から北に続く尾根筋の近傍で長時間強雨が持続する。

ドであるが、この例では地形性降水の方が激しい雨をもたらしている。地形性降水は図示したように地形の急峻な四国地域のみならず、九州や紀伊半島においてもよく見られるだけでなく、時として風の強い温帯低気圧に伴って発生することもある。

津口・加藤<sup>1)</sup>は過去の集中豪雨について統計調査を行い、台風による大雨が全体の32%を占める一方、それ以外の環境において豪雨をもたらすのは線状降水帯が6割以上であることを示した。

### 3. 大雨の発生環境と予測

集中豪雨の原因として特に着目されている線状降水帯については、Kato<sup>2)</sup>の6条件が満たされたとき、発生しやすいとされている。6条件とは、(1)水蒸気フラックスFLWVが $150\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ を超えること、(2)500m高度から自由対流高度までの高さdLFCが1km以下であること、(3)上空500hPa面(およそ高度5500m)もしくは700hPa面(およそ高度3000m)における相対湿度が60%を超えること、(4)鉛直シアーの大きさを表す嵐に相対的な環境ヘリシティーSReHが $100\text{m}^2/\text{s}^2$ を超えること、(5)高度700hPa面の400km平均領域において上昇流があること、(6)平衡高度が3000mを超えることである。これらの条件から大雨がもたらされる環境について考える。積乱雲が発達するためには、その源である水蒸気が大量に供給される環境が必要であり、その指標として(1)と(3)が挙げられる。(1)は大気下層から如何に湿った空気が流入するかをみる一方、(3)は上空の湿り具合を評価するものである。梅雨前線が存在するときは、中国大陸で発生した降水に伴う大量の水分が梅雨前線上の気流である梅雨ジェットに伴って日本に運びこまれるため、上空が湿った状態になる。梅雨期に線状降水帯が発生しやすいのは、このためである。ところで、積乱雲が発生するためには下層の水蒸気を自由対流高度まで持ち上げなければ、水蒸気

の凝結に伴う発熱が周囲の空気を上昇させることができない。(2)はこの自由対流高度が低ければ低いほど下層の水蒸気を持ち上げるためのエネルギーが小さくて済むことを表している。持ち上げるきっかけとなるのは先述のような気流収束や地形上昇の他に熱対流も挙げられる。線状降水帯の場合は、島や山など特定の地形が気流収束のきっかけとなることが多い。(5)(6)はより上空まで対流が発達する環境であることを示す。(4)は線状降水帯として積乱雲が組織化するのに必要な鉛直シアーの強さを示す指標であるが、この指標はスーパーセルが発達する指標としても用いられる。スーパーセルの場合は、 $\text{SReH} > 150\text{m}^2/\text{s}^2$ が発生条件となる。これらの条件は梅雨前線のみならず、温帯低気圧接近時や台風影響下においても満たされることがある。

天気予報に用いる数値シミュレーションは、おおまかな天気についてかなりの精度で的中させることができるものの、線状降水帯や孤立積乱雲の発生を的確に予測することはまず不可能である。これは、シミュレーションに用いる気象モデルの解像度が不足しているからではない。現在気象庁で運用している局地気象モデルLFMは水平スケールで2kmの解像度を持ち、個々の積乱雲を再現することが可能である。しかし、実事例をうまく再現できた結果においても、発生位置が数10kmずれていたり、発生時刻が数時間ずれたりすることの方が多い。これは気流の運動方程式が非線形であり、データ同化される観測データのわずかなずれが予測結果に大きく反映されるためである。従って、線状降水帯の発生はピンポイントで予測されるものではなく、上記の発生条件を満たす領域を対象としてシミュレーション予測結果を用いて評価される。方程式の非線形性の問題を解消するために、初期データを意図的にずらした複数のメンバーをシミュレーションして、統計的に起こりやすい気象状況を判断するアンサンブルモデルが活用されている。台風の進路予報につい

ては、アンサンブルモデルの利用によって改善されつつあり、台風に伴う降水はかなりの確度で予測できる。地形性降水も台風の位置関係により、ある程度発生予測が可能である。しかし、積乱雲発生の源である水蒸気の流入量については観測データが不足している。近年気象庁はマイクロ波放射計を多数配置して水蒸気量の評価を始めているが、特に太平洋に面する地域では、太平洋から如何にして水蒸気が輸送されてくるかといった観測データが欠落している。線状降水帯発生の起源となる海上からの水蒸気流入を観測船によって把握するプロジェクト<sup>3)</sup>も行われているが、常に観測を行うことはできないため、広く海上の水蒸気分布を把握できる新たな気象衛星<sup>4)</sup>の実運用が期待されている。

#### 4. 突風

突風は以下の3つに分類される。

- (1) 竜巻：対流性の雲に伴って発生する鉛直軸を激しい渦であり、親雲の移動に伴って直線的な狭い領域に被害をもたらす。よく晴れた日の運動場などで見られる渦巻きは塵旋風と呼ばれ、親雲の上昇流ではなく、熱対流によって引き起こされる別の現象である。
- (2) ガストフロント：積乱雲の降水に伴って上空の冷気が地上に蓄積したのち周囲に吹き出す冷氣外出流の先端部分を指し、水平渦を伴う。夕立前の冷氣はこのガストフロントの通過によるものである。しかし、上層の気流によって積乱雲が早く移動する場合はガストフロントも突風被害をもたらすことがある。図3はさいたま竜巻をもたらしたスーパーセルの後方からガストフロントが接近する様子を示している。この事例ではガストフロントが降水によって可視化されているが、比較的湿潤な環境にある日本では何も見えないことが多く、ガストフロント上空のアーク雲に（図4）によってしか接近を判断す



図3 2013年さいたま竜巻をもたらしたスーパーセル（押井氏撮影）。画面中央左手のやや黒い部分が飛散物などによって可視化された竜巻。その左手にガストフロントが降水粒子に可視化されて認められる。また画面右手のスカート状の雲はスーパーセル前面側のガストフロントの存在を表す。



図4 高知市葛島付近で発生したアーク雲（著者撮影）  
左手奥は激しい降水で視界が悪くなり、この上空に積乱雲本体が存在することがわかる。アーク雲はガストフロントに湿潤な暖気が乗り上げることによって形成される。

ることはできない。

- (3) ダウンバースト：積乱雲中で雹の落下などに伴い、狭い範囲に強い下降流が発生した場合、地上に衝突したのちガストフロントと同様な水平渦を伴って進行するのがダウンバーストである。図5の再現実験で示すように、ダウンバーストの強風域は先端の水平渦ではなく、その下層にある地上付近の領域である。

これらは、台風接近時のように強風が持続する場合と異なり、極めて局所的かつ短時間に発生し

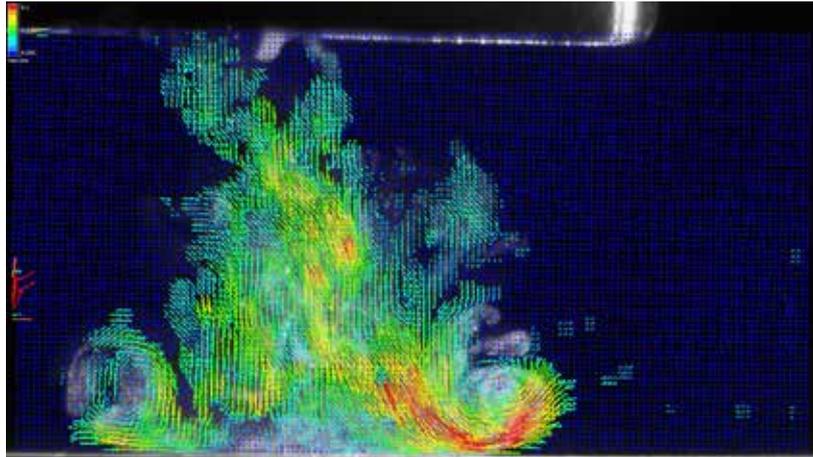


図5 水槽実験で再現したダウンバーストの速度分布。  
先端の水平渦の下にある地面付近の領域が最も強い風をもたらす。

消滅または通過してしまうため、観測で捉えることが難しい。気象レーダーにより後解析で現象を調べることはできるものの、突風がスーパーセルに伴う場合を除いて事前に接近情報を得ることは難しい。

## 5. 突風による被害

大雨は、土砂災害や氾濫災害などの誘因であり、気象現象が直接被害をもたらすものではないが、突風は直接被害をもたらす。図6に竜巻による被害事例を示す。風上側で破壊された家屋の柱が壁を突き抜けている様子が認められる。突風被害で最も怖いのは、飛来物がミサイルのように到来す



図6 2006年佐呂間竜巻の被害例（著者撮影）

ることである。木片がタイヤに突き刺さったり、窓ガラスを突き破ったりするようなことも起こり得る。室内にいた人がこのような飛来物によって大怪我をした事例もある。従って、竜巻注意情報が発表されている場合は、窓の雨戸を閉め、厚いカーテンを引くとともに、外壁からなるべく遠ざかる場所にいることが重要である。また、時間に余裕があれば、飛来物の元となるような家の外にある風に飛びやすいものを片付けておきたい。なお、プレハブ倉庫などは突風で簡単に転倒する事例が多くみられている。屋外にいる場合は頑丈な建物に避難したい。

## 6. 突風の発生環境と予測

突風は上記のように積乱雲に伴って発生する。従って、突風をもたらすような積乱雲が発生しやすいような環境の把握が重要となる。そのような積乱雲の発生指標としては、先述のSReHの他、CAPE(対流有効位置エネルギー)が挙げられる。CAPEは大気不安定度より上層まで積乱雲が発生する様子を示す指標で、先述の6条件のうち(2)(3)(5)(6)に関連する指標である。日本ではCAPE > 2000J/kgではかなり不安定な状況を示すが、米国ではCAPE > 4000J/kgとなることもある。

また、CAPE と SReH の積である EHI(エネルギーヘリシティインデックス)も用いられる。これらは主として強い竜巻をもたらしやすいスーパーセルの発生環境指標として使われる。現在気象庁が発表している竜巻注意情報<sup>5)</sup>は、数値予報モデルによりこれらの指標が発生環境を満たす場合や、気象レーダーがメソサイクロンなどの積乱雲中の渦を検出した場合に発表される。しかしながら、地表面付近に渦度を集中させるガストフロントを伴うことから本質的に竜巻をもたらす可能性が高いスーパーセルですら米国が警報を発表しても1/4程度しか当たらない。まして、親雲の多くがスーパーセルではない日本では、竜巻注意情報の的中率は5%程度とされている。スーパーセルでない積乱雲の場合、レーダーで上空の渦を捉えることができるのが竜巻発生と同時であることが発見を困難にしている。加えて、竜巻発生の原因となる下層の気流環境も十分に把握できていないことが、予測を困難にしている。これを打開するため、著者らは再現実験により竜巻をもたらす下層気流の条件を詳細に調べている<sup>7)</sup>。ただし、地上付近の気流環境はライダーなどのリモートセンシングを除いて観測ができないため、実験の成果を反映させて、可観測な情報から予測を可能とするためには、モデルシミュレーションにより、上空の積乱雲との対応関係から前兆現象を把握する必要がある。一方、竜巻親雲の形態も様々なものがあることが明らか<sup>8)</sup>になりつつある。日本においては、軽微な被害の場合は、孤立積乱雲によるものが多いが、マルチセル環境でも数多く竜巻が発生することがわかってきた。これらの降水システム毎に地域特性や発生環境を明らかにすることにより、より精度の高い注意情報の発出に寄与できるものと期待している。

## 7. 気象災害低減のための観測の高度化

線状降水帯や、突風をもたらす積乱雲の内部構

造はまだまだ十分に明らかではない。これまでに述べてきた発生環境はあくまでこれらのシステムができやすい環境を示すものであって、内部構造をより詳細に把握する必要がある。現在、国内には気象庁の配備した気象レーダー、国土交通省の XRAIN、空港気象レーダーなどが常時運用されており、これらはいずれも降水強度のみならず、ドップラー速度により局所的な渦や収束線などの現象の検出を可能としている。さらに XRAIN や気象庁レーダーの多くは二重偏波化されている。二重偏波レーダーは、降雨強度をより正確に観測できるだけでなく、積乱雲の中にある、雪や霰、雹など降水粒子の性状も判別することができるため、積乱雲の内部構造を詳細に理解することができる。積乱雲の急激な成長減衰過程を把握するためには、より高速なスキャンができるフェーズドアレイレーダーが必要となるが、まだまだ高価であり、全国配備は難しい。代わりに通常のパラボラ型二重偏波レーダーを密に配置するレーダーネットワーク<sup>9)</sup>が有用である。これは、ボリュームスキャンに用いる仰角数を制限することによって1分毎の高速スキャンを可能にするだけでなく、レーダー付近の激しい降水によって起こる降雨減衰を相互に補完して観測精度を向上させることが可能である。国土交通省の XRAIN も同様な理由で都市部を中心とした密な配備がなされている。さらに、複数のレーダーを用いれば、図1に示したようなデュアルドップラー解析を行うことにより積乱雲内部の気流構造も把握することができる。これらに加えて、先述の水蒸気観測データが加われば、よりの確な情報提供がなされるものと期待される。

## 8. レーダー観測情報の活用

気象庁ホームページのナウキャスト <https://www.jma.go.jp/bosai/nowc/> は5分毎の雨雲の様子を示すだけでなく、竜巻発生確度ナウキャストや

雷ナウキャスト、線状降水帯の情報を随時提供している。日頃から雨雲の様子を把握することによって、外出時の時間調整などに活用できる他、自身がいる場所において通常とは異なる強い雨雲が認められれば、早期に避難することができる。現状では線状降水帯の発生予測的中率も1/4程度であり、竜巻注意情報も先述のように的確な予測は難しいが、空振りであったとしても、実訓練と捉えて常々情報発表時には適切に対応できるよう心がけておきたい。合わせて、自身の目で判断することも重要である。強雨であれば、通常と明らかに異なる激しい雨が持続することを実感でき、レーダー情報と照らし合わせて早めの避難行動を取りたい。突風の場合は、強雨に続いて起こる事例もあるが、ガストフロントのように積乱雲に先行して発生する場合もある。この場合はレーダー情報で近くに発達した積乱雲があるか、竜巻発生確度ナウキャストや雷ナウキャストが高い値を示



図7 つくば竜巻接近時(左)と通過後(右)の様子(大野氏撮影) 竜巻接近時は上空の積乱雲に太陽光が遮られ、地上が夜のように暗い。

していないかを確認するとともに、黒い雲が近くにないかを確認しておく必要がある。竜巻は積乱雲の比較的后方に位置することが多いため、図7のような積乱雲で暗くなる様子から、避難行動をとることができる。

#### 【引用文献】

- 1) 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.
- 2) Kato, T., 2020: Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named “senjo-kousuitai”, causing localized heavy rainfall in Japan. J. Meteor. Soc. Japan, 98, 485- 509
- 3) Manda, A., Y. Tachibana, H. Nakamura, T. Takikawa, A. Nishina, Q. Moteki, N. Zhao, and S. Iizuka, 2024: Intensive Radiosonde Observations of Environmental Conditions on the Development of a Mesoscale Convective System in the Baiu Frontal Zone, Earth and Space Science (accepted).
- 4) 静止気象衛星に関する懇談会, 2023: 次期静止気象衛星(ひまわり10号)の整備・運用のあり方に関する提言, [https://www.data.jma.go.jp/sat\\_info/himawari/kondan/himawari10/torimatome.pdf](https://www.data.jma.go.jp/sat_info/himawari/kondan/himawari10/torimatome.pdf).
- 5) 滝下洋一, 2009: 突風に関する防災気象情報の改善, 天気 56, 67-75.
- 6) Wakimoto, R.M. and H. Cai, 2000: Mon. Wea. Rev., 128, 565-592.
- 7) 佐々浩司 2020: 第6章 室内実験による竜巻の物理の理解, 気象研究ノート 第243号 竜巻を識る, 193-226.
- 8) 芝山泰成, 佐々浩司 2024: 日本に竜巻をもたらす降水システムの分類, 日本気象学会2024年度春季大会講演予稿集 125, 74.
- 9) 佐々浩司 2022: 5.1.9 小型レーダーネットワーク, 強風災害の変遷と教訓第3版, 日本風工学会風災害研究会編, 249-255.