

総合討論

司会 (新野)：総合討論の課題として、次の4つを考えたい。第一は竜巻渦の構造、第二は竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報、第三は沿岸部や海上の竜巻、第四は今後の竜巻の調査研究・業務体制についてである。それぞれの課題について、議論いただきたい。

【竜巻渦の構造】

司会：第一の課題である竜巻渦の構造は気象学的・流体力学的に興味深く、風工学的にも直接被害に結び付く課題である。近年は、スマホ等で多くのビデオが撮られるがその有効利用、構造物への影響評価や竜巻の被害域での風速分布の推定、観測・室内実験・LES等数値モデルによる研究がなされていると思う。

工学的な見地から、何かご意見をいただけるか。

田村哲郎 (東工大)：風工学の立場からは、建築物・構造物の安全性を確保するために、竜巻の突風インパクトの特性を把握する必要がある。ただし、建築物をどのような考え方で設計するののかについては、経済性的問題もあってまだ決まっておらず、どこまでの情報が必要かははっきりしないところがある。

我々が注目するのは積乱雲の下で作られる竜巻の構造だが、下降流、上昇流、水平渦の立ち上がり、渦の鉛直方向への引き伸ばしによる竜巻生成など、パターン化された動きが明らかになり、それらの因果関係を示すメカニズムとそれによって決まるダイナミックな挙動が理解されるようになってきた最近の気象学の成果はすばらしいことと感じている。

しかしながら、インパクトの空間構造・非定常性を評価する上では竜巻のスケール感が今少し一致しない面もある。我々が建築スケールへのインパクトを見積もる上からは、地表近傍の風速分布などの空間構造と急峻な非定常性の把握が求められ、その意味で竜巻はある範囲の大きさを持つものとして捉えている。

気象解析で示される竜巻は、鉛直渦の概括的な姿であることが多く、きれいな1つの渦として表現されており、生成機構に対する大きな因果関係の説明がついているものの、風工学の立場からは、竜巻内部での微細構造に対してももう1つ何かあればと感じる。これは風工学の側で目指すべきものかも知れないが、渦である以上、組織的な運動であると同時に付随する変動特性がどのようなものであるかが建築物、構造物へ作用する力を見積もる上で重要と考えている。

司会：室内実験を使った研究をされている方からコメントをいただきたい。

喜々津仁密 (国総研)：現在、室内実験により竜巻発生装置を活用した建築物模型の風圧実験に取り組んでいる。もともと現行の建築基準に竜巻は想定されておらず、竜巻状気流による荷重の作用を明らかにすることが実験の目的である。実験ではランキン渦モデルの傾向に合うように気流を作成しており、個人的には、ランキン渦での近似は工学的モデルとしては有効ではないかと考えている。ただし、実験結果がどれだけリアリティのあるものかはわからず、結果の妥当性を検証するための実況に近いデータがないのが常々考えている。益子さんが発表された解析結果は地表面近くの気流性状まで再現されており、引きつづき知見を積み重ねて頂くことで、将来、室内実験結果を検証する貴重なデータとしても活用できるのではないかと考えた。

田村幸雄 (東京工芸大, 以下田村)：日本版改良藤田スケール (JEF) で採用しているような等価瞬間風速の評価だけで十分な場合も多いが、原子力発電所のような高危険度施設への竜巻の影響を考える場合はやや異なる。発電所内には電力、吸排気など多くの異なる施設がある。換気装置一つの破壊が大きな影響をもたらすことも考えなければならない。そのような場合は、急激な圧力低下の程度なども含めて、地上付近での竜巻の詳細な構造が必要となる。観測技術や数値解析技術の進歩に

よって、これらを解明していただくことを期待したい。

益子：高解像度の数値シミュレーションによって、ある程度現実的な竜巻の構造を再現できているように見える。しかし、地表付近の風や気圧場の値の妥当性についてはかなり疑問が残っている。地表付近の風の分布については、最近スマートフォンなどによって頻繁に捉えられるようになった竜巻の動画などを利用することにより、求めることが可能になっているのではないだろうか？

小林：越谷やつくばの竜巻では、数多くの写真や動画が残され、映像データが解析の役に立っている。今後、このような画像データを誰が収集して、研究用資料として集約するかは検討課題といえる。また、明星電気が高密度の地上観測網 POTEKA を展開しているが、竜巻渦の構造を議論する上で地上の実データは重要である。POTEKA が首都圏一円で実現できれば、いくつかの典型的な竜巻を捉えるというのも、遠い将来のことではないか。

【竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報】

司会：続いて第二の課題、竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について議論いただきたい。竜巻注意情報のような適中率の低い情報をいかに有効に利用するか、フェーズドアレイレーダー・アンサンブル予報・消防本部等からの竜巻目撃情報等のより良い情報提供への努力、原子力発電所、LNG 施設、産業廃棄物施設等危険度の施設での利用、庄内平野での突風情報の鉄道への利用研究などが考えられると思う。

田村：今の状況でも、空模様への注意との抱き合わせで、竜巻注意情報を有効に活用することはできる。その辺の啓発活動も含めて、上手にやっていく必要がある。そうすれば、エア遊具などの遊戯施設の突風事故なども防ぐことは可能であろう。

一 (会場からの質問)：竜巻注意情報を見ていると、竜巻は当てられないまでも、それなりに激しい現象は起こっているのに、「竜巻が起こらないから外れ」ではなく、「激しい現象が起こりうる」という使い方をすればよいのではないか。

また、「一次細分」というのは、石川県で言えば「加賀」や「能登」といった区分のことだと思うが、加賀で発生する可能性がある場合は能登で

は発表する必要がなくなるので利用者から見て利便性が高まる。

中里：すべておっしゃる通り。試算では、一次細分化により、竜巻等の激しい突風が発生しやすい状況になっていることをお伝えする対象面積がこれまでの府県単位での発表の半分以下になるため、より有効に使っていただけたらと思う。

小林：“メソサイクロン情報”とすれば適中率は100%になる。2008年当時はレーダーの精度の問題があったが、現在はドップラーレーダーの数も増えており人口密集地に限ればピンポイントの情報も可能ではないか。また、JR 東日本と気象研との研究では、地上付近の渦を直接捉えて予測するシステムも検討している。

司会：気象研究所の楠さんは突風情報を列車運行にどう生かすかの研究を JR 東日本とされているので可能な範囲でご意見をいただきたい。

楠 研一 (気象研)：竜巻注意情報等は、アメリカのスーパーセルを前提として組み立てられているが、日本はこれに当てはまるのだろうか。防災上でいうと、現象発生最中に情報を出さないといけないという状況である。

非スーパーセルの竜巻とも区別がついておらず、フェーズドアレイレーダー等が重要になってくる。

大都市が海岸部に集中しているという日本の都市構造も相まって、海岸沿いの観測は大切である。

田村：一般に住宅の雨戸が閉まっている夜の竜巻と、ガラス窓がむき出しの昼の竜巻では、住宅被害の程度が違う。雨戸によって飛散物の影響を防げるからである。マスメディアの方には「竜巻注意情報や雷注意情報が出たら、不要不急の外出は避けた方が良いが、外出するときは雨戸を閉めて下さい」ということを大いに言ってほしい。家に居る場合も、空が暗くなったり、雷が聞こえてきたら、しばらくの間だけなので雨戸を閉めてほしい。

小林：「夜の竜巻」というのもポイント。

日本では大部分の竜巻が F1 (JEF1) 以下のため、夜間は屋内に居ることが多いので結果的に人的被害が少ないだけかもしれない。列車や船舶で夜間の竜巻被害が顕在化したといえる。実際に多くの船乗りが、日中に竜巻が見えれば回避してい

るが、夜にそのようなことはできない。雲の異変などがわからない夜間は、気象情報と同時に「夜も竜巻が起こる」という啓発が重要である。

楠：私の共同研究は、特定事業者であり、情報はしっかりしている。将来的には一般向けになれば良いと思うが。

司会：竜巻注意情報の今後の課題についてはどう考えているか？

中里：現在の竜巻注意情報は、気象情報としてはまだ予測精度が低いのが現状である。このため、精度改善のための技術開発を継続している。一般に発表単位を小さくすると精度が低下するため現在は府県単位での発表を行っているが、これまでの技術開発で発表単位を細かくしても従来以上の精度を確保できる見込みが得られたため、一次細分化することになった。

司会：目撃情報を活用した竜巻注意情報の発表状況は？

中里：2014年9月の運用開始以来、13事例で目撃情報に基づき竜巻注意情報が発表されたが、発表後に実際に陸上で確認された数は今のところ0件。ただし、海上竜巻を含めると2件である。

司会：適中率の低い情報をいかに有効に活用するか？

中里：竜巻注意情報を受け取られた利用者の方々には、空を見て積乱雲が近づいていないかの確認や、頑丈な建物に入るなどの負担の小さい行動をお願いしている。

司会：原発などの被害にあうと危険度の高い構造物における竜巻の情報の利用の仕方は？

田村：原発のような高危険度施設については、むしろ設計の段階で竜巻の影響を考慮すべきで、ハードで対処するものだと思う。竜巻注意情報のようなソフトに期待するのは、開閉屋根、ゴルフ練習場のネット、港湾施設や建設現場のクレーン、仮設足場、遊戯施設など、風速で管理運用することを前提として成り立っている建築物等である。台風等の場合は予報が出るのでそれが可能であるが、竜巻等の突風に対しては無防備に近い。竜巻注意情報が出ている状態では、管理責任者が空模様を注意しつつ適切に対処する必要があり、啓発活動やマスメディアを通じての注意喚起が望まれる。

【沿岸部や海上の竜巻】

司会：第三の課題に関して、わが国では沿岸部の竜巻

が多く、近年気象庁の調査体制が強化されるに伴い、海上の竜巻の確認数が大幅に増えている。そもそも、海上の発生は多いのか、沿岸部で発生が多いのは摩擦の効果か、水平収束の効果か、あるいは鉛直シアが強くなるからかなどの疑問が生ずる。また、日本と米国中西部の竜巻との違いが、成層・水蒸気・鉛直シア・地形によるのか、また日本に特有な冬型時の竜巻のメカニズムはどのようなものか、など興味深い課題が残されているが、これについては時間が押しているので割愛して次に進みたい。

【今後の竜巻の調査研究・業務体制】

司会：最後に、第四の課題として、講演者の皆さんのそれぞれの関連分野での今後の方向性についてお話しいただきたい。日本がどの分野で世界をリードできるかを考えると、計算機に関しては比較的恵まれており、数値シミュレーションによる発生機構の解明やデータ同化・アンサンブル予報などでチャンスがあると思われる。また、観測面では関東平野はX-NET等、常時高密度観測網が稼働しており、米国のVORTEX1・2などのプロジェクトにも負けない観測が可能と思われる。庄内平野の稠密観測やPOTEKAを使った稠密観測などでも良い成果が期待できると思う。

中里：当面は、竜巻注意情報の一次細分単位での発表を目指して、予測精度を上げるための技術開発に注力する。中長期的には、フェーズドアレイレーダーの実用化には特に期待している。

田村：米国に較べると、日本の竜巻の方が予測は遙かに難しいものと思われる。建築物の設計でも、日本の場合、地震も風も世界最大級の荷重を考えなければならず、制振、免震装置を含め、世界で最も建設技術が進んでいると言える。難しいからこそ、優れた技術が開発されるのであり、インドやバングラデシュ、中国などのように被害が多い周辺諸国に対しても、それによって大きな貢献ができると思う。今後とも、風工学も気象学に協力して技術の進歩に貢献していきたいと思っている。

小林：竜巻観測に関しては、首都圏はレーダーネットワークや地上観測網が整備され、十分に竜巻観測のできる土壌ができつつある。また、「つくば域降雨観測実験」から20年が経ち、研究者間のネットワークも構築されている。やはり、日本では

“網を張って待つ”スタイルが適している。つくば竜巻のような強い竜巻は10年に一度かもしれないが、弱い竜巻は高い頻度で発生しているの、観測データを蓄積することが望まれる。

益子：数値シミュレーション研究において、日本は計算機資源だけではなく、初期値や境界値に必要なメソ解析値も気象研究コンソーシアムで一般に公開されており、恵まれた研究環境にあると思う。まだほとんど行われていない現実場に即した竜巻の実験をすることが可能なので、今後もっと行っていくべきだと思う。私が講演で示したつくば竜巻はクラシックスーパーセル竜巻であるが、日本

で発生頻度の高いマイソサイクロンを伴うような竜巻についても今後は調査する必要があるだろう。時空間的に極めて小さな現象で未解明な部分が多いため、フェーズドアレイレーダーなどを用いた観測的研究との連携も重要になってくると思う。

司会：多くのメソ現象がそうであるように、竜巻についても世界共通のところと、日本に特有のところがある。これらを良く認識して、研究や業務を進めていく必要があると思われる。有益な議論をいただき、御礼を申し上げる。