

気象研究所主催「竜巻シンポジウム」報告*

水野孝則^{*1}・新野宏^{*2}・小林文明^{*3}
 鈴木修^{*4}・加藤輝之^{*5}・坪木和久^{*6}
 田村幸雄^{*7}・赤枝健治^{*8}・海老原智^{*9}

1. はじめに

2007年1月23日(火)に東京大手町の気象庁講堂において「竜巻シンポジウム—わが国の竜巻研究の今後の課題と方向性—」が、気象研究所の主催により開催された。

2006年は、9月17日に宮崎県延岡市で発生した竜巻により3名が亡くなられ、11月7日には北海道佐呂間町で発生した竜巻により9名が亡くなられるなど、竜巻によって甚大な被害が発生した年であった。このため、竜巻等の突風災害への社会の関心が非常に高まり、内閣府に「竜巻等突風対策検討会」が設置され、補正予算で気象庁のドップラーレーダー整備が加速するなど、竜巻に関する様々な対策がはじまった。研究面でも、科学研究費補助金や内閣府災害対策総合推進調整費による緊急研究が開始され、平成19年度の科学技術振興調整費の募集課題の1つに「竜巻等による突風災害対策に関する調査研究」が設定されるなど、竜巻関連の研究が大きく動き始めた年となった。

このように竜巻に関する周囲の状況の急速な変化が進む中、今回のシンポジウムは、これまでの竜巻研究のレビューと最新の研究成果を報告することで、行政、防災関係者や気象予報士、報道関係者に竜巻研究の現状を知ってもらうとともに、今後の竜巻研究にとっての課題や方向性を総合討論で明らかにしていこうという趣旨で開催された。

当日は、平日にもかかわらず約300名の参加者が集まり、当初用意した席だけでは足りず、急遽30席を追加して対応にあたるなど、たいへんな盛況であった。講演と総合討論は予定より大幅に時間を超過したが、ほとんどの人が最後まで席を立たず、竜巻に対する関心が非常に高いことがうかがえた。

本報告では、各講演者から講演内容等を報告するとともに、総合討論の概要を報告する。なお、当日のプログラムや講演などのプレゼンテーション資料については、気象研究所のホームページ (http://www.mri-jma.go.jp/Topics/tornado_sympto/tornado_sympto.html) で公開している。こちらもぜひご覧いただきたい。(水野孝則)

2. 講演

2.1 わが国における竜巻の発生状況とこれまでの研究の取り組みについて

シンポジウムへの導入として、参加者に竜巻に関する共通の認識を持ってもらうために、竜巻の定義、わが国における竜巻の発生状況、竜巻渦の構造・特性や竜巻の発生機構に関する理解の現状について解説した。

竜巻は、積雲や積乱雲などの対流雲から垂れ下がる柱状または漏斗状の雲を伴う激しい鉛直軸の渦と定義

* Report on Tornado Symposium.

^{*1} Takanori MIZUNO, 気象研究所企画室.

^{*2} Hiroshi NIINO, 東京大学海洋研究所.

^{*3} Fumiaki KOBAYASHI, 防衛大学校地球海洋学科.

^{*4} Osamu SUZUKI, 気象研究所気象衛星・観測システム研究部.

^{*5} Teruyuki KATO, 気象研究所予報研究部.

^{*6} Kazuhisa TSUBOKI, 名古屋大学地球水循環研究センター.

^{*7} Yukio TAMURA, 東京工芸大学.

^{*8} Kenji AKAEDA, 気象庁観測部.

^{*9} Satoshi EBIHARA, 気象庁予報部.

© 2007 日本気象学会

される（気象庁，1988）．竜巻は晴天日に砂漠や裸地上で観測される塵旋風とは異なり，積乱雲の上昇気流で力学的に駆動される渦である．積乱雲は水平スケールが10 km程度，寿命が1時間から数時間の現象であるが，これによって駆動される竜巻の平均的な（被害域の幅に基づく）水平スケールは100 m程度と小さく，平均的寿命も10分程度と短い（Niino *et al.*, 1997）．スケールが小さく，短寿命で，なおかつ猛烈な風で構造物を破壊することは竜巻の観測的研究を難しくしている最大の原因である．

1961-1993年の日本の竜巻の統計（Niino *et al.*, 1997）によれば，わが国では竜巻は1年当たり平均で約20.5個発生している．これは1年当たり約1000個発生するアメリカの約50分の1であるが，日本の面積はアメリカの約25分の1なので，単位面積当たりの発生率にするとアメリカの約半分ということになる．わが国は決して竜巻発生率の低い国ではない．

1916年以降のアメリカの竜巻発生数の年変化を見ると，この90年間で竜巻発生数は5～10倍近く増えている．これを見た途端に地球温暖化による増加だという人がいるがそれは誤りである．よく見ると，1950年頃と1990年頃に大幅な増加が起きている．1950年頃の増加は，1948年に竜巻予報が偶然当たったこと，気象用レーダーが開発され，竜巻予報に対する社会の関心が高まったことによると思われる．また，1990年代の増加はアメリカ全土を覆うドップラーレーダー観測網（NEXRAD）の整備により，竜巻の追跡調査が行われるようになったためである．このように竜巻の発生数は，人為的要因に強く依存し，地球温暖化のような緩やかなシグナルを検出できるほど信頼できる量ではない．わが国では1960年以後になってようやく，比較的信頼できる竜巻の統計データが蓄積され始めたが，今後も継続的にデータを蓄積する必要がある．

わが国の竜巻発生率は，1年当たり100 km四方当たり0.5個である．最も発生率が高いのは沖縄で9個，これに東京，千葉，宮崎，鹿児島，茨城，埼玉が続く．竜巻の被害域に入る竜巻遭遇確率が最も高いのは東京で4000年に1度である．従って，耐用年数がただか50年の一般家屋を竜巻に耐えるように作ることは経済的ではない．家屋に関しては保険で対応すべきで，竜巻に対する対策は人的被害の軽減を念頭に置くべきである．

わが国の竜巻の発生環境は，温帯低気圧に伴うものが30%，台風に伴うものが約20%，寒冷前線に伴うもの

のが16%の順に多い．

竜巻の構造に関しては，近年，車搭載型のドップラーレーダーによる風速分布の観測が行われ，貴重なデータが得られつつある（Wurman *et al.*, 1996；Bluestein and Pazmany, 2000）．1999年5月3日のオクラホマの竜巻では， 142 ms^{-1} という驚異的な風速が測られた（Wurman 私信）．竜巻直下の気圧記録の取得にも成功し，理論的に予想されていたように100 hPa近い気圧降下も観測されている（Lee *et al.*, 2004）．

竜巻の発生機構は，スーパーセル（Browning, 1964）と呼ばれる特殊な積乱雲に伴って発生する場合と，局地前線に伴って発生する場合（Wakimoto and Wilson, 1989）の2通りがあると考えられている．このうち，後者については，数値シミュレーションによる再現も行われており（Lee and Wilhelmson, 1997），水平シアの不安定により発生した渦がその上空に発達した対流雲の上昇気流により引き伸ばされて竜巻が発生することが広く認識されている．

スーパーセルの力学については1980年代の数値シミュレーションによる研究によりかなり良く理解されてきた．特に，スーパーセルがどのような環境場で発生するかについては良くわかってきており，時折アメリカで広範囲に竜巻大発生が起きる場合には，温帯低気圧の暖域の広い範囲でスーパーセルが発生しやすい条件が整うことや，台風・ハリケーンの進行方向右前方象限でスーパーセルが発生しやすいことがわかってきている．しかし，スーパーセルの下層に形成されるメソサイクロンと呼ばれる直径数 kmの循環については，その探知がアメリカでは竜巻警報の発令基準になっているものの，竜巻の発生にどのような役割を演ずるかについては未だに良く理解できていない．例えば，メソサイクロンがドップラーレーダーで観測されても竜巻が発生する確率は20%程度という統計がある．また，ドップラーレーダーで見るとほとんど同じ構造をしたメソサイクロンが見つかったとしても，竜巻が起きる場合と起きない場合がある（Wakimoto and Cai, 2000）．最近のスーパーセルに伴う竜巻の数値シミュレーション（Noda and Niino, 2005）によると，下層のメソサイクロンは地表面近くに強い上昇気流を作る上で重要な役割を果たし，竜巻の渦度の源としては地表面近くのカストフロントの水平シアに伴う鉛直渦度が重要な役割を演じていることが示唆されている．スーパーセルとこれに伴う竜巻の数値シミュレーション

ンには坪木和久氏（名古屋大学）や益子 渉氏（気象研究所）も成功しており、竜巻の発生機構の理解が進むことが期待される。（新野 宏）

2.2 竜巻の多様性—2006年9月17日台風13号に伴う竜巻を中心として—

わが国では台風、温帯低気圧、熱雷や冬季寒気場内などさまざまな気象条件下で竜巻が発生する。また、竜巻の構造もスーパーセル型やそうでない竜巻（ノンスーパーセル型）などさまざまな様相を呈する。今回のシンポジウムでは、これまでの観測結果をもとに、わが国で発生する竜巻の多様性を示した。

2006年9月17日から18日にかけて、台風13号（T0613）の接近、通過に伴い、宮崎県、大分県、鹿児島県、高知県で、現在判明しているだけで少なくとも10個の竜巻や竜巻と推定される突風災害が相次いだ。多くの竜巻は台風中心の外側に形成された二重のレインバンドのうち、外側のバンド内で発生、発達した対流セルの通過に対応していた。宮崎県延岡市では発達したセルの通過に伴い、14時03分頃竜巻が海岸線付近で発生し、約5分間延岡市内を駆け抜けた。延岡市の被害は長さ7.5 km、幅100~200 mの狭い範囲に集中し、1400棟を越える家屋等に被害もたらされた（宮崎地方気象台、2006；宮城ほか、2007）。また、竜巻の経路と交差したJR日豊線では特急にちりん9号が脱線・横転する事故も発生した。本事例の竜巻は、日中に発生したこともあり、竜巻渦の目撃者や写真などの記録が数多く存在した。また、延岡市の被害域内には風速計による観測記録の存在、墓石の倒壊や列車の横転など、最大風速を見積もるための証拠も残されていた。被害域から約100 m離れた風速記録には46 ms⁻¹の最大瞬間風速が記録され、墓石、列車から見積もられた風速はいずれもフジタスケール（Fスケール）のF2の範囲であった。延岡竜巻の被害スケールは、フジタ・ピアソンスケールではF2-P2-P2であった。

次に、最近10年間にわが国で発生した約200個の竜巻についての統計的特徴を示す。竜巻発生時の総観場を分類すると、温帯低気圧（50%）、台風（26%）、冬型（12%）、停滞前線（8%）、熱雷（4%）となる（小林・菅原、2007）。また、Fスケールごとの頻度をみると、F2以上の強い竜巻は全体の約20%を占め、米国のそれとほぼ同じ割合であった。ただし、F0スケールの数はF1に比べかなり少ない。台風に伴う竜

巻の台風中心に相対的な発生位置を竜巻強度ごとにプロットすると、北東象限に大部分が集中したものの南東象限にも相対的に強い竜巻（F2~F3）が存在した。また、台風の中心から500 kmあるいは1000 kmという離れた場所での発生も認められた。台風の最大風速半径を用いて規格化をすると、最大風速半径からその5倍の領域に集中した。温帯低気圧（寒冷前線と温暖前線）に相対的な位置関係を調べると、寒冷前線周辺と暖域に大部分が位置し、相対的に強い竜巻は寒冷前線周辺（プレフロント領域）に集中した。

筆者が近年、観測、解析した竜巻の事例をみると、スーパーセル型の竜巻として、1988年に千歳市近郊で発生した竜巻では直径10 kmのメソサイクロン（竜巻低気圧）の中に、直径1 km程度のマイソサイクロンと呼ばれる親渦、直径100 mの漏斗雲が存在するという明瞭な階層構造が、ドップラーレーダー観測、写真等のデータから確認された（Kobayashi *et al.*, 1996）。これに対して、ノンスーパーセル型の竜巻に関して、例えば2006年に藤沢市で発生した竜巻の事例では、寒冷前線上における線状降水帯（narrow cold frontal rainband）で形成されたフック状のエコー内に直径2 km程度の渦パターン（マイソサイクロン）がドップラーレーダーにより認められた（Kobayashi *et al.*, 2007a）。また、海上で発生した竜巻として、1994年に土佐湾上で発生した事例は、シアライン上で5本の竜巻が発生し、その構造は“waterspout”（例えばGolden, 1974）と類似していた（小林ほか、1997）。しかしながら、同じ海上で発生した竜巻でも2000年に東京湾上で発生した竜巻は、ひとつの積乱雲の中に高気圧性/低気圧性の渦が複数存在し、さらにこれらの渦は雲底の漏斗雲から上空高度5 km以上まで連続しており、複雑な様相を呈した（小林ほか、2001）。一方、雪雲に伴う竜巻について、Kobayashi *et al.* (2007b) は季節風卓越時に雲頂高度が3 km程度の降雪雲セルから竜巻が形成される過程を示した。また、冬季日本海上で発生する竜巻について、北陸沿岸における観測の結果、発生頻度の多さやさまざまな構造を有している実態が示された（Kobayashi, 2003）。

竜巻の同時多発的な発生事例は、前述の台風13号に伴う竜巻以外にも、2002年10月6日から7日にかけて温帯低気圧通過時に、鹿児島から千葉までの各地で発生した竜巻について報告例がある（小林ほか、2007a）。このことは、条件が整えば温帯低気圧や台風な

ど大規模な擾乱に伴い、複数の竜巻が発生することを示唆している。

以上のように、わが国では四季を通じてさまざまな条件下で竜巻が発生し、また竜巻（渦）の構造にも多様性が認められる。すなわち、親雲である積乱雲の構造も多岐に富んでいることを意味している。わが国における竜巻の構造を理解するためには、竜巻をもたらす積乱雲の構造、竜巻渦の構造、地上被害特性の観測データを蓄積することが必要である。また、スーパーセルでは竜巻とダウンバーストが隣り合わせて発生することが多く、地上被害調査でも竜巻とダウンバーストを明確に区別できない状況にしばしば遭遇する。このため、竜巻そのものの研究を進めるためにも、例えば、小林ほか（2007b）が示したようなダウンバースト等の構造に関する研究も同時に進めていくことが重要であろう。（小林文明）

2.3 2006年11月7日佐呂間町竜巻の現地調査報告と今後の観測的研究の課題

佐呂間町で発生した竜巻は、極めて狭い被害域にも関わらず、竜巻による年平均死者数0.5名を大きく超える9名の死者などの被害をもたらした。気象研究所は、気象庁本庁・札幌管区気象台・網走地方気象台と共同して翌日から現地調査を実施した。現地調査により、竜巻に関する基本的事柄と親雲の特徴につながる手がかりなどの貴重な事実を得ることができた。

現象の判定は、被害や飛散物の移動方向などから見積もった風向分布により、回転性のパターンと収束性のパターンの確認、被害域に関する特徴の確認（帯状領域、回転性と収束性の風のパターンの存在）、一般の方が撮影された写真などにもとづいて行い、今回の現象が竜巻であることを確認した。被害が最も激しかったのは、死傷者が出たトンネル工事事務所付近及びその北北西に位置する全壊家屋付近であり、工事事務所のプレハブ2階建て部分が竜巻により吹き飛んでいた。個々の被害の情報から被害分布図を作成し、長さ約1.4 km、幅200～300 m程度の極めて局所的な被害域であったことを確認した。また、別途作成した、遠方への飛散物の落下地点の分布図から、この竜巻の特徴のひとつである飛散物の長距離輸送が確認できた。直接確認したのもでも15 kmにも達していた。また、発生時刻が目撃証言やデジタルカメラによる写真に記録されていた情報から推定され、それらをもとに約90 km/hという移動速度も計算された。

第1表 日本における主なスーパーセル報告例。ミニとあるのはミニチュアスーパーセル。

発生日	事例（総観場やスーパーセルの特徴）
1978/2/28	神奈川県-東京都-千葉県で発生した竜巻（低気圧）
1990/9/19	栃木県壬生町で発生した竜巻（台風，ミニ）
1990/12/11	千葉県茂原市で発生した竜巻（低気圧）
1996/7/5	千葉県千葉市で発生した竜巻（低気圧，ミニ）
1996/7/15	茨城県で雹と突風（高気圧縁辺）
1999/9/24	愛知県豊橋市で発生した竜巻（台風，ミニ）
2000/5/24	茨城・千葉県で雹とダウンバースト（サーマルトラフ）
2001/5/11	茨城・千葉県で雹と突風（低圧部）
2001/8/22	埼玉県で竜巻，群馬県で突風
2001/9/10	東京都で発生した竜巻（台風）
2002/7/10	群馬県境町で発生した竜巻（台風，ミニ）
2004/9/30	東京都羽田空港内を通過した竜巻（台風）
2005/5/15	東京都，神奈川県で突風（サーマルトラフ）
2005/6/4	大阪府大阪空港でダウンバースト
2006/9/17	宮崎県延岡市で発生した竜巻など（台風）

詳細な現地調査の結果についてはインターネットで入手可能な「災害時自然現象報告書2006年第1号（札幌管区気象台，2006）」や本シンポジウムでの講演資料を参照されたい。

日本の竜巻については、被害調査の結果などを基にした統計的な研究、個々の竜巻についての事例解析的な研究が蓄積されつつある。また、最近のドップラーレーダーを用いた解析からは、顕著な竜巻の親雲の多くがスーパーセルであったことや、台風に伴う竜巻の親雲がミニチュアスーパーセルであった例が見出されている。第1表は、過去の報告などをもとに、わが国でスーパーセルが発生していたと考えられる事例の一部である。スーパーセルは、米国との大気環境との違いなどから、わが国では発生は稀であると考えられていた時期もあった。しかし、この表を見ると少なくとも1990年代以降における顕著な竜巻事例などで、スーパーセル及びそれに伴う突風等の被害が意外と多い。1990年代以降の例が多いのは、研究用や空港気象用のドップラーレーダーの数が増えて親雲中のメソサイクロンが確認できるようになったことと、竜巻等突風発生時に現地調査を含む解析が多く行われるようになった結果の反映であろう。

とはいえ、竜巻の発生メカニズムにつながる研究に有効なドップラーレーダーデータがある事例数は全体の中のごく少数である。そのため、たとえば日本海側などで発生する竜巻など、十分にはその実態がわかっていない。また、スーパーセルの発生状況やそれに伴う竜巻発生数の割合など、将来の竜巻予測にもつながる基本的な知見の蓄積もこれからである。気象庁は現在、現業レーダー網のドップラー化を進めている。今後、そのレーダー網により得られる観測データと現地調査による竜巻等突風の詳細な発生状況の情報とがあいまって、現象の理解が進むものと期待される。

この節の最後に、現地調査などで個々の突風の現象が特定されることの重要性を強調しておきたい。仮に竜巻による被害が発生したとしても、その被害が比較的軽微で、現地調査などが行われなければ、竜巻として認知されない可能性が高い。このことは、竜巻の発生の実態が適切に把握できないことにつながり、気象学的な観点からの研究や予測などの防災上の研究にとって障害となる。また、発生した時間や場所の特定、強風の強さの情報も重要である。これらが曖昧であったり、誤っていると、どの積乱雲が親雲であったかすら判らず、現象発生メカニズムの解明はできないのである。(鈴木 修)

2.4 雲解像モデルによる竜巻をもたらす積乱雲の再現シミュレーション

2006年11月7日13時25分頃北海道佐呂間町で竜巻が観測され、死者9人、重軽傷者26人の犠牲者が出た。その竜巻をもたらした積乱雲および竜巻の発生時の大気状態について、観測・客観解析データ及び水平分解能1 kmの雲解像モデル(1 km-CRM)の再現結果を用いて調査した。また、水平解像度250 mの雲解像モデル(250 m-CRM)を用いて、竜巻をもたらした積乱雲の再現を試み、その積乱雲の内部構造について調べた。

竜巻が発生した当日、発達した低気圧が北海道北方に存在し、その低気圧から延びる寒冷前線が北海道を通過した。竜巻をもたらした積乱雲の発生位置は寒冷前線の東側にあたる日高山脈の東山麓で、その上空では概ね強い南よりの風が吹いていた。また、アメダスでの地上気象観測によると寒冷前線は佐呂間町を15時頃通過しており、竜巻は寒冷前線の東側の暖域内で発生していた。よって、竜巻をもたらした積乱雲は寒冷前線の東側の暖域内を北北東に移動していたことに

なる。

竜巻をもたらした積乱雲の発生位置付近での下層風は、山岳の影響を受け東よりの風になっていた。一方、高度3 km付近では東より風から西より風が変わり、高度が高くなるほど風速が強くなっていた。ストームに相対的なヘリシティ―SREH(ストームの移動速度ベクトルとして、地上～高度6 kmまでの密度平均した風ベクトルに対して、右側に30°傾き、大きさは75%を仮定した)を計算すると、 $1000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 以上になる。このような風の分布は、回転する上昇気流を伴う巨大積乱雲(スーパーセル)が発生しやすい条件である。また、自由対流高度は非常に低く(～数十m)、上昇気流が到達できる高度(浮力がなくなる高度)は約350 hPa(7～8 km)であった。この高度は気象レーダーによる観測とほぼ一致する。対流有効位置エネルギーCAPEは 400 J kg^{-1} 以下であり、米国中西部でスーパーセルが発生する典型的な値(～ 2000 J kg^{-1})に比べると小さかった。また、積乱雲の北側の下層で気圧が低下して東風が生成・強化されていた。これにより積乱雲の北側で常に大きなSREHが維持されていた。積乱雲の移動に先行して北海道の内陸部に進入していた高相当温位気塊が、その東風により内陸部まで進入することができていた。これにより積乱雲が維持されていた。

250 m-CRMで再現された積乱雲は、高さ8～10 km、水平の広がり20～30 kmであり、位置こそ約10 km東側にずれていたが、気象レーダーでの観測と非常によく一致していた。また、周辺の風の分布を調べると、積乱雲の下降気流によって作られた冷氣(ガスト)と積乱雲の下層に吹き込む暖かく湿った南よりの風が降水域の東側下層で衝突し、局地的な前線(ガストフロント)を形成していた。ガストフロントの上空では、上昇流域となっているとともに、ガストフロント上には渦状の循環が多数見られた。これらの循環のうちの1つが上空の強い上昇流によって引き伸ばされて、竜巻になった可能性が考えられる。

積乱雲の内部構造を詳しく見ると、南東側では南風により暖かい湿った空気が流入し、強い上昇気流域を作っていた。この上昇流は非常に強かったために雨やあられなどは落下することができずにヴォルト(丸天井の意味)と呼ばれる領域が形成されていた。また、上昇流域にはスーパーセルの判断基準とされる 10^{-2} s^{-1} 以上の正の渦度が存在していた。さらに、上空(0°C 以下)での降水物質は、雪ではなく、ほとんど

があられであり、エンブリオカーテンと呼ばれるあられや雹が効率よく成長できる構造が再現されていた。一方、上昇流域の西側には雨などの落下や蒸発により顕著な下降流域が作られていた。以上の解析結果から、佐呂間町に竜巻をもたらした積乱雲がスーパーセルであったと推測される。

竜巻が発生したときの佐呂間町付近の大気状態は、山岳を南よりの風が乗り越えることによるフェーン現象で、高度約1 km以下の大気下層が高温（地表付近の気温 $\sim 16^{\circ}\text{C}$ ）・乾燥化（相対湿度 $\sim 70\%$ ）していた。このような環境下、雨滴の蒸発により下降流が強められてガストが強化されていた。この強化によりガストフロント上の鉛直渦度が大きくなることから、佐呂間町付近で起こっていたフェーン現象が竜巻発生の一要因だと考えられる。また、竜巻が発生した場所は2つの谷が合流する位置にあたり、地形的な要因も考えられる。今後、この2つの要因を検証するために、雲解像モデルの水平分解能を50 mにして、竜巻の再現実験を行う予定である。（加藤輝之）

2.5 積乱雲と竜巻のシミュレーション実験

北海道佐呂間町や延岡市で発生した竜巻など、甚大な被害をもたらす竜巻が続いて発生していることから、竜巻の予測についての関心が高まっている。人的被害を軽減するためには発生予測が不可欠である。竜巻の予測には、ドップラーレーダーを用いて積乱雲を検出することで予測する方法がある。一方で近年の計算機のめざましい発達により、竜巻をもたらす積乱雲の発生をシミュレーションすることで、竜巻発生のポテンシャルを予測する方法が考えられる。前者の方法では積乱雲が発達してからでないと予測できないが、後者の方法では計算機が高速であれば、数時間前から竜巻発生の可能性を予測できることが期待される。

名古屋大学地球水循環研究センターでは、暴風や豪雨雪をもたらす気象のシミュレーションを目的として、雲解像モデル CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) の開発を行ってきた。このモデルは非静力学・圧縮系を基礎方程式とするシミュレーションモデルで、地球シミュレータなどの並列計算機で効率よい計算を行えるように設計されたものである。このモデルを用いて、竜巻とそれをもたらす積乱雲のシミュレーションを行った。このシンポジウムでは、1999年9月24日に豊橋市で発生した竜巻と、2006年9月17日に延岡市で発生した竜巻について、このモデルを用い

たシミュレーションの結果を報告した。また2006年11月の佐呂間町の竜巻についても、初期的な結果について報告した。

竜巻は積乱雲などの対流雲に伴って発生する鉛直軸を持つ渦のことで、気象庁(1988)は、「竜巻は積雲、積乱雲などの対流雲に伴って発生する鉛直軸まわりの激しい渦で、しばしば漏斗状や柱状の雲を伴う。」と定義している。ここでは数値シミュレーションの結果から竜巻を判別するために、竜巻を「遠心力と気圧傾度力のバランス、すなわち旋衡風バランスが極めて高い精度で成立している大気の渦」であると定義する。シミュレーションの結果得られる渦度と気圧分布からこれが成り立っている場合、竜巻がシミュレーションされたと判定できる。経験的に竜巻の場合、その渦度は $0.1\sim 1\text{ s}^{-1}$ 程度になる。

竜巻のシミュレーションでは、上記の定義のように遠心力と気圧傾度力のバランスが成立する渦が再現されなければならない。このため実験の解像度は数十mであることが必要である。このような計算は非常に大規模になるので、膨大な計算機資源が必要である。ここでは2006年9月17日に宮崎県延岡市で甚大な被害をもたらした竜巻のシミュレーションの結果についてやや詳しくまとめる。

延岡市を通過した竜巻は、台風0613号の東側に形成された外域降雨帯で発生した。竜巻は延岡市だけでなく、いくつかの地点で発生が確認された。気象庁レーダーから、これらの竜巻は台風降雨帯内の発達した積乱雲が通過するときに発生したことが示された。雲解像モデル CReSS を用いた500 m 解像度のシミュレーションでは、鹿児島県西方海上にある台風中心の東側に、顕著な降雨帯が形成された。延岡市で竜巻が観測された17日1400 JST には、シミュレーション実験でも延岡市上を北西から南東に横切って降雨帯が延びていた。この降雨帯を構成する積乱雲は、強い上昇流域に 0.01 s^{-1} 以上の渦度を持つなどのスーパーセルの特徴を持っていた。

水平解像度75 mの実験ではスーパーセルの詳細な構造がシミュレーションされた。そのセル南端ではフック状構造が明瞭で、そこに竜巻がシミュレーションされた。竜巻の渦度は、ほぼ円形に集中しており、中心で 0.9 s^{-1} 以上の大きな渦度となった。気圧偏差と比較すると、旋衡風バランスが極めて高い精度で成立しており、この渦は竜巻と判定される。この竜巻の渦の直径は300 m程度で、観測されたものとよく対応

している。この竜巻に伴う風速は竜巻の進行方向（北向き）の右側（東側）で 70 ms^{-1} 以上の強風に達した。一方で左側（西側）では相対的に弱い。このような竜巻周辺の風速の非対称分布は、現地調査で明らかになった被害分布をよく説明するものである。

竜巻は台風のように遠方からやってくるものではない。延岡市や佐呂間町の竜巻もそうであったように、忽然とそこに現れる。地球の大気にはそのようにして竜巻を発生させるメカニズムが備わっている。竜巻は発生しやすい地域とそうでない地域はあるが、国内ではどこで発生しても不思議ではない。強力な竜巻はある種の発達した積乱雲によって生みだされる。竜巻の予測は、竜巻そのものではなくその親となる危険な積乱雲を予測することで、間接的にできると考えられる。これまでの研究で、ある強さ以上の渦を持つ積乱雲は、竜巻と関係あることがわかっている。しかしながら、未知のタイプの積乱雲は多数あり、また積乱雲の竜巻を発生させるメカニズムについても未解明な点が多い。竜巻予測には積乱雲を研究し、積乱雲と竜巻の関係を明らかにすることが不可欠である。

（坪木和久）

2.6 竜巻に対する構造物等の設計上の問題点と気象分野への期待

2005年12月25日酒田周辺での突風では、JR羽越本線いなほ14号が脱線し、死者5名、負傷者32名を出した。しかし、1年以上経過した今でも、原因となった突風に関して、気象庁は見解を示していない。社会が一連の突風災害に関心を寄せるきっかけともなった事故でもあり、先ず、突風の特性について、簡単に紹介する。脱線現場の築堤すぐ西に位置していた農機具小屋が、基礎コンクリートごと引き抜かれて浮き上がり、バラバラに分解して飛散した。小屋の各部位の、重量物は北北東へ、軽量物は東または南東方向へ飛散した。小屋に作用する空気力の風洞実験、および飛散物方向の詳細な分析を行った結果、基礎が引き抜かれて浮き上がった瞬間の風向は南南西であると推定された。突風の進行方向（西南西から東北東）の右横から風が吹いており、脱線現場付近では旋回性の強風、つまり“竜巻”が発生していた可能性が高い（田村ほか、2007）。

ところで、日本における竜巻は比較的小規模で、測器で観測された風速等の情報が殆ど無く、現象が未知であるため、具体的な対応策を考えるのが難しい。ま

た、個々の住宅等が竜巻に遭遇する確率は、数万～数十万年に1回程度と非常に低く、これに耐えるように設計するのは極めて不経済である。人命を如何に確保するかを、別途考えるのが現実的な対応と言える。ただし、市町村単位で竜巻による住宅被害を受ける確率は数百年～千年に1回程度となり、豊橋市のように頻発する地域では、より高い遭遇確率となる。したがって、都市防災のターゲットとしては考えておくべきであろう。鉄道や送電施設などのようなライン状構造物の場合は、更に遭遇頻度が高い。JR羽越本線いなほ14号脱線事故の約1か月前の2005年11月8日にも、秋田県大湯村、琴丘町で一直線上の突風被害があり、JR奥羽本線を横切っている。2006年9月17日の延岡市の竜巻はJR日豊本線を横切り、特急にちりん9号が脱線した。鉄道線路は全国総延長が約27,000 kmもあり、多くが海岸線に沿って走っている。海岸から上陸する竜巻の多い日本では、数個に1回程度の高い頻度で、竜巻が鉄道線路を横切る。また、原子力発電をはじめとする発電施設、警察や消防署などの災害時重要施設など、社会的重要度に応じた考え方も整理しておく必要がある。

最近の突風被害からは、飛散物対策の重要性が目玉される。屋根瓦ほか、外装仕上材の被害は、飛散物となって被害を連鎖、拡大させる。室内に居て頭部に飛散物の直撃を受けて死亡した例すらある。竜巻の場合は上昇気流の影響もあり、飛散物の影響する範囲は広い。海外では、飛散物に対する外装材耐力規定の例があるが、我が国では飛散物に関連する規定がなく、竜巻だけでなく、台風時も大きな問題である。飛散物に対する雨戸やシャッターの必要性も改めて強調すべきである。

室内圧変化による被害の進展も重要である。壁面やガラス面など開口部が飛散物によって破損し、室内圧が急激に上昇し、屋根の全体飛散につながる例や、大きな金属屋根面が予め飛散物によって部分的損傷を受けた状態で、最も強い風がやや遅れてやってきて、大型スーパーの屋根パネルが大規模に破損し、室内圧が急激に低下して、出入口サッシュが室内側へ引き倒れ、死者1名が出た例もある。

佐呂間町の現場事務所の飛散は、9名の死者を出し、重要な問題を浮き彫りにした。“仮設”であるため、通常レベルでの基礎の緊結はされておらず、竜巻で倒壊するとともに壁面や屋根部分がバラバラに破壊して飛散し、数十m離れた地面および隣接建物に激

突したのである。仮設構造物の設計荷重の設定には、従来から誤った考え方が採用されている。例えば、「風荷重に対する足場の安全技術指針」（仮設工業会）では、足場の平均存置期間が6.2か月、シートが4.5か月であるという理由で、再現期間1年の風速で耐風設計することとしている。しかし、足場は、場所は移動しながらも、常に都市の中の工事現場に存在する。現場事務所も、場所は変わりながらも常に都市内に存在し、事務、会議、食事、宿泊などに“常時”使われ、通常のオフィスビルなどと利用形態は全く同じである。個々の任務での供用期間の短さが、設計荷重低減の根拠にならないことは明白である。

JR羽越本線いなほ14号の脱線と日豊本線にちりん9号の脱線では、前者が死者5名、負傷者32名、後者が軽傷者のみと、人的被害に大きな差があった。前者は夜間で、折からの吹雪もあって、運転手が突風を視認できなかったが、後者は昼であり、左前方から竜巻がやってくるのが視認でき、急停車することができた。つまり、人命確保には予知、予見とそれに伴う適切な対応が不可欠である。予知、予見ができれば、列車や航空機の運行回避や停止、歩行者のコンクリート建物や壁の多い所への避難、住宅での雨戸、シャッター、カーテンなどの閉鎖などが可能となる。気象分野へは、竜巻等の気象学的な実態把握はもとより、ナウキャスト的な予測技術の確立、および適切な情報開示と伝達手法の研究が強く望まれる。

冒頭に述べたとおり、JR羽越本線事故の原因となった突風（恐らく竜巻）については、未だに気象庁の公の資料に記述がない。一方、延岡市や佐呂間町の竜巻など、後発の竜巻は既に「災害をもたらした竜巻一覧」に掲載されている。このことについては、国土交通省航空・鉄道事故調査委員会の結論が出てないので気象庁独自の見解は出せないとも仄聞する。気象庁が国民から負託されているのは、然るべく資料に基づいて、迅速にその事象や成因に関して独自の見解を出し、個人や地方行政庁などが防災対策を講じるための一助とすることである。防災対策を適切に講じるには、竜巻等の確率統計的解析、地域特性の把握等が必要であり、現状の「災害をもたらした竜巻一覧」では、漏れが多く、統計的検討には不十分である。記録に抜けないということも重要であり、少なくとも可住地での突風情報をより緻密に把握し、網羅的に記録に残していく必要がある。もちろん、全てに関して一級の情報を得るのは難しく、“情報の質のランク付け”

など、フレキシブルな考え方を取り入れる必要があろう。（田村幸雄）

3. 総合討論

総合討論は、新野の司会進行により、「竜巻の研究面における課題」、「竜巻の気象業務、防災面における課題」について議論された。また、赤枝（気象庁観測部）と海老原（気象庁予報部）から、気象庁業務における竜巻関連の動向について話題提供があった。

「竜巻の研究面における課題」では、「観測」、「数値シミュレーション」、「統計」の3つの研究手法の課題について、それぞれ討論が行われた。

「観測」では、竜巻の発生機構や竜巻の親雲の構造を明らかにするため、ドップラーレーダー、研究プロジェクトによる観測、Phased Array Radar などについて話題提供と意見交換が行われた。ドップラーレーダーについては、3次元的な速度場を観測することができる最も有効な測器である。関東地方における研究用レーダーによるネットワークで高密度な観測を行う試みや、現業用レーダーのドップラー化によって、竜巻の観測データも増加し、この分野の研究もより進展することが期待される。また、鈴木は、ドップラーレーダーが無くても地上観測データを詳細に見ることでスーパーセルであったかどうかがわかる場合もあるので地道な調査も必要であると述べた。

「数値シミュレーション」は、坪木や加藤の講演にもあったように、現実的な環境場でも竜巻が再現できるようになるなど、急速に進展がみられる手法である。しかし、非常に大きな計算機資源を使用することや、地形の影響などまだ困難な部分も多く、加藤は、テーマを絞って効率的な研究を行う必要があるという意見を述べた。また、複数の顕著な過去の事例について、再解析データを使用してシミュレーションを行っていく必要性を述べた。新野と坪木は、シミュレーションでは竜巻ができない場合の方が多いことや、できる場合とできない場合を区別し、できる場合の条件を少しずつ変更して感度実験を行う必要があるとした。さらに、スーパーセル型の竜巻が強調されている傾向があるので、もう少し、非スーパーセル型の竜巻も調べる必要があることを述べた。

「統計」については、新野や田村が、統一した基準にもとづく信頼できるデータベースを構築することが重要であると訴えた。データベースは、信頼できる発生確率、再現期間の算定や建築物の設計荷重の予測に

必須であり、竜巻が発生しやすい環境を調べる上でも有用である。また、竜巻の強さの推定に使用されるFスケールについては、アメリカの建築物が基準になっていることから、日本での適用が難しい場合があることが指摘されている。アメリカでは、典型的な建物の被害について詳細な対照表と写真にもとづく Enhanced Fujita Scale が使われはじめてきており、日本でもそのようなスケール作成の努力が必要なが述べられた。

その後、次の議論に入る前に、赤枝と海老原から話題提供があった。赤枝は「竜巻実況把握に向けたドップラーレーダー観測の現状と課題」と題し、気象庁の現業レーダー20台のうち、平成19年度末までに過半数の11台がドップラー化されること、また、ドップラーレーダーで検出できるメソサイクロンと竜巻の関係について、定量的に把握する必要があることを述べた。海老原は「突風等に対する短時間予測情報の検討状況」と題し、平成22年度から気象庁で開始される予定の「突風等に対する短時間予測情報」の概要について紹介した。数値予報によるポテンシャル情報、(ドップラー)レーダーによる積乱雲の検出、メソサイクロンの検出を組み合わせ、情報を作成する予定であることを述べた。また、ダウンバーストの予測には課題が多いことや、業務の開始までには、改善のための技術開発がさらに必要であることを述べた。

「竜巻の気象業務、防災面における課題」の議論では、被害調査における課題や被害を最小限にするための方策について意見が交換された。

現地の被害調査では、田村は建築、土木分野の専門家との連携、協力や、マニュアルの必要性を述べた。また、小林はメソ分野の若手研究者が現地調査にあまり行っていない現状を述べ、若手研究者へのトレーニングや資金的な援助が必要であることを訴えた。

竜巻の防災では、田村が飛散物に対する問題や耐風基準、防災マニュアルについて意見を述べた。また、坪木は、竜巻の予報についてはその性質上「空振り」が多くなることは避けられず、「狼少年」の問題が起こることを指摘した。そのため、気象庁が中心となって、今から市民への竜巻に関する教育や広報を行ってほしいと述べた。

最後に、新野が、研究面では気象学と風工学のそれぞれの専門家が連携することが重要であることや、現業機関である気象庁が予報を行っていく上でも、最新の研究成果を取り入れるとともに、研究に必要な観測

データなどを提供していくといった連携をうまくやっていくことが必要であること、さらに防災にとって重要な市民への教育は研究、現業の両者が努力していくことが必要であるとまとめ、討論が終了した。

(水野孝則)

参 考 文 献

- Bluestein, H. B. and A. L. Pazmany, 2000 : Observations of tornadoes and other convective phenomena with a mobile, 3-mm wavelength Doppler radar : The spring 1999 field experiment, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 2939-2951.
- Browning, K., 1964 : Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds, *J. Atmos. Sci.*, **21**, 634-639.
- Golden, J. H., 1974 : The life cycle of Florida Keys' waterspouts. I, *J. Appl. Meteor.*, **13**, 676-692.
- 気象庁, 1988 : 気象庁地上気象観測法, 第13章, 161.
- Kobayashi, F., 2003 : Doppler radar observation of winter tornadoes over the Japan Sea. *Proceedings of 31st International Conference on Radar Meteorology*, Seattle, 613-616.
- 小林文明, 菅原祐也, 2007 : 最近10年間のわが国における竜巻の統計的特徴, 2007年度春季大会講演予稿集, (91), 325.
- Kobayashi, F., K. Kikuchi and H. Uyeda, 1996 : Life cycle of the Chitose tornado of September 22, 1988, *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 125-140.
- 小林文明, 千葉 修, 松村 哲, 1997 : 1994年10月4日土佐湾上で発生した竜巻群の形態と構造, *天気*, **44**, 19-34.
- 小林文明, 上野洋介, 杉本ゆかり, 岩元大地, 2001 : 水上竜巻に伴う渦の鉛直構造, 2001年度春季大会講演予稿集, (79), 108.
- Kobayashi, F., Y. Sugawara, M. Imai, M. Matsui, A. Yoshida and Y. Tamura, 2007a : Tornado generation in a narrow cold frontal rainband—Fujisawa tornado on April 20, 2006—, *SOLA*, **3**, 21-24, doi : 10.2151/sola.2007-006.
- Kobayashi, F., Y. Sugimoto, T. Suzuki, T. Maesaka and Q. Moteki, 2007b : Doppler radar observation of a tornado generated over the Japan Sea coast during a cold air outbreak, *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 321-334.
- 小林文明, 藤田博之, 野村卓史, 田村幸雄, 松井正宏, 山田 正, 土屋修一, 2007a : 2002年10月7日横須賀で発生した竜巻—10月6日から7日にかけて各地で発生した突風災害に関連して—, *天気*, **54**, 11-22
- 小林文明, 鈴木菊男, 菅原広史, 前田直樹, 中藤誠二,

- 2007b: ガストフロントの突風構造, 日本風工学会論文集, **32**, 21-28.
- Lee, B. D. and R. B. Wilhelmson, 1997: The numerical simulation of nonsupercell tornadogenesis. Part II Evolution of a family of tornadoes along a weak outflow boundary, *J. Atmos. Sci.*, **54**, 2387-2415.
- Lee, J. J., T. M. Samaras and C. R. Young, 2004: Pressure measurements at the ground in an F-4 tornado. 15.3, Proceedings of the 22nd Severe Local Storm Conf., Amer. Meteor. Soc.
- 宮城弘守, 菊川裕規, 松井正宏, 曹 曙陽, 田村幸雄, 2007: 2006年台風13号に伴って発生した竜巻による延岡市の被害調査速報, 日本風工学会誌, **110**, 47-59.
- 宮崎地方気象台, 2006: 平成18年台風第13号に伴い9月17日に宮崎県で発生した竜巻等の突風, 災害時気象調査報告, http://www.fukuoka-jma.go.jp/miyazaki/H18tatsumaki/mlya_tatsumaki.pdf (2007年3月1日現在).
- Niino, H., T. Fujitani and N. Watanabe, 1997: A statistical study of tornadoes and waterspouts in Japan from 1961 to 1993, *J. Climate*, **10**, 1730-1752.
- Noda, A. T. and H. Niino, 2005: Genesis and structure of a major tornado in a numerically-simulated supercell storm: Importance of vertical vorticity in a gust front, *SOLA*, **1**, 5-8.
- 札幌管区気象台, 2006: 平成18年11月7日から9日に北海道(佐呂間町他)で発生した竜巻等の突風気象災害報告, 災害時自然現象報告書, 2006年第1号.
- 田村幸雄, 須田健一, 吉田昭仁, 松井正宏, 2007: 2005年12月25日 JR 羽越本線いなほ14号脱線現場付近の風況推定, 日本風工学会・年次研究発表会.
- Wakimoto, R. M. and H. Cai, 2000: Analysis of non-tornadic storm during VORTEX 95, *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 565-592.
- Wakimoto, R. M. and J. W. Wilson, 1989: Non-supercell tornadoes, *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1113-1140.
- Wurman, J., J. M. Straka and E. N. Rasmussen, 1996: Fine-scale Doppler radar observations of tornadoes, *Science*, **272**, 1774-1777.