

第31回メソ気象研究会の報告

—突風—

コンビーナー：楠 研一 (気象研究所)

1. はじめに

2006年9月の宮崎県延岡市, 11月の北海道佐呂間町など, 近年, 竜巻等の突風による大きな災害が起きている。それをうけて最近, 突風に関する調査や突風の早期探知に関するプロジェクトが実施されている。また気象庁では2008年3月から竜巻注意情報を発表するようになった。

そこで今回の第31回メソ気象研究会 (2008年11月18日コラッセ福島 (福島市) にて開催) では, 突風をもたらしそうな局地風とそれによる災害に焦点を当て, これまで得られた知見をまとめるとともに, 突風防災のため今後どのような技術が期待されるのか, それにより減災はどこまで可能であるのかなどを議論した。

楠 研一 (気象研究所)

2. 突風現象の理解と防災

新野 宏 (東京大学海洋研究所)

突風現象の理解と防災に関して, 個人的に興味を持っていること, 重要と思うことについて最近の拙文 (新野 2008) に基づいて述べた。

突風現象の防災にはまず現象のメカニズムの理解が不可欠である。台風や低気圧に伴う突風被害は, 地形や乱流の影響を受けて局地的に起きることが多い (例えば Fujita 1992)。可搬型ドップラーレーダーによるハリケーン内部の観測 (Wurman and Winslow 1998) では, 水平方向数100m 間隔の縞状の強風域が見られるが, その形成メカニズムは未だ完全には理解されていない。

積乱雲に伴う突風には, 竜巻とダウンバーストなどがある。竜巻については, スーパーセルに伴う竜巻の発生機構と渦度源の解明が待たれている (益子氏の講

演参照)。また, 冬季の日本海側の竜巻の観測の充実とメカニズムの解明も期待されている (小林氏, 楠氏の講演参照)。ダウンバーストについては, なぜ50m/s もの突風が生じるのかは現在も本当には理解できていないように思う。また, 我が国では wet downburst しか起きないと考えられていた (大野ほか 1996) が, 冬季の関東平野で dry downburst が起きることが指摘されており (山内ほか 2008), その実態の解明が待たれている。

1976年以前はダウンバーストが発見されていなかったため, 我が国の突風被害の報告では竜巻とダウンバーストの区別が明確でなかった。このため, 竜巻のデータベースを作成する際には, 文献に遡って現象を判断する必要があり苦労した経験がある。夜間の現象では, 詳細な現地調査無しでは現象の特定が難しい場合も多い。現地調査に基づく突風の風速の推定については, 2007年2月からアメリカ気象局では Enhanced Fujita Scale (EF スケール) が使われ始めており, 日本の建物に即した EF スケールの開発が待たれている。信頼できる突風の統計を蓄積するためには気象台や日本風工学会が行っている現地調査は非常に有用であり, 継続が期待される。

地球温暖化に関連しては, 突風現象の長期変化に興味を惹いている。突風現象の報告数は, 一般市民や関連機関の関心, 情報伝達手段の革新, ドップラーレーダーなどの新しい観測技術の発展と共に変化するものであり, 長期間に渡る安定した統計を得ることは容易でない。スーパーセルの発生しやすい環境場を表すパラメータはある程度わかっているので, 客観解析や温暖化実験でこれらのパラメータの変化傾向を調べることは興味深い (例えば, 加藤 2008)。

突風の予測は現在のところ, スーパーセルの発生しやすい環境場に基づくポテンシャル予報と, ドップ

ラーレーダー等の情報に基づく実況監視とによっている。前者は数値予報の情報に基づくが、近い将来、アンサンブル予報で、より客観的に危険度を判断することが可能となるかも知れない (Seko *et al.* 2009)。後者については、2008年3月から気象庁による竜巻注意情報の提供が開始されている (海老原氏の講演参照)。今後、適中率・捕捉率をどのように向上させるか、また適中率・捕捉率が低い情報をいかに防災に繋げていくかが課題となっている。防災科学技術研究所など関東地方の大学・研究機関ほかで共同で開始した強風のリアルタイム監視システム (X-NET; Maki *et al.* 2008) も興味深い試みである。

突風災害を防ぐためには、以上のような突風現象のメカニズムの研究や、より良い予測・予知情報の提供が不可欠であるが、如何に良い情報を提供してもそれを受け取る自治体や企業・一般市民の適切な対応がなければ有効に働かない。気象学会・風工学会・気象予報士会を始めとした各種団体、気象庁・自治体・気象会社などによる啓発が不可欠である。また、携帯電話などの新しい情報伝達手段を利用したきめ細やかな警報伝達システムの構築も必要であろう。

3. 竜巻・ダウンバーストの観測

小林文明 (防衛大学校地球海洋学科)

竜巻やダウンバーストなど瞬発性の現象をリアルタイムで観測することは難しい。しかしながら、発生メカニズムの解明や防災 (予測) の観点からも、わが国で発生する竜巻・ダウンバーストの構造を知る必要がある。特に、① F0~F1竜巻の実態、②親雲内で形成される渦の構造、③竜巻とマイソサイクロンの関係について観測的にデータを蓄積することが望まれる。

わが国では温帯低気圧・前線、台風、冬季季節風、停滞 (梅雨) 前線などさまざまな擾乱に伴い年間を通じて竜巻が発生する。竜巻の大部分は F1以下 (1997~2006の10年間では9割が F1以下) であるものの、F0~F1の竜巻でも交通や仮設構造物など大きな災害に結びつく可能性があることからその実態を明らかにする必要がある。これらの竜巻は相対的に寿命が短く、スケールが小さいことから、その全体像の把握は難しい。例えば、海上で発生した竜巻は目視に頼らざるを得ず、夜間の発生数はゼロである。また、たとえ陸上で被害が生じて、F0スケールの軽微な被害はなかなか竜巻と認定されにくい。実際、F1の竜巻に比べて F0の竜巻数は半数以下と少ない。

観測的に竜巻の全体像を把握するためには、雲底下の竜巻渦と雲内の渦 (メソサイクロン) を同時に捉えなければならない。スーパーセルタイプの竜巻の場合は、直径10km程度のメソサイクロンの中に直径1km程度のマイソサイクロン、直径数十mの竜巻渦が形成される、階層構造を示すことがある (例えば、Kobayashi *et al.* 1996)。それに対して、F1スケール以下の竜巻はいわゆるノンスーパーセル型である場合が多く、竜巻渦の親渦であるマイソサイクロンのみが見えれば観測される。マイソサイクロンをレーダーで解像するには、10km程度の近距離から、高度方向の変化も含めて観測する必要がある。

竜巻とマイソサイクロンの関係について、詳細を観測できた寒冷前線の線状降水帯 (Kobayashi *et al.* 2007a)、冬季季節風下 (Kobayashi *et al.* 2007b)、waterspout (Sugawara and Kobayashi 2008) の事例をみると、漏斗雲とマイソサイクロンはほぼ同時に形成され、漏斗雲の寿命 (5~10分) に対して、マイソサイクロンの寿命は相対的に長く10~20分であった。マイソサイクロンの存在高度は、高度500m~4kmと事例により異なっていた。先行するメソサイクロンが長時間 (1時間程度) 持続した事例 (例えば、Niino *et al.* 1993; Kobayashi *et al.* 1996; Suzuki *et al.* 2000; 坪木ほか 2000) に比べて、上述の竜巻では積乱雲の発生とマイソサイクロンの形成が同時の場合もあり、その形成過程が異なっていた。メソサイクロンとマイソサイクロン、マイソサイクロンと竜巻渦はそれぞれ構造上の違いはあるのか、違いがあるとすればその関係はどうなっているのか興味深い。

4. 高解像度シミュレーションによる強風の時空間変動の解析と突風の診断

竹見哲也 (京都大学防災研究所)

計算機資源の絶え間ない発展により、近年の領域気象シミュレーションにおいては水平格子幅数100mでの高解像度計算が研究レベルでは十分可能な状況にある。今後もさらなる高解像度化が見込まれ、格子幅100m未満での領域計算も現実的になるであろう。それでは、仮に総観規模からメソスケールでの気象場が忠実に再現されたとすれば、現在の領域気象モデルの枠組みにおいて高解像度化により地上近傍での強風の時空間変動や突風が定量的に予測することが可能となるであろうか。この点について、これまでの研究成果のいくつかを紹介しながら議論した。

領域気象モデルを用いてネスティングにより30km四方程度の領域を111m格子で解像して比較的平坦な半島上での地上風の長期シミュレーションを行うと、格子分解能を上げたことでより細かい時間変動やより顕著な最大風速が表現されることが確認できた(畑村ほか 2006)。しかし、突風のように瞬間的に風速が強化される様子を再現することは困難である。そもそも地上風速の変動は、気象擾乱が持つ固有の構造のみならず地形の起伏や地面粗度(植生や人工構造物)により生じる乱流構造に強く依存し、非定常性が極めて強い。したがって、気象モデルの高解像度化にあたっては、より適切な乱流モデルを用いる必要があるだけでなく、さらに地面粗度をより現実的に表現する必要がある。

例えば乱流境界層の非定常計算にラージエディシミュレーション(LES)手法を用い、かつ都市の構造物群を陽に表現すれば、瞬発的な変動が再現されるようになる(田村ほか 2006)。工学分野でしばしば用いられるLESにおいては、現実的な粗度表現が可能となっており、さらに計算領域も1km四方以上に拡大してきている。このようなLESモデルの広域化は、気象モデルの高解像度化との間で交錯領域を有することになる。気象モデルでは現実的な気象場での大域的な風速変動を再現できることが長所であり、一方LESモデルでは複雑地形・構造物周りでの微細な乱流変動を表現できる利点がある。このような両モデルの長所を活かした風速変動の融合解析手法により、突風の定量的な診断が可能になると考えられる。このような試みはいくつかなされ始めている(丸山ほか 2006; Takemi *et al.* 2006; 富永 2007)。しかし、気象モデルが対象とする現象のスケールと地面粗度に起因する乱流のスケールとの間には大きなギャップが存在しており、物理的に整合性の取れた解析手法を構築することは容易ではない。とは言え、気象モデルにLES解析手法を取り込み、また地形の微細な起伏や人工構造物を陽に表現することは、突風の定量的な診断や予測には必要不可欠であると考えられる。特に複雑地形上あるいは都市域での突風を数値的に再現する場合には、乱流構造に伴う風速の非定常性を精度良く表現しなければならない。新しいアイデアでの突風予測技術の開発が求められていると言える。

5. 寒冷前線に伴うガストフロントによる突風

渡邊 明(福島大学理工学群)

2008年2月23日小名浜港でガントリークレーンが逸走するという事故が発生した。この事故が発生した13時56分を挟む、13時50分から14時にかけて小名浜測候所(現・小名浜特別地域気象観測所)の平均風向・風速は南西2.2m/sから北西11.4m/sに急変し、瞬間風速は13.1m/sから19.0m/sと急変した。13時50分の最大瞬間風速は北西風が入ってからの風速で、南西風では3.7m/s程度であった。また、この時小名浜では13時45分から雷が観測されており、14時16分まで継続している。また、この時の気温変動をみると、この10分間で5.7°C低下しており、ガストフロントの通過による突風が想定される気象要素の変動をしていた。このガストフロントが積乱雲からのダウンバーストによるものであるか、あるいはもっとスケールの大きい寒冷前線等に伴うガストフロントであるのかを理解するため、広域での気温降下量分布と、降下した時間の等時線解析をした結果、福島県全体で気温降下量が顕著で、ほぼ66km/hから69km/hの速度で進行していることが分かった。なお、この進行速度は19m/sとほぼ小名浜測候所の最大瞬間風速に対応していた。

一方、気象衛星観測によるTBBから求めた寒気の層厚や気温降下量から求めた重力流の速度は34.3m/sと小名浜港にある風速計で測定した値に類似したものが計算された。

さらに、CReSSを用いた数値実験では、地形に沿う流れが卓越しているものの、対象地域では10m/sとほぼ小名浜測候所で観測された平均風速に対応した結果であった。

これらの差異は突風現象を生起させた気象現象が、寒冷前線に伴うガストフロントであるという比較的大きいスケールの現象であっても、強い突風そのものを生起させている気象現象は非常に小さいスケールであるためと考えられる。なお、この時の雲の発達高度は3km程度で、発達域は突風発生域より30kmほど北に位置しており、直接積乱雲からダウンバーストが発生した可能性は考えにくい事例であった。

6. 小松空港におけるドップラーレーダーによる突風事例解析

道本光一郎(防衛大学校)

宇田英史(航空自衛隊小松気象隊)

2008年7月27日14時頃、石川県小松空港周辺におい

て突風が発生し、同空港周辺で倒木等の被害が起こった。これら一連の被害は、小松空港の南西付近を中心にして、およそ4 km四方の広がりをも有して分布していた。突風発生時前後の同空港のドップラーレーダーの観測結果や、滑走路両端の風向風速計、気温等の観測結果が入手できたので速報する。

突風による被害は、倒木、外柵フェンスの傾き、民家の窓ガラスの破損、神社灯籠の倒壊等、様々な被害が発生し、同心円状に分布していた。

ドップラーレーダーの観測によると、突風が観測された直前には、強い強度の降水エコーの存在が確認され、このエコーの通過時に突風が発生した。また、レーダーの距離方向（動径方向）の速度変化に強い発散が見られた。しかもこれらの発散域は、5 km程度の広がりをも有していた。一方、方位方向の速度変化には、顕著な収束は見られなかった。

風向・風速の日記記録紙によると、最大瞬間風速は30m/sを超えて観測され、風向の急変も見られた。

また、気温の降下（数度程度）と気圧の上昇・下降（数hPa）も突風の前後に併せて観測された。

これらのことから、現時点では、本事例の突風はダウンバースト（マイクロバースト）ではなかったかと推定される。今後さらに解析をすすめ、今後の研究会等での発表を予定している。

7. 2006年台風第13号に伴う延岡竜巻の数値シミュレーション

益子 渉（気象研究所）

2006年9月17日、台風第13号の進行方向右前方におけるアウターレインバンドの通過に伴い、宮崎県で竜巻が発生し、甚大な被害もたらされた。竜巻をもたらした積乱雲の構造、そして竜巻の発生機構を明らかにするために、気象庁非静力学モデルを用いた超高解像度数値シミュレーションを行った。

その結果、アウターレインバンドは水平スケールが20-40kmの複数の団塊状の降水システムによって構成され、その南端においてミニスーパーセル（例えば、Suzuki *et al.* 2000）の構造をもつものがあることが分かった。その鉛直・水平スケールは約5 kmで、高度1 kmと3 km付近に 0.07s^{-1} 以上の大きな鉛直渦度と、 30ms^{-1} 以上の強い上昇流域がみられた。地上付近のガストフロントを横切る温度傾度は約1度で弱いものであった。

次に水平解像度50mの実験を行い、ミニスーパー

セルに伴う竜巻の発生機構を調査した。竜巻はミニスーパーセルの衰弱期において発生し、下層のメソサイクロン近傍のRear-flank gust front (RFG)上に位置していた。気圧偏差でみた直径は約500mで、地表付近の鉛直渦度は 1.0s^{-1} 以上となっていた。竜巻の発生過程を調べると、Rear-flank downdraft (RFD)の内部的なサージが下層のメソサイクロンを取り巻くように進行し、その左先端がRFGとマージした時に竜巻が発生していた。こうした結果は、最近の米国中西部におけるスーパーセルの観測的研究結果（例えば、Marquis *et al.* 2008）と整合的である。その竜巻発生メカニズムを調べるために、後方トラジェクトリー解析や渦度収支解析を行った。その結果、RFDは、環境場の鉛直シアに伴う水平渦度を地表付近に輸送し、RFDの内部的なサージは収束を強化することで竜巻渦の発生に寄与していることが分かった。また、感度実験から、フック状の降水物質の分布に対応した降水物質のローディングの効果がRFDの振る舞いと、その後の竜巻発生過程に大きな影響を与えることが分かった。

8. 気象庁の取り組み～竜巻注意情報～

海老原 智（気象庁）

気象庁では、突風による災害の軽減に向けて平成20年3月から「竜巻注意情報」の発表を開始した。竜巻注意情報は、積乱雲に伴って発生する竜巻・ダウンバースト・ガストフロントによる突風を対象としており、ドップラーレーダーの観測などから、突風の可能性が高まったときに、各地の気象台が発表する。

さらに平成22年度には、突風の可能性が高い地域の解析と1時間後までの予測を分布図型式で示す、「突風短時間予測（仮称）」の提供を計画している。これは、10km単位の格子点値で、常時10分毎に提供する情報である。

なお、平成19年～20年度には、部外の有識者を交えた検討会を開催し、新たな情報の利活用について検討してきた。利用者の事前準備のため、平成20年度末までに、利活用のためのガイドラインを公表する予定である。（気象庁HPの利活用検討会ページを参照。<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/toppuu/index.html>）

竜巻が発生するかどうかの予測は、スーパーセル型の積乱雲の発生予測を通して行う。強い竜巻はスーパーセルを親雲として発生することが多い。スーパー

セルの中にはメソサイクロンと呼ばれる直径数 km から10km 程度の低気圧性回転が存在するので、ドップラーレーダーの観測でメソサイクロンが検出されれば、スーパーセルが存在し竜巻の発生する可能性が高いと判断する。

一方、数値予報からスーパーセルが発生しやすい大気環境を示す指数として、CAPE や SReH, EHI などなどを計算している。これらからスーパーセルの発生が予測される場合には、前日から発表する気象情報の中で、竜巻などの激しい突風に関する注意を呼びかける。

これらの指数が高い場所で積乱雲が発達していれば、それがスーパーセル型の積乱雲で竜巻を発生させる可能性があると考えられることができる。このような観点から、各種指数とレーダーの観測値を説明変数とした統計的な予測式により、今現在の突風発生可能性を示す「突風危険指数」を10分毎に計算している。

竜巻注意情報の発表判断には、ドップラーレーダーによるメソサイクロンの自動検出と、突風危険指数を利用する。どちらか一方による判断では空振りが非常に多くなるため、両者の AND 条件により絞込みを行う。この際、時刻と場所を厳密に合わせると AND 条件がほとんど成立しないので、時空間的に幅を持たせるなどの考慮をしている。

このような技術を用いても竜巻発生の予測は難しく、竜巻注意情報の精度は適中率が10%程度、捕捉率が30%程度にとどまる。しかし、竜巻注意情報発表時は、通常の状態に比べて突風に遭遇する可能性ははるかに高いので、竜巻注意情報が発表されたら、「まず空の状態に注意し積乱雲が近づく兆しがあれば安全な場所に移る」という対応を奨めている。このような負担の少ない対応でも、いざという場合には身の安全を守ることにつながる。

平成22年度に計画している分布図型式の「突風短時間予測」では、突風の発生確率に応じた2つのランク(A, B)を解析する。このうち、ランクAは竜巻注意情報と同等の判定基準とするので、同様に捕捉率が低いという課題がある。これを補うため、ランクBでは判定基準を緩めて捕捉率が90%程度になるように設定する(上記AND条件に対してOR条件を基本に判定する)。このため、ランクBの出現回数はランクAの15倍程度も多くなり、適中率(発生確率に相当)は低くなる。

気象庁の取り組みに関する詳細は、瀧下(2009)を

参照されたい。

9. 小型ドップラー気象レーダーによる鉄道安全運行のための突風探知システム

楠 研一(気象研究所)

近年、突風による列車などへの顕著な災害が複数報告されている。これらの災害を受け、われわれは突風を探知し鉄道災害を防ぐための研究を緊急かつ重要なテーマと考え、鉄道用の突風探知システム開発に向けた研究を2007年から行っている。

突風は、鉄道沿線の運行規制用風速計や一般の気象観測網では捉えられることが難しい。サイズが小さく寿命が短いため、広域の雨風の分布を面的に連続してモニターできるドップラー気象レーダーがその探知に最も適している。したがってこの研究は、ドップラー気象レーダーを用いたシステムを目指したものである。

本プロジェクトの目標である、鉄道の安全運行に支障をもたらす突風を、ドップラー気象レーダーを用いて探知するシステムのプロトタイプを開発するためには、突風の時空間変動およびそれらをもたらす気象じょう乱の詳細なメカニズムを把握することが必要である。

そのため山形県庄内平野一帯に、大規模な高密度観測網を立ち上げた。観測網として、まず風向・風速・温度・湿度・気圧・雨量を観測する地上気象観測網を構築した。突風の構造解明およびドップラーレーダーのデータ検証のために地上気象観測を行う必要があるためである。さらに突風の頻度が多い冬季には、庄内空港ビル屋上に立体観測用のドップラー気象レーダーを設置し、突風をもたらす気象じょう乱の立体像をとらえると同時に、JR余目駅にある鉄道ドップラー気象レーダーとの同期観測を行なった。

現在は得られた大量のデータから突風事例を包括的に抽出しその特徴をまとめている。今回は観測開始2007年10月～2008年1月までの4か月間に抽出された突風事例について報告した。突風の抽出のやり方として、地上風速データから、試行的に(1)(2)両方を満たす事例を考えた。

(1) 3分を目安に風速が 15ms^{-1} 程度以上増加。

(2) 風速増加の結果、風速が 25ms^{-1} 以上に到達。

抽出された突風は2007年10月～2008年1月の4か月、庄内平野 $20\text{km} \times 20\text{km}$ の領域で11事例あり、うち10事例はマイソサイクロン・フックエコーのような

渦に起因する反射強度パターンおよびドップラー速度の回転パターンに対応していた。残り1事例はボウエコーに伴うものであった。渦突風は水平スケールが小さく寿命も短いため未知の部分が多い。そのため竜巻に代表される、渦に起因する突風の発生頻度はほとんどわかっていない。竜巻の、主に被害から得られた発生頻度（1年あたり100km×100kmの発生数）は、1961～1993年の統計値として山形県で0.42、日本全国で0.54である（新野 2002）。一方、今回抽出された渦に伴う突風の発生頻度は250（4か月あたり100km×100kmの発生数）と全く異なっている。本プロジェクトの高密度観測を通し、渦に起因する突風は、家屋などに被害を起こさないものを含めると実際にはかなりの頻度で起こっていると推測される。

10. 気象レーダの観測値を用いた冬季の寒冷前線に伴う突風の予測について

加藤 亘（東日本旅客鉄道株式会社・防災研究所）

10.1 はじめに

ダウンバーストや竜巻等、積乱雲に伴う突風は全国的にしばしば発生し、大きな自然災害をもたらすことがあるが、空間的にも時間的にも非常にスケールが小さい現象であるため、離散的な点での観測となる風速計で捉えることは難しい。このような突風の検知には、面的かつ連続的な観測が可能な気象レーダが最も適しているといわれている。そこで、天気図と気象レーダを用いた突風発生予測手法を開発した。以下に詳細を示す。

10.2 総観場による一次絞込み

過去の竜巻などの突風発生時の気象状況を調査したところ、突風は日本では寒冷前線や台風などの気象状況の下で発生する頻度が高いこと、沿岸域で発生数が多いことなどが判明した。また、冬季（11月～翌年3月、151日）の寒冷前線に伴う事例が多いこと、東北日本では日本海側で多いことなどが判明した。

そこで、2001年11月～2006年3月の冬季5シーズンに北陸から北海道にかけての日本海やオホーツク海の沿岸域で発生した突風12件を気象庁の竜巻等の突風データベース（<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>）から抽出し、当時の総観場を調査したところ、低気圧から伸びる寒冷前線に伴うと思われるものが9件、それ以外の要因によるものが3件であり、特に前者は被害の規模が大きい傾向があった。

これらのことから、本研究では冬季の寒冷前線に伴う日本海側の突風を予測対象とした。

10.3 気象庁レーダデータによる二次絞込み

突風発生予測の機会をさらに絞込むために、気象庁レーダデータのエコー降水強度とエコー雲頂高度の観測値を用いて、突風発生の原因と考えられている強い積乱雲を捉えることにした。2004年以降、気象庁レーダデータは解像度が向上し、エコー降水強度が約1.1km四方、エコー雲頂高度が約2.7km四方のメッシュで提供されるようになった。そこで、両者のメッシュ幅の最小公倍数である約5.5km四方のメッシュを対象に、レーダデータのしきい値判定を行うこととした。

10.2の突風事例12件のうち寒冷前線に伴う9件のエコーデータを調査した結果、しきい値を「エコー降水強度80mm/h以上の領域が10km²以上広がっていて、かつエコー雲頂高度6000m以上」とした。この場合、寒冷前線に伴う突風発生事例9件中6件が検知できることになる。

これらの結果を踏まえ、冬季日本海沿岸部を寒冷前線が通過する場合には、以下の2つの条件を満たした場合に突風が発生する、という突風発生予測の判断基準を提案した。

- (1) 積乱雲の強さを表す「エコー降水強度」が80mm/時以上の領域が10km²以上の塊で広がっていて、かつ
- (2) 積乱雲の高さを表す「エコー雲頂高度」が6000m以上の場合

10.4 突風発生予測時の警戒範囲

10.3の6事例のレーダデータから、突風発生時刻の直前から60分前までの10分毎の移動方向と速度を調査し、しきい値を超えた積乱雲の接近を事前に捕捉するために必要な警戒エリアの大きさについて検討した。

その結果、移動方向については、およそ北北東～南東方向にかけて広がっていることがわかった。また、移動速度については10分間に最大17km程度移動しており、突風発生前に10分程度の余裕をもって積乱雲を捕捉するためには、警戒エリアとして34km以上の広さが必要となることがわかった。

これらのことから、しきい値を超過している約5.5km四方のメッシュの北から南東方向135°にかけて、メッシュ7個分に相当する半径約38kmの扇型のエリアを警戒エリアとして設定した。

なお、この手法を用いた運転規制ルールを2008年1月末から3月末まで、羽越本線新津～酒田間で試行し

たが、レーダデータが発生条件を満たさず、規制は発令されなかった。

11. 道路交通における取り組み

—吹雪による視程悪化の予測実験と観測—

佐藤 威 (防災科学技術研究所
雪氷防災研究センター新庄支所)

強い風により積もっている雪が舞い上げられる現象を地吹雪、降雪を伴うものを吹雪と呼んで区別することもあるが、いずれも視程障害や吹き溜まりなどの原因となり、寒冷な積雪地域の道路交通の安全を脅かすものとして問題となっている。その対策として、防雪柵の整備などのハード対策に加え、吹雪の発生予測情報の活用などのソフト対策の有効性も指摘されている。防災科研では、雪崩・吹雪・道路雪氷を対象とした「雪氷災害発生予測システム」の開発を行っているが、ここでは、吹雪による視程障害を予測する方法の概要、ならびに観測との比較結果について報告する。

吹雪は気象条件だけでなく、積雪条件にも依存する。この2つの条件を考慮するため、視程予測の具体的な方法を、まず降雪を含む気象予測を行い、ついで積雪状態の予測を行い、最後に吹雪強度とそれに対応する視程を評価するようにした。ただし、現在は積雪状態の予測を行う代わりに、気温から積雪状態を判定するように簡略化している。

気象予測には、気象庁非静力学モデル (NHM release 01-15) を用いている。メソ数値予報モデルの予報値を境界値・初期値として水平解像度10kmで計算後、ネスティングで水平解像度1.5kmの計算を行い1時間毎に結果を出力している。吹雪強度の評価に必要な摩擦速度は風速の対数分布を仮定して、降雪強度は混合比を空間密度に換算し雪片の落下速度を仮定して、それぞれ求めている。これまでの気象予測では、地表面粗度を海上0.2mm、陸上1 mとしてきたが、吹雪が発生する多くの場合、平坦地は積雪で覆われているので、土地利用データ (国土数値情報) に基づき田や荒地などに対して粗度を1 mmに変更した。これにより、地上風速の観測値 (アメダス、現地観測による) との整合性が改善した。

新庄支所にある人工降雪装置や低温風洞を備えた大型の実験施設「雪氷防災実験棟」において風洞実験を行い、吹雪の発達に関わる雪面の削剝や、雪面近傍において跳躍運動する雪粒子の跳躍高さ、跳躍距離、鉛直構造と風速、雪面硬度などの関係をパラメタライズ

し、吹雪強度の予測に取り入れている。また、降雪を伴う場合には、雪片が雪面に衝突した時に破壊され吹雪粒子へ転化することにより吹雪の発達が促される効果も重要である。そのプロセスも風洞実験で再現し、パラメータ化してある。

実際に視程障害が問題となるのは、自動車を運転している場合が多い。これに対応して、ドライバーの視線の高さ (普通自動車の場合約1.2m) における視程の値を求めることとした。この高さでは、吹雪粒子は浮遊運動をしていて、その濃度は乱流拡散理論で表すことができる。上述の跳躍運動のパラメタリゼーションと乱流拡散理論を結合することで、様々な気象条件下での吹雪強度が評価できる。また、既往の吹雪強度と視程の関係を用いて、高さ1.2mの吹雪強度から視程を評価している。

これまでに、吹雪が多発する山形県庄内平野を試験領域として予測実験を行ってきた。ここには、(株)東日本高速道路が管理する山形自動車道の道路気象観測点や、防災科研独自の観測点があり、得られた視程の観測結果と予測結果との比較を行っている。平坦地では、予測と観測は概ね対応していることがわかったが、内陸の山あいでは、風速の予測値が過大となるために吹雪強度も過大となり、視程が過小評価されるという問題点も明らかになった。これは、気象モデルで用いられている地形が平滑化されることによると考えられ、今後解決する必要がある。

今後、気象条件に基づき積雪状態の変化を予測するステップを導入する予定である。また、吹雪の発生や発達には、積雪を構成する雪粒子の付着力なども関わっていると考えられ、雪温 (気温) との関係についてもさらに研究を進める予定である。

参 考 文 献

- Fujita, T. T., 1992: Memoirs of an Effort to Unlock the Mystery of Severe Storms. WRL Res. Paper No. 239, The Univ. of Chicago, 145-148.
- 畑村真一, 竹見哲也, 田村哲郎, 2006: 根室半島における風況の局所性に関する高解像度シミュレーション. 第20回数値流体シンポジウム, CD-ROM, F4-2.
- 加藤輝之, 2008: 竜巻をもたらす積乱雲の発生環境場の気候学的変動. 日本気象学会2008年度秋季大会講演予稿集, (94), 247.
- 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.

- 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.
- 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.
- Maki, M., T. Maesaka, R. Misumi, K. Iwanami, S. Suzuki, A. Kato, S. Shimizu, K. Kieda, T. Yamada, H. Hirano, F. Kobayashi, A. Masuda, T. Moriya, Y. Suzuki, A. Takahori, D.-I. Lee, D.-S. Kim, V. N. Chandrasekar and Y. Wang, 2008 : X-band polarimetric radar network in the Tokyo metropolitan area—X-NET—. Proc. 5th European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology, 30 June - 4 July 2008, Helsinki, Finland.
- Marquis, J., Y. Richardson, J. Wurman and P. Markowski, 2008 : Single- and dual Doppler analysis of a tornadic vortex and surrounding storm-scale flow in the Crowell, Texas, supercell of 30 April 2000. Mon. Wea. Rev., 136, 5017-5043.
- 丸山 敬, 石川裕彦, 内田孝紀, 河井宏允, 大屋裕二, 2006 : 台風0418号通過時の宮島周辺の強風場に関する数値シミュレーション. 日本風工学会論文集, 31, 95-105.
- 新野 宏, 2002 : 激しい渦の脅威「竜巻」. 予防時報, (209), 36-42.
- 新野 宏, 2008 : 突風現象と防災—風工学と気象学の連携への期待—. 日本風工学会誌, 33, 287-289.
- Niino, H., O. Suzuki, H. Nirasawa, T. Fujitani, H. Ohno, I. Takayabu, N. Kinoshita and Y. Ogura, 1993 : Tornadoes in Chiba Prefecture on 11 December 1990. Mon. Wea. Rev., 121, 3001-3018.
- 大野久雄, 鈴木 修, 楠 研一, 1996 : 日本におけるダウンバーストの発生の実態. 天気, 43, 101-112.
- Seko, H., K. Saito, M. Kunii and M. Kyouda, 2009 : Mesoscale ensemble experiments on potential parameters for tornado outbreak. SOLA, 5, 57-60.
- Sugawara, Y. and F. Kobayashi, 2008 : Structure of a waterspout occurred over Tokyo Bay on May 31, 2007. SOLA, 4, 1-4.
- Suzuki, O., H. Niino, H. Ohno and H. Nirasawa, 2000 : Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019. Mon. Wea. Rev., 128, 1868-1882.
- Takemi, T., T. Tamura, Y. Takei and Y. Okuda, 2006 : Microscale analysis of severe winds within the urban canopy during a period of explosive cyclogenesis by coupling large-eddy simulation and mesoscale meteorological models. J. Wind Eng., 31, 165-168.
- 瀧下洋一, 2009 : 突風に関する防災気象情報の改善. 天気, 56, 167-175.
- 田村哲郎, 中山浩成, 奥田泰雄, 2006 : 実在都市における空間発達型境界層乱流中の大気拡散に関するLES解析. 日本建築学会環境系論文集, (604), 31-38.
- 富永禎秀, 2007 : 風環境予測のためのマイクロ解析からみたメソ気象解析との接続. 日本風工学会誌, 31, 121-126.
- 坪木和久, 耿 驪, 武田喬男, 2000 : 台風9918号外縁部で発生した1999年9月24日の東海地方の竜巻とメソサイクロン. 天気, 47, 777-783.
- Wurman, J. and J. Winslow, 1998 : Intense sub-kilometer-scale boundary layer rolls observed in Hurricane Fran. Science, 280, 555-557.
- 山内 洋, 新野 宏, 鈴木 修, 吉野勝美, 坂本 圭, 2008 : 2008年1月1日羽田空港周辺で発生したドライ・ダウンバースト. 日本気象学会2008年度春季大会講演予稿集, (93), 140.