

1053:5012 (竜巻; レーダー)

3. 竜巻観測の現状と課題

小林 文明*

1. この10年で観測は何が変わったか

2005年から2006年にかけて、羽越線事故（2005年12月25日）、宮崎県延岡市で発生した竜巻（2006年9月17日）、北海道佐呂間町で発生した竜巻（2006年11月7日、以後佐呂間竜巻）により死者を含む甚大な被害が発生し、列車など公共交通機関や仮設構造物に対する突風対策が議論された。庄内平野ではその後、冬の竜巻（winter tornado）を対象に長期間にわたる観測が行われている。2台のドップラーレーダーと地上観測網により、複数の渦現象を捉えることに成功し（Inoue *et al.* 2011）、列車運行のための突風探知シス

テムの構築も試みられている。

2007年には、理学、工学の多くの研究者が参加して、わが国の竜巻の実態と対策、予測可能性についてまとめられた（田村編 2008）。これらの突風災害が契機となり、2008年から“竜巻注意情報（気象庁）”が発表されるようになったのは周知のとおりである。竜巻注意情報が発表されるのと同時に、気象庁（機動調査班）による突風被害の現地調査が行われるようになり、現在では“突風データベース”にほとんどの突風被害が網羅されるようになった。

2012年5月6日に北関東で発生した竜巻（つくば竜巻）や2013年9月2日に埼玉県越谷市で発生した竜巻（越谷竜巻）は、住宅密集地を通過し、日本でもあるレベル以上の竜巻が起これば丈夫な構造物でさえ壊滅的な被害を受けることを経験し、竜巻から身を守るこ

* 防衛大学校地球海洋学科。

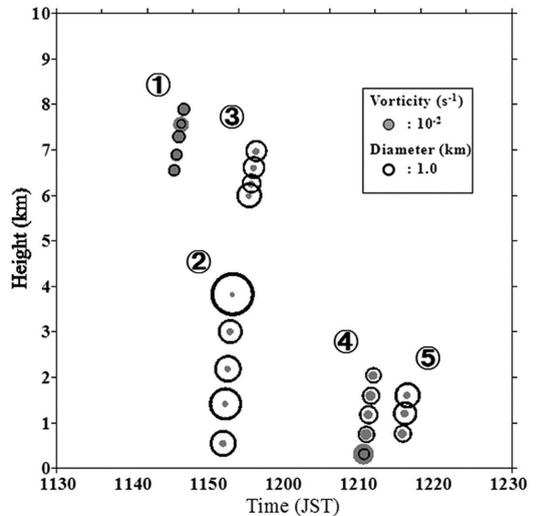
kobayasi@nda.ac.jp

© 2016 日本気象学会

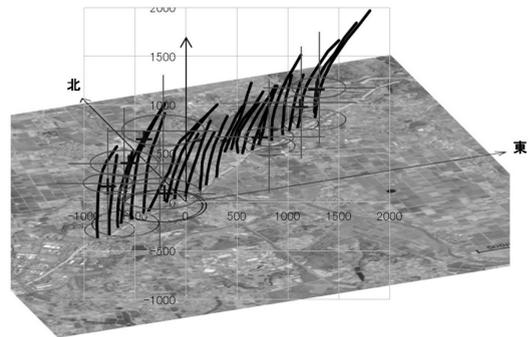
とが課題となった。講演会や啓発活動も盛んに行われるようになり、竜巻に対する関心や意識レベルは高くなったといえる。

ドップラーレーダー観測による竜巻の解析事例も議論されるようになり、この10年間で竜巻に関する論文は増加し、本学会だけでも30編以上が公表されている。つくば竜巻では二重偏波レーダーによる観測に成功し、上空のメソサイクロンから竜巻渦に至る構造を把握した。これまでの観測事例をみると、わが国では数10分前から上空に明瞭なメソサイクロンが先行して存在するスーパーセル的な竜巻の事例は少なく、直径1～2 kmのマイソサイクロンと竜巻がほぼ同時に観測される事例が多い。さらに、積乱雲の発生とほぼ同時にマイソサイクロン／竜巻が形成されることもある。マイソサイクロンの寿命は10分未満のものが多く、レーダー観測においてボリュームスキャンの仰角を絞って、3分から5分間隔のスケジュールで観測しても時間分解能は十分ではない。第1図は寒冷前線の線状降水帯上に形成された、異なった5個のマイソサイクロンの時間・高度分布である。各マイソサイクロンは1回のボリュームスキャン内、すなわち10分未満の寿命であったが、地上から高度2 kmあるいは4 kmまで達するもののほか、高度6 kmから8 kmすなわち雲頂付近の高高度にも存在した (Sugawara and Kobayashi 2009)。このように、竜巻の親渦が雲内のどの高度で形成され、どのように渦が成長するかは、竜巻渦の構造や起源を議論し竜巻のナウキャストを考える上で重要な情報であり、積乱雲内全体を高高度まで観測する必要がある理由でもある。竜巻の親渦でさえ著しい時間変化を示すため、フェーズドアレイレーダー観測によりメソサイクロン／マイソサイクロンの時間変化がどのように捉えられるかは興味深い。

佐呂間竜巻までは、たまたま竜巻に遭遇した方が撮った1枚の写真が研究上貴重な資料となったが、つくば竜巻や越谷竜巻時には、カメラ付き携帯電話の普及により数多くの写真や動画が残され、竜巻渦の構造を理解する上で役立っている。複数の画像データを用いた漏斗雲の3次元的な空間位置を特定する試みも行われ、レーダーで捉えた渦と合成して竜巻の3次元構造を表示することも可能になっている (宮城・佐々 2014, 第2図)。今後、膨大な目撃情報や画像データを、どのように収集して、解析や予測に役立てるかは重要な課題のひとつといえる。



第1図 マイソサイクロンの時間高度断面図 (Sugawara and Kobayashi 2009)。



第2図 画像解析により3次元表示されたつくば竜巻の漏斗雲 (実線) とドップラーレーダーにより観測された竜巻渦の位置 (円) (宮城弘守氏提供)。

2. 新しい観測技術

レーダー観測プロジェクトとして、首都圏では複数の研究用レーダーをネットワーク化する試み (X-NET) が2007年から始まり、水平分解能が500 mという空間的分解能で雨と風の情報を提供することが可能になっている (Maki *et al.* 2008)。レーダー自体も高度化され、MP (マルチパラメータ) レーダー網 (国土交通省 XRAIN) による観測や、ドップラーレーダーによる観測 (藤吉ほか 2008) が行われるようになり、さまざまな渦現象の観測例が報告されるようになった。

竜巻やダウンバースト／ガストフロントのようなメソ～マイクロスケールの現象を地上観測網で捉えるのは極めて難しいが、2013年7月から群馬県を中心に展開された超稠密観測網 (POTEKA, 前田ほか 2014) は、小学校やコンビニに簡易気象計を高密度で設置し、“1 km メッシュの観測網”を実現させた。POTEKA は既に複数の竜巻やダウンバーストの事例を観測している (Norose *et al.* 2016)。第3図は2013年9月16日に群馬県みどり市で発生した竜巻を捉えた事例であり、竜巻被害域周辺の気圧降下分布が観測され、約1 km 離れた観測地点で4 hPa の気圧降下が、10 km 離れた領域内で0.5～1.0 hPa 程度の気圧降下が観測され、竜巻と上空のマイソサイクロン通過に伴う気圧分布を把握することができた。

3. 何が分からないのか？

竜巻に関しては、未だにその発生メカニズムが十分に理解されているとはいえず、今日でも観測自体が難しい現象である。さらに、わが国における竜巻の発生実態も十分に把握されているとはいえない。以下に列記するような、竜巻の「構造」と「実態」を解明することが気象学に望まれている。

・竜巻の構造

竜巻やダウンバーストの発生環境は、米国とわが国では大きく異なり、日本周辺で発生するさまざまな竜巻のメカニズムを明らかにした上で、平均的な竜巻やダウンバーストの構造を提示し、概念モデルを構築する必要がある。現有のレーダーで地道に事例解析を積み上げていくのと同時に、竜巻観測のプロジェクトも必要である。

・地表面付近の構造

地表面付近における竜巻渦の構造や挙動の解明が、防災上あるいは工学的側面から強く要求されている課題である。例えば、竜巻渦コア付近の気圧分布、上昇流、風速の立ち上がり時間など、観測、室内実験、数値実験の結果を理学、工学の両面から議論することが望まれる。

・台風と竜巻

台風に伴い竜巻 (typhoon induced tornado) が発生することは知られており、しばしばレインバンド通過時に竜巻の発生が報告されている。しかし、台風中心の壁雲付近で竜巻が発生するかどうかはよくわかっていない。例えば、2004年台風22号の中心通過時に、横浜市内で駐車中のトラックが被害を受けたが、未だ原因は不明である。ドップラーレーダーによる観測、地上被害調査とも、台風の最も強い擾乱内で竜巻を検

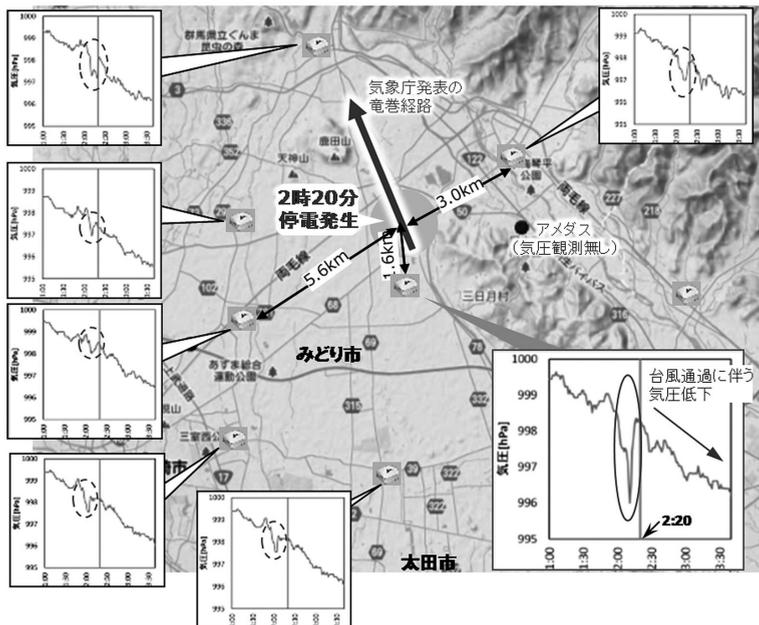
出することは難しく、検証方法を議論する必要がある。

・冬の竜巻

冬季日本海上の降雪雲から発生する竜巻 (winter tornado) の実態は未だ理解されていない。渦状エコーに伴うもの、寒冷前線やシアライン上で発生するもの、一様な季節風下で発生するものなど、多様性がみられる。また、ポーラーロウ (polar low) と竜巻の関係など不明な点は多い。

・海上の竜巻

海上で発生する竜巻の報告数は、2007年以降急増し、2007年から2013年までに報告された竜巻の内、海



上で発生した竜巻は約2/3にも達した。海岸線から漏斗雲（竜巻渦）を確認できるのは10 km程度であることを考えると、“海上”竜巻といっても、海岸線のごく近傍で発生したものしか見ていないことになる。目視やレーダーが届かない大洋上における竜巻発生の実態はほとんど理解されていない。2015年9月1日に対馬沖でイカ釣り漁船が5隻転覆して4名が死亡する事故が発生したが、船舶に対する突風対策も喫緊の課題である。

・夜の竜巻

わが国における竜巻発生時刻は、日中特に午後1時にピークがあり、夜間～早朝にかけては報告数が少ない。しかしながら、夜間の竜巻は、目撃者や漏斗雲の写真などのデータが殆ど残されないため、竜巻の認定が困難であるのも事実である。日本ではF0～F1スケールの竜巻が多いため、夜間屋内に居た結果人的被害が相対的に少ないだけかもしれない。夜間の自然災害への対応に関する啓発は重要である。

・つむじ風（弱い竜巻）

スーパーセルに伴う巨大竜巻だけでなく、相対的に弱い竜巻、あるいはつむじ風であっても、都市部では被害が生じており、防災上考慮しなければならない。例えば、ガストフロント上に形成される2次的な竜巻（gustnado）はしばしば被害をもたらす。火災旋風は首都直下地震対策として重要な課題のひとつであるが、関東大震災時の巨大な炎の渦は未だそのメカニズムがわからないままである。

参 考 文 献

藤吉康志, 山下和也, 藤原忠誠, 中西幹郎, 2008: 雲科学とLES-ドップラーライダーを用いた大気の流れの観測-I. 気象研究ノート, (219), 141-165.
Inoue, H., K. Kusunoki, W. Kato, H. Suzuki, T. Imai, T.

Takemi, K. Bessho, M. Nakazato, S. Hoshino, W. Mashiko, S. Hayashi, T. Fukuhara, T. Shibata, H. Yamauchi and O. Suzuki, 2011: Finescale Doppler radar observation of a tornado and low-level mesocyclones within a winter storm in the Japan Sea coastal region. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 351-369.

小林文明, 野呂瀬敬子, 呉 宏堯, 森田敏明, 2014: 地上稠密観測 POTEKA による竜巻・ダウンバーストの観測. 日本気象学会春季大会講演予稿集, (105), B155.

前田亮太, 鈴木真枝, 呉 宏堯, 森田敏明, 岩崎博之, 2014: 群馬県を中心とした地上稠密観測実証実験 POTEKA プロジェクトの概要と結果. 日本大気電気学会誌, (84), 44.

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. Chandrasekar and Y. Wang, 2008: X-band polarimetric radar network in the Tokyo metropolitan area -X-NET-. *Proceedings of the fifth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, Helsinki, Finland.*

宮城弘守, 佐々浩司, 2014: 漏斗雲画像解析による竜巻の空間座標測定. 第23回風工学シンポジウム論文集, 75-80.

Norose, K., F. Kobayashi, H. Kure, T. Yada and H. Iwasaki, 2016: Observation of downburst event in Gunma prefecture on August 11, 2013 using a surface dense observation network. *J. Atmos. Electr.*, **35**, 31-41.

Sugawara, Y. and F. Kobayashi, 2009: Vertical structure of mesocyclones along a narrow cold frontal rainband. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 497-503.

田村幸雄編, 2008: 竜巻等の実態および発生予測と対策. 平成19年度科学技術振興調整費重要政策課題への機動的対応の推進研究成果報告書, 486pp.