



やさしい解説
-気象学動静-

1053 : 407 : 413 : 5012 (竜巻; 渦; フェーズドアレイレーダー)

フェーズドアレイレーダーで捉えた竜巻渦

—竜巻渦は降りてくるのか昇っていくのか—

足 立 透*

1. 理解が難しい竜巻

さまざまな大気現象の中でも竜巻はとても理解が難しい現象の一つです。凄まじい破壊力によって被害をもたらしますが、その時空間スケールは小さく、観測や数値計算に極めて高い分解能が求められます。

竜巻の渦は地面付近で数100m程度の直径を持ち、地表面から積乱雲までを高さ数kmにわたって接続します。まだまだ理解の乏しい竜巻ですが、特に大きな謎の一つとなっているのが、地面付近に強い渦を作り出すしくみです。この渦の源はどこにあるのか？どのようにして地上に破壊的な渦をもたらすのか？この問いに迫る最近の研究をご紹介します。

2. フェーズドアレイレーダーによる観測

近年、竜巻研究において有力な観測手段となっているのがフェーズドアレイレーダーです。このレーダーは数多くの小型アンテナを配列しており、それぞれから放射される電波を細やかに制御することによって、形成された電波ビームの向きを素早く変えることができます。このことにより、30秒以下の短い時間で継ぎ目のない立体観測ができるようになりました。

気象用のフェーズドアレイレーダーは米国や日本、中国などで研究開発が進められており、竜巻を含むさまざまな大気現象の理解に役立てられています。

3. 竜巻の渦は降りてくる？昇っていく？

竜巻のしくみを理解するためには、渦が初めにどこで作られて、どのように伝わっていくのかを観測する

ことが大切です。竜巻の発生時には、しばしば「タッチダウン」という表現が使われますが、上空の渦が降りてきて地面に達する様子を連想させるこの表現が本当に正しいのか、議論的となっています。

竜巻を発生させる積乱雲の中にはしばしば、メソサイクロンと呼ばれる直径数km程度の寿命の長い渦が存在することが知られています。このため、上空の渦が原因となって下方に伝わり、地面に竜巻渦をもたらすというメカニズムやそれを示唆する観測結果が注目されていました（例えば、Brown *et al.* 1978）。

しかし、近年のフェーズドアレイレーダーを用いた観測では、異なる結果が報告されています。例えば French *et al.* (2013) や Bluestein *et al.* (2019) は、竜巻性の渦がむしろ地面付近で作られてから、上方に伸びていく様子を明らかにしました。あるいは Alexander and Wurman (2005) は、地面付近から高度2kmにわたって上下ほぼ同時に渦が発達する様子を報告しています。これらはいずれも、「タッチダウン」という言葉が連想させるような、単純に渦が降りてきて地上に到達する様子とは異なる結果を示しており、近年のホットトピックスとなっています。

4. 精細な観測とデータ解析で見えてくるもの

最近、この問題を解き明かす糸口となる貴重な観測結果が日本で得られました。第1図は Adachi and Mashiko (2020) によって報告された市原竜巻の事例です。フェーズドアレイレーダーから僅か5km圏内という近距離で得られた高頻度・高解像度の観測データにより、渦の形成過程が詳しく捉えられました。

積乱雲内部の高度1km以上には、メソサイクロンと呼ばれる直径数km程度の渦が存在していましたが、積乱雲後面に生じた強い下降気流に伴って、メソサイクロン下方の高度数100mにおいて、回転方向の

* 気象庁気象研究所 台風・災害気象研究部。

〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1

tadachi@mri-jma.go.jp

© 2023 日本気象学会

異なる直径数100m程度の小さな渦のペアが新たに作られた様子が分かります。このうちの反時計回りの小さな渦は、上方に伸びていきながらメソサイクロンに近づいたこと、また両者が接近した領域で渦の回転速度が急激に強まり、この領域が下方に伝わって地上被害域に達した様子が明らかになりました。

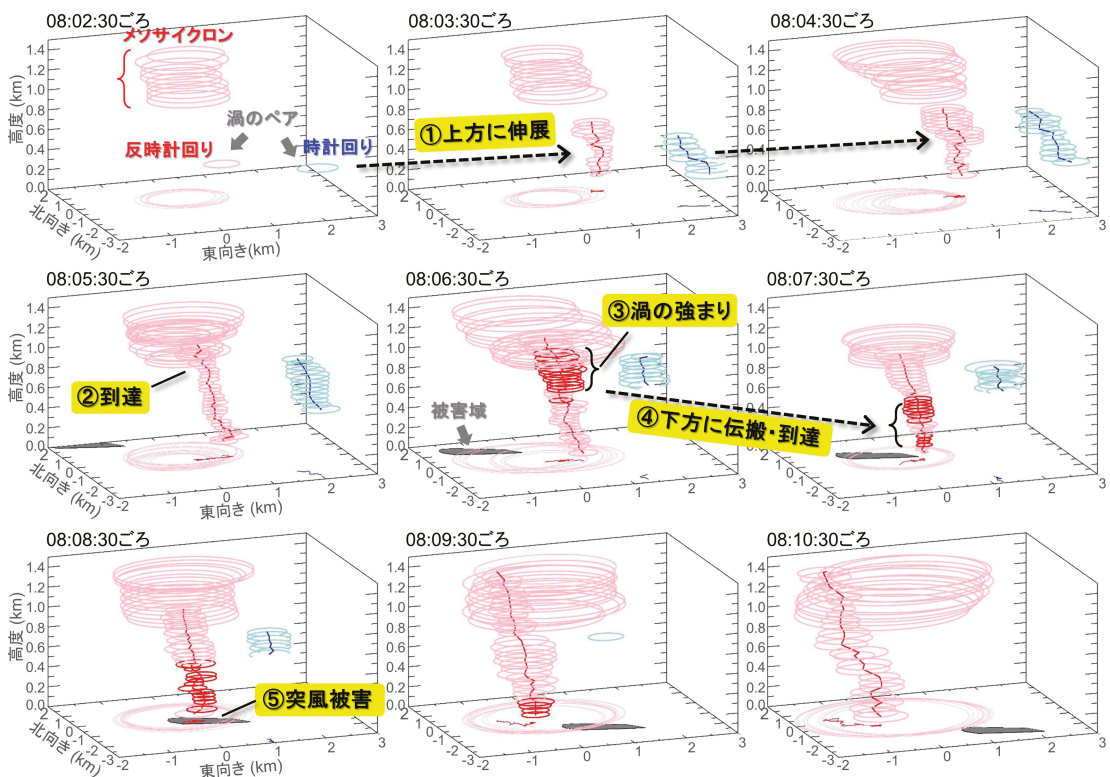
この結果はとても興味深いことを示しています。この小さな渦は低い高度で作られてから昇っていきませんが、この段階ではまだ十分な回転速度を持っていません。その後、メソサイクロンに接近するとともに、上空で回転速度が高められて、この回転の強い領域が降りてきて地上被害域に到達します。レーダー観測の分解能や渦を抽出する条件によっては、渦は地面付近から「昇っていった」と見ることもできるでしょうし、あるいは強められた渦が上空から「降りてきた」と見ることもできます。

このような渦のでき方が一般的かどうかは不明です。このため、さらなる研究が求められています。Houser *et*

al. (2022) はフェーズドアレイレーダーで観測された複数の竜巻事例を解析し、渦が「上下ほぼ同時に」形成される場合や下方から「昇っていく」場合などがあること、そして解析における条件次第で結果が敏感に変わりうることを報告しました。これらの結果は、現象を正しく理解する上で、精密な観測と注意深い解析をより一層積み上げていく必要性を示しています。

5. おわりに

竜巻は降りてくるのか、昇っていくのか。これは竜巻発生メカニズムの理解の上でとても重要な問いですが、まだ答えは得られていません。フェーズドアレイレーダーを用いた観測によって、解決のための糸口がようやく見え始めてきたばかりです。しかしこの新しい観測技術を通して、これまでは観ることのできなかった現象の姿が捉えられるようになり、そのしくみを紐解く鍵が少しずつ得られつつあります。なぜ地面付近に竜巻の渦ができるのか。このとてもシンプル



第1図 2019年10月12日千葉県市原市で発生した竜巻における渦の発生プロセス。円はドップラー速度データから推定した渦の径を表し、ピンク色の円は反時計回りの渦、水色の円は時計回りの渦を表す。赤色の円は、35m/s以上の回転速度を持つ、とりわけ強い反時計回りの渦を表す。Adachi and Mashiko (2020) より、一部を改編。© John Wiley and Sons. Used with permission.

な、そして本質的な問題を解決するため、最先端のレーダー観測技術を用いた研究が進められています。

参 考 文 献

- Adachi, T. and W. Mashiko, 2020: High temporal-spatial resolution observation of tornadogenesis in a shallow supercell associated with Typhoon Hagibis (2019) using phased array weather radar. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL089635, doi:10.1029/2020GL089635.
- Alexander, C. R. and J. Wurman, 2005: The 30 May 1998 Spencer, South Dakota, storm. Part I: The structural evolution and environment of the tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 72–96, doi:10.1175/MWR-2855.1.
- Bluestein, H. B., K. J. Thiem, J. C. Snyder and J. B. Houser, 2019: Tornadogenesis and early tornado evolution in the El Reno, Oklahoma, supercell on 31 May 2013. *Mon. Wea. Rev.*, **147**, 2045–2066, doi:10.1175/MWR-D-18-0338.1.
- Brown, R. A., L. R. Lemon and D. W. Burgess, 1978: Tornado detection by pulsed Doppler radar. *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 29–39.
- French, M. M., H. B. Bluestein, I. PopStefanija, C. A. Baldi and R. T. Bluth, 2013: Reexamining the vertical development of tornadic vortex signatures in supercells. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 4576–4601, doi:10.1175/MWR-D-12-00315.1.
- Houser, J. L. H. B. Bluestein, K. Thiem, J. Snyder, D. Reif and Z. Wienhoff, 2022: Additional Evaluation of the Spatiotemporal Evolution of Rotation during Tornadogenesis Using Rapid-Scan Mobile Radar Observations. *Mon. Wea. Rev.*, **150**, 1639–1666, doi:10.1175/MWR-D-21-0227.1.

足立 透

気象庁気象研究所 台風・災害気象研究部 主任研究官
主にレーダー気象学を専門とし、竜巻等突風や局地的大雨、台風に伴う境界層の微細な気流などの研究を進めています。フェーズドアレイレーダーによって得られた高い時間空間分解能のデータを用いて、これまでは観ることのできなかった現象の小さな時空間スケールの振る舞いを捉え、そのメカニズム解明や防災気象情報の高度化に向けた研究を行っています。