



令和2年9月29日
気象研究所

令和元年東日本台風に伴う竜巻の発生メカニズムを解明しました ～フェーズドアレイ気象レーダーによる観測データを解析～

気象庁気象研究所は、世界で初めて、フェーズドアレイ気象レーダー^{*1}による高頻度・高解像度の観測データの解析から、台風に伴う竜巻の発生メカニズムを明らかにしました。

台風に伴う積乱雲内に存在していた渦と、その下部で発生した小さな渦が結合することにより、小さな渦が急激に強くなって竜巻が発生したことが分かりました。

令和元年10月12日、東日本台風（台風第19号）が接近するなか、千葉県市原市において竜巻と推定される突風被害が発生しました（銚子地方気象台 2020）。この様子を捉えたフェーズドアレイ気象レーダー（日本無線株式会社所有）による観測データの解析から、台風に伴う竜巻が以下のメカニズムで発生したことが分かりました（図参照）。

- ① 台風の中心から400～500km離れた外側の降雨帯において、ミニチュア・スーパーセル^{*2}と呼ばれる竜巻を発生させやすい積乱雲が形成され、高度およそ1kmよりも上空にメソサイクロン^{*3}（直径1.3～2.4kmの反時計回りの渦）を伴いながら、北西に進んでいた。
- ② 積乱雲の後面で形成された下降気流に伴って、メソサイクロンの下方に、直径1km未満の小さな反時計回りの渦が作られた。この渦は上方に進展してメソサイクロンと結合し、強化された。結合から強化に至る過程は1～2分という短時間で生じていた。
- ③ 強化された反時計回りの渦は、さらに1～3分程度で下方に成長し、被害域にて地面に達する竜巻となった。

このように、台風に伴う竜巻の発生メカニズムを数分単位の過程に分けて詳細に分析できたのは、高頻度観測を行うフェーズドアレイ気象レーダーが竜巻を近傍から捉えていたため、世界的にも初めての事例となりました。

今後、他の事例についても解析を進め、今回の研究で得られた結果との比較調査を行うとともに、フェーズドアレイ気象レーダーによる観測で得られる特徴を竜巻の監視・予測技術の高度化に役立てるための研究を行う予定です。

本研究成果は、2020年9月24日付けで、アメリカ地球物理学連合が発行する「Geophysical Research Letters」誌に掲載されました。

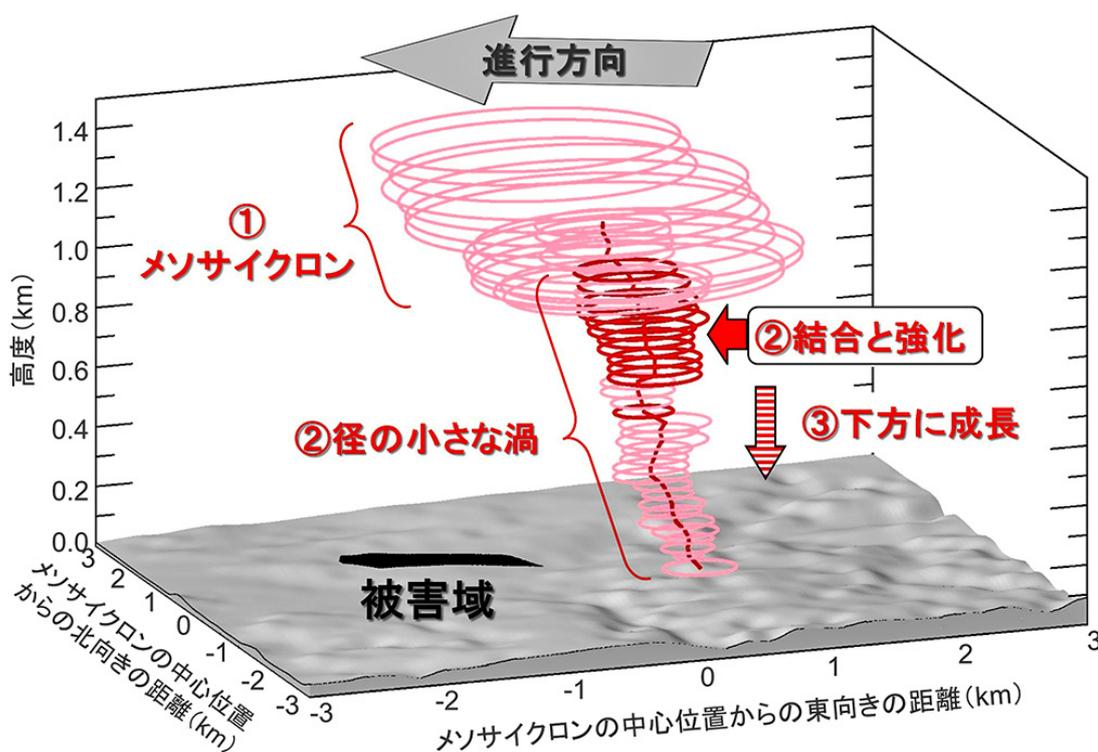


図 積乱雲（ミニチュア・スーパーセル）内で観測されたメソサイクロンとその下部で新たに生じた径の小さな渦の立体構造。ピンク色の円は反時計回りの渦、赤色の円は35m/s以上の回転速度を持つ、とりわけ強い反時計回りの渦を表す。鉛直方向に延びる赤色の線は、径の小さな渦の中心位置を表す。また、灰色のシェードは、国土地理院発行の基盤地図情報（数値標高モデル）より算出した地表面の標高を表す。

< 発表論文 >

掲載誌： *Geophysical Research Letters*

タイトル： High Temporal-Spatial Resolution Observation of Tornadoogenesis in a Shallow Supercell Associated with Typhoon Hagibis (2019) Using Phased Array Weather Radar

著者名： Toru Adachi, and Wataru Mashiko

所属： 気象庁気象研究所

< 関連情報 >

本研究は、気象研究所の令和元年度緊急研究課題「災害をもたらした令和元年度台風の実態解明とそれに伴う暴風、豪雨、高波等の発生に関する研究」（令和元年10月15日～令和2年3月31日）の一環として行われました。研究の推進にあたって、JSPS科研費JP17K13007の助成を受けています。また、解析には日本無線株式会社が運用するフェーズドアレイ気象レーダーのデータを使用しています。

< 用語解説 >

フェーズドアレイ気象レーダー^{*1}：平面上に小型アンテナを複数配列し、それぞれの電波の発射タイミングの制御により、アンテナの上下方向の機械的な首振り機構を省略した最新鋭のレーダーです。立体空間を隙間なく、10～30秒という短時間で、高分解能に観測することが可能です。現在、気象研究所（つくば市）や千葉市内など、全国に6箇所を設置されています。

ミニチュア・スーパーセル^{*2}：スーパーセルは竜巻を発生させやすい積乱雲として知られており、その内部にメソサイクロン（次項参照）と呼ばれる渦を伴います。台風に伴うスーパーセルは雲頂高度が低いため、しばしばミニチュア・スーパーセルと呼ばれます。

メソサイクロン^{*3}：積乱雲の中に存在する上昇気流を伴う渦です。北半球では上から見て反時計回りに回転し、その直径は数km、持続時間

は数10分から1時間に及びます。

問合せ先：気象研究所 台風・災害気象研究部 主任研究官 足立透

電話：029-853-8580

(広報担当)

気象研究所 企画室 広報担当 電話：029-853-8535

1. 背景

台風やハリケーンなどに伴ってしばしば竜巻が発生し、甚大な被害を与えることがあります。日本で発生する竜巻のうち、約20%が台風に伴って発生することが知られており、台風が頻繁に接近する8月下旬に着目すると、この割合は50%を超えると言われていています (Niino et al. 1997)。しかしながら、これらの竜巻を高い時空間分解能によって観測した例が乏しく、台風に伴って発生する竜巻の発生メカニズムは未解明でした。

令和元年10月12日午前8時ごろ、令和元年東日本台風は本州の南海上に位置しており、台風中心から400~500kmほど離れた関東地方は台風の外側の降雨帯に覆われ、房総半島では、竜巻を発生させやすい積乱雲として知られるミニチュア・スーパーセルが複数発生し、通過していました。そのような状況のなか、同日午前8時8分ごろ、千葉県市原市において甚大な突風被害が発生しました (図1a)。気象庁の現地災害調査によって、この突風の強さは風速約65m/s、日本版改良藤田スケールでJEF2に該当し、突風をもたらした現象は竜巻と推定されました (銚子地方気象台 2020)。

この被害域は、日本無線株式会社が千葉県千葉市において運用するフェーズドアレイ気象レーダーからわずか5km圏内に位置しており、同レーダーによって、30~100mという極めて高い空間分解能、30秒という高頻度で現象の立体的な構造が捉えられました。図1bからは、市原市付近で同日午前8時4分30秒ごろ、積乱雲の南端 (白枠で囲んだ領域) において、ミニチュア・スーパーセルの特徴である、降水域が大きく円を描くように渦巻く様子が捉えられていることが分かります。

本研究では、これらの観測データを解析し、この竜巻の発生メカニズムを調査しました。

2. 解析の結果

図2を見ると、同日午前8時4分30秒ごろ、高度およそ1.0km以上にはメソサイクロンと呼ばれる直径1.3~2.4kmの渦が存在する一方で、高度およそ1.0km以下には、0.2~0.8kmのやや小さな直径を持つ、反時計回りと時

計回りの渦のペアが存在することが分かります。

このような渦のペアは、積乱雲の中で生じた強い下降気流の周りで作られることが、これまでもたびたび確認されており、竜巻の発生に重要な役割を担っていると考えられていました (Markowski et al. 2008)。しかし、観測の時間・空間分解能が十分でなかったため、この渦のペアがどのようにして竜巻の発生に結びつくのか、明らかにされていませんでした。

本研究では、この渦のペアの発達過程について時空間に詳細な解析を行い、今回の竜巻は、以下の過程で発生したことが分かりました。

- ① 午前8時2分30秒ごろ、積乱雲の後面で形成された下降気流に伴って、メソサイクロンの下方 (高度0.3km付近) のやや東側に渦のペアが生じ、上方に進展 (図3上段、図4)。
- ② 午前8時5分ごろ、上空にあるメソサイクロンの高度に到達 (図4)。
- ③ 午前8時6分30秒ごろ、ペアのうちの反時計回りの渦の上部で回転速度が急激に強化 (図3中央、図4(a))。このとき、この渦がメソサイクロンの中心から南約400mの位置に最接近している (図5)。なお、時計回りの渦は上方に進展したのち、回転速度が高まることなく、徐々に減衰 (図4(b))。
- ④ 上部で形成された強い渦の領域が下方に成長して、午前8時7分30秒ごろに地上に到達し、竜巻となった (図3右中、図4(a))。
- ⑤ 地上に到達した竜巻は、午前8時9分30秒ごろにかけて北西に進み (図3下、図4(a))、当該地域に被害をもたらした。

3. 考察と展望

今回の研究により、ミニチュア・スーパーセルの内部に存在していたメソサイクロンと、下降気流に伴って生じた径の小さな反時計回りの渦の結合が、今回の竜巻発生の直接的な原因であることが分かりました。これは、台風に伴う竜巻の発生メカニズムを初めて観測データから明らかにしたものです。

さらに、メソサイクロンと径の小さな渦の結合は、両者が数百mの距離にまで接近することにより1～2分という短時間で生じていたこと、結合

し強化された渦は下方に成長し、1～3分程度で地面に達して、被害域に竜巻をもたらしたことが分かりました。これらの結果は、竜巻の発生過程の時空間スケールが極めて小さいことを意味しており、その全容を捉えるためには、フェーズドアレイ気象レーダーを用いた高い時空間分解能による観測が有用であることを示します。

今後、現象の発生メカニズムをさらに詳しく調査するとともに、竜巻の発生前に観測される特徴を気象レーダーから自動的に探知・追跡する技術を開発し、現象の監視・予測技術の高度化に役立てるための研究を進める予定です。

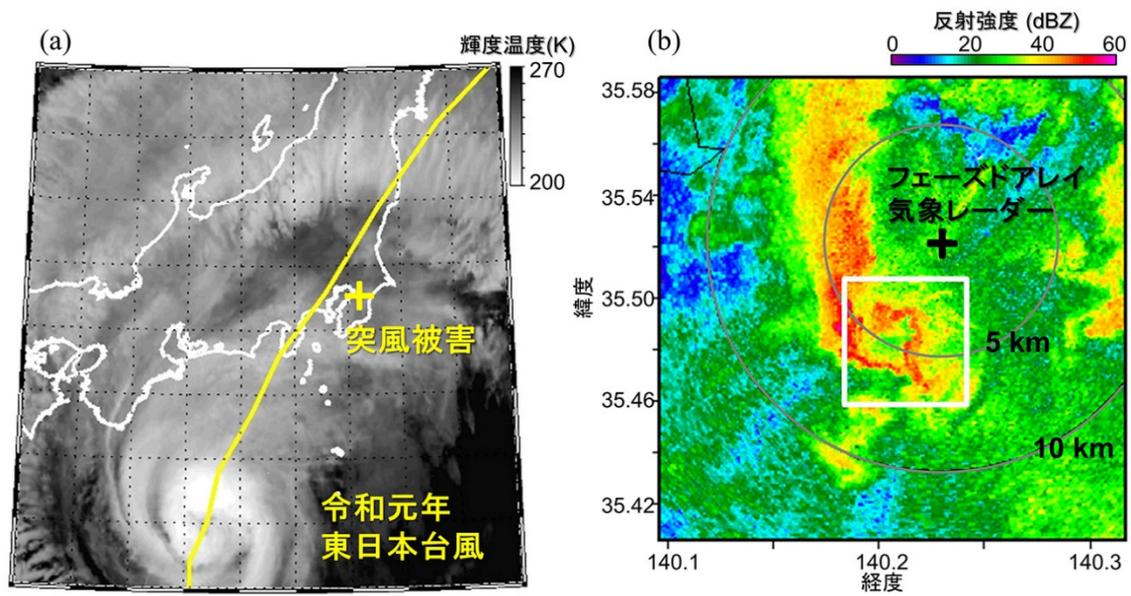


図1. (a)令和元年10月12日午前8時10分頃のひまわり8号による赤外雲画像。(b)竜巻被害をもたらした同日午前8時4分30秒ごろの千葉県市原市付近におけるフェーズドアレイ気象レーダーの反射強度（雨の強さを示す）。

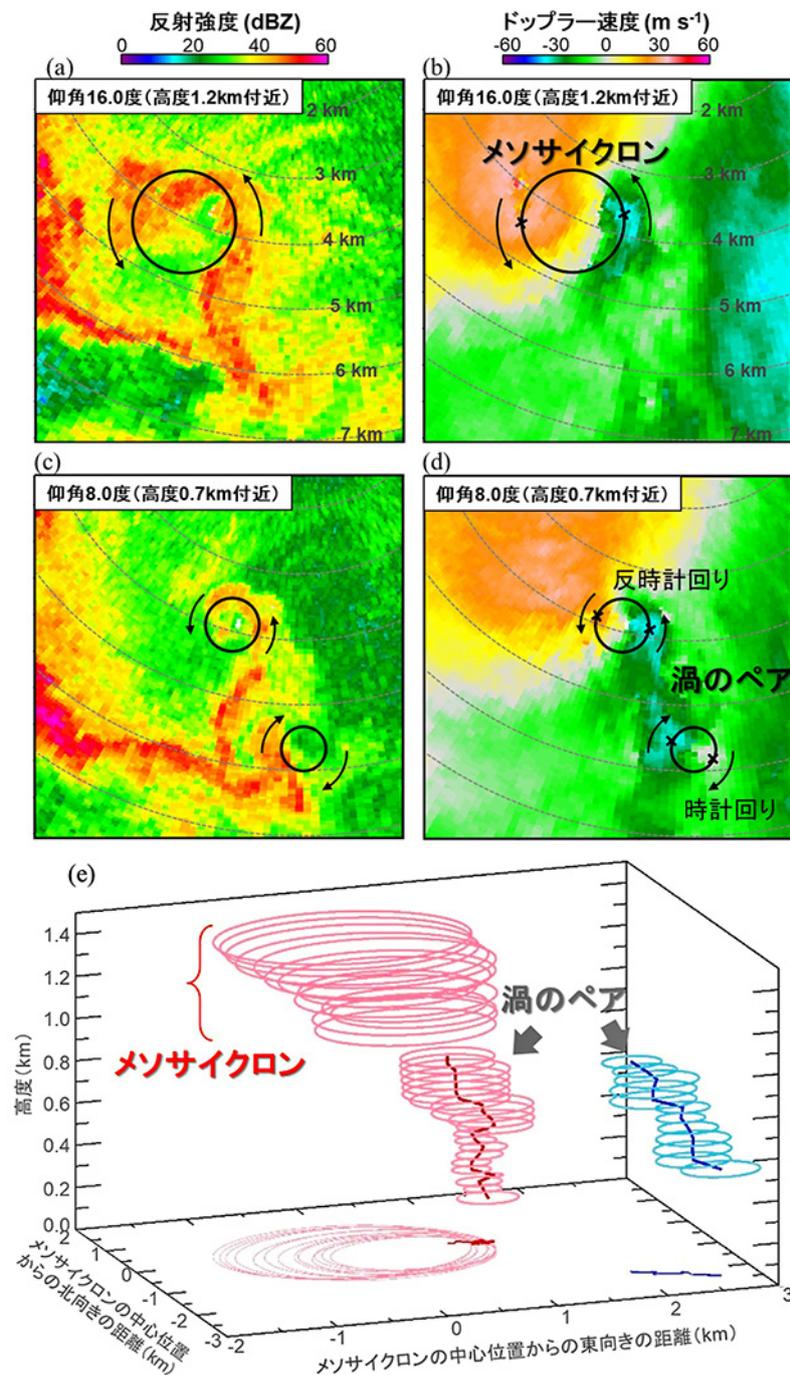


図2. (a)～(d)図1bの白枠内を拡大したフェーズドアレイ気象レーダーの画像。左 ((a)、(c)) に反射強度 (雨の強さを示す)、右 ((b)、(d)) にドップラー速度 (風の様子を示す)、上段 ((a)、(b)) は高度1.2km付近、下段 ((c)、(d)) は高度0.7km付近を示す。(e)メソサイクロンと渦のペアの立体構造。ピンク色の円は反時計回りの渦を表し、水色の円は時計回りの渦を表す。(a)～(e)すべて令和元年10月12日午前8時4分30秒頃。

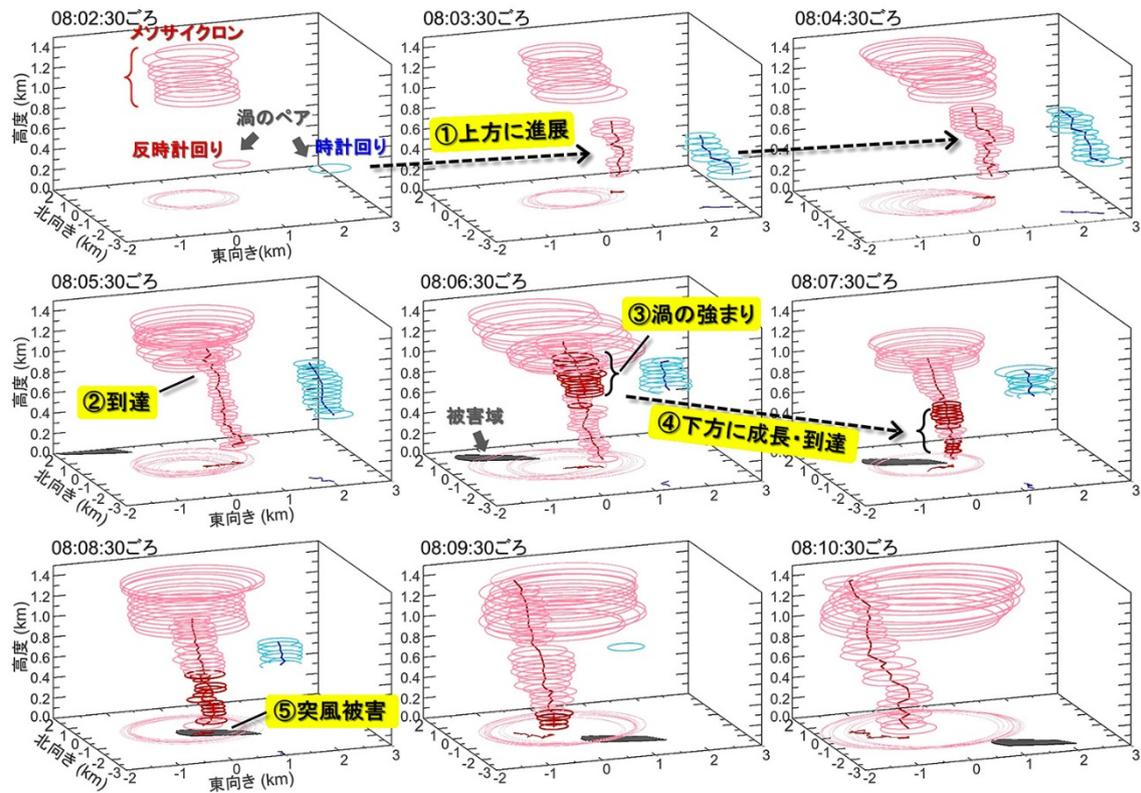


図3. メソサイクロンと渦のペアの1分ごとの時間変化。ピンク色の円は反時計回りの渦を表し、水色の円は時計回りの渦を表す。また、赤色の円は35m/s以上の回転速度を持つ、とりわけ強い反時計回りの渦を表す。

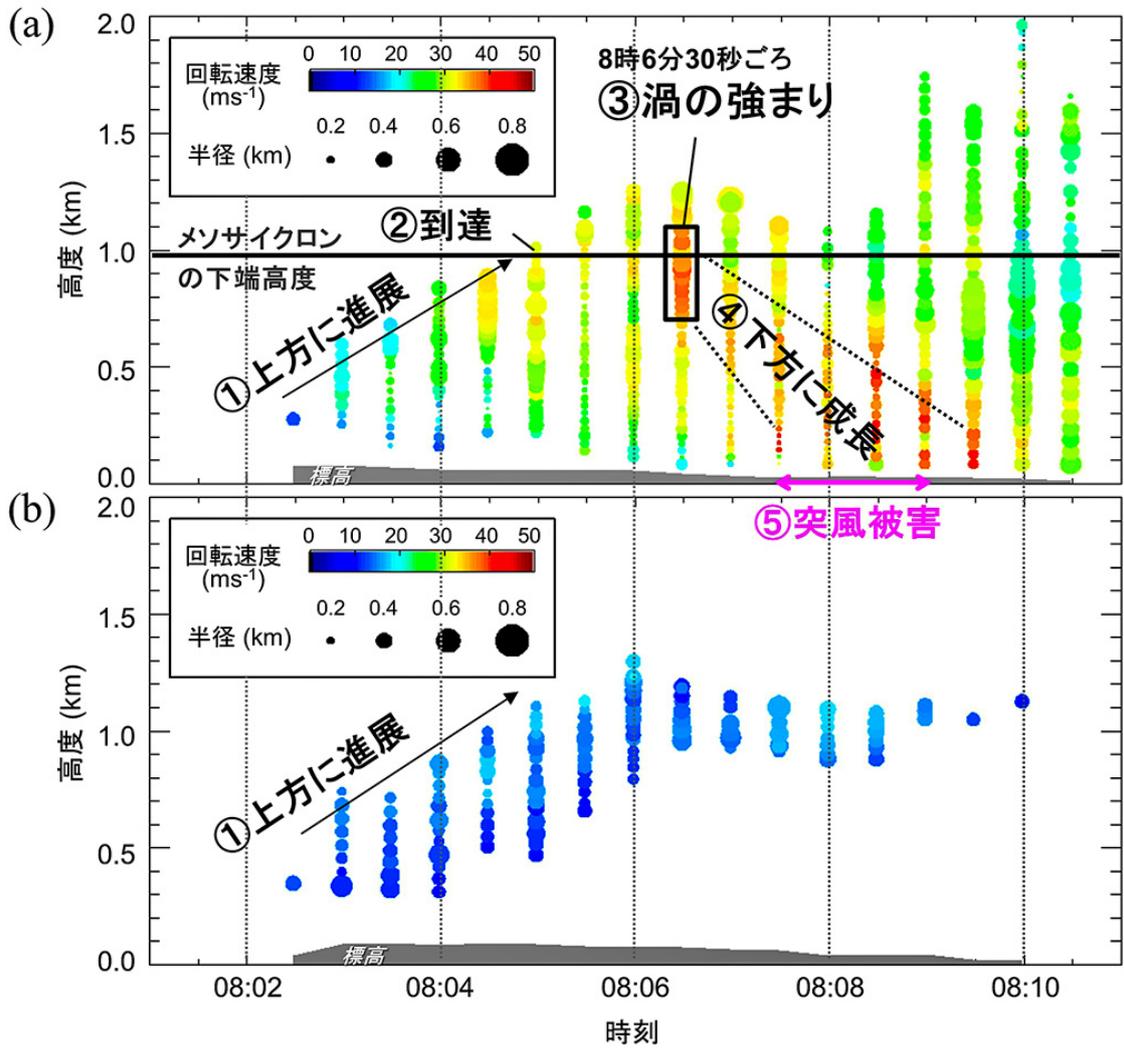


図4. ペアのうちの(a)反時計回りの渦と(b)時計回りの渦の回転速度と半径の変化の様子。

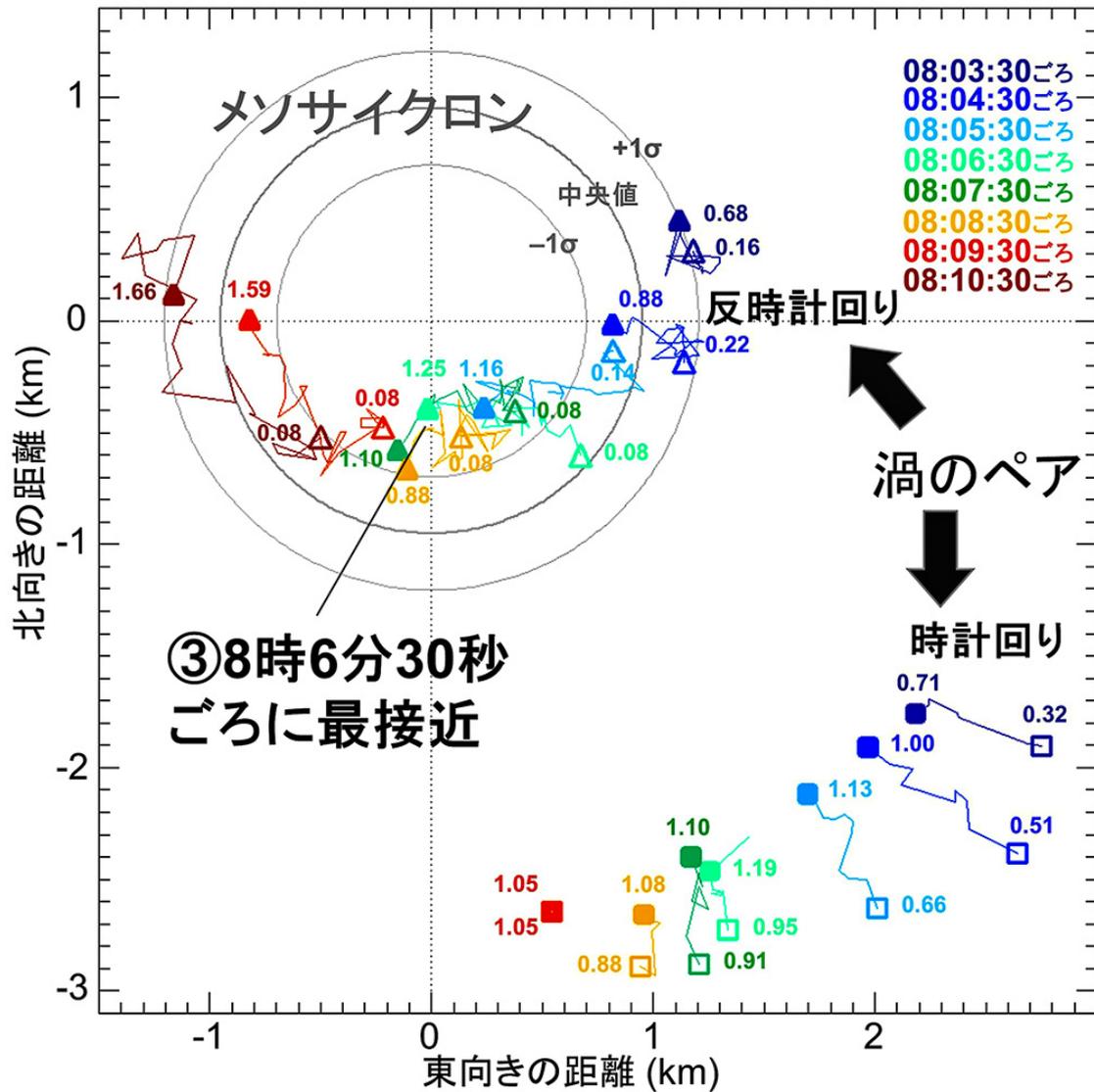


図5. メソサイクロンと渦のペアの相対的な水平位置関係。グレーの円がメソサイクロンの位置を表し、カラーの三角と四角がペアのうちの反時計回りと時計回りの渦を表す。また、色は各時刻を表し、白抜きと塗りつぶしのマークは渦の下端と上端の水平位置を表す。なお、各マークの横に記載された数字は高度(km)を表したものの。

<参考文献>

Markowski, P. M., Rasmussen, E., Straka, J., Davies-Jones, R., Richardson, Y., & Trapp, R. J. (2008). Vortex lines within low-level mesocyclones obtained from pseudo-dual-Doppler radar observations. *Monthly Weather Review*, 136(9), 3513–3535.

Niino, H., Fujitani, T., & Watanabe, N. (1997). A statistical study of tornadoes and waterspouts in Japan from 1961 to 1993. *Journal of Climate*, 10(7), 1730–1752.

銚子地方気象台 (2020). 現地災害調査報告 令和元年10月12日に千葉県市原市で発生した突風について , https://www.jma-net.go.jp/tokyo/sub_index/bosai/disaster/20191012choshi/20191012choshi.html