

高解像度再解析データを用いた竜巻の進行方向を決める環境風の解析

理学専攻・情報科学コース 2340677 三田 優里 (指導教員：神山翼)

1 はじめに

竜巻は積乱雲に伴って発生する激しい上昇気流の渦であり、局所的に甚大な被害をもたらす現象である。日本では特に太平洋沿岸地域で被害が多く、国土全体での発生数も少なくない。被害を最小限にするために、発生後の進行方向の予測可能性について、本研究では議論する。

Niino et al.(1997)[1]によれば、1961年から1993年にかけて日本で発生した竜巻の半数以上は北東象限に移動した。ただし進行方向の多くは目撃情報に基づいており、報告された竜巻の移動方向は16方位のうち8方位に偏っていることが当該研究内で指摘されている。そこで、本研究では気象庁の竜巻等突風データベースを用いて、竜巻の移動方向データを客観的に収集し、期間を拡大して統計をとり、進行方向の偏りについて調査する。その後大規模気象場の風向と竜巻の進行方向の関係を調査し、竜巻の進路を決定する要因と進行方向の予測可能性を考察する。

2 データと手法

2.1 竜巻のデータと移動方向

気象庁の「竜巻等の突風データベース」から、1961年から2023年に発生が確認された竜巻1,514件のうち、日時・場所情報の詳細な記録があり、上陸かつ直線距離で500m以上の被害が生じていた412件の事例を抽出した。時間及び水平解像度は1秒(誤差あり)である。竜巻の移動角度 θ_t は、観測報告に基づいた被害域の始点 (φ_1, λ_1) と終点 (φ_2, λ_2) から、逆正接を用いて定義する。

$$\theta_t \equiv \arctan \frac{R(\varphi_2 - \varphi_1)}{R \cos \bar{\varphi}(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (1)$$

$\bar{\varphi} = (\varphi_1 + \varphi_2)/2$ は緯度平均、 R は地球半径である。

2.2 風向のデータ

ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)の提供するERA5再解析データより、竜巻発生時の南北風(v)、東西風(w)を用いる。時間解像度は1時間、水平解像度は $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ である。竜巻発生直前の時刻の、竜巻被害の始点を囲む最近傍の4点の風速を平均することで最小格子の領域平均をとり、逆正接より風向を16方位に定める。これを、環境風 θ_w として定義する。

2.3 台風性の竜巻

地域特別気象センター(RSMC)東京のBest Track Dataより、竜巻発生時の台風の位置情報を取得し、台風中心から竜巻発生位置の距離が800km以下である竜巻を、台風性の竜巻と定義する。

2.4 角度相関

本研究では、竜巻の移動方向 θ_t と発生時の風向 θ_w の2つの角度変数間の相関を、Jammalamadaka et al.(2001)によって記述された角度相関指標[2]を使用して計算した。

2.5 スーパーセルの移動方向の推定

スーパーセルの移動方向を予測する代表的な手法に、Bunkers et al.(2000)[3]によって提案されたinternal dynamics(ID)法がある。

$$\mathbf{V}_{RM} = \mathbf{V}_{\text{mean}} + D \left[\frac{\mathbf{V}_{\text{shear}} \times \hat{\mathbf{k}}}{|\mathbf{V}_{\text{shear}}|} \right] \quad (2)$$

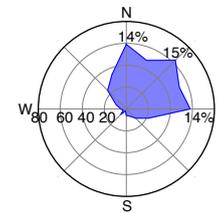
ここで、 $D = 7.5 \text{ m/s}$ は平均風に対するスーパーセルの典型的な相対速度を指す。また、計算に用いる水平風の気圧高度層に対して、 \mathbf{V}_{mean} は全層の平均風ベクトル、 $\mathbf{V}_{\text{shear}}$ は簡易的な鉛直シア(最下層と最上層の気圧面の風ベクトルの差)、 $\hat{\mathbf{k}}$ は鉛直軸に沿った単位ベクトルである。米国に比べてスーパーセルの高度が低いことを考慮し、本研究では1000 hPaから700 hPaの層における平均風と鉛直シアを用いた。

3 竜巻の移動方向の統計解析

気象庁の観測に基づく移動方向の報告の分布は、先行研究[1]と似た、8方位に突出する概形となった。しかし報告数には限りがあり、概形も自然現象の記述として不自然である。そこで本研究では独自に、より客観的な方法で移動方向を計算し、統計をとった。

3.1 北東方向への偏りの信頼性

a) 竜巻の移動方向分布



b) 竜巻移動方向の地理分布

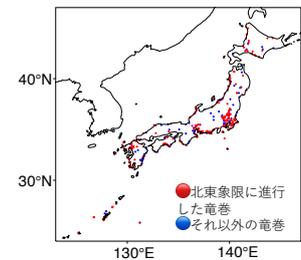


図 1: 竜巻の移動方向分布

本研究で扱う竜巻の移動方向の頻度分布は図1aのようになり、北東方向の15%に次いで北方向、東方向にそれぞれ約14%移動しており、7割近くが北東象限に偏っている。ここで、北東象限とは、東から北までの90度分を指す。この象限内に先行研究のような極端な突出は確認されず、なだらかである。均一的に移動方向を定めた本研究では、目撃証言または観測報告の際の人為的な判断バイアスを比較的排除できたことで、極端な北東象限の突出が消えたと考えられる。

また、先行研究[1]の統計期間(1961~1993年)とその後の30年間(1994~2023年)においても、同じく北東象限への偏りが見られた。さらに、この傾向は季節(春夏秋冬)や地域(日本海側と太平洋側)に分けても大きく変わることはない。図1bは、北東象限に進んだ竜巻の発生位置の地理分布である。独立した期間で同様の結果を得られたため、北東象限へ進行する傾向は

偶然ではないと考えられる。

3.2 竜巻発生時の総観場擾乱による特徴

竜巻の発生数の多い夏と秋の移動方向分布は、東と北に極端に分かれている。この時期の竜巻発生時の主要要因である台風に基づく竜巻を、本研究では93件抽出し、その移動方向分布を図2aに示した。夏と秋のいずれでも、分布の偏りは変わらず、竜巻全件の分布における北方向の突出は、台風性竜巻に起因すると考えられる。

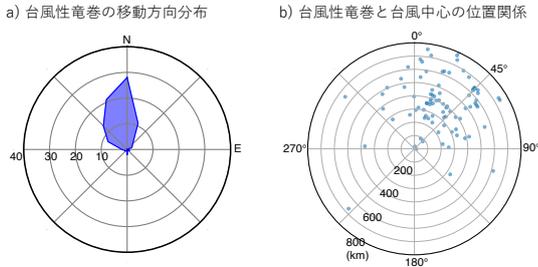


図 2: 台風に伴う竜巻

4 環境風との関係

前章において、竜巻の移動方向を北東と近似するのは不十分であることがわかった。そこで、発生時の風向を用いて、竜巻の移動方向を決定する要因を探る。

4.1 環境風との相関

北東象限に移動する竜巻と環境風との関係を調べるため、竜巻と環境風の方向がいずれも $-45^\circ < \theta \leq 135^\circ$ に収まる場合のみ相関を計算する。300-1000 hPa 面における竜巻の移動方向と風向の相関係数は 0.65~0.79 (図 3b の黒線) であり、50 hPa 毎のどの高度で見ても、95% の信頼水準で統計的に有意である。特に、700-900 hPa 面で最も強い相関が見られた。

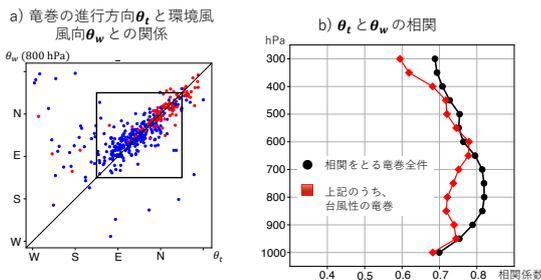


図 3: 竜巻の移動方向と環境風風向の関係

4.2 環境風のずれ

環境風に対する竜巻の移動方向 ($\theta_t - \theta_w$) のずれを描画すると、どの程度整合しているかが明らかである (図 4a)。全体で見ると 700 hPa 面で最もよく環境風と整合している。前節の結果と併せて、竜巻の移動方向を統計的に推定するには発生時の 700 hPa 面の水平風向を見れば良いことがわかった。

4.3 スーパーセルの推定移動方向との関係

移動方向のずれのメカニズムを理解するため、日本におけるスーパーセルと竜巻の関係を調査した。日本の竜巻が全てスーパーセル型であると仮定し、ID 法に

基づいてスーパーセルの移動方向ベクトル θ_s を近似すると、それに対する竜巻の移動方向 ($\theta_t - \theta_s$) は、平均的に約 18° 反時計回りにずれていた (図 4b)。スーパーセルは環境風から平均的に 30° 程度時計回りに逸れていることがわかっているため、竜巻は、地上の環境風向とスーパーセルの推定移動方向の間を進行している結果となった。

全ての竜巻がミニスーパーセルという仮定を大胆に設定しているにもかかわらず、移動方向が整合している竜巻は多い。しかし 90° やそれ以上に逸れている竜巻も一定数見受けられる。よって、スーパーセルの移動ベクトル推定は日本の竜巻の移動の目安としてはあまり信頼性が高いとは言えない。

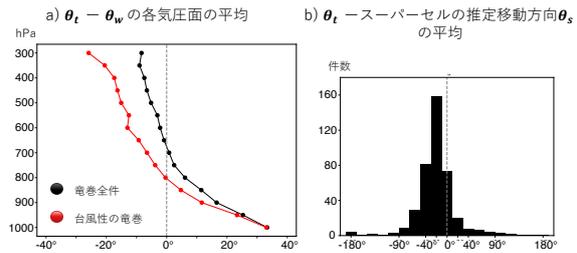


図 4: 竜巻の移動方向のずれ

5 まとめと今後の課題

先行研究から統計の期間を増やし、進行方向を客観的に算出することで、竜巻の進行が北東象限に 7 割程度偏っていることを確認した。また、竜巻発生時の風向との相関を見ることで、積乱雲と共に風に流されているという仮説を検証し、700 hPa 面の風向と概ね一致することが判明した。スケールの小さい竜巻現象において現在使用している風向データの解像度での検証が妥当かどうか、また、今後実際に防災に役立てるにあたり、発生予測のできない竜巻の判定をどう行うかが課題となっている。これが解決されれば、竜巻の進路予測は可能であると言える。

今後は、竜巻の移動方向について詳細な分類をし、環境風やスーパーセルの進行方向の予測と竜巻の移動方向がより整合する条件や初期値を探る。さらに、竜巻の親雲となる積乱雲が特定できる事例についての解析を進めれば、今後の竜巻被害の減少、特に日本の竜巻の進行に着目した対策を進められることが期待される。

参考文献

- [1] Niino, H., Fujitani, T., Watanabe, N. (1997). A statistical study of tornadoes and waterspouts in Japan from 1961 to 1993. *J. Climate*, **10**(7), 1730-1752.
- [2] National Council for the Social Studies, Chapter 230 Circular Data Analysis
- [3] Bunkers, M.J., B.A. Klimowski, J.W. Zeitler, R.L. Thompson, and M.L. Weisman, 2000: Predicting supercell motion using a new hodograph technique. *Wea. Forecasting*, **15**(1), 61-79.