

浜岡原子力発電所周辺に発生する竜巻の予測精度向上に向けた研究

Research to Predict Tornadoes Occurring Around the Hamaoka Nuclear Power Plant

局地モデルLFMと突風関連指数EHIを活用した予測で
浜岡原子力発電所周辺での竜巻発生を予測

浜岡原子力発電所では、竜巻の発生が予想される場合、発電所内への速やかな周知および現場での対応が必要となる。本研究では、防災の観点から、浜岡原子力発電所周辺に発生する竜巻を精度よく予測することを目指しており、局地モデルLFMと突風関連指数EHIを活用した予測で、竜巻の予測精度が向上することを確認した。



執筆者

原子力安全技術研究所
地震・津波・防災グループ
渡邊 康介

1 背景および目的

浜岡原子力発電所では、竜巻が予想される場合には、発電所内への速やかな周知および現場での対応が必要となる。発電所再稼働後の竜巻に関する運用（以降、竜巻警戒基準）は、気象庁の発信する利用情報をもとに、竜巻の発生可能性が高まるにつれて、竜巻注意（レベル1）、作業中止（レベル2）、速やかな屋内退避（レベル3）と移行し、各レベル毎に対応することを予定している（第1図）。また、各レベルの判定では、気象庁発信情報を活用した予測手法（以降、竜巻警戒基準の予測手法）を検討している。この予測手法は、発電所からの距離や予報時間等について時空間的な閾値を設定し、気象庁発信情報が完全または部分的に満足するかで判定することを検討している。

竜巻警戒基準の予測手法の精度を「適中」・「見逃し」・「空振り」の観点で確認した。なお、本研究におけるそれぞれの定義は、以下の通りである。

「適中」：発生すると予測して、実際に発生するパターンまたは発生しないと予測し、実際に発生しないパターン

「見逃し」：発生しないと予測し、実際には発生するパターン

「空振り」：発生すると予測し、実際には発生しないパターン

見逃しの観点では、2017～2023年で浜岡原子力発電所周辺または類似環境で実際に発生した竜巻15ケースを予測できたかを確認した（第2図（a））。また、空振りの観点では、2017～2023年で竜巻警戒基準が「速やかな屋内退避（レベル3）」を発報して竜巻の発生を予測した事例10ケースに対し、実際に竜巻が発生したかを確認した（第2図（b））。確認の結果、見逃しは無いが空振りが8ケース発生しており、竜巻警戒基準の予測手法は空振りが多いことが確認された。このことから竜巻警戒基準の予測手法は、竜巻の発生を見逃さない安全な予測手法である一方、不要な作業中断や対応作業の発生が見込まれる予測手法であると言える。

そこで本研究では、浜岡原子力発電所周辺に発生する竜巻の予測精度向上を目的に独自の竜巻予測手法を検討することとした。

	通常時	竜巻注意 (レベル1)	作業中止 (レベル2)	速やかな 屋内退避 (レベル3)	竜巻 襲来後
対応	・情報収集	・連絡体制の確認 ・運転手の待機	・車両の退避 ・資機材の固縛 ・完了後、屋内退避	・屋内退避	・制限解除
利用 情報		雷注意報など	竜巻発生確度ナウキャスト 雷ナウキャスト		

第1図 竜巻警戒基準における対応と利用情報（予定）

		予測				予測	
		竜巻 発生	竜巻 発生なし			竜巻 発生	竜巻 発生なし
実 際	竜巻 発生	適中 15ケース	見逃し 0ケース	実 際	竜巻 発生	適中 2ケース	見逃し 0ケース
	竜巻 発生なし	空振り 0ケース	適中 0ケース		竜巻 発生なし	空振り 8ケース	適中 0ケース

(a) 見逃しの観点

(b) 空振りの観点

第2図 竜巻警戒基準の予測手法の精度

2 数値予報と突風関連指数についての検討

検討では気象庁提供の竜巻発生確度ナウキャストを参考にした。竜巻発生確度ナウキャストは、数値予報およびレーダ観測から突風関連指数を求め、メソサイクロンの検出状況を加えて総合判定を行い解析および予測を行う¹⁾。突風関連指数は激しい突風の発生可能性を表す指数で、メソサイクロンは発達した積乱雲の中で直径数キロメートルの大きさを持つ低気圧性の回転である。数値予報は、気象庁のメソモデル（以降、MSM）を用いて解析をされているが、気象庁には、より小さい水平格子間隔で予報を行う局地モデル（以降、LFM）がある²⁾。MSMとLFMの比較は第1表の通りである。竜巻は、現象の継続時間が10分程度で大きさが直径100m程度と、台風や積乱雲といった気象現象と比較して時空間的には小規模な気象現象である。よって、本研究では、格子間隔が小さく、予報頻度も多いLFMを数値予報に用いて竜巻発生の予測に着目することとした。LFMは水平格子間隔をMSMの5kmからより小さい2kmとし、積乱雲等のより小さいスケールの現象を表現できるものである。竜巻は積乱雲よりもスケールの小さい現象であり、LFMを用いても直接表現することはできないが、MSMに比べて格子間隔が小さく、予測精度が向上すると考えられる。

突風関連指数には様々なものがあるが、本研究では浜岡原子力発電所周辺での竜巻予測に有効な突風関連指数として EHI (Energy Helicity Index) を研究の対象とした。EHI は、積乱雲が発達するための成層不安定と風の鉛直シアを複合的に考慮した突風関連指数で、過去の文献から竜巻の監視に有効であるとされている³⁾。

$$EHI = \frac{CAPE \times SReH}{160,000}$$

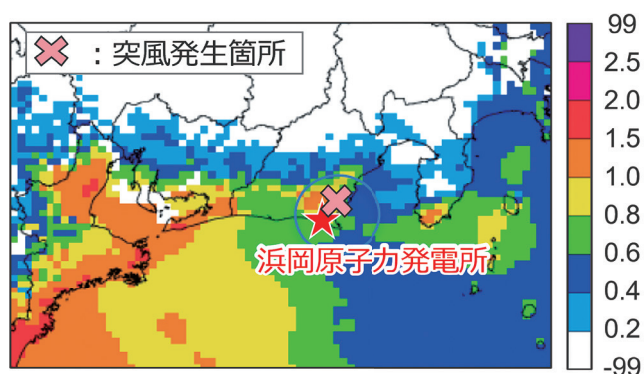
ここに、CAPE は積乱雲を発生させる上昇流の強さの目安の 1 つである対流有効位置エネルギーであり、SReH は積乱雲がスーパーセルとなるかを診断する指標である。

過去に配信された LFM を用いて EHI を計算した結果を第 3 図に示す。実際に、EHI 値が大きくなっている箇所の付近で竜巻が発生しており、EHI は浜岡原子力発電所周辺での竜巻の予測に有効であることが確認された。また、突風事象の有無を判断するための閾値は、地域によって異なると言われていることから、過去の竜巻発生事例を参考に EHI での竜巻予測の閾値を設定した。

以上のことより本研究では、MSM よりも格子間隔の小さい LFM を使い、浜岡原子力発電所周辺の地域での竜巻予測に適した EHI に関して閾値を設定し、竜巻を予測することとした。以降、この手法を検討手法とする。

第 1 表 MSM と LFM の比較

	LFM	MSM
格子間隔	2km	5km
鉛直層	60層	50層
積分時間間隔	8秒	20秒
初期値	局地解析	メソ解析
側面境界値	メソモデル	全球モデル
予報頻度・時間	1日24回・9時間予報	1日8回・39時間予報



第 3 図 EHI の計算結果 (2022 年 9 月 18 日 16:00)

3

検討手法の精度検証

検討手法の精度を見逃しおよび空振りの観点から検証した。検証は、竜巻警戒基準の予測手法の精度 (第 2 図) と同様に、見逃しの観点では、2017 ~ 2023 年で浜岡原

子力発電所周辺または類似環境で実際に発生した竜巻 15 ケースを予測できたかを確認した。また、空振りの観点では、2017 ~ 2023 年で竜巻警戒基準がレベル 3 を発報して竜巻の発生を予測した事例 10 ケースで、実際に竜巻が発生したかを確認した。

検証の結果を第 4 図に示す。同図より、検討手法は見逃しをせずに、空振りを竜巻警戒基準の予測手法から 6 ケース低減することができると判明した。一般的な二値分類同様に、竜巻予測においての見逃しと空振りの関係は、トレードオフの関係にあり、空振りを低減させると見逃しが増加する懸念があるが、検討手法では見逃しをせずに空振りを低減した。これは、従来の竜巻警戒基準の予測手法よりも検討手法が浜岡原子力発電所周辺での竜巻発生と相関性が高いことを意味しており、竜巻予測に適している可能性が確認されたことになる。

		予測	
		竜巻発生	竜巻発生なし
実際	竜巻発生	適中 15ケース	見逃し 0ケース
	竜巻発生なし	空振り 0ケース	適中 0ケース

(a) 見逃しの観点

		予測	
		竜巻発生	竜巻発生なし
実際	竜巻発生	適中 2ケース	見逃し 0ケース
	竜巻発生なし	空振り 2ケース	適中 6ケース

(b) 空振りの観点

第 4 図 検討手法の精度

4

まとめと今後の展開

浜岡原子力発電所周辺に発生する竜巻の予測精度向上を目的に独自の竜巻予測手法 (検討手法) を検討した。検討手法では、格子間隔の小さい LFM を使い、浜岡原子力発電所周辺の地域で竜巻予測を行うのに適した EHI の閾値を設定し、竜巻を予測することとした。結果、従来の竜巻警戒基準の予測手法と比較して、見逃しをせずに空振りを低減できる可能性が確認できた。今後、より長期的な精度検証や第 1 図記載の発電所対応を踏まえたリードタイム (竜巻発生時刻と予測ができた時刻の差) の調整を行う。

最後に、本研究で紹介した各種検討は、一般財団法人日本気象協会にご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 瀧下洋一、竜巻発生確度ナウキャストの提供開始、日本気象学会 天気、2010.10, pp47-52
- 2) 気象庁予報部数値予報課、気象等の情報を扱う事業者等を対象とした講習会 局地モデル (LFM) の特性と利用上の留意点について、2013.11, 「<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/minkan/koushu131120/shiryou1.pdf>」, (参照 2025.12)
- 3) 瀧下洋一、竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について—突風に関する防災気象情報の改善—、測候時報 78, pp57-93