

技術報告書

題目: 夏季猛暑環境下における「つむじ風(Dust Devil)」の最大強度推定と可視化モデルに関する研究

著者: Backyard AI Architect DD

日付: 2026年2月11日

1. 緒言

1.1 背景

近年、日本国内における夏季の気温上昇は著しく、都市部のアスファルト舗装や学校グラウンド等の地表面温度は、気温を大幅に上回る高温となる事例が頻発している。こうした環境下では、地表付近の空気が暖められて軽くなり上昇する「熱的不安定性」が局地的に高まることで、「つむじ風(Dust Devil)」が発生しやすくなる。これは時にイベント用テントの倒壊や飛来物による人的被害を引き起こす要因となる。

1.2 目的

本研究は、日本国内の観測史上最高クラスの猛暑環境(気温40°C、地表面温度68°C)を想定し、その条件下で発生しうるつむじ風の最大風速および危険域を、熱力学および流体力学モデルを用いて推定することを目的とする。また、その結果をOpenSCADを用いて3次的に可視化し、防災啓発に資するデータを提供する。

2. 物理モデルと支配方程式

本シミュレーションでは、つむじ風を「地表面の熱エネルギーを運動エネルギーに変換する熱機関(ヒートエンジン)」として捉える。すなわち、高温の地表(加熱源)と上空の冷気(冷却源)の温度差を利用して回転力を生み出すシステムとしてモデル化を行った。

2.1 熱力学的スケーリング則(最大風速の推定)

つむじ風の最大接線風速 V_{max} は、Renno & Ingersoll (1996) による熱機関モデルに基づき、観測変数を用いた以下の経験的簡易式により算出する。

$$\text{式(1): } V_{max} \approx \eta \times \sqrt{(T_{surf} - T_{air})}$$

ここで、各変数は以下の通りである。

V_{max} : 最大接線風速 [m/s]

T_{surf} : 地表面温度 [°C]

T_{air} : 地上気温(高さ1.5m-2.0m) [°C]

η (イータ): 変換効率および次元調整を含む無次元経験係数。

本研究では、Sinclair (1973) 等の観測研究に基づき、地球大気条件下での標準的な推定値として $\eta = 3.2$ を採用した。なお、Lorenz (2020) 等が示す理論的な熱力学限界値よりは保守的な値であり、現実的な発生強度を推定するものである。

2.2 流体力学的渦モデル(速度分布)

渦の内部構造は、中心部の剛体回転(回転円盤のような動き)と外縁部の自由渦(距離に反比例して弱まる動き)を組み合わせた「ランキン結合渦(Rankine Combined Vortex)」モデルで近似した。

式(2a) 強制渦域 ($r < R_c$):

$$V_{\theta}(r) = V_{\max} \times (r / R_c)$$

式(2b) 自由渦域 ($r \geq R_c$):

$$V_{\theta}(r) = V_{\max} \times (R_c / r)$$

ここで、 R_c は渦のコア半径 [m]、 r は中心からの距離 [m] である。

2.3 3次元流速場の構成とベクトル合成

粒子の挙動を再現するため、水平方向の回転に加え、以下の経験則に基づく速度成分を合成した。

$$\text{水平全風速(防災指標用): } V_{\text{horiz}} = \sqrt{V_{\theta}^2 + V_r^2}$$

$$\text{吸い込み速度 (} V_r \text{): } V_r \approx -0.3 \times V_{\max}$$

$$\text{上昇気流速度 (} V_z \text{): } V_z \approx 0.4 \times V_{\max}$$

注:これらの係数は、Sinclair (1973) による典型的なつむじ風の観測データおよび定常状態における構造比率を参考に設定したものである。

3. シミュレーション設定条件

日本国内における「現実には起こりうるシナリオ」として、以下の境界条件を設定した。

気温 (T_{air}): 40.0 °C

根拠: 日本の気象庁観測データ(歴代最高気温 41.1°C等に準拠)。

地表面温度 (T_{surf}): 68.0 °C

根拠: 夏季晴天時の密粒度アスファルト舗装表面温度に関する道路工学的調査データに基づく。気温+20~30°Cに達する高熱源領域を想定した厳しい条件である。

温度差 (ΔT): 28.0 °C

根拠: 上記条件による差分。この大きな温度差が、大気を不安定にし、渦を駆動するエネルギー源となる。

コア半径 (R_c): 5.0 m

根拠: イベント会場等への影響を考慮し、直径10m級の大型つむじ風を想定モデルとした。

4. 解析結果

4.1 最大風速の推定値

上記条件を式(1)に代入し、熱力学的最大風速を算出した。

計算: $V_{\max} \approx 3.2 \times \sqrt{(68.0 - 40.0)} \approx 16.93 \text{ [m/s]}$

これに吸い込み成分を加味した水平最大風速は、約 17.0 m/s と推定された。

4.2 工学的評価と危険度判定

算出された風速 17.0 m/s は、気象庁の風力階級および一般的な防災基準において以下の通り評価される。

風力階級: 風力7(強風)

現象: 樹木全体が揺れ、風に向かって歩きにくい状態。

留意点: 竜巻の強さを示す「改良藤田スケール(JEF)」のJEF0(25m/s～)には達しないものの、屋外活動においては十分に危険な領域である。

想定被害:

固定が不十分なイベント用テント(運動会テント等)の浮き上がりや倒壊。

立て看板やベニヤ板などの飛散による対人事故。

シミュレーション上のカラーコード: 赤色(警戒レベル)

本報告書では、15m/s 以上 20m/s 未満の領域を「赤色」で表示している。これは気象庁の基準(20m/s以上を赤とする場合が多い)とは異なるが、屋外イベント設営等の安全管理基準(風速10～15m/sで中止検討)を鑑み、より安全側に立った独自の警戒表示を採用したものである。

5. 考察と結論

本シミュレーションにより、日本の猛暑環境下(気温40℃・地表68℃)においては、風速 17m/s クラス の強力なつむじ風が物理的に発生しうることが示された。

この風速は、住家が倒壊するような巨大竜巻(JEF0以上)ほどの破壊力はないものの、イベント会場や校庭における仮設構造物に対しては脅威となり得る。特に、本モデルで仮定した地表温度68℃のような極端な高温箇所では、熱機関としての出力が最大化され、突発的な強風が発生するリスクが高い。

結論と提言

防災啓発においては、「つむじ風は単なる風ではなく、局地的な熱エネルギーの解放現象である」との認識が必要である。アスファルトや乾燥した裸地において、視覚的に砂塵の巻き上げを確認した際は、シミュレーションで示された「赤色領域(17m/s前後)」の突風、もしくはそれ以上の突風が発生している可能性を考慮し、直ちに頑丈な建物内へ退避する行動が推奨される。

なお、本モデルは定常状態を仮定した簡易モデルであり、実際の現象における移動速度や非定常的な変動については、今後のさらなる検討課題とする。

6. 参考文献

Kaimal, J. C., & Businger, J. A. (1970). Case studies of a convective plume and a dust devil. *Journal of Applied Meteorology*, 9(4), 612-620.

Lorenz, R. D. (2020). Dust devils. In *Treatise on Geophysics* (pp. 311-336). Elsevier.

Renno, N. O., & Ingersoll, A. P. (1996). Natural convection as a heat engine: A theory for CAPE. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 53(4), 572-585.

Sinclair, P. C. (1973). The lower structure of dust devils. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 30(8), 1599-1619.

気象庁. (n.d.). 風の強さと吹き方. Retrieved from [JMA Website URL]