

種々の熱源から発生する火災旋風の 直角座標と円柱座標を用いた数値シミュレーション

理学専攻・情報科学コース 津久井彩絵

1 はじめに

今後、都心で大震災が発生した際に起こりうる二次災害で最も恐ろしいものは火災旋風であると言われている。この火災旋風の代表例として、1923年の関東大震災時に発生したものがあ。東京ではおよそ100個もの火災旋風が発生し、ある地域では、約38,000人が巻き込まれた^[1]。

本研究では、軸対称性を仮定して行われた研究^[4]を進展させ、熱源の個数や形といった幾何学的条件を変化させることによる火災旋風の形状変化や威力変化についての3次元解析を行うことを目的とする。

2 計算方法

2.1 空間のモデル化

計算領域は、Fig. 1に示す、半径 ae^4 、高さ ae^3 の円柱とする。先行研究^[2]において、円柱の中心の特異点を避けるための空洞を設ける必要があり、中心付近の計算ができないという問題が生じた。そこで本研究では、円柱領域の中心に直角座標系をベースとした一般座標を用いて作成した計算領域を別途設け、計算領域を作成する。外側の領域の格子数は $r \times \theta \times z = 61 \times 82 \times 41$ 、中心付近の領域の格子数は $x \times y \times z = 23 \times 23 \times 41$ とする。

領域の中心や地面付近の流れの様子を詳しく観察するために、 $r = e^\psi$ 、 $z = e^\zeta$ ($0.0 \leq \psi \leq 4.0$, $0.0 \leq \zeta \leq 3.0$) とし、3次元直交不等間隔格子を用いる。

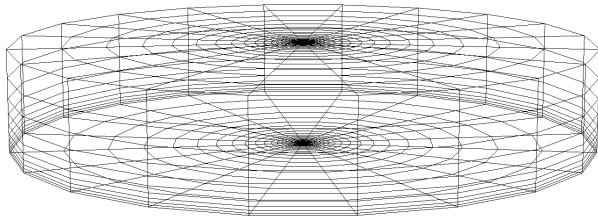


Fig. 1: Calculation model

2.2 基礎方程式

基礎方程式として、(1)連続の式、(2)3次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式、(3)温度の移流拡散方程式を使用する。

本研究では、中心付近の領域とそれ以外の領域の2つに分けて計算を行う。中心付近の領域では、 x - y 平面に平行な面で、2次元の一般座標変換 $\xi = \xi(x, y)$ 、 $\eta = \eta(x, y)$ を行い、 z 軸方向に1次元座標変換 $\zeta = \zeta(z)$ を行う。これらの変換によって、方程式(1)、(2)、(3)を変換して使用する。ここで、地面付近の解像度を上げるため、鉛直方向に $z = e^\zeta$ を使った。

また、円柱の中心軸付近以外の領域においては、方程式(1)、(2)、(3)を円柱座標系に変換して使用する。なお、熱源近くに格子を多く取り、なるべく遠方まで計算するため、半径方向と鉛直方向に座標変換 $r = e^\psi$ 、 $z = e^\zeta$ を使用する。

連続の式

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

非圧縮性 Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla P + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{V} + \frac{Gr}{Re^2} \mathbf{T} \mathbf{k} \quad (2)$$

温度の移流拡散方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) T = \frac{1}{RePr} \Delta T \quad (3)$$

$\mathbf{V} = (u, v, w) = (V_r, V_\theta, V_z)$: 流速

\mathbf{k} : 鉛直方向の単位ベクトル

P : 圧力, T : 温度

Re : レイノルズ数, Gr : グラスホフ数

Pr : プラントル数

2.3 解法

先述の方程式をフラクショナル・ステップ法を用いて解く。参考文献^[4]を元に、パラメータは、 $Re = 10^4$ 、 $Gr = 10^9$ 、 $Pr = 0.71$ とし、 $\Delta t = 0.0015$ 、計算ステップは20,000回とする。また、基礎方程式の非線形不安定性の影響を小さく抑えるために、条件に応じて、1次精度上流差分と3次精度上流差分を使い分ける。

3 計算条件

3.1 初期条件

初期状態において、全ての格子で半径方向の流速 V_r 、 z 方向の流速 V_z 、温度 T を0.0とし、角度方向の流速 V_θ を $r\omega$ とする。ここで、 r は半径、 ω は地球の無次元回転角速度とする。また、熱源領域の温度 T は1.0とし、熱源はFig. 2の4ケースとする。また、先行研究^[3]では、中心から熱源までの距離を全て等しくするという条件のみを課したが、本研究では、各熱源は中心からの距離が等しく、面積も等しいものとする。

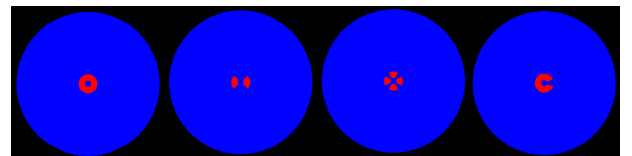


Fig. 2: Pattern of heat source (Case:1,2,3,4)

3.2 境界条件

外側の計算領域の半径方向と z 方向に関して、Fig. 3 の境界条件を課し、角度方向に関しては、周期境界条件を課す。内側の計算領域と外側の計算領域間の境界条件として、2つの領域の境界となる格子の流速と温度は、境界の1つ外側(円柱座標)と1つ内側(一般座標)の格子における流速と温度の平均値とする。

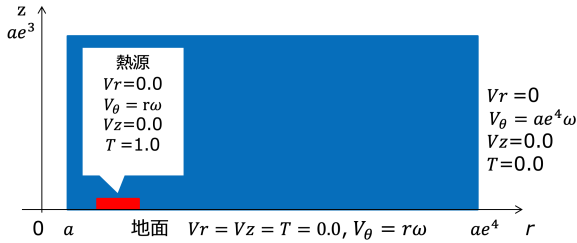


Fig. 3: Boundary condition of outer area

4 結果と考察

4.1 結果

上昇気流が発生し始めてから落ち着くまでの時間ステップの中間に当たる 7500step での $r-z$ 面における様子を掲載する。左図は温度、右図は流速の様子を示す。

Case:1

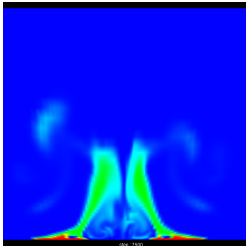


Fig. 4: Temperature

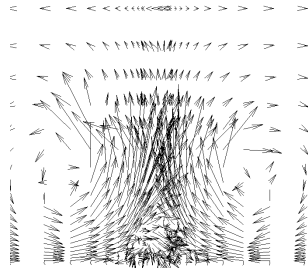


Fig. 5: Velocity

上昇気流が激しくなるに従い、熱は鉛直方向だけでなく、半径方向にも広がる。熱源上に現れた上昇気流は、コアンダ効果によって中心軸に沿った流れへと変換し、その様子が徐々に顕著になっていくことで、大きな竜巻へと変化する。10000step を境に、竜巻は落ち着いてくる。

Case:2

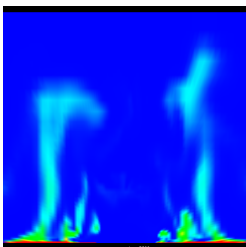


Fig. 6: Temperature

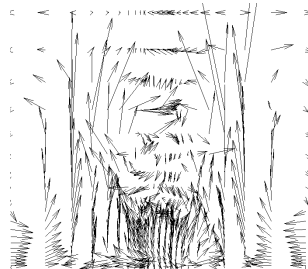


Fig. 7: Velocity

熱源の外側や2つの熱源の間から熱源に向かう流れが徐々に大きくなっていくことで、2つの熱源上に上昇気流が現れる。また、2つの熱源間から計算領域の中心に入ってくる流れにより、領域の中心にも上昇気流が発生する。

Case:3

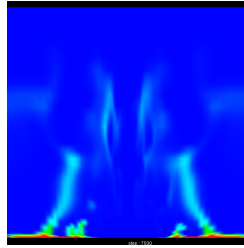


Fig. 8: Temperature

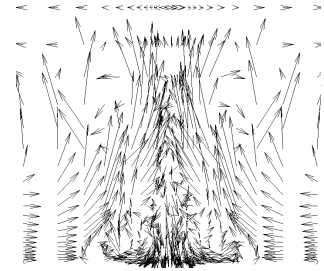


Fig. 9: Velocity

Case:2 に比べ、各熱源間の距離が小さいため、コアンダ効果の影響が大きく、4つの上昇気流は互いに引き寄せあい中心軸に沿うようになる。次第にコアンダ効果が弱まることで、竜巻は4つの熱源上に現れる流れへと変化する。

Case:4

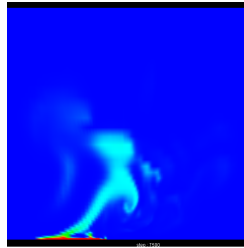


Fig. 10: Temperature

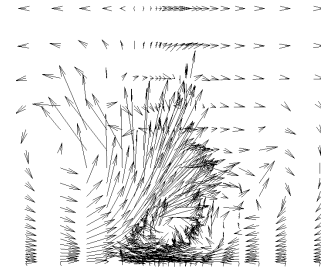


Fig. 11: Velocity

他の3つと比べると、上昇気流はすぐに大きな竜巻にはならず、半径方向に広がる。これは、熱源の切れ目部分の流れを補うことによるものと考えられる。徐々に、地面付近で熱源の切れ目から入ってくる流れが大きくなり、竜巻は中心軸に沿った流れとなる。

4.2 考察

全てのケースで竜巻が発生した。しかし、熱源間の距離や熱源の形状によってコアンダ効果の影響も異なり、その結果、竜巻の形状に関係すると考えられる。また、どのケースも竜巻は 10000step 前後で落ち着く。これは実時間で火災発生から約2時間後と推測できる。

5 まとめ

4パターンの熱源を設けた場合の火災旋風の様子を数値シミュレーションによって検証を行った。その際、計算領域の中心部分の取り扱いを工夫した。その結果、各パターンにおける火災旋風の変化を視覚化することができ、中心付近の解析をより詳しく行うことができた。今後は、パラメータや計算領域を再検討し、都心で火災旋風が発生しうる条件を考えていきたい。

参考文献

- [1] 光田寧, 文字信貴, "大火災に伴う旋風について", 京都大学防災研究所年報第25号 B-1(1982)
- [2] 津久井, 河村, "種々の条件下における火災旋風の数値シミュレーション", 第32回数値流体力学シンポジウム (2018)
- [3] 津久井, 河村, "種々の熱源から発生する火災旋風の直角座標と円柱座標を用いた数値シミュレーション", 日本流体力学学会 (2019)
- [4] Kunio KUWAHARA and Yuko OSHIMA: Thermal Convection Caused by Ring-Type Heat Source, Journal of Physical Society of Japan Vol51, No.11, November, 1982, 3711-3719.