

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

津久井彩絵 (指導教員：河村哲也)

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。火災旋風は2種類あり、林野火災から発生する場合が最も多いが、石油基地火災や大規模な市街地火災でも発生する。火災旋風の代表例として挙げられるものは1923年の関東大震災時に発生したもので、東京ではおよそ100個もの火災旋風が発生し、約38,000人が巻き込まれた。

本研究では、熱源の個数や形といった条件を変化させることで様々なパターンの火災旋風の数値シミュレーションを行い、条件変化による火災旋風の形状変化や威力変化について解析することを目的とする。

2 格子生成

2.1 格子

計算領域は、空洞の半径 $a=0.01$ 、半径 ae^4 、高さ ae^3 の以下のような円筒とし、格子数は $r \times \theta \times z = 40 \times 40 \times 40$ とした。円筒の中心付近の流れの様子を詳しく観察するために、 $r = ae^\xi$ 、 $z = ae^\zeta$ ($0.0 \leq \xi \leq 4.0$, $0.0 \leq \zeta \leq 3.0$) とし、3次元直交不等間隔格子を用いる。

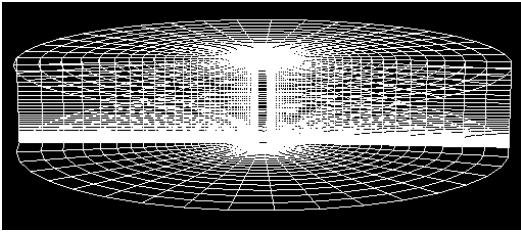


Fig. 1: 格子

2.2 初期条件

初期状態において、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。また、熱源領域の温度 T を 1.0 とする。本研究では、以下の4パターンの熱源を設けることにする。

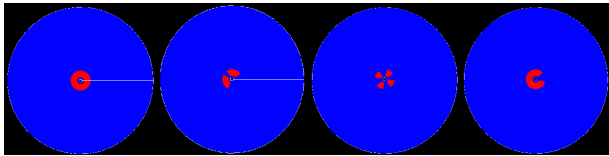


Fig. 2: 熱源のパターン (左から Case:1,2,3,4)

2.3 境界条件

半径方向の格子に関して、計算の便宜上設けた空洞部分をフリースリップと仮定しているため、1番目と2番目の格子の流速 V_θ と V_z を等しくなるようにする。角度方向に関しては、周期境界条件を課す。

3 計算方法

3.1 基礎方程式

円柱座標系の3次元 Navier-Stokes 方程式、熱に関する方程式を使用する。本研究では計算領域に不等間隔格子を用いているので、 $r = e^\xi$ 、 $z = e^\zeta$ を用いて、方程式を変換する。

Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} + e^{-\xi} \left(V_r \frac{\partial V_r}{\partial \xi} + V_\theta \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - V_\theta^2 \right) + e^{-\zeta} V_z \frac{\partial V_r}{\partial \zeta} = -e^{-\xi} \frac{\partial P}{\partial \xi} + \frac{1}{\text{Re}} \left\{ e^{-2\xi} \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} - V_r - 2 \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right) + e^{-2\zeta} \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial \zeta^2} - \frac{\partial V_r}{\partial \zeta} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial V_\theta}{\partial t} + e^{-\xi} \left(V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial \xi} + V_\theta \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + V_r V_\theta \right) + e^{-\zeta} V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial \zeta} = -e^{-\xi} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{1}{\text{Re}} \left\{ e^{-2\xi} \left(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} + 2 \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} - V_\theta \right) + e^{-2\zeta} \left(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \zeta^2} - \frac{\partial V_\theta}{\partial \zeta} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} + e^{-\xi} \left(V_r \frac{\partial V_z}{\partial \xi} + V_\theta \frac{\partial V_z}{\partial \theta} \right) + e^{-\zeta} V_z \frac{\partial V_z}{\partial \zeta} = -e^{-\zeta} \frac{\partial P}{\partial \zeta} + \frac{1}{\text{Re}} \left\{ e^{-2\xi} \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2} \right) + e^{-2\zeta} \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial \zeta^2} - \frac{\partial V_z}{\partial \zeta} \right) \right\} + \frac{Gr}{\text{Re}^2} T$$

熱に関する方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + e^{-\xi} \left(V_r \frac{\partial T}{\partial \xi} + V_\theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + e^{-\zeta} V_z \frac{\partial T}{\partial \zeta} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \left\{ e^{-2\xi} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) + e^{-2\zeta} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \zeta^2} - \frac{\partial T}{\partial \zeta} \right) \right\}$$

P : 圧力, Re : レイノルズ数,

Gr : グラスホフ数, Pr : プラントル数

3.2 解法

上記の方程式をフラクショナル・ステップ法を用いて解く。 $\text{Re} = 10^4$, $Gr = 10^9$, $\text{Pr} = 0.71$, $\Delta t = 0.0015$ とし、計算ステップは10,000回とした。また、Navier-Stokes 方程式の非線形項において境界より1つ内側の格子では1次精度上流差分を、それ以外では3次精度上流差分を適用した。熱に関する方程式の非線形項については、全ての格子で1次精度上流差分を適用した。

4 結果と考察

4.1 r - z 面における流速 V_z の変化と温度変化

以下の Fig.3 から 10 は、各 Case の 6000 ステップ目と最終ステップの 10000 ステップ目の z 方向の流れ場を示したものである。色の変化は温度変化を表し、白い矢印は流速ベクトルを表す。また、Case 2,3,4 に関しては、熱源ありの領域となしの領域の面を観察した。

Case : 1

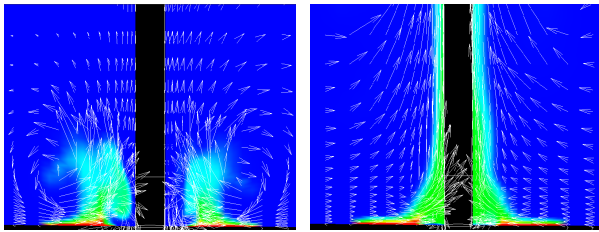


Fig.3: 6000 ステップ Fig.4: 10000 ステップ

熱源内側の地面付近に小さな渦が発生し、 z 軸に沿った上昇流が 3000 ステップ目で見られた。徐々に上昇流が強くなり、6000 ステップから z 軸に沿って渦を巻きながら激しく上昇しているのがわかる。また、 z 方向の温度変化は流速ベクトル V_z に沿った熱の流れとなっていることが確認できる。

Case : 2 (図の左半分が熱源ありの面)

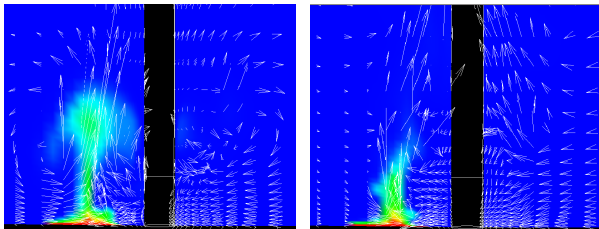


Fig.5: 6000 ステップ Fig.6: 10000 ステップ

熱源内側の地面付近に小さな渦が発生。3000 ステップで熱源上に上昇流が発生し、徐々に z 軸に沿った上昇流へと変化し、激しい流れに変化する。この際、熱源がある領域の流れ場は、上昇流発生時、地面付近以外では渦が見られなかった。熱源がない領域の流れ場では、5000 ステップまで変化が見られなかったが、以降熱源方向に向かう流れへと変化し、計算領域上部で若干上昇流が見られた。 z 方向の温度変化は、7000 ステップまでは V_z に沿った熱の流れが見られたが、以降、地面付近以外では温度変化が見られなかった。

Case : 3 (図の左半分が熱源ありの面)

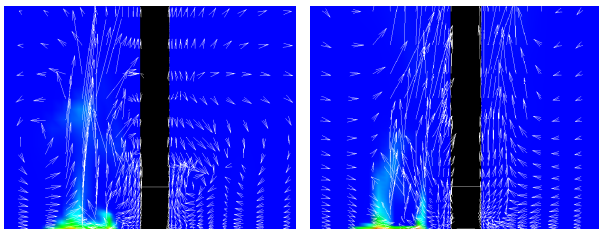


Fig.7: 6000 ステップ Fig.8: 10000 ステップ

熱源内側の地面付近に小さな渦が発生。熱源ありの領域では、3500 ステップで熱源上に上昇流が見え始め、渦を巻きながら z 方向に沿った激しい上昇流へと変化した。一方、熱源なしの領域では、左右の熱源へと向かう流れと空洞から熱源に向かう流れによって現れたと考えられる上昇流と渦が確認できた。また、 z 方向の温度変化に関して、5000 ステップまでは V_z に沿った熱の流れとなっているが、それ以降、地面付近での

温度変化以外は見られなかった。

Case : 4 (図の左半分が熱源ありの面)

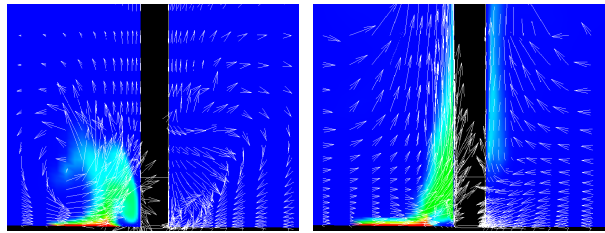


Fig.9: 6000 ステップ Fig.10: 10000 ステップ

熱源内側の地面付近に小さな渦が見られ、3500 ステップで上昇流が発生し始める。5500 ステップで熱源上に渦が現れ、その後 z 軸に沿って激しく上昇する。7000 ステップで上昇流は熱源なしの方向に流れる形となり、熱源なしの領域の上側に上昇流が現れると、以降 z 軸に沿った上昇流となる。また、 z 軸方向の温度変化に関して、熱源ありの領域では V_z の流れに沿った熱の流れが見られ、熱源なしの領域では上昇流が現れてから領域の上の方に熱の流れが見られる。

4.2 比較・考察

4つのCaseに関して、2500~3000 ステップで熱源内側の地面付近に現れる渦は熱源外部から熱源に入り込んでくる流れがぶつかることによって発生したものであると考えられる。特にCase1では、熱源のない中心部分に周囲から流れがよってくるというコアンダ効果が顕著に見られた。また、上昇時に発生する渦に関して、Case2,3の場合とCase1,4の場合を比較すると、後者の方が大きな渦が観測された。さらに、Case2,3とCase1,4の熱の流れに関して、明らかに後者の熱の流れが激しい。以上のことから、熱源の範囲が広く、熱源のない周囲からの流れをより中心に取り込めるほど、上昇時に発生する渦が大きくなり、火災旋風の威力も大きくなると考えられる。

5 まとめと今後の課題

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した。その結果、各Caseにおける火災旋風の威力や温度変化を視覚化することで捉えることができた。

今後は、レイノルズ数やグラスホフ数をより現実的な値に近づけ、また、計算領域もより現実的にすることで、火災旋風の再現度を高めたいと考えている。さらに、計算領域内に障害物を設けることで、高層ビルが建ち並ぶ場所で火災旋風が発生した場合どのような影響が生じるかを検証し、都心で大震災が発生した際に発生しうる火災旋風の被害を最小化する手法を提案していきたい所存である。

参考文献

[1] 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