

種々の条件下における火災旋風の数值シミュレーション

Numerical Simulation of Fire Tornado Under Various Conditions

- 津久井 彩絵, お茶大, 東京都文京区大塚 2-1-1, g1420527@is.ocha.ac.jp
河村 哲也, お茶大, 東京都文京区大塚 2-1-1, kawamura@is.ocha.ac.jp

Sae Tsukui, Ochanomizu University, 2-1-1 Otsuka Bunkyo-ku Tokyo Japan

Tetuya Kawamura, Ochanomizu University, 2-1-1 Otsuka Bunkyo-ku Tokyo Japan

It is said that one of the most terrible disaster is a fire tornado because of a secondary disaster that can happen in a big earthquake in the city center. Therefore, it is very important to study the fire tornado that occurs under various conditions and analyze the difference in the fire tornado due to the difference in conditions. As a method of analysis, a numerical simulation is employed, and four typical patterns of heat sources are provided there. For the basic equation, three dimensional Navier-Stokes equations and the equations related to heat are used. It is found out the flows with high temperature toward the center where no heat source exists are observed in all case although the strength of the them are different.

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。火災旋風は林野火災から発生する 경우가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。この火災旋風について、発生条件やメカニズムについてははっきりとしたことが解明されていない。

本研究では、過去に2次元軸対称で行われた研究⁽¹⁾を進展させ、熱源の個数や形状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值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. 計算方法

2.1 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。本研究では熱源近くに格子を多く取り、またなるべく遠方まで計算するため、座標変換 $r = e^\xi$, $z = e^\zeta$ を用いて方程式を変換する。

(1) Navier-Stokes 方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V_r}{\partial t} + e^{-\xi} \left(V_r \frac{\partial V_r}{\partial \xi} + V_\theta \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - V_\theta^2 \right) + e^{-\zeta} V_z \frac{\partial V_r}{\partial \zeta} \\ &= -e^{-\xi} \frac{\partial P}{\partial \xi} + \frac{1}{Re} \left\{ e^{-2\xi} \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} - V_r - 2 \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right) \right. \\ & \quad \left. + e^{-2\zeta} \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial \zeta^2} - \frac{\partial V_r}{\partial \zeta} \right) \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V_\theta}{\partial t} + e^{-\xi} \left(V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial \xi} + V_\theta \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + V_r V_\theta \right) + e^{-\zeta} V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial \zeta} \\ &= -e^{-\xi} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{1}{Re} \left\{ e^{-2\xi} \left(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} + 2 \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} - V_\theta \right) \right. \\ & \quad \left. + e^{-2\zeta} \left(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \zeta^2} - \frac{\partial V_\theta}{\partial \zeta} \right) \right\} \end{aligned}$$

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

(2) 熱に関する方程式

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

2.2 解法

上記の方程式をフラクショナル・ステップ法とオイラー陰解法を用いて解く。オイラー陰解法は、計算の便宜上設けた内側円柱を細くするために使用した。

パラメータとしては文献⁽¹⁾を参考に、レイノルズ数: $Re = 10^4$, レイリー数: $Ra = 10^{11}$, プラントル数: $Pr = 0.71$ とし、また、 $\Delta t = 0.0015$, 計算ステップ数は20000回とした。

3. 計算条件

3.1 格子

計算領域は、同軸の円柱として、内側円柱の半径 $a=10^{-4}$, 外側円柱の半径 ae^4 , 高さ ae^3 とした。格子数は $r \times \theta \times z = 40 \times 40 \times 40$ とし、Fig. 1は本計算で用いた全体の格子図である。

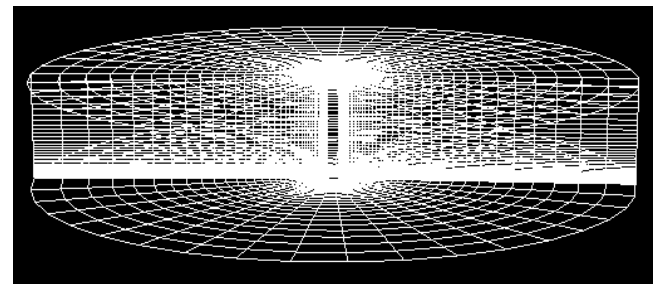


Fig. 1: Grid

3.2 初期条件と境界条件

初期条件は、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 rw とする。この時、 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 を1.0とする。本研究では、Fig. 2に示す4パターンの熱源を設けることにし、全ての熱源の大きさを一定にするのではなく、中心から熱源までの距離が一定になるようにした。

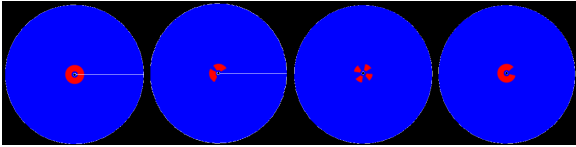


Fig. 2: Pattern(Case1,2,3,4)

半径方向と z 方向に関して、基礎方程式 (1) の非線形項において、境界より 1 つ内側の格子で 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。境界条件は、内側円柱をフリースリップと仮定するので、半径方向に関して、1 番目と 2 番目の格子の V_θ , V_z を等しくした。その他の境界条件も Fig. 3 にまとめて示す。角度方向に関しては、周期境界条件を課した。

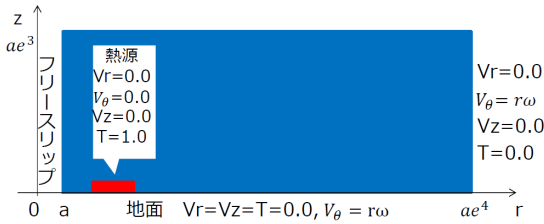


Fig. 3: Boundary conditions

4. 結果と考察

4.1 計算結果 (1)

以下に挙げる図は、各ケースにおいて、大きな変化が見られた時間 step と最終状態の r - z 面、 r - θ 面の流れ場の様子である。また r - z 面では格子の 1 番目と 20 番目の面の温度分布と速度ベクトルの様子を、 r - θ 面は下から 5 番目 (Fig. 21 参照) の格子の速度ベクトルの様子である。白い矢印は流速ベクトル、色の変化は温度変化を表す。

Case:1

2000step で中心付近の地面に熱源に向かう小さな渦が発生した。その後、熱源上に上昇気流が現れ、次第に渦を巻きながら上昇していく様子が見られた。6000step 以降で、コアンダ効果が顕著になり、熱の流れもそれに沿ったものとなっている。この時、地面付近の熱源の範囲が中心付近まで広がってきており (Fig. 4), r - θ 面を見てみると、全体の流れが中心に向かう流れになっていることが確認できた (Fig. 5)。9000step, 14000step で再び熱源上に上昇気流が発生し、16000~18000step で中心軸に沿った熱の流れが激しくなっていく様子が見られた。

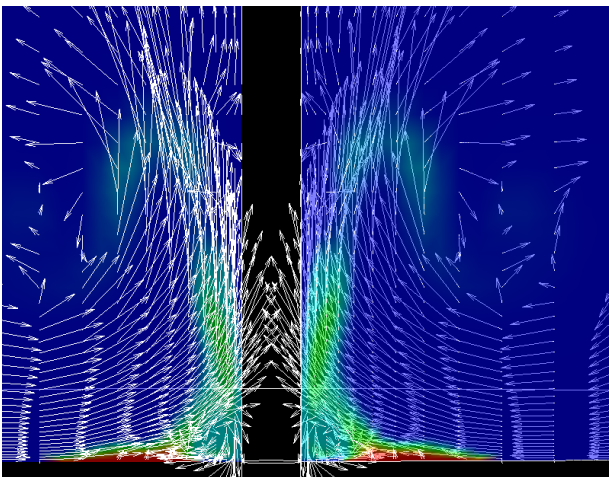


Fig. 4: Velocity and temperature distribution at 6000step(side view)

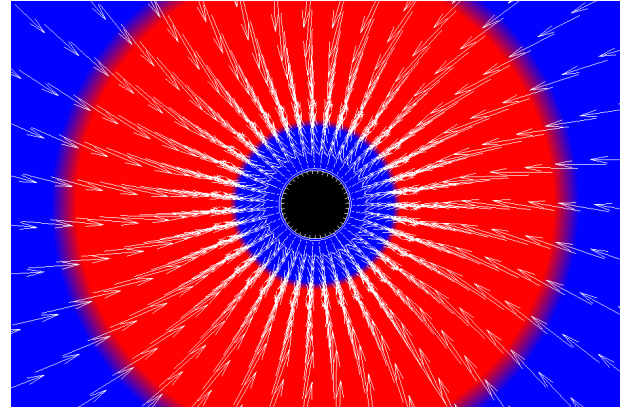


Fig. 5: Velocity near the ground at 6000step and the location of the heat source(top-view)

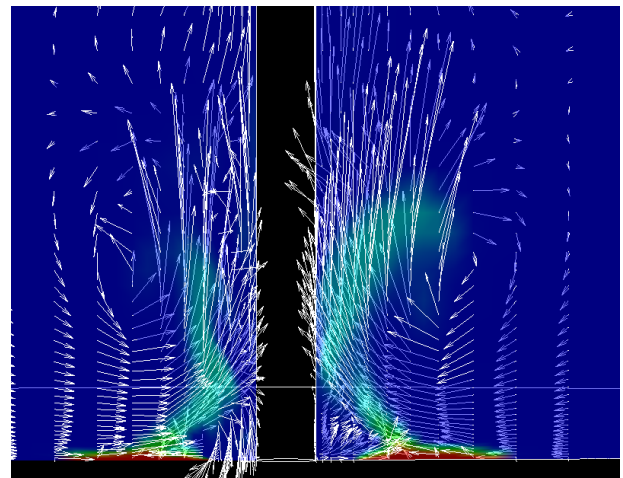


Fig. 6: Velocity and temperature distribution at 20000step(side view)

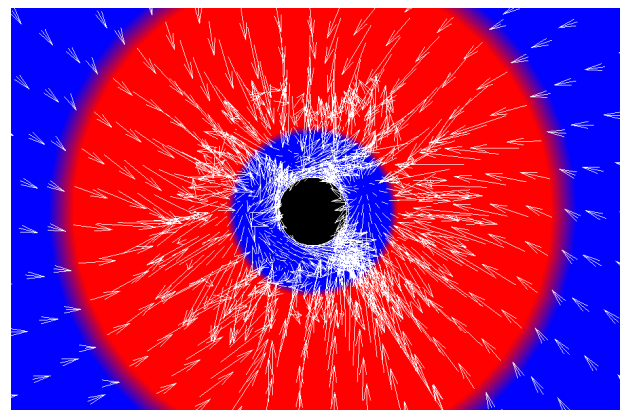


Fig. 7: Velocity near the ground at 20000step and the location of the heat source(top-view)

Case:2

Case:1 同様、2000step で中心付近の地面に熱源に向かう流れが発生し、熱源上に上昇気流が現れた。徐々に上昇気流は激しくなり、5500~8000step にかけて、若干コアンダ効果が見られた (Fig. 8)。この時の r - θ 面を見てみると、中心から 2 つの熱源間に向かう流れと、2 つの熱源の左側から熱源間に入ってくる流れの両方が見られた (Fig. 9)。さらにその後、コアンダ効果により中心に

沿った流れは、徐々に熱源上の流れに変化した。その後、熱の流れが小さくなり始めるが、再び熱源上に上昇気流が発生し、熱の流れも上昇気流に沿ったものになる。

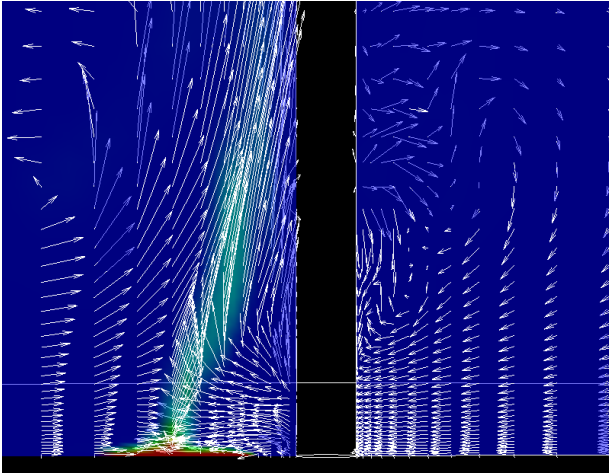


Fig. 8: Velocity and temperature distribution at 6000step(side view)

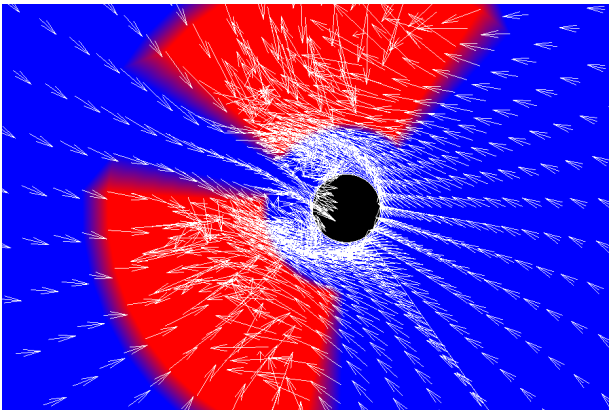


Fig. 9: Velocity near the ground at 6000step and the location of the heat source(top-view)

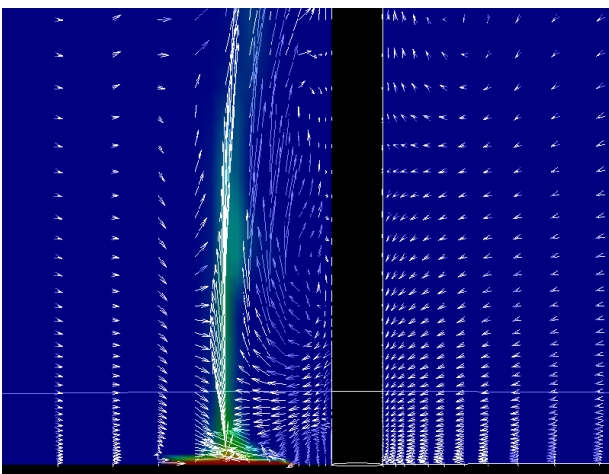


Fig. 10: Velocity and temperature distribution at 20000step(side view)

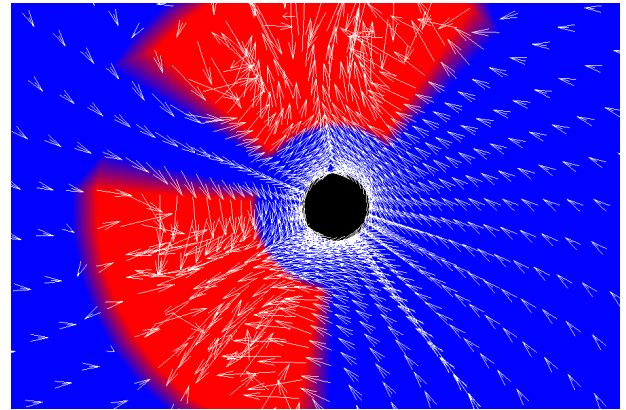


Fig. 11: Velocity near the ground at 20000step and the location of the heat source(top-view)

Case:3

1500step で中心付近の地面に熱源に向かう流れが発生し、2500step に4つの熱源上に上昇気流が現れた。徐々に上昇気流は激しくなるが、熱源同士の距離があるため、コアンダ効果は見られなかった (Fig. 12)。熱の流れに関して、上昇していく流れは見られるものの、地面付近の熱の範囲は広がっている様子があまり見られなかった。r- θ 面をみてみると、2500step 以降中心からの流れは熱源に入っていく、熱源外からの流れは中心に向かっている (Fig. 13)。

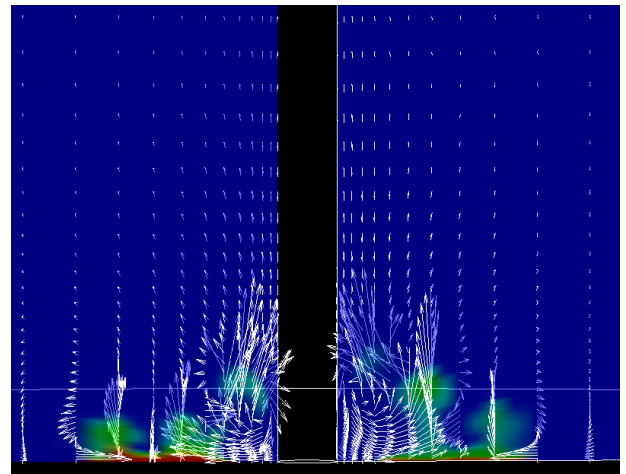


Fig. 12: Velocity and temperature distribution at 2500step(side view)

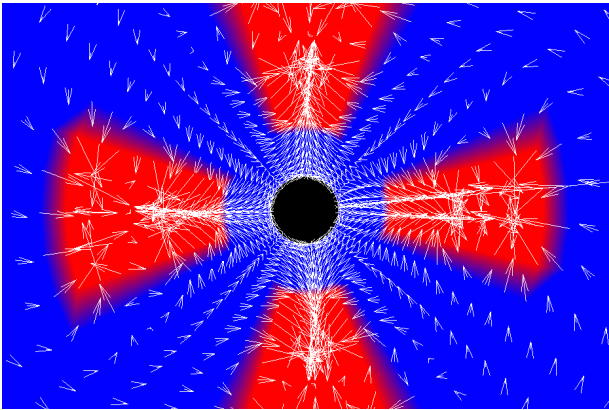


Fig. 13: Velocity near the ground at 2500step and the location of the heat source(top-view)

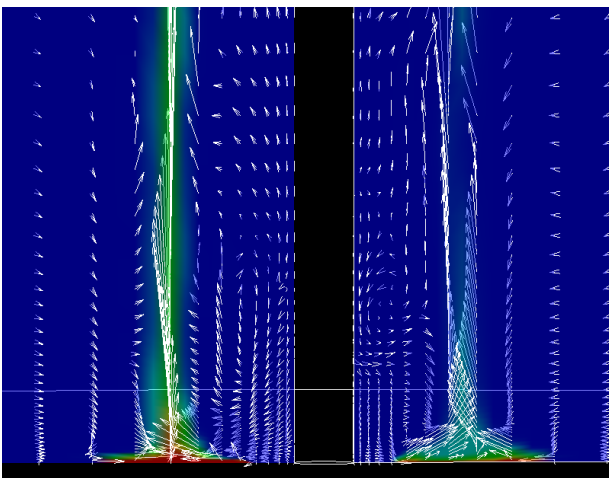


Fig. 14: Velocity and temperature distribution at 20000step(side view)

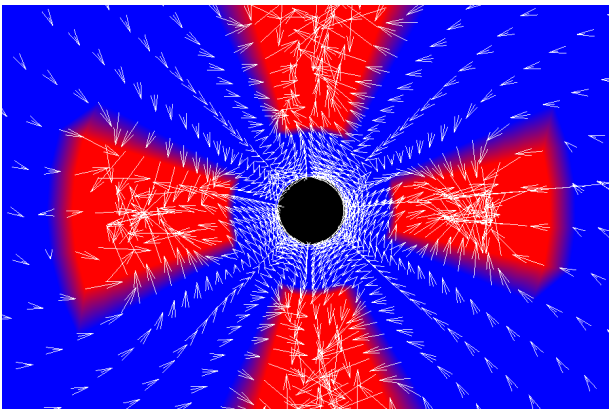


Fig. 15: Velocity near the ground at 20000step and the location of the heat source(top-view)

Case:4

Case:1, 2 同様, 2000step で中心付近の地面に熱源に向かう流れや渦が発生し, 熱源上に上昇気流が現れた. 5000~6000step で地面付近の熱源の範囲が広がり, 6000step からコアンダ効果が顕著に見られた (Fig. 16). その後熱の流れが小さくなるが, 9500step で再び上昇気流が発生し, 熱の流れもそれに沿ったものになった. 以降, その

ような現象が何度か起こった. $r-\theta$ 面の流れ場を見てみると, コアンダ効果が見られた 6000step 以降では流れ場に変化が見られなかったが, 全体の流れが中心に向かっていくことを確認できた (Fig. 17).

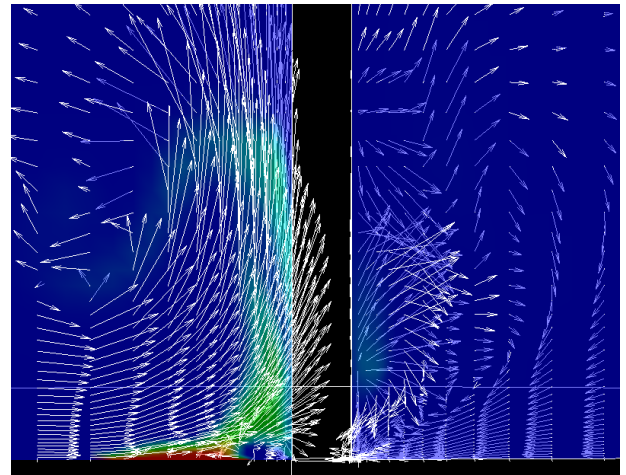


Fig. 16: Velocity and temperature distribution at 6000step(side view)

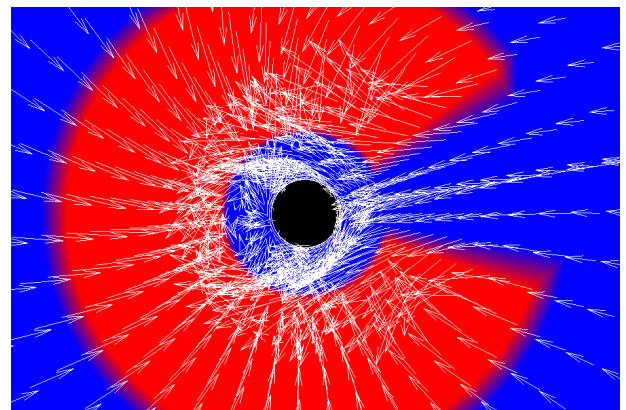


Fig. 17: Velocity near the ground at 6000step and the location of the heat source(top-view)

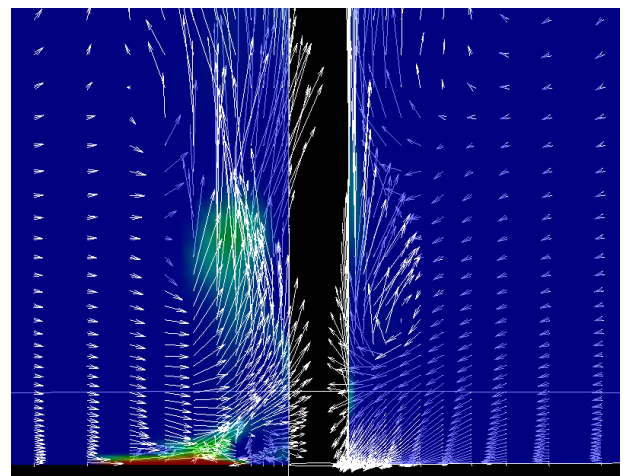


Fig. 18: Velocity and temperature distribution at 20000step(side view)

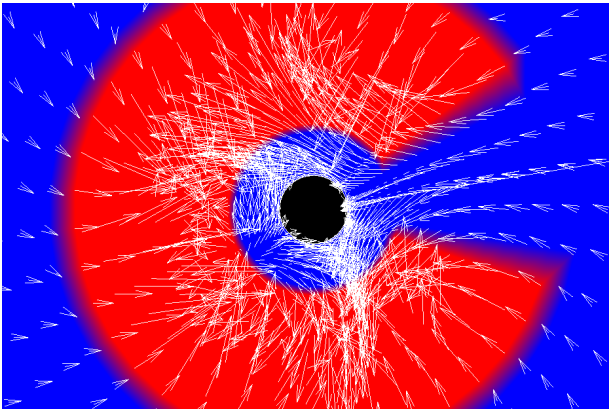


Fig. 19: Velocity near the ground at 20000step and the location of the heat source(top-view)

4.2 計算結果 (2)

以下に火災旋風に関する周方向速度の計算結果を示す。Fig. 20 は地面とともに動く境界の周方向の速さをシェーディングで表示した図であり、内円から外円に向かって周方向の速さが大きくなっている様子 (青から赤に変化) を示している。計算結果には、同時に速度ベクトルも表示している。

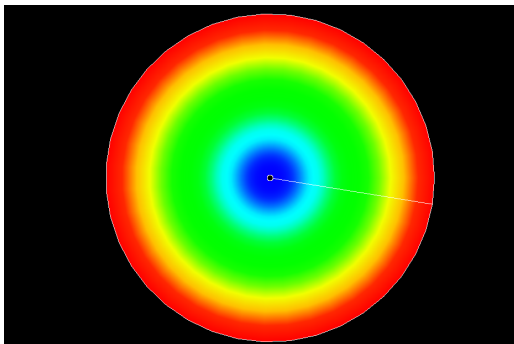


Fig. 20: Shading of V_θ near the ground

Fig.22~25 は各 Case について、境界から上へ 3 格子の面 (地面近く) での Fig. 20 に対応する図、同様に Fig.26~29 は境界から上へ 15 格子の面 (Fig.21 の赤の線で切った断面) での図、Fig.30~33 は境界から上へ 30 格子の面 (Fig.21 の黄色の線で切った断面) での図である。なお、流れの非定常性が強いので、速度は 15000~20000step で時間平均をとっている。



Fig. 21: Location of cross section

Fig. 22(Case.1) では、元々青かった部分が緑になっていることから中心付近で周方向速度が増加したというこ

とを表している。部分的に遅くなったり速くなったりした部分があるが、これは平均をとる時間が短いためだと考えられる。このような分布が得られるのは、熱源がリング上に中心を取り囲んでいるため、周方向に対しては熱の境目がないためだと考えられる。

一方、Fig. 23~25(Case:2~4) では、周方向の熱源の数だけ赤と青の顕著な領域が見て取れる。例えば、Fig. 24 は熱源が 4 つある場合であるが、赤と青がそれぞれ 4 つある。これは、4 つの熱源上で上昇気流が発生し、それを補うように地面近くでは周囲から空気を吹き込むが、周方向速度に着目すると回転下流側 (角度が小さい側) では周方向速度を増大させる速さ、回転上流側では周速度を打ち消す方向の速さになっているためだと考えられる。

中心付近に着目すると、Fig. 23 と Fig. 24 は Fig. 22 と同様にほぼ緑になっているが、Fig. 25 では赤と青の部分が中心近くまで及んでいる。これは Fig. 25(Case:4) では Fig. 23(Case:2) と Fig. 24(Case:3) に比べてリング全体の面積に対する熱源の面積が大きく、上昇気流が一つになりその中心が軸を挟んで熱源のない部分と反対側にあることと、Fig. 22(Case:1) とは異なり周方向に熱の境目があるからだと考えられる。

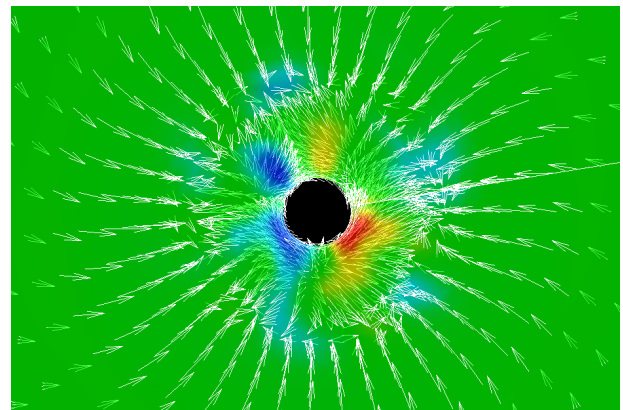


Fig. 22: Time average velocity and shading of V_θ near the ground(Case:1)

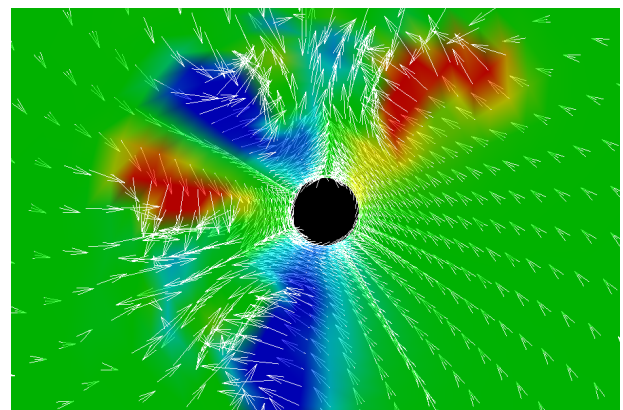


Fig. 23: Time average velocity and shading of V_θ near the ground(Case:2)

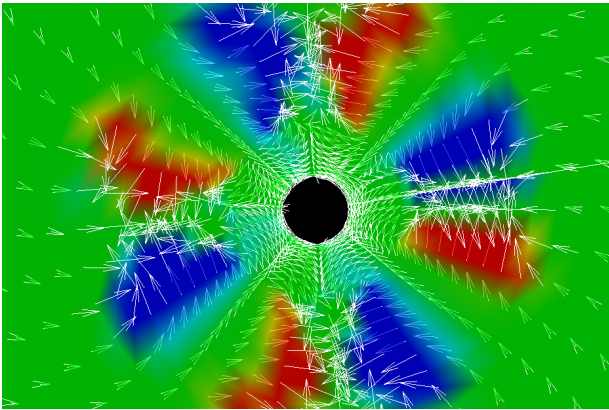


Fig. 24: Time average velocity and shading of V_θ near the ground(Case:3)

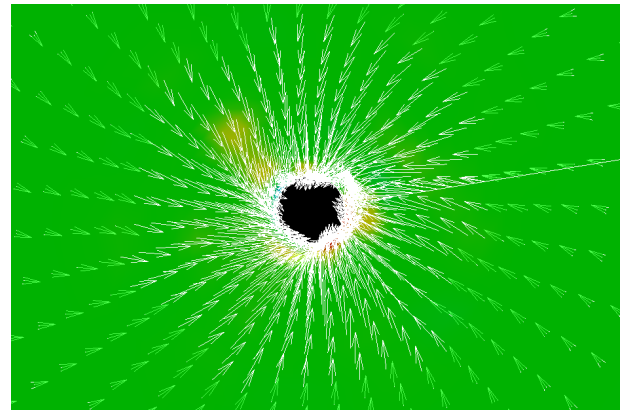


Fig. 26: Time average velocity and shading of V_θ at red area(Case:1)

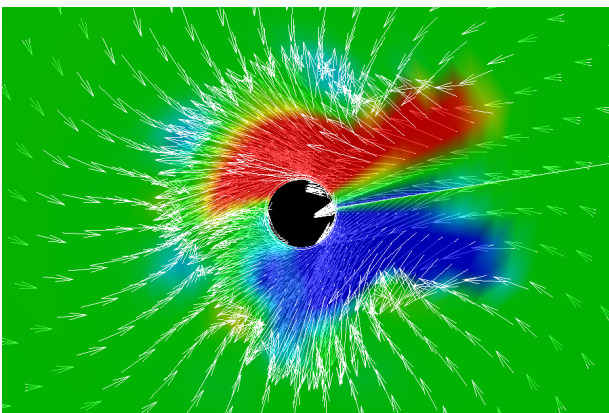


Fig. 25: Time average velocity and shading of V_θ near the ground(Case:4)

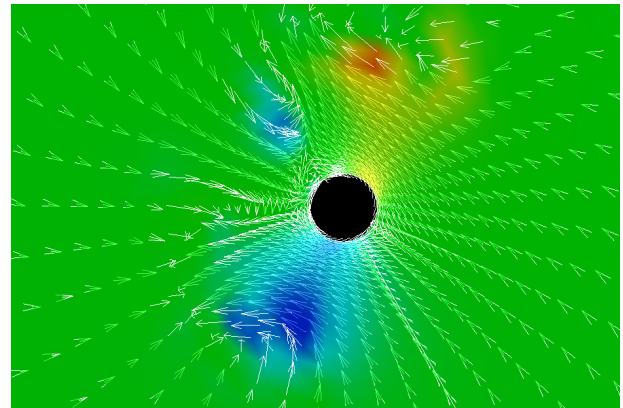


Fig. 27: Time average velocity and shading of V_θ at red area(Case:2)

次に Fig. 21 の赤い断面での周方向速度について見ていく。Case:1 に関して、Fig. 26 は Fig. 22 同様、中心付近の周方向速度が増加したことがわかる。しかし、部分的に速くなったり遅くなっている様子はさほど見られず、中心付近に速度が速くなっている部分が見られた。また、速度ベクトルに関して、Fig. 22 では乱れが見られるものの、Fig. 26 では全体が中心に向かう流れになっていることから、計算領域の中心に旋風ができているということがわかる。

一方、Fig. 27, 29(Case:2, 4) では、それぞれ Fig. 23, 25 に比べて速度が小さいものの、周方向速度を増大させる流れや打ち消す流れが見られた。これは、上昇気流が先述の原理でできるため、地面から少し離れた面では周方向の流れは Fig. 23 や 25 のような結果にはならず、弱まるということを示している。

また Case:3(Fig. 28) は、中心付近の色が緑となり、ほぼ一様な流れであることが見て取れ、Fig. 27, 29 のような結果は見られなかった。地面から少し離れたところにおいて Case:2, 4 と異なる結果になったのは、4 つ熱源があることにより、熱源上に上昇気流ができる際に、隣り合っている熱源同士で回転下流側から来る流れと回転上流側から来る流れが互いに打ち消し合ってしまうためだと考えられる。

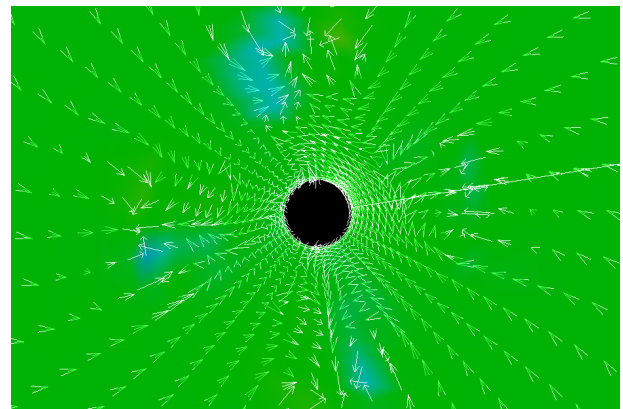


Fig. 28: Time average velocity and shading of V_θ at red area(Case:3)

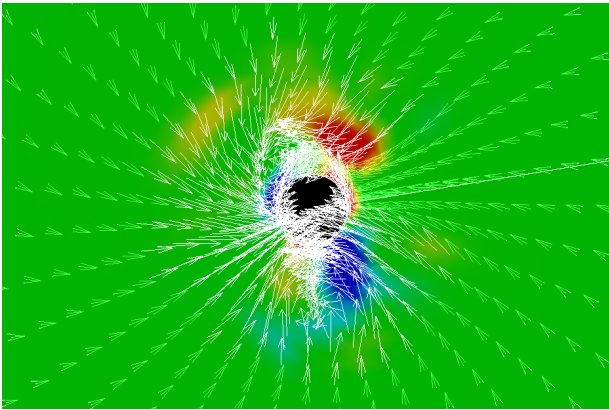


Fig. 29: Time average velocity and shading of V_θ at red area(Case:4)

領域の鉛直方向の中央部分 (Fig. 21 の黄色の断面) について, Case:1 の場合, Fig. 30 は Fig. 26 に比べ黄色の部分の広がり渦を巻いているように見え, また, 速度ベクトルからもその様子が確認できることから, 旋風が地面から鉛直方向に離れたところでも安定して存在しているということがわかる.

Case:2 に関して, Fig. 31 では Fig. 27 と比べると, 回転下流側からの流れ (赤い部分) が弱くなっている様子が見て取れるが, 速度ベクトルを見てみると, 回転下流側と上流側からの流れが2つの熱源の中心に向かって様子を確認できた. これより, 2つの熱源上に旋風ができているのではないかと考えられる.

Fig. 32 (Case:3) は, Fig. 28 とほぼ同じような流れの様子になっていることが見て取れる. 各熱源の面積が小さく離れている場合, 地面から離れたところでは (上空に近づくにつれて), 流れは各熱源上に現れる上昇気流に変化していくので, 周方向の速度は一様になるのではないかと考えられる.

Case:4 (Fig. 33) に関して, Case:1 のように速度ベクトルが渦を巻いているように見え, また, 回転下流側と上流側からの流れが中心軸の熱源がない部分の反対側に見られることから, 鉛直方向に地面から離れたところでも旋風が確認できた. Fig. 25 と Fig. 33 より, 熱源間に少しの隙間があると, そこから熱源に向かって来る流れにより旋風の中心軸は, 計算領域の中心軸から外れるということが言える.

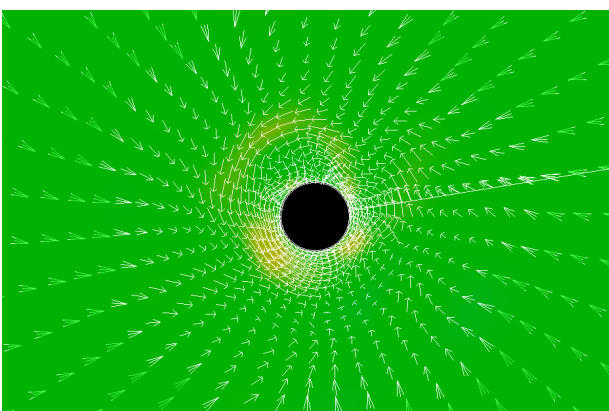


Fig. 30: Time average velocity and shading of V_θ center of the region(Case:1)

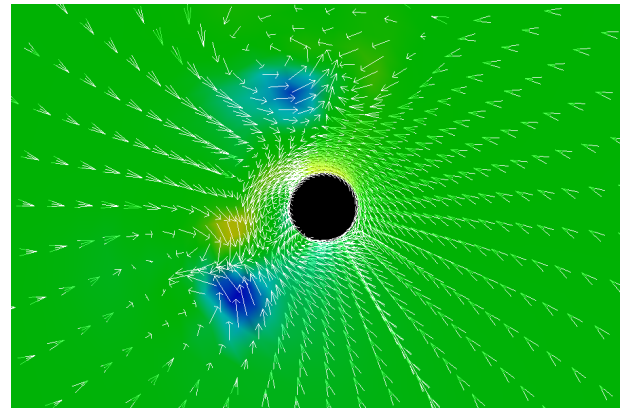


Fig. 31: Time average velocity and shading of V_θ center of the region(Case:2)

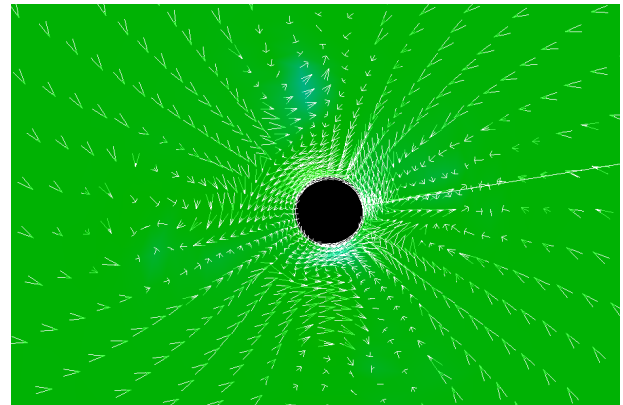


Fig. 32: Time average velocity and shading of V_θ center of the region(Case:3)

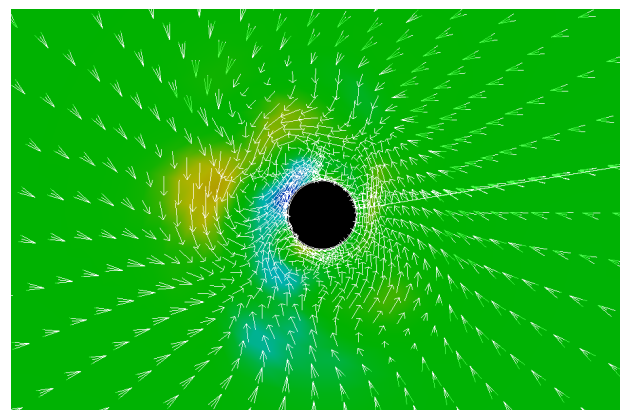


Fig. 33: Time average velocity and shading of V_θ center of the region(Case:4)

4.3 比較・考察

Case:1, 2, 4 においてコアンダ効果が見られたが, Case:3 では見られなかった. これは, 熱源間の距離が小さいほど, 流れ同士が互いに引き寄せ合う力は大きくなると考えられる. また, Case:1, 4 と Case:2, 3 の場合を比較してみると, 前者の方で熱源のない中心部分へ熱源の範囲が広がっていくことを確認できた. これは, 熱源の範囲が広く熱源のない周囲からの流れをより多く取り込む方が熱の流れが激しいということを表している.

周方向速度に関して, 熱源の面積が大きく, 周方向に流れを取り込む境目(熱の境目)がある熱源を設けた際に, 地面付近の周方向速度が激しくなるということがわかった. 熱源の大きさや形状に違いはあるものの, どの Case でも中心部分に向かう流れ場が確認できた.

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, 回転角速度といったパラメータ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