

〈一般研究課題〉 数値解析を用いた火災旋風の発生および発展機構の解明

助成研究者 名城大学 武藤 昌也



数値解析を用いた火災旋風の発生および発展機構の解明

武藤 昌也
(名城大学)

Numerical analysis of fire whirl development process in cross flow

Masaya MUTO
(Meijo University)

Abstract :

Development process of fire whirls that occur behind a fuel pool fire were investigated using numerical simulation. In this study, large-eddy simulation employing a flamelet/progress-variable approach is applied to combustion process of fire whirl. Kerosene is used as fuel and pool size is 1.5 m × 0.6 m. The cross-flow velocity ranged from 0.6 to 2.5 m/s. As a result of simulation, it was found that characteristics of present fire whirl agree with the previous experiment qualitatively. By varying the speed of the uniform flow, changes of flame containing in the fire whirl and the surrounding flow field are investigated.

1. はじめに

地震時や強風時に発生する市街地火災では、火災の規模や風の強さなどの要因により、火災旋風が発生する可能性がある。災害に強く安全な生活環境を構築するには、防災計画はもとより、現状の市街地においてもこのような火災旋風の発生を未然に予測し、被害を最小に抑えることが重要であると考えられる。火災旋風の発生、発展の機構においては火災旋風が生じる周囲の流れ場、火災旋風内部における可燃物の燃焼率、火炎高さといった情報が重要となる。しかしながら現状では、実験室規模であっても、火災旋風発生装置を用いた火炎高さなどの実験的な相関式などが提案されているが、周囲の流れ場まで含めた計測例は少なく⁽¹⁾、数値解析においては現象を単純化した解析

にとどまり⁽²⁾、火災旋風の基礎的な発生、発展機構の解明はいまだ十分に行われてはいないと考えられる。

近年、国土交通省が所管する国土技術政策総合研究所により、市街地における火災旋風の数値予測に関する共同研究の募集⁽³⁾が行われており、本研究のような基礎的な機構の解明による知見が、市街地のような大規模スケールでの火災旋風発生予測に寄与することは極めて重要な課題と考えられる。

本研究では数値シミュレーションを用いて火災旋風の再現を試み、周囲の流れ場と干渉しつつ発展する機構を詳細に調べることを目的とする。

2. 解析対象および計算方法

有風下の火災旋風の可視化を行った室内実験⁽⁴⁾を参照実験として、灯油を燃料とした火災旋風燃焼場を対象にLarge-Eddy Simulation (LES) を適用して燃焼解析を実施し、火災旋風および火災周辺の流れ場の解析を実施する。

2.1 解析対象・解析格子

本研究では、有風下の火災旋風の可視化を行った室内実験⁽⁴⁾を解析対象とする。図2-1に実験装置の概要⁽⁴⁾を示す。燃料であるレギュラーガソリンが内寸594 mm×1,485 mmの鉄製容器(図中Pools)に入れられ、形成された火炎は0.9 m/sから1.5 m/sの横風(図中Cross flow)にさらされる。図2-2には解析格子形状を示す。参照実験と同じ大きさの燃料流入口(図中Pool)から蒸発した灯油を燃料として流入させ、形成された火炎は0.6 m/s、もしくは2.5 m/sの一樣流(図中Cross flow)にさらされるものとした。図2-2において、一樣流の方向、奥行き方向、鉛直方向をそれぞれ x 、 y 、 z 方向とする。計算格子の節点数は4,734,704点、セル数は4,649,400である。

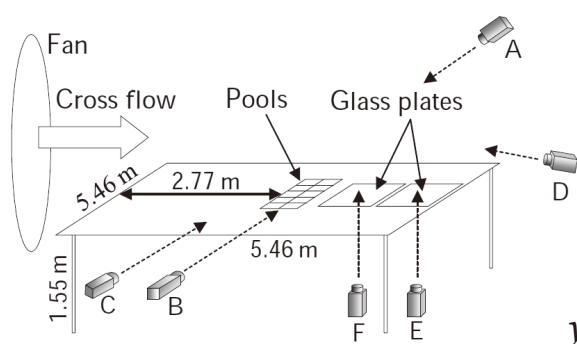


図2-1 Experimental setup
(Shinohara and Matsushima, 2014⁽⁴⁾)

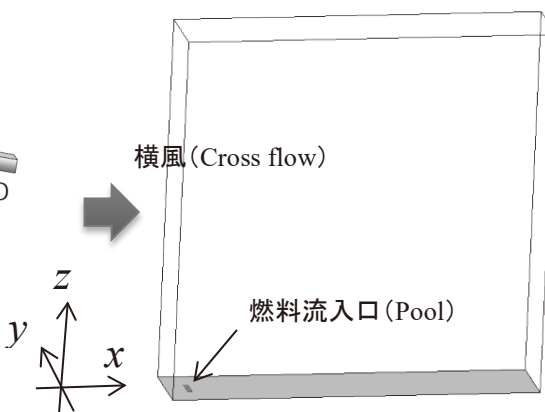


図2-2 Present calculation domain

2.2 解析対象・解析格子

流れ場については、ゼロマッハ数近似した非圧縮性流体をLESにより解析する。乱流モデルには標準Smagorinskyモデルを用いる。支配方程式は、以下に示す質量、運動量、エンタルピ、混合分率、および反応進行変数の保存式である⁽⁵⁻⁷⁾。

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{p} \tilde{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}} \tilde{\mathbf{u}}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \bar{\sigma} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{p} \tilde{h}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{h} \tilde{\mathbf{u}}) = \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{D}_h \nabla \tilde{h}) + \nabla \cdot \mathbf{q}_h, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{p} \tilde{Z}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{Z} \tilde{\mathbf{u}}) = \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{D}_Z \nabla \tilde{Z}) + \nabla \cdot \mathbf{q}_Z, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{p} \tilde{C}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{C} \tilde{\mathbf{u}}) = \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{D}_C \nabla \tilde{C}) + \nabla \cdot \mathbf{q}_C + \tilde{\omega}_C, \quad (5)$$

ここで、 ρ は密度、 \mathbf{u} は速度ベクトル、 p は圧力、 h はエンタルピー、 Z は混合分率、 C は反応進行変数 (progress variable)、 ω_C は C の生成項である。なお、本計算では C を CO 、 CO_2 、 H_2O の質量分率の和、すなわち $C = Y_{\text{CO}} + Y_{\text{CO}_2} + Y_{\text{H}_2\text{O}}$ と定義する。 Y_k は化学種 k の質量分率である。 σ は応力テンソル、 τ は応力テンソルのSGS成分である。 D_h 、 D_Z 、および D_C はそれぞれエンタルピー、混合分率、および反応進行変数の拡散係数であり、Lewis数($=\alpha/D$)を1と仮定して $\lambda/\rho c_p$ で与える。ここで、 α は熱拡散率、 λ は熱伝導率、 c_p は定圧比熱である。 \mathbf{q}_h 、 \mathbf{q}_Z 、および \mathbf{q}_C はそれぞれエンタルピー、混合分率、および反応進行変数のSGS成分である。

また、燃焼反応モデルとして、多化学種の多段反応を比較的低い計算負荷で考慮することが可能なFlamelet法の一つであるFlamelet/progress-variable (FPV) 法を用いる。FPV法では、火炎片中の物理量が燃料混合分率 Z および反応進行変数 C により表すことができるという関係から、以下に示す Z 空間におけるFlamelet方程式により、様々なスカラ消散率 χ のもとで得られた火炎片データを、 Z - C 空間に変換することでFlameletライブラリを作成し、 Z および C を参照パラメータとして化学種 k の質量分率 Y_k 、および C の反応率 ω_C を抽出する。本研究では燃料を灯油^(8,9)としてFlameletライブラリを作成した。

$$\frac{\rho X}{2} \frac{\partial^2 Y_k}{\partial Z^2} + \dot{m}_k = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\rho X}{2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{1}{c_p} \frac{\partial c_p}{\partial Z} \frac{\partial T}{\partial Z} \right) - \sum_{k=1}^N \frac{\rho X}{2} \left(\frac{\partial Y_k}{\partial Z} + \frac{Y_k}{W} \frac{\partial W}{\partial Z} \right) \left(1 - \frac{c_{p,k}}{c_p} \right) \frac{\partial T}{\partial Z} + \frac{1}{c_p} \sum_{k=1}^N h_k \dot{m}_k = 0, \quad (7)$$

3. 計算結果および考察

3.1 実験との比較

本研究では、立ち上る火炎に対して横風が干渉するような過去の実験計測⁽⁴⁾を対象として、数値シミュレーションによる解析を行った。過去の実験では、i) 火炎から生じる上昇気流が二股に分かれ、二つの渦が互いに逆回転するCVP (Counter-rotating Vortex Pair) が形成されること、ii) 火炎を含む火災旋風と火炎を含まない火災旋風が時間的に交互に現れる、といった特徴が報告されている (図3-1)。図3-2に、本解析で得られた、一様流の流速が2.5 m/sの場合の、温度等値面と火炎を含む水平断面内の流速分布の時間的変化を示す。図中左側から流入した一様流は、燃料流入口近くから立ち上る灯油を燃料とした火炎と干渉し、実験画像⁽⁴⁾と同様のあおられる火炎が再現されていることが分かる。また、図3-2より、火炎と干渉した一様流は火炎の手前側と奥側から巻き込むような流れとなり (図中に青矢印で図示)、さらに火炎下流側に互いに逆回転しつつ z 方向に伸びる一対の渦対を形成する様子が見られ、実験と定性的に一致していると考えられる。さらに、温度等値

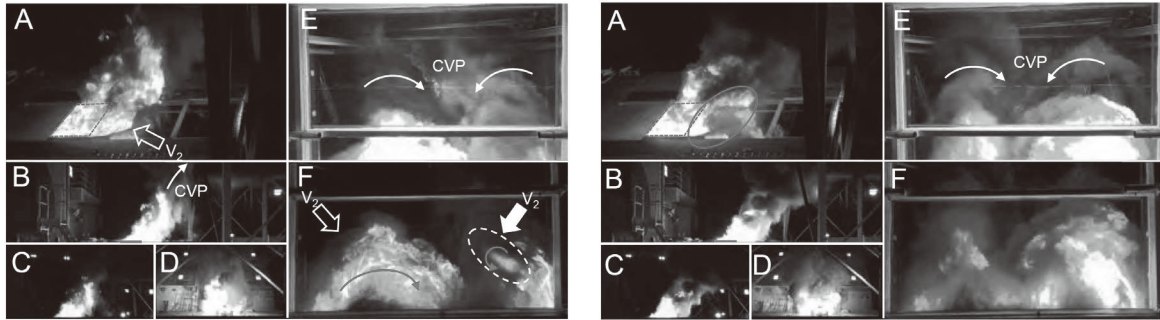


図3-1 Time evolution of flame, plume, and fire whirl in experiment⁽⁴⁾ (left: $t=65.7\text{s}$, right: $t=71.6\text{s}$)

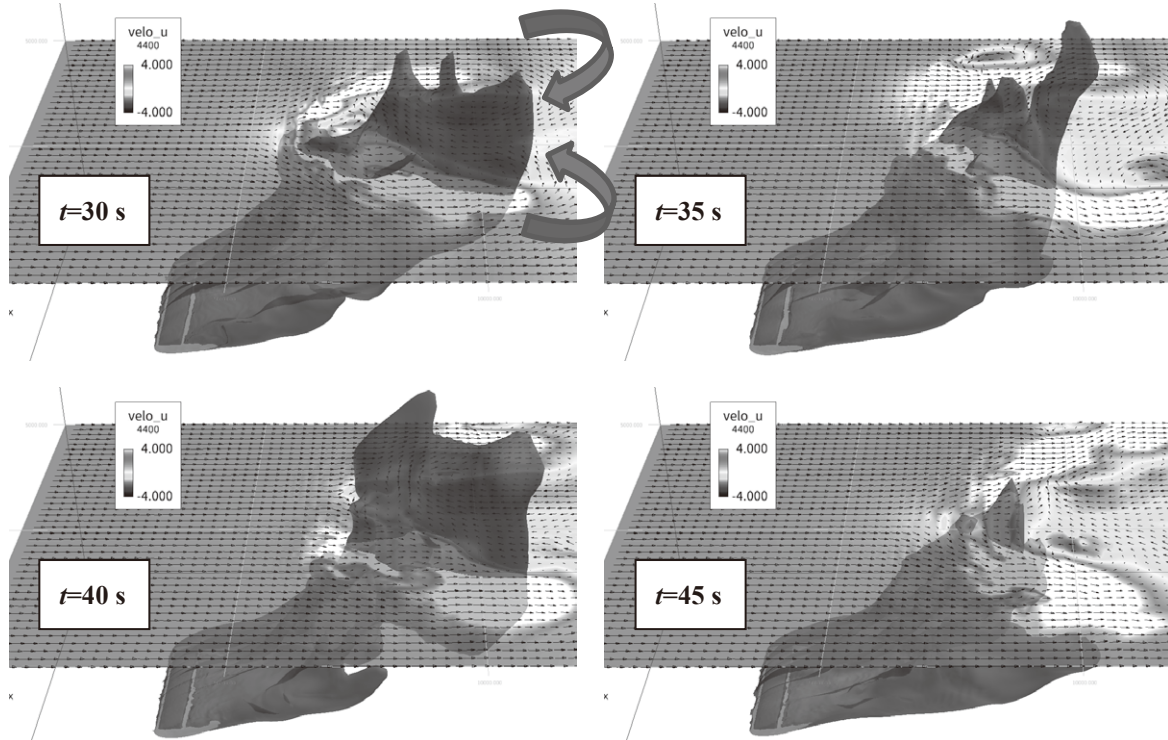


図3-2 Time evolution of iso-surface of temperature and velocity distribution in horizontal cross section (top-left: $t=30.0\text{s}$, top-right: $t=35.0\text{s}$, bottom-left: $t=40.0\text{s}$, bottom-right: $t=45.0\text{s}$)

面の時間変化に注目すると、 $t=30\text{ s}$ と $t=35\text{ s}$ の二時刻において、高温領域が上述した渦対の片方の渦内部に入り込んでいることが分かる。しかし、 $t=40\text{ s}$ と $t=45\text{ s}$ の二時刻において高温領域は渦対の間に保持される。このように、火炎が火炎旋風を形成する渦に含まれる時と含まれない時が時間的に交互に現れること、また、その時間間隔がおよそ5秒から10秒であることも実験を定性的に再現している。

3.2 旋回火炎に対する横風の強さの影響

立ち上る火炎と干渉する一樣流の大きさによる、火炎、渦構造が受ける影響について、温度等値面と火炎を含む水平断面内の流速分布(図3-3)、同水平断面内の温度分布(図3-4)、渦度分布(図3-5)により詳細に観察を行う。一樣流速の大きさとして、 0.6 m/s と 2.5 m/s の二条件で比較を行う。図3-3より、一樣流速が大きいほど火炎が一樣流方向に大きく傾けられることが分かる。また、火炎下流側に形成される渦対領域の水平断面内の大きさについても、一樣流速が大きいほど大きいことが分かる。次に図3-4より、一樣流速が大きいほど $1,000\text{ K}$ 程度の温度領域は広範に分布する

が、2,000 K程度の高温領域は小さくなるのが分かる。これは渦対領域が大きいため、燃烧による高温領域が対流により短時間で拡散するためである。また、同図に示される流速ベクトルより、一樣流速が小さい場合においては、火炎後流側の広い範囲によどみ領域が形成されていることが分かる。このよどみ領域は、渦対領域の大きさが一樣流速の大きい場合と比較して小さいことにより形成されており、時間的に定在することを確認している。図3-5に示す渦度分布より、渦度が大きな領域は一樣流速が大きいほど大きいことが分かる。また、図3-4の温度分布と比較すると、一樣流速が大きい場合には、火炎が火炎旋風を形成する渦に含まれる時と含まれない時が時間的に交互に現れる様子が見られたが、一樣流速が小さい場合には火炎が渦に含まれる様子は見られなかった。今後、火炎が渦に入り込む物理機構、一樣流速の大きさや火炎下流側に形成される渦対の大きさと火炎の干渉機構についてより詳細な解析が望まれる。

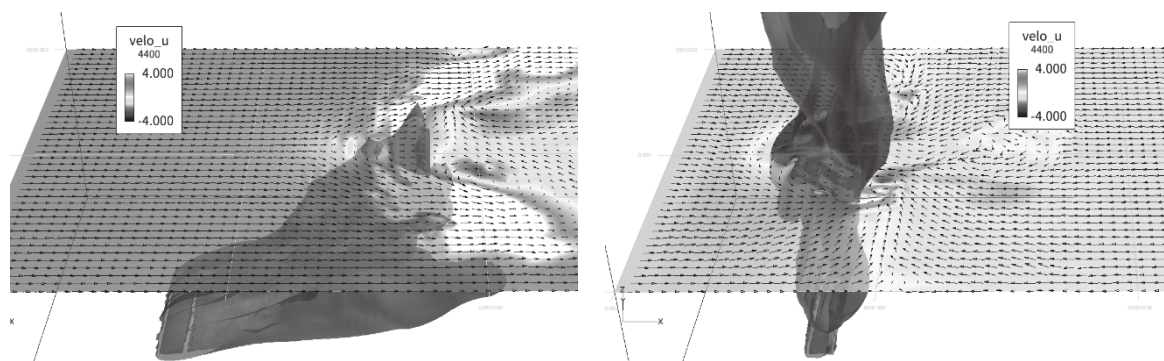


図3-3 Instantaneous iso-surface of temperature and velocity distribution in horizontal cross section (left: cross flow velocity 2.5 m/s, right: cross flow velocity 0.6 m/s)

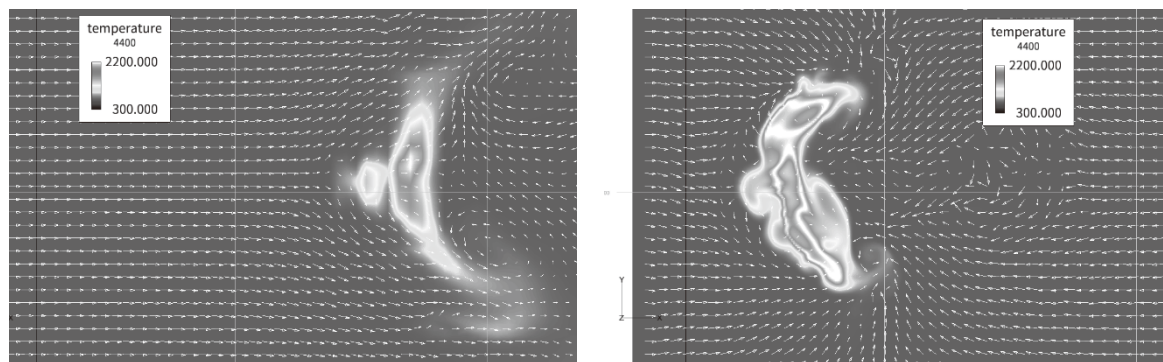


図3-4 Instantaneous temperature and velocity distribution in horizontal cross section (left: cross flow velocity 2.5 m/s, right: cross flow velocity 0.6 m/s)

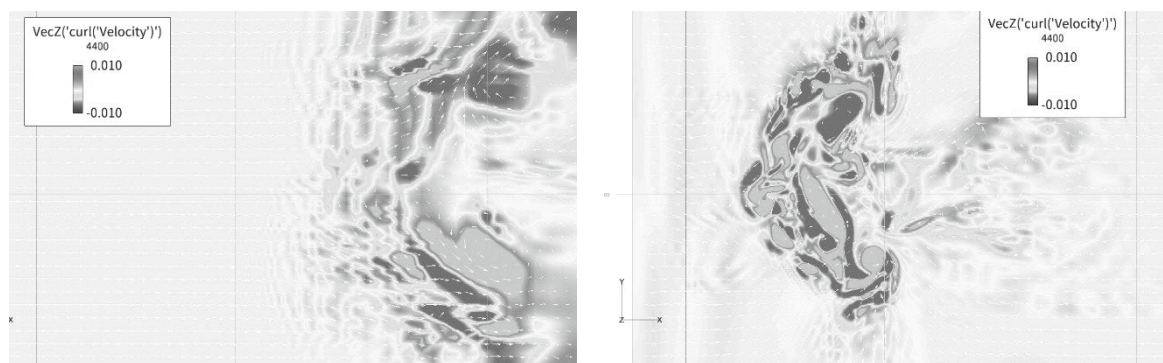


図3-5 Instantaneous vorticity distribution in horizontal cross section (left: cross flow velocity 2.5 m/s, right: cross flow velocity 0.6 m/s)

4. まとめ

本研究では数値シミュレーションを用いて火災旋風の再現を試み、周囲の流れ場と干渉しつつ発展する機構を調べた。その結果、参照した実験における火災旋風の特徴を定性的に再現することに成功した。また、火炎と干渉する一様流の大きさを変化させることにより、火炎が渦に含まれる機構が変化すること、火炎周りの流れ場によどみ点が現れるなどの異なる特徴が現れることが分かった。今後、火炎が渦に入り込む物理機構、一様流速の大きさや火炎下流側に形成される渦対の大きさと火炎の干渉機構についてさらに詳細な解析が望まれる。

参考文献

- 1) 大西博之, 桑名一徳, 火災旋風近傍の流れに関する研究, *日本燃焼学会誌*, Vol. 58, pp. 167-171, 2016
- 2) 津久井彩絵, 河村哲也, 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講演論文集, C04-4, 2018
- 3) 国土技術政策総合研究所, 大規模市街地火災における火災旋風の発生予測に関する共同研究者を募集, <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/kisya/journal/kisya20171017.pdf>, 2017
- 4) 篠原雅彦, 松島早苗, 有風下で火炎風下直後に定在する火災旋風の発生メカニズムに関する実験研究, *ながれ*, Vol. 33, pp. 503-507, 2014
- 5) K. Hirano, Y. Nonaka, Y. Kinoshita, M. Muto, R. Kurose, Large-eddy simulation of turbulent combustion in multi combustors for L30A gasturbine engine, In *Proc. ASME Turbo Expo 2015*, GT2015-42545, Montreal, 2015
- 6) A. Kishimoto, H. Moriai, K. Takenaka, T. Nishiie, M. Adachi, A. Ogawara, R. Kurose, Application of a non-adiabatic flamelet/progress-variable approach to Large Eddy Simulation of H₂/O₂ combustion under a pressurized condition, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 139, 124501, 2017
- 7) R. Kai, A. Kishimoto, K. Takenaka, M. Muto, R. Kurose, DNS and LES of Soot Formation in Oxy-fuel Spray Flame: Application of a Non-adiabatic Flamelet/Progress-variable Approach, In *Proc. 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16*, IHTC16-22496, Beijing, 2018
- 8) P. Dagaut, M. Cathonnet, The ignition, oxidation, and combustion of kerosene: A review of experimental and kinetic modeling, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 32, pp. 48-92, 2006
- 9) J. Luche, M. Reuillon, J.-C. Boettner, M. Cathonnet, Reduction of Large Detailed Kinetic Mechanisms: Application to Kerosene/Air Combustion, *Combustion Science and Technology*, Vol. 176, pp. 1935-1963, 2004