

有風下の炎の傾きに関する数値流体解析
Computational Fluid Dynamics on the Tilt of Flames in Windy Conditions

○沖大河¹, 長谷部寛²
*Taiga Oki¹, Hiroshi Hasebe²

Abstract : It is widely known that wind accelerates the spread of fires. Therefore, wind tunnel experiments were conducted to measure the effect of wind on the fire spread rate by burning dried leaves. During these experiments, it was observed that as wind speed increased, the flame tilt angle became larger, causing the fire to spread rapidly to distant leaves. This made the length of the experimental apparatus a limiting factor. Consequently, understanding the relationship between wind speed and flame tilt angle became necessary for improving the experimental setup. Therefore, this study evaluated the tilt of flames formed during methane combustion when subjected to crosswinds using computational fluid dynamics (CFD). The results confirmed that at a wind speed of 6 m/s, the flame tilt became nearly horizontal.

1. はじめに

風が火災の延焼を助長することは広く知られている。2023年8月、米国ハワイ州マウイ島で発生した山火事は、干ばつと強風により延焼範囲が急激に拡大し、100名を超す死者を出すに至った^[1]。このような自然災害が発生することから、風が火災の延焼に及ぼす影響を詳細に検討することは重要である。

一方で、通常の風洞実験室には排煙設備等が備わっていないことから、火災の風洞実験を行うことは難しい。そこで本研究では、持ち運び可能なポータブル風洞を開発し、消防学校の訓練施設内で風が火災の延焼速度に及ぼす影響の計測を行った^[2]。

計測結果を分析すると、低風速では既往の研究結果と一致したものの、既往研究では計測されていない高風速では、炎が大きく傾き、実験装置の計測部をすぐに超えてしまい、精度の良い計測が行えなかった。そのため、より高い風速での実験を可能とする実験装置の改良が課題となった。

しかしながら、どの程度のサイズの計測部を設ければ良いか、判断材料に乏しい。そこで、数値流体解析によって風が吹いたときの炎の傾きを評価し、実験装置の改良に資するデータの取得を目的に研究を進めたので報告する。

2. 解析手法

解析にはオープンソース流体解析ソフト OpenFOAM (v2412) を用いた。ソルバーには、圧縮性流体方程式と木材や可燃性ガスの燃焼モデルをカップリングできる fireFoam を用いた。

Figure 1 に解析領域と境界条件を示す。解析領域のス

パン方向サイズ (0.25 m) は文献 [2] の実験に合わせた。長さ (5.0 m) および高さ (2.0 m) は実験と異なるが、燃焼に伴う浮力による上昇流と、風による炎の傾きを想定して広い領域を設定した。

風による炎の傾きを評価するため、今回は定位置で燃焼反応が起こる設定にした。具体的には、流入境界から 0.5 m 下流側の底面から一定流量 (0.05 m³/s) でメタンガスを流入させ、流入とともに燃焼反応が生じる扱いとした。

流入境界では風速を一様に規定し、圧力などの境界条件は勾配ゼロの条件を課した。底面は本来であれば no-slip 条件を課すべきであるが、検討の初期段階であるので簡略化して slip 条件を課した。側方境界は slip 条件、上方と流出境界は自由流出条件を課した。

流れの乱流モデルには LES の一方程式モデルを採用し、燃焼モデルには EDM (Eddy Dissipation Model)、輻射計算には fvDOM (finite volume Discrete Ordinary Method) を用いた。

以上の解析手法の下で、風速を 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0 m/s と変えて解析を実施した。解析メッシュは一辺 0.05 m の立方体セルで構成した。

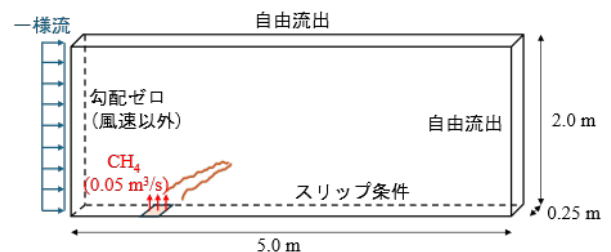


Figure 1 Computational domain and boundary conditions

1 : 日大理工・学部・土木 2 : 日大理工・教員・土木

3. 解析結果

Figure 2 に流入風速 2.0 m/s のときの流速ベクトル, および温度分布を示す. Figure 3 は同様に, 流入風速 6.0 m/s のときの解析結果である.

風速ベクトルを見ると, どちらのケースもあるところを境に風速に大きな差が生じた. これはメタンガスの燃焼で生じた高温領域との境目と考えられる. 温度分布を 300~350 K の間で色に変化するように可視化すると, おおむね風速の値が変化する境界と一致する. 温度に差が生じると浮力が流体に作用し, 上昇流成分が生じる. 常時メタンガスが流入する条件で解析を行ったため, このような風速の境目が現れたと考えられる.

前述の風速の境目をなぞるような直線と水平面の間の傾きを炎の傾きと定義し, figure 4 に風速との関係をまとめた. 今回の解析条件では流入風速に反比例する形で傾きが小さくなる(水平に近づく)ことが分かった. 流入風速 6.0 m/s の場合, 傾きが小さいため, figure 3(b) に示すように, 350 K を超える領域が 1.5 m 程度下流側まで広がっている. 炎による輻射効果を考えるとこの程度の範囲まで計測部を延ばす必要があると言える. ただし実際の実験では, 底面に枯葉が敷き詰められていることから, 底面の壁面粗度が大きい状態になり, 底面付近の風速は大きく減少する. その結果, 炎の傾きは底面から離れると考えられる. 今回, 底面にスリップ条件を課したことから, この結果は過大評価の可能性が高いが, 安全側に見積もった結果とも言える.

4. まとめ

本研究では, 風と火災の実験を行う際の計測部の長さを検討するため, 定位置で発生する燃焼に伴う炎の傾きを, 風速を変えて評価した. その結果, 風速に反比例して傾きが小さくなり, 水平に近づくことが分かった. 今後は, 燃焼物を木材に変えて, 実際の実験と同様に枯葉が燃えた際の炎の傾きを評価する予定である.

参考文献

- [1] 関澤愛: マウイ島ラハイナ火災の延焼拡大と避難に関する考察, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.219-220, 2024.
- [2] 中村優介: ポータブル風洞を用いた風と燃焼の実験法構築と有風時の延焼速度の評価, 日本大学大学院理工学研究科修士論文, 2023.

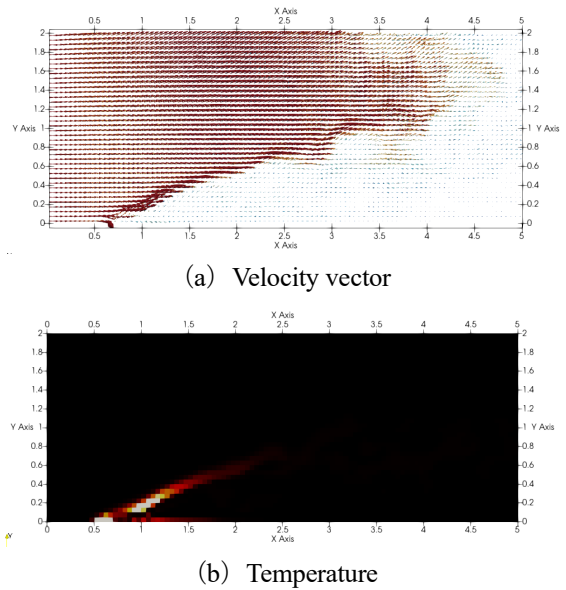


Figure 2 Computational result (2.0 m/s)

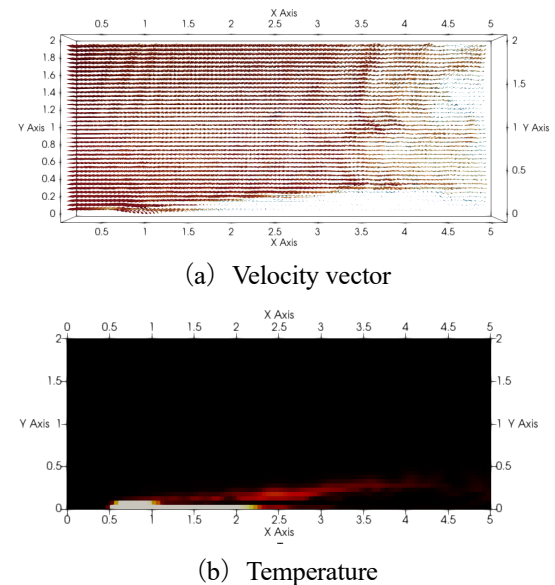


Figure 3 Computational result (6.0 m/s)

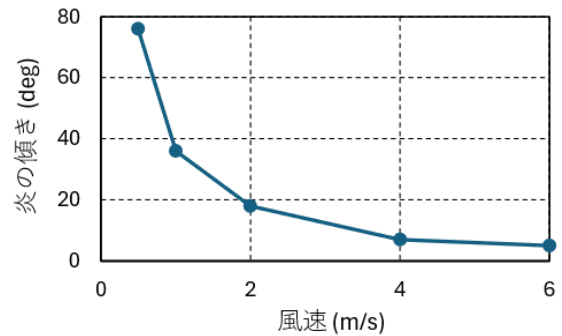


Figure 4 Tilt of flame in windy conditions