

□同時多発火災で発生する火災旋風の 発生予測に向けた基礎研究

消防研究センター大規模火災研究室 主幹研究官 篠原 雅彦

1. はじめに

首都直下地震では東京23区内で700か所を超える火災の発生が危惧されている¹⁾。100年前の1923年に起きた関東大震災では東京市で134か所から火災が発生し、約5万2千人の人々が火災によって亡くなった²⁾。このうちの7割を超える約3万8千人の人々が、東京市の全焼失面積35km²のわずか0.2%にあたる6ha(0.06km²)の空き地で亡くなった。この空き地は現在の墨田区にあった工場の跡地で被服廠跡と呼ばれていた。この一か所でこれだけの被害が生じた原因は、ここを襲った火災旋風の影響であると考えられている。一方、海外では大規模な林野火災が頻発しており、ここでも火災旋風が被害を拡大している。強風が木を裂いて吹き飛ばし、火災の強度を増大させ、死傷者を出している^{3,4)}。このようなことから火災旋風の研究は火災科学者、気象学者、森林学者らによって国内外で進められている。しかし、いまだにどのような条件下でどの程度の威力、規模を持つ火災旋風が発生するのか解明されていない。そのため被害想定も対策も立てられないでいる。

現在著者は、同時多発火災発生後の延焼火災で発生が危惧される火災旋風の発生阻止を目指して、火災の規模を想定した時に発生し得る最も回転の強い火災旋風の渦の強さと半径を、その発生メカニズムに基づいて予測するモデルの開発を行って

いる⁵⁾。この開発には火災旋風の発生メカニズムだけでなく、火災旋風の渦の強さや規模が、地上風速や火災の規模、発熱速度などによってどのように変わるのかという現象を知る必要があり、これまで実験を中心とした研究を進めてきた。

ここではまず火災旋風とはどのようなものなのかについて概説した後、発生予測モデルの開発に必要な火災旋風の現象について、著者らの最近の実験によって明らかになってきたことを紹介する。

2. 火災旋風とは

火災旋風とは、火災の内部やその周辺で発生して激しく回転する竜巻状の渦のことである。火災旋風は炎を含んだ火柱状の火災旋風(図1)として現れることもあれば、炎を含まない火災旋風(図2)として現れることもある。図1は実験で再現した火柱状の火災旋風である。旋回していない火炎にくらべてはるかに背の高い火炎となる。図2は野焼き時に発生した煙状の火災旋風である。煙や灰、砂ぼこりなどを巻き込んで黒っぽく見えているのだと考えられる。

図1のような炎を含む火災旋風が火災の外に出て図2のような炎を含まない火災旋風になることもあれば、逆に炎を含まない火災旋風が近くにある炎を取り込んだり火災の上を通過したりして、

炎を含む火災旋風になることもある。

火災旋風が引き起こす被害の多くは、火災旋風の猛烈な風に起因しているようである。この風は火の粉を遠くに飛ばしたり、周囲にまき散らしたりすることで出火点が増加し、急速な延焼拡大を引き起こす。被服廠跡での証言の中には、「強烈なる風吹き来り満場の荷物に一時に点々火が付いた、それと同時に河の方から上方に旋風来り」というものがある⁶⁾。また、火災旋風の強風は延焼速度を増加させ、延焼方向を急変させる。さらに人や物を吹きとばして避難を困難にし、死傷者を出すこともある。被服廠跡同様に火災旋風が避難場所を襲った和歌山市大空襲では、「立ち上がることも出来ず、転がされたり、叩きつけられたりして、いつの間にか意識を失ってしまった」という証言がある⁷⁾。被服廠跡では焼けトタンが飛んできて避難者の首を切ったという証言がある⁸⁾。さらに火災旋風は停滞することもあれば、予測不能な動きもするし、数 km 移動することもある。また、燃焼速度、火災の強度も増す。次節では、火災旋風の風の強さに直結する渦の回転の強さに焦点をあてた実験研究の結果をいくつか紹介する。



図1 実験で再現した火柱状の火災旋風

3. 最近の研究でわかってきたこと

3.1 風速と発熱速度が炎を含まない火災旋風に与える影響

「炎を含まない火災旋風」の渦の回転の強さや規模が、風に対する火源の向き、風速、火源の発熱速度によってどのように変わるかを風洞実験によって調べた^{9,10)}。実験では200mm×20mmの細長いバーナーを用いて火災前線を模擬した。バーナーの長辺を風に直交配置した場合と平行に配置した場合について、風速と火源の発熱速度を変え、



図2 野焼きで発生した「炎を含まない火災旋風」(写真の右端)

火源周囲に発生する「炎を含まない火災旋風」の水平面内の速度場をPIV（粒子画像流速測定法）と呼ばれる方法で測定した。得られた全速度場から渦の中心で剛体回転している渦核を抽出し、各速度場の渦核内の循環の絶対値が最大の渦核について、循環、半径、接線速度、空間平均渦度を求めた。ここで渦度とは、流体中の微小部分の回転の強さを示す量、循環とは、ある領域内の渦度を積分した値で、渦の強さを表す量である。結果を図3に示す。

直交配置の場合、図3aに示すように0.28 m/s $\leq U \leq 0.54$ m/sの風速範囲では風速の減少に伴い循環は増加する。循環は渦核内の渦度を積分して求めたので、風速に対する循環の変化が渦核内の渦度と渦核サイズのどちらによって決まっているのかを知るために、両者と循環との間の相関の

強さを調べた。渦度は渦核内の空間平均渦度の絶対値（図3d）によって評価した。その結果、風速に対する渦の循環の変化は、渦度ではなく渦半径によって決まっていることが分かった。つまり風速が減少すると循環の絶対値が大きくなるのは、風速の減少に伴い渦核サイズが増大するためであり、渦核内の空間平均渦度の変化によるものではないということが分かった。

では、低風速下で渦核が大きくなるのはなぜか。一つの仮説として流れ場の結果に基づいた考察を示す。図3bより、どちらの発熱速度の場合も、 $U = 0.38$ m/sと $U = 0.48$ m/sの間を境に渦核半径が大きく異なっている。渦を可視化して観察した結果と速度場から、渦の動きも $U = 0.38$ m/sと $U = 0.48$ m/sの間を境に大きく異なることが分かった。図4a～cに、発熱速度0.84 kWの場合

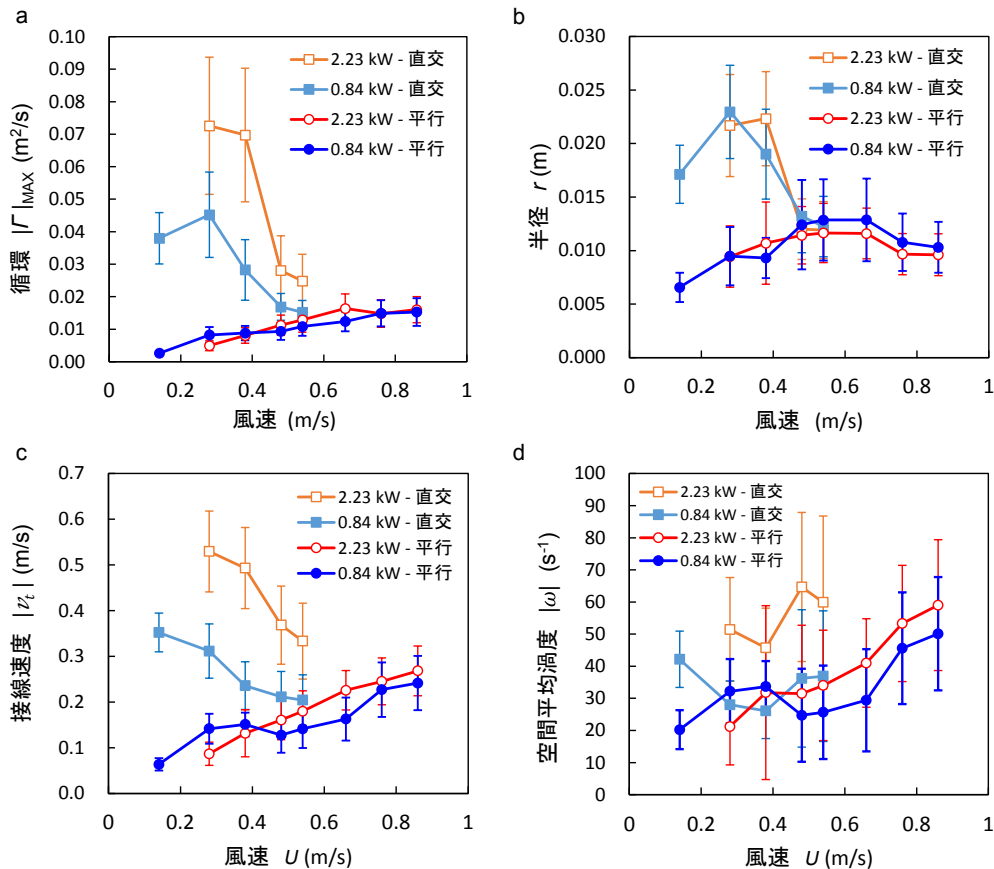


図3 風速・発熱速度・火源の向きが火災旋風に与える影響（文献10を改変）。(a) 渦核の循環の絶対値の最大値、(b) 渦核半径。(c) 渦核の接線速度の絶対値、(d) 渦核内の空間平均渦度の絶対値。図中の各点は56秒間の時間平均値、エラーバーは標準偏差を示す。

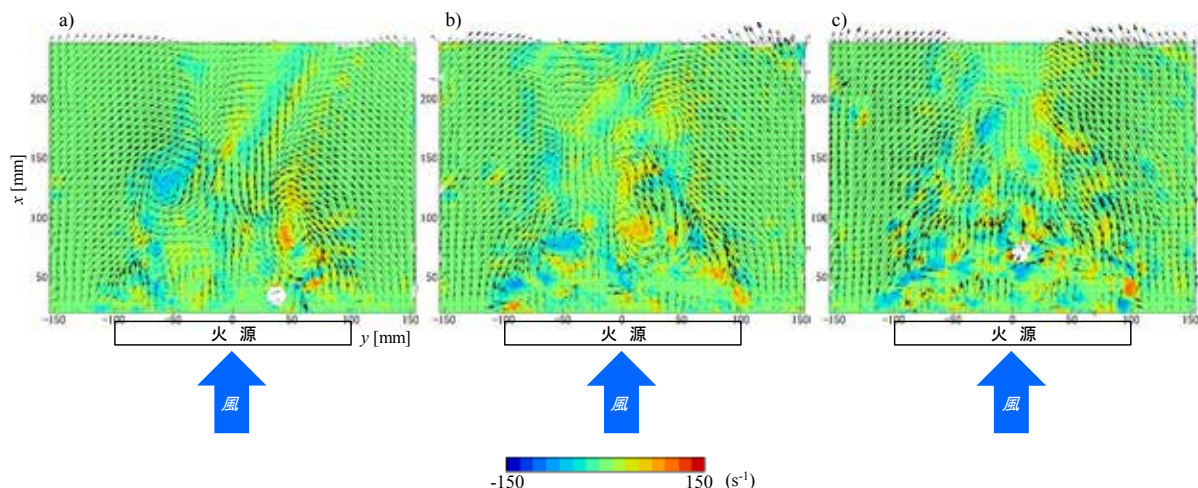


図4 発熱速度0.84 kWの場合の瞬時速度場と渦度：(a) 風速 $U = 0.28$ m/s; (b) $U = 0.38$ m/s; (c) $U = 0.48$ m/s. 図の上が風下。

(a), c) は文献9を改変)

合について $U = 0.28, 0.38, 0.48$ m/sにおける火源風下の瞬時速度場と渦度場を示す。0.38 m/sまでは渦はバーナー風下に定在する時間が長い、0.48 m/s以上では、渦は定在せずすぐに風下に流される。つまり低風速下では渦はバーナーのすぐ風下に定在しており渦サイズは大きい。高風速下では渦はすぐに流出し渦サイズは小さい。よって高風速下では渦が短時間で流出するため、渦内への渦度の蓄積が少なく渦が大規模化できず、低風速下では渦が流出せず定在するため、渦内への渦度の蓄積が多くなり、渦が大規模化できると考えることができる。ここで渦度が周囲から火源風下にやってくるような説明をしたが、渦度の供給元は床面に接する速度境界層だと過去の研究から考えている。

直交配置の場合、渦の接線速度も循環同様に風速が減少するほど増加する (図3c)。この主な原因も、風速の減少に伴い渦の半径が増加する傾向にあるためである。また、発熱速度が増加すると循環が増加する (図3a)。これは、発熱速度が増加しても渦核サイズは変わらないが、渦核内の空間平均渦度は増加するためである。

平行配置の場合の渦の循環の絶対値、渦サイズ、接線速度は、直交配置の場合に比べて小さい (図

3a～c)。また、平行配置の場合は直交配置の場合とは逆に、風速の増加に対して渦の循環の絶対値が増加傾向にある (図3a)。

循環と半径が共に大きい渦、つまり危険な火災旋風は図3a, bから分かるとおり、直交配置の低風速下で発熱速度が大きい場合に発生する。この時の渦は、火源の風下に逆方向に回転する渦のペアとして現れ、ほぼ定在する。図5はこの最も強い渦を煙で可視化した様子である。

低風速下で強く大きな火災旋風が発生するという実験結果は、林野火災や野焼き時には風が強い時よりも風の弱い時に、より多くの火災旋風が報



図5 全実験条件下で最も強い渦を煙で可視化した写真

告されてきたという結果と矛盾しない。なぜならば、回転が強く大規模な火災旋風は、そうでない火災旋風に比べて、おそらく、より目撃されやすく記録に残りやすいからである。ただし野焼きに関しては、延焼防止のため強風下を避けて行われるので、風が弱い時の観察例が多いというデータのかたよりは存在する¹¹⁾。火災の発熱速度が最も強いのは火災の側面でも後面でもなく燃え進んでいく前面（火災前線）である。したがって、「循環と半径が共に大きい渦は、低風速の風に直交する発熱速度の大きい火源の風下に、逆方向に回転する渦のペアとして現れ、ほぼ定在する」というこの実験結果は、回転が強く大規模な火災旋風は、図6に示すように風と直交する火災前線の風下部に弱風下で発生することを示唆している。

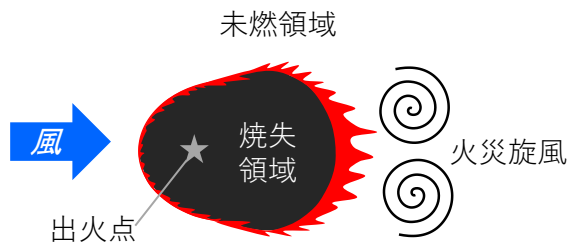


図6 実験結果から示唆される「火炎を含まない回転の強い大規模な火災旋風」の発生位置

3.2 最も強い渦の正体

ではこの最も強い渦は何者なのだろうか。図7に示すように、火災風下の地上部には定在渦と書いたほぼ一か所に留まる渦や、後流渦と書いた次々と風下に流れていく渦が火災旋風として目撃されてきた。さらに火災風下の上空全体を覆うCVPと書かれた渦も古くから知られてきた。CVPはCounter-rotating Vortex Pairの略で、直訳すれば逆回転渦対となる。火災から発生する上昇気流が風を受けると風下に傾く。この上昇気流は二股に分かれ、互いに逆方向に回転する渦のペアであるCVPを形成する。

実験の結果、定在渦はCVPの最下部である可

能性が高く^{12,13)}、この定在渦が前節で明らかになった強い渦の正体である可能性が高い¹⁰⁾ということが明らかになった。定在渦がCVPの最下部であることは図7を見れば当たり前のように思えるが、火災のすぐ風下の地上部には煙や砂や炎など空気の流れを可視化するものがない限り、定在渦は見えない。また、CVPもいつもその全貌が明確に見えるとは限らない。そのため、図8のように定在渦とCVPを同時に可視化して、あらゆる角度から観察しなければCVPと定在渦がつながっているのかどうかということが分からなかったのである。

火炎の風下部では火柱状の火災旋風が発生することもある。この火柱状の火災旋風は、定在渦の中に火炎が巻き込まれたもの、つまりCVPの下部に火炎が巻き込まれて発生しているということも実験で分かった¹³⁾。

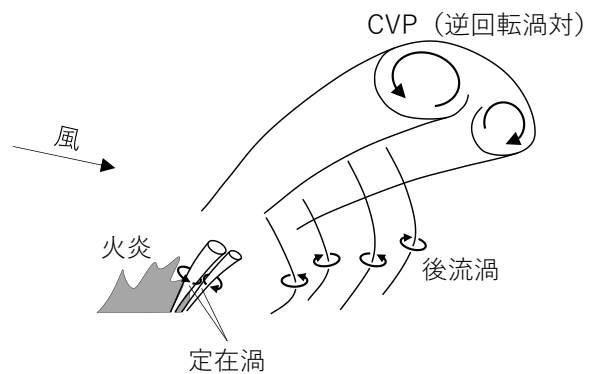


図7 火災の風下で目撃されてきた渦



図8 CVPの最下部である可能性が高い「火災風下の定在渦」

実火災に比べればはるかに小さい数 cm から数 m の火炎を用いた実験の結果ではあるが、定在渦が CVP の最下部である可能性が高いという実験結果は、大規模な林野火災を高解像度気象用レーダーで観測した結果とも一致することが最近明らかにされた¹⁴⁾。

図 7 に示した後流渦 (Wake vortex) は、しばしば逆方向に回転する渦のペアとして火炎風下に現れ、周期的に風下に流されていく。火炎の風下に定在する CVP もたまに流れ出すことが林野火災での報告¹⁵⁾ や実験¹²⁾ でわかっている。

CVP の上部の風の流れは図 7 の矢印から分かる通り、一般風と直交する方向に向かう。そのため、この流れは火の粉を側方に飛ばすため、林野火災を側面から消火する消防隊員にとって危険な現象であることが指摘されている¹⁶⁾。火の粉の飛散分布が CVP に大きく左右されることはシミュレーションでも示されている¹⁷⁾。2016年に起きた糸魚川市大規模火災では、地上と上空から撮影された映像に、火災域の上空を覆う煙によって可視化された CVP が映っていた。飛び火が多発する直前の上空の煙、つまり CVP の輪郭を地図に落とすと、その輪郭付近でその後、多くの飛び火が発生していた。これも CVP が火の粉の飛散に影響を与えたためではないかと考えている¹⁸⁾。

CVP の発生メカニズムは古くからいくつかの仮説が提唱されており、現在この発生メカニズムと、図 3 で示した実験から明らかになった強い火災旋風の発生状況などに基づいて発生予測モデルを開発している。

4. おわりに

現在作成中の火災旋風発生予測モデルの基礎となる実験の結果についていくつか紹介した。今後さらにモデルの適用範囲を広げるための実験を行い、実規模火災旋風を予測できるモデルに拡張することを目指している。

【参考文献】

- 1) 東京都防災会議, 首都直下地震等による東京の被害想定報告書, 2022. <https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/taisaku/torikumi/1000902/1021571.html>
- 2) 中央防災会議 災害教訓の継承に関する専門調査会, 1923関東大震災報告書第一編, 2006.
- 3) USDA Forest Service, Accident prevention analysis report, Indians fire, Los Padres National Forest, USDA Forest Service, Pacific Southwest Region, 2008.
- 4) Informational Summary Report of Serious or Near Serious CAL FIRE Injuries, Illnesses and Accidents, GREEN SHEET, Burn Over Fatalities, July 26, 2018, Carr Incident.
- 5) Shinohara, M., A model to predict maximum tangential wind velocity in laboratory-scale fire whirls without flames in a crosswind, IAFSS2023: 14th International Symposium on Fire Safety Science, 2023 (accepted).
- 6) 藤原咲平: 関東大震災調査報告 (気象編), 中央气象台, 1924.
- 7) 和歌山市戦災誌, 和歌山市役所, 1956.
- 8) 東京都江戸東京博物館・都市歴史研究室, 関東大震災と安政江戸地震, 東京都江戸東京博物館調査報告書第10集, 常設展示制作に伴う調査報告書 3, 2000.
- 9) Shinohara, M., Effects of wind speed and heat release rate on the vortex strength and size of fire whirls without an inner core of flame, Fire Safety Journal, Vol. 120, 103045, 2021.
- 10) Shinohara, M., Vortex strength and size of fire whirls without flames around a long narrow fire source, Fire Safety Journal, Vol. 129, 103561, 2022.
- 11) McRae, D.J., Flannigan, M.D., Development of large vortices on prescribed fires, Canadian Journal of Forest Research, 20, pp. 1878-1887, 1990.
- 12) Shinohara, M., Matsushima, S., Formation of fire whirls: Experimental verification that a counter-rotating vortex pair is a possible origin of fire whirls, Fire Safety Journal, Vol. 54, pp. 144-153, 2012.
- 13) Shinohara, M., Matsushima, S., Flow visualization study of stationary fire whirls just downwind of meter-scale turbulent flames, Flow, Turbulence and Combustion 102, pp. 313-330, 2019.
- 14) Lareau N. P. et al., Fire-generated tornadic vortices, Bull. Am. Meteorol. Soc. 103 (5) E1296-E1320, 2022.
- 15) Haines, D. A., Smith, M.C., Simulation of the collapse of bent-over vortex pairs observed in wildland fires, Forest. Sci. 38 (1992) 68-79.
- 16) Haines, D. A., Smith, M. C., Simulation of the Collapse of Bent-Over Vortex Pairs Observed in Wildland Fires., Forest Science, Vol. 38, No. 1, pp.68-79, 1992.
- 17) Thurston, W. et al. The contribution of turbulent plume dynamics to long-range spotting, International Journal of Wildland Fire, 26, pp. 317-330, 2017.
- 18) 篠原雅彦, 飛び火と上空の煙の位置に関する考察, 火災, No. 373, pp.39-42, 2021.