

博士学位論文

複数火源の融合による旋回火炎の
性状に関する研究

2020年 3月

渡 邊 憲 道

公立諏訪東京理科大学 工学・マネジメント研究科

目次

記号の説明	1
第 1 章 緒論	2
1. 1 はじめに	2
1. 2 既往の研究.....	4
1. 2. 1 火災旋風	4
1. 2. 2 融合火炎	5
1. 2. 3 複数火源の融合による火災旋風.....	6
1. 2. 4 火炎高さ	6
1. 2. 5 アトリウム及びモールの火災性状	7
1. 3 本研究の目的と意義	8
1. 4 本論文の構成	9
参考文献.....	10
第 2 章 形成される旋回火炎の空間的な特性の実験的検討	14
2. 1 はじめに	14
2. 2 実験装置及び方法.....	15
2. 2. 1 実験装置	15
2. 2. 2 火炎形状及び連続火炎高さ	17
2. 2. 3 発熱速度	17
2. 2. 4 実験装置の中心軸上の温度.....	18
2. 3 実験結果及び考察	20
2. 3. 1 火炎形状	20
2. 3. 2 火炎高さ	23
2. 3. 3 火炎の温度減衰.....	29

2.3.4 発熱速度	34
2.3.5 旋回火炎の発生条件.....	39
2.4 結言	41
参考文献.....	42

第3章 融合した旋回火炎の発生条件及び火炎高さの推定に関する検討 43

3.1 はじめに	43
3.2 実験装置の妥当性の検討	44
3.2.1 実験装置及び方法	44
3.2.2 実験結果及び考察	46
3.3 融合した旋回火炎の発生条件に関する実験.....	48
3.3.1 実験装置	48
3.3.2 発熱速度	48
3.3.3 実験装置の中心軸上の温度及び上昇速度	49
3.3.4 実験装置開口部における接線方向速度.....	52
3.3.5 火炎形状及び火炎高さ	52
3.4 実験結果及び考察.....	54
3.4.1 火炎形状	54
3.4.2 火炎高さ	61
3.4.3 融合した旋回火炎の上昇気流速度	65
3.4.4 融合した旋回火炎の火炎温度	67
3.4.5 開口部における循環.....	78
3.4.6 発熱速度	83
3.4.7 火炎の平均高さの計算モデル	87
3.5 結言	91
参考文献.....	92

第4章 融合した旋回火炎の性状を利用した排煙手法の提案	93
4.1 アトリウムを対象としたケーススタディ	93
4.2 モデルアトリウムの空間構成	94
4.3 火源設定	94
4.4 火炎高さ	98
4.5 プリューム領域の温度減衰.....	100
4.6 プリューム領域の上昇気流速度	104
4.7 結言	107
参考文献.....	108
第5章 総括	109
5.1 各章の結論.....	109
謝辞及び本論文に関わる研究業績	112
謝辞	112
業績リスト	114

記号の説明

D	燃焼容器径 [m]
D_m	火源の代表径 [m]
h	衝立高さ [m]
L_m	平均火炎高さ [m]
n	燃焼容器数 [個]
\dot{m}	質量 [kg]
\dot{Q}	発熱速度 [kW]
\dot{Q}_0	衝立のない場合の発熱速度 [kW]
Q^*	無次元発熱速度 [-]
R	実験装置の半径 [m]
S	火源の分離距離 [m]
ΔT	実験装置の中心軸に沿った温度 [K]
u_m	実験装置の中心軸に沿った上昇速度 [m/s]
V	電圧 [V]
v_s	実験装置の R の位置における接線方向速度 [m/s]
z	高さ [m]

Greek

α	3-3 式の係数
β	4-1 式の係数
Γ	循環 [m ² /s]
θ	衝立角度 [degree]

第1章

緒論

1.1. はじめに

首都直下地震の発生が懸念される中、首都直下地震に関する内閣府の報告書¹⁾では、首都圏の木造住宅密集市街における複数同時火災の発生によって広域火災に至る危険性を指摘している。木造住宅の倒壊及び損壊は、延焼拡大を助長する。倒壊した木造住宅において、複数同時火災が拡大して行く中で、互いに影響を及ぼす近距離に複数個の火災が存在する場合、火災の融合が発生する。近距離に複数個の火災が存在する場合において、火災からの放射熱損失は互いに火炎に向き合う面では小さくなる。また、火炎で囲まれる空間の温度は高くなるために強い浮力を有し、中央部分で最も速度の大きな上昇気流をもつために、随伴空気はこの上昇気流に向かって流れ込む。その際、火炎は随伴気流の影響を受けて傾斜するとともに、場合によって火炎の融合が発生する²⁾。上昇気流に向かう随伴空気の流れが火炎の接線方向に大きく偏向すれば、融合した火炎に旋回流が供給され、旋回火炎が発生すると考えられる。融合した旋回火炎は、燃料消費速度、すなわち発熱速度が増大すると考えられ、延焼拡大を招く要因となり得る。黄ら³⁾は、火災旋風の発生には地表付近で強い旋風が生じる必要があることを述べ、シミュレーションの結果から強い旋風の発生には、上昇した気流が何らかの要因で下降し、上昇と下降を繰り返す機構が重要であることを説明している。関東大震災後及び空襲において起きた火災旋風では、被害規模が大きく、多数の死傷者が生じている⁴⁻⁶⁾。しかしながら、複数同時火災に起因した延焼拡大の抑止を考える上では、強い旋風がなくても随伴空気の偏

向だけで容易に起きる融合した旋回火炎の燃焼性状を把握し、その危険性を理解しておく必要がある。

また、商業施設のアトリウム・モールのような全天候型の大規模空間で開催されるイベント及び展示会では、ブースや売店が複数あるために、火災時には短時間で延焼拡大する可能性が考えられ、複数箇所からの同時火災が懸念される。上述したように複数同時火災は、融合した火災を引き起こすと考えられる。大容量空間の開口部から給気、自然式及び機械式の換気があり、これらの流れが偏向すれば、融合火炎の旋回が起きる可能性がある。このような大容量空間では、可燃物量及びその面積に限られるため、上昇気流に基づく気流の上昇と下降を繰り返す機構が生じ難しく、関東大震災で見られたような火災旋風の起きる可能性はあまりないと考えられる。しかし、融合した旋回火炎も、高温火炎の渦柱が周囲に大きな輻射熱を与えつつ高く伸長するため、空間内に熱気及び煙が充満することになり、在館者の危険性は高くなる。さらに、接炎及び空間内の熱気によって、上階への延焼及び建物躯体の損傷が生じることになれば、その危険性はより増すことになる。

木造住宅密集市街及びアトリウム・モールのような大規模空間における複数同時火災の危険性を評価するために、複数火源の融合による旋回火炎の性状を明確にしておく必要がある。これまでに複数火源の融合による旋回火炎に関する研究例は、非常に少なく、その燃焼性状は不明確であり、火災危険性を評価する指標がない。以上の背景から、本論文では、火災安全対策に寄与することができる複数火炎の融合による旋回火炎の条件を明らかにするとともに火炎高さを推定することができるモデルの開発を行うことを目的とする。

1.2. 既往の研究

1.2.1 火災旋風

火災旋風の研究の多くは、固定フレームによって旋回流が同伴空気によって誘導されるタイプあるいは回転スクリーンによって機械的に誘導されるタイプによる研究に大きく分類される。これらの装置によって生じる火災旋風について、誘導された流れが火炎の旋回を維持する能力に関して体系的な調査が行われ、細部では異なることがあるが、多くの点で類似した結果が得られている。これまでの固定フレームに関する火災旋風の研究では、Lei ら⁷⁾は、火災旋風のプルームの温度、速度(軸方向及び接線方向)、及び空気連行に関する実験結果を示している。また、火災旋風の燃焼速度を周囲の循環及び火源径と結合する経験的モデルを提案している。Satoh ら⁸⁾は、四角形の固定フレームに4つの開口部を設けた装置によって、火災旋風の燃焼プロセスと旋回の安定性を支配する重要なパラメータのひとつは、固定フレームによって制御される同伴空気流であることを示している。Yu ら⁹⁾は、6枚の衝立間に開口部を設けた実験を行い、火災旋風の燃焼継続時間及び中心軸上の温度に及ぼす開口部の幅の影響を報告している。Coenen ら¹⁰⁾は、12枚の衝立の角度を変えることで開口部を制御し、衝立角度と火災旋風の形状と関係を包括的に調べるとともに、角度が狭い場合、質量減少が大きくなるが、角度が閾値を超えて狭くなると、質量減少が減少することを報告している。Kuwana ら¹¹⁾は、単一火源(エタノール)かつ弱い循環下では、旋回火炎の高さは循環でなく発熱速度に依存することを示している。半径方向に対して調整可能な角度あるいは幅で配置された衝立による実験は、流れの循環を半径方向の速度に変化できるため、角速度と火源との関係を理解するのに役立つ。

また、回転スクリーンを用いた研究もほとんどが単一火源によるものであり、例えば、Emmons ら¹²⁾は循環の増加にともなって火炎高さが高くなることを示し

た。Lei ら¹³⁾は、火炎形状と循環との関係を発熱速度の観点から報告している。Sugawa ら¹⁴⁾は、16枚の衝立の角度を10 deg.とした場合について、回転数及び回転方向にともなう循環の変化が火炎形状及び火炎高さに与える影響を報告している。固定フレーム及び回転スクリーンによるほとんどの研究では、単一火源の火災旋風を扱っている。

1.2.2 融合火炎

大震火災において、延焼を防げなくなれば複数火源による火災から融合火炎に至ることが予想される。これまでの融合火炎の研究では、Putnam ら¹⁵⁾は、火源間距離の減少にともなう火炎高さの急速な増加を同伴空気によって説明している。Huffman ら¹⁶⁾は、軸対称に火源を配置し、火源間距離が小さい場合、燃焼速度が大きくなるが、火源間距離が閾値を超えて小さくなると、燃焼速度が減少することを報告している。Liu ら¹⁶⁾は、燃焼速度及び火炎高さの変化は、火源間距離が燃料表面への熱フィードバックと燃焼ゾーンの空気流の両方に影響を与えることに起因することを示している。また、Liu ら¹⁸⁾は、火災が特定の範囲内で互いに近接している場合、熱フィードバックの強化の効果は空気同伴よりも大きくなることを報告している。Jiao ら¹⁹⁾は随伴空気の制限の結果として、換気不足の燃焼が生じることで、中心火災の熱フィードバックを弱めることを示している。

1.2.3 複数火源の融合による火災旋風

複数火源の融合した火災旋風に関する研究例は少なく、Soma ら²⁰⁾、Liu ら²¹⁾及び Dermer ら²²⁾は、自由空間において自己生成した旋回流に基づく融合した火災旋風の実験的な観察を行い、複数火炎の相互関係を報告している。Satoh ら²³⁾は、四角形の固体フレームの隅の1つに開口部を設けた実験装置によって4つの火源に角速度を与え、複数火源の融合による火災旋風の挙動を報告し、火源間距離の拡大ともなっていて、燃え尽き時間が増加することを示している。この関係は、自由空間における火炎の融合挙動と類似している。この報告では、角速度成分が火炎相互関係に及ぼす影響はあまり考慮されていないため、融合した火災旋風の現象論的側面は依然不明確である。このギャップを埋めるにはさらなる実験的な検証が必要である。

1.2.4 火炎高さ

自由空間における単一の正方形及び円形の火源からの火炎高さは、McCaffrey²⁴⁾、Zukoski ら²⁵⁾、または Heskestad²⁶⁾によって与えられた相関を使用して推定できる。他方、これまでの融合火炎の高さの研究では、Sugawa ら^{27),28)}は、無次元化した融合火炎高さは、同伴空気の巻き込みを考慮し、火源間距離と火源径の関数として、融合火炎高さを推定する簡単な経験式を開発している。Weng ら²⁹⁾は、火源群の火炎高さを推定する経験式を開発している。Fukuda ら³⁰⁾は、火源群の融合火炎の測定において、火炎の高さと発熱速度との関係を報告し、Kamikawa ら³¹⁾は、Zukoski ら²⁵⁾の提案式を参照することにより、火源群の融合火炎高さと無次元の発熱速度との関係を示している。しかし、融合した火災旋風の高さを推定する場合、火源相

互作用だけでなく循環の影響を考慮する必要があるため、融合火炎の高さの推定式を直接的に導入することはできない。

1.2.5 アトリウム及びモールの火災性状

アトリウム及びモールのような大容量空間における火災性状は屋外(自由空間)と似た性状を示し、燃料支配型で急速に拡大する。アトリウムを付する建物の建設においては、建築基準法第38条(以前削除されていたが、改めて平成27年6月1日施行)の大臣認定を活用することで、法令の要求以上の安全性を検証することによって特殊な建設方法が認められている。そのため、火災安全性の基準及び防災計画が建物毎によって異なる。上階への延焼を防ぐためには、想定火源によって火災高さを算出し、火災高さに応じた壁の耐火性能と放射受熱量が規定されている。成瀬³²⁾らが調査したアトリウムでは、壁は外壁並みの区画とし、各階から出火した場合には、噴出した火炎の高さが開口に達しないこと、あるいは熱気流の温度がガラスの破損する温度以下であることを上階延焼の危険性の判定基準としていることを報告している。

Suら³³⁾及びMeroney³⁴⁾は、火災によって大容量空間における開口部及び給気によって空気流の偏向に導かれた角速度が火源に与えられた場合、アトリウム内で旋回火炎が形成されることをシミュレーションによって指摘している。大容量空間でイベント及び展示会が開催される場合にはブース及び売店が複数あることを考慮すれば、この指摘から複数火源の融合による旋回火炎がアトリウム及びモールで起きる可能性が考えられる。これまでに、このような旋回火炎を想定した上階延焼可能性、建物躯体及び天井架橋に対する温度影響に関する評価は行われた例はあまりない。

1.3. 本研究の目的と意義

この論文は、複数火源の融合による旋回火炎の発生条件を定量的に示すとともに、火炎高さを推定するための計算モデルを開発し、そのモデル式の物理的な解釈を示すことを目的としている。具体的には、最初に火炎の旋回性及び火炎高さは、衝立高さと発熱速度の相互関係によって決定されることを明確にする。次に、この相互関係に基づいて、複数火源の融合による旋回火炎の発生条件を明らかにするために作製した実験装置の妥当性を検証する。妥当性の示された実験装置によって融合した旋回火炎の発生条件を定量的に明らかにするとともに、火炎高さの計算モデルを開発する。さらに、このモデルを活用することで、融合した旋回火炎の旋回流を利用したアトリウムにおける新しい排煙手法を提案する。

融合した旋回火炎の発生条件を定量的に明らかにすること及び火炎高さのモデルを開発することに加えて、このモデルを活用した新しい排煙手法を提案することは、倒壊した木造住宅密集市街及びアトリウム・モールのような大規模空間における複数同時火災の発生に際して、融合した旋回火炎に関する火災安全対策の策定に寄与するところが大きい。

1.4. 本論文の構成

本論文は、5章より構成される。第1章は「序論」であり、研究背景、関連する既往研究を述べる。また、本研究の目的を述べる。

第2章は「形成される旋回火炎の空間的な特性の実験的検討」であり、旋回火炎の火炎高さ及び発熱速度の基本的な関係を説明し、火炎の旋回に必要な空間的要素である衝立の角度及び高さの相互作用が火炎の旋回性及び火炎高さに及ぼす影響について述べる。

第3章は「融合した旋回火炎の発生条件及び火炎高さの推定に関する検討」であり、第2章の結論に基づいて、複数火源の融合による旋回火炎の燃焼性状を明らかにするために作製した実験装置の妥当性を明確にする。その上で、円周に沿って軸対称に複数個の火源を配置した場合に発生する融合した旋回火炎の燃焼性状を実験的に調べ、融合した旋回火炎の発生条件を述べるとともに、開発した火炎高さを推定できるモデル式を説明する。

第4章は「融合した旋回火炎の性状を利用した排煙手法の提案」であり、アトリウム・モールの火災安全対策に寄与するものとして、開発した火炎高さを推定できるモデル式を活用し、融合した旋回火炎の旋回流を利用した新しい排煙手法の提案することを目的として、アトリウムを対象としたケーススタディについて述べる。

第5章は「総括」であり、各章の総括を述べる。

参考文献

- 1) 首都直下地震対策検討 WG: "首都直下地震の被害想定と対策について", 中央防災会議, 2013.
- 2) 須川修身: "火災と燃焼", 日本法科学技術学会誌, Vol. 4 (2) pp. 43 - 52, 2000.
- 3) 黄弘, 加藤信介: "CFD による火災旋風と火の粉の飛散解析", 日本風工学会誌, Vol. 35 (1), p. 47 - 52, 2010.
- 4) 西田幸夫: "環境に刻印された人間活動及び災害の痕跡解読 第 3 部 景観に刻印された災害の痕跡を調べる—関東大震災・地図と写真のデータベース化", 環境に刻印された人間活動及び災害の痕跡解読, 神奈川大学 21 世紀 COE プログラム研究推進会議, pp. 133 - 146, 2007.
- 5) 相馬清二: "被服廠跡に生じた火災旋風の研究", 地学雑誌, Vol. 84, pp. 12 - 25, 1975.
- 6) 寺田寅彦: "大正 12 年 9 月 1 日, 2 日の旋風について" 震災予防調査会報告, 第 100 号戊, pp. 185 - 227, 1925.
- 7) Lei, J., Liu, N., Zhang, L., Deng, Z., Kudzo, N., Akafuah, N., Li, T, Saito, K.: "Burning rates of liquid fuels in fire whirls", Combustion and Flame, Vol. 159, pp. 2104 - 2114, 2012.
- 8) Satoh, K., Yang, K. T.: "A horizontal fire-whirl design scenario for engineering performance- based fire-code applications", Int. J. Engineering Performance-Based Fire Codes 2 (2), pp. 48 - 57, 2000.
- 9) Yu, H., Guo, S., Peng, M., Li, Q., Ruan, J., Wan, W., Chen, C.: "Study on the influence of air-inlet width on fire whirls combustion characteristic", Procedia Engineering, 62, pp. 813 -820, 2013.

- 10) Coenen, W., Kolb, E. J., Sánchez, A. L., Williams, F. A.: "Observed dependence of characteristics of liquid-pool fires on swirl magnitude", *Combustion and Flame*, 205, pp. 1 -6, 2019.
- 11) Kuwana, K., Morishita, S., Dobashi, R., Chuah, K. H., Saito, K.: "The burning rate's effect on the flame length of weak fire whirls", *Proc. Combust. Inst.*, 33 (2), pp. 2425 - 2432, 2011.
- 12) Emmons, H., Ying, S: "The fire whirl", 11th Symp. (Int.) Combust., pp. 475 - 488, 1967.
- 13) Lei, J., Liu, N., Jiao, Y., Zhang, S.: "Experimental investigation on flame patterns of buoyant diffusion flame in a large range of imposed circulations," *Proc. Combust. Inst.* 36 (2), pp. 3149 - 3156, 2017.
- 14) Sugawa, O., Kamiya, K., Watanabe, N.: "Flame characteristics of a rotating pool fire", *Proc. 9th (Int.) Seminar on Fire and Explosion Hazards*, pp. 642 - 651, 2019.
- 15) Putnam, A. A., Speich, C. F.: "A model study of the interaction of multiple turbulent diffusion flames", *Proc. 9th Symp. (Int.) Combust.*, pp. 867-877, 1963.
- 16) Huffman, K. G., Welker, J. R., Sliepcevich, C. M.: "Interaction effects of multiple pool fires", *Fire Technology* 5 (3) pp. 225 - 232, 1969.
- 17) Liu, N., Liu, Q., Lozano, J. S., Shu, L., Zhang, L., Zhu, J., Deng, Z., Satoh, K.: "Global burning rate of square fire arrays: experimental correlation and interpretation", *Proc. Combust. Inst.* 32 (2), pp. 2519 - 2526, 2009.
- 18) Liu, N., Liu, Q., Lozano, J. S., Zhang, L., Deng, Z., Yao, B., Zhu, J., Satoh, K.: "Multiple fire interactions: A further investigation by burning rate data of square fire arrays", *Proc. Combust. Inst.* 34 (2), pp. 2555 - 2564, 2013.
- 19) Jiao, Y., Gao, W., Liu, N., Lei, J., Xie, X., Zhang, L., Tu, R.: "Interpretation on fire interaction mechanisms of multiple pool fires", *Proc. Combust. Inst.* 37 (3), pp. 3967 - 3974, 2019.

- 20) Soma, S., Saito, K.: "Reconstruction of fire whirls using scale models", *Combustion and Flame*, 86, pp. 269 - 284, 1991.
- 21) Liu, N., Liu, Q., Deng, Z., Satoh, K., Zhu, J.: "Burn-out time data analysis on interaction effects among multiple fires in fire arrays", *Proc. Combust. Inst.* 31, pp. 2589 - 2597, 2007.
- 22) Dermer P. B., Varaksin A. Y., Leontiev A. I.: "The wall-free non-stationary fire whirls generation by axisymmetric burning of solid fuel pellets", *Int. J. Heat and Mass Transfer* 110, pp. 890 - 897, 2017.
- 23) Satoh, K., Yang, K. T.: "A horizontal fire-whirl design scenario for engineering performance- based fire-code applications", *Int. J. Engineering Performance-Based Fire Codes* 2 (2), pp. 48 - 57, 2000.
- 24) McCaffrey, B. J.: "Purely buoyant diffusion flames: some experimental results", *NBSIR* 79 - 1910, 1979.
- 25) Zukoski, E. E., Kubota, T., Cetegen, B.: "Entrainment in fire plumes", *Fire Safety Journal*, 3, pp.107 - 121, 1981.
- 26) Heskestad, G.: "Peak Gas Velocities and flame height of buoyancy-controlled turbulent diffusion flames", *18th Symp. (Int.) Combust.*, pp. 951 - 960, 1981.
- 27) Sugawa, O., Takahashi, W.: "Flame height behavior from multi-fire sources", *Fire and Materials*, 17, pp. 111 - 117, 1993.
- 28) Sugawa, O., Oka, Y.: "Experimental study on flame merging behavior from 2 by 3 configuration model fire sources," *Fire Safety Science*, 7, pp. 891 - 902, 2003.
- 29) Weng, W. G., Kamikawa, D., Fukuda, Y., Hasemi, Y., Kagiya, K.: "Study on flame height of merged flame from multiple fire sources", *Combust. Sci. and Tech.*, 176, pp. 2105 - 2123, 2004.

- 30) Fukuda, Y., Kamikawa, D., Hasemi, Y., Kagiya, K.: "Flame characteristics of group fires", *Fire Science and Technology*, 23 (2) pp. 164 - 169, 2004.
- 31) Kamikawa, D., Weng, W. G., Kagiya, K., Fukuda, Y., Mase, R., Hasemi, Y.: "Experimental study of merged flames from multifire sources in propane and wood crib burners", *Combustion and Flame*, 142, pp. 17 - 23, 2005.
- 32) 成瀬友宏, 菅原進一: "アトリウム防災計画事例調査", 日本建築学会構造系論文報告集, Vol. 443, pp. 147 - 157, 1993.
- 33) Su, C., Bai, J., Hung, H., Chow, C.: "A study of internal fire whirl in a vertical shaft model with partially open roof", *Measurement*, Vol. 122, pp. 141 - 148, 2018.
- 34) Meroney, R.: "Wind effects on atria fires", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aero - dynamics*, 99, pp. 443-447, 2011.

第2章

形成される旋回火炎の空間的な特性の実験的検討

2.1. はじめに

形成される旋回火炎の性状に与える空間的な特性の実験的検討を行う。旋回火炎については、Kuwana ら¹⁾、田中ら²⁾、Dobashi ら³⁾及び原田ら⁴⁾の報告により、安定して維持できる条件が分かってきている。当該研究室では、これまで燃焼による均一な随伴空気の流れを火源に供給するために衝立を設けた実験装置によって、旋回火炎の形成条件を調べてきた。衝立は、随伴空気の流れを接線方向の流れに変化でき、その流れが旋回流を火炎に与える。また、衝立の角度を変化させることで、旋回流の強さを示す指標の一つである循環(Γ)を変化させることが可能になる。この場合、衝立間の開口部の断面積を小さくすることにより、より大きい循環を火源に与えることが可能になると考えられる。そこで、本章では分離距離のある複数火源のように火源間に随伴気流が流れ込むことがない単一火源を用い、旋回火炎の火炎高さ及び発熱速度の基本的な関係を説明し、火炎の旋回に必要な空間的要素である衝立の角度及び高さの相互作用が火炎の旋回性及び火炎高さに及ぼす影響を明確にする。

2.2. 実験装置及び方法

2.2.1 実験装置

図 2-1 に実験装置を示す。この装置は、16 枚の薄い衝立板（巾: 86 mm）により半径($R=432$ mm)の円周上に正 16 角形を形成し、衝立は半径方向に対して同じ方向に傾斜させることにより、均一な随伴流を火源に与えた。衝立間の開口部は、小さい断面積にするために衝立数を 16 枚とした。ステンレス製の燃焼容器の上端は、装置底部に敷いた砂表面と同じ高さにした。燃焼容器の直径(内径, D)は、75, 90 及び 150 mm とした。衝立の高さ(h)は、200, 500, 800 及び 1000 mm とし、比較のため衝立のない場合についても実施した。衝立角度(θ)は、10, 20 及び 50 deg. とした。

燃焼容器は、ロードセルを設置した鉄板上にセラミック板を介して配置した。セラミック板は、ロードセルの使用可能な温度範囲を超えないようにするために用いた。ロードセルに垂直荷重を与えるようにするため、ロードセルは鉄板間に水平に取り付けた後、セラミック板及び燃焼容器底面と水平になるように設置した。また、敷いた砂の荷重がロードセルの指示値に影響しないようにするために、燃焼容器、セラミックボード及びロードセルは砂と接触しない構造の装置とした。

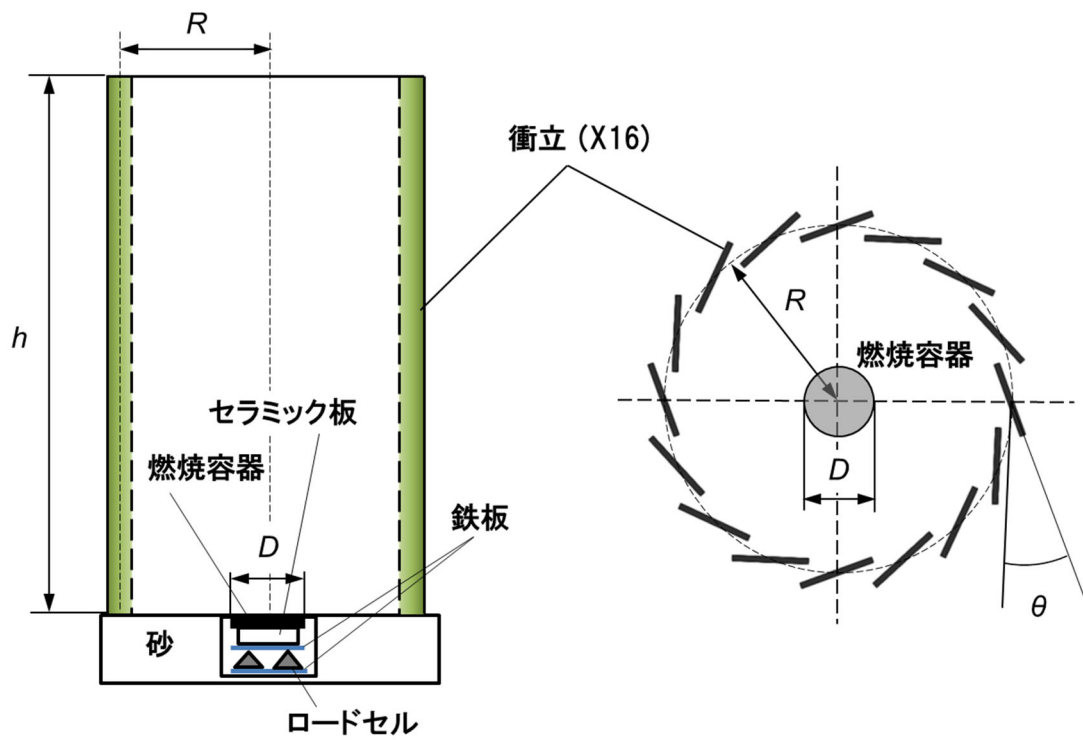


図 2-1 実験装置

(h : 衝立高さ [m], D : 燃烧容器径 [m],
 R : 装置中心から衝立中心までの距離 [m], θ : 衝立角度 [degree])

2.2.2 火炎形状及び火炎高さ

火炎形状及び平均火炎高さは、ビデオカメラ(SONY HDR-CX535)により 30 fps で実験を記録し、決定した。平均火炎高さについては、発熱速度の算出に用いた期間内の連続した 15 秒間(450 コマ)の結果を平均して得た。

2.2.3 発熱速度

燃焼中の燃料の質量減少は、3つのロードセル(共和電業, LMA-A-10N, 定格容量: 10 N)により 1 秒間隔で測定し、定常状態の 120 秒間のデータと液体燃料の単位発熱量から発熱速度を算出した。ここでは、120 秒間の発熱速度の平均値を発熱速度(\dot{Q})として扱う。液体燃料の 2-propanol 及び n-heptane の単位発熱量はそれぞれ 30.46 kJ/g 及び 44.56 MJ/kg である。

3つのロードセルからの出力された電圧は、データロガー(KEYENCE NR-500)によって和算することによって取得した。予め取得した質量(m)と電圧(V)との関係を線形近似した換算式(2-1 式)によって質量を得た。

$$\dot{m} = 513.29 V \quad (2-1)$$

ここで

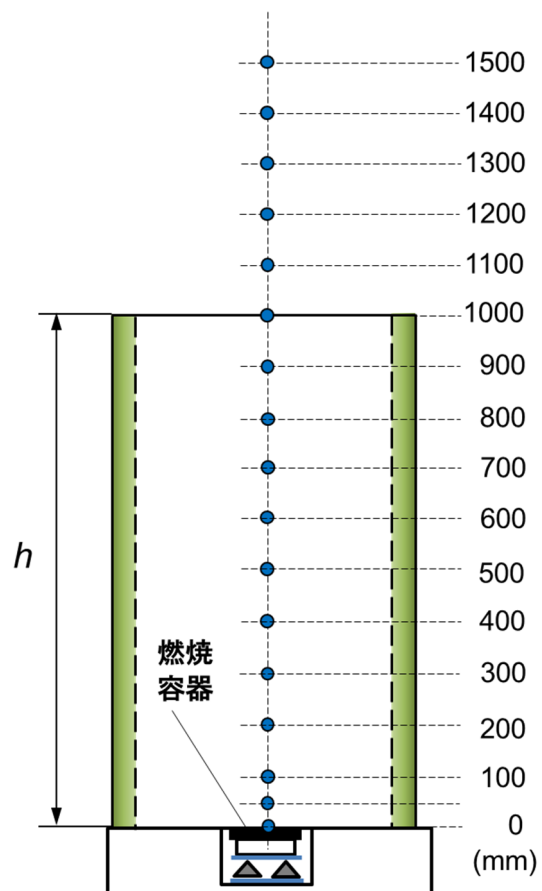
\dot{m} : 質量 [kg]

V : 和算した電圧値 [V]

である。

2.2.4 実験装置の中心軸上の温度

実験装置中心軸上の温度は、K型熱電対(線芯 ϕ 0.32 mm)を用いて、図 2-2 に示すように燃焼容器の上端から高さ 1,500 mm までを 100 mm 間隔で測定した。熱電対は燃焼容器の上端から高さ 50 mm の箇所にも設置した。また、外気温度は実験装置外に設置した K 型熱電対(線芯 ϕ 0.32 mm)によって得た。中心軸上の温度は、1 秒間隔でデータロガー(YOKOGAWA, MX-100)によって測定し、発熱速度の算出に用いた期間と同じ期間の平均値により算出した。



● 熱電対 (K-type, ϕ 0.32)

図 2-2 熱電対の設置箇所
(h : 衝立高さ [m])

2.3. 実験結果及び考察

2.3.1 火炎形状

表 2-1 及び 2-2 に、それぞれ 2-propanol 及び n-heptane を用いた場合において、衝立高さ(h)に対する火炎形態の変化を示す。表 2-1(a), (b)及び(c)は、それぞれ衝立角度(θ)が 10, 20 及び 50 deg.の場合を示している。火源径は 75, 90 及び 150 mm とし、衝立高さは、0, 200, 500, 800 及び 1000 mm とした。

目視観察によれば火炎は、火炎基部から先端まで旋回(①)、火炎基部で旋回+火炎先端で拡散(②)、火炎基部でねじれ+火炎先端で拡散(③)、傾斜あるいは歳差運動した火炎(④)、旋回及びねじれのない直立火炎(⑤)の 5 つの形状に分類できた。以下、①の火炎を旋回火炎と呼ぶ。

2-propanol においては、旋回火炎(①)は、いずれの火源径とも、 $\theta = 10$ 及び 20 deg.において観察され、 $\theta = 50$ deg.において観察されなかった。n-heptane においても同様に、旋回火炎は $\theta = 10$ 及び 20 deg.において観察され、 $\theta = 50$ deg.において観察されなかった。また、 $D = 150$ mm の場合、旋回火炎は発生しなかった。2-propanol と n-heptane の結果は、旋回火炎の形成する際には、高い衝立及び小さい衝立角度が必要であることを示している。

表 2-1 旋回火炎の発生範囲 (2-propanol)

火源径 [mm]	衝立高さ [mm]				
	0	200	500	800	1000
75	⑤	④	④	①	①
90	⑤	④	④	①	①
150	⑤	④	②	①	①

(a) $\theta = 10$ deg.

火源径 [mm]	衝立高さ [mm]				
	0	200	500	800	1000
75	⑤	②	①	①	①
90	⑤	②	②	①	①
150	⑤	②	②	②	①

(b) $\theta = 20$ deg.

火源径 [mm]	衝立高さ [mm]				
	0	200	500	800	1000
75	⑤	③	③	③	③
90	⑤	③	③	③	③
150	⑤	③	③	③	③

(c) $\theta = 50$ deg.

表 2-2 旋回火炎の発生範囲 (heptane)

火源径 [mm]	衝立高さ [mm]				
	0	200	500	800	1000
75	⑤	④	①	①	①
90	⑤	④	①	①	①
150	⑤	②	②	②	②

(a) $\theta = 10 \text{ deg.}$

火源径 [mm]	衝立高さ [mm]				
	0	200	500	800	1000
75	⑤	③	③	①	①
90	⑤	③	③	①	①
150	⑤	③	③	③	③

(b) $\theta = 20 \text{ deg.}$

火源径 [mm]	衝立高さ [mm]				
	0	200	500	800	1000
75	⑤	③	③	③	③
90	⑤	③	③	③	③
150	⑤	③	③	③	③

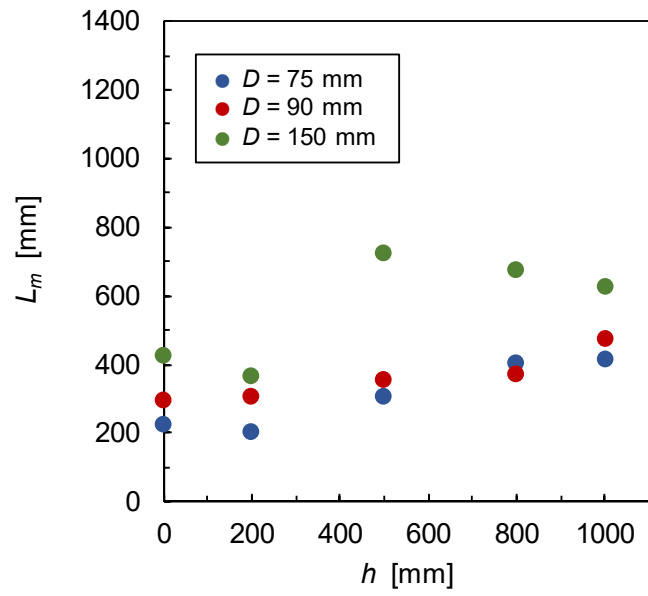
(c) $\theta = 50 \text{ deg.}$

2.3.2 火炎高さ

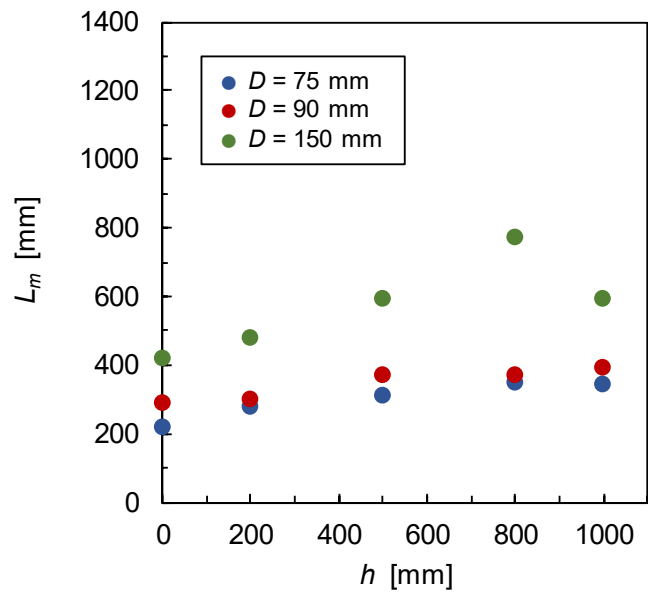
図 2-3 に、2-propanol を用いた場合において、衝立高さ(h)と平均火炎高さ(L_m)の関係を示す。図 2-3 は、衝立角度(θ)が 10, 20 及び 50 deg.の場合を示している。旋回火炎が観察された $\theta = 10$ 及び 20deg.においては、衝立の存在は火炎高さを伸長させていることがわかる。この際、火炎高さが衝立高さに近づくあるいは超えると旋回火炎は発生しない。他方、 $\theta = 50$ deg.の場合には火炎の先端を超えて随伴気流を供給しても旋回火炎が生じないことがわかる。また、火炎高さは、衝立高さが増加してもほぼ一定値である。つまり、この衝立角度の場合、開口部断面積が $\theta = 10$ 及び 20 deg.の場合と異なり、自由空間の燃焼と同様な換気支配型の燃焼になっていると考えられる。

図 2-4 に、n-heptane を用いた場合において、衝立高さ(h)と平均火炎高さ(L_m)の関係を示す。図 2-4 は $\theta = 10, 20$ 及び 50 deg.の結果を示している。n-heptane の場合も 2-propanol の場合と同様に、衝立の存在は火炎高さを伸長させ、火炎高さが衝立高さに近づくあるいは超えると旋回火炎は発生しないことがわかる。この結果は、旋回火炎の形成においては、衝立による開口部を介した随伴気流が火炎先端を超えて供給される必要があることを示している。すなわち、ウェブ公開されているブッシュ火災で起きた旋回火炎の動画で見られるように、上方に伸びた火炎では、火炎先端以上の上方に、角度をつけた衝立の効果と同じような速度の大きい偏向した随伴空気が供給されていると見ることができる。また、火炎の伸長には、未燃のガスが火炎先端に運ばれる必要があるが、衝立が高くなり空気の流入量が制限されたことで、未燃のガスが火炎先端まで運ばれたものと考えられる。ブッシュ火災の場合には、旋回火炎周囲のブッシュの燃焼にともなった未燃ガスが同様に火炎上方に供給されたものと考えられる。

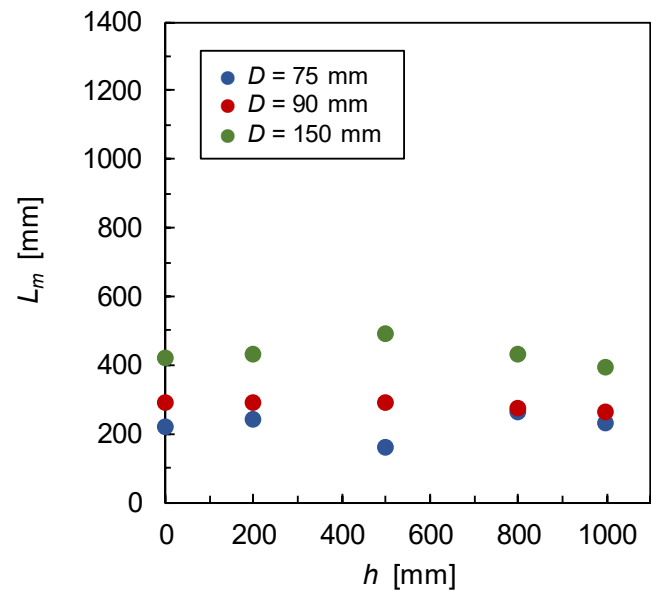
他方、 $\theta = 50 \text{ deg.}$ の場合には火炎の先端を超えて随伴気流を供給しても旋回火炎が生じないことから、自由空間の燃焼と同様な換気支配型の燃焼になっていると考えられる。つまり、 $\theta = 50 \text{ deg.}$ の燃焼性状は、10 及び 20 deg.の場合と燃焼性状が異なっていると考えられる。



(a) $\theta = 10$ deg.



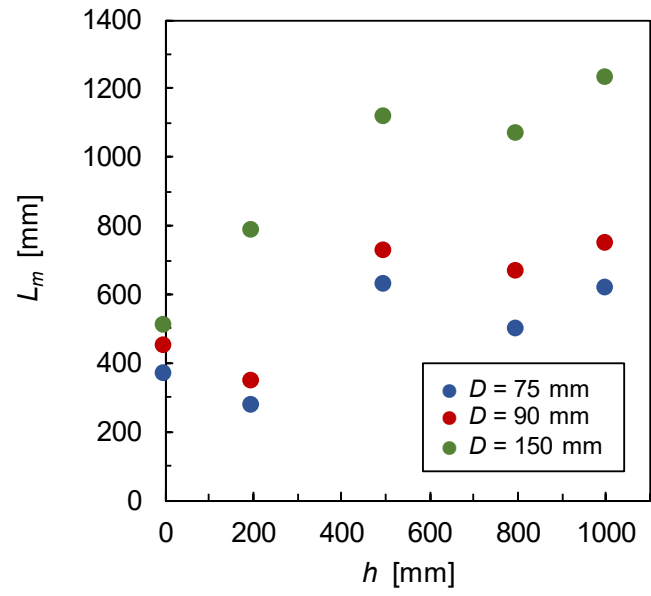
(b) $\theta = 20$ deg.



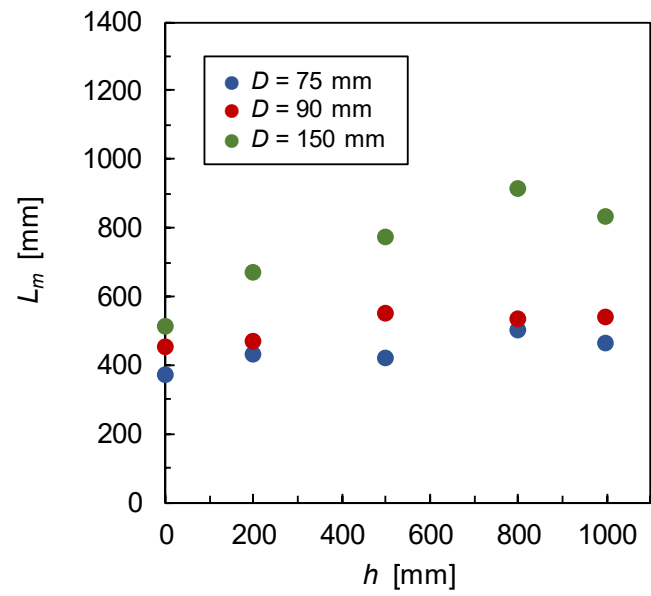
(c) $\theta = 50$ deg.

図 2-3 衝立高さ と平均火炎高さ との関係 (2-propanol)

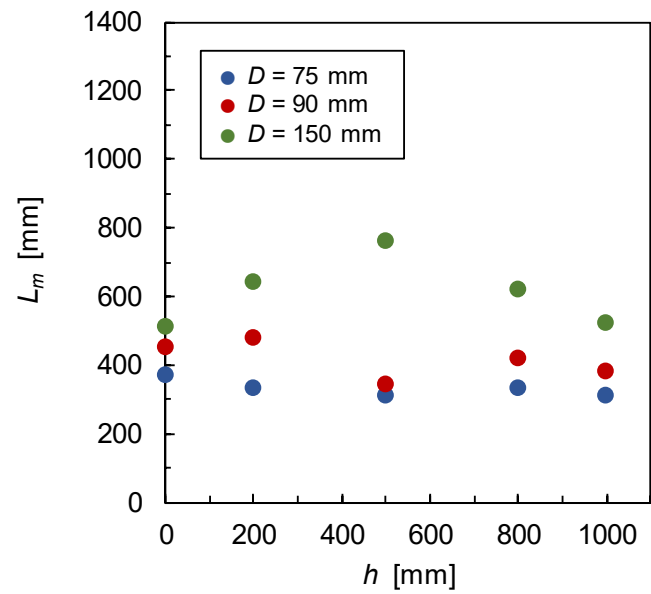
(h : 衝立高さ [m], L_m : 平均火炎高さ [m],
 D : 燃焼容器径 [m], θ : 衝立角度 [degree])



(a) $\theta = 10$ deg.



(b) $\theta = 20$ deg.



(c) $\theta = 50$ deg.

図 2-4 衝立高さ と平均火炎高さ との関係 (heptane)

(h : 衝立高さ [m], L_m : 平均火炎高さ [m],
 D : 燃焼容器径 [m], θ : 衝立角度 [degree])

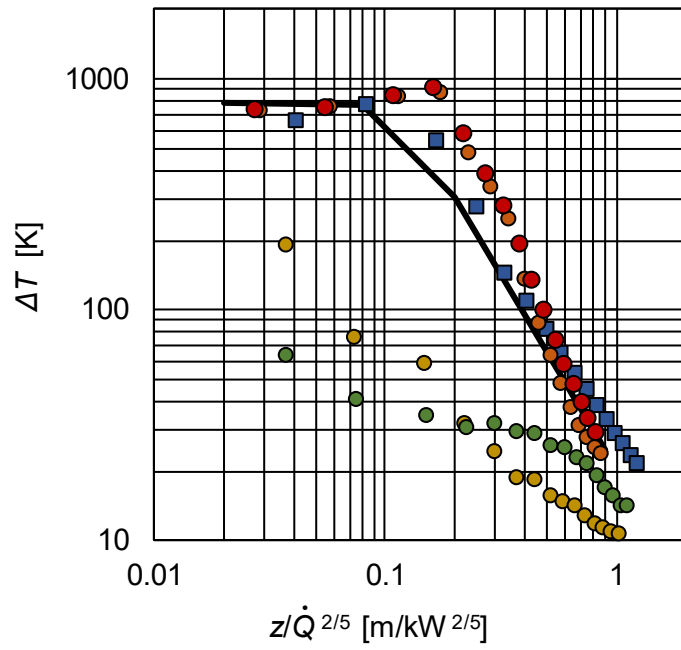
2.3.3 火炎の温度減衰

図 2-5 及び 2-6 は、それぞれ 2-propanol 及び n-heptane における場合の実験装置中心軸に沿った $z/\dot{Q}^{2/5}$ と ΔT の関係の結果を示している。この図は、浮力によって駆動される火炎の中心軸に沿った温度減衰の特性に基づいて整理した結果である。図には、代表例として $\theta = 10 \text{ deg.}$ の場合における $D = 75, 90$ 及び 150 mm の結果を示した。比較のため、McCaffrey⁵⁾により報告されている拡散火炎のモデルを併記した。

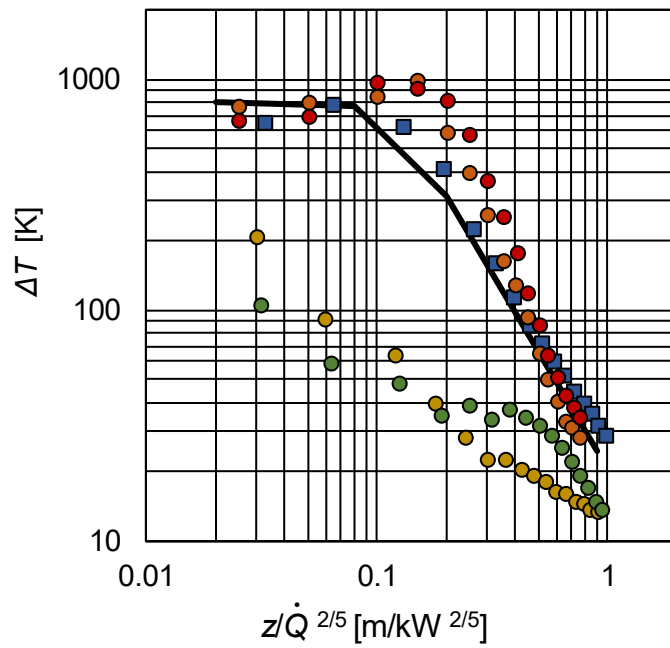
図 2-5 の 2-propanol の場合、旋回火炎はいずれの D においても $h = 800$ 及び 1000 mm において生じているが、この h の範囲では旋回火炎の発生範囲における温度減衰の開始点は、いずれも $z/\dot{Q}^{2/5} = 0.15-0.2$ 付近であり、McCaffrey の拡散火炎モデルと比較して大きい値であることがわかる。これは、旋回火炎が McCaffrey の拡散火炎モデルに比べて、連続火炎領域が拡大し、間歇火炎領域が縮減したことを示している。また、この h の範囲では、プルーム領域の温度減衰が、McCaffrey の拡散火炎モデルに比べて速いことがわかる。

図 2-6 の n-heptane の場合、旋回火炎は $D=75$ 及び 90 mm において $h=500, 800$ 及び 1000 mm において生じているが、2-propanol の場合と同様に旋回火炎の発生範囲における温度減衰の開始点は、いずれも $z/\dot{Q}^{2/5} = 0.15 \sim 0.2$ 付近であり、McCaffrey の拡散火炎モデルと比較して大きいことがわかる。プルーム領域の温度減衰が、McCaffrey の拡散火炎モデルに比べて速いことがわかる。以上のことから、旋回火炎の特徴として、旋回火炎の発生範囲では発熱速度の大きさに依存なく、連続火炎領域の拡大にともなう間歇火炎領域の縮小、プルーム領域の温度減衰の促進が挙げられる。

なお、旋回火炎の発生範囲以外において、McCaffrey の拡散火炎モデルより ΔT の極めて小さい例が複数認められる。これらの火炎は、歳差運動及び傾斜したために、熱電対を設置した軸上に火炎が継続して存在しなかったことに起因している。



(a) $D = 75$ mm



(b) $D = 90$ mm

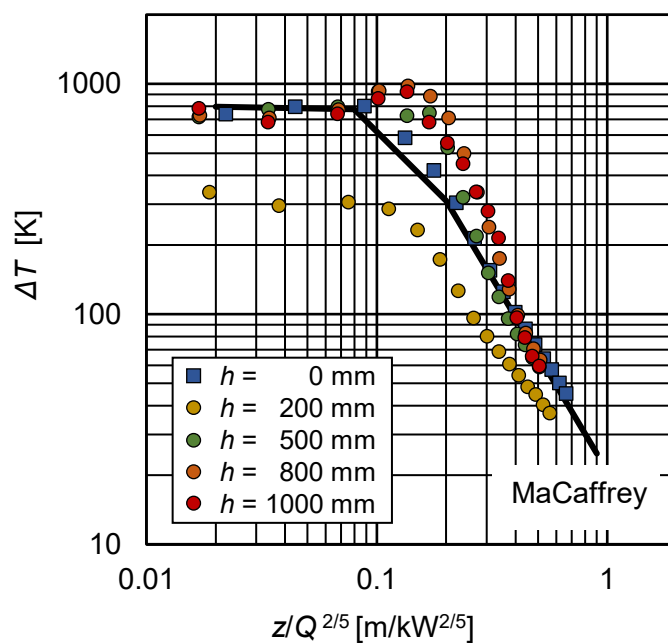
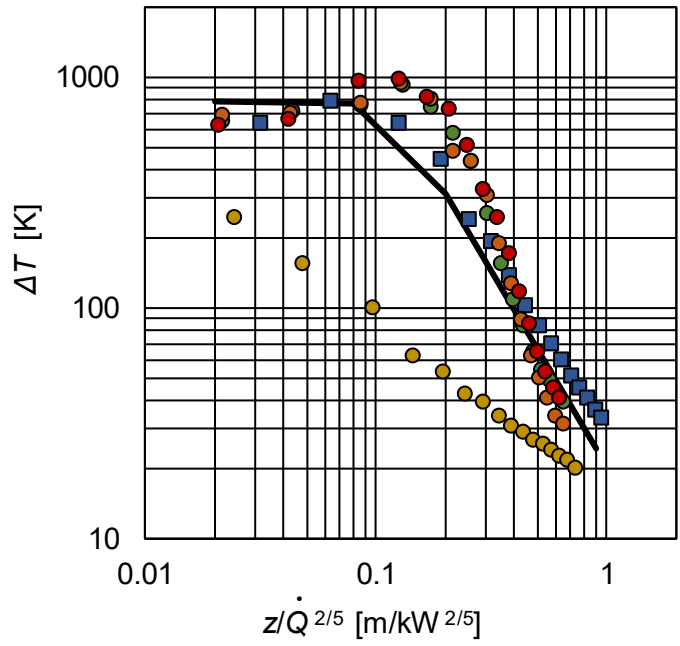
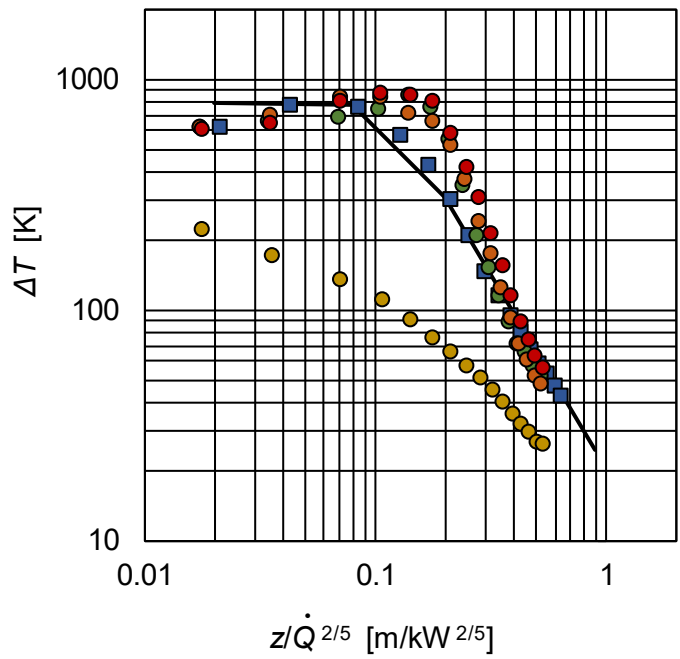


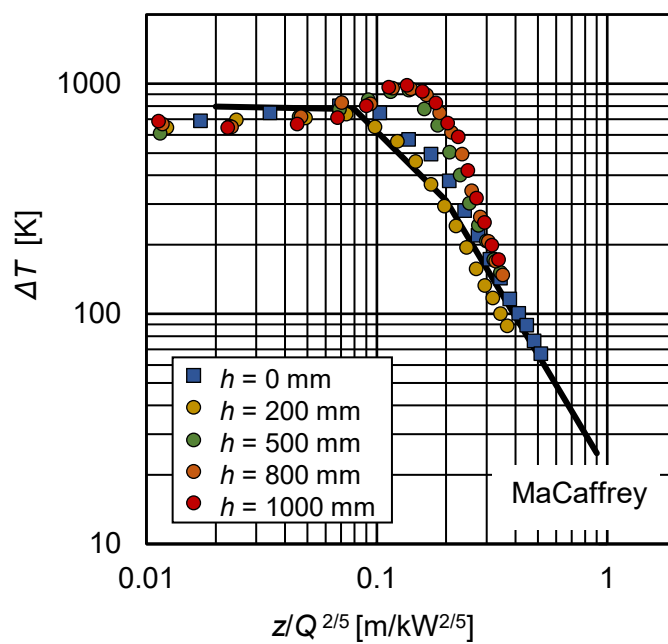
図 2-5 実験装置中心軸上の温度減衰 (2-propanol, $\theta = 10 \text{ deg.}$)
 (z : 高さ [m], \dot{Q} : 発熱速度 [kW], D : 燃焼容器径 [m], ΔT : 温度 [K],
 h : 衝立高さ [m], θ : 衝立角度 [degree])



(a) $D = 75$ mm



(b) $D = 90$ mm



(c) $D = 150 \text{ mm}$

図 2-6 実験装置中心軸上の温度減衰 (n-heptane, $\theta = 10 \text{ deg.}$)

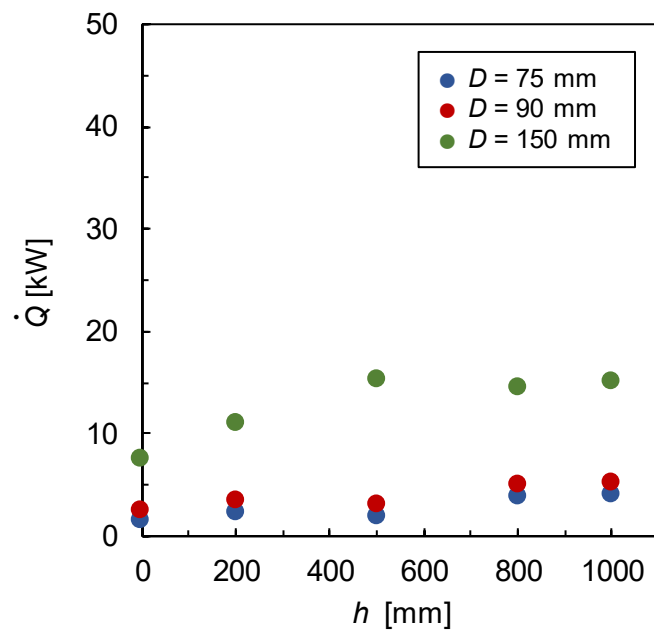
(z : 高さ [m], \dot{Q} : 発熱速度 [kW], D : 燃焼容器径 [m], ΔT : 温度 [K],
 h : 衝立高さ [m], θ : 衝立角度 [degree])

2.3.4 発熱速度

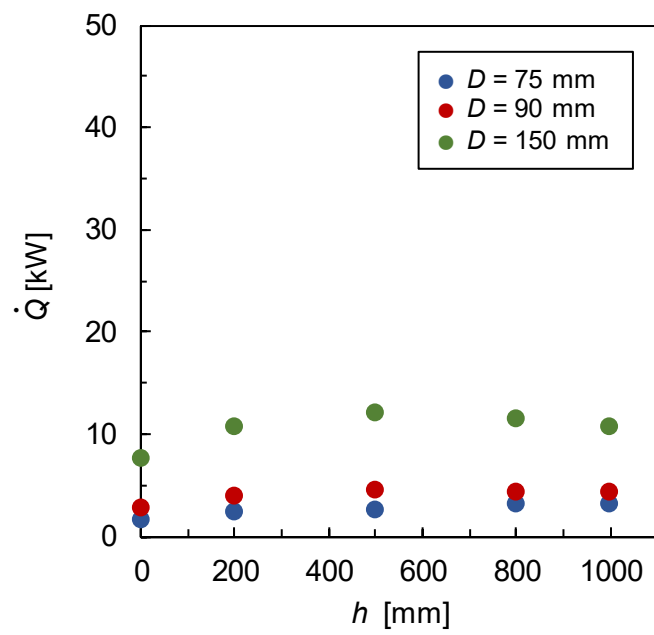
図 2-7 に、2-propanol を用いた場合における衝立高さ(h)と発熱速度(\dot{Q})の関係を示す。図 2-7 は、衝立角度(θ)が 10, 20 及び 50 deg.の場合を示している。 $\theta=10$ 及び 20deg.の場合、衝立高さの増加に伴って発熱速度は大きくなる傾向にあり、旋回火炎の発生範囲では、発熱速度が $h=0$ mm, すなわち自由空間における場合に比較して大きくなっていることがわかる。

図 2-8 に、n-heptane を用いた場合における衝立高さ(h)と発熱速度(\dot{Q})の関係を示す。図 2-8 は、衝立角度(θ)が 10, 20 及び 50 deg.の場合を示している。n-heptane の場合も 2-propanol と同様に、 $\theta=10$ 及び 20 deg.の場合における旋回火炎の発生範囲では、発熱速度が $h=0$ mm, すなわち自由空間における場合に比較して大きい。旋回火炎の発生には大きい発熱速度が必要であるが、 $D=150$, $h\leq 500$ mm では、発熱速度が大きいにもかかわらず、旋回火炎が発生していない。この結果は、旋回火炎は衝立高さに見合った発熱速度によって発生することを示している。そのため、n-heptane に比べて単位発熱量の小さい 2-propanol の場合には、より広範囲の条件で旋回火炎が発生したものと考えられる。n-heptane の場合、衝立高さを高くすれば、旋回火炎の発生範囲は拡大すると考えられる。

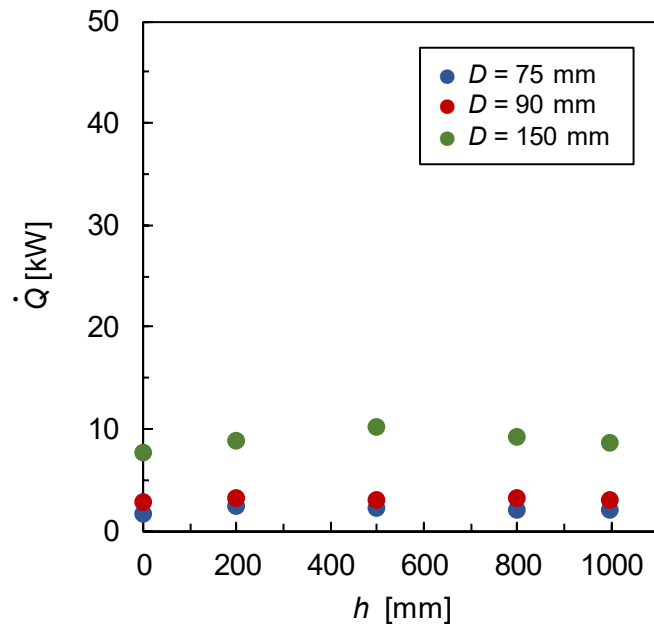
$\theta=50$ deg.の場合、2-propanol 及び n-heptane とも発熱速度の大きさにかかわらず、旋回火炎が発生していない。これは、2.3.3 項で示したように、自由空間の燃焼と同様な換気支配型の燃焼であることに起因していると考えられる。大きい断面積をもつ $\theta=50$ deg.の場合には、随伴空気の流れ速度が小さくなるとともに、火炎に流れ込む随伴空気の流量が多くなるために、自由空間と類似した燃焼性状を示すと考えられる。



(a) $\theta = 10$ deg.



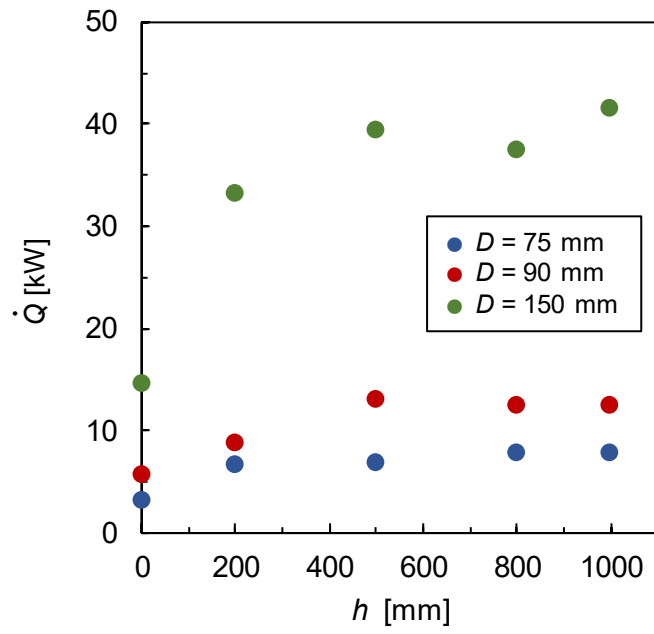
(b) $\theta = 20$ deg.



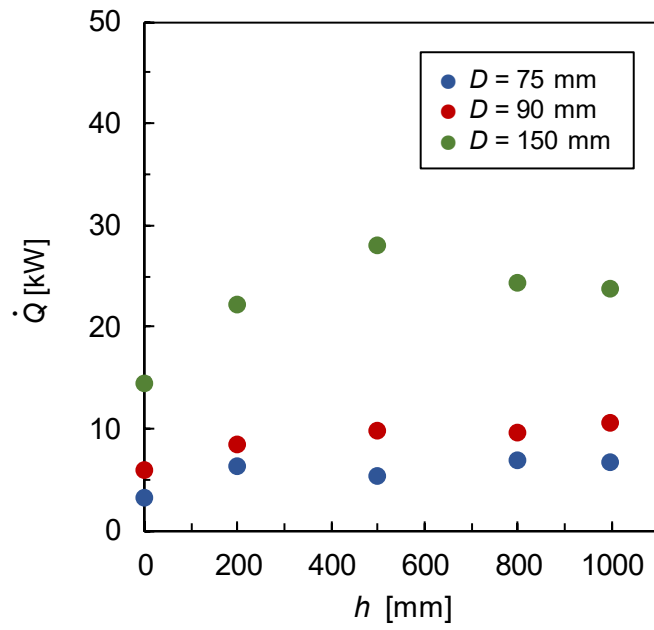
(c) $\theta = 50$ deg.

図. 2-7 衝立高さ と 発熱速度 (2-propanol)

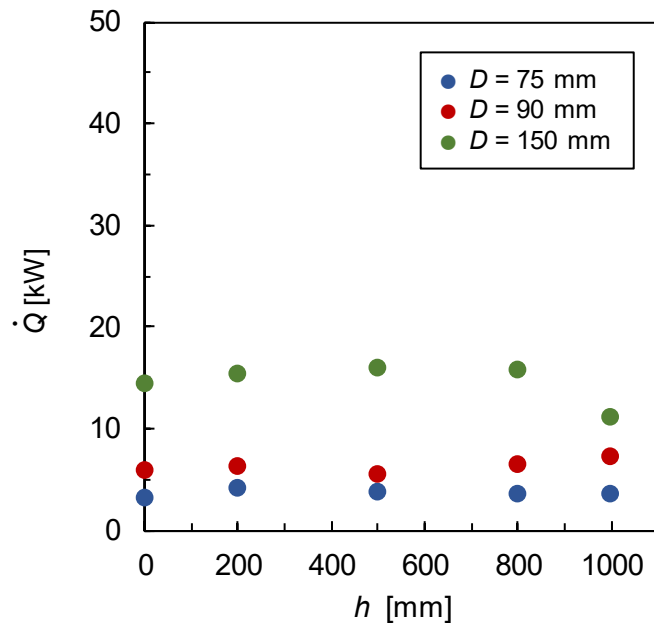
(h : 衝立高さ [m], \dot{Q} : 発熱速度 [kW], D : 燃焼容器径 [m], θ : 衝立角度 [degree])



(a) $\theta = 10$ deg.



(b) $\theta = 20$ deg.



(c) $\theta = 50$ deg.

図 2-8 衝立高さ と 発熱速度 (n-heptane)

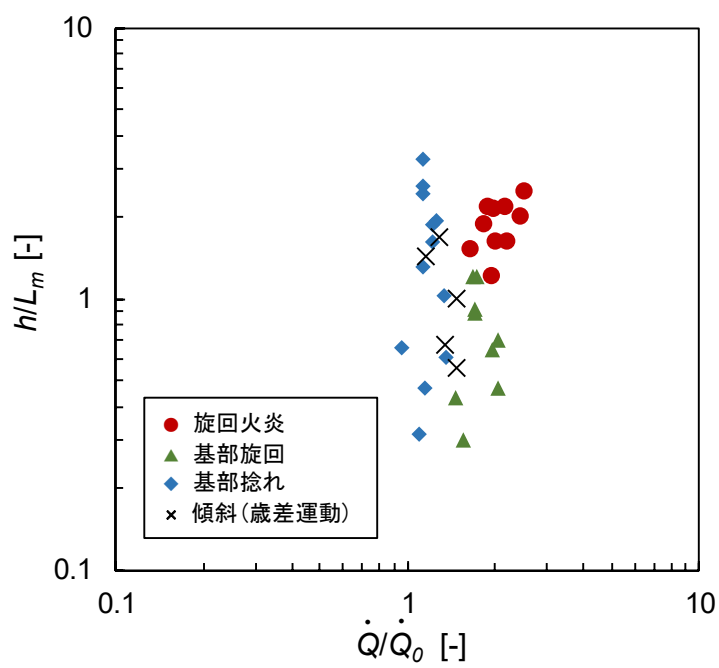
(h : 衝立高さ [m], \dot{Q} : 発熱速度 [kW], D : 燃焼容器径 [m], θ : 衝立角度 [degree])

2.3.5 旋回火炎の発生条件

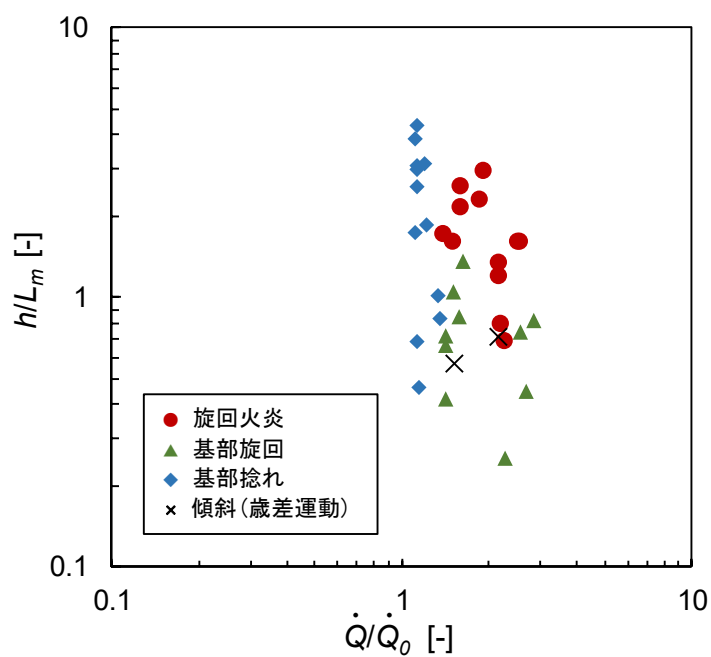
火炎の旋回には、衝立高さと発熱速度が関係することが明らかになった。図 2-9 は、発熱速度と平均火炎高さとの関係を示している。横軸は発熱速度(\dot{Q})と衝立のない場合の発熱速度(\dot{Q}_0)の比率、縦軸は衝立高さ(h)と平均火炎高さ(L_m)との比率を示している。この図は、図 2-7 及び 2-8 の結果に基づいている。図 2-9 (a)及び (b)は、それぞれ 2-propanol 及び n-heptane の場合を示している。

図 2-9(a)に示すように 2-propanol の場合、旋回火炎を形成するには $h/L_m > 1.1$ かつ $\dot{Q}/\dot{Q}_0 > 1.6$ であることがわかる。また、図 2-10(b)に示すように n-heptane の場合、旋回火炎を形成するには $h/L_m > 1.1$ かつ $\dot{Q}/\dot{Q}_0 > 1.4$ であることがわかる。図 2-9(b)では、 $h/L_m > 0.8$ においても旋回火炎が発生しているが、これは衝立高さを超えて生じた旋回火炎であることから、今回の旋回火炎の発生範囲からは除外した。

以上の結果から、 $\theta = 10$ 及び 20 deg の場合における旋回火炎の発生条件は、2つの液体燃料の共通部分 2-propanol \cap n-heptane を満たす必要があることから、衝立高さと発熱速度の関係がそれぞれ $h/L_m > 1.1$ 及び $\dot{Q}/\dot{Q}_0 > 1.6$ であることがわかる。



(a) 2-propanol



(b) n-heptane

図 2-9 発熱速度と平均火炎高さとの関係

(h : 衝立高さ [m], L_m : 平均火炎高さ [m], \dot{Q} : 発熱速度 [kW],
 \dot{Q}_0 : 発熱速度(衝立なし) [kW])

2.4. 結言

火炎の旋回には，衝立高さが発熱速度が関係することを定量的に示し，衝立高さ
と発熱速度との関係によって，火炎の旋回性及び火炎高さが決定されることを明確
にした．本章における検討の結果は，以下のようにまとめられる．

- (1) 形成された火炎は，目視観察によって以下の5つの形状に分類できた.
 - ① 旋回火炎（火炎基部から先端まで旋回）
 - ② 火炎基部で旋回＋火炎先端で拡散
 - ③ 火炎基部でねじれ＋火炎先端で拡散
 - ④ 傾斜あるいは歳差運動
 - ⑤ 旋回及びねじれない直立火炎
- (2) 旋回火炎は， $\theta = 10$ 及び 20 deg. において発生した．
- (3) 旋回火炎は，McCaffrey モデルの拡散火炎に比べて連続火炎領域の範囲が増加し，
間歇火炎領域の範囲が縮減した．
- (4) 基部から先端まで旋回する火炎の発生条件は，衝立高さが発熱速度の関係が
それぞれ $h/L_m > 1.1$ 及び $\dot{Q}/\dot{Q}_0 > 1.6$ である．

参考文献

- 1) Kuwana, K., Morishita, S., Dobashi, R., Chuah, K. H., Saito, K.: "The burning rate's effect on the flame length of weak fire whirls", Proc. Combust. Inst., 33 (2), pp. 2425 -2 432, 2011.
- 2) 田中太, 大宮喜文, 小林武雅, 石川直央, 松山賢: "火災旋風の燃焼性状と発生条件に関する研究", 日本建築学会環境系論文集, 33, pp. 2425 - 2432, 2011.
- 3) Dobashi, R., Okura, T., Nagaoka, R., Hayashi, Y., Mogi, T.: "Experimental study on flame height and radiant heat of fire whirls", Fire Technology, 52, 1069 - 1080, 2016.
- 4) 原田誠也, 水野雅之, 櫛田玄一郎: "火災旋風における火炎基部条件の影響", 東海支部総会講演会講演論文集, 163-1, 17 - 18, 2016.
- 5) McCaffrey, B. J.: "Purely buoyant diffusion flames: some experimental results", NBSIR 79-1910, 1979.

第3章

融合した旋回火炎の発生条件及び 火炎高さの推定に関する検討

3.1. はじめに

複数火源の融合による旋回火炎に関する研究例はほとんどなく、その性状は不明確なままである。そのため、融合した旋回火炎の火炎高さを推定する手法がない。本章では、円周に沿って軸対称に複数個の火源を配置した場合に発生する融合した旋回火炎の燃焼性状を調べ、融合した旋回火炎の発生条件を明確にするとともに平均火炎高さを推定するモデル式を提案する。また、この実験に先立って、融合した旋回火炎の燃焼性状を調べるための実験装置に対して、第2章において示した旋回火炎の発生条件である、衝立高さ h と発熱速度の関係がそれぞれ $h/L_m > 1.1$ 及び $\dot{Q}/\dot{Q}_0 > 1.6$ であることを検証し、実験装置の妥当性を評価する。

3.2. 実験装置の妥当性の検討

3.2.1 実験装置及び方法

本章で用いる実験装置の空間的特性において、複数火源の融合による旋回火炎の発生に関する妥当性を検証するために、衝立高さ(h) = 900 mm, 燃焼容器数(n) = 6, 4 及び 3, 燃焼容器径(D) = 38 mm(高さ 20 mm 及び壁厚 0.1 mm), 分離距離(S) = 0 mm, 液体燃料: 2-propanol とした場合に、衝立高さと発熱速度がそれぞれ $h/L_m > 1.1$ 及び $\dot{Q}/\dot{Q}_0 > 1.6$ の関係が成り立つのかについて調べた。

実験装置の概略を図 3-1 に示す。この装置は、16 枚の薄い衝立板により半径(R = 253 mm)の円周上に正 16 角形を形成し、衝立は半径方向に対して同じ方向に傾斜することにより、旋回流を火源に与える。衝立角度(θ)は、10, 20 及び 45 deg. とした。衝立板は、100 mm (巾) × 900 mm (高) × 4 mm (厚)の中質繊維板とし、前面部の衝立板 5 枚は火炎の観察のため、無色透明のポリカーボネート板とした。燃焼容器と電子天秤との間の断熱は、電子天秤上にセラミック板(一辺 110 mm, 厚さ 50 mm)及びケイ酸カルシウム板(半径 200 mm, 厚さ 15 mm)を挿入することによって行った。

図 3-2 に示すように、火源は実験装置の底板上の中心から半径 r の円周に沿って軸対称に分離距離(S) = 0 mm として、複数個設置した。燃焼中の燃料の質量減少は、電子天秤(A&D, GX-6002A)により 1 秒間隔で測定し、定常状態の 90 秒間のデータと単位発熱量(30.46 kJ/g)から発熱速度を算出した。火炎の形状及び高さは、高速ビデオカメラ(Photron, FASTCAM Mini AX200)により 50 fps で実験を記録し、決定した。平均火炎高さは、発熱速度の算出に用いた期間内の連続した 6 秒間の結果を平均して得た。

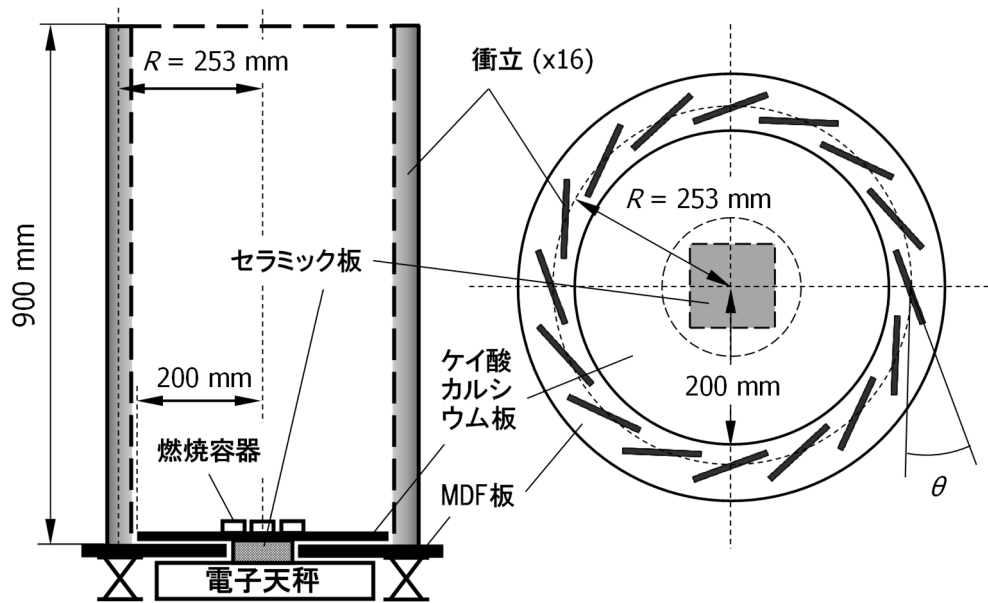


図 3-1 実験装置概略

(θ : 衝立角度 [degree], R : 実験装置半径 [m])

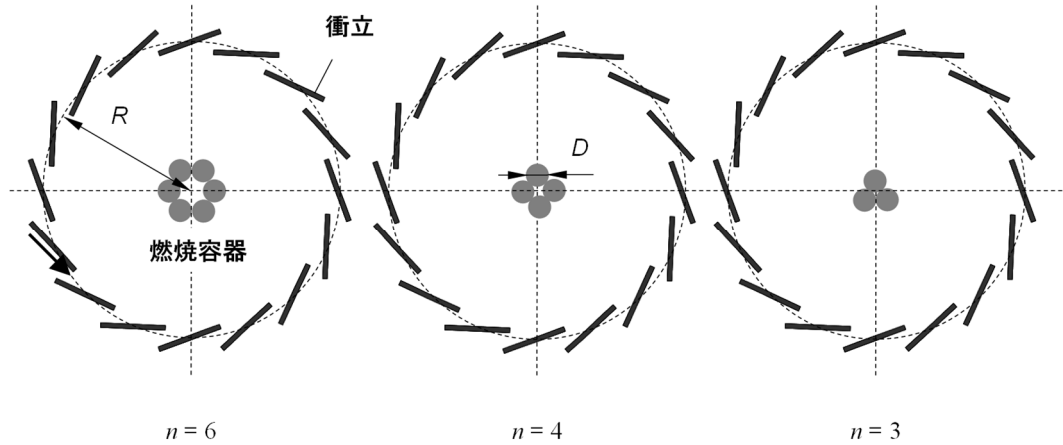


図 3-2 燃烧容器的配置の代表例($S=0$)

(D : 燃烧容器直径 [m], R : 実験装置半径 [m],
 S : 分離距離 [m], n : 燃烧容器数 [個])

3.2.2 実験結果及び考察

図 3-3 に発熱速度と平均火炎高さの関係を示す。図中の白抜きドットは、複数の燃焼容器による実験の結果を示している。塗りつぶしのドットは、図 2-10(a) 2-propanol の結果を引用している。横軸は融合した旋回火炎の発熱速度(\dot{Q})と衝突のない場合における融合した火炎の発熱速度(\dot{Q}_0)の比率、縦軸は衝突高さ(h)と平均火炎高さ(L_m)との比率を示している。

$\theta = 10$ 及び 20 deg では融合した旋回火炎が発生し、 45 deg . では融合した弱い旋回火炎が発生した。融合した旋回火炎の発生は、燃焼容器数に依存していなかった。図 3-3 から、融合した旋回火炎は、 $h/L_m > 1.1$ かつ $\dot{Q}/\dot{Q}_0 > 1.6$ の関係を満たし、融合した弱い旋回火炎は満たしていないことが分かった。これは、図 3-1 の実験装置が融合した旋回火炎の発生条件を明らかにするために適切であることを示している。以下では、この実験装置に基づいて、融合した旋回火炎の発生条件を調べることにする。

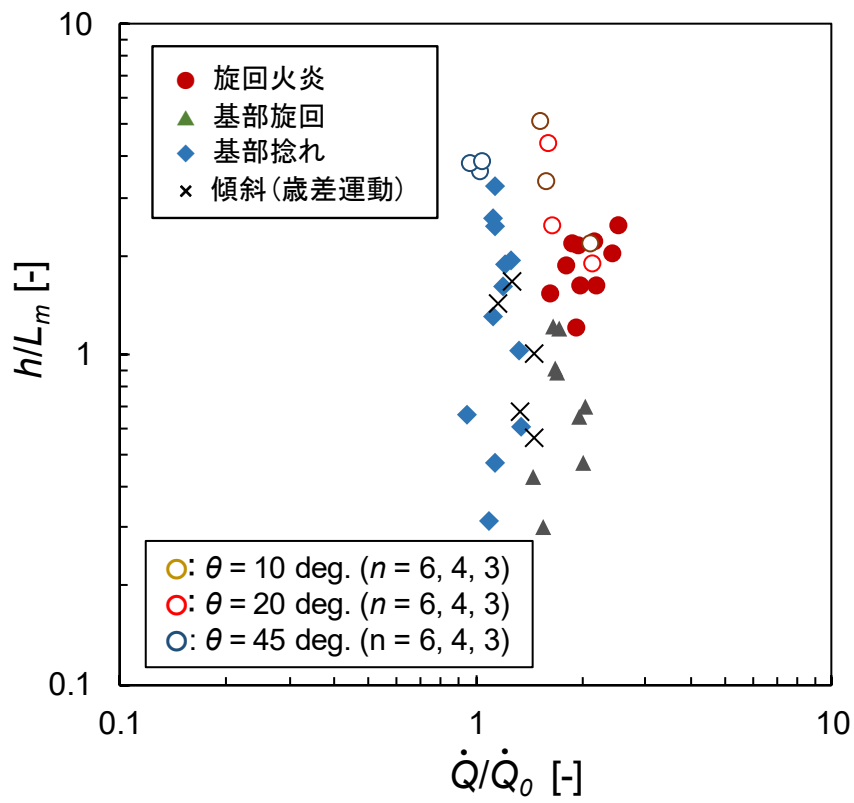


図 3-3 発熱速度と平均火炎高さの関係

(h : 衝立高さ [m], L_m : 平均火炎高さ [m], \dot{Q} : 発熱速度 [kW],
 \dot{Q}_0 : 発熱速度(衝立なし) [kW], θ : 衝立角度 [degree])

3.3. 融合した旋回火炎の発生条件に関する実験

3.3.1 実験装置

実験装置の概略を図 3-1 に示す。この実験装置は、3.2.1 項で示したものと同一のものである。16 枚の薄い衝立板により半径($R=253\text{ mm}$)の円周上に正 16 角形を形成し、衝立は半径方向に対して同じ方向に傾斜することにより、旋回流を火源に与える。衝立角度(θ)は、10, 20, 45 及び 60 deg.とした。衝立板は、100 mm (巾) \times 900 mm (高) \times 4 mm (厚)の中質繊維板とし、前面部の衝立板 5 枚は火炎の観察のため、無色透明のポリカーボネート板とした。燃焼容器と電子天秤との間の断熱は、電子天秤上にセラミック板(一辺 110 mm, 厚さ 50 mm)及びケイ酸カルシウム板(半径 200 mm, 厚さ 15 mm)を挿入することによって行った。

図 3-4 に示すように、火源は実験装置の底板上の中心から半径 r の円周に沿って軸対称に複数個設置した。燃焼容器数(n)は、6, 4 及び 3 とした。1 個の燃焼容器の大きさは、内径(D)38 mm, 高さ 20 mm 及び壁厚 0.1 mm とした。火源の分離距離(S)は、 r から算出した。燃料には、2-propanol を用いた。

3.3.2 発熱速度

燃焼中の 2-propanol の重量減少は、電子天秤(A&D, GX-6002A)により 1 秒間隔で測定し、この結果から発熱速度を計算した。質量減少は移動平均によって平滑化され、発熱速度が時間に大きく依存しない定常状態の時間幅で任意の 90 秒の期間を選択し、この期間に測定された平均の質量減少と 2-propanol の単位発熱量 (30.46 kJ/g)から発熱速度を算出した。

3.3.3 実験装置の中心軸上の温度及び上昇速度

図 3-5 に示すように実験装置中心軸上の温度は、K 型熱電対(線芯 ϕ 0.32 mm)を用いて、燃焼容器の上端から高さ 1,200 mm までを 50 mm 間隔で測定した。実験装置中心軸上の上昇速度は、二方向管に接続した微差圧計(Validyne, DP103-10-N-3-S-4-D)のデータに密度補正を行い算出した。二方向管は、図 3-6 に示すように容器上端の 100 mm の高さから 750 mm の高さまでを 50 mm 間隔で垂直方向に配置した。温度及び上昇速度は、1 秒間隔で測定し、発熱速度の算出に用いた期間と同じ期間の平均値により算出した。

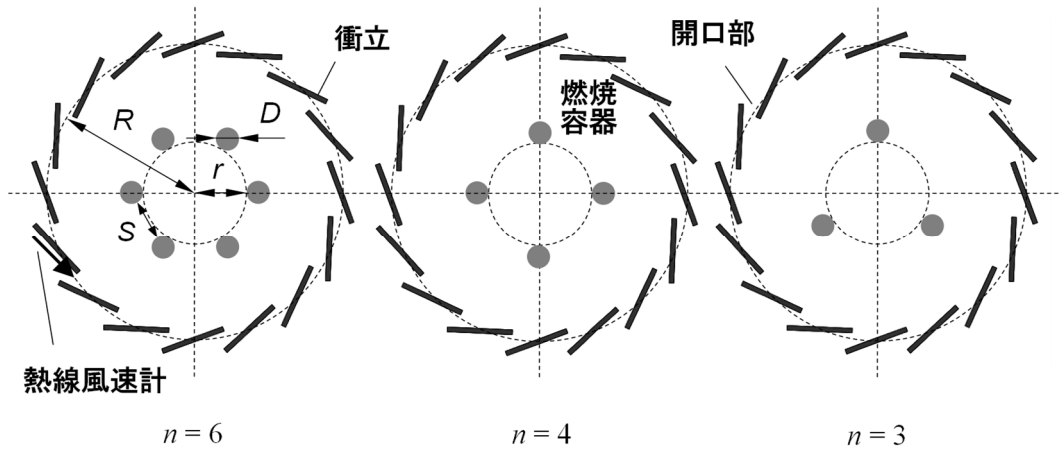
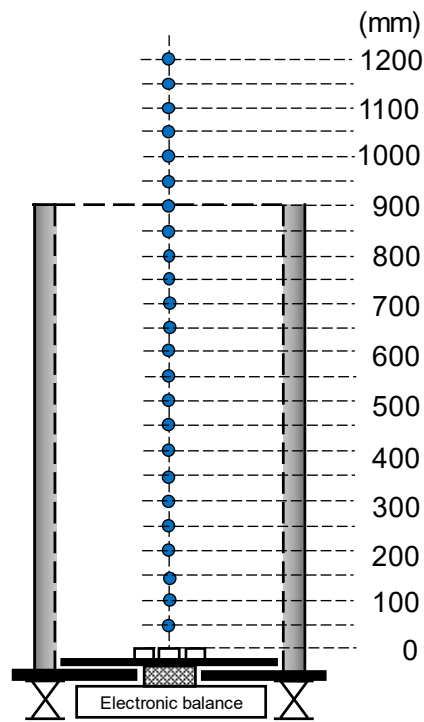


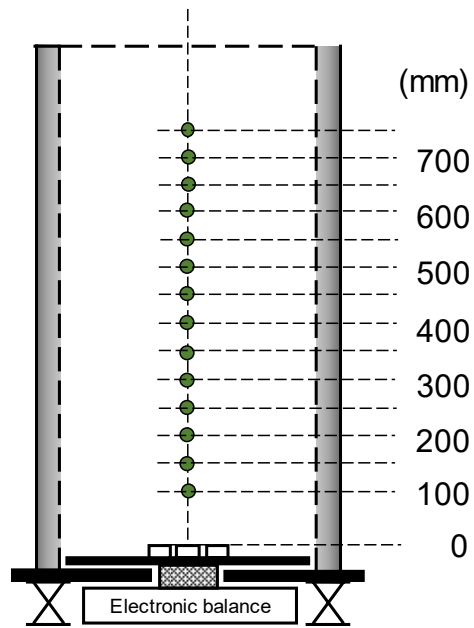
図 3-4 燃焼容器の配置

(D : 燃焼容器直径 [m], r : 実験装置中心から燃焼容器のまでの距離 [m],
 R : 実験装置半径 [m], S : 分離距離 [m])



● 熱電対 (K-type, 0.32φ)

図 3-5 熱電対の設置高さ



● 二方向管

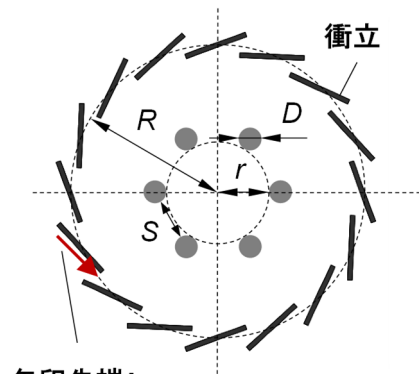
図 3-6 二方向管の設置高さ

3.3.4 実験装置開口部における接線方向速度

図 3-7 に示すように実験装置の衝立間の開口部における接線方向速度(v_s)は、衝立に対して図中の矢印の方向に流入する R 上の速度を熱線風速計(Testo, 435-4)で測定した。熱線風速計は、容器上端 50 mm から 750 mm の高さまで 50 mm 間隔で配置した。接線方向速度は、1 秒間隔で測定し、発熱速度の算出に用いた期間と同じ期間の平均値により算出した。

3.3.5 火炎形状及び火炎高さ

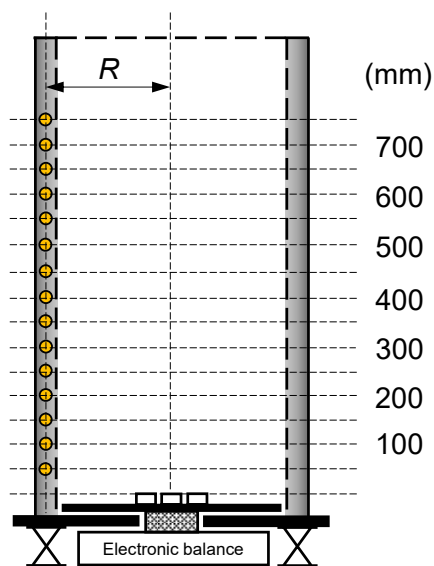
火炎形状及び平均火炎高さは、高速ビデオカメラ(Photron, FASTCAM Mini AX200)により 50 fps で実験を記録し、決定した。平均火炎高さは、発熱速度の算出に用いた期間内の連続した 6 秒間(300 コマ)の結果を平均して得た。



矢印先端：
接線方向速度の測定位置

図 3-7 熱線風速計の設置位置(矢印先端)

(D : 燃焼容器直径 [m], r : 実験装置中心から燃焼容器のまでの距離 [m],
 R : 実験装置半径 [m], S : 分離距離 [m])



● 熱線風速計

図 3-8 熱線風速計の設置高さ

3.4. 実験結果及び考察

3.4.1 火炎形状

図 3-9 に衝立角度(θ)に対する火炎形態の変化を示す。燃焼容器数(n)は 6, 4 及び 3 である。無次元化した火源間隔 S/D は、燃焼容器の分離距離と燃焼容器の内径の比である。比較のため、衝立のない場合、すなわち自由空間における結果も示した。

目視観察により融合した旋回火炎(MFW: Merging fire whirl), 融合した弱い旋回火炎(WMFW: Weak merging fire whirl), 融合火炎(MF: Merging fire)及び融合しない火炎(UM: Unmerging)の 4 つの形状に大きく分割できた。融合した旋回火炎は、いずれの n とも、 $\theta = 10$ 及び 20 deg.の小さい S/D において観察された。これらの融合した旋回火炎は、 S/D の増加にともなって融合した弱い旋回火炎を経て独立した火炎に移行した。この弱い融合火炎は、歳差運動を伴うことがあった。また、 $\theta = 45$ 及び 60 deg では、融合した旋回火炎は発生しなかった。 45 deg.の場合、小さい S/D において融合した弱い旋回火炎が観察された。融合した弱い旋回火炎は、 S/D の増加にともなって独立した火炎に移行した。 60 deg.の場合、衝立のない場合(自由燃焼)と同様に融合した火炎が小さい S/D において観察され、融合火炎は、 S/D の増加にともなって独立した火炎に移行した。以上のことから、融合した旋回火炎の発生条件は、 $\theta=10$ 及び 20 deg.の小さい S/D であることが明らかになった。

$n=6$ における $\theta=10$ 及び 20 deg.の場合には、融合した旋回火炎は $0 \leq S/D \leq 0.13$ の範囲で発生した。 $n=4$ における $\theta=10$ 及び 20 deg.の場合には、融合した旋回火炎はそれぞれ $0 \leq S/D \leq 0.04$ 及び $0 \leq S/D \leq 0.08$ の範囲で発生した。また、 $n=3$ における $\theta=10$ 及び 20 deg.の場合には、融合した旋回火炎はそれぞれ $S/D=0$ 及び $0 \leq S/D \leq 0.05$ の範囲で発生した。この結果は、 n の減少に伴って融合した旋回火炎の発生範囲が狭くなることを示している。

図 3-10 に衝立角度(θ)に対する定常状態における火炎の概観の変化を示す。燃焼容器数(n)は 6, 4 及び 3 である。この図には、各衝立角度における S/D の小さい場合の結果を示している。また、比較のため、衝立のない場合、すなわち自由空間における結果を示した。

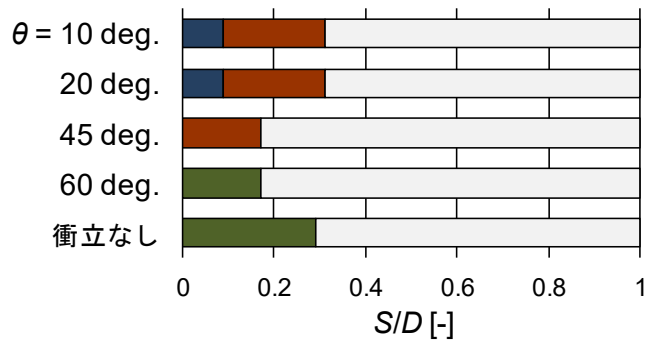
$n = 6$ の場合の火炎は、 $\theta = 10$ 及び 20 deg. では融合した旋回火炎、 $\theta = 45 \text{ deg.}$ では融合した弱い旋回火炎、 $\theta = 60 \text{ deg.}$ 及び自由空間では融合火炎をそれぞれ示している。 $\theta = 20 \text{ deg.}$ における融合した旋回火炎は、 10 deg. に比べて火炎基部から先端にかけて火炎の収束が強化され、細く長い火炎を形成した。 $\theta = 10$ 及び 20 deg. における融合した旋回火炎は、自由空間における融合火炎に比べて伸長していることが分かる。 $\theta = 45 \text{ deg.}$ の場合、 10 及び 20 deg. に比べて弱い旋回火炎を形成した。 $\theta = 60 \text{ deg.}$ の場合、自由空間の場合と同様に融合火炎を形成した。

$n = 4$ の場合の火炎は、 $\theta = 10$ 及び 20 deg. では、それぞれ $0 \leq S/D \leq 0.04$ 及び $0 \leq S/D \leq 0.08$ が融合した旋回火炎を示している。また、それぞれ $0.08 \leq S/D \leq 0.27$ 及び $S/D = 0.27$ が融合した弱い旋回火炎を示している。 $n = 6$ の場合の結果と同様に、 $\theta = 20 \text{ deg.}$ における融合した旋回火炎は、 10 deg. に比べて火炎基部から先端にかけて火炎の収束が強化され、細く長い火炎を形成した。 $\theta = 45 \text{ deg.}$ では、 $0 \leq S/D \leq 0.08$ が融合した弱い旋回火炎、 $S/D = 0.27$ が独立した火炎を示している。 $\theta = 60 \text{ deg.}$ の場合、自由空間の場合と同様に $0 \leq S/D \leq 0.08$ が融合火炎、 $S/D = 0.27$ が独立した火炎を示している。

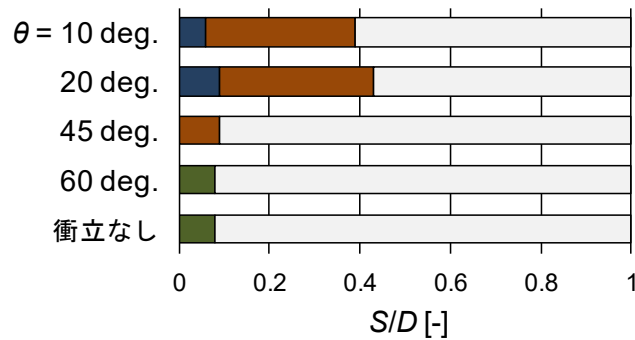
$n = 3$ の場合の火炎は、 $\theta = 10$ 及び 20 deg. では、それぞれ $S/D = 0$ 及び $0 \leq S/D \leq 0.05$ が融合した旋回火炎を示している。また、それぞれ $0.05 \leq S/D \leq 0.32$ 及び $0.09 \leq S/D \leq 0.32$ が融合した弱い旋回火炎を示している。 $n = 6$ 及び 4 の $\theta = 20 \text{ deg.}$ の場合に観察された細く長く伸びた融合した旋回火炎はあまり観察されず、 10 deg. の場合に比べて顕著な差は見られなかった。 $\theta = 45 \text{ deg.}$ では、 $0 \leq S/D \leq 0.05$ が融合した弱い旋回火炎、 $S/D = 0.09$ が独立した火炎を示している。 $\theta = 60 \text{ deg.}$ の場合、自

由空間の場合と同様に $0 \leq S/D \leq 0.09$ が融合火炎， $S/D = 0.32$ が独立した火炎を示している。

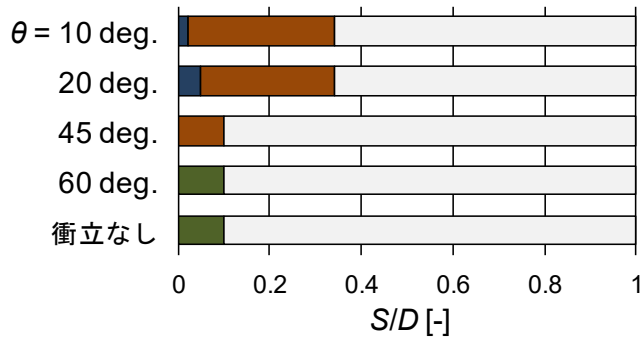
以上の結果から， $n=6$ 及び 4 の場合， $\theta=20 \text{ deg.}$ における融合した旋回火炎は， 顕著に火炎基部から先端にかけて火炎の収束が強化され， 細く長い火炎を形成することが明らかになった。 この火炎基部から先端にかけての火炎の収束の強化は， n の減少に伴って縮小した。



$n = 6$



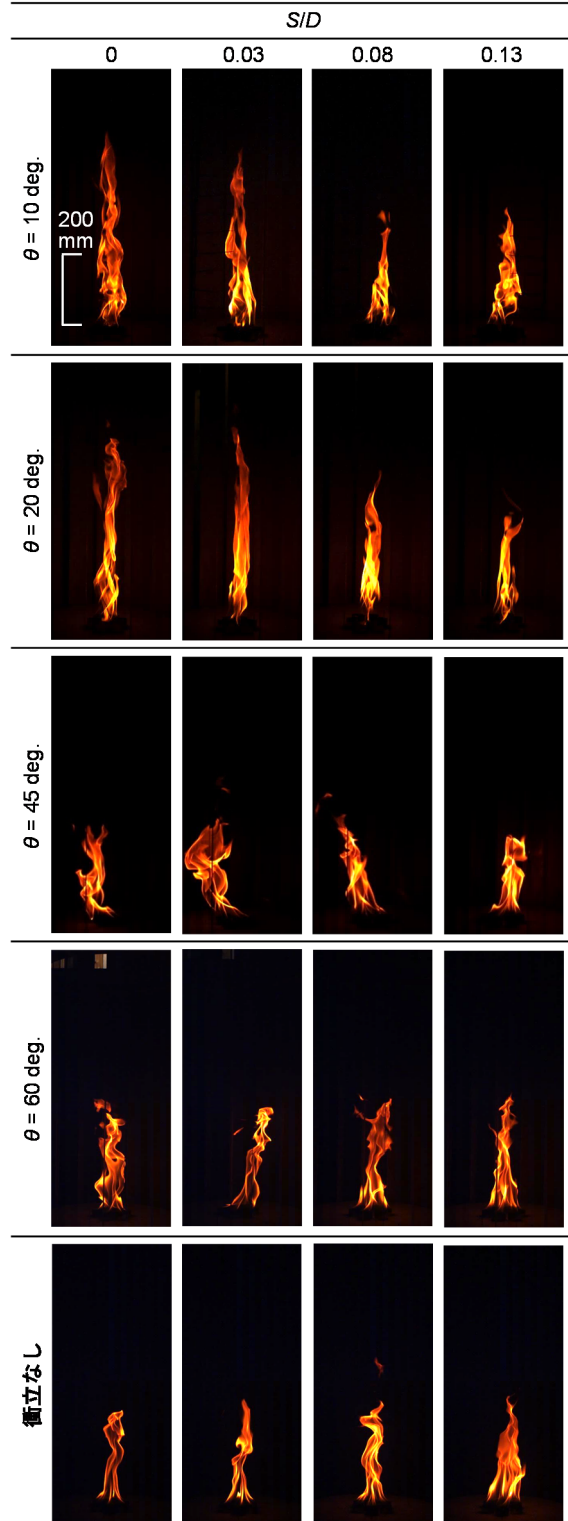
$n = 4$



$n = 3$

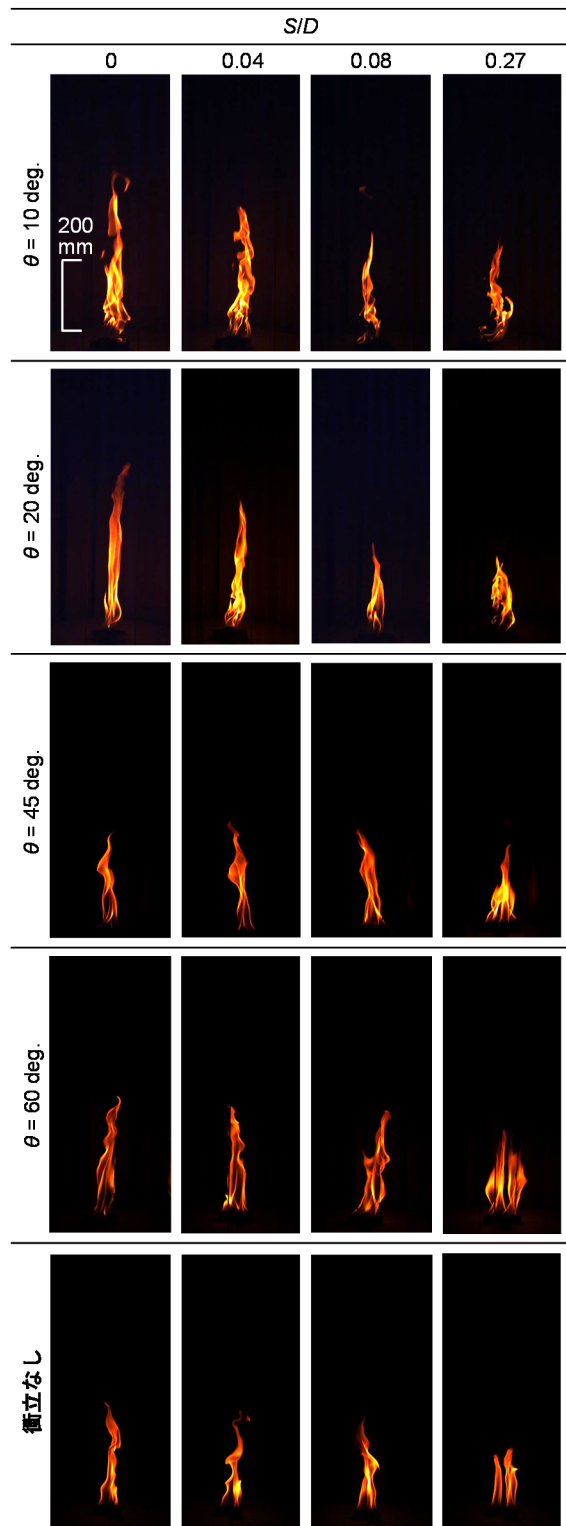
- : 融合した旋回火炎
- : 融合した弱い旋回火炎 (歳差運動)
- : 融合火炎 (歳差運動)
- : 独立火炎

図 3-9 融合した旋回火炎の発生範囲
 (D : 燃焼容器直径 [m], S : 分離距離 [m],
 θ : 衝突角度 [degree], n : 燃焼容器数 [個])



200 mm

$n = 6$



$n = 4$

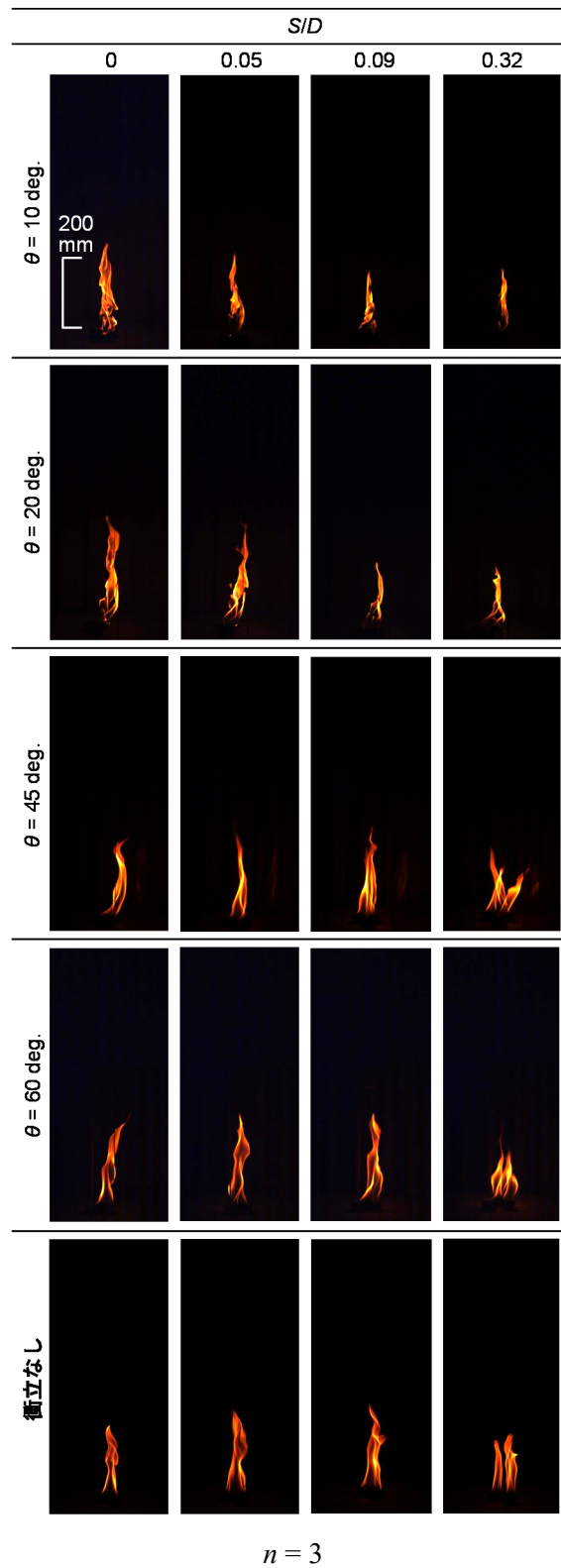


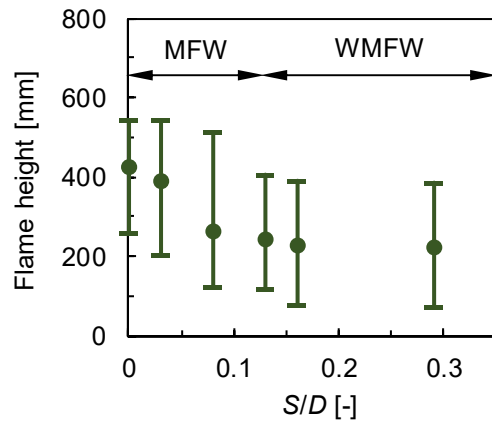
図 3-10 定常状態における火炎形状の代表例
 (D : 燃焼容器直径 [m], S : 分離距離 [m], θ : 衝立角度 [degree], n : 燃焼容器数[個])

3.4.2 火炎高さ

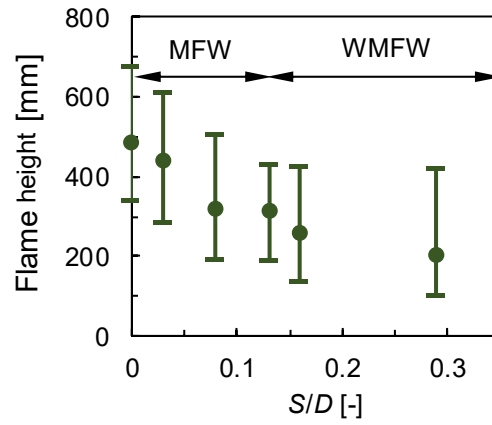
図 3-11 に融合した旋回火炎及び融合した弱い旋回火炎の観測された $\theta = 10, 20$ 及び 45 deg. において、 S/D と火炎高さとの関係を示す。図 3-11(a), (b) 及び (c) は、それぞれ $n = 6, 4$ 及び 3 の場合を示している。図中のドットは平均高さ、ひげの上端及び下端はそれぞれ火炎高さの最大値及び最小値を示している。

$n = 6$ 及び 4 における $\theta = 10$ 及び 20 deg. の場合、平均火炎高さはわずかな S/D の減少によって増大した。融合した旋回火炎は、 $S/D = 0$ (分離なし) において最も伸長し、 20 deg. の場合は 10 deg. に比べて高い結果となった。これは、融合した旋回火炎の形成において、 20 deg. では火炎同士の相互作用が強化されていることを示している。他方、 $n = 3$ の場合における 10 及び 20 deg. の場合、融合した旋回火炎と融合した弱い旋回火炎の平均火炎高さには、 $n = 6$ 及び 4 のような S/D による明瞭な差異がない。また、各 n における 45 deg. の場合の平均火炎高さは、ほぼ一定であり、 S/D に依存していない。

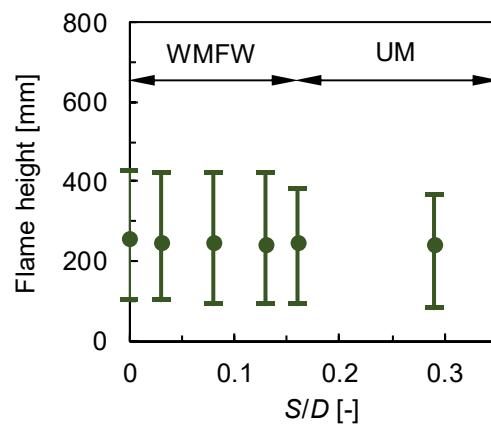
$n = 6$ の場合は、いずれの θ においても火炎高さの最大値と最小値との差が、 $n = 3$ の小さい場合に比べて大きく、火炎の伸縮が顕著である。火炎の伸縮は、 n に依存していることがわかる。



$\theta = 10$ deg.

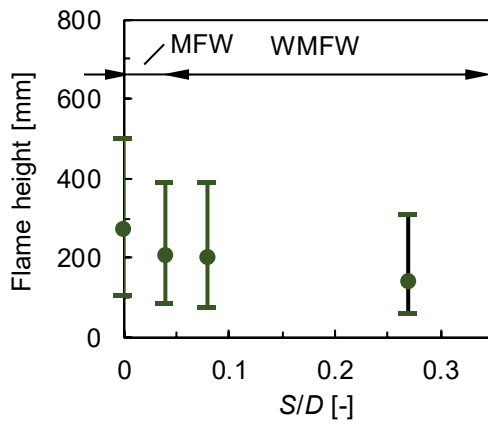


$\theta = 20$ deg.

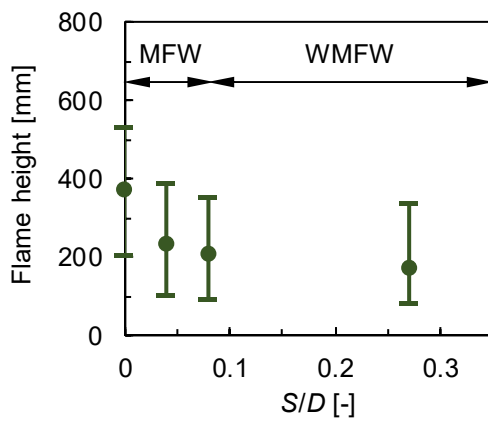


$\theta = 45$ deg.

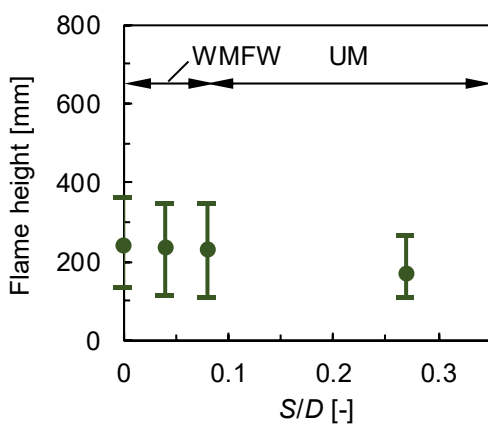
(a) $n = 6$



$\theta = 10$ deg.

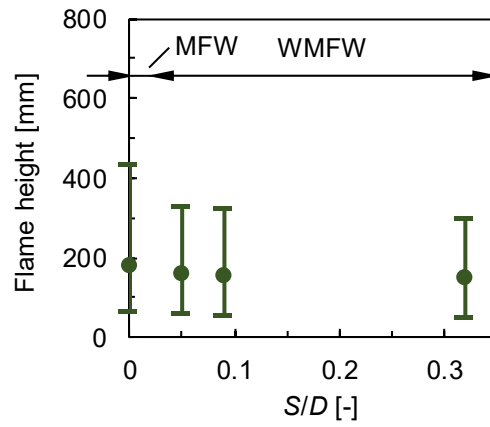


$\theta = 20$ deg.

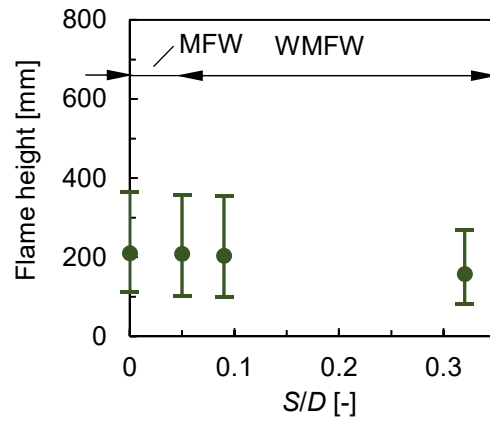


$\theta = 45$ deg.

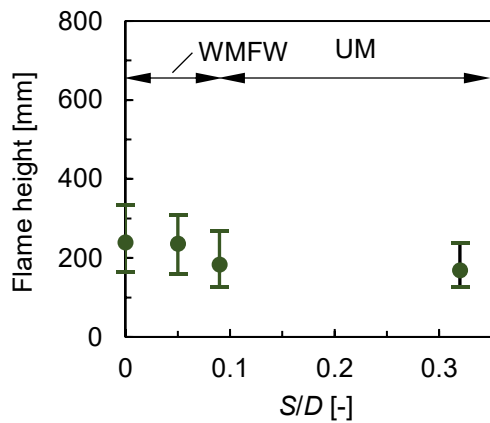
(b) $n = 4$



$\theta = 10$ deg.



$\theta = 20$ deg.



$\theta = 45$ deg.

(c) $n = 3$

図 3-11 S/D による火炎高さの変化

(D : 燃焼容器直径 [m], S : 分離距離 [m], θ : 衝立角度 [degree], n : 燃焼容器数[個])

3.4.3 融合した旋回火炎の上昇気流速度

図 3-12 は、実験装置中心軸における融合した旋回火炎の ΔT と上昇気流速度(u_m)との関係を示している。図には、代表例として $n = 6$, $\theta = 10$ deg. の場合における $S/D = 0, 0.03, 0.08$ 及び 0.13 の結果を示した。図中の線は、近似直線を示している。

$S/D = 0$ の場合、火炎は融合し旋回状態であり、 ΔT がほぼ一定の状態から u_m がほぼ一定の状態をほとんど経ずに減衰域に変遷していることがわかる。つまり、間歇火炎領域がほとんどないままにプリューム領域が形成されている。それ以外の S/D では旋回状態が緩和され、 u_m が一定の状態を経て u_m が減衰している。これは、融合した旋回火炎が連続火炎領域、間歇火炎領域及びプリューム領域を有することを示している。また、プリューム領域では、いずれの S/D においても u_m は、概ね $\Delta T^{1/2}$ に比例することがわかる。したがって、融合した旋回火炎においても、融合かつ伸長してもフルードモデルが適応でき、発熱速度は Q^* モデルを用いることができる。このダイアグラムを利用することで、間歇火炎領域とプリューム領域を分ける ΔT と高さを得ることができる。

図 3-12 に示したような整理手法によって 3 つの領域の変化を見ると、McCaffrey モデルの拡散火炎において認められた火炎中心軸に沿った ΔT と高さとの相似性¹⁾ は、 S/D が変化する融合した旋回火炎では認められない。この結果は、 $n = 4$ 及び 3 においても同様の性状が得られている。融合した旋回火炎では、この拡散火炎に比べて連続火炎領域の範囲が増加あるいは伸長し、間歇火炎領域の範囲が縮減している。極めて小さい S/D の場合に連続火炎領域が増加している傾向にあることから、分離距離の減少にともなって火炎同士の相互作用は強化されることが分かる。この強化は、水平方向の旋回流と上昇気流の慣性力の増幅をもたらしていると考えられる。

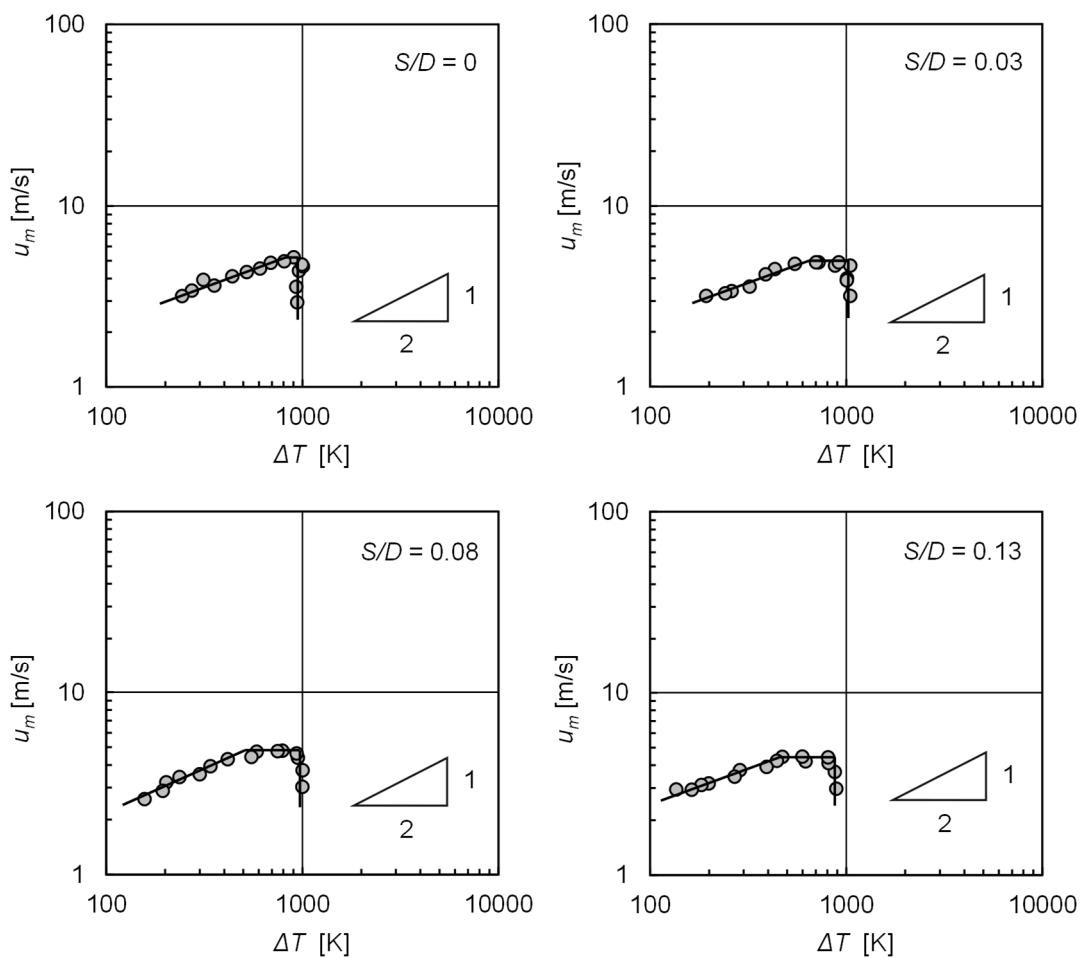


図 3-12 ΔT と実験装置中心軸に沿った上昇気流速度との関係 ($n = 6, \theta = 10 \text{ deg.}$)

(D : 燃焼容器直径 [m], S : 分離距離 [m], u_m : 上昇気流速度 [m/s],
 ΔT : 温度 [K], n : 燃焼容器数 [個])

3.4.4 融合した旋回火炎の火炎温度

図 3-13 から図 3-15 は、融合した旋回火炎及び融合した弱い旋回火炎の発生範囲における装置中心軸に沿った $z/\dot{Q}^{2/5}$ と ΔT の関係の結果を示している。この図は、浮力によって駆動される火炎の中心軸に沿った温度減衰の特性に基づいて整理した結果を示している。図 3-13、図 3-14 及び図 3-15 はそれぞれ $n = 6, 4$ 及び 3 の場合を示している。比較のため、McCaffrey¹⁾により報告されているモデルを併記した。McCaffrey モデルでは、 $\Delta T_0 = \text{一定}$ を連続火炎領域 ($z/\dot{Q}^{2/5} < 0.08$)、 $\Delta T_0 \propto z^{-1}$ を間歇火炎領域 ($0.08 < z/\dot{Q}^{2/5} < 0.2$) 及び $\Delta T_0 \propto z^{-5/3}$ をプリーム領域 ($0.2 < z/\dot{Q}^{2/5}$) として示している。

図 3-13 に示すように $n = 6$ の $\theta = 10$ 及び 20 deg. の場合、融合した旋回火炎の発生した範囲である $0 \leq S/D \leq 0.13$ では、McCaffrey モデルの拡散火炎において認められた火炎中心軸に沿った ΔT と z との相似性は、 S/D の変化に対して認められない。つまり、分離距離 (S) によって、連続火炎領域、間歇火炎領域及びプリーム領域の範囲が異なり、温度減衰が同一の曲線上に集まっていない。定性的ではあるが、 S/D の小さい場合には、連続火炎領域 ($\Delta T = \text{一定}$) が拡大し、間歇火炎領域 ($\Delta T \propto z^{-1}$) が縮減していることがわかる。この結果は、3.4.3 項で示した u_m と ΔT との関係を定量的に示した結果と一致している。 $\theta = 45 \text{ deg.}$ の場合、 10 及び 20 deg. に比較して ΔT が低下しているが、これは $\theta = 45 \text{ deg.}$ において融合した弱い旋回火炎に歳差運動が伴ったことに基づくものと考えられる。

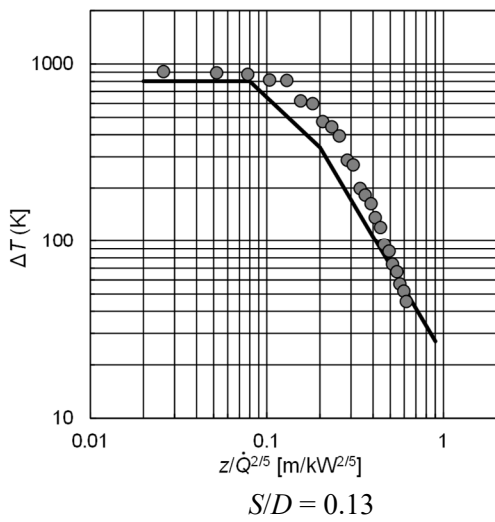
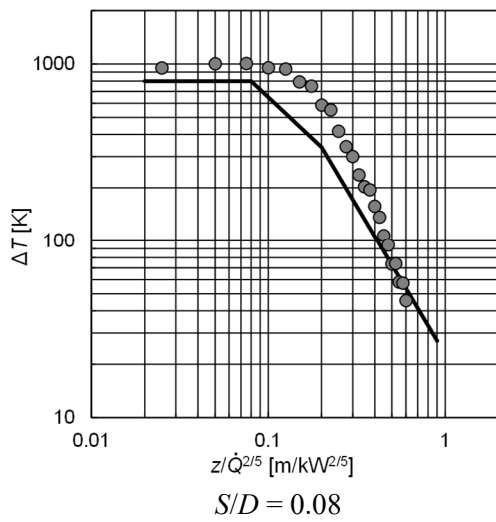
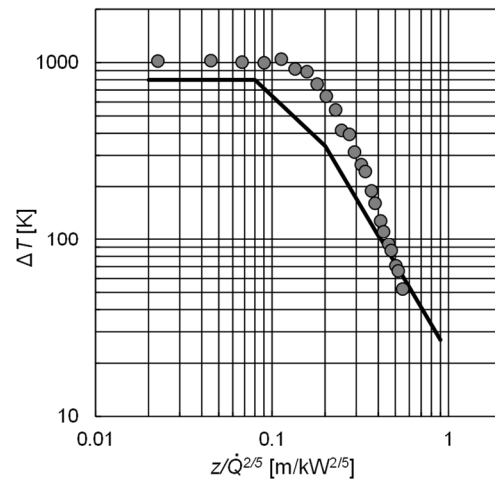
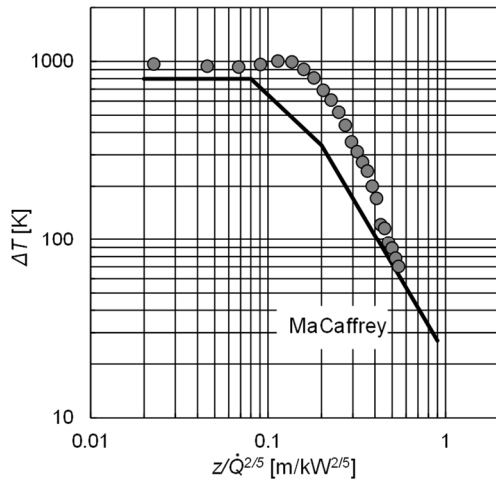
図 3-14 に示すように $n = 4$ の $\theta = 10$ 及び 20 deg. の場合、融合した旋回火炎の発生した範囲であるそれぞれ $0 \leq S/D \leq 0.04$ 及び $0 \leq S/D \leq 0.08$ では、McCaffrey モデルの拡散火炎において認められた火炎中心軸に沿った ΔT と z との相似性は、 S/D の変化に対して認められない。また、融合した弱い旋回火炎の発生範囲であるそれぞれ $0.08 \leq S/D \leq 0.27$ 及び $S/D = 0.27$ における ΔT は、融合した旋回火炎に比べ

て低下しているが、これは弱い旋回火炎に歳差運動が伴ったことに基づくものと考えられる。同様に $\theta=45\text{deg.}$ の場合、融合した弱い旋回火炎に歳差運動が伴ったことに起因して、 ΔT が低下していると考えられる。

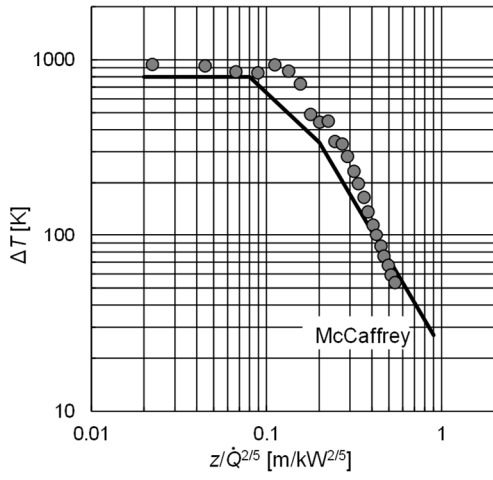
図 3-15 に示すように $n=3$ の $\theta=10$ の場合、 $S/D=0$ において融合した旋回火炎が発生しているが、火炎基部付近の ΔT に低下が見られる。これは、融合した旋回火炎に若干傾斜が加わった可能性が考えられる。他方、 $\theta=20$ の場合、 $0 \leq S/D \leq 0.05$ において融合した旋回火炎が発生しているが、この範囲では火炎基部付近の ΔT に歳差運動の影響は見られない。これは、 10 deg. の $S/D=0$ における火炎基部付近の ΔT の低下は、衝立角度の影響であることを示している。後述するように、 10 deg. の場合に、火炎基部付近で循環が大きい。 $n=3$ の発熱量は、 $n=6$ 及び 4 に比べて小さいために、循環の影響が大きくなり、傾斜が生じたものと考えられる。

$n=3$ の $\theta=20 \text{ deg.}$ の場合、融合した旋回火炎の発生した範囲である $0 \leq S/D \leq 0.05$ では、McCaffrey モデルの拡散火炎において認められた火炎中心軸に沿った ΔT と z との相似性は、 S/D の変化に対して認められない。また、 $n=3$ の $\theta=10$ 及び 20 deg. の場合、融合した弱い旋回火炎の発生範囲であるそれぞれ $0.05 \leq S/D \leq 0.32$ 及び $0.09 \leq S/D \leq 0.32$ における ΔT は、融合した旋回火炎に比べて低下しているが、これは弱い旋回火炎に歳差運動が伴ったことに基づくものと考えられる。同様に $\theta=45\text{deg.}$ の場合、融合した弱い旋回火炎に歳差運動が伴ったことに起因して、 ΔT が低下していると考えられる。

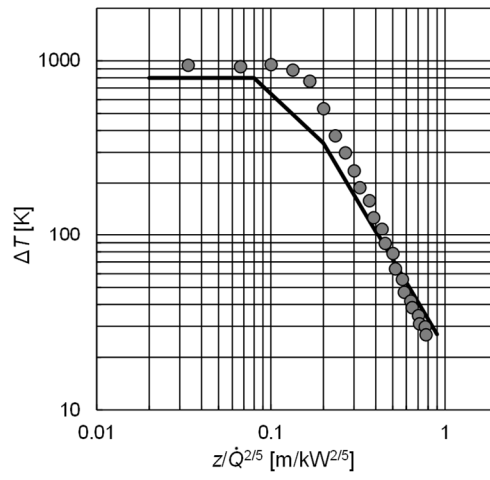
以上のことから、融合した旋回火炎では、McCaffrey モデルの拡散火炎において認められた火炎中心軸に沿った ΔT と高さとの相似性は、上昇速度と同様に実験装置中心軸に沿った温度減衰から見ても認められないことが明らかになった。したがって、融合した旋回火炎の火炎高さの推定は、従来の火炎高さを推定するモデルを用いることが困難である。



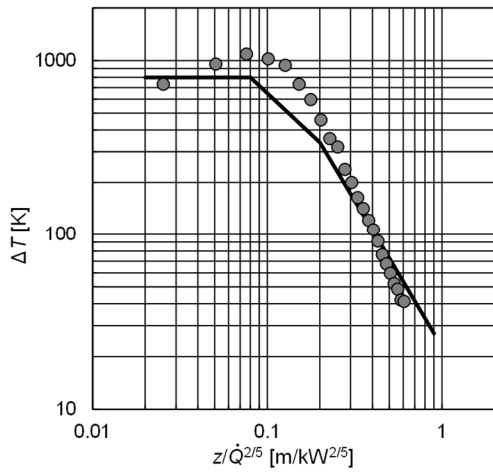
(a) $n = 6, \theta = 10$ deg.



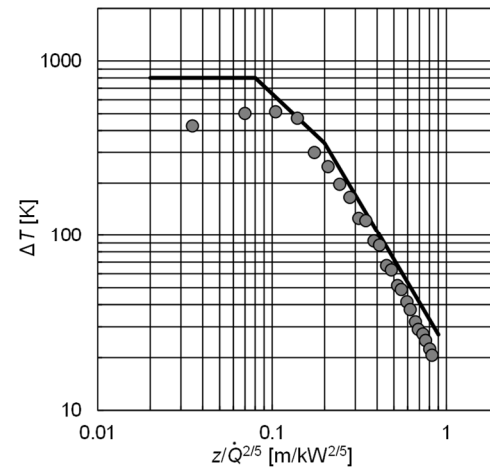
$S/D = 0$



$S/D = 0.03$

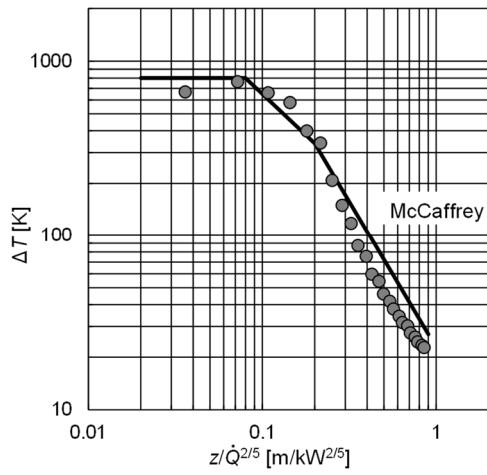


$S/D = 0.08$

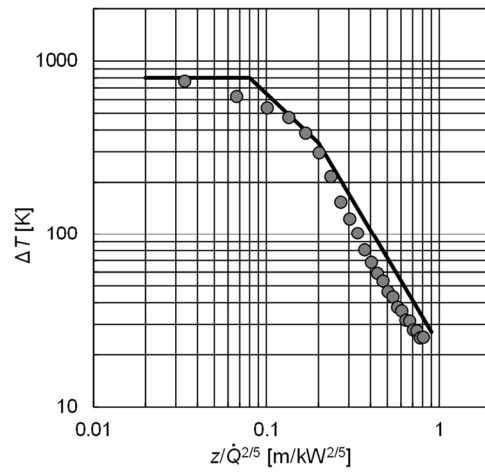


$S/D = 0.13$

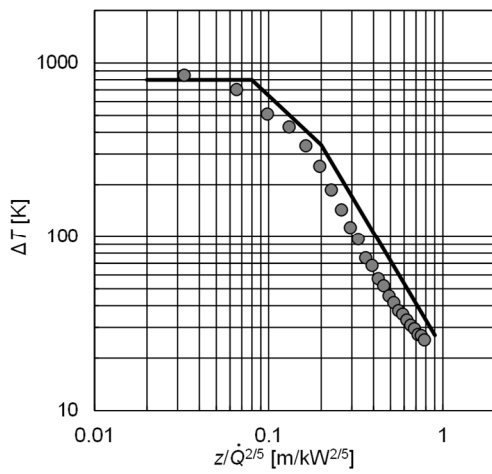
(b) $n = 6, \theta = 20$ deg.



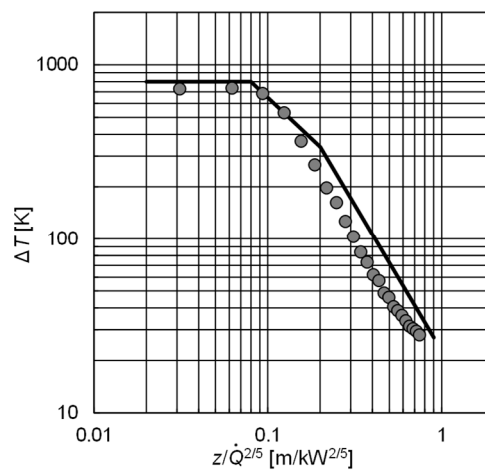
$S/D = 0$



$S/D = 0.03$



$S/D = 0.08$

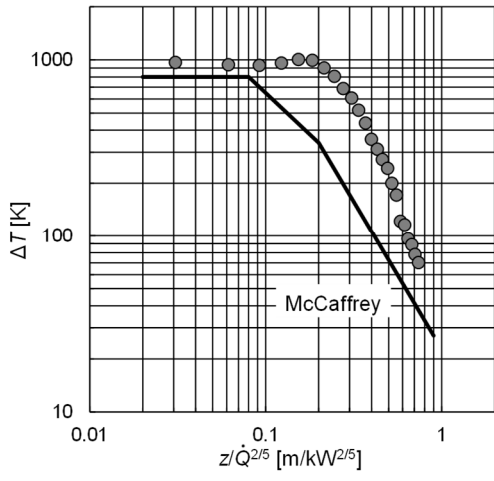


$S/D = 0.13$

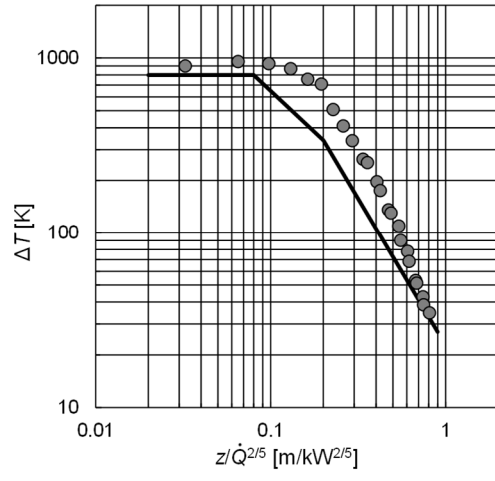
(c) $n = 6, \theta = 45 \text{ deg.}$

図 3-13 実験装置中心軸上の温度減衰 ($n = 6$)

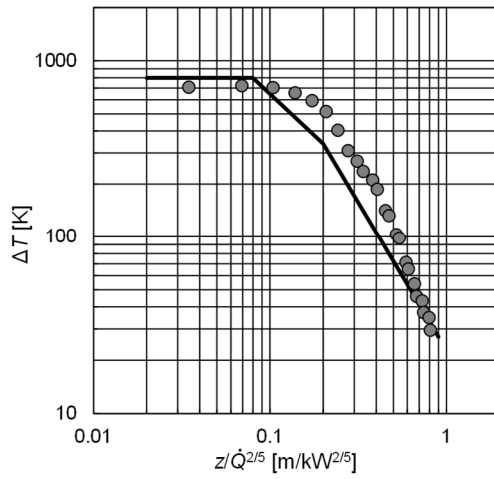
(z : 高さ [m], \dot{Q} : 発熱速度 [kW], S : 分離距離 [m], D : 燃焼容器径 [m], ΔT : 温度 [K], θ : 衝立角度 [degree])



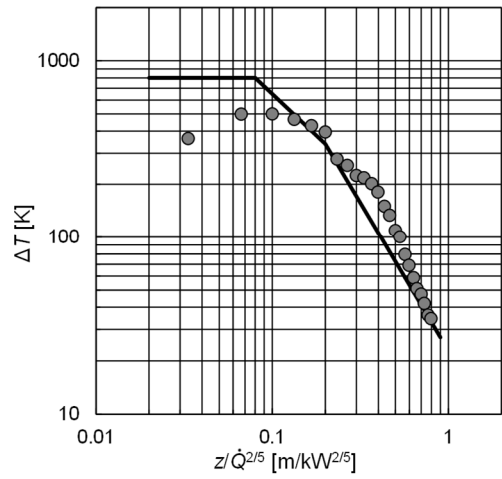
$S/D = 0$



$S/D = 0.04$

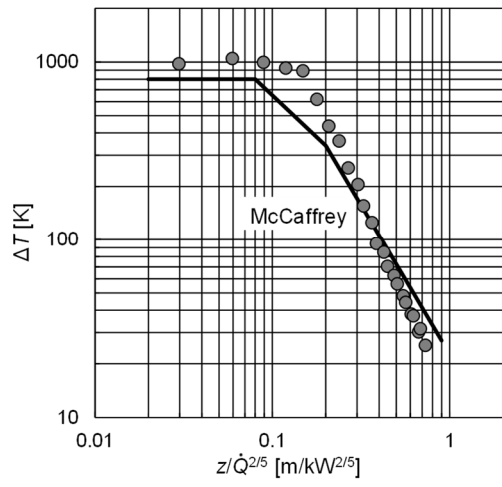


$S/D = 0.08$

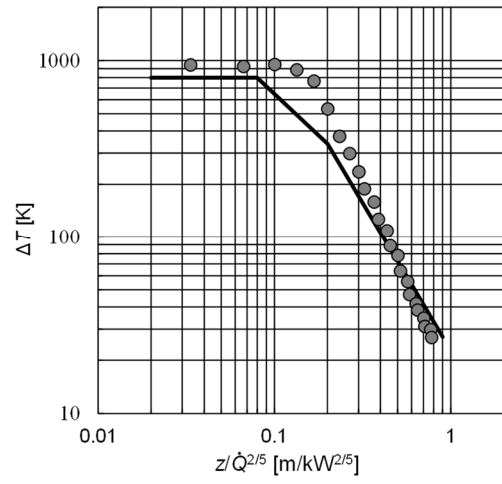


$S/D = 0.27$

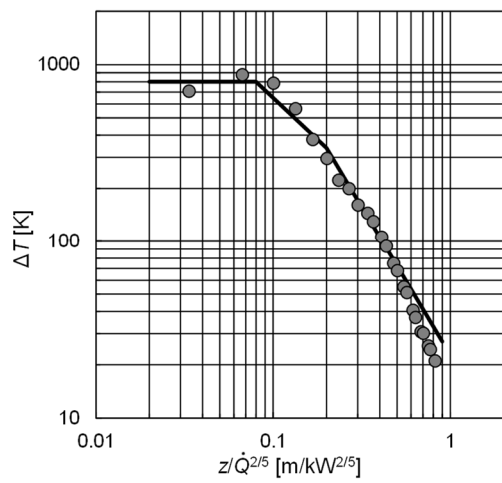
(a) $n = 4$, $\theta = 10$ deg.



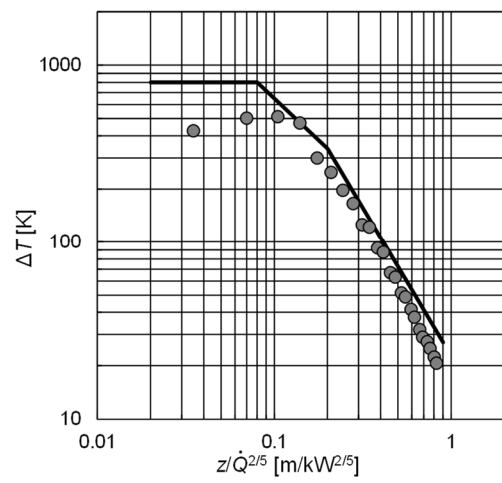
$S/D = 0$



$S/D = 0.04$

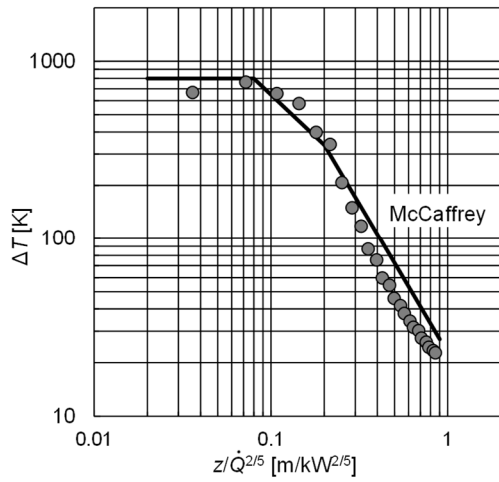


$S/D = 0.08$

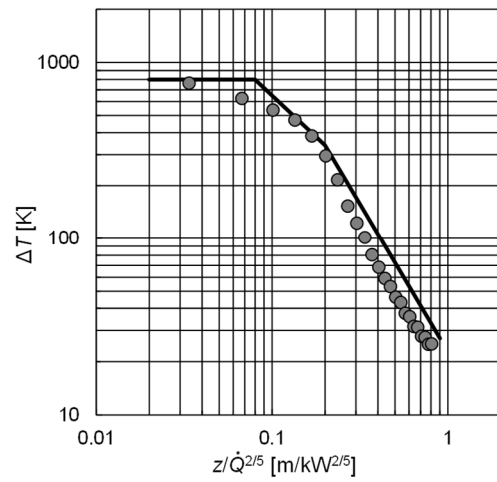


$S/D = 0.27$

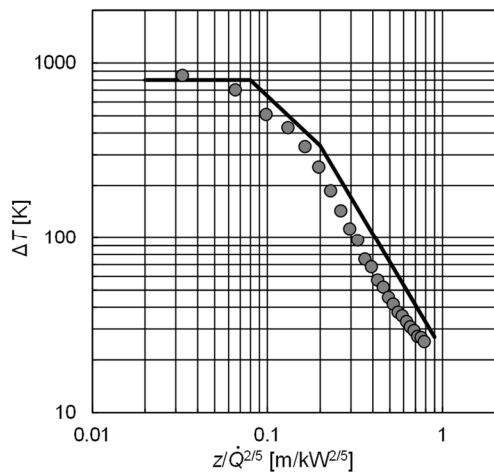
(b) $n = 4, \theta = 20$ deg.



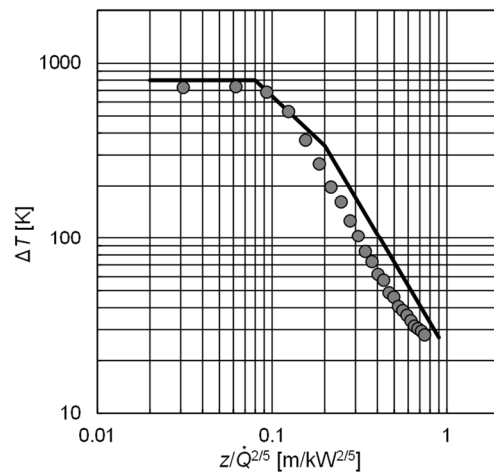
$S/D = 0$



$S/D = 0.04$



$S/D = 0.08$

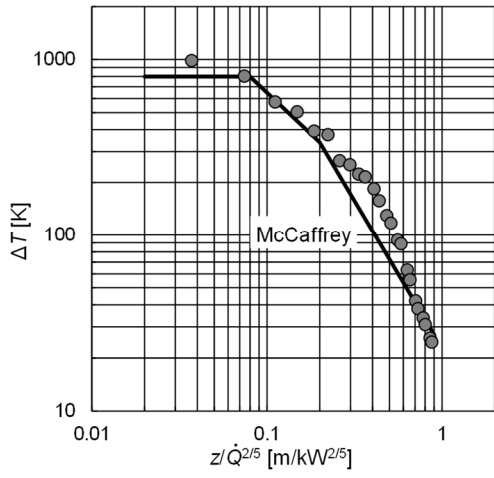


$S/D = 0.27$

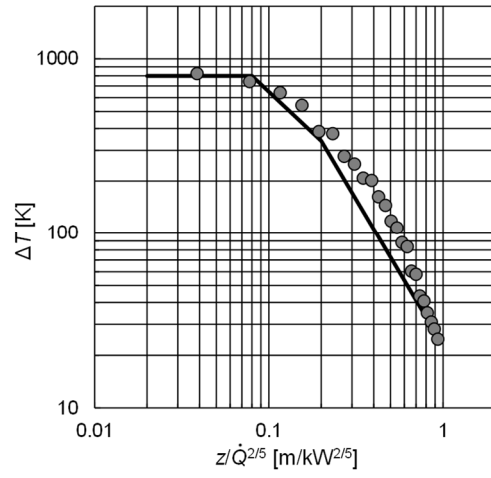
(c) $n = 4, \theta = 45 \text{ deg.}$

図 3-14 実験装置中心軸上の温度減衰 ($n = 4$)

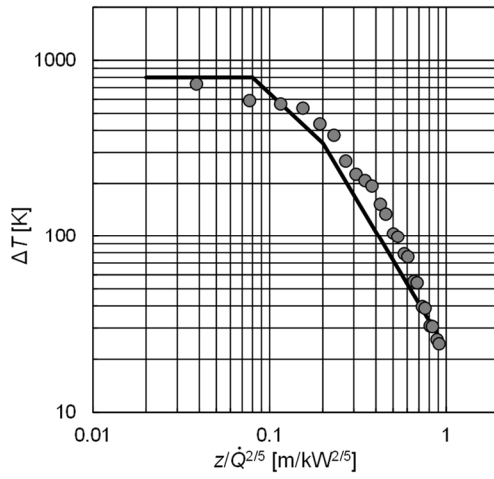
(z : 高さ [m], \dot{Q} : 発熱速度 [kW], S : 分離距離 [m], D : 燃焼容器径 [m],
 ΔT : 温度 [K], θ : 衝立角度 [degree])



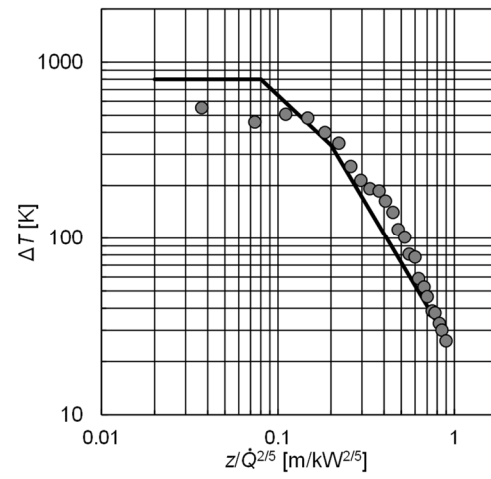
$S/D = 0$



$S/D = 0.05$

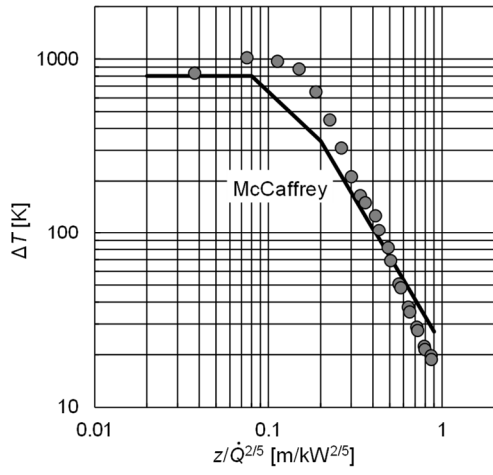


$S/D = 0.09$

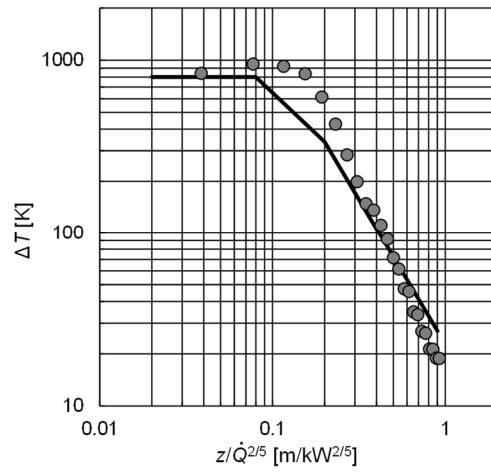


$S/D = 0.32$

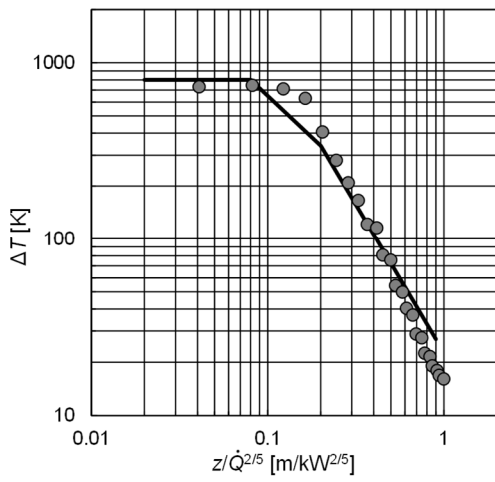
(a) $n = 3, \theta = 10$ deg.



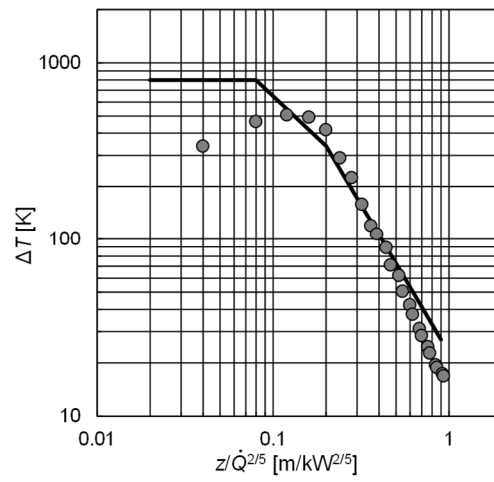
$S/D = 0$



$S/D = 0.05$

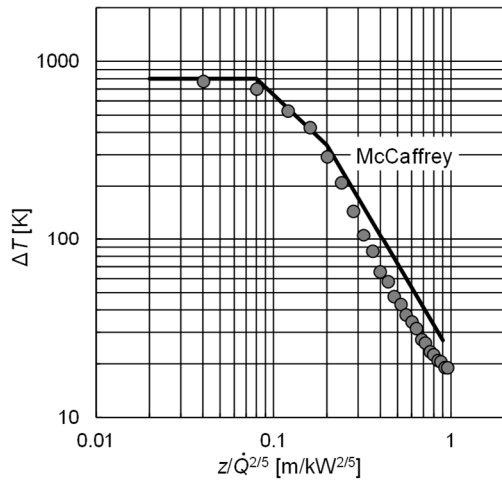


$S/D = 0.09$

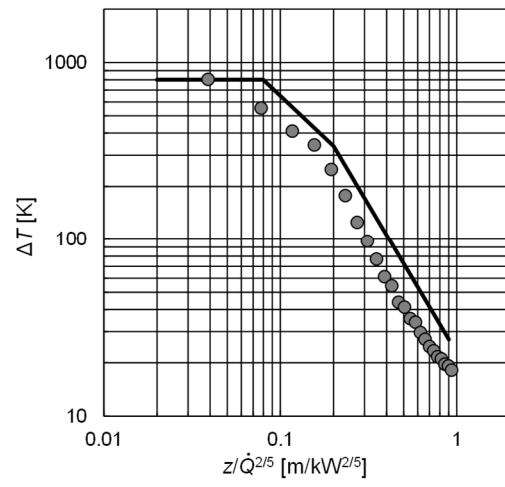


$S/D = 0.32$

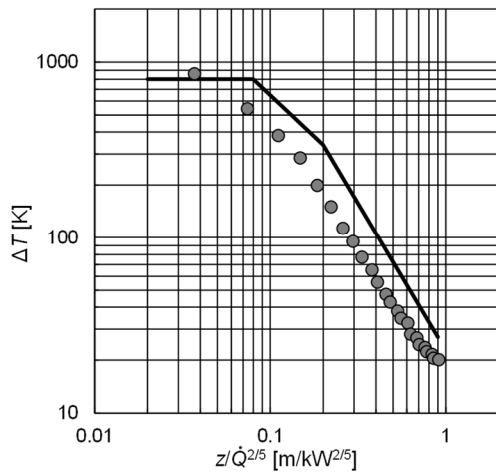
(b) $n = 3, \theta = 20$ deg.



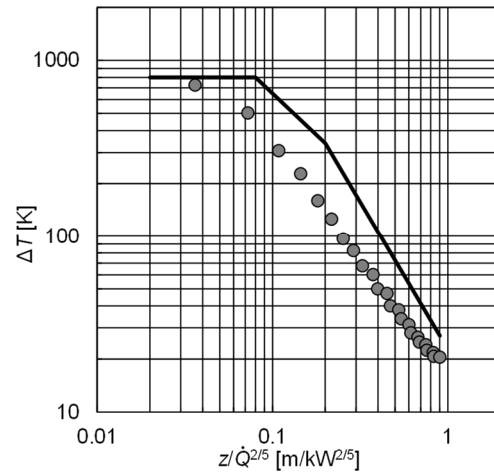
$S/D = 0$



$S/D = 0.05$



$S/D = 0.09$



$S/D = 0.32$

(c) $n = 3, \theta = 45 \text{ deg.}$

図 3-15 実験装置中心軸上の温度減衰 ($n = 3$)

(z : 高さ [m], \dot{Q} : 発熱速度 [kW], S : 分離距離 [m], D : 燃焼容器径 [m],
 ΔT : 温度 [K], θ : 衝突角度 [degree])

3.4.5 開口部における循環

循環(Γ)は、流れ場における旋回火炎の強さを示す指標として用いられている²⁾。任意の閉曲線(C)において、速度ベクトル(v)の C への接線方向の速度成分を v_s 、 C の微小要素ベクトルを ds とすると、循環は次式により表される。装置の半径(R)の円を積分経路として、旋回火炎が R の円周上を一定速度で運動していると仮定し、旋回火炎の循環は、測定した接線方向速度(v_s)の平均値に R の円周を乗じて算出した。

$$\Gamma = \oint_C \vec{v} \cdot \vec{ds} = \oint_C v_s ds \approx 2\pi R v_s \quad (3-1)$$

図3-16は融合した旋回火炎の発生機序に対する随伴空気の影響を調べるために、開口部における循環と高さとの関係を示している。図3-16に $\theta=10, 20$ 及び 45 deg.の場合を示す。

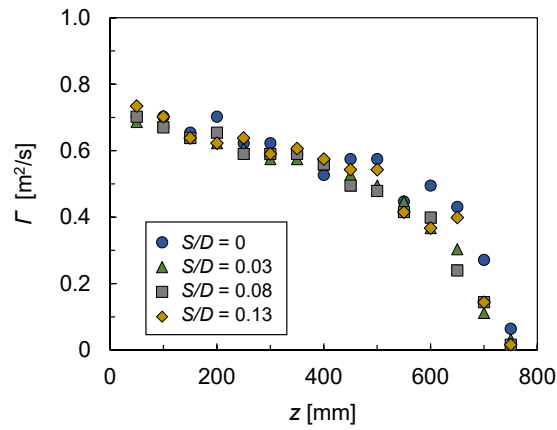
$n=6$ の場合、旋回流の発生に不可欠な火炎基部付近の循環は、開口部の小さい(θ の小さい)場合に大きな値が得られている。 $\theta=10$ deg.では、循環は火炎基部で増加し、火炎基部から離れると減少するが、 20 deg.では、循環は高さによる変動が小さい。これは3.4.1項で示した 10 deg.における融合した旋回火炎は、 20 deg.に比べて火炎基部から先端にかけての収束があまり維持できなくなっていることと一致する。 10 deg.の場合に、垂直方向の循環に勾配が生じた理由は、今後のさらなる研究で明らかにする必要がある。この垂直方向の循環に生じた勾配は、 $n=4$ 及び 3 の場合においても生じている。

$n=6, 45$ deg.の場合、 20 deg.に比較して循環の分散が大きいが、これは図3-10の $\theta=45$ deg.に示すように融合した弱い旋回火炎に歳差運動が伴ったことに基づくものと考えられる。他方、 $n=4$ 及び 3 の場合は、 $n=6$ の場合に比べて、循環の値

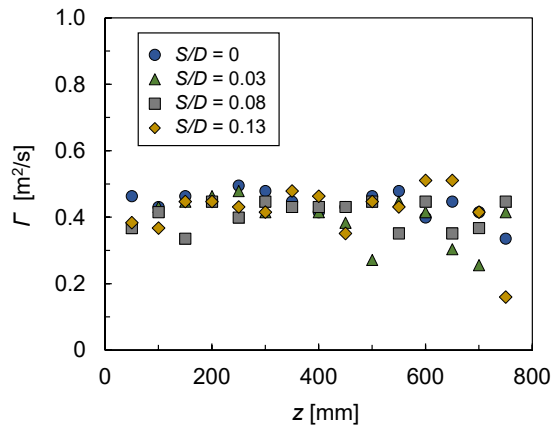
が全体的に小さくなる傾向が認められたが、 n の変化に伴う循環の値の傾向は似ている。

開口部を介した外気の総流入体積量を求めたところ、開口部における流入抵抗を受け、 $n = 6$ 、 $\theta = 10 \text{ deg.}$ の場合の総流入体積量は、最も少なく約 $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、この値は 20 deg. の場合の約 $1/2$ 、 45 deg. の場合の約 $1/3$ であった。

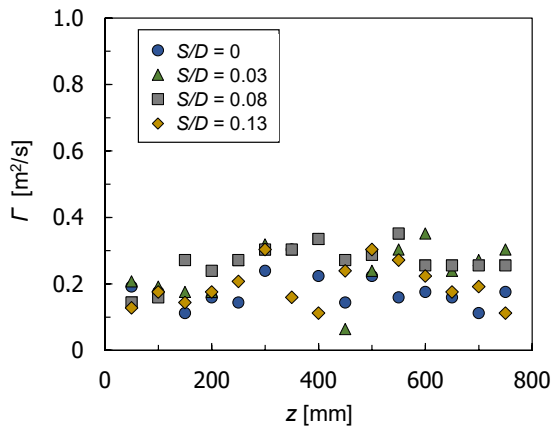
総流入体積量は、流入体積量に開口部数(16)を乗じて算出した値である。流入体積量は、接線方向速度をさらに算術平均して高さ方向の平均を求め、開口部の断面積を乗じて算出している。小さい開口部は、火炎に対して大きな循環を与えるが、流入体積量を制限する。この結果として、小さい開口部では火炎に大きな旋回流が与えられるとともに、火炎への外気供給が遅くなるために、燃焼の終結が遅れ、火炎は上方へ伸びると考えられる。また、 $\theta = 45 \text{ deg.}$ の場合、自由空間とほぼ同様な外気供給があるため、火炎高さの伸長はほとんど形成されないと考えられる。したがって、 10 及び 20 deg. の場合の融合した旋回火炎は燃料支配型、 45 deg. の場合の融合した弱い旋回火炎は換気支配型であり、両者を分ける角度は、今回用いた装置では、 20 deg. と 45 deg. との間にあると考えられる。



$\theta = 10 \text{ deg.}$

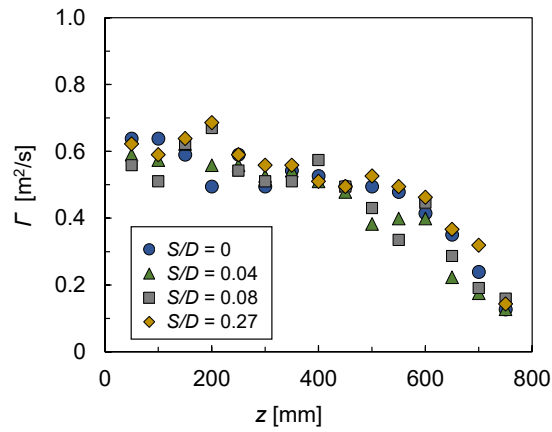


$\theta = 20 \text{ deg.}$

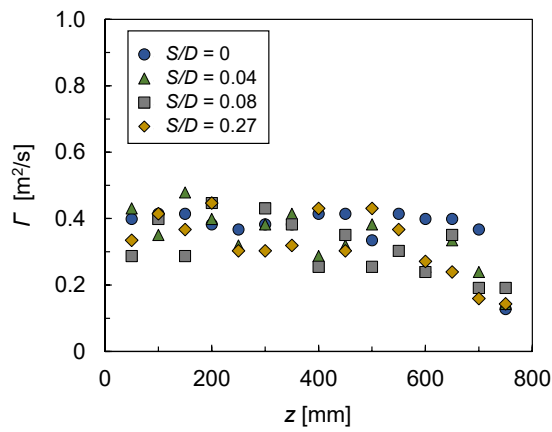


$\theta = 45 \text{ deg.}$

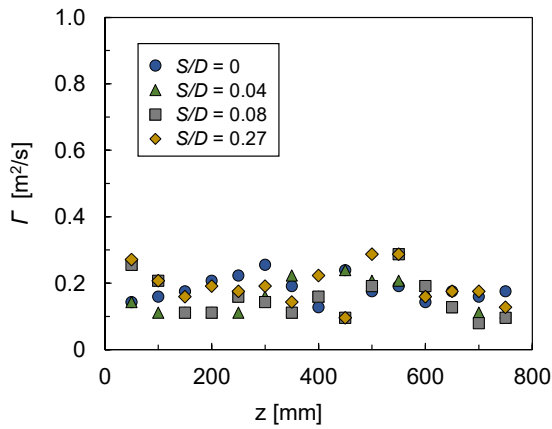
図 3-16 開口部における水平方向の循環 ($n = 6$)
 (z : 高さ [m], Γ : 循環 [m^2/s], D : 燃烧容器径 [m], S : 分離距離 [m],
 θ : 衝立角度 [degree], n : 燃烧容器数 [個])



$\theta = 10 \text{ deg.}$

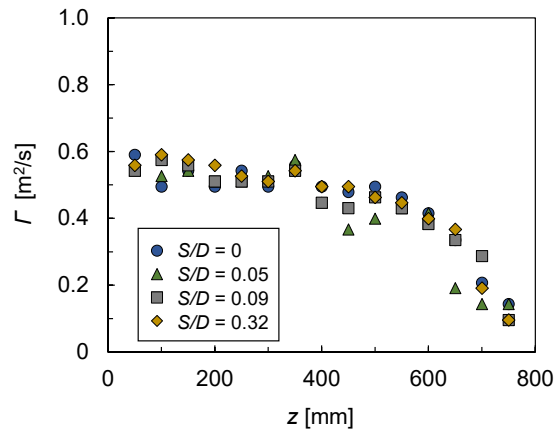


$\theta = 20 \text{ deg.}$

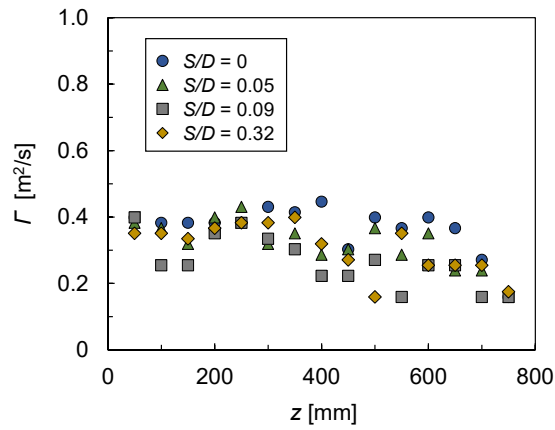


$\theta = 45 \text{ deg.}$

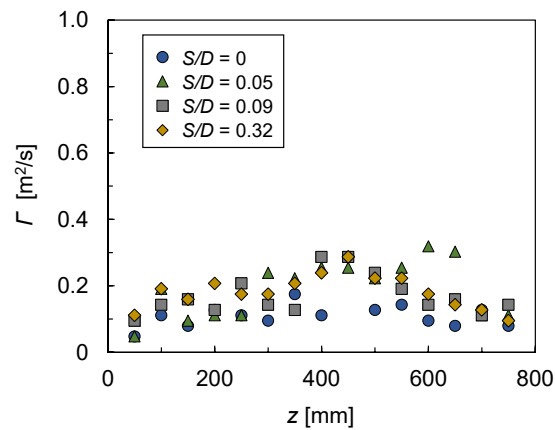
図 3-17 開口部における水平方向の循環 ($n = 4$)
 (z : 高さ [m], Γ : 循環 [m^2/s], D : 燃烧容器径 [m], S : 分離距離 [m],
 θ : 衝立角度 [degree], n : 燃烧容器数 [個])



$\theta = 10 \text{ deg.}$



$\theta = 20 \text{ deg.}$



$\theta = 45 \text{ deg.}$

図 3-18 開口部における水平方向の循環 ($n = 3$)
 (z : 高さ [m], Γ : 循環 [m^2/s], D : 燃烧容器径 [m], S : 分離距離 [m],
 θ : 衝立角度 [degree], n : 燃烧容器数 [個])

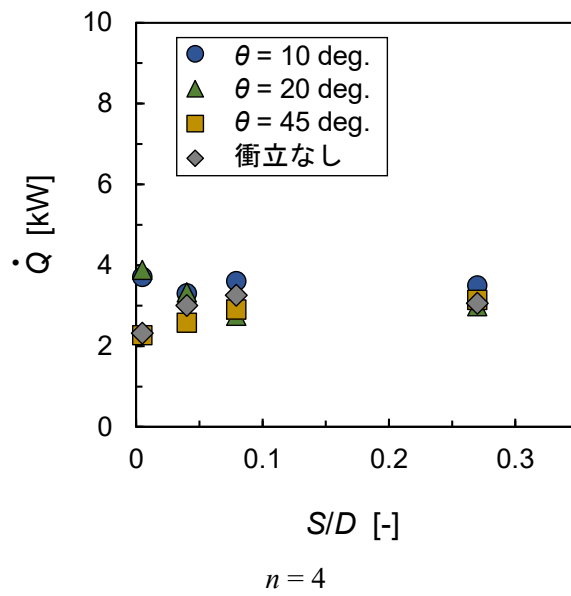
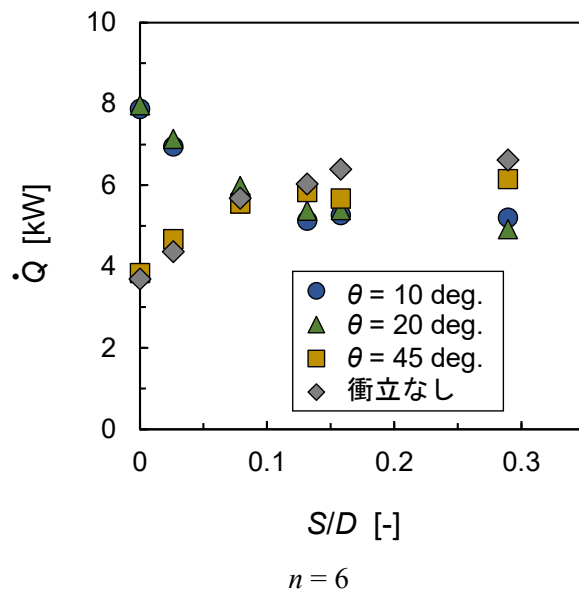
3.4.6 発熱速度

図 3-19 は、 $\theta = 10, 20$ 及び 45 deg. の場合における発熱速度を示している。比較のため、自由空間の場合の結果も示している。

発熱速度の変化は、いずれの n においても $\theta = 10, 20 \text{ deg.}$ と 45 deg. の 2 つのグループに分けられる。前者のグループの発熱速度は、 $S/D = 0$ において最大値となり、 S/D の増加とともに減少した。他方、後者のグループの発熱速度は、 $S/D = 0$ において最小値となり、 S/D の増加とともに増加した。この結果は、自由空間の場合における発熱速度の傾向と同じである。両者を分ける角度は、 20 deg. と 45 deg. との間にあると考えられる。 n の増加は、両者を分ける角度を明確化している。Kuwana ら²⁾は、単一火源(エタノール)かつ弱い循環下では、旋回火炎の火炎高さは循環でなく発熱速度に依存することを述べている。今回の実験結果も見かけ上、平均火炎高さは発熱速度に依存し、循環が依存していないように見える。しかし、融合した旋回火炎においては、循環に基づく随伴空気が火炎同士の相互作用に変化を与え、この変化が火炎高さに影響していると考えられる。

自由空間における複数火源の融合火炎の発熱速度について Sugawa ら^{3),4)}は、燃焼容器数の少ない場合、分離距離の増加に伴って見かけ上の発熱速度は減少することを報告している。他方、Liu ら⁵⁾は火源の多い場合、分離距離の増加に伴って発熱速度は増加することを報告している。すなわち、融合火炎の燃焼性状は、燃焼容器数によって異なる性状を示す。今回用いた装置では、融合した旋回火炎の発生する $\theta = 10, 20 \text{ deg.}$ では、燃焼容器数の少ない場合と同様に、分離距離の増加に伴って発熱速度は減少した。しかし、燃焼容器数の少ない場合と異なり、わずかな S/D の増加で著しく発熱速度は減少した。つまり、融合した旋回火炎の発生する $\theta = 10, 20 \text{ deg.}$ では、火源が密接していると、火炎の相互関係は強くなるとともに随伴空気は火炎に旋回流を与え、旋回火炎を伸長させる。他方、火源が分離していく

と、旋回流を与えていた随伴空気は火源と火源との間に流入し、火炎の融合を急激に妨げる。この結果、 $0 \leq S/D \leq 0.1$ においては、わずかな S/D の増加によって平均火炎高さ及び発熱速度が減衰する。したがって、融合した旋回火炎の形成の複雑性は、随伴空気による燃焼の促進と火源間への流れ込みの強化の競合によって生じる影響が大きいと考えられる。



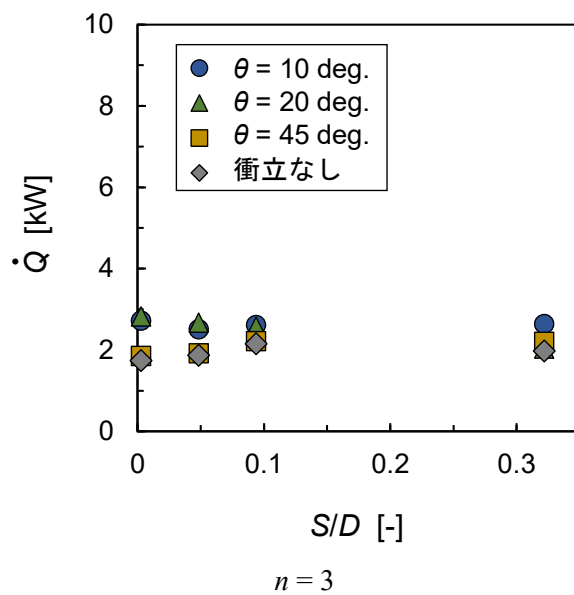


図 3-19 発熱速度

(\dot{Q} : 発熱速度 [kW], D : 燃焼容器径 [m], S : 分離距離 [m],
 θ : 衝立角度 [degree], n : 燃焼容器数 [個])

3.4.7 火炎高さの計算モデル

図 3-20 は、無次元発熱速度(Q^*)と平均火炎高さ(L_m)との関係を示している。この図には、 $n=6, 4$ 及び 3 の場合について、融合した旋回火炎及び融合した弱い旋回火炎が発生した場合の平均火炎高さをプロットしている。換気支配型と考えられる $\theta = 45 \text{ deg}$ では融合した弱い旋回火炎が起きているが、燃料支配型と考えられる 10 及び 20 deg . とは性状が異なるため、図中には含めていない。

無次元発熱速度(Q^*)⁶⁾は、(3-2)式を火源の代表径(D_m)として、(3-3)式より得た。今回の実験における火源の代表径(D_m)については、複数の円形の燃焼容器を軸対称に配置し、分離距離(S)が容器径以下の範囲であることから、離合集散する火源を火源面として想定した。この際、複数の容器内の燃料のそれぞれが同じ発熱速度をもつとした。分離距離(S)が容器径以下の範囲としたことは、実験の結果から分離距離が燃焼容器径の $1/3$ 程度に至ると融合した旋回火炎及び融合した弱い旋回火炎が発生しなくなることが得られているためである。すなわち、今回の火源の代表径では、分離距離が無限に大きくなることを想定していない。したがって、火源の代表径は、図 3-21 に示すように分離距離のない($S=0$)場合及び分離距離のある(融合した旋回火炎及び融合した弱い旋回火炎の発生する分離距離)場合を考慮し、両者の D 、 n 及び S の関係を再現できる(3-2)式を火源の代表径として想定した。

$$D_m = nD(S/D + 1) \quad (3-2)$$

$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{c_p \rho_0 T_0 \sqrt{g} D_m^{5/2}} \approx \frac{\dot{Q}}{1116 D_m^{5/2}} \quad (3-3)$$

ここで、

c_p : 定圧比熱 [kJ/kgK]

D_m : 火源の代表径 [m]

g : 重力加速度 [m/s²]

\dot{Q} : 発熱速度 [kW]

T_0 : 空気温度 [K]

ρ_0 : 空気密度 [kg/m³]

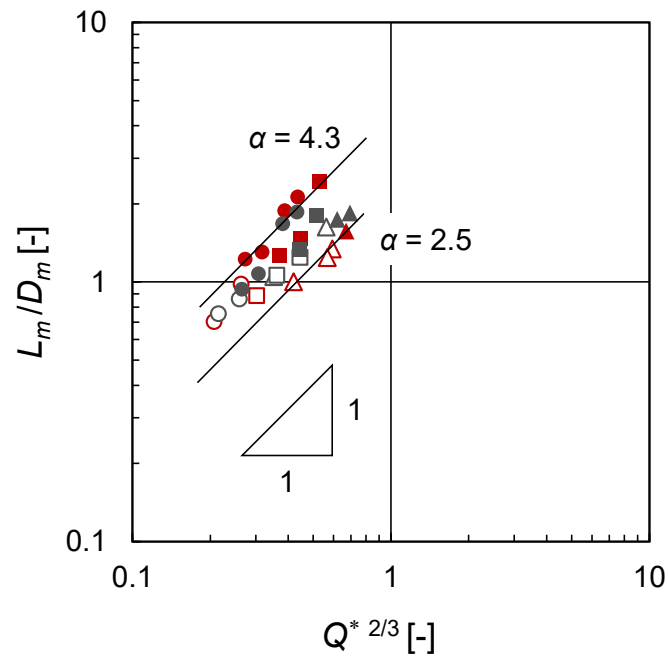
条件によってばらつきがあるが、図 3-20 の 2 つの実線に示すように、 L_m/D_m は $Q^{*2/3}$ に比例することが分かった。この結果から、融合した旋回火炎の平均火炎高さは(3-4)式のモデルによって予測可能である。

$$L_m = \alpha Q^{*2/3} D_m \quad (0.1 \leq Q^* \leq 0.6) \quad (3-4)$$

$$\alpha = 2.5 - 4.3 \quad (3-5)$$

(3-2)式を火源の代表径に用いた場合、 α の値を 2.5-4.3 の範囲でとることで、平均火炎高さの実測と計算とは概ね一致する。この式の適用範囲は取得した実験データの範囲であり、 $0.1 \leq Q^* \leq 0.6$ である。図 3-20 の融合した旋回火炎及び融合した弱い旋回火炎のプロットの結果から見て、融合した旋回火炎の場合は $\alpha = 4.3$ 、融合した弱い旋回火炎の場合は $\alpha = 2.5$ をとることで、これらの平均火炎高さを算出することができる。これは、平均火炎高さの推計において、燃焼容器の数を考慮することなく、算出できることを示している。

一般的に火炎高さは線状火源の場合は、 $Q^{*2/3}$ に比例⁷⁾し、円形及び平方火源の場合 $Q^{*2/5}$ に比例⁸⁾すること実験的に得られている。本実験のように離散的な円形の配置である無次元発熱速度は、線状火源と同様な性状を示した。円周上に設置した火源は円火源と見なすこともできるが、火炎を発生する面が、離隔 S を有して集合離散する配置を採るために、線状火源の性質を有している考えられる。主たる随伴空気は火炎(円周上)の内外からであり、互いに独立して火炎に巻き込まれるので、線状火源の性質が現れたものと考えられる。



●: $n = 6, \theta = 10 \text{ deg.}, \text{MFW}$	○: $n = 6, \theta = 10 \text{ deg.}, \text{WMFW}$
●: $n = 6, \theta = 20 \text{ deg.}, \text{MFW}$	○: $n = 6, \theta = 20 \text{ deg.}, \text{WMFW}$
■: $n = 4, \theta = 10 \text{ deg.}, \text{MFW}$	□: $n = 4, \theta = 10 \text{ deg.}, \text{WMFW}$
■: $n = 4, \theta = 20 \text{ deg.}, \text{MFW}$	□: $n = 4, \theta = 20 \text{ deg.}, \text{WMFW}$
▲: $n = 3, \theta = 10 \text{ deg.}, \text{MFW}$	△: $n = 3, \theta = 10 \text{ deg.}, \text{WMFW}$
▲: $n = 3, \theta = 20 \text{ deg.}, \text{MFW}$	△: $n = 3, \theta = 20 \text{ deg.}, \text{WMFW}$

図 3-20 融合した旋回火炎及び融合した弱い旋回火炎の無次元発熱速と無次元融合旋回火炎高さとの関係 ($\theta = 10, 20 \text{ deg.}$)

(Q^* : 無次元発熱速度 [-], L_m : 平均火炎高さ [m], D_m : 火源の代表径 [m],
 n : 燃烧容器数 [個], θ : 衝立角度 [degree], MFW: 融合した旋回火炎,
 WMFW: 融合した弱い旋回火炎)

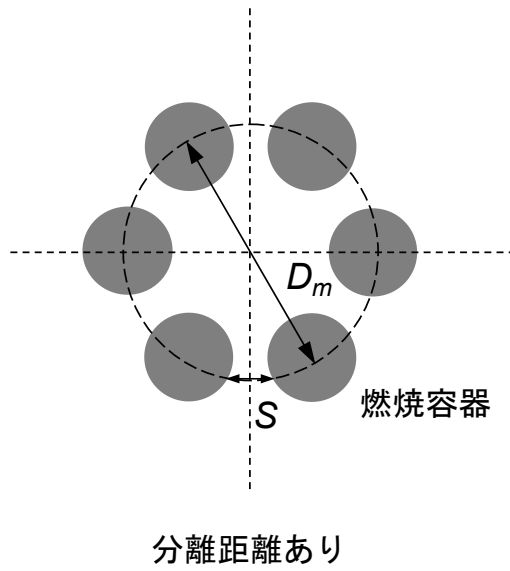
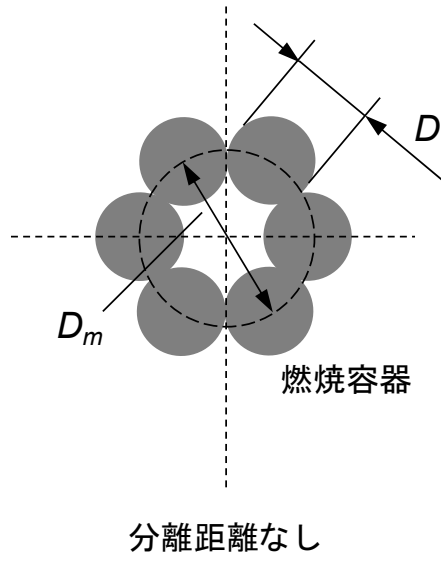


図 3-21 火源の代表径の設定

(S : 分離距離 [m], D : 燃焼容器径 [m], D_m : 火源の代表径 [m])

3.5. 結言

本章では、円周に沿って軸対称に複数個の火源を配置した場合に発生する融合した旋回火炎の燃焼性状を調べ、融合した旋回火炎の発生条件を明確にするとともに火炎高さを推定するモデルを開発した。本章における検討の結果は、以下のようまとめられる。

- (1) 融合した旋回火炎は、 $\theta = 10$ 及び 20 deg. の小さい開口部設定で、小さい S/D において発生した。 $\theta = 45$ では融合した弱い旋回火炎が発生したが、 $\theta = 60 \text{ deg.}$ では、融合した旋回火炎及び融合した弱い旋回火炎とも発生しなかった。
- (2) $\theta = 20 \text{ deg.}$ の場合に火炎同士の相互作用が最も強化され、 $S/D = 0$ において融合した旋回火炎の高さは最も伸長した。
- (3) 融合した旋回火炎では、McCaffrey モデルの拡散火炎に比べて連続火炎領域の範囲が増加し、間歇火炎領域の範囲が縮減した。プルーム領域における減衰は McCaffrey モデルの拡散火炎に比べて速い。
- (4) $\theta = 10$ 及び 20 deg. では、火炎に大きな旋回流が与えられるとともに火炎への外気供給が遅くなるために、火炎は上方へ伸びた。
- (5) $\theta = 10$ 及び 20 deg. における発熱速度は、 $S/D = 0$ において最大値となり、 S/D の増加とともに減少した。他方、 $\theta = 45 \text{ deg.}$ における発熱速度は、自由空間と同様に $S/D = 0$ において最小値となり、 S/D の増加とともに増加した。
- (6) 無次元融合旋回火炎高さ (L_m/D_m) は、 $Q^{*2/3}$ に比例することが明らかになった。
- (7) 平均火炎高さ (L_m) を計算することが可能になった。

参考文献

- 1) McCaffrey, B. J.: "Purely buoyant diffusion flames: some experimental results," NBSIR 79-1910, 1979.
- 2) Kuwana, K., Morishita, S., Dobashi, R., Chuah, K. H., Saito, K.: "The burning rate's effect on the flame length of weak fire whirls", Proc. Combust. Inst., 33 (2), pp. 2425 - 2432, 2011.
- 3) Sugawa, O., Takahashi, W.: "Flame height behavior from multi-fire sources", Fire and Materials, 17, pp. 111 - 117, 1993.
- 4) Sugawa, O., Oka, Y.: "Experimental study on flame merging behavior from 2 by 3 configuration model fire sources", Fire Safety Science, 7, pp. 891 - 902, 2003.
- 5) Liu, N., Liu, Q., Lozano, J. S., Shu, L., Zhang, L., Zhu, J., Deng, Z., Satoh, K.: "Global burning rate of square fire arrays: experimental correlation and interpretation", Proc. Combust. Inst. 32 (2), pp. 2519 - 2526, 2009.
- 6) 原田和典: "建築火災のメカニズムと火災安全設計", 日本建築センター, pp. 34 -44, 2007.
- 7) Sugawa, O., Takahashi, W.: "Flame height behavior from multi-fire sources", Fire and Materials, 17, pp. 111-117, 1993.
- 8) Cox, G., Chitty, R.: "A study of the deterministic properties of unbounded fire plumes", Combustion and Flame, 39 (2), pp. 191 - 209, 1980.

第4章

融合した旋回火炎の性状を利用した排煙手法の提案

4.1. アトリウムを対象としたケーススタディ

第3章では、融合した旋回火炎は細く長く伸び、その平均火炎高さは最大で融合火炎の約1.6倍の高さになる性状をもつことを明らかにした。また、融合した旋回火炎は、McCaffreyモデルの拡散火炎に比べて、プルーム領域における温度減衰が速いことを明らかにした。アトリウム・モールのような大規模空間で複数同時火災による融合火炎の発生を想定した場合、融合した旋回火炎のこれらの性状を利用することで排煙を効果的に行うことができる可能性がある。すなわち、複数同時火災が発生した場合、火源群の火炎を中央に集めて融合させ、旋回を生じさせることで、建物躯体への熱的ダメージを抑えながら自然に熱気流を大規模空間上方に設置した排煙口から屋外に排出することができる可能性がある。

このような排煙が可能になれば、大規模空間内における熱気流の降下時間を遅らせることができ、在館者の避難時間及び消防隊の到着までの時間の確保が図れるものと考えられる。従来の排煙設備と併用すれば、より高い効果が期待できるであろう。そこで、本章ではアトリウム・モールの火災安全対策に寄与するものとして、本研究成果を活用した排煙手法の提案をケーススタディに検討を行う。具体的には、第3章で示した融合した旋回火炎の平均火炎高さのモデル式を活用してモデルアトリウムの天井付近のプルームの温度及び上昇速度を求めることで、旋回火炎の性状を利用した自然排煙の適応可能性を明らかにし、新しい排煙手法の提案を行う。

4.2. モデルアトリウムの空間構成

モデルアトリウムの断面図及び平面図を図 4-1(a)及び(b)に示す。モデルアトリウムの空間構成は低層のアトリウムを想定した。想定に際しては江川¹⁾及び Richard²⁾の著書を参考とした。アトリウムの高さを 28 m, 階数を 5 階, 階高さを 5 m 及び床面積を 625 m² (25 m×25 m)とした。アトリウムの天井には 2 箇所の排煙口を備えた高さ 3 m の蓄煙空間を配置した。アトリウムを構成する壁は、耐火構造とした。

アトリウム底部の火源は円形の物販ブースとし、直径(D)を 2 m, 物販ブース数(n)を 6 個とした。6 個の物販ブースは、図 4-1 に示すように、円周に沿って軸対称に配置した。物販ブースの S/D は、0 及び 0.13 を代表例とした。この場合の火源の代表径(D_m)は、(3-2)式よりそれぞれ 12.0 及び 13.6 m となる。

4.3. 火源設定

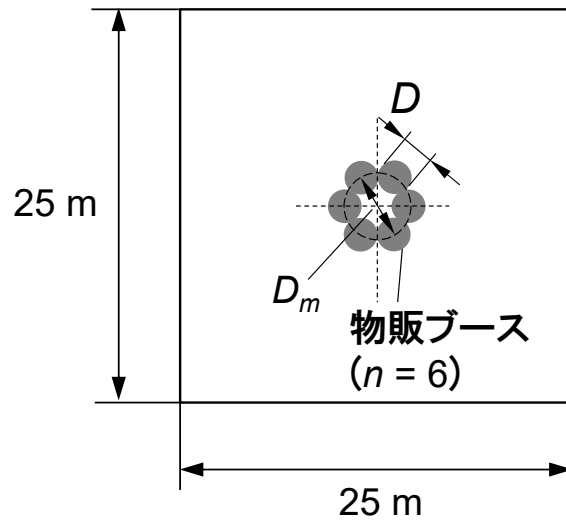
今回のモデルの定常火源は、6 個の物販ブースはそれぞれ同じ発熱速度をもつ設定とし、6 個の物販ブースの $S/D=0$ (分離距離なし)の場合における発熱速度(\dot{Q})の値を 7.0 MW とした。この値の推算に際しては、物販店舗の単位面積当たりの発熱速度(木質系可燃物に換算)である 243.6 kW/m²²⁾を参考とした。実際の物販ブースでは、木質系可燃物に比べて発熱量の大きいプラスチック製品が置かれていることを考慮し、今回は物販ブースの単位面積当たりの発熱速度を 370 kW/m²と想定して、 $S/D=0$ の場合における発熱速度の値を求めた。また、物販ブースに多くのプラスチック製品を置いている場合を仮定して、 $S/D=0$ の場合における発熱速度の値を 14.0 MW としたモデルの定常火源についても検討した。なお、火源に向かって流れる随伴空気については、衝立角度(θ)が 10 deg.の場合を想定した。

今回のモデルにおける定常火源では、発熱速度が S/D の増加に伴って変化する。そのため、発熱速度の算出に際しては、図 3-17(a)に示した $n=6$, $\theta=10$ deg.の場合における融合した旋回火炎の発生範囲である $0 \leq S/D \leq 0.13$ の発熱速度と S/D の関係を示した(4-1)式を援用した。

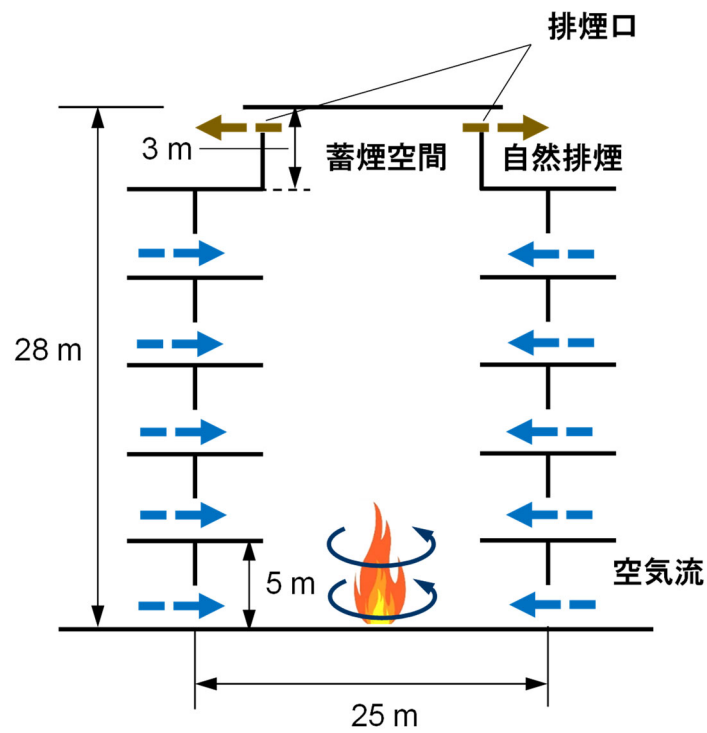
$$\dot{Q} = 5\beta (S/D)^{-0.08} \quad (0 \leq S/D \leq 0.13) \quad (4-1)$$

$$\beta = 805.6(\dot{Q} = 7\text{MW}, S/D = 0), 1611.2(\dot{Q} = 14\text{MW}, S/D = 0) \quad (4-2)$$

図 4-2 は(4-1)式に基づいて求めたモデルの定常火源の発熱速度と S/D の関係を示している。この図から、 $S/D = 0$ の場合における発熱速度の値を 7.0 MW としたモデルの定常火源では、 $S/D = 0.13$ の場合における発熱速度の値は、4.7 MW を得た。また、 $S/D = 0$ の場合における発熱速度の値を 14.0 MW としたモデルの定常火源では、 $S/D = 0.13$ の場合における発熱速度の値は、9.5 MW を得た。後述する無次元発熱速度及びプルーム領域の温度は、この図の発熱速度の結果に基づいて算出している。



(a) モデルアトリウムの平面図



(b) モデルアトリウムの断面図

図 4-1 モデルアトリウムの空間構成

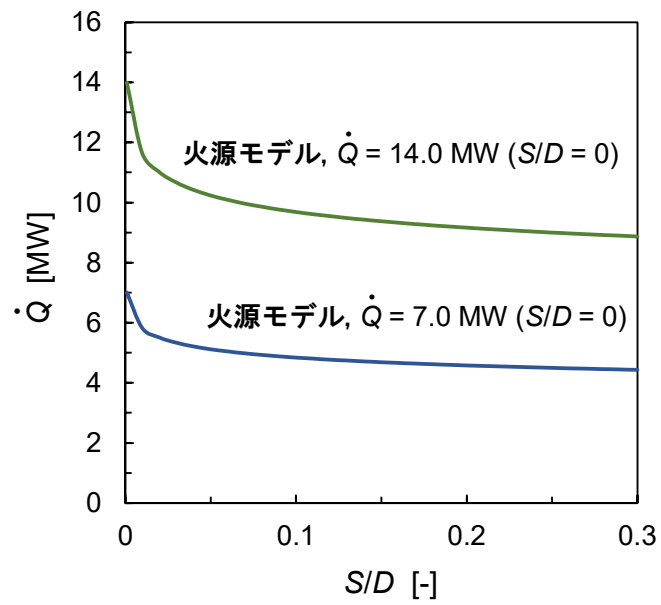


図 4-2 モデル火源における S/D と発熱速度との関係
 (D : 燃焼容器径 [m] S : 分離距離 [m], \dot{Q} : 発熱速度 [kW])

4.4 火炎高さ

火源の代表径(D_m)及び無次元発熱速度(Q^*)を求める式は、3.4.7項において既出であるがここで再度記述する。

$$D_m = nD(S/D + 1) \quad (3-2)$$

$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{C_p \rho_0 T_0 \sqrt{g} D_m^{5/2}} \approx \frac{\dot{Q}}{1116 D_m^{5/2}} \quad (3-3)$$

無次元発熱速度の算出に際して、発熱速度は図4-2、火源の代表径は(3-2)式から得た。ここで、 $S/D=0$ 及び0.13である。

平均火炎高さ(L_m)を求める式も3.4.7項において既出であるがここで再度記述する。今回のケーススタディにおいては、融合した旋回火炎を想定して、(3-4)式の α は4.3とした。

$$L_m = \alpha Q^{*2/3} D_m \quad (0.1 \leq Q^* \leq 0.6) \quad (3-4)$$

図4-3は(3-4)式から算出した融合した旋回火炎の平均火炎高さを示している。この結果から、 $S/D=0$ における発熱速度を7.0 MWとしたモデルの定常火源の場合、平均火炎高さは、 $S/D=0$ では2.9 m ($\dot{Q} = 7.0$ MW), $S/D=0.13$ では1.8 m ($\dot{Q} = 4.7$ MW)を得た。また、 $S/D=0$ における発熱速度を14.0 MWとしたモデルの定常火源の場合、平均火炎高さは、 $S/D=0$ では4.6 m ($\dot{Q} = 14.0$ MW), $S/D=0.13$ では2.9 m ($\dot{Q} = 9.5$ MW)を得た。

図4-3において示した S/D と L_m との関係は、第3章において示した S/D と平均火炎高さの関係を示した性状と同様であり、旋回火炎の平均火炎高さの計算モデル式(3-3)式を用いることで、平均火炎高さを推定可能であることが確認できた。

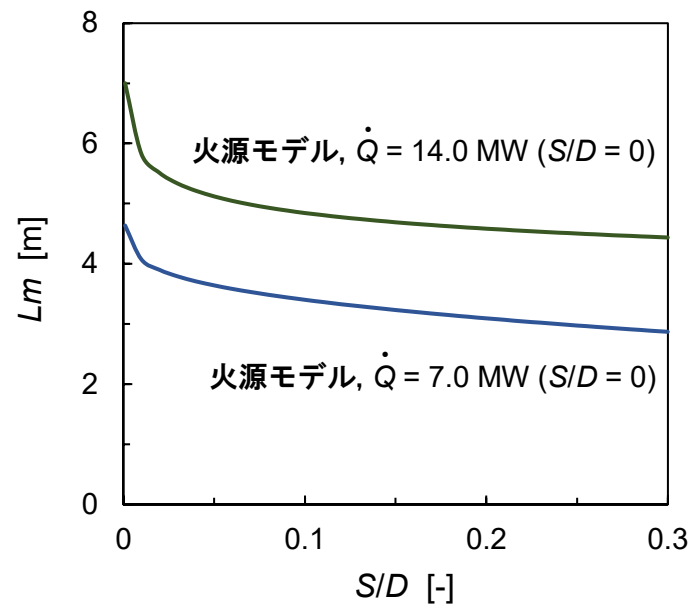


図 4-3 モデル火源における S/D と火炎高さとの関係

(D : 燃焼容器径 [m], S : 分離距離 [m], L_m : 平均火炎高さ [m], \dot{Q} : 発熱速度 [kW])

4.5 プリューム領域の温度減衰

図 4-4 は、 $n=6, \theta=10 \text{ deg.}$ の場合、 $S/D=0$ 及び 0.13 における融合した旋回火炎のプリューム領域の温度を算出するために、図 3-13 のプリューム領域の温度に対して近似直線(橙色)を追記したものである。図中の近似直線に示したように融合した旋回火炎のプリューム領域における温度減衰は $-5/2$ 乗に比例していることがわかる。

なお、McCaffrey モデルの拡散火炎の温度減衰は $-5/3$ 乗に比例している。

融合した旋回火炎のプリューム領域の温度は、図中の近似直線から求めた。4-3 式及び 4-4 式は、それぞれ $S/D = 0$ 及び 0.13 におけるプリューム領域の温度の近似直線式を示している。

$$\Delta T = 17.0(z/\dot{Q}^{2/5})^{-\frac{5}{2}} \quad (0.21 \leq z/\dot{Q}^{2/5} \leq 0.54) \quad (4-3)$$

$$\Delta T = 15.7(z/\dot{Q}^{2/5})^{-\frac{5}{2}} \quad (0.23 \leq z/\dot{Q}^{2/5} \leq 0.62) \quad (4-4)$$

(4-3)式及び(4-4)式の適用範囲は取得した実験データの範囲であり、それぞれ $0.21 \leq z/\dot{Q}^{2/5} \leq 0.54$ 及び $0.23 \leq z/\dot{Q}^{2/5} \leq 0.62$ である。

図 4-5 は、モデルアトリウムの高さ(z)と火炎軸上のプリューム領域の温度(ΔT)との関係を示している。図には、 $S/D = 0$ の場合における発熱速度の値を 7.0 及び 14.0 MW としたモデルの定常火源について、 $S/D = 0$ ((4-3)式)及び $S/D = 0.13$ ((4-4)式)の結果を示している。プリューム領域の温度の計算に際しての発熱速度の値については 4.3 項で示したように、発熱速度 7.0 MW のモデルの場合、 $S/D = 0$ 及び $S/D = 0.13$ ではそれぞれ 7.0 及び 4.7 MW、 14.0 MW のモデルの場合、 $S/D = 0$ 及び $S/D = 0.13$ ではそれぞれ 14.0 及び 9.5 MW を用いた。図中の破線は、(4-3)式及び(4-4)式に基づく推定値(取得した実験データの適用範囲外であるが、近似直線上にのっている)を示している。なお、この図の作製に際しては、算出した融合した旋回火炎の平均火炎

高さに基づく連続火炎領域の高さの範囲を考慮した上で、プルーム領域の範囲を決定している。

図 4-4 に示すように、天井に設置された排煙口付近の温度(ΔT)は、発熱速度 7.0 MW のモデルの場合、 $S/D = 0$ 及び $S/D = 0.13$ ではそれぞれ 28.9 及び 17.9 K、14.0 MW のモデルの場合、 $S/D = 0$ 及び $S/D = 0.13$ ではそれぞれ 54.9 及び 34.3 K であることがわかった。これらの結果は、今回想定した火災が起きた場合においては、アトリウム内の蓄煙空間及び天井付近まで熱気流が拡散していることを示している。また、構造躯体に顕著な熱的ダメージを与える可能性が低いことを示している。

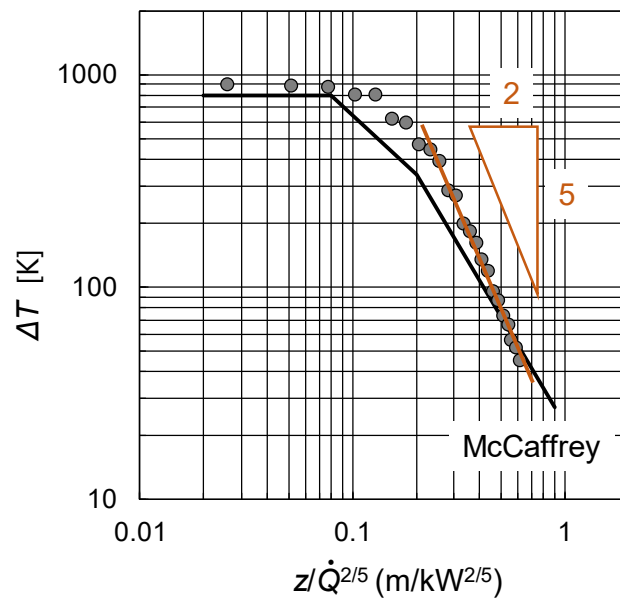
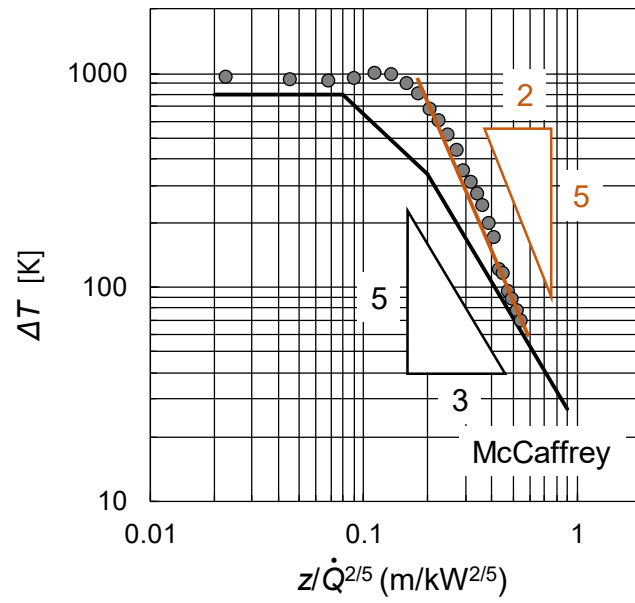


図 4-4 プリューム領域の温度の近似直線
 (z : 高さ [m], \dot{Q} : 発熱速度 [kW], ΔT : 温度 [K],
 S : 分離距離 [m], D : 燃焼容器径 [m])

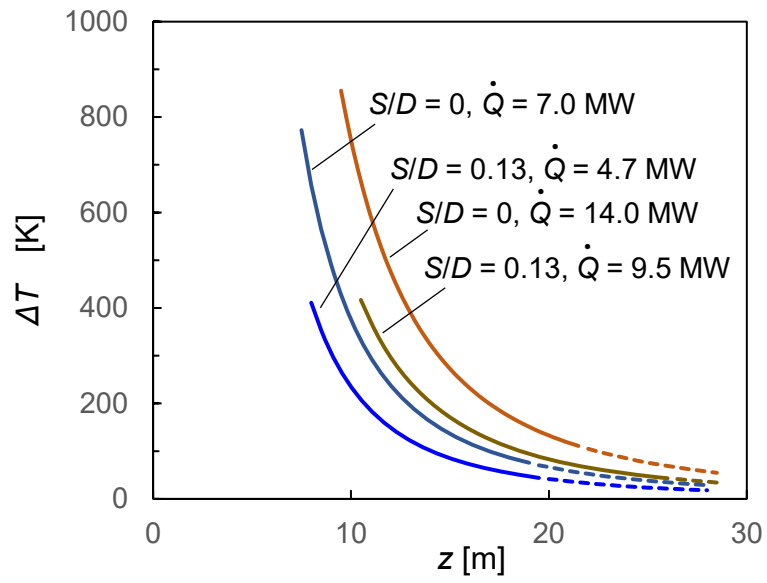


図 4-5 モデルアトリウムの高さとプルーム領域の温度との関係
 (z : 高さ [m], ΔT : 温度 [K], S : 分離距離 [m],
 D : 燃焼容器径 [m], \dot{Q} : 発熱速度 [kW])

4.6 プリューム領域の上昇気流速度

$0 \leq S/D \leq 0.13$ における火炎軸状のプリューム領域の上昇気流速度は、図 3-12 に示した近似直線から、(4-5)式によって表すことができる。そこで、今回のモデルアトリウムにおけるプリューム領域の上昇気流速度の算出には、(4-5)式を用いた。

$$u_m = 0.1 \Delta T^{1/2} \quad (4-5)$$

図 4-6 は、モデルアトリウムの高さ(z)と火炎軸上のプリューム領域の上昇気流速度(u_m)の関係を示している。図には、 $S/D = 0$ の場合における発熱速度の値を 7.0 及び 14.0 MW としたモデルの定常火源について、 $S/D = 0$ 及び $S/D = 0.13$ の結果を示している。プリューム領域の上昇気流速度の計算に際してのプリューム領域の温度(ΔT)の値については 4.4 項で示した結果を用いた。図中の破線は、(4-5)式に基づく推定値(取得した実験データの適用範囲外であるが、近似直線上にのっている)を示している。

図 4-6 に示すように、天井に設置された排煙口付近の上昇速度(u_m)は、発熱速度 7.0 MW のモデルの場合、 $S/D = 0$ 及び $S/D = 0.13$ ではそれぞれ 0.54 及び 0.42 m/s、14.0 MW のモデルの場合、 $S/D = 0$ 及び $S/D = 0.13$ ではそれぞれ 0.74 及び 0.59 m/s であることがわかった。これらの結果は、今回想定した火災が起きた場合においては、融合した旋回火炎が自然に排煙可能な水準の上昇速度を熱気流に与えていることを示している。すなわち、高温の熱気流を効率よくかつ機械式の排煙装置に頼らず天井の排煙口から逃がすことが可能である。機械式の排煙設備と併用すれば、より高い効果が期待でき、在館者の避難時間及び消防隊の到着までの十分な時間を確保することが可能になると考えられる。

以上のことから、融合した旋回火炎を利用した新しい排煙手法の有用性が明らかになり、今後のアトリウムの火災安全対策に寄与できる成果が得られた。従来の自然式換気設備及び機械式換気設備に加えて、開口部から火源付近に接線方向にある

程度の速度を与えることができる設備を設置し、物販ブースのレイアウトを考慮することで、今回示した新しい排煙手法を活用した効果的な排煙ができるものと考えられる。

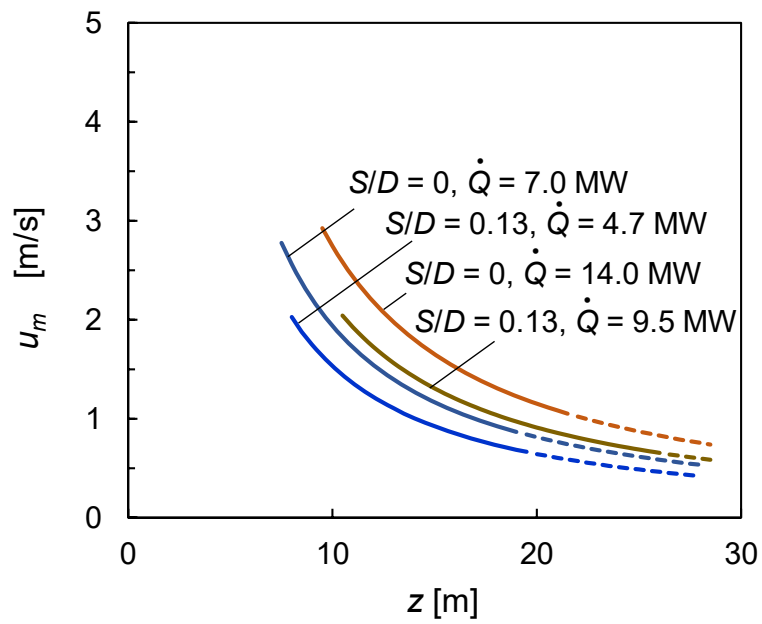


図 4-5 モデルアトリウムの高さとプルーム領域の上昇気流速度との関係
 (z: 高さ [m], u_m : 上昇気流速度 [m/s], S: 分離距離 [m],
 D: 燃焼容器径 [m], \dot{Q} : 発熱速度 [kW])

4.7 結言

本章では、アトリウム・モールの火災安全対策の策定に寄与するものとして、開発した平均火炎高さモデルを用い、加えて本研究の成果を活用して、融合した旋回火炎の性状を利用した新しい排煙手法の提案をケーススタディに検討した。検討の結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 融合した旋回火炎によって形成された熱気流は、アトリウムの蓄煙空間及び天井付近まで拡散することが明らかになった。また、熱気流の温度から見て、構造躯体に顕著な熱的ダメージを与える可能性が低いことが明らかになった。
- (2) 融合した旋回火炎が自然に排煙可能な水準の上昇速度を熱気流に与えていることがわかった。高温の熱気流を効率よくかつ機械式の排煙装置に頼らず天井の排煙口から逃がすことが可能であることが示された。
- (3) 融合した旋回火炎の性状を利用した新しい排煙手法は、今後のアトリウムの火災安全対策の策定に寄与できることが示された。

参考文献

- 1) 江川勝雄: "アトリウムの計画とデザイン", 株式会社建築技術, 1993.
- 2) Richard, S.: "Atrium Buildings, Development and Design", Second Edition, Van Nostrand Reinhold, 1987.
- 3) 日本建築学会: "火災性状予測ハンドブック", 日本建築学会, pp. 15 - 24, 2018.

第5章

総括

5.1. 各章の結論

複数同時火災による融合火災が生じた場合、融合火災に起因した気流の偏向によって融合火炎に角速度成分をもつ気流が与えられた場合、融合火炎に旋回が起きる。融合した旋回火炎は単に融合した火炎に比べて、燃焼速度が大きくなり、火炎高さ、放射熱流束及び煙量が増大するため、被害規模は大きくなる可能性が高い。しかしながら、これまで融合した旋回火炎に関する研究例は少なく、その性状は不明確なままであり、火災危険性を評価するための指標がなかった。本論文において、複数火源の融合による旋回火炎の発生条件を明確にすることで平均火炎高さのモデルを開発できたこと、このモデルを活用して新しい排煙手法を提案できたことは、これまで扱われてこなかった分野における火災安全対策の策定に寄与するところが大きい。

本論文では、半径方向に対して調整可能な角度で配置された衝立を用いて火炎に旋回流を与え、円周に沿って軸対称に複数個の火源を配置した場合に発生する融合した旋回火炎の燃焼性状を実験的に調べ、複数火炎が融合した旋回火炎の発生条件を示すとともに平均火炎高さを推定するモデル及び新しい排煙手法を提案した。以下に各章の結論を示す。

1. 形成される旋回火炎の空間的な特性の実験的検討

火炎の旋回には、衝立高さと発熱速度が関係することを定量的に示し、衝立高さと発熱速度との関係によって、火炎の旋回性及び火炎高さが決定されることを明確にした。基部から先端まで旋回の発生条件は、衝立高さと発熱速度の関係がそれぞれ $h/L_m > 1.1$ 及び $\dot{Q}/\dot{Q}_0 > 1.6$ である。

2. 融合した旋回火炎の発生条件に関する検討

複数火源の融合による旋回火炎は、衝立角度が狭い、すなわち気流の偏向が大きく、火源の分離距離が小さい場合に発生することを示した。 $\theta = 20 \text{ deg.}$ の場合に火炎同士の相互作用が最も強化され、分離距離のない場合($S/D = 0$)において融合した旋回火炎の高さは最も伸長した。衝立角度の狭い場合、火炎に大きな旋回流が与えられるとともに開口部の断面積が小さいために火炎への外気供給が遅くなる。そのため、燃焼の集結が遅れ、融合した旋回火炎は上方へ伸びたものと考えられた。 $\theta = 45$ では融合した弱い旋回火炎の発生が認められたが、 $\theta = 60 \text{ deg.}$ では、融合した旋回火炎及び融合した弱い旋回火炎とも発生が認められなかった。 $\theta = 10$ 及び 20 deg. の場合の融合した旋回火炎は燃料支配型、 45 deg. の場合の融合した弱い旋回火炎は換気支配型であると考えられる。

また、 $\theta = 10$ 及び 20 deg. における発熱速度は、分離距離のない場合において最大値となり、分離距離の増加とともに減少した。火炎に旋回流を与えていた随伴空気は、火源の分離距離の増加に伴って火源と火源との間に流入して、火炎の融合を急激に妨げたために、平均火炎高さ及び発熱速度が減衰したものと考えられた。

融合した旋回火炎では、McCaffrey モデルの拡散火炎に比べて連続火炎領域の範囲が増加し、間歇火炎領域の範囲が縮減した。この旋回火炎のプルーム領

域における減衰は, McCaffrey モデルの拡散火炎に比べて速いことが明らかになった。

3. 融合した旋回火炎の火炎高さの推定に関する検討

複数の円形の燃焼容器を軸対称に配置した場合の火源の代表径を示し, 実験的に得られた無次元発熱速度と平均火炎高さの関係を整理し, 無次元融合旋回火炎高さは無次元発熱速度の $2/3$ 乗に比例することを明確にした。この結果から, 融合した旋回火炎の平均火炎高さを予測できるモデル式を開発した。平均火炎高さの実測と計算とは概ね一致することを示した。

4. 融合した旋回火炎の性状を利用した排煙手法の提案

アトリウム及びモールの火災安全対策の策定に寄与するものとして, 開発した平均火炎高さモデルを用い, 加えて本研究の成果を活用して, 融合した旋回火炎の性状を利用した新しい排煙手法を提案した。開発した平均火炎高さモデルによって設計火源に基づいた平均火炎高さが算出可能となり, 算出した平均高さから, モデルアトリウム天井付近におけるプルーム領域の温度及び上昇気流速度を明らかにした。この結果から, 融合した旋回火炎の性状を利用すると, 高温の熱気流を効率よくかつ機械式の排煙装置に頼らず天井の排煙口から逃がすことが可能であった。融合した旋回火炎の性状を利用した新しい排煙手法は, 今後のアトリウムの火災安全対策の策定に寄与できることが示された。

謝辞及び本論文に関わる研究業績

謝辞

本論文は筆者の諏訪東京理科大学 工学・マネジメント研究科 工学・マネジメント専攻 博士後期課程在籍時（平成 29 年 4 月～令和 2 年 3 月）の 3 年間の研究成果をまとめたものです。この間、多くの皆様のご指導、ご協力並びにご鞭撻を賜り、博士論文としてまとめられましたことに対しまして、深く感謝しています。

筆者の指導教員である公立諏訪東京理科大学教授 内海重宜先生には、終始懇切丁寧なご指導を賜りました。被災し困難な状況に置かれたとき、温かい配慮で本研究を遂行できました。心から感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、元公立諏訪東京理科大学教授 須川修身先生には、長年にわたるご指導及びご鞭撻を賜り、心から感謝申し上げます。時には厳しいご指摘をいただき、時には励ましの言葉をいただきました。良好な研究環境も整えていただきました。重ねて御礼申し上げます。

公立諏訪東京理科大学講師 上矢恭子先生には日々の研究だけでなく、多岐にわたり多くのご指導を賜りました。良き相談相手になって頂いたことにも心から感謝いたします。

公立諏訪東京理科大学教授 大島政英先生、平田幸広先生、平田陽一先生及び松岡隆志先生、横浜国立大学准教授 岡泰資先生には、ご多用のなか快く審査をお引き受けいただきまして、深く感謝申し上げます。審査過程において的確なご示唆と貴重なご助言も賜りました。重ねて御礼申し上げます。

公立諏訪東京理科大学在学期間中，助力頂いた須川研究室及び上矢研究室の学生の皆様に大変感謝いたします。

最後に，これまでの研究活動を支え，協力していただいた家族に対して，心より感謝の意を表します。

2020年3月

渡邊 憲道

業績リスト

1. 論文（査読有）

- [1] 渡邊憲道, 須川修身, 上矢恭子, 内海重宜: 融合した旋回火炎の燃焼性状と火炎高さ, 日本火災学会論文集, Vol. 70 (1), pp. 19-26, 2020

2. 国際会議（査読有）

- [1] N. Watanabe, O. Sugawa, K. Kamiya: "Flame Height Behavior of Merging Fire Whirls from Multiple Fire Sources, Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards, pp. 652-661, 2019.
- [2] N. Watanabe, K. Kamiya, O. Sugawa: "Influence of Air-inlet on Flame Merging Behavior", Proceedings of the Asia Pacific Symposium on Safety, SA2-03, 2017.

3. 国内会議

- [1] 渡邊憲道, 上矢恭子, 須川修身, "複数火源の融合による火災旋風の火炎性状", 日本火災学会研究発表会, pp. 178-179, 2018.
- [2] 渡邊憲道, 上矢恭子, 須川修身, "融合した旋回火炎の火炎高さと空気連行速度", 日本火災学会研究発表会, pp. 20-21, 2019.

4. 参考論文

- [1] O. Sugawa, K. Kamiya, N. Watanabe, Flame Behavior from a Rotating Pool Fire, Proceedings of the Asia Pacific Symposium on Safety, SA1-03, 2017.
- [2] R. Seita, K. Wakatsuki, N. Watanabe, "Evaluation of Thermal Protection of Japanese Firefighter Helmet and its Improvement to Thermal Insulation", Journal of Textile Engineering, Vol.63, No.6, pp. 181-185, 2017.
- [3] O. Sugawa, K. Kamiya, N. Watanabe, "Flame Characteristics of a Rotating Pool Fire", Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (2019),

pp. 642-651, 2019.

- [4] K. Kamiya, O. Sugawa, N. Watanabe, "Using Odors to Detect Fire in a Study with Rooms Reduced to 75%Size", Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards, pp. 1210-1220, 2019.

5. 受賞歴

- [1] Best Paper Award (最優秀論文賞), "Influence of Air-inlet on Flame Merging Behavior", Asia Pacific Symposium on Safety, 2017.