

## ■原著論文／ORIGINAL PAPER■

# 火災旋風近傍の流れに関する研究

## Flow Around a Fire Whirl

大西 博之・桑名 一徳\*

ONISHI, Hiroyuki and KUWANA, Kazunori

山形大学大学院理工学研究科 〒992-8510 米沢市城南 4-3-16  
Yamagata University, 4-3-16 Jonan, Yonezawa, Yamagata 992-8510, Japan

2015 年 12 月 21 日受付 ; 2016 年 3 月 2 日受理 / Received 21 December, 2015; Accepted 2 March, 2016

**Abstract :** The objective of this paper is to provide basic information of the flow field around a fire whirl created by a fixed-frame or a rotating-frame fire whirl generator. Similar fire whirl generators to previous experimental studies are used to generate fire whirls under different conditions. A PIV method is used to obtain average flow field. The difference in tangential velocity distributions generated by the two different fire whirl generators is examined, and the validity of previous theoretical models is discussed. Radial velocity distribution near the flame base is also measured to reveal the presence of a boundary layer in which a fast flow toward flame is observed. This boundary layer controls the shape of flame base, hence the burning rate, and eventually the flame height of a fire whirl.

**Key Words :** Fire whirl, PIV, Tangential velocity, Radial velocity, Boundary layer

### 1. 緒言

火災時に火炎と旋回流が相互作用すると火災旋風が発生し、火炎高さが著しく増大する。火災旋風が発生すると燃焼率が増大することにより周囲への輻射熱量も増加し、火災被害が拡大する。林野火災や都市火災で火災旋風の発生事例が多く報告されている[1-4]。

林野火災や都市火災における火災旋風は、通常、横風と火炎の相互作用により生じ、火炎域の上に火災旋風が生じる場合と、火炎域から離れたところに生じる場合がある[2-8]。このような有風下の火災旋風は移動性を伴うことが多く、火炎高さや燃焼率、火災旋風周囲の流れ場などの詳細な計測を実施するのは容易ではない。

一方、固定型あるいは回転型の火災旋風発生装置が従来用いられ、火炎高さ等の測定が行われてきた[9-13]。ほとんどの場合、可燃性液体が燃料として用いられている。固定型の火災旋風発生装置は、浮力により空気が火炎に向かって流入する際、回転成分が与えられるような構造を配置した装置である。回転型の火災旋風発生装置は、プール火炎の周囲で円筒形の金属メッシュを回転させ、通過する空気流に回転成分を与えるものである。このような火災旋

風発生装置を用いた実験を基に、火炎高さの相関式などが提案されているが、火災旋風周囲の速度分布を計測した事例は少ない。特に、固定型と回転型の火災旋風発生装置で誘起される旋回流にどのような違いがあるのかなど、ほとんどわかっていない。

本研究では、固定型および回転型の火災旋風発生装置により得られる旋回流についての基礎的な知見を得ることを目的とし、PIV法により速度分布を測定したので報告する。

### 2. 実験装置および実験方法

#### 2.1. 接線方向の速度分布の測定方法

本研究で用いた固定型火災旋風発生装置を図 1 に、回転型火災旋風発生装置を図 2 に示す。これらの図では、接線方向の気流速度を測定する際の構成が示されている。いずれの場合も、中心でエタノールをプール燃焼させた。可燃性液体容器は装置の床面に埋め込み、容器の上端が床面と一致するようにした。

図 1 の固定型火災旋風発生装置は、高さ 50 cm、内径 30 cm のアクリルパイプを縦に半分に切断し、図 1 の右上に示した上面図のようにずらして配置したものである。浮力により空気がアクリルパイプの隙間を通して流入するときに旋回流が生じ、火災旋風が発生する。図 2 の回転型火災

\* Corresponding author. E-mail: kuwana@yz.yamagata-u.ac.jp

旋風発生装置は、円筒状の金属メッシュの部分をもータにより回転させることで、浮力により火炎に向かって流入する空気に回転成分を与え火災旋風を発生させることができる。金属メッシュの寸法は図 1 の固定型火災旋風発生装置の亚克力パイプと同じで、高さ 50 cm、内径 30 cm とした。なお、金属メッシュに 2 か所の水平なスリット部を設け、PIV 計測用のレーザーシートが通過できるようにした。それぞれの装置を用いて発生させた火災旋風を図 3 に示す。図 3 では、両者の火炎高さがほぼ等しくなるように条件を設定した。

固定型火災旋風発生装置では、燃料プールの内径を  $d=6.2$  cm とし、スリット幅 (亚克力パイプ間の隙間) を  $s=3.5$  cm とした。回転型火災旋風発生装置では燃料プールの内径を  $d=4.2$  および 6.2 cm とし、回転速度  $n$  を  $n=40$  および 70 rpm とした。

接線方向速度を測定した位置 (床面からの高さ)  $h$  は固定型火災旋風発生装置および回転型火災旋風発生装置とも  $h=7, 17, 23$  cm とした。100 mW の Nd:YVO<sub>4</sub> レーザーを、シリンドリカルレンズを用いて厚さ約 1 mm のシート状にし (出射角度 30 度)、 $h=7, 17, 23$  cm の位置に床面と水平に照射した。そして、スモークマシンにより導入した粒子の挙動を、バンドパスフィルター装着したハイスピードカメラで上方から 50 秒間撮影した。以下に報告する接線方向速度分布は、50 秒間の平均値である。なお、図 3 でも見られるように、火炎はコマの歳差運動のような回転をしながら非定常的に回転する。この周期は数秒程度であり、50 秒よりも十分短い。したがって、50 秒間の撮影により平均的な速度分布が得られると考えられる。ハイスピードカメラの設定は、解像度を 256×256、サンプルレートを 400 fps、露光時間を 2400  $\mu$ s とした。図 4(a) の上方からレーザーを照射しトレーサー粒子は下方から導入した。撮影した動画のそれぞれに対し、図 4(a) で示した太線の内側の位置を PIV 解析し、接線方向の気流の速度を測定した。プール径が異なる条件においても同様の範囲を PIV 解析の対象とした。

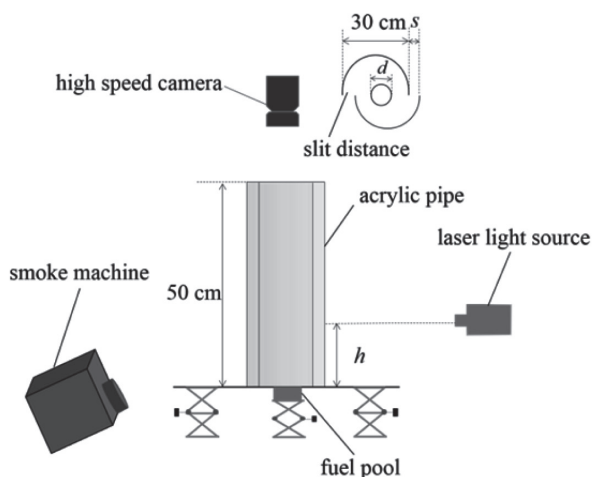


Fig.1 Experimental setup using a fixed-frame fire whirl generator.

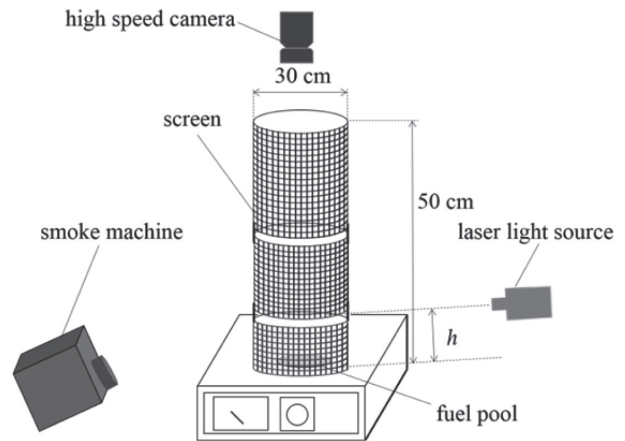


Fig.2 Experimental setup using a rotating-frame fire whirl generator.

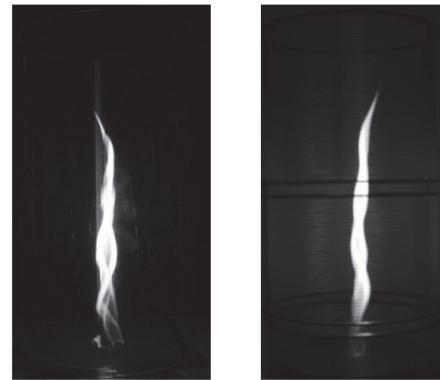
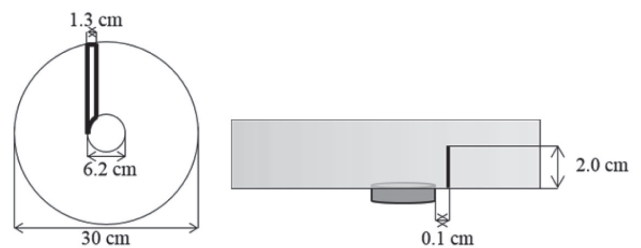


Fig.3 Typical fire whirls generated by the fixed-frame (left) and rotating-frame (right) fire whirl generators.



(a) Tangential velocity (b) Radial velocity

Fig.4 Area for PIV analysis.

## 2.2. 半径方向の速度分布の測定方法

これまでの研究では、火災旋風の発生に伴う火炎高さの著しい増加には、火炎基部における火炎に向かう流れが重要な役割を果たしていると言われている[9,14-16]。しかし、そのような流れが具体的に計測されたことはほとんど無い。そこで本研究では、火炎基部における半径方向速度分布の測定を行った。半径方向の気流の速度分布の測定には、図 1 の固定型火災旋風発生装置を用いた。回転型火災旋風発生装置を用いると、レーザーシートが金網メッシュと干

渉してしまうためである。実験方法は、火災旋風を発生させた後、床面に垂直にレーザーシート（接線方向速度の測定時と同様のもの）を照射し、横からバンドパスフィルターを装着したハイスピードカメラ（解像度 256×256, サンプルレート 1000 fps, 露光時間 990  $\mu$ s）で 21 秒間撮影した。レーザーシートのこのとき図 4(b) の右方からレーザーを照射しトレーサーの煙は左方から導入した。得られた動画において、図 4(b) の太線部分すなわち燃料プールの端から 0.1 cm 外側の位置を PIV 解析の対象とした。

### 3. 実験結果および考察

固定型および回転型の火災旋風発生装置を用いて、同一の火災高さ  $H$  の火災旋風 ( $H = 40$  cm) を発生させた際の火災旋風周囲の接線方向の気流の速度分布を図 5 に示す ( $h = 7, 23$  cm)。プール径は 6.2 cm であり、固定型火災旋風発生装置のスリット幅  $s$  は 3.5 cm, 回転型火災旋風発生装置の回転数は 40 rpm である。半径が約 3 cm 以下（つまり、プール火炎の半径以下）の領域では、火炎からの発光のためにデータ取得が困難であったので、図 5 には測定できた点の速度のみを示す。なお、それぞれの条件に対して、3 つの異なるデータを示した。全ての条件においてほぼ同じ結果が得られており、50 秒間の平均をとることにより再現性の高いデータを得られることを確認できた。

固定型および回転型の火災旋風発生装置のいずれの場合も、床面からの高さ  $h$  が大きくなるほど、接線方向速度が上昇する傾向がある。データを明確にするために図 5 には示さなかったが、 $h = 17$  cm での接線方向速度分布は、 $h = 23$  cm の場合とほぼ一致した。このことから、床面からの高さがある程度以上になると接線方向速度分布はほぼ一樣になるのに対し、床面付近では接線方向速度が減少することがわかる。

図 5 に示した条件では、火災高さは 40 cm で同一である。しかし、接線方向速度分布には違いがみられた。まず、固定型火災旋風発生装置による接線方向速度のほうが、回転型よりも大きい傾向がある。さらに、固定型火災旋風発生装置の場合は、Rankine の複合渦のような接線方向速度のピークが観察された。つまり、複合渦のコア半径がプール火炎の半径よりも大きいということであり、同じく固定型火災旋風発生装置の速度分布を測定した Hassan ら[17]の結果と一致する。コア半径は、床面からの高さとともにわずかに増加する傾向があった。一方、回転型火災旋風発生装置の場合は、接線方向速度のピークが観察されなかった。これはコア半径がプール火炎の半径よりも小さかったためであり、固定型火災旋風発生装置とは誘起される旋回流の性質が異なることがわかる。回転型火災旋風発生装置で生じる流れ場のコア半径については、今後の更なる検討が必要である。

Chuah らの理論解析[18]では、火災旋風の火災高さはコア半径により決まると結論付けられている。しかし、今回

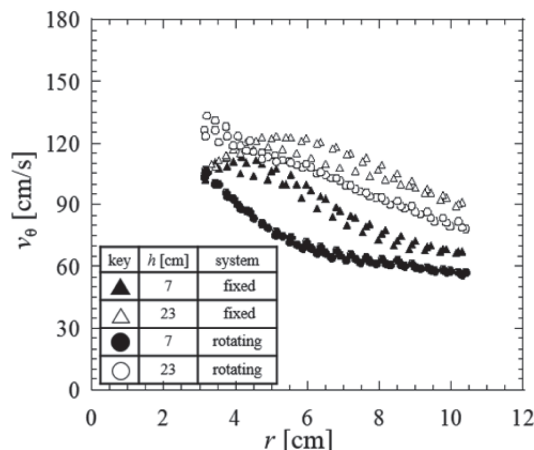


Fig.5 Tangential velocity distribution obtained using the fixed-frame ( $s = 3.5$  cm,  $d = 6.2$  cm) and the rotating-frame ( $n = 40$  rpm,  $d = 6.2$  cm) fire whirl generators.

の実験により、コア半径は異なるが火災高さが同じ火災旋風が存在することが確認された。つまり、Chuah らの理論は妥当ではないということになる。これは、Chuah らの理論では流れ場として軸方向に一樣な Burgers 渦が仮定されているためだと考えられる。ところが、図 5 からわかるように、床面付近では接線方向速度が減少する。後に示すように、床面付近での接線方向速度の減少は、床面付近において中心に向かう流れを誘起する。この流れにより火災基部形状が変化し、可燃性液体への熱流束が変化するので、蒸発速度および火災高さが変化する。したがって、床面付近で接線方向速度が減少することと火災旋風の火災高さには密接な関係があるため、火災旋風の理論解析において軸方向に一樣な Burgers 渦を仮定することは適切ではない。

Chuah らの火災高さ予測は拡散火災理論に基づいたものであるが、これ以外にも、次元解析的に[6]あるいは半経験的に[11]火災高さの相関式が提案されている。これらの相関式では、旋回流の特性値として循環の値が用いられている。しかし、図 5 では、固定型と回転型の火災旋風発生装置で、循環の値も異なる。また、床面からの高さによっても循環の値が変化する。

今回の実験結果は、火災高さがコア半径のみあるいは循環のみにより決まるものではないことを示している。火災旋風の火災高さを予測するためには、より現実的な流れ場を考慮する必要がある。

回転型火災旋風発生装置の回転速度  $n$  を変えたとき ( $n = 40, 70$  rpm) の接線方向の気流の速度分布を図 6 に示す。当然のことながら、装置の回転速度が増すと接線方向速度も上昇する。しかしながら、回転速度を 1.75 倍にしたのに対し、接線方向の速度は約 1.3 倍しか増加しなかった。装置の回転速度と接線方向速度の関係は、単純な比例関係ではないことがわかる。したがって、火災高さ等の測定において、回転型の火災旋風発生装置を用いるときは、装置の回転速度をパラメータとするのではなく、気流速度を測

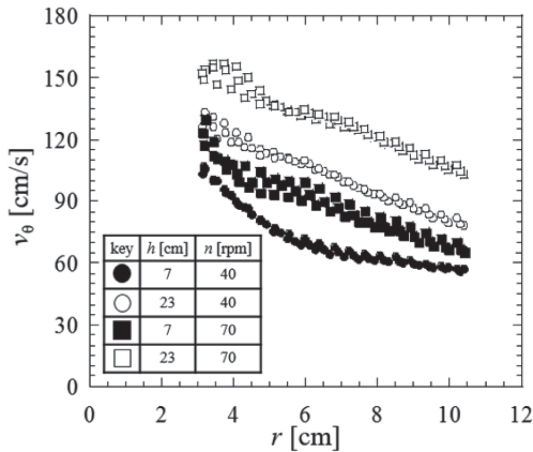


Fig.6 Tangential velocity distribution obtained using the rotating-frame fire whirl generator ( $d = 6.2$  cm).

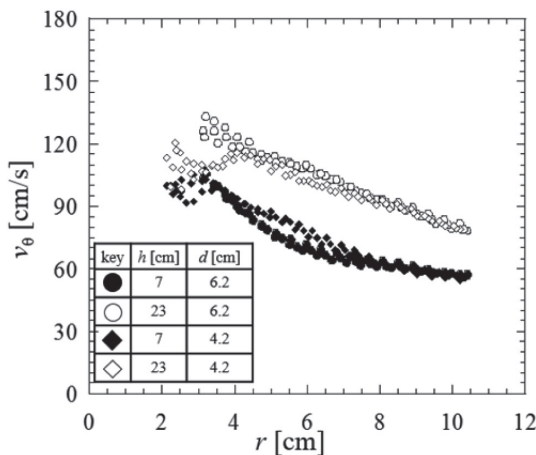


Fig.7 Effect of pool diameter on tangential velocity around fire whirl created by rotating-frame generator ( $n = 40$  rpm).

定してパラメータとしなければならない。

回転する金属メッシュの位置 ( $r = 15$  cm) における気流速度を別途計測したところ、装置の回転速度よりも低い値であった。プール火炎へ向かって流入する空気に接線方向の速度成分を与える効率は 70~90% 程度で、装置の回転速度の増加とともに効率が低下する傾向がみられた。

回転型火災旋風発生装置の回転速度  $n$  を  $n = 40$  rpm で固定し、燃料プールのプール径  $d$  を  $d = 4.2, 6.2$  cm と変化させたときの接線方向の気流の速度分布を図 7 に示す。この図より、火災旋風の接線方向の気流の速度は、測定できた範囲ではほとんど違いが見られないことがわかる。つまり、自由渦領域の循環の値がプール径にほとんど依存しないということであり、図 6 の結果と合わせると、回転する装置が空気に対して接線方向の速度成分を与える効率は、装置の回転速度に大きく依存するがプール火炎の大きさにはあまり依存しないことを示している。なお、コア半径や接線方向速度の最大値などは、当然プール径の影響を受けると考えられる。しかし、先にも述べたように今回の測定では、

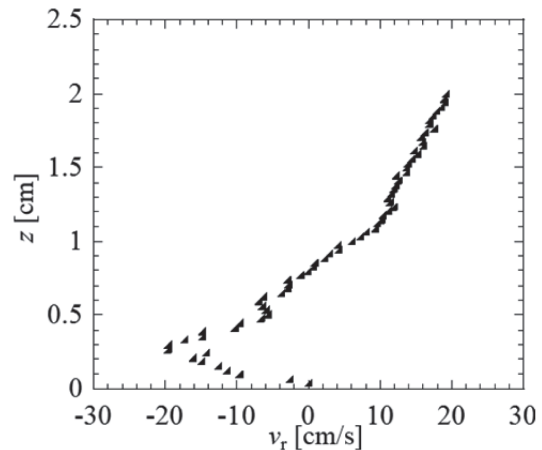


Fig.8 Radial velocity distribution obtained using the fixed-frame fire whirl generator ( $s = 3.5$  cm,  $d = 6.2$  cm).

回転型火災旋風発生装置により生じる旋回流のコア半径を測定することができなかった。回転型火災旋風発生装置のコア半径および接線方向速度の最大値は、今後の検討課題である。

Emmons and Ying [9]によると、地表(床面)付近では回転速度が減少するため、半径方向の圧力勾配により、地表付近で中心軸へと向かう境界層が形成される。いわゆる Ekman 境界層と似た現象であり、この境界層の存在が火炎高さの増大メカニズムの一つだとされている[9,14-16]。事実、Hayashi ら[15]や Dobashi ら[16]は、床面から離れたところにプール火炎を設置した場合は火災旋風が発生しない(火炎高さの増大が起こらない)ことを実験的に示した。つまり、旋回流の存在のために中心軸付近で負圧が生じるだけではなく、床面近くで Ekman 境界層のような流れが生じることにより、高温の火炎が液面に接近し、燃料の蒸発が促進されるので火炎高さが上昇すると考えられる。火災旋風発生装置を用いない、有風下で火災旋風を発生させる実験においても、強い旋風を発生・維持させるのに床面の存在が重要な役割を果たしていることが示されている[19]。しかし、火災旋風発生時における床面付近の境界層の存在は明示的に測定されていない。

本研究で測定した、床面付近の半径方向速度の分布を図 8 に示す。床面付近に厚さが 1 cm 以下の境界層が存在し、中心へ向かう流れがあることが確認できる。中心へ向かう流れのピークは床面から 2~3 mm のところにあるため、床面付近に特に注目して計測しないとこのような流れは捉えにくい。なお、この境界層の厚さは 1 cm 以下であるため、Ekman 境界層と同様なものであるとすれば、高さ  $h = 1$  cm において、旋回流速度が低下しているはずである。これまでの測定結果では、回転型火災旋風発生装置におけるレーザー計測用のスリット位置の制限のため、 $h$  の最小値は 7 cm であった。しかし、固定型回転装置の測定高さはこれに限定されないため、 $h = 1$  cm における接線方向速度の測定を行った(図 9)。中心軸から離れた自由渦領域では、

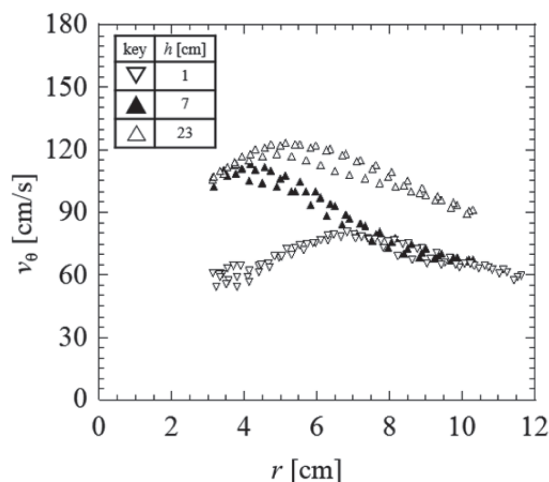


Fig.9 Tangential velocity using the fixed-frame ( $s = 3.5$  cm,  $d = 6.2$  cm) at  $h = 1, 7,$  and  $23$  cm.

$h = 1$  cm と  $7$  cm の結果は大きく変わらなかった。しかし、コア半径が 2 倍程度大きく、結果として、中心軸付近の接線方向速度は  $1/2$  程度まで低下している。これらの結果は、図 8 で観察された境界層が Ekman 境界層と同様なものだと示唆している。

#### 4. 結論

火災旋風研究でしばしば用いられる回転型および固定型の火災旋風発生装置により得られる旋回流の性質を明らかにすることを目的とし、それぞれの装置における気流速度を PIV 法により測定した。

火災高さが等しい条件においても、回転型および固定型の装置により得られる旋回流の性質は異なることが明らかになった。固定型の装置により得られる旋回流のほうが、コア半径および自由渦領域の循環の値がともに大きい傾向がある。

回転型火災旋風発生装置がプール火炎に向かって流入する空気に対して接線方向の速度成分を与える効率は  $70 \sim 90\%$  程度であり、装置の回転数の増加とともに効率が低下する。また、回転型の装置においては、自由渦領域の循環の値は装置の回転数に大きく依存し、プール火炎のサイズにはほとんど依存しない。

接線方向速度は床面付近では小さく、床面から離れるとほぼ一定の値に収束する傾向がある。床面付近で旋回流速度が小さいことにより、Ekman 境界層のような中心へ向かう流れが床面付近で形成される。今回の実験条件ではこの境界層の厚さは数ミリメートル程度であった。この流れは、火炎基部形状の変化やそれに伴う発熱速度および火炎高さの変化につながり、火災旋風の発生に重要な役割を果たすものである。

#### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 15H02977 の助成を受けたものである。

#### References

- Graham, H.E., *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 36: 99-103 (1955).
- Emori, R.I. and Saito, K., *Fire Technol.* 18:319-327 (1982).
- Soma, S. and Saito, K., *Combust. Flame* 86: 269-284 (1991).
- Kuwana, K., Sekimoto, K., Minami, T., Tashiro, T., and Saito, K., *Proc. Combust. Inst.* 34: 2625-2631 (2013).
- Kuwana, K., Sekimoto, K., Saito, K., Williams, F.A., Hayashi, Y., and Masuda, H., *AIAA J.* 45: 16-19 (2007).
- Kuwana, K., Sekimoto, K., Saito, K., and Williams, F.A., *Fire Saf. J.* 43: 252-257 (2008).
- Shinohara, M. and Matsushima, S., *Fire Saf. J.* 54: 144-153 (2012).
- Forthofer, J.M. and Goodrick, S.L., *J. Combust.* 2011:984363 (2011).
- Emmons, H.W. and Ying, S.J., *Proc. Combust. Inst.* 11: 475-488 (1967).
- Kuwana, K., Morishita, S., Dobashi, R., Chuah, K.H. and Saito, K., *Proc. Combust. Inst.* 33: 2425-2432 (2011).
- Lei, J., Liu, N., Zhang, L., Chen, H., Shu, L., Chen, P., Deng, Z., Zhu, J., Satoh, K., and de Ris, J., *Proc. Combust. Inst.* 33: 2407-2415 (2011).
- Lei, J., Liu, N., and Satoh, K., *Proc. Combust. Inst.* 35: 2503-2510 (2015).
- Hartl, K.A. and Smits, A.J., *Combust. Flame* 163: 202-208 (2016).
- Lei, J., Liu, N., Zhang, L., Deng, Z., Akafuah, N.K., Li, T., Saito, K., and Satoh, K., *Combust. Flame* 159: 2104-2114 (2012).
- Hayashi, Y., Kuwana, K., Mogi, T., and Dobashi, R., *J. Chem. Eng. Jpn.* 46: 689-694 (2013).
- Dobashi, R., Okura, T., Nagaoka, R., Hayashi, Y., and Mogi, T., *Fire Technol.* (accepted).
- Hassan, M.I., Kuwana, K., Saito, K., and Wang, F., *Fire Safety Science—Proceedings of the 8th International Symposium (2005)* pp. 951-962.
- Chuah, K.H., Kuwana, K., and Saito, K., *Combust. Flame* 156: 1828-1833 (2009).
- Shinohara, M., *Bull. Jpn. Assoc. Fire Sci. Eng.* (in Japanese) 58: 1-12 (2008).