

課題番号	Q19T-04
課題名 (和文)	凝縮水によるナノ PM の凝集促進
課題名 (英文)	Nano-PM aggregation with condensed water
研究代表者	所属 (学部、学科・学系・系列、職位) 工学部機械工学科, 准教授 氏名 小林佳弘
共同研究者	所属 (学部、学科・学系・系列、職位) 氏名
	所属 (学部、学科・学系・系列、職位) 氏名
	所属 (学部、学科・学系・系列、職位) 氏名
	所属 (学部、学科・学系・系列、職位) 氏名
	所属 (学部、学科・学系・系列、職位) 氏名

研究成果の概要 (和文)

トルエン層流拡散火炎から排出される PM に水蒸気を添加することで、水凝縮による凝集促進を試み、さらにその効果について調査を行った。その結果水蒸気添加を行った場合、およそ 160nm~910nm の範囲の粒径を持つ PM が減少し、910nm より大粒径の PM が増加した。このことから、水蒸気添加による PM の凝集促進が確認できた。

研究成果の概要 (英文)

PM (Particulate Matter) aggregation technique by water vapor condensation was attempted to remove fine PM. PM exhausted from a toluene laminar diffusion flame was used as test sample. Particle diameter (D_{PM}) distributions of PM was measured by a Low Pressure Impactor. Water vapor was supplied at 30mm and 80mm distance from the pool edge. Air was supplied at 30mm distance from the pool edge for comparison. In case of water vapor addition, mass flow rate of $160\text{nm} < D_{PM} < 910\text{nm}$ was lower than that of original PM and mass flow rate of $D_{PM} > 910\text{nm}$ was higher than that of original PM.

1. 研究開始当初の背景

燃焼場から排出される数 nm～数百 nm の粒子状物質 (PM : Particulate Matter) は人体の奥深くへ沈着し悪影響を及ぼすことが指摘されており、これらの極小粒径 PM は排出量の低減が求められている。

現状のディーゼル機関から排出される PM の低減法の主流は燃焼改善および DPF (Diesel Particulate Filter) 等の後処理装置による捕集と酸化処理である。極小粒径 PM の排出量を低減する手段として DPF の細孔径の小径化による捕集効率の向上が考えられるが、細孔径の小径化に伴い圧力損失が増大してしまう。一般に燃焼場において生成される PM は炭素質のすすを核として周りに燃焼由来の可溶性有機成や凝縮水が付着している(1)が、これらの周りの成分が粒子同士を付着させ粒子の凝集を促進させる可能性があると考えられている(2)。凝集による意図的な PM の粗大化が可能であれば DPF の細孔径を小径化せず極小粒径 PM の捕集が可能だと考えられる。

2. 研究の目的

火炎から排出される PM に水蒸気を添加し冷却することで凝縮水による PM の凝集促進を試みることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実験装置および実験条件

本研究で用いた実験装置を図 1 に示す。実験装置は PM を定量的に発生させるプール燃焼装置、空気および水蒸気を添加する供給部、PM を含む燃焼ガスと水蒸気を混合させ冷却することで凝縮水を発生させる混合ダクトおよび PM を空気力学的直径で 10 段階に分級する LPI (Low Pressure Impactor, MAIS-10, 東京ダイレック) で構成されている。プール火炎から供給される燃焼由来の PM にボイラによって発生させた水蒸気を一定流量で供給部から噴出させ、下流部の混合ダクト内で混合させ、露点以下に冷却させることで凝縮水

を発生させた。プール燃焼装置から供給される燃焼由来の PM に水蒸気を加え混合させる必要があるため、極力火炎先端の PM に直接供給できるように水蒸気をノズル型供給部から体積流量 $Q_w = 10 \text{ l/min}$ で供給し、実験を行った。また、比較のため水蒸気の代わりに空気を供給した場合 ($Q_{air} = 10 \text{ l/min}$) も実施した。この時の供給部での噴出速度 v は 2.8 m/s である。水蒸気添加時においては供給ラインでの水蒸気の凝縮を防ぐために供給ラインをヒータで 120°C に保温した。混合ダクトの内径は 40 mm であり、総吸引流量 $Q_{total} = 60 \text{ NI/min}$ で PM を含む燃焼ガスと周囲空気および水蒸気を吸入し、混合ダクト入口から 1330 mm の位置でサンプリングプローブによって試料の捕集を行った。この時のダクト内の滞留時間はおよそ 1.3 s である。燃焼ガスに何も添加しない条件である Free flame と空気添加時でのサンプリング位置での混合ガス温度は 45°C であり、水蒸気を添加した場合には 55°C であった。 $Q_w = 10 \text{ l/min}$ での露点温度は 58°C であるため、サンプリング位置では露点温度を下回っており、水蒸気の一部は凝縮水となっている。LPI のサンプリングプローブの内径は 5.0 mm であり、直径 $2.5 \text{ mm} \times 10$ の穴が開いたものを使用した。

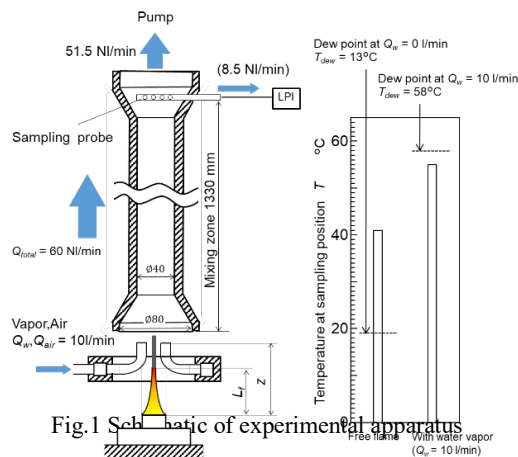
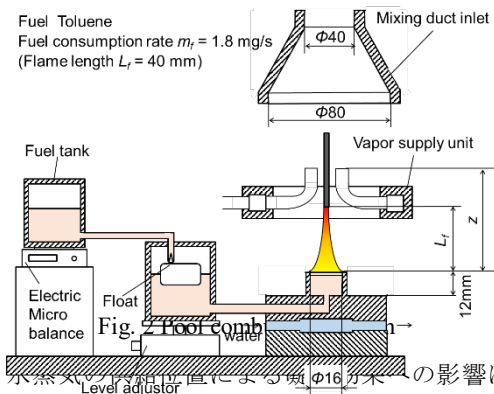


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

図 2 にプール燃焼装置の概略図を示す。プール燃焼装置は主に燃料タンク、フロートチャンバーおよび燃料プールで構成されている。燃料プール内の液面高さはフロートチャンバーの高さを変化させることにより調整可能であり、フロートに

よって常に同じ液面高さを保つことにより、定常的な層流拡散火炎を形成することが可能である。供試燃料はトルエンを用い、燃料消費量 $m_f = 1.8 \text{ mg/s}$ (火炎高さ $L_f = 40 \text{ mm}$) の条件で火炎を形成した。



水蒸気の供給位置による影響について調査を行うために、図3に示す方法で水蒸気供給を行った。供給部は燃焼ガスに沿った形で水蒸気を供給するノズル型と過去の研究[3]において用いられ燃焼ガスに乱れを及ぼさず水蒸気を供給する円筒型を用いる。図中に示す CaseA は火炎先端部の中心から半径方向に 15mm 離れた位置から供給する条件、CaseB は火炎先端より下流部の中心から半径方向に 15mm 離れた位置から供給する条件、CaseC は火炎先端より下流部の中心から半径方向に 30mm 離れた位置から水蒸気を供給する条件である。なお、水蒸気供給量は全ての条件で体積流量 $Q_w = 10 \text{ l/min}$ とした。

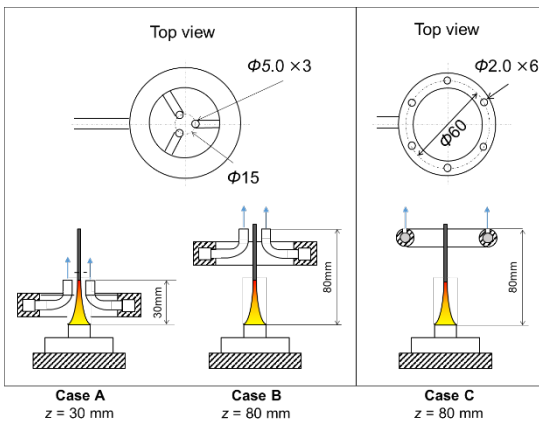


Fig.3 Water vapor supply method

(2) 実験方法

LPI 内で分級され捕集された PM および凝縮水を

電子天秤により秤量した後にオープンによって 120°C に乾燥処理を行うで水分を蒸発させ、再度電子天秤によって秤量した。この時、乾燥前に測定した粒子を Wet PM, 乾燥後の水分を蒸発させた粒子を Dry up PM と定義する。なお、LPI により分級される Wet PM の粒径は図4に示すように PM と凝縮水の混合粒子の径であり、LPI 内では Wet PM 粒径で捕集されるが、Dry up PM については乾燥させたのちに質量の測定を行っているので、秤量した Dry up PM は混合粒子内の PM の質量を示している。

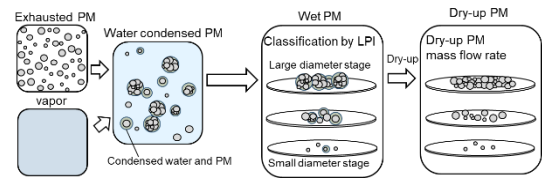


Fig.4 PM with condensed water captured by LPI

4. 研究成果

(1) 水蒸気添加における PM 質量

図5に Free Flame の火炎外観の様子とプール縁から $z = 30 \text{ mm}$ の位置にノズルを設置し空気および水蒸気を添加した場合(CaseA) の火炎外観の様子をそれぞれ示す。また、このときの Dry up PM の総質量流量についても同図中に示す。なお、PM は LPI を使用せずにダクト上部に設置したガラス繊維フィルタを用い、 $Q_{\text{total}} = 60 \text{ l/min}$ で全量吸引することにより捕集した。

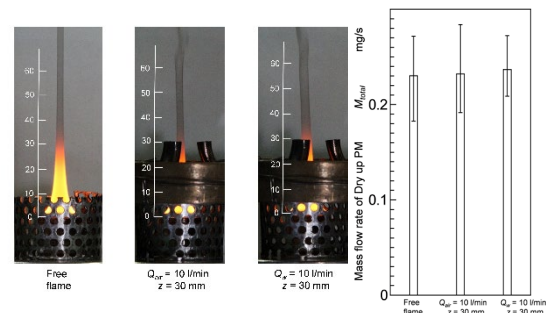


Fig. 5 Dry up PM mass flow rate at air and water

vapor addition

図5に示されるように FreeFlame と火炎周囲にノズルを設置かつ空気または水蒸気を添加した

場合、火炎の大きさなどの外観はほとんど変わらず乱れも生じなかった。火炎先端から排出されるPMは空気または水蒸気を添加した際に若干の乱れが見られたが、図中右側に示される総PM流量はほぼ変わらないことから、ノズルの設置や空気および水蒸気添加による火炎や排出PM流量への影響はほとんどないものと思われる。

(2) 水蒸気添加におけるPM粒径分布

水蒸気を添加することによるPMの粒径への影響を調査するためLPIを用いて水蒸気添加時の粒径-質量流量分布の測定を行った。水蒸気添加によるWet-PMと比較のためのFree flameおよび空気添加によるWet-PMについて図6に示す。ここで図6(a)にはWet-PMと比較のためのDry up-PMの総質量流量を示し、図6(b)にはWet-PMの粒径-質量流量分布をそれぞれ示す。

図6(a)に示す各条件におけるWet-PMの総質量流量の結果を見ると、FreeFlameと空気添加の場合ではおよそ $M=0.08\text{ mg/s}$ でほぼ同じ値となり、水蒸気添加の場合ではおよそ $M=1.7\text{ mg/s}$ と他の場合と比べて著しく高い値となった。このように水蒸気添加時の場合のみ総質量流量が高くなったことから、火炎先端部に付加された水蒸気がダクト内で凝縮水となりPMに付着したことを意味する。しかしながら、図1右側に示したサンプリング位置の温度から求めた凝縮水量はおよそ 18 mg/s となり、PM中に含まれる凝縮水量は極端に少ないことがわかる。さらに言うと仮にPMに付着しなくても、直接フィルタによって捕集されることも考えられるため、PM中に含まれる水分はさらに少ない可能性がある。また、PMに付着しなかった凝縮水は極端に粒径が小さく、よってフィルタで捕集されずに通過していったものと思われる。また、ダクト内壁に付着するなどの損失も考えられるが、これについては測定終了後に確認しており、付着量はそれほど多くはない。

図6(b)に示した粒径分布の結果を見ると

量が大きく増加していることから凝縮水が付着したPMは粒径が 910 nm より大きい粗大な粒子となってLPIに捕集されると考えられる。また、 $160\text{ nm} < D_{\text{pm}} < 910\text{ nm}$ において明確に質量流量が減少していることから、この範囲の粒子を核とした凝集が生じていると考えられる。

図7(a)は各条件でのDry up PM総質量流量を示しており、すべての条件で差は僅かであった。図7(b)はFreeFlameと供給部形状および位置が同様な場合で水蒸気、空気を添加したときの質量流量粒径分布を示す。水蒸気添加時の粒径分布ではFreeFlameの分布に対して $160\text{ nm} < D_{\text{pm}} < 910\text{ nm}$ の範囲で質量流量が減少し、 $910\text{ nm} < D_{\text{pm}}$ の範囲で質量流量が増加しており凝集による粒子の粗大化が確認できた。空気添加時ではFreeFlameに対する分布の差が見られなかった。

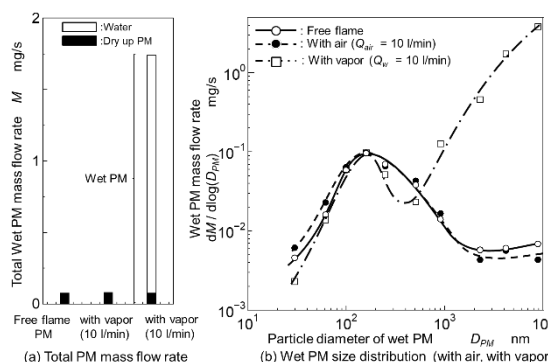


Fig.6 Wet-PM (CaseA)

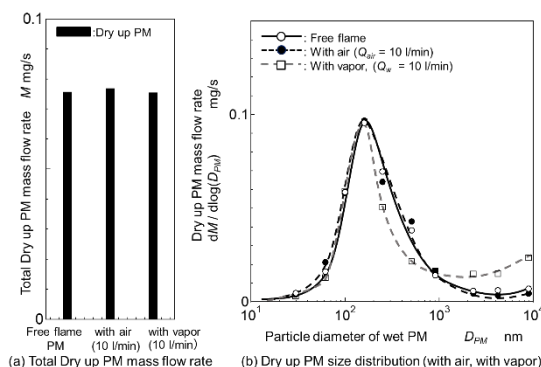


Fig.7 Dry up PM (CaseA)

(3) 水蒸気添加位置の粒径分布への影響

図8に図3で示した各水蒸気方法におけるWet-PMの結果を示し、これらの乾燥処理を行ったDry up-PMについて図9にそれぞれ示す。

図 8 (a) に示す各条件における Wet-PM の総質量流量が概ね同等の値となったことから凝縮水の発生量に対する水蒸気供給位置の影響は確認されなかった. 図 8 (b) では各条件において $30\text{nm} < D_{PM} < 510\text{nm}$ の範囲で同様な分布となった. また, $910\text{nm} < D_{PM}$ の範囲において粒径が粗大になるにつれて質量流量が増える傾向も各条件で一致した.

図 9(a)に示す各条件における Dry up-PM の総質量流量の結果を見ると, 概ね同等の値となり, 水蒸気供給位置による Dry up-PM の排出量に (損失などや火炎からの排出量) 影響はほとんどないものと思われる. 図 9(b)において蒸気供給部形状がノズル型で同一である CaseA と CaseB の分布で差が見られないことから水蒸気供給位置による粒径分布への影響は確認されなかった. 同様に, $z = 80\text{mm}$ で同一である CaseB と CaseC の分布で差が見られないことから水蒸気供給部形状による凝集への影響も確認されなかった.

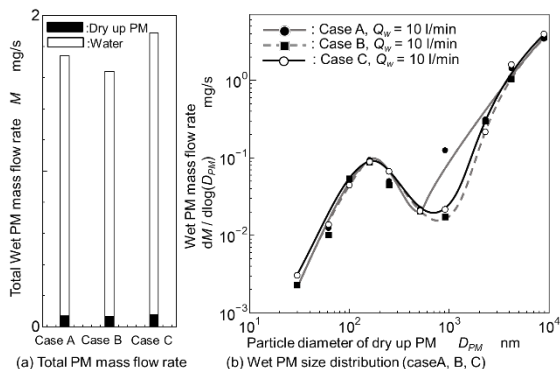


Fig.8 Wet PM (CaseA, B and C)

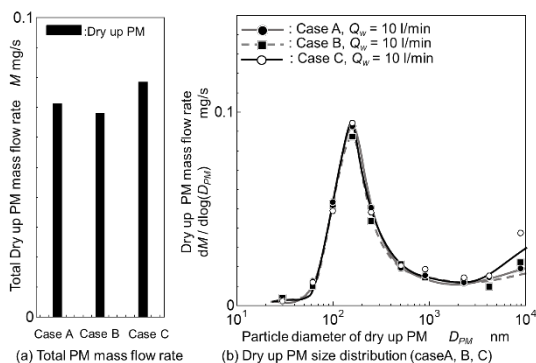


Fig.9 Dry up PM (CaseA, B and C)

(4)まとめ

トルエン層流拡散火炎から排出された PM を含む燃焼ガスに水蒸気および空気を添加し, 冷却することにより得られた粒径分布の違いから水蒸気凝縮による PM の凝集への影響の調査を行った. 得られた結果を以下に示す.

①水蒸気の添加により, Free Flameに対して $160\text{nm} < D_{PM} < 910\text{nm}$ の PM の質量流量は低下し, $D_{PM} > 910\text{nm}$ の PM の質量流量が増加したことから水蒸気添加による PM の凝集促進が確認できた.

②水蒸気供給位置および供給部形状の違いによる粒径分布の差はほぼ見られなかった

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 6 件)

- ① 皆川隼斗, 小林佳弘, 新井雅隆, 層流拡散火炎に金属メッシュを挿入したときに生成される PM の特性, 日本機械学会 2019 年次大会, (2019-9) 秋田
- ② 皆川隼斗, 小林佳弘, 新井雅隆, プール火炎をクエンチした際に生成される PM の特性, 第 57 回燃焼シンポジウム, (2019-11) 札幌
- ③ 佐原永都, 皆川隼人, 小林佳弘, 新井雅隆, 金属メッシュを用いてプール火炎をクエンチした際に生成される PM の酸化特性, 自動車技術会関東支部学術講演会, (2020-3) オンライン
- ④ 皆川隼斗, 小林佳弘, 新井雅隆, 層流拡散火炎をクエンチングした際に生成される PM の酸化特性, 日本機械学会 2020 年度年次大会, (2020-9) 名古屋
- ⑤ 皆川隼斗, 小林佳弘, 新井雅隆, 層流拡散火炎をクエンチした際に生成された PM および Soot の特性, 第 58 回 燃焼シンポジウム, (2020-12) オンライン
- ⑥ 佐藤史哉, 皆川隼斗, 小林佳弘, 新井雅隆, 層流拡散火炎の消炎過程において生成される PM, 自動車技術会関東支部 2020 年度学術講演会, (2021-3) オンライン