

令和元年6月27日現在

機関番号：32657

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18140

研究課題名(和文)水凝縮による燃焼由来ナノPMへの粒径影響

研究課題名(英文)Effect of water condensation on size of nano-PM from combustion

研究代表者

小林 佳弘 (KOBAYASHI, Yoshihiro)

東京電機大学・工学部・准教授

研究者番号：00550576

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：拡散火炎から排出されるPM(粒子状物質)に水蒸気を添加し凝縮させることでPMの凝集を試みた。水蒸気は燃料プール縁から高さ30mmの位置(火炎直上)または80mmの位置(火炎から十分離れた位置)で供給し、混合ダクト内で冷却させ凝縮水を発生させ、LPIによって粒径分布の測定を行った。その結果、水蒸気を添加することによって250nm～2300nmの粒径レンジのPMは減少し、2300nmよりも大粒径PMは増加した。水蒸気を添加することで小粒径粒子が減少し大粒径粒子が増加することから凝集効果は確認できた。しかしながら、供給位置による明確な凝集効果の違いは確認できなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は水蒸気凝縮を利用することでPMの凝集を促進させられる可能性を示したが、これによりPM後処理装置の縮小化につながることで、さらには現在問題視されている極微小PMを除去する手段になりえる可能性が考えられる。また、PMの凝集過程は不明な点が多くあるが、研究の実施によってある程度凝集についての知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：PM (Particulate Matter) aggregation technique by water vapor addition was attempted to reduce fine PM. PM exhausted from a toluene laminar diffusion flame formed by pool combustion system was used as test sample. Particle diameter (DPM) distribution of PM was measured by a Low Pressure Impactor. Water vapor was supplied from two positions, 30mm distance from the pool edge (around the flame tip) and other is far distance from the flame tip. In case of water vapor addition, mass flow rate of water-condensed PM in range of 250nm < DPM < 2300nm was lower than that of non-treated PM and mass flow rate of water-condensed PM in range of DPM >2300 nm was higher than that of non-treated PM. Therefore, it was considered that aggregation PM increased at water vapor addition and condensation.

研究分野：熱工学

キーワード：PM Soot Aggregation Flame

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ナノメータサイズの粒子状物質 (PM: Particulate Matter) による大気汚染や人体への悪影響が問題視されている。特に数 nm ~ 数百 nm 程度の極小粒径の PM ほど人体の奥深くに沈着するため悪影響が大きく、これらの排出量低減が求められている[1]。

極小粒径 PM に対してフィルタ除去効率を向上させるためには単純にフィルタ細孔径を小径化すればよいが、細孔径を小さくするほどフィルタ内の圧力損失が著しく上昇してしまう。例えば自動車用 PM フィルタの場合では圧力損失の上昇は走行燃費の悪化につながり、構造物用空気清浄機等では大型の吸引ポンプを必要としてしまうなどエネルギーの消費が増加してしまう。したがって、PM フィルタ細孔径はなるべく従来のまま、または従来以上に細孔径を大きくすることが望ましい。

一般に燃焼場において生成される PM は炭素質のすすが核となり、SOF (Soluble organic fraction) や水分などが周囲温度の低下とともに冷却され粒子表面に付着していくと言われている[2]。また、この PM に付着した成分が粒子同士を付着させる役目を果たすことが考えられ、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[3]。凝集による PM の粗大化が可能であれば PM フィルタ細孔径を大きくすることにより従来の除去効率を維持したままエネルギー損失を減らすことが可能であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では火炎から排出される PM を含む燃焼ガスに水蒸気を混入し冷却して凝縮させることで PM の凝集促進による粗大化を試み、その評価を行った。また、凝集が盛んに生じる火炎から排出直後で添加することでより大きな効果が期待できるものと推測されるため、本研究では火炎先端部での水蒸気供給も試みた。

3. 研究の方法

(1) PM への空気および水蒸気の添加

水蒸気を供給し火炎から排出された PM を含む燃焼ガスと混合させる装置を図 1 に示す。この装置は PM を定量的に発生させるプール火炎形成装置、水蒸気を添加する供給部、および PM を含む燃焼ガスと水蒸気を混合させるダクトで構成されている。プール火炎形成装置はプール内の液面高さを一定に保つ機構を有しており、定常的な火炎を形成することが可能である。PM を発生させるための供試燃料としてトルエンを用い、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。水蒸気は供給ラインでの凝縮を防ぐために供給ラインを  $120^\circ\text{C}$  に保温し、フローメータ (KG-3, 草野科学社) を用いて水蒸気体積流量  $Q_w = 2.0 \sim 10 \text{ l/min}$  の条件で供給した。混合ダクトの長さは  $1330 \text{ mm}$  で、内径は  $40 \text{ mm}$  であり、総吸引流量  $Q_{total} = 60 \text{ NI/min}$  (ダクト内の滞留時間はおよそ  $1.3 \text{ s}$ ) で PM を含む燃焼ガスと周囲空気および水蒸気を吸引した。当量比を 1 と仮定した時の燃焼ガス体積流量  $Q_c$  は  $1.25 \text{ NI/min}$  であるため空気及び水蒸気によって 50 倍近くに希釈されることになる。およそ  $120^\circ\text{C}$  に保たれた水蒸気を  $10 \text{ l/min}$  で添加した場合、 $1330 \text{ mm}$  の位置での混合ガス平均温度は  $55^\circ\text{C}$  となり、この条件での露点温度 ( $T_d = 58^\circ\text{C}$ ) をわずかに下回っており、およそ  $15 \text{ mg/s}$  程度の凝縮水が発生する。凝縮水を含む混合粒子は図に示すような側面に直径  $2.5 \text{ mm} \times 10$  の穴が設けてあるサンプリングプローブによって捕集し、空気力学相当径で 10 段階に分級する LPI (Low Pressure Impactor, MAIS-10, 東京ダイレック) によって分級した。図 2 に示すように水蒸気は火炎中心軸から半径方向に  $30 \text{ mm}$  離れた位置でプール縁から  $z = 80 \text{ mm}$  下流部から供給した。さらに供給位置による違いを見るために火炎中心軸から  $15 \text{ mm}$  の位置で火炎先端付近の  $z = 30 \text{ mm}$  と十分下流で火炎に熱的な損失を及ぼさない  $z = 80 \text{ mm}$  での供給も行った。なお、火炎先端部に水蒸気添加した場合、若干火炎先端が広がり、排出される PM にわずかな乱れは生じたが、火炎長さや大きな火炎の乱れは見られなかった。

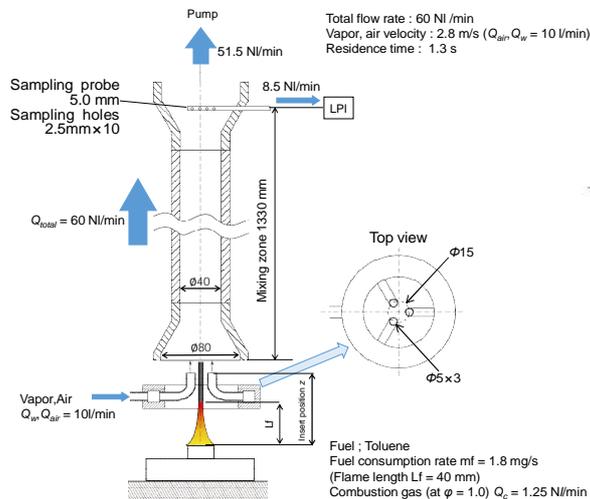


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

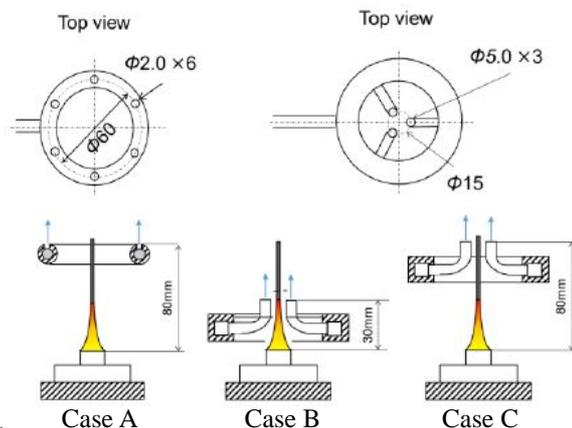


Fig. 2 Water vapor supply method

(2) PM の乾燥処理

LPI 内で分級され捕集された PM および凝縮水は電子天秤により秤量し (Wet PM), その後 120°C で乾燥処理をし, 再び秤量を行った (Dry up PM). なお, LPI により分級される Wet PM の粒径は図 3 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ため, 秤量した Dry up PM は混合粒子内の PM の質量を示している.

4. 研究成果

図 4 に水蒸気無添加時での粒径分布を示す. 図 4 より水蒸気無添加時では 160 nm 付近にピークを持つ山型の分布となり, ピーク粒径での質量流量は 0.2 mg/s 程度であった. また, Wet PM と Dry up PM では質量流量の差はほとんど見られなかった.

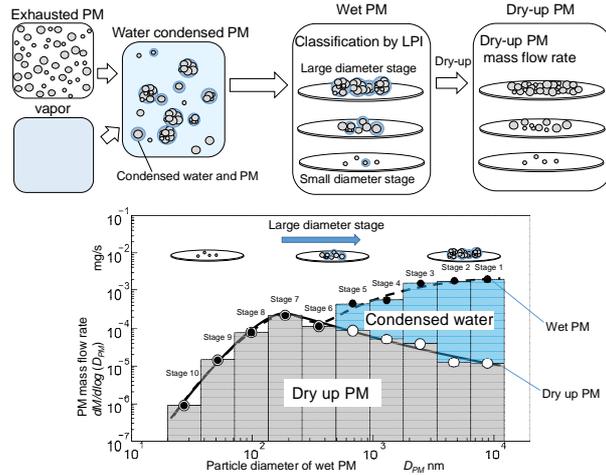


Fig. 3 PM with condensed water captured by LPI

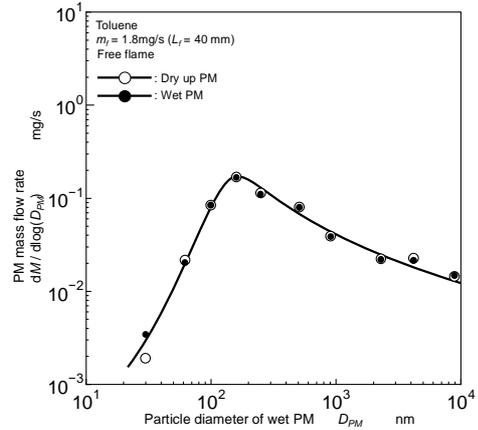


Fig. 4 Free flame PM size distribution

図 5 に水蒸気添加時での PM 総質量濃度, Wet PM 粒径質量濃度分布, および Dry up PM 粒径質量濃度分布をそれぞれ示す. 図 5(a)に示している Wet PM および Dry up PM の総質量濃度の結果から水蒸気流量の増加に伴い凝縮水の発生量は増加傾向にあり, Dry up PM の総質量濃度は一定であった. 図 5(b)に示している粒径分布の結果から主に 250nm より大きい粒子に水分が付着しており, 水蒸気供給量の増加に伴い凝縮水の発生量は増加した. また, ピーク粒径の 160nm 付近での質量濃度は水蒸気流量に関わらず一定であるが, 160nm より小さい粒子では水蒸気を混入することによって質量濃度が減少した. 水蒸気混入による 160nm より小さい粒子の質量濃度の減少割合は水蒸気流量に関わらず一定であった. 図 5(c)の Dry up PM 粒径質量濃度分布の結果では水蒸気を混入することにより, 水分が付着していた 510nm より大きい粒子の質量濃度は増加した.  $Q_w = 0 \sim 4.0$  l/min の範囲では水蒸気流量の増加に伴い 510nm より大きい粒子での質量濃度は増加したが,  $Q_w = 4.0 \sim 8.0$  l/min の範囲では質量濃度の変化はほとんど見られなかった. 小粒径側の PM の質量濃度が減少し大粒径側の質量濃度が増加したことから水蒸気の混入により, 凝集が促進されたと考えることができる.

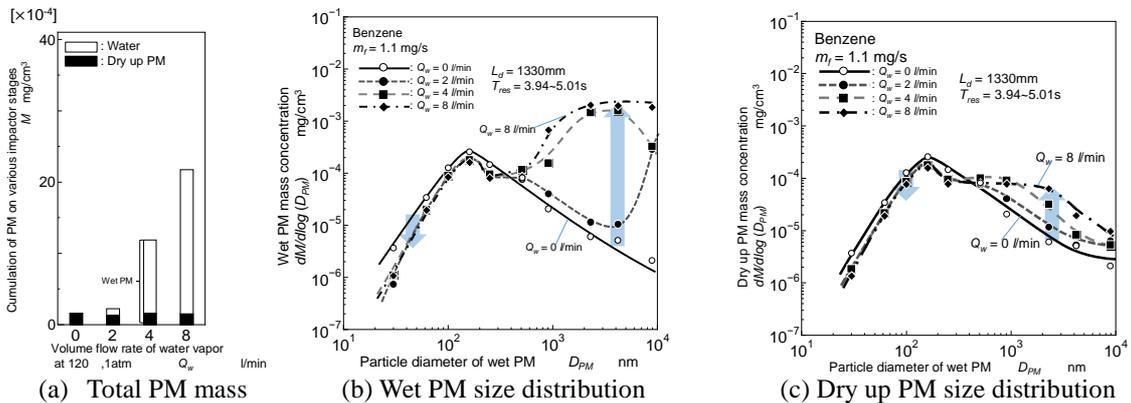


Fig. 5 PM at water steam addition (Case A)

図 6 に燃焼ガスを含む PM に水蒸気を各位置 ( $z = 30, 80$ mm) で添加し得られた Wet PM および Dry up PM の総質量流量および粒径分布の結果を示す. 図 6(a)に示す総質量の結果から,  $z = 30$  mm の位置で水蒸気を添加した場合には PM 中には多量の水分が含まれていることがわかる. ただし, 上述のように本実験装置では最大でおよそ 15mg/s の凝縮水が発生するはずであり, 最大発生量に対しておよそ 1/5 程度の凝縮水がフィルタに粒子として捕集されていることがわかる. これより下流の  $z = 80$ mm の位置で水蒸気を添加した場合には, PM 中に含まれる

凝縮水の量はいくらか高い値となった．図 6 (b)に示された結果より，水蒸気を  $z = 30\text{mm}$  の位置で添加した場合  $DPM < 160\text{nm}$  ではほとんど差がみられなかったが， $160\text{nm} < DPM < 910\text{nm}$  の範囲では減少し，さらに  $DPM > 910\text{nm}$  では値が大きく増加した．そして  $z = 80\text{mm}$  で添加した場合には  $160\text{nm} < DPM < 910\text{nm}$  での減少と  $DPM > 910\text{nm}$  の増加が  $z = 30\text{mm}$  の場合よりも顕著であった．図 6(c)の Dry up PM の粒径分布では Free flame に対して空気を添加することにより  $DPM < 160\text{nm}$  の粒子の質量流量は僅かに増加し  $DPM > 160\text{nm}$  の粒子の質量濃度は僅かに減少した．これは空気の添加により，火炎先端から排出される PM が半径方向に拡散したことで凝集しにくくなったためだと考えられる．火炎先端部に水蒸気添加を行った場合には Free flame の場合に比べ  $250\text{nm} < DPM < 2300\text{nm}$  の質量濃度は減少し， $DPM > 2300\text{nm}$  の粒子は増加したことから凝集効果が確認できた．図 6 の結果ではサンプリング位置での混合ガス温度は露天温度をわずかに下回る程度であったが，図 5 のように凝縮水の発生量を増加させれば大きな凝集効果を得られるものと思われる．さらに  $z = 80\text{mm}$  で水蒸気を添加した場合には火炎先端で添加した場合に比べわずかではあるが凝集効果が大きかった．このような差が生じた理由は火炎先端で添加した場合には半径方向に拡散してしまうためであると思われる．

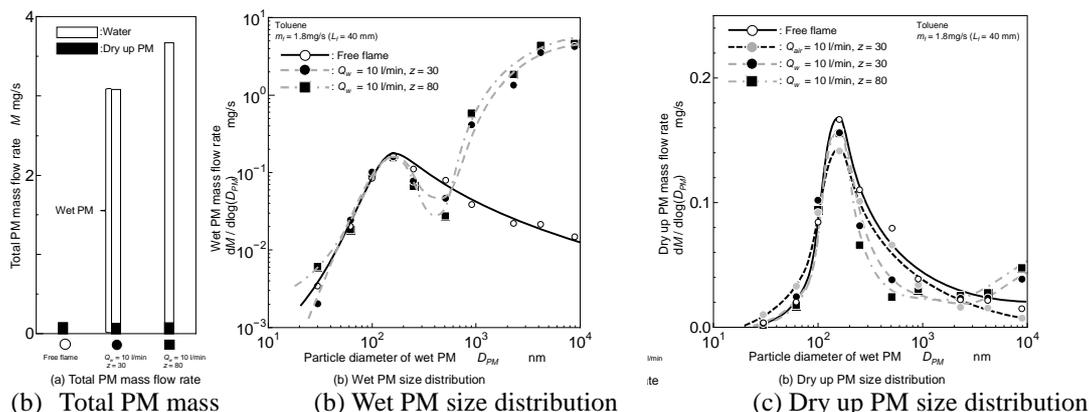


Fig. 6 PM at water steam addition (Case B, C)

以上のことから，水蒸気を混入し凝縮させた場合の Wet PM 粒径質量濃度分布は，火炎から排出された PM と同様に  $160\text{nm}$  付近にピークを持ったが，ピークより小粒径側では質量濃度が減少し，大粒径側では質量濃度が増加した．さらに Dry up PM においても同様の傾向となった．即ち，水蒸気を混入させ凝縮させることは凝集を促進させる効果がある．ただし，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．

< 引用文献 >

1. Gunter Oberdorster, Eva Oberdorster and Jan Oberdorster, Environmental Health Perspectives, Vol. 113, No.7 (2005), pp.823-839.
2. David B. Kittelson, Journal of Aerosol Science, Vol.29, No. 5/6(1998), pp. 575-588.
3. 山本知恵美, 内野寿一, 古畑朋彦, 新井雅隆, 日本機械学会論文集, Vol.75, No.753(2009-5), pp300-307.

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 3件)

佐藤賢太, 北島和太, 小林佳弘, 新井雅隆: 水蒸気凝縮が PM の粒径分布へ及ぼす影響, 2018 年度自動車技術会関東支部学術講演会, (2019-3)

北島和太, 小林佳弘, 新井雅隆: 水蒸気の添加が PM の粒径分布へ及ぼす影響, 第 56 回燃焼シンポジウム, (2018-11)

北島和太, 小林佳弘, 新井雅隆: 燃焼ガス/PM/空気/水蒸気混合流中における水凝縮が PM 凝集へ及ぼす影響, 日本機械学会 2018 年次大会, (2018-9)

〔図書〕(計 1件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1件)

名称:  
 発明者:  
 権利者:  
 種類:  
 番号:  
 出願年:  
 国内外の別:

取得状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：  
ローマ字氏名：  
所属研究機関名：  
部局名：  
職名：  
研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：  
ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。