

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 23 日現在

機関番号：32657

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K21391

研究課題名(和文) ウォーターミストを用いた燃焼由来のナノPM捕集

研究課題名(英文) Capture of nano-PM exhausted from diffusion flame using water mist

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では火炎から排出される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の凝集を試みた。そして燃焼由来のPMに凝縮水が付着した混合粒子の粒径を測定し、水蒸気凝縮によるPMの凝集促進効果の研究を行った。その結果、質量濃度分布で200nm付近にピークを持つ火炎由来のPMに水蒸気を混入させ冷却かつ水蒸気凝縮させた場合、水分を含んだPMは500nm付近にピークを持つ分布となった。このPM中の水分を除去した個体PMのみを見た場合、200nm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することがわかった。

研究成果の概要(英文)：In this study, PM aggregation technique was attempted by water vapor addition and condensation. PM exhausted from a benzene laminar diffusion flame formed by a pool combustion system was used as test sample. Mass concentrations of dry up composition and condensed water in water condensed PM were measured by filter sampling method. Size distributions of water condensed PM and non treated PM were also measured by a Low Pressure Impactor. PM diameter (DP) corresponding to a peak mass concentration was around 200nm. Mass concentration of water condensed PM at DP > 200nm was higher than that of non treated PM. Then, mass concentration of water condensed PM at DP < 200 nm was lower 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 凝縮水 凝集

1. 研究開始当初の背景

火力発電所、工場および船舶などの燃焼を用いた機関から排出される粒子状物質 (PM: Particulate Matter) による大気汚染や呼吸疾患といった人体への悪影響が問題視 (近年では PM2.5 問題として) されており、特に数 nm ~ 数十 nm 程度の極小粒径 PM ほど人体への悪影響が強いことが懸念され、これらの排出量低減が強く求められている (欧州では極小粒径を規制対象とした個数規制が実際に施行され、その規制値は徐々に厳しくなっている)。現状の PM 低減法の主流は燃焼法の改善および多孔質セラミック PM フィルタ等の後処理装置による捕集と酸化処理である。PM フィルタについて様々 (多孔質セラミックフィルタや電気集塵など) が開発されているが、そのどれもが PM 除去効率は数百 nm 以上の粒子では比較的高いものの数 ~ 数十 nm の極小粒径 PM の場合には著しく低いのが現状である。

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開口径を小径化すればよいが、開口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悪化につながり、構造物用空気清浄器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 フィルタ開口径はなるべく従来のまま、または従来以上に開口径を大きくすることが望ましい。一般に燃焼場から排出される粒子はナノメートルオーダーの PM の他に燃焼由来の水蒸気が周囲温度の低下によって液化したマイクロメートルオーダーの凝縮水があり、凝縮水の表面に PM が付着して、付着した PM 粒子間で凝集と合体がおこることで粗大粒子になると考えられている。そこで大粒径の水液滴等に PM を付着させることで極小粒径 PM を取り除くことが出来れば、PM の除去効率向上が期待できるものと考えられる。

2. 研究の目的

このような観点から、本研究では火炎から排出される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 の凝集を試みた。そして燃焼ガス中 PM に凝縮水が付着した混合粒子の粒径を測定し、水蒸気凝縮による PM の凝集促進効果の研究を行った。

3. 研究の方法

本研究で用いた実験装置を図 1 に示す。実験装置は、PM を発生させるプール火炎形成装置、水蒸気を発生させるボイラ、PM を含む燃焼ガスと水蒸気を混合させる混合ダクト、および PM を含む燃焼ガスと周囲空気と水蒸気を一定の流量で吸引するためのポンプで構成されている。PM を発生させるために供試燃料としてベンゼンを用い、PM 排出量 $M_p =$

0.08 mg/s の定常な条件で燃焼させた。また、ボイラにより発生させた水蒸気は $M_w = 37.8$ mg/s (体積流量 $Q_w = 4.0$ l/min) の定常な条件で供給した。PM を含む燃焼ガスと周囲空気を混合ダクト下流部に設置したポンプにより吸入し ($Q = 20$ NI/min)、混合ダクト入口のベンチュリ部にて水蒸気の混入を行った。

測定対象は PM を含む燃焼ガスと周囲空気を混合した Burned Gas および Burned Gas に水蒸気を混入させた Burned Gas + Vapor の二種類である。Burned Gas + Vapor はおよそ 40 の Burned Gas と 120 の水蒸気を混合ダクト内で混合させ、露点付近 (およそ 53) に温度制御することにより水蒸気の凝縮を試みた。なお、Burned Gas + Vapor は水蒸気を混入させているため Burned Gas よりも周囲空気の吸入量が少なくなる。

ガラス繊維フィルタ (GF-75, ADVANTEC 社) によって混合部より 630 mm 下流で測定対象である燃焼ガスに含まれる PM と凝縮した水分の捕集を行うことで、PM と水分の質量濃度を求めた。また、混合部より 500 mm 下流にプローブを設置し LPI (Low Pressure Impactor, MAIS-10, 東京ダイレック社) に混相流体を導入して測定対象の質量濃度分布を求めた。

図 2 に捕集後の PM の測定方法について示す。フィルタに捕集された PM を電子天秤により秤量した後にオープンにより水分を蒸発させてドライ粒子とし、再度電子天秤によって秤量した。また、LPI に導入した PM についても LPI の各ステージ上に捕集された PM ごとに上述の手法と同様の手順で測定した。このとき、加熱前に測定した PM を Wet PM、加熱して水分を蒸発させた PM を Dry up PM と呼ぶ。

なお、LPI により分級される PM の粒径は図 3 に示すように PM と凝縮水の混合粒子であるが、乾燥させた後に質量の測定を行っているので、秤量した PM は混合粒子内にある PM の質量を示している。

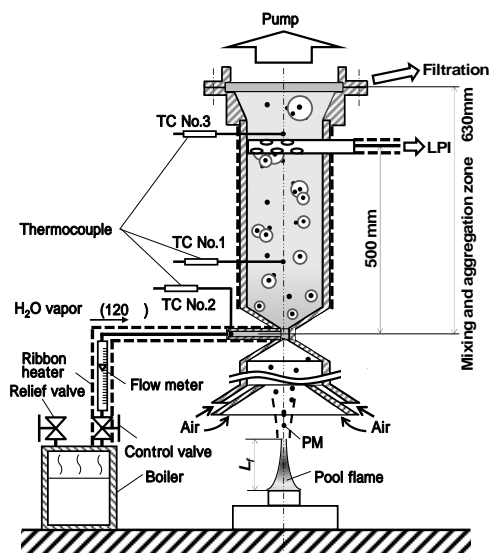


Fig. 1 Vapor mixing and aggregation line

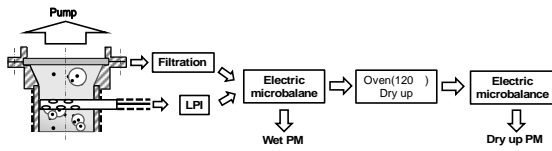


Fig. 2 PM sampling and analysis method

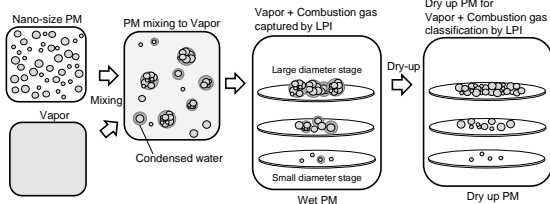


Fig. 3 Schematic of Vapor + Combustion gas captured by LPI

4. 研究成果

4.1 フィルタ捕集による PM と凝縮水の測定

混合部下流に設置したフィルタによって Burned Gas, Burned Gas + Vapor の PM について捕集を行った。ダクト内の PM を含む混相流体の単位体積当たりで捕集された PM を表現したものを図 4 に示す。

Burned Gas の結果を見ると、総質量でおよそ $2.4 \times 10^{-4} \text{ mg/cm}^3$ であり、そのうち水分量はおよそ $0.1 \times 10^{-4} \text{ mg/cm}^3$ であることから、Burned Gas はおよそ 4% の凝縮水を含んでいることがわかる。次に Burned Gas + Vapor の場合、フィルタにはおよそ $5.5 \times 10^{-4} \text{ mg/cm}^3$ の凝縮水が付着していた。これは水蒸気の供給量のおよそ 0.5% であり、残りはフィルタまでに凝縮せずに水蒸気の状態でダクトを通過したと考えられる。また、フィルタに付着した水分は PM に付着した凝縮水と凝縮水のみで粒子となったものの 2 種類が考えられることに注意する必要がある。

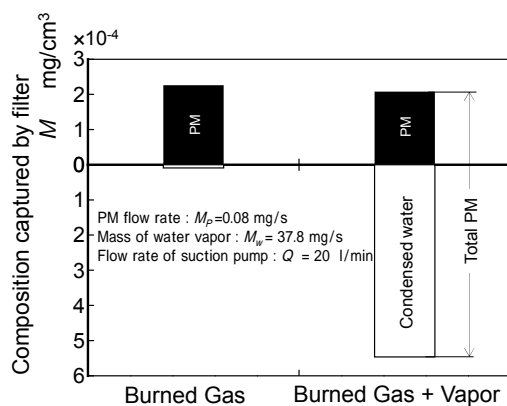


Fig. 4 PM composition

4.2 水蒸気混入による PM の粒径変化

ダクト内の燃焼ガスに水蒸気を混入させることによる PM の粒径への影響を調査するために、LPI を用い Burned Gas および Burned Gas + Vapor の粒径質量濃度分布の測定を行った。得られた結果を図 5, 図 6 に示す。なお、図 5 の Burned Gas の測定結果について

は各ステージで水分が検出されなかったため、乾燥後の Dry up PM についてのみ示す。

図 5 に示した Burned Gas の質量濃度分布を見ると、200 nm 付近にピークを持つ分布となり、質量濃度はおよそ $1.0 \times 10^{-4} \text{ mg/cm}^3$ であった。次に、図 6 に示した Burned Gas + Vapor の質量濃度分布を見ると、水分を含んだ Wet PM では 500 nm 付近にピークを持つ分布となった。Dry up PM にした場合は Burned Gas と同様に 200 nm 付近にピークを持つ分布となり、質量濃度も Burned Gas と同様になることがわかった。また、Wet PM と Dry up PM の質量濃度分布の差を見ると Burned Gas + Vapor の場合 200 nm よりも大粒径側に多量の凝縮水を含んでいることがわかった。

Burned Gas および Burned Gas + Vapor の Dry up PM の質量濃度分布と総質量濃度について図 7 に示す。

Dry up PM の質量濃度分布の最大値は Burned Gas と Burned Gas + Vapor の両者ともおよそ 200 nm であり、PM の総質量濃度は両者ともおよそ $1.0 \times 10^{-4} \text{ mg/cm}^3$ となった。また、Burned Gas + Vapor はピーク粒径である 200 nm より大粒径側では Burned Gas よりも質量濃度が高く、逆に小粒径側は濃度が低くなる結果となった。この結果は、Burned Gas よりも Burned Gas + Vapor の方が凝集した PM が増加していると考えられる。このことより、燃焼ガスに水蒸気を混入し凝縮させることで PM を核として周囲の水蒸気が凝縮し大粒径となり、PM と凝縮水の混合粒子が周囲の粒子と付着することで粗大粒子に成長していくことが考えられる。

以上の結果より、PM は水蒸気を混入させ、冷却かつ水蒸気を凝縮させることにより極小粒径の PM が減少して大粒径に凝集すると考えられる。このことより、水蒸気と PM を混合させて水蒸気の凝縮によって PM を凝集させることにより、燃焼ガスに含まれる PM の粒径をコントロールすることが可能になると思われる。

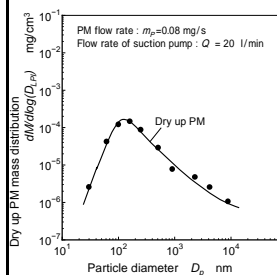


Fig. 5 PM size distribution by Benzene-PM

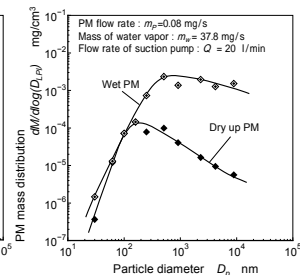


Fig. 6 PM size distribution by PM + Vapor

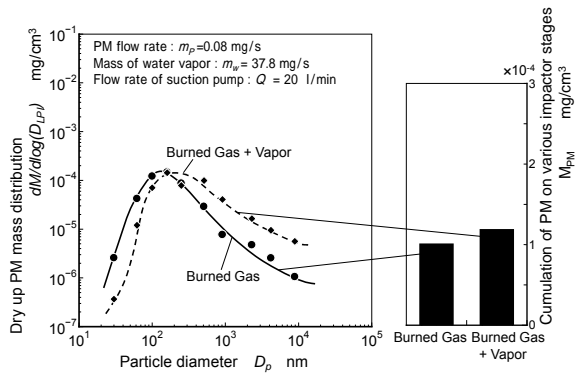


Fig. 7 PM size distribution and total mass of PM

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計1件)

進藤大知, 小林佳弘, 新井雅隆; 水凝縮と生成されたウォーターミストによる層流拡散火炎から排出されるPMの凝集過程への影響, 第54回燃焼シンポジウム, (2016-11)

6. 研究組織

(1) 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