

令和元年6月21日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00583

研究課題名(和文) 環境汚染物質・臭気の高効率除去システムの開発

研究課題名(英文) Development of a high efficiency removing system of environmental pollutant materials and bad-smelling components

研究代表者

姫野 修廣 (Himeno, Nobuhiro)

信州大学・学術研究院繊維学系・教授

研究者番号：20114887

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者が提案するシャワークリーニングシステムにおいて、サブミクロン粒子を凝縮核としたミストを発生させ、シャワー部の背後に-30℃まで冷却できる冷却部を設置して粉塵の除去実験を行った結果、冷却部に霜が形成されると、多孔質状態の霜表面にミスト粒子が捕集され、捕集が難しいサブミクロン粒子においても95%以上の高効率な除去が可能となることを明らかにした。

また代表的な悪臭成分であるエチルアミンについても除去実験を行ったところ、ミストを発生させることにより、ミスト表面で臭い成分が吸収され、ミスト粒子を除去することにより、シャワーのみの場合に比べてさらに大きな除去効果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

昨今環境汚染が大きな社会問題となっているが、環境汚染ガス・悪臭成分・粉塵等の環境汚染物質を同時に除去するのは難しい。例えば工場からの排気ガスの場合、粉塵については、粒径ごとにサイクロン、バグフィルター、電気集塵機を組み合わせた大規模装置で処理している。また臭いについては、これとは別に活性炭で吸着する方法があるが、処理効率が悪く、悪臭空気を何度も循環させるため、完全な除去には長時間を要する。それに対し、本研究で開発した、ミストを発生させ、シャワークリーニングと冷却部を組み合わせたシステムでは、大流量条件で粉塵と悪臭成分を瞬時に除去することができ、その意義は非常に大きいと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Experimental study was conducted on high efficiency removing of submicron particles. A lot of steam was introduced to the air flow including submicron particles. Then mist was generated by the submicron particles working as nuclei of condensation. Those mist particles were then efficiently removed by baffle boards and a cooling pipe which was cooled to -30 °C. By cooling to under 0 °C, frost was formed on the cooling pipe; the steam contained in the air flow moves onto the cooling pipe, and the small particles efficiently collide with the cooling pipe then to be captured by the frost. In this way the concentration of the submicron particles could be lowered to less than 5% of the original concentration.

The experiment was also conducted with this system on removing a bad-smelling component using ethylamine as a specimen. Since the mist particles absorbed the ethylamine, removing performance was greatly improved compared with a simple shower cleaning system.

研究分野：熱工学

キーワード：環境技術 環境汚染物質除去技術 シャワークリーニング

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

昨今、大気汚染、水質汚染など環境汚染が大きな社会問題となっており、汚染物質の効率的除去システムの開発が急務となっている。例えば、ゴミ集積施設、工場、トンネル工事現場などからの排出ガスには、粉塵のみならず環境汚染ガスや悪臭成分も含まれており、サイクロン、バグフィルター、電気集塵器といった従来の集塵システムだけでは対応できず、総合的なクリーニングシステムが必要となる。

こうした背景から本研究では、シャワークリーニングシステムを利用した除去システムを提案し、これについて研究を行う。雨天の後の大気が非常に清浄になることからわかるように、シャワークリーニングを利用すると、粉塵については微細なレベルまで除去できる上、悪臭などの化学汚染物質も水滴に溶解して除去することができる。特に本システムの大きな特徴として、シャワークリーニングに通す前にヒーターによる水蒸気発生部を通過させ排気ガスを加熱・加湿する。これにより、排気ガス中に含まれる水蒸気が、低温のシャワー水滴表面で直接凝縮し、その際の水滴に向かう蒸気流により効率的に汚染物質を水滴に集め除去効率を高めることができる。

2. 研究の目的

上述のように、環境汚染ガス・悪臭成分・粉塵等の環境汚染物質を同時に除去するのは難しいが、研究代表者が提案しているシャワークリーニングシステムによれば、粉塵については数ミクロン以上の粒子であればほぼ完全に除去でき、臭い成分も同時に除去可能となる。ただサブミクロン粒子については現状では除去率がまだ十分ではない。そこでこれらを凝縮核としてミストを発生させ、結果として除去粒子を大きくすることによって除去効率を高める方法について研究を行う。

また研究代表者の最近の研究によれば、サブミクロン粒子を含む流体を高温にすると、ブラウン運動によって粒子が凝集し捕集が容易になる結果が得られている。本研究では、こうしたブラウン凝集の効果についても検討を行う。

さらに、悪臭成分についても、こうしたミスト生成によるシャワークリーニングの効果について検討を行う。

3. 研究の方法

実験装置の写真を図1に示す。図1中央がシャワー部で、寸法は断面10cm×10cm、長さ1.2mである。粉塵を含んだ搬送空気流は、図の左から右に流れ、シャワー部出口にじゃま板部と冷却部および測定部が設けられている。搬送空気流は、シャワー部左に位置するボイラー部で水蒸気を添加され、100°C以上に加熱されてシャワー部に流入する。この際、水蒸気添加量を大幅に増やしてミストを発生させるが、シャワー部だけではミストを除去できない可能性があるため、その背後にじゃま板部と冷却部を取り付けた。

図2にじゃま板部の概要を示す。じゃま板は円形の板と中央に穴のあいたドーナツ状の板を組み合わせたもので、図の左がシャワー側、右が測定部側になっており、左側から流入した液滴は、6枚（3組）のじゃま板に衝突することで除去される仕組みになっている。

またじゃま板だけではミストを十分除去できない可能性があるため、図3に示す冷却部を取り付けた。外形10mm、厚さ0.8mmの銅管（全長550mm）をコイル状に巻き、アクリル円管の中に銅管の両端が出るようにしてはめ込む。その銅管に恒温槽で-30°Cに冷却した不凍液を流し循環させることにより、流路内を流れる空気を冷却して空気中の水蒸気を引き寄せ、このときに発生するコイルへ向かう水蒸気流を利用して効率良くミストを除去する。

ただし冷却パイプだけでは管中央部を



図1 実験装置全景

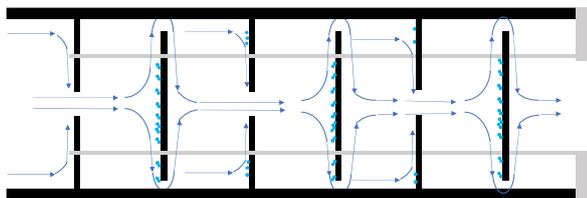


図2 じゃま板部



図3 冷却部



図4 冷却部内じゃま板

搬送空気流が素通りしていく可能性があるため、冷却パイプに接する形で銅製のじゃま板を多数取り付けする方法を試みた。図4に冷却部に製作したじゃま板の写真を示す。冷却パイプの隙間に入って良好に接触できるように厚さ0.3 mmの銅板を使用して直径55 mmの円板に加工し、中心から45°の切れ込みを入れた。各円板の切れ込みの方向を不揃いにして設置することにより、じゃま板の機能を持たせた。各円板はネジ棒にナットで固定してあるので、切れ込みの向きや枚数を自由に調整できるようになっている。今回はこれを最大30枚設置した。これにより、冷却効果を上げるとともに、極微細粒子の捕獲率向上を図っている。

また後述するように、冷却パイプを氷点下に冷却すると表面に霜が形成される。この霜が捕獲に大きな影響を及ぼすので、冷却部内部の様子を内視鏡カメラ（サンコー製 MTB4STKD）で観察した。

粒子数の測定には、パーティクルカウンター（Beckman Coulter 製、HHPC6+）を使用した。1分間あたりの粒子数を0.3 μm, 0.5 μm, 1.0 μm, 2.0 μm, 5.0 μm, 10.0 μmの6つの粒子径について同時測定できる。ただしサブミクロン粒子試料として従来使用していた線香の煙を添加して測定したところ、粒子濃度が高すぎてパーティクルカウンターの測定限界を超え測定不能であることがわかった。そこで実験室内の空気をそのまま使用し、空気中に微量に含まれる粉塵を測定対象とした。

搬送空気流量はすべての実験において $V=0.0058\text{m}^3/\text{s}$ とした。水蒸気を添加する実験では、最大電力が3 kWのボイラーを使用し、加える電力量により発生水蒸気量を調節する。搬送空気の加熱温度は100°C、シャワーを8本流して測定を行った。以下で述べる各実験では、加熱せず、シャワーを流さない状態で測定した空気中に含まれる粒子数を基準粒子数として、この粒子数との比較により粒子除去率の検討を行った。

また臭い実験では、上流側でエチルアミン水溶液の臭い蒸気を供給し、下流測定部において臭いモニタ（神栄テクノロジーOMX-AMD）により臭い強度を測定した。

4. 研究成果

(1) じゃま板の効果 最初に、図2に示すじゃま板の性能評価を行った。その結果を図5に示す。縦軸は、前述の加熱をせずシャワーを流さない状態で測定した基準粒子数で規格化した測定粒子数 y 、横軸は粒径を示している。この実験では、じゃま板の数の影響を調べるため、いずれも搬送空気の加熱は行わず（ミストの発生はない）、シャワーを8本流した状態で実験した。じゃま板の数については、図2において、真ん中が開いた板と周りが開いている板の2枚で1組とした。図5の凡例に示してあるように、■はシャワーを流さない場合（基準値）、■はじゃま板を設置しない場合（シャワーは流す）、■はじゃま板が1組の場合、■は2組の場合、■は3組の場合である。じゃま板を設置しない■の場合、1.0 μm以上の粒子径で測定粒子数が大きく増えている。このことはシャワーによって微細粒子を除去できないばかりか、かえって粒子数が増えていることを意味している。この原因として、空気中の微細粒子以外にもシャワーの液滴が混入し、それを測定したためと考えられる。従来の線香の煙を添加して測定した場合には、粒子数が多いためにシャワー液滴の影響は無視できたが、今回の実験では空気中に微量に含まれる粒子数を測定対象としているため、こうしたシャワー液滴の混入が無視できない事情による。しかしじゃま板の枚数が増えると、大きな粒子径では急激に測定粒子数は減少しており、じゃま板の効果が確認できる。しかし1.0 μm以下の粒子径については、じゃま板による除去効果は確認できるものの、その効果は非常に小さい。このように、じゃま板の設置により液滴などの大きな粒子については除去効果があるが、サブミクロン粒子については、じゃま板だけでは大きな効果は期待できない。粒子径が1.0 μm以下になるとじゃま板を設置しても空気流とともに流れ去る粒子が多いことが推察される。

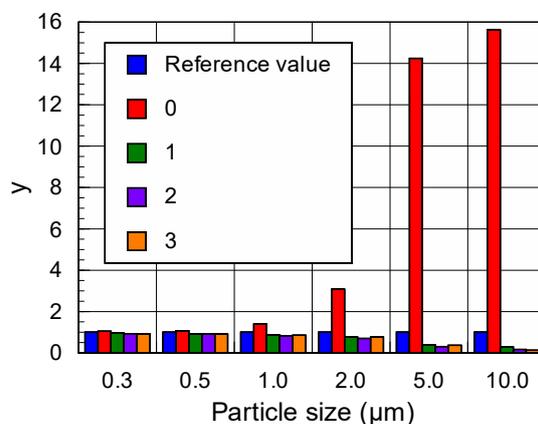


図5 じゃま板の効果（ミスト無し）

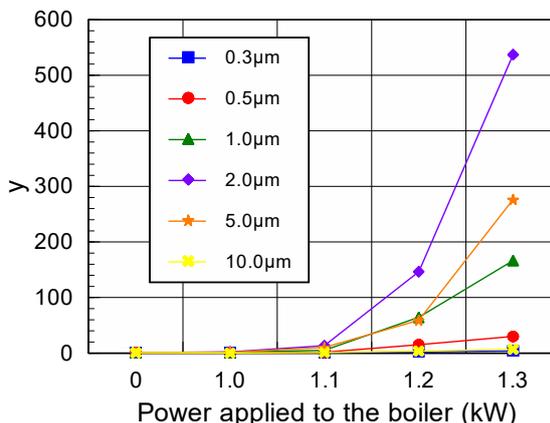


図6 じゃま板の効果（ミスト有り）

次に、じゃま板によるミストの除去性能についても調べた。じゃま板は3組すべて設置した状態で実験を行った。その結果を図6に示す。縦軸は基準粒子数で規格化した測定粒子数 y 、横軸はボイラーに加えた電力量である。この結果から、電力量が1.1 kWを超えるとミストが測定部に流入している

ことが確認でき、じゃま板だけではミストの除去には不十分であることがわかった。

(2) 冷却部の効果 そこでミストを除去する方法として、流路内を冷却し、冷却壁面上に水または氷としてミストを捕集する方法を検討した。搬送空気の冷却のため流路内に図 3 に示す冷却熱交換器（図 4 のじゃま板は無し）を設置し、そこに恒温槽で -30°C に冷却した不凍液を循環させた。実験結果を図 7 に示す。縦軸、横軸は図 6 と同様である。冷却することにより、図 6 のじゃま板のみの場合に比べて、ヒータに加える電力量が増加し蒸気発生量が多くなっても測定粒子数は小さく抑えられており、除去性能は上がっていることがわかる。しかし、供給電力量が 1.3 kW になると急激に粒子数が増えている。この結果から、流路の冷却は、限界はあるもののミストの除去に一定の効果があることがわかった。

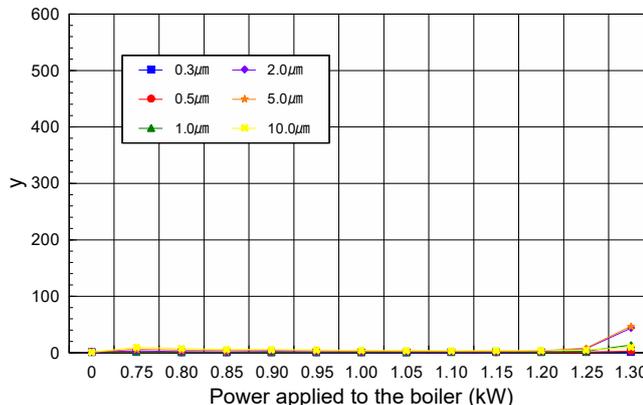


図 7 冷却部の効果（ミスト有り）

この結果から、流路の冷却は、限界はあるもののミストの除去に一定の効果があることがわかった。

そこで冷却の効果をさらに向上させるため、図 4 に示す冷却部じゃま板を図 3 に示す冷却パイプコイル内に設置して実験を行った。この状態で、表 1 に示す Condition 1-3 の 3 つの条件で粒子数を測定した結果を図 8 に示す。縦軸、横軸は、図 5 と同様である。

まず Condition 1 は、搬送空気を 100°C に加熱し、シャワーを 8 本流す場合。この場合には水蒸気は添加しないので直接接触凝縮などの影響はないが、高温にすることによりブラウン凝集が促進されると考えられる。

Condition 2 は、Condition 1 の条件に加えて流路を冷却した場合である。この場合には、積極的な水蒸気添加はないが、空気中に自然に含まれる水蒸気が冷却面で凝縮するため、いくらかの凝縮面に向かう水蒸気流の影響が考えられる。

Condition 3 は Condition 2 の条件に加えて水蒸気を添加した場合（ボイラーの加熱量： 1.5 kW ）である。この場合には、ミストが生成され、本研究で目指している最大限の捕集効果が期待される。

以上の実験条件の特性を踏まえて図 8 を見ると、Condition 1 では、サブミクロン粒子の数は減少している一方、粒径が大きな粒子の数は増えている。このことから、ブラウン凝集の効果が表れているものと考えられる。またシャワー液滴をカウントしている可能性もある。なお図 8 の縦軸は基準状態の粒子個数からの相対値を表しており、絶対値でいえば、基準状態で $0.3\mu\text{m}$ の粒子数は 30 万個程度、粒径の大きな $5\mu\text{m}$ の粒子数は 30 個程度、 $10\mu\text{m}$ の粒子数は数個程度である。したがって絶対値でいえば、粒径の大きな粒子数が非常に少ないことは考慮しておく必要がある。

表 1 実験条件

	Air Heating (100°C)	Shower (8 units)	Cooling (-30°C)	Mist (1.5 kW)
Condition 1	○	○		
Condition 2	○	○	○	
Condition 3	○	○	○	○

次に Condition 2 では、流路を冷却するだけで Condition 1 より粒子は減少しており、空気中に含まれる水蒸気が冷却面で凝縮するために、凝縮面に向かう水蒸気流が発生して捕集効果が上がっているものと考えられる。ただし、空気中の水蒸気量はそれほど多くないため、捕集率の向上は限られている。

最後に Condition 3 では、以上の 2 つの実験条件に比べて捕集率は格段に向上しており、水蒸気添加とミスト生成の効果が著しいことがわかる。

このように、本研究で提案する水蒸気を大量に添加し、ミスト生成する方法は、じゃま板を備えた冷却部を設けることによって非常に有効であることが明らかとなった。

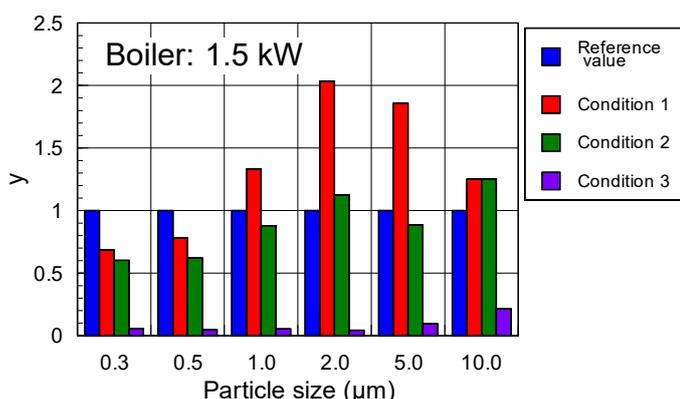


図 8 condition 1-3 での除去率の比較（ボイラー加熱量 1.5 kW ）

(3) 蒸気添加量の影響 次に、添加する水蒸気量の除去率への影響を調べるため、熱交換器内のじゃま板の設置数は図8と同じ30枚で条件を固定し、ボイラーの電力量が1.0 kWと2.0 kWの場合について、図8の実験と同様にCondition 1から3までの3つの条件で測定を行った。

その結果、蒸気発生量の少ない1.0 kWの場合には、ミクロンオーダーの大きな粒子の除去率が低くなり、蒸気発生量の多い2.0 kWの場合には、水蒸気の添加量がミストの除去性能を上回るために全体に除去率は低下する結果が得られた。このように、ボイラー電力量(蒸気発生量)には最適値が存在することがわかった。

(4) 冷却部じゃま板の枚数の影響 次に、冷却パイプコイル内に設置したじゃま板の枚数を図8の30枚から10枚と20枚に減らした場合について実験を行った。その結果、いずれの場合もサブミクロン粒子の除去率が95%程度で大きな違いはなく、じゃま板の枚数が10枚以上あれば、十分な除去性能を得られることがわかった。

(5) 冷却効果の詳細な検討 以上のように冷却部を設けることにより大きな除去率向上が得られるが、これについて詳しく検討するため、まず冷却温度による影響について調べてみた。図9に、熱交換器内を循環させる冷媒の冷却温度を変えた場合の結果を示す。縦軸はCondition 3の最終的な除去率、横軸は冷却温度で、各粒径について測定した結果を示してある。5 μm及び10 μmの粒子に関しては、元々の粒子数が少ないため、除去率に大きな変動が見られるが、計測数が多いそれ以下の粒子径では、-7.5°C以下に冷却すると、高い除去率となっている。更に、-10°C以下に冷却した場合には、除去率にほとんど差が見られない。図10と図11に冷却前後の冷却パイプの写真を示すが、氷点下に冷却すると冷却管表面に霜が付着し、-10°C以下に冷却すると霜の成長具合は温度によ

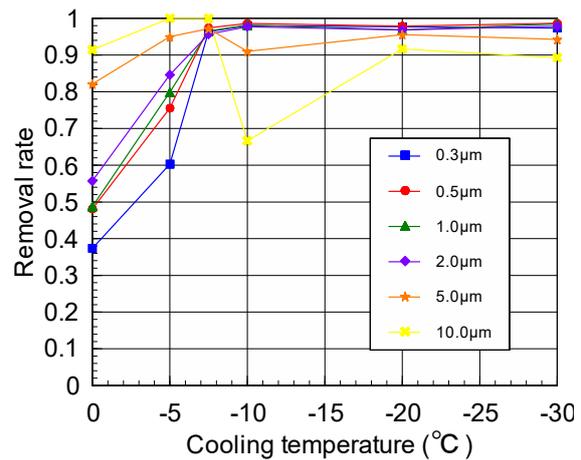


図9 冷却温度の除去率への影響



図10 冷却部 (冷却前)



図11 冷却部 (冷却後)

らずほぼ一定となった。測定された除去率は、このことと関係していると考えられる。特に冷却温度が0°Cの場合には、冷却管表面には霜の形成が見られず除去率が低い。また冷却温度が-5°Cの場合には、霜は形成されるもののその成長は遅く、-10°C以下の場合に比べて霜の付着量が少ない。それに伴い、除去率は0°Cの場合より大きい、-10°C以下の場合より小さい。以上の結果から、霜の形成状態がサブミクロン粒子の除去率に大きな影響を及ぼしていることが推察される。

図12は、冷却器を-30°Cに冷却して蒸気を添加した場合に測定された0.3 μmの粒子数の時間変化である。縦軸は1分間あたりに計測される粒子数、横軸は蒸気添加と冷却を同時に開始した後の経過時間である。また図13と図14は、図12の5分と25分の時点での冷却器内部の管表面に付着する霜の状態を内視鏡カメラにより観察した結果である。これらの図より、時間経過とともに霜が形成・成長しており、その成長具合と粒子の除去率に大きな関連があることがわかる。

以上のことを総合して考察すると、サブミクロン粒子のような極微細粒子は、例えばじゃま板などで搬送空気流から除外されたとしても空気中に漂い、やがては空気流とともに下流に流されてしまう。ところが冷却管表面

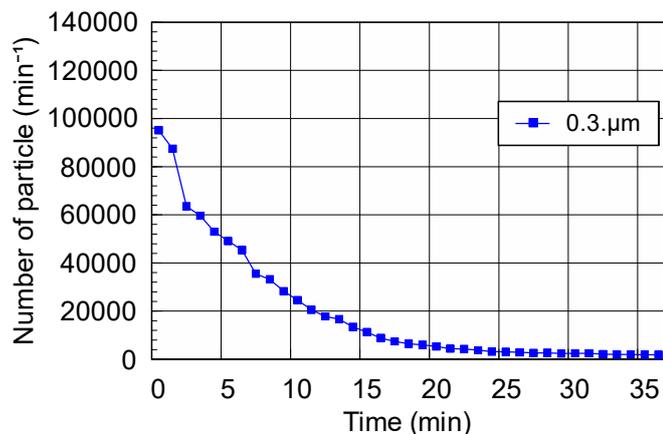


図12 0.3 μmの粒子数の時間変化 (-30°C冷却時)



図13 冷却面 5min 後



図14 冷却面 25min 後

に霜が付着すると、冷却管に向かう蒸気流とともに冷却管に衝突し、多孔質状の霜によって捕獲され空气中に漂うことがない。このことが霜の形成によってサブミクロン粒子の除去率が向上する原因と考えられる。

(6) 臭い除去実験の結果 5%濃度のエチルアミン水溶液を臭い試料として、臭い除去実験を行った結果を図15に示す。縦軸は臭い強度、横軸は実験条件を示し、シャワー0本の場合の臭い強度を参照値として、Condition1がシャワーを1本だけ稼働した場合、Condition2がミストを発生させ、シャワー1本と冷却部で臭い除去を行った結果を示している。

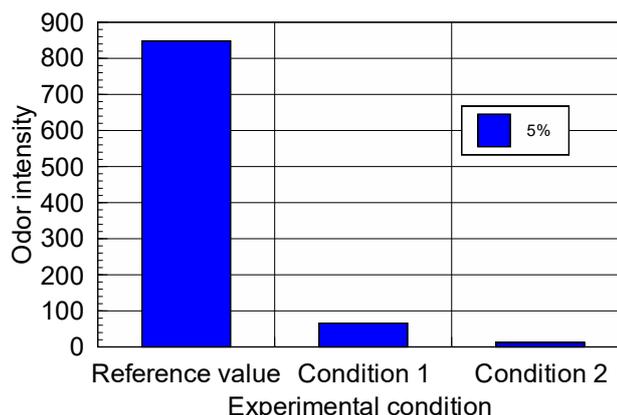


図15 臭い除去に及ぼすシャワーと冷却の効果

この結果から、シャワー部だけでもかなり臭いを除去できるが、ミストを発生させることによりさらに大きな除去効果が得られることがわかる。これはミスト表面で臭い成分が吸収され、ミスト粒子を除去することにより、シャワー以外でも臭い除去が達成されるためと考えられる。

以上のように、ミストを発生させ、冷却部を備えた本シャワークリーニングシステムにより、実用的な大流量条件で、粉塵のみならず臭い成分もほとんど除去できることが明らかとなり、実用上の意義は非常に大きいと考えられる。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

- ① 姫野修廣, 岩田拓実, 田胡裕貴; ミスト生成と冷却除去法によるサブミクロン粒子の高効率除去に関する研究, 第56回日本伝熱シンポジウム講演論文集 CD-ROM(2019-5), J122
- ② 姫野修廣, 譜久山恒士, 岩田拓実, 佐野健太; サブミクロン粒子の高効率除去法に関する実験的研究, 第55回日本伝熱シンポジウム講演論文集 CD-ROM(2018-5), D111
- ③ 姫野修廣, 譜久山恒士, 岩田拓実, 佐野健太; サブミクロン粒子の高効率除去法に関する実験的研究, 2018年度 日本伝熱学会北陸信越支部 春季伝熱セミナー

6. 研究組織

なし

※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。