

機関番号：13601  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20560186  
 研究課題名（和文） シャワークリーニングによる環境汚染ガス・臭気と粉塵除去システムの開発  
 研究課題名（英文） Development of a removing system of environmental pollutant gases, smell and dust by use of shower cleaning  
 研究代表者  
 姫野 修廣（HIMENO NOBUHIRO）  
 信州大学・繊維学部・教授  
 研究者番号：20114887

研究成果の概要（和文）：排出ガスに含まれる粉塵や悪臭成分などの化学汚染物質を同時に除去する方法として、上流で加熱・加湿を行い、液滴への直接接触凝縮効果により除去効率を高めたシャワークリーニングシステムについて実験的研究を行った。その結果、本システムの除去性能を定量的に明らかにするとともに、水蒸気を添加することにより、粉塵、臭い成分とともに、非常に効果的に除去できることを明らかにした。また光触媒による汚染物質分解性特性についても明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The present study proposes a new shower cleaning system which can remove not only small particles but also environmental pollutant gases and bad-smelling components from an exhaust gas. The removing characteristics of the system for fine particles and bad-smelling components were experimentally investigated, and steam addition was found to be conspicuously effective in removing both fine particles and bad-smelling components. The decomposition of the collected chemical pollutant materials by photocatalysis was also experimentally investigated by using ethylamine as a sample.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：物質輸送，環境，シャワークリーニング，環境汚染，臭気，粉塵

## 1. 研究開始当初の背景

昨今、大気汚染、水質汚染など環境問題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ふくまれており、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っている。

従来、粉塵についてはある程度の対策が可

能であるが、臭い成分も同時に除去するとなると対策が難しい。

そこで本研究では、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。

## 2. 研究の目的

以上のことから本研究では、シャワークリーニングシステムの有効性を定量的に明らかにすることを目的に、ミクロンオーダーの粉体、極微細粉塵として線香の煙、臭い成分としてエチルアミンを用い、搬送空気流量、水蒸気加湿量、シャワー形態などをパラメータに、シャワー領域中での気流方向の臭い成分を含む汚染物質濃度の変化を測定し、シャワークリーニングの性能と基本的特性を明らかにする。

特に水蒸気を添加することにより、液滴に直接接触凝縮するため液滴への蒸気流が生じ、除去効率の大幅な向上が期待できる。

また光触媒による汚染物質の清浄化についても実験的検討を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) シャワークリーニング実験

実験に用いるシャワークリーンシステムの概要は図1のとおりであり、図2に実験装置の全体写真を示す。装置の構造は図1に示すとおり、左側の上流から試料を流入し、シャワークリーニング部を過ぎた下流の測定部で粒子濃度や臭い強度を測定する。水蒸気添加実験を行う時には、シャワークリーニング部手前で水蒸気を混入させ、途中で蒸気が凝縮しないように配管系は全て加熱・保温する。水蒸気の混入量は、蒸気発生用ヒータの加熱量より算出する。全体の気流は下流に設置した送風機によって引き起こされ、流量はオリフィス流量計で測定する。シャワー部は全部で10個のユニットからなり、各ユニットには、面積  $80 \times 100 \text{ mm}^2$ 、孔径  $0.7 \text{ mm}$ 、穴間隔  $8 \text{ mm}$  の散水板が取り付けられている。なおシャワー密度を増やした実験では、穴間隔  $4 \text{ mm}$  の散水版を使用し、シャワー数密度を4倍にして実験を行った。

実験試料としては、粉塵除去実験では、けい砂(粒径  $27\text{-}31 \mu\text{m}$ )、フライアッシュ(粒径  $4.8\text{-}5.7 \mu\text{m}$ )、線香の煙粒子(粒径  $0.3 \mu\text{m}$  程度)、臭い成分除去実験では、線香の臭い成分、およびエチルアミン(分子式  $\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_2$ )を使用する。エチルアミンはアンモニア臭に近い臭いを発する代表的な悪臭成分の一つである。各試料の濃度測定は上述のようにシャワーク

リーニング部下流で行った。

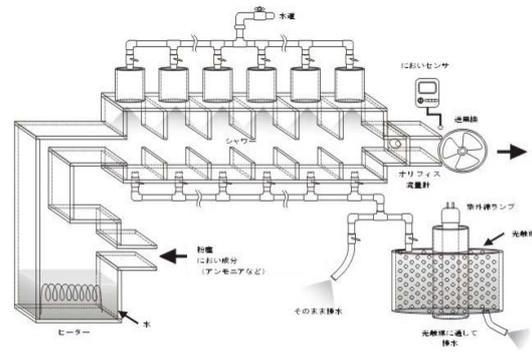


図1 シャワークリーニングシステムの概要



図2 シャワークリーニング実験装置。

### (2) 光触媒実験

図3に実験装置の概要を示す。汚染物質試料としては、代表的な悪臭成分であるエチルアミン水溶液を用い、光触媒反応槽を含む流路内を循環させる。反応槽は二重円管構造とし、内管と外管の間に光触媒ビーズの充填層を形成して、内管中心に設置したブラックライトにより紫外線を照射させる。反応量を増加させるためには、流路面積を拡げ充填層の半径方向厚さを厚くすると良さそうであるが、あまり厚くすると紫外線が外縁まで届かず、効率が落ちることが予想される。そこで内管には透過率の高いパイレックスガラス管(外径  $100 \text{ mm}$ )を使用して内管径を一定と

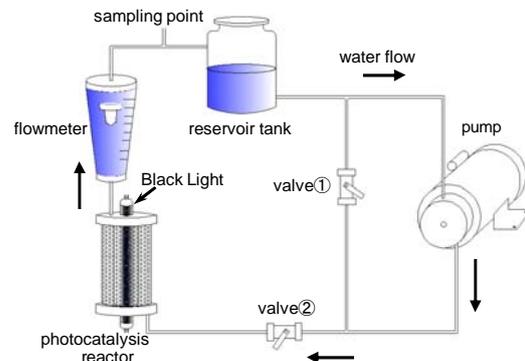


図3 光触媒実験装置

し、外管径を変化させて半径方向厚さを 10 mm, 17 mm, 32 mm, 52 mm の各場合について実験を行った。またビーズ径や溶液流量にも最適条件の存在が考えられるので、これらも変化させて実験を行った。反応量の測定は、流路途中で溶液をサンプリングし、ガスクロマトグラフにより溶液中の残留エチルアミン濃度を測定して求めた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 粉塵除去実験

###### 水蒸気を添加しない場合

粉塵除去の測定結果については、粒子径の大きなものから順に図 4 にけい砂(粒径 27-31  $\mu\text{m}$ )、図 5 にフライアッシュ(粒径 4.8-5.7  $\mu\text{m}$ )、図 6 に線香の煙の結果を示す。縦軸は、図 4 と図 5 が粒子濃度、図 6 が体積流量 0.0103  $\text{m}^3/\text{s}$  のときの粒子数、横軸はいず

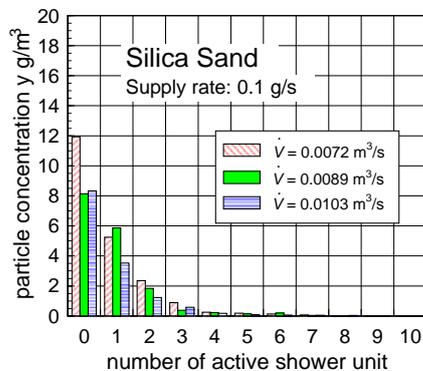


図 4 けい砂 (水蒸気なし)

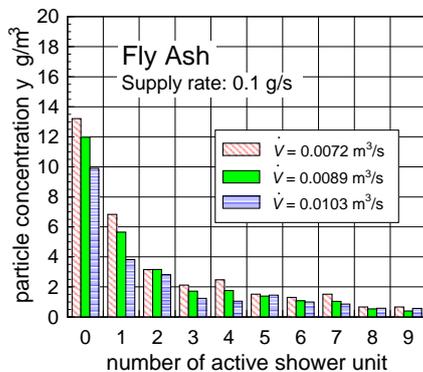


図 5 フライアッシュ(水蒸気なし)

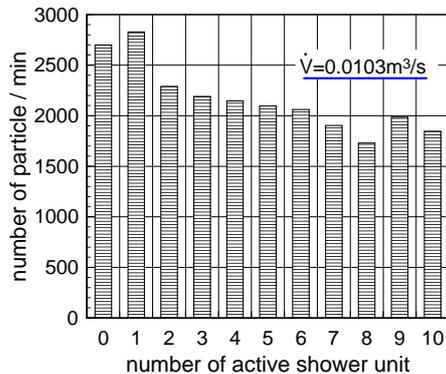


図 6 線香の煙粒子 (水蒸気なし)

れも作動させたシャワーユニット数である。図 4 と図 5 では、搬送空気流量  $V$  をパラメータにとってある。

図 4 に示すけい砂の場合には、シャワー個数の増加とともに粉塵はほぼ完全に除去できているのに対し、図 5 のフライアッシュの場合には、シャワー個数の増加とともに除去率は向上しているが完全には除去できていない。これは粒子径が小さくなると、粉塵が空気流とともにシャワーを回避して流れるためと考えられる。図 6 の線香の煙の場合には、こうした傾向はさらに著しい。

煙粒子の大きさがサブミクロンであるため測定が難しく精度が不十分な点もあるが、30%程度しか除去できていない。

なお搬送空気流量の影響については、粉塵の場合、流量が大きいほど除去率が大きくなっている。これは、空気流が速いほど粒子の慣性力が大きくなるので、シャワー液滴に捕捉されやすくなるためと考えられる。

###### 水蒸気を添加した場合

図 7 は、フライアッシュに対して水蒸気添加の効果調べた結果である。水蒸気を添加しない場合、水蒸気を添加した場合(水蒸気流量  $V_s = 0.00148 \text{ m}^3/\text{s}$ )、縦軸はシャワーを作動させない状態での値で無次元化した粒子濃度、横軸は作動させたシャワーユニット数である。水蒸気を添加することにより、除去率が大きく向上していることがわかる。特にシャワー前半部での効果が大きい。

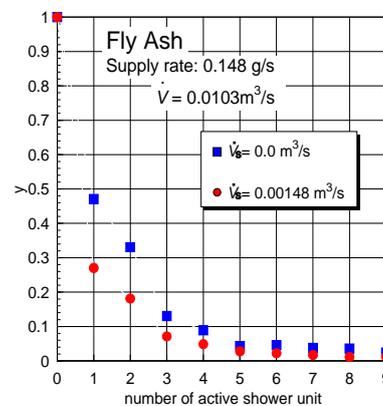


図 7 フライアッシュ (水蒸気添加)

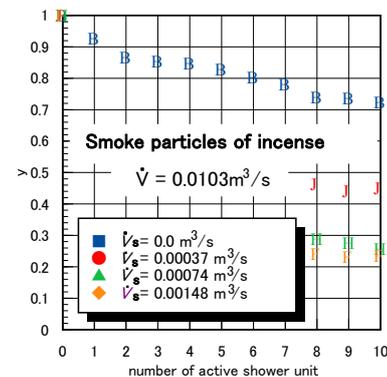


図 8 線香の煙粒子 (水蒸気添加)

これはシャワー前半部では主流温度の低下がまだ小さく、シャワー液滴との温度差が大きいため、直接触媒凝縮効果の影響が顕著に現れているためと考えられる。またシャワー後半部での除去率にあまり変化が生じないのは、フライアッシュに含まれる粒子には $2\mu\text{m}$ 以下の大きさの粒子も含まれており、そういった粒子は慣性力が小さく、直接触媒凝縮効果が小さくなるシャワー後半部では空気流に乗ってシャワーを回避してしまうためと考えられる。

一方、図8は、線香の煙に対して搬送空気流量を $V=0.0103\text{m}^3/\text{s}$ で固定し、水蒸気添加量を変化させた時の実験結果である。水蒸気添加実験では測定器の制約から大気温に近い状態の測定結果のみ示してある。水蒸気添加した場合には水蒸気添加しない時に比べて2~2.5倍程度除去率が向上しており、水蒸気添加効果が非常に大きいことがわかる。

以上のことから、本シャワークリーニングシステムは、水蒸気添加を併用することにより、粉塵除去に対して非常に有効であると結論できる。

## (2)臭い成分除去実験

### エチルアミン

エチルアミンを用いた悪臭成分除去実験の結果を図9に示す。縦軸は供給臭い強度

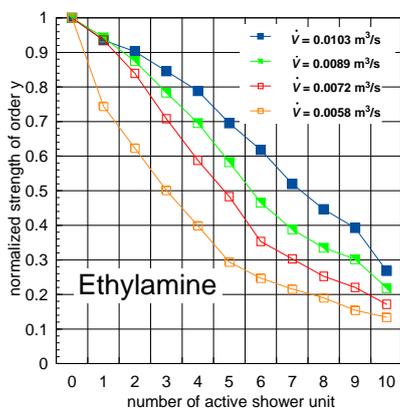


図9 エチルアミン（流速依存性）

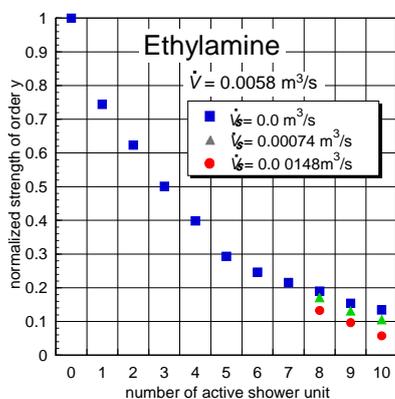


図10 エチルアミン（水蒸気添加）

（シャワーを流さないときの平均臭い強度）で規格化したクリーニング後の臭い強度、横軸は作動させたシャワーユニット数である。シャワー個数の増加に伴い除去率は向上しているが、粉塵除去の場合とは逆に、搬送空気流量 $V$ が小さい方が、除去率は向上している。これは搬送空気流が遅くなると、シャワー部での滞在時間が長くなるためと考えられる。このように搬送空気流量に対する依存性は、粉塵と臭い成分とで逆の傾向を示すことが明らかになった。

一方、図10に、搬送空気流量 $V=0.0058\text{m}^3/\text{s}$ のときのエチルアミンに対する水蒸気添加実験結果を示す。縦軸は供給臭い強度（シャワーを流さないときの平均臭い強度）で規格化したクリーニング後の臭い強度、横軸は作動させたシャワーユニット数、 $V_s$ は水蒸気を添加しない場合、 $V_s$ は水蒸気を $0.00074\text{m}^3/\text{s}$ 添加した場合、 $V_s$ は水蒸気を $0.00148\text{m}^3/\text{s}$ 添加した場合の測定結果である。水蒸気を添加した場合については、測定器の制約から大気温に近い状態での測定結果のみ示してある。図からわかるように、水蒸気を添加しない場合でも臭い成分を80%以上除去できているが、水蒸気を添加することにより、除去率が向上していることがわかる。このように粉塵だけでなく、臭気に対しても直接触媒凝縮効果の有効性を確認することができた。

### 線香の臭い成分

次に、線香の臭い成分除去実験の測定結果について述べる。図11は水蒸気添加した場合の結果で、搬送空気流量を $V=0.0103\text{m}^3/\text{s}$ で固定し、水蒸気添加量を変化させて実験を行った。前述のように、装置の制約から大気温に近い状態の測定結果のみを示してある。図より、水蒸気添加しない時に比べて除去率が1.5倍程度に向上していることがわかる。

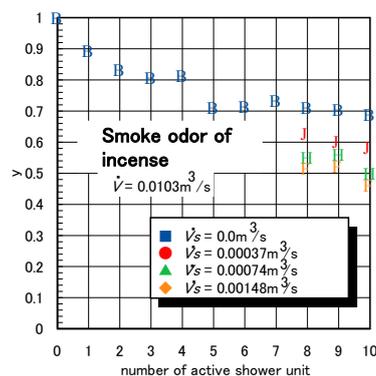


図11 線香の臭い成分（水蒸気添加）

以上の結果から粒子も臭い成分も水蒸気を添加すると除去率が向上するが、添加量を増やしてもある程度の除去率で飽和する傾向がある。これは水蒸気量を過剰にするとミ

ストが発生し、加えた水蒸気が全て液滴表面で凝縮しないためと考えられるが、水蒸気を添加することにより除去率が大幅に向上することが確認された。

### シャワー数密度の影響

シャワー数密度の影響を明らかにするため、シャワー密度の大きいシャワーヘッドに交換し、エチルアミンの臭い除去実験を行った結果を図 12 に示す。シャワーヘッドを交換する前と後の搬送空気流量  $V=0.0103 \text{ m}^3/\text{s}$  での除去率を比較したものである。図よりシャワーヘッドを交換した後の除去率が交換前よりも大幅に向上していることがわかる。これはシャワーの数密度を増やすことによって、シャワー液滴に取り込みやすくなったためと考えられる。このようにシャワー数密度を増やすことにより約 9 割程度除去できており、シャワー数密度の影響が大きいことがわかる。

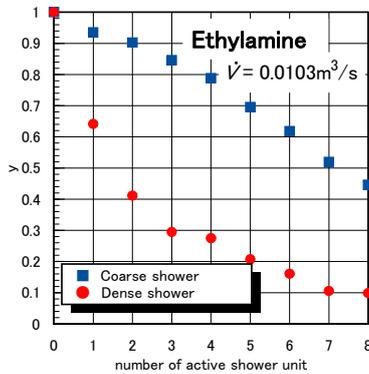


図 12 シャワー数密度の影響

### (3) 光触媒実験

#### 充填層半径方向厚さの影響

二重円管内部をブラックライトで照射し、流量一定下で  $5\text{l}(5 \times 10^{-3} \text{ m}^3)$  のエチルアミン水溶液（濃度 5%）を循環させ、1 時間毎に溶液をサンプリング（ $1\mu\text{l}$ ）して残留濃度を計測した。図 13 に、流量（ $4.9\text{l}/\text{min}$ ）、ビーズ

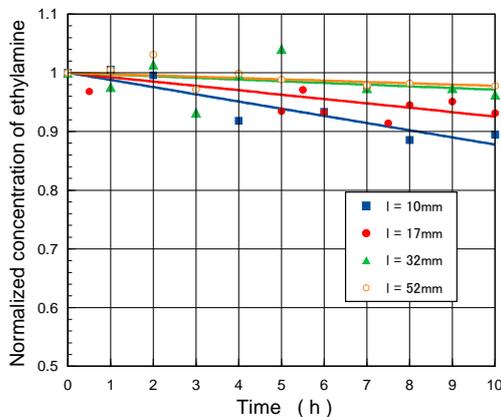


図 13 エチルアミン分解速度の充填層半径方向厚さ依存性

径（3mm）を一定とし、充填層の半径方向厚さ  $l$  をパラメータとして測定した結果を示す。グラフの縦軸は初期濃度で規格化した各時間における残留濃度、横軸は時間を示している。グラフ内のプロット点は、充填層厚さ  $l=10\text{mm}, 17\text{mm}, 32\text{mm}, 52\text{mm}$  でのそれぞれの測定結果を表し、各データ点に対する相関曲線も示してある。図より、充填層厚さを薄くするほど、分解反応量が大きいことがわかる。これはブラックライトから照射される紫外線がビーズ充填層内を透過できず、ビーズ充填層の外側にはほとんど届かないため（視覚でも確認）、充填層周辺部では光触媒反応がほとんど生じていないためと考えられる。すなわち充填層が厚い場合には、反応が生じない外側に多くの水溶液が流れるため、効率が低下したものと考えられる。したがって光触媒を利用する場合には、紫外線が届く範囲の充填層厚さにすることが重要である。

### ビーズ径の影響

次に充填層厚さ  $l=10\text{mm}$  の条件で、ビーズ径を変化させて実験を行った結果を図 14 に示す。流量や時間の条件は図 13 と同様である。グラフ内のプロット点は、ビーズ径  $d$  が 2mm と 3mm での測定結果を表し、各データ点に対する相関曲線も示してある。図より、ビーズ径の違いによって大きな変化は認められず、反応効率に与える影響は小さいことがわかる。仮に紫外線が最内側層にしか届かないとすると、粒子径の変化による 1 層あたりの粒子数の増減と粒子 1 個あたりの表面積変化量が相殺するので、最内側層の粒子に照射される紫外線総量は、理論上粒子径に依存しない。したがって今回の実験結果より、ブラックライトによる紫外線はビーズ充填層の最内部にしか到達せず、反応は最内側の層でのみ活発に生じているのではないかと推測される。

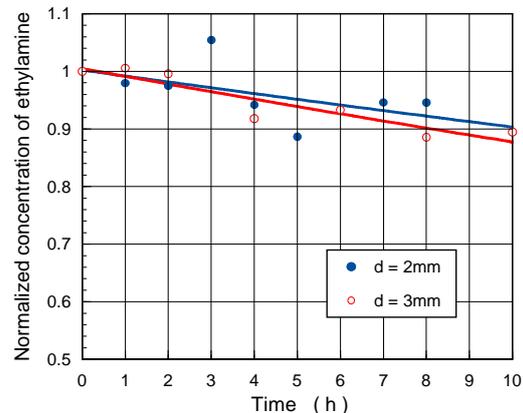


図 14 エチルアミン分解速度のビーズ径依存性

### 流量の影響

反応量は流量にも依存するので、体積流量

Qを変化させて測定した結果、流量が大きいほど反応速度が増加する結果が得られた。そこで流量をレイノルズ数に変換し、反応速度（1時間あたりの濃度変化）をレイノルズ数Reに対してプロットした結果を図15に示す。図中の直線は両対数グラフ上で0.6の傾きとなっており、反応速度が $Re^{0.6}$ の依存性を持っていることがわかる。充填層内の物質伝達率は $Re^{0.6}$ の依存性を持っていることが知られており、光触媒による分解反応が充填層内の物質伝達に依存していることがわかる。

以上のように、光触媒による分解反応槽に関して実験的研究を行い、その特性を明らかにすることができた。

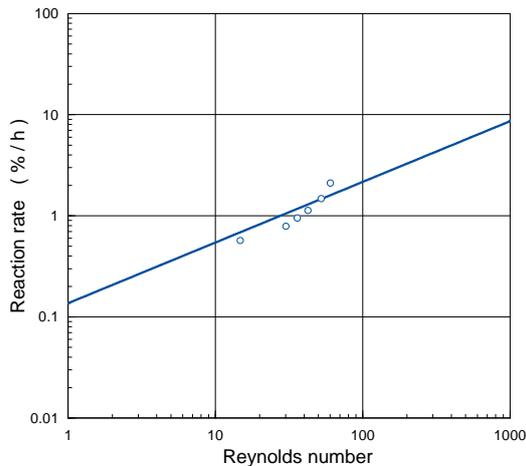


図15 反応速度のRe数依存性

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計7件)

姫野修廣，深見清貴，平岩雄一；シャワークリーニングによる環境汚染物質除去に関する実験的研究（極微細粒子・臭い成分・シャワー密度に関する検討），第48回日本伝熱シンポジウム講演論文集，vol. + (2011)，pp.353-354，岡山大学，2011/6/2

姫野修廣，野崎和也；光触媒による環境汚染物質浄化に関する基礎的研究，日本機械学会北陸信越支部第48期総会・講演会講演論文集（No.117-1），(2011)，pp.67-68，信州大学繊維学部，2011/3/5

姫野修廣，深見清貴，平岩雄一；高効率環境汚染物質除去システムの実験的研究（極微細粒子と悪臭成分に対する検討），日本機械学会北陸信越支部第48期総会・講演会講演論文集（No.117-1），(2011)，pp.65-66，信州大学繊維学部，2011/3/5

姫野修廣，野崎和也；光触媒による環境

浄化に関する基礎的研究，日本機械学会2010年度年次大会講演論文集(No.10-1)，vol.3(2010)，pp.211-212，名古屋工業大学，2010/9/7

姫野修廣，深見清貴，山本祐二郎；シャワークリーニングによる環境汚染物質除去に関する実験的研究（水蒸気添加効果の検討），第47回日本伝熱シンポジウム講演論文集，vol. + (2010)，pp.705-706，札幌コンベンションセンター，2010/5/28

姫野修廣，山本祐二郎，寺谷 茂；シャワークリーニングによる環境汚染物質除去に関する実験的研究（悪臭成分に対する水蒸気添加の効果），第46回日本伝熱シンポジウム講演論文集，vol. + (2009)，pp.617-618，国立京都国際会館，2009/6/4

姫野修廣，山本祐二郎，寺谷 茂；シャワークリーニングによる環境汚染物質除去システムの実験的研究（悪臭成分，微細粒子に対する基礎的特性），日本機械学会北陸信越支部第46期総会・講演会講演論文集(No.097-1)，(2009)，pp.191-192，富山大学工学部，2009/3/7

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

姫野 修廣 (HIMENO NOBUHIRO)  
信州大学・繊維学部・教授  
研究者番号：20114887

### (2)研究分担者

鮑 力民 (BAO LIMIN)  
信州大学・繊維学部・准教授  
研究者番号：10262700

### (3)連携研究者

鮑 力民 (BAO LIMIN)  
信州大学・繊維学部・准教授  
研究者番号：10262700