

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月10日現在

機関番号：32682

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010年度～2012年度

課題番号：22656054

研究課題名（和文） 湿度操作による空气中ナノ浮遊粒子・ガス状化学物質の除去

研究課題名（英文） Removal of Suspended Particulate Matters and Gaseous Chemical Substances with Humidity Swing Method

研究代表者

中別府 修 (NAKABEPPU OSAMU)

明治大学・理工学部・教授

研究者番号：50227873

研究成果の概要（和文）：

本研究は、空気を加熱加湿し冷却除湿する湿度操作によって、空气中に存在するナノ～マイクロメートルサイズにわたる浮遊粒子状物質（SPM）およびガス状化学物質の除去技術を提案し、その性能、実現性を明らかとすることを目的としている。平板フィン型熱交換器を用いた低空気流量の実験では、空気の絶対湿度変化0.2kg/kgで、総SPMの約80%を除去することが示された。化学物質除去実験では、入口濃度670ppmのアンモニア混合空気から、約55%のアンモニアを定常的に除去できることが示された。また、ヒートポンプの導入により、消費電力量は1/8程度に低減できることが示された。

研究成果の概要（英文）：

The air cleaning effect with humidity swing method was studied. In the method, the suspended particulate matters (SPM) of nano- to micrometer size and the gaseous chemical substances are removed from the air through a thermal humidification and dehumidification process of the air. The air cleaning effect and required electric energy were experimentally studied. The SPM removal effect of about 80 % was shown in the experiment under low air flow rate of 3 L/min with plate fin type heat exchangers at absolute humidity swing of 0.2 kg/kg. For the chemical substances removal effect, it was shown that about 55 % of ammonia can be removed under inlet condition of 670 ppm. It was also demonstrated that the electric power can be reduced to 1/8 with introducing a heat pump system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	0	1,700,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	450,000	3,650,000

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：空気清浄，湿度操作，浮遊粒子状物質，ガス状化学物質，冷凍・空調

1. 研究開始当初の背景

大気中にはナノからマイクロメートルサイズの浮遊粒子状物質 (SPM, Suspended Particulate matters, エアロゾル) が浮遊しており，半導体，医薬品，食品等の工場，病院等では，製造作業の効率，品質管理，保健衛生の観点から，SPM を除去したクリーンルームが利用されている．生活環境でも，工場や焼却炉，ディーゼル由来の SPM，スギ花粉などのアレルギー物質，建材や塗料からの揮発性有機化合物 (VOC) 等のガス状化学物質，臭い物質，かびや伝染性の病原菌など，保健衛生の観点から空気清浄ニーズは高まっている．さらに，ナノテク産業の発展，ナノテク製品の普及に伴い，検出や除去が難しいナノ浮遊粒子による環境汚染リスクが指摘され，ナノ浮遊粒子に対応する空気清浄技術が必要になると考えられる．

申請者は，空気の湿度を上昇・下降させる湿度操作により，SPM が除去できることを実験的に見出し，ナノからマイクロサイズの全 SPM の除去を効果的に行う新しい空気清浄法の開発を着想した．

2. 研究の目的

湿度操作を利用した，空気中のナノ～マイクロメートルサイズにわたる全浮遊粒子状物質，およびガス状化学物質の除去技術を提案し，その性能，実現性を明らかとすること，加えて，提案空気清浄法の省エネルギー性を検討するため，ヒートポンプを導入したシステムの効果を示すことを目的とする．

3. 研究の方法

ナノ～マイクロメートルの全粒径に渡る浮遊粒子状物質 (SPM) の除去実験として，室内空気をアクリル製の装置ダクトに導入し，平行平板型ヒートシンクを介して加熱・加湿により高温の飽和湿り空気とし，続いて，同形のヒートシンクを介して冷却・除湿を行う．入口・出口での総 SPM 数を凝縮核カウンターで計測し，0.3 μ m から 10 μ m の階級毎の SPM 数を光学式パーティクルカウンターで計測し，ナノからマイクロメートルサイズの SPM の除去特性を調べる．試料として室

内空気に加え，HEPA フィルターや静電除塵をして SPM を 1/10～1/100 に低減した濾過空気も用いた．

ガス状化学物質の除去特性に関しては，アンモニアを試験揮発性化学物質として試験空気に混入し，湿度操作による入口，出口でその濃度変化をガス検知管により調べた．

湿度操作に必要なエネルギー量に関しては，除去特性実験では加湿を電気ヒーターによる加熱で行い，除湿は冷水器から冷水を供給して実施する．これに対して，小型ヒートポンプを用い，加湿と除湿を一つのコンプレッサー動力で賄うテスト流路を作成し，湿度操作に必要なエネルギー量の低減について実験的に調べる．

4. 研究成果

湿度操作による SPM 除去実験では，導入した空気を加熱加湿により 20～67 $^{\circ}$ C の飽和湿り空気状態とし，冷却除湿により 11～18 $^{\circ}$ C の飽和湿り空気へと状態を変化させた．装置の容量で大きな湿度操作を行うために，空気流量は 3 ℓ /分，平均流速 2.6cm/s と低流量条件で実験を行った．結果として，湿度操作の度合いは絶対湿度変化量 Δx で示した場合，図 1 の様に，総 SPM 数は Δx に対して指数関数的に減少することが示され， $\Delta x=0.2$ の条件で総 SPM の 80% が除去されることが示された．また，空気流量 30 ℓ /分，コイル型冷却除湿器を用いた試験装置では， $\Delta x=0.2$ の条件で総 SPM の約 95% が除去できる実験結果も最近得られており，SPM 除去効果は装置構造を改良することで改善の余地がある．

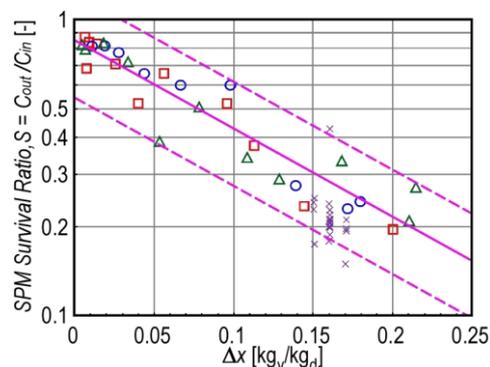


図 1 湿度操作による SPM の除去特性

S PMの除去機構に関しては、湿度操作に関係なく既存の除去メカニズムとして、慣性衝突、重力沈降、拡散沈着、静電沈着、凝集があげられるが、試験条件から効果があるのは、ナノサイズSPMに対して15%程度を除去する効果を持つ拡散沈着と数ミクロンサイズSPMに対して数10~100%の除去効果を持つ重力沈降と判断された。湿度操作に関連した機構としては、水蒸気の凝縮に伴う冷却壁面への吸込み流れ、高温側から低温側へ粒子が移動する熱泳動、過飽和領域で生じる核凝縮が挙げられる。流路断面内で粒子が一樣に分布すると仮定した飽和湿り空気の除熱除湿のモデル計算からは、 $\Delta x=0.2$ で吸込み流れは約37%のSPM除去効果を持ち、熱泳動は8%の効果と見積もられた。熱泳動に関しては、 $\Delta x=0.2$ の条件で実験的に残存したSPMの約半数は $0.3\mu\text{m}$ 以上に核凝縮による粒径成長を受けており、SPMの大多数で核凝縮が生じていると見られるが、観測された出口SPMの粒径分布からは、核凝縮が重力沈降による除去を促進するほどの効果は見られなかった。結果として、湿度操作により理論的に推定される除去効果は55%程度であり、実験結果の80%を説明することはできなかった。今後、冷却器内部の温度、湿度、SPM分布等を調べ、湿度操作によりSPMが効果的に除去される理由を解明し、さらに除去効果の高いシステムを提案する必要がある。

ガス状化学物質除去に関しては、空気流量3ℓ/分、入口アンモニア濃度320ppmの試料空気に対して、 $\Delta x=0.16$ の湿度操作によって、出口濃度が180ppmに低減することが実験的に示された(図2)。アンモニア除去の特性は、加湿・除湿に伴い内部を循環する水への飽和溶解度が重要な役割をしている。内部の水の溶解度が飽和へ近づくと吸収量は減少し、空気中の水溶性ガス状汚染物質の定常的な除去は、内部循環水量に制約される。よって、ガス状化学物質の除去を主眼とする場合には、SPM除去に必要な水量以上の水量を内部で循環し、汚染物質を吸収した水を速やかに装置外へ排出する機構が必要なことが分かった。

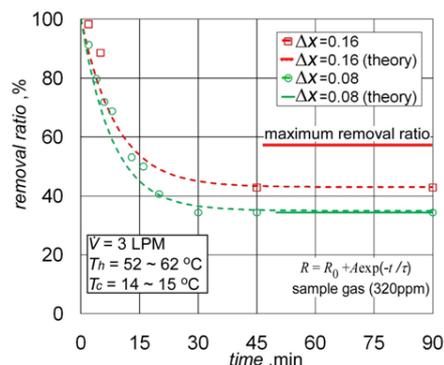


図2 湿度操作によるアンモニア除去特性

湿度操作空気清浄法では、湿度の変化に比較的大きな熱量を必要とし、これをエクセルギー率の高い電力で賄うことは現実的ではない。本研究では、市販の除湿器を転用し、流路上流で加熱加湿を行い、下流で冷却除湿を行う湿度操作を1つのヒートポンプで実現する試験流路を作成し、ヒーター、冷水器を用いたシステムとのエネルギー効率の比較を実施した。結果として、空気流量97ℓ/分に対して58°Cの湿り空気を作り、26°Cまで冷却する条件を175Wのコンプレッサー動力で実現した。これは、加熱加湿器で840W、冷却除湿器で740Wの熱量移動をもたらしており、 $COP_h=4.8$ 、 $COP_c=4.2$ となり、両者に直接電力を利用する場合に比べて電力を1/8程度に低減できることを示している。

湿度操作空気清浄法では、従来の空気清浄法のようにフィルターや静電気を用いることなく、加湿・除湿によりナノサイズからミクロンサイズに渡る空気中のSPMを除去できることが実験的に示された。除去機構の解明にはまだ研究の余地があり、除去効果向上も可能と考えられる。水溶性ガス状汚染物質に関しては、内部循環している水への飽和溶解度が除去率を左右するため、付加に応じた内部循環水量を確保する必要がある。空気清浄に対するエネルギー量に関しては、ヒートポンプの導入が必須であることが示された。

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)

[雑誌論文] (計1件)

1) 小野田渚, 中別府修, “湿度操作による空気中の浮遊粒子除去効果”, 日本機械学会論文集(C編)76巻768号(2010-8) pp.1945-1946, ノートNo.10-6017, 査読有

[学会発表] (計9件)

1) 小野田渚, 中別府修, “湿度操作による空気清浄の研究 (熱泳動, 拡散泳動と核凝縮による粒子除去特性)” 第 50 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 Vol.1, SP41, 2013. 6. 11-12

2) 小野田渚, 比企野公久, 中別府修, “湿度操作による空気清浄の研究 (浮遊粒子状物質濃度と除去率の関係)”, 第 49 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 III, E314, 2012. 5. 30-6. 1

3) Nagisa Onoda, Shota Ishiguchi, Osamu Nakabeppu, “Reduction effects of suspended particulate matters in air by thermal moisture swing method”, IMECE2011-63469, 2011.11.16

4) 小野田渚, 比企野公久, 中別府修, “温湿度操作空気清浄法の循環モードによる浮遊粒子状物質除去特性”, 日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集 No. 11-36, pp. 221-222, 2011. 10. 29

5) Nagisa Onoda, Shota Ishiguchi, Osamu Nakabeppu, “Filterless air cleaning with moisture thermal control method”, The 4th International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale (HTFFM-4), HTFFM-4-128 (Flash Memory), 2011.9.6

6) 小野田渚, 石口翔太, 中別府修, “湿度操作空気清浄法の浮遊粒子状物質の低減特性”, 第 48 回日本伝熱シンポジウム, pp. 351-352, D211, 2011. 6. 1

7) Nagisa ONODA, Osamu NAKABEPPU, "Air Cleaning Method with Humidity Swing Operation for Reducing Suspended Particulate Matters", AJTEC2011-44482, 2011.3.16

8) 小野田渚, 中別府修, 矢瀧健史, “湿度操作による空気清浄の研究 (第 3 報: ナノサイズ粒子状物質の低減効果)”, 第 47 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 F112, 2010. 5. 26

9) 小野田渚, 中別府修, “湿度操作による空気中の浮遊粒子状物質の除去に関する研究”, 第 44 回空気調和冷凍連合講演会講演論文集, pp. 59-62, 2010. 4. 21

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

http://www.isc.meiji.ac.jp/~mte_lab/index.html (明治大学理工学部機械工学科ミクロ熱工学研究室ホームページ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中別府 修 (NAKABEPPU OSAMU)

明治大学・理工学部・教授

研究者番号: 50227873

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

小野田 渚 (明治大学大学院・理工学研究科・D2)