

オゾンガスと金属触媒を利用した空気清浄に関する研究

古川 斐人* 小座野 貴弘*

要 旨

医療・福祉施設では、菌による感染リスクに加え、発生する臭気や消毒・殺菌に用いる薬品から揮発する化学物質等による健康への影響が懸念されている。われわれは、このような空気汚染に対して、金属触媒にオゾンガスを接触させることで生じる酸化分解反応を利用した空気清浄に関する研究開発を行っている。

本報では、医療施設等で発生する化学物質による空気汚染対策の実験結果より得られた知見について報告する。まず、同原理をもとに製作した空気清浄装置を用い、化学物質の除去性能について確認を行った。さらに、この空気清浄方式による病理検査室での適用効果を確認するために、流体解析を行った。流体解析は、装置の位置や台数の変化による化学物質濃度の差異について検証した。

その結果、対象とした化学物質は除去可能であることを確認し、空気清浄装置の適切な設置方法について知見を得た。

1. はじめに

医療・福祉施設では、菌による感染リスクに加え、施設内で発生する臭気や消毒・殺菌に用いる薬品から揮発する化学物質等による健康等への影響が懸念されている。われわれは、このような空気汚染に対して、金属触媒にオゾンガスを接触させることで生じる酸化分解反応を利用して、汚染物質除去を可能とする空気清浄に関する研究開発を行っている。

既報では、酸化分解反応をもとに試作した空気清浄装置による浮遊菌の除去に関する実験、及び福祉施設でのフィールド実験により、一定の効果が確認できたことを報告した¹⁾。同原理は、医療施設内で発生している化学物質に対しても同様に適用できる可能性がある。しかし、これら化学物質の分解除去に関する報告事例は現在のところ確認できていない。

そこで、われわれはこれら化学物質の除去効果について、試作した空気清浄装置を用いて確認することとした。その上で、この空気清浄方式による適用効果を確認するために流体解析を行った。

解析では、装置の位置や台数の変化による化学物質の除去効果について検討したので報告する。

2. チャンバーを用いた化学物質の除去性能に関する実験

2.1 実験目的

オゾンと金属触媒による酸化分解の除去効果を把握することを目的に、試作した空気清浄装置を用いて医療施設等で多くみられる化学物質を対象にした実験を行うことにした。対象とした物質は、一般に匂いの原因とされる^{2,3)}硫化水素、

トリメチルアミン、スカトール、アセトアルデヒドの4種類と、医療施設で殺菌・消毒の際に使用され、厚生労働省の健康障害防止対策の対象⁴⁾にもなっている人体に有害なホルムアルデヒド、グルタルアルデヒドの2種類の計6種類とした。

2.2 実験の概要

2.2.1 空気清浄装置

実験に用いた空気清浄装置は、写真-1に示すように、家庭用空気清浄機と同様の床置き型である。サイズは幅450mm、奥行225mm、高さ700mmである。装置前面から室内の空気を吸い込み、内部でオゾンガスを吹き付けられた金属触媒フィルターと接触し、装置上部から再び室内に吹き出す構造である。装置内部には、金属系触媒粉を担持したハニカム状のフィルター、フィルターに対しオゾンガスを吹き付ける機構を持ったオゾンガス供給部(最大供給能力2g/h)、送風機、及び同风量制御部(60~120m³/h)、室内へのオゾン漏出を感知するセンサーが組み込まれている。なお、オゾンガス発生方法は、一般的な放電方式である。



写真-1 空気清浄装置試作機外観

* 技術研究所 建築技術開発部

2.2.2 実験装置

実験は、図-1に示すチャンバー内に空気清浄装置を設置して行った。チャンバーは、アクリル樹脂製の容積1m³の直方体で、上部の蓋を閉じることで密閉する構造である。チャンバー内には、装置のほかに空気攪拌用のファンと対象となる化学物質の溶液が入るケース(化学物質揮発部)を設置した。また、チャンバー上部には濃度測定孔を設置した。

2.2.3 実験条件、濃度測定方法

空気清浄装置運転開始前のチャンバー内の初期濃度は、チャンバーの大きさ、測定、分析における定量下限を考慮し、悪臭防止法における各化学物質の許容濃度の10~20倍とした(表-1)。硫化水素、トリメチルアミン、ホルムアルデヒド、アセトアルデヒドの濃度測定は、検知管法によることとし、スカトールはガスクロマトグラフィー法(GC-MS法)、グルタルアルデヒドの濃度測定は、高速液体クロマトグラフィー法(HPLC法)によることとした。空気清浄装置の運転風量は、別に実施したフィルター単体での接触時間と除去効率に関する実験データをもとに決めた120 m³/hとした。

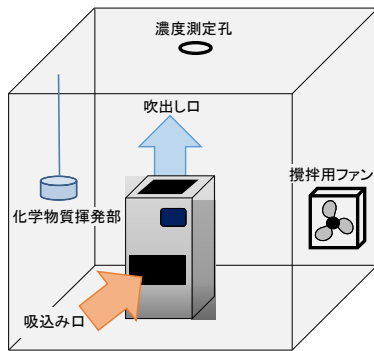


図-1 チャンバーを用いた実験装置概要図

2.2.4 実験方法

実験は、まずチャンバー内で予め濃度調整した化学物質の溶液が入ったケースの蓋を開け、チャンバー内に各物質が充満した状態で、初期濃度を測定した。そして、空気清浄装置の運転を開始し15、30分、1、2、3、4、5時間経過毎に濃度を測定した。なお、物質毎の実験については、濃度の時間減衰が装置による除去であることを明確にするため、空気清浄装置を運転しない条件での実験も行った。

2.3 実験結果及び考察

図-2に、実験結果を示す。いずれの物質においても装置運転開始から濃度は徐々に低下し、1時間経過後には運転前に比べ濃度が大幅に低下した。ここで、初期濃度(C₀)に対する運転開始1時間後の濃度(C₁)とした除去率R[%](式(1))でみると、図-3に示すとおり、各物質の除去率はいずれも80%以上となり、高い除去性能を有することが確認できた。

$$R = (1 - (C_1/C_0)) \cdot 100 \quad \dots (1)$$

表-1 対象化学物質の初期濃度、測定方法

	化学物質	初期濃度(ppm)	測定方法
匂い物質	硫化水素	2	検知管
	アセトアルデヒド	4	検知管
	トリメチルアミン	2.5	検知管
	スカトール	2.5	GC-MS
有毒	ホルムアルデヒド	1.5	検知管
	グルタルアルデヒド	0.4	HPLC

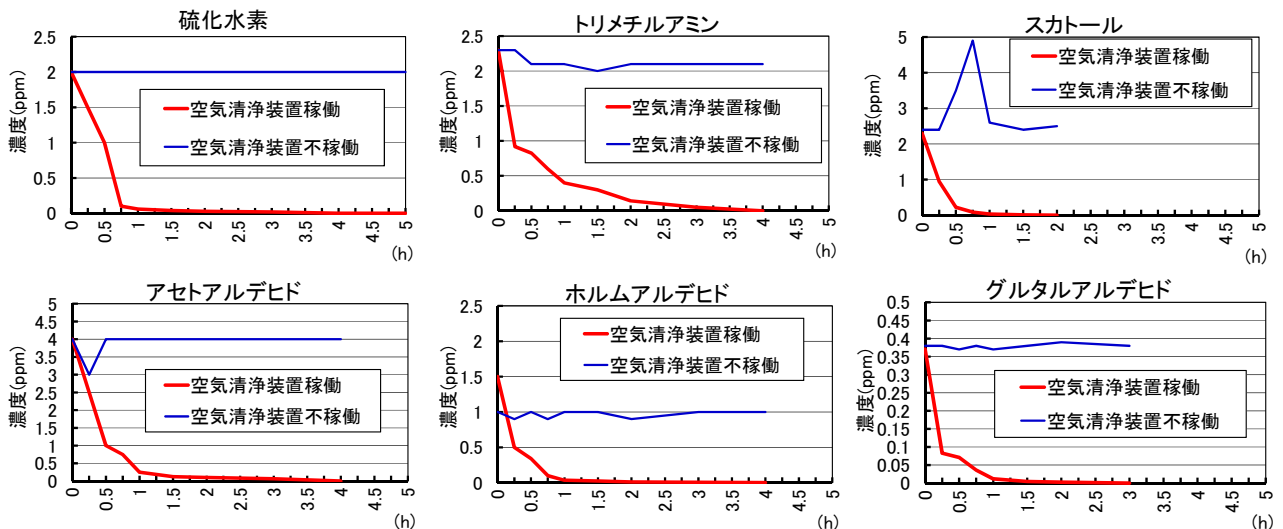


図-2 チャンバー内濃度の経時変化

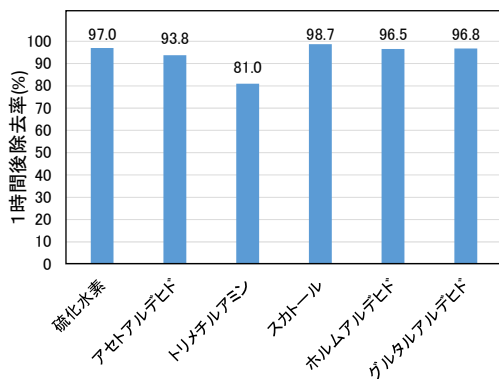


図-3 各物質の1時間後除去率

3. 空気清浄装置の配置や台数による除去効果の検証

3.1 目的

チャンバーを用いた化学物質の除去性能に関する実験結果から、空気清浄装置の医療施設への適用が期待できることが推測される。しかし、適用にあたっては空間で発生している化学物質を効率よく捕捉することが重要であり、空気清浄装置の配置計画によってその効果は大きく異なってくると考えられる。

そこで、空気清浄方式による適用効果を確認することを目的に、装置の位置や台数の変化による化学物質の除去効果について、流体解析によるシミュレーションを行い比較することとした。

病理検査室は、有害なホルムアルデヒドやグルタルアルデヒド等が使用されており、医療施設において医療従事者への曝露リスクが高い部屋である。そのため、室内空気環境の改善が求められる空間であることから解析の対象室とし、対象物質はグルタルアルデヒドとした⁷⁾。

流体解析には、環境シミュレーション社製 3 次元熱流体解析ソフト Wind Perfect を用いた。

3.2 解析の概要

3.2.1 解析対象の空間

図-4に、解析対象として模擬した病理検査室モデルと平均濃度計算範囲を示す。幅(x)4 m、奥行き(y)4.8 m、天井高さ(z)2.8 m、容積 53.76 m³ の空間とした。平面図の上方向を北とし、南側壁面に換気用のガラリ(0.3 m×0.6 m=0.18 m²の開口)が付いた扉、東西の壁面には棚、シンクのほか発熱がある機器類が並び、室中央に作業台(床から高さ 0.8 m)、天井面には、照明器具と空調機、作業者(医療従事者)2 名が立ち作業している想定とした。

3.2.2 解析条件

解析条件を表-2に示す。解析条件として、発熱量は人 1 人あたり 50 W、機器 A、B、C それぞれ 1,280 W、560 W、800 W、照明器具 22.5 W を与えた。換気は、ガラリを通して隣室

の廊下から流入して、北東側天井部に設けた換気扇(0.2 m×0.2 m=0.04 m²)により排出することとし、換気量は、病院空調設備の設計・管理指針⁵⁾をもとに換気回数 12 回/h を与えた。なお、病理検査室と上下を含めた隣室は空調室と設定し、隣室間の熱の移動は北側に設定した外壁以外ないものとした。

温度条件は、空調機が運転している条件とし、外気温度 30℃時の冷房運転を想定した。空調機の風量は、室内温度を 25℃に保つために必要な風量 1,136m³/h とした。なお、ガラリから室内へ流入する空気の温度も室内温度と同じ 25℃とした。この解析モデルの計算格子数は 98(x)×124(y)×67(z) = 814,184 個である。

汚染物質であるグルタルアルデヒドの発生源は、作業者が作業台上中央で同溶液を使った作業を行い、溶液の入った容器から揮発することを想定した。発生量は、一般に殺菌消毒作業に用いる 2%グルタルアルデヒドを使用した際の曝露を想定し、110.5 mg/h とした。これは、上述の換気条件を前提として完全拡散した場合に、図-4に示す室内中央部の作業者の呼吸域に該当する範囲のグルタルアルデヒド平均濃度が、産業衛生学会による許容濃度⁶⁾0.03 ppm の 1.5 倍である 0.045 ppm となる量にあたる。

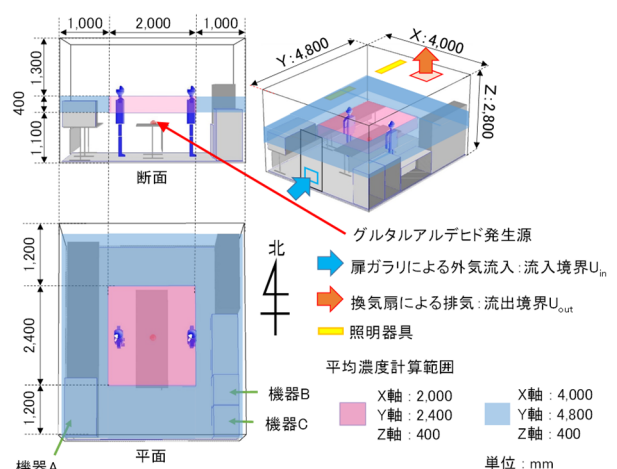


図-4 病理検査室モデルと平均濃度計算範囲

表-2 解析条件

乱流モデル	標準k-εモデル
メッシュ数	96+2(x)×122+2(y)×65+2(z) 814,184メッシュ
流入境界条件	U _{in} =0.996m/s, 0.3m×0.6m=0.18m ²
流出境界条件	U _{out} =4.48m/s, 0.2m×0.2m=0.04m ²
解析対象空間サイズ	4m(x)×4.8m(y)×2.8m(z)
空調機風量	1,136m ³ /hour
グルタルアルデヒド発生源	室中央部, FL+800mm
グルタルアルデヒド発生量	110.5mg/hour
換気回数	12回/hour
人体発熱量	50W/人
機器発熱量	A:1,280W, B:560W, C:800W
照明発熱量	22.5W/台

解析時間は、気流形成時間を考慮し、換気回数 2 回/h と
なる 600 秒とし、その後グルタルアルデヒドが発生した状況で、
1,440 秒まで計算した。1,440 秒とは、空気清浄装置1台を運
転した場合に換気回数で 2 回/h となる時間である。

3. 2. 3 空気清浄装置の設置条件

空気清浄装置の設置方法として、次の 4 つの形式を設定
した。天井カセット型空調機に対して装置を組み込む「天井
カセット型空調機内蔵型」、家庭用空気清浄機のように床に
据え置く「床置き型」、床置き型より背丈が高く、吹き出し口が
同型より高い位置にある「床置き高位置吹き出し型」、壁面にビ
ルトインする「壁埋込型」、さらに、4つの形式それぞれに空気
清浄装置の台数 1~3 台を設定した。ただし、「天井カセット
型空調機内蔵型」については、設置台数は1台として風量を
台数分に相当させ解析を行った。これらに空気清浄装置を
設置していない「換気のみ型」を加えた合計 13 パターンのモ
デルを作成し解析を行った。解析パターンを表-3に示す。

空気清浄装置によるグルタルアルデヒドの除去率は、チャ
ンバー実験の結果で得た 1 時間後除去率 R=96.8%に対し運
転時間経過継続に伴う除去性能の低下を 20%見込み、76%
とした。

3. 3 解析結果及び考察

空気清浄装置設置条件による差異を定量的に比較するた
め、解析により得られた濃度について、平均濃度を算出して
評価に用いた(表-4)。

平均値を算出する範囲は、それぞれ作業者の呼吸域に該
当する空間(x:1.0 m~3.0 m、y:1.2 m~3.6 m、z:1.1m~
1.5m)の範囲と、作業者の移動を考慮して拡大した(x:0 m~
4 m、y:0 m~4.8 m、z:1.1m~1.5m)の範囲とし、それぞれ図
-4にピンク色と水色で表示した。

図-5~9に、解析した 13 パターンの断面、平面における
空気中グルタルアルデヒドの濃度分布を示す。各図中の上
図が断面、下図が平面の濃度分布を表している。平面図の
上方向を北とする。各図左から順に設置台数 1、2、3 台運
転時を示す。

「換気のみ型」(図-5参照)では、室の南東に 0.2 ppm を
超える高い濃度の分布が確認された。これは、まず、換気
により生じる室の南から北東へ向かう気流が室中央で発生し
ているグルタルアルデヒドを東の壁側へ偏らせ、次に、徐々
に濃度が高くなった空気が、形成された気流により南方向に流
れ隅角部に滞留し、そして、隅角部に滞留した一部が、気流
により再び中央部に引き寄せられるためと考えられる。呼吸
域を平面方向に拡大した範囲内の平均濃度は 0.048ppm だ
り、呼吸域の濃度として設定した値(0.045ppm)よりも高い
濃度となった。これは、室中央で発生したグルタルアルデヒド
が室内に広く拡散されていることを示している。

「天井カセット型空調機内蔵型」(図-6参照)では、「換気
のみ型」と同様の濃度分布になった。「換気のみ型」と比べ

表-3 解析パターン

	換気のみ型	天井カセット型空調機内蔵型			床置き型			床置き高位置吹き出し型			壁埋込型		
パターン	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬
空気清浄装置台数(台)	-	1(相当)	2(相当)	3(相当)	1	2	3	1	2	3	1	2	3
空気清浄装置除去率(%)	-	76											
処理風量(m ³ /h)	-	134.4	268.8	403.2	134.4	268.8	403.2	134.4	268.8	403.2	134.4	268.8	403.2
吸込み位置	-	天井部			空気清浄装置正面 床から0.18m			空気清浄装置正面 床から0.18m			壁面 床から0.18m		
吸込み口面積	-	1.2m×0.4m:0.48m ²			0.24m×0.24m:0.0576m ²			0.24m×0.24m:0.0576m ²			0.24m×0.24m:0.0576m ²		
吹出し位置	-	天井部			空気清浄装置上面 床から0.5m			空気清浄装置上面 床から1.0m			天井部		
吹出し口面積	-	1.2m×0.1m:0.12m ²			0.24m×0.12m:0.0288m ²			0.24m×0.12m:0.0288m ²			0.24m×0.12m:0.0288m ²		
空気清浄装置位置簡略図													
平面図													

と、室の中央から西側は低濃度になっており、運転台数(風量)の増加によりその傾向は強まっている。しかし、室の中央から東側の濃度が高い傾向は変わらない。平均濃度は、空気清浄装置1台相当運転時、2、3台相当運転時と処理性能に伴って平均濃度が低下しているが、いずれにおいても基準値以下にはならず、発生したグルタルアルデヒドを捕捉し易い気流形成に至っていない。

「床置き型」(図-7)では、1台設置の場合、設置された空気清浄装置により、北西に分布が偏っている。2、3台設置では、南東に空気清浄装置が設置されたことにより、南東方向

に室中央の空気が引き寄せられた気流形成となっており、「換気のみ型」に類似した濃度分布となった。平均濃度は、呼吸域を平面方向に拡大した範囲において2、3台設置した場合に、基準値以下の0.024ppmと良好な除去効果を示したが、呼吸域に限ると3台設置の場合に0.032ppmと基準値を超えた。

このことから、室内濃度を低減させるために空気清浄装置の設置台数を増やしても、配置方法によっては気流形成の偏りにより、高濃度のグルタルアルデヒドが滞留する領域が形成されてしまう恐れがあることを表している。

「床置き高位置吹出し型」(図-8)では、「床置き型」2、3

表-4 各パターンにおける平均濃度(ppm)

範囲	換気のみ	天井カセット型空調機内蔵型	床置き型	床置き高位置吹出し型	壁埋込型
呼吸域 Z:1.1~1.5 X:1.0~3.0 Y:1.2~3.6	① 0.045	② 0.037	⑤ 0.043	⑧ 0.039	⑪ 0.054
		③ 0.035	⑥ 0.026	⑨ 0.030	⑫ 0.019
		④ 0.032	⑦ 0.032	⑩ 0.028	⑬ 0.030
呼吸域を平面方向に拡大 Z:1.1~1.5 X:0~4.0 Y:0~4.8	① 0.048	② 0.041	⑤ 0.037	⑧ 0.044	⑪ 0.041
		③ 0.039	⑥ 0.024	⑨ 0.026	⑫ 0.016
		④ 0.038	⑦ 0.024	⑩ 0.022	⑬ 0.020

※基準値(0.03ppm)を超える値を赤字で示す

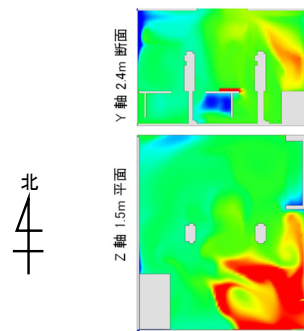


図-5 「換気のみ型」における濃度分布

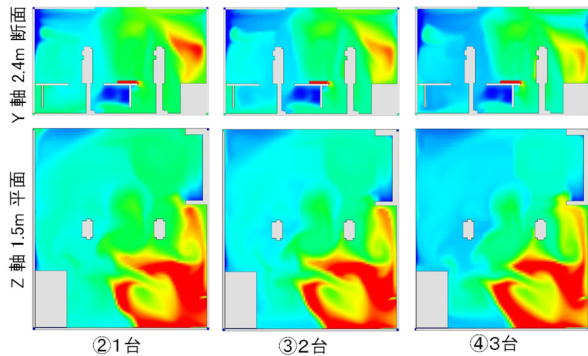


図-6 「天井カセット型空調機内蔵型」設置時の濃度分布

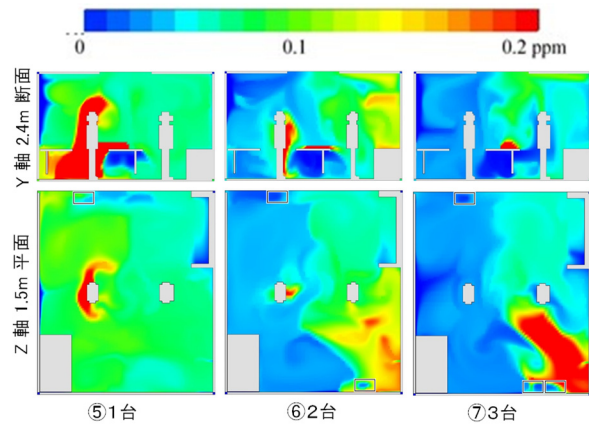


図-7 「床置き型」設置時の濃度分布

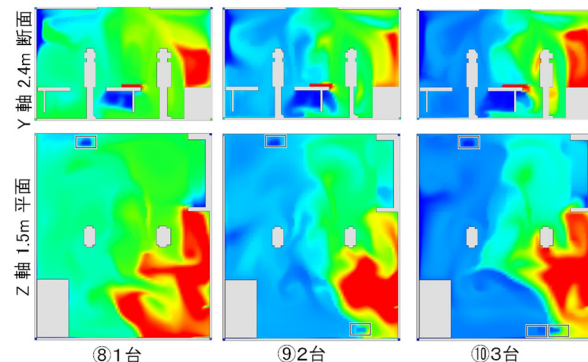


図-8 「床置き高位置吹出し型」設置時の濃度分布

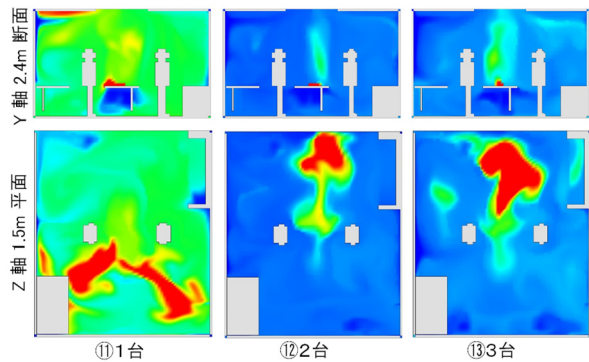


図-9 「壁埋込型」設置時の濃度分布

台設置の場合と同様の傾向がみられる。また、設置(運転)台数により、室の西側の濃度が低減している。ただし、南東に形成されている高濃度の滞留域においては、濃度低減の効果が低い傾向がみられる。これは、同滞留域が壁際に置かれた機器 B、C 上部にあり、空気清浄装置からの距離があることから、吹出された気流の影響が小さいためと考えられる。平均濃度は、呼吸域においては「床置き型」と同様に 2 台設置した場合だけ基準値を超えており、単純に装置台数分で合計した処理能力よりも装置個々の配置方法が重要であることがわかった。

「壁埋込型」(図-9)では、1 台設置の場合「床置き型」と同様に、北西に設置された空気清浄装置の吸込みにより室内空気の一部が引き寄せられ、高濃度滞留域が室中央に寄った。2、3 台設置の場合、「床置き型」、「床置き高位置吹出し型」ではみられた南東に形成される高濃度の滞留域が北側へと移動している。これは、「床置き型」と違い空気清浄装置の吹き出し方向が天井面から床面方向へ向いているため、下から上へ向かう気流が少なくなり、その結果、壁際に置かれた機器 B、C 上部に高濃度のグルタルアルデヒドが滞留することを抑制したためと考えられる。平均濃度は、呼吸域を平面方向へ拡大した範囲において 2 台設置の場合に、実施した解析パターンの中で最も低濃度である 0.016ppm、3 台設置の場合に 0.020ppm と良好な除去効果を示した。しかし、呼吸域においては、3 台設置の場合に 0.03ppm と基準値と同程度の濃度にしか低減しておらず、壁際 3 箇所に設置された空気清浄装置から吹出された気流が形成されたことで、室中央に高濃度滞留域ができる恐れがある。

そこで、例えば、室中央部天井に排気口を設けるなど、空気清浄装置の設置のほかに室内設備を工夫することで改善が期待できると考えられる。

以上、解析結果をまとめると、室内濃度低減のために、換気に加えて空気清浄装置を設置する場合、適切な設置位置を考慮しないと逆効果になる場合がある。また、同様に設置方式により設置台数を増やしても必ずしも除去効果が向上するとは限らず、換気口との位置を考慮することで除去効果の向上が期待できる。

4. まとめ

本報では、金属触媒とオゾンガスを接触させることで生じる酸化分解反応を利用した空気清浄方式について、試作した空気清浄装置を用い、医療施設で多くみられる空気中の化学物質の除去効果について、チャンバーを用いた化学物質除去実験で確認を行った。その上で、空気清浄方式による適用効果を確認することを目的に、装置の設置する位置や台数の変化による化学物質の低減効果について、流体解析によるシミュレーション手法を用いて比較検討した。その結果、

以下の知見を得た。

チャンバーを用いた化学物質除去実験の結果から、

(1)硫化水素、トリメチルアミン、スカトール、アセトアルデヒド、ホルムアルデヒド、グルタルアルデヒドの計 6 種類で、高い除去性能を示した。

流体解析の結果から、

(2)室内濃度低減のために、換気に加えて空気清浄装置を付加する場合、適切な設置位置を考慮しないと逆効果になる場合がある。

(3)天井カセット型空調機のような吹き出し、吸い込みの方式では、除去機能を有しても室内を低濃度に保つことは難しい。

(4)設置方式によって設置台数を増やしても除去効果が改善するとは限らない。

(5)空気清浄装置の設置方式や台数の検討を加えて、室内の換気口位置を考慮することで改善効果が期待できる場合がある。

今後は、今回、装置の配置方法検討の対象とした病理検査室に加えて、医療施設内で化学物質による空気汚染が懸念されるほかの室についても最適な設置方式を詳細に検討し、空気清浄装置の実用化を図っていく予定である。

【謝辞】

本報に関連する実験は、AIREX 株式会社との共同研究により実施したものである。代表取締役笈川大介氏に深く謝意を表す。

【参考文献】

- 1)小座野, 笈川: オゾンと金属触媒を用いた除菌に関する研究, 室内環境学会学術大会講演要旨集, pp.182-183, 2018.
- 2)川崎, 堀内: 嗅覚とにおい物質, pp.49-50, 1998.
- 3)室内環境学会: 住まいの化学物質, pp.157-161, 2015.
- 4)厚生労働省, 平成 24 年 10 月 10 日付け健康障害を防止するための指針公示第 23 号(最終改正 令和 2 年 2 月 7 日付け健康障害を防止するための指針公示第 27 号), 2012.
- 5)日本医療福祉設備協会: 病院空調設備の設計・管理指針 HEAS-02-2013, 2013.
- 6)日本産業衛生学会: 許容濃度等の勧告(2019 年度), 産業衛生誌 vol.61(5), pp.172, 2019.
- 7)横沢冊子, 小川真規, 西中川秀太, 石原友香, 後藤浩之, 吉田辰夫, 圓藤陽子: 病院病理室における気中ホルムアルデヒド濃度と作業者の症状の検討, 日本職業・災害医学会会誌, vol.56(5), pp.198-201, 2008.