

光触媒を利用した高効率空気浄化ユニットの開発 (その 2)

## PCO ユニット形状及び風速が反応効率に及ぼす影響の検討

### Development of High-Efficient Air Purification System with Photocatalyst (Part 2)

### Study on the Effect of Chemical Removal-Efficiency from PCO Unit Structure and Velocity

正 会 員 ○須藤 美音 (総合設備コンサルタント)

正 会 員 成 旻起 (東京大学)

正 会 員 加藤 信介 (東京大学)

非 会 員 吉田 秀 (アンデス電気)

非 会 員 川浪 文江 (アンデス電気)

Mine SUDO\*<sup>1</sup>

Minki Sung \*<sup>2</sup>

Shinsuke KATO\*<sup>2</sup>

Shuu YOSHIDA\*<sup>3</sup>

Fumie KAWANAMI\*<sup>3</sup>

\*1 SOGO SETSUBI Consultant Co.,Ltd.

\*2 University of Tokyo

\*3 ANDES ELECTRIC CO., LTD.

The purpose of this study is to development the high-efficient air purification system with photocatalyst. This paper presents the relations between the chemical removal-efficiency and PCO unit structure or air velocity. It was found using CFD simulation that the most efficient unit among the cases considered had a structure like a chamber. And PCO unit works efficiently with comparatively low air velocity of 0.1m/s. There is room for consideration, as air-conditioning systems need higher air velocity.

## 1. はじめに

従来病院では、手術室や易感染患者用の病室等高い空気清浄度が要求される室を中心として、高いスペックの換気システムが設置されている。それに対して、病室や待合室等は手術室や易感染患者用の病室ほど高い清浄度が要求されていないが、薬品臭、排泄臭、体臭等さまざまな原因の臭気の問題や、SARS やインフルエンザの蔓延による院内感染の問題が生じ、空気環境の改善が急務となっている。一方で、地球温暖化問題により CO<sub>2</sub>削減が迫られ、省エネルギーの観点から高効率の換気システムが求められている。

そこで、本研究では『光触媒』を利用して、安全かつ脱臭・除菌効果の高い換気システムの開発を目的としている。本報では、反応効率を向上させるため、PCO シートと化学物質の接触時間を最大化するよう、光触媒酸化ユニット (以下 PCO ユニット) の形状及び風速の検討を行った結果を示す。

## 2. 光触媒の反応過程

光触媒として知られる酸化チタンは、強いエネルギーの光、主に紫外線を照射すると酸化能力を持つため、空気中の化学物質の除去に広く使われている。光触媒の反応効率を向上させるためには、以下の条件があげられる (図 1)。

- ① 酸化チタン自体の酸化性能 (反応面積や化学的性質)
- ② 光触媒を活性化するための十分な紫外線量
- ③ 反応時間及びその時間で処理できる化学物質の量
- ④ 周辺環境 (温度、湿度等)

本研究では特に③に着目し、照明シミュレーションによる PCO シート面の UVA 強度分布解析及び流体解析 (CFD)、実験を行い、PCO ユニット内部の気流性状により除去対象の化学物質の除去効率を検討する。

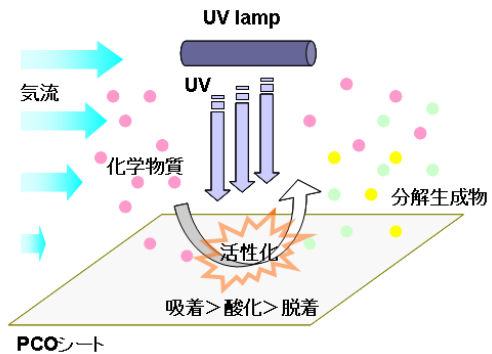


図1 光触媒の反応過程 (巨視的観点)

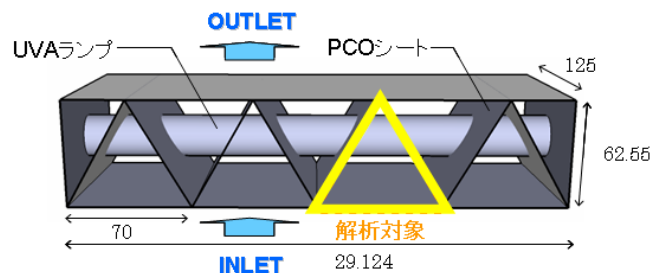


図2 PCO ユニットのモデル

表1 PCO ユニット概要

区分	詳細
UVA ランプ	National FL10BL-B (ブラックライト) 出力 10W (紫外線出力 1.2W) 管径 25.5mm, 長さ 330mm
PCO シート	面積: 総 2008 cm <sup>2</sup> (対象ユニット: 251 cm <sup>2</sup> )
全体	空間体積: 総 1976 cm <sup>3</sup> (対象ユニット: 247 cm <sup>3</sup> )

## 3. CFD 解析による PCO ユニット形状の検討

### 3.1 解析概要

#### (1) 解析対象モデル

図 2、表 1 に PCO ユニットのモデル及びその概要を示す。PCO ユニット内は PCO シートの三角ユニット

表 2 CFD 解析結果

Case	Case 1	Case 2	Case 3	範囲
形状				
開口率	INLET : 100% OUTLET : 100%	INLET : 36% OUTLET : 36%	INLET : 64% OUTLET : 36%	
風速分布 [m/s]				
トルエン濃度分布 [-]				

で構成されている。PCO ユニットの小型・軽量化を目指し、ランプは UVA ランプを使用。三角ユニットの中央を貫通している。UVA ランプは照度が高いとは言えないため、UVA ランプと PCO シートのとの距離が短くしていることが当該ユニットの特徴である。シミュレーションでは 1 つの三角ユニットを対象として実施した。

**(2) UVA 強度計算概要**

計算には Radiance 3.8 を用いた。ランプの UVA 放射率はカタログのスペック (UV 出力: 1.2W) を参考とし 45.4 [W/m<sup>2</sup>] とした。反射はユニットの中で PCO シートのみを考慮し、アイボリー色の布の反射率 0.38 を適用した<sup>2)</sup>。

**(3) CFD 解析概要**

CFD 解析により、トルエンが気流によりどのくらいの時間及び量で PCO シート表面まで運ばれ、PCO シートで除去されるかを計算した。除去率の算出方法としては、次式を用いた。

$$\text{除去率} = \frac{\text{入口濃度} - \text{出口濃度}}{\text{入口濃度}} = (1 - \text{出口濃度})$$

上式は、実験により得られる情報等でより実際に近い状態にモデル化することができる。

CFD 解析には、STAR-CD v.3.26 を用いた。メッシュ形状は非構造で、38 万メッシュ。乱流モデルは標準  $k-\epsilon$  モデルとした。境界条件の詳細は注 1 参照。

解析ケースは全 3 ケースとし、三角ユニットの INLET 側及び OUTLET 側の開口面積 (開口率) を変化させている (表 2)。Case1 は INLET・OUTLET とともに開口率 100%、Case2 では INLET・OUTLET の

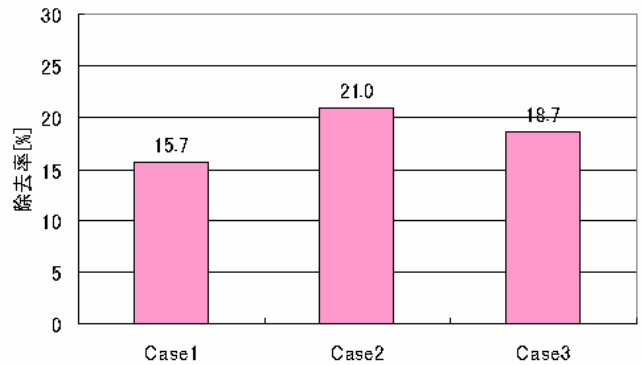


図 3 除去率

もに開口率 36%、Case3 では INLET の開口率 64%、OUTLET の開口率 36% とした。風量は全ケース 1060 cm<sup>3</sup>/s としたが、開口面積の違いにより入口側の風速は異なっている (表 2・風速分布参照)。

また、PCO シート表面に到達する空気中のトルエンは完全に酸化分解されるものと仮定する。

**3.2 解析結果**

**(1) UVA 強度計算結果**

UVA 強度計算結果、三角ユニットの底面の平均値は 0.734 mW/cm<sup>2</sup>、側面は 0.617 mW/cm<sup>2</sup> であった。

**(2) CFD 解析結果**

解析結果を表 2 に示す。Case1 は INLET から流入した空気が中央の UVA ランプ周辺の狭い空間を速い速度で通過し、ランプの裏側に渦が生じる。PCO シート表面は摩擦力により風速が小さい。トルエン濃度分布は、INLET より流入した気流が PCO シート面に沿って流れるため、PCO シート近傍の濃度が低い。Case2、3 では INLET・OUTLET 部分に障害物を設けることにより、三角ユニットがいわばチャンバーのようになる。そのため、Case1 では INLET から OUTLET の

間で反応することができなかった化学物質が、Case2とCase3では障害物の影響で再循環することにより反応の確率が高くなる。

図3に除去率を表したグラフを示す。INLETとOUTLETの開口の最も大きかったCase2の除去率が最も高い。

#### 4. 実験によるPCOユニットの性能試験

##### 4.1 実験概要

###### (1)対象PCOユニット

実験は、3章CFD解析のCase1、Case2のモデルを対象として行った(図4)。

###### (2)実験方法

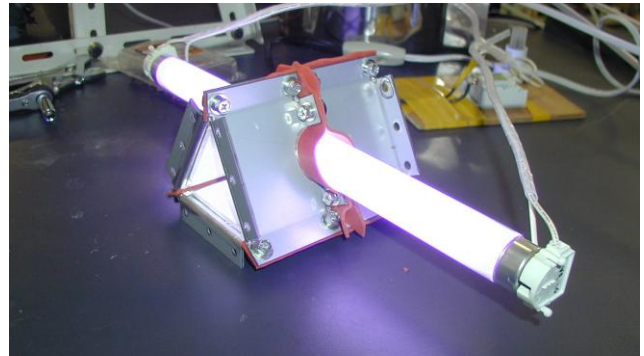
図5に実験設備の概要を示す。測定は以下の手順で行った。

- (1) アセトアルデヒド標準ガスと人工空気を扱い、流量、湿度、濃度を調整した。光音響ガスモニターにて出口濃度を確認した。
- (2) ブラックライトをOFFの状態にし、濃度が安定後、10分間濃度測定を継続した。この間の平均濃度を「暗条件での濃度」とする。
- (3) ブラックライト照射を開始し、照射による濃度が安定後、10分間濃度測定を継続した。この間の平均濃度を「明条件での濃度」とする。
- (4) 再びブラックライトをOFFにし、濃度安定後、10分間濃度測定を継続し、開始時の暗条件での濃度と同等であることを確認する。

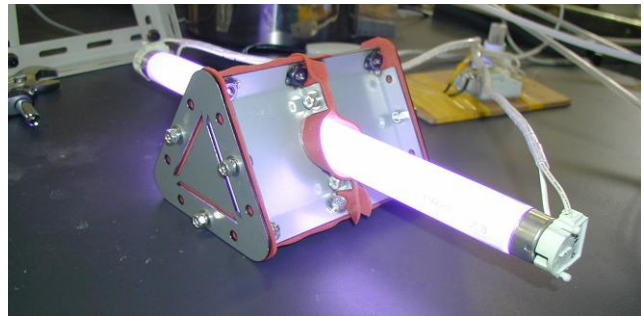
また、実験では、下記の式により除去率の計算を行った。

$$\text{除去率} = \frac{\text{暗条件での濃度} - \text{明条件での濃度}}{\text{暗条件での濃度}}$$

ブラックライト暗条件、つまり光触媒が反応していない条件での出口濃度を初期濃度とみなした。



(a) Case1



(b) Case2

図4 対象PCOユニット

表3 実験条件

分解対象ガス	アセトアルデヒド
測定機器	光音響ガスモニター (INNOVA 1412)
温度	室温(約22℃)
湿度	約40%
ガス濃度	1ppm(一定条件)
風速	0.1~1.0m/s

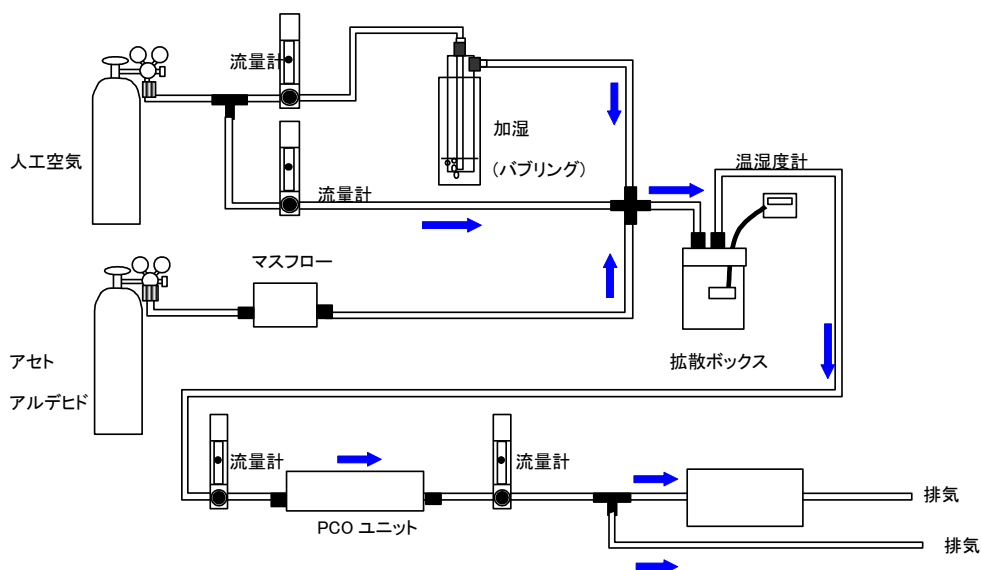


図5 実験設備概要

### (3) 実験条件

表 3 に実験条件を示す。本実験では対象ガスとしてアセトアルデヒドを用いた。3 章ではトルエンガスを想定して CFD 解析を行ったが、トルエンは高分子ガスのため完全分解に至るまで時間がかかり、シミュレーションで想定されていたような瞬間的な完全分解は困難である。そのため、ここでは、比較的分解しやすいアセトアルデヒドガスを用いている。温度は室温とし、湿度は 40% とした。ガス濃度は 1ppm の一定とし、風速は 0.1~1m とパターンを変えてガスを流出した。

## 4.2 実験結果

### (1) CFD 解析と実験値の比較

図 6 に実験結果を示す。図 6 (a) が CFD 解析の結果、(b) が実験結果である。

これより、CFD 解析では Case1 と Case2 の除去率の差が見られているものの、実験では差がほとんど見られなかった。

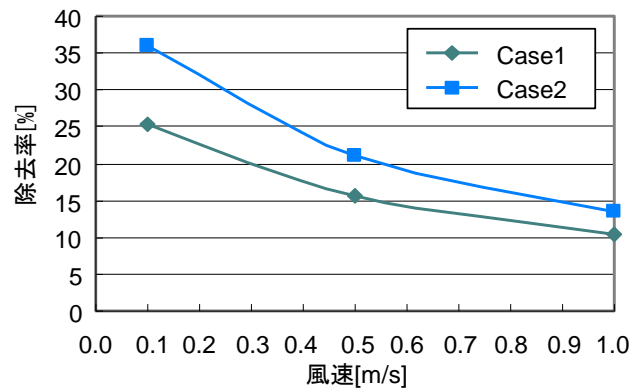
そのため、ユニット開口部の邪魔板の隙間を 4mm から 2mm へさらに縮め、追加の実験を行った (Case2' とする)。Case2' では除去率の向上が見られ、特に風速 0.1m/s の条件では、CFD 解析の Case2 に非常に近い値となった。

CFD 解析と実験値に差が生じた原因としては、光触媒の酸化分解速度の差が大きく影響したものと思われる。前述のように、CFD 解析では「全ての PCO シート表面に到達する空気中のトルエンは完全に酸化分解される」と仮定している。実際の反応では触媒表面に到達しても完全酸化まである程度の時間が必要であると考えられる。このため、たとえ開口部形状により PCO シート表面への接触効率が向上していても、風速が早い領域または紫外線強度が比較的弱い表面では分解しないうちに対象物質が流れ出てしまった可能性が考えられる。

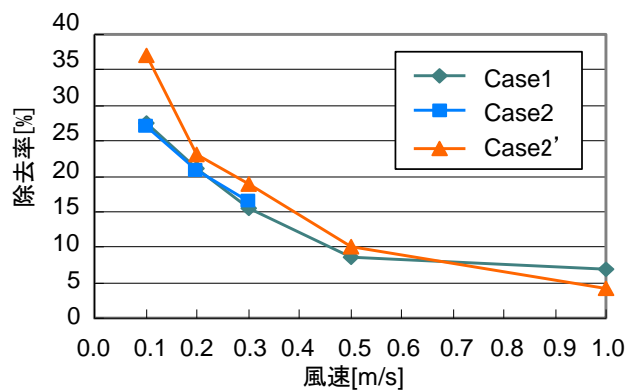
### (2) 風速の変化に対する除去率の影響

CFD 解析・実験値ともに風速が高くなるほど除去率が低下する傾向がある。これは、風速が高い方が PCO シートとガスとの接触時間が短いためである。この傾向は、実験値の方が顕著であり、風速 1m の場合 Case1 で 6.9%、Case2' の場合 4.2% となった。この原因としては、前述したが、実験の方が反応速度が遅く、風速が早くなるとますます分解の確率が低くなる。

また、CFD 解析、実験結果ともに 0.5m/s より風速が高くなると、除去効率が横ばいになっている傾向がある。この結果より、0.5m/s を超えた場合、PCO シートによるアセトアルデヒドの分解の効果はほとんどなく、主として紫外線ランプにより分解されているものと推察される。そのため、光触媒の効果を十分に発揮するためには、0.1~0.5m/s の範囲で風速を設定する必要があるが、空調システムへの導入を考えた場合、0.1~0.5m/s の風速は非常に低く、室内の十分な換気ができない可能性がある。そのため、反応効率を更に向上させるためには、ユニットの経路を長くして反応時間を増やしたり、UVA ランプの数を増加させるなどの方法により、照度を上げる必要がある。



(a) CFD 解析



(b) 実験値

図 6 風速変化に対する除去率影響

## 5. 結論

UVA ランプによる光触媒の反応効率の最大化させることを目的として CFD 解析・実験を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) CFD 解析の結果より、INLET、OUTLET の開口面積が最も小さかった Case2 の除去率が最も高い結果となった。
  - 2) 実験値と CFD の結果を比較すると、Case1、2 の差異がほとんど見られなかった。原因としては、光触媒の酸化分解速度の差が影響した可能性がある。
  - 3) CFD 解析、実験結果より風速が高くなるほど除去率が低下しており、その傾向は実験の方が顕著である。
  - 4) 風速が 0.5m/s を超えると、除去効率が横ばいになっており、光触媒による分解の効果はほとんどなく、紫外線による影響の可能性がある。
  - 5) 光触媒の効果を十分に発揮するためには、風速を 0.1~0.5 m/s の範囲まで下げる必要があるが、空調システムの導入を考えた場合、風速が低い。
- 以上の結果より、PCO ユニットの形状や要求される風速の限界などが明らかになったが、実用性に欠けるため、検討の余地がある。

**[注釈]** 1) Inlet:  $k_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.05)^2$ ,  $\epsilon_{in}=C_u \cdot k_{in}^{3/2}/l_{in}$ ,  $l_{in}$ =吹出幅の 1/7,  $C_u=0.09$ ,  $U_{in}$ : 各ケースの風速 (風量一定), Outlet: 質量保存側に従い、壁: no slip, 標準壁関数、トルエンの分子拡散係数:  $5.23 \times 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/s]

**[参考文献]** 1) 川西ら: 建築材料の紫外帯域反射・透過率に関する基礎的研究, 日本建築学会論文集, 第 525 号, 21-26, 1999 年 11 月