

# 空調機内部における空気殺菌効果向上のための 紫外線ランプ配置決定法の提案

紫外線ランプを空調機内部に設置することで空気中の微生物の殺菌効果を期待する場合、流れ場および放射場が均一でないために、殺菌効果もまた均一にはならない。期待する殺菌性能を担保するためには、通過する空気の紫外線照射量の最小値を評価する必要がある。そこで、ランプの設置決定法として、流れ場において空気の滞在時間が最短となる経路を特定し、その経路上にランプを設置することで殺菌効果の底上げを図ることを提案する。本稿では、簡易形状および実形状を対象に数値解析を行い、従来ランプ配置と提案手法によるランプ配置の殺菌効果を比較した。その結果、提案手法に基づくランプ配置によって紫外線照射量の最小値を向上できることを示した。

キーワード：シミュレーション・紫外線殺菌・空気殺菌・空気質

瓜生智裕<sup>\*1</sup> 永野秀明<sup>\*1</sup>  
白鳥英<sup>\*2</sup> 鳥野健仁郎<sup>\*2</sup>  
小田久人<sup>\*3</sup> 成旻起<sup>\*4</sup>  
加藤信介<sup>\*5</sup> 柳宇<sup>\*6</sup>

## はじめに

空調機の内部へ細菌の侵入やカビの繁殖が生じた場合、室内への再飛散によって空気質が悪化してしまうため、室内空気質の保全のための対策が必要となる<sup>1)</sup>。主な対策法のひとつとして紫外線殺菌 (Ultra Violet Germicidal Irradiation, UVGI) が挙げられる。紫外線殺菌は、照射した細胞の DNA の構造を破壊し、増殖能力を失わせるという特性上、あらゆる菌種に対して有効である。また、周囲に残留物をほとんど残さないため、空気や水など人体に入る流体の殺菌に向いているとされている<sup>2)</sup>。紫外線を浴びた菌の生存率は式 (1) のように与えられる<sup>3)</sup>。

$$S = e^{-kD} \quad \dots\dots(1)$$

$S$ : 生存率 [N.D.]  
 $k$ : 殺菌係数 [m<sup>2</sup>/J]  
 $D$ : 紫外線照射量 [J/m<sup>2</sup>]

殺菌率  $1 - S$  を高めるための紫外線照射量 (UV dose)  $D$  [J/m<sup>2</sup>] の値は、紫外線強度 (UV intensity)  $I$  [W/m<sup>2</sup>] と照射時間  $t$  [s] の積で表される (式 (2))<sup>4)</sup>。

$$D = I \cdot t \quad \dots\dots(2)$$

$I$ : 紫外線強度 [W/m<sup>2</sup>]  
 $t$ : 紫外線照射時間 [s]

紫外線ランプによる殺菌効果は、感染性エアロゾルや飛沫に対する殺菌である空気殺菌効果と、コイルフィンや建材への表面殺菌効果の両者を期待することができるが、本稿では空気殺菌のみを対象とする。空気殺菌の場合、殺菌対象は空気の移動に伴って紫外線照射領域を移動するため、紫外線照射時間  $t$  を考えるためには流れ場における滞在時間を考慮する必要がある。

紫外線殺菌に関する先行研究として、井田らは空調機内部に紫外線ランプを搭載し、微生物を除去する性能を測定によって評価した<sup>5)</sup>。数値解析を用いた検討として、成らは室内に紫外線ランプを設置した場合の空気に対する UV dose  $D$  を算出し殺菌効果を評価した<sup>4)</sup>。Azael や Fatih らは単純ダクトを対象とした流れ場における殺菌効果の評価を行っている<sup>6)7)</sup>。いずれの検討においても、単純な流れ場に

<sup>\*1</sup> 東京都市大学 正会員  
<sup>\*2</sup> 東京都市大学  
<sup>\*3</sup> 新晃工業(株) 正会員  
<sup>\*4</sup> 世宗大学校  
<sup>\*5</sup> 東京大学 特別会員  
<sup>\*6</sup> 工学院大学 正会員

おける事例研究に留まっており、空調設計において紫外線ランプの配置を決定するための明確な決定法は示されていない。前述の通り、紫外線の照射時間が長いほど殺菌効果は高まるため、空調機内部の紫外線殺菌 (In-Duct UVGI) を考える場合には、空気が内部を通過するための所要時間を考える必要がある。先行研究のような単純形状であれば、ピストンフローのような一様流になりやすく、そのために滞在時間も均一になりやすい。一方で、実際の空調機の内部の流れ場はより複雑であり、またそれは空調機の形状によって異なる。そのような複雑な流れ場において、どの位置に紫外線ランプを設置することが効果的かを議論し、かつ設置位置の決定法を示すことができれば、効率的な空調設計や室内空気質の向上に寄与することができよう。

そこで本稿では、空調機の形状・流れ場に関わらず適用可能な、汎用性のあるランプ配置の決定法を提案する。それに基づいてランプを配置した場合の殺菌効果を放射解析と数値流体解析 (Computational Fluid Dynamics, CFD) の連成計算によって評価し、提案手法の有効性を検証することを目的とする。

## 1. ランプの最適配置の決定法

空調機内部の流れ場は空調機の形状によって異なり、一様な流れ場になるとは限らない。また紫外線ランプにより形成される放射場についても同様に、ランプ近傍では紫外線強度  $I$  が高く、離れるほど低いため、流れ場の点からも放射場の点からも、通過する空気全体に対して均一に紫外線を照射することは困難である。流れ場の中にランプを配置することを考えると、流速が速い領域 (= 空気の滞在時間  $t$  が短い領域) において紫外線強度が低いと、空気に対する UV dose  $D$  が少なくなり、病原菌などが十分に殺菌されないまま通過する可能性が高くなる。反対に、流速が遅い領域 (= 空気の滞在時間が長い領域) において紫外線強度が低くとも、空気の滞在時間が長いことによって照射時間が長いため、UV dose 量は必ずしも少なくはならない。このことから、空調機内部を通過する空気に対して殺菌効果の最小値を底上げするためには、滞在時間が短い空気に対する紫外線強度を担保することが重要であるといえる。そこでまず、空調機内部における滞在時間が最短となる経路を特定し、その近傍に紫外線ランプを設置することを考える (設置決定法①)。

空気の滞在時間が最短となる経路の特定には、空気の平均移動時間を考慮することができる空気齢<sup>8)</sup>を利用する。空気齢は、流入した空気塊が空間中の任意の位置に到達するまでの平均時間を表しており、流入口から流出口までの所要時間が総滞在時間である。そこで、流出口断面における空気齢の値が最も低い領域を通過する空気の流線を特定し、その流線を滞在時間が短い空気塊の移動経路とする。

次に、この経路上のランプの設置位置について考える。一つの流線上において流速が一定である場合、流れの上流一下流のちょうど中央にランプを配置することが最適となる。ランプからの紫外線は流れとは無関係に上流にも下流にも等しく照射されるため、ランプが中央にあることで、通過する空気が最大限の UV dose を得ることができる。しかし実際には一つの流線上であっても流速は一定ではないため、一般化して考える必要がある。空気の局所的な滞在時間を流線上で積分した値が総滞在時間であることを考えると、ランプの上流と下流でこの積分値が等しくなる位置が最適配置となるといえる (設置決定法②)。

空気の滞在時間が最短となる経路はあらゆる流れ場の中に必ず存在するため、本稿で提案するランプ配置の決定法①および②を用いれば、どのような形状の空調機を設計する場合でも、CFDによって空気齢さえ求めれば、簡易的に紫外線ランプの適切な設置位置を定めることができる。

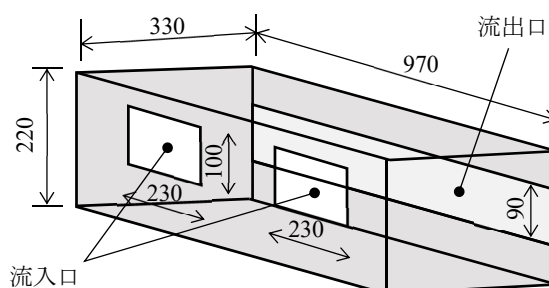
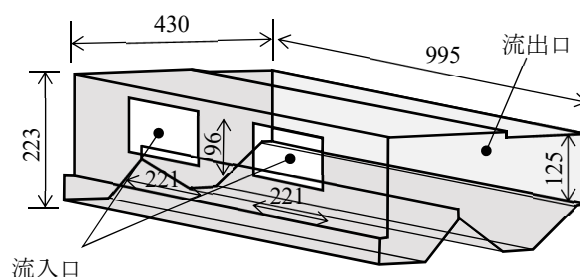
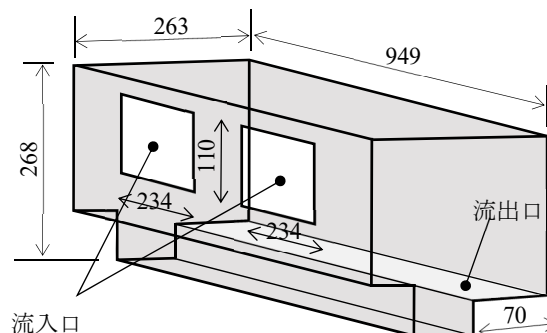


図-1 簡易モデルの全体形状



(a) Type A 天井隠ぺい型



(b) Type B カセット

図-2 詳細モデルの全体形状

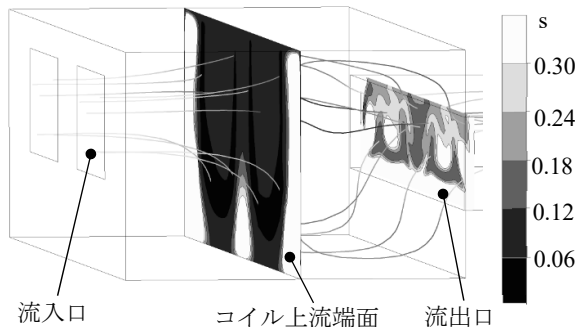
## 2. 数値解析によるランプ配置の検証

### 2.1 解析の概要

本研究ではファンコイルユニット (FCU) を対象として、ファン下流のチャンバー内部に単一ランプを配置することを考える。FCU の大きさの制約上、ランプは主流の法線方向に沿って設置するものとし、**図-1** に示す簡易形状と **図-2** に示す実形状に近い Type A 天井隠ぺい型および Type B カセット型のチャンバー部を対象とした。数値解析では、RADIANCE を用いた放射解析と Fluent による数値流体解析の連成計算を行った。本検討では空気殺菌のみを対象とし、殺菌対象である浮遊粒子の挙動は気流に完全に追随するものと仮定する。**表-1, 2** に計算条件を示す。放射解析では空間に測定点を配置し、逆光線追跡法を用いて各測定点に 6 方向から入射する UV intensity  $I$  を算出した。成らによる手法と同様<sup>4)</sup>、その値を流体計算の各セルにおけるスカラー量の発生強度と見なし、スカラー輸送方程式を解くことで、通過する空気が局所で滞在時間  $t$  を経ながらスカラー量を積算するものとし、流出口における積算量を UV dose  $D$  とした。対象とする空調機内部にはコイル式熱交換器が設置されているものとし、紫外線はコイルを透過しないものとした。また、コイルの圧力損失を再現するためにコイルの上流端面が位置する断面にポラス壁を設定した。ポラス壁厚さは今回対象とするモデルと同等の大きさの FCU 実機に採用されるコイルの実寸厚さに基づく。

### 2.2 簡易形状を対象とした解析

簡易形状において、コイル上流端面および流出口における空気齢と流線を **図-3** に示す。いずれの面においても空気齢は均一ではなく、分布を持つことがわかる。流線は 2 つの流入口のそれぞれから 5 本ずつ描いている。空気齢の値が低い領域を通過する流線が空気の滞在時間が短い経路である。コイルにより流れが整流化されるため、コイル上流端面の広い範囲で 0.12 s 以下の黒の領域が見られる一方で、壁面近傍では長時間滞在した白の領域が見られる。流出口においても同様に、短時間で通過する気流と長時間滞在した気流が二極化している様子が確認できる。



**図-3** 簡易形状のコイル上流端面と流出口における空気齢と流線

**図-4** にランプ配置を示す。配置①、②は FCU の実機で採用し得るランプ配置である。ランプを流入口の下方の配置①に置くことで、流入口よりも上流に位置するファンに対する紫外線の照射を抑えることができ、ファン内部の部品の劣化を防ぐことができる。また点検口がチャンバー下面に配置される場合、配置②の天井付近にランプを設置することで作業空間を確保でき、メンテナンスが容易となる。

**表-1** 放射解析の条件

放射計算条件	
計算手法	逆光線追跡法 <sup>9)</sup>
壁面で拡散する光線の本数	512
測定点数	57万~83万
紫外線ランプの性能	
長さ [mm]	546.2
直径 [mm]	15
出力 [W/m <sup>2</sup> ] @光源から 1 m	1.61
壁面の反射率	
全壁面 [N.D.]	0.15

**表-2** 流体計算の条件

計算条件	
乱流モデル	SST $k-\omega$ モデル <sup>10)</sup>
アルゴリズム	SIMPLE
差分法	風上二次差分法
メッシュ数 (構造格子)	簡易形状 約 61 万 Type A 約 25 万 Type B 約 98 万
境界条件	
流入速度 [m/s] (風量 [m <sup>3</sup> /h])	簡易形状 5.50 (910) Type A 5.66 (860) Type B 5.15 (960)
流出口条件	質量保存則に従う
壁面	No-slip
ポラス壁厚さ [m]	0.057
ポラス壁浸透率 [m <sup>2</sup> ]	$1.09 \times 10^{-7}$
圧力ジャンプ係数 [1/m]	153

これらの従来ランプ配置に対し、前章で示した決定法と空気齢および流線の解析結果に基づいて求めたランプ位置が配置③である。図-3において、各流線がコイル上流端面に到達したときの空気齢は一律ではない。このうち、空気齢 0.06 s の領域に到達する流線と 0.12 s の領域に到達する流線では、そこに至るまでの所要時間が 2 倍異なることとなる。今回は、描いた流線の中からコイル上流端面到達時の空気齢 0.06 s となる流線を選択した。また、この滞在時間が最短となる流線上において、コイル上流側領域における速度変化が小さいため、流入口からコイル上流端面までの中間の位置にランプを配置した。

図-5 に、ランプを各配置に設置した際に通過する空気が流出口に至るまでに照射された UV dose の値を示す。棒グラフは流出空気の数値を、バーの上端下端はそれぞれ最大値と最小値を表す。いずれの配置においても最大値と最小値の差は 30 J/m<sup>2</sup> 以上あり、流出空気の中でも流路によって UV dose が大きく異なっていることがわかり、特に配置①においてその差が大きい。UV dose の最小値が低いことは、空気が十分に殺菌されないまま通過するおそれがあることを示している。図-6 に示す流線を見ると、流路の底面近傍に渦が発生していることがわかる（図-6 黒矢印）。配置①で UV dose の最大値が高くなった理由として、渦によって空気が長時間留まりやすい底面付近にランプが配置されることにより、滞在時間の長い空気に強い照射を与えたと考えられる。その一方で配置②では、ランプを天井付近に配置することで、流速がより速く、空気の滞在時間が短い領域に対する照射が強くなるため、UV dose の最小値が底上げされたと考えられる。従来配置である配置①②では平均値が 7.33 および 7.48 J/m<sup>2</sup> であったのに対し、提案手法によって求めたランプ配置③では UV dose の平均値は 9.12 J/m<sup>2</sup> であり、およそ 30% 向上していた。また空調機の殺菌性能を担保するためには流出空気の UV dose の最小値を評価する必要があるが、最小値についても提案配置③は従来配置①②よりもそれぞれ 96% および 37% 向上した。これらのことから、提案手法によってランプ配置を決定することにより、滞在時間の短い空気に対する照射を強めることが殺菌効果の底上げにつながることを確認できた。

### 2.3 Type A 天井隠ぺい型の解析結果

FCU の 2 種 Type A および Type B を対象に、前節と同様の解析を行った。Type A 天井隠ぺい型の形状は、空調機底部に結露水を排水するための傾斜が設けられており、コイル式熱交換器部分で流路が広くなり、流出口で再び狭くなっている。簡易形状と比較すると、床面の傾斜によって、流入口直下の滞留する領域の空気が入れ替わりやすくなり（図-7 黒矢印）、それによって通過する空気全体の滞在時間は簡易形状よりも均一化しやすい。

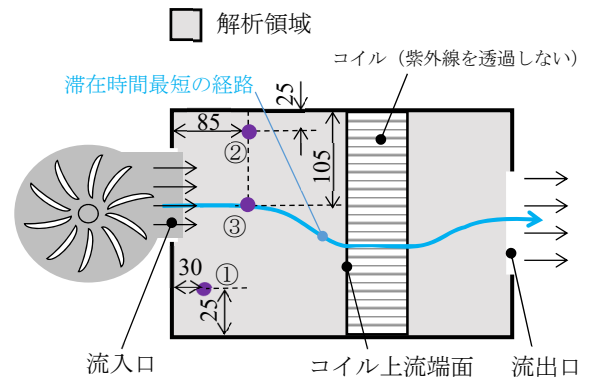


図-4 簡易形状の流路内のランプ配置

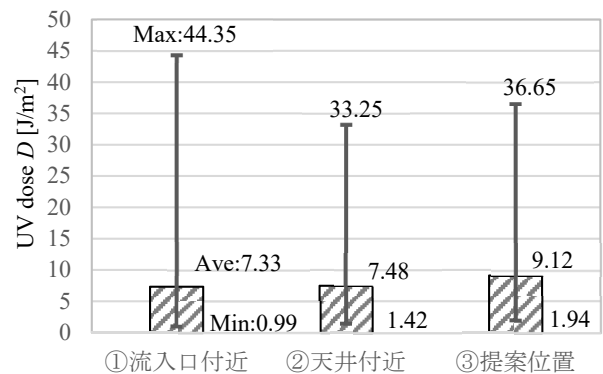


図-5 簡易形状の流出口における UV dose の比較

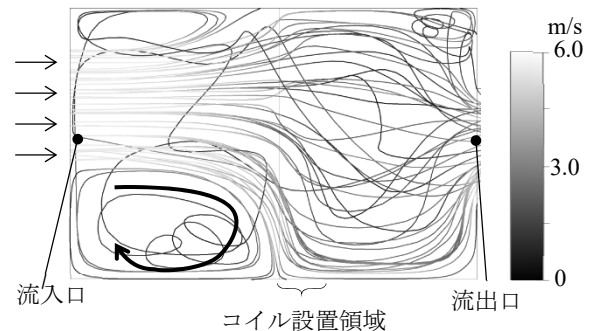


図-6 簡易形状流路内の渦の様子

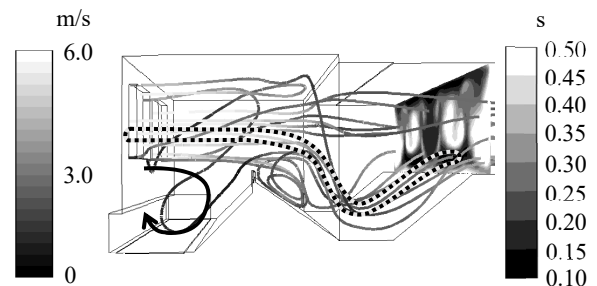


図-7 Type A 流出口における空気齢と流線

流体解析によって求めた流線と流出口における空気齢の分布を図-7に示す。点線部分が流出口における空気齢が低い領域に到達する流線であり、空調機内部を通過する空気の中で、この経路上を通る空気の滞在時間が最短となる。すなわち、紫外線照射量が最も少なく通過してしまう流線である。図-8にランプ配置を示す。従来の配置①、②に加え、空気の滞在時間が最短となる流線上において流入口とコイル上流端面の中間の位置にランプを置いた配置③の殺菌効果を比較した。また、コイルの下流にランプを置いた配置④のケースを検討した。

図-9に流出口におけるUV doseの平均値および最大値・最小値を示す。配置①②③のいずれも前節の簡易形状と比較して最大値と最小値の差が小さくなっており、これは前述の通り床面の傾斜による影響と考えられる。流入口直下に配置した従来配置①では、通過する空気の紫外線照射量の最大値は配置②③よりも高かった。これは、渦が形成される床面近傍にランプがあるためであると考えられる。配置②では最小値が配置①よりも高くなっており、これは効率よく空気が交換されやすいピストンフローに近い領域にランプを配置しているためであると考えられる。一方提案配置③では、平均値が配置①②の1.3倍、最小値が配置①の2.0倍、配置②の1.1倍となり、通過空気に対して効果的に紫外線を照射できていることがわかる。コイル下流に設置した配置④では、最大値と最小値の差が大きく、また配置①②③よりも平均値および最小値が低くなった。これは、コイル下流では上流よりも流路が広く、ランプからの紫外線を通過空気の全体に十分に照射できないことによると考えられる。

#### 2.4 Type B カセット型の解析結果

Type B カセット型は、底面に傾斜がなく、コイル部で流路が広がった後に下方に曲がる構造となっている。流入口近傍の形状は簡易形状に近いが、コイル通過後は曲がっていることから、均一な流れにはなりにくい。流体解析によって得られた流線と流出口における空気齢の分布を図-10に示す。コイル表面における空気齢分布を見ると、流入口からまっすぐに流入した気流(図-10黒点線)がコイルに到達する経路が最短であることがわかることから、この流線上にランプを配置することが効果的であると考えられる。

図-11にランプ配置を示す。従来のランプ配置①、②に加え、設置法によって決定した配置③、コイル下流の天井付近にランプを設置した配置④のケース間で比較を行った。

図-12に流出口におけるUV doseの値を示す。配置①②③の大小関係はType Aと同様であった。提案配置③に設置することで、従来配置①よりも最小値が約3倍、平均値が1.3倍、従来配置②よりも最小値が1.4倍、平均値が1.1倍となった。またコイル下流に設置した配置④では最小値が

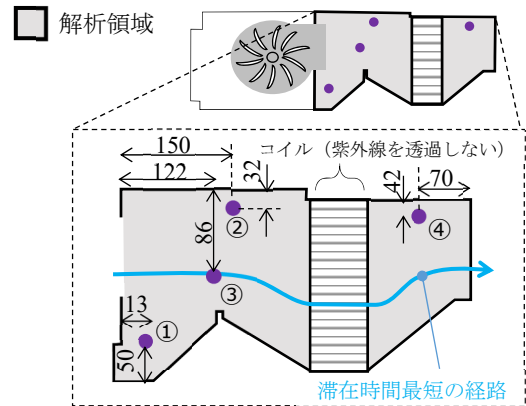


図-8 Type A 内部のランプ配置

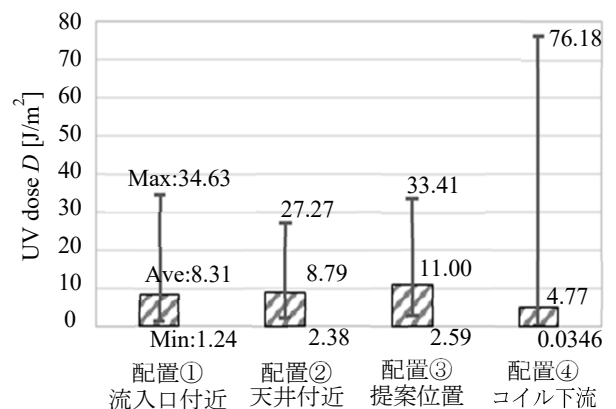


図-9 Type A 流出口におけるUV doseの比較

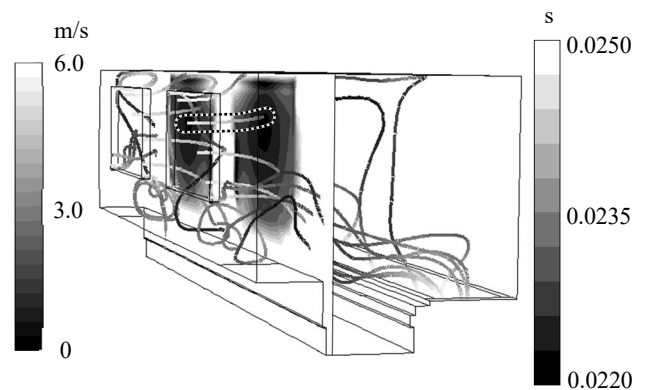


図-10 Type B コイル上流端面の空気齢と流線

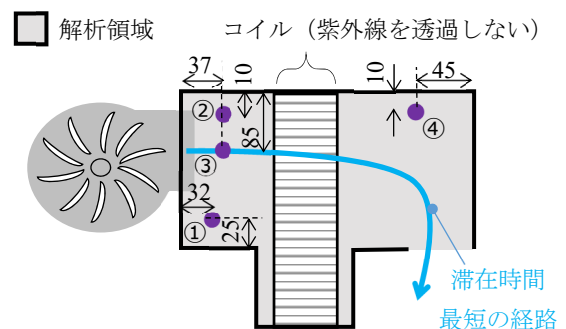


図-11 Type B 内部のランプ配置

最も低くなった。これは流路が曲がっていることにより、内側を最短で通過する気流が存在するうえに、ランプはその経路から離れていることから、十分に紫外線が照射されずに通過される空気があるためと考えられる。

また、カセット型の構造上、ランプが流出口近傍に近くなると在室者が天井を見上げた際にランプが直接見えてしまうおそれがあるため、下流側領域において配置を改善することは困難である。

### 3. 殺菌効果の比較と各菌種の殺菌率の評価

#### 3.1 形状の異なる空調機間の殺菌効果の比較

本節では、前節で扱った3種のFCUの殺菌効果を比較することで、空調機の形状による殺菌効果の違いを分析する。解析対象とした簡易形状、Type A、Type Bにおける紫外線ランプは出力が等しいものとしているが、解析空間の容積とコイルの相対的な位置が異なるため、それぞれ扱う風量と紫外線を照射する領域の広さが異なる。そのため、殺菌効果を比較するためにはこれらの差を考慮する必要がある。一般に、風量が多いほど流速は速くなるために空気の滞在時間が短くなり、その分、空気に対するUV doseも少なくなる。また、紫外線を照射する領域の容積が異なる場合、主流方向における空気の平均移動距離及び空気の滞在時間に差が生じる。ここで、空気の主流方向の平均移動距離  $d$  [m] を式 (3) で表す。

$$d = \frac{u \cdot V}{Q} \quad \dots\dots(3)$$

- $u$  : 流入速度 [m/s]
- $V$  : 紫外線を照射する領域の体積 [m<sup>3</sup>]
- $Q$  : 風量 [m<sup>3</sup>/s]

各ケースで算出した UV dose  $D$  [J/m<sup>2</sup>] をこの平均移動距離  $d$  で除すことで、通過空気が単位距離進むあたりの UV dose  $D'$  [J/m<sup>3</sup>] を求めることができ、風量と照射領域の広さを揃えた殺菌効果を比較できる。

図-13 に比較結果を示す。風量と紫外線の照射領域の体積の差を考慮して殺菌効果を比較すると、Type B で UV dose の値が最も高くなった。このことは、Type B の主流方向距離が最も短く、したがってランプ近傍の紫外線強度が高い領域のみを効果的に利用していることを表している。逆に簡易形状、Type A の順に主流方向が長く、同じ順に殺菌効果が低くなっていることから、主流方向に長い形状のFCUでは紫外線強度が低い領域も通過することから、単位移動距離あたりの紫外線照射量  $D'$  の値が小さくなったといえる。

#### 3.2 各菌種の殺菌に必要な循環回数の分析

具体的な菌種に対する実際の殺菌効果を考える。室内空気中には様々な菌種が存在し、殺菌するために必要な紫外

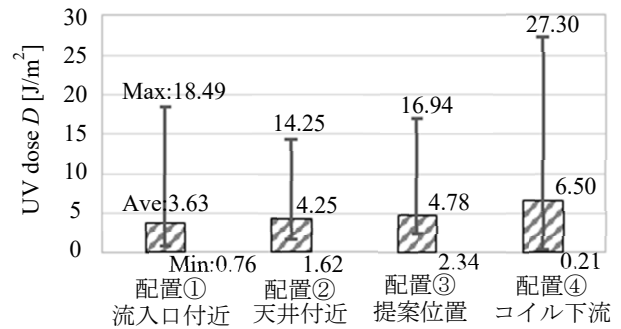


図-12 Type B 流出口における UV dose の比較

線照射量は異なる。代表的な菌種について、殺菌に必要な UV dose を表-3 に示す<sup>11-18)</sup>。表中の細菌に対して殺菌率 90%以上の殺菌を行うためには、10~30 J/m<sup>2</sup>、99.9%の殺菌を行うにはさらにその2~3倍の紫外線が必要である。

今回解析対象としたFCU内部におけるUV doseの最小値は、Type Aの従来配置①で1.24 J/m<sup>2</sup>、Type Bの従来配置①で0.76 J/m<sup>2</sup>である。対象室において病原体の新規発生がない場合を考えると、いずれのTypeおよび菌株に対しても一回の通過では殺菌できず、Type Aの場合、大腸菌の90%を殺菌するためには8回以上、コロナウイルスに対してはおよそ23回空気を循環させる必要がある。それに対し、本提案手法によって従来配置条件よりも最小値を1.1~2.0倍に向上できている。また、一回の通過による相当換気量を考えると、従来配置ではコロナウイルス90%殺菌率の1/28、提案配置では1/10のUV doseを照射していることから、(1)式より、そのときの殺菌率はそれぞれ約8%と約20%となる。総風量を900 m<sup>3</sup>/hとすると、相当換気量は従来配置のとき72 m<sup>3</sup>/h、提案配置のとき180 m<sup>3</sup>/hとなる。以上より、ランプ配置の提案決定法に従うことによって、殺菌に必要な循環回数及び殺菌に要する時間を削減できるといえる。

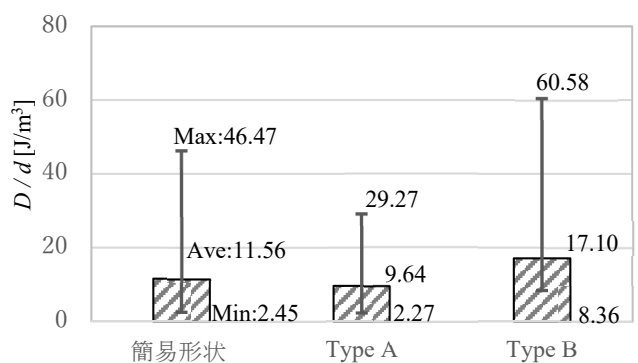


図-13 形状の異なるFCU同士の殺菌効果の比較

表-3 殺菌に必要な UV dose

病原体	90%殺菌率の 殺菌線量 [J/m <sup>2</sup> ]	99.9%殺菌率の 殺菌線量 [J/m <sup>2</sup> ]
大腸菌 <sup>11)</sup>	10	30
インフルエンザ H1N1 <sup>12)</sup>	10	—
従来コロナウイルス <sup>13-15)</sup>	28.2	—
新型コロナウイルス <sup>15-18)</sup>	27	50

## 結 言

空調機内部における空気殺菌の効果を底上げするために、以下の2段階から成るランプ配置位置の決定法を提案した。

- ① 流出口において空気の滞在時間（空気齢）が最短となる流線を見つける
- ② 見つけた流線上において流速が最も遅い位置をランプ設置位置とする

小型の空調機である FCU を対象に数値解析を行った結果、3種のFCUそれぞれにおいて上記の決定法を用いることにより殺菌効果を底上げできることを確認した。

今回提案した配置決定法は、空気齢に基づいて流線上の滞在時間を紫外線照射時間と見なすことに依っている。したがって、空調機の形状や内部構造の違いに関わらず、対象流れ場の特性を反映してランプ配置を決定する本手法は有効であるといえる。流れ場が完全混合であれば、ランプ配置を変更しても殺菌効果は影響されないことになるが、空調機内部は比較的狭い容積を大風量が通過するため、ピストンフローに近く、本手法は有効であるといえよう。

今回の解析では、ランプ配置が異なる条件間の比較に着目しているため、時間経過に依る病原体の失活やコイル表面への吸着を考慮していない。それらの影響を考慮すれば、循環回数はより少なくなると考えられる。また、今回は空気中の病原体が完全に気流に追随することを仮定している一方で、実際には病原体を含む塵埃や飛沫の粒径および重量によって重力沈降や慣性衝突が生じるため、実際の殺菌効果を評価するためにはこれらを考慮する必要がある。

今後は、表面殺菌に対する効果も考慮するとともに、複数のランプを設置する際の配置決定法の提案を目指す。

## 参 考 文 献

- 1) 古橋正吉, 実験用空調ダクトにおける紫外線空気殺菌, 防菌防黴 **36-12** (平 20-10), 日本防菌防黴学会, pp. 765-773
- 2) 菊地長四郎, 殺菌ランプとその応用, 照明学会雑誌, **58-4** (昭 49-4), pp. 143-146
- 3) Wladyslaw Kowalski, Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook UVGI for Air and Surface Disinfection (2009), p. 53, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

- 4) 成旻起 他, 紫外線放射解析による表面殺菌及び空間殺菌の評価 ID-UVGI の殺菌性能評価方法 (その 1), 日本建築学会環境系論文集, **74-644** (平 21-10), pp. 1137-1143
- 5) 井田 寛 他, UVGI を組み込んだ空調システムの感染対策例, 臨床環境医学, **27-1** (平 30-9), pp. 28-34
- 6) Azael Capetillo, et al., In-Duct UVGI air sterilisation: Optimisation study for high performance energy efficient systems, Indoor Air 2014 **4** (July, 2014)
- 7) Fatih Atci, et al., Evaluation of in-duct UV-C lamp array on air disinfection: A numerical analysis, Science and Technology for the Built Environment, **27-1: Thermal science and Technology** (Jun, 2020), pp. 98-108
- 8) 加藤信介, 室内空気汚染の時間的空間的変動特性とその検出, 計測と制御, **46-8** (平 19- 8), pp. 637-643
- 9) J.Ward, Gregory, The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System, Computer Graphics (Proceedings of '94 SIGGRAPH conference)(1994), pp. 459-72.
- 10) F.R.Menter, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications (1994), AIAA Journal, **32-8**, pp.1598-1605
- 11) Panasonic, 殺菌灯 <<https://www2.panasonic.biz/ls/lighting/plam/knowledge/document/0320.html>> (参照年月日 2021 年 3 月 5 日)
- 12) McDevitt JJ, et al., Aerosol susceptibility of influenza virus to UV-C light. Applied and Environmental Microbiology, **78-6** (2012), pp. 1666-1669.
- 13) Markus Eickmann, et al., Inactivation of three emerging viruses – severe acute respiratory syndrome coronavirus, Crimean-Congo haemorrhagic fever virus and Nipah virus – in platelet concentrates by ultraviolet C light and in plasma by methylene blue plus visible light, Vox Sanguinis, **115-3** (April, 2020), pp. 146-151
- 14) Shu-Ming Duan, et al., Stability of SARS coronavirus in human specimens and environment and its sensitivity to heating and UV irradiation, Biomed Environment Science, **16-3** (Sep., 2003), pp. 246-255
- 15) Wladyslaw J. Kowalski, 2020 COVID-19 Coronavirus Ultraviolet Susceptibility <[https://www.researchgate.net/publication/339887436\\_2020\\_COVID-19\\_Coronavirus\\_Ultraviolet\\_Susceptibility](https://www.researchgate.net/publication/339887436_2020_COVID-19_Coronavirus_Ultraviolet_Susceptibility)> (参照年月日 2021 年 3 月 5 日)
- 16) Mara Biasin, et al., UV-C irradiation is highly effective in inactivating SARS-CoV-2 replication, Scientific reports, **11** (March, 2021), Article No. 6260
- 17) Hiroko Inagaki, et al., Rapid inactivation of SARS-CoV-2 with deep-UV LED irradiation, Emerging microbes & Invections, **9-1** (Jul., 2020), pp. 1744-1747
- 18) Hiroshi Shimoda, et al., Efficacy of 265-nm ultraviolet light in inactivating infectious SARS-CoV-2, Journal of Photochemistry and Photobiology, **7** (2021), 100050

(令和 3. 4. 10 原稿受付)