

UV-C空気殺菌の設計最適化につながる、球面放射照度のモデル化

イアン・アッシュダウン

仮想的な球面放射照度メーターをシミュレーションする計算手法について解説する。結果が迅速に得られるため、信頼性の高いUV(紫外線)ベースの空気処理システムの開発に役立つ。

紫外線照射は、100年以上前から殺菌手段として利用されている。しかし、新型コロナウイルスのパンデミックを受けて、紫外線殺菌照射(ultraviolet germicidal irradiation: UVGI)システムに対する関心は、爆発的に高まってきている(<https://bit.ly/3ga4HoY>)。水銀蒸気やパルスドキセノンランプからエキシマランプやUV LEDに至るまで、

UV照射技術は、著しい進歩を遂げており、今後も進歩し続けていくと思われる。

しかし、まだわからないのは、UVGIシステムの性能のモデル化と、それよりもさらに重要な分析を行う能力が、それと同等に進化していくかということである。

建築化照明の設計者は、50年以上

前から自らの設計をモデル化して分析する能力を保有している。照明器具メーカーから提供された光度分布(配光)測定値と、クライアントから提供された構造のCADモデルを使用することにより、光源からの直接放射照度と、環境表面からの相互反射による間接放射照度の両方を考慮した、表面放射照度の分布をすばやくモデル化することができる。

そして今、建築化照明設計ソフトウェアを、そのままUVGIアプリケーションに適応させることができる。結局のところ、紫外線照射も可視光も、光学分野の同じ物理法則に従う光放射である(<https://bit.ly/3iFdmBm>)。これを行うことのメリットの1つは、照射源の直接視野には入らない表面の放射照度が予測できるようになることである。図1は、手術室の殺菌に使用されているモバイル型のUV-Cプラットフォームである。手術室は、水平面と垂直面に沿った数多くの表面が対象環境内に存在する。このような製品の開発者は、(対象とする病原菌に応じて)表面反射が照射レベルにどのような影響を与えて、環境の消毒にどれだけの時間が必要になるかを、考察する必要がある。



図1 表面放射照度は、手術室の殺菌に使用されるモバイル型のUV-Cプラットフォームを設計する際の、最も重要な検討項目である(写真と図はすべて、イアン・アッシュダウン氏提供)。

UVGI設計ソフトウェア

モバイルプラットフォームの複数の

位置と滞在時間を考察することにより、表面のUV-C照射量、すなわちフルーエンスをモデル化することが可能である。インテリジェントなUV-Cロボットは、部屋を殺菌するための最適なパスを判断するようにプログラムすることができる。UVGI設計ソフトウェアを使用することにより、照射量が十分でない可能性がある表面を特定し、より徹底的なターミナルクリーニングを行うようにフラグを立てることができる。

新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) のパンデミックが始まって、すべての表面を殺菌することが推奨されるようになったとき、このようなUVGI設計ソフトウェアは、まさに理にかなったものだった。殺菌に対するマルチモーダルなアプローチは、現在のパンデミックとは関係なく、何らかの用途で今後も利用されていくと考えられる (<https://bit.ly/3yqmUWX>)。しかし、エアロゾルが、結核、はしか、インフルエンザなどの呼吸器疾患の主要な感染経路であることを、私たちは80年以上前から知っている。現在の焦点は、屋内空間の空気殺菌にある。このことから、低圧水銀蒸気ランプ、UV照射LED、遠紫外線エキシマランプを使用するUVGIシステムが、広く普及する可能性が高まっている。

技術開発は行われており、今後も続けられるが、その性能をどのようにしてモデル化すればよいのだろうか。特に、空気体積中のUV照射の空間分布を、どのようにすればモデル化できるだろうか。

球面放射照度

まずは、いくつかの用語を定義したいと思う。表面放射照度とは、照射源の方向にかかわらず、表面に入射する単

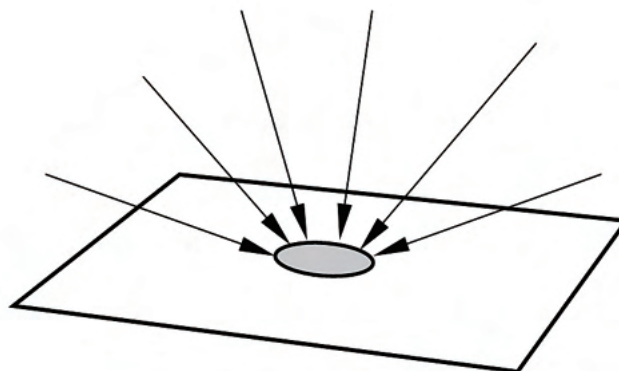
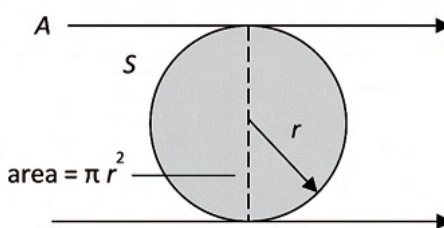


図2 表面放射照度は、照射源の方向にかかわらず、表面に入射する単位面積あたりの放射強度として定義される。



$$E_{e,o} = \int_{4\pi} L_e d\Omega$$

図3 空気中に浮遊するエアロゾル/液滴については、球面放射照度(フルーエンスレート)が、エアロゾル滴に全方向から入射する単位面積あたりの放射強度として定義される。単位は $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ である。

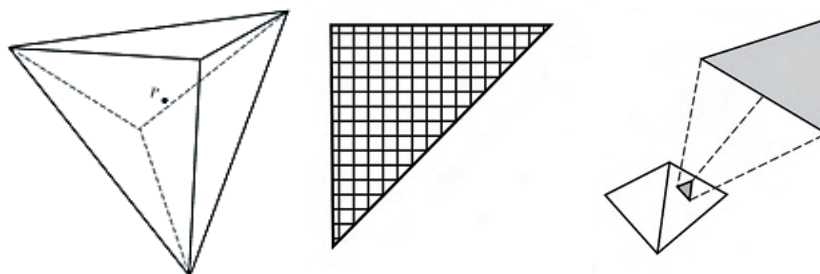


図4 仮想的な球面放射照度(SI)メーターに必要な幾何学構造について簡単に説明する。左の図は、コンピュータでシミュレーションした、2つの正四面体で構成される六面体(左)で、球状滴を表している。この六面体の各面を、三角形の要素アレイに分割する(中央)。最後に、各物体を六面体の面に投影して(右)、各物体から受ける放射照度を計算する。その結果を合計することにより、球面放射照度が求められる。

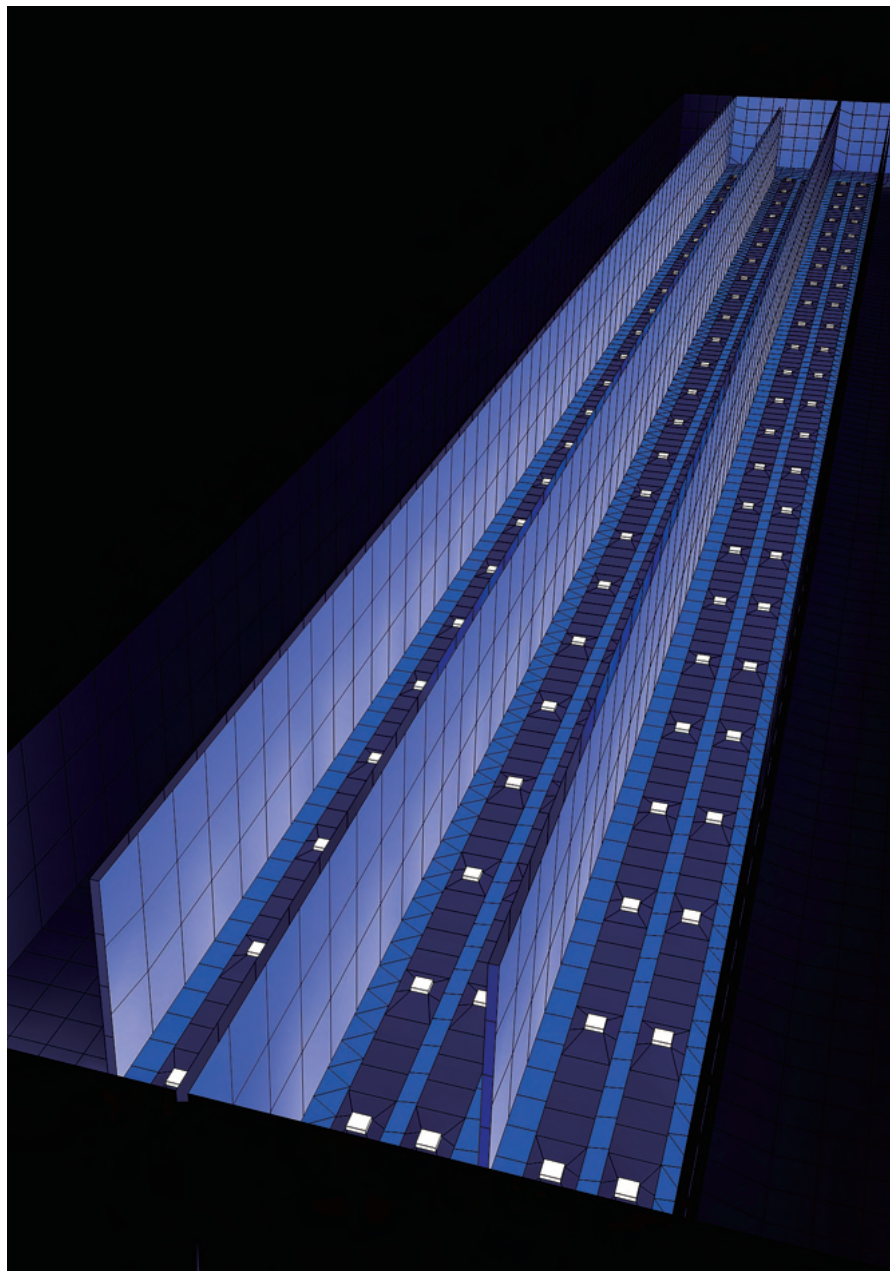


図5 CADモデル、CFD、仮想SIメーターを組み合わせることにより、空気処理ユニット内の乱流を考慮に入れて、Tグリッド状の凹型空気消毒器の設計を最適化することができる。これにより、1時間あたりの空気変化だけでなく、殺菌要件を満たすシステムが得られる。

位面積あたりの放射強度である(図2)。UVGIアプリケーションの場合は、1平方センチメートルあたりのマイクロワット数($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)の単位で測定される。

空気中に浮遊するエアロゾルや液滴については、球面放射照度が、エアロゾル滴に全方向から入射する単位面積あたりの放射強度を表す。任意の方向

に対し、対象領域は球状滴の断面積となる。全方向で積分することにより、滴の球面放射照度、すなわちフルエンスレートが求められる。こちらも単位は $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ である(図3)。

重要な点は、これらの定義において、照射源からの直接照射と表面反射による間接照射の両方が考慮されているこ

とである。多くの一般的な物質でUV-C反射率は低いが、高い反射率を持つ物質も存在し、例えば、アルミニウム板のUV-C反射率は70%にもなる場合がある。

UVGIアプリケーションにおいては、滴の紫外線照射量(フルエンス)を1平方センチメートルあたりのミリジュール数(mJ/cm^2)の単位で測定することが必要になる。残念ながら、UVフルエンスを正確に測定する実用的な装置は、球体光量計以外に存在しない。球体光量計とは、シュウ酸第二鉄カリウムなどの光反応性化学物質を溶液として充填した、中空の石英球である。

しかしここでは、空气体積中の球面放射照度の測定ではなく、モデル化が目的であるため、ここで必要なのは、仮想的な球面放射照度(Spherical Irradiance:SI)メーターである。

仮想SIメーター

数学的観点からは、球体光量計の性能のモデル化は極めて容易である。しかし、球体構造の計算は複雑で、合理的な時間以内に解くのは難しい。また、複雑な構造環境内の大きな空气体積をモデル化するには、数百から数千ものSIメーターが必要になる。

これに対する解決策は、2つの正四面体で構成される六面体で、球体を置き換えることである。2つの正四面体の底面同士を張り合わせた、2つの三面ピラミッドからなる六面体を想像してほしい(図4左)。球体と同様に、各面が周辺環境からの直接照射と間接照射を受ける。幸いなことに、面が平らになると、数学モデルははるかにシンプルになる。これにより、メーターの3次元(3D)アレイを仮想空間に配置して、UV照射領域をサンプリングすることができるようになる。

計算処理は、簡単かつ迅速である。長方形のピクセルアレイで構成されるコンピュータ画面のように、六面体の各面を三角形の要素アレイに分割する(図4中央)。自分がメーターの中心にいと想像すると、目の前には環境に対する360°の球体ビューが広がる。理論的には、実際の環境を眺めているのか、それとも、自分を取り巻く6つの三角形のコンピュータ画面を見ているのかは、見分けがつかない。

この状態で、各可視物体(または、物体の一部が隠れている場合はその一部)を、面に投影することができる(図4右)。これにより、各可視物体から受ける放射照度を計算して、その結果を合計することによって、球面放射照度を求めることができる。

これは、この仮想的なSIメーター設計の概念的概要にすぎない。設計そのものは、コンピュータグラフィックス研究ではラジオシティと呼ばれる、放射伝達理論に基づく。1980年代に構造の視覚化のために開発されたこの理論は、UVGIのモデル化に完全に適用可能である(現在、ラジオシティ手法は、米ライティング・アナリスト社[Lighting Analysts]の建築化照明設計ソフトウェア「AGi32」と「ElumTools」の基礎となっている)。

ここで重要なのは、メーター設計の実装方法ではなく、その速度である。デスクトップコンピュータを使用することにより、ほんの数秒から数分で、複雑な環境内の数千ものSIメーターをモデル化することができる。

仮想SIメーターは、空気殺菌システムを含む、さまざまな用途に適用することができる。図5は、Tグリッド状の凹型空気消毒器のサンプルで、蛇行流路を流れる空気に対して、72個のLEDによってUVが照射される。設計の観点

からは、流路内の平均球面放射照度は、流路の壁の反射率に大きく依存する。システムをモデル化することにより、設計を最適化することができる。

CADモデルを使用することにより、UV殺菌源を搭載する最も複雑な空気処理ユニットの構造も、簡単に表現することができる。ここでも、ユニット内の球面放射照度分布を、SIメーターの3Dアレイを使用して、任意の密度でサンプリングすることができる。

しかし問題は、多くの空気処理ユニット内の空気流が乱流となることである。病原菌の不活性化において重要なのは、フルーエンスレートではなく、フルーエンスそのものである。乱流は、エアロゾルが放射照度領域内にどれだけ長くとどまるかに影響を与えるため、空気殺菌の有効性を予測する際には、これを考慮する必要がある。

数値流体力学(Computational Fluid Dynamics:CFD)

この問題に対処するには、数値流体力学(CFD)手法を採用して、空気処理ユニットを流れる時間平均空気流を予測することがおそらく必要である。予測された静的な放射照度領域により、任意の商用またはオープンソースのCFDプログラムに対する入力を得られる。

残念ながら、機械エンジニアが、すべての部屋を対象とした空気処理システムを設計する際に、CFD手法を採用するのはまれで、ましてやホテルのロビーやシアターなどの複雑な構造空間については、言うまでもない。1時間あたりの最小空気変化をただ指定するだけのコードを作成することが、一般的に行われている。

著者紹介

イアン・アッシュダウン(IAN ASHDOWN)は、加サントラッカー・テクノロジーズ社(SunTracker Technologies)のシニアサイエンティスト。URL: <https://www.suntrackertech.com/>

COVID-19のパンデミックを受けて、この状況に変化が訪れるのは間違いのない。レストランなどの空間の殺菌に関する研究では、閉じた空間内の空気の流れを明らかにすることの重要性が示されており、この問題に対処するには、コード作成を見直す必要がある。

以上まとめると、既存の建築化照明設計ソフトウェアを、直接照射と間接照射の両方を含む、複雑な環境内の表面のUV放射照度の予測に適応させることが可能である。しかし、空気殺菌をモデル化するには、仮想的な球面放射照度メーターをこのソフトウェアの中に実装する必要がある。

本稿では、数千ものSIメーターによって、そうした環境内の大きな空気体積の高密度なサンプリングを可能にする、新しい方法について概要を説明した。計算時間は数秒から数分程度であるため、この方法は、UV-Cによる空気殺菌システム、空気処理ユニット、上層空気システムや、遠紫外線を利用した部屋全体の空気システムのモデル化に理想的である。

球面放射照度メーターは、空気体積中のフルーエンスレートの予測に利用できることから、このソリューションの1つの要素である。しかし、複雑な環境内では空気流に乱流が生じるため、エアロゾルがさらされる可能性のあるフルーエンスをモデル化するために、CFD計算が必要になる。

とはいえ、仮想的なSIメーターは、UVGIシステムのモデル化に有効である。これを使用することにより、パンデミック後の時代に向けた、安全で効果的な空気質システムを設計することができる。