

COVID-19と闘うために、UV利用に関する未知の要素に取り組む教育管理者

モーリー・ライト

新型コロナウイルスのパンデミックを受けて、照明業界は、UV-Cに基づく多数の製品を大急ぎで市場に投入した。その自然なターゲットは教育施設だが、教育施設の管理者らは、殺菌用UVの微妙な性質の理解に悪戦苦闘している。

UV-C域(100～280nm)における紫外線(UV)照射は、照射量が適切であれば、ほとんどのウイルス性、細菌性、殺菌性の病原菌を不活性化する。また、人間の可視域よりも短い波長の放射エネルギーは、さらに化学的な殺菌剤よりも、受け入れられやすく、導入しやすいように思われる。教育施設は、そのような環境的にクリーンな殺菌手段の適用先としてぴったりである。しかし、UV-Cにも、人間の皮膚や目に対するそれ独自の危険性があり、椅子やカウンターなどの表面を劣化させる恐れがある。そこで、学校でUV-Cがどのように活用されているかを調査してみたところ、その多くが分析麻痺の状態に陥っていることが分かった。しかし本稿では、教育施設において役立つような、照明メーカーによるUV-Cアプローチを調査し、いくつかの初期の使用事例を紹介したいと思う。

本稿は、2021年に掲載を予定しているUV-C関連のシリーズ記事の第1弾である。調査結果を特別レポートとしてまとめ、本誌の3つの号に分けて掲載する予定である。上述のとおり、今月号では教育施設を取り上げる。年内の別の号で、医療施設、そして商業施設を取り上げる予定だ。今月号には、UV関連の2つめの記事として、利用可能なUV-C光源と、新型コロナウイルス(SARSCoV-2)などの病原菌を不活性

化する照射量の決定方法について解説する、米エクセリタス社(Excellitas)の記事が当号に掲載されている(p.16)。また、本稿の別掲記事では、照射量に関する追加情報を紹介している。

殺菌用UV-Cの機会を追求する照明メーカーは、開空間に対するその適用方法として、大きく分けて空気殺菌と表面殺菌という2種類の方法に落ち着いた状態にある。携帯電話や学用品や医療器具を消毒するための殺菌器を提供するメーカーもある。UV-C製品を提供する企業は、新興企業から照明業界の大規模企業まで多岐にわたり、米アキュイティ・ブランド社(Acuity Brands)、蘭シグニファイ社(Signify)、米クーパー・ライティング・ソリューションズ社(Cooper Lighting Solutions、シグニファイ社傘下の事業部門)、米GEカレント社(GE Current)、独オスラム社(Osram)などがある。この1年間で、本誌の電子メール受信箱に洪水のように殺到した製品発表は、構想が不十分なものや明らかに危険なものから極めて革新的なものまでさまざまだった。殺菌用UV-Cというこの分野は、簡単に必要な情報を選別できる領域ではなく、教育施設がこの技術の導入に苦勞している理由も十分に理解できる。

本稿では、ポータブル型またはモバイル型のUV-C製品はほぼ除外することにする。例えば、民間航空機の乗客

室の消毒に使われているUV-Cロボットを、以前本誌で紹介した(<http://bit.ly/34gxa7s>)。類似のロボットが、レストランや教室の消毒に対しても提案されている。そうした製品の安全な使用は、それを使用する人の自己責任に委ねられている場合が多い。同様に、航空機の操縦室の消毒に携帯型機器を使用するユナイテッド航空(United Airlines)に関する記事を掲載したことがある(<http://bit.ly/3283B5i>)。このような応用事例では、使用者の保護に多大な注意を払う必要がある。

本稿では、建造物のインフラにしっかりと固定して使用することを意図したUV-C製品を取り上げたいと思う。中には、HVAC空調設備の内部に組み込まれているものも存在する。多くは、従来の照明器具のような形状をしているが、人がいるときに作動することが決してないように、かなりの保護機構が必要となる可能性がある。永続的に固定配置することを意図した製品の中には、人がいるときに使用しても安全であることが実証されつつあるものもある。現在市場に提供されている製品の多くに、昔ながらの水銀ランプが使われているが、UV-C LEDを採用する製品も存在する。

製品開発に向けた急速な動き

UV-Cに対して照明メーカー各社が

どれだけ迅速に取り組みを進めているかを示すものとして、クーパー・ライティング社の事例を紹介したいと思う。同社は2020年6月まで、UV事業をまったく手掛けていなかった。同社は6月に同市場に参入し、教育的情報と製品情報を織り交ぜた、この話題を扱うおそらく最も優れた専用ウェブサイト⁽¹⁾を立ち上げた(<http://bit.ly/3nzslNI>)。クーパー社で副社長兼ゼネラルマネージャーを務めるケン・ウォルマ氏(Ken Walma)によると、同社には、親会社であるシグニファイ社がUV事業に非常に長く携わってきたというアドバンテージがあり、また、クーパー社は、UV-C管として使用するために簡単に改変できそうな、古い蛍光灯器具をポートフォリオとしてまだ保有していたという。

本稿に掲載したトイレの写真(図1)など、クーパー社のいくつかの画像からは、同社が、天井に設置された基本

的に2つの照明システムに可能性を見出していることが明らかに見てとれる。トイレの写真には、2種類の異なるUV-C照明器具が表面殺菌用に設置されている様子が示されている。

施設全体に可視光システムとUV-Cシステムの両方を設置するコストについて、ウォルマ氏に尋ねた。殺菌用UV-Cが使用されるのは短い消毒時間の間だけなので、運用コストは無視できる。しかし資本コストはかなり大きくなると、ウォルマ氏は答え、「健康に対する価値提案には、雲泥の差がある」と述べた。

この他に、UV-Cと可視光を同じ器具に統合した製品や、可視光とUV-Cによる空気殺菌を同じ器具に統合した製品を、本誌は既に確認している。そうした統合製品は、資本コストが低くなる。とはいえ、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)のワクチンが期待どおりの効果を発揮すると仮定して、

教育施設などがそれだけのコストを負担しようと思うだろうか。ウォルマ氏は、「この製品は売れて、1つの市場として確立されるだろう」と述べた。

試験運用から導入まで

ウォルマ氏によると、クーパー社はこれまでに「数百から数千もの」UV-C装置を試験運用向けに供給しているという。組織は、評価を行い、より広範囲にわたる導入の可能性を検討するために、技術を購入する。試験運用場所の多くが教育施設だと同氏は述べた。残念ながら、そうしたプロジェクトについて本誌に語ってくれる、教育管理者や施設管理者を見つけることができなかった。ウォルマ氏によると、初期試験運用の多くが、UV-C照明器具の照射が届く範囲のウイルスのみを不活性化させる、表面殺菌を対象としているという。つまり、カウンターの下の病原菌は不活性化されない。



図1 学校などの施設の公共トイレで、水銀ランプを使用した表面殺菌用のUV-C照明器具を利用することができる。(写真提供:クーパー・ライティング・ソリューションズ社)



図2 クーパー社の「GUV User Station」は、占有センサからの入力に加えて、権限のある担当者が鍵でシステムを解除しなければ、殺菌サイクルを開始するスイッチが操作できないようになっている。(写真提供:クーパー・ライティング・ソリューションズ社)

ウォルマ氏は、将来的には空気殺菌のほうが普及するだろうとし、研究者らがSARS-CoV-2の空気感染に関する理解を深めていることがその理由の1つだと述べた。使用モデルも、表面殺菌よりもシンプルである。表面殺菌システムは、散発的に使用され、人がいるときに作動しないようにするための保護機構が必要であるのに対し、空気殺菌システムは連続的に稼働したままにすることができる。クーパー社は実際、占有センサ、鍵で保護された安全解除機構、殺菌サイクルを開始するための回転スイッチ作動機構を組み合わせた、非常に高度な制御システムを提供している(図2)。

HVACへの統合

前述のとおり、空気殺菌は複数の形態で実装可能である。商業施設や教育施設のHVACシステムへの統合は、

理想的な実装形態のように思われる(図3)。米ジョンソンコントロールズ社(Johnson Controls)は最近、図書館におけるそのようなプロジェクトの詳細を発表した。イリノイ州リンカンシャーにあるヴァーノンエリア公共図書館(Vernon Area Public Library)は、UV-C照明グリッド(UV-C管のアレイ)を、図書館の2つのエアハンドリングユニット(AHU)の内部に実装した。ジョンソンコントロールズ社のビルサービス顧客担当者であるキャサリン・ホーン氏(Catherine Hawn)は、「当社がソリューションスイート『OpenBlue Clean Air』の一環として提供するUV照明は、顧客による健康的で安全で柔軟性の高い建物の構築に役立っており、ヴァーノンエリア公共図書館の再オープンとともに、コミュニティの安心感を高める手助けができることを光榮に思う」と述べた。

しかし、HVACシステム内に配置すると、UV-C殺菌装置の全体的な有効性は低下する恐れがある。アキュイティ社で技術商用化担当副社長を務めるゲーリー・トロット氏(Gary Trott)は、学校の教室を思い浮かべて、生徒の席とHVAC排気口の距離と換気の頻度を考えてみてほしいと述べた。「誰かがくしゃみをした場合、(その空気が)殺菌装置に到達するまでの経路は長い」と同氏は指摘した。

アキュイティ社は、提携に基づいて殺菌用UV-C市場への参入を図っており、空気殺菌については米UVエンジェル社(UV Angel)と提携している。UVエンジェル社は、一端で空気を取り込んで他端で清浄空気を送出するトロファ型の器具を開発している。空気は、照明器具内部のUV-C殺菌チャンバに送り込まれる。トロファ型照明器具の中央には、可視光用の平面型のSSLライトエンジンが搭載されている。

アキュイティ社のトロット氏は、多くの施設管理者にとって、HVACに統合するよりも、トロファ照明器具を「取り外して交換」するほうが扱いやすいだろうと考えている。同氏はさらに、局所的に空気を処理する方式のほうがはるかに予測可能で、施設管理者は、局所的にどれだけの空気が殺菌されているかを正確に把握することができる」と述べた。クーパー社のウォルマ氏も同様の見解を示し、同社の顧客とのやり取りから、大半がHVACシステムよりも天井照明インフラへの統合を望んでいると述べた。クーパー社は、現時点ではそのような照明器具を提供していないが、そうした製品を開発する方向に明らかに向かっている。

トロファ型の殺菌用UV-C空気システムを開発する小規模企業は無数に存在する。本誌が最近取り上げたそのう



図3 ジョンソンコントロールズ社は、殺菌用のUV-CランプグリッドをHVACエアハンドリングユニット内部に実装している。(写真提供:ジョンソンコントロールズ社)

ちの1社が、米エナジーハーネス社 (Energy Harness) である。同社は米パデュー大 (Purdue University) と共同で、「Active-Airflow」システムというものを開発した。トロファ型のこの装置は、少なくとも初期開発されたものは、可視光機能を持たない。この製品は、インディアナ州中部の2つの学区に導入されている (<http://bit.ly/2E7toT5>)。

エナジーハーネス社社長のマイケル・フィッシャー氏 (Michael Fischer) によると、2校はこのUV-C装置にかなり満足しているという。UVエンジェル社が水銀管を使用しているのに対し、フィッシャー氏のチームは、空気チャンバにUV-C LEDを採用している。本誌でこれまでに指摘し、上述のエクセリタス社の記事にも記されているように、今日のUV-C LEDは一般的

に、例えば表面殺菌に必要な出力に欠けるが、特殊な用途において適切に機能することができる。フィッシャー氏は、同社製品の構造の具体的な詳細を明らかにしなかったが、同社が照明器具の中に長い気流チャンバを設けていることは明らかである。チャンバ全体に沿ってLEDが取り付けられており、何らかの蛇行形状のデザインになっていると考えられる。フィッシャー氏によると、1つの装置に200個弱のLEDが使用されているという。このデザインによって基本的に、気流に基づくUV-C曝露時間が長くなる(照射量に関する別掲記事を参照のこと)。

その他の空気殺菌方法

空気殺菌方法は、それ以外にも数多く存在する。何年も前になるが、医療機関などの施設で、水平照射のUV-C

照明器具が使われたことがあった。ビームを制御して、従業員の頭上のエリアを殺菌することにより、従業員の安全を確保するものである。クーバー社とシグニファイ社は現在、壁、柱、天井に取り付けることのできる、そのような製品を提供している。本誌は最近、ドイツの食料品店におけるそうした製品の導入事例を紹介した (<http://bit.ly/3q6vrcv>)。

しかし理想的には、気流を制御して病原菌を殺菌システムへと導くことが望ましい。米ビッグアスファン社 (Big Ass Fans) という、提供する製品にぴったりの社名を冠した企業は、そのようなアプローチを意外なフォームファクタで実現している。同社は、ブレードの直径が部屋いっぱいまで伸びた天井ファンで知られている。同社はその後、いくつかのLEDベースの照明機能

を自社製品に追加している。そして現在、一部の製品において、UV-C LEDライトエンジンをファンモーターの上に搭載し、UV-Cを天井と外側に向けて照射するようにした。本誌表紙の写真には、講堂に取り付けられたファンの上に紫色の光が照射されている様子が示されている。

このファンは、ファン直径の外側の空気を天井に向けて上方向に導き、UV-Cを照射した後、ブレードによって床に向けて下方向に送り返す。この製品コンセプトについては、本誌の最近のニュース記事で取り上げた (<http://bit.ly/35vmm4Y>)。このファンは、米カーネギーメロン大(Carnegie Mellon University : CMU)の一部の教室などに導入されている。

UV-Cと人間

当然ながら、人がいる状態で照射できるならば、UV-C殺菌技術の利用は



図4 アキュイティ社の「Care222」シリーズの遠UV-Cモジュールを搭載する、殺菌専用のこの円筒形照明器具は、人がいる空間で安全に使用できるとされている。(写真提供：アキュイティ・プランズ社)

格段に容易になる。下向きに光を照射する固定のUV-C照明器具により、表面と空気の殺菌が可能だ。しかし、夜間に無人空間の空気を清浄しても、翌朝その空間に感染者が一人入ってくれ

ば、その処理は何の意味もなさない。

人がいる状態で殺菌用UV-Cを安全に使用方法としては、少なくとも2つの方法が考えられる。遠UV-Cを照射する方法と、従来のUV-Cを非常

波長と気流も照射量を左右する影響因子に

エクセリタス社のパメラ・リー氏とマーヴィン・ラフィン氏によるUV-C光源に関する記事は、SARS-CoV-2の不活性化に必要なUV-C照射量について非常にわかりやすく解説している。しかしここでは、空気殺菌における波長の有効性や照射時間など、他のいくつかの側面を指摘しておきたいと思う。

表面殺菌の場合、照射量は光強度と曝露時間の積で表され、計算式は比較的単純である。しかし、すべてのUV-Cが同じというわけではない。本誌は2020年9月に、ボストン大NEIDL (Boston University National Emerging Infectious Diseases Laboratories)で行われた研究に関するニュース記事を公開している。この研究は、波長に基づくSARS-CoV-2の不活性化の有効性を調査するものだった (<http://bit.ly/2Gc5Opj>)。

NEIDLの研究では、短い波長のほうが、非常に狭い帯域においてもSARS-CoV-2の不活性化に効果的であることが示された。例えば、260nmの放射波長は280nmの放射波長よりも、はるかに急速にウイルスを不活性化させることができる。

この事実から派生する影響は、製品開発者や殺菌システムの導入者が、光源の強度と曝露時間の間でトレードオフを行うことができる可能性があるということである。それは、十分な強度を得るために水銀ランプが必要だという発想が最初に思い浮かぶ用途に対し、UV-C LEDが利用可能であることを証明するための扉を開く可能性さえある。

空気殺菌になると、この問題はさらに難しくなる。表面殺菌では、曝露時間は計算するまでもなく、時計で測定することができる。UV-C光源を備えた気流チャンバ内の曝露時間は、チャンバの長さや気流の速度に依存する。本稿の範囲を超えているので詳しくは説明しないが、気流は、ファン、気圧差、システム摩擦などの影響を受ける。

実際、気流が加わると照射量の計算は格段に複雑になる。光強度を求めるには、UV-C照射光源から殺菌対象までの距離を知る必要がある。強度は、光源における光束と、ダクトの反対側の壁の光束の間の値になる。空気経路を長くすれば、目標照射量をより簡単に達成できるが、より多くのUV光源が必要になる。

に低い出力レベルで照射する方法である。殺菌用UV-Cのほとんどの研究と製品開発が、250～280nmの波長範囲で行われている。この波長範囲が選択される理由の1つは、UV-C水銀ランプの放射波長が254nmであることに基づいている。

一方、ウシオ電機は、遠UV-Cサブバンドと呼ばれる222nmを発光中心波長とするエキシマランプを世界に先駆けて開発した。同社は、この短い波長が殺菌効果に優れていることを示す研究結果も発表している。安全性については、222nmの紫外線照射は、死細胞からなる皮膚の最外層や目の角膜を貫通しないという主張を、本誌は2020年春に初めて耳にしている。初期試験は実験動物で行われたが、人体に対する研究も進んでおり、そうした利用が安全であることが示されつつある。

本誌は2020年晩夏に、国際紫外線協会(International Ultraviolet Association: IUVA)、全米電機製造業者協会(National Electrical Manufacturers Association: NEMA)、ULなどが、さらなる研究調査が実施されるまで、人がいる場所での遠UV-Cの利用を控えるよう推奨したことを紹介した(<http://bit.ly/31u47Kv>)。現在は、その後の研究結果によって、その導入促進が支持されているようだ。そうした製品が年内に米国市場に投入され、遠UV-C分野に関するULのガイドラインが定められる可能性がある。

一方、アキュイティ社は2020年夏、ウシオ電機との契約を締結した(<http://bit.ly/2Y9wtIZ>)。アキュイティ社は、ウシオ電機の遠UV-Cライトエンジンまたはモジュールを組み込んだ、可視光製品を北米で独占的に販売する権利を獲得する。アキュイティ社は、「Care222」ブランドの下でそれら



図5 病原菌の不活性化率は、曝露時間を通したUV-C照射レベルによって大きく変わる。例えば、GEカレント社によると、低レベルのUV-Cを照射する同社の「365DisInFx」ブランドのパック型天井照明は、同社試験において、代理ウイルスに対して4時間で88%の不活性化率を示したが、SARS-CoV-2に対してはそれよりも急速な結果を示す可能性があるという。(写真提供: GEカレント社)

の製品を開発している(図4)。これについては、続報に期待してほしい。

GEカレント社も、人がいる場所で安全に使用できるとするUV-C製品を提供している。本誌は2020年9月に、UV-CとUV-Aの両方の製品を含む「365DisInFx」ブランドの立ち上げを取り上げた(<http://bit.ly/2G8AIyh>)。UV-C製品である「LPU Series」は、天井に取り付けるパック型の製品で、UV-C LEDを利用するものである(図5)。国際電気標準会議(International Electrotechnical Commission: IEC)が定める、IEC 62471のランプ及びランプシステムの光生物学的安全性と、米国産業衛生専門家会議(American Conference of Governmental Industrial Hygienists: ACGIH)の規定に準拠した、安全とされるレベルの光を照射する。

また、カレント社は最近、SARS-CoV-2の代理ウイルスとして使用される、バクテリオファージMS2エアロゾルウイルスの不活性化に対して、LPUが有効であることを示す研究結果を発表している。低レベルのUV-Cにより、4時間で同ウイルスの88%が不活性化

するという試験結果が示されている。しかし、1日24時間連続的に稼働した場合、2時間の不活性化率は44%となる。カレント社は、SARS-CoV-2に対してはより急速な結果が期待されると述べ、1時間で50%、3時間で90%の不活性化率が得られるとした。

カレント社は、LPU製品の販売を開始している。また、多数の教育施設が同製品を試験的に導入していると述べた。この製品の外観と取り付け方法は、煙感知器に非常によく似ている。

UV-C関連の今後の記事で取り上げたい話題は、他にもまだ多く存在する。アキュイティ社は、表面殺菌に対して水銀ランプではなくパルスキセノン光源を選択した。ウイルス除去において、殺菌用UV-C照射を補完するものとして抗菌面を推進する動きについては、本誌でまだまだ紹介できていない。また、次の特別レポートを発行するまでには、COVID-19ワクチンに関する新たな情報や、それがUV-C製品を急いで市場に投入しようとする動きの勢いをそぐことにならないかどうか、明らかになるだろう。