

UV光測定がもたらす、 照明設計観点での好影響

アン・ベイ

紫外線領域の非可視光を扱う際の設計上の不確かさは、標準的なテスト及び測定ツールの使用方法に変更を加えることによって、緩和することができる。本稿では、適切なUV光分布のシミュレーションを最適化して、殺菌用UVシステムで期待される結果を達成する方法について解説する。

殺菌用紫外線 (Germicidal Ultra-Violet : GUV) の応用において、UV光は、空間に充満してすべてを死滅させる殺菌ガスのようなものではないことを覚えておく必要がある。UV光は、それに曝露した表面の菌のみを死滅させる。例えば、机の上は殺菌されるが机の下は殺菌されず、布地の表面は殺菌されるが布地の中は殺菌されない。

紫外線照射は、商用提供されている多くの携帯型のUV放射計によって、その場で測定することが可能である。

そうした測定器は、各ポイントのUV放射照度(単位は通常 mW/cm^2)を測定する。しかし、そのようなポイント測定値は、オフィス空間や病院などへのGUVの新規実装を計画する際にはあまり役に立たない。

医療現場にプラスチックが使われるようになり、抗生物質やワクチンが常備されるようになるまで、GUVは、手術室やその他の部屋を夜間に消毒するために一般的に用いられていた。最近では、医療施設、オフィス空間、店舗において、

部屋全体をUV-C域(100~280nm)の光に曝露する装置の使用が復活している(<https://bit.ly/3yqmUWX>)。その目的は、室内の空気と接触可能な表面を消毒することにある⁽¹⁾。

これに伴い、認可された手法を適用して、GUVの実用的効果を予測することが不可欠となっている。つまり、適切なデータがあれば、細菌やウイルスの効果的な除去を計画することと、誤った安心感を与えることとの違いを、明らかにできる可能性がある。

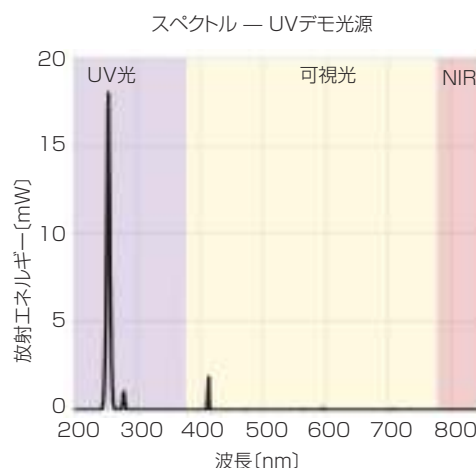
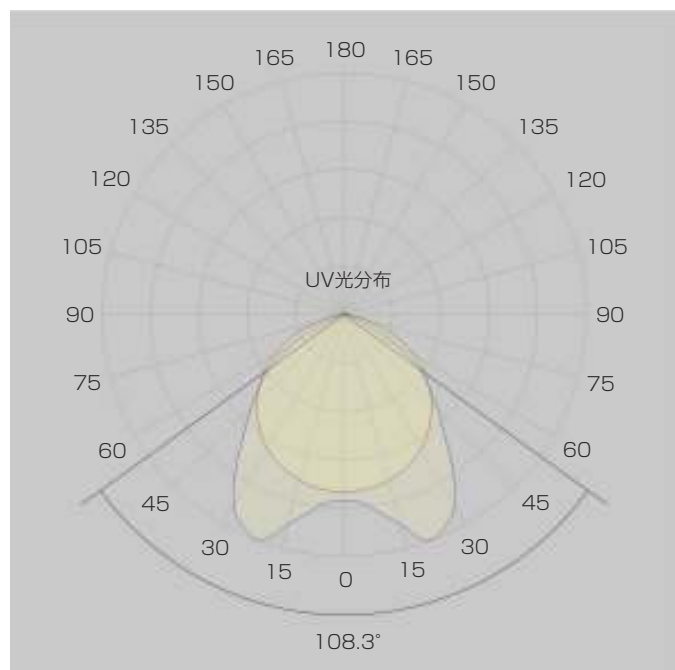


図1 紫外線(UV)光のスペクトルと放射輝度の両方を全角度で測定しなければ、正しいUV光分布を表現することはできない(図と画像は、別途記載のない限りすべてピソ・システムズ社提供)。

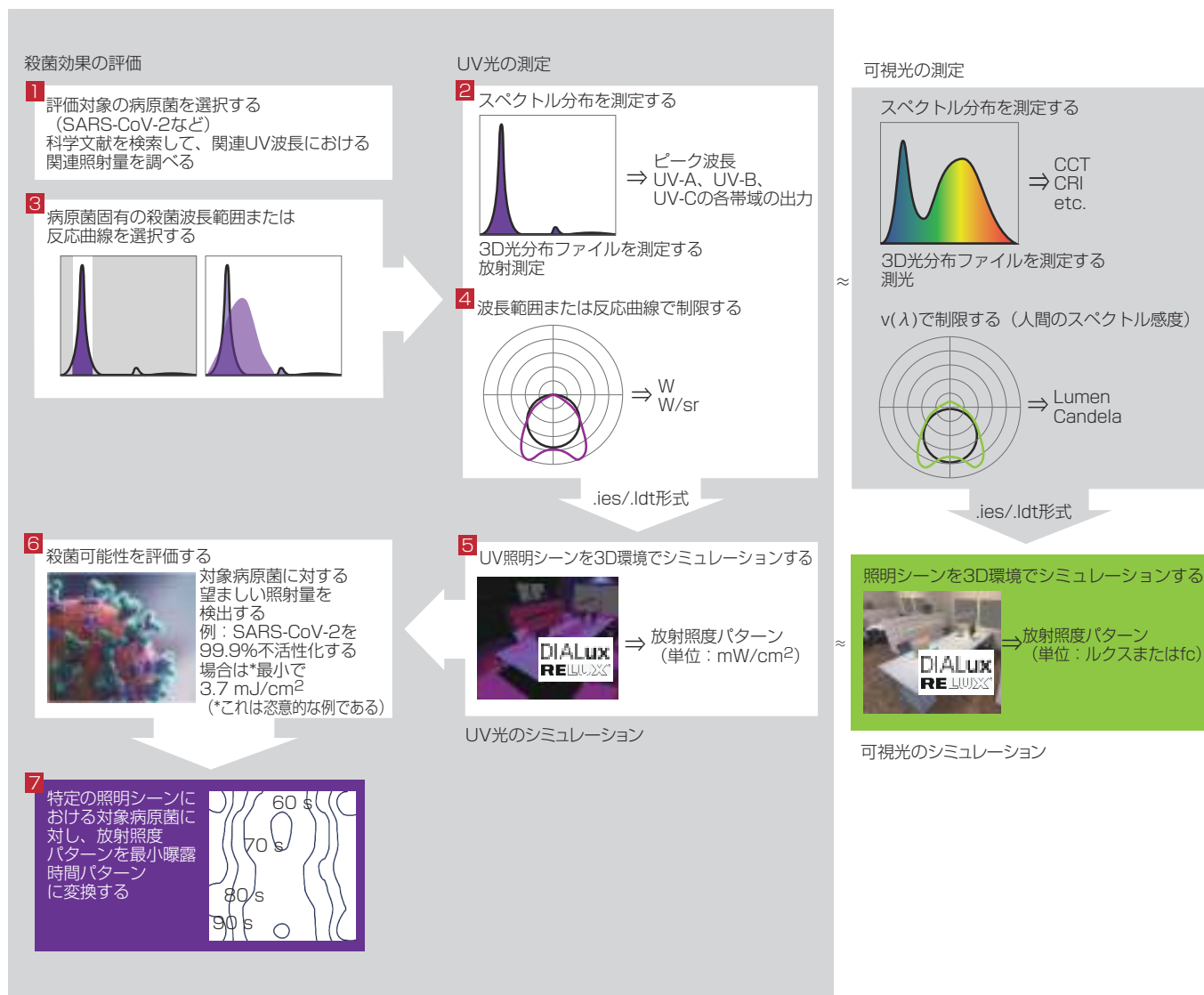


図2 UV殺菌効果を実環境でシミュレーションするための手順を図示した。一部の手順は、可視光照明設計で良く知られているものである。

殺傷力のある照明の設計

多くの理由(光線角膜炎、紅斑、発がんの可能性など)に基づき、空間内の占有者がUV-C光に曝露されてはならない(<https://bit.ly/3nSF8uA>)。しかし、不十分なUV照明設計は、殺傷性はないにしても、他の形で占有者に対して有害である。表面が受ける正確なUV放射照度がわからなければ、殺菌効果を検証することはできない。そうすると、UVを照射しても病原菌は生き残り、やはり人間を危険にさらすことになる。

幸い、UV照明設計は、想像するほど難しくはない。実際、可視光照明の設計計画に適用される類似の手法を、少し変更するだけでUV照明設計に採用することができる。

新しいプランニングソフトウェアは不要

与えられた表面に対するUV光の照射量は、可視光とほぼ同じ方法で調べることができる。一般照明の世界では、光分布の3D表現(IESまたはLDTファイル)や、何らかのスペクトル情報

(CCT、色座標など)の活用は避けて通れない。この情報を基に、実空間における光をシミュレーションすることができる。この方法は、同じソフトウェアソリューションを利用することにより、GUV製品設計にも適用することができる。

デンマークのビソ・システムズ社(Viso Systems)の顧客で、同じくデンマークのUVメディコ社(UV Medico)の製品スペシャリストであるクリスチャン・バイリエル氏(Christian Byriel)は、次のように指摘している。「全般

的に、無料のDIALuxソフトウェアを使用して、実際の殺菌可能性を推定することができて満足している。また、ソフトウェアグラフィックスは素晴らしく、その可能性を当社のクライアントに視覚的に示すのに適している。しかし、シミュレーションの入力として、正式なUV 3D測定ファイルが必須である」。

バイリエル氏が指摘しているように、手法はほぼ同じだが、少し複雑になっており、3DのUV光分布ファイルと曝露時間を計算する能力が、追加が必要となる。

正しいUV光データの取得

UV光源の配光パターンを、従来のゴニオフォトメータで測定するサプライヤーもいる。その場合、測定値はスペクトルの可視域に限定される。ほとんどのUV光源が少量の可視光も放射するため、これは実行可能である。携帯型測定器でピーク角度のUV出力を測定することにより、3DのUV光分布を計算することができる。ただし、この計算で正しい結果が得られるのは、UV光分布が可視光分布に比例する場合のみである。実経験からは、多くの場合においてその仮定は誤りであることが明らかになっている。

ビソ・システムズ社のディレクターを務めるクリスチャン・クラウス氏(Christian Krause)は、その理由を次のように説明している。「UV光は、照明器具内部の材料や表面に対して全く異なる相互作用を示す。可視光とUV光の分布が同じになるのは、おそらくむき出しのUV光源のみである」。

これは、波長が短い光のほうが多くの表面に吸収されやすいためである⁽²⁾。その結果、UV光の分布は、照明器具の光学系の複雑さに応じて、関連する

可視光の分布とは全く異なる可能性がある。吸収率は、ディフューザ、塗装面、リフレクタ、レンズに対するUV光の相互作用に依存する。

この問題に加えて、フォトメータセンサを、合計UV照射量を一括(例えば200~400nm)で取得する、UVセンサに置き換えるだけでは十分ではない可能性がある(フォトメータの場合は、380~780nmの $v(\lambda)$ 補正合量量としてのルーメン値が取得される)。UV光は、単なるUV光ではなく、サブスペクトルに分類する必要がある。従来は、UV-A、UV-B、UV-Cの各帯域に分類されていたが、現在では、さらに細かい分類が必要である。例えば、最近の科学文献⁽³⁾では、222nm周辺の興味深いサブスペクトルが、人間の皮膚に害を与えない殺菌照射を行うとして指摘されている(遠UVまたは遠UV-Cとも呼ばれている)。従って、UV殺菌効果を評価するには、図1に示すように、3DのUV光分布に、角スペクトル情報を組み合わせる必要がある。

絶対に不可欠な ゴニオスペクトロメータ

シミュレーションを行うには、正しいUV光分布を表現するために、UV光のスペクトルと放射輝度の両方を全角度で測定する必要があると、結論付けることができる。言い換えると、分光計(スペクトロメータ)を装備したゴニオメータ、すなわち、ゴニオスペクトロメータによって、角スペクトル分布を取得する必要がある。数多くの小型ゴニオスペクトロメータが市場に提供されている。そうしたシステムの多くが、プリズムや、直径1~5インチの小型光源の測定を意図したもので、長さがおそらく6~7フィートにも及ぶ、現代的なUV照射器には対応しない。

米ADJグループ社(ADJ Group)のシニアプロジェクトスペシャリストであるレッド・ウォルター氏(Red Walter)は、ゴニオスペクトロメータシステムを使用することのメリットを次のように説明している。「この技術を社内の実験施設で使用して、Acclaim社、ADJ社、Elation社(訳注:すべてADJグループ社傘下の企業)の顧客に、正確な測光レポートを5年以上にわたって提供している。UVGI(UV Germicidal Irradiation: UV殺菌照射)の計算には、携帯型や安価な測定器では提供できない測定精度が求められる。当社の実験施設にUV-VISセンサを追加したことにより、Absolve Solutions社の製品を第三者認証機関に送付する前に、すばやくテスト及び検証することができた。当社は、DIALuxやそれに類似するレンダリングソフトウェアを使用して、それぞれの顧客に対して殺菌ソリューションを設計する業界の専門家に対して、具体的なIESファイルを提供することもできる。ほとんどのUVGI装置のレポートにおいて、装置のエネルギー全体によって照射強度が判定されているが、実際には、病原菌は特定の波長に対して異なった反応を示す。UV範囲全体から254nmなどの特定の波長を分離する能力により、当社は、病原菌の不活性化に必要な詳しい計算を行うための最も正確なデータを提供することができる」。

UV光の殺菌効果の シミュレーション

実空間におけるUV光のシミュレーションは、多くの点において、可視光のシミュレーションに似ている。同じ種類の測定が必要で、DIALuxやReluxなどの良く知られたソフトウェアが利用できる。

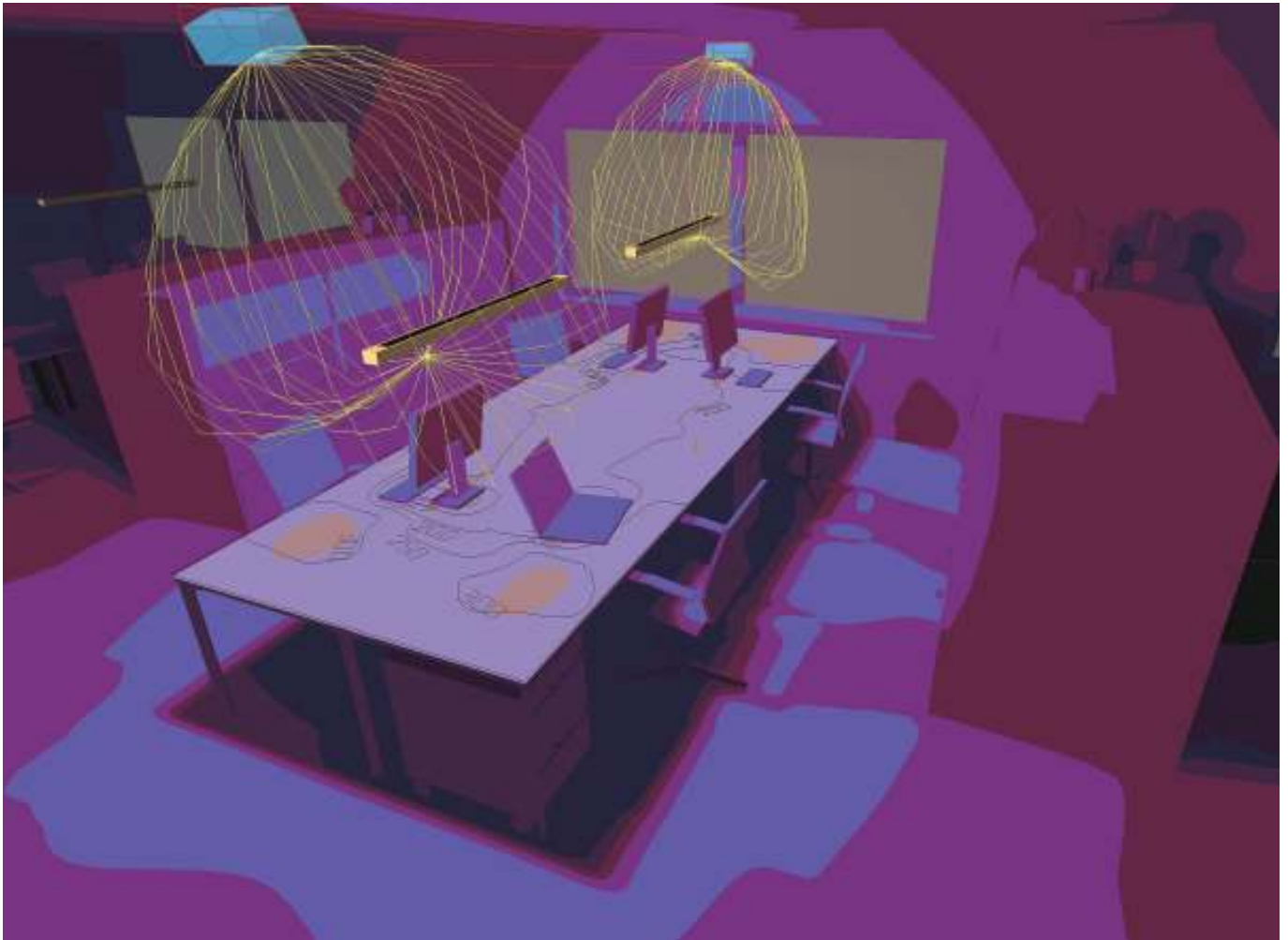


図3 オフィス空間におけるUV光のシミュレーションを示すレンダリング画像。明るいエリアは暗いエリアよりも多くのUV光を浴びる。机の上の計算プレーンは、放射照度の等高線グラフを表している(mW/m^2 の単位で表された254nmのUV光の放射照度)。

図2は、必要な手順を示したものである。これには、UV放射照度の殺菌可能性を評価するために、追加で必要となる手順が含まれている。

ステップ1: 評価対象の病原菌を選択する。 ウイルス、細菌、真菌は、UV曝露に対して全く異なる反応を示す。従来は大腸菌が、細菌活性、特に糞便汚染に対する、広く受け入れられた指標として使用されていた。この1年間は、SARS-CoV-2の特性と、このウイルスの不活性化に必要な推定照射量を対象とした、多くの科学研究が行われた(LEDs Magazineでも、ボストンの研

究調査[<https://bit.ly/2Gc5Opj>]など、複数の例を取り上げた)。例えば、イタリアの科学者グループは、254nmのUV光源と $3.7\text{mJ}/\text{cm}^2$ の照射量で、 $3\log$ の減少が得られると結論付けている。それは、SARS-CoV-2(COVID-19を引き起こすウイルス)の99.9%の不活性化に相当する⁽⁴⁾。

ステップ2: 対象光源のスペクトル分布と3D放射分布を測定する。 このステップは、可視光源の光分布とスペクトル品質の測定に似ている。ゴニオスペクトロメータにより、スペクトル品質と3D分布の両方が同時に取得される。

ステップ3: 対象病原菌のスペクトル感度を検出する。 前述のとおり、多くのUV光源が可視光も照射する。しかし測定結果には、殺菌効果がある波長のみを含めなければならない。病原菌は、さまざまな波長に対して異なる反応を示すため、対象病原菌に合わせて、波長範囲を絞る必要がある。一部の殺菌効果は、特定の波長範囲(例えば $254\text{nm} \pm 10\text{nm}$)において定義される。殺菌効果を波長の関数として定義する、より詳細なスペクトル感度曲線を示した研究も存在する。これは、可視光の世界で人間のスペクトル感度を表すために使用する、 $v(\lambda)$ 曲線に似ている。

ステップ4:放射結果にスペクトル制限を適用する。すべての波長に意味があるのではなく、殺菌効果のある波長のみがこのシミュレーションに影響を与える。そこで、波長範囲を制限するか(例えば254nm ± 10nm)、病原菌固有のスペクトル感度曲線を適用する。

次に、結果を従来の.ies(または.ldt)の光分布ファイルにエクスポートする。.ies/.ldtファイルは可視光用に設計されているため、単位はすべて、測光単位が想定されている。UV光をこの形式にエクスポートすると、基本的に形式違反になる。しかし、単位が異なるだけで値はすべて正しいことをユーザーが覚えておけば、光分布ファイルでも、続くシミュレーションでも、従来のデータ形式とソフトウェアが使用できる。ここで、ルーメン値はワット(W)、カンデラ(cd)値はワット毎ステラジアン(W/sr)と解釈する必要がある。

ステップ5:UV照明シーンをシミュレーションする。ステップ4で生成された3DのUV光分布ファイルにより、対象環境におけるUV照射シーンを構築することが可能である。これは、空間内で可視光をシミュレーションする方法に似ている。ReluxやDIALuxなどの同じシミュレーションソフトウェアが使用できるが、ここでも、出力値は正しいが単位が異なることを覚えておいてほしい。ルーメン値はワット、ルクス値はW/srとして解釈する必要がある。

シーンの3Dモデルを構築する際には、表面に対する現実的な反射率を適用するように注意する必要がある。上述のとおり、UV光は吸収されやすく、表面での反射が妨げられて、それが対象表面上のUV放射照度に誤った影響を与えるため、これは重要なことであ

る。オフィス環境などに一般的に存在する種類の表面に対する、UV吸収率を明らかにした研究は多くない。DIALuxやReluxのようなソフトウェアでは通常、天井/壁/床の表面反射率を0.7/0.5/0.2とし、シミュレーション環境内のほとんどの家具を白とする。この設定を変更する必要がある。まずはすべての表面反射率を0.1に設定して、作業を開始するとよいだろう。もう少し詳しい情報については、参考文献を参照してほしい⁽²⁾。

このようなシミュレーションの出力には、複数のUV光源を含めることが可能で、例えば図3のような形になる。可視光のシミュレーションと同様に、対象エリア内の具体的な計算オブジェクトを含めるのが自然である。オフィス空間では、例えば、机、引き出しの前面、キーボード上のUV放射照度が、調査の対象となる。

放射照度を色付けして表示すると、明るい部分と暗い影が明確に示されて、殺菌可能性を直感的に把握することができる。

ステップ6:殺菌可能性を評価する。ステップ5で、選択した3D環境における、具体的なUV放射照度(W/m²)パターンを検出した。次は、この照射に対する対象病原菌の反応を調べる。ステッ

プ1で示した科学研究結果(3.7mJ/cm²の照射量で99.9%の不活性化など)を参考にする。

ステップ7:UVランプは、どれだけの時間点灯させればよいのだろうか。この入力値については、放射照度のパターンと値を曝露時間に変換することができる。例えば、机の上の平均放射照度が250mW/m²で、3.7mJ/cm²の照射量で対象病原菌の平均99.9%を不活性化させたい場合は、以下の式に基づき、ランプの点灯時間は148秒(約2.5分)となる。

$$\frac{3.7 \text{ mWs/cm}^2 \cdot 10,000 \text{ cm}^2/\text{m}^2}{250 \text{ mW/m}^2} = 148 \text{ s}$$

このような変換により、放射照度の等高線グラフを曝露時間の等高線グラフに変換することができる。その結果は、空間設計の計画に利用可能で、仕様定義者やクライアントに結果を伝える際にも役に立つ。ただし、その結果はその特定の病原菌と特定の照明シーンに対してのみ有効であることに、注意しなければならない。不活性化の結果は、必ず実際の測定値で、できればASTM E2180-2018またはASTM E3135-2018などの規格に準拠した試験で、検証する必要がある。

参考文献

- (1) Commission Internationale de l'Eclairage (CIE; International Commission on Illumination), "CIE Position Statement on Ultraviolet (UV) Radiation to Manage the Risk of COVID-19 Transmission," retrieved from <https://cie.co.at/> (May 12, 2020).
- (2) J.T. Turner et al., "Ultraviolet Radiation Albedo and Reflectance in Review: The Influence to Ultraviolet Exposure in Occupational Settings," *Int J Environ Res Public Health* (2018).
- (3) M. Buonanno et al., "Germicidal Efficacy and Mammalian Skin Safety of 222-nm UV Light," *Radiation Res*, 187, 4, 483-491 (2017).
- (4) M. Biasin et al., "UV-C irradiation is highly effective in inactivating and inhibiting SARS-CoV-2 replication," *Scientific Reports*, 11, Article 6260 (March 18, 2021).

著者紹介

アン・ベイ (ANNE BAY、工学修士)は、デンマークのビソ・システムズ社(Viso Systems)の技術セールスディレクター。URL: <https://www.visosystems.com/>