

可視光消毒の実用例を分析

イアン・アッシュダウン

2部構成記事の後編である本稿では、各種文献を紹介しながら、可視光消毒を適切な場面に効果的に適用するには、より正確なデータが必要であるという認識の向上を図りたいと思う。

可視光消毒技術は、大手照明メーカーによって、病院の手術室から家庭のキッチンに至るまでのあらゆる場所に導入されているが、それが有効かどうか、どのような条件下で有効かといった、照明設計者の疑問はまだ解決されていない。さらに重要な疑問は、所定の可視光消毒対策の有効性を保証するために、どのようなガイドラインを適用すればよいのかということである。

前編（日本版2022年12月号）では、可視光消毒（Visible Light Disinfection：VLD）の歴史と理論について説明した。本稿では、その理論を基に、部屋全体の消毒においてさまざまな微生物種を管理するために必要な、VLD照明器具の設計パラメータや、放射照度と一日の照射量について考察する。

スペクトルの相互作用

これまでの多くの研究が、準単色LEDによって生成される狭帯域を対象としている。ある研究では、殺菌剤としての405nmの青色光と組織修復手段としての880nmの近赤外照射の組み合わせを調査した結果、880nmの照射自体が細菌の増殖を促進することが明らかになった。別の研究では、405nmと450nmの両方をピーク波長とする、蛍光体でコーティングした白色LEDのアレイを使用して、推定6500Kの相関色温度（CCT）で、新型コロナウイルス（SARS-CoV-2）の不活性化を行った⁽¹⁾。しかし、感染細胞用



の培養基にウシ胎児血清（Fetal Bovine Serum：FBS）が含まれており、それがウイルス不活性化に寄与した可能性があることを、研究者らが認めている。

それでも、広帯域の「白色」光を当てると、エンテロコッカス・フェカリス菌（内因性ポルフィリンを含有しない）は、青色光には耐性を示すが、近赤外（IR）と中赤外照射には感受性を示す⁽²⁾。紅色白癬菌は、緑色光に感受性がある。必要線量が高いことから、これらの長波長を実用的な部屋全体の可視光消毒に適用することはできないかもしれないが、さらなる研究が必要である。

青色パルス光

青色パルス光がVLDの有効性に与える影響を培養器実験（in vitro）で調べた研究は、複数存在する。ある研究

では、メチシリン耐性黄色ブドウ球菌（MRSA）に、116mW/cm²の放射照度で405nmの光を照射する場合、パルス幅デューティ比を25～100%に変化させても、同程度の不活性化に必要な線量はほとんど変わらなかった。パルス幅変調（PWM）周波数を100Hz～10kHzで変化させると、1000Hzで最も高い性能を示し、デューティ比50%で35%のエネルギー削減が得られた。この研究論文の著者らは、連続照射によって細胞のポルフィリンが飽和し、各サイクルのオフ期間によって、光子の不必要な吸収が抑えられて、吸収光による活性酸素種（Reactive Oxygen Species：ROS）の生成が可能になると推測している。

最後に、波長405nm～450nmの青色パルスで複数のヒトコロナウイルス株が不活性化することを示した研究が

あるが、有効性は株によってまちまちだった⁽³⁾。研究者らによると、放射照度が高いほど抗ウイルス効果は顕著だったという。

病院環境

ほとんどのVLD研究が、研究施設での培養器実験に基づいている。培養器実験は、細菌種と細菌株を隔離して、環境条件の影響を制御または排除するために必要である。

実環境 (in vivo) で実際の条件下でのVLDの有効性を調査することは、手術室や入院患者室などの病院環境であっても、培養器実験よりも難しい。2個の405nmのLEDアレイを、床面積が約10m²の火傷治療の隔離病室の天井に設置して使用した、2件の研究が報告されている⁽⁴⁾、⁽⁵⁾。著者らは、放射照度は「研究施設での広範な実験に基づいて、病室環境内の曝露細菌を著しく不活性化させるのに十分なレベルに設定した」と記している。論文のその他の部分は十分に詳細だったが、放射照度情報が欠けているために、その実験は再現不可能である。

幸い、その後の別の論文で、これらの研究に使われた照明器具が、「天井に設置されたLEDアレイで、病院手術室の表面の汚染除去を目的に、低放射照度の405nmの光(放射照度は0.1～0.5mW/cm²)を連続的に照射するもの」⁽⁶⁾と記述されていた。

Bacheら⁽⁵⁾は、入院患者用の隔離病室と外来患者が出入りする診療所から採取した1000を超える環境サンプルを基に、LEDアレイを1日あたり14時間適用した結果、細菌コロニーの平均個数は大きく減少した(27～75%)と報告している。平均減少率を50%(0.70log₁₀)と仮定すると、90%の減少を達成するには20時間の照射が必

表1 白色光と青色光による部屋全体消毒(90%)⁽⁹⁾

病原菌	光の種類	照射時間	線量(J/cm ²)
黄色ブドウ球菌	白	24時間	10.3-13.8
	青	10時間	12.2-15.8
エンテロコッカス・フェカリス菌	白	N/A	N/A
	青	15時間	18.4-23.8
アシネトバクター・パウマニ菌	白	14時間	6.0-8.1
	青	15時間	18.4-23.8
クロストリジウム・ディフィシレ菌	白	N/A	N/A
	青	N/A	N/A

要ということになる。さらに平均放射照度を0.3mW/cm²と仮定すると、線量は21.6J/cm²ということになる。

この研究は、黄色ブドウ球菌を対象としており、90%の減少に必要な線量は9.8J/cm²だったとする先行研究を参照している。その火傷治療室には、院内傷口感染のリスクを最小限に抑えるために、HEPAフィルタが設置されており、ターミナルクリーニングが毎日実施されていたとのことだが、その結果は、研究施設での実験から推定される線量要件に見合ったものとなっている。

Bacheら⁽⁷⁾は、火傷治療の隔離病室内での研究を続行し、0.0023mW/cm²～0.231mW/cm²の範囲の放射照度レベルと細菌の不活性化の間に相関関係はないことを発見した。一方、照射時間(すなわち線量)と細菌の不活性化の間には、強い相関関係が確認されたという。著者らはその理由を、細菌はほぼ永久に空中に浮遊していることから、照射時間が長ければ、室内の空気の動きによってLEDアレイ付近のより高い球面放射照度レベルに、細菌が曝露されることになるためとしている。これに関連してDougallら⁽⁸⁾は、表皮ブドウ球菌はエアロゾル状態の場合に、液体状態や表面に付着している場合と比

べて405nmの光に対する感受性が3～4倍高かったと報告している。これは、多くの病原菌のUV-C照射に対する感受性と類似している。

これはおそらく、部屋全体を消毒する場合の紫外線照射と可視光の最大の違いを示している。多くの用途において、UV-C照射は空気消毒を目的とするため、適切な気流が重要なパラメータである。しかしこれまでのVLD研究は、表面消毒に焦点が置かれている。可視光が空気消毒に有効である可能性を示唆する研究もあるが、決定的な根拠はまだ示されていない。

Rutalaら⁽⁹⁾は、12.5m²の窓のない部屋に、2台の61×61cm(2平方フィート)の「混色白色光」のLED照明と、1台の61×122cmの「青色光」のLED照明を設置して行った研究を報告している。白色光照明は、消毒(おそらく405nm)と、患者がいる病室に一般的に適用される「アンビエントな白色」光の両方の機能を提供し、病原菌表面の放射照度は0.12～0.16mW/cm²だった。消毒用の「青色光」照明の放射照度は0.34～0.44mW/cm²だった。

ここでも、照明のスペクトルパワー分布(Spectral Power Distribution: SPD)が不明であるため、この研究の実

LP160シリーズ

チップLEDを高密度に配置した高輝度LED透過照明。
厚さ:35~48mmの薄型、明るさは、輝度:20,000cd/m²、
照度:55,000Lux、均一性は85%以上(25分割測定)。
消費電力は、LPM-Sシリーズと比較し、30%削減。
形状は、幅広ライン照明タイプと面照明タイプをラインナップ。



LP160-310310M

LP160-310470M

LP160-150630M

■ 用途

- バックライト照明として、ガラス製品や合成樹脂製品等の透明・半透明物体におけるピンホール・気泡・異物混入等の外観形状検査。
- LCDの検査工程、基板工程、光学特性検査工程、点灯検査工程の検査光源。
- バックライトの光を利用したシルエットによる有無検査・形状検査・寸法測定。
- 光学フィルムやシートの検査。
- カメラモジュール評価用検査。

■ 特徴

- 薄型、高輝度で高均一な面照明。
- 電源は、多機能型と電圧可変型を用意。
- ファンを使用した強制空冷仕様。
- 特注サイズも製作可能。
- 160×160mmのLEDパネルを並べることによりお客様に合った発光面サイズの照明を提供。
- カタログサイズ以外の発光面サイズも製作可能。



RAYTRONICS CORP.
電通産業株式会社

URL : <http://www.dentsu-sangyo.co.jp/>

〒356-0056 埼玉県ふじみ野市うれし野1丁目7番12号
TEL.049-264-1391
FAX.049-264-8481
E-mail : sales@dentsu-sangyo.co.jp

表2 一般的な病原菌を90%減少させるために必要な線量(Tombら⁽¹⁰⁾の表を改変)

病原菌	種	線量 J/cm ²		W/m ² (8 hr)*	
		最小	最大	最小	最大
細菌	アシネトバクター・バウマニー	2	26	0.7	9.0
	セレウス菌	27	665	9.4	227.4
	カンピロバクター・ジェジュニ	0.3	3.4	0.1	1.2
	クロストリジウム・ディフィシル	13	736	4.5	255.6
	ウェルシュ菌	10	?	3.5	?
	コリネバクテリウム・ストリアアタム	4	64	1.4	22.2
	エンテロコッカス・フェカリス	64	410	22.2	142.4
	大腸菌	5	612	1.8	212.5
	肺炎桿菌	16	263	5.6	91.3
	リステリア菌	17	1,121	5.9	389.2
	マイコバクテリウム・テラエ	57	?	19.8	?
	プロテウス・ブルガリス	31	?	10.8	?
	緑膿菌	4	1,020	1.4	354.2
	サルモネラ	72	544	25.0	188.9
	セラチア・マルセッセンス	128	337	44.4	117.0
	ソルネ赤痢菌	36	608	12.5	211.1
	黄色ブドウ球菌	9	1,200	3.1	416.7
表皮ブドウ球菌	9	?	3.1	?	
真菌	クロコウジカビ	181	23,000	62.8	7,986.1
	カンジダ・アルビカンス	2	327	0.7	113.5
	サッカロマイセス・セレビシエ	58	66	20.1	22.9

*放射照度0.5 mW/cm²

験を再現するのは難しい。しかし、表1に示した90%減少の結果は有益である。表の4つの病原菌は、病院に一般的に存在する感染性細菌だが、エンテロコッカス・フェカリス菌(尿路感染症[UTI]と髄膜炎の原因)は、白色光に反応せず、クロストリジウム・ディフィシル菌(年間100万件の院内感染の原因の1/4を占める)は、白色光にも青色光にも全く反応しなかった。

この結果は、VLDの重要な問題を浮き彫りにしている。つまり、病原菌

の種やさらには株によっても、必要線量は大きく異なるということである。C.ディフィシル菌は、内生孢子と栄養細胞の2つの状態で存在する孢子形成細菌である。90%減少させるのに必要な線量は、栄養細胞状態では13~77J/cm²だが、内生孢子状態では426~736J/cm²である。

必要線量が最も高いのは、クロコウジカビ(Aspergillus niger)である。一般的な食品汚染カビであり、屋内環境の黒カビの原因でもあるこの細菌の孢子

を90%減少させるには、23,000J/cm²もの線量が必要である。

日光

日光浴(日光療法)の健康上のメリットは、6000年前から認識されている。よく晴れた日の最も高度が高い時間の太陽のソーレー帯(Soret band、約390~420nm)における放射束は、約5mW/cm²である(曇りの日は約0.5mW/cm²)。8時間の線量は約150J/cm²となる。簡単に言えば、直射日光は優れた可視光消毒

出展のご案内



IoTシステムの最先端技術展

MEMS SENSING NETWORK SYSTEM 2024

2024 1.31_{Wed.} - 2.2_{Fri.} 10:00-17:00
東京ビッグサイト
東ホール

剤である(UV-AとUV-B放射の殺菌作用は言うまでもない)。ある研究では、インフルエンザウイルスの完全直射日光による半減期(70%減少)は約150秒と報告されている。

これを室内消毒に当てはめると、5mW/cm²は、放射束500Wの405nmの光を10m²(108平方フィート)の部屋に照射することに相当する。直射日光が利用可能であれば、それは電気照明よりもはるかに有効な可視光消毒ということになる。

部屋全体消毒

部屋全体VLDシステムは、病院環境のターミナルクリーニングの補助として有効であることが根拠とともに示されている。これには、入院患者が占有する部屋に連続照射するケースと、手術室など無人状態で青色光照射が適用可能なケースの両方が含まれる。病原菌の増殖を防ぐための標準放射照度は0.1~0.5mW/cm²(1~5W/m²)で、標準照射時間は8~14時間である。

しかし、部屋全体VLDシステムは、C.ディフィシル菌など、一般的に病院に存在する病原菌の抑制または根絶に必要な、放射照度と線量を提供できないことが判明している。ましてや、一般的な食品汚染カビであるクロコウジカビは論外である。

ある照明メーカーは現在、自社製品が26種類の細菌、酵母菌、真菌、ウイルスに有効と主張している。文献には、これらの病原菌種の多くについて、90%の不活性化に必要な線量は、実用的な部屋全体VLDシステムが供給できる線量をはるかに上回ることが指摘されている。

表2に示すように、一部の病原菌の不活性化には、非現実的な光出力が必要である。放射効率を70%と仮定する

と、小さな室内のクロコウジカビのコロニーの抑制には、900W~100kW以上の電気出力が必要ということになる。

この表の一部の最大線量値は、特定の実験条件下におけるもので、部屋全体を消毒する場合の条件を反映していない可能性がある。それでも、上記のような宣伝文句には、疑問の目を向けざるを得ない。

結論

プロの照明設計者は、「作業面上の可視光放射照度は0.1~0.5mW/cm²、1日の放射線量は12時間以上」といった推奨基準を望むだろう。しかし、残念ながら私たちは、無数の病原菌種と株に汚染された世界に住んでいて、非実用的な放射照度と放射線量を適用しなければ、その90%さえも可視光で不活性化することはできない。その現実

がこの議論の底辺にある。

ピアレビューを受けた一連の研究論文によって、可視光の殺菌作用が、十分に制御された実験条件下と、(それより件数は少ないが)HEPAエアフィルターが設置されてターミナルクリーニングが毎日行われる病院環境において、示されている。しかし、その結果を基に部屋全体VLDシステムの性能を推測したり、照明設計ガイドラインの根拠としたりすることはできないことも、明らかにされている。

結論として、VLD技術は一部の用途に有効かもしれないが、万能策ではないということである。消毒システムを設計または仕様定義する際には、照明設計者とクライアントの両方が、同技術の能力と制約を十分に理解し、その目的について意見を一致させておく必要がある。

参考文献

- (1) R. De Santis et al., "Rapid inactivation of SARS-CoV-2 with LED irradiation of visible spectrum wavelengths," *J. Photochem and Photobio*, 8:100082 (2020).
- (2) P.J. Gwynne and M.P. Gallagher, "Light as a broad-spectrum antimicrobial," *Frontiers in Microbio*, 9, Article 119 (2018).
- (3) C.S. Enwemeka et al., "Pulsed blue light inactivates two strains of human coronavirus," *J. Photochem and Photobio B: Bio*, 222:112282 (2021a).
- (4) M. Maclean et al., "Environmental decontamination of a hospital isolation room using high-intensity narrow-spectrum light," *J. Hospital Infection*, 76:247-251 (2010).
- (5) S.E. Bache et al., "Clinical studies of the high-intensity narrow-spectrum light environmental decontamination system (HINS-light EDS) for continuous disinfection in the burn unit inpatient and outpatient settings," *Burns*, 38:68-79 (2012).
- (6) F.D. Halstead et al., "Violet-blue light arrays at 405 nm exert enhanced antimicrobial activity for disinfection of monomicrobial nosocomial biofilms," *Appl and Environ Microbio*, 85(21):1-16 (2019).
- (7) S.E. Bache et al., "Universal decontamination of hospital surfaces in an occupied inpatient room with a continuous 405 nm light source," *J. Hospital Infection*, 98(1):P67-73 (2017).
- (8) L.R. Dougall et al., "Efficacy of antimicrobial 405 nm blue-light for inactivation of airborne bacteria," *Proc. SPIE 10479, Light-Based Diagnosis and Treatment of Infectious Diseases*, 104791G (2018).
- (9) W.A. Rutala et al., "Antimicrobial activity of a continuous visible light disinfection system," *Infectious Control Hospital Epidem*, 39(10):1250-1258 (2018).
- (10) R.M. Tomb et al., "Review of the comparative susceptibility of microbial species to photoinactivation using 380-480 nm violet-blue light," *Photochem and Photobio*, 94(3):445-458 (2018).

著者紹介

イアン・アッシュダウン(IAN ASHDOWN)は、照明設計ソフトウェア開発を専門とする加サントラッカー・テクノロジーズ社(SunTracker Technologies)のシニアサイエンティスト。