

可視光消毒の理論を解説

イアン・アッシュダウン

2部構成記事の前編である本稿では、可視光消毒に関する公開文献を基に、殺菌のメカニズムを解説し、情報が不足して調査が必要な部分を洗い出したいと思う。

可視光消毒は、細菌やウイルスなどの病原菌を紫色光で不活性化するという、照明業界のイノベーションである。紫外線C波(UV-C)を照射する殺菌灯とは異なり、可視光は、電気性眼炎(「雪眼」)や紅斑(「日焼け」)の深刻なリスクを居室者に与えない。安価で効率的な紫色LEDが提供されていることから、大手照明メーカーは、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対して、この技術を導入している。

新しい技術によくあることだが、大小両規模のメーカーに、科学的根拠の範囲を超えた広告や宣伝を展開するケースが散見される。例えば、あるメーカーは自社製品について、「さまざまな条件下で新型コロナウイルスの94%を死滅することが、科学的に証明されている」と、裏付けとなる学術文献を示すことなく主張している。

ピアレビュー(査読)を受けているものの、詳細が曖昧になっている医学文献を引用しているメーカーも存在する。手術室における可視光消毒の有効性を調査したある研究論文には、照明器具のメーカーが「(手術室)全体で適切な照明と殺菌線量を実現するために、設置前と設置時に技術的支援を提供した」と記されていた。しかし残念ながら、放射照度と照射時間の積で求められる殺菌線量は明記されていなかった。

学的観点においてこれは、苛立たし

い状況であるとともに、無責任な行動である。プロの照明設計者は、どのような環境においても、可視光消毒システムの設計または仕様定義を求められれば、その技術のメリットとリスクの両方を理解して、適切な目標放射照度レベルと動作条件を確実に満たす責任がある。残念ながら、設計者が従うべき標準規格やガイドラインは、今のところ、照明業界にも医療業界にも存在しない。ASHRAE、IEC、IES、IUVAなどの機関が現在、紫外線照射の標準規格と推奨指針を策定している段階にある。

可視光消毒の仕組み

可視光消毒は、新たに発見されたものでは決してない。古代エジプト人はおよそ6000年前に、日光浴の健康上のメリットを報告しており、古代ギリシャ、ローマ、アラビア文明においても同様に、日光の治療力(日光療法)が認識されていた。より近代では、ニールス・リーベング・フィンセン(Niels Ryberg Finsen)が、アーク灯からの光照射(光線療法)が尋常性狼瘡(痛みと衰弱を伴う皮膚の細菌感染症)に有効な治療法であることを発見した功績により、1903年にノーベル生理学・医学賞を受賞している(図1)。

その仕組みは次のとおりである。殺菌灯(254nmのUV-Cを照射する低圧水銀蒸気アーク灯、222nmのUV-Cを照射するKr-Clエキシマランプ、狭帯

域のUV-BまたはUV-Cを照射するLEDを含む)は、細菌や真菌胞子のDNAや、ウイルスのDNAまたはRNAを破壊する。これによって、細菌や真菌胞子は細胞機構が無効化されて不活性化し、ウイルスの増殖は妨げられる。

個々の可視光子は、DNAやRNAを破壊するだけのエネルギーを持たない。しかし、ほとんどの細菌、真菌、原虫に、ソーレー帯(Soret band)と呼ばれる波長領域の可視光を強く吸収する細胞内(内因性)ポルフィリンが含まれている。一般的な理論によると、そのためにこれらの光感受性物質は、光子のエネルギーを細胞内の酸素分子に転送して、一重項酸素や過酸化水素などの活性酸素種(Reactive Oxygen Species:ROS)分子を生成し、これらの活性酸素種に、細胞機構を破壊して細胞を不活性化する作用があるという。

可視光が病原菌を不活性化する仕組みについては、上記以外の理論を裏付ける根拠も存在する。例えば、450nmで作用するリボフラビンなどの別の光感受性物質や、別の細胞不活性化メカニズムが解明されている。

細菌、真菌、原虫とは異なり、ウイルスにはポルフィリンは含まれていない。従って、理論的には青色光波長に対する感受性を持たないはずである。しかし、感受性を持つ可能性があることを示唆する証拠が、増加している。

可視光消毒に関するこれまでの研究



図1 尋常性狼瘡の患者にフィンセン灯を適用する1900年頃の様子(画像はパブリックドメインで公開されているもの)

の大半が、385～420nmの波長領域を対象とするもので、405nmが最も有効であることが示されている。しかし、可視光の殺菌効果は、740nmまでの波長で実証されている⁽¹⁾。内因性光感受性物質によって吸収特性が異なることが(例えばリポフラビン450nm周辺)、おそらくその原因である。ただし、不活性化に必要な放射線量は一般的に、波長とともに指数的に増加する。

光線力学的療法(photodynamic therapy:PDT)ではさまざまな光感受性薬剤が使われており、薬剤は疾患細胞に吸収され、その後可視光を照射することで活性化される。米食品医薬品局(FDA)は、405nmの光の光増感剤としての使用を規制することを検討している可能性があることから、この話題は可視光消毒と関係がある。

可視光消毒は、医学的用途に対して確固たる科学的根拠がある。しかし、閉じた建築空間の消毒における有効性は、それよりも曖昧である。以下では、さまざまな用途を対象に可視光消毒製品の評価または設計を行う際の検討項目について、説明する。

放射照度と線量

満足できる結果を得るために必要な可視光の放射照度と線量を判断するための最初のステップは、測定条件を定義することである。放射照度(単位: mW/cm^2)は、測光量に対する照度(単位: lm/cm^2)に対応する、照射量に対する単位である。線量は、放射照度と照射時間(単位:秒)の積で、単位は、 J/cm^2 である。放射束(W)と時間(秒)の積が放射エネルギー(J)で、これは測光量における光度エネルギーに相当し、線量は光量に相当する。しかし、光量について考察しなければならなかった経験がある照明設計者は、ほとんどいないだろう。

次に、実用的な意味で、病原菌を「不活性化」するとはどういうことを理解する必要がある。可視光が紫外線照射であるかにかかわらず、一定の放射照度を適用すると、不活性化率は最初が最も高く、その後指数的に低下する。例えば、1時間後に病原菌の90%が不活性化する場合、さらに1時間後には生き残った病原菌の90%が不活性化

する。つまり、1時間後の不活性化率は90%、2時間後は99%、3時間後は99.9%となる。

この数値は通常、 \log_{10} の単位で表す方がわかりやすい。 \log_{10} 単位で1は、病原菌の初期数の90%が不活性化したことを表し、2は99%、3は99.9%を表す。 \log_{10} 単位の値は、D値とも呼ばれる。

求められる消毒レベルは、用途によって異なる。例えば、FDAは、滅菌済み手術用器具に対して6以上のD値(99.9999%の不活性化)を求めている。これは、残存する病原菌は十分に少数で感染を引き起こさないという仮定に基づいている。しかし、可視光消毒については、90%(\log_{10} 単位で1)の不活性化で規定するのが一般的である。

病原菌の数を90%減らしてもあまり効果はないように感じるかもしれないが、可視光消毒は(病院におけるUV-C消毒と同様に)、あくまでターミナルクリーニング(患者退室時のクリーニング)を補助するものとして考える必要がある。その主要目的は、存在する細菌コロニーを根絶することではなく、次のターミナルクリーニングまでにそれらのコロニーが増殖するのを防ぐことである。

病原菌の種類と変異体

一部の照明メーカーは、黄色ブドウ球菌、リステリア菌、サルモネラ菌など、無数の病原菌を、自社製品の有効対象として挙げている。可視光感受性が調査されている細菌種数は100種類よりも少なく、真菌とウイルスについてはそれよりもさらに少ない。一般的な病原菌からなるその限られたグループだけを見ても、90%の不活性化を達成する可視光線量の範囲は、かなり広い場合がある(図2)。例えば、メチ

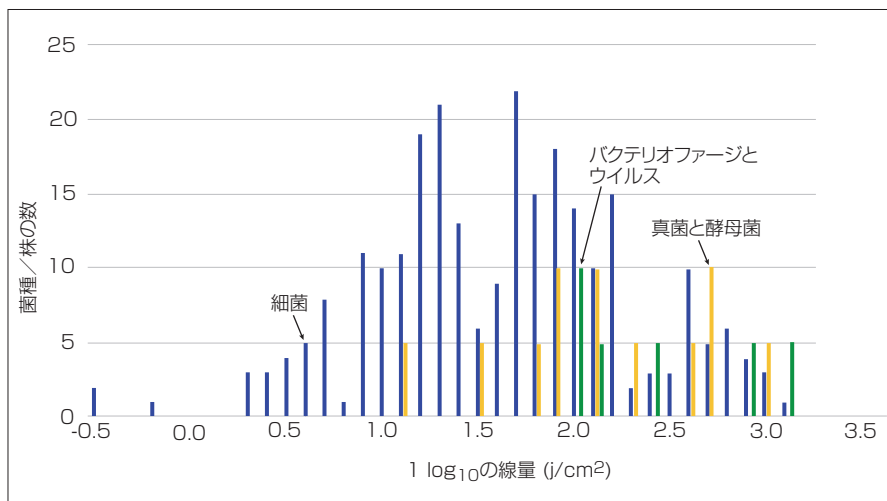


図2 90の病原菌種に405nmを照射した場合の1 log₁₀の線量の範囲(図は2018年のTombらの文献から引用して改変)

シリン耐性黄色ブドウ球菌 (Methicillin-Resistant *Staphylococcus Aureus*: MRSA) の遺伝的変異体には、実験条件によって13.7 ~ 1200J/cm²の線量が必要になる可能性がある。一般的に、単一の細菌種に対する線量は、各研究の実験環境によって、最大で1ケタの差異があると考えられる。また、真菌とウイルスには、多くの細菌よりもはるかに高い線量が必要である。

病原菌は、ペトリ皿や溶液中の培養基上で増殖してコロニーを形成するか、または、空気感染種の場合はエアロゾルとして広がる可能性がある。可視光に対する感受性は、放射照度、照射時間、相対湿度、培養基、酸素濃度、病原菌株、密度(単位はCFU/ml、CFUはコロニー形成単位)に依存する可能性がある。

さらに状況を複雑にするのは、細菌が乾燥、抗生物質、宿主の免疫系などの環境因子から自らを守るために、表面にバイオフィームを形成する可能性があることである。バイオフィームは至る所に形成される。フィルムそのものは非生物物質だが、紫外線照射(特に222nmのUV-C)で細菌が不活性化

しないように、保護する作用を持つ可能性がある。遠紫外線を支持する主張の1つに、短波長は角膜細胞や皮膚細胞に深く浸透してDNAを破壊することができないというものがある。同じ主張が、有機バイオフィームにも当てはまる。一方、405nmの可視光は、バイオフィームに覆われた一部の細菌種に有効であることが示されている。

ウイルスとバクテリオファージ

ウイルスとバクテリオファージ(細菌に感染するウイルス)の可視光感受

性の有無に関する研究は続けられている。科学者らは、ウイルスとバクテリオファージは、ROSを生成可能なポルフィリンなどの内因性光感受性物質を含まないため、感受性を持たないはずだと主張してきた。しかし、実験環境で調査されたウイルスは、ROSの形成が可能なウシ胎児血清 (Fetal Bovine Serum: FBS) など、有機物を豊富に含有する培養基に懸濁されていた可能性がある。また、宿主細胞に内因性光感受性物質が含まれている可能性もある。あるいは、バクテリオファージによって破壊されたタンパク質の産生が亢進されたために、不活性化した可能性もある。

可視光がウイルスの直接的な不活性化に有効であることを示す証拠は存在するが、そのメカニズムはまだ調査中である。溶液中のリボフラビン、光不活性化の結果に影響を与える可能性があるが、大気中など、他の条件下で可視光によってウイルスを減少させるには、はるかに高い線量が必要になる可能性がある^{(2), (4)}。

本稿の続編では、可視光消毒の実用例を取り上げて、特に部屋全体を消毒する場合について解説する。

参考文献

- (1) M. Hessling et al., "Photoinactivation of Bacteria by Endogenous Photosensitizers and Exposure to Visible Light of Different Wavelengths – A Review on Existing Data," *FEMS Microbiology Letters*, 367 (2017).
- (2) M. Hessling et al., "Review of Virus Inactivation by Visible Light," *Photonics*, 9:113 (2022a).
- (3) M. Hessling et al., "Surface Disinfection with White-Violet Illumination Device," *AIMS Bioengineering*, 92:93-101 (2022b).
- (4) W. Kowalski, *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook: UVGI for Air and Surface Disinfection*, New York, NY: Springer (2009).
- (5) R. Rathnasinghe et al., "The Virucidal Effects of 405 nm Visible Light on SARS-CoV-2 and Influenza A Virus," *Scientific Reports*, 11(11):19470 (2021).
- (6) 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セントラッカー・テクノロジーズ社 (SunTracker Technologies) のシニアサイエンティスト。