

# 進化するUV-C LED 検討時の重要性、消費電力やコストよりも用途適合性

モーリー・ライト

化合物半導体の専門家によると、UV-C LEDは、可視光LEDよりも10年かそれ以上遅れているだけで、似たような軌跡をたどっているという。本稿では、この技術が既に、適合性のある用途に対して有効である状況について解説する。

殺菌用の紫外線(UV)LED(主にUV-C域[100~280nm]のLED)を、水銀ランプなどの従来型のUV光源と比較するための簡単な方法は、出力とコストを調べることである。しかし、LEDs Magazineの最近のウェブキャスト(<https://bit.ly/3w9wtIE>)において、発表者のマイク・クレイムズ博士(Mike Krames)は、ワット(W)出力やワットあたり単価で比較しても、特定用途に照らし合わせてその光源を検討しない限り、有用な結論は得られないと述べていた。クレイムズ氏は、UV-C LEDは2030年までには一般的な意味において従来光源に追いつくだろうと述べたが、LEDが既にランプよりも優れた効果を発揮している用途も存在すると述べた。

クレイムズ氏はウェブキャストの前半を費やしてLEDの化合物半導体について詳しく解説し、可視光LEDに用いられる材料と手法を説明し、UV-C LEDのメーカーにとっての障害を指摘した。新型コロナウイルス(COVID-19)の感染拡大を受けて、UV-C LEDの研究は急速なペースで進められているが、多大な努力がまだ必要である。クレイムズ氏のウェブキャストは、同氏が2020年に本誌に寄稿したUV-C LED技術に関する記事(<https://bit.ly/3kbg2i3>)の内容を拡

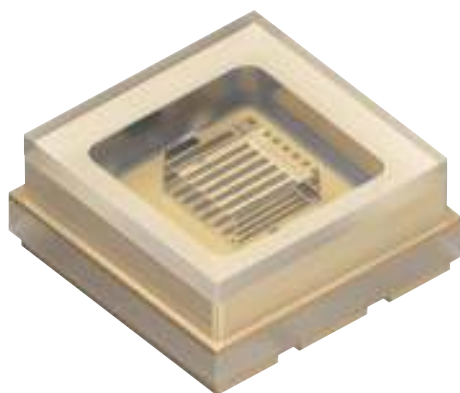


図1 独オスラム社は、同社初となる低出力と中出力のUV-C LEDを2020年終盤に発表し、高出力LEDは2021年上半年に発売する予定だと述べた。(写真提供:オスラム社)

張したものである。

## UV-C LEDの用途例

ウェブキャストでは新たに、UV-C LEDが短期的にどのような用途に適合する可能性があるか、同技術がどのように成熟していくか、市場の見通しはどのようなものかという点に、焦点を当てた内容が語られた。クレイムズ氏は、議論を進めるための対象として、室内の上層空気殺菌というUV-Cの1つの用途を取り上げた。上層空気殺菌という概念については、本誌3月号の教育施設におけるUV-C利用に関する記事で、少し詳しく説明されている(<https://bit.ly/3fn5tz8>)。

上層空気殺菌システムが最もよく使

用されているのは、おそらく医療施設だろう。適切に設計されたシステムであれば、天井近くの水平面においてUV-Cビームを制御して、天井近くに上昇する空気中の病原菌などを不活性化させることができる。また、過去のウェブキャストや記事で説明してきたように、UV-Cエネルギーは多くの物質に吸収されるため、上層空気殺菌装置を設置した空間において、下のほうにいる人間がUV-Cに曝露する可能性は低い。安全性に関する詳しい議論については、本稿の関連記事である「対COVID-19だけでなく医療施設内、病原菌対象とした殺菌用紫外線技術」を参照してほしい。

クレイムズ氏はまず、可視光照明システムと、水銀ランプを用いた上層空気殺菌装置の性能を比較した。同氏は、比較に用いた具体的な製品名を明らかにしなかったが、現在市場に提供されている一般的な製品だとだけ述べた。このような比較に意味はないように思われるかもしれないが、クレイムズ氏が指摘したい点は、以下ですぐに明らかになるので読み進めてほしい。

表1は、可視光システムと上層空気殺菌システムが、どちらも10万平方フィート(約9290m<sup>2</sup>)の施設全体に設置されていると仮定した場合の理論的な性能をまとめたものである。可視光シ

システムの性能は、施設全体に500ルクスを提供すると仮定して計算されている。殺菌システムの計算は、米疾病予防管理センター（Centers for Disease Control and Prevention：CDC）が公開する、米国立労働安全衛生研究所（National Institute for Occupational Safety and Health：NIOSH）による保健医療関連施設における殺菌照射のガイドラインに基づいている（<https://bit.ly/31vWvaE>）。

LEDを用いた可視光システムは、1日あたり12時間の稼働で年間170 MWhの電力が必要である。水銀(Hg)ランプシステムは、基本連続殺菌として1日24時間稼働すると仮定されている。また、水銀ランプの効率は、その種の製品よりも高いかもしれないが、35%と仮定して計算されている。殺菌システムには、可視光システムの2.5倍以上の電力が必要である。電気照明は建物の中で最も消費電力が高い設備の1つだが、殺菌システムの稼働時間を1日あたり12時間に減らしても、殺菌のほうが照明よりもコストがかかる計算になる。クレイムズ氏は、建物所有者と施設管理者はこのような運用コストを容認しないだろうと述べた。

## LEDと水銀ランプの比較

上層空気殺菌装置において水銀ランプの効率が比較的低いことを示したところで、クレイムズ氏は、この低効率の原因の評価へと話を進め、この用途にUV-C LEDを適用するとどうなるかについて説明した。以下の議論は、フランス語で「範囲」や「広がり」を意味する「エタンデュ」の概念に大きく依存している。光学システムにおいて、エタンデュとは、光源のサイズ（面積）と光源によって生成される固定ビーム角の積で表される指標である。光源、

表1 UVランプと可視光照明のエネルギー効率の比較

固体照明	上層空気殺菌UV（水銀ランプ）
100,000 ft <sup>2</sup> facility	
500 lx	NIOSH Guideline*
120 lm/W luminaire	1.87 W/m <sup>2</sup> UV-C
12 hr/365 days	24 hr/365 days
→170 MWh/yr	→435 MWh/yr**
*保健医療関連施設における基本的な室内上層空気殺菌照射のガイドライン、米保健福祉省（HHS）、p. viii（2009年）	
**水銀ランプのUV-C 変換効率は35%として計算	
表出典：データはすべて、米アーケッソ社（Arkesso, LLC）のマイク・クレイムズ氏が収集し、LEDs Magazine ウェブキャスト「UV-C Advancements Enable Innovative Germicidal Uses Displacing Lamps in Some Scenarios」（一部の環境においてランプに置き換わる革新的な殺菌手段を可能にするUV-Cの進歩）で示したものである。	

または光源に光学システムの他の要素（レンズやリフレクタ）を組み合わせたもののエタンデュを計算することができる。エタンデュは、複数の方法で表現できるが、クレイムズ氏は、cm<sup>2</sup>×ステラジアン(sr)の単位を使用している。

光学システムにおけるエタンデュは、エネルギー保存の法則に従う。例えば、LED光源に、ビーム角を狭くする代わりに光源の実効サイズをLEDの実サイズよりも大きくするレンズを組み合わせることができる。しかし、光源の実効サイズを小さくしながら、ビーム角も狭くすることは、決してできない。エタンデュの原理は、小売商品などに最大限のインパクトを与えるためのスポットライトなどの照明において、LEDのサイズが小さいことが非常に重要であることの理由の1つである。

表2には、水銀ランプと2020年のUV-C LEDを用いた上層空気殺菌システムの主要パラメータが示されている。このようなシステムの主要要素は、ビーム制御である。UV-C照射は、空間内にいる人の安全を確保するために、室内上層の天井から数フィートの範囲

内で行われる必要がある。しかし、UV-Cランプは指向性の光源ではない。ランプを用いた照明は一般的に、「ナイフの刃のような」とクレイムズ氏が表現する、室内上層全体にわたるビームパターンを生成するために、ランプに合わせた一連のバッフルを使用して設計される。

## 光源とビームのエタンデュ値の違い

非指向性の水銀ランプは、表面積が大きくビーム角が広いいため、光源としてのエタンデュ値は非常に高い。しかし、ビームのエタンデュ値は、制約要因であることが示されている。クレイムズ氏は、照明器具の前面の面積と、米暖房冷凍空調学会（ASHRAE）が定義するビームの限界値を使用して、ビームのエタンデュ値を計算した。このビームと光源のエタンデュ値を比較すると、このシステムの光効率は10%ということになる。残り90%のエネルギーは、システムの光効率が低いために無駄になっている。

表2の中段には、水銀と現在のLED

表2 上層空気殺菌システムの光源の比較

25Wの水銀ランプ(蘭フィリップス社[Philips]のTUV 25W 1SL/25)	上層空気 UVGI の用途	UV-C LED(ボルブ社の6060 SMD UV-C LED)
7	光源のUV-C出力(1個あたり)	0.125
25	電気入力(1個あたり)	2.5
28.0	電力変換効率(WPE)	5.0
352	表面積	0.06
1105	光源のエタンデュ	0.19
110	上層空気ビームのエタンデュ	110
0.1	ビームと光源のエタンデュ比	>500
単一装置(2020年)		
2.8	WPE	5.0
0.7/25	装置のUV-C/電力	0.7/12.5
1	光源の数	5(\$\$)
単一装置(2030年)		
2.8	WPE	50
25	電気入力	1.4
-	節電効果	95
1	光源の数	1✓

上層空気殺菌システムの比較が示されている。水銀システムの電力変換効率(Wall-Plug Efficiency:WPE)は、ランプのWPEの10%で、わずか2.8%である。LEDのWPEはそのほぼ2倍である。どちらのシステムも、有効なUV-Cエネルギーは700mWだが、LEDシステムは半分の電力でそれを達成している。ただし、LEDシステムには5つのUV-C LEDが必要であるため、初期コストははるかに高い。クレイムズ氏によると、水銀ランプの現在のワット単価は約1ドルであるのに対し、LEDは80ドルになるという。それでも、運用コストを考えればLEDシステムでも十分な投資利益率(ROI)が確保できる。また、LEDシステムはフォームファクタの面で、はるかに高い自由度が得られる。

表2の下段に示されているのは、将来のLEDシステムの見通しである。2030年までには、単一のUV-C LED

によって水銀ランプよりも高いUV-Cエネルギーが供給されるようになる。また、95%のエネルギー削減効果が得られる見込みである。そうなれば、LEDを使用することにより、上層空気殺菌の追加に伴うコストは、消費電力の観点からは無視できるレベルになると、クレイムズ氏は述べた。

UV-C LEDが、現時点で上層空気殺菌システムに対するより良い選択肢であるという考え方を裏付けるために、クレイムズ氏は、2010年には蛍光管が、液晶ディスプレイ(LCD)のバックライトの大部分を占めていたことに言及した。LEDバックライトは、初期コストが蛍光管の20倍であったにもかかわらず、わずか1年でそれに置き換わった。LEDは、性能メリット、節電効果、将来的なコスト削減効果によって、成功を収めた。UV-C LEDは現在、寿命の面で既に水銀ランプに匹敵し、オン/オフの繰り返しが可能で、有害物質を

含まず、電力効率が高いというメリットがある。水銀ランプを用いた上層空気殺菌システムについてクレイムズ氏は、「効率は最大でも10%で、あまりにも低すぎる」と述べた。

## LEDの進化

UV-C LEDの分野で生じている変化も、注目に値する。この分野には、短期間の間にも動きがみられる。まず、この分野に参入するメーカーの数が増加している。1~2年前は、UV技術を専門にこのようなLEDを製造するのは、ほとんどが特殊なメーカーだった。韓国のソウル半導体社(Seoul Semiconductor)はおそらく、傘下のソウルバイオシス社(Seoul Viosys)とセンサエレクトロニックテクノロジー社(Sensor Electronic Technology Inc:SETi)を通じて、この分野に多大なりソースを投入した最初の主流LEDメーカーである。

日亜化学工業は、UV-C分野に深く関与している。日亜のエリック・スウェンソン氏(Erik Swenson)は最近、UV-C LEDの性能指標を完全に開示する必要性を訴えるコラムを本誌に寄稿している(<https://bit.ly/3wb2iRi>)。

独オスラムオプトセミコンダクターズ社(Osram Opto Semiconductors)は、人間の可視域のUVとは反対側の端にある赤外(IR)領域には古くから従事しているが、従来はUV LEDを製造していなかった。しかし同社は、UV-Cを対象とした欧州の複数の主要な研究開発プロジェクトにしばらく前から携わっている。2020年が終わる直前には、同社初となるUV-CパッケージLEDを発表している(<https://bit.ly/35BpGeQ>)。続いて2021年2月には、UV-C LEDの新興企業である米ボルブ社(Bolb)の株式20%を取得したことを発表した(<https://bit.ly/3rrSWgo>)。



クレイムズ氏はボルブ社について、順方向電圧を引き下げつつ、UV光子抽出に関する一部の基本的な問題を克服する可能性を秘めた技術を保有していると述べた。同社の6060 UV-C LEDは、クレイムズ氏による上層空気殺菌の比較にも使用されている。同社は、100mWにも達する高出力のパッケージLEDを提供している。また、2.5Wで動作するアレイベースのモジュールを示したこともある。

多様な可視光LEDを製造するルミナス社(Luminus)も最近、UV-C分野において非常に活発な動きを見せている。同社が最も新しく発表した製品の中には、5×5mmのフットプリントのパッケージに収められた、複数のモデルが含まれている。そのパッケージは、ディスクリットなLEDパッケージに似ているが、ルミナス社は2個、3個、または4個のチップをそのパッケージに集積したモデルを提供している(<https://bit.ly/31qZT6M>)。4チップ搭載のデバイスは、240mWを出力可能で、クレイムズ氏が指摘した80ドルよりも低いワット単価で販売されていると、ルミナス社は述べた。

ウェブキャストでは、222nm範囲の遠UV-C LEDに関する話もあった。レンセラー工科大(Rensselaer Polytechnic Institute)のLESAセンター(Center for Lighting Enabled Systems & Applications)のボブ・カーリセック博士(Dr. Bob Karlicek)は、UV-Cに関する2020年の別のウェブキャストの中で、物理的な限界によってLED業界は遠UV-C部品を製造できないと述べていた。カーリセック氏とその同僚は、UV-Cに関する本誌のコラムも執筆している(<https://bit.ly/3nSF8uA>)。クレイムズ氏は、カーリセック氏とは意見が異なる。同氏の分析

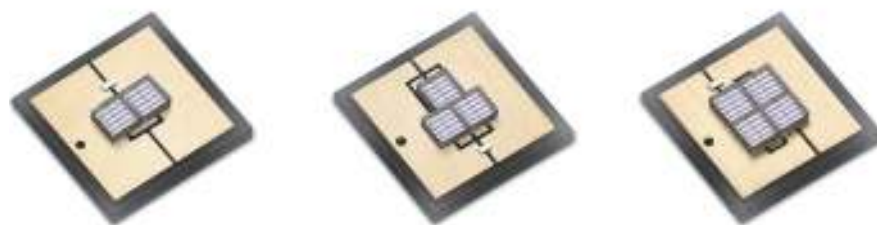


図2 ルミナス社は、同一のディスクリットパッケージに収められた3種類のUV-C LEDを提供している。最大で4つのチップを1つのパッケージに集積することにより、性能が高められている。(写真提供:ルミナス社)

では、230nmは業界が確実に実現できる波長であり、222nmは可能であると氏は考えているという。

クレイムズ氏はウェブキャストの中で、可視光LEDで10年前に行われたのと同様の性能改善が、メーカー各社によって達成されるとする強気の見通しを繰り返した。さらに同氏は、機会に満ちた市場が各種市場調査で予測されていることを指摘した。仏ヨール・デベロップメント社(Yole Development)は最近、2025年のUV-C LED売上高が25億ドルになるという予測を示している。そうなれば、可視光LEDの売上高の半分近くにまで達することになる。

ウェブキャストの発表後には、クレイムズ氏がそのような比較は意味がないと指摘したにもかかわらず、水銀管

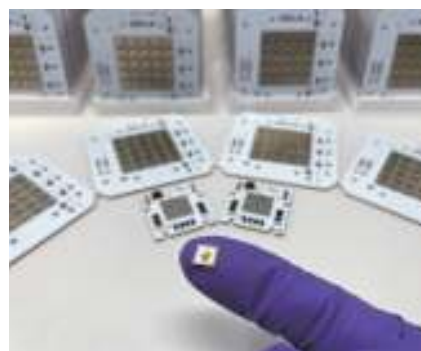


図3 米ボルブ社(Bolb)は、最大2.5Wの光束を備えるモジュール型UV-Cアレイを開発した。(写真提供:ボルブ社)

と同じ出力を得るために何個のLEDが必要かという質問が、ある参加者から出た。クレイムズ氏と同意見のUV専門家は他にも存在する。例えば、UV-C-LEDを専門とする米クリスタリス社(Crystal IS)は、用途との適合性が必要であることを説明する記事をおよそ3年前に本誌に寄稿している(<http://bit.ly/2vFaIFW>)。

この質問に対し、クレイムズ氏は「用途によって異なる。覚えておいてほしいのは、殺菌効果は光強度に依存するということだ。光束には依存しない。重要なのは、出力ワット数ではなく、単位面積あたりのワット数(W/cm<sup>2</sup>)である。LEDの放射輝度は、水銀ランプよりも2ケタ高い。従って高速になる」と回答した。ここでの高速とは、病原菌を不活性化する速度のことである。

同氏は続けて、「大量生産の用途を対象としている場合は、ワット出力の比較になる傾向が高い。現時点では、ワット出力で比較するとLEDは厳しい。しかし、素早い殺菌効果が求められる用途や、上層空気殺菌UVのようにエタンデュの制約を受ける用途に対しては、LEDに多大なメリットがある。ワット出力で比較しないでほしい。それは適切な比較方法ではない。用途を調べて適切な指標で比較する必要がある」と述べた。