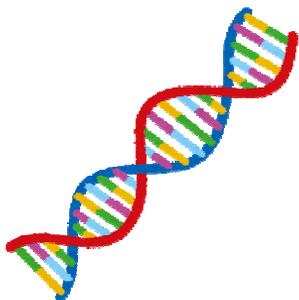


# 紫外線による殺菌・不活化効果

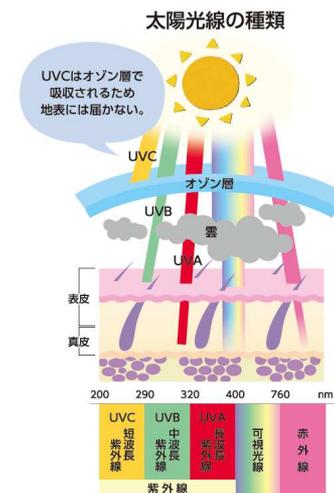


太古の昔から生物にとって紫外線は大敵で、オゾン層が出来るまで生物は陸上に上がることが出来ませんでした。紫外線は、放射線のように直接遺伝子を傷つけ、不活化します。菌、ウイルスの種類を問わずに紫外線は有効で(多少の強い、弱いはありますが)、**新型コロナウイルスも紫外線で不活化されることが様々な論文で報告されています。**

紫外線は波長によって長い方から UV-A (400-315nm), UV-B (315-280nm), **UV-C (280nm未満)** と分類されます。

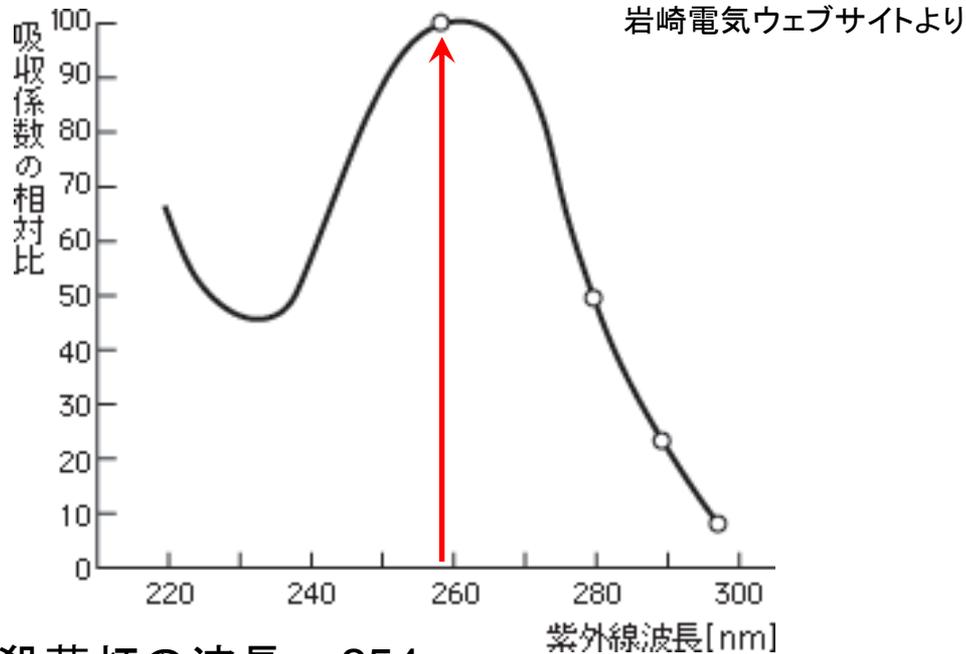
紫外線による殺菌効果のピークは **260nm** 程度で、DNA/RNAに直接損傷を与えます。310nm 程度になるとほとんど効果が無くなり、**UVレジン**などで使用する UVライトは **375nm** 程度で殺菌の目的ではほとんど使えません。太陽光では、5%程含まれるUV-B 成分によって、**最も条件の良い場合2時間弱で1/100**にまでインフルエンザウイルスを不活化できます。

論文として報告されている新型コロナウイルスのデータ(\*)を元にする  
と、8W の**UV-C 殺菌灯**からの**紫外線量**を実際に測定してみた結果、  
正面位置15cmの距離でおよそ **3秒で99.9%** が不活化可能であるという  
計算となりました。 \*Mara Biasin et al., Scientific reports, 11 (2021) 6260.

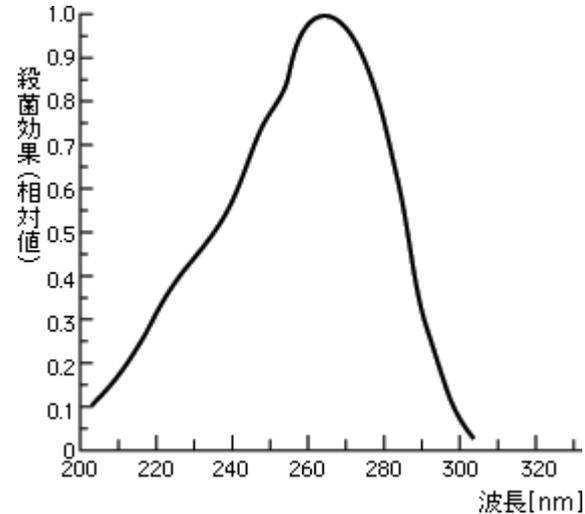


# UV-C によるウイルスの不活化

DNAに対する紫外線吸収の波長依存性



殺菌作用の紫外線波長依存性



UV-C

200-290nm

UV-B

290-320nm

UV-A

320-400nm

殺菌灯の波長 = 254nm

紫外線に対する殺菌、ウイルスの不活化の研究はほぼ全てが波長254nmの殺菌灯について行われている。様々な菌、ウイルスについて横断的なデータが存在する。

太陽光に含まれるUV-Bについては古くから殺菌効果が知られているが、定量的研究は極めて限られている。

近年話題になっている222nmの遠紫外光は、透過力が極めて小さく、皮膚ごく表面の20 $\mu$ m程度の厚さの角質層などで止まってしまうに生きて細胞にまで到達せず、炎症や皮膚癌などを引き起こさない。その一方で物体の表面に付着した直径0.1 $\mu$ m程度のウイルスの中までは届くため、遺伝子に損傷を与えて不活化できる。ウイルスよりも大きい菌(直径1 $\mu$ m程度)の場合細胞質の中のDNAまで到達する量が少なくなるため効果は小さくなる。

# UV-Cによるウイルスの不活化

既に世界中で研究が進められており、SARS-CoV-2 に対しても複数の研究者からデータが出てきている。2), 3), 5) については査読が終了しています。

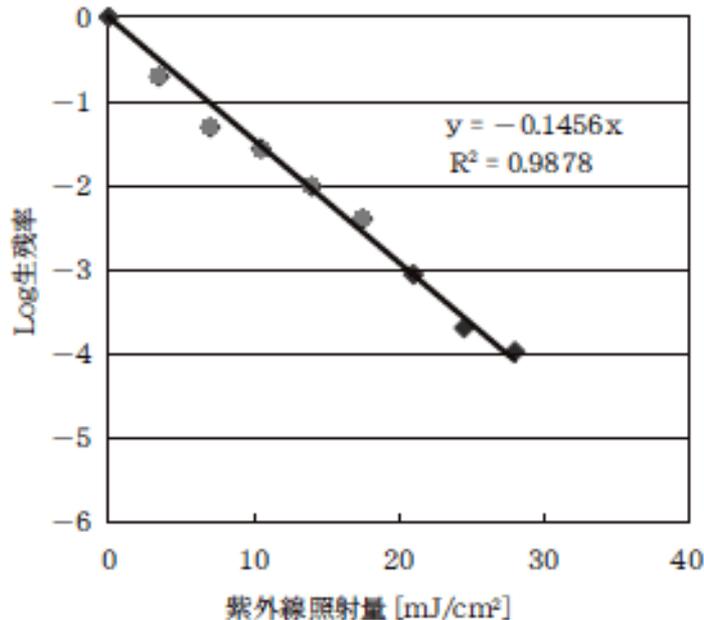
No	1)	2)	3)	4)	5)
グループ	ミラン大 Biasinら	ボストン大 Stormら	スタンレー電気	宮崎大 Inagakiら	広島大 Kitagawara
光源	254nm殺菌灯	254nm殺菌灯	265nm LED	280nm LED	222nm エキシマランプ
99.9%まで不活化に必要な線量 (mJ/cm <sup>2</sup> )	3.7	Wet: 5.3 Dry: 4.1	5.1	37.5	3.6
査読	査読済	査読済	査読無し	査読済	査読済

インフルエンザウイルスの 254nm 殺菌灯 6.6mJ/cm<sup>2</sup> で 99.9% まで不活化、よりも低い値となっており、**新型コロナウイルスの紫外線耐性は低い**と言える。

280nm LEDに対しても、高橋先生のインフルエンザに対する実験では99.9% まで不活化に75mJ/cm<sup>2</sup>(最新の論文では 60mJ/cm<sup>2</sup>)となっており、10倍程度 254nm での照射よりも積算照度が必要で、上記のSARS-CoV-2の結果と整合性が取れている。

# 紫外線積算照度と生残曲線

放射線の場合は吸収線量(Gy)などの単位で、どの程度照射を行うとどの程度影響が出るかを評価します。同様に、紫外線の場合は単位面積に単位時間あたり与えるエネルギーを**照度**(SI単位系では $\text{W}/\text{m}^2$ 、慣例的に $\text{mW}/\text{cm}^2$ が良く用いられる)と呼び、照射時間で積分したトータルのエネルギーを**積算照度**( $\text{J}/\text{m}^2$ 、 $\text{mJ}/\text{cm}^2$ )と呼び、積算照度が増えるに従って、殺菌や不活化されずに生き残っている菌やウイルスの数は、指数関数的に減少していきます。この様子を**生残曲線**と呼びます。効果が有る/無しではなく、**照射する量によって効果が変わります**。



生残曲線の例。横軸に紫外線積算照度( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ )、縦軸にどれだけ生き残っているかという生存率の**対数値**(-3で $10^{-3} = 0.1\%$ で、99.9%まで殺菌/不活化されたことを意味する)をプロットした物。必ずしも直線的になるわけではなく、最初なかなか下がらない、肩を持つ場合も多い。また、対象となる微生物によってこの曲線の傾きが異なり、どの程度照射すれば良いかが変わってくる。

なお、高い照度で短時間照射も、低い照度で長時間照射も、**積算照度が同じであれば効果は同じ**である(極端に高い照度の場合を除く)。

# 市販されている様々な紫外線グッズ(1)

7月頃にイベント関係の音響担当大手S社から担当者が訪問してマイクなどの紫外線滅菌について相談を受け、いくつかの製品の評価を行った。その中で、市販されているLEDを使った製品は非常に照射強度が弱かったり(マスクリーンスの1/100程度)、場合によってはUV-Aも含めて紫外線が検出限界(0.001 mW/cm<sup>2</sup>) 以下となる製品もあつたりするなど、極めて悪質であることが明らかになった。

そもそもの程度照射すれば良いのかというガイドラインが存在しない事も問題。

(ケニス SDカード式紫外線強度計 YK-37UVSD で測定)



この製品は、BOX 底面中央では全く紫外線を検出できませんでした。LED にベタ付けで測定すると、UV-C 3mW/cm<sup>2</sup> 程度が測定されるが、実際にBOXに物品を入れて謳い文句の通り表面のウイルスを99.9% 不活化するとしたら、7.5mJ/cm<sup>2</sup> 必要であり、仮に0.001 mW/cm<sup>2</sup> としても7500秒ほどかかり、非現実的。



ウェブサイトでの謳い文句

距離5cm での照射強度

- |   |                         |
|---|-------------------------|
| ① 僅か10分間 殺菌率は99.99%に達します。 →                   | 検出限界以下                  |
| ② 10秒即効 99.9%細菌消滅(距離の記載無し) →                  | 0.03 mW/cm <sup>2</sup> |
| ③ 10秒以内に 99.99%の滅菌率(距離の記載無し) →                | 0.02 mW/cm <sup>2</sup> |
| ④ 10秒快速殺菌、99%細菌消滅、推奨距離は2cm →                  | 0.04 mW/cm <sup>2</sup> |
| ⑤ 「紫外線は、99%殺菌機能を科学的に証明されています。」<br>距離、時間記載無し → | 検出限界以下                  |



④の製品は「推奨距離は2cmで、照射範囲は直径4cmで、最大距離は5cmを超えないでください、5cmの場合、照射範囲は直径10cmです」と謳っていて、比較的良心的だが実測とは乖離が有り、至近距離で長時間照射し続けるのは非現実的。

## 市販されている様々な紫外線グッズ(2)



ウェブサイトでの謳い文句

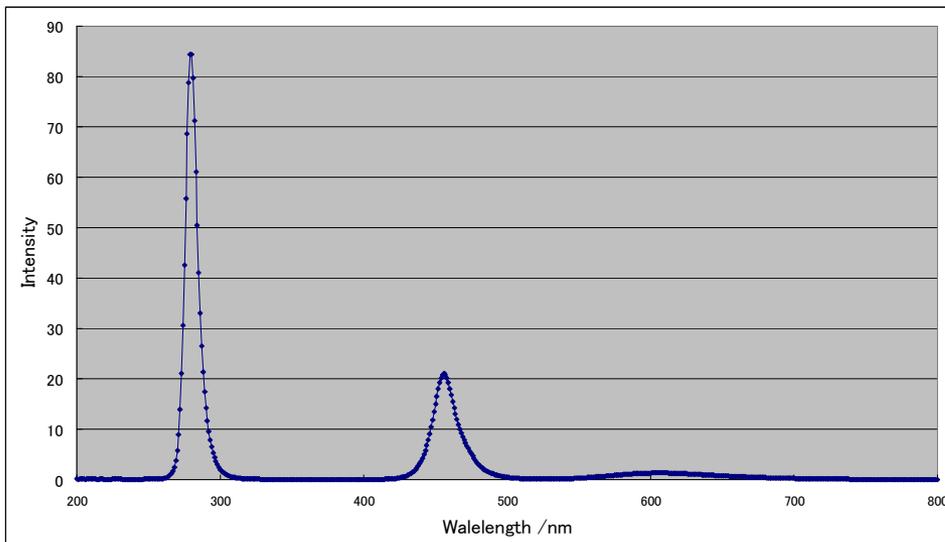
距離5cm での照度

④ 10秒快速殺菌、99%細菌消滅、推奨距離は2cm →  $0.04 \text{ mW/cm}^2$   
(ケニス SDカード式紫外線強度計 YK-37UVSD で測定)

そもそもの紫外線照度が低い事に加えて、放出される紫外線波長は殺菌灯の254nmよりも長い、280nm程度の場合がほとんど。

インフルエンザウイルス、さらに新型コロナウイルスに於いて、280nmの紫外線の効果は、殺菌灯の場合の1/10程度と評価されており、さらに大幅に効果が小さい製品と言える。

UV のピーク波長は **280nm**



Σ 各波長毎の照度 × 不活化効果相対値  
という形で表わされる、放射線と言うところの実効線量のような指標が必要。

菌に対しては、JIS Z8811 (1968) で既に与えられている。ウイルスに対しては、徳島大学高橋先生などのグループが、 $R_{AE}$  という指標を提唱。

USHIO USR45 で測定

## 市販されている様々な紫外線グッズ(3)

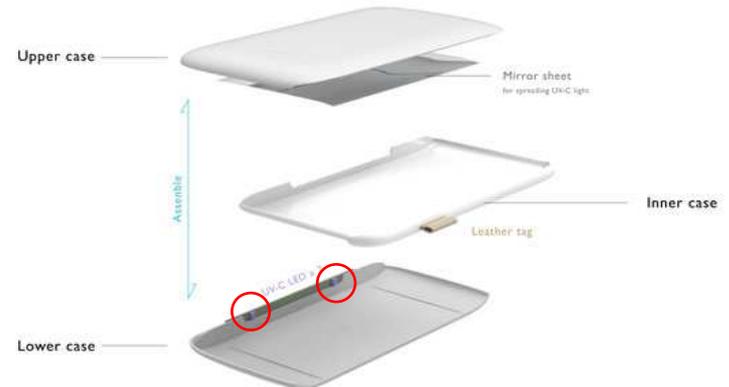


蛍光管式の物ならば大丈夫かという、左の商品は蛍光管を謳っているがユーザーのレビューによると実測値がゼロとのこと。サイズの的にGL8 だと思われるのでランプを交換すれば使えるかも知れないが、写真はどう見ても蛍光管では無く、仮にちゃんと出ていたとすると非常に危険な持ち方をしている。



左の写真のように、衣類などを詰め込んだ状態で殺菌している例も見受けられるが、UV-Cは透過率が低いため表面近傍しか殺菌されず、ほとんど意味が無い。

右の写真2枚はマスク用の薄型の除菌器だが、上の製品は中央部に2灯、下の製品はケース側面に2灯のLEDを配しているが、どう見ても全面に紫外線が当たらない構造になっている。また、「0.5Wの超強力UV-C LED」など、LEDの性能を消費電力で表記しているようである。

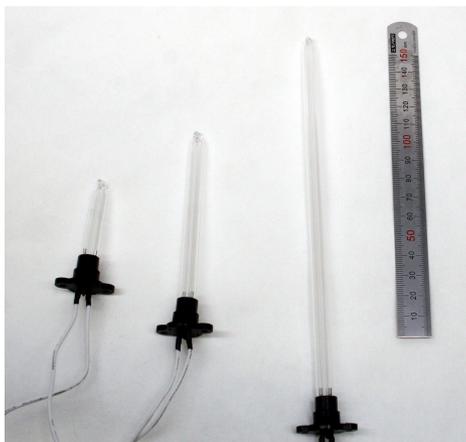


## 市販されている様々な紫外線グッズ(4)



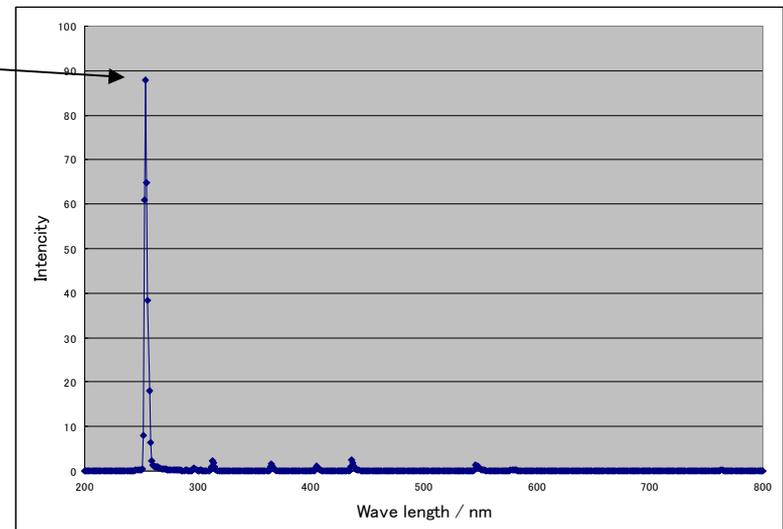
この製品はCCFL(冷陰極管)を使用した製品であり、熱陰極を利用した蛍光灯同様に水銀からの254nm殺菌線を出している。蛍光灯よりも水銀使用量が少ないとの事で現在でも製造が続けられている。12V電源などでインバータ回路を駆動するため、バッテリーでの利用も現実的で、左の写真のようなポータブルな製品も売られている(CCFL管の部分が100mm)。

5cmの距離でランプと平行な面に  $0.5\text{mW}/\text{cm}^2$  の照度があり、LEDと比べると出力が高く十分実用的。逆に、人体に当たると危険であるため、タイマーをセットして10秒後に点灯、15分後に自動消灯するようになっている。



50mm, 100mm, 200mm  
のランプ長さの製品が  
販売されている。水銀  
使用量が少なく、規制  
対象外で現在でも生産  
されている。

ピークは 254nm



# 紫外線の弱点

## 距離の二乗に反比例して強度が下がる

広い範囲に照射するために光源を遠くに設置すると、照度が非常に低くなり、同じ量を照射するのに必要な時間が長くなります。

## ほとんどの物質に対して透過力が非常に小さい

石英ガラスや水などの一部の物を除いて、数 $10\mu\text{m}$ 程度しか透過できません。ゴム手袋や紙一枚で完全に止まります。照射できるのは表面に付着している物に限られ、光源から影になる部分には効果がなく、斜めに入射すると照度が下がります。

## 皮膚や目に強い炎症を起こし、人体に有害

UV-A/B よりも波長が短くエネルギーの高いUV-Cは皮膚や目に強い影響を与えます。このため、人がいる場所での使用が基本的に(Care222などを除いて)出来ません。JIS Z8812 では、UV-C に対する許容限界値基準は $6\text{mJ}/\text{cm}^2$ となっています。

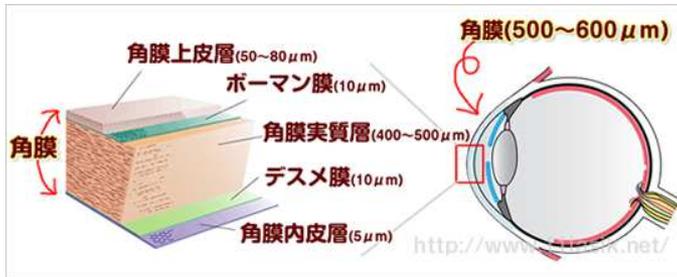
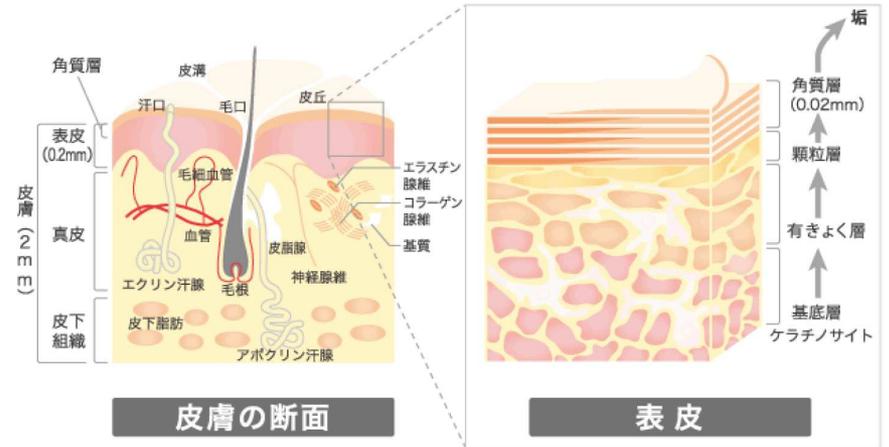
## 殺菌灯の入手が困難

2019年4月以降、省エネと水銀に対する規制のために蛍光灯器具の販売がほとんどのメーカーで終了しています。その一方でUV-C波長のLEDは出力が $100\text{mW}$ 以下と小さく、エネルギー変換効率も数%程度で高価であり、代換できていません。

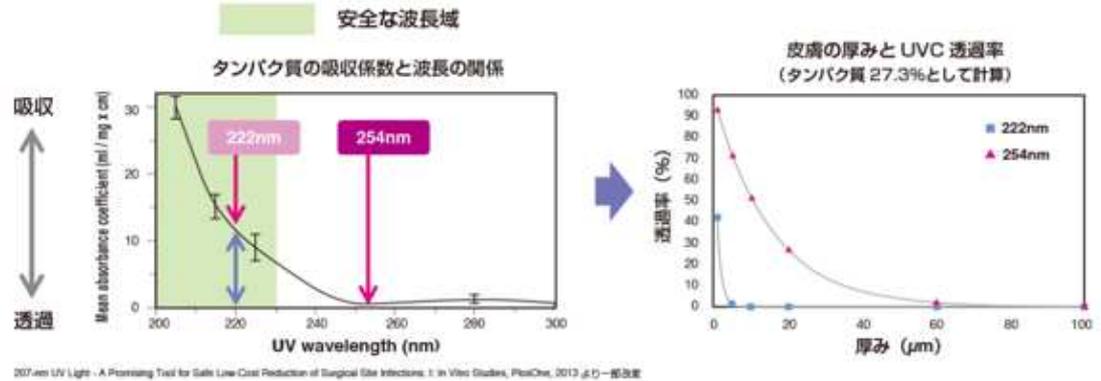
# 皮膚の構造と紫外線の透過率

紫外線は一般的に波長が短くなるほど吸収されやすくなり、透過率が下がる。UV-Aでは真皮や皮下組織、水晶体にまで到達するのに対して、殺菌灯の波長254nmでは皮膚の内側60 $\mu$ m程度までであるが、顆粒層や有きょく層、眼では角膜上皮の内側の細胞に炎症を発生させる。

一方で近年話題となっている222nmの波長では、厚さが20 $\mu$ m程度の角質層(死んだ細胞の層)や角膜上皮でほぼ完全に止められるため、炎症が発生しないと言われている。



角膜の構造。角膜全体で0.5mm程度の厚みがあり、最上層の角膜上皮は極めて新陳代謝が活発なのに対し、角膜実質細胞は数が大変少なく傷の治りが遅いと言われている。



1. 222nmは254nmと比較すると、タンパク質の吸収係数で10倍以上高い。
2. 厚み20 $\mu$ mでの生体透過率は、222nmで0.01%以下、254nmでは30%程度。

# 学協会からの公式なオーサライズ

## 紫外線殺菌

ご利用上の注意

(一社) 日本照明工業会  
(一社) 照明学会

2021/08 に、東海大学の竹下 秀先生と、照明工業会加盟各社の皆様のWGに秋吉も参加を行い、一般人向けに「紫外線殺菌 ご利用上の注意」と言う形でパンフレットの作成を行いました<sup>(1)</sup>。

紫外線の有用性の周知だけでなく、紫外線による事故について取り上げると共に、透過力が低い等の弱点や、いい加減な製品も存在することなど、上手に使用すれば有用な紫外線利用上の注意点についての周知を行っています。

このパンフレットは科学的な論文を元に記述されており、学会公認のパンフレットと言うことで「**厚労省 医療機関における院内感染対策について(H26)**」における、「**紫外線照射等については、効果及び作業者の安全に関する科学的根拠**並びに想定される院内感染のリスクに応じて、慎重に判断すること」という記述における**科学的根拠**と捉えることが出来ます。

また米国疾病予防管理センター、CDCでは公式サイト<sup>(2)</sup>で Upper-room Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) をエアロゾル対策として推奨しています。

(1) [https://www.jlma.or.jp/siry/pdf/pamph/notice\\_UV-light-emitting.pdf](https://www.jlma.or.jp/siry/pdf/pamph/notice_UV-light-emitting.pdf)

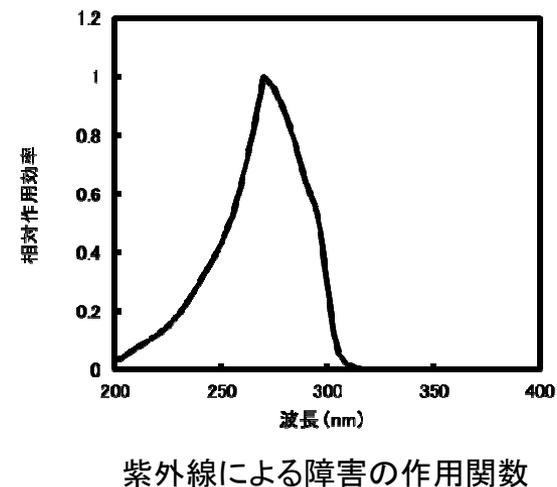
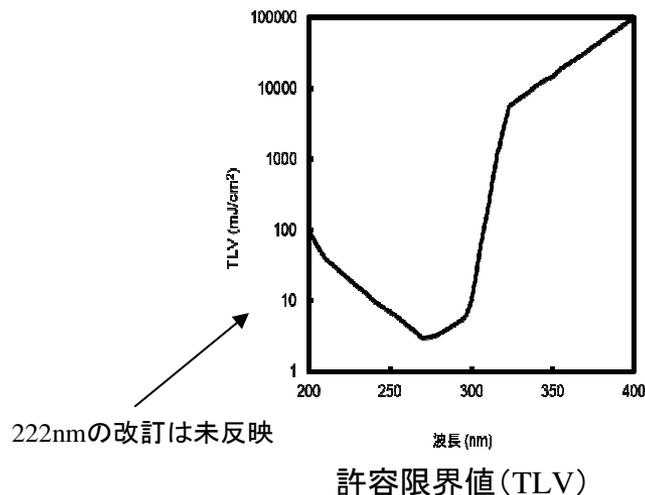
(2) <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/ventilation/uvgi.html>

# 許容限界値 TLV とは

TLV (Threshold Limit Value)、許容限界値とは、ACGIH (米国労働衛生専門官会議) が決めた、労働者を労働環境から発生する様々な障害から守るために定められた値であり、一日8時間あたりの許容値となっている。国際的に受入れられており、我が国でも紫外線については JIS Z8811, Z8812 に取り入れられている。

この許容限界値の逆数を取り、270 nm を1として規格化した物は紫外線による障害の作用関数と呼ばれており、JIS C7550 によって様々な紫外線を用いた装置の安全評価に用いられている。

260 nm 付近での TLV は  $6 \text{ mJ/cm}^2$  となっており、GL-8 の殺菌灯照度は20 cmの距離でおよそ  $1 \text{ mW/cm}^2$  であるため、この距離ではわずか6秒で許容限界値に達する ( $J = W \cdot s$ )。222 nm での TLV は  $22 \text{ mJ/cm}^2$  となっていたが、近年安全性が確認されてきており、ACGIH は2021年12月に改訂を行い、眼に対しては  $160 \text{ mJ/cm}^2$ 、皮膚に対しては  $479 \text{ mJ/cm}^2$  と大きく許容値が増加した (JISにはまだ反映されていない)。



# 紫外線照度評価標準化の重要性について

- ・現在感染症対策として紫外線消毒が注目されており、様々な UV-C 紫外線照射機器が販売されている。また光触媒を使用した機器でも UV-A 紫外線を照射して励起する物が存在する。
- ・個々の微生物に対する効果を広告などで表示することは出来ないが、〇秒で99%除菌などと言う広告があふれている(実測の結果ほとんどがパチ物)。信頼できる機器の普及のため、**客観的な効果を示すために物理的な紫外放射照度の表示義務化**が望ましい。また研究者レベルでも生物系の専門家は紫外測光には疎く、得られた生残曲線の積算照度の信頼性に問題がある。
- ・内閣官房新型コロナウイルス感染症対策推進室と2020年9月からコンタクトを取っており、井上次長、渡邊審議官や産総研イノベーション推進本部辰己氏、独立行政法人製品評価技術基盤機構(NITE)バイオテクノロジーセンター石毛氏などと現状について意見交換し、**照度測定について標準化がされておらず、測定の信頼性が担保できないことが紫外線照射技術を普及する上で最大のネックとなっていることが確認された。**
- ・紫外放射照度計に関する製品規格が存在しないことは紫外測光の第一人者である東海大学竹下先生により以前から問題提起されており(\*)、実際に様々な照度計について調査を行い機器間での大きなばらつきと、斜入射特性の悪さが問題視されている(\*\*)。

(\*)照明ハンドブック(第3版)、照明学会、オーム社、2020年。

(\*\*) 紫外放射の産業界における使用例とその実用測定機器・方法の現状、照明学会、JIEG-007-a、1994。

# 紫外線照度評価上の更なる問題点

・以前は UV-C 光源として殺菌灯(低圧水銀ランプ)しか存在せず、水銀励起に伴う輝線であるため製品間のスペクトルの差異はなかったが、現在は UV-C LED やエキシマランプなど、様々な光源が存在しており、それぞれの製品によって波長、半値幅などのスペクトル特性が異なる。このため、デジタルで単一の数値を表示する紫外放射照度計ではその光源の特性を評価することが出来ない。

・様々な感染症対策機器では、狭い機器内に光源を仕込み至近距離で照射を行う。この場合どうしても光源から斜めに入射したり反射して入射する成分が生じるため、斜入射特性の悪い検出器では大幅に測定値が小さくなる。また、光源からの距離の二乗に反比例して照度低下するが、検出器のプロープは一般に2cm程度の厚みを有しており、光源から至近距離では照射面との距離の差が極めて大きく反映され、過大評価される。

・ウシオ電機の222nm遠紫外光を用いたCare222は人が居る環境への照射を目指しているが、光源から離れ照度が弱くなると紫外放射照度計の測定下限(一般に $1 \mu W/cm^2$ )以下となり測定することが出来ないか極端に測定精度が低くなる。通常のUV-Cを使用した製品も、長時間曝露する可能性があるため照度計測定下限以下の漏れ光の評価が求められる。

**放射線計測で用いられる化学線量計はこれらの問題を全て解決可能であり、高価で専門的な機器を使用しなくても信頼できる紫外放射照度測定を可能とする。**

# 学協会の対応(紫外線)

- ・照明学会では1994年に紫外放射の放射照度測定方法特別研究委員会において報告書「紫外放射の産業界における使用例とその実用測定機器・方法の現状(JIEG-007-a)」「紫外放射の標準と校正技術(JIEG-007-b)」を取りまとめているが、その後の光源及び計測器の進化を反映させるため、2022年度より「UV-C領域殺菌用途の紫外放射研究調査委員会」が立ち上がっており、東海大学竹下先生を委員長として秋吉も委員として参加している。
- ・消費者庁事故調査室に赴き UV-C 消毒器による健康被害の報告を行い、Twitter の公式アカウントから紫外線消毒器利用上の注意について2021年3月にツイートが出された。
- ・一般公衆への注意喚起として、日本照明工業会/照明学会連名で「紫外線殺菌ご利用上の注意」リーフレットを2021年7月に作成しており、竹下先生と秋吉が編著者となっている。
- ・電気用品安全法での取扱いは、2020年度末からの日本照明工業会 消毒殺菌用UV放射小委員会において提言がなされ、2021年12月に電気用品の範囲等の解釈についての改正が行われた。これにより庫外に紫外線を放射する機器についても電安法の対象となりPSEマークの表示が必要となった。