論 文

J-STAGE Advance published date: 2023.11.30 https://doi.org/10.2150/jieij.22000625

商業施設における254 nm紫外照射装置を用いた 殺菌・ウイルス不活化効果の検証試験

非会員 愿山(岡本) 郁(東北大学) 非会員 林 武弘(株式会社オーク製作所) 会員 高野 友二郎(株式会社オーク製作所) 非会員 片岡 智史(株式会社オーク製作所) 非会員 腰髙 博(株式会社コシダカ) 非会員 村田 裕之(東北大学ナレッジキャスト株式会社) 会員 日出間 純(東北大学)

Verification Test of Sterilization/Virus Inactivation Effect Using 254 nm Ultraviolet Irradiation Device in Commercial Facility

Non Member Kaoru Okamoto Yoshiyama (Tohoku University),

Non Member Takehiro Hayashi (ORC Manufacturing Co., Ltd),

Member Yujiro Takano (ORC Manufacturing Co., Ltd),

Non Member Satoshi Kataoka (ORC Manufacturing Co., Ltd),

Non Member Hiroshi Koshidaka (Koshidaka Holdings Co., Ltd),

Non Member Hiroyuki Murata (Tohoku University Knowledge Cast Co., Ltd) and

Member Jun Hidema (Tohoku University)

ABSTRACT

With the rapid spread of the novel coronavirus (COVID-19) infection, the early establishment of safe and low-cost virus inactivation technology has become an urgent issue. We have developed a mobile ultraviolet (UV) irradiation device that uses a low-pressure mercury discharge lamp made of quartz glass with a total length of 1,000 mm. This device emits light at an emission peak of 254 nm and is designed for efficient and cost-effective virus inactivation in unmanned environments, such as conference rooms and private rooms in commercial facilities. To assess the effectiveness of our device, we used the private rooms of commercial facilities of various sizes as model rooms (S-room; 2,001 mm (W)×2,166 mm (D)×2,500 mm (H), M-room; 1,989 mm (W)×4,042 mm (D)×2,500 mm (H), L-room; 3,172 mm (W)×7,889 mm (D)×2,700 mm (H)). We temporarily installed an UV irradiation device in each room and irradiated the rooms with UV radiation for 7 min in the S-room and 10 min in the M-room. Due to the size of the L-room, the UV irradiation was performed from two places. After UV irradiation at one place for 15 min, the device was moved and re-irradiated for 15 min. To evaluate the bactericidal effect of our developed UV irradiation device on various surfaces within the room, such as walls, floors, and ceilings, we measured the inactivation rate of E. coli and verified the device's performance. The results showed the inactivation rate of E. coli was 99.90% or more, except in areas where direct UV irradiation was obstructed by furniture. In addition, even in areas where direct light from the UV irradiation device did not reach, such as furniture, we observed a decrease in the survival rate of E. coli due to reflection from the walls. On the basis of the above verification results, we confirmed that the developed device efficiently inactivates bacteria and viruses within rooms used by an unspecified number of people, such as conference rooms and commercial facilities, in a short amount of time.

KEYWORDS : COVID-19, UV irradiation device, virus inactivation, inactivation rate of E. coli

1. はじめに

新型コロナウイルスの感染拡大に伴い,安全かつ低コスト でのウイルス不活化技術の早期確立は喫緊の課題である.低 圧水銀放電ランプから放射される波長254 nmの紫外放射は 強い殺菌力を持ち,これまでに菌類の殺菌やウイルス等の不 活化に広く用いられている.しかし、ヒトに照射すると皮膚 ガンや白内障を生じさせるという欠点を有するため¹⁻³⁾、ヒ トを含む動物等に直接照射されない場所で利用されている. 一方、近年254 nmよりも波長の短い207 nm、220 nmや 222 nmに発光ピークを持つエキシマランプが開発された. これらのランプから放射される紫外放射も波長254 nmに 発光ピークを持つランプからの紫外放射と同様にDNAや RNA, そしてタンパク質等に直接損傷を引き起こすため、 菌類の殺菌, ウイルス等の不活化の作用を有する. また紫外 放射はその波長特性から、波長が短くなるに従いヒトや動物 の表皮細胞の内部まで透過しないことが報告されている⁴⁻⁶. そのため、波長の短い紫外放射は組織内のDNAやRNAに損 傷を引き起こさず,皮膚ガンや目の障害が著しく抑えられ, 有人環境下での新たな菌類の殺菌やウイルスの不活化のため の技術として着目されている.しかし一方で、波長222 nm に発光ピークを示すエキシマランプからの紫外放射を植物 (シロイヌナズナ) に照射すると、葉の表皮に存在する孔辺 細胞(気孔)が直接障害を受けることで、葉の白化や表皮細 胞の破壊が波長254 nmにピークを示す低圧水銀放電ランプ の照射の時よりも顕著に見られ、重篤な障害を引き起こすこ とが報告されている⁷⁾. したがって, 波長254 nmよりも短波 長の紫外放射を照射するランプを利用したウイルス等不活化 技術の確立、実用化には、様々な生物種に対する影響評価の 検証も必要であり、更なる時間を要すると考えられる.

これまでに我々は、会議室や商業施設の個室などの無人環 境での、安全、低コスト、短時間での効率的なウイルス等不 活性化技術の早期確立のために、254 nmに発光ピークを持 つ全長1,000 nmの石英ガラス製低圧水銀放電ランプを利用 し、オゾンを発生しないオゾンレスタイプの紫外照射装置を 開発した.そこで、様々な広さの商業施設の個室をモデル ルームとして、紫外照射装置を設置し、一定時間紫外放射を 照射した際の室内の壁、天井等における殺菌効果を、大腸菌 の不活化率から評価し、新たに開発した紫外照射装置の性能 を検証したので報告する.

2. 紫外照射装置の開発と検証方法

2.1 紫外照射装置の開発

無人環境の会議室,飲食店の個室,カラオケルーム等の 娯楽施設の個室等の殺菌・ウイルス等の不活化には,短時 間で,かつ容易,そして効率的に実施されることが期待され る.そこで我々は,標準的な天井の高さ2,500 mmを基本と したモデルルームを,出来る限り少ない本数の低圧水銀放電 ランプを使用し,効率的に壁,床,天井に付着した菌,ウイ ルス等が不活化できる紫外照射装置の開発を目指した.

全長1,000 mmの1本の低圧水銀放電ランプが基底部から 垂直に搭載され、点灯時は紫外放射が室内全空間に照射出来 る構造の移動式紫外照射装置を作製した.開発した紫外照射 装置を図1に示す.本装置は、全長1,000 mmの直管形の低 圧水銀ランプ(GLM-078/A-9.2S,電力約70 W,オーク製作 所)およびランプ破損防止構造を備える.ランプ破損防止構 造は、ランプと同軸の円筒状に設置される略円柱状の格子構 造を有し、縦方向の格子材の太さは2 mmで、ランプから格 子材への距離は30 mmである.また、格子材と格子材との 間の間隔は、13.5 mmである.したがって、本装置のランプ 照射時は、ランプから発せれられる紫外放射は、室内全空間 に照射される.この装置は稼働時間を設定できるタイマー と、誤って稼働中にヒトが近づくと停止する人感センサーも 装備されている.

2.2 検証実験

2.2.1 光源スペクトル,および紫外放射照度の測定 紫外照射装置から放射されるスペクトルは,分光放射照 度計(大塚電子株式会社,MCPD-3000)を用いて測定し,



図1 紫外照射装置の概要

(a)紫外照射装置の実物写真,(b),(c)紫外照射装置図面 a:(正面),b:(背面).(d)格子部拡大図面.(e)紫外照射装置上部拡大図面. (f)紫外照射装置基部拡大図面.

Fig. 1 Overview of the UV irradiation device.

(a) Photographs of the actual UV irradiation device. (b), (c) Drawings of the UV irradiation device. a: (front), b: (back). (d) Enlarged drawing of the grating. (e) Enlarged drawing of the upper part of the UV irradiation device. (f) Enlarged drawing of the base of the UV irradiation device.

254 nm に発光ピークがあることを確認した(図2).次に作 製した紫外照射ランプからの距離、床からの高さと照度の 関係(配光分布)を調べた(表1).紫外照射装置を室内に, ランプの中央が床から1,220 mmとなるように壁と平行に設 置した. ランプから壁までの距離(X)を変化させ, 壁の床か らランプ中央の位置にあたる1,220 mmから鉛直上方向の位 置(高さ:Y [1,220~2,530 mm]) で紫外放射照度を測定し た.なお、紫外放射照度は、紫外放射照度計(オーク製作 所,表示部:UV-M03A,受光部:UV-SN25)を用いて,セ ンサーの受光部を壁と平行に設置し測定した. ただし、セン サー受光部の斜め入射光特性は、入射角度が大きくなると理 想的な特性からマイナス方向にずれている(UVM03A取扱 説明書,オーク製作所).このため,測定値は実際の紫外放 射照度よりも小さな値を示すと考えられる. その結果, ラン プ中央と同じ高さ(床から1,220 mm)の壁の位置での紫外 放射照度は,壁からの距離に関係なく最も高くなった.ま た、ランプ中央の位置から壁に沿って鉛直上方に向かうに 従い、紫外放射照度は徐々に低下した。しかし、床からの 高さが2,530mmの位置では、壁とランプの距離が1,450から 4,000 mmへと離れても、距離に応じて紫外放射照度は低下 しておらず, 0.005~0.009 mW/cm²と低く検出された.





ランプ管中央から100 mmの距離で,分光放射照度計(大塚電 子株式会社,MCPD-3000)を用いて放射されるスペクトルを測 定した

Fig. 2 Radiation spectrum of lamps installed in the UV irradiation device.

The emitted spectrum was measured at a distance of 100 mm from the center of the lamp tube using a spectroradiometer (Otsuka Electronics Co., Ltd., MCPD-3000). 2.2.2 使用した大腸菌と大腸菌生存率の測定方法

我々はこれまでに、低圧水銀放電ランプを使って99.00% のP1ファージウイルスを不活化させるのに必要な紫外照射 量は、大腸菌を99.99%不活化させるのに必要な紫外照射 量(12 mJ/cm²)と同じであることを報告している(図3)⁷⁾. そこで我々はカラオケルーム内でP1ファージウイルスの 99.00%を不活化させる条件を検討するために、P1ファージ ウイルスよりも扱いやすい大腸菌を用いて検証することにし た.

野生型大腸菌 (AB1157) のシングルコロニーを37℃で一 夜培養し,その培養液の原液 (4.2×10⁸ cells/ml), 10⁻²希釈,



図3 野生型大腸菌(*E. coli*)とP1ファージ(P1 phage)の低
圧水銀放電ランプから放射される紫外放射の照射量に対する生存曲線

直線は野生型大腸菌(AB1157), 点線はP1ファージの生存曲 線を示す. 結果は3回実験した平均を, エラーバーは標準誤 差を示している. 赤線はP1ファージの生存率が1%(不活化 率99%)になるときの紫外照射量を示している(120 J/m²= 12 mJ/cm²). このグラフはOtake et al. Photochemical & Photobiological Sciences, vol. 20, p. 1675-(2021)のデータを元 に作製した.

Fig. 3 Survival curve of *E. coli* and P1 phage in response to UV irradiation.

Solid line and dotted line indicate wild type *E. coli* (AB1157) and P1 phage, respectively. The values are the means of three experiments. The error bars indicate the SEs of three biological replicates. Red line indicates the dose which kills 99% of P1 phage ($120 \text{ J/m}^2=12 \text{ mJ/cm}^2$). This graph is made from data in Otake's paper (Otake et at. Photochemical & Photobiological Sciences, vol. 20, p. 1675– (2021))

表1 ランプの距離(X), 床からの高さ(Y)における紫外放射照度 Table 1 The distance from the lamp (X), the height from floor (Y) and UV radiation intensity.

| [mW/cm ²] | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 床からの高さ (Y) [mm] | ランプからの距離 (X) [mm] | | | | | | | | |
| | 1450 | 1750 | 2000 | 2250 | 2500 | 2750 | 3000 | 3500 | 4000 |
| 1220 | 0.109 | 0.079 | 0.060 | 0.048 | 0.040 | 0.033 | 0.028 | 0.022 | 0.017 |
| 1430 | 0.099 | 0.073 | 0.056 | 0.045 | 0.037 | 0.031 | 0.027 | 0.021 | 0.016 |
| 1630 | 0.076 | 0.060 | 0.048 | 0.039 | 0.033 | 0.028 | 0.024 | 0.019 | 0.015 |
| 1730 | 0.063 | 0.052 | 0.042 | 0.035 | 0.030 | 0.026 | 0.023 | 0.018 | 0.015 |
| 1980 | 0.035 | 0.032 | 0.028 | 0.025 | 0.023 | 0.020 | 0.018 | 0.015 | 0.013 |
| 2180 | 0.018 | 0.019 | 0.019 | 0.018 | 0.017 | 0.016 | 0.015 | 0.013 | 0.011 |
| 2380 | 0.008 | 0.010 | 0.011 | 0.011 | 0.011 | 0.011 | 0.010 | 0.010 | 0.009 |
| 2530 | 0.005 | 0.006 | 0.007 | 0.008 | 0.008 | 0.008 | 0.009 | 0.008 | 0.008 |

a:Sルーム



図4 検証試験を実施したモデルルーム(a: Sルーム, b: Mルーム, c: Lルーム)の概要,ならびに大腸菌プレートの設置場所 図中のプレートと番号は,設置場所の番号を示し,表2,3,4の番号と一致する.赤丸は紫外照射装置の設置場所を示す.:Lルームは 照射装置を2回に分けて設置したが,紫外照射装置を最初に設置した場所をA,二回目に設置した場所をBで示した.各部屋に設置して ある家具の大きさは以下のとおりである.机のサイズ:H620×W900×D 500 mm,椅子座面の高さ:380 mm,スピーカーの大きさ H205×W 361×D233 mm.プレート6,23,26,36,39,42 に関しては,ソファーの座面に,プレート表面が紫外照射装置に向くように 設置した.

Fig. 4 Overview of the model rooms (a: S-room, b: M-room, c: L-room) where the verification tests were conducted and the locations of the *E. coli* plates.

The plates and numbers in the figure indicate the numbers of the installation places and correspond to the numbers in Tables 1, 2, and 3. Red circle indicates the position of UV irradiation device. A and B indicate first position and second position, respectively. The size of each furniture is as follows. Table: H620×W900×D 500 mm, Sofa seat height: 380 mm, speaker: H205×W 361×D233 mm. Plate 6, 23, 26, 36, 39, 42 were placed on the seat surface of the sofa so that the surface of the plate faced the UV irradiation device.

10⁻⁴希釈した3種類それぞれ100 μlを,1枚のLBプレートを 3分割して塗布した.

そのプレートは、両面テープでカラオケルームの様々な位置に、蓋を取った状態で、壁や天井に対して平行に設置した. 部屋の角は壁2面を使って、プレート表面が紫外照射装置の方向に向くよう設置した(図4).

紫外放射を照射後、プレートは37℃で一晩培養し、翌日

コロニーを数えて生菌数を計算した(図5).紫外放射照射後の大腸菌の生存率は,[紫外放射を照射後の生菌数]÷[紫 外放射を照射しない大腸菌の生菌数]×100(%)により求めた.また不活化率は100(%)-生存率(%)の計算式により求めた.

2.2.3 検証実験に利用したモデルルーム 検証実験のモデルルームとして,株式会社コシダカが所有



図4 続き Fig. 4 Continuation

する3種類の広さのカラオケルーム(まねきねこ渋谷本店), Sルーム:幅2,001×奥行2,166×高さ2,500 mm, Mルーム: 幅1,989×奥行4,042×高さ2,500 mm, Lルーム幅3,172奥行× 7,889×高さ2,700 mmを使用した(図4).壁,天井はプラス ターボードがベージュ色のビニールクロスで覆われたもので ある.

2.2.4 検証方法

紫外照射装置は、Sルーム、およびMルームにおいて は、部屋の中央となる机(高さ620 mm)の上に設置した (図4).またLルームにおいては、部屋の床面積が広いた め、図4C中のAの位置に設置し、1回照射した後、Bの位置 に移動し、再び照射することにした.なお、Lルームも、S ルーム、およびMルームと同様に紫外照射装置は机(高さ 620 mm)の上に設置した.

各部屋における紫外照射装置による照射時間は、Sルーム とMルームでは、照射装置のランプ中央から天井と2面の壁 との接点までの距離、Lルームでは照射装置のランプ中央か ら天井と2面の壁との近い方の接点までの距離での紫外放射 照度を,表1に示した結果から見積もり,ランプ中央から最 も距離が遠い地点で大腸菌を99.99%不活化させるために必 要な照射量である12 mJ/cm²から算出した.

なお、ランプ点灯後からの照度推移測定から、ランプが点 灯してから紫外放射照度が安定するまでには2分の時間を要 することがわかった.そこで、ランプ点灯から照度が安定す るまでの2分間と、安定してから2分間の積算光量から、積 算光量の比率を算出した.その結果、照度が安定するまでの 2分間の光量の比率は平均73%であったため、開発した紫外 照射装置による照射量は、紫外放射照度×120秒(2分)×定 数(0.73)+紫外放射照度×Y秒(照射時間-2分)の和とし て算出した.その結果、Sルームでは7分、Mルームでは10 分、そしてLルームではまずAの位置で15分照射した後、B に移動して15分照射することに決定した.

照射後,大腸菌のプレートを回収し,大腸菌の不活化率を 測定した.また,大腸菌のプレートを設置した場所におけ る紫外放射照度を紫外放射照度計(オーク製作所,表示部: UV-M03A,受光部:UV-SN25)を用いて測定した.



塗布菌数 4.2 x 10⁷ 4.2 x 10⁵ 4.2 x 10³ 4.2 x 10⁷ 4.2 x 10⁵ 4.2 x 10³ 図5 大腸菌不活化率を測定するための大腸菌プレート

(a)紫外放射を当てなかった大腸菌プレートの様子.(b)図4a中のプレート設置番号5において,紫外放射を当てた後,37℃で一晩培養 後の大腸菌プレートの様子.図中の数字は,プレートに塗布した大腸菌の菌数を示した.

Fig. 5 E. coli plates for measuring E. coli lethality.

(a) Survival of *E. coli* in the plate without UV irradiation. (b) Survival of *E. coli* after UV irradiation and overnight incubation at 37°C in plate #5 in Fig. 4a. The numbers in the figure indicate the number of *E. coli* on the plate.

3. 結果

3.1 Sルームでの検証結果

図4aと表2には、Sルームにおいて検証実験用の大腸菌プ レートを設置した場所と、各プレートの設置場所における紫 外放射照度、7分間における照射量、および大腸菌の不活化 率の結果を示した。

Sルームでは、 部屋の中心に設置した紫外照射装置から最

も遠い場所(プレート番号1,4,7,10)で実測された紫外放 射照度から算出した照射量は、それぞれ8.1,8.5,1.9,3.1 mJ/ cm²であった.番号7と10において照射量が低かったのは、 紫外照射装置と大腸菌プレートを結ぶ直線上にスピーカーが 設置されており、スピーカーにより紫外照射装置からの直達 光が遮られたためである.しかし、周辺の壁や天井からの反 射光がわずかに到達していたと考えられた.また、番号15 は、テーブルにより紫外照射装置からの直達光が遮られる場 表2 Sルームに設置した大腸菌プレートの位置における紫外放射照度,照射量,および不活化率.なお,各プレートの番号は,図4a中の番号を示す

| プレート# | 位置 | 紫外放射照度[mW/cm ²] | 照射量[mJ/cm ²] | 大腸菌不活化率[%] |
|-------|------|-----------------------------|--------------------------|------------|
| 1 | | 0.021 | 8.1 | 100.0 |
| 2 | 部屋角1 | 0.096 | 37 | 100.0 |
| 3 | | 0.0090 | 3.5 | 99.98 |
| 4 | | 0.022 | 8.5 | 99.98 |
| 5 | 部屋角2 | 0.095 | 37 | 100.0 |
| 6 | | 0.053 | 21 | 99.99 |
| 7 | 部屋角3 | 0.0050 | 1.9 | 99.48 |
| 8 | | 0.12 | 47 | 99.99 |
| 9 | | 0.082 | 32 | 99.98 |
| 10 | | 0.008 | 3.1 | 99.74 |
| 11 | 部屋角4 | 0.13 | 51 | 99.99 |
| 12 | | 0.093 | 36 | 99.99 |
| 13 | 山明時西 | 0.16 | 62 | 100.0 |
| 14 | 中间空间 | 0.13 | 51 | 100.0 |
| 15 | 家具の影 | 0.0050 | 1.9 | 86.91 |
| 16 | 家具の影 | 0.0010 | 0.4 | 99.99 |

Table 2 UV irradiance, approximate integrated UV radiation intensity, and inactivation rate of the *E. coli* in the S-room. The number of each plate indicates the number in Fig. 4a.

所であった.他の大腸菌プレートは,紫外照射装置から紫外 放射が直接照射される場所であり,7分間での照射量は,ス ピーカーや椅子などで紫外放射の直達光が遮られる場所を除 き,およそ8~62 mJ/cm²であった.

図5aは、紫外放射を当てなかった大腸菌プレートを一晩 37℃で培養したプレートの写真を示し、図5bは、ルーム Sの5番の位置に設置し、7分間紫外放射を当てた大腸菌プ レートを37℃で一晩培養した後のプレートの写真を示した. 5番の位置での照射量は、36 mJ/cm²であった.この条件下で は、大腸菌の原液を塗布した培地上では大腸菌の生存が確認 できたものの、10⁻²希釈、10⁻⁴希釈培養液を塗布した培地上 には、大腸菌のコロニーは検出できなかった.

各大腸菌濃度でのコロニー数を計測し、大腸菌の不活化率 を計算したところ、プレート番号3,4,9で99.98%、それ以外 の場所(プレート番号1,2,5,6,8,11~14)では、設計通り 99.99%以上であった.

また,紫外照射装置からの直達光がスピーカーで遮られた 場所(プレート番号7,10)でも,99.5%以上の不活化率とな り,想定以上の大腸菌の不活化効果が認められた。

3.2 Mルームでの検証結果

Mルームでの検証結果を表3に示した. Mルームにおいて も、スピーカーや椅子,テーブルで紫外照射装置からの直達 光放射が遮られる箇所では(プレート番号24,27),紫外放 射照度は低く照射量は著しく減少していた.一方,スピー カー等で紫外放射の直達光が遮られない箇所での照射量は, 12~33 mJ/cm²と大腸菌の不活化率が99.99%以上となる条件 であった.

大腸菌の不活化率は、紫外照射装置に対してスピーカーの 裏側(番号24,27),椅子の影となる場所(番号30),スピー カーとスピーカーの間(番号33),さらに装置の真上となる (番号32)を除いて99.9%以上であった.

一方、紫外放射照度計による紫外放射照度は測定下限以下

であった番号24,27の位置における大腸菌の不活化率はそれ ぞれ47.11%,64.05%であり,紫外放射の照射による不活化効 果が弱かった.

3.3 Lルームでの検証結果

Lルームでの検証結果を表4に示した.Lルームは部屋の4 隅上方すべてにスピーカーが設置されていることから,S,M ルーム同様に紫外照射装置に対してスピーカーの裏側となる 位置(番号34,37,43,46)での紫外放射照度の測定値は測定 下限以下であった.また,椅子やテーブル等により照射装置 からの直達光が遮られる位置(番号52,53,54)も同様に紫 外放射照度は,著しく低い,または測定下限以下であった. それら以外の位置での照射量は,6.8~41 mJ/cm²であった.

このような条件下で大腸菌の不活化率を測定すると、ス ピーカーや家具等で紫外放射が遮られる場所を除いては、 99.90%以上の不活化率であった.一方、スピーカーの影に なるプレート番号34,37,43,46に関して、番号37では不活性 化率が54.27%であったものの、他の3か所では97.00%以上 の不活化率となった.

他のS, Mルームでも同様に紫外照射装置からの直達光放 射が届いていない場所での大腸菌の不活化率は,直達光放射 が届いている場所よりも低かった.しかし,Lルームの方が SまたはMルームよりもその不活性化率は高かった.

4. まとめ

本研究では、新たに開発した紫外照射装置を用いて、実際 に利用されているカラオケルームをモデルルームとし、細菌 やウイルスの不活化の検証実験を、大腸菌の不活化率を指標 に行った.これらの結果は、会議室や商業施設など不特定多 数の人々が利用した部屋の細菌やウイルスを、紫外照射装置 を用いることで、安全かつ短時間で効率的に不活化するため の知見を示した.

実験室内での結果により、大腸菌を99.99%不活化させる

表3 Mルームに設置した大腸菌プレートの位置における紫外放射照度,照射量,および不活化率.なお,各 プレートの番号は,図4b中の番号を示す

| プレート# | 位置 | 紫外放射照度[mW/cm ²] | 照射量[mJ/cm ²] | 大腸菌不活化率[%] |
|-------|----------|-----------------------------|--------------------------|------------|
| 18 | | 0.022 | 12 | 99.99 |
| 19 | 部屋角1 | 0.059 | 33 | 99.99 |
| 20 | | 0.019 | 11 | 99.94 |
| 21 | 部屋角2 | 0.017 | 10 | 99.95 |
| 22 | | 0.027 | 15 | 99.99 |
| 23 | | 0.042 | 24 | 99.76 |
| 24 | 部屋角3 | 0.0 | 0.0 | 47.11 |
| 25 | | 0.046 | 26 | 99.99 |
| 26 | | 0.038 | 22 | 99.98 |
| 27 | | 0.0 | 0.0 | 64.05 |
| 28 | 部屋角4 | 0.024 | 14 | 99.89 |
| 29 | | 0.014 | 7.9 | 99.84 |
| 30 | 家具の影 | 0.0020 | 1.1 | 96.56 |
| 31 | 家具の影 | 0.0010 | 0.6 | 99.99 |
| 32 | 殺菌装置真上天井 | 0.0050 | 2.8 | 99.43 |
| 33 | 天井 | 0.010 | 5.7 | 95.73 |

Table 3 UV irradiance, approximate integrated UV radiation intensity, and inactivation rate of the *E. coli* in the M-room. The number of each plate indicates the number in Fig. 4b.

表4 Lルームに設置した大腸菌プレートの位置における紫外放射照度, 照射量, および不活化率. なお, 各プ レートの番号は, 図4c中の番号を示す

Table 4 UV irradiance, approximate integrated UV radiation intensity, and inactivation rate of the *E. coli* in the L-room. The number of each plate indicates the number in Fig. 4c.

| プレート# | 位置 | 紫外放射照度[mW/cm ²]A | UV放射照度[mW/cm ²] B | 照射量[mJ/cm ²] | 大腸菌不活化率[%] |
|-------|-----------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------|
| 34 | | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 99.77 |
| 35 | 部屋角1 | 0.011 | 0.031 | 36 | 99.98 |
| 36 | | 0.011 | 0.017 | 24 | 99.99 |
| 37 | | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 54.27 |
| 38 | 部屋角2 | 0.010 | 0.0090 | 16 | 99.99 |
| 39 | | 0.011 | 0.0070 | 16 | 99.87 |
| 40 | 入口対面側長手中央 | 0.0030 | 0.0050 | 6.9 | 99.98 |
| 41 | | 0.0080 | 0.0090 | 15 | 99.99 |
| 42 | | 0.0070 | 0.0060 | 11 | 99.99 |
| 43 | - 部屋角3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 98.35 |
| 44 | | 0.024 | 0.010 | 29 | 99.99 |
| 45 | | 0.016 | 0.070 | 75 | 99.99 |
| 46 | | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 97.80 |
| 47 | | 0.026 | 0.010 | 31 | 99.99 |
| 48 | | 0.021 | 0.011 | 28 | 99.98 |
| 49 | | 0.0090 | 0.0020 | 9.5 | 99.99 |
| 50 | 入口側長手中央 | 0.033 | 0.0050 | 33 | 99.99 |
| 51 | | 0.0090 | 0.0020 | 9.5 | 99.99 |
| 52 | 家具の影 | 0.048 | 0.0 | 42 | 99.99 |
| 53 | 家具の影 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 97.93 |
| 54 | 家具の影 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 90.63 |

には、低圧水銀放電ランプからの紫外放射を12 mJ/cm²照 射することが必要であると算出した.そして本検証実験に よって、モデルルームといった空間においても、殺菌した い場所に付着した大腸菌を99.99%不活化させるためには、 12 mJ/cm²照射すれば良いことを明らかにした.

検証実験に使用した部屋には、スピーカー、椅子、机と いった設備や什器が設置されていた.これらの設備や什器の 影となる部分は紫外照射装置からの直達光放射が遮られ、紫 外放射照度は著しく低かった.そのような場所では、大腸菌 を99.99%以上不活化させる効果は得られず、最も効果が低 かった場所では47.11%(Mルーム)であった.しかし、大 腸菌の不活化率は、紫外放射照度測定値より算出した照射量 から考えられる値よりは高い値を示した.これらの設備や什 器の影となる場所には周辺の壁などから反射された紫外放射 が到達している.一方、紫外放射照度計測に使用した紫外放 射照度計の斜め入射光特性から、紫外放射の入射角度が大き い場合,すなわち本実験のように反射された紫外放射が斜め 方向から入射する場合は,実際の放射照度よりも低く測定さ れる.紫外放射照度計は紫外放射装置に向けて設置したた め,これが原因であると考察した.

Lルームの紫外放射が直接照射されない場所での大腸菌の 不活化率は、SルームおよびMルームの直接照射されない場 所と比較して高い傾向が認められた.その理由は、先に考察 した紫外放射照度計の斜め入射光特性によるものに加えて、 照射時間15分間を2回照射したため、放射照度計での測定下 限以下の紫外放射照度が長く照射されたためと考察した.

本装置は,新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) 感染防止 対策機器の一つとして開発した.しかし,現時点において, 対象空間における感染経路,存在状態や密度,空気中での生 存期間など,詳細な実態が把握できていない.また,本研究 では浮遊するウィルスに対する効果は評価しておらず,物の 表面に付着したウィルスの不活化効果についての実験結果を まとめたものである.

これまでの研究報告によると、低圧水銀放電ランプなどを 用いてSARS-CoV-2を不活化するために必要な照射量は、そ の存在状態やその密度によって3~1,000 mJ/cm²と大きく異 なる⁸⁻¹¹⁾.しかし、感染多重度が1,000という高い条件下で も16.9 mJ/cm²以上の254 nmに発光ピークを持つ低圧水銀放 電ランプの照射で完全に不活化出来ることが実験室内での結 果として報告されている¹²⁾.本検証実験では大腸菌の不活化 に必要な照射量は実験室内での照射量と同じであることを明 らかにした.以上のことから、開発した紫外照射装置を用い て、殺菌対象の表面に、少なくとも16.9 mJ/cm²以上照射す るように設定すれば、その表面に付着しているSARS-CoV-2 を99.99%以上不活化可能と考える.

さらに本紫外照射装置は、たとえ広い部屋においても複数 箇所で点灯させれば、アルコールを用いた表面除菌作業と組 み合わせることで、効果的に表面不活化処理を行うことが可 能と考える.

本研究結果が、より高効率な不活化処理装置および、効果 的な除菌作業方法の開発の一助となることを期待する.

参考文献

- Sliney, D.: Balancing the Risk of Eye Irritation from UV-C with Infection from Bioaerosols, Photochem. Photobiol., 89-4, pp. 770–776 (2013). doi: 10.1111/php.12093
- Sterenborg, H. J., van der Putte, S. C. and van der Leun, J. C.: The dose-response relationship of tumorigenesis by ultraviolet radiation of 254 nm., Photochem. Photobiol., 47-2, pp. 245–253 (1988). doi: 10.1111/j.1751-1097.1988.tb02722.x
- Trevisan, A., Piovesan, S., Leonardi, A., Bertocco, M., Nicolosi, P., Pelizzo, M. G. and Angelini, A.: Unusual High Exposure to Ultraviolet-C Radiation., Photochem. Photobiol., 82-4, pp. 1077–1079 (2006). doi: 10.1562/2005-10-27-RA-728
- Buonanno, M., Randers-Pehrson, G., Bigelow, A. W., Trivedi, S., Lowy, F. D., Spotnitz, H. M., Hammer, S. M. and Brenner, D. J.: 207-nm UV Light—A Promising Tool For Safe Lowcost Reduction of Surgical Site Infections. I: In vitro studies., PLoS One, 8-10, p. e76968 (2013). doi: 10.1371/journal. pone.0076968
- 5) Buonanno, M., Stanislauskas, M., Ponnaiya, B., Bigelow, A. W., Randers-Pehrson, G., Xu, Y., Shuryak, I., Smilenov, L., Owens, D. M. and Brenner, D. J.: 207-nm UV light-A promising tool for safe low-cost reduction of surgical site infec-

tions. II: In-vivo safety studies., PLoS One, 11-6, p. e0138418 (2016). doi: 10.1371/journal.pone.0138418

- 6) Buonanno, M., Ponnaiya, B., Welch, D., Stanislauskas, M., Randers-Pehrson, G., Smilenov, L., Lowy, F. D., Owens, D. M. and Brenner, D. J.: Germicidal Efficacy and Mammalian Skin Safety of 222-nm UV Light, Radiat. Res., 187-4, pp. 483–491 (2017). doi: 10.1667/RR0010CC.1
- Otake, M., Yoshiyama-Okamoto, K., Yamaguchi, H. and Hidema, J.: 222 nm Ultraviolet Radiation C Causes More Severe Damage to Guard Cells and Epidermal Cells of *Arabidopsis* Plants Than Does 254 nm Ultraviolet radiation., Photochem. Photobiol. Sci., 20-12, pp. 1675–1683 (2021). doi: 10.1007/ s43630-021-00123-w
- Inagaki, H., Saito, A., Sugiyama, H., Okabayashi, T. and Fujimoto, S.: Rapid Inactivation of SARS-CoV-2 with Deep-UV LED Irradiation, Emerg. Microbes Infect., 9-1, pp. 1744–1747 (2020). doi: 10.1080/22221751.2020.1796529
- 9) Ruetalo, N., Businger, R. and Schindler, M.: Rapid and Efficient Inactivation of Surface Dried SARS-CoV-2 by UV-C Irradiation, bioRxiv, 09.22.308098 (2020). https://doi. org/10.1101/2020.09.22.308098
- Heilingloh, C. S., Aufderhorst, U. W., Schipper, L., Dittmer, U., Witzke, O., Yang, D., Zheng, X., Sutter, K., Trilling, M., Alt, M., Steinmann, E. and Krawczyk, A.: Susceptibility of SARS-CoV-2 to UV Irradiation, Am. J. Infect. Control, 48-10, pp. 1273–1275 (2020). doi: 10.1016/j.ajic.2020.07.031
- 11) Storm, N., McKay, L. G. A., Downs, S. N., Johnson, R. I., Birru, D., de Samber, M., Willaert, W., Cennini, G. and Griffiths, A.: Rapid and Complete Inactivation of SARS-CoV-2 by Ultraviolet-C Irradiation, Sci. Rep., 10-1, p. 22421 (2020). doi: 10.1038/s41598-020-79600-8
- 12) Biasin, M., Bianco, A., Pareschi, G., Cavalleri, A., Cavatorta, C., Fenizia, C., Galli, P., Lessio, L., Lualdi, M., Tombetti, E., Ambrosi, A., Redaelli, E. M. A., Saulle, I., Trabattoni, D., Zanutta, A. and Clerici, M.: UV-C Irradiation is Highly Effective in Inactivating SARS-CoV-2 Replication., Sci. Rep., 11-1, p. 6260 (2021). doi: 10.1038/s41598-021-85425-w

(受付日2022年6月22日/採録日2023年5月19日)

愿山(岡本) 郁(非会員)

2001年奈良先端大科学技術大学院大学博士課程終了・学位 (バイオサイエンス)取得.同年日本学術振興会特別研究員. 2005年University of California Davis博士研究員,2006年日本 学術振興会海外特別研究員,2008年奈良先端大科学技術大 学院大学国際リサーチフェロー,2012年京都産業大学博士 研究員,2013年日本学術振興会特別研究員(RPD),2018年 東北大学大学院生命科学研究科博士研究員.微生物・植物の DNA損傷応答・防御機構の研究に従事.

林 武弘(非会員)

1997年芝浦工業大学工学部卒業.同年(株)オーク製作所 に入社,電子回路基板・液晶・半導体露光用光源の開発, UV-Cを活用した除菌・消臭装置の開発に従事.

高野 友二郎 (会員)

2018年東京農工大学大学院連合農学研究科博士課程修了・ 学位(農学)取得.同年(株)オーク製作所に入社,UVラン プの研究開発に従事.

片岡 智史(非会員)

1994年東海大学工学部卒業,同年(株)オーク製作所に入社, UV ランプ,UV 照射機,ランプ用電源,UV 計測器の開発に 従事.

腰髙 博(非会員)

東北大学経済学部卒業.1990年8月カラオケ事業開始.1995 年代表取締役社長就任(現任).2007年6月ジャスダック証 券取引所(現プライム市場)に上場を果たす.中期経営ビ ジョン「エンタメをインフラに」を推進し,国内(612店 舗)だけでなく海外(17店舗)にも店舗展開している.

村田 裕之(非会員)

1987年東北大学大学院工学研究科機械工学第二専攻修了. 1991年仏国立土木学校大学院国際経営学科修了(MBA). 2006年東北大学特任教授.2009年東北大学加齢医学研究所 スマート・エイジング国際共同研究センター特任教授.2015 年東北大学スマート・エイジング学際重点研究センター特任 教授・企画開発部門長.専門はシニアビジネス,高齢社会国 際比較論,産学連携による産業創出.

日出間 純 (会員)

1992年日本学術振興会特別研究員.1993年東北大学大学院 農学研究科博士課程修了・学位(農学)取得.同年東北大学 遺伝生態研究センター助手,2001年東北大学大学院生命科 学研究科准教授.植物の紫外線応答,耐性・防御機構,光環 境適応戦略機構,宇宙微小重力・光・放射線影響の研究に従 事.