

無電極UVCランプの殺菌効果

望月智代、松本亜里奈、広瀬直人*¹

沖縄県内で製造販売されている無電極ランプをベースに開発された無電極UVCランプ（紫外線出力60 W、カサイエレクトリック株式会社、以下無電極UVC）の製品化を目的に、既存UV殺菌灯4本とともに、汚染モデル菌3株、すなわち大腸菌、枯草菌芽胞および黒カビ孢子に対する殺菌効果を検討した。その結果、殺菌率90%以上の効果が得られる照射距離と殺菌時間を得た。紫外線感受性の高い大腸菌においては、照射距離30 cmでは無電極UVCが既存UV殺菌灯よりも高い殺菌効果を示し、照射距離10 cm以下では無電極UVCと既存UV殺菌灯は同等な殺菌効果だった。紫外線感受性が低い枯草菌芽胞および黒カビ孢子では、無電極UVCは、既存UV殺菌灯と同等以上の殺菌効果だった。

1 はじめに

無電極ランプとは電磁誘導による放電を用いた光源システムで、電極の必要がないことから光源効率が良く、ランプ寿命が長いことを特徴としている^{1) 2)}。国内では製造業者が数社確認できるが、LED照明ほど普及が進んでいないのが現状である。沖縄県においても無電極ランプ製造販売業者が存在し、沖縄県総合運動公園の屋内プールや製造業の工場、物流倉庫などにおける照明器具、すなわち水銀灯の代替照明として、無電極ランプが採用されている。今回、この県内製造業者にて、無電極ランプをベースとした紫外線ランプ（無電極UVC）が開発された。この無電極UVCは、UVC（254 nm）をピーク波長とし、ブレがなく安定していることがわかっているが、詳細な殺菌効果は不明である。そこで本研究では、食品製造業等で活用可能な衛生機器開発を目的に、県内にて製造された無電極UVCの殺菌効果を検討した。

2 実験方法

2-1 供試菌株

供試菌株として、大腸菌は *Escherichia coli* ATCC11229（KWIK-STIK 凍結乾燥微生物ペレット、Microbiologics）、枯草菌芽胞は市販の枯草菌芽胞液（栄研化学、生菌数測定内部精度管理用 枯草菌芽胞液）、黒カビは *Aspergillus brasiliensis* ATCC16404（KWIK-STIK 凍結乾燥微生物ペレット、Microbiologics）を用いた。各菌株の培養は、それぞれの株に適した培地および培養条件（表1）で実施した。

大腸菌および黒カビの凍結乾燥ペレットは、付属の復元液に懸濁後、寒天培地へ塗布し復元した。復元後は斜面培地にて培養し、冷蔵保存した。枯草菌芽胞液は、そのまま冷蔵保存した。

表1 試験に使用した培地および培養条件

	大腸菌	枯草菌芽胞	黒カビ
復元および培養用培地	SCDブイヨン (日水製薬)	-	PDA培地 (栄研化学)
照射試験および菌数測定用培地	XM-G培地、 コンパクトドライEC (日水製薬)	標準寒天培地、 コンパクトドライTC (日水製薬)	PDA培地 (栄研化学)
培養条件	35℃、24時間	35℃、48時間	25℃、5日間

2-2 菌液の調製

2-2-1 大腸菌

液体培地5 mLに1～2コロニーを接種、培養したものを種培養液とした。この種培養液を液体培地100 mLに1%量添加、培養し、適宜希釈してUV照射試験用の培養液とした。培養液の菌数は、コンパクトドライECにより培養し計測した。

2-2-2 枯草菌芽胞

枯草菌芽胞液は、適宜希釈してUV照射試験用の芽胞液とした。芽胞液の菌数は、コンパクトドライTCにより培養し計測した。

2-2-3 黒カビ孢子

黒カビ孢子をひと掻き取り、9 mL滅菌生理食塩水へ懸濁後、寒天培地へ塗抹し培養した。寒天培地上に生育した黒カビと90 mL滅菌生理食塩水を、微生物検査用ホモジバグへ入れて2分間均質化した後、不織布を通して得た懸濁液をUV照射試験用の孢子液とした。孢子液中の孢子数は、セルカウタープレート（ワトソン）を用いて計測した。

2-3 UV照射試験

2-3-1 UV殺菌灯および照射装置

UV殺菌灯は、無電極UVC、対照区として殺菌灯GL-15ランプ（紫外線出力15 W、紫外線照度0.051 mw/cm²、東芝、以下GL-15）4本を用いた。これら殺菌灯と照射対象物の距離が変更できるよう、図1のような高さ可変式の照射装置（高さ450 mm×幅620 mm×奥行510 mm）

*¹現鹿児島県立短期大学

を用意し、クリーンベンチ内に設置した。



図1 照射装置

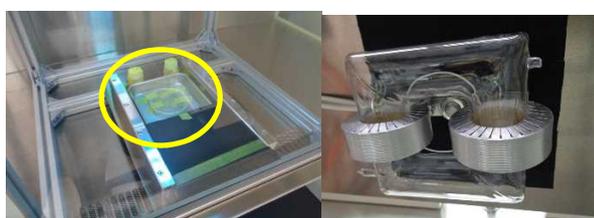


図2 照射対象物を設置している様子(左)と無電極UVC外観(右)

2-3-2 汚染プレートによる照射試験

菌数 $10^3 \sim 10^4$ 個/mL(大腸菌は一部、 10^6 個/mL)の各種菌液50 μ Lを、10 cm四方のステンレス板または各種寒天培地へ塗り広げた後、表面の水気がなくなるまで放置して汚染プレートとした。作成した汚染プレートは、各条件下でUV照射した。

UV照射後、ステンレス板の汚染プレートでは、微生物ふき取り用綿棒(佐藤化成工業所、ワイブチェックTE-302)で表面をふき取り、コンパクトドライを用いた残存菌数の測定を行った。寒天培地の汚染プレートは、そのまま所定の条件で培養し、残存菌数を計測した。

3 実験結果

3-1 ステンレス板の汚染プレートによる照射試験

ステンレス板の汚染プレートへ菌液を塗抹し、ふき取り綿棒での回収率を確認したところ、いずれの菌株においても、安定した回収率が得られなかったため(データ未掲載)、UV照射試験を行うことができなかった。

3-2 寒天培地の汚染プレートによる照射試験

3-2-1 照射距離30 cmにおける殺菌効果

照射距離を30 cmに固定し、大腸菌、枯草菌芽胞および黒カビ胞子の汚染プレートへの照射試験を行った結果をそれぞれ表2~4に示す。

大腸菌の照射試験(表2)では、初発菌数3800個(10^3 個試験区)および623個(10^2 個試験区)に対し、照射時間0、1、2.5、5および10秒で照射した。無電極UVCおよびGL-15のいずれの殺菌灯も、照射1秒では計測不可能、または 10^2 個オーダーの菌数で殺菌率60%台を示し、照射2.5秒以降では異なった殺菌効果が認められた。すなわち、無電極UVCでは照射2.5秒で菌数99および33個、殺菌率97.4および94.7%となり、照射5秒以降はほとんどが0個となった。それに対し、GL-15では2.5秒まで、菌数 10^2 個オーダーで推移し、照射5秒で菌数100および6個、殺菌率97.4および99.1%を示し、照射10秒で0個となった。また、いずれの殺菌灯においても、 10^3 個試験区は、 10^2 個試験区よりも菌数が減少するのに時間を要していた。

以上より、大腸菌へのUV照射においては、いずれの殺菌灯でも照射1秒で半数以上が死滅し、無電極UVCは照射2.5秒、GL-15は照射5秒で90%以上の殺菌効果が得られることがわかった。

表2 照射距離30 cmにおける大腸菌の生菌数および殺菌率

		生菌数cfu(殺菌率%)				
		照射時間(秒)				
		0	1	2.5	5	10
無電極	10^3 個区	3800 (0.0)	UC* (-)	99 (97.4)	1 (>99.9)	0 (100.0)
	10^2 個区	623 (0.0)	192 (69.0)	33 (94.7)	0 (100.0)	0 (100.0)
GL-15 (4本)	10^3 個区	3800 (0.0)	UC (-)	498 (86.9)	100 (97.4)	0 (100.0)
	10^2 個区	623 (0.0)	220 (64.6)	132 (78.8)	6 (99.1)	0 (100.0)

※UC: コロニー多数のため、計測不可能

枯草菌芽胞の照射試験(表3)では、初発菌数6500個(10^3 個試験区)および405個(10^2 個試験区)に対し、照射時間0、15、30、60、120および240秒で照射した。無電極UVCの 10^3 個試験区と 10^2 個試験区では、照射15秒の菌数がそれぞれ105および12個、殺菌率は97.1および98.4%を示した。照射30秒では、菌数63、7個となり、120秒まで同じオーダーを推移後、240秒で3および0個となった。GL-15の 10^3 個試験区は、照射30秒までコロニー多数のため計測不能、照射60秒の菌数は281個、照射240秒では76個となり、それぞれ殺菌率は95.7、98.8%を示した。GL-15の 10^2 個試験区では、照射15秒の菌数が59個、照射120秒まで 10^1 個オーダーを推移し、照射240秒における菌数は1個となった。殺菌率が90%以上となったのは、照射60秒の93.0%だった。

以上より、枯草菌芽胞へのUV照射において、無電極UVCは照射15秒、GL-15は照射60秒で90%以上の殺菌効果が得られることがわかった。

表3 照射距離30 cmにおける枯草菌芽胞の生菌数および殺菌率

		生菌数cfu (殺菌率%)					
		照射時間(秒)					
		0	15	30	60	120	240
無電極	10 ³ 個区	6500	105	63	54	47	3
		(0.0)	(98.4)	(99.0)	(99.2)	(93.7)	(99.9)
	10 ² 個区	405	12	7	6	1	0
		(0.0)	(97.1)	(98.3)	(98.4)	(99.9)	(100.0)
GL-15 (4本)	10 ³ 個区	6500	UC	UC	281	150	76
		(0.0)	(-)	(-)	(95.7)	(97.7)	(98.8)
	10 ² 個区	405	59	47	29	12	1
		(0.0)	(85.6)	(88.5)	(93.0)	(97.2)	(99.9)

黒カビ胞子の照射試験(表4)では菌数が多い場合、細菌よりも寒天培地上でのコロニー計測が困難となるため10²個試験区のみ実施し、初発菌数361個、照射時間0、30、60、120、240および480秒で照射した。その結果、無電極UVCでは、照射30秒、60秒の菌数が33、4個となり、照射120秒で0個を示した。殺菌率は、照射30秒で90.8%となった。GL-15では、照射30秒の菌数が115個で10²個オーダーを推移した。照射60、120秒では菌数が37、2個、殺菌率が89.8、99.5%を示した。その後照射240秒で0個となった。

以上より、黒カビ胞子へのUV照射において、無電極UVCは30秒照射、GL-15では120秒照射で90%以上の殺菌効果が得られた。

表4 照射距離30 cmにおける黒カビ胞子の生菌数および殺菌率

		生菌数cfu (殺菌率%)					
		照射時間(秒)					
		0	30	60	120	240	480
無電極	361	33	4	0	0	0	
	(0.0)	(90.8)	(99.0)	(100.0)	(100.0)	(100.0)	
GL-15 (4本)	361	116	37	2	0	0	
	(0.0)	(67.7)	(89.8)	(99.5)	(100.0)	(100.0)	

3-2-2 照射距離5、10、20 cmにおける殺菌効果

3-2-1の結果を参考に照射時間を2〜3点に絞り込み照射試験を行った結果を、表5〜7に示す。

大腸菌の照射試験(表5)では初発菌数20万個で、照射時間1、2秒で照射した。その結果、照射距離20 cm以外の全ての条件において、99.9%以上の殺菌率を示した。照射1秒、照射距離10 cmにおいて、無電極UVCとGL-15で生菌数に違いが見られたが、初発菌数10⁵個オーダーであるため、いずれも殺菌効果は高いと言える。照射距離20 cmでは、いずれもコロニー多数で計測不能であったため、殺菌効果を明らかにできなかった。

枯草菌芽胞の照射試験(表6)では初発菌数389および272個で、照射時間1、10および20秒で照射した。無電極UVCでは、照射1秒の照射距離5 cmと、照射10秒のすべての照射距離にて、殺菌率90%以上を示し、照射20秒ではすべての照射距離で、殺菌率100%となった。GL-15では、照射10秒の距離10および5 cmと、照射20秒

のすべての照射距離で、90%以上の殺菌率を示した。また照射1秒における殺菌率は、無電極UVCで15.5〜96.8%に対し、GL-15で0.0〜57.0%と、無電極UVCで殺菌効果が大きくなる傾向が見られた。

黒カビ胞子の照射試験(表7)では初発菌数315個で、照射時間15、30、60秒で照射した。ただし照射距離5 cmにおいては、照射60秒の試験は実施しなかった。無電極UVCでは、照射30秒の距離10 cmおよび照射60秒の距離20 cmにて、殺菌率90%以上を示した。また照射距離5 cmでは、すべての照射時間で殺菌率100%となった。GL-15では、照射30秒、60秒の距離10、20 cmにて殺菌率90%以上を示した。

表5 照射時間1、2秒における大腸菌の生菌数および殺菌率

		生菌数(cfu)		殺菌率(%)	
		無電極	GL-15(4本)	無電極	GL-15(4本)
(初発菌数)		200000	200000	100.0	100.0
照射1秒					
照射距離20cm		UC	UC	-	-
10	6	107	100.0	99.9	
5	0	1	100.0	100.0	
照射2秒					
照射距離20cm		UC	UC	-	-
10	0	0	100.0	100.0	
5	0	0	100.0	100.0	

表6 照射時間1、10、20秒における枯草菌芽胞の生菌数および殺菌率

		生菌数(cfu)		殺菌率(%)	
		無電極	GL-15(4本)	無電極	GL-15(4本)
(初発菌数)		389	272	100.0	100.0
照射1秒					
照射距離20cm		330	271	15.5	0.0
10	93	121	76.2	55.2	
5	12	116	96.8	57.0	
照射10秒					
照射距離20cm		25	34	93.6	87.3
10	11	26	97.1	90.2	
5	3	18	99.2	93.5	
照射20秒					
照射距離20cm		0	20	100.0	92.7
10	0	5	100.0	98.3	
5	0	2	100.0	99.1	

表7 照射時間15、30、60秒における黒カビ胞子の生菌数および殺菌率

		生菌数(cfu)		殺菌率(%)	
		無電極	GL-15(4本)	無電極	GL-15(4本)
(初発菌数)		315	315	100.0	100.0
照射15秒					
照射距離20cm		200	290	35.5	9.4
10	99	153	68.1	52.2	
5	0	46	100.0	85.7	
照射30秒					
照射距離20cm		33	123	89.4	61.7
10	2	8	99.4	97.5	
5	0	1	100.0	99.7	
照射60秒					
照射距離20cm		4	2	98.8	99.4
10	0	1	100.0	99.7	
5	-	-	-	-	

4 考察

実験結果をもとに、殺菌率90%以上の効果が得られる照射距離と照射時間を得た（表8）。

紫外線感受性の高い大腸菌では、照射距離30 cmにおいて無電極UVCで殺菌効果が高く、照射距離10 cm以下では無電極UVCとGL-15は同等な殺菌効果が得られた。紫外線感受性が低い枯草菌芽胞および黒カビ胞子においては、無電極UVCはGL-15と比較して同等以上の殺菌効果が得られた。

表8 汚染モデル菌3種を90%以上殺菌する照射時間（初発菌数 $10^2 \sim 10^3$ 個）

	(秒)					
	無電極ランプ			GL-15ランプ		
	大腸菌	枯草菌芽胞	黒カビ	大腸菌	枯草菌芽胞	黒カビ
照射距離30cm	2.5	15	30	5	60	120
照射距離20cm	不明*	10	60	不明*	20	60
照射距離10cm	1*	10	30	1*	10	30
照射距離5cm	1*	1	15	1*	10	30

※初発菌数 10^5 個に対する殺菌効果を示す。

紫外線殺菌については、これまで様々な研究が行われており、微生物ごとの必要殺菌線量も明らかにされている^{3)~5)}。本試験では、照度計による紫外線照度を計測することができなかったため、照射距離ごとのデータを得たが、距離ごとの紫外線照度の計測と殺菌線量の算出を行い、無電極UVCの特徴をさらに明確にすることが今後の課題であると考えられる。

紫外線殺菌は表面、水、空間殺菌を目的に、様々な分野へ応用されているが、照射距離やランプの配置なども重要であり、病室での病原性細菌への有効性⁶⁾や空調機内部における殺菌灯の配置⁷⁾など、効率的な照射方法を検討した報告がある。食品工業への応用としては、包材や食品自体への照射試験等の報告⁸⁾があり、紫外線による商品の変質が課題として挙げられる。無電極UVCでは、既存殺菌灯よりも発光面積が大きいこと、コンパクトな形状であることから、今後の応用が期待される一方、既存殺菌灯よりも254 nm波長が強く、安定して発光するため、対象物への影響なども慎重に明らかにしていく必要がある。

5 まとめ

無電極UVCの製品化を目的に、殺菌効果の検討および同等の出力数となる既存殺菌灯4本との比較を行った。その結果、紫外線感受性が高い大腸菌、紫外線感受性が低い枯草菌芽胞および黒カビ胞子に対し、90%以上の殺菌率が得られる照射距離と殺菌時間を明らかにした。ま

た、無電極UVCは、既存殺菌灯4本と比較して同等以上の殺菌効果を有することがわかった。

本研究は、令和3年度企業連携共同研究開発支援事業の研究課題「無電極UVCランプを用いた衛生機器の開発（2021技012）にて実施した。

参考文献

- 1) 石神敏彦, 無電極ランプの現状と将来, 照明学会誌, **85**(9), 764-768(2001).
- 2) 井上昭浩, 無電極ランプとその応用, 照明学会誌, **81**(7), 554-557(1997).
- 3) パナソニックホームページ：
<https://www2.panasonic.biz/ls/lighting/plam/knowledge/document/0320.html> (2022.7)
- 4) 石井泰造監修, 微生物制御実用事典, フジテクノシステム, 376-399(1993).
- 5) 芝崎勲監修, 有害微生物管理技術第1巻, フジテクノシステム, 730-738(2000)
- 6) 小坂ら, 日本外科感染症学会雑誌, **17**(3), 104-111(2020)
- 7) 瓜生ら, 空調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (2019)
- 8) 吉川ら, 北海道立食品加工研究センター報告, **6**, 23-30(2005)

Germicidal effects of electrodeless UVC lamps

Tomoyo MOCHIZUKI, Arina MATSUMOTO, Naoto HIROSE*¹

Okinawa Industrial Technology Center

*¹Okinawa Industrial Technology Center (currently Kagoshima Prefectural College)

To commercialize electrodeless UVC lamps (UV output of 60 W, Kasai-Elec Inc.; hereinafter referred to as electrodeless UVC) developed based on electrodeless lamps manufactured and marketed in Okinawa Prefecture, the germicidal effects of the electrodeless UVC and four existing UV germicidal lamps were evaluated against three strains of contamination model bacteria, i.e., *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* spores, and *Aspergillus brasiliensis* spores. Results identified the radiation distance and germicidal time associated with the effectiveness exhibiting an inactivation rate of $\geq 90\%$. In *Escherichia coli*, which was highly UV-sensitive, the electrodeless UVC showed a greater germicidal effect than existing UV germicidal lamps at a radiation distance of 30 cm, but showed a comparable germicidal effect to existing UV germicidal lamps at a radiation distance of ≤ 10 cm. In *Bacillus subtilis* spores and *Aspergillus brasiliensis* spores, which were less UV-sensitive, the electrodeless UVC showed a germicidal effect that was comparable to or greater than that of existing UV germicidal lamps.

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。