

紫外線照射による農産物の貯蔵に関する研究

I. 紫外線照射装置の試作について

団野皓文・宮里 満・石黒悦爾・中山高秀

(農業物理学研究室)

昭和55年8月9日 受理

Studies on the Preservation Effect on Agricultural Products by the Irradiation of Ultraviolet Ray

I. Construction of Experimental Irradiation Apparatus

Akibumi DANNO, Mitsuru MIYAZATO, Etsuji ISHIGURO and Takahide NAKAYAMA
(Laboratory of Agricultural Physics)

緒 言

紫外線の殺菌効果は日光消毒などによって経験的によく知られている。その紫外線の中でも 200~280nm の波長は特に強い殺菌効果がある。紫外線はX線や γ 線に比べてエネルギーの低い電磁波であるから、特定の化学結合に選択的に作用し、分子をイオン化あるいは励起する作用がある。このように変化を受けた分子は、細胞内の核蛋白構造を破壊し微生物を殺菌することができる⁹⁾。

紫外線はエネルギーの低い電磁波であるから、透過力は小さく、従って物質に吸収されやすいが、空気の殺菌あるいは物質の表面殺菌に効果的である。しかし、これまでの食品工業における紫外線の利用は、(1)加工・貯蔵室内の空気殺菌、(2)使用水の殺菌、および(3)調理器具の殺菌に应用されているにすぎない^{2,3,4,6,7,8)}。

食品の貯蔵には加熱処理または薬剤処理による殺菌が行われてきた。加熱処理は生鮮食品の品質を劣化させ、また薬剤処理は食品に有害な添加物を与えるなど問題が多い。これに反して、紫外線殺菌は生鮮食品にほとんど熱的影響を与えず、また薬剤等の残留公害はまったく無いという長所を有する^{8,9)}。

現在市販されている紫外線灯は、主として波長 253.7nm の紫外線を放射しており、この付近の波長は最も殺菌力が強い。最近、特に大出力・高効率の紫外線灯が利用できるようになり、その食品工業への応用が期待される。特に、果実・野菜あるいは鮮魚などの生鮮食品の表面に附着している微生物を殺菌し、その

貯蔵期間の延長を図るのを目的とする紫外線殺菌の研究は行われていないので新しい分野である。

紫外線照射装置は紫外線灯を4本用い、しかも1~4本まで点灯数を変えられるようにしたものである。装置内の紫外線の線量率は広範囲に変化し得るように設計の基準を設けた。

試作した紫外線照射装置内の線量率の測定はジアゾ感光紙を用い、紫外線照射後の感光紙の色の変化により行った。また、微生物について紫外線照射実験を行い、生存曲線を測定し、これから微生物の殺菌線量の決定に必要な D_{10} 値を求めた。

紫外線照射装置の構造

1. 紫外線灯

紫外線灯は低圧水銀灯で、水銀の共鳴波長 253.7nm の紫外線を多量に放射するものである。また紫外線を放射する効率は紫外線灯の定格電力が大きくなるほど高くなっている⁹⁾。

実験に使用した紫外線灯はウシオ電機社製の ULI-45DL2 型で、定格電力 45W、紫外線放射の有効長さ 450mm、管径 20mm ϕ 、波長が 253.7nm の紫外線出力 15W、定格電圧 100V である。

この紫外線4本を本照射装置の上部に 40mm 間隔で、また上部からの距離が 30mm の位置につり下げ、下方照射とした。

2. 配線図

Fig. 1 に紫外線照射装置の配線図を示す。光源として用いた4本の紫外線灯は並列に接続し、またおのおの紫外線灯は個別に点灯できるように、安定器と

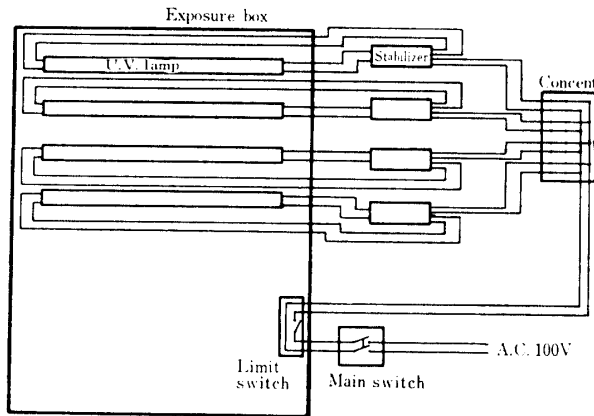


Fig. 1. Schematic diagram of the irradiation apparatus with its associated electric circuit.

リミットスイッチの間にコンセントを置いて接続した。リミットスイッチは前方に取り付けた扉の開閉により作動するように、扉の下部にセットした。紫外線の照射実験は、メインスイッチの点滅で照射時間を変えて行った。

3. 照射装置の形状

紫外線照射装置は板厚 1mm のアルミ板を側面に張り、その骨組は 20×20mm の鉄製アングルを用いて作った。大きさは10個程度の温州ミカンを同時に照射できる規模として、幅 650mm、高さ 500mm、奥行は上部 350mm、下部 400mm にした。前面に 650×400mm の扉を設け、装置内への試料の出し入れを行えるようにした。照射時の装置内の状態が観察できるように、前扉の中央に 400×200mm の覗き窓を設けた。

4. 試料台

試料台の被照射面は 450×300mm とし、幅は紫外線灯の有効長に等しくした。この被照射面は光源からの距離が 150~400mm まで変えられるように 20×20mm のアングルで格子を組んで試料台を作成した。光源から試料台までの距離を可変としたことにより、被照射面では広範囲な線量率が得られた。

5. 安全対策

紫外線照射装置内の電気配線は紫外線による劣化を防ぐためアルミ板で覆いを作り、紫外線の直射を受けないように保護した。安定器、コンセント、メインスイッチは装置側壁の外側に取り付けた。

紫外線を直接目や皮膚に受ると炎症を生じることがあるので⁴⁾、人体へのこのような影響を防止するため次のような対策を講じた。

(1) リミットスイッチ：紫外線灯を点灯中誤って扉を開けても、紫外線によって目や皮膚が被曝するとい

う事故を防止するため、扉の下部にリミットスイッチを取り付け、扉開放時の電流を遮断するようにした。リミットスイッチは立石電業社製の Z15GW255 型で、動作距離 5mm、定格 100V、15A である。

(2) 覗き窓：紫外線を十分遮蔽するようにガラス板の厚さは 5mm とした。

紫外線照射装置の性能

1. 線量率の計算

紫外線灯の定格電力を W [W]、紫外線放射期効長さを $2L$ [cm]、紫外線への変換効率を η とすると、紫外線の強さ I は、

$$I = \eta \cdot W$$

となる。

紫外線灯はすべての方向に等しい強さで紫外線を放射する。いま、単位長さ、単位方向あたりの紫外線の強さを dI_θ とすると、線源の強さ I は、

$$I = \int_0^{2L} \int_0^{4\pi} dI_\theta d\theta dx$$

と表わすことができる。

Fig. 2 に示すように、紫外線灯中心からの垂直距離が h [cm] なる点 P の紫外線灯に平行な面での直射照度 E は、 dI_θ からの距離を r [cm] とすると次式で求められる。

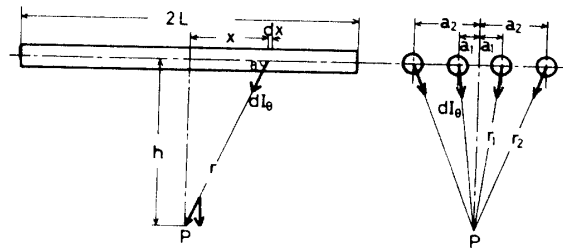


Fig. 2. Arrangement of ultraviolet lamps in the irradiation-apparatus.

$$E = 2 \int_0^L \frac{dI_\theta \sin \theta}{r^2} dx$$

$$= \frac{2L dI_\theta}{h \sqrt{h^2 + L^2}}$$

灯数が 4 本の場合、点 P への距離をそれぞれ r_1 、 r_2 とおいた時の照度を E_1 、 E_2 とすると $2E_1$ 、 $2E_2$ の和で与えられる。

以上より、紫外線灯が 1~4 本の光源について、定格電力 45W、有効長さ 45cm、紫外線への変換効率 1/3 として、光源からの垂直距離が 15~40cm までの被照射面上の直射照度の計算を行った。

2. 光源からの距離と線量率

Fig. 3 は被照射面の中心における光源からの距離と線量率の関係を示したものである。縦軸は光源からの距離が 15cm の位置の線量率を基準とした相対線量率、横軸は光源からの距離を表わす。光源からの距離が 40cm の範囲内では、相対線量率は紫外線灯の本数にかかわらず、距離の二乗にほぼ反比例して減少した。

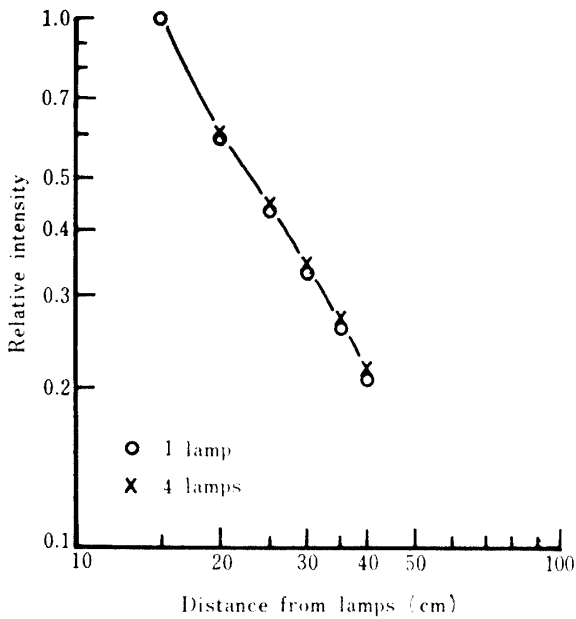


Fig. 3. Calculated relative intensities as a function of distance from ultraviolet lamps.

3. 被照射面上の線量率の分布

Fig. 4 は光源からの距離が 25cm の位置での被照射面上の線量率の分布を示したものである。光源は紫外線灯を 4 本点灯とし、被照射面の中心に対する相対線量率を計算で求めた。相対線量率が90%以上の範囲は、中心よりの半径が約 12cm の円内である。しかし、被照射面の端では60%にも低下し、紫外線の指向性があることが示された。

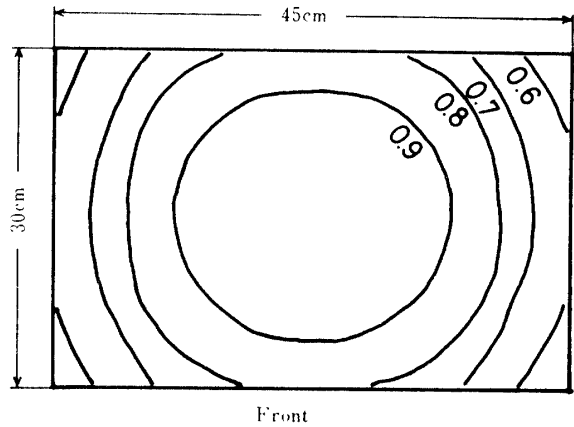


Fig. 4. Relative intensity distributions on the irradiation table under the irradiation of 4 ultraviolet lamps at 25cm.

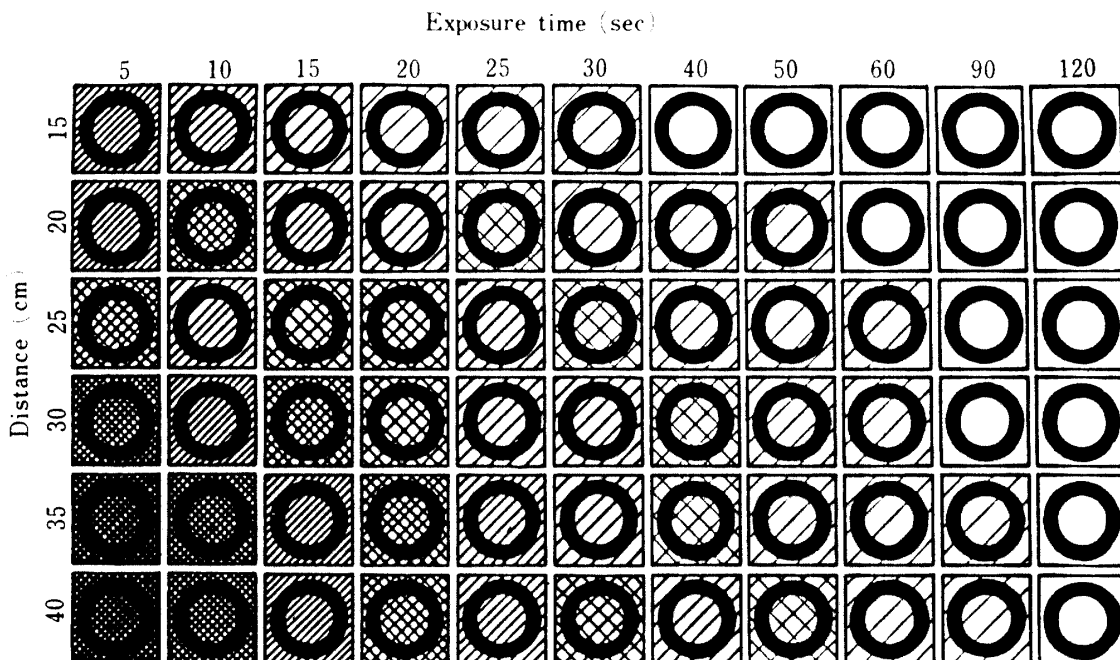


Fig. 5. Relative intensities measured by blue films under their radiation of 4 ultraviolet lamps.

紙上には薄い鉄製の中空円板（外径 25mmφ，内径 12mmφ）を置き，感光部分と非感光部分とを対比させる照射を行った。照射直後，感光紙は所定の現像液（リコー株式会社，リコージアゾ現像液 SD）で一定時間現像を行った。

Fig. 5 は紫外線灯を 4 本点灯し，感光紙を被照射面の中心に置いて照射した場合の感光度の変化を示したものである。中空円板で紫外線を遮断された非感光部分は，すべての照射条件に対して一定の色を示した。感光部分は照射時間が一定の場合には光源からの距離が遠くなるにつれて感光度は低下し，非感光部との感

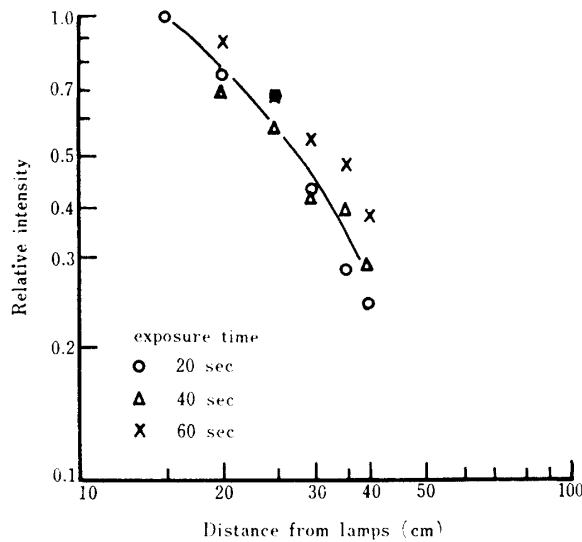


Fig. 6. Relative intensities measured by blue films as a function of distance from 4 ultraviolet lamps.

光度の差はだんだんと少なくなった。また一定距離で照射を行うと照射時間が長くなるにつれて次第に感光されてきた。しかし90秒以上の照射を行うと感光度は飽和し距離による色の変化は認められなくなった。

Fig. 5 の色の変化より，光源から 15cm の距離を基準とした距離に対する相対線量率の変化を Fig. 6 に示す。20秒照射を行った場合は Fig. 3 に示した計算による線量率の変化と傾向が一致した。しかし40秒と60秒照射の場合は，感光度が進みすぎて相対的な色の判別が困難であったため，20秒照射の場合の相対線量率の変化に一致せず，バラツキを生じた。

4. 水による紫外線の吸収

水による紫外線吸収の測定は水槽中に感光紙を置き，水槽中の蒸留水の水深を変えて行った。感光紙は 0.1 mm の厚さのポリエチレンフィルムで密閉し，水にぬれないようにして用いた。Fig. 7 に紫外線灯を 4 本点灯し，光源からの距離が 25cm，蒸留水の深さを 1~7cm まで変えて照射を行った場合の感光紙の色の変化を示す。Fig. 5 の場合と同様に照射時間が長くなるにつれて感光度は進み，水深が増すにつれて感光度は低下した。しかし 120 秒照射の場合，水深が 7cm まで水の深さに関係なく色の変化は同じとなった。

Fig. 8 は横軸に蒸留水の水深，縦軸に水深 0 の場合を基準にした相対感光度を対数目盛で表わしたものである。照射時間が20秒，40秒，60秒の場合を示した。いずれの照射時間の場合もほとんど同一直線上にあることが示された。これより紫外線の水中における強度

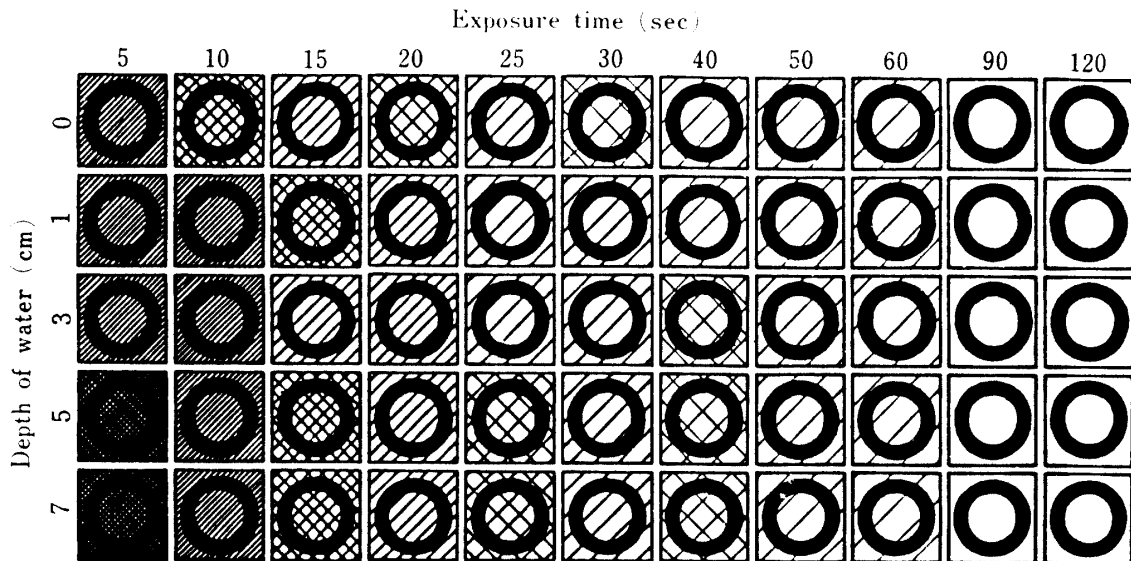


Fig. 7. Relative intensities measured by blue films in water under the irradiation of 4 ultraviolet lamps at 25cm.

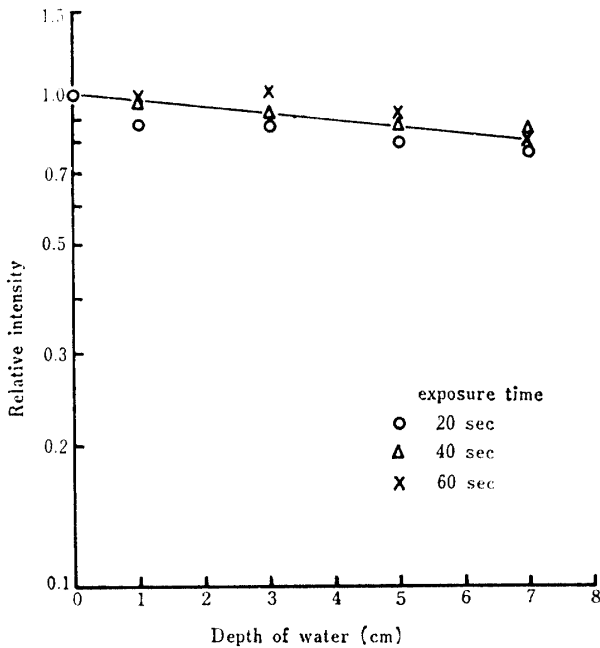


Fig. 8. Relative intensities measured by blue films in water as functions of exposure time and the depth of water under the irradiation of 4 ultraviolet lamps at 25 cm.

は水深が増すにつれて指数的に減少するが、この直線の勾配から求められる紫外線の蒸溜水中の透過率は大きいことが示された。即ち、蒸溜水中では紫外線の吸収は極めて少なく、水深 1cm の蒸溜水中では97%の紫外線が透過するという結果が得られた。

以上の結果より、今後微生物の紫外線殺菌を行う場合、微生物を蒸溜水で希釈し、シャーレ上に滴下させて照射を行っても紫外線強度の減少は極めて少なく、このような方法による照射が可能であることが示された。

紫外線照射実験

この紫外線照射装置の性能を試験するため2種類の酵母菌 (*Saccharomyces cerevisiae* IFO2193, *Candida utilis* IAM4215) について殺菌の予備実験を行った。

1. 照射方法

所定の方法に従って^{5,9)} 酵母菌を希釈し、予め無菌的に作成しておいたシャーレ中の PDA 培地上に希釈した試料液を 1ml 滴下した。このようにして作成した試料を、紫外線照射装置で、種々の照射時間で照射を行った。照射後試料を培養し、試料中に発生したコロニーを計測した。30~300 個のコロニーが発生した試料のみを計測し、その平均に希釈倍率を乗じて、検体

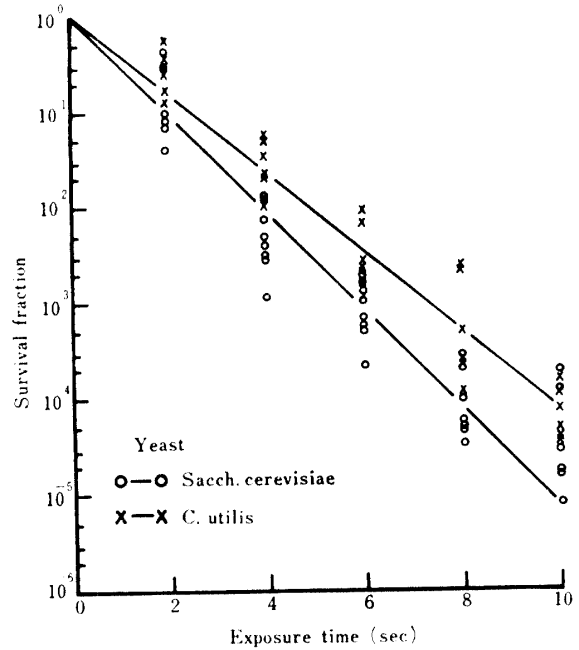


Fig. 9. Survival curves of Yeasts under the irradiation of 4 ultraviolet lamps at 25cm.

1ml 中の生菌数として算出した^{5,9)}。

2. 生存曲線および D₁₀ 値

Fig. 9 に4本の紫外線灯を点灯し、光源から 25cm の距離で酵母菌の照射を行った場合の生存曲線を示す。縦軸は生存率を対数目盛で示し、横軸は照射時間を示す。生存曲線は最小二乗法で決定した。*Sacch. cerevisiae*, *C. utilis* の生存曲線はともに直線で示され、生存率は照射時間が増すにつれて指数的に減少することが示された。

紫外線灯は一定の管壁温度に達しないと安定な強度の紫外線を放射しない。そこで、実験前に30分間の予備点灯を行って照射を開始したが、照射時間が非常に短かいため、予備点灯の効果があまり見られず、この結果生存率にバラツキを生じたと思われる。

Table 1 に2種類の酵母菌の D₁₀ 値を示す。D₁₀ 値

Table 1. Exposure-time of D₁₀ for Yeasts under the irradiation of 4 ultraviolet lamps at 25cm

Yeast	Exposure-time (sec.)	D ₁₀ (μW sec./cm ²)
Sacch. cerevisiae	1.9	6300 (Kawamoto, 1970)
		3300 (Saito, 1974)
C. utilis	2.1	—

は実験より *Sacch. cerevisiae* 1.9秒, *C. utilis* で 2.1秒と非常に短い時間となった。また *Sacch. cerevisiae* は文献値を併記した^{4,6)}。

D_{10} 値は照射後の生存菌数が照射前の対象とする菌数の 1/10 に減少させるに必要な線量や処理時間を示すものである⁸⁾。従って D_{10} 値の 3 倍の処理時間で照射を行うと、菌数は照射前の 10^{-3} に減じ、農産物の貯蔵期間を延長することが可能となる。本実験より酵母菌を、 10^{-3} に減少させるに必重大処理時間は、*Sacch. cerevisiae* 5.7 秒, *C. utilis* 6.3 秒と非常に短時間であることが示された。

以上のことより、試作した紫外線照射装置は光源が指向性を有し、被照射面は均一な線量率の分布とならなかった。しかし微生物の殺菌は短時間でできるのが非常に有効であることが示された。今後は線量率計の使用により装置内の線量率を実測し、これら 2 つの酵母菌の D_{10} 値の線量を決定する。更に他の微生物の照射実験を行って、実際の農産物の貯蔵期間の延長についての研究を行う計画である。

要 約

紫外線は食品に附着する微生物の生育を抑制したり殺菌することにより、食品の品質を変えることなくかなりの期間貯蔵することが可能である。本研究は農産物の貯蔵を研究するため、253.7nm の波長を有する大出力の紫外線照射装置の試作を目的とした。照射装置は 45W の紫外線灯を 4 本光源として用いた。試料は

紫外線灯の下の照射台上に置いて、光源と照射台の距離を変えて照射できるようにした。装置内の紫外線の線量率分布は感光紙の感光度を用いて測定し、計算値と比較した。*Sacch. cerevisiae* と *C. utilis* の酵母菌を照射し、生存曲線とこれらの酵母菌の D_{10} 値を求めた。

謝 辞 本研究を行うにあたり、微生物の希釈培養法について助言を賜った鹿児島大学農学部有村光生、小林武一の両氏に深甚の謝意を表するとともに、実験に協力していただいた三原修氏に感謝します。

文 献

- 1) 電気学会通信教育会：照明工学。p. 198-209, 電気学会, 東京 (1965)
- 2) 原田常雄：殺菌燈。照明学会雑誌, 36, 23-28 (1947)
- 3) 堀内辰男：紫外線による無菌水確保システム化の現状と問題点。食品工業, 17, 29-35 (1974)
- 4) 河本康太郎：紫外線による空気殺菌法とその効果。食品工業, 13, 33-40 (1970)
- 5) 正子 朔：微生物に対する放射線照射の影響。p. 9-30, 京都大学農学部植物病理学研究室業績特別発表, 14, (1961)
- 6) 齊藤民雄：紫外線による水殺菌装置の現状と問題点。食品工業, 17, 36-42 (1974)
- 7) 芝崎 勲：食品殺菌工学。p. 286-290, 光琳書院, 東京 (1967)
- 8) 芝崎 勲：食品の殺菌技術とその装置。食品工業, 20, 20-28 (1977)
- 9) 好井久雄, 金子安之, 山口和夫：食品微生物学。p. 405-425, 技報堂出版, 東京 (1976)

Summary

By destroying or inhibiting the growth of microorganisms in food, ultraviolet ray has been noted to be capable of preserving the quality of a number of food items in their original states for considerable periods of time. What the present study aims is to construct an experimental irradiation apparatus of ultraviolet ray with a wavelength of 253.7 nm in a large capacity to be used for the investigation of the preservation of agricultural products.

The irradiation apparatus assembled with 4 ultraviolet lamps, each of 45 W, was constructed. Samples were irradiated on an irradiation table under the lamps. Distance between the lamps and the irradiation table could be adjusted.

Intensity distribution of ultraviolet ray in the apparatus was measured in accordance with the blackness of blue films, and then the intensities were compared with the culculated ones. With the use of this apparatus, several kinds of yeasts, such as *Saccharomyces cerevisiae* and *Candida utilis*, were irradiated. Survival curves and D_{10} values of these yeasts were measured.