

(10) 紫外線照射処理および紫外線－光触媒処理における細菌の光回復

Photoreactivation Following UV Disinfection and UV with Photocatalyst Reactor

大瀧雅寛*、鹿島田浩二**、石渡淳***、赤井田悟史****、大垣眞一郎*
Masahiro OTAKI, Kouji KASHIMADA, Jun ISHIWATA, Satoshi AKAIDA, Shinichiro OHGAKI

ABSTRACT ; Recently, UV disinfection process is thought to be an alternative disinfection process. The application to real sewage treatment have been realized in several cases. Even though this technology has many advantages, it also has some defects. One of them is the photoreactivation which happens under visible light irradiation following UV inactivation. There are three main objects in this research. First is to compare the photoreactivation after different type of UV light which are emitted from low pressure mercury UV lamp (conventional one) and medium pressure UV lamp (invented recently). Second is to investigate the effect of irradiated UV dose and irradiated visible light intensity to photoreactivation rate. Third is to investigate the inhibition effect of photocatalysis to photoreactivation.

By using bioindicator methods, intensity of different UV lamp was standardized as germicidal UV intensity and they can be compared. It is observed that the difference of photoreactivation effect after both UV lamps was negligible. The photoreactivation rate was independent on the irradiated UV dose in both UV lamp cases. On the other hand, the photoreactivation rate has liner relationship with visible light intensity. The inhibition effect of photocatalysis to photoreactivation was observed. The contact efficiency of target bacteria to photocatalyst was the key of this effect.

KEY WORDS ; photoreactivation, low pressure mercury UV lamp, medium pressure mercury UV lamp, germicidal UV intensity, photocatalysis.

1. はじめに

紫外線照射による水の消毒技術は、塩素消毒の代替法として期待されている。紫外線照射処理は、従来の塩素注入による消毒手法に比べて、a) 化学薬品の添加がなく過剰注入の心配がない、b) トリハロメタン等の副生成物がない、c) 運転管理が容易である、等の長所をもっている。また処理水中に消毒効果が残存しないことは浄水処理における配水管網中の微生物増殖の抑制効果がないという点からは短所であるが、下水処理において放流後の環境負荷を軽減するという観点からは長所といえる。現在、欧米を中心に紫外線照射処理を実処理に導入する例が多数報告されている¹⁾²⁾。日本においては小規模下水処理水の消毒手法として実用化されている例が数件報告されている。一方、紫外線照射法には解決すべき問題点が残されている。それはi)紫外線吸光物質や濁質の影響を受けやすいこと、ii)ランプの汚れ付着の問題、iii)細菌の光回復、などである⁴⁾。i)の問題点については、消毒前の処理を適切に行うことや、ランプの強度を上げることなどで対応できる。また、ii)の問題については、近年ワイパー等の物理的除去法や薬品洗浄による方法などが様々開発されている。本研究では、iii)の光回復の問題に注目した。これは紫外線照射によって不活化された細菌が、その後自然光等の可視光照射を受けると遺伝子損傷が修復されて増殖能を回復するという現象である。この光回復現象の解明は、紫外線照射法の実プラントへの適用にあたって重要な課題の一つといえる。

光回復はKelner (1949) ⁵⁾によって放線菌*Streptomyces*属について発見された。紫外線照射による微生物の不活化は、紫外線光子によってDNA、RNA内の塩基が二量体を形成することによって起こる。光回復とは可視光照射下で細胞内で生産される光回復酵素の働きにより、いったん形成された二量体が開裂してDNA、RNAが正常な状

*東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻

**荏原製作所上水道事業部

***東京都水道局第二支所配水課

****鹿児島県庁

態にもどり細胞がその増殖活性を回復する現象である。

これまで、報告されている環境工学分野における光回復についての研究は、日本では神子ら（1987）⁹⁾の糞便性大腸菌群を用いた紫外線照射線量と最大光回復量の関係および時間経過による光回復能の変化についての研究、佐々木ら（1993）⁷⁾の中圧紫外線ランプと低圧紫外線ランプを用いた場合の光回復能の比較実験、鹿島田ら（1996）⁸⁾の異なる細菌種による光回復能の比較実験などがある。カナダ・オンタリオ州のガイドライン⁹⁾では光回復効果は紫外線消毒において無視できるとされている。しかし、一方ではカリフォルニア州政府に提出された National Water Research Institute の紫外線照射法に関するガイドライン案¹⁰⁾のなかでは光回復は今後の研究課題の一つとして認識されている。

本研究では糞便性汚染の指標として使われている糞便性大腸菌群から単離した大腸菌 *E. coli* を主な対象細菌とした。また、紫外線光源として中圧紫外線ランプと低圧紫外線ランプを用いて、二つのランプの殺菌効率および光回復の比較評価手法の検討、可視光強度の光回復速度への影響に関する研究を行った。

また、高度酸化処理として注目されている光触媒剤を紫外線殺菌装置に導入した場合の光回復抑制効果についても検討を行った。既存の研究¹¹⁾¹²⁾によれば、二酸化チタンを用いた光触媒はチタンが紫外光を吸収した際に生じる電子と正孔の生み出す酸化還元電位が元になっており、水中での反応はこの酸化還元電位によって生じる・OH（ヒドロキシラジカル）が主な役割を担っていると考えられている¹³⁾。そのため光触媒を用いた微生物の不活化の場合、その機構はオゾンや過酸化水素による不活化機構に近いと考えられている。従って、光触媒による微生物の不活化を効率的に紫外線処理に導入することができれば、光回復能の抑制に多大な効果があると期待される。光触媒反応において触媒表面で生成する・OH（ヒドロキシラジカル）は、オゾンや過酸化水素に比べて寿命が短いので、光触媒表面近傍でしか反応が起こらない。従って、光触媒表面と細菌との接触効率を上げることが光触媒反応効率を上げるための一つの方法であると考えられる。

2. 実験方法

2.1 紫外線照射装置

紫外線照射装置は図1に示したように市販の二重円筒管型紫外線殺菌装置を用いた。光源としては低圧水銀ランプ（三共社製UVステリトロン、100V、0.34A）と中圧水銀ランプ（Hanovia社製、155V、2.3A）の2種類を用いた。試料はシャーレに入れて気泡の入らないよう石英ガラスで蓋をし、スターラーで攪拌しながら紫外線ランプの円筒ケースの監視用窓から出る紫外線を照射した。照射する紫外線線量Dは照射時間を変えることによって調節した。ランプの光強度（紫外線線量率

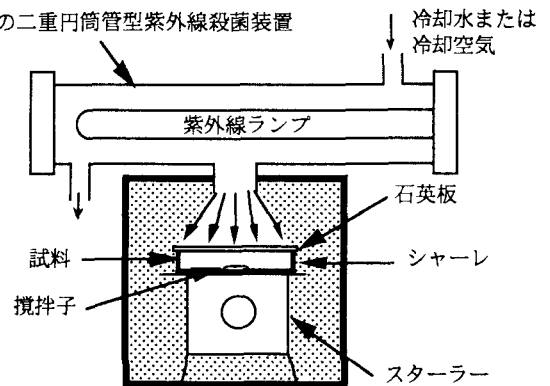


図1 紫外線照射装置

U) は温度に依存するので、低圧ランプの場合は空気を用いて、中圧ランプの場合は水を用いて冷却した。どちらもランプ点灯後30分以上後に温度が一定になってから実験を行った。紫外線を照射した後直ちに試料をアルミホイルで包んだ蓋で覆い、濃度測定まで可視光線が当たるのを防いだ。実験器具の殺菌はシャーレは180℃で30分以上の乾熱滅菌、スターラーは121℃で15分の加圧蒸気滅菌、石英ガラスは紫外線照射による。

2.2 紫外線線量率の定量

低圧と中圧の紫外線ランプは共に殺菌紫外線（254nm）を持つが、その照射スペクトルはランプに封入されている水銀の圧力によって決まる。本実験において使用したランプについては、低圧ランプは254nmのみの単波長照射

であるのに対し、中圧ランプは200～400nmの広い照射波長域を持っている¹⁴⁾。

通常紫外線ランプの線量率の測定には、紫外線線量計が用いられる。しかし紫外線線量計は254nm付近の光量のみを測定しているものであるため、単波長照射である低圧ランプの照射エネルギー評価には使えるが、広波長照射である中圧ランプの照射エネルギー評価には適さないと考えられる。また、試料への入射光の測定はできるが、装置の照射死角部分も考慮した試料全体に照射されるエネルギー量の測定には適さない。そこで本研究では微生物の不活化効率からエネルギー量を算定する生物学的線量計測定法を用いることにより、中圧と低圧ランプの照射エネルギーを殺菌に効果のある紫外線線量率として評価し比較することにした。この方法は太陽菌ファージの一種であるRNAファージQβの不活化率を測定して、殺菌に有効紫外線線量率を算定する方法である。ファージQβは次式(1)で表されるような一次式で不活化することがわかっている¹⁵⁾。

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-f \cdot U \cdot t} \quad \dots(1)$$

N_t : 紫外線照射後のファージ濃度[PFU/mL]、 N_0 : 紫外線照射前のファージ濃度[PFU/mL]
 f : ファージの不活化速度定数[cm²/mW/s]、 U : 紫外線照射線量率[mW/cm²]、 t : 照射時間[s]

既存の研究¹⁶⁾により、低圧ランプ(254nmの紫外線光)を用いた実験から速度定数($f=0.17\text{cm}^2/\text{mW/s}$)が得られている。それぞれのランプを用いた場合のファージの不活化率と照射時間を測定し、同一の速度定数を用いて紫外線照射線量率 U を算定すれば、両ランプの照射エネルギーを254nmの殺菌エネルギーに換算して算定することになる。従って、低圧と中圧ランプを統一的に殺菌効果線量を用いて比較することが可能となる。照射する紫外線の線量率及び線量をこの手法で測定した場合、これらを殺菌効果紫外線線量率及び殺菌効果紫外線線量と呼ぶ。また、この手法を用いれば化学線量計と同様に、装置の照射死角部分も考慮した全試料に照射されるエネルギー量の評価もできる。ただし、この方法を太陽菌群の不活化に適用するのは、ウイルスと細菌の不活化機構が同じであるとの仮定に立脚するものであり、本研究の結果はその立証としての意味あいも含んでいる。

2.3 蛍光灯による可視光線照射装置

可視光線は市販されている15Wの蛍光灯2本を用いて図2のように照射した。シャーレは通常のガラスの蓋を用いた。試料は直接ピペットで採水して各時間の細菌濃度を測定した。可視光線線量率はシャーレと蛍光灯との距離を変えることにより調節し、光の強さは波長360nmの線量率 I で評価した。可視光360nm線量率は、線量計

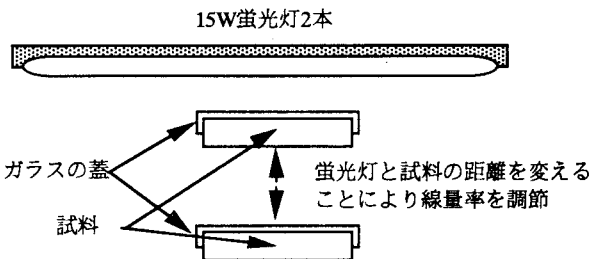


図2 可視光照射装置

(TOPCON社製UVR360)を試料の液表面の位置において、シャーレのガラスの蓋をかけ、センサ

一部分を蛍光灯に向けて測定した。また、対照実験として同じ条件で同量の紫外線線量を照射した試料を照射後暗所に保存し、その微生物濃度の時間変化を測定した。

2.4 可視光線の定量

光回復現象に影響する光の波長は近紫外線域から可視光線域にかけて幅があり、また細菌種によってその感受性も異なる。太陽菌の一種*Escherichia coli* Bの中で紫外線高感受株であるBs-1は波長340～420nmの範囲の光で強い光回復を起こし、380nm付近で相対的光回復効率が最大となることが知られている。今回の実験では、光回復作用を起こす可視光線の強さを表す指標として360nmを用いた。これは、360nmの相対的光回復効率が380nm付近の最大値とほぼ同じ(約90%)であり、かつ360nmの線量率測定器が市販されている理由による。

2.5 固定化光触媒装置

本研究では光触媒として二酸化チタンを用い、紫外線照射装置に導入した場合の光回復抑制効果について検討した。光触媒反応装置は二酸化チタンを薄膜状に固定化させる反応系を用いて行った。固定化反応系は、反応速度が懸濁系に比べて遅いものの、処理後の固液分離を省略することができるという点で工学上有利であると考えられる¹⁰⁾。二酸化チタン剤（石原産業製ST-K03）を内径13.6mm長さ40cmの石英管の内壁にコーティングして薄膜固定化光触媒として用いた。これを図3の様に配置し紫外線を照射した。薄膜固定化光触媒における反応効率は対象物質と光触媒との接触効率が大きく作用する。従って、石英管内の試料を攪拌子によって攪拌した場合、攪拌しない場合を行い、対象細菌と光触媒の接触効率を変えて、不活化された最近の光回復能に与える影響を調べた。光源は低圧紫外線ランプ（東芝製GL20、20W）を用いた。対照実験として二酸化チタンをコーティングしていない石英管を用いて実験を行った。

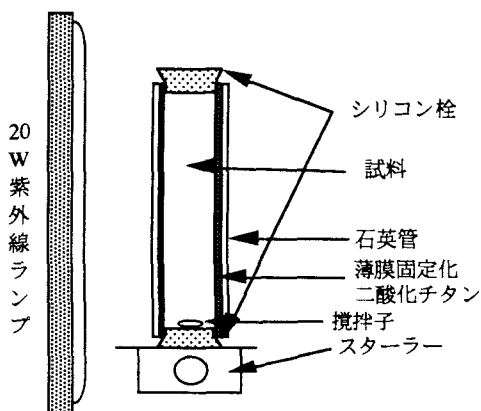


図3 紫外線-光触媒反応装置

2.6 供試した試料

試料は下水処理場流入水（東京都三河島下水処理場）から単離した*E.coli*を用いておこなった。鹿島田ら（1996）⁹⁾によれば、同じ下水処理場流入水を用いた紫外線不活化・光回復過程での糞便性大腸菌群の組成変化を調べた結果、流入水、紫外線照射後、光回復後の試料のいずれにおいても*E.coli*が7割以上を占めていた。よって本研究では糞便性大腸菌群の代表として、単離した*E.coli*を用いることにした。単離した株は寒天培地上に形成したコロニーから釣菌し同定キットを用いて同定した後、同じ株を液体培地で37℃で12～36時間培養した。濃度が $10^8 \sim 10^9$ CFU/mLになったものを滅菌済み純水で約100倍に希釈し、単離大腸菌溶液として実験に供試した。

なお、光触媒実験には同じ下水処理場流入水の大腸菌群（デスチンコール酸塩培地による測定）を対象として用いた。また、溶存物質が反応に与える影響が大きいと考えられるので、遠心分離（4000rpm×5分、 g 値 $=2.5 \times 10^3 g$ ）した後上澄みを除去することによって、分子量の小さい溶存物質をある程度除去した試料を実験に用いた。

3. 結果と考察

3.1 光回復の定式化

既存の研究⁹⁾において低圧紫外線ランプを用いた場合の紫外線照射線量と紫外線直後の生残率については一次の関係があることが知られている。また紫外線照射後の可視光照射により生残率が上昇し、紫外線照射前の細菌数より低いある飽和値に達する。この飽和値を最大光回復生残率と呼ぶ。この値は照射する紫外線線量に依存し、紫外線照射直後の不活化率と同様に一次の関係にあることがわかっている⁹⁾。この2つの一次式より、最大光回復生残率と紫外線照射直後の生残率との関係（式(2)）が得られる。

$$S_m = S_0 (a_m / a_0) \quad \dots(2)$$

S_0 : 紫外線照射直後の生残率、 a_0 : 紫外線照射直後の不活化定数[cm²/mW/s]

S_m : 最大光回復生残率、 a_m : 最大光回復後の不活化定数[cm²/mW/s]

なお紫外線によるDNAの損傷に対する修復機構には光回復の他に暗回復（除去回復、組換え回復）が知られているが、紫外線照射後可視光を照射しない対照実験において、3時間にわたって細菌の回復が見られなかった。従って、暗回復効果は本実験においては無視できるものとした。

光回復における回復過程は、Dulbecco（1955）¹¹⁾により次のような一次反応式(3)が提唱されており、多くの場

合において実測値の傾向をよく表している。

$$\frac{dS}{dt} = k \cdot (S_m - S) \quad \dots(3)$$

k : 光回復速度定数 [1/min]、 S : 可視光照射時間 t における生残率

なお、紫外線照射線量を大きくするに従って、光回復過程がこの式に従わず、光回復の開始時期において生残率の上昇が式(3)の場合よりも遅れる現象が観察されている。筆者らは、この現象については光回復過程に標的論¹⁸⁾を適用することによる原理の解明と定式化を試みた。この理論に最大光回復生残率の評価も含めた定式化について神子ら (1997) ¹⁹⁾によって報告されている。

3.2 大腸菌 *E.coli* の不活化と光回復効果における中圧と低压紫外線ランプの比較評価

前述したように照射波長の異なる中圧と低压ランプの線量率を、比較するには考慮が必要である²⁰⁾。既存の報告では佐々木ら (1993) ⁷⁾によって中圧と低压ランプによる紫外線殺菌と光回復の比較研究が行われている。しかし、照射した紫外線線量については低压と中圧ランプ共に紫外線線量計を用いた254nmの線量率で比較している。この方法は低压ランプの線量率の定量には適するものの、254nm以外の照射波長をもつ中圧ランプの線量率の定量には不十分であると考えられる。また照射光の死角部も含めた装置内全体の線量率を表しているとは言えない。

図4に *E.coli* の中圧と低压の紫外線ランプによる不活化と殺菌効果紫外線線量における最大光回復生残率を示す。横軸は上述の生物学的線量計によって測定した殺菌効果紫外線線量を示している。

この図4に示されているように、低压ランプにおいて $D > 10 \text{ mWs/cm}^2$ の領域において照射直後の生残率が一次回帰直線から外れている。既存の研究²⁰⁾ではこのような現象は報告されていない。この原因については、試料を入れたシャーレに入射光の死角部分や試料が滞留する部分が存在するという本実験で用いた装置上の問題と考えられる。従って、この領域の不活化速度は試料の極小部分の速度と考えられるので、本論文では試料全体に関する不活化速度に関しては、 $D < 10 \text{ mWs/cm}^2$ のデータから求めた速度を代表値とした。

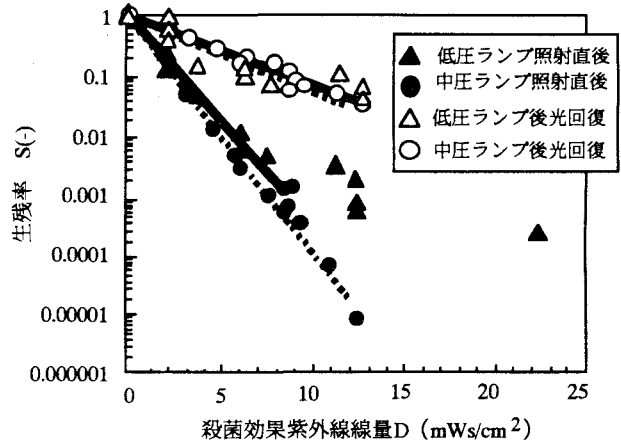


図4 中圧と低压紫外線ランプによる *E.coli* の不活化と光回復の比較

低压と中圧ランプの場合の紫外線照射直後の生残率 (不活化速度) を比較するとほぼ一致している。このことから、ファージを用いた生物学的線量計による測定値が *E.coli* において適用されることが示されており、広く細菌類を対象とする場合でもこの殺菌効果紫外線線量が適用できる可能性が示された。また、最大光回復生残率においてもほぼ一致したことは、中圧と低压ランプの *E.coli* 不活化の作用機構が変わらないことを示す。既存の研究⁷⁾では中圧ランプは殺菌線 (254nm) だけでなく光回復に有効な可視光 (360nm 付近) も同時に照射されているため、不活化と同時に光回復も同時進行で進むという報告があるが、本研究においては同時進行で進む光回復はほとんど無視できるという結果となった。

3.3 紫外線照射量の光回復速度への影響

中圧と低压紫外線ランプにおいて、不活化させるための殺菌効果紫外線線量を変化させ、その後の光回復速度への影響を調べた。実験結果から得られるデータを式(3)に従って仮定して光回復速度定数 k を求めた。なお式(3)の最大光回復生残率 S_m は、実測した紫外線照射直後の生残率 S_0 と図4のデータから計算した各々のランプの場合

の式(2)を用いて求めた。

図5に中圧と低压ランプにおける紫外線照射線量と光回復速度定数 k との関係を示した。光回復させるために用いた可視光線強度は低压と中圧ランプの実験共に360nmの線量率で120[$\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$]とした。

中圧紫外線ランプを用いた実験では可視光強度が一定ならば、紫外線照射線量の低い一点を除けば、0.04～0.05[1/min]で一定である。紫外線照射線量が低い場合のデータは、最大光回復生残率と紫外線照射直後の生残率の差が小さく、 k の決定における誤差が大きくなってしまったため信頼性が低いと考えられる。従って、中圧紫外線ランプの場合には紫外線照射線量に関わらず一定であるといえる。一方、低压紫外線ランプを用いた場合では、 k のばらつきが大きくなった。データ数が少ないことと実験の不手際のため信頼性が低いデータとなっている。しかし、低压ランプの場合と中圧ランプの場合と不活化機構が異なっているとは図4から考えにくい。従って、低压ランプの場合も殺菌効果紫外線線量に関わらず光回復速度定数は一定であると仮定すると、特に信頼性の低い $D=2.0\text{ mWs}/\text{cm}^2$ の場合のデータを除いた4点の平均値は0.046[1/min]となり、中圧紫外線ランプの場合とほぼ同じ値となった。

光回復酵素の生産量は照射した可視光のエネルギーに比例すると考えて式(4)が成立するとする。

$$E = a \cdot I \quad \dots(4)$$

E : 光回復酵素生産量 [1/min]、 a : 光回復酵素生産比例定数 [$\text{cm}^2/\mu\text{W}/\text{min}$]

I : 可視光360nm線量率 [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]

さらに光回復速度は、回復できるが回復していない細菌の生残率差($S_m - S$)と、光回復酵素生産量 E に比例すると仮定すれば、式(3)を変形した次式(5)式がえられる。

$$\frac{dS}{dt} = b \cdot E \cdot (S_m - S) \quad \dots(5)$$

b : 光回復酵素速度定数 [-]

従って光回復速度定数 k は次式(6)で表されることになる。

$$k = a \cdot b \cdot I \quad \dots(6)$$

つまり光回復モデルを一次反応式(式(3))と仮定すると、両ランプ共に可視光強度を一定にすれば、紫外線照射強度によらずその光回復速度定数は一定であると見ることができ、実験の結果を説明することができる。

3.4 可視光強度の光回復速度への影響

中圧と低压の紫外線ランプにおいて、不活化させるために一定の紫外線線量を照射し、その後の可視光強度を変化させて、光回復速度への影響を調べた。ここにおいても光回復は式(3)に従うと仮定して実験結果から、光回復速度定数 k を求めた。式(3)中の k 以外の定数については上述の紫外線照射線量の光回復速度への影響の場合と同様にして求めた。

図6に示される様に光回復速度定数 k と可視光360nm線量率 I には正の比例関係が有ることがわかる。これは、上述の紫外線照射線量と光回復速度の関係の考察と同様に、光回

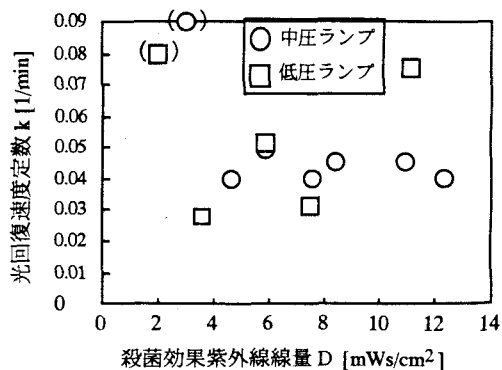


図5 光回復速度定数と紫外線照射線量の関係

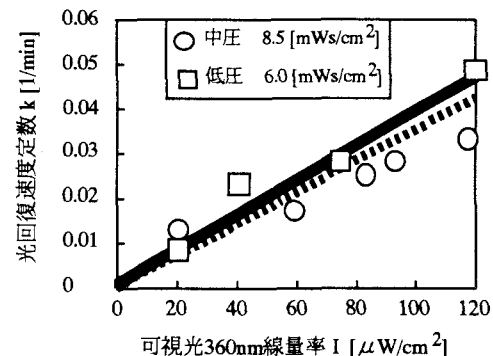


図6 光回復速度定数と可視光360nm線量率の関係

復モデルが一次式で近似され、光回復酵素生産量が可視光線量率に比例すると仮定したときに得られる 式(5)の関係から明らかである。

また、中圧と低圧ランプの場合の比較については、先に考察したとおり不活化機構の違いがほとんどないと考えられる。従って図 6 に示されている可視光線量率の光回復速度定数との関係について、中圧と低圧ランプの場合では、ほぼ同じであると考えられる。

3.5 光触媒の光回復効果への影響

図 3 に示した実験装置の光触媒をコーティングしていない石英管を用いた場合における大腸菌群の不活化と光回復による最大光回復生残率を調べた結果、式(2)の定数は $a_0=0.38[\text{cm}^2/\text{mW}/\text{s}]$ 、 $a_m=0.13[\text{cm}^2/\text{mW}/\text{s}]$ となった。従って式(2)で表現すれば、最大光回復生残率 S_m は紫外線照射直後の生残率 S_0 の0.35乗によって求められる。

二酸化チタンをコーティングした石英管を用い実験した場合の光回復を図 7、8 に示す。図中の点線は紫外線照射直後の生残率 S_0 から式(2)によって求めた光触媒が無い場合の算定最大光回復生残率 S_m を示す。

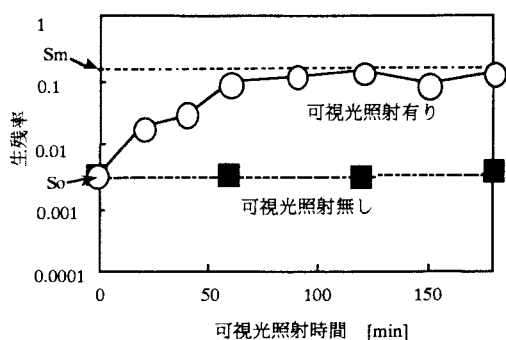


図 7 光触媒導入装置（攪拌無し）の光回復
 $S_0=0.0038$, $S_m=0.0038^{0.35}=0.14$

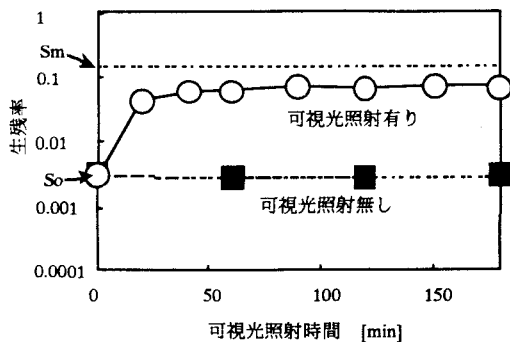


図 8 光触媒導入装置（攪拌有り）の光回復
 $S_0=0.0032$, $S_m=0.0032^{0.35}=0.13$

図 7 は石英管内の試料を攪拌せず光触媒と大腸菌群の接触効率が低い場合である。可視光照射 180 分後の生残率は 0.12 であった。光触媒がない場合の算定最大光回復生残率は 0.14 なので、生残率で 0.02 だけ光回復が抑制される効果が観察された。一方図 8 は試料を攪拌して光触媒と大腸菌群の接触効率を改善した場合である。可視光照射 180 分後の生残率は 0.066 であった。光触媒がない場合の算定最大光回復生残率は 0.13 なので、光回復後の大腸菌群数を 50% まで減少させる効果が観測された。既存の研究及び事前の実験結果によると固定化触媒の場合、見かけの大腸菌の不活化は紫外線と紫外線 + 光触媒でほとんど差が見られないことがわかっている。すなわちこれらの結果から、紫外線で不活化された大腸菌群の一部が、光触媒反応によってさらに光回復能を持たない不活化へと至っていると考えられる。また、図 8 において抑制効果が上昇したのは、大腸菌群の二酸化チタンへの接触効率が上がり、光触媒による大腸菌群の不活化の割合が増したため、二酸化チタン光触媒による光回復抑制効果が増大したためと考えられる。

本研究では、定性的な議論までしかできないが、光触媒の紫外線装置への導入については、今後、装置の設計の改良による接触効率の改善、光触媒剤の改良による反応効率の改善等により、光回復抑制効果を上げることは可能であると考えられ、紫外線殺菌装置の改善策の一つとして注目される方法だと考えられる。

4. 結論

1) ファージ Q β を使った生物学的線量計を用いれば、低圧と中圧ランプにおいて統一的に殺菌効果紫外線線量を用いての比較評価が可能となる。本研究においてこの殺菌効果紫外線線量が *E. coli* においても適用されることが示さ

れた。また、低圧と中圧ランプにおいて最大光回復生残率と紫外線線量との関係においても一致したことにより、これらのランプの*E.coli*不活化の作用機構が同じであると考えられる。

- 2)大腸菌*E.coli*に紫外線照射した場合、光回復モデルを一次反応式と仮定すれば、低圧と中圧紫外線ランプ共に可視光強度が同じならば、その光回復速度定数 k は照射した殺菌効果紫外線線量によらず一定であった。
- 3)大腸菌*E.coli*に紫外線照射した場合、光回復モデルを一次反応式と仮定すれば、低圧と中圧紫外線ランプ共に光回復速度定数 k は可視光360nm線量率 I に依存し、正の比例関係が得られた。
- 4)固定化光触媒を導入した紫外線照射装置において、光触媒と大腸菌群の接触効率をあげることで光回復抑制効果が確認された。

参考文献

- 1)L.O.Hiisvirta, "Disinfection and disinfection by products", IWSA, 1993 congress, 1993.
- 2)J.C.Kruihof, R.C.Leer, W.A.M.Hijnen, "Practical experiences with UV disinfection in the Netherlands", AQUA, vol.41, No.2, pp.88-94, 1992.
- 3)加藤益雄：紫外線消毒技術の適用分野、造水技術、vol.15, No.1, pp.33-39, 1989.
- 4)大垣眞一郎：紫外線照射による消毒技術の基礎概念、造水技術、vol.15, No.1, pp.14-19, 1989.
- 5)Kelner A., "Photoreactivation of Ultraviolet-Irradiated *Escherichia coli*, with Special Reference to the Dose-Reduction Principle and to Ultraviolet-Induced Mutation", J. Bact., 58, pp.511-522, 1949.
- 6)神子直之、大垣眞一郎：下水処理水の紫外線消毒効果に及ぼす光回復の影響、土木学会第42回年次学術講演会講演概要集II-374、1987.
- 7)佐々木賢一、大久保栄一、藤田和雄、栃久保英二、今井満、馬場利則：紫外線照射の下水処理法への適用、荏原インフィルコ時報、No.109、1993.
- 8)鹿島田浩二、大瀧雅寛、山本和夫、大垣眞一郎：紫外線消毒における光回復、用水と廃水、vol.38, No.5, pp.359-364, 1996.
- 9)Ho, A. K. W., "disinfection Practice in Ontario", Proceedings of WPCF 64th Annual Conference, Pre Conference Workshop, International Perspectives in Effluent Disinfection, pp.2-8, 1991.
- 10)National Water Research Institute (USA), "UV Disinfection Guidelines for Waste water Reclamation in California and UV Disinfection Research Needs Identification", 1993.
- 11)窪川裕、本多健一、斉藤泰和：光触媒、朝倉書店、1988.
- 12)橋本和仁、藤島昭：光触媒反応による水の浄化、用水と廃水、Vol.36, No.10, pp.851-857, 1994.
- 13)R. J. Watts, S. Kong, M. P. Orr, G. C. Miller, B. E. Henry, "Photocatalytic Inactivation of Coliform Bacteria and Viruses in secondary Waste water effluent", Wat. Res. Vol.29, No.1, pp.95-100, 1995.
- 14)Hamilton D. J., "Spectral Irradiance of UV10 ARC-tubes", 1990.
- 15)Kamiko, N., Ohgaki, S., "RNA coliphage ϕ Q as a bioindicator of the ultraviolet disinfection efficiency", Wat. Sci. Tech., Vol.21, No.3, pp.227-231, 1989.
- 16)西田継、李錫憲、武藤真、大瀧雅寛、大垣眞一郎：薄膜酸化チタンを用いた光触媒反応による水中フェノールの分解と大腸菌ファージ ϕ Qの不活化、環境工学研究論文集、第33巻、pp.133-138、1996.
- 17)Dulbecco, R., "Photoreactivation", Radiation Biology, Vol.2, pp.455-486, McGraw Hill Book Co., Inc., New York, 1955.
- 18)近藤宗平：分子放射線生物学、学会出版センター、1972.
- 19)神子直之、浦野紘平：水の紫外線消毒後の指標細菌における光回復の機構と速度、第31回日本水環境学会年会講演集、pp.546、1997.
- 20)大瀧雅寛、大垣眞一郎、山本和夫、神子直之：中圧及び低圧紫外線ランプによる有機塩素化合物の分解、水道協会雑誌、第64巻、第2号、pp.24-32、1995.
- 21)B.F.Severin, M. T. Suidan, R. S. Engelbrecht "Kinetic Modeling of U.V. Disinfection of Water", Wat. Res. Vol.17. No.11 pp.1669-1678, 1983.