

II-409

二重円筒型紫外線照射装置における消毒効率のモデル化

東京大学大学院 学生員 関谷毅史  
 東京大学工学部 五十公野光博  
 東京大学工学部 正会員 大垣眞一郎

1. はじめに

塩素注入に代わる下水処理水の消毒方法の一つとして、紫外線照射が検討されるようになってきた<sup>1)</sup>。本研究は、紫外線消毒装置として一般的な二重円筒型照射装置について、紫外線線量率分布、外筒による紫外線の反射および、装置内流速分布を仮定して、消毒効率のモデル化を試みたものである。

2. 実験装置と実験方法

本研究で対象とした低圧紫外線照射装置を図1に示す。消毒効率の実測は大腸菌ファージ（F特異RNAファージQβ）を用いて行った。Qβを含む検水の装置通過前後のQβ濃度を二層寒天法<sup>2)</sup>により測定した。実験条件は、検水の253.7nm吸光度および通過流量の増減により変化させた。なお、Qβおよびその宿主菌E.coli.K12 F+ A/λは東海大学医学部の古瀬浩介博士より分与されたものである。

3. モデルの仮定と定式化

図1の装置のモデル化にあたって、装置内の線量率分布および流速分布について以下のような仮定をおく。線量率分布は、紫外線がランプの中心から、ドーナツ型の円板状の断面に放射状に照射され、Lambert-Beerの法則にしたがって減衰するものとし、ステンレス外筒の内壁による反射(100%反射すると仮定)の効果も考慮して、断面中心からの距離 r の関数として(1)式、図2のような分布を仮定する。

$$I(r) = (r_0/r) \cdot I_0 \cdot \exp\{-2.3 A(r-r_0) \cdot [1 + \exp\{-2.3 A(2r_s - 2r)\}]\} \quad \dots (1)$$

ただし、 $r_0, r_s$ はそれぞれ、内筒壁面、外筒内壁におけるr値[cm]、Aは検水の253.7nm吸光度[ $\text{cm}^{-1}$ ]。

生存率のシミュレーションを行うためには、内筒壁面における装置内最大線量率  $I_0$  を求める必要がある。Qβの不活化に関する速度定数Dは、シャーレ実験により $5900 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ であることが知られている<sup>2)</sup>ので、Qβの不活化実験により、逆に装置内平均

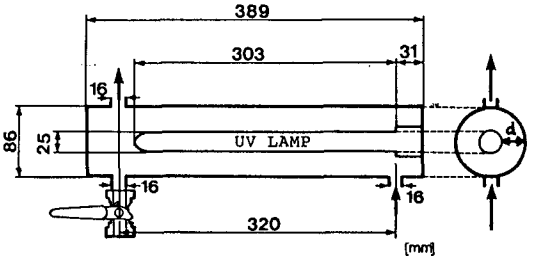


図1 低圧紫外線ランプ

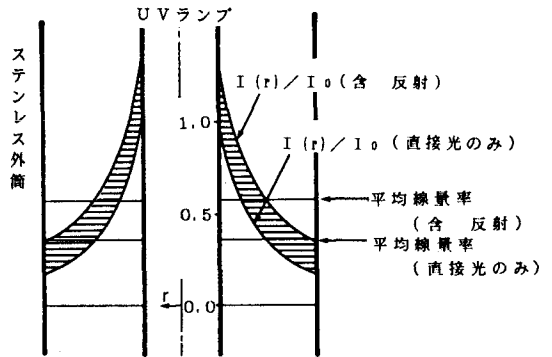


図2 管内の線量率分布  
 (検水の253.7nm吸光度:  $0.071 \text{ cm}^{-1}$ )

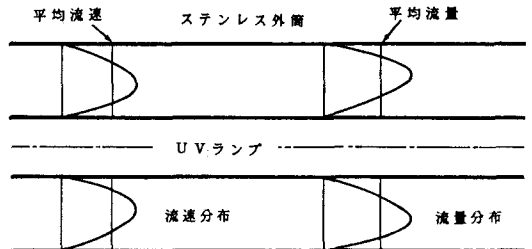


図3 層流モデルで仮定した流速および流量分布

線量率を求めることができ、その値と線量率分布（図2）より、 $I_0$ が得られる。ただし、不活化実験において、外筒内壁による反射率が実測できないため、反射を無視できるように検水の253.7nm吸光度を  $0.531\text{cm}^{-1}$ とし（この場合、外筒内壁に到達する紫外線線量率は $I_0$ の0.7%となり、反射の影響を無視できる）、かつ断面内の流速分布が一様と見なせるように二重円筒管のレイノルズ数で3000以上の条件を設定して実験的に $I_0$ を求めた。

実験範囲は乱流域から層流域にわたる。モデル化にあたって、以下のような理想的な流動状況を想定した。

乱流の場合、断面内の流速分布が一様であると仮定すれば、図2に示す平均線量率により理論的な $Q\beta$ 生存率 $S$ を計算することができる。すなわち、

$$S = N\tau / N_0 = \exp(-I_{\text{avg}} \cdot \tau / D) \quad \dots (2)$$

ただし、 $N_0$ 、 $N\tau$ は装置通過前後の $Q\beta$ 濃度[PFU/ml]、 $I_{\text{avg}}$ は平均線量率[ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ]、 $\tau$ は水学的滞留時間[sec]（装置容積を流量で除したもの）である。

層流の場合、二重円筒内の流速分布および流量分布は理想的には図3のようになり、線量率分布と合わせて、（3）式により、理論的な $Q\beta$ 生存率を計算することができる。

$$S = N\tau / N_0 = (2\pi/Q) \cdot \int_{r_0}^{r_s} r \cdot v(r) \cdot \exp\{-I(r) \cdot (L/v(r)) / D\} dr \quad \dots (3)$$

ただし、 $Q$ は流量[ $\text{cm}^3/\text{sec}$ ]、 $L$ は二重円筒管長[cm]である。 $v(r)$ は流速[cm/sec]で、（4）式の通り。

$$v(r) = a \cdot r_s^2 \cdot \{1 - (r/r_s)^2 + \{(1 - \kappa^2) / \ln(1/\kappa)\} \cdot \ln(r/r_s)\} \quad \dots (4)$$

ここに、 $\kappa = r_0/r_s$ 、 $a$ は実測流量 $Q$ により定めることができる。

#### 4. 実験結果とシミュレーション値の比較

図4に、 $Q\beta$ 生存率実測値と、それぞれ吸光度について理想状態を仮定した式（2）、（3）による計算値（乱流モデルおよび層流モデル）を示す。二重円筒管のレイノルズ数を流動条件のパラメータとしている。シミュレーション値はレイノルズ数3000以上で実測値とよく一致しており、低レイノルズ数域でも流動状況の変化による生存率の変化の傾向をよく表している。このことから、モデル化における各仮定が適切であり、また、装置の消毒効率の測定指標として、 $Q\beta$ が有効であることがわかる。

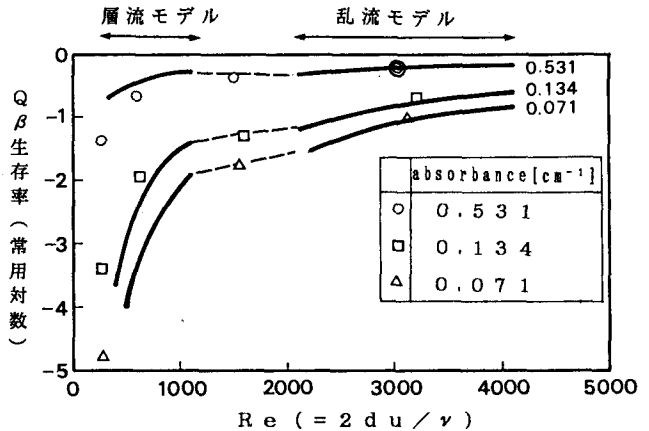


図4 実測生存率とシミュレーション値の比較

d: 図1参照 u: 断面平均流速 v: 水の動粘性係数  
 ◎ 印の実測値に基づき $I_0$ 値を決定した。

#### 5. 参考文献

- 1) 大垣眞一郎 ; 下水処理水の消毒、水質汚濁研究 11, 5, 1988
- 2) Kamiko, N and Ohgaki, S ; RNA COLIPHAGE  $Q\beta$  AS A BIOINDICATOR OF THE ULTRAVIOLET DISINFECTION EFFICIENCY, IAWPRC 14th Biennial Conference, 1988