

中圧紫外線照射装置による大腸菌ファージの不活化

東京大学 工学部 ○五十公野 光博 関谷 毅史
長岡 裕 大垣 眞一郎

1. はじめに

水中の病原性細菌やウイルスを除去する目的で、浄水場、下水処理場で塩素注入が行われている。しかしトリハロメタンなどの有機塩素化合物の生成や残留塩素による魚介類等生態系の影響の問題などから塩素にかわる消毒手法が議論されるようになり、代替手法の1つとして紫外線照射による消毒もあげられる¹⁾。

紫外線消毒装置の評価手法として大腸菌ファージを指標にした消毒効率の定式化が二重円筒型低圧紫外線消毒装置において行われた²⁾。しかし、同様な手法によって消毒装置長に比べランプ長が約半分の中圧紫外線消毒装置で行った結果、斜め方向の紫外線の影響によりシミュレーション値と若干の差がでることがわかっている³⁾。そこで、本研究では斜め方向の紫外線の影響についてさらに詳細に検討した。塩水トレーサーを用いて二重円筒型装置内の流動特性を調べ、斜め光の影響についてモデルを用いて定量的な議論を行った。

2. 実験装置と実験方法

紫外線照射装置を図-1に示す。UVランプは、ハノヴィア社製中圧紫外線ランプで、電流2.3 A、電圧155 V、照射強度55 mW/cm²（水を通さない状態）である。

装置内実紫外線量を計測するためのバイオインディケータとして大腸菌ファージQ β を用いた。大腸菌ファージQ β は、F特異RNAバクテリオファージの一種で、ウイルスの中ではもっとも小さい部類に属し、最も単純な構造である。また、F特異RNAバクテリオファージは、実際に下水中に安定して高濃度で存在している⁴⁾。なお、Q β および宿主菌である大腸菌(E. coli. K12F⁺A/ λ)は東海大学医学部古瀬浩介博士より分与されたものである。

不活化効率実験は大腸菌ファージQ β を含む検水を装置内に通過させ、その前後のQ β 濃度を二層寒天法⁵⁾により測定した。また、不活化効率実験では紫外線の斜め方向の影響を知るために、ランプに紫外線を透さないフィルム（茶色の熱遮断ポリエステルフィルムで99.48%紫外線をカットする）を内筒壁面に張り、発光する長さの調節を行った。

実験条件は、通過流量の増減と発光長、および検水の吸光度を変えることの組み合わせにより行った。なお、流量は0.5, 1.0, 1.5 m³/hであり発光長は14.7および7.4 cmである。吸光度の調整は検水中の液体培地濃度の増減によって行った。装置内流動特性は出入口に導電率センサーを設置し、塩水トレーサーの通過を測定することによって調べた（図-2）。

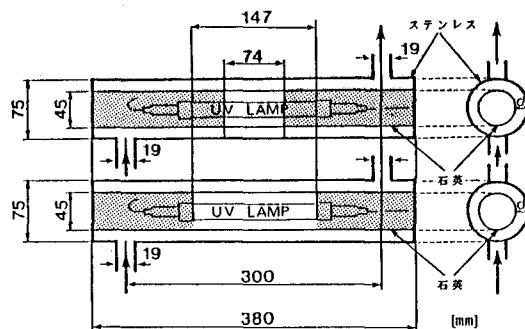


図-1 中圧紫外線消毒装置。ランプ発光長が上段7.4 cmの場合
下段14.7 cmの場合

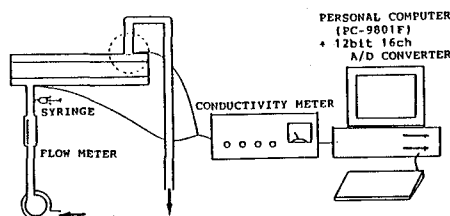


図-2 トレーサー実験装置

3. 理論的算定式

関谷ら²⁾³⁾は、二重円筒型紫外線照射装置のモデル化を行っており、それによれば紫外線線量率の分布は、(1)式で表される。

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

ただし、 r_0, r_s はそれぞれ、ランプ中心からの内筒壁面、外筒壁面までの距離[cm]、 A は検水の253.7nm吸光度[cm⁻¹]、 λ は二重円筒ステンレス外壁における反射率[%]である。

今回行った実験装置の材質は、関谷²⁾³⁾らが行った装置の材質と同等のものでありその結果から反射率 λ は50%とした。

乱流時の不活化効率(2)式で、層流時の不活化効率は(3)式で表される²⁾³⁾。

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

$$S = N\tau / N_0 = (2\pi/Q) \cdot \int_0^{r_s} r \cdot v(r) \cdot \exp[-I(r) \cdot (L/v(r)/D)] dr \cdots (3)$$

ここに、 $N_0, N\tau$ は装置通過前後のQ β 濃度[PFU/mL]、 avg は平均線量率[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]、 τ は水理学的滞留時間[sec]、 Q は流量[cm³/s]、

L は二重円筒管長[cm]である。ランプ長に等しい長さを持つ装置と仮定した。 D はQ β の不活化に関する速度定数であり、シャーレを用いた回分系の実験より5900 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ であることが知られている⁶⁾。

$v(r)$ は二重円筒内流速分布[cm/s]で(4)式で表される。

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

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。

これらの式から得られる値はランプに垂直な光(反射光を含む)を考慮したときの不活化効率の算定値である。

4. 実験結果

波長253.7nmの吸光度が異なる3通りの検水についての実測生存率のプロットと算定式²⁾³⁾より求めた各吸光度における生存率曲線とを比較したものを図-3に示す。これによれば、吸光度が低くなるに従い不活化効率の算定値と実測生存率の差がひらいてくる傾向がわかる。

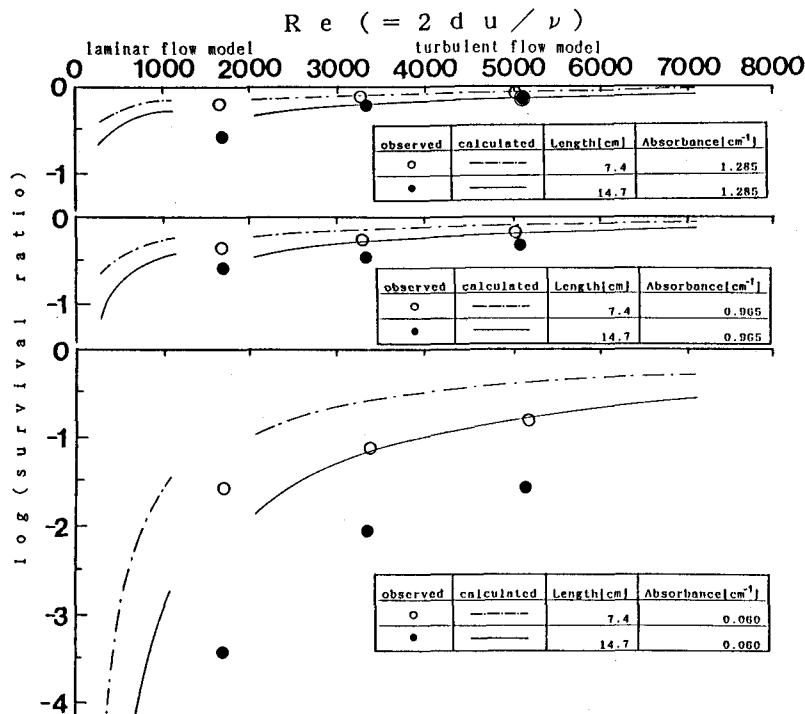


図-3 実測生存率と算定値の生存率曲線。装置内レイノルズ数2000以上は乱流モデル1000以下は層流モデルによるものである。

また、図-4は算定値と実測生存率の差を表したものである。この図からランプ長が長いほど差が大きくなり、吸光度が低くなるほど大きくなることがわかる。

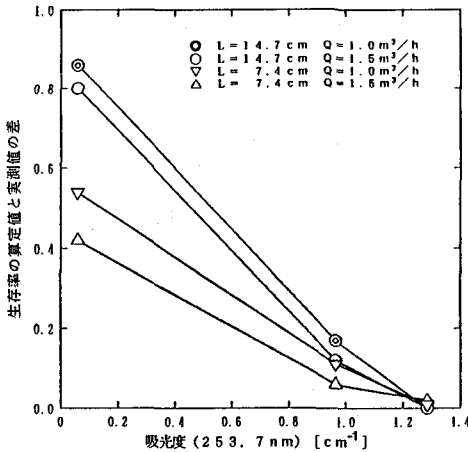


図-4 ランプに垂直な光（反射光を含む）のみを考慮したときの生存率の算定値（常用対数）と実測生存率（常用対数）の差と吸光度の関係

図-5に装置内分散係数（無次元表示、 D ：流れ方向の分散係数、 d ：内径外径差、 u ：断面平均流速）とレイノルズ数との関係を示す。低レイノルズ数領域で分散係数が大きくなり、高レイノルズ数領域で一定値に近づく傾向が伺える。この結果から乱流時のモデルはレイノルズ数で2000以上に適用した。

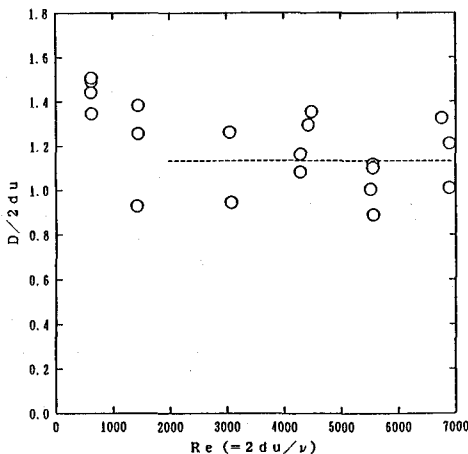


図-5 装置内分散係数とレイノルズ数との関係

5. 結論

装置形状（照射装置内のランプ設置位置、ランプ長）と吸光度の関係では、装置外筒壁面での反射光や、斜め光の強度の評価が、不活化効率の正確な判断の為に重要であることが明かとなった。装置長に比べランプ長が相対的に短い装置の場合斜め光の影響があり、吸光度が小さいほどその影響は大きくなるので、吸光度が非常に小さい純水系での不活化効率の結果を吸光度が高い水（例えば下水処理水）へ応用する場合には、前述の評価が要求されることが明かとなった。

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, 282~286, 1988
- 2) 関谷毅史、五十公野光博、大垣眞一郎；二重円筒照射装置における消毒効率のモデル化、土木学会第44回年次学術講演会、888~889, 1989
- 3) 関谷毅史、五十公野光博、大垣眞一郎；大腸菌ファージを用いた中圧紫外線消毒装置の評価、環境科学シンポジウム、講演要旨集、1989
- 4) A. Ketratanakul, M. Izumino, and S. Ohgaki；環境科学シンポジウム, IC08, 1987
- 5) M. Adams, Bacteriophages, Interscience Publ. Inc. New York, 1959
- 6) Kamiko, N and Ohgaki, S；RNA coliphage Q β as a bioindicator of the ultraviolet disinfection efficiency, IAWPRC 14th Biennial Conference, 1988