

流通式紫外線照射装置の効果について

The effect of flow type UV disinfection device on microorganisms

奥田 敦子・大瀧 雅寛

Atsuko Okuda and Masahiro Otaki

お茶の水女子大学 人間文化研究科 ライフサイエンス専攻 環境工学研究室

1.はじめに

現在研究対象として、装備が単純・維持管理が容易・副生成物は生成しにくい等の長所を持っており、塩素の代替消毒法として検討されている紫外線殺菌処理を検討している。

本稿では、最近水処理への適応が検討され始めているパルスキセノンランプ（以下、パルスランプ）による流通式反応装置の消毒効果について実験結果とともに解析を行う。

2.レイノルズ数とは

今回流通式反応装置を使用したため、解析の際流れの性質を知るためのレイノルズ数が必要となる。レイノルズ数とは、実験的に見いだされた数字である。

水道の蛇口の栓を絞って少量の水を出すと、透き通ったきれいな流出液柱が見られる。しかし、栓を大きく開いて多量の水を出すと、やや不透明な乱れた流れになってしまう。前者のような流れを層流(laminar flow)といい、後者のような流れを乱流(turbulent flow)という。

下の図に示すように、入り口部に丸みをつけたガラス管内を流れる水に着色液を注入して管内部を観察すると、着色液は管内流の流量が小さい間は線状となって秩序よく流れ、管内流が層流であることを示す(図 a 参照)、ある流量を超えると急に乱れて拡散し、管内流が乱流となっていることを示す(図 b 参照)。

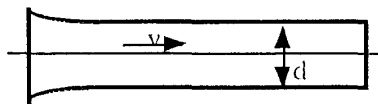


図 a 層流 (Re < Rec)

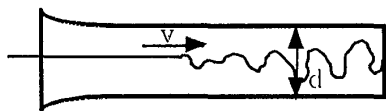


図 b 乱流 (Re > Rec)

この層流から乱流への移行(これを遷移: transition という)は、次式であらわされるレイノルズ数(Reynolds number)Re の値によって、その管内流が層流であるか

乱流であるかが決まる。

$$Re = \rho Vd/\mu = Vd/\nu$$

ただし、 ρ は流体の密度、 μ は流体の粘度、 V は管内の流体の流速、 d は管の直径、 ν は流体の動粘度である。

つまり、レイノルズ数とは流体固有の値(密度、粘度、動粘度)だけではなく、管内の流速や、管のサイズ(直径)などの流体以外の条件を含めてはじめて定まる値である。そして、ちょうど遷移が起こるレイノルズ数を臨界レイノルズ数(critical Reynolds number)といい、 Rec と書き、円管内の流れの場合 $Rec=2100\sim 4000$ である。ある流れている流体のレイノルズ数臨界レイノルズ数 Rec より小さいとき、その流れは層流であると言え、逆にある流れている流体のレイノルズ数が Rec より大きいときその流れは乱流であると言える。

3.流通式反応装置による実験

3.1.実験手順

実験に用いた流通式反応装置の概略図を図 1 に示す。ランプは二重円筒管の内側にあり内径は 30.6mm であり、反応水を流す外管内径は 110.1mm とし実験を行った。原水タンクに水道水 300l を貯めた後チオ硫酸ナトリウム 50ppm を添加し残留塩素を完全に中和させた。模擬水 1 はそのまま使用し模擬水 2、模擬水 3 はそれぞれカオリンとフミン酸を添加し透過率 60% と 3%になるよう調整を行った。

原水タンクに大腸菌フェージ $Q\beta$ (濃度 $10^7\sim 10^8$ PFU/mL) を投入し、原水タンク内の $Q\beta$ 濃度を初期濃度とし、一定流量で反応装置へ導入した反応水が反応装置から出てきたサンプル濃度を測定した。 $Q\beta$ 濃度は E.coliK12(A/λ)を宿主菌として用いる二層寒天法によるブラック法で測定した。

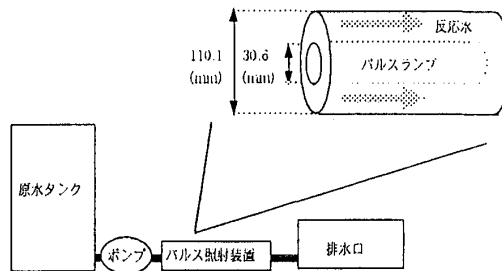


図 1.実験装置概略図

3.2.実験結果

今回用いた $Q\beta$ は生物的紫外線量測定法に用いられ、不活化率を測定して殺菌に使われた有効紫外線殺菌線量を算定することが出来る。

$$N_t / N_0 = e^{-k \cdot u \cdot t}$$

ただし、 N_t は紫外線照射 t (s)後の $Q\beta$ 濃度(PFU/ml)、 N_0 は紫外線照射前の $Q\beta$ 濃度(PFU/ml)、 k は $Q\beta$ の不活化速度定数=0.17(cm²/mWs)、 u は有効殺菌紫外線量(mW/cm²)、 t は紫外線照射時間(t)である。

装置内の線量率分布は、紫外線がランプの中心からドーナツ型の円盤状の断面に放射され、Lambert-Beerの法則に従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(λ%反射するものと仮定)の効果も考慮して、断面中心からの距離 r の関数として以下のような分布を仮定する。

$$I(r) = r_0/r * I_0 * \left\{ \exp\{-2.3(r-r_0)\} + \lambda \exp\{2.3A(2r_0-r)\} \right\}$$

direct light reflected light

ただし、 r_0 、 r_s はそれぞれ内筒壁面、外筒壁面における r 値(cm)、 A は検水の 253.7nm 吸光度(cm⁻¹)である。

層流の場合、二重円筒管内の流速分布は図 2 のようになり、線量率分布と合わせて以下の式により理論的な $Q\beta$ 生存率を計算することができる。

$$S = N_t / N_0 = 2\pi / Q \int_{r_0}^{r_s} v(r) \exp(-I(r)L/v(r)*D/1) r * dr$$

ただし、 Q は流量(cm³/sec)、 L は二重円筒管長(cm)である。 $v(r)$ は流速(cm/sec)で、次式の通りになる。

$$v(r) = \Delta P / L * r_s^2 / 4\mu \{ 1 - (r/r_s)^2 + (1-k^2) / \ln(1-k) * \ln(r/r_s) \}$$

ここに、 $k=r_0/r_s$ 、 μ は水の粘性係数、 ΔP は実測流量 Q により定めることができる。

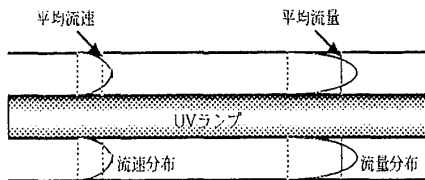


図 2 層流モデルで仮定した流速及び流量分布

図 3 は各透過率の模擬水でのレイノルズ数と算定紫外線照射量の関係を示したものである。

図中の曲線は乱流を仮定したシュミレーションモデルである。透過率 99% でレイノルズ数が 5000 のデータのみシュミレーションから大きく外れてしまっているが、その他のデータはおおむねシュミレーションによって説明できた。シュミレーション値から外れてしまったデータに関してはその理由が定かでないので、今後この点について検討していく必要がある。

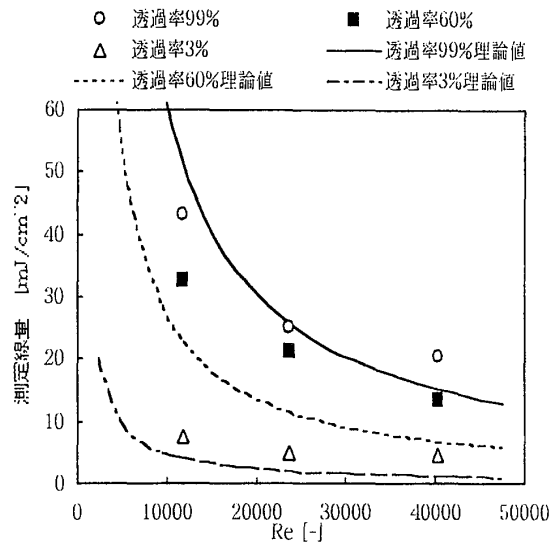


図 3 各透過率でのレイノルズ数と紫外線照射量

4. まとめ

以上の結果からこの装置は理論値に近い消毒効果が得られるのではないかと考えられる。

しかし、この実験結果の再現性を含め今後更に研究を行う必要があると考えられる。

<参考文献>

宝沢光紀 他 4 名: 拡散と移動現象、培風館
 須藤浩三 他 2 名: 流体の力学、コロナ社(1994)
 大垣眞一郎 大腸菌ファージを用いた紫外線照射装置の評価、
 土木学会第 4 4 回年次学術講演会 (1989)