

(株)クボタ ○ 岸野 宏

岩部秀樹

桶谷 智

1. はじめに

下水処理水の消毒における塩素消毒の代替技術として、紫外線殺菌が有望視されている。下水処理水用の紫外線殺菌装置を設計する際には、紫外線ランプの配置による紫外線ユニット内部での紫外線照度分布、殺菌装置内部の水理学、紫外線の透過率や負荷変動といった下水処理水の性質が配慮事項として挙げられている。しかし、紫外線ユニット内部の紫外線照度の平均値と水理学的滞留時間により紫外線殺菌装置を設計する方法が一般的であり、上で述べた配慮事項をまとめて検討した例は少ない。従来方法では紫外線ユニットの配置を最適化したり、ランプ切れ発生時における殺菌率低下の割合を予測することなどはできない。そこで本研究では、低圧・高出力紫外線ランプを用いた紫外線殺菌装置を対象に、数値流体解析技術を応用して紫外線ユニット配置の問題と、ランプ切れ発生時における殺菌率の低下の防止策について解析的に検討を行った。

2 解析方法

2.1 研究対象とする紫外線殺菌装置

本研究で対象とする紫外線ランプユニットは、大容量低圧紫外線ランプ4本より構成される。紫外線ランプユニット内部の平均紫外線照度はランプユニット容量 370[L] に対し $4.4[\text{mW}/\text{cm}^2]$ であり、紫外線照射量 $12[\text{mW} \cdot \text{S}/\text{cm}^2]$ を目安に様々な原因による照度の低下や安全率を考慮して設計を行うと、1ユニット当たりの処理水量は約 $4,000[\text{m}^3/\text{day}]$ が基準となる。このユニット2つを図1に示すように、Type A～Fの6タイプに配置して解析を行った。Type A, B, C, Dは装置内の主流れ方向に対してランプを垂直に、Type E, Fはランプを平行に設置している。Type C, Dにおいてはユニットに阻流壁を設けることによって水の流れを強制的にランプに平行となるようにしている。Type A, C, Eにおいてはユニットを流れ方向に対して並列に、Type B, D, Fにおいてはユニットを直列に配置している。

2.2 紫外線ランプユニット内照度分布の解析

本研究では[1]式で示される点光源合計法¹⁾により紫外線ランプユニット内の照度 $I[\text{mW}/\text{cm}^2]$ の分布を与える。

$$I = \int_0^L \frac{S}{4\pi R^2} \exp(-\alpha R) dz \quad [1]$$

ここで、

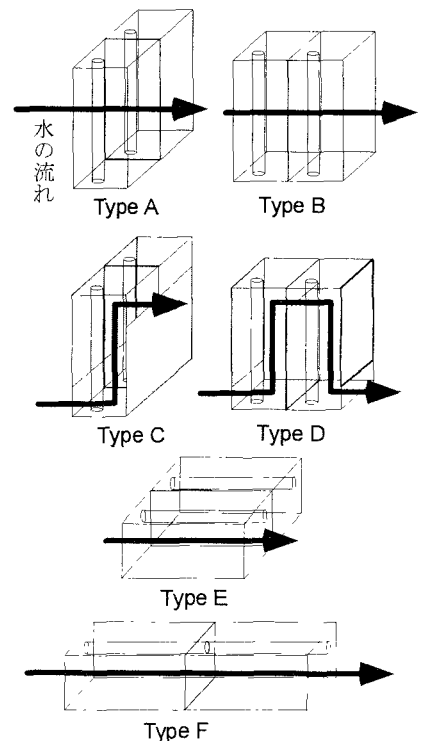


図1 解析の対象とする紫外線ランプユニットの配置

S: 紫外線ランプ単位長さ当たりの紫外線強度[mW/cm]

R: 点光源から点Pまでの距離 [cm]

α : 紫外線吸光度係数 [1/cm]

である。また、ユニット内の各点における照度はユニットを構成する4本のランプから[1]式で与えられる照度を合計して求めた。ただし計算には、実測値から以下の値を代入した。 α : 0.2 [1/cm]、L: 130 [cm]、S: 1920 [mW/cm]。

2.3 紫外線殺菌装置内部の流れ解析と大腸菌群殺菌率解析の方法

紫外線殺菌装置内部の流れ解析は図1に示したそれぞれのユニットに流量等の境界条件を与え、Navier-Stokesの式と乱流モデル(K- ϵ モデル)を連立させ、有限差分法によりこれらの方程式群を離散化して、解を求めた。また、ここで得られた装置内部の流れ場において大腸菌群を模擬した粒子の軌跡を求め、2.2で求めたユニット内部の照度分布をもとに各粒子が受ける紫外線照射量を算定した。ここで紫外線ユニットを時刻 $t_1 \sim t_2$ [s]に通過する粒子が受ける紫外線照射量 D [mW・s/cm²]は以下の式より求めた。

$$D = \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt \quad [\text{mW} \cdot \text{s/cm}^2] \quad [2]$$

ただし、 $A(t)$ は時刻 t における粒子の位置において、点光源合計法により求められる紫外線照度[mW/cm²]である。また、紫外線照射量と大腸菌群殺菌率 Z [-]との間には以下の式で表される関係が得られている¹⁾。

$$Z = 1 - 10^{-D/D_{10}} \quad [-] \quad [3]$$

ここで、

D: 個々の大腸菌が受ける紫外線照射量 [mW・s/cm²]

D_{10} : 殺菌率 90%を得るのに必要な紫外線照射量 [mW・s/cm²]

である。この式を用いて個々の粒子が受ける紫外線照射量から殺菌率を求め、2.3で求めた全ての粒子の軌跡に対して得られた殺菌率の平均値を各流量における紫外線殺菌率の推定値とした。殺菌率の推定に当たって[3]式中のパラメータ $D_{10}=6$ [mW・s/cm²]とした¹⁾。

3 解析結果と考察

図2および3に各ユニットの配置と流量に対する殺菌率の推定結果を示す。図2は通常運転時、図3は8本のランプの内の1本が切れた場合を想定したシミュレーションの結果である。図より流量の増

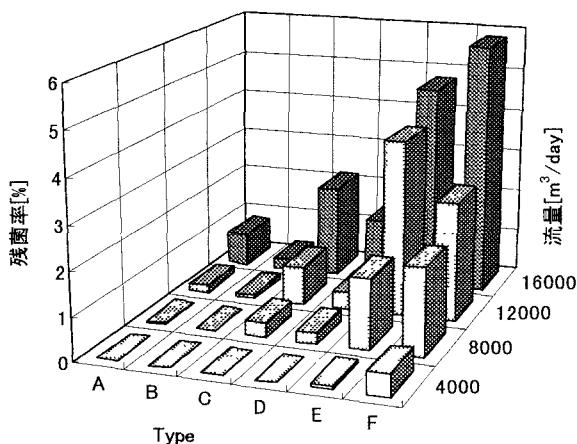


図2 大腸菌群殺菌率の推定結果[通常運転時]

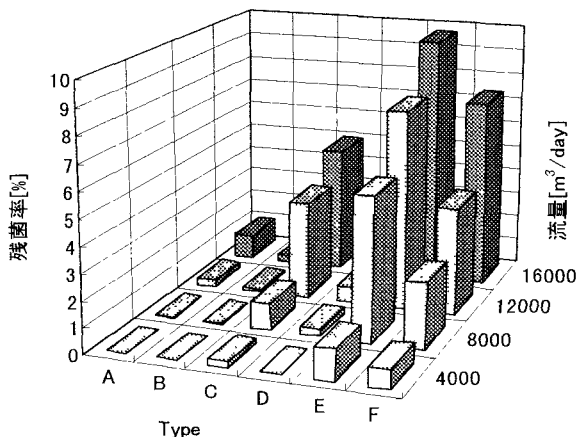


図3 大腸菌群殺菌率の推定結果[ランプ切れ発生時]

加による残菌率の上昇と、ユニットの配列の違いが残菌率に大きな影響を及ぼすことが示されている。まずユニットの配置において、Type E, F の残菌率が高い。これはランプユニットを主流れ方向に対して平行に設置することが、高い殺菌率を得るためには不利であることを意味している。次に Type C, D の残菌率が高い。これはユニット内で流れを強制的に曲げた結果生じたデッドスペースの影響であると考えることができる。また、Type C, D ではユニット前後における損失水頭も大きかった。Type A, B が最も低い残菌率を示しており、流れ方向に対して、ランプユニットを垂直に設置することが効果的であることが示されている。また、ランプ切れ発生時のシミュレーション結果である図3より、ユニットを流れ方向に直列に並べることの有効性が示されている。すなわち、ユニットを直列に並べることは水路断面積を小さくすることになるため、1つのユニットを通過するのに要する時間は短くなる。しかし個々の大腸菌に対して2つのユニットを通過する機会を与えることになり、特にランプ切れ発生時における安全性の確保に大きな効果を示すと考えられる。

図4は通常運転時に各々の粒子が受ける紫外線照射量の中央値を、各ユニットの配置と流量に対して示した図である。これより、Type A, B が他の配置と比較して高いことが示されている。しかしながら、上で述べたような残菌率の推定結果がユニットの配置の方法によって大きく異なることを説明できるような差ではない。すなわち残菌率の推定にあたって、個々の粒子が全体として受ける照射量ではなく、低い照射量しか受けない粒子の存在の有無が重要であると言える。従来のように紫外線ランプユニット内の照度分布の平均値と水理学的滞留時間をもって設計する方法ではこのことを考慮できず、今後トラブル時の安全性確保の問題や、限界設計に対処できないことを意味している。本研究で示した手法においては、装置内部の流れとともに紫外線による殺菌率を同時に予測することができ、今後の紫外線殺菌装置の設計手法として非常に有効な手段であると言える。

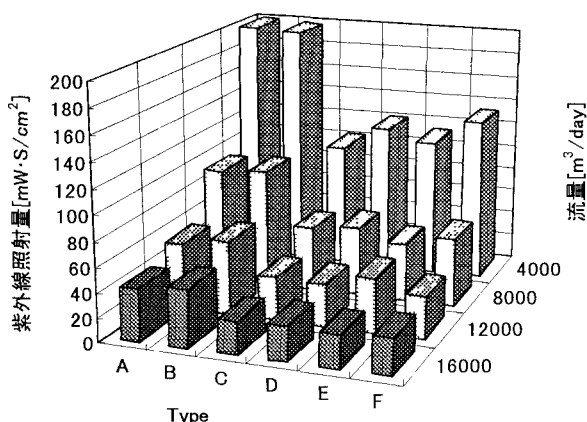


図4 大腸菌群が受ける紫外線照射量の中央値

4 おわりに

本研究では、低圧・高出力紫外線ランプユニットを対象に、主に紫外線ランプユニットの配置の違いが紫外線殺菌装置の殺菌性能に及ぼす影響について解析的に検討した。得られた成果を要約すると以下のようになる。

- ① 紫外線ランプは主流れ方向に対して垂直に配置することが、高い殺菌率を得るために有効であり、デッドスペースを生じさせるような阻流板の設置を行わない方が良い。
- ② ユニットの主流れ方向に対してランプユニットを直列に複数段配置することが、特にランプ切れ発生時の安全性確保のために非常に効果がある。

また、今後の課題として、本シミュレーションで得られた結果の信頼性を実際の紫外線殺菌装置における紫外線殺菌率と比較することにより向上させる必要がある。

5 参考文献

- 1) 安藤茂ら 1994：「紫外線による下水・排水の消毒－その2 消毒の理論－」，用水と排水, 36(7), p 29-37