研究論文

新たな紫外線強度分布推定法による
紫外線照射槽の消毒効果予測への影響

安井 宣仁*・神子 直之**・岩崎 達行***

要 旨

平成 19 年厚生労働省省令第 54 号「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」に示されたとおり、日本国内の一部の上水道において紫外線照射の適用が可能となった。しかし、紫外線照射槽における消毒効果は槽内の不均一な紫外線強度と分布を持つ滞留時間の積である紫外線照射量により決まるため、紫外線照射槽の消毒効果の予測は一般に難しいと考えられている。

そこで、本研究では 2 種類の紫外線照射槽を用いて不活化実験とトレーサー実験を行い、紫外線強度がより均一な紫外線照射槽の結果から、より高効率の紫外線照射槽の性能を予測することを試みた。その結果、従来用いられてきた簡便な半径光による紫外線強度分布から得られる消毒効果予測値よりも、新たに考案した修正半径光による予測値の方が実測値をより適切に表していた。また、修正半径光を用いた場合、紫外線照射槽外管の内表面での紫外線強度より大きくかつ平均紫外線強度よりも小さい紫外線強度で、消毒効果が定まっていることが説明可能であった。

キーワード: 紫外線照射槽, 滞留時間分布, 紫外線強度分布, 半径光, 修正半径光

1. はじめに

平成 19 年厚生労働省省令第 54 号「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」に示されたとおり、日本国内の一部の上水道において紫外線照射の適用が可能となった。欧米では紫外線照射の実績が多く、ヨーロッパでは飲料水の消毒およびレクリエーション水に適用され、現在では 5000 以上の施設が稼働している¹⁾。アメリカ合衆国では 1984 年に下水処理施設に導入され、1990 年時点で 300 箇所以上の施設がある²⁾。さらに、浄水処理施設においても 2011 年にニューヨークに日量 770 万 m³ 規模の施設が導入される予定である³⁾。日本国内においては 400 箇所以上の下水処理施設で適用されている例がある⁴⁾など、紫外線照射は一般的な技術であると言える。

紫外線照射槽の性能は紫外線強度と滞留時間の積で表される紫外線照射量により決定される⁵⁾。紫外線照射槽において、紫外線強度および滞留時間の両者がそれぞれ分布を持つため、実運転時の様々な変動を考慮しない場合においてさえ紫外線照射量の正確な算定が困難であり、消毒効果の予測が難しい。

そのような紫外線照射における消毒効果を担保するために、アメリカ合衆国では実規模紫外線照射槽に紫外線耐性が既知の微生物を添加して紫外線照射を行い、その生存率から等価紫外線照射量を求めることとしている⁶⁾。しかし、実規模紫外線照射槽の製作には多大な費用を要することに加え、大規模浄水場における流量で実験を行うことは困難を伴い、日本国内でそれらを行うことは非常に難しいと思われる。さらに現在では紫外線照射槽の性能を検証する方法が必ずしも公知のものとなっていないため、第三者的な性能の確認を行うことができない状況である。

そこで、本研究ではこれらの現況を踏まえ、2 種類の紫外線照射槽を用いて不活化実験とトレーサー実験を行い、紫外線強度がより均一な紫外線照射槽の結果から、より高効率の紫外線照射槽の性能を予測することを試みた。

2. 不活化実験

2.1 紫外線照射槽

紫外線照射槽として、内照式二重円筒管紫外線照射槽を用いた。紫外線照射槽の概略を図 1、表 1 に示す。槽

* 立命館大学大学院理工学研究科 Nobuhito YASUI

** 立命館大学理工学部 Naoyuki KAMIKO

*** 岩崎電気(株) Tatsuyuki IWASAKI

2008 年 6 月 17 日受付

2008 年 7 月 31 日受理

図1 実験に用いた紫外線照射槽の概略図

表1 紫外線照射槽の概略

槽 No	外管内径 (cm)	石英スリー ブ外径(cm)	照射容積 (ℓ)	照射槽長 (cm)	発光長 (cm)	光路長 (cm)
1	4.95	3	1.16	120	95	0.98
2	7.81		3.88	125		2.41

No. 1, No. 2 はどちらもランプ 1 灯用で、光路長（石英スリーブ外側と外管内側の距離）以外の長さがほぼ等しく、外管材質がステンレス製の槽を用いた。光源には中心波長 254nm でランプ電力が 120W の低圧紫外線ランプを用いた。

2.2 方 法

不活化実験は、上記の 2 種類の紫外線照射槽を用いて流量を段階的に変化させ実験を行った。まず原水槽に水道水 10m³ を貯留し、残留塩素の影響を除くためにチオ硫酸ナトリウム（最終濃度 50 mg/ℓ）を添加しポンプで原水槽内を循環させ、同時に紫外線ランプを点灯して出力を安定させた。残留塩素がなくなったことを確認後、大腸菌ファージ Qβ（以下、ファージと記述）高濃度液 3.5ℓ（最終濃度 1×10^6 PFU/ml）を投入し原水槽内を循環させた。ファージ高濃度液の作成は文献⁷⁾に従って行った。各実験条件下で紫外線照射槽にポンプで送水した。設定流量になったことを確認し、紫外線照射槽の容積の約 3～4 倍を通水させた後、出口水を約 50ml 採水しファージ濃度を測定した⁷⁾。また原水槽内の初期ファージ濃度に変動がないか確認するために、1 条件毎に原水槽から採水しファージ濃度を測定した。流量範囲はファージ濃度が定量的に測定できる範囲になるように 5.0～9.6m³/h

図2 流量と生残率の関係

とし、各槽で 3 流量、合計 6 ケースの実験を行った。

2.3 結 果

時間経過に伴う原水槽のファージ濃度は $9.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^6$ (PFU/ml) で初期濃度は概ね一定であった。

図 2 に流量と生残率の関係を示す。横軸は同じ流量における両紫外線照射槽の結果を比較するために流量の逆数とし、縦軸は出口水ファージ濃度を原水槽のファージ濃度で除した生残率を常用対数で表した Log 生残率とした。図 2 より、槽 No. 1、槽 No. 2 とも滞留時間の増加（流量の逆数値の増加）に伴い生残率が減少し、消毒効果が増大した。また槽 No. 1 よりも光路長の大きい槽 No. 2 の方が、同流量での生残率が小さく、消毒効果が大きかった。すなわち、同一ランプ、同一流量においても光路長の違いにより、消毒効果が異なることが示された。

3. トレーサー実験

3.1 方 法

トレーサーとして塩化ナトリウムを用いた。原水槽に貯留した水道水をポンプで送水した状態で、ポンプと紫外線照射槽の中間に設けた塩水投入ポートから濃度約 30% の塩水 60 ml を、約 5 秒間でシリンジを用いて強制的に投入した。的確に槽内の滞留時間分布を把握するために、槽の入口と出口にサンプリングポートを設け、入口水と出口水の電気伝導率を測定した。電気伝導率計には測定器として XPlorer-GLX PS-2002（島津理化）、電気伝導率センサーとして PS-2116（島津理化）を用い、0.05 秒間隔（20Hz）でデータを採取した。流量範囲は 4.9～8.4m³/h とし、各紫外線照射槽で流量を 3 段階に設定した。1 流量につき同条件での測定を 3 回行い、計 18 ケースの実験を行った。

3.2 結 果

図3に一例として槽No. 1の流量 $5.0 \text{ m}^3/\text{h}$ の結果を示す。縦軸を電気伝導率比 $(-)$ (任意時刻での電気伝導率を入口における電気伝導率の最大値で除した値)、横軸を経過時間(秒)とした。

各紫外線照射槽とも実験を行った範囲のどの流量においても出口の電気伝導率比の最大値が1に満たなかったことから、槽内において滞留時間分布が存在していることが分かった。

3.3 解析と考察

滞留時間分布を数式的に扱うため、混合拡散モデル⁸⁾を用いて解析を行った。

混合拡散モデルとは、管路の流れにおいて流れ方向に流速分布が存在しそれが拡散方程式の形で表現できることを仮定したモデルである。分散の度合はペクレ数で表現される。ペクレ数とは無次元数で、その値が大きくなるほど栓流に近い流れになっていることを表している。

この混合拡散モデルにおける紫外線照射槽内の滞留時間分布関数は式(1)で示される。また、出口の電気伝導率比は式(2)で示すように入口の電気伝導率比と滞留時間分布関数との畳み込み積分の形で表現できる⁹⁾。

$$h(\theta) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\theta \cdot Pe}} \exp\left[-\frac{Pe(1-\theta)^2}{4\theta}\right] \quad (1)$$

$$f(\theta) = \int_0^\theta g(\tau) \cdot h(\theta - \tau) \cdot d\tau \quad (2)$$

ここで、 $h(\theta)$ は滞留時間分布関数 $(-)$ 、 θ は時刻 t を平

図3 電気伝導率比の経時変化の例
(槽No. 1 流量: $5.0 \text{ m}^3/\text{h}$)

均滞留時間 t_{avg} で除した無次元化時間 $(-)$ 、 Pe はペクレ数 $(-)$ 、 $g(\theta)$ と $f(\theta)$ はそれぞれ無次元化時間 θ における入口および出口の電気伝導率比 $(-)$ である。

トレーサー実験の結果より、各紫外線照射槽の流量毎のペクレ数を求めた。求め方は、ペクレ数と平均滞留時間の値を変化させて出口の電気伝導率比を計算し、その計算値と実験値の誤差の二乗和が最小になるようにした。

図4に流量とペクレ数の関係を示す。図4より、槽No. 2は槽No. 1よりペクレ数がどの流量においても大きく、槽内の流動が栓流に近い状態であった。しかし、両紫外線照射槽とも流量変化によるペクレ数の変動には傾向がなかった。また槽No. 1においてはペクレ数が3.6~6.5であり、槽No. 2と比較してその変動幅が小さかった。

4. 消毒効果予測

4.1 紫外線照射量分布算定における仮定

前節で求めた滞留時間分布に紫外線強度分布を付加させ、紫外線照射量の分布を仮定すれば紫外線照射槽の微生物の生残率あるいは消毒効果を予測することができる。そこで、槽No. 1の実験結果に基づいて、槽No. 2における生残率を予測した。その際には、滞留時間分布の有無と紫外線強度の値を仮定し、紫外線照射量分布を求め、表2に示すCase I~IVの4種類において生残率を計算した。各Caseにおける紫外線強度は、槽内の紫外線強度分布から求まる平均紫外線強度と、紫外線照射槽外管の内表面(以下、最遠点と記述)での紫外線強度を用いた。滞留時間は、前節より混合拡散モデルにより求めた滞留時間分布と平均滞留時間を用いた。なお外管内側の反射に関しては、外管材質のステンレスの反射

図4 流量とペクレ数の関係

表2 ファージ生残率の各 Case の計算条件

Case	紫外線強度	滞留時間	生残率
I	平均	混合拡散モデル	$S = \int_0^{\infty} h(\theta) \exp\left(-\frac{I_{\text{avg}} \cdot t_{\text{avg}} \cdot \theta}{D}\right) \cdot d\theta \quad (3)$
II	平均	平均	$S = \exp\left(-\frac{I_{\text{avg}} \cdot t_{\text{avg}}}{D}\right) \quad (4)$
III	最遠点	混合拡散モデル	$S = \int_0^{\infty} h(\theta) \exp\left(-\frac{I_R \cdot t_{\text{avg}} \cdot \theta}{D}\right) \cdot d\theta \quad (5)$
IV	最遠点	平均	$S = \exp\left(-\frac{I_R \cdot t_{\text{avg}}}{D}\right) \quad (6)$

率が鏡面磨きの未使用時で 20～30%⁴⁾と小さく、反射を考慮しても各 Case の計算結果への影響が小さいことに加え、紫外線強度分布の容易な計算が複雑になり紫外線強度分布推定の有用性を減じることになると考えられたため考慮しなかった。

ここで、表2において S はファージの生残率(-)、 I_{avg} は平均紫外線強度 (mW/cm^2)、 I_R は最遠点での紫外線強度 (mW/cm^2)、 D はファージの紫外線不活化速度 $5.9 (\text{mJ}/\text{cm}^2)^{10}$ とした。

4.2 半径光を用いた紫外線強度分布推定法

紫外線強度分布推定法には、紫外線ランプからの発光が線光源を仮定した半径光、透明白光、拡散光が提案されている¹¹⁾。半径光は透明白光、拡散光よりも計算が容易であり紫外線強度分布の検証が簡便かつ有用性があることから本研究ではこれら提案されている中から、紫外線強度分布推定法として半径光を用いた。半径光は線光源がランプの中心軸上にあることを仮定した紫外線強度分布である¹²⁾。この分布に基づいた場合、紫外線照射槽の紫外線強度は式(7)で示される。また、槽内の平均紫外線強度は、式(8)で示される。

$$I_r = \frac{I_0 r_0}{r} \exp\{-2.3 \cdot Abs_{254}(r - r_0)\} \quad (7)$$

$$I_{\text{avg}} = \frac{r_0}{\pi(R^2 - r_0^2)} \int_{r_0}^R I_r \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (8)$$

ここで、 I_r は槽の中心からの距離 r における紫外線強度 (mW/cm^2)、 I_0 は石英スリーブ表面での紫外線強度 (mW/cm^2)、 R は槽の外管内側の半径 (cm)、 r_0 は石英ス

リーブ外側の半径 (cm)、 Abs_{254} は波長 254nm の吸光度 (cm^{-1}) である。 I_R の値は式(7)の r に R を代入することで求められる。

式(7)における定数として I_0 の値が必要となる。そこで、槽 No. 1 に Case I を適用し、計算値と実測値の誤差の二乗和が最小となるよう I_0 の値を定めた。これは、槽 No. 1 において発光長に対する光路長の比が 0.01 と非常に小さく、流下に伴って紫外線強度が平均化されると考えたためである。さらに流量変化に伴う混合特性を表すペクレ数の変化がほとんどなく、ペクレ数の平均値が 5.21 と比較的小さかったため、槽 No. 1 におけるファージの生残率の算定には滞留時間分布を考慮する必要があると判断したためである。その結果、 I_0 の値は $59.8 (\text{mW}/\text{cm}^2)$ であった。

また I_{avg} は、紫外線照射槽断面を 101×101 の正方格子にあてはめ、槽内となる 4948 点 (槽 No. 1)、6676 点 (槽 No. 2) での紫外線強度を算出し求めた。

図5に槽 No. 1 の計算値と実測値の比較を示す。図5

図5 半径光によるファージの生残率の計算値と実測値の比較 (槽 No. 1)

より、計算値と実測値はほぼ一致しており、Case I の仮定が槽 No. 1 において妥当であると考えられた。

図6に槽 No. 2 の各 Case の計算値と実測値の比較を示す。図6より実測値はファージの生残率が最も大きくなる Case III の計算値よりも大きかった。そのため、半径光を仮定した紫外線強度分布において、紫外線強度が最も小さくなる最遠点での値を用いた場合でさえ、消毒効果を過大評価していることになり、設計上の問題点となることが明らかとなった。よって、半径光を用いた紫外線強度分布推定法による消毒効果予測は不適切な場合があると考えられた。

4.3 修正半径光を用いた紫外線強度分布推定法

半径光では槽 No. 2 の消毒効果予測値が説明可能な範囲外であったため、半径光の仮定が不適切であると考えられ他の紫外線強度分布を考案する必要が生じた。そこで、発光点がランプ表面部分にあり発光点からの距離の -1 乗に紫外線強度が比例すると仮定し、これを修正半径光と名づけ、紫外線強度分布を推定した。

修正半径光を用いた際の紫外線照射槽の紫外線強度は式(9)で示される。

$$I_r = \frac{I_0(r_0 - r_L)}{r - r_L} \exp\{-2.3 \cdot Abs_{254}(r - r_0)\} \quad (9)$$

ここで、 r_L は紫外線ランプ半径(cm)である。平均紫外線強度は式(9)の I_r を式(8)に代入して求められる。式(9)の I_0 の値の算出は、半径光と同様に槽 No. 1 に Case I を適用し、計算値と実測値の誤差の二乗和が最小となるように定めた。その結果、 I_0 は $90.7 \text{ (mW/cm}^2\text{)}$ であった。

図6 半径光による各 Case におけるファージの生残率の計算値と実測値の比較 (槽 No. 2)

図7に槽 No. 1 の計算値と実測値の比較を示す。図7より、図5の半径光同様、修正半径光を仮定した場合でも、計算値と実測値はほぼ一致しており、Case I の仮定が半径光の時と同様、妥当であると考えられた。

図8に槽 No. 2 の修正半径光による各 Case の計算値と実測値の比較を示す。槽 No. 2 において Case I および Case II の計算値は実測値よりも小さくなることが分かった。一方、Case III および Case IV は半径光を用いた場合と異なり、計算値が実測値よりも大きかった。これは、槽内の水塊がすべて最遠点を通過した場合と、流れが理想状態である栓流の場合での範囲に実測値が収まったことになる。また Case I と Case II および Case III と Case IV の計算値は滞留時間分布による差がほとんどなかった。これは、槽 No. 2 のペクレ数の平均が 87.1 と比較的大きいため、滞留時間分布が消毒効果予測にほとんど影響しなかったためだと考えられた。

このことは、槽 No. 2 における消毒効果を予測する際に、紫外線強度分布として平均紫外線強度を用いると消

図7 修正半径光によるファージの生残率の計算値と実測値の比較 (槽 No. 1)

図8 修正半径光による各 Case におけるファージの生残率の計算値と実測値の比較 (槽 No. 2)

毒効果が過大評価となり、最遠点の紫外線強度では過小評価していることになる。したがって、紫外線照射槽の設計を行う場合に最遠点での紫外線強度を用いれば、紫外線照射量を過小評価するため安全側ということになる。しかし、生残率の実測値は Case III, Case IV の計算値を下回るため、平均紫外線強度よりも小さく、最遠点での紫外線強度より大きい紫外線強度で消毒効果が定まっていることが分かった。これは、図9に半径光および修正半径光において I_0 の値を用いた紫外線照射槽の断面紫外線強度分布の比較より考察することができる。修正半径光は半径光と比較して、石英スリーブ表面での紫外線強度が大きく、各槽の最遠点での紫外線強度が小さく予測される。槽 No. 2 における最遠点での紫外線強度は半径光で $19.6 \text{ (mW/cm}^2\text{)}$ 、修正半径光で $11.7 \text{ (mW/cm}^2\text{)}$ と、半径光の方が約 1.7 倍大きかった。したがって、紫外線強度分布推定法として修正半径光を用いた場合、半径光よりも最遠点の紫外線強度が小さくなるため、生残率の計算値が実測値よりも大きくなり、修正半径光による予測で紫外線照射槽の設計を行えば、計算値より小さい生残率が担保される。

以上より、従来用いられてきた簡便な半径光による紫外線強度分布よりも、新たに考案した修正半径光による予測の方が実測値をより適切に表していたことが分かった。

5. 結 論

本研究において、使用ランプおよびそのランプ本数が同じで、光路長以外の長さがほぼ等しい2種類の紫外線

照射槽を用いて不活化実験およびトレーサー実験を行い、滞留時間分布と紫外線強度分布の有無を仮定した消毒効果予測の計算値と実測値を比較することで紫外線強度分布推定法を検討した結果、以下の結論を得た。

不活化実験より、槽 No. 1、槽 No. 2 とも滞留時間の増加に伴い生残率が減少し、消毒効果が増大した。また槽 No. 1 よりも光路長の大きい槽 No. 2 の方が、同流量での生残率が小さく、消毒効果が大きかった。すなわち、同一ランプ、同一流量においても光路長の違いにより、消毒効果が異なることが示された。

トレーサー実験の結果、槽内の滞留時間分布は混合拡散モデルで表され、槽内の流動特性を表すペクレ数を求めることで、各紫外線照射槽の流動特性を把握することができた。

実験結果に基づいて算定した槽 No. 1 の生残率の計算値は実測値とほぼ一致しており、計算に用いた Case I における仮定が妥当であると考えられた。

半径光を用いた場合、実測値は各 Case でファージの生残率が大きくなる Case III の計算値よりも大きく、消毒効果予測が説明可能な範囲外であった。

一方で修正半径光を用いた場合、実測値は槽内の水塊がすべて最遠点を通過すると仮定した場合 (Case III と Case IV) の計算値より小さく、流れが理想状態である栓流の場合 (Case I と Case II) より大きかった。

よって従来用いられてきた簡便な半径光による紫外線強度分布よりも、新たに考案した修正半径光による予測の方が実測値をより適切に表しており、最遠点での紫外線強度より大きく、平均紫外線強度よりも小さい紫外線強度で消毒効果が定まっていることが分かった。

文 献

- 1) マシユラン 著, 海賀信好 訳; 紫外線による水処理と衛生管理, 技報堂出版, 170, 2004.
- 2) (財) 水道技術研究センター; 新しい浄水技術, 技報堂出版, 177-178, 2005.
- 3) 神子直之; 水の紫外線処理に関する動向, 水道技術ジャーナル, (45), 27-30, 2007.
- 4) 平田 強; 紫外線照射 一水の消毒への適用一, 技報堂出版, 8-9, 156-157, 2008.
- 5) 浦上逸男; 初歩から学ぶ紫外線殺菌, 工業調査会, 51-53, 2005.
- 6) United states Environmental Protection Agency; Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule, 48-52, 2006.
- 7) 土木学会衛生工学委員会編; 環境微生物工学研究法, 技報堂出版, 233-236, 1993.
- 8) 井本立也; 反応工学, 日刊工業新聞社, 201-205, 1968.
- 9) 田河生長; 応用数学, 大日本図書, 112-113, 1999.
- 10) Naoyuki Kamiko and Shinichiro Ohgaki; RNA coliphage Q β as a

図9 半径光および修正半径光による紫外線照射槽の断面紫外線強度分布の比較

- bioindicator of the ultraviolet disinfection efficiency, Wat.Sci.Tech., 21, (3), 227-231, 1989.
- 11) 船山齊, 萩原宏二郎, 菅原拓男, 大橋弘保; 低圧水銀灯を照射した光反応器の光強度分布—光源の波長分布の影響—, 化学工学論文集, 3, (4), 354-358, 1977.
- 12) 増田俊幸, 岩野俊彦, 只木楨力; 内部照射型光化学反応器の光強度について, 化学工学論文集, 2, (3), 298-303, 1976.

**The Influence of the Newly Dosed UV Rate Distribution Estimation Method
on Predictions of Disinfection Effects in UV Disinfection Reactors**

Nobuhito YASUI, Naoyuki KAMIKO, Tatsuyuki IWASAKI

ABSTRACT

According to “*Cryptosporidium* countermeasures in waterworks” from the Ministry of Health, Labour and Welfare in Japan, usage of UV was conditionally accepted. However, since disinfection effects are determined by the UV dose, which is expressed by the multiplication of the UV dose rate and the distributing residence time, in general the prediction of the disinfection effect is difficult.

In this study, inactivation experiments and tracer experiments were conducted using two UV disinfection reactors and prediction of the performance of one reactor whose efficiency was higher than the results of another reactor which had a more uniform UV dose rate was attempted. From the results, the predicted value of the disinfection effect using a newly developed modified radial light demonstrated the measured value appropriately rather than with radial light. Moreover, when modified radial light was used, it turned out that the disinfection effect was in the range from the UV dose calculated by UV dose rate on the inner surface of the outside reactor tube, to the average UV dose rate.

Key Words : UV disinfection reactor, residence time distribution, UV dose rate distribution, radial light, modified radial light