紫外線発光ダイオード(UV-LED)を用いた 環状外照式水消毒装置の開発と評価

喜多 諒¹・小熊 久美子²・酒井 宏治³・滝沢 智⁴

¹学生会員 東京大学大学院修士課程 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:kita@env.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学大学院講師 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:oguma@env.t.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京大学大学院特任助教 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:h_sakai@env.t.u-tokyo.ac.jp

⁴正会員 東京大学大学院教授 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:takizawa@env.t.u-tokyo.ac.jp

紫外線発光ダイオード (UV-LED) は小型、堅牢、無水銀などの特徴を持ち、優れた紫外発光光源として、従来の紫外線ランプでは実用化が難しい用途・分野への適用が期待されている。本研究では、環状外照式のUV-LEDモジュールを作製し、UV-LEDを利用した水消毒装置の有効性を実験およびシミュレーションによって評価した。実験では、大腸菌および大腸菌ファージQβにおける不活化効果を定量し、同時に行ったCFD解析ソフトウェアによる装置内の水流の解析から、モジュールの不活化効果が装置内の水理条件に大きく影響を受けることを明らかにした。さらに、装置内の線量率分布および流速分布のシミュレーションから、環状外照式モジュールの有する不活化特性を明らかにし、UV-LEDを用いた水消毒装置の開発に資する知見を得た。

Key Words : coliphage Qβ, disinfection, *Escherichia coli*, UV-light emitting diode (UV-LED), water treatment

1. はじめに

現在の浄水処理工程では、水消毒プロセスとして、次亜塩素酸などを用いた塩素消毒が広く用いられている。しかし、水の異臭味に対する意識の高まりやクリプトスポリジウムに代表される耐塩素性病原微生物の問題を受け、近年では、塩素消毒に代わる新たな消毒法が検討されるようになった。特に、紫外線照射による水の消毒は、クリプトスポリジウムに極めて有効、薬品添加が不要、運転管理が容易、消毒副生成物を生成しにくいなどの特徴から注目されている。

紫外線照射による水の消毒には、通常、低圧水銀ランプや中圧水銀ランプなどの紫外線水銀ランプが用いられるが、水俣条約などの社会背景を受け、近年では、無水銀紫外線光源に対する志向が強くなっている。その中で、発光ダイオード (Light Emitting Diodes, LED) の技術躍進に伴い、殺菌波長の照射が可能となった紫外線発光ダイオード (UV-LED) が新たに市場に登場した。UV-LED

は、小型、堅牢、無水銀、ウォームアップ不要などの特徴を持ち、従来の紫外線水銀ランプでは難しい用途、分野での紫外線利用が可能になると期待されている。さらに、今後の技術躍進に伴い、出力、寿命の向上および価格の低下が見込まれるとの研究報告^{1),2)}もあり、UV-LEDが今後、水の消毒に利用される可能性は高いと期待される。

しかし、UV-LEDは近年、開発されたばかりであり、水の消毒プロセスにUV-LEDを用いた研究は限られている^{3,9)}。中でも、殺菌に特に有効とされるUVC (200-280nm) の波長を照射するUV-LEDを導入した既往の研究は非常に少なく、これらの研究では、一方向からの照射^{3,8)}や内照式⁹⁾といった限定的な照射構造による基礎的な研究にとどまっている。さらに、気密性の高い装置構造をとった場合、多数のUV-LED素子を点灯させた際の素子の自己発熱により素子一つあたりの出力が低下する可能性も示唆され⁹⁾、今後の装置開発において、放熱性に配慮した構造が求められる。このように、今後、UV-

LEDを用いた水消毒装置の開発を進めるにあたり、素子のレイアウトや照射方向、放熱性を考慮した基盤構造など、装置開発に関してより実用的な知見を収集する必要があると考えられる。

本研究では、UV-LEDを用いた水消毒装置の検討として、環状外照式のUV-LEDモジュールを作製し、実験およびシミュレーションによって、環状外照式のUV-LEDモジュールの紫外線水消毒の有効性を評価した。さらに、得られた結果から、UV-LEDを用いた水消毒装置の開発に資する知見の収集を試みた。

2. 研究方法

(1) UV-LEDモジュール

本研究で用いるUV-LEDモジュールには、既存の研究⁹⁾で時間あたりの不活化効率が最も高かった282nmをピーク波長とする表面実装型UV-LED (DF8VM-2K00, DOWAエレクトロニクス)を用いた。図-1、図-2にUV-LEDの配光分布および照射スペクトルを示す。なお、放射束は、20mAあたり1.2mWである¹⁰⁾。この表面実装型UV-LEDを、環状アルミ基板の内側に計20個等間隔に設置し、環状外照式のUV-LEDモジュールとした(図-3)。実験では、外径52mm、内径48mm、長さ400mmの熔融石英管(旭製作所)の外側にモジュールを設置し、石英管内を通過す

る供試水に対し外側からのシングルパス照射を行った(図-4)。なお、使用した熔融石英管の282nm付近の紫外線透過率は、厚さ2mmあたり89.2%である。

(2) 不活化効果の定量

実験には、東京大学内に保存されている大腸菌K12 IFO3301および大腸菌ファージQ β を用い、それぞれ初期濃度 2.0×10^6 cfu/mL、 1.2×10^4 pfu/mLとなるよう滅菌済みリン酸緩衝液に懸濁し、供試水とした。図-5に実験装置全体の概要を示す。実験前準備として、有効塩素濃度1mg/Lの次亜塩素酸ナトリウム溶液を装置内に1時間通水循環し、装置内を消毒後、滅菌済みRO水を十分に通水することで残留塩素を洗浄した。通水後の滅菌済みRO水から残留塩素が検出されないことを確認した後、装置内を滅菌済みリン酸緩衝液で満たし、モジュールを点灯した。なお、電源には、小型直流電源(KX-100H, 高砂)を使用し、入力電流はUV-LED一つあたり20mAとなるよう定電流で運転した。モジュール点灯後は、石英管内の水理学滞留時間(Hydraulic Retention Time, HRT)が1分となる流量600mL/minおよびその半分となる流量1200mL/minで装置内に試料を通水し、石英管内の水が十分入れ替わる時間をHRTの3倍と想定し¹¹⁾、供試水通水開始からHRTの3倍、4倍、5倍、6倍、7倍の各時点でサンプリングを行った。サンプリングは装置出口から直接行い、通水前の微生物数(N_0)および通水後の微生物数(N)から

図-1 UV-LEDの配光分布¹⁰⁾

図-2 UV-LEDの照射スペクトル¹⁰⁾

図-3 実験に使用したモジュール

図-4 モジュール設置図

LOG不活化(-LOG(N/N₀))を算出し、5サンプルの平均を各実験条件でのLOG不活化とした。大腸菌はクロモカルト寒天培地法、大腸菌ファージQBは大腸菌K12A/λ(F+)を宿主とした重層寒天培地法で測定し、大腸菌ファージQBによる生物線量計¹²⁾を用いて254nm換算照射線量を測定した。また、本研究では、モジュール設置箇所の不活化効果への影響を検討するため、モジュールを流入口付近、石英管中央、流出口付近にそれぞれ設置し、モジュール設置箇所ごとの不活化効果の定量を行った。石英管の中央を原点、流れ方向をx、断面方向をy-z平面とし、X=-10cm, 0cm, 10cmの三地点にUV-LEDモジュールを設置した(図-6)。

(3) 石英管内の水利条件の解析

本研究では、石英管内の水利条件の検討を目的に、数値流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)解析ソフトウェアを用いた石英管内の三次元流れのシミュレーションを行った。CFD解析ソフトウェアとしてOpenFOAM(OpenCFD Ltd.)を用い、図-6の寸法に従ってCFD解析を行った。乱流モデルにはk- ω SST, RNG k- ϵ , Spalart-Allmaras, Launder-Sharma低レイノルズ数型k- ϵ の四種類のレイノルズ平均モデル(Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS)を用い、非圧縮、定常乱流ソルバであるsimpleFOAMによって計算を行った。

(4) UV-LEDモジュールの不活化特性の検討

石英管内の線量率分布および流速分布を計算によってシミュレートし、環状外照式UV-LEDモジュールにおける不活化効果を算出した。算出にあたっては、メッシュ分割による格子計算を行い、石英管の内径を100×100のメッシュに分割するよう石英管内部を正六面体体積要素

に分割した。なお、計算は、モジュール設置位置を中心とした15cm区間を対象とし、光源となるUV-LEDは石英管外壁に完全に接しているものとした。図-7に格子計算の設定を示す。

各体積要素の線量率の算出には、拡散光モデル¹³⁾を採用し、UV-LEDの配光分布と供試水のUV透過率を考慮した式(1)を計算に用いた。

$$I_0 = \sum_{i=1}^{20} \frac{R_0 \cdot T \cdot f(\cos \theta) \cdot 10^{-\alpha(100L-0.2)}}{L^2} \quad (1)$$

ここで、 I_0 は体積要素の線量率[W/m²]、 R_0 は光軸方向における単位立体角あたりの放射束(放射強度)[W/sr]、 T は石英管の透過による減衰、 $f(\cos \theta)$ は配光角による減衰、 α は供試水の吸光度[cm⁻¹]、 L は光源と体積要素間の距離[m]となっている。各光源の座標を(X_i Y_i Z_i) ($i=1, 2, 3 \dots 20$)、体積要素の座標を(x y z)とすると、光源の座標、距離要素、角度要素は、それぞれ式(2)、式(3)、式(4)のようになる。

$$(X_i \ Y_i \ Z_i) = \left(0 \quad 0.026 \cos \frac{\pi i}{10} \quad 0.026 \sin \frac{\pi i}{10} \right) \quad (2)$$

$$L = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} \quad (3)$$

$$\cos \theta = \frac{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2 - X_i x - Y_i y - Z_i z}{\sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2} \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2}} \quad (4)$$

石英管透過による減衰は厚さ2mmあたり89.2%であり、供試水の吸光度は分光光度計(UH5300, HITACHI)による測定の結果、0.022cm⁻¹となった。また、配光分布による減衰は、図-1に示す配光分布との近似を行い、8次の近似式を用いた。なお、近似式の決定係数は0.994となった。

また、石英管内の流速分布の算出にあたり、本研究で

図-5 実験装置概要

図-6 UV-LEDモジュール設置位置詳細

図-7 格子計算における設定

は円管における層流流れを仮定し、各体積要素の流速の計算に式(5)を用いた¹⁴⁾。

$$U_0 = \frac{2Q}{\pi \cdot R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (5)$$

ここで、 U_0 は体積要素のx方向の流速[m/sec]、 Q は流量[m³/sec]、 R は石英管の内径半径[m]、 r は体積要素と円管中心軸の距離[m]となっている。各体積要素の座標を考慮すると、式(5)は次のようになる。

$$U_0 = \frac{2Q}{\pi \cdot 0.024^2} \left(1 - \frac{y^2 + z^2}{0.024^2} \right) \quad (6)$$

また、全体の不活化効果は式(7)により算出した。

$$-\text{LOG} \left(\frac{N}{N_0} \right) = -\text{LOG} \frac{\sum_{i=1}^n \left(U_i \cdot \exp \left(-k \cdot \sum_{l \in F_i} \frac{l \cdot L_0}{U_i} \right) \right)}{\sum_{i=1}^n U_i} \quad (7)$$

ここで、 n は対象とする流束数、 U_i は各流束の流速[m/sec]、 k は不活化速度定数[cm²/mJ]、 L_0 は体積要素の一边の長さ[m]、 F_i は各流束をなす体積要素の集合、 l は各体積要素の線量率[mW/cm²]となっている。また、本研究では、著者らが行ったUV-LEDを用いた回分式紫外線照射実験⁹⁾に基づき、282nmUV-LEDによる大腸菌および大腸菌ファージQβの不活化速度定数 k を定量した。

3. 結果および考察

(1) 不活化効果の定量結果

図-8に環状外照式UV-LEDモジュールの不活化効果の定量結果を示す。流量600mL/min、流量1200mL/minにおいて、それぞれ最大6log程度、最大3log程度の大腸菌不活化効果が得られ、生物線量計による254nm換算照射線量は、それぞれ12.1mJ/cm²、7.1mJ/cm²となった。なお、大腸菌における1log不活化照射線量¹⁵⁾を用い、測定された254nm換算照射線量から不活化効果を算出すると、流量600mL/min、流量1200mL/minにおいて、それぞれ5.1log、3.1logとなり、本研究における不活化効果の定量結果と既往の研究との間に整合性が見られた。また、大腸菌、大腸菌ファージQβともに、X=10cm、0cm、-10cmの順に不活化効果が高く、モジュール設置箇所による不活化効果の違いが見られた。

(2) CFD解析による石英管内の水利条件の検討結果

図-9にCFD解析によって得られた石英管内のx方向の流速分布を示す。いずれのモデルでもX=-10cmにおいてバックフローを伴う噴流が示唆され、その後、噴流から

層流へと流れが遷移する傾向が見られた。また、流入口近傍であるX=-10cmでは、円管中心部分における流速が非常に大きく、紫外線照射時間が非常に短い水塊、すなわち短絡流が発生していると考えられ、対して、X=0cmおよびX=10cmでは、流速が十分に小さく、層流に近い安定した流れにあると示唆された。以上から、モジュールを設置する位置によって不活化効果が大きく異なった

図-8 不活化効果の定量結果 (エラーバーは最大値,最小値)

図-9 石英管内のx方向の流速分布 (600mL/min, z=0)

のは、流入口近傍では短絡流の影響により不活化効率が低下するものの、流下に伴い短絡流の影響が小さくなり、不活化効率が次第に高くなったためと推察される。このように環状外照式の照射構造は、噴流や層流といった局所的な水理条件の影響を大きく受けることが示唆された。

(3) X=10cmでの不活化効果のシミュレーション

不活化実験の結果、X=10cmでの層流条件下において最も高い不活化効果が得られた。そこで、層流条件下における環状外照式の照射構造にどのような不活化特性があるか、シミュレーションによる検討を行った。

a) 不活化速度定数の定量

図-10に282nmUV-LEDによる大腸菌および大腸菌ファージQβの不活化速度定数 k の定量結果を示す。なお、照射線量の測定には、シュウ酸鉄カリウムによる化学線量計¹⁶⁾を用いた。定量の結果、282nmUV-LEDによる不活化速度定数 k は、大腸菌、大腸菌ファージQβに対し、それぞれ $0.51\text{cm}^2/\text{mJ}$ 、 $0.074\text{cm}^2/\text{mJ}$ となった。なお、254nmにおける不活化速度定数 k は、大腸菌、大腸菌ファージQβに対し、それぞれ $1.0\text{cm}^2/\text{mJ}$ ¹⁵⁾、 $0.17\text{cm}^2/\text{mJ}$ ⁹⁾であり、これをDNAの吸光スペクトル¹⁷⁾を用いて280nmにおける値へ換算すると、それぞれ $0.57\text{cm}^2/\text{mJ}$ 、 $0.10\text{cm}^2/\text{mJ}$ となり、これらの結果から、本研究における定量結果と既存研究との間に概ね整合性が見られた。

図-10 不活化速度定数の定量結果

b) 光源の放射強度の算定

式(1)における光源の放射強度 R_0 は実測値を得ることが技術的に困難なため、本研究ではシミュレーションで得られる不活化効果の値を実験結果にフィッティングすることによって算定した。フィッティングには、実験結果としてX=10cmにおける不活化効果の定量結果を用い、最小二乗法により放射強度 R_0 の値を算定した。算定された放射強度 R_0 による不活化効果のシミュレーション結果と実験結果の比較を図-11に示す。これらの結果から、シミュレーションで得られた放射強度 R_0 について妥当性が高いと判断し、以後の解析に用いた。

c) 石英管内の線量率分布の算出

図-12に石英管内の流れ方向における線量率分布の算定結果を示す。なお、モジュールは、図中横軸0cmの位置にモジュール断面が流れ方向に垂直になるよう設置されているものとした。算定結果から、光源直下の壁面近傍で線量率が高く、流れ方向に離れるにつれ、急激に線量率が低下する傾向が示唆された。これは、モジュール設置箇所から流れ方向へ距離が広がるにつれ、距離による減衰の影響が大きくなり、さらに、各光源からの配光角が大きくなるため、式(1)における配光角による減衰 $f(\cos\theta)$ が不活化効果に影響するようになったためと考えられる。また、図-12の線量率分布から、本研究での環状外照式UV-LEDモジュールにおいて、モジュール設置

図-11 実験とシミュレーション間の不活化効果の比較

図-12 流れ方向における線量率分布の算定結果

図-13 断面を通る流束の照射線量分布の算定結果

図-14 全水塊における照射線量の度数および累積度数分布の算定結果

箇所の近傍にのみ紫外線照射が有効であることが分かり、環状外照式の照射構造が比較的局所的な照射であることが示唆された。

d) 石英管内の照射線量分布の算出

図-13に断面を通る流束の照射線量分布の算定結果、図-14に全水塊の照射線量の度数分布の算定結果をそれぞれ示す。図-13から、流量600mL/min、流量1200mL/minともに壁面近傍の流束の照射線量が高く、円管中央における流束の照射線量が最も低いことが分かる。また、図-14から、いずれの流量でも照射線量の低い水塊が占める割合が大きいたことが分かる。これは、円管層流の条件下では円管中央における流速が大きいため、円管中央の流束の紫外線照射時間が短くなり、かつ全体に対して占める割合が大きくなるためだと考えられる。以上から、環状外照式の照射構造では、照射線量の低い円管中央における流束が不活化において最も支配的であることが示唆される。

e) UV透過率および円管直径の不活化への影響検討

本研究では、計算に用いる円管直径および供試水のUV透過率を変えることで、不活化効果への影響を検討した。計算では、直径1cmから25cmまでの円管を対象と

図-15 供試水のUV透過率および円管直径の大腸菌不活化効果への影響の算定結果 (600mL/min)

し、円管直径に対し4mmを内径、+4mmを外径とした。また、吸光度 a を供試水のUV透過率が95%、75%、50%となるよう算出し、流量600mL/minの条件の下、大腸菌の不活化効果を算出した。図-15に各条件における大腸菌不活化効果の算定結果を示す。図-15から、各条件において、円管直径の拡大が不活化に有効であることが示唆された一方で、一定の円管直径を超えた場合に不活化効果が低下することが示唆された。これは、流量を一定

とした場合、円管直径を拡大することで管内の流速が減少し、より多くの照射時間を得ることができる一方で、一定の円管直径を超えると透過率による減衰の影響が大きくなるためだと考えられる。さらに、図-15から、UV透過率が低い条件ほど、不活化に最適な円管直径が小さくなることが示唆された。これは、UV透過率が低いほど、不活化における吸光阻害の影響がより顕著となるためだと考えられる。以上から、環状外照式の照射構造において、流量一定の条件では供試水の透過率および円管直径によって不活化効果が異なり、さらに、供試水のUV透過率によって最適な円管直径が異なることが示唆された。

なお、本研究でのシミュレーションによる検討において、UV-LEDの光軸方向における放射強度をフィッティングによって算出したが、単位立体角あたりの放射束である放射強度を直接的に測定することは難しいため、今後のモデルにおいて改善する必要がある。また、本研究では、各界面における光の屈折の影響を考慮しておらず、加えて、円管内の流れについて完全な層流を仮定しているため、屈折の影響や流動条件の変化について詳細な検討を要する。

4. まとめ

UV-LEDを用いた水消毒装置の検討として、本研究では、環状外照式のUV-LEDモジュールを作製し、その性能を実験およびシミュレーションによって評価した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 流量600mL/minで最大6log 程度の大腸菌不活化効果および12.1mJ/cm²の254nm換算照射線量、流量1200mL/minで最大3log 程度の大腸菌不活化効果および7.1mJ/cm²の254nm換算照射線量が得られ、環状外照式UV-LEDモジュールの有効性を実験により確認した。
- 2) モジュール設置条件によって不活化効果が大きく異なり、噴流や層流などの通水管内の複雑な水理条件が不活化効果に大きく影響することをCFD解析によって明らかにした。
- 3) シミュレーションによる通水管内の線量率分布の算定から、本研究における環状外照式の照射構造が局所的な照射であることが示唆された。
- 4) 円管層流条件下での照射線量分布をシミュレートした結果、円管中央における流束の照射線量が最も低く、かつ不活化に最も支配的であることが示唆された。
- 5) シミュレーションによる不活化効果の算出におい

て供試水のUV透過率および円管直径の影響を検討した結果、不活化における最適な直径の存在が示唆された。

本研究により、UV-LEDを用いた環状外照式の水消毒装置の有効性が示された。さらに、UV-LED装置の設置位置や水流の流動条件が不活化効果に影響することが示され、今後の研究と装置開発に資する重要な知見を得た。

謝辞：本研究はJSPS科学研究費補助金 26289181およびクリタ・環境科学振興財団13B057の助成を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) C. Chatterley and K. Linden : Demonstration and evaluation of germicidal UV-LEDs for point-of-use water disinfection, *Journal of Water and Health*, Vol.8, 479-486, 2010.
- 2) MA. Ibrahim, J. MacAdam and O. Autin : Evaluating the impact of LED bulb development on the economic viability of ultraviolet technology for disinfection, *Environmental Technology*, Vol.35, 400-406, 2014.
- 3) A. Hamamoto, M. Mori, A. Takahashi, M. Nakano, N. Wakikawa, T. Ikehara, Y. Nakaya and Y. Kinouchi : New water infection system using UVA light-emitting diodes, *Journal of Applied Microbiology*, Vol.103, 2291-2298, 2007.
- 4) Y. Aoyagi, M. Takeuchi, K. Yoshida, M. Kurouchi, N. Yasui, N. Kamiko, T. Araki and Y. Nanishi : Inactivation of Bacterial Viruses in Water Using Deep Ultraviolet Semiconductor Light-Emitting Diode, *Journal of Environmental Engineering*, Vol.137, 1215-1218, 2011.
- 5) M. A. Wurtele, T. Kolbe, M. Liosz, A. Kulberg, M. Weyers, M. Kneissl and M. Jekel : Application of GaN-based ultraviolet-C light emitting diodes -UV LEDs- for water disinfection, *Water Research*, Vol.45, 1481-1489, 2011.
- 6) C. Boeker, A. Sain, M. Shatalov and J. Ducoste : Microbial UV Fluence-response assessment using a novel UV-LED collimated beam system, *Water Research*, Vol.45, 2011-2019, 2011.
- 7) A. C. Chevrement, A. M. Farnet, M. Sergent, B. Coulomb and J. L. Boudenne : Multivariate optimization of fecal bi-indicator inactivation by coupling UV-A and UV-C LEDs, *Desalination*, Vol. 285, 219-225, 2012.
- 8) A. C. Chevrement, A. M. Farnet, B. Coulomb and J. L. Boudenne : Effect of coupled UV-A and UV-C LEDs on both microbiological and chemical pollution of urban wastewaters, *Science of the Total Environment*, Vol.426, 304-310, 2012.
- 9) K. Oguma, R. Kita, H. Sakai, M. Murakami and S. Takizawa : Application of UV light emitting diodes to batch and flow-through water disinfection systems, *Desalination*, Vol.328, 24-30, 2013.
- 10) DOWA electronics and material, <http://www.ultraviolet-led.com/>

- 11) 水道技術研究センター 紫外線照射装置 JWRC 技術審査基準（低圧紫外線ランプ編）, 2008.
- 12) N. Kamiko and S. Ohgaki : RNA Coliphage Q β as a Bio-indicator of the Ultraviolet Disinfection Efficiency, *Water Science and Technology*, Vol. 21, 227-231, 1989.
- 13) O. M. Alfano, R. L. Romero and A. E. Cassano : Radiation field modelling in photoreactors—I. homogeneous media, *Chemical Engineering Science*, Vol.41, 421-444, 1986.
- 14) 日野幹雄：明解水理学, pp.88, 丸善, 1983.
- 15) K. Oguma, H. Katayama and S. Ohgaki : Photoreactivation of *Legionella pneumophila* after inactivation by low- or medium-pressure ultraviolet lamp, *Water Research*, Vol.38, 2757-2763, 2004.
- 16) S. Goldstein and J. Rabani : The ferrioxalate and iodide-iodate actinometers in the UV region, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Vol.193, 50-55, 2008.
- 17) J. Jagger, Introduction to Research in Ultraviolet Photobiology, pp.59, Prentice-Hall, 1967.

(2014. 5. 23 受付)

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A RING-SHAPED WATER DISINFECTION SYSTEM USING UV LIGHT EMITTING DIODES

Ryo KITA, Kumiko OGUMA, Hiroshi SAKAI and Satoshi TAKIZAWA

A UV light emitting diode (UV-LED) is an attractive UV light source that is free of mercury and lead, robust against shocks and small. In this study, we developed a ring-shaped UV-LED module to be attached to the outer wall of quartz cylinder. Inactivation efficiencies of *Escherichia coli* and coliphage Q β were measured and the hydraulic condition inside the cylinder was simulated by a computational fluid dynamics (CFD) software. As a result, the inactivation efficiency of the module was significantly affected by the hydraulic condition. In addition, we examined the characteristics of the module by calculating the distribution of flow rate and dose rate inside the cylinder.