

令和2年度厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）
小規模水供給システムの持続可能な維持管理に関する統合的研究（20LA0501）
分担研究報告書

小型紫外線消毒装置の基礎的知見の収集と実際への適用に関する研究

研究分担者 小熊 久美子 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 准教授

研究要旨：

小規模水供給システムに適した小型紫外線消毒装置の候補として、紫外発光ダイオード（UV-LED）を光源とする流水殺菌装置を検討している。本年度は、集落規模での利用を念頭に、飲料水供給施設（利用人口21戸50名程度）で実証試験を開始した。設定処理流量は30L/minとし、原水を直接UV-LED装置に導水し処理する方式とした。装置前後の試料を毎月概ね2回採水し、大腸菌、大腸菌群、一般細菌、従属栄養細菌の変化を調べた。これまでの経過として（n=10）、大腸菌は原水の60%で検出された一方、UV-LED処理水では全試料で大腸菌不検出であった。また、大腸菌群は原水の100%から検出された一方、UV-LED処理水での検出率は50%に低下し、検出濃度も最大2CFU/100mLと低かった。UV-LED処理による不活化率は、一般細菌で最大2.8log、従属栄養細菌で最大2.2logであった。UV-LED処理水は、水道水質基準の定める大腸菌数（100mL中に不検出）、一般細菌数（1mL中に100CFU以下）および水質管理目標設定項目として示された従属栄養細菌数の暫定目標値（1mL中に2000CFU以下）の全てを継続して満たした。本研究により、分散型水処理技術としてUV-LED装置を活用する可能性が示された。

A. 研究目的

飲み水の安全性を担保するうえで消毒は欠かせないが、小規模な水供給施設の技術的課題として、施設規模に適した消毒方法が十分に検討されていないことが挙げられる。特に、消毒剤（次亜塩素酸ナトリウム溶液）の補充や当番制での維持管理が高齢の住民の負担になっているほか、塩素のにおいに抵抗感を持つ住民が少なからず存在する。すなわち、現在普及している塩素消毒は小規模な水処理施設のニーズに必ずしも適していない実態がある。

本研究では、電力があれば導入可能で、薬剤を必要とせず、維持管理が比較的容易で、水の味やにおいに一切影響しない紫外線消毒技術に注目し、国内の小規模水供給施設に紫外線消毒を適用する可能性と課題を検討している。特に、小型、無水銀でオンデマンド運転が可能な紫外発光ダイオード（UV-LED）が小規模施設での利用に適していると考え、UV-LED水処理装置の小規模施設への適用に注目する。また、実際の水処理施設で中長期的な実証試験を行うことで、運転に伴う性能低下やメンテナンス頻度など、実装に不可欠な知見を得ることを目指す。過年度までに、蛇口ごと（Point-of-Use, POU）や建物ごと（Point-of-Entry, POE）の処理を想定し、順に処理流量2L/min, 10L/minの装置を用いて実証試験を行った^{1), 2)}。その成果を踏まえ、本年度は処理流量30L/minで集落規模の実証試験を開始した。処理性能を長期的にモニタリングすることで、紫外線装置の小規模施設への適用性と課題を明らかにすることを本研究の目的とする。

B. 研究方法

1. 実証試験の概要

試験の場として、国内某所の飲料水供給施設とした。当該施設は、長年民営の簡易水道事業（水道組合）として住民主体で運営してきたが、人口減少を踏まえ簡易水道から飲料水供給施設に2020年に認可変更を受けたものであり、給水人口は21戸50名である（2017年現地ヒア

リング時点)。原水は山間の表流水である。実証試験では、実際に住民に供給される浄水プロセスの原水を分岐して実験装置に導水するフローとした。なお、原水はろ過等の処理をせずに直接 UV-LED 装置に導水した。

試験は 2020 年 8 月末から開始し、概ね毎月 2 回（隔週）の頻度で採水した。試料は UV-LED 装置の前後で採水し、また、UV-LED を消灯した状態で UV-LED 装置を通過した試料についても採水し分析に供した。ただし、2021 年 1 月に水源水量が低下傾向となって以降、住民への供給水量確保を優先して試験を中断している（2021 年 3 月末現在）。

2. 装置の概要

集落規模で利用可能な UV-LED 装置の候補として、設計処理流量 50L/min の流水殺菌装置（日機装技研）を選定した。ただし、試験地の原水流量の制約から、30L/min を設定流量として実証試験を実施した。流量は運転継続時間に伴い少しずつ減少する傾向が見られ、導水管内部の目詰まりなどが原因と推定されたが、試料採水の都度流量を 30L/min に調整し、安定を確認してから採水した。

3. 試験実施方法

- (1) 2020 年 8 月末より実験を開始した。発光ピーク波長 280nm の表面実装型 UV-LED を搭載した水消毒装置を定格電流 350mA（LED パッケージあたり）で点灯し、以降、消灯条件での採水時（以下詳述）を除いて 2021 年 1 月まで点灯状態を維持した。
- (2) 装置の処理流量は 30L/min で一定とした。ただし原水量の低下や落ち葉等による閉塞が原因と推定される流量低下の傾向がみられたため、採水の都度 30L/min に調整し、流量の安定を確認してから採水した。
- (3) UV-LED 装置前（原水）、UV-LED 点灯で装置を通過した水（処理水）、UV-LED 消灯で装置を通過した水（対照試料）の 3 つの試料を採水し、東京大学へ冷蔵輸送の後、採水後 24 時間以内に表 1 に従い細菌数を培養法で測定した。検水量は、大腸菌と大腸菌群は 100mL、一般細菌は 50mL、従属栄養細菌は 1mL とした。

表 1. 微生物測定項目と測定方法

項目	検水量	測定方法
大腸菌	100mL	メンブレン・ディスク法、m-coli blue 培地、37°Cで一晩培養後にコロニーを計数、青～深紫のコロニーを大腸菌と定義
大腸菌群	100mL	メンブレン・ディスク法、m-coli blue 培地、37°Cで一晩培養後にコロニーを計数、赤～赤紫のコロニーを大腸菌以外の大腸菌群と判定、青＋赤のコロニー総数を大腸菌群数と定義
一般細菌	50mL	メンブレン・ディスク法、Merck アンプル培地（TCC 添加）一般生菌用、37°Cで一晩培養の後に赤色のコロニーを計数
従属栄養細菌	1mL	R2A 寒天培地、25°Cで 7 日間培養後に乳白色のコロニーを計数

- (4) 微生物以外の以下の水質項目について、採水時または実験室で測定した。
濁度、色度、硬度、鉄、マンガン、水温、pH、電気伝導率、流量、紫外域吸光スペクトル（220-400nm）

4. 倫理面への配慮

該当しない

C. 研究結果及びD. 考察

1. 原水水質

表2に、一般的な水質項目の変動幅を示す（2020年8月～2021年1月、n=10）。また、その間、原水の紫外線（280nm）透過率の平均値は98.9%であった。濁度・色度の最高値（順に3.1度、3.0度）を示したのは10月20日の採水試料であるが、当該試料の紫外線透過率（280nm）は98.6%であり、紫外線処理の効率に影響を及ぼすほどの透過率低下は発生しなかった。

表2. 実証試験原水の水質変動幅
(2020年8月～2021年1月、n=10、最小-最大)

濁度	度	0.2 - 3.1
色度	度	0.7 - 3.0
硬度	mg/L	31.0 - 37.0
鉄	mg/L	0.01 - 0.14
マンガン	mg/L	0.005 未満
水温（採水時）	°C	8.9 - 20.0
pH	—	7.3 - 7.8
電気伝導率	mS/m	8.9 - 11.5
紫外線透過率（280nm）	%	98.6 - 99.3

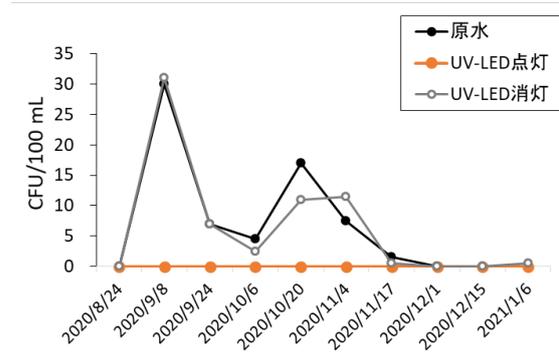
2. UV-LED 処理による微生物濃度の変化

原水、UV-LED 点灯で装置を通過した水（UV-LED 処理水）、UV-LED 消灯で装置を通過した水（対照試料）の微生物濃度を図2に示す。

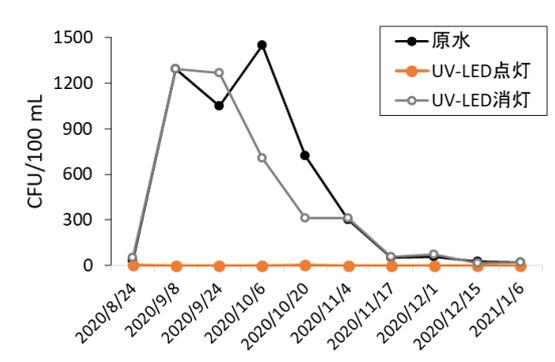
原水について、採水10回のうち6回で大腸菌を検出した。12月から1月に原水中の大腸菌不検出が連続し、また大腸菌群数も同時期にごく低濃度で推移したことから、季節的な影響（気温・水温の低下による微生物活性の低下、野生動物の活動低下など）が示唆された。原水中の一般細菌も同様の傾向を示した一方、従属栄養細菌の濃度変化に季節性は見られなかった。原水について、水道水質基準の定める大腸菌の基準（100mL中に不検出であること）および水道水質管理目標設定項目の示す従属栄養細菌の暫定目標値（2000CFU/mL以下）をそれぞれ散発的に超過した。すなわち、未処理の原水は微生物学的安全性の観点から常時飲用には不適であり、消毒処理が必要と判断された。

また、図2より、いずれの微生物項目でも、UV-LED 消灯で装置内を通水した対照試料は原水とほぼ同等の微生物濃度を示した。よって、UV-LED 点灯試料（処理水）で見られた濃度低下は、装置内への吸着等によるものではなく、紫外線による不活化の効果であることが裏付けられた。

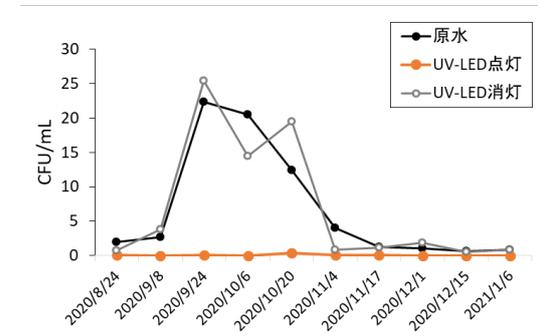
a) 大腸菌



b) 大腸菌群



c) 一般細菌



d) 従属栄養細菌

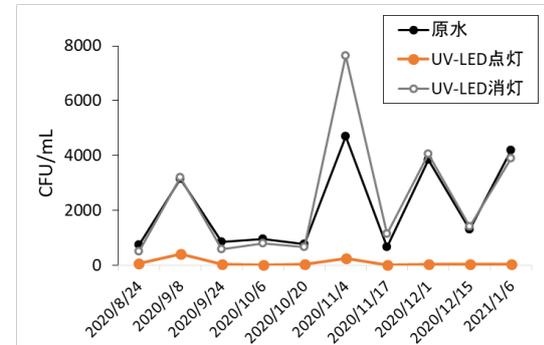
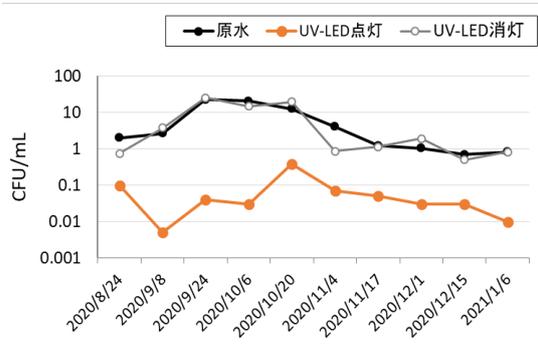


図2. 原水、UV-LED 処理水 (UV-LED 点灯)、対照試料 (UV-LED 消灯) の微生物濃度
 a)大腸菌 (CFU/100mL), b)大腸菌群 (CFU/100mL),
 c)一般細菌 (CFU/mL), d)従属栄養細菌 (CFU/mL)

図2の通り、UV-LED 処理水ではいずれの微生物項目も濃度が有意に低下した。大腸菌は UV-LED 処理水の全てで 100mL 中に不検出となった。原水と UV-LED 処理水の微生物濃度から処理による不活化率を算出すると、これまでに観察された最大値として、大腸菌は 1.5log 以上 (処理後不検出のため特定できず)、大腸菌群は 3.2log 以上 (処理後不検出のため特定できず)、一般細菌は 2.8log、従属栄養細菌は 2.2log となった。対数不活化率を視覚的に示すため、図3に一般細菌と従属栄養細菌の濃度変化を対数軸で示す。

一般細菌



従属栄養細菌

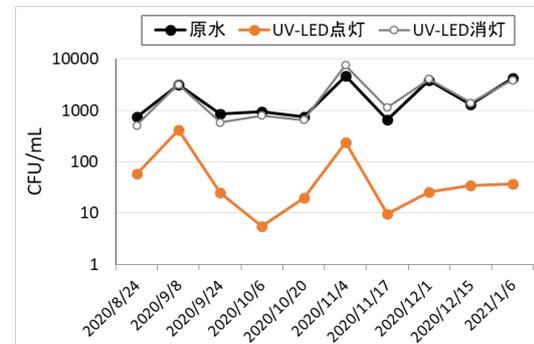


図3. 対数軸で表示した一般細菌 (左)、従属栄養細菌 (右) の変化

昨年度に報告した UV-LED 装置（処理流量 2L/min および 10L/min の二機種）の実証試験において、従属栄養細菌の不活化率は流量 2L/min の装置で最大 1.5log 程度（平均 0.77log、n=21）、流量 10L/min の装置で最大 3.0log 程度（平均 1.8log、n=17）であった^{1),2)}。今年度に試験した装置（処理流量 30L/min）による従属栄養細菌の不活化率 2.2log は昨年度の知見と概ね整合しており、今後の試験継続とデータ数の増加を待って、統計的な性能比較を試みる計画である。

E. 結論

山間の集落規模の飲料水供給施設を対象に実証試験を実施した。本研究により得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 原水では、散発的ながら大腸菌陽性の場合や従属栄養細菌が水道水質管理目標値（暫定値として2000CFU/mL）を超過する場合があったことから、常時飲用には消毒を要することが示された。
- (2) 処理流量30L/minのUV-LED装置による処理水では、原水に比べて微生物項目（大腸菌、大腸菌群、一般細菌、従属栄養細菌）の濃度および検出率が低下し、特に大腸菌については試験期間を通じて不検出を達成した。
- (3) 本研究で採用したUV-LED装置による不活化率は、これまでの最大値として、大腸菌は1.5log以上、大腸菌群は3.2log以上、一般細菌は2.8log、従属栄養細菌は2.2logであった。
- (4) UV-LED処理水は、水道水質基準の定める大腸菌数（100mL中に不検出）、一般細菌数（1mL中に100CFU以下）および水質管理目標設定項目として示された従属栄養細菌数の暫定目標値（1mL中に2000CFU以下）の全てを継続的に満たした。

本研究により、小規模分散型水システムのひとつとして、集落規模でUV-LEDを光源とする消毒装置を活用する可能性が示された。今後は、引き続き実証試験を継続し、特に季節変動を調べる観点から1年間にわたるデータの蓄積を目指す。また、使用後の装置内の汚損等を精査し、実装による処理性能劣化の可能性を検証する計画である。

参考文献

- 1) 小熊久美子、渡邊真也. 分散型水処理技術としての活用を想定した紫外発光ダイオード（UV-LED）装置の実証. 水環境学会誌, Vol.43, No.4, 119-126, 2020.
- 2) 小熊久美子. 令和元年度厚生労働科学研究費補助金「小規模水供給システムの安定性及び安全性確保に関する統合的研究（H29-健危-一般-004）」分担研究報告書, 2020.

F. 研究発表

1. 論文発表（査読付き）

- 小熊 久美子, 渡邊 真也. 分散型水処理技術としての活用を想定した紫外発光ダイオード（UV-LED）装置の実証. 水環境学会誌, Vol.43, No.4, 119-126, 2020.
<https://doi.org/10.2965/jswe.43.119>
- Majid Keshavarzfathy, Yamato Hosoi, Kumiko Oguma, Fariborz Taghipour. Experimental and computational evaluation of a flow-through UV-LED reactor for MS2 and adenovirus inactivation. Chemical Engineering Journal, 127058, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127058>

2. 学会発表

- 小熊久美子、渡邊真也. 山間地における紫外発光ダイオード（UV-LED）水消毒装置の実証. 第23回日本水環境学会シンポジウム、オンライン、2020.9.10.
- 小熊久美子. 深紫外 LED による水の消毒. GaN コンソーシアム 2020 年度光デバイス WG 講演会、オンライン、2020.12.17（招待講演）

- ・ 小熊久美子. 深紫外 LED による殺菌応用の最新動向. 三重大学北勢サテライト研究会セミナー、オンライン、2020.12.17 (招待講演)
- ・ 小熊久美子. 紫外線を利用した水処理技術の世界動向と将来展望. 第 9 回機能性バイオミニシンポジウム、オンライン、2020.9.3 (招待講演)
- ・ Kumiko Oguma, UV disinfection the achievements and prospects for the future, International UV Association Workshop, オンライン、2021.2.18. (招待講演)
- ・ 佐渡友康、小熊久美子、風間しのぶ、滝沢智. 紫外 LED を用いた太陽電池駆動型水処理装置の実証試験と電力に関するシナリオ分析、第 55 回日本水環境学会年会、オンライン、2021.3.12
- ・ 小熊久美子、佐渡友康. 紫外線と塩素の併用による水中の 2-メチルイソボルネオール分解に関する基礎的検討、第 55 回日本水環境学会年会、オンライン、2021.3.12

G. 知的所有権の取得状況

なし