

令和3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（20LA1005）
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、前年度に開始した飲料水供給施設（給水18戸50名未満）での装置実証試験を継続し、長期的な性能を追跡した。設定処理流量は30L/minとし、ろ過等の前処理を経ずに原水を直接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。2020年8月の試験開始以降、二度にわたり濁水による試験中断を余儀なくされたものの、これら中断期間を除く累計の採水回数は27回に上った。その間、原水中に大腸菌を頻繁に検出（19/27回、陽性率70%）した一方、UV-LED処理水では27試料全てで100mL中に大腸菌不検出を維持した。また、一般細菌と従属栄養細菌はいずれも原水中に常に検出されたものの、UV-LED処理水では一般細菌、従属栄養細菌とも有意に濃度が低下し、水道水質基準値（一般細菌100cfu/mL）および水質管理目標値（従属栄養細菌2000cfu/mL）を全ての試料で継続的に下回った。UV-LED処理による不活化率は、一般細菌で最大2.8log（中央値1.4log）、従属栄養細菌で最大2.2log（中央値1.3log）であった。連続運転に伴う性能の経時的な低下は現在まで認められず、原水を前処理なくUV-LED装置で処理する方式でも微生物制御に有効であることが示された。本研究により、小規模分散型の水処理技術としてのUV-LED装置の有効性と長期的な安定性が示された。

A. 研究目的

飲み水の微生物学的な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、特に飲用水供給施設や私設井戸等では塩素消毒を「する」または「しない」の二者択一を迫られるケースが多く、塩素以外の消毒技術が十分に検討されていない。塩素消毒剤（次亜塩素酸ナトリウム溶液）の補充や当番制での薬剤管理が高齢の住民の負担になるほか、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ため、消毒をしないという選択をする施設が未だ散見される現状にある。そのような住民管理型の小規模施設に対し、塩素消毒以外の消毒技術を提示することは、安全な水供給システムの実現に極めて重要である。

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 light-emitting diode, 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、実際の小規模施設で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の頻度など、実装に不可欠な知見を得ることを目指す。

本年度は、前年度に開始した集落水道（飲料水供給施設）での実証試験を継続し、処理性能を長期的に追跡することとした。これにより、UV-LED水消毒装置の小規模施設への適用性と課題について、実証規模で明らかにすることを研究の目的とした。

B. 研究方法

1. 実証試験の概要

試験の場として、国内の飲料水供給施設を選定した。当該施設は、長年にわたり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18戸50名未満である（2021年現地ヒアリング時点）。原水は山間の表流水（沢水）であり、例年冬の渇水期には原水流量が著しく低下する傾向があることから、湧水の寄与は極めて小さいと推察される。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、実験装置に導水するフローとした。なお、UV-LED装置の単独での性能評価に特化するため、また、一般に小規模施設ではできるだけシンプルなプロセスが望ましいため、実証試験ではあえてろ過等の前処理をせずに原水を直接UV-LED装置に導水するフローとした。

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装置の前段で採水し、また対照実験として、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月から5月および2022年2月から3月現在まで、渇水に伴う原水流量の低下を受けて試験を中断している。

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（DWM1、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。

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）を除いて現在まで点灯状態を維持している。
- (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) 以下の物理化学的水質項目について、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、実証試験原水の物理化学的水質項目の変動幅を示す(2020年8月～2022年1月、うち2021年1月～5月および2022年2月～3月に中断、累計試料数n=27)。また、その間、原水の紫外線(280nm)透過率の幾何平均値は96.1%、中央値は95.7%であった。濁度・色度の最大値(順に3.1度、3.0度)を示したのは2020年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。一方、紫外線透過率の最小値(91.3%)を記録したのは2021年9月28日であるが、当該試料の濁度と色度は順に1.1度、1.5度であった。紫外線消毒の性能は、紫外線がどれだけ水中の微生物に到達するか、すなわち紫外線透過率に依存するが、濁度など電氣的に常時監視が容易な水質指標だけでは紫外線透過率を推定しがたい可能性が示された。今後は、他の水質項目を含めた重回帰分析などにより、紫外線透過率を推定する方法を検討する予定である。また、紫外線透過率最小値91.3%を記録した2021年9月28日のUV-LED装置による微生物不活化率(大腸菌で1.4log以上、大腸菌群で2.6log、一般細菌で1.8log、従属栄養細菌で0.9log)は、他の採水日の試料に比べて遜色なく(以下2に詳述、図2、3を参照)、紫外線処理の効果を損なうほどの透過率低下ではなかった。

表2. 実証試験原水の水質変動幅
(2020年8月～2022年1月、中断期間を除き n=27)

		最小-最大	中央値	標準偏差
濁度	度	0.2 - 3.1	0.7	0.57
色度	度	0.7 - 3.0	0.1	0.53
硬度	mg/L	31.0 - 38.0	34.0	1.91
鉄	mg/L	0.01 未満 - 0.14	0.02	0.03
マンガン	mg/L	0.005 未満	-	-
水温(採水時)	°C	5.2 - 20.0	13.9	4.4
pH	-	7.3 - 7.9	7.6	0.13
電気伝導率	mS/m	8.5 - 11.5	9.4	0.60
紫外線透過率 (280nm)	%	91.3 - 99.9	95.7	3.31

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。

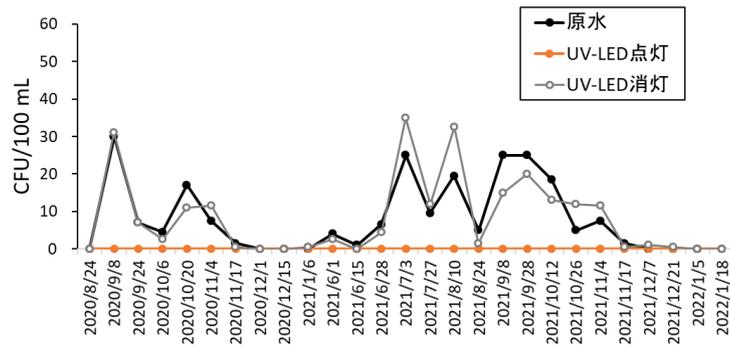
原水について、採水回数 $n=27$ のうち 19 回で大腸菌を検出した (陽性率 70%)。また、一般細菌と従属栄養細菌は全ての原水中に検出され、原水の一般細菌は常に水道水質基準値 (100cfu/mL) を下回ったものの、従属栄養細菌は暫定水質管理目標値 (2000CFU/mL 以下) を 7 回超過した (超過率 26%)。すなわち、未処理の原水は微生物学的安全性の観点から常時飲用には不適であり、消毒処理が必要と判断された。試験期間を通じて、12 月から 1 月に原水中の大腸菌不検出が連続し、また大腸菌群数も同時期にごく低濃度で推移したことから、季節的な影響 (気温・水温の低下による微生物活性の低下、野生動物の活動低下など) が示唆された。原水中の一般細菌と従属栄養細菌の濃度変化に明確な季節性は見られなかった。

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。UV-LED 処理水では、いずれの微生物項目も濃度が低下し、大腸菌は UV-LED 処理水の全てで 100mL 中に不検出となった。また、一般細菌の水道水質基準値 (100cfu/mL) および従属栄養細菌の暫定水質管理目標値 (2000cfu/mL) を全ての試料で継続的に下回った。

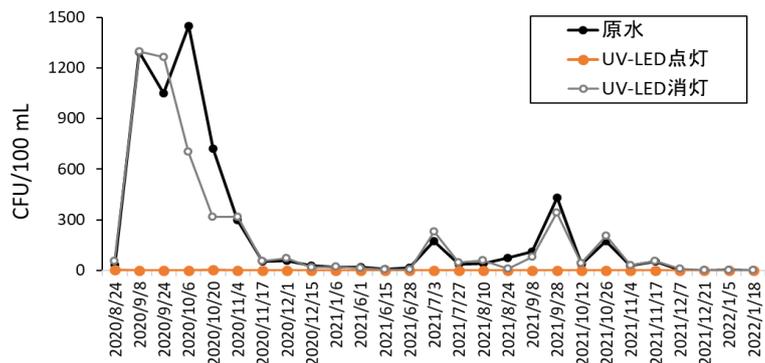
図 3 に、一般細菌と従属栄養細菌の濃度変化を対数軸で示す。本研究で採用した UV-LED 装置による不活化率 (いずれも $n=27$) は、最大値として大腸菌は 1.5log 以上、大腸菌群は 3.2log 以上であった (処理後不検出のため不活化率は初期濃度に依存)。一方、一般細菌の不活化率は最大値 2.8log、中央値 1.4log、最小値 0.5log であり、従属栄養細菌の不活化率は最大値 2.2log、中央値 1.3log、最小値 0.2log であった。なお、不活化率と物理化学的水質項目の関連性について、今後相関分析を予定している。

本実証試験では、ろ過等の前処理を経ずに原水を直接 UV-LED 装置に通水した。これは、UV-LED 装置単独での性能を評価するため、また、人的資源や資金に制約がある小規模施設ではできるだけシンプルなプロセスが望ましいと判断したため、設定した処理フローである。これまでの結果から、仮にろ過設備なく UV-LED 装置を単独で導入した場合でも、水の微生物学的な安全性を有意に向上できることが示された。一方、実装に向けては、紫外線消毒には残留効果がないことを十分に考慮した給水システムの構築と、利用者への周知が必須である。一案として、できるだけ給水末端に近い位置に紫外線装置を設置すること、給水栓から得た水は長期保管せずできるだけ速やかに消費するよう周知すること、などが挙げられる。あるいは、微量の塩素を併用することで、給水システム内の再増殖・再汚染リスクを抑制することも現実的な選択肢と考えられる。これらの方策を具体的に示し、紫外線消毒の有効性だけでなく課題や対策も併せて示すことを、本研究の最終目標としたい。

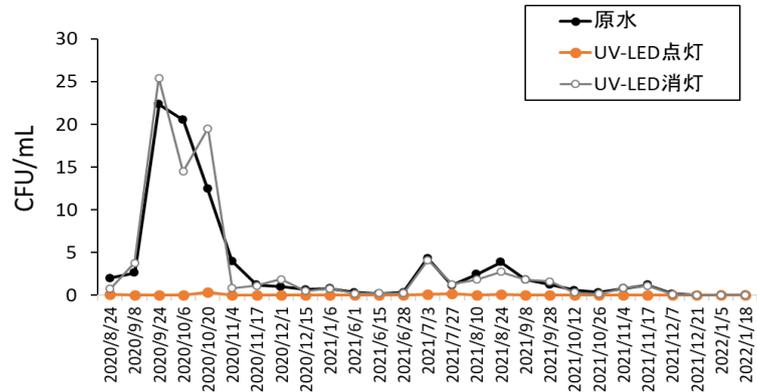
(a) 大腸菌



(b) 大腸菌群



(c) 一般細菌



(d) 従属栄養細菌

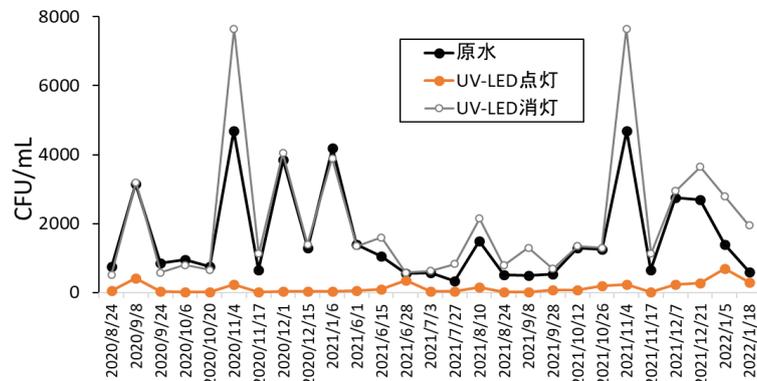


図2. 原水、UV-LED 処理水 (UV-LED 点灯)、対照試料 (UV-LED 消灯) の微生物濃度
(a)大腸菌 (CFU/100mL), (b)大腸菌群 (CFU/100mL),
(c)一般細菌 (CFU/mL), (d)従属栄養細菌 (CFU/mL)

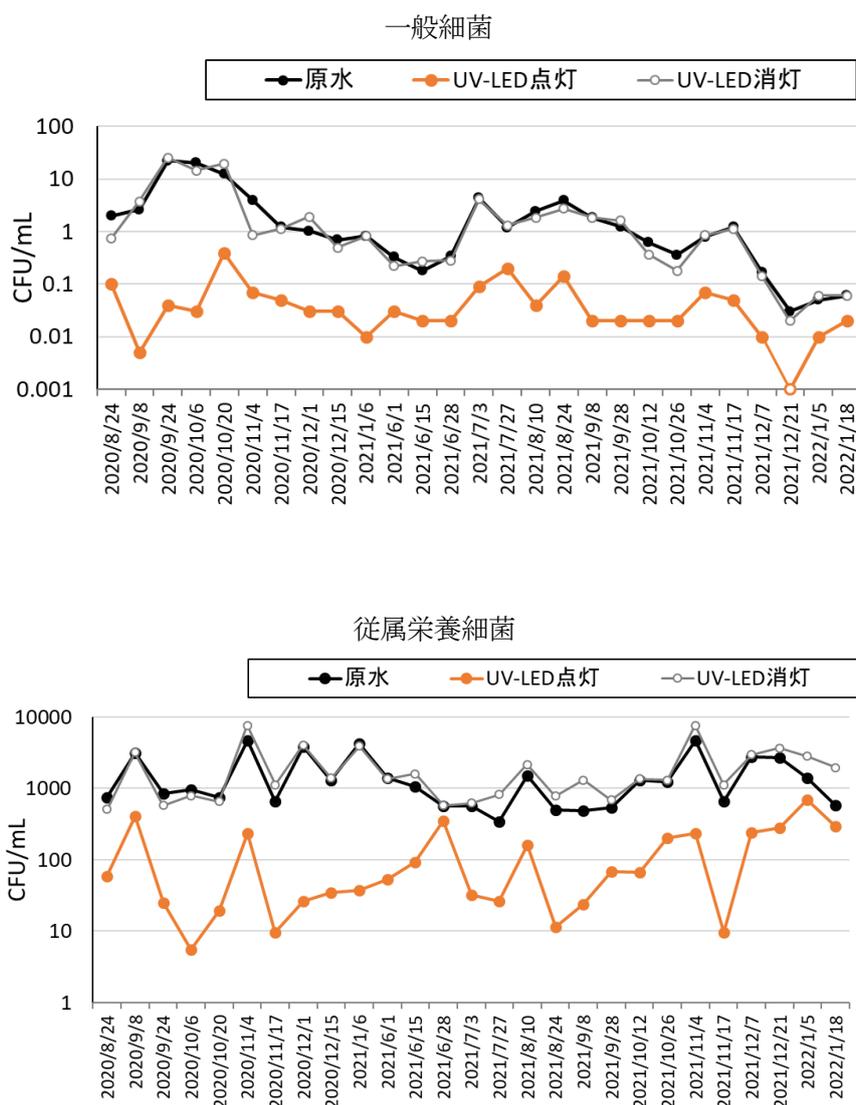


図3. 対数軸で表示した一般細菌（上）、従属栄養細菌（下）の変化

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。2020年8月から現在まで累計27回にわたる採水・分析を実施した結果、主に以下の結論を得た。

- (1) 原水では、散発的ながら大腸菌陽性の場合（27回中19回、陽性率70%）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（27回中7回、超過率26%）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、調査したすべての微生物項目（大腸菌、大腸菌群、一般細菌、従属栄養細菌）で濃度が低下し、特に大腸菌は試験期間を通じて100mL中に不検出を維持した。
- (3) 本研究で採用したUV-LED装置による不活化率は、最大値として大腸菌は1.5log以上、大腸菌群は3.2log以上であった。一方、一般細菌の不活化率は最大値2.8log、中央値1.4log、最小値0.5log、また従属栄養細菌の不活化率は最大値2.2log、中央値1.3log、最小値0.2log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）の全てを試験期間を通じて継続的に満たした。

本研究により、小規模施設で利用可能な消毒技術としてUV-LED装置の有効性と長期的な安定性が示された。今後は、引き続き集落規模での実証試験を継続し、季節変動や性能の経時劣化を追跡する。また、実証試験終了後に装置内の汚損等を調査し、実装時のメンテナンスに資する知見の獲得を目指す。さらに、紫外線消毒の有効性だけでなく実装を見据えた課題や対策も併せて示すことを、本研究の最終目標とする。

F. 研究発表

1. 論文発表（査読付き）

- ・ 渡邊真也、小熊久美子. 紫外線照射が緑膿菌のバイオフィルム形成に及ぼす影響. 土木学会論文集 G（環境）, Vol. 77, No.7, III_93-102. 2021
- ・ Kumiko Oguma, Surapong Rattanakul, UV inactivation of viruses in water: its potential to mitigate current and future threats of viral infectious diseases, Japanese Journal of Applied Physics, 60, 11, 110502, 2021 <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ac2b4f>

2. 学会発表

- ・ 小熊久美子, 紫外線処理に関する最新の動向と小規模施設への適用について, 神奈川県央地域及び県西地域「水道事業の広域化等に関する検討会」, 2022.1.19. (招待講演)
- ・ Kumiko Oguma, Application of UV-LEDs for sustainable water treatment and supply. Pacific Chemistry (Pacifichem) 2021, オンライン, 2021.12.20. (招待講演)
- ・ 小熊久美子, 遠隔地でも持続可能な小規模分散型水処理の提案と実証, 東大水フォーラム公開シンポジウム「持続可能な社会と水」, オンライン, 2021.12.8 (招待講演)
- ・ 渡邊真也, 小熊久美子, 紫外線照射が緑膿菌のバイオフィルム形成に及ぼす影響, 第 58 回環境工学研究フォーラム, オンライン, 2021.11.16.
- ・ 小熊久美子, 分散型水処理としての紫外線消毒の実証, 第 24 回日本水環境学会シンポジウム, オンライン, 2021.9.14. (招待講演)
- ・ 小熊久美子, 紫外 LED による消毒技術の動向と展望, 日本防菌防黴学会第 48 回年次大会, オンライン, 2021.9.8. (招待講演)
- ・ Kumiko Oguma, UV disinfection for decentralized water supply systems in remote areas and communities, Canada and Japan Joint Research Meeting on Small Water Supply Systems, 2021.6.23.
- ・ 小熊久美子, UV-LED を利用した水処理技術, 第 1 回フォトンテクノロジー技術部会 Web 講演会, 2021.6.21. (招待講演)
- ・ 小熊久美子, 紫外 LED による水の消毒, 電気学会パワー光源システム技術動向調査専門委員会, オンライン, 2021.4.28. (招待講演)
- ・ Kumiko Oguma, UV-LEDs for water disinfection: The forefront of research and applications, The International Conference on UV LED Technologies & Applications (ICULTA) 2021, オンライン, 2021.4.19. (招待講演)

G. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし