

令和4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た。集落規模で運営する飲料水供給施設でのUV-LED装置実証試験（2020年8月開始）を継続し、長期的な性能を追跡したうえで、2022年7月に試験を完了した。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、一般細菌、従属栄養細菌の変化を調べた。2年間の試験期間中、二度にわたり渇水に伴う原水枯渇で試験中断を余儀なくされたものの、累計の採水回数は33回に上った。その間、原水中に大腸菌を頻繁に検出（24/33回、陽性率73%）した一方、UV-LED処理水で100mL中に大腸菌を検出したのは1回（陽性率3%）で、検出濃度は0.5CFU/100mL（定量下限値）であった。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処理による微生物の対数不活化率は、大腸菌は最大値2.4log以上、一般細菌は最大値2.8log（中央値1.5log）、従属栄養細菌は最大値2.2log（中央値1.1log）であった。原水の濁度・色度と不活化率に関する性は見られず、これらの水質項目から紫外線消毒の効果を推定することは困難と推察された。装置の連続運転に伴う不活化性能の経時的な低下は試験終了まで認められなかった。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調査した。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した。

本年度は、2020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し、2022年7月に完了した。得られたデータを整理し、原水水質の変動、UV-LED装置の不活化性能の経時変化、一般的な水質項目と不活化性能の関係などについて解析した。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

実証試験の場として、国内の飲料水供給施設を選定した。当該施設は、昭和 25 年の導入以降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 44 名である（2022 年現地ヒアリング時点）。集落の記録によれば 1994 年時点では給水人口 102 名であり、約 30 年で給水人口が 57%減少したことになる。原水は山間の沢水（湧水が地表を流下したもの）をせき止めたものであり、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。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 月から開始し、2022 年 7 月までの 2 年間、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 6 月まで、渇水に伴う原水流量の低下を受けて試験を中断した。試験中断の間に装置内に生物膜が発生することを懸念し、中断の間も UV-LED 装置は点灯状態を維持した。

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、発光ピーク波長 280nm の表面実装型 UV-LED を搭載した流水殺菌装置（DWM1、日機装技研）を選定した。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。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) 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. 原水の物理化学的水質

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 7 月、うち 2021 年 1 月～5 月および 2022 年 2 月～3 月に中断, n=33)。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。紫外線処理に適した処理対象水として、紫外線の水中への透過を過度に阻害しないことの見安として、濁度 2 度以下、色度 5 度以下、紫外線透過率 75%以上が、また、紫外線装置内に着色やスケールを生じないことの見安として全鉄 0.1mg/L 以下、全マンガン 0.05mg/L 以下、硬度 140mg/L 以下が、それぞれ推奨されている¹⁾。これらの見安値に対し、表 2 の結果は濁度の最大値を除いていずれも適合しており、すなわち紫外線処理の対象水として概ね適した水質と判定された。濁度の最大値 (3.1 度) は 2020 年 10 月 20 日の試料、色度の最大値 (4.1 度) は 2022 年 7 月 5 日の試料でそれぞれ計測されたが、これら試料の紫外線透過率 (280nm) は順に 98.6%、92.7%であり、他の採水日の試料に比べて突出して低い透過率とは言えなかった。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大きく依存するが、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ことが示された。なお、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7月のまとめ, n=33)

		最小-最大	中央値	標準偏差
濁度	度	0.2 - 3.1	0.7	0.7
色度	度	0.7 - 4.1	1.1	0.7
硬度	mg/L	31.0 - 38.0	34.0	1.9
鉄	mg/L	0.01 未満 - 0.18	0.02	0.04
マンガン	mg/L	0.005 未満	-	-
水温 (採水時)	°C	5.2 - 20.0	15.7	4.3
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 280nm 透過率	%	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 33 回のうち 24 回で大腸菌を検出した (陽性率 73%)。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 8 回超過した (超過率 24%)。当該施設は地表水を原水とし、大腸菌が高頻度で陽性であることから、公共水道を対象に厚生労働省の定める「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」¹⁾に照らせば、クリプトスポリジウム汚染リスクが高いとされる「レベル 4」に該当する。厚生労働省指針では、「レベル 4」に該当する施設での有効なクリプトスポリジウム対策として、ろ過設備による厳密な濁度管理、または、ろ過と紫外線照射による消毒を挙げており、当該施設において実際に住民に供給される浄水の処理プロセス (塩素+砂ろ過+紫外線) はこれを満たしている。

総じて、原水の微生物濃度は変動が大きく、特に 2022 年 7 月 5 日に大腸菌で観察された突発的な濃度上昇は顕著であった。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。大腸菌の挙動と一般細菌の挙動は必ずしも類似せず、例えば 2020 年 9 月後半から 10 月にかけて、一般細菌は濃度が上昇したが大腸菌は顕著な濃度増加は見られなかった。この差異は、大腸菌が野生動物の糞便汚染由来である一方で一般細菌は土壌細菌等も含む多様な細菌類を含むものであり、すなわち汚染起源が異なることが原因と考えられた。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たことから、季節的な影響 (冬期の水温・気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。一方、原水中の一般細菌や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。なお、大腸菌濃度と水温・気温の関係を調べると図 3 となった。概して、水温が 17°C を超えると、あるいは気温が 23°C を超えると、高濃度の大腸菌を検出する頻度が高いことが示された。

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。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 1 回を除く試料で 100mL 中に不検出となった。処理水中に大腸菌を検出した 1 試料も 0.5CFU/100mL と定量下限値であり、総じて紫外線処理が大腸菌の不活化に継続して効果を発

揮したことが確認された。また、処理水では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。

対数不活化率は、大腸菌は最大値 2.4log 以上 (処理後不検出試料多数のため定量不能)、一般細菌は最大値 2.8log (中央値 1.5log)、従属栄養細菌は最大値 2.2log (中央値 1.1log) であった。本研究の範囲では、不活化性能に経時的な低下は見られず、また、濁水による運転停止 (2021年1月~5月、2022年2月~3月) からの復帰直後から、停止前と遜色ない性能を発揮した。

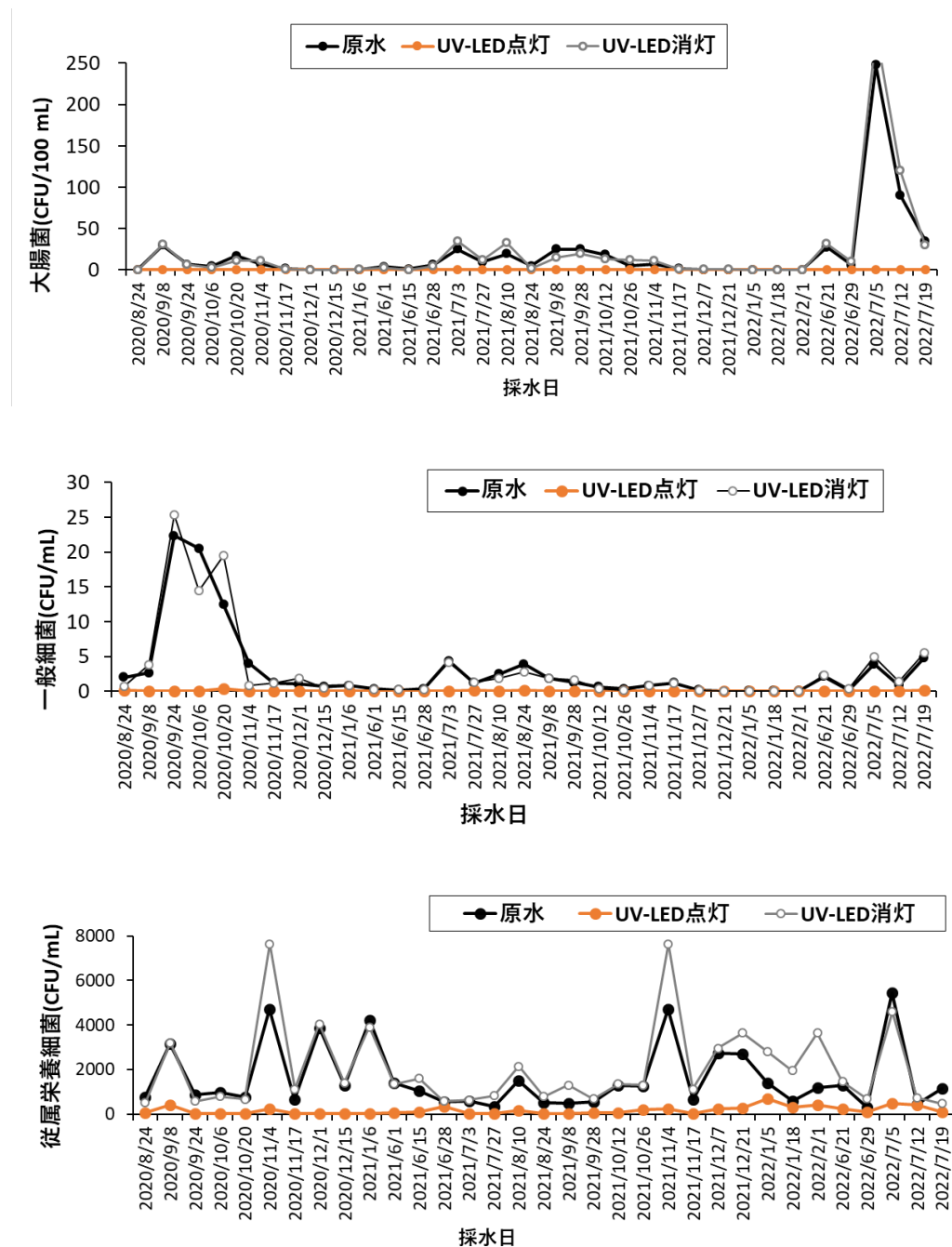


図2. 原水、UV-LED 処理水 (UV-LED 点灯)、対照試料 (UV-LED 消灯) の微生物濃度

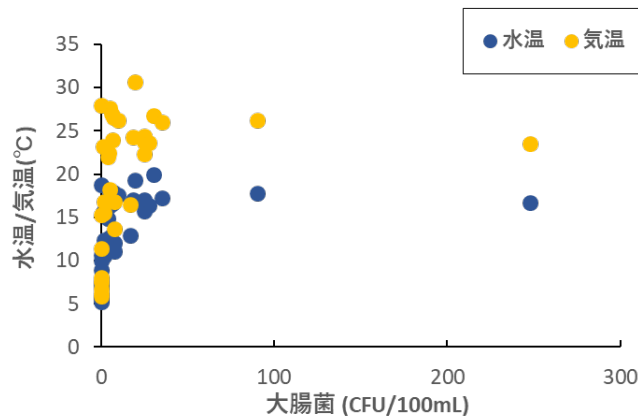


図3. 原水中の大腸菌濃度と水温または気温の関係

図4に、原水の濁度と色度の経時変化を示す。いずれも大きな変動を示し、濁度と色度の相関性は高かった（最小二乗法による決定係数 $R^2=0.855$ ）。ただし、微生物濃度の挙動（図2）と濁度色度の挙動（図4）は必ずしも類似せず、すなわち濁度色度が増加しても微生物濃度は平時と変わらないケースが散見された。ただし、図5より、濁度3度、色度4.1度の試料で大腸菌と従属栄養細菌も高い濃度を示し、当該施設においては、これらの値を閾値として微生物汚染を疑うことは一定の合理性があると考えられた。

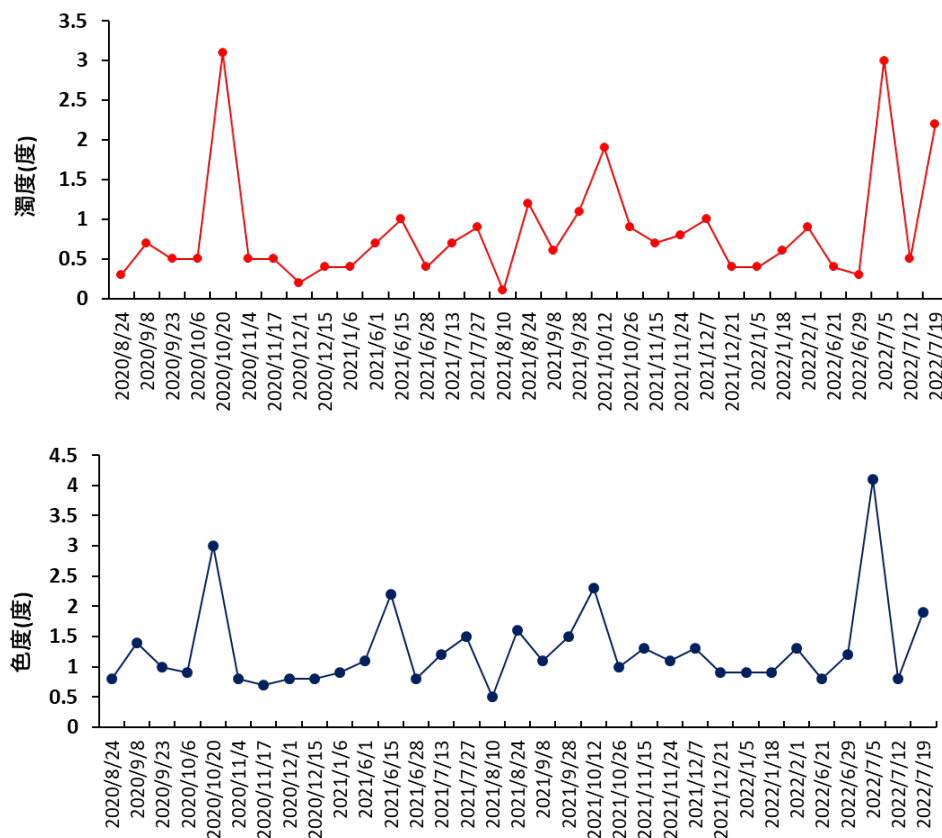


図4. 原水の濁度（上）および色度（下）の経時変化

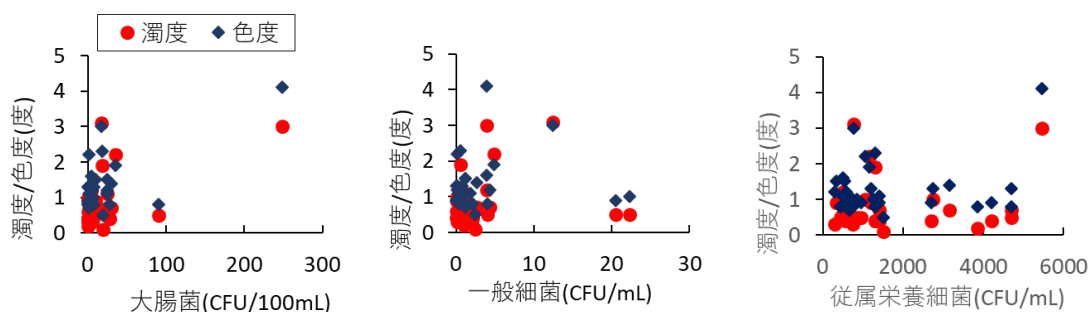


図5. 原水の微生物濃度と濁度および色度の関係

図6に、従属栄養細菌の対数不活化率と濁度および色度の関係を示す。ここで従属栄養細菌に注目したのは、大腸菌や一般細菌は処理後不検出となった試料が散見され、相関解析に不適切と判断したためである。図6より、濁度および色度と不活化性能に相関性は見いだせなかった。特に、概ね濁度1度未満、色度2度未満では不活化率の変動が大きく、すなわち、比較的モニタリングが容易なこれらの水質項目を頼りに不活化性能（消毒効果）を推定することは難しいことが示された。類似の傾向は小熊らが他の施設で実施した実証試験でも観測されており（未公開）、紫外線消毒の実装に際し監視が望ましい水質項目について、いっそうの知見の蓄積が望まれる。

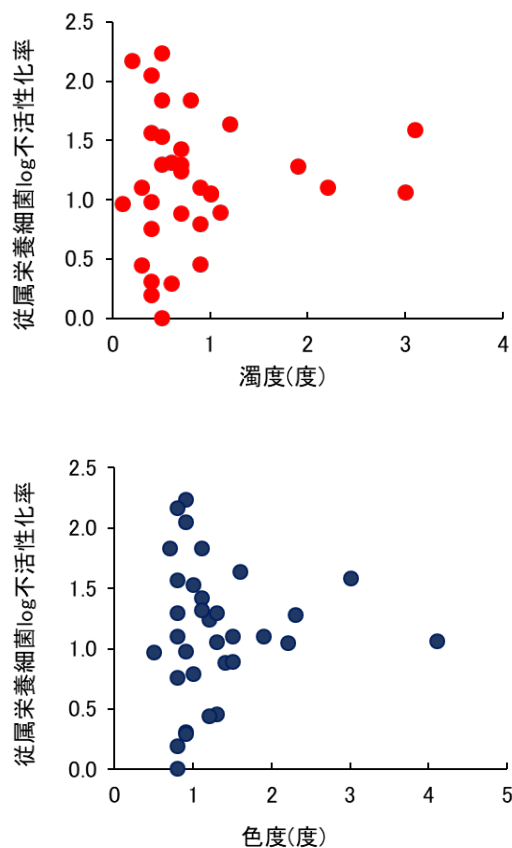


図6 濁度（上）および色度（下）と従属栄養細菌の対数不活化率の関係

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。本研究の結果から、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、塩素消毒を併用することで、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有効である。本研究と同じ UV-LED 装置による紫外線消毒をすでに導入した小規模水供給施設では、紫外線消毒と塩素消毒を併用しており、浄水の微生物学的安全性を担保する観点から極めて効果的である。

集落規模で運営する水供給施設で新しい技術を導入する場合、各地域の実情、特に、運営と維持管理に要する費用と労力に応じて、住民自らが技術を選択する必要がある。行政や学識者は、技術の選択に際し必要十分な情報を提供することで住民を支援し、さらに、技術導入後も長期的に技術的アドバイスを提供することが求められる。

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。2020年8月から2022年7月まで、途中2回の中断を経たものの累計33回にわたる採水・分析を実施した。その結果、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（33回中24回、陽性率73%）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（33回中8回、超過率24%）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、一般細菌、従属栄養細菌）で濃度が低下した。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、大腸菌陽性となった1回を除いて2年間の試験期間を通じて継続的に満たした。大腸菌陽性となった1回も、定量下限値（0.5CFU/100mL）であった。
- (3) 当該UV-LED装置による微生物の対数不活化率は、最大値として大腸菌は2.4log以上（処理後不検出試料多数のため定量不能）、一般細菌は最大値2.8log（中央値1.5log）、従属栄養細菌は最大値2.2log（中央値1.1log）であった。
- (4) 本研究の試験期間では、UV-LED装置の不活化性能に経時的な低下は認められず、また、濁水による運転停止（2021年1月～5月、2022年2月～3月）からの復帰直後から、停止前と遜色ない性能を発揮した。

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。

参考文献

- 1) 厚生労働省. 2019. 水道施設の技術的基準を定める省令の一部を改正する省令（令和元年厚生労働省令第6号. <https://www.mhlw.go.jp/content/000587119.pdf>

F. 研究発表

1. 論文発表

- ・ 小熊久美子, UV-LED を利用した消毒技術, 応用電子物性分科会誌, 29(1), 31-36, 2023
- ・ Jack Jia Xin Song, Kumiko Oguma, Satoshi Takizawa, Inactivation kinetics of 280 nm UV-LEDs against *Mycobacterium abscessus* in water, Scientific Reports 13, 2186, 2023.
<https://www.nature.com/articles/s41598-023-29338-w>
- 渡邊 真也, 小熊 久美子, 省電力長距離通信を利用した簡易無線モジュールによる小規模水供給施設の遠隔監視, 水環境学会誌, Vol.46, No.1, pp.11-19, 2023.
- 小熊久美子, 海外における小規模水供給施設の実態と課題, 保健医療科学, 71(3), 234-240, 2022.
- ・ Shinya Watanabe, Kumiko Oguma, A Simple and Practical Method for Fluence Determination in Bench-Scale UV-LED setups. Photochemistry and Photobiology, 99(1), 19-28, 2022.
<https://doi.org/10.1111/php.13668>

2. 学会発表

- 小熊久美子, 小規模水供給施設に適した消毒技術の検討, 厚生労働科学研究シンポジウム「小規模水供給システム研究の進展」, 2023/2/22.
- 小熊久美子, 小規模水供給施設の実態と消毒技術の検討, 水道実務技術指導者研究集会, 2023/2/21.
- ・ LIU Xinyue and Kumiko Oguma, Disinfection by-products formation and dissolved organic matter alteration by UV/chlorine treatment of a river water sample, 日本水環境学会紫外線を利用した水処理技術研究委員会ワークショップ, 2023/2/16.
- ・ Jack Jia Xin Song and Kumiko Oguma, Inactivation kinetics of 280 nm UV-LEDs against *Mycobacterium abscessus* in water, 日本水環境学会紫外線を利用した水処理技術研究委員会ワークショップ, 2023/2/16.
- ・ 鶴野葉月, 小熊久美子, 水道水への紫外線照射が塩素消毒副生成物に及ぼす影響, 日本水環境学会紫外線を利用した水処理技術研究委員会ワークショップ, 2023/2/16.
- ・ 小熊久美子, UV-LED を利用した消毒技術, 応用電子物性分科会研究例会, 公衆衛生と安全・安心を守る材料デバイス技術, 2023/1/27. (招待講演)
- ・ Surapong Rattanakul, Kumiko Oguma, Data analysis of virus sensitivity to ultraviolet (UV) radiation, 第13回 東南アジア水環境国際シンポジウム, 2022/12/14.
- ・ Jack Jia Xin Song, Kumiko Oguma, Satoshi Takizawa, Fluence rate modeling using ray tracing simulation for water disinfection reactors with ultraviolet light-emitting diodes, 第13回 東南アジア水環境国際シンポジウム, 2022/12/14.
- ・ Shunsuke Oka, Shinobu Kazama, Kumiko Oguma, Satoshi Takizawa, Identification of fecal contamination source and enteric viruses in groundwater in the special region of Yogyakarta province, Indonesia, 第13回 東南アジア水環境国際シンポジウム, 2022/12/13.
- ・ Kumiko Oguma. Innovative UV-LED applications to drinking water and wastewater treatment systems for sustainable water management in future communities. JST-CONCERT UV Workshop. 2022/11/17.
- 渡邊 真也, 小熊久美子, 山間集落における水供給施設の管理負担軽減に関する検討-LPWA通信モジュール活用による施設の遠隔監視-, 第101回水道研究発表会, 2022/10/20.

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