

平成 30 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

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（試作機）2機種を選定し、国内某所に当該装置を設置して長期運転を念頭に実証試験を開始した。

これまで約 10 カ月にわたる運転の経過報告として、実証試験サイトの原水水質は総じて清澄で、大腸菌は不検出～0.5 CFU/mL、大腸菌群は不検出～2.5 CFU/mL、一般細菌は 0.5～15 CFU/mL、従属栄養細菌は 70～1500 CFU/mL であった。飲用適否の観点では、突発的に大腸菌を検出する場合があったことから、給水末端等において微生物に対する追加処理を行うことが有効と考えられた。UV-LED 装置による処理後には、2機種ともに、大腸菌はすべて不検出、大腸菌群は突発的に 1 CFU/mL を一度検出した以外は全て不検出、一般細菌は不検出～2 CFU/mL、従属栄養細菌は不検出～12 CFU/mL となった。すなわち、適切な紫外線装置を選定し小規模施設や給水栓等に導入することで、水の微生物学的な安全性を向上できることが示された。

A. 研究目的

国連が示す持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals, SDGs）の目標 6 では、「だれひとり取り残さない」をスローガンに、すべての人が安全な水と衛生施設を利用可能な世界の実現を目指している。とかく SDGs は発展途上国の文脈で語られることが多いが、日本を含む先進諸国の遠隔地において公共の上下水道施設から取り残されている、あるいは将来的に取り残されうる人々についても、同じ理念と目標が掲げられてしかるべきである。国際社会の先陣を切って人口減少と高齢社会に突入した日本が、国内の遠隔地等における水の安全性をいかに担保するかは、世界各国の道標となりうる。

過去 30 年間に国内の水道施設で生じた水質事故は施設規模が小さいほど多い傾向があり、その多くは微生物関連の水質事故である（岸田ら 2015）。この事実は、現在一般的な塩素消毒剤注入による消毒方法が、技術面と維持管理面の双方で必ずしも小規模施設に適合していないことを示唆している。

H29 年度に研究班として実施した小規模水供給施設の見学と実務者ヒアリング検討により、現状の小規模施設の課題として、施設規模に適した消毒方法は十分に検討されておらず、特に、消毒剤の補充や当番制での維持管理が住民の負担になっている実情が伺えた。加えて、消毒剤のにおいに対する抵抗感から消毒を実施しない小規模施設も多かった。そこで本研究では、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することとした。その際、無水銀光源である紫外発光ダイオード（UV-LED）が小規模施設での利用に一層適しているとの研究仮説にもとづき、光源に UV-LED を備えた水消毒装置の小規模施設への適用性検討を主たる研究目的とした。小規模施設に UV-LED が適すると考える筆者仮説の論拠を表 1 に示す。

表 1. 小規模施設に UV-LED を勧める論拠

-
- 1) 斜面や狭い敷地でも利用可能な小型装置が望ましい
 - 2) 計画給水人口 100 人以下の飲料水供給施設では給水末端での残留塩素規定に必ずしも縛られず*、塩素以外の消毒方法を採用する（塩素と併用する）自由度が高い（*保健所の指導や水道組合のルールで塩素消毒が前提なケースもある）
 - 3) 利用者の多くは塩素消毒に抵抗がある（味・臭いへの懸念）
 - 4) 利用者自身（多くは高齢者）が当番制・自己責任において運転・維持・管理を求められるため、維持管理が容易で薬品補充が不要なシステムが望ましい
 - 5) 水銀ランプ破損による水への水銀混入のような重大事故がない装置が望ましい
 - 6) 小規模施設ほど水需要量の日変動・季節変動が大きく、オンデマンド運転によるエネルギー効率化が望ましい（UV-LED はウォームアップ不要で頻繁な点灯消灯に最適）
 - 7) 長寿命な装置が望ましい（UV-LED は点灯 10,000 時間超、オンデマンド運転であれば実質の装置寿命はさらに長い）
-

また、実証試験では、単発的に装置を屋外に設置して実験するのではなく、できるだけ長い期間継続運転することが重要と考えた。これは、実験室規模において UV-LED 消毒装置の不活化効果に関する基礎的知見は蓄積されつつあり、筆者自身のデータを含めて既往研究が増加の一途をたどっている一方、実証規模において実際に飲用に供する水（地下水・沢水など）を対象とする実証実験の知見は世界的にみても極めて乏しいことを踏まえた着眼であり、装置の実用化にあたっては長期運転に伴う性能低下やメンテナンス頻度などの知見が不可欠と考えたためである。

上記を踏まえ、UV-LED を備えた水消毒装置を長期的な実証試験に供し、その性能を定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した。

B. 研究方法

1. 実証実験

紫外線を利用した水処理装置、特に、紫外発光ダイオード（UV-LED）の小規模施設への適用可能性を探るため、長期運転を想定した実証試験を開始した。

（1）装置概要

実用化に資する装置の候補として、紫外発光ダイオード（UV-LED）を光源とする流水殺菌装置 2 機種（日機装技研）を選定した。

- ・装置 A：設計処理流量 2 L/min
- ・装置 B：設計処理流量 10 L/min

ここで示す設計処理流量はあくまでメーカーが装置設計に設定した流量であり、他の流量での運転を排除するものではない。本研究では、装置 A（2L/min 用）は、蛇口ごとに取り付けて使う Point-of-Use（POU）型の利用に、装置 B（10L/min 用）は建物の入り口に取り付けて使う Point-of-Entry（POE）型の利用に適すると判断し、実証試験では両装置を並列に運転して性能を比較することとした。

なお、本研究では装置 A, B を試作機として位置づけ、装置構造などの詳細は本報告書に開示しない。また、本研究の趣旨は、特定の装置の性能評価や設計最適化ではなく、小規模施設への紫外線装置導入に資する普遍的知見の獲得にあることをここに改めて明記する。また、装置提供に協力した日機装技研株式会社に深い謝意を表す。

(2) 試験地概要

実証試験サイトとして、国内某所の個人宅敷地内にある私設の給水栓を選定した。当該住宅は公共水道未普及地区に立地し、宅内の飲用の水道（給水栓）は集落の水供給施設から給水されている。一方、試験サイトとする私設給水栓は、上記の飲用水道とは別に沢水を農作業場（納屋）に引き込んだもので、納屋での手洗いや野菜・農具洗浄等のために用いられている。住民からは、現状で手洗いの限りとしても野生動物糞便由来の微生物汚染が気になっているとの意見、また、非常時等のバックアップ給水栓として、簡易的な浄水装置の追加設置で飲用可能な水質になるとすれば非常に有意義であるとの意見を頂いた。

(3) 試験期間

試験期間は、装置を現場に設置し運転を開始した 2018 年 6 月 27 日から現在に至る毎月 2 回（概ね第一週と第三週とし月ごとに適宜調整）とした。本稿では 2018 年 6 月 27 日から 2019 年 3 月 18 日に至る結果を報告する。なお、2018 年 9 月 29 日～10 月 1 日にかけて当該地を直撃した台風 24 号で原水導水管が目詰まりし運転を停止し、その後の大規模停電の影響と装置点検の後、定期採水を再開したのは 2018 年 11 月 20 日であった。

(4) 試験実施方法

- 1) 装置 A, B ともに定格電流により LED 点灯開始、以降台風による中断期間を除きすべて点灯状態を維持した。
- 2) 装置 A, B それぞれについて、順に 2 L/min, 10 L/min の定流量で通水した。
- 3) UV-LED 装置前（原水）および UV-LED 装置後の試料を採水し、東京大学へ冷蔵輸送の後、採水後 24 時間以内に表 2 に従い細菌数を測定した。なお、検水量は全て 1 mL である。
- 4) 微生物以外の一般的な水質項目として、以下の水質について、採水時（現場）または浜松市内の実験施設で測定した。
：濁度、色度、硬度、鉄、マンガン、水温、pH、電気伝導率、流量（設定値であることの確認）
- 5) 一部試料について、東京大学で紫外域吸光スペクトル（220-400nm）を測定し、紫外線線透過率を算出した。

表 2. 微生物測定項目と測定方法（検水量は全て 1 mL）

大腸菌	クロモカルトコリフォーム培地、37°Cで一晩（18 時間程度）培養の後コロニー数を計測、青～深紫のコロニーを大腸菌と定義
大腸菌群	クロモカルトコリフォーム培地、37°Cで一晩（18 時間程度）培養の後コロニー数を計測、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	LB 培地、37°Cで一晩（18 時間程度）培養の後、乳白色コロニー数を計測
従属栄養細菌	R2A 寒天培地、25°Cで 7 日間培養の後、乳白色コロニー数を計測

C. 研究結果及びD. 考察

1. 実証実験結果

(1) 原水水質

表3に、一般的な水質項目の変動幅を示す。試験期間を通じて、総じて極めて清澄な水質であった。また、紫外線透過率の測定結果の例として、図1に2018年7月試料の結果を示す。当該試料は濁度0.1度、色度0.9度であり、期間中に採水した試料として概ね平均的な水質であったことから、原水は試験期間を通じて概ね同等の高い紫外線透過率であったと推察された。

表3. 実証試験原水の水質概要
(2018年6月～2019年3月、毎月2回ずつの測定)

濁度	度	0.1 未満 - 0.1
色度	度	0.5 未満 - 2.2
硬度	mg/L	36.0 - 55.0
鉄	mg/L	0.01 未満
マンガン	mg/L	0.005 未満
水温 (採水時)	°C	6.2 (2月) - 29.0 (8月)
pH	—	7.4 - 7.8
電気伝導率	mS/m	8.8 - 13.9

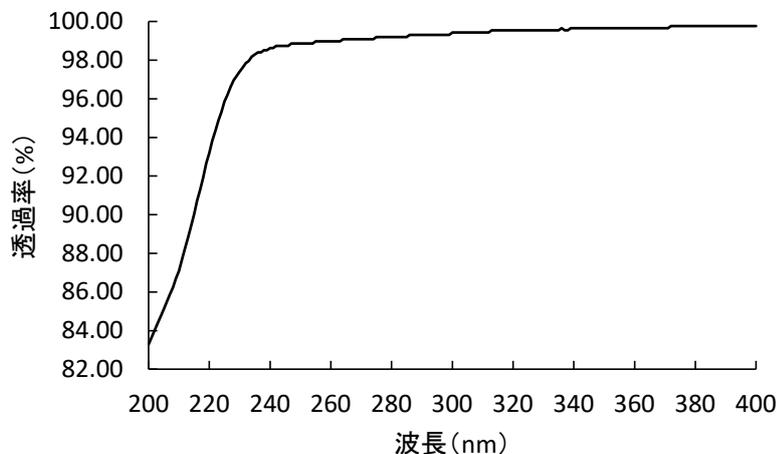


図1. 原水の紫外線透過率 (%) (2018年7月17日採水試料の例)
(98.9%@254nm, 99.1%@265nm, 99.2%@280nm)

(2) 原水および処理水の微生物測定結果

原水および装置A処理水、装置B処理水中の大腸菌、大腸菌群、一般細菌、従属栄養細菌の濃度を図2, 3, 4, 5の順に示す。

原水水質について、微生物濃度は総じて低く、大腸菌は多くは不検出であったものの、突発的に検出される場合があった。土壌細菌等も検出する大腸菌群は低濃度または不検出で推移した。水道水質基準は大腸菌について「検出されないこと」と規定していることから、本試験サ

イトの未処理原水は恒常的な飲用には不適であり、突発的な微生物混入へのバリアとして給水栓等での追加処理の必要性が明らかとなった。一般細菌は低濃度ながら概ね常時検出されたものの、水道水質基準が規定する一般細菌の基準（検水量 1mL 中に 100 コロニー以下）以下で推移した。従属栄養細菌は常時検出され、最高値で 1500CFU/mL であった。従属栄養細菌は水質管理目標設定項目として「検水量 1mL 中に 2,000 コロニー以下（暫定）」と定められており、これまでの試験期間中に当該目標値を超えることはなかった。従属栄養細菌が 1500CFU/mL となった試料の大腸菌・大腸菌群・一般細菌は不検出または低濃度であり、従属栄養細菌はその他の微生物水質項目とは異なる挙動を持つことが示唆された。

処理水について、大腸菌は装置 A,B いずれの処理水でも常時不検出となり、即ち上述の「給水栓等での追加処理」として有効であることがデータをもって示された。大腸菌群は装置 B 処理水で一度、1mL 中に 1 コロニーが検出されたものの、その他では常時不検出となった。一般細菌は装置 A,B ともに不検出または最大でも 5CFU/mL の低濃度で推移した。また、従属栄養細菌は装置 A,B ともに不検出または最大 11.5CFU/mL となった。一般に環境水中の従属栄養細菌の紫外線耐性は高く、流水（地下水）の紫外線消毒を試みた筆者らの 2016 年の試行では、流量 2 L/min への照射で従属栄養細菌はほとんど不活化できなかった（孫、2017、東京大学学位論文）。一方、本研究で用いた装置 A, B による従属栄養細菌の不活化率は、装置 A（2 L/min）で 1.5log、装置 B（10 L/min）で 3.2log 以上（処理後不検出のため特定できず）であり、適切に装置を選定すれば従属栄養細菌でも十分な不活化性能を期待できることが示された。

また、これまでの約 10 カ月の運転期間中、装置性能の低下はなく、安定的に処理を継続した。2018 年 10 月の台風被害による運転中断時（上記 B.1.(3)参照）に装置内を分解して紫外線照射槽内部の汚れ等を確認したところ、汚れやスケールの付着は見られず、装置性能を維持している要因の一つと考えられた。装置性能の経時変化については今後の試験で注視したい。

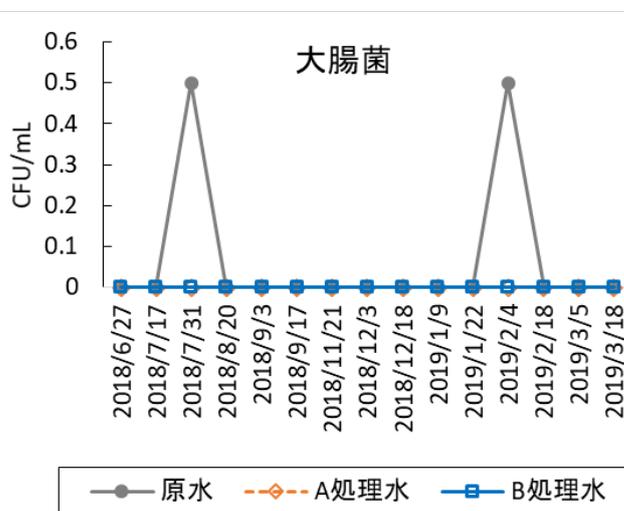


図 2. 原水および装置 A, B 処理水の大腸菌数

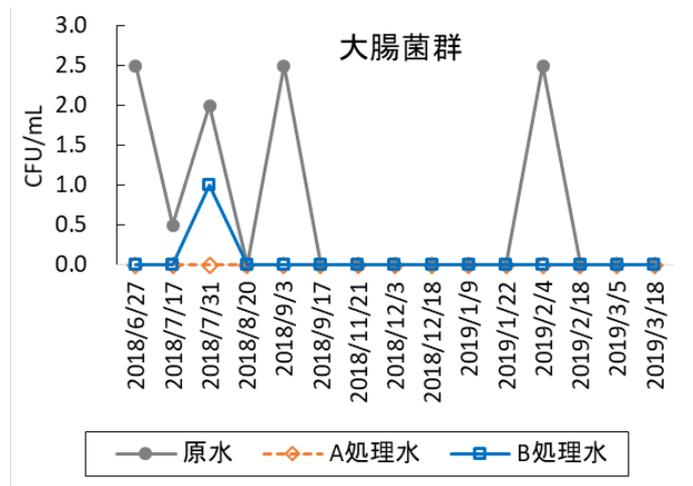


図3. 原水および装置 A, B 処理水の大腸菌群数

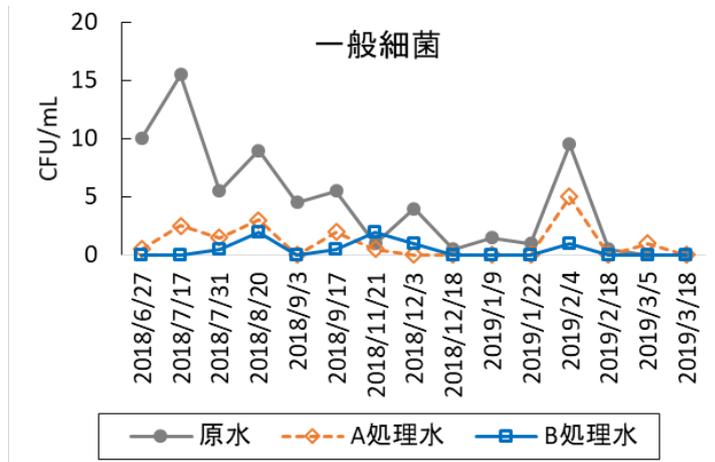


図4. 原水および装置 A, B 処理水の一般細菌数

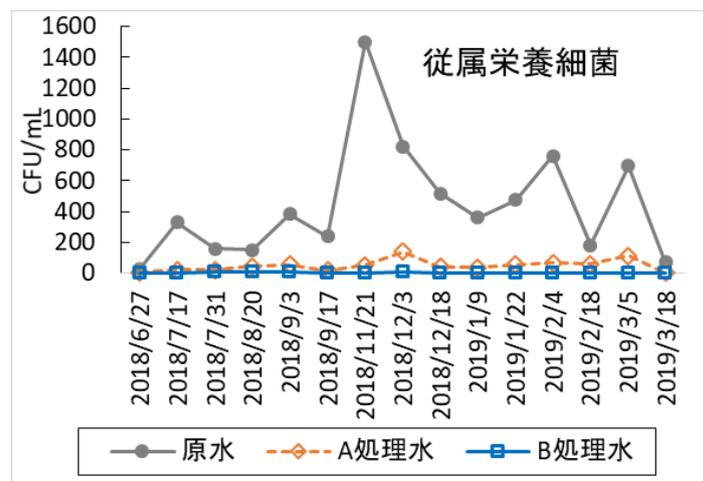


図5. 原水および装置 A, B 処理水の従属栄養細菌数

E. 結論

小規模水供給システムに適した特徴を持つ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 (試作機) 2機種を選定し、国内某所に当該装置を設置して実証試験を開始した。実証試験サイトの原水水質は総じて清澄かつ変動が小さかったものの、突発的に大腸菌を検出する場合があります。給水末端等での微生物に対する追加処理の必要性が示された。UV-LED装置による処理水では、2機種いずれの場合でも、大腸菌はすべて不検出、大腸菌群は突発的に1 CFU/mLを一度検出した以外は全て不検出、一般細菌は不検出~2 CFU/mL、従属栄養細菌は不検出~12 CFU/mLとなり、処理後の微生物学的安全性は著しく向上することが示された。今後は実証試験を継続し、長期運転に伴う性能低下の有無やその特徴に特に注目して分析する計画である。さらに、施設見学と住民へのヒアリングを継続して消毒技術に対するニーズを集約するとともに、今後の技術的課題や住民参加型の維持管理手法に求められる要件を把握し、今後の研究に資する知見としたい。

F. 研究発表

1. 論文発表

- Kumiko Oguma, Surapong Rattanakul and Mie Masaike. Inactivation of health-related microorganisms in water using UV light-emitting diodes. *Water Science and Technology: Water Supply*, in press, 2019. doi: 10.2166/ws.2019.022
- Fariborz Taghipour and Kumiko Oguma. UV LED System Design, Operation and Application for Water Treatment. *UV Solutions 2019 Quarter 1*, 22-26, 2019. <https://uvsolutionsmag.com/articles/2019/>
- Kumiko Oguma. Inactivation of feline calicivirus using ultraviolet light-emitting diodes, *FEMS Microbiology Letters* 365(18): 1-4, 2018.
- 政池美映, 小熊久美子, 橋本崇史, 滝沢 智. 紫外発光ダイオードによる腸炎ビブリオ(*Vibrio parahaemolyticus*)の不活化. *土木学会論文集 G(環境)* 74(7), III_225-230. 2018.
- Kumiko Oguma, Kaori Kanazawa, Ikuro Kasuga and Satoshi Takizawa. Effects of UV Irradiation by Light Emitting Diodes on Heterotrophic Bacteria in Tap Water. *Photochemistry and Photobiology* 94(3): 570-576, 2018. (Early view published online in February 2018).
- Surapong Rattanakul and Kumiko Oguma. Inactivation kinetics and efficiencies of UV - LEDs against *Pseudomonas aeruginosa*, *Legionella pneumophila*, and surrogate microorganisms. *Water Research* 130: 31 - 37, 2018. (published online in Nov, 2017)

2. 学会発表

- Kumiko Oguma. Responses of health-related microorganisms in water to UV-LED exposures. International UV Association (IUVA) World Congress. 2019年2月, シドニー.
- 小熊久美子, 紫外線消毒の動向と展望, 第11回 JWRC 水道講座. 公益財団法人 水道技術研究センター. 2019年2月, 東京.
- 小熊久美子, 水処理における UV 殺菌技術の最新情報, 造水技術シンポジウム 2018. 造水促進センター. 2019年2月, 東京.
- 小熊久美子. 紫外線を利用した水処理技術の最前線. サイエンスアゴラ, 安全な「水」の科学技術を考えるワークショップ. 2018年11月, 東京.
- 浅見真理, 阿部功介, 越後信哉, 伊藤禎彦, 島崎大, 小熊久美子, 増田貴則, 中西智宏. 小規模水供給システムの維持管理の実態に関する調査. 平成30年度全国会議 (水道研究発表会). 2018年10月, 福岡.
- Kumiko Oguma and Surapong Rattanakul. Inactivation of health-related microorganisms in water using UV light emitting diodes (UV-LEDs). International Water Association (IWA) World Congress. 2018年9月, 東京.
- Kumiko Oguma. Water supply systems in Japan: Current status and future perspectives. Special Seminar

by International Experts. DVGW/TZW. 2018 年 4 月, カールスルーエ.

G. 知的所有権の取得状況

なし