生活排水処理施設における紫外線消毒効果

Effect of Disinfection Using UV Radiation in Domestic Wastewater Treatment Facilities

堀尾明宏¹, 浅野秀昭¹, 中島 淳²

¹岐阜県環境管理技術センター／〒500-8357 岐阜市六条大溝4-13-6

²立命館大学理工学部環境システム工学科／〒525-8577 草津市野路東1-1-1

AKIHIRO HORIO¹, HIDEAKI ASANO¹, and JUN NAKAJIMA²

¹Gifu Prefectural Environment Conservation Center/4-13-6, Rokujou Ohmizo, Gifu 500-8357, Japan

²Department of Environmental Systems Engineering, Ritsumeikan University
/1-1-1, Nojihigashi, Kusatsu 525-8577, Japan

Abstract

Effect of disinfection using UV radiation system in rural sewerage facilities was investigated. The treated wastewater before disinfection in 19 domestic wastewater treatment facilities was applied to the UV radiation system in the plant and its disinfection effect was tested. The number of total coliforms after the UV radiation was less than 30 CFU/ml, showing a good and stable performance. The performance of disinfection was not good in the case of chlorination even though residual chlorine was detected in the chlorination effluent. The double amount of UV dose resulted in the increase of disinfection by 20 times. The UV radiation for 4 sec exhibited the same effect of disinfection as the chlorination. More than 30mW·s/cm² of UV dose was required to get 2log survival ratio. Multiple regression of the survival ratio by UV dose, SS, COD and color showed that the survival ratio was able to be explained by only UV dose.

Key word: domestic wastewater, UV radiation system, chlorination, survival ratio, Multiple regression

1. はじめに

現在、浄化槽等の污水处理施設では、公衆衛生上の観点から、主に有機系や無機系の固形塩素剤を用いた塩素消毒法が用いられている。塩素消毒法は、主に塩素剤の取り扱い易さ、残留塩素濃度の管理の容易性、ランニングコストの安価な点が利点として挙げられるが、塩素消毒による消毒副生成物や残留塩素等の公共用水域の生態系への悪影響の欠点も指摘されている¹⁻⁴⁾。そこで、近年ではその塩素代替法として、紫外線やオゾン、二酸化塩素等を用いた消毒法が試みられている。しかし、これ

らの塩素代替法においても、いずれも万全なものではなく、塩素消毒法同様に利点欠点が指摘されている¹⁻⁴⁾。今後いずれの消毒法を選択するにおいても、それぞれの消毒法の利点欠点を勘案し、水の性状や利用目的等に応じた適用が求められる。

近年、注目されている紫外線消毒法では、消毒副生成物の生成を著しく抑制することができるとの報告³⁾や残留性がないことで放流先への悪影響が少ない等の利点が挙げられる一方で、光回復現象の報告例⁵⁻⁷⁾やSSの高い試料には不向きであること、ランニングコストが高いこと等の欠点が指摘されている。

紫外線消毒法は既に生活排水への適用として、下水道分野では適用されているものの、浄化槽分野ではまだ普及はしていない。しかし、浄化槽の中でも、中大規模である農業集落排水施設においては、紫外線消毒の適用事例が次第に増加しつつある。実際に、岐阜県内の河川上流域等に設置されている農業集落排水施設では、塩素消毒された処理水を安易に河川に放流できない等の理由から、町村独自に紫外線消毒を試みる施設が増え始めた。今後、紫外線消毒は、農業集落排水施設等の浄化槽分野においても地域の実情に応じて、その適用が求められることが予想される。そこで、実稼動している農業集落排水施設で消毒効果の実態を調査するとともに、浄化槽への今後の適用に向けて、生活排水処理施設の消毒前処理水を用いた紫外線消毒効果の検討を行った。

2. 方法

2.1 消毒効果の実態調査

2.1.1 調査施設

実態調査および消毒効果の検討の対象施設は、岐阜県に設置されている2,680人槽の回分式活性汚泥法を用いた農業集落排水施設である。この施設の消毒設備 (Fig. 1) は、紫外線消毒と塩素消毒の両消毒設備を有しており、その流路の切り替えは、紫外線消毒装置流入前の電動弁の開閉により、容易に切り替えることができる構造となっている。現在は、平常時の消毒に紫外線消毒を行い、紫外線装置のメンテナンス時や緊急時に塩素消毒を行っている。

紫外線消毒設備の構造は、ステンレス製の開放水路 (外形寸法 (H940mm×W480mm×L7,070mm) となってお

り、消毒には浸水式の紫外線ランプ (波長254nm, ランプ電力65W, 発光長1.473mの石英ガラス) が40本 (横5列, 縦4本, 2系列) 用いられている。また、有効容量から求められる設計上での照射時間は、装置内通過流速が0.175m/秒であり、2系列で16.8秒 (8.4秒/1系列) であった。

一方、塩素消毒設備の構造は、短絡流防止用迂流板等で槽 (有効容量12.3m³) は4槽に区分されており、消毒には有機塩素錠剤 (トリクロロイソシアヌル酸錠剤) が用いられている。また、計画水量と有効容量から求められる設計上での滞留時間は、16.2分であった。

2.1.2 調査方法

調査は、平成11年3月～平成12年2月の期間に月3回の頻度で処理水の性状と消毒効果の調査を行った。

本施設は回分活性汚泥方式のため、流入、嫌気、好気、沈殿、排出を1サイクルとしており、1日4サイクルで運転されている。調査は、その内の1サイクルの排水処理工程時 (排水設定時間: 2時間) に、紫外線消毒の流路にした状態で紫外線消毒前後の調査を行い、その後、塩素消毒の流路に切り替え約30分後において、塩素消毒後の調査を行った。

試料の採水は、紫外線消毒では紫外線消毒前と紫外線消毒後とし、塩素消毒では消毒槽内の末端 (放流ポンプ槽直前) とした。

処理水の性状としては、調査項目として消毒前処理水のpH, BOD, COD, SS, T-N, NH₄-N, NO₂-N, NO₃-Nの8項目とした。NH₄-N, NO₂-N, NO₃-Nは、イオンクロマトグラフを用い、その他は下水試験方法に準じた。また、消毒効果の調査では、紫外線消毒法と塩素消毒法の消毒効果を消毒前後の大腸菌群数で比較した。

大腸菌群数は、デソオキシコレート酸塩重層平板法を用いた。塩素消毒では残留塩素をDPD法を用いて測定し、紫外線消毒では据付の紫外線モニターより紫外線強度を測定した。なお、紫外線モニターは、紫外線装置1系列 (横5列, 縦4本, 計20本) に1個のセンサーが紫外線ランプ上部1本目と2本目の間に据え付けられており、その瞬時の紫外線強度がモニターされるようになっている。

2.2 紫外線実験による消毒効果の検討

2.2.1 試料

本実験では、単独処理浄化槽、合併処理浄化槽等 (n=19) の各消毒前処理水を試料として用いた。試料の性

Fig. 1 Structure of disinfection facilities.

状としては、pH、BOD、COD、SS、濁度、色度を測定した。pH、BOD、COD、SS、濁度、色度の測定は下水試験方法に準じ、濁度、色度は濁色度計（日本電色工業 Water Analyzer 2000）で測定した。

2. 2. 2 実験方法

実験は、本施設の紫外線装置内に試料を持ち込み行った。紫外線ランプの保護管として用いられている予備の石英スリーブ管を挿入管として利用した。

石英スリーブ管（Fig.2）中に試料を充填し、処理水が排出されていない時間帯に手差しでステンレス製の開放水路内の一定部位に挿入後、紫外線を照射した。その際、水路内は静止した施設処理水で満たされている。この場合、施設処理水による紫外線ランプと試料を充填した石英スリーブ間での紫外線照射量の減衰については、紫外線ランプと石英スリーブ間との距離が短いこと、施設処理水が良好で安定していたことから考慮に入れずに行った。また、試料への紫外線照射時間は、本施設の1系列あたりの照射時間が10秒以下であったことから8秒とその半分の4秒で行った。一定時間照射した試料については、試験室に持ち帰り消毒前後の大腸菌群数を測定した。

また、塩素消毒効果を比較するために、実験に用いた各種処理水の（ $n=11$ ）塩素消毒前後の大腸菌群数を測定した。大腸菌群数の測定は、デソオキシコレート酸塩重層平板法で行った。

3. 結果と考察

3. 1 紫外線消毒施設の実態

本施設の消毒前処理水性状をTable 1に示す。処理水は、平均値でBOD 6.0mg/l、COD 7.7mg/l、SS 3.8mg/lであり、BOD、CODは共に10mg/l以下、SSは5mg/l以下の良好な処理水であった。また、pH 6.9、T-N 7.1mg/l、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 2.7mg/l、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 0.1mg/l、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 3.2mg/lであり、硝化や脱窒も効率的に行われていた。これらの処理水質は、1年を通じて比較的安定していた。

消毒前後の大腸菌群数の経日変化をFig.3に示した。消毒前の大腸菌群数は、 $3.4 \times 10^1 \sim 5.3 \times 10^3$ 個/mlの範囲であり、基準値3,000個/mlを超えたのは2回（5.3%）のみであった。このように、大腸菌群数の多くは消毒前で低減していた。紫外線消毒後の大腸菌群数は、すべてが30個/ml以下であり、内24回（63%）は不検出と安定して良好に除去されていた。これは、消毒前のBOD、SSが低濃度であり、紫外線消毒に適していたことと、紫外線照

Fig. 2 Insertion of the quartz sleeve tube.

Table 1 Treated wastewater quality before disinfection in the treatment plant

	Average	Range
Water temp (°C)	20	14~27
pH	6.9	6.5~7.3
BOD(mg/l)	6.0	0.7~20
COD(mg/l)	7.7	5.2~11
SS(mg/l)	3.8	< 1~9.5
T-N(mg/l)	7.1	1.4~1.4
$\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/l)	2.7	<0.02~13
$\text{NO}_2\text{-N}$ (mg/l)	0.1	<0.02~0.35
$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/l)	3.2	<0.03~13

Fig. 3 Changes in the total coliforms.
□, Before disinfection, △, After chlorination;
○, UV disinfection.

射量が十分確保できていたことにより、良好に除去されたと考えられる。排水に適用する紫外線照射量の目安としては、99.9%以上の不活化のために $16\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2 \sim 30\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ とされている⁸⁾。今回の紫外線照射量は、1列あたり平均 $46\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ であり、十分な紫外線照射量であったといえる。

一方、塩素消毒後の大腸菌群数は $0 \sim 1.6 \times 10^3$ 個/ml、除去率は87% (66~99%)であり、消毒効果は低く、大きなばらつきがあった。このときの残留塩素は、すべてにおいて検出 ($0.1 \sim 1.0\text{mg}/\text{l}$) されていた。

処理水量と槽の有効容量から塩素消毒の滞留時間を計算すると、平均15分 (13~17分)であり、平均的には構造基準で示される15分以上の滞留時間を確保していた。これらから、Ct (残留塩素濃度×接触時間)を計算すると、平均 $5.9\text{mg}\cdot\text{min}/\text{l}$ ($1.6 \sim 15\text{mg}\cdot\text{min}/\text{l}$)であった。筆者ら¹⁰⁾は、大腸菌群数を90%除去するためにはCtが $10\text{mg}\cdot\text{min}/\text{l}$ 、99%除去するためにはCtが $33\text{mg}\cdot\text{min}/\text{l}$ 必要であるとしている。また、遊離塩素による消毒で滞留時間30分としたとき、流出水で少なくとも $0.5\text{mg}/\text{l}$ (Ctでは $15\text{mg}\cdot\text{min}/\text{l}$)が残留することを提示している報告¹¹⁾もある。これらの報告値と比較して、今回のCtは低く、このため大腸菌群数の除去率は低かったと考えられる。

塩素消毒効果は、遊離型塩素や結合型塩素のような塩素形態によって異なり、その塩素形態は処理水の性状や塩素注入量によって決まる。不連続点に必要な塩素注入量を理論式 ($7.60 \times \text{NH}_4\text{-N} + 5.07 \times \text{NO}_2\text{-N}$)を用いて求めると、 $0.08 \sim 99\text{mg}/\text{l}$ (平均 $20.7\text{mg}/\text{l}$)であり、かなり高い場合がみられた。理論上では、これ以上の塩素量が注入されなければ、消毒槽内では結合型塩素が主体となる。浄化槽での塩素注入量は、 $10\text{mg}/\text{l}$ 以上としている⁹⁾。筆者らの小規模合併浄化槽での調査では、塩素注入量は夏期で $16.3\text{mg}/\text{l}$ 、冬期で $6.5\text{mg}/\text{l}$ であった¹²⁾。これらと比較すると、今回の必要塩素量は高く、ほとんど結合型塩素と考えられる。消毒効果の室内実験では、結合型塩素の条件下では同じCtであっても消毒効果は低く、ばらつきは大きい¹²⁾。これらのことから、本施設では滞留時間が構造基準通り確保されていても、消毒に必要なCtが十分確保できておらず、また塩素形態が結合型塩素であったことによって、消毒効果が低く、大きなばらつきが生じたものと考えられる。

このように、本施設のような比較的良好な処理水が得られている施設であっても、塩素消毒ではその消毒効果が低い場合がみられ、ばらつきが大きかった。一方、紫外線消毒は、安定して高い消毒効果が得られていた。

3. 2 紫外線装置を用いた消毒効果

用いた試料の性状をTable 2に示す。試料の各項目の平均値(範囲)はBODが $31\text{mg}/\text{l}$ ($13 \sim 66\text{mg}/\text{l}$)、SSは $29\text{mg}/\text{l}$ ($8.0 \sim 90\text{mg}/\text{l}$)であった。文献によると紫外線消毒のSSは、 $20\text{mg}/\text{l}$ が適用限界とされており、 $10\text{mg}/\text{l}$ 以下が望ましいとされている¹⁾。今回用いた試料は、半数以上がSS $20\text{mg}/\text{l}$ を超えており、 $10\text{mg}/\text{l}$ 以下は約2割の4基であった。

本実験での試料への紫外線照射量 (4秒照射, 8秒照射)は、 $7.6 \sim 35.2\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ であった。また、消毒前の大腸菌群数は $1.0 \times 10^2 \sim 2.0 \times 10^6$ 個/mlであった。

紫外線消毒 (4秒照射, 8秒照射)と塩素消毒での消毒前後の大腸菌群数の関係をFig. 4に示す。紫外線消毒の照射時間4秒 (平均照射量 $13.3\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$)と8秒 (平均 $26.5\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$)では、照射量は約2倍であるが消毒後の大腸菌群数は約1/20となり、20倍の消毒効果があった。また、塩素消毒での効果は、紫外線消毒の4秒 (平均照射量 $13.3\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$)と同程度であった。このように紫外線消毒は、短時間で塩素消毒と同等以上の消毒効果が期待できる。

次に、消毒前の大腸菌群数 (N_0)と消毒後の大腸菌群数 (N)の比を生残率 (N/N_0)とし、紫外線照射量 (X_1)との関係をFig. 5に示す。両者には、有意な相関 ($n=38$, $r=0.702$)があり、回帰式は $\log(N/N_0) = -0.0620 X_1$ であった。回帰式から、 $2 \log(\text{除去率}99\%)$ にするには約 $30\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ (95%信頼区間; $15 \sim 50\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$)の照射量が必要であるといえる。また、本実験では同様な照射量で生残率に大きなばらつきがあった。紫外線消毒の微生物の不活化については、Sobsey¹³⁾は、下水処理水の大腸菌群で99.9%不活化するのに照射量 $6.5\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ 、竹田ら¹⁴⁾は、中規模浄化槽の二次処理水を用いた紫外線消毒の実験で大腸菌群数99%除去するのに $38\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ としている。これらの報告値の差は、対象とする水の性状によるものと考えられた。本実験においても消毒効果にはばらつきがみられたが、竹田らの報告¹⁴⁾に近い値であった。

紫外線消毒は、紫外線エネルギーを消費する物質の存在によって、消毒効果も左右され、これらの物質として水中のSSや濁度、有機物 (COD)、色度等とされている¹⁾。そこで、生残率 (Y)を目的変数とし、紫外線照射量 (X_1)、SS (X_2)、COD (X_3)、色度 (X_4)を説明変数として重回帰分析 (色度を測定していないものを除く $n=31$ について)を行った。結果はTable 3の通りで、1変

Table 2 Treated wastewater samples used in disinfection test

No	Type of treatment plants	pH	BOD mg/l	COD mg/l	SS mg/l	Turbidity degree	Color degree
1	N	7.8	17	120	50	56	120
2	N	7.4	64	48	22	22	99
3	N	6.4	59	120	90	90	170
4	N	7.3	38	130	27	73	120
5	N	7.4	15	60	72	50	62
6	N	7.0	13	59	50	36	48
7	N	6.8	23	120	16	80	29
8	N	7.8	66	50	18	—	—
9	G	7.1	18	38	8.0	38	51
10	G	7.4	23	28	24	29	34
11	G	7.1	26	34	40	31	36
12	G	7.5	26	23	16	16	39
13	G	7.9	41	50	10	57	32
14	G	7.8	38	32	31	47	28
15	G	6.9	17	39	15	31	59
16	G	6.7	35	32	34	49	18
17	R	7.5	13	21	8.0	6.2	31
18	R	7.1	26	22	9.3	—	—
19	S	7.3	23	29	14	—	—
Avg		7.3	31	56	29	44	61
Max		7.9	66	130	90	90	170
Min		6.4	13	21	8.0	6.2	18

N: Small-scale tandoku-shori Johkasous, G: Small-scale Gappei-shori Johkasous, R: Rural sewerage facilities (JARUSⅢ), S: Sewerage treatment plant

Fig. 4 Relationship of total coliforms between before and after of disinfection. ○UV dose of 4sec; ◇UV dose of 8sec; △Chlorination. —, chlorine disinfection; —, UV dose of 4sec; ---, UV dose of 8sec

Fig. 5 Relationship between UV dose and survival ratio. —, regression line; ---, 95% confidence interval

Table 3 Result of multiple regression analysis

Step	Multiple regression equation	Multiple correlation coefficient	Coefficient of determination(%)
1	$Y = -0.0602(X_1)$	0.697	48.6
2	$Y = -0.0590(X_1) - 0.010(X_2)$	0.698	48.7
3	$Y = -0.0572(X_1) - 0.000(X_2) + 0.0014(X_3)$	0.701	49.1
4	$Y = -0.0576(X_1) - 0.0013(X_2) + 0.0027(X_3) + 0.0022(X_4)$	0.705	49.7

Y: Survival ratio, X_1 : UV dose, X_2 : SS, X_3 : COD, X_4 : color

数（紫外線照射量）を取り込んだ場合と4変数（紫外線照射量, SS, COD, 色度）を取り込んだ場合では寄与率にほとんど差がないことから、生残率は紫外線照射量1因子で説明可能であるといえる。

このことから、紫外線消毒では紫外線照射量の安定した確保が最も重要であることが示唆された。また、他の因子については、本実験では試料水が石英スリーブ管内のみに充填されているため、紫外線の透過において比較的SSや色度等の影響を受けにくい状況にあったと考えられる。

本実験では、SSが生残率に寄与する結果に至らなかったが、同じ紫外線照射量でも生残率が大きくばらつくことを考えると、SSの粒形や性質、他の妨害物質との複合的な影響もありうるものと考えられる。安藤ら¹⁵⁾は、下水道の余剰汚泥を用いた高SS濃度の擬似的二次処理水で紫外線照射実験を行い、SS濃度が60mg/l～70mg/lではSS濃度のない場合より大腸菌群数の除去率が1桁低下すると報告している。したがって、安定した紫外線消毒を行うためには、消毒前にSSをはじめとする妨害物質を良好に除去することが重要である。

4. まとめ

紫外線消毒を実施している農業集落排水施設で消毒効果の実態を調査するとともに、浄化槽等の各種生活排水処理水を用いた紫外線消毒効果を検討した結果は、以下のとおりであった。

- (1) 調査対象施設では、紫外線消毒後の大腸菌群数はすべてが30個/ml以下と、安定して良好に除去されていた。紫外線照射量が十分確保できており、また消毒前処理水質が良好であったことによると考えられた。
- (2) 塩素消毒を用いた場合には、すべてにおいて残留塩素が検出されたものの、大腸菌群数は0～1.6×10³個/mlに分布しており、消毒効果に大きなばらつきがみら

れた。これは、消毒に必要なCtが十分確保できていなかったことや塩素形態が結合型塩素の形態により、消毒効果が低く、大きなばらつきが生じたためと考えられる。

- (3) 各種処理水を用いた紫外線消毒効果の実験では、照射量が2倍で約20倍の消毒効果があった。また、平均照射量13.3mW・s/cm²で塩素消毒と同程度の消毒効果が得られた。
- (4) 紫外線照射量と生残率の関係から、2log(除去率99%)にするには約30mW・s/cm²の照射量が必要であった。
- (5) 紫外線照射量, SS, COD, 色度を説明変数とした重回帰分析の結果、紫外線消毒では紫外線照射量の安定した確保が最も重要であることが示唆された。

謝辞

本調査研究の実施にあたり、ご協力頂きました東海環境事業(株)の北川寛明氏、藤田昭仁氏に深謝いたします。

参考文献

- 1) 金子光美:水の消毒, (財)日本環境整備教育センター, 東京 (1997)
- 2) 神子直之:塩素代替法技術の必要性と今後の課題, 水環境学会誌, 21 (9) 566-570 (1998)
- 3) 相沢貴子:浄水処理における塩素代替消毒技術, 水環境学会誌, 21 (9) 571-576 (1998)
- 4) 弓倉純一:下水処理場における塩素代替消毒技術の開発状況, 水環境学会誌, 21 (9) 577-580 (1998)
- 5) 鹿島田浩二, 神子直之, 山本和夫, 大垣眞一郎:紫外線照射処理における光回復の評価, 水環境学会誌 18 (1) 44-50 (1995)
- 6) 土佐光司, 平田強, 竹馬大介, 古畑勝則, 福山正文:下痢原性大腸菌の紫外線による不活化と光回復, 水環境学会誌 20 (9) 610-615 (1997)
- 7) 土佐光司, 平田強:サルモネラ菌の紫外線による不活化および光回復, 浄化槽研究 12 (1) 15-22 (2000)
- 8) 金子光美, 河村清史, 中島淳:生活排水処理システ

- ム, 技報堂出版, 東京 (1998)
- 9) 建設省住宅局建築指導課ほか監修: 尿尿浄化槽の構造基準・同解説: 日本建築センター, 東京, 194-195 (1984)
- 10) 堀尾明宏ら: 農業集落排水施設における塩素消毒と紫外線消毒の実態, 浄化槽研究, 10 (2) 49-55 (1998)
- 11) 財団法人日本環境整備教育センター: 水質環境を確保するための生活排水等の高度化処理技術の確立に関する研究 (平成3年度厚生省委託研究), 189-190 (1992)
- 12) 南部敏博, 浅野秀昭, 後藤淳, 堀尾明宏, 額額保朗, 青木堯: 小型合併処理浄化槽処理水の塩素消毒に関する基礎的研究, 浄化槽研究, 11 (1) 3-9 (1999)
- 13) Sobsey, M. D: Inactivation of healthrelated micro-organisms in water by disinfection process. Wat. Sci. Tech., 21 (3) 179-195 (1989)
- 14) 竹田茂, 伏脇祐一, 森康明: オゾン及び紫外線照射による生活排水の消毒効果, 日本水処理生物学会誌別巻21号, 83 (2001)
- 15) 安藤茂, 城村幹彦: 下水処理水の紫外線消毒, 用水と廃水, 38 (4) 312-317 (1996)

(受付 2001.10.24)

(受理 2002.3.11)