

循環水の紫外線処理を考慮した微生物および化学線量計の検討

Study of biological and chemical actinometries
for the evaluation of UV treatment of circulating water.

高浪 龍平 (Takanami Ryohei)

感染症対策による衛生管理ニーズの急激な高まりにより、紫外線技術が注目されている。法改正により、水道における紫外線処理が地表水にも適用が可能となったことで、紫外線処理の利活用は、さらに増えると考えられる。また、UV-LED などの水銀を用いない深紫外線光源による水処理技術の開発が進められている。本研究では、水銀フリーの深紫外線光源による細菌の不活化機構や有機物の分解特性を明らかにし、微生物線量計および微生物線量計を代替する化学線量計に関する知見を得ることにより、水銀フリーの深紫外線光源を用いた水処理システムの基礎的な知見を構築することを目的としている。本研究は、循環水の紫外線処理を考慮した微生物および化学線量計に関する研究として、JSPS 科研費 22K12480 とともに 2022 年度より検討を開始し、2022 年度において以下の成果が得られた。

【新光源による細菌の不活化機構の解明】

従来の紫外線処理で用いられる低圧水銀ランプは、細菌の不活化機構が明らかとなっている一方、水銀フリーの深紫外線光源においては、不活化機構の解明が不十分である。本研究では、大腸菌を対象とした不活化および光回復について、基礎的な知見を得ることを目的に実験を行った。

紫外線光源として、紫光技研製のプラズマ光源 (SK-BUVC(260)、以後 LAF) を用い、対照として、セン特殊光源製の低圧水銀ランプ (UVL10DL-12、以後 LML) を用いた。供試菌は大腸菌 (*Escherichia coli*、NBRC102203) を用いた。

光源別の 3 log 不活化に必要な照射線量を図 1 に示す。図 1 には実験装置図も示している。3 log 不活化に必要な照射線量は、LML は 8.7 mJ/cm²、LAF は 2.8 mJ/cm²であり、LAF は LML に比べて不活化効率が 2 ~ 5 倍程度高くなった。これは、DNA の吸収極大が 260 nm 付近かつブロードな吸収域を持ち、LAF の 260 nm を中心としたブロードな発光特性と一致するため、254 nm の単波長である LML よりも不活化が効率的に起こり、殺菌効率が高くなったと考えられる。

3 log 以上の不活化条件下における光回復率を図 2 に示す。図 2 には実験装置図も示している。大腸菌の光回復率は、LML は 5.55 %、LAF は 0.13 %となり、LAF における光回復率が低くなった。これは、不活化と同様に LAF の発光特性によるものと考えられ、核酸損傷に加えて、光回復酵素などの損傷も引き起こしていることが示唆された。

【化学線量計の開発】

紫外線照射線量を測定する方法は、微生物線量計法や照度計を用いた物理的測定が一般的である。しかし、微生物線量計法は、測定および解析に時間を要し、物理的測定はセンサーへの直接的な測定に限定されるなどの短所があるため、簡便な測定方法として化学線量計に着目し、実験による検討を行った。

化学線量計としてウリジン法とヨウ化物/ヨウ素酸法の2種を検討した。ウリジン法は、Rabani ら (Rabani *et al*, *Photochemistry and Photobiology*, 97(5), 873-902, 2021) の方法を参考に、ウリジンを蒸留水に溶解し、0.2 mM のウリジン溶液を作成した。測定波長は、最大吸収波長である 262 nm とした。ヨウ化物/ヨウ素酸法は、Rabani らの方法を参考にヨウ化カリウム、ヨウ素酸カリウム、四ホウ酸ナトリウムを蒸留水に溶解し、10 mM に希釈したものをを用いた。測定波長はピーク波長である 290 nm と 350 nm にした。

照射方法は、LAF の一方位照射型 (以後 LAF 一方位) と全方位照射型 (以後 LAF 全方位) を用い、対照として LML を用いた。照射時間は、分光光度計で測定が可能な範囲を検討し、ウリジン法の LAF 一方位は 60 秒毎、LAF 全方位は 30 秒毎、LML は 5 秒毎とした。ヨウ化物/ヨウ素酸法の測定では、全ての方法で 5 秒毎とした。

LAF 全方位におけるウリジン法とヨウ化物/ヨウ素酸法の吸光度の変化を図 3 に示している。ウリジン法は紫外線照射に伴って吸光度が減少し、ヨウ化物/ヨウ素酸法は紫外線照射に伴って吸光度が増加する。時間変化に伴う吸光度の増減は、どちらの方法においても一部で直線性が得られ、これらの反応速度から照射線量の比較を行うことが可能と判断した。

それぞれの条件により得られた反応速度の比較により照射線量を評価したものを表 1 に示す。なお、ヨウ化物/ヨウ素酸法は、290 nm と 350 nm の測定波長について、それぞれを示している。ウリジン法とヨウ化物/ヨウ素酸法のすべてにおいて同様の挙動を示し、照射線量の高い条件は、LMF 全方位、LML、LMF 一方位の順であった。LMF 一方位に対し、LMF 全方位は最大で 4.40 倍、最小で 2.43 倍となった。ウリジン法は、量子収率の低い一方で、DNA に類する吸収波長を持つ。ヨウ化物/ヨウ素酸法は、反応速度が速く希釈しても測定が可能である一方で、吸収波長のピークが 290 nm と 350 nm の 2 つがあり、条件によってこれらの反応に差が生じた。このため、微生物線量計の代替や簡易測定としての化学線量計として、ウリジン法が適すると判断し、本研究における紫外線照射線量の評価に用いることとした。

成果の公表

出田七輝, 蘆原瑞樹, 河野ゆみ, 高浪龍平 : 異なる照射装置を用いた水銀フリー光源による紫外線照度の評価, 環境技術学会年次大会予稿集, 22, 29-30, 2022

山中真人, 福原康平, 蘆原瑞樹, 出田七輝, 河野ゆみ, 高浪龍平 : 異なる材質の通水管を用いた流水紫外線照射装置の評価, 日本水環境学会年会講演集, 44, 575, 2023

河野ゆみ, 蘆原瑞樹, 出田七輝, 山中真人, 福原康平, 高浪龍平 : プラズマ発光型紫外線光源による大腸菌の不活化および光回復, 日本水環境学会年会講演集, 44, 631, 2023

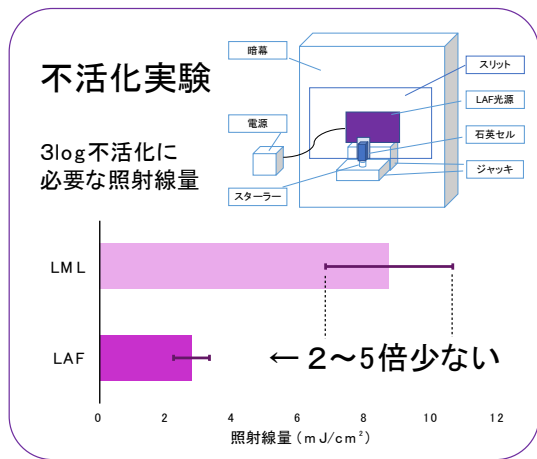


図1 大腸菌の3 log 不活化に必要な照射線量

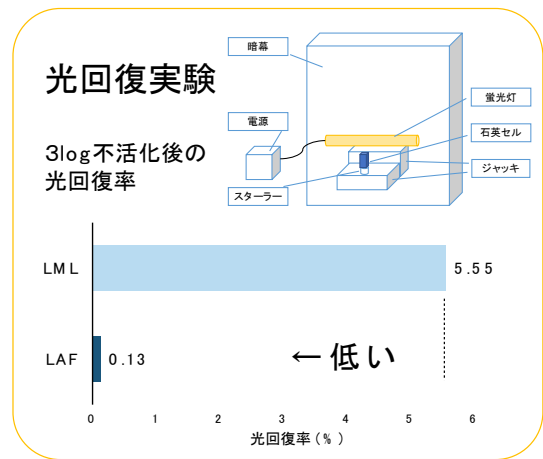


図2 不活化条件下における大腸菌の光回復率

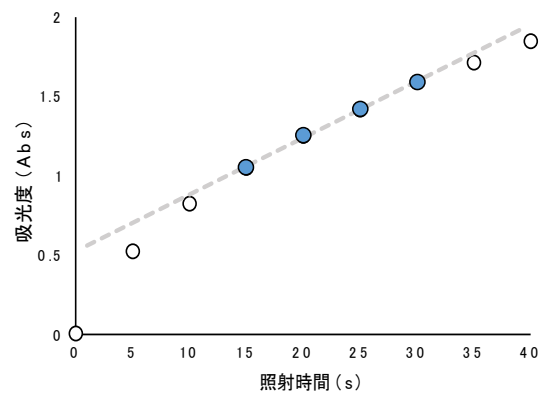
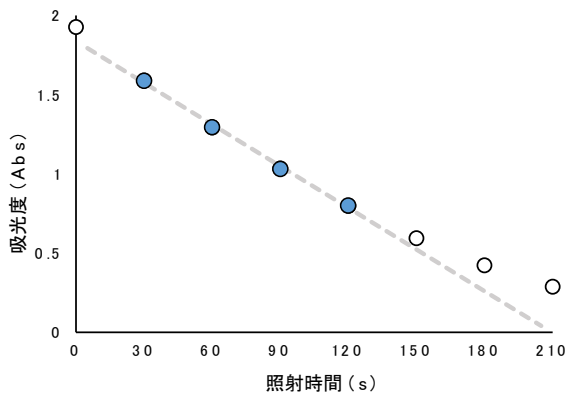


図3 LAF全方位における吸光度の変化 (左:ウリジン法、右:ヨウ化物/ヨウ素酸法)

表1 条件別の照射線量の比較

測定方法	(列÷行)	LAF 一方位	LAF 全方位	LML
ウリジン (262 nm)	LAF 一方位	1.00	4.40	2.75
	LAF 全方位	0.23	1.00	0.63
	LML	0.36	1.60	1.00
ヨウ化ヨウ素酸 (290 nm)	LAF 一方位	1.00	2.43	1.31
	LAF 全方位	0.41	1.00	0.52
	LML	0.76	1.85	1.00
ヨウ化ヨウ素酸 (350 nm)	LAF 一方位	1.00	2.70	2.10
	LAF 全方位	0.37	1.00	0.78
	LML	0.48	1.29	1.00