

II. その他の予算による研究

[下水処理研究室]

1. 下水放流水による水辺利用地域の衛生学的指標に関する研究

下水処理研究室 室 長 南山 瑞彦
研 究 官 平出 亮輔
研 究 員 桜井 健介

1. はじめに

下水道の整備が進み、平成 13 年度時点で全国 1,718 箇所の下水処理場から年間約 130 億 m^3 もの下水処理水が放流されており、放流先の河川等に占める処理水の割合が増加している。また、都市域内における貴重な水資源確保の観点から下水処理水の再利用が進み、全国 218 箇所の下水処理場において、下水処理水が場外に送水され、水洗用水や修景用水、植樹帯散水、工業用水として年間約 1.9 億 m^3 利用されている¹⁾。その様な背景から、一般住民が下水処理水に接する機会がますます増大してきていると言える。

一方、下水中には、人間生活から排出される多種類の病原微生物が含まれている。そこで、大腸菌群、糞便性大腸菌群のような指標細菌が病原微生物の存在を示唆するものとして伝統的に用いられてきた。しかし、糞便に由来しない大腸菌群の存在、大腸菌群や糞便性大腸菌群のウイルスや原虫類に対する指標性の問題、塩素消毒後の損傷回復菌の存在の問題点が指摘されている^{2),3),4)}。

下水処理水や環境水の衛生学的安全性を適切に保つためには、各種の指標細菌の特性を把握し、目的に応じた適切な指標を選択するべきであると考えられるが、その特性については、不明な部分が多い。本研究では、従来から使われている大腸菌群と、大腸菌、糞便性連鎖球菌、ウェルシュ菌芽胞等の下水放流先での挙動を比較し、下水処理水を利用したせせらぎ等での、指標細菌の特性を把握することを目的として調査を行った。

2. 過年度の調査結果

2. 1 平成 14 年度の調査結果

2. 1. 1 模型水路実験

放流先水系での指標細菌の挙動の傾向を把握することを目的に、河川を模した模型水路に消毒した下水二次処理水を流し、水路の流入時と流出時で、指標細菌の測定を行った。全 17 回の測定の結果、それぞれ濃度が増加した回数は、大腸菌群 10 回、糞便性大腸菌群 8 回、大腸菌 5 回となり、大腸菌群は、水路内で増加しやすいと考えられた。

2. 1. 2 現地調査

実際の下水処理水が放流されている河川、なじみ水路、せせらぎから選んだ 5 地点において各指標細菌の測定を行った。その結果、なじみ水路、せせらぎでは、大腸菌を除く指標細菌が放流直後から増加した。大腸菌は増加せずほぼ一定であった。また、凝集剤併用型循環式硝化脱窒砂ろ過法に塩素消毒を行っている下水処理場の処理水中の指標細菌は、放流先の河川水中の指標細菌の存在量より少なかった。また、処理水が河川水に放流された場合、河川水に希釈されることによる指標細菌濃度の低下が確認されたが、その他の因子による濃度の増減は、この調査では観察されなかった。

2. 2 平成 15 年度の調査結果

2. 2. 1 模型水路実験

塩素消毒の程度の相違による放流先水系での指標細菌の挙動の把握を目的に、河川を模した模型水路に塩素添加量を変化させた下水二次処理水を循環させ、0、2、4、6、8、12、18、24、36、48 時間経過時に採水を

行って、指標細菌数を測定した。その結果、菌種によって再増加や生残性の違いが見られ、再増加がピークに達する時間は塩素消毒の程度によって変化した。

2. 2. 2 現地調査

規模の異なる茨城県内の3河川において、下水処理水が河川へ放流される前、放流された直後、その下流など、それぞれ5～6箇所にて採水し、それらの指標細菌を即日分析した。分析した結果、処理水が河川水で希釈されることによる指標細菌の濃度低下が測定できた。一方、模型水路実験で確認された様な指標細菌の再増加は、確認されなかった。

3. 平成16年度の調査内容

3. 1 目的

平成16年度は、模型水路実験を行った。

平成15年度の調査において、水路を流下している水中の指標細菌の生残性について、菌種によって相違が見られた。特にウェルシュ菌芽胞は水中の濃度が低下していたが、芽胞形成菌が死滅したとは考え難く、水路床の砂利層に捕捉されていると推測された。水路床の状況は、浮遊物質の砂利層での捕捉や巻き上がり等に影響を与え、それと共に菌数へも影響すると思われた。そのため、模型水路実験では、水路床の状況の違いが及ぼす指標細菌の挙動への影響を把握することを目的として実験を行った。

3. 2 実験方法

国土技術政策総合研究所湖北総合実験施設内に設置した模型水路に、ポンプを用いて循環するように供試水を流し、経時的に指標細菌の測定を行った。模型水路の概要を図-1に示す。模型水路は原水供給ポンプ、循環水槽、循環水供給ポンプ及び水路から構成されている。水路はステンレス(SUS304)で作られており、幅20cm、長さ30mの水路を2本直列に接続してあり、合計で60mの長さがある。この水路はポンプを用いて供試水を循環式で流下させることが可能である。

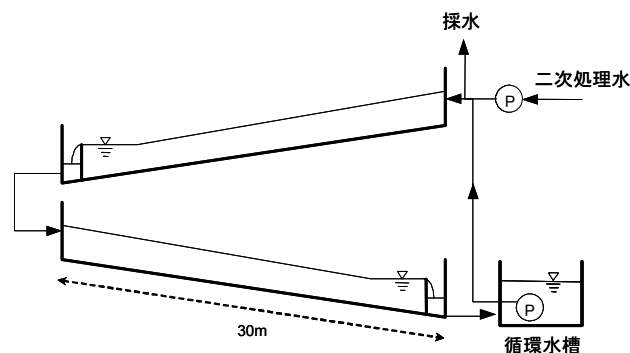


図-1. 模型水路の模式図

本実験の条件を表-1に示す。RUN-1とRUN-2は、水路床の玉砂利の有無による指標細菌数の挙動の相違を観察し、RUN-3では水道水の残留塩素を中和した水を循環させ測定し、実験中に微生物の混入による汚染がないことを確認するために行った。

RUN-1,2の供試水は実下水を用いた反応槽容量10m³の標準活性汚泥法パイロットプラントから得られた二次処理水を利用した。標準活性汚泥法パイロットプラントの運転条件は、HRT(設定)8時間、汚泥返送比43.2%、SRT10日とした。実験では、水路及び循環水槽を二次処理水で満水にした後、二次処理水の流入を止め、水路及び循環水槽内の水を循環水槽内の水中ポンプを用いて循環させた。

供試水の水路一周の平均時間は9.7分であった。採水間隔は、循環開始後から、0、2、4、6、8、12、18、24、36、48時間とした。採水は、図-1に示したように水路の直前にて行った。玉砂利の性状は、重量で85%が粒径8～12mmであり、空隙率は36.7%となった。

測定項目は、指標細菌として大腸菌群、大腸菌、糞便性連鎖球菌、ウェルシュ菌芽胞、及び、一般細菌とした。指標細菌の測定方法の詳細を表-2に示す。平板培養法による大腸菌の測定方法は、食品衛生検査指針に

表-1. 実験条件

	RUN-1	RUN-2	RUN-3
原水	二次処理水		水道水
流下水量	100L/min		
勾配	2.33‰		
水路床	SUS304	SUS304上に玉砂利	
平均石深	-	14.3mm	
平均水深	26.9mm	49.6mm	

示されている培地を利用した。菌数は、同一サンプルをシャーレ3枚に培養し、その相加平均値とした。下水試験方法等では、コロニー形成数が30~300個のシャーレの計数を推奨しているが、30個以下の場合でも計数し、括弧で囲んで表記した。シャーレ3枚全てにコロニー形成が確認されない場合はndと表記した。また、0と表記された欄は、コロニー形成が確認されたがシャーレ3枚の相加平均が0.5個未満であったことを示す。

表-2. 微生物試験方法

指標細菌	測定方法	準拠する試験方法
大腸菌群	デソキシコール酸塩培地法	下水試験方法
大腸菌	特定酵素基質培地法	食品衛生検査指針
糞便性連鎖球菌	M-エンテロコッカス寒天培地法	下水試験方法
ウェルシュ菌芽胞	ハンドフォード改良培地法	上水試験方法
一般細菌	標準寒天培地法	下水試験方法

指標細菌の他に一般水質項目として、水温、pH、SSを測定した。

3.3 調査結果

模型水路実験の調査開始時の気温、水温、pH、SSを表-3に示す。水路は、1系列のみであり同時に実験を行えないため、実験時期が異なっている。そのため、各実験の原水とした二次処理水の水質が異なっていた。

表-3. 実験開始時の状態

	RUN-1	RUN-2	RUN-3
気温(°C)	22.9	17.5	18.5
水温(°C)	25.0	20.0	21.9
pH	7.51	7.48	7.38
SS(mg/L)	2.7	1.4	0.1

本実験の指標細菌及びSSの測定結果を表-4及び図-2,3に示す。経過時間0時間とは、循環開始直後を指す。ウェルシュ菌芽胞は、検水量10mLで測定を行っているため、単位を[CFU/mL]に換算した際に小数点1位まで表記した。図-2,3のエラーバーは、その培養した3枚のシャーレの内、コロニー形成数の最小と最大の個数を示す。

表-4. 測定結果

	水路床	経過時間(h)										定量 下限
		0	2	4	6	8	12	18	24	36	48	
大腸菌群 (CFU/mL)	RUN-1	209	187	167	159	176	184	183	169	147	156	30
	RUN-2	116	106	109	107	105	89	106	93	89	81	
	RUN-3	nd	(0)	nd	nd	nd	nd	(1)	nd	nd	nd	
大腸菌 (CFU/mL)	RUN-1	53	49	58	68	67	69	66	62	55	50	30
	RUN-2	50	43	45	46	36	46	40	37	(24)	(28)	
	RUN-3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
糞便性連鎖球菌 (CFU/mL)	RUN-1	(3)	(4)	(3)	(4)	(4)	(3)	(3)	(3)	nd	nd	30
	RUN-2	31	31	30	(20)	(25)	(15)	(18)	(13)	(4)	(4)	
	RUN-3	(5)	(3)	(2)	(2)	(2)	(3)	(4)	(3)	(2)	(3)	
ウェルシュ菌芽胞 (CFU/mL)	RUN-1	9.6	8.7	8.9	5.0	7.9	6.4	7.2	6.3	3.7	(1.7)	3.0
	RUN-2	4.8	(2.4)	(0.4)	(0.5)	(0.6)	(1.0)	(1.4)	(0.5)	(0.3)	(0.2)	
	RUN-3	nd	(0.1)	(0.3)	(0.1)	nd	(0.1)	(0.0)	nd	nd	nd	
一般細菌 (CFU/mL)	RUN-1	3,467	3,300	2,900	2,300	2,400	2,500	1,067	2,767	3,267	2,467	30
	RUN-2	1,313	1,583	4,833	9,600	9,667	9,400	11,133	8,467	7,533	6,600	
	RUN-3	195	303	370	627	620	683	723	563	493	633	
SS (mg/L)	RUN-1	2.7	2.4	2.5	2.3	2.4	2.3	2.1	1.5	1.3	1.5	0.1
	RUN-2	1.4	1.1	1.0	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	(0.0)	
	RUN-3	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	

*培養したシャーレ3枚のコロニー形成数の相加平均を記載した。

図-2,3 より、大腸菌群及び大腸菌の挙動は、RUN-1,RUN-2 共になだらかな右下がりを示し、それぞれ顕著な差異は無かった。糞便性連鎖球菌は、存在量が少なく定量下限を概ね下回ったため、差異は判断できなかった。ウェルシュ菌芽胞は、RUN-2 は4時間経過時で、コロニー数が1個を下回るなど大幅に減少していた。ウェルシュ菌芽胞は、芽胞を形成する芽胞菌であり、大腸菌群よりも長期間生残可能であると考えられることから、死滅による減少とは考え難い。RUN-1,2,3 の採水位置は、砂利層への沈殿物などが構造上採水できないことから、ウェルシュ菌芽胞は、砂利層へ沈殿していたものと推測された。

ウェルシュ菌芽胞が、沈んでいると推測されたため、再度 RUN-2 と同様の実験を行い、水路を流れる水の

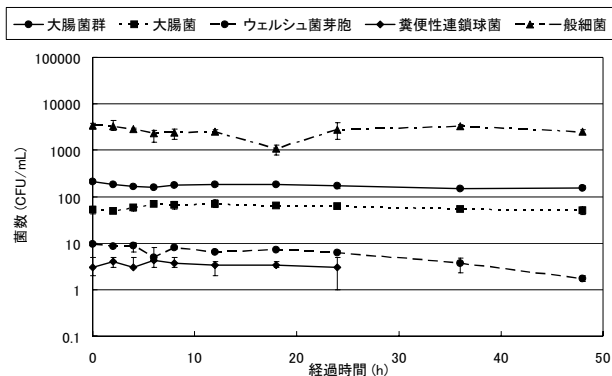


図-2. RUN-1 の指標細菌の挙動

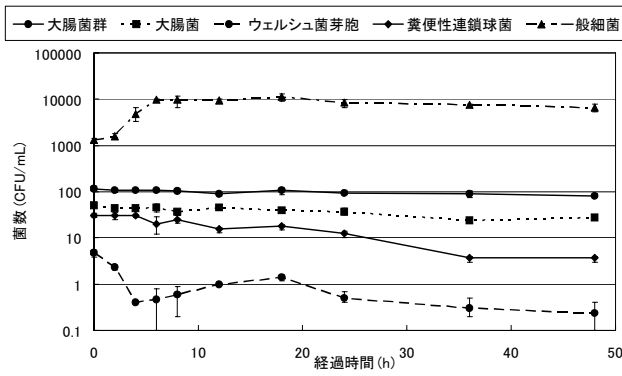


図-3. RUN-2 の指標細菌の挙動

上層部と下層部に分けて指標細菌を調査した。採水には、ピペットを用い、水路下端部の上層部(水面から10mm程度の深さ)と下層部(砂利層の中：水面から40mm程度の深さ)に直接挿入し、吸い出した。測定時間は、0,24,48時間経過時のみとした。同時に、水路に流したものと同一二次処理水をビーカーに入れ、沈降しないようにビーカー内で攪拌し続けた二次処理水中の指標細菌も測定した。

測定結果を表-5に示す。0時間経過時の上層、下層、ビーカーの値は、循環させる直前の二次処理水の値とした。ビーカー内のSSは、一定であると思われるため測定しておらず、24、48時間経過時の値は、0時間経過時と同値とした。

表-5. 測定結果

経過時間(h)	大腸菌群 (CFU/mL)			大腸菌 (CFU/mL)			糞便性連鎖球菌 (CFU/mL)			ウェルシュ菌芽胞 (CFU/mL)			一般細菌 (CFU/mL)			SS (mg/L)		
	0	24	48	0	24	48	0	24	48	0	24	48	0	24	48	0	24	48
上層	153	137	135	49	33	(23)	(5)	(4)	(2)	59.0	25.5	17.5	7850	11300	89650	1.8	0.3	0.5
下層	153	137	525	49	31	41	(5)	(20)	39	59.0	665.0	1055.0	7850	12050	99650	1.8	21.4	33.5
ビーカー	153	340	670	49	47	48	(5)	(8)	(5)	59.0	72.0	67.0	7850	36700	95850	1.8	1.8	1.8

*培養したシャーレ2枚のコロニー形成数の相加平均を記載した。

下層では、大腸菌群、糞便性連鎖球菌、ウェルシュ菌芽胞、及び、一般細菌が増加していたため、これらの指標細菌が沈降していた可能性がある。ただし、大腸菌群、及び、一般細菌は、攪拌したビーカー内でも同程度の比率で増加していたため、この2種については必ずしも沈降しているとは判断できなかった。糞便性連鎖球菌は、存在量が少なく定量下限以下となったものの、下層での増加傾向が示唆されたことから、沈降している可能性が高いと考えられた。ウェルシュ菌芽胞の上層では、ビーカーテストに比べ減少し、下層では細菌数が増加していることから、沈降していたものと思われる。下層でのウェルシュ菌芽胞については、24、48時間経過時に原水に対しそれぞれ11、18倍となり、他の指標細菌よりも増加率が大きかった。また、SSはウェルシュ菌芽胞の増加率と同程度であったことから、この実験においては、ウェルシュ菌芽胞と同様な挙動を示した可能性があると考えられた。

4. まとめ

模型水路を用いて、水路床の玉砂利の有無による下水処理水中の指標細菌の増減の変化を調査した。調査の結果、指標細菌の特性について、以下のことを得た。

- ・ 大腸菌群は、流下の過程で水路床の違いの影響をあまり受けなかった。
- ・ 大腸菌は、水路床に玉砂利が有る時に、若干の減少があったものの、玉砂利層内での増加傾向は無く、水路床の違いの影響をあまり受けないと考えられた。
- ・ 糞便性連鎖球菌は、今回使用した測定方法で行うには存在量が少なく、明確な挙動に関する傾向は明らかにならなかったものの、玉砂利層がある条件での水路の下層で濃度がやや上昇する傾向が見られたことから、流下の過程で水路床の違いの影響を受ける可能性が示唆された。
- ・ ウェルシュ菌芽胞は、流下の過程で水路床の違いの影響を受け、水路の下層で濃度が上昇した。この傾向はSSの増加傾向と類似していた。

5. おわりに

本研究は、平成14年度から16年度にかけて、各種の指標細菌の下水処理水の放流後の挙動の解明を目標に研究を実施した。その結果、従来から糞便汚染の指標として使われている大腸菌群は、同一の水であっても僅かな時間経過により、細菌数が増加したため、下水放流水の消毒効果を把握するための指標としては一定の役割を果たすものの、下水処理水の再利用等、放流後ある程度の時間を経た後の衛生学的安全性の指標として利用することもあるような条件下では、必ずしも適切な指標とは言えない場合があると考えられた。今回の実験では塩素消毒後でもあまり増減の無かった特定酵素基質培地を用いた大腸菌を指標として用いた方が望ましい場合があると考えられた。糞便性連鎖球菌は絶対数が少なく、指標細菌としての利用は困難であると考えられた。ウェルシュ菌芽胞は、塩素消毒の程度が変化しても菌数に変化が無かったことから、強い塩素耐性を示していると言え、塩素耐性のある病原微生物の指標としての利用可能性があるが、大腸菌などと比べ強い沈降性が見られたことから、ウェルシュ菌芽胞の不検出のみを病原微生物による汚染が無いことの判断に用いることは困難であることが示唆された。

なお、本調査研究は試験研究費により実施されたものである。

参考文献

- 1) 「日本の下水道（平成15年）」、国土交通省都市・地域整備局下水道部監修、p. 206-209
- 2) 金子光美編著「水質衛生学」、技報堂出版、pp. 435-489、1996
- 3) 平田強「塩素消毒と細菌」、水道協会雑誌、Vol. 62、No. 5、pp. 6-9、1993
- 4) 芦立徳厚「水質環境基準項目としての大腸菌群の評価」、用水と排水、vol. 30、No. 3、pp. 229-238、1988