

## 7. 下水処理水の衛生学的安全性に関わる技術基準に関する調査

下水処理研究室 室長 南山 瑞彦  
主任研究官 吉澤 正宏  
研究員 桜井 健介

### 1. はじめに

下水道の普及に伴い、下水処理水はその水環境中での重要性が増している。一方、水系感染性病原微生物による健康被害が発生しており、下水処理水も水環境における役割に応じ、衛生学的安全性を確保することが求められている。しかし、現行指標の大腸菌群は糞便汚染を示す指標として必ずしも適切ではないとされており、適切な衛生学的安全性を確保するための基準として十分とは言えない状況にある。

本調査は、衛生学的安全性確保の観点からの大腸菌をはじめとした指標の有効性及びこれらの指標による衛生学的安全性の評価手法を明らかにし、下水処理水放流先の水利用状況や再利用用途を踏まえた衛生学的安全性確保のための技術基準を確立することを目的としている。

平成18年度は、下水処理水再利用における滝や噴水等から発生する空中浮遊菌量、及び、PCR法における検出結果の評価方法を含む下水処理過程や放流先における大腸菌をはじめとした指標と病原微生物の相関関係について検討を行った。

### 2. 下水処理水再利用における空中浮遊菌発生量の評価方法に関する検討

下水処理水の適切な再利用を推進するため、『下水処理水の再利用水質基準等マニュアル』が平成16年度に策定された<sup>1)</sup>。その中で衛生学的基準についても、一定の仮定により再利用時の暴露量を設定し、リスク評価を行って水質基準等が示されたところである。ただし、霧状の飛沫が発生するような利用形態については、その発生量が不明であり暴露量を設定することが困難であったため、当面、親水利用として取り扱うこととし、再生水利用における空中浮遊菌の発生量に関する調査を進めることとされた。本調査は、リスク評価に必要となる空中浮遊菌の発生量を明らかにしようとするものであり、2.1で環境条件に起因する空中浮遊菌発生量の一般的な性質について調査し、2.2で具体的な構造条件と空中浮遊菌発生量の関係について調査を行った。

#### 2.1 環境条件の相違による空中浮遊菌発生量への影響

##### (1) 実験方法

過年度調査<sup>2)</sup>に引き続き、環境条件（日射、湿度、気温、風速、発生源からの距離、飛沫の発生規模、下水中細菌濃度等）の相違による空中浮遊菌数への影響について検討を行うこととし、ここでは、①風速（風向）及び②発生源との高度差について取り上げた。

空中浮遊菌の測定には、過年度調査を踏まえ、空中浮遊菌測定エアースンプラー BIO-SAS（アイネクス社製）を使用し、腸内細菌（クロモカルト寒天培地）を計測することにより行った。空中浮遊菌の発生方法は、過年度調査同様、空中浮遊菌が適量捕捉できるよう、標準活性汚泥法により運転（HRT：8hr）するパイロットプラントの反応槽内活性汚泥混合液を地下水で適宜希釈し、この希釈液をホース先端に取り付けノズル（孔径2mm）からポンプの圧力により下方に向け噴霧することにより行った。

空中浮遊菌発生量は、希釈液中の腸内細菌濃度（CFU/希釈液・mL）に対する空中浮遊菌として捕捉され

た腸内細菌濃度 (CFU/空気・L) の比率 (以下、「捕捉率 (単位: L/mL)」という。) により示した。ただし、空中浮遊菌発生量は発生源の構造によるため、この実験の中では捕捉率の相対比較により環境条件の相違の影響を検討するものである。なお、希釈液中の腸内細菌濃度は、8,010~26,900CFU/L の範囲にあった。

実験は11月~3月に屋外で行い、実験時の気象条件は表-1に示すとおりであった。風速については実験地 (つくば市) の季節的条件とも言える2m/s程度の風が吹いている場合が多かった。また、発生源との高度差に関する実験を除き、空中浮遊菌発生源高さ (構造条件) は1.5m、空中浮遊菌の測定高さは1.0m (子供~大人の口の高さを想定) とした。

表-1 実験時の気象条件

気温(°C)	湿度(%)	照度(LUX)	風速(m/s)
10~21	29~65	7,860~93,200	0~4

## (2) 結果および考察

### ①風速 (風向) と空中浮遊菌分布

空中浮遊菌発生源から風下方向を0°とし、それより30°、60°及び90°の方向に発生源からの距離と捕捉率の関係を図-1(a)に示す。風速は1.5~2.5m/sの範囲にあるデータとした。

風向と直角方向となる90°方向については、発生源近傍でもほとんど空中浮遊菌を観測しないが、60°程度以内では、ほぼ同程度の空中浮遊菌を観測し、比較的捕捉率が高かった。発生源からの距離に対して指数関数的に減少し、離隔距離1mと5mでは、1~2オーダー程度の差が表れた。

### ②発生源との高度差

高度差を設定するため、発生源高さを3.0m、或いは測定高さを0.5mとして実験を行い、発生源からの距離と捕捉率との関係を求めた (図-1(b))。凡例の「1.5m (1.0m)」は発生源高さ1.5m、測定高さ1.0mを表す。測定高さ0.5mでは、発生源近傍で1.0mの場合より捕捉率は小さいが、発生源から離れた地点では逆に大きくなった。空中浮遊菌 (を含むエアロゾル) の下降速度のためこのような現象が生じたと考えられる。同じ理由により、発生源高さを3.0mとした条件において、離隔距離1mではなく3mの位置で捕捉率のピークが発生したものと考えられた。また、発生源高さが高いほど、より遠方まで空中浮遊菌が到達した。

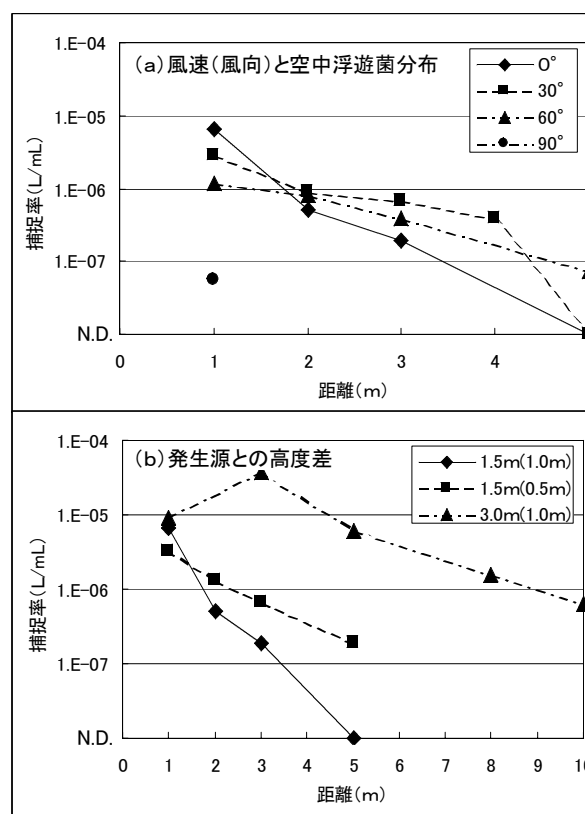


図-1 環境条件等と空中浮遊菌数

## 2. 2 構造条件による空中浮遊菌の発生量

### (1) 実験方法

下水処理水を修景用水や親水用水として再利用する場合の主な形態 (構造条件) 毎に空中浮遊菌の発生量を調査した。構造条件として①滝、②壁泉、③噴水及び④せせらぎを想定し、それぞれの構造を模した実験装置に通水して、空中浮遊菌の捕捉率を求めた。

実験は屋内で行い、気温は13°C、風速は0m/sであった。空中浮遊菌の測定方法は2.1と同じであり、測定高さは1.0mとした。実験装置に通水した試料は2.1と同様に作成した希釈液であり、希釈液中の腸

内細菌濃度は5,160~7,500CFU/L であった。その他実験条件については、構造毎に以下に示すとおりである。

①滝 (表-2、図-2(a))

下水処理水を利用した修景・親水施設の実態調査 (以下、「実態調査」という。) によれば、滝の構造を有する施設は全国に15箇所 (構造規模が分かるもの) あり、その規模は例えば落差で0.5m~8mまで様々であるが、中央値で落差3m、1m 幅当たりの流量 (単位幅流量) 150L/min であった。これを参考に、同程度の落差3mのケースとその1/2の落差1.5mの2ケースの実験を行った。幅60cm のコンテナから100L/min で落水させたため、単位幅流量は167L/min であった。

②壁泉 (表-2、図-2(b))

実態調査では10箇所壁泉 (壁面を伝わって流れ落ちる滝) があり、中央値で落差2.7m、単位幅流量223 L/min であった。このため、①の実験と同様、落差3mと1.5mの2ケースの実験とした。流水の伝わる壁面には細礫 (主に粒径5mm 程度以下) を貼り付けたストーンライナー (オアーゼ社) を用いた (幅1.2m)。流量は、流水が壁面から跳ねない程度に調整した (単位幅流量: 83L/min)。

表-2 構造等実験条件

構造		落差(高さ) (m)	幅(直径) (m)	水路勾配 (%)	水量 (L/min)	備考
滝	大	3.0	0.6	—	100	
	小	1.5	0.6	—	100	
壁泉	大	3.0	1.2	—	100	
	小	1.5	1.2	—	100	
噴水	噴射型	2.6	1.5	—	約50	吹き出し口高さ0.8m
	水膜型	1.0	1.5	—	約70	吹き出し口高さ0.8m
せせらぎ	緩流	—	0.6	0	100	下流端水深1.5cm(堰上げ)
	急流	—	0.6	10	100	河床に小石を配置

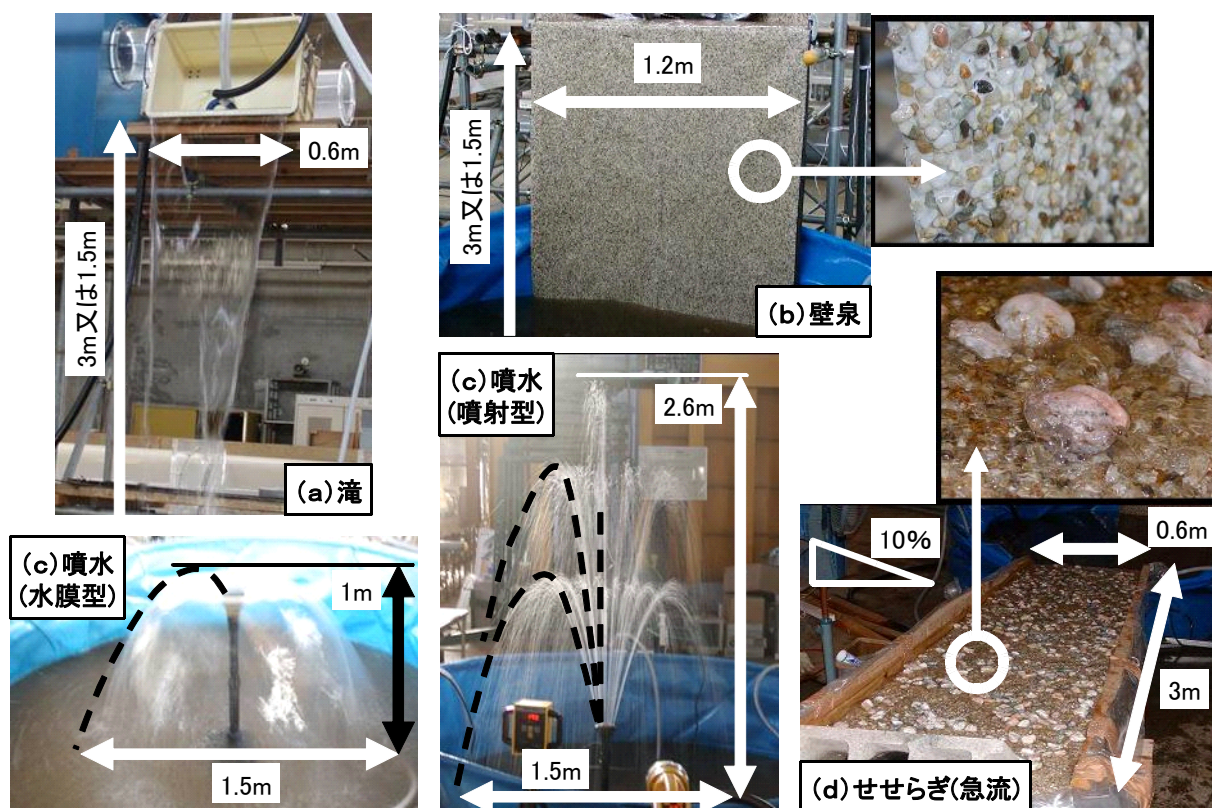


図-2 構造条件

③噴水（表-2、図-2(c)）

噴水の事例は数少ない（5箇所）。その規模は、高さで0.5m~5m、流量で23~767L/minの範囲にあった。形状も様々であると推測される。実験では噴水形状の異なる2ケース（上方に吹き上げる噴射型及び横方向に水膜状に広がる水膜型（ともにオアーゼ社））について行った。噴射型は、吹き出し口高さ0.8m、噴水の最大高さと最大幅（直径）がそれぞれ約2.6m、約1.5mであり、水膜型は、それぞれ0.8m、約1.0m、約1.5mであった。流量はそれぞれ約50L/min、約70L/minであった。

④せせらぎ（表-2、図-2(d)）

緩やかな流れ（緩流）と速い流れ（急流）の2ケースの実験を行った。緩流は、②の実験で用いたストーンライナーを底面に敷いた、水路勾配0%の水路（幅0.6m×長さ3.0m）に100L/minの流量を流したものである。水路下流端に木片を置いて堰上げし、下流水深は約1.5cm、上流水深は約9cmであった。また、急流は同じ水路の水路勾配を10%とし、河床には大きさの異なる小石（粒径4cm~1.5cm）を配置した。下流端で堰上げさせず、流量は緩流同様、100L/minとした。なお、水路の設置高さを下流端で40cmとし、下流端から1mの位置で流れと直角方向に空中浮遊菌を測定（測定高さ1.0m）したので、水面と測定器との高度差は、緩流で60cm、急流で50cmであった。

(2) 結果および考察

構造毎に発生源からの距離と捕捉率との関係を図-3に示した。同じ構造でも施設規模の相違により捕捉率に差が生じるため、一概には言えないものの、滝=噴水>壁泉>せせらぎの順に捕捉率が高いことが分かる。以下、それぞれの構造毎に実験結果を考察するが、ここで得られた捕捉率を用いて、当該構造に通水する試料（下水処理水の再利用では、再利用水）中の細菌数から空中浮遊菌数が求められ、ヒトの呼吸量などから暴露量を設定することが可能になると考えられる。また、本実験結果は腸内細菌について求めたものであるが、過年度調査において大腸菌群、腸内細菌、嫌気性芽胞の捕捉率を比較し、細菌の種類による相違は特に見られなかったことを明らかにしており<sup>2)</sup>、想定する病原細菌の捕捉率を同程度と推定して、当該病原細菌の当量反応モデルを適用すればリスク評価も可能になると考えられる。

①滝（図-3(a)）

大滝（落差3m）は約1.5mの高さで水流に乱れが見られ、小滝（落差1.5m）と比べて水面上の広い範囲に飛沫が生じていた。このことが、大滝の正面方向の捕捉率が高くなった理由と考えられる。発生源から離れるほど捕捉率は低くなり、1mで $10^5$ オーダー、4mで $10^7$ オーダーとなった。側面方向は、正面方向より低くなり、その差は発生源近傍で大きい。小滝は、正面方向の発生源近傍で若干高くなるが、正面方向、側面方向ともに大滝の側面方向と同程度であった。

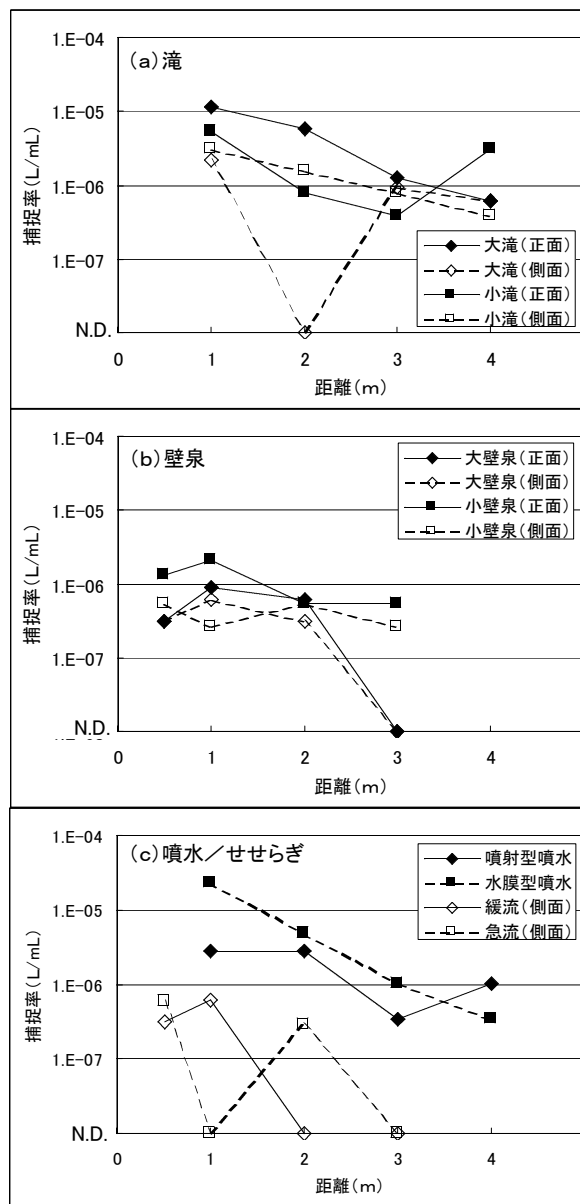


図-3 構造条件と空中浮遊菌数

## ②壁泉 (図-3 (b))

滝と比べ穏やかな流れであり、発生源近傍で一部 $10^6$ を超える捕捉率もあるが、基本的に $10^6$ 未満であり、離隔距離3mでは N. D. となるデータも見られる。全体として捕捉率は低く、落差の相違は明確でないが、正面方向より側面方向が低くなる傾向があった。

## ③噴水 (図-3 (c))

水膜型は大滝とほぼ同様の捕捉率であり、離隔距離1mで本実験中最も高い値となった。水膜型では測定方向に水が放射されており、発生源近傍で高い捕捉率となったものと考えられる。ただし、発生源からの距離に対する捕捉率の低減幅も大きく、離隔距離4mでは、 $10^7$ オーダーまで低下した。発生源高さが低いことが理由と考えられる。

噴射型はデータに若干バラツキがあり、評価が難しいが水膜型と比べると捕捉率は低いようである。視覚的には飛沫が最も多く発生しているようであるが、空中浮遊菌として浮遊するような細かい飛沫は大滝や水膜型噴水と比べれば少なかったのではないかと考えられた。

## ④せせらぎ (図-3 (c))

今回の実験条件では、緩流と急流の相違は明確でなかった。いずれも離隔距離0.5mで $10^6$ 未満、離隔距離3mで N. D. となっている他、離隔距離1mや2mでも N. D. を観測することがあり、捕捉率は低かった。

## 3. PCR 法における検出結果の評価方法に関する検討

細胞培養法で検出ができないウイルスも PCR 法で検出が可能であるが、PCR 法では感染性の有無を評価することができないため、リスク評価を行うことができない。そこで、消毒強度と不活化率の関係について、PCR 法による検出結果と細胞培養法による検出結果を比較検討することにより、PCR 法における検出結果と感染性の有無の関係について実験的検討を行うものである。

塩素消毒実験は、過年度調査で下水二次処理水の消毒レベルより少し高い  $Ct(mg \cdot min/L) = 100$ 程度までのデータを得ているので、本年度調査ではこれよりも消毒強度を高めて実験を行った。このような消毒強度の事例は、例えば米国カリフォルニア州の最も高度な再生水に求められる衛生学的基準の一つとして  $Ct \geq 450 (T \geq 90min)$  がある。実験方法は、過年度調査と同様であり、Milli-Q 水にウイルス指標としての F 特異大腸菌ファージ  $Q \beta$  (NBRC20012) を適量添加した試料を作成して消毒実験を行い、 $Q \beta$  数を E. coli K12F<sup>+</sup>株 (NBRC13965) を宿主としたブラック法及び PCR 法によって測定した。

実験結果を図-4に示す。PCR 法による不活化率がブラック法による不活化率より小さいことは、過年度調査結果と同様であるが、過年度調査結果では  $Ct = 100$ 程度で PCR 法の不活化率が1程度となったのに対し、本実験では極めて小さな不活化率しか得られなかった。今回の実験の範囲では、PCR 法による検出結果と不活化率の関係は、極めて評価が困難であると言わざるを得ず、引き続き、検討を進めることとする。なお、ブラック法による  $Q \beta$  の不活化率は、 $Ct$  値が数百程度までは  $Ct$  値の増加に伴い不活化率の増加が比較的大きいが、 $Ct$  値が数百程度を超えると、不活化率の向上効率は小さくなる結果が得られた。

## 4. 環境水中のウイルスの挙動に関する検討

下水処理水が放流される環境水 (小河川) 中の大腸菌等の挙動について調査を行った。調査対象としたA川は、

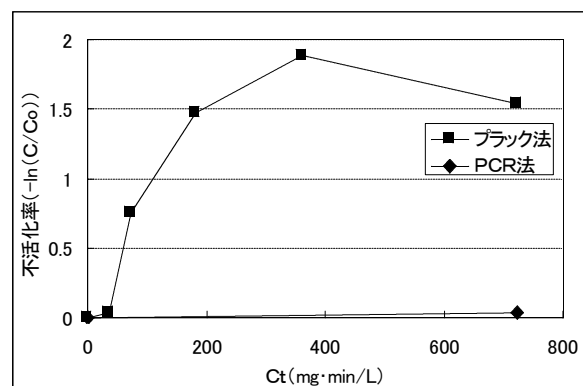


図-4 消毒強度と不活化率との関係(塩素消毒)

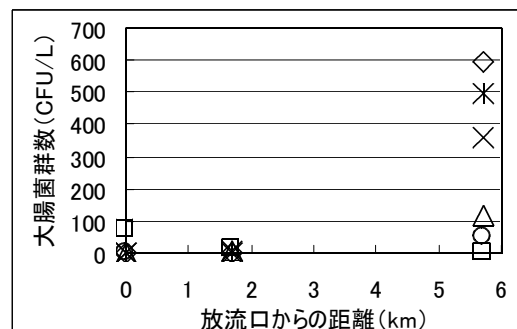
主に田園地域を流れる小河川であり、下流で大きな河川に合流する（写真－1）。この合流点より上流約6kmの地点にB下水処理場の放流口がある。B下水処理場は標準活性汚泥法により下水を処理し、放流量は平均0.31m<sup>3</sup>/sである。放流口下流のA川の流量は0.76m<sup>3</sup>/sであるから、下水処理水の割合は4割程度と計算される。放流口から下流には主に3つの支流が流入するが、いずれも流量は小さく、合流点前でもA川の流量は0.78m<sup>3</sup>/sである。



写真－1 調査対象河川(St3付近)

このA川の3地点（St1：放流口直下流、St2：放流口下流1.7km、St3：放流口下流5.7km(合流点直前)）を調査箇所として選定し、ノロウイルスが流行する冬季に2回/週の頻度で試料を採取した。採水日はいずれも晴天日を選び、3週間合計6回の調査を行った。

ノロウイルス(G1、G2)はほとんどの場合1 copies/mL以下であったが、1回の調査についてSt1で $1.4 \times 10^2$ copies/mL(G1)を観測した。この調査において、下流のSt3はSt1より小さい3.2copies/mLであった。



図－5 環境水中の大腸菌群数

大腸菌はほとんどの場合で N. D.、最大で13CFU/Lであった。流下方向の変化は小さく、ほぼ一定であった。測定値が小さく、ウイルス濃度との関係については今後の検討課題である。

また、大腸菌群数は図－5に示すように下流ほど増加するとともに、分布の幅が大きくなっており、自然由来その他の汚染が考えられた。処理水以外の要因が含まれることから、このようなデータ（大腸菌群数）をもとに、処理水による当該水域のリスク評価及びこれに基づく衛生学的基準の設定することは困難である。

## 5. まとめ

本調査では、下水処理水再利用における滝や噴水等から発生する空中浮遊菌量、及び、PCR法における検出結果の評価方法を含む下水処理過程や放流先における大腸菌をはじめとした指標と病原微生物の相関関係について検討を行った。調査の結果得られた知見を以下に示す。

- (1) 下水処理水の修景・親水利用施設で整備される主な構造形態（滝、壁泉、噴水及びせせらぎ）について実験的検討を行い、それぞれの構造からの離隔距離と空中浮遊菌数（捕捉率）の関係を明らかにした。施設規模にもよるが、概ね、滝＝噴水＞壁泉＞せせらぎの順に捕捉率は高くなった。
- (2) 今回の実験の範囲では、PCR法による検出結果と不活化率の関係について評価することは困難であった。
- (3) 下水処理水が4割程度を占める小河川中の大腸菌等の挙動について調査を行った。大腸菌は、N. D. ～13CFU/Lと測定値が小さく、ウイルス濃度との関係については今後の検討課題である。また、大腸菌群数は流下過程で増加するなど、処理水以外の要因が含まれることから、大腸菌群数をもとに、処理水による当該水域のリスク評価を行うことは困難である。

## 参考文献

- 1) 国土交通省下水道部、国土技術政策総合研究所：下水処理水の再利用水質基準等マニュアル、2005.4
- 2) 国土技術政策総合研究所：平成17年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp.33～38、2006.6