

## 活性汚泥処理による病原性原虫類 — クリプトスポリジウムの除去 —

諏訪 守\* 鈴木 穰\*\*

### 1. はじめに

下水道普及の進展に伴い、上水取水源の上流に下水処理場が建設される事例が増加しており、流域内において下水処理水が再び上水等として利用されるようになってきている。また、下水処理水を再利用水として様々な形態で利用される事例も近年増加傾向にある。

現在、下水処理水を環境水中に排出する際には、消毒などによって大腸菌群数を 3,000 個/ml 以下に削減することが定められている。しかし、現行指標が定められた頃と比較すると病原性微生物に関する知見が一段と拡大した現在、その妥当性について他の病原性微生物を含めて改めて検討すべきであると考えられる。

水中の病原性微生物の検出技術の向上に伴い、米国などでの水系感染症の発病要因は 1960 年代には皆無とされていたウイルス、原虫類等が大きなウエイトを占めるようになってきている<sup>1)</sup>。我が国においても平成 8 年 6 月から 7 月にかけ埼玉県越生町で病原性原虫類の一種であるクリプトスポリジウムによる大規模な集団感染事例<sup>注 1)</sup>が発生している<sup>2)</sup>。越生町の集団感染事例では、浄水過程で除去しきれなかったクリプトスポリジウムのオーシスト<sup>注 2)</sup>を含む水道水が各家庭に給水され、9,000 人近い感染者が発生した。

感染症等が発生した場合には、オーシストはふん便とともに多量に排出されるため、下水道処理区域内に感染者が存在すれば、それらが下水処理場に流入する。下水処理場に流入したオーシストは活性汚泥処理により除去が行われ、その多くは削減されると考えられるが、除去しきれないオーシストの存在により、放流先下流域への感染リスクが増大する可能性がある。

病原性微生物の対策としては、通常、活性汚泥処理による除去等を含め最終的には消毒を行い制御するが、クリプトスポリジウムを含めた消毒耐

Removal of *Cryptosporidium* by Activated Sludge Treatment.

性の高い病原性微生物に関しては、従来の消毒レベルでは対応できないことも考えられる。

このため、本報告では主に病原性微生物の一種である原虫類のクリプトスポリジウムに関して、集団感染症発生時における除去能力の向上を目的として、活性汚泥処理法による除去能力の把握を行った。また、除去効率向上のための凝集剤添加法に関する検討を行ったので、その結果について報告する。

### 2. 実験方法

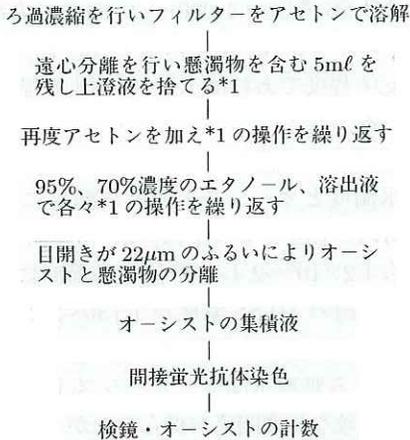
本実験では、水槽内 (H200×W200×D200mm、槽内容量 5ℓ) に、A 浄化センター内に設置してある活性汚泥パイロットプラント中の活性汚泥を入れ、オーシスト (*C. parvum*) を添加し曝気混合を行った。添加したオーシストは、市販されているものであり、ホルマリン固定後リン酸緩衝生理食塩水で洗浄を行ったものである。曝気混合後、活性汚泥を 2 時間沈殿させ、上澄液について図-1 に示す方法によりオーシスト数を測定した。

なお、作成したオーシスト集積液は、フィルター (直径 25mm、セルロースアセテート製、公称孔径 0.2μm) に通し間接蛍光抗体染色した後、落射専用蛍光顕微鏡にてオーシストを観察・定量した。間接蛍光抗体染色には、ENSYS 社製の HYDROFLUOR, Combo キットを用いた。本測定方法によるオーシストの平均回収率<sup>注 3)</sup>は 57.6%であった。

注 1) クリプトスポリジウム症は、激しい下痢と腹痛であり、健康な人であれば 1~2 週間自然治癒する。しかし、免疫力の低下している人が感染すると致命的になる場合がある。オーシスト 30 個程度の摂取で発症、1 個でも発症の可能性があると考えられている。

注 2) クリプトスポリジウムは外界では生存のために、膜 (オーシスト壁) に覆われた嚢胞体 (オーシスト) の形態で存在する。丈夫な膜に覆われていることから、塩素などの化学薬剤に強い抵抗性があり、消毒によっても容易には死滅しない。直径約 5μm の類円形で、オーシストの内部には、4 個のスプロゾイト (虫体) と 1 個の残体などが存在する。

注 3) 一般的に測定個数は、濃縮・回収等の種々の要因により、実際に含まれる個数に比べ低くカウントされる。回収率の算出方法は、以下のとおりである。既知の個数 (A) のオーシストを試料に添加し、測定を行う。得られた結果が (B) であれば、回収率は (B/A) となる。



フィルター：セルローズ混合エステル製、公称孔径3 $\mu$ m  
遠心分離：1,050G

図-1 測定方法の概略フロー

水質分析項目は水温、pH、DO、活性汚泥濃度 (MLSS)、濁度とした。なお、濁度計はセントラル科学社製 TC-205 型、セル長 100mm を用いた。

### 3. 実験結果

#### 1) オーシストの沈降性

活性汚泥処理によるオーシストの除去実験に先立ち、使用するオーシストの清水および流入下水中での沈降性について実験を行った。清水には、残留塩素をチオ硫酸ナトリウムで中和した水道水、流入下水は A 浄化センターのものをを用いた。

なお、予備実験として活性汚泥曝気後の静置沈殿時間の把握を行うため、沈殿時間の違いによる濁度の測定を行った。その結果、曝気後の沈殿時間を 2 時間とすれば上澄液の濁度レベルがほぼ一定となることから、静置沈殿時間を 2 時間とし、以降の実験を行った。

沈降性の実験では、清水あるいは流入下水 5 $\ell$  中にオーシストを添加し曝気混合を行った後、2 時間静置沈殿させ、各々上層および下層から試料を採取してオーシストの定量を行った。試料量は、清水の場合 50ml、流入下水の場合懸濁物量が多いため 0.1ml とし、蛍光染色用フィルターに直接通水して定量を行った。

図-2 には清水、表-1 には流入下水を用いた実験結果を示す。清水中、流入下水中ともに上層および下層から検出されたオーシストの個数は同一であり、濃度変化が見られない。よって、今回実験に使用したオーシストは、2 時間程度であれば沈降しないことが確認された。特に、流入下水中

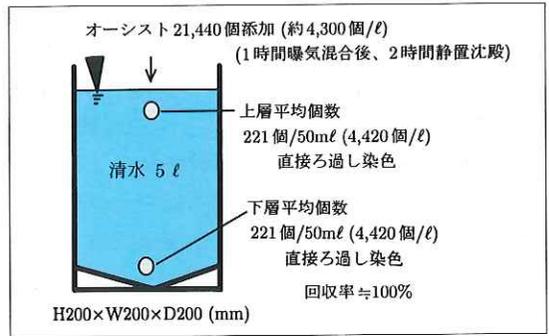


図-2 反応水槽の概略図

表-1 流入下水中での沈降性

添加濃度 991,000 個/ℓ	2 時間沈殿後		
	添加直後	上層	下層
オーシスト数 (個/0.1ml)	101	100	100
SS (mg/ℓ)	130	40	293
濁度 (度)	94	58	156
回収率 ≈ 100 (%)			

においては、SS 等の懸濁粒子が下層に沈降しても、それらに取り込まれることなくオーシストが浮遊した状態となっている。これは、流入下水中の SS 等の懸濁粒子とオーシストの表面電荷が互いにマイナスであるため、反発しあっていることによるものと推定される。このため、流入下水中のオーシストが懸濁物に付着していない状態であれば、最初沈殿池でのオーシストの除去効率は低いものと考えられる。

#### 2) 処理時間と処理水オーシストの関係

活性汚泥の処理 (曝気混合) 時間の違いによる処理水中 (上澄液) オーシスト濃度の変化について、図-3 に示す。オーシストの添加濃度は、 $4.2 \times 10^3 \sim 2.4 \times 10^6$  個/ℓ の範囲において 4 段階の設定とした。槽内の MLSS 濃度は 1,630~2,290mg/ℓ の範囲であった。

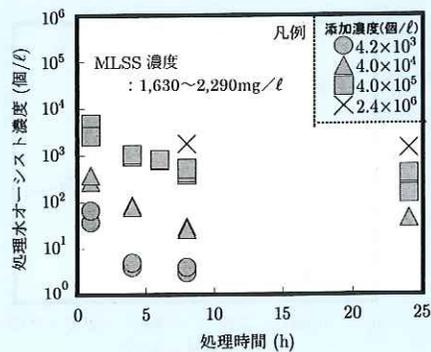


図-3 オーシスト添加濃度ごとの処理時間と処理水オーシスト濃度の関係

処理時間の経過とともに処理水中のオーシスト濃度は低下するが、処理時間を 24 時間としても 8 時間の処理水中のオーシスト濃度より若干低くなる程度であった。オーシストの添加濃度が約  $4.0 \times 10^5$  個/ℓ の場合では、処理時間を 1 時間から 8 時間にすると処理水中の平均オーシスト濃度は約 1/10 に減少、8 時間から 24 時間とすると約 1/2 に減少していた。また、添加オーシスト数を多くすることによって処理水中のオーシスト濃度が上昇した。

3) MLSS 濃度と処理水オーシスト濃度の関係

MLSS 濃度を変化させた場合の処理時間と処理水中のオーシスト濃度の関係について図-4 に示す。槽内の MLSS 濃度は 1,000、2,000、4,000mg/ℓ 程度の 3 段階、オーシストの添加濃度は約  $4.0 \times 10^5$  個/ℓ である。MLSS 濃度を高濃度とし処理時間を長時間とすることによって、処理水中のオーシスト濃度は低下する傾向を示している。

処理時間が 8 時間の場合について、MLSS 濃度と処理水中のオーシスト濃度の関係を図-5 に示す。

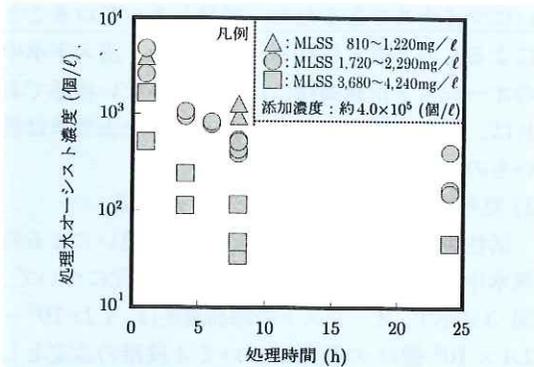


図-4 MLSS 濃度の異なる 3 ケースにおける処理時間と処理水オーシスト濃度の関係

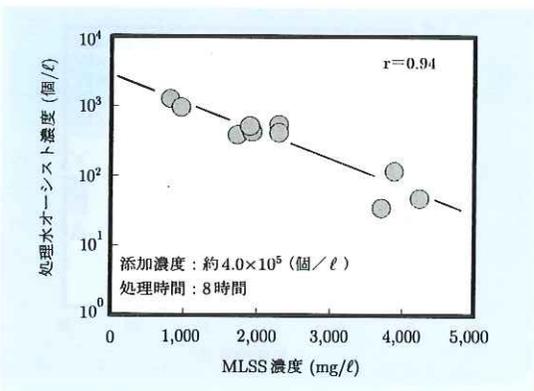


図-5 MLSS 濃度と処理水オーシスト濃度の関係

槽内の MLSS 濃度が 1,000mg/ℓ 程度であれば、処理水中のオーシスト濃度は  $1.0 \times 10^3$  個/ℓ 程度、4,000mg/ℓ 程度であれば  $1.0 \times 10^2$  個/ℓ 程度に減少している。

4) 処理水濁度との関係

処理水濁度とオーシスト濃度の関係について図-6 に示す。図中プロットは、オーシストの添加濃度が約  $4.2 \times 10^3 \sim 2.4 \times 10^6$  個/ℓ の範囲における 4 段階、槽内の MLSS 濃度が 1,730~2,290mg/ℓ の範囲、処理時間が 8 時間のものである。活性汚泥処理による処理水濁度とオーシスト濃度については、明確な相関関係が得られなかった。むしろ、添加個数を多くすることによって、処理水中のオーシスト濃度が上昇した。

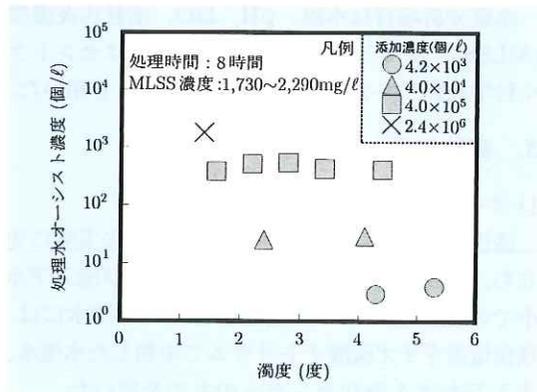


図-6 処理水濁度とオーシスト濃度の関係

5) MLSS1g あたりの除去量と処理水オーシスト濃度の関係

処理水中のオーシスト濃度は、8 時間の処理によりほぼ一定の値となるため、処理時間が 8 時間の処理水中のオーシスト濃度を用いて MLSS1g あたりの除去量と処理水オーシスト濃度の関係について整理を行った。MLSS1g あたりのオーシスト除去量は、以下に示す (1) 式により算出を行った。

$$\text{オーシスト除去量 (個/g-MLSS)} = \frac{\{ \text{添加オーシスト [個]} / \text{活性汚泥容量 [ℓ]} \} - \text{処理水オーシスト濃度 [個/ℓ]} / \text{MLSS [g/ℓ]} \quad (1)$$

処理水オーシスト濃度の測定は、曝気沈殿後の上澄液 1ℓ を測定したものであり、除去オーシスト量としては全て活性汚泥中に移行したものと仮定した。槽内の MLSS 濃度は 810~4,240mg/ℓ、オーシストの添加濃度は約  $4.2 \times 10^3 \sim 2.4 \times 10^6$  個/ℓ の範囲である。

MLSS1gあたりのオーシスト除去量と処理水中のオーシスト濃度の関係について図-7に示す。処理水中のオーシスト濃度の実測値および回収率を考慮した値(実測値を回収率で割り戻した値、平均回収率：57.6%)を各々示した。活性汚泥処理による実験結果から、オーシスト除去量と処理水中のオーシスト濃度を両対数上にプロットすると直線関係が得られた。処理水中のオーシスト濃度を平衡濃度と仮定、また、除去量も活性汚泥に取り込まれ蓄積(濃縮)されると推測されることから吸着量と仮定し、フロイントリヒ(Freundlich)型吸着等温線を実験結果を整理すると、(2)式(回帰式)のとおりとなる。定数A、Bについて表-2に示す。

$$Ro = A \cdot C^B \quad (2)$$

ここに、

$Ro$  : 除去(吸着)オーシスト量(個/gMLSS)

$C$  : 処理水平衡オーシスト濃度(個/ℓ)

A, B : 定数

表-2 図-7の回帰式

	定数A	定数B	相関係数
実測値	1,039	0.90	0.96
回収率考慮	636	0.90	0.96

6) 連続的な下水処理での除去割合の算出

上記の結果から、MLSS1gあたりの除去量と処

理水オーシスト濃度の関係が明らかとなったが、実際の下水处理場で処理区域内に感染者等が存在している場合には、オーシストは連続的に流入してくるため、除去(吸着)量もある時点で飽和に達する。また、曝気槽内では活性汚泥の生成や死滅(分解)も生じていることから、連続的な下水処理の場合のオーシストの除去割合を算出する必要がある。算出仮定条件を以下に示す。

[条件]

曝気槽内：押し出し流れ

実質滞留時間：8時間

簡略化のため、汚泥返送比  $\ll 1$

MLSS濃度：2g/ℓ

汚泥転換率：(溶解性BOD) 0.5gMLSS/g

S-BOD, (SS)1gMLSS/g SS

初沈流出水濃度：溶解性BOD80mg/ℓ,

SS60mg/ℓ

初沈流出水中有機物成分による

活性汚泥生成量  $\Delta X$

$\Delta X = (80 \times 0.5 + 60 \times 1) = 100 \text{ mg MLSS/ℓ}$

$= 0.1 \text{ g MLSS/ℓ}$

流入下水オーシスト濃度 ( $C_{in}$ )  $10^1, 10^2, 10^3,$

$10^4, 10^5$ (個/ℓ)

以上の条件をもとに、吸着式(2)式とオーシスト収支式(3)式を連立させて解く。

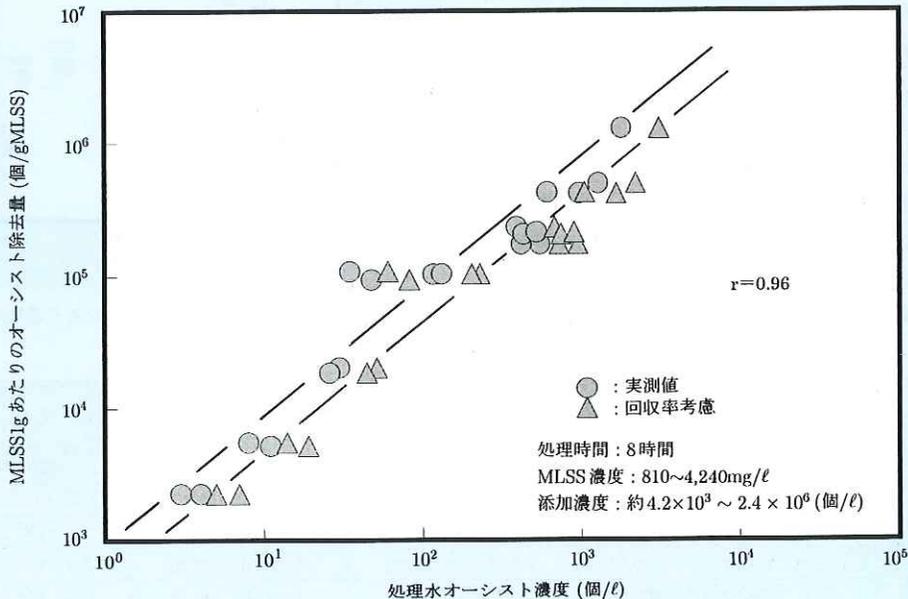


図-7 MLSS1gあたりのオーシスト除去量と処理水オーシスト濃度の関係

$$C_{in} = C + X_o \cdot R_o \quad (3)$$

ここに、

$C_{in}$  : 流入下水オーシスト濃度 (個/ℓ)

$C$  : 処理水平衡オーシスト濃度 (個/ℓ)

$X_o$  : 除去 (吸着) 能力を持つ活性汚泥濃度 (gMLSS/ℓ)

計算にあたっては、以下の2つの期間に分ける。

**8~16h** : オーシスト流入初期において、活性汚泥が高いオーシスト除去 (吸着) 能力を持つ期間。このため吸着に係わる活性汚泥濃度  $X_o$  は 2gMLSS/ℓ。

**定常** : 活性汚泥全てが高濃度のオーシストと接触し、活性汚泥の除去 (吸着) 能力がほぼ飽和となるが、連続的に流入する有機物によって新たに生成される活性汚泥のみが除去 (吸着) 能力を持つ状態で  $X_o$  は 0.1g MLSS/ℓ。

上記算出条件から求めた流入と処理水オーシスト濃度の関係を表-3 に示す。活性汚泥処理による定常状態でのオーシスト除去率は、98.0~99.3%、回収率を考慮した場合には、96.6~98.7%と計算された。よって、連続的な活性汚泥処理により 1.5~2log 程度の除去 (残存比  $10^{-1.5} \sim 10^{-2}$ ) が行えると推定される。

なお、参考までに流入水量が 100,000m<sup>3</sup>/日規模の下水処理場で、下水道処理区域内の感染者数別に流入下水中のオーシスト濃度を推定<sup>3)</sup> すると、感染者が 100 人存在した場合、平均オーシスト濃度は約 10<sup>3</sup> 個/ℓとなる。同様に、感染者が 1,000 人存在した場合には、平均オーシスト濃度は約 10<sup>4</sup> 個/ℓとなる。

・100,000m<sup>3</sup>/日規模の処理場 (人口で 20 万人程度)

・オーシストの排出数 10 億個/人・日

100 人の感染者 (感染率約 0.05%) — 10<sup>3</sup> 個/ℓ

1000 人の感染者 (感染率約 0.5%) — 10<sup>4</sup> 個/ℓ

7) 凝集剤添加による除去効率

さらに、除去効率を向上させることを目的と

して、凝集剤添加活性汚泥法によるオーシストの除去実験を行った。槽内の MLSS 濃度は 1,790~1,970mg/ℓ の範囲に設定し、オーシストの添加濃度は約 4.0×10<sup>5</sup> 個/ℓ とした。凝集剤には、PAC (ポリ塩化アルミニウム) 多木化学社製の PAC250A を使用した。PAC の添加量は槽内の Al 濃度が 0~15mg/ℓ の範囲とした。活性汚泥処理時間は 8 時間としたが、その内 7 時間経過後、残りの 1 時間に PAC の添加を行った。

実験結果を図-8 に示す。槽内の Al 濃度が高くなるにつれ、処理水中のオーシスト濃度も低下しており、Al 濃度が 10mg/ℓ 以上で安定した除去が行われている。図中の ( ) 内数値は濁度を示したが、PAC の添加により濁度も低下している。また、PAC を添加していない系は、処理水中に多数の微細なフロックの存在を目視できたが、PAC の添加系ではその存在が明らかに低減していた。しかし、PAC 添加によるオーシスト除去率と濁度除去率の関係 (図-9) には、若干右上がり傾向が見られるものの、明確な相関関係は見られなかった。一方、水道においては、濁度 (0.1 以下) 管理による対応策を打ち出しており、0.1 度レベルの濁度とオーシストの除去率の関係について、今後

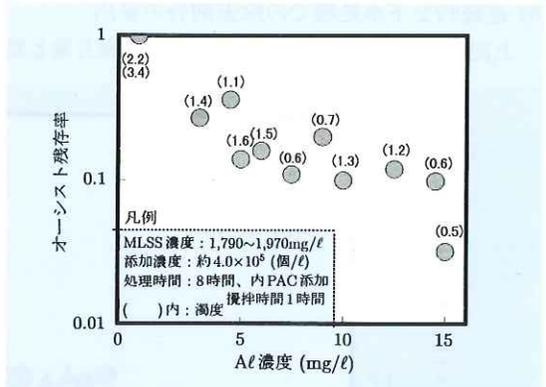


図-8 PAC 添加濃度と処理水オーシスト濃度の関係

表-3 流入と処理水オーシスト濃度

流入オーシスト濃度 (個/ℓ)	処理水濃度 (個/ℓ)			
	8~16h		定常	
	実測値	回収率考慮	実測値	回収率考慮
10 <sup>1</sup>	2.7×10 <sup>-3</sup> (>99.9)	4.6×10 <sup>-3</sup> (>99.9)	7.4×10 <sup>-2</sup> (99.3)	1.3×10 <sup>-1</sup> (98.7)
10 <sup>2</sup>	3.4×10 <sup>-2</sup> (>99.9)	5.9×10 <sup>-2</sup> (99.9)	9.5×10 <sup>-1</sup> (99.1)	1.6×10 <sup>0</sup> (98.4)
10 <sup>3</sup>	4.4×10 <sup>-1</sup> (>99.9)	7.7×10 <sup>-1</sup> (99.9)	1.2×10 <sup>1</sup> (98.8)	2.1×10 <sup>1</sup> (97.9)
10 <sup>4</sup>	5.7×10 <sup>0</sup> (99.9)	9.9×10 <sup>0</sup> (99.9)	1.6×10 <sup>2</sup> (98.4)	2.7×10 <sup>2</sup> (97.3)
10 <sup>5</sup>	7.4×10 <sup>1</sup> (99.9)	1.3×10 <sup>2</sup> (99.9)	2.0×10 <sup>3</sup> (98.0)	3.4×10 <sup>3</sup> (96.6)

( ) 内数値はオーシスト除去率 (%)

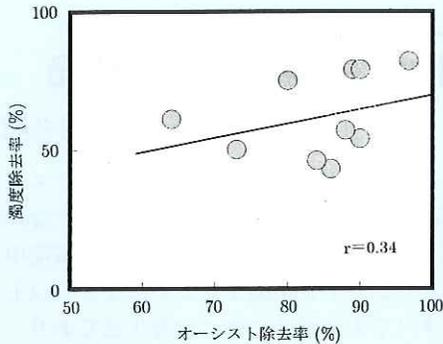


図-9 PAC 添加によるオーシスト除去率と濁度除去率の関係

詳細な検討も必要であると考えられる。

PAC 添加によるオーシストの除去率は、Al 濃度が  $0\text{mg/l}$  の時を基準として  $10\text{mg/l}$  の場合約 90% であり、除去効率を  $1\log$  (残存比  $10^{-1}$ ) 向上させることができる。

#### 4. まとめ

本報告ではクリプトスポリジウムの集団感染発生時における除去能力の向上を目的として、活性汚泥処理法によるオーシスト除去能力の把握および除去効率向上のための凝集剤添加法に関して検討を行った。以上の結果を要約すると次のとおりである。

- 1) 流入下水に添加したオーシストは、SS 等の濁度粒子が下層に沈降しても、それらに取り込まれることなく浮遊した状態であった。このため、流入下水中のオーシストが懸濁物に付着していない状態であれば、最初沈殿池でのオーシストの除去効率は低いものと考えられる
- 2) 活性汚泥処理時間の経過とともに処理水中のオーシスト濃度は低下するが、処理時間が 8 時間以上では、処理水中のオーシスト濃度はほぼ一定となった。
- 3) 活性汚泥処理による処理水濁度とオーシスト濃度については、明確な相関関係が得られなかった。むしろ、オーシストの添加個数を多くすることによって、処理水中のオーシスト濃度が上昇した。
- 4) MLSS  $1\text{g}$  あたりのオーシスト除去量と処理水中のオーシスト濃度の関係について整理した結果、処理水濃度の 0.9 乗に除去量が比例する関係式が得られた。

- 5) 連続的な活性汚泥処理により、最大で  $2\log$  程度のオーシストの除去が行えると推定される。
- 6) 凝集剤を活性汚泥に  $10\text{mg} - \text{Al/l}$  添加することにより、除去効率を  $1\log$  向上させることができる。

上記の結果から、通常の活性汚泥処理法によりオーシストの除去効率は、最大で  $2\log$  程度、凝集剤を添加した場合には、除去効率をさらに  $1\log$  向上させることが可能であることがわかった。しかし、集団感染症発生時の規模、河川水等による希釈割合、さらに、下水処理水放流先の水利用の形態によっては、必ずしも  $3\log$  程度の除去効率では、十分でないことも予想される。この場合、削減目標を達成するための追加的制御手法についてさらに検討が必要である。これらの制御手法としては、流入下水の凝集沈殿処理、砂ろ過によるろ過の徹底、塩素混和池の利用を想定した浮上分離等が考えられる。

今後は、これらの制御手法について実施の可否、効果等に関して検討を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) (社) 水環境学会：水中の健康関連微生物シンポジウム講演集, 1995.
- 2) 埼玉県衛生部：クリプトスポリジウムによる集団下痢症 報告書, 平成 9 年 3 月
- 3) 諏訪 守、鈴木 穰：土木研究所資料第 3533 号, 下水処理場等におけるクリプトスポリジウムの検出方法の検討及び実態調査, 平成 10 年 1 月

諏訪 守\*



建設省土木研究所  
下水道部  
三次処理研究室研究員  
Mamoru SUWA

鈴木 穰\*\*



同 三次処理研究室長  
Yutaka SUZUKI