環境中に排出される病原性微生物の制御と管理

Control and Management of Pathogens Discharged to Environment

鈴木　穣[1)]：諏訪　守[2)]
Yutaka SUZUKI　Mamoru SUWA

はじめに

近年、環境中に存在する原虫やウイルスによる水系感染症が問題とされている。

これまで、水道および下水道の建設と、塩素を中心とした消毒方法により、水系感染症の脅威は大幅に低減されてきた。しかし、平成８年の夏に埼玉県越生町で発生したクリプトスポリジウム症の集団感染は、この水道・下水道システムが、そのまますべての病原性微生物に対して有効とは限らないことを示した。

最近の環境中での原虫やウイルスの検出結果からすると、これらの病原性微生物は、濃度は低いものの、環境中にある程度存在していると考えられる。また、海外へ容易に旅行できる現在では、海外から国内に病原性微生物が持ち込まれる可能性も高い。このような状況の下で、人の糞便を受けて処理する排水処理システムには、感染の連鎖を確実に断ち切る役割を果たすことが求められている。

ところで、環境中あるいは人間社会での病原性微生物を動的に捉えた場合、一番問題となるのが、いったん人や動物が感染すると、感染者（動物）内で病原性微生物が増殖し、それが大きな負荷となって外界に排出されるということである。感染者からの負荷を受ける排水処理システムが、病原性微生物を十分に除去できない場合には、処理水放流先への負荷が高まることによって、社会における感染拡大の危険性が高まることになる。

このような状況認識のもと、クリプトスポリジウムおよび腸管系ウイルスの制御および管理を目的として、下水道としての対応のあり方が２つの場において検討されてきたので、その検討結果の概略を紹介する。また、平成17年４月に、「下水処理水の再利用水質基準等マニュアル」が国土交通省から発刊されたので、その概要を紹介する。

Ⅰ. クリプトスポリジウムへの対応

1. 検討の経緯

埼玉県越生町におけるクリプトスポリジウム集団感染においては、浄水場において原水中のクリプトスポリジウムが十分に除去されなかったことのほか、水道取水源の上流に排水処理施設が位置していたことも、感染拡大の原因であったと指摘されている[1)]。

一方、下水道の普及拡大により、河川上流域に下水処理場が建設される例が増え、また、下水処理水量の増加により、環境水に占める下水処理水の割合が増加している。

これらのことから、下水道におけるクリプトスポリジウムへの対応方法等を検討するため、（社）日本下水道協会内に「下水道におけるクリプトスポリジウム検討委員会」が設置され、土木研究所の調査・実験結果をもとに審議が行われたのち、最終報告書[2)]が取りまとめられた。以下にこの概要を紹介する。

独立行政法人土木研究所
1）水環境研究グループ 水質チーム
2）材料地盤研究グループ リサイクルチーム
〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6

Public Works Research Institute
(1-6, Minamihara, Tsukuba-shi, Ibaraki)

2. 下水および下水処理水中のクリプトスポリジウム濃度の実態

全国67カ所の下水処理場（下水処理水を再利用している処理場）について、平成8年に流入下水および処理水中のクリプトスポリジウムの濃度測定を行った。測定に供した試料の量は、流入下水については200mL程度、処理水については原則20Lである。

その結果、クリプトスポリジウムが検出された箇所は全体の1割程度であり、検出濃度範囲は流入下水で8～50個・L^{-1}、処理水で0.05～1.6個・L^{-1}であった[3)]。なお、この検出率および濃度は、米国等で報告されている数値[4～8)]よりも低い値であった。

3. 下水道におけるクリプトスポリジウムに関するリスク管理方法

下水道におけるリスク管理に関して、特に問題となるのは、クリプトスポリジウムが感染者の腸内で増殖し、感染者から1日に10億個程度のオーシストが排出されるということである。このため、集団感染が発生した場合には、下水処理場に流入する下水中のクリプトスポリジウム濃度は大きく上昇することが考えられる。

このため、下水道における対応（リスク管理）方法は、平常時と感染症発生時とで区別した。

1）平常時

(1) 処理目標水質について

クリプトスポリジウムに人が感染するリスクは、摂取するオーシスト数により決まってくると考えられ、下水処理水放流先の希釈状況および水利用状況が影響因子となる。このため、処理目標水質は、これらの条件を勘案して、感染リスクに基づいて合理的に設定することが望まれる。しかしまだ、目標リスクや曝露量の考え方が確立していないため、処理目標水質については、設定の検討例が示された（詳細については割愛）。

(2) クリプトスポリジウムの除去方法

クリプトスポリジウムの濃度を低下させることが必要な場合には、「本項3）下水・汚泥処理プロセスのクリプトスポリジウム除去効果」に示す処理法により除去を行う。

(3) その他

集団感染に素早く対応するため、関係機関との連絡体制を整備する。

2） 異常時

集団感染発生時や、長期間継続的にクリプトスポリジウムの流入が見られるなどの異常時には、処理水放流先の安全性確保のために、緊急的な追加処理を行うとともに、感染リスクを低下させるために総合的対策を実施する。また、流入下水中のクリプトスポリジウムの大部分が汚泥に移行することから、汚泥処理についても注意する。

(1) 総合的対策

下水道、河川、水道、衛生等の関係行政部局が、情報の密接な交換、および、さらなる感染防止のために、発生源対策も含めた総合的対策を実施する必要がある。

(2) 下水処理場における対応

下水処理水中のクリプトスポリジウム濃度を極力低下させるため、本項3）に示す処理法を組み合わせて適用する。また、汚泥処理プロセスにおいては、熱処理を基本とする。

3）下水・汚泥処理プロセスのクリプトスポリジウム除去効果

下水・汚泥処理プロセスのクリプトスポリジウム除去効果は、以下の通りである。なお、文献に基づき評価した消毒方法の不活化効果については、紙面の関係上割愛した。

(1) 下水処理プロセス[9)]

(a) 活性汚泥法

沈殿処理下水を、エアレーションタンクと最終沈殿池からなる活性汚泥法で処理する場合、約99%（2 log）の除去率が得られる（**図1**）。小規模処理場での適用例が多いオキシデーションディッチ法についても、同様の除去率が期待できる。なお、既存の外国における研究結果[10)]と比べると、本実験の方が幾分高い除去率を示した。

活性汚泥処理における除去率向上を目的として、活性汚泥法のエアレーションタンク末端に凝集剤（ポリ塩化アルミニウム；PAC）を添加し、最終沈殿池で沈殿除去する方法について検討したところ、凝集剤添加濃度10mg Al・L^{-1}において、全体で99.999%（5 log）の除去率が得られた（**図1**）。このため、凝集剤添加により、活性汚泥法に比べて除去率は99.9%（3 log）が上積みされることになる。

活性汚泥処理以前にクリプトスポリジウム濃度を

低下させることを目的として、流入下水に凝集剤（PAC）を添加し、沈砂池での撹拌の後に最初沈殿池で沈殿除去する方法について検討した。凝集剤添加濃度5, 12.5～15mg Al・L^{-1}に対して、それぞれ、90%（1 log）以上, 99.9%（3 log）以上の除去率が得られた（**図2**）ことから、生物処理以前にクリプトスポリジウム濃度を大きく低下させることが可能であることが明らかとなった。

(b) 砂ろ過

活性汚泥法の処理水を直接砂ろ過する方法、および、活性汚泥法の処理水に凝集剤（PAC）を添加し（3mg Al・L^{-1}）、スタティックミキサーで混合後、砂ろ過を行う方法について検討した。ろ過速度100m・d^{-1}および200m・d^{-1}において、直接砂ろ過では70%程度の除去率であったが、凝集剤添加の方法では99.7%（2.5 log）の除去率が得られ、除去効果が向上した。

(c) 処理プロセスの組み合わせ

最大の除去効果を得るための組み合わせは、消毒プロセスを除外すると、**図3**のようになる。

(2) 汚泥処理プロセス

汚泥処理プロセスにおけるクリプトスポリジウム不活化効果を、温度と不活化率に関する実験結果（**図4**）[11]をもとに評価した。

(a) 焼却

焼却によりクリプトスポリジウムは死滅する。

(b) コンポスト

60℃15分の条件で95%の不活化率が得られたことから、設計指針で規定されているコンポスト化施設の発酵条件65℃48時間以上を確保できれば、クリプトスポリジウムの大半は死滅すると考えられる。

(c) 嫌気性消化

35℃の中温嫌気性消化では、20日の滞留時間で、80%以上の不活化率が得られるものと考えられる。

(d) 生石灰の添加

生石灰と汚泥中水分とを反応させて発熱させ、汚泥の温度上昇[12]によりクリプトスポリジウムを不活化する。所要の不活化率を得るための温度と時間については、**図4**の結果を適用する。

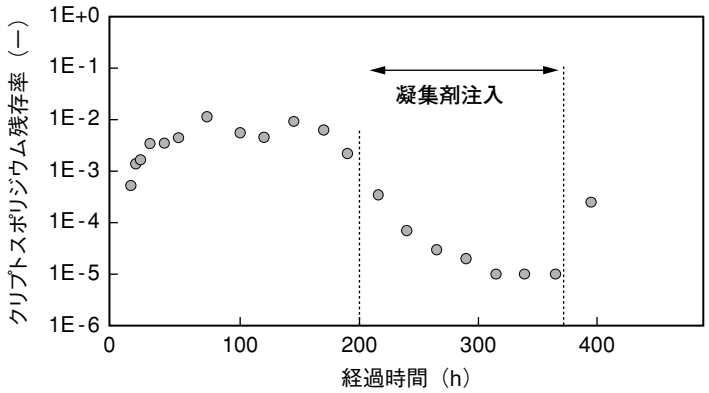

図1　クリプトスポリジウムの下水処理による除去

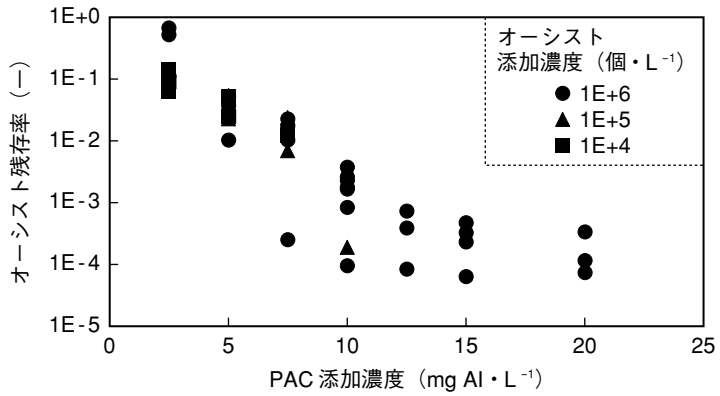

図2　PAC添加濃度とオーシスト残存率の関係

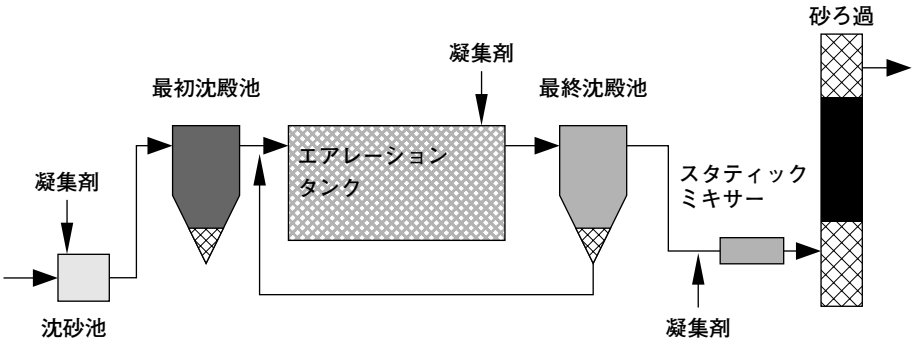

図3　処理プロセスの組み合わせ

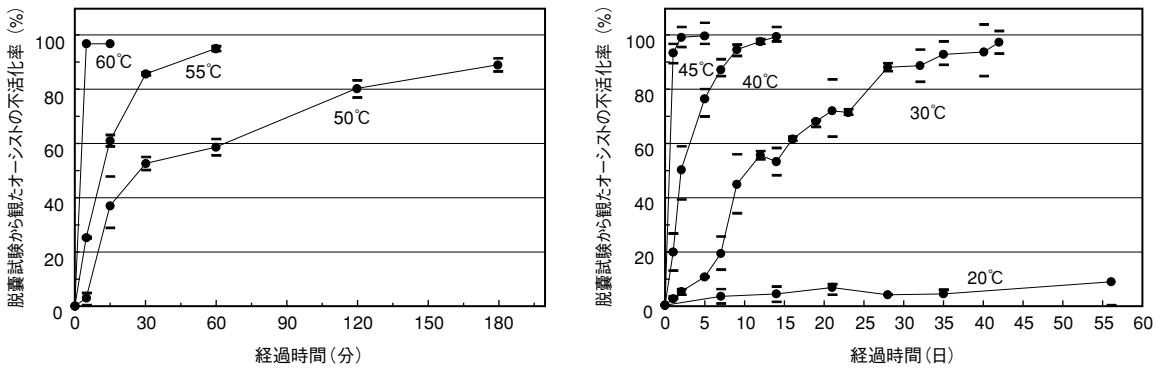

図4　クリプトスポリジウムの各温度条件下での経過時間と不活化率の関係
（右図：20～45℃のケース、左図：50～60℃のケース）

Ⅱ. ウイルスへの対応

1. 検討の経緯

都市における代替水資源として期待されている下水処理水は、現在、親水・修景用水や河川維持用水などの環境用水、あるいは水洗トイレ用水などとして利用されており、その量は下水処理水全体の1.2%[13]となっている。病原性微生物に関する安全性の確保のため、再利用用途ごとに大腸菌群数や残留塩素濃度の目標水質が設定されている[14, 15]。

しかし近年、これまで問題にされなかった水系病原ウイルスに関して、存在実態[16, 17]や消毒耐性[18～20]に関する報告がなされ、新たに対応する必要が生じてきている。水系病原ウイルスに関しては、海外の下水処理水再利用において水質基準や処理法ガイドラインの設定例[21]が見られるものの、日本における検討はまだ行われておらず、安全性確保のための対応方法が求められている。

以上の背景から、高度処理会議[22]の中に再生水質検討小委員会[23]が設置され、下水処理場のウイルス実態調査、ウイルスの除去不活化実験、および、下水処理水の安全性確保方法の検討が行われ、「ウイルスの安全性からみた下水処理水の再生処理法検討マニュアル（案）」として取りまとめられた[24]。

2. 安全性確保のための基本方針

(1) 再生処理法によって安全性を確保

再生水中の病原ウイルス濃度を、直接測定して常時監視することは多大の労力と困難を伴うことから、再生処理法を定めることによって、再生水の安全性を確保することとした。

(2) 感染リスク評価に基づき再生処理法を選定

再生水の用途ごとにウイルス感染リスクを算出し、許容リスク以下に抑えるための再生処理法を選定することとした。

3. 再生処理法の選定に用いる基礎的情報

(1) 下水二次処理水中のウイルス濃度分布

全国10カ所の下水処理場で2年間、病原ウイルス（腸管系ウイルス）の実態調査を行い、下水二次処理水中のウイルス濃度全体分布を推定した。宿主細胞は、BGM細胞およびHep-2細胞の2種類とし、

MPN 法（最確数法、3段階10本法）を適用した。

正規確率紙にプロットしたウイルス濃度の対数値とその非超過確率の関係を、**図5**に示す。両者間に直線関係が得られたことから、下水二次処理水中のウイルス濃度全体分布は対数正規分布に従うとした。

(2) ウイルス摂取量と感染確率の関係

ウイルス摂取量と感染確率の関係には、β分布感染確率モデル[25]を用いた。

(3) 再生処理法のウイルス除去率[26]

再生処理法の病原ウイルス除去率を求めるため、下水処理水にポリオウイルス（ワクチン株）を添加し、塩素・紫外線・オゾン消毒および砂ろ過のパイロットプラント実験を行った（**表1, 2**）。凝集・砂ろ過についても実験を行ったが、添加ウイルスの不具合により良い結果が得られなかったので、マニュアル（案）には用いなかった。

4. 再生処理法を選定する手順

再生処理法の選定は、**図6**の手順に従うこととした。

(1) 再生水用途ごとの誤摂取水量と頻度の設定

対象とする再利用施設の利用状況を想定して、再

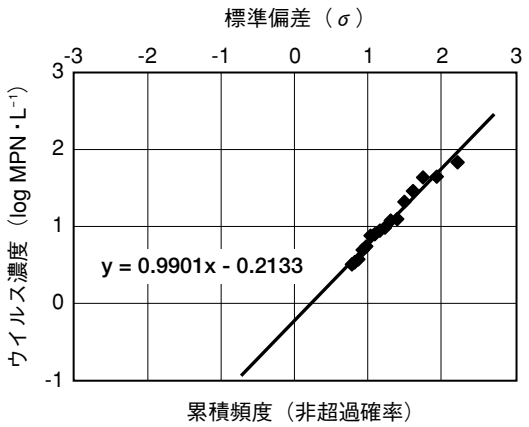

図5　下水二次処理水中の腸管系ウイルス濃度分布

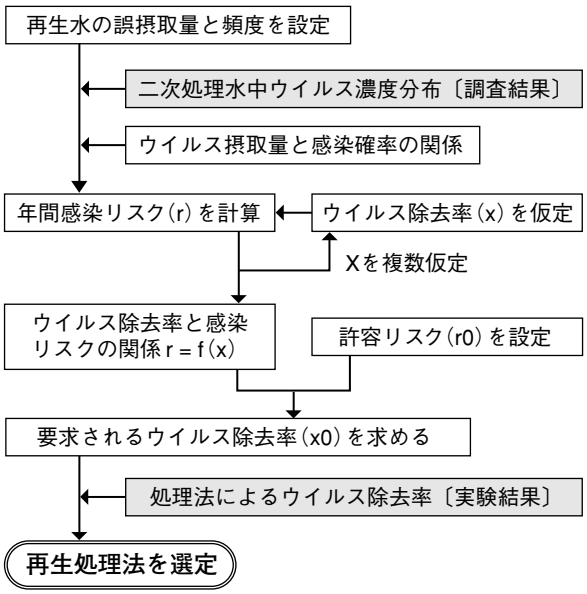

図6　再生処理法を選定するための手順

表1　各消毒方法による下水処理水中のウイルス不活化率

消毒方法	原　水		ウイルス不活化率		
	種　類	濁度（−）	1 log（90%）	2 log（99%）	3 log（99.9%）
塩素（mg・L^{-1}）	二次処理水	3.0 ～ 3.5	15	−	−
	三次処理水 + NH_4-N	0.7	7.0	17	−
	三次処理水	0.4 ～ 0.6	2.5	7.9	13
オゾン（mg・L^{-1}）	二次処理水	3.8	16	−	−
	三次処理水	0.4 ～ 0.6	7.6	13	18
紫外線（mWs・cm^{-2}）	二次処理水	3.5	980	2,000	−
	三次処理水	0.6	560	1,200	1,800

注）・塩素およびオゾンの濃度は注入濃度で、接触時間は15分　　−：データなし
・三次処理水：二次処理水を砂ろ過したもの

表2　砂ろ過によるウイルス除去率および濁度の変化

試　料	ウイルス濃度（PFU・mL^{-1}）	ウイルス除去率	濁度（−）
原水（二次処理水）	9,000	――	3.5
ろ過水（100m・d^{-1}）	4,000	0.36 log（56%）	1.1
ろ過水（200m・d^{-1}）	6,500	0.14 log（28%）	1.2

表3　再生水の用途および誤摂取量と頻度に関する設定例

再生水の用途	摂取形態	1回あたりの摂取水量（mL）	年間摂取頻度（回・y^{-1}）
親水施設（全身を浸す可能性）	水遊びにおける誤飲	30	8
親水施設（手足を浸す可能性）	手についた水の間接経口摂取	0.3	20
滝・噴水（大規模）	ミストを吸い込む	1	10
釣り堀	手についた水の間接経口摂取	0.2	20
芝生の散水	手についた水の間接経口摂取	0.1	20
トイレ水洗用水	しぶきが口に入る	0.02	3

生水を誤って経口摂取する年間頻度と、1回あたりの摂取水量を設定する。マニュアル（案）中には、簡単な実験や既存の文献値[27]に基づき、**表3**のような誤摂取シナリオの例を示した。

(2) 再利用における年間感染リスクの算出

再利用における誤摂取水量・頻度の設定値と、二次処理水中のウイルス濃度分布、ウイルス摂取量と感染確率の関係を示す式から、二次処理水をそのまま再利用した場合の年間感染リスクを計算する。ウイルス濃度が分布を示すので、モンテカルロ法（確率論的問題の処理に乱数を利用する方法）を適用[28]して、それぞれのウイルス誤摂取量に応じた年間感染リスクを算出し、リスク分布の上位2.5%値を年間感染リスクとする。

(3) ウイルス除去率と年間感染リスクの関係の導出

再生処理による二次処理水中のウイルス除去率を複数仮定し、ウイルス除去後の年間感染リスクを上記（2）の方法に従い計算する。この計算結果から、ウイルス除去率（x）と年間感染リスク（r）の関係（r＝f（x））を求める。**表3**の誤摂取シナリオのうち、手足を浸す可能性がある親水利用について、結果を**図7**に示す。

(4) 許容年間リスクの設定

再利用において許容される年間リスク（r0）を設定する。

(5) 許容年間リスクの達成に必要なウイルス除去率の導出

ウイルス除去率と年間感染リスクの関係（r＝f（x））から、許容年間リスク（r0）を達成するために必要なウイルス除去率（x0）を求める。

(6) 再生処理法の選定

表1, 2に示された再生処理法のウイルス除去率から、要求されるウイルス除去率を達成するための、再生処理法を選定する。

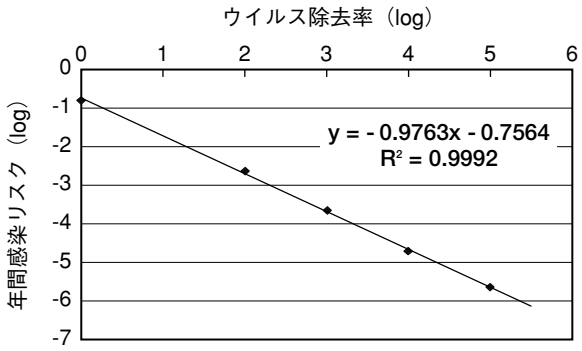

図7　ウイルス除去率と年間感染リスクの関係
（親水施設・手足を浸す可能性がある場合）

Ⅲ. 下水処理水再利用マニュアル

国土交通省は、下水処理水再利用に当たっての水質基準および水質目標を再検討するため、「下水処理水再利用における水質基準等に関する委員会（委員長：金子光美）を平成15年5月に設置し、2年間の検討の後、平成17年4月に、「下水処理水の再利用水質基準等マニュアル」を策定して発刊した。

再生水水質基準設定のポイントは、以下の通りである。

①従来の大腸菌群数に代え、大腸菌（100mLあたり不検出）を新たな基準として設定（修景用水を除く）。

②施設基準を新たに規定し、施設が適切に機能していることを担保する指標として濁度を規定。

なお、親水用水利用については、衛生学的安全性に特に配慮する必要があるため、「凝集沈殿＋砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設」を施設基準として規定している。

おわりに

下水道を通して環境中に排出されるクリプトスポ

リジウムや腸管系ウイルスの制御および管理を目的として、これまでに行われた検討結果の概要を中心に紹介した。

ここで示された対策手法や管理手法を適用することにより、下水処理水や再生水に起因する感染を抑制し、また、集団感染が生じた場合にも、感染拡大を防止することが可能になると考えられる。

今後は、感染リスク評価に基づく対策を進めるため、許容リスクについての議論を深めるとともに、より的確な管理や制御を行うために、短時間で簡易に病原性微生物が検出できる測定法の開発が必要である。

文献および補注

1）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, 30, 1997.

2）(社)日本下水道協会：下水道におけるクリプトスポリジウム検討委員会最終報告, 2000.

3）諏訪守, 鈴木穣：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, 土木研究所資料第3533号, 1998.

4）Rose, J.B.: Occurrence and significance of *Cryptosporidium* on water, *Journal American Water Works Association*, **80**(2) : 53-58, 1988.

5）Robertson, I.J., Smith, H.V., Paton, C.A.: Occurrence of *Giardia* cysts and *Cryptosporidium* oocysts in sewage influent in six sewage treatment plants in Scotland and prevalence of cryptosporidiosis and giardiasis diagnosed in the communities served by those plants, *Protozoan Parasites and Water*, 47-49, 1995.

6）Kfir, R., du Preez, M., Bateman, B.: Studies on the prevalence of *Giardia* cysts and *Cryptosporidium* oocysts in south african water, *Water Science & Technology*, **31**(5-6) : 435-438, 1995.

7）Enriquez, V., Rose, J.B., Enriquez, C.E., Gerba, G.P.: Occurrence of *Cryptosporidium* and *Giardia* in secondary and tertiary wastewater effluents, *Protozoan Parasites and Water*, 84-86, 1995.

8）Stanley States, Kathleen Stadterman Knauer, Rebecca Zerrer.: Impact of Wastewater Treatment Plants and Wet Weather Events on *Giardia* and *Cryptosporiodium* Numbers in Source Waters, *Proceedings* of Source *Water protection symposium*(at San Francisco), American Water Works Association, 1998.

9）諏訪守, 鈴木穣：下水処理のクリプトスポリジウム除去効果およびその向上方策, 下水道協会誌論文集, **39**(474) : 135-144, 2002.

10）Stadterman, K.L., Sninsky, A.M., Sykora, J.L., Jakubowski, W.: Removal and inactivation of *Cryptosporiodium* oocysts by activated sludge treatment and anaerobic digestion, *Water Science & Technology*, **31**(5-6) : pp.97-104, 1995.

11）北村友一, 森田弘昭：脱嚢－フローサイトメトリー試験から観た *Cryptosporidium parvum* オーシストの生存力に及ぼす水温の影響, 環境工学論文集, **37** : 355-360, 2000.

12）松尾友矩ら：水環境工学, 技報堂出版, 590, 1993.

13）(社)日本下水道協会：日本の下水道, 201, 2001.

14）建設省：下水処理水循環利用技術指針(案), 17, 1981.

15）建設省・高度処理会議：下水処理水の修景・親水利用水質検討マニュアル(案), 7, 2000.

16）神子直之, 芦立徳厚, 平田強, 保坂三継：健康関連微生物汚染の評価・管理手法, 水環境学会誌, **28** : 139-144, 1997.

17）松本範夫, 川本歩, 伊藤敏行, 戎谷佐知子, 本田達之助：河川水中のウイルス分離について,「鳥取県衛生研究所調査研究事業報告」, 35-36, 1996.

18）V. Lazarova, P. Savoye, M. L. Janex, E. R. Blatchley III, and M. Pommepuy.: Advanced Wastewater Disinfection Technologies : State of the Art and Perspectives, *Wat. Sci. Tech.*, **40**(4-5) : 203-213, 1999.

19）R. Morris.: Reduction of Microbial Levels in Sewage Effluents Using Chlorine and Peracetic Acid Disinfectants, *Wat. Sci. Tech.*, **27**(3-4) : 387-393, 1993.

20）G. D. Lewis, F. J. Austin, M. W. Loutit and K. Sharples.: Enterovirus Removal From Sewage － The Effectiveness of Four Different Treatment Plants, *Wat. Res.*, **20**, : 1291-1297, 1986.

21）田中宏明：病原性微生物のリスク評価,「水のリスクマネジメント実務指針」, 620-624, 株式会社サイエンスフォーラム, 1998.

22）(補注)土木研究所, 国土交通省都市局下水道部, 日本下水道事業団, および全国17の地方公共団体下水道部局を構成員とし, 下水の高度処理技術の向上を図るため, 基準の検討等を行う組織である。

23）(補注)構成機関：土木研究所、国土交通省、日本下水道事業団、札幌市、東京都、千葉県、横須賀市、浜松市、名古屋市、大阪市、神戸市、北九州市、福岡市

24）高度処理会議：ウイルスの安全性からみた下水処理水の再生処理法検討マニュアル(案), 2001.

25）Joan B. Rose and Charles P. Gerba.: Use of Risk Assessment for Development of Microbial Standards, *Wat. Sci. Tech.*, **24**(2) : 29-34, 1991.

26）鈴木穣, 小越眞佐司, 諏訪守：病原性微生物の発生源および対策に関する調査,「国土技術政策総合研究所資料平成12年度下水道関係調査研究年次報告書集, 国総研資料第10号」, 145-154, 2001.

27）T. Asano, L. Y. C. Leong, M. G. Rigby, and R. H. Sakaji.: Evaluation of the California Wastewater Reclamation Criteria Using Enteric Virus Monitoring Data, *Wat. Sci. Tech.*, **26** : 1513-1524, 1992.

28）Hiroaki Tanaka, Takashi Asano, Edward D. Schroeder and George Tchobanoglous.: Estimating the Safety of Wastewater Reclamation and Reuse Using Enteric Virus Monitoring Data, *Water Environment Research*, **70**(1) : 39-51, 1998.