

8. 下水処理水の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 中島英一郎
主任研究官 山下 洋正
研究官 齋野 秀幸

1. はじめに

近年、下水処理水は修景・親水用水等への再利用、河川流量の維持等、その重要性が増大している。一方、原虫クリプトスポリジウムによる集団感染やノロウイルス（SRSV）による食中毒等、水系の病原微生物による被害が発生しており、それらが下水処理水中に存在する可能性があるため、その対策が求められている。

本調査の目的は、国民の健康保護に資する観点から、下水処理水の安全性が適切に確保されるために必要な技術基準を提示することである。提示にあたっては、下水処理水中の病原性微生物について定量的なリスク評価を行い、適切な安全度を算出することとする。

平成 14 年度は、クリプトスポリジウムに関して、放流水及び再生水中の存在量の確率分布、集団感染発生時に予測される濃度並びに対策の B/C 等を考慮した下水処理水の適切な安全性レベルを算出し、リスク評価による下水処理水の安全性指針として提示した。さらに、QALYs（質調整余命）を用いて対策の効果（リスク削減）を定量的に評価し、リスク便益分析を行った。また、下水処理水の病原リスクに関するリスクコミュニケーションの一環として、一般市民を対象としてアンケート調査を行った。

2. クリプトスポリジウムに関する下水処理水の安全性指針の提示

2. 1 調査方法

下水道におけるクリプトスポリジウム対策としては、日本下水道協会に設置された委員会の報告¹⁾において平常時及び異常時における対策の考え方が示されている。ここで、下水道管理者の迅速かつ適切な対策行動を一層促進するためには、具体的な管理基準値及びそれに対応した行動指針が必要であると考えられるため、国土技術政策総合研究所が主宰する下水道技術会議「処理水、再生水の衛生学的水質検討プロジェクト」において、下水道のクリプトスポリジウム対策について平成 13 年 7 月より調査・検討を行い、下水処理水中のクリプトスポリジウムのモニタリングデータに基づく定量的リスク評価及び下水処理水のクリプトスポリジウム対策について暫定的な案を作成した。

(1) モニタリング及び分布の把握

平成 13 年 10 月より 1 年間、関東及び関西の 8 下水処理場において、月 1 回、流入下水及び処理水（二次処理水、砂ろ過水）のクリプトスポリジウム濃度測定を行った。流入下水 200mL 又は処理水 20L より免疫磁気ビーズでオーシストを分離し、落射蛍光及び微分干渉顕微鏡により FITC 像、DAPI 像及び微分干渉像を観察し、*Cryptosporidium Parvum* のオーシストを計数した（測定法は平成 13 年度の報告²⁾の通り）。

下水中のクリプトスポリジウム存在量の確率分布については、非超過確率を正規化した値と対数濃度との間の直線関係が成り立つことから対数正規分布と仮定できる（コルモゴロフスミルノフ検定（Kolmogorov - Smirnov test）の信頼区間 80% で有意）ことを既に報告している²⁾。今年度は、ポアソン分布、ポアソン対数正規分布及び負の二項分布を仮定した場合の各パラメータについて最尤法を用いて推定し、さらに尤度比を用いて測定値に対する各分布の適合度を比較検討した。

(2) 定量的リスク評価

下水処理水の放流及び再利用におけるヒト健康リスク評価として、モンテカルロシミュレーション（各 500 回試行）により年間感染リスクを定量的に評価した。手法の詳細は平成 13 年度の報告の通り²⁾であり、曝露シナリオ、摂取用量及び頻度は、水道水摂取量を 1L/日に変更³⁾した以外は表-1 に示す通り既存の報告¹⁾の仮定を使用した。クリプトスポリジウムの容量反応モデルは、Haas らの指数型モデル（パラメータ 238.6）

を用いた⁴⁾。

(3) クリプトスポリジウム対策の検討

下水道におけるクリプトスポリジウム対策としては、平常時と集団感染発生時の2通りを検討する必要がある。平常時については、上述の計算で得られたクリ

プトスポリジウムの年間平均の感染リスクに対応した対策を検討した。集団感染発生時については、我が国の既往最大事例である埼玉県越生町の集団感染⁵⁾ (1996年)に基づいて、想定しうる下水道への最大流入濃度を試算した。さらに、集団感染の発生の可能性を速やかに把握して対応する方策について検討した。

表-1 処理水放流及び再生水利用における曝露頻度および摂取量

接触/再利用形態	被曝者	曝露形態	曝露頻度	1回当たり摂取水量
水浴	水浴者	水浴中の誤飲	40日/年	100mL/日
水道利用	水道利用者	水道中の飲用利用	365日/年	1L/日
親水用水 (公園)	公園利用者	水遊び	100日/年	10mL/日
修景用水 (公園)	公園利用者	魚釣り	2日/週	1mL/日
水洗用水 (Office)	勤労者	飛沫による接触	5日/週	0.1mL/日
散水用水 (公園)	公園利用者	芝生等での接触	60日/年	1mL/日

2. 2 結果及び考察

(1) モニタリング及び分布の把握

下水中のクリプトスポリジウム測定データの確率分布への当てはめについて尤度比を用いて適合度検定を行った結果を表-2に示す。流入下水及び処理水(二次処理水、砂ろ過水)のいずれについても、ポアソン対数正規分布(以下PLN分布と呼ぶ)が負の二項分布(以下NB分布と呼ぶ)よりもわずかながら適合度が高かった。ここで、NB分布、PLN分布はそれぞれ、平均濃度がガンマ分布又は対数正規分布する試料からサンプリングを行った場合に、ポアソン分布として測定値(個数)が求められた結果としての混合分布と考えられる。これらの結果より、現時点ではクリプトスポリジウムの濃度分布について対数正規分布の方が適していると考えられた。

表-2 クリプトスポリジウムの確率分布の適合度

	ポアソン分布		負の二項分布		ポアソン対数正規分布	
	$-2\ln(\Lambda)$	μ	$-2\ln(\Lambda)$	μ	$-2\ln(\Lambda)$	ξ
流入下水	484.7	49.8	38.2	49.8	33.0	2.6
二次処理	912.4	1.4	77.1	1.4	76.8	-0.7
砂ろ過	24.9	0.2	12.6	0.2	12.0	-2.0
			k	s		
			0.3	0.5	1.7	1.5
			1.0	1.0	0.9	0.9

Λ は尤度比を表し、 $-2\ln(\Lambda)$ が小さいほど分布の当てはまりがよい

(2) 定量的リスク評価

モンテカルロシミュレーションによるリスク計算の結果について、500回計算の平均値及び95%信頼区間の上限値及び下限値(97.5%値及び2.5%値)を図-1に示す。これより、下水処理水のリスクは曝露形態によって異なり、 10^{-5} ~ 10^{-2} の範囲にあると推定された。また、安全側のリスク評価として97.5%値を用いると、対数正規分布の方がより高めリスク推定値を与えることになるため、安全側のリスク管理としては、クリプトスポリジウムの濃度分布に対数正規分布を用いることが適切と考えられた。

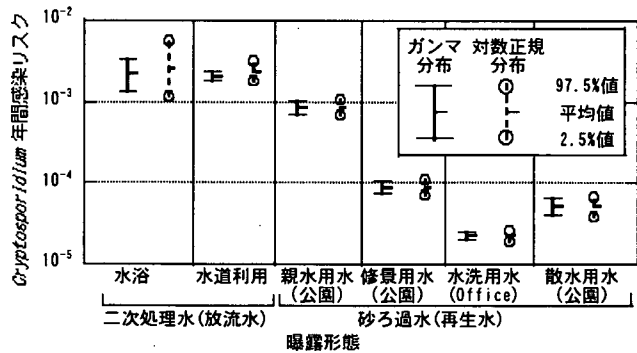


図-1 下水処理水のクリプトスポリジウム年間感染リスク

(3) クリプトスポリジウム対策の検討

平常時の年間感染リスク対策のための対応の枠組みを図-2に示す。これは、年間を通じた測定値の算術平均値(例えば年12回の測定値の平均値)が年間リスク基準値を超過すれば、凝集剤の常時添加や高度消毒施設(例えば紫外線、オゾン)の導入を図る必要があるとの考え方である。ここで年間リスクの管理目標値としては、暫定的に、一人の年間感染リスクが 10^{-2} を超過しないこととしている。例えば、米国環境保護庁より年間感染リスク 10^{-4} 、WHOよりDALY(障害調整生命年)として 10^{-6} 等が目標として提示されている⁶⁾が、それらの目標までリスクを低減させることに関す

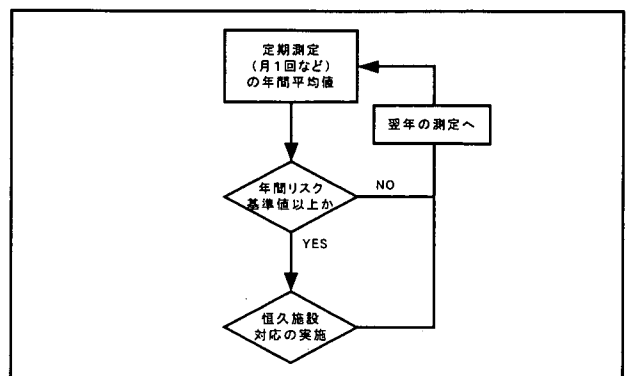


図-2 年間年間感染リスク対策の枠組み

る定量的なリスク便益分析がなされておらず、そのための社会的投資に関する社会的合意がまだ存在しないことや、定量的リスク評価より日本における現状の *Cryptosporidium* リスクが 10^{-5} から 10^{-2} の範囲であること等を踏まえ、最低限の対策として合意が得られるであろう 10^{-2} を暫定目標とするものである。

次に、集団感染におけるリスク対策に関して、埼玉県越生町の事例では、町民約 13,800 人（アンケート回答者は 12,345 人）の内、8,812 人（約 7 割）が下痢等の症状を起こした⁵⁾。この発生患者数の推移の実績データを元に、各患者が 2 週間の間 10^9 個のクリプトスポリジウムを排出し、一人一日当たりの下水量が 0.5m^3 であると仮定した場合の発生患者数及びクリプトスポリジウム排出者数の経日変化を図-3 に示し、全区域が一つの下水道処理区域として整備された仮想的な都市にあてはめて試算した場合の流入下水中のクリプトスポリジウム濃度の経日変化を図-4 に示す。これらより、最大同時排出者数は全住民の約 50% であり、その際の下水道への流入濃度は、 $0.5 \times 10^9 / (0.5 \times 10^3) = 10^6$ (個/L) となることから、既往最大事例より想定される、下水道への流入濃度の最高値は 10^6 (個/L) となる。通常の下水処理においては、標準活性汚泥法による二次処理までで約 2 Log 除去され、それに砂ろ過や凝集剤添加を行っても約 4.5 Log 程度の除去と考えられる。

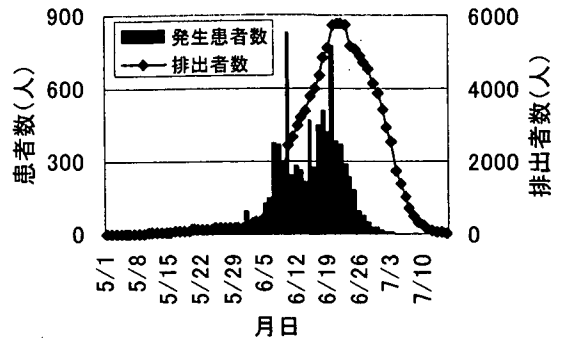


図-3 発生患者数とオシト排出数の推移

従って、凝集剤添加等の対策を行った場合でも、最大で $10^{1.5}$ (約 30) 個/L 程度のクリプトスポリジウムが処理水中に残存するため、この濃度で問題となるリスクが発生する放流先及び再利用先については、紫外線やオゾン等による消毒・不活化処理などより高度な対策を行うか、定期的な測定により集団感染による高濃度流入を監視して必要な対応（凝集剤の添加、対応不可能な場合の情報提供・再生水の供給停止等）を行うことが必要と考えられる。

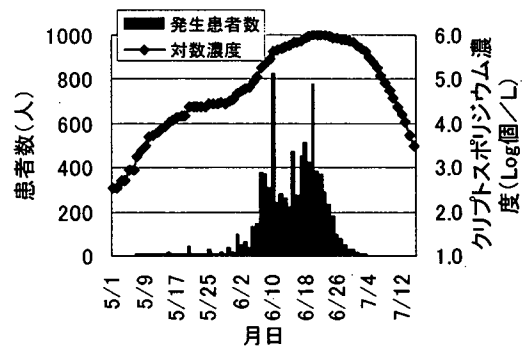


図-4 発生患者数とオシト濃度の推移

集団感染の疑いのある高濃度への対応の枠組みとしては、図-5 に示すものが考えられる。ここで、L1（監視強化基準値）及び L2（緊急対応基準値）は、それぞれ 2 回及び 3 回測定した場合の幾何平均値の 95% 信頼区間上限値であり、それぞれ統計的には 40 回に 1 回起こる程度の異常値を検出するものである。現実の対応において、1 回測定して高濃度値が検出された場合は、確認及び経過監視のために何度か再測定すると考えられるため、逆にそうした複数回の測定の平均値を行動のための基準値として設定する考え方である。

今回の 8 処理場のモニタリングデータを用いて試算すると、表-3 に示す通り、水浴及び水道については、放流水（二次処理水）で L1 が 2.8、L2 が 4.1、親水用水、修景用水、水洗用水及び散水用水については、再生水（砂ろ過水）で L1 が 0.39、L2 が 0.49（全てクリプトスポリジウム個/L）と算出される。また、年間リスク基準値は、 10^{-2} レベル相当として水浴で 6.0、水道で 6.6、親水用水で 2.4、修景用水で 23.1、水洗用水で 91.9、散水用水で 40.0（全てクリプトスポリジウム個/L）であり、これらは L1、L2 を各下水処理場のデータより算

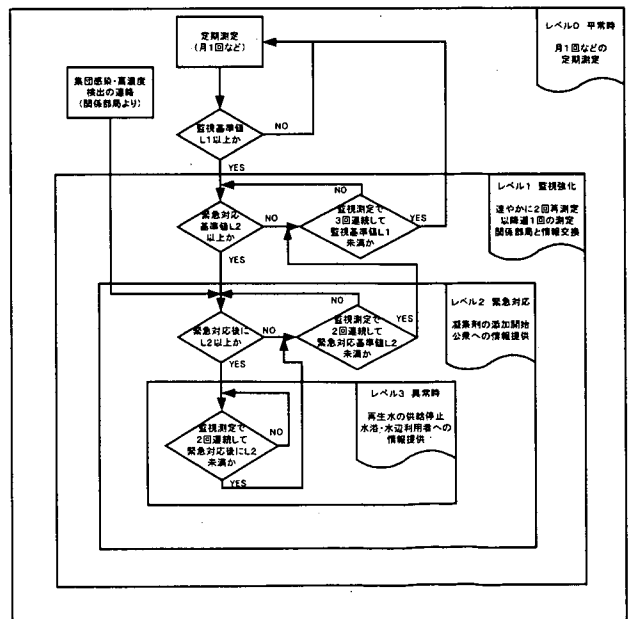


図-5 集団感染対策の枠組み

出する場合の基準上限値となる。

表-3 放流水及び再生水のクリプトスポリジウム濃度基準案

利用対象	監視強化基準値 L1	緊急対応基準値 L2	基準上限値 L1,L2はこの値を超過して設定してはならない	測定対象	年間リスク
	Cryptosporidium 濃度(個/L)	Cryptosporidium 濃度(個/L)			
水浴	2.8	4.1	6.0	放流水	10 ^{-2.2}
水道	2.8	4.1	6.6	放流水	10 ^{-2.2}
親水用水	0.39	0.49	2.4	再生水	10 ^{-2.7}
修景用水	0.39	0.49	23.1	再生水	10 ^{-3.7}
水洗用水	0.39	0.49	91.9	再生水	10 ^{-4.3}
散水用水	0.39	0.49	40.0	再生水	10 ^{-3.9}

注1:検水量は20Lとし、測定方法は別途定める方法を原則とする
注2:L1,L2は下水処理区域の実態等に基づき変更しうるが、基準上限値を超過してはならない

3. QALYs を用いたリスク便益分析

3. 1 調査方法

下水処理水の病原リスクに関する対策に当たっては、限られた予算・資源の範囲内で最大限の安全性を確保するために、対策に要する費用と対策の実施により見込まれる健康の改善便益とを比較評価して対策を選択することが求められる。

クリプトスポリジウム感染では、免疫不全者では重篤になりうるが、免疫正常者では一時的な下痢等にとどまるため、健康リスクとして、致死的影响と非致死的影响の両方を評価する必要がある。そうした評価手法としては、例えば WHO は DALYs (Disability Adjusted Life Years) による様々な疾病の影響評価を行っており、飲料水質ガイドライン案⁶⁾にも取り入れているが、評価対象は健常者に限定されている。しかし、下水処理水の影響は必ずしも健常者に限定されないため、より広い範囲を対象にして評価を行う必要がある。また、損失余命では表現されない医療費や休業損失等の発生費用についても評価の必要があると考えられる。そこで、クリプトスポリジウム感染による健康リスクについて、QALY (Quality Adjusted Life Years; 生活の質で調整された余命) を用いた損失 QALYs の観点および損失費用の観点から評価を行い、さらに、平常時および集団感染発生時での下水処理水のクリプトスポリジウム対策におけるリスク便益分析を行った。

3. 2 結果及び考察

(1) クリプトスポリジウム感染率に応じたリスクの算出

現状および対策後の年間感染率をそれぞれ 0.02, 0.01 と仮定し、10 万人中の健常者 (15 歳~65 歳, 人口比 67.4%), 弱者 (0 歳~14 歳および 65 歳以上, 人口比 32.45%), 免疫抑制者 (AIDS 患者および免疫治療患者, 人口比 0.1%) について、それぞれの感染率での損失 QALYs および損失費用を算出して対策の効果求めた結果を、損失 QALYs について図-6 に、損失費用について図-7 にそれぞれ示す。ここで損失費用は、医療費と損失利益 (病気による休業損失) の和とし、感染の症状は USEPA の報告⁷⁾を参考に、軽度 (1 日程度の下痢), 中~重度 (14 日程度の下痢) および死と仮定している。クリプトスポリジウム対策により感染率を 0.02 から 0.01 へと 0.01 下げることにより、損失 QALYs は 2.18, 損失費用は約 1,319 万円削減され、1 人あたりの単位感染リスク削減による効果は QALYs; 2.18×10^{-3} , 費用; 13,191 円となる。

なお、WHO はクリプトスポリジウムによる健康被害を 1 感染当たり 1×10^{-3} DALYs 程度としており⁶⁾、発症率等のパラメータの設定の相違や健常者のみを対象としている点で、本研究の QALYs の計算とは設定が異なるものの、得られた質調整生命年数はオーダーとしてほぼ同等のものとなっている。

(2) 曝露形態の異なる集団に関するリスク便益分析

1 人あたり単位感染リスクでの損失 QALYs および損失費用から、仮想上の町 (人口 10 万人, 処理水量; 放流水 45,000m³, 再生水 5,000m³) での異なる曝露形態¹⁾ごとの各対策時の損失 QALYs, 損失費用を試算し、リスク便益分析を行った。各曝露集団数は、水道利用 10 万人, 水浴 5,000 人, 親水用水 1,570 人, 修景用水 14,000 人, 水洗用水 10,000 人, 散水用水 15,570 人と仮定した。対策費用とオーシスト追加除去率の仮定を表-4 に示す。

(A) 平常時 各曝露集団における平常時の年間感染リスク⁴⁾に応じた損失 QALYs を算出して図-8 に示し、単

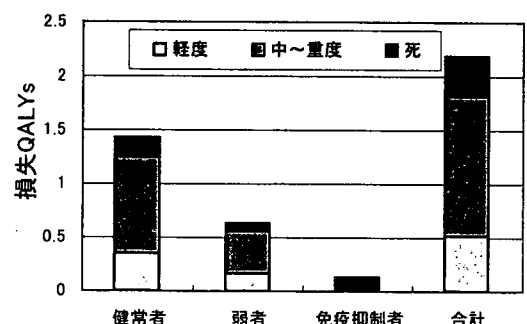


図-6 対策により削減された損失 QALYs

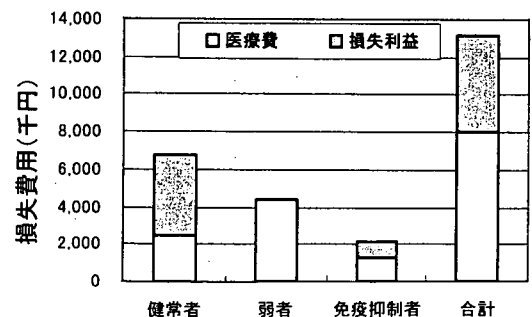


図-7 対策により削減された損失費用

位削減リスクあたりの費用をB/Rとして図-9に示す。図-8より曝露集団としては水道利用者集団が最大、散水用水利用者集団が最小の損失QALYsを与えることが分かる。図-9において、リスク当たりの対策費用が最低でも1千万円/1QALYsであり、ほとんどの対策でより高い値となっているが、この理由の一つとしては平常時のリスクが $10^{-2} \sim 10^{-5}$ とさほど高くないため⁸⁾、追加的なリスク削減便益として高い値が得られないことが考えられる。リスク削減の効率性の観点からは、水道利用者集団のリスク削減のための凝集剤添加対策が最も合理的で優先的に実施すべき対策と考えられる。

(B) 集団感染発生時 各曝露集団における集団感染発生時の感染率(埼玉県越生町での集団感染事件より発生患者数の2ヶ月間の推移の実績データ⁵⁾に基づいて処理水中濃度を算出して感染率を試算)での無対策および各対策後の損失QALYsを算出して図-10に示し、リスク便益分析の結果を図-11に示した。図-10と図-8を比較すると、水浴、親水、散水等のリスクが水道利用等のリスクと比較して相対的に高くなっているが、これは集団感染発生時を夏期と想定したため、これらの夏期に摂取頻度が高い曝露形態ではオーシスト摂取量が多く計算されるためと考えられる。また、図-11で水浴のリスク削減当たりの費用が他より高く現れているのは、再生水に係るリスク対策と比べて放流水が水量が多く費用が大きいためと考えられる。

4. リスクコミュニケーション調査

下水処理水中のクリプトスポリジウムのリスクに対する国民の意識を把握するとともに、そのリスクを管理するための対策への意見を把握するためにアンケート調査を実施した。

4.1 調査方法

アンケートは以下の2通り実施した。

(1) 会場アンケート

a) 質問項目 「問1：下水処理水の循環利用に関する認知度・ふれあい状況」、「問2：災害・事故・病気に対するリスクの発生確率、危険の大きさの比較」、「問3：下水処理水中のクリプトスポリジウム等に関する知識」、「問4：対策に対する考え方」、「問5：提供を望む関連情報」

b) 実施方法 調査は4日間で行い、調査対象は第3回世界水フォーラム(2003年3月)の関連行事として大阪で開催された「水のEXPO」の下水道フェア来場者である。調査方法は面接回収法(質問票、回答用紙を渡し、その場で回答用紙に記入してもらい回収)とした。調査

表-4 対策費用とオーシスト追加除去率の仮定

対策費用(円)	凝集剤添加	UV処理	オゾン処理
放流水(45000m ³)	15,060,000	32,460,000	95,460,000
再生水(5000m ³)	3,060,000	4,460,000	11,460,000
追加除去率	2Log	3Log	3Log

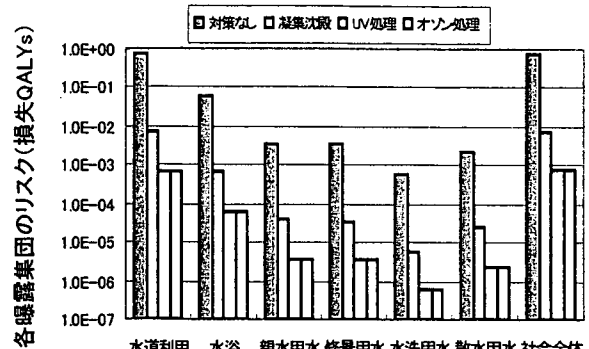


図-8 平常時の無対策、各対策後のリスク(損失QALYs)

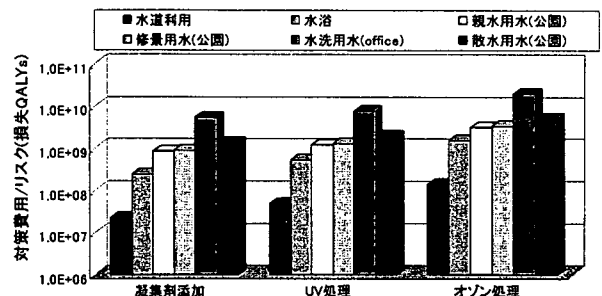


図-9 平常時のB(便益)/R(リスク)

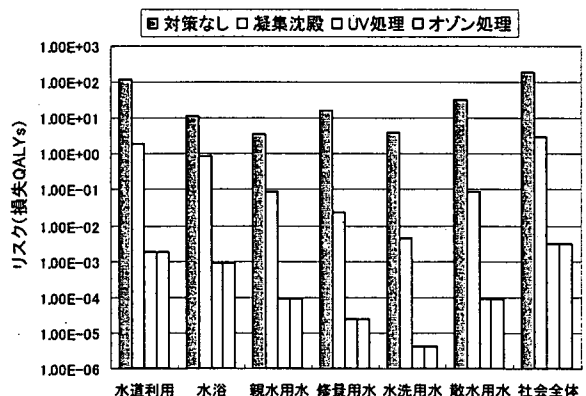


図-10 集団感染発生時の無対策、各対策後のリスク(損失QALYs)

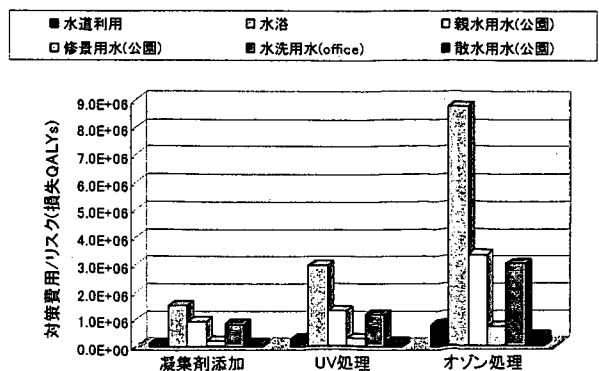


図-11 集団感染発生時のB(便益)/R(リスク)

規模は、有効回答数 300～400 を目標とした。

(2) インターネットアンケート

a) 質問項目 会場アンケートの質問項目に加え、各対策ごとの支払い意志額や、アンケート回答による下水処理水に対する心境の変化を尋ねた。

b) 実施方法 調査は5日間で行い、調査対象はインターネットを利用可能な全国の一般市民である。調査方法はインターネットアンケート(民間サービスを利用し、回答者がホームページで入力)とした。調査規模は、有効回答数 2,000 程度を目標とし、サービス登録会員(約 12 万人)より 10,000 人を無作為抽出した。

4. 2 結果及び考察

有効回答数は、会場アンケートで 423 票、インターネットアンケートで 2,213 票であった。会場アンケート及びインターネットアンケートの調査結果は、全般的な傾向としては以下の通りであった。

(1) 下水処理水にクリプトスポリジウムが含まれていることを知っている人は少ない。

(2) 感染確率をゼロまたはもっと低減してほしいと考えている人がかなりいる。

(3) 病原微生物が人体に与える影響や近隣での下水処理水の利用状況に情報提供を望む意見が多い。

支払い意志額等も含めた定量的な解析については次年度に引き続き行うこととした。

5. まとめ

(1) 下水処理水のクリプトスポリジウム対策として、平常時及び集団感染時のそれぞれに応じた対応が必要であることを明らかとし、暫定的な目標として年間感染リスク 10^{-2} を達成するために必要な濃度基準案及び対策案を提示した。

(2) 下水処理水のクリプトスポリジウム対策に関するリスク便益分析(B/R)の結果、用途・対策ごとに効率が異なることが明らかとなった。B/Rとしては凝集剤添加が最も効率的であったが、集団感染発生時に必要な削減レベルが達成できない場合があり、より高度な対策も必要と考えられた。

(3) 下水処理水の病原リスクに関するリスクコミュニケーションの一環としてアンケート調査を実施した結果、下水処理水の病原リスクに関する事前知識は少ないものの、より安全な対策や詳細な情報提供を求める意見が多いという傾向が見られた。

なお、本年度のクリプトスポリジウムに関する全国調査データは、「下水道技術会議 処理水、再生水の衛生的水質検討プロジェクト」における調査により収集された。ここにメンバーの地方公共団体(茨城県、埼玉県、東京都、滋賀県、大阪府、横浜市及び京都市)、独立行政法人土木研究所北村研究員及びアドバイザー(摂南大学金子教授、東北大学大村教授、麻布大学平田教授、東京大学片山講師)各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 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、平成 12 年
- 2) 中島英一郎、山下洋正、斎野秀幸、病原性微生物の発生源および対策に関する調査、平成 13 年度下水道関係調査研究年次報告書集、国土技術政策総合研究所資料 No.64、pp.185-190、2002
- 3) 矢野一好他、飲用水量についてアンケート調査の結果から、第 3 回日本水環境学会シンポジウム講演集、pp.159-160、2000
- 4) C.N.Haas, Assessing the risk posed by oocysts in drinking water, Journal AWWA, Sept.131-136, 1996
- 5) 埼玉県衛生部、クリプトスポリジウムによる集団下痢症 越生町集団下痢症発生事件報告書、平成 9 年
- 6) WHO, Guidelines for Drinking Water Quality, Third edition, 2003
- 7) U. S. EPA, Comparative Risk Framework Methodology and Case Study (SAB Review Draft,), 1998
- 8) 山下洋正他、下水処理水の *Cryptosporidium* に関する定量的リスク評価、第 37 回日本水環境学会年会、2003、pp.381