Ⅲ. 原虫問題　　水中の健康関連微生物シリーズ－4

水源河川と水道水の原虫汚染

Contamination of water environment and drinking water by protozoan parasites

保坂三継：猪又明子
Mitsugu HOSAKA　　Akiko INOMATA

はじめに

平成8年に埼玉県越生町で発生したクリプトスポリジウム（*Cryptosporidium parvum*）集団感染を契機に、水源河川等の水環境、水道原水および浄水におけるクリプトスポリジウムやジアルジア（*Giardia lamblia*）の汚染状況について、水道事業体、大学、研究機関等により各地で調査が行われている。これらの原虫類は塩素消毒に対する耐性の高い病原微生物であり、なかでもクリプトスポリジウムは水道水の塩素消毒では不活化がほとんど期待できないことから、水道水や水道原水における出現状況に基づくリスクアセスメント[1]により、水道水の感染リスクや浄水処理効果などを評価し、より安全な処理対策に結びつけることが有効である。そうした視点から、本稿では水道水源となっている代表的な河川流域、水道水として処理するために浄水場に取り入れられた水道原水、ならびに浄水場で処理され水道水として配られる浄水における原虫類の調査データを収集・解析し、水環境における原虫汚染状況について考察する。なお、以下にクリプトスポリジウムおよびジアルジアとあるのは、すべてクリプトスポリジウムのオーシストおよびジアルジアのシストのことである。

Ⅰ. 水源河川の原虫汚染状況

1. 相模川水系

橋本ら[2]は神奈川県の主要水源である相模川水系の11地点において1997年4～12月まで、延べ77試料について、最大水量100Lで原虫類の調査を行っている。この調査においてクリプトスポリジウムは11地点中10地点、77試料中51試料で検出された。検出数の範囲は後述する片原地点を除いて1～500個/100Lであり、相模川本川では1～130個/100Lであった。ジアルジアは11地点すべてから検出され、77試料中51試料が陽性であった。検出数の範囲は片原地点を除いて1～130個/100Lであり、相模川本川で130個/100Lの値が検出された。流入河川の小鮎川の片原地点では、その直上流に養豚場排水が流入しているため、両原虫とも高濃度に検出されている（クリプトスポリジウム190～11,000個/100L、ジアルジア14～20,000個/100L）。水道原水が取水される地点ではクリプトスポリジウム不検出～67個/100L、ジアルジア1～18個/100Lであった。

2. 多摩川水系

保坂らは多摩川本川の環境基準点等8地点において、1999年9月～2000年1月の3回（試料水量20L）、2000年11月と2001年1月の2回（試料水量100L）[3]、ならびに2002年6月～2003年1月の3回（試料水量100L）[4]、計8回延べ61試料について原虫類等の調査を行った。クリプトスポリジウムは拝島原水補給点から下流の4地点から検出され、2000年1月以降の47試料中13試料に検出された。特に下水処理場放流水の混入率が高い多摩川原橋から下流域の3地点で2001年1月に126～220個/20Lと極めて多数検出された。ジアルジアは多摩川原橋から下流域の3地点では1999年9月の最初の調査か

東京都健康安全研究センター 環境保健部 水質研究科
〒169-0073 東京都新宿区百人町3-24-1

Tokyo Metropolitan Institute of Public Health
(3-24-1, Hyakunincho, Shinjuku-ku, Tokyo)

らほぼ毎回検出され、クリプトスポリジウムの場合と同様、2001年1月の調査では240～300個/20Lと極めて高濃度で検出された。さらに最上流地点の昭和橋や和田橋でも0.2～3.8個/20Lが検出された。平松ら[5]は多摩川下流域で2000年2月～3月に30～340個/20Lのジアルジアを検出しており、1999年9月以降、多摩川下流ではジアルジアの濃度が恒常的に高い状況にあり、さらに2000年2月以降にその濃度が著しく上昇する現象が加わったものと推察される。しかしながら、2002年6月～2003年1月の調査ではこうした高濃度の値は観察されず、2002年6月に多摩川原橋でジアルジアが13個/20L検出された以外は、クリプトスポリジウム、ジアルジアとも0.2～0.4個/20Lと少なかった。こうした変化の原因としては、糞便汚染指標細菌数の減少が見られることから、流域の下水処理場において放流水改善対策が取られたためと推察されている[4]。なお、水道原水が取水される地点では全調査を通じてクリプトスポリジウム不検出～0.2個/20L、ジアルジア不検出～1個/20Lであった。

猪又ら[6]は多摩川水系上流域の山間部の秋川からクリプトスポリジウムとジアルジアを検出している。検出地点は7地点中3地点、両原虫ともに試験した21試料中3試料に検出され、検出数はすべて1個/20L（検水量20L）であった。周囲の状況から自然由来の汚染と考えられた。

3. 利根川・江戸川水系

関東の水道水源として極めて重要な利根川・江戸川水系で北千葉広域水道企業団と東京都水道局が2000年11月と2001年2月に行った共同調査結果を五十嵐ら[7]が報告しており、上流から下流に至る広い範囲に原虫類汚染があることが明らかとなった。この調査での検査水量は10Lと少なく、1個/10L以下の汚染状況については把握できないが、2回の調査を通じて16地点すべてから原虫類が検出された。本川（利根川、江戸川、渡良瀬川）各地点で検出されたクリプトスポリジウムとジアルジアの数はおおむね1～10個/10Lであった。しかし、クリプトスポリジウムは汚濁した流入河川を加えると水系全体では1～93個/10Lとなり、また2000年11月よりも2001年1月に、検出地点、検出数とも多くなった。水道原水が取水される地点ではクリプトスポリジウム不検出～3個/10L、ジアルジア1～6個/10Lであった。

4. 淀川水系

中西ら[8]は、近畿の重要な水道水源である淀川水系28地点において大阪府水道部、枚方市水道局ならびに寝屋川市水道局が2000年7月と2001年1月に行った共同調査の結果を報告している。この調査でも検査水量は10Lと少なく、1個/10L以下の汚染状況については把握できないが、両原虫とも2000年7月よりも2001年1月に、検出地点、検出数とも多かった。本川（木津川、宇治川および桂川と、この3川が合流した淀川）16箇所の調査地点では、クリプトスポリジウムは1～27個/10L、ジアルジアは1～79個/10Lであった。淀川水系においても本川よりも流入河川で高濃度の値が見られ、水系全体の検出数範囲はクリプトスポリジウムで1～32個/10L、ジアルジアで1～380個/10Lであった。

5. 水源河川の原虫汚染の特徴

以上述べたわが国の主要水源河川における原虫類調査データから、以下の点が指摘できる。

(1) 各河川ともほとんどすべての調査地点から原虫類が検出され、出現レベルはクリプトスポリジウムとジアルジアでおおむね同様である。しかし、多摩川と淀川水系ではジアルジアが、江戸川の支流および相模川ではクリプトスポリジウムが多く検出されるなど、河川ごとに若干の傾向の違いが見られる。

(2) 多摩川、利根川・江戸川水系、淀川水系では冬期に原虫類の検出数が増加する傾向が見られる。冬期の河川流量の低下や低温による下水処理等の効率低下などが可能性として考えられる。

(3) 河川の本川よりも支流で検出数が多い傾向がある。支流では河川の自流が少なく、排水等の影響がより大きく現れるためと思われる。

(4) 相模川と多摩川以外はいずれも検査水量10Lによる結果であり、後述するように1個/10L以下の汚染を把握できない。相模川や多摩川のように100Lレベルの調査が行われれば、特に水道原水の取水点におけるより詳細な汚染状況の把握とそれに基づくリスク評価が可能になると思われる。

6. 水源河川における原虫汚染原因と汚染指標

クリプトスポリジウムやジアルジアはヒトを含む

哺乳類の糞便が汚染源であり、野生動物が原因と考えられる事例もある[6]。しかし、負荷量は人為的排出の影響が遙かに大きい。実際、畜産排水の流入の影響を受ける地点[2, 9]や下水処理場放流水の流入後の地点[3, 5, 8]では原虫濃度の増大が観察されている。これまで報告されているわが国の下水（下水処理場への流入下水）や下水処理水（放流水）の原虫測定結果[5, 10～12]を総合すると、流入下水中にはおおむねクリプトスポリジウムが10^2～10^3個/10L、ジアルジアが10^3～10^5個/10Lのオーダーで、また下水処理水中にはおおむねクリプトスポリジウムが10^1～10^2個/10L、ジアルジアが10^2～10^3個/10Lのオーダーで含まれると考えられる。しかし畜産排水についてはこうした測定値や排出量など、汚濁負荷を考察するための情報がなく、水環境の原虫汚染への関与の実態を解明する障害となっている。

原虫類の汚染源が糞便に関係する汚水であることから、原虫類汚染の有無を示す代替指標としての糞便汚染指標細菌の有効性が期待される。推定ウェルシュ菌芽胞については相模川水系と多摩川水系の調査で最も有効な代替指標であることが示されている[2, 13]。しかし、利根川・江戸川水系ではそうした明瞭な相関は見られておらず[7]、今後さらにデータを集積する必要がある。大腸菌は排水処理における消毒の影響があり、多摩川のジアルジアとの単相関で有意でなかったケースもあった[13]。しかし、原虫濃度が著しく上昇した2001年1月の多摩川下流では、指標細菌数の著しい増加に加えて大腸菌群に占める大腸菌の比（EC/TC比）がそれまでになく大きかったことから、糞便中の大腸菌を効果的に減少させる排水処理、すなわち消毒を含む下水処理等を受けていない未処理汚水の流入があったものと推定されている[3]。

Ⅱ. 水道水の原虫汚染状況

1. 水道原水

水道原水の原虫類の調査データは、全国の29水道事業体の1997～2001年度の年報等から入手した。都道府県別に、データを収集できた事業体数、調査地点数、陽性試料数/検査試料数、陽性試料の濃度範囲（個/10L）、検査水量を**表1**にまとめた。

クリプトスポリジウムは19都道府県の29事業体

表1　都道府県別水道原水の原虫類調査結果概要

都道府県名	クリプトスポリジウム				ジアルジア			
	事業体数	調査地点数	陽性 / 検査数（濃度範囲：個 /10L）	検査水量（L）	事業体数	調査地点数	陽性 / 検査数（濃度範囲：個 /10L）	検査水量（L）
北海道	1	5	ND/10	10	1	5	ND/10	10
青森	1	3	ND/81	10, 20, 40	1	3	1/81（1）	10, 20, 40
宮城	2	14	4/67（1～14）	10, 20	1	11	18/57（1～8）	
新潟	1	4	ND/30	10, 20	1	4	9/30（1～23）	10, 20
埼玉	1	12	1/24（1）	10	1	12	2/24（1～2）	10
東京	1	28	54/293（1～11）	10	1	28	65/293（1～10）	10
神奈川	5	11	75/151（1～26）	10	5	11	43/151（1～4）	10
千葉	2	6	6/57（1～6）	10	0	0	NT	NT
茨城	1	7	ND/30	20, 40	1	7	ND/30	20, 40
長野	1	3	ND/3	20	1	3	ND/3	20
愛知	2	15	2/57（1,7）	5, 10, 20	2	15	ND/41	5, 10, 20
奈良	1	2	ND/51	10	1	2	ND/51	10
大阪	3	7	28/337（1～14）	10	1	1	ND/12	10
山口	1	3	ND/18	10, 20, 40	0	0	NT	NT
香川	1	5	ND/180	10	1	5	ND/180	10
福岡	2	13	2/263（1）	10	1	6	5/55（1～3）	10
長崎	1	12	ND/46	10	1	12	ND/46	10
宮崎	1	3	5/144（1～4）	20	1	3	ND/144	20
沖縄	1	8	5/90（1～2）	10	0	0	NT	NT
計（範囲）	29	161	182/1,932（1～26）	5～40	21	128	143/1,208（1～23）	5～40

ND：検出せず
NT：試験せず

によって161地点1,932試料で調査され、182試料（9.4%）で検出された。ジアルジアは16都道府県の21事業体によって128地点1,028試料について調査され、143試料（13.9%）で検出された。どちらの原虫も、検出は一部の大都市圏に集中しており、検出濃度レベルは10^0～10^1個/10Lのオーダーであった。それぞれの調査の頻度、調査地点の適否など検出率に影響を与える因子については不明であるが、平常時のわが国における水道原水の原虫汚染レベルは10^0～10^1個/10Lのオーダーを大きく超えることはないと考えられる。ただし、クリプトスポリジウムで91%、ジアルジアで86%を占める非検出試料の多くが、「水道に関するクリプトスポリジウムのオーシストの検出のための暫定的な試験方法」（厚生省 平成10年）（以下、「暫定的な試験方法」という）で原水を試験する場合の採水量の標準とされた10Lで調査されており、この試験方法の回収率[14]（平均回収率19.4%）等から判断して、採水量10Lの調査では10^0個（＝1個）/10Lのオーダーの汚染状況を正確に把握することは困難であると考えられる。また今回のデータは大都市圏での検出報告が多いが、これは試験頻度や水道事業体の検査体制、検出能力などの違いによるもので、都市部での汚染が高いことを示すものではないと考えられる。

これらの調査のうち、検査試料数と陽性試料数の多い5水系（荒川、多摩川、相模川、江戸川、淀川）から取水されている原水について、クリプトスポリジウム検出状況の詳細を**表2**に示した。5水系の原水におけるクリプトスポリジウム陽性率は5～75%、陽性試料の濃度範囲は1～26個/10Lであった。これらの調査はすべて検査水量10Lで行われたものである。

一方、相模川から原水を取水するある浄水場（以下、A浄水場という）において、限外ろ過膜を用いて原水の検査水量を100Lに増加した調査報告がある[18]。そこで相模川水系の原水C1～C4のデータと比較することで、水道原水のクリプトスポリジウム検出結果に及ぼす検査水量の影響を検討した。

表2にはA浄水場原水のクリプトスポリジウム調査結果も合わせて表示している。検出されたクリプトスポリジウム濃度の最小値と最大値の範囲は100Lで調査されたA浄水場原水では16～150個/100Lと報告されているが、これは10Lで調査されたC1～C4での1～26個/10Lの範囲内であった。また陽性試料における検出濃度の幾何平均値についてもA浄水場原水では40個/100Lと報告されているが、これもC1～C4での1.7～5.1個/10Lの範囲内であった。しかし、陽性率は検査水量10LのC1～C4では47～75%であるのに対して、100Lで行われたA浄水場原水では100%であり、大きく異なっていた。**図1**にはこれら5水系の原水におけるクリプトスポリジウム濃度の累積出現確率分布を示す。なお、相模川以外の水系についてはすべての調査地点を一括してプロットしている。検出された濃度範囲においてはおおむね対数正規分布の形態を示した。しかし、すべての水系でおおむね3～5個/10L付近を境に低濃度域ではプロットが急に検出限界（1個/10L）以下に傾斜しており、その結果、相模川水系のC1～C4では30～70%の試料で、他の水系にいたっては70～90%の試料で、検出限界（1個/10L）未満となっている。それに対して、C1～C4

表2　代表的な5水系原水のクリプトスポリジウム出現状況

水系名	荒川	多摩川			相模川					江戸川					淀川		
採水地点	A1	B1	B2	B3	C1	C2	C3	C4	A*	D1	D2	D3	D4	D5	E1	E2	E3
検査数	65	17	19	19	27	12	15	9	13	34	32	4	17	17	67	67	67
陽性数	22	3	1	5	17	9	7	6	13	9	12	2	2	2	8	12	8
陽性率（%）	34	18	5	26	63	75	47	67	100	26	38	50	12	12	12	18	12
最小値（個/10L）	1	1	6	1	1	1	1	1	1.6	1	1	1	1	1	1	1	1
最大値（個/10L）	12	10	6	2	26	10	15	3	15	7	9	6	3	4	14	14	11
全試料算術平均（個/10L）	1.1	1.1	0.3	0.3	4.3	4.7	1.9	1.2	—	0.6	1.2	1.8	0.2	0.3	0.5	0.5	0.4
標準偏差（個/10L）	2.1	2.9	1.3	0.6	7.1	3.8	3.8	1.0	—	1.4	2.2	2.5	0.7	1.0	1.9	1.9	1.6
陽性試料幾何平均（個/10L）	2.6	4.3	6.0	1.1	4.5	5.1	2.4	1.7	4.0	3.5	2.2	2.4	1.7	2.0	2.3	2.0	2.8
陽性試料算術平均の標準偏差（個/10L）	2.5	3.9	0.0	0.4	6.7	3.0	4.7	0.7	—	2.2	2.6	2.5	1.0	1.5	4.3	3.6	3.0

＊相模川から取水しているある浄水場（本文でA浄水場と仮称）の原水についてのHashimoto et al.（2002）[18]によるデータ。

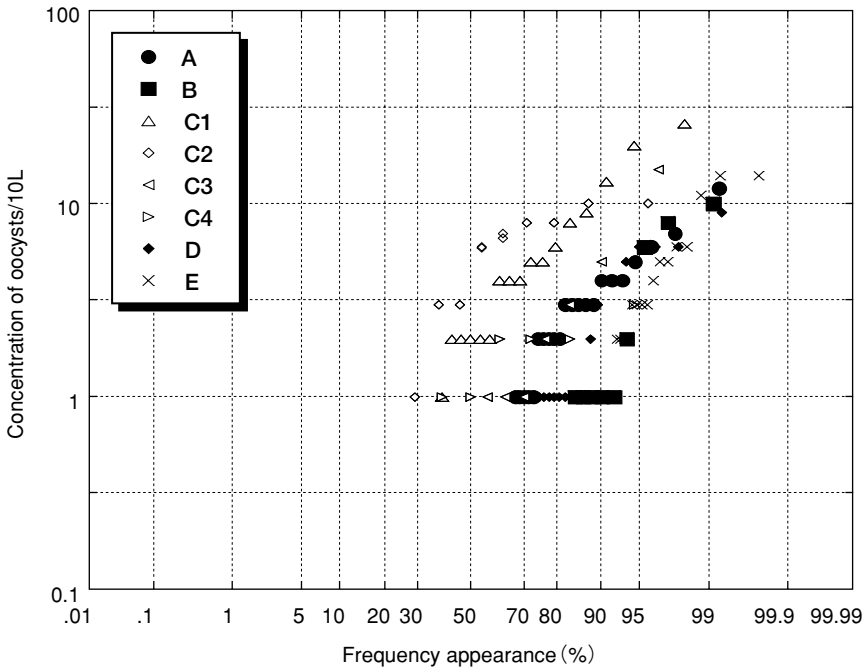

図1　荒川水系（A）・多摩川水系（B）・相模川水系（C）・江戸川水系（D）・淀川水系（E）の原水におけるクリプトスポリジウム濃度累積出現分布

と同じく相模川水系の原水であるが100Lで調査したA浄水場原水では累積出現確率分布のプロットはほぼ一直線上に分布し、検出限界（1個/100L）未満となる試料がないことが示されている[18]。このように検査水量100Lで行われた場合の濃度分布形態から推測すると、検査水量10Lでは原水の正確な陽性率と濃度分布の把握が困難であろうことが示され、検査水量を増やすことにより、原水中の原虫の存在状況をより正確に把握することができると考えられる。このことから、後述するようにクリプトスポリジウム許容濃度の提案値1個/m^3 [15]を浄水の基準として適用すると、浄水処理による除去率が低下して2log_{10}となった場合でも、これを満足することができる水道原水の許容クリプトスポリジウム濃度レベルである1個/ 10Lを正確に測定するためには、水道原水の検査水量を増加させる必要があると考えられる。

2. 浄水

浄水における原虫類の調査結果は、前述の原水の結果と同様な方法で入手した。**表3**に浄水の原虫類調査結果の概要を示す。

入手できたデータは、クリプトスポリジウムについて15都道府県の25事業体による131地点1,843試料、ジアルジアについて13都道府県の19事業体による113地点1,344試料であり、結果はすべて不検出であった。検査水量は10～50Lであり、中でも20Lおよび40Lで検査を行っている事業体が多かった。

一方、前述の相模川水系を原水とするA浄水場については、限外ろ過膜を用いて検査水量2,000Lで浄水を調査した結果が報告されている[18]。それによれば、クリプトスポリジウムは26試料のうち9試料から、検出範囲で0.5～8個/1,000L、陽性試料の幾何平均値で1.2個/1,000Lの濃度で検出され、累積出現確率70%以上でおおむね対数正規分布に従った。この調査結果から、浄水中のクリプトスポリジウム濃度は最大でも10個/1,000L程度であり、この濃度レベルは「暫定的な試験方法」で水道水を試験する場合の採水量の標準とされた20Lでは0.2個に相当し、ほとんど検出されない濃度であることが示された。すなわち、浄水中のクリプトスポリジウム濃度を正確に把握するためには、検査水量の増加が必要である。また、浄水場の浄水処理による原虫類除去効果の評価を行うためにも、特に浄水において検査水量を増加した調査は有効である。A浄水場の例はその貴重なデータを提供しており、原水および浄水のクリプトスポリジウム濃度から算出した平均除去率は2.47log_{10}であり[18]、適切な運転管理を行っている急速ろ過方式の実施設における原虫類の

除去率を知ることができた。

3. 水道水の原虫汚染レベルと感染リスク評価

日本水環境学会「水中の健康関連微生物研究委員会」は2001年の水環境学会シンポジウムにおいて、許容感染リスク 10^{-2}/年に対応する水道水のクリプトスポリジウム基準値として1個/m^3という値を提案した[15]。この値は、1) 非加熱水道水の摂取量は1L/日で常に一定、2) 水道水中のクリプトスポリジウム濃度は常に一定、3) 塩素消毒は実質的に無効、4) 検出されたクリプトスポリジウムはすべて感染力があり、感染力は一定、5) 用量反応モデルは免疫正常な健康成人で得られた式を適用、6) 個体差による不確実係数10、との仮定に基づいて算出されたものである。またこの基準値1個/m^3の運用として、許容感染リスク 10^{-2}/年を「日リスクの年間総和」とみなせば、この基準値は年平均値扱いとなり、原虫類の出現確率分布から、実質上年平均値が1個/m^3以下の達成が可能な具体的基準値として、決して超えてはならない最大許容濃度として1個/100L（10個/m^3）以下が提案された[15]。Ⅱ－2で紹介したA浄水場の浄水の調査結果[18]をこうした基準に当てはめると、浄水のクリプトスポリジウム濃度分布では累積出現確率で約10%の浄水が1個/m^3を超える可能性があるが、最大許容濃度基準である10個/m^3を超えることはなかった。すなわち、平均除去率2.47 $\log_{10}$で適切に運転管理されている急速ろ過方式の実施設において、この基準を満足する処理が行われており、この基準が実務的に十分適用可能なことが示された。しかしながら、**表3**に明らかなように、A浄水場以外では、検査水量の問題もあって浄水の実データからこの基準に照らした評価を行うことはできない。そこで、**表1**で示した全国の原水のデータを用いて浄水の原虫レベルを推定し、評価を試みた。まず、過去の集団感染事例では水源で高濃度汚染が突発的に生じたことも原因として推定されていることから、リスクの高いケースを想定して、**表1**の全国データから原水のクリプトスポリジウム濃度の最大値を用いて累積出現確率分布図を作成した（**図2**）。さらに、A浄水場におけるクリプトスポリジウム平均除去率2.47 $\log_{10}$[18]のほか、急速砂ろ過法によるクリプトスポリジウム除去に関する他の報告における除去率（平均2.38 $\log_{10}$[16]、平均4.7 $\log_{10}$[17]、＞2.3 $\log_{10}$[19]、2.0 $\log_{10}$[20]、＞2.7 $\log_{10}$[21]）を考慮すれば、実施設での浄水処理によるクリプトスポリジウムの物理的除去は2ないし3 $\log_{10}$と推定できることから、リスクの高いケースを想定した原水を2 $\log_{10}$, 2.5 $\log_{10}$および3 $\log_{10}$の3水準の除去率で浄水処理したときの浄水での濃度分布を推定して図示した。

表3　都道府県別浄水の原虫類調査状況一覧

都道府県名	クリプトスポリジウム				ジアルジア			
	事業体数	調査地点数	陽性 / 検査数（濃度範囲：個 /10L）	検査水量（L）	事業体数	調査地点数	陽性 / 検査数（濃度範囲：個 /10L）	検査水量（L）
北海道	1	5	ND/10	40	1	5	ND/10	40
青森	1	3	ND/11	10, 20 ,40	1	3	ND/11	10, 20, 40
宮城	2	14	ND/92	40	1	11	ND/77	40
新潟	1	5	ND/38	20	1	5	ND/38	20
東京	1	28	ND/544	40	1	28	ND/544	40
千葉	2	8	ND/153	20, 40	0	0	NT	NT
神奈川	5	23	ND/357	10, 20, 40, 50	5	23	ND/357	10, 20, 40, 50
茨城	1	2	ND/6	40	1	2	ND/6	40
長野	1	3	ND/3	20	1	3	ND/3	20
愛知	2	15	ND/96	10, 20	2	15	ND/49	10, 20
奈良	1	2	ND/30	20	1	2	ND/20	20
大阪	3	4	ND/210	20, 40	1	1	ND/12	20
福岡	2	13	ND/197	20, 40	2	13	ND/169	20, 40
宮崎	1	2	ND/48	20	1	2	ND/48	20
沖縄	1	4	ND/48	40	0	0	NT	NT
計（範囲）	25	131	0/1,843	10～50	19	113	0/1,344	10～50

ND：検出せず
NT：試験せず

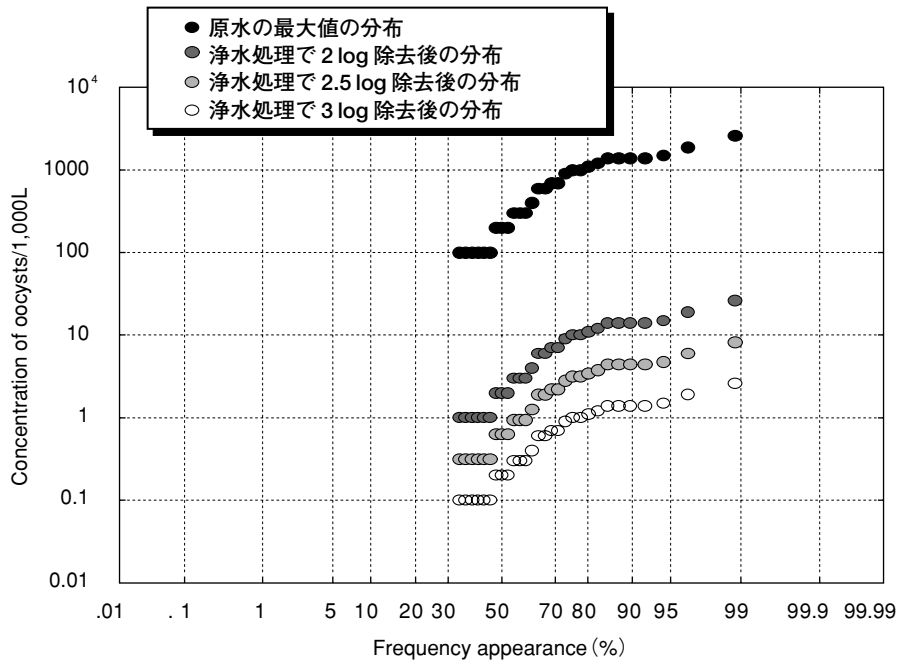

図 2　原水のクリプトスポリジウム最大値の分布と浄水濃度の予測

図 2 に示したとおり、除去率を $2\log_{10}$ とした場合ではほぼ 50%で、$3\log_{10}$ とした場合ではほぼ 20%で浄水中のクリプトスポリジウム濃度が 1 個/m^3 を超える可能性があることが示された。また最大許容濃度基準である 1 個/100L（10 個/m^3）を適用すると、除去率 $2.5\log_{10}$ で 99%が基準内に収まるが、除去率 $2\log_{10}$ では約 25%の浄水中にこの基準を上回るクリプトスポリジウムが出現する可能性があることがわかる。

「水道水中のクリプトスポリジウム暫定対策指針」（厚生省 平成 8 年）では、クリプトスポリジウム対策として、ろ過等の設備を設置し、ろ過水濁度が常時 0.1 度以下になるように浄水システムを管理することとなっている。このような管理の下で、越生町での事件以後、日本では水道水を原因とするクリプトスポリジウムの集団感染は発生していない。しかし一方で、急速ろ過や緩速ろ過処理を行っている上水道や簡易水道の浄水から原虫類が検出されて給水停止になった事例は、1996 年の越生町での事件以降も 2002 年まで毎年発生している[14]。急速ろ過による微生物の物理的除去率は水温、濁度、pH などの水質要因のほか、薬品注入率や沈殿池、ろ過池などの施設の運用如何によって大きく変動する。したがって、降雨流出・集団感染の発生など様々な要因によって起こると考えられる、クリプトスポリジウム濃度が上昇した高リスクな原水に対しても感染リスクを 10^{-2}/年以下に維持し、より微生物学的に安全な水道水を供給するためには、除去率 $2.5\log_{10}$ 以上での浄水処理を確実に実施する技術力の発揮あるいはそれが常時可能な浄水処理方法の導入、もしくは水道水の消毒程度の塩素濃度と接触時間では実質的に不活化が困難なクリプトスポリジウムに対する不活化効果の高い消毒処理を追加的に導入する必要があると考えられる。

一方、ジアルジアはクリプトスポリジウムとは異なり、塩素により不活化させることが可能である。所定の不活化率を得るために必要な消毒剤濃度（C：mg/L）と接触時間（T：分）の積を CT 値として表す。ジアルジアの不活化に必要な塩素の CT 値は数多く報告されている。同一の不活化率を得るために必要な CT 値は、一般に低水温・高 pH ・高塩素濃度になるほど大きくなる。

塩素によるジアルジアの不活化 CT 値は、$2\log_{10}$ の不活化では 60mg・min/L（15℃、pH7.5、塩素濃度 1mg/L）[22]、100mg・min/L（10℃、pH7 ～ 7.5）[23]、80mg・min/L（10℃）[24]、$4\log_{10}$ の不活化では 221mg・min/L（5℃、pH7.5）[25] との報告がある。これらの値から、遊離残留塩素濃度 1mg/L では 1 ～ 2 時間の接触で $2\log_{10}$ 不活化され、4 時間接触すれば $4\log_{10}$ の不活化が期待できることがわかる。わが国の浄水場の浄水池や配水池での滞留時間を考慮すると、浄

水の遊離残留塩素濃度が1mg/L程度あれば十分な不活化が可能と考えられる。しかし、水道水のおいしさの観点から残留塩素濃度をできるだけ下げようとする動きもあり、特に配水系統で塩素濃度が減少しにくい冬季に、浄水場出口の塩素濃度を低下させる傾向がある。冬季は水温が低く、塩素の消毒力が低下するため、不活化CT値が大きくなるとともに、急速ろ過処理の要である凝集が不良となって処理機能の低下が起こりやすい。さらに、一般的に冬季は河川流量が少なくなり、相対的に河川水に占める下水処理水の割合が増加して原水中のジアルジア数およびクリプトスポリジウム数の増加が起こりやすいので、ジアルジアの不活化が十分可能な塩素濃度が確保できるよう、慎重な対応が必要である。

4. まとめ

水道水源となっている代表的な河川流域、ならびに全国の水道原水および浄水における原虫の調査結果をとりまとめ、浄水の感染リスクを推定した。

(1) 大河川の本川での原虫類の出現数範囲はクリプトスポリジウムでおおむね$< 10^{0} \sim 10^{1}$個/20L、ジアルジアでおおむね$< 10^{0} \sim 10^{2}$個/20Lのオーダーと推察される。流入河川等では汚濁源からの影響が大きく、河川本川よりもそれぞれ1オーダー程度高い値が出現する可能性がある。

(2) 原虫汚染の代替指標としての糞便汚染指標細菌については推定ウェルシュ菌芽胞が有望と考えられるが、さらに多くの水系で検証していく必要がある。

(3) 全国の原水の原虫濃度レベルは$10^{0} \sim 10^{1}$個/10Lのオーダーを大きく超えない程度であり、水源河川での状況と一致していた。ただし、原水の多くは検査水量10Lで調査されており、10^{0}個/10Lのレベルでの汚染実態を詳細に把握することは困難と考えられた。浄水では10～50Lで検査されていたが全試料で原虫類陰性であった。

(4) 急速ろ過による除去率（$2 \sim 3 \log_{10}$）から推測すると、原水中のクリプトスポリジウム濃度が上昇した場合でも感染リスクを10^{-2}/年に維持するためには、$2.5 \log_{10}$以上の除去を確実に実施するか、もしくはクリプトスポリジウム不活化効果の高い消毒処理の導入が必要と考えられる。

(5) 既報の不活化CT値から、ジアルジアは浄水の遊離残留塩素濃度が1mg/L程度あれば十分に不活化されると考えられる。しかし、水道水のおいしさの観点から残留塩素濃度を下げる傾向があり、特に冬季の低水温時には不活化CT値が大きくなるとともに、原水中のジアルジア数の増加が起こりやすいので、十分な残留塩素濃度の確保が必要である。

文　献

1）Haas, C.N., et al.: Jour. AWWA., **88**(9) : 131-136, 1996.
2）橋本温ほか：水環境学会誌, **22** : 282-287, 1999.
3）保坂三継ほか：用水と廃水, **44** : 295-303, 2002a.
4）保坂三継ほか：東京健安研セ年報, **54** : 290-295, 2003.
5）平松順子ほか：平成12年度日本水道協会関東地方支部研究発表講演集, 13-15, 2000.
6）猪又明子ほか：水道協会雑誌, **71**(9)： 31-38, 2002.
7）五十嵐公文ほか：平成13年度日本水道協会関東地方支部水質研究発表会講演集, 16-18, 2001.
8）中西正治ほか：第52回全国水道研究発表会講演, 558-559, 2001.
9）北澤弘美ほか：水道協会雑誌, **68**(4) : 22-31, 1999.
10）橋本温ほか：水環境学会誌, **20** : 404-410, 1997.
11）川村吉晴・五藤久貴：平成11年度東京都下水道局技術調査年報, 165-173, 1999.
12）山下洋正ほか：第37回日本水環境学会年会講演集, 381, 2003.
13）保坂三継ほか：東京衛研年報, **53** : 223-228, 2002b.
14）日本水道協会：クリプトスポリジウム－解説と試験方法－, 232pp, 2003.
15）平田強ほか：第4回日本水環境学会シンポジウム講演集, 181-182, 2001. および平田強：水環境学会誌, **24**(12): 826-828, 2001.
16）LeChevallier, M.W. et al.: Applied and Environmental Microbiology, **57** : 2610-2616, 1991.
17）Payment, P. and Franco, E.: Applied and Environmental Microbiology, **59** : 2418-2424, 1993.
18）Hashimoto, A. et al.: Water Research, **36**(3): 519-526, 2002.
19）Nieminski, E.C. and Ongerth, J.E.: Journal AWWA, **87**(9): 96-106, 1995.
20）Payment, P. et.: Canadian Journal of Microbiology, **46**(6): 565-576, 2000.
21）Swertfeger, J. et al.: Journal AWWA, **91**(9): 90-100, 1999.
22）Pontius, F.W.: Opflow, **19**(7): 9, 1993.
23）WHO : Guirelines for Drinking-water Quality, Third Edition, Volume 1, Recommendations, pp.140-141, 2004.
24）Daniel, P.A.: 20th International Water Supply Congress and Exhibition, Technical Papers, SS6-1-SS6-5, 1995.
25）Hibler, C.P. and Hancock, C.M.: In Drinking Water Microbiology (ed. G. A. McFeters), pp.271-293, 1990. Springer-Verlag, New York/Berlin/Heidelberg.