下水処理水の消毒*

大 垣 眞一郎

1. はじめに

消毒は廃水処理単位プロセスの中で最も長い歴史を持つものであろう。100年以上前にすでに塩素が下水の脱臭に使われていたようである。当時の知識としては脱臭すなわち消毒を意味していた¹⁾。水を介して広範囲に病気が伝播することが示された最初の記録は、1854年のロンドンのブロード通りで発生したコレラの流行である^{2),3),4)}。

下水処理プロセスの一つとしての消毒は、下水処理水を、病原微生物からみてその安全性を確保し、公衆の健康へのリスクを最小にするための最終プロセスである。その最も一般的な手法は、塩素（液化塩素、塩素化合物）消毒である。

しかしながら、社会状況の変化に伴う利水の変化、修景、生態系維持用水の水資源などとしての再利用需要、および水中病原微生物に関する新しい情報等により、下水処理水の塩素消毒技術に対してその安全性と必要性が改めて議論されるようになってきている。

論点は三つある。第一は、活性汚泥法等高級処理の場合でも消毒は必要かどうかである。第二は残留塩素の魚介類等生態系への悪影響、および、塩素消毒によって生成されるトリハロメタン等ハロゲン化合物の飲料水への安全性の危惧である。第三は、ウイルス汚染などに対して、大腸菌群数を指標とした現行の消毒制御手法が適切かどうかという議論である。

上記第二の論点は代替消毒手法の問題である。第三の論点からは、代替指標の問題と、その新しい指標による消毒手段の再評価の問題が生じる。

2. 下水処理における消毒の現状

わが国では、下水処理放流水に要求されている病原微生物関連の水質は、大腸菌群数を3000個・cm⁻³以下にすることである。消毒剤の接触時間は計画1日最大汚水量を基準として、接触槽に放流管渠を含めて15分以上にするとされている⁵⁾。

日本下水道事業団が受託し建設した公共下水道終末処理場（指定都市を除く152処理場。その内、9割以上が昭和50年以降供用開始。）についての調査資料（昭和62年3月末現在）に基づき、使用されている消毒剤を図1に示す。ほとんど（85%程度）の処理場が次亜塩素酸ナトリウムと次亜塩素酸カルシウムを使用している。液化塩素は相対的に安価ではあるが、その取扱いなどについての各種規制の強化、地震に対する配慮などから、使用されることが減ってきている。図1に含まれる処理場のうち、昭和56年4月以降通水した処理場（90カ所程）に限れば、液化塩素を使用している所は2カ所にすぎない。また、この約90処理場の内、相対的に小規模な処理場（日最大現有処理能力にして、概略5000m³/日以下）では、取り扱いやすい固形状の次亜塩素酸カルシウムが用いられている例が多い。

塩素の注入率は、活性汚泥処理水に対して2～4 mg・ℓ⁻¹とされている⁵⁾。図1中の処理場の内、次亜塩素酸ナトリウムを使用している80処理場の消毒剤使用量から計算すると、総流入水量に対する現状の塩素の注入率は概略1 mg・ℓ⁻¹程度となる。

都市修景用水のための消毒の実例を東京都多摩川上流処理場（野火止用水、玉川上水への供給）にみてみる⁶⁾と、魚類に影響しないように砂戸過装置出口で残留塩素0.1mg・ℓ⁻¹以下にしている。

3. 消毒の必要性

改めて確認するまでもなく、下水は、不特定多数の人間からの、糞便、口や皮膚などからの排泄物、さらに、血液などの各種体液も含まれるものであるから、様々の病原微生物が存在し得る。わが国の下水中に50型以上のウイルスが検出されていること^{7),8)}、各種の病原細菌、A型肝炎ウイルスを含む腸管系ウイルス、あるいは寄生虫がアメリカ合衆国各地の下水中に見いだ

Shinichiro Ohgaki

昭和49年 東京大学大学院博士課程修了

同年 東北大学工学部助手

52年 東京大学工学部都市工学科
助教授

58～60年 アジア工科大学助教授
工学博士

〔趣 味〕 乱読 水泳

* Wastewater Disinfection, 昭和63年3月17日受理

図1 消毒剤の種類

されていること⁹⁾など多くの報告がある。表1に示すように、消毒前の二次処理水中には多くの指標生物が見いだされる¹⁰⁾から、二次処理をしても健康に危険性のある微生物は皆無とはならない。

処理水中の病原微生物が人間へ感染する経路は複雑で、受水域におけるレクリエーション中の経口および皮膚(粘膜)接触、汚染された魚介類の摂取、さらに、第2次感染などがある^{11),12)}。腸管系ウイルスを対象とした場合、臨床的に何によって発病したかわからない程度の危険率(発病率 10^{-5} 以下)を目安として考えることもできるという報告⁹⁾もある。しかし、残念ながら、疫学的調査の感度が鈍いために、処理水への曝露と疾患との関係を直接証明するのは一般的には難しいようである。

4. 消毒に関連する基準

日本における下水処理水の消毒に関する排水基準はすでに示したように大腸菌群数で $3000\text{個}\cdot\text{cm}^{-3}$ である。水浴場水質の基準と水洗便所用水への再利用時の基準は $10\text{個}\cdot\text{cm}^{-3}$ である^{8),13)}。修景用水、散水用水については、建設省「下水処理水循環利用技術指針(案)昭和56年」では、「検出されないこと」とされている¹³⁾。また、残留塩素の濃度については、水産資源保護の立場から水産用水基準が遊離塩素で許容濃度 $0.02\text{mg}\cdot\ell^{-1}$ としている¹⁴⁾。

米国では、1972年以前には、消毒に関する全国一律の基準はなく、1972年から1976年の間は全国一律に、処理水の大腸菌群数に最大値が課せられていた³⁾。1976年以降は、下水処理水の消毒に関する USEPA のガイドラインに基づき、消毒の基準は、州あるいは、地方公共団体が地域の状況に応じて独自に設定できることになった。その EPA の示すガイドラインの主旨は¹⁰⁾、消毒による便益が明らかでない場合は、消毒を行う必要はないこと、また、公衆衛生および水生生物への影響の両者を考慮しなければならない場合には、塩

表1 未消毒の下水処理水中に含まれる微生物濃度(文献10)より)

微生物	個数/100mℓ	
	最小	最大
大腸菌群	45,000	2,020,000
糞便性大腸菌群	11,000	1,590,000
糞便性連鎖球菌	2,000	146,000
ウイルス	0.05	1,000
サルモネラ菌	12	570

素以外の代替消毒技術あるいは脱塩素を考慮すべきである、というものである。これを受けて、多くの州の場合、基準としては糞便性大腸菌群数 $200\text{個}\cdot 100\text{m}\ell^{-1}$ が用いられている⁹⁾。

具体的な基準の例をいくつかの州について見てみると、オハイオ河流域各州水保全組合の各州では³⁾、オハイオ河本川へ直接放流されるすべての廃水に対して、糞便性大腸菌数(月間幾何平均値)で、レクリエーション期間(5月から10月)は $200\text{個}\cdot 100\text{m}\ell^{-1}$ 以下、他の期間は $1000\text{個}\cdot 100\text{m}\ell^{-1}$ としている。州によってはこの基準をさらに強化しており、例えば、イリノイ州など5州は、年間を通して $200\text{個}\cdot 100\text{m}\ell^{-1}$ 以下を適用している。また、残留塩素の最大許容値を定めている州もある。例えば、イリノイ州では $0.75\text{mg}\cdot\ell^{-1}$ である。また、オハイオ州では、河川水質基準を残留塩素 $0.002\text{mg}\cdot\ell^{-1}$ とし、必要に応じて新設の処理場に対し脱塩素を要求している。

カルフォルニア州は¹¹⁾、大都市域と大農業生産地をかかえており、かつ、水資源に恵まれていないため、放流水域に対応した重層的で厳しい規制が行われている。例えば、内湾と感潮域への放流水の総残留塩素は6カ月間の中央値が $0.002\text{mg}\cdot\ell^{-1}$ をこえてはならない。水と接触型のレクリエーションを行う水域に対しては、大腸菌群数で $1000\text{個}\cdot 100\text{m}\ell^{-1}$ 以下とされている、などである。

5. 残留塩素の生態系への影響

環境水系の生態系への残留塩素の影響は生物種、放流地先の水質、水温などによって大きく変化する。また、魚などは、忌避行動がとれるので、実験室内毒性評価試験と異なり、自然水系での毒性評価は難しい。サケのある種は、総残留塩素が $0.2\text{mg}\cdot\ell^{-1}$ でも忌避を示さないが、ある淡水魚では $0.015\sim 0.017\text{mg}\cdot\ell^{-1}$ で忌避を示す¹⁵⁾などの報告がある。下水処理水放流先実河川(イリノイ州の2河川)で、塩素消毒を中止すると、魚類の種の数、大きさが増大したという報告¹⁵⁾もある。

また、ノリを指標生物として、塩素消毒済みの水処理水の毒性評価を行なった丸山^{(14),(16)}によると、その作用機序および物質は同定されていないものの、クロラミンを含む塩素消毒に起因する生成物質がノリに対して毒性をもつようである。

塩素消毒によって副次的に生成される揮発性および不揮発性の有機塩素化合物が、飲料水の水源として利用されている水域に放流される場合には、消毒は別の潜在的な危険性をもつことになる懸念されている。しかし、下水処理水がアンモニアを含む場合、塩素注入量がブレイクポイント以下であれば、トリハロメタン等の生成は小さいと言われている⁽¹¹⁾。放流水域の水質条件、希釈水量の相違、処理水中のアンモニアの濃度など多くの因子が関係し、塩素消毒の生態系への影響を分離して評価するためには、多くのデータが必要である。

6. 消毒の評価のための新しい指標

大腸菌群数ならびに糞便性大腸菌群数が消毒の評価に広く使われてきた。これは大腸菌群が海水中および淡水中において *Salmonella* 菌の検出の頻度とよい相関を示したことによる⁽¹¹⁾。日本でもこの相関関係が得られており、水浴場水質と水洗便所用水への再利用時の日本での基準($10\text{MPN}\cdot\text{m}\ell^{-1}$)の根拠とされている⁽⁸⁾ようである。

最近、US EPA は、水浴場における胃腸炎の発病数と糞便性大腸菌群、腸球菌および *E. coli* の濃度との相関を調べ、海水域と淡水域の両者で、糞便性大腸菌群は発病数と相関がなく、腸球菌と *E. coli* がよい相関を示したとしている⁽⁹⁾。その回帰式に従えば、水泳中の1000人あたり1人の発病の危険率を示す *E. coli* の濃度は $23\text{個}\cdot 100\text{m}\ell^{-1}$ となる。未だ測定方法の標準化などが残されているものの、EPA は、この調査結果に基づき、腸球菌と *E. coli* を新しい微生物汚染の指標として提案しており、前項で述べたアメリカ合衆国各州の消毒政策が再検討される可能性もある⁽¹¹⁾。

その他の指標細菌として、ウェルシュ菌 (*Clostridium perfringens*) が、塩素消毒に対して相対的に高い耐性を示すという研究⁽¹⁷⁾なども進められている。

また、原生動物のシストや腸管系ウイルスは、塩素消毒に対してより強い抵抗性を示す傾向がある^{(18),(19)}。水利用の高度化に伴い、ウイルス性の感染症についてもその病原微生物の除去が求められるようになってきており、新しい指標の開発が国際的にも重要な課題となってきている⁽²⁰⁾。

ウイルスの指標として、有望視されているものにバクテリオファージ(細菌ウイルス)がある⁽²⁰⁾。タイ国の

大学・寮排水処理酸化池には、*E. coli* B を宿主菌とするコリファージが十分存在し、定量性もよいことが報告されている^{(21)~(24)}。USA Standard Methods⁽²⁵⁾には、宿主菌として *E. coli* C を用いるコリファージ定量法(案)が示されている。

遺伝子 RNA の研究の一環として行われた下水の調査結果から、多種の RNA ファージを含む大腸菌ファージが量的にも多く検索されている^{(26),(27)}。ウイルス指標としてのバクテリオファージを精力的に研究している Havelaar の表現⁽²⁸⁾を借りれば、バクテリオファージの中でも、F 特異 RNA バクテリオファージは、①その構造と大きさが、エンテロウイルス属(A 型肝炎ウイルスが含まれる)に似ており、②太陽光、熱、高 pH、紫外線、およびクロラミンなど多くの消毒剤などに相対的に抵抗性があり、また、③その純粋株を水処理における消毒実験研究に用いることができる、という魅力を備えている。さらに加えれば、人体に対して危険性がなく、測定が容易でもある。Havelaar は、宿主菌として *Salmonella typhimurium* を推奨している。

宿主菌として *E. coli* K12 を用いて、東京都三河島下水処理場の流入下水とエアレーションタンク内の野性の大腸菌ファージの存在状態を、著者らが実測した一例を図2に示す^{(29),(30)}。4カ月間の調査の範囲内では、下水中の全大腸菌ファージは $10^4\text{PFU}\cdot\text{ml}^{-1}$ オーダーであり、全体の19—53%が F 特異 RNA 大腸菌ファージであった。図2に示すように、エアレーションタンク内の大腸菌ファージはほとんど活性汚泥に吸着しており、また、その77—97%が F 特異 RNA 大腸菌ファージであった。

この種のデータより、処理工程中でのウイルスの消長、汚泥への移行、消毒効率などを推定することができる。バクテリオファージを消毒指標として実用化するためには廃水処理系、消毒プロセス、および、自然水系中でのバクテリオファージの消長と生態に関する基礎研究がさらに必要である。

7. 代替消毒技術

より高度な公衆衛生的安全性を確保し、かつ水域生態系との調和を図りたいという要請に答える方法の一つが、塩素消毒に替わる技術の適用である。US EPA が、下水の消毒に関する詳細なデザインマニュアル⁽³¹⁾(消毒の必要性、各種消毒手法の比較、ハロゲン系消毒・オゾン消毒・紫外線消毒の各技術解説より構成されている)を発表している。そのマニュアルより、表2に各種技術の特性比較を示す。なお、この表には費用が含まれていないが、質的に異なるプロセス間の費

図2 下水中およびエアレーションタンク内の大腸菌ファージの存在状態(実測例)

用比較は難しい。下水の消毒技術の費用比較表を示している例³²⁾もあるが、その著者の White 自身も真の比較は難しいとしている。建設費と運転費の評価は重要ではあるが、下水処理全体の費用の中でその占める割合は小さい。

表2より、塩素消毒に替わりうる技術は、塩素+脱塩素、オゾンおよび紫外線と考えられるが、その選択は、主に、施設の規模、放流先の条件、排水基準に支配される。EPA マニュアルの示唆するところによれば、排水基準が厳しいほど、オゾン消毒や紫外線消毒の適用性が相対的に増す。

前述したように、厳しい排水基準と水系生態系への影響に対する強い懸念から、米国では、これら代替技術の導入が盛んである。WPCF 消毒技術委員会の総説¹¹⁾によると次のような状況である。

脱塩素技術については、500以上の処理場で化学的脱塩素が行われている。多くの場合二酸化イオウとその誘導体が用いられている。遊離二酸化イオウの簡易な測定法がないため、過剰投入になる懸念があるが、多

くの経験によれば溶存酸素回復のための再曝気プロセスは必要ないようである。

オゾン消毒は、1985年11月現在、24下水処理場で使用されており、3処理場が計画中である。オゾンとその副生成物は、その化学的特性から残留性は小さく、水圏生態系への影響は小さいと考えられている。

紫外線技術は、1984年春現在で、54装置が稼働中であり、64装置が計画されている。消毒効率としては、ウェルシュ菌のような2、3の病原菌に対しては塩素消毒より有効である。また、約 $38,000\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (10mgd)以上の規模では、オゾンと併用する方が、オゾン、紫外線をそれぞれ個別に使用するより費用は安くなる。紫外線消毒の最大の長所は、残留物質が存在しないことより、生態系へ影響を与えないという点にある。また、設計値以上に紫外線を照射しても、化学的消毒剤と異なり、過剰注入ということは生じえない。従って、放流水域への影響を考慮して、消毒の制御を行なければならない処理場では、消毒の運転管理がより容易になる。

これら適用上の代替技術については、上に示した米国の経験、あるいは、各種基礎研究によって、現在も、新しい知見の蓄積が進められており、費用等をはじめ相対的な技術評価は日々変化していくであろう。たとえば、下水処理水の紫外線消毒にあたっては、水質的には色度と濁質が問題となるといわれているが、カオリンによる濁質は紫外線の効率を阻害しないという可能性を示す実験研究³³⁾なども進められている。また、従来の低圧水銀紫外線ランプに加え、新しく大容量処理に対応できる中(高)圧水銀ランプが開発されており、食品工業等産業用として用いられ始めている。上水処理では、英国のテムズ水道公社で1987年より井戸水 $54,500\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ の消毒に実用化されている³⁴⁾。

表2 代替消毒技術の比較 (文献31) Table 3-2より抄訳)

比較項目	塩素	塩素と脱塩素	塩化臭素	二酸化塩素	オゾン	紫外線
規模	すべて	すべて	すべて	中・小	大・中	中・小
信頼性	よい	ほぼよい	不明	不明	ほぼよい	ほぼよい
運転制御技術	十分開発済	ほぼ開発済	やや問題有	未開発	開発途上	開発途上
技術的複雑さ	やや易	普通	普通	普通	複雑	やや易
取扱の安全性	要注意	要注意	要注意	要注意	ほぼ安全	安全
ウイルス不活化	やや劣	やや劣	普通	よい	よい	よい
魚類への毒性	有	なし	やや有	有	多分なし	なし
有毒物質副生成	有	有	有	有	多分なし	なし
残留性	長	無	短	中間	無	無
接触時間	長	長	中	中～長	中	短
アンモニアとの反応	有	有	有	なし	有(高pH時)	なし
色度除去	中	中	不明	あり	あり	なし
溶解物質の増加	有	有	有	有	なし	なし

8. おわりに

米国各州の政策は、日本の消毒政策を決定する上でよい選択肢リストとなる。しかし、一方で消毒規定のない西独のような諸国もある。日本としては、放流地先水利用状況に対応して、多様な政策が将来とれるように、わが国独自の消毒技術体系の開発を進めるべきであろう。下水の消毒に関する総合的な政策としては、同時に、病院排水等の受け入れ体制、余剰汚泥の処理処分体制なども視野にいれておかなければならない。

社会の中における技術の位置づけは時代と共に変わる。先端技術と現在称されている技術群は、社会的なニーズとは独立に発見、発明された知識の社会への適用に関する技術である。これに対置する形で、上・下水道あるいは廃水処理技術は、吉川³⁵⁾の定義によれば、成熟技術に分類される。成熟技術とは、技術的にかなりの完成度に達しているもので、その技術に関する社会的合意が形成されており、その技術なくしては現在の社会生活、産業活動が成立しえないようなものである。下水処理水の塩素消毒は、長年にわたる実績の下に“成熟”した技術として一つの社会的合意を得てきたものである。しかし、本稿ですでに述べたように、塩素消毒をめぐる様々な問題、すなわち、新たな社会的合意形成のための胎動、が生じている。拙速は避けなければならないが、新しい社会的合意形成のためには、正確な知識の蓄積と新技術体系の開発が急務である。

文 献

- 1) WPCF Disinfection Committee (1984) Water Pollution. Control Federation. Committee Report
- 2) ウェバー (南部祥一, 丹保憲仁監訳) (1981) 水質制御の物理化学的プロセス, 第9章, 朝倉書店。
- 3) Engelbrecht, R.S. and C.N. Haas (1986) Wastewater disinfection: Concepts and practice, 2nd WPCF/JSWA Joint Technical seminar on Sewage Treatment Technology.
- 4) 萩原耕一(編者)(1985)水質衛生学, 第1章, 光生館,
- 5) 日本下水道協会(1984), 下水道施設設計指針と解説—1984年版, 第4編第7節。
- 6) 金井英治, 横田孝昭(1987)東京都における清流復活のための下水処理水の活用, 下水道協会誌, 24, 279, 20-30.
- 7) 矢野一好, 林 志直, 藪内 清, 田中文章(1985), 下水中のウイルスの消長とその不活性化に関する研究, 用水と廃水, 27, 5, 39-45.
- 8) 金子光美(1987), 下水処理水活用の衛生学的課題, 下水道協会誌, 24, 279, 45-53.
- 9) Shertger, R.h. (1986), Wastewater disinfection-Time for a change?, *JWPCF*, 58, 3, 174-180,
- 10) EPA (1986) Municipal Wastewater Disinfection, Design Manual, EPA-6 25/1-86-021, Ch.2
- 11) WPCF Disinfection Committee (1987) Assessing the need for wastewater disinajction, *JWPCF*, 59, 10, 856-864.
- 12) 大村達夫, 金子光美, 大垣眞一郎(1987)水環境におけるウイルス汚染の実態とその社会的影響, 第15回環境問題シンポジウム講演論文集, 60-65, 土木学会環境問題小委員会.
- 13) 岩下久生(1986)処理水の有効利用, 月刊下水道, 9, 1, 59-65.
- 14) 丸山俊朗, 三浦昭雄, 吉田多摩夫(1987)養殖ノリの生育に及ぼす塩素殺菌都市下水処理水の影響, 日本水産学会誌, 53, 3, 465-472.
- 15) Paller, M.H. et al. (1983) Effects of ammonia and chlorine on fish in streams receiving secondary discharges., *JWPCF*, 55, 8, 1087-1097,
- 16) 丸山俊朗(1987)ノリ養殖を考慮した処理技術の改善, 日本水産学会編, 下水処理水と漁場環境, 水産学シリーズ68, 132-148.
- 17) 平田強, 江指正彦, 原田薫, 田口真, 河村清史, 田口勝久(1987)下水および尿尿処理過程における指標細菌の除去, 水質汚濁研究, 10, 4, 243-250.
- 18) 文献4), 第7章.
- 19) 金子光美(1986)水道水の微生物汚染, 水質汚濁研究, 9, 8, 478-483.
- 20) IAWPRC Study Group on Water Virology (1983) *Water Res.* 17, 121-132.
- 21) Ohgaki, S. and Ketranakul (1986), "Adsorption of coliphage to particulates", *Wat. Sci. Tech.* 18, 267-275.
- 22) 大垣眞一郎, ケトラタナクン(1986), 酸化池内でのコリファージの挙動に及ぼす日射の影響, 衛生工学研究論文集 22, 163-172.
- 23) Ohgaki, S. and A. Ketranakul (1986) Effect of Sunlight on Coliphages in an Oxidation Pond, *Wat. Sci. Tech.* 18, 10, 37-46.
- 24) Omura, T., et al. (1985) Behaviour of Coliphages in Oxidation Ponds, *Wat. Sci. Tech.* 17, 219-227.
- 25) APHA, AWWA, WPCF (1985) Standard Methods 16th Edition, 919C, 1033-1034.
- 26) Furuse, K., et al. (1981) Distribution of Ribonucleic Acid Coliphages in Raw Sewage from Treatment Plants in Japan, *Appl. Env. Micro.* 41, 5, 1139-1143.
- 27) 古瀬浩介他, (1982)遺伝子 RNA の起源と進化, “遺伝子としての RNA.” (岡田吉美・石浜明編) 第1章, 講談社.
- 28) Havelaar, A.H. (1987) Bacteriophages as model organisms in water treatment, *Microbio. Scie.* 4, 12, 362-364.
- 29) Ketranakul, A., M. Izumino and S. Ohgaki (1987) Occurrence of coliphages and RNA-F-specific coliphages in sewages., 環境科学シンポジウム1987講演報告集, IC08, 52.
- 30) Ketranakul, A. and S. Ohgaki (1987) Indigenous coliphages and RNA-F-spchfic coliphages associated to suspended solid in activated sludge process, Discussion Paper series No. 32. Dept. of Urban Eng., Univ. of Tokyo.
- 31) 文献11)Ch.3
- 32) White, G.C. (1986) Handbook of Chlorination, Van Nostrand Reinhold Company, Ch.8, 504-505.
- 33) 神子直之, 大垣眞一郎(1988)紫外線消毒の効率を制限する因子についての実験的検討, 第22回水質汚濁学会講演集.
- 34) Thames Water, UK (1987) Hambleden Pumping Station, Ultraviolet and Electrochlorination Disinfection.
- 35) 吉川弘之(1988)先端技術と人間, 世界, 509号, 1988年1月号, 19-46, 岩波書店.