

## 2021年度厚生労働科学研究 分担研究報告書

### 水道における水質リスク評価および管理に関する総合研究 —消毒副生成物分科会—

研究代表者	松井佳彦	北海道大学大学院工学研究院
研究分担者	伊藤禎彦	京都大学大学院工学研究科
	越後信哉	京都大学大学院工学研究科
	小坂浩司	国立保健医療科学院生活環境研究部
研究協力者	小牧裕佳子	静岡県立大学
	今井美江	東京都水道局
	柴 雅彦	茨城県企業局
	渡邊みどり	北千葉広域水道企業団
	眞鍋 晋	川崎市上下水道局
	船岡英彰	京都市上下水道局
	今中壮一	大阪市水道局
	竹田泰治	大阪広域水道企業団
	片木孝徳	阪神水道企業団
	中谷 悠	奈良県水道局
	愛甲俊郎	沖縄県企業局

#### 研究要旨

ハロアセトアミド (HAcAms) について浄水では、水温および塩素注入率が高い夏季に生成が増す傾向であった。また、これは総 THMs(浄水)と同様の生成傾向であった。活性炭による処理について、毎年 20%の交換補充を行うことにより、10年にわたり HAcAms の一定の除去性を維持する効果がある。ハロベンゾキノロン類 (2,6-dichloro-quinone-4-chloroimide (DCQC), 2,6-dichloro-1,4-benzoquinone (DCBQ), p-quinone-4-chloroimide (QC)) について、細胞毒性の強さは、 $QC \gg DCQC > DCBQ$ であることを示した。塩素酸濃度上昇の原因は、次亜塩素酸ナトリウムの貯蔵期間や貯蔵温度によるものが多かったが、その他にも次亜塩素酸ナトリウム貯留槽への外気流入の影響を受けた事例を確認した。夏期・冬期ともにオゾン注入率が高くなると、オゾン処理水でのシアン化合物が増加する傾向があるが、GACにより除去された。珪藻類オーラコセイラは、塩素添加により樹脂臭の原因物質 1-hexen-3-oneを放出する。また、珪藻類スケルトネマ・サブサルサムでも塩素処理で 1-hexen-3-one が放出または生成されることを示した。GAC 処理水中の蛍光強度は、GAC 吸着池の通水倍率に比例して増加し、水温が高くなるほどその増加割合は大きいこと、蛍光強度は総トリハロメタン生成能との相関が高く、前駆物質の存在量を把握する指標として有用であることを示した。消毒副生成物の全国調査では、塩素化体の消毒副生成物濃度には関連性があり、また、消毒副生成物間の Bromine Incorporation Factor (BIF)の関連性が認められた。さらに、原水の臭化物イオン濃度が高い場合に消毒副生成物の BIF も高い傾向にあった。目標値案が示されたブロモクロロ酢酸、プロモジクロロ酢酸の最高値は、それぞれ目標値案の 40%超、50%超であった。未規制消毒副生成物の濃度と総トリハロメタン等基準項目の「緩い関係性」について、国内水道事業者の測定データを用いて解析を行った。その結果、検出例がある多くの物質について関係性があるケースが認められ、現行の基準項目がある程度未規制副生成物の目安 (マーカー) となる可能性が示された。

#### A. 研究目的

水質基準の改正に際して重要と考えられる事項として、ハロアセトアミド類 (HAcAms)、ハロベンゾキノロン類 (HBQs)、塩素酸、塩化シアン、臭気物質、ハロ酢酸、トリハロメタン等を対象に、生成実態・特性、分析技術、低減策について調査を行った。あわせて、消毒副生成物に関する全国調査を行い、物質間の関係性について検討した。

さらに、現行の基準項目が未規制の消毒副生成物のマーカーとして利用できるか検討を行った。

以下に研究課題ごとの具体的な研究の目的・概要を示す。

#### 1. 未規制消毒副生成物の挙動と毒性評価

1.1 ハロアセトアミド類に関する調査 (阪神水道企業団)

未規制消毒副生成物であるハロアセトアミドについて、浄水処理工程における実態、浄水における他水質項目との関係性、浄水処理工程における生成能の挙動及び活性炭における処理性に関して調査を行った。

## 1.2 ハロベンゾキノロン (静岡県立大学)

ハロベンゾキノロン類として 2,6-dichloro-quinone-4-chloroimide (DCQC), 2,6-dichloro-1,4-benzoquinone (DCBQ), p-quinone-4-chloroimide (QC) の細胞毒性を評価した。

## 2. 塩素酸

### 2.1 山間部における塩素酸の検出状況 (京都市上下水道局)

山間部の小規模施設における塩素酸が検出される要因について検討を行った。

### 2.2 塩素酸の検出実態調査 (大阪広域水道企業団)

2016年にWHOにおいて、塩素酸の1日許容摂取量(TDI)が $30\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{日})$ から約 $11\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{日})$ に見直された。このTDIから水道水における指針値を試算すると、 $0.2\text{mg}/\text{L}$ となる(現行の水質基準は $0.6\text{mg}/\text{L}$ )。そこで、大阪広域水道企業団における塩素酸の過去の検出状況について、統合済みの中小規模の水道事業も含めてデータを整理し、次亜塩素酸ナトリウムの管理状況と塩素酸濃度との関連を調査した。

## 3. シアン化合物 (茨城県企業局)

これまでに霞ヶ浦浄水場に設置した実証実験プラントのオゾン処理水から比較的高濃度の塩化シアンが検出される事例が確認された。そのため、霞ヶ浦浄水場実証実験プラントに加えて、処理工程の異なる利根川浄水場について、年間を通してのシアン化合物の生成能及び生成量を把握するとともに、塩素処理やオゾン処理を行うことにより、シアン化合物が生成しやすい条件を調査した。

## 4. 臭気に関連する消毒副生成物 (川崎市上下水道局)

珪藻類オーラコセイラを塩素処理した際に生じる臭気物質と考えられる 1-hexen-3-one について生成特性や処理性の評価を行った。

## 5. トリハロメタン・ハロ酢酸

### 5.1 浄水処理における GAC 吸着池での消毒副生成物生成能の除去性調査 (大阪市水道局)

浄水処理トータルシステムとしての高度浄水処理機能の健全性を確保する観点から、GAC 処理水中の蛍光強度の経年変化を測定することで、消毒副生成物生成能の除去性の把握を試みた。

### 5.2 蛍光光度計を用いた消毒副生成物生成能の予測 (沖縄県企業局)

蛍光強度を利用した THM 生成能および HAAs 生成能の予測手法について検討を行った。

### 5.3 高度浄水処理工程における THM 生成能の変化と有機物指標項目との関係 (北千葉広域水道企業団)

THM 生成の低減化と管理手法の構築を目的とし、各処理工程における THM 生成能の変化と THM 前駆物質の代替指標として蛍光強度、TOC、E260 (紫外線吸光度) をとりあげ、その除去性と THM 生成能との関連性を調査した。

### 5.4 山間部浄水施設におけるハロ酢酸低減化のための対応状況 (東京都水道局)

山間部小規模浄水所におけるハロ酢酸低減化対応について、事例の整理を行った。

### 5.5 奈良県における消毒副生成物の実態調査 (奈良県水道局)

昨年度に引き続き浄水場からの距離やラフィド藻の発生状況と消毒副生成物濃度の関係に着目して実態調査を行った。

### 5.6 豪雨時の消毒副生成物の生成に関する調査 (神奈川県企業庁)

ハロ酢酸類の生成原因の一つとして台風等豪雨があげられ、原水の高濁度が問題となっている。しかし、消毒副生成物の挙動については報告がほとんどないため、台風等豪雨時のハロ酢酸前駆物質やハロ酢酸の挙動について評価を行った。

## 6. 消毒副生成物の全国的な生成実態

### 6.1 全国の浄水場における消毒副生成物の網羅的調査 (国立保健医療科学院)

現在、水道水中からは多くのグループの消毒副生成物の存在が報告され、ハロゲン化消毒副生成物については、さらに塩素化体、臭素化体等によって分類されている。このように多種多様な消毒副生成物が存在する状況において、各消毒副生成物間の関連性等の評価は、特定の地域では検討事例はあるが、海外と比べて、特に多地点で多種間の情報は少ない。また、要検討項目のハロ酢酸のうち、ブロモクロロ酢酸、ブロモジクロロ酢酸の目標値案 (いずれも  $10\mu\text{g}/\text{L}$ ) が出され、最新の存在実態の把握が必要である。

本研究では、4 グループの消毒副生成物の塩素化体、臭素化体について全国調査し、グループ間の関連性、原水中の臭化物イオンとの関連性について調査した。さらに、ブロモクロロ酢酸、ブロモジクロロ酢酸を含むハロ酢酸については、消毒副生成物分科会に参加している水道事業者

の調査結果も合わせてとりまとめた。

## 6.2 国内の水道事業体のデータにおける基準項目と未規制消毒副生成物の関係性の調査（京都大学）

消毒副生成物には多種多様なものが知られており、未規制のものも多い。今後毒性評価が進みより多くの物質が基準となる可能性もあるが、対象物質数が増えた場合、すべての物質を測定することは、実務上困難となることも想定される。このような状況を踏まえ、本調査ではトリハロメタン等の現行の基準項目が、これら未規制項目のマーカーとして利用できるか国内水道事業体のデータに基づき検討した。この際に、マーカーと未規制副生成物の相関だけでなく、例えばマーカーの何%以下に収まるという緩い関係も有用であると判断して解析を行った。

### B. 研究方法

#### 1. 未規制消毒副生成物の挙動と毒性評価

##### 1.1 ハロアセトアミド類に関する調査

ハロアセトアミド (HAcAms) のうち、クロロアセトアミド(CAcAm), ブロモアセトアミド(BAcAm), ジクロロアセトアミド(DCAcAm), ブロモクロロアセトアミド(BCAcAm), ジブロモアセトアミド(DBAcAm), トリクロロアセトアミド(TCAcAm)を対象とした。処理フロー(原水, 沈澱処理水, オゾン処理水, 活性炭処理水, ろ過水, 浄水)の調査を行うとともに、浄水においてはHAcAmsの生成状況を整理するため、水温(原水), 塩素注入率(殺藻用, 中間塩素及び後塩素の合計), 総トリハロメタン(総 THMs・浄水), 全有機炭素(TOC・原水)及び電気伝導率(原水)との関係を調査した。また、浄水処理工程におけるHAcAmsの生成能の実態調査を行うため、原水, 沈澱処理水, オゾン処理水及び活性炭処理水について調査した。さらに、これまでの実態調査から、オゾン処理水から活性炭処理水のHAcAmsの処理性(除去率)は100%近いことが多かったが、低下することもみられた。この原因を調査するためバッチ実験を行った。具体的には、活性炭(新炭及び経年炭)を用いて、水温の影響や、活性炭の生物処理性の有無の影響について処理性の調査を行った。分析にはGC/MSを用いた。

##### 1.2 ハロベンゾキノン

細胞毒性評価はPlewaらの方法(2009)を参考にした。Chinese hamster ovary (CHO) 細胞 K-1 株は10%のウシ胎児血清 (Biosera) および1%ペニシリン・ストレプトマイシン溶液を含む Ham's F12 培地 (Wako) にて5% CO<sub>2</sub>, 37°C の環境で維持した。実験作用時には細胞懸濁液をカウントし、3,000 cells/100 µL/ウェルとなるように96 ウェルプレート(Corning #353072) に添加した。DCQC (TCI

#T0397), DCBQ (TCI #D0344), QC (TCI #Q0019) をジメチルスルホキシド (DMSO) に溶解し、250 mM ストックを作製した。培養培地にて希釈し、100 µL ずつ96 ウェルプレートに添加した。96 ウェルプレートには細胞液のみのコントロールウェル, 培地のみをブランクウェル, 希釈系列を配置した。試験物質の揮発とウェル間のクロソコタミネーションを防ぐため, AlumaSeal® 96 フィルム (Merck #Z721549) でウェルをカバーした後, ロッカー式シェーカーで96 ウェルプレートを振とうし, 細胞培養液と試験物質希釈液の混合及び細胞播種が均一となるようにした。96 ウェルプレートを5% CO<sub>2</sub>, 37°C の環境で72時間インキュベートした。

72時間のインキュベート後, 上清をアスピレートし除去した。メタノールを50 µL ずつ各ウェルに加え, 10分間静置し細胞固定を行った。メタノールを除去し, 1%クリスタルバイオレット溶液 (1 g クリスタルバイオレット (Cica #07470-30) を50 mL dH<sub>2</sub>O + 50 mL メタノールで溶解) を50 µL ずつ各ウェルに加え, 10分間静置した。クリスタルバイオレットは流水で洗い流し, DMSO : メタノールの3:1溶液を50 µL ずつ各ウェルに加え, 10分間静置した後, 595 nm の吸光度をマイクロプレートリーダーで測定した。得られた吸光度の値からブランク値を引き, コントロールウェルの吸光度に対する割合を計算した。Sigmaplot 11.0 で近似曲線を求め, 50%阻害値 (IC<sub>50</sub>) を計算した。

### 2. 塩素酸

#### 2.1 山間部における塩素酸の検出状況

給水から塩素酸が検出される浄水場と検出されない浄水場について(定量下限値: 0.06 mg/L), 共通して遠隔監視による無人施設である, 市街地の浄水場と比較して給水量が少なく薬品等の使用量が少ない, 管理拠点である市街地からアクセスが悪い等の条件は同じであることから, 塩素酸の検出の有無の要因となりうるその他の具体的な差異について, 比較を行った。

#### 2.2 塩素酸の検出実態調査

用水供給事業では, 村野浄水場系の定期検査の結果を調査対象とした。水道事業では, 統合済みの13水道事業のうち, 大阪広域水道企業団市町村水道水質共同検査及び大阪広域水道企業団河南水質管理ステーションにより検査を行った結果を対象とした。対象期間は, 用水供給事業, 水道事業ともに過去10年間(平成23~令和2年度)とした。また, 塩素酸濃度の上昇が見られた事例について, それぞれ次亜塩素酸ナトリウムの管理状況を調査した。

### 3. シアン化合物

霞ヶ浦浄水場実証実験プラント及び利根川浄水場の処理過程毎のシアン化合物の生成量及び有機物等の測定を行った。霞ヶ浦浄水場実証実験プラントの処理フローは、原水→生物処理\*→凝集沈殿→砂ろ過→オゾン→粒状活性炭\*→浄水 (\*:次亜塩素酸ナトリウム添加)、利根川浄水場の処理フローは、原水→\*凝集沈殿→オゾン→生物活性炭→砂ろ過\*→浄水 (\*:次亜塩素酸ナトリウム添加) (注:1/2は従来处理であるため浄水はオゾン処理と従来处理のブレンド)である。

また、実証実験プラントでオゾン注入率を段階的(0.7, 1.5, 3.0 mg/L)に変化させてシアン化合物の生成量及び有機物等の測定を行った。

#### 4. 臭気に関連する消毒副生成物

原水中の珪藻類(オーラコセイラ等)と臭気物質(1-hexen-3-one)の関係性を明らかにするとともに、塩素添加試験や活性炭吸着試験の調査によって、適切な浄水処理方法の確立に向けて検討を行った。両者の関係性については、原水濃度の比較とともに、オーラコセイラを単離培養した試料を用いた調査を行った。原水から1群体のオーラコセイラを単離し、培養液に入れ、一定温度・明暗条件で1ヶ月間かけて7,000群体/mLまで培養した。培養液を除き、孔径1 µmのフィルターでろ過した原水を用いて5段階に希釈した試料を作成した。各試料水に塩素注入率4 mg Cl<sub>2</sub>/Lとなるように次亜塩素酸ナトリウムを添加、2時間振とう・静置後、孔径0.45 µmのPVDFフィルターでろ過し、測定した。

原水への塩素添加実験では、オーラコセイラ300群体/mLの原水にそれぞれ1, 2, 3, 4 mgCl/Lとなるよう塩素を添加し、2時間振とう・静置後、孔径0.45 µmのPVDFフィルターでろ過し、測定した。

また、1-hexen-3-oneの活性炭除去性を確認するため、50n g/Lの試料に、各々1, 3, 5, 10 mg/Lとなるよう活性炭を添加するとともに、接触時間も5分, 15分, 30分と経過させた。

#### 5. トリハロメタン・ハロ酢酸

##### 5.1 浄水処理におけるGAC吸着池での消毒副生成物生成能の除去性調査

水温が異なる時期(水温:7°C, 18°C, 26°C)に本市柴島浄水場のGAC吸着池(下系12池, 上系14池)から採水し、蛍光強度(Ex330 nm/Em430 nm)、色度、総トリハロメタン生成能の測定を行い、通水倍率との関係を調べた。

なお、GAC吸着池の通水倍率は2,600~188,900となっており、購入仕様を満たす複数の製造メーカーの製品が搬入されており、原料は全て石炭系となっている。

##### 5.2 蛍光光度計を用いた消毒副生成物生成能の予

測

蛍光強度測定に基づいたPARAFAC成分抽出を行い、THM生成能およびHAAs生成能を予測する簡便なモデルの作成を試みた。

##### 5.3 高度浄水処理工程におけるTHM生成能の変化と有機物指標項目との関係

令和3年6~10月にかけて月1~2回程度の頻度で凝集沈殿処理水、オゾン処理水、BAC処理水の調査を行った。BAC処理水については、粒状活性炭(石炭系)の使用年数が処理に与える影響を調査するため、通水開始から約1年経過した池と約3年経過した池を選定した。令和3年8月時点での通水倍率は、通水約1年の池は27,663、通水約3年の池は101,201であった。なお、調査期間中に前塩素処理の実施はなかった。

有機物指標項目として、蛍光強度、TOC、E260を測定し、浄水処理工程における除去性とTHM生成能との関連性を調査した。

蛍光強度の測定は、フミン物質の指標として測定している波長(Ex320/Em430)で行った。調査期間中の沈殿処理水の水質は相対蛍光強度0.22~0.33 (50 µg/L硫酸キニーネ/0.1N硫酸水溶液基準)、TOC0.8~1.1 mg/L、E260(Abs/5 cm)0.081~0.109であった。

##### 5.4 山間部浄水施設におけるハロ酢酸低減化のための対応状況

山間部にある表流水系小規模浄水所では、通常時の原水水質は良好であるものの、降雨時に原水のフミン質濃度が上昇し、浄水のハロ酢酸類濃度が高くなるという課題がある。これに対し、ハロ酢酸類の生成抑制のため、降雨時には原水濁度、色度等によるピークカット(取水停止)等で対応を行っており、このような事例を収集・整理した。

##### 5.5 奈良県における消毒副生成物の実態調査

浄水、受水地点、給水末端でのトリハロメタンやハロ酢酸のプロファイルを比較した。また、ラフィド藻の発生状況と消毒副生成物生成能の関係について、トリクロロ酢酸/ジクロロ酢酸比による評価を行った。

##### 5.6 豪雨時の消毒副生成物の生成に関する調査(神奈川県企業庁)

対象試料としては、寒川浄水場の原水及び浄水工程水を用いた。測定項目は、対象物質としてハロ酢酸9種、ハロ酢酸の生成量に影響を及ぼすと予測される関連項目としてTOC、UV(260 nm)、臭化物イオン、pH、及びハロ酢酸生成能とした。

豪雨時の寒川浄水場の浄水工程において、濁度の上昇初期、最大時付近、下がり始め、収束時等原水の濁度変化に伴い試料を採取し測定を行

った。具体的には、令和3年台風16号が接近し、風雨が強まった10月1日に原水の採水を行った。濁度が上昇初期(①)、最大時付近(②)、下がり始め(③)と思われる時間に3回採水を行い、それぞれの試料に関して、測定を行った。また、2021年12月1日低気圧や前線の通過に伴い激しい雨が降ったため、原水の採水(原水④~⑧)を実施し、同様の測定を行った。

更に、採水を行った高濁度時及び平常時の工程水に関しても採水を行い、関連項目の測定を行った。

## 6. 消毒副生成物の全国的な生成実態

### 6.1 全国の浄水場における消毒副生成物の網羅的調査

#### 6.1.1 網羅的調査の結果

4グループ20種の消毒副生成物と臭化物イオンを対象とした(図1)。2021年10月と2022年1月、全国21浄水場を対象に、給水栓水の消毒副生成物の調査を行った(そのうち1浄水場はハロ酢酸のみ調査)。残留塩素はアスコルビン酸ナトリウムで除去した。

トリハロメタンはPT-GC/MSで、ハロ酢酸はLC-MS/MSで、ハロアセトニトリルとハロアルデヒドは液液抽出-GCMSで、臭化物イオンはLC-MS/MSで測定した。定量下限値は、それぞれ1, 1, 0.2, 0.2, 2 µg/Lであった。

#### 6.1.2 分科会参加事業体によるハロ酢酸の実態調査

消毒副生成物分科会に参加している10事業体において、10種のハロ酢酸の実態調査を行った。定量下限値は、1 µg/Lの場合が多かったが、一部はそれより高い濃度であった。

### 6.2 国内の水道事業体のデータにおける基準項目と未規制消毒副生成物の関係性の調査

今回の調査では、国内の11の事業体(注:以降ではA~Kとコード化している)から情報提供を得た。これらの事業体に、過去(原則2004年以降)に測定した浄水または給水栓水中の未規制副生成物94種および関連基準項目の濃度についてデータの提供を依頼した。対象とした未規制消毒副生成物94物質のうち全ての事業体で未測定ものは55物質、すべての事業体で定量下限値未満のものは6物質、検出例があるものは33物質(1回のみ等まれな場合も含む)であった。

解析は、基本的には収集したデータから基準項目と未規制消毒副生成物の濃度を比較する散布図をもとに行った。その際、定量下限値未満のデータは定量下限値の半分の値として扱った。また、基準項目のうち、総トリハロメタン、総トリハロメタンの中で占める割合が最大であるクロロホルム、ハロ酢酸の中で占める割合が多い

ジクロロ酢酸、トリクロロ酢酸の計4種類を比較対象とした。逆にいえば、ブロモジクロロメタン、ジブロモクロロメタン、ブロモホルム、クロロ酢酸、ホルムアルデヒドは除外した。

判断基準としては、以下の3つの判断基準のうちどれか1つを満たせば、基準項目と未規制副生成物の間に関係があるとして解析を進めた。基準1は相関係数が0.7以上であること、基準2は基準項目が高いグループの方が、対象とする未規制消毒副生成物の濃度も高いと統計的に示された場合(箱ひげ図の分布に差がある場合(具体的にはU検定で $p < 0.05$ ))、基準3は対象未規制物質最大値であるときに基準項目も最大値かつその対象未規制物質の最大値が基準項目濃度の低い領域ではすべてそれ未満であること、である。

なお、解析にあたっては、検出回数が0-2回のは除外した、さらにU検定については、10セット(基準項目と対象未規制副生成物のペア)以上データがない場合には、行わなかった。

## C. 調査結果およびD. 考察

### 1. 未規制消毒副生成物の挙動と毒性評価

#### 1.1 ハロアセトアミド類に関する調査

まず実態調査の結果について述べる。原水ではわずかにDcAcAmが検出し、沈澱処理水は、殺藻用の塩素注入によりDcAcAm, BCACAm, DBACAmの順に生成が認められた。オゾン処理では増減せず、活性炭処理で低減した。ろ過水では中間塩素処理及び後塩素注入により、DBACAm, BCACAm, DCACAmの順にジハロアセトアミドの生成が認められた。浄水は、塩素との接触時間が長いため、ろ過水に比べ各成分が増加した。浄水の総HAcAmsは1.0~4.5 µg/Lであり、夏季に高く冬季に低い検出傾向であった。

他の水質項目との関係については、水温、塩素注入率及び総THMsと相関が強く、TOCとも相関があった。一方、電気伝導率及びアンモニア態窒素とは相関が認められなかった。以上から、水温や塩素注入率が高い夏季に、総THMsと同様に生成が増すと認められた。

次に生成能(FP)について述べる。原水ではDCACAm, BCACAm, TCACAm, DBACAmの順で生成し、DCACAm及びTCACAmは処理工程が進むにつれ低減傾向であった。一方、BCACAmは原水からオゾン処理水にかけて低減せず、活性炭処理で低減した。また、DBACAmは原水からオゾン処理水にかけて増加し、活性炭処理での増加は認められなかった。臭素化体の減少しにくい理由は速度論的なものと考えられた。

HAcAmsの活性炭における処理性は、新炭や経年炭の違い、温度、活性炭の生物処理性の有無で結果は異なった。新炭では温度や活性炭の生物処理性の有無によらず、いずれの成分も物理吸

着により 100%近く除去された。一方、経年炭では成分ごとに処理性が異なっており、BCAcAm, TCACAm 及び DBAcAm はいずれも物理吸着で 100%近く除去された。

しかし、CAcAm, BAcAm 及び DCACAm は、経年炭（3年経過）では、BCAcAm, TCACAm 及び DBAcAm に比べて除去率が低下し約 60～90%に留まった。ただし生物処理効果が一定程度寄与するとわかった。

経年炭経年炭（10年経過ただし3年目以降毎年20%を入れ替え）では、CAcAm, BAcAm 及び DCACAm は、同様に BCACAm, TCACAm 及び DBAcAm に比べ除去率が低下し約 70～90%に留まった。また、温度は 10°C の場合、30°C に比べやや除去率が低下した。ただし生物処理効果はほとんど見られず物理吸着性による効果が大きいと分かった。

両者の経年炭は、実施設における HAcAms 類の処理性が同程度であったものの、仮に毒物が流入した場合、生物処理性が阻害される恐れがある。運用としては、阪神水道企業団では毎年活性炭接触槽内の 20%量を交換補充する運用を行っており、新炭の交換補充を繰り返すことが有効であると考えられた。

## 1.2 ハロベンゾキノ

CHO 細胞を用いて測定した細胞毒性について、DCQC, DCBQ, QC の IC50 は、それぞれ 19.7  $\mu\text{M}$ , 22.6  $\mu\text{M}$ , 3.51  $\mu\text{M}$  であり、細胞毒性の強さは QC >> DCQC > DCBQ の順であった。Prochazka ら (2015) は CHO AS52 株を用いて同様の方法で DCBQ の細胞毒性を測定しており、IC50 は 10.9  $\mu\text{M}$  と報告した。Du ら (2013) はヒト由来膀胱癌細胞株 T24 に DCBQ を 24 時間作用させ MTS アッセイにて得られた IC50 を 94.5  $\mu\text{M}$ 、ニュートラルレッドアッセイにて得られた IC50 を 11.4  $\mu\text{M}$  と報告した。報告された IC50 は手法や細胞の違いにより差はあるが、おおむね数十  $\mu\text{M}$  のオーダーであり、本研究においても同程度の感度での結果が得られたと考えられる。

Du ら (2013) は DCBQ と他 3 種類のハロベンゾキノ類を飲料水中から検出し、これらの細胞毒性を求めたが、4 種類のハロベンゾキノ類の中で DCBQ が最も細胞毒性が高いことを報告した。本研究で毒性を評価した 3 種類のハロベンゾキノ類のうち最も細胞毒性が高かったのは QC である。QC は p-芳香族アミン類の塩素処理により生成する物質であり、塩素反応性が低いため、浄水中での存在が予想され、今後より注視する必要がある。

## 2. 塩素酸

### 2.1 山間部における塩素酸検出状況

まず、次亜タンク設置場所の空調の有無、次亜

の希釈率及びタンク内の次亜の入替わり頻度の、塩素酸の検出の有無への直接の影響を検討した結果、これらの因子はとはいえないことがわかった。また、タンク内次亜の人為的な入換えは、塩素酸の低減に一定の効果がみられるが、効果は一時的であり、一旦塩素酸が検出された浄水場からは持続して検出される状況が見受けられた。一方で、塩素酸が検出されている浄水場において、次亜タンク設置場所に空調を導入した場合、やや塩素酸の検出濃度が低減する傾向にあることがわかった。

次亜の人為的な入換え後も塩素酸が検出されやすい要因として、次亜の入れ替えが全量行っているわけではないことが考えられる。次亜タンクに引抜き弁が無く、引抜き後も一定量が残存し、残存する次亜中の不純物が、その後の塩素酸生成の原因となっていると考えられる。この残存不純物の解消のためには、次亜の入換え頻度を増やす他、タンクの洗浄等を実施することが効果的と考えられるが、山間部の浄水場には下水道等が供用されていない場所が多く、排水を全て持ち帰って処分する必要があるため、これらの作業を実施するハードルが高い状況にあることが明らかとなった。

### 2.2 塩素酸の検出実態調査

過去 10 年間における浄水場出口の塩素酸の検出濃度を取りまとめた結果、用水供給事業では、浄水場出口は過去 10 年間のデータすべてで 0.10 mg/L 以下であった。一方、水道事業では、独自に保有する浄水場の塩素酸が用水供給事業の浄水場と同程度のところもあれば、0.20 mg/L を超えて検出されるところもあり、水道事業によりばらつきが見られた。

過去 10 年間における末端地点の塩素酸を取りまとめた結果、用水供給事業の末端地点では、過去 10 年間のほぼすべてのデータが 0.10 mg/L 以下であった。一方、水道事業の末端給水栓について、用水供給から受水している系統では、追加塩素により濃度が高い領域が増える傾向が見られたが、概ね 0.15 mg/L 以下であった。独自に浄水場を保有し、かつ、その浄水場出口の塩素酸が比較的高い水道事業では、主に自己水系の末端給水栓で 0.20 mg/L を超過する事例が見られた。

あわせて、比較的塩素酸濃度が高くなった事例について情報を収集した。塩素酸濃度上昇の原因は、次亜塩素酸ナトリウムの貯蔵期間や貯蔵温度によるものが多かったが、その他にも次亜塩素酸ナトリウム貯槽への外気流入の影響を受けた事例を確認した。

### 3. シアン化合物

まず、実態調査について述べる。オゾン処理では季節変動はなく霞ヶ浦浄水場実証実験プラン

ト、利根川浄水場ともにシアン化合物が生成された。

原水の TOC は霞ヶ浦浄水場実証実験プラントでは 3.0~3.4 mg/L、利根川浄水場では 1.2~2.4 mg/L であり、霞ヶ浦浄水場実証実験プラントでは TOC が恒常的に高くシアン化合物の生成もされていることから有機物とシアン化合物の関係性があることが示唆された。

霞ヶ浦浄水場実証実験プラントにおいては砂ろ過で塩化シアンが生成され、その後のオゾン処理でもシアン化合物が最大で 0.0043 mg/L 検出されているが、その後の粒状活性炭処理では不検出であり、活性炭処理を行うことで除去されていると考えられる。利根川浄水場においてもオゾン処理でシアン化合物が生成されているがその後の生物活性炭処理では不検出であった。

霞ヶ浦浄水場実験プラントにおけるオゾン注入率とシアン化合物濃度の関係を検討した結果、オゾン注入率が高くなると、オゾン処理水でのシアン化合物が増加する傾向であった。最大濃度は基準値の 8 割程度（合算値 0.0079 mg/L）であった。一部の条件を除いてオゾン単独とオゾン/AOP の違いによるシアン化合物生成量に大きな差はなく、上述のオゾン処理による生成量調査と同様に GAC 以降の処理においては、シアン化合物は不検出であった。

#### 4. 臭気に関連する消毒副生成物

原水オーラコセイラ濃度と 1-hexen-3-one 濃度の間には相関がみられオーラコセイラから 1-hexen-3-one が生成されていると推測された。

また、単離培養後のオーラコセイラを塩素処理した場合の 1-hexen-3-one と群体数には高い相関性があり、また、次亜無添加の試料からは 1-hexen-3-one が検出されていないことから、臭気物質がオーラコセイラ由来で、塩素添加により細胞が破壊されることで検出されると推察した。

原水への塩素添加試験では、塩素注入率を上げると、破壊される群体数が増加する一方、1-hexen-3-one は減少した。ニオイ嗅ぎ装置を用いても、2 mgCl<sub>2</sub>/L までは樹脂臭を感じるものの、4 mgCl<sub>2</sub>/L 以上では感じられなかった。過剰の塩素注入により 1-hexen-3-one そのものが分解、樹脂臭が減少するものと推察した。

原水への活性炭注入の効果については、1-hexen-3-one の除去率は、活性炭注入率、接触時間に依存した。長沢浄水場では、従来、接触時間が 5 分程度であったものが、活性炭接触池を設けたことで 30 分に増加しており、活性炭注入はより効果的であることがわかった。

なお、令和 3 年 4 月中旬に発生した臭気障害について、珪藻類スケルトネマ・サブサルサムからも塩素添加により 1-hexen-3-one が生成することを別途確認した。

#### 5. トリハロメタン・ハロ酢酸

##### 5.1 浄水処理における GAC 吸着池での消毒副生成物生成能の除去性調査

まず、通水倍率と蛍光強度（Ex330 nm/Em430 nm）について検討した。蛍光強度は通水倍率に比例して増加しており、水温が高くなるほどその増加割合は大きくなることがわかった。また、通水倍率が大きい GAC 吸着池では、流入水よりも流出水の方が蛍光強度の値が高くなる傾向が確認されたことから、通水倍率と GAC 吸着池における蛍光強度除去率の関係を調べることにした。なお、流入水の蛍光強度に対する GAC 吸着池での蛍光強度除去量の割合を除去率と定義している。

通水倍率が小さい新炭状態であれば、除去率 90%以上と高い値を示したが、通水倍率の増加に伴い除去率は徐々に低下し、通水倍率 80,000 程度を超過すると、流入水よりも流出水の方が値は高くなり、除去率が負の値を示すようになった。また、水温が高いほど除去率の低下割合は大きくなっており、除去率が負となる通水倍率の値は小さくなった。大阪市では、各系統の GAC 吸着池が 5 年で全て入れ替わるよう、毎年数池ずつ更新する 5 年分散更新を行っている。各池の処理水が混合された集合水の処理水水質から GAC 吸着池の処理性能を求めると、単池換算で 3 年使用相当であるが、3 年使用相当の通水倍率はおおよそ 90,000 程度であることから、新炭から更新直前までの GAC が混在している GAC 吸着池においては、蛍光強度発現物質は除去されていると考えられた。

また、蛍光強度が 0~80 の範囲においては、総トリハロメタン生成能との相関関係が高くなっており、蛍光強度を把握することで浄水中の総トリハロメタン濃度を予測することができることが確かめられた。

次に色度について述べる。水温 7℃時においては、通水倍率にかかわらず色度はほぼ 0 度であったが、通水倍率が大きくなるほど、また水温が高くなるほど色度は高い値を示し、通水倍率が一定値を超過すると流入水よりも流出水の方が高くなる傾向も認められた。

これらの結果が示すように、通水倍率と蛍光強度及び色度の関係が類似していること、蛍光強度の発現物質がフルボ酸であることから、GAC 処理水の色度は GAC 処理水中に漏出したフルボ酸に起因していると推測された。

##### 5.2 蛍光光度計を用いた消毒副生成物生成能の予測

昨年度、石川浄水場 1 系原水の水源でもある久志浄水場原水における各蛍光成分と THMFP の関係性を確認した結果、2 成分で関係性が確



認められたため、予測はこれらを使用して行った（それぞれ成分1、成分2）。しかし、1成分での予測だと利便性が高まるとの意見があったことから、今年度は1成分で予測を行った。昨年度の結果において成分1がTHMFPとの関係性が一番良好であり、成分1には2つの励起波長が存在するため、第1ピーク(250/450)と第2ピーク(350/450)の関係性を確認した。その結果、成分1の第2ピーク(350/450)が良好であることが確認できたため、今年度は成分1の第2ピーク(350/450)で予測を行った。

このピークを導電率を使用し重回帰分析を用いて久志原水(石川浄水場1系原水)についてTHM生成能の予測モデルを作成した。調査期間は2017年7月～2020年8月、調査点数は37点であった。その結果、相関係数が0.83で予測式は良好であった。よって、昨年度と同様に久志原水の蛍光強度(350/450)から石川浄水場1系原水のTHM生成を予測することは可能であることが示された。石川浄水場2系原水についても、同様の手法で予測モデルを作成できた。また、ハロ酢酸についても同様に予測モデルを作成することができた。

### 5.3 高度浄水処理工程におけるTHM生成能の変化と有機物指標項目との関係

高度浄水処理導入前後における浄水中の各トリハロメタン濃度と総トリハロメタン濃度に占める割合をそれぞれ比較すると、従来処理では、クロロホルム及びブromoジクロロメタンの生成量が多く、総トリハロメタンに対する割合はそれぞれ36%、37%を占めていた。高度浄水処理では、クロロホルム及びブromoジクロロメタンの生成量が減少し、総トリハロメタンに占める割合もそれぞれ9%、27%へ低下していた。ジブromoクロロメタンの生成量は高度処理によりわずかに減少したものの、総トリハロメタンに対する割合は22%から45%へ増加した。ブromoホルムは生成量に差が見られなかったが、高度浄水導入後は検出回数が多く、総トリハロメタンに占める割合は大きくなっている。

次に各処理工程水の蛍光強度等のトレンドを検討した。蛍光強度はオゾン処理により大きく低下し、除去率は80%であったが、後段のBAC処理では、流入水に対し10%増加していた。

また、各処理工程におけるトリハロメタン生成能の変は、流入水に対する除去率はオゾン処理で36%、後段のBAC処理で25%であった。凝集沈澱処理水に対する最終的な除去率は52%であった。

オゾン処理では、E260、蛍光強度が減少したことから、有機物の質的変換とそれによるTHM前駆物質の減少が推察された。BAC処理では、TOCとE260が減少したことから、オゾン処理によ

て増加した生物易分解性有機物のBAC上での微生物による分解と粒状活性炭の吸着効果によるTHM前駆物質の減少と考えられた。

通水年数の異なるBAC池の処理性を評価した。通水時間の延長とともに、蛍光強度は顕著に増加し、流出水が流入水を上回っていることから、BACからの漏出が疑われた。オゾン処理水に対する各BAC池の除去率は、TOCは通水1年が30%、通水3年が25%であり、E260はそれぞれ26%及び11%であった。BACの長期使用による吸着能の低下やクロマト効果による蛍光強度発現成分の漏出が確認されたが、両池のトリハロメタン生成能に大きな差は見られなかった。

E260と蛍光強度はTHM生成能との関連性が報告されているが、前駆物質が減少したBAC処理後ではその相関関係は弱くなる傾向にあることから、E260、蛍光強度(Ex320/Em430)として現れないTHM前駆物質の存在とそれらをBACで除去する効果が働いたため、THM生成能に差が生じなかったと考えられた。

### 5.4 山間部浄水施設におけるハロ酢酸低減化のための対応状況

東京都水道局の山間部小規模浄水所では主に膜ろ過による浄水処理法が採用されている。降雨時には原水濁度上昇に伴う膜への負荷等の増大や、トリクロロ酢酸の濃度上昇を抑制するため、原水濁度及び膜ろ過水色度にピークカット暫定指標値を設け、取水停止の目安としている。色度の暫定指標(1.2度)は、過去の調査で膜ろ過水色度とトリクロロ酢酸生成能の関係を確認し、この値以上となった場合、浄水のトリクロロ酢酸が水質基準の50%を超過する危険性があるとされた値である。

一例として、平成30年7月の総降雨量232mmの降雨イベントをあげる。大丹波浄水所では原水濁度がピークカット暫定指標(50度)を超過したため、7月28日18時から29日7時までピークカットを実施した。原水のトリクロロ酢酸生成濃度は最大で0.092mg/Lまで上昇したが、ピークカットを実施した結果、浄水では最大でも0.009mg/Lで、水質基準(0.03mg/L)の30%程度に抑制することができた。この他にもピークカットによりハロ酢酸を制御できたケースについて集計を行った。

### 5.5 奈良県における消毒副生成物の実態調査

ジクロロ酢酸、トリクロロ酢酸ともにトリハロメタンとの相関が認められたが、給水末端ではジクロロ酢酸濃度のばらつきが大きくなった。

今年度の水源定期検査において、ラフィド藻の大幅な増殖はほとんど確認されず、原水池においては、最大でも3細胞/mL(9/2)であった。また、この時期の桜井浄水場原水の生成能比を確



認したところ、生成能比は通常時の2程度であり、ラフィド藻の影響は極めて少なく、浄水クロロホルム濃度制御による消毒副生成物の一括管理を行った。

#### 5.6 豪雨時の消毒副生成物の生成に関する調査

濁度の増加に伴い、原水のハロ酢酸生成能の値が上昇していることが分かった。塩素化体の生成能が上昇しており、特に、ジクロロ酢酸(DCAA)及びトリクロロ酢酸(TCAA)に関して顕著であった。濁度、TOC、ハロ酢酸生成能の値は概ね同様の増減率を示していたがTOCあたりのハロ酢酸生成能の値に大きな差はなかった。これは有機物の量が増えたため生成能の量が上昇したと考えられる。

工程水についても平常時と比較して、高濁度時はDCAAとTCAAの値が上昇する傾向があった。原水の濁度は浄水の水質に影響を与えると考えられる。

### 6. 消毒副生成物の全国的な生成実態

#### 6.1 全国の浄水場における消毒副生成物の網羅的調査

##### (a) 網羅的調査の結果

図2に、各浄水場における4グループの消毒副生成物それぞれの合計濃度の分布を示す。10月の場合、合計濃度はトリハロメタン、トリハロ酢酸、トリハロアルデヒド、ジハロ酢酸、ジハロアセトニトリルの順であった(ハロ酢酸は、ジハロ酢酸、トリハロ酢酸に分類)。1月の場合、トリハロメタン、トリハロ酢酸、ジハロ酢酸、トリハロアルデヒド、ジハロアセトニトリルの順であった(図省略)。また、10月の方が1月よりも濃度は高かった。目標値案が示されたブロモクロロ酢酸、ブロモジクロロ酢酸について見ると、ブロモクロロ酢酸について10月は21浄水場中18浄水場から検出され、1月は20浄水場から検出された。最高値はそれぞれ5.7、3.5 µg/Lであった。ブロモジクロロ酢酸は、10、1月でそれぞれ20、21浄水場から検出され、最高値は5.4、4.2 µg/Lであった。

消毒副生成物濃度の関連性を見たところ、塩素化消毒副生成物であるクロロホルムは、トリクロロ酢酸や抱水クロラールといった他の塩素化消毒副生成物と関連していることが示された(図3)(10、1月の結果を合わせて評価)。また、各グループ間のbromine incorporation factor (BIF)の関連性を見たところ、BIF同士の関連性は確認された(図4)。さらに、BIFは原水中の臭化物イオンとの関連性があることも示された(図5)。

##### (b) 分科会参加事業者によるハロ酢酸の実態調査

表1に、分科会参加事業者全体のハロ酢酸の調査結果のまとめを示す。また、表2に、各事業者

の調査結果のまとめを示す。ハロ酢酸の調査地点数はハロ酢酸によって異なり、72~86地点であった。9種中ブロモ酢酸、トリブロモ酢酸を除く6種類が1試料以上から検出された。トリクロロ酢酸、ジクロロ酢酸の検出試料数が最も高かった。最高濃度もこれら2種が高かった。

目標値案が示されたブロモクロロ酢酸はジクロロ酢酸よりは検出率は低かったが77中25地点から検出され最大値は4.0 µg/Lであった。同様に、ブロモジクロロ酢酸は75中29地点から検出され最大値は5.7 µg/Lであった。(a)、(b)の結果のいずれも、ブロモクロロ酢酸は目標値案(10 µg/L)の40%超、ブロモジクロロ酢酸は目標値案(10 µg/L)の50%超で検出されていた。

#### 6.2 国内の水道事業者のデータにおける基準項目と未規制消毒副生成物の関係性の調査

図6に上記で定義した関係性があったものの例を示す。図6(a)は基準1,2を満たしている例である(一部プロットが重複している点に注意)。図6(b)はジクロロアセトニトリルの濃度が高い場合に必ず総トリハロメタン濃度が高く、基準3を満たしている例である。図6(c)は基準2,3を満たしている、つまりばらつきはあるものの最大値は対応し、かつ総トリハロメタンが高いときに対象未規制物質の濃度が高い傾向にある場合の例である。図6(d)は基準1,3を満たす例で概ね比例関係にみなせるケースである。図6(e)基準2,3を満たしている例である。図6(f)は、ばらつきが大きいが全体的な傾向として、総トリハロメタンが高めのときに抱水クロラールも高い傾向にあり、基準2に該当する例である。

図6では、関係があった例を示したが、基準1~3を満たさない例も当然あった。ただし、基準を満たさない例の多くは、測定回数が少ない場合、検出下限付近の濃度しか検出されない場合であった。

次に、各事業者(配水系統、地点別)について、対象とした基準項目のいずれか一つと未規制副生成物に関係が認められた場合、その未規制消毒副生成物については、関係性が期待できると判断した。さらに、対象とした11事業者のどこか一つでも、関係性があれば、その未規制副生成物については、基準項目と関係性があると評価した。この評価は、水源や、処理条件の違いを無視して、ある未規制副生成物について関係性を期待できる可能性があるかという評価になる。そのまとめを表3に示す。この表には一定程度検出があった物質のみをあげているが、可能性としては、多くの物質について、トリハロメタンやハロ酢酸は、未規制副生成物のマーカーとなりうるといえる。この評価は、関係性がなかった事業者の結果を無視していることになるが、関係性があった事業者の方が検出濃度が総じて高い

傾向にあり、水質管理上この手法はある程度期待できるものと考えられた。

#### E. 結論

- 総 HAcAms は、浄水処理工程において殺藻用塩素注入により沈澱処理水で生成し、オゾン処理では増減しないものの、活性炭処理により低減した。次いでろ過水では中間塩素処理及び後塩素注入により生成され、浄水はさらに生成した。
- 浄水では、水温および塩素注入率が高い夏季に HAcAms の生成が増す傾向であった。また、総 THMs(浄水)と同様の生成傾向であった。
- 活性炭による処理について、毎年 20%の交換補充を行うことにより、10 年にわたり HAcAms の一定の除去性を維持する効果があると認められた。
- ハロベンゾキノロン類について、CHO 細胞を用いた細胞毒性評価の実験系を確立し、IC50 から得られる細胞毒性の強さは、QC >> DCQC > DCBQ であることを示した。
- 用水供給事業に比較して規模の小さい水道事業の浄水場で、過去 10 年間に浄水場出口の塩素酸が 0.20 mg/L を超えて検出される事例があった。塩素酸濃度上昇の原因は、次亜塩素酸ナトリウムの貯蔵期間や貯蔵温度によるものが多かったが、その他にも次亜塩素酸ナトリウム貯留槽への外気流入の影響を受けた事例を確認した。
- オゾン注入率とシアン化合物濃度の関係については、夏期・冬期ともにオゾン注入率が高くなると、オゾン処理水でのシアン化合物が増加する傾向であり夏期の最大で 0.0079 mg/L (基準値の 8 割程度) 検出されているが、GAC 以降の処理においては、シアン化合物は不検出であった。
- 珪藻類オーラコセイラは、塩素添加により細胞が破壊され体外に放出され、樹脂臭の原因物質 1-hexen-3-one を放出することがわかった。活性炭処理により最大 90%除去できることを示した。珪藻類スケルトネマ・サブサルサムでも塩素処理で 1-hexen-3-one が放出または生成されることを示した。
- GAC 処理水中の蛍光強度の経年変化を測定することで、消毒副生成物生成能の除去性を調査したところ、GAC 吸着池の通水倍率に比例して処理水中の蛍光強度は増加し、水温が高くなるほどその増加割合は大きいこと、蛍光強度(Ex 330 nm/Em 430 nm)は総トリハロメタン生成能との相関が高く、前駆物質の存在量を把握する指標として有用であることを示した。

- THM 生成能と HAA 生成能予測について、蛍光強度と電気伝導度に基づいたモデルを作成する手法を整理した。特に蛍光 1 成分でも有効なモデルが作成できることを示した。
- 高度浄水処理導入により総トリハロメタン濃度は低減されたが、臭素化トリハロメタンの生成割合、生成量は従来に比べ大きい傾向にある。BAC 処理後の THM 生成能と有機物指標項目 (E260, 蛍光強度) との相関は弱かった。
- 小規模浄水施設における原水水質悪化時のピークカットの有効性を示す事例を整理した。
- 豪雨時の消毒副生成物濃度の上昇を確認した。
- 全国調査では、10 月では、トリハロメタン、トリハロ酢酸、トリハロアルデヒド、ジハロ酢酸、ジハロアセトニトリルの順に濃度は高かった。1 月では、トリハロメタン、トリハロ酢酸、ジハロ酢酸、トリハロアルデヒド、ジハロアセトニトリルの順に濃度は高かった。
- 塩素化の消毒副生成物濃度は関連性があり、また、消毒副生成物間の BIF 関連性が認められた。さらに、原水の臭化物イオン濃度が高い場合に消毒副生成物の BIF も高い傾向にあった。
- 目標値案が示されたブロモクロロ酢酸、ブロモジクロロ酢酸の検出率は、全国調査の方が消毒副生成物分科会より高かった。最高値はいずれの調査でも、それぞれ目標値案の 40%超、50%超であった。
- 未規制消毒副生成物の濃度と総トリハロメタン等基準項目の「緩い関係性」について、国内水道事業体の測定データを用いて解析を行った。その結果、検出例がある多くの物質について関係性があるケースが認められ、現行の基準項目がある程度未規制消毒副生成物の目安(マーカー)となる可能性が示された。

#### F. 参考文献

- Du, H, Li, J, Moe, B, McGuigan, C F, Shen, S, Li, X-F, 2013. Cytotoxicity and oxidative damage induced by halobenzoquinones to T24 bladder cancer cells. Environ. Sci. Technol. 47:2823-2830.
- Plewa, M J, Wagner, E D, 2009. Mammalian cell cytotoxicity and genotoxicity of disinfection by-products. Water Research Foundation: Denver, CO.
- Prochazka, E, Escher, B I, Plewa, M J, Leusch, F D, 2015. In vitro cytotoxicity and adaptive stress responses to selected haloacetic acid and halobenzoquinone water disinfection byproducts.

G. 健康危機情報  
なし

H. 研究発表

1. 論文発表  
なし

2. 学会発表  
なし

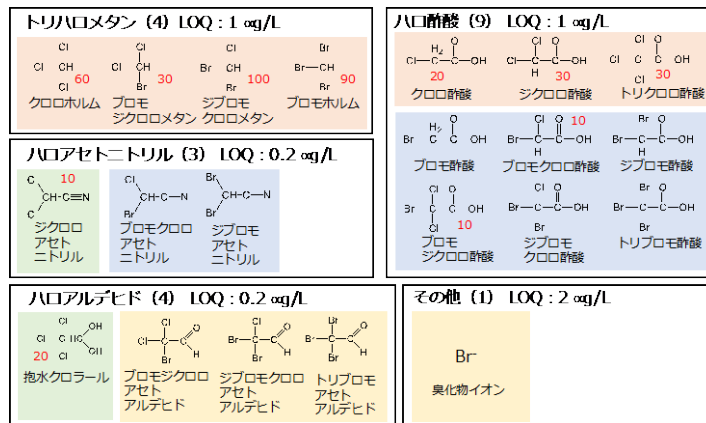


図1 対象物質

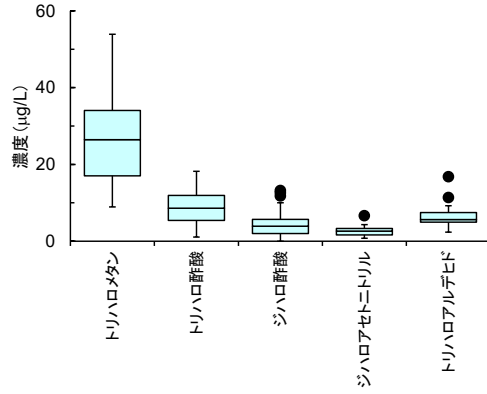


図 2 各消毒副生成物グループの合計濃度の分布 (2021 年 10 月)

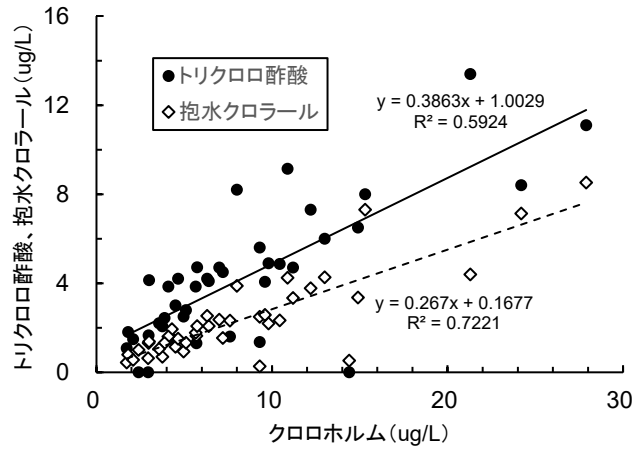


図 3 クロロホルムとトリクロロ酢酸, 抱水クロラール濃度の関連性

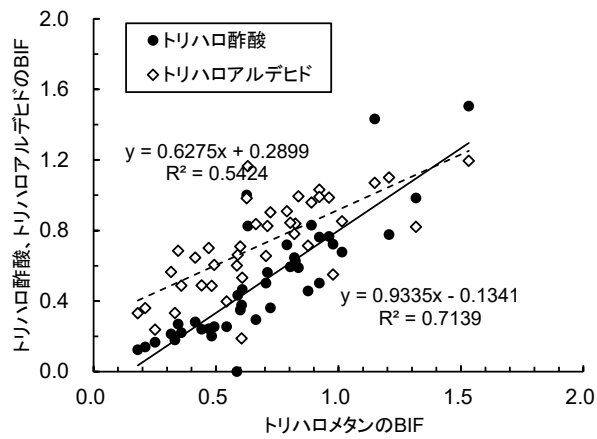


図4 トリハロメタンのBIFとトリハロ酢酸、トリハロアルデヒドのBIFの関係

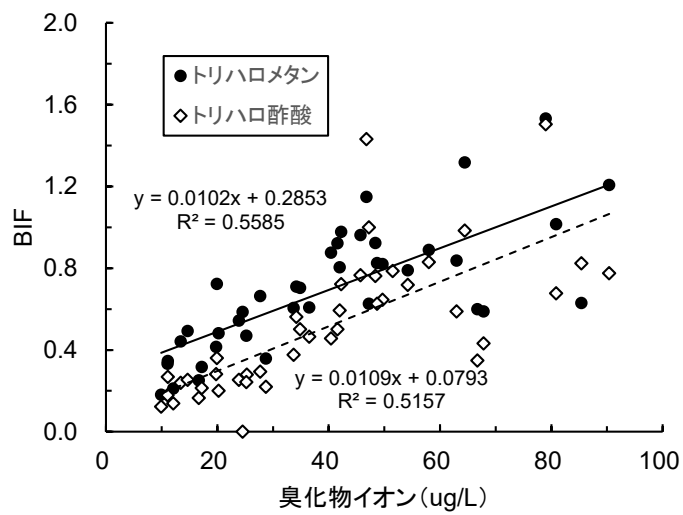


図5 原水の臭化物イオンとトリハロメタン、トリハロ酢酸のBIFの関係







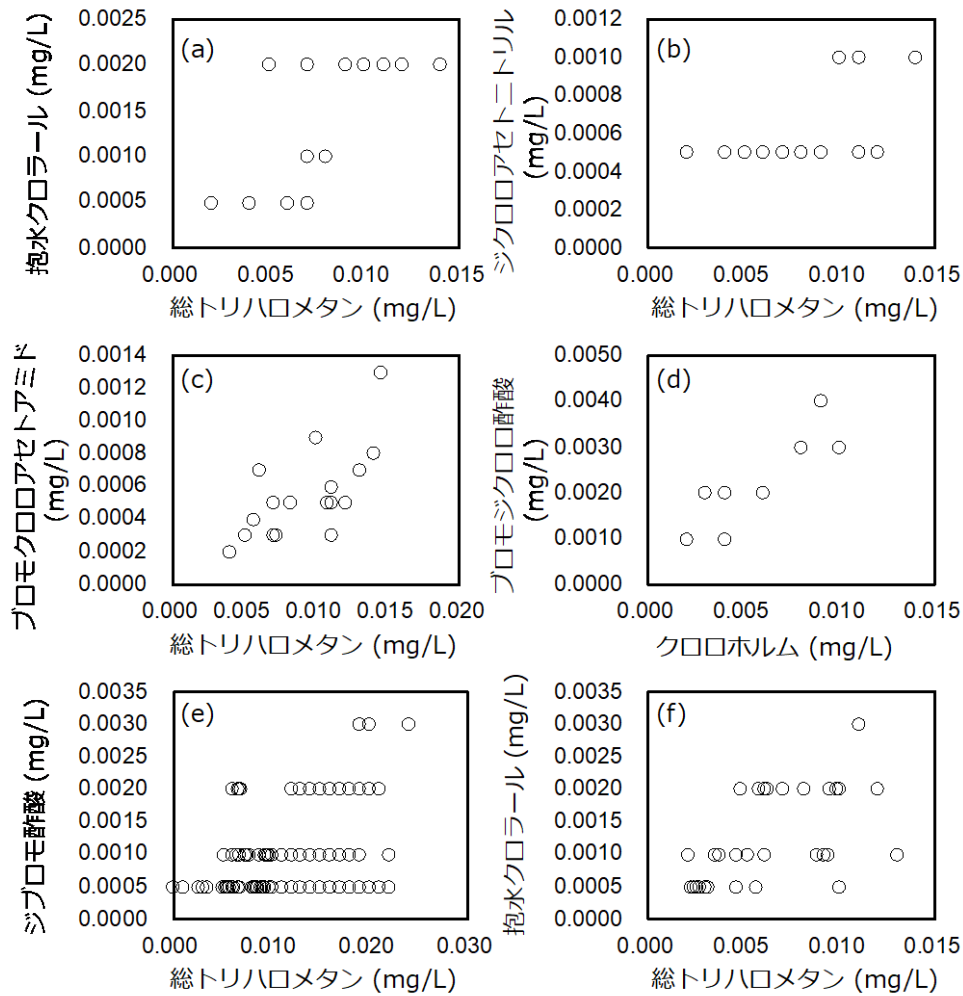


図 6 確認された関係性の例 ((a), (b)C 事業体-1, (c)D 事業体-2, (d)F 事業体, (e) H 事業体-1, (f) I 事業体)

表 3 関係性のまとめ

未規制副生成物	関係性	関係性のある基準項目
モノブromo酢酸	あり	総トリハロメタン, クロロホルム, ジクロロ酢酸, トリクロロ酢酸
ジブromo酢酸	あり	総トリハロメタン, クロロホルム, ジクロロ酢酸, トリクロロ酢酸
ブromoクロ酢酸	あり	総トリハロメタン, クロロホルム, ジクロロ酢酸, トリクロロ酢酸
ブromoジクロ酢酸	あり	総トリハロメタン, クロロホルム, ジクロロ酢酸, トリクロロ酢酸
ジブromoクロ酢酸	あり	総トリハロメタン
抱水クロラール	あり	総トリハロメタン, クロロホルム, ジクロロ酢酸, トリクロロ酢酸
ジクロロアセトアミド	あり	総トリハロメタン, クロロホルム
ブromoクロロアセトアミド	あり	総トリハロメタン
トリクロロニトロメタン	なし	
クロロアセトニトリル	なし	
ブromoアセトニトリル	なし	
ジクロロアセトニトリル	あり	総トリハロメタン, クロロホルム, ジクロロ酢酸, トリクロロ酢酸
ブromoクロロアセトニトリル	あり	総トリハロメタン, クロロホルム, ジクロロ酢酸, トリクロロ酢酸
トリクロロアセトニトリル	あり	ジクロロ酢酸
ジブromoアセトニトリル	あり	総トリハロメタン, ジクロロ酢酸
塩化シアン	あり	ジクロロ酢酸
アセトアルデヒド	あり	ジクロロ酢酸, トリクロロ酢酸