

厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）  
総括研究報告書

地表水を対象とした浄水処理の濁度管理技術を補完する紫外線処理の適用に関する研究

研究代表者 大垣 眞一郎 公益財団法人水道技術研究センター理事長

研究要旨

我が国の水道水源の多くは地表水であるが、耐塩素性病原微生物の汚染が懸念されている。厚生労働省は、クリプトスポリジウム等対策指針を策定し、その対策を求めているが、特に小規模水道においては、未対応の施設が残っている。また、クリプトスポリジウム等対策の目標であるろ過水濁度 0.1 度以下を常時維持することに困難を感じている水道事業者も見受けられ、近年、急激な濁度上昇等の増加と相俟って懸念が増している。一方、これまで国内で地表水を対象とした紫外線処理の導入例はなく、関連する研究も少ない。

このような背景から、本研究では、濁度管理を補完する技術としての地表水を対象とした紫外線処理の適用に関し、以下の具体的な検討課題を設定して取り組んでいる。

- (1) 濁度管理等における課題の抽出
- (2) 原水条件及び処理効果の検証
- (3) 紫外線の照射手法及び設計諸元の検討
- (4) 維持管理上の留意事項の検討

研究予定期間は平成 26～28 年度の 3 か年を予定している。平成 26 年度の研究体制は大垣眞一郎（水道技術研究センター理事長）を研究代表者とし、学識者及び水道技術研究センター職員を研究分担者とするとともに、水道事業体・民間企業の技術者を研究協力者とした。

平成 26 年度の研究結果の概要は次のとおりである。

- (1) 濁度管理等における課題の抽出

地表水の浄水処理においては、小規模事業体において、ろ過池ごとの濁度管理が予算や人員確保の面から困難であること等をあらためて浮き彫りにした。本調査は中・小規模施設を主要な調査対象として平成 27 年度にかけて 2 年度にわたり作業を実施し、地表水の濁度管理及び紫外線処理施設の維持管理の実態把握をとりまとめる。

- (2) 原水条件及び処理効果の検証

模擬原水と模擬粒子による小型実験装置による凝集沈澱ろ過実験結果に対して、紫外線照射を仮定した場合のリスク試算結果は、紫外線照射がない場合と比較して、凝集処理が必ずしも良好ではない条件においてもリスクが低減されるという結果を得た。また、地表水の水質の分析結果から、現行の紫外線処理に対する水質要件が地表水においても有効である可能性が示唆された。さらに、濁質を含む水における濁質の不活化速度への影響を確認する実験では、不活化速度は低濁度領域においては濁質の影響を受けないという結果を得た。

- (3) 紫外線の照射手法及び設計諸元の検討

平成 26 年度は、地表水の濁度変動に対応する紫外線照射量の検討を行うために、濁質による紫外線の吸収・散乱を評価する手法の検討を行った。具体的には、透過光のみによる測定方式と透過光と散乱光による測定方式とによる二種類の異なる測定法で測定した濁度の比によって、紫外線処理の効果への影響を評価できる可能性があることを示した。

なお、(4)維持管理上の留意事項の検討については、本研究計画の 2 年目（平成 27 年度）以降に検討することとしている。

研究分担者氏名

大垣 眞一郎	水道技術研究センター	理事長
安藤 茂	水道技術研究センター	専務理事
富井 正雄	水道技術研究センター	浄水技術部長
島崎 大	国立保健医療科学院	上席主任研究官
神子 直之	立命館大学	教授
大瀧 雅寛	お茶の水女子大学	教授
小熊 久美子	東京大学	准教授

## A. 研究目的

我が国の水道水源の多くは地表水であり、耐塩素性病原微生物の汚染が懸念されている。厚生労働省は、クリプトスポリジウム等対策指針を策定し、その対策を求めているが、特に小規模な水道において、対策のとられていない水道施設が残っているという指摘がある。また、クリプトスポリジウム等対策の目標であるろ過水濁度0.1度以下を常時維持することに困難を感じている水道事業者も見受けられ、近年の異常気象等に伴う急激な濁度上昇等の増加と相俟って懸念が増している。一方、これまで国内で地表水を対象とした紫外線処理の導入例はなく、関連する研究も少ないのが現状である。

このような背景から、本研究では、濁度管理を補完する技術としての地表水を対象とした紫外線処理の適用に関し、濁度管理等における課題を明確化し、地表水の原水水質特性が処理に与える影響を評価したうえで、紫外線照射方法と処理装置の設計諸元、及び維持管理上の留意事項について具体的な提案を行うことを目指している。

なお、本検討は、平成26年度から平成28年度までの3か年計画で実施することとしている。

## B. 研究方法

平成26年度は、1.濁度管理等における課題の抽出、2.原水条件及び処理効果の検証、及び3.照射手法及び設計諸元の検討の三つの課題に取り組んだ。

濁度管理等における課題の抽出では、地表水の浄水処理における濁度管理等の実態把握及び課題をヒアリング等により抽出した。また、地表水以外を対象とした紫外線処理設備の維持管理の実態についても、地表水を対象とした場合の維持管理上の留意事項の提案に反映するためにヒアリング等を実施した。

原水条件及び処理効果の検証では、1)国内における地表水の濁度成分等の分析及び2)地表水の水質特性が紫外線処理の効果に及ぼす影響評価についての検討及び検証を開始した。これらは、地表水の原水・

ろ過水について分析し、地表水の水質特性が紫外線照射の効果に与える影響を明らかにして、その結果を設計諸元及び維持管理上の留意事項の提案に反映させることを目的としている。

国内における地表水の濁度成分等の分析については、国内の地表水を対象とした場合と模擬地表水を対象とした場合について、検討した。模擬地表水に対しては、模擬高濁度原水に対するクリプトスポリジウム除去性並びに紫外線処理導入による感染リスク低減効果の推定を実施した。クリプトスポリジウムの模擬粒子を添加し、様々な凝集条件のもとでろ過水のクリプトスポリジウム模擬粒子の除去率をそれぞれ求め、得られた結果に対して、紫外線照射を行ったとした場合のリスク低減率を試算した。一方、国内地表水については、紫外線処理装置の処理要件に係る可能性のある地表水の水質特性が紫外線処理の適用可能性に及ぼす効果への影響を評価した。

地表水の水質特性が紫外線処理の効果に及ぼす影響評価では、回分式実験槽内で地表水へ紫外線照射を行い、濁度除去の不活化効果への影響等を検証した。

照射手法及び設計諸元の検討では、平成26年度は濁度変動に対応する紫外線照射線量の検討を行った。とくに、濁度として計測されている水中の懸濁物質が紫外線照射時に紫外光を散乱及び吸収する影響を評価するための簡易指標について基礎的な検討と評価試験を行った。

次に、具体的な個別の研究方法を示す。

### 1. 濁度管理等における課題の抽出

地表水を対象とした濁度管理等の実態調査、及び地表水以外を対象とした紫外線処理設備の維持管理の実態把握及び課題の抽出は、それぞれ平成26～27年度に実施する予定である。両者の調査先は、水道統計等を基に、地域、施設規模、水源、水質、処理方法等を判断基準として選択した。どちらの調査も、まず調査先へ調査票（添付資料）を送り、事前に調査票に記入・返却後、ヒアリング調査と調査対象の一部施設について現地調査を行った。

## 2. 原水条件及び処理効果の検証

### 2.1 模擬高濁度原水に対するクリプトスポリジウム除去性及び紫外線処理導入による感染リスク低減効果の推定

小型浄水処理実験プラントを用いた模擬高濁度原水に対する処理効果と水質特性評価を行うと共に、クリプトスポリジウム模擬粒子の除去性に基づいた紫外線処理の導入による感染リスクの低減効果を明らかにするために次のような方法で実験を行った。

#### 1) 模擬高濁度原水の調整

模擬原水の濁質として粘土鉱物であるカオリン及びベントナイトを1:1の割合で混合し、有機物としてフミン酸ナトリウム試薬を添加した。水道水を活性炭フィルターに通水して残留塩素除去を行ったのち、原水調製に用いた。濁度設定については、集中豪雨時の河川での急激な濁度変化を想定し、通常時の濁度（5度）から急激にピーク時の高濁度（1000度）を経て、濁度が徐々に漸減していく推移とした。各濁度の設定は2008～2010年度の水道統計に基づいた。有機物についても水道統計を基にTOC換算濃度として2～8mg/Lの範囲で設定した。クリプトスポリジウム模擬粒子として、水道技術研究センタークリプトレーザー1号を使用し、原水中に $10^5 \sim 10^6$ オースト/Lの最終濃度になるよう調整した。

#### 2) 凝集剤の種類

凝集剤には多くの浄水場で使用されている従来型 PAC（塩基度 50%）を基本とし、近年、高濁度時の凝集沈澱処理に適するとされる超高塩基度 PAC（塩基度 70%）も選定した。

#### 3) 浄水処理実験装置の概要及び測定項目

凝集沈澱実験には小型浄水処理実験装置を用いた。この装置は、薬品混和、凝集沈澱（傾斜板脱着可）砂ろ過、膜ろ過を備えており、最大濁度 1,000 度程度までの処理を可能としており、最大処理能力は 4m<sup>3</sup>/日である。実験装置の原水、沈澱水、ろ過水の 3 箇所から採水を行い、濁度、微粒子数、pH、アルカリ度、アルミニウム（溶存態、懸濁態）TOC、E260 及びクリプトレーザー粒子数を測定した。表 1 に運転条件等を示す。

#### 4) クリプトスポリジウム感染リスク評価

砂ろ過水を直接飲用する場合、並びに、紫外線消毒後に飲用する場合を対象としたクリプトスポリジウム感染リスク評価を行った。後者については実測したクリプトレーザー除去率と砂ろ過水の紫外線吸光度の値により、ろ過水に対して紫外線消毒を行う場合の条件を仮定した。

表 1 原水水質及び運転条件

	原水濁度	有機物	凝集剤	二段凝集	備考
RUN 1	5～1000 度	なし	適正注入率	なし	5 度（～01:30）→1000 度（～02:30）→500 度（～04:00）→200 度（～05:30）→50 度（～08:00）
RUN 2	5～1000 度	2～8mg/L	適正注入率	なし	同上
RUN 3	50 度（目標沈澱水濁度 5 度）	2.5mg/L	適正注入率（70mg/L）	0～4 mg/L	沈澱不良（傾斜板除去により）
RUN 4	50 度（目標沈澱水濁度 5 度）	2.5mg/L	注入不足（27mg/L）	0～4 mg/L	凝集不良（凝集剤注入不足）
RUN 5	50 度（目標沈澱水濁度 5 度）	2.5mg/L	注入不足（27mg/L）	0～4 mg/L	凝集剤、後凝集剤を超高塩基度 PAC に変更
RUN 6	5 度（目標沈澱水濁度 5 度）	なし	なし	0～6 mg/L	後 PAC のみ
RUN 7	5 度（目標沈澱水濁度 5 度）	2 mg/L	なし	0～25 mg/L	凝集沈澱せず後 PAC のみ

- ・紫外線消毒による不活化率の推定  
紫外線吸光度と透過率の関係式及び図 1 より、ろ過水の紫外線吸光度におけるクリプトスポリジウム不活化率を表 2 と仮定しリスク評価に用いた。
- ・クリプトスポリジウム感染確率  
以下の Hass 式より一年間の感染確率を推定した。

$$P(N) = 1 - e^{-N/k} \quad \text{式(1)}$$

ここで、

P(N): 摂取数 N の時の感染確率

N: 摂取数

k: 定数

(クリプトスポリジウム: 238.601)

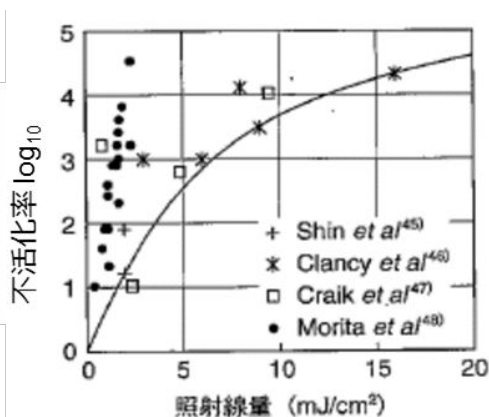


図 1 各紫外線吸光度に対する不活化率

表 2 各紫外線吸光度に対する不活化率

紫外線吸光度 abs./10mm	紫外線不活化率 log
~ 0.022	3.6
0.023 ~ 0.071	3.4
0.070 ~ 0.125	3.2
0.126 ~	3.0

なお、高濁度の水道原水に含まれるクリプトスポリジウムのオーシスト数は「100個/L」とした。わが国における非加熱飲用水の摂取量については 0.321L/日及び 0.327 L/日との報告があるが、ここではさらに安全側として「1.0L/日」と仮定した。

## 2.2 地表水における紫外線処理の適用可能性のための水質分析

地表水を原水とする浄水場への紫外線処理導入の可能性を検討するため、鍵とな

る水質項目の抽出とその変動幅の整理を行った。都市河川を水源とする浄水場 2 か所において、原水、凝集沈澱水(砂ろ過前)、浄水の 3 試料を採水し、水質を分析した。分析項目として、紫外線処理への影響が大きいとされる濁度、色度、及び紫外線透過率の変動幅を調査した。

### 1) 留意すべき水質項目の選定

地表水への紫外線適用に際し注目すべき水質項目として、2007 年 3 月に通知された「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」改訂版における地表水以外への紫外線処理の適用要件水質項目とされた濁度、色度、紫外線透過率の 3 項目を重視し、その変動幅を調査することとした。また、現行指針で「水質を満たすことが好ましい」とされた鉄、硬度、マンガンについて、一部の試料について独自に分析したほか、各浄水場の定期水質分析結果の公表値を参照した。

### 2) 試料採取

都市河川を水源とする浄水場 A、B の 2 施設において、原水、凝集沈澱水(砂ろ過前)、浄水の 3 試料を 2014 年 9 月から 2015 年 3 月の 7 ヶ月間、毎月 1 回の頻度で計 7 回採水し、水質分析に供した。浄水場 A、B とも取水位置における水源河川は A 類型に指定されている。また、両浄水場とも前塩素処理を実施し、その残留塩素が砂ろ過池出口でも検出されていることから、凝集沈澱砂ろ過水(後塩素添加前)と浄水の水質的な違いは実質的に残留塩素濃度の差のみと考えられた。そこで本研究では、凝集沈澱砂ろ過水と同等の水質を示す試料として採取の容易な浄水を対象試料とした。

濁度、色度、紫外線透過率、粒径分布、大腸菌(群)、鉄及びマンガンの測定には、採水試料そのままを供した。溶存有機炭素(Dissolved Organic Carbon, DOC)三次元励起蛍光マトリックス(Excitation Emission Matrix, EEM)の測定には、採水直後にオンサイトで膜ろ過除菌(孔径 0.45µm 精密ろ過膜、PTFE 製)した試料を供した。試料はそれぞれ滅菌済みプラス

チックボトルに満水を保って封入し、4に保冷して実験室に輸送し、分析した。

### 3) 分析項目と方法

濁度及び色度は透過光測定法を原理とするデジタル濁色度計を用い、濁度は870nm透過率、色度は390nm透過率として定量した。すなわち、単位は濁度、色度とも[度]である。紫外線透過率は、分光光度計による254nm吸光度( $A_{254}[\text{cm}^{-1}]$ )を用いて以下の計算式に従い算出した。

$$254\text{nm 透過率}[\%] = 10^{-A_{254}} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

溶存有機炭素は全有機炭素計で定量した。溶存有機物組成は励起蛍光マトリックスから推定することとし、蛍光分光光度計を用いて励起波長220-450nm、蛍光波長230-600nmにおいて測定した。微粒子の粒径分布は、動的光散乱式ナノトラック粒度分析計(公称定量範囲0.8nm-6.54 $\mu\text{m}$ )により測定した。

鉄及びマンガンの分析には、ポータブル吸光光度計を用いた。原水中の大腸菌(群)濃度は、クロモカルト寒天培地を用い、37℃で一晩培養後に形成した青いコロニーを大腸菌、赤いコロニーと青いコロニーの和を大腸菌群として試験水1mL当たりのコロニー数(Colony forming unit, CFU)を算定した。

### 2.3 地表水の水質特性が紫外線処理の効果に及ぼす影響評価

試料には、地表水を原水とする浄水場の原水を用いた。原水の一部を公称孔径5 $\mu\text{m}$ のメンブランフィルターでろ過し、これも試料として用いた。試料の濁度、254nm吸光度を測定した後、低圧紫外線ランプの中央直下で、スターラーバーを入れて石英ガラスで蓋をした水深6.7cmのフラットシャーレ中で試料に紫外線を照射した。試料表面における紫外線照度は1.464mW/cm<sup>2</sup>であった。また、大腸菌及び大腸菌群の測定には、X-MGメンブランフィルター法を用いた。

### 3. 濁度変動に対応する紫外線照射線量の検討

紫外線処理に影響を与える因子として最重要視されているのは、対象水中の懸濁物質の存在量及び紫外吸光度である。しかし、一般的にはその両者の影響を、紫外光の透過率という単一指標によって処理効率への影響評価を行っている場合が多い。この方法では懸濁物質による散乱光の影響は無視されており、正確な影響評価とはいえない。そこで、懸濁物質による紫外光の散乱及び吸光による減衰を評価するための簡易な指標を提案することを目的として、以下のような方法で実験を行った。

#### 1) 濁質の散乱特性を把握する指標の検討

一般的に用いられる濁度測定法には、透過光測定方式、透過光と散乱光で測定する方式、表面散乱光方式、がある。このうち透過光測定方式と、透過光+散乱光測定方式の2方式において測定される濁度値の比を用いることによって、対象とする懸濁液の持つ可視光(濁度測定に用いられる光)の散乱特性の指標となると考えた。ただし透過光と散乱光で測定する方式における散乱光の測定方法には、i)90°散乱光を測定する方式と、ii)積分球式にて測定する方式とがある。今回はii)積分球式にて測定する方式を採用することとした。

対象試料の透過光測定方式による濁度測定には、吸光光度計を用いて660nmの吸光度を測定し、カオリン標準液において検量線を作成することによって測定した。以後、この方法による測定値を「透過光式濁度値」と呼ぶ。また-i)の透過光と散乱光で測定する方式(積分球式測定)では、濁度計による測定の後、あらかじめカオリン標準液を用いて作成しておいた検量線で単位を度に換算した。以後、この方法による測定値を「積分球式濁度値」と呼ぶ。

各対象試料において、上記及び-i)の2方式にて濁度を測定し、その測定値の比である(積分球式濁度値)÷(透過光式濁度値)を「濁度比」とした。

#### 2) 濁質による紫外光の散乱特性の把握

懸濁液による散乱の影響をも含めた紫外線処理の低減効果を把握するために、分光光度計に、積分球式検出器を付加して測

定した。用いた波長は 254 nm とした。この測定値は、試料への入射光の減衰率を入射方向のみでなく、全方向を考慮して測定できるため、散乱特性が高い懸濁液においては減衰率が低くなる。すなわち、散乱光によって生じる紫外線処理の効果も含めた影響評価が可能となると考えられる。この測定方式によって得られる紫外吸光度から、紫外線処理の減衰率推定値を求めた。

### 3) 仮想人工濁液の混合比の算定

上記 1) で求めた濁度値の比を元に、各対象水をカオリン(散乱特性大)と活性炭(散乱特性低)の混合液と想定したときの混合比率を式(3)及び式(4)によって求めた。

$$C_{カオリン混合比率} = \frac{\text{対象水の濁度比} - \text{活性炭懸濁液の濁度比}}{1 - \text{活性炭懸濁液の濁度比}} \quad \text{式(3)}$$

$$\text{活性炭混合比率} = 1 - \text{カオリン混合比率} \quad \text{式(4)}$$

### 4) 仮想人工濁液の紫外線処理の減衰率推定値の算定

対象水をカオリンと活性炭の混合溶液と仮定した時の混合比を上記 3) に従って求め、その混合比と対象水の濁度値からカオリン及び活性炭の想定濃度をそれぞれ求め、その濃度における紫外線処理の減衰率推定値を元にして、対象水の紫外線処理の減衰率推定値を算定した。算定は式(5)及び(6)に従って行った。

$$C_{カオリン} = \frac{\text{対象水の濁度(積分球式)}}{(1 + 1\text{mg/Lあたりの活性炭濁度}) \times \frac{\text{活性炭混合比率}}{\text{カオリン混合比率}}} \quad \text{式(5)}$$

$$C_{活性炭} = \frac{\text{活性炭混合比率}}{\text{カオリン混合比率} \times C_{カオリン}} \quad \text{式(6)}$$

$$A_{推定} = \varepsilon_{カオリン} \times C_{カオリン} + \varepsilon_{活性炭} \times C_{活性炭} \quad \text{式(7)}$$

$$X_{対象水} = 1 - 10^{-A_{推定}} \quad \text{式(8)}$$

$A_{推定}$  : 積分球式吸光測定値の推定値

$C_{カオリン}$  : 想定カオリン濃度

$C_{活性炭}$  : 想定活性炭濃度

$\varepsilon_{カオリン}$  : カオリン単位量当たりの吸光度値

$\varepsilon_{活性炭}$  : 活性炭単位量当たりの吸光度値

$X_{対象水}$  : 単位量当たりの紫外線処理の減衰率推定値

### 5) 人工濁水を用いた検討

対象試料として、人工的に作成した懸濁液(以後人工濁水と呼ぶ)を用いて、可視光(濁度測定に用いる光)の散乱特性を把握する指標を検討した。人工濁水は、カオリン、活性炭、ベントナイトを純水に懸濁させたものを用いた。

カオリン(白陶土)は濁度標準液を希釈した試料を用いた。活性炭は粉末活性炭(粒径 150  $\mu\text{m}$  以上 10%、149 ~ 50  $\mu\text{m}$  20 ~ 40%、49  $\mu\text{m}$  以下 55 ~ 75%)を純水に懸濁させて用いた。ベントナイトはベントナイト試薬(粒径 3 ~ 5  $\mu\text{m}$ )を純水に懸濁させて用いた。

カオリンと活性炭は、それぞれ 10 mg/L 懸濁液を調整し、その濁度比を上記 1) に従って測定した。次にベントナイト 10 mg/L 懸濁液について濁度比を同様に求め、その値からベントナイト懸濁液をカオリン及び活性炭の混合液と想定した場合の各々の混合比を求めた。想定した混合比を元に上記 4) に従って、紫外線処理の減衰率推定値を算定した。

ベントナイト懸濁液に関しては、上記 2) に従い、別途積分球式検出器を用いた吸光度計により、紫外線処理の減衰率推定値を測定した。この値と前者の算定値を比較し、評価した。

### 6) 浄水場原水を用いた検証

東京近郊の 2 か所の浄水場(A 浄水場及び B 浄水場)から原水を月に一度の頻度で採水し、対象水とした。この対象水に対して上記 4) で述べたベントナイト懸濁液の場合と同様の手順にて測定、解析を行い、実試料に対しても、紫外線処理の減衰率推定値が、濁度測定によって算定できるか検証した。

(倫理面への配慮)

本研究においては、研究対象者の人権擁護を必要とする調査又は人権への不利益を生ずる調査は行わず、また実験動物を用

いる実験を実施しないことから、倫理面への問題は生じない。

### C. 研究結果

#### 1. 濁度管理等における課題の抽出

調査先として選出した地域別の施設数と規模の一覧を表3に示す。

表3 調査先の地域と施設規模

地域	事業体数	施設数*	施設能力**			UV (内数)
			大	中	小	
北海道	2	5	0	2	3	0
東北	1	2	1	1	0	1
中部	2	5	3	2	0	2
中国	2	5	1	3	1	2
九州	3	22	1	9	12	11
合計	10	39	6	17	16	16

\* 調査の過程で、ろ過の主目的が濁質除去であると判断した施設の数

\*\* 施設の規模 大：50,000m<sup>3</sup>/d 以上、中：5000～50,000m<sup>3</sup>/d、小：5,000m<sup>3</sup>/d未満とした

#### 1.1 地表水の浄水処理における濁度管理等の実態把握及び課題の抽出

地表水を原水とする全国の浄水場のうち、急速ろ過方式（凝集沈澱＋急速ろ過）については15浄水場（7事業体）の調査を実施した（表4参照）。そのほか、水源種別は伏流水であるが、急速ろ過水の紫外線処理を行っている浄水場、緩速ろ過を行っている浄水場について調査を実施した。

なお、この調査は平成27年度まで継続して実施し、平成27年度に全体を整理してまとめる予定である。したがって今年度は途中経過報告となる。今年度の調査で明らかとなった点を以下に示す。

##### 1) ろ過水濁度が上昇しやすい原因

今年度の調査において、最も多かった回答は『原水高濁度』であった。また、原水濁度が急上昇する際に薬品注入管理のミスを生じやすいという趣旨の意見も得られた。

また、原水濁度5度程度で取水停止とするような清澄で低濁度原水の浄水場では、凝集剤の注入率が濁度に比して多くなるため、アルミニウムを多量に含んだ汚泥

表4 濁度管理等の実態調査先

	事業体	施設(浄水場)	施設規模	濁度管理調査			紫外線処理施設	水源	備考
				急速ろ過	緩速ろ過	直接ろ過			
1		Nk	中				地表水		
2	Nk町	Kn	小	( )			地表水	*1	
3		Nt	小	( )			地表水	*2	
4		Ky	小	-			地表水	*3	
5	Ct市	Rn	中				地表水	*4	
6	Ht企業団	Hk	大				2系統の地表水		
7	Ng市	Ks	大				地表水		
8		Nb	大				地表水		
9		Oh	大				地表水		
10	Ok市	Mn	大				地表水、伏流水、地下水		
11		Kk	中				地表水、地下水		
12		Kw	小				地表水		
13	Hk市	Hy	中	( )			伏流水	*5	
14	Is市	Ir	中				地表水		
15	Kg市	Ks	大				地表水		
16		Tk	中				地表水		
17		Hk	中				地表水		
18		Nm	小				湧水		
19		Me	小				湧水		
20		Mr	小				地表水		
21		My	小				伏流水		
22		Hc	小				伏流水		
23		Ty	小				湧水		
24		It	小				湧水		

\*1 沈澱池は普通沈澱池に、急速ろ過池は緩速ろ過池に転用して運用中。

\*2 冬季：緩速ろ過のみ、夏季：高濁度・色度の場合は急速ろ過を使用

\*3 低濁度時：緩速ろ過主体、高濁度時：膜ろ過（急速ろ過は現在使用せず）

\*4 地表水だが、その主水源は川の湧水

\*5 濁度上昇時のみ凝集剤を注入

( )は凝集沈澱後の急速ろ過としては使用されない場合があることを示す。

処理に係る作業への負担が大きいとのことであった。

ろ過水濁度が『上昇しない』という回答は2件のみで、今回の調査では洗浄後のろ過再開、あるいはピコプランクトンの発生など、何等かの要因により、多くの浄水場においてろ過水濁度の上昇を経験し、その対策に追われている状況がうかがえた。

##### 2) ろ過水濁度の監視

調査対象の15浄水場では、全ろ過池の



集水を測定対象とする場合も含めて、いずれの浄水場でもろ過水濁度の連続監視を行っていた。

全ろ過池への濁度計整備については、サンプリング配管の切り替えによりろ過池ごとの濁度監視を行っている浄水場と合わせると、今回の調査においては約6割の浄水場でろ過池ごとの濁度監視が可能（又はその計画がある）であるという結果となった。

その一方で、ろ過池ごとの濁度監視を実施しない浄水場もあり、その理由として、ろ過水濁度がほとんど上昇しない、あるいは人員不足が課題となっている状況下で維持管理の負担が大きい濁度計の台数を増やすことは考えられないという回答があった。また回答にはなかったものの、整備費用の負担が大きいことも、ろ過池ごとの濁度計整備が進みにくい背景要因であると推察できる。

### 3) 緩速ろ過における濁度管理

緩速ろ過の場合、十分に養生された後のろ過水濁度は安定するが、ろ過水濁度が上昇する場合は、ろ過速度を低下させる対策や取水停止が講じられている。

なお、Ng市によれば、散乱光測定法を緩速ろ過系に適用すると気泡による誤差が生じるため、緩速ろ過系では価格の高い粒子数計測法の濁度計を整備したとのことであった。また、緩速ろ過水には塩素が含まれておらず濁度計内部が汚れやすいため、自動洗浄設備も濁度計ごとに設けられている。さらに、サンプリング配管は人手による洗浄をしており、その作業が負担になっていることが明らかとなった。

## 1.2 地表水以外を対象とした紫外線処理設備の維持管理等の実態把握及び課題の抽出

本年は、7事業体16施設について調査を実施した（表5 参照）。この調査も平成27年度まで継続して行うため、平成27年度に全体を整理してまとめる予定である。今年度の報告では調査で明らかとなったことの中から5点を以下に示す。

表5 紫外線処理設備の維持管理等の実態調査先

	事業体	施設名	施設規模	濁度管理調査		水源	備考
				急速ろ過	緩速ろ過		
1	H t 企業団	Kn	中			湧水	
2	G h 市	K g	中			伏流水	
3		O b	中			伏流水	
4	Ok市	M s	中			伏流水	
5	H k 市	H y	中	( )		伏流水	
6	I s 市	K m	小			深井戸	
7		Y m	小			深井戸	*
8		K o	小			深井戸	
9		K b	小			深井戸	
10	K g 市	T s	中			湧水	
11		J g	中			湧水	両者を1か所に集めて紫外線処理
		T n				湧水	
12	K g	中			湧水	三者を1か所に集めて紫外線処理	
	K g				深井戸		
	K y				湧水		
13		K u	小			深井戸	
14	K m 市	I p	中			浅井戸	
15		H k	中			浅井戸	
16		K g	中			浅井戸	

\* 施設全体の規模は640m<sup>3</sup>/日だが、紫外線の処理対象となっているのは300m<sup>3</sup>/日のみ  
( )は凝集沈澱後の急速ろ過としては使用されない場合があることを示す。

### 1) 紫外線処理設備導入時の課題

紫外線処理設備は、後付けでの設置が多いため、設計段階で特段の検討を要する可能性がある。今年度の調査では、設置スペース、水位差等の制約により、設計時に配慮を必要としたケースがあった。

### 2) 濁度管理について

今年度の調査対象施設においては、紫外線処理設備の上流側の濁度について、各施設とも独自の基準を設け、流入水の濁度が2度を超過しないように対応していた。短時間で高濁になることを懸念する施設では、低めに濁度管理値を設け、濁度の計測

値が管理値を超過すると紫外線処理の停止、若しくは取水停止等を実施していた。

### 3) 紫外線吸光度の測定について

紫外線処理装置の上流側で、紫外線処理の効果に直接影響する紫外線吸光度若しくは透過率を計測器により常時計測している施設は、今年度の調査対象施設においては一か所もなかった。対象が地表水以外であり、水質が比較的安定していることによると推測する。

### 4) 維持管理上の課題について

紫外線ランプの保護管の汚れを防ぐため、ブラシ等で洗浄を行っている。洗浄時、ワイパーを反転させるために磁石を利用している装置があり、その場合磁石に引き寄せられた鉄錆により保護管に瑕がつくことがあるという指摘があった。また、水質によっては紫外線処理設備の前段に除鉄・除マンガン設備を設けることが推奨されているが、紫外線処理の後段に既設の除鉄除マンガン設備を置くフローとせざるを得ない場合もあり、清掃の負担が大きいという指摘もあった。

### 5) 維持管理コストについて

維持管理費用については、2011 年以降に供用を開始した施設が多かったため、すべての費用を定量的に把握できている施設はまだ少なかった。平成 27 年度の調査終了後、あらためて検討する予定である。

## 2. 原水条件及び処理効果の検証

### 2.1 模擬高濁度原水に対するクリプトスポリジウム除去性及び紫外線処理導入による感染リスク低減効果の推定

各 RUN における濁度除去率とクリプトレーサー除去率の算出結果を表 6 に示した。

#### 1) クリプトスポリジウム感染リスク評価

各 RUN における感染確率を試算した(表 7、表 8)。適正注入率がおびやかされるような条件では、多くの場合で米国 EPA が提唱する許容感染確率  $10^{-4}$  を超過したが、砂ろ過水に対して紫外線処理の適

用を想定すると、感染確率  $10^{-4}$  を超過するケースは大幅に減少した。

## 2.2 地表水における紫外線処理の適用可能性のための水質分析

### 1) 濁度と色度

濁度と色度の全測定データを表 9 に示す。原水の水質変動が大きく、特に台風と降雨の影響があった 10 月と 3 月に濁度・色度とも著しく高い値を示した。よって、試料ごとの平均値と標準偏差を用いた評価は不適切と判断し、データの分布型に依存しない記述統計量として、最大値・中央値・最小値に注目した。測定値の変動範囲を図 2 及び図 3 に示す。なお、図 2、3 における外れ値とは、四分位区間(全測定値の 25% 値から 75% 値までの範囲、すなわち図中の箱の示す範囲)の 1.5 倍を 75% 値に加算、又は 25% 値から減算した値を超過する値又は下回る値として統計学的に定義される。この結果、浄水場 A における台風直後の 10 月原水試料の濁度と色度、及び浄水場 B の 12 月の凝集沈澱水の色度は外れ値に該当し、特異的な水質と判定された。いずれの浄水場でも、原水の濁度及び色度は大きく変動したものの、凝集沈澱水、浄水と処理工程を経るごとに変動幅が減少し、次第に水質が安定した。

色度が外れ値(5.5 度)となった浄水場 B の 12 月の凝集沈澱水を除く凝集沈澱水、及び全ての浄水が、紫外線適用が認められる濁度、色度の要件を満足した。なお、色度が外れ値となった凝集沈澱水については、同日の原水色度が他試料に比べてやや高い傾向にあったものの突出した特徴はなく、色度が平時に比べて高かった理由は不明である。なお、同日に採水した浄水の色度は 0.5 度であり、紫外線処理適用の観点からは十分に低い値であった。

### 2) 紫外線透過率

紫外線透過率の全測定結果を表 10 に、変動範囲を図 4 に示した。

表6 各 RUN における濁度除去率及びクリプトレーサー除去率

	原水 濁度[度]	沈澱水 濁度[度]	砂ろ過水 濁度[度]	凝沈 濁度 Log 除去率	砂ろ過 濁度 Log 除去率	凝沈 クリプト Log 除去 率	砂ろ過 クリプト Log 除去 率	Total クリプト Log 除去 率
RUN1 有機物なし, 高濁	3	0.53	0.0017	0.7	2.5	0.7	2.2	2.9
	752	1.70	0.0027	2.6	2.8	2.3	3.0	5.2
	412	1.78	0.0022	2.4	2.9	2.4	>4.1	>6.5
	154	1.50	0.0023	2.0	2.8	2.2	2.5	4.8
	49	1.94	0.0018	1.4	3.0	1.7	3.4	5.1
RUN2 有機物あり, 高濁	4	0.40	0.0013	1.0	2.5	1.0	3.9	4.9
	774	1.23	0.0023	2.8	2.7	2.6	5.8	8.4
	455	1.16	0.0021	2.6	2.7	2.4	4.9	7.3
	210	1.02	0.0012	2.3	2.9	2.4	5.5	7.8
RUN3 有機物あり, 沈澱不良, 後 PAC	49	1.06	0.0006	1.7	3.2	2.2	5.3	7.5
	63	4.25	0.0015	1.2	3.5	1.0	3.6	4.6
	66	4.71	0.0005	1.1	4.0	0.9	>4.6	>5.5
	45	7.19	0.0003	0.8	4.4	2.0	>4.5	>6.5
RUN4 有機物あり, 凝集不良, 後 PAC	47	6.56	0.0004	0.9	4.2	1.1	3.9	5.1
	51	7.94	0.0006	0.8	4.1	0.9	>4.6	>5.5
	42	5.70	0.0598	0.9	2.0	1.2	2.8	4.0
	42	5.40	0.0275	0.9	2.3	1.0	4.1	5.0
RUN5 有機物あり, 凝集不良, 超高塩基度 PAC,後 PAC	47	7.01	0.0291	0.8	2.4	1.1	3.7	4.8
	48	6.76	0.0177	0.9	2.6	1.0	3.8	4.9
	39	6.65	0.0145	0.8	2.7	1.0	4.7	5.7
	37	7.49	0.0472	0.7	2.2	0.7	1.7	2.4
	38	6.42	0.0259	0.8	2.4	1.2	3.4	4.6
RUN6 有機物なし, 凝沈なし, 後 PAC	52	7.02	0.0165	0.9	2.6	1.1	3.5	4.6
	44	6.19	0.0054	0.9	3.1	1.6	3.2	4.8
	42	6.98	0.0042	0.8	3.2	0.7	4.0	4.7
	-	5.33	4.60	-	0.1	-	0.1	0.1
	-	5.59	0.16	-	1.5	-	2.9	2.9
RUN7 有機物あり, 凝沈なし, 後 PAC	-	5.40	0.12	-	1.6	-	3.4	3.4
	-	5.29	0.08	-	1.8	-	3.9	3.9
	-	5.18	0.16	-	1.5	-	2.7	2.7
	-	5.53	5.50	-	0.0	-	0.1	0.1
	-	5.55	5.50	-	0.0	-	0.1	0.1
RUN7 有機物あり, 凝沈なし, 後 PAC	-	5.48	5.48	-	0.0	-	0.1	0.1
	-	5.43	0.58	-	1.0	-	2.1	2.1
	-	6.52	0.03	-	2.3	-	4.9	4.9
	-	5.28	4.38	-	0.1	-	0.3	0.3

表7 凝集沈でん・砂ろ過処理水のクリプトスポリジウム感染確率

	原水中の クリプト濃度 個/L	飲用水量 L/日	除去率 log	摂取量 個/日	感染確率* 人/年
RUN1			2.9	0.126	<b>0.193</b>
			5.2	0.000631	<b>0.000965</b>
			6.5	0.0000316	0.0000483
			4.8	0.00158	<b>0.00242</b>
			5.1	0.000794	<b>0.00121</b>
RUN2			4.9	0.00126	<b>0.00193</b>
			8.4	3.98E-07	0.000000609
			7.3	5.01E-06	0.00000766
			7.8	1.58E-06	0.00000242
			7.5	3.16E-06	0.00000483
RUN3			4.6	0.00251	<b>0.00384</b>
			5.5	0.000316	<b>0.000483</b>
			6.5	0.0000316	0.0000483
			5.1	0.000794	<b>0.00121</b>
			5.5	0.000316	<b>0.000483</b>
RUN4	100	1	4.0	0.01	<b>0.0153</b>
			5.0	0.001	<b>0.00153</b>
			4.8	0.00158	<b>0.00242</b>
			4.9	0.00126	<b>0.00193</b>
			5.7	0.0002	<b>0.000306</b>
RUN5			2.4	0.398	<b>0.608</b>
			4.6	0.00251	<b>0.00384</b>
			4.6	0.00251	<b>0.00384</b>
			4.8	0.00158	<b>0.00242</b>
			4.7	0.002	<b>0.00306</b>
RUN6			0.1	79.4	<b>103</b>
			2.9	0.126	<b>0.193</b>
			3.4	0.0398	<b>0.0609</b>
			3.9	0.0126	<b>0.0193</b>
			2.7	0.2	<b>0.306</b>
RUN7			0.1	79.4	<b>103</b>
			0.1	79.4	<b>103</b>
			0.1	79.4	<b>103</b>
			2.1	0.794	<b>1.21</b>
			4.9	0.00126	<b>0.00193</b>
			0.3	50.1	<b>69.1</b>
最大					103
最小					0.000000609

\*イタリック体数字で背景がグレーの部分がEPA基準(10<sup>-4</sup>)超過のケース

表8 凝集沈でん・砂ろ過・仮想紫外線照射水のクリプトスポリジウム感染確率

	原水中の クリプト濃度 個/L	飲用水量 L/日	除去率 log	砂ろ過水 吸光度 abs./10mm	推定紫外線 不活化率 log	摂取量 個/日	感染確率* 人/年
RUN1			2.9	0.001	3.6	0.0000316	0.0000483
			5.2	0.008	3.6	0.00000158	0.00000242
			6.5	0.011	3.6	7.94E-09	1.21E-08
			4.8	0.009	3.6	0.00000398	0.00000609
			5.1	0.007	3.6	0.0000002	0.00000306
RUN2			4.9	0.012	3.6	0.00000316	0.00000483
			8.4	0.007	3.6	1E-10	1.53E-10
			7.3	0.011	3.6	1.26E-09	1.93E-09
			7.8	0.009	3.6	3.98E-10	6.09E-10
			7.5	0.012	3.6	7.94E-10	1.21E-09
RUN3			4.6	0.014	3.6	0.00000631	0.00000965
			5.5	0.011	3.6	7.94E-08	0.00000121
			6.5	0.013	3.6	7.94E-09	1.21E-08
			5.1	0.013	3.6	0.0000002	0.00000306
			5.5	0.012	3.6	7.94E-08	0.00000121
RUN4	100	1	4.0	0.028	3.4	0.00000398	0.00000609
			5.0	0.021	3.6	0.00000251	0.00000384
			4.8	0.017	3.6	0.00000398	0.00000609
			4.9	0.017	3.6	0.00000316	0.00000483
			5.7	0.017	3.6	5.01E-08	7.66E-08
RUN5			2.4	0.020	3.6	0.0001	<b>0.000153</b>
			4.6	0.018	3.6	0.00000631	0.00000965
			4.6	0.019	3.6	0.00000631	0.00000965
			4.8	0.017	3.6	0.00000398	0.00000609
			4.7	0.017	3.6	0.00000501	0.00000766
RUN6			0.1	0.012	3.6	0.02	<b>0.0306</b>
			2.9	0.011	3.6	0.0000316	0.0000483
			3.4	0.009	3.6	0.00001	0.0000153
			3.9	0.010	3.6	0.00000316	0.00000483
			2.7	0.015	3.6	0.0000501	0.0000766
RUN7			0.1	0.147	3.0	0.0794	<b>0.121</b>
			0.1	0.174	3.0	0.0794	<b>0.121</b>
			0.1	0.171	3.0	0.0794	<b>0.121</b>
			2.1	0.069	3.4	0.000316	<b>0.000483</b>
			4.9	0.019	3.6	0.00000316	0.00000483
			0.3	0.183	3.0	0.0501	<b>0.0766</b>
最大							0.121
最小							1.53E-10

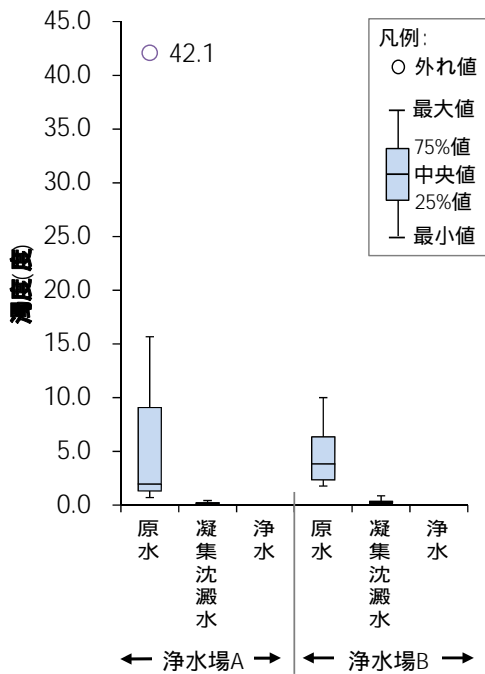
\*イタリック体数字で背景がグレーの部分が EPA 基準 (  $10^{-4}$  ) 超過のケース

表9 濁度と色度

	濁度(度)						色度(度)					
	浄水場 A			浄水場 B			浄水場 A			浄水場 B		
	原水	凝集 沈澱 水	浄水	原水	凝集 沈澱 水	浄水	原水	凝集 沈澱 水	浄水	原水	凝集 沈澱 水	浄水
9月	2.5	0.1	0.0	2.0	0.1	0.0	4.0	1.2	0.0	5.5	1.8	0.2
10月	42.1	0.1	0.0	10.0	0.1	0.0	54.7	0.8	0.0	25.2	2.3	0.0
11月	1.6	0.4	0.0	3.8	0.3	0.0	7.3	2.0	0.5	9.8	2.0	0.0
12月	0.7	0.0	0.0	4.7	0.2	0.0	4.8	0.8	0.0	14.7	5.5	0.5
1月	2.0	0.1	0.0	2.7	0.9	0.0	3.2	0.3	0.0	9.3	2.5	0.0
2月	1.0	0.1	0.0	1.8	0.3	0.0	3.2	1.0	0.0	10.5	3.0	0.2
3月	15.7	0.3	0.0	8.0	0.4	0.0	27.3	1.0	0.0	22.7	2.7	0.5
平均値	9.4	0.2	0.0	4.7	0.3	0.0	14.9	1.0	0.1	14.0	2.8	0.2
標準偏差	15.4	0.2	0.0	3.2	0.3	0.0	19.5	0.5	0.2	7.4	1.2	0.2
最大値	42.1	0.4	0.0	10.0	0.9	0.0	54.7	2.0	0.5	25.2	5.5	0.5
中央値	2.0	0.1	0.0	3.8	0.3	0.0	4.8	1.0	0.0	10.5	2.5	0.2
最小値	0.7	0.0	0.0	1.8	0.1	0.0	3.2	0.3	0.0	5.5	1.8	0.0

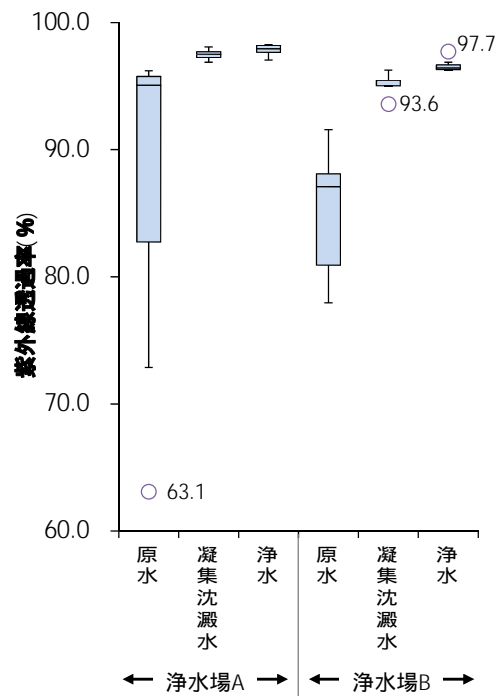
表10 紫外線透過率(%)

	浄水場 A			浄水場 B		
	原水	凝集 沈澱 水	浄水	原水	凝集 沈澱 水	浄水
9月	96.0	96.9	97.1	91.6	95.0	96.2
10月	63.1	97.4	97.6	78.2	95.1	96.5
11月	92.6	97.1	97.7	87.1	95.0	96.4
12月	96.2	97.8	97.9	83.7	93.6	96.3
1月	95.5	98.1	98.3	87.5	96.2	97.7
2月	95.1	97.6	98.2	88.6	95.8	96.9
3月	72.9	97.5	98.2	77.9	95.0	96.3
平均値	87.3	97.5	97.9	84.9	95.1	96.6
標準偏差	13.6	0.4	0.4	5.3	0.8	0.5
最大値	96.2	98.1	98.3	91.6	96.2	97.7
中央値	95.1	97.5	97.9	87.1	95.0	96.4
最小値	63.1	96.9	97.1	77.9	93.6	96.2



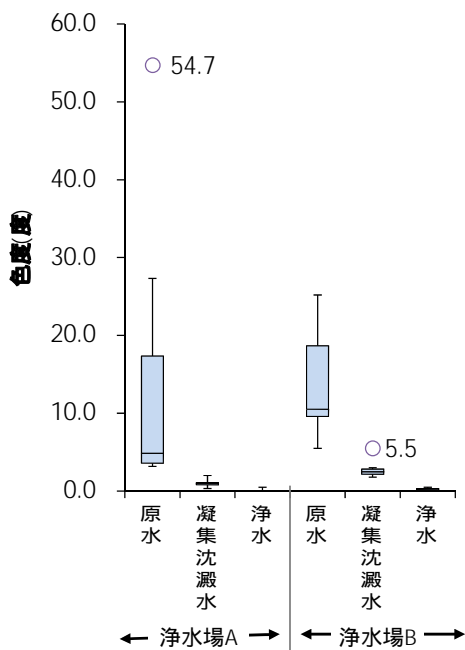
(試料ごとのデータ数 n=7、数値は外れ値)

図 2 濁度の変動



(n=7、数値は外れ値、凡例は図 2 に同じ)

図 4 紫外線透過率の変動



(n=7、数値は外れ値、凡例は図 2 に同じ)

図 3 色度の変動

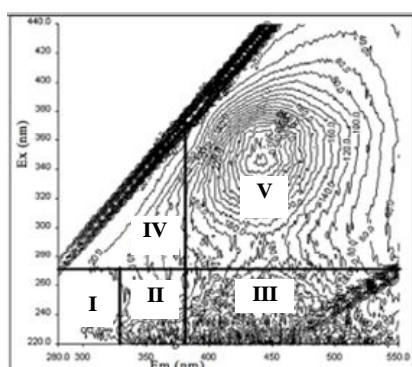
### 3) 溶存有機炭素と溶存有機物組成

溶存有機炭素(DOC)濃度の経月変化は、いずれの浄水場でも台風直後の10月に高い値を示した。例えば浄水場Bでは、10月の原水DOCは3.3mg/L程度だった。浄水処理に伴い低減したが、濁度や色度にくらべて低減率は一般的に小さく、B浄水場の10月の浄水DOCは約3mg/Lだった。

溶存有機物の質的特性を把握するため、励起蛍光マトリクス(EEM)測定を行った。EEMの領域ごとの成分は概ね図5に従うことが知られている。結果の一例として、図6に浄水場Bの10月から1月のEEM分析結果を示す。なお、図6の凡例は任意単位(arbitrary unit, au)であるが、すべての試料についてスケールを固定しており、強度の相対的な大小について試料間の相互比較が可能である。

浄水場Bの原水では、フルボ酸様物質、トリプトファン関連物質、フミン酸様物質が卓越していたが、10月、11月にはる過

処理によって、12月、1月には凝集沈澱処理によって、溶存有機物の多くが除去されたことが分かった。採水月によって浄水工程における除去のタイミングに違いがあったことについて、詳細は不明であるが、凝集沈澱処理での除去率の違いが影響したことから、粒子表面に吸着していた有機物の挙動が関与していた可能性が推察される。



I:チロシン関連物質、II:トリプトシン関連物質、  
III:フルボ酸様物質、IV:溶存微生物産生物質、  
V:フミン酸様物質

図5. 溶存物質のEEM出現領域

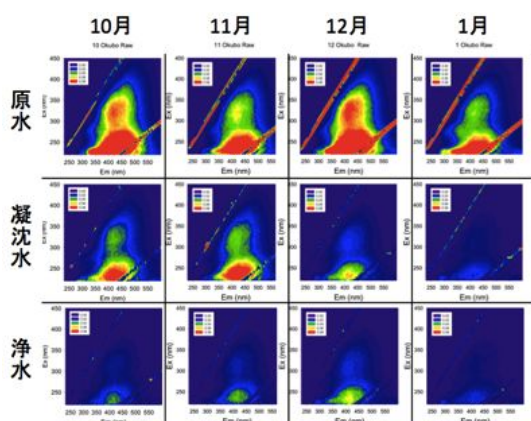


図6. 浄水場BにおけるEEM変化

DOCとEEMを比較すると、DOC濃度は同等でもEEM強度が著しく異なる試料が確認された。例えば、11月と12月の凝集沈澱水のDOCは同等であったが、EEM強度は11月で大きかった。また、月別の浄水を比較すると、10月のDOCは他月に比べて高かったが、10月のEEM強度はむしろ他月よりも低かった。すなわち、EEM測定により、浄水場の処理工程に伴

う溶存有機物の質の変化を視覚的に捉えることができた。溶存有機物組成による紫外線処理性への影響は今後の検討課題であるが、EEM測定がその有用な分析方法となりうることが示された。

#### 4) 粒径分布

およそ0.8nm~6.54μmの粒径をもつ微粒子の粒径分布測定を試みたが、凝集沈澱水及び浄水では試料中の粒子総数が少なく、検出に至らなかった。また、原水試料でも測定対象範囲の粒径に該当する粒子の存在量は少なく、粒径の経月推移を明確に捉えることは困難であった。

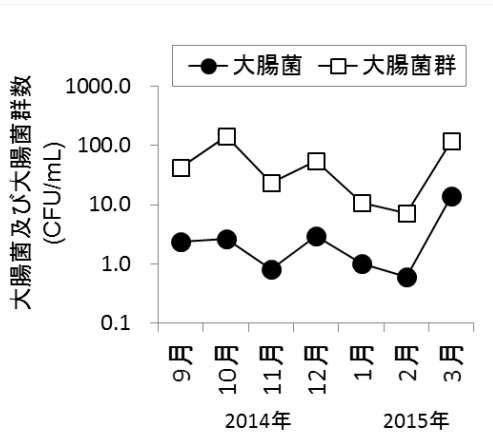
一般に、粒子による紫外線処理への影響を検討した先行研究の多くは粒径数μmから数十μmの粒子について調査しており、ナノスケール微粒子による紫外線処理性への影響は不明な点が多い。ナノスケール粒子は、微生物を光子から保護し紫外線処理効率を低下させる「遮蔽効果 (shielding effects)」は小さいと推察されるが、紫外線の散乱や反射、微生物の凝集性への影響などを介して間接的に紫外線処理効率に影響する可能性がある。よって、ナノスケール粒子の粒径分布による紫外線処理性への影響について本研究で調査する余地はあるが、本年度の結果から、自然河川水中に含まれるナノスケール粒子は存在量が少なく、それらを用いた微生物不活化実験は困難であることが判明した。今後の研究では、自然河川中の微粒子成分の濃縮、モデル微粒子の添加など、実験設計上の工夫が必要と考えられた。

#### 5) その他の水質項目

原水中の大腸菌及び大腸菌群数を図7に示す。いずれの浄水場でもすべての原水試料で大腸菌陽性であり、クリプトスポリジウム等対策指針の定義するレベル4 (原水中に指標菌を検出し地表水を原水とする施設、現行指針ではろ過池出口濁度を0.1度以下に維持することが求められる) に該当することが確認された。大腸菌及び大腸菌群濃度は、特に台風直後の10月や降雨直後の3月の試料で高くなる傾向がみられた。



[浄水場 A]



[浄水場 B]

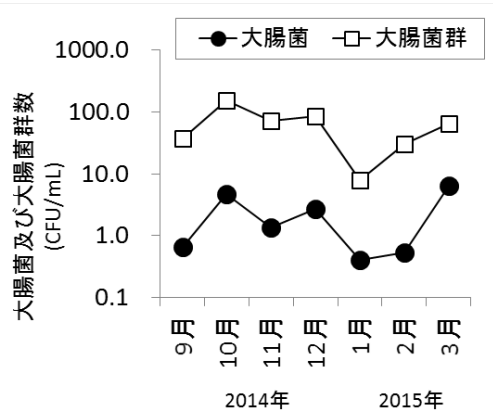


図7 浄水場 A、B 原水中の大腸菌及び大腸菌群数

鉄及びマンガンについて、いずれの浄水場でも台風直後に採水した 10 月の原水試料で紫外線適用において好ましいとされる推奨値(鉄 0.1mg/L、マンガン 0.05mg/L)を超過したものの、凝集沈澱水、浄水の全試料で推奨値を下回り、定量下限値(鉄 0.03mg/L、マンガン 0.02mg/L)と同等又はそれ以下で安定的に推移した。

硬度は、浄水場 A の原水試料で最大値 63mg/L、浄水場 B の原水試料で最大値 86mg/L であり、台風や降雨の後でもほぼ一定の値を示した。また、浄水処理工程を経て原水とほぼ同じ値を示し、紫外線適用における推奨値 140 mg/L を常に下回った。

2.3 原水条件及び処理効果の検証

公称孔径 5 $\mu$ m のメンブランフィルターろ過による水質変化の一例を表 11 に示す。

表 11 ろ過による水質変化

	ろ過前	ろ過後	除去率(%)
大腸菌濃度 (CFU/100mL)	100	20	80.0
大腸菌群濃度 (CFU/100mL)	9400	3200	66.0
濁度(NTU)	7.3	1.2	83.6
紫外線透過率 (%)	85.5	91.8	-

この結果から分かるとおり、公称孔径 5 $\mu$ m のメンブランフィルターでろ過を行うことにより、大腸菌、大腸菌群、濁度のそれぞれが 66～84%除去された。

不活化実験を行った結果を図 8、9 に示す。ここで測定した水における大腸菌及び大腸菌群という細菌指標の不活化は、肩を持たない不活化直線で表されることが分かった。また、実験を行った範囲ではテーリングは観察されなかった。

また、図 8 でろ過前後の大腸菌、大腸菌群の結果を比較すると、大腸菌と大腸菌群のどちらもろ過後の傾きが大きくなっており、濁度成分の除去によって紫外線照射槽内の平均紫外線量が大きくなっていることと符合する結果である。

図 9 における、log 生残率の結果は、大腸菌及び大腸菌群のどちらも、平均紫外線量が同じであれば同様の生残率になってい

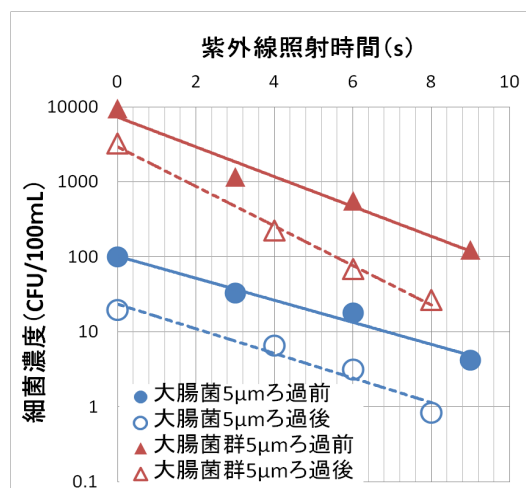


図 8 ろ過前後の大腸菌及び大腸菌群における紫外線照射時間と細菌濃度の関係

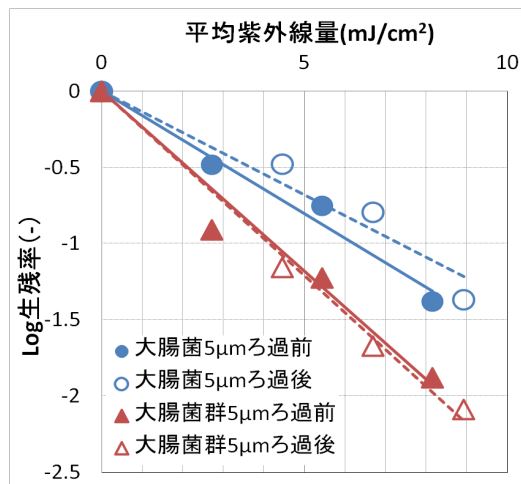


図9 ろ過前後の大腸菌及び大腸菌群における平均紫外線量と log 生残率の関係

ることが分かる。また、今回の実験においては大腸菌の紫外線耐性は大腸菌群よりも大きく、不活化されにくい傾向が見られた。

すなわち、試料の吸光度を測定し、平均紫外線量を用いることで、大腸菌及び大腸菌群の log 生残率を概ね予測できることが示された。

### 3. 濁度変動に対応する紫外線照射線量の検討

図 10 に各試料の濁度を測定し、その濁度比 (=積分球式濁度値 / 透過光式濁度値) を求めて示した。濁度比はカオリンが最も高い値 (= 1) となり、活性炭が最も低い値となっていた。散乱光が大きいほど、積分球式濁度値が高く濁度比が高くなると考えられるため、カオリンの散乱特性が非常に高い物質であることが分かった。また活性炭は最も低い濁度比となったことから、散乱特性が非常に低い物質であることが分かった。このことから、高散乱の標準物質としてカオリンを、低散乱の標準物質として活性炭を用いることとした。ベントナイト懸濁液及び、各浄水場原水の濁度比は、いずれもカオリンと活性炭の間の値となっていた。従って、ベントナイト及び浄水場原水は、いずれも標準物質としたカオリンと活性炭の混合液と想定することができた。

図 11 は各試料をカオリンと活性炭の混合液と想定した場合の混合比を示したものである。想定混合比は図 10 に示されるカオリンと活性炭の濁度比、及び各試料の濁度比から式(3)及び(4)を用いて求めたものである。ベントナイトは濁度比が活性炭に近いことから、活性炭の想定混合比率が高い結果となり、また浄水場原水については、様々な想定混合比率となっていることが分かった。

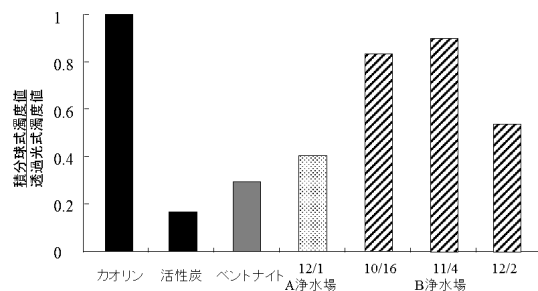


図10 各試料の濁度比 (=積分球式濁度値 / 透過光式濁度値)

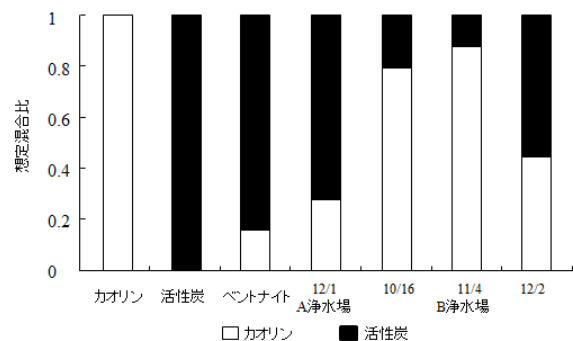


図11 各試料をカオリン及び活性炭の混合液と想定した場合の想定混合比率

## D. 考察

### 1. 濁度管理等における課題の抽出

今年度は、結果的に事業体の規模が比較的大きいところの浄水場及び施設を中心に調査を行った。また、四国、近畿地方の事業体の調査は、諸般の事情から、計画変更を余儀なくされ、実施できなかった。したがって、平成 27 年度は近畿、四国、及び関東地方の中・小規模事業体を主な調査先として作業を継続する予定である。

## 2. 原水条件及び処理効果の検証

### 2.1 模擬高濁度原水に対するクリプトスポリジウム除去性並びに紫外線処理導入による感染リスク低減効果の推定

凝集沈澱及び砂ろ過のみの場合では許容感染確率  $10^{-4}$  を超過したケースが大半に上り、適切な浄水処理が行われない運転条件下での感染確率の上昇が確認された。一方で、PACの適正注入により最適な凝集沈澱処理の実施することで、感染リスクを適切に低減できることが示された。さらに、砂ろ過水に対して紫外線処理を適用することで、感染確率  $10^{-4}$  を超過するケースは大幅に減少した。このことから、高濁度原水に対して凝集沈澱・砂ろ過処理が不十分となるような事態に対して、感染リスク低減の面から紫外線処理の追加が有用であることが示された。

### 2.2 地表水における紫外線処理の適用可能性のための水質分析

総じて、原水水質は変動が大きく、特に台風や降雨の後に特異的な水質が観察されることが多かった。一方、凝集沈澱水、浄水と処理が進むに従い水質変動の幅が小さくなり、台風や降雨の直後を含めて安定して良好な水質を維持した。現行の指針が示した紫外線処理適用の水質要件（濁度2度以下、色度5度以下、紫外線透過率75%以上）と比較すると、凝集沈澱水では色度5.5度を示した1試料を除く13試料が水質要件を満たし（適合率約93%）、浄水では台風直後を含む14試料すべてが水質要件を満たした（適合率100%）。

紫外線透過率とその他水質項目（濁度、色度、DOC、鉄、マンガン）との関連について、ピアソンの積率相関係数  $r$  を算出した（表12）。いずれの浄水場でも、また、原水、凝集沈澱水とも、紫外線透過率と相関が最も高いのは色度であった。一方、濁度は、原水試料では紫外線透過率と高い相関を示したものの、凝集沈澱水では相関は低かった。また、浄水試料では特定の水質項目間に強い相関は見られなかったが、これはいずれの項目も浄水処理に伴い値が低下し、水質が均質化したためと推察された。

表12 紫外線透過率との相関係数

（試料ごとのデータ数  $n=7$ ）

	浄水場A			浄水場B		
	原水	凝沈水	浄水	原水	凝沈水	浄水
濁度	0.96	0.48	n.a.	0.96	-0.58	0.27
色度	0.99	0.78	0.18	0.98	0.68	0.50
鉄	0.95	0.64	n.a.	0.69	-0.02	0.16
マンガ	-0.25	0.15	0.01	0.77	0.44	0.14
DOC	0.57	0.32	0.25	0.64	0.41	0.23

n.a.: 算出不可能（全測定値が0のため）

紫外線透過率とDOCの相関は必ずしも高くなかったが、既述の通り、DOCは同等でも有機物組成の異なる場合があった。浄水場原水中に卓越していたフルボ酸様物質、トリプトファン関連物質、フミン酸様物質のうち、特にフミン質は紫外線吸収率が高いことが知られており、溶存有機物の質（組成）と紫外線透過率の関係について詳細な検討が望まれる。

粒径と紫外線処理性の関係について、粒径の小さいほうが紫外線処理を阻害したとする研究、大きいほうが阻害したとする研究、紫外線照射量によって粒径の影響が異なるとする研究が混在する。本研究では、台風や降雨の後に粒径の大きい粒子が増加する傾向を確認したことを踏まえ、降雨等に伴う粒径の変化が紫外線処理性に及ぼす影響について検討する余地がある。

### 2.3 地表水の水質特性が紫外線処理の効果に及ぼす影響評価

$5\mu\text{m}$  のろ過膜によるろ過の前後で濁度が減少し、同時に大腸菌及び大腸菌群も減少している。ここで減少した理由は菌が濁質に吸着したからであると推察できる。その場合、濁質に吸着している大腸菌及び大腸菌群は濁質の陰になりやすいと考えられ、ろ過で除去された菌の紫外線耐性が透過したものに比べて大きいことが推察された。そこで、下記の式(9)を仮定する。

$$S_{5\mu} = S_{A0} \cdot \exp\left(-\frac{It}{D_A}\right) - S_{B0} \cdot \exp\left(-\frac{It}{D_B}\right) \quad \text{式(9)}$$

ここで、 $S$  は細菌濃度、 $D$  は不活化速度

定数、 $I_t$  は紫外線量を表し、下付きの文字は、A がろ過前、B がろ過後、 $5\mu$  は公称孔径  $5\mu\text{m}$  で捕捉された成分、0 は紫外線照射前の初期値であることを表す。

つまり、ろ過で捕捉された成分における紫外線量  $I_t$  照射後の細菌濃度  $S_{5\mu}$  は、ろ過前の試料に紫外線量  $I_t$  照射後の細菌濃度からろ過後の試料に紫外線量  $I_t$  照射後の細菌濃度を差し引いたものになると仮定する。実験においてろ過前後の  $D$  を実測できるので、これを用いて捕捉された成分における生残濃度を算定することができる。この計算の結果を、平均紫外線量に対して大腸菌及び大腸菌群の実測値のプロットと同時に図 12、13 に示した。

これらの結果より、ろ過で除去された大腸菌及び大腸菌群における紫外線耐性はほぼ変わらず、濁度成分による防護効果は本実験系においては顕著でないと考えられ、予想と異なる結果となった。

しかし、この結果は照射時間の長い回分式の系という照射装置上の理由で差が出なかったのか、高照射強度で照射時間が短い流水式の系においても差が出ないのかどうかについては、今後の課題である。

### 3. 濁度変動に対応する紫外線照射線量の検討

濁度比を積分球式濁度値 / 透過光式濁度値とした場合、散乱光が高い懸濁質では積分球式濁度値が高くなる傾向があり、濁度比は高い値を示すと考えられ、可視光の

散乱特性を示す指標となると考えられた。図 10 に示したようにカオリンの濁度比が 1 と最高値であり、活性炭が約 0.2 と最低値だった。濁度比が最高値となったカオリンを高散乱の標準物質とし、濁度比が最低値となった活性炭を低散乱の標準物質とすることにした。

図 14 はベントナイト及び浄水場原水試料水の紫外光吸光度を積分球式で測定し、その吸光度から紫外線処理における消毒効果の減衰率推定値を求めた値と、濁度比からカオリンと活性炭の想定混合比を求め、その値から紫外線処理における消毒効果の減衰率を算定し、それらの相関を示したものである。

図 14 に示した点線は、算定値と測定値が同じ値になることを示し、2 方式の濁度値による濁度比によって、紫外線処理の減衰率が把握できることを示している。図示されたように、ベントナイト懸濁溶液については、算定値と測定値が非常に近い値となっていることから、2 方式の濁度値による濁度比から、紫外線処理の影響をより正確に推定することができたと考えられる。

浄水場原水においては、4 採水試料のうち 3 採水試料は算定値と測定値がほぼ同じであり、同様に、2 方式の濁度測定によって紫外線処理の影響を推定することができた。しかし 10/16 採水試料 (B 浄水場) においては、算定値が実測値に比べて高い値となっており、紫外線処理の低減効果を過剰に評価したこととなった。

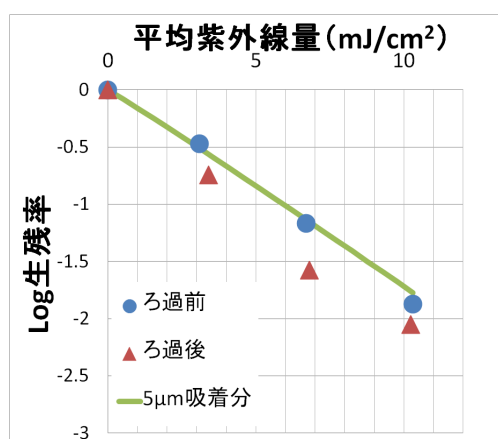


図 12 ろ過で除去された大腸菌における平均紫外線量と log 生残率の関係

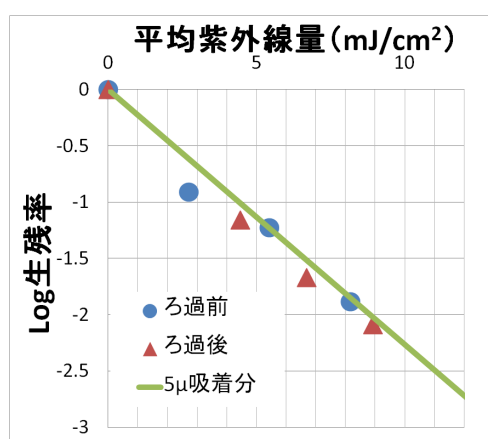


図 13 ろ過で除去された大腸菌群における平均紫外線量と log 生残率の関係

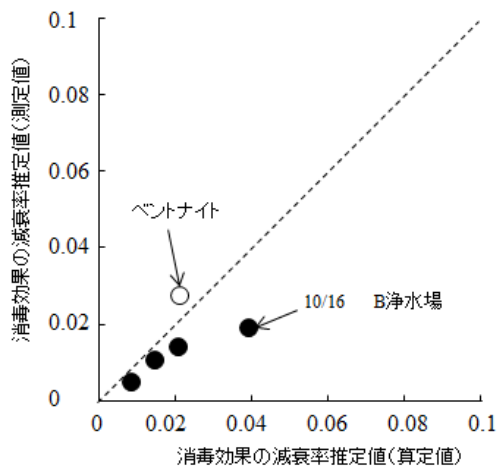


図 14 紫外線処理の減衰率推定値の算定値 (横軸)と吸光度測定による測定値(縦軸)の関係

算定値に比べて測定値が低いということは、可視光の散乱特性よりも紫外光の散乱特性の方が高いことを示しており、可視光よりも紫外光が散乱するために、紫外線処理における減衰効果が算定値よりも低くなったと考えられる。このようなケースでは、濁度比を用いて紫外光の散乱を想定して、低減効果を低めに見積もった以上に、低減効果がなかったということであるが、一般的な方法である紫外吸光のみによる低減効果は、かなり過大評価であることを示すともいえる。見方を変えれば、このようなケースでは、紫外吸光のみによる紫外線処理の評価は、かなり安全側の評価となっていることになる。

この採水日(10/16)は台風による豪雨の直後であり、積分球式の濁度値が通常時(1.8~4.7度)よりも、18度と比較的高く、かつ濁質成分が通常と異なっていたケースであると考えられる。

今後はこのようなケースの濁質の由来や、その他の分析値(例えば粒径分布や組成)との関連性を検討し、適切な評価方法をケースバイケースにて選択できるようにする必要があると考えられる。

## E. 結論

当初計画どおりに各種の調査・実験等を行い、研究を進めた。

### 1. 濁度管理等における課題の抽出

今年度は、調査先の事業体の規模が中規模~大規模が多くなった結果、浄水場も中~大規模が多くなった。平成27年度は、可能な限り全国を網羅するように地域を見直すとともに、中・小規模施設を主要な調査対象として作業を継続し、ろ過池の濁度管理及び紫外線処理施設の維持管理の実態把握を行う予定である。

### 2. 原水条件及び処理効果の検証

#### 2.1 模擬高濁度原水に対するクリプトスポリジウム除去性並びに紫外線処理導入による感染リスク低減効果の推定

小型浄水処理実験装置を用いて行ったクリプトレーザー除去率の実験結果等を基に行ったリスクの試算結果から、凝集沈澱及び砂ろ過処理においてクリプトスポリジウムの除去が不十分となる場合でも、紫外線処理の追加によりほとんどの場合で感染リスクは $10^{-4}$ 未満となることが示され、紫外線処理導入の有用性が示された。

#### 2.2 地表水における紫外線処理の適用可能性のための水質分析

地表水を原水とする浄水場二か所において、原水、凝集沈澱水(砂ろ過前)、浄水を採水し、水質を分析した結果、以下の結論を得た。

- 1) 原水試料の濁度、色度、紫外線透過率はいずれも変動が大きく、特に台風や降雨直後の試料で水質変動幅が大きかった。
- 2) 凝集沈澱水、浄水では台風直後を含むすべての試料で水質が安定し、変動幅は凝集沈澱水、浄水の順に次第に小さくなった。
- 3) 現行指針の示す地表水以外に対する紫外線処理適用の水質要件と比較すると、凝集沈澱水では色度5.5度を示した1試料を除く13試料が水質要件を満たし、適合率は約93%であった。また、浄水では台風直後を含む14試料すべてが水質要件を満たした。

以上より、地表水を原水とする浄水場において、紫外線設備を凝集沈澱ろ過後に設置すれば、突発的な水質変動を考慮しても紫外線処理が有効である可能性が示唆された。

### 2.3 原水条件及び処理効果の検証

表流水を原水とする浄水場の原水を用い、ろ過による濁度除去、紫外線透過率の上昇、大腸菌と大腸菌群という測定方法の差がどのように不活化効果に影響するのか、低圧水銀ランプを用いた回分式紫外線照射槽を用いて調べた。その結果、大腸菌及び大腸菌群の不活化プロセスは肩及びテーリングを持たない一次反応的な曲線で表され、平均紫外線量で整理すると、濁度成分の不活化速度への影響は見られなかった。

また、5 $\mu$ m ろ過で捕捉された大腸菌及び大腸菌群の不活化速度はろ過前後とほぼ同じであった。濁質による細菌の防護効果は、比較的照射時間の長い回分式においては観察されにくい可能性が示された。

### 3. 濁度変動に対応する紫外線照射線量の検討

濁質の可視光散乱特性を、二つの方式による濁度の比(積分球式濁度値/透過光式濁度値)を指標とすることで把握することができた。この濁度比を元に、紫外光の散乱特性を推定し、紫外線処理への影響をより正確に推定する可能性を見出した。

## F. 健康危険情報

特になし。

## G. 研究発表

### 1. 論文発表

該当なし

### 2. 学会発表

- ・Mika Koshio, Kumiko Oguma and Satoshi Takizawa, "Effects of turbid and dissolved matters in surface water on UV treatment", The 11th International Symposium on Southeast Asian Water Environment. November 26-28, 2014. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- ・石田晃啓、神子直之、小川敬士、「濁質を含む水に対する紫外線消毒の適用性」

第 49 回日本水環境学会年会講演集、  
p.476、2015 年 3 月

## H. 知的財産権の出願・登録状況(予定を含む)

### 1. 特許取得

該当なし

### 2. 実用新案登録

該当なし

### 3. その他

該当なし