

写真-1 国立保健医療科学院
浄水実験プラント凝集沈澱槽

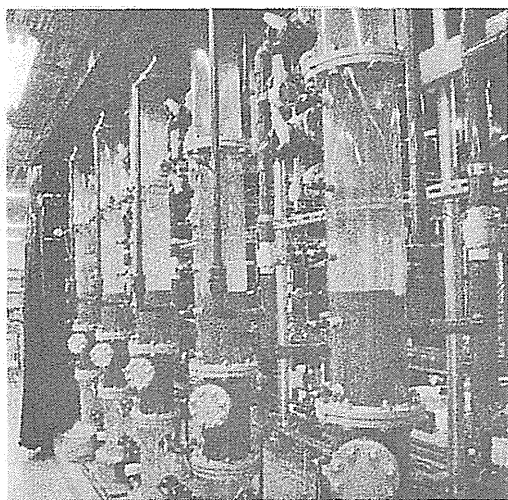


写真-2 国立保健医療科学院
浄水実験プラント砂濾過塔

用し（従来型 PAC 系）、他方の系統には凝集剤として塩基度72%の高塩基度 PAC を使用した（高塩基度 PAC 系）。各々の系統は、原水調製槽と凝集沈澱槽、砂濾過塔、膜濾過設備で構成され、沈澱水は砂濾過塔 2 塔及び膜濾過設備へ分岐されるフローとなっている。実験原水は、国立保健医療科学院内の深井戸から取水した地下水に、濁度が約20,000度の高濃度カオリン（和光純薬製）水をチュービングポンプで添加し、濁度を調整したものを使用した。凝集剤と pH 調整剤（硫酸）は、原水調製槽から凝集混和槽へ接続する配管内で注入した。凝集剤は、希釈せずに原液をそのまま注入した。

凝集 pH は、予備実験として実施したジャーテストによる上澄水濁度及び残留アルミニウム濃度の結果から適正とされた pH 7 とし、凝集混和槽内の pH 計により pH6.9~pH7.1 でフィードバック自動制御した。

攪拌強度は、予備実験として実施したジャーテストにおいて、攪拌強度を変化させても上澄水濁度に大きな差異が生じなかったことから、凝集剤に従来型 PAC を用いた場合におけるこれまでの運転実績から急速攪拌速度126rpm（G 値450）、緩速攪拌速度8.6rpm（G 値12）と設定した。

凝集沈澱槽での処理水量は10.0L/min とした。各槽の容積から求めた滞留時間は、凝集混和槽は5.5分、フロック形成槽は34分、沈澱槽は90分となった。凝集沈澱処理水（沈澱水）は、ポンプにより後段プロセスである砂濾過プロセス及び膜濾過プロセスへ送水した。

系統毎に 2 塔運転した砂濾過塔の運転条件は、同一とした。砂濾過速度は一般的な濾過速度である120m/日とし、逆洗間隔は24時間とした。砂濾過の逆洗方法は、空気洗淨（330秒）+ 気水洗淨（70秒）+ 水洗淨（400秒）とした。

膜濾過設備は、分画分子量150,000の酢酸セルロース製 UF 膜を用いて、膜濾過 Flux を1.8m³/m²/日の全量濾過方式で運転した。膜の物理洗淨については、179分の濾過継続時間の後、1分の逆洗を行った。逆洗浄時の Flux は8.6m³/m²/日で、次亜塩素酸ナトリウム等の薬品は添加しなかった。

2.2 実験条件

原水濁度は、5 度、30度及び300度と設定した。

凝集剤注入率は、予備実験として実施したジャーテストにおける上澄水濁度の結果及び実験中の沈澱水濁度から勘案して、設定原水濁度が5 度及び30度の条件では36mg/L、300度の条件では36mg/L と72mg/L とした。急速濾過システム及び膜濾過システムをそれぞれの設定原水濁度で24時間ずつ、合計72時間連続運転した（以下、実験①とする）。設定原水濁度300度の条件においては、凝集剤注入率36mg/L で6時間運転した後、凝集剤注入率72mg/L で18時間運転した。

その後、沈澱水中フロックのゼータ電位及び粒径分布の測定、並びに実験結果の再現性の確認を

目的に、再度、実験を行った（以下、実験②とする）。実験②では、設定原水濁度を30度及び300度、凝集剤注入率を36mg/L 及び72mg/L の計4条件で、それぞれの条件における運転時間は実験①より長い48時間とした。実験②では、実験条件を変える前に、凝集混和槽、フロック形成槽、沈澱槽及び砂汚過塔を排水・洗浄することで、前条件の影響を排除した。実験②においては、両系統とも、実験①で使用した膜モジュールから新しい膜モジュールに交換して、実験を行った。

2.3 凝集剤

本研究で使用した従来型 PAC と高塩基度 PAC の成分を表-2に示す。Al₂O₃ 濃度は、どちらの PAC も約10wt%であった。

PAC の塩基度 (%) は、PAC の一般式を [Al₂(OH)_nCl_{6-n}] としたとき、n/6×100 で表される。塩基度が異なると PAC に含まれるアルミニウム形態の存在比が変化し、塩基度が高いほど、モノマー状態のアルミニウム種 (Al₃) の存在比が低く、ポリマー (Al_p) 及びコロイド状態 (Al_c) のアルミニウム種の存在比が多いことが報告されており^{13), 15-18)}、Al₃ の含有量が高いほど残留したアルミニウム濃度が高い傾向が示されている^{17), 18)}。

表-2 本研究で使用した凝集剤の主な成分

| 系 統 | 凝集剤 | 塩基度 (wt%) | Al ₂ O ₃ (wt%) | SO ₄ (wt%) |
|------------|----------|-----------|--------------------------------------|-----------------------|
| 従来型 PAC 系 | 従来型 PAC | 51 | 10.1 | 2.8 |
| 高塩基度 PAC 系 | 高塩基度 PAC | 72 | 10.5 | 2.8 |

2.4 分析・測定方法

濁度、pH、砂汚過圧力、膜差圧は、プラントに設置した連続計器にて測定した。

原水濁度及び沈澱水濁度は、原水調製槽及び沈澱水貯留槽にそれぞれ設置した表面乱反射式濁度計を用いて、30分毎に系統を切り替えて測定した。表面乱反射式濁度計は、濁度標準溶液（カオリン）を用いて校正した。砂汚過水濁度及び膜汚過水濁度は、レーザー式高感度濁度計（日本電色工業 NP500T）を用いて、30分毎に系統を切り替えて測定した。

pH は、pH センサーを用いて、原水調製槽及び

凝集混和槽で測定した。

砂汚過圧力については、砂汚過一次圧力を砂汚過圧力とし、一次圧力を圧力センサーで測定した。膜差圧については、一次圧力と二次圧力の差とし、それぞれ圧力センサーで測定した。

連続計器による測定値は、データロガーで5分毎に記録した。

アルミニウム濃度、電気伝導率、総アルカリ度、沈澱水中フロックのゼータ電位及び粒径分布は、ポリエチレン瓶を用いて採水した試料を測定した。原水は原水調製槽、沈澱水は沈澱水集水槽から採水し、砂汚過水及び膜汚過水は配管途中のサンプリングコックから採水した。

アルミニウム濃度、マンガン濃度及び鉄濃度は、サンプルに濃度が1%となるように硝酸を添加後、測定した。試料を0.45μm のメンブレンフィルター (ADVANTEC DISMIC 25AS45AN) で汚過して測定したものを溶解性アルミニウム濃度、溶解性マンガン濃度及び溶解性鉄濃度とし、汚過せずに測定したものを総アルミニウム濃度、総マンガン濃度及び総鉄濃度とした。アルミニウム濃度、マンガン濃度及び鉄濃度は、誘導結合プラズマ質量分析装置 (ICP-MS Agilent 7500Ce) を用いて測定した。

電気伝導率は、電気伝導率計を用いて測定した。総アルカリ度は、自動滴定装置を用いて、pH4.8 までの硫酸消費量から算出した。

沈澱水中フロックのゼータ電位及び粒径分布は、沈澱水をポンプで後段の砂汚過及び膜汚過へ送水していることを考慮して、測定前に激しく攪拌した後に測定した。ゼータ電位は、ゼータ電位・粒度分布測定装置 (ZEECOM ZC-3000) を用いて測定し、粒径分布はレーザー式高感度濁度計を用いて測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 実験原水水質

設定原水濁度毎の実験原水の水質測定結果（平均値）を表-3に示す。

原水濁度は、設定原水濁度5度の時は平均7.9度、設定原水濁度30度の時は平均36度、設定原水濁度300度のときは平均360度であり、設定原水濁度より高かった。系統間の差は1～8%程度だった。

表-3 原水水質測定結果

| 項目 | 単位 | 設定原水濁度 | | |
|--------|---------------|--------|--------|--------|
| | | 5度 | 30度 | 300度 |
| pH | (-) | 6.9 | 6.8 | 6.8 |
| 濁度 | (度) | 7.9 | 36 | 360 |
| 水温 | (℃) | 17.5 | 17.2 | 17.3 |
| アルカリ度 | (mg/L) | 91.0 | 90.8 | 90.9 |
| 電気伝導率 | (μ S/cm) | 379 | 379 | 379 |
| 総 Al | (mg/L) | 0.035 | 0.20 | 1.1 |
| 溶解性 Al | (mg/L) | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| 総 Mn | (mg/L) | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| 溶解性 Mn | (mg/L) | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| 総 Fe | (mg/L) | 0.003 | 0.007 | 0.004 |
| 溶解性 Fe | (mg/L) | <0.001 | <0.001 | <0.001 |

設定原水濁度が高くなると総アルミニウム濃度や総鉄濃度が上昇した。これは濁質成分のカオリンが原因と考えられた。一方で、アルカリ度及び電気伝導率については、設定原水濁度を変えても大きな変化はなかった。

3.2 濁度の除去性

(1) 凝集沈澱プロセスにおける濁度の除去性

図-2に、条件毎の沈澱水濁度の平均値及び凝集沈澱プロセスにおける濁度除去率を示す。

沈澱水濁度は、設定原水濁度 5度~300度、凝

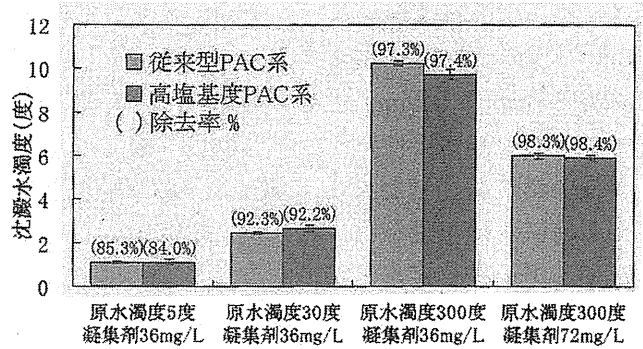


図-2 条件毎の沈澱水濁度平均値と凝集沈澱プロセスにおける濁度除去率 (実験①)

集剤注入率36mg/L~72mg/Lの条件において、沈澱水濁度は約1度~約10度まで変化したが、同条件における高塩基度PAC系と従来型PAC系の沈澱水濁度に見られた差異は小さく、凝集沈澱プロセスにおける濁度除去率は同等となった。また、同一条件で再実験を行った場合においても、図-2に示した結果と同様に、高塩基度PAC系と従来型PAC系の沈澱水濁度に見られた差異は小さかった。

(2) 膜ろ過プロセス及び砂ろ過プロセスにおける濁度の除去性

図-3に、実験①における膜ろ過水及び砂ろ過水濁度の経時変化を示す。砂ろ過水濁度は、各々の系統で2塔分の結果を示した。

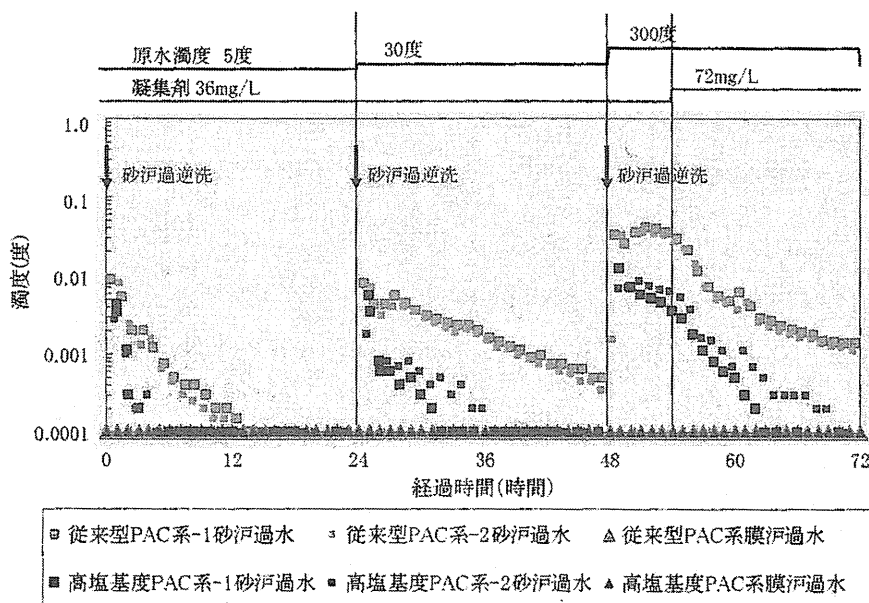


図-3 砂ろ過水濁度の経時変化 (実験①)

膜汚過水濁度については、両系統とも高感度濁度計の検出下限値 (0.0001度) 以下だった。

砂汚過逆洗直後の初期漏出濁度は、系統間に大きな差異は見られなかった。しかし、逆洗後、汚過時間が進むにつれて、高塩基度 PAC 系砂汚過水濁度が従来型 PAC 系砂汚過水濁度より低くなり、高塩基度 PAC 系砂汚過水は、従来型 PAC 系砂汚過水より洗浄後の初期漏出濁度の清澄化が早くなった。同じ系統内において、各々の砂汚過塔間で砂汚過水濁度に差異はほとんどなかったことから、砂汚過塔の違いによる性能の差は小さいと考えられた。また、実験②の4条件においても、同様の傾向が得られた。このことから、系統間で見られた砂汚過水濁度の差異は、各砂汚過塔の性能の違いではなく、砂汚過までの前処理の違いにより生じたものであることが示された。また、高塩基度 PAC 系で見られた初期漏出濁度の清澄化が早い傾向は、原水濁度条件や凝集剤注入率の変更によらず、両系統の沈澱水濁度が同程度であったにもかかわらず、全ての条件で見られた。このことから、凝集剤の性状の違いが濁度以外の因子に影響を与えたことによって、この傾向が生じているものと推測された。

海老江らによると、初期漏出期～清澄期の汚層では、径の大きなフロックから順に抑留が進行し、汚層上部ほど至適凝集領域に近いゼータ電位を持つフロックが優先的に除去され、ゼータ電位が低く、凝集力が弱いフロックほど汚層から流出しや

すい¹⁹⁾としている。このことを考慮すると、高塩基度 PAC 系のフロックは従来型 PAC 系のフロックより粒径が大きく、ゼータ電位は至適凝集領域に近いことが考えられた。このことを検証するために、実験②で、沈澱水中フロックの粒径分布及びゼータ電位の測定を行った。

図-4に、実験②の各運転条件における24時間運転後の沈澱水中フロックの粒径分布を示す。高塩基度 PAC 系のほうが従来型 PAC 系より大きい粒径の粒子が多い分布の傾向が見られ、Wuらのジャーテストによる結果¹⁶⁾と同様の結果となった。前述したように高塩基度 PAC は、ポリマー (Al_p) 及びコロイド状態 (Al_c) のアルミニウム種の存在比が高いことから、架橋しやすいことがフロックの粒径が大きいの一因と考えられた。沈澱水中フロックの粒径分布に差異がみられたのに対し、沈澱水中濁度は同程度であったことに対しては、何らかのフロックの性状の違いに原因があるものと考えられる。

図-5に、実験②の各運転条件において、概ね8時間に1回採取した沈澱水中フロックのゼータ電位の測定結果を示す。ゼータ電位測定の結果、高塩基度 PAC 系のほうがゼータ電位の絶対値が小さくなり、至適凝集領域に近い傾向がみられた。両者のゼータ電位についてt-検定 (有意水準 $\alpha = 0.05$) を行ったところ、凝集剤注入率36mg/Lの条件においては統計的に有意な差が見られた。

石川らは、コロイド滴定により、高塩基度

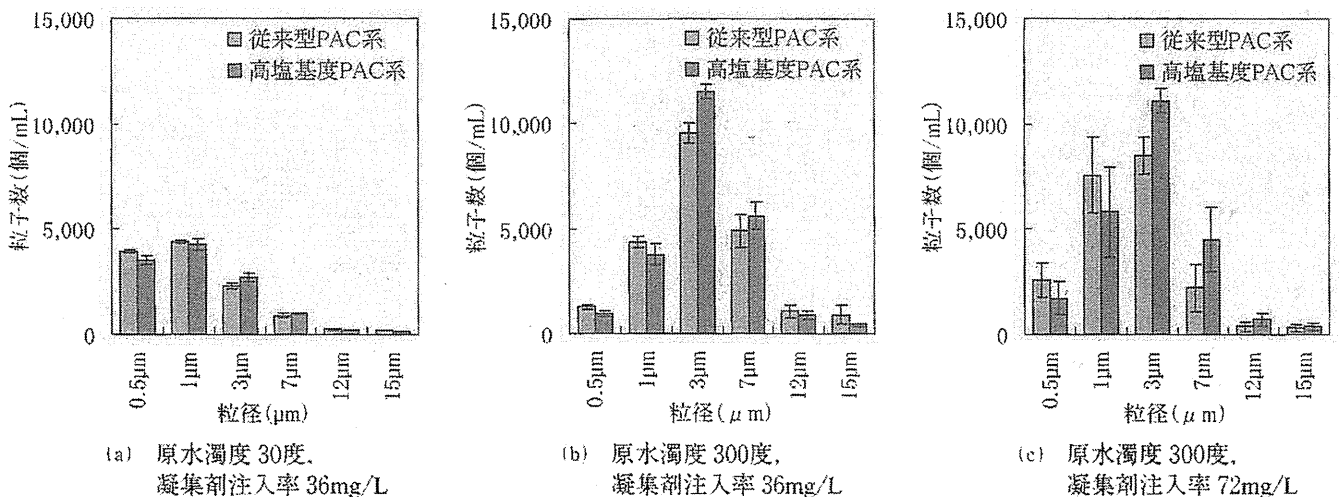


図-4 沈澱水に残留したフロックの粒径分布 (実験②)

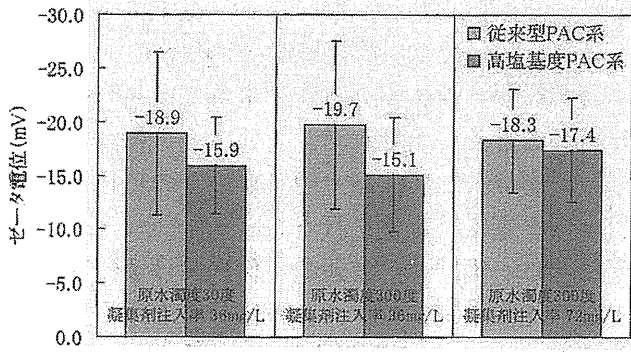


図-5 沈澱水に残留したフロックのゼータ電位 (縦線は標準偏差) (実験②)

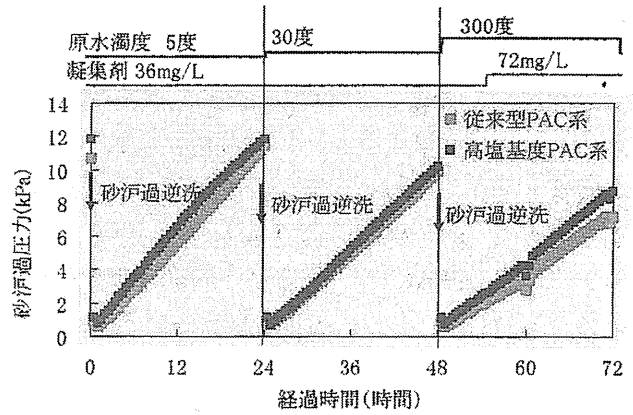


図-6 砂濾過圧力の経時変化 (実験①)

PACの荷電量が従来型PACより多いことを示している²¹⁾。また、Yanらは、塩基度の異なるPACを用いたジャーテストにより、pH7付近では塩基度が高いほどゼータ電位が高く¹⁵⁾、至適凝集領域に近くなることを示している。本研究結果は、これら既往の研究と整合していた。

以上のことから、高塩基度PAC系で砂濾過初期漏出の清澄化が早く、フロックが捕捉されやすい原因は、高塩基度PACの荷電量が多いことやポリマー及びコロイド状態のアルミニウム種が多いことにより、粒径が大きくゼータ電位が至適凝集領域に近いフロックが形成されたためと考えられた。

近年のクリプトスポリジウム等対策による低濁度管理においては、砂濾過逆洗直後の初期漏出濁度をいかに抑制するかが重要となっており、初期漏出水を捨水するなどの対策が求められている²¹⁾。高塩基度PACは初期漏出の清澄化が早いことから、高塩基度PACの使用により、捨水時間の短縮など、初期漏出濁度対策軽減化の可能性が示唆された。

(3) 砂濾過損失水頭の変化

図-6に、実験①における砂濾過圧力(一次圧力)の経時変化を示す。本実験装置は、砂濾過の二次圧が一定であるため、砂濾過圧力の経時変化は損失水頭の経時変化と同様と考えられる。

従来型PAC系と高塩基度PAC系で比較すると、設定原水濁度300度の条件(凝集剤注入率36mg/L及び72mg/L)では、高塩基度PAC系で砂濾過圧力上昇が大きい傾向が見られたが、原水濁度5度

及び30度の条件(ともに凝集剤注入率36mg/L)では、砂濾過圧力の上昇傾向に大きな差異は見られなかった。実験②の結果では、原水濁度300度の条件(凝集剤注入率36mg/L及び72mg/L)でも、砂濾過圧力の上昇傾向に凝集剤の塩基度の違いによる差異は見られなかったため、高塩基度PACの使用による砂濾過損失水頭上昇への影響は限定的と考えられた。

一方で、原水濁度と凝集剤注入条件で比較すると、凝集剤中のアルミニウム濃度と原水濁度の比(AL/T比)が最も大きい原水濁度5度、凝集剤36mg/Lの条件(AL/T比:0.38)で最も砂濾過圧力の上昇が大きくなり、続いて原水濁度30度、凝集剤36mg/Lの条件(AL/T比:0.06)となり、条件によって差異がみられた。AL/T比の小さい原水濁度300度の条件(凝集剤72mg/Lの場合はAL/T比:0.01)では、それぞれの運転期間が短いため一概に評価できないが、傾きから評価すると他の条件より砂濾過圧力の上昇は小さいものと考えられる。一般的にAL/T比が大きいほど損失水頭は大きくなる²⁰⁾が、本実験でもAL/T比が大きいほど砂濾過圧力上昇が大きくなる傾向を示した。

以上のことから、砂濾過圧力については、PACの塩基度の違いよりAL/T比の違いのほうが与える影響が大きかったため、高塩基度PACの使用は、従来型PACと比べても、砂濾過の操作性に大きな影響はないものと考えられた。

(4) 膜差圧の挙動

実験①における実験期間中の膜差圧挙動を図-7

に示す。膜差圧は、膜の一次圧と二次圧の差とし、25℃で補正した。

○3時間に1回膜の物理洗浄を実施しているため、設定した3時間毎に膜差圧の回復が見られている。従来型 PAC 系と高塩基度 PAC 系を比較すると、示したデータは3日間という短期的な挙動では、凝集剤（塩基度）の違いによる明確な差異は見られなかった。

図-7をもとに、3時間に1回行っている物理洗浄の終了から次の物理洗浄の開始までの間に上昇した膜差圧をプロットしたものを図-8に示す。その結果、高塩基度 PAC 系膜差圧のほうが従来型 PAC 系膜差圧より、上昇幅が小さい傾向を示した。実験②では、膜モジュールを新しい膜モジュールに交換して行ったが、同じ傾向を示した。このことから、物理洗浄間で上昇した膜差圧で生じた差異は、膜モジュールの性能の違いによるものではなく、膜汚過までの前処理の違いにより生じた

ものと考えられた。

凝集条件により、膜差圧の挙動や膜のファウリングが影響を受けることが知られており²³⁾、膜汚過原水のアルミニウム濃度²⁴⁾やフロックのゼータ電位²⁵⁾及び粒径分布²⁶⁾が影響する可能性があるとの報告もある。本研究では、膜汚過原水である沈澱水において、高塩基度 PAC 系と従来型 PAC 系でこれらの項目に差異が生じていることから、物理洗浄間で上昇した膜差圧で生じた差異の原因は、沈澱水中フロックにおける、ゼータ電位や粒径分布などの物性の違いや残留アルミニウム濃度が影響しているものと考えられた。詳細については今後の検討課題と考えられる。

加藤らは、34日間にわたる内圧式モノリス型セラミック膜を用いた実験で、高塩基度 PAC と従来型 PAC の膜汚過性を検討し、高塩基度 PAC は膜差圧上昇が抑制されることを示している²⁷⁾。酢酸セルロース膜を用いた本研究の結果や加藤らによる研究結果から考慮すると、高塩基度 PAC の使用による膜汚過性への負の影響はないものと推定されるが、今後は膜の材質や孔径の影響、長期的な膜汚過運転を行った場合のファウリングへの影響などについて、検討する必要があると考えられる。

3.3 アルミニウムの残留性

実験原水中の総アルミニウム濃度は原水濁度と共に上昇したが、溶解性アルミニウム濃度は0.001mg/L以下となり、定量下限値以下だった。

図-9に、実験①における従来型 PAC を使用した場合と高塩基度 PAC を使用した場合の沈澱水中総アルミニウム濃度と沈澱水中溶解性アルミニウム濃度の関係を示す。沈澱水中総アルミニウム濃度の分布は、両系統とも100 μ g/L~500 μ g/Lの範囲であった。高塩基度 PAC 系総アルミニウム濃度のほうが低くなる傾向もみられるが概ね同程度の分布を示し、沈澱水濁度と同様の傾向だった。その一方で、沈澱水中溶解性アルミニウム濃度の分布については、従来型 PAC 系沈澱水は30 μ g/L~70 μ g/Lの範囲だったのに対し、高塩基度 PAC 系沈澱水は10 μ g/L以下となり、高塩基度 PAC 系のほうが低くなった。

続いて、図-10に従来型 PAC を使用した場合と

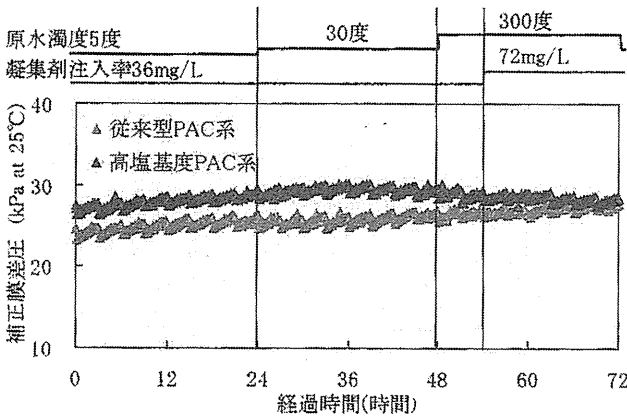


図-7 膜差圧の挙動 (25℃補正) (実験①)

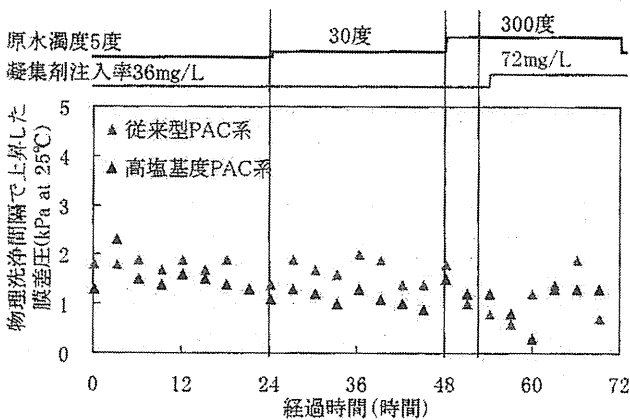


図-8 物理洗浄間隔で上昇した膜差圧 (実験①)

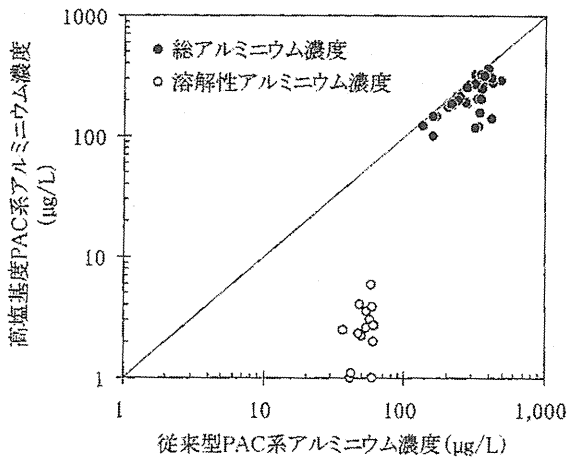


図-9 凝集剤による沈澱水中アルミニウム濃度の比較 (実験①)

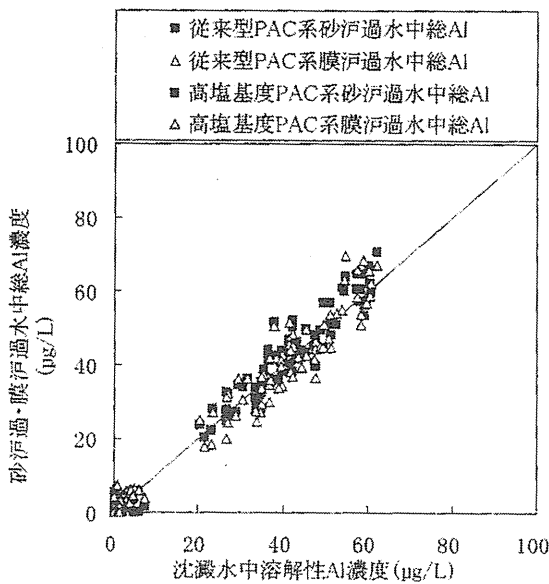


図-10 砂ろ過水中総アルミニウム濃度と膜ろ過水中総アルミニウム濃度の関係 (実験①)

高塩基度 PAC を使用した場合の沈澱水中溶解性アルミニウム濃度と砂ろ過水及び膜ろ過水中総アルミニウム濃度との関係を示す。砂ろ過水及び膜ろ過水中総アルミニウム濃度は $20\mu\text{g/L}$ ~ $70\mu\text{g/L}$ の範囲で両者は同程度で、沈澱水中溶解性アルミニウム濃度と同程度だった。すなわち、砂ろ過及び膜ろ過により沈澱水中の懸濁態で存在するアルミニウムは除去できたが、溶解性のアルミニウムは除去できなかった。このことから、水道水中のアルミニウム濃度を低減するには、沈澱水中溶解性アルミニウム濃度を低減することが不可欠であ

ることが示された。

以上のことから、高塩基度 PAC は従来型 PAC と同一の運転条件において、残留アルミニウムの低減効果があるものと考えられた。

4. まとめ

地下水にカオリンを添加した実験原水について、パイロットスケールの実験装置にて、高塩基度 PAC の濁度の除去性とアルミニウムの残留性に関して検討した結果、以下の結論が得られた。

- 1) 高塩基度 PAC を使用した場合の凝集沈澱プロセスにおける濁度の除去性は、従来型 PAC を使用した場合と同等であった。
- 2) 高塩基度 PAC 系砂ろ過水は、従来型 PAC 系砂ろ過水より洗浄後の初期漏出濁度の清澄化が早くなった。
- 3) 高塩基度 PAC 系沈澱水中フロックは、従来型 PAC 系より粒径が大きく、ゼータ電位が至適凝集領域に近かった。これらによって、砂ろ過水初期漏出濁度の清澄化が早まるものと考えられた。
- 4) 膜ろ過水濁度は、高塩基度 PAC 系も従来型 PAC 系も、高感度濁度計の検出下限値以下だった。
- 5) 砂ろ過損失水頭及び膜差圧に対する高塩基度 PAC と従来型 PAC の使用の差異は限定的だったことから、高塩基度 PAC を使用することに関するろ過性への影響は小さいと考えられた。
- 6) 高塩基度 PAC 系沈澱水中に残留する溶解性アルミニウムは、従来型 PAC 系より低かった。また、砂ろ過水及び膜ろ過水には沈澱水中溶解性アルミニウムと同程度残留した。そのため、水道水中アルミニウムの低減には、沈澱水中溶解性アルミニウムの低減が不可欠であることが示された。
- 7) 高塩基度 PAC は、従来型 PAC と同一の運転条件にて、水道水中アルミニウムを低減できることが示された。

謝辞

本研究は、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「飲料水の水質リスク管理に関する統括的研究」の一部として行わ

れた。本研究を遂行するにあたりご協力いただいた、平成21年度国立保健医療科学院水道工学研修の研修生である南方則之氏、堀野秀一氏、佐藤研一郎氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 厚生労働省健康局水道課：水道統計 施設・業務編 (平成19年度)
- 2) Martyn C. N, Barker D. J. P, Osmond C: Geographical relation between Alzheimer's disease and aluminum in drinking water, *Lancet*, Vol.1, pp.59-62 (1989)
- 3) McLachlan D. R. C, Bergeron C, Smith J. E: Risk for neuropathologically confirmed Alzheimer's disease and residual aluminum in municipal drinking water employing weighted residential histories, *Neurology*, Vol.46, pp.401-405 (1996)
- 4) Virginie R, Daniel C, Helene J. G, Dartigues J. F: Relation between aluminum concentrations in drinking water and Alzheimer's disease: An 8-year follow-up study, *American Journal of Epidemiology*, Vol.152, pp.59-65 (2000)
- 5) 厚生労働省健康局水道課：第6回厚生科学審議会生活環境水道部会配付資料水質基準の見直し等について (案)
- 6) 眞柄泰基、伊藤雅喜、国包章一：厚生労働科学研究「最新の科学的知見に基づく水質基準の見直し等に関する研究—無機分科会—」分担研究報告書、pp.19-24 (2005)
- 7) 内山恵、大野浩一、亀井翼、眞柄泰基：PSIを用いたフロックレーター設計の基礎的研究、水道協会雑誌、第72巻、第6号、pp.2-11 (2003)
- 8) 奥田哲士、Phengxay Deevanhxay、長谷川孝雄、西嶋涉、岡田光正：ポリシリカ鉄凝集剤を用いた凝集沈殿—急速汚濁処理の特性、水道協会雑誌、第73巻、第11号、pp.2-10 (2004)
- 9) 伊藤豊彰：水田の水環境保全機能 環境保全型水田農業におけるポリシリカ鉄凝集剤 (PSI) 浄水発生土資源化の可能性、用水と廃水、Vol.52、No.1、pp.76-82 (2010)
- 10) 海老江邦雄、東義洋、浅香博則、山木暁、萩下隆、凝集処理における攪拌条件の最適化に関する基礎的検討、第52回全国水道研究発表会論文集、pp.96-97 (2001)
- 11) 海老江邦雄、東義洋、山木暁：凝集沈殿の処理性改善に関する基礎的研究—GR値の上昇による濁度とSTIの低減化—、水道協会雑誌、第71巻、第9号、pp.11-21 (2002)
- 12) 佐藤文彦、巻木康宏、梶早苗、石原俊、松井佳彦：浄水中の残留アルミニウムを低減する新しいポリ塩化アルミニウム、第60回全国水道研究発表会論文集、pp.108-109 (2009)
- 13) 木村正興、大野浩一、松下拓、松井佳彦：高塩基度ポリ塩化アルミニウムを用いた凝集処理時におけるアルミニウム残留性の評価、第60回全国水道研究発表会論文集、pp.48-449 (2009)
- 14) 松井佳彦、伊藤雅喜、国包章一：無機物質分科会分担研究報告書、厚生労働科学研究「飲料水の水質リスク管理に関する総合的研究」研究報告書、pp.71-97 (2008)
- 15) Mingquan Yan, Dongsheng Wang, Jianfeng Yu, Jinren Ni, Marc Edwards, Jihui Qu: Enhanced coagulation with polyaluminum chlorides: Role of pH/Alkalinity and speciation, *Chemosphere*, Vol.71, No.9, pp.1665-1673 (2008)
- 16) WU Xiaohong, WANG Dongsheng, GE Xiaopeng, TANG Hongxiao, YE Changqing: Effect of speciation transformation on the coagulation behavior of Al13 and Al13 aggregates, *Water Science & Technology*, Vol.59, No.4, pp.815-822 (2009)
- 17) YAN Mingquan, WANG Dongsheng, QU Jihui, HE Wenjie, CHOW Christopher W. K.: Relative importance of hydrolyzed Al (III) species (Al_3 , Al_2 , and Al_1) during coagulation with polyaluminum chloride: A case study with the typical micro-polluted source waters, *Journal of colloid and interface science*, Vol.316, No.2, pp.482-489 (2007)
- 18) 石川太了、木村正興、松井佳彦、松下拓、大野浩一：高塩基度 PACI を用いた凝集処理後の残留アルミニウム濃度とその温度影響、第61回全国水道研究発表会論文集、pp.236-237 (2010)
- 19) 海老江邦雄、土井克哉：定速砂汚濁における凝集フロクの汚濁内挙動と汚濁水水質の改善、水道協会雑誌、第67巻、第10号、pp.25-35 (1998)
- 20) 汚泥処理上からみた合理的浄水方法、汚泥処理上からみた合理的浄水方法に関する研究総括報告書 (1980)
- 21) 厚生労働省健康局水道課、水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針
- 22) 加藤絵美、村田直樹、川瀬優治、青木伸浩、松井佳彦：高塩基度ポリ塩化アルミニウムによる膜汚濁性の検討、第61回全国水道研究発表会論文集、pp.248-249 (2010)
- 23) 前田智宏、木村克輝、渡辺義公：前凝集/MF 膜処理において凝集条件が膜ファウリングに及ぼす影響、第13回衛生工学シンポジウム論文集、pp.235-238 (2005)
- 24) 峯岸進一、池田啓一、渡辺義公、山村弘之：浄水処理における中空糸 UF 膜のファウリング物質の把握、水道協会雑誌、第71巻、第5号、pp.2-13 (2002)
- 25) 朴宰亨、滝沢智、片山浩之、大垣眞一郎：生物汚濁前処理による精密ろ過膜のファウリング制御、水道協会雑誌、第71巻、第3号、pp.19-31 (2002)
- 26) 安藤由華、湯浅晶、李富生、松下拓：膜汚濁抵抗を抑制させるための凝集処理条件に関する検討、岐阜大学大学院修士論文 (2007)
- 27) 加藤絵美、村田直樹、川瀬優治、青木伸浩、松井佳彦：高塩基度ポリ塩化アルミニウムによる膜汚濁性の検討、第61回全国水道研究発表会論文集、pp.248-249 (2010)

(平成22年5月6日受付)

水安全計画品質保証ツールを用いた水安全計画の評価と改善*

小坂 浩司 鈴木 克徳

1. はじめに

世界保健機関 (World Health Organization, WHO) は、WHO 飲料水水質ガイドライン第3版¹⁾で、水道システムの水源から消費者までの各段階でリスク評価とリスク管理のアプローチを適用する統合的な水質管理の方法として、水安全計画を提唱した。水安全計画は、食品産業で利用されている危害分析重要管理点の考え方を取り入れている。これ以降、世界各国の水道事業者により、水安全計画の策定と運用が進められている。また、2009年、WHOは国際水協会 (International Water Association, IWA) と共同で、水安全計画の策定を支援する、水安全計画マニュアルを公表した²⁾。

国内では、厚生労働省健康局水道課が、WHOの動向を受け、2008年、水安全計画策定ガイドラインを公表した³⁾。また、2011年度頃までに、水安全計画の策定を推奨している⁴⁾。現在、水安全計画は、数十以上の国内の水道事業者により策定が行われている⁵⁻⁷⁾。

一方、水安全計画の策定や運用に対し、その状況を客観的に評価し、継続的に改善されるような取り組みも必要となる。2010年、WHOとIWAは、策定、運用されている、あるいは策定途中の水安全計画を評価し、その改善の手助けを目的に、水安全計画品質保証ツールを公表した⁸⁾。本稿では、水安全計画品質保証ツールについて紹介を行うとともに、ツールのドラフト版を用いて実

施された、パイロット試験について報告する。

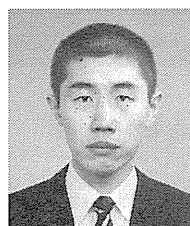
2. 水安全計画品質保証ツールについて

2.1 概要

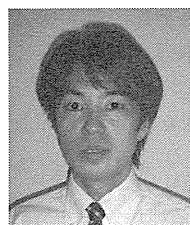
水安全計画品質保証ツールは、Excelをベースとしたツールであり、水道事業者やその類似団体が、水安全計画の完成度を評価し、効率的に運用していくのを支援することを目的としている^{9,10)}。ツールとその使用方法を詳述している水安全計画品質保証ツールユーザーマニュアル¹¹⁾は、WHOやIWAのウェブサイト^{9,10)}から入手可能である。

WHOとIWAは、ツールの利点として、水安全計画の運用にともなって進展している箇所や改善箇所が、系統的に明らかになることを挙げている¹¹⁾。水安全計画を策定中の場合には、その手引きとして利用することもできる。また、ツールの利用対象は、水道事業者やその類似団体の水安全計画チームであるが、水安全計画の策定や運用状況を監視したり、評価を行う、上級管理者や内部、外部の監査人も対象となる。

水安全計画品質保証ツールによる水安全計画やその運用の評価は、12の表で構成された、各質問事項に回答することで行う。図1に評価入力セクションの例¹¹⁾を、表1に各表題と質問数を示す。表番号1, 2は、水道事業者と対象水道システムに関する一般情報である。表番号3~12は、水安全計画チームの結成から水安全計画のレビューに至る、水安全計画の策定と運用に係わる各ステップに対応している。質問によっては、同一の内容を水道システムの各要素 (水源流域、浄水処理、配水、給水末端)等に対して回答する。表1で、括弧内の数値は、各要素等に対して回答する質問を、それぞれ別の質問として数えた場合の質問数である。質問数の合計は85に



Koji Kosaka
 平成14年 京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了
 同年 日本学術振興会特別研究員
 15年 国立保健医療科学院水道工学部研究員
 22年 同水道工学部主任研究官
 23年 同生活環境研究部水管理研究分野主任研究官
 博士 (工学)



Katsunori Suzuki
 平成9年 東北大学理学部卒業
 11年 同大学院理学研究科修士課程修了
 同年 東京都入都
 現在 東京都水道局水質センター

図1 水安全計画品質保証ツールの評価入力セクションの表の例¹¹⁾

* Evaluation and Improvement of Water Safety Plan Using Water Safety Plan Quality Assurance Tool

表1 水安全計画品質保証ツールの評価入力セクションの表題と質問数

| 番号 | 表題 | 質問数 | | |
|----|----------------|---------|--------|---------|
| | | スコア型 | スコア型以外 | 合計 |
| 1 | 水道事業者に関する一般情報 | 0 | 11(13) | 11(13) |
| 2 | 水道システムに関する一般情報 | 0 | 8(12) | 8(12) |
| 3 | 水安全計画チーム | 5 | 0 | 5 |
| 4 | 水道システムの記述 | 2 | 0 | 2 |
| 5 | 危害の抽出とリスク評価 | 7(25) | 3(12) | 10(37) |
| 6 | 管理措置と妥当性の確認 | 5(17) | 3 | 8(20) |
| 7 | 改善計画 | 3(12) | 2(8) | 5(20) |
| 8 | 運転監視 | 4(16) | 7 | 11(23) |
| 9 | 検証 | 8 | 7(25) | 15(33) |
| 10 | 管理手順 | 3(9) | 0 | 3(9) |
| 11 | 支援プログラム | 2 | 0 | 2 |
| 12 | 水安全計画のレビュー | 5(14) | 0 | 5(14) |
| 合計 | | 44(110) | 41(80) | 85(190) |

括弧内の質問数は、同様の内容の質問を水道システムの各要素（水源流域、浄水処理、配水、給水末端）等について回答する場合、それぞれ別の質問として数えた数値

表2 水安全計画品質保証ツールにおける質問例

| 質問形式 | 質問例 |
|--------|---|
| スコア型 | <ul style="list-style-type: none"> 水安全計画チームを特定し、結成しているか 水道システムは、水源流域から消費者まで記述されているか 水安全計画を、定期的にレビューし、必要に応じて改訂しているか |
| スコア型以外 | <ul style="list-style-type: none"> 給水人口 過去一年内の配水システム内での漏水率 (%) 抽出した危害原因事象の数 |

なる（各要素等についての回答を別とした場合は190）。また、質問には、質問内容を補足したり、水安全計画のステップを説明するガイダンスと、水安全計画マニュアルでの該当箇所を示した参考文献がポップアップメモとして付いている。

質問の形式は、スコア型とそれ以外の2種類がある（表1）。それぞれの質問例を表2に示す。スコア型の質問では、水安全計画アプローチの各ステップについて、0～4までの5段階のスコアで回答を行う。スコア0はステップをまだ開始していない場合に、スコア4はステップが完了し、文書化され、整備されている場合に与えられる。スコア化することで、ステップの進捗状況が理解しやすくなる。一方、スコア型以外の質問には、給水人口や漏水率等、具体的な数値を記入する量的質問がある（表2）。これらは、水安全計画の運用状況を評価するのに役立つ。水安全計画の規模や複雑さを理解するための情報にもなる。また、量的質問だけでなく、水安全計画の策定や運用によって得られた効果、水道システムの各要素に対する責任の有無等の質問もある。スコア型、スコア型以外のいずれの形式の質問も、水道事業者の実情に合わせて、新規の質問を追加することができる（図1）。時系列評価や複数の水道システムを比較して評価するために、新規の評価を追加することもできる。また、コメント欄には、回答の補足説明等を記入することができる。

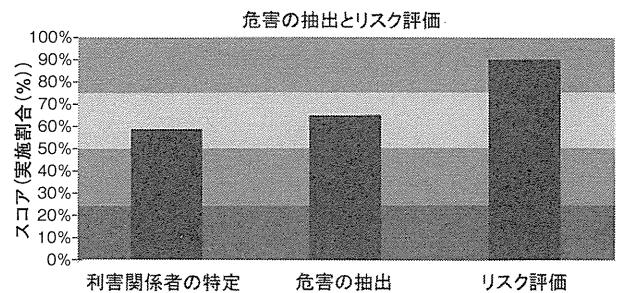


図2 水安全計画品質保証ツールの評価結果の図の例¹¹⁾

各質問への回答結果は、評価結果の図表において自動的に整理される。この中で、スコア型の質問は、水安全計画のステップ（水安全計画の全般的な進捗、危害の抽出とリスク評価、検証）と水道システムの要素（水源流域、浄水処理、配水、給水末端）の観点から分類され、実施割合（スコア合計／総得点）(%)の形で表示される。とくに、図示化することで、水安全計画の策定や運用において、どの箇所が進展しているか、改善が必要かが視覚的に表されるため、容易に理解することができる（図2¹¹⁾）。この評価結果の図は、ツールの特徴の一つとなっている。

2.2 水安全計画策定ガイドラインとの比較

水安全計画品質保証ツールは、水安全計画マニュアル²⁾に沿って作成されている。したがって、その質問は、マニュアルのいずれかの箇所記載されている。一方、

水安全計画は、WHO 飲料水水質ガイドラインで提唱されたものであるため、厚生労働省による水安全計画策定ガイドライン³⁾の内容は、水安全計画マニュアルの内容とほぼ同様ではあるが、国内の水道事業を想定して策定されている。このため、水安全計画品質保証ツールの質問の中には、水安全計画策定ガイドラインには記載されていない質問、国内の水道事業者はすでに実施しているが、水安全計画策定ガイドライン（あるいは水安全計画）には必ずしも含まれていない質問もあった。

具体的には、水安全計画策定ガイドラインでは、水安全計画のステップ（水安全計画チームの結成、危害の抽出、リスク評価等）の中に、利害関係者に関する項目は記載されていなかった。一方、水安全計画マニュアルでは、水安全計画の各ステップを実施し、また、利害関係者に飲料水の安全性に対する責任を認識してもらう上で、水道システムの各要素での利害関係者の特定と利害関係者への接触の必要性について記述している。このため、水安全計画品質保証ツールでも、これらは質問に挙げられている。これら質問が水安全計画策定ガイドラインでの記載がなかった理由として、国内の水道事業者は、地方自治体やそれに準ずる団体であるため、必ずしも利害関係者を特定したり、接触しなくても、必要な情報は入手可能な場合があること、また、一般的な公開情報も比較的豊富であることが推測された。ただし、実際には、用水供給事業者と末端給水事業者の関係や委託業者等、国内水道でも、一部の利害関係者とのやり取りは行われている。しかし、水源で排水を放流している事業者等の特定、接触は、十分には行われていないかもしれない。

それ以外で、水安全計画策定ガイドラインに記載されていない質問として、水質検査に係わる採取計画とその実施に関する質問、試験室の技術やデータの信頼性に関する質問、消費者からの苦情に関する質問が挙げられた。水質検査については、国内水道の場合、水質検査計画¹²⁾として別のプログラムで運用されており、支援プログラムに位置付けられると考えられた。また、残りの2つも、実際には行われている内容であり（実施内容が質問に沿った内容かは別であるが）、どこまでを水安全計画の範囲とするかの違いであると考えられた。

一方、水安全計画策定ガイドラインにも、水安全計画マニュアルには記載されていない、独自の内容が記載されていた。例えば、監視方法はできるだけ常時監視可能なものとする（とくにリスクが高い場合）、管理手順の要点を取りまとめた運転管理マニュアルを作成する等が挙げられた。

3. 水安全計画品質保証ツールのパイロット試験

2009年末～2010年初めにかけて、水安全計画品質保証ツールのドラフト版を用いて、11ヶ国13水道事業者と1規制当局を対象に、パイロット試験が実施された（イギリス、インド、ウガンダ、オーストラリア、オマーン、シンガポール、中国、日本、ニュージーランド、ポルトガル、南アフリカ⁸⁾）。目的は、ツールを使用した結果をフィードバックし、その改良に反映させるためである。日本からは、東京都水道局が参加した。

WHOの担当者によると、パイロット試験の参加者からの全般的なコメントは、水安全計画品質保証ツールは、

水安全計画アプローチを開始し始めた場合からすでに運用している場合まで、水安全計画の進捗状況を評価するのに役立つとの評価であった。しかし、評価の完了に時間がかかった、繰り返しの質問があったとのコメントがあった。また、ユーザーインターフェースに係わるコメントも複数寄せられた。これらを踏まえて、ツールの公表版^{9,10)}では、表の構成を変え、繰り返しをなくし、簡素化し、より使い勝手がよくなるように改良が行われた。

東京都水道局では、2007年4月から水安全計画の運用を実施している。パイロット試験は、2010年1～2月にかけて、4人（リーダー、サブリーダー、書記（原案作成）、翻訳）で行われた。原案作成と内容確認に3週間、その後の翻訳に1週間費やされた。

スコア型の質問は、ほぼすべての項目でスコア4であり、東京都水道局の水安全計画は、水安全計画マニュアルが想定した内容を満たした形で策定、運用していることがわかった。この中で、水安全計画のレビューは、東京都水道局では、水安全計画、ISO 9001、ISO/IEC 17025が一体となった「TOKYO 高度品質プログラム」⁵⁾を管理、運用するために局内に設置した、プロジェクトチームとワーキンググループが定期的実施していた。一方、スコア4以外の質問は、消費者からの苦情、利害関係者との接触（水源流域、浄水処理、配水、給水末端）、危害の抽出における現場調査（水源流域）、外部監査に関する質問であった。2.2でも述べたが、これらは、水安全計画策定ガイドラインに（具体的に）記載されていない質問であった。このため、実施していても質問内容に沿った形ではなかった（消費者からの苦情）、国内では、国や都道府県等の統計データが充実している（利害関係者との接触）ことが、スコア4でなかった理由であった。外部監査については、水安全計画策定ガイドラインでは、具体的な仕組みは述べられていない。このため、外部監査を取り入れるには、国内で統一的、あるいは水道事業者が独自に、外部監査に相当する仕組みを考えていくことになるかもしれない。大阪市水道局では、ISO 22000を取得し、その中で実施していると報告されている⁶⁾。

水安全計画の策定と運用による効果に関する質問では、選択肢に挙がっていた、利害関係者との関係の改善、水道についてのリスクの理解の改善、飲料水水質の改善、事故数の低下のいずれも「はい」との回答であった。加えて、それ以外の効果として、お客さまの信頼性の向上（安全性に関する説明責任）、水質管理技術のさらなる向上、技術継承等を挙げていた。

表3に、東京都水道局によるパイロット試験を通じた、ツールに対するアンケートの抜粋を示す。上述した、全般的なコメントと同様、東京都水道局の場合も、ツールを利用した感想は、概ね良好で、利用可能なものであるが、重複した質問等が多かったとの評価であった。また、水安全計画策定ガイドラインに記載されていない質問に対する取扱いへのコメントがあった。

ウガンダでは、国営上下水道公社がパイロット試験に参加した¹¹⁾。参加メンバーは、ツールについて最初は十分には理解できていなかったが、パイロット試験の終了までに、ツールや体系的な水安全計画の策定プロセスを正しく理解できた、とコメントした。東京都水道局の場合と同様、ガイダンスの有用性についても報告した。

表3 東京都水道局によるパイロット試験後のアンケートの質問と回答(抜粋)

| 質問 | 回答 |
|-------------|--|
| ツールの使い勝手 | <ul style="list-style-type: none"> ・参考資料がリンクされているのが使いやすかった。 ・プルダウンによるリスト選択なので、誤入力が少なかった。 ・一部の質問は、水安全計画策定ガイドラインに記載がなく、評価しにくかった(消費者からの苦情等)。 ・重複した質問等が多かった。 |
| ガイダンスについて | <ul style="list-style-type: none"> ・役に立った。 ・質問だけでは理解できない部分、特に4段階の評価については、評価基準が明確でなく、ガイダンスがないと評価困難であった。 |
| ツールの有用性について | <ul style="list-style-type: none"> ・役立つと考えられる。 ・既に水安全計画の運用を開始しているので、定期的なレビューの際に利用可能。 ・一部の質問項目は、2回目以降、省略可になると便利。 ・スコアによる評価は理解しやすいが、評価結果で得点に対する総合評価があると良いと考えられた。 |

4. おわりに

厚生労働省健康局水道課は、2011年度頃までに、水安全計画の策定を推奨している⁴⁾。一方、水安全計画策定後は、その運用を通じて、水道システムの統合的管理を行い、安全な飲料水の供給につなげること、あるいは供給していることを保証することが重要となる。

本稿で紹介した水安全計画品質保証ツールは、水安全計画を評価し、その改善や運用を支援する手段の一つとして利用できればと考えられる。当初、ツールの使用言語は英語のみであったが、改良版では、英語以外に、日本語を含む5ヶ国語での使用が可能となる予定である。また、国立保健医療科学院生活環境研究部水管理研究分野のウェブサイトでは、ユーザーマニュアルの日本語版の公表を予定している。

謝辞

本原稿の作成にあたり、WHOのJennifer de France氏、Bruce Gordon氏に、貴重な情報の提供をいただいた。水安全計画品質保証ツールのパイロット試験の実施において、東京都水道局の保坂幸尚氏、篠田豊氏、池田麻衣子氏にご協力いただいた。記して謝意を表する。

参考文献

1) 国包章一、遠藤卓郎、西村哲治監訳(2008) WHO飲料水水質

ガイドライン(第3版)第1巻, pp.47-82, 社団法人日本水道協会, 東京.

- 2) Bartram, J., Corrales, L., Davison, A., Deere, D., Drury, D., Gordon, B., Howard, G., Rinehold, A. and Stevens, M. (2009) *Water Safety Plan Manual: Step-by-step Risk Management for Drinking-water Suppliers*, 101pp., WHO Press, Geneva.
- 3) 厚生労働省健康局水道課(2008)水安全計画策定ガイドライン.
- 4) 厚生労働省健康局水道課(2008)「水安全計画策定ガイドライン」の送付について(平成20年5月30日健水発第0530001号).
- 5) 東京都水道局, TOKYO高度品質プログラム(東京都版水安全計画), <http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/press/h19/press080328.html> (2011年6月時点).
- 6) 大阪市水道局, 大阪市水道局ISO22000水安全マネジメントシステム(大阪市水道・水安全マニュアル概要版), http://www.city.osaka.lg.jp/contents/wdu030/oishii/secret/iso/pdf/iso22000_01.pdf (2011年6月時点).
- 7) 江崎智昭, 小田琢也, 熊木芳宏, 藤田誉生, 橋上重弘, 伊藤裕之(2011) 神戸市水道局水安全計画の策定と運用, 水道協会雑誌, 80(4), 17-23.
- 8) De France, J. (2010) Assessing water safety plans. A new international tool, *Water Safety Conference 2010*.
- 9) WHO, Water Safety Plan Quality Assurance Tool, http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/wsp_qa_tool/en/index.html (2011年6月時点).
- 10) IWA, Water Safety Plan Quality Assurance Tool, http://www.wsportal.org/templates/ld_templates/layout_1367.aspx?ObjectId=20686&lang=eng (2011年6月時点).
- 11) WHO and IWA (2011) *User Manual Water Safety Plan Quality Assurance Tool*, 28pp., WHO Press, Geneva.
- 12) 厚生労働省(2003)水道法施行規則の一部を改正する省令(平成15年9月29日厚生労働省令第142号).

Climate change and drinking water – climate change impacts on water supply, and their mitigation and adaptation in Japan

Toshiro YAMADA, Reina NAKAMURA, Dai SHIMAZAKI, Michihiro AKIBA

Department of Water Supply Engineering,

National Institute of Public Health, Saitama 351-0197, JAPAN

IMPACTS ON WATER SUPPLY BY CLIMATIC PHENOMENA

Basic water supply system

The water supply system is basically classified into major three subsystems; source, treatment and distribution, as shown Figure 1. In a water supply system, raw water is abstracted from river, lake or well at an intake point, and then the raw water is treated in a treatment system, consisting mainly of coagulation, sedimentation, filtration, and disinfection processes. Purified water at a treatment plant is provided to users through a distribution system, including service reservoir, service tanks, and pipe networks.

Impact on water sources by climate change

A major impact of climate change on water source is drought, which is the major problem all over the world as well. Sufferings from local drought have been reported every year in Japan. For example, severe drought has often occurred in an area in Shikoku Island. In 2008, the storage volume of Sameura reservoir, which is the major water source in this area, went down to zero and restriction on water intake lasted 124 days in the summer¹⁾.

Rise in water temperature and increase in precipitation would also affect the quality of source water, especially water in closed water area such as reservoir. Rise in water temperature could result in occurrence of algae bloom that would cause increase of concentration of odorous substances in water. It also results in stagnation of water circulation in a reservoir that might cause production of anaerobic condition at bottom layer of reservoir and elution of heavy metals from sediment. Increase of frequency and amount of rainfall will cause increase of pollution loadings from non-point source such as farm land. Those are also possible problems on water sources by climate change.

Due to rise in sea level, saltwater intrusion into groundwater for drinking in coastal areas is also one of the major impacts on water source. There was a case occurred that water in drinking wells was contaminated

by sea water due to a high tide in a coastal town in Toyama prefecture in 2008. People there couldn't drink their well water for up to 3 months because of high salinity and drinking water was provided by water trucks²⁾.

Impact on treatment system by climate change

Damages from deterioration of water quality on treatment system can be considered as an adverse

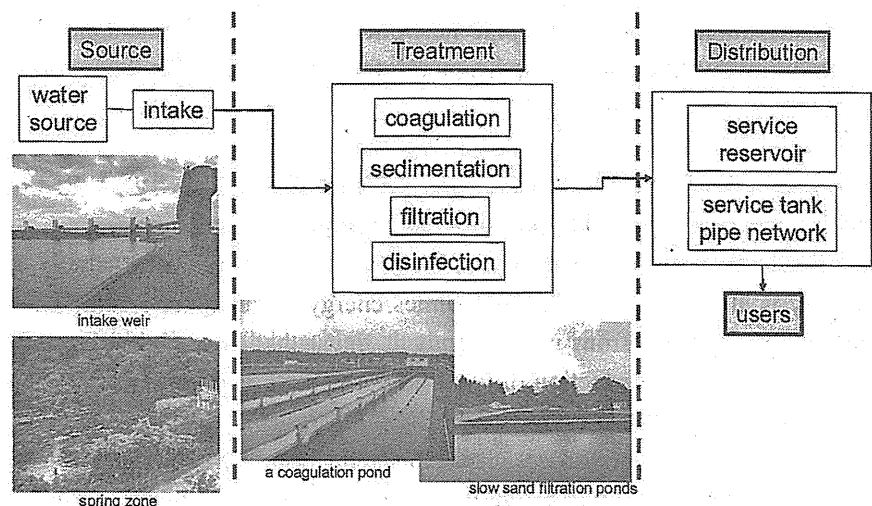


Figure 1. A diagram of a basic water supply system

effect by climate change. Especially, high turbidity in a long period, which is caused by runoff of suspended matters by heavy and long rain, will be a cause of capacity degradation in drinking water treatment. This can sometimes result in shutdown of water supply. Even when it is possible to deal with the high turbidity in the treatment system, a large amount of chemical reagents such as coagulant as well as energy for treatment would be needed.

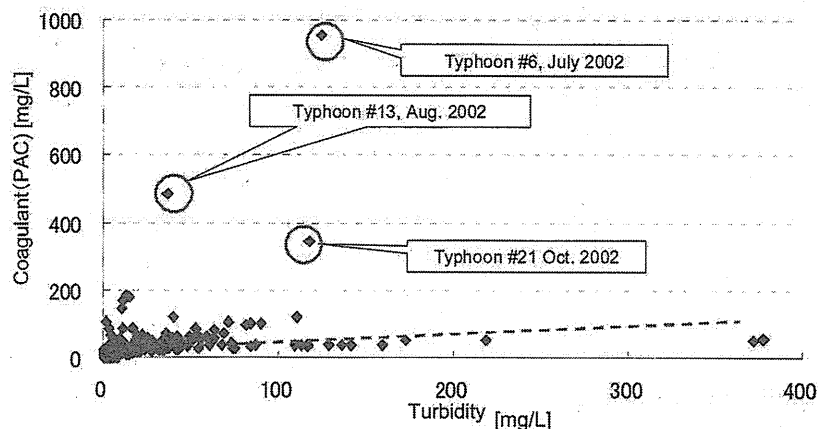


Figure 2. Relationship between the injection concentration of coagulant (Poly aluminum chloride) and turbidity in raw water at a WTP

Figure 2 shows the relationships between the injection ratio of coagulant needed and turbidity in raw water at a water treatment plant in the Kanto area, Japan. While positive relationships as shown in a blue line can be seen in usual situation, the ratio of the injection of coagulant (PAC; poly aluminum chloride) can increase shown as three encircled points during a heavy rain such as typhoons. At a typhoon No. 6 in 2002, the injection concentration of the coagulant was 960 ppm against the raw water turbidity of 125 mg/L, while the usual injection concentration ranges from 10 to 50 ppm. This may suggest that increase in frequency of high intense precipitation result in larger amount of coagulant needed for adequate treatment.

Direct damages of treatment plants from flood and high tide can be possible impact by climatic phenomena. A treatment plant in Yamaguchi city was flooded by a heavy rain in July, 2009³⁾. 35,400 households, which are almost half of the population in the city, experienced shutdown of water supply for 10 days by the incident.

Impact on distribution system by climate change

Rise in water temperature as well as deterioration of water quality would result in inadequate chlorination due to increase in chlorine demand for disinfection. They would also result in acceleration of bacteria regrowth in the course of water distribution. Those impacts could produce increase of microbiological risk in drinking water. Flood, thunderstorm, high tide could bring damages on the processes of distribution; water pump, pipe networks. There was an incident of breaking of three major pipes for distribution by landslide due to heavy rainfall in Sasebo city in August, 2009, resulting in shutdown of water supply for 17,500 households⁴⁾.

APPROACHES TO CLIMATE CHANGE IN WATER SUPPLY SECTOR IN JAPAN

Mitigation of climate change in the water supply sector in Japan

Reduction of carbon dioxide (CO₂) emission from water supply system is required because water supply is also an industry that consumes energy. Ministry of Health, Labour and Welfare reported that the total CO₂ emission from water supply in Japan had been 3,400 Tg, which was 0.3 % of total domestic emission in 2006. Reduction of water losses as well as promotion of use of natural energy in water supply system is also needed for reduction of CO₂ emission.

Reduction of water losses, especially reduction of water leakage from pipes is a major issue in terms of energy reduction. Tokyo metropolitan waterworks bureau, which has ca. 26,000 km of distribution pipes in Tokyo, has addressed the issue of water leakage from pipes, and the leakage ratio has successfully decreased from 20% in 1955 to 3.3% in 2007. The amount of water saved against leakage in a year was estimated to

340 million m³, which is equivalent to annual amount of water supplied in a city with a 2.5 million population. Saving this amount of water is estimated to be equivalent to reduction of 68,000 Mg of CO₂ emission in a year.

Energy reduction in distribution system is also needed because distribution process including water pump consumes energy most in the whole water supply system. Some water supplier have implemented to replace the current distribution system using a rooftop receiving tank in a high building by the direct connection to a major pipe under the ground in terms of energy reduction as well as improvement of water quality.

Use of natural energy is a mitigation of climate change. In some water supply, panels for solar power generation has installed above sedimentation ponds in a treatment plant (Photo 1).

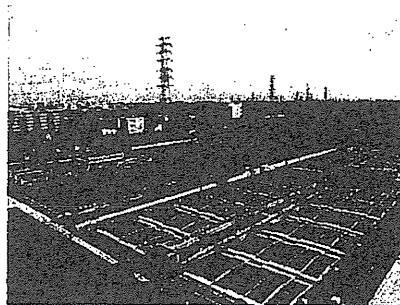


Photo 1. Panels for Solar power generation above sedimentation ponds in a WTP

Adaptation to climate change in the water supply sector in Japan

As adaptation approaches in water supply sector, there are technical methods such as infrastructure installation, institutional methods as diversion of water for agriculture to drinking water and economic methods as charges for water use and abstraction. Technical options in Japan are shown in this chapter.

Countermeasures against flood and drought on water source include construction or restructure of dams, conservation of water source forest and utilization of rainwater. Conservation of water source forest is expected to enhance functions of recharge of water, prevention from surface runoff and soil loss by rainfall, and purification of water. Carbon sink is a possible function of water source forest in terms of climate change adaptation. Tokyo metropolitan waterworks own 21,600 ha of water source forest upstream, where 25,000 Mg of CO₂ is expected to be fixed.

Measures against deterioration of water quality at source would be implementation of circulation unit with air bubble, algae fence, selective intake at a reservoir and introduction of advanced treatment system. Installation of private electric generator and enhancement of disaster prevention facilities such as heightening of floodwalls around a treatment plan can be options for damage reduction from flood or high tide on water supply systems.

As shown above, those technical adaptation approaches against individual impact related to climate change are used with existing methods for supply of safe drinking water. Risk management and adaptive management including technical and institutional method would be needed against possible adverse impacts by climate change in medium- and long-term perspectives. It is also needed to consider and implement countermeasures for small-scale water utilities the including monitoring of raw water quality and quantity for the future impact.

References

- 1) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *Water Resources in Japan 2009 edition*, p.98, 2009 (in Japanese)
- 2) Nyuzen Machi, *Nyuzen Machi Public magazine*, Vol.4, p.2, 2008 (in Japanese)
- 3) Suido Sangyo Shinbun Sha, The Suido Sangyo Shinbun Newspaper, No.4504 (27 July 2009), p.1, 2009 (in Japanese)
- 4) Suido Sangyo Shinbun Sha, The Suido Sangyo Shinbun Newspaper, No.4506 (3 August 2009), p.1, 2009 (in Japanese)

筑波大・生物資源 ○吉田史郎

筑波大院・生命環 佐藤千恵、杉浦則夫、内海真生

硫酸銅散布による殺藻処理は、アオコが発生した水源池で広く用いられている。一方で、硫酸銅散布が水柱および底泥中の環境や生物相に与えている影響は十分に明らかになっていない。そこで、硫酸銅散布が水柱・底泥環境や微生物群集に与えている影響を明らかにすることを目的に、茨城県内の水源池を対象に硫酸銅散布前後の期間、各種環境因子の分析と PCR-DGGE 法による群集構造解析を行った結果について報告する。

東京農大・応生 ○松尾絵理子、森田真紀、藤本尚志
大西章博、鈴木昌治
水資源機構 遠本和也、柳橋泰生
国立保健医療科学院水道工学部 山田俊郎、秋葉道宏

近年、湖沼・貯水池を水源とする浄水場においてピコプランクトンによる濁度障害が問題となっている。そこで草木湖を対象としクローニングにより群集構造解析を行った。プラシノ藻綱、渦鞭毛藻綱、クリプト藻綱、従属栄養性であるピコソエカ類などを近縁種とする多様な真核ピコプランクトンが存在することが明らかとなった。多くのクローンは近縁種との相同性が 90%以下と低く、複数の新規の系統群の存在が示唆された。

分子生物学的手法による草木湖の微小プランクトン 群集の季節変化の解析

○村田昌隆(東京農大院・農)
藤本尚志、大西章博、鈴木昌治(東京農大・応生)
遠本和也((独)水資源機構)
岸田直裕、秋葉道宏(国保医科院)

1. はじめに

近年、浄水場において水源で発生したピコプランクトンによる濁度障害が発生し、問題となっている。ピコプランクトンは細胞の大きさが0.2~2 μ mのプランクトンの総称であり、その大きさゆえに砂ろ過による除去効率が低く、塩素や凝集剤の注入回数や量を増やすことで対応している。ピコプランクトンは落射蛍光顕微鏡による蛍光の色調の違いで3グループに分けて定量されているのみであり、淡水域における属レベルでの優占種や季節的消長といった基礎的な知見が不足している。そこで本研究では群馬県草木湖を研究対象とし、草木湖を取水源としている浄水場において真核ピコプランクトンによる濁度障害が報告されている¹⁾ことから、分子生物学的手法を用いて真核ピコプランクトンの群集構造の季節変化を解析した。

2. 実験方法

群馬県草木湖の表層から2009年6月12日、7月3日、8月19日、10月6日、12月1日、2010年3月1日、4月20日、5月24日に採水した試料を用いた。採水後、試料中の真核ピコ植物プランクトンを落射蛍光顕微鏡により計数した。真核ピコプランクトンの群集構造解析はRichardsら²⁾に従って行った。試料中のナノプランクトンを孔径5 μ mのメンブレンフィルターで除去した後、孔径0.2 μ mのポリカーボネート製のメンブレンフィルターで吸引し、集菌を行った。集菌したフィルターからCTAB法³⁾によりゲノムDNAの抽出を行い、真核生物の18S rDNA領域を特異的に増幅させるプライマー(3Fphp, 1749Rphp)²⁾を用いてPCRを行った。このPCR産物をアガロースゲルおよび精製キットを用いて精製した後、TOPO TA Cloning Kit(invitrogen)を用いて、大腸菌のプラスミドベクターに挿入し、コロニーを形成させた。形成されたコロニーから任意で48コロニーを選択し、挿入部分をコロニーPCRで増幅させた。これを制限酵素HaeIIIを用いたRFLP法にてグループ分けを行った後、サイクルシーケンス法にて塩基配列を決定した。RFLP法で分けた1グループを1 OTU(operational taxonomic unit)とした。

3. 結果および考察

真核ピコ植物プランクトンは6月、10月、5月に10⁴cells/ml以上となり、夏期と冬期に減少する傾向が見られた(図1)。各月のOTU数は細胞数の多い時期は12~13 OTUsであるが、7月、8月、3月はそれぞれ15、23、19 OTUsとなり、細胞数が少ない時期にOTU数が増加する傾向が見られた。各OTUの塩基配列についてFASTAにより近縁種を検索したところ、草木湖の真核ピコプランクトン群集はクリプト藻綱、ハプト藻綱、プラシノ藻綱、緑藻綱、従属栄養性であるピコゾエカ類、ケルコモナス類などから構成されることが明らかとなった。各分類群のクローン数の割合は季節によって変化し(図2)、優占種が季節によって異なることが示唆された。クリプト藻綱は年間を通じて存在し、その割合は7月および8月を除き、20%以上を占めた。さらに真核ピコ植物プランクトン数が多い6月と10月において割合が高まっていることから、クリプト藻綱が草木湖における主要な真核ピコ植物プランクトンであることが示唆された。

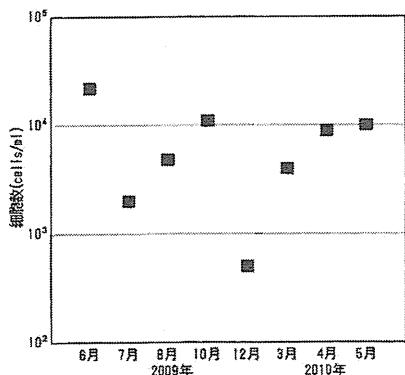


図1 真核ピコ植物プランクトン細胞数の季節変化

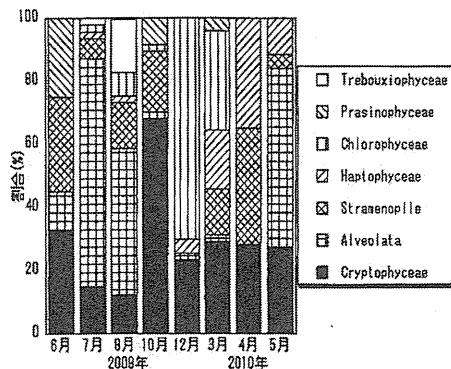


図2 各分類群のクローン数の割合の季節変化

参考文献

- 1) 矢澤秀行, 用水と廃水, 44(9), 763-769 (2002)
- 2) Thomas A. Richards, et al., Environ. Microbiol., 7(9), 1413-1425 (2005)
- 3) Marie Lefranc, et al., Appl. Environ. Microbiol., 71(10), 5935-5942 (2005)

(4-60)パイロットプラントにおける濁度急変による浄水処理への影響に関する実験的検討

○古林 祐正(国立保健医療科学院) 伊藤 雅喜(国立保健医療科学院)
 山田 俊郎(国立保健医療科学院) 南方 則之(和歌山市水道局)
 堀野 秀一(八戸圏域水道企業団) 佐藤研一郎(神奈川県内広域水道企業団)

1. はじめに

水道分野においては、将来起こると予測されている地球温暖化によって、水資源の減少や水源水質の悪化等の影響があるものと考えられる。本研究では、将来、地球温暖化等の気候変動により降水量や大雨日数が増加し、河川原水濁度上昇が現在より増加することを想定し、凝集沈澱、砂ろ過、膜ろ過プロセスを有するパイロットスケールプラントを用いて原水濁度を変化させて浄水処理実験を行い、濁度やアルミニウム等の処理性や砂ろ過損失水頭や膜差圧等の運転管理に関わる項目について検討を行ったので、報告する。

2. 実験方法

実験フローを図 1 に示す。実験は、当院内浄水実験プラント(15m³/日)を用い、凝集沈澱水を砂ろ過と膜ろ過に分岐するフローとした。各プロセスの仕様及び運転条件を表 1 に、原水濁度と凝集剤注入率の実験条件を図 2 に示す。実験原水は、当院の深井戸から取水した地下水に濁質成分としてカオリン(和光純薬製)を添加したものをを使用した。大雨による原水濁度上昇を想定し、原水濁度を 5 度(通常時濁度)、30 度(降雨時濁度)、300 度(大雨時濁度)の 3 段階で変化させた。凝集剤には塩基度 50%の水道用 PAC を使用し、凝集剤注入率は濁度急変時に凝集剤注入が追従できない場合も想定し、極力 30mg/L で一定としたが、沈澱水濁度の状況によって 60mg/L へ増加した。凝集 pH は 7.0(pH6.9~7.1 で制御)とした。

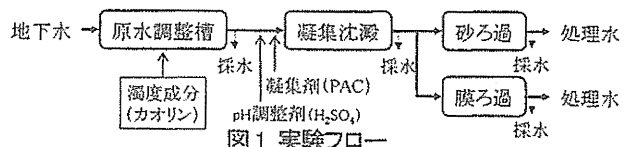


表 1 各プロセスの主な仕様と運転条件

| プロセス | 主な仕様と運転条件 |
|------|---|
| 凝集沈澱 | 急速攪拌:126rpm×5分、緩速攪拌:8.7rpm×30分、沈澱槽:90分、凝集pH:7.0 |
| 砂ろ過 | 砂層厚:60cm、有効径:0.6mm、均等係数:1.5以下、ろ過速度:120m/d、逆洗間隔:24時間 |
| 膜ろ過 | 酢酸セルロース製内圧式UF膜、分画分子量:150,000、全量ろ過方式、Flux:1.8m/d、物理洗浄間隔:180分 |

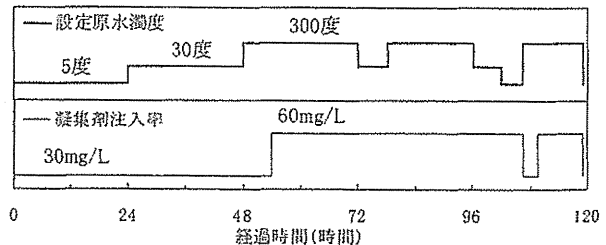


図 2 実験条件(設定原水濁度と凝集剤注入率)

測定項目は、プラントに設置している連続計器を用いて、濁度、pH、砂ろ過圧力及び膜差圧などを測定した。

3. 結果と考察

原水と沈澱水、砂ろ過水、膜ろ過水の濁度推移を図 3 に示す。原水濁度は設定原水濁度付近で調整できた。沈澱水濁度については、凝集剤注入率 30mg/L 条件において、設定原水濁度(以下、原水濁度)5 度の場合で沈澱水濁度は約 1 度、原水濁度が 30 度の場合で沈澱水濁度は約 3 度となった。原水濁度を 300 度とすると沈澱水濁度が約 10 度となったため、設定原凝集剤注入率を 60mg/L に増加した結果、沈澱水濁度は約 6 度へ低下した。このように、沈澱水濁度は、原水濁度の上昇に伴い上昇し、原水濁度の下降に伴い低下し、凝集剤注入率の増量で沈澱水濁度は低下し、凝集剤注入率の減量で沈澱水濁度が上昇した。原水濁度と凝集剤注入率が同一であれば、安定後の沈澱水濁度は原水濁度の上昇時及び下降時で同程度となり、差異は認められなかった。砂ろ過水濁度については、原水濁度の上昇に伴い、砂ろ過洗浄直後の濁度も上昇する傾向が見られた。また、原水濁度の上昇に伴い、砂ろ過池洗浄直後に上昇した時間経過と共に低下する砂ろ過水濁度の低下速度が緩やかになる傾向が見られ、原水濁度と凝集剤注入率の条件が同一であれば、この低下速度は同程度となった。これらは、原水濁度の上昇により砂ろ過原水である沈澱水濁度が上昇したことで砂ろ過への負荷が増大したことに加え、原水濁度の上昇により砂ろ過に流入したフロックが砂ろ過では捕らえにくい性状に変化したことによるものと考えられる。

実験条件毎の砂ろ過損失水頭の上昇速度及び沈澱水濁度(平均値)を図4に示す。砂ろ過二次圧力が一定であるため、砂層上圧力を損失水頭とした。同じ凝集剤注入率で比較すると、原水濁度が上昇することで沈澱水濁度は上昇したが、損失水頭上昇速度は減少する傾向を示した。また、同じ原水濁度で比較すると、原水濁度5度と30度の条件では、凝集剤注入率の増加により沈澱水濁度が低下し、損失水頭上昇速度も減少する傾向を示したが、原水濁度300度では、凝集剤注入率の増加により沈澱水濁度は低下したが、損失水頭上昇速度は増加する逆の傾向を示した。このように砂ろ過損失水頭上昇速度の増減については、沈澱水濁度に示される砂ろ過原水中の濁質量の増減以外による影響も示唆され、今後、その原因について調査する予定である。

膜ろ過に関しては、膜ろ過水濁度が、今回の全ての運転条件において高感度濁度計の検出限界値(0.0001度)以下となると共に、膜差圧挙動(図5)も原水濁度の変化及び凝集剤注入率の変更等の条件による大きな差異は認められなかったことから、濁度急変時においても確実な濁質除去及び安定した運転管理性が認められた。

平成21年4月に水質管理目標設定項目に追加されたアルミニウム濃度については、砂ろ過処理水及び膜ろ過水ともに沈澱水中の溶解性アルミニウムと同等量が検出されたことから、濁度急変時においても最終処理水中アルミニウム濃度を抑制するには、凝集沈澱池におけるコントロールが不可欠であることが改めて示された。

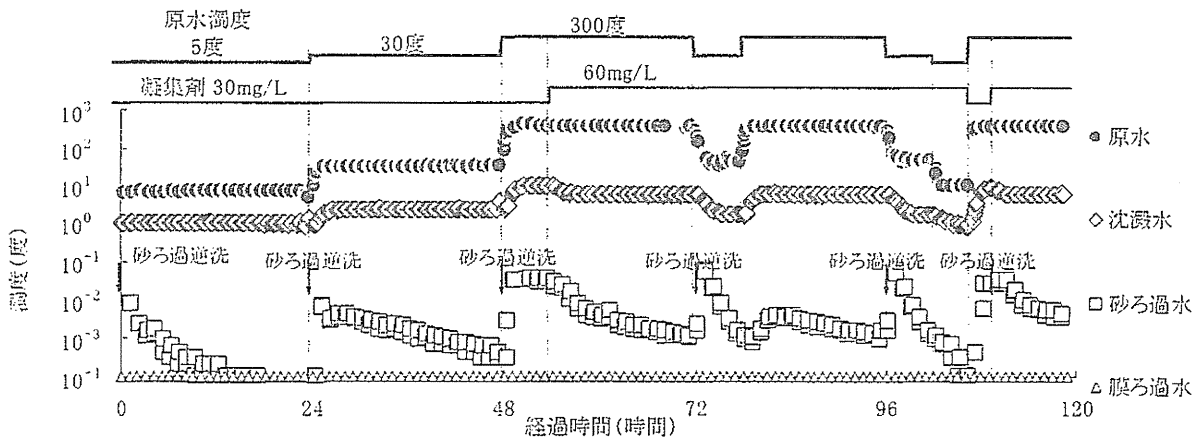


図3 原水濁度と沈澱水濁度、砂ろ過水濁度

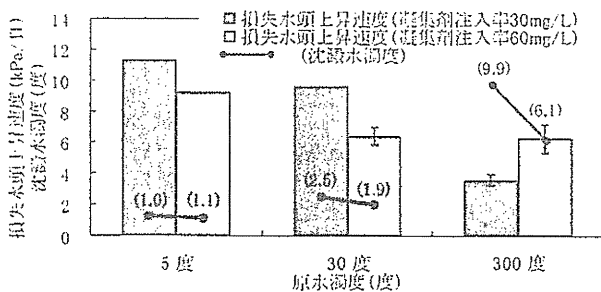


図4 砂ろ過損失水頭上昇速度と沈澱水濁度

損失水頭上昇速度については、同一条件で複数回行った場合は、平均値、最大値、最小値を示す。沈澱水濁度は平均値。

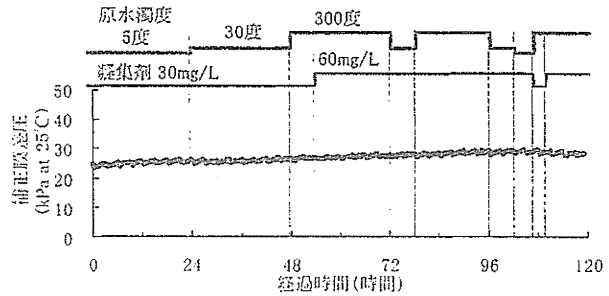


図5 膜差圧挙動

4. まとめ

本研究では、濁度急変による浄水処理への影響を実験的に検討した。その結果、凝集沈澱-砂ろ過システムにおいては、原水濁度上昇により沈澱水濁度が上昇すると、最終処理水である砂ろ過水濁度や砂ろ過損失水頭への影響が認められた一方で、凝集沈澱-膜ろ過システムにおいては、原水濁度の変化による除濁性及び膜差圧挙動への明確な影響は認められなかった。このことから、濁度急変時における濁質除去においては、凝集沈澱-膜ろ過システムのほうが凝集沈澱-砂ろ過システムより、確実な処理システムであることが示された。凝集沈澱-砂ろ過において、濁度急変による浄水処理への影響を最小限に留めるためには、最終プロセスの前段である凝集沈澱等で確実な濁度除去を行い、最終プロセスへの負荷を軽減することが不可欠と考えられる。

34 水資源機構ダム貯水池における水質の長期的変動

独立行政法人水資源機構 柳橋泰生 今本博臣
廣瀬真由 榎 暁史

Long-term trend of water quality in the dam reservoirs managed by Japan Water Agency

Japan Water Agency Yasuo YANAGIBASHI, Hiroomi IMAMOTO

Masayoshi HIROSE, Akihito MAKI

1. はじめに

気候変動による貯水池の水質への影響としては、水温の上昇による藍藻類の増殖、降雨パターンの変化による濁度の上昇等が考えられる。水資源機構が管理している施設をみても、平成20年では、51施設中25施設において植物プランクトンの異常増殖や濁水長期化などが確認されており¹⁾、気候変動による貯水池の水質への影響の有無やその程度について解明することが求められている。

このため、本研究では、貯水池の水質の長期的変動について気候変動との関係を見るため、水資源機構においてこれまでに蓄積されたダム貯水池の水温や水質データの長期的変動の解析を試みた。

2. 解析の方法

2.1 定期調査結果の解析

水資源機構が管理している51施設のうち、長期的にデータが蓄積されている20のダム貯水池の定期調査結果について長期的変動をみた。最も長いものでは、1975年から2008年までの34年間のデータが蓄積されており、最も短いものは、2001年から2008年までの8年間であった。これらの貯水池では、原則として月1回、環境基準設定項目、富栄養化関連項目等の測定を実施している²⁾。なお、測定日は、各月中旬に行うことが多いが必ずしも一定ではない。気候変動に関連する項目として、水温および富栄養化関連項目を選定し、長期的な変動の傾向をみた。水質観測データは季節により周期的に変化することから、トレンドを求めるため、ノンパラメトリック検定法であるSeasonal Mann-Kendallの方法³⁾を用いた。

2.2 自動観測装置の観測結果の解析

長期間にわたり自動観測装置のデータが蓄積されている2つのダム貯水池の水温について長期的変動を解析した。Dダムでは、1977年5月から2009年10月までの32年間余、Fダムでは、1992年1月から2008年12月までの17年間の水温データを解析の対象とした。Dダムのデータは、ダムサイト付近で毎正時観測されたデータを日単位で平均したものであり、Fダムのデータは、毎日9時にダムサイトの水深5m地点で観測されたものである。Dダムでは藍藻類の増殖抑制のため、1994年度に1基、1995年度に1基、1996年度に2基、1997年度に1基の曝気循環設備が設置されており、水深10~20mから曝気が行われている。このため、長期的変動の解析にあたっては、曝気の影響を受けないように、水深60mのデータを用いた。解析には、Seasonal Mann-Kendallの方法を用いた。

3. 解析の結果および考察

3.1 定期調査結果の解析

20のダム貯水池における各月の測定値について、Seasonal Mann-Kendall 検定法を用いて解析を行った結果を表-1に示す。Bは、任意の2観測値間の傾きの中央値、Zは、標準正規分布のZ値である。

Z値が有意 ($p < 0.05$) な施設についてみると、気温のBは、 -0.06 °C/年 (Fダム) から 0.15 °C/年 (Nダム) の範囲であり、20年間で 1 °C以上の変化を意味する 0.05 °C/年以上の上昇傾向にあるのが6ダム (表-1の↑を付したダム)、低下傾向にあるのが1ダム (表-1の↓を付したダム。以下、同様。) であり、上昇傾向にある施設の方が多かった。表層水温のBは、 -0.11 °C/年 (Bダム) から 0.08 °C/年 (Nダム) の範囲