

異常発生時の予測制御に向けた浄水場のデータ分析に関する研究

竹内風太 水野雅裕 中井豊 市川学(芝浦工業大学)

Study on data analysis of water treatment plant for predictive control
in case of abnormal occurrence

F. Takeuchi, M. Mizuno, Y. Nakai and M. Ichikawa (Shibaura Institute of Technology)

概要— 浄水場は原水を水道水へ浄化処理を行う施設であり、気象の状況などにより常に変動する原水の水質を予測して対応しなければならない。本研究では大阪市の柴島浄水場から提供を受けた水質や制御のデータと気象データを併せて分析することで、未来の事象を予測するための検討を行い、異常時の処理制御を最適化することを目的とする。また、現状の柴島浄水場の処理制御が水質変動に対応できているか判断し、評価を行う。

キーワード: データ分析, 最適化提案, 予測制御

1. 背景と目的

1.1 はじめに

日本では現在、厚生労働省の統計¹⁾によると水道普及率が98%(2017年度)に達しており、水道が生活にとって不可欠なものになっているとともに、供給水質の安全性・安定性が求められている。厚生労働省は2004年に水道ビジョンを策定し、安心して飲める水道水の供給や持続可能な水道システムなどについて示した。2013年3月に新水道ビジョン²⁾が策定され、将来的にわたり水道を維持するため、安全な水の供給、強靱な水道構築、持続性の確保が掲げられた。しかし、都市の開発や異常気象などの要因により様々な利水障害が発生しており、それに伴う異臭味や濁りなど水道水質への影響が起きている。

厚生労働省では昭和58年以降、水質汚染や水道の異臭味の発生・被害状況について調査³⁾している。Fig.1より、水質汚染事故発生により被害を受けた水道事業者の数は近年増加しており、原因として油類・濁度の割合が増えている。Fig.2より異臭味被害人口は1990年代から高度浄水処理等の導入により減少し、近年は横ばい傾向にある。一方で被害に遭った事業者数は増加傾向にあることから、比較的規模の小さな事業者で被害が発生していることがわかる。

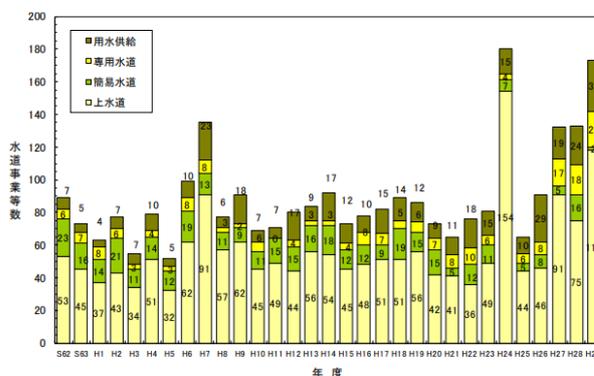


Fig.1 水質汚染事故の被害を受けた水道事業者数³⁾

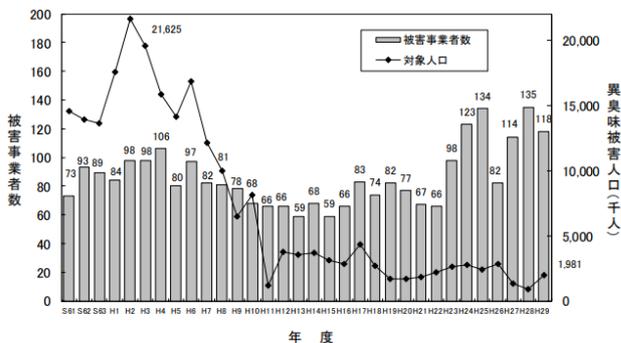


Fig.2 水道における異臭味被害の発生状況変化³⁾

1.2 浄水処理の課題

浄水場は河川や湖などの水源から原水として水を取り込み、原水中に含まれる土砂などの汚染物質を取り除き、厚生労働省の定める水質基準に適合する水道水へと浄化処理を行う施設である。浄化処理には様々な過程があり、薬品注入による処理は原水の水質によって制御されている。しかし、原水の水質は水源種類や気象状況などにより常に変動しており、水道事業者はこのような変動を予測して対応しなければならない。また、浄水処理における基準はFig.3

に示す配水時の水質基準⁴⁾のみ定められており、これに沿うように各事業者が異なった方法で処理を行い、経験則に頼った制御を行うなど不安定な一面もある。

(平成 27 年 4 月 1 日施行)

項目	基準	項目	基準
一般細菌	1mlの検水で形成される集落数が100以下	総トリハロゲン	0.1mg/L以下
大腸菌	検出されないこと	トリクロロメタン	0.03mg/L以下
カドミウム及びその化合物	カドミウムの量に關して、0.003mg/L以下	プロピルブロモメタン	0.03mg/L以下
水銀及びその化合物	水銀の量に關して、0.0005mg/L以下	プロモホルム	0.03mg/L以下
セレン及びその化合物	セレンの量に關して、0.01mg/L以下	ホルムアルデヒド	0.03mg/L以下
鉛及びその化合物	鉛の量に關して、0.01mg/L以下	亜鉛及びその化合物	亜鉛の量に關して、1.0mg/L以下
ヒ素及びその化合物	ヒ素の量に關して、0.01mg/L以下	アルミニウム及びその化合物	アルミニウムの量に關して、0.2mg/L以下
六価クロム化合物	六価クロムの量に關して、0.05mg/L以下	鉄及びその化合物	鉄の量に關して、0.3mg/L以下
亜硝酸態窒素	0.04mg/L以下	銅及びその化合物	銅の量に關して、1.0mg/L以下
シアニド化合物及び塩化シアニド	シアニドの量に關して、0.01mg/L以下	ナトリウム及びその化合物	ナトリウムの量に關して、200mg/L以下
硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素	10mg/L以下	マンガン及びその化合物	マンガンの量に關して、0.05mg/L以下
フッ素及びその化合物	フッ素の量に關して、0.8mg/L以下	塩化物質イオン	200mg/L以下
硼素及びその化合物	硼素の量に關して、1.0mg/L以下	カルシウム、マグネシウム等(硬度)	300mg/L以下
四塩化炭素	0.02mg/L以下	溶存有機物	500mg/L以下
1,4-ジオキサベン	0.05mg/L以下	陰イオン界面活性剤	0.2mg/L以下
1,2-ジクロロエチレン及びトリス(1,2-ジクロロエチレン)	0.04mg/L以下	ジエチルベンゼン	0.0001mg/L以下
1,2-ジクロロメタン	0.02mg/L以下	テトラヒドロカルボネール	0.0001mg/L以下
トリクロロエチレン	0.01mg/L以下	陰イオン界面活性剤	0.02mg/L以下
トリクロロエチレン	0.01mg/L以下	フェノール類	フェノールの量に關して、0.005mg/L以下
ベンゼン	0.01mg/L以下	有機物全有機炭素(TOC)の量	3mg/L以下
塩素酸	0.6mg/L以下	pH値	5.8以上6.8以下
クロロホルム	0.02mg/L以下	味	異常でないこと
クロロホルム	0.06mg/L以下	臭気	異常でないこと
ジクロロメタン	0.03mg/L以下	色度	5度以下
ジクロロメタン	0.1mg/L以下	濁度	2度以下
臭素酸	0.01mg/L以下	(空白)	(空白)

Fig. 3 水質基準項目と基準値(51項目)⁴⁾

1.3 目的

本研究では、大阪府大阪市の柴島浄水場より提供された水質や処理制御のデータ、気象庁の気象データ⁵⁾を併せて分析し、未来の事象を予測するための検討を行うことによって、異常発生時の処理制御を最適化することを目的とする。また、現状の柴島浄水場の処理制御が浄水処理の過程の中で水質変動に対応ができていないかを判断するために、評価を行う。

2. 先行研究

本研究を行うにあたり、先行研究を3つ取り上げる。

2.1 先行研究 1

「水安全計画を用いた水道水源・浄水プロセス・給配水システムでの危害と監視方法の解析」(平成 27 年度総括・分担研究報告書)⁶⁾では、水源から給水栓までの統合的リスク管理手法である水安全計画において、優先度の高い危害原因事象、危害因子、それらへの対応方法について抽出・解析を行うことで、水安全計画未策定の事業者に対して有益となる知見を示すことを目的とし、策定済の水安全計画データを用いた解析を行った研究である。研究結果としては、以下のような事が述べられており、本研究で関係する部分を取り上げる。

連続計器による主要な監視項目として、濁度計、pH計、アルカリ度計が挙げられていた。主要監視地点は取水、沈殿水、浄水であった。取水においては

フィードフォワード制御、沈殿水においてはフィードバック制御、浄水においては水質基準の遵守確認が主な目的と推測される。

pH計とアルカリ度計については、取水あるいは着水井に設置して監視を行う場合が多かった。これは、高濁度になる降雨時には河川水の水質基準のアルカリ度が一般には減少するのに加え、凝集に必要なアルミニウム注入量が増加するため、pHおよびアルカリ度を監視し、フィードフォワード管理をしている場合もあると考えられる。

2.2 先行研究 2

「全国 20 事業者における水道原水の連続監視データの変動解析」(水道協会雑誌平成 30 年 2 月第 1001 号抜刷)⁷⁾では、水源の状況が異なる全国の 20 事業者の浄水場を対象に、原水の複数項目の連続監視データを解析し、各項目の水質の安定性や変動特性の把握、及び複数項目の結果を踏まえた原水の水質全体の安定性やそのパターンの評価を行った研究である。結果として以下のような事が述べられており、本研究で関係する部分を取り上げる。

総合的な解析を行った例は少ないと考えられる自動水質計器のデータについて、収集を行った。濁度の変動は流域の特性や気象特性などと関連すると考えられた。原水pHは特に藻類等による炭酸同化作用を受けやすい場合の変動が顕著に見られ、炭酸同化作用の影響の受けやすさにより左右されるものと推測された。

濁度は降雨による影響が大きく、気象特性の影響を受ける。全国的な傾向として、6月から10月にかけて、梅雨の影響、集中豪雨や台風の影響を受けて、濁度が上昇している傾向が見られた。河川では水の流れによって基本的には藻類が発生しにくく、水が停滞しているダムや湖等の表層では、藻類等による炭酸同化作用が起きやすいため、原水pHは水源によって異なる。また、水深の深い位置から取水すると、水面で起こる炭酸同化作用によるpH変動の影響を受けにくくなる。

2.3 先行研究 3

「連続自動水質計器のデータによる水質変動の比較分析」(平成 27 年度総括・分担研究報告書)⁸⁾は、水道水源での監視体制の最適化、連続自動水質計器等を活用した浄水プロセスでの処理性能評価手法、水質変動・異常への対応手法の構築を目的とし、表流

水を水源とする複数の浄水場における濁度やpH、電気伝導度等の過去の自動水質計器の1時間ごとのデータを入手し、Excel(表計算・解析ソフト、Microsoft社製)やOrigin(作図・解析ソフト、OriginLab社製)を用いたグラフ作図、相関の関係、主成分分析等の解析を行った研究である。結果として以下のような事が述べられており、同様に本研究で関係する部分を取り上げる。

原水濁度は一般的に地下水で低く、表流水では流域の濁質の影響を受ける。特に降雨の場合は局所的な豪雨や土砂崩れ、土木工事などにより急激な濁度の上昇が見られる場合がある。

pHは、地下水の場合は地質的な影響が大きく、表流水の場合は、地域的な特性に加えて、藻類の増殖や光合成等によって酸素濃度が増加し、pH上昇等の影響を受ける。表流水では一般的に、これらの最小値から昼間の日光の影響で藻類による炭酸同化作用等によりpHが上昇し、夜間には減少する現象が繰り返されていることが多いと考えられる。

原水濁度のピーク数は降雨等の影響によるとみられ、平均値と標準偏差は必ずしも相関関係は無く、変動は流域の特性などと関連すると考えられる。

原水pHは、特に生物の同化作用を受けやすい場合の変動が顕著に見られ、藻類の光合成等の影響の受けやすさにより左右されるものと考えられる。

2.4 先行研究と本研究の関係性

これまで浄水処理の研究として、個別の薬品処理、濾過方式、水質の項目についての研究や、浄水場内のデータのみを解析した研究は多く行われている。一方で、水質変動の予測や処理制御の最適化のため同一の浄水場を対象に、複数種の水質データや薬品注入のデータに加え気象データを用いる研究は行われていない。本研究では浄水場の水質や処理データと気象データを用い、同一浄水場内での処理プロセスの評価と高負荷処理となる原因の調査を行う。

3. 柴島浄水場

3.1 研究対象

本研究で対象とする浄水場の概要について Table 1 に示す。

3.2 浄水場内に設置されているセンサ

研究対象である柴島浄水場より提供を受けたデータから、計測項目を Table 2 に纏めた。浄水場内で19の計測項目があり、合計3864か所でデータ取得を行

っている。

Table 1 研究対象概要

対象浄水場	大阪市水道局 柴島浄水場
所在地	大阪府大阪市東淀川区 柴島 1-3-14
水源	淀川表流水
取水口	柴島取水口(大阪市東淀川区柴島) 一津屋取水口(摂津市一津屋)
処理方法	急速濾過、高度浄水処理
対象期間	2010年4月～2018年9月

Table 2 浄水場内に設置されているセンサ

No.	センサ名	No.	センサ名
1	アルカリ度計	11	魚類監視装置
2	残留塩素濃度計	12	塩素要求量計
3	導電率計	13	アンモニア態窒素濃度計
4	流量計	14	油分モニタ
5	水位計	15	損失水頭計
6	水圧計	16	ITV カメラ
7	pH計	17	TOC 計
8	水温計	18	バイオセンサ
9	濁度計	19	溶存オゾン濃度計
10	UV 計		

3.3 データについて

本研究で使用するデータについて説明する。

- ①浄水場の水質や薬品の注入量など前節の項目について計測しており、2010年4月～2018年9月までの期間を1分毎、1時間毎、1日毎にそれぞれ計測した3種類のデータを用いる。それぞれデータサイズは、35.1GB、788.6MB、40.7MBであり、1分毎のデータに関してはサイズが大きいため使用していない。Fig. 4に日データの一部抜粋を示す。
- ②国土交通省気象庁が公開している過去の気象データ⁵⁾をダウンロードして使用する。データ項目は、降水量、気温、日照時間などがあり、ダウンロードした地点は大阪、枚方、長岡京、京田辺、京都の5地点である。

3.4 浄水処理の方法

浄水処理方式は大まかに緩速濾過と急速濾過に分かれ、これらは「凝集沈殿+砂濾過」を用いて不溶性濁質の除去を目的としており、「通常の浄水処理」

と呼ばれる。

緩速濾過方式は、原水の水質が良好で濁度が低く安定している場合に用いられる。細かな砂の層に水をゆっくり流すことで、砂表面と砂層に増殖した微生物によって、水中の不溶性物質や溶解性物質を吸着・酸化分解させる。維持管理が簡単で良質な処理水を安定的に得られるが、濾過速度が遅いため設置面積が大きくなる。

急速濾過方式は、緩速濾過方式と比べて濾過砂が粗く、濾過速度も30倍ほどの速さで処理するため、狭い設置面積で大量の浄化処理が可能となる。この処理方式では濾過前の凝集沈殿処理の良否が重要で、凝集剤の最適注入などの管理に高度な技術が必要となる一方、自動化や遠隔管理が可能のため省力化を行いやすい。

通常の浄水処理である「凝集沈殿+砂濾過」では十分に除去できない有機物やカビ臭等の溶解性成分の除去を目的として、オゾンの強力な酸化力と活性炭の吸着力を活用する処理方式を「高度浄水処理」と呼ぶ。1990年代に入り首都圏、関西圏を中心に高度浄水処理施設の導入が進んだ。

本研究が対象とする柴島浄水場では急速濾過方式と高度浄水処理を用いて処理を行っており、Fig.5に柴島浄水場の浄水フロー図を示す。

①急速濾過方式

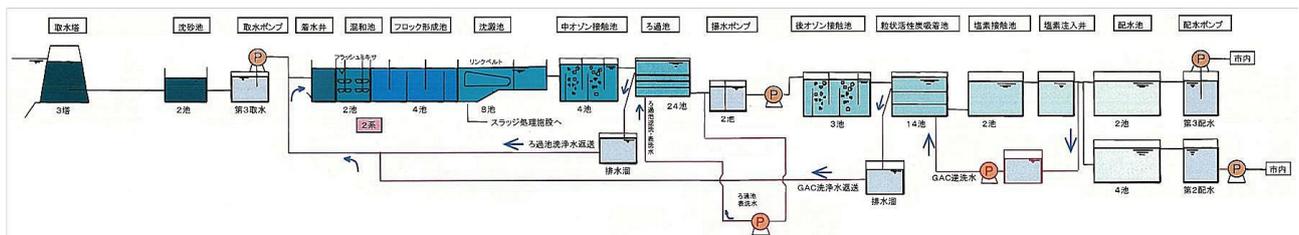


Fig.5 柴島浄水場の処理フロー図

4. 研究方法

本研究では、大阪市柴島浄水場より水質や薬品注入量のデータの提供を受けている。加えて、国土交通省気象庁の公表している過去の気象データを併せて分析することで、気象による水質変化の傾向を予測し、処理制御の最適化や現状の処理制御の評価を行う。提供を受けたデータは生データであり、分析を実行する前にデータクリーニングを行う必要がある。クリーニングを行ったデータを使用し、日付順で整列させ、グラフや相関関係のヒートマップを出力することで、仮説の検証や根拠づけ、データの変動の解析

主に濾過池より前半部分の処理過程。

- A: 混和池…取水した原水に対して薬品を注入する。
 - A1: pH調整剤…硫酸, 苛性ソーダ
凝集剤やオゾン処理の効果を高めるためにpHの調整を行う。
 - A2: 殺藻, 酸化剤…次亜塩素酸ナトリウム(塩素)
原水中の有機物やプランクトンを処理する。
 - A3: 凝集剤…硫酸ばんど
原水中の物質を沈殿可能な状態へ凝集させる。
 - B: フロック形成池…攪拌させることで原水中の物質をフロック(かたまり)状へ変化させる。
 - C: 沈殿池…生成されたフロックを沈殿させる。
 - D: 濾過池…沈殿処理できなかった物質を砂濾過により除去する。
- ②高度浄水処理⁹⁾
- 処理中盤のオゾン処理と活性炭処理を指す。
 - E: 中オゾン処理…溶解性のマンガンなどを砂濾過で除去可能な不溶性へ酸化させ、沈殿処理できなかったプランクトンを殺菌する。
特にマンガンは水を黒く着色させる性質があるため、処理を行う。
 - F: 後オゾン処理…カビ臭や有機物などを酸化、分解を行う。
 - G: 粒状活性炭吸着池…分解した物質を活性炭へ吸着させ、除去する。

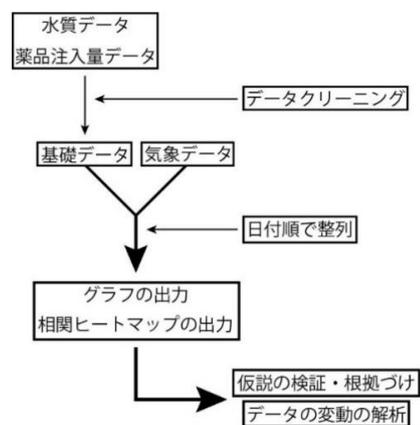


Fig.6 研究方法フロー図

動の分析を行う。研究方法について Fig. 6 にフロー図を示す。

5. データ分析

5.1 気象と浄水場の関係

降水の有無が浄水場の取水する原水の水質へ影響を及ぼす場合、その影響は時間遅れが発生するのではないかという仮説を立てた。この仮説を検証するため、大阪地方気象台で観測された日単位の気象データと、浄水場の水質データの相関分析を試みた。気象データからは、季節によらず原水の水質へ影響を与える「降水量」と、季節や時間によって値が変化し水質に影響を与えると考えた「最高気温」、「最低気温」、「日照時間」を抽出した。水質データからは、これら気象の影響を強く受けると考えた取水直後の原水の「濁度(c933)」、「全有機体炭素(c935)」、「UV(c936)」を抽出した。この3つのセンサはそれぞれ異なる方法で濁度を計測するものである。水質データ各項目の先頭に数字を振ることで、気象データと同日(=c933~c936)、1日遅れ(=1c933~1c936)、2日遅れ(=2c933~2c936)、3日遅れ(=3c933~3c936)の分析が行えるようにした。Fig. 7 に相関分析の結果として出力したヒートマップを示す。ヒートマップでは各項目同士の相関の有無や大小が視覚化され、正の相関は暖色、負の相関は寒色、それぞれ相関の値が大きいほど明度が高くなるように設定した。

Fig. 7 より、「降水量の合計」と「取水直後の原水の濁度」の相関係数は、同日の場合 0.2 前後、1日遅れの場合 0.5 前後、2日遅れの場合 0.3 前後、3日遅れの場合 0.1 前後となり、降水の影響は1日遅れて取水直後の原水濁度へ影響することが判明した。加えて気温と日照時間は濁度との相関が小さく、日毎の変化も確認できないため、気温と日照による濁度への影響はないと判断した。

5.2 相関分析

気象と柴島浄水場の浄水処理過程の水質の相関関係を調べるために、気象データと水質データを相関分析し、Fig. 8 にヒートマップを出力した。気象データは前節と同じく、「降水量」、「最高気温」、「最低気温」、「日照時間」の4項目を抽出し、水質データは取水塔から濾過池までの浄水処理過程の20項目を抽出した。全20項目は、Table 3に示す。また、各データは計測項目が異なり単純な数字比較では正確性に欠けるため、項目ごとに平均を基準に分散が1と

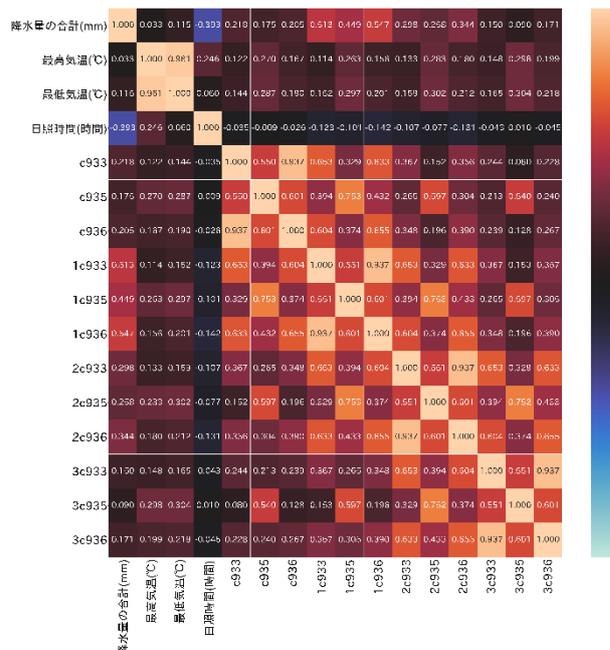


Fig. 7 降水量と水質の相関ヒートマップ

なる標準化を行ったうえで相関分析を行った。前節において、浄水場水質への天気の影響は1日遅れることが判明しているため、気象データは水質データよりも1日前のデータを使用している。Fig. 8 より、それぞれの項目の相関をまとめて見る事ができる。

ここで c2680 の着水井濁度と c599 の硫酸ばんど注水量を観察すると、相関係数が 0.830 と強い正の相関があることを示した。硫酸ばんどは濁質の除去を目的とするため、相関分析の結果は正しいと言える。

5.3 プランクトン処理について

本節では大阪市水道局からの依頼により濾過水濁度の上昇原因と傾向について分析した。

濾過水濁度では凝集沈殿処理・中オゾン処理・濾過処理を終えた後の水質を計測しており、濾過水濁度で主に検出されるのはプランクトンである Fig. 9 に濾過水濁度の推移について示す。プランクトンは混和池での殺藻剤注入、凝集沈殿、高度浄水処理でのオゾンの酸化殺菌、濾過池を通じて処理される。しかし、Fig. 9 より濾過水濁度は、夏期は 0.06 度前後まで上昇するが冬期は 0 付近まで減少し、毎年同じ傾向を繰り返しており 1 年を通して安定していないことがわかる。

プランクトンは水温の高い春から秋にかけて増殖し、浄水処理において障害となる種もいるため、プランクトンによる浄水処理障害が夏期における濾過水の高濁度をもたらしたと考えられる。プランクト

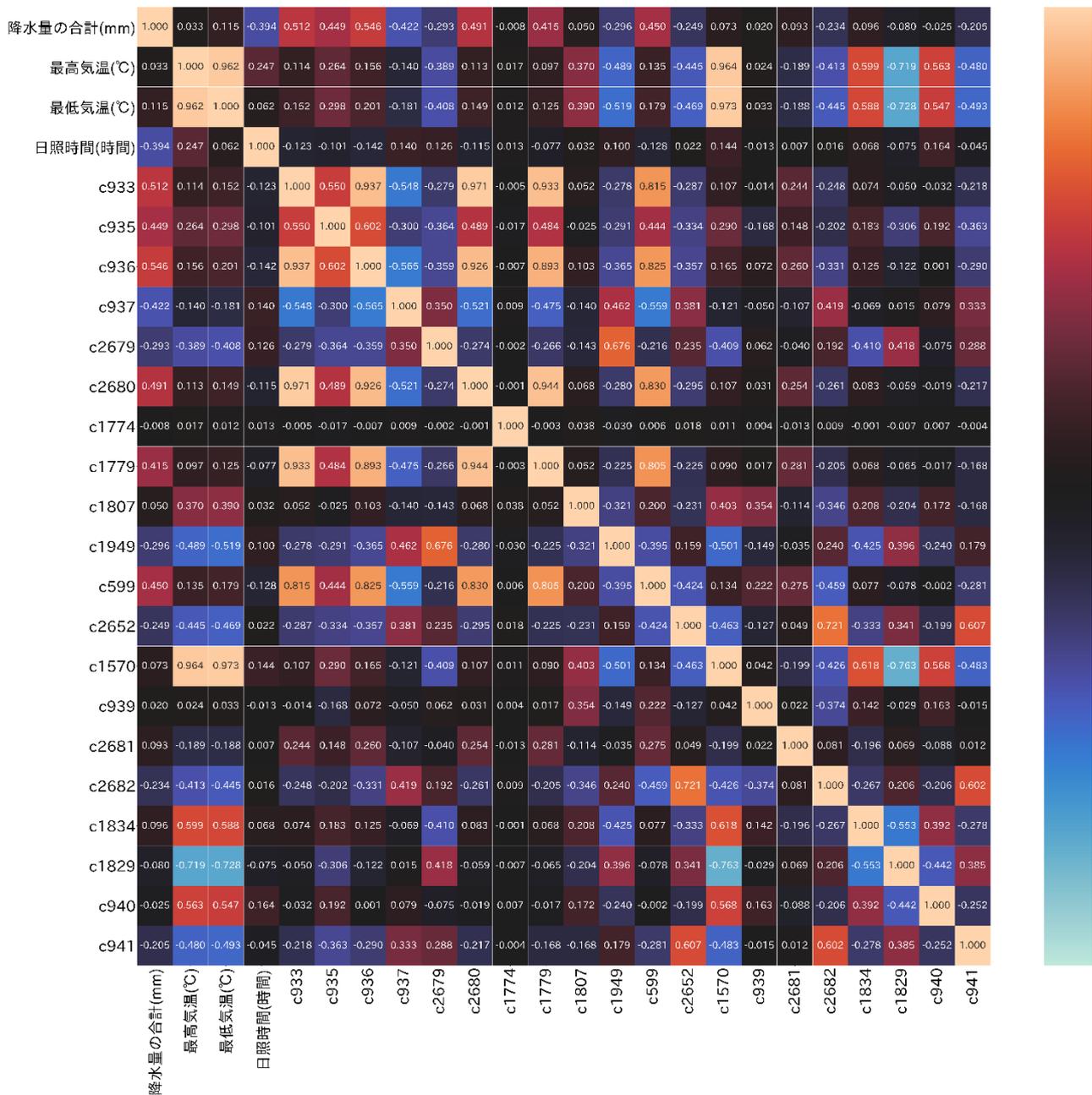


Fig.8 天気と水質(20項目)の相関ヒートマップ

Table 3 水質20項目のセンサ名

センサ番号	項目	センサ番号	項目	センサ番号	項目	センサ番号	項目
C933	取水塔濁度	C2680	着水井濁度	C599	硫酸ばんど 注入量	C2682	沈殿池pH
C935	取水塔全有 機炭素量	C1774	次亜塩素酸 ナトリウム 注入量	C2652	フロック形 成池pH	C1834	中オゾン注 入量
C936	取水塔 UV計	C1779	苛性ソーダ 注入量	C1570	沈殿池水温	C1829	中オゾン溶 存濃度
C937	着水井 アルカリ度	C1807	殺藻剤 注入量	C939	沈殿池 UV計	C940	濾過池 濁度

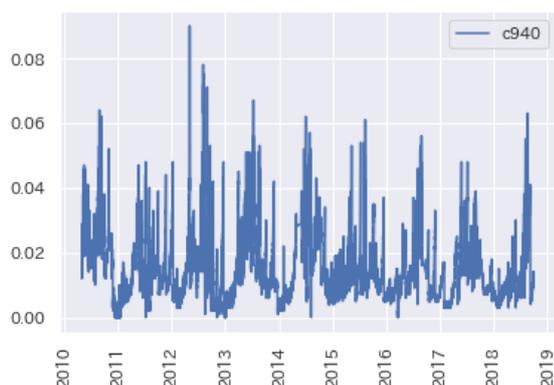


Fig.9 濾過水濁度

ンが浄水処理障害を引き起こす原因は、

- ①浮力を持つため凝集剤との接触が難しく、凝集沈殿が不十分となり濾過池での目詰まり・閉塞を引き起こす
- ②殺藻剤やオゾンによる酸化処理により群体や細胞が破壊され、濾過池での砂濾過の目より小さくなり、濾過漏洩を引き起こす

などが挙げられる。また、Table 4 に浄水処理障害となるプランクトンの一例を示す。

Fig.10 は濾過水濁度と殺藻剤注入量の推移を示す。x 軸に時系列、y1 軸に濾過水濁度を緑線、y2 軸に殺藻剤注入量を青線で描画した。殺藻剤は塩素を成分としてプランクトンの殺菌を目的として用いられ、高度浄水処理におけるオゾンと同様に、酸化力によってプランクトンを殺菌する。Fig.10 より、殺

藻剤は 2010 年～2013 年は夏期の長期間にわたって注入され、2014 年、2016 年、2018 年は夏期に一時的な注入が確認され、2015 年と 2017 年においては殺藻剤の注入は確認できない。いずれの場合も、グラフからは濾過水濁度の変化は毎年同じ傾向を示すことが確認できる。さらに、殺藻剤の成分である塩素は水中のフミン質などの有機物と反応すると、発がんの可能性がある物質であるトリハロメタンを副生成物として発生させる。プランクトンの酸化殺菌はオゾン処理でも可能となるため、殺藻剤注入の必要性は低いと考える。また、対象期間中に殺藻剤注入の有無に関わらず、浄水処理後の水質が厚生労働省の定める基準項目を満たしていたことから、殺藻剤注入については不要であると判断した。

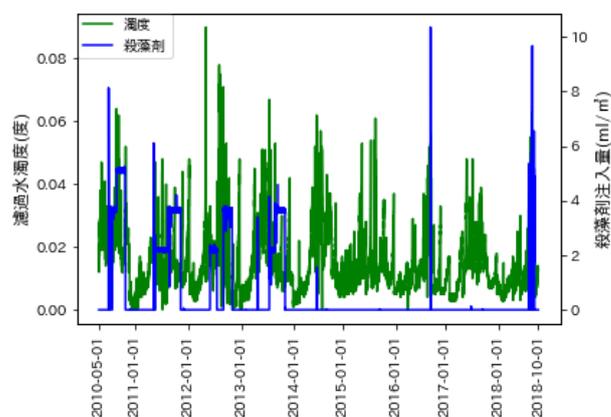


Fig.10 濾過水濁度と殺藻剤注入量

Table 4 浄水処理で障害となるプランクトン¹⁰⁾

生物障害名	原因となる主な障害生物の属名
濾過閉塞	珪藻類：アステリオネラ属，オーラコセイラ属，フラギラリア属，シネドラ属
濾過漏出 及び 浄水着色	藍藻類：ミクロキスチス属 珪藻類：キクロテラ属，ステファノディスカス属，ニッチア属 緑藻類：カルテリア属，クラミドモナス属，ジクチオスフェリウム属 その他：ピコプランクトン(0.2～2μm)
異臭味(カビ臭)	藍藻類：アナベナ属，フォルミジウム属
異臭味(生ぐさ臭)	黄金藻類：ウログレナ属，シヌラ属
発泡	鞭毛藻類：クリプトモナス属

5.4 気象との関係性のまとめ

本章では柴島浄水場の水質データや薬品の注入量のデータ、気象庁の気象データを分析した。

分析に先立ち、水質への気象の影響の時間差について仮説を立てた。日毎のデータを用いた検証の結果、大阪の「降水量」は「取水直後の原水の水質」に対して、1日遅れて

影響を与えることが明らかになった。また、プランクトン処理の観点から濾過水濁度について分析した。濾過池での処理後に濁度として検出されるのはプランクトンであり、春から夏にかけて高水温期での増殖や、プランクトンの特性による濾過障害が発生し濁度の上昇の原因となることが判明した。分析より、この濾過池の濁度は、殺藻剤注入

の有無に関係なく同様の推移をする傾向があることが判明した。殺藻剤注入による副生成物の発生や、非注入時においても厚生労働省の水質基準を満たしていることから、殺藻剤注入の必要性は低いと結論づけた。

現在の柴島浄水場の一連の浄水処理について分析をした結果、浄水処理において問題は特にないと判断した。

6. 異常発生について

本章では浄水処理の過程において通常とは異なり、高負荷処理となる部分の分析と、その予測について研究を行った。通常処理と異なった推移を示す点を分析するため、異常発生と表現する。

6.1 中オゾン処理の逼迫について

中オゾン処理プロセスにおいて、溶存オゾン濃度が低下する事態が発生しており、これを逼迫と表現し原因について分析した。

柴島浄水場では砂濾過の前後で二段のオゾン処理を行っている。このうち、前段の中オゾン処理プロセスではマンガンなど溶解性物質を砂濾過が可能な不溶解性へ変化させる必要があるため、酸化処理を行っている。中オゾン処理プロセスにおけるオゾン注入量は、低水温期には反応槽末端で0.1mg/Lの溶存オゾンが残留するように注入を制御し、オゾンの自己分解が大きくなる高水温期には0.7mg/Lで一定注入を行っている。これは、水中に溶存する臭化物イオンとオゾンが反応することによって発生する、発がん物質の疑いがある臭素酸イオンの発生抑制を目的とし、柴島浄水場が定めた基準である。

中オゾン処理プロセスにおけるオゾン注入量と溶存オゾン濃度の推移を Fig. 11 に示す。1時間毎に計測されたデータを用い、x軸に時系列、y1軸に溶存オゾン濃度を緑線、y2軸に中オゾン注入量を青線で描画した。Fig. 11 から夏期のオゾン一定注入期間中に溶存オゾン濃度の低下が確認できる。オゾン濃度の低下原因としては、①オゾンの酸化反応が活発でオゾン消費量が多い、②オゾンの自己分解がより進んでしまうことが考えられる。

① オゾンの酸化反応が活発となる場合

オゾンは強い酸化力を持っており、殺菌、脱臭、脱色など有機物の分解や、溶解性のマンガン等の重金属類の不溶解化へ用いられる。オゾンが注入される水中に有機物やマンガンなどが多く溶存している場合、それらとオゾンの反応が多くなり、既溶容量によってオゾン濃度の低下が発生する。

②オゾンの自己分解が進む場合

オゾンは不安定な分子であるため、自己分解を行うこと

で安定した酸素に変化する性質がある。オゾンの自己分解速度は温度や水素イオン濃度(pH)が高いほど速くなる。

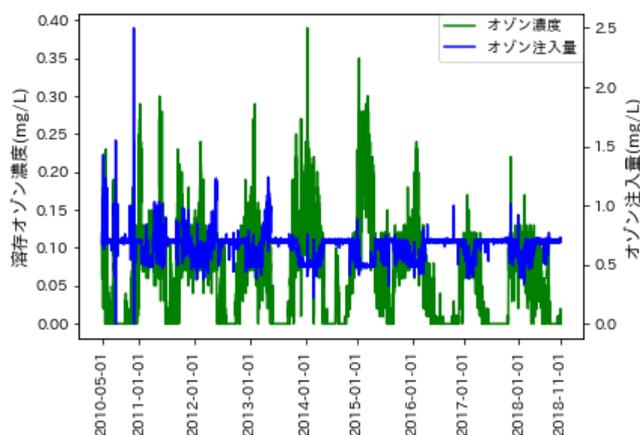


Fig. 11 中オゾン注入と濃度の推移

溶存オゾン濃度低下の原因を探るため中オゾン注入前の沈殿水pHとの比較を試みた。沈殿水pHの推移について Fig. 12 に示す。データは1時間毎の計測データを使用し、x軸に時系列、y軸にpH値を描画した。柴島浄水場では混和池において硫酸と苛性ソーダを注入することによりpH値を制御しており、Fig. 12 より沈殿水pHは概ね6.4~6.9前後で推移していることが確認できる。さらに、オゾン濃度の低下する夏期においてpHが低下する傾向が毎年見られるが、オゾンの自己分解の加速はpHの上昇により発生することが分かっている。以上より、pHによるオゾン自己分解への影響は小さいことが判明し、溶存オゾン濃度の低下はオゾンの酸化反応が多くなることで引き起こされていると考える。

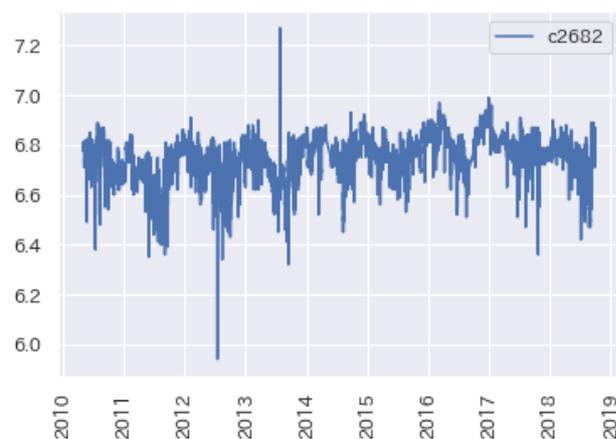


Fig. 12 沈殿水pH

中オゾン処理前の沈殿水濁度について Fig. 13 に示す。Fig. 13 より濁度は中オゾン処理プロセスへ到達する前に、硫酸ばんどによる凝集沈殿処理によって概ね0.6度以下に処理されており、季節による値の変化も確認できない。

Fig. 14 では2017年の日毎の計測データから y1 軸に大阪で観測された降水量を青線で、y2 軸に沈殿水濁度を緑線で描画した。Fig. 13 において確認できる2017年10月末の高濁度は、Fig. 14 から直前に降水量の増加が確認され、台風21号の影響で高濁度が発生したと考えられる。

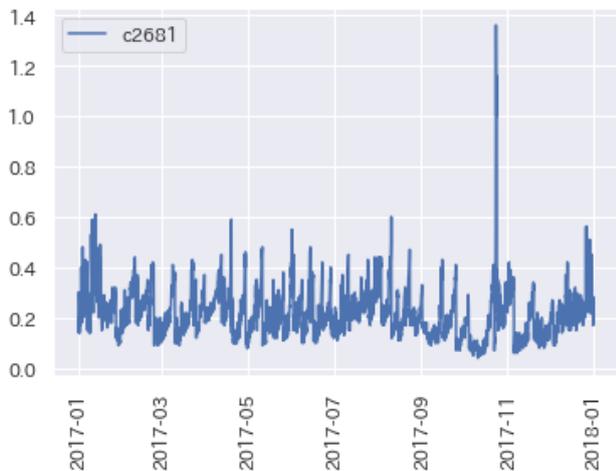


Fig. 13 沈殿水濁度(2017年)

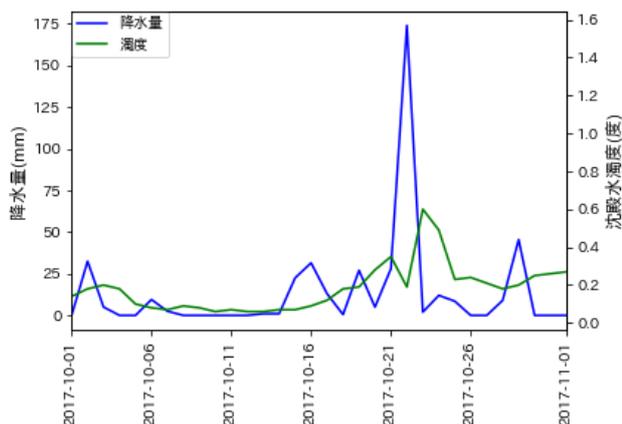


Fig. 14 沈殿水濁度と降水量(大阪, 2017年10月)

一方でFig. 9の濾過水濁度のグラフからは、濁度の値は小さいものの、夏期になると濁度が上昇する傾向があることが確認できる。濾過水濁度では濾過後の濁度を計測しており、プランクトン等の微小物質が濾過漏洩した際に検知される。プランクトンは水温の高い季節に増殖することがわかっており、さらにその個体の小ささや酸化による破壊・群体の分離で濾過漏洩が発生し、夏期の濾過水濁度上昇の原因となっている。沈殿水濁度と濾過水濁度の間では中オゾン処理と濾過処理が行われているが、濾過水濁度の上昇から夏期においては十分な処理が行われていない可能性がある。

次に、濾過水濁度と中オゾン処理での溶存オゾン濃度の推移についてFig. 15に示す。2017年の1時間毎の計測データから x 軸に時系列、y1 軸に濾過水濁度を青線、y2 軸に溶存オゾン濃度を緑線で描画した。Fig. 15 より2017年

5月～10月にかけて溶存オゾン濃度が0まで低下する期間と、濾過水濁度が上昇し変動が大きくなる期間が一致することが確認できるうえ、濾過水濁度では漏洩したプランクトン類が計測される。濾過プロセスの後にオゾン処理のプロセスがあるため、漏洩したプランクトンに対するオゾンの酸化反応が活発となり、オゾンが多く消費され溶存オゾン濃度の低下に繋がったと考える。

Fig. 16に2017年の1時間毎で計測された中オゾン注入量を青線、後オゾン注入量を緑線で示す。これより、中オゾン注入量が0.7mg/Lの定量注入期間中、特に5月～10月にかけて後オゾン処理においてオゾン注入量が増加していることが確認できる。これはFig. 15より濾過水濁度の変動が大きくなる期間と重複する。

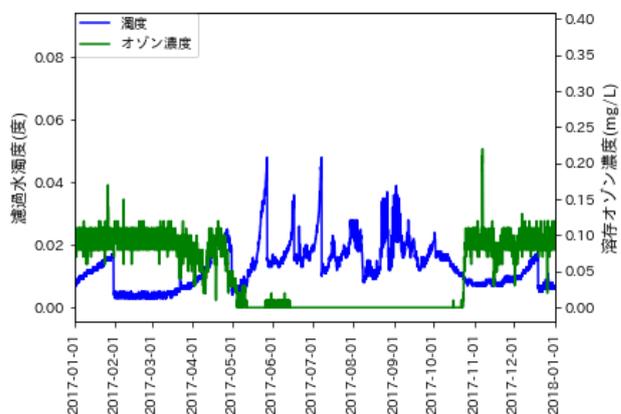


Fig. 15 濾過水濁度と溶存オゾン濃度(2017年)

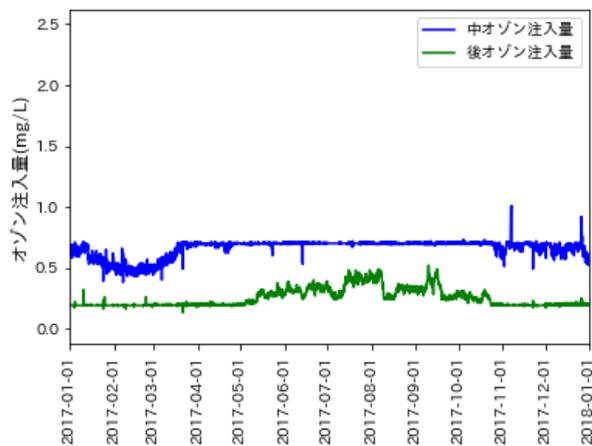


Fig. 16 中オゾン・後オゾン注入量(2017年)

Fig. 17に後オゾン処理プロセスでのオゾン注入量と溶存オゾン濃度を示す。これより、後オゾン注入後の溶存オゾン濃度は0.1mg/L前後で安定していることが確認でき、中オゾン溶存濃度の低下を後オゾン注入の増加により補っていることが考えられる。しかし、中オゾン処理と後オゾン処理の間にある濾過処理のプロセスでは臭化物イオンは取り除かれないため、臭素酸イオンの発生に

繋がる可能性のあるオゾンは、中オゾン注入量と後オゾン注入量の合計となる。中オゾン注入量を0.7mg/Lに抑制している夏期において後オゾン注入量が増えている現状から、臭素酸イオン発生を考慮して中オゾン注入量を抑制する必要性は薄いと考える。さらに、中オゾンの溶存濃度が低下すると、本来酸化する必要のある有機物やマンガンなどの溶解性物質に対して十分な酸化・不溶解化処理を行わず、濾過池を通過してしまう可能性が考えられるため、中オゾン注入量の上限引き上げなどの対策が必要だと考える。

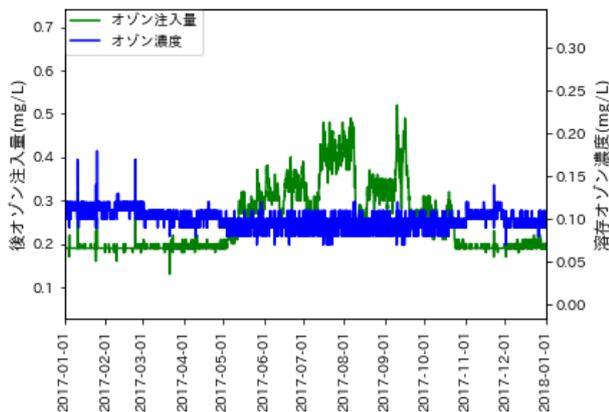


Fig. 17 後オゾン注入量と濃度の推移

6.2 上流地点降雨からの時間差

原水の濁度は降雨の影響を強く受けることが判明しており、降雨からどの程度の時間差で原水の濁度に影響するかを把握できていれば、適した処理制御を行うための予測を立てることができると考えた。特に上流地点での降雨から柴島浄水場の「取水直後の原水の濁度」に影響する時間差について調査した。対象とした地点は、淀川周辺と淀川に流れ込む木津川・桂川周辺の気象庁観測点の大阪、枚方、長岡京、京田辺、京都の5地点である。以下Fig. 18に位置関係を示す。

調査には時間毎の水質データを用いて、気象庁ホームページ上の過去の気象データ¹¹⁾と比較した。1地点からの影響の時間差の発見を目的としたため、1地点で降雨があり、他地点で降雨が少ない状況を探った結果、2012/7/15には京都で一時的にとっても強い降雨があり、他4地点ではほとんど降雨がない事象が見つかった。また、2014/8/16には京都で一時的にとっても強い降雨があり、柴島浄水場の一津屋取水口がある一津屋に近い地点では降雨が少ない事象が見つかった。2012/7/15は京都で4時台に1時間で54.5mmの降雨があり、2014/8/16は平成26年8月豪雨と呼ばれ、西日本を中心に全国的に記録的な多雨・日照不足になった豪雨で、京都で13時台に1時間で66.5mmの降雨

があった。2012/7/15の事象のグラフをFig. 19, 2014/8/16の事象のグラフをFig. 20に示す。

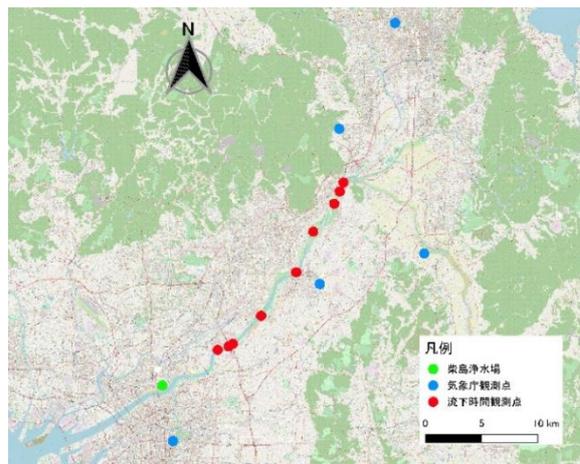


Fig. 18 浄水場、気象庁観測点、流下速度各地点

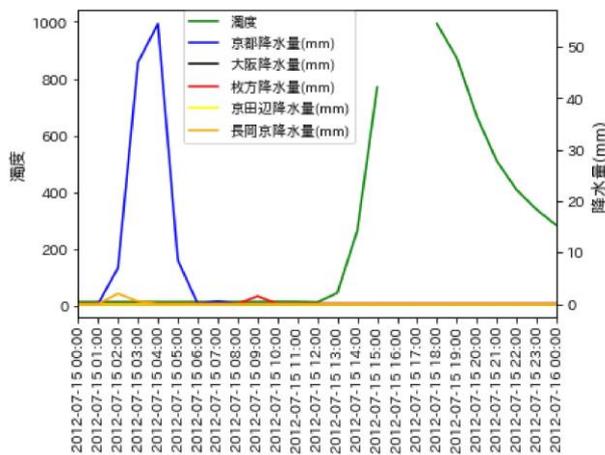


Fig. 19 2012/7/15の濁度と降水量

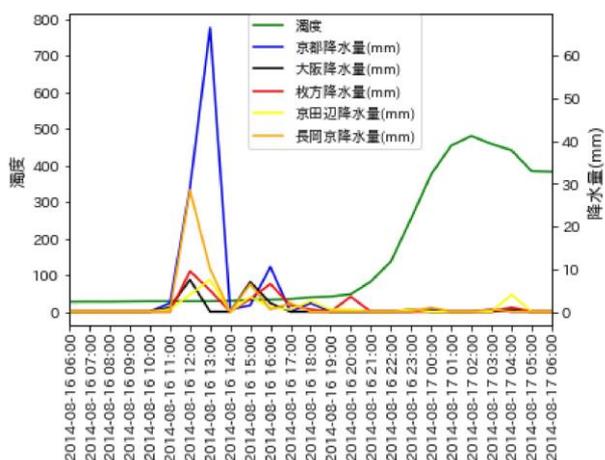


Fig. 20 2014/8/16の濁度と降水量

Fig. 19, Fig. 20より、京都での降雨から約9時間後に柴島浄水場での「取水直後の原水の濁度」の上昇の勢いが強くなり、約10時間後には濁度の値が200を超えることが示されている。Fig. 20より、2014/8/16の20時台からゆるやかに濁度の上昇が始まっているのは、柴島浄水場の

一津屋取水口に近い地点での雨が観測されているためだと考えられる。また、長岡京で2014/8/16の12時台に1時間で28.5mmの降雨が観測されているが、京都と長岡京は直線距離で約10km強しか離れていないため、柴島浄水場の一津屋取水口がある一津屋に到達するまでには京都での降雨が長岡京での降雨に追いついていると考えられる。この京都からの時間差は、厚生労働省の河川流下到達時間早見図表(Fig. 21)¹²⁾からもおおよそ正しいと判断できる。河川流下到達時間早見図表により、地点距離と河川の流量から到達時間を予測することができる。Fig. 21より、柴島浄水場の一津屋取水口がある一津屋と枚方の距離間は10kmである。Table 5, Table 6にそれぞれの場合での枚方で計測された淀川の流量¹³⁾を示す。これにより、「取水直後の原水の濁度」が上昇する約5時間前に流量が1000m³/sに達していることが判明した。流量が1000 m³/sの時、枚方から一津屋までの到達時間は約2.5時間である。柴島浄水場から京都までの距離間は約40kmであり、距離が約4倍であるから、到達時間も約4倍と考えると約10時間となるため、おおよそ正しいと言える。よって、京都で強い降雨があった場合、約9時間後に「取水直後の原水の濁度」の上昇の勢いが強まると判断できる。

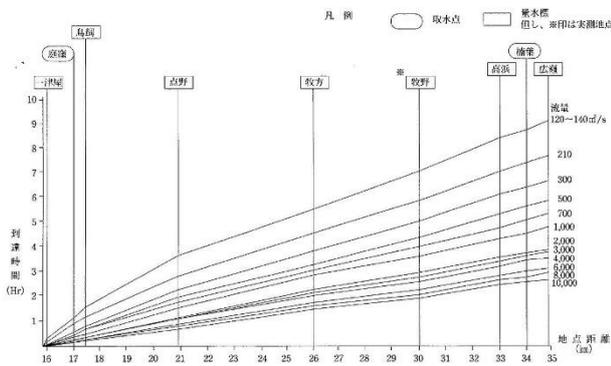


Fig. 19 淀川の河川流下到達時間早見表¹²⁾

Table 5 2012年7月15日 枚方で流量¹³⁾

日	時	流量
2012/07/15	04:00	欠測
2012/07/15	05:00	欠測
2012/07/15	06:00	欠測
2012/07/15	07:00	655.54
2012/07/15	08:00	945.24
2012/07/15	09:00	1131.31
2012/07/15	10:00	1221.89
2012/07/15	11:00	1243.70
2012/07/15	12:00	1205.65

Table 6 2014年8月16日 枚方で流量¹³⁾

日	時	流量
2014/08/16	13:00	447.51
2014/08/16	14:00	508.91
2014/08/16	15:00	740.45
2014/08/16	16:00	987.50
2014/08/16	17:00	1159.94
2014/08/16	18:00	1270.06
2014/08/16	19:00	1339.81
2014/08/16	20:00	1365.64
2014/08/16	21:00	1372.14

6.3 異常発生に関するまとめ

6.1 では中オゾン濃度が低下し処理が逼迫することについて原因を分析し、オゾン濃度の低下についてオゾンの反応による消費と、オゾンの自己分解を原因として挙げた。分析の結果、pHの低下と夏期の濾過水濁度の上昇から、オゾン反応の活発化による消費量の増加が濃度低下の原因であると判断した。また、中オゾンの一定量注入期間において濾過水濁度の上昇と中オゾン溶存濃度の低下、後オゾン注入量の増加が重複して起きていることが確認された。これにより臭素酸対策として行っている中オゾン注入量の制限の必要性は薄いと考える。さらに、オゾン濃度の低下により酸化処理が不十分となり安定性に欠けるため、中オゾン注入量の制限値の引き上げを提案する。

6.2 では降雨による制御予測のために上流地点と水質の時間関係を分析した。淀川上流沿岸で気象庁の観測する5地点で、対象期間中に、京都のみ一時的で強い降雨があり、他4地点ではほとんど降雨がない事象と、京都のみ一時的で強い降雨があり、柴島浄水場の一津屋取水口がある一津屋に近い地点では降雨が少ない事象が確認された。いずれの場合も、約9時間後に「取水直後の原水の濁度」の上昇の勢いが強くなり、約10時間後に濁度の値が200を超える事象が確認された。このことから、大阪で雨が降っていない場合でも京都でもとても強い降雨があった場合は、約9時間後の制御を高濁度に対応させる必要があることが判明した。

7. おわりに

本研究では、大阪水道局柴島浄水場を研究対象として、浄水場の水質や薬品注入量のデータと気象庁の公開する気象データを併せて分析し、柴島浄水場の現在の処理制御の評価、予測制御に向け気象などによる水質変化の傾向の分析を行った。

研究結果より、対象期間中において厚生労働省の定める水質基準を問題なく満たしていたことから、現状の柴島浄水場の処理制御は特に問題がないと判断した。また、中オゾンの逼迫についての分析では、中オゾン溶存濃度が低下する原因として、中オゾン注入量が制限される高水温時にプランクトン数の増加が発生し濃度低下が引き起こされると判明した。この時、後オゾン処理においてオゾン注入量が増加していることや、溶存オゾン濃度低下による不安定な処理を引き起こさないために、中オゾン注入量の制限引き上げなどの提案につながった。さらに、京都でのとても強い降雨から約9時間後に柴島浄水場の「取水直後の原水の濁度」の上昇の勢いが強まることが判明し、処理制御の最適化を行うための一材料となる研究結果を導き出した。

9. 謝辞

本研究は、環境総合研究推進費 S-17-2 の助成を受けたものである。

10. 参考文献

- 1) 厚生労働省 水道普及率の推移
<https://www.mhlw.go.jp/content/000501638.pdf>
- 2) 厚生労働省 新水道ビジョンについて
https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/newvision/1_0_suidou_newvision.htm
- 3) 厚生労働省 水質汚染事故による水道の被害及び水道の異臭味被害状況について
<http://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000546324.pdf>
- 4) 厚生労働省 水質基準項目と基準値(51項目)
https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/ki_jun/ki_junchi.html
- 5) 国土交通省気象庁 過去の気象データ・ダウンロード
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>
- 6) 大野, 小坂, 秋葉, 岸田, 佐々木, 小川: 水安全計画を用いた水道水源・浄水プロセス・給配水システムでの危害と監視方法の解析 平成27年度総括・分担研究報告書
- 7) 朝野, 浅見, 斎藤, 小坂, 小池, 秋葉, 宮林: 全国20事業体における水道原水の連続監視データの変動解析 水道協会雑誌平成30年2月第1001号抜刷
- 8) 浅見, 小坂, 斎藤, 小池, 宮林: 連続自動水質計器のデータによる水質変動の比較分析 平成27年度総括・分担研究報告書
- 9) 厚生労働省 「水道事業における高度浄水処理の導入実態及び導入検討等に関する技術資料」について
<https://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/jousui/01.html>
- 10) 神奈川県 水道水質の解説(2)
<http://www.pref.kanagawa.jp/docs/u3m/kaisetsu-2.html>
- 11) 国土交通省気象庁 過去の気象データ検索
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 12) 厚生労働省 資料C8 河川流下到達時間早見図表(例)
https://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/kikikanri/dl/chosa-0603_03c.pdf
- 13) 国土交通省 水文水質データベース
<http://www1.river.go.jp/cgi-bin/SiteInfo.exe?ID=306041286606090>