

小規模水供給施設における衛生問題と微生物的安全確保法

研究分担者 伊藤禎彦 京都大学大学院工学研究科教授
研究協力者 曾 潔 京都大学大学院工学研究科博士後期課程
武藤陽平 京都大学工学部生

研究要旨：

広島市安佐北区、および広島県山県郡安芸太田町において地元管理されている簡易水道組合への訪問調査を行った。地元管理されている施設の場合、塩素貯留槽への塩素の継ぎ足し作業が広く行われていることから、そのような施設での水質検査は、基本項目に加えて塩素酸を検査項目に加えることが望ましいことを指摘した。地元管理されているような小規模水供給施設について、原水の種類、浄水処理の有無、消毒の有無によって分類したうえで、現実的な水質検査のあり方を考えるための枠組みを示した。京都市西京区における施設を調査対象とし、原水の微生物リスクを推定したうえで、必要な浄水処理レベルについて考察を行った。さらに、限定的な情報の下で、微生物的な安全性を確保するためのアプローチ方法を提示した。

A. 研究目的

本研究課題のひとつは、小規模水供給システムにおける衛生的な水の持続的供給を目的とした技術的検討を行うことである。

飲料水供給施設等の小規模水供給施設においては、浄水処理や消毒が不十分である場合も少なくない^{1, 2)}。特に、地元管理されている施設では、塩素消毒の必要性が認識されていない場合や、意図的に忌避される場合がある。ここでは、そのような小規模水供給システムを取り上げ、その水質管理や衛生管理上の課題を抽出する。

微生物的安全性の面では、たとえ塩素消毒が行われていなくても、利用者は、もちろん清浄な水を使用できていると考えているし、通常、感染症の流行などが起きるわけでもない。このような状況下において、都会に出た人が帰省した際、しばらく滞在していると、同行した子供（孫にあたる）がおなかをこわすことがあるという。渓流水や沢水を手ですくって飲んだ場合、“おなかをこわす本体”とはいったい何か、興味あるところである。しかし、そのような水道原水について病原微生物に関する検査が行われることは皆無と言ってよい。ここでは、限定的な情報の下で、微生物的な安全性をいかに確保すればよいか、そのアプローチ方法について考察を行った。

B. 方法

1. 広島市安佐北区および広島県山県郡安芸太田町への訪問調査

地元管理されている広島市安佐北区安佐町^{うづ}宇津簡易水道組合、および広島県山県郡安芸太田町^{すみあい}澄合簡易水道組合への訪問調査を行った。いずれも、直接、管理されている方からヒアリングすることができた。

2. 滋賀県長浜市寺院への訪問調査

滋賀県長浜市内の^{だいきちじ}大吉寺（長浜市野瀬町）の水供給施設への訪問調査を行った。以前膜ろ過施設を設置していた企業（株式会社清水合金製作所）立会いのもと、ご住職からヒアリングすることができた。また、株式会社清水合金製作所からも、これまでの経緯等についてヒアリングを行った。原水、および寺院への供給水を採水し水質測定を行った。原水である溪流と、原水槽を写真1に示す。溪流水面にスクリーンが設置されているのがわかる。



写真1 大吉寺供給水の原水である溪流と原水槽

3. 京都市内における原水調査

新型コロナウイルス感染症が終息しない状況下にあっては、高齢者の多い地元管理水道を調査対象とすることは困難であった。このため、同様の原水を利用している施設を探索した。この結果、京都市西京区において、トロッコ保津峡駅（嵯峨野観光鉄道株式会社）の駅舎と売店に水供給している施設を見出し、これを調査対象とした。保津川を挟んで、北側の施設と南側の施設の2か所があり、前者は売店へ、後者は駅舎へ水供給しているものである。北側施設の原水の状況を写真2に示す。



写真2 トロッコ保津峡駅北側施設の原水状況

（倫理面への配慮）

本調査研究の内容は、京都大学大学院工学研究科工学研究倫理委員会における審査非該当であることを確認した上で、個人情報の保護及び調査に係る対象者を含む安全性に配慮して実施した。ヒアリング調査における具体的な配慮事項は以下のとおりである。1)ヒアリングでは個人情報に関する設問を含まない、2)得られた情報は本研究実施以外の目的には使用しない、3)得られたデータに含まれる情報は適切に管理し、第三者には開示しない。また、同情報は研究担当者のみが扱い、研究終了後に適切に廃棄する。

C. 結果

1. 広島市安佐北区および広島県山県郡安芸太田町への訪問調査

1.1 広島市安佐北区安佐町^{うづ}宇津簡易水道組合

（1）水道施設の現況

従来あった水供給施設に対して、砂防堰堤築造に伴う補償工事として設置されたものと考えられる。昭和35年に申請、設計は中国電力が実施した。昭和37年配水開始（60年近く経過していることになる）。

現在、給水戸数 32～33 戸、給水人口 74～75 人。

砂防堰堤を県が平成元年に築造。ここから取水している。大雨時には、礫の全面から流出してくる。原水が濁る。浄水処理によって、濁度は低下するが、風呂水がやや濁っている（黄色っぽい）のが分かる程度になる。

別に、湧水（ヨコ水と呼ばれている）も取水している。これは濁りのないきれいな水。湧水（ヨコ水）用の集水タンクが併設されている。

（2） 施設管理の状況

処理プロセスは、普通沈殿池—緩速ろ過池—分配槽・塩素注入—貯水槽（配水池）。

通常時は、主として緩速ろ過池と塩素注入の維持管理を行っている。砂の全層入れ替えを 15～20 年前に行った。砂 750 袋を搬入し、40 人で作業した。作業は、管理人が半年ごとに交代するので、その際に行う。まずは、ろ過池表面の葉などを除去する。砂表面を 10cm くらいかきとり。これは洗浄せずに捨てる。層厚は次第に薄くなる。薄くなると濁りが出やすくなる。そのため、5 年に 1 度程度補砂を行っている。

塩素貯留槽（写真 3、赤いフロートがあるのがわかる）へ、1 回/月程度の頻度で塩素を継ぎ足している。塩素酸濃度増大の可能性は否定できないとみられる。

普通沈殿池の老朽化が進み、水漏れしている。

組合長がひとりで、電気設備、機械設備等を設置・改良してきている。県は、毎年、現況を確認するための調査を行っている。配水量など変化がないか。水質検査は広島県環境保健協会に送って行っている。以前は、全項目試験を行っていたこともある。費用がかかること、水質に異常はないことから、住民で話し合い、基本項目だけにした。

（3） 管理の体制

宇津簡易水道組合。役員 7 人。管理人は 4 人で半年交代。32～33 戸で持ち回り。

ランニングコストは 50～70 万円/年必要。管理人 1 人に 1.5 万円。水質検査に 6,730 円。収入は約 80 万円あり、残額は補修等のために積み立てている。

水道代は 4 カ月ごとに集金。基本料金 980 円＋一人あたり 100 円＋水洗トイレ使用＋営業用水使用。

（4） 要望等

高齢化が進み、管理作業を継続することが難しくなりつつある。組合を解散し、市へ移管することを考え始めている。窓口は水道局。下水道が延伸され使用を開始するときが、移管のタイミングではないかと考えている。移管するとは、上水道接続という意味。配水管を延伸して接続すればよい条件の地域なので、所要費用に関して住民合意されれば接続するのは困難ではない（元市職員による）。

老朽化が進んでいるので、管が破損するなどのトラブルが発生しないか心配である。

1.2 広島県山県郡安芸太田町^{すみあい} 澄合 簡易水道組合

（1） 水道施設の現況

中国自動車道のトンネル工事時に補償工事として設置された。平成 7 年完成。昔は緩速ろ過の施設があり、維持管理が大変であった。



写真 3 塩素貯留槽

給水戸数 58 戸、給水人口 93 人。

(2) 施設管理の状況

トンネル内の湧水を導水。プロセスは、滅菌槽—配水池のみ。

(3) 管理の体制

水道組合が、維持管理を業者に委託している。ただし、保守契約しているわけではなく、トラブル等が発生する都度に業務依頼している。

安芸太田町は、修繕費については、その半分を補助している。他は住民負担。維持管理費等をまとめた書面あり。塩素 2 万円。水質検査 17 万円（年 2 回分）。清掃代 14 万円。基本料金 1000 円＋従量料金。メータあり、年に 1 回検針する。その使用量によって、翌年の従量料金を決定する。

(4) 要望等

役場に要望したいことが特にあるわけではない。

2. 滋賀県長浜市寺院への訪問調査

(1) 経緯

以前は砂ろ過施設が設置されていた（写真資料あり）。これに対し、観光地でもあることから、旧浅井町から対策の必要性を指摘され、2005 年に、膜ろ過装置を設置した（写真資料あり）。クリプトスポリジウム対策の意味もあったとみられる。導入されたのは、株式会社清水合金製作所のアクアレスキュー類似装置（初期モデル、MF、50 m³/日）。旧浅井町が発注したもの（2006 年市町村合併により長浜市に移管）。2013 年、長浜市は、地元自治会に管理を移管した。その後も、長浜市は水質検査を行っていたようである。

導入したシステムは、原水流量の減少により、ポンプが作動しなくなるなどのトラブルがしばしば発生した。給水栓からしばらく水を流していると、水量が減少することがしばしばあった。断水もよく起きるので困っていた。ただし、これらは膜ろ過装置に原因があるのではなく、取水設備が不良だったことに原因があるとみられる。

このため 3～4 年前に膜ろ過装置は撤去し、現有設備に変更した。これは長浜市が業者に設計を依頼し、長浜市が設置したものと思われる。

(2) 水供給施設の現況

原水は渓流水。水面に、目開き数 mm のスクリーンが設置されている。この下部に集水管＝導水管があるものとみられる。原水槽（柵）に導入（写真 1 参照）。これは沈砂池の役割あり。設置後 3～4 年が経過し、砂が堆積している。流入管および流出管がほぼ埋まっている状態。数年に一度程度の頻度で除去・清掃を行う必要があるとみられる。槽内に目開き数 mm のストレーナを備えた集水管（流出管）あり。流出管は、溪流岸の石の下に埋設され、溪流水面に沿って下流へと延伸されている。

下流には防火水槽兼原水槽があり、原水はここに流入。直前にドレンがあり、ここで捨水および採水が可能。防火水槽からの流出管は、槽下部に設置されているので、防火水槽は沈砂池にはなっていない。ポンプアップして寺内に供給。塩素は注入されていない。

ポンプ室内には、以前砂ろ過装置があったが、その後、膜ろ過装置に置き換えられた。

下流位置に以前から防火水槽とポンプ施設があったため、これらを活用したものと思われる。ただし、寺内に供給するためには、下流側からポンプアップする必要がある状況となっている。

大吉寺のみの水供給施設であり、他に供給を受けている住宅等はない。

(3) 施設管理の状況

メンテナンスは特に行っていない。費用も不要。ただし、原水槽には砂が堆積しているので、数年に一度程度の頻度で除去・清掃を行う必要があるとみられる。

現在、市の関与があるわけではなく、補助等も特にあるわけではない。

(4) 管理体制、利用状況

定期的な水質検査を行っているわけではない。自費で8000円を負担し、検査してもらったことがある。市が発行する広報で水質検査の希望を募っていたので、これに申し込んだもの。保健所に依頼。11項目検査とみられる。大腸菌も不検出であって、特に問題はなかった。

飲用しているが、おなかをこわすなどの問題は全くない。上流域に住居など、汚染源はない。周辺で、シカが死んでいたこともあるが、問題とは思っていない。

(5) 水質測定結果

水質測定結果を表1に示す。原水濁度は高くないが、浄水メカニズムがないため、濁度は低減していない。細菌の測定結果をみても、低減しているとはいえない。

一方、防火水槽内の滞留時間が長いとみられるので、コンクリートのアルカリ分が溶出し、高pH、高硬度になる可能性がある。しかし、今回測定した範囲では特にそのような傾向は認められなかった。

(6) その他

長浜市内には10の寺院があるが、他寺院には水道が普及しており、独自施設をもつのは大吉寺だけである。水道普及地域から大吉寺までは距離があり、配水管を敷設することはできないため、寺独自の施設となっている。今後、長浜市市民生活部環境保全課へのヒアリングを実施する予定。(当該地域の上水道事業、簡易水道事業は長浜水道企業団が行っている。)

また、40項目の原水水質検査も実施する予定。

表1 大吉寺水質検査結果
(採水日 2021年3月9日)

	原水	給水栓水
pH	7.62	7.68
電気伝導率 (μ S/cm)	60.5	59.8
濁度(度)	0.68	0.49
一般細菌 (CFU/mL)	5.6	2.1
従属栄養細菌 (CFU/mL)	653	963
大腸菌群 (MPN/100 mL)	≥ 240	24
大腸菌 (MPN/100 mL)	1.5	0.92
嫌気性芽胞菌 (CFU/L)	12	4

3. 京都市内における原水調査

3.1 原水試験結果

北側施設、南側施設の原水について、厚生労働大臣登録検査機関に依頼して水質検査を行った。測定項目は、水質基準51項目のうち、消毒副生成物等11項目を除く40項目である。結果を表2に示す。なお、細菌、外観等に異常がみられる場合は味の検査を省略することがあるとされており、本試験でも省略されている。

3.2 微生物試験結果

これまでに行った細菌を中心とする水質試験結果を表3に示す。南側施設の方が、濁度、一般細菌、従属栄養細菌の値は小さいが、電気伝導度、大腸菌の値は大きい。南側施設の方が何らかの汚染を受けている可能性が考えられる。

表2 トロッコ保津峡駅施設 原水試験結果			
採水日: 2020年12月1日			
項目	基準値 (mg/L)	北側施設	南側施設
一般細菌	100 /mL	59	8
大腸菌	不検出	検出	検出
カドミウム及びその化合物	0.003	0.0003未満	0.0003未満
水銀及びその化合物	0.0005	0.00005未満	0.00005未満
セレン及びその化合物	0.01	0.001未満	0.001未満
鉛及びその化合物	0.01	0.001未満	0.001未満
ヒ素及びその化合物	0.01	0.001	0.005
六価クロム化合物	0.02	0.002未満	0.002未満
シアン化物イオン及び塩化シアン	0.01	0.001未満	0.001未満
硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素	10	0.06	0.40
亜硝酸態窒素	0.04	0.004未満	0.004未満
フッ素及びその化合物	0.8	0.08未満	0.08未満
ホウ素及びその化合物	1	0.02未満	0.02未満
四塩化炭素	0.002	0.0002未満	0.0002未満
1,4-ジオキサン	0.05	0.005未満	0.005未満
シス-1,2-ジクロロエチレン及びトランス-1,2-ジクロロエチレン	0.04	0.004未満	0.004未満
ジクロロメタン	0.02	0.002未満	0.002未満
テトラクロロエチレン	0.01	0.001未満	0.001未満
トリクロロエチレン	0.01	0.001未満	0.001未満
ベンゼン	0.01	0.001未満	0.001未満
亜鉛及びその化合物	1	0.005未満	0.005未満
アルミニウム及びその化合物	0.2	0.03	0.02未満
鉄及びその化合物	0.3	0.08	0.03未満
銅及びその化合物	1	0.01未満	0.01未満
ナトリウム及びその化合物	200	5.0	3.9
マンガン及びその化合物	0.05	0.022	0.005未満
塩化物イオン	200	2.9	3.8
カルシウム、マグネシウム等(硬度)	300	22.6	36.4
蒸発残留物	500	69	78
陰イオン界面活性剤	0.2	0.02未満	0.02未満
ジオスミン	0.00001	0.000001未満	0.000001未満
2-メチルイソボルネオール	0.00001	0.000001未満	0.000001未満
非イオン界面活性剤	0.02	0.005未満	0.005未満
フェノール類	0.005	0.0005未満	0.0005未満
有機物(全有機炭素(TOC)の量)	3	0.8	0.5
pH値	5.8-8.6	7.50	7.48
味	異常でない	(検査せず)	(検査せず)
臭気	異常でない	異常なし	異常なし
色度	5度以下	2	2
濁度	2度以下	1.6	0.3

表3 原水の水質測定結果

(1) 北側施設

採水日	一般細菌 CFU/mL	従属栄養細菌 CFU/mL	嫌気性芽胞菌 CFU/L	大腸菌 MPN/100mL	大腸菌群 MPN/100mL	pH	電気伝導度 μS/cm	濁度 度
2020/11/17	115	260	56	3.6	>2400	7.37	-	7.76
2020/12/01	32	440	3.3	不検出	>2400	7.37	68.2	5.89
2020/12/21	11	110	6.6	0.92	150	7.55	76.8	3.12
2021/01/06	7.1	29	2.3	0.92	>240	6.75	81.3	0.75
2021/01/20	6.9	13	1.3	0.92	29	6.66	87.1	1.19
平均値 (幾何/ 算術)	18.2	86.1	5.2	1.3	-	7.14	78.4	3.7
最大値	115	440	56.0	3.6	-	7.55	87.1	7.8
最小値	6.9	13.0	1.3	0.9	29	6.66	68.2	0.8
中央値	11.0	110	3.3	0.9	-	7.37	79.1	3.1

(2) 南側施設

採水日	一般細菌 CFU/mL	従属栄養細菌 CFU/mL	嫌気性芽胞菌 CFU/L	大腸菌 MPN/100mL	大腸菌群 MPN/100mL	pH	電気伝導度 μS/cm	濁度 度
2020/11/17	28	256	120	43	43	7.34	-	1.66
2020/12/01	6.3	220	17	240	240	7.12	98.4	0.81
2020/12/21	3.8	23	6.6	1.5	93	7.56	96.1	0.59
2021/01/06	4.6	11	6.6	24	>240	6.75	94.6	0.29
2021/01/20	1.7	37	5.3	4.3	15	6.46	96.8	0.30
平均値 (幾何/ 算術)	5.5	55.5	13.6	17.4	-	7.05	96.5	0.7
最大値	28.0	256	120	240	-	7.56	98.4	1.7
最小値	1.7	11.0	5.3	1.5	15	6.46	94.6	0.3
中央値	4.6	37.0	6.6	24.0	-	7.12	96.5	0.6

D. 考察

1. 塩素酸濃度増大の可能性について

宇津簡易水道組合では、1カ月に1回程度の頻度で塩素貯留槽への塩素の継ぎ足しが行われていた。この問題点は、古い塩素が貯留槽内に長く滞留してしまう可能性があることである。また、手持ちの塩素剤がどの程度新しいのか古いのかも不明である。このため、塩素酸イオン (ClO₃⁻)濃度が増大する可能性を否定できない。



写真4 奈良県十津川村田戸地区飲料水供給施設の塩素注入設備

写真4は、奈良県十津川村田戸地区の飲料水供給施設の塩素注入設備である。普段は塩素注入を行っておらず、1カ月に1度、試料水を水質試験センターへ送付するときだけ塩素を注入しているという。このような運用の場合、塩素が注入装置内に長く滞留してしまっている可能性がある。ただし、塩素酸濃度が高い水道水が配水されている可能性があるものの、それは1カ月に1日だけであるともいえる。

実際、委託業者が貯留槽へ塩素を継ぎ足す作業を行っている旧簡易水道地域において、塩素酸濃度が基準値(0.6mg/L)を超過した事例が報告されている。その他、塩素剤の管理状況と塩素酸濃度の実態調査結果も報告されている³⁾。

わが国における塩素酸イオンの検出実態を表4に示す⁴⁾。まず、2016年度から2017年度にかけて調査地点数が

表4 わが国における塩素酸イオンの検出実態

	2015年度			2016年度			2017年度			2018年度		
	調査地点数	超過地点数	超過割合	調査地点数	超過地点数	超過割合	調査地点数	超過地点数	超過割合	調査地点数	超過地点数	超過割合
対基準値	6,174	5	0.1%	6,627	2	0.0%	8,354	8	0.1%	8,653	6	0.1%
対50%値	6,174	194	2.9%	6,627	194	2.9%	8,354	307	3.7%	8,653	319	3.7%
対10%値	6,174	2,954	50.0%	6,627	3,314	50.0%	8,354	4,326	51.8%	8,653	4,630	53.5%

参考文献4より抜粋

急激に増大しているが、これは簡易水道事業の上水道事業への統合が進んだことともなっており、調査地点数も増

えたためである。「対 50%値」超過地点数をみてみよう。調査地点数が 6,627 から 8,354 に 1,727 地点増えているのに対して、対 50%値を超過した地点数は 194 から 307 へと 113 地点も増えていることがわかる。その割合は、 $113/1,727=6.5\%$ に達している。すなわち、旧簡易水道のような小規模施設において高濃度が出現しやすい傾向があるとみることができる。

わが国における塩素酸イオン (ClO_3^-)の基準値は 0.6 mg/L である。これに対して、WHO は、2016 年、毒性評価を変更した。すなわち、TDI (耐容 1 日摂取量) を従来の $30 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{day})$ から $11 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{day})$ へ修正したのである。これをわが国の評価値算定式にあてはめると、評価値の試算値として 0.2 mg/L が得られる。0.6 mg/L は、0.2 mg/L の方が望ましい可能性があるということを意味する。

地元管理されている施設の場合、上記のような塩素の継ぎ足し作業は広く行われている。そのような施設での水質検査は、飲用井戸等衛生対策要領に示される基本項目 11 項目だけという場合も数多いが、これに加えて塩素酸を検査項目に加えることが望ましいといえる。基本項目 11 項目の検査費用は 7,000 円程度～11,000 円程度 (残留塩素検査を含む場合あり) であるが、塩素酸の検査費用は 6,000 円程度である。

2. 小規模水道における現実的な水質管理へ向けた枠組み

地元管理されているような小規模水道における現実的な水質検査のあり方を考えるための枠組みを図 1 に示す。

まず、原水を地下水と表流水に大別している。これに対して、浄化処理が行われている場合と行われていない場合がある。浄水処理装置といたつ、ほぼ処理機能がないケースもみられる。ついで消毒であるが、本来消毒は浄水処理の一部であるが、この図では分けて描いている点が重要である。塩素消毒が行われている場合もちろんあるが、行われていない場合も数多い。著者は、これまでに、この図の実線で示される組み合わせのすべてに出くわしてきた。このうち、もっとも懸念されるのは、「表流水—浄水処理なし—消毒なし」のケースである。紫外線消毒はクリプトスポリジウム対策として導入が認められている。これに加えて、たとえば、塩素消毒が忌避される場合に、微生物的安全性を現実的に確保する方法として有用であると考えられる。

このような組み合わせの中であって、原水および浄水の水質試験における検査項目と検査頻度を整理することが望まれる。それぞれの施設の実態に応じて、検査項目を選択するとともに、検査頻度を設定していけばよいものとする。ただし、検査項目数を減らす方向ばかりではなく、微生物に関する

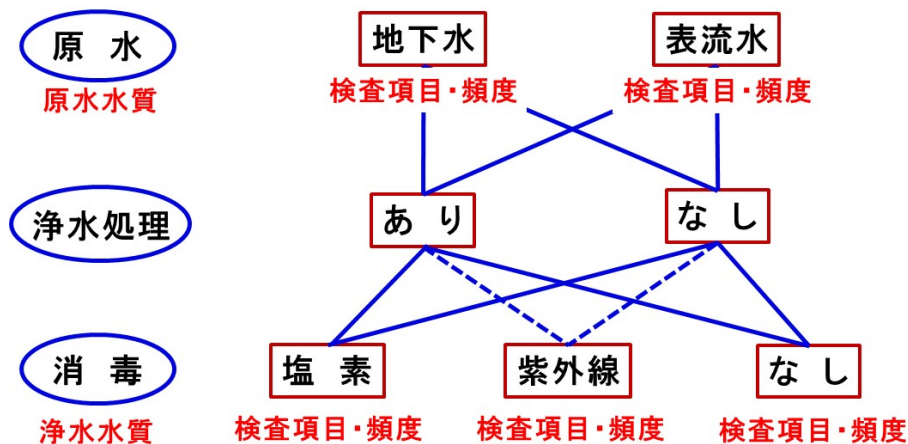


図 1 小規模水道における現実的な水質管理へ向けた枠組み

る項目はむしろ拡充し、定量的微生物リスク管理（Quantitative Microbial Risk Assessment; QMRA）手法をコンセプトとするのが望ましい。その具体例を次項で論じる。

3. 調査対象原水の微生物リスクと浄水処理における必要除去・不活化能

岸田ら⁵⁾は、わが国において、過去30年間(1983～2012年)に飲料水を介した健康危機の発生事例をまとめている。この結果によれば、化学物質等を含む健康被害数の合計は140件であるが、うち微生物によるものが131件であった。また、そのような健康被害が発生しているのは、多くが小規模水道であった。このように、小規模水道においては、まずは微生物的な安全確保が優先される。

冒頭で、子供がおなかをこわすことがあることを述べた。もちろん、子供がおなかをこわす原因は多くあり、水が原因ではない可能性もあるが、水の可能性もある。また、日本語には“水あたり”という言葉がある。この“水あたり”を起こす原因としては3種類ほどが考えられるようである⁶⁾。それらは、①病原微生物による汚染、②硬度の高い水、③年少者による冷水の多量摂取。

ここでは、QMRA手法によって、原水の微生物リスクを定量したうえで、必要な浄水処理レベルについて考察する。

3.1 微生物的安全確保へ向けたアプローチ方法^{7,8,9)}

ここでは、地元管理されている水供給施設を含めた小規模水道施設を扱っている。そのような施設の場合、特定の病原微生物、すなわちカンピロバクター、ロタウイルス、クリプトスポリジウム、ジアルジアなどの原水中の濃度が把握されているのは皆無であろう。また、浄水処理や消毒が不十分である場合も少なくない。そのような施設において、微生物的な安全性を確保しようとする場合、どのようなアプローチ方法をとればよいのだろうか。図2は、そのための枠組みを示したものである。

飲用井戸等衛生対策要領は、給水開始前に、消毒副生成物11種類を除く40項目の検査を求めている。これより、一般細菌と大腸菌については検査結果が存在するはずである。万一、存在しなければ、これら2項目の検査を行うものとする。すなわち、図2では、原水について、一般細菌と大腸菌の検査結果が存在することを前提としている。

原水において一般細菌のみが検出（大腸菌は不検出）され、利用できる情報がこれしかない場合、既存の文献情報を参照しつつ日和見菌等の病原性細菌濃度を推定する。また、適用すべき用量-反応モデルも不明なので、代表的な日和見菌の感染確率モデルを使用するが、通常は安全側のモデル（感染確率が大きく算出されるモデル）を使用する。なお、最大感染確率モデルや逆に低確率モデルを使用することも考えられる。これより算出される、浄水処理において必要な除去・不活化能は大きな値となり、実際のリスクよりも極めて安全側の評価をすることになるだろう。

これに対して、原水に対する追加調査を実施できる場合を考える。網羅的検出（一斉検出）試験や病原種を特定する試験などを実施できる場合には、対象微生物を限定できる。また種によっては、特定の用量-反応モデルを使用できる場合がある。これによって、安全側に過ぎる評価が緩和され、必要な除去・不活化能も小さな値ですむことになるだろう。

次に、大腸菌が検出された場合を考える。追加調査を行わない場合、大腸菌「検出」という定性結果のみであるので、病原性微生物の濃度としては安全側の値に設定することになる。これは、対象となる病原微生物の原水中濃度に関するデータがない、または不足している場合にも、類似した原水に関する文献値から設定する方法としてしばしば採用される方法である。例えば、カンピロバクター：1/10 L，クリプトスポリジウム：1/m³など。

これに対して、図2では、追加調査を行える場合の考え方を示している。まず、大腸菌や嫌気性芽胞菌といった指標細菌の濃度を測定できた場合には、これに既存文献に基づいた比率を乗じることによって、細菌、ウイルス、原虫の濃度を設定する。さらに、もっとも望ましい追加調査とは、各病原微生物の濃度を実測できることである。こうして推定または実測した病原微生物の濃度に基づいて、必要な除去・不活化能の導出を進める。

重要な点は、原水に対する既存データのみでは、安全側の評価とせざるを得ず、必要な除去・不活化能も大きくなるのに対して、追加調査を詳しく行えば行うほど、制御すべきリスクを限定することができるので、必要除去・不活化能の大きさも適切に設定できるということである。

3.2 一般細菌数を用いた必要除去・不活化能の試算

今回の原水試験の結果は表2、表3に示す通りであるが、ここではまず、一般細菌のみ検出され大腸菌が検出さなかった場合を考える。

表5は、文献に見られる比率等を取りまとめたものである。25文献をレビューしたが、それらは、浄水処理の有無、消毒の有無等を含む各種の報告である。このうち、原水が表流水（河川、貯水池、湖沼）である場合のデータを抽出した。表のNは、報告数を意味する。なお、ここでは、HPCについて一般細菌と従属栄養細菌を区別していない。

表5 文献に見られる比率等のまとめ

	HPC/全細菌	HPC/全生菌	全生菌/全細菌
表流水における値 (各ケースについての中央値を算出。その後、全体の中央値を算出。)	N=12 9.82E-06 ~ 3.10E-01 Median=7.47E-04	N=8 3.31E-04 ~ 7.75E-01 Median=1.81E-03	N=8 3.08E-01 ~ 9.55E-01 Median=0.506

必要除去・不活化能の試算結果を表6に示す。測定した一般細菌数をもとに、病原細菌による感染確率 10^{-4} /人/年以下を満たすのに必要な除去・不活化 log 数を算定したものである。

表5を参照して設定した比率等は以下の通り。一般細菌/全細菌=0.075%、一般細菌/全生菌=0.18%、病原性生菌/全病原性細菌=50.6%。また、全細菌の約3%は病原性細菌とした^{10,11)}。

また、病原性生菌はすべて日和見菌等であるとみなしている。用量-反応モデルとしては、代表的日和見菌である *Legionella* のモデル¹²⁾($\gamma=5.99E-02$)を適用した。一方、これらの日和見菌の感染能力は低いとみて、指数モデルの γ が最小である *Staphylococcus aureus* のモデル¹²⁾ ($\gamma=7.64E-08$) を借用した場合についても試算した。

北側施設、南側施設ともに、10 log 程度の除去・不活化が必要であると評価された。また、適用する用量-反応モデルの影響がきわめて大きいことがわかる。

表6 一般細菌数に基づく必要除去・不活化能の試算

条件/パラメータ	日和見菌等濃度 北側/南側 (cells/mL)	北側施設 必要 log 数	南側施設 必要 log 数
一般細菌 $\div 0.075\% \times 3\% \times 50.6\%$; $\gamma = 7.64E-08$	3.68E+02 / 1.11E+02	4.5	4
一般細菌 $\div 0.075\% \times 3\% \times 50.6\%$; $\gamma = 5.99E-02$		10.4	9.9

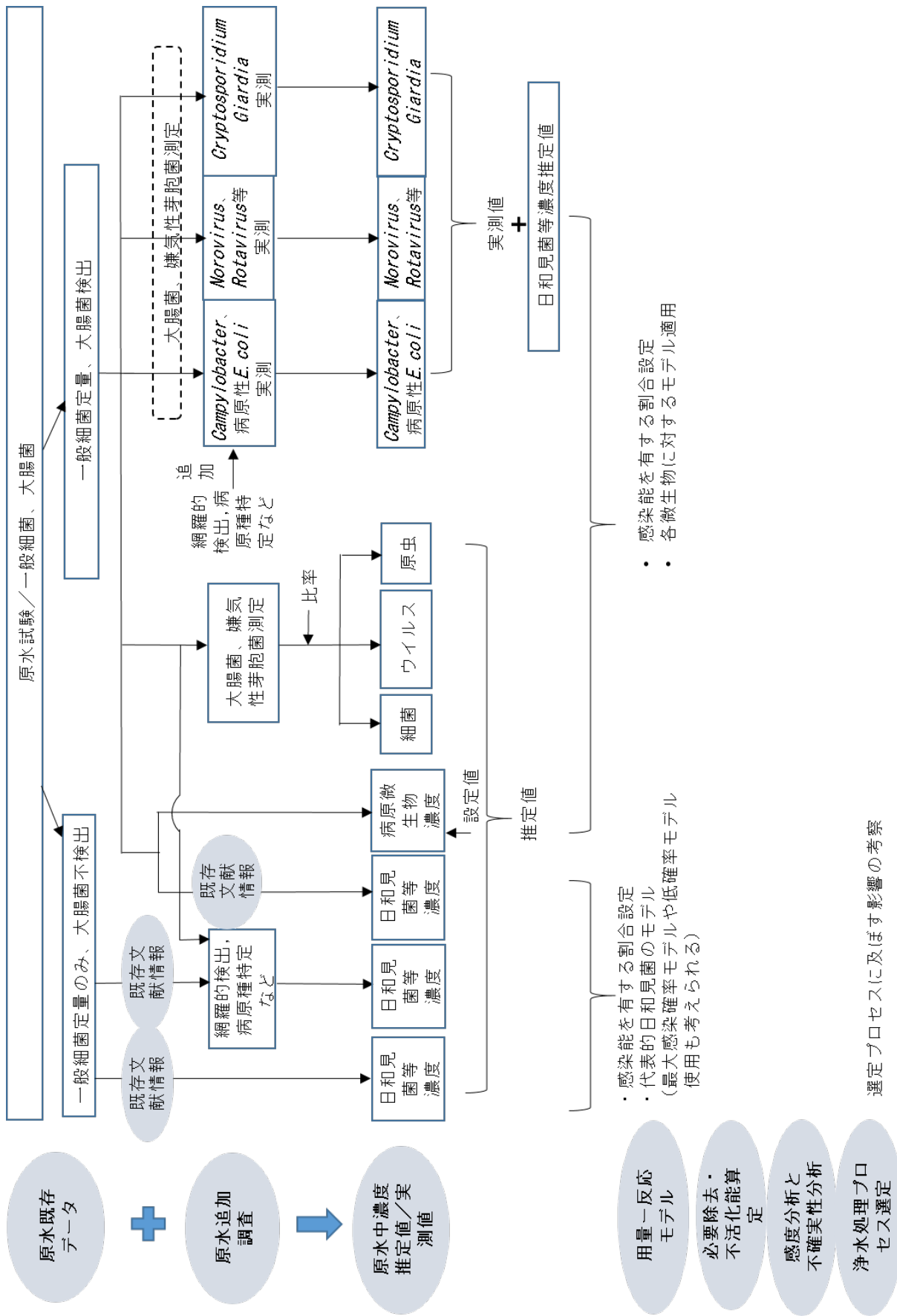


図 2 微生物的安全確保に向けたアプローチ方法

3.3 大腸菌数を用いた必要除去・不活化能の試算

つぎに、一般細菌に加えて大腸菌が検出された場合を想定する。大腸菌については、水質検査機関による検査結果の報告は、「不検出」または「検出」の定性的結果のみである。したがって、検査結果が「検出」であった場合、濃度は独自に測定する必要がある。

表3に示す大腸菌濃度測定値に基づいて、各種病原微生物に対する必要除去・不活化能を試算した結果を表7に示す。まず、大腸菌測定値に対して比率を乗じ各種病原微生物濃度を設定した。その後、感染確率 10^{-4} /人/年以下を満たすのに必要な除去・不活化 log 数を算定したものである。

「WHO 定量的微生物リスク評価ガイドブック」⁷⁾に記載されている大腸菌：*E. coli* O157:H7、大腸菌：ロタウイルス、大腸菌：クリプトスポリジウム、大腸菌：カンピロバクターの比率はそれぞれ 1:0.08、1:5.00E-06、1:1.00E-06、1:0.66 である。また、カンピロバクターについては他の報告例（0.0415（オランダ・マース川）¹³⁾、0.00481（日本・桂川）¹⁴⁾）を適用した場合も示した。

用量—反応モデルについては、*E. coli* O157:H7 は $\gamma=0.0093$ ⁷⁾、ロタウイルスは $\gamma=0.59$ ¹⁵⁾を適用した。

このような、細菌、ウイルス、原虫を対象としてリスク評価を行った場合、カンピロバクターに対する必要除去・不活化能がもっとも大きい結果となる場合が多い。表7の結果も同様であることがわかる。

表7 大腸菌濃度測定値に基づく各種病原微生物に対する必要除去・不活化能の試算

病原微生物	条件/パラメータ	病原微生物濃度 北側/南側 (cells/mL)	北側施設 必要 log 数	南側施設 必要 log 数
病原大腸菌 <i>E. coli</i> O157:H7	大腸菌×0.08 ; $\gamma=0.0093$	1.04E-03 / 1.39E-02	4.1	5.2
カンピロバクター	大腸菌×0.0415 ; $\gamma=0.686$	5.40E-04 / 7.22E-03	5.6	6.8
	大腸菌×0.00481 ; $\gamma=0.686$	6.25E-05 / 8.37E-04	4.7	5.8
	大腸菌×0.66 ; $\gamma=0.686$	8.58E-03 / 1.15E-01	6.8	8.0
ロタウイルス	大腸菌×5.00E-06 ; $\gamma=0.59$	6.50E-08 / 8.70E-07	1.7	2.8
クリプトスポリジウム	大腸菌×1.00E-06 ; $\gamma=0.2$	1.30E-08 / 1.74E-07	0.5	1.6

3.4 不確実性分析

表6で、*Legionella* の用量-反応モデル($\gamma=5.99E-02$)を適用した場合をベースケースとして不確実性分析を行った。南側施設を対象とした場合の結果を表8に示す。

表5に示した文献情報を精査し、極端な報告値を除外すると、一般細菌/全細菌：0.00681%~1.75%、一般細菌/全生菌：0.0595%~5.93%、全生菌/全細菌：32%~65.5%の範囲とみなせる。これらを参考として、一般細菌/全細菌の割合、病原性細菌/全細菌の割合、病原性生菌/病原性細菌の割合の上限値および下限値を表8のように設定した。また、日和見菌等生菌/全生菌、病原性細菌/全細菌、日和見菌等/病原性生菌の割合の最小値は、とりあえず、それぞれ0.01%、0.01%、0.1%と仮定する。これより、日和見菌等/病原性生菌の割合の下限値として0.1%を設定した。感染能を有する割合は10%~100%に設定することが多いことから、下限値を10%とした。用量—反応モデルは *Legionella* のモデル($r=5.99E-02$)に対して、*Staphylococcus aureus* のモデル ($r=7.64E-08$) を適用した。非加熱飲料水

消費量 327 mL は大阪市で得られた値であるが、WHO 飲料水水質ガイドラインに記載されている 1 L を設定した。

ベースケースにおける 9.9 log に対して必要除去・不活化能の差が 1 log を超える項目を朱書している。これらはリスク評価において不確実性が高い項目であるということが出来る。このように、不確実性分析を行うことによって、今後重点的に調査を行ったり知見の集積を行うべき項目を抽出することができる。

今後は、調査データを集積しつつ、図 2 に示した枠組みを構築していくこととする。

表 8 不確実性分析の結果(南側施設対象)

項 目	必要除去・不活化 log 数
ベースケース	
一般細菌数:5.5 CFU/ml ; 一般細菌／全細菌の割合=0.075% ; 病原性細菌／全細菌の割合=3% ; 病原性生菌／病原性細菌の割合=50.6% ; 日和見菌等／病原性生菌の割合=100% ; 感染能を有する割合=100% ; 非加熱飲料水消費量=327 mL ; Legionella 用量-反応モデルを借用 $\gamma=5.99E-02$)	9.9
一般細菌／全細菌の割合	0.001%
	10%
病原性細菌／全細菌の割合	0.01%
	10%
病原性生菌／病原性細菌の割合	10%
	80%
日和見菌等／病原性生菌の割合	0.1%
感染能を有する割合	10%
非加熱飲料水消費量	1 L
用量-反応モデル	$\gamma=7.64E-08$

赤字：必要除去・不活化 log 数の差が 1 を超える項目。

E. まとめ

(1) 地元管理水道と塩素酸

広島市安佐北区、および広島県山県郡安芸太田町において地元管理されている簡易水道組合への訪問調査を行った。地元管理されている施設の場合、塩素貯留槽への塩素の継ぎ足し作業が広く行われていることから、そのような施設での水質検査は、基本項目に加えて塩素酸を検査項目に加えることが望ましいことを指摘した。

(2) 小規模水供給施設における現実的な水質管理へ向けた枠組み

地元管理されているような小規模水供給施設について、原水の種類、浄水処理の有無、消毒の有無によって分類したうえで、現実的な水質検査のあり方を考えるための枠組みを示した。

(3) 小規模水供給施設における定量的微生物リスク評価と安全確保へ向けたアプローチ方法

京都市西京区における施設を調査対象とし、原水の微生物リスクを推定したうえで、必要な浄水処理レベルについて考察を行った。

また、限定的な情報の下で、微生物的な安全性を確保するためのアプローチ方法を提示した。

謝辞：トロッコ保津峡駅施設における調査にご協力いただいた嵯峨野観光鉄道株式会社に謝意を表す。

F. 研究発表

1. 学会発表

木村昌弘, 伊藤禎彦; 人口減少を踏まえた小規模水道のあり方についての一考察, 環境衛生工学研究, Vol.34, No.3, pp.64-66, 2020.7.

中山信希, 伊藤禎彦, 堀さやか; 情報提供による水道料金評価の改善効果に関する分析, 環境衛生工学研究, Vol.34, No.3, pp.67-69, 2020.7.

中山信希, 伊藤禎彦, 堀さやか; 水道料金に対する評価を改善するための提供情報, 令和2年度全国会議(水道研究発表会)講演集, pp.48-49, 2020.11.

齋藤真太郎, 須田康司, 惣名史一, 伊藤禎彦, 伊藤雅喜, 清塚雅彦; スマートな浄水システム/技術レベルの維持・向上を目指して—A-Dreams プロジェクトの取組から—, 令和2年度全国会議(水道研究発表会)講演集, pp.214-215, 2020.11.

2. 総説・解説

伊藤禎彦; 小規模水道をめぐって, 水団連, 第146号(新年号), p.5, 2021.1.

伊藤禎彦; 緊急用浄水装置に求められるコンセプトづくり, 水道人エッセイ集「それぞれの3.11、あの日から私は」, 名古屋大学 NUSS 教育研究ファイルサービス共有(PDF), 2021.3.11.

3. 講演

伊藤禎彦, 堀さやか; 住民との連携に関する検討, 小規模水供給システム研究会, 国立保健医療科学院生活環境研究部, 東京大学大学院工学系研究科附属水環境工学研究センター主催, Zoom 開催, 2020.6.24.

伊藤禎彦; 小規模化が進む水道システムを考える～地元管理水道から水道料金問題まで～, 2020年度「ダクタイト鉄管協会セミナー」, 一般社団法人日本ダクタイト鉄管協会主催, 合人社ウェンディひと・まちプラザ北棟6階マルチメディアスタジオ(広島市), 2020.10.28.

伊藤禎彦; 地元管理水道の実態と水質管理上の課題, 土木学会環境工学委員会臨床環境技術小委員会・環境技術思想小委員会, 小規模水道の衛生問題に関するシンポジウム, Zoom 開催, 2020.11.26.

Sadahiko Itoh; Water Supply System and its Perspectives, The 4th Workshop on Kyoto University - Mahidol University On-site Laboratory, Zoom 開催, 2020.11.27.

Sadahiko Itoh; Water Supply System Facing a Depopulation Society of Japan, 京都大学 - 清華大学 2020年日中環境技術共同研究・教育シンポジウム, Zoom 開催, 2020.12.5.

G. 知的所有権の取得状況

なし

【参考文献】

- 1) 伊藤禎彦, 堀さやか; 住民との連携による水供給システムの維持管理手法とそれらの知見共有方策に関する検討, 平成30年度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)小規模水供給システムの安定性及び安全性確保に関する統合的研究(H29-健危-一般-004)総括研

- 究報告書, pp.82-89, 2019.3.
- 2) 伊藤禎彦, 堀さやか: 地元管理されている小規模水道の実態と課題、平成 31 年度 (令和元年度) 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) 小規模水供給システムの安定性及び安全性確保に関する統合的研究 (H29-健危-一般-004) 分担研究報告書, pp.108-141, 2020.3
 - 3) 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、化学物質等の検出状況を踏まえた水道水質管理のための総合研究 研究報告書 令和元(2019)年度、pp.254-263, 2020.
 - 4) 令和 2 年度第 1 回水質基準逐次改正検討会(2021 年 1 月 26 日) 資料 1 参考 2
 - 5) 岸田直裕, 松本悠, 山田俊郎, 浅見真理, 秋葉道宏; 我が国における過去 30 年間の飲料水を介した健康危機事例の解析 (1983~2012 年)、保健医療科学, 64(2), 70-80, 2015.
 - 6) 私信: 木村昌弘氏
 - 7) 国立保健医療科学院; 定量的微生物リスク評価-水安全管理への適用-, 235p., 2020.
 - 8) Federigi, I., et al.; The application of quantitative microbial risk assessment to natural recreational waters: A review, [Marine Pollution Bulletin, Vol.144](#), pp.334-350, 2019.
 - 9) Vetrovsky T, Baldrian P; The Variability of the 16S rRNA Gene in Bacterial Genomes and Its Consequences for Bacterial Community Analyses. PLoS ONE 8(2): e57923. doi:10.1371/journal.pone.0057923, 2013.
 - 10) 軸丸淳史、糟澤桂、真砂佳史、小椋義俊、石井聡、鈴木祥広: 河川上流から河口域に至る病原性細菌の検出率の変化、第 53 回日本水環境学会年会講演集、p.15, 2019.
 - 11) 清水宏樹、軸丸淳史、糟澤桂、真砂佳史、小椋義俊、石井聡、鈴木祥広: 泡沫濃縮と菌叢解析を組み合わせた河川水からの病原性細菌の網羅的検出法の開発、第 53 回日本水環境学会年会講演集、p.631, 2019.
 - 12) QMRA wiki, <http://qmrawiki.org/>.
 - 13) 伊藤禎彦; 定量的感染リスク評価の感度分析における非加熱飲料水消費量データの影響、用水と廃水, 52(8), 55-65, 2010.
 - 14) Liang Zhou; Quantitative Microbial Risk Assessment of Water Treatment Process for Reducing Chlorinous Odor, 135 p., Kyoto University PhD Thesis, 2015.
 - 15) World Health Organization; Guidelines for Drinking-water Quality, Fourth Edition Incorporating the First Addendum, 2017.