

小規模水供給システム向け取水施設および給配水管路の維持管理手法

研究分担者 中西智宏 京都大学大学院工学研究科助教

研究分担者 伊藤禎彦 京都大学大学院工学研究科教授

研究要旨：

小規模化が進む水道システムでは、配水管内での滞留時間が増大する傾向にあり、水道水質が劣化することが懸念される。このため配水管内環境の管理を高度化させ、これを制御する必要がある。本研究ではまずいくつかの小規模な水道施設をとりあげ、配水管内の蓄積物の重量 (g/m^2) とその分布を推定した。①浄水処理における懸濁物質等の除去、②配水管網における水理条件の管理・制御、③洗管といった複数のアプローチによる制御性を推定・比較した。地域特有の管路維持管理作業がもつ制御性についても考察した。

取水設備については、取水口の閉塞が発生し、住民の維持管理上の負担となる場合が多い。そのような背景とニーズから生み出された小規模水供給施設向け表流水取水装置の事例を示した。また、過去の経験を踏まえて技術的に適切な設計がなされた施設例を示した。

A. 研究目的

小規模化が進む水道システムでは、配水管内での滞留時間が増大する傾向にあり、水道水質が劣化することが懸念される。このため配水管内環境の管理を高度化させ、これを制御する必要がある。配水管内における懸濁物質等の管理・制御のための考え方としては、①浄水処理における懸濁物質等の除去、②配水管網における水理条件の管理・制御、③洗管があり実務上はこれら3つの段階を組み合わせる必要がある。これを踏まえ、本研究ではまず、実際の配水システムを対象として管内蓄積物に関する実態調査を行い、蓄積物の存在量や組成に関する情報を収集した。次に、蓄積物の主要な構成成分であるマンガン (Mn) に着目して蓄積過程をモデル化し、管網全域での蓄積量分布を推定するとともに、シナリオ分析によって上記①～③による制御性について考察した。

小規模水供給施設においては濁質除去が課題となることが多く、懸濁物質が管路内に蓄積することで管内環境を悪化させることが懸念される。主要な除濁操作としては砂ろ過と膜ろ過があるが、微粒子除去の精度という観点で両者には大きな隔たりがある。そこで、本研究ではこのような除去性能の隔たりを定量的に推定し、その中間的な除去能を示す除濁処理を探索することで小規模水供給システムにおいて利用可能な単位処理の拡充を図ることを目的とした。具体的には、砂ろ過の高機能化(砂ろ過に通常よりも高い除去能を持たせること)と膜ろ過の低機能化(あえて MF 膜よりも低い除去能を持つ膜素材を探索すること)に着目し、実験的検討を行った。

水供給システムの出発点は水道原水の取水である。しかしながら、取水設備として、多孔構造を有する集水管を、沢水や渓流水の流水中に横たえただけのものであることも数多い。この場合、落葉などによって取水口が閉塞することがしばしば起き、その都度住民の方が清掃する必要がある。取水能としても不安定であるといわざるを得ず、これが住民による管理上の主な困りごとの一つとなっている。これに対して、技術的な整備がなされた取水施設や、取水装置として改良された好例も存在する。ここでは、各地の小規模水供給システムを訪問調査する過程で見出された事例を収集した。

最後に、実際の小規模水供給施設を対象として配水管内環境の維持管理方策について検討した。中部地方 Y 市内、東北地方 A 市内を対象とし、小規模な水道施設をとりあげた。それぞれの配水区域において、まずは配水管内に蓄積する重量(g/m²)とその分布を推定する。それぞれの地域では、浄水処理方法や管路の維持管理方法などに特徴があり、それをふまえた解析や考察を行った。

B. 方法

1. 滋賀県 T 市における配水管内環境に関する実態とシナリオ分析

1.1 配水管内環境に関する実態調査

表 1 のように滋賀県 T 市における 2 つの配水区域、合計 3 地点でピグ洗管の現場に赴き、洗浄排水を採取した。ピグは上流の消火栓から圧入し、それぞれ 1170 m、490 m、1570 m の管路にピグを流下させ、下流側の消火栓からピグを取り出した。この時に消火栓から出される洗浄排水を定期的に一定容量ずつ採水し、1 つのポリタンクに混合させた。なおピグは硬さの異なるものを複数回圧入したため、その都度この採水を行った（表 1）。試料は大学に持ち帰ったあと無機元素（Al, Ca, Fe, Mn, Si）と SS/VSS を測定し、蓄積物の存在量と組成を調査した。

表 1 採水した試料の詳細

地域	試料名	説明	
配水区域A	No.1	ピグ(ソフト)通過1回目	
	地点 1	No.2	ピグ(ハード)通過1回目
		No.3	ピグ(ソフト)通過2回目
		No.4	ピグ(ハード)通過2回目
	地点 2	No.1	ピグ(ハード)通過1回目
		No.2	ピグ(ソフト)通過1回目
		No.3	ピグ(ハード)通過2回目
	配水区域B	No.1	ピグ(ソフト)通過1回目
		No.2+3	ピグ(ハード)通過1回目+ピグ(ソフト)通過2回目
		No.4+5	ピグ(ハード)通過2回目+ピグ(ソフト)通過3回目

1.2 マンガン蓄積量の予測と制御性に関するシナリオ分析

ここでは、管内流速の影響を組み込んだ Mn 蓄積モデルを実態調査の対象管網（配水区域 A）に適用することで、制御方策を議論することを目的とした。

まず、実態調査の結果を利用してモデルパラメータの校正を行った結果、以下の校正済みモデル

式(1)～(3)を得た。なお、 Mn_{sur} : 管内面の Mn 蓄積量(mg/m^2), K_{att} : 1 次付着速度定数(管内流速に依存)($s^{-1} \cdot L \cdot m^{-2}$), k_{sur} : 反応速度定数($(\mu g/L)^{-2} \cdot s^{-1}$), K_{det} : 脱離速度定数(管内流速に依存)(s^{-1}), v : カラム体積(L), A : 管内面積(m^2), c : 定数(管内流速に依存)($(\mu g/L)^{-1.3} s^{-1}$), D : 管内径 (m)である。

$$\frac{\partial Mn_{sur}}{\partial t} = \frac{0.15}{D} \cdot (K_{att} \cdot [MnO_2] \cdot \frac{A}{v}) \cdot \frac{v}{A} + 3 \cdot k_{sur} \cdot [HOCl]_T \cdot [Mn^{2+}] \cdot Mn_{sur} - \frac{0.025}{D} K_{det} \cdot Mn_{sur} \quad (1)$$

$$k_{sur} = c \cdot [Mn]_T^{-1.7} \quad (2)$$

$$Mn_{sur} = \begin{cases} Mn_{sur} & Mn_{sur} \leq 400 \\ 400 & Mn_{sur} > 400 \end{cases} \quad (3)$$

計算にあたっては、まず対象地域の管網データに基づいて管網形状を可視化した上で (図 1)、管網計算ソフト EPANET2(USEPA)を用いて全管路の平均流速を計算した後、EPANET の拡張モジュール EPANET-MSX に上記モデル式(1)～(3)を実装して蓄積量を計算した。配水池での全 Mn 濃度とその形態組成は実態調査で得たデータをもとに全 Mn 濃度 $8.6 \mu g/L$ 、 $[Mn^{2+}]:[MnO_2]=9:1$ と設定し、蓄積期間 18 年として現状の Mn 蓄積量を推算した。

続いて、表 2 に示すように、冒頭で紹介した蓄積物制御のための段階的方策に基づいて複数の対策シナリオを設定した。まずベースケースは上記と同一の計算条件であり、何も対策をしない場合のシナリオとして設定した。シナリオ WQ1-4 では配水池における浄水中全 Mn 濃度とその組成を変化させた場合を表現した。シナリオ PD1～3 は管路の縮径に伴う管内流速の向上によって蓄積量を低減することを意図しており、縮径対象となる管路を管内流速に応じて変化させた。さらにシナリオ RF1-4 は洗管であり、図 2 のように 6 つに分割された小区画ごとに洗管する場合を想定した。その際、洗管対象とする小区画の選び方と洗管頻度を変化させ、ベースシナリオの条件で 18 年間の蓄積を計算した後の 6 年間を洗管期間とし、計 6 回または 12 回の洗管を行うこととした。1 回の洗管によって Mn 蓄積物は 100%除去されると仮定した。各シナリオの条件で Mn 蓄積量を計算し、各方策による制御性を定量的に比較した。

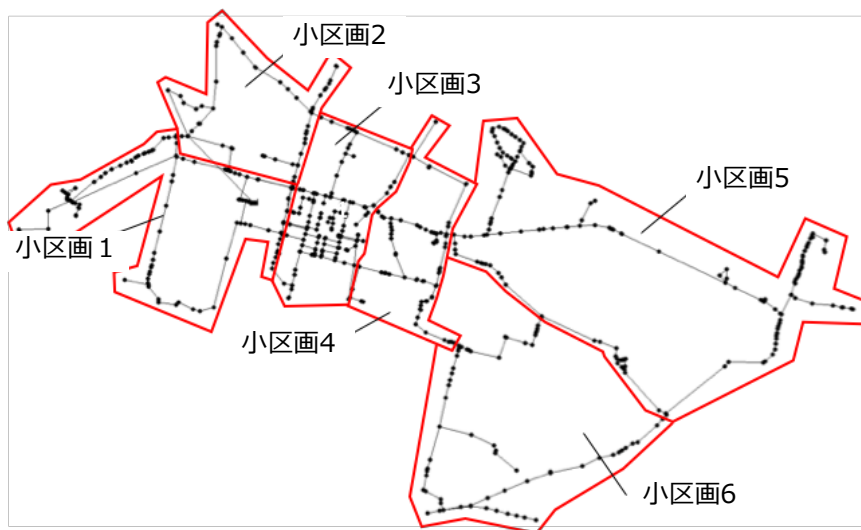


図 1 対象管網（配水区域 A）の形状と洗管シナリオにおける小区画の分割方法

表2 Mn蓄積物制御のための設定シナリオと計算条件

シナリオ名	説明	計算条件など	
ベース	対策なしの場合	[Mn ²⁺]:[MnO ₂]=9:1, [Mn] _T = 8.6 μg/L, 蓄積期間 18 年	
WQ1	ベースケースから浄水中 Mn の 形態組成を変化	[Mn ²⁺]:[MnO ₂]=1:9, [Mn] _T = 8.6 μg/L	
WQ2		[Mn ²⁺]:[MnO ₂]=5:5, [Mn] _T = 8.6 μg/L	
WQ3	ベースケースから全 Mn 濃度を 変化	[Mn ²⁺]:[MnO ₂]=9:1, [Mn] _T =4.3 μg/L	
WQ4		[Mn ²⁺]:[MnO ₂]=9:1, [Mn] _T =6.0 μg/L	
PD1	配水管の縮径（一段階分）によ る管内流速の向上	全管路を縮径	
PD2		平均流速 0.01 m/s 以下の管路を縮径	
PD3		平均流速 0.03 m/s 以下の管路を縮径	
RF1	定期的な洗管 （管網を 6 つの小区画に分割 し、ベースケースの状態から小 区画ごとに洗管を開始）	毎回最も蓄積量が多い小区画を選んで洗管	年 2 回
RF2			年 1 回
RF3		洗管期間の開始時点で蓄積量の大きい小区画 から順番に洗管	年 2 回
RF4			年 1 回

2. 複数のろ材を用いた砂ろ過・膜ろ過による濁質除去能の定量比較

本実験では、砂ろ材としてケイ砂、均等化ケイ砂、アンスラサイト、ガーネットを、膜ろ材として MF 膜、大孔径膜（孔径 1 µm、2 µm）、セラミック基材（孔径約 13 µm）を選定し、これらによる濁質除去実験を行った。原水は桂川由来の河川水（京都市内の浄水場から採水）とし、凝集剤(PAC)を注入率 0.16 mg-Al/L でインライン注入しながら直接ろ過を行った。ろ過水濁度を時間的に測定し、濁度-微粒子濃度の回帰直線からろ過水中の濁質濃度を推定し、log 除去能で評価した。

3. 表流水の取水装置に関する実地調査

3.1 静岡市由比地区における調査

静岡市内の民営簡易水道施設と飲料水供給施設を所掌する静岡市保健所でヒアリングを行った。また、小規模水供給施設用の表流水取水装置を開発した日本エンジニア株式会社から資料を収集した。なお、同じ静岡市内の権現沢水道組合ごんげんざわにおける整備後の取水施設例については既報²⁾に記載している。ここでは、その他の施設を示す。

3.2 愛知県東栄町における調査

愛知県東栄町事業課においてヒアリングを行うとともに、振草浄水場ふりくさとその水源地进行を訪問した。ここは住民管理ではなく役場によって管理されている。

3.3 滋賀県長浜市寺院への訪問調査

滋賀県長浜市内の大吉寺だいきちじ（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。さらに、取水施設に関する設計図面等の資料を収集した。

4. 小規模水供給施設における配水管内環境の維持管理方策

4.1 中部地方 Y 市 k 浄水場配水区域

本配水区域は、以前は簡易水道であったが、現在は上水道として統合されている。この配水区域

における管路の維持管理作業についてヒアリングを行った。ここでは、「排泥作業」と称する放水作業が行われている。この「排泥作業」は毎年実施されているものの、その洗管効果は明らかではない。そこで、ここではこの「排泥作業」を強化し、管内流速を 0.4 m/sec 程度以上に確保して、管内に蓄積した懸濁物質等を積極的に排出するというシナリオを設定することとした。

4.2 東北地方 A 市 n 浄水場・t 浄水場配水区域

両浄水場の概要を表 3 に示す。ともに、クリプトスポリジウム等対策を理由の一つとして膜ろ過（UF）設備が導入されている。

表 3 n 浄水場、t 浄水場の概要

事業主体名		基本計画			
市町村名	浄水場名	施設能力(m³/day)	原水種別	浄水施設種別	配水方式種別
A 市	n 浄水場	190	湧き水	膜ろ過	自然流下
	t 浄水場	160	湧き水	膜ろ過	自然流下

- ・ n 浄水場 湧き水源—自然流下—UF 膜（4 ユニット×2 モジュール）—塩素消毒—50 軒(給水人口 150 人以内)に配水
- ・ t 浄水場 湧き水源—ポンプ圧送—UF 膜（3 ユニット×2 モジュール）—塩素消毒—100 軒に配水

この配水地域における管路の維持管理作業についてヒアリングを行った。n 浄水場配水区域の末端には「排流装置」が設置され、稼働している。この「排流装置」によって水道水を常時放水している目的は、配水区域内の残留塩素と pH の管理を容易にすることにある。

本配水区域における以上の特徴をふまえて、制御性の検討における設定予定条件を表 4 に示す。すなわち、この区域では、膜ろ過の導入と排流装置が特徴的であることから、それぞれの導入効果を定量的に評価するためのケース設定とした。

表 4 設定シナリオ

	CASE 1	CASE 2	CASE 3
膜	×	○	○
排流装置	×	×	○

C. 結果

1. 滋賀県 T 市における配水管内環境に関する実態とシナリオ分析

1.1 配水管内環境に関する実態調査

表 5 に各サンプルの懸濁物質(SS/VSS)濃度、懸濁態元素(Al, Ca, Fe, Mn, Si)濃度の分析結果をまとめる。洗管時の排水中 SS は約 30～6000 mg/L であった。各回の採水試料(No.1～)の懸濁物質濃度を足し合わせ、洗浄対象の管路の情報から配水管単位内面積あたりの懸濁物質の蓄積量を推定したところ、配水区域 A の地点 1 で 56 g/m²、地点 2 で 1 g/m²、配水区域 B で 12.6 g/m² と推算された。図 2～図 4 には蓄積量に占める各懸濁態元素の割合を示す。2 つの地点では Mn が蓄積物の主要な構成元素であり、Mn に起因すると思われる黒い排水が確認された。対象区域は地下水を水道原水としており、配水管の使用期間のうち除 Mn 処理がなされていない期間が数年間あったとのことであ

る。国内の小規模な水供給システムにも地下水を原水とする地域があるが、塩素消毒を行う場合には配水過程で Mn の酸化が進み管内での蓄積が進行するため、適切な除 Mn 処理を行うことが必要と考えられる。

表 5 各試料の SS 濃度、懸濁態元素濃度 測定結果

地域	試料	SS濃度 (mg/L)	SS濃度に占める割合(%)					
			VSS	Al	Ca	Fe	Mn	Si
配水区域A	No.1	6067	17.1	3.9	3.0	2.5	33	2.7
	地点 1	No.2	143	16.4	8.5	1.6	7.1	23
	No.3	57	20.1	8.6	1.5	9.3	22	8.5
	No.4	43	24.0	7.5	1.4	9.1	18	7.2
	地点 2	No.1	677	N.A.	6.5	0.7	27	3.1
	No.2	206	N.A.	8.4	1.3	24	1.2	13.0
	No.3	102	N.A.	8.4	1.8	23	0.9	11.8
配水区域B	No.1	96	13.7	2.9	<LOQ	13.3	40	2.1
	No.2+3	44	14.4	5.9	<LOQ	23.9	29	4.7
	No.4+5	33	13.3	5.4	<LOQ	24.3	24	4.2

N.A.:分析せず、<LOQ : 定量下限未満

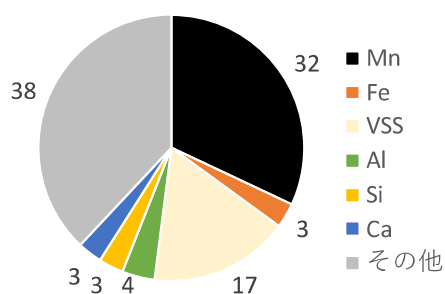


図 2 蓄積量(56 g/m²)に占める各元素の割合(%)
(配水区域 A 地点 1)

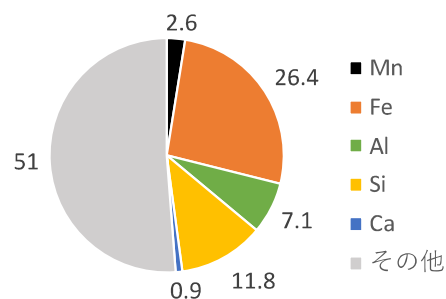


図 3 蓄積量(56 g/m²)に占める各元素の割合(%)
(配水区域 A 地点 2)

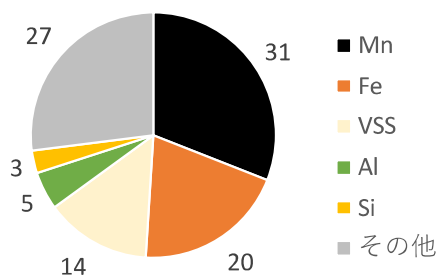


図 4 蓄積量(1.0 g/m²)に占める各元素の割合(%) (配水区域 B)

1.2 実管網におけるマンガン蓄積量の予測と制御性に関するシナリオ分析

図 5 に対象管網における Mn 蓄積量を推算した結果を示す。全管路の Mn 蓄積量の平均値は 518 mg/m² となった。また、管内流速の大きい上流の管路（配水池に近い管路）ほど蓄積量が多い傾向にあった。上流の管路ほど Mn の蓄積量が多い傾向にあることは既往研究³⁾でも確認されており、その傾向を数値モデルで再現し、蓄積量分布を可視化することができた。

続いて、図 6 にシナリオ分析結果を示す。対策なしのベースケースに対する平均蓄積量の割合は、WQ1～4 と RF1～4 のシナリオで 100%を下回り、蓄積量を削減する効果があることがわかった。まず、WQ1,2 の結果から、現状の全 Mn 濃度を維持したまま Mn²⁺の割合を現状の 90%から 10%、50%

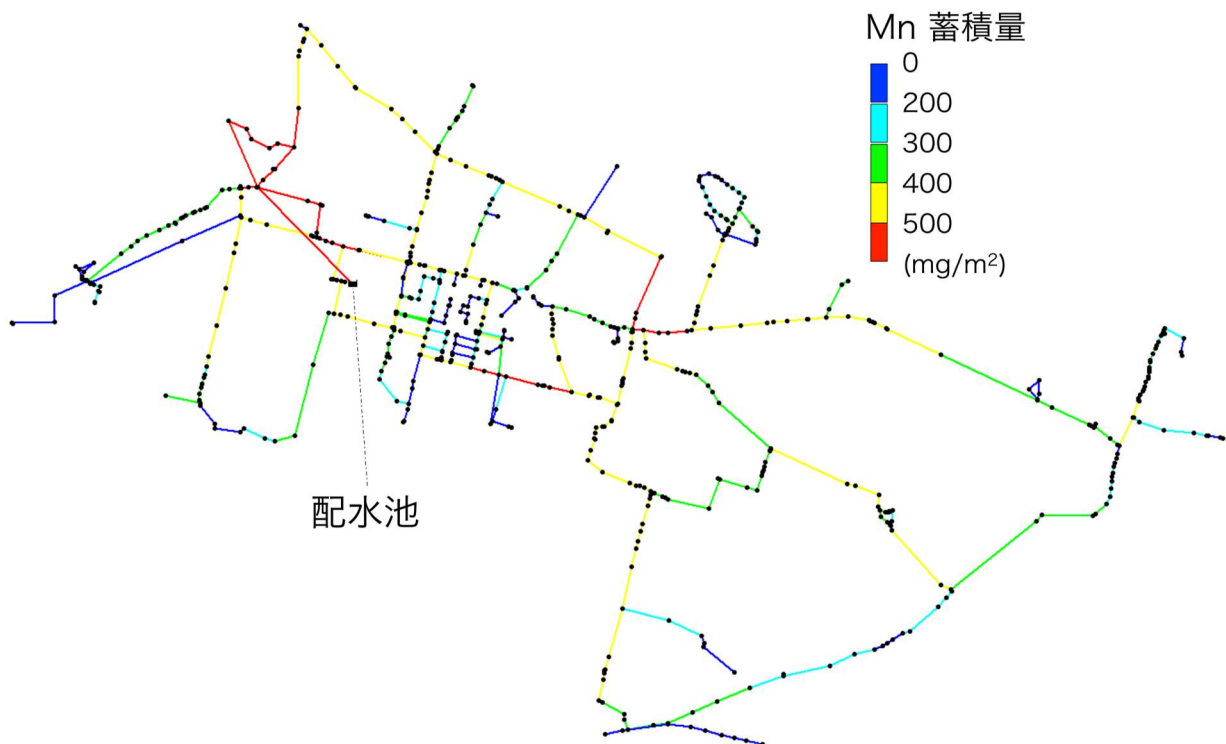


図 5 対象管網における Mn 蓄積量分布の推定結果

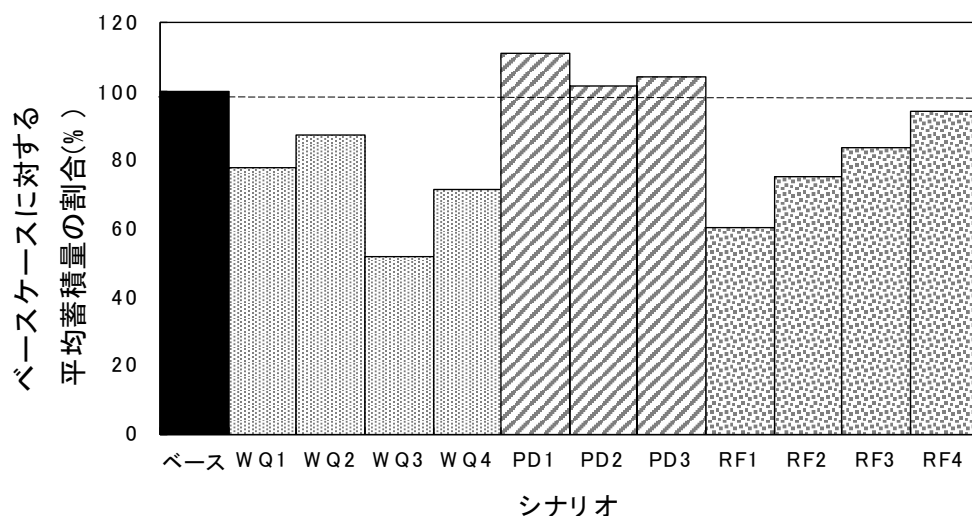


図 6 Mn 蓄積物の制御に関する各シナリオの効果の比較（シナリオの内容は表 2 を参照のこと）

に低減することによってそれぞれ 22%、18%の削減効果が推算された。これは Mn^{2+} の割合が大きいほど化学酸化による加速度的な Mn 蓄積が進むためであると考えられ、なるべく Mn を酸化させてから配水することが重要と考えられる。一方、シナリオ WQ3,4 より、Mn の形態組成を保ったまま全 Mn 濃度を 50%、30%に低減した場合の削減効果はそれぞれ 48%、29%となり、WQ1,2 よりも大きな効果が見込まれた。以上より、浄水処理の段階でなるべく全 Mn 濃度を低減し、 Mn^{2+} を酸化させることが Mn 蓄積量の低減には重要であることが示された。

次に、管路の縮径を行うシナリオ PD1~3 ではいずれもベースケースよりも高い平均蓄積量が得られた。これは縮径に伴って管内流速が向上したことにより、 MnO_2 粒子の物理付着と Mn^{2+} の化学酸化を介した蓄積の両方が促進されたことに起因する。一般的に懸濁物質の蓄積を制御するためには管内流速を向上させることが有効な手段と考えられているが^{1,4)}、Mn は特有の蓄積機構を持つために縮径は有効な制御方策とならない可能性が示された。

さらに、定期的な洗管を想定したシナリオ RF1~4 は 6~40%の蓄積量の削減効果が見込まれた。洗管頻度を年 2 回とする RF1,3 は、それぞれ年 1 回の洗管を行う RF2, 4 よりも蓄積量を低減できしており、高頻度の洗管が有効であることが示された。また、毎回の洗管で蓄積量の大きい小区画を優先的に洗管するシナリオ RF1,2 の方が、単純に小区画を順番に洗管していくシナリオ RF3, 4 よりも高い削減効果を示しており、洗管対象とする区画の適切な選定が重要であることがわかる。

浄水処理(WQ1~4)と洗管(RF1~4)のシナリオを比較すると、例えば WQ2 と RF3 のシナリオや、WQ3 と RF1 のシナリオが同等の制御性を示すことがわかる。特に小規模水供給システムにおいて洗管は実施可能ではないことも多いが、それに相当する効果が浄水処理の改善によって達成できる可能性が本分析によって示された。

2. 複数のろ材を用いた砂ろ過・膜ろ過による濁質除去能の定量比較

図 7 に各ろ材からのろ過水濁度の変化の一例を示す。PAC 注入率 0.16 mg-Al/L の条件では、砂ろ過水の濁度範囲が 0.1~0.6 度程度であったのに対して、膜ろ過水の濁度は 0~0.005 度と極めて低かった。砂ろ過材の中では、有効径の最も大きいアンスラサイトでのろ過水濁度が最も高く、次いでケイ砂、均等化ケイ砂、ガーネットの順番で濁度が大きかった。一方、膜ろ過材の中では、最も孔径が大きいセラミック基材で 0.008~0.039 度と他の膜ろ材(0.005 度未満)よりもやや濁度が高いものの、他の孔径のろ材間では顕著な違いは見られなかった。各ろ材による濁質除去 log 数を 3 回分の実験結果から推定したものを図 8 に示す。砂ろ材と膜ろ過材の間には約 1log ほどの除去能の違いが見られた。また、砂ろ過材の中ではアンスラサイトとガーネットの間にのみ統計的な有意差が見られたものの、他の砂ろ材や膜ろ過材の間では有意差は見られなかった。

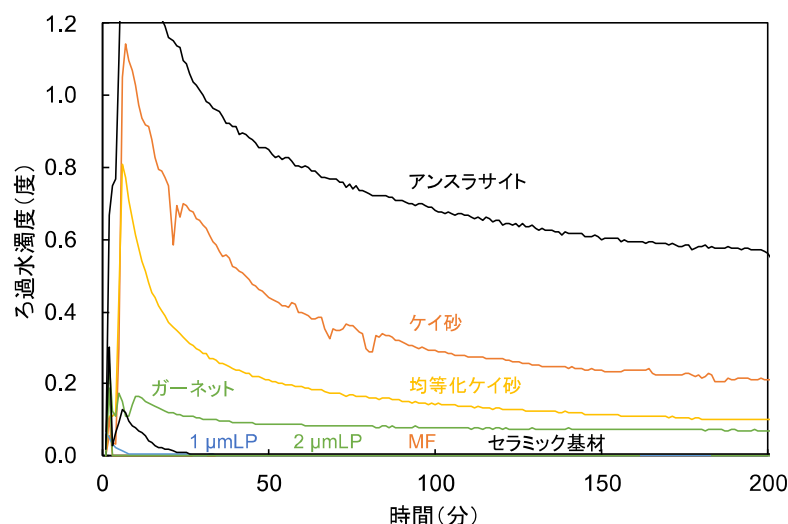


図7 各ろ材からのろ過水濁度の時間変化 (PAC 注入率 : 0.16 mg-Al/L)

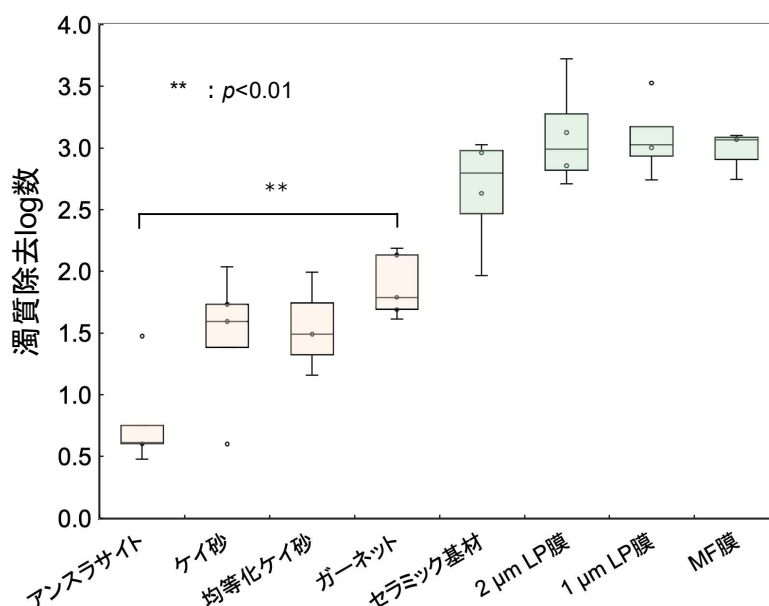


図8 各ろ材による濁質除去 log 数の比較(PAC 注入率 : 0.16 Al-mg/L)

3. 表流水の取水装置に関する実地調査

3.1 静岡市由比地区における調査

静岡市保健所は、2017 年、市内に存在する民営簡易水道施設と飲料水供給施設に関する実態調査を行った^{5,6)}。調査時点における施設整備補助の対象となる施設数は、前者が 6 施設（給水戸数 280 戸、給水人口 747 人）、後者が 168 施設（給水戸数 1576 戸、給水人口 3805 人）であった（現在は前者 4 施設、後者 146 施設）。平成 8 年度以降、これらの民営簡易水道施設と飲料水供給施設は衛生部局（保健所）が所掌している。

上記のうち、特に困りごとがあると回答した施設は 25 あった。困っていることに関する回答をみると、「水質」、「日頃の管理」、「高齢化」、「台風・大雨」、「負担額」、「老朽化」が上位にリストアップされた。これらの諸課題は、静岡市だけではなく、各地の小規模水供給施設に共通すると言っ

てよい。

静岡市保健所は、この結果を受けて、安定水源の確保、メンテナンスフリーの取水・浄水処理装置の設置、確実な消毒の実施などによって、将来にわたって持続可能な水道施設とすることを目標とする施策を精力的に進めている。すなわち、住民の代表的な困りごとになっている、①取水口閉塞、②濁り、および③日常の水質管理（消毒）を解消するための施設整備を目指している。このとき、取水・浄水処理装置として求められるのは、メンテナンスフリーに近いこと、および安価であることである。

以上を背景として、上記困りごとの解決のために、施設統合を重要施策として推進しようとしている。安定水源の確保、メンテナンスフリーの取水・浄水処理装置の設置、確実な消毒の実施などによって、将来にわたって持続可能な水道施設とすることを旨とするものである。統合へ向けて地元住民らへの提案・調整が精力的に行われている。

以上の背景とニーズから生み出された装置が、小規模水供給施設向けの表流水を取水するためのスクリーンを備えた装置（ウォータースクリーン；日本エンジニア株式会社）である。

装置の側面図を図9に示す。表流水を越流させ、常にスクリーン表面を洗い流しながら、原水を取出口から取り出す構造になっている。このため、落ち葉や土砂による目詰まりがしにくく、安定した取水が可能となる。装置の仕様例を表6に示す。この例の場合、取水能力は最大25m³/日である。後述するように、堰に埋め込むこともできるが、U字溝があればその流路内に設置することも可能である。

静岡市由比地区において、取水口閉塞対策として、目開き約1mmの表流水取水装置（ウォータースクリーン）を設置した飲料水供給施設がある。詰まりが解消され、非常に優れていると高く評価されている。

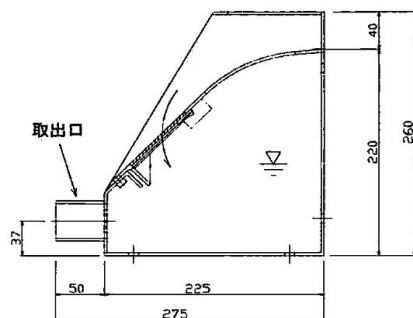


図9 表流水取水装置 側面図

表6 表流水取水装置の仕様

取水能力	25 m ³ /日（最大）
スクリーンサイズ	幅 160 mm×高さ 78 mm
取出口口径	32A（配管外形Φ42.7）
重量	約 6 kg
材質	SUS304

3.2 愛知県東栄町における調査

振草浄水場とその水源地を訪問した。施設の詳細は別報に記載している⁷⁾。

原水は渓流水である。ステンレス製スクリーンが堰に埋め込まれて設置されている（日本エンジニア製、ウォータースクリーン）。写真1に示す。設置は10年程度前。費用数百万円。図9とは異なり、取水装置内部の側面から取水する構造になっている。導水管は埋設されている。施設は役場によって管理されている

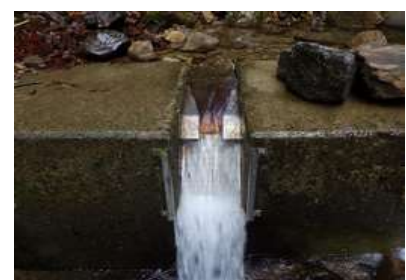


写真1 堰に設置されたステンレス製スクリーン（愛知県東栄町振草浄水場水源地）

が、取水地点の維持管理がきわめて容易になったと評価されている。

3.3 滋賀県長浜市寺院への訪問調査⁸⁾

大吉寺には、以前、砂ろ過施設が設置されていた。これに対し、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。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）。2013 年、長浜市は、地元自治会に管理を移管した。

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。

原水である溪流と、現在の原水槽を写真 2 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。スクリーンの目開きは数 mm である。この下部に集水管が設置されている（設計図面あり）。



写真 2 大吉寺 スクリーンと原水槽

原水は、原水槽（桝）に導入され、水槽中の水位は溪流水の水位と一致している。これは沈砂池の役割を有している。実際、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。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。

居住者（ご住職）によるメンテナンスは特に行われていない。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。

4. 小規模水供給施設における配水管内環境の維持管理方策

4.1 中部地方 Y 市 k 浄水場配水区域

(1) 管路の維持管理作業

k 浄水場では上向流緩速ろ過施設が導入されており、現在の給水戸数は 250 戸となっている。この配水区域における管路の維持管理作業についてヒアリングを行った。ここでは、配水区域の末端において、「排泥作業」と称する放水作業が行われている。すなわち、1 年に 1 回、主としてお盆の時期に人口が急激に増加し、配水区域の下流域で水量が不足するという。この時期の必要水量は平時の 1.5 倍程度に達するようである。この不足水量を補うため、この時期に限り、隣接する e 浄

水場配水区域（東北方面に広がる地域）から配水を受ける。e 浄水場配水区域からの水は末端から流入し、上流方向 4 分の 1 程度まで到達すると推定されている。ただし、このとき、水は平時とは逆方向に流れることになる。この流向の変化に伴って濁水が発生するのを未然に防止するために行われているのが、「排泥作業」と称する放水作業である。ただ、これまでに濁水発生によって苦情が発生するなどの例はないようである。この「排泥作業」の目的は、配水管内で滞留傾向にある水を排出するのが目的である。作業は経験的に行われており、数時間内に終了する。放水時の流量や管内で確保される流速などは把握されておらず、その洗管効果は明らかではない。

この事例を参考にして、次節では洗管シナリオを設定し定量的な評価を試みた。

(2) 懸濁物質等の蓄積とその制御

管網解析を行い、配水区域内における懸濁物質等の蓄積量とその分布を推定した。測定した濁度から、配水される浄水の SS は $12 \mu\text{g/L}$ と推定した。浄水場から 20 年間配水を継続した場合の平均蓄積量は 0.68 g/m^2 と推定された。

ついで制御性に関する評価を行った。本検討の目的は、「排泥作業」のような特徴ある管路維持作業の効果を定量的に評価することにあること、および、浄水処理については、導入されている上向流緩速ろ過施設によって除去能は十分確保されていることから、新たなシナリオは設定しないこととした。また、縮径についても、とりあえず取り上げないこととした。

上記「排泥作業」は毎年実施されているものの、その洗管効果は明らかではない。そこで、ここではこの「排泥作業」を強化し、管内流速を 0.4 m/sec 程度以上に確保して、管内に蓄積した懸濁物質等を積極的に排出するというシナリオを設定することとする。

放水による洗管作業はそれぞれの水道事業体で少しずつ異なる方法で行われるが、例えば神戸市における洗管作業は、 $25 \sim 50 \text{ m}^3/\text{h}$ を下流側節点から引き出し、管内流速を 0.4 m/s 程度以上に確保することによって行われている。また、1 回の作業で洗管される区画の管路総延長は約 $2 \sim 4 \text{ km}$ である。この事例を参考にして対象区域のシナリオを設定することにする。ここでは実際に行われている洗管時管路延長を考慮して $30 \text{ m}^3/\text{h}$ で排泥作業を行う場合を設定する。

配水を 10 年間継続した後、排泥作業強化シナリオを適用した。すなわち、10 年後から、毎年 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ で排泥作業を実施することとし、管内流速 0.4 m/s 以上が出現する管路に対し、除去率 100% を与えた。蓄積期間（評価期間）は 20 年とし、排泥作業を行わない場合（ベースケース）とを比較した。

結果をまとめて図 10 に示す。ベースケースとは、洗管を実施せず、配水開始から 20 年後の蓄積量(g/m^2)などを求めた結果を意味する。

排泥作業強化シナリオでは、ベースケースと比較して総蓄積量に大きな低減効果が得られ、後者は 62%減少し 0.26 g/m^2 となった。この結果から、現在経験的に行われている排泥作業について、手法とその効果を定量的に示しつつこれを強化することによって、配水管内環境の大きな改善が期待できると指摘できる。もちろん上述のように、図 10 はひとつの設定条件で得られた結果であり、

さまざまなシナリオを設定してその効果を推定・比較することもできる。また、実際の運用にあた

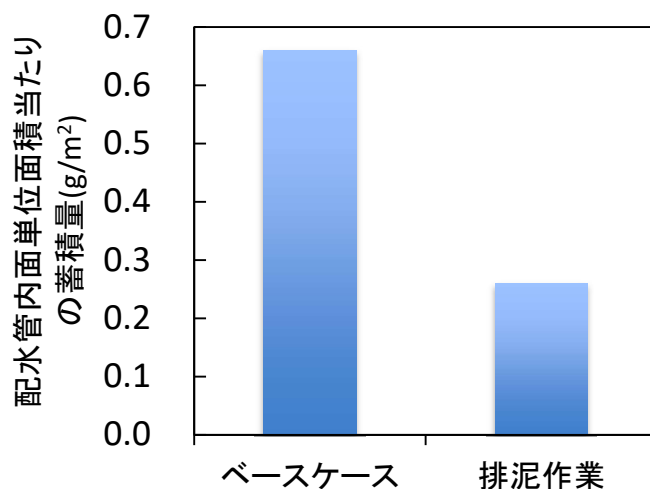


図 10 配水管内面単位面積当たり蓄積量の比較

っては、有収率低下への影響等にも配慮する必要がある。

4.2 東北地方 A 市 n 浄水場・t 浄水場配水区域

(1) 施設概要

・計器での表示値 (2018/8/27)

項目	t 浄水場	n 浄水場
原水濁度	0.005	0.028
膜ろ過水濁度	0.000	0.009
配水残塩 (mg/L)	0.76	0.74

・水質測定結果

粒径 (μm)	t 原水	t 浄水	n 原水	n 浄水	排流装置
0.5-1.0	13096	199	8419	184	683
1.0-3.0	990	15	607	5	2
3.0-7.0	102	1	95	3	1
7 ≦	422	6	230	0	4
濁度	0.1086	0.0008	0.0048	0.0006	0.0014
TOC (mg/L)	0.140	0.135	0.102	0.088	0.094

2つの配水区域の管路図を作成した。n 浄水場配水区域の末端節点と t 浄水場配水区域の上流側節点とは管路で連結されている。

(2) 管路の維持管理作業

ついで、この配水地域における管路の維持管理作業についてヒアリングを行った。

n 浄水場配水区域の末端には「排流装置」が設置され、稼働している。この「排流装置」によって水道水を常時放水している目的は、配水区域内の残留塩素・pH 管理を容易にすることにある。

n 浄水場・t 浄水場の運転管理は、M 浄水場での遠隔監視によって行っている。また、業者への外部委託により、週 3 回（月水金）の浄水場への定期巡回が行われている。さらに、給水末端の毎日検査は私人への委託により実施されており、水質がもっとも劣化する可能性がある給水末端において残留塩素濃度等が測定されている。

水道事業体としては、浄水場での塩素注入率は低くしたいが、配水区域内での残留塩素は確保する必要がある。これを常にモニタリングしなくても確実に（自動的に）達成できているようにするために行われるのが「排流装置」を用いた放水である。

放水流量は、約 $20 \text{ L/min} = 28.8 \text{ m}^3/\text{日}$ であり、これは n 浄水場における配水量 $50 \text{ m}^3/\text{日}$ の実に 58% に達している。調査時（2018/8/27）の残留塩素濃度は 0.32 mg/L であった。

その他、A 市における洗管の考え方についてヒアリングを行った。まず、計画的に順次行っていくという洗管作業は実施されていない。配水区域の切り替え作業時などにおいて、濁水発生が予想される管を特定する。当該管路に対して普段とは異なる流向や、流速が発生する場合に、あらかじめ想定しうる流速で洗管しておくという目的で放水が実施されている。

流速確保の考え方としては、出現しうる流量・流速を予測した上で放水を実施している。例えば、 $2 \text{ m}^3/\text{min}$ が予想されるなら、事前に $2.5 \text{ m}^3/\text{min}$ の流量を与えておく、などである。

なお、n 浄水場・t 浄水場配水区域のような旧簡易水道エリアでは、配水区域の変更や流速が大きく変化することがあまりないためこのような放水洗管を実施していない。

本配水区域における以上の特徴をふまえて、制御性の検討における設定予定条件を表 2 に示す。すなわち、この区域では、膜ろ過の導入と排流装置が特徴的であることから、それぞれの導入効果を定量的に評価するためのケース設定となっている。

排流装置による放水が行われているのは n 浄水場配水区域であるが、t 浄水場配水区域においても排流装置は末端 2 か所に設置されている。そこで、t 浄水場配水区域においても、この 2 箇所から配水量のそれぞれ 29% が放水される場合を想定した。その合計量 58% は、n 浄水場配水区域における放水量と一致させたものである。

(3) 管内環境に対する効果の定量化

結果を図 11 に示す。膜ろ過を導入することによって（CASE 2）配水管内蓄積量が低く抑制されていることがわかる。一方、CASE 2 と CASE 3 を比較すると、排流装置を設置することによる効果は小さく、その削減率は 0（n 旧簡水）～7%（t 旧簡水）であった。一方、総蓄積量は減少しており、たとえば n 旧簡水では 110 g が 93 g となった。総蓄積量の変化と単位面積あたり蓄積量の変化が必ずしも一致しないのは、蓄積量が定常に達するまでに要する期間が管内流速に依存し、それが管網内で分布しているためである。総蓄積量でみると排流装置がその低減にも効果があるといえるが、その効果は大きいとはいえない。すなわち、排流装置による放水は、配水管内を清浄に保つのに寄与するというよりは、配水管網内の滞留時間が短縮されることによって管路末端での残留塩素・pH 濃度を安定して保つ役割を果たしていると推察できる。

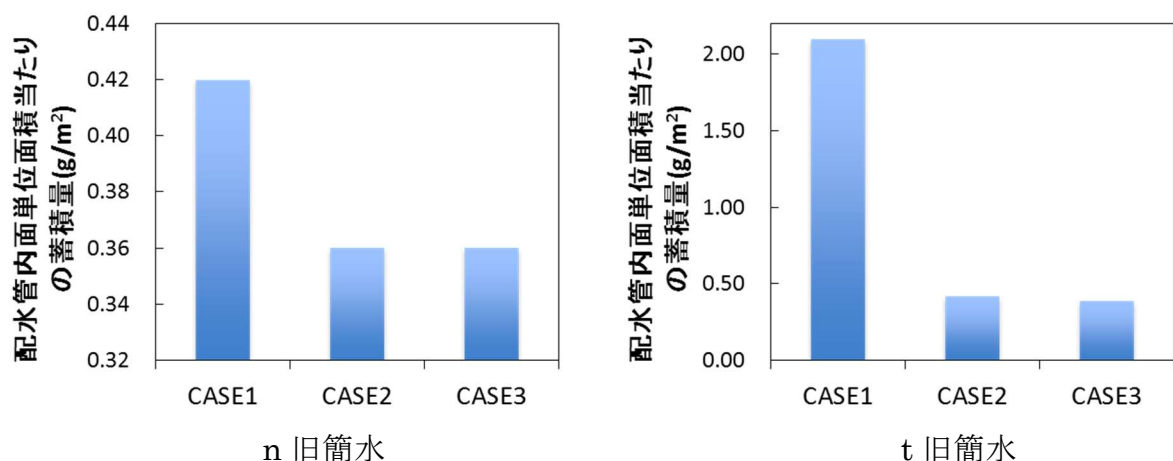


図 11 シナリオ比較結果

D. 考察

1. 滋賀県 T 市における配水管内環境に関する実態とシナリオ分析

「C. 結果 1.」を参照のこと。

2. 複数のろ材を用いた砂ろ過・膜ろ過による濁質除去能の定量比較

濁質の除去 log 数で見た場合には統計的な有意差は見られなかったが、各試行回でのろ過水濁度はガーネットが最も低く、通常のケイ砂よりも高い濁質除去能を持つ可能性が示された。大孔径膜は通常の MF 膜に比べてエネルギー消費量が小さく時間当たりの処理水量が大きいという利点があり、小規模水供給システムに適している可能性がある反面、膜孔径が大きいために処理水質が悪く管内環境管理の観点からは望ましくない可能性が考えられた。しかしながら、本実験では膜孔径を 0.1～約 13 μm と大きく変化させたにも関わらず除去能に顕著な差は見られなかった。すなわち、少量でも凝集剤を注入すれば、大孔径膜でも良好な処理水質が得られる可能性が示された。

3. 表流水の取水装置に関する実地調査

取水設備が、多孔構造を有する集水管を、沢水や渓流水の流水中に横たえただけのものであることも数多い。この場合、落葉などによって取水口が閉塞することがしばしば起き、その都度住民の方が清掃する必要がある。これが水供給システム上の主な困りごとの一つとなっている。ここで取り上げた小規模水供給施設向け表流水取水装置は、そのような背景とニーズから生み出された取水装置である。

長浜市寺院の事例は、過去の経験を踏まえて技術的に適切な設計がなされたものである。スクリーン機能と沈砂池機能を備えつつ、安定した取水を可能にした施設の好例とみることができる。

4. 小規模水供給施設における配水管内環境の維持管理方策

本研究では、2 地域における旧簡水施設を対象として、配水管内環境を評価するとともに、これを制御するための方法について論じた。A. 研究目的に記したように、配水管内における懸濁物質等の管理・制御のための考え方としては、①浄水処理における懸濁物質等の除去、②配水管網における水理条件の管理・制御、③洗管の 3 つの段階がある。それぞれの効果と手法間の比較については既報で論じてきたところである⁴⁾。

これに対して本研究では、地域特有で行われている管路維持管理作業を取り上げ、それが配水管

内環境の大きな改善に寄与できることを定量的に示すことができた。

E. 結論

1. 滋賀県 T 市における配水管内環境に関する実態とシナリオ分析

実際の配水管網においてマンガンが蓄積物の重要な構成成分として挙げられた。さらに、蓄積物制御のための 3 つの方策（浄水処理による Mn の形態・濃度の制御、縮径による管内水理条件の制御、洗管）による制御性をシナリオ分析によって推定し、通常は実施不可能な洗管と同等の効果を浄水処理の改善によって見込まれることなどを示した。

2. 複数のろ材を用いた砂ろ過・膜ろ過による濁質除去能の定量比較

砂ろ過と膜ろ過を含む種々の除濁処理法による濁質除去能を比較した。この結果、配水管内環境管理からみた必要十分な除濁処理プロセスを選択可能とした。

3. 表流水の取水装置に関する実地調査

住民の維持管理上の負担とならない小規模水供給施設向け表流水取水装置の事例、および過去の経験を踏まえて技術的に適切に設計された施設例を見出し、普及が望まれると指摘した。

4. 小規模水供給施設における配水管内環境の維持管理方策

地域特有の管路維持管理作業が配水管内環境の制御に寄与できることを示した。それぞれの配水管網の特徴や課題を踏まえつつ複数のシナリオを設定することによって、小規模水道における配水管内環境を制御する手法とその効果を提示できた。ここで得られた知見をもとに、今後当該水道事業体と議論しつつ、対象地域に適した浄水処理方法、及び配水システムの管理・制御方法を提示・策定することができる。

F. 研究発表

1. 論文

Zhou, X., Nakanishi, T., Echigo, S., Kosaka, K. and Itoh, S.: Effect of hydraulic conditions on manganese accumulation by physical and chemical pathways in chlorinated water distribution system: A preliminary laboratory study, *Water Supply*, Vol. 22, No.10, pp. 7576-7589, 2022.

中西智宏, 亀子雄大, 周心怡, 小坂浩司, 伊藤禎彦, 藤井宏明: 配水管網における水道水の着色ポテンシャルからみた浄水中微粒子濃度の制御目標, 土木学会論文集 G(環境) (環境工学研究論文集 第 58 巻), Vol.77, No.7, III_311-III_319, 2021.

中西智宏, 岸本如水, 小坂浩司, 伊藤禎彦: 浄水中微粒子による配水管内環境の形成過程のモデル化とその制御性, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 75, No. 7, III_53-III_63, 2019.

2. 学会発表

中西智宏, 亀子雄大, 周心怡, 森智志, 小坂浩司, 伊藤禎彦: 配水管内蓄積物に起因する水道水の着色ポテンシャル評価と浄水中微粒子・マンガン濃度の制御目標, 令和 2 年度全国会議 (水道研究発表会) 講演集, pp.314-315, 2020 年 11 月.

桂美月, 中西智宏, 越後信哉, 伊藤禎彦: 配水管内環境の制御を目的とした砂ろ過と膜ろ過の濁質除去能とその多様化に関する基礎研究, 第 55 回日本水環境学会年会講演集, p.172, 2021.3

周心怡, 中西智宏, 越後信哉, 伊藤禎彦: A scenario analysis of controlling manganese accumulation in chlorinated drinking water distribution systems, 第 55 回日本水環境学会年会講演集, p.27, 2021.3

桂美月, 中西智宏, 越後信哉, 伊藤禎彦: 配水管内環境の制御を目的とした浄水処理方法に関する基礎実験, 第 57 回 環境工学研究フォーラム講演集, p.26, オンライン開催, 2020 年 12 月.

S. Itoh, S. Fukuoka, J. Kishimoto, T. Nakanishi: Controlling the Quality inside Distribution Pipes of Small Water Supply Facility, IWA World Water Congress and Exhibition, 11-15 September 2022, Copenhagen, Denmark.

木村昌弘, 浅見真理, 伊藤禎彦: 小規模水道・水供給システムの維持管理に関する経営シミュレーション, 令和 3 年度全国会議 (水道研究発表会) 講演集, pp.100-101, 2022.2.

松本幸太郎, 伊藤禎彦: ミャンマー・バゴー地域における将来の人口減少を見据えた水供給計画の立案, 環境衛生工学研究, Vol.36, No.3, pp.38-40, 2022.7

久保章, 山西陽介, 田中広樹, 山村寛, 大滝雅寛, 伊藤雅喜, 伊藤禎彦, 清塚雅彦: 水道の基盤強化に資する浄水システムの 更新・再構築に関する研究-A-MODELS プロジェクト-, 令和 4 年度全国会議 (水道研究発表会) 講演会, pp.288-289, 2022.10.

2. 著書

伊藤禎彦: 公益財団法人水道技術研究センター, 多様な社会・技術に適応した浄水システムに関する研究 (A-Dreams), 将来を見据えたスマートな浄水システムの構築～要素技術・システムによる課題解決事例集～, 197p., 2022.3

3. 講演

伊藤禎彦: 浄水施設の更新・再構築, 第 34 回水道技術セミナー, (公財) 水道技術研究センター主催, 京都市勧業館みやこめっせ特別展示場, 2022.12.1

G. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

【参考文献】

- 1) van der Kooij, D., van der Wielen, P. eds.: Microbial Growth in Drinking-Water Supplies, 453p., IWA Publishing, London, UK, 2014.
- 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) Ma, X., Li, G., Yu, Y., Chen, R., Zhang, Y., Tao, H., Zhang, G. & Shi, B.: Spatial variation of loose deposit characteristics in a 40 km long operational drinking water distribution system, *Environmental Science: Water Research & Technology*, Vol. 5, No.10, pp.1689-1698, 2019.
- 4) 中西智宏, 岸本如水, 小坂浩司, 伊藤禎彦: 浄水中微粒子による配水管内環境の形成過程のモ

デル化とその制御性, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 75, No. 7, III_53-III_63 2019.

- 5) 静岡市：静岡市飲料水供給施設及び民営簡易水道実態調査結果、平成 29 年 7 月
- 6) 静岡市保健福祉長寿局、経済局、上下水道局：【市長報告】中山間地における水の安定供給に係る体制と取組の推進について、平成 31 年 2 月
- 7) 伊藤禎彦, 曾潔：小規模水供給施設の管理実態と課題、令和 3 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持続可能な維持管理に関する統合的研究（20LA1005）分担研究報告書、2022. 3.
- 8) 伊藤禎彦, 曾潔, 武藤陽平：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、令和 2 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持続可能な維持管理に関する統合的研究（20LA1005）分担研究報告書、2021.3.