

マンガンによる配水管内環境の形成とその制御方策

研究分担者 中西智宏 京都大学大学院工学研究科助教
研究協力者 伊藤禎彦 京都大学大学院工学研究科教授
周心怡 京都大学大学院工学研究科

研究要旨：

小規模水供給システムにおいては、水需要のさらなる減少によって配水管内の流速が低下し、管内環境の悪化が懸念される。本研究は、配水管内環境の管理という観点から効率的な維持管理方法について定量的に議論可能とすることを目的として調査および実験的検討を行った。滋賀県の実配水管網において管内蓄積物に関する実態調査を行った結果、懸濁物質の蓄積量が $1\sim 56\text{ g/m}^2$ と推定され、マンガン(Mn)が蓄積物の重要な構成成分として挙げられた。室内実験によって Mn 蓄積過程を種々の管内流速条件で把握した結果、 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管内流速によって促進されることを明らかにした。最後に Mn 蓄積に関する数理モデルを構築し、対象管網に適用した。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定量的に推定・比較し、通常は実施困難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。

A. 研究目的

近年の人口減少に伴う水需要減少によって配水管内の水は滞留傾向にあり、水中の懸濁物質等の蓄積により配水管内環境の悪化と水道水質の劣化が懸念される。特に人口減少の著しい小規模水供給システムにおいては、より効率的で実現可能な管路の維持管理方法が求められる。

配水システムにおける懸濁物質の蓄積を制御するための方策として、1)浄水場から配水系へ流入する懸濁物質量の低減、2)管網形状の適切な設計による懸濁物質の蓄積の抑制、3)定期的な洗管、からなる3段階の方策が考えられる¹⁾。しかし、これまで各段階による効果が定量的に比較されたことはなく、小規模水供給システムで有効な対策について議論するには至っていない。

以上を踏まえ、本研究は配水管内環境という観点から適切な管路の維持管理方法について検討することを目的とした。具体的には、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、室内実験によって Mn の蓄積過程を把握するとともに数理モデルによってそれを表現し、配水管内の水理条件（管内流速）が Mn 蓄積過程に及ぼす影響を定式化した。さらに、管内流速の影響を組み込んだモデル式を実態調査の対象区域に適用し、管網全域での蓄積量分布を推定した上で、シナリオ分析によって適切な制御方策について考察した。

B. 研究方法

1. 滋賀県 T 市における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。ピグ洗管とは樹脂製のピグ（写真 1）を配水管に直接圧入し流下させることで管内部の蓄積物を剥離させる洗浄方法である。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	



写真 1 洗浄に用いたピグ（ハード）の外観

2. 配水管内におけるマンガンの蓄積特性の把握

上記の実態調査において蓄積物に占める Mn の割合が極めて高かったことから、ここでは管内での Mn 蓄積特性を実験的に把握することを目的とした。

まず京都大学実験室の水道水に MnSO_4 溶液を約 $10 \mu\text{g}\cdot\text{Mn}/\text{L}$ となるように添加した試験水と次亜塩素酸ナトリウム溶液を連続的に反応タンク(容量 3.5 L)に供給し、残留塩素濃度 $0.5 \text{ mg}/\text{L}$ のもとで Mn を酸化させ Mn 粒子と Mn^{2+} を含む反応液を作成した(図 1)。反応液の全 Mn 濃度は約 $1\sim 4 \mu\text{g}/\text{L}$ であり、その 30～50 %が溶存態 Mn であった。この反応液を、配水管を模した 4 本のアクリルカラム(内径 25 mm, 長さ 700 mm)に循環通水した。カラム内の流速は 0.02, 0.05, 0.08, 0.2 m/s と設定した。カラムには一般的な管内面材質であるエポキシ樹脂製の試験片(幅 15 mm, 長さ 150 mm)を水流

に対して平行に 8 枚ずつ固定し、時間的に取り出して Mn の蓄積量の変化を測定した。Mn 蓄積量は試験片を硝酸に浸漬し蓄積物を溶解させた後、ICP-MS による Mn 濃度の測定によって推算した。

Mn の蓄積過程には、水中の MnO_2 粒子の物理的な付着（物理経路）に加えて、 Mn^{2+} が Mn 蓄積物に吸着し遊離塩素による自触媒酸化反応によって蓄積する化学経路が存在することが分っている²⁾。そこで、ここではこれらの経路と水流による Mn 蓄積物の脱離を考慮し、下記の数理モデル(1)～(2)を構築した。式(1)の右边第 1 項が物理経路、第 2 項が化学経路、第 3 項が脱離を示す。物理/化学的経路のモデル化には分担者による先行研究²⁾を参考にした。

$$\frac{d\text{Mn}_{\text{sur}}}{dt} = (K_{\text{att}} \cdot [\text{MnO}_2] \cdot \frac{A}{v}) \cdot \frac{v}{A} + K_{\text{sur}} \cdot [\text{Mn}^{2+}] \cdot \text{Mn}_{\text{sur}} - K_{\text{det}} \cdot \text{Mn}_{\text{sur}} \quad (1)$$

$$K_{\text{sur}} = c \cdot ([\text{Mn}^{2+}] + [\text{MnO}_2])^{-1.7} ([\text{OH}^-] \cdot [\text{HOCl}]_T \cdot \alpha_{\text{Cl}}) \quad (2)$$

ここで、 Mn_{sur} : 試験片上の Mn 蓄積量(mol/cm^2)、 K_{att} : 1 次付着速度定数($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)、 K_{sur} : 反応速度定数($\text{M} \cdot \text{s}^{-1}$)、 K_{det} : 脱離速度定数($\text{M} \cdot \text{s}^{-1}$)、 v : カラム体積(L)、 A : 試験片の表面積(cm^2)、 α_{Cl} : 遊離塩素に対する HOCl の比率(無次元)、 c : 定数($\text{M}^{-1.7} \cdot \text{s}^{-1}$)である。モデルによる予測と実験結果の比較によって K_{att} と c を各流速条件で推定し、管内流速との関係を定式化した。なお、 K_{det} は別途脱離実験を実施し、管内流速の 1 次式で表されることを確認した。

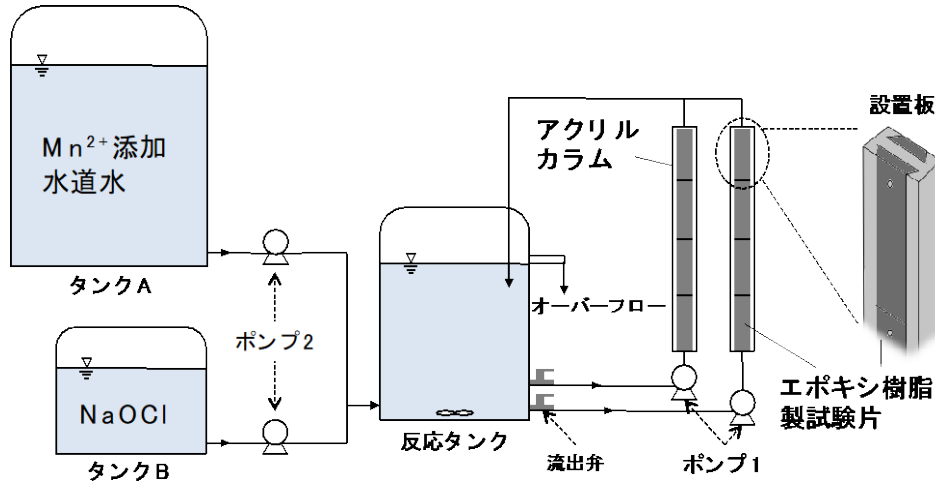


図 1 室内マンガング蓄積実験の概要

3. 実管網におけるマンガング蓄積量の予測と制御性に関するシナリオ分析

ここでは、上記で得られた管内流速の影響を組み込んだ蓄積モデルを実態調査の対象管網（配水区域 A）に適用することで対象区域での Mn 蓄積物の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(3)～(5)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)($\text{s}^{-1} \cdot \text{L} \cdot \text{m}^{-2}$)、 k_{sur} : 反応速度定数($(\mu\text{g}/\text{L}) \cdot 2 \cdot \text{s}^{-1}$)、 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)($(\mu\text{g}/\text{L})^{-1.3} \cdot \text{s}^{-1}$)、 D : 管内径 (m)である。

$$\frac{\partial \text{Mn}_{\text{sur}}}{\partial t} = \frac{0.15}{D} \cdot (K_{\text{att}} \cdot [\text{MnO}_2] \cdot \frac{A}{v}) \cdot \frac{v}{A} + 3 \cdot k_{\text{sur}} \cdot [\text{HOCl}]_T \cdot [\text{Mn}^{2+}] \cdot \text{Mn}_{\text{sur}} - \frac{0.025}{D} K_{\text{det}} \cdot \text{Mn}_{\text{sur}} \quad (3)$$

$$k_{\text{sur}} = c [\text{Mn}]_T^{-1.7} \quad (4)$$

$$Mn_{sur} = \begin{cases} Mn_{sur} & Mn_{sur} \leq 400 \\ 400 & Mn_{sur} > 400 \end{cases} \quad (5)$$

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 2）、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 (Multi-Species eXtention)に上記モデル式(3)～(5)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 µg/L、[Mn²⁺]:[MnO₂]=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 年間の洗管期間とし、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。

（倫理面への配慮）

本調査および実験は、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対象とはならないことを確認した。その他、調査に関係する対象者を含む安全性に配慮して実施した。

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

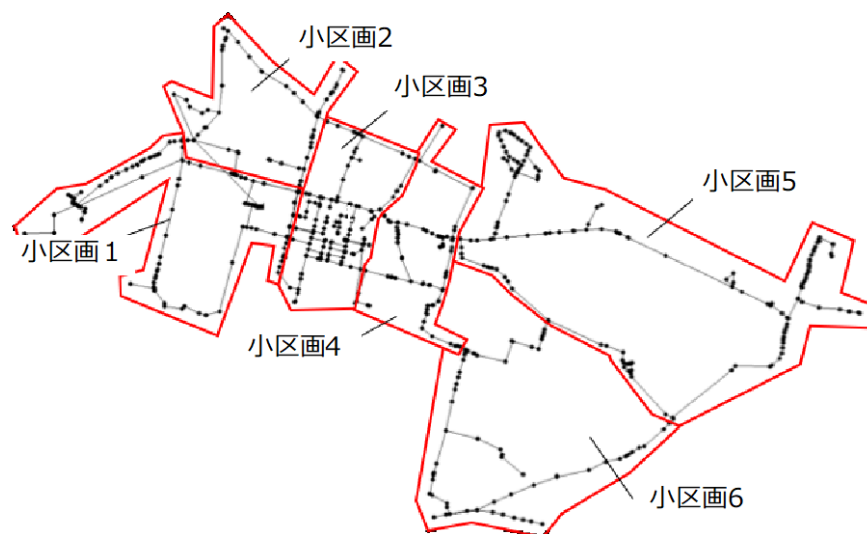


図 2 対象管網（配水区域 A）の形状と洗管シナリオにおける小区画の分割方法

C. 研究結果および 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調査

写真 2 に採取したサンプルの様子を示す。どの地点からも懸濁物質の非常に多い排水が採取され、概して黒色を呈していた。また、表 3 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 3～図 5 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、写真 2 のような黒い排水は Mn に起因するものと推察された。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。



写真 2 採取したサンプルの様子

表 3 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 地点 1	No.1	6067	17.1	3.9	3.0	2.5	33	2.7
	No.2	143	16.4	8.5	1.6	7.1	23	6.9
	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	11.4
	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

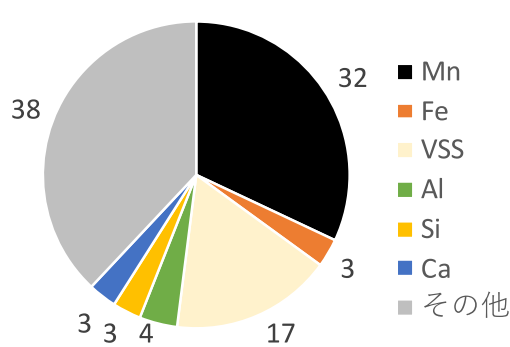


図 3 蓄積量(56 g/m²)に占める各元素の割合(%)
(配水区域 A 地点 1)

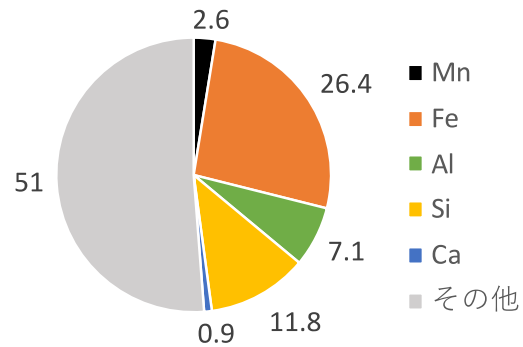


図 4 蓄積量(56 g/m²)に占める各元素の割合(%)
(配水区域 A 地点 2)

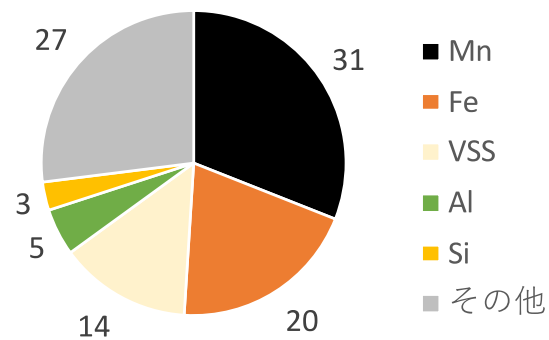


図 5 蓄積量(1.0 g/m²)に占める各元素の割合(%) (配水区域 B)

2. 配水管内におけるマンガンの蓄積特性の把握

図 6 に室内実験における Mn 蓄積量の時間変化と蓄積モデルの適合結果を示す。各流速条件で Mn 蓄積量は時間的に増加し、特に高流速(0.08, 0.2 m/s)の条件では加速度的な増加が見られた。Mn²⁺の酸化反応は自触媒反応であり、蓄積が進むほど Mn²⁺の吸着できる MnO₂が増加することで酸化反応が加速されたことがその原因と考えられる³⁾。また蓄積量は高流速ほど大きい傾向にあった。一般に管内流速が大きいほど管壁面での水流によるせん断力によって蓄積物は脱離しやすいため、高流速の条件ほど蓄積量が小さくなると予想されたが、本実験では逆の傾向が見られたことになる。これは流速が大きいほど管内の流れの乱れが増し、試験片表面に対する MnO₂粒子や Mn²⁺の時間当たりの供給量が増加したことに起因すると考えられる。さらにモデル式とのフィッティングによって MnO₂粒子の付着速度定数 K_{att} と酸化反応速度に関するパラメータ c を推定した結果、どちらの定数も管内流速と正の相関があり(図 7)、検討した流速域においては線形関係とみなせた。

次節ではこの経験式を一連の蓄積モデル式に組み込み、前節で調査した T 市の配水管網に適用した。

3. 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 8 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、上述の室内実験の結果を踏まえた蓄積モデルを用いているため、管内流速の大きい上流の管路(配水池に近い管路)ほど蓄積量が大きい傾向にあった。上流の管路ほど Mn の蓄積量が大きい傾向にあることは既往研究⁴⁾でも確認されており、その傾向を数理モデルで再現し、蓄積量分布を可視化することができた。

続いて、図 9 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%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 Mn²⁺の割合が大きい

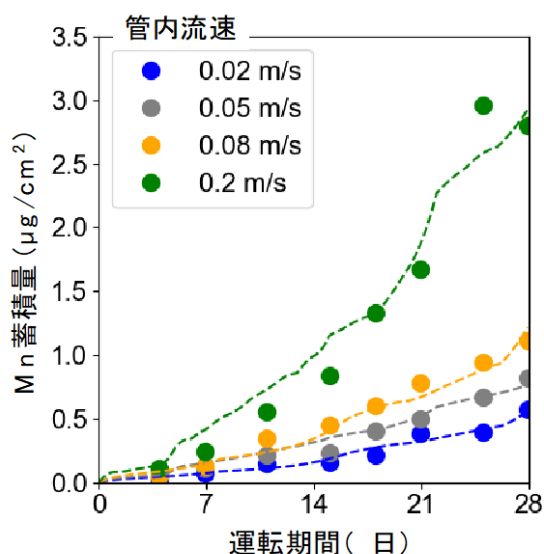


図 6 Mn 蓄積実験と数理モデルによる適合結果

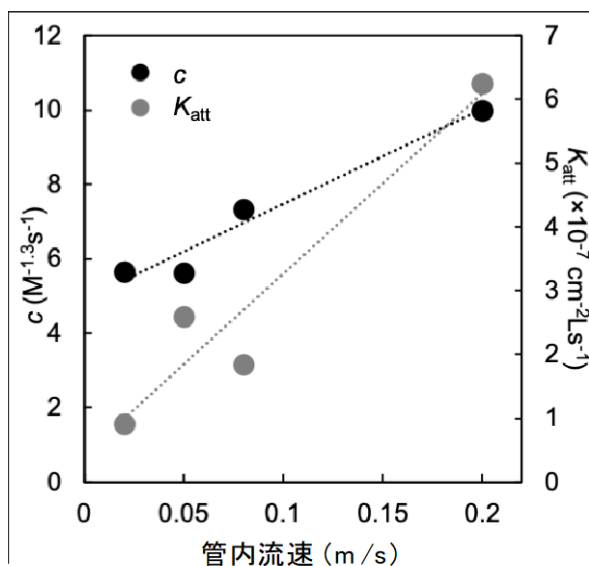


図 7 管内流速と Mn²⁺の酸化に関する定数 c 及び MnO₂粒子の付着速度定数 K_{att} の関係

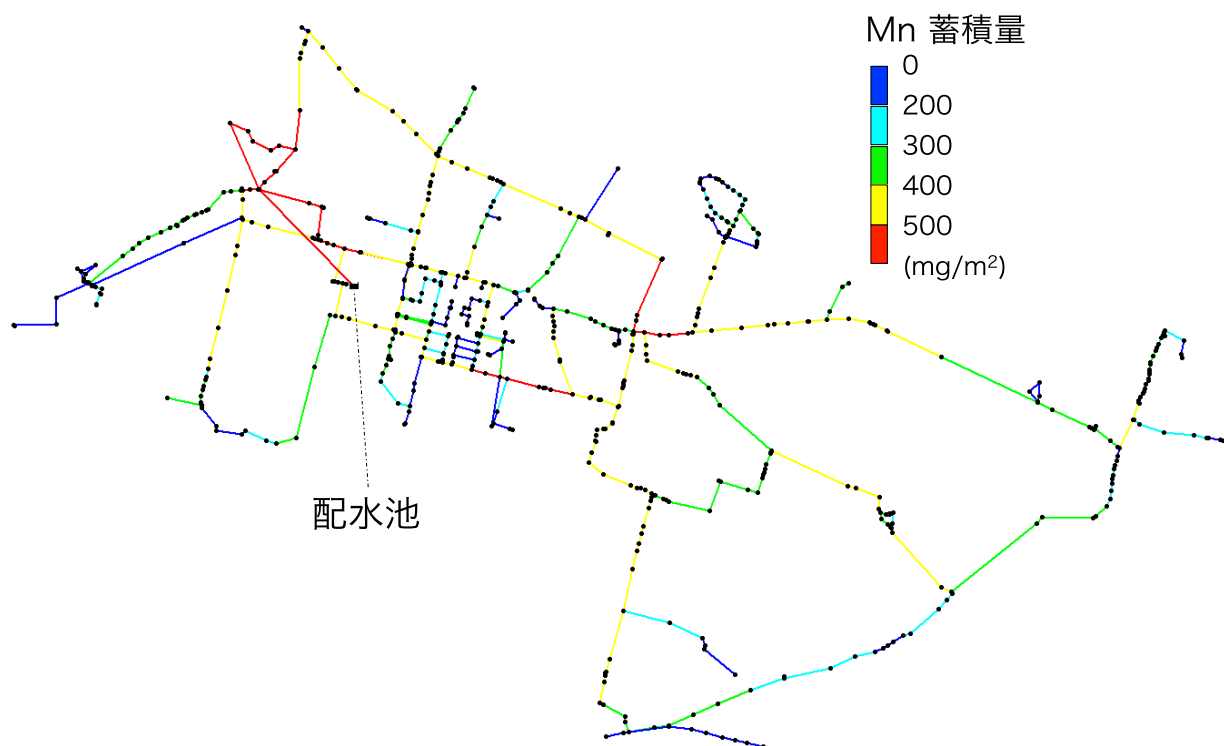


図 8 対象管網における Mn 蓄積量分布の推定結果

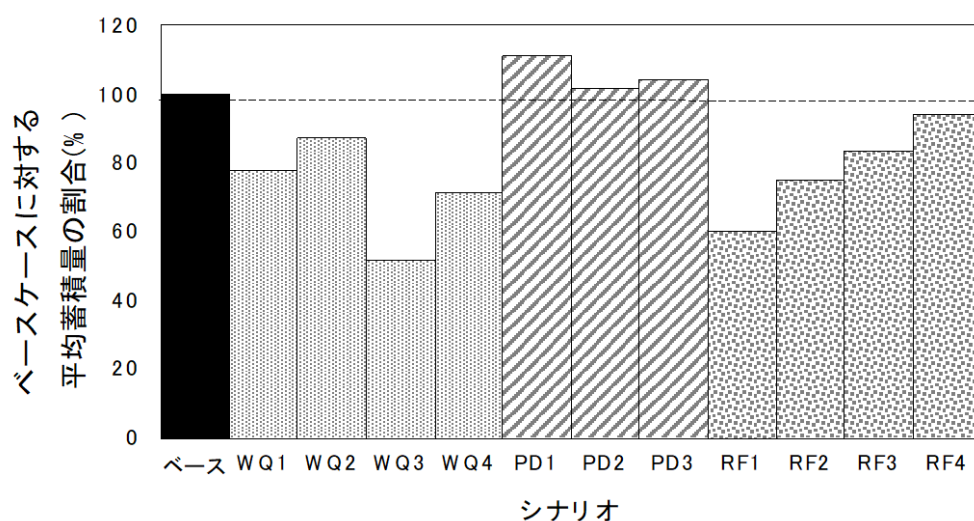


図 9 Mn 蓄積物の制御に関する各シナリオの効果の比較（シナリオの内容は表 2 を参照のこと）

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, 5)}、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。このように異なる制御方策による効果を定量的に比較できたことが本研究の主要な成果といえる。

4. まとめ

(1) 配水管内環境に関する実態調査

実際の配水管網において配水管内環境に関する実態調査を行ったところ、配水管の単位内面積あたりの懸濁物質の蓄積量は 1~56 g/m² と推定された。また、マンガンが蓄積物の重要な構成成分として挙げられた。

(2) 配水管内におけるマンガンの蓄積特性の把握

室内実験によって Mn の蓄積過程を異なる管内流速条件で把握したところ、管内流速が大きい条件ほど Mn の蓄積が大きく、MnO₂ 粒子の物理付着と Mn²⁺の化学酸化を介した蓄積の両方が管内流速によって促進されることを明らかにした。さらに、これを定式化した蓄積モデル式を構築できた。

(3) 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

上記のモデル式を(1)の調査区域に適用することで、Mn の蓄積量分布を可視化することができた。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定量的に推定し、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。

謝辞：T 市水道局には洗管作業時での採水にご協力いただき、また管網データを提供頂いた。株式会社クボタには室内実験に用いるエポキシ樹脂製試験片を提供頂いた。ここに記して謝意を表す。

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

Zhou, X., Nakanishi, T., Echigo, S., Kosaka, K. and Itoh, S.: A scenario analysis of controlling 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 年 3 月 10-12 日.

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.

2. 総説・解説

なし

3. 講演

なし

H. 知的財産権の出願・登録状況

なし

【参考文献】

- 1) van der Wielen, P., Italiaander, R., Wullings, B. A., Heijnen, L. and van der Kooij, D.: Opportunistic pathogens in drinking water in the Netherlands, Microbial growth in drinking water supplies (Van der Kooij, D. and van der Wielen(eds.)), IWA Publishing, 2014.
- 2) Zhou, X., Kosaka, K., Nakanishi, T., Welfringer, T. and Itoh, S.: Manganese accumulation on pipe surface in chlorinated drinking water distribution system: Contributions of physical and chemical pathways, *Water Research*, Vol.184, 116201, 2020.
- 3) Zhou, X.: Manganese Accumulation and its Control in Chlorinated Drinking Water Distribution System, 京都大学学位論文, 2020.
- 4) 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.
- 5) 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.