

| | | | |
|---|---|----|------|
| 京都大学 | 博士 (工学) | 氏名 | 周 心怡 |
| 論文題目 | Manganese Accumulation and its Control in Chlorinated Drinking Water Distribution System (塩素処理された水道配水システムにおけるマンガンの蓄積性とその制御) | | |
| <p>(論文内容の要旨)</p> <p>わが国の上水道システムは水需要の減少や配水管路の老朽化といった問題に直面しており、将来にわたって水道水質を維持するためには配水管内環境の管理・制御を高度化させる必要がある。特に浄水中に微量に残存するマンガンは配水管内での蓄積によって水道水の着色障害（黒水）を引き起こす。本論文はその制御にむけた技術的知見を得ることを目的として行ったものであり、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、日本の上水道システムが直面する課題として、管路施設の老朽化と水需要減少に伴う管内流速の低下や水道水質劣化を取り上げ、人口減少社会における配水管内環境の管理・制御の重要性を指摘している。配水システムでの主要な水質劣化の1つとして「黒水」の発生を指摘し、その方策として浄水場での除マンガン(Mn)処理、管網形状による水理条件の制御、洗管に着目し、それらによる制御性を定量的に評価することを本論文の目的として定めている。</p> <p>第2章は文献考察であり、配水システムの老朽化が及ぼす問題を俯瞰的に整理した後、配水管内の蓄積物の分類や性状等についてまとめている。水道水の着色障害についても整理し、Mn蓄積物が引き起こす「黒水」の制御の重要性を改めて指摘している。次いで、配水システムにおけるMnの蓄積現象について文献を収集した上で、残留塩素の維持された配水システムでは生物作用とは異なる蓄積機構が重要となり得ることを示し、残留塩素共存下でのMn蓄積特性とそれに及ぼす管内水理条件の影響について知見が不足していることを指摘している。また、対策として1) 浄水処理によるMn濃度・化学形態の制御、2) 管網形状による管内水理条件の制御、3) 洗管に着目し、各段階による制御性を定量化することの意義と重要性を議論している。最後に、本論文の独自性、新規性を述べている。</p> <p>第3章では、Mnの蓄積特性を室内バッチ実験によって多角的に把握し、蓄積機構を踏まえた数理モデルを構築している。特に、遊離塩素の共存下のもと、配水管材質の試験片に対するMn蓄積過程を水中Mnの酸化形態(Mn²⁺/MnO₂)を変化させて把握している。その結果、両者で蓄積過程に大きな違いが見られ、MnO₂粒子の付着（物理的経路）と蓄積したMnO₂表面におけるMn²⁺の自触媒酸化反応（化学的経路）を主要な蓄積機構として提示するに至っている。さらに、この蓄積機構を考慮した数理モデルを構築し、物理的経路における付着速度定数や化学的経路における単相系/混相系の酸化反応速度定数の推定に成功している。加えて、共存Br⁻イオンや配水管材質、全Mn濃度が蓄積性に及ぼす影響も同様の実験で把握し、モデルによる定量的な考察がなされている。最後に、構築したモデルを用いて長期的な蓄積過程を推定しており、化学的経路を抑制することが蓄積物の制御に効果的であると考察している。</p> <p>第4章では、配水管内の水理条件がMnの蓄積過程に与える影響を把握することを目的とした室内実験を実施している。試験片を装着した円筒形リアクターに対してMn²⁺/MnO₂を含む水道水を4つの管内流速条件で連続通水し、流速が高い系ほど蓄積量の増加速度が大きいことを確認している。さらに、Mn蓄積物の脱離実験も各流速条件で実施し1次脱離速度定数と流速との間に線形関係を見出している。これを第3章</p> | | | |

の蓄積モデルに統合した上で冒頭の実験結果に適用した結果、Mn 粒子の物理付着速度定数と Mn^{2+} の酸化速度定数 (混相系) の双方が管内流速と正の相関を持つことを示し、管内流速が Mn 蓄積の化学/物理的経路に与える影響を定式化するに至っている。最後にこのモデルを用いた計算によって、Mn の化学形態と管内流速が与える長期的な影響について考察している。

第 5 章では、上記の蓄積モデル式を実配水管網に適用可能とすることを目的として、Mn 蓄積物に関する実態調査とモデルパラメータの校正が行われている。関西地方における 2 つの実配水区域を対象とした実態調査から、浄水中 Mn 濃度によらず、Mn は管内蓄積物の主要な構成元素の 1 つであることなどを示した。次いで、第 4 章のモデル式を当該地域に適用してパラメータ校正を行った結果、対象地域によってパラメータの推定値に違いが見られるものの、実態調査と一定の整合性を有する蓄積モデルを得ることに成功している。さらに校正済みのモデルによって対象区域での蓄積量分布を推定したところ、管内流速が大きい上流部で Mn の蓄積が進みやすい可能性を指摘している。

第 6 章では、第 5 章の対象区域における Mn 蓄積物の制御方策について、校正済みモデルを用いた定量的な考察を行っている。具体的には、1) 浄水中の Mn 濃度と化学形態の制御、2) 配水管の縮径による管内水理条件の制御、3) 定期的な洗管、からなる複数のシナリオを設定し、蓄積物の低減効果を定量的に比較している。その結果、浄水中 Mn 濃度の低減や、対象地域によっては全 Mn 濃度に占める Mn^{2+} 濃度の割合を低減することが蓄積物の低減につながり得ること、縮径は Mn 蓄積物の制御には効果的ではないこと、頻繁な洗管作業によって蓄積物の大幅な低減が可能であること、などを示した。最後に、上記 1) ~ 3) の方策の間で制御性を比較しており、3) 洗管と 1) 浄水中 Mn 濃度の低減が特に大きな制御性を示し、効果的な方策といえるとの結論を得ている。

第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、人口減少社会における水道配水システムの再構築に向けて、配水管内環境の管理・制御方策の高度化に着目し、水道水の着色障害（黒水）の原因物質であるマンガン(Mn)の配水管内における蓄積特性の把握とその制御方策の提案を行ったものである。得られた主な成果は以下の通りである。

1. 残留塩素濃度の存在下での Mn 蓄積過程をバッチ式実験によって把握し、蓄積機構に基づいた数理モデルを構築した。その結果、蓄積過程は MnO_2 粒子の付着（物理的経路）と、蓄積した MnO_2 表面における Mn^{2+} の自触媒酸化反応（化学的経路）からなることを明らかにした。さらにモデル計算によって、水中 Mn の化学形態($\text{Mn}^{2+}/\text{MnO}_2$)を制御することで長期的な蓄積を低減できる可能性を示した。
2. Mn の蓄積特性に対する水理条件の影響を定式化するため、異なる管内流速下での蓄積過程と脱離過程を連続通水式リアクターによって把握した。その結果、高流速の条件ほど蓄積量の増加速度が大きいことを確認し、物理的/化学的経路による蓄積速度定数と脱離速度定数はそれぞれ管内流速と線形関係にあることを示した。
3. 関西地方における2つの異なる実配水区域で管内蓄積物に関する実態調査を行い、Mn 蓄積物の存在量などの情報を収集した。さらに得られたデータを用いて上記の Mn 蓄積モデルのパラメータ校正を実施し、対象区域における Mn 蓄積量分布の推定を可能とした。
4. Mn 蓄積物の管理・制御のための方策として、浄水処理による Mn 濃度/形態の制御、管路の縮径による管内流速の増加、定期的な洗管を取り上げ、シナリオ分析によって各手法による制御性を定量的に比較した。その結果、洗管と浄水中 Mn 濃度の低減が制御に有効であることなどを示した。

以上、本論文は Mn 特有の蓄積特性を明らかにしたうえで、配水システムにおける Mn 蓄積物の制御方策について多角的に議論している。得られた成果は水道工学上、重要な知見を与えており、人口減少社会における配水システム再構築のための技術的枠組み整備にも大きく貢献するものである。したがって本論文は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年10月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。