

## B-33 水道における残留塩素消費実験 に関する一考察

○山崎 公子<sup>1\*</sup>・小泉 明<sup>1</sup>・稲員 とよの<sup>1</sup>・関 丙大<sup>1</sup>・具 滋茸<sup>2</sup>

<sup>1</sup>首都大学東京大学院都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

<sup>2</sup>ソウル市立大学 環境工学部 環境工学科 (〒139-743 ソウル特別市東大門区典農洞90)

\* E-mail: nosu@tmu.ac.jp

### 1. はじめに

全国の多くの水道事業者では、残留塩素の低減化に取り組んでいる。水道法では、給水栓での遊離残留塩素濃度は、0.1mg/L以上と定められているが、浄水場で注入された塩素は、給水栓までの送配水過程において、様々な要因によって消費されていくことが過去の研究で明らかとなっている<sup>1)</sup>。要因としては水道水中の有機物(以下、TOC)や管の材質、温度等が考えられ、これらの要因と残留塩素の反応等により消費されていくと考えられている<sup>2) 3) 4)</sup>。したがって、給水栓での残留塩素濃度を法律で定められた0.1mg/L以上に保つためには、消費されると想定される残留塩素の量を上積みした初期残留塩素濃度にする必要があり、需要点における残留塩素濃度を把握する残留塩素消費速度をTOC・管の材質・温度の要因で表すモデル式が示されている<sup>2) 3) 4) 5)</sup>。

しかし、配水管の洗浄作業を行うと、配水管内に存在する鉄サビやシールコート片などの濁質が回収されることがある<sup>6) 7) 8)</sup>。配水管網を流れる水道水の水量に比べると微量な量ではあるが、管の形状や滞留時間によっては、水道水と濁質の接触の機会が多くなることも考えられ、実際の配水管網での残留塩素消費の分析を行うには、これらの濁質成分が残留塩素消費にどのような影響を与えるかについても、把握しておく必要がある。

そこで、本稿ではこれらの水道管内濁質に着目し、濁質が残留塩素消費に与える影響を実験的に求めるための実験装置の開発を行い、管内濁質の影響の定式化を試みることを目的とする。

### 2. 残留塩素消費実験装置について

従来、残留塩素の消費の室内実験では、よく洗浄されたガラス製の容器を測定回数分用意し、測定時間が来

るごとに数個ずつ試料容器を開けて残留塩素濃度をDPD(dyethylphenylene-diamine)法により測定を行うという方法が多くとられていた。しかし、試料容器の洗浄を綿密に行い、すべての試料容器の状態を同じにすることは難しく、大変な労力と時間を要する。また、濁質による残留塩素消費を従来の方法で測定するためには、全試料容器に同じ状態の等量の濁質を添加されることが必要条件となる。しかし、これは実際には困難である。そこで今回の実験では、実験開始から終了までを1つの容器で行うことにより、容器の個体差を無くし作業を容易にすることを検討した<sup>9)</sup>。

残留塩素消費実験では、試料中の残留塩素が大気と接する部分から揮散するため、経時変化を求める場合、揮散が実験結果に影響を与えないように、密栓状態で大気との接触を断つことが必要である。そこで、残留塩素の測定は、残留塩素計を用いての測定を試みた。しかし、測定開始24時間後から時間経過とともに測定値のばらつきが大きくなり、安定した測定はできなかった。残留塩素系での測定を数十回、条件を検討して試みた結果、計器間の誤差、精度などを考慮し連続実験には自動測定機器は不適と判断した。

そこで、残留塩素の測定は従来からのDPD法による測定とした。DPD法による残留塩素測定は、測定時に採水するため、試料容器内の試水量は順次減少していく。また、採水時に容器を開放することにより、残留塩素の気散が想定される。そこで、実験開始から終了まで容器は密封された状態とし、密封状態のまま試料を採取でき、容器内の水量の減少に対応できるという条件に対応できる実験装置の考案開発を行った。

実験に使用した容器は、密栓できる20Lのポリエチレン製の立方体のやわらかい容器を使用した。容器のふた部分に穴をあけてシリコン製セプタムを取り付け、実験中の試料が空気と接触すること無く、注射器により残留

塩素測定用試料を採取できるようにした。残留塩素測定試料採取に伴う試料水量の減少には、試料容器が変形することで対応することができた。その結果、同一試料容器での連続実験が可能となった。また、実験中、スターラーで攪拌し容器内の試水に流れを生じさせるため、円筒状のコンテナ内に容器を置いて形状を保ち、マグネティックスターラー上に設置した。図1に装置の概略図を示す。この実験装置Aを使用して管内濁質の残留塩素消費実験を行った。

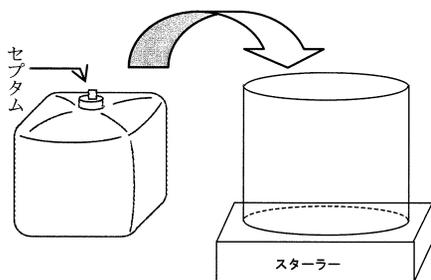


図1 実験装置Aの概略

この実験装置は開口部の直径が5cm以下と小さく、容器内の洗浄には訓練が必要であり、洗浄に個人差が出やすいことから、実験を実施した際は、特定の作業者に限って洗浄作業を行った。そこで、洗浄が容易な実験装置への改良を試みた。開口部が大きく、洗浄が容易な容器は、概ね、変形しにくい材質で作られている。したがって、試料採取による試料水量の減少に、試料容器の変形による対応はできない。そこで、一定容量の試料容器内の水量減少に対応するため、試料容器内に設置した圧力調整袋に外気を導入する事によって水量減少分を補填することとした。容器は、容量20Lの高密度ポリエチレン製のペール缶を使用した。密閉性が高く、開口部は直径30cmと大きく洗浄は容易である。密閉用の蓋の面積も大きく加工が容易であることから、センサー用の穴をあけることによってpH等の測定が可能となった。改良実験装置Bの概要を図3に示す。

この改良実験装置の容器として、ガラス製の容器についても検討対象とした。容器の洗浄は非常に容易であるが、試料容器の重量があるため試料を入れると運搬が大変なこと、蓋が変形しないため、実験開始時に密閉容器内に空気が残留しやすい等の問題があり使用を見送った。

### 3. 濁質による残留塩素消費実験

配水管路内に存在する濁質は、多種多様であり、管の洗浄作業の際には、シールコート片、鉄サビ、砂、凝集フロック、スケール、活性炭などが捕集されている。そ

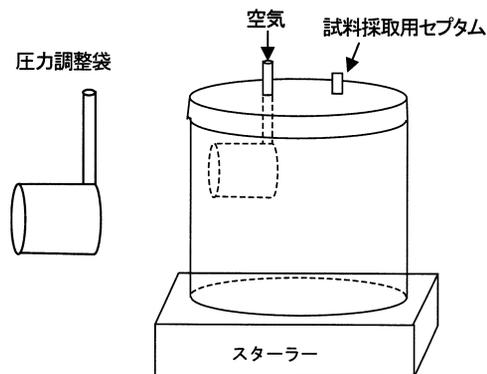


図2 改良型実験装置B

の中で、シールコート片、鉄サビ、砂の3種類の物質が量的に多く確認されている<sup>7)8)</sup>。そこで、これらの3種類を用いて残留塩素消費実験を行う。

シールコート片は、管内面のセメントモルタルライニングの表面に塗布されたシールコート(塗布厚:数 $\mu\text{m}$ ~30 $\mu\text{m}$ )が剥離したものである。シールコートの原料は、アクリル樹脂系と塩化ビニル樹脂系の大きく2種類に分けられ、比重は1.1以下である。近年では、シールコート片対策として剥離しにくいシールコートなどが採用されているが、経年管にはまだ旧来のシールコート塗装の管が多く存在する。

鉄サビは、鉄鋼や铸铁で製造されたパイプやバルブなどが腐食し、鉄原子がイオン化し、酸化反応により水酸化第1鉄に変化し、最終的に水酸化第2鉄となることによって生成される。

砂は、管の敷設工事の際に混入し、使用開始前の管路の洗浄によっても取り除ききれなかったものが主であると考えられているが、管内面のモルタルライニングが磨耗しモルタルの骨材である砂が残存したもの、さらに、浄水プロセスの急速ろ過などで使用されるろ過砂が微量に含まれることもある。

残留塩素消費実験に用いる3つの濁質のうち、シールコート片はS市水道局で水道管の洗管を行った際に出た夾雑物に含まれていたものである。鉄サビは、あらかじめ塩酸に漬けてサビさせた鉄クギを用いた。砂は砕砂を用いた。砕砂は天然の岩石を砕いて造ったコンクリートの骨材用として作られる砂である。

実験を行う際に、濁質間の残留塩素消費速度の比較を行うため、濁質添加量を表面積に換算した。表1に各濁質1gあたりの表面積を示す。

表1 単位濁質量あたりの表面積

	シールコート片	鉄クギ	砂
表面積( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	270.5	1.5	16.7

実験には、蒸留水に次亜塩素酸ナトリウムを添加して残留塩素濃度を0.8mg/Lに調整したものを模擬水道水として使用した。用いた蒸留水のTOC濃度は約0.2mg/Lである。実験の温度条件は、残留塩素消費が最も大きい夏期を想定し、水温25℃とした恒温室内で実験を行った。マグネティックスターラーによる攪拌速度は130rpm/minに維持した。実験装置に調整した模擬水道水を入れ、所定量の濁質成分を加え、空気が入らないように密栓した後、攪拌し実験開始とした。実験開始から0, 6, 12, 24, 36, 48, 60, 72時間後に試料を採取し、残留塩素濃度を測定した。

実験結果は、(1)式に示す残留塩素消費速度式を用いて整理し、残留塩素消費速度係数  $k$  値を算定した。

$$C_p = C_0 \cdot \exp(-k \times TP) \dots\dots\dots (1)$$

$TP$ : 経過時間(h)、 $C_0$ : 初期残留塩素濃度(mg/L)、  
 $C_p$ :  $TP$  時間後の残留塩素濃度(mg/L)

濁質がまったく入っていない実験での  $k$  値を模擬水道水中の溶存物質や容器などによるブランク値  $k_0$  とし、各濁質添加の実験結果から算定された  $k$  値からブランク値  $k_0$  を減じたものを各実験条件における  $k$  値とした。これにより、2種類の実験装置AとBそれぞれで得られた実験結果を共通に使用し評価することが可能となった。また、実験開始時の残留塩素濃度を、全実験において同じ濃度にするには難しく、多少の誤差が生ずるため、 $k$  値を求める際は各実験における初期残留塩素濃度  $C_0$  で残留塩素濃度  $C_p$  を除した基準化残留塩素濃度として用いた。

実験結果から、シールコート片、鉄サビ、砂による残留塩素消費速度係数と表面積の関係は、3つともにおおむね直線関係であることが伺えた。そこで、それぞれの濁質について、表面積で  $k$  値を表す推定式を回帰分析により求めた。得られた推定式の係数を比較すると、鉄サビの係数は他の2濁質に比べて大きな値となっており、表面積が同じであれば鉄サビは砂やシールコートの40倍以上の  $k$  値となることを示している。3種類の濁質の表面積と実験から得た  $k$  値の関係、および得られた推定式による推定値を図3に示す。図からも、鉄サビとほかの2

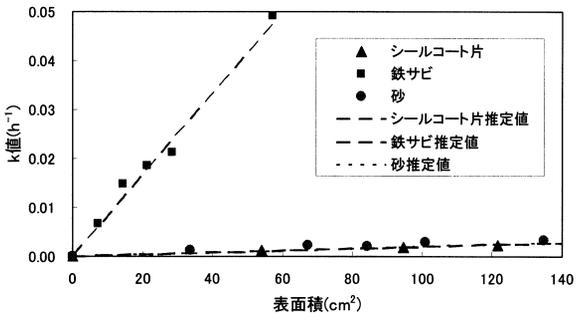


図3  $k$  値の実験値及び推定値

物質との間では残留塩素消費に大きな差があることが明確に示された。また、実験結果の有意性検定を行った結果、有意水準1%で実験結果の有意性が認められた。

今回考案した実験装置での残留塩素消費実験から有意な実験結果を得られたことから、実験装置が残留塩素消費実験に適した装置であることが示された。

#### 4. おわりに

本稿では、水道管内に存在するとされる濁質が残留塩素消費に与える影響について、実験により把握した。

最初に、濁質添加実験に対応できるように考案した実験装置Aと、改良した実験装置Bについて述べた。これらの装置は1つの試料容器で、試料中の残留塩素濃度の変化を測定することが可能なものであり、実験装置Aは、測定試料採水による容器内の試料水量の減少を容器の伸縮性により対応したものであり、実験装置Bは、容器の洗浄の容易さを考慮して開口部の大きい密閉容器を使用し、測定試料採水による容器内の試料水量の減少を容器ではなく圧力調整袋を採用することによって対応したものである。

考案した実験装置を用いて、水道管内に存在する濁質のなかで存在比率が大きいシールコート片、鉄サビ、砂を対象として、残留塩素消費実験を行った。実験結果から残留塩素減少速度係数  $k$  を濁質成分の表面積で表す推定式を作成し、添加された濁質の総表面積が同じであれば、鉄サビは砂やシールコートの40倍以上の  $k$  値となることを示した。

#### 参考文献

- 1) 東京都水道局：東京の水道経営プラン，2010
- 2) 佐藤親房・吉沢健一・及川智・北野弘美・稲員とよの・小泉明：全有機炭素(TOC)を考慮した残留塩素減少に関する化学反応論モデル，水道協会雑誌，Vol. 76, No. 10, pp. 9 - 20, 2007
- 3) 佐藤親房・吉沢健一・及川智・尾崎勝・芋坂晴男・稲員とよの・小泉明：送配水系統における実用的な残留塩素濃度予測式，水道協会雑誌，Vol. 77, No. 11, pp. 4 - 14, 2008
- 4) F. Hua, J. R. West, R. A. Barker and C. F. Forster : Modling of chlorine decay in municipal water supplies, Water Research, Vol. 33, No. 12, pp. 2735 - 2746, 1999
- 5) 洲上知弘・寺島勝彦：配水管内面の塩素消費を考慮した残留塩素濃度管理手法の構築，水道協会雑誌，Vol. 74, No. 6, pp. 15 - 26, 2005
- 6) さいたま市水道局・(株)栗本鐵工所：濁質対策技術に関する調査研究報告書(CUPIDS Project)，pp. 12 - 15
- 7) 小泉明・宮島正克・藤原正弘・国實誉治：管路内の濁質挙動に関する実験的研究，水道協会雑誌，Vol. 74, No. 11, pp. 2 - 12, 2005
- 8) 国實誉治・稲員とよの・小泉明・有吉寛記・下村政裕：配水管網における洗管調査に基づいた濁質発生量の推定，環境工学論文集，Vol. 43, pp. 569 - 575, 2006