

配水管網の水質監視データを活用した残留塩素濃度シミュレーション

首都大学東京大学院 正会員 ○荒井康裕, 稲員とよの, 堀口幸菜, フェロー 小泉明
公益財団法人 水道技術研究センター 佐々木史朗

1. はじめに

近年の水道事業を取り巻く環境を見ると、水需要の減少による給水収益の悪化や水道事業に携わる技術者の人材不足等により、「更新の遅れ」、「送配水管内環境の悪化」、「維持管理の不足」などの課題が生じている。特に小規模水道事業では、これらの課題が顕著となっており、水道サービス持続の危機に立たされている。このような状況の中で、水道水を配る役割を担う管路網においては、安心・安全なシステムを実現するため、水質管理手法の確保・向上を図ることが求められている。

本研究では、小規模水道事業体における効率的な管網管理手法の提案を目的に、一般世帯に設置した自動水質測定器のモニタリングデータを用いて、管網末端での残留塩素濃度（以下、残塩）を推定するモデルを構築する。

2. 対象地域と使用データ

本研究の対象は、図-1 に示す送配水ネットワークとする。以降の分析では、2 地点の残留塩素濃度（浄水場残塩 B_t (mg/L)・個人宅残塩 C_t (mg/L)）、個人宅水温 W_t (°C)、4 地点の流量（K 浄水場送水流量 $Q1_t$ (m³/h)・S 系第一配水流量 $Q2_t$ (m³/h)・M 系-d 配水流量 $Q3_t$ (m³/h)・M 系-o 配水流量 $Q4_t$ (m³/h)）の計 7 種類の時間単位データを使用する。

本研究では、水温の変化に伴う残塩消費量の差異や滞留時間の変動を考慮し、夏と冬の 2 つの期間について、重回帰分析によるモデルの作成を試みる。夏モデルは、モデル化期間を 7 月 17 日（日）から 7 月 23 日（土）、検証期間を 7 月 24 日（日）から 7 月 30 日（土）とし、冬モデルは、モデル化期間を 1 月 22 日（日）から 1 月 28 日（土）、検証期間を 1 月 29 日（日）から 2 月 4 日（土）とした。

3. 相互相関分析による時間遅れの検討

本研究では、残塩の消費量に焦点を当て、浄水場残塩 B_t と個人宅残塩 C_t との差分を消費幅 D_t とし、モデルの目的変数に設定した。その際、浄水場から個人宅までの滞留時間分の時間遅れを考慮するため、浄水場残塩 B_t と個

人宅残塩 C_t の相互相関分析を実施した。その結果、夏期間は 11 時間、冬期間は 10 時間の時間遅れがあると判定し、それを用いて消費幅を算出した。すなわち、夏期間は消費幅 $D_t = B_{t-11} - C_t$ 、冬期間は $D_t = B_{t-10} - C_t$ を目的変数とし、以降のモデル化で扱うこととした。

次に、モデルの説明変数を選択するため、モデル化期間と検証期間を合わせた 2 週間における残塩消費幅 D_t と各要因との相互相関分析を行った。時間遅れが 24 時間以内となる範囲で最も相関が高くなる時間とその相互相関係数を表-1 に示す。

この結果を踏まえ、各要因について、同時点から表-1 に示す時間前までの値をモデルの説明変数に設定した。すなわち、浄水場残塩 B_t については、夏期間は 11 時間遅れまで、冬期間は 13 時間遅れまでを用いる。個人宅水温 W_t については、夏期間は 2 時間遅れまで、冬期間は 0 時間遅れまでを説明変数として選択する。また、流量については、各地点における 24 時間の変動傾向を確認すると、 $Q1_t$ 、 $Q2_t$ 、 $Q3_t$ の 3 地点の流量は、朝と夜の 1 日 2 回のピークを持ち、変動傾向が類似していることが分かった。これより、モデルの説明変数には $Q1_t$ 、 $Q2_t$ 、 $Q3_t$ の内、最も相関係数（絶対値）が大きい $Q1_t$ を選択し、夏

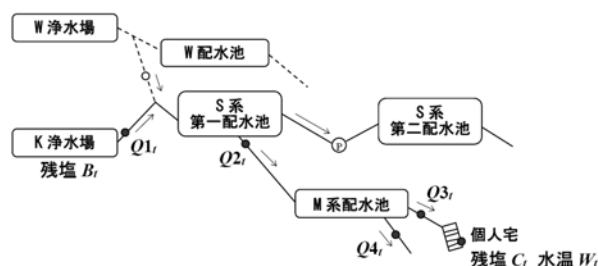


図-1 対象の送配水ネットワーク

表-1 残塩減少幅と各要因との相互相関分析結果

要因	夏モデル $D_t(B_t-11-C_t)$		冬モデル $D_t(B_t-10-C_t)$	
	時間遅れ(h)	相互相関係数	時間遅れ(h)	相互相関係数
浄水場残塩 B_t	11	0.539	13	0.423
水温 W_t	2	-0.382	0	0.669
K 浄水場送水流量 $Q1_t$	5	-0.189	12	-0.242
S 系第一配水流量 $Q2_t$	14	0.140	12	-0.104
M 系-d 配水流量 $Q3_t$	14	0.134	11	-0.214
M 系-o 配水流量 $Q4_t$	7	-0.121	4	0.289

【キーワード】送配水ネットワーク、残留塩素濃度（残塩）、相互相関分析、時間遅れ 重回帰分析

【連絡先】〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 TEL.& FAX.042-677-2947

期間は5時間遅れまで、冬期間は12時間遅れまでを説明変数とする。

4. 重回帰分析によるモデル推定と検証

推定されたモデル式は夏期間が式(1)、冬期間が式(2)である。 R^* は自由度調整済み重相関係数を表す。

$$D_t = -0.431 - 0.171B_{t-1} - 3.55 \times 10^{-2}B_{t-2} + 0.159B_{t-2} - 8.64 \times 10^{-3}B_{t-3} - 4.89 \times 10^{-2}B_{t-4} - 3.04 \times 10^{-2}B_{t-5} - 1.05 \times 10^{-2}B_{t-6} + 6.80 \times 10^{-3}B_{t-7} - 1.14 \times 10^{-2}B_{t-8} + 0.122B_{t-9} + 0.128B_{t-10} + 0.730B_{t-11} + 3.91 \times 10^{-2}W_t - 1.65 \times 10^{-2}W_{t-1} - 1.03 \times 10^{-2}W_{t-2} - 1.40 \times 10^{-4}Q_{1t} - 3.96 \times 10^{-4}Q_{1t-1} - 5.51 \times 10^{-4}Q_{1t-2} - 1.76 \times 10^{-4}Q_{1t-3} - 4.70 \times 10^{-4}Q_{1t-4} - 2.88 \times 10^{-4}Q_{1t-5} \quad [R^*=0.767] \quad \cdots(1)$$

$$D_t = 0.649 - 0.429B_t - 0.140B_{t-1} - 0.201B_{t-2} - 4.07 \times 10^{-2}B_{t-3} - 9.65 \times 10^{-2}B_{t-4} - 0.225B_{t-5} + 1.06 \times 10^{-3}B_{t-6} - 4.36 \times 10^{-2}B_{t-7} + 7.11 \times 10^{-2}B_{t-8} - 0.442B_{t-9} + 0.837B_{t-10} - 0.219B_{t-11} - 1.30 \times 10^{-2}B_{t-12} - 0.150B_{t-13} + 9.48 \times 10^{-3}W_t + 2.49 \times 10^{-5}Q_{1t} + 1.50 \times 10^{-4}Q_{1t-1} + 3.24 \times 10^{-5}Q_{1t-2} + 2.23 \times 10^{-5}Q_{1t-3} + 2.27 \times 10^{-4}Q_{1t-4} + 1.39 \times 10^{-4}Q_{1t-5} + 7.41 \times 10^{-5}Q_{1t-6} + 6.97 \times 10^{-5}Q_{1t-7} + 2.06 \times 10^{-4}Q_{1t-8} - 7.83 \times 10^{-4}Q_{1t-9} - 5.11 \times 10^{-6}Q_{1t-10} + 1.85 \times 10^{-4}Q_{1t-11} + 3.54 \times 10^{-4}Q_{1t-12} \quad [R^*=0.818] \quad \cdots(2)$$

モデルの精度を表-2に、夏モデルの検証期間における時系列図を図-2に示す。表-2より、夏期間、冬期間共に全体的な変動傾向を捉えることができ、値を推定できていることが読み取れる。また、夏モデルと冬モデルの項を相対的に比較すると、夏モデルは「水温」を、冬モデルは「流量」を重視していると言える。検証期間前半4日間と全体7日間の精度を比較すると、夏モデルでは、検証期間の短縮に伴う精度の向上が確認できた。冬モデルでは、前半4日間も全体7日間と同程度の精度で C_t が推定できることが示された。

次に、モデル化期間において、浄水場残塩 B_t が低下した場合の個人宅残塩 C_t への影響を把握するため、感度分析を実施した。浄水場残塩 B_t は、モデル化期間の平均値を丸めた値から0.05mg/L刻みで低下させ、個人宅水温 W_t と K 浄水場送水流量 Q_{1t} については外的要因と考え、モデル化期間の実測値を用いた。これらの条件下で算出された個人宅残塩 C_t の値に対し、許容できる最低値以上であれば、浄水場で残塩が低下しても、個人宅での水質の安全性を保つことができると判断する。ここで、許容できる最低値は、安全を見込んだ個人宅での残塩濃度0.20mg/Lにモデルの最大誤差を加えた値と設定する。感度分析によって得られたモデル化期間の C_t の最低値を

表-3にまとめる。夏モデルでは、モデル化期間における C_t の実測値の最低値が、目標とする C_t の許容値を既に下回っており、浄水場残塩 B_t が現状以下になると、個人宅残塩 C_t が条件を下回ってしまうリスクがあることが明らかとなった。冬モデルでは、 B_t が現状から0.1mg/L減少して0.5mg/Lとなっても、個人宅での残留塩素濃度を安全に保つことができると分かった。つまり、冬期間は夏期間よりも管網末端での影響が小さく、残塩管理における余裕が確保されていると判断された。

5. おわりに

本研究では、重回帰分析を用いて個人宅残塩の値を推定するモデルを作成した。時間遅れを考慮した残塩減少幅に着目し、相関分析から影響要因を決定することで、高い精度のモデル式を推定することが出来た。さらに、モデル式を用いた残塩の低下影響シミュレーションにより、夏期間は現在の管理水準を維持することが必要であると分かった。一方、冬期間は現在より浄水場残塩が0.1mg/L低下しても管網末端での安全性が保たれることが明らかとなった。

今後は、より精度の高いモデルを目指し、目的変数と説明変数に関する時間遅れの精査等が必要である。また、小規模事業体での残塩管理の効率化に向け、年間を通して残塩管理が可能なモデルの構築も求められる。

表-2 個人宅残塩の推定・検証精度

(mg/L)	夏モデル		冬モデル	
	モデル化期間	検証期間	モデル化期間	検証期間
絶対平均誤差(A)	0.036	0.070	0.009	0.035
最大誤差(A)	0.080	0.200	0.023	0.068
絶対平均誤差(B)		0.036		0.029
最大誤差(B)		0.095		0.068

※(A)は7日間、(B)は検証期間前半4日間の精度を表す

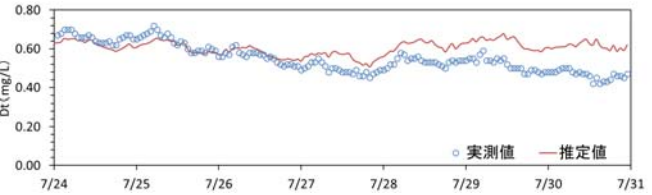


図-2 夏モデルの検証期間における時系列図

表-3 感度分析結果

B_t 濃度低下 (mg/L)	夏期間 $C_t > 0.28\text{mg/L}$		冬期間 $C_t > 0.22\text{mg/L}$	
	B_t (mg/L)	C_t 最低値 (mg/L)	B_t (mg/L)	C_t 最低値 (mg/L)
(現状)	0.85	0.26	0.60	0.49
-0.05	0.80	0.25	0.55	0.38
-0.10	0.75	0.24	0.50	0.31
-0.15	0.70	0.23	0.45	0.21
-0.20	0.65	0.22	0.40	0.11